口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 9:00 ~ 10:20 A会場：2451中講義室（4F）

[1-A1] CCUS

座長：井伊 亮太 (パシフィックコンサルタンツ株式会社)

9:00 ~ 9:20

[1-A1-01]

従来型およびCO_2吸収型コンクリートの製造・輸送に係るCO_2排出量の比較・検討

*髙瀬 美涼[1]、大橋 美彩子[1]、並木 克也[1]、平尾 雅彦[1,2]、野田 優[1] (1. 早稲田大学、2. 東京大学)

9:20 ~ 9:40

[1-A1-02]

2050年における日本のCCUSポテンシャルの空間的需給分析

*永友 佑[1]、長野 尚也、井伊 亮太[1] (1. パシフィックコンサルタンツ株式会社)

9:40 ~ 10:00

[1-A1-03]

産業施設への大規模焼却熱利用に関するシナリオ分析～CCU導入と電力排出係数変化の影響～

*中川 岳[1]、大西 悟[2]、藤井 実[2]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学、2. 国立環境研究所)

10:00 ~ 10:20

[1-A1-04]

Ascertaining the pyrolysis process impacts on biochar properties and GHG emission nexus

*GAJASINGHE ARACHCHIGE GANGA KAVINDI[1]、湯 龍龍[1]、佐々木 勇麻[1] (1. 農業食品産業技術総合研究機構)

©日本LCA学会

2050 年における日本の CCUS ポテンシャルの空間的需給分析

Spatial Supply and Demand Analysis of Japan's CCUS Potential in 2050

○永友佑*[1)]、長野尚也、井伊亮太 [1)]
Yu Nagatomo, Naoya Nagano and Ryota Ii
1) パシフィックコンサルタンツ株式会社
* yuu.nagatomo@tk.pacific.co.jp

1. 緒言

我が国の 2050 年カーボンニュートラル（CN）達成に向けて、CCUS（Carbon Dioxide Capture, Utilization and Storage）の導入は重要な対策の一つと位置付けられており、様々な技術開発・実証が進められている。特に CCU の場合、本格的な導入の際には施設単位での CO_2 の輸送距離や炭素の量的バランスが重要になると考えられるが、エネルギーシステムモデル等による分析の多くは日本全体のマクロな炭素需給バランスの考慮にとどまっている。

また、CCU 製品を燃料利用した場合、最終的には大気に放出されることを踏まえると、CN 社会においては非化石由来炭素の重要性が高まると考えられる。そのような中、ごみ焼却施設や下水処理施設は貴重な非化石由来炭素排出源であると考えられ、当該分野での CCUS 技術の研究開発・実証等も実施され始めている。一方で、これらの施設は小規模分散という特徴を有し、大規模排出源と比較すると炭素供給可能量は小さいため、マクロな分析では考慮されていないことが多い。

以上を踏まえて、本研究では、日本における将来的な CCUS の導入を見据えて、CO_2 供給施設と CO_2 需要施設の立地と規模を考慮した効率的な CO_2 のマッチングについて分析を行うとともに、その中で小規模分散という特徴を持つ一般廃棄物焼却施設が CO_2 供給源として果たし得る役割について明らかにする。

2. 方法

2.1 評価手法

本研究では、CO_2 の供給施設・需要施設間の CO_2 輸送の効率を表現する指標として「CO_2 輸送密度」という概念を導入した。具体的には式 (1), (2)のとおりであり、半径 200km 以内の位置関係にある CO_2 供給施設 i と CO_2 需要施設 j の全組合せに対して CO_2 輸送密度 D_{ij}[t-CO_2/km]を求めた。ここで、W_{ij} は CO_2 輸送量[t-CO_2]、d_{ij} は施設間距離[km]である。W_{ij} は供給施設 i の供給可能量 $CO2sup_i$[t-CO_2]と需要施設 j の需要可能量 $CO2dem_j$[t-CO_2]のうち小さい方を参照した。

$$W_{ij} = \min\left(CO2sup_i, CO2dem_j\right) \quad (1)$$

$$D_{ij} = \frac{W_{ij}}{d_{ij}} \quad (2)$$

全組合せの中から輸送密度が最大となる組合せ (i^*, j^*) がマッチングする（CO_2 のやり取りが成立する）と仮定した（式(3)）。1 回のマッチングが完了するたびに、輸送密度が最大の組合せであった供給施設 i^* の CO_2 供給可能量及び需要施設 j^* の CO_2 需要可能量を式(4), (5)のとおりに更新した。更新後の CO_2 供給可能量 $CO2sup'_{i^*}$[t-CO_2]と CO_2 需要可能量 $CO2dem'_{j^*}$[t-CO_2]のいずれかは 0 となる。

$$(i^*, j^*) = \arg\max_{i,j} D_{ij} \quad (3)$$

$$CO2sup'_{i^*} = CO2sup_{i^*} - W_{i^*j^*} \quad (4)$$

$$CO2dem'_{j^*} = CO2dem_{j^*} - W_{i^*j^*} \quad (5)$$

式(1)~(5)のプロセスを、マッチングが完了するまで（つまり、全ての組合せに対して W_{ij}= 0 となるまで）繰り返すことで、施設の立地と規模を考慮した日本全体での CCUS の姿について分析した。

2.2 CO_2 の供給施設／需要施設に関するデータ整備

CO_2 供給源は、CN に向けた選択肢として CCUS が検討され、技術開発等が進められている分野（鉄鋼、セメント、製紙、石油化学、発電、一般廃棄物処理（焼却）、下水処理）の各種施設を対象とした。鉄鋼、セメント、製紙、石油化学、発電については環境省「温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度」の対象となっている施設を想定し、一般廃棄物処理施設は環境省「一般廃棄物処理実態調査」から、下水処理施設は日本下水道協会「下水道統計」から対象施設を想定した。

CO_2 需要先は、CCU 製品の製造拠点や CCS 拠点となり得る施設等を対象とした。具体的には、都市ガス工場（合成メタンによる都市ガス代替）、製油所（合成燃料によるガソリン・軽油代替、SAF によるジェット燃料代替）、エチレンプラント（ナフサ代替）、生コンクリート工場（コンクリートへの CO_2 固定）、CCS の陸上拠点（各地域の大規模 CO_2 排出源に隣接して立地すると仮定）を想定した。

上記の各施設について、現状の CO_2 排出量（生物由来分を含む）／炭素需要量を各種文献より整理・試算した。次に、主に文献 1）のマクロフレームや対策の想定を参考に、現状と比較した際の 2050 年における各分野での CO_2 排出量／炭素需要量の比率を試算した。

また、2024 年 11 月時点において公表情報ベースで把握できた工場の廃止情報等を基に、2050 年において残存している施設を仮定し、それらの施設に対して 2050 年の CO_2 排出量／炭素需要量を現状と同じ比率で按分し、これを各施設の 2050 年における CO_2 供給可能量／CO_2 需要可能量とした（供給可能量については CO_2 回収率を考慮して CO_2 排出量の 90%と仮定した。）。

2.3 CO_2 輸送距離の設定

本研究では道路輸送を対象とし、半径 200km の範囲に存在する CO_2 の供給地点と需要地点の間の輸送距離を GIS（Geographic Information System）を用いて計算した。道路輸送のみを考慮しているため、離島は計算対象から除外した。また、下水処理施設は 1 箇所当たりの CO_2 排出量が小さく施設数が多いことを踏まえ、計算負荷の関係で半径 50km の範囲を計算対象とした。

3. 結果及び考察

3.1 CO_2 供給可能量／CO_2 需要可能量

試算した 2050 年における各分野の CO_2 供給可能量／CO_2 需要可能量を図 1 に示す。CO_2 供給可能量の合計値は 205Mt-CO_2、CO_2 需要可能量の合計値は 215Mt-CO2 であり、需要側のポテンシャルの方がわずかに大きい結果となった。

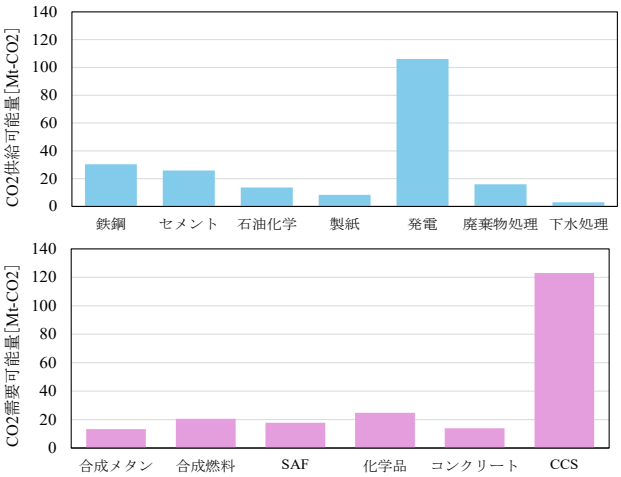


図 1　分野別の CO_2 供給可能量／CO_2 需要可能量

3.2 CO_2 のマッチング結果

マッチングした組合せの総数は 4,420 件、マッチングした CO_2 の総量は約 183Mt-CO_2、一組当たりの平均 CO_2 輸送量は 41kt-CO_2、一組当たりの平均 CO_2 輸送距離は 31km であった。なお、4,420 件のうち上位 200 件で CO_2 輸送量の約 90%がカバーされていたほか、輸送距離 100km 以下の組合せで CO_2 輸送量の約 90%がカバーされていた。

CO_2 供給施設の種類別の供給量及び平均 CO_2 輸送密度を図 2 に、供給先の割合を図 3 に示す。鉄鋼は大部分が CCS であり、平均 CO_2 輸送密度が他の施設種と比較して非常に大きかった。セメントや発電も 50%程度が CCS であり、大規模排出源の CO_2 はその多くを CCS に回すことが効率的であることが示唆された。石油化学は、鉄鋼の次に平均 CO_2 輸送密度が大きかったが CCS の割合は小さく、代わりに合成燃料製造や化学品製造の割合が高かった。これは、本分析において製油所の多くが CO_2 供給施設と CO_2 需要施設の両方に分類されており、輸送距離が 0km の組合せが一定数あるためであると考えられる。また、廃棄物処理施設及び下水処理施設は、小規模分散型という特徴を持つため CO_2 輸送密度は小さいものの、同じく小規模分散で立地しているコンクリート工場とのマッチング率が高いことが特徴的であった。

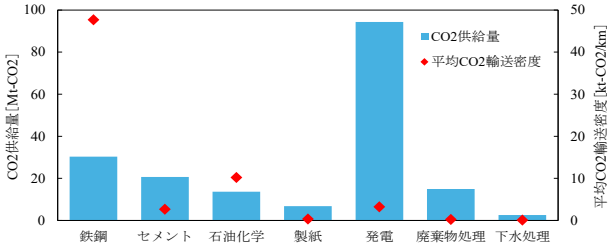


図 2　CO_2 供給施設種別の供給量及び平均輸送密度

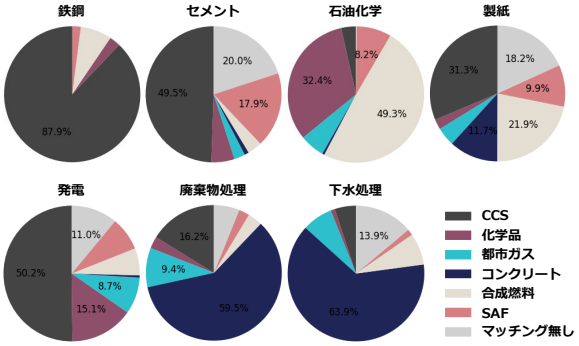


図 3　CO_2 供給施設種別の供給先割合

4. 結言

本研究では「CO_2 輸送密度」という概念を導入して 2050 年における施設単位での CO_2 のマッチングについて分析することで、分野ごとにマッチング先の施設種に特徴があることが確認された。今後の展開としては、船舶等の CO_2 輸送オプションを追加することや、輸送効率にコストの観点を導入することが考えられる。

引用文献

1) 国立環境研究所 AIM プロジェクトチーム：“2050 年脱炭素社会実現に向けた排出経路分析”,（2023）

謝辞：本研究は環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20223001）により実施した。

産業施設への大規模焼却熱利用に関するシナリオ分析
～CCU 導入と電力排出係数変化の影響～

Scenario analysis of large-scale incineration heat utilization in industrial facilities
～Effects of CCU introduction and changes in electricity emission factor～

○中川岳*[1)]、大西悟[2)]、藤井実[2)]、橋本征二[1)]
Gaku Nakagawa, Satoshi Ohnishi, Minoru Fujii, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学, 2) 国立環境研究所
* ce0044re@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

カーボンニュートラル(以下 CN)に向けて、産業部門、特に素材産業における脱炭素は緊緊の課題である。一方、一般廃棄物焼却施設における発電効率は平均で 14%程度[1)]であり、廃棄物が持つエネルギーを十分有効活用できていない。このようなことから、廃棄物の焼却熱を石油化学コンビナート等の製造プロセスで高効率に利用することが、GHG 削減の観点から有効と考えられる[2)]。本研究では、堺・泉北コンビナートの近隣に大規模な焼却施設を建設、焼却熱をコンビナートに直接供給することを想定し、その CO_2 排出量・事業コストを推計した。本稿では、既報[3)]に対し、CCU 導入と電力排出係数の変化を考慮した。

2. 方法

2.1 シナリオの設定

コンビナート近隣自治体の焼却ごみ量に関する2050年までのシナリオ(BAU・ごみ減少)を作成し、2035 年を対象に 2 つの廃棄物処理ケース(建替・統合)を想定した。建替ケースでは、対象自治体の焼却施設を全て更新し、従来通りごみ発電によりエネルギー回収を行うものとした。統合ケースでは、コンビナートに新規の焼却施設を建設、近隣26 自治体の一般廃棄物を全て当該焼却施設に搬入し、コンビナートへの熱供給によりエネルギー回収を行うものとした。さらに統合ケースでは、CCU を実施する場合を想定し、表に示すシナリオ S1-S6 を作成した。

2.2 CO_2 排出量とコストの推計

CO_2 排出量については、施設の建設、廃棄物・残渣の輸送、施設での電力消費、廃棄物の燃焼に係る排出量、及びエネルギー回収による排出削減量を推計した。コストについては、施設の建設、廃棄物・残渣の輸送、保管、焼却に係るコスト及びエネルギー回収による売上を推計した。

表　シナリオの概要

	焼却ごみ量	処理ケース	CCU の実施
S1	BAU	建替ケース	×
S2		統合ケース	×
S3			○
S4	ごみ減少	建替ケース	×
S5		統合ケース	×
S6			○

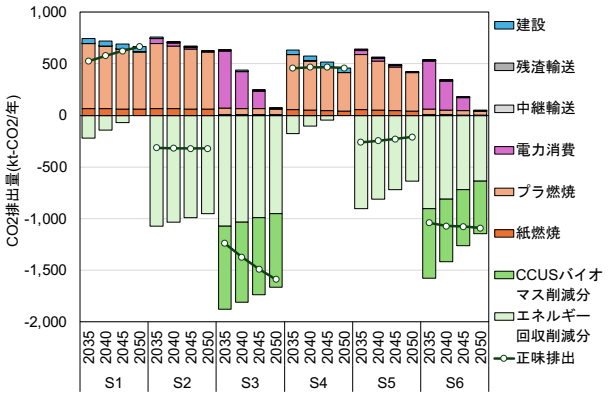


図　各シナリオにおける CO_2 排出量の推計結果

3. 結果と考察

図に示すように、各シナリオにおける正味排出量は、建替ケース(S1、S4)、統合ケース(S2、S5)、CCU 実施統合ケース(S3、S6)の順となった。統合ケースでは、中継輸送による排出量が僅かに増加するものの、エネルギー回収による排出削減量は約 5 倍(2035 年)と推計された。S3 と S6 では、CCU によって、燃焼による排出量の 9 割が削減されるが、電力消費による排出量が約 10 倍に増加した(2035 年)。また、バイオマス起源の CO_2 も回収されるため、削減効果が大きくなった。一方、2035 年から 2050 年にかけて、電力排出係数が減少することにより、建替ケースでは正味排出量が年々増加したが、統合ケースでは減少した。いずれにしても、産業施設での熱利用による効果が高いことが示された。事業コストの推計結果については学会当日報告する。

謝辞：本研究は、環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20223C02)による成果である。

引用文献

1) 環境省：一般廃棄物の排出及び処理状況等(令和３年度)、2023
2) Fujii et al.: Resources, Conservation and Recycling, 149, 586-594, 2019
3) 中川ら：第 35 回廃棄物資源循環学会研究発表会 講演原稿、D4-4-O、2024

Ascertaining the pyrolysis process impacts on biochar properties and GHG emission nexus

○Kavindi Gajasinghe*[1)], Longlong Tang[1)], Yuma Sasaki[1)]
[1)] Institute for Agro-environmental Sciences, National Agriculture and Food Research Organization
* gajasinhak076@affrc.go.jp

1. Introduction

Thermochemical conversion of biomass is a potent solution that offers multiple benefits across diverse sectors, including waste management, green energy generation, and agricultural implications. Depending on the pyrolysis temperature, heating rate, and holding time, pyrolytic pathways can be categorized into slow pyrolysis, fast pyrolysis, torrefaction, and gasification, influencing the final composition and output yields. Still, do not have a clear overview of the optimal range of pyrolysis temperature, which depends upon physicochemical properties, greenhouse gas (GHG) emission reduction, and their cumulative interactions. This study would facilitate filling these knowledge gaps by meticulously assessing individual and combined interactions and tradeoffs between pyrolysis temperatures with physicochemical properties and GHG emission reduction of rice husk (RH) derived biochar.

2. Materials and methods

2.1 Biochar properties data extraction

A systematic literature survey was executed using the Scopus database to extract physicochemical data from peer-reviewed articles on RH-derived biochar production systems. Thirty papers were utilized in the literature survey, from which data on pH, cation exchange capacity (CEC), Ash percentage, Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area, total pore volume, organic carbon percentage, and yield percentage data of biochar were extracted.

2.2 GHG emission estimation

Total GHG emissions were estimated in two steps that include the estimation of potential carbon storage based on organic carbon content and yield percentage of biochar and theoretical avoided emission by surplus energy utilization. Potential carbon storage was calculated according to the IPCC carbon storage estimation procedure. Then, estimates of avoided emissions from surplus energy utilization were executed based on theoretical electricity generation potential from the pyrolytic volatiles. Electricity generation efficiency was estimated according to the Catalog of CHP Technologies (2015).

3. Results and discussion

The results reveal that biochar characteristic features, such as BET surface area and ash percentage, which contribute to the beneficial functional attributes, were improved at the higher pyrolysis temperature. However, better biochar pH and yield% performances at lower pyrolysis temperatures reveal the tradeoff between functionality and pyrolysis temperature. Although the current study is limited to a single feedstock type (RH), these biochar functional features results are compatible with the results of prevailing studies. The carbon storage does not change considerably due to the tradeoff between the biochar yield and the carbon stabilization ratios at elevated pyrolysis temperatures. However, substantial GHG emission reduction at higher pyrolysis temperatures can be realized, considering the avoided GHG emissions estimates from biochar production and waste and heat utilization at the pyrolysis process. Considering the interactions and tradeoffs between biochar functionality and GHG emission reduction, pyrolysis at higher temperatures seems more suitable for realizing substantial benefits in agricultural system implications.

4. Summary

Given the beneficial functionality and elevated GHG emission reduction at higher pyrolysis temperatures, we recommend adjusting the optimal pyrolysis temperature to a higher temperature range. This would maximize the co-beneficial effects on agricultural systems, particularly the effective use of excess energy while producing high-functional biochar.

Acknowledgement

This study is based on results obtained from a project commissioned by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

References

1) Kambo, H. S., Dutta, A.: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, (2015), pp.359-378.
2) Lehmann, J.: Frontiers in Ecology and the Environment, 5(7), (2007), pp.381-387

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 10:40 ~ 12:00 A会場：2451中講義室（4F）

[1-A2] 産業政策

座長：永島 史弥 (近畿大学)

10:40 ~ 11:00

[1-A2-01]

レオンチェフ‐アーミントンアプローチによる炭素税導入のCO_2排出移転分析

*上原 将[1]、月岡 葵[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

11:00 ~ 11:20

[1-A2-02]

前方連関と後方連関の統合フレームワークを用いたエネルギー由来のコストとCO_2排出量のホットスポット分析

*月岡 葵[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

11:20 ~ 11:40

[1-A2-03]

統合評価モデルにおける産業部門表現の改善策の検討

*西浦 理[1]、花岡 達也[1] (1. 国立環境研究所)

11:40 ~ 12:00

[1-A2-04]

産業連関表分析における電力排出分離による削減効果分析とScope2,3への応用

*外岡 豊[1] (1. 埼玉大学)

©日本LCA学会

統合評価モデルにおける産業部門表現の改善策の検討

Examination of a method to improve the representation of the industrial sector in an integrated assessment model

○西浦理*[1)]、花岡達也[1)]
Osamu Nishiura, Hanaoka Tatsuya
1) 国立環境研究所
* osamu.nishiura@nies.go.jp

1. はじめに

パリ協定で示された長期気温目標を達成するためには、脱炭素社会を実現する必要がある。脱炭素社会の実現には、再生可能エネルギーの利用や省エネルギー技術に加え、CO2 の回収貯留(Carbon dioxide Capture and Storage; CCS)技術や水素利用技術といった最新技術を社会全体で計画的に運用することが重要である。エネルギーや経済に関するモデルを統合して開発される統合評価モデル(IAM: Integrated Assessment Model)は、社会全体の緩和シナリオを定量化し、気候政策の議論に貢献してきた。IAM は、エネルギーシステムモデル、応用一般均衡モデル、最適成長モデルなどのモデルを中核とし、一つ一つの産業部門は集約的に表現される。

一方で、脱炭素社会の実現には鉄鋼やセメント生産といった排出削減が困難な部門への対処が重要である。緩和シナリオの定量化は、特定の部門を対象とした部門モデル(Sectoral Model)でも推計されてきた。部門モデルは、対象部門を詳細に表現しているため、より多くの削減策を考慮できる。ただし、対象外の部門は外生的に設定することや社会全体の緩和シナリオを推計できないといった欠点を持つ。

IAM を使用した緩和シナリオ研究では、特定の産業部門や部門間のつながりが持つ特徴を考慮した分析が不足している。そこで本研究では、部門モデルにおける排出削減策の表現と、IAM における産業部門の表現について最新の研究の状況を整理することで、IAM における産業部門の表現方法の改善策を検討することを目的とする。

表 1 文献調査の手法.

文献収集に用いたキーワード
Decarbonization, Carbon neutralization Climate change mitigation, Iron and steel industry Cement industry, Scenario, Pathways
文献のスクリーニングに用いた基準
2 度もしくは 1.5 度目標に基づくシナリオを分析 鉄鋼またはセメント部門の 2050 年以降の CO_2 排出を報告 英語で書かれた査読付き論文

表 2 報告されたシナリオの削減率のまとめ.

	Iron and Steel		Cement	
	IAM	Sector	IAM	Sector
Median	66.2	78.8	63.6	75.8
Quantile	76.3	86.4	64.9	87.6
Maximum	93.0	100	66.1	104

2. 手法

ここでは、鉄鋼とセメント部門を対象に緩和シナリオを推計した研究を収集する方法について説明する。文献の収集には Web of Science のデータベースを使用し、**表 1** のキーワードを使用して 2015 年から 2024 年 6 月までに公開された論文を抽出した。次に抽出された論文を表 1 に示す基準を用いてスクリーニングした。収集した論文から推計に使用したモデルの種類、CO_2 または GHG の直接排出量、考慮された排出削減技術とその表現方法といった情報を収集し、排出削減率の比較を容易にするため、2020 年と比較した 2050 年の排出削減率を計算した。収集した情報から、IAM の産業部門の表現を改善する方策を検討した。

3. 結果

上記の手法により 182 の文献が収集され、スクリーニングにより 31 の文献が抽出された。収集された文献リストは SI に記載する。抽出された 31 の研究では、合計で 107 の長期目標に基づく排出削減シナリオが報告された(**表 2**)。このうち 34 のシナリオが IAM により推計され、73 のシナリオが部門モデルを用いて推計された。鉄鋼部門を対象としたシナリオでは、最大で 100%の排出削減率が計算され [1),2)]、セメント部門を対象としたシナリオでは、最大で 104%の排出削減率が計算された [3)]。排出削減率の中央値や最大値は部門モデルの結果が IAM の結果を上回った。

推計に使用されたモデルの種類と考慮されている技術についての関係を確認すると、部門モデルでは幅広い種類の方策が考慮されている一方、IAM では電化や水素利用といった燃料転換と CCS のみを考慮したシナリオが多い(**図 1**)。削減率が上位 5 パーセンタイルに入るシナリオに注目すると、広範な削減策を考慮した部門モデルを用いて推計されていた [1-5)]。鉄鋼部門を対象とした研究について、大きな削減率を推計した研究 [1),2),4)]に注目すると、いずれも鉄スクラップの供給や鉄鋼の需要について楽観的な想定を置いたシナリオであった。セメント部門を対象とした研究について、大きな削減率を推計した研究 [3),5)]に注目すると、セメント製品の需要低減策や炭酸化反応による CO_2 吸収を考

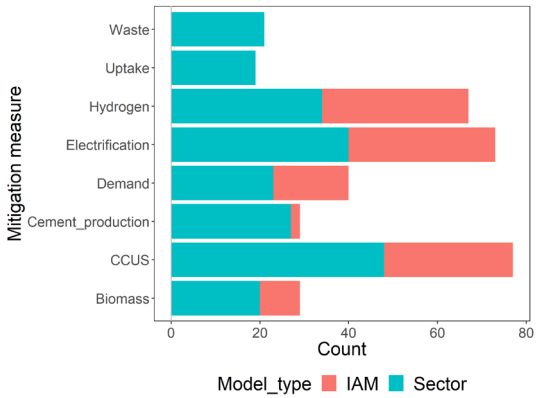


図1 モデルの種類と考慮された技術の関係.

慮していた。これらのシナリオを推計したモデルは、材料のストックとフローを明示的に扱うことで上記の削減策を表現した。

IAM を利用した研究のほとんどは、対象部門の技術表現を改良しているにもかかわらず、クリンカーの代替材の利用やクリンカーセメント比の変更といったセメント製造における主要な削減策を考慮しておらず、鉄鋼部門の電化を行う際の制約となる鉄スクラップの供給変化も考慮していない。

4. 考察

鉄鋼およびセメント部門における緩和シナリオを推計した研究を収集し、推計に使用したモデルの排出削減策の表現を分析した結果、部門モデルでは、材料のフローとストックを考慮し、広範な排出削減策をモデル内で表現することで、CO_2 または GHG 排出を大幅に削減するシナリオが推計されている。しかし、部門モデルを用いた研究の多くは、対象外の部門を外生的に設定しているため、電炉の利用の増加によるクリンカー代替材としての鉄鋼スラグ供給の減少や、需要を低減させたことによる鉄スクラップ供給の減少といった緩和策の実施に伴う諸条件の変化を考慮することが難しい。本研究が収集した IAM を用いた研究では全てエネルギーシステムモデルを中核としたモデルを使用していた。近年の研究では、エネルギーシステムモデルを中核とした IAM において材料のフローとストックを表現する取り組みが進められている。しかし、エネルギーシステムモデルには部門間の関係についての表現がほとんど無く、材料のフローとストックを考慮する部門モデルでの推計の欠点を完全に克服することが難しい。

現在の統合評価モデルの開発状況から、材料のストックとフローや部門間のつながりを表現し、特定の産業部門の特徴に応じた広範な排出削減策を考慮できる統合評価モデルが求められている。こうした状況に対し、モデルの開発の方向性の一つとして、応用一般均衡モデルを中核とした統合評価モデルとマテリアルフロー分析を組み合わせた推計手法の開発があげられる。応用一般均衡モデルは産業連関表をもとに複数の部門とその関係を明示的に考慮し、経済の均衡構造を前提に政策による経済全体の変化を推計する。この特徴から特定の部門における排出量の推計や排出削減に伴う波及的な影響を推計することができる。部門モデルを用いた研究では、産業連関表とストックを形成のための材料の投入とストックの量に関する情報を組み合わせることで産業連関表のストックの表現を拡張し、セメント製品の需要や使用中の製品の量を推計した研究[3]が存在する。応用一般均衡モデルは産業連関表をベースに開発されるため、マテリアルフロー分析と組み合わされることで、統合評価モデルにおいても材料のストックとフローを考慮することが可能となると考えられる。

5. まとめ

本研究は、鉄鋼およびセメント部門を対象に、緩和シナリオを推計した研究を収集および整理し、統合評価モデルにおける産業部門の表現方法の改善方法を検討した。収集した研究が推計した排出削減率を整理すると、統合評価モデルと比較して部門モデルが推計するシナリオが高い削減率を推計し、その要因の一つにとして広範な排出削減技術を考慮していることがあげられた。部門モデルにおける産業部門の表現と統合評価モデルにおける産業部門の表現の比較から、詳細な排出削減技術の表現には材料のフローとストックや部門間の連携を考慮することが必要であり、統合評価モデルの開発の方向性として応用一般均衡モデルとマテリアルフロー分析を組み合わせた分析の手法が考えられることが示された。

謝辞

本研究は、環境省・(独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費 S-20-3(1) [JPMEERF21S12009]により実施した。

引用文献

1) D. Huang, C. D. Dinga, Y. Tao, Z. G. Wen, Y. H. Wang, and D. Razmadze, Renew Sust Energ Rev, vol. 183, 2023.
2) Y. X. Wang, J. Liu, X. L. Tang, Y. Wang, H. W. An, and H. H. Yi, Resour Conserv Recy, vol. 194, 2023.
3) T. Watari, Z. Cao, S. Hata, and K. Nansai, Nature Communications, vol. 13, no. 1, 2022.
4) G. Lopez, J. Farfan, and C. Breyer, Journal of Cleaner Production, vol. 375, 2022.
5) T. Y. Wu, S. T. Ng, J. Chen, and Z. Cao, Resour Conserv Recy, vol. 198, 2023.

Supporting Information

References

C. Andrade, L. Desport, and S. Selosse, Net-negative emission opportunities for the iron and steel industry on a global scale, Applied Energy, vol. 358, Mar 1.5 2024.

C. Bataille, S. Stiebert, O. Hebeda, H. Trollip, B. McCall, and S. S. Vishwanathan, Towards net-zero emissions concrete and steel in India, Brazil and South Africa, Clim Policy, Mar 17 2023.

P. P. Chen, S. H. Zhang, J. Meng, T. Y. Lei, B. X. Li, and D. Coffman, Technological Solutions to China's Carbon Neutrality in the Steel and Cement Sectors, Earths Future, vol. 11, no. 9, Sep 2023.

X. Han et al., Policy Design for Diffusing Hydrogen Economy and Its Impact on the Japanese Economy for Carbon Neutrality by 2050: Analysis Using the E3ME-FTT Model, Energies, vol. 16, no. 21, Nov 2023.

K. Keramidas, S. Mima, and A. Bidaud, Opportunities and roadblocks in the decarbonisation of the global steel sector: A demand and production modelling approach, Energy Clim Chang-Uk, vol. 5, Dec 2024.

Z. L. Li and T. Hanaoka, Plant-level mitigation strategies could enable carbon neutrality by 2060 and reduce non-CO2 emissions in China's iron and steel sector, One Earth, vol. 5, no. 8, pp. 932-943, Aug 19 2022.

M. Ren et al., Decarbonizing China’s iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality, Applied Energy, vol. 298, p. 117209, 2021/09// 2021.

C. Weckenborg, Y. Graupner, and T. S. Spengler, Prospective assessment of transformation pathways toward low-carbon steelmaking: Evaluating economic and climate impacts in Germany, Resour Conserv Recy, vol. 203, Apr 2024.

S. Paltsev, A. Gurgel, J. Morris, H. Y. Chen, S. Dey, and S. Marwah, Economic analysis of the hard-to-abate sectors in India, Energ Econ, vol. 112, Aug 2022,

Y. Y. Ju, M. Sugiyama, E. Kato, Y. Matsuo, K. Oshiro, and D. S. Herran, Industrial decarbonization under Japan's national mitigation scenarios: a multi-model analysis, Sustain Sci, vol. 16, no. 2, pp. 411-427, Mar 2021.

A. Garvey, J. B. Norman, and J. Barrett, Technology and material efficiency scenarios for net zero emissions in the UK steel sector, Journal of Cleaner Production, vol. 333, Jan 20 2022.

C. Harpprecht, T. Naegler, B. Steubing, A. Tukker, and S. Simon, Decarbonization scenarios for the iron and steel industry in context of a sectoral carbon budget: Germany as a case study, Journal of Cleaner Production, vol. 380, Dec 20 2022.

O. Hebeda, B. S. Guimara, G. Cretton-Souza, E. L. La Rovere, and A. O. Pereira, Pathways for deep decarbonization of the Brazilian iron and steel industry, Journal of Cleaner Production, vol. 401, May 1.5 2023.

D. Huang, C. D. Dinga, Y. Tao, Z. G. Wen, Y. H. Wang, and D. Razmadze, Quantitative analysis of net-zero transition pathways and synergies in China's iron and steel industry, Renew Sust Energ Rev, vol. 183, Sep 2023.

D. C. Liu, P. Wang, Y. Sun, H. W. Zhang, and S. Q. Xu, Co-abatement of carbon and air pollutants emissions in China's iron and steel industry under carbon neutrality scenarios, Renew Sust Energ Rev, vol. 191, Mar 2024.

X. M. Liu, R. Peng, C. Q. Bai, Y. Y. Chi, H. Li, and P. B. Guo, Technological roadmap towards optimal decarbonization development of China's iron and steel industry, Sci Total Environ, vol. 850, Dec 1 2022.

V. Shatokha, Environmental Sustainability of the Iron and Steel Industry: Towards Reaching the Climate Goals, Eur J Sustain Dev, vol. 5, no. 4, pp. 289-300, 2016.

J. C. Sun et al., Decarbonization potential collaborated with source industries for China's iron and steel industry towards carbon neutrality, Journal of Cleaner Production, vol. 429, Dec 1 2023.

Y. X. Wang, J. Liu, X. L. Tang, Y. Wang, H. W. An, and H. H. Yi, Decarbonization pathways of China's iron and steel industry toward carbon neutrality, Resour Conserv Recy, vol. 194, Jul 2023.

X. Yu and C. Tan, Chinas pathway to carbon neutrality for the iron and steel industry, Global Environ Chang, vol. 76, Sep 2022.

G. Lopez, J. Farfan, and C. Breyer, Trends in the global steel industry: Evolutionary projections and defossilisation pathways through power-to-steel, Journal of Cleaner Production, vol. 375, Nov 1.5 2022.

M. Ren et al., Negative emission technology is key to decarbonizing China's cement industry, Applied Energy, vol. 329, Jan 1 2023.

G. Clark, M. Davis, Shibani, and A. Kumar, Assessment of fuel switching as a decarbonization strategy in the cement sector, Energ Convers Manage, vol. 312, Jul 1.5 2024.

C. D. Dinga and Z. G. Wen, China's green deal: Can China's cement industry achieve carbon neutral emissions by 2060?, Renew Sust Energ Rev, vol. 1.55, Mar 2022.

X. Q. Gao, C. P. Liao, X. L. Qi, and Y. L. Zhang, A Scenario Simulation of Material Substitution in the Cement Industry under the Carbon Neutral Strategy: A Case Study of Guangdong, Sustainability-Basel, vol. 1.5, no. 7, Apr 2023.

M. Georgiades, I. H. Shah, B. Steubing, C. Cheeseman, and R. Myers, Prospective life cycle assessment of European cement production, Resour Conserv Recy, vol. 194, Jul 2023.

P. Jajal and T. Mishra, Temperature change and mitigation potential of Indian cement industry, Carbon Manag, vol. 13, no. 1, pp. 341-351, Jan 2 2022.

I. Junianto, Sunardi, and D. Sumiarsa, The Possibility of Achieving Zero CO Emission in the Indonesian Cement Industry by 2050: A Stakeholder System Dynamic Perspective, Sustainability-Basel, vol. 1.5, no. 7, Apr 2023.

M. Y. Roche, Built for net-zero: analysis of long-term greenhouse gas emission pathways for the Nigerian cement sector, Journal of Cleaner Production, vol. 383, Jan 10 2023.

T. Watari, Z. Cao, S. Hata, and K. Nansai, Efficient use of cement and concrete to reduce reliance on supply-side technologies for net-zero emissions, Nature Communications, vol. 13, no. 1, 2022-07-18 2022.

T. Y. Wu, S. T. Ng, J. Chen, and Z. Cao, More intensive use and lifetime extension can enable net-zero emissions in China's cement cycle, Resour Conserv Recy, vol. 198, Nov 2023.

産業連関表分析における電力排出分離による削減効果分析と Scope2,3 への応用

Separation of Electricity from Input-Output Emissions tables and Application to Scope2,3 for Emissions Reductions

○外岡　豊*1)
Yutaka Tonooka
1) 埼玉大学名誉教授
* ytonooka@gmail.com

1. 概要

LCA を環境負荷削減につなげるために、産業連関表 CO2 誘発排出量分析において Scope2 相当の電力排出分を分離推計することで、再生エネ電力導入等の排出削減効果を正確に評価しやすい評価手法を用意した。また基本表 390 部門の約半数を物量当換算することで、正確な Scope3 推計にも応用できる。既存の３EID との接合性を確保するべく、その電力消費量と CO2 排出量について直接排出と誘発排出を分離推計した。

2. 経緯

筆者は日本の産業連関（I/O）表を用いたエネルギー消費量、温室効果ガス（CO2,CH4,N2O）、大気汚染物質(SO2,NOx)の排出量推計とその海外波及を含む誘発量分析を 1985 年表から５年毎の I/O 表について行って来た。その成果は電力中央研究所の報告として公表され、また筆者が委員をして来た日本建築学会建築 LCA 推計手法向けの排出量原単位データベースとしてデータ提供して来た。2015 年産業連関表については(独)国立環境研究所の 3EID(Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan Using Input-Output Tables)基本表(390 部門)誘発排出量をもとに、統計データの不正確な部分を修正*a し、３EID から電力排出分の分離推計を行い、鉄鋼、セメント等についてはその他の資料を援用してできるかぎり物量換算した CO2 排出原単位の推計を進めてきた。

3. ３EID 表から電力直接、誘発排出量の分離

3EID では燃焼 CO2 排出量は総合エネルギー統計（以下エネバラ表）の値を、非エネルギー起源排出量については日本国温室効果ガスインベントリ報告書（インベントリオフィス)の値を引用しているが、電力消費は直接の排出がないので火力発電の燃料投入として計上し、その誘発元として間接的に扱われている。こうした扱いの結果、事業用電力は生産者価格の誘発係数を経由しての算定となっており、自家発電は加熱用と区別できない燃料消費の一部として計上されており、燃料消費より正確さが劣っている。そこで総合エネルギー統計から事業用電力量、自家発電量を３EID の 390 部門別に計算し、エネバラ表による発電電力量当 CO2 排出係数(CO2t/GWh)を用いて発電用に投入された燃料による CO2 排出量を計算し、３EID に組込んだ改訂表を作成して来た。

4. 自家発電排出量の分離

エネバラ表ではエネルギー供給側の行部門として各部門、とくに産業部門の業種別自家発電電力量が掲載されており、燃料種類と併記される電力種類別供給量として列部門の自家発電量があるが、これは各部門が消費した自家発電電力量である。このようにエネバラ表には供給側の各部門の発電量としての自家発電と、需要側の電力消費量としての自家発電とが併記されており、それぞれに電力量と炭素単位表があるので、電力 kWh 当の平均 CO2 排出係数が部門別、業種別に得られる。ところが産業連関表では、その区別は表記できず、３EID では自家発電 CO2 排出係数を陽表化することはできない。自家発電は購入エネルギーではないので Scope２には計上されないが、各事業場において PVC やバイオマス燃焼発電を取り込んだ際の排出削減効果を正確に評価できない。そこで自家発電についても、その排出量をエネバラ表より各業種部門の CO2 排出係数の違いを反映させて計算し加熱用燃料消費排出から分離推計している。

5. 鉄鋼製品別自家発電率補正

そこで問題になったのは鉄鋼業各鉄鋼製品部門別の自家発電率である。エネバラ表では鉄鋼業一律に 24.8%の自家発電率となっており、電炉製鋼所については明らかに過大、高炉一貫製鉄所においては過小である。これを是正するため、鉄鋼製品については高炉転炉鋼製品、電炉鋼製品、普通鋼、特殊鋼の４種類に再区分してその生産工程と上工程における CO2 排出量を独自計算した。なおその際、以前から検出されていた冷間圧延鋼材の素材構成の修正に加えて不均衡な投入産出物量を修正している。電炉鋼製鉄所では自家発電率ゼロと仮定し鉄鋼業全体の自家発電率が 24.8%

となる各製品種類別自家発電率を生産量構成比を用いて算出し、それにより鉄鋼製品各部門別に事業用電力購入量と自家発電量を独自に再推計することでエネバラ表の不正確な部分を独自改訂した。

6. 電力誘発排出量計算

以上の計算による発電の直接排出量から電力消費の誘発排出量を計算する。３EID の G1,H1 表は海外を含む上流誘発排出を加算した値、G2,H2 表はそのうち国内誘発排出だけを加算した値である。G1,H1 表値から直接排出を除した差が電力消費の Scope3 上流排出分になる。電力消費は需要先で発生するので輸送に伴う下流排出はゼロとする。この誘発率は３EID の事業用電力､自家発電部門の G1,H1,G2,H2 表から計算できる。３EID の 390 部門別誘発排出量は G1,G2,H1,H2 の各マトリクス表に表記されている。そこから電力分を分離するが、３EID の内部値として含まれていた電力直接、誘発排出量とこちらで独自推計した値は一致しない。厳密に正確な値とするには G1,G2,H1,H２表において、その差を補正した修正を行うべきであるが、その補正を行うと３EID 全体の補正値一式を作成する必要が生じ煩雑である。誘発排出量の推計精度を考えると、その補正をすべき程の高い精度は期待できない。ことに３EID が輸入品国産仮定型逆行列表を用いた計算であるため海外誘発排出量の推計精度に限界があり、そうした点を考慮して全体誘発排出量は３EID 値を踏襲し、電力誘発分の計算手法による相違差は原則として燃料、非エネルギー起源を含む全体誘発量に吸収させる扱いとしたが、差が大きかった自家発電と工業用水道についてだけ補正を行っている。

7. 購入者価格当と物量当換算

産業連関表は基本的に生産額マトリクスからなるものであり、購入者価格表は付随表の一部として扱うべきものであるので、Scope3 の下流分誘発量においてもまず生産額当値を計算する。産出製品が次の需要家に届けられるまでの追加的排出として卸小売と輸送、倉庫分（９部門）を加算する。実取引は購入者価格で行われるので、この計算でも全てを購入者価格当に換算した表も用意している。

カーボンフットプリントにしても LCA においても金額当よりは物量当の方が正確であり、とくに削減効果を正確に評価するには物量当が適しているので、筆者はできるかぎりの物量換算を行って来た。物量換算は統合された 390 部門別より投入産出表で、さらに国内生産表を参考にすることもできる。

8. 電力分離計算結果と Scope1,2,3 原単位

以上の計算から３EID の CO2 誘発排出量表において購入電力量、自家発電量とその直接、誘発 CO2 排出量を得て、それを用いた Scope1,2,3 誘発 CO2 排出量原単位群と Scope2 排出量のもとになる電力需要原単位が用意された。生産額当、購入額当、計算できた部門における物量当値である。

この分離により、購入電力の一部を排出水準が低い再生エネルギー電力に置き換えた場合や、原材料の一部を低排出素材に置き換えた場合の Scope1,2,3 誘発 CO2 排出量削減量を推計できる。

３EID の各表における CO2 とその他の GHGs 温室効果ガス排出量の比を用いれば GHGs 排出量への換算も可能である。なお排出削減効果は部門と排出物質により単純に比例しないので、その正確さには限界があることに留意されたい。

得られた原単位群は厳密には産業連関表基本表による 2015 暦年生産額当のエネバラ表による 2015 年度のエネルギー消費量、排出量である。正確を期すなら国内生産表（部門を構成する詳細な製品群の生産額、単価、生産量が掲載されている）で基本表部門平均価格と求めたい製品の価格差を参考に補正したり、国民経済計算のデフレーターや資材積算資料等の年次別、地域別物価等で適宜補正して用いる。

主要資料

1)総務省：産業連関表 2015
2)資源エネルギー庁：総合エネルギー統計 2015 年度
3)温室効果ガスインベントリオフィス国立環境研究所：日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2024 年度
4)国立環境研究所：産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)(2019)

関連発表

1)外岡豊 : 2015 年環境産業連関表の改良について,環太平洋産業連関分析学会 PAPAIOS 第 34 回全国大会, 2023.10.28
2)外岡豊 : 産業連関表基本表 CO2 排出分析－電力排出の正確な推計－第 43 回エネルギー・資源学会研究発表会. 7 － 3 ,2024(令和 6 年）.8.07
3)外岡豊 : 物量ベース Scope3 計算に向けた産業連関表基本表 CO2 排出量推計,第 41 回エネルギーシステム・

注

*a：産業連関表で冷間圧延鋼材の原材料投入量が過小であったため誘発 CO2 排出量が異常に低かったが､投入量を補正し上方修正した(2023.4 実施)。それ以外の鉄鋼製品にも投入産出表を物量換算した値の収支に不均衡が見られたが誘発 CO2 排出量の補正は行っていない。またエネバラ表において、石油製品製造の購入電力量はゼロ、自家発電量も過小な疑いがあり、産業連関表物量表値に置き換えて補正した（2024.12 実施）。鉄鋼製品の自家発電率補正は本文記載の通り。

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 14:40 ~ 16:00 A会場：2451中講義室（4F）

[1-A3] 産業連関分析

座長：横井 崚佑 (産業技術総合研究所)

14:40 ~ 15:00

[1-A3-01]

産業連関分析を用いた資源の経済的重要性と直接間接的な自給率の評価手法の提案

*尾下 優子[1]、横井 崚佑[2]、畑山 博樹[2] (1. 東京大学、2. 産業技術総合研究所)

15:00 ~ 15:20

[1-A3-02]

産業連関モデルを用いたセルロースナノファイバーの社会実装がもたらす社会経済影響分析

*稗貫 峻一[1]、尾下 優子[2]、兼松 祐一郎[2]、西嶋 大輔[3]、菊池 康紀[2] (1. 電力中央研究所、2. 東京大学、3. 福島大学)

15:20 ~ 15:40

[1-A3-03]

地球・地域規模での持続可能な水資源利用に向けたグローバルサプライチェーン構造の探索

*前野 啓太郎[1]、本下 晶晴[1]、Islam Kamurul[1] (1. 産業技術総合研究所)

15:40 ~ 16:00

[1-A3-04]

世界多地域産業連関表を利用したデカップリング分析手法の開発とその実証分析

*西藤 和佳[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

©日本LCA学会

産業連関分析を用いた資源の経済的重要性と直接間接的な自給率の評価手法の提案

A study for a method to evaluate the economic importance of resources and direct and indirect self-sufficiency rates using input-output analysis

○尾下優子*[1)]、横井崚佑[2)]、畑山博樹[2)]
Yuko OSHITA, Ryosuke YOKOI, Hiroki HATAYAMA
1) 東京大学, 2) 産業技術総合研究所
* y_oshita@ifi.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

資源の重要性やリスクを評価し、戦略的な資源政策や技術・制度設計を行うことは、持続可能な社会を実現する上で重要である。特に、カーボンニュートラル等のグローバルな要求や社会情勢の変化により、資源の経済的な重要性は変化するため、定期的な更新に耐えうる評価手法が必要となる[1)]。一方で、金属資源の経済重要性は、各金属が主に原材料として使用される産業の GDP を用いた算定が行われてきたが、各産業の GDP をすべて計上されていたり、各資源の供給比率で GDP が按分されていたり、手法の開発が十分であるとは言えない。また、上記の方法の多くは、間接的に利用された資源の貢献が計上されていない[2)]。

本研究では、資源の経済的重要性を、オープンデータを用いて比較的簡便かつ科学的な根拠を持って示す手法についての検討を行う。具体的には、鉄（銑鉄）、銅、鉛・亜鉛、アルミニウム、その他の非鉄金属地金を対象に、産業連関分析を用いて、各金属が直接間接的に利用されている産業の付加価値を按分する方法と、各金属の直接輸入だけでなく間接的な輸入も含めた直接間接自給率の分析方法について、提案・検討を行う。

2. 分析手法

2.1 資源の経済的重要性の分析手法

資源と各産業の付加価値との関係性については、産業連関分析のレオンチェフ逆行列[3)]を用いて分析する。レオンチェフ逆行列は、産業間の直接間接的な投入構造を表しており、各要素 (L_{ij}) は産業 j の 1 単位の生産に必要な製品 i の直接間接的な投入額を示している。

金属資源の経済的重要性を測る指標として、産業 j が創出する付加価値のうち、金属資源 i の貢献分、貢献付加価値額 (cV_{ij}) を定義する。この時、金属 i の投入量・額に関わらず、金属 i が産業 j の生産プロセス上必須の材料であれば、産業 j の付加価値の 100%を金属 i の貢献分だと考えることも可能である。しかし、各材料の技術的な重要度の情報を作成することは、かなりのコストが必要であり、また技術の変革に伴っての都度の更新が必要であるため、本研究の目的である比較的簡便な手法とは合致しない。一方で、直接間接的な投入が僅かでもある場合 $(L_{ij}\neq 0)$ 、金属 i の貢献付加価値額 (cV_{ij})が産業 j の付加価値額の 100%と設定すると、多くの金属資源の貢献付加価値額がすべての産業の付加価値額の合計、つまり日本の GDP と同じ値となってしまい、各金属の経済的重要性を分析するためには不適当である。

そこで本研究では、材料投入額は、生産プロセスでの重要性を一定程度表しているという仮定に立ち、産業 j の年間付加価値額を、レオンチェフ逆行列の値に基づいた比率で按分することで、金属 i の産業 j に対する貢献付加価値額 (cV_{ij})とする。金属 i について全産業（j=1~n）の貢献付加価値額を合計したものが、対象地域の産業構造に対する金属 i の年間の貢献付加価値合計額(scV_i)となる。

2.2 直接間接的な自給率の分析手法

潜在的な金属の需要は、当該金属の直接的な国内生産と輸入だけでなく、加工製品として輸入される製品に直接間接的に使用されたものも含む。この潜在的な需要を、もし対象地域（日本）のすべての産業が自給率 100%だった場合に必要だった当該金属の需要額とし、閉鎖型レオンチェフ逆行列を用いて算出する。これと、各資源の国内生産額を比較することにより、各資源の直接間接的な需要に対する自給率を導出し、各資源の潜在的な海外依存度を分析する。

3. 結果と考察

分析の結果、直接的な需要額と直接間接的（潜在的）な需要額の差と海外依存度はアルミニウムが最も大きいことが分かった。また、貢献付加価値合計額は鉄（銑鉄）が最も大きく、次いでその他非鉄金属地金、アルミニウムであるが、各資源の需要額で除した 100 万円あたりの貢献付加価値合計額はアルミニウムが最も高く、次いでその他の非鉄金属地金、鉄（銑鉄）という順序になった。これは、銑鉄とアルミニウムが投入さ

れる産業部門や投入額の差によるものである。これらの結果の詳細や要因をもとに、本研究で提案する手法が、金属の経済的重要性を測る指標として適当か、またどのような点に課題があるかについて議論を行う。

謝辞

日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（B）24K03154）の成果を含んでいる。

引用文献

1) Schrijvers, et al., Resour. Conserv. Recycl., 155, (2020), 104617.
2) Gian Andrea Blengini, et al., Resources Policy, 53, (2017), pp. 12-19.
3) Miller, R.E, and Blair, P.D., Input–output analysis: foundations and extensions, Cambridge University Press, Cambridge (2009).

産業連関モデルを用いた
セルロースナノファイバーの社会実装がもたらす社会経済影響分析

Input-Output Analysis of the Socioeconomic Effects of Cellulose Nanofiber Deployment

○稗貫 峻一*[1)]、尾下 優子[2)]、兼松 祐一郎[2)]、西嶋 大輔[3)]、菊池 康紀[2)]
Shunichi Hienuki, Yuko Oshita, Yuichiro Kanematsu, Daisuke Nishijima, Yasunori Kikuchi
1) 電力中央研究所, 2) 東京大学, 3) 福島大学
* hienuki3901@criepi.denken.or.jp

1. 背景と目的

セルロースナノファイバー（CNF）は、木材由来の植物資源から製造される軽量かつ高強度な素材であり、化石資源利用の削減に伴う環境負荷の低減と循環型経済の貢献への寄与が期待されている。特に、CNF は樹脂との複合化により製品の軽量化や強度の向上が可能となり、自動車部品、家電、建材など幅広い分野での応用が見込まれている。また、政府のグリーン成長戦略においても、CNF 技術は 2050 年のカーボンニュートラル達成に向けた重要な技術として位置付けられている[1)]。一方で、CNF の本格的な社会実装に向けては依然として課題が残されている。具体的には、既存材料と比較して製造コストが高いこと、製造プロセスの効率化や安定供給体制の整備が求められていること、さらに普及が進むにつれて原材料調達の持続可能性やリサイクル性の評価が重要となることが指摘されている。さらに、新しい技術や材料を導入する際には、製造プロセスのエネルギー効率向上や副産物の有効活用が重要な課題とされている[2)3)]。特に、欧州のエコデザイン規則などでは、環境負荷の低減と持続可能な調達率の確保が求められており、これらの基準に適合するための技術革新が進められている[4)]。従って、新素材の市場拡大に伴い、産業全体への経済的波及効果を捉えることが、新しい技術や材料の社会実装を議論するために重要な要素となる。

そこで本研究は、CNF を含む新素材の導入が日本国内経済に与える直接的および間接的な影響を明らかにすることを目的としている。特に、既存の産業連関（IO）表を拡張し、CNF を含む関連セクターを組み込むことで、新素材の導入がもたらす経済効果を詳細に分析可能なモデルを構築した。また、エアコンと自動車部品を想定したシナリオと組み合わせることで、技術代替や導入速度による違いを分析した。

2. 方法

2.1 前提条件

本研究では、京都大学等で開発されている京都プロセスでの実証データ[5)]を用いて、タルク強化樹脂（Talc+PP）と CNF 強化樹脂（CNF+PE）の代替を対象に社会経済効果を分析する。両樹脂の 1t あたりの価格は、実証データから得られる両樹脂の重量構成比コスト評価結果[5)]、IO 表の物量表の単価[6)]、貿易統計[7)]などを用いて推計した。その結果、タルク強化樹脂が 1 トンあたり約 0.21 百万円であるのに対し、CNF 強化樹脂は約 0.38 百万円となり、タルク強化樹脂より約 30%高いことが確認された。

また、既存 IO 表において、CNF の主要な原材料となる素材（木材）、木材チップ、パルプの輸入率はそれぞれ 0.70、0.26、0.76 であるが、これら原材料の国産化、輸入化による影響を考慮するために、国内自給ケース、現状ケース、輸入ケースの 3 つを想定した。

2.2 CNF 分析のための拡張 IO 表の作成

本研究では、新材料や化学プロセスの導入が社会経済に与える影響を詳細に分析するため、2015 年の IO 表を用いて、約 440 部門の IO 表を作成した。具体的にはまず、鉱物、パルプ、化学製品中間材、樹脂製品など、製品の原材料に関連する部門を基本分類表の情報を基本として分割した。例えば、CNF 製品に強く関連する部門の場合、熱可塑性樹脂をポリエチレン（高密度、低密度）、ポリスチレン、ポリプロピレン、塩素化ビニル樹脂に分割した。

また、CNF 製造部門については、京都プロセスのコストデータ[5)]を基本として、IO 分析に必要な情報を整理した。

2.3 推計方法

CNF 導入により生じる全体付加価値Ad_{total}、国内付加価値$Ad_{in.}$、国外付加価値$Ad_{out.}$は、式（1）から（3）により推計した。ここでの、$\hat{v}$は付加価値ベクトルの対角行列、Iは単位行列、Aは投入係数行列、$\hat{M}$は輸入係数ベクトルの対角行列、Fは最終需要ベクトルを表す。なお、式（3）により推計された国外付加価値は、国内産業を仮定している点に留意する必要がある。

$$Ad_{total} = \hat{v}(I - A)^{-1}F \quad (1)$$

$$Ad_{in.} = \hat{v}\{I - (I - \hat{M})A\}(I - \hat{M})F \quad (2)$$

$$Ad_{out.} = Ad_{total} - Ad_{in.} \quad (3)$$

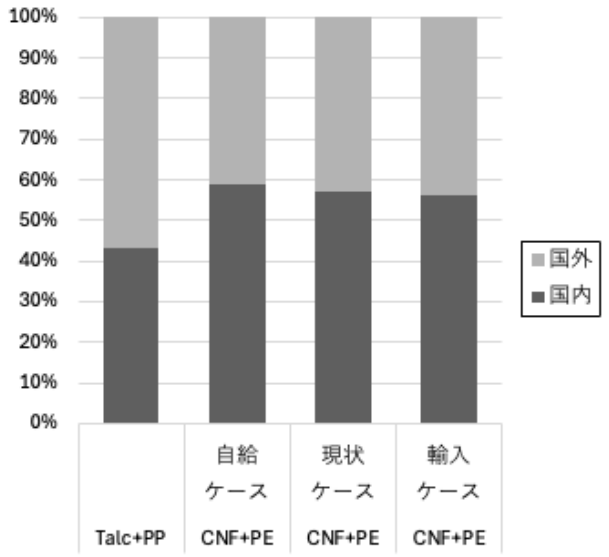


図 2 Talc＋PP と CNF＋PE の国内外付加価値比率

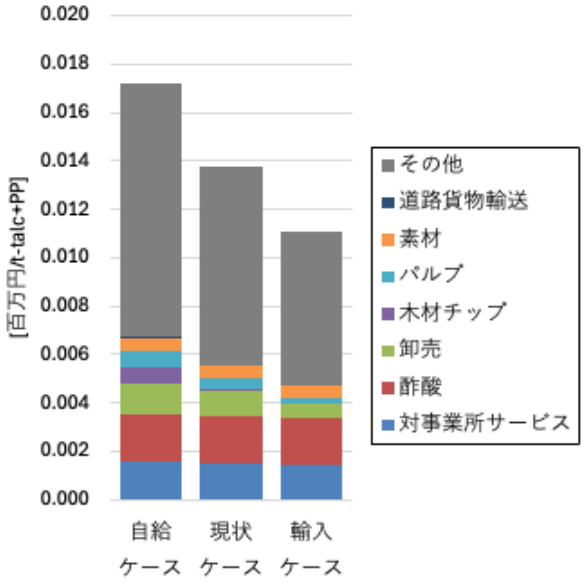


図 3 PP を除いた CNF による国内既存産業への影響

3. 結果

Talc+PP の直接間接付加価値は 0.17 百万円/t-Talc+PP、CNF＋PE は 0.22 百万円/t-Talc+PP と推計された。このうち、国内産業比率は、Talc+PP が 43%、CNF＋PE（自給ケース）が 59%、CNF＋PE（現状ケース）が 57%、CNF＋PE（輸入ケース）が 56%となった（図 1）。

また、これら国内付加価値の一次産業、二次産業、三次産業別の比率は、CNF+PP（現状ケース）で 1%、17%、82%と推計された。CNF+PP（自給ケース）はそれぞれ 3%、19%、78%であり、CNF に必要な原材料を国産とすることで一次産業、二次産業の国内効果が高まる可能性が示唆された。

図 3 は、CNF＋PP のうち、PP を除いた CNF 製造に伴う国内の既存産業で生じる付加価値を示している。メンテナンスなどの対事業所サービス部門、木材チップ、パルプ、素材（木材）などの CNF の主要な原材料部門、酢酸などの化学中間製品部門、卸売、道路貨物輸送などのサービス部門での効果が確認された。

ただし、今回の推計に用いた CNF 製造のコスト情報において、一般管理費や付加価値（賃金・俸給、営業余剰、資本減耗引当など）の設定には改善の余地が残されており、今後結果が変わる可能性に留意されたい。

4. まとめ

本研究は、CNF 導入による国内の社会経済影響を中心に分析した。今回の推計は、CNF 含有率が 5%を前提としたため、1t あたりの全体付加価値として CNF の効果は小さい傾向にあった。しかし、CNF の導入は育林、素材、木材チップ部門での付加価値創出に一定の効果があり、これらの効果は地域の雇用や経済循環として期待される。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業（JPNP20009）により実施された研究成果の一部である。

参考文献

1) 環境省：“脱炭素・循環経済の実現に向けた セルロースナノファイバー 利活用ガイドライン”、（2021）
2) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：“実用化へのカウントダウン、セルロースナノファイバー”、（2021）
3) 矢野 浩之、廃棄物資源循環学会誌、2021、 32 巻 4 号、p. 292-299
4) 環境省：“海外における持続可能な「購買行動」「公共調達」促進のための動向調査”、環境配慮型製品の国際展開、（2023）
5) 東京大学、未来ビジョン研究センター：“「京都プロセスで製造するアセチル化変性 CNF 強化樹脂材料の製造コスト試算」に係る実績報告書”（2020）
6) 総務省：“平成 27 年（2015 年）産業連関表”、平成 27 年（2015 年）産業連関表（2019）、入手先＜https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00200603＞（参照 2025-1-22）
7) 財務省：”貿易統計”、 財務省貿易統計、入手先＜https://www.customs.go.jp/toukei/search/futsu1.htm ＞、（参照 2025-1-22）

地球・地域規模での持続可能な水資源利用に向けた グローバルサプライチェーン構造の探索

○前野啓太郎*[1)]、本下晶晴[1)]、Kamrul Islam[1)]
Keitaro Maeno, Masaharu Motoshita, Kamrul Islam
1) 産業技術総合研究所
* maeno.keitaro@aist.go.jp

1. 研究背景

産業のグローバルサプライチェーン（GSC）の拡大により、淡水資源への需要が特定の国や地域に集中し、当該地域の人間健康や生態系に過度な圧力がかかっている[1)]。 このような状況の中で、先行研究[1)]は、日本の最終需要が誘発する GSC における淡水の過剰消費のホットスポットを明らかにし、当該 GSC に含まれる各地域における水資源消費の持続可能性に及ぼす影響を消費者責任の観点から強調した。しかし当該先行研究は、特定したホットスポット地域において具体的にどのような対策をとれば良いのかなど、当該 GSC を持続可能な構造へと移行させるための方策を示唆できる分析まで踏み込んでいない。 さらに、GSC における生産活動は、環境負荷のような負の効果だけでなく、地域経済への正の効果（経済的付加価値や雇用の創出）も引き起こす。 つまりここで重要な課題は、持続可能な水消費構造を実現しつつ、世界・地域の両レベルにおいて正の効果を増大させるために、産業はどのように GSC を構築すべきなのか、ということである。

本研究は、各国産業の GSC における正の効果（付加価値創出）と負の効果（水過剰消費）の関係を明らかにすると同時に、各 GSC における生産活動の水消費-経済効率性を世界・地域規模で検証し、各 GSC における持続的な水資源利用実現に向けた方策を検討する。

2. 研究手法・データ

分析の始めに本研究は，GLORIA データベース[2)]から 2015 年における 164 ヵ国 120 産業部門における産業間取引を記録した MRIO 表、および WaterGAP 2.2d モデル[3)]から生活用水，工業用水，畜産用水の消費量データを入手した。灌漑用水消費量データは, 2000 年の 170 作物生産の水消費量データ[4)]を，2000 年と 2015 年の灌漑用水総消費量にスケーリングすることによって推定した。 各水消費データは、関連する 164 カ国の 120 産業部門に割り当てられ、2015 年のデータを集計した。 続いて本研究は、整備したデータセットと先行研究[1)]に基づき、世界 11000 流域において利用可能な淡水資源と、各地域の人間生活・生態系を維持するための基本的な水需要のバランスによって定義される、持続可能性の観点から見た各地域の水資源利用許容量を超える淡水の過剰消費量を計算し、それを 164 ヵ国レベルに統合したうえで、各国の水資源消費量と比較することで各国水資源利用の過剰消費率を計算した。

続いて、先述した GLORIA-MRIO 表に水資源過剰消費データセットを統合し、基本的な IO モデルに従うことで、特定の国の産業の GSC に誘発される各国の水過剰消費量（立米: m^3）ならびに経済的付加価値創出量（アメリカドル: USD）を推計した。 本研究では、各 GSC における両効果の“絶対量”に加えて、それらが当該 GSC に含まれる各地域に与えた影響、つまり相対量に基づく“貢献度”に着目し、各 GSC における両効果の“絶対量”を、当該 GSC に含まれる各地域の“貢献度”で重み付けした貢献度加重付加価値創出・水資源過剰消費量を計算し、それぞれの標準化スコア（Z-スコア）を比較することによって、GSC 全体の世界規模における各 GSC の水消費-経済効率性指標を明らかにした。また、各 GSC における両効果の“絶対量”ベース Z-スコア、“貢献度”ベース Z-スコアのギャップに着目し、地域・部門レベルへギャップの貢献因子を分解することで、各 GSC における地域規模の水消費-経済効率性指標を明らかにした。

3. 結果

2015 年における世界の水資源過剰消費量は約 2,400 億 m^3 であり、総水消費量の 4 分の 1 近くが地域の利用許容量を超えていることがわかった。 特に、水消費集約的な農業部門の生産活動は過剰消費において支配的な役割を果たし、過剰消費総量の 92%を占めた。更に水資源過剰消費は一部の国の産業による GSC に大きく偏っており、上位 20 ヵ国の産業 GSC だけで、世界全体水過剰消費量の約 9 割を占めていた。本研究では、これら 20GSC の農業部門における水資源過剰消費・経済的付加価値創出に焦点を当てて分析を行った。

図 1 は、分析対象 20 ヵ国産業の GSC における農業部門の貢献度加重付加価値創と水過剰消費の Z-スコアの関係を示し、各軸は 20 ヵ国 GSC の平均と比較して、当該 GSC 農業部門の生産活動における付加価値創出と水過剰消費がどの程度大きい/小さいのかを示す。

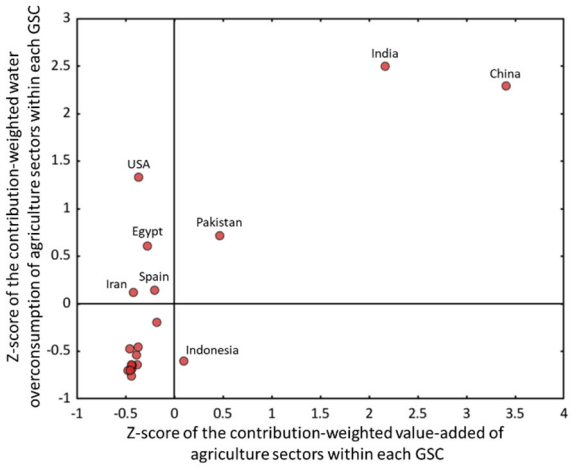


図 1. 水過剰消費上位 20GSC の農業部門における貢献度加重付加価値創出・水過剰消費の Z-スコアの関係

図 1 から、インドと中国は貢献度加重水過剰消費が最も高いが、貢献度加重付加価値創出も相対的に大きいことがわかる。対照的に、アメリカは水過剰消費が大きい一方、付加価値創出が平均を下回っていることがわかる。これは、当該 GSC の農業部門が創出する付加価値の地域貢献度が、GSC 全体規模でみると低く、水過剰消費の経済効率性指標が低いと解釈できる。

この水消費-経済効率性指標は、各 GSC における農業部門がどこで、どれだけの“量”の付加価値・水資源過剰消費を産み、各地域でどれだけの“貢献度”を持つかに依存する。そこで本研究は各 GSC における両効果の“絶対量”と“貢献度”を切り離し、両者のギャップから各 GSC における効率性指標を分析した。

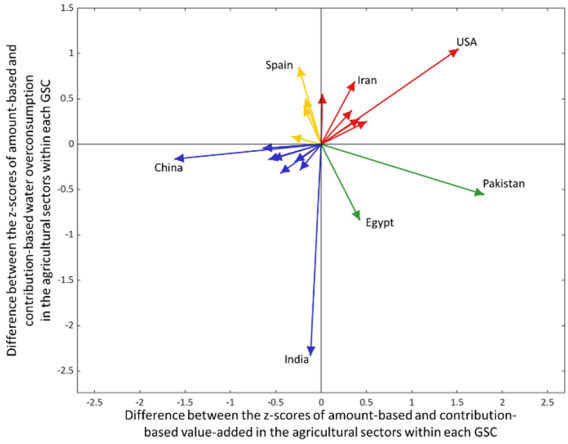


図 2. 水資源過剰消費上位 20GSC における農業部門の付加価値創出・水資源過剰消費の絶対量ベース Z-スコアと貢献度ベース Z-スコアのギャップ

図 2 は、各 GSC 農業部門が、各地域で産み出す付加価値・水過剰消費の“絶対量”に基づく Z-スコア基準として、“貢献度”に基づく Z-スコアとのギャップを原点からのベクトルとして示している。図 2 において第一象限にプロットされた GSC は、付加価値創出・水過剰消費の両影響に関して、絶対量ベースの Z-スコアよりも貢献度ベースの Z-スコアが大きく、地域レベルでの付加価値創出貢献度が比較的大きいと同時に、各地域における水過剰消費への圧力も大きいグループと解釈できる。本要旨では、アメリカ産業農業部門の GSC に関する結果のみを記述する。まず当該 GSC がこのグループにおいて両影響に大きなギャップをもつことがわかる。前述の結果では、当該 GSC における貢献度加重付加価値創出は平均以下であったが、純粋な貢献度だけでみると地域レベルに与えている付加価値創出効果が大きいことが読み取れる。

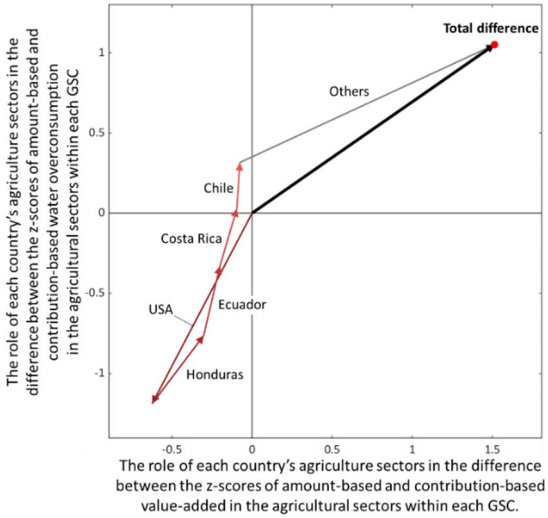


図 3. アメリカ産業の GSC における農業部門の付加価値創出・水資源過剰消費の量ベース Z-スコアと貢献度ベース Z-スコアのギャップの国別分解

更に本研究は当該 GSC に関するベクトルを、国・部門別の貢献因子に分解し、詳細な分析を行った（図 3）。図 3 から、当該 GSC におけるアメリカ国内の農業生産はベクトル左下方向に寄与しており、アメリカ国内における付加価値貢献度が低いと同時に水過剰消費につても“絶対量”を基準とした場合、自国に与えている圧力は比較的小さいことがわかる。一方、アメリカ国外の貢献因子に目を向けると、ホンジュラスやエクアドルにおいて右上方向の寄与となっている。ここから、アメリカ産業の GSC に組み込まれるこれらの国の農業部門の生産活動は、各国における付加価値創出に貢献する一方、相対的に大きな水過剰消費圧力を引き起こしている状況が読み取れる。

ここまでの結果に加えて本会では更に、各国における貢献因子を産業部門レベルまで分解し、各 GSC における水消費-経済効率性指標の改善に向けて鍵となる国・部門を特定する。最終的に得られた結果に基づき、各 GSC において世界・地域規模での持続可能な水資源利用に向けた政策立案について包括的に議論する

引用文献

1) Motoshita et al. (2023) Resour. Conserv. Recycl. 196, 107055.
2) Mülle et al. (2014) Hydrol. Earth Syst. Sci. 18:3511-3538.
3) Pfister et al. (2014) J. Clean. Prod. 73:52-62..
4) Lenzen et al. (2022) Nat. Sustain. 5:157-166.

世界多地域産業連関表を利用したデカップリング分析手法の開発とその実証分析

Development of a Decoupling Analysis Method Using the World Multi-Regional Input-Output Table and Its Empirical Analysis

○西藤和佳*[1)]、加河茂美[1)]
Waka Nishifuji, Shigemi Kagawa
1) 九州大学
* nishifuji.waka.321@ s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景・目的

気候変動抑制のためには、経済成長と温室効果ガス（GHG）排出を切り離す過程を明らかにし、経済の効果的な低炭素化を実現することが極めて重要である[1)]。

多くの研究は、経済成長に伴って GHG 排出量に影響を与える要因を特定しようとしてきた[2,3)]。こうした研究では、構造分解分析や指数分解分析を用いて実証的な結果が得られているが、複数国・複数期間の比較や時間的傾向に基づいて特定の国にとって効果的な低炭素化の道筋を特定することには貢献していない。

各国が効果的なデカップリング政策を策定するためには、包括的で詳細な要因分解分析が必要であるが、現在のところ、デカップリング過程に焦点を当てた世界的な GHG 削減政策のための十分な指針を提供する研究はない。特に、デカップリングの要因としてのグローバルサプライチェーンの役割を検討した研究はほとんどない。

本研究は、世界多地域産業連関表（MRIO）を用いた構造分解分析を適用し、デカップリングの要因を詳細に特定することで、世界の CO2 排出量を削減するための指針を示すことを目的とする。

2. 分析手法

2.1 デカップリング指標の定義

N ヵ国・M 産業からなる MRIO に、環境拡張型産業連関モデルを適用すると、ある期間（0 年から t 年）の特定の国 r のデカップリング指標は、以下のように定義される。

$$D_t^r = \frac{\frac{q_t^r - q_0^r}{q_0^r} \times 100}{\frac{v_t^r - v_0^r}{v_0^r} \times 100} = \frac{\%\Delta q_t^r}{\%\Delta v_t^r} \quad (1)$$

$$q^r = \frac{\mathbf{eLf}^r}{pop^r} = \mathbf{eL}\frac{\mathbf{f}^r}{pop^r} \quad (2)$$

$$v^r = \frac{\sum_{j=1}^{M} va_j^r}{pop^r} \quad (3)$$

ここで、q^r は一人当たりカーボンフットプリント（消費ベース CO_2 排出量）、$\mathbf{e}$ は直接 CO_2 排出係数行ベクトル、$\mathbf{L}$ は直接・間接中間投入を示すレオンチェフ逆行列、$\mathbf{f}^r$ は国 r の最終需要列ベクトル、pop^r は国 r の人口、$\sum_{j=1}^{M} va_j^r$ は国 r の M 産業の付加価値合計を表す。

2.2 クラスタリング分析

同期間に、N ヵ国が経済成長と環境負荷の関係についてどのような経路をたどったかを明らかにするために Ward 法を適用する。

2.3 CO_2 排出の要素分解分析

デカップリングを引き起こす要因を詳細に特定するため、カーボンフットプリントの推計式を分解する。応用的な要素分解法を用いると、式 (2) は以下のように再定式化される。

$$q^r = \mathbf{eL}\frac{\mathbf{f}^r}{pop^r} = \mathbf{e}(\mathbf{I} - \mathbf{T}_m \odot \mathbf{A})^{-1}\left(\mathbf{T}_f^r \odot \mathbf{Y}^r\right)c^r \quad (4)$$

ここで、$\mathbf{I}$ は単位行列、$\mathbf{T}_m$ は中間財の交易係数行列、$\mathbf{A}$ は技術係数行列、$\mathbf{T}_f^r$ は r 国の最終財の交易係数行列、$\mathbf{Y}^r$ は r 国の最終需要の産業構成、c^r は r 国の一人当たり最終需要額、$\odot$ はアダマール積を表す。

2.4 CO_2 排出の構造分解分析

構造分解分析を用いると、同期間における国 r のカーボンフットプリントの変化 $\Delta q_t^r = q_t^r - q_0^r$ は以下のように分解される。

$$\Delta q_t^r = \Delta q_e + \Delta q_{Tm} + \Delta q_A + \Delta q_{Tf} + \Delta q_Y + \Delta q_c \quad (5)$$

ここで、Δq_e は排出係数の変化、Δq_{Tm} は中間財の交易構造の変化、Δq_A は生産技術の変化、Δq_{Tf} は最終財の交易構造の変化、Δq_Y は消費嗜好の変化、Δq_c は一人当たり最終需要額の変化が、それぞれカーボンフットプリントの変化に与えた影響を表す。

3. データ

43 の国・地域、56 産業部門から構成される世界多地域産業連関表 World Input-Output Database[4,5]を使用した。2000-2014 年について経年分析を行うために、2014 年価格に実質化された接続表[6]を用いた。

4. 結果

4.1 各国のデカップリング指標

図 1 は、2000-2014 年における各国のデカップリング指標を示す。点線は D が 1（GDP が 1%増加したときカーボンフットプリントも 1%増加する）を表す。

この結果は、同期間に、多くの国で相対的または絶対的なデカップリングが達成されたことを示す。

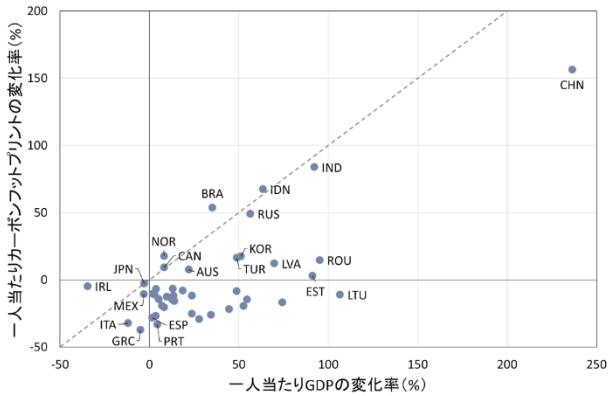


図 1. 2000-2014 年における各国の GDP 変化率とカーボンフットプリント変化率

4.2 デカップリング指標の推移パターン

デカップリング指標について 8 つの推移パターン（クラスター）が特定された。クラスター間の階層構造より、43 ヵ国はまず経済成長率に基づき 3 つに分類された後、カーボンフットプリントの変化率に基づきさらに細分類された。

この結果は、同程度の経済成長を達成したにもかかわらず、CO_2 排出量を相対的または絶対的に削減した国もあれば、増加させた国もあることを示す。

4.3 CO_2 排出の変化要因

デカップリングの要因を特定するために、カーボンフットプリントの変化を 6 つの要因に分解した。ただし、4.2 で特定された経済成長率に基づく 3 分類別に、クラスター間で比較した。

図 2 より、中規模の経済成長の段階にある国では、中間財、最終財の交易構造の変化がデカップリングを達成するために重要な要素であることが分かる。

一方で、図 3 より、大規模の経済成長の段階にある国では、一人当たり最終需要額および消費嗜好の変化による排出増加効果を抑制することが重要である。

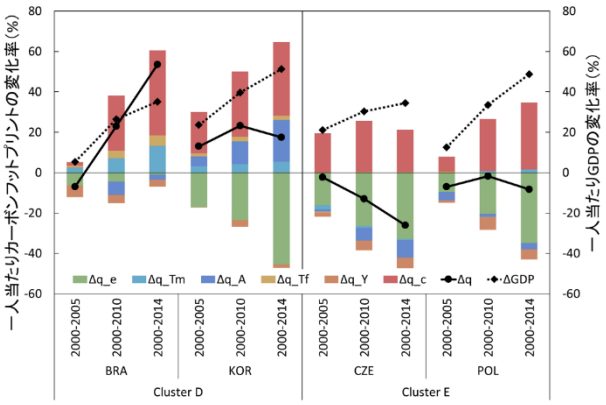


図 3. Cluster D, E（中規模の経済成長）所属国のカーボンフットプリント変化要因

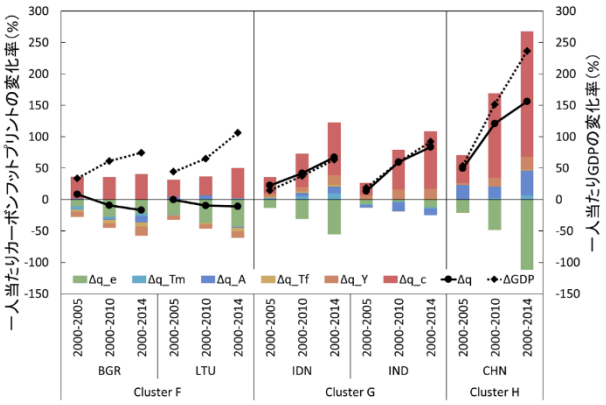


図 4. Cluster F, G, H（大規模の経済成長）所属国のカーボンフットプリント変化要因

5. 考察・結論

経済がある程度成熟した国では、グローバルサプライチェーンからの排出を削減する政策を実施することが重要である。例えば、グローバルサプライチェーンの再構築（貿易相手国の変更や貿易量に占める割合の調整）や、世界の工場的役割を担う国への技術的・資金的支援などが有効である。

一方、著しい経済成長期にある国にとっては、貿易構造ではなく、消費スタイルを環境に適応したものに変えていくことが重要である。

引用文献

1) Yang, J., Hao, Y., Feng, C.: *Energy Econ*, 100, (2021), 105327.
2) Nansai, K., Kagawa, S., Suh, S., Inaba, R., Moriguchi, Y.: *Environ. Sci. Technol.*, 41(4), (2007), pp.1465-1472.
3) Okamoto, S.: *J. Econ. Struct.*, 2, (2013), pp.1-21.
4) Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R., Timmer, M., De Vries, G. (2013).: *Econ Syst Res*, 25(1), (2013), pp.71-98.
5) Timmer, M.P., Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R., De Vries, G.J.: *Rev Int Econ*, 23(3), (2015), pp.575-605.
6) Tokito, S., Nagashima, F., Hanaka, T.: *Spat Econ Anal*, (2024), pp.1-15.

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 16:20 ~ 17:40 A会場：2451中講義室（4F）

[1-A4] プラネタリー・バウンダリー

座長：本下 晶晴 (産業技術総合研究所)

16:20 ~ 16:40

[1-A4-01]

成層圏エアロゾル注入による気候変動と大気汚染のトレードオフ分析

*持田 祐行[1]、永島 達也[2]、湯 龍龍[3]、伊坪 徳宏[4] (1. 東京都市大学、2. 国立研究開発法人国立環境研究所、3. 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、4. 早稲田大学)

16:40 ~ 17:00

[1-A4-02]

気候変動および大気汚染に関わる環境正義: 誘発/排出/被害国の関係に基づく不平等性分析

*横井 崚佑[1]、伊坪 徳宏[2]、湯 龍龍[3]、前野 啓太郎[1]、本下 晶晴[1] (1. 産業技術総合研究所、2. 早稲田大学、3. 農業・食品産業技術総合研究機構)

17:00 ~ 17:20

[1-A4-03]

化学物質を対象とした淡水生物種の絶滅リスク評価手法の開発

*村本 麻里花[1]、内藤 航[2]、加茂 将史[2]、本下 晶晴[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 産業技術総合研究所)

17:20 ~ 17:40

[1-A4-04]

総合討論

©日本LCA学会

気候変動および大気汚染に関わる環境正義: 誘発/排出/被害国の関係に基づく不平等性分析

Environmental justice for climate change and air pollution: Inequality analysis based on nexus between inducing, emitting, and damaged countries

○横井崚佑*[1)]、伊坪徳宏 [2)]、湯龍龍 [3)]、前野啓太郎 [1)]、本下晶晴 [1)]
Ryosuke Yokoi, Norihiro Itsubo, Longlong Tang, Keitaro Maeno, Masaharu Motoshita
1) 産業技術総合研究所, 2) 早稲田大学, 3) 農業・食品産業技術総合研究機構
* r.yokoi@aist.go.jp

1. はじめに

ライフサイクルアセスメント (LCA: Life cycle assessment) やプラネタリーバウンダリのコンセプトなどによって環境影響の「量」の側面に関して様々な研究がなされてきたが、環境影響の「配分」や「公平性」の側面もまた重要である。環境正義は、「環境法、規制、政策の策定や実施、施行に関して、人種や肌の色、国籍、所得に関わらず、すべての人々が公平に扱われ、意義のある関与を果たす」という原則を指し、アメリカ国内における有害廃棄物処理施設の場所に関する問題などが始まりと考えられるが、その後は国間の問題も環境正義の文脈においても扱われてきた [1)]。環境正義が目指す全ての人々の「公平な扱い」と「意義のある関与」を世界的に実現するためには、国間の環境影響の不公平性とそこへの責任を定量的に明らかにするとともに、定量的なエビデンスに基づいて国際的な議論と取り組みを促進することが必要である。

国レベルでの環境的不公平性は、「誘発国」と「排出国」の乖離と「排出国」と「被害国」の乖離という 2 つの乖離によって生じる。サプライチェーンの国際化により、環境負荷物質の排出が行われる国 (排出国) とその排出の原因となる消費活動を行う国 (誘発国) の乖離が進んできた。また一部の環境問題は、原因物質の排出地域から離れた別の地域 (被害国) に対して健康被害を発生させることが多い。例えば気候変動は全球規模の問題ではあるが、脆弱な地域における被害が大きい。大気汚染についても原因物質は大気中を長距離移動して、遠くの地域に被害をもたらし得る。これらの要因によって誘発国と排出国、被害国に関して乖離が生じ、その乖離は環境影響の不公平性、そして環境不正義へと繋がる。

そこで本研究では環境正義の実現に向けた定量的なエビデンスの提供を狙いとして、気候変動と大気汚染に関して誘発、排出、被害国の関係性に基づいて環境影響の不公平性を明らかにする。さらに不公平性の緩和に向けて、各国の立場に応じた効果的な対策に関しても議論を行う。

2. 方法

2.1 研究対象

本研究では、気候変動に関しては温室効果ガス (GHG: Greenhouse gas) の排出を対象とし、大気汚染についてはブラックカーボンおよび有機炭素、窒素酸化物、二酸化窒素の排出を含む微小粒子状物質 (PM2.5) の排出と、窒素酸化物および非メタン揮発性有機化合物の排出による光化学オキシダントを対象とした。それぞれは異なる影響領域に分類されるが、排出による人間健康被害量を算定することで、それぞれの排出による影響を統合して結果を示す。対象国は 159 ヵ国とし、1990 年から 2020 年までを対象に 5 年ごとに推計を行った。

2.2 誘発国と排出国の関係性

多地域間産業連関 (MRIO: Multi-regional input-output) モデルを用いて、各国の消費活動が各排出国に誘発する温室効果ガスと大気汚染物質の排出量を推計した。MRIO 表としては GLORIA (Global Resource input-output assessment) を用いた [2,3)]。誘発国hのt年における最終需要が排出国iに誘発した環境負荷物質xの排出量$E_{t,x}^{h,i}$は次式で算定される。

$$E_{t,x}^{h,i} = \sum_{l} q_{l,t,x}^{i} \sum_{k} L_{k,l,t}^{h,i} y_{k,t}^{h} \quad (1)$$

ここで、kおよびlはそれぞれ誘発および排出セクター、qは単位産出額あたりの環境負荷物質排出量、Lはレオンチェフ逆行列、yは最終需要を表す。

2.3 排出国と被害国の関係性

ライフサイクル影響評価 (LCIA: Life cycle impact assessment) において開発されてきた、排出地域と被害地域を考慮した特性化係数を適用することで [4-6)]、各国で排出された GHG と大気汚染物質が各被害国にもたらす健康被害量を推計した。なお適用した特性化係数は地域レベルとなっているため、地域レベルの健康被害を対象年における人口 (GHG については対象年か

ら 2100 年までの累積人口) に基づいて地域ごとに各国に分配することで国レベルの特性化係数へと変換した。影響領域nに関して排出国iにおけるt年の環境負荷物質群の排出が被害国jにもたらす健康被害量$D_{n,t}^{i,j}$は次式で算定される。

$$D_{n,t}^{i,j} = \sum_{x} c_{n,t,x}^{i,j} \sum_{h} E_{n,t.x}^{h,i} \qquad (2)$$

ここで、$c_{n,x}^{j,s}$は影響領域nに関して排出国iにおける環境負荷物質xの単位量排出が被害国jにおよぼす健康被害量を表す特性化係数である。なお、以上の算定結果の健康被害量は障害調整生存年 (DALY: Disability-adjusted life year) で表される。

3. 結果と議論

2020 年の GHG 排出および大気汚染による人間健康被害に関して、誘発国および排出国、被害国の関係性を**図 1** および**図 2** に示す。気候変動は排出地点に関わらず脆弱な国に対して被害を及ぼすが、低所得地域に脆弱な国が多いために GHG 排出に関して誘発国と被害国の乖離 (不平等性) が顕著に見られた。一方大気汚染に関しては、排出地点から比較的近い地域において被害が発生する傾向にあるため、排出国と被害国の乖離は比較的小さかった。

GHG 排出および大気汚染を合わせた合計の人間健康被害に関して、G7 および G20 は全体の健康被害のそれぞれ 19.1%および 76.8%を誘発した一方で、自国で発生した被害量はそれぞれ全体の 1.6%および 45.5%となり、先進諸国が自国に対する健康被害以上に他国に健康被害を及ぼしている傾向が示唆された。国別に見ると、誘発および排出、発生被害量の全てにおいて中国とインドが上位 2 ヶ国となったが、誘発および排出被害量についてはどちらもアメリカ、ロシアが続くのに対して、発生被害量についてはナイジェリア、コンゴ民主共和国が続き、異なる傾向が見られた。

発生被害量に対する誘発被害量の比率はいかに人間健康被害において不平等を受けているかを表す指標として捉えることができる。本指標を各国に対して算定すると、上位国の多くはアフリカの途上諸国に集中し(最大はコンゴ民主共和国の約 50 倍)、人間健康被害における不平等性が示された。

本研究の結果は GHG 排出と大気汚染による人間健康被害における不平等性を定量的に示すとともに、不平等性の軽減に向けた効果的な対策も示唆するものである。本発表においては主要な誘発源および排出源となっているセクターの特定やより詳細な推計結果に基づいて、主要な誘発および排出、被害国を対象とした効果的な対策についても議論する。

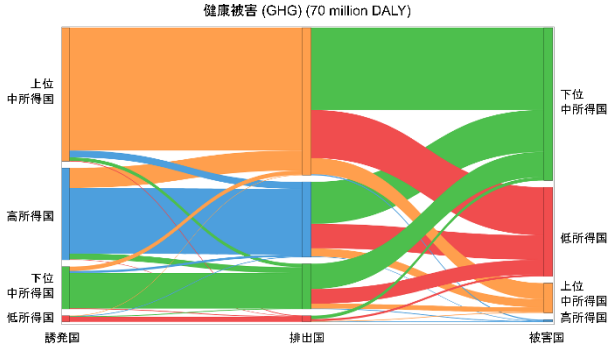


図 1 GHG 排出による人間健康被害における誘発/排出/被害国の関係 (2020 年) (4 所得レベル別)

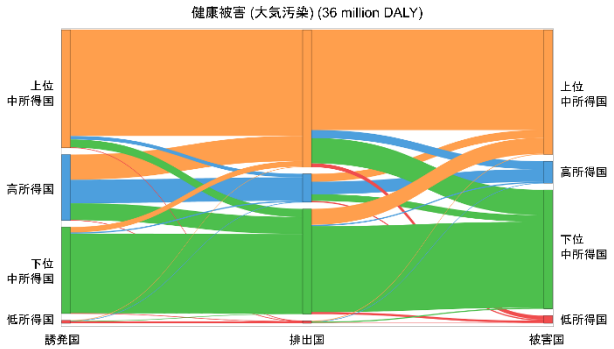


図 2 大気汚染物質排出による人間健康被害における誘発/排出/被害国の関係 (2020 年) (4 所得レベル別)

謝辞

本研究は科研費基盤研究 A (21H04944) および基盤研究 B (23K28302) の支援を受けた。

引用文献

1) EPA, Final Guidance for Incorporating Environmental Justice Concerns in EPA's NEPA Compliance Analyses. Washington, DC, (1998)
2) Lenzen et al.: Econ. Syst. Res. 29, (2017), 158-186
3) Lenzen et al.: Nat. Sustain. 5, (2022), 157-166
4) Tang et al.: Int. J. Life Cycle Assess. 23, (2018), 2300-2310
5) Tang et al.: Int. J. Life Cycle Assess. 23, (2018), 2339-2348
6) Tang et al.: Int. J. Life Cycle Assess. 24, (2019), 1118-1128

公募企画セッション

2025年3月5日(水) 9:00 ~ 10:20 B会場：2455中講義室（4F）

[1-B1] 削減貢献量・実績量の主張における課題

オーガナイザー：醍醐市朗 (東京大学)

9:00 ~ 10:20

[1-B1-01]

削減貢献量・実績量の主張における課題

©日本LCA学会

公募企画セッション

2025年3月5日(水) 10:40 ~ 12:00 B会場：2455中講義室（4F）

[1-B2] 森林と資源のライフサイクル思考

オーガナイザー：斎木祐子 (東京大学)、兼松祐一郎 (東京大学)、菊池康紀 (東京大学)

10:40 ~ 12:00

[1-B2-01]

森林と資源のライフサイクル思考

©日本LCA学会

森林と資源のライフサイクル思考

◆日時　2025 年 3 月 5 日（水） 10:40-12:00

◆セッションの趣旨・概要

森林は木本系リグノセルロース資源を生産することができる場であり、持続的な管理を適用することにより持続的に炭素資源を生産しうる場となる。リグノセルロース資源は、セルロース、ヘミセルロース、リグニンにより構成され、それぞれ、多岐にわたる化成品の原料となりうることがわかっているが、持続的な調達可能量、技術の組合せによる製品併産、ライフサイクルでの環境影響を考慮しながら、化石に依存しない素材・燃料製造のライフサイクルを設計していく必要がある。本企画セッションでは、森林と資源に関するライフサイクル思考の最新の状況を俯瞰し、議論する。

◆タイムテーブル

10:40 - 10:50	菊池 康紀（東京大学） 資源生産の場としての森林
10:50 - 11:05	斎木 祐子、劉 俊希、醍醐 市朗（東京大学） セルロースナノファイバーの材料物性と代替材料の探索について
11:05 - 11:20	八木原 昴輝（東北大学） 改質リグニンの紹介と導入効果の計算方法について
11:20 - 11:30	金沢 大輔（東京大学） 化学産業の炭素資源調達におけるバイオマス利用の位置付けについて
11:30 - 12:00	パネルと質疑応答 モデレーター 菊池 康紀（東京大学）

◆オーガナイザー連絡先

東京大学　斎木祐子　ysaiki@utlca.u-tokyo.ac.jp
東京大学　兼松祐一郎　kanematsu@platinum.u-tokyo.ac.jp
東京大学　菊池康紀　ykikuchi@ifi.u-tokyo.ac.jp

公募企画セッション

2025年3月5日(水) 14:40 ~ 16:00 B会場：2455中講義室（4F）

[1-B3] 社会変化を取り入れた将来のインベントリデータベースのあり方

オーガナイザー：田原聖隆 (産業技術総合研究所)、福島康裕 (東北大学)、醍醐市朗 (東京大学)

14:40 ~ 16:00

[1-B3-01]

社会変化を取り入れた将来のインベントリデータベースのあり方

©日本LCA学会

公募企画セッション

日時：2025 年 3 月 5 日（水）14:40 ~ 16:00
会場：B 会場：2455 中講義室（4F）

「社会変化を取り入れた将来のインベントリデータベースのあり方」

セッションの趣旨・概要

我が国は、2050 年カーボンニュートラルを宣言し、産業界でも達成に向かって技術開発等の対策を講じていかなければならない。効果的な対策を実施するには、温室効果ガスなどの環境負荷物質の定量が必須であり、社会変化を取り入れたインベントリデータベースの構築の必要性が高まってきている。そこで本セッションでは、海外の事例の紹介や企業内でのニーズを調査した結果を紹介するとともに、課題解決を議題にパネルディスカッションを実施する。

セッション内容

1. 「我々の活動内容の紹介」　産業技術総合研究所　田原聖隆
2. 「海外の事例紹介」東北大学　福島康裕、東京大学　醍醐市朗
3. 「企業等のニーズに関する調査結果」　国立環境研究所　田崎智宏
   各担当（福島、田崎、正畠、中島、醍醐、中谷、菊池、一杉、田原）
4. 討議

公募企画セッション

2025年3月5日(水) 16:20 ~ 17:40 B会場：2455中講義室（4F）

[1-B4] エネルギーシステムと地域経済の変革が創り出す将来社会

オーガナイザー：本藤祐樹 (横浜国立大学)

16:20 ~ 17:40

[1-B4-01]

エネルギーシステムと地域経済の変革が創り出す将来社会

©日本LCA学会

第 20 回日本 LCA 学会研究発表会 企画セッション

エネルギーシステムと地域経済の変革が創り出す将来社会

2025 年 3 月 5 日　県立広島大学

セッションの趣旨

我が国におけるカーボンニュートラル実現のためには、エネルギーシステムの脱炭素化と同時に社会経済システム全体の変革が伴うでしょう。その変革を成功に導くためには、国を構成する各地域レベルでどのような変化が生じうるかを考える必要があります。例えば、エネルギーシステムの抜本的な転換は、エネルギー関連産業やインフラに大きな変革を迫るとともに、多様な産業創出の契機となり新たなベネフィットをもたらすかもしれません。それが都市部に集中するのか、各地域に分散するのか、いずれの可能性もあります。また、雇用や付加価値の産業間・地域間シフトが引き起こされ、正負どちらの影響を受けるかは産業や地域によって異なるでしょう。つまり、社会の効率性や公平性に関わる問題が生じ得ます。本セッションでは、日本全体のエネルギーシステムの費用効率的な脱炭素を目指すとともに、公平な便益の配分に関わる地域経済や産業・雇用構造への影響も考慮した上で、将来の再生可能エネルギー基盤社会に向けた潜在的な道筋について議論したいと思います。

セッションの構成

本セッションは、JST の社会シナリオ研究事業「地域特性を活かし価値を創造する再生可能エネルギー基盤社会への道筋（代表：本藤祐樹）」において得られた中間的な研究成果をベースにして、上述の趣旨を踏まえて議論を深めたいと思います。時間も限られていることから、話題提供では将来社会に向けた道筋を検討するためのモデル分析に重点をおいていますが、研究事業全体に関する議論も歓迎します。

1. セッションの趣旨説明	
地域特性を活かし価値を創造する再生可能エネルギー基盤社会への道筋	本藤祐樹（横浜国立大学）
2. 話題提供（題目は仮題）	
将来のエネルギーシステムの姿	大槻貴司（横浜国立大学）
将来におけるエネルギーシステムと地域経済の関係	森泉由恵（横浜国立大学）
将来技術の導入に伴う我が国の技術構造の変化	西村一彦（中京大学）
3. 議論	
セッション参加者による意見交換	参加者全員

JST 低炭素社会実現のための社会シナリオ研究事業「地域特性を活かし価値を創造する再エネ基盤社会への道筋」

http://www.hondo.ynu.ac.jp/JST/index.html

本研究事業の研究実施機関

横浜国立大学、産業技術総合研究所、日本エネルギー経済研究所、中京大学、日本福祉大学

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 9:00 ~ 10:20 C会場：2313中講義室（3F）

[1-C1] デジタル技術

座長：髙橋 和枝 (武蔵野大学)

9:00 ~ 9:20

[1-C1-01]

講演取消

9:20 ~ 9:40

[1-C1-02]

ロボットを用いた自作防犯サービスの環境社会影響評価

*星川 真菜[1]、渡邊 紀文[1]、髙橋 和枝[1] (1. 武蔵野大学)

9:40 ~ 10:00

[1-C1-03]

脱炭素社会に向けたシナリオ構築への生成AIの活用可能性

*中野 祐樹[1]、本藤 祐樹[1]、森泉 由恵[1]、大槻 貴司[1]、工藤 祐揮[2]、小澤 暁人[2] (1. 横浜国立大学、2. 産業技術総合研究所)

10:00 ~ 10:20

[1-C1-04]

YouTube動画が気候変動対策に向けた人々の行動意図に与える影響

*大里 優佳[1]、栗栖 聖[1]、福士 謙介[1] (1. 東京大学大学院)

©日本LCA学会

脱炭素社会に向けたシナリオ構築への生成 AI の活用可能性

Exploring the Potential of Generative AI in Building Scenarios for a Decarbonized Society

○中野祐樹*[1)]、本藤祐樹 [1)]、森泉由恵 [1)]、大槻 貴司 [1)]、工藤 祐揮 [2)]、小澤 暁人 [2)]
Yuuki Nakano, Hiroki Hondo, Yue Moriizumi, Takashi Otsuki, Yuki Kudoh, Akito Ozawa
1) 横浜国立大学, 2) 産業技術総合研究所
* nakano-yuuki-tb@ynu.ac.jp

1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けて、「社会シナリオ」の活用が進められている。社会シナリオとは、未来の社会の望ましい姿をそこに至るまでの道筋や戦略と共に示したものであり、政策や計画の立案などに利用される。シナリオの中核となる将来像を描くためには、温室効果ガスの排出量や再生可能エネルギーの導入量の推計など様々な情報やデータを統合的に処理することが必要となる。また、環境や経済など社会の多様な側面に焦点を当てることも求められる。このように、脱炭素に関する具体的な将来像を描き出すプロセスには多くの課題が伴うとされる。

そこで、将来像の構築において人工知能（AI）、特に生成 AI を活用することが期待される。生成 AI は「文章、画像、プログラム等を生成できる AI モデルに基づく AI の総称」（総務省・経済産業省）と定義され、学術からエンターテイメントまで様々な領域で利用が急速に拡大している。多様なデータに基づいてクリエイティブな成果物を生成することを得意とするツールであることから、生成 AI は将来像の描写に貢献する可能性が考えられる。一方で、社会シナリオに関連する領域で実際に生成 AI の応用を試みた事例はほとんど見当たらず、その有効性や効果的な活用方法が明らかにされているとは言い難い。

以上より、本研究では生成 AI の活用に向けた予備的な検討として、生成 AI が描く脱炭素に関する将来像の特徴を明らかにすることを目的とする。

2. 方法

生成 AI と人間に同一の指示を与えることで 2030 年の横浜市の将来像を描かせ、両者を比較することでその特徴を明らかにする。ここでは生成 AI として ChatGPT-4o を採用する。ChatGPT は OpenAI 社の提供する対話型プログラムであり、インターネット上の広範な知識に基づいた柔軟な応答を特徴とする。人間として実験に参加するのは、横浜市内の大学の理工学部に在籍する学生 5 名である。

はじめに、横浜市の脱炭素に関する 13 の定量的・定性的な情報を提示する（表 1）。これらは「横浜市地球温暖化対策実行計画」（令和 5 年 1 月）において、2030 年の温室効果ガス排出量 50%削減（2013 年度比）に向けた重点取組として示されている目標である。この中から任意の目標をひとつまたは複数選択した上で、その目標が達成された横浜市の街の姿を一文で記述するように図 1 のような指示を与える。作成された将来像について、形式的・内容的な特徴を分析する。

表 1 将来像の前提として提示する情報

項目	目標
臨海部における CO_2 排出量	480 万 t
脱炭素化への取組を実施した事業者の割合	40 %
脱炭素先行地域の電力消費に伴う CO_2 排出	実質ゼロ
郊外部における脱炭素化モデル事業の実施	展開
国際園芸博覧会における 持続可能な都市モデルの創出	創出
新築住宅における 省エネ性能の高い住宅の普及戸数	19,8000 戸
市が実施する取組による再エネ切替え者数	1,0000 件
サーキュラーエコノミーの構築	推進
次世代・ハイブリッド自動車の普及割合	55 %
市役所における温室効果ガスの排出量	46 万 t
公共施設への太陽光発電設備の導入割合	約 50 %
公共施設の LED 等高効率照明の割合	100 %
一般公用車の次世代自動車等の導入割合	100 %

以下の指示に従って 2030 年の横浜市の将来像を描いてください。
#表の目標が達成された場合の横浜市の街の姿を記述してください。
#任意の目標をひとつまたは複数選択してください。
#以下の例のように単文で記述してください。
#例#
全ての世代が気候変動対策の重要性を認識し、使用機器や行動における省エネ対策や再エネの利用、脱炭素化に資する製品・サービスの利用等、自然と脱炭素に配慮した行動を取る脱炭素ライフスタイルが定着しています。

図 1 ChatGPT と学生に与える指示

3. 結果

実験の中で学生は合計 42 の将来像を描いているため、ChatGPT にも同じ数だけ将来像を生成させて分析を行う。両者が作成した将来像の一例を以下に示す。

【ChatGPT】
- 臨海部では CO_2 排出量が 480 万トンに削減され、再生可能エネルギーの活用と効率的な産業運営が都市経済を支えています。
- 市内の車両の 55 %が次世代自動車となり、クリーンな交通システムが整備され、騒音と大気汚染が大幅に軽減されています。

【学生】
- 市全体として、海外も含めた他地域との経済的、産業的な関連が深まり、環境面では日本国内を代表することもできるようなポテンシャルをもち、他地域からも技術を学ぼうとする人達が集まり、先端技術が集積する研究所、工場などが増える。
- 電気自動車やハイブリッドカー、水素自動車の普及によって、騒音や排気ガスが少なく住みやすい街となったことを目の当たりにして、次世代自動車の重要性を多くの市民が認識し、さらなる次世代自動車の需要拡大とそれに伴いそのような車を手に入れやすい値段で買えるようになるという好循環を作った都市となっている。

3.1 形式的な特徴の分析

はじめに、ChatGPT と学生が同一の指示の下で描いた 2030 年の横浜市の将来像について、文章の構造を比較する。両者が作成した将来像の大半が共通の構造を有しており、前半部分で変化の原因や理由を述べた上で、後半部分で未来の街の様子を表現していることが分かる。ChatGPT が描いた将来像には「臨海部では CO_2 排出量が 480 万トンに削減され」のように提示した目標の文言を引用した記述が多く見受けられ、したがって定量的な表現も含まれている。一方で、学生が描いた将来像にはそのような傾向は認められず、定性的な描写を中心に構成されている。

つぎに、語句の出現傾向を比較する。学生の将来像には「住みやすい」「手に入れやすい」などの形容詞が多く現れている一方で、ChatGPT の将来像には形容詞がほとんど含まれていないことが分かる。また、将来像一文あたりの平均文字数は学生が 86.3 字、ChatGPT が 51.2 字と、学生の方が多くなっている（Welch の t 検定：$t = -7.94$, $p < .001$）。以上より、学生の方が修辞的かつ具体的で詳細な将来像を描く傾向にあると言うことができる。

3.2 内容的な特徴の分析

描かれた将来像の中には、横浜市の臨海部に工場や事業所を構える企業として、実在の石油関連企業や都市ガス関連企業などの名称を挙げているものが含まれている。また、「みなとみらい 21 地区は埋め立て地である」など具体的な地名やその実情に言及した記述も見受けられる。このような将来像はいずれも学生が描いた中にのみ認められ、ChatGPT が描いた中には確認できない。したがって、学生には地域の状況を適切に反映した将来像を構築する傾向があると考えられる。

つづいて、将来像は多様な視点から描写するのが望ましいとされていることを踏まえて、ChatGPT と学生が描いた将来像の多様性を比較する。ここでは、「臨海部における CO_2 排出量が 480 万トン」という目標を踏まえた将来像に着目する。この目標に関連する将来像は 5 名の学生がひとつずつ作成していることから、ChatGPT にも 5 つの将来像を生成させる。ChatGPT が描いた 5 通りの将来像どうしの多様性、および 5 名の学生が描いた 5 つの将来像どうしの多様性を定量的に評価するために、コサイン類似度を算出する。コサイン類似度とは、文章の類似性を表す指標であり、文章をベクトルで表現したときにふたつの文章ベクトルが成す角のコサインと定義される。値は 1 から-1 の範囲を取り、1 に近いほどふたつの文章の内容は類似していると評価される。全てのペア（将来像 1 と将来像 2、将来像 1 と将来像 3、…、将来像 4 と将来像 5）についてコサイン類似度を算出し、ChatGPT と学生のそれぞれについてその平均値を求める。その結果、ChatGPT の平均値は 0.667、学生の平均値は 0.623 であることから、学生の方が類似性は低い、すなわち将来像の多様性が高いと言うことができる。ただし、両者の差異は統計的に有意な水準には達していない点に注意が必要である（$t = 0.978$, $p = .341$）。

当日は上記以外の結果についても報告することを予定している。

4. おわりに

本研究では、生成 AI と人間に同一の指示を与えて将来像を描かせることで、その特徴を明らかにすることを試みている。結果は、生成 AI は総論的で抽象的な将来像を描く傾向にあり、人間は地域の文脈に即した具体的な将来像を描き出す傾向にあることを示している。今後は、生成 AI と人間の協働による将来像の構築についても検討を深めたい。

【謝辞】本研究は JST 低炭素社会実現のための社会シナリオ研究事業 JPMJCN2302 の支援を受けている。

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 10:40 ~ 12:00 C会場：2313中講義室（3F）

[1-C2] 企業（1）

座長：中澤 克仁 (一般社団法人サステナブル経営推進機構)

10:40 ~ 11:00

[1-C2-01]

金融機関における投融資ポートフォリオのLCA

*西谷 直輝[1]、高橋 沙織[2]、梶間 宏和[2]、大久保 寛基[1]、伊坪 徳宏[3] (1. 東京都市大学大学院、2. 農林中央金庫、3. 早稲田大学)

11:00 ~ 11:20

[1-C2-02]

LCAを用いた金融機関によるエンゲージメント効果分析

*伊澤 璃矩[1]、加藤 正裕[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 三菱UFJ信託銀行株式会社)

11:20 ~ 11:40

[1-C2-03]

Does financial materiality matter to investors: a cross-national analysis

*沈 思語[1]、藤井 秀道[1] (1. 九州大学)

11:40 ~ 12:00

[1-C2-04]

総合討論

©日本LCA学会

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 14:40 ~ 16:00 C会場：2313中講義室（3F）

[1-C3] エネルギー需給

座長：藤田 壮 (東京大学)

14:40 ~ 15:00

[1-C3-01]

建築物ストック動態を考慮した技術普及シナリオ分析—住宅用給湯器の事例—

*黄 文彦[1]、林 徹[1]、中谷 隼[1]、藤田 壮[1] (1. 東京大学)

15:00 ~ 15:20

[1-C3-02]

貸集合住宅における太陽光発電とヒートポンプ給湯機の最適システムの提案

*小川 莉空[1]、磐田 朋子[1]、吉岡 剛[1] (1. 芝浦工業大学)

15:20 ~ 15:40

[1-C3-03]

雪冷房を導入した農産物直売所のライフサイクルコスト評価

*山崎 健笑[1]、樋口 健志[1] (1. 山形大学)

15:40 ~ 16:00

[1-C3-04]

総合討論

©日本LCA学会

雪冷房を導入した農産物直売所のライフサイクルコスト評価

Life Cycle Cost Assessment of an Agricultural Products Direct Sales Station with Snow Cooling

○山崎健笑*[1)]、樋口健志[1)]
Kensho Yamazaki, Takeshi Higuchi
1) 山形大学
* t241036m@st.yamagata-u.ac.jp

1. 緒言

地域によって使用できる再生可能エネルギーには特色があり、筆者の住んでいる山形県米沢市では「雪」が該当する。建築物における雪利用の一つに雪冷房がある。雪冷房は冷熱を発生させる過程で CO_2 を排出しないメリットがある一方で、雪を保存する貯雪庫の建設コストが高くつく[1)]ことから、広い導入・普及には至っていない。

当研究室で雪冷房を導入した郊外型スーパーマーケット（SM）のライフサイクルコスト（LCC）を評価したところ、冷房にかかる電気代の削減分よりも貯雪庫の建設コストが大きく、現時点では SM への雪冷房の導入は難しいと判断した[2,3)]。

本研究では、SM よりも規模、室内の機器発熱が小さいことで冷房負荷が相対的に小さくなり、貯雪庫の建設コストも小さくなると予想される農産物直売所（直売所）に電気冷房／雪冷房を導入した場合の LCC の比較を行い、貯雪庫の建設コストを削減するための条件を採用した場合にどれだけの削減効果があるのかを計算した。

本研究で扱った雪冷房の概念図を図 1 に示す。図 1 中の HEX は熱交換器、HPC はヒートポンプチラー（熱源機）、FCU はファンコイルユニット（空調機）である。

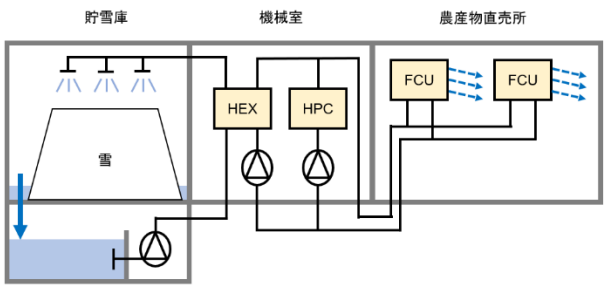


図 1　雪冷房の概念図

2. 計算方法

2.1 評価対象と諸条件

評価対象の直売所と貯雪庫は鉄骨造、建物寿命 30 年、直売所の冷房期間を 6/1～9/30 とした。直売所の基本情報を表 1、貯雪庫の基本情報を表 2 に示す。

表 1　直売所の基本情報

延床面積	550 m^2
使用断熱材	吹付け硬質ウレタン
断熱材厚さ	外壁 25 mm　屋根 50 mm
冷房運転時間	8.5 h　(09:30～18:00)
冷房温度	26 ℃

表 2　貯雪庫の基本情報

延床面積	192.08 m^2
使用断熱材	ポリスチレンフォーム
断熱材厚さ	外壁 100 mm　屋根 100 mm

表 1、2 のときを基準条件として、貯雪庫の建設コストを削減するための条件についても計算した。機能単位を「直売所の冷房は 8.5 h 運転、冷房温度は 26 ℃である」として、本研究で検討した 4 つの条件を以下に示す。このとき、条件ウ、エは直売所内の環境が基準条件と異なるため、機能単位が揃っていないことに留意する。

ア：貯雪庫の断熱材厚さを 2 倍にする
イ：直売所の断熱材厚さを 2 倍にする
ウ：冷房運転時間を 1 h 短縮する
エ：冷房温度を 1 ℃上げる

上記の 4 条件を採用した場合の貯雪庫面積を表 3 に示す。

表 3　各条件を採用した場合の貯雪庫面積

条件	延床面積 [m^2]	基準との差 [m^2]
基準	192.08	-
ア	169.28	-22.80
イ	188.18	-3.90
ウ	180.50	-11.58
エ	165.62	-26.46

2.2 計算手順

本研究では、3 つの計算ツールを使用して LCC を算出した。計算の流れを図 2 に示す。まず、概算エクセル [4]に計算対象となる建築物の構造や延床面積、部屋別面積などを入力し、必要資材量などを算出した。次に、BEST 設計ツール [5]に計算対象となる建築物の構造や延床面積、空調や照明をはじめとした各設備の能力などを入力し、熱負荷やエネルギー消費量などを算出した。最後に、AIJ-LCA ツール（一般建築版）_ver.6.02[6]に概算エクセルと BEST 設計ツールで算出した結果や電気料金などを入力し、LCC を算出した。

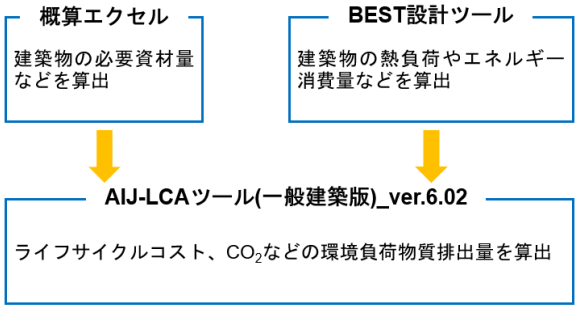


図 2　計算の流れ

3. 結果および考察

機能単位を揃えた場合（条件ア、イ）の LCC を表 4、機能単位を揃えない場合（条件ウ、エ）の LCC を表 5 に示す。

表 4 から、基準条件と比較したときに貯雪庫の断熱材厚さを 2 倍にする（条件ア）と合計で 10 百万円の削減がある一方で、直売所の断熱材厚さを 2 倍にする（条件イ）と直売所の運用、貯雪庫の建設、運用段階でのコスト削減分を直売所の建設段階でのコスト増加分が打ち消すため、LCC の削減は見られなかった。

表 5 から、基準条件と比較したときに冷房運転時間を 1 h 短縮する（条件ウ）と合計で 11 百万円の削減があり、冷房温度を 1 ℃上げる（条件エ）と 17 百万円の削減があることが分かる。どの条件を採用しても雪冷房の LCC が電気冷房より優位になることはなかった。

LCC の削減には、貯雪庫で保存する雪について、冷房期間開始までの融雪量を減らす対策または雪の使用量を減らす対策が有効だと考えられる。ただし、後者の対策では直売所利用者に負担をかけてしまう（冷房運転時間を 1 h 短縮するまたは冷房温度を 1 ℃上げることにより、直売所利用者が不快な思いをする）ことに留意する必要がある。貯雪庫の建設コストを削減するための条件を採用しても電気冷房の方が LCC は優位であることから、貯雪庫の「雪を保存する」という機能に何らかの付加価値を加えるなどのアプローチが必要だと考える。

表 4　LCC 比較_機能単位を揃えた場合

単位：百万円		基準	ア	イ	電気
直売所	建設	285	285	288	285
	運用	392	392	391	400
	廃棄	10	10	10	10
貯雪庫	建設	79	75	78	-
	運用	49	43	48	-
	廃棄	3	3	3	-
合計		818	808	818	695

表 5　LCC 比較_機能単位を揃えない場合

単位：百万円		基準	ウ	エ	電気
直売所	建設	285	285	285	285
	運用	392	388	391	400
	廃棄	10	10	10	10
貯雪庫	建設	79	75	70	-
	運用	49	46	42	-
	廃棄	3	3	3	-
合計		818	807	801	695

4. 引用文献

1) NEDO：“NEDO 再生可能エネルギー技術白書 初版”，NEDO，（オンライン），入手先 <https://www.nedo.go.jp/content/100116323.pdf>，（参照 2025-01-07）
2) 山崎健笑，樋口健志，伊藤凛太郎：“第 19 回日本 LCA 学会研究発表会”，宇都宮，(2024)，pp.2-P2-64
3) 伊藤凛太郎，樋口健志，山崎健笑：“第 19 回日本 LCA 学会研究発表会”，宇都宮，(2024)，pp.2-P2-65
4) “概算エクセル”，ksekisan，（オンライン），入手先 <http://ksekisan.o.oo7.jp/Gsetumei/Gsetumei.htm>，（参照 2025-01-07）
5) IBECs：“The BEST Program【ザ・ベスト・プログラム】建築物総合エネルギーシミュレーションツール”，IBECs，（オンライン），入手先 <https://www.ibecs.or.jp/best/>，（参照 2025-01-07）
6) 日本建築学会，“建物の LCA 指針 —温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール—（改訂版）”，丸善出版，東京，(2024)

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 16:20 ~ 17:40 C会場：2313中講義室（3F）

[1-C4] 水素、将来技術

座長：東海 明宏 (大阪大学)

16:20 ~ 16:40

[1-C4-01]

日本における水素発電のライフサイクル評価

*赤見 廉[1]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学)

16:40 ~ 17:00

[1-C4-02]

Optimal Design of Hydrogen Production Processes in Vietnam

*Nguyen Thi Quynh Trang[1]、Zhang Zhengyang[2]、Matsubae Kazuyo[3] (1. Student, Tohoku university、2. Assistant Professor, Tohoku university、3. Professor, Tohoku university)

17:00 ~ 17:20

[1-C4-03]

多規準性を考慮した最適水素輸送システムの探索
ー東京、神奈川、千葉をモデルとしてー

*山縣 慧子[1]、東海 明宏[1]、中久保 豊彦[1] (1. 大阪大学)

17:20 ~ 17:40

[1-C4-04]

技術開発のためのLCAの現状と展望

*福島 康裕[1] (1. 東北大学)

©日本LCA学会

日本における水素発電を対象としたライフサイクル GHG 排出量算定

Life Cycle GHG Emissions Assessment for Hydrogen Power Generation in Japan

○赤見廉*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Ren Akami, Norihiro Itsubo
1) 早稲田大学
* ren_akami1002@fuji.waseda.jp

1. はじめに

日本は自国のエネルギー政策の基本的な方向性を示すために、S+3E（Safety, Energy Security, Economic Efficiency, Environment）の考え方を軸としたエネルギー基本計画を策定している。2021 年には第 6 次エネルギー基本計画を策定し、2050 年カーボンニュートラルの実現や気候変動対策を視野に入れた現状のエネルギー課題とその克服方法について取りまとめている。第 6 次エネルギー基本計画では、火力発電の脱炭素化のために水素・アンモニア発電を利用するものとし、水素をカーボンニュートラル実現に必要不可欠な 2 次エネルギーとして注目している。2024 年 12 月に公開された第 7 次エネルギー基本計画（案）においても、この水素への期待には変化がない。しかしながら、日本において水素を導入することによる脱炭素効果の試算結果は少ない。以上の背景から、水素の脱炭素技術としての商用利用に先立ち、S+3E の Environment に当たる環境負荷は最優先で定量評価する必要がある。

そこで本研究では、水素のエネルギー利用による脱炭素効果を日本における水素発電を対象としたライフサイクル GHG 排出量算定によって可視化することを目的としている。

2. 研究方法

2.1 算定対象

本研究の算定対象は、海外で製造後日本まで輸送した水素、およびその水素による発電で得た電力である。したがって、機能単位は製造された水素 1 kg あたり、および発電された電力 1 kWh あたりとしている。水素は海外の適地で石炭ガス化（オーストラリア褐炭も考慮）や天然ガス改質、水電解などの手法で製造された複数種類を考慮した。これらの水素は CCS の活用や再生可能エネルギー由来の電力を利用することによって、ブルーまたはグリーン水素として扱うものとした。また製造された水素は、液化水素やアンモニア、液体有機水素キャリアなどの輸送キャリアに変換され、日本まで海上輸送されるものとしている。日本に輸送された水素は輸送キャリアからの脱水素処置が行われ、その後小規模 CGS 水素専焼発電によって熱と電気に変換される。

2.2 システム境界

システム境界には、水素製造の原料調達から、各手法による水素製造、水素の輸送キャリアへの変換、水素の海上輸送、輸送キャリアからの脱水素処置、水素発電による熱電獲得までを含んでいる。

システム境界中の「各手法による水素製造」には、ブルー水素とするための CCS 利用による追加排出や、グリーン水素とするために設置した再エネ電力設備製造による追加排出も考慮している。同様に「水素の海上輸送」には、輸送船への積荷および揚荷に要する電力排出も考慮している。

また、各プロセス間の細かな輸送や仮貯蔵などによる排出は、全体への影響が極めて小さいものとしてシステム境界に含めていない。

2.3 使用データ

使用データに関しては、算定対象となる水素サプライチェーンが商用段階に達してないことや秘密保持の観点等から 1 次データの入手が困難であったため、ヒヤリングデータを先行研究由来の文献値および実証試験公開レポート由来の 2 次データで補完している。原単位データベースには IDEA v3.4 を使用した。

また、システム境界中の「水素の海上輸送」では、各水素輸送キャリアの海上輸送について、固有の原単位データが確立されていないため、液化水素なら LNG、アンモニアなら LPG、液体有機水素キャリアなら石油というように、性状の似た物質のタンカー輸送と仮定することで算定を行っている。

3. 算定結果

本要旨では、算定結果の一部を詳細なシナリオ設定とともに紹介する。以下に示す結果は、オーストラリア褐炭ガス化と CCS によって製造されたブルー水素と、それを液化水素にて海上輸送し、日本で発電した際の電力のライフサイクル GHG 排出量である。

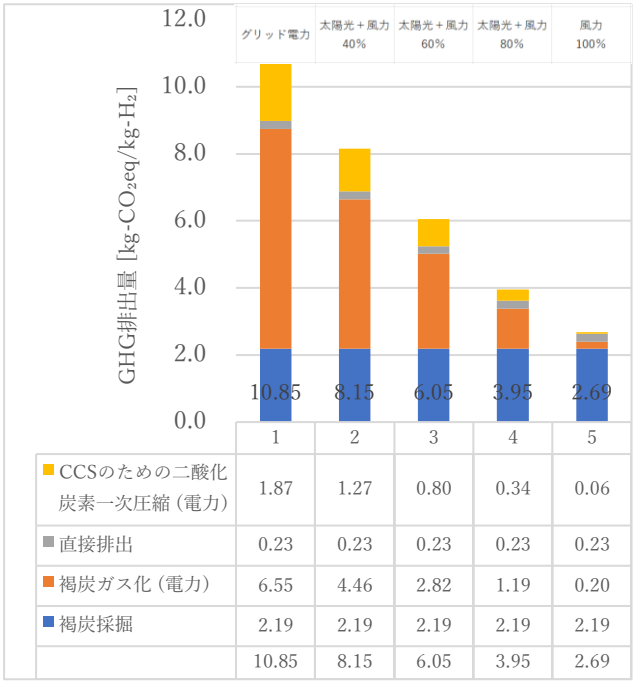
詳細な技術条件について、CCS は 95%回収と 90%回収の 2 段階で行うことで実質 99%回収としている。水素の液化に要する電力は水素 1 kg あたり 11.9 kWh または 6.0 kWh で考慮している。海上輸送中の液化水素のボイルオフ条件は 1 日あたり 1%、0.3%、0.1%のいずれかで考慮

している。また、全プロセス中で使用する電力原単位の電源構成について、太陽光と風力の合計割合が現在のグリッド電力の該当値から 40%、60%、80%と上昇し、最終的に風力 100%となる場合の排出量削減効果について比較した。

3.1 水素製造プロセスまでの GHG 排出量

水素基本戦略において、1 kgの水素製造におけるWell to Production GateのGHG排出量で、3.4 kg-CO_2eq以下の水素が低炭素水素であると設定されたことから、ここではその観点で検討する。

以下のグラフは水素製造装置出口までの水素1 kgあたりのGHG排出量を示している。



	1	2	3	4	5
CCSのための二酸化炭素一次圧縮（電力）	1.87	1.27	0.80	0.34	0.06
直接排出	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
褐炭ガス化（電力）	6.55	4.46	2.82	1.19	0.20
褐炭採掘	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19
	10.85	8.15	6.05	3.95	2.69

図1 水素1 kgあたりのGHG排出量

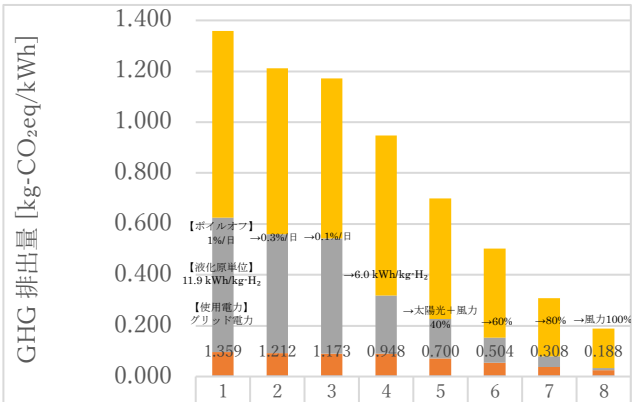
シナリオ1の結果より、水素製造にグリッド電力を用いた場合、CCSによりブルー水素としていても、水素1 kgあたりのGHG排出量が10.85 kg-CO_2eqとなり、水素基本戦略における低炭素水素要件は満たしていないことがわかる。

またシナリオ2、3、4の結果より、太陽光および風力電力の合計割合を40%、60%、80%と増やしても同様に低炭素要件は満たさなかった。

最終的にシナリオ5の結果より、水素製造時の使用電力を100%風力とすることで、水素1 kgあたりのGHG排出量が2.69 kg-CO_2eqとなり、低炭素水素要件を満たした。したがって、低炭素水素の製造には再エネ電力の導入が必須であると考えられる。

3.2 水素発電による電力の GHG 排出量

次に上記の水素による発電で得た電力のGHG排出量について検討する。以下のグラフは発電された電力1 kWhあたりのGHG排出量を示している。



	1	2	3	4	5	6	7	8
水素製造段階	0.734	0.651	0.629	0.629	0.473	0.351	0.229	0.156
水素液化段階	0.528	0.468	0.453	0.228	0.155	0.098	0.041	0.007
水素輸送段階	0.092	0.087	0.086	0.086	0.067	0.050	0.032	0.021
発電所建造段階	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
合計排出量	1.359	1.212	1.173	0.948	0.700	0.504	0.308	0.188

図2 電力1 kWhあたりのGHG排出量

シナリオ4の結果より、液化水素輸送中のボイルオフ条件や水素液化時に要する電力量条件が将来の目標水準を達成した場合でも、ライフサイクル中の使用電力にグリッド電力を用いた場合には、電力1 kWhあたりのGHG排出量が0.948 kg-CO_2eqと非常に高い値となるため、火力発電の代替として機能していないことがわかる。

対してシナリオ7, 8の結果より、ライフサイクル中の使用電力の80%以上を再エネ電力とした場合には、電力1 kWhあたりのGHG排出量が0.308 kg-CO_2eq以下となり、火力発電の排出係数を下回るために、代替となり得る可能性を示唆している。

4. 今後の展望

今後の展望として、エネルギー基本計画のS+3Eにおけるる Economic Efficiencyに関わる経済負荷の定量的評価として、コスト評価も行う予定である。経済負荷については、安定供給性も評価できるという点で、Energy Securityに関する評価も行えていると考えられ、GHG排出量算定と合わせてより総合的な視点を持った評価になると思われる。

5. 参考文献

1) 経済産業省, “水素基本戦略”, Available: https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_2.pdf [アクセス日: 2025/1/6]
2) 経済産業省,”第6次エネルギー基本計画”, Available: https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf [アクセス日: 2025/1/6]

技術開発のための LCA の現状と展望

Current status and a future perspective on LCA for technology development

○福島康裕*[1]
FUKUSHIMA Yasuhiro
1) 東北大学大学院環境科学研究科
* fuku@tohoku.ac.jp

1. はじめに

LCA の手法を拡張し、さまざまな目的に合致した分析を可能にする、いわばライフサイクル思考の適用範囲を拡大する研究と、手法の標準化を進め、データの共通化を行い、誰が実施しても同じように分析ができるようにするライフサイクル思考の普及活動の両方が不可欠である。

技術開発の推進時に用いる LCA においては、上記の２者の乖離が大きく、新手法の体系的整理と普及活動が足りていないのではないだろうか。

プラスチックリサイクル、バイオマス利用、そして炭素固定利用など、カーボンリサイクル技術の開発は気候変動対策として重要な取り組みである。これらの技術の開発段階で、ライフサイクル思考を取り入れた開発を進め、目先の製品カーボンフットプリントの低減ではなく環境適合性と経済合理性とに矛盾のない技術とバリューチェーンを構築していくことは大変重要な課題だ。この要請に応えるべく、これまでに LCA の手法の提案が行われてきた。

一方、技術開発の現場において LCA の重要性が強調され、ライフサイクルの視点を持った開発が求められるようになっている。ところが技術開発向けに、将来のバリューチェーンの設計に向けて開発された LCA 手法が技術開発の現場で用いられることは僅少で、機能単位を縛り、多様性をある意味犠牲にして、普及が進められてきた製品 LCA が、技術開発の結果想定される状態における製品の環境負荷を下げると主張するため用いるよう、指示されることが多い。

本発表では、炭素循環を題材として、これまでに技術開発向けに提案されてきた LCA 手法を改めて展望し、これを使われるツールにしていくための議論をはじめる礎石としたい。

2. 関連する手法

技術開発の現場で LCA を利用していくのに際してツールボックスに入ってくる手法や枠組みを、いかに述べる。これらが全てというわけではなく、一部であり、他にも整備していくべき手法や枠組み、データベースなどがありうる。

2.1 制約条件を揃えた LCA

製品 LCA では環境負荷/機能単位を計算するために、機能単位が規定される必要がある。このため、バリューチェーンの一部を、決められた方針に則って、あるいは計算に都合の良いようにアドホックに切り取って実施される他ない。現状の生産体系が大きく変わらないような技術導入による改善のヒントを得るために、ホットスポット解析などを用いることができる。しかし、変化が大きく速い現況で、その変化のありかたに関するシナリオの比較検討や、それに基づく技術開発や制度設計の議論に用いることは難しい。また、バリューチェーンの諸制約を評価に反映することが難しい。

そこで福島は LCA を制約条件基準に拡張することを許容すべきではないかという提案をおこなった [1)]。機能単位を規定し、揃えた LCA も設定された評価範囲で生み出される機能単位が揃っているという制約条件を設定したと考えればこの枠組みの中でも用いていくことができよう。かわりに、資源制約を課した LCA、温室効果ガス排出正味ゼロ、森林や生活・インフラにおける炭素ストック保持といった、ビジョンを反映した制約条件を課すこともできよう。もちろん、それらの組み合わせも可能である（図１）。例えば、サトウキビ圃場の面積を一定と制約し、そこに植えるサトウキビの品種や、生産する粗糖、エタノール、電力、といった製品をどれだけ生産すべきか、といった議論が LCA の枠組みの中で実施可能となる。

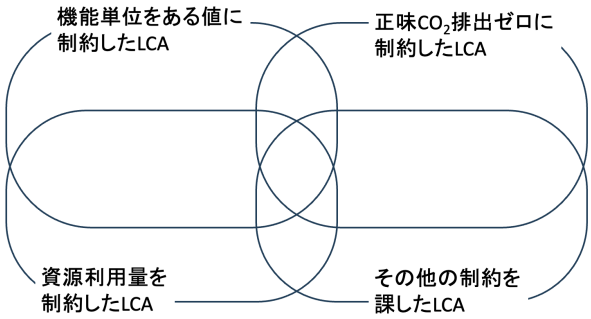


図１　制約条件を揃えた LCA における複数の制約条件の適用枠組み

このような LCA を実施する際には、評価範囲の設定に工夫が必要となり、環境負荷についても従来とは

異なる考え方が必要となる場合がある。例えば化石資源を利用し続ける工場が存在する前提で、正味 CO_2 排出ゼロ制約を課した LCA を実施しようと思えば、評価範囲に、化石資源使用を補償する炭素貯留(Carbon Capture and Storage, CCS)設備を別途含めることで実現できる（図 2)。また、炭素固定設備の設置された工場の検討ならば、空気からの炭素固定(Direct Air Capture, DAC)設備を回避プロセスとして設定することで、空気からの固定よりも有利な条件となる場合はポジティブな結果が出るような枠組みとすることができる（図 3)。

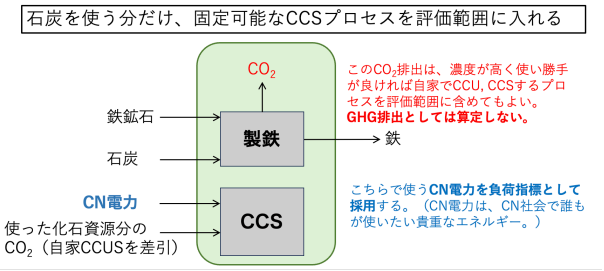


図２ カーボンニュートラル制約での LCA の評価範囲設定例: CCU なし

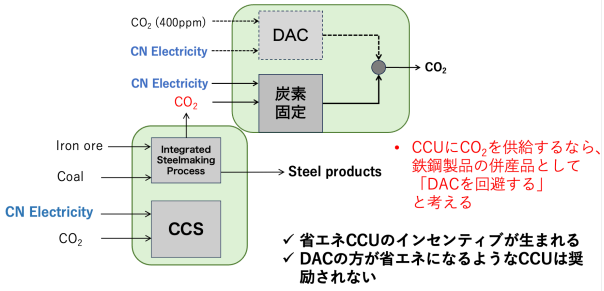


図３ カーボンニュートラル制約での LCA の評価範囲設定例: CCU あり

また、図 2、3 に示したように、環境負荷項目としては CO2eq.の排出はもはや環境負荷項目として用いることができなくなる。この場合、従来の他の環境負荷項目に加えて、例えば（カーボンニュートラルな）電力の消費量といった指標をもちいることが有効となる。環境撹乱(environmental intervention)だけでなく、このような循環を形成する際に負荷となる指標、についてもあわせてもちいていくことが推奨される。 同様に、再生可能水素の使用量、バイオマス由来炭素の使用量といった指標が考えられよう。

2.2 複合(Composite) LCA

Chen らは、複合 LCA という手法を提案[2, 3] している。同一のインベントリを持つプロセスでは必要となる処理量を供給しきれない場合、水素やアンモニア燃焼のように、利用プロセスが社会実装される量に応じて回避可能な環境負荷が変化するような場合にこの手法を用いることができる。

前節の例で言えば CCS がこの手法の適用先として良い例となるだろう。貯留できる場所とそこで許される方式によって、CCS に伴うエネルギー消費量やコストは大きく異なってくる。例えば負荷項目が異なる 3 つの CCS 設備が想定される場合(図 5) 複合 LCA を用いて各技術評価において用いるべき CCS のインベントリを、学会などで提供していけるだろう。他にも、DAC の技術のインベントリについても同様で、標準的に使えるものが設定されていくことが、普及や制度の検討において利用していくために必要である。また、図 4 における横軸をどこまで取るべきかについては、排出削減のロードマップと整合した貯留シナリオに即して決定されるべきと考える（図 5)。

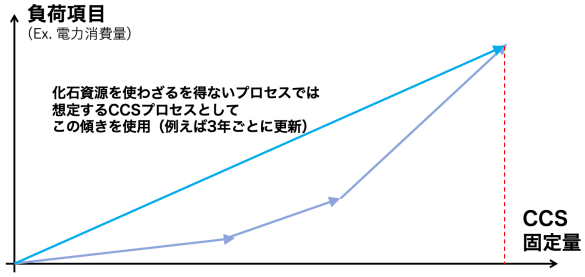


図４ CCS の環境負荷の複合 LCA

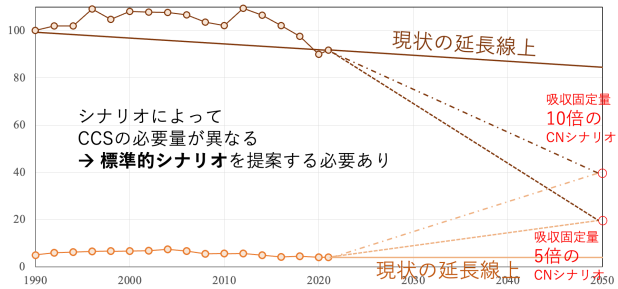


図５ CO_2 の排出量と吸収量を合わせるシナリオ

2.3 その他

演繹的(Deductive) LCA、ブレークイーブン解析、技術選択モデル、多目的最適化など、ツールボックスに入れられる手法は他にも、数多く提案されている。これらを体系化し、使えるようにしていく普及活動がいまこそ必要である。

3 最後に

ライフサイクル思考を技術開発において戦略的に有用なツールとすべく、関係する研究者や企業で協力してツールボックスの整備とデータ整備・維持のメカニズム、学会の役割を明らかにして推進すべきである。

引用文献

1) 福島康裕: 第 19 回日本 LCA 学会(2024.3)
2) Chen I.-C. ら: 第 6 回日本 LCA 学会(2011.3)
3) Chen I.-C., Fukushima Y., Kikuchi Y. and Hirao M.: Int. J. LCA, 17 (2), (2012), pp 119-125

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 9:00 ~ 10:20 D会場：2317中講義室（3F）

[1-D1] 運輸（1）

座長：前野 啓太郎 (産業技術総合研究所)

9:00 ~ 9:20

[1-D1-01]

国際海運活動を組み込んだ新たなグローバルサプライチェーン分析の開発とその実証分析

*庄田 朋申[1]、前野 啓太郎[2]、下津浦 大賀[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学、2. 産業技術総合研究所)

9:20 ~ 9:40

[1-D1-02]

船舶の平均寿命の変化がもたらす包括的な環境影響評価

*下津浦 大賀[1] (1. 九州大学)

9:40 ~ 10:00

[1-D1-03]

アンモニア燃料船への転換における二酸化炭素と反応性窒素の排出量分析

*神代 将輝[1,4]、光斎 翔貴[1,4]、柏倉 俊介[1,4]、山末 英嗣[1,4]、仁科 一哉[2,4]、松八重 一代[3,4]、林 健太郎[4] (1. 立命館大学、2. 国立環境研究所、3. 東北大学、4. 総合地球環境学研究所)

10:00 ~ 10:20

[1-D1-04]

日本の貨物輸送におけるCO_2排出削減効果に関する分析

*松瀬 真未[1]、永田 あい[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

©日本LCA学会

船舶の平均寿命の変化がもたらす包括的な環境影響評価

Comprehensive Environmental Impact Assessment of Changes in Vessel Lifespan: The Case of Japanese Maritime Transport

○下津浦大賀*[1)]
Taiga Shimotsuura
1) 九州大学
* shimotsura.taiga.359@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

国際海運は、2040 年までに 2008 年比で 70%以上という非常に野心的な温室効果ガス削減目標のもと、運航時に CO_2 を直接排出しない次世代船舶の早期導入を目指している [1)]。一方で、その急速な導入やそれに伴う既存船の早期廃棄（寿命が来る前の廃棄）を考慮したライフサイクルアセスメント（LCA）の観点は見過ごされている [2)]。加えて、寿命変化による CO_2 排出削減効果を、他の要因（例えば燃費改善や船舶の大きさの最適化等）による効果と比較した研究は未だ存在せず、船舶の寿命変化の分析とそのほかの CO_2 排出削減策の分析との間にはギャップが存在する。

そこで、本研究では日本の国内海上輸送をケーススタディとして、船舶のライフサイクル段階別に寄与度を測定する構造分解分析（SDA）手法を新たに提案する。本 SDA を平均寿命ベースラインのシナリオに適用することで、カーボンフットプリント（CF）変化に寄与したステークホルダーを明らかにする。加えて、同 SDA を平均寿命を±5 年変化させたシナリオにも適用することで、CF 変化の差（つまり、寿命変化による影響）を明らかにする。最後に、寿命変化による CF 変化に対する影響及び CF 変化に寄与したステークホルダーを基に政策提言を行う。

2. 研究方法

2.1. 動的システムに基づく船舶ストックの推計

本研究ではコンテナ船の寿命関数を特定した先行研究 [3)]に基づき、0年に製造された船舶がt年に退役する確率（$F(t)$）が平均を 23.97、分散を 6.58 とする正規分布に従うと仮定する。上記のパラメータから、船舶の平均寿命のベースライン（$\bar{\mu}$）は 23.97 年となる。

ここで、0年に製造された船舶のt年における累積残存確率は、$\varphi(t) = 1 - F(t)$として定式化できる。ただし、本研究では全ての船舶が同じ残存確率に従うと仮定した。以上の仮定を基に、t年における船舶のストック隻数（$S(t;\bar{\mu})$）は、船舶の平均寿命$\bar{\mu}$におけるt年の新規製造隻数（$B(t;\bar{\mu})$）、i年に製造された船舶のt年における累積残存確率（$\varphi(t-i;\bar{\mu})$）を用いることで以下の(1)式から求めることができる。

$$S(t;\bar{\mu}) = B(t;\bar{\mu}) + \sum_{i=1}^{t-i} \varphi(t-i;\bar{\mu})\, B(i;\bar{\mu}) \quad (1)$$

また、船舶の平均寿命を±5年変化させた場合（すなわち、平均寿命をμとした場合）の船舶ストック隻数（$S(t;\mu)$）も(1)式と同様に推計する。

2.2. 海上輸送由来カーボンフットプリントの推計

2.1 で推計された船舶ストックに基づき、本研究では、2005 年から 2022 年にかけての国内海上輸送における船舶製造時・船舶に用いられる燃料製造時・船舶修理時・運航時由来の CO_2 排出量（本研究におけるカーボンフットプリント、CF）を(2)式のように推計する。

$$CF(t;\mu) = \underbrace{Q^{ves}(t;\mu) + Q^{fuel}(t)}_{Manufacturing\ stage} + \underbrace{Q^{rep}(t;\mu)}_{Repair\ stage} + \underbrace{Q^{ope}(t)}_{Activity\ stage} \quad (2)$$

ここで、$Q^{ves}(t;\mu)$、$Q^{fuel}(t)$、$Q^{rep}(t;\mu)$は、それぞれ船舶の平均寿命μにおけるt年の船舶製造、船舶に用いられる燃料製造、船舶修理によって直接・間接的に誘発される CO_2 排出量を表し、環境拡張型産業連関分析によって推計する。また、$Q^{ope}(t)$は、t年における運航時の CO_2 排出量を表しており、t年の国内海上輸送由来の燃料消費量データに CO_2 排出係数を乗じることで求める。(2)式からわかる通り、本研究では、日本の国内海上輸送由来の CF として、船舶の廃棄段階以外の全てのライフサイクル由来の CO_2 排出量を推計した。

2.3. 国内海上輸送由来の CF に対する包括的な SDA

本研究では、LMDI 法を用いることで、2.2 で推計された CF のうち、2005 年から 2015 年における変化に対し(3)式のような包括的な構造分解分析（SDA）を適用する。本研究における SDA の分解構造については図 1 を参照されたい。

$$\Delta CF = \Delta E + \Delta L + \Delta F^{ves} + \Delta F^{fuel_A} + \Delta F^{fuel_C} + \Delta F^{rep} + \Delta S + \Delta D + \Delta C + \Delta LF + \Delta\lambda + \Delta CI \quad (3)$$

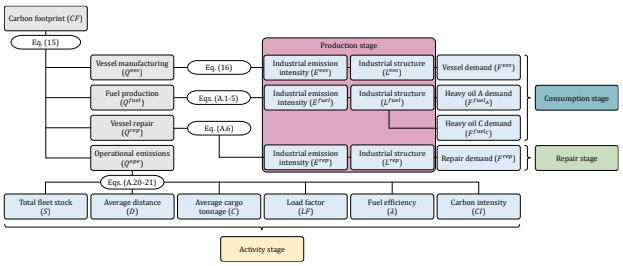


図 1. 本研究における SDA の分解構造

3. 結果と考察

図 2 は、2005 年から 2022 年にかけて平均寿命を±5 年変化させた場合の累積 CF を、平均寿命ベースラインによる買い替えサイクルを基準に示す。寿命延長した場合の CF の推移の上部にある緑の領域は、寿命延長により増える既存船に対する修理の需要をそのほかの船舶の水準の 30 倍（新規造船価格の約 60%程度）にまで増加させた場合の CF の変化を示す。

図 2 から、平均寿命の買い替えサイクルによる CF に比べて、寿命短縮した場合は、CF は 2005 年から 2022 年の 17 年間で約 3.5 Mt-CO_2（2022 年単年の CF の約 34%）増加する一方、寿命延長した場合は、約 2.5 Mt-CO_2（2022 年単年の CF の約 24%）減少することがわかる。また、寿命延長した場合、寿命延長により増える既存船舶に対する修理の需要が 30 倍に増加したとしても、CF は累計約 1.7 Mt-CO_2（2022 年単年の CF の約 17%）減少することがわかる。

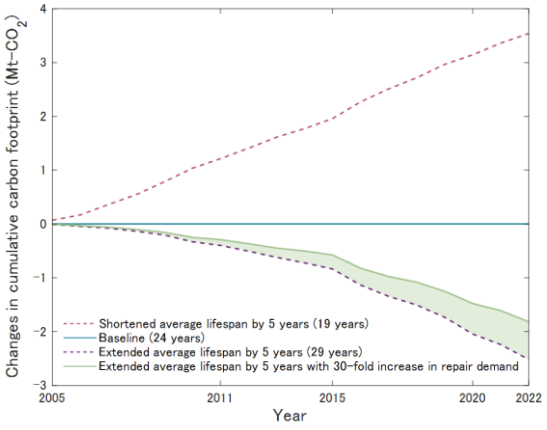


図 2.寿命変化による CF の累積の差の推移
（平均寿命ベースラインを基準）

次に、図 3 は 2005 年から 2015 年にかけての、平均寿命ベースラインでの買い替えサイクル時における CF 変化に対する SDA の結果を示す。図 3 をライフサイクル段階別にみると、消費要因及び修理要因の CF 増加への寄与（それぞれ 0.57 Mt-CO_2、0.05 Mt-CO_2）を生産要因及び活動要因の CF 減少への寄与（それぞれ 1.0 Mt-CO_2、0.93 Mt-CO_2）が上回ったことがわかる。従って、造船会社及び海運会社（それぞれ生産段階、活動段階における主要なステークホルダー）によって CF が減少したことが明らかになった。

図 3 のうち、CF 削減に大きく寄与した生産・活動段階について考察すると、最も CF の削減に寄与した生産段階では、直接 CO_2 排出係数（**e**）、産業構造（**L**）のどちらも大きく CF の減少に寄与し、寄与度はそれぞれ約 0.53 Mt-CO_2、約 0.50 Mt-CO_2 であった。従って、造船会社（生産段階における主要なステークホルダー）のサプライチェーンマネジメントが CF 削減に対し大きな役割を持つことが明らかになった。

また、生産段階の次に CF 削減に寄与した活動段階では、燃費改善や炭素強度の改善ではなく、船舶ストックの再構成（総ストック隻数の減少、大型船舶の増加による輸送距離の減少）が、海上輸送由来の CF 削減に大きく寄与した。従って、海運会社に代表される活動段階では、次世代船舶の導入だけでなく、運航方法の改善も生産段階と同等の役割を持ち、次世代船舶の導入と運航方法の改善のどちらも重要であることが示唆される。

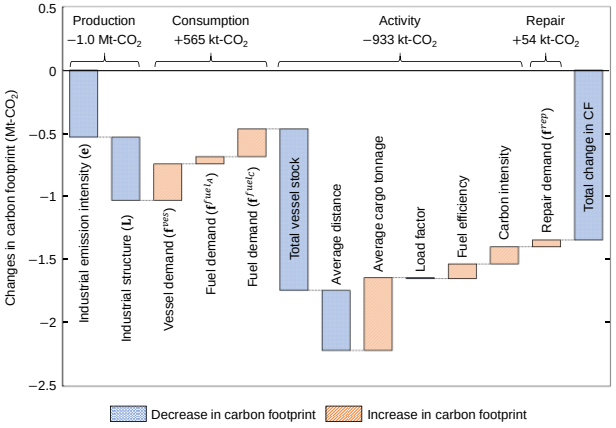


図 3. 2005 年から 2015 年にかけての日本の海上輸送由来 CF に対する SDA の結果
（平均寿命ベースライン）

本会では、この結果に加えて船舶の寿命変化による CF への影響を分析することで、寿命変化の影響と図 3 の各要因の寄与度を比較し、海上輸送由来の CF 削減策としての船舶の寿命変化の是非について議論する。

4. 引用文献

1) International Maritime Organization (IMO), *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*, (2023).
2) International Maritime Organization (IMO), 2018. *Guidelines on Lifecycle GHG Intensity of Marine Fuels (LCA Guidelines).*
3) T. Shimotsuura, *Journal of Environmental Management*, 365, 121558. (2024).

アンモニア燃料船への転換における二酸化炭素と反応性窒素の排出量分析

Analysis of carbon dioxide and nitrogen emissions in the conversion to ammonia fuel ship

○神代将輝*[1),2)]，光斎翔貴[1),2)]，柏倉俊介[1),2)]，山末英嗣[1),2)]，仁科一哉[3)]，松八重一代[4)]，林健太郎[2)]
Shouki Jindai, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue, Kazuyo Matsubae, Kentaro Hayashi
1) 立命館大学, 2) 総合地球環境学研究所, 3)国立科学研究所, 4)東北大学
* rm0224px@ed.ritsumei.ac.jp

1. 諸言

現代の地球において地球温暖化は異常気象や海面上昇などの問題を引き起こしており，脱炭素化が重要課題とされている．現在世界の二酸化炭素排出のうち25%が輸送部門で占めており，その内の2.5%が海運部門とされている．さらに2015年から2050年の間に海運部門における二酸化炭素排出量が50%～250%程度増加すると予想されている[1)]．そのため，海運部門においてはネット・ゼロ・エミッションに向けて現在主に使用されている重油燃料をアンモニア燃料に転換することが議論されている．アンモニア燃料への転換は脱炭素化が期待される一方で，反応性窒素の排出が懸念されている．反応性窒素とは窒素ガス以外の窒素化合物のことを指す．プラネタリーバウンダリーでは反応性窒素の排出量は地球が持続可能な限界点をすでに超えていると示唆しているため，追加の反応性窒素の排出は極めて深刻な問題である[2)]．

既存研究では，重油とアンモニア，水素燃料の燃焼における CO_2, CH_4, NO_X, および PM のライフサイクル排出量を評価[3)]しているが，輸送，貯蔵面において水素が船舶燃料として実用的でないことについては考慮されていない．水素は常温常圧下において体積エネルギ密度が 10.9 MJ/m^3 と重油の約3400分の1であり，保存に大型タンクを必要とするため，圧縮もしくは液化して輸送，貯蔵する必要がある．体積エネルギ密度は水素を圧縮すれば 7500 MJ/m^3，液化すれば 8500 MJ/m^3 となる．またアンモニアは水素密度が 121 kg/m^3 と高く，-33℃で液化することから水素燃料の輸送及び貯蔵の媒体として注目されている．そこで本研究では，燃料の貯蔵方法を考慮に含め，重油，アンモニア，水素燃料の燃焼を行った場合の地球温暖化係数と反応性窒素のライフサイクル排出量の比較を行い，船舶燃料変換における二酸化炭素と反応性窒素のトレードオフについて明らかにすることを目的とした．

2. 研究手法

評価範囲は，燃料の製造段階，貯蔵段階，燃焼段階とした．Econvent3 と IDEA3.4.1 の2種類のインベントリデータベースを利用して，製造時と燃焼時に排出される単位量当たりの CO_2, NO_X, N_2O, の3つを算出した．そしてトンキロ当たりの CO_2 排出量を式(1)より算出した．P はエンジン出力で 13500 kW，T は積載量 (3000t - tank)，V は船の航行速度 27.38 km/h と設定した．NO_X, N_2O に関しても同様である．なお，貯蔵媒体によってタンクの大きさが変わるため，重油のタンク容積を 1800 m^3 と設定して保存している媒体の密度比でタンクの大きさを求めた．

$$\mathrm{CO_2[kg/Tkm]} = SFC^* \times \frac{P}{TV} \times \mathrm{CO_2[kg/fuel\ kg]} \qquad (1)$$

*SFC**: 燃料消費量(Specific Fuel Consumption)

アンモニア燃焼に関する燃焼熱などの熱力学データは，アンモニア燃焼時の NO_X の排出について分析した研究を参考にした[4)]．水素燃料の貯蔵方法については，圧縮した気体水素，液体水素，そして水素密度が高く，液化が容易なアンモニアの3点で比較した．

3. 結果

Fig.1 では地球温暖化係数(GWP)，Fig.2 では NO_X のライフサイクル排出量を重油，アンモニア，水素燃料の3つについて比較を行った．なお GWP は CO_2 排出量と N_2O 排出量の265倍の合計で算出した．重油は原油から分留によって製造する場合を想定した．水素は現在最も使用されている天然ガスをエネルギ源とした水蒸気改質法と再生可能エネルギである水力発電を利用した電気分解法で製造する場合を想定した．また上記の2つの製造法ごとに得られた水素と空気中の窒素からハーバーボッシュ法でアンモニアを製造すると仮定した．Table.2 では燃料ごとの製造方法と貯蔵形態の考えられうる組み合わせを示した．

重油燃料は水蒸気改質法によって製造されたアンモニア燃料，水素燃料よりも GWP, NO_X 排出量が小さくなった．電気分解法によって製造されたアンモニア燃料，水素燃料は重油燃料と比べ，GWP が同程度か小さくなった．現在広く使用されている天然ガスから水蒸気改質法を用いて製造されたアンモニアや水素燃料よりも再生可能エネルギを活用した電気分解法によるアンモニア製造のほうが CO_2 排出量を大幅に削減ができることは既存研究と同様の傾向が得られた[3)]．NO_X 排出についてはアンモニア燃焼時に多く排出され，水素燃焼時の排出量はアンモニアに比べ小さくな

った．水素燃料の貯蔵方法の違いで比較するとアンモニアキャリアを用いた場合が最も GWP を抑えることができた．NOx については大きな差異はなかったが液体水素を媒体とする水素燃料が最も抑えられることが分かった．

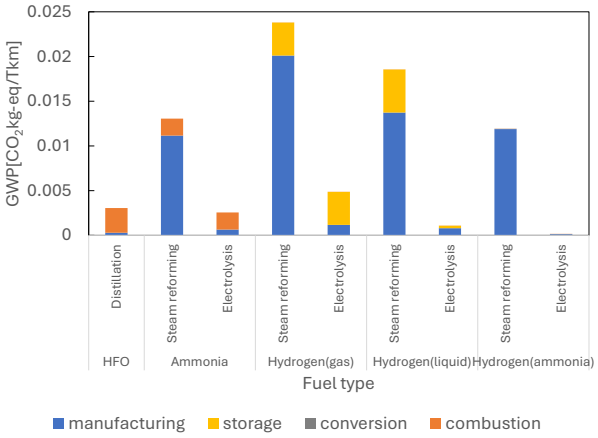


Fig.1 製造方法，貯蔵方法ごとの GWP の比較

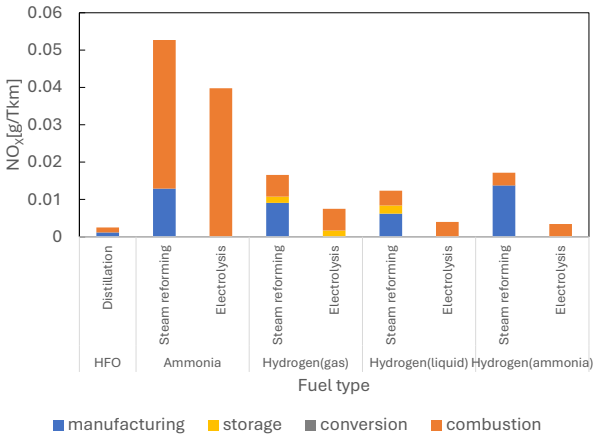


Fig.2 製造方法，貯蔵方法ごとの NO_X 排出量の比較

Table.2 燃料ごとの製造方法と貯蔵形態の組合せ

燃料	重油	アンモニア		水素					
製造方法	分留	水蒸気改質	電気分解	水蒸気改質			電気分解		
貯蔵形態	重油	アンモニア		圧縮水素	液体水素	アンモニア	圧縮水素	液化水素	アンモニア

4. 考察

気体水素は容積が大きくタンクで積載量を小さくしてしまうため，トンキロ当たりの燃料消費量が重油より 2.4 倍，液体水素より 1.5 倍程度大きくなり，GWP が大きくなったと考えられる．一方で液体水素をキャリアとして用いる場合，タンク容積は抑えられるが，水素を液体状態に維持するのにエネルギを必要とし，アンモニアキャリアとした場合よりも追加で GWP が大きくなったと考えられる．アンモニアキャリアを用いた場合はアンモニアから水素への変換時に必要なエネルギが小さいことや水素密度が高いことにより，GWP, NO_X 排出量を抑えることができた．アンモニア燃料は，燃料消費量が大きいことによるアンモニアの大量生産が必要となるうえ，燃焼時に NO_X を発生させる．アンモニアの直接燃焼を利用するには希薄燃焼による燃費効率の改善や燃焼温度の上昇による NO_X 生成の促進を低減する技術が必要である．

5. 結言

本研究では，海運部門における燃料の貯蔵方法を考慮に含めた，重油，アンモニア，水素燃料の二酸化炭素と反応性窒素の排出量の推定を行った．現在最も使用されている重油燃料よりも再生可能エネルギを利用した水素燃料が二酸化炭素と反応性窒素どちらも排出量を減らすことができるが，今後水素の需要が高まると予想される中，再生可能エネルギでどれだけ水素を賄えるかが課題となる．また化石燃料由来の水素，アンモニアにおいても二酸化炭素を抑える製造技術，上記に述べた燃焼段階における技術や NO_X 排出を向上も重要である．

6. 引用文献

1) 国土交通省:”国際海運の 2050 年カーボンニュートラル達成に向けて”, (2020), pp1-50
2) Shigeaki Tonomura, Naoki Kikuchi, Natsuo Ishiwata, Shin Tomisaki, Yukio Tomita, “Journal of Sustainable Metallurgy”, (2016), pp191-199
3) Duc Tuan Dong, Alessandro Sch¨onborn, Jos´ e Gonz´alez-Celis: ”Life cycle assess ment of ammonia/hydrogen-driven ma rine propulsion”, Proc ImechE Part M: J Engineering for the Maritime Environment, 238(3), (2024), pp531-542
4) Xiangyu Meng, Chenhan Zhao, Zechuan Cui, Xiaolei Zhang, Mingkun Zhang, Jiangping Tian, Wuqiang Long, Mingshu Bi, “Understanding of combustion characteristics and NO generation process with pure ammonia in the pre-chamber jet-induced ignition system”, Fuel, 331,(2023), 12574

日本の貨物輸送における CO_2 排出削減効果に関する分析

Analysis of CO_2 Emission Reductions in Japanese Freight Transport

○松瀬真未*[1]、永田あい[2]、加河茂美[3]
Mami Matsuse, Ai Nagata, Shigemi Kagawa
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学府, 3) 九州大学経済学研究院
* matsuse.mami.626@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

2022 年度における日本の CO_2 排出量のうち、運輸部門からの排出量は 18.5%を占めており、特に貨物自動車は運輸部門の 38.0%を占めている [1]。日本政府は 2030 年度において運輸部門からの CO_2 排出量対 2013 年度比 35%削減を目標としており、貨物自動車業界における対策が急務となっている [2]。手段別の環境負荷に関して、輸送活動量当たりの CO_2 排出量は自家用トラックが 1136g-CO_2/ﾄﾝｷﾛ、営業用トラックが 208g-CO_2/ﾄﾝｷﾛの一方、船舶は 43g-CO_2/ﾄﾝｷﾛ、鉄道は 20g-CO_2/ﾄﾝｷﾛと、自動車と比較して船舶や鉄道は環境負荷が小さく[3]、自動車から船舶や鉄道への輸送手段の移行であるモーダルシフトが期待されている。よって、本研究は日本の 47 都道府県間の輸送手段別・輸送品目別の貨物輸送における CO_2 排出量を推計する（輸送手段 3 通り・輸送品目 32 品目）。また、モーダルシフト（自動車から鉄道・海運への移行）を行った場合の CO_2 削減効果を推計することで、脱炭素化に向けた運輸部門の効果的な CO_2 排出削減策について議論を行う。

2. 分析方法・データ

2.1 分析方法

本研究は、(1)式に示される式を用いて、都道府県間の輸送における CO_2 排出量を、輸送手段別・輸送品目別に推計した。

$$\mathbf{Q} = e \cdot (\mathbf{W} \odot \mathbf{D}) \qquad (1)$$

ここで、$\mathbf{Q} = \{q_{ij}\}$は当該輸送手段当該品目における都道府県区間別の CO_2 排出量を表す行列であり、q_{ij}は都道府県iから都道府県jへの輸送における CO_2 排出量を表す。eは当該輸送手段における輸送活動量（t・km）当たりの CO_2 排出係数を表す。$\mathbf{W} = \{w_{ij}\}$は当該輸送手段当該品目における都道府県区間別の輸送量を表し、w_{ij}は都道府県iから都道府県jへの輸送量(t)を表す。$\mathbf{D} = \{d_{ij}\}$は当該輸送手段当該品目における都道府県区間別の輸送距離、d_{ij}は都道府県iから都道府県jへの距離(km)を表す。⊙は行列要素同士の掛け算を示す。

本研究では、トラック・船舶・鉄道の 3 つの輸送手段について畜産品や機械などの 32 品目の輸送を対象とした。各都道府県の区間距離はトラック輸送においては都道府県庁間の距離を、船舶輸送においては都道県庁最寄りの港間の距離を、鉄道輸送においては都道府県庁最寄りの駅間の距離を用いた。モーダルシフトに関しては、輸送距離が 500km 以上の都道府県間のトラック輸送であり [3]、モーダルシフトによって各都道府県庁と最寄りの港や駅間はトラック輸送のままだが、最寄りの港・駅間は船舶や鉄道で代替したと仮定した。

2.2 データ

本研究では、輸送活動量あたりの CO_2 排出係数を国土交通省の自動車輸送統計 [4]・内航船舶輸送統計 [5]・鉄道輸送統計 [6]を用いて推計された CO_2 排出係数を用い、品目別輸送手段別取引量を国土交通省の貨物地域流動調査 [7]より用いた。輸送手段別都道府県間距離をトラックは Google map、船舶は OpenStreetMsp、鉄道は JR 日本貨物鉄道株式会社のコンテナ時刻表 [8]より推計した。

3. 結果・考察

図 1 と図 2 はそれぞれ船舶と鉄道によってモーダルシフトの対象となる距離 500km 以上のトラック輸送を代替した場合の CO_2 削減割合を示している。船舶においては、2022 年度比では 17%減少し、2013 年度比では 32%減少する。鉄道においては、2022 年度比では 23%減少、2013 年度比では 37%減少する。鉄道に関しては、国土交通省の運輸部門からの CO_2 排出量対 2013 年度比 35%削減を目標を達成する結果が得られた。

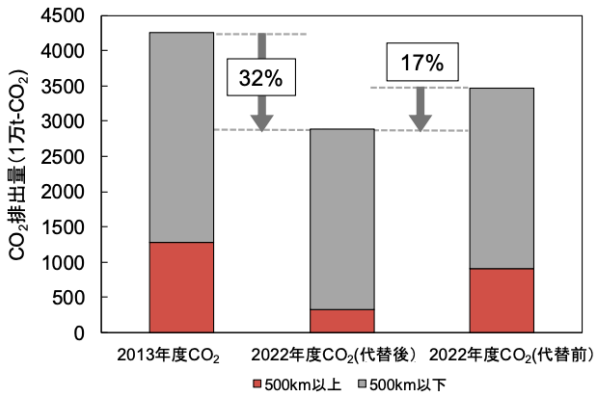


図 1. トラックによって 500km 以上輸送される全国の全品目を船舶により代替した場合の CO_2 削減割合（対 2022 年度と 2013 年度比）

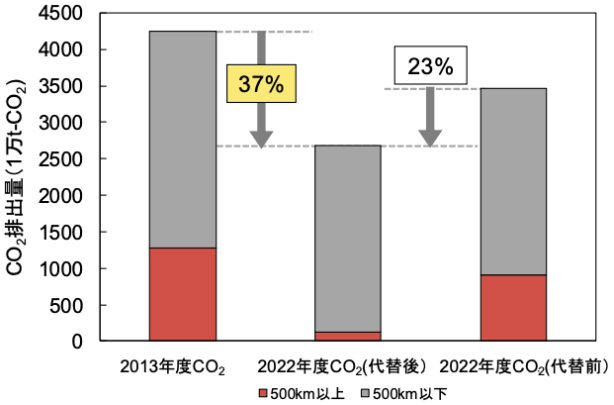


図 2. トラックによって 500km 以上輸送される全国の全品目を鉄道により代替した場合の CO_2 削減割合（対 2022 年度と 2013 年度比）

表 1 は、モーダルシフトの対象となる各都道府県区間の CO_2 排出量の多い区間を示している。CO_2 排出量の多い特定の都道府県間の区間においてのみモーダルシフトを行うことによる削減効果は小さいが、福岡や大阪のような都道府県が多く上位に位置していることより、これらの地域を対象にモーダルシフトを優先的に行うことにより、効率的な CO_2 削減対策を取ることができる。

表 1.　トラックにおける 500km 以上輸送から排出される都道府県区間別 CO_2 排出量

順位	区間	割合(%)
1	福岡 ↔ 大阪	2.3
2	千葉 ↔ 大阪	1.6
3	福岡 ↔ 愛知	1.4
4	埼玉 ↔ 大阪	1.3
5	福岡 ↔ 兵庫	1.2

図 3 はモーダルシフトの対象となる輸送のうち CO_2 を多く排出している品目を表している。トラックの柔軟な輸送に適した食料工業品や野菜や果物以外の、3 つの品目（その他の特殊品・日用品・機械）を代替することにより全てを代替することによる減少割合の船舶・鉄道ともに約 4 割を達成することができる。よってこれらの品目の産業から優先的にモーダルシフトを促進することにより、より効率的な CO_2 削減効果が得られると読み取れる。

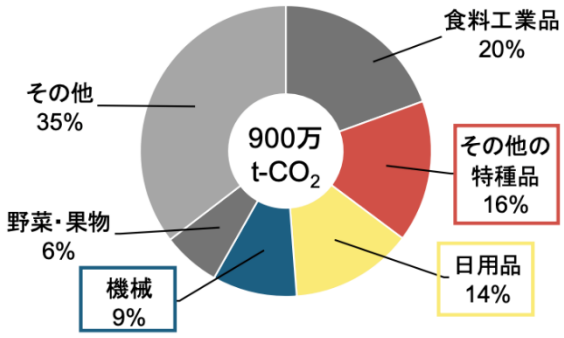


図 3. トラックの 500km 以上の輸送から排出される品目別 CO_2 排出量と内訳（2022 年度）

本要旨では、モーダルシフトを行うことによる貨物輸送由来の CO_2 削減ポテンシャルを明らかにするとともに、モーダルシフトを促進する上で、注目すべき都道府県や産業を明らかにした。

4. 参考文献

1) 国土交通省：“運輸部門における二酸化炭素排出量”, (オンライン), 入手先 <https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html>, (参照 2025-01-10)
2) 国土交通省：“国土交通白書”, (2022), 第 I 部 第 2 章 第 1 節 2 交通・物流の脱炭素化に向けた取り組みの課題と方向性
3) 国土交通省：“モーダルシフトとは”, (オンライン), 入手先 <https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/modalshift.html>, (参照 2025-01-10)
4) 国土交通省： “自動車輸送統計”, (2022)
5) 国土交通省： “内航船舶輸送統計”, (2022)
6) 国土交通省： “鉄道輸送統計”, (2022)
7) 国土交通省： “貨物域流動調査・旅客地域流動調査”, (2022)(2015)
8) 日本貨物鉄道株式会社：“コンテナ時刻表”, (オンライン), 入手先 <https://www.jrfreight.co.jp/library/service/book/index.html#target/page_no=1>, (参照 2025-01-10)

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 10:40 ~ 12:00 D会場：2317中講義室（3F）

[1-D2] 運輸（２）

座長：木下 裕介 (東京大学)

10:40 ~ 11:00

[1-D2-01]

日本の道路網における乗用車由来のライフサイクルCO2排出削減ポテンシャルの推計

*細島 千聖[1]、加河 茂美[2] (1. 九州大学経済学府、2. 九州大学経済学研究院)

11:00 ~ 11:20

[1-D2-02]

都市圏旅客交通網のライフサイクル費用・CO_2評価

*林 龍矢[1]、加藤 博和[1]、徐 非凡[1] (1. 名古屋大学)

11:20 ~ 11:40

[1-D2-03]

鉄道のCO_2・経費削減を路線状況に応じて実現する方策の検討

*澤村 祐樹[1]、加藤 博和[1] (1. 名古屋大学大学院環境学研究科)

11:40 ~ 12:00

[1-D2-04]

クラスター分析を用いた空港ターミナルの脱炭素推進対策に関する研究

*松下 凌大[1]、磐田 朋子[1]、吉岡 剛[1] (1. 芝浦工業大学)

©日本LCA学会

日本の道路網における乗用車由来のライフサイクル CO_2 排出削減ポテンシャルの推計

Estimation of the Life Cycle CO_2 Emission Reduction Potential from Passenger Vehicles on Japan's Network

○細島千聖*[1)]、加河茂美[2)]
Chisato Hososhima, Shigemi Kagawa
1) 九州大学経済学府, 2) 九州大学経済学研究院
* hososhima.chisato.765@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

2015年12月のパリ協定採択を受け、日本政府は2013年比で2030年までに温室効果ガスを46%削減し、2050年までにカーボンニュートラルを実現することを宣言した[1)]。2024年12月時点で、日本の1127自治体がCO2排出量を2050年までにゼロにする「ゼロカーボンシティ」を目指すことを表明している[2)]。

日本における運輸部門のCO2排出量は、全体の約19%を占めており、そのうち45%は自家用車に由来する[3)]。このため、都市の脱炭素化を進める上で、乗用車からのCO2排出量削減が重要な課題となっている。

また、東京への人口集中や地方の過疎化など、日本の都市が直面する人口動態の課題は多岐に渡る。このような都市構造(人口密度・インフラ整備の状況など)の違いは、都市の交通特性に影響を与える。したがって、都市構造の違いが交通特性に与える影響を理解することは効果的な脱炭素政策を立案する上で不可欠である。

本研究では、日本の1523都市を対象に、都市構造が交通密度や乗用車のライフサイクルCO2排出量に与える影響を分析する。また、人口動態の変化も考慮した、複数の交通およびエネルギー政策シナリオを評価する。これらの分析を通して、都市の特性に応じた持続可能な交通・エネルギー政策の必要性について検討することを目的とする。

2. 研究手法

まず、i市（i =1 , 2, … ,1523）における道路1kmあたりの乗用車の1日の平均走行台数を被説明変数、i市における人口密度（人/km^2）、人口当たりバス停数、高齢者のみ世帯割合、就業者のうち自市区町村で従業する人の割合、住宅地平均値価格（m^2/円）の5つの説明変数を持つ重回帰分析モデルを定式化し、市区町村レベルで都市構造が交通量に与える影響を推計する。なお、本推計では、それぞれ2015年のデータを使用している。

次に、回帰モデルによって推計される交通密度を用いて、2015年から2050年の各年における乗用車の保有台数の推計と、乗用車の走行段階、アイドリング段階、燃料の精製・発電段階(WtT)。製造段階、および廃棄段階のCO2排出量を推計する。

さらに、2016年から2050年の乗用車のライフサイクルCO2排出量について、2015年から人口だけが変化した場合(BAU)、発電・水素精製時のCO2排出係数が改善した場合(シナリオ1)、自動車の燃費が向上した場合(シナリオ2)、2030年に向けた日本政府の次世代自動車(HV, PHV, EV, FCV)普及目標を達成した場合(シナリオ3)、2030年に向けた日本政府の次世代自動車普及目標達成後、2050年までにEVとFCVの割合をそれぞれ94%, 6%にする場合、シナリオ3に排出係数の改善と自動車の燃費向上を加えた場合(シナリオ5)、シナリオ4に排出係数の改善と自動車の燃費向上を加えた場合(シナリオ6)の7つのシナリオを立てて分析を行った。なお、当分析を行う際の各シナリオにおける数値目標は、政府や研究機関の目標値に基づく。

3. データ

交通量および道路に関するデータは、国土交通省の「平成27年度全国道路・街路交通情勢調査」[4)]を使用した。バス停数は、経路検索サービス「NAVITIME」[5)]の都道府県別バス時刻表から取得した。人口密度、高齢者のみ世帯割合、就業者のうち自市区町村で従業する人の割合については、政府統計の総合窓口(e-Stat)の「統計でみる都道府県・市区町村のすがた(社会・人口統計体系)」[6)]のデータを基に算出した。住宅地の平均価格は、一般財団法人土地情報センターの「平成27年度地価公示」より、『都道府県市区町村別・用途別　平均価格・対前年平均変動率表』[7)]から取得した。

4. 結果

4.1 重回帰分析

表1は推定されたパラメータ(括弧内はt値)を示しており、すべてのパラメータが統計的に有意であるこ

とが確認された。

重回帰分析の結果から、人口密度が 1000 人増加すると、道路 1km あたりの交通量が 1 日当たり 1359 台増加することが分かった。このことから、都市化の進行によって、交通量が増加することが示唆される。

また、バス停数や高齢者世帯割合、居住地で働く労働者の割合が増加すると、交通量が減少する傾向が見られた。一方で、地価が高くなると交通量が増加することも確認された。これらの結果から、都市構造が交通密度に多面的な影響を与えていることが分かる。

表 1. 重回帰モデルの推計パラメータ

人口密度	1.359^{***}
(人/km^2)	(19.432)
人口当たりバス停数	-102700^{**}
	(-2.09)
高齢者のみ世帯割合	-21470^{***}
	(-6.823)
就業者のうち自市村で	-5982^{***}
従業する人の割合	(-5.991)
住宅地平均価格 (円/m^2)	0.03523^{***}
	(17.593)

4.2 シナリオ分析

図 1 は、日本全体の 2016 年から 2050 年までの乗用車におけるライフサイクル CO_2 排出量の累計値をシナリオごとに算出し、ベースラインシナリオとの比較を示したものである。

各シナリオの棒グラフは、乗用車のライフサイクルの各段階における CO_2 排出量の違いを示している。棒グラフ横の数値は、ライフサイクル CO2 排出量の総変化量で、括弧内の数値は 1 自治体当たりの変化量を示している。

図 1 から、ベースラインシナリオと比較して乗用車のライフサイクル CO_2 削減量が最も大きかったのは、シナリオ 5 であり、次いでシナリオ 6、シナリオ 2、シナリオ 3、シナリオ 4、シナリオ 1 の順に削減量が大きいことが分かる。

シナリオ 4 およびシナリオ 6 では、走行段階とアイドリング段階の CO_2 排出削減量が大きい一方で、製造段階の CO2 排出量の増加が顕著である。また、シナリオおよびシナリオ 4 では排出係数の改善を行わないため、WtT (Well-to-Tank) 段階の CO_2 排出量の増加が目立つ。シナリオ 3、シナリオ 4 における走行段階、アイドリング段階の CO_2 排出量削減量はシナリオ 2 を大きく上回るが、WtT 段階、製造段階、廃棄段階含めた全体のライフサイクル CO_2 削減量はシナリオ 2 の方が大きくなることが分かった。

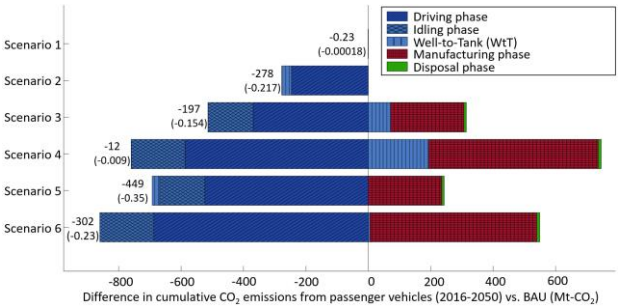


図 1. 乗用車からの累積 CO_2 排出量（2016～2050 年）の BAU との差（Mt-CO_2）

5. まとめ

本研究では、都市構造によって交通密度を説明するモデルを構築し、そのモデルを使用して 2016 年から 2050 年までの乗用車のライフサイクル CO_2 を推計し、シナリオ分析を行った。本会では、乗用車のら畏怖サイクル CO_2 における市区町村ごとの違いについて詳細に議論する。

6. 参考文献

1) 環境省：“日本の NDC (国が決定する貢献) ”，（オンライン），入手先〈https://www.env.go.jp/earth/earth/ondanka/ndc.html〉，（参照 2024-10-29）
2) 環境省: “2050 年二酸化炭素排出実質ゼロ表明”, (オンライン), 入手先〈https://www.env.go.jp/content/000277212.pdf〉, (参照 2024-12-28)
3) 国土交通省：“運輸部門における二酸化炭素排出量”，入手先 <https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html>, （参照 2024-12-28 ）
4) 国土交通省：“平成 27 年度全国道路・街路交通情勢調査”，（オンライン），入手先 <https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/> ，（参照 2022-7-23）
5) NAVITIME：（オンライン），入手先 <https://www.navitime.co.jp/>, （参照 2022-7-23）
6) 政府統計の総合窓口(e-Stat) “都道府県・市区町村のすがた(社会・人口統計体系)”，（オンライン），入手先 <https://www.e-stat.go.jp/regional-statistics/ssdsview>, （参照 2022-7-23）
7) 一般財団法人土地情報センター：“[地価公示](平成 27 年) 『都道府県市区町村別・用途別』平均価格・対前年平均変動率表，（オンライン），入手先 <https://www.lic.or.jp/landinfo/pdf/kouji/K2015.pdf>, （参照 2022-7-23）

都市圏旅客交通網のライフサイクル費用・CO_2評価

Assessment of Life Cycle Costs and CO_2 Emissions of Urban Passenger Transport Networks

○林龍矢*[1)]、加藤博和[1)]、徐非凡[1)]

Ryuya Hayashi, Hirokazu Kato, Feifan Xu

1) 名古屋大学

* hayashi.ryuya.w3@s.mail.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

旅客交通の脱炭素化には、鉄道・バスなどの乗合交通機関に比べ輸送人キロあたり CO_2 排出量が大きい自家用車の利用削減が有効であると言われている。この実現には、速達性・定時性を兼ね備えた乗合交通機関を幹線区間へ導入するとともに、出発・到着地から最寄りの駅・バス停留所への端末交通手段の利便性向上によって幹線区間の乗車率を高めることが重要である。

そこで、既存公共交通機関に加え、シェアリングモビリティやオンデマンド交通など利便性が高い新たな端末交通手段も含めた都市旅客交通網を対象に、需要量やサービスレベルの違いが輸送人キロベースでライフサイクル(LC)-費用・CO_2に与える影響を推計する。それを踏まえ、都市旅客交通網の CO_2 を定量的に分析する。

2. 輸送人キロと走行台キロ

旅客輸送サービスの CO_2 排出量は基本的に、車両運行量（走行台キロ）に台キロあたり CO_2 排出量原単位を乗じることで計算される。一方、旅客の単位は人である。その輸送の合計である輸送人キロPKTから、混雑率（あるいは乗合率）や実車率、車両定員の違いによって走行台キロが決定される。（図2）



図２　旅客輸送サービスの輸送人キロと走行台キロ

したがって、旅客交通における CO_2 削減には、交通手段の相乗り・乗合を進めることで、輸送人キロに比べ走行台キロを低くすることが有効である。それは幹線区間だけでなく、端末区間においても当てはまる。しかし、乗合率等を高めるために端末交通手段の利便性が低くなってしまうと本末転倒になる。このあたりのバランスが CO_2 削減に影響してくる。

3. 旅客輸送サービスのLC-費用・CO_2推計手法

本研究で推計・分析対象とする旅客輸送サービスは、1)定路線型、2)非定路線型、3)カーシェア型とし、4)自家用車 1 人利用時との比較を行う。費用について、車両の導入M_{Int}・維持M_{Main}・ガソリン消費M_{Gas}・電力消費M_{El}・人件費M_{Person}を LC-費用として、CO_2 排出量について、車両の製造E_C・走行E_V・再配置$E_{Nonoperation}$・メンテナンスE_{Main}・廃棄E_{Dis}を合わせたものを LC-CO_2 として算出する。

$$m_{LC,PKT} = \frac{M_{Int} + M_{Main} + M_{Gas} + M_{El} + M_{Person}}{PKT} \quad (1)$$

$$e_{LC,PKT} = \frac{E_C + E_V + E_{Nonoperation} + E_{Main} + E_{Dis}}{PKT} \quad (2)$$

E_C・E_Vは、加藤ら(2000)[3)]や長谷川ら(2017)[4)]の必要車両台数・車両移動距離の推計手法を基に、$E_{Nonoperation}$・E_{Main}・E_{Dis}は金成ら(2024)[5)]のE_Cとの比率より推計する。LC-費用の推計手法や費用・CO_2 原単位は、金成(2024)[4)]、朴ら(2023)[6)]、「地域公共交通づくりハンドブック」[5)]、市場での値等を基に設定する。

4. 都市圏旅客交通網へのケーススタディ

4.1 旅客輸送サービスの人キロあたりLC-費用・CO_2

ここでは仮に、駅勢圏 1km に利用者が 100[人/日]存在し、運行本数が 1 時間に 2 本である地区を想定する。このときの、人キロあたり LC-費用・CO_2 を図3、4 に示す。また運行頻度による LC-CO_2 の違いを図 5 に示す。

旅客輸送サービスの LC-費用は、車両の維持に伴う費用やサービス提供に必要な人件費の占める割合が大きく、2)非定路線型の場合、自家用車の LC-費用を上回る。

LC-CO_2は、自家用車に比べて小さく、車両製造CO_2排出の違いによるものと考えられる。また、旅客輸送サービスの頻発化に伴う走行距離の増加により、LC-CO_2は増加する。以上より、車両定員が小さい車両への乗合がCO_2削減に寄与し、輸送人キロに対する走行台キロの低下がCO_2削減には有効であることが示された。

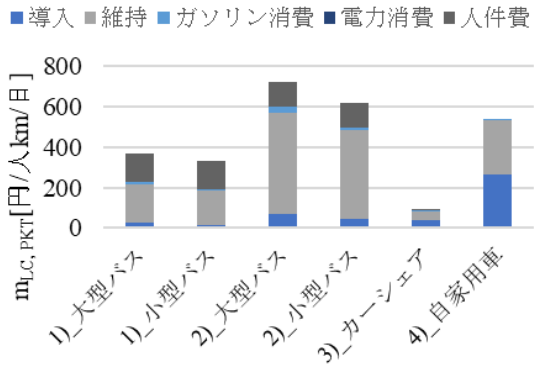


図３　１人あたり LC-費用

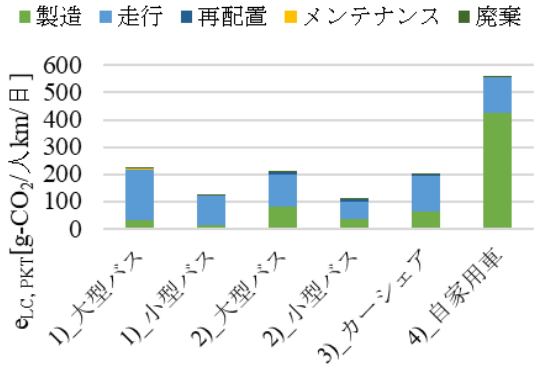


図４　１人あたり自家用車 LC-CO_2

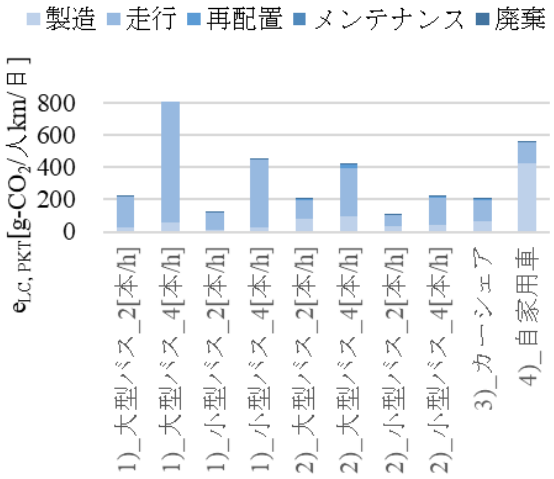


図５　運行頻度による LC-CO_2 比較

4.2　都市圏交通網への適用による LC-CO_2 変化

駅勢圏 1km の交通手段分担率は、「三大都市圏の最寄り駅からの距離に応じた交通手段分担率」[8]を用いる。圏内の自家用車利用から旅客交通輸送サービスへの転換に伴う LC-CO_2 変化を図６に示す。この結果より、定路線で運行される旅客輸送サービスへの転換が LC-CO_2 の観点から有効であることが示された。

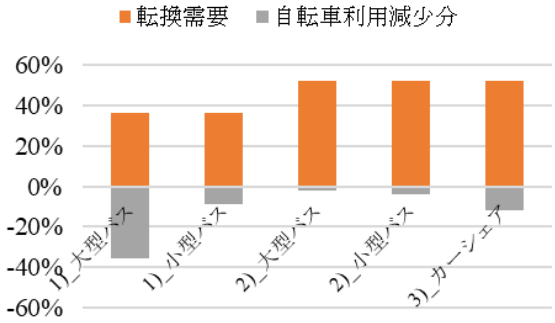


図６　自家用車からの転換による LC-CO_2 変化
（自転車・徒歩からの転換率 40%）

参考文献

1) 石河正寛，松橋啓介ほか：交通工学論文集, Vol. 8, (2022), No. 5, pp.1-10
2) “運輸部門（自動車）CO_2排出量推計データ”，国土交通省，（オンライン），入手先 <https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/tools/car.htmlf>（参照 2025-01-20）
3) 加藤博和ほか：土木計画学研究・論文集, No.17, (2000), pp471-479
4) 長谷川 大輔，鈴木 勉：都市計画論文集，Vol. 52, No. 3, (2017), pp. 2017
5) 金成修一ほか：エネルギー・資源学会論文誌，Vol. 45, No.4, (2024)
6) 朴秀日，加藤博和ほか：土木学会論文集 D3, Vol78, No.5, (2023), pp.I_41-I_50
7) “地域公共交通づくりハンドブック”，国土交通省，（オンライン），入手先 <https://www.mlit.go.jp/common/000036945.pdf>（参照 2025-01-20）
8) “第 7 回全国都市交通特性調査結果”，国土交通省，（オンライン），入手先 <https://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/toshi_tosiko_fr_000024.html>（参照 2025-01-20）

鉄道の CO_2・経費削減を路線状況に応じて実現する方策の検討

Study of Measures to Reduce CO_2 Emissions and Costs from Railways According to Line Conditions

○澤村祐樹*[1)]、加藤博和[1)]
Yuki SAWAMURA, Hirokazu KATO
1) 名古屋大学大学院環境学研究科
* sawamura.yuuki.j2@s.mail.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

日本の鉄道分野における CO_2 排出のうち、車両走行に関わる排出量が 4 分の 3 を占めている。これを削減するために、各メーカーや事業者が蓄電池やハイブリッド技術、高効率なパワー半導体デバイスを搭載した車両を開発し、運行するなど、化石燃料や電力の消費量削減を目指す取り組みが行われている。

また、鉄道は他の旅客輸送機関に比べて輸送人員当たりの CO_2 排出量が少ないと言われるが、輸送人員が少ない場合は当てはまらず、事業性の観点から見ても非効率である。したがって、鉄道の CO_2 排出量と経費を削減するためには、路線状況に応じた車両の選択や、輸送機関自体を転換する施策も有効である。

2. 研究の目的

鉄道とその代替となりうる輸送機関および車両の仕様ごとに、輸送人員や表定速度に応じた CO_2(LC-CO_2)と経費をライフサイクルにわたり推計する。この結果から、既存の鉄道路線において車両を取り換えた場合や輸送機関を転換させた際の LC-CO_2 と経費の変化を評価する。さらに、LC-CO_2 と経費の観点から適した輸送機関と車両の仕様を提示する。

3. LC-CO_2 排出量評価について

3.1 評価対象

対象とする輸送機関は鉄道と Light Rail Transit(LRT)、Bus Rapid Transit(BRT)とし、それぞれ車両とインフラから構成されるシステムとする。

車両は各輸送機関に対して、表 1 に示す動力方式を扱う。編成車両数と車両定員はメーカーや事業者が公表している値[1)]を参考とし、鉄道ではディーゼルと架線電化のみ車両の製造年の違いも考慮する。

インフラはバラスト軌道、道路、支柱・架線柱、駅(停留所)、電路設備、変電設備、通信設備、車両基地を対象とする。ただし、輸送機関や車両の動力方式に応じて各インフラの有無や投入量は異なるため、実在する路線を参考にして決定する。[2,3)]

表 1 対象とする車両の動力方式一覧

輸送機関	動力方式
鉄道	ディーゼル、ハイブリッド(シリーズ式、パラレル式)、燃料電池、蓄電池、架線電化
LRT	蓄電池、架線電化
BRT	ディーゼル、ハイブリッド(パラレル式)、燃料電池、電気

3.2 評価範囲

車両は、1) 製造段階、2) 走行段階、3) メンテナンス段階、4) 廃棄段階に分け、インフラは、1) 整備段階、2) 維持段階に分けて推計する。

特に車両走行段階の CO_2 排出量推計は、既往研究[4)]より式(3.1)で推計する。

$$\frac{u \times k}{c \times s} \tag{3.1}$$

u：車両電力(燃料)消費量原単位[kWh/両 km (L/両 km)], k：電力(燃料)CO_2 排出係数[kg-CO_2/kWh (L)], c：車両定員[人/両], s：各時間帯混雑率

なお、各時間帯混雑率は既往研究[5)]を元に、編成定員と各時間帯の輸送人員およびそこから導かれる必要運行本数に応じて変化する設定としている。また、1 日あたり輸送人員の分布は朝ラッシュ時(1h)、平常時(15h)、 夕ラッシュ時(2h）とする。

3.3 各輸送機関の LC-CO_2 排出量推計

図 1 に、実在する路線を参考とした仮想路線(路線延長 : 20[km]、表定速度[3)] : 鉄道 34[km/h]、LRT 28[km/h]、BRT 25[km/h])の LC-CO_2 排出量推計結果を示す。1 日あたり輸送人員を 3 パターン（設定①：500[人/day]、設定②：1,000[人/day]、設定③：2,000[人/day]）で推計している。

設定した輸送人員では、鉄道はほとんどの動力方式で BRT よりも LC-CO_2 が大きい。これは鉄道では BRT に比べて走行時 CO_2 排出原単位が大きいことや、設定した輸送人員に対して過剰な編成車両数や車両定員であること、必要なインフラが多い輸送機関であることが理由と考えられる。

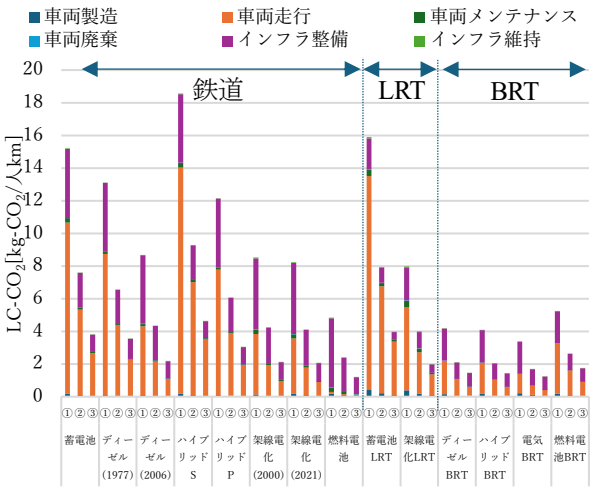


図 1 各輸送機関の LC-CO_2 排出量推計結果

4. 表定速度の影響分析

表定速度を変化させた際の、鉄道の LC-CO_2 排出量への影響を分析する。

図 2 に、1 日あたり輸送人員を 5,000[人/day]に設定し、表定速度を 10[km/h]から 50[km/h]まで変化させる場合の LC-CO_2 排出量変化を示す。

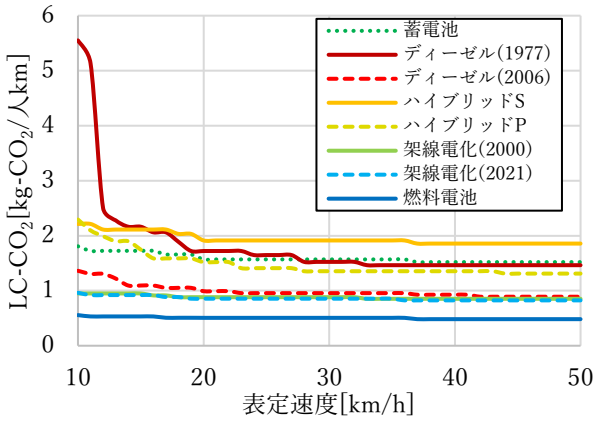


図 2 表定速度と LC-CO_2 排出量の関係

表定速度の向上に伴って LC-CO_2 排出量が減少する傾向がみられる。例えば 20[km/h]から 40[km/h]に変化したときには、車両の動力方式によるばらつきはあるものの 3～14[%]程度の排出量削減効果が見られる。

このことから、加減速性能に優れた車両を導入することや停車駅の見直しを行うことにより表定速度を向上させることが、鉄道の CO_2 排出量削減に繋がる可能性があると考えられる。

5. 編成車両数の影響分析

編成車両数を変化させた際の、鉄道の LC-CO_2 排出量への影響を分析する。

図 3 に、1 日あたり輸送人員を 2,000[人/day]に設定し、編成車両数を 2～12[両/編成]まで変化させる場合の LC-CO_2 排出量変化を示す。メーカーや事業者が公表している編成車両数が 1 または 2[両/編成]の製品を参考としたため、比較を容易にするために 2 両ごとに車両を増減させている。既往研究 [5]より、同一の輸送人員において編成車両数が増加すると運行本数が減少する設定で推計する。

この結果、編成車両数の増加に伴って LC-CO_2 排出量が増加する傾向がみられる。例えば 2 から 10[両/編成]に変化すると、車両の動力方式によるばらつきはあるものの 1.3～2.3 倍程度の LC-CO_2 排出量増加が見られる。

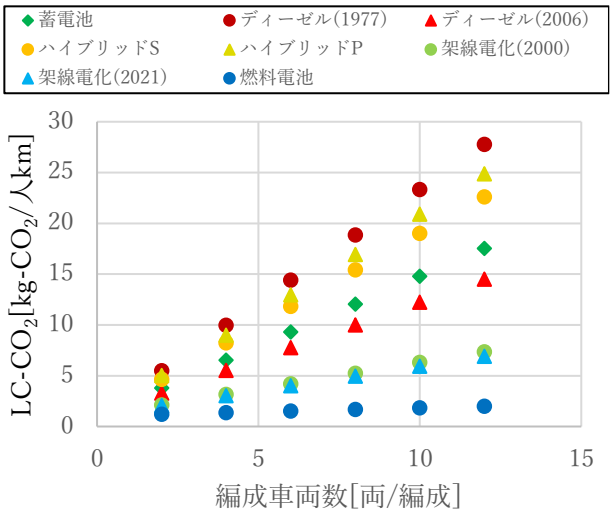


図 3 編成車両数と LC-CO_2 排出量の関係

6. 引用文献

1) 例えば、滝口裕之：蓄電池駆動電車 EV-E301 系の概要, サイバネティクス, 19 (4), (2014), pp.19-23
2) 国土交通省鉄道局：令和 4 年度鉄道統計年報, (2023)
3) 富山県：“城端線・氷見線における LRT(電化)以外の交通モードの検討調査業務”, 第 5 回城端線・氷見線 LRT 化検討会, (オンライン), 入手先 <https://www.pref.toyama.jp/8001/20230202lrtkentoukai.html>, (参照 2024-12-10)
4) 山田祐磨, 朴秀日, 加藤博和：中量旅客輸送システムのライフサイクル CO_2 排出量の推計手法, 土木計画学研究・講演集, 66, (2022), (CD-ROM)
5) 加藤博和, 大浦雅幸：新規鉄軌道整備による CO_2 排出量変化のライフ・サイクル評価手法の開発, 土木計画学研究・論文集, 17, (2000), pp.471-479

クラスター分析を用いた空港ターミナルの脱炭素化推進対策に関する研究

A Study on Decarbonization Measures for Airport Terminals Using Cluster Analysis

○松下凌大*[1)] 、磐田朋子[1)] 、吉岡剛[1)]
Ryoto Matsushita, Tomoko Iwata, Tsuyoshi Yoshioka
1) 芝浦工業大学
* br21041@ shibaura-it.ac.jp

1. 背景と目的

空港は航空機の運航を支える基盤施設であるだけでなく，地域経済の活性化や国際的な交流の拠点としても機能している．一方で空港はエネルギー消費が多く，温室効果ガス排出源の一つとなっている．特に，旅客ターミナルは空港建築施設の中で最も CO_2排出量が多く，空港環境負荷削減における中心的な課題となっている(図 1 参照)．

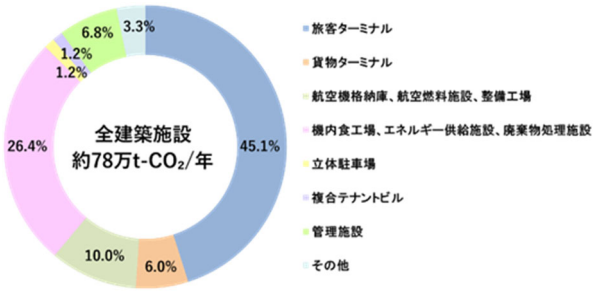


図 1　空港建築施設の CO_2排出割合（2019 年度）

国土交通省は 2022 年以降，各空港における脱炭素化推進計画の策定を推進するとともに，空港脱炭素化推進事業を開始した．空港脱炭素化推進計画は，空港施設・空港車両等からの CO_2排出量を削減する方策及び空港の再生可能エネルギー拠点化に向けた方策等についての検討を適切かつ迅速に行うための一助となることを目的としており，推進計画はすべての空港で策定されることが望ましい．2025 年 1 月現在，44 の空港で脱炭素化推進計画の認定・作成がされている．

しかし，空港は地理的特性，規模，気象条件など多様な特徴を持つため，すべての空港に画一的な脱炭素化手法の適用は難しい．それぞれの空港に適した手法を見出すためには，空港を特性ごとに分類し，効果的なアプローチを設計することが重要である．

先行研究では，空港全般のエネルギー消費や温室効果ガス排出に関する分析が進んでいるが，地域特性に応じた脱炭素化手法の検討は十分に行われていない．

そこで本研究では，各空港の特性に効果的な脱炭素化手法を導く参考となるように，空港の運用特性や地理的条件を多角的に評価した．

2. 研究方法

2.1 分析手法

本研究では，ヘリポートおよび非公共用飛行場を除いた国内 96 空港を対象とした．

96 空港の空港データおよび気象データを基に，空港を分類するためのクラスター分析と，その解釈性向上を目的とした主成分分析(PCA)を実施した．

2.2 使用データ

空港の運用特性や地理的条件を多角的に評価するため，以下の 9 つのデータを選定した．

- 空港管理：管理者による分類(国管理等)
- 空港敷地面積(ha)
- 着陸回数(回)
- 利用客数(人)
- 運用時間(h)
- 年間平均降水量(mm)
- 年間平均風速(m/s)
- 冷房デグリーデー(℃日)：冷房需要の指標
- 暖房デグリーデー(℃日)：暖房需要の指標

デグリーデーは数値が大きいほど冷暖房需要が高いことを示し，エネルギー需要の評価に用いられる．

3. 分析結果

3.1 クラスター分析

クラスター分析の結果，空港は運用特性や気象条件に基づき 7 つのクラスターに分類された(表 1 参照)．

表 1 クラスター分析結果

No.	空港名
1	東京国際空港
2	新千歳空港・関西国際空港・成田国際空港・北九州空港・中部国際空港・那覇空港・福岡空港
3	稚内空港・奥尻空港・利尻空港・福島空港・松本空港・岡山空港・花巻空港・山形空港・青森空港 札幌飛行場・三沢飛行場・中標津空港・紋別空港・礼文空港・釧路空港・函館空港・帯広空港 旭川空港・女満別空港
4	伊江島空港・多良間空港・与論空港・沖永良部空港・徳之島空港・粟国空港・奄美空港・喜界空港 慶良間空港・北大東空港・波照間空港・南大東空港・久米島空港・与那国空港・下地島空港 新石垣空港・宮古空港
5	大阪国際空港・山口宇部空港・長崎空港・新潟空港・仙台空港・高松空港・広島空港・大分空港 松山空港・鹿児島空港・高知空港・宮崎空港・大館能代空港・能登空港・秋田空港・熊本空港
6	八尾空港・岡南飛行場・調布飛行場・大分県央飛行場・天草飛行場・但馬飛行場・小松飛行場 百里飛行場・徳島飛行場・名古屋飛行場・富山空港・岩国飛行場・美保飛行場
7	屋久島空港・新島空港・大島空港・神津島空港・上五島空港・小值賀空港・種子島空港 三宅島空港・庄内空港・出雲空港・鳥取空港・神戸空港・佐賀空港・福井空港・隠岐空港 佐渡空港・壱岐空港・石見空港・南紀白浜空港・八丈島空港・静岡空港・対馬空港・福江空港

以下に，それぞれのクラスターの特徴を示す．

・クラスター1：東京国際空港のみが属する．利用客数や運用規模が圧倒的に大きい．

・クラスター2：新千歳，関西国際，成田国際空港などが属する大規模空港.

・クラスター3：寒冷地に位置する中小規模空港.

・クラスター4：南西諸島や離島の小規模空港.

・クラスター5：地域主要都市の中規模空港.

・クラスター6：地域輸送に特化した小規模飛行場や地方空港.

・クラスター7：中小規模の地方空港や離島空港が混在.

3.2 主成分分析（PCA）

主成分分析を用いて空港特性に影響を与える要因を分析した．分析の結果，空港の特性は 4 つの主成分で 87%説明可能であることが明らかとなった（図 2 参照）.

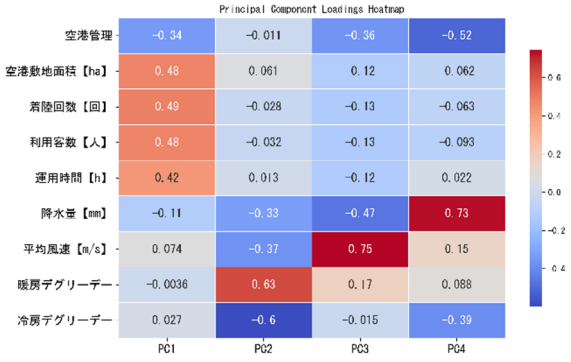


図 2　主成分分析結果

各主成分の寄与率は以下の通りである.

・PC1(42.7%)：利用客数，着陸回数，空港敷地面積，運用時間といった空港の運用規模に関する主成分.

・PC2(24.2%)：暖房デグリーデーおよび冷房デグリーデーが寄与し，気象条件を反映．寒冷地と温暖地の区別をする主成分.

・PC3(10.8%)：平均風速が主要因となり，気象条件が影響.

・PC4(9.4%)：降水量が主要因となり，空港の地域特性を反映.

上記の主成分分析により，本研究のクラスター分析では，運用規模が最もクラスター生成に影響を与え，次いで気象条件が一定の影響を及ぼしていると言える.

4. 結論

4.1 クラスターごとの脱炭素化推進の方向性

本研究では，96 空港を対象にクラスター分析と主成分分析を実施し，空港の運用特性や気象条件に基づいた分類を行った.

この結果，クラスターごとの脱炭素化推進計画の進捗や課題が明らかとなった（図 3 参照）.

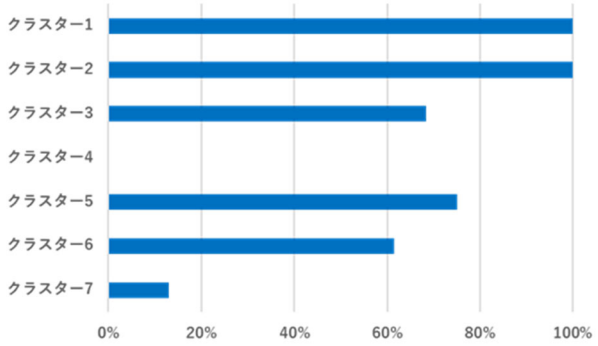


図 3　クラスターごとの脱炭素化推進計画策定状況

クラスター1，2 の策定率は 100%であり，既存の計画を着実に進めていくことで効率的な脱炭素化が期待できる．一方，クラスター4 では策定率が 0%であることから，脱炭素化推進計画の作成が急務である.

クラスター3，5，6，7 においては各クラスター内で代表となるモデル空港を選定し，モデル空港における脱炭素化対策を同クラスターに適用することで，今後の脱炭素化への方向性を検討した.

クラスター3 では，花巻空港をモデル空港とし，夏期の暑さ対策や照明設備の LED 化促進, 再生可能エネルギーの導入が有効であると推測する.

クラスター5 においては，長崎空港をモデルとした．高効率熱源などの導入を促進し，地方空港のリーダーとして脱炭素化を牽引することを期待する.

クラスター6 および 7 では，それぞれ八尾空港，鳥取空港をモデルとした. 照明設備の LED 化や設備更新など低コストな省エネルギー対策を導入していくことが現実的であると考える．また，クラスター7 では策定率が低いため，早急に脱炭素化推進計画の作成が求められる.

4.2 今後の展望

本研究で示された方向性の実現可能性を評価するため，管理状況や地域特性を考慮し，費用や技術的課題を整理する必要がある．また，設備更新などを全国的に導入した場合の CO_2削減効果について，シミュレーションを用いて定量的に試算することが求められる.

5. 引用文献

1) 国土交通省：“航空 - 空港脱炭素化推進計画策定状況”，国土交通省ホームページ，（オンライン），入手先<https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk9_000085.html>，（参照 2025-1-12）

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 14:40 ~ 16:00 D会場：2317中講義室（3F）

[1-D3] 社会経済政策

座長：田口 潤 (横浜国立大学)

14:40 ~ 15:00

[1-D3-01]

新型コロナウィルスの流行によるインバウンド需要の減少がもたらした 経済・環境・社会面への直接・間接的影響の構造経路分解

*大賀 雄介[1]、加河 茂美[2] (1. 九州大学院経済学府経済システム専攻、2. 九州大学経済学研究員)

15:00 ~ 15:20

[1-D3-02]

テキストマイニングを用いた環境エネルギー研究と自治体施策動向の分析

*前田 瑶一郎[1] (1. 芝浦工業大学)

15:20 ~ 15:40

[1-D3-03]

社会学理論を基盤としたライフサイクル持続可能性評価（LCSA）に向けた検討
―― 文理融合研究の試み：バイオエコノミーを事例として ――

*木村 元[1] (1. 桜美林大学 リベラルアーツ学群 環境学専攻)

15:40 ~ 16:00

[1-D3-04]

日本の二次医療圏レベルでの効率性分析を通した地域医療の資源分配政策

*牛島 大悟[1]、加河 茂美[2] (1. 九州大学大学院、2. 九州大学)

©日本LCA学会

テキストマイニングを用いた環境エネルギー研究と自治体施策動向の分析

Analysis of environmental energy research and trends in municipal policies using text mining

○前田瑶一郎*[1)]，磐田朋子[1)]，吉岡剛[1)]
Yoichiro Maeda, Tomoko Iwata, Tsuyoshi Yoshioka
1) 芝浦工業大学
* br21031@ shibaura-it.ac.jp

1. 背景と目的

2050 年までのカーボンニュートラル宣言に伴い，令和 6 年現在では 1112 の自治体が 2050 年までに二酸化炭素排出ゼロを表明した．しかし，令和 2 年から現在にかけて宣言自治体数が近年で急激に増加している一方で，具体的な技術や計画が示されたロードマップを掲げる自治体は限られていることから，ゼロカーボンシティ実現への道筋は不透明であるという課題が存在する．今後の脱炭素化の実現に向けては，現在開発が進められているペロブスカイト太陽電池や洋上風力発電といった革新的なイノベーションが必要である．したがって， 過去の研究で得られた成果の実用化状況を分析し，現在の研究が将来実用化される可能性を探ることが重要であると考えた．また， 実際に研究成果を自治体の施策に反映する際は，事業採算性や安全性といった様々な要素を複合的に考慮する必要があるため，実現までにタイムラグが生じることが予想できる．

そこで本研究では，脱炭素化に関する過去の研究論文を対象に，研究成果が施策に反映されるまでのタイムラグや自治体の地域特性による施策の違いと先進地域の動向を可視化することを目的とする．

2. 研究方法

2. 1 分析手法

本研究では，エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集一般社団法人エネルギー・資源学会）（以下，「エネ資論文集」とする）と脱炭素先行地域（環境省）を分析の対象とした．

エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集第 24 回（2008 年）から第 40 回（2024 年）までの 17 年間を対象に日本語タイトルをテキストデータ化し，対応分析と共起分析を行った． また，脱炭素先行地域は，全国 38 道府県 107 市町村の 81 提案を対象に計画概要書の「取り組みの全体像」欄に記載された内容をテキストデータ化し，対応分析と共起分析を行った． 分析用ソフトウェアとしては，テキストマイニングツール KH Coder を用いた．

2. 2 使用データ

・エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集:日本語タイトル(第 24 回-第 27 回，第 37 回-第 40 回)，総抽出語数 14978 語
・脱炭素先行地域：計画概要書の取り組みの全体像（全国 38 道府県)，総抽出語数 7743 語

3. 分析結果

3. 1 エネ誌論文集:【対応分析】

エネ資論文集のテキストデータを用いた対応分析の結果を図 1 に示す．

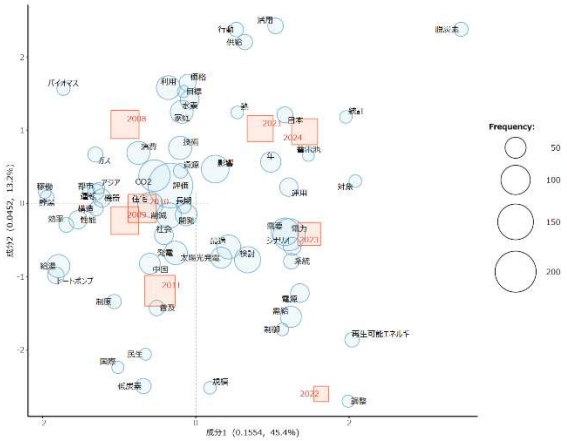


図 1．エネ資論文集の対応分析

以下に，分析結果の特徴を示す．

・2008-2011 年:この時期は，低炭素社会実現計画」が策定されたことから温室効果ガス削減の具体策として「低炭素化」に焦点が当てられていたことが推測できる．特に「住宅」や「機器」の効率改善，「バイオマス」などの代替エネルギー利用が注目されており，主に家庭や民生部門の対策が議論されていたことが示唆される．
・2021-2024 年: 2020 年のカーボンニュートラル宣言以降，エネルギー政策の目標が「低炭素」から「脱炭素」へと移行したことが推測できる．「行動」や「供給」というキーワードから，需要家側の行動変容や社会全体の協力が求められる段階にあることが推測できる． また，「統計」や「シナリオ」の出現は，長期的な脱炭素シナリオや数値目標の設定が重

要視されていることを示している.

3. 2 エネ誌論文集:【共起分析】

エネ資論文集のテキストデータを用いた共起分析の結果を図２に示す.

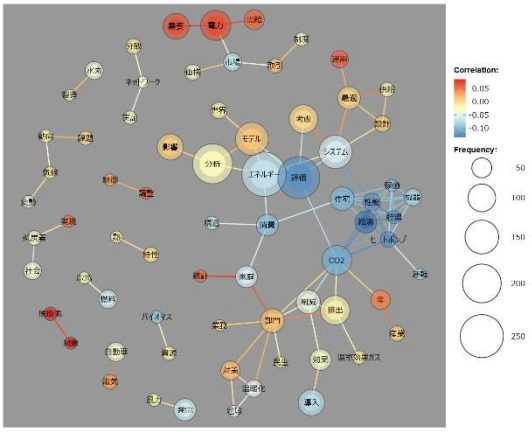


図 2. エネ資論文集の共起分析

以下に，分析結果の特徴を示す.

・青い語句（2008 年付近）：「家庭」は「住宅」や「性能」と結びついている．また，間接的に「ヒートポンプ」や「給湯」と結びついていることから，主に省エネ技術や効率改善が議論されていたことが考察できる.

・赤い語句（2024 年付近）：「家庭」が近年は直接議論の中心にないことや「部門」と結びついていることから，エネルギー政策の焦点が個別の省エネからシステム全体の最適化への移行が進んでいることが考察できる.

3.3 脱炭素先行地域計画概要書:【対応分析】

都道府県を変数とし，脱炭素先行地域計画概要書のテキストデータについて対応分析を行った結果を図３に示す.

この対応分析の主成分の寄与率を考慮すると，成分 1（28．56%）と成分 2（24．73%）の合計が全体の分散の 53．29%となっている．これは， 都道府県ごとに地域特性が異なり，個別の課題が存在することから共通のテーマ性があまり見出せないことを意味している．したがって，都道府県ごとの特徴を共起分析によって見出す必要があることが示唆された.

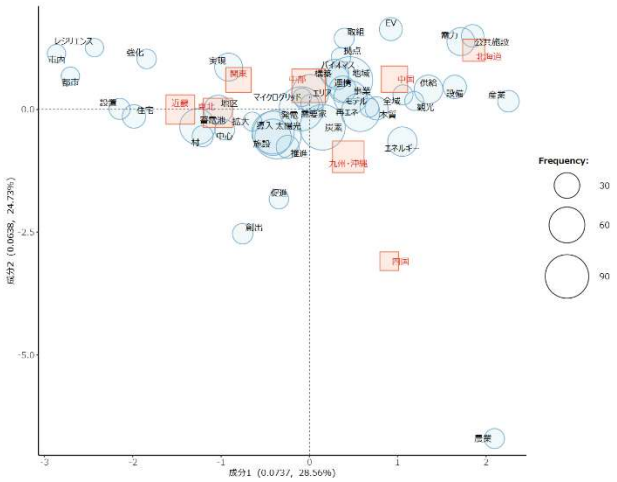


図 3. 脱炭素先行地域計画概要書の対応分析

3. 4 脱炭素先行地域計画概要書:【共起分析】

最後に，道府県を変数とし， 脱炭素先行地域計画概要書のテキストデータについて共起分析を行った結果を図４に示す.

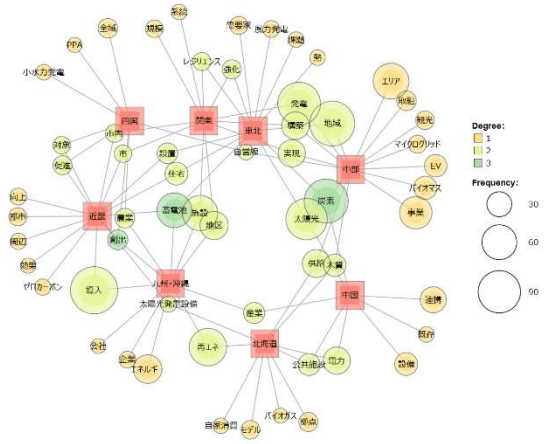


図 4:脱炭素先行地域計画概要書の共起分析

北海道は風力や地熱を活用した再エネ供給拠点化，近畿は都市農村連携，中国はバイオマス発電や広域連携九州・沖縄は太陽光発電や蓄電池の企業主導の再エネ導入等，地域特性に応じて異なるアプローチで脱炭素化を推進していることが考察できる.

4. 分析結果の比較と今後の展望

共通して表示された「電力」を比較すると，エネ資論文集は需要・市場との関連から全国規模の供給需給バランスや系統安定化を研究し，効率的な運用の追究が示唆された．一方，脱炭素先行地域概要書では，公共施設や地域単位での太陽光発電や蓄電池導入など現実的な施策が目立った.

今後は脱炭素先行地域計画概要書の変数を政令市等で分析を行い，先進地域の動向を詳細に可視化する.

社会学理論を基盤としたライフサイクル持続可能性評価(LCSA)に向けた検討 ― 文理融合研究の試み：バイオエコノミーを事例として ―

A Consideration toward the Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) based on Sociological Theory: an Attempt at the Humanities and Sciences-Integrated Research taking Bioeconomy as a Case

○木村元*[1)]
Hajime Kimura
1) 桜美林大学 リベラルアーツ学群 環境学専攻
* kimura_h@obirin.ac.jp

1. はじめに

環境面のみならず社会面や経済面も含めた総合的な影響評価をおこなう LCSA（ライフサイクル持続可能性評価）の機運が高まっている [1), 2)]。これまでの日本 LCA 学会誌における LCSA に関連した議論では，社会学(者)の LCSA への貢献が期待されているものの [3), 4)]，社会学理論を基盤とした LCSA の議論は（管見の限り）行われていない。本研究は，社会学 [5)]，LCA [6)]，バイオエコノミー [7)] の各分野において研究実績をもつ著者が，LCSA への貢献を目指して推進するものである。

2. 研究目的

LCSA の原則を体系的に論じた文書『Principles for the application of life cycle sustainability assessment』[8)]における結論部分に述べられた今後の課題は，主に，環境・経済・社会の３つの次元のあいだの相互関係の扱いや，個々の評価手法（LCA，LCC，S-LCA）の統合にある。本研究は，このような今後の課題への対応として１つの選択肢を提供することを目指す。具体的には，当該文献でも提案される学際的なアプローチを用いた，統合性を重視した LCSA 手法の構築を研究目的とする。

3. 基本的な考え方

上述の課題の根幹には，従来の LCSA の枠組みが基盤とする持続可能性のモデルがある。環境・経済・社会の３本柱で表現されることの多い，この代表的な持続可能性のモデルには，実のところ，環境・経済・社会のあいだの相互関係を記述する理論が備わっていないことが指摘されている [9)]。この課題に対応するための鍵となるアプローチの１つは，環境・経済・社会のあいだの相互関係を記述する社会（学）理論の基礎の上に，LCSA 手法を構築することにあると考えられる。なお，著者は最近，２つの代表的な社会学理論に基づいて，環境・経済・社会のあいだの相互関係を記述する統合的な理論を構築した [5)]。この社会学理論は，気候変動，生物多様性の損失，その ESG 投資との関連等現代的課題をめぐるダイナミクスの分析を可能とする。

4. 「バイオエコノミー」を事例として

バイオエコノミーは，バイオマス（生物資源）やバイオ技術を活用した産業群の拡がりや経済活動の全般を指す包括的な概念である。各国政府は，SDGs に象徴される社会課題解決を志向した産業へと転換すべく，そのビジョンとしてバイオエコノミー戦略を策定している。しかし，同戦略の推進に伴う負の影響，例えば，バイオ由来製品の生産に必要な生物資源の乱獲による生物多様性への影響なども同時に懸念されている [2), 7)]。加えて，経済成長を重視する同戦略の限界を踏まえ，プラネタリー・バウンダリーなどの制約下での社会的ニーズの充足を重視する代替案も提案されている [10)]。このように，資源や技術の活用のあり方だけでなく，社会構造のあり方も左右する要素を伴いうる同戦略に関し，適切な意思決定に貢献する LCSA が期待される。

引用文献

1) Ferreira V., Fabregat-Aibar L., Pié L., Terceño A.: Environ. Impact Assess. Rev. 96, (2022), 106842
2) 木村元：富山大学紀要，5，（2024），pp.20-35
3) 青柳みどり : 日本 LCA 学会誌, 8(3),（2012）, p.243, pp.258-264
4) 伊坪徳宏 : 日本 LCA 学会誌，8(2),（2012），pp.161-169
5) 木村元 : 環境社会学研究，28,（2022），pp.122-139
6) 木村元, 渡邉絵里子, 久保利晃, 内田裕之, 河西亮, 反町俊哉, 増本隆夫, 坪山良夫, 伊坪徳宏, 沖大幹：水利科学，340(58, 5),（2014），pp.74-88
7) 木村元, 加藤都「第２章第１節 勃興するバイオエコノミー」, 山本一彦監修 “バイオものづくりへの挑戦ーバイオファウンドリの成功戦略”, 中央経済社，東京,（2022），pp.8-19
8) Valdivia S. et al.: Int. J. LCA, 26, (2021), pp.1900-1905
9) Purvis B. et al.: Sustain. Sci., 14, (2019), pp. 681–69
10) Giuntoli J. et al.: “Exploring new visions for a sustainable bioeconomy”, (2023), EU JRC132650

日本の二次医療圏レベルでの効率性分性を通じた地域医療の資源分配政策

Regional Healthcare Resource Allocation Policy Through Efficiency Analysis at the Secondary Medical Care Area Level in Japan

○牛島大悟*[1)]、加河茂美 [2)]
Daigo Ushijima, Shigemi Kagawa
1) 九州大学大学院経済学府, 2) 九州大学経済学研究院
* ushijima.daigo.599@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景・目的

日本では高齢化率の進展とともに医療サービス需要が増加しており、それに伴い画像診断機器、特にComputed Tomography(CT) や Magnetic Resonance Imaging (MRI)の重要性が増している。日本ではそれらの機器の導入数が年々増加し、1990 年から 2020 年にかけて CT は 114%、MRI は 860%増え、その導入数は世界一である[(1)]。しかし、OECD 諸国間で人口あたりの台数を比較すると、CT では 2 位のオーストラリアの 2.1 倍[(1)]、MRI では 2 位のアメリカの 1.4 倍[(1)]と、他国と比べ機器への投資は過剰である。一方、一台あたりの検査数は、CT では 20 位(1)、MRI では 9 位[(2)]であり、装置の運用は効率的ではない。

そこで本研究では、医療計画に基づき医療資源の分配が行われる日本の各二次医療圏の開設者別病院群の投入に関する機器数と放射線技師数、医師数、各二次医療圏の開設者別病院群の産出に関する検査数のデータセットをもとに、メタフロンティア Data Envelopment Analysis(DEA)を用いて、各二次医療圏の開設者別病院群における CT と MRI それぞれの運用効率性を推計し、さらに各二次医療圏の開設者別病院群における非効率性の要因分解（開設者間の装置運用、都道府県間の装置運用、二次医療圏間の装置運用の３つの要因）を行う。

2. 分析手法

DEA は生産関数型を仮定せずに複数の投入・産出要素をもつ意思決定主体(Decision Making Unit: DMU)と生産フロンティアとの相対的距離により DMU の効率性を評価する。DEA にはラディアル型と呼ばれる生産フロンティアと DMU の距離から算出される投入の削減可能な割合をもとに DMU の相対的効率性を推計するモデルがある。このラディアル型 DEA では、複数の投入・産出要素を考慮し効率性を推計できるが、各投入･産出要素のスラック変数が効率性に反映されず、DMU の効率性が過大評価される場合がある[(3)]。そこで本研究では上記の問題点を解消した、各 DMU の投入･産出要素のスラック変数を考慮した Slack-Based Measure(SBM)モデル[(4)]を用いて各二次医療圏の開設者別病院群における CT と MRI の運用効率性を推計した。本研究では投入指向型 SBM モデルを用いた。本モデルにおける DMUz の効率性（ρ_z）は以下の式で推計される。

$$\rho_z = \min 1 - \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{s_{iz}^-}{x_{iz}}$$

$$s.t.$$

$$x_{iz} = \sum_{j=1}^{N} x_{ij}\lambda_j + s_{iz}^- \ (i = 1, \dots, m)$$

$$y_{rz} = \sum_{j=1}^{N} y_{rj}\lambda_j - s_{rz}^+ \ (r = 1, \dots, s)$$

$$\sum_{j=1}^{N}\lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0, s_i^- \geq 0, s_r^+ \geq 0 \qquad (1)$$

ここでx_{ij}、y_{rj}はそれぞれ DMUz の投入と産出、Nはすべての DMU のプールしたサンプルサイズ、mは投入の要素数、sは産出の要素数、λ_jは DMUj の重み係数、s_i^-は投入要素iの投入スラック、s_r^+は投入要素rの産出スラックを示す。(1)式で求められる効率性（ρ_z）は 0 から 1 の値を取り、値が大きいほど効率性が高くなる。

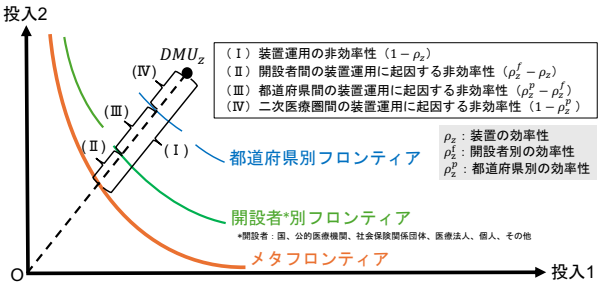


図 1. メタフロンティア DEA の概念図

図 1 は２投入１産出モデルにおけるメタフロンティア DEA の概念図を示す。図 1 におけるメタフロンティアは二次医療圏の開設者別病院群の全データから推計される生産フロンティアである。ここでメタフロンティアにて推計される DMUz の非効率性は、1 と(1)式で求めた効率性（ρ_z）の差分で求められる（図 1 の

(Ⅰ)を参照)。また、本研究ではDMUzの非効率性を開設者間の装置運用に起因する非効率性、都道府県間の装置運用に関する非効率性、二次医療圏間の装置運用に関する非効率性に分解した。それぞれの非効率性の算出方法については図1の(Ⅱ,Ⅲ, Ⅳ)を参照されたい。なお、開設者は厚生労働省の分類区分に基づき、国、公的医療機関、社会保険関係団体、医療法人、個人、その他の6分類とした。

3. 結果・考察

全国の二次医療圏の開設者別病院群の CT の運用効率性の平均値は0.36であった。これは全国平均で約64%の効率性の改善余地があることを意味する。

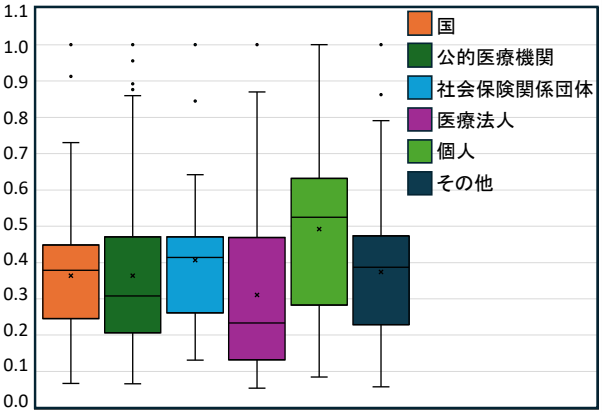


図2. 各開設者の CT の運用効率性

図2は各開設者における CT の運用効率性の箱ひげ図である。国と公的医療機関、社会保険関係団体、医療法人、その他の開設者における効率性の平均値は0.36、0.36、0.41、0.31、0.49、0.37 であり、それぞれ64%、64%、59%、69%、51%、63%の効率性の改善余地があることが明らかになった。また、図2より個人を除く開設者の病院群の75%以上で効率性が0.5を下回っていることがわかった。

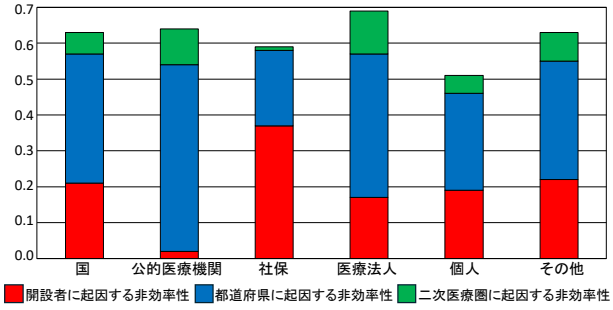


図3. 各開設者における CT の運用効率性の要因分解

図3は各開設者における CT の運用非効率性の要因分解の結果を示す。図3より多くの開設者において非効率性の主因は都道府県間での装置運用の非効率性に起因することがわかった。一方で、二次医療圏間での装置運用に起因する非効率性の影響は他の要因と比べて小さかった。

ここで CT の運用効率性の平均値を都道府県間で比較した際に最も値が低かった宮崎に着目する。図4は各開設者別のおける宮崎の二次医療圏における CT の非効率性の要因分解の結果を示す。各開設者において二次医療圏間の非効率性の主因は都道府県間での装置運用に起因するものであるが、公的医療機関における宮崎東諸県や日向入郷、医療法人における都城北諸県などのように二次医療圏間の装置運用に起因する非効率性が他と比較して大きい地域もある。そのため、装置の運用改善のためには二次医療圏ごとの非効率性の要因に基づき国や自治体が装置の配置や運用に関する政策を立案することが望まれる。

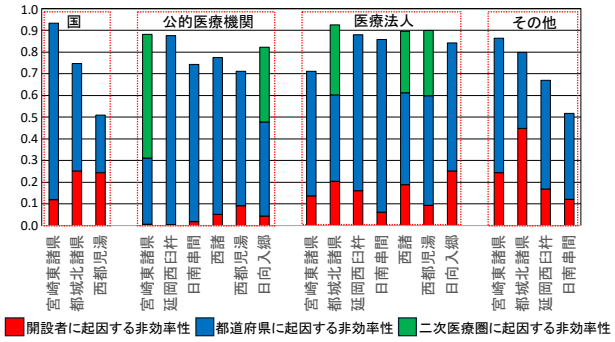


図4. 宮崎における CT の運用効率性の要因分解

4. 結論

本研究ではメタフロンティア DEA を用いて、各二次医療圏の開設者別病院群における CT と MRI それぞれの運用効率性を推計し、さらに各二次医療圏の開設者別病院群における非効率性の要因分解を行った。結果より日本における装置の運用は非効率である一方、病院の開設者間での非効率の主因は都道府県間での装置のマネジメントに起因するものであった。一方で二次医療圏レベルでは、装置の非効率性の要因にはばらつきが見られるため、効率性改善のためには二次医療圏ごとに効率性改善策を考える必要がある。

5. 参考文献

(1) OECD, 2024. Medical Technology Availability. OECD Data Explorer.
(2) OECD, 2024. Diagnostic Exams. OECD Data Explorer.
(3) W. W. Cooper, M. L. Seiford and K. Tone, 2007. Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software, Springer.
(4) K. Tone, 2001. A slack-based measure of efficiency in data envelopment analysis, European Journal of Operational Research, 130, pp. 498–509.

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 16:20 ~ 17:40 D会場：2317中講義室（3F）

[1-D4] 繊維・衣服

座長：西嶋 大輔 (福島大学)

16:20 ~ 16:40

[1-D4-01]

繊維のインベントリデータ作成と衣類のケーススタディ

*高田 亜佐子[1]、太田 淳子[1]、高 智紅[1]、楊川 翠[1]、藤井 千陽[1]、田原 聖隆[1] (1. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所)

16:40 ~ 17:00

[1-D4-02]

繊維製品の物質フロー分析と資源循環モデルの検討

*鶴田 大地[1]、中谷 隼[1]、藤田 壮[1] (1. 東京大学大学院)

17:00 ~ 17:20

[1-D4-03]

公開データを基にした年別の日本の衣服のストック量の推計

*角田 志歩[1]、西嶋 大輔[1] (1. 福島大学)

17:20 ~ 17:40

[1-D4-04]

総合討論

©日本LCA学会

繊維のインベントリデータ作成と衣類のケーススタディ

Development of textile inventory data and implementation of clothing LCA

○高田亜佐子*[1)]、太田 淳子[1)]、高 智紅[1)]、楊川 翠[1)]、藤井 千陽[1)]、田原 聖隆[1)]
Asako Takada, Junko Ohta, Zhihong Gao, Midori Yanagawa, Chiharu Fujii, Kiyotaka Tahara
1) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
* asako-takada@aist.go.jp

1. はじめに

衣類は私たちの生活にとって必要不可欠なものであるものの、従来型の衣類のライフサイクル(製造、使用、廃棄段階)に目を向けると、多くの事業者および個人が関わり、かつ直線的な産業構造であるため、衣類に関する環境問題の解決には困難を伴う。2019 年に国連において組織された UN Alliance for Sustainable Fashion は、ファッション分野が持続可能な開発目標に貢献することを目指している。国内では 2021 年に消費者庁、経済産業省、環境省が第 1 回サステナブルファッションの推進に向けた関係省庁連携会議を開催し、事業者および消費者に向けた取り組みを検討している。どちらもライフサイクル全体に目を向けることを説いている。衣類に由来する Life Cycle Assessment(LCA)の精度を向上させることが、実態を把握し、対策の効果を検討する上で重要である。我々は、LCA を支援するためのバックグラウンドデータベース AIST-IDEA[1)](IDEA)を開発してきた。

本研究では、IDEA Ver.3.4 に関する繊維のインベントリデータのうち更新したものを報告する。さらに衣類のケーススタディを実施し、ケーススタディの考察とともに、IDEA 開発者の視点から IDEA の利用方法を検討する。

2. 綿花のインベントリデータの作成

IDEA Ver.3.4 に格納されている綿花に関するデータ(既存データ)として、綿花および綿実が製品として出力されるプロセスが存在する。本来はそのプロセスには畑での実綿の栽培、工場での実綿から綿花および綿実に分ける作業(綿繰り)が含まれるべきだが、綿繰りを考慮していなかったなどの問題が見つかった。そこで、綿花に関するデータを更新した。更新データの情報源を、既存データよりも新しい対象年かつ詳細なデータが確認できる文献・統計に更新した。実綿の栽培プロセスと綿繰りプロセスの 2 つを設定することによって、生産現場の実態を反映させた。生産国は既存データおよび更新データともにアメリカである。

既存データおよび更新データの綿花 1kg 当たりの温室効果ガス排出量を図 1 に示す。環境影響手法には IPCC 2007 GWP100[2)]を利用した。

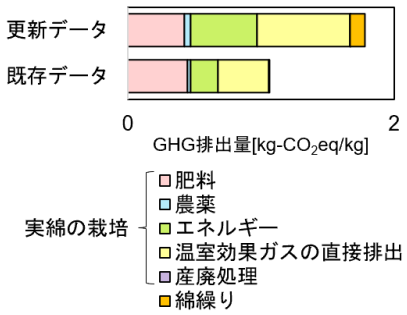


図 1 綿花 1kg 当たりの GHG 排出量

更新データの 1kg 当たりの GHG 排出量は既存データの 1.7 倍だった。温室効果ガスの環境中への直接排出について、更新データが既存データよりも多い理由は、残さのすきこみおよび有機質土壌改良剤由来の N_2O を追加したことによる。綿花を更新したことによる IDEA に格納されている各製品の GHG 排出原単位への影響を確認した。原材料として綿花を 1kg 前後入力している「綿縫糸、綿ねん糸」、「純綿糸(落綿糸を含む)」および「混紡綿糸(落綿糸を含む)」の製品 1kg 当たりの GHG 排出量が 25%程度増加した。

3. 衣類のケーススタディ

3.1 対象製品および評価範囲

対象製品はブルゾン 1 着とした。紳士用、M サイズで、表地重量は 0.379kg/着、表地の素材は綿 35%とポリエステル 65%の混紡とした。評価範囲は、原材料の調達、ブルゾンの製造、流通、使用、廃棄とした。使用は、①ドライクリーニング、②家庭での手入れ(家庭用洗濯機による洗濯、自然乾燥(乾燥機不使用)、およびアイロンがけ)の 2 通りを想定した。寿命はライオン株式会社(2023)[3)]のスーツの平均寿命 7.2 年を参考に、7 年とした。ドライクリーニングおよび家庭での手入れの回数は、衣料及び繊維製服飾雑貨(天然毛皮・天然皮革製品を除く)の製品カテゴリールール(PCR)[4)]記載の 1 年間のアウターの洗濯回数(4 回/年)を参考に、本ケーススタディのブルゾンは半年程度の使用と考え、2 回/年と設定した。小売店や倉庫における保管、小売店での販売、小売店と消費者宅の間の移動、通信販売による輸送は、評価範囲に含めない。

3.2 データの収集および分析

原材料の調達およびブルゾンの製造のデータは、経済産業省(2009)[5]を基に、各プロセスへの入出力データを精査した。上記文献は、ブルゾン製造を、紡糸、紡績、製織、染色整理、縫製、流通に分けデータを整理していたので、本研究も同一の詳細度での分析を意図しその区分にしたがった。流通は、PCR から、特定地域に限定されない場合(国内)の輸送距離 1,000km、10t トラック、平均積載率を引用した。使用のドライクリーニング、家庭用洗濯機、アイロンは PCR 記載の 1 回当たりのデータを基に作成した。IDEA に「ドライクリーニング」が属するものとして「洗濯」があるが、「洗濯」には他の方法による洗濯も含まれ対象が広いため、今回は PCR を採用した。ドライクリーニング済のブルゾンに被せるビニールおよびハンガーは山口ら(2010)[6]記載の素材および重量を基に設定した。廃棄のうち、ごみ集積場から処理施設までの輸送は PCR から市内もしくは近隣市間に閉じることが確実な輸送距離 50km、10t トラック、平均積載率を引用した。

バックグラウンドデータには IDEA Ver.3.4 を使用し、先に述べた綿花は更新データを利用した。環境影響評価手法には IPCC 2007 GWP100 を利用した。

3.3 結果および考察

ブルゾン 1 着の GHG 排出量を①ドライクリーニング、②家庭での手入れに場合分けして算出した(図 2)。

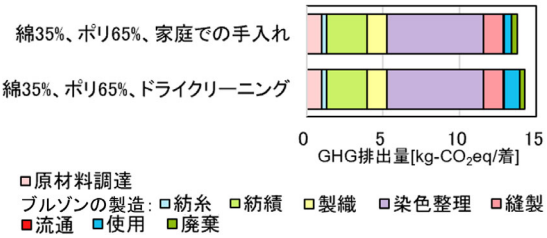


図 2 ブルゾン 1 着の LCA

GHG 排出量はブルゾンの製造がもっとも多く、そのうち染色整理由来が支配的(ライフサイクル全体のうち①のシナリオは 44%、②のシナリオは 46%)だった。GHG 削減策としては、染色整理の中でエネルギー由来がもっとも多かったので、エネルギー源の検討や効率的な利用が考えられる。

今回のケーススタディでは、経済産業省(2009)からブルゾンの製造を細分化したプロセスごとに入出力データを得られた。一方、細分化せずに縫製プロセスの入出力データに IDEA に格納されている「綿・スフ織物(合成繊維紡績糸織物を含む), 幅 13cm 以上」、「綿・スフ・麻・絹・人絹織物染色整理」、エネルギー、産廃処理を上流連鎖させると、ブルゾン 1 着の GHG 排出量は、IDEA を引用した場合は経済産業省(2009)を利用した場合の 6 割程度にとどまった。「綿・スフ織物(合成繊維紡績糸織物を含む), 幅 13cm 以上」の製造プロセスは綿、ポリエステル、ナイロン、羊毛などが含まれる織物を対象としているため、今回のケーススタディのように素材およびその構成比が特定されている織物と比べて、製品の範囲が広く、その利用に注意が必要である。ただし、日本における綿・スフ織物全体のマクロ分析には役立つ。IDEA に格納されているデータはすべての入出力データが明示されているため、環境影響の算出および検討に役立つ。LCA の目的および連鎖させるデータの特徴に合致した IDEA データを選択することで精度の高い結果が得られる。

4. まとめ

IDEA に格納されている綿花のインベントリデータの更新前後の GHG 排出量を比較し、綿花の原単位変更が及ぼす影響を示した。衣類のケーススタディを実施し、ライフサイクルの各段階に由来する GHG 排出量を算出し、排出源を分析した。IDEA データの効果的な利用について述べた。今回は温暖化影響を示したが、染色工程で大量に使用される水の環境影響なども今後評価する必要がある。

引用文献

1) 国立研究開発法人産業技術総合研究 安全科学研究部門 IDEA ラボ:“LCI データベース AIST-IDEA Ver.3.4”, (2024)
2) IPCC : “IPCC AR4 WG1: Climate Change 2007: The Physical Science Basis”. IPCC, (オンライン), 入手先 <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf>, (参照 2024-01-20)
3) ライオン株式会社 :“「衣類のロングライフ化」に関する調査”, ライオン株式会社, (オンライン), 入手先 <https://doc.lion.co.jp/uploads/tmg_block_page_image/file/9164/20230929_01.pdf>, (参照 2024-01-20)
4) 一般社団法人サスティナブル経営推進機構 : “製品カテゴリールール(PCR)(認定 PCR 番号 : PA-780000-CN-01)”, SuMPO 環境ラベルプログラム, (オンライン), 入手先 <https://ecoleaf-label.jp/pcr/download/248>, (参照 2024-01-20)
5) 経済産業省製造産業局繊維課(株式会社産業情報研究センター) : “繊維製品(衣料品)の LCA 調査報告書 染色工程等のデータ修正に伴う更新版 資料編”, (2009), pp.10-11
6) 山口庸子, 清井えり子、永山升三 : 日本 LCA 学会誌, 6(3), (2010), pp.209-216

繊維製品の物質フロー分析と資源循環モデルの検討

Material Flow Analysis of Textile Products and Resource Circulation Modeling

○鶴田大地*[1)]、中谷隼 [1)]、藤田壮 [1)]
Daichi Tsuruta, Jun Nakatani, Tsuyoshi Fujita
1) 東京大学大学院
* tsuruta@env.t.u-tokyo.ac.jp

1. 背景と目的

繊維産業がもたらす環境問題への影響に近年注目が集まる。製造段階では水や化石資源の消費が、廃棄段階では繊維製品の焼却による GHG 排出が影響として挙げられる。これらの環境影響を低減させるアプローチとして、製造段階では不可の少ない素材の使用、廃棄段階ではリユースやリサイクルの普及が考えられる。

リユースについては近年、海外へ輸出した衣類が現地で再利用されずに廃棄されること [1)]が問題視されている。一方でリサイクルでは、様々な素材の繊維製品があること、それらのうち混紡繊維の割合が多い [2)]ことが課題となる。多くの製品は複数種類の繊維を用いる混紡によって製造され、それらが混在した繊維廃棄物のリサイクル技術は開発途上である [3)]。

繊維廃棄物の処理方法はそれぞれ利点と欠点があり、廃棄物の種類に応じてリユースやリサイクルを適切に組み合わせることが有効であると考えられる。そのため今後発生する繊維廃棄物の内訳に応じて、適切な処理方法を組み合わせたシナリオの構築が求められる。

本研究の最終的な目的は、繊維廃棄物の処理における環境負荷を削減するためのシナリオを構築することである。そのために二つの段階をもってアプローチする。一つ目は繊維製品の製造量や消費量、廃棄物の発生量とその内訳を推定し物質フローを作成することであり、二つ目は内訳に応じた繊維の資源循環モデルを構築し、適切な処理技術を組み合わせた上で LCA の手法を用いて環境影響を評価することである。推計の範囲は日本国内全体を想定し、対象となる繊維製品は衣服に絞ることとする。

2. 研究手法

研究の枠組みを図 1 に示す。これは衣類の大まかなフローと、それぞれの断面における推計手法の関係をまとめたものである。

物質フローの作成は主に産業連関表と貿易統計を用いた。産業連関表では国内で流通する衣服について、産業や家庭といった部門間の流れ、輸入品と国産品の内訳などを把握した。貿易統計では特に衣服の多くを占める輸入品について、重量と金額による内訳を把握した。これらをもとに衣服を種類と素材、輸入品や国産で細分化し、それぞれの衣服がどれだけ流通しているかを推計し物質フローで表現した。

さらにこのフローを動的フローに展開するために寿命関数を取り入れた。寿命関数のデータを得るために約 20 件の家庭でワードローブ調査を行い、家庭で保有している衣服の内訳を把握した。また、一般消費者 15,000 名を対象としたアンケート調査によって消費者の衣類の保有状況や購入、廃棄の頻度を把握した。

また、廃棄される衣服のうちリユースがなされるものの内訳を把握するため、古着回収事業者での衣服の組成調査を実施した。同事業者へのヒアリングも併せて行い、再流通に適した衣服の選別基準を調査した。

作成したフローをもとにした影響評価は、LCA を用いる予定である。衣服の種類や素材ごとに適した処理方式を特定し、資源循環モデルを構築した上で発生する温室効果ガスの排出量を計算する。

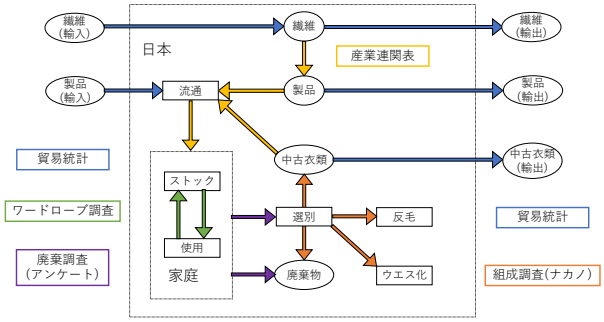


図 1　衣類フローのイメージと各推計の関係

3. 推計結果

3.1 貿易統計を用いた推計

日本国内における繊維製品の流通の概要を把握するため、財務省の貿易統計を用いた輸入量・輸出量の推計を行なった。貿易統計のうち、繊維製品が対応している第 50～63 類の大分類について、2020 年の 1 年間における日本の輸入量・輸入額と輸出量・輸出額をそれぞれ求めた。主要な製品ごとにまとめたほか、第 63 類に含まれるうちの中古衣類は別で推計した。

輸入品の総量は 260 万 t で金額は 3.8 兆円となった。輸入品の中では、重量・金額ともに織物製衣服やニット製衣服という既製衣服が多くなっており、既製品の割合が高いことが確認された。

輸出品の総量は 80 万 t で金額は 0.7 兆円となった。

輸出品の中では、重量・金額ともに人造繊維が多かったほか、重量では中古衣類も多かった。国内で製造された人造繊維と、使用後の中古衣類を海外に多く輸出していることがわかった。ただし、中古衣類は金額としては多くないこともわかった。

金額を重量で割って求められた製品ごとの単価も求めた。繊維製品は輸入品と輸出品によって単価が大きく異なる。基本的には輸入品の方が輸出品に比べて単価が低く、安い製品を海外から大量に輸入し、国内で生産された高級な製品を海外向けに輸出するという日本の傾向が読み取れる。製品間の比較では、既製品が概ね高い単価を示していることもわかった。一方で、中古衣類では輸入品の単価が輸出品の 20 倍ほどになっている。国内で使い古された衣類を安価かつ大量に海外へ輸出している一方、海外から輸入される衣類は相対的に単価が高いものとなっていることが明らかになった。

3.2 産業連関表を用いた推計

産業連関表を用いて、国内における製品ごとの投入額の関係を明らかにした。これによって、繊維製品の製造に繊維がどれだけ投入されるかを擬似的に把握することができる。

図 2 は、主要な繊維製品のカテゴリ間の金額フローのうち、50 億円以上の流れがあるものを可視化したものである。製品の流れは矢印で示された金額フローと逆向きになる。推計の結果として、衣服には各種類の繊維や生地が一定量投入されていることと、中でも化学繊維の投入額が多いことがわかった。

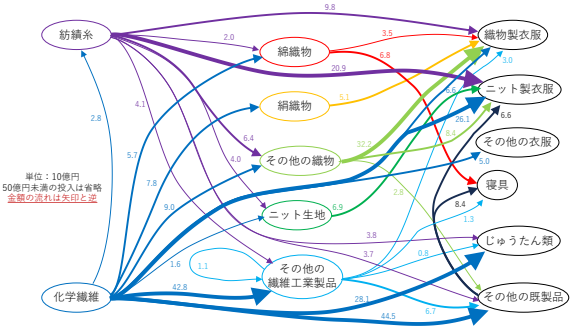


図 2　繊維製品間のフロー（推計結果）

3.3 古着回収事業者における衣服の組成調査

JGC Digital が実施する衣類の回収事業で回収された衣類が、衣類選別業者であるナカノで選別されている。その選別データを入手し分析することで、中古衣類の内訳を把握した。

選別の分け方は貿易統計や産業連関表との整合性を取るように定義し、選別後の用途（4 種類）、品目（8 種類）と素材（混紡を含む 28 分類）で細分化した。回収された 1000kg の衣類について選別を行い、それぞれの用途・品目・素材の内訳ごとに重量を測定した。

図 3 は衣類の選別後の用途ごとに、8 品目の割合を示したものである。また図 4 は、中古衣類向けの衣類 811kg について、品目ごとに素材の内訳を示したものである。選別の用途では中古衣類向けに選別されるものが多く、品目の偏りはあまりなかった。中古衣類における素材の内訳では、綿またはポリエステルの単一素材からなる製品が多い一方で、混紡繊維によってつくられた製品が半分程度あることがわかった。

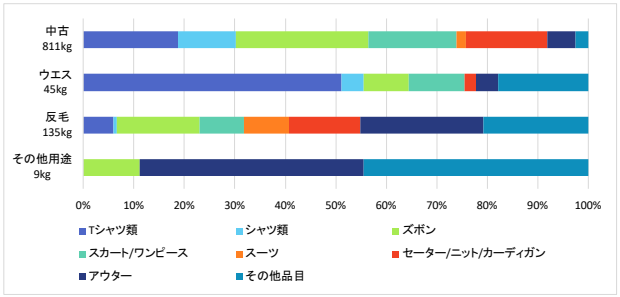


図 3　選別後の用途ごとの品目割合（重量ベース）

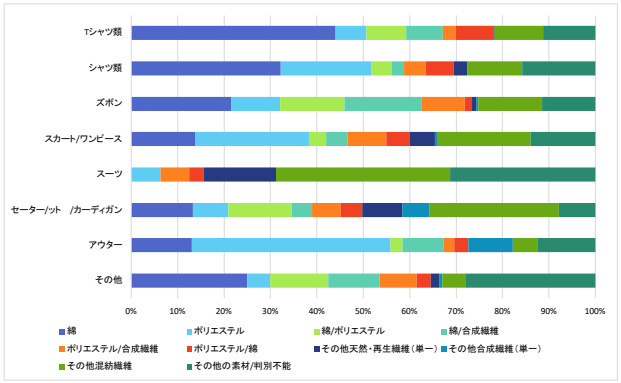


図 4　中古衣類の品目別素材内訳（重量ベース）

謝辞：　衣服の組成調査の実施には，ナカノ株式会社，JGC Digital 株式会社，日本エヌ・ユー・エス株式会社の皆様に多大なる貢献をいただいた。謝意を表する。

引用文献

1) 木村隆介，田村銀河，野原直路：“着られなくなった衣服の“末路”とは…”，NHK 国際ニュースナビ，（オンライン），入手先 <https://www3.nhk.or.jp/news/special/international_news_navi/articles/feature/2022/05/29/21711.html>，（参照 2025-01-22）
2) 環境省：“ファッションと環境（環境省）”第 2 回繊維製品における資源循環システム検討会 (2021)
3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：“繊維製品の資源循環システムの構築に向けた技術開発について”第 1 回 繊維製品の資源循環システムの検討会（2023）

Supporting Information

公開データを基にした年別の日本の衣服のストック量の推計

Estimation of garment stock in Japan using open data

○角田志歩*[1)]、西嶋大輔[1)]
Shiho Kakuta, Daisuke Nishijima
1) 福島大学
* s2370014@ipc.fukushima-u.ac.jp

1. 研究背景

環境問題の解決に向けてその重要な対象は多く存在するが、その 1 つとして我々の生活に身近な衣服が挙げられる。多くの先行研究[1,2)]で衣服は製造段階の環境負荷の割合が大きく、その製造量の減少が重要であるとされている。そして、その削減が期待できる利用形態としてシェアリングが注目されている。1 つの製品を複数人で共有して利用することから、社会で必要となる衣服の量、および生産量の減少が期待できる。よって、その普及による環境負荷の削減ポテンシャルを考える上で、一国での衣服のストック量を知ることがより有用である。しかし、衣服についてストック量に関するデータは十分ではなく、個人レベルでの衣服のストック量やその使用期間に留まっている。[3,4,5)]そこで本研究では、公開データを基に製品ストックフローの推計モデルを用いて、日本における衣服のストック量の推計を行う。同時に、その推計の際に必要な衣服の寿命分布の推定も行う。なお、本研究の対象期間は 1999 年から 2021 年とする。

2. 研究手法

本研究でのt年における衣服のストック量$S(t)$は、以下の式(1)のように表される。

$$S(t) = \sum_{j}^{t} [inflow(j) \times \{1 - \Phi_t(t - j + 0.5)\}] \quad (1)$$

ここで、jは衣服が流入した年を示す変数、tは分析対象年を示す変数、$inflow(j)$はj年における衣服の流入量、$\Phi_t(y)$はt年における流入からy年経過した衣服の累積廃棄確率をそれぞれ示す。累積廃棄確率$\Phi_t(y)$の変数である使用年数yには幅があり、最大値は$t - j + 1$年、最小値は$t - j$年となる。よって、その中央値として$t - j + 0.5$とする。本研究では式(1)における各年の衣服の流入量$inflow(j)$は、以下の式(2)で表されるとする。

$$inflow(j) = \delta\{B(j) + I(j) - E(j)\} \quad (2)$$

ここで、δは流入量全体に占める家庭への流入量の割合、$B(j), I(j), E(j)$はj年における国内生産量、輸入量、輸出量をそれぞれ示している。δの値は、環境省(2020)[4)]を参考に設定した。

$$W(t) = \sum_{j}^{t} [inflow(j) \times \{\Phi_t(t - j + 0.5) - \Phi_{t-1}(t - j - 1 + 0.5)\}] \quad (3)$$

式(3)の累積廃棄確率の差分はj年に生産された衣服が$t-1$年からt年の期間に廃棄される割合になる。なお、式(1)と同様に、経過年数の値には 0.5 が加えられている。本研究では、累積廃棄確率はワイブル分布に従うと仮定した。具体的に、先に形状パラメータを設定し、衣服の廃棄量の観測値と式(3)から求められる推計値との差が最小となるように、最小二乗法によって各年の尺度パラメータの値を推定した。先に設定する形状パラメータの値は、一定の値をとるとし、1.5から5までの 0.1 刻みで設定した。また、平均寿命の最小値を 1 年、最大値を 8 年として推定を行った。なお、8 年については、アンケート調査での先行事例[8)]を参考にした。パラメータ推定の結果、観測値との差の合計が最小であった形状パラメータの値が 2.5 のときをパラメータの値として用いた。

3. データ

本研究では、環境省(2020,2023)[4,5)]の推計方法を基に各値の設定を行った。国内生産量$B(j)$は、生産動態統計[9)]のニット・衣服縫製品の生産量、輸入量$I(j)$と輸出量$E(j)$は、貿易統計[10)]の第 61 類と第 62 類を参照した。ただし、乳児用の衣類や手袋などついては、除外した。累積廃棄確率のパラメータ推定の際に用いた廃棄量$W(t)$は、家庭からの廃棄量、資源回収量、集団回収量、店頭回収量の 4 種類の合計とした。家庭からの廃棄量は、一般廃棄物処理実態調査[11)]の生活系ごみの可燃ごみ・不燃ごみ・混合ごみの合計値に、「家庭ごみに占める繊維類のごみの割合」と「繊維類のごみに占める衣類の割合」を乗じて求めた。資源回収量と集団回収量は、一般廃棄物処理実態調査[11)]の布類の資源回収量と集団回収量のそれぞれの集計値に、「家庭ごみの繊維類に占める衣服の割合」を乗じて求めた。店頭回収量は、文献[4,5,12)]を参照し 1999 年、2009 年、2020 年、2022 年の値を設定し、それ以外については線形増加を仮定した。「家庭ごみに占める繊維類のごみの割合」は、容器包装廃棄物の使用・排出実態調査[13)]を

基に各年の「繊維類」の湿重量比率の平均値を用いた。「繊維類のごみに占める衣服の割合」は、環境省(2020,2023)[4,5]での値を用いたところ、推計がうまくなされなかった。そのため、衣類以外での家庭から出る主要な繊維類のごみをタオルとリネン類（シーツ類）と仮定し、衣服を含めたそれらの流入量の合計に対する衣服の流入量の割合を、「繊維類のごみに占める衣服の割合」とした。この割合を算出する際のタオル類は、今治タオル工業組合(2024)[14]、リネン類は、生産動態統計 [9]と貿易統計 [10]を基にそれぞれ設定した。データの制約上、1997 年から 2021 年のデータを基に計算を行った結果、その値は 80.8%となった。

4. 研究結果

図 1 は、1999 年から 2021 年における日本の衣服の平均寿命の推移を示したものである。衣服の平均寿命は、おおよそ 1 年から 2 年の間で推移していることが分かる。その推移を見ると、2006 年までは減少傾向にあるが、2007 年以降からは逆に全体として増加傾向にあることが分かる。また、図 2 は重量ベースと点数ベースの 1 人あたりストック量を示している。特に点数ベースの結果を見ると、2006 年以降からそのストック量が全体として増加傾向になっており、対象期間の比較的早い段階で増加傾向が表れていることが分かる。本稿で示された結果は、異なる分布での推定や感度分析など、さらに検証が必要であることに注意されたい。しかし、本研究の結果を参照すると、衣服のストック量は増加傾向にあることから、日本での衣服のシェアリングの普及による衣服のストック量や生産量の削減ポテンシャルは、ある程度見込まれると示唆される。

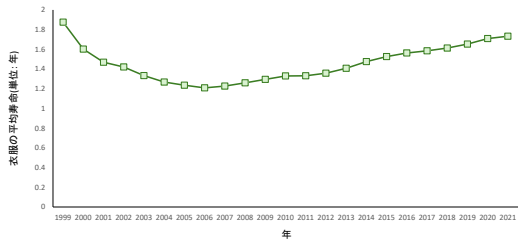


図 1 日本での年別の衣服の平均寿命

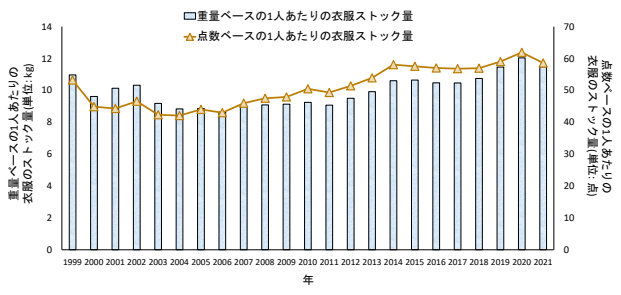


図 2 日本の重量ベースと点数ベースでの 1 人あたりの衣服のストック量の推移

5. 謝辞

本研究は福島大学学内競争的研究資金(23RI003、24RI004)の助成を受けたものである。

6. 引用文献

1) Amasawa, E., Brydges, T., Brydges, C. E., Kimita, K. (2023) Clean. & Respon. Consum., 8, 100103.
2) Wiedemann, S.G., Clarke, S.J., Nguyen, Q.V., Cheah, Z.X., Simmons, A.T. (2023), Res. Cons. & Rec., 198, 107119.
3) 環境省：“ファッションと環境に関する調査業務 -「ファッションと環境」調査結果 -”,(2020)
4) 環境省：“令和 4 年度循環型ファッションの推進方策に関する調査業務-マテリアルフロー-”,(2023)
5) 日本衣料管理協会：“令和 4 年度調査分『衣料の使用実態調査』について”，日本衣料管理協会ホームページ，（オンライン），入手先 <https://www.jasta1.or.jp/research.html>,（参照 2024-12-19）
6) 田崎 智宏, 小口 正弘, 亀屋 隆志, 浦野 紘平: 廃棄物学会論文誌, 12(2), (2001), pp. 49-58
7) Daigo, I., Iwata, K., Oguchi, M., Goto, Y., Procedia CIRP, 61, (2017), pp.146–151
8) ライオン株式会社 ：“「衣類のロングライフ化」に関する調査”, ライオンホームページ,（オンライン）, 入手先 <https://doc.lion.co.jp/uploads/tmg_block_page_image/file/9164/20230929_01.pdf?_gl=1*1o8zo8q*_ga*OTUxODAxODI1LjE3MDcxMDM2OTc.*_ga_V38CPVQV9B*MTcwNzEwMzY5Ni4xLjEuMTcwNzEwMzg0NS40NC4wLjA.>,（参照 2024-02-05）
9) 経済産業省: 生産動態統計, (1988-2021)
10) 財務省: 貿易統計, (1988-2021)
11) 環境省: 一般廃棄物処理実態調査, (1998-2021)
12) 経済産業省（2002）：“平成１３年度繊維産業活性化対策調査（アジア繊維産業戦略連携推進事業（消費流通実態調査分））報告書”,(2002)
13) 環境省: 容器包装廃棄物の使用・排出実態調査, (2006-2022), <https://www.env.go.jp/recycle/yoki/c_2_research/index.html>,（参照 2023-11-15）
14) 今治タオル工業組合：“企業数、織機台数、革新織機台数、従業員数、綿糸引渡数量、生産量、輸出・輸入数量の推移”,今治タオル工業組合ホームページ、（オンライン）,入手先 <https://itia.or.jp/toweldata.html>（2024 年 4 月 15 日）

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 9:00 ~ 10:20 E会場：2321中講義室（3F）

[1-E1] 再生可能エネルギー

座長：森泉 由恵 (横浜国立大学)

9:00 ~ 9:20

[1-E1-01]

自家消費型・小型風力発電のライフサイクル評価

*大村 崇太[1]、兵法 彩[1] (1. 東京都市大学)

9:20 ~ 9:40

[1-E1-02]

関連産業立地を考慮した陸上風力発電の地域経済効果

*大山 雅貴[1]、本藤 祐樹[1]、森泉 由恵[1] (1. 横浜国立大学)

9:40 ~ 10:00

[1-E1-03]

地域に裨益する再生可能エネルギー電気の利用に向けて：2015年地域間次世代エネルギーシステム分析用産業連関表による

*鷲津 明由[1]、板 明果[2] (1. 早稲田大学、2. 東北学院大学)

10:00 ~ 10:20

[1-E1-04]

経済的不平等性を緩和し再生可能エネルギー導入を促進する地域間連携施策

*伊達 貴彦[1]、栗栖 聖[1]、羽合 佳範[1]、福士 謙介[1] (1. 東京大学)

©日本LCA学会

自家消費型・小型風力発電のライフサイクル評価

Life cycle assessment of self-consumption small-scale wind power generation

○大村崇太 [1)]、兵法彩*[1)]
Sota Omura, Aya Heiho
1)　東京都市大学
*heiho@tcu.ac.jp

1. はじめに

世界各国で気候変動に対しての取り組みは喫緊の課題となっている。気候変動対策のひとつとして、再生可能エネルギーの活用が挙げられる。日本では、2011年の福島第一原子力発電所の事故をきっかけとして、再生可能エネルギーの導入が加速した。特に2012年には「固定価格買取（FIT）制度」が始まり、設定された固定価格で電力会社が買い取ることを保証することで、比較的大規模な太陽光発電（メガソーラー）や風力発電の導入が進んだ。しかしながら、発電装置の維持・管理、事業継続という観点では、一時的な買取に頼らない発電設備の設置の重要性が増している。特にカーボンニュートラル宣言を受けて、今後さらに再生可能エネルギーの導入促進に向けた施策が増える見込みであり、発電事業者ではない企業・団体による再生可能エネルギーの導入が増加すると考えられる。一方で、FITに依存しない発電設備の導入や小規模分散による導入を加速するための目途は立っておらず、特に自家消費型の再生可能エネルギーに関する議論は不足している。

そこで本研究は、東京都市大学横浜キャンパスに設置されている小型風力発電設備のライフサイクル評価・発電実績を反映したGHG排出量削減効果を明らかにすることを目的とする。この結果に基づき自家消費型を目的とする再生可能エネルギー発電設備としての小型風力発電の有効性や課題を考察し、小型風力発電の活用に向けた議論への寄与を目指す。

2. 研究方法

評価対象とした発電機は1.1kWの小型風力発電×2機（図1）である。また、同じく東京都市大学横浜キャンパスに設置されている単結晶シリコンモジュールの太陽光発電41.2kWも比較対象とした。それぞれのGHG排出量を推計し、発電実績を用いてGHG排出量削減効果を算定した。インベントリデータは、環境省のガイドラインの数値[5)]を用いた。GHG排出係数はIDEAv.3.4.1のLCIA結果LIME2を使用した。発電実績は導入されているモニタリングシステムから入手した。GHG排出量削減効果は、LNG火力発電と比較して算定した。



図1　東京都市大の小型風力発電
（東京都市大学ホームページから引用）

3. システム境界

システム境界は原材料調達、製造段階、流通段階、処分段階、リサイクルの5段階で構成される。このうち、製造段階は塗装・組み立てで構成されている。リサイクルによって再生された素材は、新たな原材料を代替すると仮定する。

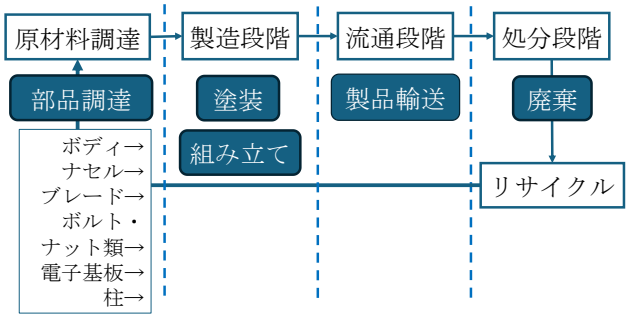


図2　システム境界

4. 結果

4.1 ライフサイクル評価

小型風力発電機のGHG排出量は1機あたり904 kg-CO_2eqであった。プロセス別割合では、柱製造が最も大きい割合で30%である。次いで、発電機製造27%、電気使用16%、電子基板製造15%となった。単結晶シリコンモジュール太陽電池のGHG排出量は小型風力発電1機の発電能力1.1kWhあたりで2,602 kg-CO_2eqである。リサイクルによるGHG排出量削減は1機あたり、4 kg - CO2eqとなった。

小型風力発電の発電量は、2023 年の 1 年間 17.5 khw・平均風速 1.18m/s であった。太陽光発電は、2023 年の 1 年間で 50,248 kWh であった。

1kWh あたりの GHG 排出量が火力発電の原単位を上回っており、GHG 排出量削減効果は見られなかった。太陽光発電に関しては、年間の削減量が 22,11kg-CO_2eq の削減効果があった。小型風力発電の CO_2 ペイバックタイムは約 140 年、太陽光発電は 2.5 年であった。設備利用率は 0.09%であった。NEDO が示す陸上風力発電の設備利用率指標は 20%である。

表 1　結果まとめ

	小型風力	太陽光	
年間発電量（2023 年実績）	17.50	50248	kWh
GHG 排出量：1kWh あたり	6.08	0.11	kg-CO2eq /kWh
年間 GHG 排出量削減量	-96.38	22114.53	kg-CO2eq
CO_2PT	140.81	2.55	年

5. 考察

今回の結果を踏まえ、今後の自家消費型・小型風力発電の活用に向け、3 つの考察を述べる。

5.1 運用上で発生する制約の回避

今回のケースでは、近隣住民からの要請で、休日夜間の稼働制限が発生していた。設置位置が近隣住宅との距離が近いため、風切り音などが理由である。また、教育資材としての機能維持のため、設備寿命を延ばす大学の意向のために稼働を制限していた。このような、運用上の制約は大きく、小型風力発電の発電量と GHG 排出量削減効果に大きく影響する。そのため、運用上で制約が発生しない地点での設置を慎重に検討することが重要である。

5.2 設備利用率の目標値を設定

対象の設備利用率は 0.09%と NEDO が示す陸上風力発電の設備利用率指標 20%を大きく下回る結果となった。対象が耐用年数内（17 年想定）で GHG 排出量削減効果が発生する分岐点は年間発電量 288kWh・設備利用率 1.5%である。このように、GHG 排出量削減効果が発生する分岐点を明確化し、それを踏まえた目標値を設定した設置・運用が必要である。

表 2　設備利用率と CO_2PT

設備利用率	0.09	1.5	20	%
CO_2PT	140	17	0.6	年

5.3 柱の環境負荷

柱の長さ・素材の検討が必要である。対象のライフサイクル評価の GHG 排出量のうち 32%が柱由来(製造・廃棄)によるものである。使用されている柱の長さは 15m である。一般的に高度が増加するに伴い、平均風速を増加する。しかし、高い平均風速のために、長い柱を使用する場合、設備自体の GHG 排出量は増加する。そのため、GHG 排出量削減効果を最大するための、発電量と GHG 排出量のバランスを考慮した柱の長さ・素材に関する議論が必要である。

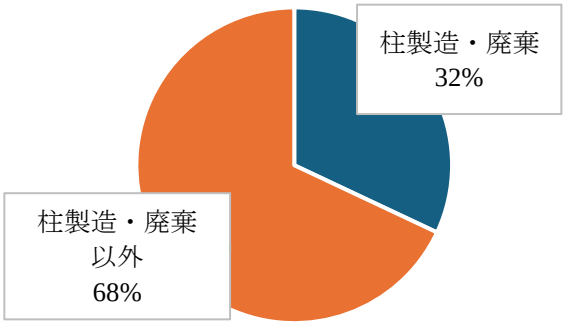


図 3　柱製造・廃棄の GHG 排出量割合

6. まとめ

小型風力発電の GHG 排出量は 1 機あたり 904kg-CO_2eq であった。今後の自家消費型・小型風力発電の活用に向け、「運用上の制約が発生しない地点での設置」「GHG 排出量削減を意識した設備利用率の目標値設定」「柱の長さ・素材の検討と議論」の 3 項目が重要になることが明らかとなった。

参考文献

1)　平尾雅彦, 傍田光路, 伊藤瞭介, 川上勝史, 小型風力発電機のライフサイクルインベントリ分析,第 4 回日本ＬＣＡ学会研究発表会講演要旨集,北九州国際展場,p272-273

2)　東京都市大学ホームページ, DX 環境エネルギー人材教育紹介(2023)

4)　中央電力研究所, 日本における発電技術のライフサイクル CO_2排出量評価,2016

5)　再生可能エネルギー等の温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン, 2021

関連産業立地を考慮した陸上風力発電の地域経済効果

Regional economic impacts of onshore wind power generation considering the location of related industries

○大山雅貴*[1)]、本藤祐樹[1)]、森泉由恵[1)]
Masataka Oyama, Hiroki Hondo, Yue Moriizumi
1) 横浜国立大学
* oyama-masataka-fy@ynu.jp

1. 緒言

脱炭素社会の実現に向けて、今後さらなる再生可能エネルギー（以後、再エネ）の導入が求められている。また、再エネの導入は地域経済活性化にもつながる可能性があり、脱炭素と地方創生を同時に進める地域脱炭素において注目されている。再エネ技術の一つである陸上風力発電は、地域共生等の面で課題が指摘されているが、地域脱炭素に資する再エネ技術として期待されている。今後の導入に向けては、陸上風力発電の導入を地域や国の経済活性化につなげるための検討が求められる。さらに、風力発電サプライチェーンを国内で構築する動きもあり、将来の社会・技術状況の変化による国内・地域内への経済影響を明らかにすることも求められる。しかしながら、風力発電技術の将来変化を考慮して日本の地域へ導入したときの社会経済効果を評価している研究は十分ではない。

本研究では、陸上風力発電を導入したときの地域への社会経済効果を、サプライチェーンの産業立地を反映させて定量的に評価することを目的とする。国内のある地域を対象として、現状と関連産業参入拡大後の2つのケースで推計を行っている。

2. 方法

2.1 モデル設定

本研究では、国内において陸上風力発電の導入ポテンシャルが大きく、大規模導入が可能な地域の一つである、青森県のむつ・十和田・三沢圏域を対象として推計を実施した。

対象システムとして、地域内で現在稼働中と今後稼働予定の発電所規模を踏まえ、単基出力 2.5MW の風車 20 基からなる総出力 50MW の陸上風力発電所を設定した。この発電所において、製造・建設と 20 年の運用を合わせたライフサイクル全体での生産誘発額を、地域内、国内（地域外）、海外に分けて推計した。

2.2 ケース設定

表 1 に示される陸上風力発電のライフサイクルにわたる活動に関して、関連産業が地域内、国内（地域外）、海外のどこに立地しているかに着目して、現状ケースと参入拡大ケースを設定した。

表 1 陸上風力発電のライフサイクル

製造・建設段階	運用段階
・設計 ・調査 ・風車製造 （タワー, ブレード, ナセル, 制御装置） ・基礎 ・電気設備 ・設置 ・その他工事	・運転 （人件費, その他サービス） ・点検 （ピッチ駆動システム, 発電機部品, 増速機部品, 軸受部品, その他風車部品, 人件費） ・修繕 （ブレード, 制御装置, ピッチシステム, 発電機, 軸受, ヨーシステム, 増速機, その他機器, 人件費）

現状ケースでは、風車製造は海外メーカー製が多くの割合を占めている状況を反映させてすべて海外立地とした。また、自治体の企業リストの情報をもとに各工事が地域内企業で実施可能かを判断した。発電所運転時に現場に常駐する作業員の人件費は地域内の効果とし、点検・修繕は地域外企業が実施するとしている。点検・修繕での部品交換は、ブレードなどの大規模部品は海外製造とした一方で、発電機などを構成する小さな部品についは国内メーカー製を使用するとした。

参入拡大ケースは陸上風力発電の国内・地域内サプライチェーン構築の動向を考慮している。国内メーカーの参入により、風車設計、タワー・ブレード製造産業が国内立地になると想定した。ナセル製造は一部が国内製造となる状況を反映させた。また運用段階では、地域内企業がメンテナンスに参入する動向があるため、点検や修繕に関する産業を地域内立地とした。

2.3 生産誘発額の推計

本研究では、ライフサイクルでの生産誘発額を産業連関分析により推計した。生産誘発額の内、建設費や運用費の値を直接効果、需要増加によって生じる産業間の波及による誘発額の値を間接効果とした。

間接効果の推計には、再生可能エネルギー部門拡張産業連関モデル・地域版（REFIO-Region）[1)]を使用した。REFIO-Region の地域表と全国表を使用することで、396 の内生部門と 11 の付加価値部門での地域内、国内（地域外）、海外の効果を推計した。

最終需要ベクトルは、建設費と運用費の金額を、事業者からの提供データをもとに各工程にかかる費用に格付けを行うことで作成した。ケース設定の情報をもとに、全体、国内のみ、地域内のみの 3 本のベクトルを 2 つのケースでそれぞれ作成した。

3. 結果と考察

3.1 現状ケースの生産誘発額

ライフサイクルでの生産誘発額は 876 億円となり、内訳は製造・建設段階で 36%（315 億円）、運用段階で 64%（561 億円）となった。生産誘発額が発生する場所を見ると、地域内は 87.8 億円と限定的になり、地域外に大きな経済効果が流出している結果となった。製造・建設段階では地域内企業が現状で実施できる工事が限られ、運用段階では発電所のメンテナンスを地域外の企業に委託していることが影響している。

次に、製造・建設段階の結果について詳しく示す。地域内の効果は 84.1 億円となり、投資（直接効果）は 47.8 億円であったので投資対効果は 1.76 倍となった。地域内の上流段階での生産誘発額（間接効果）の結果を 396 部門レベルで図 1 に示す。図中では上位 20 部門を載せており、物品賃貸業部門や土木建築サービス部門で波及額が大きくなった。地域内では主に土木関連の工事を行っており、工事車両のレンタルや工事前

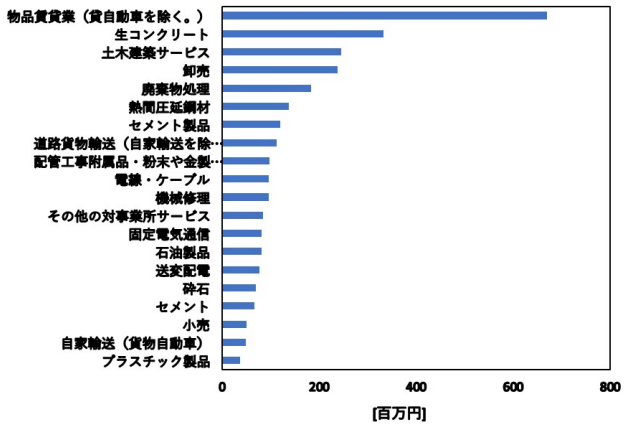


図 1 製造・建設段階における地域内間接効果

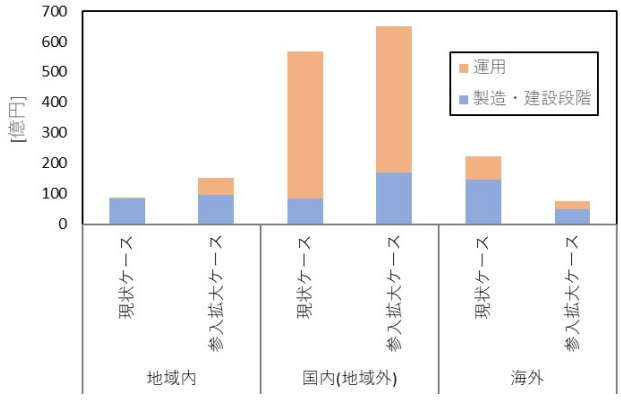


図 2 現状ケースと参入拡大ケースの結果比較

の地質調査による影響でこれらの部門への波及が目立っている。また配管工事付属品部門やセメント製品部門、砕石部門、道路貨物輸送部門といった工事に関連する産業への波及も目立つ結果となった。

3.2 参入拡大ケースでの変化と地域経済への影響

図 2 に現状ケースと参入拡大ケースの変化を示す。地域内の生産誘発額は 87.8 億円から 151 億円と約 1.7 倍に増加した。国内の効果は約 14%増加し、海外の効果は約 66%減少した。地域内においては運用段階での生産誘発額が大きく増加した。これは発電所のメンテナンスを地域内企業が行うようになったためであり、現状ケースでは国内（地域外）に波及していた効果が地域内にもたらされるようになった。国内（地域外）においては、製造・建設段階の効果が大きく増加した。参入拡大ケースではナセル以外の風車関連部品を国内で製造するとしたため、現状ケースで海外に波及していた分が国内（地域外）にシフトした。

ここで、地域への経済効果をさらに高めるためには、地域の得意産業（特化係数や地域内生産額が大きい産業）に最大の経済波及をもたらすことが重要である。そのような産業への波及が地域外の効果となっている場合は、新市場への参入などを通して地域内にその効果を取り込むことが有効である。本研究の対象地域では得意産業の一つとして土木建築サービスがある。しかし、発電所設計や事前調査などのコンサルティング業務を地域外の企業が担っているため、当該産業への波及が地域外にもたらされる結果となっている。よって、地域内の土木建築サービス企業が風力発電関連事業を請け負うことができるよう新事業への進出を支援するなど、地域内企業の風力発電サプライチェーン参入を促進する施策が求められる。

4. 結言

本研究では、将来の関連産業立地の変化を考慮して、陸上風力発電導入が地域へもたらす経済効果を定量的に明らかにした。今後は国内のほかの地域でも推計を行い、地域ごとの効果を比較しながら、最適な地域脱炭素政策の実行につなげることが求められる。

引用文献

1) Moriizumi, Y.; Hondo, H.: Jpn. Inst. Energy, 102(1), 1-18(2023)

謝辞

本研究は、JST 低炭素社会実現のための社会シナリオ研究事業 JPMJCN2302 による支援を受けている。

地域に裨益する再生可能エネルギー電気の利用に向けて：2015 年地域間次世代エネルギーシステム分析用産業連関表による

Towards the use of renewable energy that benefits the region: Based on the 2015 Inter-Regional Input-Output Table for Analysis of Next-Generation Energy Systems

○鷲津明由*[1)]、板明果[2)]
Ayu Washizu, Sayaka Ita
1) 早稲田大学, 2) 東北学院大学
*washizu@ waseda.jp

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現と地域の環境・社会・経済の統合的発展に向けて，地域に裨益する方法で再生可能エネルギーを使用することが求められるようになっている。その中で 2015 年地域間次世代エネルギーシステム分析用産業連関表(地域間 IONGES)を開発した。再エネ生産活動における地域誘発効果，再エネの地産地消の程度等を俯瞰的に評価することで，地域に裨益する再生可能エネルギー電気の利用に向けて必要な政策の方向性を考察する。

2. 研究の背景と方法

2.1 研究の背景

図 1 は，本研究が目指す，将来のカーボンニュートラルなエネルギーシステムの青写真である．日本の沿岸部には，大規模な人口と経済活動が集積する大都市がある．沿岸部には，技術的に脱炭素が難しい製造業も多く立地している．このような沿岸部の大都市地域では，周辺地域に存在する再エネ (主として太陽光発電) を最大限活用したとしても，それだけでカーボンニュートラルを達成することは難しく，エネルギー・産業技術の根本的なパラダイム転換が必要である．また，大都市の徹底した省エネには，高度に制御されたスマートなエネルギーマネジメントシステムの構築が不可欠である．これらの技術転換はまずは工学的なイノベーションの進展を待たねばならず，一定の移行期間を要する．

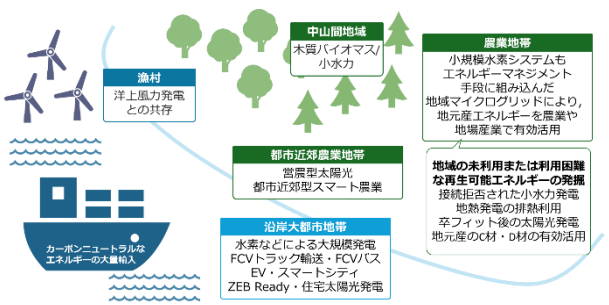


図 1 カーボンニュートラルなエネルギーシステム

大都市に比べ，農山漁村には再エネ資源が豊富に存在する一方，エネルギー需要が限られている．したがってこれらの地域では，地域の再エネ資源を活用したカーボンニュートラルの達成を，早期に実現可能である．そして農山漁村の面的広がりは大きいことから，それらの地域におけるカーボンニュートラルの定着が，日本全体の脱炭素化に与える影響も大きい．しかし，農山漁村では，地域の活性化という喫緊の社会的課題があることから，環境・社会・経済の三位一体のソーシャル・イノベーションが必要である。

また，2022 年以降は，再エネの主力電源化を推進するために，再エネの活用モデルを競争電源と地域活用電源に大別し，前者には FIP(市場価格に一定のプレミアムを交付する)制度を，後者には一定の地域活用要件を課した上で FIT 制度を適用するというように制度が変更された。つまり，同じ再エネでも，その果たす役割について区別がされるようになった。

このような背景の中で，地域の再エネ導入効果を，再エネの役割とともに分析手法として，地域間 IONGES 開発の必要性がある。

2.2 2015 年地域間次世代エネルギーシステム分析用産業連関表

図 2 は地域間 IONGES の概念図である。地域分類は，経済産業省の 9 地域の経済産業局が管轄する都道府県を集計している。

		北海道	東北	・・・	沖縄	最終需要	国内総生産額
		部門1・・・部門n	部門1・・・部門n		部門1・・・部門n		
北海道	部門1 ・ ・ 部門n						
東北	部門1 ・ ・ 部門n						
・ ・							
沖縄	部門1 ・ ・ 部門n						
付加価値							
国内総生産額							

図 2 地域間 IONGES の概念図

図 2 はまず，2015 年の都道府県表を積み上げることで 9 地域間産業連関表の作成を行い，次に 2015 年版 IONGES(想定表)[1]の再エネ関連部門を 9 地域分割してそれに組み込むことで作成した。

9 地域間表の作成手順は文献 2)と 3)と同じだが，その概略は次のとおりである。都道府県表の部門概念を統一して競争輸入型非競争移入型表に変更後，各都道府県の域内取引関係はそれぞれを尊重するが，輸出入の都道府県合計が 2011 年の総務省表の値と一致するように，また移出合計と移入合計が一致するように数値を調整する。各都道府県の域内取引表，輸出入額，移出入額を 9 地域に集計後，各地域の移出額を，相手先別に分割することで 9 地域間表を得る。移出額の相手先分割比率は，財部門は 2011 年商品流通調査または貨物流動調査、サービス部門は旅客地域流動調査や各地域の需要構成比に基づく。

IONGES(想定表)の再エネ部門の地域間分割 および地域間送電の在り方については文献 4)の研究結果に基づく。そこでは電気事業者が提出する供給計画に基づく火力機や原子力機と，第 6 次エネルギー基本計画で野心的水準とされた発電電力量を達成可能な再エネの設備容量を想定し，より詳細な調整力必要量の想定のもとで LNGCC の運転を最適化した場合の，地域別の各種発電量や地域間送電量が計算されている。

2.3 分析方法

2015 年版地域間 IONGES(想定表)の輸入を考慮したレオンチェフ逆行列は(1)式の通りである。

$$\mathbf{B} = \left\{\mathbf{I} - \left(\mathbf{A} - \widehat{\mathbf{M}}\mathbf{A}^{*}\right)\right\}^{-1} \qquad (1)$$

ただし$\mathbf{A}^{*} = \left[a_{ij}^{*gh}\right]$ h s 地域内投入係数行列($a_{ij}^{*gh} = a_{ij}^{gh}$ when g=h and $a_{ij}^{*gh} = 0$ when g≠h)，$\mathbf{B} = \left[b_{ij}^{gh}\right]$は輸入を考慮したレオンチェフ逆行列($g = 1,\cdots,9, h = 1,\cdots,9, j = 1,\cdots 100, i = 1,\cdots 100$)であり，$\mathbf{I}$ は単位行列，$\mathbf{A}$ は地域間 IONGES の投入係数行列，$\widehat{\mathbf{M}}$ は輸入係数行列を示す。

(1)式を用いて地域別部門別最終需要(国内最終需要と輸出の合計)が，自地域および他地域に誘発する生産額は(2)式で計算される。

$$\mathbf{X} = \left\{\mathbf{I} - \left(\mathbf{A} - \widehat{\mathbf{M}}\mathbf{A}^{*}\right)\right\}^{-1}\left\{\left(\mathbf{I} - \widehat{\mathbf{M}}\right)\boldsymbol{F} + \boldsymbol{EX}\right\} \qquad (2)$$

ここで，$\boldsymbol{F}$は各地域の最終需要を要素とするベクトル，$\boldsymbol{EX}$ は各地域の輸出需要を要素とするベクトルを示す。(2) 式の計算に用いた最終需要ベクトルのうち g 地域産の財に対する最終需要のみを要素とし，他地域産の財に対する最終需要をゼロとしたベクトルを，$\boldsymbol{Fg}$と$\boldsymbol{EXg}$とおく。

$$\mathbf{Xg} = \left\{\mathbf{I} - \left(\mathbf{A} - \widehat{\mathbf{M}}\mathbf{A}^{*}\right)\right\}^{-1}\left\{\left(\mathbf{I} - \widehat{\mathbf{M}}\right)\boldsymbol{Fg} + \boldsymbol{EXg}\right\} \qquad (3)$$

(1)～(3)の式を用いて以下のリサーチクエスチョンに関する指標を作成した。

RQ1. 各地域の再エネ生産活動における地域活用度はどの程度か？（例えば「地域活用電源」とされる木質バイオマス発電の地域への誘発効果は十分に大きいと言えるのか？

RQ2. 各地域財生産に直接間接に必要とされる電力(とりわけ再エネ電力)需要における，地元産電力(とりわけ地元産再エネ電力)の活用は進んでいるか？

RQ3. 再エネの地産地消が達成されているか？（最終需要全体がある地域の再エネにもたらす誘発効果のうち，同地域産の最終需要がもたらす誘発効果の割合はどの程度高いか？）

3. 分析結果

RQ2 についての結果を図 3 に示す。再エネ電力の地元生産活動への貢献率は一般の事業用電力より高い。

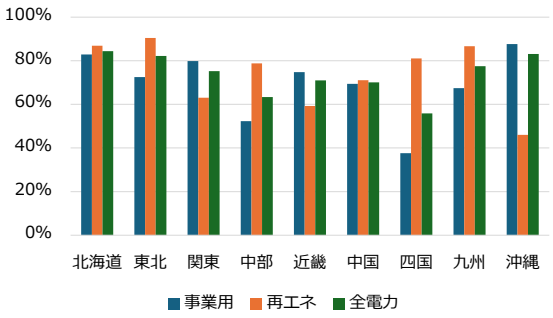


図 3　各地域財生産に電力需要に占める地元産電力の割合

4. おわりに

本研究では 2015 年地域間 IONGES を開発し，再エネ生産活動における地域誘発効果，再エネの地産地消の程度等を俯瞰的に評価した。

5. 引用文献

1) 次世代科学技術経済分析研究所ウェブページ：https://washizu.w.waseda.jp/table.html
2) 鷲津明由，板明果：環境科学会誌 Vol.36 No.4, (2023) , pp.145-159
3) 新井園枝，鷲津明由：2015 年再生可能エネルギー分析用非競争移入競争輸入型地域間産業連関表作成方法について，経済産業統計協会 経済統計研究，第 51 巻Ⅳ号，(2024)，pp.24-59
4) 矢部 邦明，林 泰弘：電気学会論文誌 B，Vol.144 No.1,(2024)， pp.5-16

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 10:40 ~ 12:00 E会場：2321中講義室（3F）

[1-E2] 鉄鋼

座長：武山 健太郎 (東京大学)

10:40 ~ 11:00

[1-E2-01]

RCOTモデルを用いた国別製鉄技術の最適選択

*今田 青冶[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

11:00 ~ 11:20

[1-E2-02]

削減実績量を反映した鉄鋼製品とカーボンフットプリント

*礒原 豊司雄[1]、堂野前 等[1]、安尾 暁彦[1]、鷲見 郁宏[2]、渡壁 史朗[2]、鈴木 善継[2]、高椋 規彰[3]、田村 潤一[4]、川又 広実[4]、青木 宗太[4] (1. 日本製鉄株式会社、2. JFEスチール株式会社、3. 株式会社神戸製鋼所、4. 一般社団法人日本鉄鋼連盟)

11:20 ~ 11:40

[1-E2-03]

化学組成の推定に向けた画像解析に要求される二次資源中の不純物検出モデルの性能評価

*留永 雄星[1]、田島 圭二郎[2]、醍醐 市朗[1] (1. 東京大学、2. 株式会社EVERSTEEL)

11:40 ~ 12:00

[1-E2-04]

要求材料特性による制約を考慮した鉄リサイクルにおけるCu濃化モデルの構築

*八巻 悠太[1]、諸星 未莉[1]、玉城 わかな[1]、醍醐 市朗[1] (1. 東京大学)

©日本LCA学会

RCOT モデルを用いた国別製鉄技術の最適選択

Optimal Selection of Ironmaking Technology by Country Using RCOT Model

○今田青冶*[1)]、加河茂美[2)]
Imada Seiya, Shigemi Kagawa
1) 九州大学 経済学府, 2) 九州大学 経済学研究院
* imada.seiya.104@s.kyushu-u.ac.jp

1. 背景

鉄鋼部門は、住宅建設や自動車・自転車などの耐久消費財の製造において重要な中間財を生産しており、人々の生活を支える基盤となる重要な部門である。また、鉄鋼部門への需要は、2024 年から 2050 年にかけて 25%増加すると予測されている[1)]。そのため、鉄鋼部門は世界経済において極めて重要な役割を果たしている。しかし、当該部門の直接 CO_2 排出量は 2020 年に 26 億トンに達し、これは世界全体の CO_2 排出量の 7%を占めるとされている[2)]。さらに、2050 年までに鉄鋼部門のカーボンニュートラルを達成するためには、2030 年までに直接 CO_2 排出量を 25%、直接 CO_2 排出原単位を年間 3%削減する必要があることが明らかになっている[3)]。

加えて、先行研究では、鉄鋼製品の製造がサプライチェーン全体を通じて他部門に対しても環境負荷を与えていることが指摘されている。例えば、Imada *et al.* (2024)[4)]は、日本の産業連関表を用いて、日本国内の木造住宅 1 軒のカーボンフットプリントの 12%を銑鉄部門が占めていることを明らかにした。一方、Imada *et al.* (2024)が日本国内の経済活動に焦点を当てたのに対し、国際貿易に焦点を当てた研究として Peng *et al.* (2018) がある。Peng *et al.* (2018)は、世界多地域産業連関表（GMRIO）を用い、中国国外の家計需要および固定資本需要に起因する中国鉄鋼部門由来の CO_2 排出量が、中国鉄鋼部門の総 CO_2 排出量のそれぞれ 3.4%および 3.0%を占めていることを示した。しかし、Peng *et al.* (2018)が使用した GMRIO においては、粗鋼および鉄鋼製品が単一のセクターとして集約されている。

鉄鋼部門には主要な製鉄方法として高炉法と電炉法の 2 種類があり、これらはそれぞれ異なる原材料（高炉法 : 鉄鉱石、電炉法 : 鉄スクラップ）、燃料（高炉法 : コークス、電炉法 : 電力）、および用途（高炉法 : 自動車、電炉法 : 建設材料）を用いており、サプライチェーン構造や主流とされる製鉄方法も国ごとに異なる。このような背景を踏まえ、本研究では、TransitionZero 社が提供する The Global Steel Cost Tracker (GSCT)[5)]を基に、GMRIO の 1 つである GLORIA[6) 7)]に記載されている鉄鋼部門を、中国、インド、日本、韓国、ロシア、アメリカの 6 か国において銑鉄部門、転炉部門、電炉部門、鉄鋼製品部門へと拡張する。

2. 分析手法とデータ

2.1. 拡張対象

本研究は、2023 年における世界の鉄鋼生産量上位 6 カ国（中国、インド、日本、アメリカ、ロシア、韓国）を対象にデータの拡張を行う。中国は世界の鉄鋼総生産量の 54%を占めており、2 番目に生産量の多いインドの約 8 倍の生産を行っている。

2.2. 使用データ

本研究では、164 か国、120 部門で構成される GMRIO である GLORIA の 2021 年データを用いた。また、GLORIA の鉄鋼部門を銑鉄部門、転炉部門、電炉部門、鉄鋼製品部門に拡張するため、以下のデータを使用した：

①:The World Steel Association が提供する世界の鉄鋼生産量データおよび各国の高炉-転炉（BF-BOF）と電気炉（EAF）の比率[8)]。

②:TransitionZero 社が提供する The Global Steel Cost Tracker (GSCT)。GSCT は、BF-BOF と EAF の各製鉄方法における工場レベルの鉄鋼生産コストに関するデータを含み、原料、エネルギー、労働、その他のコストに分類されている。

③:鉄鋼部門が銑鉄、転炉、電炉、鉄鋼製品に細分化されている 2015 年の日本の産業連関表[9)]。

2.3. 鉄鋼部門の拡張

本研究では、GLORIA MRIO に記載されている対象国の鉄鋼部門の列ベクトルおよび行ベクトルを銑鉄、転炉、電炉、鉄鋼製品に分割することで、鉄鋼部門に特化した GMRIO 表を作成した。以下はその手順である。

①:粗鋼部門と鉄鋼製品部門への拡張

各国の鉄鋼部門の生産プロセスの違いを反映するため、GLORIA の「鉄鋼部門」を「粗鋼部門」と「鉄鋼製品部門」に拡張した。日本の産業連関表を基に、粗鋼部門と鉄鋼製品部門の投入比率を推計し、拡張を実

施した。

②:BF-BOF と EAF への拡張

拡張した「粗鋼部門」を、各国の BF-BOF と EAF の比率を掛け合わせて分割した。その際、GSCT に記載されている国別・製鉄方法別の生産コストデータ（原料、エネルギーなど）を使用して、各中間財の投入比率を推計し、投入構造を反映させた。

③:銑鉄部門と転炉部門への拡張

「BF-BOF」部門を「銑鉄」と「転炉」に拡張するために、日本の産業連関表に基づく銑鉄部門および転炉部門の投入比率を「BF-BOF」部門に適用した。これにより、銑鉄部門と転炉部門の投入構造を推計した。

④:行方向の拡張

同様の手順を用いて、鉄鋼部門の行ベクトルも拡張した。

4. 結果

図 1 は、2021 年における中国と日本の銑鉄部門（#77）の中間投入に占める国内部門割合の一部を抜粋した結果を表している。この結果から、中国の場合、鉄鉱石の投入割合が 51.5 %と最も多いが、日本の場合では、7.7 %になっている。これは日本が、銑鉄の原料である鉄鉱石のほぼすべてを輸入に頼っているため、中国と比べると極めて小さい割合になっている。輸入依存の影響は、コークスの原料である石炭にも出ており、中国の場合は、自国の石炭部門が 6.8 %を占めているのに対して、日本はほとんど 0 %になっている。

部門コード	部門名	中国 銑鉄	日本 銑鉄
24	硬質石炭	6.8%	0.0%
25	褐炭と泥炭	0.0%	0.0%
26	石油採掘	0.0%	0.0%
27	ガス採掘	0.0%	1.5%
28	鉄鉱石	51.5%	7.7%
62	コークス炉製品	34.4%	84.8%
67	基礎無機化学品	0.1%	1.8%
75	セメント、石灰、石膏製品	0.1%	0.0%
76	その他の非金属鉱物製品（n.e.c.	0.2%	3.8%
77	銑鉄	0.1%	0.0%
78	転炉	0.0%	0.0%
79	電炉	0.0%	0.2%
80	鉄鋼製品	0.0%	0.0%
96	電力	6.8%	0.1%

図 1 中国と日本の銑鉄部門（#77）の中間投入に占める国内部門割合

図 2 は、2021 年における中国と日本の電炉部門（#79）の中間投入に占める国内部門割合の一部を抜粋した結果を表している。この結果から、中国は石炭部門（#24）が約 60 %と最も大きい割合を占めているのに対して、日本は電炉部門（#79）が約 35 %と最も大きな割合を占めている。この違いは、中国と日本の電炉の原料に起因する。中国の場合、電炉の原料は鉄スクラップに加えて、直接還元鉄（DRI）を使用しているためである。この際、還元反応を促進するために石炭やコークスを使う可能性がある。一方で、日本の場合、電炉の原料のほとんどが鉄スクラップであるため、石炭ではなく、電炉部門が大きな排出割合を占めている。本会では、GMRIO の利点の一つである各国の鉄鋼部門の輸入構造も考慮し、製鉄方法を考慮したサプライチェーン構造を明らかにする。

部門コード	部門名	中国 電炉	日本 電炉
24	硬質石炭	59.7%	0.0%
25	褐炭と泥炭	0.0%	0.0%
26	石油採掘	0.0%	0.0%
27	ガス採掘	0.3%	3.5%
28	鉄鉱石	0.0%	0.0%
62	コークス炉製品	0.0%	0.0%
67	基礎無機化学品	0.9%	16.8%
75	セメント、石灰、石膏製品	0.3%	0.0%
76	その他の非金属鉱物製品（n.e.c.	0.4%	16.3%
77	銑鉄	14.9%	28.5%
78	転炉	0.0%	0.0%
79	電炉	5.8%	34.7%
80	鉄鋼製品	0.0%	0.0%
96	電力	17.7%	0.3%

図 2 中国と日本の銑鉄部門（#79）の中間投入に占める国内部門割合

5. 参考文献

1. SMS Group, 2024. The Steel Industry in 2050. https://www.sms-group.com/insights/all-insights/the-steel-industry-in-2050.
2. IEA, 2020. Iron and Steel Technology Roadmap. https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap.
3. IEA, 2023. Breakthrough Agenda Report 2023. https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2023/steel
4. Imada *et al.* (2024), *Journal of Environmental Management,* **353**, 120151.
5. TansitionZero, 2022, Global steel production costs. https://www.transitionzero.org/insights/global-steel-production-costs
6. Lenzen *et al.* (2017), The Global MRIO Lab-charting the world economy. *Economic Systems Research*, **29**, 158-186.
7. Lenzen *et al.* (2021), Implementing the Material Footprint to measure progress towards SDGs 8 and 12. *Nature Sustainability*.
8. The World Steel Association (2024), World Steel in Figures 2024. https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/
9. 総務省（2019）産業連関表 https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/

1-E2-02 削減実績量を反映した鉄鋼製品のカーボンフットプリント

Carbon footprint of steel products with allocated reduced emissions

○礒原 豊司雄*[1)]、堂野前 等[1)]、安尾 暁彦[1)]、鷲見 郁宏[2)]、渡壁 史朗[2)]、鈴木 善継[2)]、高椋 規彰[3)]、田村 潤一[4)]、川又 広実[4)]、青木 宗太[4)]

Toshio Isohara, Hitoshi Dohnomae, Akihiko Yasuo, Ikuhiro Sumi, Shiro Watakabe, Yoshitsugu Suzuki, Noriaki Takamuku, Junichi Tamura, Hiromi Kawamata, Souta Aoki

1) 日本製鉄株式会社, 2) JFE スチール株式会社, 3) 株式会社神戸製鋼所, 4) 一般社団法人日本鉄鋼連盟

* isohara.4hq.toshio@jp.nipponsteel.com

1. 鉄鋼の低炭素化とグリーンスチール

鉄鋼産業では、2050 年のカーボンニュートラルに向けて、鉄鋼製造の低炭素化に関する各社様々な取組を行っているが、鉄鋼の低炭素化は容易ではなく、鉄鋼は hard-to-abate 産業の一つと言われている。鉄鋼は鉄鉱石を還元して製造されるが、還元材として現在は石炭等の炭化水素が用いられている。還元材を水素に変える研究開発が進められているが、その工業化は容易ではない。また、スクラップの電炉での利用も進んでいるが、高級鋼をスクラップ電炉で製造するのも同じく容易ではない。これらの実機化は非常に大きな投資を伴うにも関わらず、プロセス毎に徐々に段階的に進むものの、そこから得られる削減実績量の鉄鋼製品のカーボンフットプリント（CFP）低減への反映は、移行初期はわずかであり、製品価値として見えにくく評価もされにくい。これは、低炭素化への更なる投資に繋がらず、ひいてはカーボンニュートラルへの移行を妨げかねない。

そこで、削減実績量を特定の「低炭素鉄鋼製品」に集中的に反映させることにより、削減実績量を当該製品で可視化し、当該製品購入者の企業の排出や製品の LCA に反映できる仕組み作りが急務になっている。

2. マスバランス方式によるカーボンフットプリントへの反映

日本鉄鋼連盟では、企業における削減実績量をプールし、それを ISO 22095 規格に定めるマスバランスモデルに類似した手法で製品の排出量に割当て、それを購入した需要家のスコープ 3 上流の排出削減に使用できることを第三者認証を付けて保証するしくみに関する「マスバランス方式を適用したグリーンスチールに関するガイドライン」を 2023 年 10 月に公開し、世界鉄鋼協会（worldsteel）はこれを元に worldsteel guidelines for GHG chain of custody approaches in the steel industry を 2024 年 11 月に発表した。これらのガイドラインでは、既製品のカーボンフットプリントに別途証書を発行することにより低カーボンフットプリントとする、証書式の低カーボンフットプリントへの反映の指針を示している。

これらのガイドラインでは、削減実績量の算定の要件として、追加性のある削減とするなど、削減実績量算定の定義を明確化した。一方、カーボンフットプリントの証書による変更（読み替え）は、既存の規格類には明示的には示されておらず、根拠規格が不明確という課題が残っている。

3. アロケーションによるカーボンフットプリントへの反映

一方、LCA の基本規格である ISO 14044 やカーボンフットプリントに関する ISO 14067 規格には、LCI や CFP の input、output に関して、co-product における配分（アロケーション）の規定がある。これらによれば、同一製造プロセスで製造した製品を「低炭素鉄鋼製品」と「非低炭素鉄鋼製品」に区別して co-product と考え、CO_2 や GHG 排出量を特定の関係に従い配分することが認められていると考えられる。低炭素鉄鋼製品と非低炭素鉄鋼製品は経済的価値が異なるため、一種の経済的配分の手法とも考えられる。その際に、削減実績量の範囲内で配分を行うことにより、削減実績量を反映した低炭素鉄鋼製品と考えることができる。

このようにして算定された低炭素鉄鋼製品の CFP や LCA は、既存の規格に基づき算定されたものなので、マスバランス方式による CFP におけるような準拠規格の問題を惹起することなく、通常製品と同様に購入者の LCA 算定にも使えると考えられる。

4. アロケーションにおける課題

本研究では、削減実績量を基に、配分により低炭素鉄鋼製品のカーボンフットプリントを算定する際に課題となりうる点について検討を行う。

5. 引用文献

1) 日本鉄鋼連盟, グリーンスチールに関するガイドライン (2023, 2024)
2) worldsteel, worldsteel guidelines for GHG chain of custody approaches in the steel industry (2024)

化学組成の推定に向けた画像解析に要求される二次資源中の不純物検出モデルの性能評価

Performance Evaluation of Impurity Detection Models in Secondary Resources for Chemical Composition Estimation through Image Analysis

○留永雄星*[1)]、田島圭二郎[2)]、醍醐市朗[1)]
Yusei Tomenaga, Keijiro Tajima, Ichiro Daigo
1) 東京大学, 2) 株式会社 EVERSTEEL
* yusei0615@ g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

鉄リサイクルの促進を阻む主要因の一つとして、不純物元素を含む異物の混入による品質低下の問題がある[1)]。鉄スクラップの状態での不純物組成の把握は、許容濃度を満たす鋼材の生産を容易にし、鉄リサイクルの促進につながると期待される。しかし現状では、鉄スクラップの化学組成の観測には溶解が必要であり、大量に流通する鉄スクラップに対してこの方法を適用することは、コストの観点から現実的ではない。このような背景から、深層学習、特にCNN（Convolutional Neural Network）を用いた画像解析技術の応用が注目されている。物体検出モデルを用いることで、鉄スクラップ中の異物の種類､数､大きさなどの情報を取得し、これらの情報から鉄スクラップ全体の化学組成を推定することが期待される。しかし、鉄スクラップには、機械的変形による形状の不規則性、鉄スクラップ同士の重なりによる物体境界の不明瞭化、異物との視覚的類似性、重層化による部分遮蔽などの物理的特性があり、画像認識技術の適用を困難にしている。実用的な精度で化学組成推定を行うには、これらの特性を考慮した上での物体検出モデルの性能向上が必要である。特に、異物種によって不純物組成が異なることから、異物種ごとの検出物体数の推定誤差を最小化することが重要となる。しかしながら、従来研究の多くは鉄スクラップ全体の分類[2)]、また異物全体の検出[3)]といった点に主眼を置いており、個々の異物種への検出特性の十分な検討がなされていない。そこで本研究では、画像解析を用いた実用的な精度を持つ鉄スクラップの化学組成推定システムを構築する際に物体検出モデルへ要求される性能の評価手法を構築することを目的とする。

2. 研究手法

2.1 研究手法概要

物体検出モデルへの要求性能は、モデルを適用した際の異物種ごとの検出物体数により定量的に評価できる。検出物体数(Nd)とモデルの性能指標であるprecision(p：正解予測の割合)およびrecall(r：正解の検出率)を軸とする三次元空間において、図1に示すように、許容できる検出物体数の範囲と実際の変動を考慮することで、要求性能を定量的に表現できると考えられる。本研究では、各異物種に対する物体検出モデルの検出特性を解明し、その検出特性を考慮した検出物体数の分布を明らかにすることとした。

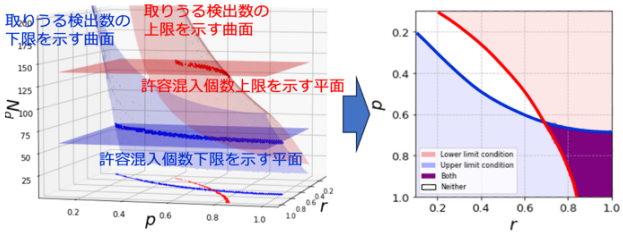


図 1 物体検出モデルへの要求性能評価手法の概要図

2.2 Mask R-CNN の学習と推論の実施

本研究では、物体検出モデルとしてMask R-CNN[4)]を採用した。このモデルは物体検出とインスタンスセグメンテーションを同時に実行可能なフレームワークであり、密集して存在する鉄スクラップ中の異物の個別検出と形状の正確な把握に適している。モデルの学習および推論には、電炉メーカーに搬入される鉄スクラップの荷下ろし工程を撮影した画像データセットを使用した。データセットには、ケーブル、モータ、コンプレッサの3種類の異物に対するアノテーション情報が含まれている。モデルの学習のため、元の大きさの画像のデータセットに加えて、画像を分割したデータセットを作成した。また、可能な限り多くの異物に対する評価を行うため、複数のテスト用データの割り当てパターンでの学習・推論を実施した。

2.3 異物種ごとの特徴と検出特性の分析

異物種ごとの特徴を定量的に把握するため、アノテーションとして付与されたマスク情報とMask R-CNNモデルによって出力されたマスク情報の両方について、色彩と形状の定量的評価を実施した。色彩分析ではHSV色空間を用い、各マスク領域と荷台上の鉄スクラップに対してHSV値の統計量と分布を算出した。形状分析では、マスク面積、縦横比、円形度などの6つ

の特徴量による定量的評価を行った。これらの分析は、アノテーションマスクについては TP と FN に分類した上での比較分析も実施し、推論の結果と FP と出力されたマスクについては定性的な分析も実施した。

2.4 異物種ごとの誤検出物体数分布の分析

本研究では検出物体数の分布特性を理解する上で特に重要となると考えられる、FP 数の確率分布に焦点を当てて分析を行った。異物種ごとの FP 数の確率分布を推定するため、異物のアノテーションを含まない鉄スクラップ画像に対して推論を実行し、各荷台における FP の信頼度スコアを取得した。これにより、物体検出モデルの実運用時における異物種別の検出物体数の分布の導出、分析を行った。

3. 結果と考察

3.1 Mask R-CNN の学習と推論の実施

作成したデータセットを用いて Mask R-CNN モデルの転移学習を実施し、各データセットの検出性能を比較した。異物種別の評価では、ケーブルとモータでは分割ありのデータセットで性能が向上した一方、コンプレッサでは若干の性能低下が見られた。平均的な性能としては分割ありのデータセットを用いたモデルの方が優れており、以降の分析ではこちらを利用した。

3.2 異物種ごとの特徴と検出特性の分析

色彩と形状の両面からの定量的な分析の結果、異物種ごとに特徴的なパターンが明らかとなった。ケーブルは高い色相のエントロピーと明度を示し、形状面では不規則で細長い特徴を持つことが確認された。この結果から、モデルはケーブル特有の細長く不規則な形状特性を適切に学習していると考えられる。モータは最も規則的な特徴を示し、色彩特性は鋼材と最も類似していた。形状特性では円形に近い形状が特徴的であり、特に単純な形状を持つ物体ほど検出率が向上する傾向が見られた。コンプレッサは最も低い明度を示し、形状特性はモータと類似しながらも、より広い分布範囲を示した。特に鋼材に近い明度を持つ個体で検出率が低下する傾向が見られ、明度の差異が検出性能に強く影響することが明らかとなった。

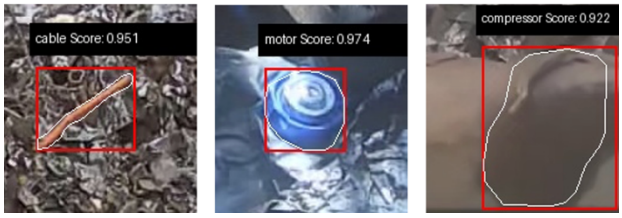


図 2 Mask R-CNN による異物種ごとの誤検出事例

3.3 異物種ごとの誤検出物体数分布の分析

異物種ごとの FP 数の分布を分析した結果、その分布特性は異物種によって異なり、特にコンプレッサは他の 2 カテゴリーと比較して狭い分布範囲を示した。この現象は、鋼材の色彩や積層構造による影の影響で生じる低明度領域が各荷台に一定割合で存在することに起因すると考えられる。一方、ケーブルやモータの誤検出は、特定の形状特徴を持つ鋼材が存在する場合に集中して発生するため、荷台間での FP 数の差異が大きくなった。また、低い FP 数の期待値域では各カテゴリーで異なる分布特性を示す一方、FP 数の期待値増加に伴い類似した分布パターンへと収束する傾向が見られた。これは、信頼度スコアの閾値低下により、各カテゴリーの検出器がより一般的な鋼材の特徴も検出対象として認識するようになったためと考えられる。

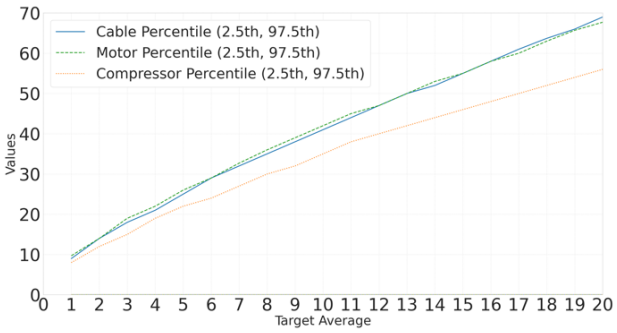


図 3 異物種ごとの FP 期待値に対する検出物体数の変動範囲

4. まとめ

本研究では、異物種ごとの検出特性と検出物体数の分布を解析することにより、鉄スクラップの化学組成推定における物体検出モデルへの要求性能を評価する手法を構築した。解析の結果、異物種の視覚的特徴と鉄スクラップの物理的構造に起因して、異物種ごとに、誤検出物体数の確率分布が異なることを明らかにした。これらの知見は、化学組成推定システムの実用化に向けた要求性能の定量化に貢献するものである。

引用文献

1) Daigo, I., Tajima, K., Hayashi, H., Panasiuk, D., Takeyama, K., Ono, H., Kobayashi, Y., Nakajima, K., Hoshino, T.: ISIJ Int., 61(1), (2021), pp.498-505
2) dos Santos, P. H., Santos, V. de C., Luz, E. J. da S.: "Towards Robust Ferrous Scrap Material Classification with Deep Learning and Conformal Prediction", arXiv, (2024), arXiv:2404.13002
3) Koinig, G., Kuhn, N., Fink, T., Lorber, B., Radmann, Y., Martinelli, W., Tischberger-Aldrian, A.: Waste Manag., 190, (2024), pp.520-530
4) He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., Girshick, R.: "IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)", Venice, (2017), pp.2961-2969

Supporting Information

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 14:40 ~ 16:00 E会場：2321中講義室（3F）

[1-E3] 建築（１）

座長：加用 千裕 (東京農工大学)

14:40 ~ 15:00

[1-E3-01]

実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析
　マルチクライテリア評価結果に基づくアップフロントとエンボディドの比較

*田中 洋介[1]、鈴木 好幸[1]、小林 謙介[2]、梶谷 凌聖[2]、三河 大志[2]、矢澤 華英[2] (1. 株式会社安藤・間、2. 県立広島大学)

15:00 ~ 15:20

[1-E3-02]

実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析
~マルチクライテリア評価結果に基づく構造種別の比較~

*鈴木 好幸[1]、田中 洋介[1]、小林 謙介[2]、梶谷 凌聖[2]、三河 大志[2]、矢澤 華英[2] (1. 株式会社安藤・間、2. 県立広島大学)

15:20 ~ 15:40

[1-E3-03]

実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析
～IDEA Ver.3.4を用いたマルチクライテリアでの評価に基づく建物用途別の支配的要因の分析～

*梶谷 凌聖[1]、三河 大志[1]、矢澤 華英[1]、小林 謙介[1]、鈴木 好幸[2]、田中 洋介[2] (1. 県立広島大学、2. 安藤ハザマ)

15:40 ~ 16:00

[1-E3-04]

実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析
－IDEA Ver.3.4を用いたマルチクライテリアでの評価に基づく投入資材別の支配的要因の試算－

*三河 大志[1]、梶谷 凌聖[1]、矢澤 華英[1]、小林 謙介[1]、鈴木 好幸[2]、田中 洋介[2] (1. 県立広島大学、2. 安藤ハザマ)

©日本LCA学会

実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析

～マルチクライテリア評価結果に基づく、新築時および使用・解体時のプロセスの影響分析～

Study on Environmental Impact Analysis of Buildings Based on Analysis of Actual Buildings
Multi-criteria Analysis Based on Results of New Construction and Use and Demolition

○田中洋介*[1)]、鈴木好幸[1)]、小林謙介[2)]、梶谷凌聖[2)]、三河大志[2)]、矢澤華英[2)]
Yosuke Tanaka, Yoshiyuki Suzuki, Kensuke Kobayashi
1) 安藤ハザマ, 2) 県立広島大学
* tanaka.yosuke@ad-hzm.co.jp

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向けた世界的な潮流を受け、建築分野においても CO_2 や温室効果ガス（GHG）の影響を算定する動きが広がりつつある。

建築物の環境負荷削減策を検討する上では、環境影響を定常的に評価する LCA 手法が有効である。LCA に関する規格には、ISO14040（原則及び枠組み）、ISO14044（要求事項および指針）があり、関連規格としてタイプⅢ環境宣言（Environmental Product Declaration : EPD）がある。建築製品の環境宣言に関する ISO21930 では、地球温暖化、オゾン層破壊、富栄養化、酸性化、光化学オキシダントなどの影響領域の LCA 実施義務があるが、建築物においてこの規格に則って LCA が実施された事例は少ない。

そこで本稿では、ISO21930 規格に則って評価可能な IDEA Ver.3.4.1 を用いて約 100 件の実建物の LCA を実施し、新築時および使用・解体時のプロセスに着目した分析結果について報告する。

2. 実建物の LCA 実施手順

2.1 評価対象物件

表 1 に、今回の分析対象の実建物の概要を示す。著者らが過去に LCA を実施した約 120 件の母データのうち、IDEA Ver.3.4.1 による再集計が完了し、かつ特殊用途施設や未実施物件、算定根拠の不具合を排除した計 95 件を分析対象とした。

2.2 算定方法

算定は一般社団法人サステナブル経営推進機構が運営管理する「SuMPO 環境ラベルプログラム」において、「建築物」を対象とした PCR（PA-241000-AA-09）[1)]に基づいて実施した。

対象プロセスは、資材製造時(A1 : 原材料の調達、A2 : 工場への輸送、A3 : 製造)、建設時(A4 : 現場への輸送、A5 : 施工)、使用時（B3 : 修繕、B4 : 更新）、解体時（C1 : 解体撤去、C2 : 廃棄物の輸送、C3 : 中間処理、C4 : 廃棄)とし、本報告では A1-5 までを新築時、B3・4 および C1-4 を使用・解体時と表現して報告する（図 S1）。

表 1　評価対象物件の概要

用途	構造形式※			計
	S 造	RC 造	複合	
物流倉庫	11	1	7	19
生産工場	19	3	1	23
事務・庁舎	11	3	4	18
学校	3	4	3	10
病院	4	7	3	14
ホテル・マンション	5	5	1	11
計	53	23	19	95

※S 造：鉄骨造，RC 造：鉄筋コンクリート造，
複合：SRC，RC+S，RC+S，SRC+S などの複合構造

対象とした工種は，建築工事における躯体および仕上げとし仮設・設備・外構・附帯工事は対象外とした。

各物件に投入される資材種類と数量は実際の積算データから取得し、各プロセスにおいて条件を設定し算定した（表 S1）。

原単位は IDEA Ver.3.4.1 を用いた。算定にあたっては，日本建築学会地球環境委員会 LCA 小委員会 HP で公開されている「IDEA Ver.3.4 用 ツール」[2)]を用いた。積算で示される単位と IDEA の単位が一致しない項目については、素材・寸法情報等を基に適宜単位換算を行った。

3. 算定結果

3.1 特性化結果

評価対象全件の新築時および使用・解体時の 5 つの特性化（地球温暖化、オゾン層破壊、富栄養化、酸性化、光化学オキシダント）と、延床面積との相関関係を図 1 に示す。散布図中の青色が A1-5 の新築時、オレンジ色が B3・4 および C1-4 を使用・解体時を示している。それぞれ切片を 0 とした場合の回帰直線 $Y = aX$（Y 目的変数　a 傾き　X 延床面積）を求めた。

気候変動においては、相関の強さを示す R2 値は新

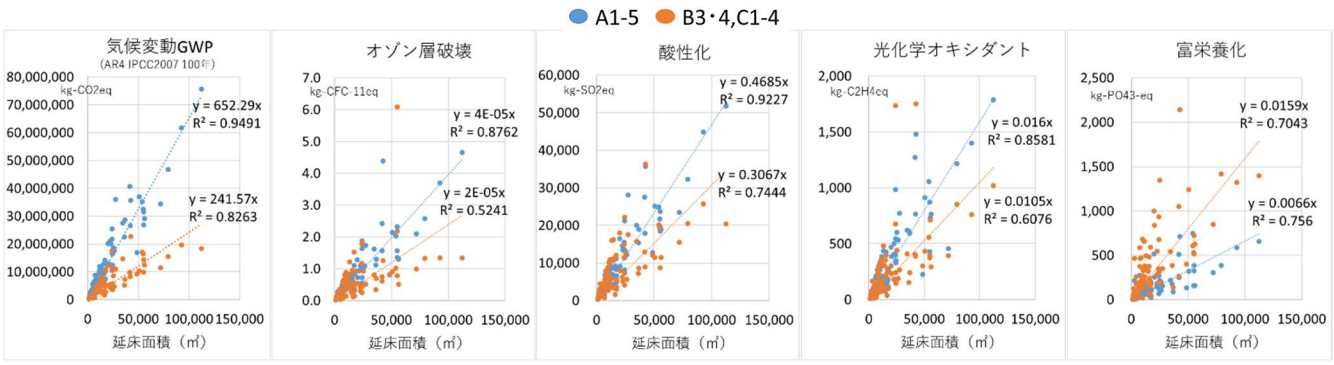


図 1　新築時および使用・解体時における、各特性化と延床面積の相関関係

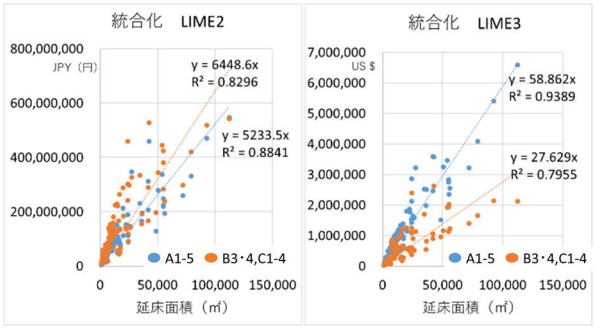


図 2　統合化と延床面積との相関関係

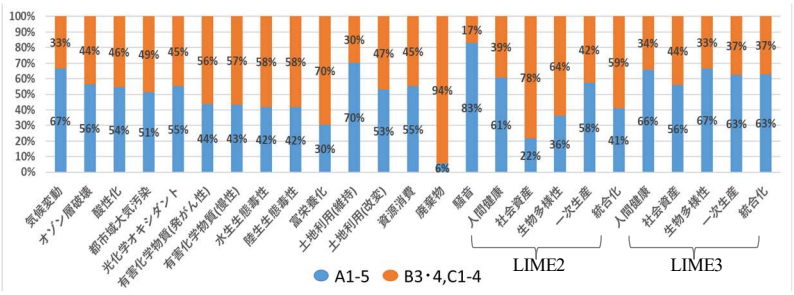


図 3　各特性化と被害評価の新築時,使用・解体時の影響比率

築時で 0.95、使用・解体時で 0.83 となり共に強い相関を示した。傾き a は延べ床面積あたりの気候変動 kg-CO2eq を示す値となるが、新築時が 652kg-CO2eq、使用・解体時が 242kg-CO2eq となった。

一方で、オゾン層破壊、酸性化、光化学オキシダントの R2 値は、新築時の相関係数がそれぞれ 0.88、0.92、0.86 となり気候変動より相関は弱く、使用・解体時についてはさらに相関が弱いことが確認できた。これには合板やプラスチック製品、アルミニウム製品の資材投入量が多い物件が影響している。

富栄養化においては、R2 値は新築時および使用・解体時がそれぞれ 0.7 程度となり他の特性化よりも弱い相関が確認できた。また、分布の傾向から新築時よりも、使用・解体時に占める割合が大きい結果となった。

3.2 統合化結果

評価対象全件の新築時および使用・解体時の統合化と延床面積との相関関係を図 2 に示す。

左側の LIME2 の結果によると、R2 値は新築時が 0.88、使用・解体時では 0.83 となった。傾き a は延床面積あたりの被害評価額を示す値となるが、新築時 5234 円よりも使用・解体時が 6449 円と高い結果となった。LIME3 の結果によると、インパクト係数の違いの影響を受け、新築時および使用・解体時共に相関と傾きは LIME2 と異なる傾向を示した。

3.3 新築時および使用・解体時の影響比率

各特性化・被害評価の各物件の結果において、今回算定プロセス全体に対しての新築時の割合（%）と、使用・解体時の割合（%）を求め、各特性化および被害評価ごとの単純平均(%)を求めた結果を図 3 に示す。

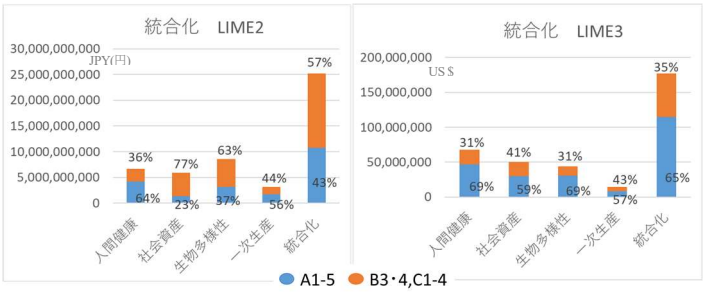


図 4　評価対全件の被害評価の総合計

有害化学物質、水生および陸生生態毒性、富栄養化、廃棄物、LIME2 の社会資産や生物多様性については、使用・解体が新築時の影響を超える割合となった。

3.4 被害評価、統合化の総合計

図 4 に、今回の評価対象全件の被害評価の総合計を示す。LIME2 では生物多様性、LIME3 では人間健康が最も高く、LIME2 においては使用・解体時の影響割合が新築時よりも大きいことが確認できた。

4. まとめ

本報告では, IDEA Ver.3.4.1 を用いて約 100 件の実建物の LCA を実施し、新築時と使用・解体時の傾向をマルチクライテリア視点で分析した。各特性化の傾向をとらえる為の指標として活用されることに期待したい。

引用文献

1) PCR　認定番号 PA-241000-AA-09　対象製品：建築物【第 9 版】<https://ecoleaf-label.jp/pcr/18>,
2) 日本建築学会地球環境委員会 LCA 小委員会 http://news-sv.aij.or.jp/tkankyo/s5/guideline_02.html

Supporting Information

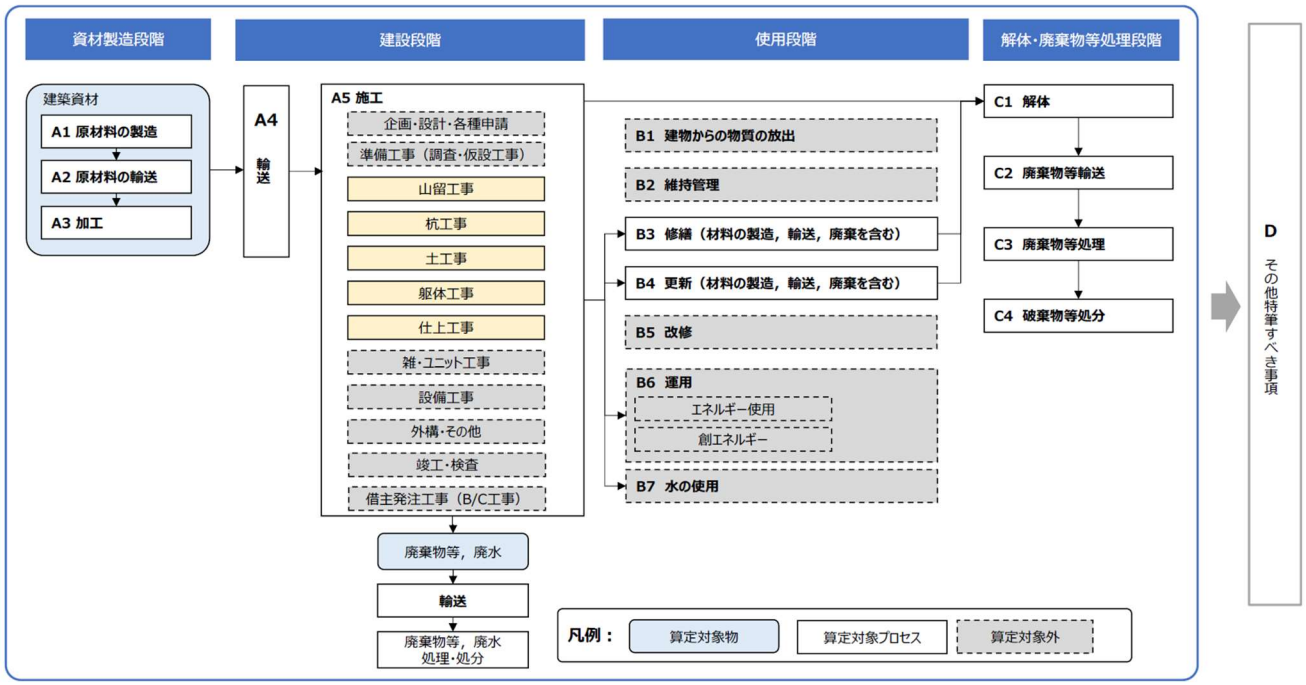


図 S1　算定対象プロセス（建築物 RCR【第 9 版】より）

分類					今回対象	本検討における条件設定	具体的な設定値
A	建設段階	資材製造	A1	原材料の調達	●	実建物の積算データをもとに投入資材データを設定	
			A2	工場への輸送	●		
			A3	製造	●		
		施工	A4	現場への輸送	●	物流センサスをもとに材料別に設定	窯業・土石製品 72km、鉄鋼製品 197km などのように設定。往路は積載率 100%、復路は積載率 0%と設定して計算。
			A5	施工	●	過去実績データ（19 件）をもとに設定	電力：10.19kwh/㎡、灯油：0.4L/㎡ 軽油：13.49L/㎡、A 重油：0.0005MJ/㎡ として計算。
B	使用段階	使用	B1	使用（フロン漏洩等）			
			B2	維持保全			
			B3	修繕	●	建築物のライフサイクルマネジメント用データ集（BELCA）をもとに設定	
			B4	更新・交換	●		
			B5	改修		改修は実施しないと想定	
			B6	エネルギー消費			
			B7	水消費			
C	解体・廃棄段階	解体・廃棄	C1	解体	●	文献値（IDEA の原単位）をもとに解体に伴うエネルギー消費量を抽出し、1 ㎡あたりのエネルギー消費量を設定	
			C2	廃棄物の輸送	●	建設副産物実態調査をもとに廃棄物の種類ごとに輸送距離を設定	コンクリート塊 15.5km、金属くず 23.9km、木くず 27.9km、その他（埋立）26.2km と設定。　往路は積載率 100%、復路は積載率 0%と設定して計算。
			C3	中間処理	●	建設副産物実態調査をもとに資材ごとの廃棄物の分別回収・リサイクル率を設定	分別回収率：コンクリート塊 0.99（路盤材）、金属くず 0.99（金属資源）、木くず 0.9（焼却）、その他（埋立） 0 と設定。石膏ボードのリサイクル率は 50%、合板の再造林率は 100%と設定して計算。
			C4	廃棄	●		
D	捕捉		D	再利用、リサイクル、エネルギー回収による便益と負荷			

図 S2　ISO21930 におけるシステムバウンダリの定義および、今回算定における条件設定

実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析

～マルチクライテリア評価結果に基づく構造種別の比較～

Study on Environmental Impact Analysis of Buildings Based on Analysis of Actual Buildings - Comparison of Structure Type Based on Results of Multi-criteria Analysis -

○鈴木好幸*1)、田中洋介 1)、小林謙介 2)、梶谷凌聖 2)、三河大志 2)、矢澤華英 2)
Yosuke Tanaka, Yoshiyuki Suzuki, Kensuke Kobayashi
1) 安藤ハザマ, 2) 県立広島大学
* suzuki.yoshiyuki@ad-hzm.co.jp

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向けた世界的な潮流を受け、建築分野においても CO_2 や GHG をはじめとする環境負荷物質による環境影響を算定する動きが広がりつつある。建築物の環境負荷削減策を検討する上では、環境影響を定量的に評価する LCA 手法が有効である。特に効果的なのは、構造種別等の諸条件が固まる前の企画・計画検討時の上流段階で環境影響を把握し、それに基づく削減策を設計段階に組み込んでいくことが重要である。そのため、用途や構造種別ごとの環境影響をデータベース化し、精度良く活用できることが望まれる。

そこで本稿では、前報 [1] に続き IDEA Ver.3.4.1 を用いた約 100 件の実建物の LCA を実施し、構造種別の違いに着目した分析結果について報告する。

2. 実建物の LCA 実施手順

2.1 評価対象物件

今回の対象の実建物は、前報 [1] で示した 95 件を分析対象とした。

2.2 算定方法

算定方法も前報と同様であり、対象プロセスは A1-5、B3･4、C1-4 を対象とした。

2.3 分析方法

筆者らの既報告 [2]では、65 件の実建物について資材製造段階（A1-3）について、各用途の延床面積と CO_2 排出量の関係を示した。今回は、前回から 30 件増加した評価対象物件に対し、対象プロセスをエンボディドカーボンと同程度の範囲（A1-5、B3･4、C1-4）に拡張した。評価対象の環境影響は気候変動（IPCC2021GWP 100 年値）とし、さらに LIME2、LIME3 による統合化被害評価の結果も含めて分析を行った。

3. 算定結果

3.1 構造種別と気候変動、統合化の関係

各構造種別の延床面積（m^2）と気候変動の関係を図 S1 に、統合化（LIME2、3）との関係を図 S2 に示す。また、これらの結果に基づき、切片を 0 とした場合の回帰直線（y=ax）の係数 a と決定係数 R^2 を表 1 に示す。各構造種別のサンプル数に差はあるが、いずれも高い相関が認められることから、構造種別毎に延床面積から気候変動、統合化（LIME2、3）の結果をある程度の精度で推計できるものと考えられる。ただし、RC 造をみると、サンプル数 23 件のうち 22 件が延床面積 15000m^2 以下に集まっているが、1 点だけ 72000m^2 と離れたデータがあり、そのデータを除いた場合に係数 a が大きく変わることが分かる。

各構造種別の係数 a をみると、気候変動、統合化（LIME2、3）のいずれも、全データを含めた結果では S 造＞複合＞RC 造の順になっているが、RC 造の 1 データを除くと RC 造＞S 造＞複合となる。当該建物はフル PCa 工法を採用した大規模物件であり、建物規模による影響なのか、フル PCa 工法といった一般的な RC 造とは異なる工法を採用した影響なのか、本検討ではデータ数が不足しているため明らかにできなかった。今後は、さらにデータ数を蓄積したうえで、建物規模や特殊な工法等による影響も含めて詳細に分析していきたい。

3.2 各用途の気候変動、統合化の関係

各用途の気候変動、統合化結果と延床面積（m^2）の

表 1　各構造種別の気候変動、統合化結果と延床面積の関係

環境影響	構造	建物数	係数 a	決定係数 R^2
気候変動 (kg-CO_2eq)	S	53	917	0.91
	RC*	23 (22)	719 (1011)	0.92 (0.94)
	複合	19	848	0.97
LIME2 統合化 (JPY)	S	53	12785	0.84
	RC*	23 (22)	10303 (17679)	0.80 (0.90)
	複合	19	11179	0.91
LIME3 統合化 (US$)	S	53	92	0.9
	RC*	23 (22)	77 (114)	0.89 (0.92)
	複合	19	84	0.94

*:括弧内の数値は延床面積が大きい建物 1 点を除いた結果

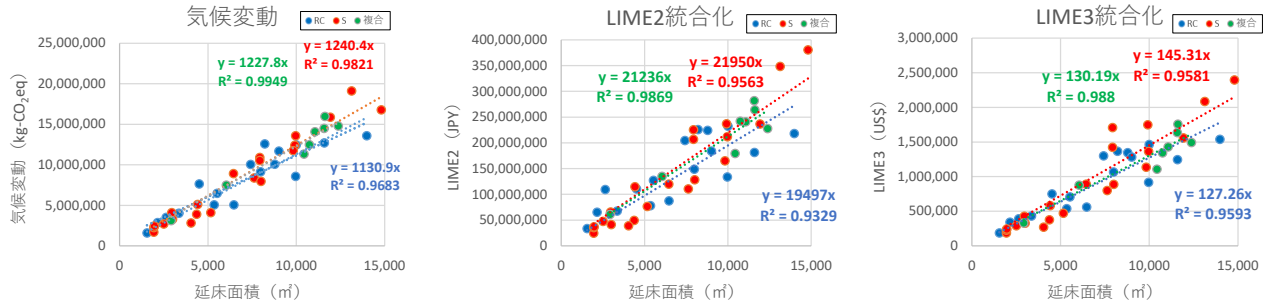


図 2　気候変動、統合化結果と延床面積の関係
（延床面積 15000m² 以下の事務所・庁舎、学校、病院、ホテル・マンション）

関係を図 S3 に示す。用途別の構造種別による傾向を分析するにはさらなるデータの蓄積が必要であるが、今回の結果から推察できる事項を下記に整理する。

物流施設は、サンプル数 19 件に対して S 造が 11 件、複合が 7 件であり RC 造は 1 件のみである。対象サンプルの構造種別の特徴としては、4 万 m² 以下の建物では S 造が多く、4 万 m² を超える大規模な建物になると複合が多くなっている。気候変動および統合化（LIME2、3）ともに相関係数 R² が 0.9 以上と高く、S 造と複合での傾向の違いは認められない。

生産施設は、サンプル数 23 件に対して S 造が 19 件と多く、RC 造が 3 件、複合が 1 件である。RC 造は 2 万 m² 以下の比較的小規模な建物で採用されており、S 造が主流である。気候変動および統合化（LIME2、3）ともに相関はみられるが、物流施設に比べてばらつきが多い。S 造と RC 造では、RC 造の係数 a が S 造に比べて小さいが、RC 造のサンプル数が 3 件のため今後データを増やしたうえで詳細に分析していきたい。他方で、生産施設の中にはクリーンルームなど先端的で特殊な機能が含まれる場合も多く、そういった場合には仕上材の仕様も一般的な建築とは異なることで環境負荷に大きな影響を及ぼす可能性も考えられることから、用途や構造種別の影響だけでなく投入資材別の影響なども考慮した分析が必要になると考えられる。

事務所・庁舎関連は、サンプル数 18 件に対して S 造が 11 件、RC 造が 3 件、複合が 4 件である。複合は 1 万 5 千 m² を超える規模が大きい建物で採用されているが、気候変動および統合化（LIME2、3）ともに構造種別による傾向の違いは認められない。

学校は、サンプル数 10 件に対して S 造が 3 件、RC 造が 4 件、複合が 3 件であり、いずれもサンプル数が不足しているが、構造種別の傾向をみると RC 造が S 造、複合に比べて気候変動および統合化（LIME2、3）ともに係数 a が小さくなっている。

病院は、サンプル数 14 件に対して S 造が 4 件、RC 造が 7 件、複合が 3 件である。RC 造と S 造では気候変動および統合化（LIME2、3）ともに係数 a は同程度であり、複合が大きくなっているが、複合のサンプルで延床面積 24000m² の 1 点の建物データが大きく影響してしまっている可能性があるため、この点が異常値（特殊な要因）であるかなど精査する必要がある。

ホテル・マンションは、サンプル数 11 件に対して S 造が 5 件、RC 造が 5 件、複合が 1 件である。サンプル数が少なくばらつきがあるが、RC 造に比べて S 造の係数 a が小さくなっている。

さらに、一般的な建築物の傾向を確認するため、本結果の中から低層・大平面型の施設になることが多い物流施設と生産施設を除いて、延床面積 15000m² 以下の規模の事務所・庁舎、学校、病院、ホテル・マンションの結果を合わせた構造種別ごとの気候変動、統合化（LIME2、3）結果と延床面積の関係を図 2 に示す。サンプル数は 46 件で、S 造が 21 件、RC 造が 17 件で複合が 8 件である。全用途・全規模で整理した結果（表 1）とは差がみられ、全体的に係数 a が大きくなっている。つまり、規模や用途のグルーピングによって延床面積に対する環境影響の傾向は異なり、より精度の良い推計のためには、影響因子を考慮したデータベースが整備されることが望ましい。

4. まとめ

本報告では、IDEA Ver.3.4.1 を用いて構造種別の違いに着目した気候変動と統合化の傾向分析を行った。後報では、マルチクライテリア視点での用途別の支配的要因の分析 [3] や投入資材別の支配的要因に関する分析 [4] を報告する。今後、さらなるデータの蓄積と、様々な視点での分析結果を有効に活用し、LCA を活用した環境配慮建築の推進に繋げていきたい。

引用文献

1) 田中洋介ほか，実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析~マルチクライテリア評価結果に基づく、新築時および使用・解体時のプロセスの影響分析~，第 20 回日本 LCA 学会研究発表会、2025.3
2) 鈴木好幸ほか，実建物分析に基づく建築物の用途別・構造別 CO2 排出原単位に関する検討，第 18 回日本 LCA 学会研究発表会、2023.3
3) 梶谷凌聖ほか，実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析～IDEA Ver.3.4 を用いたマルチクライテリアでの評価に基づく建物用途別の支配的要因の分析～，第 20 回日本 LCA 学会研究発表会、2025.3
4) 三河大志ほか，実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析-IDEA Ver3.4 を用いたマルチクライテリアでの評価に基づく投入資材別の支配的要因の試算-，第 20 回日本 LCA 学会研究発表会、2025.3

Supporting Information

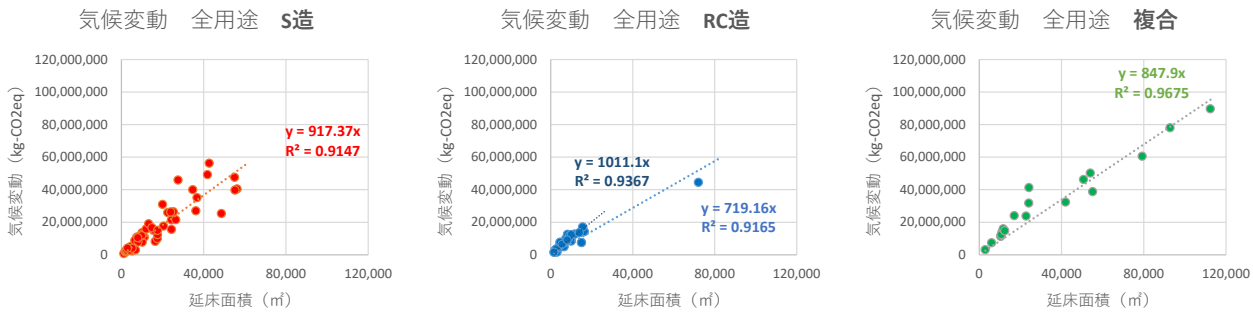
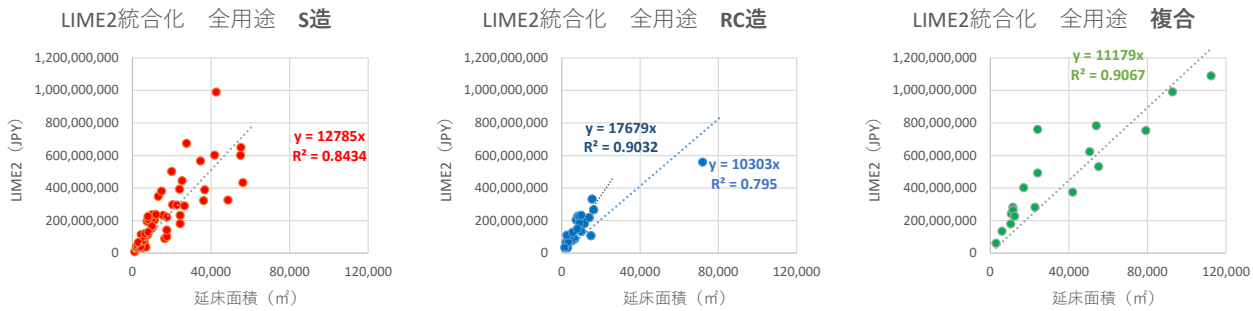
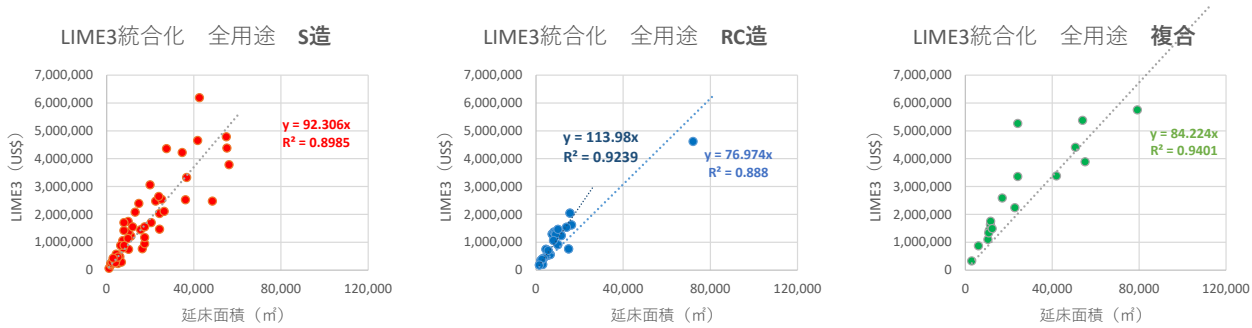


図 S1　各構造種別の気候変動結果と延床面積の関係（全用途）



（a）LIME2 による統合化結果



（b）LIME3 による統合化結果

図 S2　各構造種別の統合化結果と延床面積の関係（全用途）

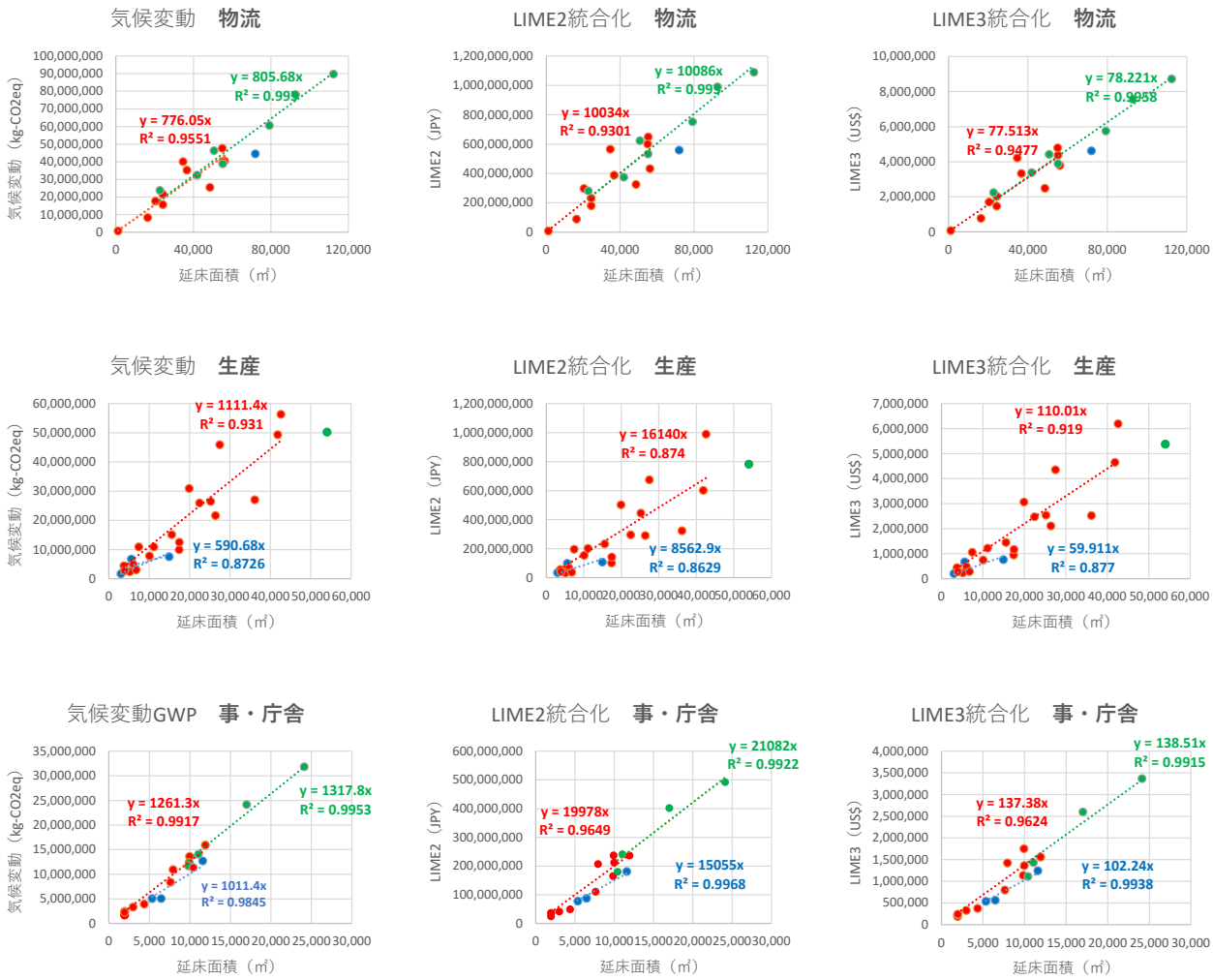


図 S3　各用途の気候変動、統合化結果と延床面積の関係（1）

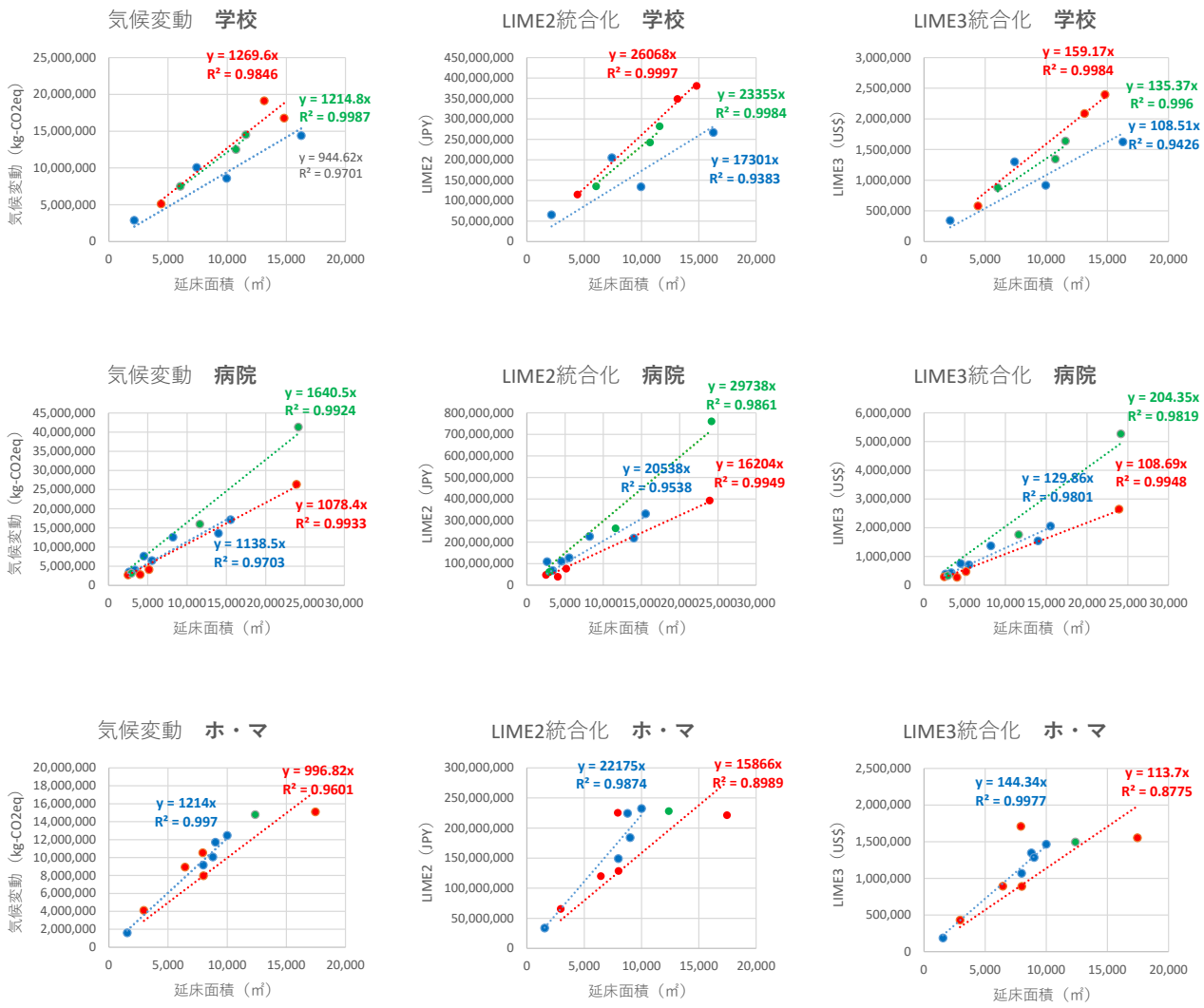


図 S3　各用途の気候変動、統合化結果と延床面積の関係（2）

実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析

～IDEA Ver.3.4 を用いたマルチクライテリアでの評価に基づく建物用途別の支配的要因の分析～

Study on Environmental Impact Analysis of Buildings Based on Analysis of Actual Buildings - Analysis of dominant factors by building use based on multi-criteria evaluation using IDEA Ver.3.4 -

○梶谷凌聖 [1)]、三河大志 [1)]、矢澤華英 [1)]、小林謙介*[1)]、鈴木好幸 [2)]、田中洋介 [2)]

Ryosei Kajitani, Hiroshi Mikawa, Hanae Yazawa, Kensuke Kobayashi, Yoshiyuki Suzuki, Yousuke Tanaka

1) 県立広島大学, 2) 安藤ハザマ

* kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. 背景・目的

我が国の CO_2 排出量の約３分の１は住宅・建築物に関連しており、その負荷削減策を実施することが不可欠である。脱炭素社会を実現するには多様な環境負荷物質を総合的に環境影響評価できる LCA が有効である。建築分野は資材投入量が多いため、１物件の算定で多くの時間と労力が必要である。データベースを整備することで、分析作業の効率化が可能となる。

本検討では、ISO21930 規格等に基づく評価が可能な IDEA Ver.3.4.1 を用い、実建物データを対象としてマルチクライテリアの視点で支配的要因を解析し、建築物の設計初期段階での効率的な LCA 実施手法の提案・構築を行った。

2. 研究概要

本検討では、日本国内における実建物95件を対象とし、物流や生産、事務所、学校など大きく 6 つの用途区分に分けて検討した。対象としたプロセスは A1-5、B3・4、C1-4 である。いずれも詳細は田中らの報告に示した [1)]。評価は IDEA Ver.3.4.1 を用いて実施した。

3. 研究方法と結果

3.1 全体の分析

図１に検討対象範囲全体の分析を、IDEA Ver3.4.1 を用いて行った結果を示す。建築段階の CO_2 排出量のうち、A1-3 が全体の約５～７割、B4 が約２～３割を占めた。また、図２に統合化を IDEA Ver3.4.1、LIME2 を用いて行った結果を示す。A1-3 が約３～５割、B4 が約３～４割、C4 が約１～３割の割合を占め、GHG に比べ C1-4 (特に埋立) の影響が大きくなった。さらに、図３に統合化を LIME3 を用いて行った結果を示す。A1-3 が約４～７割、B4 が約１～４割の割合を占めた。また、C1-4 が約１～２割を占めた。

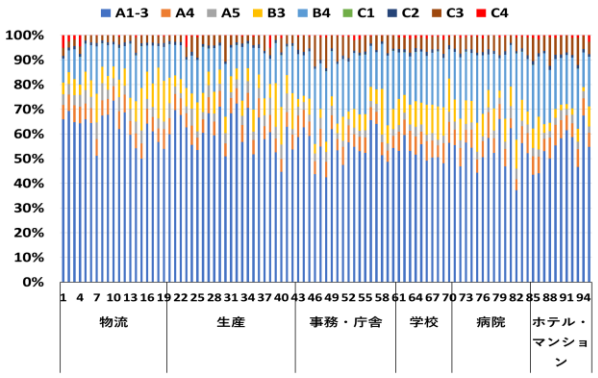


図１　建築段階別での CO_2 排出量

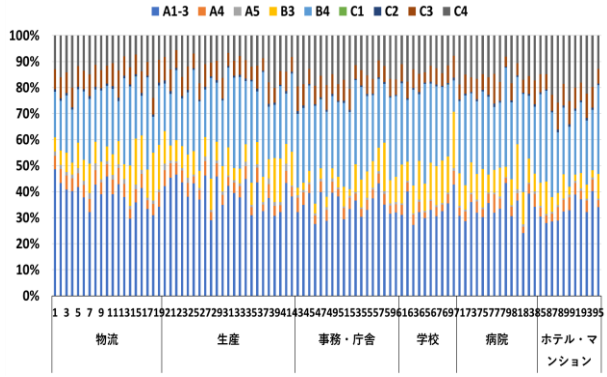


図２　建築段階別での統合化(LIME2)

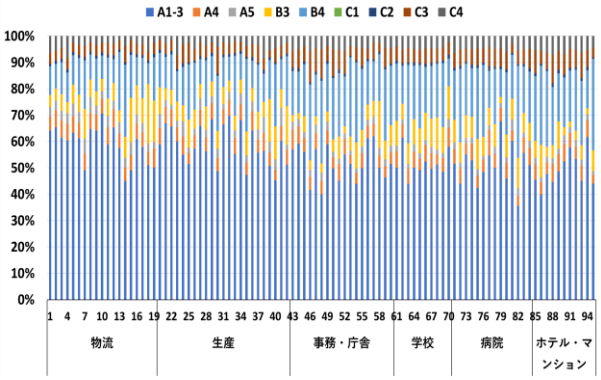


図３　建築段階別での統合化(LIME3)

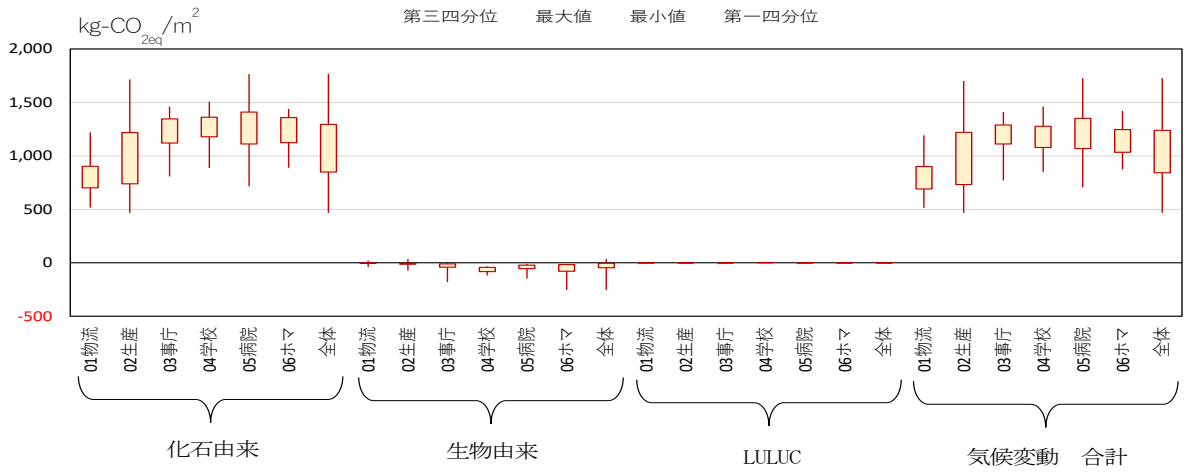


図４　建物用途別の GHG 排出量のばらつき

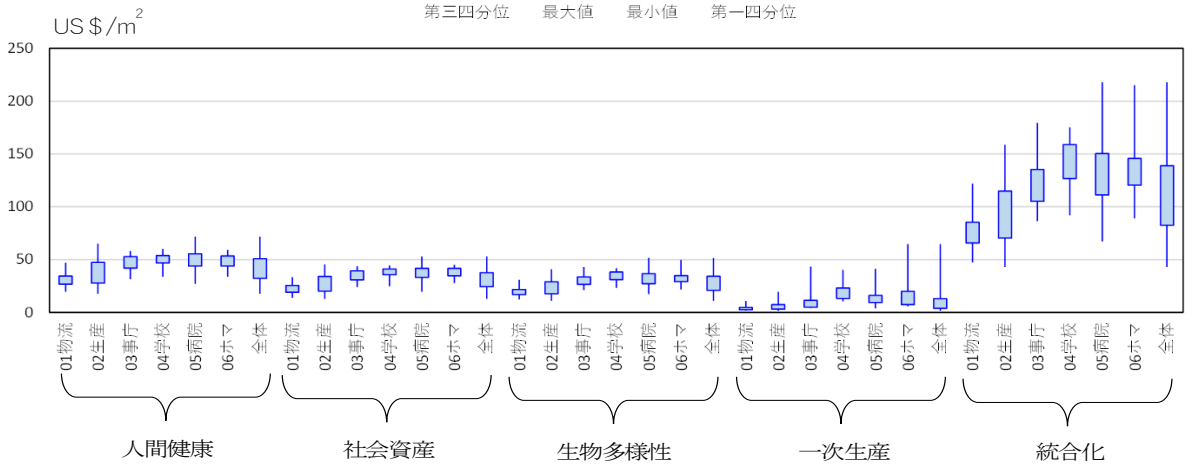


図５　建物用途別の被害評価・統合化（LIME3）のばらつき

3.2 用途別の分析

図４は６つの用途の気候変動を構成する化石由来、生物由来、LULUC（土地利用及び土地利用変化）の延床面積あたりの GHG 排出量である。IDEA Ver3.4.1 では、化石由来だけでなく、生物由来から排出される GHG も評価できる。なお、生物由来は放出と吸収の合算値である。また、LULUC（土地利用・土地改変）に関連する GHG 排出も分類可能となり、森林伐採や土地開発による GHG 排出がより適切に評価可能となった。被害評価別では、化石由来の影響が大きく、生物由来の影響はマイナス、LULUC の影響は相対的に小さいことが読み取れる。生物由来の影響がマイナスになっている要因としては、木材の投入により炭素固定され、放出より吸収量のほうが多くなっているからである。用途別で見ると、物流施設の影響が特に小さく、事務・庁舎、学校、病院、ホテル・マンションが大きい傾向がうかがえた。また、生産施設のばらつきが最も大きくなっている。

図５は統合化のばらつき分析の結果であるが、統合化を構成する人間健康、社会資産、生物多用性、一次生産の中で寄与率が高い傾向がみられたのは人間健康であった。また、極端に小さい領域はなく、それぞれが影響を及ぼしていた。用途別で見ると、物流施設の影響が特に小さく、事務・庁舎、学校、病院、ホテル・マンションが大きい傾向がうかがえた。また、生産施設のばらつきが最も大きくなっている。

以上より、建築物を用途別に分析することによって、GHG 排出量と統合化のばらつきが小さくなることが確認できた。

4. まとめ

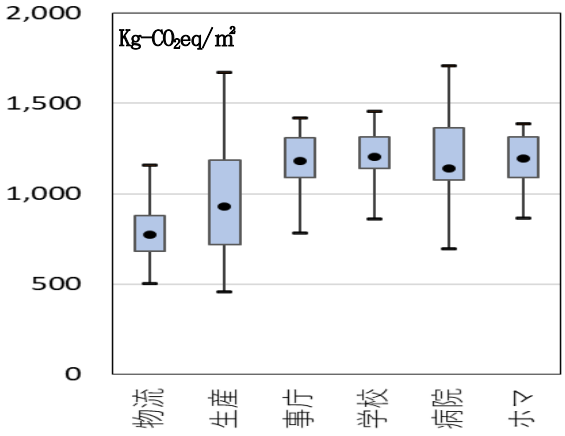
本検討では、95 件の実建物に用いられた用途別の環境負荷量を算出し、支配的要因の分析を行った。全体の分析では、９つの段階のうち CO_2 排出量や統合化の影響が大きくなる段階を定量的に確認した。用途別の分析では、GHG 排出量と統合化分析においてそれぞれの評価対象のばらつきを確認した。

5. 参考文献

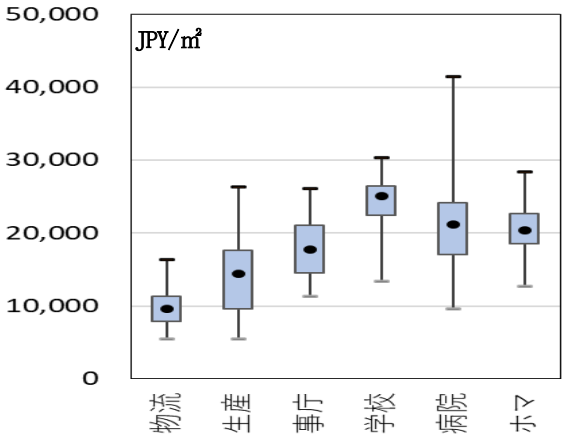
1) 田中ら、実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析～マルチクライテリア評価結果に基づく、新築時および使用・解体時のプロセスの影響分析～、第 20 回日本 LCA 学会研究発表会、2025.3

Supporting Information

評価条件
A1-3　建築物の積算データ
A4　建設副産物実態調査
A5　他建物の実績値
B3・B4　BELCA の建築物のライフサイクルマネジメント用データ集を用いて修繕量、更新回数を算出
C1-4　建設副産物実態調査



SI 図１　用途別での地球温暖化係数

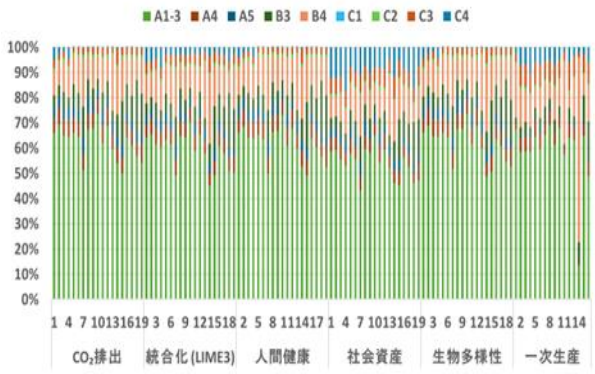


SI 図２　用途別での統合化分析(LIME2)

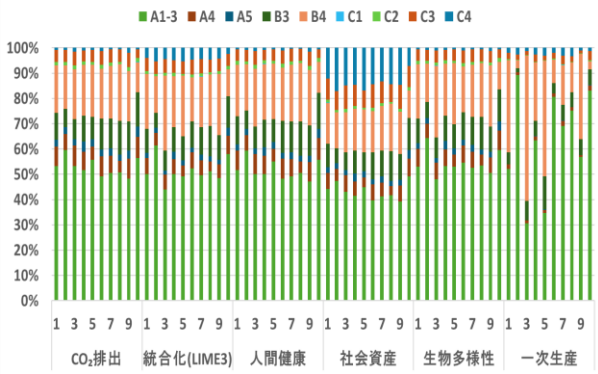
SI 表１　CO_2排出量分析での寄与率上位３資材

用途	A1-3	B3	B4	C4
物流施設	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小形棒鋼	シャッタ 亜鉛めっき鋼板 その他板ガラス	シャッタ 亜鉛めっき鋼板 石膏ボード	普通合板 生コンクリート 木製フローリング
生産施設	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小形棒鋼	シャッタ 金属製サッシ ビル用アルミニウム製サッシ	亜鉛めっき鋼板 石膏ボード 軽量鉄骨	生コンクリート 外装用ライナ,段ボール原紙 薬品処理木材
事務・庁舎	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小形棒鋼	金属製サッシ 住宅用アルミニウム製サッシ その他板ガラス	プラスチック床材 石膏ボード 軽量鉄骨	普通合板 薬品処理木材 生コンクリート
学校	生コンクリート 鉄骨 普通鋼小形棒鋼	ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ シャッタ	石膏ボード 軽量鉄骨 ビル用アルミニウム製サッシ	普通合板 木製フローリング 生コンクリート
病院	生コンクリート 鉄骨 普通鋼小形棒鋼	ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ 板ガラス	石膏ボード 軽量鉄骨 プラスチックシート	普通合板 生コンクリート 集成材
ホテル・マンション	生コンクリート 鉄骨 普通鋼小形棒鋼	金属製サッシ 石膏ボード その他板ガラス	石膏ボード 軽量鉄骨 プラスチックシート	普通合板 木製窓枠 薬品処理木材

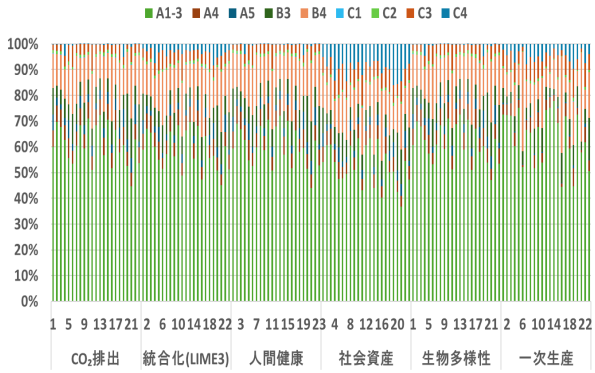
マルチクライテリア分析



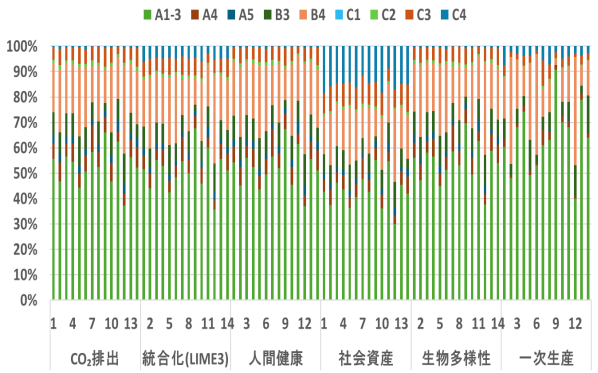
SI 図３　物流施設



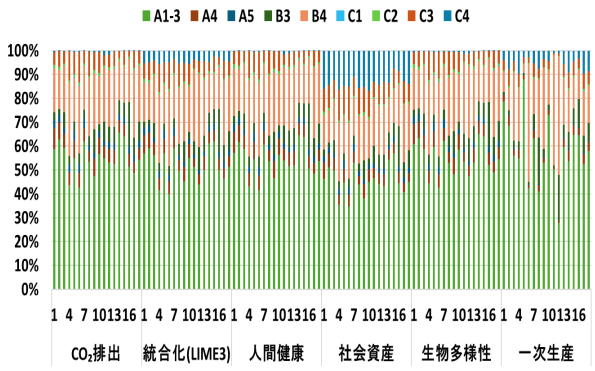
SI 図６　学校



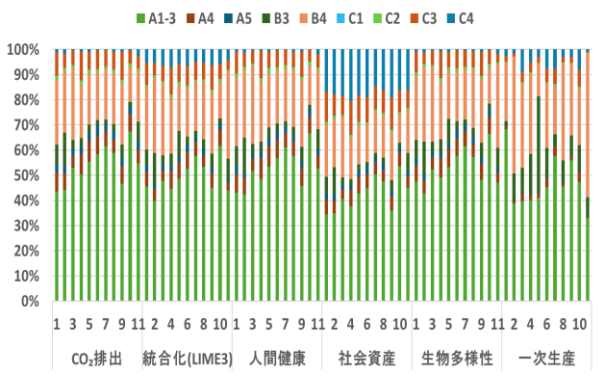
SI 図４　生産施設



SI 図７　病院

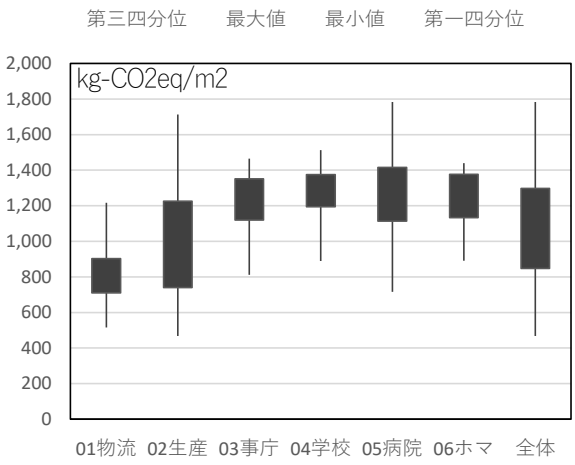


SI 図５　事務・庁舎

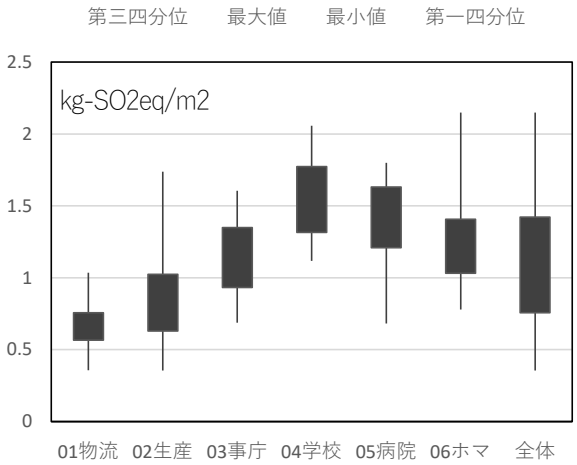


SI 図８　ホテル・マンション

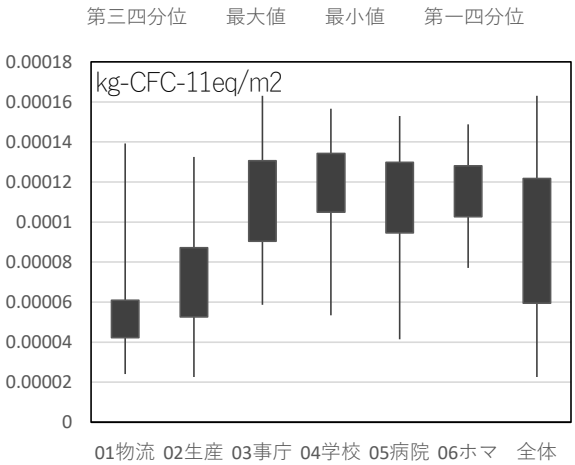
影響評価分析



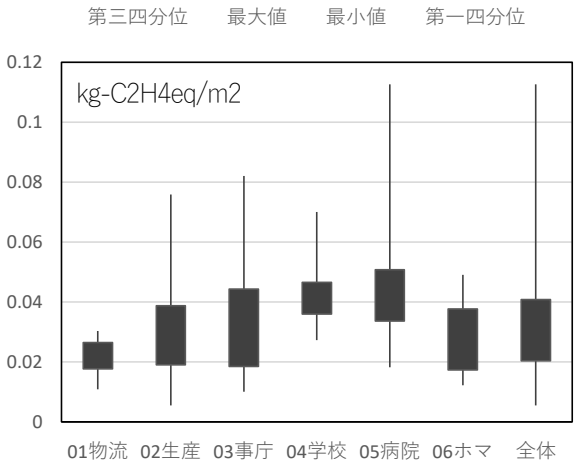
SI 図９　地球温暖化



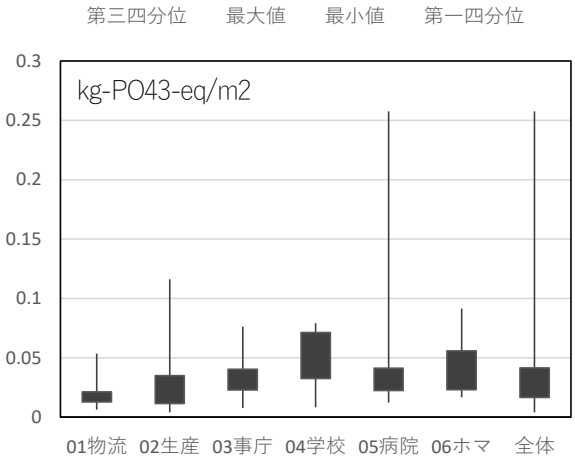
SI 図 12　酸性化



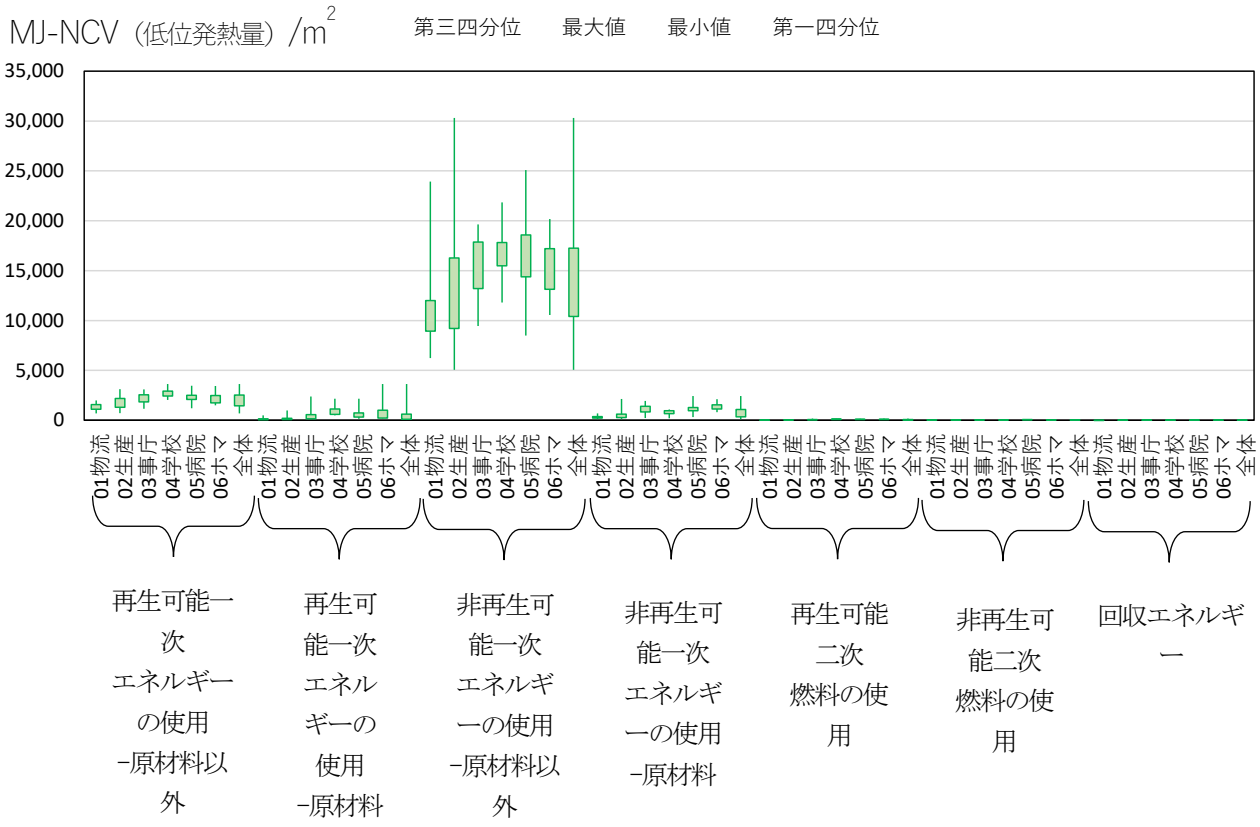
SI 図 10　オゾン層破壊



SI 図 13　光化学オキシダント

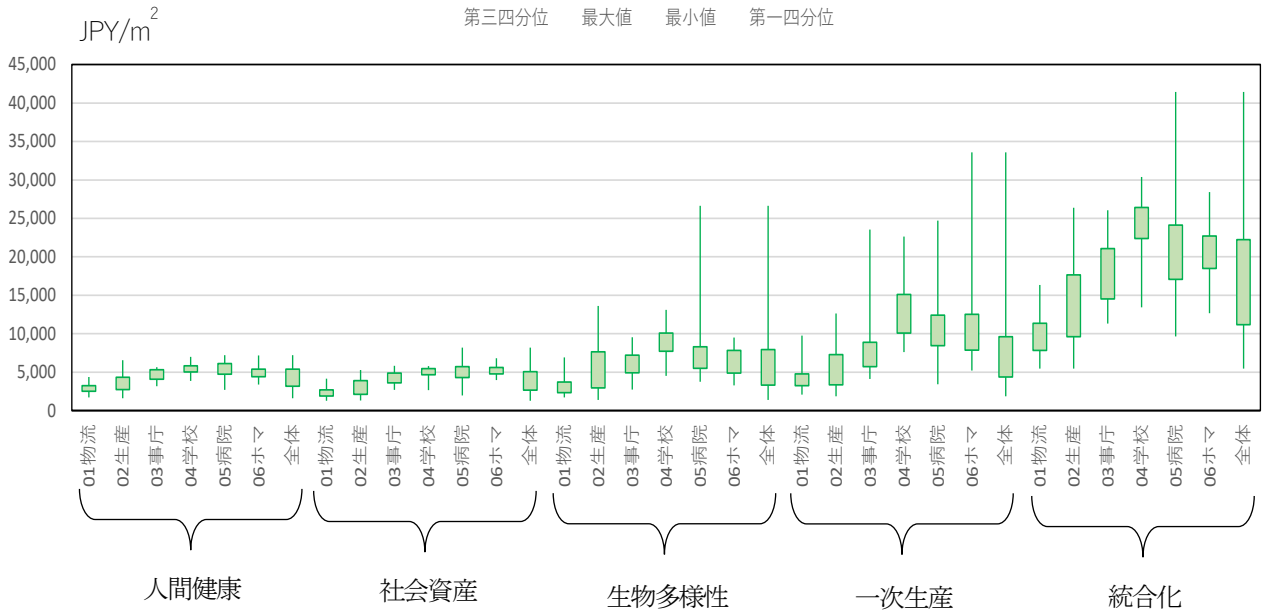


SI 図 11　富栄養化



SM　（二次材料は単位が異なるためここでは計上していない）

SI 図 14　資源利用　ISO21930



SI 図 15　LIME2

実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析

-IDEA Ver3.4 を用いたマルチクライテリアでの評価に基づく投入資材別の支配的要因の試算-

Study on Environmental Impact Analysis of Buildings Based on Analysis of Actual Buildings -The estimation of dominant factors for each input material based on multicriteria evaluation using IDEA Ver3.4-

○三河大志 [1)]、梶谷凌聖 [1)]、矢澤華英 [1)]、小林謙介*[1)]、鈴木好幸 [2)]、田中洋介 [2)]
Hiroshi Mikawa, Ryosei Kajitani, Hana Yazawa, Kensuke Kobayashi, Yoshiyuki Suzuki, Yousuke Tanaka
1) 県立広島大学, 2) 安藤ハザマ
* kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. 背景・目的

近年、環境問題が注目を集めており、特に脱炭素、カーボンニュートラルなどへの強い関心が高まっている。我が国の住宅・非住宅に起因する CO_2 排出量は全産業の約 3 分の 1 を占め、その環境負荷削減が急務である。その環境負荷削減のためには、環境影響の定量化が欠かせず、総合的に環境影響を定量化する手法の LCA の活用が重要と考える。しかし、建築物の LCA は部品数や実施範囲が広く、評価作業に多大な労力がかかる。このようなことから、設計初期段階で活用可能なデータベースを整備することにより評価作業の効率化が期待され、設計初期段階において LCA の概算を行うことが可能となる。

本検討では、95 件の実建物を用いた建築物の設計初期段階における投入資材に着眼して支配的要因の試算を行った。

2. 研究概要

本検討では、日本国内における実建物 95 件を対象とし、物流や生産、事務庁舎、学校など 6 つの用途区分に分けて検討した。対象としたプロセスは A1-5、B3・4、C1-4 である。いずれも詳細は田中らの報告に示した[1)]。評価は IDEA Ver.3.4.1 を用いて実施した。

3 研究方法と結果

3.1 全体と建築用途・段階別での分析

梶谷らの報告[2)]では、実建物の検討対象範囲全体、用途・段階別に CO_2 排出量や統合化の分析を IDEA Ver.3.4.1、LIME3 を用いて行った。全建築段階の CO_2 排出量のうち、A1-3 が 5～7 割程度、B4 が概ね 2～3 割程度を占めた。統合化の分析では、A1-3 が 4～7 割程度、B4 が 1～4 割程度であった。以降の用途別・段階別での CO_2 排出量、統合化分析寄与率上位 3 資材の分析においては、環境負荷影響が大きい A1-3、B3、B4、C4 の 4 つの段階について分析を行った。

3.2 資材別での分析

各用途、各建物に投入された資材を対象に、IDEA Ver.3.4.1、LIME3 を用いて CO_2 排出量と統合化の分析を行った。図 1～図 4 は全用途の全プロセスの結果と、そのうち事務・庁舎における全プロセスでの資材別での結果である。1 建物に投入される資材点数は非常に膨大であるため、本分析では総 CO_2 排出量及び統合化における寄与率が 1%以上の資材を表示した。

投入資材別の CO_2 排出量分析(図 2)、統合化(図 4)による分析ともに生コンや鉄骨などに大きなばらつきが確認できた。

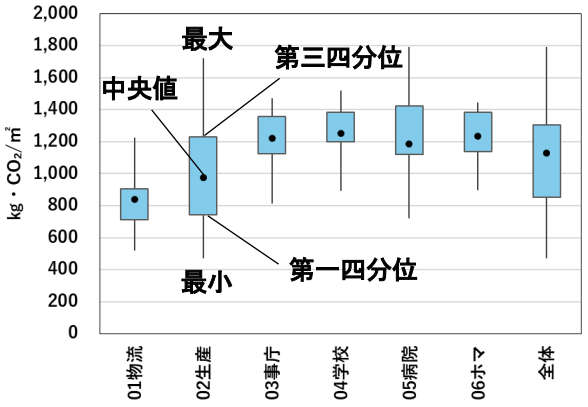


図 1　用途別での CO_2 排出量分析

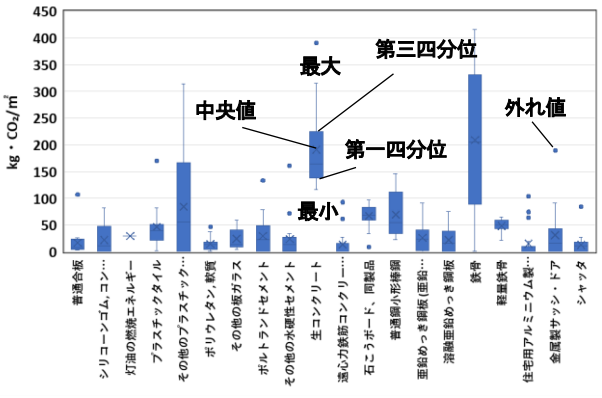


図 2　資材別の CO_2 排出量分析(事務・庁舎)

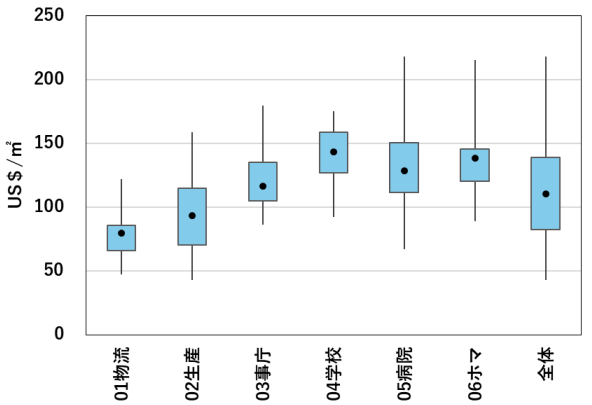


図３　用途別での統合化分析

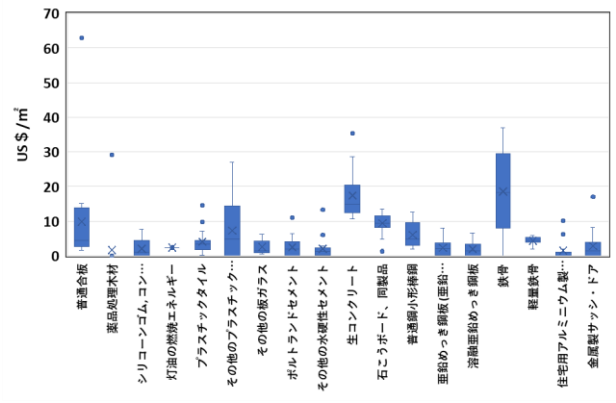


図４　資材別の統合化分析（事務・庁舎）

表１　用途別、CO_2排出量寄与率上位３資材

用途	A1-3	B3	B4	C4
物流施設	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小型棒鋼	シャッタ 亜鉛めっき鋼板 溶剤系樹脂	シャッタ 亜鉛めっき鋼板 石こうボード	普通合板 生コンクリート 木質フローリング
生産工場	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小型棒鋼	シャッタ 金属製サッシ ビル用アルミニウム製サッシ	亜鉛めっき鋼板 石こうボード 軽量鉄骨	生コンクリート 外装用ライナ，段ボール原紙 薬品処理木材
事務・庁舎	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小型棒鋼	金属製サッシ 住宅用アルミニウム製サッシ シャッタ	プラスチック床材 石こうボード 軽量鉄骨	普通合板 薬品処理木材 生コンクリート
学校	生コンクリート 鉄骨 普通鋼小型棒鋼	ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ シャッタ	石こうボード ビル用アルミニウム製サッシ 軽量鉄骨	普通合板 木質フローリング 生コンクリート
病院	生コンクリート 鉄骨 普通鋼小型棒鋼	ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ 板ガラス	石こうボード 軽量鉄骨 ビル用アルミニウム製サッシ	普通合板 生コンクリート 集成材
ホテル・マンション	生コンクリート 鉄骨 普通鋼小型棒鋼	石こうボード 金属製サッシ 板ガラス	石こうボード 金属製サッシ 板ガラス	普通合板 木製窓枠 薬品処理木材

表２　統合化分析での寄与率上位３資材

用途	A1-3	B3	B4	C4
物流施設	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小型棒鋼	シャッタ 亜鉛めっき鋼板 板ガラス	シャッタ 亜鉛めっき鋼板 石こうボード	石こうボード 外装用ライナ，段ボール原紙 ロックウール
生産工場	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小型棒鋼	シャッタ 金属製サッシ ビル用アルミニウム製サッシ	亜鉛めっき鋼板 石こうボード 軽量鉄骨	石こうボード 生コンクリート 外装用ライナ，段ボール原紙
事務・庁舎	鉄骨 生コンクリート 普通合板	金属製サッシ 住宅用アルミニウム製サッシ シャッタ	石こうボード プラスチック床材 普通合板	石こうボード 生コンクリート 板ガラス
学校	生コンクリート 普通合板 鉄骨	ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ住宅用アルミニウム製サッシ	石こうボード ビル用アルミニウム製サッシ 軽量鉄骨	石こうボード 生コンクリート 普通合板
病院	生コンクリート 普通合板 鉄骨	ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ 石こうボード	石こうボード 軽量鉄骨 ビル用アルミニウム製サッシ	石こうボード 生コンクリート 普通合板
ホテル・マンション	生コンクリート 鉄骨 普通鋼小型棒鋼	木製窓枠 乾燥桁材 金属製サッシ	石こうボード 軽量鉄骨 プラスチックシート	石こうボード 普通合板 木製窓枠

表１、２は用途別の CO_2排出量と統合化における分析結果の平均寄与率上位３資材を示したものである。CO_2排出量では、全用途共通して寄与率の高かった資材は、生コン、鉄骨、普通鋼小型棒鋼等であった。統合化では、全用途共通して生コン、鉄骨、普通合板、石膏ボード等の寄与率が高かった。用途別では、物流・生産施設ではシャッタなど、事務・庁舎、学校、病院ではサッシ類など、ホテル・マンションでは木製窓枠などが高かった。

CO_2排出量と比べて、統合化において共通して普通合板の寄与率が高くなった原因は、森林資源を利用して製造される普通合板において、再造林が十分に行われていないためと考えられる。これにより保護対象である生物多様性や一次生産の影響が大きいと考えられる。また、統合化において共通して石膏ボードの寄与率が高くなった原因は、石膏ボードの多くが C4 の埋立において大きく寄与していたからである。これらのことから、廃石膏ボードのリサイクルのための分別回収などによって、統合化の影響の低減が期待できる。

4. まとめ

本検討では 95 件の建築物を対象に環境負荷の大きな支配的要因となるものを様々な視点で解析した。

全体の分析では 9 つの段階のうち CO_2排出量や統合化の影響が大きくなる段階を定量的に確認した。用途別の分析では用途ごとに CO_2排出量と統合化で差異が見られた。資材別の CO_2排出量では、共通して生コン、鉄骨、普通鋼小型棒鋼等が CO_2排出量の影響が大きいことが示された。資材別の統合化では生コン、鉄骨の他に、石膏ボード、普通合板等の影響が大きくなった。

以上より、建築物に起因する環境負荷影響の大きい資材を特定するための支配的要因を明らかにした。

5. 参考文献

1)田中ら、実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析～マルチクライテリア評価結果に基づく、新築時および使用・解体時のプロセスの影響分析～、第 20 回日本 LCA 学会研究発表会、2025.3

2)梶谷ら、実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析～IDEA Ver.3.4 を用いたマルチクライテリアでの評価に基づく建物用途別の支配的要因の分析～、第 20 回日本 LCA 学会研究発表会、2025.3

Supporting　Infomation

評価条件

A1-3　建築物の積算データ

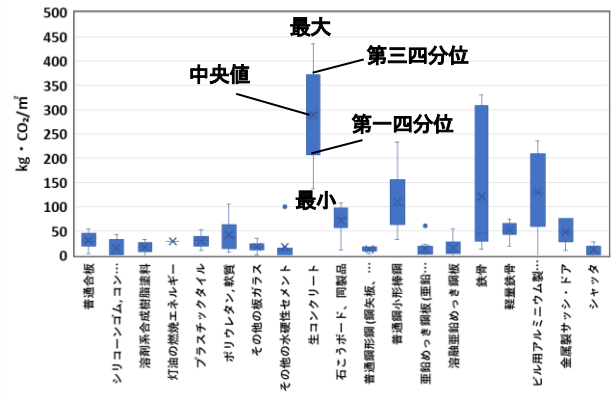
A4　建設副産物実態調査

A5　他建物の実績値

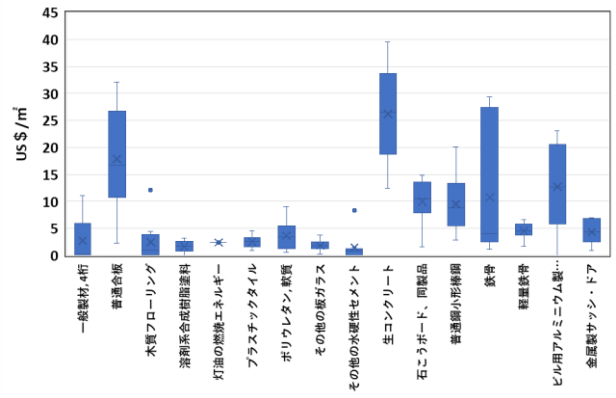
B3・B4　BELCA の建築物のライフサイクルマネジメント用データ集を用いて修繕量、更新回数を算出

C1-4　建設副産物実態調査

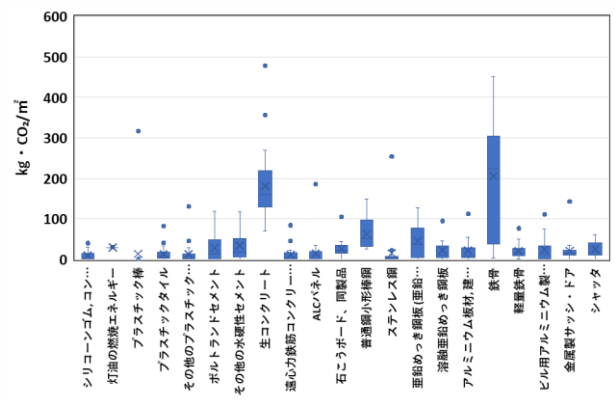
ばらつき分析



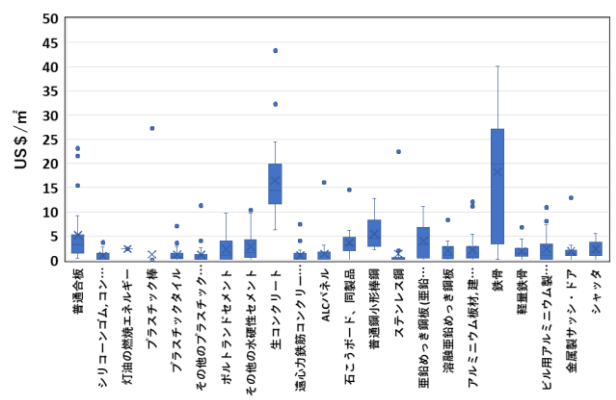
SI 図 1　資材別の CO_2 排出量分析（学校）



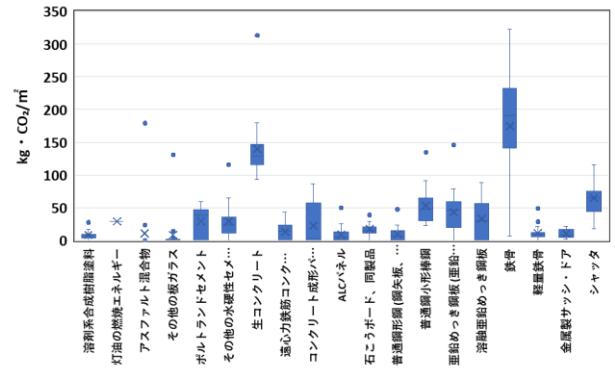
SI 図 2　資材別の統合化分析（学校）



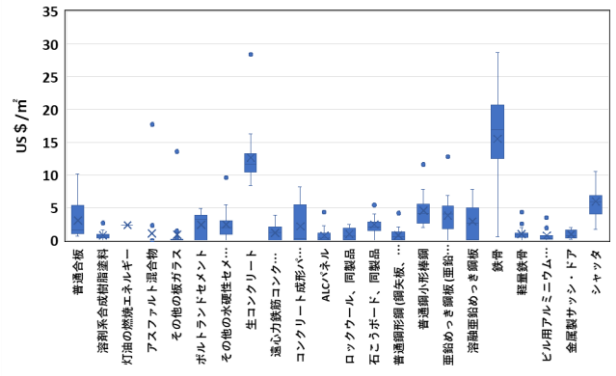
SI 図 3　資材別の CO_2 排出量分析（生産）



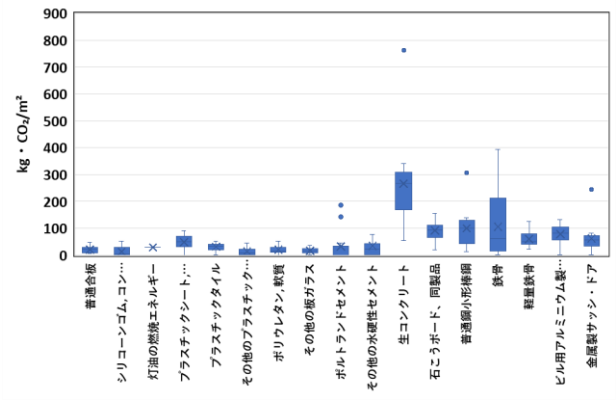
SI 図 4　資材別の統合化分析（生産）



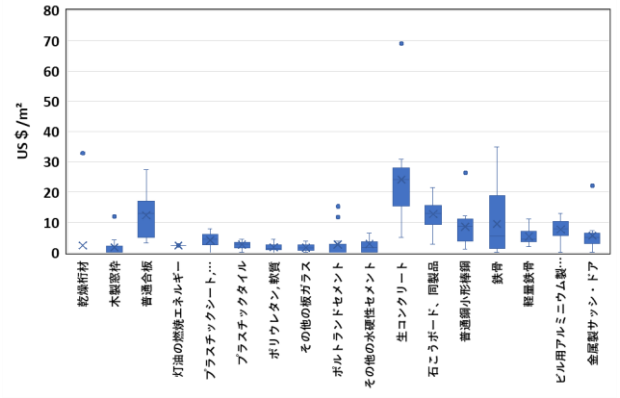
SI 図 5　資材別の CO_2 排出量分析（物流）



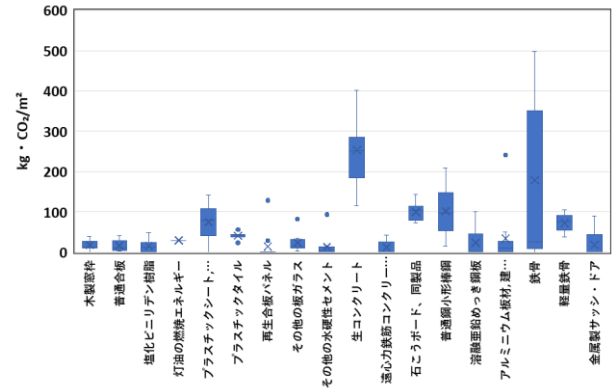
SI 図 6　資材別の統合化分析（物流）



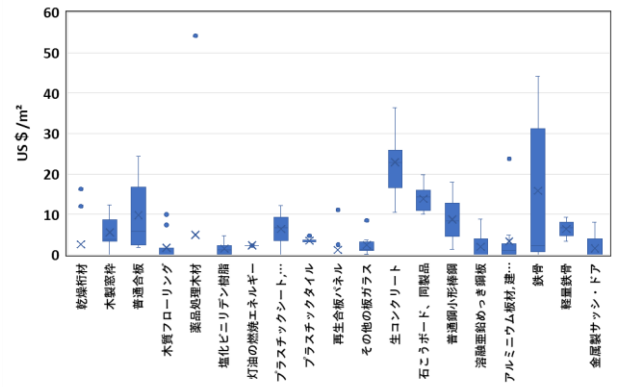
SI 図 7　資材別の CO_2 排出量分析（病院）



SI 図 8　資材別の統合化分析（病院）

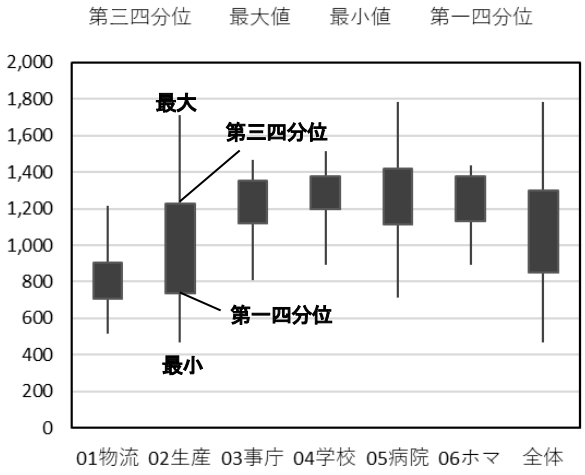


SI 図 9　資材別の CO_2 排出量分析（ホテル・マンション）

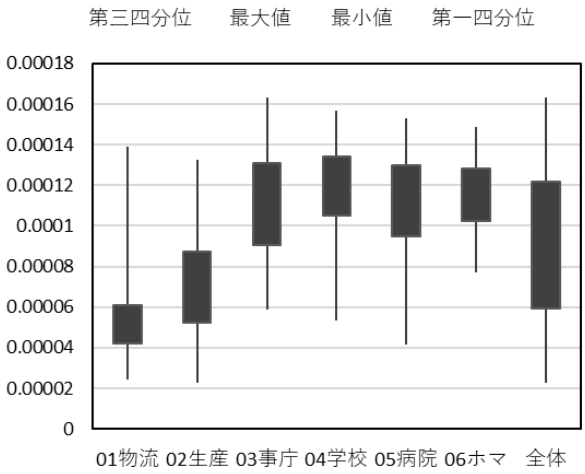


SI 図 10　資材別の統合化分析（ホテル・マンション）

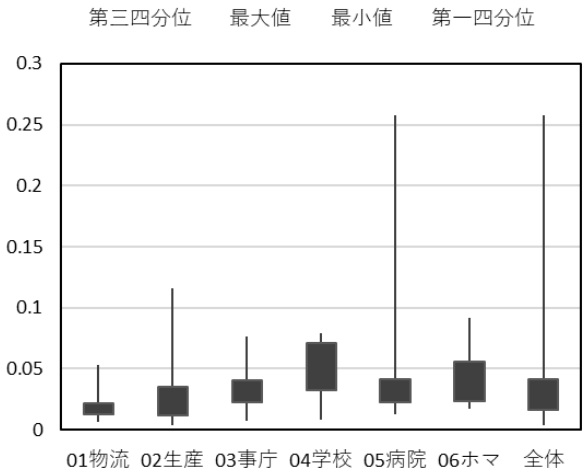
影響評価分析



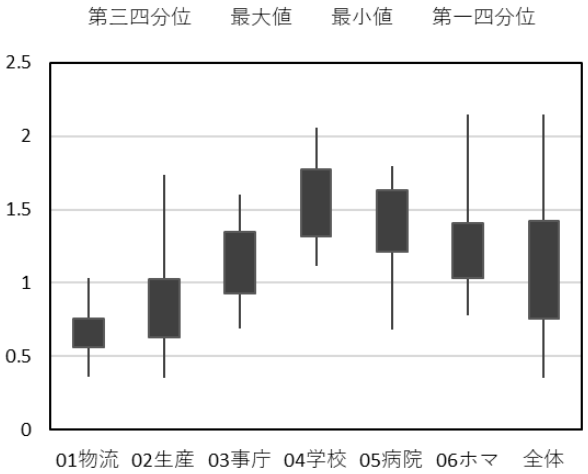
SI 図 11　地球温暖化



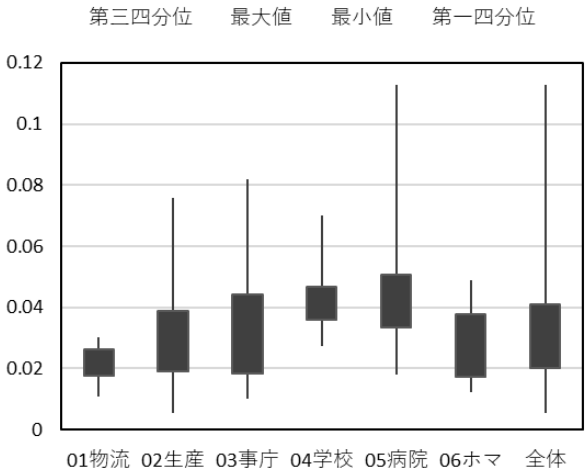
SI 図 12　オゾン層破壊



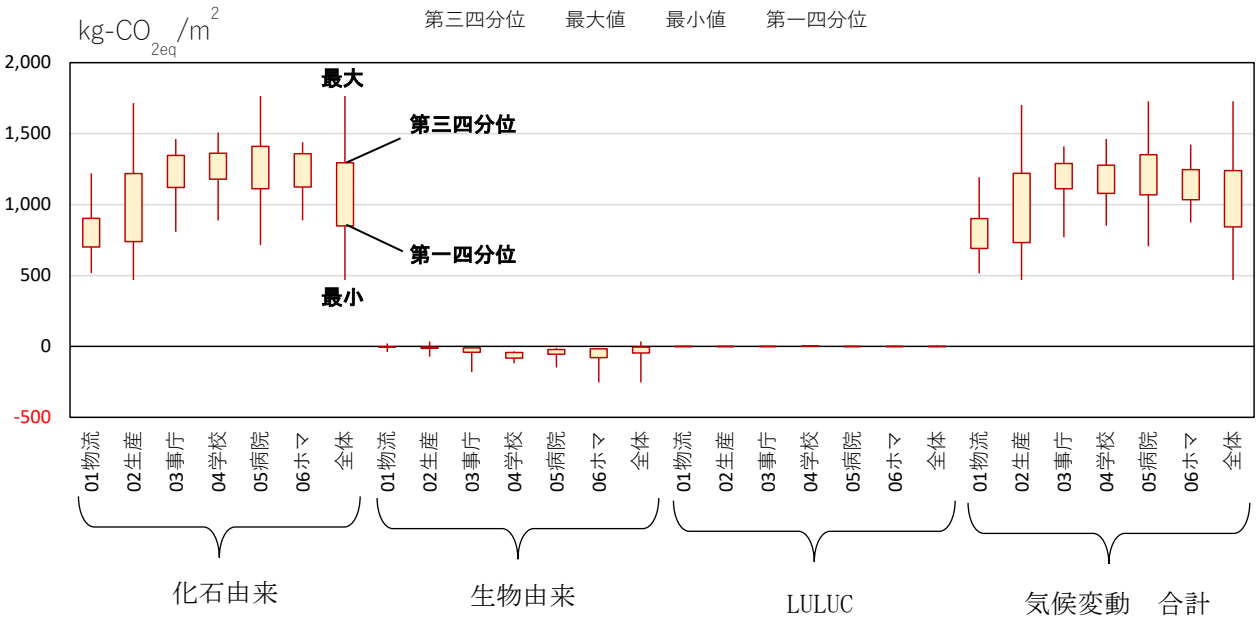
SI 図 13　富栄養化



SI 図 14　酸性化

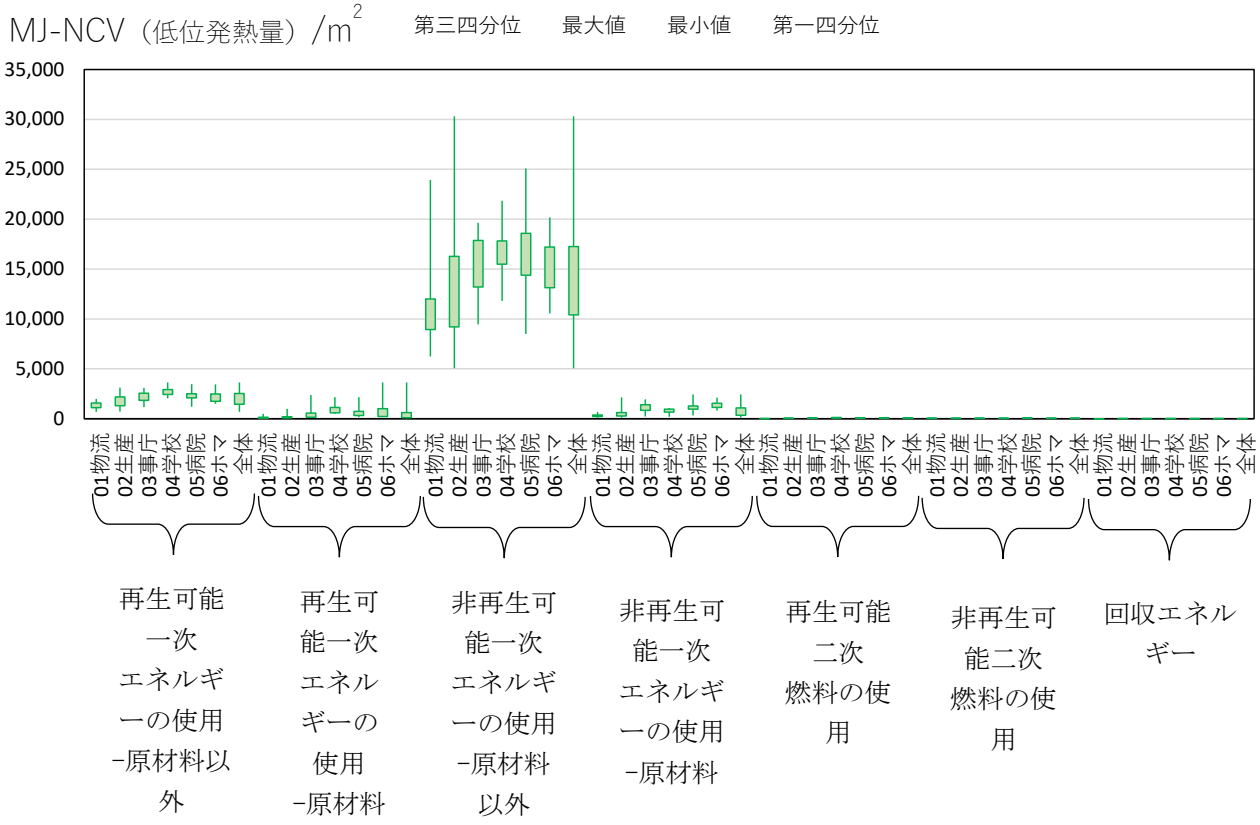


SI 図 15　光化学オキシダント



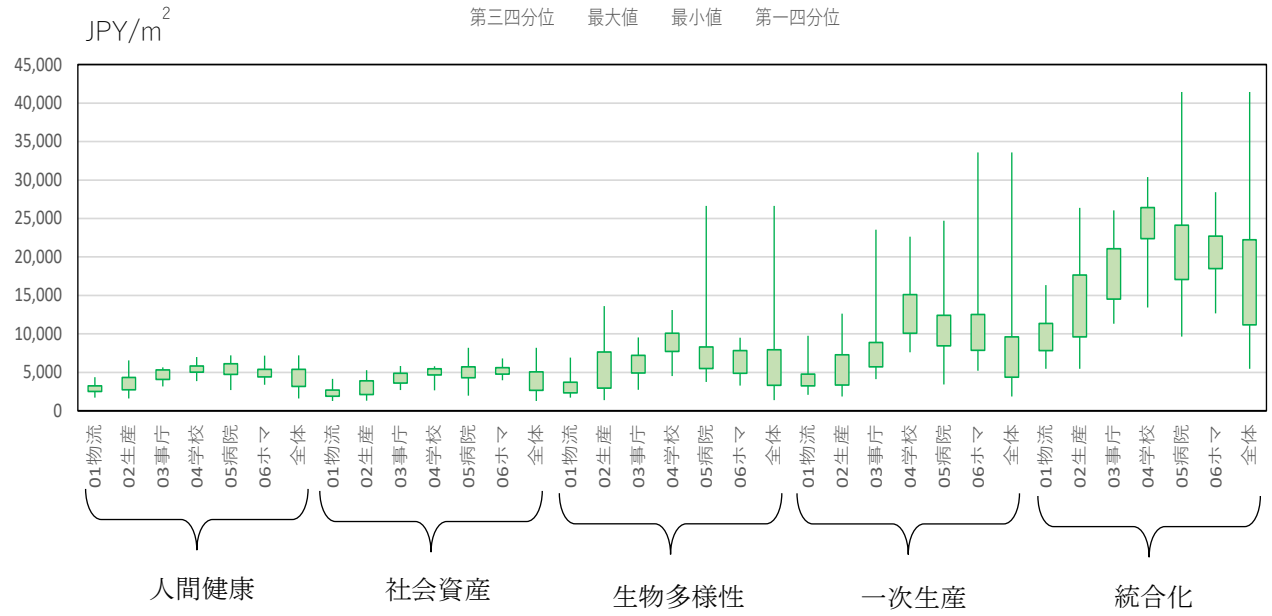
＊生物由来は放出と吸収の合算値であることに注意

SI 図 16　気候変動　ISO21930

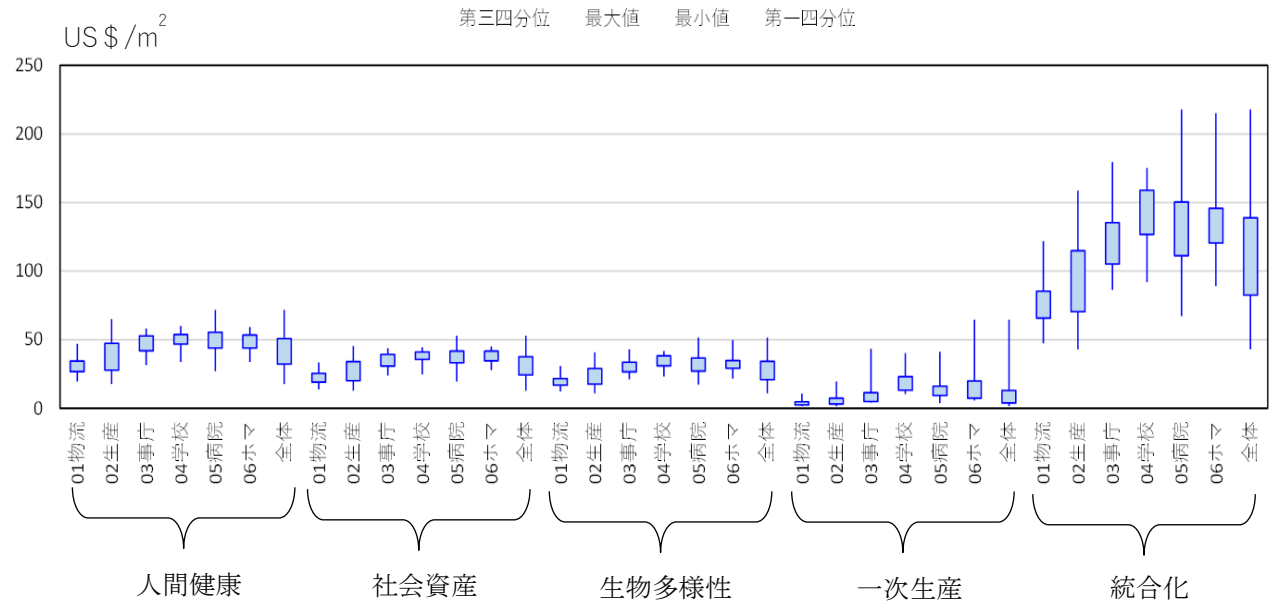


SM　（二次材料は単位が異なるためここでは計上していない）

SI 図 17　資源利用　ISO21930



SI 図 18　LIME2



SI 図 19　LIME3

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 16:20 ~ 17:40 E会場：2321中講義室（3F）

[1-E4] 建築（２）

座長：小澤 暁人 (産業技術総合研究所)

16:20 ~ 16:40

[1-E4-01]

熱的快適性を考慮した断熱住宅のLCA評価

*佐藤 蓮真[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1]、本田 智則[2]、小澤 暁人[2] (1. 立命館大学、2. 産業技術総合研究所)

16:40 ~ 17:00

[1-E4-02]

日本の建築物の寿命についての検証

*三條 瑚都子[1]、加用 千裕[1]、外崎 真理雄[2] (1. 東京農工大学大学院、2. 国立研究開発法人　森林研究・整備機構　森林総合研究所)

17:00 ~ 17:20

[1-E4-03]

建築工法の違いを考慮した日本の住宅のCO_2排出量の分析

*永田 あい[1]、松嶋 そら[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

17:20 ~ 17:40

[1-E4-04]

総合討論

©日本LCA学会

熱的快適性を考慮した断熱住宅の LCA 評価

LCA of insulated houses considering thermal comfort

○佐藤蓮真*[1)]、光斎翔貴[1)]、柏倉俊介[1)]、山末英嗣[1)]、本田智則[2)]、小澤暁人[2)]
Remma Sato, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue, Tomonori Honda, Akito Ozawa
1) 立命館大学, 2) 産業技術総合研究所
* rm0223ex@ed.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

近年建築・建設部門における環境負荷低減が重要視され[1)], 住宅の断熱性能の義務化が進んでいる[2)]. 断熱性能の向上は冷暖房エネルギー消費量を抑え，温室効果ガス排出量の削減に寄与することから，省エネ対策の柱として位置付けられている．特に空調エネルギー消費の削減は，住宅部門全体の環境負荷を低減するために重要であり，断熱性能の改善がその鍵を握る．

LCA により海外の特定の断熱性能における住宅の環境負荷を評価した既存研究はあるものの，加えて熱的快適性を包括的に評価した研究はこれまで注目されてこなかった．不快指数を用いた熱的快適性の評価を追加することにより，住人の快適性を犠牲にせず環境負荷を低減する設計が可能になる．

そこで，本研究では断熱性能の基準を満たすように設計した住宅と日本の既存住宅をシナリオとして比較し，LCA による環境負荷の定量評価と気候特性に応じた地域ごとの熱的快適性の両方の観点から断熱住宅のシナリオの評価を行う．それにより，断熱性能の向上が環境負荷の低減や住環境の快適性に与える効果を明らかにすることを目的とする．

研究実施にあたっては，利用地域が判別可能な約 14,000 台の空調機に関する 1 時間毎の運転データ(空調ビッグデータ)を用いて分析を行った．

2. 研究手法

2.1 断熱住宅のライフサイクル分析

住宅のライフサイクルは建設段階，運用段階，メンテナンス段階，廃棄段階の大きく 4 つの段階に分かれる．ここでは断熱性能と電力消費の関係性に注目するため，建設段階では異なる断熱材の生産に伴う CO_2排出量を，運用段階では断熱材に伴う空調エネルギー消費に起因する CO_2排出量を主な変化要因として評価する．メンテナンス段階と廃棄段階での環境負荷に関しては，G.P. Gerilla らの研究結果を用いた[3)].

なお，空調機ビッグデータには空調機が使用されている住宅の詳細が含まれていないため，都道府県別の平均的な延べ床面積のデータから対象地域の住宅の仮定を行った．住宅は寿命が 30 年の簡易的な木造の一戸建て住宅と仮定し，対象地域は気候特性の違いにより北海道，宮城県，新潟県，岡山県，長崎県，沖縄県の 6 つの地域を選択した[2)].

2.2 LCA によるシナリオ比較

断熱住宅の LCA を行うにあたり，既存住宅の現状を可視化するため，理論値に基づくシナリオ 1 と実測値に基づくシナリオ 2 を比較した．シナリオ 1 では国土交通省が定める地域別の断熱等級の UA 値[2)]を理論値とし, 各断熱等級を満たす住宅を対象とした. 一方, シナリオ 2 では空調ビッグデータに基づく都道府県別の空調機運転データを実測値とし，仮定した住宅を対象とした. ここで LCA における機能単位は床面積 1 ㎡の 30 年間の利用とする．

2. 2. 1 運用段階の算出

運用段階において，シナリオ 1 は断熱等級 2 から 5 で定められている UA 値から消費電力量Eを逆算した．計算には，式(1)[2)]より，住宅の外皮面積Aと室内外の温度差ΔT，空調機の APF を用いた．通年エネルギー消費効率(APF, Annual Performance Factor)は空調ビッグデータの対象機の値とする．シナリオ 2 は，空調ビッグデータを用いて消費電力量を引用した．

$$UA = \frac{Q_{loss}[W]}{A[m^2] \times \Delta T[K]} = \frac{E[kWh] \times APF \times 3.6 \times 10^6}{A[m^2] \times \Delta T[K] \times 3600[s]} \quad (1)$$

2. 2. 2 建設段階の算出

建設段階では，断熱材の生産に伴う CO_2排出量を算出する．シナリオ 1 は住宅が断熱等級 2 から 5 の断熱性能を満たすために必要な断熱材の資源量を，CO_2排出量，エネルギー消費量，コストが最小限となるように算出した．シナリオ 2 は空調ビッグデータより式(1)の右辺に消費電力量Eと室内外の温度差ΔTを代入することで既存住宅の断熱性能を推定し，シナリオ 1 と同様の方法で断熱材の資源量の推定を行う．断熱材以外の建材の製造や調達を含むその他のプロセスにおいては G.P.Gerilla らの研究結果を用いた[3)].

2.3 不快指数DIを用いた熱的快適性評価

本研究では，各シナリオにおける熱的快適性を評価するために不快指数[4)]を用いた．不快指数は電力使用

量予測のために開発されたもので気温Tと湿度Hを用いて以下の式(2)で表される．ここで気温とは室温を指す．室温Tは式(1)より室内外の温度差を逆算し，湿度Hは空調ビッグデータを用いた．期間は 1 月の午前 5 時から 7 時の 3 時間を対象とし，室温を変数として算出した数値によって住人の不快度合いを推定した．

$$DI = 0.81T + 0.01H(0.99T - 14.3) + 46.3 \quad (2)$$

3. 結果

ここでは，北海道における断熱住宅の 2 種類のシナリオの LCA 結果を図 1 に示す．理論値に基づくシナリオ 1(S1)では断熱等級 2, 3, 4, 5 に細分化しており，実測値に基づくシナリオ 2(S2)と比較している．

図 1 の LCA 結果より，住宅の断熱等級を上げることでライフサイクル全体にかかる環境影響は小さくなることがわかる．これは建設段階にかかる環境影響はわずかに大きくなるが，運用段階にかかる環境影響がはるかに小さくなるからである．年間を通して他の地域より冷暖房需要が少ない沖縄県においては建設段階にかかる CO_2排出量が運用段階にかかる CO_2排出量を上回ることがある．

シナリオ 1 とシナリオ 2 を比較すると，空調ビッグデータより推定した北海道の既存住宅の平均的な断熱等級は 4 の基準を満たしていないため，3 であると推定できる．これは沖縄県以外の他の地域においても同じ傾向がみられる．沖縄県の既存住宅は断熱等級 2 を下回る推定結果となった．

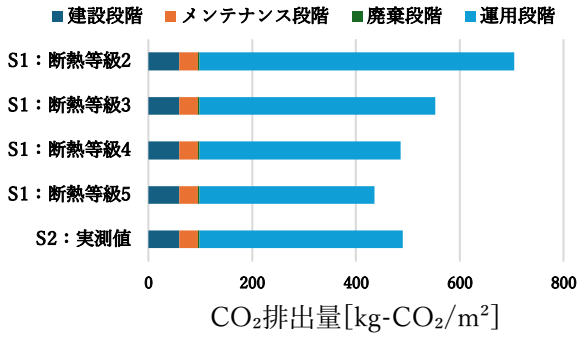


図 1 北海道の断熱住宅の LCA 結果

4. 考察

上記で示されたように住宅のライフサイクルにおける CO_2排出量は断熱等級により変化する．また，断熱等級の違いによる CO_2排出量に対する影響は建設段階ではほぼ無視できる一方，運用段階において大きいことが LCA により明らかとなった．

続いて持続可能かつ地域適応型の断熱住宅設計のために LCA に加え，断熱住宅の 2 種類のシナリオを熱的快適性の観点から分析した結果を表 1 に示す．LCA と同様に 6 つの地域の断熱住宅を対象として比較し，式(2)を用いて算出した不快指数を色別で分けた．

表 1 より住宅の断熱等級を上げることで快いと感じる人の割合は徐々に増えることがわかる．実際に沖縄県を除いた地域では断熱等級 2 の住宅では寒いと感じても断熱等級 5 の住宅ではほとんどの人が快いと感じるようになる．一方，理論値に基づくシナリオでは、沖縄県の結果から温暖地において高断熱住宅が常に熱的快適性を保証するとは限らないことが示唆された．

表 2 シナリオ別の不快指数

	北海道	宮城県	新潟県	岡山県	長崎県	沖縄県
S1：断熱等級2	53.9	54.7	53.8	52.8	52.1	64.6
S1：断熱等級3	60.5	56.9	55.7	53.5	53.6	66.0
S1：断熱等級4	65.0	70.0	63.9	61.1	61.0	72.5
S1：断熱等級5	69.6	73.4	69.1	68.9	67.3	78.2
S2：実測値	61.5	61.7	62.4	60.6	64.1	61.3

寒い(~55)
肌寒い(55~60)
何も感じない(60~65)
快い(65~70)
暑くない(70~75)
やや暑い(75~80)

5. 結言

本研究では，LCA や熱的快適性の観点から日本の地域別の断熱住宅のシナリオ評価を行った．これより，住宅の断熱性能向上に伴う建設段階での CO_2排出量の増加は極めて小さく運用段階が支配的であることから，両者間にトレードオフは生じないと示された．断熱性能の向上により環境負荷を削減しつつ，熱的快適性の向上も同時に期待できることがわかった．これらの結果は住人の快適性を犠牲にせず，今後の日本で取り組むべき課題である建築物分野での省エネ対策を加速するために役立つと考えられる．

ただ，本研究にはいくつかの限界が存在する．具体的には，住宅に関する仮定の正確性やライフサイクルコストの要素を考慮できていない点が挙げられる．本研究の結果にこれらの要素を含めたより詳細な分析を行うことで，日本全国の住宅においてより最適な断熱住宅のシナリオを提案することが可能になる．これらが今後の研究で取り組むべき課題である．

6. 引用文献

1) I. Andersen: 2021 Global Status Report for Buildings and Construction, UN Environment Programme, (2021), pp.39-41
2) 国土交通省：“建築物省エネ法に基づく建築物の販売・賃貸時の省エネ性能表示制度”，国土交通省, (オンライン), 入手先＜https: //www.mlit. go.jp/shoene-label/＞, (参照 2024)
3) G.P. Gerilla, K. Teknomo, K. Hokao: Building and Environment, 42 (7), (2007), pp.2778-2784
4) 国土交通省　気象庁：“湿度・気圧・日照時間について”，気象庁, (オンライン), 入手先＜https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/faq/faq5.html＞, (参照 2024)

日本の建築物の寿命についての検証

Verifying the Lifetime function and half-life of buildings in Japan

○三條瑚都子*[1)]、加用千裕[1)]、外崎真理雄[2)]
Kotoko Sanjo, Chihiro Kayo, Mario Tonosaki
1) 東京農工大学大学院, 2) 国立研究開発法人　森林研究・整備機構　森林総合研究所
* s234411v@st.go.tuat.ac.jp

1. 背景・目的

建築物が環境に及ぼす影響について評価する方法は、ライフサイクルアセスメントやマテリアルフロー分析、産業連関表分析など、様々であり、正確な寿命を使用することは、より正確な環境への影響を把握するために重要である。このようなことから、建築物自体の寿命について解明することは建築物に関わる環境影響評価にとって非常に有益であると考えられる。

建築物の「寿命」というと、主に平均寿命（同じ年に建てられた建築物のうち半数が取り壊される経過年）のことを示す場合が多いが、本研究内ではこれを半減期と称する。さらに、建築物のストック（現存量）は、インフロー（その年の新規増加量）と寿命関数を用いて推計することができる。この寿命関数というものは、半減期をパラメーターとして持つ関数であり、建築物が時間経過に伴いどのように減少していくのかということを表す。建築物の寿命を詳細に把握するためには、構造・用途ごとに寿命関数や半減期を特定することが必要であるが、日本では年単位の研究しか報告されておらず、国全体の知見が不足している[(1-3)]。

よって、本研究の目的は、日本全国の建築物を用途と構造によって分類し、それぞれに適する寿命関数および半減期を解明することである。

2. 手法

分析は日本全国の建築物を対象に、1974–2021 年の期間で行われた。

2.1 入手データ

本研究で入手する統計データは、２種類である。一つ目が、建築物のインフローの床面積データである。二つ目は、建築物のストックの床面積データである。これらの統計データは「固定資産の価格等の概要調書（総務省）」から入手した。

2.2 分析手法

まず、寿命関数の候補として使用する６種類の累積密度分布とインフローのデータを乗じることにより、建築物のストックの推計値を算出する。その後、建築物のストックのデータとその推計値の残差平方和を取り、それがそれぞれ最小になるように寿命関数のパラメーターを決定する。最終的に残差平方和が最小であったものをその「用途」・「構造」の建築物に最適な寿命関数および半減期であるとする。

分析にはエクセルのソルバー機能を使用した。

2.3 分析における建築物の分類

本研究では、建築物を「用途」と「構造」という特性で分類して分析を行った。

「用途」としては①住宅建築物、②事務所・商業建築物、③工場・市場・倉庫、④ホテル・病院という４種類の分類区分を設けた。これは固定資産の価格等の概要調書の統計区分を考慮して設定された。

「構造」については、木造、鉄骨鉄筋コンクリート造（SRC 造）、鉄筋コンクリート造（RC 造）、鉄骨造（S 造）、コンクリートブロック造（CB 造）の５種類に分類した。構造についても、固定資産の価格等の概要調書の統計区分を考慮して設定された。

3. 結果

建築物の用途ごとに結果を示す。

＜①住宅建築物＞

木造住宅建築物の寿命関数はワイブル分布が適することが分かった。半減期は 1974 年が 34 年、1975–1996 年の期間が 49 年、1997–2021 年の期間が 91 年という結果になった。図１に６種類の寿命関数を用いて算出したストックの推計値と統計データとして入手したストックの値を比較している。

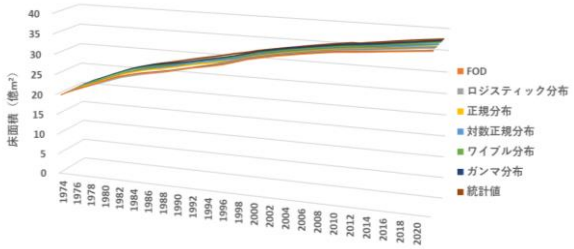


図１．木造住宅建築物の寿命関数によるストック量の推計値と統計値

住宅建築物においては、SRC 造と RC 造、そして S 造をまとめて非木造として扱った。非木造住宅建築物は対数正規分布が適しており、半減期は 1974 年が 50 年、1975–1996 年の期間が 50 年、1997–2021 年の期間が 64 年であった。

CB 造住宅は対数正規分布が適しており、半減期は 1974–2021 年の期間で変わらず 48 年であった。

＜②事務所・商業建築物＞

木造の事務所・商業建築物は、寿命関数としては FOD が適しているという結果であり、半減期は 1974 年が 69 年、1975–1996 年の期間が 23 年、1997–2021 年の期間が 28 年であった。

RC 造の事務所・商業建築物は、対数正規分布が

寿命関数として適し、半減期は 1974–2021 年の期間で変わらず 59 年であった。

S 造の事務所・商業建築物は、対数正規分布が寿命関数として適し、半減期は 1974–2021 年の間で変わらず 51 年であった。

CB 造の事務所・商業建築物においても、対数正規分布が適し、半減期は 1974–2021 年で変化することなく 51 年という結果であった。

SRC 造に関しては、特定の結果を得ることができなかった。

4. 考察

木造住宅建築物の半減期は 1974 年が 34 年、1975–1996 年の期間が 49 年、1997–2021 年の期間が 91 年であったが、先行研究の結果と比較すると特に 1997–2021 の期間で約 30–40 年ほど長い（図 2）。これについては原因と考えられる点が３つ挙げられる。まず一つ目は、分析対象地域の違いである。1 年間のデータで分析した先行研究では都市部のみを対象としていた[1–3]。建築物の半減期は都市部の方が他の地域よりも短くなる傾向があることが報告されていることから、日本全国を対象とした本研究は都市部のみを対象とした先行研究よりも長い半減期を持つことが想像される。二つ目は分析対象の建築物の種類の違いである。Kayo et al.,2022 は本研究と同様に日本全国を対象としているが、用途が住宅に限定されていない。住宅のみを対象としている本研究は近年の住宅の長寿命化の影響を受けたことで、このように先行研究との結果の差が出たと考えられる[4]。

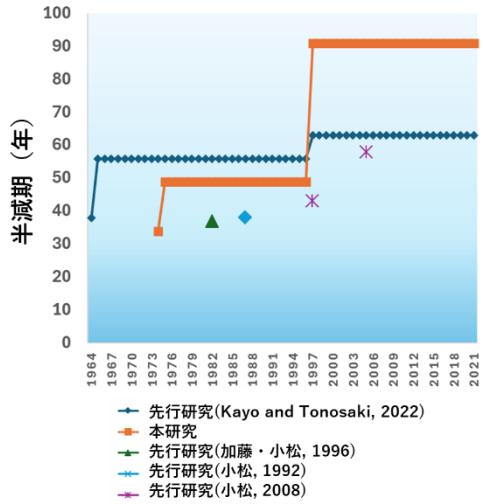


図２．木造住宅建築物の半減期における先行研究と本研究の結果の比較[1–4]

三つ目は空き家の考慮の有無である。住宅・土地統計により調査される空き家率を考慮して再度分析を行うと、先行研究の結果に近づいたことから、実際に住宅として機能している建築物の半減期は 91 年よりも短くなるのではないかということが考えられた。

5. 結論

本研究では、日本全国の建築物を用途や構造で分類し、適切な寿命関数と半減期を明らかにするために、寿命関数のパラメーターを最適化する分析を行った。これにより、木造住宅はワイブル分布、非木造住宅と CB 造住宅は対数正規分布が適切であることが分かった。木造と非木造では、1974–2021 年の期間中に半減期が変化していることも分かった。また、事務所・商業建築物については、木造は FOD、その他の構造は対数正規分布が適切な寿命関数として決定された。1974–2021 年の間で半減期が変化していたのは木造のみであるという結果になった。

木造住宅建築物については、既存の研究で報告されていたものよりも長い半減期が得られたが、空き家を考慮して再度分析したところ、半減期は先行研究の結果に近づいたことから、空き家率が多少なりとも影響していると考えられる。

今回の研究で明らかになった寿命関数や半減期を今後の将来予測や環境影響評価に用いることで、より正確な結果が得られると考えられる。

6. 参考文献

1). 小松幸夫. 建物寿命の年齢別データによる推計に関する基礎的考察. 日本建築学会計画系論文報告集. 1992 年;439:91–9.

2). 小松幸夫. 1997 年と 2005 年における家屋の寿命推計. 日本建築学会計画系論文集. 2008 年;73(632):2197–205.

3). 加藤裕久, 小松幸夫. 木造専用住宅の寿命に関する調査研究: 累積ハザード法による寿命推定. 日本建築学会計画系論文報告集. 1986 年;363:20–6.

4). Kayo C, Tonosaki M. Lifetimes of buildings in Japan. Resources, Conservation and Recycling. 2022 年;185:106504.

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 9:00 ~ 10:20 F会場：2333小講義室（3F）

[1-F1] 一次産業（1）

座長：レオン 愛 (国際農林水産業研究センター)

9:00 ~ 9:20

[1-F1-01]

農業のスマート化がライフサイクル温室効果ガス排出量へ及ぼす影響

*田口 潤[1]、本藤 祐樹[1]、森泉 由恵[1] (1. 横浜国立大学)

9:20 ~ 9:40

[1-F1-02]

Domestic Carbon Sourcing Through Forestry Management Considering Wood-Based Material and Energy Production Pathways

* 紫怡[1]、Teah Heng Yi[1]、兼松 祐一郎[1]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学)

9:40 ~ 10:00

[1-F1-03]

早生桐を利用した内装材におけるライフサイクル評価

*山口 実友[1]、大澤 悠[2]、内藤 茂樹[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. パナソニックハウジングソリューションズ株式会社)

10:00 ~ 10:20

[1-F1-04]

森林・木材の炭素蓄積変化を考慮した木材利用によるGHG排出削減効果の評価

*林 亮介[1]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学)

©日本LCA学会

農業のスマート化がライフサイクル温室効果ガス排出量へ及ぼす影響

Impacts on life cycle greenhouse gas emissions of the transition from conventional to smart farming

○田口潤*[1)]、本藤祐樹[1)]、森泉由恵[1)]
Jun Taguchi, Hiroki Hondo, Yue Moriizumi
1) 横浜国立大学
* taguchi-jun-wy@ynu.jp

1. 緒言

我が国の農業においては、営農者の高齢化、及びそれに伴う労働力不足が課題となっている。そうした背景の下、ロボット技術、人工知能、IoT といった先端技術を活用するスマート農業に注目が集まっている。スマート農業は、農作業の自動化やデータの収集・活用等を行うことによって、農作業の効率化や労働負荷の軽減、生産コストの削減等を可能とし、労働力不足の解消、農業の生産性向上等への貢献が期待される。

また、スマート農業技術を活用することに伴い、肥料や農薬、燃料といった中間投入の削減が期待され、温室効果ガス（以下、GHG）削減への貢献も注目される。他方、農業のスマート化にあたっては、慣行農法と比較して機械資本の投入が増加することから、その GHG 排出削減効果を評価するためには、ライフサイクル全体を考慮した包括的な分析が必要となる。しかし、これまでにそうした分析は十分に行われていない。

本研究では、水田作（水稲）を例として農業のスマート化がライフサイクル（以下、LC）GHG 排出量に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。

2. 研究の方法

2.1 分析の概要

本研究の分析フローを図 1 に示す。本研究では、390 部門の平成 27 年（2015 年）産業連関表[1)]（以下、2015 年表）を基礎として、スマート農業関連部門を新設した投入係数表（以下、拡張投入係数表）を作成し、産業連関分析を行うことで、水田作のスマート化に伴う LC-GHG 排出量の変化について分析を行った。

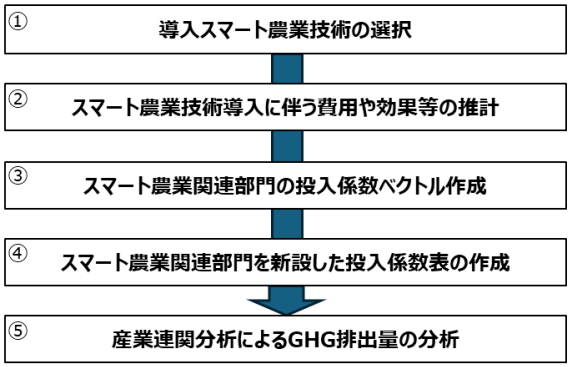


図 1 本研究における分析のフロー

2.2 スマート農業技術の選択/導入費用・効果の推計

本研究の分析において考慮したスマート農業技術は、表 1 の通りである。なお、本研究で対象とする自動運転技術は、有人監視下での無人走行が可能な水準を想定した。また、営農管理システムは農業用機械と連携することで、収量マップや可変施肥マップの作成が可能な製品を想定した。

次いで、農林水産技術会議及び農研機構が実施している「スマート農業実証プロジェクト」の報告書[2)]や、行政が公開する関連資料（例えば文献 3)）、各種統計（例えば文献 4)）、農業用機械製造業者の製品カタログ等を参照し、各スマート農業技術の導入に伴う費用やその内訳、及び中間投入の削減等に関する効果を調査した。そして、それらを参考として、水田作のスマート化に伴う各種の変化（中間投入（肥料、農薬、燃料）、資本投入、単収の変化等）が農業経営へ与える影響を定量化した。

表 1 本研究で導入を想定したスマート農業技術とその主な用途

導入スマート農業技術	主な用途
自動運転トラクタ	耕起・代掻き
自動運転田植機	田植、施肥
農業用ドローン	防除
自動運転コンバイン	収穫
営農管理システム	営農管理、可変施肥マップ作成

2.3 スマート農業関連部門の投入係数ベクトル作成、及び拡張投入係数表の作成

本研究では、2015 年表を基礎として、「米（スマート農業）」、「スマート農業用機械」、「農業用ドローン」の 3 部門をスマート農業関連部門として新設し、投入係数ベクトル及び拡張投入係数表の作成を行った。

新設した 3 部門の投入係数ベクトルは、2015 年表における既存の関連部門の投入係数ベクトルを基礎として、2.2 において定量化したスマート化に伴う各種変化を与えることによって作成した。

そして、それらの新設したスマート農業関連部門の投入係数ベクトルを、2015 年表における投入係数表に

追加することで、拡張投入係数表（393 部門）を作成した。この時、新設した 3 部門の産出構造は、投入構造と同様に既存の部門を参考として想定した。

2.4 LC-GHG 排出量の推計

GHG のうち、CO_2（エネルギー起源、非エネルギー起源）、CH_4、N_2O を対象として排出量の推計を行った。本研究では、米部門と米（スマート農業）部門において生産される財（米）は、同等のものであると想定した。その上で、慣行農法からスマート農業への段階的な移行に伴う GHG 排出量の変化を明らかにするため、スマート化率（米部門と米（スマート農業）部門の生産額合計に占める米（スマート農業）部門の割合）別に排出量の推計を行った。

まず、新設したスマート農業関連部門の直接 GHG 排出係数を算出した。3EID[5]における既存の関連部門の直接排出係数を基礎として、2.2 で定量化したスマート化に伴う各種の変化を考慮することで算出した。

次に、式(1)より水田作の LC-GHG 排出量（E）の推計を行った。

$$E = \mathrm{e}^{T}(\mathrm{I} - \mathrm{A})^{-1}\,\mathrm{F} \qquad (1)$$

ここで、e: 直接 GHG 排出係数、T: 転置、I: 単位行列、A: 投入係数行列、F: 最終需要ベクトルを意味する。

3. 結果と考察

図 2 に、米生産額 100 万円当たりのスマート化率別 LC-GHG 排出量の推計結果を示す。スマート化率 0%は、すべての米が慣行農法で、100%はスマート農業で生産されたことを示している（したがって、以下ではスマート化率 0%を慣行農法、同 100%をスマート農業とする）。本結果は、水田作が慣行農法からスマート農業へと完全移行した場合、LC-GHG 排出量が約 8%削減される可能性を示している。排出量に占める GHG 別の内訳は、各スマート化率において大きな差異はなく、割合は CH_4、CO_2（エネルギー起源）、CO_2（非エネルギー起源）、N_2O の順に大きい。また、慣行農法、スマート農業ともに、総排出量のうち営農活動に伴う排出量は約 9 割で、資本投入に係る排出量は約 1 割である。

LC-GHG 排出量を産業部門別にみると、慣行農法では米部門、スマート農業では米（スマート農業）部門からの排出量（直接間接）が最も大きい。両者を比較すると、後者では排出量が 8%小さいが、これは主に、肥料、燃料を中心として中間投入が削減されたことや、単収が向上したこと等による影響と考えられる。次いで排出量が大きい部門として、慣行農法、スマート農業ともに事業用電力部門、化学肥料部門が挙げられる。化学肥料部門は、他の部門と比較してスマート化に伴う削減率が大きく、約 11%と推計された。

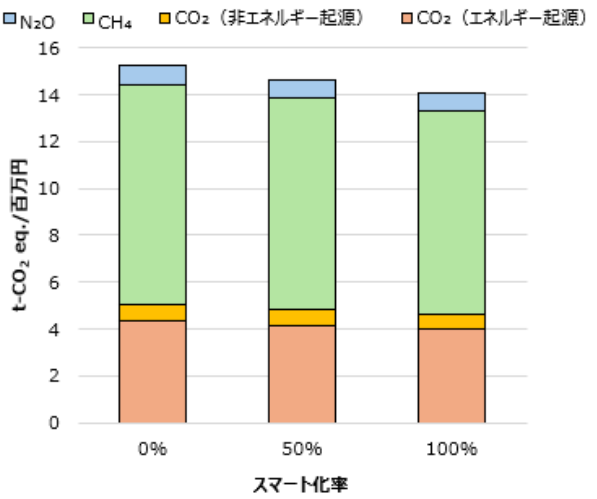


図 2 スマート化率別米生産額百万円当たりの GHG 排出量（試算値）

他方、事業用電力部門では、スマート化に伴う排出量の削減率が 6%と比較的小さい。これは、中間投入の削減が電力消費量を押し下げる一方で、スマート化に伴う機械資本投入の増加が、それらの製造に伴う電力消費を増加させるためである。

以上より、スマート化の推進は一定程度農業の LC-GHG 排出量削減に貢献する可能性があるといえる。他方、さらなる GHG 排出削減のためには、スマート農業技術の導入のみならず、農業用機械の水素化・電化といった燃料転換の促進や、CH_4 削減に向けた栽培体系の構築などが重要となる。

4. 結言

今後は、他のスマート農業技術の導入や、スマート農業用機械の燃料転換等を考慮した分析を行う予定である。同時に、そうした変化に伴う社会経済的な影響に着目した分析の検討も必要となる。

5. 引用文献

1) 総務省: “平成 27 年（2015 年）産業連関表”, (2019).
2) 農林水産技術会議事務局, 農研機構: “令和元年度スマート農業実証プロジェクトの成果について”, (2022).
3) 茨城県農業総合センター: “スマート農業導入の手引き（第 4 版） 普通作物 編”, (2024).
4) 農林水産省: “農業経営統計調査 平成 27 年産米及び麦類の生産費”, (2017).
5) 国立環境研究所: “産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）”, (2019).

6. 謝辞

本研究は、JST 低炭素社会実現のための社会シナリオ研究事業 JPMJCN2302 による支援を受けている。

Domestic Carbon Sourcing Through Forestry Management Considering Wood-Based Material and Energy Production Pathways

○Ziyi Han[1)], Heng Yi Teah[1)], Yuichiro Kanematsu[1)], Yasunori Kikuchi[1)]
1) The University of Tokyo
* Zzzhan@chemsys.t.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

Forests are essential for mitigating climate change, serving as both carbon sinks and sources of renewable materials. In Japan, insufficient forest management has resulted in a suboptimal age class distribution of forests, with many mature trees left aging and remained unattended, while the plantation of new trees are inadequate.[1)] This constrains the downstream utilization of domestic woody biomass, both currently and in the future. It also increases the reliance on imported wood products, lowering the resource self-sufficiency. To address these challenges, a systematic approach would be required to identify and enhance the opportunities of emission reduction during the transformation of forest resources to usable products along the forest value chain. This strategy would promote a sustainable use of domestic wood resources, in which a long-term forest health and productivity is ensured, while the reliance on imported materials is reduced.

In this study, we aim to elucidate the potential changes in the environmental performance of utilizing the increased domestic wood resources produced from forestry management activities to replace the imported materials, to provide a broader implication of the environmental benefits and challenges associated with enhancing domestic wood resources.

2. Methodology

To identify the opportunities of GHG reduction along forest value chain, we conducted a simulation of long-term carbon balance in forest management and forest resources utilization. The simulation incorporated the material flows of woody biomass across five modules, which includes two wood supply modules (forestry management and wood processing) and three wood utilization modules (construction material production, biomass energy generation, and biochemical conversion). Then, we explored how substituting imported wood materials with domestic wood resources across various applications would affect greenhouse gas (GHG) emissions. Moreover, we examined how a shift toward self-sufficient domestic wood resources would influence the life cycle environmental performance of the forest value chain.

2.1 Domestic wood supply

To simulate the long-term growth of forests and the derived roundwood supply under active forestry management, we designed a model that represents the transitioning from the current forest age class distribution to a more balanced uniform distribution within 100-year simulation period.[2)] The transition is achieved by forestry management activites such as harvesting, thinning, and replantation. The model also tracks the material flow of woody biomass from forest stock to harvested wood, which is then processed by sawmills to produce three major wood products: timber, plywood, and wood chips.

2.2 Wood utilization

When allocating the domestic roundwood supply, priority is placed on meeting the 100% self-sufficiency for timber and plywood for wood construction. The rest of the roundwood are accounted for wood chips for either bioenergy generation or biochemical conversion. For bioenergy generation, wood chips are used as feedstock combined heat and power (CHP) generation plants. For biochemical production, dry woody biomass undergoes thermochemical conversion[3)] to produce hydrocarbons that serve as energy carriers, including hydrogen, jet fuels and biodiesel.

For imported wood products, the system boundary encompasses overseas production, overseas transportation (both by truck and by shipment), and the transportation by truck in Japan. The material flow of imported wood products is derived from official import data records. Timber and plywood are considered for imported wood construction materials. For imported bio-based fuel materials, six different products are included, comprising both wood-based and non-wood-based fuels that are directly used in CHP.

The overall GHG emissions for the imported materials can be described by Eq. (1).

$$\mathrm{GHG}_{domestic} = \mathrm{GHG}_{production} + \mathrm{GHG}_{transportation,truck} \quad (1)$$

where $\mathrm{GHG}_{domestic}$ is the total GHG emissions of domestic wood products, $\mathrm{GHG}_{production}$ is the GHG emissions from production, and $\mathrm{GHG}_{transportation,truck}$ is the GHG emissions from domestic transportation by truck.

The overall GHG emissions for the imported materials can

be described by Eq. (2) as below.

$$\mathrm{GHG}_{imported} = \mathrm{GHG}_{production} + \sum_{i=1}^{3} \mathrm{GHG}_{transportation,i} \quad (2)$$

where $\mathrm{GHG}_{imported}$ is the total GHG emissions of imported material, $\mathrm{GHG}_{production}$ is the GHG emissions from production, and $\mathrm{GHG}_{transportation,i}$ is the GHG emissions from transportation, with index i=1, 2, 3 indicating domestic transportation (i=1), overseas transportation by truck (i=2), and overseas transportation by shipment (i=3).

The substitution of imported products is functional based. For example, domestic wood chips are employed to match the total theoretical maximum potential energy provided by imported fuel materials, and domestic biochemicals can substitute their imported fossil-based alternatives in transportation.

3. Results and discussion

The simulation of long-term carbon balance in forest and forestry management has demonstrated that a continuous active forestry management strategy would result in an overall decrease in carbon fixation effect in the forest. This is due to efforts to adjust the forest age class distribution, where mature trees are harvested, thereby reducing the presence of trees with high carbon sequestration capacity.

The changes in GHG emissions that result from substituting imported wood products by their domestic alternatives are calculated by accounting for the avoided emissions resulting from the use of domestic wood instead of imported wood. We use composite curves, similar to attainable region graphs, to represent the avoided emissions,[4] considering the constraints of self-sufficiency rates and the availability of woody biomass.

Our results revealed that the additional woody biomass from forest and forestry management will make up for the reduced carbon sequestration effect by extensively substituting imported resources. The substitution of both woody construction materials and woody biomass co-firing feedstock can contribute to GHG emission reduction significantly, as switching to local sourcing can avoid long-distance transport.

Our results indicated that forestry management does not necessarily lead to improved carbon fixation in the forest, nor does it always enhance the overall reduction of GHG emissions, as forestry activities themselves also contribute to GHG emissions. Therefore, the overall contribution to GHG reduction is limited when considering only the supply side of wood resources. As such, it is essential to integrate both the supply and downstream utilization of wood resources to clarify the environmental benefits of the forestry management strategy through a more comprehensive approach.

4. Conclusion

Simulating the long-term carbon balance and the avoided emissions from substituting imported wood products with domestic wood resources enables the clarification of the environmental benefits of promoting utilization of domestic wood resources throughout the full forestry value chain. Our study can provide insights on the selection of pathways at forest management and forest resource utilization aiming at maximizing carbon mitigation in the forestry sector, which would support the policymakers and relevant industry stakeholders for a more comprehensive forestry management and biomass application planning in Japan in the future.

Acknowledgement

This work was supported by JST SPRING, Grant Number JPMJSP2108. The activities of the Presidential Endowed Chair for “Platinum Society” at the University of Tokyo are supported by Mitsui Fudosan Corporation, Sekisui House, Ltd., East Japan Railway Company, and Toyota Tsusho Corporation.

References

1) Forestry Agency, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Japan: “Annual Report on Forest and Forestry in Japan, Fiscal Year 2022 (Summary),” (2022), p10.
2) Oosawa, K. *et al.*, Forestry and Wood Industry, in "Energy Technology Roadmaps of Japan", ISBN13: 9784431559498 (2016)
3) Corradini, L. *et al.*, Simulation-based design of regional biomass thermochemical conversion system for improved environmental and socio-economic performance, Comput. Aided Chem. Eng., **52**, 2361-2366, (2023)
4) Chen, I.-C., Fukushima, Y., Kikuchi, Y., & Hirao, M.: *Int. J. LCA,* **17**(2), (2012), pp.119–125.

早生桐を利用した内装材におけるライフサイクル評価

Life cycle assessment of interior materials using early-ripening paulownia

○山口 実友*[1)]、大澤 悠[2)]、内藤 茂樹[1)]、伊坪 徳宏[1)]
Miyu Yamaguchi, Osawa Yu, Shigeki Naito, Norihiro Itsubo
1) 早稲田大学, 2) パナソニックハウジングソリューションズ株式会社
* miyu18@ruri.waseda.jp

1. はじめに

2050 年の脱炭素社会達成に向けて、エネルギー消費量の約 3 割を占める建築分野では、木材利用による低炭素化が注目されている。木材では、樹木が成長過程で吸収した CO_2 を炭素として蓄積し、建物に固定することができるため、持続可能な炭素循環サイクルを形成できる。本研究では、密度が小さく多孔質なため軽量で断熱性や吸放湿性に優れ、日本では古来より箪笥のような家具などに使用されてきた桐のうち、成長が早く炭素固定効率の高い「早生桐」を非住宅向け床材に利用し、植物の炭素固定を考慮した内装材のライフサイクル影響評価を行うことで、樹木の炭素固定による CO_2 除去が与える環境負荷削減効果とネガティブエミッション貢献度を明確化することを目的としている。

2. 方法

2.1. 研究方法

本研究では、非住宅(オフィスや店舗)向けの床材を評価対象として算定を行った。評価対象は、植林-伐採-輸送-製造-施工-使用-廃棄までで、影響領域は、気候変動気候変動(IPCC 2021 GWP 100a)・土地利用とした。

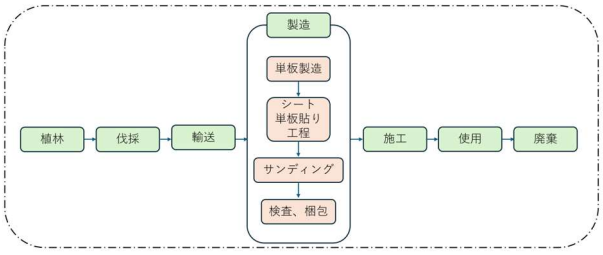


図 1 システム境界

本研究では、床材の輸送から施工に関しては、パナソニックハウジングソリューションズ株式会社(PHS社)製のオフィス向け床材を対象にした調査で実測された 1 次データを使用し、”植林から伐採”と”使用から廃棄・改修”に関しては、論文から引用した 2 次データと組み合わせて使用する。また、主材料である合板に関しては、スギ、早生桐の 2 種類の合板を用いたシナリオから環境影響を評価する。機能単位は、床材 $1m^2$ あたりとし、算定には、IDEA ver3.4 を用いた。

2.2. 算定方法

本研究では、最も多用されている式(1)をベースに算定を行った。

$$CO_2\text{固定量} = \text{気乾済み木材体積} \times \text{木材密度} \times \text{炭素含有率} \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

3. 算定結果

3.1. 炭素固定量と GHG 排出量の比較

スギ合板、早生桐合板を用いた床材の GHG 排出量の算定結果を図 2 に示す。また、廃棄のシナリオは、埋め立てで統一した。

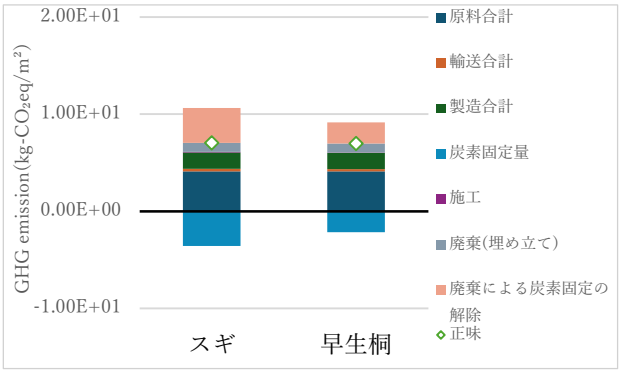


図 2 床材(スギ), 床材(早生桐)の GHG 排出量の比較

スギ合板を用いた床材の GHG 排出量は、7.02(kg-CO_2eq/m^2)、早生桐合板を用いた床材の GHG 排出量は、6.97(kg-CO_2eq/m^2)となった。早生桐は桐と同様に密度が小さいため、式(3.1)を用いた結果、早生桐合板を用いた床材は、スギ合板を用いた場合より炭素固定量は小さいが、軽量なため、輸送に係る GHG 排出量も小さくなった。

3.2. 廃棄・改修方法の違いによる GHG 排出量の比較

床材の廃棄・改修方法の違いによる GHG 排出量の比較を図 3 に示す。廃棄方法については、廃棄木材を分別し、破砕して埋め立てることを想定した。また埋め立ての代わりに、廃チップでパーティクルボードを生

成する場合と廃チップを燃焼してバイオマス発電に活用する場合についても試算を行った。改修方法に関しては、一般的な床の改修で全面が貼り換えられることが主流であるのに対し、PHS 社のオフィス向け床材は不具合が生じた部分について 1 ピース単位から交換（一部貼り替え）が可能であり、本要旨では施工面積の 10 分の 1 を貼り換えることを想定して試算した。

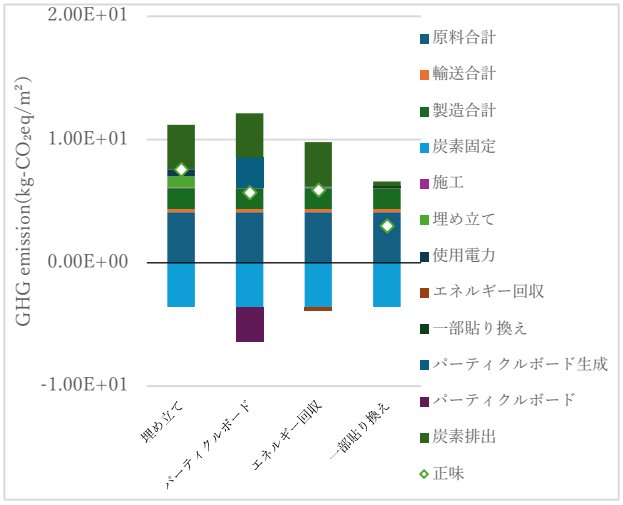


図 3 床材（スギ合板）の廃棄による GHG 排出量の比較

試算の結果、廃棄方法の影響については、埋め立てをパーティクルボード生産あるいはエネルギー回収にすることで GHG 排出を削減できる結果となった。改修方法については、一部貼り換えによって GHG 排出を抑制でき、入退去時の改修における GHG 排出の削減が期待できる結果となった。

3.3. 土地利用面積の比較

次に、スギ合板、早生桐合板を用いた床材の原料の土地利用面積の算定結果を図 4 に示す。

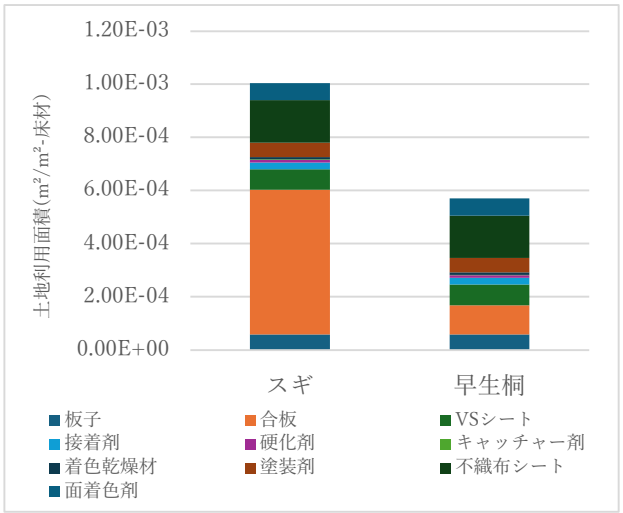


図 4 床材（スギ），床材（早生桐）の土地利用面積の比較

スギ合板を利用した床材の原料の土地利用面積は 10.0E-04(m^2/m^2-床材)、早生桐合板を利用した床材の原料の土地利用面積は 5.70E-04(m^2/m^2-床材)となった。早生桐はスギの 4.93 倍の速さで成長するため、合板の土地利用面積は 1/4.93 へ小さくなる。そのため、床材の原料の土地利用面積を 43.0%削減できる。

4. まとめ

木材を内装材などの建材として同じ単位面積に施工した場合、早生桐は密度が小さいため、他の密度の大きい木材に比べて、床材への炭素固定量は少ない。しかし、輸送時の GHG 排出量が小さいため、全体の GHG 排出量はわずかに小さくなることがわかった。また、早生桐は森林循環サイクルが早いことから、原料の土地利用面積を削減することができる。早生桐を建材に活用することで、自然環境への影響を小さく保ちながら且つ効率的に大気中の炭素を固定できる可能性を確認できた。

したがって早生桐の活用については、軽量性・断熱性・吸湿性などの特徴を活かした新たな商品の開発および利用の拡大によって、既存のスギなどの木材利用と相乗した脱炭素などの環境貢献が図れると考えられる。例として、早生桐の高い断熱性を活かした、空間の温度調節のために必要なエネルギーの削減をしながら、高い吸音性を活かした、居住快適性の向上などを同時に達成できる床材や壁材などが期待できる。

また床材の廃棄・改修方法については、部分的に改修する方法はオフィスや店舗のような入退去が頻繁に行われる領域での GHG 排出抑制を期待できる。

5. 今後の展望

早生桐は二次林であり、近年植林を経て普及が進んでいる。今回の結果は、一次林と二次林の違いが反映されていないため、その違いを考慮した環境影響評価を実施することが課題である。

6. 引用文献

鈴木誠一：“早生桐植林地の土壌調査及びバイオマス調査”，（2019），pp. 1−15

森林の炭素蓄積変化を考慮した木材利用による GHG 排出削減効果の評価

Assessment of GHG emission reduction effects of wood use considering changes in forest and wood carbon stocks

○林亮介*[1)]、橋本征二[2)]
Ryosuke Hayashi, Seiji Hashimoto
1)立命館大学大学院, 2)立命館大学
* ce0027xf@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

温室効果ガス(GHG)の削減は世界共通の課題であり、日本では、2030 年度において 46%の削減(2013 年度比)を目指すこととしている。木材は、再生可能な資源であり、カーボンニュートラルな性質を持ち、炭素を貯蔵することができることから、木材により炭素強度の高い建築材や化石燃料を代替することで、GHG の排出削減に貢献することができると考えられる。Lippke et al.[1)]は、森林管理と木材利用による GHG 排出削減に関する近年の研究をレビューしているが、森林は国によっても異なり、日本の条件下での GHG 削減効果の分析も行う必要がある。本研究では、森林・木材の炭素蓄積変化を考慮し、木材を代表的な利用先である建築材に利用した場合と、木質バイオマス発電の燃料としてエネルギー利用した場合[2)]の GHG 排出低減効果の評価を日本の条件下で行い、GHG 排出低減に効果的な森林の利用方法について考察した。

2. 方法

本研究では森林の伐採(主伐、間伐)による森林・木材の炭素蓄積変化を考慮し、木材の建築材代替・エネルギー代替による GHG 排出削減効果を評価する。具体的には、森林の炭素貯蔵量(t-C)、建築材の炭素貯蔵量(t-C)、木材の建築材利用による炭素排出回避量(t-C)、木材のエネルギー利用による炭素排出回避量(t-C)を考慮し、以下のシナリオで正味の炭素排出削減効果を評価する。

① 主伐、間伐を行い、収穫した主伐材を建築材利用し、収穫した間伐材をエネルギー利用する。
② 主伐、間伐を行い、収穫した木材をすべてエネルギー利用する。

また、以下の条件で分析する。

- 木質バイオマスの種類と主伐周期：スギ、40 年
- 初期状態：面積 40ha、40 区画の法正林で、最大林齢が 40 年生
- 歩留まり：建築材利用:50%、エネルギー利用:80%
- 建築物の寿命：木造、非木造ともに 50 年

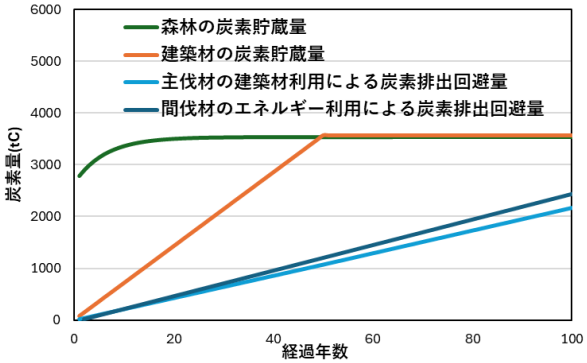


図　主伐、間伐を行い、主伐材を建築材利用、間伐材をエネルギー利用した場合の各炭素量の推計結果

3. 結果および考察

本要旨では、①のシナリオにおける各炭素量の変化の推計結果を図に示す。建築物の寿命が 50 年であるため、建築材の炭素貯蔵量は経過年数が 50 年以降で一定となり、森林の炭素蓄積量と同等になると推計された。建築材利用の歩留まりを 50%としていることから、40 年経過した時の建築材の炭素貯蔵量が、本研究で想定する法正林の地上バイオマスの炭素貯蔵量に同等となると考えられ、地下バイオマスも考慮すると、妥当な結果である。また、建築材利用による炭素排出回避量と間伐材のエネルギー利用による炭素排出回避量は単調に増加し続けることとなり、長期的にはこの効果が大きくなると考えられる。

謝辞：本研究は、環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20223C02)による成果である。

引用文献

1) Lippke, B., et al.: *Carbon Management,* 2(3), 303-333, 2011
2) 林亮介ら：第 19 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、2-C1-01、2024

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 10:40 ~ 12:00 F会場：2333小講義室（3F）

[1-F2] 一次産業（２）

座長：佐々木 勇麻 ((農業・食品産業技術総合研究機構)

10:40 ~ 11:00

[1-F2-01]

生産性向上と環境貢献を目指したコメ生産システムのデザイン：ビール酵母資材等のバイオスティミュラントが実現する新たな乾田直播栽培の可能性

*林 清忠[1]、北川 隆徳[2]、山﨑 能央[3]、真中 千明[2]、芦田 延久[2]、上籔 寛士[2]、安田 源太郎[2] (1. アースシフトグローバル・アジア合同会社、2. アサヒバイオサイクル株式会社、3. 株式会社ヤマザキライス)

11:00 ~ 11:20

[1-F2-02]

植物細胞農業による培養米生産の環境影響評価

*竹中 夏史[1]、菊地 怜[3]、松本 萌人[2]、井岡 隼人[3]、加用 千裕[1]、五十嵐 圭介[2] (1. 東京農工大学大学院農学府、2. 東北大学大学院農学研究科、3. 東北大学農学部)

11:20 ~ 11:40

[1-F2-03]

LCA手法を用いた水稲栽培の有効性評価

*レオン 愛[1] (1. 国際農林水産業研究センター)

11:40 ~ 12:00

[1-F2-04]

農作物を対象とした栽培時活動量データベースの構築

*湯 龍龍[1]、豊島 浩史[1]、佐々木 勇麻[1]、GAJASINGHE ARACHCHIGE GANGA KAVINDI [1] (1. 農業・食品産業技術総合研究機構)

©日本LCA学会

生産性向上と環境貢献を目指したコメ生産システムのデザイン：ビール酵母資材等のバイオスティミュラントが実現する新たな乾田直播栽培の可能性

Designing Productive and Environmentally Sustainable Rice Production Systems: Potentiality of Dry Direct-Seeding Cultivation Enhanced by Biostimulants Such as Brewer's Yeast Materials

○林清忠*[1)]、北川隆徳[2)]、山﨑能央[3)]、真中千明[2)]、芦田延久[2)]、上籔寛士[2)]、安田源太郎[2)]
Kiyotada Hayashi, Takanori Kitagawa, Yosio Yamazaki, Chiaki Manaka, Nobuhisa Ashida, Hiroshi Kamiyabu, Gentaro Yasuda
1) アースシフトグローバル・アジア合同会社, 2) アサヒバイオサイクル株式会社, 3) 株式会社ヤマザキライス
* hayashi@earthshiftglobal.com

1. はじめに

地球温暖化緩和策の一環として、生産性の向上と温室効果ガス（GHG）排出量の削減を同時に追求するコメ生産システムの確立が求められている。コメ生産において注目すべき GHG はメタンであり、中干期間の延長、間断灌漑の実施等による削減が試みられている。

このとき重要な点は、生産物当たり排出量を削減する際には、面積当たり排出量に加え、生産性（収量）に注目する必要があることである。社会として生産量を一定に保つためには、ある場所での生産性の低下は、別の場所での生産量の増加を伴う必要があり、後者が土地利用変化を生じさせる結果として社会全体の環境影響が増加する可能性もある。こうした背景の下、これまで陸稲栽培あるいは乾田状態で水利用を抑制したコメ栽培は、単位面積当たりメタン排出量を削減できるポテンシャルが高いにも関わらず、収量を経済的水準とすることが困難であったため、考慮の外に置かれることが多かった。

ところが、近年、ビール酵母資材等のバイオスティミュラント資材を活用することによって、経済的に成立する節水型乾田直播栽培を実践できる可能性が示され[1)]、そのメカニズムも解明された[2)]。これは、持続可能なコメ生産システムの新たな方向性を示唆している。この報告では、その可能性を生産性向上と環境貢献の視点から検討する。

2. 方法

2.1 システム間の比較からシステム転換の分析へ

これまで複数の農業生産システムを比較する際には、土地、生産物等に関する複数の機能単位を用いて比較することが一般的であった[3)]。たとえば、複数のシステムを、10a 当たり環境影響、生産物 1kg 当たり環境影響により比較することが該当する。

ここで、視点を個々の生産システムから、システム転換に移すと、生産物当たり改善部分を収量向上に起因する部分と面積当たり環境影響の改善に起因する部分に分解可能であることがわかる[4)]。すなわち、比較対象となる慣行の生産システムから新たな生産システムへの転換によって削減可能な GHG 排出量は、収量改善効果と環境改善効果に分解できる。これにより同一の単位での要因分解が可能となり、システム転換を見通し良く把握できるようになる。本研究では、この分解方法を用い、システム転換を分析する。

2.2 生産システムとシステム転換

対象としたコメ生産システムは、バイオスティミュラントを使用する乾田直播栽培（Y1）、バイオスティミュラントを使用しない乾田直播栽培（Y2）、慣行の水稲栽培（Y3）である。Y2 と Y3 が比較対象（レファレンス）であり、Y2 から Y1、Y3 から Y1 への２つの転換を定義する。ここでバイオスティミュラントとは、ビール酵母資材（CW1）および菌根菌資材（マイコス菌根菌水和剤）を示す。用いた品種は、「にじのきらめき」である。

分析対象であるコメ生産システムの機能単位は、生産物であるコメ（玄米）の生産量（kg）とした。システム境界は、コメの圃場からの搬出段階まで（Cradle to Gate）とした。モミ乾燥プロセスならびに精米プロセスはシステム境界外としたが、コメの生産量は玄米重量として示す。また、資本財の環境影響は、計算過程から除外した。

2.3 インベントリデータ

コメ生産プロセスおよび CW1 製造プロセスは、独自収集データ（一次データ）に基づいて作成した。ただし、農業資材の活用実態については、地域慣行等の情報からシナリオを作成した。肥料製造、農薬製造、その他資材製造等の投入財については、ecoinvent 等の既往データベースや研究成果等として公表されている二次データを活用した。

収量については、埼玉県北葛飾郡杉戸町において 2024 年に実施した圃場試験等に基づいた数値を用い

た。直接排出のうち、移植栽培におけるメタンについては、温室効果ガスインベントリオフィス [5]の排出係数（日排除・常時湛水、堆肥、関東、2022）に基づいて計算した。乾田直播栽培についてはヤマザキライスにおいて暫定的に計算された数値を用いた。一酸化二窒素の直接排出量の計算には、同文献における農用地の土壌への化学肥料の施肥に伴う排出係数を用いた。

2.4 影響評価手法

地球温暖化（IPCC 2021 GWP 100a）を影響領域として取り上げた。ライフサイクル GHG（以下、LC-GHG）排出量の計算には、PRé 社の SimaPro を使用した。

3. 結果

3.1 各生産システムの LC-GHG 排出量

各コメ生産システムの LC-GHG は、表 1 の通りである。生産物当たり LC-GHG 排出量が最も小さい Y1 は、Y2 と比較して収量が改善されいること、Y3 と比較して面積当たり LC-GHG 排出量が減少していることが特徴的である。

表 1 各生産システムの LC-GHG 排出量

生産システム	(a)	(b)	(c)
Y1	552	264	0.478
Y2	180	261	1.452
Y3	576	788	1.369

(a) 玄米収量（kg /10a）
(b) 面積当たり LC-GHG 排出量（kg CO2-eq/10a）
(c) 生産物当たり LC-GHG 排出量（kg CO2-eq/kg 玄米）

3.2 システム転換がもたらす削減量の分解

LC-GHG 削減量を分解する方法を用いることにより、その特徴をより明確に示すことができる（表 2）。２つのシステム転換において、削減量自体に大きな違いはないが、その要因には大きな違いがある。

Y2 から Y1 への転換、すなわち乾田直播栽培においてバイオスティミュラントを導入するという技術変化は、収量改善効果が大きく、結果として生産物あたり LC-GHG 排出量を大きく削減できる可能性が高いことが示された。

これに対して、Y3 から Y1 への転換、すなわち慣行の（バイオスティミュラントを用いない）水稲栽培から、バイオスティミュラントを用いる乾田直播栽培への転換においては、環境改善効果が大きく、結果として生産物あたり LC-GHG 排出量を削減できることが示された。

表 2 システム転換による LC-GHG 削減量とその分解

システム転換	(a)	(b)	(c)
Y2→Y1	0.975	0.979	–0.004
Y3→Y1	0.891	–0.060	0.951

(a) LC-GHG 削減量（kg CO2-eq/kg 玄米）
(b) 収量改善効果（kg CO2-eq/kg 玄米）
(c) 環境改善効果（kg CO2-eq/kg 玄米）

4. 考察と結論

4.1 節水型乾田直播栽培の可能性

本研究では、ビール酵母資材等のバイオスティミュラントを活用した節水型乾田直播栽培は、生産物当たり LC-GHG 排出量を削減できることを示した。ただし、その道筋はレファレンスに依存し、収量改善効果による場合と環境改善効果による場合があり、両効果は同時にはみられなかった。

このことは、本研究で取り上げた技術の特徴を表している。すなわち、システム転換における生産性向上と環境貢献は現時点で排他的である（ほぼ直交している）。ただし、両システム転換を合成する（混合レファレンスを定義する）ことにより、同時達成を確率的に実現するシステム転換を構成することは可能である。

4.2 今後の課題

乾田直播栽培を実践する上で、雑草防除が重要な役割を果たす。乾田状態における雑草防除は、湛水状態の場合とは異なった防除体系を用いる必要がある。雑草管理を含む様々な管理手法の効果を同定するための綿密な圃場試験の実施は、今後の課題である。

引用文献

1) 農林水産省：”米輸出促進に向けた、「未来の米づくり」対話（第 1 回）を開催します”, 農林水産省, （オンライン）, 入手先 <”https://www.maff.go.jp/j/press/y_kokusai/kokkyo/240610.html>, （参照 2025-1-10）
2) Kitagawa T: PLOS ONE, (2025), DOI: 10.1371/journal.pone.0313379
3) Hayashi K: Int J Life Cycle Assess, 18, (2013), pp.331–339
4) Hayashi K: Int J Life Cycle Assess, 28, (2023), pp.336–348
5) 温室効果ガスインベントリオフィス (2024) 日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2024 年, 地球環境研究センター, 国立環境研究所

LCA 手法を用いた水稲栽培の有効性評価

Evaluating the efficacy of sustainable technologies in rice cultivation using life cycle assessment

○レオン愛*1)
Ai Leon
1) 国際農研
* leona0407@ jircas.go.jp

1. はじめに

農林水産業における気候変動の緩和策推進の一環として、コメ栽培における温室効果ガス（GHG）排出量削減に向けた栽培技術の見直しや持続可能な栽培技術の開発が行われている。一方、GHG 排出量削減を目的として新たな栽培技術を採用したとしても、GHG 排出量削減と収量変化にはトレードオフが生じる可能性がある。持続可能な栽培技術の採択を農家に促すには、収量が増加する、あるいは増加しないまでも収量の減少を十分抑えて農家の収入が保障される必要がある。また、栽培技術の採択による水田土壌からの GHG 排出量削減の効果が、ライフサイクルを通じた GHG 総排出量の削減にもつながる必要がある。

本研究では、ライフサイクルアセスメント（LCA）で評価した原著論文 68 本を用いて、コメ栽培における栽培技術の有効性を評価した（Leon, 2024）。

2. 方法

2.1 文献検索

文献データベース（Web of Science、Scopus、Google scholar）を用い文献検索を行った。「ライフサイクルアセスメント及びコメ」、「温室効果ガス、コメ、及びライフサイクル」と「カーボンフットプリント及びコメ」をキーワードとして検索したところ、2000 年から 2021 年までに出版された論文のうち 2643 編が該当した。これらの論文から以下の条件を満たす原著論文 68 本に絞り込んだ。

- コメ栽培の GHG 排出量が LCA 手法を用いて算定されている。
- 収量が記載されている。
- 面積当たりまたは収量当たりの GHG 排出量が記載されている。
- 土壌由来のメタン（CH_4）と一酸化二窒素（N_2O）の算定方法が記載されている。
- 重複を除く。

LCA の研究では、多くの場合標準偏差が示されていないため、本研究ではメタ分析を用いず、以下の式を用い、収量、面積当たりと収量当たりの GHG 排出量について持続可能な栽培技術に対する慣行の栽培技術の平均変化（%）を計算した。

$$\text{平均変化（\%）} = \frac{1}{n}\sum\left(\frac{X_{\text{持続可能な栽培技術}}}{X_{\text{慣行の栽培技術}}} \times 100 - 100\right) \quad （式 1）$$

ここで、n は持続可能な栽培技術と慣行の栽培技術をペアにしたサンプル数、$X_{\text{持続可能な栽培技術}}$ と $X_{\text{慣行の栽培技術}}$ は、各原著論文に報告された収量、面積当たりまたは収量当たり GHG 排出量である。LCA では、土壌炭素含量の変化を考慮しない研究が多いため、本研究でも考慮しなかった。平均変化が 100%より小さければ、持続可能な栽培技術により、収量及び GHG 排出量が削減されたことを意味する。

3. 結果・考察

68 本の論文では、13 の栽培技術が取り上げられていた。ここでは、主に、1.不耕起、2.無代かき、3.間断灌漑、4.化学肥料施肥量削減、5. 稲わらすき込み、6.家畜糞尿・たい肥を施肥する、7.家畜糞尿・たい肥・有機質肥料を施肥するが化学肥料や農薬を施用しない栽培技術に着目する。

3.1 不耕起

主に不耕起では、土壌のかく乱が最小限に抑えられ、慣行の耕起に比べ酸化状態が保たれることにより、CH_4 排出量が削減される。不耕起では、収量の平均変化（式 1）が 98%（n=13）、収量当たり GHG 排出量と面積当たり GHG 排出量の平均変化がそれぞれ 77%と 79%である（図 1）。すなわち、不耕起栽培により収量は微減するが、面積当たり GHG 排出量が 23%と収量当たり GHG 排出量が 21%削減される。

3.2 無代かき

主に無代かきでは、慣行の栽培技術（代かき）に比べ土壌のかく乱が抑えられ、薄い酸化層が保たれることにより、土壌由来の CH_4 排出量が削減される。収量の平均変化は 104%（n=6）、収量当たり GHG 排出量と面積当たり GHG 排出量の平均変化がそれぞれ 85%と 81%である（図 1）。すなわち、無代かきでは、収量が微増、面積当たり GHG 排出量が 15%、収量当たり GHG 排出量が 19%削減される。

3.3 間断灌漑

湛水と落水を繰り返す間断灌漑（例、AWD: Alternate Wetting and Drying）は、慣行の水栽培（常時湛水）に比べ灌漑水使用量と GHG 排出量（主に CH_4 排出量）を同時に減らす技術として注目されている。収量の平均変化は 98%（n=21）、面積当たり GHG 排出量の平均変化は 73%（n=21）、収量当たりの GHG 排出量の平均変化はそれぞれ 77%（n=23）である（図 1）。すなわち、収量は微減するが、面積当たりの GHG 排出量が 27%と収量当たりの GHG 排出量が 23%削減される。

3.4 化学肥料施肥量削減

窒素施肥量を増やすと収量は増加するが、N_2O 排出量が増加する。一方で、窒素施肥量を削減した場合、収量の平均変化が 85%（n=11）、面積当たり GHG 排出量の平均変化が 73%（n=18）、収量当たり GHG 排出量が 83%（n=11）である。すなわち、窒素施肥量削減により GHG 排出量とともに収量も削減する。

3.5 稲わらすき込み

水田に稲わらをすき込むと分解されやすい有機物が投入されるため、嫌気条件下でメタンを合成するメタン生成細菌の働きが活発になり、主に土壌由来の CH_4 排出量が増加する。収量の平均変化は 106%（n=15）、面積当たり GHG 排出量の平均変化が 123%（n=17）、収量当たり GHG 排出量の平均変化が 121%（n=16）である（図 1）。すなわち、稲わらすき込みにより、収量、面積当たり GHG 排出量と収量当たり GHG 排出量が増加する。

3.6 家畜糞尿・たい肥を施肥する

家畜糞尿・たい肥を施肥する場合も主にメタン生成細菌の働きが活発になり、主に土壌由来の CH_4 排出量が増加する。収量の平均変化は 105%（n=10）、面積当たり GHG 排出量の平均変化が 173%、収量当たり GHG 排出量の平均変化が 165%である（図 1）。すなわち、収量、面積当たり GHG 排出量と収量当たり GHG 排出量が増加する。

3.7 家畜糞尿・たい肥・有機質肥料を施肥するが化学肥料や農薬を施用しない

化学肥料や農薬製造に伴う GHG 排出量と土壌由来の N_2O 排出量が削減する。一方で、堆肥等の有機物施用により、主に土壌由来の CH_4 排出量が増加する。収量の平均変化は 85%（n=11）、面積当たり GHG 排出量の平均変化が 105%、収量当たり GHG 排出量の平均変化が 131%である（図 1）。すなわち、収量が減り、GHG 排出量が増加する。

4. おわりに

本研究では、LCA を用いてコメ栽培技術を収量、収量当たり及び面積当たり GHG 排出量の 3 つの基準で評価した。無代かき、間断かんがい、不耕起が持続可能な農地管理実現のための栽培技術であることが示唆された。ここで用いた 3 つの基準を用いることにより、農家の技術採択インセンティブに配慮したカーボンニュートラルに寄与する技術に関する情報提供に貢献することが期待される。また、本研究の結果は、収量向上と GHG 排出量削減の間でトレードオフを抱える栽培技術を改善するための一つの資料として用いることが期待される。

引用文献

1) Leon A.: Sci. Total Environment.118, (2024), 171693.

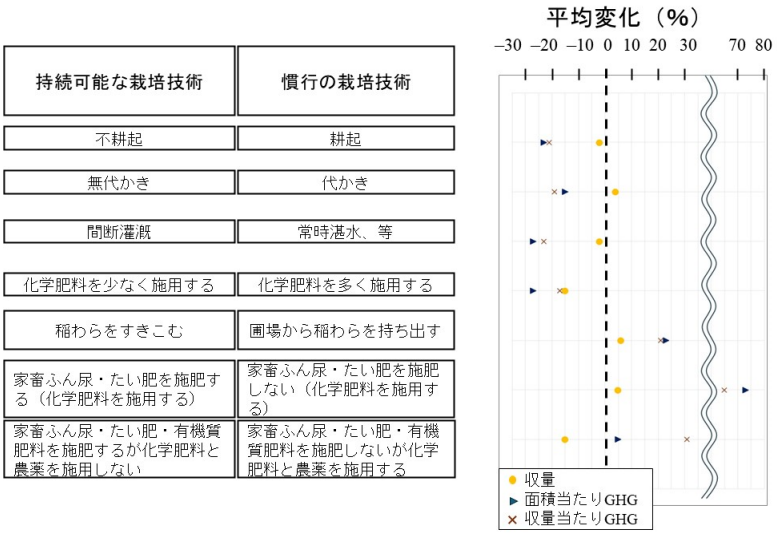


図 1 持続可能な栽培技術が収量や LC-GHG 排出へ及ぼす影響

農作物を対象とした栽培時活動量データベースの構築

Development of a database for crop farming activities

○湯龍龍*、豊島浩史、佐々木勇麻、Kavindi Gajasinghe
Longlong Tang, Hiroshi Toyoshima, Yuma Sasaki, Kavindi Gajasinghe
農業・食品産業技術総合研究機構
*tanglonglong@affrc.go.jp

1. はじめに

2030 年までに国全体で温室効果ガス（GHG）排出量の半減を目指す中、農業分野においても効果的な緩和策の検討と実施が求められる。そのためには、現状の GHG 排出量について排出要因だけはなく、地域や作型の違いも理解する必要がある。日本国温室効果ガスインベントリ報告書（NID）では、農業分野の GHG 排出量は農地や家畜の飼育からの直接排出と燃料燃焼が対象であり、農産物栽培時の投入資材や燃料などの製造に由来する間接排出が含まれていない。一方、農産物を対象とした LCA データベース[1] は、直接と間接の GHG 排出量を考慮しているが、統計データを用いているため、産地と作型を体系的に考慮することができない。よって、現状ではGHG排出総量に対する作型の影響が明らかでない。

上記課題に対して、前回大会では産地、作型、管理の組合せをシナリオとして捉えたうえで、シナリオベースの栽培時活動量データ構築方法を検討・報告した[2]。今回は、そのうち慣行栽培時のデータ整備の進捗を紹介する。具体的には、20 作物を対象とした慣行栽培時活動量データの構築方法と結果を報告する。

2. 方法

2.1 活動量データの構築方法

本研究での活動量データは、農作物の栽培時に投入される肥料、農薬、プラスチック、燃料および電力を対象とする。これら活動量は生産の三要素である、立地、作型（例：促成、抑制）、管理（例：慣行、特栽）に影響される。我々はこれまでに生産の三要素で定義されるシナリオに応じて、活動量データを構築する方法を提案した[2]。その方法に従った 20 作物を対象とした慣行栽培時の活動量データの作成方法を図 1 に例示する。

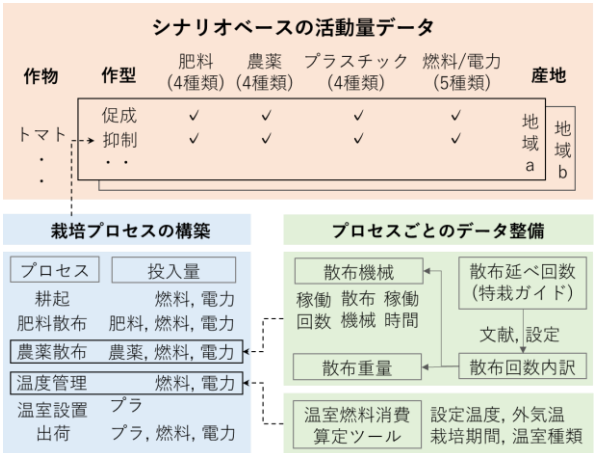


図 1　シナリオベースの活動量データの作成方法（トマトを例に）

シナリオは、管理を慣行としたうえで、産地（県レベル）と作型の組合せ別に設定した。作型は、トマトの場合、促成、半促成、露地、雨よけ、抑制に分けた。

栽培プロセスについて、耕起から、出荷までの主要なプロセスとともに、対応する作型（図 1 では抑制）に必要な温度管理プロセスを設けた。さらに、プロセスごとに考慮される投入量データの項目も特定した。

プロセスごとのデータ整備の方法を以下に要約する。肥料と農薬は特別栽培農産物に係る表示ガイドライン（特栽ガイド）が公表する県別、作型別のデータを基に整備した。肥料は窒素、リン酸、カリそれぞれの成分重量が得られた。農薬は、散布延べ回数のみ公表されていたため、回数から重量に換算し、殺虫、殺菌、除草、土壌消毒別に整備した。プラスチックは公表されている経営指標を基に、平均的な投入量モデルを構築した（地域性なし）。燃料と電力は機械作業が伴うプロセスを対象に、機械名、稼働時間を設定し、消費量を求めた。トマトの温度管理に由来する燃料消費は、地域別の加温期間、外気温を考慮し、温室暖房燃料消費試算ツール[3]を用いて算定した。

2.2 活動量データに基づく農作物の GHG 試算

ここでは、上記作成した活動量を基に、トマト（中玉、大玉）の GHG 排出総量とその内訳を算出した。トマトの場合は収穫量統計データが冬春と夏秋に分かれているため、産地と季節の違いを考慮したトマトの年間 GHG 排出量（*Annual GHG*）を以下のように算定した。

$$Annual\ GHG = \sum_{s,r}\left(EI_{s,r} \cdot Production_{s,r}\right) \quad (1)$$

$$EI_{s,r} = \sum_{c}\left(EI_{c,r} \cdot w_c^s\right) \quad (2)$$

$$EI_{c,r} = \sum_{i}\left(Input_{i,c,r} \cdot EF_i\right) / Yield_{c,r} \quad (3)$$

ここで、$EI_{s,r}$ は季節（冬春と夏秋）別、地域（9 地域）別の GHG 排出強度(ton-CO_2e/ton-tomato)、*Production* は収穫量(ton-tomato)である。季節別の *EI* は、5 つの作型（*c*）別の *EI* に、作型ごとの収穫期間に基づく重みづけ係数（*w*, 表 SI1）を乗じることで暫定的に算定した。

$Input_{i,c,r}$ は作型別、地域別の各種資材、燃料、電力の投入量(ex. kWh/ha)、EF_i は各種資材、燃料、電力の GHG 排出原単位(ex. kg-CO_2e/kWh)、$Yield_{c,r}$ は面積あたり収量(ton-tomato/ha)である。

季節別、地域別の収穫量と単収は農林水産省統計データ[4]より得た。作型別の投入量データは、本研究が作成した活動量データである。各種資材、燃料、電力の GHG 排出原単位は IDEA データベース[1]より得た。

3. 結果と考察

穀類、葉茎菜類、根菜類、果菜類、果実的野菜の計 20 作物を対象に、慣行栽培時の活動量データを作成した。具体的な作物名、作型と活動量データの項目などは表 SI2 に要約した。

トマトについて、作成した作型別の活動量データ（化肥の窒素成分量、農薬と暖房用重油消費量）を金額ベースの統計データから物理量に換算する既存研究（施設栽培）と比較した（図 SI1）。いずれの活動量においても、作型（促成、半促成と抑制）間に顕著な差があり、また、既存研究の値は各作型のおおよそ中間に位置することが確認できた。

トマトの活動量データを用いて、2 つの生産時期と 9 つの産地の組合せ別に GHG 排出強度を推計し、収穫量との関係を確認した（図 2）。国全体の GHG 排出量は年間 41.3 万 ton-CO_2e と推計され、暖房燃料消費による影響が最も大きかった。季節別では、冬春に収穫されるトマトが年間 GHG 総排出量の 74%を占めた。冬春は夏秋に比べて、収穫量は同程度であるが、燃料消費量の多い促成と半促成の作型が中心のため、GHG 排出強度が大きかった。暖房用化石燃料を削減するヒートポンプなど省エネ暖房設備の導入が重要と改めて示唆された。

一方、地域に注目すると、北海道と東北では冬春の GHG 排出強度が高いものの、収穫量が相対的に小さいため、夏秋の GHG 排出量が大きくなった。したがって、特に秋に導入される抑制栽培での燃料消費を優先的に削減することが重要と言える。

また、本研究は産地と作型の組合せ別に GHG 排出強度を算出しているが、これらを施設栽培が中心である冬春と露地栽培が中心である夏秋に集約すると、それぞれ 1.1 と 0.4 (ton-CO_2e/ton-tomato) になった。この値は、IDEA データベースが持つ施設と露地の GHG 排出原単位（地域性なし）と同程度である。

4. まとめと今後の展開

20 作物を対象とした慣行栽培時活動量データを構築した。トマトを例に、年間 GHG 排出総量とその内訳を算定することにより、GHG 排出量の大きい地域と季節を特定することができた。

今後は得られる活動量データの不確実性評価を行うとともに、既存データとの比較検証を進める。そのうえで、20 作物を対象に直接間接を含む GHG 排出総量を推計し、NID が示す農業分野の GHG 直接排出量との関係を明らかにする。

引用文献

1) LCI データベース IDEA version 3.3：国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ（参照 2024-12-01）
2) 湯, 佐々木, Gajasinghe : 第 19 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集（2024）pp. 315-317
3) 高市ら：わが国各地における各種温室の暖房燃料消費量の試算ツール（2007）、職務作成プログラム（機構登録番号 機構-F02）
4) 農林水産省：作物統計（参照 2024-11-01）
https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/

謝辞

この成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務で得られたものです。

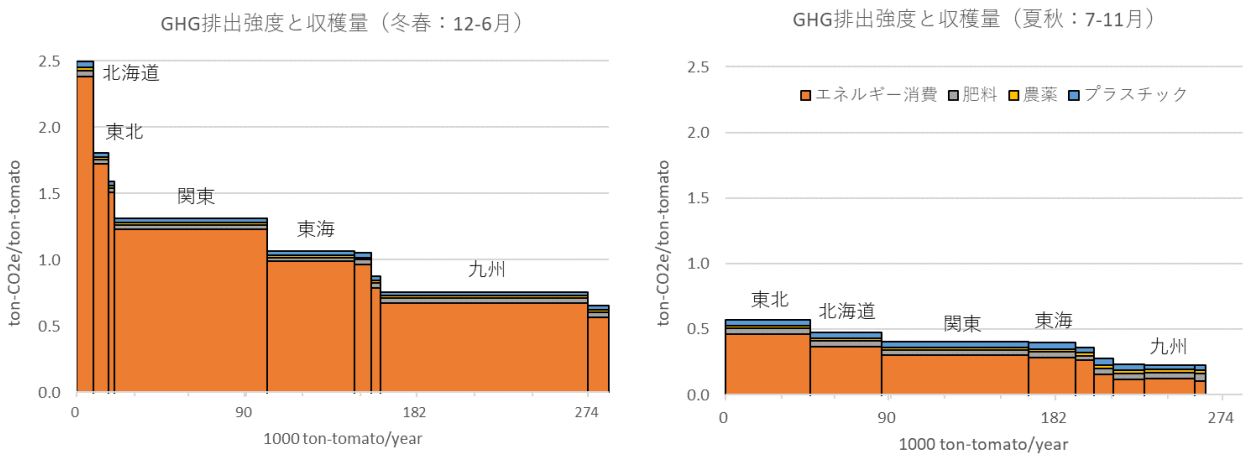


図２　トマトの GHG 排出強度と収穫量（季節別、地域別）

Support Information

農作物を対象とした栽培時活動量データベースの構築

表 SI1　作型ごとの GHG 排出強度（EI）[ton-CO_2e/ton-tomato] から季節ごとの EI を算出する際に使用する収穫時期に基づく重みづけ係数（w）

農林水産省の作物統計で定義される収穫量の季節区分		冬春 1月	冬春 2月	冬春 3月	冬春 4月	冬春 5月	冬春 6月	夏秋 7月	夏秋 8月	夏秋 9月	夏秋 10月	夏秋 11月	冬春 12月	冬春のEIを算出するための重みづけ係数	夏秋のEIを算出するための重みづけ係数
本研究が設定した作型別の収穫期間	促成	✓	✓	✓	✓	✓	✓						✓	7/11	
	半促成				✓	✓	✓							3/11	
	露地							✓	✓						2/9
	雨よけ							✓	✓	✓	✓				4/9
	抑制									✓	✓	✓	✓	1/11	3/9

表 SI2　慣行栽培時活動量データの概要（20 作物）

類別	作物	作型	肥料 (N/P/K/有機) (kg/10a)	農薬 (虫/草/菌/消) (kg/10a)	プラスチック (PP, PE, PVC, PS) (kg/10a)	エネルギー (電力, 各種燃料) (kWh or L/10a)
穀類	水稲	移植, 直播	県	県	全国(作型別)	県
	小麦, 大豆	露地				
葉茎菜類	ホウレンソウ	露地, 施設	県	県	全国(作型別)	県
	レタス, 白ネギ, 青ネギ キャベツ, ハクサイ, タマネギ	露地				
根菜類	ダイコン, ニンジン バレイショ, サトイモ	露地	県	県	全国(作型別)	県
果菜類	トマト, ミニトマト	促成, 半促成, 露地, 雨よけ, 抑制	県	県	全国(作型別)	県
	キュウリ	促成, 半促成, 露地, 抑制				
	ナス	促成, 半促成, 露地				
	ピーマン	促成, 露地				
果実的野菜	イチゴ	施設土耕, 施設高設	県	県	全国(作型別)	県

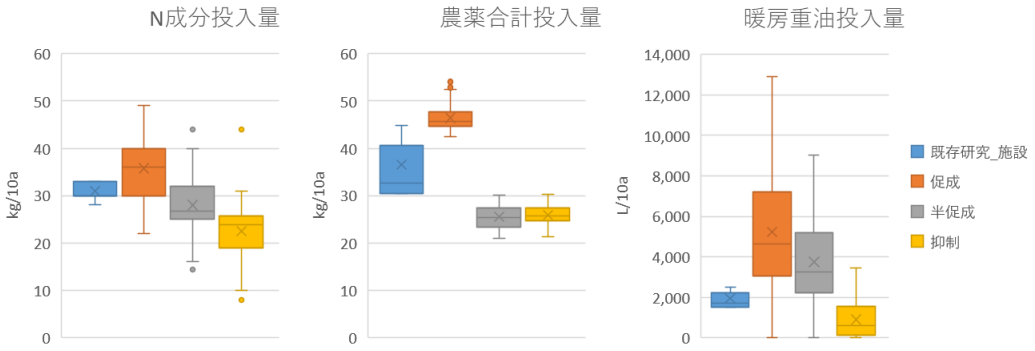


図 SI1　トマトの施設栽培における化肥（窒素成分量）、農薬（合計重量）と暖房用重油消費量の既存研究との比較
（既存研究（農林水産省簡易算定ツール）：施設、本研究：促成、半促成、抑制）

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 14:40 ~ 16:00 F会場：2333小講義室（3F）

[1-F3] 一次産業（３）

座長：中石 知晃 (九州大学)

14:40 ~ 15:00

[1-F3-01]

養殖魚を対象としたLCA

*森 拓磨[1]、桑江 朝比呂[2]、吉原 哲[3]、松浦 崇裕[3]、末廣 富士代[3]、鈴木 広美[3]、濱﨑 祐太[4]、志村 遥夏[4]、王 媛媛[4]、朝山 英悟[6]、 堺 恭輔[6]、大久保 寛基[1]、伊坪 徳弘[5] (1. 東京都市大学、2. 港湾航空技術研究所、3. 八千代エンジニヤリング株式会社、4. マルハニチロ株式会社、5. 早稲田大学、6. ㈱マルハニチロAQUAアクア事業所)

15:00 ~ 15:20

[1-F3-02]

日本における持続可能な漁業のための効率性分析

*伊藤 久史[1]、下津浦 大賀[2]、中石 知晃[3]、加河 茂美[3] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済学府、3. 九州大学経済学研究院)

15:20 ~ 15:40

[1-F3-03]

ヤイトハタ (*Epinephelus malabaricus*)の海面養殖の環境影響評価

*石田 哲也[1]、宇田川 伸吾[2]、佐藤 幸[1]、小原 聡[1]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学、2. 琉球大学)

15:40 ~ 16:00

[1-F3-04]

社会実装とLCA：磯焼け解決に向けた藻食性未利用魚の有効利用

*光斎 翔貴[1,2]、戸田 耕介[2] (1. 立命館大学、2. オーシャンリペア株式会社)

©日本LCA学会

養殖魚を対象としたLCA

Life cycle Assessment of farmed fish

○森 拓磨※1)、桑江 朝比呂 2)、吉原 哲 3)、松浦 崇裕 3)、末廣 富士代 3)、鈴木 広美 3)、濱﨑 祐太 4)、
志村 遥夏 4)、王 媛媛 4)、朝山 英悟 4)、 堺 恭輔 5)、 山本 翔 6)、大久保 寛基 1)、伊坪 徳弘 7)
Takuma Mori, Tomohiro Kuwae, Satoru Yoshihara, Fujiyo Suhiro, Hiromi Suzuki,
Takahiro Matsuura, Yuta Hamasaki, Haruka Shimura, Yuanyuan Wang, Eigo Asayama, Kyousuke Sakai, Yamamoto Tsubasa,Hiroki Okubo, Norihiro Itsubo
(1. 東京都市大学、(2. 港湾航空技術研究所、(3. 八千代エンジニヤリング株式会社、
(4. マルハニチロ株式会社、(5. ㈱マルハニチロ AQUA アクア事業所
(6. ㈱マルハニチロ Marine 熊野事業所 (7.早稲田大学
* g2383016@tcu.ac.jp

1. 背景

新興国を中心とした人口増加によって、良質なタンパク質を供給できる水産業の需要は増加傾向にある [1)]。水産業は漁業と養殖業に大別されるが、漁業は近年では水産資源枯渇や気候変動の影響から減少傾向が見受けられ、反対に養殖業ではアジアを中心として成長している [2)]。日本では、今なお7割以上を漁業に頼っている状況にあり [3)]、今後は養殖生産量に移行する必要性があるが、実情は年々減少傾向を示している。その背景として従事者の高齢化や人手不足、労働環境の過酷さ、原材料価格の高騰といった課題があり、養殖業での生産効率化や製品付加価値を上げることが喫緊の課題となっている。製品付加価値を上げる方法の一つとして、環境影響評価（以後：LCA）による水産品の環境情報開示に注目が集まっている。養殖業を対象とした LCA は世界各国では中国やヨーロッパを中心として比較的活発に行われているが、日本では少ない状況である。日本に適合する養殖方法の研究開発とあわせて環境影響の評価に関する検討が求められる。

2. 研究目的

本研究では、日本の養殖事業からの一次データを基に養殖魚を対象とした LCA を実施することにより環境負荷の可視化を行う。また、その結果に応じて環境負荷の多いプロセスであるホットスポットを特定し、環境負荷低減に繋がる解決策を提案する。

3. 研究方法

本研究では、日本で養殖されるマダイ、ブリ、クロマグロを評価対象とした。どれも日本の養殖魚として代表的な種であり、ブリは生産量が最も多く、マダイはブリに続いて生産量が多く、生産尾数は最も多い。クロマグロはマダイ、ギンザケに続いて生産量が多い魚種である。使用データにおいては、可能な限り日本の養殖事業者より一次データを入手し、ブリとマダイの配合飼料に関しては、飼料メーカーより各魚種に対応した代表的な製品の原材料データを入手した。マダイに関してはデータの粒度が他魚種と比べて粗いため、他魚種との完全な比較は難しい。

本研究におけるシステム境界は以下となる。漁場はそれぞれの魚種で異なるため、漁場 A、B、C とした。

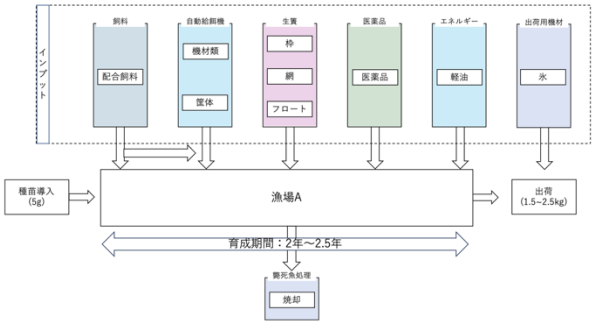


図1 マダイのシステム境界

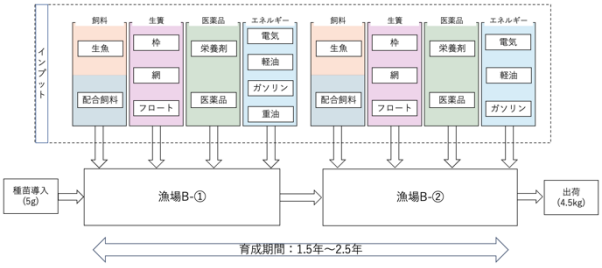


図2 ブリのシステム境界

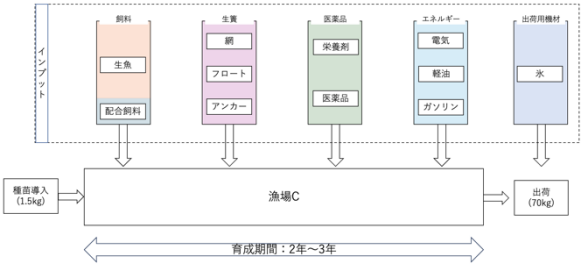


図 3 クロマグロのシステム境界

算定に用いるデータベースは配合飼料に係るものは Ecoinvent 3 と Agri-footprint 、それ以外には IDEA v3.4 を使用した。評価手法は IPCC 2021、LIME 3(増補改訂版)、使用算定ソフトは SimaPro ver. 9. 6. 0. 1 である。

表 1 評価手法

評価手法	影響領域・保護対象
IPCC 2021 GWP100	気候変動(GWP)
LIME 3 (消費国、利子率 2%)	人間健康、生物多様性、社会資産、一次生産

機能単位はタンパク質 100g あたりとした。

4. 結果

(1) GHG 排出量の比較 (図 4)

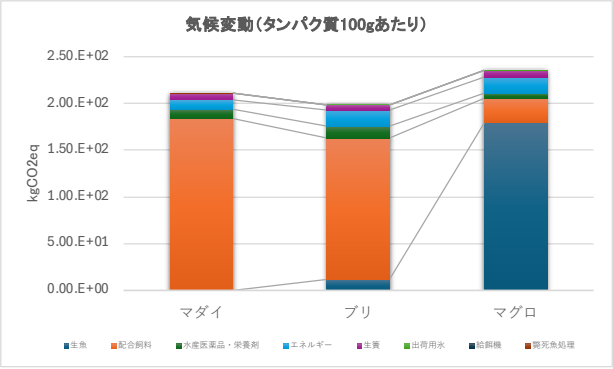


図 4 GHG 排出量比較

GHG 排出量あたりの比較では、マダイ 2.11E+02kgCO_2-eq 、ブリ 1.99E+02kgCO_2-eq 、クロマグロ 2.36E+02kgCO_2-eq となった。飼料による影響が最も大きく、マダイ、ブリにおいては配合飼料がそれぞれ 87%、77%、クロマグロでは生魚が 76%を占めた。配合飼料のうち、魚粉や魚油といった動物性由来の原材料が最も配合割合が多く、結果としても大きな割合を占め 70%ほどとなった。

(2) LIME3 での評価結果 (図 5)

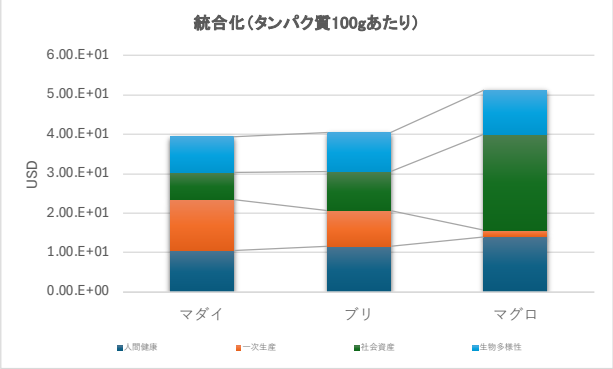


図 5 LIME3 での評価結果

LIME3 での評価結果でも配合飼料は大きな影響を占め、それぞれの保護対象あたりではマダイでは 91%～99%、ブリでは 56%~92%を占めた。また、人間健康や社会資産では動物性由来、一次生産や生物多様性では植物性由来の原材料が大きな影響を占めた。クロマグロでは、一次生産を除いて生餌の影響が 67%～82%を占めたが、一次生産では配合飼料が 51%を占め、続いてエネルギーが 51%を占めた。統合化では、マダイが 3.93E+01 USD、ブリが 4.04E+01 USD、クロマグロが 5.13E+01USD という結果となった。

5. 結果

本研究では、日本の代表的な養殖魚 3 種に関して環境負荷を可視化した。配合飼料、生餌などの飼料は大きな環境負荷を与えていることが確認できた。

研究における課題としては、①研究結果の不足、②データ粒度の不統一、③LIME 3 における海洋生態系の未評価 が挙げられる。①に関しては、本研究においてはそれぞれの魚種の対象数は一漁場のみであるため、一日本で養殖される魚種別の代表的な結果とは言えない。②に関してはマダイとブリ・クロマグロで 2 事業者からのデータ取得となったため、粒度が異なっているために完全な比較が難しい点にある。③に関しては、LIME3 では現時点では陸域のみの生物多様性評価となっており、海洋を対象とした場合には結果が異なってくる可能性が考えられる。いずれの課題に関しても研究の継続と評価手法のアップデートに期待したい。

6. 引用文献

1)FAO:"THE STATE OF WORLD FISHERIES AND AQUACULTURE 2022 "（オンライン）, <https://www.fao.org/documents/card/en?details=cc0461en > (参照 2024-12-17)

2)水産庁: "(1)世界の漁業・養殖業生産"（オンライン）,<https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/r02_h/trend/1/t1_4_1.html#:~:text=%E3%80%88 世界の漁業・養殖業,急激に伸びています%E3%80%82 > (参照 2024-12-15)

3)水産庁: "第 2 節 我が国の水産業をめぐる動き"（オンライン）<https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/h29_h/trend/1/t1_2_2.html > (参照 2024-12-17)

日本における持続可能な漁業のための効率性分析

Management Efficiency Analysis for Sustainable Fisheries in Japan

○伊藤久史*[1)]、下津浦大賀[2)]、中石知晃[3)]、加河茂美[3)]
Hisashi Ito, Taiga Shimotsuura, Tomoaki Nakaishi, Shigemi Kagawa
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学府, 3) 九州大学経済学研究院
* ito.hisashi.481@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

近年、漁業補助金政策は乱獲を助長する要因として国際的に批判されている。世界貿易機関（WTO）は、漁業補助金を撤廃するため、2022 年 6 月に漁業補助金協定を採択した[1)]。日本は世界で 5 番目に多くの漁業補助金を導入しており、その削減が急務となっている[2)]。そこで漁業のあり方を改革し、漁業補助金への依存を減らすため、各経営体の生産性の向上が必要である。

また、環境負荷低減の観点からも、各経営体の生産性の向上は重要である。漁業は、農業に比べてカーボンフットプリントが少なく[3)]、食糧生産由来の環境負荷低減の観点から生産量のさらなる拡大が期待される。しかし、1990 年から 2011 年において世界の漁業生産量はほとんど一定であるにもかかわらず、漁業由来 GHG 排出は 28%も増加し[3)]、漁業における環境効率性の低下が示唆される。

以上より、漁業経営体の補助金依存体制の是正や CO_2 排出量の削減の実現に向けて、漁業の生産効率性の測定や、生産効率性向上のための要因分析が不可欠である。しかし、個々の漁業経営体レベルで生産効率性を分析した研究は筆者の知る限り存在しない。そこで、本研究は階層型データ包絡分析（メタフロンティア DEA）を用いて、各漁業経営体の生産効率性を測定し、非効率性の要因を特定する。さらに、メタフロンティア DEA によって求めた油費の削減ポテンシャルから、削減可能な CO_2 排出量を推計する。

2. 分析手法・データ

本研究では農林水産省による 2018 年漁業経営体調査[4)]対象から、海面漁業を営む 438 経営体を対象に投入指向型メタフロンティア DEA を適用し、4 投入（漁船隻数、従業員数、出漁日数、油費）、1 産出（売上）に基づく生産効率性を測定した。加えて、本研究では、メタフロンティア DEA を用いることで、l階層（$l = 1, \dots, L$）における生産非効率性が測定可能となる。本研究では、漁業全体、漁業規模、地域の 3 階層（L=3）に基づく生産非効率性を測定し、どの階層による影響が大きいかを特定する。ある経営体z（以下、DMU_z）の効率性スコアは下式(1)で推計される。

$$\theta_z^*(l,k) = \min \theta_z(l,k) \tag{1}$$

Subject to

$$\sum_{j \in F(J^{l,k})} \lambda_j x_{ij} \le \theta_z(l,k) x_{iz}; i = 1,2,\dots,m$$

$$\sum_{j \in F(J^{l,k})} \lambda_j y_{rj} \ge y_{rz}; r = 1,2,\dots,s$$

$$\lambda_j \ge 0, j \in F(J^{l,k})$$

ここで、x_{ij}とy_{rj}はそれぞれj番目のDMU のi番目の投入物の量、r番目の産出物の量を示す。また、mとsは、投入物の数と産出物の数を示す。さらに、k（$k = 1, \dots, K$）は、階層lにおけるグループ数を表し、後述するが、この値は階層lの値によって異なる。$F(\cdot)$は対応する添字集合を表し、DMUの数を表すJの値は階層lとグループkの値によって変化する。λ_jは全ての投入産出データを用いて(1)式で求められる重み係数を示す。$\theta_z^*(l,k)$は$\mathrm{DMU}_Z(l,k)$の効率性スコアを表し、その値は 0 から 1 で基準化される。スコアは 1 が最大効率値であり、1 未満であればDMU_Zは非効率（すなわち、投入を削減可能）であることを示す。

本研究で用いたメタフロンティア DEA の構造を図 1 に示す。本研究では、まず(1)式で求めた$\theta_z^*(l,k)$のスコアを用いて、（Ⅰ）で示される漁業全体非効率性を測定する。その後、図 1 に示すように、漁業全体非効率性を、漁業規模非効率性（漁業規模の違いによる非効率性）、地域非効率性（同程度の規模内での地域差による非効率性）、経営非効率性（同程度の規模で同地域内における経営の非効率性）に分解する。

ここで、各階層におけるグループ数は漁業全体の階層ではグループ分けを必要としないため、（Ⅰ）式では、kは$l = 1$である時、$K = 1$である。2 番目の階層で推計される漁業規模非効率性（Ⅱ）において、本研究では、漁業規模の階層を 3 漁業種類（沿岸漁業、沖合漁業、遠洋漁業）に基づいて分類した。従って、$l = 2$である時、$K = 3$である。3 番目の階層で推計される地域非効率性（Ⅲ）において、本研究では、地域を 5 海域（親潮地域、黒潮地域、リマン海流地域、対馬海流地域、瀬戸内海地域）に基づいて分類した。従って、3 つの漁業種類につき 5 地域に分類されるため、$l = 3$である時、K=15 である。最後に、経営非効率性（Ⅳ）

では、更なる分類をしないため、$l = 3$であり、K=15 である。

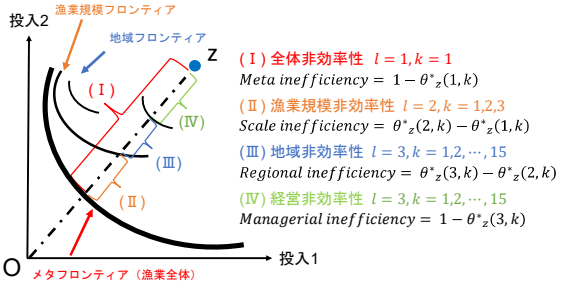


図 1. 本研究で用いたメタフロンティア DEA の構造および各非効率性の推計方法

3. 結果・考察

図 2 は、2018 年の日本における漁業全体非効率性と漁業規模によってグループ分けされた経営体ごとの規模別非効率性の箱ひげ図を示す。図 2 から、日本の漁業全体の非効率性スコアの平均は 0.74 であることがわかる。従って、漁業全体で 74%の改善の余地があり、漁業の効率性の改善が急務であることが分かる。この全体非効率性の要因を漁業規模別に見てみると、沖合漁業の平均値が 0.23 と最も高い一方で、沿岸漁業における非効率が 0.13 と最も低いことがわかる。この結果から、規模（漁業種類）別にみると沿岸漁業が最も効率的であることが分かる。しかし、沿岸漁業においては、地域非効率性や経営非効率性と比較するとこの規模非効率性は小さい。

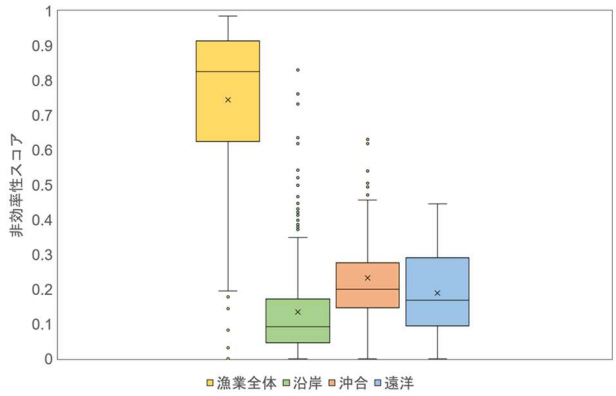


図 2. 漁業規模ごとの非効率性

図 3 は、沿岸漁業における漁業規模別、地域別の各非効率性の平均値を積み上げ棒グラフに表している。各種類の非効率性の平均値の合計が全体非効率性の平均値と合致することに留意されたい。図 3 より、経営要因を含めた沿岸漁業の平均非効率性は、各地域 0.7 以上と非常に高い数値であることが分かる。全地域を通して沿岸漁業における各地域の非効率性の主要な要因は、経営非効率性であり、次いで地域非効率性が高かった。特に、瀬戸内海地域の沿岸漁業の非効率性の平均値は 0.86 であり、最も非効率的であった。これは瀬戸内海地域の地域非効率性が他の地域に比べて高いことが原因と考えられる。瀬戸内海地域における非効率性は、海域の狭さが原因である。狭い海域に多くの沿岸漁業が競合するため、非効率性が高くなってしまったと考えられる。

沿岸漁業における経営非効率性が高い原因は、沿岸漁業を営む経営体の多くが、家族で営む個人経営体であるためであると考える。実際に日本の沿岸漁業を営む経営体の約 96%が個人経営体であるといわれており、60 歳以上の従事者が 65%以上を占めることから、加齢による生産能力の低下が予想される [5]。また個人経営体の多くが会社経営体と比べれば、漁船や漁具の質が劣るため、生産効率性が低くなると考えられる。

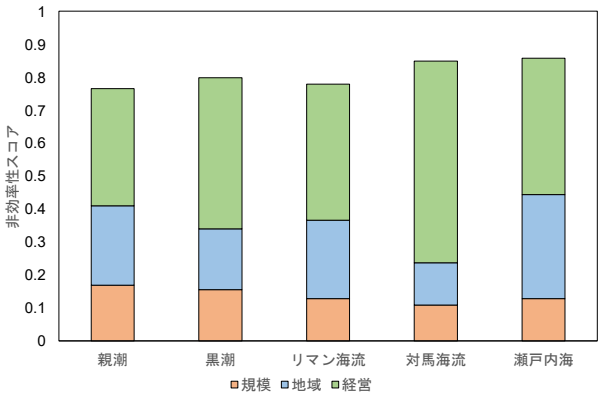


図 3. 規模別・地域別の各非効率性

このように日本の漁業においては、多面的かつ複雑な要因が非効率性を高めることに直結しており、その改善が重要である。特に、日本の漁業経営体の 9 割以上を占める沿岸漁業 [5]に対する効率性の改善は急務であり、適切な措置が求められる。本会では、効率性分析の結果に加えて、DEA によって求められた投入削減ポテンシャルを基に CO_2 排出削減可能量を推計し、環境負荷低減と漁業の効率性改善に向けた政策を提言する。

4. 引用文献

1) World Trade Organization 2022. Agreement on Fisheries Subsides https://docs.wto.org/dol2fe/Pages/SS/directdoc.aspx?filename=q:/WT/MIN22/33.pdf&Open=True
2) Sumaila, U. *et al*. (2019), Updated estimates and analysis of global fisheries subsides, *Marine Policy*, 109,
3) Parker, P.W.R. *et al.* (2018), Fuel use and greenhouse gas emissions of world fisheries, *Nature Climate Change*, 8, 333-337.
4) 農林水産省, 2018 年漁業経営体調査
5) 水産庁, 令和元年度水産白書

ヤイトハタ（*Epinephelus malabaricus*)の海面養殖の環境影響評価

Environmental Impact Assessment of Mariculture for Malabar Grouper (*Epinephelus malabaricus*)

○石田哲也*[1)]、宇田川伸吾[2)]、佐藤幸[1)]、小原聡[1)]、菊池康紀[1)]
Tetsuya ISHIDA, Shingo UDAGAWA, Yuki SATO, Satoshi OHARA, Yasunori KIKUCHI
1) 東京大学, 2) 琉球大学
* tetsuya.ishida@ ifi.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

世界人口の増加に伴う食料需要増大により、水産養殖への期待が高まっている。水産養殖は魚の計画的な生産と出荷を可能にする手段として注目されている。日本における水産養殖は100年以上の歴史があり、地域に根差した重要な産業となっている。海に囲まれた環境を活かし、養殖魚の約9割が海水魚[1)]で、かつ地域特性を反映して魚種が豊富である。またサーモンに代表されるようなグローバル資本による大規模養殖とは異なり、規模は小さく、生産物の多くが国内で消費されており、地域の資源や経済の循環を担う役割を持つ。日本において水産養殖が今後も持続的な産業として発展し続けるため、環境側面においては、水産養殖に伴う環境影響を正しく理解し、適切な改善策を講じる必要がある。一方で日本における水産養殖、特に地域特性が反映されたマイナー魚種養殖の環境影響に関する研究は十分とは言えない。

そこで本研究では、ケーススタディとして、沖縄地方で古くから高級魚として食されるヤイトハタの海面養殖に焦点を当て、LCAにより環境影響を把握し、ホットスポットを特定することを目的とする。

2. 研究方法

システム境界は、ゆりかごから養殖場ゲートまでとした。機能単位は市場へ出荷可能な生きたヤイトハタの生産とし、参照フローとして生産物1kgおよび養殖場の単位面積あたりの生産物1kg/m^{2}で表される生きたヤイトハタとした。フォアグランドデータは、沖縄県石垣市での生産者からの聞き取りと、沖縄県水産海洋技術センターの事業報告書[2)3)4)]から得た。また同事業報告書記載データに基づき、海面養殖におけるヤイトハタの成長曲線を作成し、養殖期間中の飼料摂取量を試算した。海洋に放出されるため定量が困難な排泄物については、飼料組成から飼料中の窒素とリン濃度を算定し、液性排泄物および固形排泄物へのそれぞれの移行率[5)]を乗じ、窒素は最終的に硝酸塩に、リンはリン酸塩に変換されたと仮定した。バックグランドデータにはIDEAv3.4を用いた。影響領域は水産に関連するものを使用し、評価指標としてエンドポイントモデリング（LC-LIME2）指標に基づくライフサイクル影響評価手法を採用した。

3. 結果と考察

ヤイトハタの海面養殖における主たるホットスポットは、気候変動では飼料原料の魚粉と飼料製造に伴う電力、富栄養化では排泄物、統合化では魚粉と寄生虫予防に行う淡水浴用の水道水であることが分かった。一般的に魚体重は飼養期間が長いほど増加するが、飼料摂取量と排泄物量､淡水浴用の水道水量も増加する。本研究では生産者からの聞き取り内容に基づき出荷体重を3.5kgに設定したが、これを1.0kgとして試算したところ、養殖期間、GHG排出量ともに3.5kgの場合と比較してそれぞれ約50%まで低減した。出荷体重と環境影響の関係を詳細に調査することで、環境側面において最適な出荷体重推定の可能性が示唆された。

4. 結言

ヤイトハタの海面養殖のLCAを行い、魚粉、排泄物、淡水浴用の水道水が主たるホットスポットであることが分かった。これらと飼育期間の関係から、環境側面において最適な出荷体重推定の可能性が示唆された。

謝辞

本研究はJST共創の場支援プログラム(COI-NEXT:JMJPPF2003, JMJPPF2012)の支援を受けて実施した。

引用文献

1) 農林水産省, 令和5年漁業・養殖業生産統計
2) 金城ほか:“平成9年度沖縄県水産試験場事業報告書”, (1997), pp.160-164
3) 中村ほか:“平成16年度沖縄県水産試験場事業報告書”, (2004), pp.121-123
4) 山内ほか:“平成25年度沖縄県水産海洋施術センター事業報告書”, (2013), pp.83-91
5) A. Midlen and T. Redding, “Environmental Management for Aquaculture”, Springer, (1998), p.223

社会実装と LCA：磯焼け解決に向けた藻食性未利用魚の有効利用

Social implementation and LCA: Valorization of unused herbivorous fishes to protect seaweed beds

○光斎 翔貴[1,2]、戸田耕介[2]
1）立命館大学、2）オーシャンリペア株式会社
＊ kosai@fc.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

過去数十年において，浅海の岩礁の藻場が著しく衰退・消失し貧植生状態となる現象（以下，磯焼け）が報告されており、全世界において年間 2～7%ずつ消失していると推定されている[1]．日本では藻場は別名「海のゆりかご」と呼ばれ，様々な魚介類の産卵・育成にとって必須な場所であり，また炭素を吸収するブルーカーボン生態系としても知られている．生物多様性・地球温暖化対策の観点から磯焼け対策が喫緊の課題となっている．水産庁によると藻場消失の主な要因の一つとして考えられるのが，藻食性魚類（イスズミ，アイゴなど）による藻類への食害である[2]．

一方で，藻食性魚類による藻類への食圧を低減できていない理由として，これらの魚が多くの地域において未利用魚であるという点にある．これまで食害魚であるイスズミ・アイゴのヒト用食材としての利用が模索されてきたものの，独特の臭いを取り去ることが困難であり[3]，経済価値が付けづらいことから漁獲が行われてこなかった．漁業現場では偶然網にイスズミ・アイゴが混入したとしても放流するのが現状であり，管理が難しく現状野放し状態となっている．

そこで，本研究では藻食性未利用魚対策として，行政による取り組みと民間事業による取り組みの 2 つのアプローチによる，温室効果ガス排出量と経済性の比較評価を行い，社会実装における長所短所をライフサイクルの観点から議論することを目的とする．これまで，水産残渣や死亡した魚を養殖の餌やペットフードの原料に利用することによる環境負荷は議論されておりその環境負荷低減が示されてきた[4]．一方で，未利用資源の有効利用という観点では同じである一方で，本研究のようにブルーカーボンと紐づけた上での議論はこれまでなされていない．また，社会実装を踏まえると，廃棄物のアップサイクルとしてペットフードに利用することは行動心理学の観点からハードルが高い[5]，本研究の対象である未利用魚はアップサイクルとは異なる考え方であり，将来的なビジネスに耐えうることから，民間事業のアプローチとしても現実的なシナリオであると考えられる．

2. 研究手法

本研究では，行政と民間のそれぞれの藻食性未利用魚の取り組みのプロセスによる温室効果ガス排出量と経済性評価を行う．温室効果ガス排出量の推定には IDEA ver3 を用いる．ここでは，藻食魚を駆除/漁獲することにより回復が見込まれるブルーカーボン生態系によって吸収される炭素分も LCA の枠組み内とする．

2.1 行政による取り組み

全世界において，唯一長崎県壱岐市が壱岐島内にて，2019 年から 4 年間，市の財源を用い補助金として藻食性食害魚の駆除を行った．壱岐市水産課へ 2024 年 5 月にヒアリングを行い，総駆除数，総補助金額，及び回復藻場量に関するデータ収集を行った．ヒアリングにより駆除された藻食性未利用魚の取り扱いとして，焼却処分もしくは他水産残渣と共に魚粉とする場合があるが，これまでは焼却処分が主流であったため，本研究では焼却処分を行うものとする．

2.2 民間による取り組み

前述の通り，対象となっている魚は未利用魚とされており，人の食利用はこれまで困難とされてきた．そこで，2022~2023 年に筆者らは人の食利用以外の藻食性未利用魚の利用先として，ドッグフードの開発を行った．対象となる藻食性魚類は白身魚であり，食物アレルギーをもつ犬にとって白身魚ベースのフードは低アレルゲン性であることから好まれており[6]，需要が見込められるためである．ドッグフードの製品として重要な側面が嗜好性であることから，2022 年 12 月から 2023 年 5 月にかけて計 122 匹の被験犬への食いつき調査を行った．

また，業界大手メーカーの多くは薄利多売のビジネスモデルのために本製品の高価格帯性から社会実装が難しく，著者らが自ら 2024 年 2 月に起業，2024 年 9 月より商品販売することにより，民間事業としてのアプローチを確立することとした．

ドッグフードの製造にかかる温室効果ガス排出量は比較のために広く流通しているチキンベースのフード[7]と比較する．機能単位としては，10kg の犬が 1 日に必要とするカロリー摂取量あたりで比較する．ここで，この民間事業による取り組みは 2024 年度の 9 月であることから，現段階における藻場回復量の推計が難しい．そこで，2.1 の行政の取り組みにおける藻場回復量を民間による取り組みでも利用する．

3. 結果と考察

3.1 行政による取り組み

行政による取り組み例として，藻食性未利用魚の駆除及び焼却とその結果回復するブルーカーボンを

踏まえた二酸化炭素排出量，及び補助金とブルーカーボンクレジットを踏まえたコストの結果を図１に示す．この結果より，藻食性未利用魚の漁獲及び焼却により排出される二酸化炭素より，回復するブルーカーボン量の方が多く，藻食性未利用魚 1kg あたり，8.8 kg-CO_2 の吸収が可能となることがわかる．

一方でコストは補助金の方がブルーカーボンクレジットよりも高く，藻食性未利用魚 1kg あたり 106 円となった．これは，日本の多くのブルーカーボンクレジットの事例と同様潜水調査に係る費用に加え魚の買取のコスト高から赤字の取り組みとなっていることに起因する．

また，二酸化炭素排出量はマイナスの値となる一方で，魚に含まれている窒素などの栄養分は環境中に放出されており，魚資源としての循環はなされていない．同時に駆除活動はアニマルウェルフェアの観点からも問題視されており，パブリックアクセプタンスの課題を解決する必要がある．さらに，ここでの行政による藻食性未利用魚の買取価格は漁師の損益分岐点となる値段となっており，漁師の所得向上にはほとんど寄与するものではない．藻場回復による漁場回復は期待できるものの，未利用魚としての扱いは変わらない課題も追記しておく．

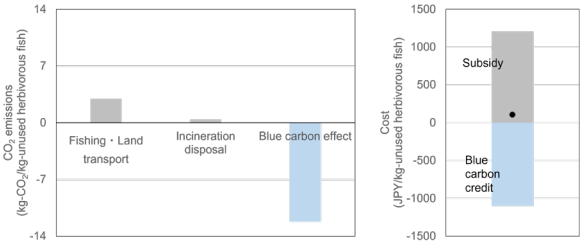


図１　行政による取り組みにおける藻食性未利用魚 1kg あたりの駆除に対するに二酸化炭素排出量とコスト

3.2 民間による取り組み

民間の取り組みとして，藻食性未利用魚をドッグフードとした際の二酸化炭素排出量の結果を図２に示す．鶏肉に対して藻食性未利用魚の 1kg あたりのカロリーが低いこと，また原単位あたりの二酸化炭素排出量の違いから，製造における二酸化炭素排出量はチキンベースのドッグフードの方が低いことがわかる．一方で，期待できるブルーカーボン創出を加味すると，製造以上の吸収が期待でき，1 日あたり 1.1 kg-CO2 の二酸化炭素が吸収されることがわかる．つまり，藻食性未利用魚をドッグフードとして利用することにより使用されればされるほど炭素固定がなされることがわかった．

また，民間の取り組みでは，税金を利用する行政の取り組みとは異なり，新たな経済価値を見出しており，従来のドッグフードとしての利益に加えブルーカーボンクレジットによる経済効果がもたらされると考えられる．

一方で，ここでの問題点として，行政による取り組みにより得られたブルーカーボン量を民間の結果にあてがっている点にある．行政による駆除された量と同程度の売上が見込めないとこの結果にはならないと考えられる．民間事業としての持続性が結果に大きく影響を与える点に不確実性が存在する．

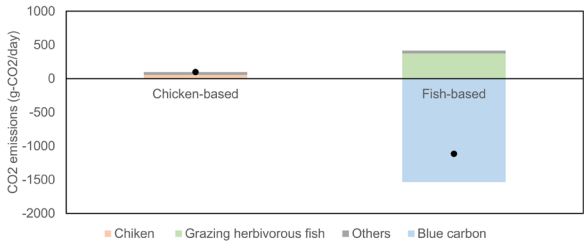


図２　民間による取り組みとして藻食性未利用魚ベースのドッグフードとチキンベースのドッグフードの製造にかかる二酸化炭素排出量の比較

5. 結言

本研究では，磯焼けの要因として考えられている藻食性未利用魚対策として，行政および民間の取り組みが二酸化炭素とコストの面からどのような影響を及ぼすか分析を行った．結果，共にブルーカーボン創出による効果によりライフサイクルの観点からも二酸化炭素の吸収に寄与することがわかった．

今後の展開は，同じ藻食性未利用魚という原料に対し，異なる処理先（焼却か有効利用可）をどのように比較するか，そのフレームワーク作りを行う．

6. 参考文献

1) Atsushi Watanabe, Tomohiro Kuwae, Carlos M. Duarte, Ryo Kohsaka, Jay Mar D. Quevedo, and Hiromichi Nagai (2023) Blue Carbon Roadmap: Carbon Captured by the World's Coastal and Ocean Ecosystems (ICEF Innovation Roadmap Project)
2) 水産庁，磯焼け対策ガイドライン（第 3 版）(2021)
3) Fusae Morinaka, Wataru Ando, Study on Making Food on Kyphosus Vaigiensis, Fisheries Engineering, vol.48, No.1, pp.73-75 (2011)
4) Cristiano, S.; Baarset, H.; Bruckner, C.; Johansen, J.; Pastres, R.; Innovative options for the reuse and valorisation of aquaculture sludge and fish mortalities: Sustainability evaluation through Life-Cycle Assessment, Journal of Cleaner Production, 352, 131613 (2022)
5) Bhatt, S.; Ye, H.; Deutsch, J.; Ayaz, H.; Suri, R.; Consumers' willingness to pay for upcycled foods, Food Quality and Preference, Volume 86, December 2020, 104035
6) Mueller, R. S.; Olivry, T.; Prélaud, P.; Critically appraised topic on adverse food reactions of companion animals (2): common food allergen sources in dogs and cats, BMC Veterinary Research (2016) 12:9
7) Costa, J. L. G.; Bánkuti, F. I.; Oiko, O. T.; Monti, M.; Loureiro, B. A.; Henríquez, L. B. F.; Florindo, T. J.; Vasconcellos, R. S.; Life cycle assessment of the production of an extruded dog food in Brazil, Journal of Cleaner Production, Volume 458, 15 June 2024, 142505

口頭発表セッション

2025年3月5日(水) 16:20 ~ 17:40 F会場：2333小講義室（3F）

[1-F4] 消費者行動

座長：栗栖 聖 (東京大学)

16:20 ~ 16:40

[1-F4-01]

資源循環促進に向けた家庭系生ごみの分別行動に関する調査

*大塚 彩美[1]、荒井 隆平[2]、兵法 彩[2] (1. 東京大学、2. 東京都市大学)

16:40 ~ 17:00

[1-F4-02]

GHG排出削減指標を表示した環境配慮製品の提供と生活者の行動変容分析

*今後 舞[1]、澤村 翔太[1]、楢崎 桃子[1]、和田 佑介[2]、中澤 克仁[1]、鶴田 祥一郎[1] (1. 一般社団法人サステナブル経営推進機構、2. Earth hacks株式会社)

17:00 ~ 17:20

[1-F4-03]

再生可能エネルギーを利用した日本酒の消費者受容性

*袴田 英希[1]、栗栖 聖[1]、福士 謙介[1] (1. 東京大学)

17:20 ~ 17:40

[1-F4-04]

総合討論

©日本LCA学会

GHG 排出削減指標を表示した環境配慮製品の提供と生活者の行動変容分析

Supply of environment-conscious products displaying GHG emission reduction indicator and analysis of consumer behavior changes

○今後 舞[*1)] 、和田 佑介[2)]、楢崎桃子[1)]、澤村翔太[1)]、中澤克仁[1)]、鶴田祥一郎[1)]
Mai Imago, Momoko Narasaki, Shota Sawamura, Katsuhito Nakazawa, Shoichiro Tsuruta, Yusuke Wada
1) 一般社団法人サステナブル経営推進機構, 2) Earth hacks 株式会社
* imago@sumpo.or.jp

1. はじめに

世界中でカーボンニュートラルを目指す動きが加速する中、国際サステナビリティ基準審議会が2023 年 6 月にスコープ 3 の開示義務化を確定する[1)]など環境情報開示の要請が高まっている。特に温室効果ガスの排出削減に向けた透明性のある可視化がますます重要になる[2)]。

企業における環境情報の開示および排出量の削減が進む一方、生活者が環境負荷の少ない製品を選択するなど需要側の行動変容も不可欠である。製品の購入やサービスを利用する生活者の行動変化を後押しするため、日々の購買行動における指標を生活者に提供する必要がある。

環境負荷低減に資する商品を認定する環境ラベルは製品・サービスにおける環境情報ツールとして有用であり、環境省の「環境ラベル等データベース」[3)]に掲載されている環境ラベルだけでも141 種類を超える (2025 年 1 月時点) 。

過去の結果[4)]より、環境情報の表示における生活者の反応を調べたところ、生活者は GHG 排出量そのものより削減効果を好むことが分かっている。従って本報では、削減効果のラベルにより消費者とのコミュニケーションを図っている Earth hacks 株式会社の協力のもと、ラベルの効果検証における結果をもとに分析を行った。

2. デカボスコア

2.1. デカボスコアとは

GHG 排出削減効果を示すラベルとして「デカボスコア」がある。Earth hacks 株式会社が算定によって商品やサービスにおける GHG 排出量における削減率を可視化した指標である[5)] (図 1)。従来の製法で作られた同等製品などと比較した GHG 排出量の削減率を「デカボスコア」として可視化することで、商品選択時の判断材料の一つとなり、GHG 排出量の少ない商品やサービスの購入を促すことができる。

商品等に「デカボスコア」を表示することにより生活者の購買行動に変化があるのか、実店舗において効果検証のための実証も行っている。



図 1 デカボスコア (Earth hacks HP より)

2.2. デカボスコアの算定方法

デカボスコアは、企業から提供される製品の部品の投入量やエネルギー使用量などのデータと、文献値や官公庁のデータ等を元に「活動量×GHG 原単位」にて製品やサービスの GHG 排出量を算定する。GHG 排出原単位は IDEAver3.4 や環境省のデータベース[6)]等を使用した。

算定範囲は、基本的にはライフサイクル全体を対象としたが、製品の機能の特徴に応じて対象とする範囲を決定した。

Earth hacks 株式会社のデカボスコアを算定を実施したのに対して、弊機構が原単位の選択や算定方法の妥当性等を確認した。

3. ラベルの効果実証

3.1. 概要

上記の方法により算定されたデカボスコアを実際の商品に表示することにより生活者の購買行動がどう変わるのか実証を行った。

Earth hacks 株式会社と専門小売企業(以下、A 社)が連携し、A 社の都内大型店を本実証の対象店舗とした。植物由来の素材で作られたお菓子や無染色の素材で作られたバッグなど、複数商品にデカボスコアを表示して店頭で販売した。

・対象店舗 東京都内 1 店舗
・対象商品 8 点
・実証期間
表示前) 2024 年 7 月 19 日～8 月 11 日
表示後) 2024 年 8 月 16 日～9 月 8 日

対象商品へのデカボスコアの表示前後それぞれ 1 か月間での各商品の売上を集計することで、生活者の購買行動を比較した。

なお、A 社は東京都内に 100 店舗以上有しており、全店舗において季節要因による売上増減への影響をできるだけ排除し、また同価格での販売とした。デカボスコアの表示をしていない都内の他店舗のデータと比較することで、デカボスコアの

表示による行動変容を分析した。

3.2. 結果

図 2 にデカボスコア表示前後の対象店舗における売上比率と東京都内の他店舗における同期間の売上比率のグラフを示す。(縦軸が売上比率)
都内の他店舗の売上比率と比較して対象店舗の売上比率は、商品全体、対象商品のどちらも高いことが分かる。

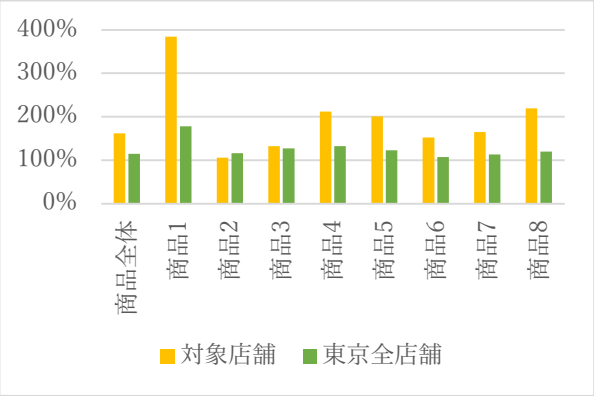


図 2 売上比率の比較

また、図 3 には売上比率の差分を示した。(縦軸が売上比率) 商品全体においては対象店舗の売上比率が 47%の伸びとなった。一部の商品を除いて都内の他店舗の売上比率より対象店舗における売上比率が高く、対象店舗における対象商品の売上が増加したことが分かる。

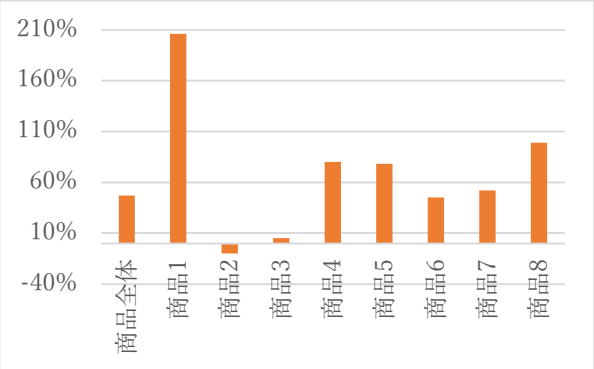


図 3 売上比率 差分

4. 考察

4.1. 本実証の結果を受けて

本実証の結果を受けて、デカボスコアを表示している商品の売り上げが伸びていることから、商品に指標を表示することにより、生活者が GHG 排出量の小さい商品を選択しうることが示唆された。

一方で、本実証において対象商品数や対象店舗への来店人数、購買人数などデータとして不十分な点があったことは否めない。データ範囲やデータ数が少なく再現性について課題があり、前提条件を揃えた上で規模を少しずつ拡大したさらなる検証が必要である。

4.2. 生活者の行動変容

生活者が環境負荷の小さい製品を選択すれば、製品やサービスを提供する企業側もより環境負荷の低い製品の開発促進に繋がる。

しかしながら、企業が優れた環境配慮製品を開発しても、生活者がその製品を認知していない、あるいはその利点を理解できなければ、需要の拡大や普及には繋がらず、その結果、生活者の行動変容も実現しえない[7]。また、環境に配慮しつつも価格に見合った品質を付加した製品でなければ、生活者に広げていくことは難しい[8]。

デカボスコアに限らないが、環境ラベルのような指標がどういったものであるか、認知度向上のためのマーケティングやそういった指標が実生活にどのような関りがあるか等の説明を実施する必要がある。生活者への環境情報の開示と環境情報の捉え方について理解を促進することが重要である。

5. 参考文献

1) IFRS,「Project Summary」,2023 https://www.ifrs.org/content/dam/ifrs/project/general-sustainability-related-disclosures/project-summary.pdf (参照 2025-01-16)
2) 金融庁,「事務局説明資料」,2024 https://www.fsa.go.jp/singi/singi_kinyu/sustainability_disclose_wg/shiryou/20240628/01.pdf (参照 2025-01-16)
3) 環境省,「環境ラベル等データベース」 https://www.env.go.jp/policy/hozen/green/ecolabel/touroku.html (参照 2025-01-16)
4) Anjuri Kakkar ら,「A Case Study on the Impact of Environmental Information Disclosure」, 第 18 回日本 LCA 学会研究発表会, 3-C2-01
5) Earth hacks 株式会社 HP, https://decarbo.earth-hacks.jp/about/ (参照 2025-01-16)
6) 環境省,「グリーン・バリューチェーンプラットフォーム」 https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/estimate_05.html (参照 2025-01-20)
7) 藤澤 美恵子ら,「環境ラベル認知度と環境配慮行動の関係」Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol.42, No.4, 249-256
8) 野田朗子,「環境配慮型製品のマーケティング戦略：普及に向けてメーカーと消費者との接点を探る」『同志社政策科学研究』第 2 巻第 1 号, 69-92

基調講演

2025年3月5日(水) 13:20 ~ 14:20 M会場：2143大講義室（1F）

[1-M2] 基調講演

13:20 ~ 14:20

[1-M2-01] 基調講演「建築物ホールライフカーボン評価をめぐる国際動向とわが国の対応」

伊香賀 俊治 氏 (慶應義塾大学名誉教授、一般財団法人住宅・建築SDGs推進センター理事長)

G7気候・エネルギー・環境大臣会合（2023年4月）において「建物のライフサイクル全体の排出量を削減する目標の推進」が採択された。これを受けて内閣官房に建築物のライフサイクルカーボン削減に関する関係省庁連絡会議が設置され、建物新築時の報告義務化、有価証券報告書へのScope3までのカーボン開示義務化などの政策調整が進んでいる。本講演では、そのための建築物ホールライフカーボン算定ツール（J-CAT）の概要を含めて、国内外の最新動向を紹介する。

©日本LCA学会

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 9:00 ~ 10:20 A会場：2451中講義室（4F）

[2-A1] プラスチック（1）

座長：藤山 淳史 (北九州市立大学)

9:00 ~ 9:20

[2-A1-01]

LCAを用いた都市特性別プラスチック循環システムの評価とシナリオ分析

*川越 広大[1]、藤山 淳史[1]、松本 亨[1] (1. 北九州市立大学)

9:20 ~ 9:40

[2-A1-02]

再生プラスチック製品に対する社会的受容性を考慮したCO_2削減貢献量に関する考察

向山 達稀[1]、蔡 佩宜[2]、*田畑 智博[1] (1. 神戸大学、2. 九州工業大学)

9:40 ~ 10:00

[2-A1-03]

品質要件を考慮した将来的な再生プラスチックの需給バランスの分析

*田畑 智佑[1]、中谷 隼[1]、林 徹[2]、藤田 壮[1] (1. 東京大学、2. 東京大学（現・環境省）)

10:00 ~ 10:20

[2-A1-04]

容リプラスチック・製品プラスチックの高品質リサイクルを想定したライフサイクル評価

*崎田 結香[1]、松本 亨[1]、藤山 淳史[1] (1. 北九州市立大学)

©日本LCA学会

LCA を用いた都市特性別プラスチック循環システムの評価とシナリオ分析

Evaluation of Plastic Circulation Systems by Urban Characteristics Using LCA and Scenario Analysis

○川越広大*[1)]、藤山淳史[1)]、松本 亨[1)]
Kodai Kawagoe, Atsushi Fujiyama, Toru Matsumoto
1) 北九州市立大学
* e3mac003@eng.kitakyu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、プラスチックによる海洋汚染（漂流プラスチック、マイクロプラスチック）や、プラスチックごみの輸出規制等、廃プラスチックを取り巻く問題は世界的な課題となっている。日本では、プラスチックの資源循環を促進するため、「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律」が 2022 年 4 月に施行された。また、2019 年に策定された「プラスチック資源循環戦略」では、2035 年までにリユース・リサイクル 100%の達成が目標として掲げられている。この目標を実現するためには、地域の実情に応じた分別回収、選別、資源化を最適なスケールで実現するための仕組みの構築が不可欠である。そのために、まず地域における廃プラスチックの物質フローを詳細に把握し、現状の課題や改善策を環境評価（LCA）等を通じて明らかにする必要がある。さらに、マテリアルリサイクル（MR）の可能性を最大限に引き出すため、再生処理施設に高度選別機械を導入することについても検討する必要がある。

そこで本研究では、特定地域を対象に廃プラスチックの物質フローを推計し、それにもとづく LCA を用いた環境評価を行うとともに、高度選別機の導入が優位となる事業規模の損益分岐点を導出することを目的とした。

2. 廃プラスチック賦存量の推計

対象地域として、大規模都市には福岡市と北九州市、中規模都市には久留米市、小規模都市には南筑後地域（大木町、柳川市、筑後市、大川市、みやま市）を設定した。図 1 に示す廃プラスチックフローの概念図をもとに、対象地域別に現状の廃プラスチック物質フローを推計した。なお、福岡市では容器包装プラスチックと製品プラスチックは可燃ごみとして回収され、PET ボトルは資源ごみとして回収されている。一方、久留米市では製品プラスチックは可燃ごみとして扱われているが、容器包装プラスチックと PET ボトルは資源ごみとして回収されている。大木町では容器包装プラスチックと製品プラスチック、PET ボトルのすべてが資源ごみとして回収されている。

3. 家庭系廃プラスチックフローの LCA 評価

CO_2 排出量の原単位については、プラスチック製容器包装再商品化手法およびエネルギーリカバリーの環境負荷評価（LCA）[1)] とグリーン・バリューチェーンプラットフォーム排出原単位データベース[2)] をもとに設定した。

3 市町における一人あたりの CO_2 削減量を比較した結果を図 2 に示す。この結果より、大木町、福岡市、久留米市の順で CO_2 削減量が大きく、大木町では特に MR による CO_2 削減効果が大きいことが確認された。また、処理方法の違いについては、久留米市ではケミカルリサイクル（CR）の割合が 12.0%と他の市町に比べて高く、大木町では MR の割合が 67.7%と高い結果が得られたが、これらの違いは再資源化手法の違いによるものである。

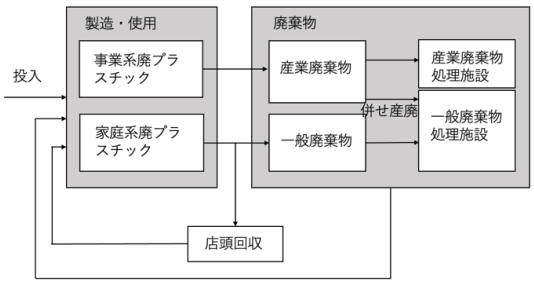


図 1 廃プラスチックフローの概念図

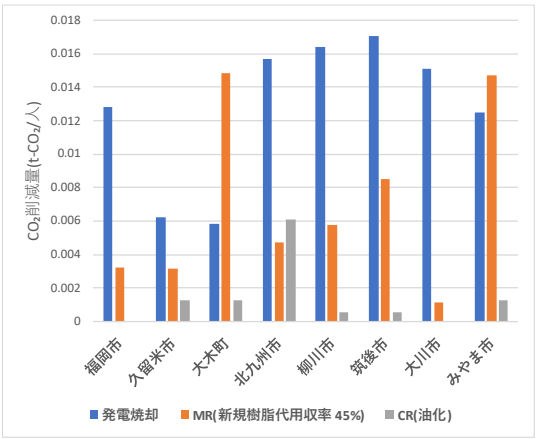


図 2 一人あたり CO_2 削減量

4．シナリオ分析

本研究では、廃プラスチックの選別効率と精度を大幅に向上させる技術である高度機械選別の導入が優位となる事業規模の損益分岐点について分析した。

高度機械選別として、本研究では容器包装プラスチックから任意の 2 種類の素材に選別ができる分別能力を有する光学選別機を取り上げ、紺野ら[3]をもとに分析に必要なパラメータを設定した。

固定費：

- 減価償却費　初期投資の償却期間 8 年（2,400 日稼働）
- 人件費　機械 1 台あたり 5,000 円/日

変動費：

- 高度機械選別の電気代　消費電力 25kWh、電力料金単価 20 円/kWh
- 高度機械選別の維持費　設備投資額の 2%/年・台[4]
- 残渣処理費　残渣率[5]を選別内容に応じて設定し、100%焼却されると仮定
- 収集運搬費　走行距離をもとに収集車両の燃料費と人件費を算出

収入：

- 再生材売上　廃プラスチックの組成ごとの売価を、プラスチック製容器包装に係る実証試験（平成 24 年 4 月～平成 26 年 3 月実施）[6]をもとに設定
- 処理受託費用　日本容器包装リサイクル協会の再商品化委託単価データ[7]をもとに設定

推計結果を図 3 に示す。

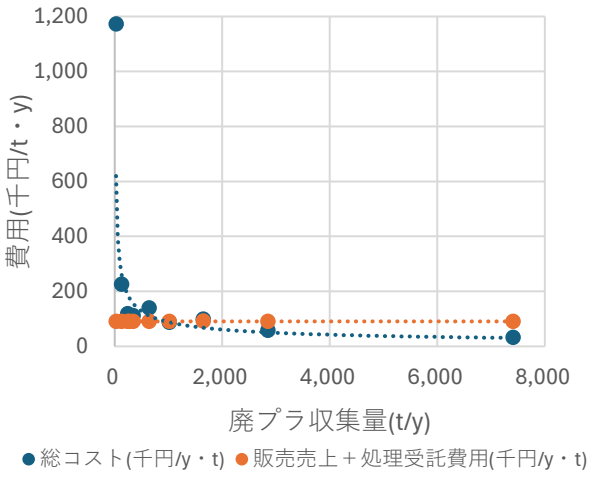


図 3 推計結果

5. まとめ

本研究では、福岡市、北九州市、久留米市及び南筑後地域を対象として、それぞれの自治体の廃プラスチック賦存量と物質フローを推計するとともに、LCA による評価を行った。また、高度機械選別の導入可能性に関する経済評価についても行った。今後は、今回の結果をベースに、政策の変更や住民行動の変化等をシナリオとして与え、環境面、経済面の評価結果に与える影響を分析する予定である。

引用文献

1) 海洋プラスチック問題対応協議会（JaIME）：プラスチック製容器包装再商品化手法およびエネルギーリカバリーの環境負荷評価（LCA）の報告書，（2019）
2) 環境省：グリーン・バリュチェーンプラットフォーム排出原単位データベース
3) 紺野聖人，中谷隼，森口祐一：容器包装プラスチックリサイクルにおける大規模選別施設の導入の評価，（2011）
4) 松藤敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価，技報堂出版，（2005）
5) Moeko Kawai, Jun Nakatani, Kiyo Kurisu, Yuichi Moriguchi: Quantity- and quality-oriented scenario optimizations for the material recycling of plastic packaging in Japan, Resources, Conservation and Recycling, (2022)
6) 公益財団法人日本容器包装リサイクル協会：プラスチック製容器包装に係る実証試験（平成 24 年 4 月～平成 26 年 3 月実施）報告書
7) 日本容器包装リサイクル協会：再商品化実施委託単価・拠出委託単価 https://www.jcpra.or.jp/specified/specified_data/tabid/133/index.php（2024/12/17 参照）

再生プラスチック製品に対する社会的受容性を考慮した CO_2 削減貢献量に関する考察

Impact of social acceptance for avoided CO_2 emissions by plastic recycled products

向山達稀 [1)]、蔡 佩宜 [2)]、○田畑智博*[1)]
Tatsuki Mukoyama, Peii Tsai, Tomohiro Tabata
1) 神戸大学, 2) 九州工業大学
* tabata@people.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

サーキュラー・エコノミー(CE)は、資源保全、カーボン・ニュートラル等の達成に向けて資源生産性の向上を促すための戦略である。Ellen Macarthur foundation[1)]は、CE を構築するための三原則の一つとして、製品と材料を高い価値を持って循環させることを掲げている。即ち、高品質のリサイクルを行うリソーシングが重要視されており、これを通じてリサイクル製品が普及することで社会全体の環境負荷削減に貢献できると考えられる。

一方、リソーシングによる環境負荷の削減貢献量が効果を発揮するためには、リサイクル製品が抵抗なく使用されることが必要である。田畑 [2)]が実施したアンケート調査(対象者:20 歳以上の神戸市在住の 1,652 人、調査期間：2024 年 1 月 29 日～同月 31 日)によると、「容器包装プラスチックをリサイクルした製品を購入したいか」という質問に対して、「衛生用品として使用される」、「飲食料品に直に触れる」ことを用途とした製品の購入に否定的な回答が多い傾向にあった。

リサイクル製品に抵抗感を感じる消費者は、一定数存在する。リサイクル製品が普及しなければ、リサイクルによる環境負荷の削減貢献量はキャンセルされることとなる。本研究はプラスチックのリサイクル製品(以下、プラ再生品)に対する消費者の社会的受容性を調査し、プラ再生品が敬遠されることで CO_2 削減貢献量がどのように変化する可能性があるかを考察した。

2. 研究の方法

2.1 アンケート調査

消費者のプラ再生品に対する意識を評価することを目的として、Web アンケート調査を実施する。回答者は、神戸市在住の 20 歳以上の男女 1,652 人である。神戸市の性別年齢階級別人口の割合を考慮して回答者を集めた。調査期間は 2024 年 9 月 26 日～同月 28 日である。アンケート調査は、基本属性に関する質問(性別、年齢等)、本質問(①プラ再生品の購入意向、②プラ再生品購入時の抵抗感、等)である。

本質問の質問①は、「プラ再生品を購入しようとしている」という仮想的な状況を付与し、コンジョイント分析の実施を意図した質問とした(図 1)。表 1 に属性と水準を示す。想定したプラ再生品は、田畑 [2)]が実施したアンケート調査結果で購入に否定的な回答が多い傾向がみられた「衛生用品として使用される」に関わる製品として飲料用ペットボトル、「飲食料品に直に触れる」に関わる製品として爪切りホルダーの 2 種類である。いずれも水平リサイクルを想定している。但し、爪切りホルダーは紙面の都合で省略する。本質問の質問②は、上記 2 種類のプラ再生品について、購入しようとするものがリサイクル品を用いていることに対して抵抗感があるかどうかを、「全く抵抗感はない」から「非常に抵抗感がある」までの 5 段階で尋ねた。

2.2 LCA とコンジョイント分析

500ml の飲料用ペットボトル 1 本を機能単位として、インベントリ分析を行う。図 2 に示すシステム境界で CO_2 を算出する。リサイクルを行う場合は、先ずは天然資源から製品を製造し、回収後にリサイクルして同

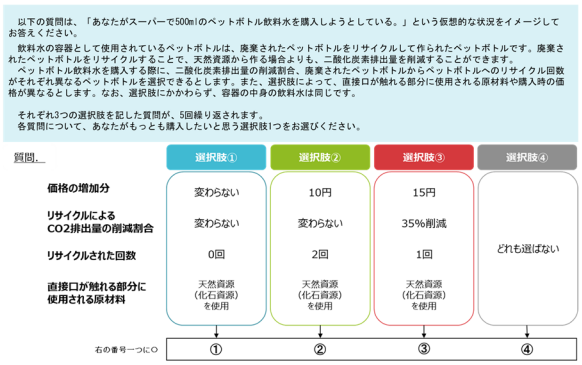
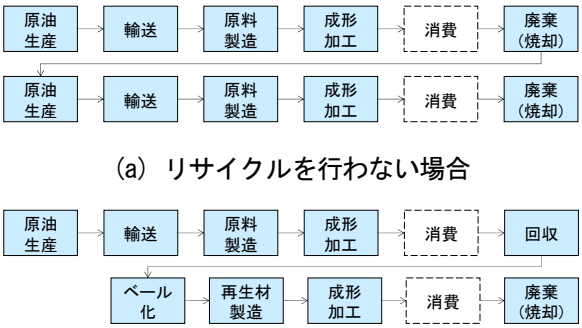


図 1　質問の一例

表 1　属性と水準

	属性1：価格の増加分	属性2：リサイクルによるCO_2排出量の削減	属性3：リサイクルされた回数	属性4：直接口が触れる部分に使用される原材料
水準1	変わらない	変わらない	0回	天然資源(化石資源)を使用
水準2	5円	25%削減	1回	ペットボトルをリサイクルしてできた原料を使用
水準3	10円	35%削減	2回	ー
水準4	15円	45%削減	3回	ー



(a) リサイクルを行わない場合

(b) リサイクルを行う場合

図 2　プラ再生品のシステム境界

(注釈)点線のプロセスは対象外とする。

じ製品に戻すことを想定する。2 回目の廃棄後は焼却すると想定する。リサイクルを行わない場合は、天然資源から製品を製造し、廃棄後に焼却するサイクルを 2 回繰り返すことを想定する。インベントリデータとして主に IDEA Ver.3.4.1 を使用したが、廃棄後の自治体による収集と減容化は神戸市から提供された施設等の運転データから算出したものを用いた。

コンジョイント分析では、表 1 に示した属性に対する回答者の選考強度と限界支払意思額(MWTP)を推定した。MWTP を用いて、プラ再生品がもつ環境性能に対して感じる価値を評価する。

3.　結果と考察

3.1　プラ再生品の貨幣価値の推定

コンジョイント分析の結果を表 2 に示す。係数が正となった属性は、属性 2 と属性 4 である。回答者は、CO_2 削減やリサイクルに対して一定の価値を感じていると考えられる。逆に係数が負となった属性は、属性 1 と属性 3 である。属性 3 と属性 4 の関係から考察すると、回答者はリサイクルに対して肯定的なイメージはあるものの、リサイクルの回数が複数になると抵抗感が出てくる可能性があることが伺える。

3.2　CO_2 削減貢献量のキャンセル効果の推定

図 3 にリサイクルされたペットボトルを用いた飲料の購入に対する抵抗感の結果を示す。「少し抵抗感がある」と「非常に抵抗感がある」を合わせると、回答者の約 9.6%が抵抗感を示していた。

回答者の意識と神戸市民の意識は同じであると仮定して、CO_2 削減貢献量のキャンセル効果を推定した。神戸市 [3]が 2022 年度に回収したペットボトルは、約 5,377t である。これらが全て水平リサイクルされた場合、神戸市におけるペットボトルリサイクルの CO_2 削減貢献量は 618t-CO_2 となる。図 3 の結果を踏まえて、神戸市民の約 9.6%がプラ再生品の購入を回避したと想定した場合のキャンセル効果は、99t-CO_2 となった。

表 2　各属性の推定結果

	係数	t 値	p 値	MWTP
属性1	−0.096	−30.08	p<0.001	
属性2	0.25	20.04	p<0.001	2.63
属性3	−0.089	−6.5	p<0.001	−0.93
属性4	0.11	3.45	p<0.001	1.1

(注釈)属性 1:価格の増加分，属性 2:リサイクルによる CO_2 排出量の削減，属性 3:リサイクルされた回数，属性 4:直接口が触れる部分にペットボトルをリサイクルしてできた原料を使用。サンプル数は 8,260(1,652 人×5 回の質問)。p 値は全て 0.1%水準で有意。

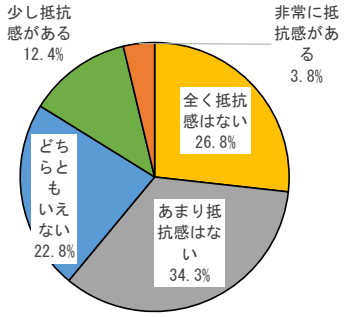


図 3　プラ再生品に対する抵抗感（リサイクルされたペットボトルを用いた飲料の購入）

4.　おわりに

CO_2 削減効果の年間キャンセル量は決して大きな値ではないが、プラ再生品が忌避される負の効果が積み重なることは CE 構築の足かせになるおそれがある。特に、使用時に衛生面でのイメージが強い製品はリサイクルに対して抵抗感を抱かれやすいため、消費者により使用される確実性がより高い製品を選定してリサイクルしていくことが重要である。

謝辞

本研究は、内閣府 SIP(課題番号 S323A302)および日本学術振興会科学研究費補助金(課題番号 JP23K11546)により実施した。ここに記して謝意を表す。

引用文献

1) Ellen Macarthur foundation: “Circulate products and materials”, (Online), Retrieved from <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circulate-products-and-materials>, (Accessed 2025-1-19)
2) 田畑智博, “第 36 回環境工学連合講演会”, 東京, (2024)
3) 環境省：”令和 4 年度一般廃棄物実態調査”, (オンライン), 入手先<https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r4/>, (参照 2025-1-19)

品質要件を考慮した将来的な再生プラスチックの需給バランスの分析

Projection of the supply-demand balance of recycled plastics in consideration of the quality requirement of recycled plastics

○田畑智佑*[1)]、中谷隼[1)]、林徹[2)]、藤田壮[1)]
Tabata Tomohiro, Jun Nakatani, Toru Hayashi, Tsuyoshi Fujita
1) 東京大学, 2) 東京大学（現・環境省）
* tabata@env.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

近年、再生プラスチックの導入拡大に向けた動きが世界的に進んでいる。欧州委員会は、いくつかの製品について再生材の使用を義務付ける規制案を発表している。日本でも欧州の動きに対応して再生材の利用を促進・義務づける立法化が進められており、今後再生プラスチックの需要が拡大すると考えられる。

一方これまでの日本における再生プラスチックの国内利用量は、およそ 30 年前からほぼ横ばいに推移してきた。そこで本研究は、日本における将来的な再生プラスチックの導入拡大に向けた需給バランスのボトルネックを特定することを目的とする。推計に当たっては、用途に対応する品質面での制約も考慮した。

2. 研究方法

2.1 容器包装プラスチック廃棄物発生量の推計

2030 年および 2050 年の人口変化を考慮し、容器包装プラスチック廃棄物の発生量を推計した。発生量は国内でのプラスチック容器包装の生産量と輸入量から、輸出量を除いたものである。この際、平田ら(2022)[1)]の推計結果をもとに、リデュースが行われた場合の削減効果も考慮した。

2.2 再生プラスチック需要量の推計

再生プラスチックの需要量として、Nakatani, et al. (2020)[2)]と平田ら(2022)[1)]の推計による産業別の容器包装プラスチック使用量をベースに、欧州の規制に対応するために必要な量を推計した。

欧州の規制に基づく需要量の推計に当たっては、2 つの規制を参考にした。「包装・包装廃棄物規則案」では、2030 年以降において PET 製の食品用包装材には最低 30%、ボトル以外の食品用包装材には最低 10%、使い捨てボトルには最低 30%、その他の包装材には最低 35%の再生プラスチックを使用することが求められている。また、2040 年以降にはボトル以外の食品用包装材には最低 50%、ボトルには最低 65%、その他の包装材には最低 65%の再生プラスチック使用が要求される。「廃自動車(ELV)規則案」では、新規製造の自動車に使用するプラスチックのうち 25%を再生材とし、そのうち 25%（全体の 6.25%）を廃自動車由来の再生樹脂で賄うことが求められている。自動車に用いる再生プラスチックの需要は、廃自動車由来の再生プラスチックを最大限導入し、残りを容器包装由来で満たすものとした。

2.3 リサイクルの収率

リサイクルの収率（リサイクルプロセスに投入された混合プラスチック廃棄物と再生材の重量比率）については、現状の容器包装プラスチック廃棄物の組成から、ソーティングとプロセスの収率を考慮して算定した。なおケミカルリサイクル(CR)の収率については、マスバランス方式の割り当て方式である「自由配分」「燃料除外」「樹脂限定」について、それぞれ日本の石油化学製品のマテリアルフローを考慮して算定した。

3. 結果

3.1 需要と容器包装プラスチック発生量の関係

各年の容器包装プラスチックの発生量と、最小要求量の推計結果について図 1 に示した。総量としてみれば PET も PET 以外の樹脂も廃棄物の発生量より再生材の需要量のほうが小さくなっているが、実際の需給バランスを推計するためには容器包装プラスチックの回収率やリサイクルプロセスの収率等を考慮する必要がある。なお PET については日本では高度な分別回収のシステムが既に整備されているため、需給バランスの分析からは除外した。

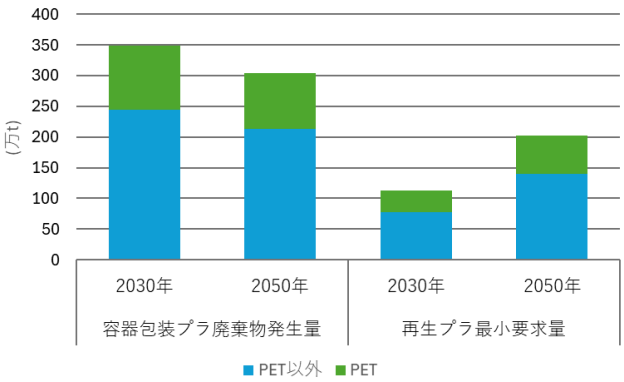


図 1 容器包装プラスチック廃棄物の発生量と再生プラスチックの需要量

3.2 品質を考慮した需給バランスの分析結果

PET 以外の樹脂について、再生材の供給可能性の分析した結果が図 2 である。横軸は容器包装プラスチックの回収率、縦軸は再生材の供給量を示し、接触に注意が必要な(contact sensitive)用途でない需要量を黄色の線、全体の需要量を赤色の線で示した。マテリアルリサイクル(MR)による再生材の代替率とマスバランス方式の割り当て方式によって必要な回収率は大きく異なるが、2030 年においては最も収率の高いシナリオでも 78%の回収率が必要となる。また 2050 年の需要量に対しては回収率が 100%でも需要を満たすのは困難であるという結果となった。

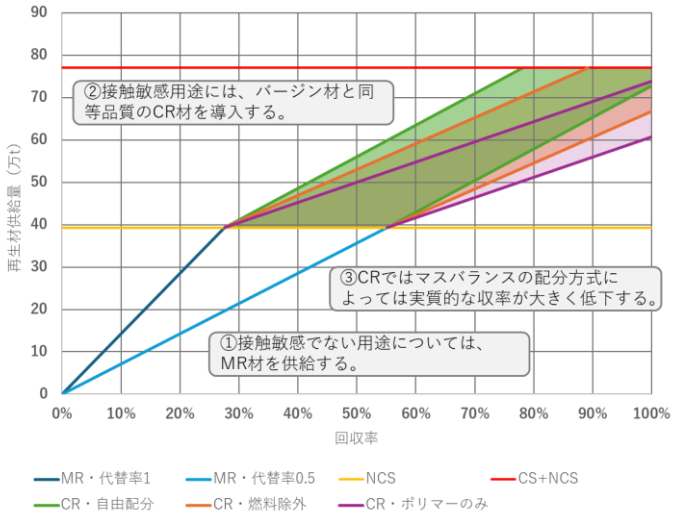


図 2 割り当て方式別の需給バランス分析（2030 年）

3.3 CR の石油化学プロセスへの実装について

マスバランス方式による CR のみで 2030 年の最小需要量を満たすためには、マスバランスの割り当て方式が「燃料除外」の場合、必要な投入率は石油精製に投入する場合で 1.20%、ナフサクラッカーに投入する場合で 0.88%となる。「樹脂限定」の場合は石油精製に投入する場合で 3.19%、ナフサクラッカーに投入する場合で 1.13%となる。将来的な石油精製やナフサクラッキングの減産を考慮すると、現在 1%程度となっている投入率を向上させる技術開発が必要である。CR に投入できるプラスチック廃棄物は限られているため、燃料除外や樹脂限定の割り当て方式においては、燃料以外の製品や樹脂をより高い割合で製造しているプロセスに対し集中的に再生油を投入する必要がある。

4. 議論

4.1 データ収集と計算ルールの確立の必要性

本研究の結果から、マスバランスの配分方式が需給バランスに大きな影響を与えることが分かった。今後世界的な動向を注視し、国内でも再生材成分の算定ルールを確立する必要があるだろう。燃料除外や樹脂限定の方式では、再生材の特性を割り当てるために熱分解油を投入するクラッカーや石油精製設備の最終製品を把握する必要があり、複雑な石油化学製品のフロー全体を明らかにする必要がある。

また MR の代替率と、製品の再生材含有率の関係についても注意しなければならない。図 2.においては機能ベースでの収率を示したが、実際は代替率が小さくなれば、製品の機能を維持するためにより多くのプラスチックを導入する必要があり、その結果重量ベースでの再生材含有率が大きくなる可能性がある。

4.2 今後の資源循環政策の方向性

本研究の結果から、容器包装プラスチックからのリサイクルでは供給量に限界があり、製品プラスチックのリサイクルも合わせて進める必要があることや、リサイクルの収率向上に向けたさらなる技術開発が必要であることが示唆された。特に 2050 年の需要量の供給達成のためにはリサイクル率の向上だけではなく、リサイクルプロセスの収率向上が不可欠である。また再生材（PE,PP）の不足を補うため、日本でリサイクルシステムが高度に整備されている飲料用 PET ボトルからの再生 PET を容器包装に導入していく方向性も考えられる。

再生プラスチックの需要を満たすには、MR と CR の技術を効果的に組み合わせる必要がある。MR は工程が単純で消費エネルギーが少ないが、品質が低く用途が限定される。一方、CR は新規プラスチックと同等品質の再生プラスチックを供給できるが、収率が MR より低く、商業レベルでの稼働実績が少ない。今後は、品質ごとの需要を満たすため、これらのリサイクル手法に容器包装プラスチック廃棄物を適切に割り振る必要がある。また、ソーティング施設の導入によりこれまで残渣となっていたプラスチック廃棄物がリサイクルできるようになる可能性があるため、大規模な施設の設置についても検討していく必要があるだろう。

引用文献

1) 平田一馬, 中谷隼, 林徹, 藤田壮:物質フロー分析に基づく使い捨てプラスチック利用の削減可能量の推計, 日本 LCA 学会誌 19(3), 143-157 (2023)
2) J. Nakatani, T. Maruyama, Y. Moriguchi. Revealing the intersectoral material flow of plastic containers and packaging in Japan. Proceedings of the National Academy of Sciences 117(3), 19844-19853 (2020)

容リプラスチック・製品プラスチックの高品質リサイクルを想定したライフサイクル評価

Life Cycle Assessment Assuming High Quality Recycling of Container Plastic and Product Plastic

○崎田結香[*1)]、松本 亨[1)]、藤山淳史[1)]
Yuika Sakita, Toru Matsumoto, Atsushi Fujiyama
1) 北九州市立大学
* y-sakita@kitakyu-u.ac.jp

1. はじめに

2050 年までのカーボンニュートラル実現に向け、さまざまな分野で取り組みが進められている。廃棄物・資源循環分野においても、脱炭素ロードマップにおいて、資源循環の高度化を通じた循環経済への移行が重点対策の 1 つに挙げられている。また、プラスチックの海洋流出や輸出規制など、廃プラスチックを取り巻く問題は深刻化している。2019 年 5 月に「プラスチック資源循環戦略」が策定されたが、この戦略のもと、資源循環への取り組みが一層促進されている。このような背景のもと、プラスチックの再生利用率を向上させるための技術開発が進められている。

本研究では、容器包装プラスチック（容リプラ）と製品プラスチック（製品プラ）を原料としてマテリアルリサイクル（MR）を行い、バージンプラスチックを原料に製造された製品とほとんど同等の品質を持つ製品を生産することを想定した高品質 MR のライフサイクル評価を実施した。

2. 解析方法

本研究では、リサイクル事業所のヒアリングによって得られたデータと、業界報告書（2019）[1)]（2022）[2)]をもとに解析を行った。機能単位は廃プラ 1kg（容リプラ$x$kg と製品プラ$(1-x)$kg）の処理と設定した。システム境界を図 1 に、条件設定を表 1 に示す。

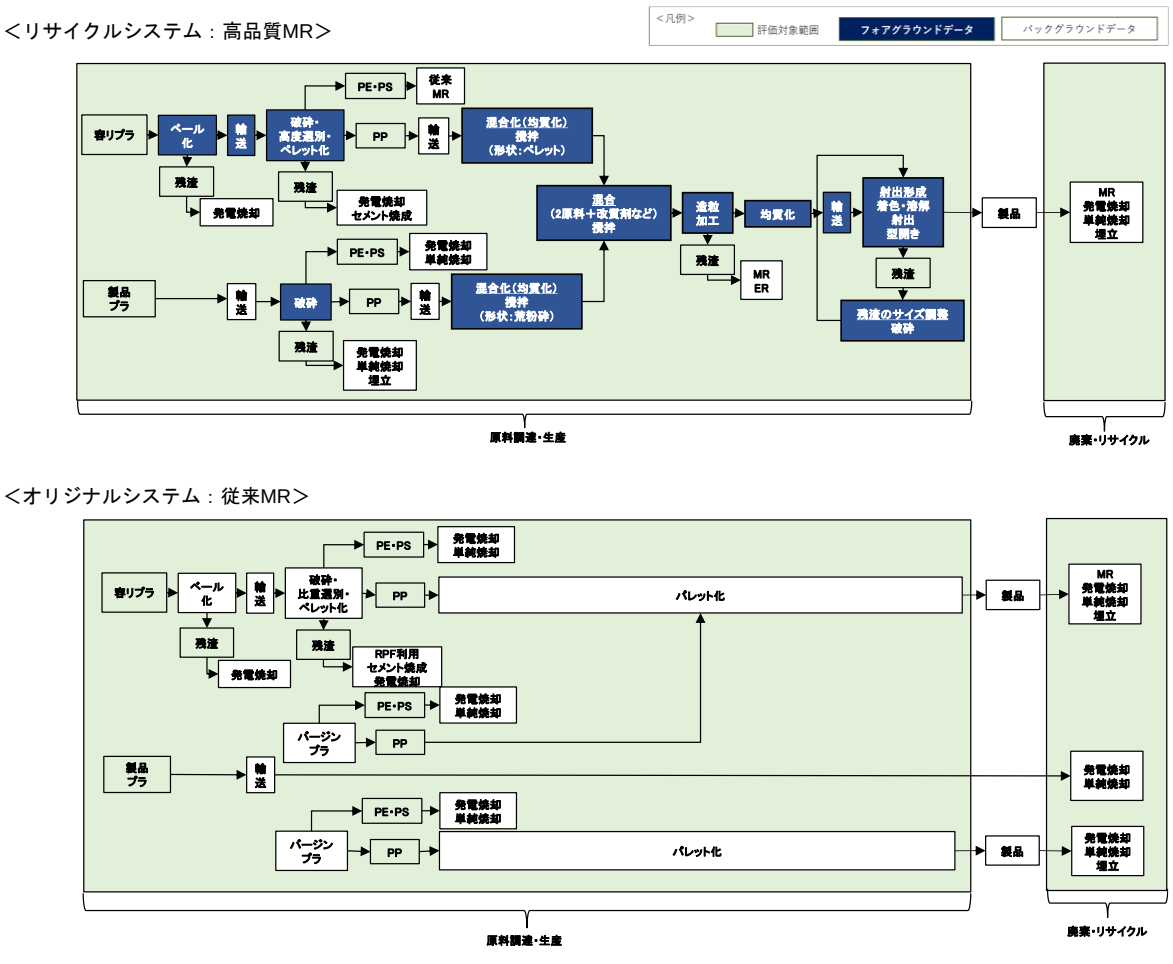


図 1　システム境界

表1　条件設定

機能単位	• 家庭から排出される廃プラ1kg（容リプラxkg、製品プラ(1−x)kg）の処理 • 高品質MRの最終製品化に仕向けられるプラ量をA:Bにするためにインプットを調整	
プラ組成	• 容リプラは容リプラのリサイクル事業所の実績値、製品プラは製品プラリサイクル事業所より	
評価対象システム（高品質MR）	容リプラ	• PP,PE,PSをMR→PPは高品質MR、PE,PSは従来MR • ベール化～ペレット化は容リプラのリサイクル事業所、akg-PPペレット/kg-容リプラ、機能代替率はα、残渣率は i • 混合化（均質化）撹拌（形状：ペレット）はプラリサイクル事業所、機能代替率はα’、残渣率は ii • 最終製品化はプラ製品製造工場、残渣率は iii
	製品プラ	• PP,PE,PSをMR→PPは高品質MR、PE,PSは焼却（一部発電） • 破砕は製品プラリサイクル事業所、bkg-PPペレット/kg-製品プラ、残渣率は iv • 混合化（均質化）撹拌（形状：荒粉砕）はプラリサイクル事業所、機能代替率はβ、残渣率は ii • 最終製品化はプラ製品製造工場、残渣率は iii
ベースライン（従来MR）	容リプラ	• PP, PE, PSを従来MR→ペレット化、PPのみ本事業の製品に活用 • 機能代替率は0.5 • 残渣率は0.48(JaIME2019を参考に)、残渣処理の仕向け率は容リ協2023
	製品プラ	• 全量分別無で清掃工場で焼却（一部発電） • ペレット化、PPのみ本事業の製品に活用 • 発電装置の設置率は39.8%（環境省R4）、発電効率は12.81%（JaIME2019）

2.1 リサイクルシステム

リサイクルシステムでは、高品質 MR を実現するために、容リプラと製品プラの適切な割合を考慮する必要がある。製品に使用される容リプラ由来 PP 重量と製品プラ由来 PP 重量を$A:B$にするために、下記の式を用いて Input 容リプラ重量と Input 製品プラ重量を求めた。

Input 容リプラ：$x$kg

Input 製品プラ：$(1-x)$kg

容リプラ由来の PP 重量を$a$kg-PP/kg-容リプラ、製品プラ由来の PP 重量を$b$kg-PP/kg-製品プラとすると、下記の関係が成り立つ。

$$x * a : (1-x) * b = A : B$$

この式を変形すると、

Input 容リプラ$x = A * b/(A * b + B * a)$

Input 製品プラ$(1-x) = 1 - \{A * b/(A * b + B * a)\}$

2.2 オリジナルシステム

オリジナルシステムでは、容リプラは従来 MR と仮定するため、リサイクルシステムにおける容リプラの機能代替率αとオリジナルシステムにおける容リプラの機能代替率 0.5 の 2 つを考慮した計算が必要となる。

オリジナルシステムで必要な容リプラは、下記に示す通り、「必要なバージンプラ量＝従来 MR で必要なプラ量－従来 MR で供給可能なプラ量」で算出される。

必要なバージンプラ量

$$= x * \{(1 - i) * \alpha\} - y * \{(1 - 0.48) * 0.50\}$$

x：リサイクルシステムでの Input 容リプラ

y：オリジナルシステムでの Input 容リプラ

i：リサイクルシステムの容リプラのベール化~ペレット化の残渣率

α：リサイクルシステムの容リプラのベール化~ペレット化の機能代替率

0.48：オリジナルシステムの容リプラの残渣率

$(1 - 0.48)$：オリジナルシステムの容リプラのリサイクルプロセスで製造されるペレット（PE・PP・PS）の有効重量

0.50：オリジナルシステムの容リプラの機能代替率

3. まとめ

本研究では、容リプラと製品プラを原料とした高品質 MR を想定し、従来 MR との比較を行った。研究発表会では、具体的な数値をもとに算出結果を示す。

謝辞：本研究は、環境省令和 6 年度脱炭素型循環経済システム構築促進事業進事業（リサイクル困難素材等の高品質リサイクル実証事業）の成果の一部である。記して謝意を表す。

引用文献

1) 海洋プラスチック問題対応協議会（JaIME）:プラスチック製容器包装再商品化手法およびエネルギーリカバリーの環境負荷評価（LCA）の報告書,（2019）
2) 海洋プラスチック問題対応協議会（JaIME）: 産業系廃プラスチックの LCA 評価,（2022）

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 10:40 ~ 12:00 A会場：2451中講義室（4F）

[2-A2] プラスチック（2）

座長：松本 亨 (北九州市立大学)

10:40 ~ 11:00

[2-A2-01]

遺伝的アルゴリズムを用いた廃プラスチック選別・リサイクル技術の多目的組み合わせ 最適化

*瀬山 遼維[1]、福嶋 一期[1]、大野 肇[1]、福島 康裕[1]、八木原 昂輝[1] (1. 東北大学大学院)

11:00 ~ 11:20

[2-A2-02]

炭素源の持続可能性を考慮したバイオマス由来プラスチックのフロー解析

*千田 康太[1]、ティア ヘンイ[1]、兼松 祐一郎[1]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学)

11:20 ~ 11:40

[2-A2-03]

再生プラスチック・バイオマスプラスチック含有製品の消費者選好評価

*藤山 淳史[1]、岩﨑 愛子[1]、松本 亨[1] (1. 北九州市立大学)

11:40 ~ 12:00

[2-A2-04]

線形計画法を用いた廃プラスチックの再資源化施設選択モデルの開発：東海三県を対象としたケーススタディ

*鉾岩 風人[1]、叢 日超[1]、藤山 淳史[1]、松本 亨[1] (1. 北九州市立大学)

©日本LCA学会

遺伝的アルゴリズムを用いた廃プラスチック選別・リサイクル技術の多目的組み合わせ最適化

Genetic Algorithm-based Multi-objective Optimization of Plastic Waste Sorting and Recycling Technologies

○瀬山遼維*[1)]、福嶋一期[1)]、大野肇[1)]、八木原昂輝[1)]、福島康裕[1)]
Ryosuke Seyama, Kazuki Fukushima, Hajime Ohno, Koki Yagihara, Yasuhiro Fukushima
1) 東北大学
*ryosuke.seyama.r1@dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

カーボンニュートラルの実現に向けて化石燃料利用低減を目指す中で、ナフサを原料とする化学品製造は再生可能な炭素源を用いた新たな製造ルートを確立する必要がある。化学製品中の炭素の半数がプラスチックに含まれることから[1)]、使用後の廃プラスチック（廃プラ）は今後貴重な炭素源となる。廃プラを樹脂として再生利用するマテリアルリサイクル(MR)と化学原料化するケミカルリサイクル(CR)は、廃プラの組成や純度によりリサイクル品の質が変化するため[2)]、選別方法によってリサイクル可能な廃プラ量は大きく異なる。現在、産業系の廃プラで組成が単純かつ明らかなものについては、MR によって処理されているが、一般系の廃プラ中には複数樹脂種が混在しているため、MR や CR による処理が難しく、埋め立てやエネルギー回収(ER)を伴う焼却による処理が主流となっている。

埋め立てによる海洋流出や焼却に伴う温室効果ガスの排出が社会問題として取りざたされていることから、適切な選別・リサイクルシステム設計が必要である。樹脂種毎、混合状態毎に適したリサイクル手法が存在し、リサイクルに供するまでの選別のパターンも無数に考えられる中で、コストや GHG 排出量などの複数の目的関数を同時に最適化出来れば、実現可能性の高いシステム設計の提案が期待できる。そこで本研究では、遺伝的アルゴリズム NSGA-Ⅱ[3)]を用いてコスト・排出量の両面から選別操作とリサイクルの組み合わせを最適化した。

2. 手法

2.1 NSGA-II

NSGA-II は、多目的最適化のために設計された進化的アルゴリズムであり、複数の目的を同時に最適化する際に用いられる。候補解は評価され、他の解を凌駕する非劣解が優先的に選択され、世代を重ねて進化する。このプロセスにより、解の多様性を保持しつつ、より広範な範囲で最適解を発見することが可能となる。

NSGA-II は、複数の目的を同時に最適化する必要がある複雑な問題を解決する上で有効である。遺伝的アルゴリズム（GA）は、多目的最適化問題においてパレートフロントを導出するために適しており（図 1 参照）、NSGA-II（図 2 参照）はその代表的な手法の一つである。また、設定要件を表 1 に示した。母集団サイズ、世代数は計算時間や結果の分布に大きく影響する[4)]為、変数とした。

2.2 選別・リサイクルシステム

5 種類の廃プラ(PE, PP, PS, PET, PVC)を含む混合廃プラの処理について、7 種の選別方法(近赤外線

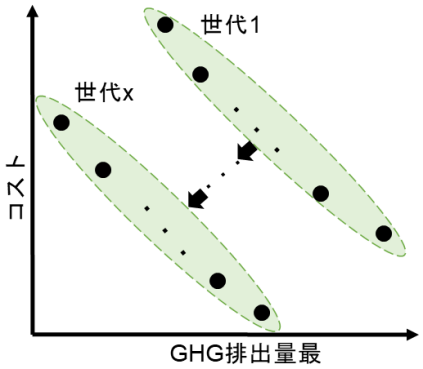


図 1 NSGA-Ⅱの計算アルゴリズム

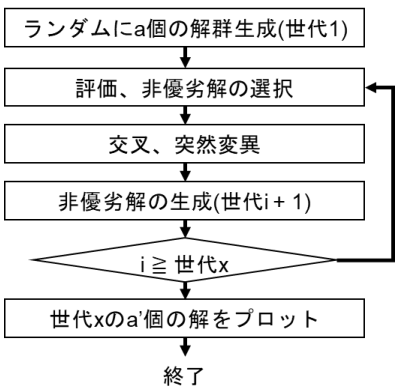


図 2 NSGA-Ⅱの解群の生成過程

表 1 NSGA-Ⅱの設定要件

母集団サイズ	世代数	交叉確率	突然変異確率
P	X	0.7	0.01

表 2 選別・リサイクル技術

	選別機	対象樹脂		技術	生成物
選別	選別機 1	PE	リサイクル	MR1	rePET
	選別機 2	PP		CR1	ディーゼル代替油
	選別機 3	PS		CR2	ナフサ代替油
	選別機 4	PET		CR3	原油代替油
	選別機 5	PVC		CR4	ディーゼル代替油
	選別機 6	PP, PE		CR5	ディーゼル代替油
	選別機 7*	none		ER	電力

*選別機の設置なし

選別機 6 種と選別機の不設置)と 6 種類のリサイクル方法(表 2)の組み合わせを最適化した。システム境界は廃プラの選別からリサイクル製品の製造までとした。

式(1)のように選別・リサイクルシステム由来の GHG 排出量(E_s)、最終生成物による代替分の GHG 排出量(E_d)を引いた正味 GHG 排出量(GHG)の最小化と、式(2)のようにシステムの運用費(C_{ope})と、設備投資費(C_{inv})を足したコスト($Cost$)の最小化をそれぞれ目的関数とした。年間当たりの設備投資費を求めるため、アニュイティファクター(I)を用いた(式(3))。

$$\text{Minimize } (GHG) = (E_s) - (E_d) \quad (1)$$

$$\text{Minimize } (Cost) = (C_{ope}) * (V_{mpw}) + (C_{inv}) * \frac{1}{I} \quad (2)$$

$$I = \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad (3)$$

リサイクル先はダウングレードプラ(rePET)、熱分解油、および直接燃焼による熱である。熱分解油は発熱量に応じた発電量から利益を算出した。ダウングレードプラ、熱分解油、いずれにも回らなかった廃プラは ER に回るとした。[5)]

3. 結果と考察

異なる設定要件のもとで、GHG 排出量最小化とコスト最小化のパレート解を求めたものを図 3 に示した。計算時間はそれぞれ 20 分(P=10, X=10 のもと 20 回計算)、70 時間(P=100, X=100 のもと 1 回計算)であった。GHG 排出量最小化とコスト最小化はトレードオフの関係にあることが分かる。

技術の組み合わせや順番を全列挙し、GHG 排出量、コストで順番に並べ、それぞれを最小とする点を図 3 上に示した(赤、青ダイヤ)。コスト最小点近傍で二目的最適解の探索が出来たことが分かる。一方で GHG 排出量が減少するにつれて、コストが上昇し、GHG 排出量最小点から離れる結果となった。

次に母集団の初期値に GHG 排出量最小点とコスト最小点を含み、二目的最適化を行ったところ、GHG 排出量最小点近傍に点近傍で二目的最適解の探索が出来た。また、技術の組み合わせの一例(緑四角)を図 4 に示した。選別機は 4 つ配置され、選別後の樹脂種の純度が高くなることで MR や CR が行

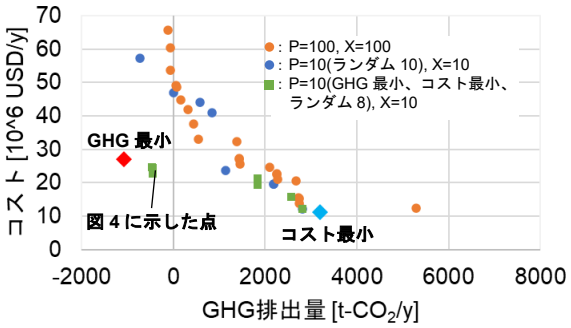


図 3 GHG 排出量最小化とコスト最小化のパレート解

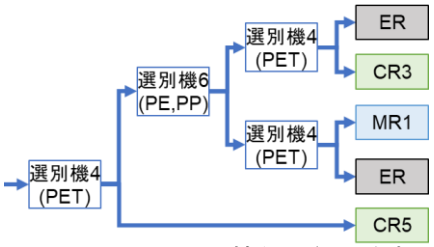


図 4 選別・リサイクル技術の組み合わせ

われたが、依然 ER が複数稼働していることから、現状のリサイクル技術では ER を削減しきれないことが示唆された。

4. 緒言

NSGA-Ⅱを用いて GHG 排出量最小化とコスト最小化の二目的を同時に最適化するための手法を提案した。本研究で用いたデータは、現在使用されているリサイクル技術を参考にしているため、新規技術を導入する為の要件を導出できるような枠組みに本手法を拡張する必要があると考える。

記号

V_{mpw}：年間当たりの廃プラ投入量、r：割引率(=0.08)、n：減価償却可能耐用年数(=38)

謝辞

本研究は JST さきがけ地球環境と調和しうる物質変換の基盤科学の創成(JPMJPR2272)の助成を受けて実施された。

引用文献

1) Ohno H., *et al.*, *Environ. Sci. Technol.*, **52**, 3899-3907 (2018)
2) 府川伊三郎, “プラスチックのケミカルリサイクルとその技術開発(上),” p. 8, 2020.
3) Kalyanmoy D., *et al.*, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, **6**, 2, 182-197 (2002)
4) Weijie Z., *et al.*, *Process Saf Environ Prot.*, **325**, 104016 (2023)
5) Jonghun L., *et al.*, *Process Saf Environ Prot.*, **169**, 685-696 (2023)

炭素源の持続可能性を考慮したバイオマス由来プラスチックのフロー解析

Flow Analysis of Biomass-Based Plastics Considering Carbon Source Sustainability

○千田康太*1)、ティア ヘンイ 1)、兼松祐一郎 1)、菊池康紀 1)
Kota Chida, Heng Yi Teah, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi
1) 東京大学
*chida-hanaike@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

バイオマス由来/リサイクル由来プラスチックは、従来の石油プラスチックの代替素材としてその導入拡大が検討されている。これらのプラスチックが環境影響に及ぼす影響については盛んに研究が行われている。例えば個々の種類のプラスチックに関してライフサイクルアセスメント(LCA)を用いて環境負荷や経済性を評価し、従来の石油由来プラスチックと比較を行ったケーススタディは多く存在する[1,2]。しかしながら、これらの導入が環境や社会に真に正の影響を与えるかどうかについては未だに明らかではない。また、原料として用いられるバイオマスの種類や樹脂製造プロセス、地理的バウンダリといったライフサイクルの違いによって影響評価にばらつきが生じている他、複数の樹脂を導入した際に現在の社会における素材や技術の選定に及ぼす環境影響などを包括的かつ定量的に評価した研究はほとんど存在しない。更にプラスチックにおける炭素の通りうるフローの全体像が明らかでないため、プラスチックのライフサイクルステージに関与する各ステークホルダー間のつながりが弱く、持続可能社会に向けて柔軟にライフサイクルを設計することが難しいという現状にある。

本研究では、まずバイオマスやリサイクル由来炭素を原料とするプラスチックの導入によって生じうる、炭素のライフサイクル全体の変化を明らかにする。その上でフロー解析を通じて環境影響や炭素源の再生可能性の観点からライフサイクルの評価を行い、バイオマス由来プラスチックの導入に向けた原料や樹脂の種類、EoL(End of Life)手法の適切な組み合わせを明らかにする。

2. フロー解析手法

2.1 評価対象・評価指標

本研究では日本の容器包装用途プラスチックに限定してケーススタディが実施された。評価対象として既存の石油由来プラスチック (PE, PP, PS, PET) に加えて、バイオマス由来プラスチックとして Bio-PE, Bio-PP, Bio-PET, PEF , PHA, PLA が設定された。PHA, PLA, PEF はバイオマス由来プラスチックとして現在製造量が多いもしくは製造技術が確立されている種類が[3]、Bio-PE, Bio-PP, Bio-PET は既存の汎用石油由来プラスチック製品を、同じ物性を有するバイオマス由来製品で代替することを想定して設定された。

評価指標は、環境影響評価の指標に GHG 排出量が、ライフサイクル内の炭素の再生可能性を定量化する指標としてシステム内の石油由来樹脂の量が設定された。

2.2 システム領域

はじめに計量書誌分析によって文献のクラスタリングを実施し、評価対象とする樹脂や技術についてのキーワードが抽出された。次に得られたキーワードを基にプラスチックの既存文献の調査を実施し、各プラスチックについて原料、製造手法、用途、EoL 手法についての情報が商用化されていないものを含めて収集され、プラスチックライフサイクルのスーパーストラクチャ[4]の作成が行われた。

容器包装プラスチックのフロー解析におけるシステム領域はこのスーパーストラクチャを基に構築された。バイオマス由来プラスチックの原料としてサトウキビ、テンサイ、トウモロコシ、パーム油、微細藻類が検討された。EoL 手法のオプションとしては焼却と埋立に加え、サーマルリサイクル、closed-loop でないケミカルリサイクル、closed-loop なマテリアルリサイクルが考慮された。

2.3 モデル構築

最適化のために、線形計画法のアプローチが用いられた。環境影響と炭素の再生可能性の目的関数はそれぞれ式(1), (2)のように定義され、それぞれ計算が行われた。式中の各プロセスの GHG 排出量原単位やインベントリデータは主に文献から収集された。

制約条件として、技術の実現可能性(存在しな

GHG emission:

$$\text{Min. } G_{total} = \sum_{mat}^{all}\sum_{tech}^{all}\sum_{resin}^{all} M_{mat,tech,resin}E_{mat,tech,resin} + \sum_{resin}^{all}\sum_{EoL}^{all} M_{resin,EoL}E_{resin,EoL} \quad (1)$$

Percentage of renewable carbon:

$$\text{Min. } W_{total} = \sum_{\text{mat}}^{fossil}\sum_{tech}^{all}\sum_{resin}^{all} M_{mat,tech,resin} + w \cdot G_{total} \text{ ただし } w \cdot G_{total} \ll M_{mat,tech,resin} \quad (2)$$

M: 製品樹脂の質量, E: GHG 排出量原単位, , w: 重みづけ係数

いフローの場合、$M = 0$)、原料であるバイオマス各種の供給可能量、製品樹脂の需要、そして各EoL手法の処理可能容量が考慮された。バイオマスの供給上限は現在の各原料の製造量の比率に基づいて設定された。製品樹脂の需要については、現在のPE, PP, PS, PETの容器包装用途における消費量(製造量に等しいと仮定)がそれぞれ推計され[5]、プラスチックが社会全体で満たすべき機能と定められた。再生可能炭素由来プラスチックによって代替が行われてもその機能が変化しないと仮定された。別種の樹脂による代替の際には、既存のバイオマス由来プラスチックと石油由来プラスチックの環境影響の比較に関する先行研究[6,7]に基づいて、同体積の樹脂が同等の機能を有するとして計算が行われた。EoL手法の処理可能上限については、現在の処理量のデータに基づいて決定された。この研究では、制約条件の変化によるライフサイクルの変化を可視化するために、バイオマス供給可能量とマテリアルリサイクル処理可能量の制約条件の値を変化させる2つのケース(それぞれCase-bio, Case-recycleとする)が検討された。

3. 結果・考察

フロー解析の結果から、原料供給、バイオマスの炭素吸収、樹脂製造、EoLなど多くのライフサイクルステージが容器包装プラスチック全体の総GHG排出量に大きく寄与していることが示された。このことから、ライフサイクル全体の設計が必要と考えられる。

Case-bioの結果から、GHG排出量と炭素の再生可能性の観点における、バイオマスの利用可能性の拡大に従うシステム内の炭素の流れの変化が明らかとなった。GHG排出量と炭素の再生可能性のいずれの結果おいてもBio-PETとPHAがそれぞれPETとPSを代替素材として優先的に導入されることが分かった。これは、代替による負荷削減効果の大きい樹脂に対応している。炭素の再生可能性を評価指標とした場合では、バイオマスの導入量増加にしたがって、GHG排出量が増加するトレードオフが生じる場合があることが観察された。したがってバイオマスの導入による持続可能なシステムを設計していく上で、環境影響と再生可能性の均衡を慎重に探る必要があると考えられる。また、このケースにおいて完全な脱化石には約2Mtの再生可能炭素が必要であり、さらにシステム全体の炭素の内リサイクル由来のものはわずか4%程度であった。これはリサイクルの許容量が現在のスケールに基づいて設定されているためである。現実的な脱化石の達成にはリサイクルの寄与をさらに拡大させバイオマス資源の投入量を減少させていくべきであると考えられる。

Case-recycleの結果から、リサイクルの許容量拡大に伴って優先されるマテリアルリサイクルの順序が明らかとなった。しかしながら、GHG排出量の観点からはPP, PET, PHAの順でリサイクルに投入すべきであるのに対し、再生可能性の観点からはPE, PET, PPの順であった。バイオマスの投入での議論と同様、両指標の重要性を議論したうえで判断する必要がある。また、リサイクル容量を増加させてもある値でフローは変化しなくなり、完全な脱化石は実現しなかった(リサイクル由来炭素の割合=約30-40%)。これは、マテリアルリサイクルによる再生品の品質の低下に起因する。このことから、システム内の再生可能性を高める上では、バイオマスも継続的に導入規模を拡大していく必要があるといえる。

4. 結言

本研究では、バイオマス由来/リサイクル由来炭素の導入に向けて、日本の容器包装用途のプラスチックライフサイクルにおけるフロー解析手法が開発され、環境影響・炭素の再生可能性の観点から評価がなされた。その結果、バイオマス供給量やリサイクル許容量などが限られた制約条件の中で優先して製造・リサイクルすべき樹脂の種類やその効果が可視化され明らかとなった。また、GHG排出量の少ない脱化石システムを実現する上で、バイオマス利用拡大とリサイクルの規模拡大の両立が求められることも明らかとなった。

構築されたフロー解析の基盤は評価対象や技術、変数が変化しても適用可能である。したがって、今後の研究では、考慮できていない用途や樹脂の種類、そしてプロセスへとモデルを拡充していくことでより広範にわたるフロー解析を行い、将来的なシステムの変化を考慮したシナリオ分析を通じて持続可能性の高いライフサイクルを設計していくことが望まれる。

謝辞

本研究はNEDO委託事業(JPNP20012)、JST COI-NEXT共創の場形成支援プログラム(JPMJPF2003)、科学研究費助成事業(23K21780)の成果を一部含む。
東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は、三井不動産(株)、積水ハウス(株)、東日本旅客鉄道(株)、豊田通商(株)からの寄付で活動している。

引用文献

1) Amasawa, E. et al., Environ. Sci. Technol., 55(5), (2021), pp.3380–3388
2) Gursel, I. V. et al., Sci. Total Environ., 2021, 793(1)
3) European Bioplastics, Bioplastics market development update 2023, (オンライン) <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics-market-development-update-2023-2/>, (参照: 2025-01-20)
4) Fukushima, Y., J. Life Cycle Assess. Jpn., 10(3), (2014), pp.206-212
5) プラスチック循環利用協会, プラスチックリサイクルの基礎知識, (2024)
6) Rattana, S., & Gheewala, S. H., JREE, 10, (2019), pp.9-17
7) Choi, B. et al., Sustainability, 10(7), (2018), 2369

再生プラスチック・バイオマスプラスチック含有製品の消費者選好評価

Consumer Preference Evaluation of Products Containing Recycled Plastic and Biomass Plastic

○藤山淳史*[1)]、岩﨑愛子[1)]、松本 亨[1)]
Atsushi Fujiyama, Aiko Iwasaki, Toru Matsumoto
1) 北九州市立大学
* fujiyama@kitakyu-u.ac.jp

1. はじめに

国内における資源循環の促進が重要性を増すなか、「プラスチック循環戦略」が策定され、使用済みプラスチックの有効利用とバイオマスプラスチックの利用拡大が進められている。プラスチック製品の購買、消費、廃棄に伴う消費者の行動は、資源循環の起点であり、プラスチック削減において重要な役割を担っている。本研究では、再生プラスチック等を含有する製品の購入意向に対し、環境関連情報がどのような影響を与えるのかを定量的に把握することを目的とした。

2. 研究方法

事前調査として、消費者が再生プラスチック・バイオマスプラスチック含有製品を購入する際に重視する項目を把握するため、WEB アンケート調査を実施し、1,190 名から回答を得た。

- 実施日　2024 年 12 月 6 日～10 日
- 対象プラスチック製品［6 種類］　日用品（ごみ箱・バケツ等）、日用品（衣装ケース・ファイルケース等）、文具、衣類、食品パッケージ、アメニティ（くし・歯ブラシの柄・化粧品容器等）
- 属性［15 項目］　使いやすさ、耐久性、素材、色、柄、環境に関するラベルの表示、カーボンフットプリント、製造国、ブランド、流行、再生プラスチック含有情報、再生プラスチックのトレース情報、バイオマスプラスチック含有情報、バイオマスプラスチックのトレース情報、価格

事前調査によって得られた回答結果に対して、コレスポンデンス分析を実施した結果を図 1 に示す。その結果、第 1 成分（左右軸）はデザインと信頼性の対立を、第 2 成分（上下軸）は認知度と機能性の対立を示すことがわかった。この結果をもとに、対象プラスチック製品の特性を考慮して、コンジョイント分析の属性と 3 段階の水準を設定し、WEB アンケート調査を実施した。調査では、回答者に 9 枚のコンジョイントカードから無作為に抽出された 3 枚を提示し、最も望ましいカードを 1 枚選択させる操作を 7 回繰り返してもらった。得られた回答結果については、選択型コンジョイント分析にもとづき、解析した。

3. まとめ

本研究では、コンジョイント分析によって、プラスチック製品の購入における消費者の選好を分析した。その結果、製品ごとの特性が消費者の選好に与える影響を定量的に明らかにし、選好が製品特性によって異なることを示した。

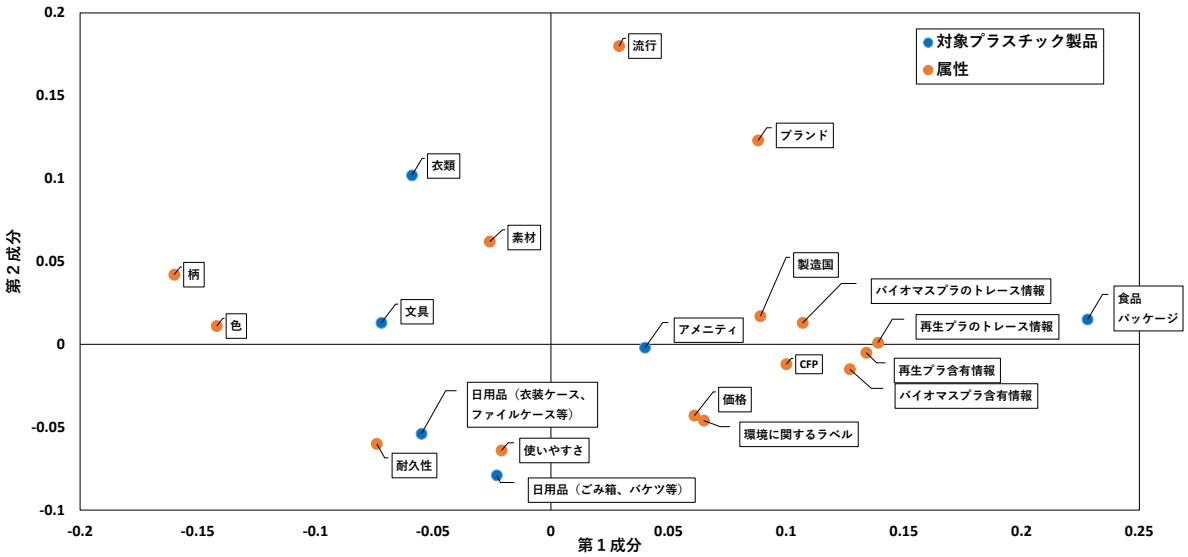


図 1 コレスポンデンス分析の結果

線形計画法を用いた廃プラスチックの再資源化施設選択モデルの開発：東海三県を対象としたケーススタディ

Development of a Recycling Facility Selection Model for Waste Plastics Using Linear Programming: A Case Study of Three Tokai Prefectures

○鉾岩風人*[1)]、叢 日超[1)]、藤山淳史[1)]、松本 亨[1)]
Kazato Hokoiwa, Richao Cong, Atsushi Fujiyama, Toru Matsumoto
1) 北九州市立大学
*e3mac005@eng.kitakyu-u.ac.jp

1. はじめに

世界的な廃プラスチック問題が深刻化しているなか、アジア諸国においては廃プラスチックの輸入規制が強化され、日本国内における資源循環が急務となっている。3R+Renewable を基本原則として掲げた「プラスチック資源循環戦略」が 2019 年 5 月に策定され、プラスチック廃棄物問題への包括的な対応の取り組みが推進されている。プラスチック循環の適正化・最適化を検討するためには、まず、廃プラスチックの種類と形状、さらにそれらがどこで排出・処理され、どの再生利用に提供されているかといった詳細な物質フローを把握する必要がある。その際，全国レベルでのマクロな解像度の物質フローのみならず、都道府県や、さらには市区町村レベルのミクロな解像度での分析も必要である。これらの情報を明らかにすることで、プラスチックの排出・処理、さらに再利用先の空間構造を考慮したリサイクル技術選択の検討が可能となる。同時に、廃プラスチックの最適なリサイクル技術と処理拠点（再資源化拠点）を選定するための最適化手法の開発も必要である。

そこで本研究では、廃プラスチックに関する行政報告データと産業廃棄物処理事業者の公開情報を用いて、廃プラスチックを運搬する際に排出される CO_2 排出量とリサイクルする際に排出される CO_2 排出量の合計が最小、さらにリサイクルによる CO_2 削減効果を考慮し CO_2 削減量が最大となるように、発生源と再資源化施設の最適な組み合わせを導出することができる手法を構築し、東海三県（三重県、愛知県、岐阜県）で発生した廃プラスチック由来のポリプロピレン，ポリエチレン、ポリスチレン（PP、PE、PS）を対象に、市町村レベルでモデルを適用した。

なお、対象とした行政報告データは、産業廃棄物管理交付等状況報告書および電子マニフェスト登録等状況報告書（マニフェストデータ）であり、著者らの先行研究ではこれらのデータを用いて廃プラスチックのフローを把握[1)]し、PVC のみを対象として発生源と再資源化施設選択の最適化の解析[2)]を実施した。

2. 研究手法

2.1 廃プラスチック排出量の推計

三重県の廃プラスチック発生量はマニフェストデータ（2018 年）をもとに算出した。先行研究において使用した業種別樹脂割合を考慮し、市町村別樹脂別の排出量を推計した。業種分類については、産業大分類を基本とし、製造業のみは産業中分類を適用した。

愛知県と岐阜県の廃プラスチック排出量については、三重県のマニフェストデータをもとに推計した。まず、三重県の業種別廃プラスチック排出量と業種別人口を用いて、業種別 1 人あたりの廃プラスチック排出量を求め、それを愛知県・岐阜県の市町村別業種別人口に乗じることで、愛知県・岐阜県の市町村別業種別の廃プラスチック排出量を推計した。それぞれの推計結果を愛知県・岐阜県の産業廃棄物処理実態調査（平成 30 年）[3)]の廃プラスチック排出量と比較したところ、過大であったため、産業廃棄物処理実態調査のデータをもとにコントロールトータルを実施することで、市町村・業種別廃プラスチック排出量を補正した。廃プラスチックの組成については、先行研究[1)]と同様に市町村・業種別廃プラスチック排出量に業種別排出樹脂割合を乗じることにより、市町村別・業種別・樹脂別の廃プラスチック排出量を推計した。推計結果を表 1 に示す。

表 1 東海三県における樹脂別廃プラスチック排出量

	PP[t]	PE[t]	PS[t]
三重県	32,200	41,530	16,325
愛知県	120,477	155,454	64,008
岐阜県	31,475	43,148	19,299

2.2 再資源化拠点情報

産業廃棄物処理事業振興財団のさんぱいくん[4)]を用いて、東海三県における PP、PE、PS をリサイクルすることが可能な再資源化施設の処理能力[t/日]の情報を収集した。処理能力が不明な場合は、施設を運営する企業の資本金または従業員数と処理能力の相関を考慮することで、推計した。なお、様々な事業を展開する企業やリサイクル専業で処理能力が資本金に対して

明らかに大きい施設は除外することで、補正した。

東海三県以外の都道府県における再資源化拠点については、産業廃プラスチックの都道府県間移動量の情報をもとに、東海三県から廃プラスチックが流入している都道府県の中心座標にマテリアルリサイクル（MR）、エネルギーリカバリー（ER）それぞれ 1 拠点があるものと仮定し、その処理能力は東海三県からの流入量をもとに設定した。

2.3 再資源化技術の CO_2 排出量削減効果原単位

PP、PE、PS の MR、ER、ケミカルリサイクル（CR）の CO_2 排出量削減効果の原単位については、海洋プラスチック問題対応協議会（JaIME）の報告書[5]と LCA データベース IDEA ver.3.4 をもとに設定した。

2.4 輸送の CO_2 排出量原単位

廃プラスチックの発生市町村から再資源化拠点までの運搬過程の CO_2 排出量については、ディーゼル 4t トラックを使用し、積載率 75%で運搬することを仮定し、改良トンキロ法を用いて、1t の廃プラスチックを 1km 運搬する際に排出される CO_2 排出量を算出した。

改良トンキロ法の式を(1)に、最大積載量別の積載率に応じた輸送トンキロ当たり燃料使用量を(2)に示す。

$$O = W \times L \times \alpha \times \beta \div 1000 (kL/L) \quad (1)$$

$$\ln\beta = 2.71 - 0.812 \ln(x/100) - 0.654 \ln z \quad (2)$$

ここで、O は CO_2 排出量[t-CO_2]、W は輸送重量[t]、L は輸送距離[km]、α は CO_2 排出係数[t-CO_2/kL]、β は改良トンキロ法の燃料消費量原単位[L/t・km]、x は積載率[%]、z は最大積載量[kg]。

2.5 最適化計算

本研究では線形計画法を用いて、CO_2 排出量の最小化（または、CO_2 排出量削減効果の最大化）の計算を行った。最適化の計算には、混合整数最適化法のソフトウェアである LPSolve IDE を使用した。

目的関数を式(1)に、PP と PE の総排出量と、再資源化施設の処理能力に関する制約条件を式(3)～(5)に示す。

$$\text{Minimize} \quad CO_2 emission = \sum_{i,t}^{n} ef_t \cdot Input_{i,t} \quad (3)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{i,t}^{n} Input_{i,t} = E \quad (4)$$

$$C_i \geq Input_{i,t} \quad (5)$$

ここで、CO_2emission は CO_2 排出量[t-CO_2]、n はリサイクル施設数（n=62）、i は施設の区分番号、t は再資源化技術種類、Input は廃プラスチック量、ef は CO_2 排出係数[t-CO_2/t]、E は廃プラスチックの組成別の総排出量[t]、C は再資源化拠点の処理能力[t/日]である。

3. まとめ

本研究では、行政報告データと廃プラスチックを再資源化している産業廃棄物処理事業者の情報を用いて、CO_2 排出量が最小（または、CO_2 削減効果が最大）となる発生源と再資源化技術の最適な組み合わせを導出する手法を構築し、東海三県に適用した。再資源化技術の比較評価に用いた CO_2 原単位の精緻化と、技術比較のためのより適切な指標の設定が課題として挙げられる。

謝辞：本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の研究事業「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」の成果の一部である。記して謝意を表す。

引用文献

1) 古賀愛，范学周，松本亨，藤山淳史：行政報告データを活用したボトムアップ型物質フロー推計手法の開発：三重県の産廃プラを対象として土木学会論文集 G（環境），Vol.77，No.6，(2021), II_33, II_42
2) Cong R., Fujiyama A., and Matsumoto T.: Optimal plastic recycling system and technology development could accelerate decarbonization: A case study from Japan. Waste Manag., 175, (2024), pp 110-120
3) 環境省：産業廃棄物処理実態調査（2018 年）
4) 産業廃棄物処理事業振興財団：さんぱいくん https://www2.sanpainet.or.jp/zyohou/index.php
5) 海洋プラスチック問題対応協議会（JaIME）：プラスチック製容器包装再商品化手法およびエネルギーリカバリーの環境負荷評価（LCA），2019 年 3 月

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 13:00 ~ 14:40 A会場：2451中講義室（4F）

[2-A3] バイオマス

座長：兼松 祐一郎 (東京大学)

13:00 ~ 13:20

[2-A3-01]

植物由来炭素の導入による製油連産品のインベントリ分析

*黒田 裕章[1]、兼松 祐一郎[2]、中野 勝行[3]、兵法 彩[4]、菊池 康紀[2] (1. 三菱UFJリサーチ＆コンサルティング株式会社、2. 東京大学、3. 立命館大学、4. 東京都市大学)

13:20 ~ 13:40

[2-A3-02]

Rethinking Diverse Co-product Utilization from Oil Palm Industry through Waste Valorization

*高 怡惟[1]、Teah Heng Yi[1]、Kanematsu Yuichiro[1]、Kikuchi Yasunori[1] (1. 東京大学)

13:40 ~ 14:00

[2-A3-03]

バイオ生産の原料となる糖の化学合成技術の環境影響評価

*田畑 裕[1,2]、小原 聡[1]、兼松 祐一郎[1]、Teah Heng Yi[1]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学、2. 大阪大学)

14:00 ~ 14:20

[2-A3-04]

木質バイオマスエネルギー事業を対象とした非専門家向けプランニング支援システムの開発

*山口 裕太[1]、木下 裕介[1]、中塚 記章[2]、赤松 史光[2]、柳田 高志[3] (1. 東京大学、2. 大阪大学、3. 森林総合研究所)

14:20 ~ 14:40

[2-A3-05]

全国における気候変動適応策としての河道内植生伐採とバイオマス発電の連携による緩和効果の評価

*山本 千裕[1]、栗栖 聖[1]、福士 謙介[1] (1. 東京大学)

©日本LCA学会

植物由来炭素の導入による製油連産品のインベントリ分析

Inventory analysis of oil refinery products introducing plant-derived carbon

○黒田裕章*[1)]、兼松祐一郎[2)]、中野勝行[3)]、兵法彩[4)]、菊池 康紀[2)]
Hiroaki Kuroda, Yuichiro Kanematsu, Katsuyuki Nakano, Aya Heiho, Yasunori Kikuchi
1) 三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング株式会社, 2) 東京大学, 3) 立命館大学, 4) 東京都市大学
* hiroaki-kuroda@murc.jp

1. 背景

化学産業におけるカーボンニュートラル達成には化石由来原料の削減が必要であり[1)]、植物油や使用済み廃食用油のような植物由来原料や、廃プラスチックの熱分解油等のリサイクル原料が製油所で使用され始めている。特に、バイオマス原料の使用は既に実用化されており、持続可能な航空燃料（SAF）の製造にも活用されている。

既往研究では、原油原料と植物由来原料では得られる製油製品の種類と量が異なることが報告されているものの、製油所の一部のプロセスにおける分析にとどまっており[2)]、製油所全体における植物由来原料の流れは解析されていない。また、植物原料の違いによって製品の環境負荷が大きく異なることも示されている[3)]ことから、化学産業のカーボンニュートラル達成のためには、植物を原料とした製油連産品の収量分析とその環境影響の評価が必要である。

そこで、本研究は、化石資源由来炭素と植物由来炭素を区別した製油連産品のインベントリ分析を目的とした。インベントリ分析を行うために、石油精製プロセス、石油化学プロセス及び植物油の前処理から成る製油所フローモデルを開発し、フロー解析を行った。

2. 製油所フローモデル開発

2.1 システム境界の設定

新規原料製造、製油所に植物油を投入するための前処理、製油連産品及び基礎化学品の製造を行う石油精製・石油化学プロセスを対象とした。基礎化学品からプラスチック等の化学製品の製造は含まない。

石油精製プロセスでは、原油を原料として、LPG、ナフサ、ガソリン、航空燃料、灯油、軽油、重油等が製造される。ここで得られたナフサは石油化学プロセスの原料として使用され、オレフィンや BTX（ベンゼン、トルエン、キシレン）等の基礎化学品が製造される。

植物油は脂肪酸とグリセリンがエステル結合したグリセライドで構成されており、石油精製プロセスへの投入にあたっては、エステル結合を分解することが望ましい。よって、植物油の脱酸素によりエステル結合を分解してから常圧蒸留装置に投入するパターンと、植物油を製油所内の水素化装置に直接投入することでエステル結合を分解するパターンの 2 つが想定される。本要旨では、前者（植物油を脱酸素して常圧蒸留装置に投入する事例）を紹介する。

2.2 植物原料の選択

植物油により、グリセライドの脂肪酸組成が異なる。今回は、以下の異なる特徴を持つ[4)]３つの植物油を対象とした。

- 大豆油：オレイン酸やリノール酸等、炭素数 18 の脂肪酸を多く含む
- なたね油：オレイン酸やリノール酸等、炭素数 18 の脂肪酸と、炭素数 22 のエルカ酸を同程度含む
- パーム核油：炭素数 12 のラウリン酸を多く含む

後述する製油所モデルにおいては、脂肪酸の炭素数が 1～4 の場合は LPG 留分、5～9 の場合はナフサ留分、10～13 の場合は灯油留分、14～19 の場合は軽油留分、20～24 の場合は重質軽油留分、25 以上の場合は常圧残油留分とみなした。

2.3 製油所モデルにおける定数の設定

石油精製プロセス及び石油化学プロセスの構成や各単位操作における成分収率、通油量あたりの CO2 排出量は文献[5,6)]から設定した。各単位プロセスの処理可能量は、実通油量[5)]を稼働率[7)]で除して設定した。なお、本モデルは循環型ケミカルリサイクルの評価のために開発されたモデル[8)]をもとに、植物油の投入が可能なよう作成した。

植物油の前処理（植物油の脱酸素）における入出力及び収率については、既往研究[3)]をもとに設定した。

2.4 炭素源を区別したフロー解析

開発した精油所モデルを用いて、原油及び植物油の炭素源を区別したフロー解析を行った。原油及び植物油の投入量を変数、基礎化学品の製造量が最大となるよう目的関数を設定した。各単位操作の処理可能量を制約条件とした。なお、原油と植物油の混合割合に関する制約条件は設けていない。目的関数や制約条件を変えることで、様々な条件下でのフロー解析も可能で

ある。

2.5 温室効果ガス（GHG）排出量の算定

GHG 排出量の算定における機能単位は、製油連産品 1kg の製造とした。石油精製及び石油化学プロセスにおける GHG 排出量は、通油量あたりの CO_2 排出量 [5] に、製油連産品 1kg の製造に必要な各プロセスの通油量を乗じることで算定した。原料の生産及び植物油の前処理については別途算定した。

3. 結果

以下に、常圧蒸留装置に植物油を投入した場合のフロー解析結果を紹介する。投入する植物油により、得られる製油連産品の種類と量が異なることが明らかになった。これは、常圧蒸留装置へ原料を投入すると、精製工程を経て、留分（炭素数）に応じてガソリンや灯油、軽油等の製油連産品へと変換されるためである。基礎化学品の収量を最大化するためには、石油化学プロセスの原料となるナフサの収量を高めることが重要である。よって、原料におけるナフサ留分や、軽質留分、重質軽油留分等の割合が重要になる。

今回はフロー解析における目的関数を基礎化学品の製造量の最大化と設定したが、実際にはガソリンや航空燃料（特に SAF）の需要が見込まれることから、フロー解析における制約条件や目的関数を変更することで、より現実的なシナリオ分析が可能となる。

3.1 大豆油を常圧蒸留装置に投入した場合

植物由来炭素の多くは軽油に移行した。これは、大豆油は軽質留分を多く含むためである。軽油脱硫、接触改質、BTX 抽出の処理量が上限に達しているため、これらの装置の処理能力を拡充することで、さらなる大豆油の投入が可能になると考えられる。

3.2 なたね油を常圧蒸留装置に投入した場合

植物由来炭素の多くはガソリン、軽油、A 重油に移行した。これは、なたね油は軽質留分及び重質軽油留分を多く含むためである。大豆油のように多く含まれる留分が特定の留分に偏っていないため、軽油脱硫や減圧軽油脱硫の処理量は上限に達しておらず、接触改質や BTX 抽出、ガソリン製造に関連するアルキレーションの処理量が上限に達している。なたね油の投入量を増やすためには、これらの装置の処理能力の増強が必要になる。

3.3 パーム核油を常圧蒸留装置に投入した場合

フロー解析における最適化計算の条件では、パーム核油を使用せず、原油のみを使用した方が基礎化学品の収量が多くなった。これは、パーム核油は灯油留分や軽質留分が中心であり、基礎化学品の原料となるナフサ留分が得られにくいためだと考えられる。

4. 結言

製油所における植物由来原料の導入において、炭素源を区別したモデルを開発し、フロー解析及び GHG 排出量の算定を行った。投入する植物油により、得られる製油連産品の種類と量が異なることが明らかになった。基礎化学品の収量を最大化するためには、ナフサの収量を増やす、つまり、原料におけるナフサ留分や、軽質留分、重質軽油留分等の割合が重要になる。また、解析結果から、処理能力が不足する単位操作も明らかになった。これにより、植物原料のさらなる活用に向けて増強が必要となる単位操作を特定することができるようになった。

謝辞

本研究は、環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20243004）により実施した。

引用文献

1) F. Meng et al., Proc. Natl. Acad. Sci., 120(8), (2023)
2) Pinho, A. de R et al., Fuel Processing Technology, 229, (2022)
3) Yasunori Kikuchi et al., Process Saf. Environ. Prot., 166, (2022)
4) 公益財団法人日本油脂検査協会, ”食用植物油脂の脂肪酸組成”, (2023)
5) 一般財団法人石油エネルギー技術センター, “令和３年度燃料安定供給対策に関する調査（製油所の競争力に係る技術動向に関する調査）調査報告書”, (2022)
6) 石油連盟, “石油製品の LCI データの概要”, (2003)
7) ENEOS 株式会社, “第 24 表 原油処理能力・処理量・稼働率の推移”
8) 中村拓真ほか, “炭素循環を考慮した廃プラスチック循環型ケミカルリサイクルの評価” 第 19 回日本 LCA 学会研究発表会, (2024)

Rethinking Diverse Co-product Utilization from Oil Palm Industry through Waste Valorization

○Gao Yiwei[1)], Teah Heng Yi[1)], Kanematsu Yuichiro[1)], Kikuchi Yasunori[1)]
1) 東京大学
*gaoyiwei728@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

In oil palm industry, palm oil is generated as primary product associated with an abundance of wastes from processes of plantation, palm oil mill, palm oil refinery and utilization. These wastes are mainly biomass materials and can be valorized through thermochemical or biochemical conversion and other processes to produce green energy and value-added products[1)]. With the increasing global demand for palm oil[2)], waste generation from palm oil production processes is also increasing. Therefore, it is necessary to consider the environmental performance of waste valorization.

Previous life cycle assessment (LCA) study on oil palm industry waste valorization have mostly focused on the technologies and processes of single or several specific oil palm-derived biomass waste valorization pathways to assess their greenhouse gas (GHG) emission and environmental impacts[3)]. However, a single pathway may only optimize the environmental or economic benefits of that pathway, while ignoring the optimization potential of the entire system.

To offer a comprehensive evaluation, this study aims to map an overall system of waste valorization start from plantation in the process of palm oil production and examines the environmental performance impacts of the entire oil palm system. The results are intended to provide insights for valorization choices from stakeholders and potential improvement in technologies of oil palm waste valorization under some practical scenarios.

2. Method

We established a cradle-to-grave palm oil supply chain with material flow, incorporating other wastes and covering stages from plantation to utilization.

We set 193 kg of refined palm oil (RPO) produced from 1 ton of fresh fruit bunch (FFB) as the functional unit, with processes including palm oil production and waste treatment before directly releasing the biomass into the environment as the benchmark. From these processes, biomass waste oil palm trunk (OPT) and oil palm frond (OPF) are from plantations, palm kernel shell (PKS), empty fruit bunch (EFB), mesocarp fiber (MF) and palm oil mill effluent (POME) are from palm oil mills, palm fatty acid distillate (PFAD) is from a palm oil physical refinery, and used cooking oil (UCO) is from utilization. For waste valorization, OPT, OPF, EFB, PKS, and MF are utilized to produce electricity and heat through the process of pyrolysis, POME is utilized to produce biogas through the process of anaerobic digestion, PFAD is processed into biodiesel, and UCO is converted into both biodiesel and sustainable aviation fuel (SAF) through hydrotreatment. These palm oil production and biomass valorization processes are included in the system boundary.

Scenarios are set to show the environmental and economic value of different pathways from various feedstocks to value-added products: (S1) Palm oil production with full waste valorization, (S2) Palm oil production with plantation waste valorization, (S3) Palm oil production with palm oil mill waste valorization, (S4) Palm oil production with palm oil refinery waste valorization, (S5) Palm oil production with used cooking oil valorization. The wastes that are not valorized will be treated as the benchmark.

3. Result and Discussion

3.1 Result

Material flow tracks and quantifies the outputs of products and wastes throughout the process. Through waste analysis, suitable methods for valorization can be identified. Optimizing waste utilization reduces emissions, and fully utilizing waste facilitates the design of a zero-waste system. In the case study, most feedstock is transformed into biomass waste, which offers significant potential for valorization. And currently, we mainly consider the pathway of converting biomass into energy or fuel.

For the life cycle assessment result, we mainly focus on the indicator GWP100 from the IPCC 2013 method to show the impact of climate change. The result of

environmental load of each scenario shows the main contributor of GWP100 are energy input in each process and waste treatments in all scenarios. Energy input includes electricity, natural gas and diesel. Besides, waste treatment refers to the direct release of waste into the environment after simple treatment to meet emission standards. During the waste treatment process, landfill waste decomposes during anaerobic decomposition or aerobic composting, releasing CO_2. And part of the carbon is emitted in the form of methane (CH_4) under anaerobic conditions, it will eventually be converted into CO_2 in the atmosphere. The benchmark has relatively low CO_2 emissions attributed to energy input, implying that all waste valorization processes are the main cause of GHG emissions caused by energy input. S4 has a relatively low environmental load due to the mass of PFAD, the waste needed to be valorized, is only a little. Also, the combustion of carbon in the waste will release CO_2 in the process of waste incineration.

Economic value is also calculated to show how the product from waste performs. We searched market prices of all products from reference and multiplied by the mass of the products. Products in S1 has highest economic value but highest environmental load, because S1 involves all of pathways in system boundary. In S2-S5, S2 and S5 has relatively highest economic value because S2 produced large amount of power and heat, and sustainable aviation fuel has high market price.

3.2 Discussion

The results provide the environmental and economic performance of waste valorization in each scenario, and highlight the interaction between environmental impact of production pathways and economic value of products. Among them, the reason why energy occupies large CO_2 emissions is that production of energy is all generated by fossil fuels, which will bring large GHG emissions compared to other clean energy. Electricity and heat derived from woody biomass waste can be used within defined scenarios which can help realize resource circularity in oil palm industry, while the surplus energy can be sold to create economic benefits. Also, the result can provide suggestions to stakeholders based on scenarios with high economic value and low environmental load, especially S2 and S3.

4. Conclusion

The LCA modeling in this study shows the situation using biomass waste to generate value-added product especially green energy and biofuel under specific technologies with extra economic value and low environmental load.

However, the system boundary defined in this LCA study mainly focus on using waste to generate energy and biofuel. The biomass waste has other potential utilization such as construction materials, chemicals, nutrients and so forth which can be involved in overall picture using system expansion approach in the future.

Acknowledgement

This study is financially supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP22KK0169.

Reference

1) Okolie, J. A., Epelle, E. I., Tabat, M. E., Orivri, U., Amenaghawon, A. N., Okoye, P. U., & Gunes, B.: Process Saf Environ, 159, 323–344, (2022).
2) Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M: Agricultural Production. Our World in Data, (2023).
3) Nur Izzah Hamna A. Aziz, Marlia M. Hanafiah: Renew Energ, 145, Pages 847-857, (2020).

バイオ生産の原料となる糖の化学合成技術の環境影響評価

Life cycle assessment of chemical sugar synthesis for biomanufacturing

○田畑裕*[1,2]、小原聡[1]、兼松祐一郎[1]、Teah Heng Yi[1]、菊池康紀[1]
Hiro Tabata, Satoshi Ohara, Yuichiro Kanematsu, Heng Yi Teah, Yasunori Kikuchi
1) 東京大学, 2) 大阪大学
* tabata-hiro@platinum.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

グルコースやフルクトースなどの糖は、人類の食料生産を支える基幹物質として、また化学品のバイオ生産における基質として極めて重要である。現在、糖は水と CO_2 を原料として光合成（農業）によって作られている。しかし、膨大な燃料や化成品の需要に対し糖の生産量は十分ではなく、バイオ生産への過度な利用の拡大は食料需要との競合を招く。そうした背景のもと、このエネルギー源である糖を触媒化学的に合成するという取り組みが注目を集めている[1]。この手法はバイオマス糖が依拠する光合成（農業）プロセスと比べ圧倒的に高速、かつ消費地生産が可能であり、また土地や水といった資源消費を大幅に抑制できることから、バイオ生産における原料供給の課題解決が期待される。そこで本研究では、本技術をバイオ生産に応用展開する上での課題を明らかにするため、各プロセスに必要なエネルギーや環境影響の評価を行った。

2. 研究方法

糖の化学合成は、ホルムアルデヒドを触媒存在下において加熱することで糖が生成する反応（ホルモース反応[2]）の利用を想定した。機能単位は合成された糖 1 kg とし、システム境界は原料の調達と糖の合成反応、触媒の除去および生成物の濃縮を含むものと定義した。

物質およびエネルギー収支は化学量論方程式と反応のエネルギー消費に基づいて計算した。糖の収率は既報[3]の常微分方程式による反応モデルを MATLAB で数値的に解くことで算出した。インベントリデータは文献やデータベース IDEA ver.3.4.1 に基づき作成し、インパクト係数には LIME2 を用いた。

3. 結果と考察

環境影響評価を行った結果、気候変動や酸性化、土地利用を含む多くの評価指標において、糖液の濃縮プロセスが大きな影響を与えることが明らかになった。これは、濃縮過程において溶媒である水を蒸発させるのに多くのエネルギーを必要とするためである。そこで、ホルモース反応をバッチプロセスからセミバッチプロセスに変更した時のエネルギーの使用量を計算した。ホルモース反応は自己触媒反応であるため、反応開始後に基質であるホルムアルデヒドを継続的に添加することで反応を持続させることが可能である。計算を行った結果、バッチプロセス（最終糖濃度約 4.5%）からセミバッチプロセス（最終糖濃度 20%）に引き上げることで、濃縮に必要なエネルギーを約 80%削減可能であることが確かめられた。

続いて、原料であるホルムアルデヒドの調達について、①化石燃料を用いた従来の生産法、および②CO_2 の水素化によって得られるメタノールを用いた新規の生産法[4]の二通りでその環境影響を比較した。その結果、②は水素生産および糖合成反応、濃縮に必要なエネルギーを再生可能エネルギーによって賄った場合、気候変動への影響を従来法よりも減少させることが可能であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、バイオ生産に用いる糖の化学合成プロセスの環境影響評価を行った。その結果、バッチプロセスでは糖液の濃縮に大きなエネルギーを要するためセミバッチプロセスの開発が不可欠であること、気候変動への影響を低減する上では再生可能エネルギーの導入を前提とした CO_2 資源化技術の採用が有効であることが確かめられた。今後は、プロセスシミュレーションを用いたより詳細なシステム設計、バイオ生産との接合も含めた環境影響評価を行う。

謝辞

本研究は JSPS 科研費(JP24K23916)および NEDO「カーボンリサイクル実現を加速するバイオ由来製品生産技術の開発／データ駆動型統合バイオ生産マネジメントシステム(Data-driven iBMS)の研究開発」(JPNP20011)の成果を含んでいる。東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は、三井不動産(株)、積水ハウス(株)、東日本旅客鉄道(株)、豊田通商(株)からの寄付で活動している。

引用文献

1) S. Cestellos-Blanco, et al., *Joule*, **2022**, *6*, 2304–2323.
2) A. Butlerov, *C. R. Acad. Sci.*, **1861**, *53*, 145-147.
3) R. F. Socha & A. H. Weiss, J. Catal., **1981**, *67*, 207-217.
4) J. Puhar, et al., *J. Clean. Prod.*, **2022**, *377*, 134537.

全国における気候変動適応策としての河道内植生伐採とバイオマス発電の連携による緩和効果の評価

Synergies between climate change adaptation and mitigation: Removal of riverbank vegetation as a flood protection measure and its use for biomass power generation

○山本千裕*[1)]、栗栖聖[1)]、羽合佳範[1)]、伊達貴彦[2)]、福士謙介[1)]

Yamamoto Chihiro, Kiyo Kurisu, Yoshinori Hawai, Takahiko Date, Kensuke Fukushi

1) 東京大学, 2) 住友商事

* yamamoto-chihiro037@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

IPCC 第 6 次評価報告書では、気候変動により全ての人にとって住みやすい将来を確保するための機会の窓が急速に閉じていることが指摘され、気候にレジリエントな開発の重要性が述べられている[1)]。気候にレジリエントな開発を進めるためには、気候変動の原因となる温室効果ガス（GHG）の排出削減対策を進める「緩和」と気候変動により既に生じている、あるいは、将来予測される被害を回避・軽減する「適応」を同時に進めていくことが重要となる。適応と緩和を統合する総合的で効果的かつ確信的な対策によって、適応と緩和の間のトレードオフを低減し、シナジー（相乗効果）をもたらすとされる[1)]。

適応策と緩和策を同時に進めることが可能な気候変動適応策として、河道内植生の伐採が考えられる。河道内植生とは、河道に繁茂する植生のことで、放置すると増水時に流水を阻害し氾濫の要因となる。伐採をするなど、適切に管理することによって洪水被害軽減効果が期待できる。伐採された植生は通常河道内に放置されるが、これをバイオマス発電に利用することによって、緩和効果を期待できる。実際に、環境省と国土交通省は、伐採した河道内植生をバイオマス発電に利用するための手引き[2)]を作成している。しかし、そのような連携を広域的に行うことを想定した研究や、その緩和効果を評価した研究は限られている。

そこで本研究では、適応策と緩和策のシナジーを生み出すことを目標に、河道内植生の伐採とバイオマス発電との連携による緩和効果を定量的に評価することを目的とした。

2. 手法

2.1 伐採量の設定

日本全国での評価をする前に、より閉じたエリアでの評価を行うことを目的に北海道を評価対象エリアとした。バイオマス発電所のデータは、森のエネルギー研究所より全国の木質バイオマス発電所データを取得した。同データには各発電所の立地、容量、発電方式などのデータが含まれる。

河道内植生量の推定には、環境省による自然環境保全基礎調査[3)]の植生調査によって作成された、2.5 万分の1植生図を使用し、QGIS 上で植生図を河道マスクデータで切り取り、河道の植生の種類、植生が繁茂しているエリアの面積の把握を行なった。河道内植生は単一植種、単一被度であると仮定した。北海道の河道内植生の伐採については国土交通省北海道開発局建設部建設政策局維持管理防災課より入手した伐採実績データから、植生密度（植生量[t]/伐採面積[m^2]）を設定した。北海道の過去 5 年間の河道の伐採量の合計を伐採面積の合計で除すことで、0.016 という値が得られた。また、個別の伐採ごとの伐採量を面積で除した値に大きなばらつきがあり、0.016 を大きく上回る外れ値も多く得られたことから、植生量を多めに見積もるため、植生密度が 0.05 の場合の分析も行った。この植生密度と面積を掛け合わせることによって、植生量の算出を行なった。各河川で、伐採から再繁茂のサイクルを20年周期で繰り返すと仮定し、本研究では、最初の 1 年分の伐採のみを対象とした。最初の 1 年で伐採する河道は、河川の下流から植生量が全体の 20 分の 1 になるまで、幅優先探索でポリゴン抽出した。ただし、植生量については、樹木が存在するポリゴンは面積に植生密度を乗じたものとし、樹木が存在しないポリゴンは0とした。樹木が存在するかどうかは、植生の中区分から判断した。

2.2 河道内植生の需要と供給のマッチング

各河川の伐採植生を、どれだけの量、どの発電所に輸送するかを決めるため、河道内植生の需給の最適化を行った。発電所の需要量は、植生密度が0.016の時は、河川からの供給量と等しくなるものとした。植生密度が 0.05 の時は、需要量を発電所の総容量の 2 割及び供給量と一致するようにした。まず、1 年目の各河

表 1　各河川から発電所への伐採植生の輸送最適化結果（千 t, シナリオ1, 植生密度：0.016）

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
網走	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.4	0	**2.4**
湧別	0	0	4.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**4.7**
後志利別	0	0	0	0.16	0	0	0	0	0	2.1	0	0	**2.3**
十勝	19	0	3.8	0	5.5	0	0	0	7.3	0	0	5.7	**41.3**
釧路	2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**2.6**
天塩	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**23.0**
鵡	0	0	0	0	0	0	0	0	3.3	0	0	0	**3.3**
沙流	0	0	0	0	0	0	0	0	3.5	0	0	0	**3.5**
渚滑	0	0	2.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**2.9**
石狩	0	13	0	1.9	0	23	1.1	0	18	0	0	0	**57.0**
常呂	0	0	0	0	0	0	0	2.2	0	0	3.5	0.24	**5.9**
尻別	0	0	0	3.4	0	0	0	0	0	0	0	0	**3.4**
留萌	0	0	0.44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0.4**
	21.6	**13.0**	**34.8**	**5.5**	**5.5**	**23.0**	**1.1**	**2.2**	**32.1**	**2.1**	**5.9**	**5.9**	152.7

表 2　各河川から発電所への伐採植生の輸送最適化結果（千 t, シナリオ3, 植生密度：0.050）

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
網走	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.5	0	**7.5**
湧別	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**15.0**
後志利別	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	**6.0**
十勝	53	0	1.1	0	15	0	0	0	0	0	0	13	**82.1**
釧路	8.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**8.2**
天塩	0	0	71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**71.0**
鵡	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	**10.0**
沙流	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	**11.0**
渚滑	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**9.0**
石狩	0	36	0	4.8	0	65	3.1	0	69	0	0	0	**177.9**
常呂	0	0	0	0	0	0	0	6.1	0	0	9.2	3.3	**18.6**
尻別	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	**10.0**
留萌	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**14.0**
	61.2	**36.0**	**110.1**	**14.8**	**15.0**	**65.0**	**3.1**	**6.1**	**90.0**	**6.0**	**16.7**	**16.3**	440.3

川の伐採エリアの重心を求め、重心と発電所までの直線距離を求めた。次に、距離×輸送量を目的関数として、これが最小になるよう最適化を行った。制約条件としては、需要が満たされることと、供給量が 0 以上であること、最大供給量を超えた輸送をしないこととした。

2.3 緩和効果の定量化

伐採植生をバイオマス発電に用いることで得られる緩和効果を定量化するため LCA を行った。機能単位は、伐採した河道内植生 1 t（湿重量）とした。各工程のインベントリに GHG 排出量の原単位を掛け合わせることで、伐採から発電に至るまでの GHG 排出量を算定した。バイオマス発電によって得られる電力は、現在の北海道の系統電力を代替するものとした。評価シナリオとしては、1) 植生密度が 0.016 で供給量と需要量が等しい場合、2) 植生密度が 0.05 で供給量と需要量が等しい場合、3) 植生密度が 0.05 で需要量が発電所の総容量の 2 割の場合の 3 つを設け評価した。

3. 結果

表 1、表 2 は、それぞれシナリオ1および3の需給マッチング結果である。表内の数値は、各河川から発電所（A～L）への伐採植生の輸送量[t]を表している。各河川からは複数個所の発電所にバイオマスを輸送する結果となっている。また、供給量が増えたシナリオ 3 ではシナリオ1とは異なる輸送先が結果として出てくる河川も見られた。より詳細なマッチング結果および LCA の結果は発表の際に紹介する。

謝辞：本研究は JSPS 科研費（JP24H00329）により助成を受けた。

引用文献

1) 環境省: IPCC 第 6 次報告書統合報告書の解説資料 (2023). https://www.env.go.jp/content/000171954.pdf (2025-1-16 閲覧)
2) 環境省, 国土交通省: 河川内樹木及びダム流木のバイオマス利用の手引 (2022). https://www.env.go.jp/content/000050337.pdf (2025-1-16 閲覧)
3) 環境省：自然環境保全基礎調査. https://www.biodic.go.jp/kiso/fnd_list_h.html (2025-1-16 閲覧)

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 9:00 ~ 10:20 B会場：2455中講義室（4F）

[2-B1] 金属（1）

座長：醍醐 市朗 (東京大学)

9:00 ~ 9:20

[2-B1-01]

アルミニウム合金の循環利用に伴う添加合金元素の物理的・質的散逸総量の推計

*菊田 勇一[1]、武山 健太郎[1]、星野 岳穂[1] (1. 東京大学)

9:20 ~ 9:40

[2-B1-02]

入力変数となる物質・プロセスによる二次資源および再生材における質の評価手法の整理

*小杉 耀刻[1]、醍醐 市朗[1] (1. 東京大学)

9:40 ~ 10:00

[2-B1-03]

エネルギー転換におけるアンチモンの物質フロー分析

*Xu Linting[1]、Zhang Zhengyang[1]、Matsubae Kazuyo[1] (1. 東北大学)

10:00 ~ 10:20

[2-B1-04]

日本における錫のマテリアルフロー分析

*田島 順一郎[1]、山末 英嗣[1]、柏倉 俊介[1]、光斎 翔貴[1] (1. 立命館大学)

©日本LCA学会

アルミニウム合金の循環利用に伴う添加合金元素の物理的・質的散逸総量の推計

Estimation of Physical and Quality Dissipation of Alloying Elements Associated with Al Alloy

○菊田勇一*[1)]、武山健太郎[1)]、星野岳穂[1)]
Yuichi Kikuta, Kentaro Takeyama, Takeo Hoshino
1) 東京大学
*kiku-carp81@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

アルミニウム合金 (Al 合金) は、金属材料の中で世界での生産量が 2 番目に大きい基盤材料であり、利用の際は合金元素を添加し特性を向上させることが殆どである。Al 合金の二次生産は一次生産と比較して環境負荷が大幅に小さいため、リサイクルが CO_2 排出量低減等の環境負荷低減に有効である。しかし、現状の Al 合金のリサイクルでは、添加元素の物理的な散逸および質的な散逸が発生していることが課題として指摘されている[1)]。物理的な散逸とは、回収されない使用済み素材やスラグへの分配などの製品外に蓄積しているものを指す。また、質的な散逸は合金元素の許容濃度の低い展伸材から許容濃度の高い鋳造材へのリサイクルに起因する、鋳造材への意図しない合金元素の投入を指す。これらの物理的・質的散逸を削減すれば、合金元素添加用途の天然資源消費量を削減し、より環境負荷を低減することが可能となる。

先行研究[2)]において Al スクラップの需給状況の分析が行われており、Al 合金のリサイクルフローが精緻に推計されているが、循環利用による合金元素の蓄積については考慮されていない。循環利用に伴う鉄鋼材と合金元素の蓄積量の推計には、それに適した MaTrace-Alloy モデルが提案され[3)]、Cr と Ni の質的散逸量が分析されているが、Al 合金について適用されていない。本研究では、MaTrace-Alloy モデルを Al 合金に適用し、循環利用に伴う合金元素の物理的・質的散逸量の推計およびリサイクル技術の導入による天然資源消費量削減効果の定量化を行う。

2. 研究手法

2.1 研究手法の概要

MaTrace-Alloy モデル[3)]は、産業連関分析、マルコフ連鎖モデル、動的マテリアルフロー分析を組み合わせ、合金組成を考慮することで、時間経過に伴う合金と合金元素の廃棄・リサイクルによる存在状態の変化を推計するモデルであり、これを用いて合金種別の用途別蓄積量と散逸量を定量的に推計することが可能である。しかし Al 合金については、統計上、合金系別の部門設定がされ、かつ投入量が物量により記述されたデータが存在しないため、このモデルをそのまま適用することはできない。この数理モデルは、(1)スクラップ回収量の推計、(2)スクラップの再生素材への投入量の推計、(3)再生素材の製品への投入量の推計から構成され、先行研究では(3)に投入する分配率を産業連関分析から算出していたが、本研究では Al 合金の合金種別の需要量を推計することで算出した。再生素材から製品を製造する際に発生する加工屑は再び精錬プロセスへ投入されることを想定した。図 1 に本モデルの概念図を示す。

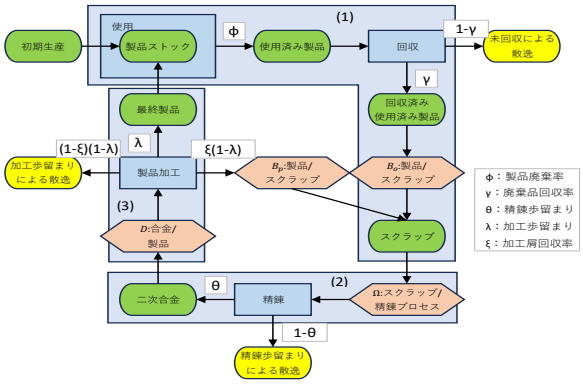


図 1 本研究のモデルの概念図

2.2 データの設定

状態推移表は 2020 年の日本国内の Al 合金のフローのデータに基づいて推計した。また、別用途別需要量は、先行研究[2,4)]の手法を用いて統計値[5,6)]から推計した。スクラップの再生素材への分配率も同様の手法[2)]により統計値から推計した。製品の寿命、廃棄率、老廃品回収率、加工歩留まり、加工屑回収率は先行研究[2)]の値を採用した。製錬歩留まりは、合金種、元素によらず 0.95 と仮定した。元素濃度は先行研究[2)]の手法に基づき算出した。対象合金は展伸材 8 種と鋳造材 2 種の 10 種類、対象製品は 61 種類、対象元素は母材の Al、合金元素の Si、Fe、Cu、Mn、Cr、Ti、Mg、Zn の 9 種類とした。

2.3 解体・分離シナリオ

リサイクル技術の導入による天然資源消費削減効果の定量化を行うために、①ベースラインシナリオ、②自動

車解体シナリオについてシナリオ分析を実施した。①ベースラインシナリオは、2020年のAl合金のリサイクルフローを想定したシナリオである。②自動車解体シナリオは、自動車老廃スクラップが合金種ごとに100%解体・分離され、同じ合金種の製造に投入されることを想定した。

3. 結果

3.1 合金元素の散逸量の推計

2020年に展伸材に使用されたAlと随伴する合金元素の動的マテリアルフロー分析を行った。Al合金に随伴する合金元素のうち展伸材において最も需要量の大きいMgについて、循環利用に伴う合金種別の存在形態の推移を図2に示す。鋳造材・ダイカストへの蓄積を質的散逸、脱酸材・製品外への散逸を物理的散逸として扱う。初期生産から50年後のMgの質的散逸量は5.5kt、物理的散逸量は9.9ktであり、散逸総量は15.4ktであると推計された。

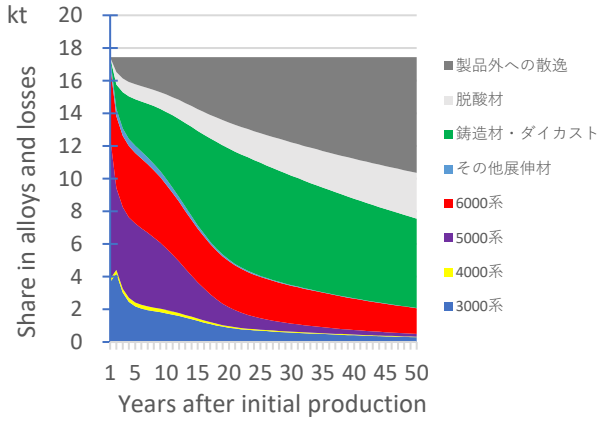


図2 Al合金に随伴するMgの存在形態の推移

対象とした8種の合金元素の初期生産から50年後における質的散逸と物理的散逸の割合を図3に示す。

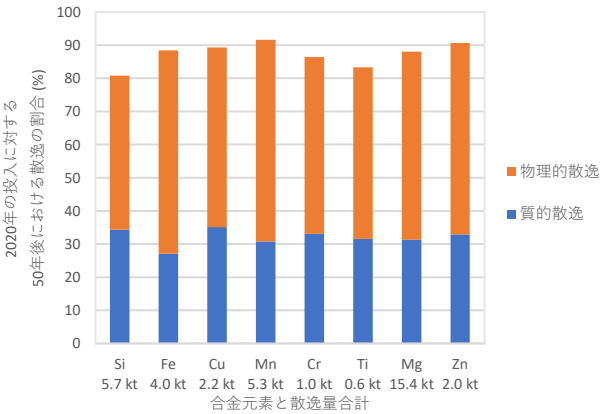


図3 8種の合金元素の散逸量

4. 考察

2.2で示した2つの解体・分離シナリオに基づき50年後の散逸量を推計・比較することで、技術導入による削減可能な散逸量を推計した。展伸材への需要量が最も大きいMgと二番目に大きいSiについての結果を図5に示す。Mgのシナリオ分析において質的散逸量が1.0kt、物理的散逸量が0.1kt減少することが確認された。また、Siのシナリオ分析においては質的散逸量が0.6kt、物理的散逸量が0.5kt減少することが確認された。そのため、この減少量に相当する量の合金添加用途の天然資源消費量を削減することができると考えられる。このことから、自動車老廃スクラップを精緻に解体・分離することによって、加添加用の天然資源消費量の削減効果があるといえる。

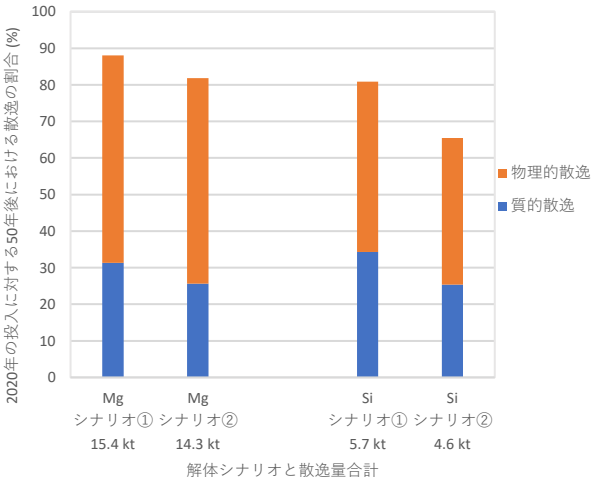


図4 シナリオ間のMgとSiの散逸量の比較

5. 結言

本研究では、素材の製品への分配と合金組成を考慮した動的マテリアルフロー分析を行うことにより、Al合金と随伴する合金元素の物理的・質的散逸総量を確認することができた。老廃スクラップの解体・分離シナリオを変えて分析を実施した結果、解体・分離技術を導入することにより追加添加用の天然資源消費量を削減することができるとわかった。

6. 引用文献

1) Nakamura S., Kondo Y., Matsubae K., Nakajima K., Tasaki T., Nagasaka T.: Environ. Sci. Technol., 46 (17), (2012), pp.9266-9273
2) 武山健太郎, 大家直也, 醍醐市朗, 星野岳穂: 第16回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, (2021), 1-D2-01
3) Nakamura S., Kondo Y., Nakajima K., Ohno H., Pauliuk S.: Environ. Sci. Technol., 51 (17), (2017), pp.9469-9476
4) 畑山博樹, 山田宏之, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 日本金属学会誌, 70 (12), (2006), pp.975-980
5) 日本アルミニウム協会: “2020年度アルミニウム統計年報”
6) 日本アルミニウム協会: “アルミニウムハンドブック第7版”, (2007)

入力変数となる物質・プロセスによる二次資源および再生材における質の評価手法の整理

○小杉耀刻*1)、醍醐市朗 1)
Akitsugu Kosugi, Ichiro Daigo
1) 東京大学
* kosugi-akitsugu511@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

資源の過剰な消費は資源の枯渇や環境への負荷を引き起こすため、リサイクルによって一度利用した資源を再利用し、資源利用効率を向上することが望ましい。リサイクルによる資源保全の効果を評価するための循環性指標が求められるものの、既存指標、例えばEOLRR (End-of-Life Recycle Rate)は、二次資源の「量」に着目しており、「質」の評価が欠如している。リサイクルが促進された将来では、鉄などの金属素材において、材料の質がリサイクルの促進に制約となることが懸念されている [1)]。しかしながら、既存の回収された資源の質の評価は、適用の範囲や目的などが様々であり、共通の指標がいまだない。そこで本研究では金属の循環性を想定し二次資源および再生材の質の評価手法を整理することを目的とした。

2. 既存指標のレビュー

評価手法の整理にあたっては、それぞれの手法によって導かれる指標の特徴によって整理を行った。既存の二次資源の質を表現した個別の製品リサイクルでの評価に用いられる指標を Web of Science と google scholar にて調査し、それぞれに評価手法の異なる 7 つの指標を得た。Technical Suitability for Substitution (TSS) [2)]は 二次資源をリサイクルする際に、どの程度天然資源で希釈する必要があるかの指標、希釈不要の場合 1 で希釈が必要な場合その倍率の逆数である。Urban-Ore Total Material Requirement (UO-TMR) [3)]はリサイクル材料が製造されるにあたって関与した物質の総量である。自然鉱石換算元素濃度 [3)]は、天然資源の鉱物濃度と TMR の関係式を用い、リサイクルされた材料の UO-TMR に等価な天然資源の鉱物濃度を指標としたものである。Chemical exergy[4)] (Embedded exergy)は、対象となる物質の取り出せる仕事で、値は参照環境との差に基づく。Exergy loss[5)]と exergy efficiency[5)]は、それぞれプロセスに投入された物質や仕事、熱などの exergy と生産された物質の exergy の差および比である。Embodied exergy はリサイクルでの累積の投入 exergy である。

3. 指標の整理

3.1 整理の方針

各指標が評価対象とする状態や、指標が用いる変数として参照する状態・プロセスによって、各指標の特徴を整理した。

次に、各指標が金属の資源循環における質を評価するにあたって適切かどうか、整理された情報を参照し、判断した。判断にあたっては、指標の要件を以下のように設定した。金属のリサイクルにおいて、溶解と精錬よって除去されない不純物があり、リサイクル材料の特性の発現が制約されることが知られている [1)]。このため質指標に求められる要件として、不純物濃度の違いを評価できることが挙げられた。また、資源循環は個別の製品（ミクロシステム）を対象にした評価でも、国などより広い範囲（マクロシステム）でも機能するものが望まれる [6)]。そのため、指標に求められる要件として、マクロ(社会全体)での資源への影響との不整合がないことが挙げられた。

3.2 指標の評価対象と入力変数による整理

リサイクルにかかる状態・プロセスを図 1 のように S_1, S_2, S_3, P_1, P_2 と定義し、各指標の評価対象となる状態と参照する状態・プロセスを表 1、表 2 のように整理した。なお、表 2 では複数の状態・プロセスを対象とする指標の場合これによって参照する状態対象とする状態・プロセスを括弧内に記す。

3.3 不純物濃度を評価できる範囲による整理

7 つの質指標においては、不純物濃度はすべての指標に変数として入っており、適切な範囲では不純物濃度の違いが指標として評価できると分かった。次に、不純物濃度の違いが指標として表現される範囲を、鉄鋼材リサイクルの実態への適用を想定した上で、指標の定義式から、変数の関係性から論理的に導いた。

各指標における不純物濃度に対する定量方法は、2 つに大別できることがわかった。1 つ目の方法は、混合のエントロピーを用いる”exergy 系指標”であり、embedded exergy, exergy efficiency, exergy loss, embodied exergy が含まれる。2 つ目は、溶解時の希釈倍率を用いる”希釈倍率系指標”であり、TSS、UO-TMR、自然鉱石換算元素濃度が含まれる。混合のエントロピ

ーは、実態として不純物濃度と認識される範囲においては、不純物濃度に対して単調に変化し、全範囲で適用可能である。他方、希釈倍率は、不純物濃度が許容濃度を超えると指標の低下として評価される一方、許容濃度内においては評価値が変化しないため、希釈倍率系指標は不純物濃度が許容濃度以上の範囲に限って適用可能であると分かった。

3.4 マクロシステムとの整合による整理

カスケードリサイクルの実態から、評価対象期間に不純物の蓄積によるリサイクル制約が見込まれるかどうかによってマクロシステムとの整合性は変わると考えられる。希釈倍率系指標では、マクロシステムで不純物によるリサイクル制約が生じる場合、リサイクル先が許容濃度のより高い材料に変化することによって、質が向上すると指標では表現される。一方、全体では、それに伴って許容濃度の低い材料にリサイクルされる二次資源が等量発生するため、全体としては何も変わらない。つまり、マクロシステムで変化がなくとも、切出されたミクロシステムでの指標では質の向上と認識されてしまうため、マクロシステムとの整合において不適格であるとわかった。一方、マクロシステムで不純物によりリサイクル制約がない場合、マクロシステムでのリサイクルは量にのみ制約されており、不純物許容濃度の違いは影響しない。この場合、マクロシステムでは質を評価する必要がないため、どのような指標も不整合は起きないと考えられた。

4. 結言

二次資源および再生材における質の評価手法を、これにより導かれる指標の評価対象、および因子となる状態やプロセスにより整理した。既存手法による指標7つは、質の評価の観点から exergy 系指標と希釈倍率系指標に大別できた。また、金属の循環性指標における質評価に用いる際の要件を明らかにし、これと照らし合わせることで exergy 系指標が有効であると明らかにした。ただし、当該リサイクルで希釈が必要、かつ、マクロシステムで質によるリサイクル制約がない場合に限り、希釈倍率系指標も有効であることがわかった。

5. 引用文献

1) Katrin E. Daehn, Cabrera Serrenho André, Allwood Julian M.: Environmental Science & Technology, 51 (2017), pp. 6599-6606
2) Roosen Martijn, Tonini Davide, Albizzati Paola Federica, Caro Dario, Cristóbal Jorge, Lase Irdanto Saputra, Ragaert Kim, Dumoulin Ann, De Meester Steven : Environmental Science & Technology, 57, (2023), pp. 13669-13680
3) 山末 英嗣, 南埜 良太, 奥村 英之, 石原 慶一: 廃棄物資源循環学会誌, 22(1), (2011), pp. 11-18
4) O. Ignatenko, A. van Schaik, M.A. Reuter : Miner. Eng. , 20 , (2007), pp. 862-874,
5) S.H. Amini, J.A.M. Remmerswaal, M.B. Castro, M.A. Reuter : Journal of Cleaner Production, 15, (2007), pp. 907-913
6) Julian Kirchherr, Denise Reike, Marko Hekkert : Resources, Conservation and Recycling, 127, (2017), pp. 221-232

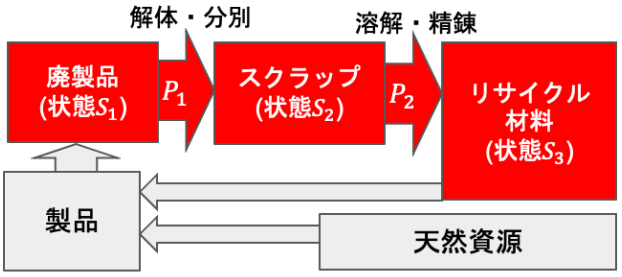


図1:リサイクルにおける状態とプロセス

表 1 質指標の評価対象となる状態とプロセス

	S_1	S_2	S_3	P_1	P_2
TSS	-	0	-	-	-
Embedded exergy	0	0	0	-	-
Embodied exergy	-	-	0	-	-
Exergy loss	-	-	-	0	0
Exergy efficiency	-	-	-	0	0
UO-TMR	-	-	0	-	-
自然鉱石換算元素濃度	0	0	-	-	-

表 2 質指標の因子となる状態とプロセス

	S_1,	S_2	S_3	P_1	P_2
TSS	-	0	0	-	-
Embedded exergy(S_1)	0	-	-	-	-
Embedded exergy(S_2)	-	0	-	-	-
Embedded exergy(S_3)	-	-	0	-	-
Exergy loss(P_1)	0	0	-	0	-
Exergy loss(P_2)	-	0	0	-	0
Embodied exergy	-	-	0	0	0
Exergy efficiency(P_1)	0	0	-	0	-
Exergy efficiency(P_2)	-	0	0	-	0
UO-TMR	0	0	0	0	0
自然鉱石換算元素濃度	0	0	0	0	0

日本における錫のマテリアルフロー分析

The tin material flow analysis of Japan

○田島順一郎 [1)]、光斎翔貴 [1,2)]、柏倉俊介 [1,2)]、山末英嗣 [1,2)]
Junichiro Tashima, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue
1) 立命館大学, 2) 総合地球環境学研究所
* rm0226sh@ed.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

紛争鉱物とは反武装勢力の資金源になる可能性のある鉱物のことであり, アメリカのドット・フランク法第 1502 条で金, 錫, タンタル, タングステンが認定された. アフリカのコンゴ民主共和国やその周辺地域で採掘されているこれらの鉱石は、武装勢力が鉱山を支配し, 強制労働や人権侵害が深刻化している状況下で採掘されている. そこで持続可能な社会の実現のため, 企業の調達活動やサプライチェーン全体において責任ある資源調達が求められる [1)]. 紛争鉱物の 1 つである錫は, はんだや電線として電子機器や輸送機器など我々にとって身近な商品に用いられている.

アメリカや EU ではドット・フランク法や EU 紛争鉱物規制法などが施行されており、この状況下において錫のマテリアルフロー分析を海外に適用した先行研究が存在している [2)]. この先行研究において EU における錫の重要性を評価するためにマテリアルフロー分析を行っている. 一方, 日本では紛争鉱物に関する法律が存在していない. また, 日本では錫含有製品の使用段階以降の物流が不明瞭であり, その全体像が把握されていない。前述した先行研究は EU 全体におけるマテリアルフロー分析はトップダウン方式によるデータ収集であるため正確性が低い. またリサイクル手法は国によって違うため, この研究をそのまま日本に適用することはできない. したがって本研究の目的は日本における錫のマテリアルフロー分析を行うことにより, 不明瞭であった製品以降からリサイクル過程までの錫の量を定量化することである.

2. 研究手法

EU, アメリカについで錫の使用量の多い, アジアの日本の 2020 年に地域を対象に錫のマテリアルフロー分析を行った. この際, 各製品に含まれる錫の含有量や製品の普及率を明らかにするために各製品の生産量の統計 [3,4,5)]や先行研究における報告値を用い, 以下の手順により錫のマテリアルフローを作成した.

まず錫の使用されている製品を調査・特定し, 製品を一次製品, 二次製品など分類分けを行い各製品のフローを作成した. ここで一次製品を錫地金から生産される製品とし, 二次製品を一次製品から製品される製品, 三次製品を二次製品から生産される製品とする. 続いて, 作成した各フローを元に各製品に使用されている錫の重量を計算した.

各製品に使用される錫の重量については以下のように計算を行った. まず 2020 年における各製品の生産量を統計データを用いて算出した. このとき, 同じ製品名であっても錫の含有量が違うことがあることに注意して生産量を算出した. 例えば, 錫が使用されているはんだは大きく分けると鉛はんだと鉛フリーはんだの 2 種類が存在している. これらは統計上では合算で報告されており, どちらがどの程度生産されたかはわからない. そこで先行研究 [6)]を用いてそれぞれのはんだが使用されている製品の普及率を算出した. 次に, 各製品に含まれる錫の含有量（製品 1kg に含まれる錫の重量）を先行研究を用いて算出した. 製品の生産量と各製品の錫の含有量のデータによる按分で各製品に使用される錫の重量を計算した.

3. 結果

本研究で得られた錫のマテリアルフローを図 1 に示す. 図の数値は各製品に 2020 年で使用された錫の純分である. 矢印の色がグラデーションになっているものは混入経路が明らかになっていないものである. またリサイクル/リユースに記載の値はそのリサイクル手法にかかわらずリサイクルやリユースされた錫を含む製品から算出したものである [5)].

2020 年に日本で使用可能な錫地金は 22,474 t であった. このうち一次製品に使用された錫は 26,008 t であった. 使用量ははんだ(13,844 t), ブリキ(5,739 t), 青銅品(5,393 t)の順に多い. はんだは鉛の規制により鉛フリーはんだの普及率が上昇し錫の使用量が増加傾向にある.

二次製品に使用された錫の量は 8,307 t である. 二次製品のうち電子基板にはんだとして多くの錫が使用されており 3,890 t である.ブリキは食飲料缶に 2,104 t の錫が用いられている. 青銅品は主に船用部品に 1,360 t 用いられている.

三次製品以降では電子機器が特徴的である. 電子機

器は二次製品以前の製品が多く用いられている.また, 電子機器は最終製品である産業機器･機械に用いられている. 電子機器のフローが錫のマテリアルフローの中心である.

錫としてのリサイクルはわずかである. 主に 3,555 t の錫が電子機器の中古品のリユースや, 電子機器としてリサイクル/リユースされている. 他には太陽光モジュールとして 114 t がリサイクルやリユースされている. ブリキ缶は主に鉄鋼スクラップとして 2,785 t がリサイクルされており, ブリキ缶に混入している錫はその多くが分離回収されることなく鉄鋼スクラップに混入していると考えられる.

以上の結果からマスバランスが一致していない部分がある. 例えばスチール缶は 2,104t が国内生産されているがリサイクル/リユースされているスチール缶は 2,785t である.これは輸入スチール缶が 798t あるからである. 他のマスバランスが一致しない部分の原因を考察で述べる.

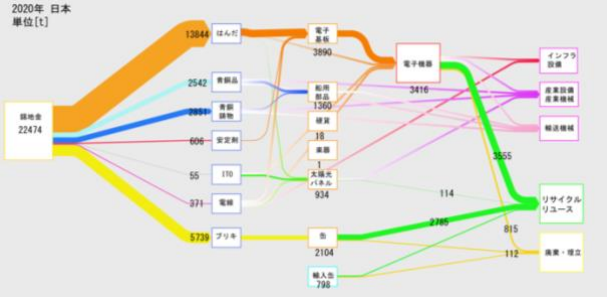


図 1　2020 年日本の錫のマテリアルフロー

4.　考察

第一に日本では一次製品に使用される錫の量が二次製品で使用される錫の量(マスバランス)と一致しないことが特徴として挙げられる. この原因として次の 4 つが考えられる. 医療機器などの考慮できていない電子機器があること, 一次製品自体の販売, 輸出があること, 日本企業が海外の工場に国内生産の一次製品を持ち込んでいること, 及び企業や国による一次製品のストックが存在していることである. 国内生産された製品に含まれる錫の使用量を明らかにすることができたが, 輸出入量の統計データや企業や国のストックデータが不足しているため原因に上げた輸出入量やストック量を明らかにすることができなかった. これらを明らかにするためには幅広い製品の統計データ, 業界へのヒアリング調査, 各製品に含まれる金属量の調査とリサイクル性の検証が求められる.

第二に国内生産された製品に使用された錫の重量を計算したため身の回りの製品の量と計算結果に差があることが特徴である. この原因として日本では電子機器を筆頭に最終製品の輸入が多いことが挙げられる[7]. 日本は通信機器の輸入を中国や韓国などのアジアから行っている. また日本企業の海外進出により国内生産される最終製品が少ないことがあることが挙げられる. 日本企業の多くが中国やインドなどのアジアに進出している. これより日本で製品に含まれる錫の使用量やストック量を明らかにし, 日本の錫のマテリアルフローをさらに明確化させるためにはアジア各国で錫の使用量を明らかにしなければならない.

5.　結言

本研究では, 2020 年の日本における錫のマテリアルフロー分析を行い, 不明瞭であった製品以降の錫の使用量を明らかにすることができた. これにより紛争鉱物規制のために注意しなければいけない製品として使用量の高いはんだ, ブリキ, 青銅品などが挙げられる. はんだは電子機器, 青銅品は産業機械や施設に用いられ数十年単位で使用され使用ストックになる. ブリキは鉄鋼スクラップに混入していると考えられる. また, 企業のグローバル化に伴って資源のフローはますます複雑になっていくと考えられる. さらに紛争鉱物としてリスクの評価を進めていくには日本における製品のストックや輸出入量等の不明瞭な部分を明らかにしなければならない. そのために考察で述べたようにアジア各国で錫のマテリアルフロー分析を行い、それらを統合していくことが求められる.

6.　引用文献

1) OECD 紛争地域および高リスク地域からの鉱物の責任あるサプライチェーンのための デュー・ディリジェンス・ガイダンス、OECD パブリッシング。http://dx.doi.org/10.1787/9789264111110-en
2) Reassessing tin circularity and criticality Jessie E. Bradley, Willem L. Auping, René Kleijn, Jan H. Kwakkel, Benjamin Sprecher First published
3) https://mric.jogmec.go.jp/wp content/uploads/2022/06/material_flow2021_Sn.
4) Research and Statistics Department Minister's Secretariat Ministry of Economy, Trade and Industry(METI)
5) https://www.env.go.jp/recycle/yoki/dd_3_docdata/index.html 環境省 Ministry of the Environment
6) https://riss.aist.go.jp/wp-content/uploads/2021/08/RTA_metal.pdf 独立行政法人　産業技術総合研究所　安全科学研究部門
7) 一般社団法人 日本貿易協会 https://www.jftc.or.

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 10:40 ~ 12:00 B会場：2455中講義室（4F）

[2-B2] 金属（2）

座長：畑山 博樹 (産業技術総合研究所)

10:40 ~ 11:00

[2-B2-01]

金採掘国における金のサプライチェーンリスク評価

*山尾 清音[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1]、中島 謙一[2] (1. 立命館大学、2. 国立環境研究所)

11:00 ~ 11:20

[2-B2-02]

Environmental Impacts of Chile’s Copper Mining Amid the Clean Energy Transition

*Cepeda Kato Javiera[1]、Zhengyang Zhang[1]、Matsubae Kazuyo[1] (1. Tohoku University)

11:20 ~ 11:40

[2-B2-03]

Copper stock, demand, scrap, and secondary reserves in Southeast Asian countries

*Le ThiVan[1]、Dente Sebastien [2]、Hashimoto Seiji[2] (1. Ritsumeikan University Graduate School、2. Ritsumeikan University)

11:40 ~ 12:00

[2-B2-04]

EVPIによる二次資源の組成の不確実性を考慮した資源循環指標の構築

*岩本 康之介[1]、醍醐 市朗[1] (1. 東京大学大学院)

©日本LCA学会

Environmental Impacts of Chile's Copper Mining Amid the Clean Energy Transition

Javiera Cepeda-Kato*[1)], Zhengyang Zhang[1)], Kazuyo Matsubae[1)]
1) Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 468-1 Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-0845, Japan.
*cepeda.kato.javiera.fernanda.q5@dc.tohoku.ac.jp

1. Introduction

The transition to clean energy is driving up demand for copper, which is essential for electricity-based technologies. As the world's largest copper producer, Chile is key to this shift but also faces challenges since copper mining is a major source of the country's greenhouse gas emissions. To address this, Chile plans to power copper production with 100% renewable energy by 2050, use hydrogen-fueled trucks, and rely on desalinated seawater to reduce freshwater use. However, the combined impact of renewable energy, hydrogen use, and desalinated water management in copper mining hasn't been fully studied. This study uses Life Cycle Assessment (LCA) to explore the environmental impacts and trade-offs of these changes, aiming to highlight the challenges and opportunities for making copper production more sustainable.

2. Methodology

LCA is a robust tool for quantifying the environmental impacts of energy transition. The functional unit of "1-ton copper cathodes" is adopted for this analysis. The system boundaries are defined as follows: for renewable electricity, hydrogen production via water electrolysis, and seawater desalination through reverse osmosis (RO) a cradle-to-gate approach is used; for copper production, a gate-to-gate approach is applied.

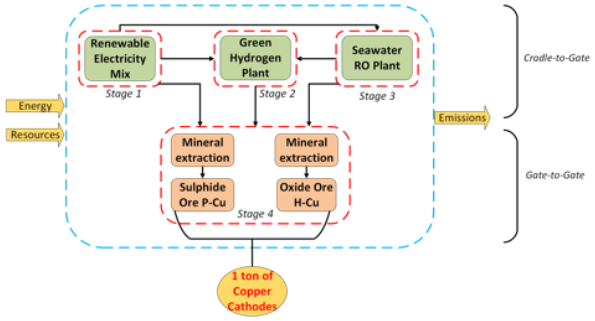


Figure 1 System Boundary

Two scenarios were analyzed: the Business-as-usual (BAU) Scenario- representing the current situation in 2023, and the Renewables-led Scenario– representing a projected situation in 2050. In the Renewables-led Scenario, mining operations rely on a 100% renewable electricity matrix and Green hydrogen produced via water electrolysis to power mining haul trucks for open-pit mining activities. All water consumption is sourced from desalinated seawater using RO plans. Both the green hydrogen and the RO are powered by renewable electricity.

Data on copper production and energy inputs were collected from two production routes: pyrometallurgy (P-Cu) and hydrometallurgy (H-Cu). These data were primarily sourced from the Chilean Copper Commission Statistics Yearbook[1)] and supplemented with datasets from Ecoinvent 3.3. The decreasing ore grade and increase in the energy input are included in the calculations.

The electricity matrices for the current and projected scenarios were obtained from the Ministry of Energy of Chile[2)], and the data was obtained from Ecoinvent 3 and reports fromNREL[3)]. Data for the hydrogen plant design were drawn from academic literature[4–6)]. Two types of electrolyzers were evaluated: the Alkaline Electrolyzer (AEL) and the Proton Exchange Membrane Electrolyzer (PEMEL). Additionally, two transportation options for delivering hydrogen over a distance of 200 km to the mining site were considered: hydrogen pipelines and gaseous hydrogen tanks transported by trucks.

The LCA inventory and impact assessment was conducted using SimaPro software, with the ReCiPe H Midpoint method selected for a problem-oriented analysis. The chosen impact indicators include: Global Warming Potential (GWP), Mineral Resource Scarcity (MRS), Land Use (LU), Fossil Resource Scarcity (FRS), and Water Consumption (WC).

3. Results

3.1 Electricity Mix

By 2023, Chile's electricity mix is predominantly renewable. Approximately 38% of the energy produced is derived from fossil fuels, mainly coal (25%), while 62% comes from renewable sources, led by solar (22%), run-of-river hydropower (15%) and wind (12%). Projections for 2050 indicate a substantial reduction in fossil fuel contribution to just 2%, alongside a remarkable increase in renewables to 98%, with wind (41%), solar (27%), and concentrated solar power (17%) playing leading roles. To

achieve a 100% renewable electricity mix, contributions from fossil fuels and storage sources were reassigned to solar energy, reflecting its significance in the regions where copper mining companies operate.

3.2 Hydrogen Production and Deliver

Hydrogen production shows a slight difference between AEL and PEMEL. Based solely on GWP, AEL generated 2.98 $kgCO_{2eq}$ per kilogram of hydrogen, while PEMEL produced 3.10 $kgCO_{2eq}/kgH_2$. Approximately 90% of this impact comes from the electricity mix production, with the remaining 10% divided between RO water supply (4%) and the acquisition of stack and balance-of-plant materials (6%). Similar trends are observed for other impact indicators, such as MRS, LU, and WC.

Including transportation to the mine site significantly increases the GWP. For truck transportation, GWP doubles to 6.28 $kgCO_{2eq}/kgH_2$ for AEL and 6.33 $kgCO_{2eq}/kgH_2$ for PEMEL. Pipeline transportation increases GWP by approximately 70%, to 5.09 $kgCO_{2eq}/kgH_2$ for AEL and 5.32 $kgCO_{2eq}/kgH_2$ for PEMEL. Figure S1 in Supporting Information illustrates the differences between electrolyzers and transportation methods.

The main differences between transportation methods lie in the materials required for infrastructure. For GWP and WC, road transportation has the larger contribution due to the acquisition of carbon fiber for tank materials. In contrast, pipelines contribute more to MRS and LU. The higher MRS impact stems from the low steel alloy needed for pipelines, while the LU impact is driven by the land transformation required per kilometer of the pipeline.

3.3 Copper Production

Results for each indicator impact in each scenario are present fully in Table S1 in Supporting Information. For P-Cu, results indicate that the global warming potential (GWP) for BAU was 6.19tCO_{2eq}/tCu, while in the renewables-led scenario, the value decreased by around 35%. The lowest GWP values achieved using pipeline transportation with AEL at 3.95tCO_{2eq}/tCu and PEMEL at 3.97tCO_{2eq}/tCu, compared to road transportation with AEL at 4.037tCO_{2eq}/tCu and PEMEL at 4.04tCO_{2eq}/tCu.

In the renewables-led scenario compared to the BAU scenario, there was a 1% increase in Mineral Resource Scarcity, mainly due to the acquisition of materials for photovoltaic plants, electrolyzer stacks, and zinc coatings for pipes. Meanwhile, there was a decrease in Land use (-1%), Fossil Fuel Scarcity (-37%), and Water consumption (-50%).

Both P-Cu and H-Cu production lines follow the same trends; however, they differ in magnitude. The H-Cu line is a less energy- and water-intensive process. Therefore, the impacts are lower compared to P-Cu.

4. Conclusions

Hydrogen production exhibits only slight differences between Alkaline and PEM electrolyzers, with approximately 90% of the environmental impact driven by the electricity mix. Pipeline transportation outperforms road transportation in terms of carbon footprint but results in higher impacts related to Mineral Resource Scarcity and Land Use.

For copper production processes, the Renewable-led Scenario achieves a 35% reduction in carbon footprint and a comparable decrease in Fossil Fuel Scarcity impacts for both Pyrometallurgy (P-Cu) and Hydrometallurgy (H-Cu). However, the impacts of Land Use and Mineral Resource Scarcity impacts remain largely unchanged under the Renewable-led Scenario.

The overall impact of the energy transition on Chilean copper production yields few improvements in most environmental indicators. Water consumption is notably high due to exclusive considerations of freshwater in the calculations. Nevertheless, incorporating renewable energy sources can significantly reduce the carbon footprint of copper mining production in Chile despite the increased energy demand resulting from the decline in ore grade.

5. References

1) Chilean Copper Commission, Yearbook: Copper and Other Mineral Statistics 2004-2023, Santiago, Chile, 2024.

2) Ministry of Energy C., “Long-Term Energy Planning.”

3) Smith B. L., Sekar A., Mirletz H., Heath G., Margolis R., An Updated Life Cycle Assessment of Utility-Scale Solar Photovoltaic Systems Installed in the United States, 2024.

4) Bareiß K., de la Rua C., Möckl M., Hamacher T., *Appl Energy*, **237**, 862–872 (2019).

5) Koj J. C., Wulf C., Schreiber A., Zapp P., *Energies (Basel)*, **10**, (2017).

6) Wulf C., Reuß M., Grube T., Zapp P., Robinius M., Hake J. F., Stolten D., *J Clean Prod*, **199**, 431–443 (2018).

Supporting Information

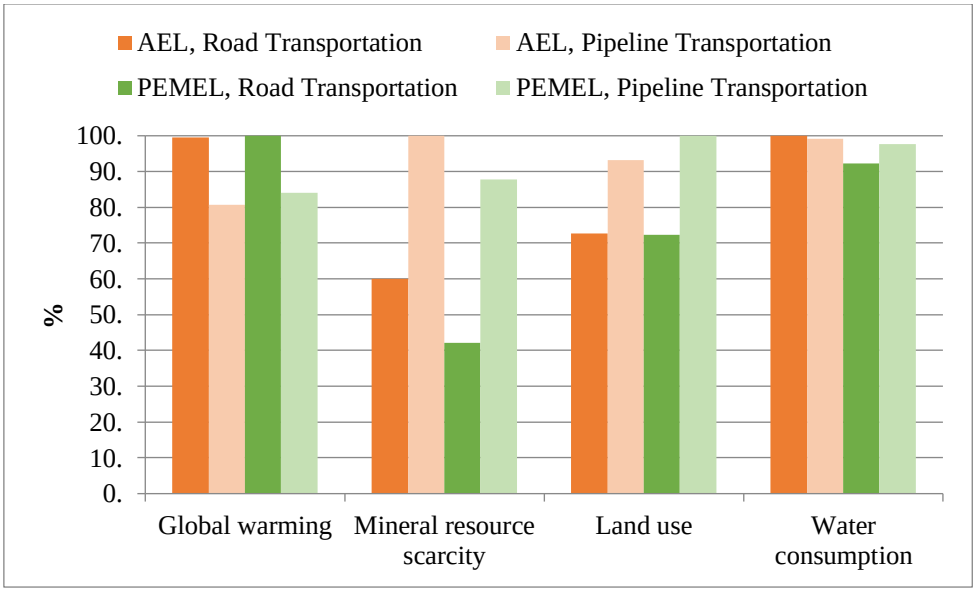


Figure S1 Impact Assessment Comparison [1 kg of Hydrogen] Generation and Transportation

Table S1 Impact Assessment for [1 ton Copper Cathodes]

Scenario	Impact Indicator	Unit	P-Cu	H-Cu
BAU	GWP	$kgCO_{2eq}$	6,191	4,767
	MRS	$kgCu_{eq}$	1,432	1,672
	FRS	$kgOil_{eq}$	1,616	1,202
	LU	m^2aCrop_{eq}	1,699	706
	WC	m^3	100	93
Renewable-led (AEL, Truck transportation)	GWP	$kgCO_{2eq}$	4,039	3,124
	MRS	$kgCu_{eq}$	1,439	1,675
	FRS	$kgOil_{eq}$	1,054	771
	LU	m^2aCrop_{eq}	1,672	671
	WC	m^3	51	77
Renewable-led (PEMEL, Truck transportation)	GWP	$kgCO_{2eq}$	4,042	3,125
	MRS	$kgCu_{eq}$	1,437	1,674
	FRS	$kgOil_{eq}$	1,058	772
	LU	m^2aCrop_{eq}	1,672	671
	WC	m^3	50	76
Renewable-led (AEL, Pipeline transportation)	GWP	$kgCO_{2eq}$	3,950	3,090
	MRS	$kgCu_{eq}$	1,442	1,676
	FRS	$kgOil_{eq}$	977	741
	LU	m^2aCrop_{eq}	1,681	675
	WC	m^3	51	77
Renewable-led (PEMEL, Pipeline transportation)	GWP	$kgCO_{2eq}$	3,968	3,096
	MRS	$kgCu_{eq}$	1,441	1,676
	FRS	$kgOil_{eq}$	981	742
	LU	m^2aCrop_{eq}	1,685	676
	WC	m^3	50	77

EVPI による二次資源の組成の不確実性を考慮した資源循環指標の構築

Development of a Circular Resource Indicator Considering the Composition Uncertainty of Secondary Resources Using EVPI

○岩本康之介*1)、醍醐市朗 1)
Konosuke Iwamoto, Ichiro Daigo
1) 東京大学
* k-iwamoto0202@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. 諸言

循環経済へ向けて、製品の循環性指標が開発されており、二次資源の質も反映した指標になっている[1]ものの、その質を定量するための手法は価格情報を参照する手法以外にない。金属リサイクルにおける課題は、混入する不純物元素の存在とともに、その不純物元素濃度がばらつくことである[2]。そのため、物質の情報に基づいた質の評価において、不純物元素そのものだけではなく、その濃度の不確実性を考慮した指標の開発が望まれる。

二次資源の化学組成の不確実性を反映した指標として、EVPI (Expected Value of Perfect Information)を用いた指標が提案されている[3]。化学組成の不確実性を反映した EVPI は、プロセスコストを参照し金額単位で導出される。しかしながら、コストは外的要因により乱高下することから、評価時点により大きく異なることが考えられる。そこで本研究では、物質情報などの基準を参照した二次資源の組成の不確実性を考慮した EVPI により、物質情報に基づく二次資源の質を反映した資源循環指標の構築を目的とする。

2. 研究方法

2.1 EVPI の応用

EVPI は、情報の価値を定量的に評価する指標であり、「完全情報がある場合の期待値」と「不確実な情報（部分情報）に基づいた最適な意思決定による期待値」の差で表される[4]。二次資源の組成の不確実性を考慮した EVPI は、スクラップ組成に関する完全な情報を溶解前に得ることで、リサイクルがどれほど最適化されるかを定量的に示すものである。

評価の対象となる「情報の価値」は、製造プロセスの効率化や材料の最適利用、環境負荷の軽減といった要素をどの基準で評価するかに応じて、金額以外の基準でも導出可能である

本研究では、「情報の価値」の基準として、評価時点までに消費されるエネルギー総量を示す CED[5]（Cumulative Energy Demand）を用いて EVPI を導出した。CED は主に生産プロセスに依存するため、技術開発の進展により一定の変化が見込まれるが、評価時期による影響が少ない基準である。そして、CED で導出した EVPI（CED-EVPI）とプロセスコストで導出したもの（Cost-EVPI）を比較し、CED の基準としての有用性を評価した。

2.2 対象としたケース

先行研究[4]と同様に、ステンレス鋼 AISI 304 のスクラップから同種のステンレス鋼 100 t へのリサイクルをケースとし、ステンレス鋼スクラップの化学組成の範囲が変化することによる EVPI の変化を評価した。本ケースでは、AISI 304 が Fe, Cr, Ni の３元素によって構成されると仮定した。Table 1 のようにステンレス鋼スクラップの Cr, Ni 濃度の範囲を製品基準の濃度を中心に変化させた。リサイクルは、スクラップ、銑鉄、フェロクロム(68%Cr)、フェロニッケル(30%Ni)の混合によって行われるとした。また、Cr および Ni 濃度は範囲内に正規分布に従い分布するとし、各範囲設定において 1000 個の化学組成を作成し、それぞれに対して EVPI を導出した。その平均値をその設定範囲における EVPI とした。

Table 2　EVPI を導出した範囲設定

	Cr 濃度範囲 [%]	Ni 濃度範囲 [%]
製品基準	18~20	8~10
設定 1	16~22	6~12
設定 2	16.25~21.75	6.25~11.75
設定 3	16.5~21.5	6.5~11.5
設定 4	16.75~21.25	6.75~11.25
設定 5	17~21	7~11
設定 6	17.25~20.75	7.25~10.75
設定 7	17.5~20.5	7.5~10.5

2.3 EVPI の導出方法

本ケースのリサイクルは、溶解プロセスと調節プロセスの２段階で構成されるとした。まず、溶解プロセスでは、スクラップ、銑鉄、フェロクロム、フェロニッケルを配分して 100 t のステンレス鋼を生成する。

部分情報の場合は、調整プロセスを考慮して基準を満たせるような材料配分を行い、その中でスクラップの使用量が最大となるように決定した。一方、完全情報の場合は、溶解プロセスにおいて基準を満たす最適な材料配分が決定されるため、調整プロセスは必要としない。

次に、調整プロセスでは、溶解プロセス後の化学組成が基準を満たしていない場合に銑鉄、フェロクロム、フェロニッケルを追加して調整を行う。この調整では、追加可能な最大量を 10 t と設定した。

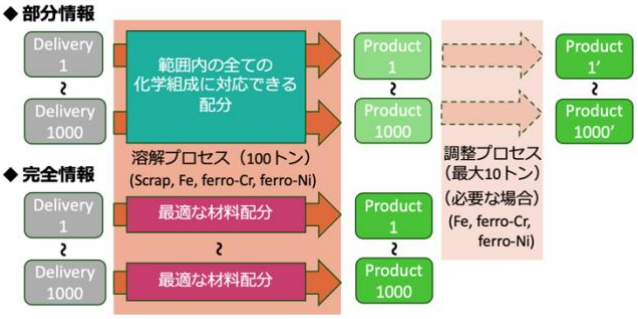


Figure 2　リサイクルケースの概要

3. 結果・考察

各 EVPI の計算結果を、スクラップの Cr、Ni 濃度範囲の幅を横軸にプロットしたものを Figure 2 に示す。

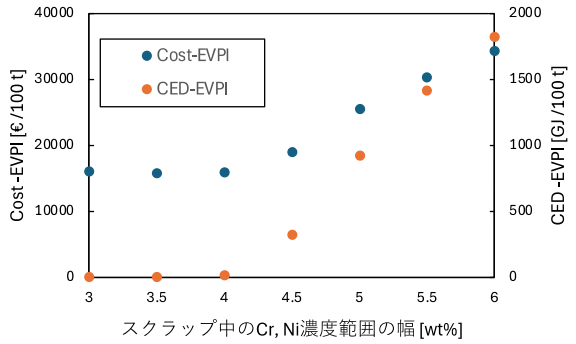


Figure 4 EVPI の導出結果

Cost-EVPI および CED-EVPI は、スクラップの化学組成の不確実性が小さくなるほど小さくなった。この一致は、リサイクルにおける不確実性の影響を両者が共通して反映していることを示唆しており、本ケースでは、Cost-EVPI の外的要因により乱高下する弱点を克服した基準として CED-EVPI を用いることができると考えられた。

また、Figure 3 に示すように、Cost-EVPI の変化は「部分情報」の場合のプロセスコストの変化に起因している。さらに、Figure 4 に示すように、「部分情報」の場合のプロセスコストは、ほとんどが溶解プロセスによって占められていた。これらの傾向は CED-EVPI についても同様であった。溶解プロセスにおけるコストや CED は、スクラップおよび製品の化学組成の上限・下限値から求められた配分によるものであるから、これらをパラメータとして定式化できる。したがって、これらのパラメータを用いて EVPI を定式化できる可能性が示唆された。この定式化が実現すると、解析をせずとも EVPI を求められるため、循環性指標への組み込みが容易になると期待される。

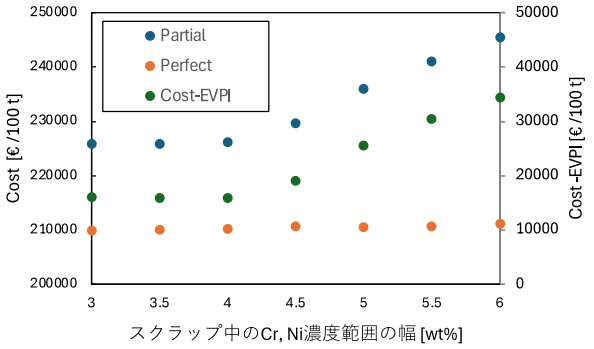


Figure 1 Cost-EVPI の導出

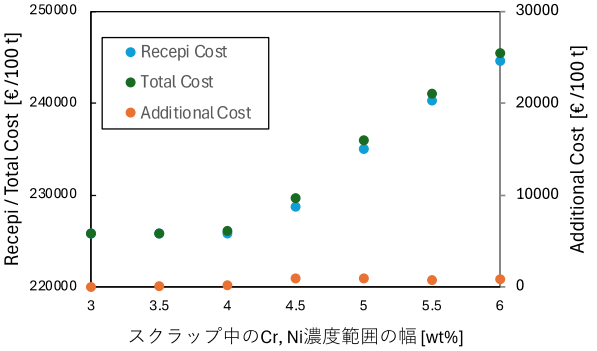


Figure 3　部分情報の場合のプロセスコスト

4. 結言

本研究では、ステンレス鋼 AISI 304 のリサイクルを対象に、プロセスコストおよび CED を用いて EVPI を導出し、CED-EVPI の有用性を示した。また、EVPI をスクラップおよび製品の化学組成の上限・下限値をパラメータとして定式化できる可能性が示唆された。これにより、繰り返し計算を要せずに EVPI を導出し、容易に循環性指標へ組み込むことが期待される。今後は他の材質やリサイクルプロセスへ適用範囲を拡大するとともに、本手法の実用性や精度をさらに検証することが期待される。

参考文献

[1] E. Bracquené, Wim Dewulf, Joost R. Duflou: *Resour Conserv Recycl* **154**, (2020)
[2] I. Daigo, K.Tajima, H.Hayashi, D.Panasiuk, K.Takeyama, H.Ono, Y.Kobayashi, K.Nakajima, T. Hoshino: *ISIJ Int.* **61**, (2021) 498-505.
[3] R.J.Compañero, A.Feldmann, P.Samuelsson, P.G.Jönsson: *Miner Econ* **36**, (2023) 463-480
[4] K.Szaniawski: *Synthese* **17**, (1967) 408-424.
[5] ecoinvent ver. 3.8 (2021)

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 13:00 ~ 14:40 B会場：2455中講義室（4F）

[2-B3] 地域経済

座長：岡本 隼輔 (尾道市立大学)

13:00 ~ 13:20

[2-B3-01]

地域産業特性を考慮した木質バイオマス発電による社会経済効果の分析

*鈴木 信太朗[1]、本藤 祐樹[1]、森泉 由恵[1] (1. 横浜国立大学)

13:20 ~ 13:40

[2-B3-02]

Evaluating greenhouse gasses emission from domestic wastewater treatment in each prefecture in Japan

*テグ-アヒティア スヤディ[1]、古川 柳蔵[1]、林 健太郎[2]、仁科 一哉[2,3]、小野寺 崇[2,3]、伊坪 徳宏[4] (1. Tokyo City University、2. Research Institute for Humanity and Nature、3. National Institute for Environmental Studies、4. Waseda University)

13:40 ~ 14:00

[2-B3-03]

全国自治体における地域特性を踏まえた分野横断的な気候変動リスク評価枠組みの構築と評価

*井田 新[1]、栗栖 聖[1]、福士 謙介[1] (1. 東京大学)

14:00 ~ 14:20

[2-B3-04]

インフォーマルセクターを考慮したサプライチェーンの社会影響評価

*三苫 春香[1]、山野 紀彦[2] (1. 広島経済大学、2. OECD)

14:20 ~ 14:40

[2-B3-05]

脱炭素と脱物質を先導する地域経済サプライチェーンの変革要因の探索

*畑 奨[1]、南齋 規介[1]、中島 謙一[1,2] (1. 国立環境研究所、2. 東京大学)

©日本LCA学会

地域産業特性を考慮した木質バイオマス発電による社会経済効果の分析

Socio-economic effects of wood biomass generation considering regional industrial characteristics

○鈴木信太朗*[1)]、本藤祐樹[1)]、森泉由恵[1)]
Shintaro Suzuki, Hiroki Hondo, Yue Moriizumi
1) 横浜国立大学
*suzuki-shintaro-mb@ynu.jp

1. 緒言

木質バイオマス発電は、地方経済の活性化への手段の 1 つとして期待される。また、その効果的な導入のためには、地域産業構造と発電事業との関係性を把握することが重要である。そこで、木質バイオマス利用が地域にもたらす社会経済効果について地域産業連関(IO)法による分析がされてきたものの、国内研究には、使用される地域 IO 表の部門数が少ないことや対象地域が単一の行政区分に限られるといった課題が残る。

本研究は、木質バイオマス発電による社会経済効果と地域産業との関係性を、2 地域の比較により明らかにすることを目的とする。本稿では、木質バイオマス発電がライフサイクルにわたって地域にもたらす粗付加価値創出ポテンシャルを分析する。

2. 方法

分析には、地域産業特性を詳細に反映できる、396 部門からなる地域 IO モデル(REFIO-region)[1)]を用いた。REFIO-Region は、2015 年産業連関表をベースに 1,741 市区町村の産業構造及び 12 種の再エネの技術構造を詳細に表現した産業連関モデルで、複数の市区町村を統合した地域内表を作成できる。木質バイオマス発電事業の評価においては、複数の自治体にわたって存在する木質資源分布単位での分析が重要であり、REFIO-Region を使用することでそれが可能となる。本研究では、さらに、木質バイオマスに関わる内生部門を拡張し、発電技術を詳細に表現した最終需要ベクトルを与えることで、地域資源を用いる木質バイオマス発電事業の評価に適したモデルを作成した。

また、本研究では、発電所の建設や運転、保守に伴う直接効果、これらの活動へ投入される財・サービスの生産に伴う間接効果、直接・間接効果が家計を介してもたらす誘発効果を対象とした。誘発効果としては、家計の内生化をせず 2 次波及のみを対象とした。

	発電用素材	発電用木材チップ	再エネ発電	自家発電	最終需要	移輸入	生産額
発電用素材		→ a			0	$-m_1$	$a-m_1$
発電用木材チップ			→ b	→ c	0	$-m_2$	$b+c-m_2$

図 1 発電用部門の産出ベクトル

2.1 内生部門の拡張

本研究では、素材部門および木材チップ部門を移輸入率に着目して、それぞれ「発電用部門」と「その他部門」とに分割した。拡張にあたり、まず発電用部門の産出・投入ベクトルを推計し、既存部門からこれらを差し引くことでその他部門を推計した。まず、図 1 に示すように発電用部門の産出ベクトルを作成した。発電用木材チップ部門は、再生可能エネルギー発電部門および自家発電部門へ産出し、発電用素材部門は発電用木材チップ部門へ産出する。これらの中間需要に移輸入を加え、産出ベクトルを作成した。発電用部門の移輸入率は変数とし、地域内外で生産される素材または木材チップの競争を表現する。本稿では、地域資源の活用に着目するため、発電用部門の移輸入を 0 に設定した。投入ベクトルは、発電用部門とその他部門の技術係数が既存部門と同一であると仮定した上で、産出方向の合計（生産額）と技術係数より算出した。

2.2 最終需要ベクトル

本稿では、木質バイオマス発電のライフサイクルを建設と運用の 2 段階に分け、それぞれに対応する最終需要ベクトルを与えた。ベクトルには、REFIO-region[1)]作成のために用意されているものを用いた。

2.3 ケーススタディ

本稿では、産業特性の異なる 2 地域を対象にケーススタディを行った。今回は、複数市町村からなる経済圏として、森林資源が豊富かつ地域内総生産が同程度である、岩手県の県央広域振興圏（3 市 5 町）と県南広域振興圏（5 市 3 町）を取り上げる。2 地域の概要を表 1 に示す。また、対象施設として、導入事例を参考に、表 2 に示す発電施設を想定した。なお、本稿では、

表 1 対象地域の概要

	県央地域	県南地域
人口（令和 5 年）	452,087 人	447,082 人
面積	3,642 km^2	5,256 km^2
地域内総生産[1)]	18,789 億円	17,709 億円

表 2 対象とする木質バイオマス発電所の概要

設備容量	6,300 kW
設備耐用年数(評価期間)	15 年
設備利用率	78.1%
所内率	16%
木材使用量(熱量換算)	約 597,000 GJ/年

当該施設が燃料として各地域内産の木質バイオマスのみを用いた場合の効果を推計する。なお、県央・県南地域の未利用木質バイオマス賦存量 [2]は、それぞれ想定した発電所 13.3 個分および 18.1 個分に相当する。

3. 結果と考察

図 2 は、発電施設の建設および 15 年間の運用が各地域にもたらす効果の内訳を表している。結果は、発電所の建設や運転・メンテナンスに伴う直接効果が地域内で生じ、各地域で最大限の経済取引が行われた際の、粗付加価値創出ポテンシャルを示す。まず、直接効果は 2 地域で同一であり、地域内効果のうち建設時で 55～63%、運用時で 37～40%と大きな割合を占める。この結果は、地域の建設会社が工事を請け負うことや地域内の発電事業者が運転を行うことが、木質バイオマス発電による地域振興において有効であることを示唆している。また、間接効果が占める割合は、両地域に共通して、運用段階の方が建設段階よりも大きい。両地域とも、建設段階では、ボイラ・タービンをはじめとする主要な機器を地域外に依存している一方、運用段階では木質バイオマスの調達に関わる工程の多くが地域内で行われているためである。

図 3 は、398 の産業部門で生じる間接・誘発粗付加価値を 15 部門に集約し、ライフサイクル段階別かつ地域別に示している。結果より、両地域における波及構造について、以下のような特徴が挙げられる。県央地域では、県南地域よりも、商業や金融・保険、サービスにおける粗付加価値が占める割合が大きい。商業は発電機器や木材チップ等の流通・販売過程における卸売・小売業者の経済活動に由来する。金融・保険は、発電所運用に伴う損害保険に加え、家計消費による生命保険の影響も大きい。サービスは、発電所の設計や機械リース等の対事業所サービスが主で、一部家計による対個人サービスが含まれる。一方、県南地域では、県央と比較して、製造業や農林漁業の占める割合が大きい。製造業に関しては、特に建設段階において顕著に表れている。具体的には、生コンクリート、ボルト・ナット、ケーブル、はん用機械等における粗付加価値が大きい。運用段階では、設備の点検・修繕に関わる金属製品のほか、再生資源回収・加工処理等へ効果が

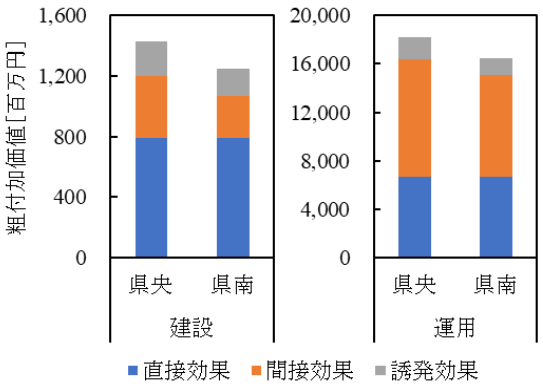


図 2 ライフサイクル段階別かつ地域別の粗付加価値創出ポテンシャル（試算値）

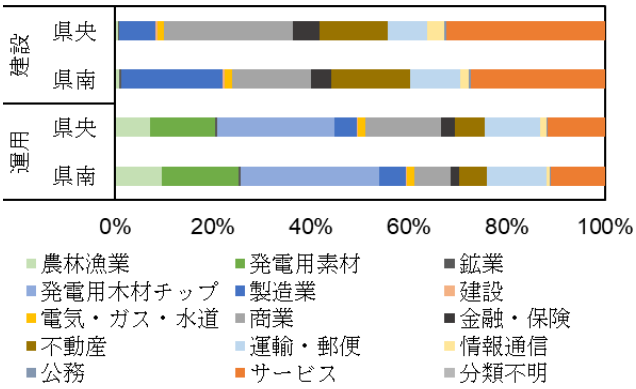


図 3 各産業で生じる間接・誘発粗付加価値（試算値）

波及している。農林漁業における地域差は、木質バイオマスの生産にあたる育林業の地域内比率に起因する。県南地域では、県央地域よりも育林業を地域内で調達しているため、当該部門における地域外への漏洩が抑えられた。

以上より、産業特性が異なる県央地域と県南地域では、同じ技術の導入においても波及構造に差が生じることが定量的に示された。

4. 結言

上述のように、発電事業と地域産業構造との関係性を定量的に把握することは、政策立案や事業導入の検討に当たって重要であり、本稿の手法および結果はその検討において貢献することが期待される。

5. 参考文献

1) 森泉由恵, 本藤祐樹：日本エネルギー学会誌, 102（1）,（2023）, pp. 1-18　2) 環境省, REPOS

【謝辞】
本研究は JST 低炭素社会実現のための社会シナリオ研究事業 JPMJCN2302 の支援を受けている。また、関連する自治体・事業者より情報をご提供戴いた。ここに謝意を表する。

Evaluating Greenhouse Gasses Emission from Domestic Wastewater Treatment in Each Prefecture in Japan

Teguh Adhitia Suyadi*[1)], Ryuzo Furukawa[1)], Kentaro Hayashi[2)], Takashi Onodera[2,3)], Kazuya Nishina[2,3)], Norihiro Itsubo[4)]

1) Tokyo City University, Japan, 2) Research Institute for Humanity and Nature, Japan, 3) National Institute for Environmental Studies, Japan, 4) Waseda University, Japan

* g2383008@tcu.ac.jp

1. Introduction

In 2020, Japan's wastewater treatment coverage was recorded more than 90% [1], while the global average was only 56% for the same year [2]. However, despite having relatively higher coverage wastewater treatment, challenges remain in this sector in Japan. Methane (CH_4) and Nitrous Oxide (N_2O) will be released during the biological treatment process of wastewater. Additionally, treating wastewater will consume energy and chemicals, leading to CO_2 emissions in its supply chain. Besides, study by Cascade et al. (2021) modeled the flow of Total Nitrogen (Total-N) from sewerage systems of each country worldwide to the ocean, revealed that Japan's sewerage system contributed approximately 36.9 Gg of Total-N per year [3]. The uncontrolled nitrogen emissions can lead to eutrophication in aquatic environments. Acknowledging the significance of GHG and Eutrophication Potential (EP) from wastewater treatment system, this study aims to quantify GHG emissions and EP both from direct and indirect emissions across prefectures in Japan. Furthermore, this study will also examine the relationship between treatment capacity to GHG emissions and EP.

2. Methodology

2.1 Goal and Scope of Study

The objective of this study is to calculate GHG emissions and EP per cubic meter (m^3) of treated wastewater from each prefecture in Japan. Additionally, the study will include an analysis of how treatment capacity affects GHG emissions and EP. The scope of study included the operational phase of wastewater and sewage sludge treatment.

2.2 Inventory Analysis

In this study, data inventory was arranged for 2,169 treatment facilities across Japan, extracted from the national sewerage database of Japan [1]. The calculation was carried out with SimaPro using Life-cycle Impact Assessment Method Based on Endpoint Modeling (LIME2) model with IDEA database.

3. Current Progress and Result

Average GHG emissions and EP from wastewater treatment in Japan are measured at 0.248 kg CO_2-equivalent (eq)/m^3 and 5.39E-3 kg PO_4^{3-} eq/m^3 of treated wastewater respectively, as shown in Figure 1A and 1B. Study by Soda et al. (2013) indicated the GHG emissions and EP from a treatment system using conventional activated sludge (CAS) method in Japan were 0.220 kg-CO_2-eq/m^3 and 6.40E-3 kg PO_4^{3-}-eq/m^3 respectively [4]. High populations prefectures, such as Osaka, Tokyo, and Kyoto, exhibit GHG emissions per m^3 that are lower than the national average, recorded at 0.189, 0.189, and 0.152 kg-CO_2-eq/m^3, respectively. These prefectures demonstrate an EP that also falls below the national average, recorded at 3.85E-3, 5.21E-3, and 4.05E-3 kg PO_4^{3-} eq/m^3, respectively. The next section will further explore how capacity affects GHG emissions and EP.

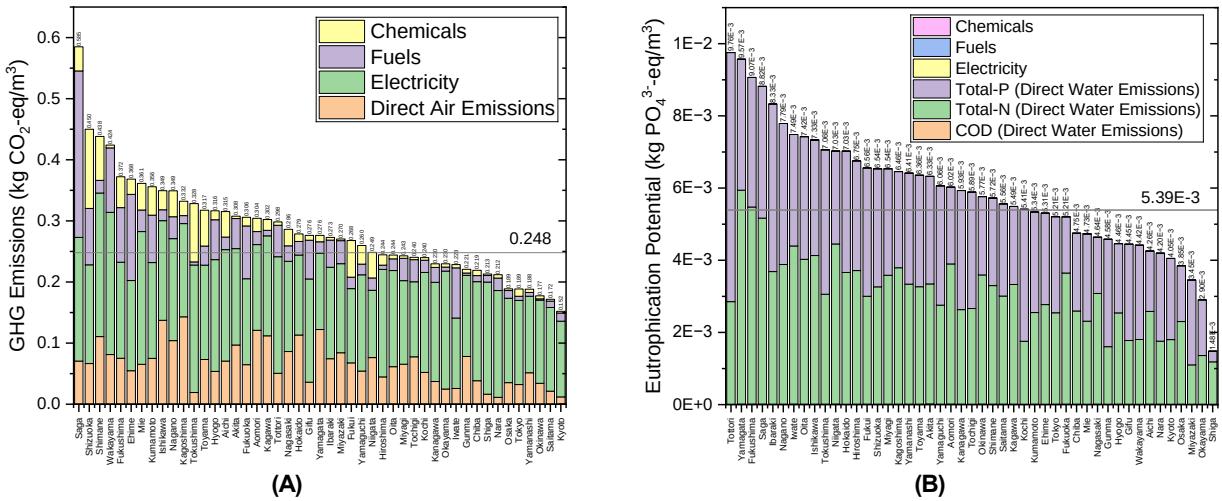


Figure 1. (A). GHG Emissions per m^3 in each prefecture; (B). EP per m^3 of treated wastewater in each prefecture

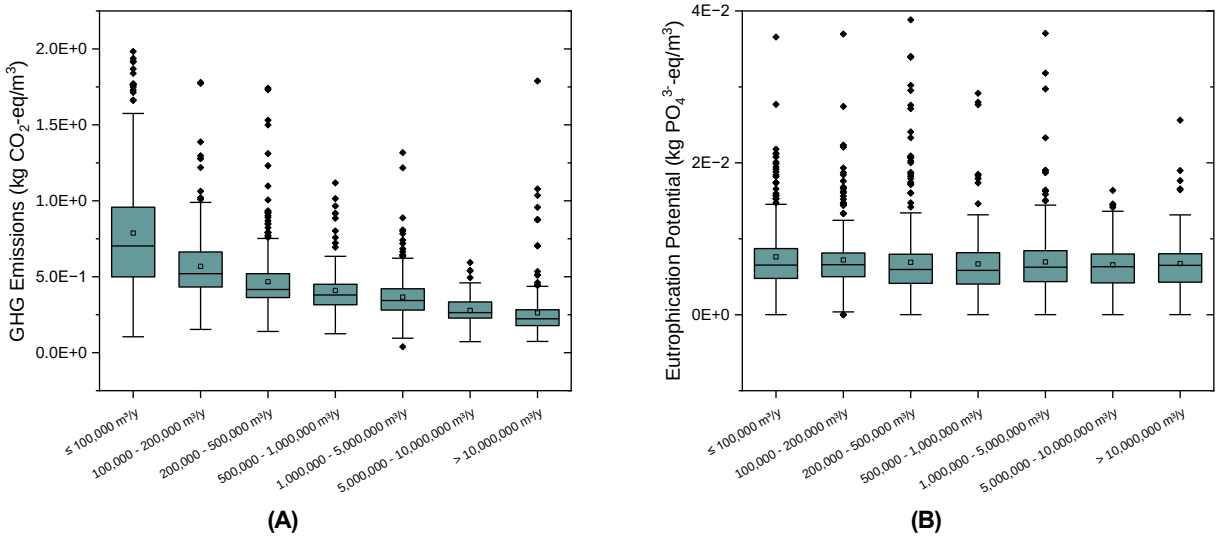


Figure 2. Influence of Treatment Capacity to Environmental Impact (A). GHG Emissions per m^3; (B). EP per m^3

Annual treatment capacity of treatment facility has been categorized into seven categories: ≤100,000 m^3/year; 100,000 – 200,000 m^3/year; 200,000 – 500,000 m^3/year; 500,000 – 1,000,000 m^3/year; 1,000,000 – 5,000,000 m^3/year; 5,000,000 – 10,000,000 m^3/year; and >10,000,000 m^3/year. As can be shown in Figure 2A, facility with higher annual treatment capacity tended to have lower GHG emission than those with lower annual treatment capacity. Median GHG emission from the lowest to highest annual treatment capacity recorded as 0.703, 0.520, 0.416, 0.380, 0.344, 0.264, and 0.223 kg CO_2-eq/m^3. Niu et. al. (2019) mentioned that electricity consumption for a facility with capacity less than 1 million liters (ML) per day is around 4 – 6.5 kWh/kg COD removed. Meanwhile, facility with capacity around 5 – 10 ML per day reduces to 2 – 3 kWh/kg COD removed as plants become more efficient [5]. In contrast, the impact of treatment capacity appears to be insignificant to EP, as shown in Figure 2B. Median EP from the lowest to highest annual treatment capacity recorded as 6.54E-3, 6.59E-3, 5.96E-3, 5.84E-3, 6.26E-3, 6.33E-3, and 6.51E-3 kg PO_4^{3-}-eq/m^3. Rashid and Liu (2020) noted that 99% contributions of EP coming from Total-N and Total-P from direct water emissions [6]. In that sense, further analysis should also be conducted to identify which variables that affect Total-N and Total-P removal efficiency.

4. Conclusions

The key findings of this study can be summarized as follows:

1. GHG emissions in each prefecture in Japan ranged from 0.152 to 0.585 kg CO_2-eq/m^3, with average value of 0.248 kg CO_2-eq/m^3.
2. EP in each prefecture in Japan ranged from 1.48E-03 to 9.76E-03 kgPO_4^{3-}eq/m^3, with average value of 5.39E-03 kgPO_4^{3-}eq/m^3.
3. Higher annual treatment capacity tended to generate lower GHG emissions since it will consume lower electricity than those with lower annual treatment capacity.
4. Influence of treatment capacity to EP considered as insignificant.

5. References

1) National Sewerage Database of Japan. (2024). Limited access from https://portal.g-ndb.jp/portal/.
2) UN Habitat and WHO. (2021). Progress on wastewater treatment – Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.3.1. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) and World Health Organization (WHO), Geneva.
3) Tuholske C, Halpern BS, Blasco G, Villasenor JC, Frazier M, Caylor K. (2021). Mapping global inputs and impacts from of human sewage in coastal ecosystems. PLoS ONE 16(11): e0258898. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258898.
4) Soda, S., Arai, T., Inoue, D., Ishigaki, T., Ike, M., and Yamada, M. (2013). Statistical Analysis of Global Warming Potential, Eutrophication Potential, and Sludge Production of Wastewater Treatment Plants in Japan. Journal of Sustainable Energy and Environment. 4(1).
5) Niu, K., Wu, J., Qi, L., & Niu, Q. (2019). Energy intensity of wastewater treatment plants and influencing factors in China. 670, 961–970. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.159.
6) Rashid, S. S., & Liu, Y.-Q. (2020). Assessing environmental impacts of large centralized wastewater treatment plants with combined or separate sewer systems in dry/wet seasons by using LCA. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(13), 15674–15690. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08038-2.

全国自治体の地域特性を考慮した気候変動リスクの評価枠組み構築評価

Development and Evaluation of a Framework for Assessing Climate Change Risks Considering Regional Characteristics of Municipalities Nationwide

○井田新*[1)]、栗栖聖[1)]、福士謙介[1)]
Arata Ida, Kiyo Kurisu, Kensuke Fukushi
1) 東京大学
* ida@env.t.u-tokyo.ac.jp

1. 研究の背景と目的

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は地球温暖化の着実な進行と、我々の生活環境への影響を指摘している。日本においては気候変動適応法が地域レベルでの対応を求めており、各自治体では自然的・経済的・社会的状況に応じた適応が必要とされている。しかしながら地域の気候変動適応計画は都道府県単位で大きく進む一方で, 市区町村単位では2025年1月現在1,724自治体中 270 自治体に留まる現状がある。馬場ら[1)]は気候変動適応計画策定に向けた課題のひとつとして、部署間での職務分掌や優先度に関する認識の違いを指摘しており、多様な気候変動影響への共通認識を築くことが難しいことがわかる。戸川ら[1)]も指摘するように、既往研究の多くは農業や社会基盤といった個別分野への気候変動影響評価に留まり、自治体の気候変動影響やリスクを総合的に評価する研究は少ない。自治体単位での適応を進めていくうえで、各自治体がリスクを総合的かつ多角的に把握できるような枠組みが必要といえる。

そこで、本研究では日本全国の 1,741 の市区町村を対象に、気候変動へのリスクを分野横断的に評価する枠組みを構築することを研究目的とした。特に、自治体規模に依存しないリスク指標を定め、自治体間でのリスクの相互比較および自治体内での弱点を明らかに出来る枠組みの構築を目指した。

2. 評価の枠組みの構築

評価対象とする気候変動影響については、環境省の気候変動影響評価報告書[2)]において気候変動影響が確認されている分野を対象に、農業、水産業、観光業、社会基盤、健康の 5 分野を選定した。その上で各分野について、表 1 に示す評価対象を定めた。対象分野の選定においては、特に自治体規模での影響が懸念され、その対応において自治体の占める役割が大きいと考えられるものを評価対象項目として選定した。

表 1 ：本研究におけるリスク評価対象一覧

分野	評価対象
農業	・耕種作物（53 種）の収量低下
	・家畜生産物の低下
林業	・木材における収量低下
水産業	・回遊性魚介類の漁獲量低下
観光業	・砂浜減少によるビーチレジャー衰退
	・自然雪減少による雪上レジャー衰退
社会基盤	・家屋の浸水被害
	・交通インフラの浸水被害
健康	・暑熱による死亡者数の増加
	・感染症による死亡者数の増加

また、気候変動リスクについて、A)気候変動影響の将来変化を軸に、リスクを左右する要素として B)分野固有の因子と C)自治体固有の因子に注目した。ここで A)影響変化は、例えば、農業であれば気候変動影響予測結果に基づく作物収量の変化率がこれにあたる。B)分野固有の因子とは、IPCC のフレームワークでは曝露や感受性として捉えられる因子である。ヒトやモノの存在を相対的な割合で捉え、地域としての依拠度を測る指標や、産業自体の脆弱性を測る指標などが該当する。なお、IPCC や一般的なリスク評価においては曝露量として絶対量を乗ずるが、ここでは自治体間の相対比較を可能とするため、自治体規模当たりの値のように相対的な指標を採用した。C)自治体固有の因子とは、自治体の人的資源や経済的資源の豊富さといった自治体の潜在的な能力を測る指標であり、IPCC のフレームワークでは適応能力として捉えられる。

本研究では表 1 に示す各項目について，上記 A) に B）を乗じた値を C）で除することでリスク値を求めた。

3. 結果の可視化

本研究では自治体への情報提供を念頭に、上記のリスク算出結果を自治体別の気候変動リスク評価シート

へとまとめた。このシートは自治体の担当者が自身の自治体における気候変動リスクの実情を理解することを促し、実態に沿った認識の醸成や効果的な適応策の立案を後押しするものとして想定した。また本研究ではリスク偏差値の算出や、その数値のレーダーチャートによる可視化など、情報の提供方法についても検討した。

例えばA市のリスク評価結果として、農業以外の分野について図1のようなレーダーチャートを作成した。ここで、偏差値の高い項目はリスクが低いことを、偏差値の低い項目はリスクが高いことを示す。

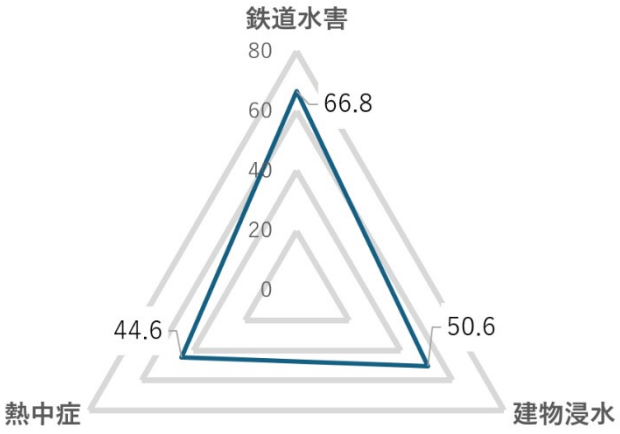


図 1：A市における分野別気候変動リスク偏差値

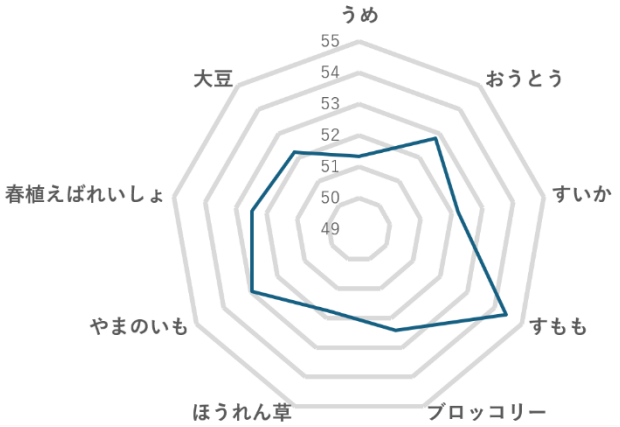


図 2：A市における作物別気候変動リスク偏差値

図1は気候変動影響が悪化すると認められる分野についてのみ抽出したものである。対象となる分野について同市のリスク値を分野毎に偏差値化し、そのリスクを視覚的かつ直感的に理解できるようにした。図2は農業分野のみを取り出して53種の作物の内、気候変動影響が悪化すると認められる作物のリスク値を作物別に偏差値化して一つのレーダーチャートにまとめたものである。

A市の分野別気候変動リスク偏差値をまとめたレーダーチャートからは、熱中症のリスクが高いことがわかる。熱中症リスクは、1) 熱中症搬送者数変化率、2)幼児高齢者割合、3)人口当たり病床数、4)自治体の人的/経済的資源の4項目で評価した。A市における1)熱中症搬送者数変化率は全国で138位、2)幼児高齢者割合は全国で1184位、3)人口当たり病床数は全国で133位、4)自治体の人的/経済的資源は全国で1471位である。2)幼児高齢者割合が低く、3)人口当たり病床数が高いことはリスクを低下させる要因だが、1)熱中症搬送者数変化率の高さと、4)自治体の人的/経済的資源の乏しさがリスクを高めている。

本フレームワークでは，このように，リスクやリスク偏差値という大局的な値を項目別に細分化して分析していくことで、その自治体の強みと弱みを把握できる点が優れている。ブレイクダウンが可能なフレームワークでは、熱中症リスクを下げるためには1)を下げるための取り組みが重要だという判断や、4)を強化する予算のつぎ込みが必要だという判断を下すことが可能になる。

完成したリスク評価シートについては実際に自治体の担当者へとヒアリングを行うことで、その効果を検証しながらシートの改良へとつなげる。発表では各自治体における評価例とともにリスク評価結果の詳細、ヒアリング結果より得られた知見などを示す。

謝辞:本研究は (独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費(S-18-4(1), JPMEERF20S11815) により助成を受けた。

引用文献

1) 馬場憲司, 工藤泰子,渡邊茂,永田裕,田中博春,田中充, 土木学会論文集 G, 74(5), (2018), I_405-I_416
2) 戸川卓哉, 高野剛志, 森田紘圭, 大場真R.C.Estoque,近藤美沙希, 土木学会論文集 G, 76(5), (2020), I_461-I_470.
3) 環境省 (2020) 気候変動影響評価報告書(総説).

脱炭素と脱物質を先導する地域経済サプライチェーンの変革要因の探索

Identifying the transformative drivers of regional economic supply chains for a decarbonized and dematerialized society

○畑 奨*[1)]、南齋 規介 [1)]、中島 謙一 [1),2)]
Sho Hata, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima
1) 国立環境研究所, 2) 東京大学
* hata.sho@nies.go.jp

1. 諸言

物質の大量生産･大量利用による経済発展によって人類は豊かさを享受した一方、生存の基盤である地球環境は限界に近づきつつある。特に気候変動による影響は自然災害の増加等の形ですでに顕在化しており、温室効果ガス（GHG）の排出量を実質ゼロとする経済社会（カーボンニュートラル）への転換が肝要である。我々が利用する物質の生産（採掘・製錬）が気候変動に与える影響は大きい。世界全体の GHG 排出に占める物質生産由来の排出割合は年々上昇しており、2015 年には 23%を占める [1)]。しかし、物質生産には電化が困難な化学反応プロセス・高温領域等のプロセスも多く、再生可能エネルギーの普及では解決にならない。国連は、物質利用の究極的な効率化による物質消費の徹底的な抑制と管理が気候変動緩和の鍵と提唱する [2)]。具体的には、気候 2℃目標の達成には、世界の高所得国は社会における一人当たり金属利用量を現状の 12 トンから 7 トンにまで削減することが必要との分析がある [3)]。

2021 年に日本が気候 2℃目標を超える野心的な「2050 年カーボンニュートラル社会」を宣言したことに呼応し、年間 16 億トンの物質を利用する現状から、どれほどの物質利用の効率化と削減が要求されるかを解明する先進的研究が展開される [4),5)]。また日本は循環基本計画に基づき設定された 3 つの物質フロー指標（資源生産性、最終処分量、循環資源利用率）を改善することで、物質利用が効率化された循環型社会への転換を目指す [6)]。日本経済を一体とした巨視的な分析が着手され、国全体の物質利用の転換像と求められる政策が具現化されつつある。しかし、その転換政策の実行主体である都道府県や市区町村の各地域経済が 16 億トンの物質利用に如何に関与し、その削減は同時にカーボンニュートラル社会の達成へと導くのかは全く不明である。加えて、国内の物質利用効率化と GHG 削減に貢献する地域経済の変化は、国際貿易を通じて国外で生じる物質消費と GHG 排出の削減にも寄与するのかも未解明である。

本研究の目的は、地域経済のサプライチェーンにおける如何なる要因が国内の物質フロー指標改善と GHG 削減に寄与したかを定量化し、さらなる物質利用効率化と GHG 削減の両立に向けた、最も改善すべき要因を行政単位別に特定することである。さらに、国際貿易を通じた国外での物質消費と GHG 排出への影響を算定し、国外に対する貢献量を定量化する。

この目的のため、国内 67 地域と世界 163 地域のサプライチェーンおよび物質利用と GHG 排出に関するビッグデータを統合し、地方行政単位の消費を起点とした国内外の物質利用量と GHG 排出量の算定を遂行するためのデータ創生基盤を構築する。

2. 方法とデータ

2.1 Japan nested-MRIO データベースの構築

シドニー大学が豪州地域のデータ整備に成功した nested multiregional input-output model (nested-MRIO)[7)]の手法と計算システムを日本地域に適用する。具体的には、Japan IELab (Industrial Ecology Virtual Laboratories)[8)]を用いて、日本国内の地方行政単位を各 380 部門で生産活動を定義した MRIO を作成する。さらに、日本を含む世界 164 地域の生産システムと国際貿易を記述した大規模 MRIO である GLORIA と接続することで、Japan nested-MRIO を構築する。接続(nesting)の方法については当日に詳細を報告する。なお、対象とする国内の地方行政単位は政令指定都市（20 都市）とそれ以外の地域を都道府県（47 地域）に集約した 67 地域とする。また、対象年は公表済みの接続産業連関表の最新年と対応する 2015 年、2011 年、2005 年とする。

Japan nested-MRIO の地域・部門と対応した単位生産あたりの直接物質投入量と直接 GHG 排出量のインベントリデータを整備する。国内のインベントリデータについては発表者らの既存研究 [9)]および 3EID [10)]を用いて整備する。国外のインベントリデータは GLORIA データベース [11)]より取得する。

2.2 産業連関モデルによる物質フロー指標の定式化

Japan nested-MRIO によって定義される経済・技術的要因およびインベントリデータを用いて、物質フロー指標（資源生産性: RP、循環利用率 : CU）を次のとおり定式化する。

$$\mathrm{RP}_l = \frac{(\mathbf{v}+\mathbf{i})\mathbf{L}\mathbf{y}_l}{\sum_k\left(\mathbf{R}_k\mathbf{L}\mathbf{y}_l + \mathbf{O}_{k,l}\right)} = \frac{\tilde{\mathbf{v}}\mathbf{L}\mathbf{y}_l}{\sum_k\left(\mathbf{R}_k\mathbf{L}\mathbf{y}_l + \mathbf{O}_{k,l}\right)} \quad (1)$$

$$\mathrm{CU}_l = \frac{\mathbf{U}_s\mathbf{L}\mathbf{y}_l}{\sum_s(\mathbf{U}_s\mathbf{L}\mathbf{y}_l) + \sum_k\left(\mathbf{R}_k\mathbf{L}\mathbf{y}_l + \mathbf{O}_{k,l}\right)} \quad (2)$$

ここで$\mathbf{L}$はレオンチェフ逆行列、$\mathbf{y}_l$は地域 l の最終需要、$\mathbf{v}$は単位生産あたりの付加価値額である。また、$\mathbf{R}_k$、$\mathbf{U}_s$はそれぞれ単位生産あたりの天然資源 k の投入量、循環利用資源 s の投入量を表し、$\mathbf{O}_{k,l}$は天然資源 k の最終需要による直接消費量を表す。
また、単位生産あたりの炭素排出量 $\mathbf{e}$ および最終需要による直接排出$\mathbf{G}_l$を用いて、地域 l のカーボンフットプリント（CF_l）は $\mathrm{CF}_l = \mathbf{e}\mathbf{L}\mathbf{y}_l + \mathbf{G}_l$ と表現できる。

2.3 構造分解分析

構造分解分析[12]により、物質フロー指標および CF の変化は、次のように各変化要因の寄与を分解することができる。

$$\begin{aligned}\Delta\mathrm{RP} &= \Delta\mathrm{RP}_{\tilde{v}} + \Delta\mathrm{RP}_L + \Delta\mathrm{RP}_y + \Delta\mathrm{RP}_R + \Delta\mathrm{RP}_O \\ &= \bar{p}_{\tilde{v}} + \bar{p}_L + \bar{p}_y + \bar{p}_R + \bar{p}_O\end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}\Delta\mathrm{CU} &= \Delta\mathrm{CU}_U + \Delta\mathrm{CU}_L + \Delta\mathrm{CU}_y + \Delta\mathrm{CU}_R \\ &\quad + \Delta\mathrm{CU}_O \\ &= \bar{p}_U + \bar{p}_L + \bar{p}_y + \bar{p}_R + \bar{p}_O\end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}\Delta\mathrm{CF} &= \Delta\mathrm{CF}_e + \Delta\mathrm{CF}_L + \Delta\mathrm{CF}_y + \Delta\mathrm{CF}_G \\ &= \bar{p}_e + \bar{p}_L + \bar{p}_y + \bar{p}_G\end{aligned} \quad (5)$$

本研究では、サプライチェーン構造の変化の寄与$\bar{p}_L$を、GHG プロトコル[13]の分類に従い直接エネルギー消費(Scope 1 and 2)、製品・サービスの生産(Scope 3)の 2 つのサプライチェーン効果に分解し、さらに国内と国外のサプライチェーン効果を分解する。これにより、国内外の如何なるサプライチェーンが物質フロー指標と CF の変化に寄与するかを定量化する。

3. 結果と考察

学会当日に報告する。

4. 引用文献

1) Hertwich et al., Nature Geoscience, 14, (2021), pp 151-155.
2) UNEP-IRP. Resource Efficiency and Climate Change; Nairobi, Kenya, 2020.
3) Watari et al., Environmental Science & Technology, 54(19), (2020), pp 12476-12483.
4) Watari et al., Nature Communications, 13, (2022), 4158.
5) Watari et al., Nature Sustainability, 6, (2023), pp 336-343.
6) Moriguchi et al., Journal of Material Cycles and Waste Management, 9(2), (2007), pp 112-120.
7) Fry et al., Jornal of Industrial Ecology, 26(1), (2022), pp 281-293.
8) Wakiyama et al., Resources, Conservation and Recycling, 154, (2020), 104588
9) Hata et al., Resources, Conservation and Recycling, 186, (2022), 106334.
10) K. Nansai, Embodied energy and emission intensity data for Japan using input-output tables (3EID); 2019.
11) Lenzen et al., Nature Sustainability, 5, (2022), pp 157-166.
12) Hata et al., Environmental Science & Technology, 57, (2023), pp 12713-12721
13) Greenhouse gas protocol, Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard; 2011

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 9:00 ~ 10:20 C会場：2313中講義室（3F）

[2-C1] 地理情報

座長：山末 英嗣 (立命館大学)

9:00 ~ 9:20

[2-C1-01]

ロシア-ウクライナ戦争による人工物と自然環境に対する影響評価

*林 冬喜[1]、Tomer Fishman[2]、劉 致煒[3]、山下 奈穂[3]、白川 博章[3]、谷川 寛樹[3]、佐久間 東陽[4]、劉 潤椏[1]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. ライデン大学、3. 名古屋大学、4. 木更津工業高等専門学校)

9:20 ~ 9:40

[2-C1-02]

衛星画像および深層学習を組み合わせた全球採掘領域モニタリング

*廣田 琳治[1]、佐久間 東陽[1,2]、山野 博哉[2,3]、南齋 規介[2]、中島 謙一[2,3] (1. 木更津工業高等専門学校、2. 国立環境研究所、3. 東京大学)

9:40 ~ 10:00

[2-C1-03]

環境影響評価に向けた深層学習による人工衛星画像からの土地利用情報抽出

*中村 圭吾[1]、長谷川 浩章[1]、内藤 健太[1]、石川 敬郎[1]、高橋 宏昌[1]、簸内 真[1]、渡辺 康一[1] (1. （株）日立製作所)

10:00 ~ 10:20

[2-C1-04]

Land Use Change Classification Induced by Intensified Nickel Mining Activities in Indonesia

*アティカ ラトゥケニ[1]、Zhang Zhengyang[1]、Matsubae Kazuyo[1] (1. Tohoku University)

©日本LCA学会

衛星画像および深層学習を組み合わせた全球採掘領域モニタリング

Monitoring of global mining area using satellite imagery and deep learning

○廣田琳治*[1)]、佐久間東陽[1,2)]、山野博哉[2,3)]、南齋規介[2)]、中島謙一[2,3)]
Rinji Hirota, Asahi Sakuma, Yamano Hiroya, Nansai Keisuke, Nakajima Kenichi
1) 木更津工業高等専門学校, 2) 国立環境研究所,3) 東京大学
* scc24c07@inc.kisarazu.ac.jp

1. はじめに

経済成長に伴う鉱物資源需要の増加は、今後も継続すると予測される。一方で、鉱物資源の生産および消費は、気候変動、生物多様性の損失、環境汚染等の環境問題を引き起こす[1)]。このため、これらの問題は、UNEP より提唱される「The Triple Planetary Crisis」と密接に関連しており、地球の将来を左右する重要な要素である。このような背景のもと、近年では経済成長を資源消費から切り離し、資源を循環的に活用する Circular Economy (CE) への移行が国際的に進められている[2)]。この目標の達成には鉱物資源サプライチェーン全体にわたる環境影響評価が不可欠である[1)]。

鉱物資源採掘段階における環境影響は、単位鉱物資源産出量あたりの採掘面積で表される土地改変強度に基づいて評価される[3,4)]。一般的に採掘面積の推定は 2 時期の衛星画像を用いた目視判読によって行われるが[5)]、この方法は高精度である一方、多大な労力を要する。

このため、画像解析技術を適用した自動的な採掘領域推定法の開発が進められている。しかしながら、既往研究では適用に鉱物種や土地被覆帯による制約を抱えており[4,6)]、全球規模での採掘領域推定法の開発には未だ至っていない。

以上の背景を踏まえ、本研究では、全球規模での採掘領域推定手法の開発に向けた第一段階として、衛星画像と深層学習技術を組み合わせることで、全球採掘領域推定における課題を明らかにすることを目的とする。本研究で得られた知見は、鉱物資源採掘段階における環境影響評価の高度化に寄与するとともに、CE の実現に貢献するものである。

2. 方法

2.1 対象領域

Tang et al.(2023)[5)]が整備した全球採掘領域ポリゴン(73943 ポリゴン)を対象領域として選定した。その後、10 km 以内に隣接するポリゴンを同士を同一サイトとみなして、全 4927 サイトに集約した。また、全球土地被覆図(Copernicus Global Land Cover Layers)を用いて、すべてのサイトを 5 つの土地被覆帯(Forest, Grass land, Agricultural land, Urban, Bare)に分類した。

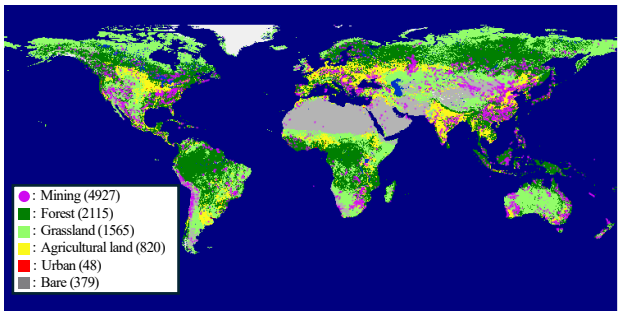


図 1 対象領域と土地被覆毎のサイト数

表 1 使用衛星画像

Date of observation	Satelliete	Sensor	Resolution(m)	Spectal Band
2000/01/01~2000/12/31	Landsat-5	TM	30	B1-B5,B7,QA_PIXEL
2000/01/01~2000/12/31	Landsat-7	ETM+	30	B1-B5,B7,QA_PIXEL
2021/01/01~2021/12/31	Landsat-8	OLI/TIRS	30	B2-B7,QA_PIXEL

2.2 Landsat 衛星画像および採掘領域ポリゴンの整備

2000 年時の採掘領域ポリゴンを土地被覆帯毎に 30 サイトずつ作成した(Urban では 10 サイト分作成した)。また、サイト毎に Landsat 衛星画像を四方に 19.2 km（1280 × 1280 pix）を取得領域として取得した(表 1)。

2.3 前処理

QA-PIXEL に格納された CF-Mask アルゴリズムの値を用いて Landsat 衛星画像の雲画素にマスク処理を施した。次に、雲マスク後の画像からサイトごとに年間最小値合成画像を作成し、それを 50 %オーバーラップをもたせて 640 × 640 pix に切り出した。

2.4 モデル構築

2021 年における Landsat-8 衛星画像および採掘領域ポリゴンを教師データとして、採掘領域推定モデルを画像セグメンテーションアルゴリズムである U-Net を用いて構築した。

2.5 精度検証

2000 年における Landsat-5、Landsat-7 衛星画像および採掘領域ポリゴンを検証データとして、モデルの採掘領域推定性能の評価を行った。この時、推定性能の評価には Precision, Recall, F1-score, False Negative を用いた。また、評価指標はピクセル単位で計算した。

表 2 衛星画像および土地被覆毎の領域推定性能比較

Satellite	Landcover	F1-score	Precision	Recall	Satellite	Landcover	F1-score	Precision	Recall
Landsat-5	Overall	0.265	0.712	0.163	Landsat-7	Overall	0.227	0.781	0.132
	Forest	**0.457**	0.771	**0.325**		**Forest**	**0.460**	0.830	**0.318**
	Grass land	0.336	**0.826**	0.211		Grass land	0.243	0.818	0.142
	Agricultural land	0.400	0.729	0.275		Agricultural land	0.344	**0.831**	0.217
	Urban	0.134	0.382	0.080		Urban	0.098	0.378	0.056
	Bare	0.113	0.506	0.064		Bare	0.123	0.679	0.068

3. 結果と考察

モデルの推定性能評価結果を表 2、採掘領域推定の例を図 2 に示す。表 2 から、モデルは既往の植生域での採掘領域分類性能[4]（F-score＝0.8）と比較して大きく劣っていた。また、評価指標の分析および結果の可視化より、モデルは採掘領域を過小評価する傾向（Precision＞Recall）が示唆された（表 2、図 2）。そこで、モデルが採掘領域を非採掘領域と誤分類した割合である False Negative Rate（FNR）を採掘領域の規模ごとに算出したところ(図 3)、小規模（1000 pix 以下）の採掘領域で FNR が上昇することが示された。小規模領域における性能低下ついては、画像の分解能や切り取り幅の影響が考えられる。例えば画像幅の縮小は、小規模オブジェクトの推定性能の向上に貢献できる。しかしながら、大規模なオブジェクトの推定性能の低下を招く恐れがある。ここで、一般的に鉱物資源採掘による環境影響を考える上では、大規模採掘領域での推定性能が重要である。したがって、スケール間の異なるオブジェクトの推定に優れるモデルの開発が採掘領域推定において非常に重要であると考えられる。

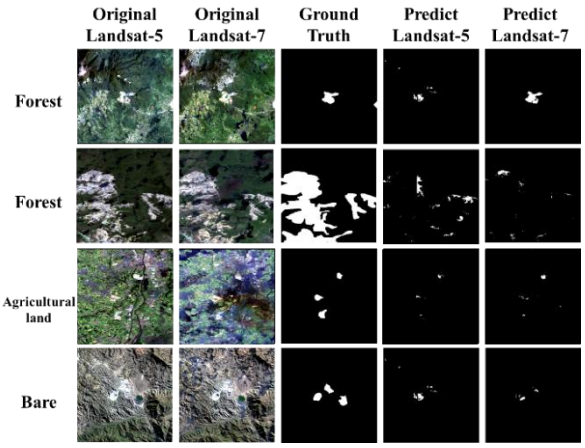


図 2 Landsat-5,7 における採掘領域推定結果

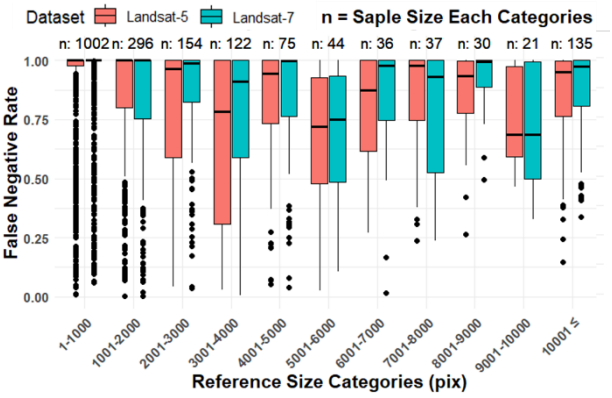


図 3 採掘領域の規模毎の採掘領域推定結果

4. まとめ

本研究では、衛星画像と深層学習を組み合わせ、全球規模の採掘領域推定への適用可能性を検討した。その結果、推定性能は実用段階には至らなかったものの、全球規模での採掘領域推定での課題を確認することができた。今後は、採掘領域の規模によらず領域推定を可能にする方法に着目して研究を進めていく。

5. 引用文献

1) Takuma W et al.: Resources, Conservation and Recycling, Vol.164, (2021), 105107
2) Gustavo M et al.: Resources, Conservation and Recycling, Volume 146, (2019), pp. 452-461
3) Yasunori I et al.: Resources, Conservation and Recycling, Vol.134, (2018), pp. 361-366
4) 佐久間東陽:“農業・鉱業による環境影響の評価および対策に向けた土地利用時空間変化の衛星リモートセンシングに関する研究”, (2021)
5) Tang, L., Werner, T. T.: Communications Earth & Environment, **4** (1), (2023), pp. 134
6) 廣田琳治他.:リモートセンング学会第 76 回学術講演会論文集, (2024),pp. 125-126

環境影響評価に向けた深層学習による人工衛星画像からの土地利用情報抽出

Extraction of Land Use Information from Satellite Images Using Deep Learning for Environmental Impact Assessment

○*中村 圭吾*[1)]、長谷川 浩章[1)]、内藤 健太[1)]、石川 敬郎[1)]、高橋 宏昌[1)]、籔内 真[1)]、渡辺 康一[1)]
Keigo Nakamaura, Hiroaki Hasegawa, Kenta Naito, Takao Ishikawa, Hiromasa Takahashi, Shin Yabuuchi, Koichi Watanabe
1) (株)日立製作所
* keigo.nakamura.xk@hitachi.com

1. はじめに

人類の経済活動の拡大は、気候変動や環境汚染を引き起こし、生物多様性の喪失の一因となっている。Johan Rockström らが提唱した地球の持続可能性を評価する「プラネタリーバウンダリー」に関しては、9 項目中 4 項目が限界を超えている[1,2]。特に、窒素とリンの負荷量は、限界量に対しそれぞれ 3.3 倍および 2 倍にあたると試算されている。このような状況の中、企業は環境保全に取り組む際、TNFD(自然関連財務情報開示 タスクフォース)などの情報開示枠組みを通じて、企業の環境負荷を公表することが社会的責任として重要視され始めている。また、ESG(Environmental, Social and Governance)投資の拡大に伴い、企業の環境負荷改善計画の策定がより重要となる。そのため、生物多様性に関連する指標の計測と評価、さらにその低減・保全計画の策定が求められ始めている。

企業や個人社会活動による水域を通じた排出物質の拡散は環境や生物多様性に与える影響評価の指標の一つであることが知られている[3)]。我々は、水域を通じた窒素・リンの拡散に着目し、図 1 に示す窒素・リンの拡散の影響を評価する「陸上水域シミュレータ」を開発している[4)]。陸上水域シミュレータでは、選択した地域における地形、土壌分類、土地利用、人口分布などの入力データを自動で収集し、収集されたデータをもとに水文シミュレータの一つである SWAT+を用いて窒素・リンの物質拡散を推算し、その計算結果をブラウザ上で可視化・表示することができる。

陸上水域シミュレータで用いる入力データの一つである土地利用データの更新頻度は 3〜4 年に一度であり、数か月単位で変化する土地利用をとらえるには、時間分解能が不足しているという課題がある。このため、著者らはデータ更新頻度が高い人工衛星画像を用いて土地利用を予測し、陸上水域シミュレータの精度向上を検討している。本報告では人工衛星画像から土地利用情報を取得するための深層学習モデルの開発について報告する。

2. 研究方法

本研究では、深層学習による人工衛星画像のセマンティックセグメンテーションを用いて、陸上水域シミュレータの入力データとして利用する 7 つのカテゴリ（田、畑、森林、荒地、建物用地、水域、草原）の土地利用予測を行った。深層学習の教師データは、JAXA が公開する高解像度土地利用土地被覆図[5)]から取得した土地利用情報と、Copernicus Data Space Ecosystem[6)]から取得した Sentinel-2 衛星の光学センサによる人工衛星画像から作成した。教師データの人工衛星画像には、6 チャンネルで構成されるマルチチャンネル画像を利用し、各チャンネルには可視光領域の波長バンドである B2、B3、B4 と赤外光領域の B8、B11、B12 をそれぞれ割り当てた。人工衛星画像と土地利用情報のデー

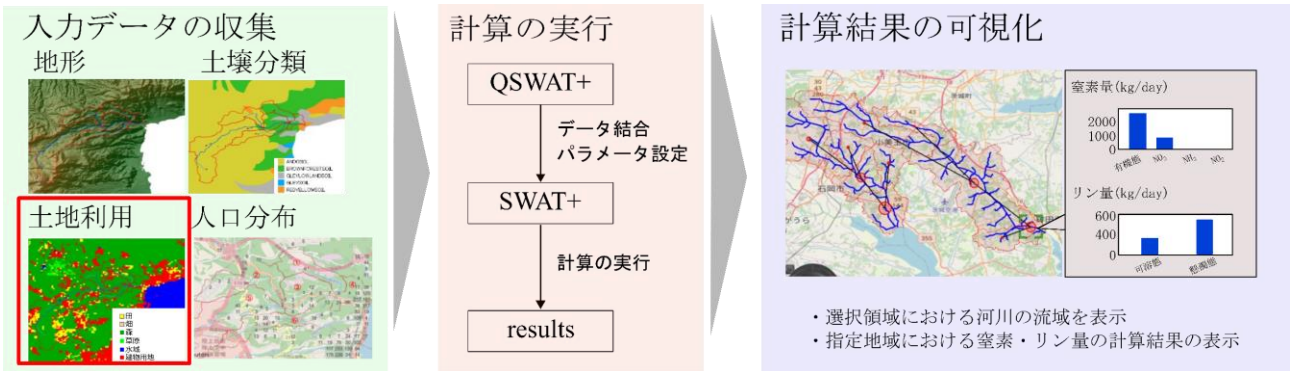


図 1 水域を通じた窒素およびリンの拡散を推算する陸上水域シミュレータの概要図

タセットは、人工衛星画像を 224 pix × 224 pix（1 pix は 10 m × 10 m 相当）に切り取り、対応する領域の土地利用情報を取得して解像度を 224 pix × 224 pix に変換して揃えることで作成した。作成した全教師データを階層型クラスタリングを用いてデータ中の各カテゴリの割合によって分類し、各クラスタのデータ数を均一化することでデータセット全体の偏りを軽減した。

本研究では、複数の深層学習アーキテクチャ（FCN、FPN、PSPNet、DeepLabV3+、ViT）を用いたセマンティックセグメンテーションの学習を行い、それぞれの予測性能を比較した。学習時の損失関数には交差エントロピー損失を利用した。交差エントロピー損失のハイパーパラメータである重みについては、ベイズ最適化を用いたパラメータ探索を行った。評価関数として、mIoU（mean Intersection over Union; 全分類カテゴリにおける予測領域と正解領域の重なりの割合を示す評価指標の平均値）と mAcc（mean accuracy; 平均予測精度）を使用し、各アーキテクチャの予測精度を評価した。

3. 結果と考察

深層学習による人工衛星画像からの土地利用予測に関する学習結果と実際の予測例を示す。

表 1 には、FCN を用いた場合の学習結果を示す。教師データの偏り軽減前のデータセットを用いた学習結果では、森林の過学習が進み、mIoU は 0.046 と低かった。しかし、データセットの偏り軽減により過学習が解消され、mIoU は 0.300 に向上した。さらに、損失関数のハイパーパラメータ探索によって全カテゴリの IoU が向上し、mIoU は 0.562 まで改善した。

探索された損失関数のハイパーパラメータを用いて、各アーキテクチャについて学習を行った結果、FCN、FPN、PSPNet、DeepLabV3+、および ViT における mIoU はそれぞれ 0.562、0.497、0.533、0.553、0.520 となった。これにより、すべてのアーキテクチャが比較的高い精度で予測できることが確認された。しかし、どのアーキテクチャにおいても荒地の予測精度は IoU が約 0.20 と低かった。これは、荒地を含む教師データが不足していることが原因であると考えられる。

表 1 FCN を用いた深層学習における(a)教師データの偏り軽減前、(b)教師データの偏り軽減後、および(c)損失関数のハイパーパラメータ探索後の学習結果

		(a)	(b)	(c)
IoU	paddy field	0.000	0.000	0.608
	field	0.000	0.000	0.300
	forest	0.364	0.763	0.872
	wilderness	0.000	0.000	0.232
	building site	0.000	0.406	0.656
	body of water	0.000	0.932	0.944
	grassland	0.000	0.000	0.322
mIoU		0.046	0.300	0.562
mAcc		0.125	0.379	0.715

図 2 に人工衛星画像と予測土地利用図の例を示す。2017 年から 2023 年の間に建設された太陽光発電パネルは、土地利用予測図において森林から建物用地への変化として観測されている。また、土地利用割合においても建物用地が 1%から 9%へと増加しており、土地利用割合の変化を数値的に確認できた。

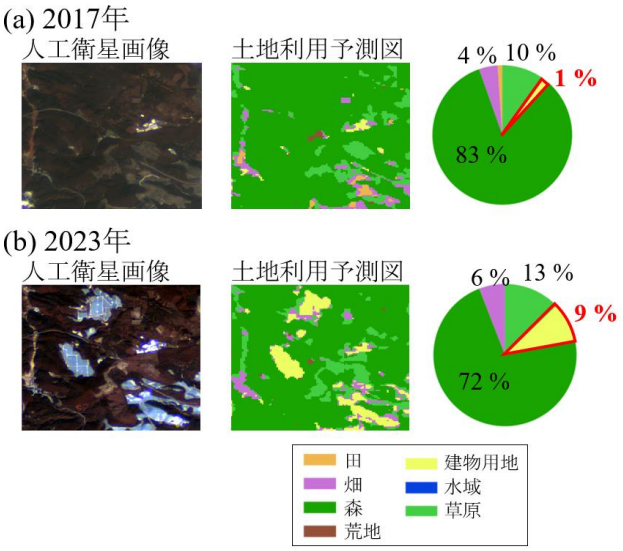


図 2 大分県豊岡付近の(a) 2017 年 (b) 2023 年の人工衛星画像、FCN モデルによる土地利用予測、および土地利用割合

4. まとめ

本報告では、陸上水域シミュレータにおける入力データの時間分解能を向上させるため、深層学習を用いた人工衛星画像からの土地利用予測を検討した。深層学習においては、教師データセットの偏り軽減と損失関数のハイパーパラメータ探索を行い、予測精度の向上を確認した。また、実際の予測結果から森林開発による土地利用の変化を捉えられることも確認した。

今後は、土地利用予測と陸上水域シミュレータを連動させ、特定地域における開発などによる土地利用の変化が水域を通じて環境に与える影響を評価していく。

5. 参考文献

1) J. Rockström and et al.: Ecol. Soc., 14 (2), (2009), p. 32
2) W. Steffen and et al.: Science, 347, (2015), p. 1259855
3) G. Maïté and et al.: Front. Ecol. Evol., 5, (2017), pp 1-9
4) 長谷川浩章ほか：”第３３回地理情報システム学会学術研究発表大会”，京都, (2024), D5-02, pp. 447-450
5) JAXA：“高解像度土地利用土地被覆図ホームページ”，地球観測衛星データサイト，https://earth.jaxa.jp/ja/data/2562/index.html
6) ESA, Copernicus data space ecosystem, https://dataspace.copernicus.eu/

Land Use Change Classification Induced by Intensified Nickel Mining Activities in Indonesia

Ratu Keni Atika*[1)], Zhengyang Zhang[1)], Kazuyo Matsubae[1)]
1) Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University
*ratu.keni.atika.r6@dc.tohoku.ac.jp

1. Introduction

The adverse effects of climate change require progressive actions, which have driven global energy transitions to adopt renewable energy and clean technology. This shift has increased the mineral demand for raw materials to sustain clean technology.

Nickel, a crucial mineral in the energy transition, has seen its demand surge threefold between 2017 and 2022.[1)]. Meanwhile, the nickel ore quality is experiencing declining trend, suggesting the necessity of larger mining area that could potentially intensify the environmental impact[2)].

Land use serves as a key metric to evaluate the severity of environmental impact, as measuring land alteration per unit of production can evaluate the sustainability of an intensified production system[3)]. Mining involves not only the extraction process, but also different activities such as the refinery process, waste management, as well as daily employee activities. Classifying such activities help to assess the impact of different mining activities and its rehabilitation planning [4)].

While global transformation land use intensity factors exist, this value is lacking in accuracy due to the site-specific nature of mining activities. This study evaluates the land use intensity of nickel mining activities in Indonesia, which supplied 50% of the global nickel demand in 2023[5)].

2. Materials and Methods

2.1 Study Area

Tabel 1 Company information summary

Company	Operation Start Year	Refinery type	Period of evaluation
A	1979	Pyrometallurgy	2014-2023
B	1978	Pyrometallurgy	2014-2023
C	2019	Pyrometallurgy & Hydrometallurgy	2019-2023
D	2013	Pyrometallurgy & Hydrometallurgy	2019-2023

Four nickel mining companies in Indonesia were evaluated and they are integrated with refinery plant(s). Two companies are one of oldest nickel mining sites that have been operating in Indonesia since 1970s, and they integrated with pyrometallurgical plant. Meanwhile, the other two companies are newer mining sites that started their operation in 2010s and are integrated with both pyrometallurgical and hydrometallurgical plants.

These mining companies are affiliated with listed companies which disclosed publicly their nickel production and other information that is necessary for this study. Period of study and summary information of each company is presented in Table 1.

2.2 Land Use Classification

Nickel mining concession area was obtained from the Ministry of Energy and Mineral Resources of Indonesia as the boundary area. Further, these concession area is classified through obtaining the latest image publicly available such as company report and user tagged information available in Google maps. Description of each area classification is defined in Table 2.

Tabel 2 Classification area definition

Classification Area	Definition
Mining Area	Area with open pit
Waste Area	Including area for slag, wastewater, and sedimentation pond for drainage.
Factory & Offices	Including area for refinery plant(s), offices, and parking area for office area
Housing & Others	Including employee houses, dorms, and recreational facilities such as sport fields.

After defining each classification area, empirical visual image is firstly reviewed to identify dynamic change because of rehabilitation activity or construction activitiy. Area with minimal dynamic change was digitized with vectors utilising QGIS 38.2, while area with significant changes were classified using a thresholding method based on Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and supervised machine learning algorithm method in Google Earth Engine to distinguished between vegetated and non-vegetated areas. See Figure S1 in supporting information for further detail in methodology workflow.

2.3 Land Use Intensity

Land use intensity is calculated as the total altered area substracted with rehabilitated area divided by the total ore production[6)], and expressed as follow:

$$Land\ Use\ Intensity = \frac{\sum A - \sum R}{P}$$

Where ∑A is the total altered area, ∑R is the total rehabilitated area, and P is the nickel ore production. Rehabilitated area is defined as the post mining area converted to green space, built environment, or infrastructure.

3. Results & Discussion

3.1 Proportion of Utilised Area

Older mining companies (Company A and B) have much higher proportion of mining area which accounts more than 70% of the total area. Meanwhile, newer mine sites that has just started their operation (Company C and D) have lower portion of mining area. Figure 1 showed the utilised area of each class in 2023.

Portion of factory and office area for Company C & D which have both pyrometallurgy and hydrometallurgy in their refinery process have higher portion of land use compare to Company A & B who only have pyrometallurgy process. Hydrometallurgy process in nickel mining adopt High Pressure Acid Leaching Process (HPAL) which require larger land area for its process[7].

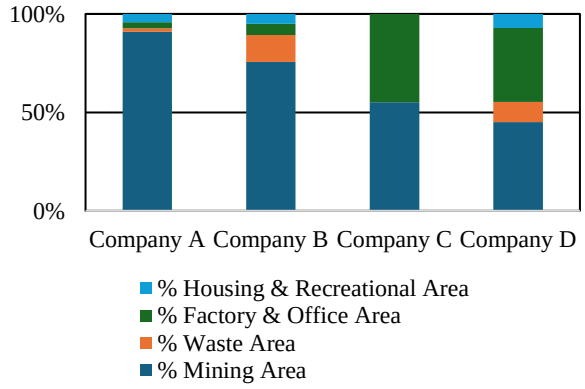


Figure 1 Utilised area portion in 2023

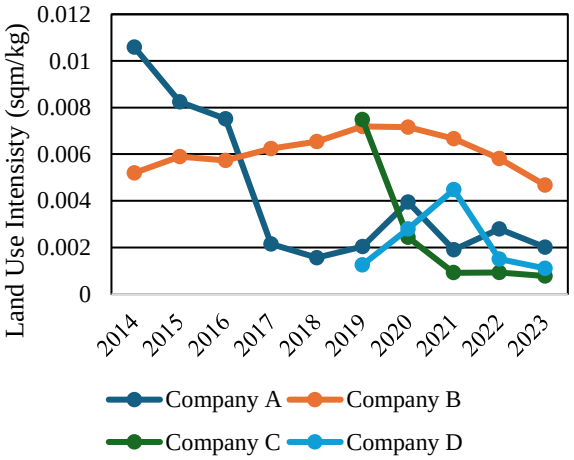
Mining companies in Indonesia is expected to adopt HPAL in the near future as this process can produce high-quality nickel ore which is one of the necessary raw material for battery[8]. More adoption of HPAL could lead to higher land use for nickel mining activities in Indonesia.

3.2 Land Use Intensity

In year 2023, the land use intensity (in sqm/kg-Ni Ore) of the older mining companies, A & B, are higher compare to newer mining companies. This signifies nickel ore quality is lower in the older mining sites.

Rehabilitation effort is affecting the land use intensity as shown in Company B which has its highest recording production in 2023, but managed to keep the land use intensity similar to 2014 (see Supplementary Information 1 & 2 for nickel production and annual rehabilitated area).

In 2019, during Company C's start of operation, the land use intensity was high because the nickel production was still low and infrastructure is still in construction. The land use intensity were getting lower in the later year when facilities are established and production tonnage started to increase. Investigating more companies will be included in the future for further comprehensive analysis.



4. Conclusion

Nickel laterite refinery process with HPAL that produce high quality nickel require larger land area compare to pyrometallurgy process; and increasing demand of high quality nickel is suggesting more HPAL plant in Indonesia will be adapted in the future. Older nickel mining sites have higher land use intensity signifying these sites have lower ore quality, and causing more land is needed to mine. Progressive rehabilitation effort could lower the land use intensity of nickel mining. Additional company information will be collected in the future for a more comprehensive analysis

5. References

1) IEA, Critical Minerals Market Review 2023, 2023.
2) Mudd G. M., Jowitt S. M., *Economic Geology*, **117**, 1961–1983 (2022).
3) Kuemmerle T., Erb K., Meyfroidt P., Müller D., Verburg P. H., Estel S., Haberl H., Hostert P., Jepsen M. R., Kastner T., Levers C., Lindner M., Plutzar C., Verkerk P. J., van der Zanden E. H., Reenberg A., *Curr Opin Environ Sustain*, **5**, 484–493 (2013).
4) Iwatsuki Y., Nakajima K., Yamano H., Otsuki A., Murakami S., *Resour Conserv Recycl*, **134**, 361–366 (2018).
5) US Geological Survey, Nickel Statistics and Information, 2024.
6) Heijlen W., Duhayon C., *Extr Ind Soc*, **17**, 101421 (2024).
7) IEA, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, Paris, 2021.
8) Wood Mackenzie, The rise and rise of Indonesian HPAL – can it continue?, 2023.

Supporting Information

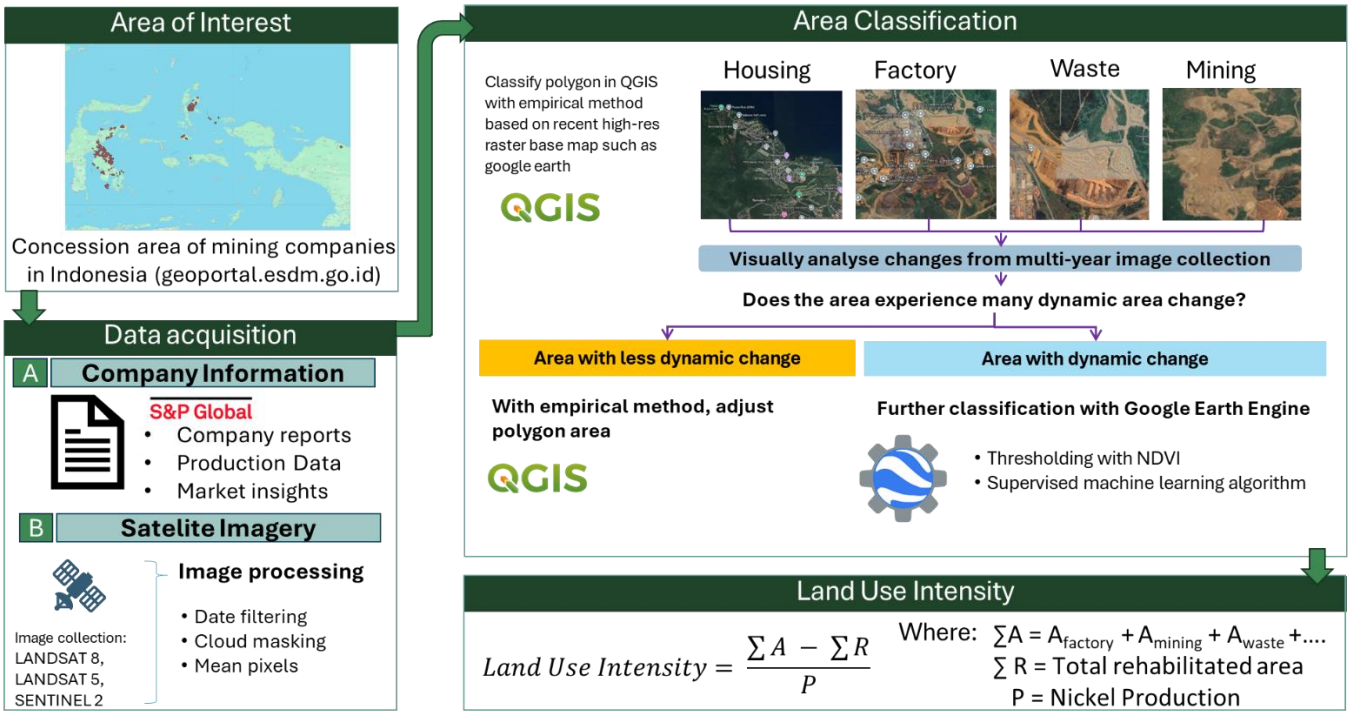


Figure S 1 Methodology Workflow

Table S 1 Nickel Ore Production in Wet Million Ton

Year	Company A	Company B	Company C	Company D
2014	1.3	4.4	n/a	n/a
2015	1.7	4.7	n/a	n/a
2016	1.6	4.7	n/a	n/a
2017	5.6	4.6	n/a	n/a
2018	9.3	4.5	n/a	n/a
2019	8.7	4.3	0.5	7.8
2020	4.8	4.2	3.4	4.8
2021	11.0	4.1	14.0	3.2
2022	8.6	4.6	21.1	10.7
2023	13.5	5.8	36.3	20.8

Table S 2 Annual Rehabilitated Area

Year	Company A	Company B	Company C	Company D
2014	112.8	140.3	n/a	n/a
2015	95.4	82.5	n/a	n/a
2016	201.1	278.3	n/a	n/a
2017	171.7	265.9	n/a	n/a
2018	40.3	206.7	n/a	n/a
2019	69.8	177.4	3.6	46.9
2020	140.1	308.0	3.0	77.9
2021	118.6	429.0	2.4	57.0
2022	89.1	360.6	6.3	53.4
2023	83.6	310.0	0.0	20.8

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 10:40 ~ 12:00 C会場：2313中講義室（3F）

[2-C2] 食品産業

座長：松嶋 そら (九州大学)

10:40 ~ 11:00

[2-C2-01]

食品ロス削減のための技術や取組を対象としたLCA：自動発注システムとフードボックスを例に

*八幡 智也[1]、岡本 数彦[2]、西山 明人[3]、沖杉 大地[4]、大久保 寛基[1]、伊坪 徳宏[5] (1. 東京都市大学、2. 株式会社シノプス、3. 株式会社ウェザーニューズ、4. ZERO株式会社、5. 早稲田大学)

11:00 ~ 11:20

[2-C2-02]

持続可能な酒蔵運営に向けた環境・経済・社会的影響分析

*森 涼太[1]、前迫 晃一[2]、徐 維那[1] (1. 東京理科大学、2. 石川酒造株式会社)

11:20 ~ 11:40

[2-C2-03]

植物油製造プロセスへの資源活用技術導入に向けたライフサイクル評価

*渡邉 有希人[1]、兼松 祐一郎[1]、Teah Heng Yi[1]、廣森 浩祐[2]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学、2. 東北大学)

11:40 ~ 12:00

[2-C2-04]

データ包絡分析を用いた日本のエコフィード工場における生産効率性分析

*都留 惇嗣[1]、牛島 大悟[1]、中石 知晃[2]、加河 茂美[2] (1. 九州大学　経済学府、2. 九州大学　経済学研究院)

©日本LCA学会

食品ロス削減のための技術や取組を対象としたLCA：自動発注システムとフードボックスを例に

LCA Targeting Technologies and Initiatives for Food Loss Reduction: A Case Study of Automatic Ordering Systems and Food Boxes

○八幡智也*[1)]、岡本数彦[2)]、西山明人[3)]、沖杉大地[4)]、大久保寛基[1)]、伊坪 徳宏[5)]
Tomoya Hachiman, Kazuhiko Okamoto, Akihito Nishiyama, Daichi Okisugi, Hiroki Okubo, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学, 2) 株式会社シノプス, 3) 株式会社ウェザーニューズ, 4) ZERO 株式会社, 5)早稲田大学
*g2383011@tcu.ac.jp

1. 序論

近年、食品ロスに対する関心が高まり、様々な対策が講じられている。令和6年度に環境省が発表した食品ロス発生量の推計によると、2022年の食品ロス発生量は472万トンとなり過去最低値となった。特に、事業系食品ロスは43万トン削減されており、企業や自治体による食品ロス削減に向けた技術や取り組みが年々向上していることが寄与していると考えられる。

2. 研究目的

本研究では食品ロスの発生抑制に焦点を当て、企業による食品ロス対策の取り組みを2つの事例を用いて環境負荷を定量化し、その寄与度を評価する。

3. 研究方法

環境負荷の算定は、インベントリ分析の式を以下の通りとした。(式1)

$$LCIA = \Sigma(\text{活動量} \times \text{原単位}) \cdots (式1)$$

3.1 研究方法_自動発注システム

機能単位はスーパーにおける1年間の廃棄とした。活動量には、株式会社東急ストアの店舗で発生する食品の廃棄金額を使用する。原単位は、IDEA ver3.4.1を用いた。データの対象期間は2017年3月から2023年6月までとして、システム導入時期は2019年3月に一律で設定している。

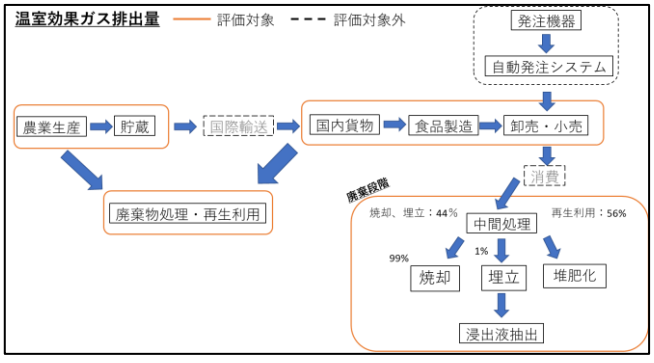


図1　自動発注システムのシステム境界図

3.2 研究方法_フードボックス

フードロス削減Box「ZERO」を対象に、機能単位は、フードボックスによって回避された1ヶ月当たりの食品ロスと設定した。活動量には、取り扱う食品の重量を用い、原単位には、IDEA ver3.4.1内の各原単位を乗じて環境負荷の算出を行った。データの対象期間は、2024年6月度の58Box分の販売実績を用いた。以下にフードボックスのシステム境界図を示す。

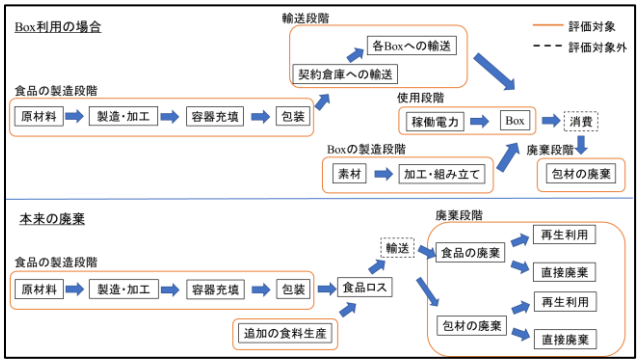


図2　フードボックスのシステム境界図

3.3 リバウンド効果

本研究では、環境負荷の定量化に加え、食品ロス対策によって生じるリバウンド効果についても検討を行った。リバウンド効果の算定式はTamarら（2022）の研究を参考に作成したもので、追加的に生じる環境負荷を環境負荷低減効果で除し、百分率で表すことで評価を行った。さらに、アンケート調査を基に5つのシナリオを設定し、それぞれのリバウンド効果を分析した。

$$\%ERE = \left(\frac{AEI}{|PEB|}\right) \times 100 \cdots (式2)$$

$\%ERE$: *Environmental Rebound Effect (Percentage)*
AEI: *Added Environmental Impacts*
PEB: *Potential Environmental Benefits*

4.1 算定結果_自動発注システム

食品ロスの生産から廃棄に係るまでのGHG排出量

を含めた結果を示す。結果として、1 店舗平均の正味排出量は 2017 年の 19.1 t-CO_2eq から導入後の 2022 年には 13.6 t-CO_2eq へと約 29 %削減されており、1 店舗当たり 5.5 t-CO_2eq の削減寄与となる。特に生産段階の負荷が大きく、食品そのものの排出を防ぐことが有効である。

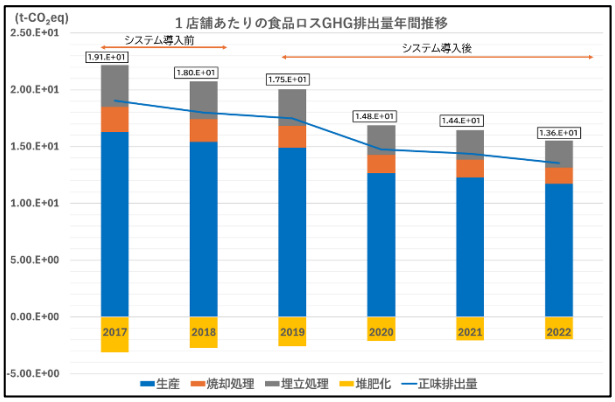


図 3　1 店舗当たりの食品ロス GHG 排出量年間推移

4.2 算定結果_フードボックス

本分析では、Box 利用と本来の廃棄における環境負荷を比較し、それぞれの影響要因を明らかにした。Box 利用では、食品 1 つ分の生産から包装までの負荷、工場から契約倉庫を経由した各 Box への輸送、Box の稼働に必要な電力使用による負荷、Box 自体の製造負荷（月割り）、および包材の廃棄段階での負荷が考慮されている。一方、本来の廃棄では、食品の生産から包装、廃棄段階に至る負荷に加え、追加生産される食品の負荷が含まれている。分析の結果、Box 利用による環境負荷は 1 か月あたり 2.79.E+03 kg-CO_2eq であり、本来の廃棄の 3.50.E+03 kg-CO_2eq と比較して、7.11.E+02 kg-CO_2eq の削減効果が得られた。

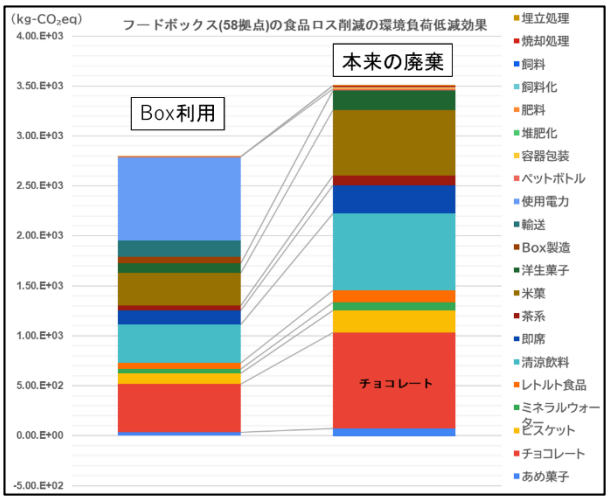


図 4　フードボックス(58 拠点)の食品ロス削減の環境負荷定量化結果

4.3 リバウンド効果

システム導入による値引き節約額および Box 利用による節約額の再消費に伴うリバウンド効果を、5 つのシナリオに基づいて推計した結果、システム導入ではリバウンド効果が-42%～185%、Box 利用では-13%～151%と、それぞれ幅広い値を示したことが明らかとなった。これにより、節約額の再消費先によっては環境負荷が低減するだけでなく、逆に増加する可能性があることが示され、再支出の消費先が環境負荷において重要な役割を果たすことが分かった。

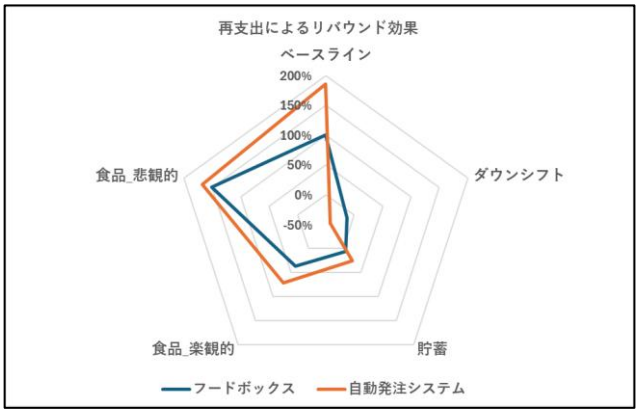


図 5　再支出によるリバウンド効果

5.まとめ

本研究では、2 つの食品ロス削減に向けた技術や取り組みを対象として評価を実施したところ以下のようなことが分かった。

・自動発注システムでは、1 店舗あたり年間 5.5 t-CO_2eq、フードボックスでは全体で 1 ヶ月当たり 7.11.E+02 kg-CO_2eq の環境負荷低減効果

・リバウンド効果を考慮すると、-42%から 185%までの幅広い値を示し、技術そのものの導入効果だけでなく、消費者行動の変化に注目することが極めて重要であることが明らかとなった

6. 今後の展望

今後は、アンケート調査の範囲を拡大し、年齢や性別といった要因を考慮し、より実態に即した調査を実施する。また、環境面に加え、経済面での多角的な評価を行うことで、包括的な分析を目指す。

引用文献

1) 環境省, 我が国の食品ロスの発生量の推計値（令和 4 年度）の公表について, 2024
2) Tamar Meshulam, Sharing economy rebound: The case of peer-to-peer sharing of food waste, Journal of Industrial Ecology Volume 27, Issue 3 p. 882-895, 2023

S1　自動発注システムの再支出シナリオ

(1)ベースラインシナリオ

節約された金額がアンケート調査結果に基づき、再消費される場合を想定する。（追加の食料は、システム対象 14 品目に分配するものとする）

(2)ダウンシフトシナリオ

節約された収入が労働時間の削減を目的として使用され、その結果として削減される労働に伴う環境負荷を差し引いて計上する場合を想定する。

(3)貯蓄シナリオ

節約された金額の 50%を貯蓄に回し、残りの 50%をアンケート調査で得られた結果に基づく追加の食料購入を除いたその他の支出に再消費する場合を想定する。

(4)食品への 50%再消費_楽観的シナリオ

節約された金額の半分を環境負荷の低いシステム対象品目（サラダやパン類など）の食品購入に充て、残りの半分を食品以外の支出パターンに基づき再消費する場合を想定する。

(5) 食品への 50%再消費_悲観的シナリオ

節約された金額の半分を環境負荷の高いシステム対象品目（惣菜類や鶏卵など）の食品購入に充て、残りの半分を食品以外の支出パターンに基づき再消費する場合を想定する。

S2　フードボックスの再支出シナリオ

(1)ベースラインシナリオ

節約された金額がアンケート調査結果に基づき、再消費される場合を想定する。（追加のお菓子は Box が取り扱う 10 品目に分配、その他は貯蓄と分類する）

(2)ダウンシフトシナリオ

節約された収入が労働時間の削減を目的として使用され、その結果として削減される労働に伴う環境負荷を差し引いて計上する場合を想定する。Box の利用者層において、節約された時間が余暇活動に使われるケースを考慮する。

(3)貯蓄シナリオ

節約された金額の 50%を貯蓄に回し、残りの 50%をアンケート調査で得られた結果に基づく追加の食料購入を除いたその他の支出（生活用品や嗜好品など）に再消費する場合を想定する。

(4)食品への 50%再消費_楽観的シナリオ

節約された金額の半分を環境負荷の低い Box 対象品目（ビスケットなど）の食品購入に充て、残りの半分を食品以外の支出パターンに基づき再消費する場合を想定する。

(5)食品への 50%再消費_悲観的シナリオ

節約された金額の半分を環境負荷の高い Box 対象品目（飲料など）の食品購入に充て、残りの半分を食品以外の支出パターンに基づき再消費する場合を想定する。

持続可能な酒蔵運営に向けた環境・経済・社会的影響分析

○森　涼太*[1)]、前迫 晃一[2)]、徐　維那[1)]
Ryota Mori, Yuna Seo
1) 東京理科大学 創域理工学研究科 経営システム工学専攻, 2) 石川酒造株式会社
*7423528@ed.tus.ac.jp

1. はじめに

日本の酒蔵は、日本酒製造の重要な役割を担うと同時に、日本文化を象徴する伝統的産業として高い文化的価値を持つ。近年では地域密着型の事業運営や観光資源化、さらには大規模産業化を進める酒蔵も見られるなど、業態が多様化している。一方、日本酒製造における持続可能性に関する評価は十分に進んでおらず、特にライフサイクル全体を通じた環境、経済、社会的な影響の包括的評価は未だ限定的である。しかし、酒蔵を効率的に運営し、多様化する国内外の競争環境に適応するためには、持続可能性を考慮した包括的な評価が不可欠である。

そこで、本研究では日本酒蔵の持続可能な発展のため、環境・コスト・社会的側面を統合的に評価することを目的とする。また本研究は、酒蔵業界全体の持続可能性評価の基盤となることを目指す。

2. 研究手法

2.1 研究対象

本研究では日本酒業界全体における持続可能性評価の拡大を目指すにあたり、ケーススタディとして東京都福生市に位置する石川酒造を研究対象に選択した。石川酒造は伝統的な酒蔵の一つであり、その歴史は160 年以上にわたる(図 1)。



図 1. 石川酒造における酒造り風景の一部

2.2 システム境界と機能単位

本研究でシステム境界は、原料調達から清酒製造、出荷前までに設定された(SI1)。これは玄米生産、輸送、搗精、精米、浸漬、蒸し、酒母造り、主発酵、濾過圧搾、検定、殺菌、冷却貯蔵と瓶詰めを含む。また、機能単位は日本酒 1L とした。

2.3 環境影響評価

日本酒製造プロセスにおける環境評価のため、Life Cycle Assessment (LCA)を実施した[1)]。設備や原料投入量のデータは取材を通じて収集し、バックグラウンドデータは Ecoinvent v3.10 データベースを用いて補完した。これらのデータを Simapro (Ver 9.6)を用いて、ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.09 を評価指標として環境負荷を算出した。また、感度分析では地球温暖化が最も高い工程に着目し、シナリオを設定して環境負荷の変化を検証した。

2.4 ライフサイクルコスト

Life Cycle Costing(LCC)では、発生するコストを初期コスト・運用コスト・保守コストに分類した[2)]。保守コストは集計が困難であったため、初期コストの5%を計上することで推計値とした。

2.5 社会影響評価

社会影響評価(Social Life Cycle Assessment, SLCA)は、UNEP の SLCA ガイドラインに基づき[3)]、従業員、地域社会、バリューチェーン関係者、消費者の 4 つのステークホルダーを選定し、それぞれのサブカテゴリに含まれる日本酒醸造のための評価指標を設計した(SI2)。その後、正規化した各評価指標のスコアに重みを掛け、統合スコアを算出した。

インベントリ分析は、ステークホルダーへの調査および対象酒蔵から提供された資料を基に実施した。また、酒造業界の専門家への調査で決定した重要度係数を用いて指標を算出した。具体的には、石川酒造の従業員 10 名および周辺地域住民 20 名を対象に調査を実施し、これをステークホルダーからの回答として使用した。さらに、酒造業界の専門家 12 名に対して、サブカテゴリの重要度を 1～10 のスケールで評価するアンケートを実施した。

3. 結果

3.1 環境影響評価

LCA の結果、機能単位における環境影響の各指標は、水消費は 0.4m^3、発がん性ヒト毒性は 27.0kg 1,4-DCB、土地利用は 5.1 m2a crop eq、化石系資源の希少性は 152.9kg oil eq、そして地球温暖化は 137.2kg CO2 eq であった(SI3, SI4)。また、地球温暖化が最も高いのは輸送であった。そこで感度分析は輸送の工程に関して行い、玄米の仕入れ先において、地

域の酒米の使用率が現在 2.0%の所を 10~100%に変更するシナリオを設定し、各シナリオの地球温暖化を比較した(SI5)。結果、地域の酒米の使用率を増やすことで、8.8%から最大 95.3%の地球温暖化削減につながることが示された。

3.2 ライフサイクルコスト

石川酒造に対する取材により得たデータは、初期コスト、運用コスト、保守コストに分類された(SI6)。また、各コストがコスト全体に占める割合を示した円グラフを以下の図 2 に示す。初期コストは 59.6%、運用コストは 37.5%、保守コストは 3.0%を占めた。

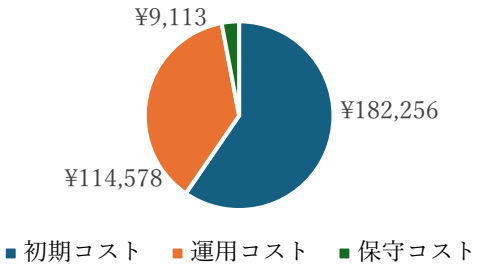


図 2. ライフサイクルコスト分析結果

3.3 社会影響評価

インベントリ分析の結果を SI7 に、専門家による重み付け係数を SI8 に示す。各ステークホルダーのスコアに重みを乗じた結果を図 3 に示す。最終的な指標では労働者が 0.492、地域コミュニティが 0.459、バリューチェーンが 0.379、消費者が 0.456 なった。

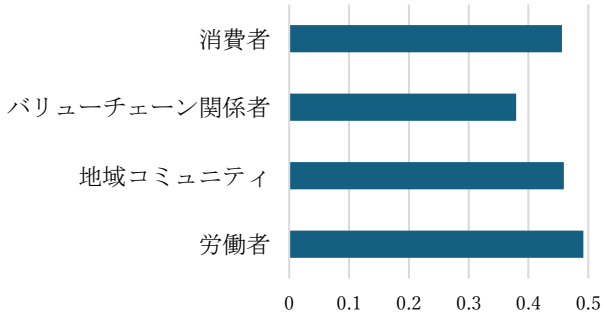


図 3. SLCA 結果

4. 考察

本研究の結果から、環境負荷、コスト構造、バリューチェーンにおける課題が明らかになり、持続可能な酒蔵運営にはこれらの改善が必要であると示唆された。LCA では輸送が環境負荷の主因であることが明らかになった。これは玄米の生産地が遠方であることに起因し、高品質な酒米を使用する酒造りが広まった背景が関係していると考えられる。しかし、感度分析により地域の酒米を活用することで、この負荷は大幅に削減可能であると示唆された。LCC の分析では、酒造りにおける最低限の必要経費がコストの大部分を占めている。一方、コスト全体の 7.3%を占める人件費には削減の余地がある可能性がある。現在の石川酒造では作業工程ごとに人材を雇用しているが、これにより人員過剰と一人当たりの賃金が低下する状況が生じている。これは適切なシフト管理と人材配置の見直しによってコスト削減が期待される。また、SLCA のでは、バリューチェーンの評価値が低いことが課題として浮かび上がった。これは、酒業界の伝統的な体質や酒税法などが影響している可能性がある。

以上の結果は石川酒造のケーススタディから得られた特有のものであるが、他の酒蔵においても類似の状況が存在する可能性が十分に考えられる。今後、持続可能な酒蔵の発展を実現するためには、これらの問題点を改善していくことが重要であり、また、本研究のように環境・経済・社会的な側面から酒蔵を評価する手法は、今後も必要とされると考えられる。

5. 最後に

本研究では、環境・経済・社会的な観点から酒造業の持続可能性を評価した。結果として、輸送における環境負荷の削減や、人材配置の最適化によるコスト構造の改善が重要であることが明らかになった。一方で、日本の酒蔵が持つ伝統や酒造法は、文化的な価値を持つ重要な資産であり、その保護と活用が求められる。本研究の手法と知見は、石川酒造だけでなく、他の酒蔵においても適用可能であり、酒造業全体の持続可能な発展に寄与するものであると考えられる。

6. 引用文献

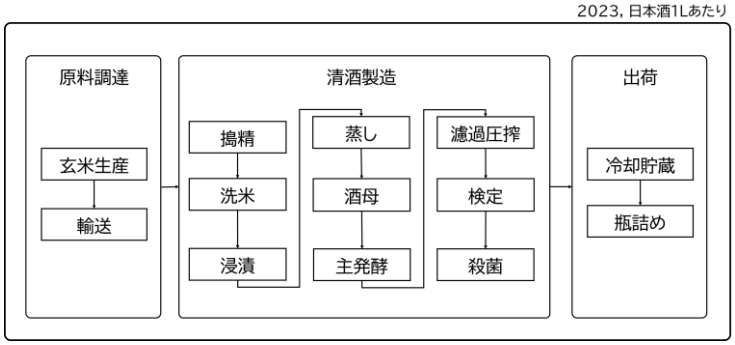
Falcone G., De Luca A.I., Stillitano T., Strano A., Romeo G., Gulisano G.: Sustainability, 8 (793), (2016), https://doi.org/10.3390/su8080793

García García J., García Castellanos B., García García B.: Agronomy, 13 (1478), (2023), https://doi.org/10.3390/agronomy13061478

United Nations Environment Programme (UNEP): Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organisations 2020, (2020), https://wedocs.unep.org/20.500.11822/34554

Supporting Information

SI1. システム境界



SI2. ステークホルダーとサブカテゴリ

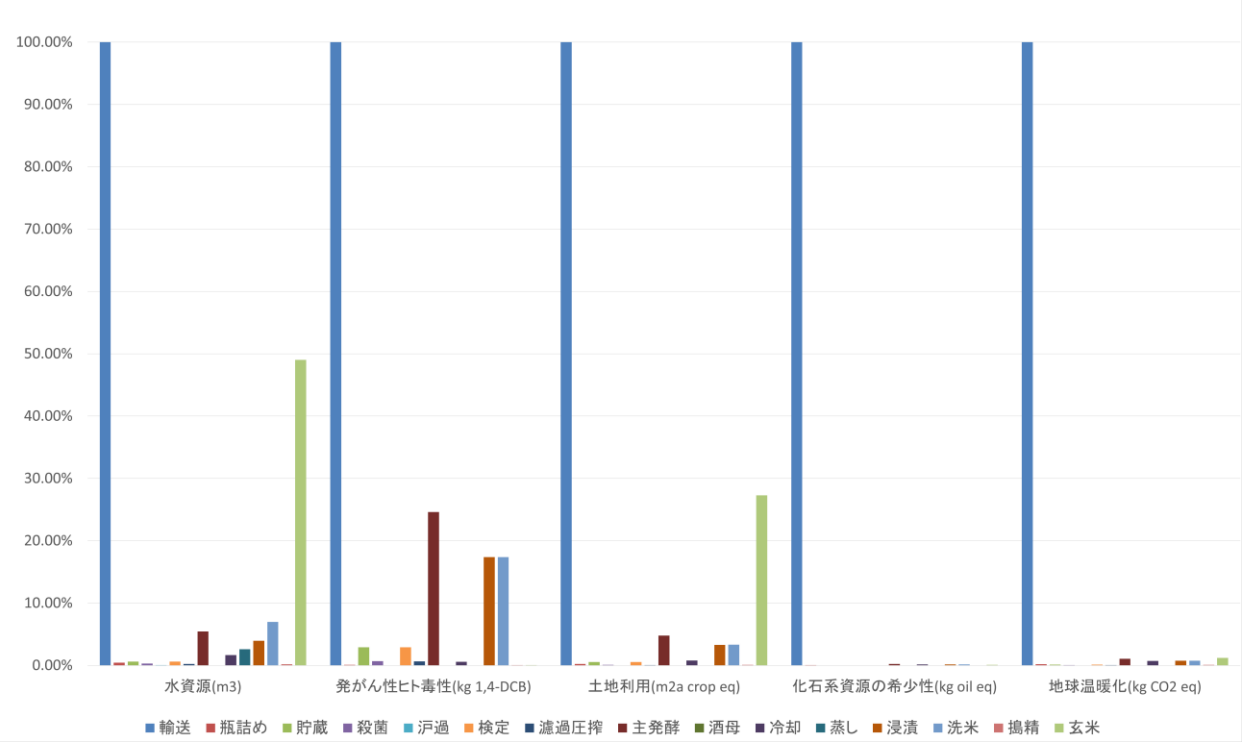
ステークホルダー	サブカテゴリ
労働者	賃金
	健康と安全
	強制労働
	差別（多様性）
	労働時間
	仕事の満足度
	結社の自由と団体交渉権
	雇用規則
地域社会	健康的な生活条件
	企業の地域コミュニティへの参加
	地元雇用
	安全な生活環境
バリューチェーン	公正な競争
	知的財産権の尊重
	サプライヤーとの関係
消費者	透明性
	フィードバックメカニズム
	健康と安全
	透明性
	廃棄物処理

SI3. ライフサイクルインベントリ

工程	原料	投入量	単位	工程	原料	投入量	単位
搗精	玄米	144000	kg	濾過圧搾	電気	1911.6	kWh
	電気	22688.4	kWh		醪搾機	1	台
	精米機	1	台	検定	貯酒槽	1	台
洗米	電気	468	kWh		撹拌槽	1	台
	水	936000	L	沪過	電気	4400	kWh
	洗浄機	1	台		沪過助剤	30	kg
浸漬	水	93000	L		活性炭	30	kg
	浸漬槽	6	台		加圧沪過機	1	台
蒸し	電気	486	kWh	殺菌	電気	2527.2	kWh
	蒸気(水)	360000	L		熱交換器	2	台

	ボイラー	1	台	冷却	電気	192720	kWh
	A 重油	48	kL		冷却器	2	台
酒母	酒母槽	10	台	貯蔵	貯酒槽	1	台
主発酵	電気	2397.6	kg	瓶詰め	電気	52915.2	kWh
	種麹	18	台		瓶	150000	個
	製麹機	1	台		瓶詰めシステム	1	式
	30%アルコール	3000	kg				
	発酵槽	24	台				

SI4. LCA の結果



SI5. 感度分析結果

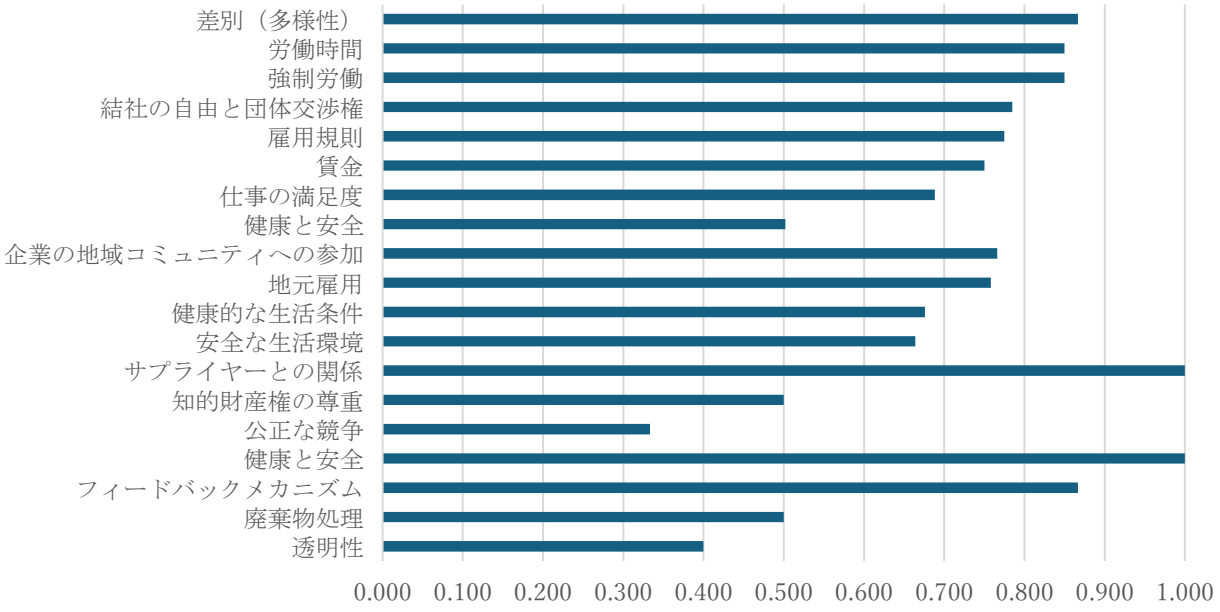
地域米使用率	2%	10%	30%	50%	70%	100%
輸送 (kg CO2 eq)	130.5	119.9	93.5	67.2	40.8	1.2
全体 (kg CO2 eq)	137.2	126.3	99.9	73.5	47.2	7.6
削減率	-	8.8%	28.1%	47.3%	66.5%	95.3%

SI6. LCC のインベントリ

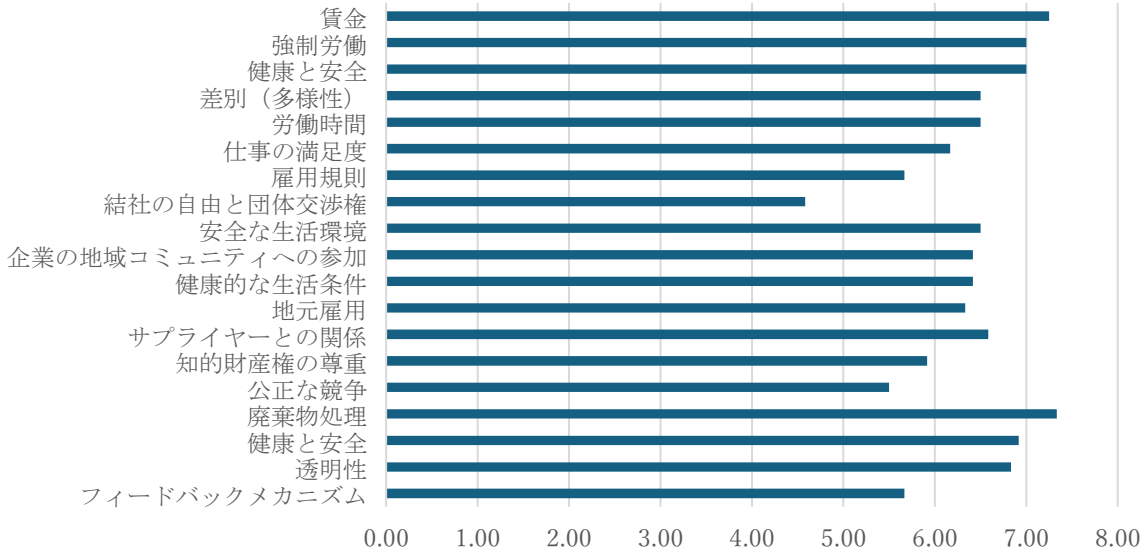
コスト種別		価格(千円)	耐用年数(年)	コスト種別		価格(千円)
初期コスト	精米機	¥3,000	7	運用コスト	人件費	¥22,410
	洗浄機	¥3,500	7		玄米	¥39,600
	浸漬槽	¥18,000	7		電気	¥8,887
	ボイラー	¥7,500	7		水	¥0
	製麹機	¥8,000	7		A 重油	¥5,184
	酒母槽	¥30,000	20		30%アルコール	¥750

発酵槽	¥72,000	20		沪過助剤	¥45
醪搾機	¥3,000	7		活性炭	¥30
貯酒槽	¥6,000	20		瓶	¥22,500
撹拌槽	¥3,000	20		減価償却費	¥15,172
加圧沪過機	¥800	7		合計	¥114,578
熱交換器	¥6,000	20	保守コスト	初期コスト 5%	¥9,113
冷却器	¥1,456	7		合計	¥9,113
瓶詰めシステム	¥20,000	7			
合計	¥182,256	–			

SI7. SLCA における正規化されたステークホルダーの回答平均



SI8.専門家により決定された重み付け係数



植物油製造プロセスへの資源活用技術導入に向けたライフサイクル評価

Life cycle assessment for introducing resource-utilizing technologies into vegetable oil mill process

○渡邉有希人 [1)]、兼松祐一郎 [1)]、Teah Heng Yi [1)]、廣森浩祐 [2)] 、菊池康紀*[1)]
Yukito Watanabe, Yuichiro Kanematsu, Heng Yi Teah, Kosuke Hiromori, Yasunori Kikuchi
1) 東京大学, 2) 東北大学
* ykikuchi@ifi.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

植物資源は脱化石資源の実現に向けて最大限活用することが期待されている。植物油工場は様々な地域に分布し、その精製工程では、化石燃料由来のエネルギーを使用して有効活用されていない廃棄物を多く生み出している。環境負荷低減に向けてこのような地域資源活用技術の導入を進めていくことが課題である [1)]。

本研究では、植物油製造プロセスにおける環境負荷低減を目的として、プロセスシミュレーションのモデルを構築し、LCA を実施した。導入技術の一例としてエネルギーを脱炭素化するために木質バイオマスの熱電併給 (CHP: Combined Heating and Power)の導入を想定し、技術導入前後での環境負荷を比較した。

2. 方法

2.1 植物油製造プロセスのモデリング

一般に、植物油製造プロセスでは菜種などの油分の多い油糧作物は圧搾・抽出工程を経て、大豆などの油分の少ない油糧作物は抽出工程のみを経て原油と脱脂粕に分離される。その後、脱ガム工程では温水を加えリン脂質がガム質として分離され、脱酸工程では酸と塩基を加えることにより、遊離脂肪酸が分離される。脱色工程では活性白土で色素などを吸着して、脱臭工程で高温の水蒸気を吹き込むことにより有臭成分や揮発成分が分離され、食用の精製油が製造されている。

これらプロセスで製造される植物油の LCA を行うために、文献に基づいて物質収支とエネルギー収支の計算ができるモデルを構築した。原料由来の成分には油分、水分、繊維分、リン脂質、遊離脂肪酸、色素、有臭成分、その他を、プロセス中で添加する薬品としてヘキサン、リン酸、苛性ソーダ、活性白土を考慮した。原料の油糧作物の成分比および主に各工程での分離比率 [2)]に基づいて植物油製造プロセスの物質収支を、植物油の製造全体のエネルギー原単位 [3)]から配分比率に基づいて各工程に分割 [4)]することでエネルギー収支のモデル化を行った。

2.2 木質バイオマス CHP のモデリング

木質バイオマス CHP は間伐材などのバイオマスを燃料とした熱電併給システム [5)]であり、植物油製造プロセスへの導入を想定してモデルを構築した。

2.3 インベントリ推算と GHG 排出量の評価

評価範囲は油糧作物の栽培と製造プロセスとした。油糧作物の栽培のインベントリデータとして IDEA ver3.4.1 を参照した。製造プロセスは本研究のモデルでインベントリを推算して、GHG 排出量を計算した。また、脱脂粕を利用した飼料等の副産物については、飼料生産を代替とするとみなし、GHG 排出量を控除した。

3. 結果と考察

植物油製造プロセスでは油糧作物の栽培の負荷が大きな割合を占め、製造プロセスのみに着目すると圧搾及び抽出工程の熱及び電力が大きな負荷となった。また、木質バイオマス CHP の導入によりエネルギー消費に起因する GHG 排出量を低減できることがわかった。

4. 結言

植物油製造プロセスへの木質バイオマス CHP の導入により、GHG 排出量を製造プロセスでは 6 割程度削減できるが、ライフサイクル全体で見ると 1 割程度となり、油糧作物の栽培への対策の必要性が示唆された。

謝辞

本研究は、JST COI-NEXT(JPMJPF2003)の支援を受けている。東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は、三井不動産(株)、積水ハウス(株)、東日本旅客鉄道(株)、豊田通商(株)からの寄付で活動している。

引用文献

1) Kikuchi Y. et al.: Sustainability Science, 15, (2020), pp.1473-1494
2) 後藤直宏編, “油脂製造の知識”, 幸書房, 東京, （2022）, pp.61-104
3) 藤田重文編, “化学プロセス集成”, 東京化学同人, 東京, （1970）, pp. 959-967 など
4) JICA: “ポーランド国 省エネルギー計画マスタープラン調査最終報告書”, （1999）, pp. 1–24 など
5) 藤井照重編, “コージェネレーションの基礎と応用”, コロナ社, 東京, （2004）, pp. 178-225 など

データ包絡分析を用いた日本のエコフィード工場における生産効率性分析

Production Efficiency Analysis of Eco-Feed Plants in Japan Using Data Envelopment Analysis

○都留惇嗣*[1)]、牛島大悟[1)]、加河茂美[2)]
Junji Tsuru, Daigo Ushijima, Shigemi Kagawa
1)九州大学経済学府, 2)九州大学経済学部研究院
* tsuru.junji.426@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

日本の家畜飼料の75%は輸入に依存している(1)。そのため、国内の家畜飼料の価格はその輸入価格により上昇する可能性がある。そこで、日本政府は家畜飼料の輸入依存を脱却するために、2030年までの飼料自給率の目標を34%に設定した。そして、エコフィードと呼ばれる食品廃棄物から作られる動物用飼料の導入を進めており、エコフィードは飼料コストの削減だけでなく、食品廃棄物処理の削減も期待されている(1)。しかし、先行研究によると、エコフィードの生産活動が非効率であることが指摘されている(2)。

本研究では、3つの方法（乾燥法、液状化法、発酵法）で生産を行っている国内の45のエコフィード工場を対象とし、データ包絡分析（Data Envelopment Analysis: DEA）を適用することで、各工場の相対的な生産効率性を推計する。加えて、各プラントの非効率性の要因が生産技術と生産規模のいずれに起因するのかを特定することで、日本政府や地方自治体、エコフィードプラント事業者に向けた効率性改善策を提案する。

2. 分析手法

DEAは、複数の投入要素と産出要素を持つ意思決定主体（DMUs: Decision Making Units）の相対的な効率性を評価するための数理計画法である。DEAには規模の収穫が一定と仮定されるCRS (Constant Returns to Scale)-DEA(3)と規模の収穫が可変と仮定されるVRS (Variable Returns to scale)-DEA(4)の2つのモデルが存在するが、CRS-DEAでは生産効率性（OTE: Overall Technical Efficiency）が、VRS-DEAでは“正味の”技術効率性（PTE: Pure Technical Efficiency）が推計される。生産効率性（OTE）は、“正味の”技術効率性（PTE: Pure Technical Efficiency）と規模効率性（SE: Scale Efficiency）の積で表される(4)。本研究は上記の2つのモデルを用いることで、乾燥法、液状法、発酵法の3つの生産手法ごとに、日本における45件のエコフィードプラントの生産効率性・技術効率性・規模効率性を推計した。

生産効率性分析を行うために、食品廃棄物の搬入量と維持管理費を投入データ、エコフィード生産量を産出データとした２投入１産出における産出指向型CRS-DEAモデルを適用した。その式は以下の通りである(3)。

$$\text{Max.}\ \phi_m \tag{1}$$

Subject to

$$\sum_{n=1}^{N} \lambda_n x_{in} \le x_{im}, (i = 1,2, \dots, I)$$

$$\sum_{n=1}^{N} \lambda_n y_{jn} \ge \phi_m y_{jm}, (j = 1,2, \dots, J)$$

$$\lambda_n \ge 0 \quad n = 1,2, \dots, N.$$

(1)式におけるϕ_mはDMU$_m$の生産効率性を示す。NはDMUの数、IとJはそれぞれ投入要素(x)の数、産出要素(y)の数を示す。nはn番目のエコフィードプラントを表し、iとjはそれぞれi番目の投入要素、j番目の産出要素を表す。λ_nはn番目の投入要素と産出要素によって内生的に決定する重み係数を示す。本研究ではϕ_mの逆数を生産効率性$OTE_m = \frac{1}{\phi_m}$と定義する。その場合、OTE_mは0から1の値を取り値が1であれば効率的であり、1未満は非効率となり、0に近いほど非効率的となる。

VRSモデルは(1)式に$\sum_{n=1}^{N} \lambda_n = 1$の制約式を追加することで定義され、その定式化された数理計画問題を解くことで、PTE_mが推計される(2)。

さらに、生産規模に関する効率性を表す規模効率性スコア(SE: Scale Efficiency)は以下の(2)式で推計される。

$$SE_m = \frac{OTE_m}{PTE_m} \tag{2}$$

SE_mも同様に0から1で基準化され、その値が1であれば最も効率的であり、逆に0に近いほど非効率的である。規模の非効率性はDMU_mにおける生産規模が最適ではなく、大きすぎるか小さすぎるかのどちらか

であることを示している。

3. データ

本研究で用いた食品廃棄物量とエコフィード生産量は農林水産省が提供する「エコフィード製造業者情報公開」（農林水産省, 2023）[5]のデータを使用した。また、維持管理費は各エコフィードプラントのデータの入手が困難であったため、日本の環境省グローバル環境センターが提供する「バイオマス利用技術情報データベース Ver. 2.1」（社団法人地球環境資源センター, 2021）[6]のデータを基に推計した。

4. 結果・考察

表 1. 各生産手法における各効率性の平均値

手法	OTE	PTE	SE
乾燥(28)	0.44	0.55	0.82
液状(11)	0.49	0.68	0.78
発酵(6)	0.47	0.59	0.85

表 1 は各生産手法におけるエコフィードプラントの生産効率性（OTE）、技術効率性（PTE）、規模効率性（SE）の平均値を表している。表 1 より、OTE の平均値は、乾燥法が 0.44、液状法が 0.49、発酵法が 0.47 であった。これは、1 プラントあたりの平均的な効率性改善余地がそれぞれ約 56%、約 51%、約 53%であることを意味し、生産効率性を向上させることで、各手法におけるエコフィードの生産量を約 1.5 倍に増加させる可能性があること示す。

次に、OTE の分解要因である PTE と SE に注目する。表 1 によると、各生産手法における PTE と SE の平均値は、乾燥法がそれぞれ 0.55 と 0.82、液状法がそれぞれ 0.68 と 0.78、発酵法がそれぞれ 0.59 と 0.85 であり、いずれの生産手法においても PTE の方が SE よりも低いスコアであった。このことは、PTE の方が SE よりも OTE の平均値低下への寄与が大きいことを意味する。

また、図 1 は乾燥法における PTE と SE の箱ひげ図を示している。液状法・発酵法においても同様の結果が得られたため、今回は乾燥法のみを掲載する。図 1 より、PTE は SE よりもプラント間でばらつきが大きいことが分かる。これはプラント間での生産技術に大きな乖離があり、生産技術の違いによって維持管理費や食品廃棄物あたりのエコフィード生産量に大きな差が生じ、その結果、各プラント間で PTE および OTE に大きな差が生じていることを示している。

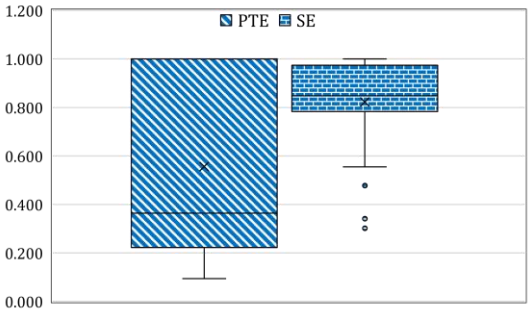


図 1. 乾燥法における PTE と SE の箱ひげ図

5. 結論

本研究の結果から、各生産手法における非効率の主な要因は PTE にあり、プラント間で大きな生産技術の差が生じていることが推察された。日本国内のエコフィードプラントにおける PTE の非効率性を改善するには、非効率なプラントが生産技術に関する知識を身に付け、最適な設備を導入する必要がある。非効率なプラントが最適な生産技術を取り入れるには、効率的なプラントがどのような食品廃棄物を利用し、どのような機械で処理・加工を行い、エコフィードを生産しているかを把握し、学ぶ必要がある。そのため、政府は PTE を改善のために、非効率なプラントが本研究で効率的であった工場から学習できる機会を提供するべきである。

6. 参考文献

1) 農林水産省 (2024) : エコフィードをめぐる情勢
2) Nakaishi, T., Takayabu, H., 2022. Production efficiency of animal feed obtained from food waste in Japan. *Environmental Science and Pollution Research* 29, 61187-61203.
3) Charnes, A., Cooper, W.W., Rhodes, E., 1978. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research* 2, 429-444.
4) Banker, R.D., Charnes, A., Cooper, W.W., 1984. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science* 30, 1078-1092.
5) 農林水産省 (2022) : エコフィード製造業者情報公開
6) 社団法人地球環境資源センター (2021) : バイオマス利活用技術情報データベース Ver2.1

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 13:00 ~ 14:40 C会場：2313中講義室（3F）

[2-C3] 食の消費者行動

座長：光斎 翔貴 (立命館大学)

13:00 ~ 13:20

[2-C3-01]

宗教由来の食料消費に伴う二酸化炭素排出量の推計

*吉田 萌世[1]、戸田 遥香[1]、西藤 和佳[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

13:20 ~ 13:40

[2-C3-02]

日本の食事メニューを対象とした環境・健康影響評価

*杉山 弦太[1]、小野田 章人[2]、新居 紗知[2]、古田 千恵[2]、中村 恵治[3]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 味の素株式会社 食品研究所、3. 味の素株式会社 R&B企画部)

13:40 ~ 14:00

[2-C3-03]

LCAと人の運動時消費エネルギーの統合：自転車を例に

*溝口 創[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1] (1. 立命館大学)

14:00 ~ 14:20

[2-C3-04]

砂糖の消費がアメリカの健康に与える影響分析

*津田 薫[1]、大賀 雄介[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

14:20 ~ 14:40

[2-C3-05]

食を通した生活者行動変容に関する実証と今後の期待

*シンウン ニカンドラ[1]、神谷 優大[1]、戸田 寛明[1]、澤村 翔太[1]、中澤 克仁[1]、鶴田 祥一郎[1] (1. 一般社団法人サステナブル経営推進機構)

©日本LCA学会

宗教由来の食料消費に伴う二酸化炭素排出量の推計

The Carbon Footprint of Religious Food Consumption

○吉田萌世＊[1)]、戸田遥香[2)]、西藤和佳[2)]、加河茂美[2)]
Moyo Yoshida, Haruka Toda, Waka Nishifuji, Shigemi Kagawa
１）九州大学経済学部　２）九州大学経済学研究院
＊yoshida.moyo.808@s.kyushu-u.ac.jp

１．研究背景

近年、人間の生活や生態系に様々な影響を及ぼす地球温暖化が注目され、その原因である CO_2 等の温室効果ガスの排出が問題視されている。CO_2 排出要因の一つには食料消費があり、食料システムからの温室効果ガス排出量は全体の約 34%である。[1)]。

食料消費由来の CO_2 排出量削減のためには、食料の購入・選択を反映した生活習慣の変化が必要である[2)]。食料の購入・選択の動機の一つに、所属している文化がある[3)]。文化は個人の特性に影響を与えることで、食事などの経済活動に影響を及ぼしており、文化の重要な要素の一つに宗教がある。宗教が及ぼす影響は大きく、2010 年には五大宗教（キリスト教、イスラム教、ヒンドゥー教、仏教、ユダヤ教）のいずれかを世界人口の約 77%が信仰し、約 40%は食料消費に制限がかけられている[4)]。そのため、本研究では食料消費に影響を与える要因の一つとしての宗教信仰の影響力の大きさを推計する。

２．研究目的

本研究は、GLORIA の 2019 年の世界多地域産業連関表と、宗教人口データ[5)] を用いて、四つの宗教の信者一人当たりが消費する食料消費額とそれに伴う CO_2 排出量の産業連関分析を行う。

３．研究手法

3.1　信者一人当たりの食料消費額の推計

宗教 R における食料部門での一人当たりの消費額は次式で表される。

$$\mathbf{Y}^R = (y_m^R) = \left(\frac{\sum_{r\in R}\sum_{n=1}^{N} f_m^{nr}}{\sum_{r\in R} p^r}\right)$$

ここで、$\mathbf{Y}^R$ は宗教 R における M 産業の一人当たりの最終消費を示す最終需要列ベクトルであり、食品セクターのみが値を取る。以上から、$\mathbf{Y}^R$ を宗教 R の信者一人当たりの最終消費の平均と定義することができる。

3.2　信者一人当たりの CO_2 排出量の推計

宗教 R の食品部門 m の消費に基づく一人当たりの CO2 排出量は以下の式で推定することができる。

$$q_m^R = \frac{\sum_{r\in R}\mathbf{e}(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{f}_m^r}{\sum_{r\in R} p^r} = \frac{\sum_{r\in R}\mathbf{eLf}_m^r}{\sum_{r\in R} p^r}$$

ここで、$\sum_{r\in R}\mathbf{e}(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{f}_m^r = \sum_{r\in R}\mathbf{eLf}_m^r$ は、宗教 R に属する国（すなわち、宗教 R の信者が全人口の 70%以上を占める国）における産業 m の消費による CO2 排出量の合計である。$\sum_{r\in R} p^r$ は、宗教 R に属する国 r の人口の合計である。私たちは、q_m^R を宗教 R の信者の一人当たりの食料消費に基づく CO2 排出量の平均であると定義した。

４．結果・考察

4.1：各宗教の信者一人当たりの食料消費額

本研究は、各国において特定の宗教の信者数が人口の 70%を上回った時、その国の食文化はその宗教に則ったものであると定義して推計を行った。図-1 は、四つの宗教（キリスト教、イスラム教、仏教、ヒンドゥー教）の信者一人当たりの食費のグラフである。図-1 から、キリスト教の信者の食費が他の宗教に比べて約五倍の大きさであることと、肉類、その他食品、乳製品・飲料の消費比率はどの宗教にも大差がないことがわかる。

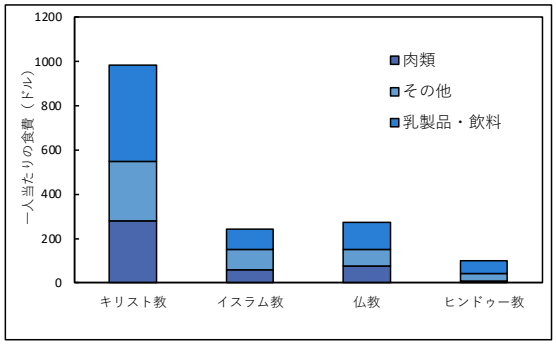


図-1　各宗教の信者一人当たりの食料消費額

4.2：各宗教の信者一人当たりの食料消費由来の CO_2 排出量の推計

図-2 は図-1 と同様に各国の宗教信者割合によってその国の宗教を定義し、合計の人口で食料消費由来の二酸化炭素排出量の合計を割ったものである。

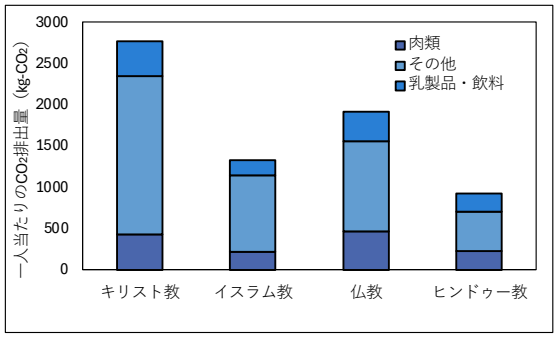


図-2　各宗教の信者一人当たりの食料消費に伴う二酸化炭素排出量

図-2 からいずれの宗教においても食料消費額に対して、その他の部門における二酸化炭素排出量が多いことがわかる。

６．参考文献

１） Crippa, et. al., (2021): Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions, Nature Food volume 2, pages198–209, 2021

２） Duchin, F. (2005) Sustainable consumption of food: a framework for analyzing scenarios about changes in diets, *Journal of Industrial Ecology*, 9(1-2), pp. 99-114.

３） Robert J. Barro & Rachel McCleary (2003): Religion and Economic growth, American Sociological Review, Vol. 68, No.5 (Oct.,2003), pp.760-781

４） Pew Research Center (Dec.,2012): The Global Religious Landscape https://assets.pewresearch.org/wp-content/uploads/sites/11/2014/01/global-religion-full.pdf ,2012

５） Barrett, D.B., Kurian, G.T. and Johnson, T.M. (2001) *World Christian Encyclopedia. 2nd Edition*, Oxford University Press, New York.

日本の食事メニューを対象とした環境・健康影響評価

Environmental and Health Impact Assessment of Japanese Diet Menus

○杉山弦太*[1)]、小野田章人[2)]、新居紗知[2)]、古田千恵[2)]、中村恵治[3)]、伊坪徳宏[1)]
Genta Sugiyama, Akito Onoda, Sachi Nii, Chie Furuta, Keiji Nakamura, Norihiro Itsubo
1) 早稲田大学, 2) 味の素株式会社食品研究所, 3) 味の素株式会社 R&B 企画部
* g.sugiyama@aoni.wasesda.jp

1. はじめに

食料システムの改善によって世界の栄養状態は大きく改善された。一方で、不健康な食事の増加によって生活習慣病の健康リスクが増加している。加えて、現在の食料システムは複数の環境領域に対する影響が大きく、持続不可能であると報告されている。

食料生産や食事に関する環境影響評価は盛んに行われており、畜肉に由来する環境負荷が大きいことが明らかになっているが、摂食による健康への影響を含めて統合的に評価している事例は限られている[1)]。

本研究では、日本の食事メニューを対象として、食材の生産から調理までの環境影響と、食事に含まれる食品・栄養素摂取による健康影響の統合評価を行い、健康で持続可能な食事の提案を行う。

2. 研究方法

2.1 データ収集と前処理

本研究では味の素株式会社の「レシピ大百科」[2)]に掲載されている 12,438 件のメニューを対象に、食材の分量、調理手順、栄養素情報などを収集した。料理 1 人前(1 皿)当たりを機能単位とするため、記載分量が「20 個」「作りやすい分量」等の 1 人前換算が不可能なメニューは除外し、残りの 9,429 メニューを食材レベルで日本食品標準成分表(第八訂)増補 2023 年[3)]と、IDEAv3.4.1 データベースに対応付けた。メニュー単位で体系的に分析するため、最も使用量が多い食材をメイン食材として、各メニューを表 S1 に示す食品群に分類するとともに、表 S2 に示した主食・主菜・副菜・汁物の 4 つの料理カテゴリにも分類した[4)]。

2.2 環境健康評価

システム境界は食材の生産から調理・調理時廃棄物の廃棄までとし、二次データには IDEAv3.4.1 を用いた。炊飯器や電子レンジ、ガスコンロの電力・ガス消費量は省エネ型製品情報サイト[5)]から単位時間・回数あたり消費量を推定し、各メニューの調理時間とかけ合わせて算出した。廃棄物は食品標準成分表[3)]の廃棄率を用いて推定し、全量埋立処理と仮定した。気候変動、オゾン層破壊、大気汚染、光化学オキシダント、水消費の五つの影響領域について、特性化手法に LIME2、被害評価手法に LIME3 を用いて障害調整生存年数(以下 DALY)へ換算した。

2.3 栄養健康評価

食品・栄養摂取による健康影響について、Life Cycle Initiative のライフサイクル影響評価指標および手法に関する世界ガイドライン(以下 GLAM)で提示されている「Dietary risk factors (DRFs)」[1)]を利用して DALY の指標で算出した。DRFs はアメリカの食品成分表に基づく定義で 15 項目の食事リスク係数が開発されているため、本研究では日本の定義と合致した表 S3 に示す 11 項目を対象に評価を実施した。なお、係数がプラスの場合は健康寿命の損失、マイナスの場合は健康寿命の延伸効果を示すものとして扱う。

3. 研究結果

以降では、日本の食文化に基づく四つの料理カテゴリ（主食、主菜、副菜、汁物）のうち、栄養素の供給源として利用しやすい主菜に該当する 3,772 メニューを代表例として解析し、メニュー数の多い野菜、魚介、鶏肉、豚肉、牛肉の五つの分類に着目した。その他の分類群の結果については図 S1、S2 に示す。

図 1 に示したメニュー別の環境健康影響では、牛肉メインメニューが最も高い値を示しており、25%値でさえ他のメニュー群の最大値よりも大きい結果となった。一方、その他のメニュー群の中央値は同程度であるが、ばらつきの大きさにわずかに違いがみられ、中でも鶏肉メインメニューはばらつきが最も小さく、最大値も最も低い結果となった。

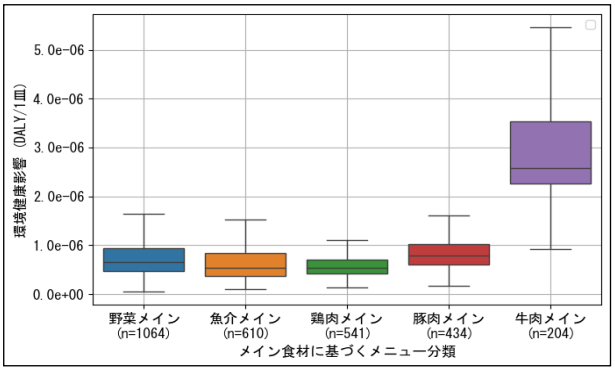


図 1. 主菜カテゴリのメニュー分類別環境健康影響

図 2 に示したメニュー別の栄養健康影響では、牛肉メインメニューの健康影響が最も大きく、次いで豚肉メインメニューの影響が大きくなっている。鶏肉と魚介メインのメニューは 0 付近から負にかけて分布するメニューが 75%以上を占めており、健康リスクが低い、あるいは健康上の便益があるメニューが多いことが示された。野菜メインメニューは幅が非常に広く、摂取する食品や栄養素によって大きくバランスが変化する可能性が示唆された。

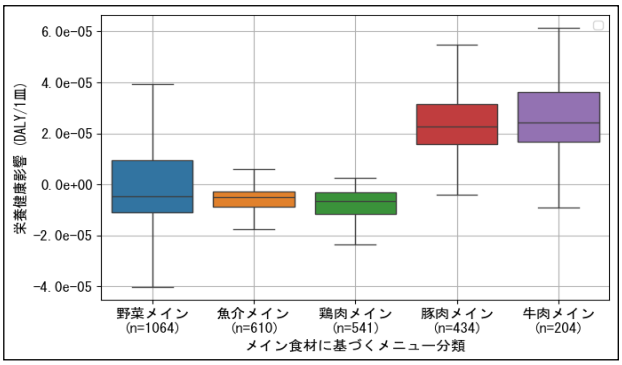


図 2. 主菜カテゴリのメニュー分類別栄養健康影響

図 3 では、各分類の統合健康影響の最小値と最大値にあたるメニューを代表として抽出した。抽出されたメニューの詳細については表 S4 に示す。野菜・魚介・鶏肉メインの最小メニューにおいては、正味の値を表す赤丸が示す通り、明確に健康寿命延伸の効果が示唆された一方で、最大メニューでは加工肉や塩の増加に加えて、野菜や食物繊維の摂取量が減少したことで DALY が増加し正値に転じている。

豚肉や牛肉メインのメニューでは赤肉に起因する健康影響が大きいことがわかる。一方、最小メニューにおいては種実類の摂取による DALY 低減効果が特に大きく、正味の影響では赤肉摂取による DALY を相殺して負値に転じている。

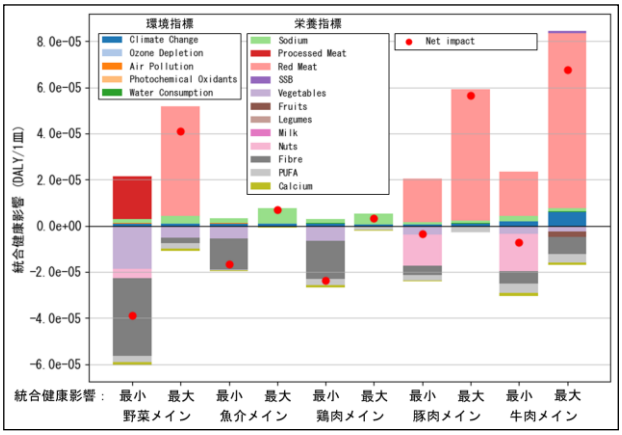


図 3. 分類別代表メニューの統合健康影響

4. 考察

図 S3 からわかる通り、一般的に単一のメニューに魚介類と肉類が混在することはなく、肉類メニューでも鶏肉と牛肉などが混在することはない。そのため、魚介・鶏肉メインのメニューは比較的ばらつきが小さく、食物繊維や塩分摂取による DALY 低減/増大効果が正味の影響に直結したと考えられる。

今回考慮した食事リスクの中で、種実類は DALY 低減効果が 2 番目に大きく、ピーナッツやごまが種実類にあたる。ごまは日本で古来から利用されており、1 人当たり消費量も世界 2 位であるため、追加摂取への文化的・心理的障壁は少ないと考えられる。

結果として、動物性タンパク質が多く必要な場合は鶏肉・魚介類を中心とし、野菜や種実類を取り入れながら塩分を控えめに仕上げることが健康的で持続可能な食事の実現に有効であることが示唆された。

5. 今後の展望

本研究では日本の 9,429 メニューを対象として、材料調達・調理・廃棄時の環境影響と栄養摂取による健康影響を統合した健康影響評価を実施した。

限界点として、DRFs は食品分類レベルの粒度であり、同じ食品分類中の種類の違いは考慮できていないため、過大・過小評価となっている可能性がある。

課題点として、今回算定した環境影響は人間健康に関する領域のみであり、食料の評価において議論されている土地利用や生態系の観点は含めていない。

今後は単一のメニュー評価だけでなく、複数メニューを組み合わせた献立単位での評価を行うことで、より日本の食文化に即した提案を行う。また、環境影響については生物多様性への影響も併せて評価を行い、トレードオフの関係性について分析を行っていく。

6. 引用文献

1) Katerina S. Stylianou, Victor L. Fulgoni III, Olivier Jolliet.: nature food, (2), (2021), pp616-627
2) 味の素株式会社: ”レシピ大百科”, 味の素株式会社, (オンライン), 入手先 < https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/>, (参照 2025-1-15)
3) 文部科学省: “日本食品標準成分表（八訂）増補 2023 年”, (オンライン), 入手先 < https://www.mext.go.jp/a_menu/syokuhinseibun/mext_00001.html>, (参照 2024-11-30)
4) Furuta Chie e al.: Frontiers in Nutrition, 9, (2022)
5) 経済産業省資源エネルギー庁: “省エネ型製品情報サイト”, 省エネ型製品情報サイト, (オンライン), 入手先< http://seihinjyoho.go.jp/>, (参照 2024-11-15)

Supporting Information

表 S1. 日本食品標準成分表の食品番号に基づく食品群分類表

大分類	番号	中分類	番号	小分類	番号
穀 類	1	米・加工品	1	米	1
				米加工品	2
		小麦・加工品	2	小麦粉類	3
				パン類（菓子パンを除く）	4
				菓子パン類	5
				うどん 中華めん類	6
				即席中華めん	7
				パスタ	8
				その他の小麦加工品	9
		その他の穀類・加工品	3	そば・加工品	10
				とうもろこし・加工品	11
				その他の穀類	12
いも・でんぷん類	2	いも・加工品	4	さつまいも・加工品	13
				じゃがいも・加工品	14
				その他のいも・加工品	15
		でんぷん・加工品	5	でんぷん・加工品	16
砂糖・甘味類	3	砂糖・甘味類	6	砂糖・甘味類	17
豆 類	4	大豆・加工品	7	大豆(全粒)・加工品	18
				豆腐	19
				油揚げ類	20
				納豆	21
				その他の大豆加工品	22
		その他の豆・加工品	8	その他の豆加工品	23
種実類	5	種実類	9	種実類	24
野菜類	6	緑黄色野菜	10	トマト	25
				にんじん	26
				ほうれん草	27
				ﾋﾟｰﾏﾝ	28
				その他の緑黄色野菜	29
		その他の野菜	11	キャベツ	30
				きゅうり	31
				大根	32
				たまねぎ	33
				はくさい	34
				その他の淡色野菜	35
		野菜ジュース	12	野菜ジュース	36
		漬け物	13	葉菜漬け物	37
				たくあん・その他の漬け物	38
果実類	7	生 果	14	いちご	39
				柑橘類	40
				バナナ	41
				りんご	42
				その他の生果	43
		ジャム	15	ジャム	44
		果汁・果汁飲料	16	果汁・果汁飲料	45
きのこ類	8	きのこ類	17	きのこ類	46
海藻類	9	海藻類	18	海藻類	47
魚介類	10	生魚	19	あじ いわし類	48
				さけ ます	49
				たい かれい類	50
				まぐろ かじき類	51
				その他の魚類	52
				貝類	53
				いか たこ類	54
				えび かに類	55
		魚介加工品	20	魚介（塩蔵 生干し 乾物）	56
				魚介（缶詰）	57
				魚介（佃煮）	58
				魚介（練り製品）	59
				魚肉ハム ソーセージ	60
肉類	11	畜肉	21	牛肉	61
				豚肉	62
				ハム ソーセージ類	63
				その他の畜肉	64
		鳥肉	22	鶏肉	65
				その他の鳥肉	66
		肉類（内臓）	23	肉類（内臓）	67
		その他の肉類	24	鯨肉	68
				その他の肉加工品	69
卵	12	卵類	25	卵類	70
乳	13	牛乳・乳製品	26	牛乳	71
				チーズ	72
				発酵乳・乳酸菌飲料	73
				その他の乳製品	74
		その他の乳類	27	その他の乳類	75
油脂類	14	油脂類	28	バター	76
				マーガリン	77
				植物油脂	78
				動物油脂	79
				その他の油脂	80
菓子類	15	菓子類	29	和菓子類	81
				ケーキ・ペストリー類	82
				ビスケット類	83
				キャンディ類	84
				その他の菓子類	85
嗜好飲料類	16	アルコール飲料	30	日本酒	86
				ビール	87
				洋酒・その他	88
		その他の嗜好飲料	31	茶類	89
				コーヒー・ココア	90
				その他の嗜好飲料	91
調味料・香辛料類	17	調味料	32	ソース	92
				しょうゆ	93
				塩	94
				マヨネーズ	95
				みそ	96
				その他の調味料	97
		香辛料・その他	33	香辛料・その他	98
調理済み食品	18	調理済み食品	34	調理済み食品	99

表 S2. レシピの食材・栄養素構成に基づくカテゴリ分類表

食事カテゴリ	カテゴリ番号	該当件数	特徴	メニュー例
主食	**1**	84	エネルギーが 400kcal 未満であり、野菜が 50g 未満かつタンパク質が 6g 未満	ご飯、パン
	2	559	エネルギーが 400kcal 未満であり、かつ野菜が 50g 以上またはたんぱく質が 6g 以上	赤飯、ハンバーグ
	3	144	エネルギーが 400kcal 未満であり、かつ野菜が 50g 以上またはたんぱく質が 6g 以上であり、汁気がある	うどん、そば
	4	1334	エネルギーが 400kcal 以上であり、かつ野菜が 50g 以上またはたんぱく質が 6g 以上	カレーライス親子丼
	5	131	エネルギーが 400kcal 以上であり、かつ野菜が 50g 以上またはたんぱく質が 6g 以上であり、汁気がある	ラーメン
主菜	**6**	1301	食材重量が 120g 以上、かつたんぱく質が 6g 以上	焼き魚、ステーキ、焼き鳥
	7	1901	食材重量が 120g 以上、かつ野菜が 50g 以上	野菜炒め
	8	570	食材重量が 120g 以上、かつ野菜が 50g 以上であり、汁気がある	鍋
汁物	**9**	338	野菜が 50g 未満かつたんぱく質が 6g 未満	豆腐の味噌汁
	10	285	野菜が 50g 以上かつたんぱく質が 6g 未満	ミネストローネスープ
	11	646	タンパク質が 6g 以上	豚汁
副菜	**12**	1816	前記条件のどれも満たさない単品料理、かつ野菜が 50g 以上、エネルギーが 100kcal 以上、もしくはたんぱく質が 6g 以上	ほうれん草のおひたし
	13	325	前記条件のどれも満たさない単品料理	漬物
古田ら(2022)[4]に記載の表から引用、筆者により一部改変				

表 S3. Dietary Risk と日本の国民健康栄養調査の対応表

食事リスク	Stylianou ら(2021)[1]における定義	国民健康栄養調査対応項目の食品群番号及び栄養素項目名	DALY 係数 (DALY/g)
vegetables	Fresh, frozen, cooked, canned, or dried vegetables, excluding legumes, salted or pickled vegetables, juices, and starchy vegetables	25~33,35,46,47*	-3.7E-08
calcium	Calcium from all sources	カルシウム**	-1.0E-05
fibre	Fiber from all sources	食物繊維**	-1.4E-06
fruits	Fresh, frozen, cooked, canned, or dried, excluding fruit juices and salted or pickled fruits	39~43, 44*	-1.5E-07
legumes	Fresh, frozen, cooked, canned, or dried legumes	18, 23*	-1.1E-07
milk	Milk (including non-fat, low-fat, and full-fat milk) but excluding plant derivatives	71*	-1.3E-08
procmeat	Meat preserved by smoking, curing, salting, or addition of chemical preservatives	63*	3.4E-07
redmeat	Beef, pork, lamb, and goat but excluding poultry, fish, eggs, and all processed meats	61,62,64*	3.8E-07
nuts	Nut and seed foods	24*	-1.8E-06
pufa	Omega-6 fatty acids from all sources	n-6 系脂肪酸**	-5.9E-07
Sodium	Dietary sodium from all sources	ナトリウム**	1.7E-06

* (出典) 令和４年国民健康・栄養調査 第５表の１ 食品群別摂取量 - 食品群，年齢階級別，平均値，標準偏差，中央値 - 総数，１歳以上
** (出典) 令和４年国民健康・栄養調査 第１表の１ 栄養素等摂取量 - エネルギー・栄養素等，年齢階級別，平均値，標準偏差，中央値 - 総数，１歳以上

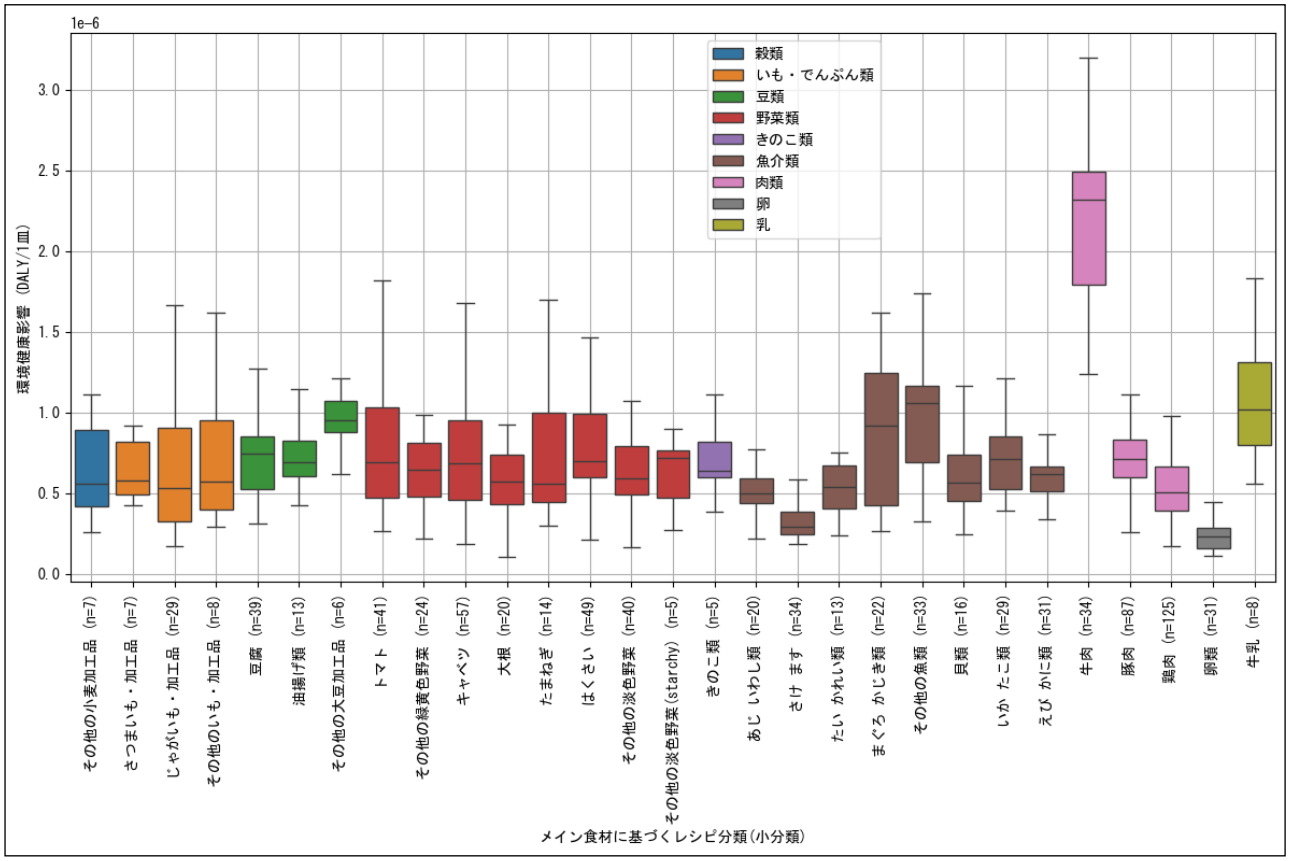


図 S1. 主菜カテゴリのメニュー分類別環境健康影響 (小分類レベル)

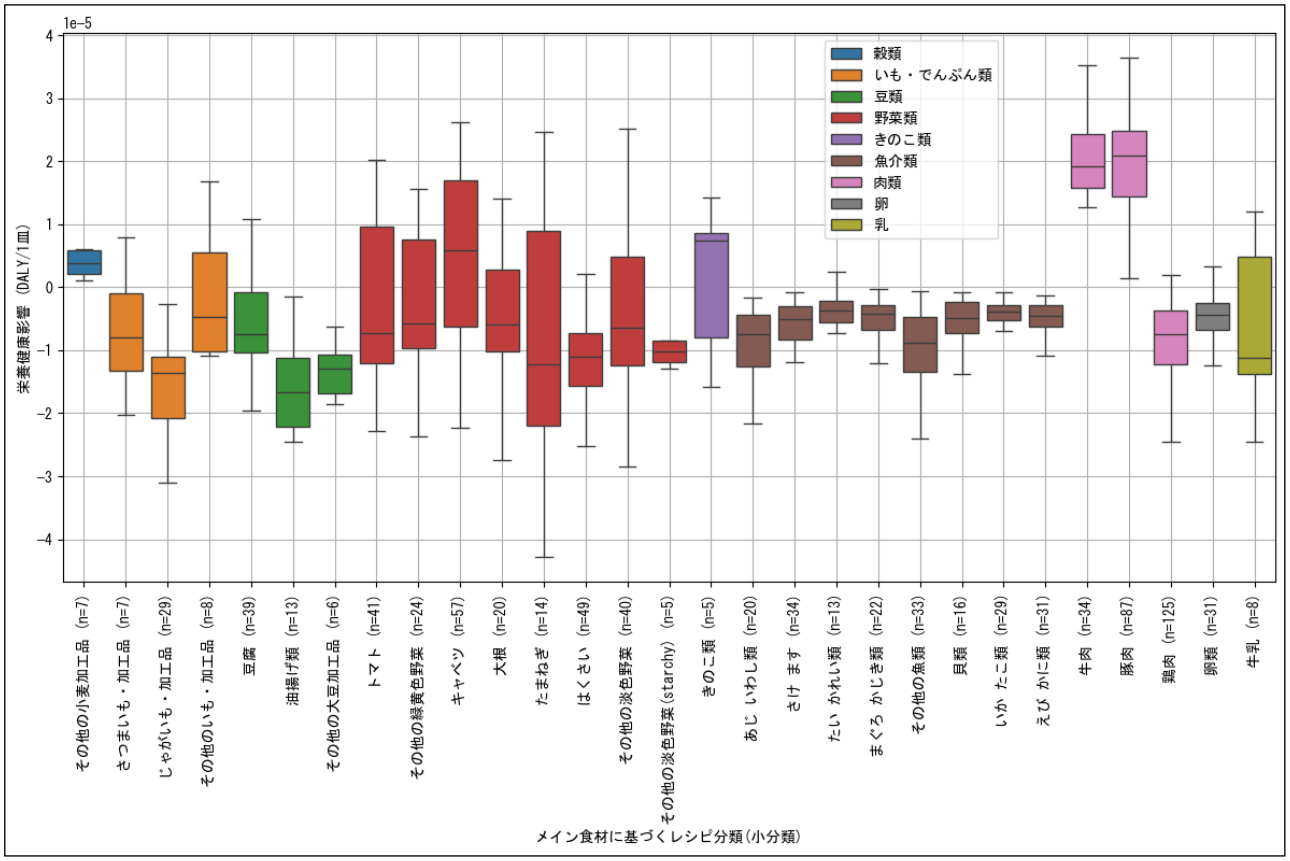


図 S2. 主菜カテゴリのメニュー分類別栄養健康影響 (小分類レベル)

表 S4. 分類群別代表レシピのレシピ名および掲載先 URL[2)]

分類名	レシピ名	URL
野菜メイン_最小	カラフルポトフ	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/706603/
野菜メイン_最大	大根と豚バラ肉のラフティ	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/621186/
魚介メイン_最小	たらとじゃがいものトマト煮込み	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/709530/
魚介メイン_最大	魚介の塩焼き	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/700169/
鶏肉メイン_最小	トマト鍋	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/706985/
鶏肉メイン_最大	鶏チャーシュー	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/802120/
豚肉メイン_最小	豚しゃぶサラダのピーナッツソース	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/700709/
豚肉メイン_最大	トンテキ	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/706433/
牛肉メイン_最小	彩りチャプチェ	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/702867/
牛肉メイン_最大	芽キャベツとスペアリブのカレー	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/260006/

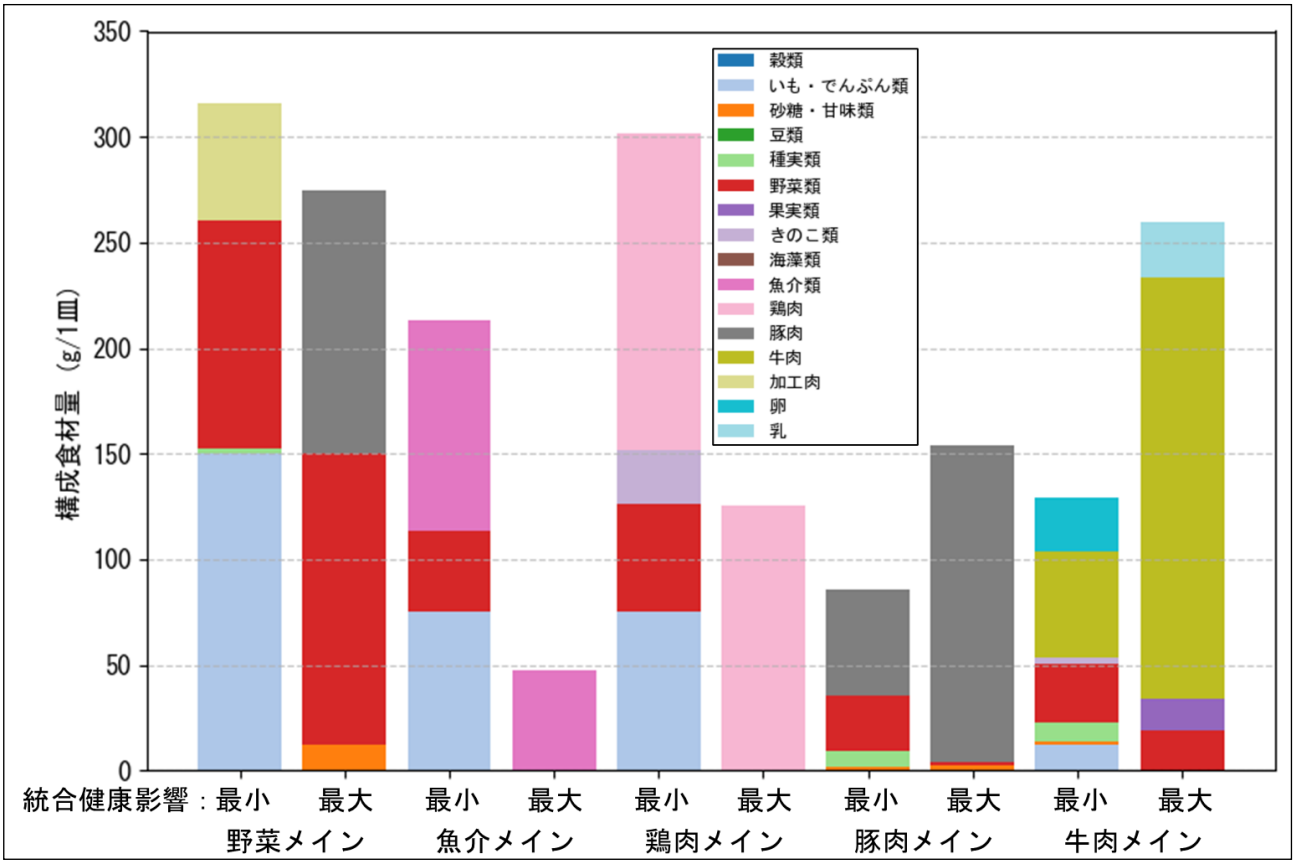


図 S3. レシピ分類別代表レシピの構成食材内訳

LCA と人の運動時消費エネルギーの統合：自転車を例に

Integration of LCA and human energy expenditure during exercise: Using a bicycle as an example

○溝口創*[1)]，光斎翔貴[1)]，柏倉俊介[1)]，山末英嗣[1)]
Hajime Mizoguchi, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue
1) 立命館大学
*rm0191ek@ed.ritsumei.ac.jp

1. 諸言

LCA は製品のライフサイクルにおける環境への影響を評価する手法であり，包括的な評価ができるのが特徴である. これまでの LCA 研究の枠組みにおいて，製品のライフサイクルに付随する人間の身体活動によるエネルギー消費はシステム境界外であった. しかし，この人間の運動エネルギーが製品の使用段階において重要な要素となりうる場合がある．例えば，自転車では，その使用段階において，人間の運動エネルギーに依存しており，このエネルギーは食事によって補給される．食事を構成する種々の食材を生産する際には当然環境影響をもたらす．実際先行研究[1-3)]でも，自転車という製品を評価する際，この身体活動による環境影響を考慮していない.

そこで，本研究では人間の運動時消費エネルギーを LCA の枠組みに統合することを目指し，自転車を含む輸送機関を例に製品の製造時及び使用時における人間の運動時消費エネルギーのデータを収集し，それを摂取すべき食事の量に換算することで身体活動による環境影響を定量化した．身体活動によるエネルギー消費を加味したうえで，自転車の車種ごとの環境影響評価を行う．また他の輸送機関との比較を通じ，環境負荷を考慮した新たなモビリティの形態を提言する.

2. 研究手法

2.1 機能単位とシステムバウンダリ

当研究では輸送機関の生産段階，使用段階，メンテナンス段階における環境影響を評価した．製造段階と使用段階の評価においては人間の身体活動によるエネルギー消費を加味している．機能単位は人間 1 人を 1 km 輸送する際の GHG 排出量と定義した.

2.2 評価対象

当研究では小規模輸送機関である自動車や自転車，また，徒歩による移動を評価の対象とした．自動車においては二輪車，ガソリン車，ハイブリッド車，電気自動車，燃料電池自動車，自転車では一般車，電動アシスト自転車，ロードバイクを評価した．各輸送機関の環境影響評価には，先行研究[4)]の値やライフサイクルアセスメント実施を支援するソフトウェアである MiLCA を使用した.

2.3 身体活動によるエネルギー消費に起因する環境影響の分析

各輸送機関製造時，使用時の身体活動によるエネルギー消費量を分析した．輸送機関使用時の身体活動によるエネルギー消費量については，スマートウォッチによる測定データや，国立健康・栄養研究所の資料[5)]を基に推定した．各輸送機関製造時の身体活動によるエネルギー消費については，経済産業省の工業統計調査[6)]や生産動態統計年報[7)]から得た産業別従業者数や輸送機関別生産台数の値を利用して算出した.

食事の環境影響については，FAO のフードバランスシート[8)]から得た世界 17 地域における各食品カテゴリーの摂取量と，各食品の質量あたりの環境影響値から，各地域における食事 1 kcal 当たりの GHG 排出量を算出した.

上記の方法で得られた身体活動によるエネルギー消費量の値と，食事の環境影響値から，身体活動に起因する環境影響を定量化した.

2.4 使用輸送機関の転換シナリオ

算出した各輸送機関の環境影響値に基づき，低環境負荷の輸送機関への転換による環境負荷低減効果を算出した．今回は，近畿圏における各自治体で 10 km 以下の輸送を自動車から自転車に転換するシナリオを設定した．算出にあたっては国土数値情報交通流動量パーソントリップ OD 量データ[9)]を参照した.

3. 研究結果と考察

3.1 食事の環境影響

図 1 に世界の各地域における食事の GHG 排出量を示す．北アメリカと南アメリカの食事は 1 kcal 当たりの GHG 排出量が大きい．これは，環境影響の大きい牛肉や牛乳の消費量が他の地域に比べて大きいことによる．反対に，アフリカやアジアでは比較的 GHG 排出量は小さい. GHG 排出量が最も大きいのは北アメリカの食事で, 最も小さいのは西アフリカの食事である. 前者の GHG 排出量は後者の約 3 倍である.

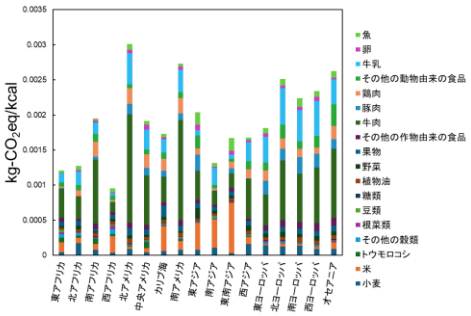


図 1　各地域における食事の GHG 排出量

3.2 各輸送機関の環境影響評価

図 2 に身体活動によるエネルギー消費を考慮した評価に基づく各輸送機関の GHG 排出量を示す．使用時の身体活動による環境影響については，先述した食事内容によって変動する．図中のバーは平均値を，エラーバーは上限値と下限値を示す．自転車の中では電動アシスト自転車の環境影響が最も大きく，ロードバイクの環境影響が最も小さい．電動アシスト自転車については，搭載されているリチウムイオン電池の製造や交換による環境影響が大きい．

自転車以外の輸送機関との比較に目を向けると，人間の身体活動によるエネルギー消費を考慮しても，自転車は自動車と比べて環境影響が小さいことがわかる．しかし，摂取する食事の環境影響が大きい場合，自転車の自動車に対する優位性は小さくなる．また，各輸送機関製造時の身体活動による環境影響は極めて小さいことがわかった．

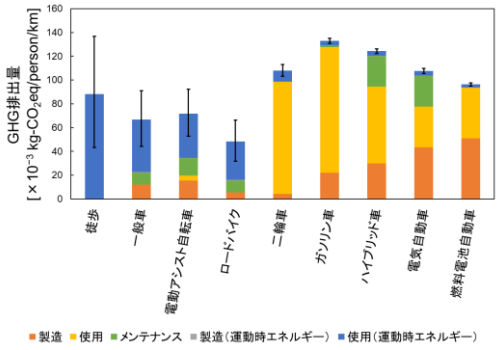


図 2　各輸送機関の GHG 排出量

3.3 使用輸送機関の転換による環境負荷低減効果

図 3 に近畿圏における各自治体で 10 km 以下の輸送を自動車から自転車に 100%転換した場合の GHG 排出量削減率を示す．自治体別に見ると，地方部を中心に15%以上の削減率が期待される自治体が存在する一方，大阪市などの大都市部では削減率 10%以下と比較的効果が小さいことが分かった．これは，地方部では自動車の保有割合が高く，10 km 以下の移動でも自動車を利用することが多いが，大都市部ではもともと 10 km 以下の距離帯における自転車の利用割合が大きいことによると考えられる．

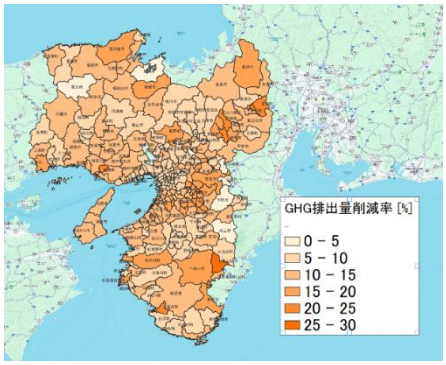


図 3　使用輸送機関の転換による GHG 排出量削減率

4. まとめと今後の展望

輸送機関の環境影響評価を行い，自動車，徒歩，自転車の順に環境影響が大きいことが分かった．また，身体活動によるエネルギー消費が LCA において大きな影響を与える場合があることも分かった．自動車から自転車への転換によって最大 25% の GHG 排出量削減効果が期待される．今後は，世界の主要都市における使用輸送機関のシェアと摂取する食事を考慮した分析を行う予定である．

5. 引用文献

1) Shoki Kosai, Kenyu Matsui, Kazuyo Matubae, Eiji Yamasue, Tetsuya Nagasaka: Conservation & Recycling, 166, (2021), pp.10256
2) Shoki Kosai, Muku Yuasa, Eiji Yamasue: Energies, 13, (2020), pp.2094
3) Dominik Bucher, René Buffat, Andreas Froemelt, Martin Raubal: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 114, (2019), pp.109298
4) Wenqiu Liu, He Liu, Wei Liu, Zhaojie Cui: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 139, (2021), pp.110596
5) 国立健康・栄養研究所：“改訂版 身体活動のメッツ（METs）表”，(2012)
6) 経済産業省：“工業統計調査”，(2020)
7) 経済産業省：“生産動態統計年報機械統計編”，(2019)
8) “Food Balance Sheets”, FAO,（オンライン），入手先 <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>,（参照 2024-11-10）
9) “国土数値情報　交通流動量 パーソントリップ OD 量データ”，国土交通省，（オンライン），入手先 <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-S05-b-v2_2.html>,（参照 2024-04-09）

砂糖の消費がアメリカの健康に与える影響分析

Health Impact Analysis of Sugar Consumption in the United States

○津田薫*[1)]、大賀雄介[1)]、加河茂美[1)]
Kaoru Tsuda, Yusuke Oga, Shigemi Kagawa
1) 九州大学
* tsuda.kaoru.801@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

食料の過剰消費は、人々の健康に悪影響をもたらす。特に砂糖の過剰消費は、食事の質の低下や、非感染症疾患のリスクを高める恐れがある[1)]。そのため、世界保健機関(World Health Organization: WHO)は、1 日あたりの遊離糖類摂取量を総エネルギー摂取量の 10%未満にすることを推奨している[2)]。しかし、国連食糧農業機関(Food and Agriculture Organization: FAO)によると、アメリカはこの推奨量を約 5%上回っている[3)]。アメリカ人の健康的な食生活を実現するために、砂糖摂取量を減らす具体的な策を講じる必要がある。しかし、今日までにアメリカにおける砂糖の消費について詳細に分析を行なった研究は非常に少ない。これまでアメリカ政府は砂糖摂取に関する食事ガイドライン[4)]を公表するなど様々な対策を講じてきたが、いずれも問題の解決には至っていない。本研究の目的は、アメリカにおける砂糖の過剰消費問題について、原因となる産業を特定し、さらに世帯の特徴を考慮した個人レベルで分析を行うことである。

2. 研究手法

2-1. 砂糖消費原単位の推計

本研究では、金額物量混合型産業連関分析を用いて、1 ドルあたりの家計支出に含まれる砂糖の量（以下: 砂糖消費原単位）を算出する。産業連関モデルに従い、以下の式を用いて推計を行った。

$$\mathbf{x}_w = \mathbf{i}(\mathbf{I} - \mathbf{A}_w)^{-1}\hat{\mathbf{f}}_w \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \frac{\mathbf{x}'_w}{\mathbf{f}} \quad (2)$$

ここで、$\mathbf{x}_w$は 2019 年にアメリカ国内で消費された産業部門ごとの砂糖の量を表す。また、$\mathbf{i}$は「砂糖および菓子 (sugar and confectionery product manufacturing)部門」のみ単一で、他の要素を全て 0 にした列ベクトルであり、$(\mathbf{I} - \mathbf{A}_w)^{-1}$は砂糖および菓子部門のみ物量で表されたレオンチェフ逆行列を表し、$\hat{\mathbf{f}}_w$は家計消費支出ベクトルのうち、砂糖および菓子部門のみ物量の最終需要ベクトルを表す。$\mathbf{y}$は部門別の砂糖消費原単位を表す。(2)式の右辺は列ベクトル要素ごとの割り算を示す。

2-2. 世帯ごとの砂糖摂取量の推計

米国労働統計局 (U.S. Bureau of Statistics: BLS)による消費支出調査[5)]を用いて、2019 年の単身世帯における砂糖摂取量を所得・年齢・性別に(3)式で算出した。

$$\mathbf{c}_g^{i,a} = \mathbf{y}\mathbf{h}_g^{i,a} \quad (3)$$

ここで、$\mathbf{c}_g^{i,a}$は 2019 年に単身世帯において消費された所得・年齢・性別の砂糖摂取量を表す。$\mathbf{h}_g^{i,a}$は所得・年齢・性別ごとの家系消費支出を表す。

3. データ

本研究では、米国経済分析局 (U.S. Bureau of Economic Analysis: BEA)が公開している 2017 年版の国内産業連関表を元に分析を行った[6)]。また、各産業に投入された砂糖の量についてのデータは、米国農務省(United States Department of Agriculture: USDA)から取得した[7)]。本研究では、コロナの影響を除外するために、2019 年時点までのデータを用いた。

4. 結果

分析により、約 3900 万の単身世帯における 1 人 1 日あたりの平均的な砂糖摂取量は、62.2 グラムであることが明らかになった。このうち、女性は 62.0 グラムで、男性は 62.4 グラムであった。また、産業部門別の砂糖摂取量上位 3 部門は、ファストフード産業(limited-service restaurant)、パン産業(bread and bakery product manufacturing)、そして砂糖および菓子産業(sugar and confectionery product manufacturing)であった。砂糖の総摂取量のうち、47%をこれら上位 3 部門が占める。
図 1 は、所得階層別・性別別の 1 人 1 日あたり砂糖摂取量を産業部門別に推計し、上位 6 部門を示したものである。最も多く砂糖を消費したのは、男女ともに所得が最も高いグループで、女性は 91 グラム、男性は 98 グラムであった。図 1 が示すように、所得が大きくなるにつれて砂糖摂取量も増加することが明らかになった。部門を比較すると、所得の増加に伴いレストラン産業(full-service rsestaurant)と、ファストフード産業からの砂糖摂取量が特に大きく変化していることがわかる。特に男性において、所得の増加と外食の増

加に強い因果関係が見られた。

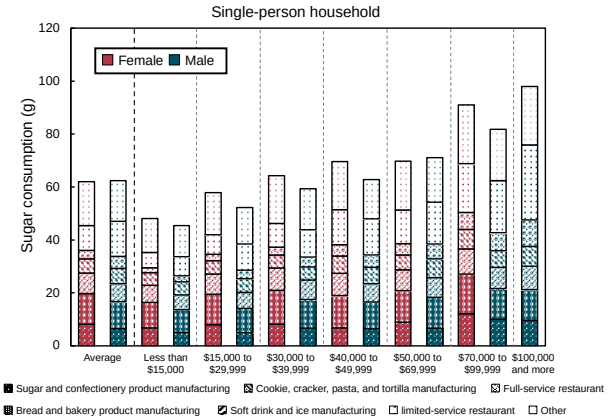


図 1. 所得階層別・性別別の砂糖消費量

図 2 は、年齢階層別・性別別の 1 人 1 日あたり砂糖摂取量を産業部門別に推計し、その上位 6 部門を示したものである。最も多く砂糖を消費したのは、男女ともに 35 歳から 44 歳のグループで、女性は 70 グラム、男性は 72 グラムであった。また、砂糖の消費量が最も少ないグループは男女ともに 25 歳以下のグループで、女性は 43 グラム、男性は 37 グラムであった。部門を比較すると、年齢が上がるにつれ、外食産業 2 部門からの砂糖摂取量が減少する一方で、パン産業やクッキー産業(cookie, cracker, pasta, and tor tilla manufacturing)からの摂取量が増加していることがわかる。これは、年齢が上がるとともに社会的な交流が減少したり、仕事を辞めて時間に余裕ができたりすることで外食の機会が減少し、家庭で食事する時間が増加したためであると考えられる。あるいは、高齢者にとって外出先で食事をすることは、移動など様々な面で障害があるとも捉えられる。

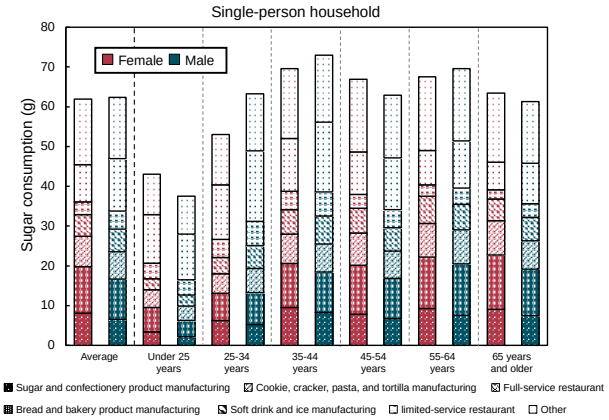


図 2. 年齢階層別・性別別砂糖消費量

図 3 は、全単身世帯における 1 人 1 日あたりの産業部門別砂糖摂取量に関するスカイライン図である。縦軸が 1 ドル支出あたりに含まれる砂糖の量を示し、横軸が 1 日あたりの支出額を示しており、グラフの面積は各産業からの砂糖摂取量を表す。砂糖の過剰摂取に陥る原因は 2 つあるといえる。まず、お菓子やパンなどの加工食品の消費によって引き起こされる過剰摂取は産業が製造過程で過剰に砂糖を使用していることが原因であると考えられる。一方、外食産業の利用によって引き起こされる過剰摂取は、消費者の過剰支出、つまり利用機会が多いことが原因であると考えられる。

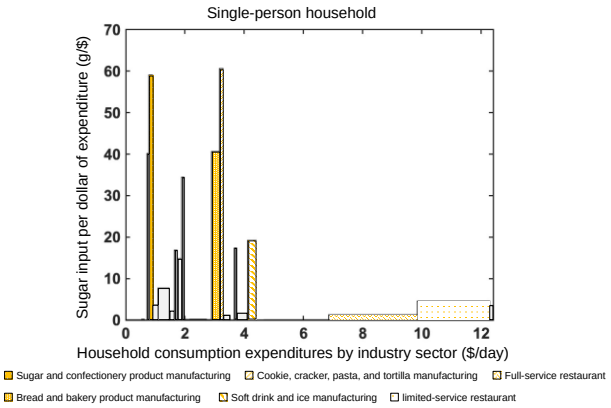


図 3. 産業別砂糖摂取量

以上より、アメリカにおける砂糖の過剰消費の原因となる産業や個人の特徴が分かった。本会では、これらの結果を元に問題解決のための有効な政策について議論を行う。

5. 引用文献

1) World Health Organization (WHO), 2023. Global report on the use of sugar-sweetened beverage taxes, 2023.
2) World Health Organization (WHO), 2015. Guideline: sugars intake for adult and children.
3) Food and Agriculture Organization, FAOSTAT, Food Balances (2010-) (最終更新日: 2024-7-19) (参照: 2023-10-20) https://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS
4) United States of Department Agriculture (USDA), 2020. Dietary Guidelines for Americans 2020-2025
5) U.S. Bureau of Statistics (BLS), 2019. Consumer Expenditure Survey.
6) Bureau of Economic Analysis (BEA), 2017. Input-Output Accounts Data.
7) United States of Department Agriculture (USDA), 2019. U.S. Sugar Crop production and Sugar production Deliveries and Stocks.

食を通した生活者行動変容に関する実証と今後の期待

Demonstrating Behavioral Changes in Consumers Through Food and Future Expectations

○シンウン ニカンドラ[1)]、舩橋 和美[2)]、佐野 浩司[2)]、宮田 佳泉[2)]、
神谷 優大[1)]、戸田 寛明[1)]、澤村 翔太[1)]、中澤 克仁[1)]、鶴田 祥一郎[1)]
Nikandra Shin Woong, Kazumi Funahashi, Hiroshi Sano, Kasen Miyata,
Yuta Kamiya, Hiroaki Toda, Shouta Sawamura, Katsuhito Nakazawa, Shouichiro Tsuruta
1) 一般社団法人サステナブル経営推進機構, 2) エームサービス株式会社
* nikandra@sumpo.or.jp

1. はじめに

近年、パリ協定を基づく政策として 2050 年までにカーボンニュートラルを達成することを目指した取り組みが世界的に進められている。その結果、多くの企業が環境に配慮した製品設計に取り組んでいる。一方で、生活者の環境意識は十分に浸透しておらず、日常的に消費される製品やサービスの温室効果ガス（GHG）排出量に関する情報も十分ではない。このような情報を生活者に提供することで、環境負荷への理解が深まり、生活者が自信を持って環境に優しい選択を行うことが可能になると考えられる。当機構では、2021 年に「SuMPO レシピ de カーボンフットプリント」プロジェクトを立ち上げた。この取り組みは、レシピの環境負荷を簡単に理解できる仕組みを提供し、生活者の行動変容を促すことを目的としている。本プロジェクトでは、1,300 種類の食材と 25 種類の調理方法のデータを基に、GHG 排出量を算定するレシピ算定ツールを作成した。本プロジェクトでは、良好な炭素循環の重要性を生活者が認識し、日常生活の中で「GHG 排出量」をカロリー情報ように「地球の健康を示す指標」として意識できるよう設計されている。

本報では、算定ツールを通して料理に係るレシピを活用した算定方法について説明するとともに、これらプロジェクトの算定結果等を活用した生活者行動変容の実証試験について紹介する。

2. 手法の開発

本発表では、食品対象とし、レシピのインベントリ情報を活用した算定方法の開発を行った。LCA の基本的な枠組みである「活動量 × 原単位」を適用し、食品の活動量データとしては、インターネット上のレシピサイトに掲載されている重量や加熱時間などの情報を活用した。また、原単位については、3EID データベースを基に当機構で開発した原単位を用いることで、レシピの GHG 排出量を算定可能とした。

2.1 機能単位と算定範囲

本プロジェクトにおける料理の機能単位は、重量での評価が困難であることから、「調理された料理 1 食の提供」と設定した。算定範囲は、素材の製造から提供に至るまでのライフサイクル全体とした。また、レシピについては食べ残しが発生しないものと仮定し、使用段階および廃棄段階は評価対象外とした。

2.2 算定方法

レシピの算定では、レシピ情報から得られる食材および調理に関する情報を考慮した。また、食材の使用による GHG 排出量に加え、調理に伴う GHG 排出量を加算する形で評価を行った。なお、本検討では、レストランや食堂、家庭での算定・定量も考慮しているが、調理された料理に使用される包装材などは算定対象外とした。

2.3 食品データベースの開発

2.3.1 データベースの選定

食材の活動量データを構築するにあたり、食材の種類から調味料の種類まで数百から数万に及ぶ項目が存在する。この膨大な種類の食材に対応するため、国立環境研究所が開発した「産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）[1]」（2015 年）に着目した。また、レシピデータから得られるインベントリ情報は重量ベースで提供されるため、食材の単価情報（重量あたりの金額情報）を活用し、物量ベースの食材データベースを構築した。

2.3.2 食材の単価情報

3EID の特性を考慮し、得られる食材の単価情報については、2015 年データとして整理された総務省の小売物価統計調査の食材データ[2]を基本として活用した。統計に記載がない食材に関しては、別途、インターネット上の情報をもとに調査を行い、データを補完する形で単価情報を整理した。その上で、該当する 3EID の項目に合わせ、重量ベースのデータベースとして構築した。

2.3.3 食材項目の整理

食材の項目整理においては、食品業界へのヒアリング調査を基に、文部科学省が公表する「日本食品標準成分表（八訂）[3]」に準拠した食品データベースの構築を基本とした。この基準に合わせることで、GHG 排出量データの整理はもとより、カロリー情報の効率的な整理も可能となるよう配慮した。また、八訂を使用している食品企業

のデータとも連携が可能となり、さらなる活用が期待できる形となった。

2.4 調理工程データベースの作成

レシピ算定に欠かせない調理に関するデータについては、レシピ情報から調理工程を精査し、1分あたりの排出量データとして整理した。その際、調理に使用する機器のガス使用量や消費電力などを調査し、それらを基に GHG 排出量の試算を行った。これらのデータを基盤として、調理工程のデータベースを構築した。

2.5 算定ツールの作成と試算結果

2.3 項および 2.4 項で整理した食品および調理工程のデータベースを活用し、算定方法を図 1 に示した。また、この算定方法を用いてケーススタディを実施するため、エクセルベースの算定ツールを構築した。このツールでは、レシピから得られた情報を入力し、データベースに接続することで、料理の CFP の算定が可能となった。

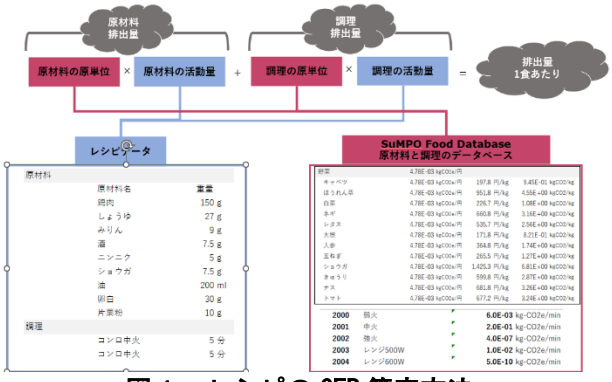


図 1　レシピの CFP 算定方法

上記で構築したデータベース及びツールを通じて、700 以上のレシピ算定を実施した。その一例として、21 種類の料理について米、肉類、野菜、その他材料による食材の影響と調理工程による影響を分けた。21 種類の算定結果は、1 食当たり 0.21kg-GHG～4.21kg-GHG の範囲となり、図 2 にそれら結果及び内訳を示す。

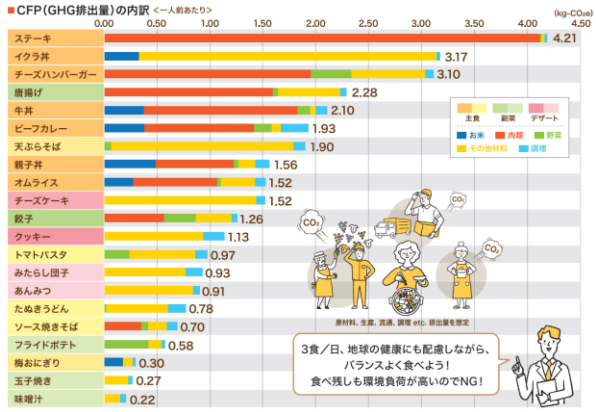


図 2　21 種類レシピの CFP 内訳

3. 生活者行動変容の実施

エームサービス株式会社と共同で本レシピの算定結果を用いた行動変容の実証を行った。本実証は、同社の取引先社員食堂において、新人社員向けの社内ブランディング活動の一環として、環境への取り組みの重要性を伝えることを目的に実施した。試験は 2023 年 5 月 17 日から 5 月 21 日までの 5 日間にわたり実施し、当社が算定した 7 品目の料理を提供した。それぞれの料理における GHG 排出量を示すラベルを表示するとともに、メニューカードおよびサイネージを用いて情報発信を行った。

3.1 考察

最終日の 5 月 21 日にはアンケート調査を実施し、生活者の行動変容について確認を行った。最終日の来客数は 662 名で、そのうち 398 名が回答した。回答者のうち、「カーボンニュートラル」という言葉を知っている方は 383 名（96.2%）、GHG 排出量ラベルに気が付いた方は 280 名（70.3%）であった。意識・行動の視点では、GHG に対して意識が変わった 129 人（32.4%）、GHG を意識してメニューを選択した 51 人（12.8%）、環境配慮メニューを選びたい方は 189 人（47.4%）であった。価値評価の視点では、環境の取組で食堂の評価上がるに対して、298 人（74.8%）、GHG に配慮したメニューにお金を多く払える方は 261 人（65.5%）であった。 短期間の実証試験ではあったが、アンケート結果から、全体的に環境意識の向上が見られることが確認された。

4. まとめと今後展望

本発表では、算定方法および実証試験の結果について整理し、その考察を行った。また実証試験の結果、生活者の環境問題に対する理解や関心が一定程度向上していることが示唆された。また、環境配慮メニューに対する追加支払いの意向が示されたことから、企業による環境意識向上施策への高い期待がうかがえた。

今後は、GHG 排出量に加え多面的な影響評価や食品の栄養素情報も提示できる仕組みの開発を進め、環境と栄養素を考慮した LCA への取り組みを開始する。また、蓄積した知識をもとに、未来の生活者への教育や行動変容を促進する施策に活用することで、カーボンニュートラルな社会の実現を目指す。

5. 引用文献

1) 国立研究開発法人国立環境研究所, 産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）, 2022
2) 総務省, 小売物価統計調査, https://www.stat.go.jp/data/kouri/index.html , （参照 2024 年 12 月 20 日）
3) 文部科学省, 日本食品標準成分表（八訂）増補 2023 年, 2023

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 9:00 ~ 10:20 D会場：2317中講義室（3F）

[2-D1] 自動車（１）

座長：福島 康裕 (東北大学)

9:00 ~ 9:20

[2-D1-01]

国連自動車基準調和世界フォーラムにおける自動車LCAの国際調和手法の開発

*鈴木 徹也[1] (1. 一般財団法人日本自動車研究所)

9:20 ~ 9:40

[2-D1-02]

ライフサイクル最適化に基づく自動車電動化ロードマップ

*中本 裕哉[1]、横井 崚佑[2]、 時任 翔平[3] (1. 大分大学、2. 産業技術総合研究所、3. 山形大学)

9:40 ~ 10:00

[2-D1-03]

The application of modular life cycle assessment in substocks-driven model: a case study of electric vehicle penetration in China

*巩 文静[1]、醍醐 市朗[1] (1. 東京大学)

10:00 ~ 10:20

[2-D1-04]

将来技術シナリオを考慮した地域別自動車パワートレインの環境影響評価

*垣内 冴郁[1]、橋本 瑠李[1]、赤見 廉[1]、小澤 環[2]、佐野 啓介[2]、八坂 慶仁[3]、正畠 宏一[3]、Karkour Selim[1]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. トヨタ自動車株式会社、3. ＴＣＯ２株式会社)

©日本LCA学会

国連自動車基準調和世界フォーラムにおける
自動車 LCA の国際調和手法の開発

Development of an internationally harmonized LCA methodology for automobiles at the UN World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations

○鈴木徹也*[1)]
Tetsuya Suzuki
1) 一般財団法人日本自動車研究所
* stetsuya@jari.or.jp

1. はじめに

地球温暖化への対応は喫緊かつ重要な課題であり、脱炭素化は世界的な潮流となっている。運輸部門は、世界の GHG 排出とエネルギー消費の主な要因の 1 つであり、その大部分を道路交通が占めている。

自動車のカーボンニュートラルを実現するためには、使用段階の燃料/電力消費だけでなく、生産や廃棄・リサイクル段階も含めたライフサイクル全体での GHG 排出量を客観的に評価することが重要である。そして、比較可能性や一貫性を備えた包括的な CFP 値を入手できるようにするには、国際的に統一された LCA 手法を定義・開発することが望ましい。LCA 国際規格として ISO 14040[1)] が 2006 年に発効しており、自動車メーカー等は既に、同規格に準拠した様々な LCA 結果を公表している。しかし、ISO 14040 では、LCA を実施するための調査範囲や前提条件は、自動車メーカーなどの実施者が決定すべきとされており、各実施者が独自の手法で LCA を実施している。よって、グローバルな事業活動を展開する自動車産業向けに設計された国際的に調和された LCA 手法が求められている。

そこで、日本の国土交通省は、自動車の環境・安全基準が世界的に議論・策定されている国連欧州経済委員会自動車基準調和世界フォーラム（UNECE/WP.29）において、公平で国際調和された LCA 手法を策定すべきであると 2021 年 6 月に提案した。そして、WP.29 の専門分科会の 1 つである GRPE（排出ガスとエネルギー）では、第 86 回会議（2022 年 10 月）において自動車 LCA を専門とする非公式作業部会（IWG：Informal Working Group）を設置することを決定した。これを受け、2022 年 10 月に第 1 回 Automotive LCA（A-LCA）IWG が沖縄で開催され、日本と韓国による共同議長体制で議論を進めることを決定した。第 87 回 GRPE（2023 年 1 月）では、議論の進め方を定義した Terms of Reference（ToR：付託事項）[2)] 案を審議した。その後、本案は合意され本格的な議論が開始された。

本報告では、WP.29 における自動車 LCA の国際的に調和された手法の開発状況について説明する。

2. 議論の状況

2.1 A-LCA IWG の概要

A-LCA IWG の全体的な作業内容は、ToR に定義されている。A-LCA IWG の目的は、まずは地球温暖化への対応を優先すべく、自動車のライフサイクル GHG 排出量について、国際的に調和された手法を透明性と一貫性の原則を尊重して開発することである。この算出手法は、WP.29 に参加している各国の政策立案に活用でき、エネルギー使用量も考慮しながら自動車産業からの GHG 排出量を削減することを促すことができる。ただし、エネルギー政策は各国に依存するため、WP.29 で一般的に議論される強制力のある自動車基準とはせず、ガイドラインに留める。

手法開発において、ISO 14040 をはじめとする既存の規格を活用する。例えば、目的と調査範囲の設定では、機能単位、システム境界、配分手順など所定の項目をカバーする、インベントリ分析においては、データ品質要件として時間的範囲、地理的範囲、技術的範囲、精度、完全性など所定の項目を満たすこととする。また、開発する手法は、自動車産業の複雑なサプライチェーンを考慮し、正確さと作業量のバランスを取るものとする。

A-LCA IWG のタイムラインとして、2015 年 6 月に GRPE、2025 年 11 月に WP.29 において国連決議を採択することが合意された。ただし、ToR の承認後に WP.29 関連会議の全体スケジュールが変更され、それぞれ 2015 年 10 月、2026 年 3 月にずれ込む予定である。

2.2 サブグループの構成

A-LCA の手法開発では、ライフサイクルの多岐に渡る専門性が必要となる。GRPE には通常、燃費や排出ガスなど自動車技術に関する専門家が多く参加してい

るが、それ以外の分野（例えば燃料製造やリサイクルなど）に関する専門家の知見も必要となる。そこで、A-LCA IWG の傘下に小規模で機動的に専門的な議論を進めるためのサブグループ（SG）を設置することが、第 6 回 A-LCA IWG（2023 年 4 月）で合意された。サブグループの構成を図 1 に示す。

	担当領域	リーダー
SG1	Overarching aspects	IWG Leading Team
SG2	Material & Material recycling	日本
SG3	Parts & Vehicle production	韓国、中国、OICA、CLEPA
SG4	Use	欧州委員会、OICA、AVERE
SG5	End of Life	日本、中国
SG6	Fuel & Energy Cycle	日本、AVERE
SG7	Drafting	フランス、OICA

OICA：国際自動車工業連合会／CLEPA：欧州自動車部品工業会
AVERE：欧州電気自動車協会

図 1 A-LCA IWG における SG の構成

2.3 レベルコンセプト

A-LCA の手法開発の大きな方向性について、A-LCA IWG で重要な論点とされたのは、自動車メーカーが実測できる 1 次データの可用性である。例えば、車両製造段階において、製造工場での実際の使用電力量が把握できれば、製造段階の GHG 排出量の精度は向上する。一方で、自動車サプライチェーンは複雑であり、その全てにおいて製造段階の 1 次データを取得することは困難である。

この課題への対応策として、1 次データの適用範囲に応じて 4 段階のレベル分けを行う「レベルコンセプト」が韓国から提案された。レベル 1 は統計等からの 2 次データを使用し、レベルが上がるにつれてメーカー特有の 1 次データの適用範囲を広げるというものである。第 8 回 A-LCA IWG（2023 年 5 月）で、この韓国提案の採用が決定したが、ライフサイクルの全ての段階で一様に適用できるのか、A-LCA 手法の適用先を定義することにならないか、手法が複数になるのではないかなどの意見もあり、IWG および各 SG で現在も議論が続いている。

2.4 各サブグループの進捗

包括的課題を担当する SG1 では、対象車種は Category 1-1（乗用車）をベースラインとすることで合意した。対象 GHG は IPCC AR6 の GWP100 に準じることに合意したが、水素も含めるか議論中である。そのほか、インフラの扱い、データ品質要件なども包括的課題として挙がっているが、専門性が高いため他の SG でも並行して議論している。

素材製造を担当する SG2 では、材料リスト、システム境界などが合意され、素材製造時のリサイクルの扱いなど議論中の項目もあるが、ドラフティングが進んでいる。

部品・車両製造を担当する SG3 は、データ品質評価、1 次データシェア、輸送、廃棄などが合意されドラフティングが進んでいるが、カットオフ基準や代表車両などは議論中である。

使用を担当する SG4 では、機能単位、システム境界、エネルギー消費、メンテナンス、代表車両等について細かい部分は議論中であるが、コンセプトは合意されドラフティングが進んでいる。フロン類等のリーケージについては、コンセプトレベルで議論中である。

廃棄・リサイクルを担当する SG5 では、リサイクルモデリング、境界条件、セカンドライフ部品の扱いなどほとんどの項目が合意され、ドラフティングが進んでいる。

燃料・エネルギーサイクルを担当する SG6 では、エネルギーモデリングについてドラフティングが進んでいるが、レベルコンセプト、水素、間接的土地利用変化などが議論中である。

SG7 はドラフティングを担当するため、第 16 回 A-LCA IWG（2024 年 9 月）から正式に活動を開始した後、ドラフティングの共通手順と基本フォーマットを各 SG に提供した。各 SG から提供されたドラフトの確認および統合作業を進めている。

3. まとめ

WP.29 の GRPE に設置された A-LCA IWG における自動車 LCA の国際調和手法の開発状況について、概要を説明した。A-LCA IWG は 2025 年 2 月まで 20 回、SG についても SG1 と SG7 以外はほぼ毎月開催され、かなり精力的に議論が進められている。日本は共同議長ならびに複数の SG リーダーを務めるなど積極的に関与しており、次の主要なマイルストーンである第 92 回 GRPE（2025 年 3 月）での Informal Documents の提出に向けて、一層貢献していきたい。

引用文献

1) ISO: "ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework", (2006)
2) UNECE："(A-LCA) Latest version of draft Terms of References (ToRs)", (2023) <https://unece.org/transport/documents/2023/01/informal-documents/lca-latest-version-draft-terms-references-tors>, （参照 2025-1-15）

ライフサイクル最適化に基づく自動車電動化ロードマップ

○中本裕哉*[1)]，横井崚佑[2)]，時任翔平[3)]
1) 大分大学, 2) 産業技術総合研究所, 3) 山形大学
*y-nakamoto@oita-u.ac.jp

1. はじめに

2023年のグローバルな新車販売における electric vehicle (EV) の割合は18%であり，5年前である2018年の2%から増加を続けている (IEA, 2024)。Thies et al. (2022)は，欧州の排出基準値を遵守するためには，域内で EV への需要を大幅に増加させる必要があるとしている。EV の lifecycle CO_2 ($LC\text{-}CO_2$)における well-to-wheel 時の CO_2 排出量は，internal-combustion engine vehicles (ICEV)に比べると少ない (Das et al., 2024)。一方で，EV は ICEV に比べて車両やバッテリー製造時の排出が多く，またそのグローバルサプライチェーンに伴う排出も比較的大きい (Nakamoto et al., 2023)。したがって，EV の普及がある地域における well-to-wheel 時の CO_2 排出量を削減するとしても，$LC\text{-}CO_2$ や他地域への排出移転をかえって増加させる可能性がある。

本研究による既存研究への貢献は，ライフサイクル最適化と製品ストック・フロー分析を組み合わせることで，ライフサイクル最適化の範囲を個人から地域全体へ，また単年から2020年から2050年までの長期間へと空間的に拡張し，よりマクロな観点から，排出削減に最大限貢献する地域の電動化ロードマップ（動的な最適戦略）を提供することである。

本研究の特徴は，well-to-wheel だけでなく国内およびグローバル $LC\text{-}CO_2$ をそれぞれ最小化する 2050 年までの動的な最適戦略を提供する点である。さらに，最適化問題の制約条件にバッテリー供給量を含めることで，資源調達のリスクを考慮した場合の最適戦略の実現可能性と，これらの制約が最適戦略に与える影響についても分析する。また，最適戦略による削減量を既存の排出削減策（例：燃費改善，車両・バッテリー製造時の排出削減，グリーン発電）と比較し，最適戦略が自動車に関する排出削減策のオプションの一つとなり得るかどうかを対費用効果の観点から検証する。

2. 研究手法

本研究では，2020年から2050年までの日本国内で生産・走行される5つの燃料タイプの乗用車 (ICEV, Hybrid Electric Vehicle (HEV), Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV), Battery Electric Vehicle (BEV), and Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV))をケーススタディとして，1年目からN年目末までの累積 CO_2 排出量を最小化する各燃料の販売シェアを求めることを目的とする。最適化問題の目的関数は，自動車の累積 CO_2 排出量（Well-to-Wheel，国内 $LC\text{-}CO_2$，グローバル $LC\text{-}CO_2$ のいずれか）であり，問題を解くことで得られる決定変数は，各年の各燃料タイプ別自動車の販売シェアρである。例えば，グローバル $LC\text{-}CO_2$ の最適化問題は，以下のように定式化できる:

$$\min_{\rho} \sum_t \sum_k Q_k(t)$$
$$s.t. \sum_k \rho_k(n) = 1,$$
$$\rho_{ICEV}(n) \geq \rho_{ICEV}(n+1),$$
$$\rho_{EV}(n+1) \geq \rho_{EV}(n), \ \forall n \in [i, N] \quad (1)$$

ここで，$Q_k(t)$は t 年における燃料種kの自動車の $LC\text{-}CO_2$ を示す。また，ICEV の販売比率ρ_{ICEV}は常に減少し，EV の販売比率ρ_{EV}は常に増加するが，5 つの燃料タイプの販売比率の合計は常に 1 になるように問題を制約する。さらに，各燃料の販売シェアは政府目標によって制約され，上限と下限が毎年設定される。

3. 結果

最適戦略では，政府の 2030 年目標よりも早く ICEV の販売をゼロにし，EV を普及させる必要があり，現在の政策目標とは大きく異なる（図 1）。例えば，Well-to-Wheel CO_2 排出量を最適化する戦略では，2030 年の燃料タイプ別販売シェアは，ICEV:0%，HEV:30.1%，PHEV:5.8%，BEV:64.0%，FCEV:0.1%となる。このシフトは，技術革新と排出ガス削減により，EV の Well-to-Wheel 排出量と $LC\text{-}CO_2$ 排出量が ICEV や HEV に比べて少ないことによる。

しかしながら，BEV の販売シェアは，最適化が Well-to-Wheel 基準か，国内 $LC\text{-}CO_2$ 基準か，グローバル $LC\text{-}CO_2$ 基準かによって大きく異なる。BEV は，Well-to-Wheel 最適化では 2030 年に，国内最適化では 2035 年に，新車販売台数の 80%を占めるべきであるが，グローバル最適化では 15%程度に抑えるべきである。

2020 年には，Well-to-Wheel，国内 $LC\text{-}CO_2$，グローバル $LC\text{-}CO_2$ 排出量は，それぞれ 111.2 Mt，124.0 Mt，140.1 Mt となる（表 S1）。グローバル $LC\text{-}CO_2$ 最適化戦略は，ベースラインと比較して，2050 年の CO_2 累積排出量を，Well-to-Wheel:251.5Mt（12.5%削減），国内:218.0Mt（9.5%），グローバル:215.4Mt（8.2%）削減する。逆に，Well-to-Wheel の CO_2 排出量を最適化する戦略では，Well-to-Wheel，国内，グローバルの累積 CO_2 排出量は，そ

れぞれ 1,705.3 Mt, 2,072.7 Mt, 2,465.2 Mt となる。この戦略では，国内とグローバルの LC-CO_2 排出量は，他の戦略に比べて増加している。政策立案者は，Well-to-Wheel CO_2 排出量のみに焦点を当てた排出削減対策は，LC-CO_2や他地域への排出移転を増加させる可能性があることを認識すべきである。

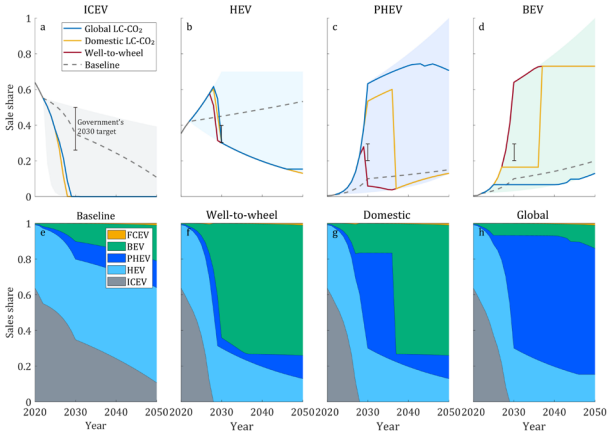


図 1: Sales share of cars by fuel type and strategy.

グローバル最適戦略（グローバル LC-CO_2最適化）は，既存の緩和策よりも大幅な削減を達成する（図 2）。既存の排出削減対策を組み合わせて適用した場合，ベースラインに対するグローバル LC-CO_2の累積削減量は，燃費改善（5.4%），燃費改善とグリーン発電（5.8%），燃費改善とグリーン発電と車両・バッテリー製造の排出改善（10.3%）であるのに対し，最適戦略の削減効果は 8.2%である。また，最適戦略は既存の排出削減対策と整合性があり，その削減効果を高めることができる。例えば，すべての対策を実施した場合，2050 年の CO_2 排出量は，Well-to-Wheel：9.3Mt，国内：12.5Mt，グローバル：15.7Mt となり，ベースラインから累積 504.8Mt（19.2%）の削減となる。

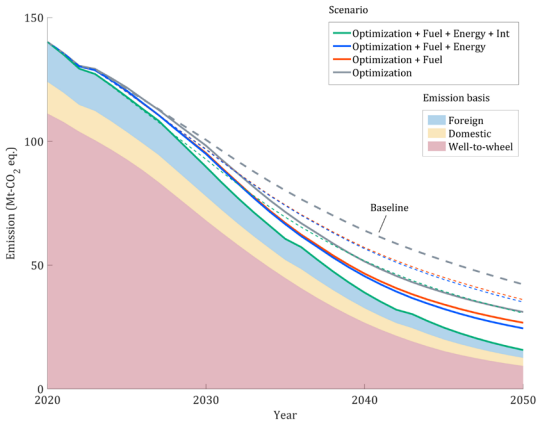


図 2: Global lifecycle CO_2 emissions under the combined scenarios.

4. まとめと考察

本研究では，自動車のグローバル LC-CO_2 排出量に対する最適な戦略に基づき，日本の自動車電動化ロードマップを導出した。BEV の普及は，既存研究（Shafiei et al., 2022; Thies et al., 2022）と整合的であり，Well-to-Wheel と国内の LC-CO_2排出量を削減し，2013 年比 46%削減という国の排出削減目標の達成に貢献する。しかし，グローバル LC-CO_2排出量を最適化するためには，BEV の販売シェアは，普及のために 15%に制限されるべきである。政策決定者は，自動車の CO_2 排出量を削減するための新たな選択肢として最適戦略を検討し，その実施に向けた措置を講じるべきである。注目すべきは，最適戦略は現在の政府目標とは異なり，政府の 2030 年目標よりも早く ICEV の販売をゼロにし，EV を普及させる必要があることである。

多くの政府が推進している BEV の普及が，地域の Well-to-Wheel 排出削減ではなく，グローバルな排出削減に貢献するためには，BEV のライフサイクルとグローバルサプライチェーン全体での排出削減を伴わなければならない。燃料効率の改善やグリーン電力発電による Well-to-Wheel の CO_2排出量削減に加え，技術革新やグリーンサプライチェーンの構築による車両やバッテリー製造段階での排出量削減も求められる。このような課題を解決することで，本研究による最適戦略を書き替え，自動車の電動化がより早期にグローバルな LC-CO_2排出の削減を実現することに寄与するだろう。

参考文献

1) International Energy Agency (2024) Global EV outlook 2024.
2) Das et al. (2024) *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 31.
3) Nakamoto et al. (2023) *Environ. Res. Lett.*, 18.
4) Shafiei et al. (2022) *Transp. Res. D.*, 102.
5) Thies et al. (2022) *J. Ind. Ecol.*, 26.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 22K13393 および大分大学学長戦略経費の助成を受けたものである。

The application of modular life cycle assessment in multi-stock-driven model: a case study of electric vehicle penetration in China

○Wenjing T. Gong*[1)], Ichiro Daigo[1,2,3)]
1) Department of Advanced Interdisciplinary Studies, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Japan.
2) Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST), The University of Tokyo, Japan.
3) UTokyo LCA Center for Future Strategy, The University of Tokyo, Japan.
* gong-wenjing1101@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

Human activities, principally through emissions of carbon dioxide, have caused global warming[1]. Promoting technological upgrades is widely regarded as an effective strategy for reducing carbon emissions[2]. For example, the promotion of vehicles upgrading from internal combustion engine vehicle (ICEV) to electric vehicle (EV) could reduce almost 30% carbon emissions in the whole life cycle[3]. Even the life cycle emission of upgraded products is smaller installing than that of conventional products, trade-offs may arise between upgraded products and carbon reductions in the whole society[4]. Material flow analysis (MFA) is a methodology used to analyze material flows and stocks within defined systems[5]. The stock-driven model is widely used in dynamic MFA to estimate the distribution of products across different life cycle stages[6]. However, the traditional stock-driven model restricts the penetration rate of upgraded products to the inflow, neglecting consumer behaviors, such as shortening the lifetime of conventional products to adopt upgraded ones. This limitation hinders the understanding of the key factors influencing carbon emissions during the penetration of upgraded products. To fill this research gap, this study designed a novel multi-stock-driven model, which includes both conventional and upgraded product stock to simulate upgraded product penetration process in the whole society. By incorporating the modular life cycle assessment (mLCA) into the model, we examined key factors influencing carbon emissions. As China's vehicle transitions rapidly from ICEVs to EVs[7], this study uses the model to conduct a case study on the penetration process of EVs replacing ICEVs in the whole society during 2005 to 2060.

2. Method and materials

As shown in Figure 1, compared to the traditional stock-driven model, this study introduced a multi-stock-driven model that includes conventional and upgraded products to estimate their stocks and flows throughout their life cycles separately. Driven by the consumer's novel-seeking behavior in the multi-stock-driven model, the upgraded product will penetrate fast to the market through shortening the expected life of conventional products by consumers.

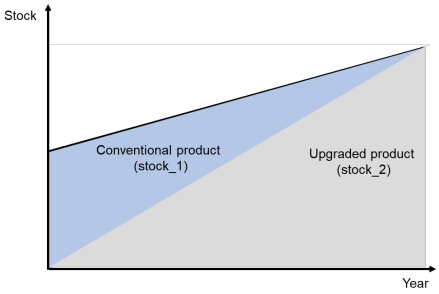


Figure 1. The concept of the multi-stock-driven model.

This study reformed the lifetime distribution (e.g., Weibull lifetime distribution) to adapt to the shorten lifetime phenomenon. The cohorts involved in early retirement will follow the "first in, first out" principle, with the

relatively "older" cohorts being retired first. The total outflow of the conventional product is composed of the outflow followed the Weibull distribution and the outflow caused by the stock change.

Modular life cycle assessment analyzes individual life cycle stages or processes, referred to as 'modules,' which are later flexibly combined rather than modeling the entire system upfront[8]. To explore the changes in carbon emissions introduced by the penetration of upgraded products, this study applied the mLCA method to integrate the carbon emissions for each life cycle stage of the two stocks. Gompertz function model and Bass new product growth model is applied to simulate the total stock of vehicles and the penetration rate of EVs, respectively.

3. Results

We examine the proportion of ICEV that shortened lifetimes relative to the expected lifetimes (Figure 2). The average service lifetime of cohorts is proportionally correlated with the percentage of units experiencing shortened lifetimes, except for the cohort manufactured in 2022, which has a slightly shorter average service lifetime compared to the cohorts manufactured in 2021 and 2023, despite having a similar percentage of the products in cohort which is shortened lifetime. It is because all units in the cohort manufactured in 2022 are projected to be discarded after 10-year use instead of longer service lifetime for other cohorts.

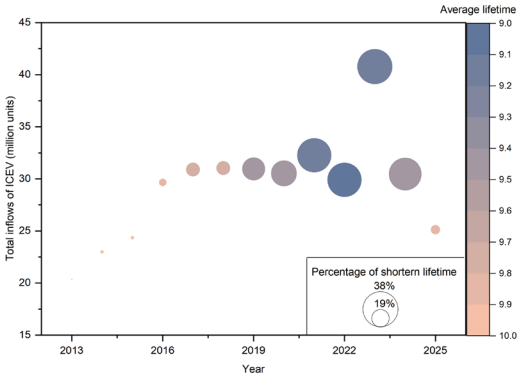


Figure 2. Inflows, percentage of shortened lifetime, and average service lifetime for each cohort.

By integrating the multi-stock-driven model with mLCA and compare the results to a scenario applied traditional stock-driven model, we found that carbon emissions will peak in 2028, one year earlier than the multi-stock-driven model. However, 163 million tons of carbon will be additionally generated compared to the Bass EV growth scenario due to the longer usage of ICEV. As EV penetration rate becomes stable, the sensitivity of factors is in the order as use, production, waste management phase, and EV expected lifetime.

4. Conclusions

In this study, we developed a novel multi-stock-driven model, incorporating both conventional and upgraded products, to simulate the product replacement process. Applied to a case study of China's rapidly evolving vehicle market, the model, combined with estimates of future vehicle stocks and EV penetration rates, suggests that EV penetration in China will follow three stages: initial, transition, and stable stages. Approximately 81.5 million ICEVs introduced between 2013 and 2025 are likely to experience shortened lifetimes between 2028 and 2037 due to the rapid uptake of EVs. By incorporating the mLCA into the multi-stock-driven model, we revealed that carbon reduction benefits from the use phase of EVs are expected to become noticeable after 2029.

References:

1. Lee, H. et al. *CLIMATE CHANGE 2023 synthesis report summary for policymakers.*

2. Lynch, J. et al. *J. Cleaner Prod.* **432,** 139746 (2023).

3. Hsieh, I. et al. *Environ. Sci. Technol.* **56,** 6836-6846 (2022).

4. Yokota, K. et al. INT J LIFE CYCLE ASS. **8,** 129-136 (2003).

5. Müller, E. et al. *Environ. Sci. Technol.* **48,** 2102-2113 (2014).

6. Daigo, I. et al. *Environ. Sci. Technol.* **49,** 8691-8696 (2015).

7. IEA. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023.

8. Barkhausen, R. et al. *J. Cleaner Prod.* **407,** 137017 (2023).

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 10:40 ~ 12:00 D会場：2317中講義室（3F）

[2-D2] バッテリー

座長：菊池 康紀 (東京大学)

10:40 ~ 11:00

[2-D2-01]

リチウムイオン電池の再生を対象とした環境影響評価

*鈴木 瑛也[1]、兵法 彩[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 東京都市大学)

11:00 ~ 11:20

[2-D2-02]

Designing the Recycling System for Spent Automotive Batteries in China with an Integrated Optimization-Assessment Model Considering Resource Circulation

*Nie Shuai[1,2]、竇 毅[1]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学、2. 中国科学技術大学)

11:20 ~ 11:40

[2-D2-03]

Flow Modeling of the End-of-Life Electric Vehicle Batteries from Japan Considering Second-hand Vehicle Export

*YANG SUYI[1]、Teah Heng Yi[1]、Kanematsu Yuichiro[1]、Ihara Tomohiko[1]、Kikuchi Yasunori[1] (1. 東京大学)

11:40 ~ 12:00

[2-D2-04]

南米におけるリチウム採掘の社会的影響評価

*三戸 亮哉[1]、張 政陽[1]、松八重 一代[1] (1. 東北大学)

©日本LCA学会

Designing the Recycling System for Spent Automotive Batteries in China with an Integrated Optimization-Assessment Model Considering Resource Circulation

○ニエ・シュアイ*[1),2)]、竇 毅[1)] 、菊池 康紀[1)]
Nie Shuai, Dou Yi, Yasunori Kikuchi
1) 東京大学, 2) 中国科学技術大学
* nieshuai@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

As the global electric vehicle fleet expands, demand for automotive lithium-ion batteries (LIBs) has soared, straining supplies of metals like lithium, cobalt, and nickel and raising concerns over end-of-life (EOL) battery pollution. Consequently, battery recycling has become increasingly important. However, designing cost-optimal recycling systems to meet targets for critical metals (Li, Co, Ni, Mn) remains challenging—a topic that could guide national and regional strategies for managing EOL automotive batteries. To address this gap, this research presents an Integrated Optimization-Assessment Model that designs a cost-optimal recycling system under various scenarios and evaluates its economic and environmental outcomes.

2. Methodology

To estimate EOL battery volumes, we built a city-level, stock-driven, chemistry-specific dynamic MFA model covering 2010–2050 in China. We focus on average battery inflows/outflows from 2040 to 2050.

Using these MFA outputs, we developed a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) model adapted from EverBatt[1)] to identify the cost-optimal spatial configuration under various scenarios. We define the recycling rate as the fraction of recycled battery mass over total EOL battery mass, and we set four scenarios: 25%, 50%, 75%, 100%. The corresponding circularity rate is the share of recovered critical metals relative to the metals needed for new EV batteries.

Finally, we conducted a prospective LCA using ReCiPe midpoint indicators (Global Warming Potential, Human Toxicity Potential (carcinogenic)). The system boundary covers collection, transportation, preprocessing, and hydrometallurgical recovery of LIBs. We employed PREMISE[2)] and Ecoinvent 3.10[3)] to generate future background databases matching three climate change scenarios: SSP2-base, SSP2-RCP2.6, SSP2-RCP1.9.

3. Results

The circularity rate increases with the recycling rate, reaching 4.00%, 8.53%, 13.18%, and 18.18% under the 25%, 50%, 75%, and 100% scenarios, respectively.

The cost-optimal layouts spread from coastal cities to inland areas as recycling rates rise. At 25%, the recycling system is focused on eastern and southern coastal cities with a few large facilities benefiting from economies of scale. At 50%, it expands inland with some smaller centers. By 75%, more inland cities join the network, and at 100%, the system covers the entire country.

Regarding economic performance, higher circularity rates increase unit recycling costs partly because the average transportation distance grows with system expansion. Another reason is the higher proportion of NMC batteries, which are more expensive, thereby raising total costs. Similarly, LCA results show that higher recycling rates lead to increased environmental impacts, driven by longer transportation distances and greater use of chemical reagents for NMC battery recycling.

Meanwhile, the choice of future background database significantly affects environmental impact results. Using SSP2-RCP2.6 yields notably lower impacts than SSP2-base, whereas SSP2-RCP1.9 yields even lower impacts than SSP2-RCP2.6. This demonstrates that battery recycling impacts depend not only on the recycling technology itself but also on the selected background data, underscoring the importance of choosing a suitable database for policy-relevant conclusions.

4. Reference

1) Q. Dai, J. Spangenberger, S. Ahmed, L. Gaines, J. Kelly, and M. Wang, “EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model” (2019).
2) R. Sacchi, T. Terlouw, K. Siala, A. Dirnaichner, C. Bauer, B. Cox, C. Mutel, V. Daioglou, G. Luderer, Renew Sust Energ Rev, 160, (2022), p. 112311.
3) G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema, Int. J. LCA, 21(9), (2016), pp. 1218–1230.

Flow Modeling of the End-of-Life Electric Vehicle Batteries from Japan Considering Second-hand Vehicle Export

○Yang Suyi*[1)], Heng Yi Teah [1)], Yuichiro Kanematsu [1)], Tomohiko Ihara [1)], Yasunori Kikuchi [1)]
1) The University of Tokyo
* yangsuyi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

The current transportation electrification is progressing unevenly. Developed countries are adopting electric vehicles (EVs) faster than developing countries except for China. With the anticipation of battery waste, the developed countries are more prepared to treat the spent batteries, including the heavy investment in battery recycling technology. However, the leakage of spent batteries to developing countries through the export of second-hand EVs is unaccounted for. Japan is the second-largest exporter of second-hand vehicles in the global market. In 2023, 58% of all spent vehicles were exported for reuse[1]. Most of their destination countries are developing and are often less prepared to treat spent batteries, thus leading to an increase in the overall environmental impact of EVs. Therefore, the situation of Japanese used vehicles is representative of the developed countries when assessing the environmental performance of EV-related policy.

2. Methods

This study aims to fill in the research gap by modeling the flow of end-of-life EV batteries, including cross-border transportation and recycling at the destination. The environmental impact of the flow is modeled with a life cycle assessment (LCA) to clarify the difference in the performance between the end-of-life battery treatments in Japan and the destination countries.

The export data is sourced from the Trade Statistic of Japan. The foreground inventory for battery recycling is compiled from previous studies and supplemented with the GREET model. The background data on transportation and energy emissions are obtained from Ecoinvent 3.10.

First, we estimate the quantity of waste batteries in Japan from 2025 to 2050 baseing on a dynamic material flow model[2] that considers EV sales goal by Japanese government. We then estimate the scale of second-hand EVs exporting to other countries based on the current trend of second-hand vehicle trade.

Next, we analyze the environmental consequences of the scenarios of battery flows, second-hand vehicle use, and collection and recycling in each destination country. We specifically consider the differences in energy supply systems in the country, such as the electricity mix and the air emission standard. We also consider the feasibility of implementing recycling technologies, including pyrometallurgical, hydrometallurgical, and direct cathode recycling, based on the technological readiness of each country.

3. Results

In our estimation, EVs will account for 4.4% of end-of-life vehicles (ELVs) by 2035, and this share expected to rise to 36% by 2050. Based on this trend, the number of batteries accompanying second-hand EV exports is expected to exceed 500,000 units in 2050.

In the results of LCA, that long-distance cross-border transportation has a significant environmental impact. In the case of second-hand EVs exported to Chile, the life cycle greenhouse gas emissions of shipping are four times greater than that of the battery recycling process. In addition, the electricity mix of the destination countries is critical to the performance. In the case of second-hand EVs exported to New Zealand and Kenya, the higher renewable energy in those countries favors overseas recycling with hydrometallurgical and direct cathode technologies.

4. Conclusion

The findings of this study are expected to recommend to policymakers the consideration of the extended producer responsibility and international support for managing waste batteries, especially for developing countries that are transitioning toward transportation electrification.

Acknowledgement

This study is financially supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP24K15399 and JST SPRING, Grant Number JPMJSP2108.

Reference

[1] Japan Automobile Recycling Promotion Center. (2023). 2023 Automobile Recycling Databook. https://www.jarc.or.jp/data/databookcomplete/

[2] Dou, Y., Heiho, A., Tokoro, C., et al. (2024). Novel precise separation technology will significantly improve the circulation of critical metals in automotive lithium-ion batteries. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4213507/v1

南米におけるリチウム採掘の社会的影響評価

Assessing the social impacts of lithium mining in South America

○三戸亮哉*[1)]、張政陽[1)]、松八重一代[1)]
Ryoya Mito, Zhang Zhengyang, Kazuyo Matsubae
1) 東北大学
* mito.ryoya.q4@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

今日、電気自動車やエネルギー貯蔵技術への世界的な関心が高まり、リチウムイオン電池の生産に必要なリチウムの需要が急速に増加している。リチウムは、主に鉱石や塩湖のかん水から生産されているが、特に南米のリチウム・トライアングルは埋蔵量が多く、今後リチウム採掘が加速していくことが考えられる。一方、Slattery ら（2023）[1)]は、水資源の利用や雇用、公衆衛生、インフラ等の課題が地域の会議で議論されていると指摘し、リチウム採掘が地域住民の日常生活に及ぼす影響への懸念を示している。しかし、リチウム採掘が地域社会に与える影響に関する研究は不足している。そこで、本研究では、南米の主要な塩湖のリチウム埋蔵量や地理情報、水ストレス指標を用いて、異なるリチウム抽出技術による地域コミュニティへの社会的影響評価を行った。

2. 手法

本研究では、まず南米 3 ヵ国（アルゼンチン、ボリビア、チリ）の主要な塩湖の埋蔵量推定を行った。また、塩湖の地理情報を用いて塩湖別の水ストレス指標 Available Water Remaining (AWARE) を特定した。その結果を踏まえ、抽出技術の違いによる水使用量を用いて、塩湖別に水使用量がどのように変化するのかを定量的に評価した。

2.1 塩湖のリチウム埋蔵量の推定と地域別水ストレスの特定

2.1.1 リチウムの埋蔵量の推計

既存研究[2)]から図 1 を作成し、塩湖の面積とリチウムの埋蔵量に正の相関があることがわかった。ここから、各塩湖の面積からリチウム埋蔵量の推計を行った。

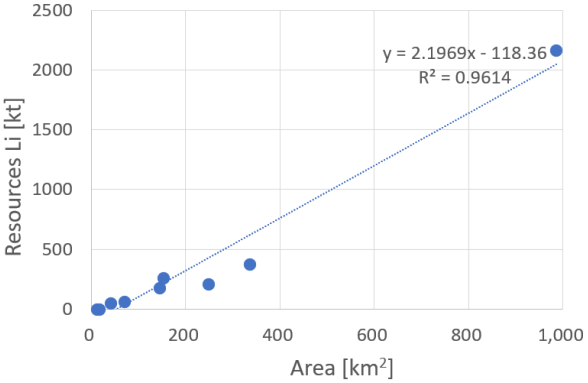


図 1. 塩湖の大きさと埋蔵量の関係

2.1.2 地域別の水ストレス

地域別の水ストレスを求めるために AWARE[3)]を使用した。AWARE とは、水資源の利用可能性を評価する指標で、特定の流域で人間や生態系の需要を満たした後に残る水量である。Human Water Consumption(HWC)は人間の水使用量、Environmental Water Requirements(EWR)は生態系の水必要量を表す。

$$AMD_i = \frac{(\text{Availability} - \text{HWC} - \text{EWR})}{\text{Area}}$$

$$\frac{1}{AMD_i} = \frac{Area}{A - D} = \frac{Area}{A - HWC - EWR} = STE_i$$

$$\text{AWARE} = \begin{cases} AMD_{world\ ave.}/AMD_i & for\ D_i < A_i \\ 0.1 & for\ AMD_i > 10 \cdot AMD_{world\ average} \\ 100 & for\ D_i \geq A_i\ or\ AMD_i < AMD_{world\ average} \end{cases} / 100$$

2.1.3 計算方法

塩湖の地理情報、塩湖の面積、地域別の AWARE の値を使用した。次に、QGIS を用いて、3 ヵ国の主要な 10 の塩湖を地図上にプロットし、AWARE の値を特定した。

2.2 リチウム採掘方法と塩湖別水ストレスの比較

2.2.1 南米のリチウム抽出技術

Evaporation processes(EVA)では、太陽光と風による蒸発で塩水が濃縮され、中間塩の回収や不純物の除去が行われる。また、この過程で淡水も消費される。一方、Direct Lithium Extraction (DLE) は、リチウムを効率的に濃縮する技術の総称で、最大 90%の抽出効率と EVA よりも小さい面積かつ短時間での運用が可能である。

2.2.2 採掘時の水使用量

2.1 で選定した 10 の塩湖に対して、全埋蔵量を採掘するときの水使用量を AWARE で重み付けを行い、計算した結果を図 3 に示す。また、2 つの採掘方法について比較を行った。

表 1. 1kg の Li_2CO_3 生産とリチウム採掘時の水使用量[kg]

	EVA	DLE
Input demand/kg Li_2CO_3	38	474

3. 結果

表 2.塩湖の埋蔵量と AWARE の関係

No.	塩湖名	埋蔵量 Li[kt]	AWARE
①	Uyuni	27.60	25
②	Olaroz	9.15	1.8
③	Atacama	7.39	95
④	Tres Quebradas	3.45	29
⑤	Tres Quebradas	2.13	2.7
⑥	Pintados	1.82	100
⑦	Hombre Muerto	1.49	2.7
⑧	Pedernales	0.60	65
⑨	Salar Grande	0.46	44
⑩	Punta Negra	0.41	100

※選定した 10 の塩湖の埋蔵量の合計は、3 ヵ国のリチウム埋蔵量全体の約 96%である。

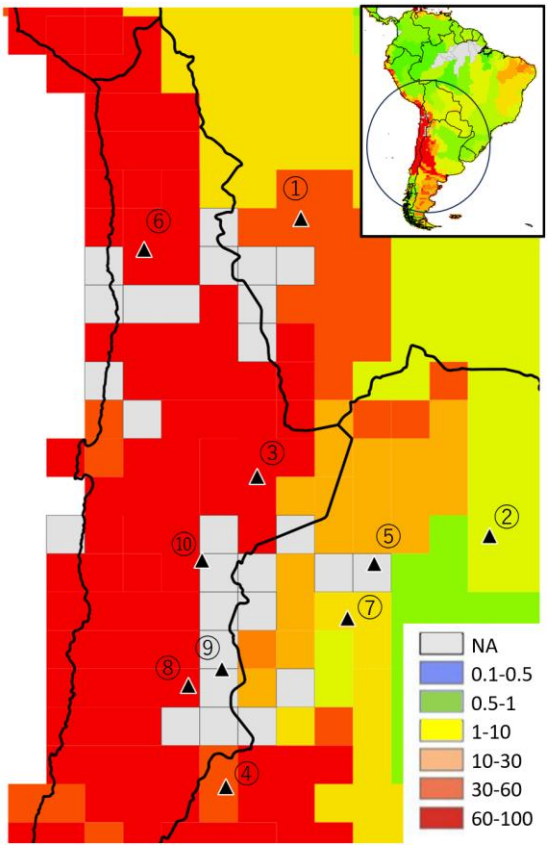


図 2. 塩湖の場所と埋蔵量、AWARE の関係

図 3 から①と③に関して、埋蔵量で約 4 倍の違いがあるが、水ストレスを考慮すると、③の塩湖の方が水ストレス値は高くなる。また、採掘方法の違いに関して、水ストレス値が高い場所では、相対的に大きな差が出るのに対して、水ストレス値が低い場所だと大きな差はない。

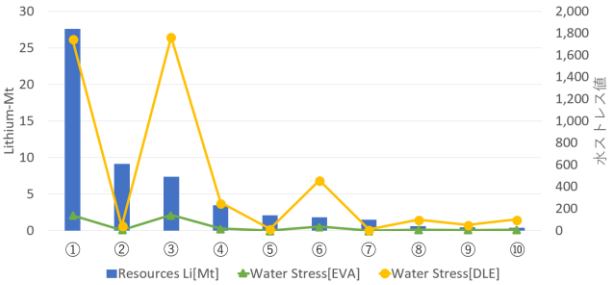


図 3. リチウム埋蔵量と水ストレスの関係

4. まとめ

リチウムの需要拡大により、ボリビア、アルゼンチン、及びチリでは、リチウムの開発と採掘の拡大が予想される。これらの国々の塩湖が存在する地域は、水ストレスが高く、塩湖の場所や採掘方法により、水ストレスの値が大きく変わる。

近年、南米では、リチウムの採掘活動による鉱物紛争が発生しているが、リチウムの採掘と地域コミュニティに関する社会的影響評価は発展途上にある。

今後は、リチウムの採掘に伴う水使用量と採掘地域を詳細に特定し、採掘活動が与える地域コミュニティへの影響を定量的に評価する。また、将来的な鉱物紛争の予測についても研究を進めていく。

5. 参考文献

1) Slattery, M., Kendall, A., Helal, N., & Whittaker, M. L. : Energy Research & Social Science, 99, (2023), pp.1-11
2) José Cabello: Ore Geology Reviews, 128, (2021), pp.1-5
3) Anne-Marie Boulay ほか:Int J Life Cycle Assess 23, (2018), pp368-378
4) Vanessa Schenker, Christopher Oberschelp, Stephan Pfistera: Conservation and Recycling, 187, (2022), pp.1-10

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 13:00 ~ 14:40 D会場：2317中講義室（3F）

[2-D3] 環境と安全

座長：稗貫 峻一 (電力中央研究所)

13:00 ~ 13:20

[2-D3-01]

障害調整生命年を用いた環境影響と社会影響の統合的評価

*中野 勝行[1,2]、塚原 建一郎[2]、田原 聖隆[2] (1. 立命館大学、2. 産業技術総合研究所)

13:20 ~ 13:40

[2-D3-02]

原発事故が周辺地域の社会経済に与えた影響

*鍛治屋 智啓[1]、中石 知晃[2] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済学研究院)

13:40 ~ 14:00

[2-D3-03]

プロセス事故の直接・間接ヒト健康影響を考慮したライフサイクル影響評価手法の構築

*川原 大知[1]、稗貫 峻一[1,2]、中山 穣[1]、鈴木 智也[1]、三宅 淳巳[1]、伊里 友一朗[1] (1. 横浜国立大学、2. 電力中央研究所)

14:00 ~ 14:20

[2-D3-04]

低GWP・可燃性代替冷媒を対象とした環境影響・火災事故リスク評価

*安藤 伊吹[1]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学)

14:20 ~ 14:40

[2-D3-05]

冷媒代替におけるリスクトレードオフの分析：R32とR290の例

*菊池 康紀[1]、山木 亜由美[1]、藤井 祥万[1]、尾下 優子[1] (1. 東京大学)

©日本LCA学会

障害調整生命年を用いた環境影響と社会影響の統合的評価

Integrated Assessment of Environmental and Social Impacts Using Disability-Adjusted Life Years

○中野勝行*[1,2]、塚原建一郎[2]、田原聖隆[2]
Katsuyuki Nakano, Kenichiro Tsukahara, Kiyotaka Tahara
1) 立命館大学, 2) 産業技術総合研究所
* nakanok@fc.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

日本版被害算定型影響評価手法（LIME）では環境負荷物質による人間健康への影響を障害調整生命年（DALY）を用いて定量評価する。しかし、人間健康への影響は自然災害や労働災害といった他の社会的事象によっても発生する。そこで、本発表ではDALYを用いてこれら社会的な事象に起因する人間健康への潜在的な影響をDALYを用いて定量化することで、環境面と社会面の統合的評価の可能性について検討する。

2. 方法

本報告では社会的な事象に起因して発生する可能性のあるDALY（potential-DALY, pDALY）の発生源として自然災害、労働災害、児童労働を選定した。各側面のリスク係数（pDALY/人）を作成し、IDEA物量連関表に加えた。以下に各側面のデータ追加方法について述べる。

2.1 自然災害

災害に関するデータベースEM-DAT[1]から、2014年から2023年までに発生した5598件の自然災害を抽出した。自然災害は、Flood、Storm、Extreme temperature、Earthquake、Wildfireなど、12種類に分けられている。これら自然災害による死者数を各国の人口[2]で除し、10年間の自然災害による国別死亡割合を作成した。年齢に関するデータが不明であるため、後述の労働災害における平均DALY（33.4 DALY/人）を用いた。

2.2 労働災害

国内は死亡災害統計[3]を用いて産業別の労働災害による死亡割合を求めた。そして、死亡者の年齢に関するデータもあるため、簡易生命表[4]を用いてpDALYとした。本データをIDEAの各プロセスにあてはめ、基準フローあたりの労働災害による死亡割合を算定した。

海外については各国の労働災害に関する統計[5]を用いて労働者1名あたりの死亡割合を算定した。

2.3 児童労働

知識・経験の少ない子どもの労働は事故が発生しやすい。また死亡事故が発生した場合は平均余命が長いためDALYが多くなる。さらに、労働災害といった直接的な健康被害に加えて、教育機会のはく奪による長期的な影響もある。そこで、教育と事故に起因するリスクを評価に加えた。なお、児童労働時の事故に伴うリスクは労働災害に含めず、児童労働として扱った。具体的なリスク係数（pDALY/人）算出方法については丸岡ら[6]を参照されたい。

2.4 インベントリ分析と影響評価

IDEA 物量連関表を用いてプロセス別労働者数を整理した。各国からの製品別輸入割合を用いて仮想的な国別労働者の輸入量を算定した。具体的な算出方法については中野ら[7]を参照されたい。これら製品別の仮想的な国別労働者輸入量と前述の自然災害、労働災害、児童労働に起因するpDALYを用いることで、社会的なpDALYを試算した。

3. 結果と考察

3.1 国別DALYの内訳と規模

各国の自然災害、労働災害、児童労働のpDALYの内訳を図1に示した。日本、米国は労働災害がほぼすべてを占めた。イタリア、英国、ドイツなど欧州先進国は自然災害の割合が一定程度あった。これは主に熱波による死者が近年増加しているからである。フィリピン、ラオスなどでは児童労働の割合が高かった。

国別のpDALYとGDPの関係を図2にまとめた。縦軸横軸とも対数であり、円の大きさは各国の人口を示している。一人当たりのGDPが増加すると一人当たりのpDALYは減少する傾向がみられた。

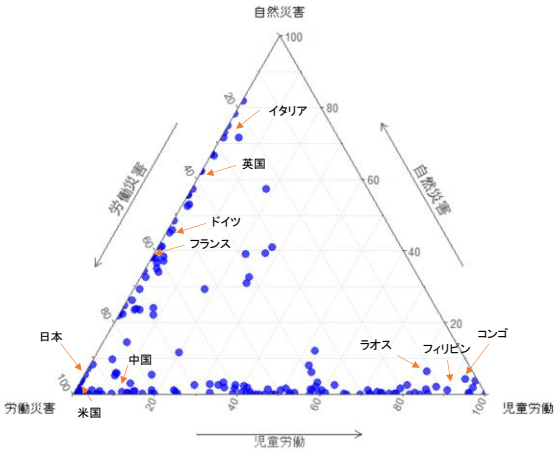


図1 リスク係数（pDALY）の内訳

3.2 製品評価の試行

IDEA の「革製ケース」と「紳士用革靴, 23cm 以上」を例として、基準フローあたりの社会的 pDALY を算定した。国別の分析結果（図 3）では、革製ケースでは中国のリスクが最も高く、次いでベトナム、インドと続いた。一方、紳士靴ではインドが最もリスクが高く、カンボジア、バングラデシュ、ミャンマーと続いた。

原因別の分析結果（図 4）からは、革製ケースと紳士靴とも、労働災害と児童労働のリスクが高く、自然災害のリスクが低いことが示された。一部はイタリアから輸入しているが、主に日本はアジア諸国から輸入しているものが多いため、児童労働のリスクが一定程度あった。

環境負荷物質に伴う人間健康リスクを LIME2 で評価した結果と本分析結果を合算し、その割合を図 5 に示した。革製ケースと紳士靴とも社会的 pDALY がより大きかった。

4. まとめ

DALY という単位を用いることで、環境影響と社会的影響に伴う DALY と合算して評価できる可能性があることが示された。また、IDEA を用いたため、産業連関表よりも詳細な産業分類で分析ができた。

ただし、当該社会的 DALY は様々な仮定を用いた評価である。例えば、自然災害は過去 10 年間の平均値を用いているため、必ずしも将来を予測しているものではない。労働災害は国内については産業別にリスク係数を作成したが、海外は国別でのみリスク係数を作成している。児童労働に関しては元データが古く、不確実性が大きいと考えられる。今後、データの見直しにより結果が大きく変わる可能性があることに注意を要する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 22K12491 の助成を受けた。

引用文献

1) CRED/UCLouvain: “EM-DAT”, (2025). （オンライン）, 入手先< https://public.emdat.be/>, （参照 2025-1-16）
2) UN: “World Population Prospects 2024”, （オンライン）, 入手先< https://population.un.org/wpp/>, （参照 2025-1-16）
3) 厚生労働省：“死亡災害統計”, (2023)
4) 厚生労働省：“令和 3 年簡易生命表”, (2023)
5) World Bank: “World Development Indicators”, (2024), （オンライン）, 入手先< https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators >, （参照 2025-1-16）
6) 丸岡ら:“第 20 回日本 LCA 学会研究発表会”, (2025), 2-P3-19
7) 中野ら:“第 19 回日本 LCA 学会研究発表会”, (2024), 3-C1-01

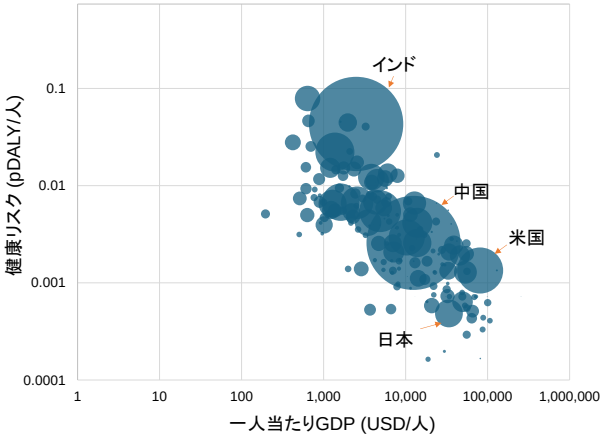


図 2 一人当たり GDP とリスク係数（pDALY）（円の大きさは人口）

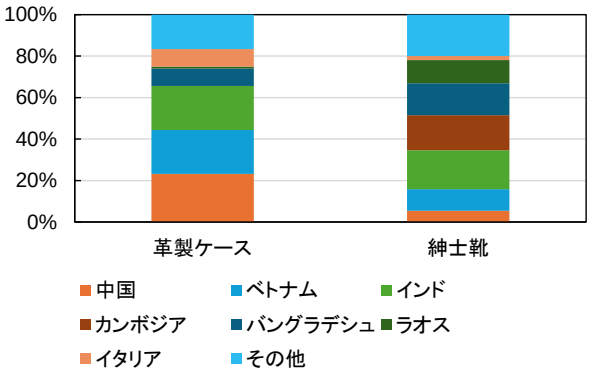


図 3 国別の社会的 pDALY 内訳

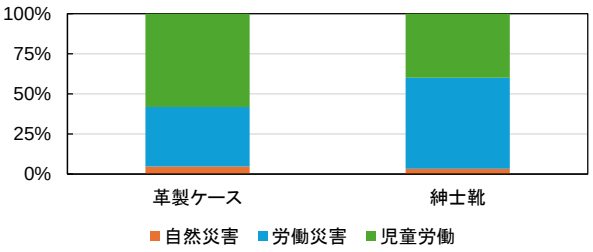


図 4 原因別の社会的 pDALY 内訳

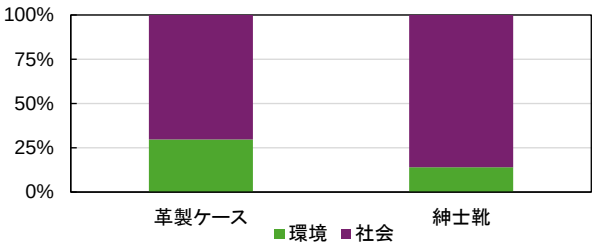


図 5 環境 DALY と社会的 pDALY の割合

福島原発事故が川内原発周辺地域に与えた影響

The Impact of the Fukushima Daiichi Accident on Land Prices near the Sendai Nuclear Power Plant in Kagoshima Japan

○鍛治屋智啓*[1)]、中石知晃[2)]
Tomoihro Kajiya, Tomoaki Nakaishi
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学研究院
*kajiya.tomohiro.540@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

原子力発電はカーボンニュートラル達成に向けて重要な選択肢の 1 つである。原発は CO_2 の排出量を抑えながら安定的な電力供給ができるという利点がある。一方で、事故リスクも高く、その潜在的な費用は高い。実際に、2011 年 3 月に起きた福島原発事故は原発周辺地域に大きな影響を与え、その事故処理費用は推定 21 兆円にも上った[1)]。

事故による直接的な損害（放射能汚染）はよく試算されているが、原発の外部性という間接的な影響はあまり考慮されていない。Rosen（1974）[2)]は公共施設の建設やサービス供給による外部性は地価に反映されることを明らかにした。また、Bauer et al.（2017）[3)]は福島原発事故によってドイツの原発から 5 ㎞以内の住宅価格が減少し、地域経済の衰退およびエネルギー政策の転換につながったことを明らかにした。ここで、これらの研究は日本で起きた原発事故がドイツやアメリカの原発周辺地域の住宅価格に与えた影響を推定したものであることを注意する必要がある。言い換えれば、原発への近接性が周辺地域に与えた日本特有の影響については依然として明らかにされていない。

本研究では、福島原発事故による日本の原発周辺地域の地価の変化についてヘドニックアプローチに基づく調査を行った。具体的に、国土交通省による土地総合情報システムの不動産取引データを基に差分の差（Difference in Difference：DID）分析を実施した。分析の結果、原発周辺地域の地価は、事故後に追加的に約 7.2%上昇することが明らかになった。

2 研究手法

本研究では、ヘドニックアプローチに基づく DID 分析を実施する。1 平方メートルあたりの地価を自然対数としたヘドニック価格方程式は以下で定義される：

$$Y_{ijt} = X_{ijt} + \gamma NPP_{ij} + \delta\left(NPP_{ij} \times Fuk_t\right) + D_j + D_t + \epsilon_{ijt} \quad (1)$$

ここで、iは取引、jは都市、tは年次を表す。被説明変数であるY_{ijt}は取引された土地の㎡単価を表す。NPP_{ij}は各原発の近くでおこなわれた取引を表すダミー変数であり、Fuk_tは東日本大震災の福島原発事故が起きた 2011 年以降の取引を表すダミー変数となっている。X_{ijt}は、土地属性が地価に与える影響を制御するための変数ベクトルであり、土地の用途、土地の形状、面積などの変数が含まれている。D_jは都市固定効果、D_tは年次固定効果、ϵ_{ijt}は誤差項である。事故による処置効果は δ となっており、これは原発周辺の地域と原発から遠い地域の平均取引価格の福島第一原発事故前後の変化の違いをとらえている。

3. データ

本研究では、国土交通省の「土地総合情報システム」から得られた不動産データ[4)]と「国土数値情報」の町・大字レベルの緯度経度データから計算した距離データ[5)]をマッチングしたデータを使用している。被説明変数となる 1 ㎡あたりの取引価格単価は、不動産取引データの取引価格総額を面積（㎡）で割ったものである。被説明変数に取引価格を選んだのは、取引価格の方が公示地価よりも実際の土地需要や取引動向を反映しているからである。公示地価は不動産鑑定士によって決められる地価であり、放射能汚染のような前例のない事象が発生した直後に、その影響をどのように評価するかは実際のところ明らかでない[6)]。

分析の対象地域は、川内原発と玄海原発周辺の宅地（土地）となっている（図 S1 参照）。分析期間は、2010 年第 1 四半期から 2011 年第 4 四半期までとなっている。使用する変数の記述統計を以下の表 1 に示す。

表 1 記述統計

	原発事故前		原発事故後		DID
	0-50 (km)	50-100 (km)	0-50 (km)	50-100 (km)	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
取引価格	5.05	3.59	5.43	3.73	2.35
(千/㎡)	(6.21)	(4.68)	(6.35)	(5.00)	(-1.82)
面積	3.32	3.66	3.28	3.82	-0.21
(百/㎡)	(2.95)	(3.15)	(3.04)	(3.22)	(0.01)
前面道路	6.97	6.65	6.84	6.76	-0.24
幅(㎡)	(4.76)	(4.33)	(4.35)	(4.50)	(-0.58)

住宅地	0.84	0.84	0.85	0.83	0.02
(%)	(0.37)	(0.36)	(0.36)	(0.37)	(-0.02)
観測数	1446	3437	1189	2554	8626

注）数値は平均値、カッコ内は分散。

4. 結果

表 1 によると、平均取引価格は原発から 50km 圏内の土地（+3760 円）、50km 以上離れた土地（+1402 円）と、ともに、福島原発事故の前後と比較して上昇した。そして、これら 2 つの差の差、すなわち無条件差分（DID）推定値は+2357 円である。しかし、この推定値は統計的に有意とは言えないものである。

表 2 は、取引価格と原発からの距離、および土地のその他の特性の回帰結果を示している。(1) 列は処置群を 0～50km とし、(2) 列は原子力災害対策指針で定められている避難区域を処置群とした分析結果となっている。避難区域は paz、upz、ppa の 3 種類が定められており、それぞれ原発から 0～5km、5～30km、30km～50km 圏内となっている（図 S2 参照）。(1) の分析において、処置効果の係数は正で、統計的に有意であった。推定された係数 0.072 は福島原発事故後、原発から 50km 圏内の地価が約 7.2%上昇したことを意味している。(2) の分析では、paz に対する処置効果の係数は負、ppa に対する処置効果の係数は正となり、統計的に有意であった。これは、福島原発事故後に、paz 圏内では、地価が約 55.9%減少し、反対に ppa 圏内では、9%増加したことを示している。

表 2 差分の差分析の結果

	(1)	(2)
Treatment group	Within50km	paz upz ppa
within50×Fukushima	0.072***	
	(0.026)	
paz×Fukushima		-0.559**
		(0.265)
upz×Fukushima		-0.010
		(0.044)
ppa×Fukushima		0.090***
		(0.027)
Land specification	Y	Y
Time F.E.	Y	Y
City F.E.	Y	Y
Adjusted R Square	0.686	0.686

注）*, **, ***, 10% 5% 1%水準で有意。カッコ内は地域単位でクラスタリングされた標準誤差。

図 1 では、処置群と対照群の平行トレンドが検定されている。具体的に、ここでは、福島原発事故から 1 四半期、2 四半期、3 四半期前のダミー変数と within50km の交差項をモデルに追加した分析を行った。図 1 によると、交差項の係数はすべて有意でない。これにより、福島第一原発事故前に処置群と対照群の取引価格が異なるトレンドを辿っていたという証拠は見つからない。さらに、処置効果が時間の経過で、どのように変化したのかについても調査した。福島原発事故後のダミー変数と within50km との交差項の係数は、事故から 3 四半期後のみ有意に正となった。

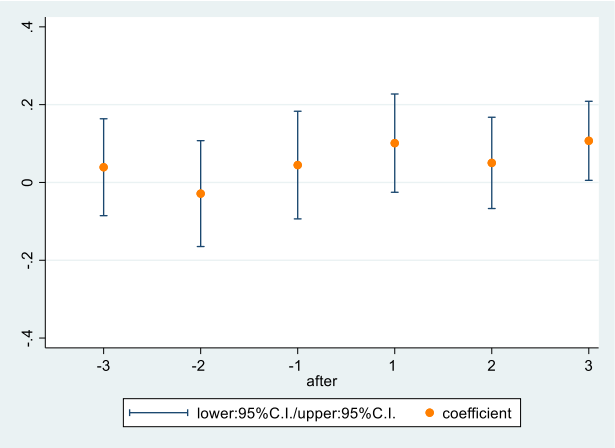


図 1 イベントスタディの結果

5. まとめ

本研究では、福島原発事故は川内・玄海原発から 50km 以内で地価を上げる影響をもたらしたことが明らかになった。5km 以内の地域では、地価が大幅に減少し、被害総額は 1m^2 あたり 7785.86 円となり、30～50km 圏内では 1m^2 あたり 5583.40 円増加するという地理的な異質性も確認することができた。

引用文献

1) Takizawa H.: “Current Status of Japan’s Nuclear Power”, (2021), pp.1–39
2) Rosen S.: J. Polit. Econ., 82(1), (1974), pp.34–55
3) Bauer T.K., Braun S.T., Kvasnicka M.: J. Urban Econ. 99, (2017), pp.94–106
4) 国土交通省：”不動産価格（取引価格・成約価格）情報の検索・ダウンロード”, 不動産情報ライブラリ, 入手先 <https://www.reinfolib.mlit.go.jp/realEstatePrices/ >, （参照 2024-1-16）
5) 国土交通省：”位置参照情報”, 国土数値情報ダウンロードサイト, 入手先< https://nlftp.mlit.go.jp/>, （参照 2024-1-16）
6) Kawaguchi D., Yukutake N.: J. Urban Econ., 99, (2017), pp.148–160

Supporting Information

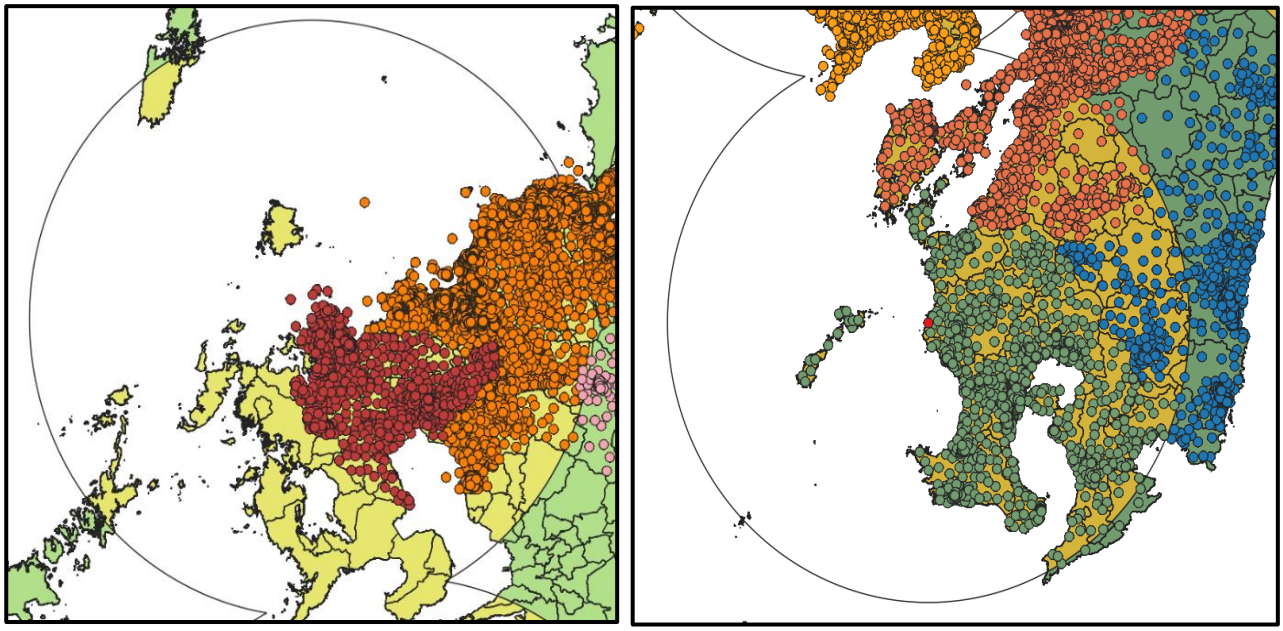


図 S1 川内原発・玄海原発周辺 50km 以内の地域

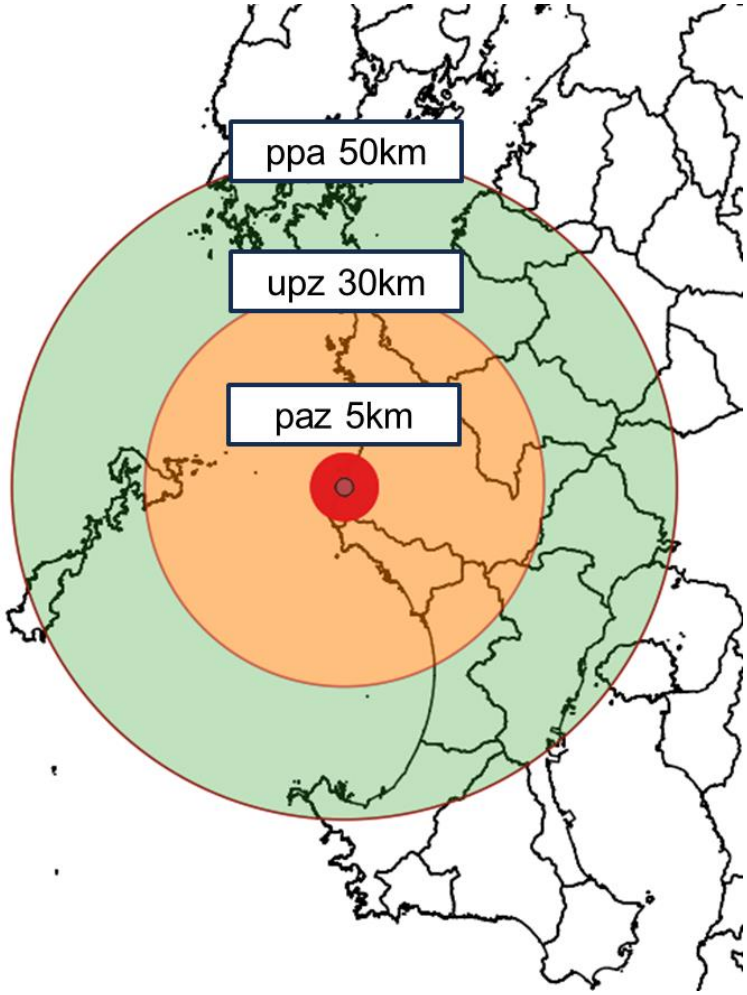


図 S2 paz upz ppa の範囲図

プロセス事故の直接・間接ヒト健康影響を考慮したライフサイクル影響評価手法の構築

Development of Life Cycle Impact Assessment Method Considering Direct and Indirect Human Health Impacts of Process Accidents

○川原大知*[1)]、稗貫峻一[1,2)]、中山穣[1)]、鈴木智也[1)]、三宅淳巳[1)]、伊里友一朗[1)]
Daichi Kawahara, Shunichi Hienuki, Jo Nakayama, Tomoya Suzuki, Atsumi Miyake, Yu-ichiro Izato
1) 横浜国立大学, 2) 電力中央研究所
* kawahara-daichi-gm@ynu.jp

1. 背景・目的

化学製品の製造プロセスは、爆発・火災事故のリスクを内包しており、事故により周辺の人々、構造物等に対して即時に甚大な被害をもたらす。しかし、多くのライフサイクル影響評価(LCIA)は、事故が発生しないことを想定した定常時の製造活動に係る影響を評価している。また、欧州環境毒性化学学会が提案したLCIA で考慮すべき影響領域のリスト[1)]にも事故が挙げられており、LCIA における事故の重要性が指摘されている。事故を考慮した LCIA 実施のためには、安全対策の効果を定量化し、定常的な健康・環境影響と事故による影響の両面を包括的に低減する上で重要な情報を提供する手法構築が必要となる。

これまでに我々は、プロセス事故を考慮した LCIA 実施に向けて、①事故により生成・放出される化学物質量の推算と LIME の被害係数の組み合わせによる事故時の環境への化学物質放出に伴う長期的なヒト健康影響を分析する手法[2)]や、②事故による従業員・周辺住民の人命・健康への物理的な影響を障害調整生命年(DALY)により算出する手法[3)]を構築してきた。これらの手法は DALY を用いて、事故により環境中に放出された化学物質が引き起こす直接のヒト健康影響の定量分析を可能にした。さらに、事故時の防災・減災対応、事故後の廃棄物処理、復旧作業等の波及的に発生する活動に伴う間接的な影響を総合した分析の重要性を示してきた。そこで本研究では、爆発・火災による構造物への影響範囲、影響強度の推定方法[4)]と、LIME の被害係数との組み合わせにより、事故の間接ヒト健康影響を DALY により算定する手法を構築する。

2. 事故の間接ヒト健康影響の定量分析手法

本研究で構築した分析手法のフローを図 1 に示す。まず、分析対象施設とその周辺の環境をモデル化し、条件を設定する。この段階において、使用されている資源の種類、場所、量を設定する。次に、イベントツリー分析(ETA)を実施し、漏洩発生後の事象進展を設定し、事故シナリオを構築する。その後、次の(a)-(c)により、事故の間接ヒト健康影響を分析する。

(a) 爆発・火災事故の影響度解析

漏洩する物質の性状やプロセス条件から、影響度算出モデル式[4)]を用いて爆発・火災の影響範囲と強度を推定する。例えば、爆発の場合は最大過圧とインパルスを算出する。その強度の影響への暴露による構造物の損傷確率は Probit 関数を用いて算出できる。構造物を対象とした Probit 関数には損傷度合いに応じて Collapse, Major, Minor の 3 種類が存在し[4)]、それぞれ構造物の 100%, 50%, 10%が損傷するとして計算した。

(b) 事故後の活動を通じたインベントリの推算

(a)で算出した各地点での構造物の損傷確率および損傷度合いと、その地点における各資源の使用量の積から、現場で発生する廃棄物発生量および復旧時に要する資源量を推算する。これらのデータをフォアグラウンドデータとして、IDEA を用いてそれらの活動の実施に係る上流まで遡ったインベントリを算出する。

(c) 間接ヒト健康影響の算定

(b)の結果と LIME の被害係数の積から、DALY を指標に事故による間接ヒト健康影響を算出する。

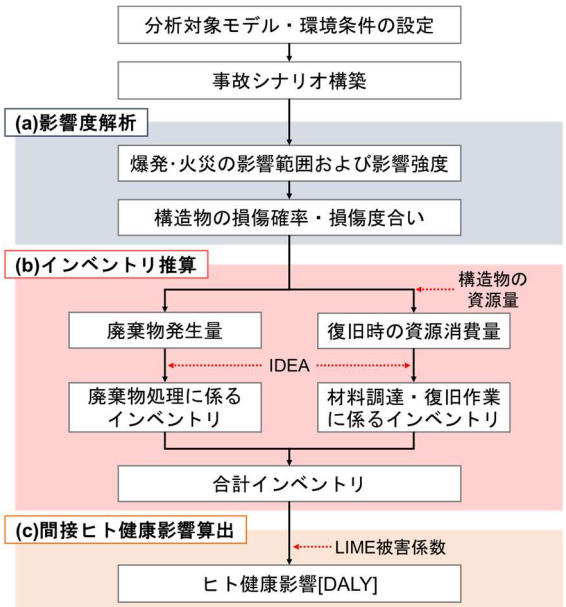


図 1 事故の間接ヒト健康影響分析手法の全体フロー

3. 事例検討 : 仮想水素ステーションの爆発・火災事故

3.1 前提条件

本研究では、仮想の水素ステーション(HRS)および周囲の街を設定し、構築した手法を適用する事例検討を実施した。まず、プロセスからの水素漏洩を想定し、爆発・火災による間接影響として周辺構造物の損傷により発生する廃棄物の処理および復旧作業に伴う資源消費を推算した。また、比較対象として既往の手法 [3] を適用し、事故の直接影響である死傷者も分析した。

HRS の機器構成や配置は、周辺の人の死亡リスクを分析した既往研究 [5]のモデルを参照した。また、HRS 周辺環境として図 2 のような仮想の木造建物が並ぶ町を設定し、モデル化した。これらの建物は 10 m 四方から成り、HRS 敷地外に一定間隔で配置されていると仮定した。建物 1 軒あたりの使用資源量はコンクリート 16 ton、木材 8 ton、ガラス 1 ton、鉄 1 ton とし、建物の中心を代表座標として考えた。建物 1 軒あたりの建設費は 500 万円と仮定した。また、各建物の代表座標に 2 人ずつ人が存在すると仮定した。事故の影響範囲および影響強度の推定には HyRAM+ [6]を用いた。

3.2 結果・考察

本稿では、重大な事故シナリオである水素の大規模漏洩による爆発の分析結果を示す。事故による直接・間接のヒト健康影響の分析結果は図 3 のようになった。事故の直接影響が最も大きく 0.76 DALY の損失であった。また、間接影響では復旧時に係る影響が 0.04 DALY であり、廃棄物処理に係る影響は微小であった。検討したシナリオでは直接影響が支配的であった。ただし、本稿の結果は暫定のものであり、今後結果は変わる可能性があるが、本検討を通じて、DALY を指標に事故の直接・間接ヒト健康影響の両方を総合した分析が可能であることが示された。

4. まとめ

本研究では、プロセス事故の間接ヒト健康影響の分析手法を構築し、手法を HRS からの水素漏洩・爆発の事故シナリオに適用した。事例検討を通じて、事故により間接的に発生するヒト健康影響を DALY で算出可能であることが示され、プロセス事故の直接・間接影響の両方を考慮した LCIA の実施が可能となった。今後は、水素漏洩による火災を含めた他の事故シナリオの詳細な分析や、安全対策による影響低減効果の分析を実施する予定である。

5. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K15409 の助成を受けて実施された。

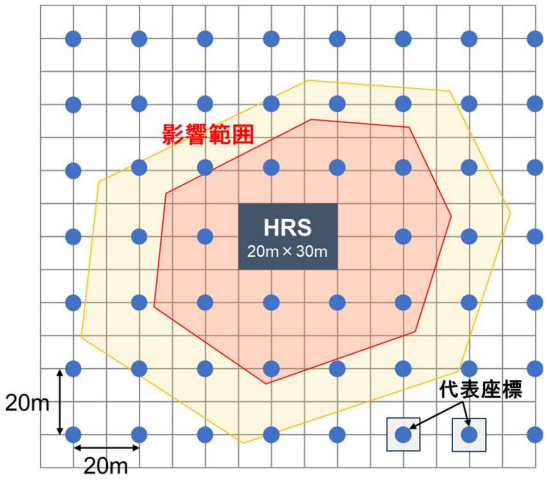


図 2 HRS 周辺の建物のモデル化

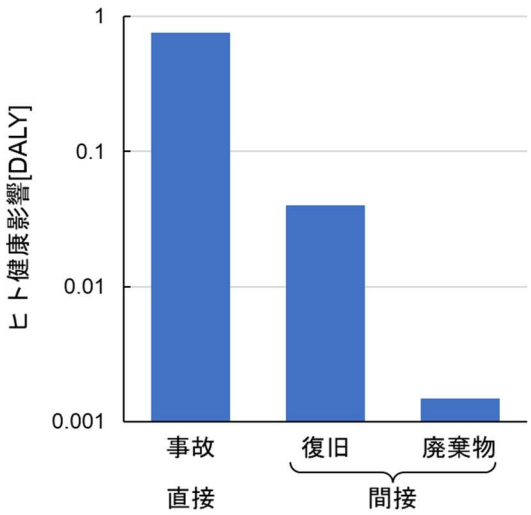


図 3 水素漏洩・爆発による直接間接のヒト健康影響

引用文献

1) Society of Environmental Toxicology and Chemistry: Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment (1996)
2) 川原大知, 中山穣, 稗貫峻一, 鈴木智也, 伊里友一朗, 三宅淳巳: 安全工学シンポジウム 2023, 東京, (2023), pp.282-285
3) Kawahara D., Hienuki S., Nakayama J., Suzuki T., Izato Y., Miyake A.: Ecobalance2024, Sendai, (2024), 1-3F-2
4) CCPS: Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis Second ed. American Institute of Chemical Engineers (2000)
5) Suzuki T., Shiota K., Izato Y., Komori M., Sato K., Takai Y., Ninomiya T., Miyake A.: Int. J. Hydrog. Energy, 46(11), (2021), pp.8329-834
6) Ehrhart B.D., Hecht E.S., Schroeder B.B.: Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 5.1 Technical Reference Manual. Sandia Report SAND2023-14224 (2023)

低 GWP・可燃性代替冷媒を対象とした環境影響・火災事故リスク評価

Environmental Impact and Fire Accident Risk Assessment for Lower GWP and Flammable Alternative Refrigerant

○安藤伊吹*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Ando Ibuki, Itsubo Norihiro
1) 早稲田大学
* ibuki.33585@asagi.waseda.jp

1. 研究目的

地球温暖化に伴い、冷凍機や空調機の世界的な需要の増加が見込まれており、これらの環境負荷低減に向けて、機器の高効率化による消費電力の削減とともに、冷媒の大気放出による地球温暖化影響の対策強化が求められている。冷媒に関しては HFC 系冷媒の生産量・消費量の段階的な削減に関するモントリオール議定書キガリ改正が 2016 年に採択され、より温暖化影響の小さい冷媒の選定と移行といった対策が国際的に進められている。

家庭用空調機用途については、現行の R32 冷媒を代替可能な実用的な次世代冷媒はまだ見出されていないが、特に欧州において、GWP が低いことと、フッ素系冷媒を避ける観点から、プロパン（R290）を候補冷媒として推す動きが加速している。プロパンの大気放出時の温暖化影響はほぼゼロであるが、強燃性冷媒に分類されるため、温暖化影響と安全性はトレードオフの関係にある。現在の家庭用空調機に利用される冷媒の環境、安全性の観点から見た推移を図 1 に整理する。

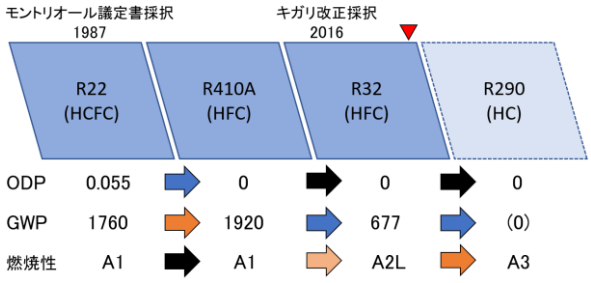


図 1 日本の家庭用エアコンにおける冷媒移行

また栗山[1)]は家庭用冷蔵庫を対象に、コンジョイント分析を用いて温暖化対策と安全性の社会的効果を評価しており、両者がトレードオフの関係にあるときは温暖化改善の社会的効果よりも事故による損害の方が上回る可能性が高いと結論づけている。

本研究では家庭用空調機の機器ライフサイクルにおける環境影響評価を行い、その結果と火災事故リスクに関する情報を提供しアンケート調査を行うことで、可燃性冷媒を導入した製品の安全対策の検討に貢献することを目的とする。

2. 環境影響評価

2.1 研究方法

本研究では冷房能力 2.8kW 家庭用空調機 1 台を算定対象とした LCA を行う。家庭用空調機のライフサイクルのうち、「素材・部品製造」「製品製造」「流通」「使用」「廃棄・リサイクル」をシステム境界に含める。新冷媒を導入した機器のデータは公開されていないため、従来の冷媒(R32)を使用した家庭用空調機のデータを、性能係数を考慮した調整により、冷媒を R290 に変更した際の環境影響をライフサイクルの視点から評価する。評価対象の主な構成について表 1 に示す。

表 1　評価対象の構成

ライフステージ	項目	R32 機器	R290 機器
素材・部品製造	冷媒	R32 (0.95kg)	R290 (0.50kg)
	冷媒漏出感知センサ	無し	有り
	配管	4 分管	5 分管
	主要機器 (熱交換器・圧縮機)	同一	
使用	使用年数	13 年	
	冷媒漏洩率	2%/年	
	消費電力	同一	
廃棄・リサイクル	冷媒処理	適正処理 (破壊)	大気放出
	冷媒回収率	40%	

R290 に変更した際の変更点について、本研究では安全装置と室内・室外連絡配管経を考慮し、熱交換器や圧縮機などその他の部分は同一とした。また、消費電力についても、冷媒の物性値から R290 は性能が低下し消費電力が増加すると考えられるが、製品設計を想定した定量的評価が現時点で困難であったため、本研究では同一としている。

2.2 結果

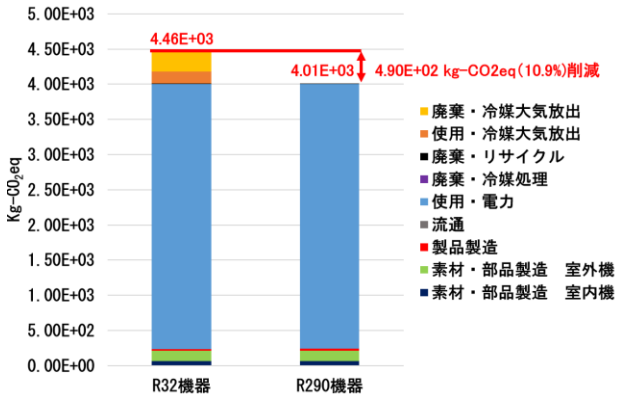


図 2 家庭用空調機 1 台の LC-GHG 排出量

GHG 排出量の 85%~95%を消費電力が占めており、R32 機器と R290 機器の GHG 排出量の大きな差異は冷媒の大気放出による影響である。しかし、本算定では「R290 の性能特性」と「冷媒影響低減対策効果」を考慮できていないため、R290 機器の消費電力と冷媒回収率の影響を把握するためにパラメトリックスタディを行う。

2.3 考察

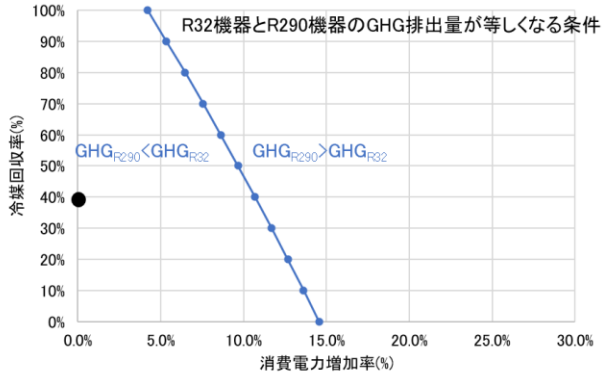


図 3 消費電力増加率と冷媒回収率の PS

パラメトリックスタディを行った結果、R290 機器の消費電力が 10.7%増加することで、GHG 排出量の大小が逆転することがわかった。また、消費電力増加が 10%の場合、冷媒回収率が 10%向上することでも GHG 排出量の大小が逆転することがわかった。R290 機器の性能は製品設計に依存し、それよって製品の大きさやコスト、資源利用量なども変化するため、今後はより製品化された時と近い条件での算定を検討して環境影響評価を行う。

3. コンジョイント分析

可燃性冷媒を導入した空調機の安全性評価について、火災発生確率や火災発生時の被害規模などについて様々な検討が行われている。本研究では、それらの情報と環境経済学の知見を用いて、コンジョイント分析を行うことを検討する。栗山[1)]によるとコンジョイント分析では他属性の評価対象を属性単位で評価することが可能になる。環境影響と火災リスクという異なる属性について、限界支払意思額を算出することで消費者がそれぞれのリスクに対してどれだけの危機感を持っているのか定量的に評価し、安全に導入するためにどれだけのリスクを削減するべきかを示すことが可能になる。分析を行う際に設定した属性と水準について表 2 に示す。

表 2　属性および水準一覧

属性	水準 1	水準 2	水準 3	水準 4
価格	10 万円	15 万円	20 万円	25 万円
対応畳数（冷房能力）	6 畳（2.2kW）	8 畳（2.5kW）	10 畳（2.8kW）	12 畳（3.6kW）
電気料金（kWh/月）	1200 円/月（40kWh/月）	1350 円/月（45kWh/月）	1500 円/月（50kWh/月）	1650 円/月（55kWh/月）
温暖化	120%	100%	80%	60%
危険性（火災発生件数）	100 台/年	10 台/年	1 台/年	

4. 結論・今後の展望

環境影響評価では、可燃性冷媒にすることで冷媒の大気放出による温暖化が削減されるが、冷媒性能特性や冷媒影響低減対策効果を検討すると、削減幅は小さくなることが考察された。また栗山[1)]では、温暖化対策と安全性の社会的効果がトレードオフの関係にある時は、温暖化改善の社会的効果よりも事故による損害の方が上回る可能性が高いと結論づけられている。

今後の展望として、コンジョイント分析を行うことで、消費者の環境意識の改善や対象機器が変わったことによる変化を考慮した結果を示し、安全対策の検討に貢献する。

5. 引用文献

1)　栗山浩一: “コンジョイント分析による地球温暖化と安全性の経済評価”, (2005),　The Waseda journal of political science and economics, 358, p.60-82

冷媒代替におけるリスクトレードオフの分析：R32 と R290 の例

Analysis of risk trade-offs in refrigerant substitution: A case study of R32 and R290

○菊池康紀、山木亜由美、藤井祥万、尾下優子
Yasunori Kikuchi, Ayumi Yamaki, Shoma Fujii, Yuko Oshita
東京大学
* ykikuchi@ifi.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

全ての化学物質には多かれ少なかれ危険要因（ハザード）があり、人為的に使用することにより何らかの危害（リスク）をもたらす可能性があるため、適切なリスク管理が不可欠である [1]。本稿では、家庭用エアコンの冷媒として現在使われている R32（ジフルオロメタン）とその代替冷媒として検討されている R290（プロパン）を例として、冷媒代替における化学物質リスクのトレードオフについて分析し、カーボンニュートラルへ向かう社会における化学物質リスクの考え方について議論する。

2. 化学物質リスクと LCA

2.1 リスクアセスメント（RA）と LCA

LCIA において評価される環境影響は、人為的な化学物質の消費や使用（インベントリ）に起因する環境中の変化と、これを介した保護対象への潜在的影響 [2] であり、広義で考えればインパクト係数はインベントリが化学物質として持つハザードともいえる。RA と LCA の統合は議論され [3]ており、LCIA の係数決定においても利用されている。一方で、RA と LCA が取り扱うことができる化学物質に起因する悪影響には、時間的・空間的な違いがあり（図１）[4]、化学物質を工程中で使用することが必要な産業プロセスでは特に RA と LCA を個別に実施し、リスクのトレードオフを認知し、管理することが必要であることが分かっている [5-7]。

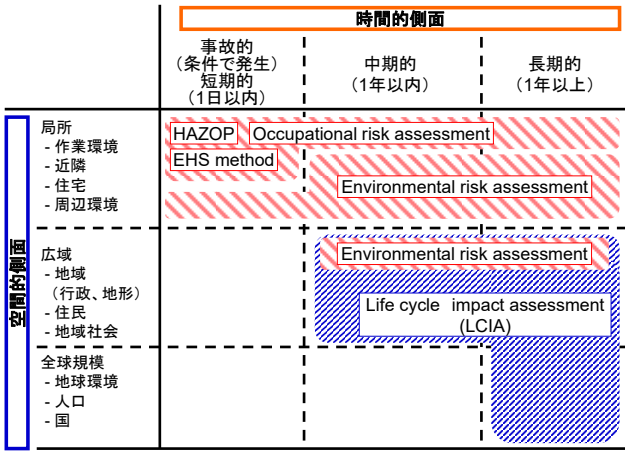


図１　化学物質に起因する悪影響の
時間的・空間的側面に基づく評価手法群の整理 [4]

2.2 Social LCA における局所的・短期的リスクの扱い

RA により評価される化学物質リスクのうち、特に火災・爆発や急性毒性といった、局所的・短期的なリスクについては、Social LCA における評価対象として議論されてきている [8]。特に労働者や消費者における安全については、社会性として優先順位の高いトピックとされており [9]、Environmental LCA では考慮しきれない範囲がある。

3. ケーススタディ：冷媒代替

3.1 背景

冷凍・空調機器に使用される冷媒については、オゾン層保護の観点からモントリオール議定書（1987）によりハザード管理的に国際的な規制がなされ、オゾン層破壊係数を持たない物質への転換が進められてきた。さらに近年は地球温暖化防止の観点からモントリオール議定書キガリ改正（2016）により、温暖化係数の低い冷媒への転換が進められている [10]。本研究では、こうした冷媒に適用される化学物質の代替におけるリスクトレードオフを分析し、物質代替によって起こりうる波及的影響について解釈する。

3.2 R32 / R290 の潜在的リスクトレードオフ

日本の家庭用エアコン用冷媒においては R22(クロロジフルオロメタン)からオゾン層破壊係数を持たない R410A(R32 と R125(ペンタフルオロエタン)の混合冷媒)への転換が 1998 年頃から進められた。R410A は高い地球温暖化係数を持つ(GWP100:2,088 kg-CO_2eq/kg)ため、より低い R32(GWP100: 675 kg-CO_2eq/kg)への転換が 2013 年よりなされたが、さらに温暖化係数の低い冷媒への転換を求められている。代替候補の一つである R290 はハイドロフルオロカーボンに該当せず、温室効果を引き起こしにくい、冷媒として採用した際の機器成績係数においても大きな変化が無い場合、気候変動のみに着目すると R290 の方が小さい環境負荷で駆動できる冷媒となりうる。

しかし、R32 および R290 が持つハザードが異なることにより、図１に示される悪影響の項目が変化し、

リスクのトレードオフが発生する。R290 は R32 と比較し、特に局所的・短期的なリスクにつながりうるハザードを多く有している [11,12]。例えば、最小着火エネルギーが R290 は 2 桁低く、R32 と比較して着火源となりうるものが多い。また、燃焼速度・燃焼熱も R290 は 1 桁大きい。そのため、局所的・短期的（事故的）なリスクとして、着火確率も事故時の危害度も R32 と比較して相対的に高いといえる。また、LCIA インパクト係数においても、冷媒に利用される HFC のほとんどは地球温暖化係数を持つ代わりに光化学オキシダント形成に関する係数を持っておらず、R32 も係数はゼロである。他方、プロパンは非メタン炭化水素として光化学オキシダント形成に関する係数を有している。

3.3 冷媒物質代替において必要となるリスクトレードオフの分析と解釈

前節に示されるようにリスクトレードオフについて、特に日本での家庭用エアコン（セパレートタイプ）において冷媒代替が行われることを想定し、分析を行った。まず、図 1 に示されるリスクカテゴリに基づき、既往の研究 [4]と同様なハザード解析を行った。据付や使用、廃棄といった空調機のライフサイクルにおけるリスクシナリオに関し、R32 と R290 の採用時リスクをリスクマトリックス上で半定量解析を行った。ハザード解析からは、R32 と R290 が異なるリスクカテゴリを持ち、リスクの種類が変化するトレードオフが発生することが、ハザード値に基づく半定量的なスコアとして明らかになった。また、リスクマトリックス上での整理により、R32 と R290 で着火によるリスク発生の頻度が異なることと、着火した場合にもたらされうる被害の大きさが異なることが明らかになった。

4. おわりに

気候変動対策は喫緊の課題であり、多様な方策を駆使することで実現しなければならないものである。しかし、気候変動への対策によって異なるリスクが発生しうることも事実であり、リスクの認知が必須といえる。空調機は社会において極めて広範囲に分散して設置されている機器である。家庭用エアコンは日本において広く普及しており、各家庭の室内外に設置されて生活に密着しているだけでなく、業務用設備と異なり管理者も不在であり、特に使用後の適切な廃棄過程のコントロールは困難である。こうした機器において適用されている化学物質のリスクとして、火災等の局所的・短期的なリスクが変化するような物質代替においては、製品の受益者でありリスクの被害者となりうる消費者をはじめとした一般社会との入念なリスクコミュニケーションが必須と言える。

本研究で試行しているリスクトレードオフ分析では、こうしたリスクコミュニケーションにおいて必要となる科学的な技術システム評価結果を得ようとするものである。このとき、LCA だけでは評価しきれない局所的・短期的な化学物質リスクの評価が必須である。安全性に関しては Social LCA においても評価の方針が示されてはいるが、冷媒における物質代替は現時点では未実施の将来性評価を必要とするものであり、十分な統計等が存在しない中での分析が必要となっている。気候変動問題のみに傾倒しすぎることなく、総合的な評価を実施した上で、化学物質リスクの管理が可能となるための方法論が必要といえる。

引用文献

1) OECD policy sub-issue: Risk management, risk reduction and sustainable chemistry, https://www.oecd.org/en/topics/risk-management-risk-reduction-and-sustainable-chemistry.html
2) Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. Ed.): Life Cycle Assessment, Theory and Practice, Springer (2018). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3
3) Guido, S., Tsang, M., Schuhmacher, M.: Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes and Products. CRC Press (2020) ISBN: 978-0367570880
4) Kikuchi, Y., Hirao, M.: J. Chem. Eng. Jpn., 46(7) (2013) 488-500
5) Kikuchi, Y., Hirao, M.: Environ. Sci. Technol., 42(12) (2008) 4527-4533
6) Kikuchi, Y., Hirao, M.: J. Ind. Ecol., 13(6) (2009) 945-964
7) Kikuchi, E., Kikuchi, Y., Hirao, M.: J. Clean. Prod., 19(5) (2011) 414-423
8) Life Cycle Initiative: Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations (2020)
9) Bouillass, G., Blanc, I., Perez-Lopez, P.: Int. J. Life Cycle Assess., 26 (2021) 2408-2435.
10) 花岡達也: 地球環境, (2022) 127-135
11) 日本冷凍空調工業会: 微燃性冷媒を使用したビル用マルチエアコンの リスク評価報告書, (2017). https://www.jraia.or.jp/outline/file/vrf_a0.pdf
12) Kataoka, H., Minamida, T., Ikawa, S., Nakao, T., Ohkubo, H.: JRAIA Symposium 2023 (2023) TS045
13) 日本 LP ガス団体協議会: LP ガス取扱事業者のリスクアセスメント対応指針, (2018) https://www.nichidankyo.gr.jp/technology/standard/pdf/g_rou_001/g_rou_001_01.pdf

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 9:00 ~ 10:20 E会場：2321中講義室（3F）

[2-E1] エネルギーマネジメント

座長：柏倉 俊介 (立命館大学)

9:00 ~ 9:20

[2-E1-01]

水素吸蔵合金タンクと燃料電池を用いた家庭への電気・熱供給に伴うCO2排出量の評価

*瑞慶覧 諒大[1]、平尾 雅彦[1,2]、野田 優[1]、花田 信子[1] (1. 早稲田大学、2. 東京大学)

9:20 ~ 9:40

[2-E1-02]

太陽光発電と蓄熱システムを利用した甜菜糖製造における石炭消費量削減の定量化

*村上 凌[1]、八木原 昂輝[1]、大野 肇[1]、福島 康裕[1] (1. 東北大学)

9:40 ~ 10:00

[2-E1-03]

電力需要の変動と負荷追従性を考慮した蓄エネルギーシステムの比較

*山木 亜由美[1]、藤井 祥万[1]、兼松 祐一郎[1]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学)

10:00 ~ 10:20

[2-E1-04]

基礎自治体レベルのエネルギーフロー推定に基づく熱融通ポテンシャル評価

*藤井 祥万[1]、兼松 祐一郎[1]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学)

©日本LCA学会

太陽光発電と蓄熱システムを利用した甜菜糖製造における石炭消費量削減の定量化

Quantifying Coal Consumption Reduction through the Integration Photovoltaics and Thermal Energy Storage in Beet Sugar Production

○村上凌*[1)]、八木原昂輝[1)]、大野肇[1)]、福島康裕[1)]
Ryo Murakami, Koki Yagihara, Hajime Ohno, Yasuhiro Fukushima
1) 東北大学
* murakami.ryo.p3@ dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

北海道の主要な農作物である甜菜を原料とした甜菜糖製造は、国内産糖量の約 8 割を占めている[1)]。工場内燃料として主に化石燃料である石炭を使用していることから、温室効果ガス排出の削減と持続可能な産業への移行が求められている。甜菜糖製造の副生成物であるビートパルプは出力調整可能なバイオマス燃料として利用できるが、北海道では動物飼料として既に有効活用されている。そのため、甜菜糖製造の持続可能性を高めるには、太陽光や風力などの変動性再生可能エネルギー(VRE)の活用を検討する必要がある。本研究では、VRE として太陽光の利用を想定し、太陽光発電の導入拡大とともに直面する適地減少の課題解決が期待される営農型太陽光発電(AVS)に着目した。

産業プロセスは製品需要に応じた適切な稼働率の維持が求められるため、VRE の出力変動性は重大な課題となる。この対策として考案された蓄エネルギー技術のうち、既に太陽熱発電で実用化されている蓄熱システム(TES)が注目されている。需要に応じて蓄えた熱から再発電する際に、一部は低温低圧蒸気として排出されるため、TES は他技術に比較して効率が低いが、甜菜糖製造のように低温熱需要が大きく、元来熱電併給を行う産業との親和性が高いと考えられる。

本研究では、製糖工場周辺での AVS および製糖工場での TES の導入による、甜菜糖製造における石炭消費量削減ポテンシャルの定量化を目的として北海道芽室地区の製糖工場にて導入を仮定した。

2. 手法

図 1 に、本研究で導入を仮定した AVS 由来の電力と TES を含む製糖工場のエネルギーシステムの概略図を示す。従来の熱供給源である石炭ボイラーとの併用を前提に、AVS 由来の電力を熱に変換する熱変換器と TES、さらに蒸気を生成するための熱交換器を導入した。TES には、太陽熱発電で実用化されている溶融塩を蓄熱材とする 2 タンク型を採用する[2)]。低温タンク中の溶融塩は AVS 由来の熱により加熱され、高温タンクに貯蔵される。高温タンク中の溶融塩が持つ顕熱は熱交換を介し高圧蒸気を生成し、温度が低下した溶融塩は低温タンクに戻される。高圧蒸気は石炭ボイラー由来の蒸気とともに蒸気ヘッダに集められ、タービンや減圧バルブを経て甜菜糖製造プロセスに電力や熱を供給する。

AVS は対象工場の半径 5 km 圏内にある普通畑への導入を仮定し、その発電量は環境省の手法[3)]を参考に推計した。環境省は月別平均日射量を基に年間発電量を推計していたが、本研究では変動性を表現するため時刻別日射量[4)]を基に時刻別発電量を推計した。TES への入熱量の変動性を解消し、安定した放熱量を維持するため、入熱量に TES の往復効率を掛け平準化した(図 2)。本研究では平準化する計画期間[5)]を 1 週間とし、往復効率は低温低圧蒸気の利用も加味し 80%であると仮定した。

必要な高圧蒸気の熱量($Q_{\mathrm{h.p.}}^{\mathrm{dem}}$)は、対象製糖所が公開する 2022 年度の甜菜糖 1 t 製造当たりのエネルギー使用量[6)]を参考とした。石炭ボイラー効率を 90%として、2022 年度の生産量と製糖期間[7)]から 1 時間あたりの平均値を算出した。$Q_{\mathrm{h.p.}}^{\mathrm{dem}}$ の一部が放熱により代替されることで石炭消費量が削減される。石炭ボイラーの定格出力を 500 GJ/h、最低出力はその 30%とそれぞ

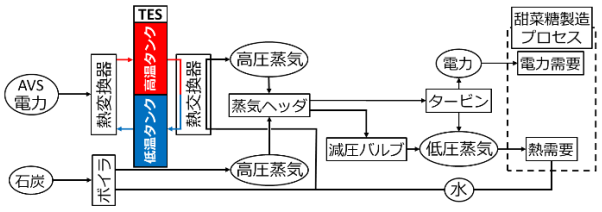


図 1　AVS 由来の電力と TES を導入した製糖工場のエネルギーシステムの概略図

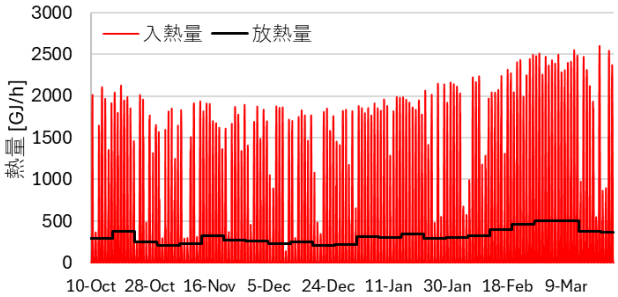


図 2　TES への入熱量と計画期間 1 週間での放熱量の時間変動

れ仮定し、放熱量の大きさに応じて出力を変えて運転し続けるとした。ただし、一時的な入熱量不足により高温タンク中の溶融塩が最小量に達し放熱量を維持できない場合には、石炭ボイラーの出力を上げ、$Q_{\mathrm{h.p.}}^{\mathrm{dem}}$を維持するとした。

製糖期間全体を通じて、入熱量や放熱量、各タンクの溶融塩量を 1 時間単位で計算し、$Q_{\mathrm{h.p.}}^{\mathrm{dem}}$を維持可能な石炭消費量を算出した。各タンクの溶融塩量の初期値を等しいものとし、その初期値を変化させた場合の影響を検討した。

3. 結果

図 3,4 に、各タンクの溶融塩量の初期値をそれぞれ 5, 10 kt として計算した場合の、$Q_{\mathrm{h.p.}}^{\mathrm{dem}}$として供給される熱量の製糖期間中の時間変動を示す。石炭消費量はそれぞれ約 38 kt, 31 kt であった。TES からの放熱量が十分である場合、石炭ボイラーは最低出力での運転を維持し、その分石炭消費量が削減された。しかし、入熱量不足により放熱量が維持されなかった場合には、$Q_{\mathrm{h.p.}}^{\mathrm{dem}}$を維持できるよう石炭由来の熱量供給が増加し、石炭消費量の削減が抑制された。石炭由来の熱量供給は図 3,4 の紺色部分として表れており、溶融塩量の初期値が小さいほど多かった。溶融塩量が小さいほど高温タンク中の溶融塩の最小量に達しやすくなることが示唆された。

一方、各タンク中の溶融塩量の初期値をそれぞれ 0 から 30 kt として計算した場合、溶融塩量増加による石炭消費量の削減量は逓減した(図 5)。図 3,4 の上部紺色の領域として表れているように、石炭ボイラーの運転には最低出力の制約条件があるためである。石炭ボイラーとの併用により、甜菜糖製造プロセスの既存設備を維持しながら持続可能性を高めることが可能であるが、削減率は最大でも約 60%に留まることが示唆された。

4. 結言

製糖工場周辺での AVS と製糖工場での TES の導入と石炭ボイラーとの併用運転を想定し、高圧蒸気生成を代替することによる石炭消費量削減を定量化した。VRE である太陽光の変動性を TES により解消することで、蒸気生成に要する熱量を安定供給できることが分かった。一方で、石炭ボイラーが維持すべき最低出力の制約により、溶融塩量をどれだけ増加させても石炭消費量削減は最大約 60%に留まることが示唆された。今後の展望として、最適な溶融塩量を決定のための温室効果ガス排出量の算定や、石炭ボイラーを併用せずにさらなる石炭消費量削減を可能とするエネルギーシステムの構築を検討している。

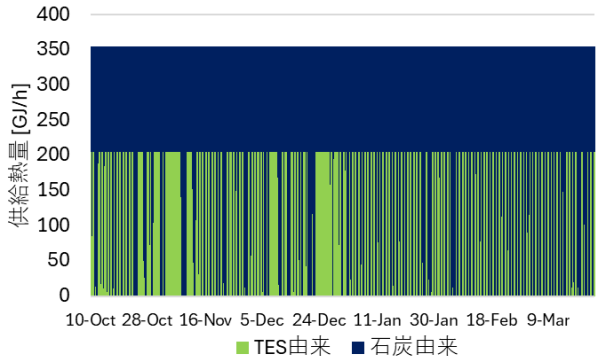


図 3　溶融塩量の初期値 5 kt における由来別供給熱量の時間変動

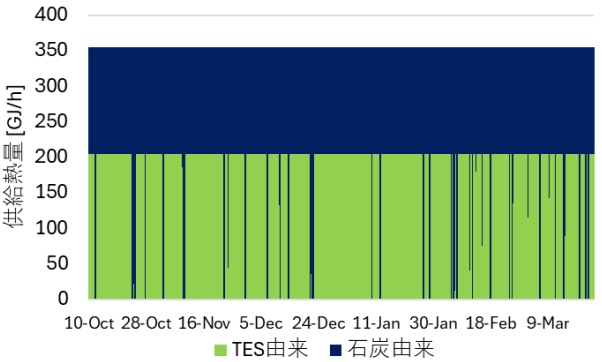


図 4　溶融塩量の初期値 10 kt における由来別供給熱量の時間変動

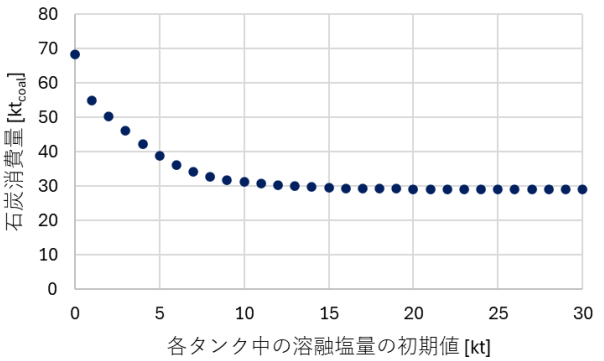


図 5　溶融塩量の初期値を変化させたときの石炭消費量

5. 引用文献

1) 農林水産省: “令和 6 砂糖年度における砂糖及び異性化糖の需給見通し(第 2 回)”, (2024)
2) Alva G. *et al*: Energy, 144, (2018), pp.341-378
3) 環境省: “令和 3 年度再エネ導入ポテンシャルに係る情報活用及び提供方策検討等調査委託業務報告書”, (2022)
4) NEDO: “METPV-20”, (2021)
5) S. Fujii, *et al*: “Full-year simulation and prospective lifecycle assessment of Carnot Battery with AL-Si based PCM”, 4th International Workshop on Carnot Batteries IWCB 2024, Stuttgart (Germany), Sep. 2024
6) 日本甜菜製糖株式会社: “ESG データ”, (2023)
7) 北海道農政部: “令和 4 年(2022 年)産てん菜糖の生産実績”, (2022)

電力需要の変動と負荷追従性を考慮した蓄エネルギーシステムの比較

Comparison of energy storage systems considering electricity demand fluctuations and load following

○山木亜由美*[1)]、藤井祥万[1)]、兼松祐一郎[1)]、菊池康紀[1)]
Ayumi Yamaki, Shoma Fujii, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi
1) 東京大学
*a-yamaki@ifi.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

変動性再生可能エネルギー（VRE）の導入が進んでいるが、VRE による発電は調整力が必要で、安定供給に課題がある。需要に応じた電力供給のため、蓄電池、水素貯蔵、蓄熱（TES）等の蓄エネルギー（蓄エネ）の導入が注目されている。しかし、異なる種類の蓄エネでは、エネルギー変換効率や負荷追従性などの性能や、資源消費量（ARD）などの環境影響[1)]が異なる。大量導入された VRE を用いた電力の安定供給のためには、異なる蓄エネを組み合わせて利用することが求められ、また、蓄エネの種類や規模は地域の特性に合わせて設計する必要がある[2)]。そこで本研究では、蓄エネの性能を考慮したエネルギーフローシミュレーションとライフサイクル評価（LCA）による環境影響評価をすることを目的とした。環境影響評価では、温室効果ガス（GHG）排出量と ARD を分析する。

2. 研究手法

VRE と蓄エネの導入量を仮定して、VRE 由来エネルギーを全量蓄エネし、2023 年の電力需要カーブに合わせて売電することを検討した。1 年間のエネルギー収支を蓄エネの負荷追従性やエネルギー変換効率を考慮して 1 時間単位で計算し、売電総量の最大値を求めた。VRE の導入量は、既存モデル[3)]に合わせ、風力で大規模ウィンドファームと同等の 100 MW 導入し、年間平均風速の速いえりも岬の風速変動に合わせた発電/発熱量とした。売電は北海道の電力需要カーブに合わせるとし、上限まで蓄エネされている時は VRE 由来のエネルギーを廃棄した。蓄電池はリチウムイオン電池を用い、水素貯蔵では、VRE 由来の電気を用い電解装置で製造した水素をタンクに貯蔵し、燃料電池で発電する。電解装置の容量は VRE と水素タンクの規模に合わせて調整するとした。TES は、VRE で生成した熱を溶融塩に蓄熱して、熱交換器で蒸気を生成し、復水タービンで発電する。

LCA では、蓄エネシステムの 1 年間の稼働に起因するライフサイクル GHG（LC-GHG）と ARD を求めた。風力発電機等の VRE 由来電力/熱の製造装置と蓄エネの他、燃料電池等の蓄エネシステムで必要な装置の製造から廃棄までのライフサイクルを含めた。売電電力は、需要に合わせた出力変動が可能なため、従来電源として日本の平均的な電力構成による発電電力と比較した。

3. 結果と考察

蓄エネの導入量を変えた時の売電量、LC-GHG、ARD を比較した。蓄エネが大きいほど売電量は増加したが、蓄エネが過剰になると、VRE の導入量が蓄エネできる上限になり売電量を増やせず、また蓄エネ時のロスにより売電量が減る場合もあった。LC-GHG と ARD は蓄エネが大きいほど増加した。どの蓄エネの負荷追従性であっても現状の電力需要カーブに合わせた電力供給が可能であったが、蓄エネシステムを経由しない VRE が大量導入された場合には蓄エネシステムからの電力供給を一時的に停止することが求められ、蓄エネシステムの起動に時間がかかる場合には需要に合わせた電力供給ができなくなることが予想される。蓄電池は、負荷追従性は高いが、LC-GHG や ARD は他 2 つの蓄エネに比べ高いため、負荷追従性や環境影響の違いを考慮して環境負荷を下げつつ安定した電力供給をするための蓄エネの組み合わせを検討していくことが必要である。本研究で構築したモデルを複数の蓄エネの導入時の検討ができるように改良することで、蓄エネの組み合わせの検討が可能になる。

4. まとめ

VRE を調整する蓄エネシステムの LCA を行い、蓄エネシステムからの売電量、LC-GHG と ARD を求めた。負荷追従性や環境影響の違いを考慮した蓄エネシステムの効果を定量的に比較できるようになった。本研究で構築したモデルを改良することで、蓄エネの組み合わせの検討につなげていく。

引用文献

1) Peters J.F., Baumann M., Zimmermann B., Braun J., Weil M.: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67 (2017), pp. 491-506
2) Yamaki A., Fujii S., Kanematsu Y., Kikuchi Y.: Energy, 270 (2023), pp. 126886
3) Yamaki A., Fujii S., Kanematsu Y., Kikuchi Y.: J. Chem. Eng. Jpn., 57 (1), (2024), pp.

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 10:40 ~ 12:00 E会場：2321中講義室（3F）

[2-E2] 材料

座長：藤井 祥万 (東京大学)

10:40 ~ 11:00

[2-E2-01]

プリント基板の電子部品からみる資源効率評価

*井出口 輝斗[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1] (1. 立命館大学)

11:00 ~ 11:20

[2-E2-02]

講演取消

11:20 ~ 11:40

[2-E2-03]

セルロース繊維複合材料のライフサイクル設計における品質機能展開の応用

*杉之原 大和[1]、兼松 祐一郎[1]、Teah Heng Yi[1]、斎木 祐子[1]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学)

11:40 ~ 12:00

[2-E2-04]

総合討論

©日本LCA学会

プリント基板の電子部品からみる資源効率評価

Resource efficiency assessment from the perspective of electronic parts on printed circuit boards

○井出口輝斗[*1)]、光斎翔貴[1)]、柏倉俊介[1)]、山末英嗣[1)]

Teruto Ideguchi, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue

1) 立命館大学

[*]rm0217ik@ed.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

現在社会では，急速な技術発達により地球温暖化が加速している．またコンピュータやスマートフォン等の IT 機器は私たちの生活に必要不可欠であり，世界中で大量に使用されている．これらの IT 機器の環境負荷を減らすことが地球温暖化を抑える方法の 1 つとなり得る．

堀越ら[1)]によると，IT 機器の環境負荷はプリント基板に由来する割合が高いことが示唆されている．また，熊澤ら[2)]はプリント基板の製造に係る環境負荷を温室効果ガスの観点から研究を行った．一方で，投入される資源量は詳しく議論されてこなかった．光斎ら[3)]によると，金属の生産において資源使用量と温室効果ガスの排出量は異なる傾向を示すことがわかっている．これより，材料として金属が多く投入されるプリント基板においても温室効果ガスとは別に採掘活動を考慮した資源使用量も評価する必要があるといえる．

本研究では，プリント基板の電子部品ごとにカーボンフットプリント（CFP）と，資源使用量を評価する指標である関与物質総量（TMR）を用いてプリント基板を評価する．影響力の大きい投入物質を明確にすることで環境影響を最小化しながら持続的に資源を利用し，IT 機器等の技術を発展させていくことが可能である．以上より，環境負荷低減に向けプリント基板の資源効率を評価し可視化することを研究目的とする．

2. 研究手法

2.1 関与物質総量（TMR）

関与物質総量（TMR, Total Material Requirement）とは資源使用量を評価するための指標である．TMR は，直接的な物質投入だけでなく，間接的な物質投入や採掘活動から出る鉱山廃棄物などの隠れたフローも考慮し採掘活動量を定量化することができる．

また，TMR 係数という機能単位あたりの TMR を示す表現がある．TMR 係数については以下の式(1)が成り立つ．（投入物質の TMR 係数をT_x、重量をW_x、出力製品の TMR 係数をT_y、重量をW_yとする）

$$T_y = \frac{\sum(T_x \times W_x)}{W_y} + 1 \qquad (1)$$

TMR は TMR 係数と物質投入量の積で求めることが可能である．

2.2 評価対象

本研究ではプリント基板の環境負荷を評価するためにプリント基板によく用いられる 37 種類の電子部品[4)5)]と 5 種類 16 枚のプリント基板[6)]を評価した．

3. 結果

3.1 投入物質による TMR と CFP への影響

電子部品の投入物質において，TMR と CFP に影響を与える物質が異なった．TMR では 37 種類のうち 30 種類の電子部品で銀や銅の金属材料が最も影響を与え，CFP では 37 種類のうち 25 種類の電子部品で

セラミックやプラ製品の非金属材料が最も影響を与えた．以上より金属物質は TMR に，非金属物質は CFP に影響を与えやすいことがわかった．

プリント基板の実装部品において，TMR と CFP に影響を与える部品が異なった．集積回路が TMR に，トランジスタが CFP に最も影響を与えた．

3.2 プリント基板の性能と TMR，CFP の関係

プリント基板の性能を示す指標の 1 つである動作周波数（クロック周波数）により評価する．動作周波数とは，CPU が処理を同期させるために用いる信号であるクロックの 1 秒間に行われる振動数である．これは値が大きいほど処理能力が高い．

プリント基板 1 枚あたりの TMR，CFP と動作周波数 1 Hz あたりの TMR，CFP の変化を評価した．プリント基板の TMR の変化を図 1 に，CFP の変化を図 2 に示す．ここで，評価するプリント基板の動作周波数は基板 A が 8 MHz，基板 B が 240 MHz，基板 C が 80 MHz，基板 D が 2.48 GHz，基板 E が 928 MHz である．

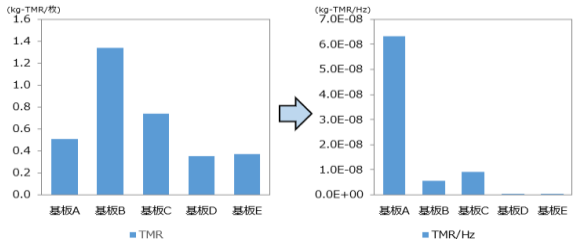


図 1　TMR の変化

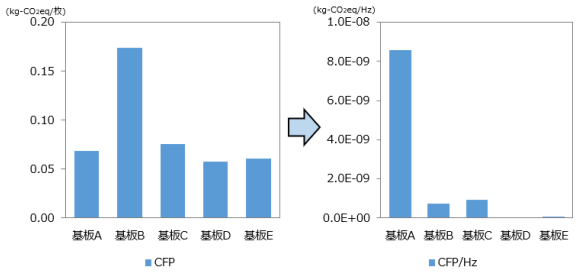


図 2　CFP の変化

図 1，図 2 から，プリント基板 1 枚あたりと 1 Hz あたりで TMR と CFP の大小関係が異なった．また，1 Hz あたりだと処理能力が高いプリント基板の TMR と CFP が小さくなった．

4. 考察

銀や銅の金属物質は TMR 係数が大きくこれらの投入量が多い電子部品は TMR が大きくなる．一方で，セラミックやプラ製品の非金属物質は GWP が大きくこれらの投入量が多い電子部品は CFP が大きくなる．またプリント基板は，TMR が大きい集積回路，CFP が大きいトランジスタの実装数に影響される．

5. 結言

本研究では電子部品からプリント基板の TMR と CFP を算出し環境負荷を評価した．その結果，TMR，CFP に影響を与える電子部品と物質，プリント基板の性能との関係がわかった．また，電子部品への物質投入量や電子部品の実装数の削減が資源使用量や温室効果ガス排出量を減少させることが示された．今後は資源使用量や温室効果ガス排出量が大きい電子部品の投入物質の代替が可能かを検討する．

6. 引用文献

1) Y. Horikoshi, K. Nakazawa, T. Hashitani, M. Kutami, K. Fuse, “Environmental burden of printed circuit board for IT-products”, 第 2 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 2007, p180-181

2) T. Kumazawa, S. Koizumi, M. Takeshima, M. Watanabe, Y. Hara, H. Maekawa, “Estimation of CO2 emission for printed circuit board assembly”, 第 6 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, 2011, p302-303

3) S. Kosai, E Yamasue, “Global warming potential and total material requirement in metal production: Identification of changes in environ mental impact through metal substitution”, Science of The Total Environment, 2019, Vol.651, p1764-1775

4) JEITA 電子部品部会, “電子部品の環境影響負荷データ公開について”, 2023, https://home.jeita.or.jp/cgi-bin/page/detail.cgi?n=1288

5) MiLCA v3.2

6) LEAFONY SYSTEMS 株式会社, “リーフ技術資料”, 2024, https://docs.leafony.com/docs/leaf/

セルロース繊維複合材料のライフサイクル設計における品質機能展開の応用

Application of Quality Function Deployment in life cycle design of cellulose fiber composites

○杉之原大和[1)]、兼松祐一郎[1)]、Teah Heng Yi[1)]、斎木祐子[1)]、菊池康紀*[1)]
Yamato Suginohara, Yuichiro Kanematsu, Teah Heng Yi, Yuko Saiki, Yasunori Kikuchi
1）東京大学
* ykikuchi@ ifi.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

化石資源からバイオマスなどの再生可能資源への移行は、気候変動や資源枯渇への対策のひとつとして重要性を増している。マテリアル用途での活用が期待されるバイオマス資源としてセルロースが挙げられる。セルロースは植物成分の乾燥重量の約50%を占めており、大気中の二酸化炭素が固定化された再生可能な素材である。[1)]セルロース系原料から機械解繊や化学処理を経て作られるセルロースナノファイバー(CNF：Cellulose nanofiber)は高機能材料としての利用が見込まれており、プラスチックに導入した複合材料が開発されている。しかし製造時の消費エネルギーは大きく[2)]、ライフサイクルを通して環境負荷を評価する必要がある。CNFは、様々な製造プロセスによって生産が可能であり、それぞれ異なる物性を持つ材料が得られる。これまでCNF製造技術の比較分析を可能にするための類型化は試みられてきたが、これら枠組みは物性や用途との関連付けが不十分なまま、技術的側面に重点を置いている。本研究は、セルロース繊維複合材料のライフサイクル設計に向けて、物性・用途・環境負荷を考慮した統合的分析を行う。その上でCNFの材料特性と最終製品の要求品質を論理的に階層化し対応関係を調査することができる品質機能展開（QFD）の応用可能性を検討する。

2. セルロース繊維複合材料のライフサイクル設計に向けた評価手法

TEMPO酸化法(TO法)、パルプ直接混練法(PD法)および新規プロセスであるリアクティブプロセッシング法(RP法)の3種類の製造プロセスを評価・調査対象とした。TO法はTEMPOを酸化触媒として用い、セルロース繊維同士の静電的反発を生じさせ機械解繊を容易にする手法である。PD法は、リグニン含有パルプを化学修飾により表面を疎水化させ、樹脂との混練と同時にセルロースの微細化を行うことで、アセチル化CNF強化樹脂を製造する手法である。[3)]RP法は予めパルプの解繊を行った後に添加剤を用い、混練と同時に化学反応を進行させる新規プロセスである。CNF材料の環境影響およびその特徴を把握するためPD法、TO法に関しては文献調査を行い、RP法に関しては実地調査に基づき原料調達から製造までのLCAを行った。またCNFの用途適合性評価は分野によって大きく異なる特徴を持つ。構造材用途では、剛性等の物性値による定量的評価が可能で、明確な評価基準が確立されている。一方、化粧品や医療用途などの機能性用途では、物性値のみでは評価が困難であり、実使用条件下での性能評価や実証実験が必要となる。特にナノ材料としてのCNFは特性が完全には解明されていない部分も存在するため、ある程度の不確実性を含んだ機能評価に基づく比較を行う必要がある。このような特徴を踏まえ、本研究では厳密に定義された物理化学的特性の定量評価と、用途における不確実性を含む定性・半定量評価の両方を用いた統合的評価を実施する。

3. セルロース繊維複合材料製造技術に関するLCAケーススタディ

RP法によるCNF複合材料の製造に関して、実地調査に基づくインベントリ分析を行った。10wt%のCNFを配合したBio-PE（以下10wt%CNF/Bio-PEと表記）と10wt%CNF/PPの2種類の材料について、実験室スケールから連続生産までの各段階におけるGHG排出量を評価した。分析の結果、全工程において解繊工程の電力消費が最も大きな割合を占めることが明らかとなった。しかしながら、実験室スケールから連続生産へのスケールアップに伴い、この解繊工程の単位あたり消費電力量は約2/3程度まで低減されることが確認された。特に、ロット切替え等で発生する材料ロスを最小限に抑えられる完全連続生産を想定した場合、消費電力量は大きく低下する結果となった。また、原料選択による環境負荷への影響も顕著に表れた。バイオポリ

エチレンを採用した場合、原料由来の GHG 吸収効果[4]により、製品ライフサイクル全体での GHG 排出量が大幅に低減された。

4. セルロース繊維複合材料の物性・用途・環境負荷を関連付けた分析

4.1 CNF 複合材の物性とその環境負荷

前項にて基材樹脂が異なるセルロース繊維複合材料製造にかかる環境負荷が明らかとなったが、これは樹脂 1 kg あたりの製造原単位であり、各複合材料の物性の違いは考慮されていない。材料間比較を行うには実際の用途を想定した機能単位の工夫が必要になる。構造材料として広く使用されている 10wt%タルク/PP を基準材料とし機能単位を「1kg の 10wt%タルク/PP と同等の曲げ弾性率 E を発揮する材料」と定義した。(補正後 GHG_対象材料)＝(GHG_対象材料)×(E_基準材料)/(E_対象材料) と書ける。物性値と製造原単位を分析した結果、PD 法および RP 法においては基材樹脂に CNF を混錬すると曲げ特性が向上する傾向があるが、環境負荷においても CNF 混練率が増加したことによる物性の上昇により機能単位当たりの GHG 排出量が下がっていた。実際の製品適用の際は剛性を重視する製品ならばこれら CNF 複合材料は物性・環境負荷ともに有利だと分かった。対して TO 法に関しては CNF 混練率とともに強度が減少した。TOCNF が有する多量の COOH 基により疎水性樹脂中で凝集が生じやすく、凝集体の形成が物性の低下を引き起こしたと考えられる。環境負荷においても CNF 混練率の上昇とともに GHG 排出量は増加した。

4.2 CNF 複合材の用途を考慮した分析

CNF 材料の想定される用途[5]を衛生基準の高さという指向性をもって順序付けた。すなわち衛生基準の高いほうから医療品、食品、化粧品、軟質パッケージ、硬質パッケージ、家電製品、自動車部材を対象とした。各最終製品の製造にかかる GHG 排出量を従来材料を基準として相対評価した。それに基づき剛性などの物性値が採用基準となる構造材用途と製品化した際に発現する機能により材料選択される機能性用途とを環境負荷により紐づけて分析した。洗濯機の脱水受け用途では、従来からガラス繊維強化樹脂が使用されているため比較的環境負荷が高く、それゆえ CNF 複合材料への転換による相対的な GHG 排出量の増加は小さい結果となった。一方、収納ボックスなどの硬質パッケージ用途では、要求される機械的特性が比較的低く、従来材料として PP が使用されている。そのため、CNF の導入は従来比 GHG 排出の増加を招くことが明らかとなった。特筆すべき点として、化粧品用途における TOCNF の応用では、チキソトロピー性により優れた塗布性が付与される。また、医療用途における創傷被覆材としての応用では、従来材料である HDPE や PVA と比較して高い生体適合性を実現できる。これらの用途では環境負荷は増加するものの、材料の高機能化により付加価値が創出される。現状では環境負荷とトレードオフの関係にあるが創出される付加価値が十分に大きい場合、CNF 製品の実用化は十分に検討に値する。以上の分析を基に材料特性と最終製品の要求品質を整理し、対応関係を調査した。

5. 結言

本研究ではセルロース繊維複合材料のライフサイクル設計向けて、ライフサイクル思考に基づき物性と用途を関連付けた評価を行うことで QFD の活用可能性を検討した。CNF 材料の製造にかかる環境負荷や物性値に関しては文献調査や現場調査からデータおよび知見を収集した。CNF が利用可能と考えられる様々な用途を衛生基準の高さという指標で半定量化することで議論した。CNF 複合材料の物性は基材樹脂から向上し、製品使用を想定した機能単位においては環境負荷も低減する場合があると分かった。機能性用途においては環境負荷の増加が認められるが、その増加は製品の革新的な機能性によって正当化される可能性があるため高付加価値製品としての位置づけが適切だと考えられる。このような情報を基に CNF 材料に対し QFD を活用することで CNF 製造において専門家が暗黙的に把握していた品質・機能・特性の連関を明示的に整理し体系化することに役立てることができると考えられる。

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務 (JPNP20009)の成果を含む。

引用文献

1) 吉田隆, “セルロースナノファイバー研究と実用化の最前線”, エヌ・ティー・エヌ, (2021).
2) N. Lavoine, et al.: Carbohydr. Polym., 2012, 90(2), pp735-764
3) Y. Kanematsu, et al.: ACS Sustainable Chem. Eng., 2021, 9(31), pp 10444-10452
4) Y. Kikuchi, et al.: J. Chem. Eng. Japan, 2013, 46(4), pp319-325
5) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO): “セルロースナノファイバーの市場および技術動向調査”, (2022)

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 13:00 ~ 14:40 E会場：2321中講義室（3F）

[2-E3] モビリティ

座長：大野 肇 (東北大学)

13:00 ~ 13:20

[2-E3-01]

Repairによる自動車産業の天然資源量削減効果：日本をケーススタディとして

*梅﨑 泰介[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、谷川 寛樹[2]、山末 英嗣[1] (1. 立命館大学、2. 名古屋大学)

13:20 ~ 13:40

[2-E3-02]

半導体デバイスの金属材料に着目した環境影響

*美川 佑之[1]、松八重 一代[1]、張 政陽[1] (1. 東北大学大学院)

13:40 ~ 14:00

[2-E3-03]

自動車エンジン補機のリビルトプロセスの分析

*山田 樹[1]、早川 明宏[3]、根津 俊大[3]、藤田 光伸[3]、井上 全人[2]、森 孝男[4]、山田 周歩[4] (1. 富山県立大学大学院、2. 明治大学、3. 株式会社NGP、4. 富山県立大学)

14:00 ~ 14:20

[2-E3-04]

液体アンモニア電解によるオンデバイス生成水素を用いた燃料電池自動車のCO2排出量評価

*村上 路有久[1]、平尾 雅彦[1,2]、野田 優[1]、花田 信子[1] (1. 早稲田大学、2. 東京大学)

14:20 ~ 14:40

[2-E3-05]

燃料電池アシスト自転車の環境影響評価及び稼働率変化に対する感度分析

*江澤 朋哉[1]、片山 昇[1]、堂脇 清志[1] (1. 東京理科大学)

©日本LCA学会

自動車 Repair による持続可能な自動車利用方法の策定

Development of vehicle use patterns for sustainable development through vehicle repair

○梅﨑泰介*[1,2)]、光斎翔貴[1,2)]、柏倉俊介[1,2)]、谷川寛樹[3)]、山末英嗣[1,2)]
Taisuke Umesaki, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Hiroki Tanikawa, Eiji Yamasue
1) 立命館大学, 2) 総合地球環境学研究所, 3) 名古屋大学
* rm0180pi@ed.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

自動車産業は，低炭素社会の実現に向けて，内燃機関自動車(ICEV)からバッテリー電気自動車(BEV)への車両転換が見られている[1)]．しかし，BEV の製造には従来使われてこなかった天然資源が追加的に必要であり， 2050 年までの世界の自動車産業における天然資源量の増加傾向が報告されている[2)]．

天然資源利用量の低減に向けて，自動車の Repair が資源循環戦略の一つと考えられている．Repair は製品や部品の寿命を延ばすものと定義されており，自動車の寿命延長が自動車の生産台数の削減，ひいては製造にかかる資源量低減に貢献すると考えられる．実際に，アメリカのカリフォルニア州では自動車 Repair 局が設置され[3)]，日本でも自動車整備分野特定技能評価試験が実施されている[4)]．

しかし，これまで自動車 Repair の工程に必要な天然資源量は無視される場合が多かった．自動車の寿命延長には，様々な部品を随時交換する必要があるため，自動車 Repair の工程では少なからず天然資源が投入されている．実際に，光斎らは ICEV1 台のメンテナンス段階では，10 万 km ごとにタイヤと鉛蓄電池の交換により 2957kg の天然資源が投入されると推定している[5)]ものの，Repair において交換が必要な部品はタイヤと鉛蓄電池だけではない．

この天然資源量を分析する上で，様々な指標がこれまで提案されてきたものの，最も包括的なものとして，その直接重量や間接物質投入量だけでなく資源の採掘活動に伴う隠れたフローも踏まえた関与物質総量(TMR, Total Material Requirement)が重要視されてきた[5)]．そこで本研究では，自動車 Repair にかかる天然資源量を定量化するために TMR を用いる．

そこで本研究では，採掘活動量の観点からみた自動車 Repair による，従前注目されてきた生産台数減少に伴う天然資源減少に加え，その工程における新たな追加的投入資源の推計を目的とする．これにより，自動車 Repair にかかる天然資源利用の真の負荷を明らかにし，持続可能な自動車利用方法の策定に役立てる．

2. 研究手法

2.1 動的マテリアルフロー分析

本研究では，全世界において Repair が必要な自動車の台数を推計するために，動的マテリアルフロー分析を用いた．これはある年における保有台数N_t，生産台数I_t，廃棄台数W_tの関係より式(1)で表され，ある年における Repair が必要な自動車の台数R_sは式(2)で表される．

なお分析は ICEV について行い，全世界における保有台数の推移は Beyond 2℃ Scenario(B2DS)を基に考慮した[1)]．また，廃棄台数の推定にはワイブル分布関数を用い，ここでは渡らの研究で用いられた形状パラメータと寿命のデータを適用する[2)]．

$$N_t - N_{t-1} = I_t - W_t \quad (1)$$

$$R_s = I_t - \sum_{n=t}^{s} W_n \quad (2)$$

2.2 自動車 Repair にかかる TMR 推計

日本の自動車 Repair 工場にヒアリング調査を行い，ICEV において寿命延長のための交換が必要な部品を 42 点選定し，各部品の交換年数を同定した．

本研究では，自動車 Repair にかかる TMR 推計は以下の式(3)を用いた．ここでは Repair にかかる TMR をT， 部品の TMR 係数をS， 部品の重量をMとする．

本研究では，その TMR に推計した Repair が必要な自動車の台数をかけあわせることにより，世界全体における自動車 Repair にかかる天然資源量の変化を分析した．なお，Repair は 2020 年以降生産の自動車から実施し，寿命は日本の平均自動車所有期間である 53.4 年[6)]に延長されると仮定した．

$$T = \sum(S \times M) \quad (3)$$

3. 結果

全世界の自動車産業における ICEV の生産・運用・Repair 段階の TMR を図 1 に示す．BAU シナリオは，自動車 Repair による寿命延長を実施しない場合を指

している．ここで生産・運用段階の分析は，滝本らの研究で用いられたデータ用い[7]，年間走行距離は日本の平均である 4344km[6]として分析した．

図 1 より，自動車 Repair を実施すると BAU と比較し TMR が削減できる期間があることがわかる．しかし，自動車 Repair にかかる追加的天然資源削減量は無視できない．実際に，2042 年以降は Repair を考慮した TMR が BAU を上回っている．これは自動車 Repair にかかる追加的天然資源削減量を考慮することで必ずしも Repair が有効とはならない場合があることを示唆している．

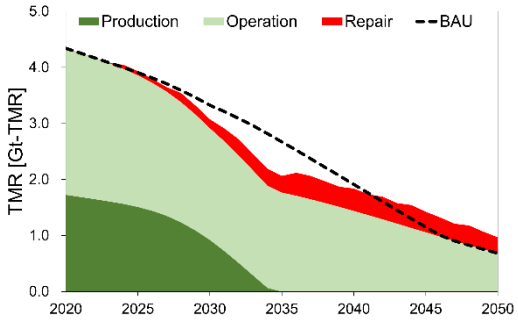


図 1　自動車 Repair も考慮した TMR

4.　考察

推計した Repair にかかる TMR を個人が生涯誘発する TMR の観点から分析し，図 2 に示す．ここでは，1 台の ICEV を乗り続ける Repair シナリオと ICEV の新車に乗り換えるシナリオを比較した．乗り換えシナリオにおける 1 台あたりの所有期間は 7.7 年とし，分析は日本の平均自動車所有期間である 53.4 年地点で行った[6]．生産段階にかかる TMR は，1 台あたりの所有者数を 3 人として，経済価値で按分した．

図 2 より，自動車 Repair は乗り換えシナリオと比較して TMR を削減できることがわかる．しかし，その削減効果はわずか 2.4%程度しかない．さらに，自動車の供給制限問題はあるものの，1 台あたりの所有期間が短縮されると，この傾向が変わり Repair シナリオが乗り換えシナリオを上回る可能性がある．

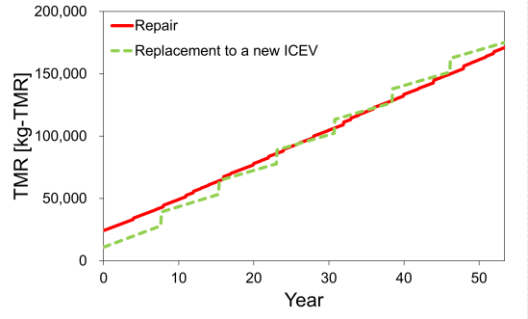


図 2　個人が生涯誘発する TMR

5.　結言

本研究では，TMR の観点から ICEV の自動車 Repair にかかる追加的天然資源量を推計した．これより，その追加的天然資源量の影響によって，2042 年以降は自動車産業における天然資源量が増加することが分かった．この結果は，天然資源量の観点から 2042 年以降 ICEV の自動車 Repair は実施すべきではないことを意味し，持続可能な自動車利用方法の策定に役立つと考えられる．

また，本研究の限界として，エアコンなどの検討しきれなかった部品の存在が挙げられる．本研究で検討した部品のみで自動車の寿命延長は可能であるが，エアコンなどの部品の交換による利便性向上は今後の研究の範囲である．

6.　引用文献

1) IEA, Energy Technology Perspectives 2017: Catalysing Energy Technology Transformations. OECD, Paris, France, 2017
2) T. Watari, B. C. McLellan, D. Giurco, E. Dominish, E. Yamasue, K. Nansai, "Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity", Resources, Conservation and Recycling, 148, pp. 91-103, 2019
3) California Bureau of Automotive Repair, “About the Bureau of Automotive Repair,” California Bureau of Automotive Repair, 2024.
4) Japan Automobile Service Promotion Association, “Specified skills evaluation test,” Japan Automobile Service Promotion Association.
5) S. Kosai, K. Matsui, K. Matsubae, E. Yamasue , T. Nagasaka, "Natural resource use of gasoline, hybrid, electric and fuel cell vehicles considering land disturbances", Resources Conservation And Recycling, 166, 105256, 2021
6) Japan Automobile Manufacturers Association, Inc., “Passenger Vehicle Marketing Trend Survey 2023,” Japan Automobile Manufacturers Association, Inc., 2024.
7) H. Takimoto, S. Kosai, T. Watari , E. Yamasue, “Circular economy can mitigate rising mining demand from global vehicle electrification,” Resources, Conservation and Recycling, 209, 107748, 2024.

自動車エンジン補機のリビルトプロセスの分析

Analysis of the Remanufacturing Process for Automotive Engine Auxiliary Components

○山田 樹*1)，早川 明宏 2)，根津 俊大 2),藤田 光伸 2)，井上 全人 3)，森 孝男 4)，山田 周歩 4)
Tatsuki YAMADA, Akihiro HAYAKAWA, Shundai NEZU
Mitsunobu FUJITA, Masato INOUE, Takao MORI, Shuho YAMADA
1) 富山県立大学大学院, 2) 株式会社 NGP, 3) 明治大学, 4) 富山県立大学
*u453027@st.pu-toyama.ac.jp

1. 緒言

持続可能な社会の実現には，GHG（Green House Gas）排出量，資源使用量，廃棄物削減が重要であり，製品の再利用や長期使用が求められる．自動車業界ではリユース部品やリビルト部品といったリサイクル部品の活用が有用である．先行研究により，リユース部品の主要 90 部品について GHG 削減効果調査にもとづく推定モデルが提案されている [1]．一方，リビルト部品に関する調査はエンジン [2]や補機類 [3]といった，個々の部品の削減効果の事例に限定され，推定モデルの提案はない．本研究は，スタータ，オルタネータ，コンプレッサを対象に，リビルトプロセスを調査・分析し，GHG 削減効果を評価し，削減効果の推定モデルを提案する．さらに，交換部品製造時の GHG 排出量が全体の大きな割合を占めることが確認されたため，この割合を低減した場合の削減効果全体に与える影響を評価するために感度分析を実施する．本稿では，スタータ 6 部品，オルタネータ，コンプレッサ各 7 部品を評価し，予測モデルの提案，感度分析の結果を報告する．

2. GHG 排出量荷削減効果の概念・算出

本研究では，リビルト部品活用による GHG 削減効果を換算 CO_2 排出量の削減効果として定義する．図 1 に GHG 削減効果の概念を示す．GHG 削減効果 X は，式（1）に基づき，新品製造時の GHG 排出量 A から交換部品製造時の GHG 排出量 B とリビルト部品生産工程で発生する GHG 排出量 C の和を減算して算出する．また，新品部品とリビルト部品の輸送・使用時の GHG 排出量は同等と仮定し，対象外とする．したがって，材料調達から製品製造までの範囲で LCA を実施する．

$$X = A - (B + C) \quad (1)$$

GHG 排出量算出に必要な活動量は，リビルト工程の調査を行ない，使用される機器に投入されるエネルギや，液類等の投入量を把握する．交換部品の製造，新品部品の製造による GHG 排出に関しては，実際の部品をなるべく単一の素材となるまで分解し，素材，重量，加工方法を調査し算出する．なお，排出原単位は環境負荷データベース IDEA v3.1.0 に記載されている温室効果ガス排出原単位情報 [4]を使用する．

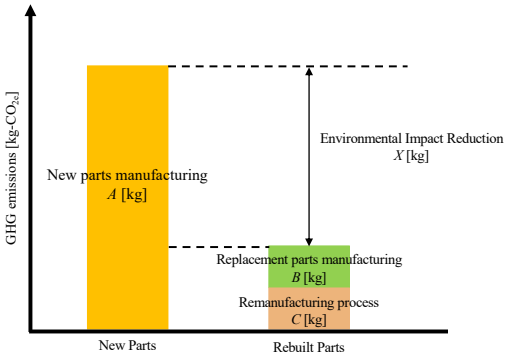


Figure 1 Conceptual diagram of CO_2 emission reduction

3. リビルト部品活用による GHG 排出量削減効果

各部品の新品部品およびリビルト工程における GHG 排出量（図 1 の A, C 部分）は，部品の分解調査，工場調査により得られた活動量を用いて算出した．交換部品製造による GHG 排出量（図 1 の B 部分）は先述の活動量に加え，各パーツの交換率の調査をし，算出した．これらをもとに，GHG 排出量削減効果を算出した．リビルト部品製造時の GHG 排出量の内訳の一例として，ワゴン車用オルタネータの結果を図 2 に示す．全ての結果において，摩耗した部品の交換に使用される修理用部品の製造で発生する GHG 排出量が最も大きな割合を占める傾向が確認された．

また，GHG 排出量削減効果の算出結果の一例としてオルタネータのものを図 3 に示す．調査の結果，リビルトオルタネータを使用することで GHG 排出量が 51.1%から 94.6%削減されることが明らかになった．

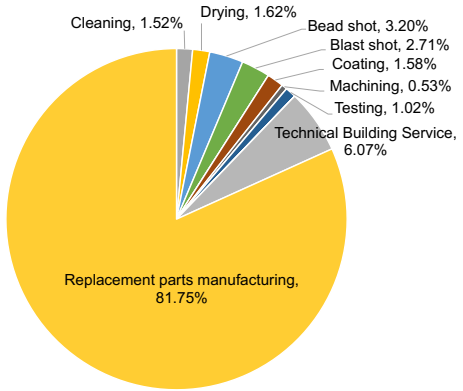


Figure 2 Breakdown of GHG emissions from production of rebuilt alternator for van by process

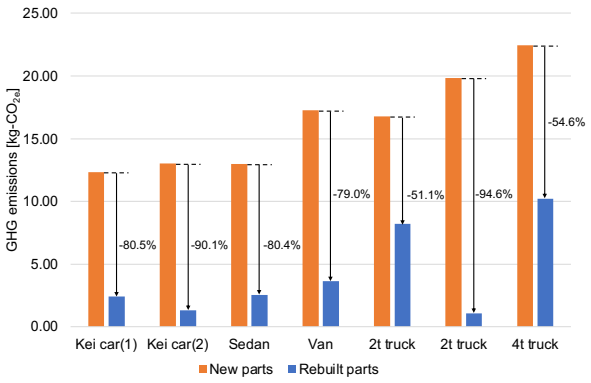


Figure 3 Reduction in GHG emissions through use of remanufactured alternators

4. 感度分析

リビルト部品生産時の GHG 排出量の内訳より，交換部品製造時の GHG 排出量が大部分を占めていることを確認した．そこで，交換部品製造による GHG 排出量を現状より 10%から 50%削減させた際のリビルト部品活用による GHG 排出量削減効果を感度分析した．オルタネータの結果を図 4 に示す．分析の結果，交換部品製造による排出量を 50%削減したとしても，削減効果は平均 10%の増加にとどまることを確認した．よって，工程の改善による削減効果は限定的であり，リビルト部品の活用を推進し新品部品の利用を抑制する方が GHG 排出量削減に有効であることが示唆された．

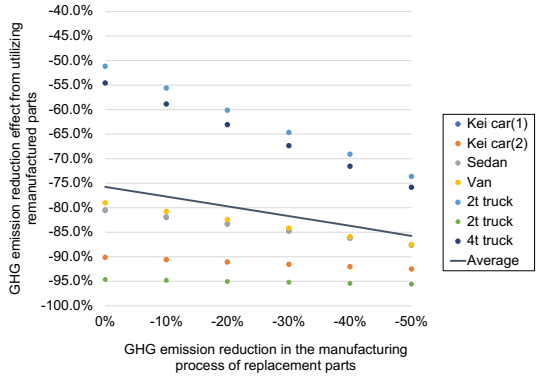


Figure 4 Impact of exchange parts GHG reduction on remanufactured alternator manufacturing

5. リビルト部品活用による GHG 削減効果の推定

リビルト部品活用による GHG 排出量削減効果の算出結果と車両の諸元情報に基づき，GHG 排出量削減効果の推定式を作成した．対象部品がエンジン補機類であるため，排気量および車両重量を説明変数とした 2 種類の単回帰分析を実施した．また，商用トラックと一般家庭用車両では部品の駆動電圧が異なるため，それらを分けて分析を行なった．図 5 に，一般家庭用車両用オルタネータの車両重量と GHG 削減効果の関係を示す．推定式は図 5 中に記載されているものとなり，実測値との誤差は最大 7.9%であった．したがって，一般家庭用車両用に関しては，リユース部品の場合 [1]と同様に誤差 20%以内で GHG 排出量削減効果の推定が可能である．一方，トラック用部品についてはサンプル数が不足しているため，追加調査が必要である．

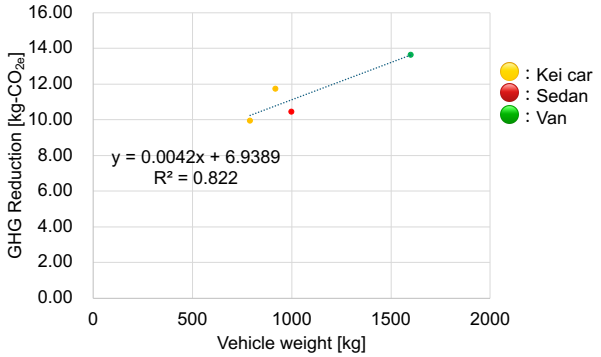


Figure 5 The relationship between vehicle weight excluding trucks and the GHG reduction effects of alternators

6. 結言

本研究ではリビルト部品を使用することで，スタータは平均 59.0%，オルタネータは平均 75.8%，コンプレッサは平均 42.1%の GHG 排出量削減効果を得られることを確認した．また，交換部品製造時の GHG 排出量がリビルト部品製造時の大部分を占めることを確認したため感度分析を行ない，交換部品製造時の排出量が半分になったとしても，削減効果は大幅に向上しないことを確認した．さらに，削減効果の推定を行い，一部の部品は推定が可能であることを確認した．

今後の課題として，推定精度が低い部品やトラック用部品においてサンプル数を増やし，推定式の作成，精度の向上を図る必要がある．また，エンジン補機以外の部品においてもリビルト部品活用による GHG 排出量削減効果を推定可能とすることが課題である．

7. 参考文献

1) Inoue, M., Takahashi, S., Fujita, M., Mori, T., Tamaki, M., Suzuki, S., Hayakawa, A.: Int. J. Supply Chain Management, 6 (4), (2017), pp 110-122
2) 小林峻，岡本拓也，藤田光伸，森孝男，早川明宏，井上全人: 日本機械学会設計工学・システム部門講演会講演論文集，ID: 2604, (2018)
3) 山田周歩，堀内郁矢，井上全人，藤田光伸，早川明宏, 森孝男: 日本機械学会論文集, 90 (940), (2024)
4) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ,“LCI データベース IDEA version 3.1”

液体アンモニア電解によるオンデバイス生成水素を用いた燃料電池自動車のCO$_2$排出量評価

Evaluation of greenhouse gas emissions of fuel cell vehicles using on-device produced hydrogen by liquid ammonia electrolysis

○村上 路有久*[1)]、平尾 雅彦[1),2)]、野田 優[1)]、花田 信子[1)]
Luke Murakami, Masahiko Hirao, Suguru Noda, Nobuko Hanada
1) 早稲田大学, 2) 東京大学
*murakamiluke@fuji.waseda.jp

1. 緒言

2022年の日本におけるCO$_2$などの温室効果ガス(GHG: greenhouse gas)排出量の中で、輸送部門の割合は18.5%を占めている[1)]。輸送部門のGHG排出量の削減は重要であり、燃料電池自動車(FCV：Fuel cell vehicle)への移行が一つの手段として考えられる。また、日本は2040年に年間水素換算で約3 Mtの水素キャリアを輸入し、そのほとんどがアンモニアであると想定されている[2)]。現在FCVの燃料は高圧水素が使用され、アンモニアで輸入した場合、水素に分解してからFCVに充填する必要がある。そこでFCVに液体アンモニアを供給し、燃料電池の電力の一部でアンモニアをオンデバイスで電解して水素を生成し、燃料電池に供給する新しいFCV(アンモニアFCV)を提案する。図1にアンモニアFCVの模式図を示す。アンモニアFCVは高圧水素を燃料とするFCV(水素FCV)に比べて燃料を短時間に充填可能になると考えられる。

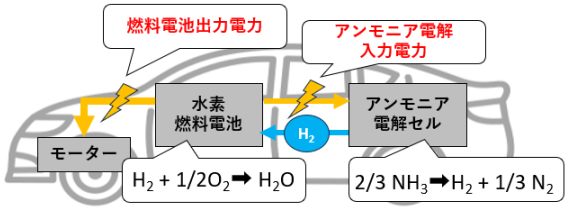


図1 アンモニアFCVの模式図

2. 目的

本調査では、アンモニアFCVを用いるシナリオのGHG排出量を評価し、どのプロセスの影響が大きいか調査することを目的とした。また水素FCV・電気自動車(BEV：Battery electric vehicle)・ガソリン車(ICEV：Internal-combustion engine vehicle)のライフサイクルにおけるGHG排出量を評価し、アンモニアFCVと比較することを目的とした。

3. 研究方法

影響領域を地球温暖化、機能単位を車が1 km走行するとして各シナリオにおけるGHG排出量を評価した。自動車の製造などに関するデータはMiottiら[3)]の論文の値から算出した。

3.1 アンモニア・水素FCVのGHG排出量評価

アンモニア・液化水素はオーストラリアで製造し、船により日本の川崎に輸送し、東京のステーションで充填するシナリオを想定した。アンモニアFCVシナリオのシステム境界を図2に、水素FCVシナリオのシステム境界を図3に示す。車体の製造に伴うGHG排出量は、既報[3)]をもとに算出した。船・トラックの製造と図中の破線で囲われたプロセスにおける環境負荷は含めなかった。アンモニア電解のプロセスではGHGは排出されないが、損失した電力に基づくGHG排出量を仮想的に割り当てた。また、アンモニアFCVにおける電解に要する電力とFCで得られる電力の比をrとし、rに関する感度分析を行った。液化水素のボイルオフで生じた気体水素は廃棄することとした。ボイルオフではGHGは排出されないが、失った水素の製造・輸送時などで排出されるGHG排出量を仮想的に割り当てた。水素ガスの圧縮に必要な電力は、2015年時点の東京電力の系統電力から供給されたものを使用した。

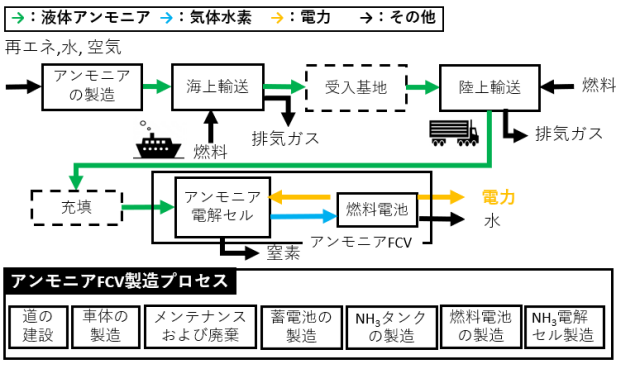


図2 アンモニアFCVシナリオのシステム境界

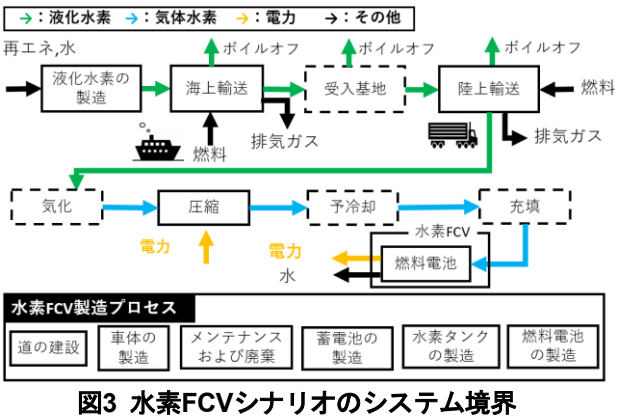


図3 水素FCVシナリオのシステム境界

3.2 BEV・ICEVのGHG排出量評価

BEVは国内で発電した電力を用い、ICEVは国内で生産したガソリンを燃料に用いた。図4にBEVシナリオのシステム境界を、図5にICEVシナリオのシステム境界を示す。BEVシナリオは発電方法を風力発電、太陽光発電、2015年の東京電力の3つの場合に分けて評価した。送電に必要な設備の材料および建設は含めなかった。ICEVシナリオではガソリンの製造所からガソリンスタンドへの輸送は含めなかった。

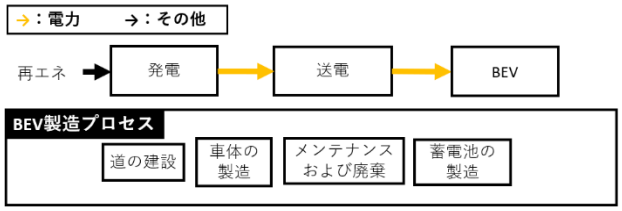


図4 BEVシナリオのシステム境界

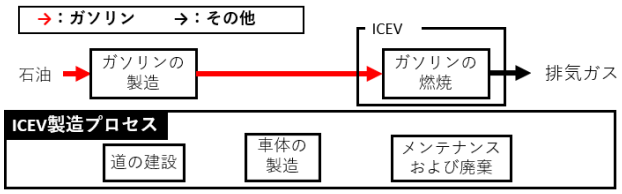


図5 ICEVシナリオのシステム境界

4. 結果及び考察

4.1 アンモニアFCVのGHG排出量評価

図6にアンモニアFCVにおける電解に要する電力とFCで得られる電力の比*r*に対する合計GHG排出量の変化を示す。燃料電池の理論起電圧は1.23Vで、アンモニア電解のエンタルピー基準の理論電解電圧は0.277 Vなので、最小の*r*は22.5%と算出された。この時アンモニア電解は全体の4.08%を占めた。一番多くGHGを排出するのは車体の製造で、全体の32.5%を占めた。*r*を変化させるとアンモニア電解のGHG排出量のみが増加した。*r*=50%の時、アンモニア電解はFCで得られた電力の半分を消費し、全体の12.8%を占めた。*r*=83.4%の時、ICEVシナリオの合計GHG排出量と一致し、アンモニア電解は全体の42.4%を占めた。ここからアンモニア電解と燃料電池の性能がアンモニアFCVのGHG排出量に大きく関わることが分かった。

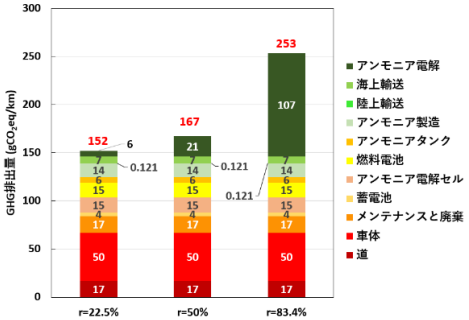


図6 電解に要する電力とFCで得られる電力の比 *r* に対する合計GHG排出量の変化

4.2 各シナリオのGHG排出量比較

図7にアンモニアFCVシナリオ(*r*=22.5%), 水素FCVシナリオ、BEVシナリオ、ICEVシナリオのGHG排出量の比較を示す。※の項目は直接的にはGHGを排出しない。合計のGHG排出量はBEV(風力)<BEV(太陽光) <水素FCV<アンモニアFCV<BEV(系統電力)<ICEVの順で多くなった。水素FCVに比べアンモニアFCVはアンモニア電解セル製造やアンモニア電解によるGHG排出があるため、アンモニアFCVの方が合計GHG排出量が多くなった。BEVに比べアンモニアFCVは製造時のGHG排出量が多いが、合計GHG排出量は系統電力利用のBEVの方が多くなった。しかし系統電力にかかるGHG排出量が下がればBEVの合計GHG排出量の方が低くなることも考えられる。ICEVに比べアンモニアFCVは燃料の利用時にGHG排出が無く、ICEVの方が合計GHG排出量が多かった。しかし*r*値が83.4%を越えればアンモニアFCVの方がGHG排出量が多くなった。

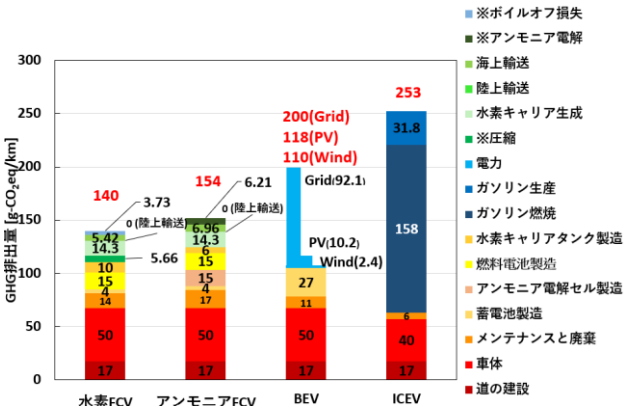


図7 各シナリオのGHG排出量

5. 結論

アンモニアFCVという新方式を提案し、ライフサイクルにおいて各プロセスにおけるGHG排出量を調査した。結果アンモニア電解の電力消費が多くなるほどアンモニア電解に割り当てられるGHG排出量の影響が増えた。次に水素FCV, BEV, ICEVとアンモニアFCVの各シナリオにおける合計GHG排出量を比較した。結果BEV(風力) < BEV(太陽光) < 水素FCV < アンモニアFCV(*r*=22.5%) < BEV(系統電力) < ICEVとなった。

参考文献

1) 国土交通省, “輸送部門における二酸化炭素排出量”, (オンライン),入手先 <https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html>, (参照2025-01-14)

2) IEA,”Global Hydrogen Review 2024”, (オンライン), 入手先<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>, (参照2025-01-14)

3) Marco Miotti, Johannes Hofer, Christian Bauer : Int J LCA, 22, (2017), p. 125086.

燃料電池アシスト自転車の環境影響評価及び稼働率変化に対する感度分析

Environmental impact of fuel cell-assisted bicycles and sensitivity analysis of changes in operating time

○江澤朋哉*[1)]、片山昇[1)]、堂脇清志[1)]
Tomoya Ezawa, Noboru Katayama, Kiyoshi Dowaki
1) 東京理科大学
*7423504 @ ed.tus.ac.jp

1. 序論

固体高分子形燃料電池（PEFC）は化学的に電気エネルギーを取り出すため、サイズや温度に対して、通常の使用範囲では、変換効率に影響を及ぼさない。また、既に導入されているシステムにおいても、耐用年数が長く、長期間運用する用途に対して利用価値が高い。そこで本研究は、PEFC アシスト自転車(H-bike)での導入を想定し、従来のリチウムイオンバッテリーを搭載したアシスト自転車(E-bike)と運用面を考慮し、環境指標を用いて比較した。なお、水素は下水汚泥由来のグリーン水素の利用を想定し、貯蔵を水素吸蔵合金とした。また、ここでの評価指標は GWP 及び ADP を対象とし、それぞれのバッテリーの劣化を考慮した評価を行った。

2. 手法

2.1 システム境界

システム境界を図 1 に示す。E-bike にはリチウムイオンバッテリー(Li-ion)の製造及び、充電される電力が含まれる。また H-bike には下水汚泥から製造するグリーン水素を水素吸蔵合金タンク(MH)に貯蔵し、それを PEFC で駆動させるバッテリー(MH-PEFC)を想定する。

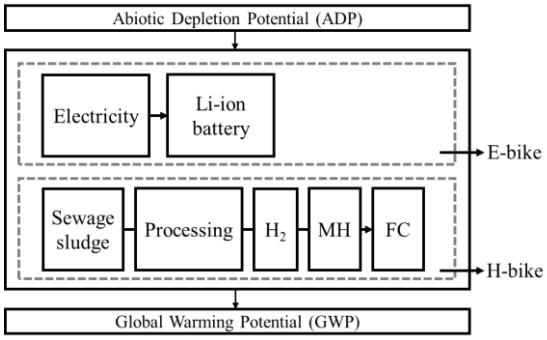


図１：システム境界

また機能単位は E-bike 及び H-bike の 5 年間における使用とする。また、稼働率に関する感度分析を実施するためのシナリオ(表 1)を設定した。なお、E-bike 及び H-bike は平たん路を一定速度で走行するものとし、その際の消費電力は 50 W とする。

表１：各シナリオ

シナリオ	稼働率 [h/day]	電力消費率 [Wh/day]
A	0.25	12.5
B	0.5	25
C	1	50
D	2	100
E	4	200

E-bike と H-bike のバッテリー容量に対する構成部材を表２に示す。

表２：E-bike と H-bike の構成部材と規模

構成デバイス	E-bike	H-bike
Li-ion [Wh]	306	-
PEFC [W]	-	300
MH[g]	-	2280

詳細なインベントリデータは表 S1 に記載する。

2.2 バッテリーの劣化

本研究では、ライフサイクルの視点からバッテリーの劣化を考慮した。まず、Li-ion の劣化による容量損失Q_{loss}[%]は、充放電サイクルと経年劣化によって引き起こされ、式(1)でモデル化されており[1]、これに基づいて性能劣化を考慮した。各パラメータは表 S2 に記載する。

$$Q_{loss_cycle} = (a \cdot T^2 + b \cdot T + c)\exp[(d \cdot T + e) \cdot I_{\mathrm{rate}}] \cdot Ah_{throughput} + A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \cdot D^{0.5} \quad (1)$$

ここで充・放電時の C レートはそれぞれ 0.33 及び 0.16 とし、SOH が 70%になったときにバッテリーを交換するものとした。なお各シナリオの交換までの日数と機能単位内での交換回数は表３のようになる。

表３：シナリオごとの交換回数

シナリオ	日数	交換回数
A	-	0
B	-	0
C	1625	1.1
D	1325	1.4

E	975	1.9

次に MH-PEFC については、運転時間中の触媒の酸化等により過電圧が増加する。結果、所定の電流に対する電圧が低下し、発電効率が低下することで水素の消費量が増加する。ここでは、栃木ら[2]の劣化モデルをもとに、電圧の低下を式(2)のように線形近似した。

$$V = -2.0^{-6} \cdot t + 0.7157 \quad (2)$$

ここで、MH-PEFC のシナリオごとの稼働時間と電圧の低下は表４のようになる。なお、MH は 1000 回程度の吸脱着が可能であることに注意されたい。

表４：燃料電池稼働時間及び劣化後の電圧

シナリオ	稼働時間 [h]	初期電圧 [V]	劣化後電圧 [V]
A	465	0.7157	0.7149
B	913	0.7157	0.7139
C	1825	0.7157	0.7121
D	3650	0.7157	0.7084
E	7300	0.7157	0.7011

ここから、MH-PEFC のライフサイクル期間での水素消費量は以下のように計算される。

まず、PEFC の効率は式(3)のように表される。

$$\eta(t) = \mu_f \times \frac{V_c(t)}{V_{OCV}} \quad (3)$$

ここで、μ_fは燃料電池のストイキ比、$V_c(t)$[V]はセル電圧、$V_c(t)$[V]は開放起電圧である。本研究ではストイキ比は 0.95、開放起電圧は 1.18 V とする。

次に、電圧低下を考慮した水素の消費量$H_{2_{total}}$[MJ]は以下の式で表される。

$$H_{2_{total}} = \frac{1}{2} \times t \times \left(\frac{P_{FC}}{\eta_0} + \frac{P_{FC}}{\eta(t)} \right) \times 3600 \quad (4)$$

ここで、η_0は初期の発電効率、P_{FC} [W]は燃料電池の出力である。

3. 結果

以上の条件に従って、各シナリオに対する H-bike と E-bike の環境影響指標の比較を行った。

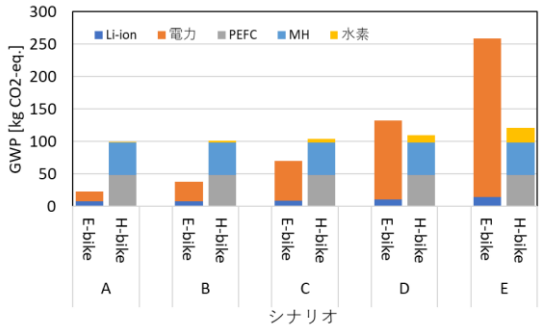


図２：シナリオごとの GWP

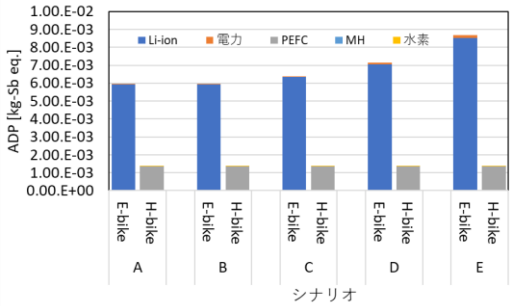


図３：シナリオごとの ADP

まず GWP において、シナリオ A、B、C と D、E では E-bike と H-bike の GWP が逆転した(図２)。また、E-bike においては電力が GWP の大部分を占め、割合はシナリオ A~E で 66~94%と 28 ポイント増加しており稼働率に対する影響は大きい。一方 H-bike では水素が占める割合は 1~19%と 18 ポイント増加し、唯一変化するインベントリデータであるものの、稼働率に対する影響は E-bike 程大きくない。また、稼働率 1 h/day の増加に対する GWP の増加傾向は両自転車とも線形であり、E-bike の場合は約 62.8 kg-CO_2-eq.であるが、H-bike の場合は約 5.7 kg-CO_2-eq.と大きな差がある。そのため、シナリオ D、E ではそれぞれ 727 日目、1455 日目で GWP の逆転が生じた(図 S1)。また ADP において、全てのシナリオで E-bike より H-bike の方が小さくなった(図３)。両自転車においてバッテリー製造が占める割合は 98%以上であり、E-bike では Li-ion の劣化による交換が発生したため、稼働率 1 h/day の増加に約 8E-4 kg-Sb eq.増加した。一方 H-bike は、MH-PEFC の交換が発生しなかったため、稼働率 1 h/day の増加に対する ADP の増加は約 7E-7 kg-Sb eq.に留まった。

4. 結論

本研究では、E-bike と H-bike について、搭載する Li-ion と PEFC の劣化を考慮した 5 年間の環境負荷について、稼働率の観点から感度分析を実施した。その結果、変化率の差異から GWP では E-bike と H-bike の値に逆転が生じ、2 h/day 以上の稼働率において H-bike が優位となった。また ADP においては稼働率に関わらず H-bike が優位であり、変化率については E-bike のほうが大きい結果となった。

5. 引用文献

1) John Wang, Justin Purewal, Ping Liu, Jocelyn Hicks Garner, Souren Soukazian, Elena Sherman, Adam Sorenson, Luan Vu, Harshad Tataria, Mark W. Verbrugge, Journal of Power Sources, 269 (2014) 937-948
2) Shota Tochigi, Kiyoshi Dowaki, Energies, (2023), 16(4), 198

Supporting Information

表 S1 にインベントリデータを示す。

表 S1：インベントリデータ

PEFC Stack[S1]	Input (kg/W)	
	NAFION	7.0×10^{-3}
	Platinum	7.5×10^{-8}
	Graphite	4.5×10^{-3}
	Polyvinylidene chloride (PVDC)	1.1×10^{-3}
	Aluminum	3.0×10^{-4}
	Chromium steel	1.0×10^{-4}
	Glass fires	1.0×10^{-4}
	Carbon black	8.0×10^{-8}
	Steel product	3.7×10^{-3}
	Polyethene high-density granulate (HDPE)	1.5×10^{-3}
	Chromium steel	1.1×10^{-3}
	Cast iron component	8.0×10^{-4}
	Aluminum	7.5×10^{-4}
	Polypropylenes granulate (PP)	2.5×10^{-4}
Li-ion battery	Input(kg/kWh)	
	Battery, Li-ion, rechargeable, prismatic {GLO}| market for | APOS, U	
MH	Input (g/MH tank)	
	Mischmetal {GLO}| production, primary | APOS, U	
Hydrogen	Input(m^3/s)	
	Bio H_2 from sewage sludge [S2]	
Electricity	Input(kWh)	
	Electricity, high voltage {JP}| market for | APOS, U	

表 S2 に式(1)のパラメータを示す。

表 S2：パラメータ

パラメータ	値
a	8.61E-6, 1/Ah-K^2
b	-5.31E-3, 1/Ah-K
c	7.63E-1, 1/Ah
d	-6.7E-3, 1/K-(C-rate)
e	2.35, 1/(C-rate)
f	14,867, 1/$day^{1/2}$
I_{rate}	C レート
D	Days
E_a	24.5, kJ mol^{-1}
R	8.3145, J mol^{-1} K^{-1}
T	K

なお、$Ah_{throughput}$[Ah]は充放電における累積の電荷量である。

図 S1 に、各シナリオにおける GWP の時間的推移の示す。

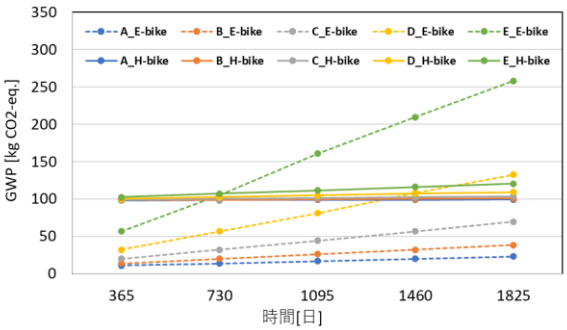


図 S1：各シナリオにおける GWP の時間的推移

＜引用文献＞

S1) Chen Z S, Lam J S L (2022), Transportation Research, Part D 103 103192

S2) Kako S, Seo Y, Dowaki K, Kameyama M, Proc. Conf. Biomass, (2019), Sci. p 137–138

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 9:00 ~ 10:20 F会場：2333小講義室（3F）

[2-F1] 家計消費

座長：重富 陽介 (立命館大学)

9:00 ~ 9:20

[2-F1-01]

空間家計消費推計値を用いた時空間における世帯特性を考慮した家庭活動からの環境影響量推計

*牧 誠也[1]、大西 悟[1]、藤井 実[1]、後藤 尚弘[2]、河井 紘輔[1] (1. 国立環境研究所、2. 東洋大学)

9:20 ~ 9:40

[2-F1-02]

地域・世帯の違いに着目したGHG排出量の分析

*横山 真菜[1]、古川 柳蔵[1]、石田 秀輝[2]、兵法 彩[1] (1. 東京都市大学、2. 東北大学)

9:40 ~ 10:00

[2-F1-03]

多地域間産業連関モデルを用いた年代別家計カーボンフットプリントの解析：韓国の少子高齢化に注目して

*岩元 晟洋[1]、王 家歓[2]、昔 宣希[3]、重富 陽介[4] (1. 長崎大学環境科学部環境科学科、2. 立命館大学理工学研究科、3. 長崎大学水産・環境科学総合研究科、4. 立命館大学理工学部環境都市工学科)

10:00 ~ 10:20

[2-F1-04]

介護予防の促進が環境・経済に及ぼす影響の解析

*吉良 成美[1]、重富 陽介[1] (1. 立命館大学大学院)

©日本LCA学会

空間家計消費推計値を用いた時空間における世帯特性を考慮した家庭活動からの環境影響量推計

Estimation of Environmental Impacts from Household Activity in Spatiotemporal Household Characteristics Using Estimated Spatial Household Consumption-

○牧誠也*[1)]，大西悟[1)]，藤井実[1)]，後藤尚弘[2)]，河井紘輔[1)]
1) 国立環境研究所, 2) 東洋大学　情報連携学部情報連携学科
* maki.seiya@nies.go.jp

1. 背景・目的

地球温暖化への適用・対応のほか，SDGs で規定されるような経済・貧困・コミュニティなど規模・範囲ともに多様な環境問題への対応が必要となっている. その中で，産業や行政だけでなく，家庭からの環境影響を評価することがますます重要になってきている．特に，環境問題における原因を把握・対応方法を検討するために空間的な環境負荷を推計できることが望ましい.

家庭からの環境影響を空間的に把握するため，家計消費を空間的把握することを対象とした研究のうち，メッシュ単位では食料品を例にした筆者らの研究 1)とその改良を行った研究 2)，3)のほかに存在しない.

筆者らによる過去の研究 2)，3)では将来人口，世帯特性の違い，世帯主の年齢区分の違いを反映させ，政府統計 E-stat の API 機能を活用し，時系列的な空間家計消費推計値を自動計算するアルゴリズムを開発し，空間家計消費推計値を用途項目・品目項目で推計を行った．得られた家計消費の推計値の精度には議論の余地があるものの，自動的に推計を行えるシステムを構築できたことで，環境負荷評価のほか多様な応用が可能になると考えられている．ただし，その応用方法についてはまだ検討がなされていない.

本研究では，上記の過去研究で得られた空間家計消費推計値を活用した環境影響評価の一例として，構築した時空間家計消費推計モデルの結果のうち，用途分類の空間推計値をもとに世帯主年齢や年代の影響を考慮し，家計由来の GHG 排出量の時空間的推計を行った．GHG 排出量の推計プロセスをもとに，過去の研究で求めた空間家計消費推計値を活用する場合の課題を整理した.

2. 方法

2.1 牧らの空間家計消費方法

政府統計を取得可能な政府サービスとして総務省が E-stat が公開され，プログラミングコード等を介して東映データ取得・分析ができる API が提供されている.

牧ら 2)は，家計消費推計を目的とし，Python3 を用い，すべての統計でデータのある 2009 年から 2021 年の各家計消費を自動で計算することを目的として，世帯種類別に消費項目の違いがない用途分類をデータ取得した．また，将来予測を可能とするため，経済指標のうち各地域の時系列データが存在する県民経済計算の課税所得をデータ取得した．データの取得だけでなく将来の家計消費を予測することによる環境影響等を分析できる体制を整えるため，将来予測モデルを組み込んだ．ただし，家計消費の用途分類は 100 以上の項目を含むため，すべての計算を精密に行うのは困難である．そのため，予測モデルを変換可能なサブモデルとして構築し，分析には図 1 のように簡易な計算である線形回帰分析のみを用いて 2040 年までの推計を行った.

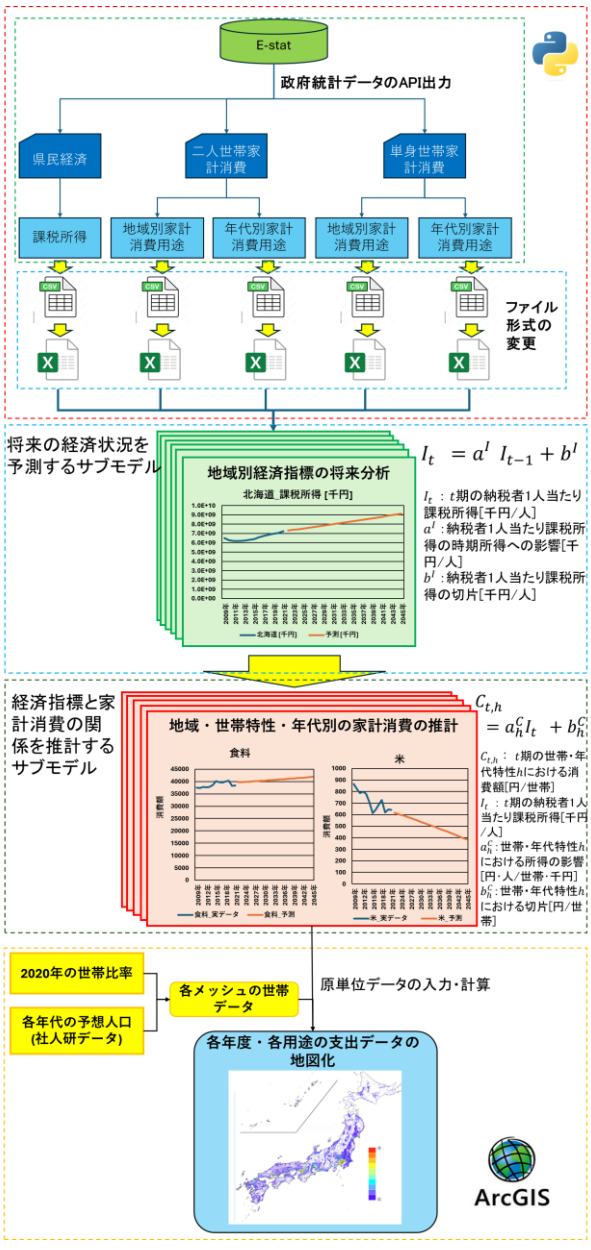


図 1　空間家計消費推計の方法

2.2 空間家計消費推計の結果

本研究では，100 以上あるすべての家計消費項目について自動計算による空間家計消費推計値を求めた．図 2 はそのうち一部を示したものである．

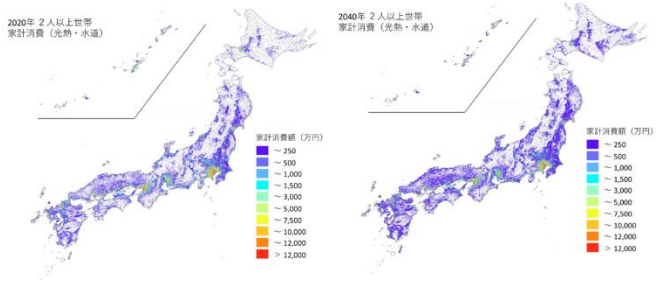


図 2　モデルによる空間家計消費の推計例

2.3 空間家計消費推計をもとにした環境影響推計

筆者らの過去の研究で求めた空間家計消費推計値をもとに，家庭部門からの空間的な環境影響を評価した．家計消費から環境影響を推計するため，最終消費の原単位として使用可能な 3EID4)を用いて，GHG 排出量の推計を行った．家計消費の用途分類には E-stat の分類において複数の階層のデータが同時に出力される. GHG 排出量の推計には E-stat の level6 の用途分類と菓子類・酒類・光熱水道費類などの 6 種, 計 56 用途を用いて推計を行った.

3. 結果及び考察

3.1 空間家計消費推計からの GHG 排出量の推計

図 3 は北海道を対象に GHG 排出量を 1 ㎞メッシュ単位で推計した結果である．この図の中では 2020 年と 2040 年を示したものである．本研究では紙面の都合から 56 用途・すべての世帯特性を考慮した GHG 排出量の合計を示しているが，個別の用途における影響や世帯特性別の影響についても評価することができる．加えて，本研究では 3EID の GHG 排出量を用いているため，GHG 排出量のみ記述しているが，同様の方法を用いることでほかの環境影響を評価することも可能であると考えられる．本研究では，図 3 のように北海道だけを示したが，図 2 と同様に全国レベルで同様の空間推計を示すことができる計算方法を構築できた.

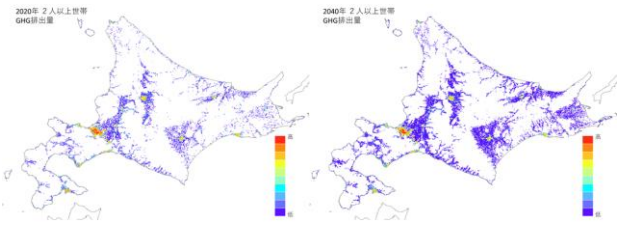


図 3　空間家計消費推計からの GHG 排出用の推計

3.2 推計結果から確認された課題

本研究では，計 56 用途を用いて推計を行った．しかし，家計消費における用途分類の項目と 3EID における分野別の項目が必ずしも一致しない問題が存在する. 例えば，家計消費の用途項目には「生鮮肉」「加工肉」の違いがあるが，3EID では「食肉」よりも詳細な分類がなく，このような詳細部分までの分析には対応する原単位の作成が新たに必要になると考えられる.

一方で，家計消費の項目を選ぶ際の問題も確認された. 本研究では level6 に分類される 50 項目と追加の level5 の分類 6 項目を対象としたが，異なる分類を対象としないといけなかったのは E-stat における項目の分類別の最下層が「level」を同一にしていないことによるものである. そのため，家計消費推計を自動で計算するシステム化を行ったが，推計された結果を活用するには各用途の最下層の設定の統一表現を整備するなど，データ活用に適した処理方式を検討する必要があることが確認された.

4. まとめ

本研究では，家計部門における環境影響等の基礎となる家計消費を推計した筆者らの過去研究 2)で求めた空間家計消費推計をもとにした応用方法を検討することを目的に，3EID の原単位を用いて家庭部門における空間的な GHG 排出量を求めることを行った． その結果，空間家計消費推計値を用いて GHG 排出量を推計することができた. この推計では, 全国レベルでの分析が可能なほか, 用途ごとの影響や世帯特性ごとの影響についても空間的に推計することができ，空間家計消費推計値の活用方法の一つを示すことができたと考えられる.

一方，本研究の結果から用途分類における原単位の不足から項目数の多い品目分類ではさらに原単位が不足していることが考えられ，連結するデータの整備が課題と考えられる．加えて，目的に対応した E-stat からのデータ取得方法の整備方法の検討も必要になると考えられた.

5. 謝辞

本研究は科研費若手研究(21K14281)，独）環境保全再生機構・環境研究総合推進費(JPMEERF20201003, JPMEERF20223001, JPMEERF22575974, JPMEERF20223C02)及び「大学の力を結集した，地域の脱炭素化加速のための基盤研究開発」事業の成果の一部である．ここに記して感謝の意を表する.

引用文献

1) 牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘, 河井紘輔: 環境科学会 2023 年会講演要旨集, 2023
2) 牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘, 河井紘輔: 第 52 回環境システム研究論文発表会, 2024
3) 牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘, 河井紘輔: 2024 年度環境情報科学研究発表大会, 2024
4) 国立環境研究所: 産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID), 2022

地域・世帯の違いに着目したGHG排出量の分析

Analysis of GHG emissions focusing on differences in regions and household types

○横山真菜*[1)]、古川柳蔵[1)]、石田秀輝[2)]、兵法彩*[1)]
Mana Yokoyama, Ryuzo Furukawa, Hideki Ishida, Aya Heiho
1) 東京都市大学, 2)東北大学
*heiho@tcu.ac.jp

1. 研究背景

私たちのライフスタイルは気候変動に大きく影響している。実際に生活に関連する温室効果ガス（Green house gas: GHG）の排出は全体の約60%を占めており、パリ協定における1.5℃目標達成のためには日々の暮らし（ライフスタイル）に伴うGHG排出量の根本的な削減が求められている[1)]。

日本は2050年までにカーボンニュートラルを目指す、カーボンニュートラル宣言を行っており、これ呼応して、多くの自治体が「ゼロ・カーボンシティ宣言[1)]」を行っている。このように国や地域でのGHG排出削減に向けた取り組みが加速する一方で、個人が実践できる具体的な取り組みや個人としてどこを目指す必要があるのかに関して議論ままだ不足しており十分な情報がないのが現状である。

消費者のライフスタイルGHG排出量については、国別平均値や主要地域での分析[3)]が行われている。特に、暮らしの中での4割削減に向けた代表的取り組みとその削減効果に関しての情報発信は、個人がGHG排出量削減を目指すうえでは重要な定量的情報といえる。その一方で、脱炭素ライフスタイルの選択肢（カーボンフットプリントの削減効果がある選択的行動）は、住宅設備の見直しや移動手段や食材の変更、嗜好品を控えるなど、我慢までいかないにせよ選択行動の最良化を求めるものとなっている。また、女性の社会進出比率の向上やコロナ禍を経て、働き方や食生活等の選択肢は多様化しているため、平均的な暮らし方に伴うGHG排出量削減およびその効果に関する議論のみでは不十分な状況といえる。

そこで本研究は、持続可能なライフスタイルとはどのようなものなのかを探る初期的な作業として、全国平均値と東京都と離島（沖永良部）の家計消費に基づきGHG排出量を分析する。特に東京都の世帯構成等によるデータと離島データの比較を行うことで、暮らし方が大きく異なる場合、GHG排出量やその内訳がどのように異なるのかを明らかにすることを目的とする。また分析結果から、環境負荷の低いライフスタイルについて考察する。

2. 研究方法

2.1 調査対象

全国・東京都の家計消費は、東京都「都民の暮らし」東京都生計分析調査(年報）令和4年のデータ[4)]を使用した。離島の暮らしの定量化は、沖永良部で生活する14世帯を対象とした調査結果を用いた。

沖永良部島は、鹿児島県の奄美群島に位置し、鹿児島市から南へ552km、沖縄から北に60kmほどの距離にある。人口約12,000人、年間平均気温が22度と温暖な気候で、奄美群島に属しながらも、歴史的な背景や地理的な距離から、琉球文化の影響を色濃く受けた島でもある。年間を通してエアコン使用量は少なく、島内の移動は自動車が主流であるが、移動距離がそれほど大きくないことが特徴として挙げられる。ただし、島外での用事（仕事や子どもの遠征）が生じた場合には、飛行機での移動が必須となる。畑を有している住民が一定数いて、日々の暮らしに必要な食材のおすそ分けが多いことも特徴のひとつといえる。

2.2 計算方法

GHG排出量の推計は、生活に伴う財・サービス料が網羅できる家計消費を用いて行った。計算方法は3EID[5)]とIDEA ver.3.4.1[6)]のハイブリッド法を用いた。

GHG排出量［kg-CO_2eq］＝
購入した財サービスの生産に伴うGHG排出量
＋
化石燃料消費（燃焼）に伴うGHG排出量

購入した財・サービスの生産に伴うGHG排出量の推計は、家計消費の推計と3EIDの購入者価格ベース原単位を用いて推計した。

化石燃料消費に伴うGHG排出量の推計は、消費支出額から物量を推計し、IDEAv3.4.1の係数を用いて推計した。

全国、東京では、都市ガス燃焼、灯油燃焼、ガソリン燃焼の3項目に関するGHG排出量を物量から推計した。沖永良部島ではプロパン燃焼、灯油燃焼、ガソリン燃焼、電気、水道の5項目に関して物量ベースで調査し、GHG排出量を推計した。沖永良部の電力排出係数はディーゼル発電であるため推計してそれを用い

た。家計消費から計算した GHG 排出は、食料、住居、光熱費・水道、家具・家事用品、被服及び履物、保険医療、交通鵜・通信、教育、教育娯楽、その他の出費支出の計 10 項目に分類して分析した。全国、東京都、沖永良部それぞれの世帯平均のほかに、東京都では、生計支出 7 分位階層別、年齢別での比較も行った。生計支出 7 分位階層は、調査世帯を生計支出額の小さいものから大きいものへ順番に並べ 7 等分した分類となっている。なお、生計支出 7 分位階層別、年齢別の比較では、内訳や構成比のほかに基礎的支出（支出弾力性が 1.00 未満生活に不可欠な支出項目）・選択的支出（支出弾力性が 1.00 以上嗜好的な支出項目）に着目して分析・比較した。

3. 結果・考察

図 1、図 2 に全国平均・東京平均・沖永良部の家計消費[円]と GHG 排出量[kg-CO2eq]を、全国平均を 1 として示した。東京の家計消費は、住居や教育、教養娯楽といった項目が全国平均と比べても大きい。沖永良部の場合は、家計消費、GHG 排出量ともに全国平均、東京都平均よりもほとんどの項目で小さい値となった。交通・通信の GHG 排出量は、沖永良部、全国平均、東京平均の順となっている。これは、沖永良部で他地域への移動が飛行機であること、東京では全国平均と比べて車の利用（ガソリン消費量）が少ない点が挙げられる。月あたりの GHG 排出量で比較した場合には、沖永良部では調査した 14 世帯のうち 10 世帯がすでに東京都平均を基準としたときに、GHG 排出量 4 割削減を達成していることが明らかとなった。選択的支出の見直しによる GHG 排出量が重要になると考えられる。一方で、選択的支出は嗜好性の高いものが多いため、あまり選択的支出による削減を促進すると我慢や無理を強いることにつながるため気を付ける必要があると考えられる。

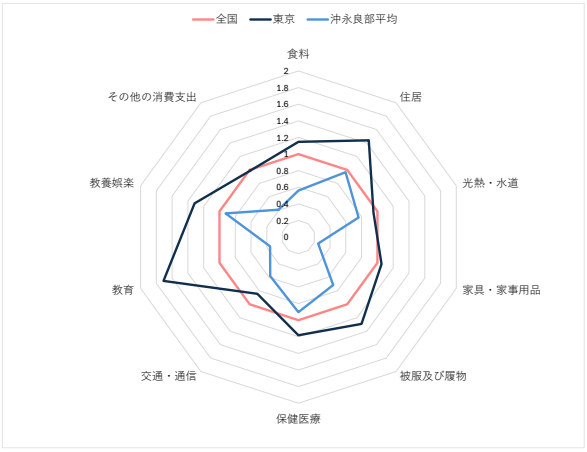


図 1　全国・東京都・沖永良部の家計消費

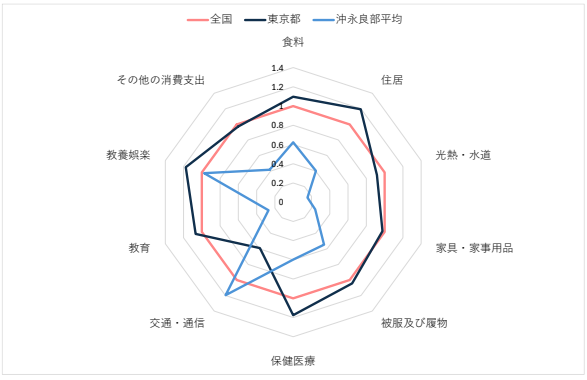


図 2　全国・東京都・沖永良部の GHG 排出量

4. まとめ

本研究を通して、地域や世帯分類の違いに着目して、暮らし方と環境負荷の関係を明らかにした。離島での生活は全国・東京と比べ消費金額・GHG 排出量ともに小さくく複数の世帯ですでに全国・東京平均の GHG 排出量の 4 割削減に到達していることが明らかとなった。また、東京都の生計支出 7 分位階層における基礎的支出と選択的支出の分析結果より、収入が多く支出額が多い世帯ほど GHG 排出量が選択的支出で増加傾向にあることがわかった。今後、持続可能なライフスタイルを構築していくためには、すでに 4 割削減を達成している暮らしを下敷きにしていくことが、抜本的な課題解決につながっていくと考えられる。

引用文献

1) 環境省_令和 5 年版_環境・循環型社会・生物多様性白書　第 1 部第 3 章第 2 節_ライフスタイルシフト, https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r05/html/hj23010302.html, （参照日 2025 年 1 月 20 日）
2) 環境省, 地方公共団体における 2050 年二酸化炭素排出実質ゼロ表明の状況｜地域脱炭素｜環境省 https://www.env.go.jp/policy/zerocarbon.html, 参照日 2025 年 1 月 20 日）
3) 国立環境研究所, 脱炭素型ライフスタイルの選択肢カーボンフットプリントと削減効果：全国・52 都市・10 地方・4 大都市圏別データベース, https://lifestyle.nies.go.jp/,(参照日 2025 年 1 月 20 日）
4) 東京都,「都民のくらしむき」東京都生計分析調査報告（年報）令和 4 年（令和 5 年 4 月 27 日公表）https://www.toukei.metro.tokyo.lg.jp/seikei/2022/sb22q00000.htm,（参照日 2025 年 1 月 20 日）
5) 国立環境研究所「産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID)」(2015 年)
6) IDEA Ver.3.4.1　(2024/09/02)　国立研究開発法人産業技術総合研究所安全科学研究部門 IDEA ラボ

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 10:40 ~ 12:00 F会場：2333小講義室（3F）

[2-F2] 廃棄物

座長：一杉 佑貴 (産業技術総合研究所)

10:40 ~ 11:00

[2-F2-01]

2020年廃棄物産業連関表の推計及び廃棄物フットプリントの試算

*深田 淳史[1]、近藤 康之[1]、一杉 佑貴[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 産業技術総合研究所)

11:00 ~ 11:20

[2-F2-02]

使用済紙おむつの水溶化処理によるマテリアルサイクルのライフサイクル評価

*李 雅娟[1]、松本 亨[1]、藤山 淳史[1]、山田 陽三[2]、安村 宜之[3]、石川 繁夫[4]、立木 貞史[5]、鳥井 一司[6]、三好 弘明[7] (1. 北九州市立大学、2. トータルケア・システム株式会社、3. 住友重機械エンバイロメント株式会社、4. 大王製紙株式会社、5. TOPPAN株式会社、6. 株式会社日本触媒、7. 株式会社リブドゥコーポレーション)

11:20 ~ 11:40

[2-F2-03]

有機系廃棄物の亜臨界水処理のLCA

*田中 佑海汰[1]、山本 貴光[2]、廣瀬 健[2]、丸山 雄平[3]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学、2. SANYOホールディングス （株）、3. アーキテクツ・スタジオ・ジャパン（株）)

11:40 ~ 12:00

[2-F2-04]

関西６府県の住宅耐震化による災害廃棄物発生量の削減効果
～南海トラフ巨大地震による地震動・津波を考慮して～

*盛本 怜太郎[1]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学)

©日本LCA学会

2020 年廃棄物産業連関表の推計及び廃棄物フットプリントの試算

Estimation of 2020 Waste Input-Output Table and Waste Footprint

○深田淳史*[1)]、近藤康之 [1)]、一杉佑貴 [2)]、伊坪徳宏 [1)]
Atsushi Fukada, Yasushi Kondo, Yuki Ichisugi, Norihiro Itsubo
1) 早稲田大学 2) 産業技術総合研究所
* a.fukada@fuji.waseda.jp

1. はじめに

2024 年 5 月、サーキュラーエコノミーの実現に向けた定量評価手法を示す国際規格 ISO 59020 が発行された。同規格は、製品・サービスの循環性評価の重要性を強調しており、廃棄物もそのうちの重要な観点として挙げられた。これに伴い、廃棄物の流れを産業間で把握する廃棄物産業連関表は、循環型経済の推進に向けた政策立案や企業戦略の基盤としての重要性を増していると考えられる。

本研究は、最新の統計に基づき日本国内の 2020 年版の廃棄物産業連関表を推計し、廃棄物フットプリントの観点からサーキュラーエコノミーの実現に向けて新たな提案を行う。

2. 研究方法

2.1 2020年廃棄物産業連関表の概要

本研究において推計対象とする 2020 年廃棄物産業連関表（以下、2020 年 WIOT）の雛形を図 1 に示す。

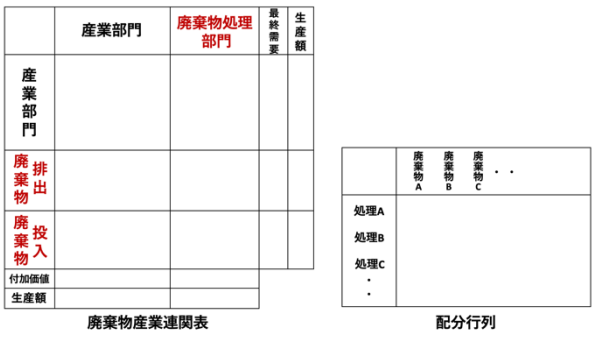


図 1 2020 年廃棄物産業連関表の雛型

図 1 の 2020 年 WIOT の本表（左側）について、本表では、国内の各産業からの廃棄物排出量および各産業への廃棄物投入量（再生利用量）を重量データで推計した。また、従来の産業連関表の産業部門「廃棄物処理」を「焼却」や「埋立」などの廃棄物処理部門に細分化し、内生部門の一部として表を拡張した。そして、図 1 右側の配分行列は、本表に並列される廃棄物種と廃棄物処理部門に対応しており、排出された廃棄物のうち各産業へ直接投入（再生利用）されないものに対して、各廃棄物処理部門が処理する量を割合で推計したものである。

本研究の 2020 年 WIOT では、産業部門を従来の産業連関表の中分類に対応した 108 部門とし、廃棄物処理部門を 60 部門程度に細分化して推計した。また、廃棄物種は国の定義に則った産業廃棄物 19 種と、それらの中間処理によって排出される焼却灰や乾燥汚泥などの処理残渣及び回収資源を対象に推計した。なお、本研究において一般廃棄物は推計の対象外である。

2.2 産業廃棄物の部門別種類別排出量の推計

産業廃棄物の部門別種類別排出量の推計は、環境省が公開する統計「産業廃棄物の排出及び処理状況等」[1)]（以下、産廃統計）の 2020 年度実績データを利用した。この統計では日本標準産業分類に基づいて業種別種類別の産業廃棄物排出量が公開されている。そのため、日本標準産業分類と産業連関表の中分類を照合し、必要に応じて 2020 年産業連関表の国内生産額による廃棄物排出量の按分を行った。これにより、産業廃棄物 19 種における 2020 年 WIOT の業種別種類別排出量を推計した。

2.3 配分行列と部門別種類別廃棄物投入量の推計

まず、排出された産業廃棄物のうち各産業へ直接投入されるものについては、産廃統計の産業廃棄物種別の直接再生利用量のデータを利用し、2020 年 WIOT の部門別種類別廃棄物投入量として推計した。

次に、総排出量の約 80%を占める産業廃棄物が直接投入されず、中間処理されるプロセスについて、本研究では自治体への調査によって得られた近年の産業廃棄物処理実績データを基に、各産業廃棄物に対する配分行列の値を推計した。そして、この値を基点とし、産業廃棄物種ごとに図2のような廃棄物処理フローの定量分析を行った。

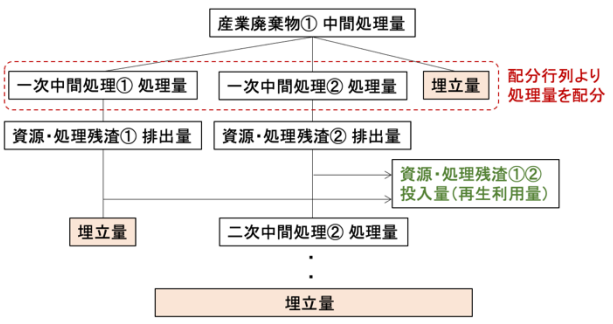


図 2 廃棄物処理フロー分析の概要

この廃棄物処理フロー分析は主に環境省の「廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用量実態調査報告書」[2]から得たデータを利用し、推計した資源及び処理残渣の再生利用量（図2 緑字）とその用途を2020WIOTの部門別種類別廃棄物投入量に反映した。

2.4 廃棄物フットプリントの試算

式(1)に示す2020年WIOTの廃棄物産業連関分析により、最終需要Yの廃棄物フットプリントを試算した。

$$Waste\ Footprint = D_w(I - A)^{-1}\hat{Y} \qquad (1)$$

（D_w:部門別種類別廃棄物直接排出係数行列、I：単位行列、A：投入係数行列、$\hat{Y}$ ：最終需要を対角成分とした対角行列）

D_wは2.2節で推計した部門別種類別の産業廃棄物排出量から算出した19×108の行列、そして$(I - A)^{-1}$及び$\hat{Y}$も同様に2020年WIOTの産業分類に対応した108×108の行列である。よって、式(1)より算出される廃棄物フットプリントは19×108の行列となる。

3. 結果

3.1 廃棄物フットプリント

廃棄物フットプリントの試算の1つとして、式(1)を用いて3つの最終需要部門の値（国内最終需要計、輸出計、輸入計）ごとに産業廃棄物排出誘発量を算定した。その結果を13部門分類に集計したものが図3である。なお、輸入計は最終需要部門において一般に負の値であるが、本試算では誘発量の規模の理解を容易にするため正の値に変換して計算した。また、鉱業の国内最終需要計における在庫純増の値の影響で、一部負の排出誘発量となった。

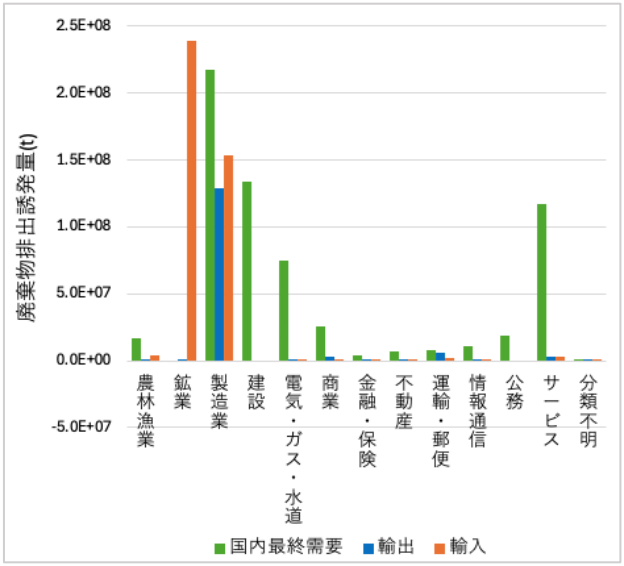


図3 産業別最終需要部門別の産業廃棄物排出誘発量

図3の結果より、国内最終需要に由来してサプライチェーン全体における廃棄物排出を多く誘発するのは製造業、公務・サービス、建設などの産業であり、これら3部門の排出誘発量はそれぞれ1億トンを超えている。また、特に製造業に関しては、日本の貿易を支える主要な産業であることから、その輸出入の動向が廃棄物排出に与える影響も大きい。

そして、図3においてもう一つ注目すべき点は、鉱業の輸入による廃棄物排出誘発量が2億5,000万トン近くと最も大きいことである。本試算は競争輸入型の廃棄物産業連関分析であるため、この結果は「日本の鉱業が海外から輸入した資源を仮に国内のものと同じ技術で採掘した場合に想定される廃棄物排出誘発量」を表し、その点では廃棄物排出の実情とは異なる。しかし2億5,000万トンという排出誘発量はかなり大きく、実際の日本国内の2020年産業廃棄物年間排出量合計がおおよそ3億8,000万トンであることからもその規模の大きさがうかがえる。

4. まとめ及び今後の展望

これまでに述べたように、まず本研究では主に環境省が公開する日本の産業廃棄物に関する統計データを集め、2020年WIOTを推計した。また、この表を用いた廃棄物排出誘発量の試算結果から、日本の鉱業が輸入に依存しているために、その過程で海外では既に大量の廃棄物が排出されている可能性が高いことが示唆された。このように、廃棄物産業連関表を用いて分析することで、今までの日本国内の産廃統計からは得られなかった新たな提言を示すことができると考えられる。

本研究の今後に関して、2020年WIOTのデータ精度は、まだ改善の余地が大いにある。例えば、廃棄物処理部門ごとに中間需要額を詳しく分析し、各処理部門の特徴を明確に反映させることで、廃棄物処理に伴う環境影響をより精度良く分析できると考えられる。また、現状の産業廃棄物に加えて一般廃棄物も推計の対象に含めることで、例えば、動植物性残渣の排出業種に該当しない飲食店等や最終消費者に対して、食品廃棄物に関する効果的な提言が可能になると考えられる。

5. 参考文献

1) 環境省, “産業廃棄物の排出及び処理状況等”, Available: https://www.env.go.jp/recycle/waste/sangyo.html . [アクセス日: 2025/1/6]
2) 環境省,”廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用量実態調査報告書”, Available: https://www.env.go.jp/content/000127243.pdf [アクセス日: 2025/1/6]

使用済紙おむつの水溶化処理によるマテリアルサイクルのライフサイクル評価

Lifecycle Assessment of Material Cycle through Water-Solubilization Treatment of Disposable Diapers

○李 雅娟*[1)]、松本 亨[1)]、藤山淳史[1)]、山田陽三[2)]、安村宜之[3)]、石川繁夫[4)]、立木貞史[5)]、鳥井一司[6)]、三好弘明[7)]

Yajuan Li, Toru Matsumoto, Atsushi Fujiyama, Yozo Yamada, Yoshiyuki Yasumura, Shigeo Ishikawa, Sadafumi Tachiki, Kazushi Torii and Hiroaki Miyoshi

1) 北九州市立大学, 2)トータルケア・システム, 3)住友重機械エンバイロメント,
4) 大王製紙, 5)TOPPAN, 6)日本触媒, 7)リブドゥコーポレーション

* y-li@kitakyu-u.ac.jp

1. はじめに

高齢化社会の進展に伴い、介護の必需品として広く普及している紙おむつの使用量は年々増加している。このため、最終処分量の削減や資源の有効活用の観点から、使用済み紙おむつのリサイクルを実現する意義は大きい。現在、家庭から排出される使用済み紙おむつ、病院や介護施設等から排出される紙おむつは、いずれもほとんど焼却処理されている[1)]。紙おむつは、主にパルプ、プラスチック、高分子吸水材（SAP）で構成されているが、そのリサイクルの方法としてはサーマルリサイクルやマテリアルリサイクルがある。しかし、汚物の付着に伴う衛生的・心理的な問題や、複合素材であるために分離・選別が難しいといった課題があるため、リサイクルの実施例は少ない。環境省の調査では、リサイクルを実施している自治体は1～2%である[2)]。

以上のような背景のもと、本研究では、水溶化処理システム[3)]を採用してパルプとプラスチック、SAPを分離・回収し、再生原料として利用するケースを対象に、従来の焼却処理と比較することでその効果を明らかにするために、ライフサイクルアセスメント（LCA）を適用して評価した。

2. 評価対象

2.1 リサイクルシステムの概要

本研究では、1 日あたり 20t の処理能力を有する施設を対象とした。この施設では、病院や福祉施設から排出された使用済み紙おむつが収集・運搬業者によってリサイクル施設へ搬入され、工場内ではエネルギーおよび水、薬剤を用いて、パルプとプラスチック、SAPの分離が行われている。分離工程では大量の水を使用するが、その約 80%は下水処理場の処理水を活用することを想定した。

リサイクルによって得られた再生パルプは、建築資材（外壁材や内装材など）の原料として活用されている。また、分離されたプラスチック類は RPF として利用されている。

2.2 評価対象システムの設定とシステム境界

本研究では、使用済み紙おむつの水溶化処理によるマテリアルリサイクルを評価するため、LCA を用いて CO_2 排出量を算出した。大人用と乳児用の使用済み紙おむつの投入枚数比は 5：5、重量比に換算すると 6：4 と設定した。また、CO_2 削減効果を比較するため、4 つのケースを設定した。評価対象システムを図 1～3 に示す。

評価範囲は、使用済み紙おむつがリサイクル工場に搬入されてから、各素材に分離・再生され、二次利用可能な状態になるまでとした。具体的には、再生パルプは防火板製造工場へ搬入されるまでの工程、再生プラスチックはペレット製造工程に搬入されるまで、再生 SAP は二次利用製造工場へ搬入されるまでの工程とした。また、廃プラスチックと廃 SAP については RPF に加工され、燃料として使用されるまでを評価対象とした。一方で、使用済み紙おむつの回収・輸送とリサイクル施設から再商品化工場までの輸送は評価の対象外とした。

比較対照として、従来の処理方法である焼却処理・埋立処分を設定した。焼却処理では、家庭系一般廃棄物の可燃ごみ処理を想定し、廃棄物焼却発電により発生した電力を購入電力の代替として控除した。埋立処分は、一般廃棄物の埋立処分を想定した。再生パルプの比較対照は防火板製造に用いられるバージンパルプと設定し、廃プラスチックと廃 SAP は RPF として一般炭を代替するものとして代替効果を算出した。機能単位は、リサイクル施設に搬入される使用済み紙おむつの処理量 20t/日とした。

3. 分析方法

3.1 利用データ

CO_2 排出量原単位には、IDEA ver.3.3 のと、海洋プラスチック問題対応協議会（JaIME）の「産業系廃プラスチックの環境負荷評価（LCA）」、環境省・経済産業省の「温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル」を用いた。

3.2 石炭の代替量の設定

RPF を石炭の代替とする際、発熱量（MJ/kg）を基準に石炭の必要量を等価換算した。RPF の JIS 規格では含水率を 5%以下と定めており、プラスチックの種類によって低位発熱量が異なるため、JaIME を参考に、RPF の製造量を算出した。石炭の発熱量については、資源エネルギー庁の資料をもとに 24.8MJ/kg と設定し、単位換算を行うことで石炭の代替量を推計した。

3.3 焼却処理、埋立処分の設定

焼却施設への輸送については、リサイクルするケースと同条件であると仮定し、評価対象外とした。灰分の算出については、北大の H-IWM を参考に、パルプとプラスチックの乾ベースの灰分をそれぞれ 0.0742、0.0557 と設定した。事業系の使用済み紙おむつは、一般廃棄物または産業廃棄物として焼却処理されているが、本研究では一般廃棄物処理を対象とし、焼却処理（ごみ発電を除く）および埋立処分に関する CO_2 排出量原単位を用いて計算を行った。

4. 分析結果

結果を図 4 に示す。単純な焼却処理の場合、CO_2 の年間排出量は 2,883t-CO_2 であり、全素材再生ケースは年間 70t-CO_2 となった。また、パルプ再生ケースは全素材再生ケースより CO_2 の削減効果が大きい結果となった。ここで、清掃工場と連携して廃熱を利用することを想定した評価を実施したが、全素材再生ケースの CO_2 の削減効果は最も大きい結果が得られた。

5. まとめ

全素材再生ケースは、単純な焼却処理と比較して 2,813t-CO_2/年の削減効果が得られることが明らかとなった。これは、従来の焼却処理における CO_2 排出量の削減に加え、RPF 燃料の石炭代替や再生パルプ、再生プラスチック、再生 SAP の利用によるバージン素材の製造工程を代替したことよる。この結果は、マテリアルリサイクルシステムの構築が CO_2 排出量の削減に大きく貢献する可能性を示唆している。

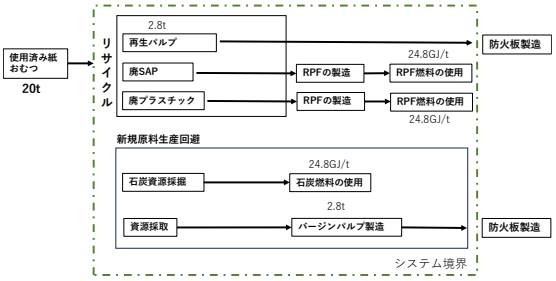


図 1 パルプ再生ケース

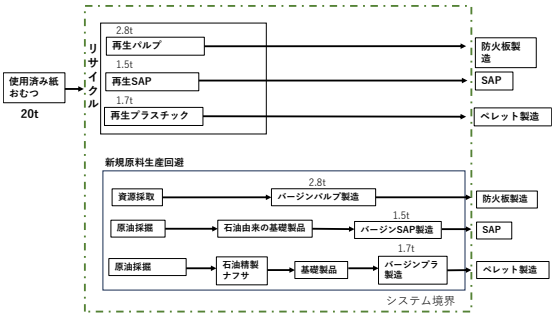


図 2 全素材再生ケース

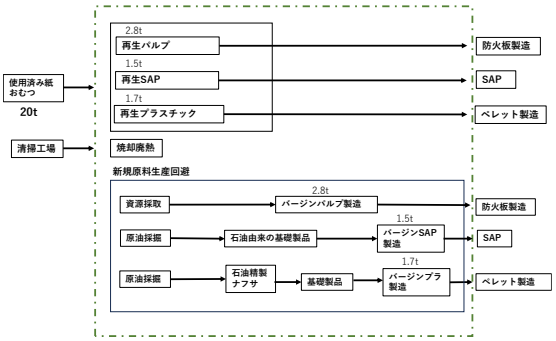


図 3 全素材再生+焼却連携ケース

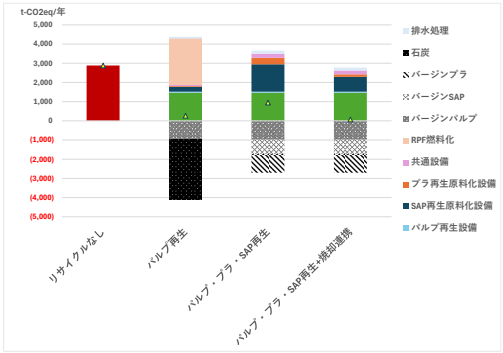


図 4 LCA 評価による各ケースの比較結果

引用文献

1) 松本　亨，藤山　淳史：総論：使用済み紙おむつをめぐる動向, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.33, No.4, pp.257-264, 2022
2) 環境省："使用済紙おむつの再生利用等の促進プロジェクト検討結果取りまとめ"，（2023）
3) 藤山淳史，櫻井利彦，松本 亨，長 武志：使用済み紙 おむつのマテリアルリサイクルのライフサイクルインベントリ分析，日本 LCA 学会誌，第 8 巻，第 1 号, pp.37-44 (2012)

有機系廃棄物の亜臨界水処理の LCA

LCA of subcritical water treatment for organic waste

田中佑海汰*[1)]、山本貴光 [2)]、廣瀬健 [2)]、丸山雄平 [3)]、橋本征二 [1)]
Yuta Tanaka, Takamitsu Yamamoto, Takeshi Hirose, Yuhei Maruyama, Seiji Hashimoto
1)立命館大学, 2)SANYO ホールディングス(株), 3)アーキテクツ・スタジオ・ジャパン(株)
* ce0043rv@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

プラスチックや厨芥などの有機系廃棄物については様々な処理・再資源化の方法があるが、いずれも品質の劣る廃棄物の再資源化や処理後残渣の取り扱いが課題となっている。また、近年では、廃棄物の処理・再資源化についても、温室効果ガス排出削減への貢献が重要となっている。本研究では、有機系廃棄物の処理・再資源化に関する上記の課題に対応するものとして、亜臨界水処理を対象とした LCA を実施し、これを焼却処理等と比較した。亜臨界水処理の LCA については、外口ら [1)]、山本ら [2)]の報告があるが、本研究は、医療系廃棄物の処理を対象としてエネルギー回収を考慮している点等が異なる。

2. 方法

2.1 機能単位とシステム境界

本研究では、医療系廃棄物の 1 トンの処理を機能単位とした。対象とする医療系廃棄物は 100%プラスチックごみと仮定し、これを亜臨界水処理もしくは焼却処理するものとした。双方の処理について、施設の建設、運用、廃棄物の燃焼、エネルギー回収の各段階について、CO_2 排出量および CO_2 排出回避量を算出した。エネルギー回収については、亜臨界水処理では生成物の燃料利用、焼却処理では発電を想定した。

2.2 CO_2 排出量・回避量の算出方法

施設の建設段階については、建設に必要な建材量に各建材の CO_2 排出原単位を乗じて集計し、これを耐用年数、年間処理量で除して、処理 1 トンあたりの CO_2 排出量とした。運用段階については、処理 1 トンあたりの電力消費量、燃料消費量、水消費量にそれぞれの CO_2 排出原単位を乗じて集計し、処理 1 トンあたりの CO_2 排出量とした。燃焼段階については、廃プラスチックの処理量に、廃プラスチック燃焼時の CO_2 排出原単位を乗じて算出した。エネルギー回収段階については、亜臨界水処理の生成物量にその発熱量を乗じ、同等熱量の石炭を代替するものとして(セメント製造時に燃料利用するものとして)、また、焼却処理による発電量に電力の CO_2 排出原単位を乗じて、CO_2 排出回避量を算出した。各処理技術に関わるデータを収集し、CO_2 排出原単位は AIST-IDEA_v3.4[3)]、環境省 [4)]の値を用いた。

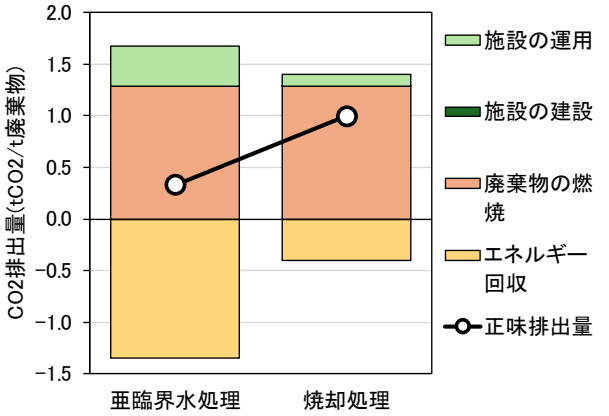


図 医療系廃棄物(廃プラスチック)の処理 1 トンあたりの CO_2 排出量

3. 結果と考察

医療系廃棄物(廃プラスチック)の処理 1 トンあたりの CO_2 排出量の試算結果を図に示す。亜臨界水処理において運用段階の排出量が多くなったが、これは、亜臨界水処理が主に電力を多く消費するためである。なお、亜臨界水処理では、排水処理や燃料利用前の脱塩素化などのプロセスも考慮する必要があるが現時点ではこれらを考慮できていない。また、亜臨界水処理において、生成物を石炭代替の燃料として利用した場合の CO_2 排出回避量は、亜臨界水処理及び燃料利用に係る CO_2 排出量の約 8 割に相当し、生成物の二次利用が CO_2 排出量の削減に大きく寄与することが示された。正味の CO_2 排出量も焼却処理を下回った。なお、本試算では生成物の発熱量を廃プラスチックと同じと仮定していることや、医療系廃棄物や生成物の含水のばらつきの影響にも留意する必要がある(本試算ではそれぞれ 50%、30%と設定)。

引用文献

1) 外口絵理子ら：第 7 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、pp.172-173、2012
2) 山本貴光ら：第 19 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、2-D2-03、2024
3) 産業施術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ：LCI データベース AIST-IDEA_v3.4_日本語版
4) 環境省：温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧、2024

関西 6 府県の住宅耐震化による災害廃棄物発生量の削減効果
：南海トラフ巨大地震による地震動・津波を考慮して

Reduction effect of disaster waste generation by promoting earthquake-resistant housing in six Kansai prefectures: Considering the seismic motion and tsunami caused by the Nankai megathrust earthquake

○盛本怜太郎[*1)]、橋本征二[1)]
Ryotaro Morimoto, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* ce0049ir@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

南海トラフ巨大地震により発生する災害廃棄物量は、最大で東日本大震災の約 11 倍[1)]と推計されている。災害廃棄物対策としては、処理能力の確保や再生利用の促進だけでなく、発生抑制も含めた対策が必要不可欠である。住宅の耐震化は、災害時の住宅被害を減らして人命を保護することが主目的であるが、それは災害廃棄物の発生抑制にもつながると考えられ[2)]、その効果を定量化することも重要である。本研究では、関西 6 府県・市区町村を対象として、住宅耐震化の進展が災害廃棄物量の削減にどの程度の効果をもたらすのかについて検討した。既報[3)]に対し、津波の影響も考慮しメッシュ単位で分析した。

2. 方法

2.1 耐震化前後の災害廃棄物発生量の推計

南海トラフ巨大地震における予想計測震度(250m メッシュ)[4)]と住宅の建て方別世帯数(小地域)[5)]を重ねあわせ、小地域の世帯数を 250m メッシュに対応する面積割合で割り当てた。次に、住宅土地統計調査[6)]を用いて、世帯数から構造別、築年別の住宅戸数を算出し、これに構造別、築年別の倒壊確率を乗じて全壊・半壊戸数を推計した。さらに廃棄物発生原単位を乗じて災害廃棄物発生量を推計した。なお、木造の住宅の築年は、旧築年(1980 年以前)、中築年(1981～2000 年)、新築年(2001 年～)、非木造の住宅の築年は、旧築年(1970 年以前)、中築年(1971～1980 年)、新築年(1981 年～)に分類され、1980 年以前の住宅に非耐震化住宅が含まれる。

2.2 耐震化の想定と考慮の方法

各府県が公表している現状の耐震化率と耐震化目標をもとに、1980 年以前の住宅を耐震化し、耐震化された 1980 年以前の住宅は新築年と同等の耐震性を持つものとして、以下の耐震化シナリオについて災害廃棄物量を推計した。

- 耐震化を行う前の現状シナリオ
- 耐震改修促進計画に従って旧築年住宅を優先的に耐震化した旧築年耐震化計画シナリオ
- 旧築年住宅を優先的に全て耐震化した旧築全耐震化シナリオ

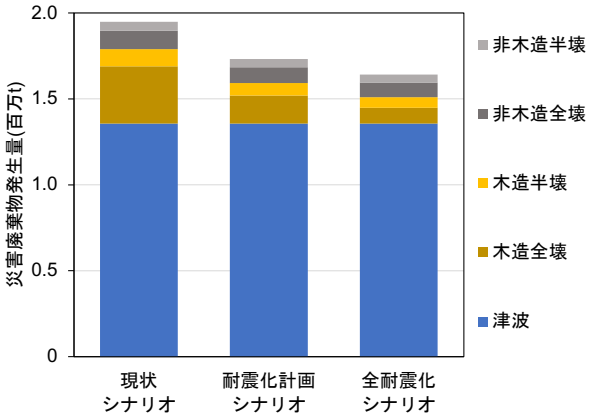


図　和歌山市の各シナリオにおける構造別・築年別の災害廃棄物発生量

3. 結果と考察

図に和歌山市の各シナリオにおける構造別・築年別の災害廃棄物発生量を示す。和歌山市では、津波により約 1.3 百万 t の災害廃棄物量が発生すると推計され、これが多くを占める結果となった。また、耐震化計画シナリオは現状シナリオと比較して約 217 千 t (11%)、全耐震化シナリオは現状シナリオと比較して約 307 千 t (16%)の災害廃棄物発生量が削減できる結果となった。地震動のみに着目すると、それぞれ 37%、52%の削減率となる。和歌山市は旧築年の木造住宅戸数が大きく、今後の耐震化により災害廃棄物の削減効果も大きくなると考えられる。関西圏 6 府県の詳細な結果については、学会当日報告する。

参考文献

1) 環境省：巨大地震発生時における災害廃棄物対策のグランドデザインについて～中間とりまとめ，2014
2) 平山修久、福和伸夫：地域安全学会論文集、39、245-253、2021
3) 盛本怜太郎、橋本征二：土木学会論文集、80(26)、24-26003、2024
4) 内閣府：南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ最終報告、2013
5) 総務省統計局：e-Stat 令和 2 年国勢調査
6) 総務省統計局：e-Stat 平成 30 年住宅土地統計調査

口頭発表セッション

2025年3月6日(木) 13:00 ~ 14:40 F会場：2333小講義室（3F）

[2-F3] 環境コミュニケーション

座長：中野 祐樹 (横浜国立大学)

13:00 ~ 13:20

[2-F3-01]

Understanding consumer decision-making on bioplastics in Japan: influence of information provision on psychological factors

*Yunmeng Cao[1]、Ayami Otsuka[1]、Heng Yi Teah[1]、Yuichiro Kanematsu[1]、Yasunori Kikuchi[1] (1. the University of Tokyo)

13:20 ~ 13:40

[2-F3-02]

市民に対するライフサイクル思考の醸成に向けた情報提供法の検討

*長谷川 慶信[1]、栗栖 聖[1]、福士 謙介[1] (1. 東京大学)

13:40 ~ 14:00

[2-F3-03]

東京都市大学における教育研究活動の環境ホットスポット分析

*味岡 優斗[1]、兵法 彩[1] (1. 東京都市大学)

14:00 ~ 14:20

[2-F3-04]

探究学習の課題指導におけるライフサイクル思考の活用方法の検討

*松本 真哉[1]、平山 世志衣[2]、水野 建樹[2]、菱沼 竜男[3] (1. 横浜国立大学、2. 横浜LCA環境教育研究会、3. 宇都宮大学)

14:20 ~ 14:40

[2-F3-05]

総合討論

©日本LCA学会

日本におけるバイオプラスチックに関する消費者意思決定の理解：心理的要因に対する情報提供の影響

Understanding consumer decision-making on bioplastics in Japan: influence of information provision on psychological factors

○Yunmeng Cao*[1)], Ayami Otsuka[1)], Heng Yi Teah[1)], Yuichiro Kanematsu[1)], Yasunori Kikuchi[1)]
1) the University of Tokyo
* YmCao@chemsys.t.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

Plastics produced from biogenic feedstock or biodegradable materials are called 'bioplastics'[1)]. To introduce bioplastics, as part of the Plastic Resource Circulation Act, the government of Japan set a milestone aiming to achieve 2 million tons of domestic bio-based plastic production by 2030[2)]. Consumers' acceptance of bioplastics is crucial as it influences industry demand, impacts waste flow in recycling systems, and plays a key role in promoting green consumption[3)]. Although governments and industries have been actively promoting the adoption of bioplastics, the influence of information provision on consumers' psychological factors has yet to be fully explored. This study examines the psychological factors that shape consumer decision-making processes regarding bioplastics, utilizing data collected through an online survey conducted in Japan.

2. Methodology

2.1 Questionnaire design and data collection

Norm Activation Theory (NAT) serves as a psychological framework aimed at predicting and explaining individuals' behaviour and decision-making processes[4)]. As shown in Figure 1, the questionnaire was designed based on an extended NAT framework, incorporating ascription of responsibility, personal norms, and awareness of consequences as core constructs, while integrating perceived behavioural control, social norms, subjective knowledge, and efficacy as extended constructs. Willingness to pay (WTP)—representing the price premium consumers are willing to pay—and purchase intention (PI) for plant-based and biodegradable plastic bottles were set as dependent variables. The questions were presented on a 7-point Likert scale (i.e., from 1 = strongly disagree to 7 = strongly agree), except for the demographic questions.

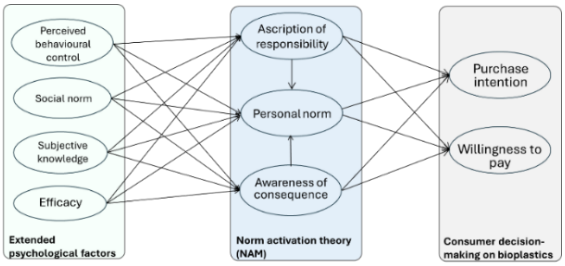


Figure 1. Theoretical framework of the extended Norm Activation Theory

Data for the study were collected through an online access panel in March 2024. A market research company in Japan was subcontracted to recruit the respondents based on the equal distribution of gender and population across regions to ensure representativeness. To investigate the influence of information provision, respondents were randomly divided into two groups. One group, referred to as the treatment group, received an introduction to bioplastics, including the concepts, raw materials, environmental impacts, and labels. The other group, referred to as the control group, did not receive this information for comparison. In total, nearly 2,500 questionnaires were collected and cleaned for analysis.

2.2 Statistical analysis

The following steps were carried out by SPSS 29.0 and SPSS AMOS 29.0 to analyze the data. First, descriptive statistical analysis was conducted to characterize the overall features of the samples, including demographic distributions and key variable summaries, providing a comprehensive overview of the dataset. Second, reliability and validity analyses were performed to evaluate the fitness of the theoretical model, ensuring that the measurement instruments were consistent and accurately captured the intended constructs. Third, Structural Equation Modeling (SEM)[4)] was employed to explore the causal relationships between observed and latent variables,

offering a thorough understanding of the model's dynamics. Path coefficients were analyzed to assess the strength and direction of these relationships, enabling meaningful comparisons across different constructs.

3. Results

3.1 Descriptive statistics

The results of descriptive statistics indicated a relatively balanced distribution in groups and gender, demonstrating a good representation of the samples. For the descriptive analysis of two dependent variables, consumers exhibited a slightly higher WTP for bioplastic bottles compared to traditional plastic bottles, suggesting a greater perceived value for bioplastics. Furthermore, consumers expressed a slightly positive PI for bioplastic bottles, highlighting favorable attitudes toward sustainable alternatives. The WTP and PI of consumers in the treatment group were slightly higher than those in the control group, indicating that the provision of information helped influence consumers' psychology and decision-making.

3.2 Hypotheses testing by SEM

The reliability and validity analysis, which reflected the model's fitness, indicated that the extended NAT framework effectively predicted consumer decision-making regarding bioplastics. The Cronbach's α of the overall scale and each dimension were measured to test the reliability of the survey. Convergent validity and discriminant validity were assessed using indicators such as factor loadings. These results highlighted the robustness of the framework in capturing the key factors influencing consumers' decision-making on bioplastics.

The results of path coefficients in both the treatment and control groups further revealed that information provision impacted consumers' PI and WTP through specific psychological pathways (Table 1). Constructs like ascription of responsibility, perceived behavioral control, social norm, and subjective knowledge differed in their impact on both PI and WTP, while personal norm and awareness of consequence showed minor differences on either.

Table 1. Pathways between constructs with significant differences due to information provision

Constructs	PI	WTP
Ascription of responsibility	○	×
Personal norm	×	×
Awareness of consequence	×	×
Perceived behavioural control	○	○
Social norm	○	○
Subjective knowledge	○	○

○: significant difference; ×: minor difference

4. Conclusions

The study underscores the importance of targeted strategies to enhance consumers' acceptance of bioplastics. Providing relevant information enhances consumers' awareness and positively influences psychological factors, such as perceived behavioral control and ascription of responsibility, which in turn affect both PI and WTP. The findings offer practical insights for promoting bioplastic consumption in Japan by tailoring information to consumers and leveraging psychological motivators.

Acknowledgments

This work contains the results of projects supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO, Grant number JPNP20009), and the Japan Science and Technology Agency (JST, COI-NEXT Grant number JPMJPF2003). The activities of the Presidential Endowed Chair of the 'Platinum Society' at the University of Tokyo are supported by Mitsui Fudosan Corporation, Sekisui House, Ltd., East Japan Railway Company, and Toyota Tsusho Corporation.

Reference

1) Van Roijen, E. C. A., Miller, S. A.: Resource Conservation Recycle, 181, (2022), pp. 106236.
2) Ministry of the Environment (Japan) [MOE Japan]: "Roadmap for bioplastics introduction", (2021)
3) Findrik, E., Meixner, O.: Journal of Cleaner Production, 410, (2023), pp. 13731
4) Schwartz, S. H.: Advances in Experimental Social Psychology, 10, (1977), pp. 221–279

東京都市大学における教育研究活動の環境ホットスポット

Environmental hotspot analysis of academic activities at Tokyo City University

○味岡優斗 [1)]、兵法彩*[1)]
Yuto Ajioka, Aya Heiho
1) 東京都市大学
*heiho@tcu.ac.jp

1. はじめに

現在、日本では教育のオンライン化・デジタル化が進んでいる。政府CIOポータルによって発表されている、教育データ利活用ロードマップ [1)] には、教育のデジタル化によって、2030 年頃までに目指すべき姿が描かれている。コロナ禍でオンライン化が進んだ教育現場も多いと考えられるが、引き続き教育におけるデジタル化・オンライン化は進む見込みである。また、2050 年カーボンニュートラル宣言を受けて、大阪大学では、「大阪大学エネルギーマネジメント中期目標・基本方針」[2)]で今後、新築するすべての建物をZEB Readyとする条項を追加した。広島大学では、「2030 年までに通勤・通学を含めたキャンパスで使うエネルギーのカーボンニュートラル実現を宣言」[3)]するなど大学においても、環境負荷低減に向けた取り組みが活発化している。このようなことから、大学教育現場の環境負荷を計算することが必要であると考える。しかし、テレワークに関する先行研究は多くみられるが、大学講義の環境負荷に関する論文は少ない現状がある。

2. 研究目的

本研究は、東京都市大学横浜キャンパスにおける対面講義とオンライン講義の環境負荷を定量的に評価し、大学講義における環境負荷の主な原因（環境ホットスポット）を明らかにすることで、環境負荷を含めた大学講義の適切な方法を明らかにすることを目的とする。

3. 研究方法

図 1 に示した 1 日の流れより対面講義では、講義、通学、用紙による環境負荷の計算。オンライン講義では、パソコン、エアコン、自由行動による環境負荷の計算を行う。東京都市大学横浜キャンパスでの講義平均受講者数が約 100 人であること、電力消費量などが季節によって結果が大きく変化することから、100 人あたりの 1 年間（2023 年 6 月～2024 年 5 月）のGHG排出量の計算を行う。GHG排出量の算出には、IDEAv 3.4.1 を用いる。

教室の消費電力は原則 2023 年のデータを使用したが、4，5 月に関しては、データの欠損が大きかったため、

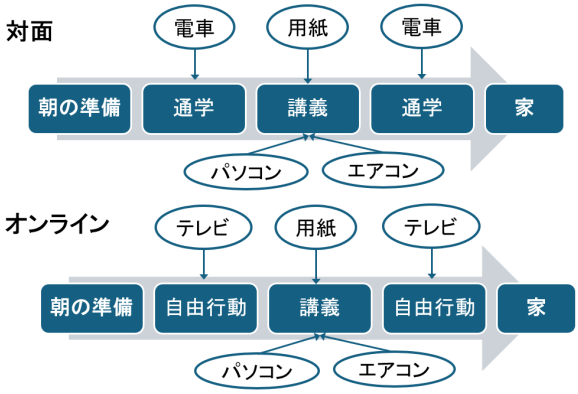


図 1　対面講義、オンライン講義の 1 日の流れ

2024 年度のものを使用した。講義の開講時期は、4,5 月を 1Q、6,7 月を 2Q、10,11 月を 3Q、12,1 月を 4Qとした。用紙の使用量は、東京都市大学ISO事務局に記録されているデータを用いた。通学の計算は、全員徒歩か電車の移動と仮定をし、日本学生支援機構｜令和 4 年度学生生活調査 [4)]のデータを用いた。最寄りの駅から約徒歩 10 分かかることから、通学時間が 10 分以内の生徒を徒歩と仮定した。

オンライン受講者のパソコンとエアコンの電力消費量は、サンワサプライのTAP-TST10Nを用いて測定。自由行動は、テレビ視聴と動画視聴が考えられたが、動画視聴は電車移動中にも同様であること、計測した動画視聴の電力消費量が非常に小さいことから、テレビ視聴の電力消費量のみ測定した。

4. 結果

4.1 対面講義

対面講義のGHG排出量は 31,485kg-CO_2eqとなった。それぞれの比率は図 2 に示す。教室の電力消費量が 1Qと 3Qが他のクォーターよりも低くなった。講義数にそこまで違いがないのに差が出た理由は、季節的にエアコンを使用していないためと考えられる。通学の環境負荷が、比率として高くなってしまった要因として、使用したデータが乗車している時間だけでなく、通学にかかるすべての時間であること、近年設備更新により、エアコンの省エネ化が進んだことで相対的に大きくなってしまっていることがあげられる。

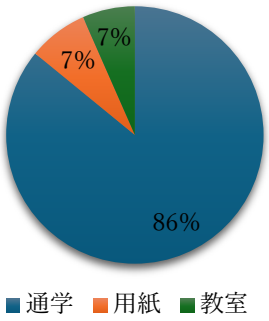


図２　対面講義のGHG排出量の内訳

4.2 オンライン講義

オンライン講義のGHG排出量は12,311kg-CO_2eqとなった。それぞれの比率は図３に示す。オンライン講義の主な環境負荷要因はエアコンであり、これは個人が各家庭で使用しているためと考えられる。

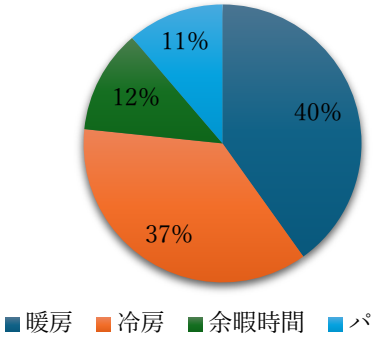


図３　オンライン講義のGHG排出量の内訳

4.3 環境ホットスポット分析の比較

対面講義のGHG排出量は31,485kg-CO_2eq、オンライン講義のGHG排出量は12,311kg-CO_2eqとなり、対面講義がオンライン講義よりも環境負荷が大きくなる結果となった。対面講義では通学、オンライン講義ではエアコンが結果に大きく影響を与えていることから、環境負荷を含めた適切な大学講義を考えるには、通学方法とエアコンについて考える必要がある。

4.4 講義プロセスでの比較

対面とオンラインそれぞれの講義でのGHG排出量（図４）は、対面講義は4,751.1kg-CO_2eq、オンライン講義は2Qが5,882.3kg-CO_2eq、4Qが6,327.5kg-CO_2eqとなり、エアコンを使用する時期の講義については、オンライン講義のほうが大きい結果となった。これは、個人がエアコンを使用しているため、オンライン講義のGHG排出量が大きくなったと考えられる。

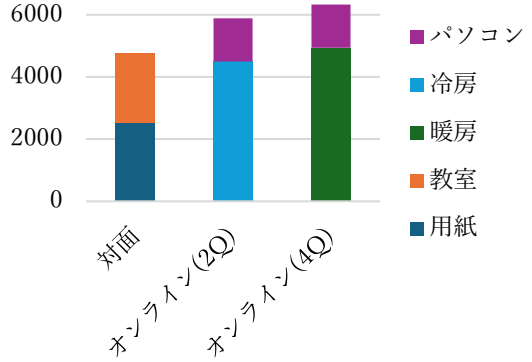


図４　講義プロセスでの比較[kg-CO_2eq]

5. 講義プロセスに関する考察

家族と一緒に暮らしている自宅から通っている人が、対面講義に参加し、家には在宅勤務等の人がいると仮定した場合の計算を行った。その結果、対面講義と並行して動いている自宅のエアコンのGHG排出量は、6,227.2kg-CO_2eqとなり、この数値を対面の講義プロセスのGHG排出量に足すと、オンラインの講義でのGHG排出量よりも大きい数値となった。このように、家庭と社会（仕事、大学）の方向性があっていないと、実際の環境負荷低減につながらないことがわかった。

6. まとめ

東京都市大学横浜キャンパスの対面講義・オンライン講義の環境ホットスポット分析を行った結果、対面講義のGHG排出量がオンライン講義よりも大きくなった。また、自宅でのエアコンの利用状況によって講義での結果が大きく異なってくることがわかった。今後、デジタル化とカーボンニュートラルを共に促進していくには、複数のパターンの分析を行い、大学の特徴に合わせた環境負荷低減策を明らかにする必要がある。

引用文献

1) 政府CIOポータル 教育データ利活用ロードマップ https://cio.go.jp/sites/default/files/uploads/documents/digital/20220107_news_education_01.pdf，（参照　2024-12-9）
2) 大阪大学 大阪大学エネルギーマネジメント中期目標・基本方針https://www.osaka-u.ac.jp/ja/guide/policies/energy-management，（参照　2024-10-28）
3) 広島大学　カーボンニュートラル×スマートキャンパス 5.0https://www.hiroshima-u.ac.jp/about/initiatives/cn，（参照　2024-10-28）
4) 独立行政法人　日本学生支援機構
令和４年度学生生活調査・高等専門学校生生活調査・専門学校生生活調査 https://www.jasso.go.jp/statistics/gakusei_chosa/2022.html，（参照　2024-7-16）

探究学習の課題指導におけるライフサイクル思考の活用方法の検討

The Way to Use Life Cycle Thinking in Student Instruction of Research Problem Setting in Inquiry-based Learning

○松本真哉*[1)]、平山世志衣[2)]、水野建樹[2)]、菱沼竜男[3)]
Shinya Matsumoto, Yoshie Hirayama, Tateki Mizuno, Tatsuo Hishinuma
1) 横浜国立大学, 2) 横浜 LCA 環境教育研究会, 3) 宇都宮大学
* matsumoto-shinya-py@ynu.ac.jp

1. 緒言

ライフサイクル思考(LCT)を取り入れた学校向けの教材の開発と実践が進められている。以前は環境教育向けの教材が主体であったが、最近では、家庭科教育や、SDGs に関連する内容など、持続可能な社会形成に結び付く内容のものも増えている。このように LCT の学びに関係する教育内容が充実する一方で、開発された教材などが教育現場で定常的に活用されるためには、まだ多くの課題が存在する[1)]。私たちは、LCT を取り入れた教材を環境教育や通常の教科教育の場に展開するのではなく、学習指導要領の改訂に伴い高等学校(以下高校とする)で新しく導入された必履修教科である「総合的な探究の時間」において活用することに着目し研究を進めてきた[2)]。本発表では、その活動で実施した教員研修で得られた知見を基に執筆を進めている書籍の内容検討の結果について報告する。

2. 総合的な探究に時間の指導における LCT の活用

現在、高等学校の必履修教科として指導が進められている「総合的な探究の時間」は、研究活動に類似する探究学習を主体としている。探究学習は、当該教科の導入前は、スーパーサイエンスハイスクールなどの取組み以外では一般的な高校の学習内容では無かった。

この教科では、生徒が、能動的な学習に基づく主体的かつ対話的な学びを、“実生活や実社会と関係が深く、かつ教科横断的で一つの正解が存在しない課題”の探究学習を通して実現することが、学習指導要領などで示されている。また探究学習の学習過程として、課題の設定、情報収集、整理・分析、まとめ・表現の四つの過程が学習指導要領などで示されている。これらの四つの過程は、いずれも従来の教科学習とは異なる性質をもっている。そのため、学習主体である生徒も、生徒を指導する教員も、双方が難しさを感じながら学習と指導が進められている調査結果が示されている[3)]。教員に関しては、これらの四つの中で、特に探究課題の設定指導に難しさを感じていることが分かっている[3)]。この傾向は、私たちが研究活動を開始する前に関わっていた教員研修の調査結果と同様である。当該教科における探究課題は、前述したように“実生活や実社会と関係が深く、かつ教科横断的で一つの正解が存在しない課題”であることが求められている。しかし、高校生が、探究学習に適したこのような課題を自主的に見つけることは容易ではない。また教員にとっても、生徒が主体的にこのような条件に適合する探究課題の設定を指導することも、やはり容易ではない。

他方で、私たちが日常生活で利用する製品や口にする食品などの背景には、多様な環境や社会とのつながりが存在する。私たちは、そのつながりを介して、地球温暖化などの社会の持続可能性に関わる課題に直接的や間接的に関わっている。そのつながりを調べ自らの生活が関係する環境や社会の課題を考えることは、当該教科が想定する性質を満たす課題に該当する。そこで私たちは、「総合的な探究の時間」の探究課題設定の指導において LCT を活用することを考え、日常生活に関わる身近な対象のライフサイクルに関する高校教員向けの教材開発と研修内容の検討を進めた[2)]。

3. 教員研修から得られた知見

探究課題の設定指導のための教員研修用教材として、過去の研究活動で得られた内容を基礎にカレーライス、タオル及びスマートフォンのライフサイクルのポスターを作成した。加えて、LCT の講義と温暖カード[4)]の体験及びモノのライフサイクルを考えるグループワークで構成した教員研修を実施した[5)]。実施した 2 回の研修の教材活用に関するアンケート調査の結果では、温暖カードとグループワークについて、共に生徒の課題設定に資する内容であるとの評価が 9 割程度得られた。また実際の探究学習指導の活用可能性に関する設問では、活用できるとの意見が 5 割以上得られた。一方で、活用するために必要な資料や支援に関する自由記述では、専門的な人材支援や補足資料の充実、指導計画案や具体的な指導事例の提示などの必要性が示された。この結果を踏まえ、身近な対象の LCT に基づく、より具体的な探究課題の設定の多様性を示す具体的な事例をまとめた書籍の検討を開始した。

4. 書籍内容の検討

書籍については、研修会のアンケート調査で示され

た、探究課題の設定指導における、より具体的な LCT の活用方法の例示を強く意識して構成を検討した。

検討の結果、LCT の考察対象として、ごはん、カレーライス、タオルを取り上げた。前述した研究活動で作成した探究学習用ポスターの三つの題材から、高校生の探究学習向け課題として身近でかつ取組み易いと考えられるカレーライスとタオルを最初に選択した。そしてこれらの題材と地球温暖化や SDGs の課題との関係を考える内容を、探究課題指導の具体的な事例として提示することになった。また、LCT の導入内容として、LCA と LCT の概要を紹介し、その具体例としてある対象のライフサイクルを考察する内容を配置した。この対象として、私たち日本人の主食であり、カレーライスの内容にも登場するごはんを題材として決定した。書籍の構成案を以下に示す。

第 1 章：探究的な学習について

第 2 章：ライフサイクル思考とは

第 3 章：モノのライフサイクル思考から探究課題の指導を考える

第 4 章：カレーライスに関する探究学習の課題設定

第 5 章：ライフサイクル思考による探究学習　ータオルを教材としてー

第 1 章では、「総合的な探究の時間」が必履修教科として導入された背景を、大学を含む学校を取り巻く社会と環境の変化の観点を軸に紹介した。加えて、探究学習の課題指導などにおける研究者の見解を示した。

第 2 章は LCT の導入章と位置付けた。ここでは、LCT と LCA の概要を紹介した後、ごはんに関わる温暖化ガス(GHG)排出や SDGs の課題などを具体的に紹介した。GHG 排出については、お茶碗 15 杯分のごはんに関係する排出量の図を用いて説明した。SDGs の課題との関係については、SDGs の三つの目標(⑦、⑫、⑬)を取り上げ、米の生産から消費に関わる過程と各過程における使用資源や作業内容との関係を表として示し、その内容を解説した。

第 3 章では、第 2 章で取り上げたごはんと GHG 排出を含む三つの SDGs の目標に関する対応策について、より具体的な探究課題事例につながるように紹介した。例えば、SDGs の課題⑬に関する内容として、ごはんに関わる GHG 排出を、稲作によるメタン発生や、ごはんのライフサイクル全体における電力利用と運搬の影響について紹介した。また SDGs の課題⑫に関する内容では、米生産や販売などで利用される資材のリサイクルや、有機農法や GAP 認証などの稲作時の取組み、炊飯の選択による調理や食べ方の多様性などを取り上げた。SDGs の課題⑦では、再生可能エネルギーの利用を中心に、農業機械や大量運搬手段の電動化事例などを紹介した。最後に、このような内容に沿った当該教科の学習指導計画のポイントをまとめて示すと同時に、関連する探究課題の候補案を例示した。

第 4 章は、第 3 章とほぼ同様の構成である。SDGs の課題⑬に関しては、カレーライスの GHG 排出に関して、利用する肉類の選択による影響の違いを入り口として、畜産における関連課題を中心に紹介した。またカレールーに含まれるスパイスなど、多様な食材を利用するカレーライスの特徴を反映し、SDGs の課題⑤、⑧、⑨、⑫、⑮に関係する国際的な課題も多く含めた。第 4 章でも、学習指導計画のポイントと関連する探究課題の候補案を例示した。

第 5 章では、タオルの生産や利用、廃棄に関わる探究課題の紹介だけでなく、具体的に調査や検討を進めるための試行的な内容を数多く取り入れた。その一つが、排出量原単位を利用したタオルの利用に関わる二酸化炭素排出の計算方法の解説と、利用条件の変更に伴う影響の考察である。その他、タオルに関わる課題や考察をバスタオルや衣類へ展開することについても、潜在的な課題の方向性を含め紹介した。

本発表では、このような内容の概要と高校教員の活用を意識したポイントなどについて報告する。

5. 今後の課題

書籍の本文については概ね執筆は終了し、現在は補足資料などの整備を進めている。今後も、探究学習に LCT の学びを活用する更なる書籍の検討を継続する。

謝辞

本研究は、科研費基盤研究 C (21K12365)「総合的な探究の時間におけるライフサイクル思考型環境教育教材の活用」の支援を受け実施した。

引用文献

1) 松本真哉：日本 LCA 学会誌, 16 (4), (2020), pp. 212-219
2) 科研基盤 C「21K12365」総合的な探究の時間におけるライフサイクル思考型環境教育教材の活用, 日本学術振興会, 入手先 <https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-21K12365/>, (参照 2024 年 8 月 30 日)
3) 探究学習研究会編著, “「探究学習」とはいうけれど　ー学びの「今」に向き合うー”, 晃洋書房, 京都, (2024), pp. 34-50
4) 田原聖隆, 藤井千陽, 津田祥子, 水野建樹:“第 5 回日本 LCA 学会研究発表会”, 横浜, (2010), B2-1
5) 松本真哉, 平山世志衣, 水野建樹, 比良剛：“第 18 回日本 LCA 学会研究発表会”, オンライン, (2023), 3-C2-04

ポスター発表セッション

2025年3月6日(木) 15:00 ~ 16:00 P1会場：2161大競技室（1F）

[2-P1] ポスターセッション（1）

[2-P1-01]
日本LCA学会学生交流ネットワーク　2024年度活動報告

*大賀 雄介[1]、吉良 成美[2]、杉山 弦太[3]、盛本 怜太郎[2]、長谷川 慶信[4]、中村 晃大[5] (1. 九州大学院経済学府経済システム専攻、2. 立命館大学理工学研究科、3. 早稲田大学創造理工学研究科、4. 東京大学工学系研究科、5. 横浜国立大学大学院環境情報学府)

[2-P1-02]
Environmental, Social, and Governance Factors as Tools for Improving Market Efficiency: A Study on Equity Misvaluation

*王 心雨[1] (1. 九州大学)

[2-P1-03]
環境に配慮した食のLCA評価とSNSの活用

*中逵 晃[1]、兵法 彩[1] (1. 東京都市大学)

[2-P1-04]
エネルギー転換におけるアンチモンの物質フロー分析

*Xu Linting[1]、Zhang Zhengyang[1]、Matsubae Kazuyo[1] (1. 東北大学)

[2-P1-05]
eスポーツの2種の実施形式における環境・社会経済性分析

*松井 奨[1]、兵法 彩[1] (1. 東京都市大学)

[2-P1-06]
農作物栽培における地熱利用を通した環境フットプリントの削減ポテンシャル

*大村 聖真[1]、小綱 美咲[1]、森友 かりん[1]、佐藤 聖也[2]、中本 裕哉[1] (1. 大分大学、2. 株式会社 タカフジ)

[2-P1-07]
分別・洗浄効果に着目したペットボトル水平リサイクルのライフサイクル評価

*小林 千夏[1]、菅野 剛史[1]、菊池 康紀[2]、兵法 彩[1] (1. 東京都市大学、2. 東京大学)

[2-P1-08]
地方公共団体の汚泥燃料化事業の環境経済影響評価

*東 怜[1]、波多野 愛[1]、中本 裕哉[1] (1. 大分大学)

[2-P1-09]
家庭系生ごみの資源循環促進に向けた社会的受容性調査

*荒井 隆平[1]、大塚 彩美[2]、兵法 彩[1] (1. 東京都市大学、2. 東京大学)

[2-P1-10]
木材の建材利用におけるMFAとLCA実施による環境負荷ホットスポット分析
—2022年を基準とした環境負荷削減策の検討—

*若林 國久[1]、小林 謙介[2]、船本 悠太[2]、森岡 心[2] (1. 県立広島大学大学院、2. 県立広島大学)

[2-P1-11]
講演取消

©日本LCA学会

[2-P1-12]
ビールケグにおけるライフサイクル環境負荷の比較分析
*森林 未菜[1]、吉川 直樹[1] (1. 滋賀県立大学)

[2-P1-13]
要求材料特性による制約を考慮した鉄リサイクルにおけるCu濃化モデルの構築
*八巻 悠太[1]、諸星 未莉[1]、玉城 わかな[1]、醍醐 市朗[1] (1. 東京大学)

[2-P1-14]
Vehicle to Home（V2H）の導入を考慮したEVにおける環境影響評価
*前河 智英[1]、吉川 直樹[1] (1. 滋賀県立大学)

[2-P1-15]
事例集合住宅を対象としたIDEA ver3.4での評価と削減実績量に関する試算
*正木 琳太朗[1]、三河 大志[2]、福岡 亜弥[1]、小林 謙介[1] (1. 県立広島大学、2. 県立広島大学　大学院)

[2-P1-16]
部材の生涯性能を考慮した新規LCA手法の提案とリチウムイオン電池用一酸化ケイ素負極の環境影響評価
*前 智太郎[1]、Teah Heng_Yi[1,2]、平尾 雅彦[1,2]、野田 優[1] (1. 早稲田大学、2. 東京大学)

[2-P1-17]
暮らしの個性化に向けたモデリングと環境ホットスポット分析
*出口 綾[1]、小野寺 舞音[1]、古川 柳蔵[1]、石田 秀輝[2]、兵法 彩[1] (1. 東京都市大学、2. 東北大学)

[2-P1-18]
講演取消

[2-P1-19]
環境に配慮した長期的取り組みの実施効果分析:東京都市大学横浜キャンパスの例
*中本 采那[1]、味岡 優斗[1]、兵法 彩[1] (1. 東京都市大学)

[2-P1-20]
化学組成の推定に向けた画像解析に要求される二次資源中の不純物検出モデルの性能評価
*留永 雄星[1]、田島 圭二郎[2]、醍醐 市朗[1] (1. 東京大学、2. 株式会社EVERSTEEL)

[2-P1-21]
廃棄物系バイオマスの利用促進に向けた基礎的分析
*苗村 理咲[1]、兵法 彩[1] (1. 東京都市大学)

[2-P1-22]
窒素フットプリントに基づく環境負荷が低く健康的な食事の特徴
*河嵜 唯衣[1]、佐藤 清香[1,2]、吉井 瑛美[3]、赤松 利恵[1] (1. お茶の水女子大学、2. 高崎健康福祉大学、3. 長野県立大学)

[2-P1-23]
産業施設への大規模焼却熱利用に関するシナリオ分析～CCU導入と電力排出係数変化の影響～
*中川 岳[1]、大西 悟[2]、藤井 実[2]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学、2. 国立環境研究所)

[2-P1-24]
製品用途に依存しない金属素材自体の持続可能性を定量評価する指標の構築

©日本LCA学会

*三浦 優太[1]、武山 健太郎[1]、星野 岳穂[1] (1. 東京大学)

[2-P1-25]

Tourist carrying capacity for sustainable development of Gunung Gede Pangrango natioal park ecotourism

*Ahmad Sopian Pamungkas[1,2]、Hashimoto Seiji[1]、Dente Sebastien[1]、Djoko Santoso Abi Suroso[2] (1. Ritsumeikan University、2. Institut Teknologi Bandung)

[2-P1-26]

全国自治体における地域特性を踏まえた分野横断的な気候変動リスク評価枠組みの構築と評価

*井田 新[1]、栗栖 聖[1]、福士 謙介[1] (1. 東京大学)

[2-P1-27]

コーヒー豆炭火焙煎のカーボンフットプリント

*村口 颯[1]、渕上 智子[1]、中野 勝行[1] (1. 立命館大学)

[2-P1-28]

森林・木材の炭素蓄積変化を考慮した木材利用によるGHG排出削減効果の評価

*林 亮介[1]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学)

[2-P1-29]

焼却熱の産業利用に向けた廃棄物焼却施設の統合手順の検討

*神田橋 幸也[1]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学)

[2-P1-30]

公開データを基にした年別の日本の衣服のストック量の推計

*角田 志歩[1]、西嶋 大輔[1] (1. 福島大学)

[2-P1-31]

電動キックボードシェアリングの環境負荷評価

*中村 太一[1]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学)

[2-P1-32]

バイオマス割当プラスチックに関する認知と適切な情報提供内容の検討

*福田 光郷[1]、橋本 征二[1]、Dente Sébastien[1] (1. 立命館大学)

[2-P1-33]

富士山噴火時の降灰に伴う木造家屋倒壊による災害廃棄物量の推計

*荒井 駿佑[1]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学)

[2-P1-34]

Integrating Circular Economy Principles in Urban Planning: Pathways to Carbon Neutrality in Compact Cities

*樊 天惠[1]、任 宇傑[2]、 チャップマン アンドリュー[3] (1. 京都大学、2. 南京林業大学、3. 九州大学)

[2-P1-35]

都市のコンパクト度と道路に関わる物質ストック量の関係

*前田 桃花[1]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学)

[2-P1-36]

リチウムイオン電池の資源制約を考慮した乗用車技術選択モデル

*小松原 充夫[1]、西 智樹[1] (1. 株式会社豊田中央研究所)

©日本LCA学会

[2-P1-37]
新聞の電子化に向けたインベントリ分析：電子新聞と配達型新聞の比較
*石川 雄一[1]、兵法 彩[1] (1. 東京都市大学)

[2-P1-38]
水素吸蔵合金タンクと燃料電池を用いた家庭への電気・熱供給に伴うCO2排出量の評価
*瑞慶覧 諒大[1]、平尾 雅彦[1,2]、野田 優[1]、花田 信子[1] (1. 早稲田大学、2. 東京大学)

[2-P1-39]
YouTube動画が気候変動対策に向けた人々の行動意図に与える影響
*大里 優佳[1]、栗栖 聖[1]、福士 謙介[1] (1. 東京大学大学院)

[2-P1-40]
従来型およびCO_2吸収型コンクリートの製造・輸送に係るCO_2排出量の比較・検討
*髙瀬 美涼[1]、大橋 美彩子[1]、並木 克也[1]、平尾 雅彦[1,2]、野田 優[1] (1. 早稲田大学、2. 東京大学)

[2-P1-41]
鉄スクラップのリサイクルにおける合金元素の散逸量を最小化する方法の解明と、範囲分析による製品解体分離の精度の影響評価
*松原 周稔[1]、武山 健太郎[1]、星野 岳穂[1] (1. 東京大学)

[2-P1-42]
建築LCA簡易算定ツールにおける日本モデルの拡張～One Click LCAカーボンデザイナー3D日本版～
*石津 旭[1]、掛上 恭[1] (1. 住友林業株式会社)

[2-P1-43]
ペット飼育のカーボンフットプリント分析
*都筑 未夢[1]、松瀬 真未[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

[2-P1-44]
液体アンモニア電解によるオンデバイス生成水素を用いた燃料電池自動車のCO2排出量評価
*村上 路有久[1]、平尾 雅彦[1,2]、野田 優[1]、花田 信子[1] (1. 早稲田大学、2. 東京大学)

[2-P1-45]
滋賀県東近江市の廃食用油の再資源化におけるカーボンフットプリントの解析
*大聖 竜央[1]、重富 陽介[1] (1. 立命館大学)

[2-P1-46]
Evaluation of the Carbon Negative Potential in Pig Husbandry with Novel Technologies
*李 友仁[1]、一杉 佑貴[1]、利谷 翔平[2]、寺田 昭彦[2]、林 彬勒[1] (1. 産業技術総合研究所、2. 東京農工大学)

[2-P1-47]
持続可能な酒蔵運営に向けた環境・経済・社会的影響分析
*森 涼太[1]、前迫 晃一[2]、徐 維那[1] (1. 東京理科大学、2. 石川酒造株式会社)

[2-P1-48]
Identifying activity patterns and areas of heightened demand in overtouristed Kyoto
*DENTE SEBASTIEN[1]、HASHIMOTO SEIJI[1] (1. 立命館大学)

[2-P1-49]

©日本LCA学会

路線バスの次世代型移行に伴う経済・社会・環境評価：京都市営バスを事例として

*河本 竜祐[1]、重富 陽介[1] (1. 立命館大学)

[2-P1-50]

関西６府県の住宅耐震化による災害廃棄物発生量の削減効果
～南海トラフ巨大地震による地震動・津波を考慮して～

*盛本 怜太郎[1]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学)

[2-P1-51]

フッ素資源循環構築に資するフッ素化合物フロー解析

*五十嵐 迪香[1]、大野 肇[1]、八木原 昂輝[1]、福島 康裕[1] (1. 東北大学)

[2-P1-52]

大気汚染がスポーツに与える影響：Jリーグからの証拠

*砂川 海人[1]、中石 知晃[2] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済学研究院)

[2-P1-53]

運輸部門の環境効率性評価：国際的視点から見た日本の立ち位置

*友綱 ヒ加璃[1]、中石 知晃[2] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済大学院)

[2-P1-54]

成長期の食育が個人の食品ロス削減意識・努力・行動に及ぼす影響

*川畑 慶馬[1]、中石 知晃[2] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済学研究院)

[2-P1-55]

経済的嗜好性が環境保護行動に及ぼす影響

*原口 恭輔[1]、中石 知晃[2] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済学研究院)

[2-P1-56]

原発事故が周辺地域の社会経済に与えた影響

*鍛治屋 智啓[1]、中石 知晃[2] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済学研究院)

[2-P1-57]

鉄道用ゴム材料の環境影響評価手法の検討

*半坂 征則[1]、太田 達哉[1] (1. （公財）鉄道総合技術研究所)

©日本LCA学会

日本 LCA 学会学生交流ネットワーク 2024 年度活動報告

ILCAJ-Student Communication Network Activity report 2024

○大賀雄介*[1)]、吉良成美[2)]、杉山弦太[3)]、盛本怜太郎[2)]、長谷川 慶信[4)]、中村晃大[5)]
Yusuke Oga, Narumi Kira, Genta Sugiyama, Reitaro Morimoto, Yosinobu Hasegawa, Kota Nakamura
1) 九州大学, 2) 立命館大学, 3) 早稲田大学, 4) 東京大学, 5) 横浜国立大学
* oga.yusuke.452@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

環境問題が現代社会における一つの大きな問題となった中で、ライフサイクルアセスメント（LCA: Life Cycle Assessment）を基盤とし、持続可能性のための科学的かつ定量的な評価方法とそれに基づく意思決定方法を検討する日本 LCA 学会が果たすべき役割は拡大してきた。本会に所属する学生会員は、研究発表会をはじめとする各種活動に参加し、様々な知識や経験を得ている。同学会に所属し、広い意味での環境問題という同じ問題を考える学生同士で、文理の垣根を越えて意見や考えを交換することは、各学生にとって非常に有意義である。学生会員の間で研究活動をはじめとする様々な問題に対処するための知識や人脈のネットワークを形成することを目指し、日本 LCA 学会の研究会の一つとして学生交流ネットワーク（SCN: Student Communication Network）が設立された。SCN では、学生会員の LCA への理解を深める契機として、様々なイベントを企画・開催している。SCN 設立から現在までの流れを表 1 に示す。

表 1 SCN 設立から現在までの流れ

年	月	活動内容
2008 年	夏	学生組織設立に向けて始動
2008 年	10 月	学生部会設立の熱意書を理事会に提出。
		(提案者 2 名、賛同者 9 名)
2008 年	12 月	学生部会(仮称)設立が理事会に承認される
		設立集会(第 8 回 EcoBalance 国際会議会期中)
2009 年	3 月	第 1 回学生総会(第 4 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
2009 年	9 月	第 1 回工場見学会およびワークショップ 2009 開催
2010 年	1 月	第 1 回工場見学会およびワークショップ 2009 の様子を学会誌で報告
2010 年	3 月	第 2 回学生総会(第 5 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
		第 1 回セミナー開催(第 5 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
2010 年	8 月	第 2 回工場見学会およびワークショップ 2010 開催
2011 年	3 月	第 3 回学生総会(第 6 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
		第 2 回セミナー開催(第 6 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
2011 年	4 月	第 2 回工場見学会およびワークショップ 2010 の様子を学会誌で報告
2011 年	9 月	第 3 回工場見学会およびワークショップ 2011 開催
2012 年	3 月	第 4 回学生総会(第 7 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
		第 3 回セミナー開催(第 7 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
2012 年	9 月	第 4 回工場見学会およびワークショップ 2012 開催
2013 年	3 月	第 5 回学生総会(第 8 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
		第 4 回セミナー開催(第 8 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
2013 年	9 月	第 5 回工場見学会およびワークショップ 2013 開催
2014 年	3 月	第 6 回学生総会(第 9 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
		第 5 回セミナー開催(第 9 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
2014 年	9 月	第 6 回工場見学会およびワークショップ 2014 開催
2014 年	10 月	1st Young Researchers Workshop を開催(EcoBalance2014 会期中)
2015 年	3 月	第 7 回学生総会(第 10 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
		第 6 回セミナー開催(第 10 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
2015 年	9 月	第 7 回工場見学会およびワークショップ 2015 開催
2016 年	3 月	第 8 回学生総会(第 11 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
		第 7 回セミナー開催(第 11 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
2016 年	8 月	第 8 回工場見学会およびワークショップ 2016 開催
2016 年	10 月	2nd Young Researchers Workshop を開催(EcoBalance2016 会期中)
2017 年	3 月	第 9 回学生総会(第 12 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
		第 8 回セミナー開催(第 12 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
2017 年	9 月	第 9 回工場見学会およびワークショップ 2017 開催
2018 年	3 月	第 10 回学生総会(第 13 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
		第 9 回セミナー開催(第 13 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
2018 年	8 月	第 10 回工場見学会およびワークショップ 2018 開催
2018 年	10 月	3rd Young Researchers Workshop を開催(EcoBalance2018 会期中)
2019 年	3 月	第 11 回学生総会(第 14 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
		第 10 回セミナー開催(第 14 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
2019 年	9 月	第 11 回工場見学会およびワークショップ 2019 開催
2020 年	9 月	第 12 回ワークショップ 2020 開催
2021 年	9 月	第 13 回ワークショップ 2021 開催
2022 年	9 月	第 14 回ワークショップ 2022 開催
2022 年	10 月	4th Young Researchers Workshop を開催(EcoBalance2022 会期中)
2023 年	3 月	第 11 回セミナー開催(第 18 回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
2023 年	9 月	第 15 回工場見学会およびワークショップ 2023 開催
2024 年	3 月	第 12 回セミナー開催(第 19 月回日本 LCA 学会研究発表会会期中)
2024 年	8 月	第 16 回工場見学会およびワークショップ 2024 開催
2024 年	11 月	5th Young Researchers Workshop を開催(EcoBalance2024 会期中)

2. 主な活動内容

・現場見学会（年 1 回開催）

実際に工場施設や研究所を見学することで、プロセスの仕組みや現場での LCA の利用法を理解し、議論を行う。本年度は大阪府大阪市にて大阪広域環境施設組合 舞洲工場の見学を行った。

・ワークショップ（年 1 回開催）

研究成果を発表形式で報告する。本年度は 8 月 20 日から 22 日にかけて、大阪府茨木市にある立命館大学大阪いばらきキャンパスで開催した。

・セミナー（年 1~2 回開催）

環境に関する研究に取り組む学生会員の現在の研究活動を将来にどう活かしていくのか、企業やアカデミアに所属する正会員による講演などを通して意見交換を行う。本年度は第 20 回日本 LCA 学会研究発表会の会期中に、招待講演者による講演を予定している。

・学生総会（年 1 回開催）

毎年開催される日本 LCA 学会研究発表会の会期中に開催する。活動報告や、翌年度の活動内容の検討、役員の決定などを行う。

・Young Researchers Meeting (EcoBalance 会期中に開催)

EcoBalance2014 にて SCN の主催により初めて開催され、会期中に招待講演や世界各国から参加する若手研究者による研究発表会等を行う。今年度は、Flash Presentation Competition と Dinner Party を通じて国内外

の若手研究者で交流を深めた。
・交流会（随時開催）
研究活動や進路選択、普段の生活まで様々なことについて学生同士で話し合い、情報交換を行う。

3. 2024 年度現場見学会およびワークショップにおける活動報告（2024 年 8 月 20～22 日）

本年度の第 16 回現場見学会およびワークショップ 2024 は、8 月 20 日から 22 日にかけて大阪府で開催され、6 大学 9 研究室から総勢 54 名の参加者が集った。本要旨では、その内容と参加学生からの反応について報告する。

3.1 第 16 回現場見学会の様子

今年度は、大阪府大阪市のごみ焼却場の 1 つである舞洲工場の見学を行った。本見学会は、環境問題や持続可能な社会の形成を研究テーマとする学生にとって、有害物質の発生・エネルギー問題に取り組む最先端の現場を見ることが有益な経験になると考え実施した

舞洲工場では、ごみの投入から焼却、燃焼ガスや排水の処理などといった廃棄物処理のフローの仕組みなどについて説明を受け、質疑応答の時間が設けられた。ここでは多くの参加者から活発な質疑が行われた。その後、実際にいくつかの施設に足を運び、説明を受けながら見学を行った。（図 1, 2）。



図 1　2024 年度現場見学会の様子

3.2 ワークショップ 2024

2 泊 3 日で行われたワークショップでは、8 研究室からの参加者による研究発表会が行われ、45 件の口頭発表が行われ、各自 8 分の発表時間と 4 分の質疑応答の時間が設けられた。

そして昨年度までに続き、全参加学生の投票による優秀発表者の表彰（修士課程学生及び学部生が表彰対象）が今年度も引き続き行われ、学部優秀発表賞を、神田橋幸也さん(立命館大学・橋本研)、岩本晟洋さん（長崎大学・昔研究室）修士優秀発表賞を細島千聖（九州大学・加河研究室）、林冬喜さん（早稲田大学・伊坪研究室）がそれぞれ受賞した。

3.3 参加学生からの反応について

研究所見学・ワークショップ終了後、Google Forms にて参加者全員を対象にアンケート調査を実施した。多くの回答では、現場見学会と研究発表会の内容を肯定的に捉えており、一定の成果があったといえる。また現場見学会の内容に関しては、ほとんどの回答で「有意義であった」という結果が得られた。

また今年度のワークショップも昨年同様、時間の都合上パラレルセッションで行ったが、時間設定や発表形態は適切であったという回答が寄せられた。参加者が増加傾向にある同ワークショップは、今後学生同士の十分な交流時間の確保や講演会、ディスカッションなど発表以外の新たな試みの検討が課題となるといえる。



図 2　2024 年度現場見学会での集合写真

4. 今後の活動に向けて

SCN では、これまでの経験と反省を活かしながら、今後も学生会員同士のみならず、学生と企業あるいは大学の間のネットワークを広げる活動を続けていく予定である。正会員や賛助会員の皆様には、SCN の活動にご理解いただくとともに、工場・現場見学会や招待講演などで今後もご協力いただければ幸いである。また、学生会員の皆様には、是非 SCN の活動に積極的に参加していただきたい。

環境に配慮した食の LCA 評価と SNS の活用

Life cycle assessment of sustainable foods and utilization of social networking services

○中逵晃 [1)]、兵法彩*[1)]
Akira Nakatsuji, Aya Heiho
1) 東京都市大学
*heiho@tcu.ac.jp

1. はじめに

地球規模での気候変動や資源の枯渇といった環境問題が深刻化する中、持続可能な発展に向けた取り組みとして、環境に配慮した食品への関心が急速に高まっており [1)]、生産量や流通量の増加が見込まれる。しかし、現在は食品の環境影響を定量的に評価するためのデータは少なく、実際にどの程度の環境負荷を低減できるのかについては不鮮明である。ライフサイクルアセスメント（Life cycle Assessment ; LCA）は、食品の環境影響を比較するための重要なツールとしてだけでなく、食品のサプライチェーン全体を通しての持続可能性を評価し、改善するための基礎情報を提供する役割も果たす。そのため、消費者が環境に配慮した選択をする際の信頼できる指標として重要な役割を担う。

また、食の環境影響を定量的に評価するためのデータは、持続可能な選択に必須であると同時に、選択を行う消費者に認知される必要がある。そこで利用者が多く、今後も利用者の増加が見込まれている [2)]ソーシャルネットワーキングサービス（Social Networking Service ;SNS）を活用した環境情報の発信に着目した。

本研究は環境に配慮した食品の環境負荷について、定量的に評価することに加え、SNS が環境に関する情報の拡散に有効なツールであるかについて明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

特定の料理の環境影響について LCA により GHG 排出量を推計することで、食品の生産から消費、廃棄に至るまでの環境負荷を定量的に評価する。SNS 活用については、先行研究である「TikTok を通じた農家主導の気候変動対話における市民の関与調査」[3)]より、他の SNS と比べてコンテンツを迅速に広められることがわかっていることから､活用する SNS を TikTok とした。具体的には、料理の LCA 結果を TikTok 内で、動画コンテンツとして発信し、消費者の認知や行動変容を促すことに効果的なツールであるかどうかを TikTok 内のインサイトデータ（視聴者数、視聴回数、視聴時間など）を使って調査した。なお、TikTok アカウントは既存のもので、過去に一定数（過去最高 30 万回）のアクセスがあるものを使った。

2.1 食の GHG 排出量

まずはカレーライスの GHG 排出量を定量化した。環境影響評価は IDEAv3.4.1 の LCIA 結果_LIME シートの「気候変動」の係数を用いて、食材等の消費や調理時間に基づき計算した。

2.2 TikTok における SNS 活用

次にカレーライスに関する動画コンテンツを作成し、期間を設定して TikTok 内で投稿を行った。料理内容に GHG 排出量を掛け合わせたものをコンテンツ内容とし、TikTok 上で閲覧できるインサイトデータを参考にして効果を評価する。具体的には、インサイトデータの中でも視聴者の年齢層、性別、本コンテンツと関わったワードに着目し、「TikTok を通じて LCA 調査結果を発信した際の情報の拡散範囲はどの程度か。」について視聴者数、視聴回数、視聴時間などの定量的データをもとに検証した。

3. 調査結果

図 1 に原料別 GHG 排出量算出結果、図 2 に工程別 GHG 排出量算出結果を示す。また、表 1、図 3 に TikTok による SNS 活用の結果を示す。

3.1 カレーライスの GHG 排出量

鶏ひき肉 300g をもとに作成したところ、GHG 排出量は 2.88kgCO2eq となった。原料内ではお米、鶏ひき肉、バターの値が大きく、使用料を考慮するとバターの値が群を抜いていることが分かる。工程では電力の GHG 排出量が大きいことが分かり、なかでも IH 電力

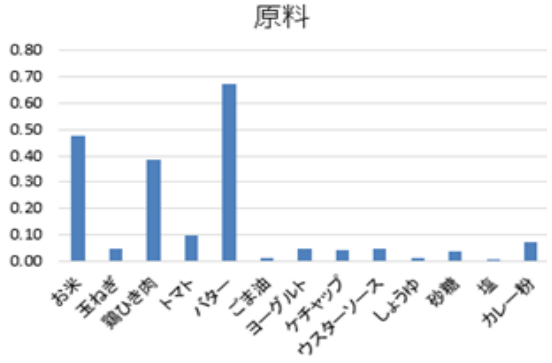


図 1：原料別 GHG 排出量算出結果

は炊飯と比べて使用時間が短いにも関わらず、値が大きくなっている。このことから IH 電力の環境負荷が高いことが分かる。

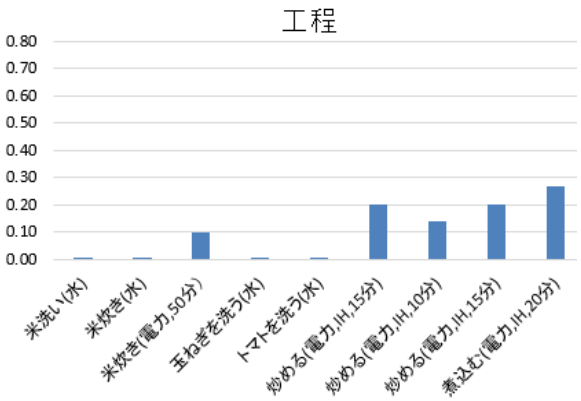


図 2：工程別 GHG 排出量算出結果

3.2TikTok による SNS 活用

全視聴者のうち 96%がおすすめ欄で表示されており様々な視聴者に届けられていた。コンテンツ概要は表 1 に示した通りであり、視聴回数から拡散効果はあまりよくない結果となっている。また、視聴者の年齢層は若年層が 69%、中年層以上が 31%となり若年層の割合が中年層以上の 2 倍以上となった。性別については男性 53%、女性 47%と大きな偏りはなかった。

また、本コンテンツと関わった TikTok 内のワード（図 4）ではカレーライスに関するワードしかなく、GHG 排出量及び環境に関するものはなかった。

表 1：コンテンツ概要

作成時間	6 時間
総視聴者数	841 人
総視聴回数	941 回
平均視聴時間	10.03/60 秒
フル視聴率	5.20%
コメント数	0

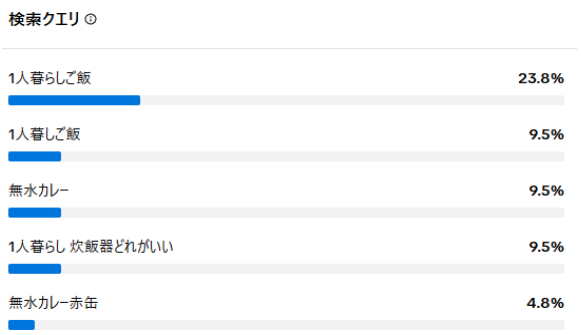


図 3：コンテンツと関わったワード

4. 考察

食の GHG 排出量算出結果から、原料と工程で比較すると原料の GHG 排出量が圧倒的に多く、なかでも牛に関する原料（バター）の GHG 排出量がとても大きいため、使用料を減らすことや変更をすることが GHG 排出量の削減に有効であることが分かる。

TikTok による SNS 活用について、視聴数が伸びていないことに加え、コンテンツと関わったワードに動画内容であったカレーライスに関するものはあったが、同じく動画内で触れた GHG 排出量や環境に関するものがなかったことから、環境に関する情報の拡散効果は現時点ではあまり高くないと考えられる。

投稿の属性や関連するコンテンツをまとめるハッシュタグについて、TikTok 内にある環境に関するものは転々としおり、伸びも悪い。このことから環境に関する情報を拡散し人々の行動変容を促すためには、環境関連の言葉の統一や、本研究であれば環境に配慮した食の概念を明確にすることが必要であると考える。

5. おわりに

料理の環境影響について調査したことで環境負荷の高い食品や工程が分かった。今後は他の食品についての調査や食における具体的な環境負荷削減方法の考察が求められる。また、今回の SNS 活用結果から環境分野の拡散効果は低いという結果に至ったため、今後は SNS での拡散方法や SNS だけに限らず、環境情報の拡散についての議論が必要であると考える。

特に本稿は、LCA と SNS の活用の一例としてカレーライスを対象としたが、例えば植物性たんぱく質と動物性たんぱく質の健康と環境に対する影響の比較や、一般に環境意識が高く料理に携わる機会の多い女性向けに発信する工夫についても検討することが重要であり、さらに TikTok 以外のツール活用についても考える必要がある。

引用文献

1) 農林水産省,令和３年度 食育白書, 環境に配慮した農林水産物・食品選択の重要性, https://www.maff.go.jp/j/syokuiku/wpaper/r3/r3_h/book/part1/chap2/b1_c2_1_03.html, (参照日 2025-01-17)
2) 総務省, 令和 6 年度 情報通信白書, 世界のソーシャルメディア利用者数の推移及び予測, https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r06/html/nd217100.html, (参照日 2025-01-17)
3) Ilkay Unay-Gailhard, Kati Lawson, Mark A. Brennan: Journal of Rural Studies, 102, (2023), 103075
4) LCI データベース IDEA v3.4.1 国立研究開発法人産業技術総合研究所安全科学研究部門 IDEA ラボ

e スポーツの 2 種の実施形態における環境・社会経済性分析

Environmental and socioeconomic analysis of two types of e-sports

○松井奨*[1)]、兵法彩[2)]
Sho Matsui, Aya Heiho
1) 東京都市大学
* heiho@tcu.ac.jp

1 はじめに

e スポーツとは Electronic Sports の略称であり、モバイルゲームやビデオゲームを使った対戦に競技性を加えたものとなっています。知略や戦略、プレイヤースキルなど競技性を含むため、スポーツとして捉えられています。e スポーツの流行は世界に及んでおり、その市場規模は 2018 年から 2023 年までに 2 倍ほど成長している。インターネットを使用した動画配信も盛んであり、e スポーツの観戦を楽しむファンの数は 6 億 4600 万存在していて、気軽に無料で観戦できる部分が流行りの要因の一つにもなっている。

一方で、ゲームと子どもの発育・成長に関する影響に対する懸念の声が挙がっているのも事実であり、例えば「ゲームと子どもに関するアンケート調査」[1)]ではこちらかといえば悪影響がある／悪影響があると回答が 50.7%を占めた。しかしながら、同アンケートで、どちらともいえないは 36.2%であるため、e スポーツにあまり詳しくない人や無関心層あるいは過去のテレビゲームのイメージで悪影響があると考えている人たちに対して、e スポーツの実態を正しく伝える情報を発信することで、今後の e スポーツ発展に貢献できると考えた。e スポーツは、まだ発展途上のカルチャーであり先行研究は限定的で、特に環境側面の分析はまだ十分に行われていない。例えば、e スポーツの実施形態は、オンライン環境での大会とオフライン環境での大会の 2 つの主たる形式があるが、それぞれを構成する要素や環境負荷の定量化は議論されていない。そこで、本研究は e スポーツの実施に伴う影響を環境と社会経済性の両側面で明らかにすることを目的とした。まずはこれまで整理されてきていない、オンライン大会とオフライン大会のそれぞれに必要な財・サービス（活動量）を整理し、GHG 排出量を産業連関表を用いた経済波及効果の分析を行う。得られた結果から、実施形態の違いによる様々な影響の違いを明らかにし、今後の e スポーツの発展に向けた考察を行う。

2 研究方法

2.1 研究対象

e スポーツは、スポーツと同様に個人で競うゲームや、人数が複数人同士いる団体競技のようなものが存在している。本研究では現在、e スポーツの中で流行しているゲームのひとつである『Valorant』という 5 対 5 の団体競技科型ゲームの大会を評価対象とした。大会の実施形式は、競技者と観客はそれぞれの自宅等からオンラインで参加するオンライン形式と、競技者と観客が会場に集まって実施するオフライン形式の 2 種類とした。

2.2 環境負荷の算出について

環境負荷の算出は、IDEAv3.4.1[2)]を用いた。算出するにあたり、初めに必要な活動量データについての整理を行った。その一例として電力消費量を用いた例を紹介する。最初に調べたのは選手がプレイする際に使用する PC の電力消費量である。推計結果を算出するために PC については大会規定の PC から発生する電力消費データを用い算出を行った。次に家や会場で用いられる空調管理について。空調に関しては、オンラインの算出は自宅のエアコンから発生する電力消費量の使用データを TAP-TST10N(電力計)を用いて計算。オフラインに関しては、会場のデータ[3)]から冷房能力を参考にして算出した。以下がオンラインとオフラインにおいて環境評価を行った内訳である。

オンライン・オフライン共通
pc の電力負荷(選手)
空調管理に使う電力負荷(選手)
観客から発生するコスト
オフラインのみ
会場の商品物販にかかるコスト

2.3 経済波及効果について

会場の商品の値段や産業連関表係数に基づいて算出した。オフライン環境において発生する金額のうち来場者の移動にかかる数値の計算から行った。地方一つ一つを内訳として算出した結果、その合計は 7314 万

7488 円となった。次に物販は元々金額ベースで算出を行っていたのでその数値をそのまま使用し、合計 1380 万円となった。続いて料金が発生する入場料は二種類あり A 席と見切り席の二種。合計が 7400 万円となった。運営は産業連関表の係数を組み合わせて算出した。会場のレンタルにかかる金額をベースに人件費を計算した。結果、運営費は 639 万 9 千円となった。

オンライン環境において発生する金額は、視聴者が PC とエアコンを利用する際にかかる計は 57 万 245 円となった。

3 結果・考察

3.1 GHG 排出量推計結果

GHG 排出量の推計結果は以下の通りとなった。(1 時間の使用における)PC の電力消費から GHG 排出量は 0.0108kg-CO_2eq となった。空調管理による GHG 排出量はオンラインが 0.083kg-CO_2eq、オフラインが 15.89kg-CO_2eq となった。観客にかかる GHG 排出量についてオンラインでは視聴者数の平均から算出。68465kg-CO_2eq となり、オフラインは移動方法と距離から算出。55185kg-CO_2eq となった。最後に物販については金額ベースで数値を算出。39100kg-CO_2eq となった。

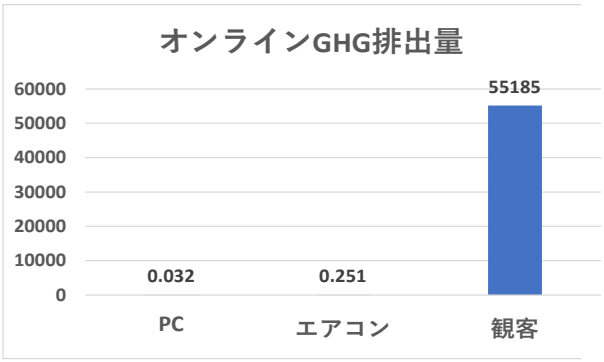


図 1 オンライン GHG 排出量推計

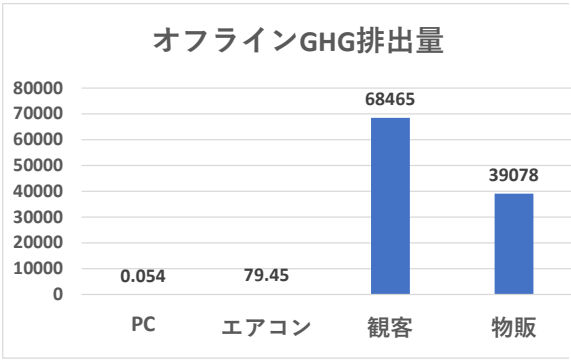


図 2 オフライン GHG 排出量推計

これらの結果から、二つの環境下における GHG 排出量の推計総量が分かった。オンライン環境の合計は 55185kgCO_2-eq。オフライン環境の合計は 107622kgCO_2-eq となり、その差は約二倍の推計結果となった。



図 3　二種の推計結果合計

3.2 考察

この差の一つは間違えなく観客から排出される GHG 排出量である。しかしこれに関していえば、オンライン環境においても観客から排出される GHG 排出量は少なくなかった。よって、互いの GHG 排出が大きくなる原因は観客であることがわかったが、差の原因は物販であるといえる。物販からは 39100kgCO_2-eq 排出されている。さらにこの部門の問題点は、その大会の規模によって数値が大きく異なることである。今回は評価対象をパーカー2 枚、T シャツ 2 枚としているが、大会でこの数は少ない方であるといえるだろう。今後の発展具合を考えると発売する枚数や種類がさらに増え、より個々の数値が大きくなることが危惧できる。よってこれら 2 つが GHG 排出量を大きくする要因であることがわかり、今後 e スポーツが発展していくうえで環境負荷について考える必要があれば、これらの改善は視野に入れる必要がある。

4 おわりに

本稿では e スポーツの活動量の整理と環境負荷の定量化を行った。今回の結果から e スポーツの大会をする中でのオフライン開催は環境面において効率が悪いことがわかった。さらにこの数値は状況によって大きく増えることも理解した。そのうえで、環境保全活動が大きくなっている世の中で、オフライン環境での大会が開催される理由とは、お金を儲けるためなのか、選手・観客の熱狂を肌で感じることを届けたいからなのか、改めて考えていく必要があると考えた。今後は推計したデータに基づき、経済波及効果の分析も行って環境・社会経済性の両側面からの考察を深める。

引用文献

1) 「ゲームと子どもに関するアンケート調査」, https://www.asmarq.co.jp/data/mr201409game/(参照日 2025-01-21)
2) "IDEA Ver.3.4 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ"
3) 有明 GYM-ex データ, https://www.bigsight.jp/organizer/buildings/gym-ex/facilities/, (参照日 2025-01-17)

農作物栽培における地熱利用を通じた環境フットプリントの削減ポテンシャル

○大村聖真*[1)]，小綱美咲[1)]，森友かりん[1)]，佐藤聖也[2)]，中本裕哉[1)]
1) 大分大学, 2) 株式会社タカフジ
*j2221050@oita-ac.jp

1. はじめに

世界の人為起源CO_2排出量に農業部門が占める割合は約12%であり，2007年から2016年において年間平均約62億トンを排出している (IPCC, 2019)。農業部門の脱炭酸化に向けて，農作物の栽培時に地熱を活用することにより、エネルギー投入量やその燃焼に伴う環境負荷を削減する取り組みが進んでいる。例えば、大分県九重町では、パプリカの栽培時に地熱を利用した「温泉パプリカ」が生産されている。本研究の目的は、このような農作物栽培における地熱利用の取り組みが環境フットプリント（例：CO_2排出量）削減に与える影響を定量的に評価することである。

ケーススタディとして本研究では、地熱を活用して栽培されたパプリカ（温泉パプリカ）のカーボンフットプリントを推計する。パプリカは日本国内で通年栽培を行う場合、冬季にはボイラーを常時稼働させる必要があり、その結果、莫大な燃料コストが発生するとともに、燃焼に伴うCO_2排出量も多い（農林水産省, 2006）。そのため、地熱利用によるカーボンフットプリント削減の可能性は比較的大きいと期待される。得られた分析結果をもとに、地熱利用がもたらす持続可能な農業のあり方と今後の課題について議論する。

2. 研究手法

本研究では、株式会社タカヒコアグロビジネスが大分県九重町で所有する地熱エネルギーを活用した大規模パプリカ栽培施設『愛彩ファーム九重』のライフサイクルインベントリーデータを用いて環境影響評価を行う。この施設は2013年に設立され、敷地面積約30,000㎡を誇る大規模農業施設であり、主にパプリカやトマトを栽培している。本研究が分析対象とするパプリカの栽培に用いるガラスハウスは，通常のビニールハウスよりも強度が高く、さらに太陽光の透過率も高い。さらに、このガラスハウスでは、温泉井戸から取り出した蒸気と温泉水の熱を熱交換システムで抽出し、ハウス内に張り巡らされたパイプ内の雨水に伝えることでボイラーの役割を果たし、ハウス全体を温めている。ハウス内のパイプに直接温泉を入れないのは、温泉の成分によってパイプ内が詰まることを避けるためである。



図 1: 愛彩ファーム九重（株式会社タカヒコアグロビジネス，2024）

本研究のシステム境界は、ガラスハウスを含む施設の建設時と地熱利用を含めたパプリカの栽培管理時である。まず、パプリカ栽培に利用された地熱に由来する年間生成熱量（J）を原油使用量（KL）に換算する。年間生成熱量は，実際に栽培施設でJクレジットの計算に用いられた2019年のデータを使用する。この地熱利用に由来するエネルギー節約量（原油換算）は，以下の式を用いることによってCO_2排出削減量に換算することができる。

燃料使用量×単位発熱量×炭素排出係数×44/12
＝CO_2排出量 (1)

ここで，原油の単位発熱量は38.3 (GJ)，原油の炭素排出係数は0.019 (tC/GJ)であり，44/12は炭素量を二酸化炭素量へ変換する係数である（環境省、2024）。

次に、パプリカを栽培するガラスハウスを建設する時の部門別事業費に，「産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）」に基づく排出原単位を乗じることによって，ガラスハウス建設時のCO_2排出量を推計する。

本研究において栽培管理費は、パプリカ栽培に伴い毎年発生する費用であると仮定する。しかしながら，日本で入手できるパプリカは輸入品が多く，国産パプリカの栽培管理費に関するデータが得られなかったため、ピーマンの施設栽培に関するデータを代用する。表1は、施設栽培での品目別（キュウリ，シシトウ，トマト，ミニ

トマト，ナス，ピーマン）の年間粗利益・経費・所得を表している（政府統計の総合窓口e-Stat、2007）。表1からピーマンの施設栽培に伴う経費173万円（1000㎡あたり）を利用する。分析対象のパプリカハウスの面積は、約30,000㎡であるため、先述の経費をこの面積に対応させると、173万円（1000㎡あたり）×30=約5,190万円である。さらに，この経費に「産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）」の対応する部門の排出係数を乗じて，パプリカの栽培管理に伴うCO_2排出量を求める。

3. 結果と考察

温泉パプリカの栽培初年度では，CO_2排出量が建設時，3045.3トン，栽培管理時，204.3トンである一方で，削減量は1246トンである。これらを合計すると，初年度の温泉パプリカのカーボンフットプリントは2003.6トンである。特に，本研究で利用したインベントリデータに基づく秋から冬にかけての地熱による生成熱量に注目すると，他の季節に比べてエネルギーの節約に大きく貢献している。2019年の1年間の生成熱量は、約18100GJであり原油に換算すると約467KLとなった（経済産業省、2020年）。

続いて，これらのデータに基づいて，ガラスハウス建設時やパプリカの栽培管理に伴うCO_2排出量をどれくらいの期間でオフセットできるのか，分析する。

温泉パプリカのカーボンフットプリント（t-CO_2eq）	
排出量	
ガラスハウス建設時	3,045.3
栽培管理時（年）	204.3
削減量	
地熱利用によるCO_2削減量（年）	1,246.0
合計（初年度）	2,003.6

図1：温泉パプリカの栽培初年度のCO_2排出量

図2は、温泉パプリカの栽培1年目から5年目までのCO_2排出量とCO_2削減量を示している。初年度に約2,003トンのCO_2を排出しているものの、2年目以降は地熱利用によるCO_2削減量が栽培管理時のCO_2排出量を大きく上回っていることにより，毎年約1042トンのCO_2排出量を削減している。従って，4年目には初年度から４年目までの累積CO_2排出量がゼロであり，5年目以降は累積CO_2削減量が累積CO_2排出量を上回る，ネガティブエミッションを達成できている。

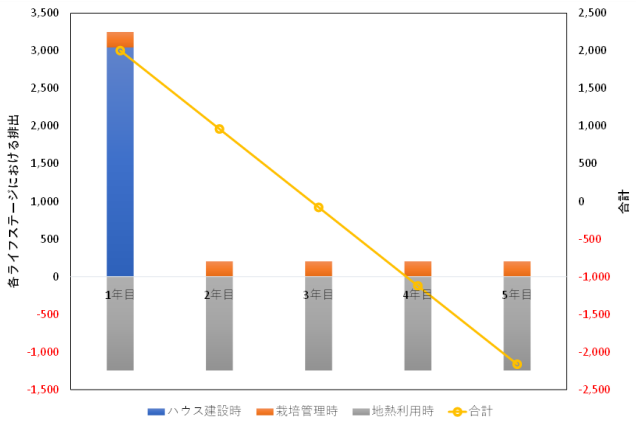


図2：温泉パプリカのカーボンフットプリント

4. まとめ

本研究では、地熱を利用したパプリカ栽培（温泉パプリカ）のカーボンフットプリントを推計した。結果から，地熱利用により原油換算で年間約1246トンのCO_2排出量を削減することができ、パプリカのハウス建設や栽培管理に伴うCO_2排出は3年でオフセットすることが可能であることが明らかになった。したがって，本研究の分析対象である「温泉パプリカ」のように、日本の豊富な地熱資源を活用することで持続可能な作物栽培が可能であり，長期的にはカーボンネガティブな作物栽培のポテンシャルが示された。しかしながら，日本は地熱資源量が世界3位であるにもかかわらず、地熱発電設備容量は世界10位である（エネルギー・金属鉱物資源機構、2024）。特に北海道では、豊富な地熱資源があるもののあまり活用できていないので、今後の更なる活用が期待される。

参考文献

１） IPCC（2019）：土地関係特別報告書
２）農林水産省(2006)：「品目別経営統計」
３）
環境省（2024）：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル(Ver5.0) 第II編 温室効果ガス排出量の算定方法
４）
経済産業省(2020)：各種係数(単位発熱量、排出係数等)燃料の単位発熱量
５） 「政府統計の総合窓口（e-Stat）」（2007）：農林水産省 品目別経営統計 I 調査結果の概要
６） 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 地熱資源情報（2024）：日本の地熱発電
７） 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 地熱資源情報（2024）：世界の地熱発電
８）
農林水産省農産局農業環境対策課（2024）：農業分野における気候変動・地球温暖化対策について

分別・洗浄効果に着目したペットボトル水平リサイクルのライフサイクル評価

Life cycle assessment of horizontal PET bottle recycling focusing on sorting and washing

○小林千夏 [1)]、菅野剛史 [1)]、菊池康紀 [2)]、兵法彩*[1)]
Chinatsu Kobayashi, Takeshi Kanno, Yasunori Kikuchi, Aya Heiho
1) 東京都市大学, 2) 東京大学
* heiho@tcu.ac.jp

1. はじめに

現在、世界的なプラスチック廃棄物の増加は、海洋汚染や生態系への影響を引き起こし、持続可能な社会の実現に向けた大きな課題のひとつとなっている。日本では 2020 年 7 月 1 日にレジ袋有料化がスタートし、プラスチックの過剰使用の抑制に向けて、消費者が普段手にするプラスチックが本当に必要かを見直す動きが本格化した。また、2022 年 4 月 1 日に、プラスチックのライフサイクル全体で 3R+ Renewable の取り組みを促進するための「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律」が施行 [1)]され、環境配慮型容器の製造・販売の必要性が高まっている。特に、環境配慮型容器に関する課題解決手段のひとつである使用済みペットボトルを回収・再生プロセスを経て、ペットボトル原料に戻す循環型生産プロセスの水平リサイクルへの期待は大きい [2)]。この動きに呼応する形で、飲料メーカー・小売事業者らはリサイクルペット、バイオプラスチック等の環境配慮型のペットボトルの調達・製造に取り組み始めている。こうした動きを受けて、今後のペットボトルリサイクルシステムは、これまで以上に水平リサイクルが中心的な位置を占めることになると予想される。

ペットボトル水平リサイクルに関する先行研究 [3)]では、モデルデータでの評価が行われているが、ペットボトルの分別・洗浄の徹底がリサイクル効率や環境負荷に与える影響については示されていない。

本研究では、ペットボトル水平リサイクル事業の実績値データを用いて、ペットボトル水平リサイクルにおける温室効果ガスを「自治体系回収ペットボトル」と「事業系回収ペットボトル」に分類してライフサイクル評価を行い、これらの比較について考察する。

2. 研究方法

評価対象は、PET to PET 製造事業者の 2023 年度 1 年間の稼働実績値とした。評価対象と研究方法について詳細は表 1 に記す。

自治体系回収ペットボトル（図 1）は、主に家庭から排出された廃ペットボトルで、各家庭でキャップ・ラベルの分別や、ボトルの洗浄が行われているため、異物混入率が低いことが特徴となっている。事業系回収ペットボトル（図 2）は、自動販売機脇排出型、自社排出型、拠点持ち込み型、利用者排出型に区分され、飲料販売事業者、チェーンストア、交通機関、レジャー施設等の民間事業者がそれぞれで発生するペットボトルの回収をしており、ほとんど分別･洗浄が行われていない。

表 1　評価対象と研究方法

評価対象	PET to PET 製造事業
評価期間	令和 5 年（2023 年）4 月 1 日 ～令和 6 年（2024 年）3 月 31 日
評価指標	温室効果ガス（GHG）排出量
算定範囲	廃 PET ベール輸送からフレーク製造、フレークから再生ペレット輸送
算定方法	原単位法を用いる 原単位は IDEAv3.4.1 を利用
使用データ	事業者から得た一次データ



図 1　自治体系回収ペットボトル



図 2　事業系回収ペットボトル

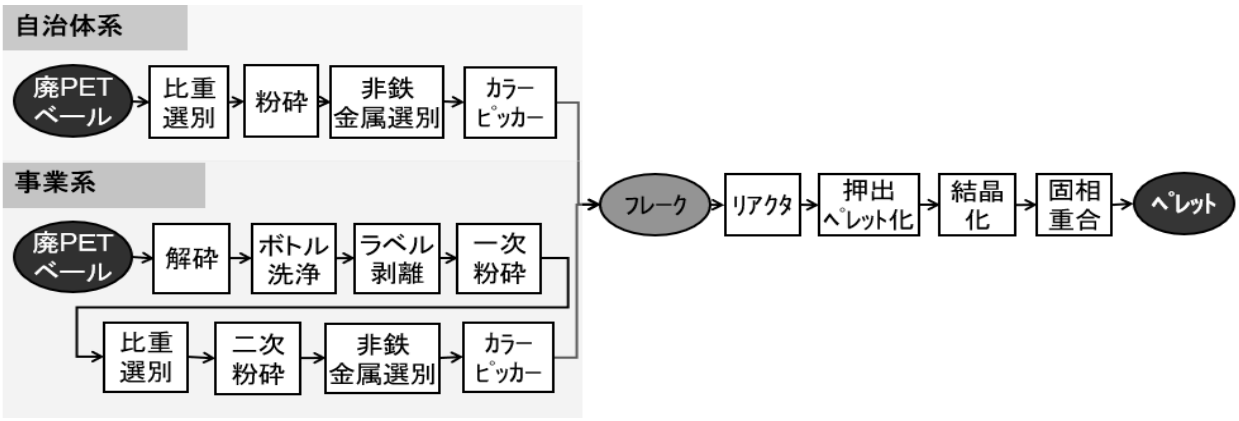


図 3　自治体系・事業系廃 PET ベールの再資源化プロセスフロー図

ペットボトル水平リサイクルにおける自治体系回収ペットボトルと事業系回収ペットボトルの処理プロセスのフロー図を示す（図 3）。処理プロセスは、自治体系と事業系どちらとも、回収した廃ペットボトルを圧縮し、結束材で梱包されたベールを細かく砕き、異物を除去してフレークに加工する。さらに、そのフレークを一旦加熱した後、3～5mm 程度の粒状に成型したペレットに加工する。自治体系、事業系のプロセスの大きな違いとして、事業系はベールからフレークに加工する過程で、プロセスが多いことが挙げられる。

3. 算定結果

ペットボトル水平リサイクルにおける再生ペレット生産量 1kg あたりの全体の GHG 排出量を示す（図 4）。再生ペレット生産量 1kg あたりの GHG 排出量は、自治体系回収ペットボトルが 0.23 kg-CO_2eq、事業系が 0.46 kg-CO_2eq であった。自治体系より事業系のほうが水平リサイクルの環境負荷が大きい。また、全ての項目において、GHG 排出量は、事業系が自治体系の約 2 倍という結果になった。そして、電力の占める割合が最も多く、次に LPG が多い。電力での差が最も多い原因として、事業系は自治体系では行わないボトル洗浄・ラベル剥離など、ベールからフレークにする工程が多いため、環境負荷が大きくなると考えられる。

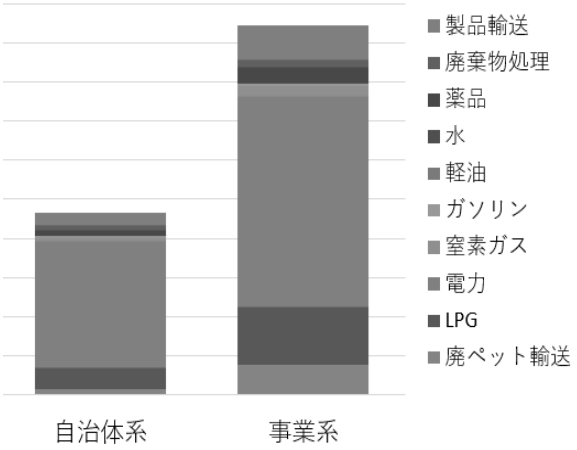


図 4　再生ペレット生産量 1kg あたりの全体の GHG 排出量算定結果

4. おわりに

ペットボトル水平リサイクルにおいて、自治体系回収ペットボトルより事業系回収ペットボトルのほうが環境負荷は大きい。分別･洗浄の有無が GHG 排出量に影響するため、分別･洗浄の重要性は高い。また、原料に合わせた設計は LCA 的に有効であることが明らかとなった。そのため、ペットボトル水平リサイクルにおいて環境負荷を減らすには、消費者が分別・洗浄の徹底を行うだけでなく、リサイクル事業者が分別･洗浄の有無に応じたリサイクル処理ルートを設置することも重要になることがわかった。

謝辞

東京大学総括プロジェクト機構「プラチナ社会」総括寄付講座は、三井不動産㈱、積水ハウス㈱、東日本旅客鉄道㈱、豊田通商㈱からの寄付で活動している。

引用文献

1) 環境省,「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律について」, 〈https://plastic-circulation.env.go.jp/wp-content/themes/plastic/assets/pdf/setsumei_siryou.pdf〉, （参照 2024-12-26）
2) PET ボトルリサイクル推進協議会,「年次報告書 2024」, 〈https://www.petbottle-rec.gr.jp/nenji/new.pdf〉, （参照 2024-12-26）
3) 鈴岡章黄,「素材産業における環境配慮と資源循環」, 精密工学会誌, 71(8), (2005), pp.954-959

地方公共団体の汚泥燃料化事業の環境経済影響評価

○波多野愛 [1)], 東怜*[1)], 中本裕哉 [1)]
1) 大分大学
*j2221224@oita-u.ac.jp

1. はじめに

政府は、2024年12月に新たな温室効果ガスの排出削減目標を2040年度に13年度比73%減とする野心的な地球温暖化対策計画の目標案を取りまとめた。目標達成にあたっては技術革新や消費者の環境意識の向上に加えて、既存資源のより効率的な利活用も重要であることがこの目標案では、指摘されている [1)]。下水汚泥は、人々の生活や産業活動から排出される下水を処理する過程で発生する副産物であり、その効率的な処理と再利用は、持続可能な社会の実現に向けた重要な課題である。下水汚泥を活用し、火力発電の燃料となるガスや炭化物、セメントやコンクリートなどの資材、肥料などを生成する事業が、日本各地の地方公共団体によって実施されている。

Kakuta and Ishida (2015)[2)]では、従来の下水汚泥処理施設に、固形燃料生産技術あるいはバイオガス発電技術を導入することによって、温室効果ガス排出および費用削減に大きく貢献することが示されている。また、荒木ら(2017)[3)]では、地域の産業構造(例; セメント工場, 製紙工場, ガス化溶融炉を有するごみ焼却場)と下水処理施設の連携によってより効率的な温室効果ガス排出量の削減が実現できることを示している。

しかしながら、先述の下水汚泥処理事業(火力発電の燃料となるガスや炭化物、セメントやコンクリートの資材、肥料などの生成)が、環境や経済に与える影響を総合的に評価した研究はこれまでにない。そこで本研究では、ケーススタディとして九州に所在する下水処理場のバイオガス発電施設についてデータ包絡分析モデル(Data Envelopment Analysis, DEA)を用いて効率性を分析する。さらに、研究結果から、より効率的な下水汚泥の利活用が温室効果ガスの排出削減にどの程度寄与できるかを定量的に評価し、将来の政策立案や技術開発に資する知見を提供する。

2. 研究手法

本研究では令和2年度の九州に所在する下水処理場で消化ガス発電を行っている20か所の施設を意思決定主体(Decision making unit, DMU)とする。具体的には, 2投入2産出(投入:下水汚泥量(m^3/年), 汚泥処理に用いた電力使用量(KWh/年); 産出:電力換算された消化ガスの精製量(KWh/年):精製プロセスに伴うGHG排出量(t-CO_2))の出力指向型DEAを用いてバイオガス発電施設のガス精製プロセスの効率性を分析する。本研究の分析対象となる下水汚泥の利活用に関しては、処理水量を事業者がコントロールすることが現実的ではないため、投入を所与とした上で産出を最大化する産出指向型を用いる。産出指向型BCC modelに基づくDMUoの発電効率性は下式のとおり計算できる(Banker et al.1984)[4)]。

$$\begin{aligned} &\text{Min} \quad \phi = \boldsymbol{v}'\boldsymbol{x}_o + g \\ &s.t. \ \ \boldsymbol{u}'\boldsymbol{y}_o = 1, \\ &\boldsymbol{v}'\boldsymbol{x}_o - \boldsymbol{u}'\boldsymbol{y}_o + g \geq 0 \\ &\boldsymbol{u} \geq \boldsymbol{0}, \boldsymbol{v} \geq \boldsymbol{0}, g \text{ free.} \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、$\boldsymbol{x}_o, \boldsymbol{y}_o$はそれぞれDMU$o$の投入、産出ベクトルを表す。$\boldsymbol{v}, \boldsymbol{u}$はそれぞれ処理施設$o$に関する入力乗数、出力乗数を示す。$g$は規模に関して収穫可変を仮定するための自由変数である。(1)式の最適解を$(\boldsymbol{v}^*, \boldsymbol{u}^*, g^*)$とすると、$\phi^*$は最適解をもとに算出される最適値であり、もし$\phi^* = 1$ならば、DMU$o$は効率的な投入産出構造を持つ。もし、$\phi^* > 1$ならば、DMU$o$は非効率であり、産出量を$\phi$倍する余地がある。本研究では、公益社団法人日本下水道協会によって作成された「現状を「見える化」するためのツール」[5)]を使用し、データを集計した。

3. 結果と考察

表1は, 各バイオガス発電施設の収穫可変モデル(VRS)効率性値、収穫一定モデル(CRS)効率性値、および2つのモデルの効率性値の比から得られる規模の効率性値を示している。バイオガス発電施設のVRS効率値に注目すると、効率値が1に近い施設が比較的多く、このことは運用効率の高い施設が比較的多いことを示している。一方で、VRS効率値が1よりも大きい施設は非効率性があり、出力を増加させる余地があることを示している。

規模の効率性は、平均0.671, 中央値0.618と全体的に低く、このことは最適規模を有する施設が少ないことを示している。DMU#1, #2は、規模の非効率性が比較的大きいため、他の施設に比べて運用を改善する余地が大きい。一方で, DMU#4,#7,#10の規模の効率は1であり, 施設の規模が適切であり、運用効率も高いので, 多くの施設の改善目標として参照される。

規模の効率性が比較的高いDMU#4、#7、#10に注目すると、DMU#7と#10は、汚泥処理量が分析対象全ての20施設平均の約1割程度と非常に少なく、比較的人口が少ない地域に位置している。このため、処理に伴う電力消費量や

GHG 排出量が非常に少ない。また, DMU#10 は、電力使用量のうち再生可能エネルギーをベースとしたエネルギー自給率(以下,「エネルギー自給率」)が非常に高く、全体の約5割を占めている。このように、DMU#7 および#10 は施設規模が小さく, その稼働に必要なエネルギー自給率の高さによって GHG 排出量を相対的に小さく抑え、効率的な運営を実現していると推察される。

また、DMU#4 の中央浄化センターでは、汚泥処理量が全体平均の約 8 割と規模的には中規模施設に分類され、他の多くの施設にとって参考となるモデルケースである。DMU#4 は, 汚泥処理に使用する電力消費量が極端に低い点が特筆される。この背景には省エネルギー対策があると考えられるが、具体的な要因については今後のさらなる分析が必要である。さらに、この施設のエネルギー自給率は非常に高く、消化ガス発電による電力をすべて施設内で利用しているうえ、太陽光発電の導入もエネルギー自給率の向上に貢献している。したがって, 施設内での再生可能エネルギーの利用拡大が効率性の上昇に寄与すると期待される。特に、エネルギー自給率の向上や省エネルギー型施設の導入が鍵となる。

表 1: バイオガス発電施設の効率性値

DMU	下水道管理者	施設名	VRS	CRS	規模の効率性
1	福岡県北九州市	日明浄化センター	2.926	10.517	0.278
2	福岡県福岡市	中部水処理センター	1.971	7.875	0.250
3	福岡県福岡市	和白水処理センター	1.106	1.806	0.613
4	福岡県久留米市	中央浄化センター	1.000	1.000	1.000
5	福岡県久留米市	南部浄化センター	1.030	1.282	0.803
6	福岡県宗像市	宗像終末処理場	1.000	1.080	0.926
7	福岡県芦屋町	芦屋町浄化センター	1.000	1.000	1.000
8	佐賀県唐津市	唐津市浄水センター	1.061	1.751	0.606
9	佐賀県鳥栖市	鳥栖市浄化センター	1.090	2.460	0.443
10	佐賀県伊万里市	伊万里市浄化センター	1.000	1.000	1.000
11	長崎県佐世保市	中部下水処理センター	1.040	1.325	0.785
12	長崎県大村市	大村浄水管理センター	1.027	1.349	0.761
13	熊本県熊本北部流域	熊本北部浄化センター	1.103	2.293	0.481
14	熊本県熊本市	中部浄化センター	1.150	1.884	0.610
15	熊本県熊本市	東部浄化センター	1.000	1.604	0.623
16	大分県日田市	日田市浄化センター	1.017	1.189	0.855
17	宮崎県宮崎市	大淀処理場	1.000	1.831	0.546
18	宮崎県宮崎市	宮崎処理場	1.334	2.347	0.568
19	宮崎県延岡市	妙田下水処理場	1.066	1.738	0.613
20	沖縄県名護市	名護下水処理場	1.077	1.662	0.648

4. まとめ

本研究では、九州内の下水処理場における消化ガス発電施設の効率性を分析し、効率的な運用をしている施設を特定した。効率的な施設では、エネルギー自給率の高さや環境負荷の低い燃料や電力の活用による GHG の排出量の低減といった共通点を持つことが明らかになった。一方で、効率性が悪い施設の共通点としては、消化ガス発電電力量も多いが、汚泥の処理量が多い。そのため、汚泥処理に必要な電力を再生可能エネルギーだけで賄うことができず、火力発電などに由来する電力に依存せざるを得ない。この結果、ガス精製プロセスにおける GHG 排出量が増加し、効率性が低く評価されていると考えられる。

下水処理場の脱炭素化に向けて, 日本政府は令和 4 年度に「カーボンニュートラル地域モデル処理場計画」[6]を開始した。これは、再生可能エネルギー、創エネルギーに関する技術の導入等を行う処理場に対し、政府が集中して支援を行うものである。本研究で利用したデータが令和 2 年度であることから、この支援実績が今回の分析対象である処理施設の効率性値に影響を与えていないが、導入された施設ではより効率性が改善していることが予測される。今後は、処理施設の技術革新に対する政策的な補助だけでなく, 各施設が再生可能エネルギーの利用拡大を進めるインセンティブの設計が重要である。

参考文献

1) 首相官邸 :“ 地球温暖化対策推進本部 (第 52 回)”, 地球温暖化対策計画(案) の概要 , (オンライン) , 入手先<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai52/siryou1-1.pdf >, (参照 2025-1-11) .
2) Kakuta and Ishida (2015):“The Evaluation of Costs and Greenhous Gas Reduction Using Technologies for Energy from Sewage Sludge”, World Academy of Science, Engineering and Technology , (オンライン) , 入手先 <https://publications.waset.org/10003207/the-evaluation-of-costs-and-greenhouse-gas-reduction-using-technologies-for-energy-from-sewage-sludge> (参照 2024-11-10).
3) 荒木 洸太朗 ほか : 将来の産業動向を見据えた下水汚泥燃料の全国の発電施設での活用が GHG 削減に及ぼす効果 , 土木学会論文集 G (環境) , Vol.73, No.6 (環境システム研究文集 第 45 巻) , II_245-II_256, 2017.
4) Banker et al. (1984) *Manag Sci*, 30, 1078–92.
5) 公益社団法人日本下水道協会 :“エネルギー消費量等の「見える化」ツール”,公益社団法人日本下水道協会, (オンライン),入手先<https://www.jswa.jp/gx/energy-cost-calc/>, (参照 2024-11-28).
6) 国土交通省 :“「カーボンニュートラル地域モデル処理場計画」の実施要綱”, 国土交通省ウェブサイト, (オンライン) 入手先<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/001518054.pdf> (参照 2025-01-13).

家庭系生ごみ資源循環促進に向けた社会的受容性調査

A survey on the social acceptance of resource circulation of kitchen waste

○荒井隆平[1)]、大塚彩美[2)]、兵法彩*[1)]
Ryuhei Arai, Ayami Otsuka, Aya Heiho
1) 東京都市大学, 2)東京大学
*heiho@tcu.ac.jp

1. はじめに

限りある地球資源の活用による循環型社会の形成が求められる中で、生活から切り離すことのできない生ごみが新たな資源の 1 つとして注目されている。京都市の調査によると家庭から出る可燃ごみの約 4 割が生ごみとなっている[1)]。また化石資源由来のプラスチックごみの分別・再生利用がより一層進んだ場合、水分量の多い生ごみは燃焼効率の低下につながることが懸念される。このことからも、生ごみ分別収集・有効利用は喫緊の課題であるといえる。特に、生ごみ分別を適切に進めていくうえで必要不可欠となるのは、地域住民による協力である。福岡県大木町における事例では資源循環行動において、自己の行動が目的に対して有効であると認知すること、何に対して作用しているのか認知することがごみの減量に影響することが認められている[2)]。福島県福島市[3)]では、2025 年 3 月より施行される新条例として、ごみ分別などのルールを意図的に守らない違反者を特定するために袋を開封して調査を行うなどの内容を含んだ条例が同市議会で可決・成立した。開封対象のごみ袋にはシールを張り 1 週間の猶予を設けたのち、2 度の注意勧告を行い、3 度目には氏名と 1 部住所などを公表することになっている。これに関して 2025 年 1 月には住民への説明会を実施し、悪質ごみ対策とごみ分別率の向上による地域内資源ごみの適正処理・利用を目指している。

本研究は、家庭系生ごみの資源循環促進に向けたアンケートの分析を通じて説明会等の対象は、どこの層(性別、年齢、地域性など)をターゲットとしていくのがより有効かを明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

インターネット調査を用いて全国の 20 代以上の男女 10,000 人に対してアンケート調査を行った。各性別・年代(20 代、30 代、40 代、50 代、60 代以上)を 1,000 人ずつとし、男女合わせて 10,000 人とした。

質問項目は個人属性(年齢、性別、居住地、家族構成、同居人数など)に加え・エネルギー関連・ごみ捨て行動についてとした。具体的には以下の内容である。

・エネルギー関連:カーボンニュートラル宣言理解度、政策課題理解優先度意識など。
・ごみ捨て行動:1 週間の料理回数、ごみ捨て担当、コンポスト実施、家庭内生ごみ分別など。

コンポスト実施は、コンポストを現在行っているのかという質問に対して「している」「していないがやってみたい」「してないし今後もやらない」を回答してもらった。その他にも日ごろからのごみ捨てに関する行動、環境問題に対する認識などを質問した。

また、生ごみ分別を行っている施設を有する地域を巡見し、生ごみ分別・資源循環の横展開に関して行ったヒアリング結果も合わせて考察した。

3. 結果

アンケート調査の結果を集計クレンジングを行い、有効回答数は 9,579 人を用いて、SPSS29 分析した。

3.1 カーボンニュートラル宣言理解度と性別・年代

図 1 に示すとおり、カーボンニュートラル宣言理解度には男女での差が大きく見られた。男女ともに年齢が上がるにつれ宣言の理解度も上昇してく傾向にあったことは共通点であったが、20 代～40 代の男女においての認知度は約 2 倍の差があり、男性の方に理解度が偏っていた。50 代以上は約 1.5 倍の差にはなるがどちらも男性の方に偏りのある結果となった。

また、“理解している”、“知らない” の回答ともに男女両方で 20 代の回答が最頻となった。

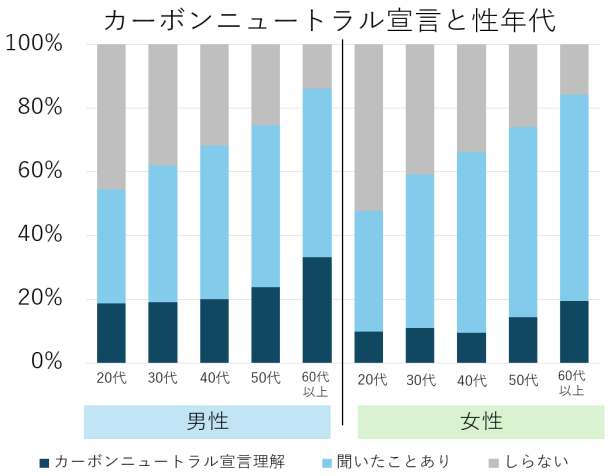


図 1　カーボンニュートラル宣言と性別・年代

3.2 家庭内でのごみ捨て担当と性別・年代

性別・年代と家事(ごみ捨て)に関しては、反比例の関係性にあった（図 2)。家事に対しては年齢が上がるにつれ男女ともに積極的な人が増加する傾向にあった。男女の比較では、男性よりも女性のほうが家事に対して積極的に行動しているといった結果になった。女性の方では 20 代から 30 代に上がるにつれて数値が約 20%上昇した。この理由として生活様式の変化や家庭の状況の変化などが考えられる。

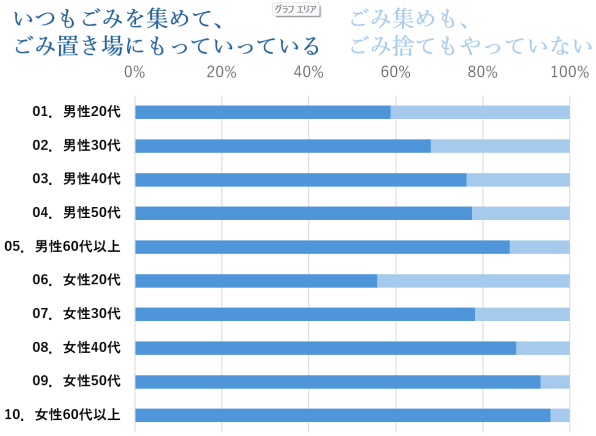


図 2　家庭内でのごみ捨て担当と性別・年代

3.3 ごみ捨てルール遵守と地域性

回答者が居住している各自治体のごみ捨てルールに従っているかという質問に関して、地域性との関係を分析した。ごみ捨てルール遵守の回答としては「毎回従っている」「だいたい従っている」「あまり従っていない」「全く従っていない」「わからない」で回答してもらった。結果として「毎回従っている」「だいたい従っている」を合わせて全国的に約 90%の遵守率となった。これは生ごみ分別が導入された場合でもルールがあれば守るという結果につながると考えられる。

3.4 コンポストと地域性

コンポストを現在行っているのかという質問に対して「している」「していないがやってみたい」「してないし今後もやらない」の回答と地域(北海道、東北、関東、中部、近畿、中国・四国、九州・沖縄)を分析した。結果として「している」と回答した人の割合としては関東・近畿の 2 地域がほかの地域に比べて低かった。北海道や東北、中国/四国など都心から離れた地域(郊外)の値は高くなった。「していないがやってみたい」の回答では全体的に約 25%以上の値であった。中でも「している」とは逆に関東において「していないがやってみたい」は多く占めており、約 30%に上った。都会に住んでいるためにコンポストをする機会が少ないことが関係してくると考えられる。

3.5 コンポストと家庭内生ごみ分別

コンポストを「している」や「していないがやってみたい」と答えた人より、「していないし今後もやらない」と答えた人のほうが家庭内生ごみ分別の実施率が高い値となり、予想に反した結果を得た。回答者がコンポストを行っているため「生ごみ分別はしていない」と認識している可能性がある。

3.6 地域巡見

生ごみ分別実施地域でのヒアリング調査により、収集運搬の大変さ、地域ごとに適したやり方があり、一部の成功例の横展開は難しいといった意見が多く挙げられた。 また、自治体主導で説明会を開催する場合、生ごみ分別に関係ない質問・内容が議論に混ざってくるという課題があるため、地域住民と自治体の関係性によっては、第 3 者(委託事業者)主導の説明会開催を検討していくべきだという意見も聞かれた。

4. おわりに

環境問題への理解としては比較的男性のほうが高いという傾向にあったが、まだ家庭内の家事などに関しては女性のほうがやや積極的に行っているということが明らかになった。また、日ごろのゴミ出しルールの遵守においては約 90%がほぼ毎回ルールに従っていることから、生ごみ回収・有効利用も施策として実施すれば多くの人の協力が得られると考えられる。

これらの結果から、説明会や講演会の対象者の選定を考えると、家庭内でより多くごみ分別やゴミ出しに携わる方、またコンポストを「していないがやってみたい」と回答した人たちを対象にしていくことが、生ごみ分別および資源循環型社会への移行に貢献すると考える。また、地域巡見の結果より、説明会開催は自治体主導だけでなく、回収業者等の民間事業者等主導も選択肢となることが分かった。

謝辞

本研究は、環境省・(独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF2023R04)の成果を含んでいる。

参考文献

1) 京都市, 京都市食品ロスゼロプロジェクト 京都市の生ごみのデータ, http://sukkiri-kyoto.com/data, 参照 2024-10-25
2) 菊澤育代, 近藤加代子 :環境科学会誌, 31(5), (2018), pp. 241-251
3) 福島市、Go！みらい！ごみ減量説明会, setumeikaishiryou-shin.pdf,参照 2025-01-18

木材の建材利用における MFA と LCA 実施による環境負荷ホットスポット分析
—2022 年を基準とした負荷削減策の検討—

Environmental hotspot analysis by MFA and LCA in wood building materials
—Reduction of environmental load with 2022 as the base year—

○若林國久*[1)]、森岡心[2)]、船本悠太[2)]、小林謙介[2)]
Kunihisa Wakabayashi, Kokoro Morioka, Yuuta Funamoto, Kensuke Kobayashi
1) 県立広島大学大学院、2) 県立広島大学
*r423015en@ed.pu-hiroshima.ac.jp

1.はじめに

森林は植林から伐採までの成長過程で光合成により大気中の炭素を貯留する。この温暖化の緩和に欠かせない森林を伐採して得た丸太や製材などの木材製品の7割は住宅などの建築で消費し、建築物の建替えなどに伴いリサイクル・廃棄される。伐採後、再造林することで炭素貯留量の均衡は維持されるが、伐採後の造林未済地(再造林放棄地)や土地利用・改変により森林資源量・炭素貯留量の減少などの環境影響が生じる。また、育苗・植林・育林・伐採(丸太生産)や製材などの木材製品製造、建築物の解体廃棄、木くず処理でのエネルギー消費などにより温室効果ガス(GHG)などの環境負荷が発生する。建築物を維持している間は建築物に炭素が貯留されるが解体で出た木くずの埋立、焼却や燃料利用で貯留されていた炭素を放出することになる。森林資源のライフサイクルを通した環境影響は、化石由来GHGの影響に着目して、2016年を基準年としたMFA(マテリアルフロー分析)と環境影響評価(LCA)を実施した[1)]。その後、化石由来だけでなくLULUC(土地利用・土地改変) ・生物由来の影響を加えたGHG影響評価が国際的主流になってきたこと、国産材の利用促進による自給率向上などの変化があり、直近のデータに基づくMFAとLCAを実施した。

2.マテリアルフロー分析

2.1分析方法

直近でデータ入手可能な2022年を基準年にマテリアルフローを構築した(図 1)。マテリアルフローには丸太や木材製品の輸入国を追加し、工場残材や木くずの廃棄・リサイクルを細分化した。分析は木材需給表や森林林業統計要覧、貿易統計などの既報データを活用した。具体的な収集データと推計方法の概要を表 1 に示す。

2.2 分析結果

国内資源は5,550百万㎥で2016年比1割弱増加した。丸太生産量(国産材)は2,208万㎥で1割弱増加した半面、輸入材は363万㎥で3割強減少し、全体としては微減していた。製材は1,186万㎥(国内生産696万㎥、輸入490万㎥)で1割強減少した。合板は487万㎥(国内生産292万㎥、輸入195万㎥)で1割弱増加した。集成材は201万㎥(国内生産97万㎥、輸入104万㎥)で7割強増加した。工場残材は1,293万㎥、建築解体などによる木

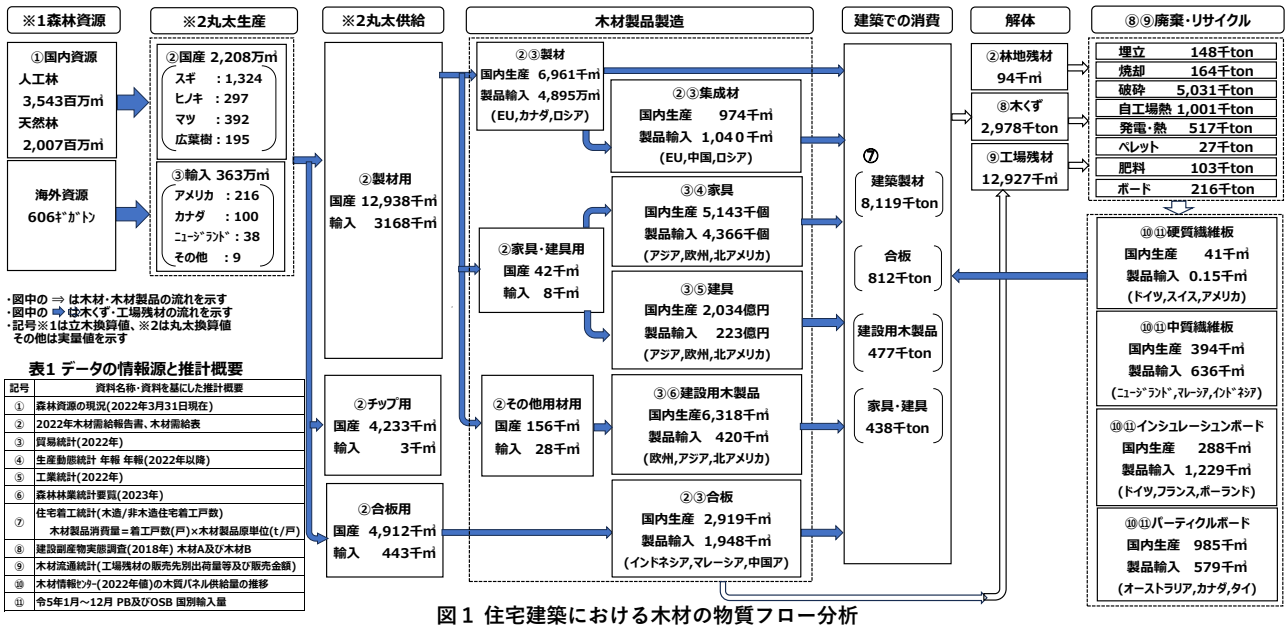


表1 データの情報源と推計概要

記号	資料名称・資料を基にした推計概要
①	森林資源の現況(2022年3月31日現在)
②	2022年木材需給報告書、木材需給表
③	貿易統計(2022年)
④	生産動態統計 年報 年報(2022年以降)
⑤	工業統計(2022年)
⑥	森林林業統計要覧(2023年)
⑦	住宅着工統計(木造/非木造住宅着工戸数) 木材製品消費量＝着工戸数(戸)×木材製品原単位(t/戸)
⑧	建設副産物実態調査(2018年) 木材A及び木材B
⑨	木材流通統計(工場残材の販売先別出荷量等及び販売金額)
⑩	木材情報ﾋﾝﾄ-(2022年値)の木質パネル供給量の推移
⑪	令5年1月～12月 PB及びOSB 国別輸入量

図 1 住宅建築における木材の物質フロー分析

くずは 298 万 ton で、1 割強～2 割弱増加した。

3.環境負荷分析

3.1 方法

構築したマテリアルフローをもとにLCAを実施した。分析はIDEA ver. 3.4.1とLIME2，LIME3を用いて統合化まで行った。環境影響の指標である化石由来、生物由来、LULUCのGHG排出量と、特性化（LIME2）、被害評価・統合化(LIME3)で支配的要因を明らかにし、詳細に分析した。

3.2 分析条件

評価範囲は丸太生産(育林から伐採)から製材や合板、家具などの木材製品製造及び建築後の解体廃棄・リサイクルまでを対象とした。マテリアルフローのプロセスにおいて国内生産は国内の排出量原単位を、輸入品は海外の排出量原単位(平均値)を使用した。原単位に影響する再造林率は平均値(50%)を採用した。

3.3 プロセスごとの GHG 排出量と排出比率

GHG 排出量(GWP100a with LULUCF)、CO_2(生物由来を除く)はそれぞれ、427 万 ton-CO_2eq、406 万 ton-CO_2eq で、GHG 排出量が 1 割弱多い結果となった。プロセス別では丸太生産や製材などの木材製品製造 (熱利用は含まない) が全体の 7 割強(合板 2 割弱、丸太生産・製材・家具・建具が各 1 割強など)を占めたが、木くず・工場残材の再利用・廃棄も 3 割弱(自工場での熱利用 2 割弱、木質パネル製造 1 割弱など)を占める結果となった(図 2)。排出量全体の 7 割弱が国内で、3 割強が輸入木材製品の生産国で排出されることが分かった(図 3)。

3.4 分野別 GHG 排出量

排出量は化石由来が 424 万 ton-CO_2eq、生物由来(収支であり、木材製品の固定量は含んでいない)が 15 万 ton-CO_2eq、LULUC が 1 万 ton-CO_2eq で、合計排出量は 440 万 ton-CO_2eq であった。生物由来と LULUC の影響は全体の 1 割弱であった(図 4)。

3.5 特性化

土地利用(維持)、廃棄物を除く気候変動などは木材製品の割合(5～9 割強)が大きく、化石由来の燃料燃焼の影響と考えられる。一方、土地利用(維持) は丸太生産がほとんどを占めていた。丸太生産した跡地への再造林の影響が推測される。廃棄物は木くずの埋立の割合(8 割強)が大きい結果となった (図 5)。

3.6 被害評価・統合化

被害評価を比較すると一次生産が最も大きかった。(図 6)。一次生産はほぼすべてを丸太生産が占めていた。人間健康、生物多様性も丸太生産 (6 割弱～9 割弱)が大きく、社会資産は製材等の木材製品製造(5 割強)が大きく、次いで、木くず・工場残材の熱利用や産廃処理(1 割弱～1 割強)であった。統合化すると丸太生産が 9 割強を占める結果となった (図 7)。丸太生産を分析すると

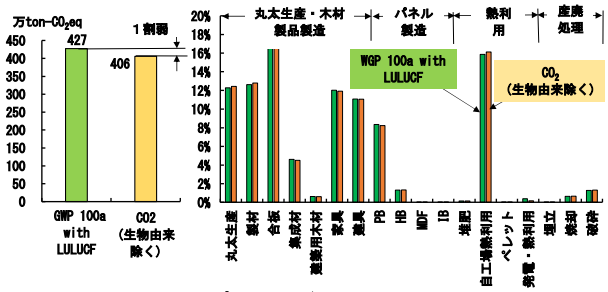


図2 プロセスごとのGHG排出量

図3 排出比率

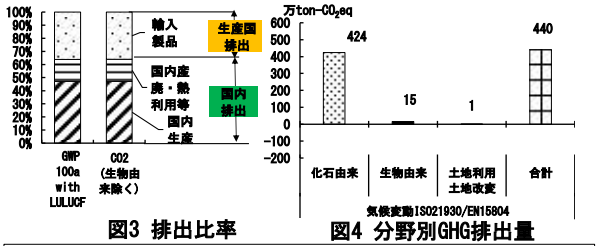


図4 分野別GHG排出量

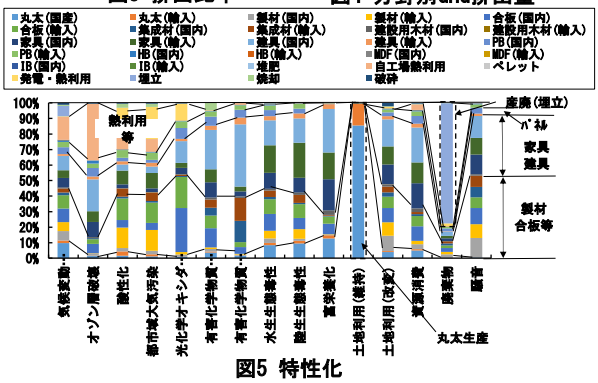


図5 特性化

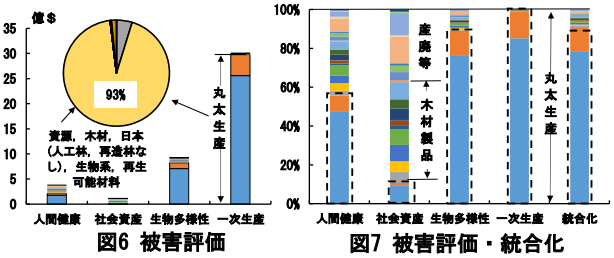


図6 被害評価　　図7 被害評価・統合化

再造林の影響がほとんどを占めていた。被害評価と統合化の結果から、建築における木材ライフサイクルに最も影響するプロセスは丸太生産(土地利用(維持)で、環境負荷削減には再造林による森林再生が重要である。

4.まとめ

本報告では、全国の木材資源のマテリアルフローをデータ入手可能な2022 年を基準年に再構築して建築における森林資源の直近の需給動態を明らかにした。さらに、木材利活用のライフサイクルにおける LCA を実施して環境影響の大きいプロセスの抽出と GHG の影響を数値で示した。その結果、環境影響の大きいプロセスは丸太生産で再造林の影響が大きいこと、GHG 排出量は化石由来が 9 割強で生物由来、LULUC は 1 割弱であること、GHG 排出量の 3 割強が輸入木材製品の生産国で排出されていることが示唆された。

5.参考文献

1) 若林ら：第 14 回日本 LCA 学会研究発表会 P2-53、P2-058、2019.3

ビールケグにおけるライフサイクル環境負荷の比較分析

Comparative Analysis of Life Cycle Environmental Impact of Beer Kegs

○森林未菜*[1)]、吉川直樹[1)]
Mina Moribayashi、 Naoki Yoshikawa
1) 滋賀県立大学
* to12mmoribayash@ ec.usp.ac.jp

1. 背景

近年、様々な飲料容器において瓶などのリターナブル容器に代わり、ペットボトルや缶などのワンウェイ容器が主流となっている。[1)]2000 年代に入って以降圧倒的にペットボトル飲料の生産量が多くなっている。[2)]ワンウェイ容器のメリットとしては多品種・小ロットでの販売ができる点や、回収の手間が省かれる点にある。[3)]

このように様々な種類のワンウェイ容器が普及している中で、ステンレス製が主流であるビールケグにおいてもプラスチック製のワンウェイ容器が注目され始めている。ステンレス製のものは再使用のために回収し、洗浄する必要がある。それに対してプラスチック製のワンウェイ容器は使い捨てであることで回収・洗浄が不要であり、軽量であることもメリットである。

以上のような飲料容器の素材の移り変わりを受けて、環境負荷に関する研究が進んでいる。政策科学研究所[4)]は飲料容器を対象とした LCA 分析を行い、飲料容器の環境負荷について明らかにしている。その他にも西薗ら[5)]は紙パック、リターナブル瓶、アルミ缶を対象として LCA 分析を用いていくつかのパターンで環境負荷の比較を行っている。このようにペットボトルや紙パック、瓶などの身近な容器の環境負荷に関する研究は多く見られるが、ビールケグに関する研究はいまだ進んでいない。

2. 研究の目的・意義

本研究では、ビールケグにおける素材の違いによる環境負荷の違いを輸送方法やリサイクル方法におけるいくつかのパターンに分け、LCA 分析を用いて比較することと、素材の違いによるコストの違いを比較することを目的とする。

本研究では、ビールケグにおいて使用方法や輸送方法の条件による違いを考慮した上で、環境負荷が少ない素材を明確にし、ビールケグにおける最適な環境配慮方法を提案することを意義とする。

3. 研究方法

3.1 研究概要

本研究ではステンレスケグ、プラスチックケグをそれぞれ 1 回使用する際の GHG 排出量を比較する。図 1、図 2 にそれぞれのシステム境界を示す。

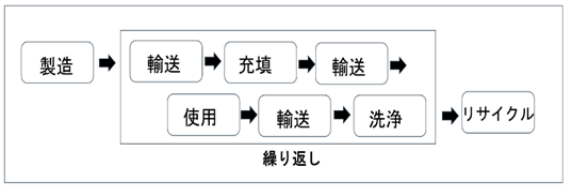


図 1　ステンレスケグのシステム境界

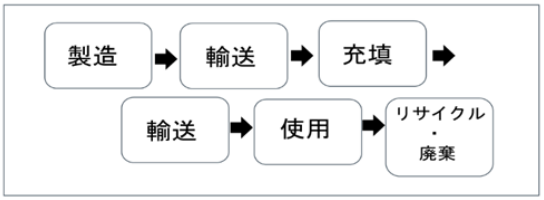


図 2　プラスチックケグのシステム境界

本研究ではヒアリング調査に基づいたいくつかの条件で比較を行う。輸送先に関しての 4 つのパターン、リターナブル容器であるステンレスケグに関する 3 つの使用回数のパターン、プラスチックケグの処理段階に関するマテリアルリサイクルと焼却処分の 2 つの処理パターンである。

3.2 ヒアリング調査・実測調査

ステンレスケグに関してはステンレスケグを使用し、クラフトビールの製造・販売を行っている企業にヒアリング調査、実測調査を実施した。プラスチックケグに関してはプラスチックケグの製造を行っている企業にヒアリング調査を実施した。

3.3 インベントリデータ

以上のようなヒアリング調査、実測調査で取得したデータをまとめたインベントリデータを作成した。得られなかったデータはインターネット調査にて補った。また、本研究ではインベントリデータベースとして、IDEA3.1.0[6)]を用いる。また、今回は GHG として CO_2、N_2O、CH_4の 3 つの物質の排出量を算出した。N_2O、CH_4に関しては地球温暖化係数(N_2O：265、

CH_4：28)を乗じている。

4. LCA 分析結果

すべてのプロセスにおける GHG 排出量の結果を図 3 に示す。

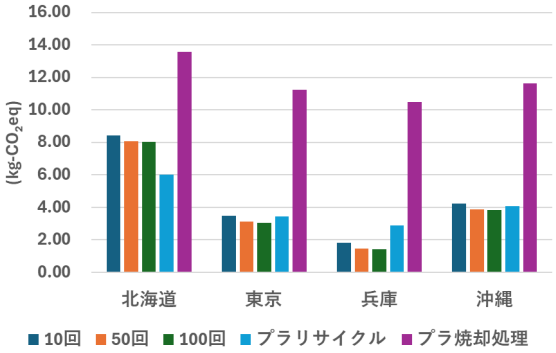


図 3　ライフサイクル GHG 排出量

プラスチックケグ焼却処分が圧倒的に GHG 排出量が大きい結果となった。どちらもリサイクルの場合は距離によって結果が異なっている。北海道への輸送のパターンのみプラスチックケグの方が GHG 排出量が少ない結果となった。このように輸送距離によって結果が異なるため、輸送距離の変化に対する感度分析を行った。図 4 にその結果を示す。

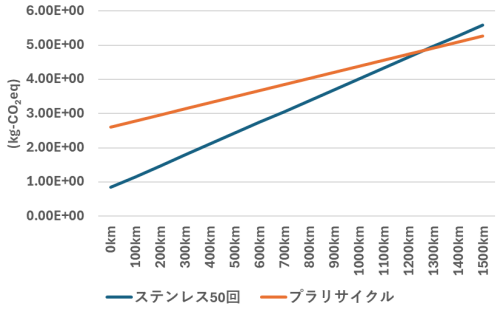


図 4　輸送距離の変化に伴う GHG 排出量の変化

ステンレス 50 回使用、両者ともにリサイクルするという条件の下では輸送距離が 1300 ㎞以上であればプラスチックケグ、1300 ㎞未満であればステンレスケグの方が GHG 排出量が少ない結果になるとなった。

5. コスト評価

ヒアリング調査の結果をもとにコスト評価を行った。図 5 にコスト評価の結果をまとめたグラフを示す。

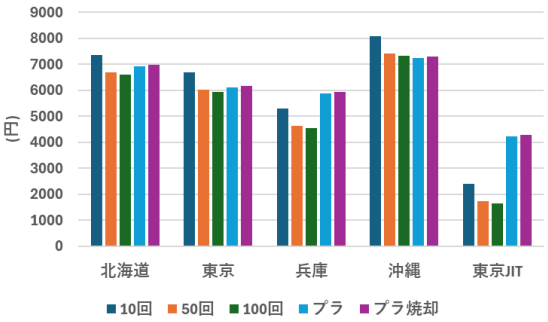


図 5　すべてのプロセスにおけるコスト比較

図 5 がすべてまとめて比較したものである。それぞれに大きな差はなく、コスト面に関してはどの条件が良いとは断言できない結果となった。しかし、一度に多くの量を輸送することができる JIT 便に関しては、同じ輸送距離である東京と比較すると、コストが低い結果となった。

5. 結論

結論としては、環境負荷の観点では様々な条件で結果が変わるため、使用方法によって使い分けることで環境負荷の削減が可能となってくる。また、コストに関しては輸送方法の見直しによって削減につなげることが可能となるだろう。

6. 引用文献

1) 西村尚：飲料用容器の材料及び製造法の変遷,日本機械学会第 9 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集,01(26),(2001),pp463-464
2) 堀孝弘：グラフは語る その 3 飲料容器の主役交代(オンライン)＜https://horitakahiro.sakura.ne.jp/2019/04/22/gragh3/＞,(参照 2024-12-10)
3) ガラスびんリサイクル促進協議会：日本国内におけるリターナブルびんの現状(オンライン)＜https://www.env.go.jp/council/36pet-junkan/y360-03/mat01.pdf ＞ ,(参照 2024-12-10)
4) 財団法人 政策科学研究所：“平成 16 年度 容器包装ライフ・サイクル・アセスメントに係る調査事業 報告書-飲料容器を対象とした LCA 分析-”(2005),pp1-122,
5) 西薗大実,大津佳子：LCA 的方法による飲料容器の環境負荷に関する評価,群馬大学教育学部紀要 芸術・技術・体育・生活科学編 35,(2005),pp271-281
6) 国立研究開発法人産業技術総合研究所安全科学研究部門 IDEA ラボ,LCI データベース IDEA version 3.1.0

Vehicle to Home（V2H）の導入を考慮したEVにおける環境影響評価

Environmental Impact Assessment of EV Considering Introduction of Vehicle to Home (V2H)

○前河智英*[1)]、吉川直樹[1)]
Tomohide Maegawa，Naoki Yoshikawa
1) 滋賀県立大学
* to12tmaegawa@ec.usp.ac.jp

1. 諸言

近年、走行時に CO_2 を排出しない電気自動車（EV）に環境の観点から注目を集まっている。EV は Vehicle To Home（V2H）システムを用いることで蓄電池として利用することもでき、太陽光発電（PV）と組み合わせることで PV による電気での走行や、余剰電力を EV に蓄えておき、家庭で利用することもできる。

しかし、EV は製造時の CO_2 排出量が大きいことが課題となっている。近年では、EV に搭載されるバッテリーの製造には多くのレアメタルが使われており、資源問題に繋がるという見方もされており、レアメタル確保のための多くの採掘が環境負荷を与えている[1)]。

本研究では、V2H を含む複数の設備や走行パターンの異なるシナリオ、異なる地域間でガソリン車（GV）と EV の資源面における環境影響を、関与物質総量（TMR）、LCA を用いて推計した。

2. 研究手法

本研究では、設定したシナリオをもとに、EV の走行量や日射量の違いなどによる環境影響を評価するためのシミュレーションを行い、それをもとに自動車をはじめとする設備の 1 年あたりの環境影響を評価する。

はじめに、シナリオの設定、地点の選定を行い、各地点における 1 年あたりの電力購入量を算出した。それをもとに、採掘活動量を定量化できる指標である関与物質総量（TMR）推計、LC-GHG 排出量の評価を行った。

本研究では EV、GV、蓄電池の TMR 係数は TMR 係数データベース[2)]、電力、ガソリン燃焼の TMR 係数は Kosai *et al.*[3)]より引用した。また、ソーラーパネル、V2H 機器の TMR 係数は MiLCA によって推計した。V2H 機器の TMR 係数は International Energy Agency[4)] より構成要素のデータを引用した。LC-GHG 評価は IDEAv3.1.0 を用いた。

設定したシナリオは**表 1** に、走行パターンは**表 2** に示した。EV のバッテリー容量は 40kWh とし、GV の燃費は 19.4km/L[5)]、EV の電費は 6.45km/kWh[6)] とした。家庭用蓄電池はリチウムイオン蓄電池を使用するものとし、容量は 8.69kWh[7)] とした。本研究で使用する EV、GV、家庭用蓄電池、V2H 機器の耐用年数は 10 年、ソーラーパネルの耐用年数は 17 年とした。地域によって日射量が異なることや電力需要が異なる可能性を考慮して、本研究では宮城県仙台市、新潟県新潟市、兵庫県西宮市の 3 地点を選定した。**図 1** に一例として V2H を使用するシナリオのシステム境界を示す。

3. 結果及び考察

3.1 TMR 推計

3 地点での TMR 推計の結果の一例として宮城県仙台市の結果を**図 2** に示す。3 地点すべてにおいて長距離、短距離パターンともに GV を所有し、太陽光発電

表 1　シナリオの概要

	走行パターン	所有する自動車の種類	太陽光発電	V2H設備	家庭用蓄電池
Case.1	長距離	EV	○	○	×
Case.2	長距離	EV	○	×	×
Case.3	長距離	EV	×	×	×
Case.4	長距離	GV	○	×	○
Case.5	長距離	GV	×	×	×
Case.6	短距離	EV	○	○	×
Case.7	短距離	EV	○	×	×
Case.8	短距離	EV	×	×	×
Case.9	短距離	GV	○	×	○
Case.10	短距離	GV	×	×	×

表 2　走行パターンの概要

	長距離	短距離
走行回数	平日（送迎）：週5回 土日祝（買物）：週2回	土日祝（買物）：週2回
自宅駐車以外時間帯	平日：8～9時，18～19時 土日祝：16～17時	土日祝：16～17時
走行距離（1日あたり）	平日：30km 土日祝：15km	土日祝：15km
年間走行距離	9165km	1785km

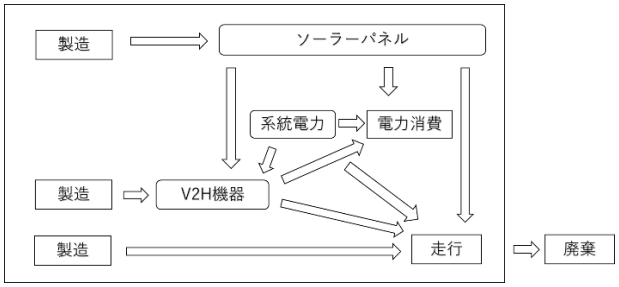


図 1 Case.1,6 のシステム境界

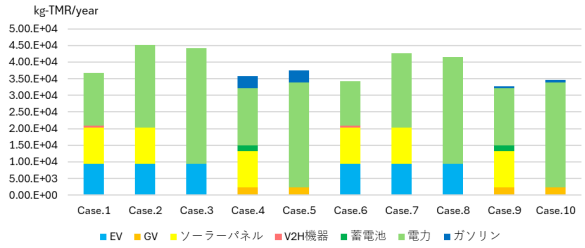


図 2 宮城県仙台市における TMR 推計結果

を行うシナリオにおいて最も TMR 係数が小さくなり、EV のみを所有するシナリオ、EV とソーラーパネルを所有するシナリオが TMR 係数の大きさの上位 2 シナリオを占めた。TMR は物質の製造にかかる採掘活動量であり、走行時の環境負荷が GV と比較して小さいという EV のメリットが TMR 比較には影響を与えないことが要因の 1 つとして考えられる。

資源利用の観点では、EV は環境負荷が小さいといえないと考えられるが、V2H システムを用いることで、環境負荷を削減できると考えられる。

3.2 LC-GHG 評価

LC-GHG 評価の結果の一例として宮城県仙台市の結果を**図 3** に示す。短距離パターンの LC-GHG 評価結果として、シナリオごとの GHG 排出量の傾向は 3 地点とも同様の結果となった。また、長距離パターンにおいては 3 地点とも V2H システムを用いる Case.1 が最も GHG 排出量を削減できたことから、走行量が多い家庭ほど、V2H システムを用いることで GHG 排出量削減効果を発揮できることが分かった。走行量が多くなるほど、EV を所有し、V2H システムを用いることで GHG 排出量削減効果を発揮できると考えられる。また、地点や走行パターンを問わず、ソーラーパネルを所有しないパターンにおいて GHG 排出量が大きくなるという結果になったことから、PV を用いることでも GHG 削減効果を発揮できるといえる。

4. 結論

TMR 比較の結果より、走行パターンや地点を問わず GV・ソーラーパネル・蓄電池を所有するパターンが最も TMR 係数が小さくなり、GV のみを所有するシナリオを比較して EV のみを所有するシナリオ、EV・ソーラーパネルを所有するシナリオの TMR 係数が大きくなったことから、資源問題の観点では、GV と比較して EV は環境負荷が大きいことが分かった．しかし、短距離パターンや長距離パターンの一部の地域では GV のみを所有するシナリオよりも EV を所有し、V2H システムを使用するシナリオの方が TMR 係数が小さくなったため、V2H システムを活用することで資源面

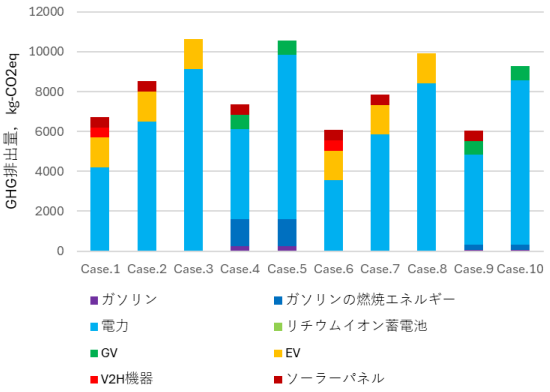


図 3 宮城県仙台市における LCA 分析結果

における環境負荷を削減できる。

LC-GHG 評価の結果からは、3 地点すべての長距離パターンにおいて、EV・ソーラーパネルを所有し、V2H を行うパターンが最も GHG 排出量が小さくなったことに対して、短距離パターンでは 3 地点すべてにおいて GV、ソーラーパネル、家庭用蓄電池を所有するパターンが最も GHG 排出量が小さくなった。以上から、走行量が多い家庭では V2H システムを利用することで GHG 排出量を抑えることができる。

5. 参考文献

1) 山末英嗣，光斎翔貴：車載用リチウムイオン電池にかかわる資源問題，廃棄物資源循環学会誌，33(3)，pp.175-180 (2022)
2) 立命館大学理工学部山末研究室：TMR 係数データベース，〈https://www.ritsumei.ac.jp/~yamasue/tmr/database.html〉，（参照 2023-11-14）
3) Shoki Kosai, Kenyu Matsui, Kazuyo Matsubae, Eiji Yamasue, Tetsuya Nagasaka : Natural resource use of gasoline, hybrid, electric and fuel cell vehicles considering land disturbances, Resources, Conservation and Recycling, 166, pp.3 (2021)
4) International Energy Agency : Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems 2020，pp.57-58 (2020)
5) 国土交通省：ガソリン乗用車の WLTC モード燃費平均値の推移〈https://www.mlit.go.jp/jidosha/content/2.1.R4_G_LD_FE_WLTC.pdf〉（参照 2024-07-28）
6) 日産リーフ：主要装備一覧／諸元表〈https://www3.nissan.co.jp/vehicles/new/leaf.html〉，（参照 2024-07-23）
7) 一般社団法人 日本電機工業会 JEMA：蓄電システム自主統計 2023 年度出荷実績〈https://www.jema-net.or.jp/Japanese/data/jisyu/pdf/libsystem_2023.pdf〉（参照 2024-07-25）

事例集合住宅を対象とした IDEA ver. 3. 4 での評価と削減実績量に関する試算

Evaluation by IDEA ver.3.4 and reduced emission in apartment house

○正木琳太朗[1)]、三河大志[2)]、福岡亜弥[1)]、小林謙介[*1)]
Rintaro Masaki, Hiroshi Mikawa, Aya Fukuoka, Kensuke Kobayashi
1) 県立広島大学, 2)県立広島大学大学院
*kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. 背景・目的

わが国の CO_2 排出量の約３分の１を建築分野が占めるといわれ、その削減対策は急務である。そのため建築に関する事業者がその削減対策を実施することが重要である。また削減効果の評価の１つとして削減貢献量や削減実績量の評価も重要になると考えられる。一方、その分析事例はわが国ではほとんどない。本検討では、住宅事業者の主力製品を対象に IDEA ver.3.4 を用いて、LCA を実施し、削減策を検討した。また削減実績量を試算し、結果から評価における課題等について考察した。

2. 事例集合住宅の概要

本検討で対象とした集合住宅の概要を表１に示す。本研究では、木造汎用集合住宅の 3 種類を対象とした。またすべての住宅の耐用年数は 35 年を想定した。

表１　用いた事例集合住宅の概要

項目	住宅 A	住宅 B	住宅 C
構造	2×4 工法	2×4 工法	2×4 工法
建物階数	地上 2 階・3 戸並	地上 2 階・3 戸並	地上 2 階・3 戸並
延床面積	351.09 ㎡/棟	333.64 ㎡/棟	322.13 ㎡/棟
建築面積	183.92 ㎡	174.33 ㎡	169.77 ㎡
販売時期	2010 年～	2015 年～	2020 年～
太陽光発電	なし	1.3×10^5 kWh/棟年	2.2×10^5 kWh/棟年
省エネ基準地域	6 地域（岡山）	6 地域（静岡）	5 地域（東京）

3. 計算条件

本住宅のライフサイクルにおけるインベントリ分析を実施した。評価には IDEA Ver.3.4 を用い、IS021930、EN15804 に対応した評価項目（化石由来・生物由来等による気候変動や資源利用）の観点から環境影響評価を行った。。また日本版被害算定型影響評価手法(LIME2,3)を用いて、被害評価、統合化を行った。ISO21930(建築物・建材の製品環境宣言に関する規格)を参考に、建物ライフサイクルにおけるプロセスを整理した。資材製造（A1-3)、輸送（A4)、施工（A5)、修繕(B3)、更新（B4)、エネルギー消費（B6)、水消費（B7)、解体・廃棄（C1-4)、創エネ設備に分類した。製造(A1-3)は本住宅の積算時の投入資材データを基に計算し、投入資材に IDEA の原単位を乗じ算出した。輸送（A4）は当該事業者の実績値をもとに平均輸送距離を算出した。施工（A5）は実績値をもとに算出した。修繕・更新（B3・4）は当該住宅事業者が整備する使用材料の修繕・更新に関するデータベースを基に、35 年間での修繕量、更新回数を算出し、評価した。エネルギー消費（B6）は住宅に関する省エネルギー基準に準拠したプログラムによる算定結果を用いた。水消費（B7）は上水消費量、下水排出量ともに 422m^3/年で計算した。解体・廃棄（C1-4）は住宅事業者の平均廃棄率を、廃棄物量を乗じて算出した。創エネ設備は太陽光発電システムの発電電力量であり、1 棟・1 年あたりの発電電力量は表１に示した。また創エネ発電分を排出量からマイナス計上し、その合計を実質排出量として試算した。

4. 研究方法と結果

4.1 ISO21930 に対応した評価項目の分析

化石由来、生物由来、土地利用・土地改変による気候変動影響の影響及びその合計の分析結果を図１と SI 図 5～7 に示す。図１から、運用、化石由来の資材・製造段階の影響が大きかった。排出分に注目すると、共通して運用段階の影響が大きく、化石由来の気候変動では排出分の 8～9 割を占めた。したがって、運用設備の使用時間削減などの対策が重要である。また生物由来の分析結果を見ると、木材の炭素貯蓄分によるマイナス計上分が大きかった。しかし、木材をマテリアルリサイクルしたのち、その廃棄物が燃焼した場合の排出分は計上されていない。したがって、生物由来の結果解釈は注意を要する。

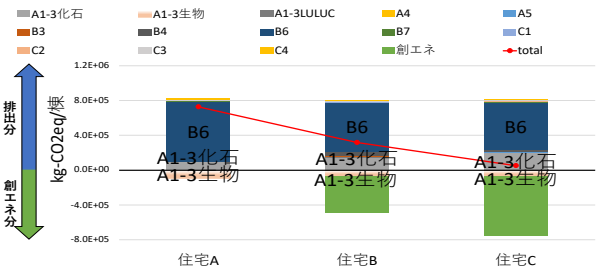


図１　気候変動合計の分析結果

4.2 ISO21930、EN15804 に対応した評価項目の分析

一次資源及び二次資源利用による環境影響評価を行った。その結果を図 2 と SI 図 8～11 に示す。図 2 では創エネ分は未評価である。資源利用の分析の結果、図 2 から使用したエネルギーは非再生可能エネルギーが多く、再生可能エネルギーは全体の約 1/5 のみ使用されていた。また SI 図 8 から資材・製造段階では木材等のバイオベースの材料の使用量が多く、特に住宅 A では大きく影響していた。SI 図 9～11 からバイオベース材料の二次燃料としての使用量が多かった。環境負荷削減のため、再生可能エネルギーや二次材料の積極的な使用が重要である。

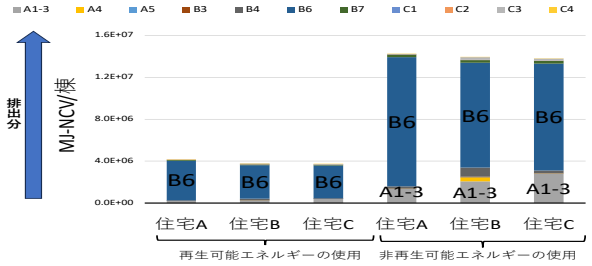


図２　一次資源　再生/非再生可能エネルギー消費量

4.3 環境影響評価

LIME を用いた評価結果を図 3、SI 図 12～21 に示す。LIME2 の統合化結果は、運用段階が約 6 割、資材製造段階が約 3 割を占めた。統合化のうち、生物多様性が最も影響していた。生物多様性には資材・製造段階、運用段階に加え、水消費の影響が大きいことから節水対策が重要である。また資材・製造段階は住宅モデルが変わるたび、影響は増加していた。一例として電灯コンセントやエアコンディショナ等の銅製品の製造過程での重油の燃焼や電解による影響も小さくなかった。したがって、再生可能エネルギーの使用やリサイクルによる電力削減が必要である。

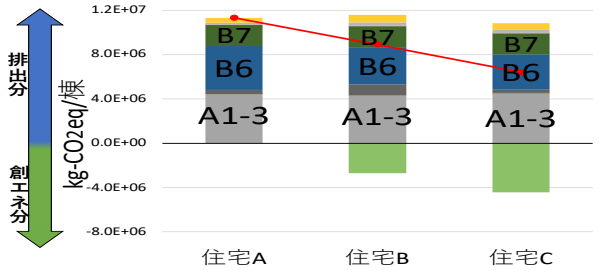


図３　LIME2　統合化結果

4.4 削減貢献量に関する試算

4.4.1 削減実績量に関する検討概要

削減実績量とは温室効果ガス削減に資する環境性能が優れた製品の提供によりその代替製品の提供と比べた時の温室効果ガス排出削減量である。また LCA 学会の「温室効果ガス排出量削減貢献量算定ガイドライン」を参考にした[1]。本検討では住宅 A を 1 年に 100 棟建築し、以降 15 年間にわたり毎年 100 棟ずつ建築するベースラインと、住宅モデルを 5 年ごとに変える環境配慮型を比較し、計 1500 棟から 35 年間で発生する環境影響についての削減実績量を試算した。その結果の一例を図 4 に示す。試算結果から、GHG 排出量、統合化ともに削減効果が大きいことを明らかにした。また排出分の削減効果も見られた。削減効果を上げるため、4.1～4.3 で示した対策の実施による排出分の削減や太陽光発電による創エネ分を増加することが重要である。

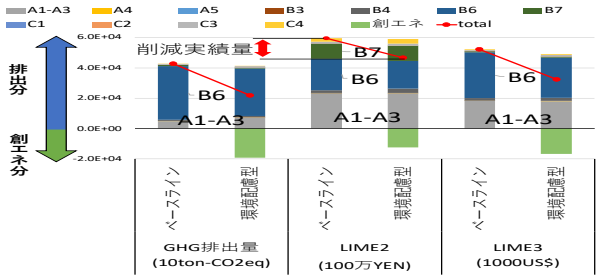


図４　LIME2　削減実績量試算結果

4.4.2 削減実績量の試算に関する課題等

本検討では、住宅ごとに創エネ地域が異なり、水消費量に平均値を用いて計算している。これらは影響の大きな水消費、運用段階に関与するため、条件の統一が評価の精度上昇に必要であると考える。また削減実績量で評価を行う場合、日本 LCA 学会が発行しているガイドラインを参考にしつつ、正確な販売数をもとに現実的なベースラインの設定が重要である。

5. まとめ

本検討では、事例集合住宅を対象に環境影響を分析し、改善策を提案した。また削減実績量の試算を行った。

統合化分析の結果、それぞれ影響の大きなプロセスを確認し、削減策を提案した。また IDEA ver.3.4 から可能となった、ISO21930、EN15804 に対応した評価項目である化石由来や生物由来の気候変動の影響や一次資源や二次資源による影響などを分析し、資源燃焼による環境影響や資源使用量の改善策を提案した。

また削減実績量を試算した結果、削減効果を明らかにし、評価対象の設定など課題の改善策を提案した。

6. 参考文献

1)　温室効果ガス排出量削減貢献量算定ガイドライン, 日本 LCA 学会

Supporting Information

表２　B6 に含まれる設備項目

暖房設備
冷房設備
換気設備
照明設備
給湯設備
その他の設備

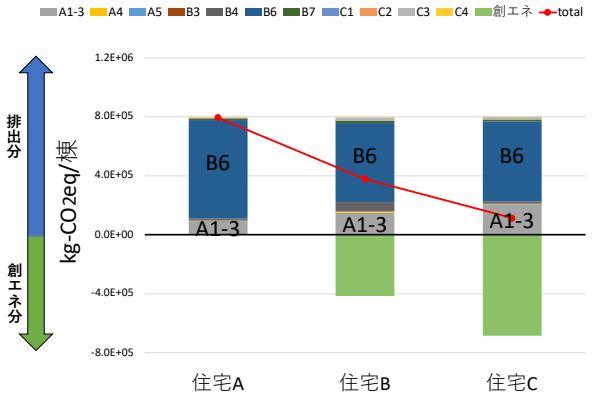


図５　気候変動　化石由来

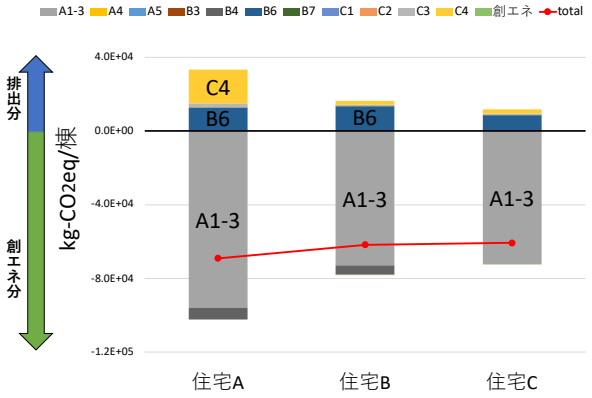


図６　気候変動　生物由来

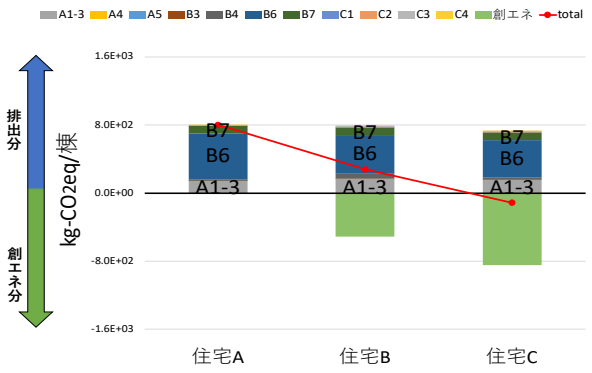


図７　気候変動　土地利用・土地改変

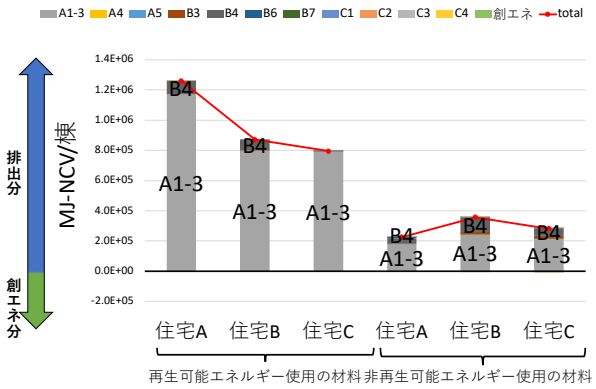


図８　一次資源　エネルギー使用の材料

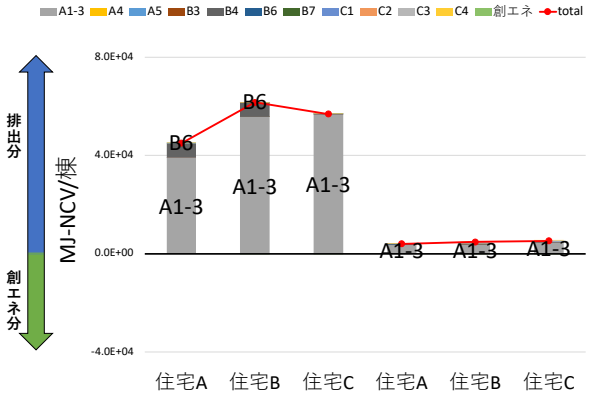


図９　二次資源　再生可能/非再生可能二次燃料

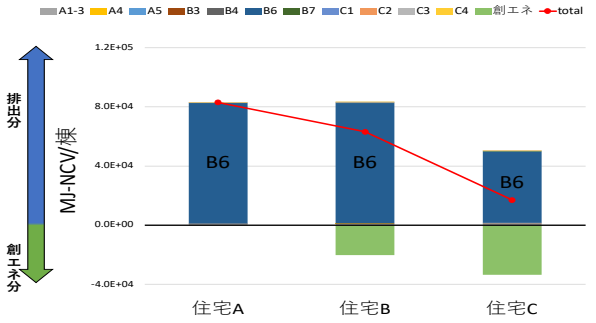


図 10　回収エネルギー

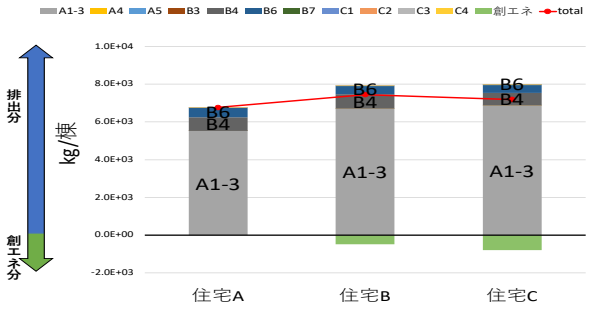


図 11　二次材料

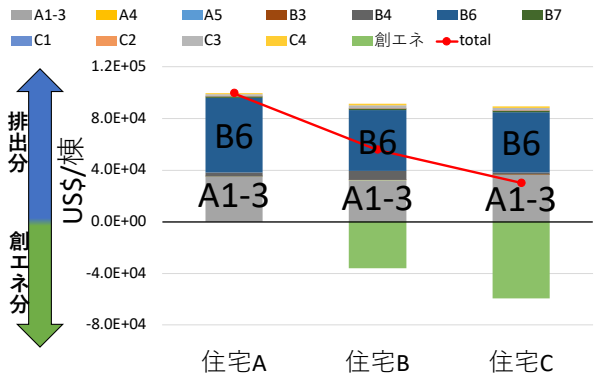


図 12　LIME3 統合化

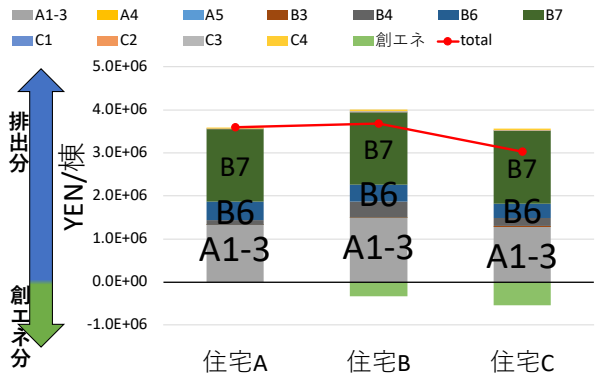


図 16　LIME2　一次生産

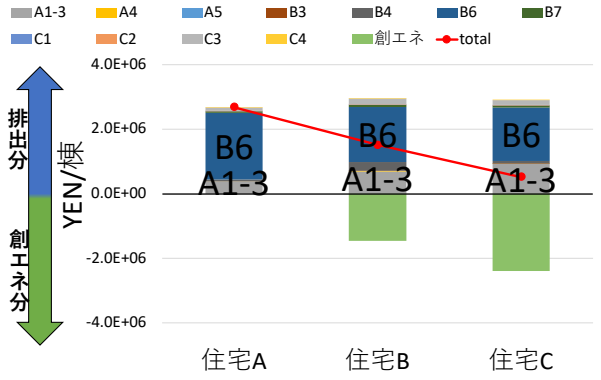


図 13　LIME2　人間健康

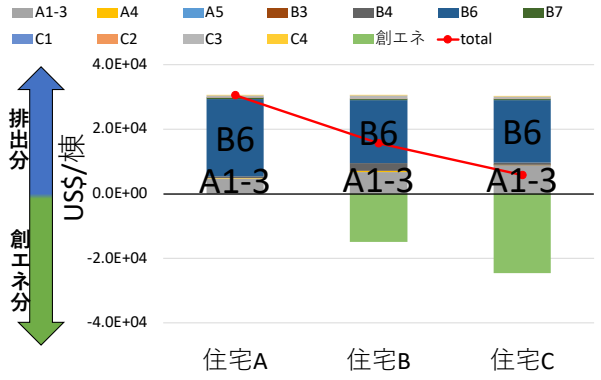


図 17　LIME3　人間健康

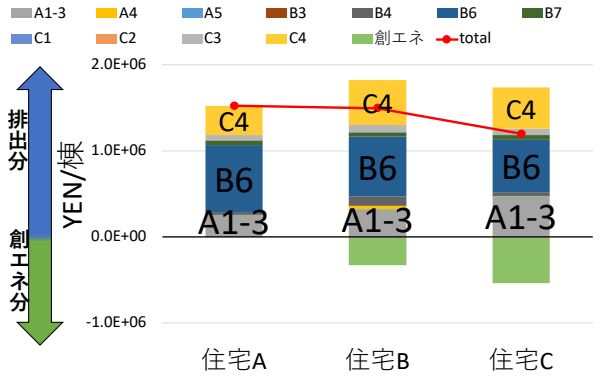


図 14　LIME2　社会資産

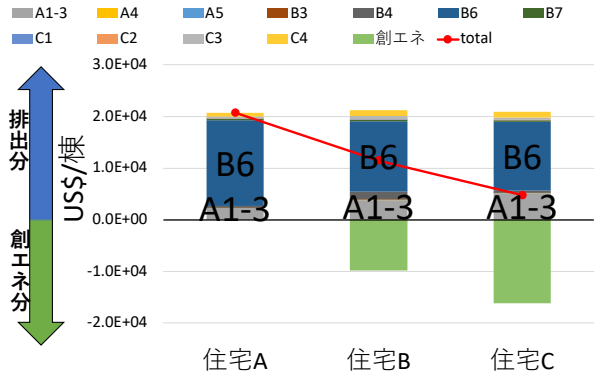


図 18　LIME3　社会資産

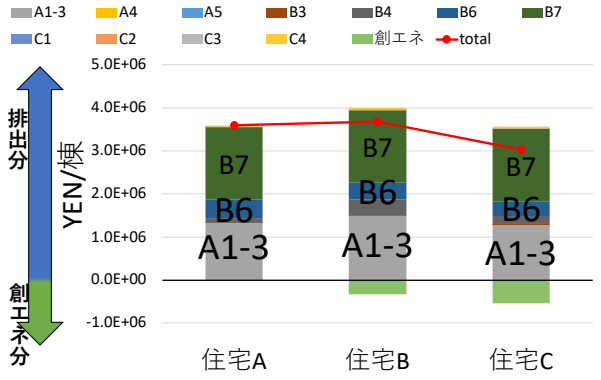


図 15　LIME2　生物多様性

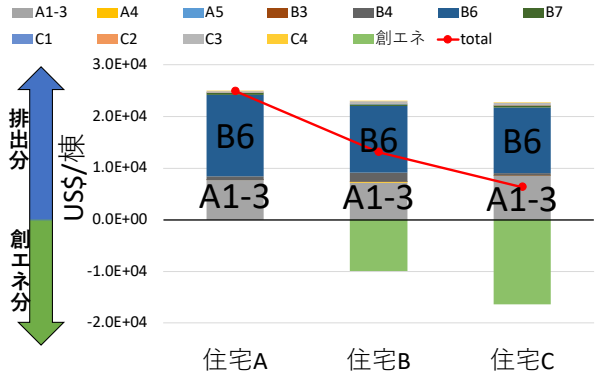


図 19　LIME3　生物多様性

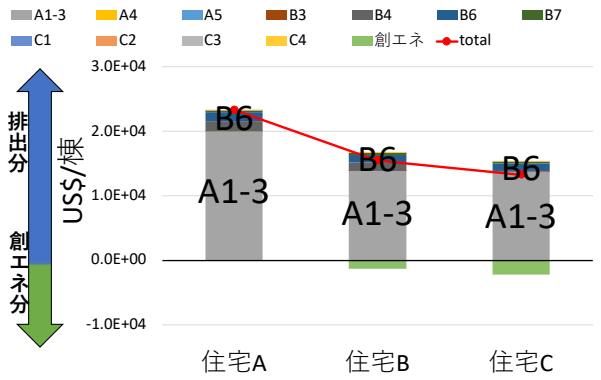


図 20　LIME3　一次生産

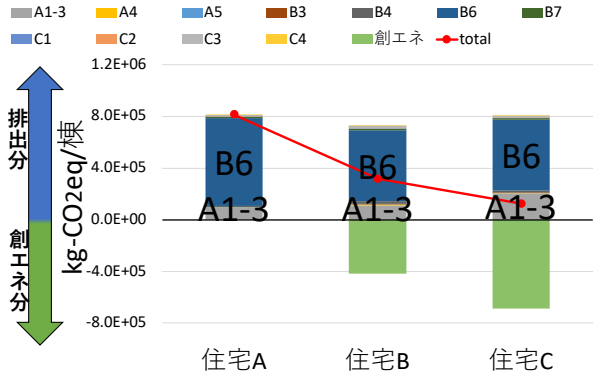


図 21　GHG 排出量

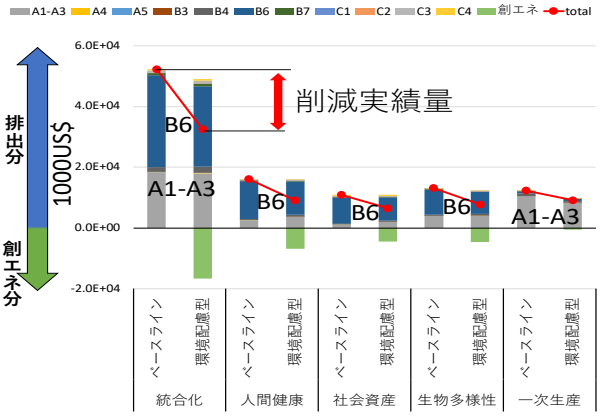


図 22　LIME3　削減実績量

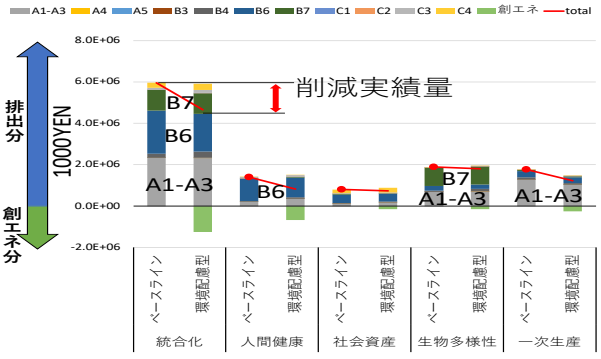


図 23　LIME2　削減実績量

暮らしの個性化に向けたモデリングと環境ホットスポット分析

Modeling and environment hotspot analysis for the individualization of daily life

○出口綾[1)]、小野寺舞音[1)]、古川柳蔵[1)]、石田秀輝[2)]、兵法彩*[1)]
Aya Deguchi, Mao Onodera, Ryuzo Furukawa, Hideki Ishida, Aya Heiho
1) 東京都市大学, 2) 東北大学
* heiho@tcu.ac.jp

1. はじめに

2024 年 5 月に第 6 次環境基本計画が閣議決定して、現在および将来の国民一人一人のウェルビーイングの実現が環境政策の最上位目標に掲げられた。2050 年カーボンニュートラル実現に向けて、多くの企業が様々な取り組みを展開し、働く人の環境問題への認知度や関心が高まっている一方で、個人の意思による行動変容やウェルビーイングの実現への到達はまだ遠い。働き方や日々の暮らしに欠かせない食だけに着目したとしても、個人の選択の幅は明らかに広がっており、その組み合わせによる暮らしの個性化は、これからの環境とウェルビーイングの共存に欠かすことができない。

例えば、食事については、飲食店や宅配システムなど様々なサービスが普及している。飲食店は一定品質で大量に、そして安価に仕入れを行う傾向があり、輸入依存の加速が進むと考えられる。板ら（2009）によると完全内食型、完全中食型、完全外食型の三つの極端な食生活パターンでは内食が最も環境配慮的である[1)]との結果が得られているが、働き方の変化に伴う食事の摂り方に関する分析はまだ行われていない。

特に、最近の働き方の大きな変化として、在宅ワークが挙げられる。在宅ワークの普及率は、2019 年まで緩やかな増加傾向で 20%であったが 2020 年の新型コロナウイルス感染症拡大後、現在では 50%を超えている[2)]。在宅ワークへの変更により、オフィスのエネルギー消費の削減が期待される一方で、在宅ワークの拠点となる自宅で増加する可能性があるが、そうした増減を考慮した定量的議論はまだ十分に行われていない。幅広い選択肢の中で効果的な暮らしの個性化を展開していくためには、暮らしを構成する各要素の特徴を捉えた意思決定が求められる。

本研究の目的は、生活を構成する要素が異なるライフスタイルのモデル化と環境負荷の定量化を行い、暮らしの個性化に向けた選択肢を考察することである。本稿では、仕事と食のそれぞれの要素（オフィスワーク、在宅ワーク、外食、自炊、通勤、自由時間）を抽出して、環境負荷の定量化を通じて環境負荷の大きい要素（ホットスポット）を明らかにする。

2. 研究方法

2.1 前提条件

異なる要素を持つ 2 つのライフスタイルをモデリングした。一般的な生活の流れを基に要素を抽出しライフスタイルにおけるプロセスを四角、また各要素に伴って消費される資源やエネルギーなどのマテリアルを丸として示した（図 1）。図 1 左側は、オフィスワーク・外食モデルで、家とオフィス間の往復、仕事、昼食は外食で構成される。図 1 右側は在宅ワーク・自炊モデルで、通勤はなく自宅で仕事、昼食は自炊であり勤務後は自由時間で構成される。自由時間は自宅で過ごす場合と外出する場合の 2 つのパターンを設定した。

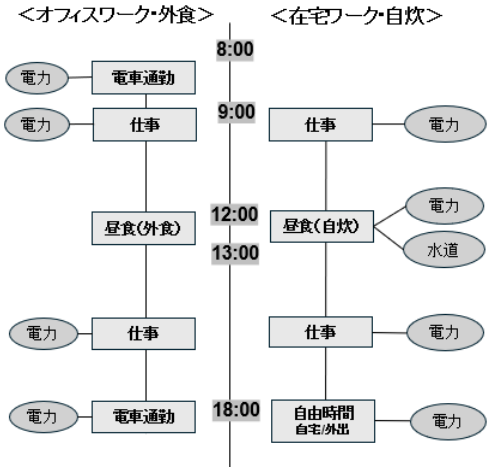


図１　２つのライフスタイル

表１　文献値に基づいて設定したデーター覧

項目		単位
電車通勤時間	38	分
電車通勤距離	22.6	km
オフィス電力	0.18231	kWh
家庭用エアコン	0.45	kWh
パソコン	0.00685	kWh
液晶テレビ	0.229	kWh
仕事（昼食前）	3	時間
仕事（昼食後）	5	時間
外食価格平均	831	円

外食及び自炊のメニューは、勤務中の限られた時間の中で手軽に調理または購入が可能であることからナポリタン[3]を基準とした。またオフィスワークにおける勤務地は小田急エージェンシーの研究サイト[4]の情報に基づき新宿とした。また、自宅の場所は、社会生活基本調査[5]から平均通勤時間が 38 分であったことから新宿駅から約 38 分の市川駅付近とした。

2.2 調査対象

調査対象は、図 1 で示したマテリアルを基に設定した。オフィスワーク・外食の場合、電車利用の通勤や仕事の中に使う空調とパソコン利用に伴う電力消費量、昼食（外食）の購入者価格とした。在宅ワーク・自炊の場合は自宅の中で使う空調とパソコン利用や昼食（自炊）で IH コンロを用いた調理に伴う電力消費量、さらに水道量と食材量とした。また自由時間において、外出しない場合には自宅でのテレビと空調、外出する場合には電車移動に伴う電力消費量とした。

2.3 算定方法

抽出した各要素の細分化して、設定した調査対象に対してそれぞれ IDEAv3.4.1 を用いて GHG 排出量を算出する。定量化した結果からホットスポットを分析することで、これからの環境とウィルビーイングが共存可能な暮らし方の選択肢を考察する。排出量を算出する項目は、「電車通勤」・「仕事」・「昼食」「自由時間」、各項目に伴うマテリアルの「電力」、「水道」とする。電車通勤は前程条件で示した新宿駅から市川駅の走行距離、仕事は午前 3 時間、午後 5 時間の所定労働時間である計 8 時間を一日の勤務時間としてそれに伴う電力量を活動量とした。また、自炊ではレシピを基に算出した食材量と合計使用電力量を活動量としそれぞれ IDEA3.4.1 の原単位にかけて算出する。外食は購入価格、自由時間は行動パターンによる活動量の変動性がみられるため感度分析する。

3. 結果・考察

ライフスタイルの各要素における GHG 排出量は、図 2 の通りである。食における感度分析の結果は図 3 の通りであり、外食価格の変動によって GHG 排出量の結果が大きく変化することが分かる。自由時間の感度分析で電車移動やテレビ利用の場合には、長時間の利用をしない限り GHG 排出量との関連性が薄いため、自由時間で大幅に GHG 排出量が増加するとは考えにくい。本研究で得られた暮らしの要素と GHG 排出量の関係性を基に、個々で要素を選択しライフスタイルを構築することで、GHG 排出量の削減に寄与できる可能性が高まる。

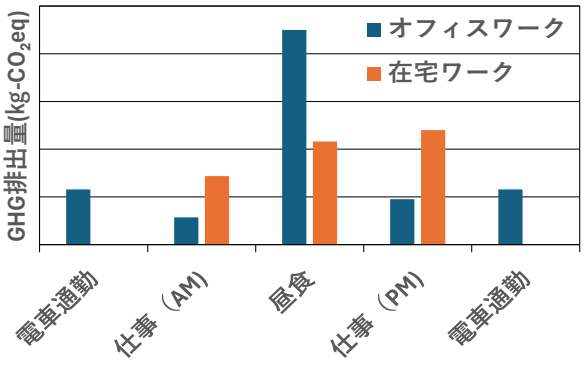


図 2　GHG 排出量

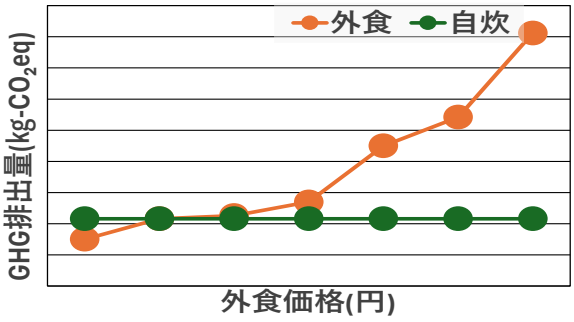


図 3　感度分析結果（昼食）

4. おわりに

本研究では 2 つのライフスタイルの各要素の GHG 排出量を算定、ホットスポット分析を行い、暮らし方の選択肢を考察した。結果・考察でも述べたように、移動手段や距離、食事のメニュー、企業の規模によって GHG 排出量の値は変化する。今後は評価範囲の拡大や本研究とは異なるパターンの要素の GHG 排出量を算定し、ホットスポット分析を行う必要がある。

引用文献

1) 板明果,高瀬浩二,近藤康之,鷲津明由:廃棄物資源循環学会論文誌, 20(2) , (2009), pp.119-132
2) 総務省, “デジタル活用の動向”,令和 5 年版 情報通信白書, https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r05/html/nd24b220.html, (参照 2024-11-27)
3) “スパゲッティ（外食）の値段価格推移”,小売物価統計調査による価格推移, https://www.jpmarket-conditions.com/2112/, (参照 2025-01-04)
4) 増田光一郎, “東京の都心 6 エリアのワーカーの数を可視化したら、意外な事実が見えてきた”,Think!!Shinjuku, https://thinkshinjuku.com/column/291/, （参照 2025-01-04）
5) e-stat,”社会生活基本調査 令和 3 年社会生活基本調査” ,(2022),表番号 1-2

環境に配慮した長期的取り組みの実施効果：東京都大学横浜キャンパスの例

Analysis of Long-Term Environmentally Conscious Initiatives: A case study of Tokyo City University Yokohama Campus

○中本采那[1)]、味岡優斗[1)]、兵法彩*[1)]
Ayana Nakamoto, Yuto Ajioka, Aya Heiho
1) 東京都市大学
* heiho@tcu.ac.jp

1. はじめに

現在、環境に配慮した経営が様々な組織に求められている。例えば、環境省が制定したエコアクション21[1)]は、中小の事業者でも環境経営システムを実現できる第三者認証・登録制度で、PDCAサイクルを備えた国内規格の環境マネジメントシステムである。この取り組みには大学等の高等教育も含まれており、大学等の高等教育に対して環境人材の育成とともに、大きな環境負荷を発生させる事業であるためエコアクション21への参加を求めている。

今回の研究対象とした東京都市大学横浜キャンパスでは、1998年に日本の大学を含む教育機関として初めてISO14001の認証を受け、現在も継続して認証取得している。ISO14001とは1996年に環境マネジメントシステムの仕様として制定され、「経営に環境の要素を取り入れ、環境問題意識とその対応を行うことで、“環境”、“社会”及び“経済”という持続が必要な“三本柱”のバランスを維持し、PDCAサイクル（Plan-Do-Check-Act）を運用すること」[2)]を目的としている国際規格である。また「組織が自社で設定した環境に関する方針や目的に整合して、自社の事業活動屋その結果生まれる製品・サービスが環境に影響を及ぼす影響を管理することによって、健全な環境パフォーマンスを達成し、それを実証できるようにする仕組みの構築を目的とした規格」[2)]である。東京都市大学横浜キャンパスでは、認証取得のために、環境目標を定め、目標達成のための行動をし続けているが、長期的に蓄積したデータ解析はまだ十分に行われていない。そこで本研究は、IS014001認証取得の継続効果を明らかにするために、東京都市大学横浜キャンパスの長期的な蓄積データを分析する。また、今後のISO14001の運営がより効果的かつ有効的に機能するように、現状の到達点・課題点を明らかにする。

2. 研究方法

本研究では東京都市大学ISO14001の環境目標の中で削減目標が掲げられている電気・廃棄物・用紙・水使用量の取り組み事例を調査した。電力消費量については1997年から2023年のデータを使用した。廃棄物・用紙・水使用量のデータについては東京都市大学ISO事務局[3)]に記載されている2006年から2023年のデータを使用した。また設備の交換や設備の利用停止などの情報などを基に電力・廃棄物・用紙・水使用量の増減との関係性を見つけ、長期的なISO14001の運営による影響を考察する。

3. 結果・考察

3.1 電力消費量の推移（1997年～2023年）

電力消費量（図1）は、1997年から増加傾向であるが、学生数の増加により1人あたりの電力使用量は減少傾向であることがわかった。現在に至るまで、全体としては減少傾向であり、特に大きな変化があったのは2011年、2020年となった。2011年は、東日本大震災が起こった年であり震災後の節電対策として、空調、照明、エレベーター、トイレ、給湯器、事務機器・電気機器、エントランス、庭の設備の利用の制限を学内で積極的に取り組んだためと考えられる。2020年に大きく減少した理由は、新型コロナウィルス感染症拡大の影響で、2020年5月18日より講義がオンライン化されたためである。2021年度は対面とオンラインを併用、2022年度からは原則対面となったが2022年、2023年の電力使用量が大きく増加することはなかった。

3.2 廃棄物量の推移（2006年～2023年）

廃棄物量（図2）は2018年以降に若干の減少傾向が確認された。今回の調査では、2018年以降に始めた効果的取り組みは明らかになっていない。参考として廃棄物量削減に関わる2023年に取り組まれたものを挙げると資源回収BOXの設置、分別・再資源化啓発、ごみ混在率調査が行われていた。2020年以降大きな増加はしていないが、同様に削減にも転じていないため、廃棄物量や大学内で発生している廃棄物の特徴を捉えて抜本的に廃棄物量を減らす活動を展開する必要があると考える。

3.3 用紙使用量の推移（2006年～2023年）

用紙使用量（図3）は継続して減少傾向にあると分かる。特に、完全オンライン化となった2020年度に大きく減少し、原則、完全対面講義が再開した2022年度以降も低い状態を保ち続けている。また、2021年入学

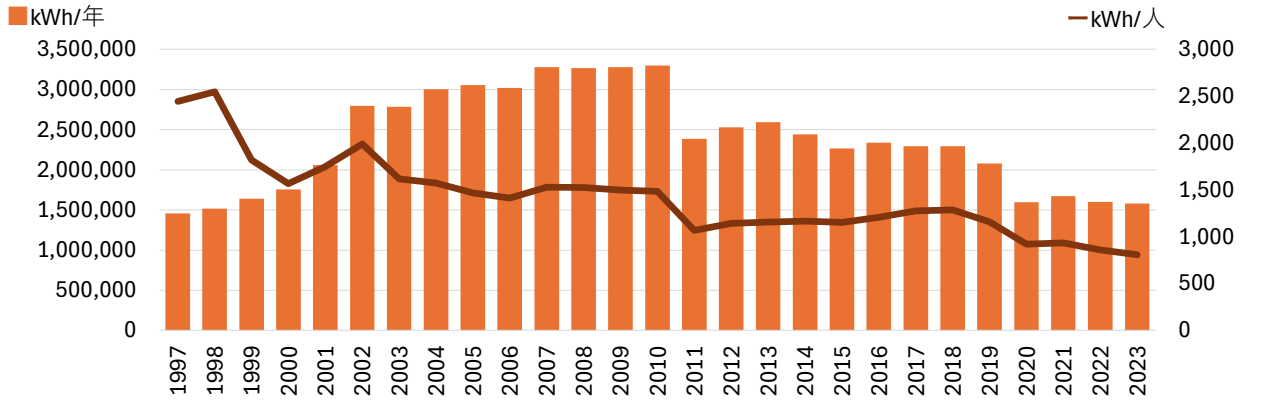


図 1　電力消費量の推移（1997 年度～2023 年度）

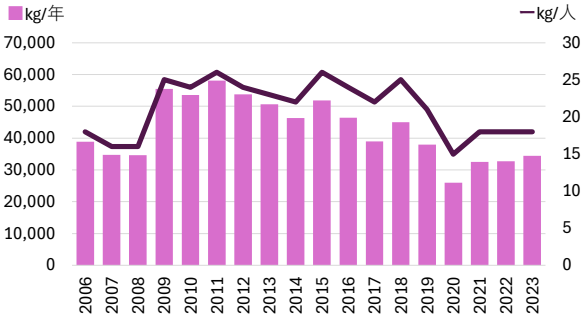


図 2　廃棄物量の推移（2006 年度～2023 年度）

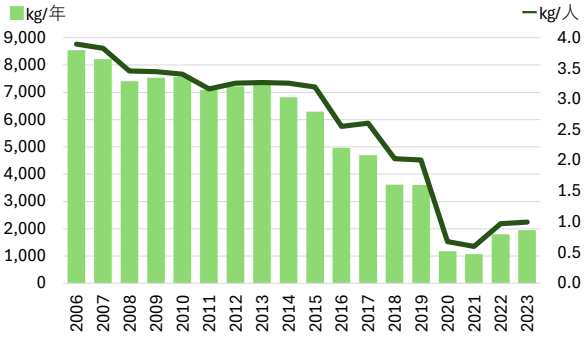


図 3 用紙使用量の推移（2006 年度～2023 年度）

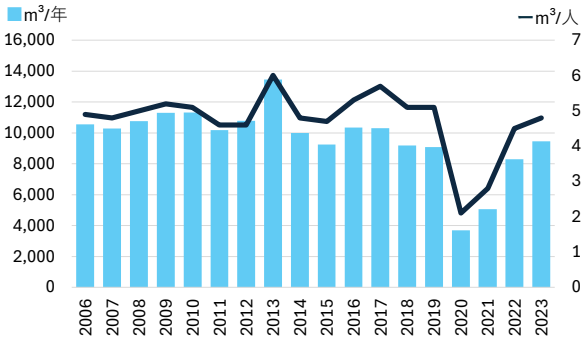


図 4　水使用量の推移（2006 年度～2023 年度）

生からパソコン必携化になり、講義等での資料がオンラインでの共有で、印刷不要になったことも、用紙使用量の削減に貢献していると考えられる。

3.4 水使用量の推移（2006 年～2023 年）

水使用量（図 4）は、2020 年のコロナ禍による影響以外の変化がほぼなく横ばいの状況であると分かる。水使用量の削減のための取り組みとしては、例えば、雨水利用が挙げられるがその効果は十分に表れていないことがわかった。水使用量削減に向けた効果的な取り組みを明らかにするためには、水使用量の内訳を調べ、対策を講じていく必要があると考えられる。

4. おわりに

電力消費量・用紙使用量は長期的にみて減少傾向にあり、廃棄物・水使用量も大きく増加していないことから ISO14001 の実施効果はあると考える。他方、現状では、設備交換や自然災害などの影響による削減であることが明らかになった。今後、大学としてさらに環境経営を展開する上では、教職員・学生の意識改善につながるような取り組みの展開が期待される。

引用文献

1) 環境省,エコアクション 21　大学等高等旧幾向けガイドライン 2017 年版,第一章,(2019),pp1-2
2) 一般社団法人　日本能率協会　審査登録センター, ISO14001（環境マネジメントシステム : EMS）とは？導入のメリットや構築のポイントを解説,入手先 <https://jmaqa.jma.or.jp/index.html>,(参照日 2024-12-23)
3) 東京都市大学 ISO 事務局, “電気・水道等使用量”, 入手先 <https://www.comm.tcu.ac.jp/isooffice/record/data.html>,(参照日 2024-12-23)

化学組成の推定に向けた画像解析に要求される二次資源中の不純物検出モデルの性能評価

Performance Evaluation of Impurity Detection Models in Secondary Resources for Chemical Composition Estimation through Image Analysis

○留永雄星*[1)]、田島圭二郎[2)]、醍醐市朗[1)]
Yusei Tomenaga, Keijiro Tajima, Ichiro Daigo
1) 東京大学, 2) 株式会社 EVERSTEEL
* yusei0615@ g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

鉄リサイクルの促進を阻む主要因の一つとして、不純物元素を含む異物の混入による品質低下の問題がある[1)]。鉄スクラップの状態での不純物組成の把握は、許容濃度を満たす鋼材の生産を容易にし、鉄リサイクルの促進につながると期待される。しかし現状では、鉄スクラップの化学組成の観測には溶解が必要であり、大量に流通する鉄スクラップに対してこの方法を適用することは、コストの観点から現実的ではない。このような背景から、深層学習、特にCNN（Convolutional Neural Network）を用いた画像解析技術の応用が注目されている。物体検出モデルを用いることで、鉄スクラップ中の異物の種類､数､大きさなどの情報を取得し、これらの情報から鉄スクラップ全体の化学組成を推定することが期待される。しかし、鉄スクラップには、機械的変形による形状の不規則性、鉄スクラップ同士の重なりによる物体境界の不明瞭化、異物との視覚的類似性、重層化による部分遮蔽などの物理的特性があり、画像認識技術の適用を困難にしている。実用的な精度で化学組成推定を行うには、これらの特性を考慮した上での物体検出モデルの性能向上が必要である。特に、異物種によって不純物組成が異なることから、異物種ごとの検出物体数の推定誤差を最小化することが重要となる。しかしながら、従来研究の多くは鉄スクラップ全体の分類[2)]、また異物全体の検出[3)]といった点に主眼を置いており、個々の異物種への検出特性の十分な検討がなされていない。そこで本研究では、画像解析を用いた実用的な精度を持つ鉄スクラップの化学組成推定システムを構築する際に物体検出モデルへ要求される性能の評価手法を構築することを目的とする。

2. 研究手法

2.1 研究手法概要

物体検出モデルへの要求性能は、モデルを適用した際の異物種ごとの検出物体数により定量的に評価できる。検出物体数(Nd)とモデルの性能指標であるprecision(p：正解予測の割合)およびrecall(r：正解の検出率)を軸とする三次元空間において、図1に示すように、許容できる検出物体数の範囲と実際の変動を考慮することで、要求性能を定量的に表現できると考えられる。本研究では、各異物種に対する物体検出モデルの検出特性を解明し、その検出特性を考慮した検出物体数の分布を明らかにすることとした。

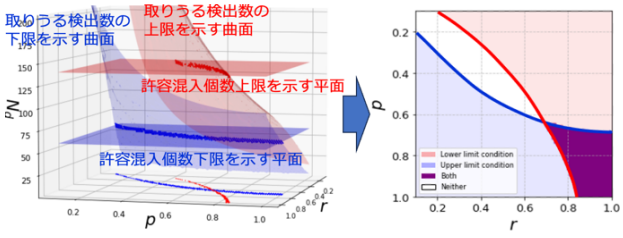


図 1 物体検出モデルへの要求性能評価手法の概要図

2.2 Mask R-CNN の学習と推論の実施

本研究では、物体検出モデルとしてMask R-CNN[4)]を採用した。このモデルは物体検出とインスタンスセグメンテーションを同時に実行可能なフレームワークであり、密集して存在する鉄スクラップ中の異物の個別検出と形状の正確な把握に適している。モデルの学習および推論には、電炉メーカーに搬入される鉄スクラップの荷下ろし工程を撮影した画像データセットを使用した。データセットには、ケーブル、モータ、コンプレッサの3種類の異物に対するアノテーション情報が含まれている。モデルの学習のため、元の大きさの画像のデータセットに加えて、画像を分割したデータセットを作成した。また、可能な限り多くの異物に対する評価を行うため、複数のテスト用データの割り当てパターンでの学習・推論を実施した。

2.3 異物種ごとの特徴と検出特性の分析

異物種ごとの特徴を定量的に把握するため、アノテーションとして付与されたマスク情報とMask R-CNNモデルによって出力されたマスク情報の両方について、色彩と形状の定量的評価を実施した。色彩分析ではHSV色空間を用い、各マスク領域と荷台上の鉄スクラップに対してHSV値の統計量と分布を算出した。形状分析では、マスク面積、縦横比、円形度などの6つ

の特徴量による定量的評価を行った。これらの分析は、アノテーションマスクについては TP と FN に分類した上での比較分析も実施し、推論の結果と FP と出力されたマスクについては定性的な分析も実施した。

2.4 異物種ごとの誤検出物体数分布の分析

本研究では検出物体数の分布特性を理解する上で特に重要となると考えられる、FP 数の確率分布に焦点を当てて分析を行った。異物種ごとの FP 数の確率分布を推定するため、異物のアノテーションを含まない鉄スクラップ画像に対して推論を実行し、各荷台における FP の信頼度スコアを取得した。これにより、物体検出モデルの実運用時における異物種別の検出物体数の分布の導出、分析を行った。

3. 結果と考察

3.1 Mask R-CNN の学習と推論の実施

作成したデータセットを用いて Mask R-CNN モデルの転移学習を実施し、各データセットの検出性能を比較した。異物種別の評価では、ケーブルとモータでは分割ありのデータセットで性能が向上した一方、コンプレッサでは若干の性能低下が見られた。平均的な性能としては分割ありのデータセットを用いたモデルの方が優れており、以降の分析ではこちらを利用した。

3.2 異物種ごとの特徴と検出特性の分析

色彩と形状の両面からの定量的な分析の結果、異物種ごとに特徴的なパターンが明らかとなった。ケーブルは高い色相のエントロピーと明度を示し、形状面では不規則で細長い特徴を持つことが確認された。この結果から、モデルはケーブル特有の細長く不規則な形状特性を適切に学習していると考えられる。モータは最も規則的な特徴を示し、色彩特性は鋼材と最も類似していた。形状特性では円形に近い形状が特徴的であり、特に単純な形状を持つ物体ほど検出率が向上する傾向が見られた。コンプレッサは最も低い明度を示し、形状特性はモータと類似しながらも、より広い分布範囲を示した。特に鋼材に近い明度を持つ個体で検出率が低下する傾向が見られ、明度の差異が検出性能に強く影響することが明らかとなった。

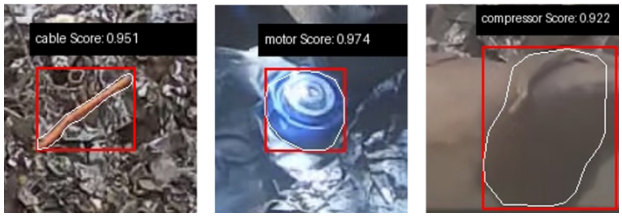


図 2 Mask R-CNN による異物種ごとの誤検出事例

3.3 異物種ごとの誤検出物体数分布の分析

異物種ごとの FP 数の分布を分析した結果、その分布特性は異物種によって異なり、特にコンプレッサは他の 2 カテゴリーと比較して狭い分布範囲を示した。この現象は、鋼材の色彩や積層構造による影の影響で生じる低明度領域が各荷台に一定割合で存在することに起因すると考えられる。一方、ケーブルやモータの誤検出は、特定の形状特徴を持つ鋼材が存在する場合に集中して発生するため、荷台間での FP 数の差異が大きくなった。また、低い FP 数の期待値域では各カテゴリーで異なる分布特性を示す一方、FP 数の期待値増加に伴い類似した分布パターンへと収束する傾向が見られた。これは、信頼度スコアの閾値低下により、各カテゴリーの検出器がより一般的な鋼材の特徴も検出対象として認識するようになったためと考えられる。

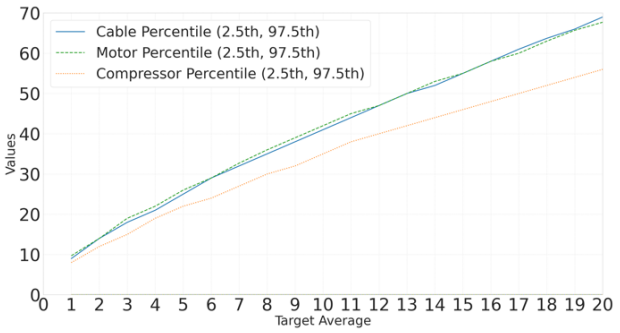


図 3 異物種ごとの FP 期待値に対する検出物体数の変動範囲

4. まとめ

本研究では、異物種ごとの検出特性と検出物体数の分布を解析することにより、鉄スクラップの化学組成推定における物体検出モデルへの要求性能を評価する手法を構築した。解析の結果、異物種の視覚的特徴と鉄スクラップの物理的構造に起因して、異物種ごとに、誤検出物体数の確率分布が異なることを明らかにした。これらの知見は、化学組成推定システムの実用化に向けた要求性能の定量化に貢献するものである。

引用文献

1) Daigo, I., Tajima, K., Hayashi, H., Panasiuk, D., Takeyama, K., Ono, H., Kobayashi, Y., Nakajima, K., Hoshino, T.: ISIJ Int., 61(1), (2021), pp.498-505
2) dos Santos, P. H., Santos, V. de C., Luz, E. J. da S.: "Towards Robust Ferrous Scrap Material Classification with Deep Learning and Conformal Prediction", arXiv, (2024), arXiv:2404.13002
3) Koinig, G., Kuhn, N., Fink, T., Lorber, B., Radmann, Y., Martinelli, W., Tischberger-Aldrian, A.: Waste Manag., 190, (2024), pp.520-530
4) He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., Girshick, R.: "IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)", Venice, (2017), pp.2961-2969

Supporting Information

廃棄物系バイオマスの利用促進に向けた基礎的分析

Preliminary analysis for promoting the utilization of waste biomass

○苗村理咲 [1)]、兵法彩[*1)]
Risa Naemura, Aya Heiho
1)東京都市大学
* heiho@tcu.ac.jp

1. はじめに

日本は、2050 年カーボンニュートラルを目標として、実現するために GHG 排出量の削減・吸収に関しての取り組みを加速している。廃棄物分野の GHG 排出量（2018 年）のうち、焼却が全体の 80.1%[1)]を占めている。また、世界の焼却施設の半分以上は日本となっており、焼却による廃棄物処理の見直しは日本における喫緊の課題となっている。例えば、焼却施設と相性の悪い水分量の多い生ごみは、分別収集することで、バイオガス化し発電・熱利用、堆肥・液肥化に活用することができる。また、バイオマス資源の生ごみを分別・有効利用によって、住民が個々にカーボンニュートラルに貢献することが期待できる。住民による生ごみの分別方法は、市町村によって細かなルールが設定されており、多種多様である。本研究では、廃棄物系バイオマスの利用促進のために、住民が行う生ごみの分別方法の更なる改善に向けて、各市町村で住民が行っている分別方法の違いにより生じる、ごみの排出量や住民の金銭面負担への影響を明らかにすることを目的とする。

2. 方法

本稿では、生ごみ分別に関して 3 種の分析を行った。分別に用いる情報は、市町村や市町村がごみ収集を委託している企業のホームページから収集した。

2.1 各自治体の生ごみ分別方法の分類

全国にある 1741 市町村のうち、生ごみ分別がされている 169 市町村 [2)]を対象に、各自治体の生ごみ分別方法を調査した。調査内容は、家庭から排出するまでに使用する水切り袋等やバケツに関して、自治体の指定の有無、指定袋やバケツに係る費用の有無、排出場所の 3 項目とした。これらの調査項目の結果から、169 市町村を分別方法の特徴に応じて分類した。

2.2 燃やすごみ袋への記名の有無と排出量の関係

全国の生ごみ分別されている 169 市町村を対象に、各市町村の燃やす（可燃）ごみ袋への記名の有無と可燃ごみ排出量の関係性を調査した。各市町村の可燃ごみの排出量は、環境省の一般廃棄物処理実態調査の令和 4 年度調査結果 [3)]にある可燃ごみの収集量の値を用いた。

2.3 生ごみ・可燃ごみ指定袋の価格の分析

169 市町村のうち、有料の生ごみ指定袋を使用している 115 市町村を対象に、市町村が販売する指定生ごみ袋・指定可燃ごみ袋の容量とそれに対する価格を調査した。その調査結果から、容量 1L あたりの価格を算出した。袋の容量の種類が 2 種類以上ある場合は、全種類の平均値をその市町村の容量 1L あたりの価格とした。一世帯がゴミ収集日に出す生ごみと可燃ごみの排出量を設定し、各市町村で生ごみの分別した場合としなかった場合に係るごみ袋の費用を算出し、価格差の計算を行った。

3. おわりに

生ごみを用いたバイオマスの利活用の推進に向けて、169 市町村で行われている生ごみ分別方法の現状を調査し、異なる分別方法により生じる影響を明らかにした。今後は、住民が行う分別だけでなく、市町村が行う回収や処理までを含めた各処理方法の環境影響の分析を展開する。

謝辞

本研究は、環境省・独立行政法人環境再生保全気候の環境研究総合維持費（JPMEERF202304）の成果を含んでいる。

引用文献

1) 環境省：“廃棄物分野における排出量の算定方法について（案）”，環境省，(2021),pp4
2) Aya HEIHO, Ayami Otsuka EcoBalance 2024, 2024/11/05, Miyagi
3) 環境省廃棄物処理技術情報：“令和 4 年度調査結果”，環境省廃棄物処理技術情報，（オンライン），入手先 https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/r4/index.html （参照 2025-01-16）

窒素フットプリントに基づく環境負荷が低く健康的な食事の特徴

Characteristics of a healthy diet with low environmental impact based on nitrogen footprint.

○河嵜唯衣*[1)]、佐藤清香[1,2)]、吉井瑛美[3)]、赤松利恵[1)]

Yui Kawasaki, Sayaka Nagao-Sato, Emi Yoshii, Rie Akamatsu

1) お茶の水女子大学, 2) 高崎健康福祉大学, 3) 長野県立大学

* kawasaki.yui@ocha.ac.jp

1. 背景

窒素循環の崩壊による富栄養化や土壌の酸性化等，地球環境への影響が深刻化している。これを回避するために，窒素循環の崩壊の要因の 90%以上を占める食料の生産・消費のあり方の見直し，特に消費者の食事パターンの変容が不可欠である[1)]。食事パターンの変容は，健康増進と両立して実践する必要がある。

環境中に排出された反応性窒素（reactive nitrogen : Nr）を，個人の食物摂取量やエネルギー消費量から推定する指標として窒素フットプリント（Nitrogen footprint: NF）がある[2)]。先行研究では，窒素フットプリントの少ない食事や[3)]，健康的な食事を摂っている人の栄養素等摂取量の特徴[4)]についての報告があるが，両者を組み合わせ，環境負荷が低く健康的な食事の特徴を検討した報告は少ない。そこで本研究では，NF が低く健康的な食事を摂っている人の栄養素等摂取量の特徴を示すことを目的とした。

2. 方法

2021 年 12 月，調査会社がリクルートした成人男女 600 人（女性 : 50.0%）に，自記式質問紙調査の調査票を郵送した。本研究は，お茶の水女子大学人文社会科学研究の倫理審査委員会の承認を得て実施した（承認番号 2021-7）。

2.1 調査項目

先行研究で妥当性の確認された質問票である，簡易型自記式食事歴法質問票（Brief-type self-administered Diet History Questionnaire: BDHQ）[5,6)] 及び発表者らが作成した質問紙調査の回答から得た年齢，BMI，世帯構成，学歴，世帯年収及び食事・栄養素等摂取量のデータを用いた。BDHQ は，わが国で一般的に摂取されている 54 種類の食品について，過去 1 か月の摂取頻度を 3～9 件法でたずねる。専用の解析プログラムを用いて，1 日当たりの習慣的な食事摂取量を推定できる。

2.2 窒素フットプリントの算出

NF の算出には，環境中に排出された Nr を，個人の食物摂取量やエネルギー消費量から推定する方法である N-Calculator 法[2)]を用いた。N-Calculator 法では，個人の食物摂取量から推定する NF を，摂取した食品由来のたんぱく質を Nr に換算した値と仮想窒素係数（virtual nitrogen factor : VNF）[2)]を掛け合わせて算出する。VNF とは，摂取した食品の Nr に対する，その食品の生産から消費までに環境中に排出された Nr の比率である[2)]。本研究では，BDHQ から得られる食品群別摂取量等のデータを元に，先行研究に基づいて 15 つの食品群とそれに対応する VNF を設定し（表 SI-1），それぞれの食品群から摂取した Nr に（VNF＋1）を乗じたものを合計して NF を算出した。最後に，個人の性別・年齢，身体活動レベル等の対象者の属性による栄養素等の必要量の違いを考慮するために，算出した NF を推定エネルギー必要量（Estimated energy requirements : REE ; 以下の式を使用して算出）で除し，NF/REE を算出した。

REE=基礎代謝基準値（kcal/kg 体重/日）[a]×標準体重（kg）[b]×身体活動レベル

[a] 日本人の食事摂取基準（2020 年版）[7)] より代入

[b] 身長（m）^{2}×22 で算出

2.3 食事バランスガイド遵守得点の算出

健康な食事の指標として，食事バランスガイド遵守得点を使用した[8)]。食事バランスガイド順守得点は，健康な食生活を目指すための食事の望ましい組み合わせと量をイラストで示した「食事バランスガイド」[8)]の遵守度の指標であり，70 点満点で評価される[8)]。本研究では，先行研究の方法[8)]に倣い，BDHQ から算出された食品群別摂取量を用いて，主食，副菜，主菜，牛乳・乳製品，果物，総エネルギー，菓子・嗜好飲料由来のエネルギーの各摂取量を，各 10 点満点として評価して合計得点を算出した。

2.4 統計解析

調査に回答した 538 名のうち（回答率 : 89.7%），妊娠中・授乳中（n=11），質問票の回答不備（n=29）を除外し，498 名を解析対象とした（適格率 : 83.0%）。Shapiro-Wilk の正規性検定の結果，本研究では全ての

変数を正規分布しないものとして扱い，中央値及び四分位範囲（25，75 パーセンタイル）で示した。

NF 及び食事バランスガイド遵守得点に基づき対象者を低群・高群の 2 群に分類し，それらを組み合わせて対象者を以下の 4 群に分類した：低 NF*不健康群（n=125；25.1%）；高 NF*不健康群（n=124；24.9%）；低 NF*健康群（n=124；24.9%）；高 NF*健康群（n=125；25.1%）。カイ二乗検定及び Kruskal-Wallis 検定を用いて，4 群間の属性と栄養素（42 種類）及び食品群別摂取量（16 種類）を比較した。

3. 結果と考察

3.1 対象者の属性

対象者は男性 247 名（48.6%），女性 259 名（51.0%），年齢の中央値（25，75 パーセンタイル値）は 41（30, 50）歳だった（表 SI-1）。NF/REE の中央値は，0.0029 (0.0019, 0.0045) g-N/REE だった。

性別（p<0.001）・年齢（p=0.01）・世帯構成（p=0.005）は，4 群間で有意に異なり，高 NF*健康群では男性の割合が最も少なく（n=43, 34.4%），高 NF*不健康群では年齢が最も高く，低 NF*不健康群では一人暮らしが多い等，世帯構成が最も小さかった。

3.2 NF が低く健康的な食事を摂っている者の栄養素及び食品群別摂取量の特徴

4 群間の栄養素等摂取量及び食品群別摂取量の中央値を表 1 に示す。解析対象としたほとんどの栄養素等で，4 群間に有意差がみられた（p<0.05）。高 NF*健康群と比較して，低 NFP*健康群では，エネルギー，動物性たんぱく質，総脂質，飽和脂肪酸，コレステロール等が低く，炭水化物エネルギー比等が高かった。食品群別にみると，高 NF*健康群と比較して，低 NF*健康群では，卵類の摂取量が少なく，穀類の摂取量が多かった。同じ食事バランスガイド遵守得点が高い者の中でも，低 NF の対象者では，卵類の摂取量が少なく，肉類の摂取量の中央値も低 NFP*不健康群や高 NFP*不健康群より少なかった。これが，過剰摂取が健康増進を妨げる栄養素の摂取抑制に繋がったと考えられる。

4. 結論

本研究の対象者集団における環境負荷が低く健康的な食事は，動物性たんぱく質，総脂質，飽和脂肪酸，コレステロール，肉類，卵類等の摂取量が少なく，炭水化物エネルギー比，穀類等の摂取量が多かった。

5. 引用文献

1) Shibata, H., Cattaneo, L.R., Leach, A.M., Galloway, J.N.: Environ. Res. Lett., 9 (2014) 115013
2) Leach, A.M., Galloway, J.N., Bleeker, A., Erisman, J. W., Kohn, R., Kitzes, J.: Environ. Dev., 1 (1), (2012), pp. 40‐66（2012）
3) 鮫島媛乃, 赤松利恵, 林芙美, 武見ゆかり: 栄養学雑誌，80 (6)，(2022)，pp. 307-316
4) Shimazu, T., Kuriyama, S., Hozawa, A., Ohmori, K., Sato, Y., Nakaya, N., Nishino, Y., Tsubono, Y., Tsuji, I.: Int J Epidemiol. 36(3), (2007), pp. 600-609
5) Kobayashi, S., Honda, S., Murakami, K., Okubo, H., Hirota, N., Notsu, A., Fukui, M., Date, C.: J. Epidemiol., 22(2), (2012), pp. 151‐159
6) Kobayashi, S., Murakami, K., Sasaki, S., Okubo, H., Hirota, N., Notsu, A., Fukui, M., Date, C.: Public Health Nutr., 14(7), (2011), pp. 1200‐1211
7) 厚生労働省: 日本人の食事摂取基準（2020 年版），https://www.mhlw.go.jp/content/10904750/0005/（参照 2025-1-7）
8) Kurotani, K., Akter, S., Kashino, I., Goto, A., Mizoue, T., Noda, M., Sasazuki, S., Sawada, N., Tsugane, S.; BMJ, 352, (2016), i1209

表 1　各群の栄養素等摂取量及び食品群別摂取量の中央値（抜粋；四分位範囲は省略）

栄養素/食品群	単位	低 NF*不健康（n=125）	高 NF*不健康（n=124）	低 NF*健康（n=124）	高 NF*健康 (n=125)	p 値¶
栄養素等摂取量						
エネルギー	kcal	1305^{abc}	1567^{ad}	1596^{be}	1885^{cde}	<0.001
動物性たんぱく質	g	25.3^{ab}	34.5^{ac}	30.1^{bcd}	40.3^{bd}	<0.001
総脂質	g	38.4^{abc}	52.4^{ade}	45.1^{bdf}	60.8^{cef}	<0.001
炭水化物エネルギー比	%	51.7^{a}	48.9^{bc}	57.5^{acd}	53.3^{cd}	<0.001
飽和脂肪酸	g/1000kcal	8	9^{a}	8^{ab}	9^{b}	0.004
コレステロール	mg/1000kcal	196^{a}	224^{b}	168^{abc}	227^{c}	<0.001
食品群別摂取量						
穀類	g/1000kcal	212^{ab}	184^{ac}	240^{bcd}	201^{d}	<0.001
肉類	g/1000kcal	44^{ab}	48^{bc}	35^{ac}	39	<0.001
卵類	g/1000kcal	22^{a}	28^{b}	15^{abc}	25^{c}	<0.001

¶Kruskal-Wallis 検定。　$^{a\sim f}$同じアルファベットを付した群間に有意差あり。

Supporting Information

表 SI-1　NF の算出に用いた食品群ごとの仮想窒素係数（VNF）とたんぱく質摂取重量の計算式

	食品群	VNF	Nr の算出に用いたたんぱく質摂取重量の算出方法
1	穀類	1.5	BDHQ の穀類由来たんぱく質量
2	いも類	4.9	BDHQ のいも類由来たんぱく質量
3	豆類	1.3	BDHQ の豆類由来たんぱく質量
4	野菜類	5.5	BDHQ の野菜類由来たんぱく質量
5	果実類	7.5	BDHQ の果実類由来たんぱく質量
6	きのこ類	0.2	BDHQ のきのこの摂取重量×食品成分表のきのこ（生）のたんぱく質量（19 品目の平均値；1 g あたり）
7	魚介類	0.8	BDHQ の魚介類由来たんぱく質量
8	牛肉 [a]	12.4	BDHQ の牛肉・豚肉摂取重量×食品成分表の牛肉のたんぱく質量（ホルモン・加工品以外の生肉 92 品目の平均値；1 g あたり）/4
9	豚肉 [a]	6.7	BDHQ の牛肉・豚肉摂取重量×食品成分表の豚肉のたんぱく質量（ホルモン・加工品以外の生肉 45 品目の平均値；1 g あたり）×3/4
10	鶏肉	6.0	BDHQ の鶏肉摂取重量×食品成分表の豚肉のたんぱく質量（ホルモン・加工品以外の生肉 15 品目の平均値；1 g あたり）
11	肉加工品	6.7	BDHQ の肉加工品摂取重量×食品成分表の肉加工品のたんぱく質量（ハム・ソーセージ・ベーコン類 21 品目の平均値；1 g あたり）
12	卵類	6.7	BDHQ の卵類由来たんぱく質量
13	乳類	2.7	BDHQ の乳類由来たんぱく質量
14	菓子類	0.2	以下①②③の合計 ①洋菓子・クッキー・ビスケット：BDHQ の当該食品摂取摂取重量×食品成分表の当該食品のたんぱく質量（該当 49 品目の平均値；1 g あたり） ②和菓子：BDHQ の当該食品摂取摂取重量×食品成分表の当該食品のたんぱく質量（せんべいを除く該当 86 品目の平均値；1 g あたり） ③せんべい・スナック菓子・もち・お好み焼き：BDHQ の当該食品摂取摂取重量×食品成分表の当該食品のたんぱく質量（お好み焼きを除く該当 14 品目の平均値 [b]；1 g あたり）
15	調味料香辛料類	0.2	BDHQ の調味料・香辛料類由来たんぱく質量

食品成分表：日本食品標準成分表（八訂）；BDHQ: Brief-type self-administered Diet History Questionnaire（簡易型自記式食事歴法質問票）；NF：Nitrogen Footprint；VNF：Virtual Nitrogen Factor

[a]BDHQ では、牛肉と豚肉の合算として摂取量が算出されるため，国民健康栄養調査（令和元年度）の摂取量を参考に，摂取量比 1：3 と推定した。

[b] お好み焼きは食品成分表に未収載のため除外した。

表 SI-2　4 群の属性の分布

	合計 {n=498; 中央値(四分位範囲)又は n (%)}	低 NF*不健康 (n=125)	高 NF*不健康 (n=124)	低 NF*健康 (n=124)	高 NF*健康 (n=125)	*p* 値¶
性別						
男性	247 (48.6)	79 (63.2)	56 (45.2)	63 (50.8)	43 (34.4)	<0.001
女性	259 (51.0)	46 (36.8)	68 (54.8)	61 (49.2)	82 (65.6)	
年齢	41 (30, 50)	39 (28, 49)[a]	46 (35, 51)[ab]	40 (29, 48)[b]	42 (31, 51)	0.01
BMI	21.0 (19.2, 24.0)	21.6 (19.8, 24.4)	21.3 (19.1, 25.3)	20.5 (18.9, 23.1)	20.9 (19.2, 23.4)	0.053
<18.5	89 (17.5)	16 (12.8)	25 (20.2)	23 (18.5)	24 (19.2)	
18.5-25.0	321 (63.2)	83 (66.4)	66 (53.2)	85 (68.5)	80 (64.0)	0.052
25.0<	95 (18.7)	26 (20.8)	33 (26.6)	15 (12.1)	21 (16.8)	
世帯構成 (0:一人暮らし～3:3・4 世帯世代)	2 (1, 2)	1 (0, 2)[abc]	2 (1, 2)[a]	2 (1, 2)[b]	2 (1, 2)[c]	0.005
学歴(1:小学校・中学校～4：大学・大学院)	4 (3, 4)	4 (2, 4)	4 (2, 4)	4 (3, 4)	4 (3, 4)	0.782
世帯年収(1:200 万円未満～6：1000 万円以上)	3 (2, 5)	3 (2, 5)	4 (2, 5)	3 (2, 4)	4 (3, 5)	0.284

¶カイ二乗検定及び Kruskal-Wallis 検定。
[a~c] 同じアルファベットを付した群間に有意差あり。

産業施設への大規模焼却熱利用に関するシナリオ分析
～CCU 導入と電力排出係数変化の影響～

Scenario analysis of large-scale incineration heat utilization in industrial facilities
～Effects of CCU introduction and changes in electricity emission factor～

○中川岳*[1)]、大西悟[2)]、藤井実[2)]、橋本征二[1)]
Gaku Nakagawa, Satoshi Ohnishi, Minoru Fujii, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学, 2) 国立環境研究所
* ce0044re@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

カーボンニュートラル(以下 CN)に向けて、産業部門、特に素材産業における脱炭素は緊緊の課題である。一方、一般廃棄物焼却施設における発電効率は平均で 14%程度[1)]であり、廃棄物が持つエネルギーを十分有効活用できていない。このようなことから、廃棄物の焼却熱を石油化学コンビナート等の製造プロセスで高効率に利用することが、GHG 削減の観点から有効と考えられる[2)]。本研究では、堺・泉北コンビナートの近隣に大規模な焼却施設を建設、焼却熱をコンビナートに直接供給することを想定し、その CO_2 排出量・事業コストを推計した。本稿では、既報[3)]に対し、CCU 導入と電力排出係数の変化を考慮した。

2. 方法

2.1 シナリオの設定

コンビナート近隣自治体の焼却ごみ量に関する2050年までのシナリオ(BAU・ごみ減少)を作成し、2035 年を対象に 2 つの廃棄物処理ケース(建替・統合)を想定した。建替ケースでは、対象自治体の焼却施設を全て更新し、従来通りごみ発電によりエネルギー回収を行うものとした。統合ケースでは、コンビナートに新規の焼却施設を建設、近隣26 自治体の一般廃棄物を全て当該焼却施設に搬入し、コンビナートへの熱供給によりエネルギー回収を行うものとした。さらに統合ケースでは、CCU を実施する場合を想定し、表に示すシナリオ S1-S6 を作成した。

2.2 CO_2 排出量とコストの推計

CO_2 排出量については、施設の建設、廃棄物・残渣の輸送、施設での電力消費、廃棄物の燃焼に係る排出量、及びエネルギー回収による排出削減量を推計した。コストについては、施設の建設、廃棄物・残渣の輸送、保管、焼却に係るコスト及びエネルギー回収による売上を推計した。

表　シナリオの概要

	焼却ごみ量	処理ケース	CCU の実施
S1	BAU	建替ケース	×
S2		統合ケース	×
S3			○
S4	ごみ減少	建替ケース	×
S5		統合ケース	×
S6			○

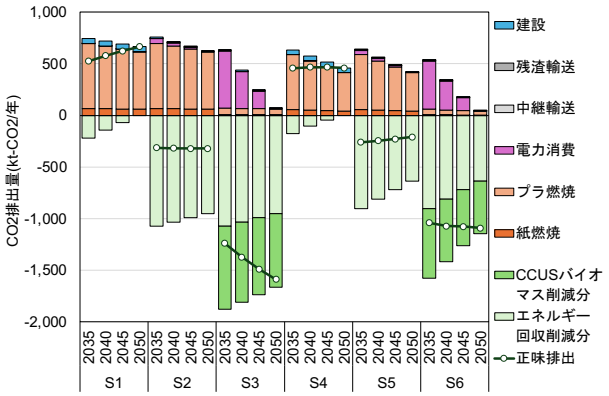


図　各シナリオにおける CO_2 排出量の推計結果

3. 結果と考察

図に示すように、各シナリオにおける正味排出量は、建替ケース(S1、S4)、統合ケース(S2、S5)、CCU 実施統合ケース(S3、S6)の順となった。統合ケースでは、中継輸送による排出量が僅かに増加するものの、エネルギー回収による排出削減量は約 5 倍(2035 年)と推計された。S3 と S6 では、CCU によって、燃焼による排出量の 9 割が削減されるが、電力消費による排出量が約 10 倍に増加した(2035 年)。また、バイオマス起源の CO_2 も回収されるため、削減効果が大きくなった。一方、2035 年から 2050 年にかけて、電力排出係数が減少することにより、建替ケースでは正味排出量が年々増加したが、統合ケースでは減少した。いずれにしても、産業施設での熱利用による効果が高いことが示された。事業コストの推計結果については学会当日報告する。

謝辞：本研究は、環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20223C02)による成果である。

引用文献

1) 環境省：一般廃棄物の排出及び処理状況等(令和３年度)、2023
2) Fujii et al.: Resources, Conservation and Recycling, 149, 586-594, 2019
3) 中川ら：第 35 回廃棄物資源循環学会研究発表会 講演原稿、D4-4-O、2024

製品用途に依存しない金属素材自体の持続可能性を定量評価する指標の構築

Establishment of an index to quantitatively evaluate the sustainability of metal materials themselves, regardless of product use

○三浦優太*[1)]、武山健太郎[1)]、星野岳穂[1)]
Yuta Miura, kentaro Takeyama, Takeo Hoshino
1)東京大学大学院
* yutabaseball0307@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1,緒言

製品や企業等の「持続可能」な開発の実現に向けた各種対策の進捗状況を定量的に評価することの必要性が高まり、その評価手法の確立が求められている[1]。評価対象となる製品は、機械製品やシステムだけでなく、製品を構成する「素材」にも拡大しており、素材自体に着目した持続可能性の評価手法が必要となる。持続可能性の明確な定義に関する議論は多くなく[2]、「持続可能性」の定義は一意には定まっていない[3]のが現状である。

「製品」を対象とした持続可能性の評価手法としては、LCSA (Life Cycle Sustainability Assessment)が提案されている[1]。また素材を対象とした評価手法として、素材の製造プロセスやその素材を使用した製品の持続可能性からその素材そのものの持続可能性を評価する手法が提案されている[5][6]。しかしこれらの手法は素材そのものの持続可能性に要求される要素の一部しか評価できていない[4]。そのため、素材の用途に依らず、素材そのものに着目した評価手法の確立が必要である。用途を限定せず評価手法を確立することで、素材を選択する需要者だけでなく、素材生産者にとっても素材の開発指針として有用となる。本研究では、金属素材に着目をし、金属素材の持続可能性に必要な要素を網羅的・体系的に整理し、金属素材固有の要素を考慮した持続可能性評価の指標を開発することを目的とする。

2,評価軸の決定

1 つ目のステップとして、金属素材の持続可能性に関連する 43 件の論文を対象とした文献調査を実施した。金属素材の持続可能性評価に必要な評価軸の要素として、頻度の高さから、「リサイクル性」、「環境への影響」、「供給安定性」の 3 つが抽出された。これらを金属素材の持続可能性を評価する上で欠かせない 3 つの柱と考え、これら 3 面の達成度合いによって金属素材の持続可能性を定量評価した。

3,各指標の準備

素材のリサイクル性については、先行研究[7][8]に基づき、定量的な評価が可能である人為的要素 1 つ「①素材の循環」と物理的要素 3 つ「②リサイクルによる材料の劣化」「③選別のしやすさ」「④環境上の利点」の 4 つをリサイクル性の小要素として、これらを評価する指標を準備した。①に対しては、2000-2016 年の日本における使用済み回収率の平均値[9]を指標として用いることとした。②に対しては、材料の機能を価格で評価できるものと仮定をして、2016-2020 年のアメリカにおけるバージン材の価格に対するリサイクル材の価格の比[10]を指標として用いる。③については、スクラップへの異材の混入を回避のための物理選別のしやすさを素材の物性値[11]を用いて評価する。④は、対象材料を一次資源・二次資源からそれぞれ 1 t 製造した場合の環境影響の比から評価を行う。本研究では環境影響の評価値としてとしてエンドポイント評価値[12][13]を使用した。人為的要素の評価値と物理的要素の評価値の平均値を、リサイクル性の評価値とする。

素材の供給リスクは、先行研究[12]に従い「地質学的リスク」「地政学的リスク」「社会学的リスク」を各 2 要素、合計 6 要素に分解を行う。各要素について元素ごとに評価値を得たのちに、合金組成で加重平均をとって合金種ごとの評価値を得る。6 要素

の評価値の平均値を供給安定性の評価値とする。

素材の環境への影響評価は、先行研究[13]より元素毎のエンドポイント評価値を得たのちに、合金組成で加重平均し合金種毎の評価値を得た。

その後、先行研究[12]に従い正規化を行って得た値を環境への影響の評価値とする。「リサイクル性」「供給安定性」「環境への影響」の 3 つの評価値の平均値を持続可能性の評価値とする。

4,ケーススタディと考察

2.2 で準備したリサイクル性の指標を、Fe, Cu, Al, Mg を母材とする合計 48 種類の合金種にそれぞれ適用し、合金種に持続可能性の定量評価を行った。母材ごとに合金の添加がない 4 素材の、「リサイクル性」2 項目、「供給安定性」3 項目、「環境への影響」の計 6 項目の評価値について図 1 に示す。普通鋼とアルミ 1000 系の評価値が全体的に高い。Mg 系合金は国内において、リサイクルが行われていないことから、評価値が 0 となっている。純銅は「環境への影響」の評価値が相対的に低くなっている。

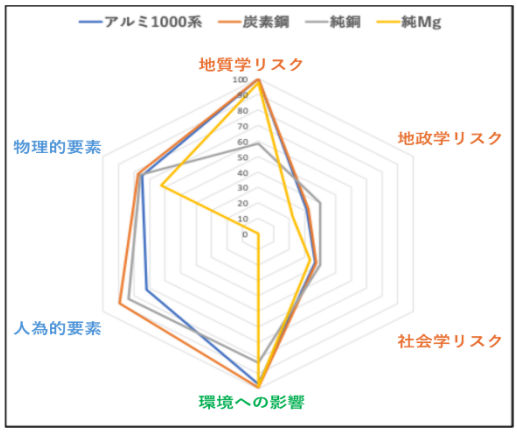


図 1　合金の添加がない素材の評価値

4.1 金属素材の開発指針についての考察

次に銅素材に着目し、各合金種の「供給安定性」、「環境への影響」、「リサイクル性」の評価値と、総合評価値、引張強度、銅以外の合金成分を表 1 に示す。純銅については評価値を示し、その他の合金は純銅の評価値との差分を示した。

まず銅素材の強度向上を重視した場合には、添加元素は Ti の選択が最も好ましく、次いで Sn, その次に Ni と Zn が同程度で最後に Fe である。評価値を考慮した場合には、Ti の選択が最も好ましく、次いで Sn と Ni が同程度でその次に Zn である。よって材料に同程度の強度を求める際は、添加元素 Ni と Zn では、Ni の選択することが持続可能の観点から好ましいという評価が得られた。また、Sn は Ni を添加した場合と比較して、評価値とトレードオフの関係にはならない。

表 1 Cu 系素材の評価値の変化

	合金成分	引張強度	I SUSTAIN = (I RECY+ I SR+ I ENV)/3			
			I SUSTAIN	I RECY	I SR	I ENV
純銅		334	(69.62)	(79.76)	(46.16)	(82.95)
鉄入銅	Fe2, Zn2	445	+0.27	+0.35	+0.17	+0.30
黄銅系	Zn10, Sn2	522.5	+0.54	+1.12	-0.33	+0.83
Ni-Sn系	Ni9, Sn2	517.5	+0.55	+1.43	-0.31	+0.54
リン青銅	Sn8	647.5	+0.54	+1.40	-0.18	+0.39
チタン銅	Ti3	832.5	+0.60	+1.36	+0.23	+0.21

5,まとめ

金属素材の持続可能性を評価する指標を構築した。また、ケーススタディとして基盤材料の合金種へ指標の適用を行い、金属素材の開発指針として本研究の指標が有用であることが確認できた。

6,参考文献

[1]T.Tasaki, R.Tajima, K.Shobatake, K.Tsuda: Journal of Life Cycle Assessment , 8, 2012, 272-281
[2]C.Wulf, J.Werker, C.Ball, P.Zapp, W.Kuckshinrichs: Sustainability, 11, 2019, 5717
[3]S.Bell, S.Morse: Sustainabiility Indicators, 2008
[4]N.Kulachenkov, Q.Haar, S.Shipilovskikh, A.Yankin, J.Pierson, A.Nomine, A.Milichko Advanced functional Materials, 32, 2022, 1-16
[5]K.Saur, A.Fava, S.Spatari:Environmental Progress, 2000, 73-82
[6]L.Smith, Liberty Speciality Steels, 2020, 123
[7]A.Yannis, S.Kouikoglou, X.Zhu:Journal of Intelligent and Robotic Systems, 55, 2009, 21-38
[8]日本鉄鋼連盟「鉄鋼製品の LCI 計算法の国際標準化と同計算法に基づく LCI データベースの整備および普及活動」,2019
[9]中駄将人　本学修士論文(2019)
[10]US Geological Survey. Minerals Yearbook
[11]衛然　本学卒業論文(2018)
[12]T.E.Graedel, E.M.Harper, N.T.Nassar, P.Nuss, K.Reck., PNAS, 112, 2015, 4257-4262
[13]M.Goedkoop, R.Heijungs, M.Hujibregts, A.Schryver, J.Strujis, R.Zelm:Recipe 2008 Main Report

全国自治体の地域特性を考慮した気候変動リスクの評価枠組み構築評価

Development and Evaluation of a Framework for Assessing Climate Change Risks Considering Regional Characteristics of Municipalities Nationwide

○井田新*[1)]、栗栖聖[1)]、福士謙介[1)]
Arata Ida, Kiyo Kurisu, Kensuke Fukushi
1) 東京大学
* ida@env.t.u-tokyo.ac.jp

1. 研究の背景と目的

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は地球温暖化の着実な進行と、我々の生活環境への影響を指摘している。日本においては気候変動適応法が地域レベルでの対応を求めており、各自治体では自然的・経済的・社会的状況に応じた適応が必要とされている。しかしながら地域の気候変動適応計画は都道府県単位で大きく進む一方で, 市区町村単位では2025年1月現在1,724自治体中 270 自治体に留まる現状がある。馬場ら[1)]は気候変動適応計画策定に向けた課題のひとつとして、部署間での職務分掌や優先度に関する認識の違いを指摘しており、多様な気候変動影響への共通認識を築くことが難しいことがわかる。戸川ら[1)]も指摘するように、既往研究の多くは農業や社会基盤といった個別分野への気候変動影響評価に留まり、自治体の気候変動影響やリスクを総合的に評価する研究は少ない。自治体単位での適応を進めていくうえで、各自治体がリスクを総合的かつ多角的に把握できるような枠組みが必要といえる。

そこで、本研究では日本全国の 1,741 の市区町村を対象に、気候変動へのリスクを分野横断的に評価する枠組みを構築することを研究目的とした。特に、自治体規模に依存しないリスク指標を定め、自治体間でのリスクの相互比較および自治体内での弱点を明らかに出来る枠組みの構築を目指した。

2. 評価の枠組みの構築

評価対象とする気候変動影響については、環境省の気候変動影響評価報告書[2)]において気候変動影響が確認されている分野を対象に、農業、水産業、観光業、社会基盤、健康の 5 分野を選定した。その上で各分野について、表 1 に示す評価対象を定めた。対象分野の選定においては、特に自治体規模での影響が懸念され、その対応において自治体の占める役割が大きいと考えられるものを評価対象項目として選定した。

表 1 ：本研究におけるリスク評価対象一覧

分野	評価対象
農業	・耕種作物（53 種）の収量低下
	・家畜生産物の低下
林業	・木材における収量低下
水産業	・回遊性魚介類の漁獲量低下
観光業	・砂浜減少によるビーチレジャー衰退
	・自然雪減少による雪上レジャー衰退
社会基盤	・家屋の浸水被害
	・交通インフラの浸水被害
健康	・暑熱による死亡者数の増加
	・感染症による死亡者数の増加

また、気候変動リスクについて、A)気候変動影響の将来変化を軸に、リスクを左右する要素として B)分野固有の因子と C)自治体固有の因子に注目した。ここで A)影響変化は、例えば、農業であれば気候変動影響予測結果に基づく作物収量の変化率がこれにあたる。B)分野固有の因子とは、IPCC のフレームワークでは曝露や感受性として捉えられる因子である。ヒトやモノの存在を相対的な割合で捉え、地域としての依拠度を測る指標や、産業自体の脆弱性を測る指標などが該当する。なお、IPCC や一般的なリスク評価においては曝露量として絶対量を乗ずるが、ここでは自治体間の相対比較を可能とするため、自治体規模当たりの値のように相対的な指標を採用した。C)自治体固有の因子とは、自治体の人的資源や経済的資源の豊富さといった自治体の潜在的な能力を測る指標であり、IPCC のフレームワークでは適応能力として捉えられる。

本研究では表 1 に示す各項目について，上記 A) に B）を乗じた値を C）で除することでリスク値を求めた。

3. 結果の可視化

本研究では自治体への情報提供を念頭に、上記のリスク算出結果を自治体別の気候変動リスク評価シート

へとまとめた。このシートは自治体の担当者が自身の自治体における気候変動リスクの実情を理解することを促し、実態に沿った認識の醸成や効果的な適応策の立案を後押しするものとして想定した。また本研究ではリスク偏差値の算出や、その数値のレーダーチャートによる可視化など、情報の提供方法についても検討した。

例えばA市のリスク評価結果として、農業以外の分野について図1のようなレーダーチャートを作成した。ここで、偏差値の高い項目はリスクが低いことを、偏差値の低い項目はリスクが高いことを示す。

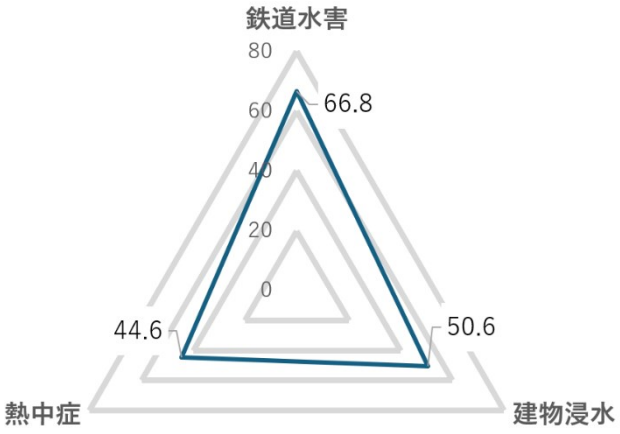


図 1：A市における分野別気候変動リスク偏差値

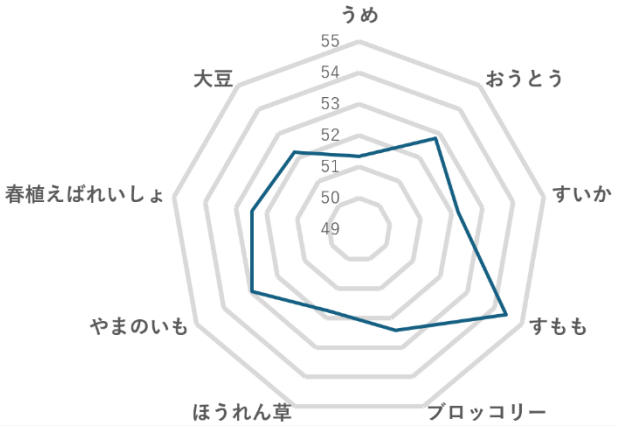


図 2：A市における作物別気候変動リスク偏差値

図1は気候変動影響が悪化すると認められる分野についてのみ抽出したものである。対象となる分野について同市のリスク値を分野毎に偏差値化し、そのリスクを視覚的かつ直感的に理解できるようにした。図2は農業分野のみを取り出して53種の作物の内、気候変動影響が悪化すると認められる作物のリスク値を作物別に偏差値化して一つのレーダーチャートにまとめたものである。

A市の分野別気候変動リスク偏差値をまとめたレーダーチャートからは、熱中症のリスクが高いことがわかる。熱中症リスクは、1) 熱中症搬送者数変化率、2)幼児高齢者割合、3)人口当たり病床数、4)自治体の人的/経済的資源の4項目で評価した。A市における1)熱中症搬送者数変化率は全国で138位、2)幼児高齢者割合は全国で1184位、3)人口当たり病床数は全国で133位、4)自治体の人的/経済的資源は全国で1471位である。2)幼児高齢者割合が低く、3)人口当たり病床数が高いことはリスクを低下させる要因だが、1)熱中症搬送者数変化率の高さと、4)自治体の人的/経済的資源の乏しさがリスクを高めている。

本フレームワークでは，このように，リスクやリスク偏差値という大局的な値を項目別に細分化して分析していくことで、その自治体の強みと弱みを把握できる点が優れている。ブレイクダウンが可能なフレームワークでは、熱中症リスクを下げるためには1)を下げるための取り組みが重要だという判断や、4)を強化する予算のつぎ込みが必要だという判断を下すことが可能になる。

完成したリスク評価シートについては実際に自治体の担当者へとヒアリングを行うことで、その効果を検証しながらシートの改良へとつなげる。発表では各自治体における評価例とともにリスク評価結果の詳細、ヒアリング結果より得られた知見などを示す。

謝辞:本研究は (独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費(S-18-4(1), JPMEERF20S11815) により助成を受けた。

引用文献

1) 馬場憲司, 工藤泰子,渡邊茂,永田裕,田中博春,田中充, 土木学会論文集 G, 74(5), (2018), I_405-I_416
2) 戸川卓哉, 高野剛志, 森田紘圭, 大場真R.C.Estoque,近藤美沙希, 土木学会論文集 G, 76(5), (2020), I_461-I_470.
3) 環境省 (2020) 気候変動影響評価報告書(総説).

コーヒー豆炭火焙煎のカーボンフットプリント

Carbon Footprint of Charcoal Roasting of Coffee Beans

○村口颯*[1)]、渕上智子[1)]、中野勝行[1)]
Sou Muraguchi, Tomoko Fuchigami, Katsuyuki Nakano
1) 立命館大学
ps0590es@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

コーヒーは現在世界中で愛される嗜好飲料であり、その消費量は年間 42 万トンにのぼる。そしてコーヒーは豆が収穫されてから様々な工程を経て我々のもとへ届き、その過程において多様な環境負荷が生じている。その中でも、コーヒー豆の焙煎工程はエネルギー消費が多く、温室効果ガスの排出が顕著な段階の一つである。焙煎時の熱源としては、現在化石燃料が一般的に使用されているが、一部では、炭火を用いた焙煎が行われている。しかし、これら二つの熱源が環境に与える影響についての定量的な比較評価は十分に行われていない。本研究では、焙煎時に使用される熱源の違いが温室効果ガス排出量に与える影響を評価することを目的とした。

2. 分析手法

2.1 機能単位とシステム境界

本研究ではコーヒー製品製造工場から商業生産工程のデータ提供を受け、研究を進めた。機能単位はドリップパック 1 個（コーヒー粉 10g/個）の製造に設定した。システム境界は、コーヒー生豆の栽培・加工・輸送から焙煎、梱包までを対象とした。特に焙煎時の熱源燃料の違いによる環境影響を評価対象とした。

2.2 評価プロセス

図 1 に本研究でデータを収集した製造過程の概要を示す。焙煎段階の A、B、C はそれぞれ熱源に都市ガス、炭、軽油を使用する焙煎である。さらに、都市ガス使用の焙煎 A では A1、A3、A9 の 3 台の焙煎機によるデータを収集し、炭使用の焙煎 B では B4、B5 の 2 台、軽油使用の焙煎 C では C2 の 1 台のデータを収集した。各焙煎機への生豆（グリーンビーンズ）投入量を表 1 に示す。焙煎工程では、焙煎機の動力に資する電力、熱源の燃料、そして脱臭・脱煙のための燃料を消費する。炭には備長炭とオガ炭を使用する。

表 1　各焙煎機への生豆投入量(単位：kg)

A1	2,845,047	B4	175,426
A3	222,449	B5	27,134
A9	2,339,366	C2	525,077

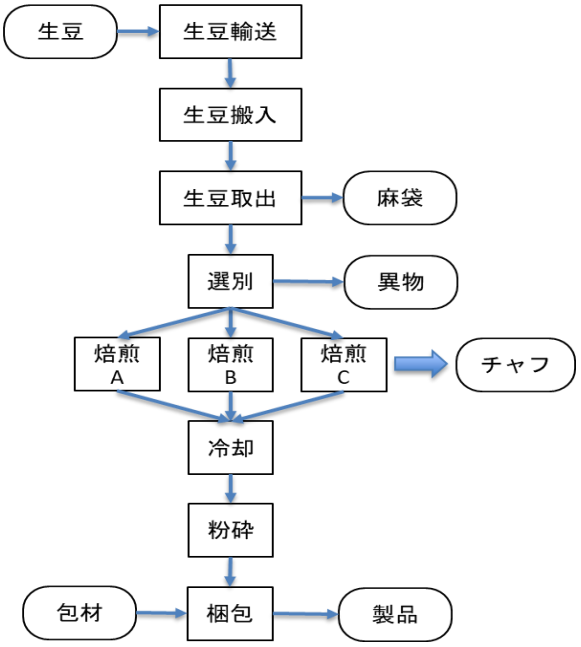


図 1 ドリップパック製造過程フロー図

2.3 評価データ

今回収集したデータは商業生産の二次加工（取出・選別・焙煎・粉砕・梱包）工程に係る実データである。使用された生豆の種類や一次加工方法（湿式/乾式）等は単一ではない。そのため生豆の GHG 排出係数はレビュー文献[1)]を参照し、直接土地利用変化の評価の有無も含め多様な評価事例を総合して示された 0.15～14.5 kg-CO_2e/kg（中央値 3.6 kg-CO_2e/kg）を用いた。また、電力や燃料等の排出係数には IDEA v3.4[2)]を参照した。

3. 結果と考察

GHG 排出量の評価結果を図 2 に示す。いずれのケースもドリップパック 1 個の CFP はほぼ同じ値を示し、生豆の排出係数に中央値を採用した場合で、0.098～0.104 kg-CO_2e/個となった。梱包の原材料負荷が 23%、廃棄負荷が 16%を占めた。梱包材を除いたコーヒー粉あたりでは、二次加工工程は 13%を示した。

二次加工工程のみの結果を図 3 に示す。焙煎燃料に軽油を用いた C2 で最も高い排出量を示し、都市ガス

を使用した A3, A9 では低い排出量を示す傾向が見られた。図 4 に二次加工工程のユーティリティーごとの GHG 排出量を示す。焙煎燃料の負荷は炭の場合が最も小さく、都市ガス、軽油の順に大きくなった。一方で、焙煎燃料と同等以上に脱臭・脱煙の燃料の寄与が大きいことが見て取れた。各ケースの燃料条件は表 2 の通りである。焙煎燃料に炭を使用するケースでは、脱臭・脱煙に多くの燃料を消費する傾向があり、その結果、焙煎工程トータルでは炭焙煎による負荷削減効果が見えなくなる結果となっていることが分かった。また、焙煎機の処理量の影響については、A3 と A9 の比較から、処理量が小さい焙煎機でエネルギー消費量が少ない結果となった。これには焙煎機の熱効率等の影響が考えられる。

表 2　各焙煎機の燃料条件

A1	焙煎：都市ガス	脱臭・脱煙：軽油
A3	焙煎：都市ガス	脱臭・脱煙：無
A9	焙煎：都市ガス	脱臭・脱煙：無
B4	焙煎：炭	脱臭・脱煙：軽油
B5	焙煎：炭	脱臭・脱煙：都市ガス
C2	焙煎：軽油	脱臭・脱煙：軽油

4. まとめ

商業生産のコーヒー豆二次加工工程の実データを収集することで、コーヒー粉製品の GHG 排出量の評価を行った。ドリップパック 1 個あたりの CFP は、梱包材の影響が大きく、焙煎条件によらずほぼ同じ値となった。コーヒー粉における二次加工工程の負荷は 13%であり、この工程の負荷削減を検討することは有意義であることが示唆された。焙煎工程の燃料による影響を仔細に見ると、炭の使用は焙煎の負荷を大きく削減するが、同時に必要となる脱臭・脱煙のための燃料消費により削減効果が相殺される可能性があることがわかった。商業生産であるが故に不可欠となる脱臭・脱煙工程が、製品の環境負荷に少なからず影響を与えることが示された。焙煎工程のエネルギー消費を実験的に調査した先行研究 [2]では、生豆の水分含有量や焙煎度が影響することが示されている。今後は生豆および焙煎豆のスペックを特定したデータ収集を進めていく必要がある。

熱源および脱臭･脱煙の燃料の選択と最適化が環境負荷軽減に寄与することが明らかとなった。また、廃棄物由来の資源を活用した炭の利用は、持続可能な焙煎方法と考えることができるが、全体最適化により環境負荷削減効果の発現が見込まれる。

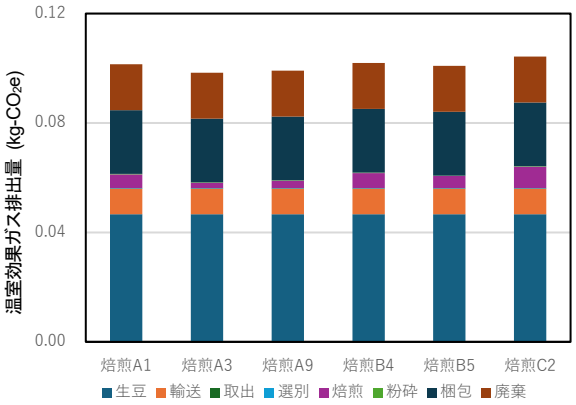


図 2　ドリップパック製造までの GHG 排出量

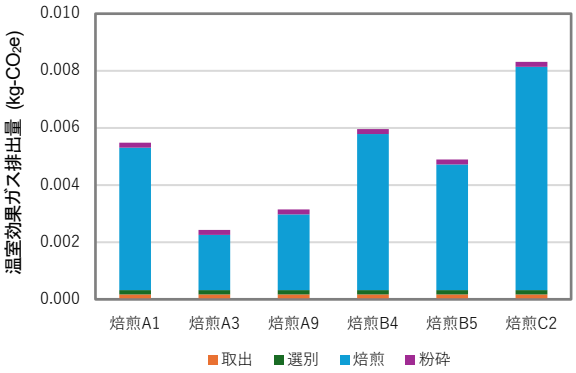


図 3 二次加工工程における工程別 GHG 排出量

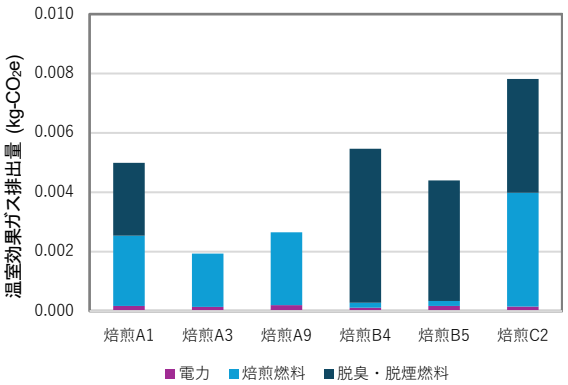


図 4 二次加工工程の燃料・電力別 GHG 排出量

謝辞

本研究のデータ収集にあたり、株式会社ユニオンコーヒーロースターズの皆様にご協力いただいた。

引用文献

1) Cheron-Bessou, C. et al.: Sustain. Product. Consump., 47, (2024), pp.251-266
2) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ: “LCI データベース IDEA version 3.4”, (2024)
3) Irawan A., Mclellan B.C.: J. Engineer. Sci. Tech., 19(2), (2024), pp.60-72

森林の炭素蓄積変化を考慮した木材利用による GHG 排出削減効果の評価

Assessment of GHG emission reduction effects of wood use considering changes in forest and wood carbon stocks

○林亮介*[1)]、橋本征二[2)]
Ryosuke Hayashi, Seiji Hashimoto
1)立命館大学大学院, 2)立命館大学
* ce0027xf@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

温室効果ガス(GHG)の削減は世界共通の課題であり、日本では、2030 年度において 46%の削減(2013 年度比)を目指すこととしている。木材は、再生可能な資源であり、カーボンニュートラルな性質を持ち、炭素を貯蔵することができることから、木材により炭素強度の高い建築材や化石燃料を代替することで、GHG の排出削減に貢献することができると考えられる。Lippke et al.[1)]は、森林管理と木材利用による GHG 排出削減に関する近年の研究をレビューしているが、森林は国によっても異なり、日本の条件下での GHG 削減効果の分析も行う必要がある。本研究では、森林・木材の炭素蓄積変化を考慮し、木材を代表的な利用先である建築材に利用した場合と、木質バイオマス発電の燃料としてエネルギー利用した場合[2)]の GHG 排出低減効果の評価を日本の条件下で行い、GHG 排出低減に効果的な森林の利用方法について考察した。

2. 方法

本研究では森林の伐採(主伐、間伐)による森林・木材の炭素蓄積変化を考慮し、木材の建築材代替・エネルギー代替による GHG 排出削減効果を評価する。具体的には、森林の炭素貯蔵量(t-C)、建築材の炭素貯蔵量(t-C)、木材の建築材利用による炭素排出回避量(t-C)、木材のエネルギー利用による炭素排出回避量(t-C)を考慮し、以下のシナリオで正味の炭素排出削減効果を評価する。

① 主伐、間伐を行い、収穫した主伐材を建築材利用し、収穫した間伐材をエネルギー利用する。
② 主伐、間伐を行い、収穫した木材をすべてエネルギー利用する。

また、以下の条件で分析する。

- 木質バイオマスの種類と主伐周期：スギ、40 年
- 初期状態：面積 40ha、40 区画の法正林で、最大林齢が 40 年生
- 歩留まり：建築材利用:50%、エネルギー利用:80%
- 建築物の寿命：木造、非木造ともに 50 年

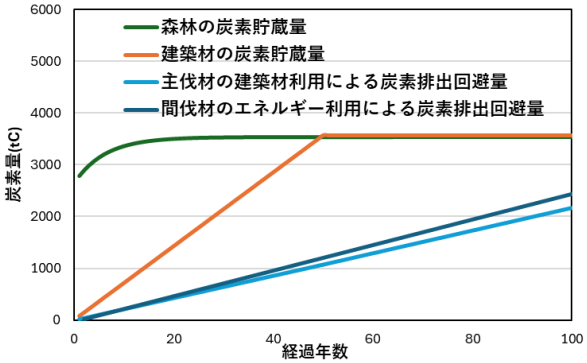


図　主伐、間伐を行い、主伐材を建築材利用、間伐材をエネルギー利用した場合の各炭素量の推計結果

3. 結果および考察

本要旨では、①のシナリオにおける各炭素量の変化の推計結果を図に示す。建築物の寿命が 50 年であるため、建築材の炭素貯蔵量は経過年数が 50 年以降で一定となり、森林の炭素蓄積量と同等になると推計された。建築材利用の歩留まりを 50%としていることから、40 年経過した時の建築材の炭素貯蔵量が、本研究で想定する法正林の地上バイオマスの炭素貯蔵量に同等となると考えられ、地下バイオマスも考慮すると、妥当な結果である。また、建築材利用による炭素排出回避量と間伐材のエネルギー利用による炭素排出回避量は単調に増加し続けることとなり、長期的にはこの効果が大きくなると考えられる。

謝辞：本研究は、環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20223C02)による成果である。

引用文献

1) Lippke, B., et al.: *Carbon Management,* 2(3), 303-333, 2011
2) 林亮介ら：第 19 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、2-C1-01、2024

焼却熱の産業利用に向けた廃棄物焼却施設の統合手順の検討

Examination of procedures for integrating waste incineration plants towards industrial utilization of incineration heat

○神田橋幸也*[1)]、橋本征二[1)]
Yukiya Kandabashi, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* ce0057hv@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

人口減少に伴う廃棄物排出量の減少、老朽化した焼却施設の増加、自治体財政の逼迫といった問題への対応として、集約化による廃棄物処理の効率化、合理化が求められている。また、脱炭素化に向けて、廃棄物焼却熱の高効率な利用も求められており、集約した焼却施設と素材産業施設の連携によって CO_2 排出量の削減に貢献できる可能性が指摘されている[1)]。このようなことから、本研究では、廃棄物の焼却熱を産業施設で利用することを想定し、焼却施設の統合手順について、焼却施設の統合優先度を用いて検討した。

2. 方法

2.1 施設統合の考え方

焼却施設の集約効果を検討するにあって田崎ら[2)]が用いた焼却施設の親和度の考え方を援用し、焼却施設の施設年齢、自治体の財政状況、大規模焼却施設までの距離を考慮して、施設の統合優先度A_{ti}を以下のように定義した。

$$A_{ti} = \left(L_{ti} \cdot B_i \cdot d_i\right)$$

ここで、L_{ti}: t年における施設iの施設年齢、B_i:施設iを管理している自治体の財政力指数の逆数、d_i:施設iと大規模焼却施設までの距離の逆数であり、各値は0～1で正規化して影響力を同程度とした。本研究では、このA_{ti}値の高いものから統合を行うこととした。

2.2 対象地域・施設と対象期間

上記の適用例として、対象地域を水島コンビナート周辺とし、岡山県内の全焼却施設を水島コンビナート近隣に新設した大規模焼却施設に統合することとした。統合の対象となる施設は、2022年時点で稼働している焼却施設であり、建て替えが決定している施設については、建て替え後の施設を統合対象とした。対象期間は2025-2050年とした。

2.3 将来の焼却ごみ量と大規模焼却施設の施設規模

2050年までの焼却ごみ量のシナリオを作成し、2050年の岡山県全体の焼却量から大規模焼却施設の最終的な施設規模を推計した。また、同規模の施設を、330t/dayの炉を順に増設して完成させるものとし(1炉目を2035年、2炉目以降を5年おき)、統合の際は、既存施設の焼却ごみ量の合計が1炉の処理能力を超過しないように統合対象施設を決定した。

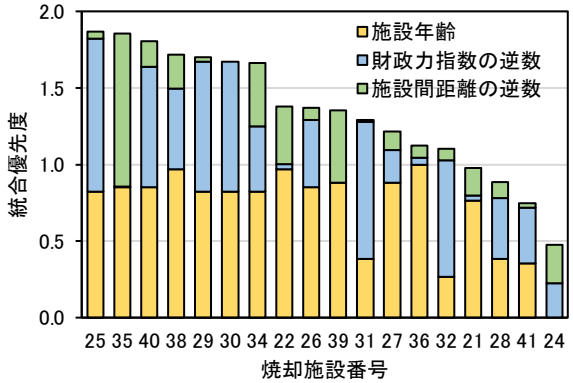


図　BAUシナリオにおける2炉目建設時の各焼却施設の統合優先度

3. 結果と考察

3.1 将来の焼却ごみ量と大規模焼却施設の施設規模

1人あたりの焼却ごみ排出原単位が変化しないBAUシナリオでは、2050年時点の焼却量が約426(kt/year)、大規模焼却施設の施設規模が約1,720(t/day)と推計された。

3.2 統合優先度による焼却施設の統合順

BAUシナリオにおける1炉目建設時(2035年)には、統合優先度にもとづき3施設が統合された。2炉目建設時(2040年)の各焼却施設の統合優先度を図に示す。この段階では施設25から34までが統合される。岡山県では高年齢施設が多く、統合優先度に対して施設年齢の影響が大きいものの、同じような年齢の施設で統合順を検討する上では、財政力指数の影響が重要になると考えられる。施設31、32のように財政力指数が統合優先度を高めている場合もある。年齢が同程度の施設が複数ある場合や財政的な問題が大きい自治体がある場合など、統合順を検討する上で必要な情報を統合優先度により視覚化することができる。なお、統合優先度の各変数については、その重要度に応じて重み付けすることも考えられる。

謝辞：本研究は、環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20223C02)による成果である。

引用文献

1) Fujii, M. et al: Resources, Conservation and Recycling, 149, 586-594, 2019
2) 田﨑智宏ら：土木学会論文集、77(6)、Ⅱ_193-Ⅱ_198、2021

公開データを基にした年別の日本の衣服のストック量の推計

Estimation of garment stock in Japan using open data

○角田志歩*[1)]、西嶋大輔[1)]
Shiho Kakuta, Daisuke Nishijima
1) 福島大学
* s2370014@ipc.fukushima-u.ac.jp

1. 研究背景

環境問題の解決に向けてその重要な対象は多く存在するが、その 1 つとして我々の生活に身近な衣服が挙げられる。多くの先行研究[1,2)]で衣服は製造段階の環境負荷の割合が大きく、その製造量の減少が重要であるとされている。そして、その削減が期待できる利用形態としてシェアリングが注目されている。1 つの製品を複数人で共有して利用することから、社会で必要となる衣服の量、および生産量の減少が期待できる。よって、その普及による環境負荷の削減ポテンシャルを考える上で、一国での衣服のストック量を知ることがより有用である。しかし、衣服についてストック量に関するデータは十分ではなく、個人レベルでの衣服のストック量やその使用期間に留まっている。[3,4,5)]そこで本研究では、公開データを基に製品ストックフローの推計モデルを用いて、日本における衣服のストック量の推計を行う。同時に、その推計の際に必要な衣服の寿命分布の推定も行う。なお、本研究の対象期間は 1999 年から 2021 年とする。

2. 研究手法

本研究でのt年における衣服のストック量$S(t)$は、以下の式(1)のように表される。

$$S(t) = \sum_{j}^{t} [inflow(j) \times \{1 - \Phi_t(t - j + 0.5)\}] \quad (1)$$

ここで、jは衣服が流入した年を示す変数、tは分析対象年を示す変数、$inflow(j)$はj年における衣服の流入量、$\Phi_t(y)$はt年における流入からy年経過した衣服の累積廃棄確率をそれぞれ示す。累積廃棄確率$\Phi_t(y)$の変数である使用年数yには幅があり、最大値は$t - j + 1$年、最小値は$t - j$年となる。よって、その中央値として$t - j + 0.5$とする。本研究では式(1)における各年の衣服の流入量$inflow(j)$は、以下の式(2)で表されるとする。

$$inflow(j) = \delta\{B(j) + I(j) - E(j)\} \quad (2)$$

ここで、δは流入量全体に占める家庭への流入量の割合、$B(j), I(j), E(j)$はj年における国内生産量、輸入量、輸出量をそれぞれ示している。δの値は、環境省(2020)[4)]を参考に設定した。

$$W(t) = \sum_{j}^{t} [inflow(j) \times \{\Phi_t(t - j + 0.5) - \Phi_{t-1}(t - j - 1 + 0.5)\}] \quad (3)$$

式(3)の累積廃棄確率の差分はj年に生産された衣服が$t-1$年からt年の期間に廃棄される割合になる。なお、式(1)と同様に、経過年数の値には 0.5 が加えられている。本研究では、累積廃棄確率はワイブル分布に従うと仮定した。具体的に、先に形状パラメータを設定し、衣服の廃棄量の観測値と式(3)から求められる推計値との差が最小となるように、最小二乗法によって各年の尺度パラメータの値を推定した。先に設定する形状パラメータの値は、一定の値をとるとし、1.5から5までの 0.1 刻みで設定した。また、平均寿命の最小値を 1 年、最大値を 8 年として推定を行った。なお、8 年については、アンケート調査での先行事例[8)]を参考にした。パラメータ推定の結果、観測値との差の合計が最小であった形状パラメータの値が 2.5 のときをパラメータの値として用いた。

3. データ

本研究では、環境省(2020,2023)[4,5)]の推計方法を基に各値の設定を行った。国内生産量$B(j)$は、生産動態統計[9)]のニット・衣服縫製品の生産量、輸入量$I(j)$と輸出量$E(j)$は、貿易統計[10)]の第 61 類と第 62 類を参照した。ただし、乳児用の衣類や手袋などついては、除外した。累積廃棄確率のパラメータ推定の際に用いた廃棄量$W(t)$は、家庭からの廃棄量、資源回収量、集団回収量、店頭回収量の 4 種類の合計とした。家庭からの廃棄量は、一般廃棄物処理実態調査[11)]の生活系ごみの可燃ごみ・不燃ごみ・混合ごみの合計値に、「家庭ごみに占める繊維類のごみの割合」と「繊維類のごみに占める衣類の割合」を乗じて求めた。資源回収量と集団回収量は、一般廃棄物処理実態調査[11)]の布類の資源回収量と集団回収量のそれぞれの集計値に、「家庭ごみの繊維類に占める衣服の割合」を乗じて求めた。店頭回収量は、文献[4,5,12)]を参照し 1999 年、2009 年、2020 年、2022 年の値を設定し、それ以外については線形増加を仮定した。「家庭ごみに占める繊維類のごみの割合」は、容器包装廃棄物の使用・排出実態調査[13)]を

基に各年の「繊維類」の湿重量比率の平均値を用いた。「繊維類のごみに占める衣服の割合」は、環境省(2020,2023)[4,5]での値を用いたところ、推計がうまくなされなかった。そのため、衣類以外での家庭から出る主要な繊維類のごみをタオルとリネン類（シーツ類）と仮定し、衣服を含めたそれらの流入量の合計に対する衣服の流入量の割合を、「繊維類のごみに占める衣服の割合」とした。この割合を算出する際のタオル類は、今治タオル工業組合(2024)[14]、リネン類は、生産動態統計 [9]と貿易統計 [10]を基にそれぞれ設定した。データの制約上、1997 年から 2021 年のデータを基に計算を行った結果、その値は 80.8%となった。

4. 研究結果

図 1 は、1999 年から 2021 年における日本の衣服の平均寿命の推移を示したものである。衣服の平均寿命は、おおよそ 1 年から 2 年の間で推移していることが分かる。その推移を見ると、2006 年までは減少傾向にあるが、2007 年以降からは逆に全体として増加傾向にあることが分かる。また、図 2 は重量ベースと点数ベースの 1 人あたりストック量を示している。特に点数ベースの結果を見ると、2006 年以降からそのストック量が全体として増加傾向になっており、対象期間の比較的早い段階で増加傾向が表れていることが分かる。本稿で示された結果は、異なる分布での推定や感度分析など、さらに検証が必要であることに注意されたい。しかし、本研究の結果を参照すると、衣服のストック量は増加傾向にあることから、日本での衣服のシェアリングの普及による衣服のストック量や生産量の削減ポテンシャルは、ある程度見込まれると示唆される。

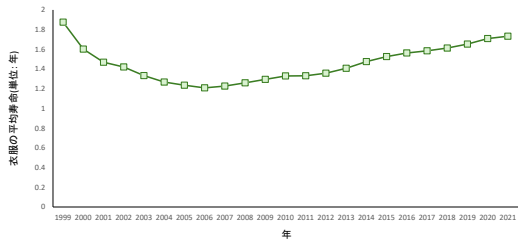


図 1 日本での年別の衣服の平均寿命

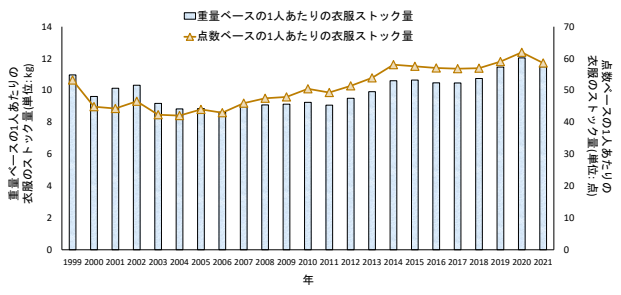


図 2 日本の重量ベースと点数ベースでの 1 人あたりの衣服のストック量の推移

5. 謝辞

本研究は福島大学学内競争的研究資金(23RI003、24RI004)の助成を受けたものである。

6. 引用文献

1) Amasawa, E., Brydges, T., Brydges, C. E., Kimita, K. (2023) Clean. & Respon. Consum., 8, 100103.
2) Wiedemann, S.G., Clarke, S.J., Nguyen, Q.V., Cheah, Z.X., Simmons, A.T. (2023), Res. Cons. & Rec., 198, 107119.
3) 環境省：“ファッションと環境に関する調査業務 -「ファッションと環境」調査結果 -”,(2020)
4) 環境省：“令和 4 年度循環型ファッションの推進方策に関する調査業務-マテリアルフロー-”,(2023)
5) 日本衣料管理協会：“令和 4 年度調査分『衣料の使用実態調査』について”，日本衣料管理協会ホームページ，（オンライン），入手先 <https://www.jasta1.or.jp/research.html>,（参照 2024-12-19）
6) 田崎 智宏, 小口 正弘, 亀屋 隆志, 浦野 紘平: 廃棄物学会論文誌, 12(2), (2001), pp. 49-58
7) Daigo, I., Iwata, K., Oguchi, M., Goto, Y., Procedia CIRP, 61, (2017), pp.146–151
8) ライオン株式会社 ：“「衣類のロングライフ化」に関する調査”, ライオンホームページ,（オンライン）, 入手先 <https://doc.lion.co.jp/uploads/tmg_block_page_image/file/9164/20230929_01.pdf?_gl=1*1o8zo8q*_ga*OTUxODAxODI1LjE3MDcxMDM2OTc.*_ga_V38CPVQV9B*MTcwNzEwMzY5Ni4xLjEuMTcwNzEwMzg0NS40NC4wLjA.>,（参照 2024-02-05）
9) 経済産業省: 生産動態統計, (1988-2021)
10) 財務省: 貿易統計, (1988-2021)
11) 環境省: 一般廃棄物処理実態調査, (1998-2021)
12) 経済産業省（2002）：“平成１３年度繊維産業活性化対策調査（アジア繊維産業戦略連携推進事業（消費流通実態調査分））報告書”,(2002)
13) 環境省: 容器包装廃棄物の使用・排出実態調査, (2006-2022), <https://www.env.go.jp/recycle/yoki/c_2_research/index.html>,（参照 2023-11-15）
14) 今治タオル工業組合：“企業数、織機台数、革新織機台数、従業員数、綿糸引渡数量、生産量、輸出・輸入数量の推移”,今治タオル工業組合ホームページ、（オンライン）,入手先 <https://itia.or.jp/toweldata.html>（2024 年 4 月 15 日）

電動キックボードシェアリングの環境負荷評価

Assessing environmental load of e-scooter sharing

○中村太一*[1)]、橋本征二[1)]
Taichi Nakamura, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
*ce0063fe@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

電動キックボードのシェアリングは、公共交通機関同士の接続や移動手段の選択肢の拡充、行動範囲の拡大やエリア間移動の容易化などを可能にすることから、全国的に導入が進んでいる。電動キックボードのシェアリングに関して、Severengiz ら[1)]は、ベルリンにおける電動キックボードの生産の分析と使用段階に与える環境影響を、様々なシナリオを想定することで評価している。その結果、電動キックボードを用いることが必ずしも環境負荷を軽減するわけではないが本体の寿命と回収作業によって環境負荷が大きく変化することを指摘している。今後、電動キックボードのシェアリングが、関連する環境負荷の変化に与える影響について定量的に分析することが求められる。本研究では、電動キックボードシェアリングシステムの利用状況を調査し、同システムの導入によるモビリティに関わる環境負荷の変化を評価した。

2. 方法

2.1 電動キックボードシェアリングシステムの利用状況の調査

電動キックボードシェアリングシステムの利用によって、利用者のモビリティがどのように変化したかを調査するため、18 名の利用者にヒアリング調査を行った。これをもとに利用者のモビリティの変化を類型化した。

2.2 電動キックボードシェアリングシステム利用前後の環境負荷評価

ヒアリング調査の結果を踏まえ、電動キックボードシェアリングシステム利用前後の CO_2 排出量を下式により評価することとした。

$$E = \sum_{p}\sum_{i} M_{pi} \times UE_i \times f_p$$

ここで、Eは CO_2 排出量(kgCO_2)、M_{pi}は利用目的 p の移動手段 i による移動距離(km)、UE_iは移動手段 i の CO_2 排出量原単位(kgCO_2/km)、f_pは利用目的 p の頻度である。M_{pi}、f_pについてはアンケート調査、UE_iについては、AIST-IDEA_v3.4[2)]や既存研究[3)]を参考に設定した。

2.3 アンケート調査の実施

電動キックボードシェアリングシステムの利用状況に関するアンケート調査(主として上式M_{pi}、f_pに関する調査)を 412 名(男女・年齢問わず)に対して実施した。

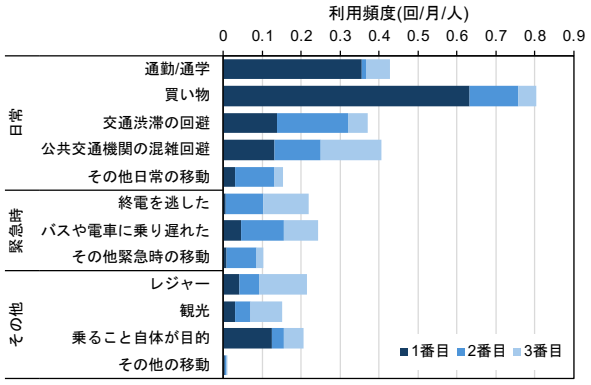


図　電動キックボードの利用目的上位 3 つの利用頻度の期待値(n=359)

3. 結果と考察

電動キックボードの利用目的上位 3 つの利用頻度の期待値を図に示す。最も利用頻度の高い目的は買い物であり、次いで通勤/通学、交通渋滞の回避、公共交通機関の混雑回避となった。ただし、回答者の利用頻度としては月 2 回以下の回答が 8 割程度であり、これまでの利用回数も 2～10 回で 6 割程度を占めたため、1 月あたりの利用頻度の期待値はそれほど大きくはなかった。また、電動キックボードが代替した移動手段の多くは徒歩や自転車であり、電車やバスの代替手段とする回答は少なかった。なお、1 番目の利用目的で電動キックボードを利用した理由として最も回答が多かったのは「楽しいから」であった。

代替交通手段に関する詳細な回答をもとに、電動キックボードシェアリングシステム利用前後の CO_2 排出量を推計した結果やアンケート結果の詳細については学会当日報告する。

謝辞：本研究は科学研究費補助金(22H03805)による成果である。

引用文献

1) Severengiz, S. et al.: Life cycle assessment on the mobility service e-scooter sharing, 2020 IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS), 2020
2) 産業施術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ：LCI データベース AIST-IDEA_v3.4_日本語版
3) 朴秀日ら：土木学会論文集 D3 (土木計画学)、78(5)、I_41-I_50、2023

バイオマス割当プラスチックに関する認知と適切な情報提供内容の検討

Perception and appropriate information provision regarding biomass-attributed plastics

福田光郷*[1)]、田中大介[1)]、Sebastien Dente[1)]、橋本征二[1)]
Hirosato Fukuda, Daisuke Tanaka, Sebastien Dente, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
*ce0065sr@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

温室効果ガスの排出量削減、循環型社会の形成の観点から、バイオマスや再生材を含有するプラスチック製品の普及が求められている。このような中、原材料中に含まれるバイオマス・再生材由来の成分をマスバランス方式により特定の製品に割り当てる新たな概念のプラスチックが登場し、世界的に急速に広がりつつある。しかしながら、同方式のような考え方は、消費者や事業者にとって分かりにくく、製品上の表記が実際のバイオマス含有率や再生材含有率ではないことから、情報の受け手に誤解を与える可能性がある[1)]。本研究では、適切なコミュニケーションに資することを目的として、「バイオマスプラスチック」及び「マスバランス方式」に対する情報の受け手の認知を分析し、バイオマス割当プラスチックに対する理解を促進するために有益な情報を明らかにした。

2. 方法

2.1 メンタルモデル・アプローチ

上記目的のため、メンタルモデル・アプローチを用いた。これは、対象とする題材に対して、情報の受け手と専門家の知識や概念を図式化し、それらを比較することで、情報の受け手がその題材を理解するために有益な情報内容を抽出する手法[2)3)]であり、以下の手順で実施した。

2.2 専門家のメンタルモデル作成

「バイオマスプラスチック」及び「マスバランス方式」について、これらに関する環境省の資料[1)]や関連文献を対象に、ⓐ専用ソフトウェア(KH coder)を用いたテキスト分析、ⓑ生成 AI(ChatGPT、Google Gemini、Copilot)を用いたテキスト分析を行い、これらの結果を比較・統合し、専門家のメンタルモデルを作成した。

2.3 情報の受け手のメンタルモデル作成

同じ 2 つの用語について、投資家や一般消費者を対象にオンラインでインタビュー調査を実施し、情報の受け手のメンタルモデルを作成した。インタビュー調査では、これらの用語の定義や捉え方、これらの導入における利点や課題等について質問した。

2.4 提供すべき情報内容の抽出

作成した専門家及び情報の受け手のメンタルモデルを比較し、提供すべき情報内容の抽出を行った。特に、情報の受け手が誤った認識をしている事項について、適切な状況提供内容を検討した。



図 「マスバランス方式」に関する専門家のメンタルモデル

3. 結果と考察

「マスバランス方式」に関する専門家のメンタルモデルの作成結果を図に示す。図では、ⓐ専用ソフトウェアの結果から作成した部分を緑文字、ⓑ生成 AI の結果から作成した部分を青文字、ⓐⓑ両者の結果から作成した部分を赤文字で示している。図に示すように、「マスバランス方式」に関する専門家のメンタルモデルは、①マスバランス方式の意味、②利点・意義、③議論点・課題、④適用分野、⑤認証制度の 5 つの主要な概念から構成された。特に、②利点・意義では、既存施設で利用可能であり、市場価値の高い製品の販売が可能であること、③議論点・課題では、グリーンウォッシュのリスクや環境負荷低減効果に関する評価の不十分さが含まれ、⑤認証制度も主要な項目として抽出された。

情報の受け手のメンタルモデルについては、要旨執筆時点でインタビュー調査を実施中であり、その結果及び提供すべき情報内容については、学会当日に報告する。

謝辞：本研究は、環境省・(独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20243004)による成果である。

引用文献

1) 環境省：「プラスチック資源循環におけるマスバランス方式の活用に関する基本的な考え方」について、https://www.env.go.jp/recycle/plastic/related_information/workshop/workshop_00001.html、2024 年 10 月アクセス
2) 小杉素子ら：メンタルモデル作成マニュアル、電力中央研究所調査資料、Y03917、2004
3) 田頭直人、千田恭子：エネルギー・資源学会論文誌、30(4)、8-16、2009

Integrating Circular Economy Principles in Urban Planning: Pathways to Carbon Neutrality in Compact Cities

○樊天惠*[1)]、任 宇傑 [2)]、チャップマン アンドリュー[2)]
Tianhui Fan, Yujie Ren, Andrew Chapman
1) 京都大学, 2) 南京林業大学, 3) 九州大学
*fan.tianhui.4v@kyoto-u.ac.jp

1. Introduction

Climate change poses a critical global challenge, with phenomena like global warming, rising sea levels, and extreme weather threatening human and ecological survival. Urban areas, responsible for 70% of global carbon emissions, are central to addressing this crisis (UN-Habitat, 2011). Reducing urban carbon emissions is therefore a key focus for governments, researchers, and society at large.

Recent discussions on sustainable urban development emphasize resource efficiency, environmental protection, and social equity. Among the strategies proposed, the compact city concept, introduced in 1989, has gained prominence as a solution to urban sprawl, traffic congestion, and aging populations (Newman & Kenworthy, 1989). Compact cities prioritize high-density development, land-use efficiency, and public transportation, offering potential benefits like improved energy efficiency and reduced transportation-related emissions (Ahlfeldt & Pietrostefani, 2017). Key characteristics of compact cities include population density, accessibility, and reliance on public transit (OECD, 2012). However, their success depends on tailored planning and policies. Cities like London, Melbourne, Toyama, and Shenzhen have implemented compact city strategies, albeit with varying oucomes influenced by local demographics, geography, and economic conditions. For instance, densely populated cities like Shenzhen focus on controlling sprawl, while aging cities like Toyama prioritize revitalizing urban centers and enhancing public transport (Toyama City, 2019).

Compact city policies are increasingly recognized for their role in reducing CO2 emissions. Prior studies highlight that strategies to enhance population density and land-use mix can lower emissions, though their impact on transport-related emissions remains complex and requires further exploration. This study investigates these dynamics, emphasizing nonlinear relationships and offering guidance for future urban planning.

2. Methodology

This study encompasses four primary stages. Firstly, prefecture-level cities in mainland China were selected as the study area and data was collected on urban construction, socio-economic indicators, and carbon emissions for the years 2005, 2010, 2015, and 2020. Secondly, to examine the nonlinear relationships between compact urban development characteristics and carbon emissions, machine learning models were utilized, specifically XGBoost, and the elicited results were then compared with traditional linear regression and spatial regression models. Thirdly, the SHAP method was used to interpret the results of the machine learning models, providing insights into feature importance and the nature of nonlinear relationships. Lastly, a clustering analysis was conducted on the compact development indicators of the sample cities, followed by a simulation of the temporal trends in carbon emissions for different city clusters. Figure 1 illustrates the detailed research framework developed for this study.

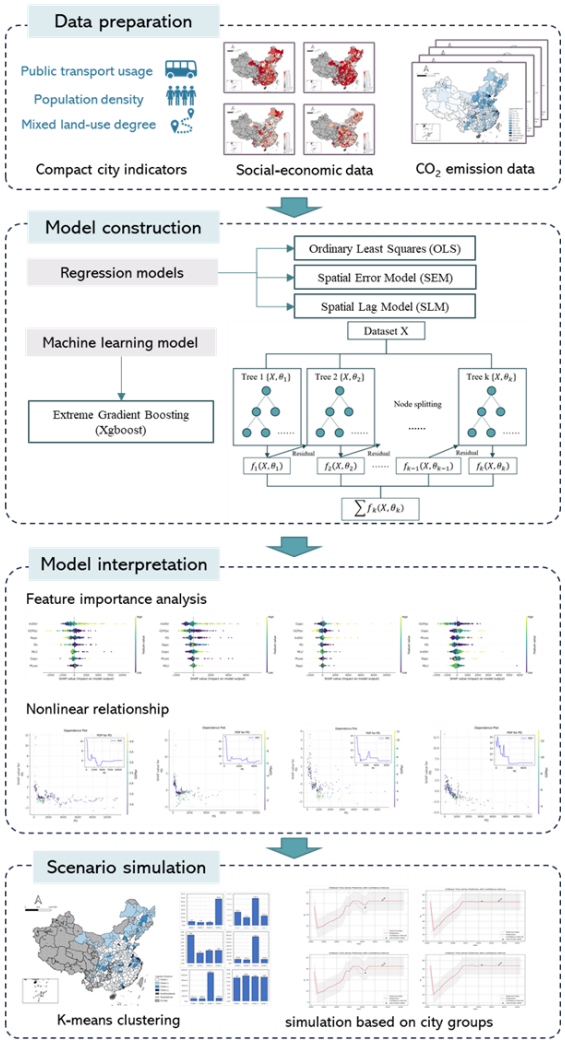


Figure 1. Research framework

3. Results

3.1 Nonlinear relations between compact urban characteristics and urban carbon intensities

Figure S1 presents the feature importance plot of the model, where the horizontal axis illustrates the SHAP value, reflecting the contribution of each feature to the model's output. The SHAP analysis highlights that GDP per capita and green area per capita have gained greater importance in recent years, while population density and public transportation usage remain crucial in reducing carbon emissions. These results emphasize the evolving nature of urban development and the necessity for adaptive urban planning and policy approaches to effectively address carbon emissions. The next section presents summary and dependence plots, providing a deeper exploration and visualization of the nonlinear relationships between these key urban characteristics and carbon emissions.

The following analysis delves into the trends and insights from these plots for three key variables: population density (PD), mixed land-use (MLU), and public transport usage (Ptuse) across the years 2005, 2010, 2015, and 2020. Figure S2 presents the summary plots and dependence plots for the impact of these variables on urban carbon intensities. The findings underscore the importance of considering nonlinear effects in urban planning and policymaking. While population density, mixed land-use, and public transport usage are crucial for reducing carbon emissions, their impacts are not linear and require careful optimization. In the following section, these insights and their implications for urban sustainability strategies are further discussed via clustering and forecasting.

3.2 Cluster-based simulation and forecasting of city-level CO2 emissions

To simulate the temporal variation in carbon emissions across cities with different compact urban characteristics, we first conducted a clustering analysis. The cities are then categorized into four groups: moderately developing cities, slowly developing cities, mega cities, and rapidly developing cities. Figure 2 shows the spatial distribution of our clustering results.

In this section, we utilize the XGBoost model to simulate and forecast the changes in CO2 emissions over time. The simulation results reveal distinct trends in CO2 emissions for the selected cities within each cluster. Figure S3 presents the results of our simulation and forecasting.

The model's simulation results provide valuable insights into the distinct emissions trends and highlight the need for tailored strategies for CO2 emissions reduction in different types of cities.

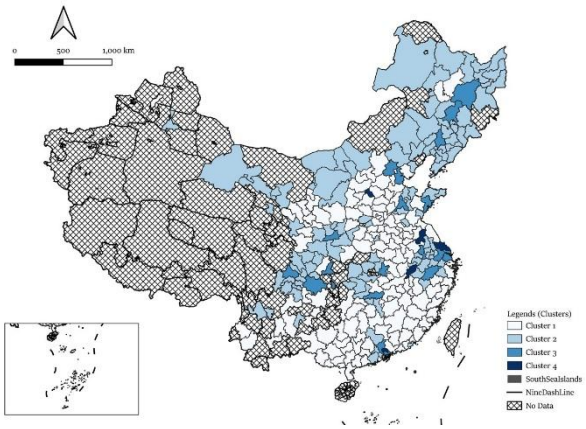


Figure 2. Spatial distribution of clustering results

While mega cities and rapidly developing cities face significant challenges due to their high growth rates, moderately and slowly developing cities have opportunities to implement sustainable practices more gradually.

4. Conclusions

This study examines the core mechanisms of carbon reduction in compact cities, using Chinese cities as case studies. By employing machine learning models, we analyze how key features of compact cities—such as population density, land-use mix, and public transportation development—contribute to the achievement of carbon neutrality. Additionally, we simulate future carbon emission levels under various urban development scenarios. The results indicate that an optimal population density and an appropriate land-use mix can significantly reduce carbon emission intensity and accelerate the attainment of carbon neutrality. However, excessive density or overly mixed land use may lead to negative effects.

References

1) UN-Habitat. (2011). Global Report on Human Settlements 2011: Cities and Climate Change
2) Newman, P. W. G., & Kenworthy, J. R. (1989). Gasoline Consumption and Cities. Journal of the American Planning Association, 55(1), 24–37.
3) Ahlfeldt, G. M., & Pietrostefani, E. (2017). The compact city in empirical research: A quantitative literature review. Spatial Economics Research Centre,London, June, 73.
4) OECD. (2012). Compact City Policies-A Comparative Assessment. In OECD Green Growth Studies, OECD Publishing. OECD.
5) Toyama City. (2019). Toyama City: Environmental Model City Action Plan.

Supporting Information

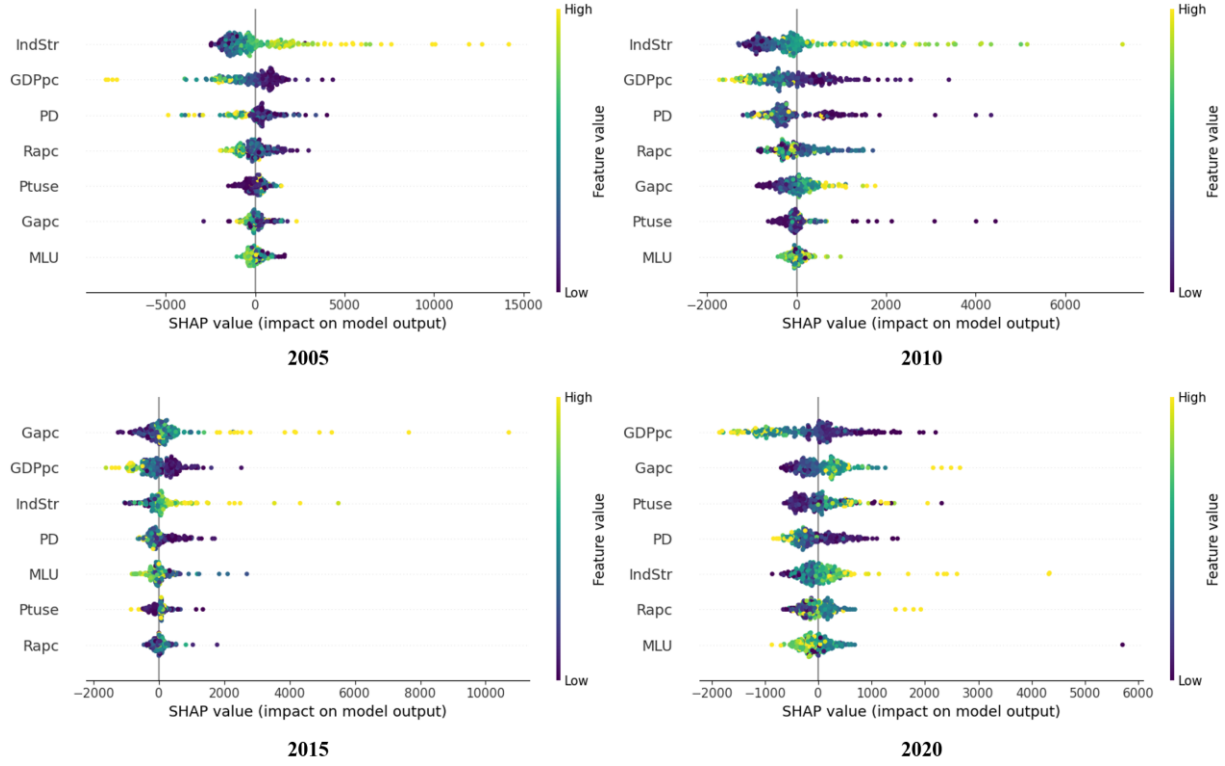
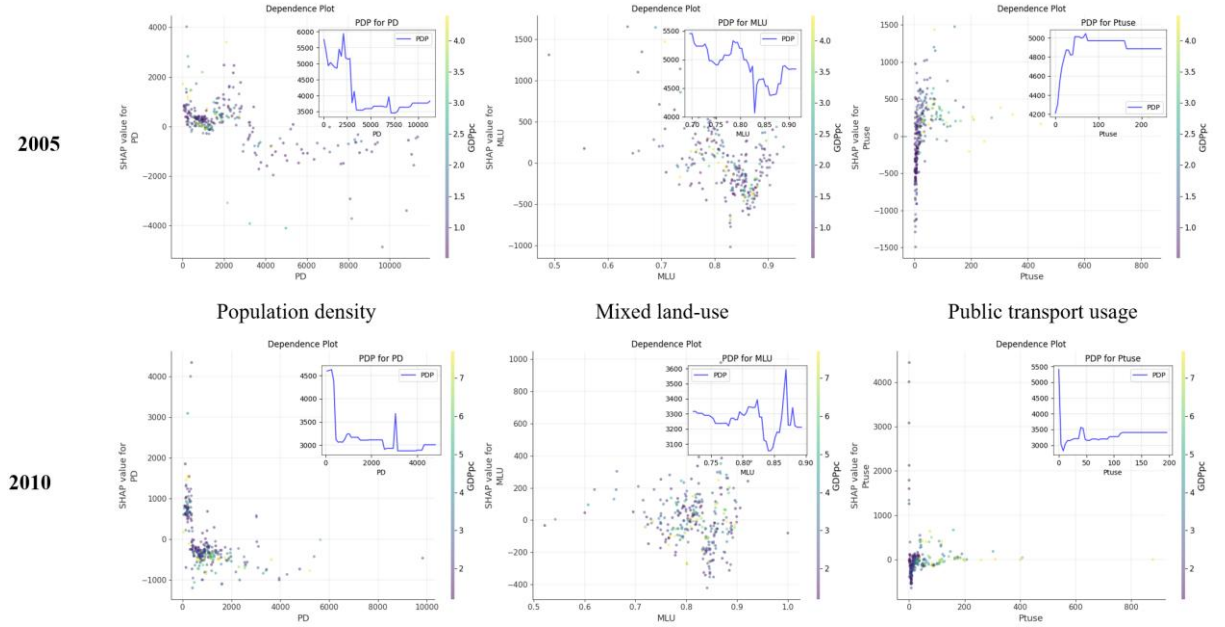


Figure S1 Importance of SHAP values regarding urban compact development indicators



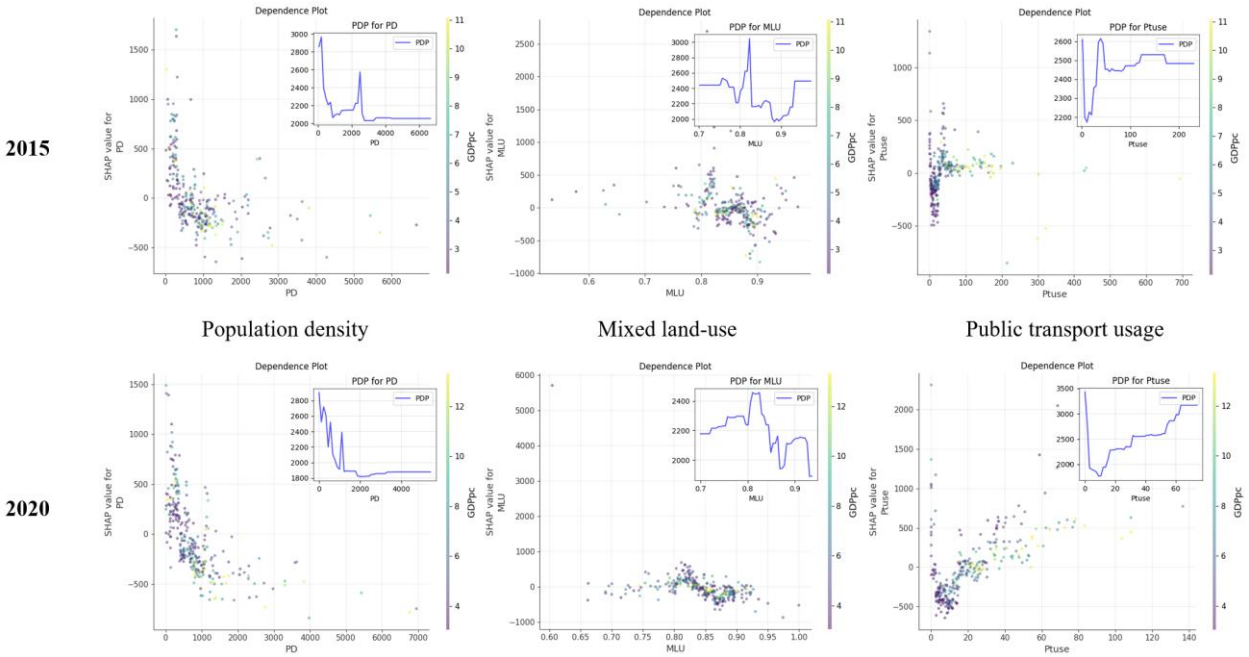


Figure S2. Partial dependence analysis of compact urban characteristics

都市のコンパクト度と道路に関わる物質ストック量の関係

Relationship between the compactness of a city and the amount of material stock related to roads

○前田桃花*[1)]、橋本征二[1)]
1) 立命館大学
*ce0066rv@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

近年、日本では人口減少・高齢化が進み、都市機能に対して様々な問題が生じている。そうした問題への対応策として、国はコンパクトシティ化を推進しているが、都市がコンパクト化することによる環境問題の改善も期待されている。これまで、CO_2排出量[1)]やエネルギー消費量[2)]に着目した研究が行われてきているが、資源利用やそれに伴う環境影響に着目した研究は建築物に関するもの[3)4)]にとどまっている。フロー型社会からストック型社会への転換が求められている中で、コンパクトシティ化が資源利用に与える影響について評価することも必要である。

本研究では、道路を対象としてコンパクトシティ化と資源利用の関係について分析した。都市のコンパクト度と道路インフラの物質ストック量の関係を明らかにし、コンパクトシティ化の意義を検討した。

2. 方法

2.1 対象都市とコンパクトシティ指標の選定

後述のとおり、本稿では道路の物質ストックを推計するが、そのデータの制約から対象都市を全国20の政令指定都市とした。コンパクトシティ指標について、武田ら[5)]は、人口密度や就業者居住者比、形状まとまり度、鉄道駅勢圏カバー率、大型店舗集積度等を提案している。既存研究[1)3)4)]においても、人口密度が用いられ、また相関も示されていることから、本研究でも人口密度を選定したが、集住をより表現するものとして分母を可住地面積とした。

2.2 道路に関わる物質ストック量の推計

対象都市における道路の物質ストック量は下式[6)]により推計した。

$$MS_t = \sum_{ni,j} (L_{n,t} \times r_{n,i,j,t} \times W_{n,j} \times I_{i,j,t})$$

ここで、MS_t：t年における道路の物質ストック量[kg]、$L_{n,t}$：t年における道路種nの総延長[m]、$r_{n,i,j,t}$：t年における道路種n、舗装区分i、道路幅員区分jの割合、W：道路種n、道路幅員区分jの道路幅員[m]、$I_{i,j,t}$：t年における舗装区分i、道路幅員区分jの資材投入原単位[kg/m^2]である。

2.3 コンパクト度と道路に関わる資源利用の関係の分析

対象都市について、コンパクト度(可住地面積における人口密度)と、一人当たりの道路の物質ストック量(トン/人)をプロットし、両者の関係について分析した。

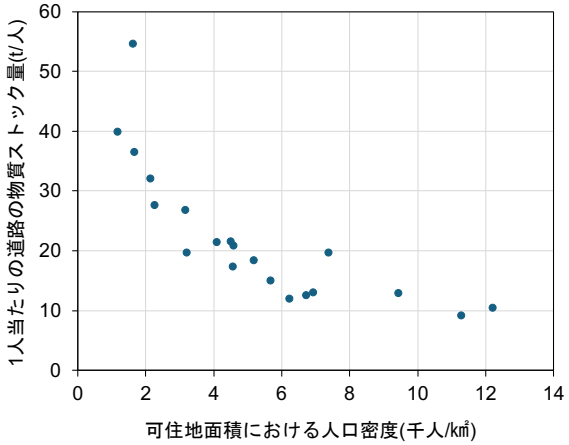


図　可住地面積における人口密度と１人当たりの道路の物質ストック量の関係

3. 結果と考察

物質ストック量の推計結果について、高速道路ではアスファルト舗装がそのほとんどを占めていた一方、一般道路では、ほとんどの都市において簡易アスファルト舗装がその大きな割合を占めた。また、可住地面積における人口密度と1人当たりの道路の物質ストック量をプロットしたものを図に示す。人口密度と道路の物質ストック量には負の相関関係があることから、都市のコンパクト化により、道路の物質使用量を削減できる可能性がある。人口の少ない地域における道路インフラの維持管理という観点でも集住の有効性は指摘できる。なお、本研究は政令指定都市レベルの分析であるが、都市のコンパクト化についてはさらにミクロに検討する必要があり、人口密度以外のコンパクト度指標を用いた分析も必要である。

引用文献

1) 岩田和之、馬奈木俊介：環境科学会誌、24(4)、390-396、2011
2) 中井秀信、森本章倫：土木学会論文集D、64(1)、1-10、2008
3) 長谷川裕之、奥岡桂次郎、谷川寛樹、橋本征二：第14回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、292、2019
4) 高杉晃司、橋本征二：第19回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、3-D1-05、2024
5) 武田裕之、柴田基宏、有馬隆文：日本建築学会論文集、76(661)、601-607、2011
6) 田中健介、早川容平、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹：土木学会論文集G(環境)、69(6)、24-34、2013

リチウムイオン電池の資源制約を考慮した乗用車技術選択モデル

Technology Choice Model of Light Duty Vehicles Considering the Mineral Constraint of Lithium-ion Battery

○小松原充夫*[1)]、西　智樹[1)]
Atsuo Komatsubara, Tomoki Nishi
1) 豊田中央研究所
* komatsubara@mosk.tytlabs.co.jp

1. はじめに

気候変動緩和に向けて輸送部門では電気自動車（BEV）の大量普及が期待されている。これにともないリチウム（Li）・コバルト（Co）・ニッケル（Ni）などリチウムイオン電池（LiB）に必要な金属資源の需要も数倍～数十倍に増加し、金属資源の供給不足[1)]や価格の高騰[2)]が懸念されている。乗用車の技術選択に関する研究は数多いが、金属資源の需給や価格の影響を明示的に考慮した研究は少ない。Wang ら(2023)[3)]は金属資源需要の想定から将来の金属資源価格の上昇とLiB・BEV 価格への影響を推定し、中国の BEV 普及に与える影響を分析した。しかし BEV の大量普及を想定し高い金属資源需要を前提条件とするほど、BEV 価格が上昇し BEV 普及が抑制されるため、前提条件と結果が大きく乖離することが懸念される。

本研究では金属資源需要の増加が BEV 価格やその普及にどの程度影響を与えるか評価し、金属資源の利用可能性を考慮した輸送部門の将来シナリオを提案することを目的とする。本発表では乗用車を対象に、技術選択により BEV の新車台数の決定と、その金属資源需要を受けて金属資源・LiB・BEV 価格の更新を交互に繰り返すモデルを構築し、金属資源の需給と価格に整合性を確保しながらこれらの BEV 普及への影響を評価したのでその結果を報告する。

2. 方法

モデルの概要を**図 1** に示す。本モデルでは 2020~2050 年を対象に 1 年を 1 ステップとして計算を行う。LiB として NMC622、その金属資源mとして LiB 価格への影響が大きい Li・Ni・Co を対象とした。

2.1 金属資源価格

式 1 により金属資源需要D_mから金属資源価格P_mを計算した。パラメータ$\alpha \cdot \beta$は 1970-2020 年の金属資源生産量・価格データ[4)5)]の回帰分析により推定した。

$$\log P_m = \alpha \log P_m + \beta \quad (1)$$

2.2 LiB 価格

金属資源価格に金属使用量を乗じて金属由来コストとし、製造由来コスト（累積生産量に対して学習率 20 %[6)]で低減と仮定）と合計して LiB 価格とした。

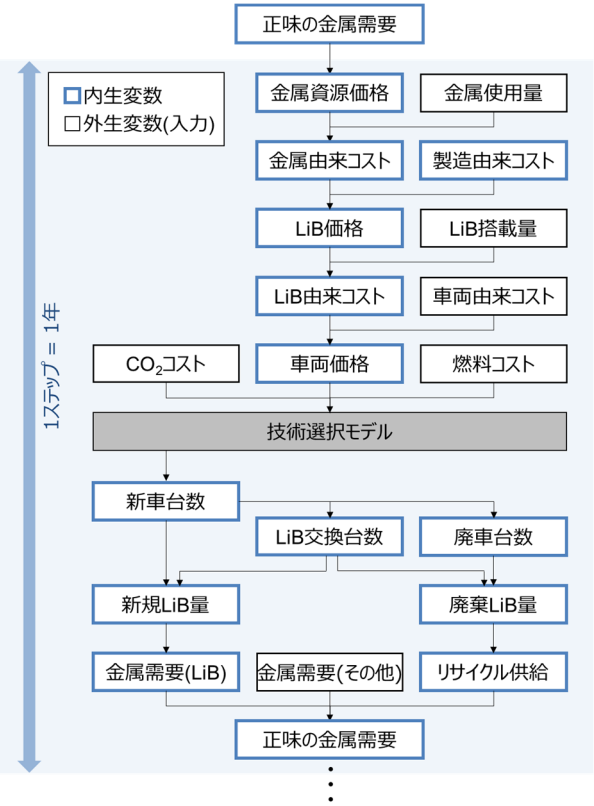


図 2 モデルの概要

2.3 車両価格

LiB 価格に LiB 搭載量を乗じて LiB 由来コストとし、車両由来コスト（車両の LiB 以外の構成要素）と合計して車両価格とした。

2.4 技術選択モデル

各年の新車台数合計をもとにコスト最小となる各年の技術別新車台数を線形計画法により計算した。ここでコストは車両価格・燃料コスト・CO_2 コストの合計とした。乗用車の技術として ICEV（内燃機関車）・HEV（ハイブリッド車）・PHEV_20~PHEV_80・BEV_300 を想定した。末尾の数字は電動走行可能距離 [km]を示す。

2.5 金属資源需要

技術別新車台数および LiB 交換台数から金属資源需要（LiB）を計算した。その他の金属資源需要およびリサイクルによる供給を合計し正味の金属資源需要とした。その他の金属資源需要は GDP 成長率の世界平均

（2.8 %）[7]で増加するとし、リサイクル率は欧州バッテリー規則[8]を参考に設定した。

2.6 シナリオ

各年の新車販売台数合計・車両由来コスト・燃費・燃料（化石燃料・電力）のコスト・CO_2 排出係数などは文献[9][10]を参考に設定し、過去の普及速度から技術シェアの変化率を 10 %/年に制限した。本発表では車両寿命を平均 14.2 年とし、LiB 寿命を車両寿命と同一としたベースケースと、10 年後に必ず交換を行う LiB 交換ケースを分析した。

3. 結果および考察

ベースケースの結果を**図 2** に、LiB 寿命を 10 年とした LiB 交換ケースの結果を**図 3** に示す。

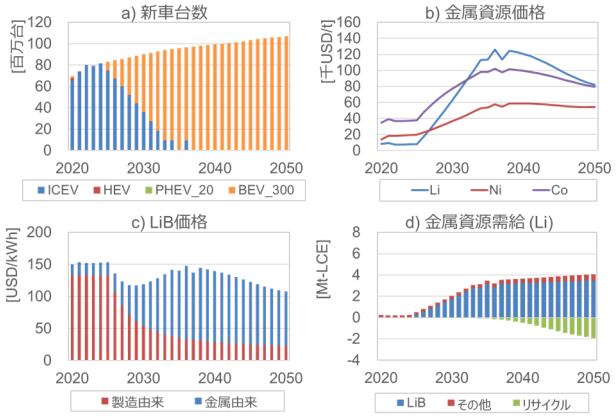


図 2 ベースケース

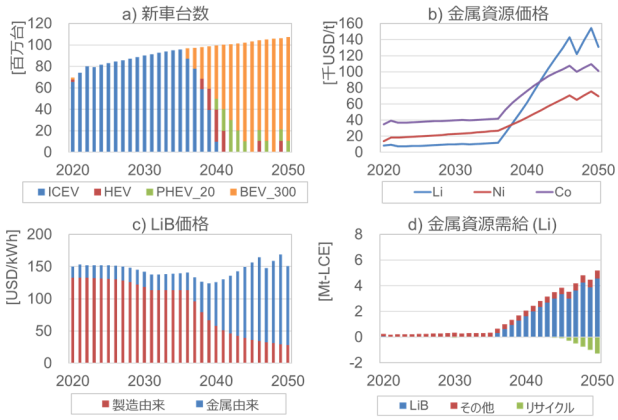


図 3 LiB 交換ケース

ベースケース（**図 2**）では、2025 年ごろから BEV の導入が始まり（図 2a）、それにともない金属資源価格が数倍に上昇（図 2b）、結果 LiB 価格は製造由来コストの低減にも関わらず上昇していった（図 2c）。一方で 2035 年ごろからは BEV の廃車にともない金属資源のリサイクルが始まることで（図 2d）金属資源価格・LiB 価格ともに減少傾向に転じ、結果技術選択では主に BEV が選択され続けた（図 2a）。

LiB 交換ケース（**図 3**）では、（LiB 交換コストを含めた）BEV の車両価格が上昇するために技術選択では主に ICEV が選択された（**図 3a**）。2035 年ごろからは BEV も選択され始めるが、LiB 交換により金属資源需要がベースケースよりも大きいため（**図 3d**）金属資源価格および LiB 価格が高止まりし（**図 3b**）（**図 3c**）、HEV や PHEV_20 など LiB 容量の少ない技術も一定程度選択された（図 3a）。

4. まとめ

本発表では BEV の普及にともなう金属資源価格や BEV 価格の上昇と乗用車の技術選択をモデル化した。本モデルの分析結果は車両コスト等の前提条件に大きく依存するが、BEV の普及が拡大しつつもその廃棄（→リサイクル）が開始されるまでの期間に LiB 価格がピークを迎え、BEV 普及にとって大きな障壁となる可能性が示された。また LiB 交換を考慮した場合には LiB 交換コストおよび金属資源価格の高止まりにより BEV の普及が阻害される可能性が示された。

本発表では定置用など廃棄 LiB の二次利用やリサイクルの詳細（コスト・環境負荷等）について十分検討できておらず、今後の課題である。

5. 引用文献

1) IEA: “Global Critical Mineral Outlook 2024”, (2024).
2) Boer, L. et al.: IMF Working Paper, (2021), WP/21/243.
3) Wang, H. et al.: Nature. Commun., 14, (2023), 1246.
4) USGS: “Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States”, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/historical-statistics-mineral-and-material-commodities> , (参照 2024-12-20).
5) USGS: “Mineral Commodity Summaries”, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries> , (参照 2024-12-20).
6) Mauler, L. et al.: Energy Environ. Sci., 14 (9), (2021), pp. 4712-4739.
7) IEA: “World Energy outlook 2022”, (2022), p.108.
8) Commission of European Union: “Council adopts new regulation on batteries and waste batteries”, <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/07/10/council-adopts-new-regulation-on-batteries-and-waste-batteries/>, (参照 2024-12-20).
9) EIA: “Annual Energy Outlook 2023”, <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>, (参照 2024-12-20).
10) EIA: “International Energy Outlook 2023”, <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>, (参照 2024-12-20).

新聞の電子化に向けたインベントリ分析：電子型新聞と配達型新聞の比較

Inventory analysis for the digitalization of newspapers：A comparison of electronic newspapers and delivered newspapers

○石川雄一[1)]、兵法彩[*1)]
Yuichi Ishikawa, Aya Heiho
1) 東京都市大学
* heiho@tcu.ac.jp

1. はじめに

近年、電子機器の発達やインターネット環境の整備により多くの物の電子化が進んでいる。インターネットは 5Gまで発達しその普及も進められている中、日本での新聞業界は従来のまま配達型が中心であり、朝バイクが走っている風景は昔と変動がない。

しかし、新聞にもとめられている安全性などは健在であり、実際に、新聞は「安全性」や「正確性」、「公平性」が高いことから、今でも選挙や人事情報などの情報は新聞から情報を得ているというデータがある[1)]。

反対に天気や世の中の一般的なニュースはインターネット、いわゆる電子機器での情報取得が主流となってきており、新聞そのものの需要や、購読時間が減りつつあるのも事実である。

例えば私たちが軽くニュースや出来事を調べたいときには新聞を買うのではなく、スマホを使ってインターネットで検索をかける。これはIT 化による人類の進化のたまものであり、今後も需要が増え続けるとともにさらなる開発が期待される。

冒頭でも述べた通り多くの物の電子化が進む中、新聞も電子化すべきなのかを検討することを目的とし、まずは従来の方法である配達型新聞と電子化した場合の電子型新聞のインベントリ分析を行い、その結果をもとに新聞業界がとるべき行動を考察する。

2. 研究方法

2.1 評価範囲、機能単位

評価範囲は図 1 に示す通りとし、機能単位は 1 紙 3 年間あたり、新聞購読時間は総務省による「総務省情報通信政策研究所の令和 4 年度情報通信メディアの利用時間と情報行動に関する調査報告書のデータ」を参照にし、6 分間と設定する。

2.2 電子型新聞の研究方法

電子機器の GHG 排出量平均値と iPad の GHG 排出量がほぼ同値であるため電子型新聞を読む際は iPad を使用すると仮定する。

また、iPad は apple 社の iPad pro 第 5 世代の 11 インチを評価対象とし、本製品のホームページより、Product Environmental Report[2)] のデータを参照する。また、本製品は 3 年間の使用を想定し、評価した報告書であるため、使用段階以外のデータはそのまま引用するものとする。

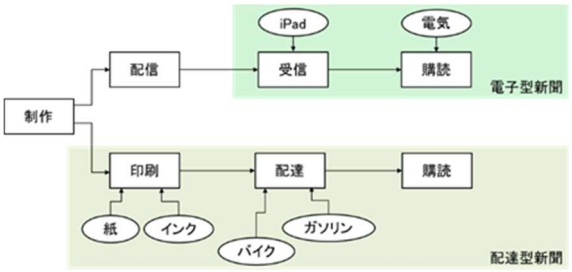


図 1 電子型新聞および配達型新聞のバウンダリ

本製品はオプションの着脱が可能であるが、本研究ではオプションはつけないものとし、研究を行う。

使用段階では、iPad の使用時間はすべて新聞を読む時間に充てるわけではないため、新聞購読時間を 6 分と設定し、計算を行うこととする。

2.3 配達型新聞の研究方法

配達型新聞の評価は大きく分けて製作段階と配達段階に分けて評価を行う。

製作段階では産業連関表をもとに朝日新聞の価格を参考にするものとする。朝日新聞の現在の購入者価格は平均で 180 円となっており、そこからマージン率を引き 121.1 円とし、IDEA v 3.4.1 を用いて評価を行う。

配達段階では、配達地域を人口規模や世帯数においては地方の市と同程度の規模を誇る「神奈川県川崎市多摩区菅地域」と設定し、配達時間を 2 時間 15 分、世帯数あたりの新聞購読者数[3)] をもとに必要配達数を 10,338 部、ガソリン量を 1.43L、バイクの対応年数を 13 年等すべて考慮したうえで IDEA v 3.4.1[4)] にて計算を行う。

配達用のバイクは「クロスカブ」を使用するものとし、荷台に 150 部、前かごに 50 部の計 200 部を一回配達で配ることができるため、10 台体制で 5 往復し配達を行うものとする。

3．結果、考察

3.1 電子型新聞の結果

計算の結果、製造段階が約 90%を占め環境負荷に大きな影響を与えているということが分かった。

表 1　電子型新聞の段階別 GHG 排出量

	割合[%]	GHG 排出量 [kgCO_{2e}]
合計	100	82.9211
製造段階	93	77.19
輸送段階	6	4.65
使用段階	1	0.1511
処理段階	1	0.93

3.2 配達型新聞の結果

新聞製作段階では 1 紙あたりの活動量 121.1 円で計算し、1 紙あたり 0.3207 kg CO_{2e} という結果を得た。これを 1 紙 3 年間あたりに表すと 331.4546 kg CO_{2e} となる。

新聞配達段階ではバイク 1 台の 1 日の GHG 排出量が計算の結果 4.958 kg CO_{2e} であり、この値を 1 日 10 台体制で 3 年間あたりに換算すると 5429.01 kg CO_{2e} になる。この数値を必要配達数 10,338 部で分割し、1 紙 3 年間あたりの GHG 排出量は 5.2515 kg CO_{2e} となる。

以上より、新聞製作段階と、新聞配達段階の評価結果を合計し、配達型新聞の 1 紙 3 年間あたりの GHG 排出量は 336.7061 kg CO_{2e} という結果となった。

3.3　電子型新聞と配達型新聞の比較

電子型新聞と配達型新聞の LCA 分析を行い、電子型新聞の 1 紙 3 年間あたりの GHG 排出量が 82.9211 kg CO_{2e}、配達型新聞の GHG 排出量が 336.7061 kg CO_{2e} という結果を得た。

今回の比較において、図 2 に示す通り GHG 排出量の観点では電子機器を用いて新聞を読む、電子型新聞のほうが、従来の配達型新聞よりも 4 倍ほど優れているということが分かった。

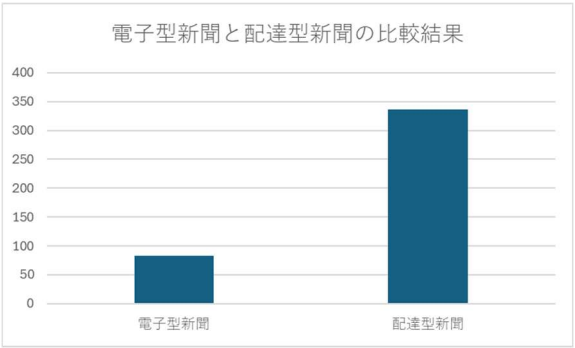


図 2 電子型新聞と配達型新聞の比較結果

3.4 考察

今回の結果から、少なくとも配達型新聞の GHG 排出量を抑えるべきであることが分かる。その中でも特に製作段階での GHG 排出が著しく改善の必要がある。

そこで、今回は新聞の QR 化を提案する。配達型新聞では新聞製作段階で多くの温室効果ガスを排出しており、単純にそこを省くことができれば環境負荷を減らすことができる。

大きなニュースや、高齢者が求めているニュースは従来通り文字に起こし、それ以外のニュースを QR 化することで新聞のページ数を減らすことができる。

この方法では、QR コードを読み取るための端末も必要となるため、その分の環境負荷は増えるが、新聞のページ数を 4 分の 1 まで減らすことができれば、従来の配達型新聞の半分ほどに GHG 排出量を減らすことができるということになる。

4．おわりに

本研究の比較結果より、電子型新聞のほうが環境面で優れていることが証明された。すべての新聞を電子化することが新聞業界の環境負荷を抑えることに 1 番近いことは間違いないが、実際にはそう簡単にできるものではない。

例えば、新聞紙は新聞を読むこと以外にも生ごみの処理等に用いることができる。このように、新聞の完全電子化は現実的に難しいため、QR 化のような徐々に電子化に切り替えていく方法が合理的であると判断できる。

引用文献

1)　総務省情報通信政策研究所．令和 4 年度情報通信メディアの利用時間と情報行動に関する調査報告書. https://www.soumu.go.jp/main_content/000887659.pdf、（参照日、2024 年 8 月 24 日）

2)　Apple, Product Environmental Report,iPad Pro 11-inch and 13-inch (M4) Product Environmental Report (apple.com),　（参照日、2024 年 8 月 16 日）

3)　一般社団法人日本新聞協会、新聞の発行部数と普及度、新聞の発行部数と世帯数の推移、https://www.pressnet.or.jp/data/circulation/circulation05.php、（参照日、2024 年 8 月 16 日）

4)　国立研究開発法人　産業技術総合研究所　安全化学研究部門 IDEA ラボ、IDEAVer3.4.1（参照日、2024 年 10 月 12 日）

鉄スクラップのリサイクルにおける合金元素の散逸量を最小化する方法の解明と、範囲分析による製品解体分離の精度の影響評価

Minimization of the dissipation of alloying elements in steel recycling and evaluation of the effect of product disassembly using range analysis

○松原周稔*[1)]、武山健太郎[1)]、星野岳穂[1)]
Amane Matsubara, Kentaro Takeyama, Takeo Hoshino
1)東京大学工学部
* amane-tosa95-517@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1.緒言

鉄鋼材は、金属素材中、世界で最も多く使用されており、我々の社会にとっては必要不可欠な基盤材料である。粗鋼の生産方法は、鉄鉱石を原料とする高炉-転炉法と、リサイクルで回収された鉄スクラップを原料とする電炉法によって生産されている。電炉法は粗鋼 1 t あたりの CO_2 排出量を高炉-転炉法の約 1/4 に抑えられ [1)]、現在は高炉―転炉法の方が生産量は多いが、カーボンニュートラルの実現に向けては電炉法の生産割合を現在より大幅に増加させる方向に進むことが予測される。

現在の鉄鋼材のリサイクルプロセスにおいては、老廃スクラップに含まれる合金元素の種類、量等が多様であることから、鉄スクラップ中の合金元素の量や比率は不明の状態で流通しており、よってスクラップ中の添加合金元素は有効利用できていない。有効利用の促進により合金元素添加用の一次資源の投入量を削減できれば、それに誘発される CO_2 排出量を削減可能であるため、スクラップの物理選別による添加合金の有効利用はこれから重要になってくる。

先行研究 [2)]では、鉄スクラップを合金種別の製造プロセスに最適に投入する場合の鉄スクラップ中の Ni, Cr, Mo の有効利用量が推計されている。しかし、分析の前提条件となる普通鋼中の合金元素濃度の分布 [3)]に起因する不確実性が考慮されていない。

分析の前提条件の不確実性を含めた最適化手法として、線形計画法の範囲分析が提案されている [4)]。この手法は、線形計画型技術選択モデルに対して適用することで最適解が変化しない前提条件の範囲を求めることが可能である。

本研究では、国内における合金元素添加用一次資源の消費量が最小となる鉄スクラップの各製鋼プロセスへの投入構造を線形計画法により推計する。また、範囲分析を行うことで、最適化した投入構造が変化しない鉄スクラップ中の合金元素濃度の許容範囲をスクラップ種別・製鋼プロセス別に推計し、現状の製品解体・分離精度の評価を行うことを目的とする。

2.研究手法

2.1 手法の概要

本研究では、２種類の合金元素 Ni, Cr それぞれについて、スクラップの有効利用により一次資源の消費量が最小となる鉄スクラップの各製鋼プロセスへの投入構造を線形計画法によって明らかにした。その後、範囲分析を用いて、最適な投入構造が変化しない鉄スクラップ中の合金元素濃度の許容範囲をスクラップ種別・製鋼プロセス別に推計した。本研究では、2005 年の日本国内を対象とした分析を実施した。

2.2 一次資源消費量最小となる投入構造における鉄スクラップ中の合金元素濃度範囲の推計

線形計画法における変数は検収品種別鉄スクラップと一次資源の各製鋼プロセスへの投入量とした。目的関数は合金元素添加用の一次資源投入量とし、これが最小となる変数を求めた。制約条件は①特殊鋼製造プロセスで合金元素の投入量と要求量が一致する、②各検収品種スクラップの投入量と統計値が一致する、③粗鋼の生産量と統計値が一致する、の 3 条件とした。加えて、範囲分析手法 [4)]に基づき、変数の値が変化しない検収品種別・製鋼プロセス別の合金元素濃度範囲を推計した。

2.3 必要なデータの推計

本研究では、2005 年の製品別・合金種別の鉄鋼材需要量を WIO-MFA(Waste Input-Output Material Flow Analysis)モデルを用いて推計した [5),6)]。

合金種別・検収品種別鉄スクラップ回収量の推計は、産業別・合金種別鉄スクラップの回収量の推計と検収品種別スクラップ回収量への分配によって推計を行った。産業別・合金種別鉄スクラップ回収量は産業別・合金種別の需要量の時系列データと製品の寿命分布を用いて動的マテリアルフロー分析を用いて推計した。推計した老廃スクラップ回収量を、最終鋼材の品種別の検収品種別鉄スクラップへのフローの調査結果 [7)]を

用いて、検収品種別スクラップに分配した。自家発生屑と加工屑の回収量は WIO-MFA モデルによる歩留まり落ちから推計する。本研究で研究対象とするスクラップはヘビー、シュレッダー、プレス、その他の老廃スクラップとステンレススクラップの 5 種類とした。

最適化計算に使用する検収品種別鉄スクラップの合金元素濃度の推計は、検収品種への各鋼材の分配量とそれらの鋼材の合金元素濃度を用いて推計した。普通鋼の合金元素濃度は、先行研究 [3]で明らかにされた形状別普通鋼の合金元素濃度分布の中間値、特殊鋼の合金元素濃度は、WIO-MFA を用いて推計を行った。

3.結果と考察

本研究で構築したモデルを用いて Ni, Cr それぞれについて合金元素添加用一次資源の消費量最小となる検収品種別鉄スクラップの投入構造を推計した。ここでは Ni に着目した場合の結果を示す。最適投入構造では、Ni の一次資源の消費量は統計値よりも、27.8%削減可能である。最適な Ni 投入のフローを図 1 に示す。また、先行研究 [3]から推計した、形状別鋼材の想定される Ni 濃度分布を図 2 に示す。

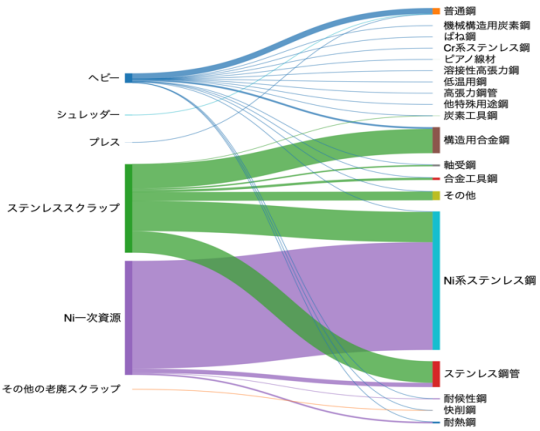


図 1　最適投入構造における Ni 元素フロー図

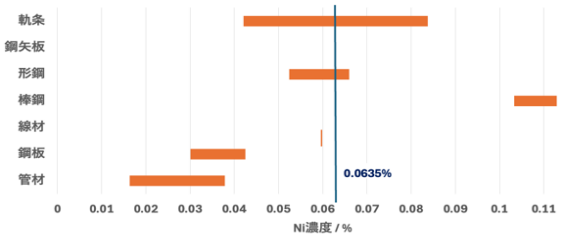


図 2　形状別鋼種の想定される Ni 濃度分布

また、範囲分析により推計した最適解が変化しないヘビーの製鋼プロセス別の Ni 濃度許容範囲を表 1 に示す。最適化計算で用いたヘビーの Ni 濃度は 0.0635%であった。ここで、Ni 濃度の制約がない普通鋼と、最適投入構造におけるヘビー投入量が 0 t であったステンレス鋼管・高速度工具鋼・その他の工具鋼に対する範囲分析は行わなかった。対象とした鋼種は許容 Ni 濃度の幅によって①幅が存在しない鋼種（赤）、②全ての濃度が許容される鋼種（青）、③増加側のみ幅が存在する鋼種（黄）の３つに大別することが可能である。

表 1　製鋼プロセス別 Ni 濃度許容範囲（ヘビー）

製鋼対象	許容減少幅 /%	許容増加幅 /%
炭素工具鋼	0	0
合金工具鋼	0	0
合金工具鋼	-0.0635	99.9365
構造用合金鋼	0	0
ばね鋼	-0.0635	99.9365
軸受鋼	0	0
Cr 系ステンレス	-0.0635	99.9365
Ni 系ステンレス	0	0
耐熱鋼	0	0.5530
快削鋼	-0.0635	99.9365
ピアノ線材	-0.0635	99.9365
溶接性高張力鋼	-0.0635	99.9365
耐候性鋼	0	99.9365
低温用鋼	-0.0635	99.9365
高張力鋼管	-0.0635	99.9365
他特殊用途鋼	-0.0635	99.9365
特殊鋼その他	0	0

国内ではヘビースクラップは主にスクラップの厚さによって分類され、添加元素濃度では区別されていないが、Ni 一次資源の消費量を削減するためには Ni 濃度による分類を行い、ヘビーの中でも③の鋼種生産には棒鋼、①では軌条と形鋼、②では残りの鋼種由来のスクラップを利用し最適投入構造を実現するのが望ましい。

4.結言

本研究では最適化計算により、Ni 添加用一次資源の消費量を最小化する鉄スクラップの投入構造が明らかになった。また、範囲分析によって最適化した投入構造が変化しないヘビーの Ni 濃度範囲を製鋼プロセス別に推計することで、ヘビースクラップにおいて現行の厚みによる分類ではなく Ni 濃度に着目した分類を行うことが望ましいことがわかった。

5.参考文献

1) world steel ASSOCIATION: “World Steel Figures 2024”, World Steel in Figures 2024,（オンライン）, 入手先 <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>,（参照 2025-1-8）

2) 柿本理一: 東京大学卒業論文(2022)

3) I. Daigo., L. Fujimura., H. Hayashi., E. Yamasue., S. Ohta., Tran, D. H., Y. Goto.: ISIJ. International, 57, (2), (2017), 388-393

4) 原卓也, エネルギー・資源学会論文誌, 40, (6), (2019), pp202-219

5) S. Nakamura., K. Nakajima.: Mater. Trans., 46, (12), (2005), pp2550-2553

6) H. Ohno., K. Matsubae., K. Nakajima., S. Nakamura., T. Nagasaka.: Journal of Industrial Ecology, 18, (2), (2014), pp242-253

7) 日本鉄源協会：“鉄スクラップの素性推計”, (2005)

建築 LCA 簡易算定ツールにおける日本モデルの拡張 ～OneClickLCA カーボンデザイナー3D 日本版～

Extension of the Japanese Model in the Building LCA Simplified Calculation Tool ～Japanese version of One Click LCA Carbon Designer 3D～

○石津旭*[1)] 、掛上恭[1)]
Akira Ishizu, Takashi Kakegami
1) 住友林業
*[1)] ISHIZU_akira@star.sfc.co.jp

1. はじめに

住友林業は、国際規格に準拠した建築用 LCA ツール「One Click LCA 日本版」を販売代理店として提供している。One Click LCA には詳細算定と簡易算定の機能があり、簡易算定機能は、企画段階において、建物の用途・規模（高さ・面積）など基本的な情報から、短時間で概算算定ができる。

元々欧州の建物がベースとなっていたが、日本の基準（構造・耐火等）に適合したモデル整備を行い、使用可能な建物用途・規模の拡張を行っている。

前報となる文献2）では事務所の簡易算定事例を報告した。本報では新たにモデルとして搭載した戸建住宅モデルの算定事例を紹介する。

1.1 初期段階での LCA の重要性

設計後期に LCA を実施した場合、多くの仕様が固まっているため、削減余地は極端に小さくなる。一方、設計の初期段階に LCA を実施する事で、脱炭素設計の効果を最大限発揮できる（図1） 。

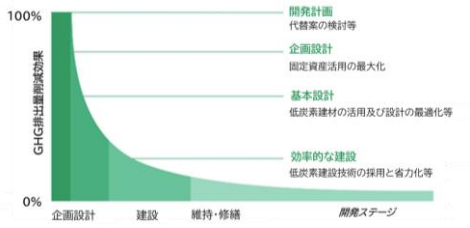


図1 GHG 排出量削減効果のイメージ図

設計の初期段階で構造・用途・規模別の GHG 排出量を見える化する事により、企画設計の検討材料として利用したり、脱炭素設計の目標値・ベースラインを把握することに繋がる。将来的に資材数量を実態に合わせて詳しく入力した時の結果の妥当性の検討にも活用できる。

2. 簡易算定機能

One Click LCA 日本版の簡易算定機能、カーボンデザイナー3D（以下 CD3D）は、一定の精度を担保しつつ、短時間（10分程度）で、与えられた条件から、工程別・部位別・資材別の GHG 排出量・CO2固定量を導き出すツールである。次章でその簡易算定機能の作業フローを説明する。

2.1 簡易算定機能の作業フロー

2.1.1 基本情報入力

延床面積・算定期間を入力。参照モデルを選択する。参照モデルは国際モデル・日本モデル・他があり、現在（2025年3月）、国際モデルは15用途、日本モデルは6用途22モデルが選択可能である。

2.1.2 条件設定

算定に含める部位（基礎・躯体・仕上・設備等）を定義し、階数や構造モデルを選択、基礎の条件等を入力する。構造モデルは、構造・高さ・最大柱間距離などの条件から選択する（図2）。

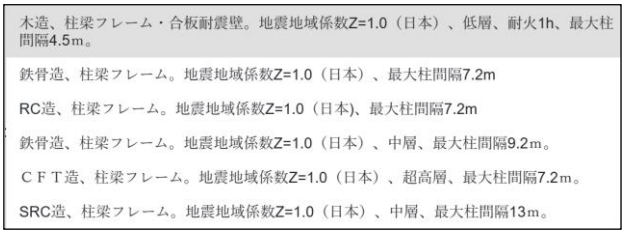


図2 構造モデル（抜粋）

2.1.3 建物の寸法・面積の自動計算

建物の寸法（高さ・幅・奥行等）各部位の面積（屋根・床・壁等）・長さ（柱・梁・階段）が予め設定されたパラメータで自動計算される。（図3）。



図3 建物の寸法・面積の自動計算画面の例

2.1.4 算定結果表示

部位別・資材別の算定結果が出力され、更にモデル毎の比較検証も容易に行える（図4）。

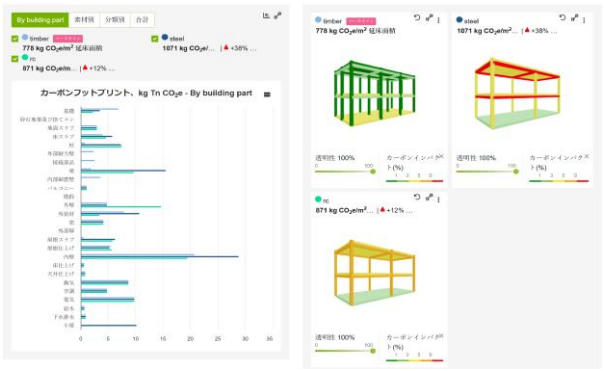


図4　結果画面の例

2.1.5　算定結果の追加・変更・再利用

ユーザーが作成した複合原単位を用いた算定モデルを登録することで、ユーザーの独自仕様を反映したモデル構築にも対応することが出来る。

3. 簡易算定機能の拡張

元々搭載されていた建築モデル（国際モデル）は、欧州の建物がベースであり、構造・耐火等の要件が異なる日本の建築に適用することが難しかった。そこで、国内建築の資材数量を元に CD3D 日本版の標準搭載建築モデルを整備した。2025年3月段階で算定可能な用途・規模を下表に示す（表1）。

表1　CD3D 日本版建築モデル

用途	構造	柱スパン	低層	中層	高層	超高層
			1-3F	4-8F	9-15F	16F-
オフィス	W造	≦4.5m	○	-	-	-
	S造	≦7.2m	○	○	○	-
		≦9.2m	-	○	拡張	-
	RC造	≦7.2m	○	○	-	-
	CFT造	≦7.2m	-	-	-	○
ホテル	S造	≦7.2m	○	○	○	-
	CFT造	≦7.2m	-	-	-	○
倉庫	SRC造	≦12.3m	-	○	-	-
店舗	S 造	≦9.2m	拡張	-	-	-
戸建住宅	W造	-	拡張	-	-	-
	S造	≦4.5m	拡張	-	-	-
	RC造	-	拡張	-	-	-
集合住宅	W造	-	-	拡張	-	-
	RC造	≦7.2m	○	○	拡張	-

戸建住宅は国内文献を参照し、一部当社にて情報を付加することで拡張を行った。他の用途・規模については、協力企業より実物件の図面及び見積明細の提供を受け、使用可能なモデルを拡張した。

3.1　戸建住宅モデル

文献3）に記載の戸建住宅モデルを元に構造計算及び積算を実施し資材数量を算出した。サンプルモデルに関する図面（図5）及び記述子（表2）を記す。

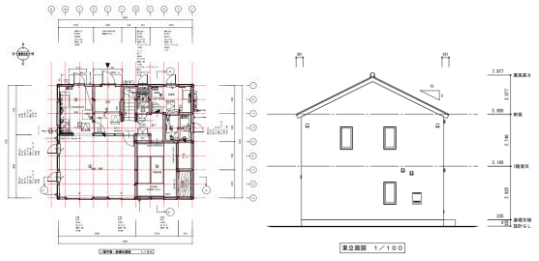


図5　平面・立面図

表2　記述子

サンプル建物概要	用途	戸建住宅
	延床面積	125.86㎡
	階数	2階
	構造	一般木造／鉄骨造／RC造
	参考	CASBEE標準プラン
フォアグラウンドデータ	・部材リストを用いて数量算出 ・躯体は耐震等級1の構造計算で数量算出 ・木造のみCAD積算データから算出 ・サッシ・設備等はメーカーヒアリングにより収集	
非算定項目	外構、地盤改良、非主要金物、家電、家具、防蟻、シーリング、テープ、接着剤、板金、カーテン	

4.　戸建住宅の算定結果

CD3D 日本版を使用して木造･鉄骨造･RC 造の簡易算定を行った。算定概要を下表に示す（表3）。

表3　簡易算定概要

算定概要	目的	簡易算定ツールによる構造別GHG排出量計算
	実施日	2025年1月10日
	評価期間	60年
	使用ツール	OneClickLCA　ライフサイクルカーボン2022(推奨版) Carbondesigner3D(簡易算定ツール)
	評価範囲（システムバウンダリ）	建築物のライフライクルを通した排出量のうち、使用･維持･エネルギー消費･水消費分を除く（A1～A3、A4、A5、C1～C4）

4.1　算定結果

上記条件で算出した結果を以下（図6）に示す。

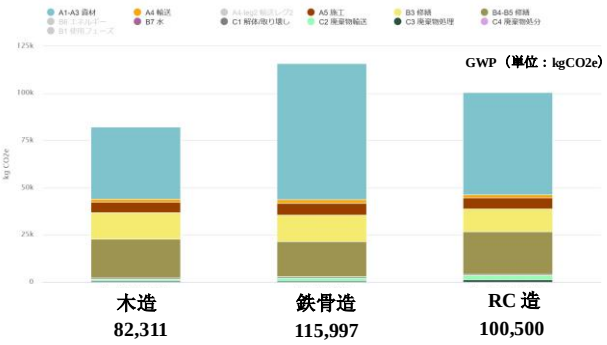


図6　簡易算定の結果グラフ

簡易算定機能の活用により、資材数量が明確でない段階から GHG 排出量を定量化することができ、戸建住宅の構造検討段階や、脱炭素設計の計画段階において、具体的な検討が行える可能性を示した。

5. 課題と今後の対応

簡易算定機能の活用による効率的な脱炭素設計を支援するため今後は以下の課題に取り組んでいく予定である。

① 算定可能な用途・規模の更なる拡充
② 削減提案手法の検討

6. 引用文献

1) 住友林業：OneClickLCA 日本版 HP, 入手先 <https://sfc.jp/treecycle/value/oneclicklca.html>
2) 掛上恭, 石津旭：第20回日本 LCA 学会研究発表会, 宇都宮, （2024）, 建築 LCA 簡易算定ツールにおける日本モデルの提案, 2-P1-42
3) 財団法人建築環境・省エネルギー機構 CASBEE-すまい(戸建)評価マニュアル(2007年版)参考資料4

ペット飼育のカーボンフットプリント分析

Analysis of the Carbon Footprint of Pet Ownership

○都筑未夢*[1)]、松瀬真未[2)]、加河茂美[3)]
Miyu Tsuzuki, Mami Matsuse, Shigemi Kagawa
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学部, 3)九州大学経済学研究院
*tsuzuki.miyu.048@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

日本では少子高齢化が進行する中で、家庭におけるライフスタイルや価値観が多様化している。このような社会構造の変化に伴い、ペットは単なる飼育対象に留まらず、家族の一員や心の癒しを提供する存在として、その役割を拡大している。2023 年時点で日本におけるペットの飼育数は、犬猫だけで約 1,600 万頭[1)]に上り、15 歳未満の子供の人口約 1,200 万人を大きく上回る。この現象は、ペットが現代社会において重要な社会的・経済的地位を占めることを示唆している。よって、脱炭素社会の実現に向けても、影響力の大きいペット業界からの CO_2 排出量の削減することが重要である。したがって本研究では、ペット飼育に伴う地球温暖化への影響を明らかにすることを目的に、ペットフード、ペット医療、ペット用品、ペットサービスの 4 項目別の CO_2 排出量を推計する。

2. 分析方法・データ

2.1 分析方法

本研究は、(1)式に示される環境拡張型産業連関モデルを用いて、国内のペット飼育におけるペットフード・ペット用品・ペット医療・ペットサービスの各項目別の直接・間接 CO_2 排出量を推計した。

$$\mathbf{q} = \hat{\mathbf{e}}\mathbf{L}\mathbf{f} \quad (1)$$

ここで、**q**はペット飼育の最終需要に伴って各産業から排出される直接・間接の CO_2 排出量を表すベクトルである。$\hat{\mathbf{e}}$は各部門の直接 CO_2 排出係数を表すベクトルを対角化した行列であり、**L** はレオンチェフ逆行列を表し、**f**は最終需要ベクトルを表す。本研究で用いた最終需要ベクトルは、ペットフード・ペット用品・医療・ペットサービスの家計消費額をそれぞれ対応する産業連関表の部門に割り当て、それ以外の要素を全て 0 にしたベクトルである。また、(1)式により推計した CO_2 排出量をペットの頭数で割ることで、ペット一頭当たりの CO_2 排出量を求めた。

2.2 データ

本研究では、直接 CO_2 排出係数のデータを国立環境研究所による環境負荷原単位データブック(2015 年版)[1)]より取得する。逆行列のデータについては、総務省による 2015 年産業連関表[2)]の購入者価格表より取得した。最終需要としては、ペットフードには飼料・有機質肥料を、ペット用品にはその他の製造工業製品を、ペット医療には医療を、ペットサービスには洗濯・利用・美容・浴場業を対応させ、家計消費額を総務省による家計調査の世帯主の年齢階級別 1 世帯当たりの品目別支出金額[3)]のペットフード、動物病院代、他の愛玩動物・同用品、他の愛玩動物関連サービスより用いた。また、ペットフード協会による令和 6 年(2024 年)全国犬猫飼育実態調査の主要指標サマリー[4)]より、2015 年の犬・猫の数を用いた。

3. 結果・考察

図 1 はペットを一頭飼育するにあたり排出される CO_2 量の内訳を示している。ペット一頭あたりに排出される CO_2 量は 478kg-CO_2 であった。日本の温室効果ガス排出量データ[5)]より、人間一人あたりの CO_2 排出量は 9～10t-CO_2 であり、ペットは人間の約 20 分の 1 であることが分かる。また内訳を見ると、ペットフード部門による CO_2 排出量が半分以上を占めていることが読み取れる。

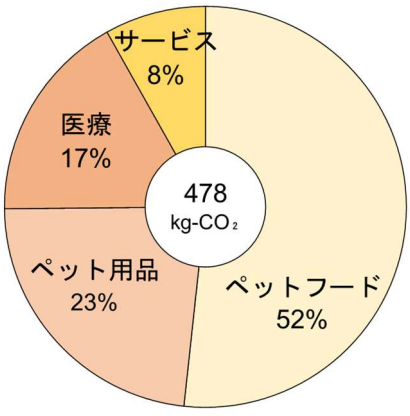


図 1. ペット一頭当たりの CO_2 排出量の内訳

図 2 から図 4 までは、ペットフード・ペット用品・ペット医療・ペットサービスの 4 項目の各産業からの CO_2 排出量上位 5 項目を示している。全項目において、直接的にペット飼育関連部門と関係する部門からの

CO_2 排出量が最も多かった。他部門からの間接的な CO_2 排出量においては、ペットフードにおいては、耕種農業が最も多く、他の項目においては、電力が最も多かった。ペットフードにおいても、電力の占める CO_2 排出量が他の項目と同様に多く、電力が CO_2 排出量に大きく起因しているとことが分かる。

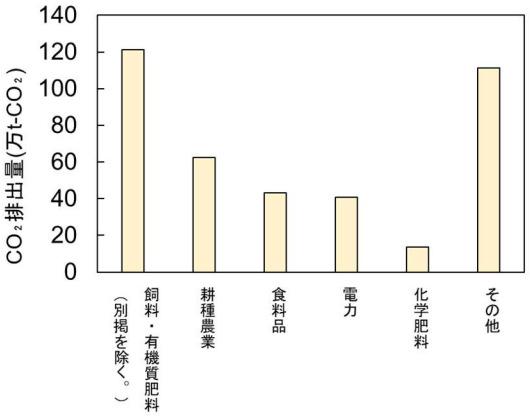


図 2. ペットフード由来の CO_2 排出量 (2015 年)

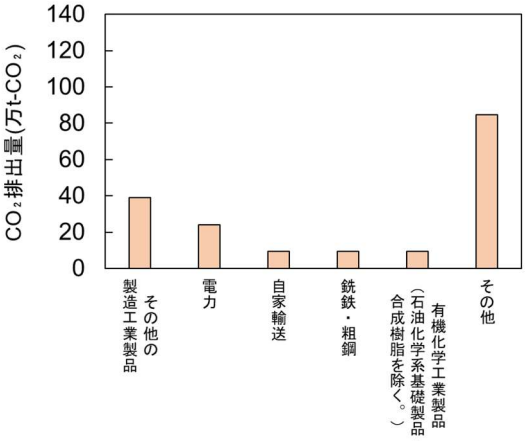


図 3. ペット用品由来の CO_2 排出量(2015 年)

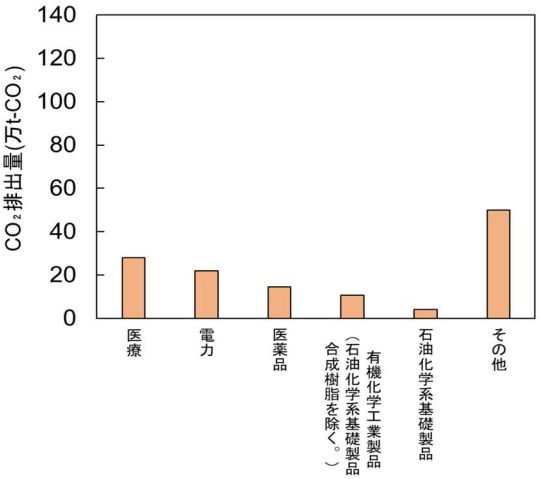


図 4. ペット医療由来の CO_2 排出量(2015 年)

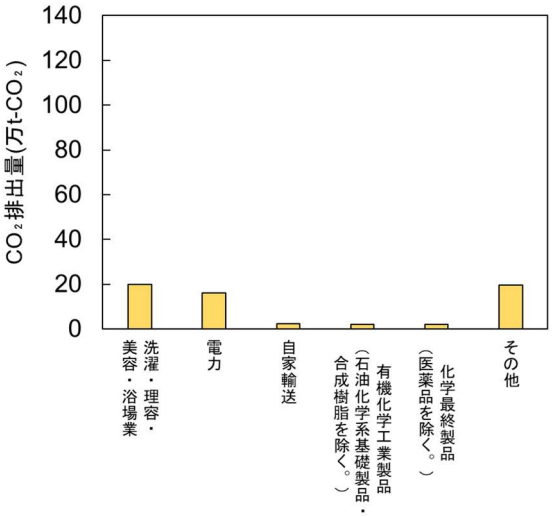


図 5. ペットサービス由来の CO_2 排出量(2015 年)

以上のように、本要旨はペット飼育に伴う CO_2 排出量の最も多くの割合を占めるのはペットフードであることを明らかにし、ペット飼育に関わる各項目において注目すべき部門を明らかにした。

4. 参考文献

1) K. Nansai, Embodied energy and emission intensity data for Japan using input-output tables (3EID); 2015
2) 総務省：平成 27 年（2015 年）産業連関表, 総務省 HP, 入手先< https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200603&tstat=000001130583&cycle=0&year=20150&month=0&tclass1val=0> (参照 2025-01-14)
3) 総務省：家計調査,世帯主の年齢階級別 1 世帯当たりの品目別支出金額,総務省 HP,入手先< https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200561&tstat=000000330001&cycle=7&year=20150&month=0&tclass1=000000330016&tclass2=000001087835&stat_infid=000031454395&result_back=1&tclass3val=0> (参照 2025-01-14)
4) 一般社団法人ペットフード協会：全国犬猫飼育実態調査,主要指標サマリー,ペットフード協会 HP,入手先<https://petfood.or.jp/pdf/data/2024/3.pdf > (参照 2025-01-14)
5) 国立環境研究所：日本の温室効果ガス排出量データ,国立環境研究所 HP,入手先< https://www.nies.go.jp/gio/archive/ghgdata/index.html > (参照 2025-01-14)

液体アンモニア電解によるオンデバイス生成水素を用いた燃料電池自動車のCO$_2$排出量評価

Evaluation of greenhouse gas emissions of fuel cell vehicles using on-device produced hydrogen by liquid ammonia electrolysis

○村上 路有久*[1)]、平尾 雅彦[1),2)]、野田 優[1)]、花田 信子[1)]
Luke Murakami, Masahiko Hirao, Suguru Noda, Nobuko Hanada
1) 早稲田大学, 2) 東京大学
*murakamiluke@fuji.waseda.jp

1. 緒言

2022年の日本におけるCO$_2$などの温室効果ガス(GHG: greenhouse gas)排出量の中で、輸送部門の割合は18.5%を占めている[1)]。輸送部門のGHG排出量の削減は重要であり、燃料電池自動車(FCV：Fuel cell vehicle)への移行が一つの手段として考えられる。また、日本は2040年に年間水素換算で約3 Mtの水素キャリアを輸入し、そのほとんどがアンモニアであると想定されている[2)]。現在FCVの燃料は高圧水素が使用され、アンモニアで輸入した場合、水素に分解してからFCVに充填する必要がある。そこでFCVに液体アンモニアを供給し、燃料電池の電力の一部でアンモニアをオンデバイスで電解して水素を生成し、燃料電池に供給する新しいFCV(アンモニアFCV)を提案する。図1にアンモニアFCVの模式図を示す。アンモニアFCVは高圧水素を燃料とするFCV(水素FCV)に比べて燃料を短時間に充填可能になると考えられる。

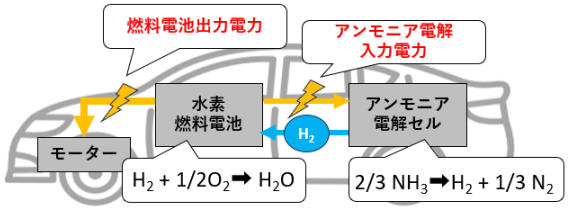


図1 アンモニアFCVの模式図

2. 目的

本調査では、アンモニアFCVを用いるシナリオのGHG排出量を評価し、どのプロセスの影響が大きいか調査することを目的とした。また水素FCV・電気自動車(BEV：Battery electric vehicle)・ガソリン車(ICEV：Internal-combustion engine vehicle)のライフサイクルにおけるGHG排出量を評価し、アンモニアFCVと比較することを目的とした。

3. 研究方法

影響領域を地球温暖化、機能単位を車が1 km走行するとして各シナリオにおけるGHG排出量を評価した。自動車の製造などに関するデータはMiottiら[3)]の論文の値から算出した。

3.1 アンモニア・水素FCVのGHG排出量評価

アンモニア・液化水素はオーストラリアで製造し、船により日本の川崎に輸送し、東京のステーションで充填するシナリオを想定した。アンモニアFCVシナリオのシステム境界を図2に、水素FCVシナリオのシステム境界を図3に示す。車体の製造に伴うGHG排出量は、既報[3)]をもとに算出した。船・トラックの製造と図中の破線で囲われたプロセスにおける環境負荷は含めなかった。アンモニア電解のプロセスではGHGは排出されないが、損失した電力に基づくGHG排出量を仮想的に割り当てた。また、アンモニアFCVにおける電解に要する電力とFCで得られる電力の比をrとし、rに関する感度分析を行った。液化水素のボイルオフで生じた気体水素は廃棄することとした。ボイルオフではGHGは排出されないが、失った水素の製造・輸送時などで排出されるGHG排出量を仮想的に割り当てた。水素ガスの圧縮に必要な電力は、2015年時点の東京電力の系統電力から供給されたものを使用した。

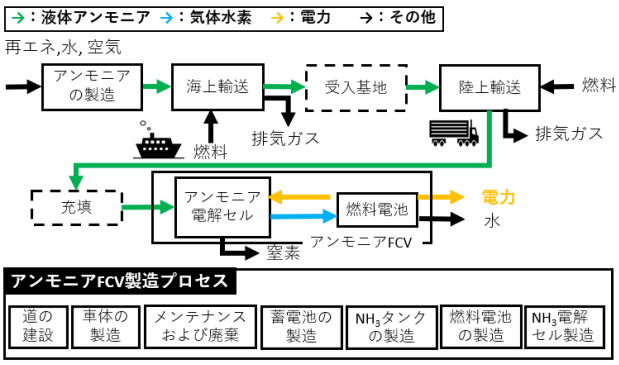


図2 アンモニアFCVシナリオのシステム境界

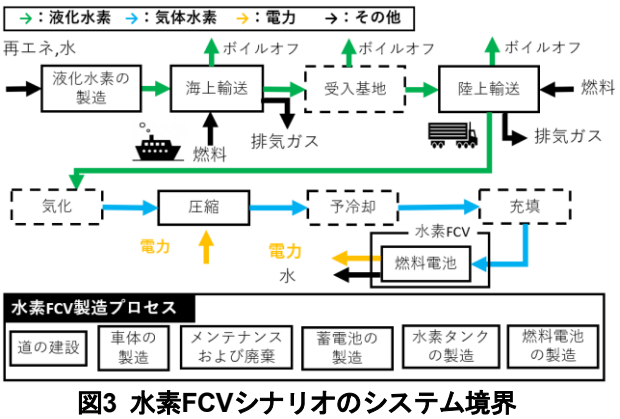


図3 水素FCVシナリオのシステム境界

3.2 BEV・ICEVのGHG排出量評価

BEVは国内で発電した電力を用い、ICEVは国内で生産したガソリンを燃料に用いた。図4にBEVシナリオのシステム境界を、図5にICEVシナリオのシステム境界を示す。BEVシナリオは発電方法を風力発電、太陽光発電、2015年の東京電力の3つの場合に分けて評価した。送電に必要な設備の材料および建設は含めなかった。ICEVシナリオではガソリンの製造所からガソリンスタンドへの輸送は含めなかった。

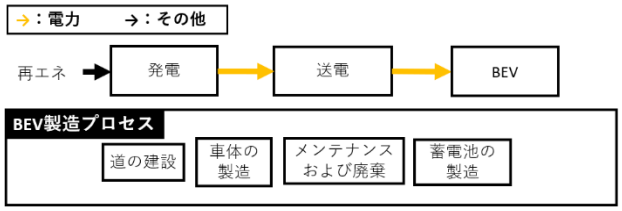


図4 BEVシナリオのシステム境界

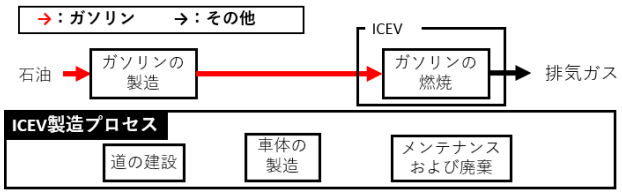


図5 ICEVシナリオのシステム境界

4. 結果及び考察

4.1 アンモニアFCVのGHG排出量評価

図6にアンモニアFCVにおける電解に要する電力とFCで得られる電力の比*r*に対する合計GHG排出量の変化を示す。燃料電池の理論起電圧は1.23Vで、アンモニア電解のエンタルピー基準の理論電解電圧は0.277 Vなので、最小の*r*は22.5%と算出された。この時アンモニア電解は全体の4.08%を占めた。一番多くGHGを排出するのは車体の製造で、全体の32.5%を占めた。*r*を変化させるとアンモニア電解のGHG排出量のみが増加した。*r*=50%の時、アンモニア電解はFCで得られた電力の半分を消費し、全体の12.8%を占めた。*r*=83.4%の時、ICEVシナリオの合計GHG排出量と一致し、アンモニア電解は全体の42.4%を占めた。ここからアンモニア電解と燃料電池の性能がアンモニアFCVのGHG排出量に大きく関わることが分かった。

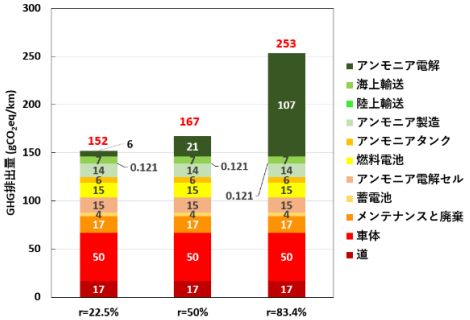


図6 電解に要する電力とFCで得られる電力の比 *r* に対する合計GHG排出量の変化

4.2 各シナリオのGHG排出量比較

図7にアンモニアFCVシナリオ(*r*=22.5%), 水素FCVシナリオ、BEVシナリオ、ICEVシナリオのGHG排出量の比較を示す。※の項目は直接的にはGHGを排出しない。合計のGHG排出量はBEV(風力)<BEV(太陽光) <水素FCV<アンモニアFCV<BEV(系統電力)<ICEVの順で多くなった。水素FCVに比べアンモニアFCVはアンモニア電解セル製造やアンモニア電解によるGHG排出があるため、アンモニアFCVの方が合計GHG排出量が多くなった。BEVに比べアンモニアFCVは製造時のGHG排出量が多いが、合計GHG排出量は系統電力利用のBEVの方が多くなった。しかし系統電力にかかるGHG排出量が下がればBEVの合計GHG排出量の方が低くなることも考えられる。ICEVに比べアンモニアFCVは燃料の利用時にGHG排出が無く、ICEVの方が合計GHG排出量が多かった。しかし*r*値が83.4%を越えればアンモニアFCVの方がGHG排出量が多くなった。

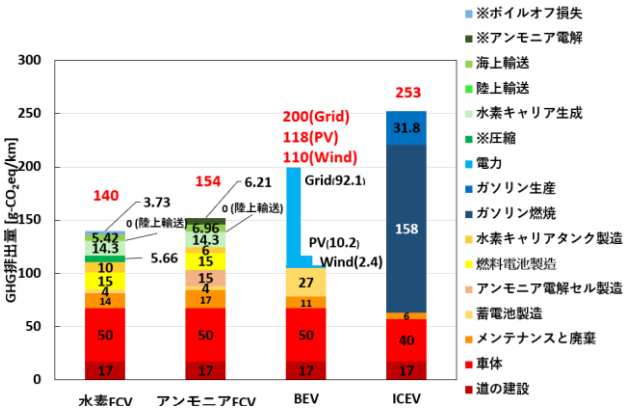


図7 各シナリオのGHG排出量

5. 結論

アンモニアFCVという新方式を提案し、ライフサイクルにおいて各プロセスにおけるGHG排出量を調査した。結果アンモニア電解の電力消費が多くなるほどアンモニア電解に割り当てられるGHG排出量の影響が増えた。次に水素FCV, BEV, ICEVとアンモニアFCVの各シナリオにおける合計GHG排出量を比較した。結果BEV(風力) < BEV(太陽光) < 水素FCV < アンモニアFCV(*r*=22.5%) < BEV(系統電力) < ICEVとなった。

参考文献

1) 国土交通省, “輸送部門における二酸化炭素排出量”, (オンライン),入手先 <https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html>, (参照2025-01-14)

2) IEA,”Global Hydrogen Review 2024”, (オンライン), 入手先<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>, (参照2025-01-14)

3) Marco Miotti, Johannes Hofer, Christian Bauer : Int J LCA, 22, (2017), p. 125086.

滋賀県東近江市の廃食用油の再資源化における カーボンフットプリントの解析

Quantifying the carbon footprint of biodiesel from waste cooking oil in Higashi Omi, Shiga

○大聖竜央*[1)], 重富陽介 [1)]
Ryo Daisho, Yosuke Shigetomi
1) 立命館大学
* ce0062fh@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

近年、地球温暖化対策のひとつとして、廃食油、微細藻類、サトウキビ、古紙などを主な原料として製造されるバイオ燃料 (BDF : Bio-Diesel Fuel) が注目されている。日本では、1998 年から滋賀県東近江市 (旧愛東町) で、使用済み天ぷら油を回収し BDF に再資源化する活動が始まり、現在では全国各地でこの活動が行われている。しかしながら、一部 [1-2)] を除き多くの地域ではその正味の環境影響が明らかにされていない。

そこで本研究では、滋賀県東近江市の菜の花エコプロジェクトを事例として、現地でのヒアリング調査や土地情報システム (GIS) の活用を通じて同市の廃食油が BDF として活用されることに由来するカーボンフットプリントへの影響を定量化し、地域内における廃食油の BDF 化の意義について検討する。

2. 方法

2.1 廃食油由来の BDF のライフサイクル CO_2 排出量の算定方法

本研究で想定した廃食油を BDF とする再資源化におけるシステム境界を図 1 に示した。図中のT_1は、自家用車による家庭から回収地点までの輸送 (輸送 1 とする) におけるガソリン由来の CO_2 排出量を表す。T_2は、トラックによる回収地点から BDF 製造装置までの輸送 (輸送 2 とする) における軽油由来の CO_2 排出量を表す。T_3は、トラックによる BDF 製造装置からグリセリン処理施設までの輸送 (輸送 3 とする) における軽油由来の CO_2 排出量を表す。*BDFP* は、BDF 製造に由来する CO_2 排出量を表す。

東近江市で BDF を 1 L 製造する際のライフサイクル CO_2 排出量 *CDE* (kg-CO_2/L-BDF) については、式(1)により求めた。

$$CDE = T_1 + T_2 + T_3 + BDFP \quad (1)$$

T_1 は式(2)により求めた。

$$T_1 = \frac{D_1 \times GL}{WA \times FE_1} \quad (2)$$

ここで、D_1 は家庭から回収地点までの平均輸送距離 (km/世帯) を表す。*GL* はガソリン 1 L 当たりの CO_2 排出量 (kg-CO_2/L-gasoline) を表す。*WA* は一世帯あたりの平均廃食油排出量 (L/世帯) を表す。FE_1は、乗用車の燃費 [3)] (km/L-gasoline) を表す。

次に、T_2を式(3)により求めた。

$$T_2 = \frac{D_2 \times DL}{WCOP \times FE_2} \quad (3)$$

ここで、D_2は回収地点から BDF 製造装置までの距離 (km) を表す。DLは軽油 1 L 当たりの CO_2 排出量 (kg-CO_2/L-diesel) を表す。$WCOP$は廃食油の回収量 (L) を表す。FE_2はトラックの燃費 (km/L-diesel) を表す。

T_3を算出するにあたっては、「回収頻度」、「処理施設の場所」および「処理方法」を東近江市役所にヒアリン

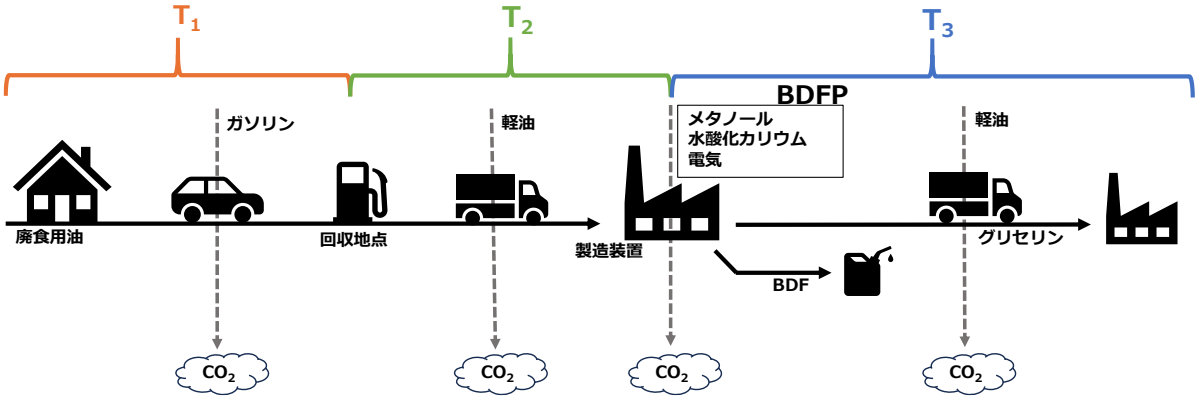


図 1　本研究が考慮した廃食油から BDF への再資源化におけるシステム境界

グ調査することで得た。得られた情報をもとにグリセリン 1 L あたりの CO_2 排出量を推計し、これを BDF 1 L あたりに換算することにより求めた。

最後に、$BDFP$の算定方法について説明する。東近江市では、回収された廃食油は、まずろ過とタンクでの沈殿分離によって、水分や細かいごみを取り除く。次に、反応槽に 200 L の廃食油を投入し、メタノール 36 L、触媒(水酸化カリウム)3 kg を加え、約 90 分加熱攪拌する。ここで、グリセリンが分離される。さらに、純度を高めるために水で二度洗い、脱水処理することで BDF が完成する。BDF 製造の際の電力使用による CO_2 排出量は、製造業者である「愛のまちエコ倶楽部」へのヒアリング調査および環境省・経済産業省が公開している電気事業者別排出係数 [4] を用いた。また、メタノール、水酸化カリウム使用による間接排出量の算定には、IDEA v3.3.0 を用いた。

2.2 家庭から回収地点までの平均輸送距離の推計方法

2020 年の東近江市全体の世帯数 42,899 世帯に対して、八日市地区の世帯数は 19,192 世帯数であり、東近江市の世帯の約半数が八日市地区に集中している。また、八日市地区以外の同市内の正確な廃食油の回収場所については把握が困難な状況である。

そこで今回は、同地区における家庭から回収地点までの平均輸送距離を式(2)の D_1 とした。具体的には、ArcGIS とグーグルマップを用いて、八日市地区のメッシュ (500m×500m) あたりの世帯数と、メッシュの中心から乗用車で最短で行くことができる回収地点までの距離により推計した。

2.3 廃食油の排出原単位の推計方法

東近江市の廃食油の排出原単位 (WA) の推計は、まず、家計調査から東近江市での食用油の購入量を推計した。東近江市は、人口 112,819 人 (2020 年) であり、小都市 A に該当する。そこで、小都市 A における一世帯あたり食用油の平均購入量に、全国油脂事業協同組合連合会が公表する使用済みオイルのリサイクルの流れ図 [5] から得られる食用油が廃食油になる割合を乗じた値を WA とした。

3. 結果と考察

本研究で考慮した廃食油の再資源化におけるシステムに関する CO_2 排出量の算定結果を表 1 に示す。輸送 1、2、3 における BDF の単位生産あたり CO_2 排出量 T_1、T_2、T_3 は、それぞれ 1.168 kg-CO_2/L-BDF、0.099 kg-CO_2/L-BDF、0.049 kg-CO_2/L-BDF と見積もられた。BDF 製造過程での CO_2 排出量は、0.618 kg-CO_2/L-BDF と推計された。以上より、本研究で想定した廃食油を BDF として再資源化した際の CO_2 排出量の合計 (CDE) は、1.934 kg-CO_2/L-BDF となった。

表 1　T_1、T_2、T_3 および BDFP の算定結果

T_1	1.168	kg-CO_2/L-BDF
T_2	0.099	kg-CO_2/L-BDF
T_3	0.049	kg-CO_2/L-BDF
BDFP	0.618	kg-CO_2/L-BDF
CDE	1.934	kg-CO_2/L-BDF

軽油 1 L あたりのライフサイクル CO_2 排出量は、2.889 kg-CO_2/L-diesel である。走行状態が同じであるときは、軽油と BDF を利用した場合の燃費に差はないと考えられる [6]。よって、BDF を 1L 製造し、それを軽油と代替するごとに CO_2 排出量を 0.955 kg 削減しているとみなすことができる。著者らのヒアリング調査によると、2023 年に同市の家庭から実際に回収された廃食油は 8.1 t であり、そこから 25,890 L の BDF が製造されたことを確認している。したがってこのときの BDF 製造による軽油の代替効果は、約 25 t-CO_2 と考えられる。しかしながら、購入された食用油から廃食油になる割合 [5] を考慮すると、さらに廃食油の回収率を上げて CO_2 を削減する余地があると考えられることから、今後はより高い回収率を達成するための方策について検討が進められていくことが重要である。

より詳細な結果や考察については、本学会発表において報告する。

4. 謝辞

本研究は、東近江市役所およびあいとうエコプラザ菜の花館の情報提供をもとに行われた。

5. 引用文献

1) 蒲原弘継, 山口瞬, 橘隆一, 後藤尚弘, 藤江幸一 (2008) *日本LCA 学会誌*, 4(4), 318-323.
2) 寺川卓志, 東野達 (2008) *エネルギー・ 資源学会誌*, 29(6), 1-7.
3) 国土交通省 (2024) 自動車燃費一覧
4) 環境省 (2023) 算定方法・排出係数一覧
5) 全国油脂事業協同組合連合会 (2021) UC オイルのリサイクルの流れ図 (令和 2 年度版)
6) 藤井修 (2008) 久留米工業大学研究報告

Evaluation of the Carbon Negative Potential in Pig Husbandry with Novel Technologies

○李　友仁*[1)]、一杉　佑貴[1)]、利谷　翔平[2)]、寺田　昭彦[2)]、林　彬勒[1)]
Yu-Jen Lee, Yuki Ichisugi, Shohei Riya, Akihiko Terada, Bin-Le Lin
1) 産業技術総合研究所, 2) 東京農工大学
* yujen.lee@aist.go.jp

1. Introduction

Pig husbandry is deemed an industry requiring significant resource input, giving rise to a high impact on the environment, including a large amount of greenhouse gas (GHG) emission[1)]. As a result, the potential of carbon negativity, or negative global warming potential (GWP) of pig husbandry has been investigated by introducing novel agricultural technologies using life cycle assessment (LCA). Unlike conventional pig husbandry, novel technologies evaluated in this study include fast-growing crop cultivation, pig manure treatment using dry anaerobic digestion (dry AD), and microbial protein (MP) production using biogas from dry AD. This study found that the pig husbandry system with all three novel technologies (fast-growing crop + pigpen + dry AD manure treatment + MP production) can be sustainable in Japan, with a reduction of 81.5% of GWP compared to a conventional system. Although CO_2 in biogas may increase the system's overall GWP, dry AD coupled with MP production may be an innovative technique utilizing the originally composted pig manure, achieving overall carbon negativity compared to traditional pig husbandry.

2. Methodologies

2.1 System boundary and functional unit

The processes included in the system boundary are (1) pig feed production, (2) pigpen operation, (3) waste treatment of pig manure, and (4) upcycling of treated waste via MP production. Traditional pig husbandry, serving as the base scenario, includes a typical feed production unit consisting of 79% corn + 21% soybean (w/w, both imported from overseas)[2)], pigpen operation, agricultural wastewater treatment of pig urine, and composting of pig feces. Novel technologies include TUAT1 fast-growing rice (TUAT1) substituting corn in pig feed, manure treatment using dry AD, and MP production using biogas (from dry AD). Since MP production requires biogas as the carbon source, the MP production unit always appears along with the dry AD unit. Regarding the biogas formation, 55% CH_4 + 45% CO_2 (v/v)[2)] was used for calculation. Effects of other trace gas (e.g. ammonia, hydrogen sulfide) are not considered. For MP production, methane-oxidizing bacteria (MOB) was implemented in this study (data not shown).

As for the functional unit, 1 kg protein has been set as the functional unit, with protein content of pork being 18.8% (w/w)[3)] and MP being 62.83% (w/w)[4)]. Scenarios with novel technologies being introduced are listed in **Table 1**.

Table 1. Novel technologies included in scenarios

	a (base)	b	c	d	e
TUAT1	X	O	X	X	O
Dry AD	X	X	O	O	O
MP production	X	X	X	O	O

2.2 Protocol: Database and software used

The LCA analysis protocol was established based on ISO 14040 and 14044. IDEA database ver 3.4, including the GWP of more than 4000 products per unit provided in Japan, was used as a reference for each material and energy input and output crossing the system boundary[]. The overall process GWP for different scenarios was calculated using Microsoft Excel.

3. Results and discussion

3.1 GWP of scenarios being studied

From **Figure S1** and **Table S1**, for the conventional pig husbandry (Scenario a), an overall GWP of 69.24 kg-CO_2eq was calculated to produce 1 kg protein, with about 45% contributed by corn production, followed by feces composting and soybean production. However, if substituting 10% (w/w) of corn in pig feed with TUAT1[2)], the overall GWP can be reduced to 66.45 kg-CO_2eq/kg protein produced (-4.0% from the base scenario).

For scenario c (with dry AD but no MP production), if CO_2 in biogas was emitted entirely to the atmosphere, even if the CH_4 in biogas was completely used as electricity for pigpen and dry AD unit without leakage, the overall GWP would still largely increase to 88.6 kg-

CO_2eq/kg protein, or +24.5% from the base scenario. Nevertheless, if biogas was used to produce MP, the overall GWP would vastly decrease to 12.83 (feed without TUAT1) and 12.43 (feed with TUAT1) kg-CO_2eq/kg protein, respectively, or -81.5% compared to the base scenario. **Table 2** lists the GWP variation after introducing novel technologies to the base scenario.

Table 2. GWP variation after novel technology introduction

	GWP variation from base scenario
TUAT1	-4.0%
Dry AD	+24.5%
MP production	-81.5%

3.2 Contribution of GWP variation for different novel technologies

If considering the GWP per kg crops being produced, as in **Table 3**, since the TUAT1 has lower GWP, around one-third of corn and one-seventh of brown rice, the overall GWP in pig husbandry is expected to decrease with a higher substitution ratio of TUAT1 in pig feed.

Table 3. GWP per kg selected crop

	GWP [kg-CO_2eq/kg]	Source
Brown rice	1.246	IDEA ver 3.4[5)]
Corn	0.591	IDEA ver 3.4[5)]
Soybean	0.930	IDEA ver 3.4[5)]
TUAT1	0.184	This work

For biogas formation, 55% CH_4 + 45% CO_2 (v/v)[1)] was used for calculation. Nonetheless, the higher the fraction of CO_2 in biogas, the lower the calorific value the biogas becomes, which may limit its useability since CO_2 in pig husbandry is of little value and has no choice but to be emitted. As a result, improving the quality of biogas by increasing the CH_4 fraction turns out to be a research aim with high priority. Alba-Reyes et al. (2023) reported that 60% (v/v) CH_4 with the rest being CO_2 can be achieved[1)], which indicates that trials of increasing the CH_4 fraction in biogas are also worthwhile. Also, since the GWP of CH_4 is about 25 times as CO_2, leakage prevention of dry AD units is also necessary.

For MP production, scenarios d and e have shown vast decrease of GWP per kg protein can be anticipated with MP production. Since the protein ratio of cultivated microbes can reach up to 70%[4)] with less resource input needed than in pig husbandry, MP can be a strong candidate for reaching negative GWP in pig husbandry, via valorzing pig manure. Plus, if CO_2 can be simultaneously converted to other compounds with lower GWP, such an effect would be more significant. Li et al. (2024) have reported a hydrogen oxidizing bacteria (HOB) species with the ability to synthesize biomass using CO_2 as a carbon source, reaching a CH_4 purity of outlet biogas up to 98.47% in lab-scale cultivation in 3 days, and 94.22% in pilot scale cultivation in 4 days[4)]. As a result, cultivating HOB for biogas valorization can also be provisional of carbon negativity in pig husbandry if this cultivation can be scaled up to pilot, or even industrial scale.

4. Conclusions

The introduction of novel technologies (TUAT1, dry AD, MP production) can potentially make pig husbandry carbon negative. However, since the CO_2 in biogas has no choice but to be emitted to the atmosphere in this study, raising the fraction of CH_4 in biogas, or valorizing the CO_2 turns out to be an opportunity for future research. For instance, cultivating HOB species as MP for biogas valorization can be provisional in achieving carbon negativity in pig husbandry[4)].

5. References

1) Alba-Reyes et al.: Sci. Tot. Environ., 858, (2023), 159915.
2) 利谷 翔平, 周 勝, 細見 正明: 環境学会会誌, 34(1), (2021), pp.27-39
3) 文部科学省: “日本食品標準成分表 2020 年版(八訂)”, (2020)
4) Li R et al.: Chem. Eng. J., 490, (2024), 151576
5) 産業技術総合研究所: IDEA database version 3.4, (2024)

Supporting Information

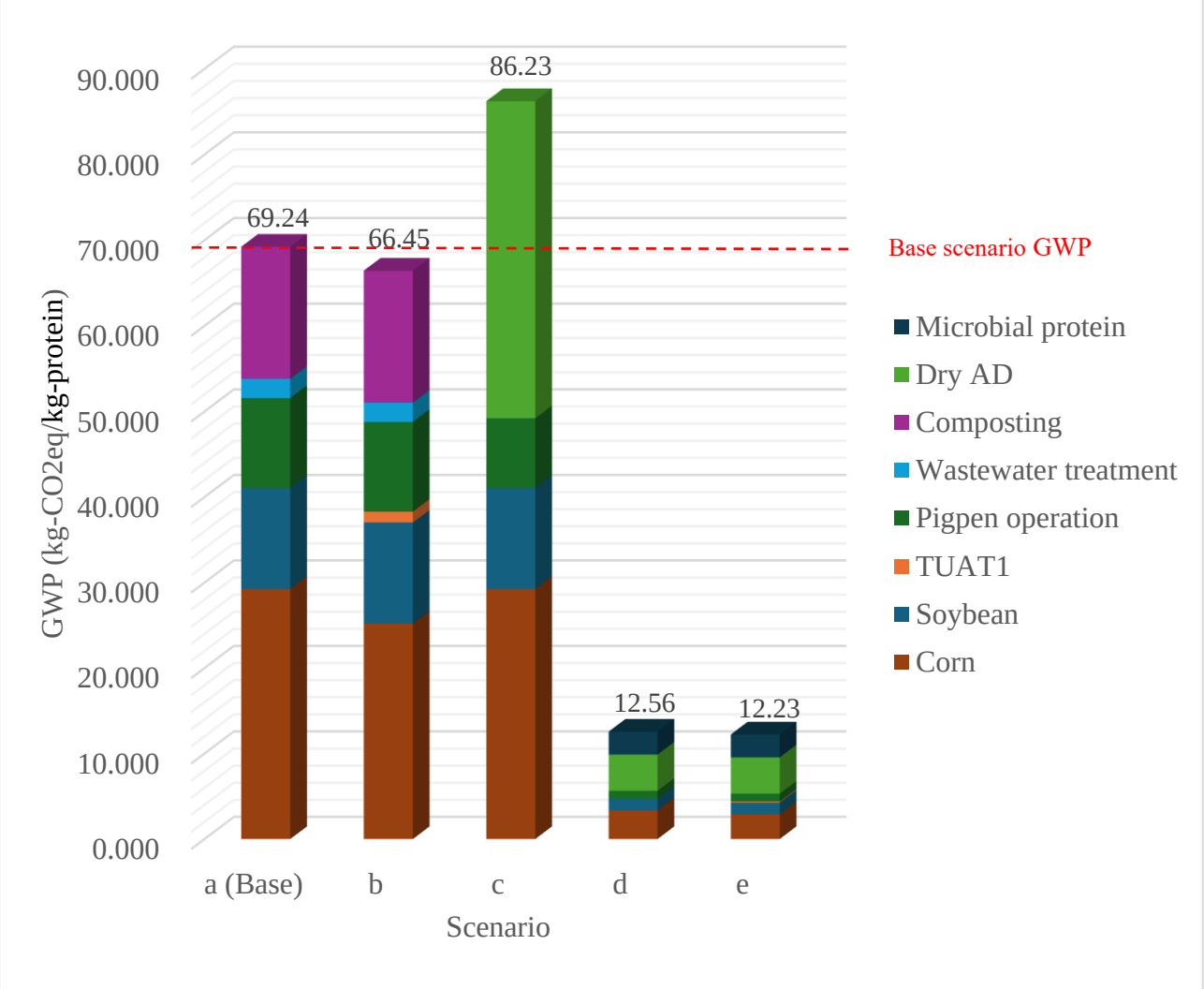


Figure S1. Overall GWP of scenarios being studied.

Table S1. Percentage of GWP variation, using the base scenario as reference.

Scenario	% of GWP variation from base scenario
a (Base)	0.00%
b	-4.04%
c	24.54%
d	-81.86%
e	-82.33%

持続可能な酒蔵運営に向けた環境・経済・社会的影響分析

○森　涼太*[1)]、前迫 晃一[2)]、徐　維那[1)]
Ryota Mori, Yuna Seo
1) 東京理科大学 創域理工学研究科 経営システム工学専攻, 2) 石川酒造株式会社
*7423528@ed.tus.ac.jp

1. はじめに

日本の酒蔵は、日本酒製造の重要な役割を担うと同時に、日本文化を象徴する伝統的産業として高い文化的価値を持つ。近年では地域密着型の事業運営や観光資源化、さらには大規模産業化を進める酒蔵も見られるなど、業態が多様化している。一方、日本酒製造における持続可能性に関する評価は十分に進んでおらず、特にライフサイクル全体を通じた環境、経済、社会的な影響の包括的評価は未だ限定的である。しかし、酒蔵を効率的に運営し、多様化する国内外の競争環境に適応するためには、持続可能性を考慮した包括的な評価が不可欠である。

そこで、本研究では日本酒蔵の持続可能な発展のため、環境・コスト・社会的側面を統合的に評価することを目的とする。また本研究は、酒蔵業界全体の持続可能性評価の基盤となることを目指す。

2. 研究手法

2.1 研究対象

本研究では日本酒業界全体における持続可能性評価の拡大を目指すにあたり、ケーススタディとして東京都福生市に位置する石川酒造を研究対象に選択した。石川酒造は伝統的な酒蔵の一つであり、その歴史は160 年以上にわたる(図 1)。



図 1. 石川酒造における酒造り風景の一部

2.2 システム境界と機能単位

本研究でシステム境界は、原料調達から清酒製造、出荷前までに設定された(SI1)。これは玄米生産、輸送、搗精、精米、浸漬、蒸し、酒母造り、主発酵、濾過圧搾、検定、殺菌、冷却貯蔵と瓶詰めを含む。また、機能単位は日本酒 1L とした。

2.3 環境影響評価

日本酒製造プロセスにおける環境評価のため、Life Cycle Assessment (LCA)を実施した[1)]。設備や原料投入量のデータは取材を通じて収集し、バックグラウンドデータは Ecoinvent v3.10 データベースを用いて補完した。これらのデータを Simapro (Ver 9.6)を用いて、ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.09 を評価指標として環境負荷を算出した。また、感度分析では地球温暖化が最も高い工程に着目し、シナリオを設定して環境負荷の変化を検証した。

2.4 ライフサイクルコスト

Life Cycle Costing(LCC)では、発生するコストを初期コスト・運用コスト・保守コストに分類した[2)]。保守コストは集計が困難であったため、初期コストの5%を計上することで推計値とした。

2.5 社会影響評価

社会影響評価(Social Life Cycle Assessment, SLCA)は、UNEP の SLCA ガイドラインに基づき[3)]、従業員、地域社会、バリューチェーン関係者、消費者の 4 つのステークホルダーを選定し、それぞれのサブカテゴリに含まれる日本酒醸造のための評価指標を設計した(SI2)。その後、正規化した各評価指標のスコアに重みを掛け、統合スコアを算出した。

インベントリ分析は、ステークホルダーへの調査および対象酒蔵から提供された資料を基に実施した。また、酒造業界の専門家への調査で決定した重要度係数を用いて指標を算出した。具体的には、石川酒造の従業員 10 名および周辺地域住民 20 名を対象に調査を実施し、これをステークホルダーからの回答として使用した。さらに、酒造業界の専門家 12 名に対して、サブカテゴリの重要度を 1～10 のスケールで評価するアンケートを実施した。

3. 結果

3.1 環境影響評価

LCA の結果、機能単位における環境影響の各指標は、水消費は 0.4m^3、発がん性ヒト毒性は 27.0kg 1,4-DCB、土地利用は 5.1 m2a crop eq、化石系資源の希少性は 152.9kg oil eq、そして地球温暖化は 137.2kg CO2 eq であった(SI3, SI4)。また、地球温暖化が最も高いのは輸送であった。そこで感度分析は輸送の工程に関して行い、玄米の仕入れ先において、地

域の酒米の使用率が現在 2.0%の所を 10~100%に変更するシナリオを設定し、各シナリオの地球温暖化を比較した(SI5)。結果、地域の酒米の使用率を増やすことで、8.8%から最大 95.3%の地球温暖化削減につながることが示された。

3.2 ライフサイクルコスト

石川酒造に対する取材により得たデータは、初期コスト、運用コスト、保守コストに分類された(SI6)。また、各コストがコスト全体に占める割合を示した円グラフを以下の図 2 に示す。初期コストは 59.6%、運用コストは 37.5%、保守コストは 3.0%を占めた。

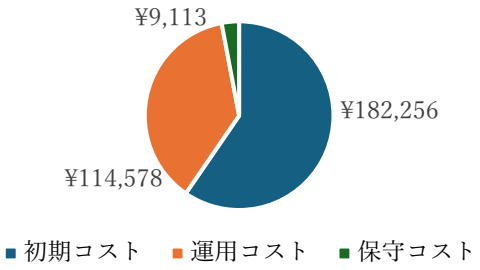


図 2. ライフサイクルコスト分析結果

3.3 社会影響評価

インベントリ分析の結果を SI7 に、専門家による重み付け係数を SI8 に示す。各ステークホルダーのスコアに重みを乗じた結果を図 3 に示す。最終的な指標では労働者が 0.492、地域コミュニティが 0.459、バリューチェーンが 0.379、消費者が 0.456 なった。

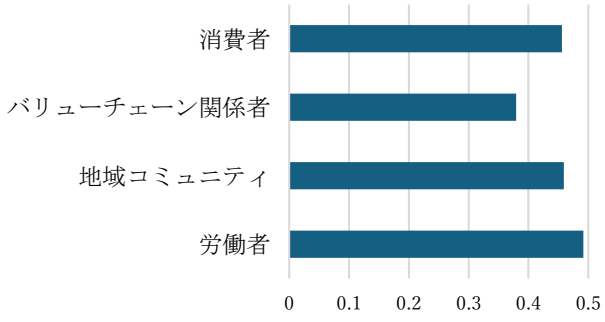


図 3. SLCA 結果

4. 考察

本研究の結果から、環境負荷、コスト構造、バリューチェーンにおける課題が明らかになり、持続可能な酒蔵運営にはこれらの改善が必要であると示唆された。LCA では輸送が環境負荷の主因であることが明らかになった。これは玄米の生産地が遠方であることに起因し、高品質な酒米を使用する酒造りが広まった背景が関係していると考えられる。しかし、感度分析により地域の酒米を活用することで、この負荷は大幅に削減可能であると示唆された。LCC の分析では、酒造りにおける最低限の必要経費がコストの大部分を占めている。一方、コスト全体の 7.3%を占める人件費には削減の余地がある可能性がある。現在の石川酒造では作業工程ごとに人材を雇用しているが、これにより人員過剰と一人当たりの賃金が低下する状況が生じている。これは適切なシフト管理と人材配置の見直しによってコスト削減が期待される。また、SLCA のでは、バリューチェーンの評価値が低いことが課題として浮かび上がった。これは、酒業界の伝統的な体質や酒税法などが影響している可能性がある。

以上の結果は石川酒造のケーススタディから得られた特有のものであるが、他の酒蔵においても類似の状況が存在する可能性が十分に考えられる。今後、持続可能な酒蔵の発展を実現するためには、これらの問題点を改善していくことが重要であり、また、本研究のように環境・経済・社会的な側面から酒蔵を評価する手法は、今後も必要とされると考えられる。

5. 最後に

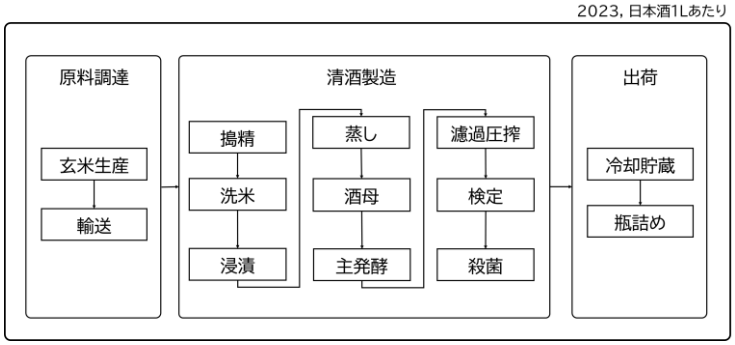
本研究では、環境・経済・社会的な観点から酒造業の持続可能性を評価した。結果として、輸送における環境負荷の削減や、人材配置の最適化によるコスト構造の改善が重要であることが明らかになった。一方で、日本の酒蔵が持つ伝統や酒造法は、文化的な価値を持つ重要な資産であり、その保護と活用が求められる。本研究の手法と知見は、石川酒造だけでなく、他の酒蔵においても適用可能であり、酒造業全体の持続可能な発展に寄与するものであると考えられる。

6. 引用文献

Falcone G., De Luca A.I., Stillitano T., Strano A., Romeo G., Gulisano G.: Sustainability, 8 (793), (2016), https://doi.org/10.3390/su8080793
García García J., García Castellanos B., García García B.: Agronomy, 13 (1478), (2023), https://doi.org/10.3390/agronomy13061478
United Nations Environment Programme (UNEP): Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organisations 2020, (2020), https://wedocs.unep.org/20.500.11822/34554

Supporting Information

SI1. システム境界



SI2. ステークホルダーとサブカテゴリ

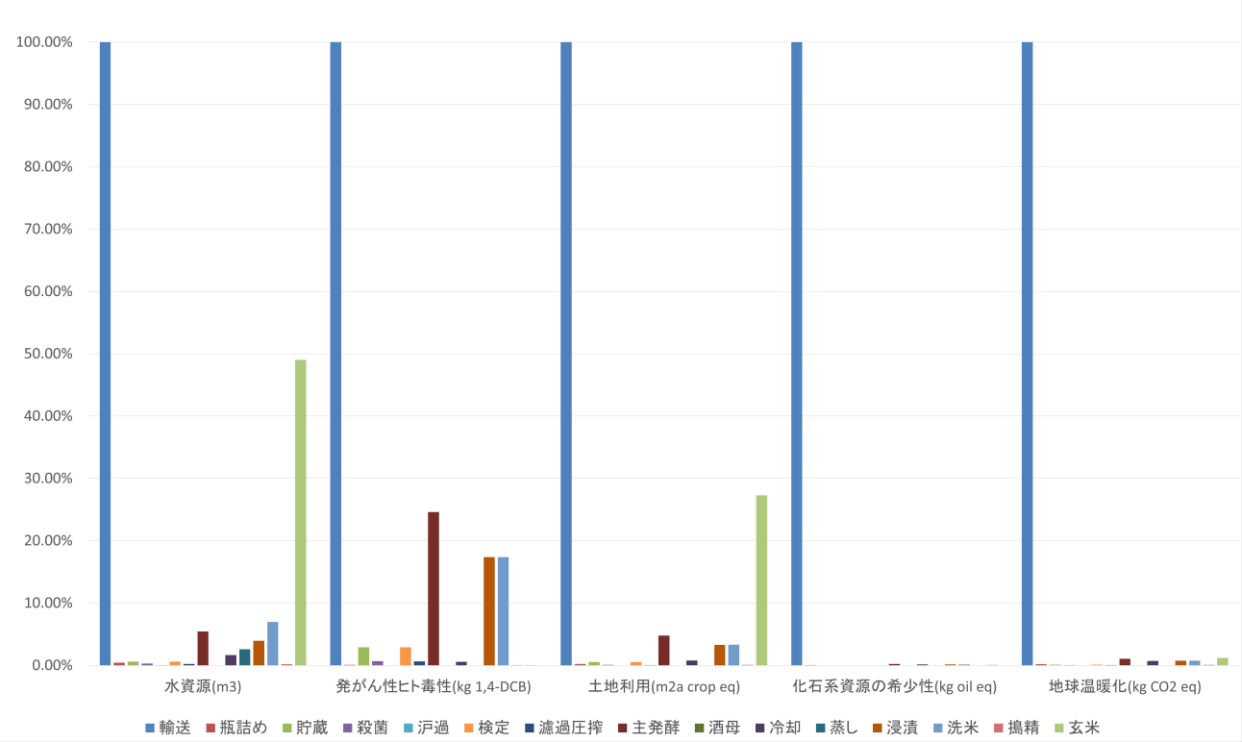
ステークホルダー	サブカテゴリ
労働者	賃金
	健康と安全
	強制労働
	差別（多様性）
	労働時間
	仕事の満足度
	結社の自由と団体交渉権
	雇用規則
地域社会	健康的な生活条件
	企業の地域コミュニティへの参加
	地元雇用
	安全な生活環境
バリューチェーン	公正な競争
	知的財産権の尊重
	サプライヤーとの関係
消費者	透明性
	フィードバックメカニズム
	健康と安全
	透明性
	廃棄物処理

SI3. ライフサイクルインベントリ

工程	原料	投入量	単位	工程	原料	投入量	単位
搗精	玄米	144000	kg	濾過圧搾	電気	1911.6	kWh
	電気	22688.4	kWh		醪搾機	1	台
	精米機	1	台	検定	貯酒槽	1	台
洗米	電気	468	kWh		撹拌槽	1	台
	水	936000	L	沪過	電気	4400	kWh
	洗浄機	1	台		沪過助剤	30	kg
浸漬	水	93000	L		活性炭	30	kg
	浸漬槽	6	台		加圧沪過機	1	台
蒸し	電気	486	kWh	殺菌	電気	2527.2	kWh
	蒸気(水)	360000	L		熱交換器	2	台

	ボイラー	1	台	冷却	電気	192720	kWh
	A 重油	48	kL		冷却器	2	台
酒母	酒母槽	10	台	貯蔵	貯酒槽	1	台
主発酵	電気	2397.6	kg	瓶詰め	電気	52915.2	kWh
	種麹	18	台		瓶	150000	個
	製麹機	1	台		瓶詰めシステム	1	式
	30%アルコール	3000	kg				
	発酵槽	24	台				

SI4. LCA の結果



SI5. 感度分析結果

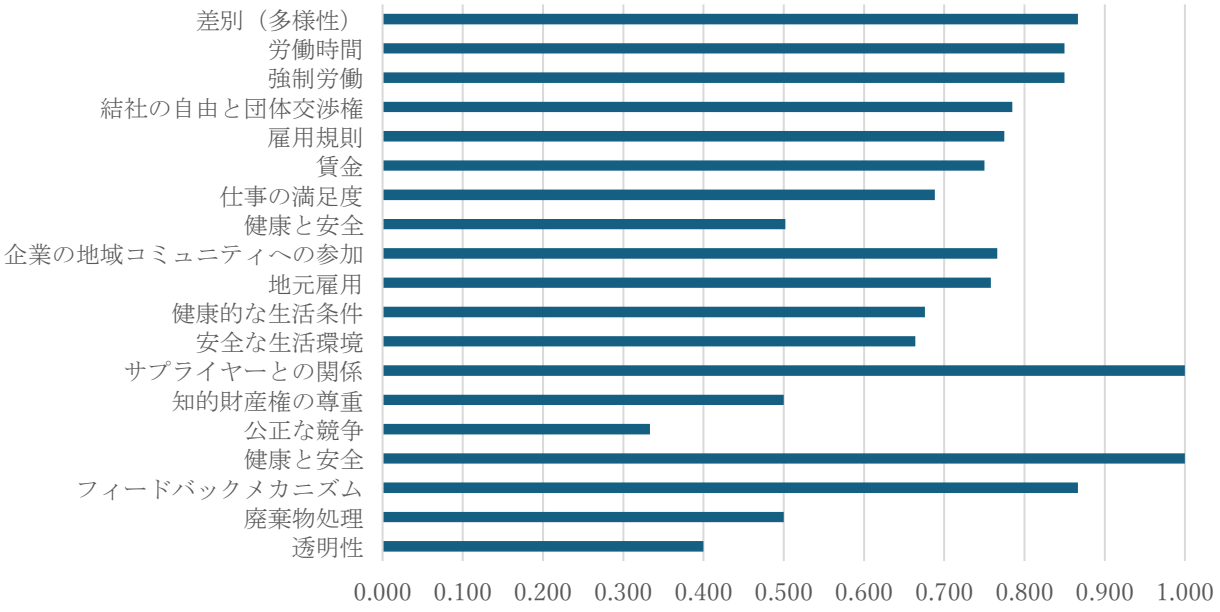
地域米使用率	2%	10%	30%	50%	70%	100%
輸送 (kg CO2 eq)	130.5	119.9	93.5	67.2	40.8	1.2
全体 (kg CO2 eq)	137.2	126.3	99.9	73.5	47.2	7.6
削減率	-	8.8%	28.1%	47.3%	66.5%	95.3%

SI6. LCC のインベントリ

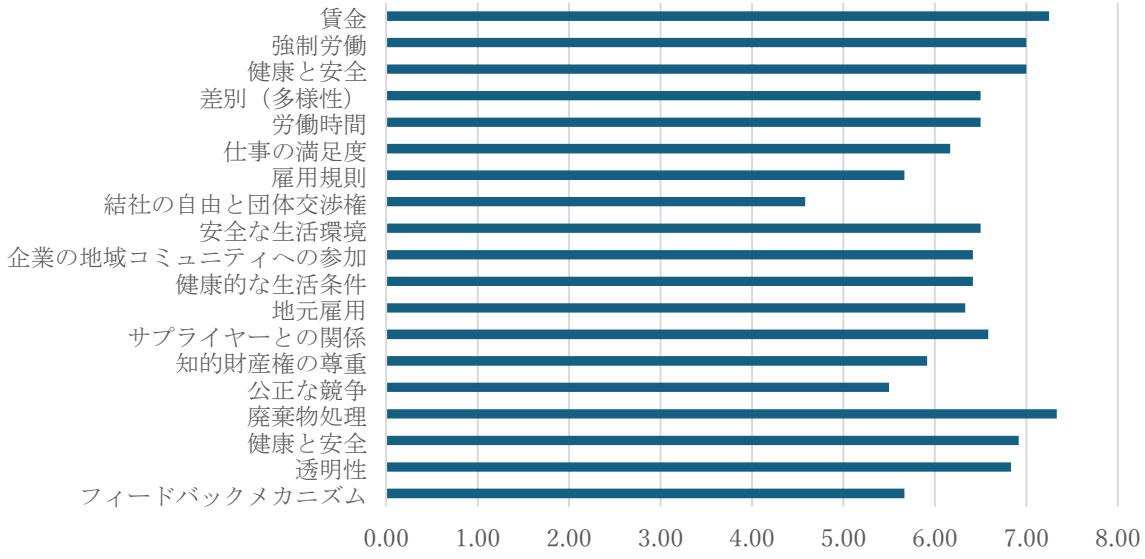
コスト種別		価格(千円)	耐用年数(年)	コスト種別		価格(千円)
初期コスト	精米機	¥3,000	7	運用コスト	人件費	¥22,410
	洗浄機	¥3,500	7		玄米	¥39,600
	浸漬槽	¥18,000	7		電気	¥8,887
	ボイラー	¥7,500	7		水	¥0
	製麹機	¥8,000	7		A 重油	¥5,184
	酒母槽	¥30,000	20		30%アルコール	¥750

発酵槽	¥72,000	20		沪過助剤	¥45
醪搾機	¥3,000	7		活性炭	¥30
貯酒槽	¥6,000	20		瓶	¥22,500
撹拌槽	¥3,000	20		減価償却費	¥15,172
加圧沪過機	¥800	7		合計	¥114,578
熱交換器	¥6,000	20	保守コスト	初期コスト 5%	¥9,113
冷却器	¥1,456	7		合計	¥9,113
瓶詰めシステム	¥20,000	7			
合計	¥182,256	–			

SI7. SLCA における正規化されたステークホルダーの回答平均



SI8.専門家により決定された重み付け係数



Identifying activity patterns and areas of heightened demand in overtouristed Kyoto

○Sebastien M.R. Dente*[1)], Seiji Hashimoto[1)]
1) Ritsumeikan University
* sdente@fc.ritsumei.ac.jp

1. Introduction

The COVID-19 pandemic caused a significant pause in Kyoto's tourism sector due to travel restrictions, but since April 2023, the lifting of border measures has resulted in a rapid resurgence of visitors. By the end of 2023, Kyoto welcomed approximately 50.28 million tourists[1)], representing 94% of pre-pandemic levels. This resurgence intensified the phenomenon of overtourism, marked by increased competition for urban resources among residents, commuters, and tourists. This study investigates the spatial and temporal activity patterns of these groups, focusing on areas of heightened demand and their implications for urban management.

2. Methodology

2.1 Harmonizing statistics

The data collection involved integrating various previously disconnected datasets on tourist flows, commuter activities, and resident behaviors, sourced from municipal records, mobility and time-use surveys, and tourism statistics. This integration was essential due to the lack of standardized reporting across sources.

2.2 Construction of an activity matrix based on Time-Use

To quantify how residents, commuters, and tourists use Kyoto's urban space, an activity matrix was developed This matrix captures the number of individuals in three categories—residents, commuters, and tourists—engaged in specific activities across the eleven Kyoto wards during four distinct time periods: night (23:00–6:00), morning peak (6:00–9:00), daytime (9:00–18:00), and evening (18:00–23:00). The segmentation identifies spatial and temporal hotspots of urban congestion, offering ward-level insights into population density, tourism impacts, and commuting patterns. Person-days were calculated as:

$$A_{ij} = p_{ij} \times t_{ij} \quad (1)$$

where

- A_{ij} is person-hours for activity i in category j
- p_{ij} is the number of people in category j engaged in activity i
- t_{ij} is the time spent on activity i per person in category j.

Figure 1 illustrates the average duration of overnight stays by tourists, an important parameter showcasing the concentration of visitors in Kyoto during nighttime hours.

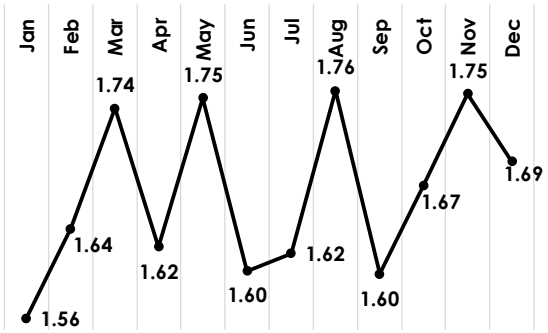


Figure 1: Average length of overnight stay (All tourists)

3. Results

In 2023, the daily inflow of 218,482 commuters increased Kyoto city's daytime population by 15%, with commuting activity concentrated in office-heavy wards like Minami-ku and Shimogyō-ku during morning and evening peaks. Similarly, the daily inflow of day trippers' tourists adds 97,260 person per day or 6.7% to the daytime population.

Overnight tourists represent 25 million person-nights for an average of 68,769 persons per day, equivalent to 5% of Kyoto's nighttime population. Foreign tourists represented 46% of overnight person-nights despite making up only 34% of visitors, as their stays were 65% longer than those of Japanese tourists. Tourist activity was most concentrated between 9:00 and 18:00, aligning with sightseeing schedules and causing congestion in areas such as Kyoto Station, Kiyomizu-Gion, and Fushimi-ku. while other wards remained underutilized, suggesting opportunities for redistributing visitor flows. Seasonal peaks during cherry blossom (March–April) and autumn foliage (November) further intensify pressures on infrastructure and public spaces leading to peak demand on Kyoto's transportation network, dominated by trains and buses.

These insights inform LCA models by integrating spatial and temporal consumption patterns and identifying ways to optimize resource use under tourism pressures.

Acknowledgment: This research was supported by the Research Promotion Program of Ritsumeikan University

References

1) 京都市産業観光局：京都観光総合調査令和５（２０２３）年１月～１２月

路線バスの次世代型移行に伴う経済・社会・環境評価：京都市営バスを事例として

Economic, Social, and Environmental Evaluation of the Transition to Next-Generation Route Buses: A Case of Kyoto City Buses

○河本竜祐*[1)]、重富陽介[1)]
Ryusuke Kawamoto, Yosuke Shigetomi
1) 立命館大学
* ce0056xf@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

日本のバスによる CO_2 排出量は運輸部門由来の0.7%と小さいものの、年間の総利用者数は 37 億人を超えている。このため多くの人に関わりをもつ路線バスの EV (Electric Vehicle) 化は、カーボンニュートラルに向けた取り組みを示すシンボルとしても有効であると考えられる。

一方で、日本では少子高齢化が深刻化している。例えば、京都市の 2050 年の生産年齢人口は 2020 年と比べて 3/4 の 66.9 万人まで減少すると予測されている。これに対して 2023 年の京都市の観光客数はコロナ以前の 2019 年とほぼ同数まで回復し、宿泊客数も 2019 年比で 11%増加している [1)] ことから、労働力の不足が懸念されている。したがって、今後はより少ない人員での業務が求められ、公共交通を含めたあらゆる分野での自動化の必要性が高まると考えられる。しかしながら、特定条件下における完全自動運転となるレベル 4 の自動運転化は実証実験が始まったばかりであり、バスの EV 化についても日本では 7 台が最多と海外に比べて少ないというのが現状である。

そこで本研究では、京都市営バスをモデルに、EV 化・自動運転化といった次世代型路線バスへの移行を大規模に行なうことで生じる CO_2 排出量と経済コスト、労働力への影響を解析し、環境・経済・社会の側面からその有効性について考察することを目的とする。

2. 方法

2.1. 研究に用いる各種データの定義

本研究では従来型のディーゼルバスと次世代型バス (ハイブリッドバスと EV バス) の走行段階および原料から製造段階に伴う各 CO_2 排出量と導入コストの差異を考慮する。想定するバスについては、BYD「K8」(海外 EV バス)、いすゞ自動車「エルガ EV」(ディーゼルバス、ハイブリッドバス、国産 EV バス) の 4 車種とした。それぞれのバスの新車価格・乗車定員・バッテリー容量は各 HP より抽出し、整備費は国土交通省の電動バス導入ガイドラインから、充電器本体のコストについては東光高岳製のものを利用した。バスの充電設備に関しては、今回は充電器本体のみを考慮した。

次に交通需要については、令和 4 年度「京都市交通事業白書Ⅱ 自動車運送事業」を参考に、京都市営バスの交通需要 (各系統の利用者数合計)・各系統の走行距離を設定した。運用を想定するにあたり、車両稼働率 85%、1 日 1 両当たりの平均運航回数約 6.2 回は現在と同一と仮定した。一方で運行本数をこのままで運用した場合、一部の系統では大混雑の状態にある。これを緩和するために、式(1)の通り車両ごとの乗車定員をもとに乗車率の上限を 120%と設定し、運行本数とこれに比例して運用台数を増加させることを想定した。

$$N_{2(h)} = N_{1(h)} \frac{O_{(h)}}{1.2} \quad (1)$$

ここでhはバスの系統、$N_{2(h)}$は調整後の運行本数を表す。$N_{1(h)}$は調整前の運行本数を表す。$O_{(h)}$は調整前の乗車率を意味する。

ディーゼルバスとハイブリッドバスの燃費については、それぞれ性能諸元表より 4.9 km/L と 5.5km/L と仮定した。これに軽油の CO_2 排出係数を乗じて、それぞれの走行 1 km あたりの CO_2 排出量を算出した。EV バスはどちらも電力消費率 1.2 km/kWh とし [2)]、関西電力から給電されることを想定して同電力の発電による CO_2 排出係数をこれに乗じることで、走行 1 km あたりの CO_2 排出量を算出した。

2.2. 自動運転化による影響

自動運転化による走行段階の CO_2 排出量への影響について市販 EV を用いた航続距離への影響を分析した先行研究 [2)] によると、市街地のみの走行の場合航続距離換算でそれぞれ LiDAR (レーダーによる画像検出と測距) 装備有で 14%、LiDAR 装備無で 11%走行距離低下が見られている。本研究では自動運転による走行距

離の低下の影響を、この LiDAR 装備有の場合を適用した。

経済コストの影響については、経済産業省が行った推計を参考に経年変化を含めた自動運転の運用にかかるコストを加味した。

2.3. ライフサイクル CO_2 排出量分析

対象とするバス本体および自動運転機器の原料から製造に伴う CO_2 排出原単位については、IDEA v.3.3.0 と先行研究 [3,4] より参照した。

走行に伴う CO_2 排出について京都市営バスにおいて 4 車種のバスをそれぞれ導入した場合の 1 日当たりの系統hの走行由来 CO_2 排出量$G_{(h)}$を式(2)のように推計した。

$$G_{(h)} = D_{(h)} N_{(h)} g_b \qquad (2)$$

ここで$D_{(h)}$は系統 h のバスにおける 1 回の運行における走行キロ数、$N_{(h)}$は 1 日の運行本数を表す。g_bはバスの車種 b の CO_2 排出係数を意味する。系統ごとに算出して累計排出量を比較した。

2.4. 経済コストの算定方法

京都市営バスにおいて各車両を 2025 年より導入を開始し 30 年間の累計運用コストを予測した。各年に発生するものとして燃料代、電気代、年間整備費、人件費、自動運転の運用、加えてバス車両の新車購入費、充電設備の費用の資本的支出と、バッテリー交換費を考慮した。バス車両は 15 年、充電設備は 7-8 年で更新を想定しており、自動運転の場合車両購入と同年に車体改造を行うとした。燃料代は軽油価格と燃費から算出し、電気代は本研究では関西電力の法人向け電力プランを参考に年間コストを算出した。

2.5. バッテリー劣化速度予測

長期的な EV バスの運用に際して、バッテリーの経年劣化による容量低下を考えなければならない。市販 EV におけるバッテリー容量低下関数 [5] を参考にすると、一般的なバッテリー交換の目安である容量 20%低下および 30%低下には、それぞれ約 6.8 年、16 年で到達する。このことを踏まえてバス車両 15 年の間にバッテリー交換を行う場合と行わない場合の 2 つのパターンを比較した。

3. 結果

京都市営バス全 72 系統のディーゼルバスをハイブリッドバス、EV バス 2 車種にそれぞれ置換した場合、走行時の年間 CO_2 排出量はディーゼルバス比でそれぞれ 89.1%、93.6%、98.3%と見積もられた。また、自動運転による増加分を含めると、EV バスは 106.7% (海外 EV)、112.1% (国産 EV) と増加した。また、EV バスの製造時の CO_2 排出量は、ディーゼルバスに対して 3.4-4.0 倍となった (図 1)。

続いて経済コストについては、自動運転によるコスト増加を除いた場合、ディーゼルバス比でハイブリッドバスは 150.4% (バッテリー交換無で 109.2%)、EV バスは 148.7% (海外 EV)、194.3% (国産 EV) (バッテリー交換無で同 107.6%、151.5%) と推計された。自動運転によるコストの増加は、自動運転装置のない場合の 1.0-1.3 倍となった (図 2)。

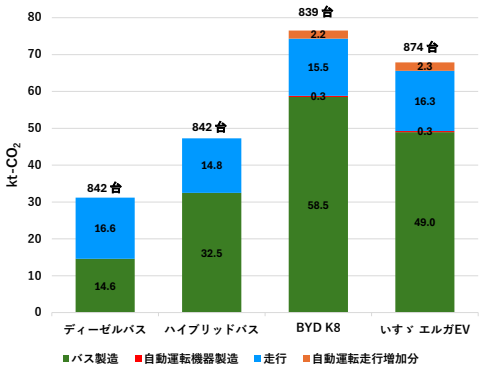


図 1. 京都市営バスの車種別の製造時と 1 年間の走行によるライフサイクル CO_2 排出量

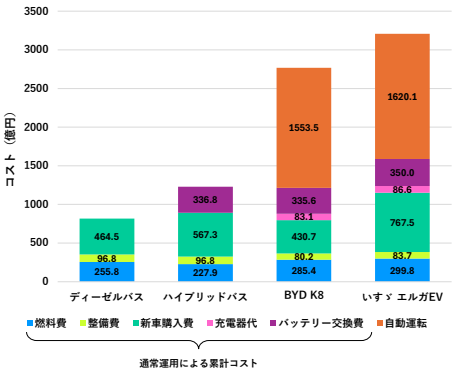


図 2. 車種別の経済コスト内訳

2050 年までの自動運転導入による経済コストと労働力の推計結果、および詳細な考察については、本学会発表中に報告する。

4. 引用文献

1) 京都市産業観光局, 京都市観光総合調査 (2024)
2) Mohan et al. (2020) *Nat. Energ.*, 5, 543–549
3) Gawron et al. (2018) *ES & T.*, 52(5) 3253-3256
4) Kawamoto et al. (2019) *Sustainability* 11(9), 2690
5) Daniel-Ioan Stroe et al. (2017) Proc. 2017 IEEE ECCE, pp. 5631-5637

関西 6 府県の住宅耐震化による災害廃棄物発生量の削減効果
：南海トラフ巨大地震による地震動・津波を考慮して

Reduction effect of disaster waste generation by promoting earthquake-resistant housing in six Kansai prefectures: Considering the seismic motion and tsunami caused by the Nankai megathrust earthquake

○盛本怜太郎[*1)]、橋本征二[1)]
Ryotaro Morimoto, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* ce0049ir@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

南海トラフ巨大地震により発生する災害廃棄物量は、最大で東日本大震災の約 11 倍[1)]と推計されている。災害廃棄物対策としては、処理能力の確保や再生利用の促進だけでなく、発生抑制も含めた対策が必要不可欠である。住宅の耐震化は、災害時の住宅被害を減らして人命を保護することが主目的であるが、それは災害廃棄物の発生抑制にもつながると考えられ[2)]、その効果を定量化することも重要である。本研究では、関西 6 府県・市区町村を対象として、住宅耐震化の進展が災害廃棄物量の削減にどの程度の効果をもたらすのかについて検討した。既報[3)]に対し、津波の影響も考慮しメッシュ単位で分析した。

2. 方法

2.1 耐震化前後の災害廃棄物発生量の推計

南海トラフ巨大地震における予想計測震度(250m メッシュ)[4)]と住宅の建て方別世帯数(小地域)[5)]を重ねあわせ、小地域の世帯数を 250m メッシュに対応する面積割合で割り当てた。次に、住宅土地統計調査[6)]を用いて、世帯数から構造別、築年別の住宅戸数を算出し、これに構造別、築年別の倒壊確率を乗じて全壊・半壊戸数を推計した。さらに廃棄物発生原単位を乗じて災害廃棄物発生量を推計した。なお、木造の住宅の築年は、旧築年(1980 年以前)、中築年(1981～2000 年)、新築年(2001 年～)、非木造の住宅の築年は、旧築年(1970 年以前)、中築年(1971～1980 年)、新築年(1981 年～)に分類され、1980 年以前の住宅に非耐震化住宅が含まれる。

2.2 耐震化の想定と考慮の方法

各府県が公表している現状の耐震化率と耐震化目標をもとに、1980 年以前の住宅を耐震化し、耐震化された 1980 年以前の住宅は新築年と同等の耐震性を持つものとして、以下の耐震化シナリオについて災害廃棄物量を推計した。

- 耐震化を行う前の現状シナリオ
- 耐震改修促進計画に従って旧築年住宅を優先的に耐震化した旧築年耐震化計画シナリオ
- 旧築年住宅を優先的に全て耐震化した旧築全耐震化シナリオ

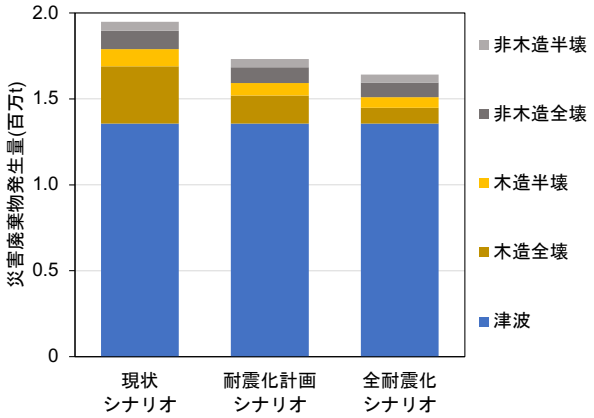


図　和歌山市の各シナリオにおける構造別・築年別の災害廃棄物発生量

3. 結果と考察

図に和歌山市の各シナリオにおける構造別・築年別の災害廃棄物発生量を示す。和歌山市では、津波により約 1.3 百万 t の災害廃棄物量が発生すると推計され、これが多くを占める結果となった。また、耐震化計画シナリオは現状シナリオと比較して約 217 千 t (11%)、全耐震化シナリオは現状シナリオと比較して約 307 千 t (16%)の災害廃棄物発生量が削減できる結果となった。地震動のみに着目すると、それぞれ 37%、52%の削減率となる。和歌山市は旧築年の木造住宅戸数が大きく、今後の耐震化により災害廃棄物の削減効果も大きくなると考えられる。関西圏 6 府県の詳細な結果については、学会当日報告する。

参考文献

1) 環境省：巨大地震発生時における災害廃棄物対策のグランドデザインについて～中間とりまとめ，2014
2) 平山修久、福和伸夫：地域安全学会論文集、39、245-253、2021
3) 盛本怜太郎、橋本征二：土木学会論文集、80(26)、24-26003、2024
4) 内閣府：南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ最終報告、2013
5) 総務省統計局：e-Stat 令和 2 年国勢調査
6) 総務省統計局：e-Stat 平成 30 年住宅土地統計調査

フッ素資源循環構築に資するフッ素化合物フロー解析

Fluorine Compounds Flow Analysis
for the Development of a Fluorine Resource Circulation

○五十嵐迪香*[1)]、大野肇[1)]、八木原昂輝[1)]、福島康裕[1)]
Michika Igarashi, Hajime Ohno, Koki Yagihara, Yasuhiro Fukushima
1) 東北大学
* igarashi.michika.t5@dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

フッ素化合物は、電子機器の製造や金属精錬、建設資材の製造など様々な産業で使用されている。さらに、フッ素樹脂やセラミックスは耐久性、耐熱性、耐薬品性などに優れていることから化学材料として身近な部品にも使用されており、現代社会に欠かせないものとなっている。しかし、日本ではフッ素化合物の主な原料である蛍石(CaF_2)の工業的な採掘は行われておらず、供給を他国に依存していることが課題である。現在は蛍石供給の大部分を中国とベトナムからの輸入に頼っているが[1)]、フッ素資源を国内で循環させることで自給率を高め、安定供給につなげることができると考える。また、フッ素化合物は人体に過剰に摂取されると骨や関節、神経や肝臓など様々な部位に悪影響を及ぼすことが報告されている[2)]。人体への悪影響を防ぐためにもフッ素資源を循環させ環境への散逸を防ぐことが重要であると考える。本研究では、フッ素資源循環構築の一助となるデータを示すことを目的とし、2022年時点における、フッ素化合物の国内フローを明らかにした。さらに、産業廃棄物からフッ素資源を回収・再利用する効果について検討した。

2. 手法

2.1 フッ素化合物の種類と計算手法

フッ素化合物の主な原料である蛍石は主成分のフッ化カルシウム(CaF_2)の含有率によって 2 種類に分類される。含有率が 97%を上回るものはアシッドグレード、97%以下の物はセラミックグレードと呼ばれる。様々な化合物に加工されるのはアシッドグレードの蛍石であり、より多く使用されている。セラミックグレードの蛍石は製鉄における融剤やセメントの硬化剤として利用されている。本研究では、アシッドグレードの蛍石を調査対象とした。図 S1 に示すように、工業的に使用されている主要なフッ素化合物は、そのほとんどがフッ化水素酸(HF)を原料としている。フロー分析を行うにあたって各フッ素化合物の生産量や需要量から HF の量に換算し、アシッドグレード蛍石需要を算出した。計算には各化合物の生成反応式(表 S1)に基づく量論値を用いた[3)]。反応率は 100%としており、プロセス内での損失等は考慮していない。

2.2 フッ素フロー分析

国内フローの分析には Coherent Market Insights 社の市場調査レポート[4), 5)]を参照した。最新のデータが 2022 年のものであることから、本研究では 2022 年を調査対象とした。ここで示すフッ素フローとは、フッ素化合物や製品に含まれるフッ素量を蛍石量に換算したものである。蛍石の CaF_2 純度は 100%と仮定した。フッ素化合物やフッ素含有製品の製造プロセスでの蛍石需要と小売業を含めた国内全体の蛍石需要の差には、輸入品のフッ素化合物が含まれるとし、財務省の貿易統計[6)]を参照することで内訳を求めた。各フッ素化合物の貿易統計から蛍石の輸入量に換算したが(表 S2)、製法が不明な化合物(表 S1 参照)は含まれず、同一の HS コードに分類される化合物はフッ素化合物のみが等量輸入されると仮定した。また、世界の地域ごとの値のみ入手可能なデータについては、ヨーロッパの値を基に各産業の生産量や市場規模を用いてスケールダウンを行い、日本の値を推算した。

2.3 アルミニウムドロスからのフッ素回収法

廃棄物からフッ素を回収し・再利用した際の効果を検討するための第一歩として、本研究ではアルミニウムドロス(以下、ドロス)に着目した。アルミニウム精錬では、フラックスを用いて金属から酸化物を取り除き、副産物のドロスを形成する。新地金の精錬には主に塩化物を用いたフラックスが使用されるが、再生アルミニウム精製時のフラックスには、酸化物との反応性が高いフッ素化合物がしばしば用いられるため[7)]、ここで生じるドロスには金属、酸化物とともにフッ素化合物が含まれる。ドロスは製鉄における電気炉の熱源や建設資材の原料として再利用されるが[8)]、環境へフッ素が散逸する危険性がありドロスの無害化が検討されている。本研究ではドロスの燃焼によるフッ素除去に着目した。これはドロスを完全に燃焼させることでハロゲンを気化・回収し、残されたハロゲンフリーな酸化物を建築資材等として再利用することを目指した開発中の技術である[9)]。フッ素化合物の主な用途は化学

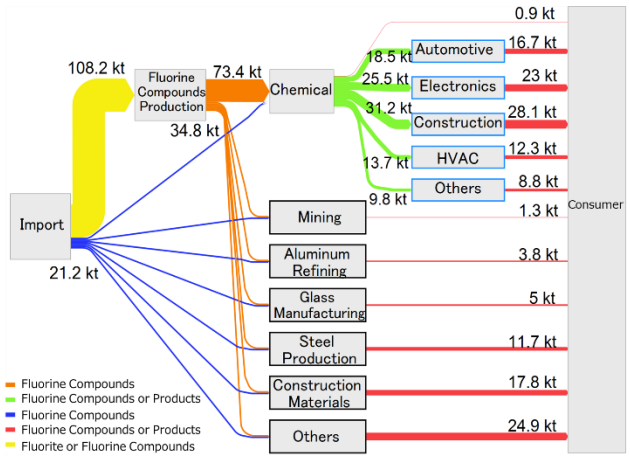


図 1　国内フッ素フロー(2022) [kt-fluorite / year]
収支の差は散逸、輸出入、統計の誤差など

産業での使用であるため、アルミニウム精錬に使用されるフッ素化合物は限定的である。しかし、フッ素の回収が試みられており、ドロスの XRF 分析結果が入手可能であることから本研究ではアルミニウムドロスを調査対象とした。

3. 結果と考察

3.1 フッ素化合物の国内フロー

フッ素化合物の国内フローを図 1 に示す。図 1 内の数値は蛍石量に換算したフッ素化合物又はフッ素含有製品の量である。”Fluorine Compounds Production”から黒枠で囲まれた産業に配分されるフッ素化合物の内訳は不明である。これらの産業で生産される製品の需要はヨーロッパの値からスケールダウンを行って推計した。また、フッ素化合物の輸入量は 21.2 kt と算出されたが、産業ごとの輸入量は不明である。青枠で囲んだ 5 つの分野は各分野でのフッ素化合物消費量のみ入手できたため、プロセス内でのフッ素損失率を 10%と仮定した。日本国内全体での蛍石需要は 154.3 kt [4]であるため、各産業から供給される量との差異より、その他の産業からの供給量は 24.9 kt と推算された。

本研究では、輸入されたフッ素含有製品が直接消費者へ供給される可能性と、製品の輸出を考慮していない。したがって、今後のさらなる分析によって輸入量やその他の産業からの供給量を修正する必要がある。しかし、図 1 から得られた国内のフッ素化合物利用状況の概要として、フッ素化合物の大半は化学産業で消費されていることがわかる。化学産業内でフッ素資源循環を実現させることができれば、蛍石輸入量を削減することができると考えられる。

3.2 アルミニウムドロスからのフッ素回収

アルミニウムドロスに関する先行研究のデータ [10]と、2022 年のアルミニウム生産 [11]から 2022 年にアルミニウム精錬産業で除去可能なフッ素量を算出すると、0.817 kt であったことが分かった。これを除去されたフッ素の回収率を 100%と仮定して蛍石量に換算するとおよそ 1.68 kt である。この値は今後増加する可能性があると考える。近年、再生アルミニウムの精製時に生じる CO_2 が、新地金精製時のおよそ 1/30 であることから温室効果ガスの排出量削減に効果的であると注目されている [12]。したがって、今後再生アルミニウムの生産量は増加することが見込まれる。それに伴い、フッ素化合物を用いたフラックスの使用量とフッ素含有ドロスの発生量の増加が予想される。増加したドロスから確実にフッ素を回収し、回収したフッ素資源を需要が増すと見込まれるフラックスの原料として用いることで、フッ素資源の新規投入量を抑える方策になりうると考えられる。

4. 結言

本研究ではフッ素フローの分析を行い、日本国内におけるフッ素化合物の主な流れを可視化した。また、アルミニウムドロスからフッ素を回収した場合の効果について検討し、この技術の必要性が今後さらに増加する可能性が示唆された。今後は、今回明らかにしたフローの精度を高めるとともに、新たなフッ素回収ポテンシャルを検討していきたい。

謝辞

本研究は科研費基盤 S(20H05708)の助成を受けて行われた。また本研究の一部は東北大学工学研究科平木特任准教授の助言のもとで行われた。

引用文献

1) “鉱物資源マテリアルフロー 2022 27.フッ素(F)”, JOGMEC 金属資源情報,（オンライン）, 入手先 <https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2023/10/material_flow2022_F.pdf>,（参照 2024-10-30）
2) 魏賛道, “フッ素中毒を止めた人びと 中国の飲料水フッ素添加問題特別レポート”, 績文堂出版株式会社, 東京, (2005), pp.113-134
3) AGC 旭硝子 化学品カンパニー, “2018 年版 16918 の化学商品”, 化学工業日報社, 東京, (2018), pp.172-189
4) Coherent Market Insights: “Fluorspar Market ~Global Industry Insights, Trends, Outlook, and Opportunity Analysis, 2023-2030~”, (2024), pp360-387
5) Coherent Market Insights: “Global Acid-Grade Fluorspar Market ~Production & Consumption Analysis, 2018-2030~”, (2024), pp91-98
6) 財務省 : “財務省貿易統計”, 財務省,（オンライン）, 入手先 <https://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm>,（参照 2024-12-12）
7-10) ヒアリング調査
11) 経済産業省 : “統計表一覧（経済産業省生産動態統計）”, 経済産業省,（オンライン）, 入手先 <https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html>,（参照 2025-01-10）
12) 一般社団法人 日本アルミニウム協会 : “アルミニウム VISION 2025”, (2020)

Supporting Information

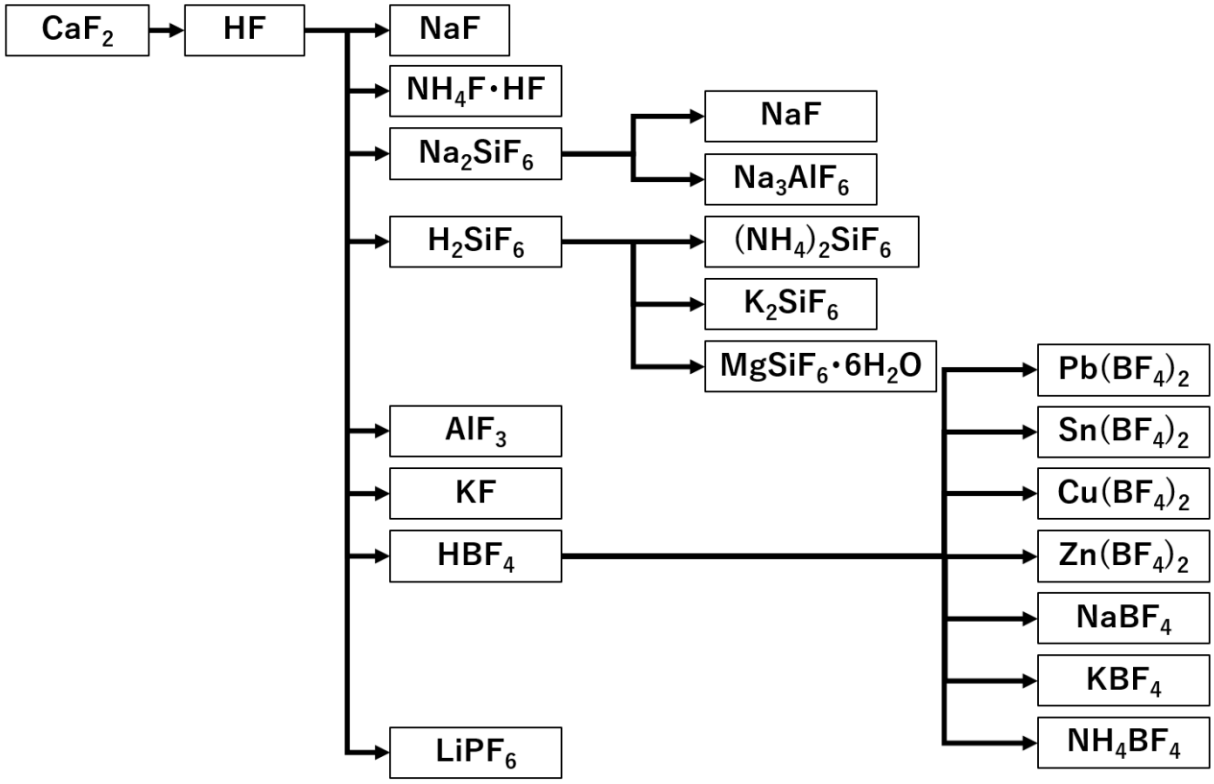


表 S1　HF から製造されるフッ素化合物

表 S1　各フッ素化合物の生成反応式 [3)]

フッ素化合物	反応式
F_2	不明
HF	$CaF_2 + H_2SO_4 \rightarrow 2HF + CaSO_4$
NaF	①$Na_2SiF_6 + 6NaOH \rightarrow 6NaF + Na_2SiO_3 + 3H_2O$ ②$2HF + Na_2CO_3 \rightarrow 2NaF + H_2O + CO_2$
$NH_4F \cdot HF$	$HF + NH_3 \rightarrow NH_4F$ $NH_4F + HF \rightarrow NH_4F \cdot HF$
Na_2SiF_6	$CaF_2 + H_2SO_4 \rightarrow 2HF + CaSO_4$ $4HF + SiO_2 \rightarrow SiF_4 + 2H_2O$ $3SiF_4 + 4H_2O \rightarrow 2H_2SiF_6 + SiO_2 + 2H_2O$ $H_2SiF_6 + 2NaCl \rightarrow Na_2SiF_6 + 2HCl$
H_2SiF_6	$4HF + SiO_2 \rightarrow SiF_4 + 2H_2O$ $2HF + SiF_4 \rightarrow H_2SiF_6$
$(NH_4)_2SiF_6$	$H_2SiF_6 + NH_3 \rightarrow (NH_4)_2SiF_6$
K_2SiF_6	$H_2SiF_6 + 2KCl \rightarrow K_2SiF_6 + 2HCl$
$MgSiF_6 \cdot 6H_2O$	$H_2SiF_6 + MgCl_2 \cdot 6H_2O \rightarrow MgSiF_6 \cdot 6H_2O + 2HCl$
ClF_3	$3F_2 + Cl_2 \rightarrow 2ClF_3$
BF_3	不明
AlF_3	$3HF + Al(OH)_3 \rightarrow AlF_3 + 3H_2O$
KF	$HF + KOH \rightarrow KF + H_2O$
HBF_4	$4HF + H_3BO_3 \rightarrow HBF_4 + 3H_2O$
$Pb(BF_4)_2$	$2HBF_4 \rightarrow PbO \rightarrow Pb(BF_4)_2 + H_2O$
Na_3AlF_6	$Na_2SiF_6 + 4NH_3 + 2H_2O \rightarrow 2NaF + 4NH_4F + SiO_2$ $NaOH + Al(OH)_3 \rightarrow NaAlO_2 + 2H_2O$ $2NaF + 4NH_4F + NaAlO_2 \rightarrow Na_3AlF_6 + 4NH_3 + 2H_2O$
$Sn(BF_4)_2$	$2HBF_4 + SnO \rightarrow Sn(BF_4)_2 + H_2O$
$Cu(BF_4)_2$	$2HBF_4 + CuO \rightarrow Cu(BF_4)_2 + H_2O$
$Zn(BF_4)_2$	$2HBF_4 + ZnO \rightarrow Zn(BF_4)_2 + H_2O$

（続き）

$NaBF_4$	①$2HBF_4 + Na_2CO_3 \rightarrow 2NaBF_4 + H_2O + CO_2$ ②$HBF_4 + NaOH \rightarrow NaBF_4 + H_2O$
KBF_4	①$2HBF_4 + K_2CO_3 \rightarrow 2KBF_4 + H_2O + CO_2$ ②$HBF_4 + KOH \rightarrow KBF_4 + H_2O$
$Fe(BF_4)_2$	不明
NH_4BF_4	$HBF_4 + NH_3 \rightarrow NH_4BF_4$
WF_6	$W + 3F_2 \rightarrow WF_6$
$LiPF_6$	$PCl_5 + 5HF \rightarrow PF_5 + 5HCl$ $PF_5 + LiCl + HF \rightarrow LiPF_6 + HCl$

※製法が 2 種類あるものは各プロセスで 50%ずつ製造していると仮定。

表 S2　各フッ素化合物の輸入量（蛍石換算）

HS コード	品目	輸入量[t] [6)]	蛍石量[t]	備考
2801.30	F_2	1406.4	*1	臭素も含む
2811.11	HF	82849.9	161623.6	
2811.19900	H_2SiF_6 HBF_4	3327.7	5696.9	*2
2812.90	BF_3 ClF_3	1791.5	*1	塩化物など複数の化合物を含む
2826.12	AlF_3	1689.5	2356.0	
2826.19010	NaF $(NH_4)_2SiF_6$ $NH_4F \cdot HF$	5972.6	7193.0	*2
2826.19090	KF $MgSiF_6 \cdot 6H_2O$	615.0	469.0	*2
2826.30	Na_3AlF_6	1557.5	2268.0	
2826.90100	Na_2SiF_6 K_2SiF_6	373.4	431.2	*2
2826.90990	$NaBF_4$　$Pb(BF_4)_2$ KBF_4　$Sn(BF_4)_2$ NH_4BF_4　$Cu(BF_4)_2$ WF_6　$Zn(BF_4)_2$ $LiPF_6$　$Fe(BF_4)_2$	2388.6	2809.5	*3

*1: 化合物の製法が不明なため、蛍石量に換算不可。
*2: フッ素化合物のみが等重量含まれていると仮定。
*3: 製法が不明な $Fe(BF_4)_2$ と WF_6 は含まれないと仮定。残りの 8 種の化合物のみが等重量含まれると仮定。

大気汚染がスポーツに与える影響：Jリーグからの証拠

The Impact of Air Pollution on Sports: Evidence from Japanese Pro Soccer Leagues

○砂川海人*[1)]、中石知晃[2)]
Kaito Sunagawa, Tomoaki Nakaishi
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学研究院
* kaito.sunagawa.954@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

世界人口の 90%は世界保健機関が定める安全基準値を超える大気汚染レベルの地域で暮らしており、大気汚染は毎年 700 万人の早死を引き起こす、健康に対する最大の環境リスクとなっている[1)]。例えば、Lee et al.(2023)[2)]では、大気汚染によるエリートアスリートの肺機能と呼吸器症状への影響が調査され、低濃度の大気汚染でさえ、アスリートのトレーニング後の肺機能や呼吸器症状に大きな影響を与えることが報告された。

最新の疫学・心理学研究では、大気汚染は、健康や環境上の課題にとどまらず、人々の認知機能や行動にも重大な影響を及ぼす可能性が示唆されている。例えば、Malvina et al.(2024)[3)]では、大気汚染への曝露がロンドンの犯罪率に影響を及ぼし、より自然発生的な犯罪に大きな影響を与えることが報告された。また、Jiawei et al.(2023)[4)]では、大気汚染は e スポーツプレイヤーの意思決定に影響を与え、競技全体のパフォーマンス強度の低下やチーム間格差の拡大を招くことが報告された。

このように、近年、大気汚染と人々の認知機能や行動の関係を検証する研究が増加している一方で、様々な懸念点や結果の相違が確認されており、大気汚染が人々の認知機能や行動に及ぼす影響について、未だ確固たる証拠を得ることはできていない。

これらの点を踏まえ、本研究では、一般の人々より大気汚染への曝露レベルが高い[2)]とされるアスリートに焦点を当て、汚染が彼らのパフォーマンスに与える影響について調査することで、上記一連の既存研究に貢献する。具体的に本研究では、日本のプロサッカーリーグである J リーグの一試合における違反行為数とスタジアム近隣の大気汚染濃度の関係性に着目し、汚染への暴露がプロサッカー選手の試合中のフェアプレー精神にどのような影響を及ぼすのかを統計的に検証する。

2. 研究手法とデータ

本研究では、試合が開催されたスタジアム近辺の大気汚染濃度を説明変数、日本のプロサッカーリーグである J リーグ 1 試合当たりの違反行為数を被説明変数とした、以下のような単回帰モデルを構築し、汚染への曝露がサッカーの試合における違反行為数に及ぼす影響について検証する:

$$Foul_i = \beta_0 + \beta_1 lnAP_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

ここで、$Foul_i$は、サッカーの試合iの違反行為の数を、$lnAP_i$は試合iのキックオフ時間における大気汚染物質の対数値を、ε_iは誤差項をそれぞれ指す。

具体的な違反行為としては、試合ごとのファウル数、イエローカード数、レッドカード数のデータを利用する。また、大気汚染物質は、$PM_{2.5}$（μg/㎥）、SO_2（ppm）、NO_x（ppm）の 3 種類を考慮する。前者については、J リーグ公式サイト[5)]から入手した 2024 年明治安田 J1 リーグにおける試合結果のデータを、大気汚染物質については、環境省大気汚染物質広域監視システム[6)]から入手したデータをそれぞれ利用する。

3. 分析結果

図 1～3 は、各試合の違反行為数と $PM_{2.5}$ 濃度（μg/㎥）の散布図及び単回帰分析の結果を表したものである。具体的に、図 1 は、ファウル数（回）と $PM_{2.5}$ 濃度（μg/㎥）の対数値、図 2 は、イエローカード（枚）と $PM_{2.5}$ 濃度（μg/㎥）の対数値、図 3 はレッドカード（枚）と $PM_{2.5}$ 濃度（μg/㎥）の対数値についての結果が示されている。図 1～3 によると、ファウル数、イエローカードと $PM_{2.5}$ 濃度の間には正の相関関係がみられる一方で、レッドカードと $PM_{2.5}$ 濃度の間には負の相関関係が確認された。

図 S1～S3 および S4～S6 には、図 1～3 と同様に各試合の違反行為数と SO_2（ppm）、NO_x（ppm）の散

布図及び単回帰分析の結果を表したものを添付している。図 S1～S3 によると、ファウル数、イエローカードと SO_2 濃度の間には正の相関関係がみられる一方で、レッドカードと SO_2 濃度の間には負の相関関係が確認された。また、図 S4～S6 によると、ファウル数、イエローカード、レッドカードと NO_x 濃度（ppm）の間には全て正の相関関係が確認された。

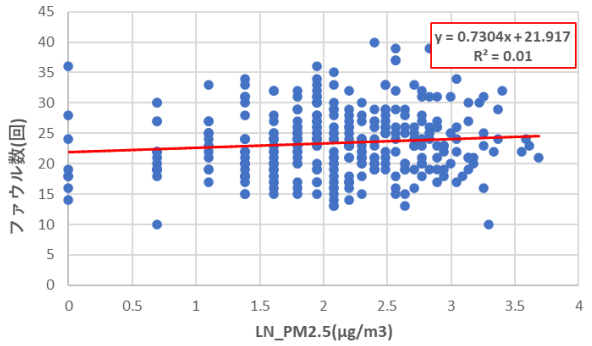


図 1　ファウル数と $PM_{2.5}$ の相関関係

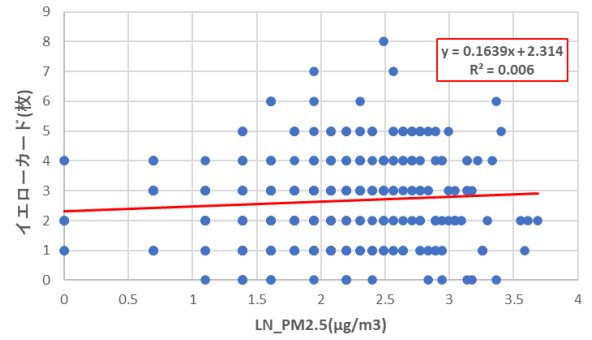


図 2　イエローカードと $PM_{2.5}$ の相関関係

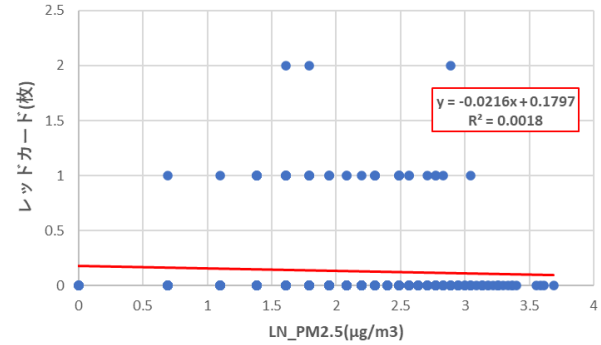


図 3　レッドカードと $PM_{2.5}$ の相関関係

4. 考察

汚染と違反行為数に正の相関がみられる理由として、まず、医学的要因が考えられる。最近の文献では、大気汚染への曝露が、脳への酸素の輸送を損ない、認知力の低下をもたらすことやストレスホルモンの上昇を引き起こすことが指摘されており、これらが違反のメカニズムである可能性がある [3]。また、既にストレス下にある人は汚染による精神障害リスクが増加する可能性があり、サッカー選手は一般的に高レベルのストレス下にあることから、精神的ストレスを抱えた選手が、汚染濃度の上昇に敏感に反応したという可能性も考えられる [7,8]。

5. 結論と今後の展望

今回の結果から $PM_{2.5}$ 及び SO_2 の濃度が上昇するとファウル数とイエローカードの頻度は増加する一方、レッドカードの頻度は減少するという結果が得られた。また、NO_x の濃度が上昇するとレッドカードを含む全ての種類の違反頻度が増加するという結果が得られた。

最後に、本要旨では、違反行為数と汚染濃度に同時に影響を与える共変量を制御していないため、本分析結果を、因果関係として解釈することはできないことに注意する必要がある。今後は、気温や湿度といった制御変数や操作変数を考慮した重回帰モデルを構築することで、変数間の因果関係に迫っていく必要がある。

引用文献

1) Health Effects Institute: “State of Global Air 2024. Special Report”, (2024), pp.1-35
2) Lee H.Y., Kim H.J., Kim H.J., Na G. et al.: Sci. Total Environ., 855, (2023), pp.158862
3) Bondy M., Roth S., Sager L.: J. Assoc. Environ. Reso., 7(3), (2024), pp.555-585
4) Mo J., Wu Z., Yuan Y.: J. Environ. Manag., 122, (2023), pp.102886
5) J リーグ公式サイト：“J リーグ日程・結果”, J.LEAGUE.jp,（オンライン）, 入手先 <https://www.jleague.jp/>,（参照 2025-01-04）
6) 環境省：“そらまめくん”,環境省大気汚染物質広域監視システム,（オンライン）, 入手先 <https://soramame.env.go.jp/nodomap>,（参照 2025-01-04）
7) IQAir：“大気汚染と子供のメンタルヘルス” レビュー記事,（オンライン）, 入手先< https://www.iqair.com/jp/>,（参照 2025-01-16）
8) FIFPro:“プロサッカーにおける心の健康問題の調査”, Health and Performance, オンライン）, 入手先< https://www.fifpro.org/en>,（参照 2025-01-16）

Supporting Information

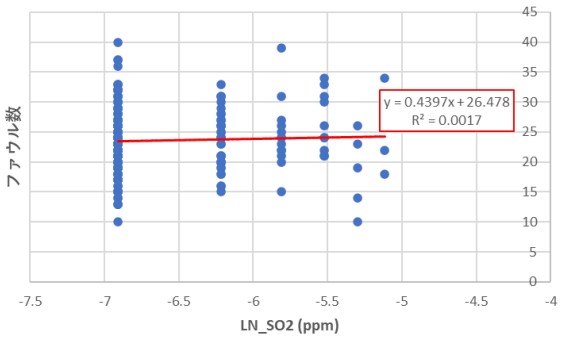


図 S1 ファウル数と SO_2 の相関関係

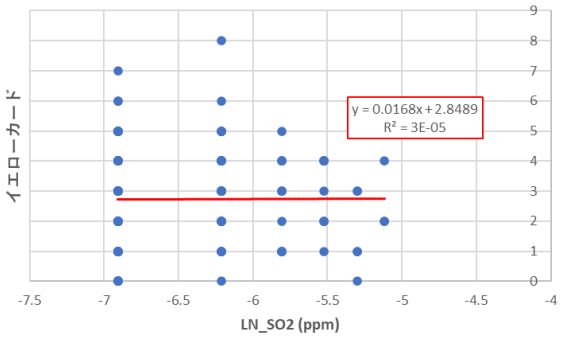


図 S2 イエローカードと SO_2 の相関関係

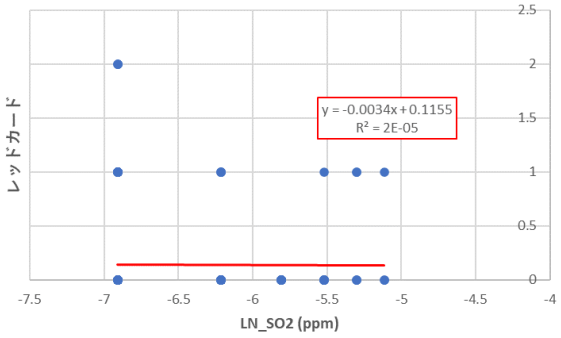


図 S3 レッドカードと SO_2 の相関関係

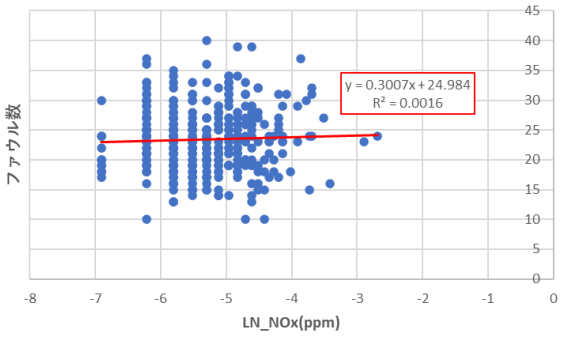


図 S4 ファウル数と NO_x の相関関係

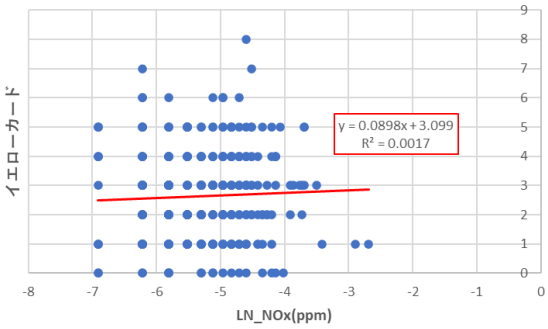


図 S5 イエローカードと NO_x の相関関係

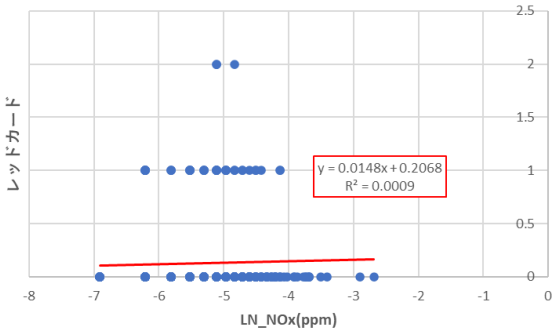


図 S6 レッドカードと NO_x の相関関係

運輸部門の環境効率性評価：国際的視点から見た日本の立ち位置

Environmental Efficiency Analysis of the International Transportation Sector

○友綱ヒ加璃*1)、中石知晃 2)
Hikaru Tomotsuna, Tomoaki Nakaishi
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学研究院
*tomotsuna.hikaru.816@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景と目的

2024 年度からトラックドライバーに時間外労働の上限規制が適用された [1]。トラックドライバーの年間労働時間は全産業平均に比べ 2 割程度長く、労災請求件数、支給決定件数ともに最も多い業種となっている。国土交通省によると、トラック運転者の改善基準告示によって、全国で約 35%、東北などの一部地方では約 41%もの荷物が運べなくなると試算されている。このように労働時間が短くなり、輸送能力が不足することでモノが運べなくなる懸念がなされている。

加えて、2021 年以降、国際情勢の悪化等に起因して世界各国で物価が上昇している。我が国でも原材料・エネルギー価格の高騰によって消費者物価指数と企業物価指数の上昇がみられ、2022 年 12 月の消費者物価指数は前年同月比で 4%上昇と約 40 年ぶりの水準となっている [2]。燃料価格の高騰が運輸事業の経営に与える影響は大きく、今後、エネルギー使用の合理化に各所が協力して取り組んでいくことが求められている。

これらの国内運輸部門における労働もしくは環境問題を解決するためには、労働者 1 人当たりの生産額（労働生産性）や環境負荷 1 単位当たりの生産額（環境生産性）の向上が決定的に重要である。そして、これらの向上に資するためにも、以下の二つの事項について、理解を深める必要がある：①日本の生産性は、現時点で国際的にどれくらいのレベル（立ち位置）にあるのか；②過去から現在にかけて日本の生産性は改善の傾向にあるのか。

このような背景を踏まえ、本研究の目的は、以下の 2 つである：①各国の運輸部門の 3 つの生産要素（労働、資本、エネルギー）と 2 つの産出要素（生産額、CO_2 排出）を考慮した包括的な生産性指標を新たに開発し、国際比較を行うとともに、日本の位置づけについて明らかにする；②世界的な生産性の上昇（もしくは下降）トレンドを把握し、日本のそれと比較する。

具体的に、本研究では、世界産業連関表（World Input Output Database：WIOD）[3]から入手した投入・産出データに包絡的分析法 [4]を適用し、世界 43 ヵ国の運輸部門における多要素生産性の計測及びその経年変化観察を実施する。尚、本要旨では、生産要素ごとの単純効率性（もしくは生産性）の比較分析結果についてのみ報告を行う。

2. 手法とデータ

2.1 効率性・生産性分析

本研究では、4 つの生産要素に関するそれぞれの効率性指標を以下（1）～（4）式の様に定義する：

$$LE_i^t = GO_i^t / EMPE_i^t \quad (1)$$

$$KE_i^t = GO_i^t / K_i^t \quad (2)$$

$$EE_i^t = GO_i^t / EC_i^t \quad (3)$$

$$CE_i^t = GO_i^t / CO2_i^t \quad (4)$$

ここで、LE_i^t、KE_i^t、EE_i^t、CE_i^t はそれぞれ、国 i の t 年における労働効率性、資本効率性、エネルギー効率性、環境効率性を示す。

さらに、上記の効率性指数の経年での変化率を生産性の指標として以下（5）～（8）式の様に定義する：

$$LP_i^{t,s} = LE_i^s / LE_i^t \quad (5)$$

$$KP_i^{t,s} = KE_i^s / KE_i^t \quad (6)$$

$$EP_i^{t,s} = EE_i^s / EE_i^t \quad (7)$$

$$CP_i^{t,s} = CE_i^s / CE_i^t \quad (8)$$

ここで、$LP_i^{t,s}$、$KP_i^{t,s}$、$EP_i^{t,s}$、$CP_i^{t,s}$ はそれぞれ、国 i の t 年から s 年における労働、資本、エネルギー、環境効率性の変化率、つまり、労働生産性、資本生産性、エネルギー生産性、環境生産性である。

2.2 データ

本研究では、WIOD[3]及び付帯の環境勘定から入手した代表的な 43 か国運輸部門の 2000 年及び 2014 年の投入産出データを分析に利用する。具体的な投入要素としては、従業員数（千人）、資本ストック（百万米国ドル）、エネルギー消費（TJ）の 3 つを、産出要素としては、産業別総生産額（百万米国ドル）及び CO_2 排出量（kt）の 2 つを選択した。下の表 1 はこれらの使用データの記述統計である。

表 1 記述統計

	GO	EMPE	K	EC	CO_2
平均	44,399	670	91,353	306,028	20,175
S.D.	66,131	1,484	181,285	625,953	39,293
最大	441,889	13,794	1,201,036	6,755,628	441,889

最小	74	1	173	426	32

注：S.D.は標準偏差を示す。

3. 結果

3.1 効率性分析

表2は、43か国の各効率性指標（2000年）のランキングである。表2によると、スイス、キプロス、メキシコなどが複数の指標で上位を占めていることが分かる。日本は、エネルギー効率性（8位）や環境効率性（6位）では比較的高い水準だが、資本効率性（42位）では著しく低い水準にあり、労働効率性（17位）も中位の水準にある。

表2 43か国の各効率性指標（2000年）の順位

順位	LE_i^{00}	KE_i^{00}	EE_i^{00}	CE_i^{00}
1	CHE	MEX	TUR	CYP
2	NOR	EST	CYP	AUT
3	CAN	AUS	MEX	MEX
		（中略）		
41	IND	PRT	POL	POL
42	RUS	JPN	BGR	LVA
43	IDN	RUS	RUS	RUS

表3は、43か国の各効率性指標（2014年）のランキングである。表3によると、スイス、メキシコ、ルクセンブルクなどが複数の指標で上位を占めていることが分かる。日本は、エネルギー効率性（15位）や環境効率性（10位）の面では比較的高評価だが、2000年同様、資本効率性（41位）が大きな課題だと分かる。

表3 43か国の各効率性指標（2014年）の順位

順位	LE_i^{14}	KE_i^{14}	EE_i^{14}	CE_i^{14}
1	CHE	MEX	TUR	LUX
2	TUR	AUS	ESP	CHE
3	ITA	FIN	CHE	AUT
		（中略）		
41	BRA	JPN	TWN	BGR
42	IDN	RUS	POL	SVN
43	IND	KOR	RUS	LTU

3.2 生産性分析

表4は、2000年から2014年までの43か国の各生産性指標のランキングである。表4によると、ルーマニア、ロシア、リトアニアなどが複数の指標で上位を占めていることがわかる。これらの国に注目することが、各国の政策や産業構造に関する比較分析が効率改善の手がかりになる。日本は、労働生産性（43位）と資本生産性（35位）が依然として低い水準である。一方で、エネルギー生産性（36位）及び環境生産性（29位）は、中位に位置している。

表4 43か国の各生産性指標（2000～2014年）の順位

順位	$LP_i^{00,14}$	$KP_i^{00,14}$	$EP_i^{00,14}$	$CP_i^{00,14}$
1	ROU	MEX	ESP	LUX
2	RUS	AUT	RUS	RUS
3	LTU	LTU	ROU	BEL
		（中略）		
41	CYP	BGR	GBR	LTU
42	MLT	EST	SWE	NOR
43	JPN	KOR	USA	CYP

4. 結論と考察、今後の展望

本研究では、労働、資本、エネルギー、環境効率性及び生産性を各国で算出し、国際的な比較を行うとともに日本の位置づけを明らかにした。日本は、労働生産性や資本生産性が低く、エネルギー生産性や環境生産性は中下位の水準を保っている。グローバルな競争力を高めるためには、さらなる効率化が必要なため、総合的な課題として、資源活用の最適化や生産性向上のための技術導入、柔軟な労働制度の改革などがあげられる。

今後は、労働生産性、資本生産性、エネルギー生産性、環境生産性の4つの指標を総合的に評価した「多要素生産性」の指標を作成し、国際的なランキングを構築することを目指す[5,6]。これにより、各国の運輸効率化施策を体系的に比較・分析し、優れた取り組みを日本の運輸システムへ応用することで、持続可能な社会の構築に貢献することを狙いとしている。

引用文献

1) 経済産業省・国土交通省・農林水産省：“我が国の物流を取り巻く現状と取組状況”，(2022)，pp.1–43
2) 厚厚生労働省 労働基準局 監督課：“資料1 改善基準告示の見直しについて”，(2022)，pp.1–16
3) Timmer M.P., Dietzenbacher E., Los B., Stehrer R., de Vries G.J.: Rev. Int. Econ., 23, (2015), pp.575–605
4) Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.: European Journal of Operational Research, 2(6), (1978), pp.429–444
5) Mariano E.B., Gobbo Jr. J.A., Camioto F.C., Rebelatto D.A.N.: J. Clean. Prod., 163, (2017), pp.166–178
6) Rashidi K., Cullinane K.: Transport Policy, 74, (2019), pp.35–46

成長期の食育が個人の食品ロス削減意識・努力・行動に及ぼす影響

The Role of Dietary Education During the Growth Stage in Reducing Food Waste

○川畑慶馬*[1)]、中石知晃[2)]
Keima Kawabata, Tomoaki Nakaishi
1) 九州大学経済学部 2) 九州大学大学院経済学研究院
*kawabata.keima.413@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

「食品ロス」とは端的に言うと、本来食べられるにもかかわらず捨てられる食品である。国連食糧農業機関（FAO）によると、世界中で生産された食料のうち消費者に流通していく過程で全体の約 3 分の 1、重量にして約13億トンの食品ロスが発生している[1)]。また、農林水産省の令和 4 年度における推計によると、日本では年間 472 万トンの食品ロスが発生している[2)]。

食品ロスは、事業系食品ロスと家庭系食品ロスの大きく 2 つに大別され、前者の事業系は約 50%、残りの家庭系は約 50%を占める[2)]。日本の食品ロスの削減の目標は、事業系食品ロスと家庭系食品ロスにおいて共に 2000 年度比で 2030 年度までに食品ロス量を半減させる設定している[2)]。具体的な数値としては、前者が 273 万トン、後者が 216 万トンである[2)]。しかし、2022 年度において事業系食品ロスはこの数値目標を達成したが、家庭系食品ロスは目標まで 20 万トン不足している。このような背景を踏まえ、本研究は、家庭系食品ロスの削減に注目する。

一般家庭における食品ロス削減には、消費者の行動変容が必要不可欠であり、その手段の 1 つとして“食育”が挙げられる。関連する既存研究である町田（2022）[3)]では、小・中・高での食育（ここでは、農林漁業体験）が、成人以降の食に関する推奨事項の知識と正の相関があることが示されている。しかし、彼らの焦点は、食に関する知識であり、食育と食品ロス削減意識や努力、行動との関係は依然として明らかにされていない。

本研究では、小・中・高での農業生産経験を含む様々な食育（例えば、家族との食事や食前後の挨拶、学校での食育講話など）が、個人の食品ロス削減意識、努力、行動に影響を与えるかについて明らかにする。具体的に、独自のアンケート調査データに基づく重回帰モデルを構築し、成長期の様々な食育が食品ロス削減意識、努力、行動に与える影響について統計的に検証する。最終的に、食育の効果的なアプローチについて考察し、食品ロス削減に資する取り組みへと応用する。

2. 研究手法とデータ

2.1 アンケート調査

九州大学経済学部の『経済・経営学演習』を受講する学部 3、4 年生を対象に、食育と食品ロスに関するアンケート調査を行った。調査は、2024 年 11 月 12 日～14 日にグーグルフォームを用いて行われた。得られた有効回答数は 17 で、サンプル中の男女比は 14 対 4 であった。質問項目の選定は、農林水産省の「令和元年度－食育に対する意識調査」を参考に行った。主要なアンケート項目を表 1 に示す（項目の詳細については SI を参照）。尚、表 1 の各項目については 5 段階のリッカート尺で計測を行った。

表 1 主要なアンケート項目

項目	質問
食品ロス削減行動	あなたは、どの程度、購入した商品を食べないまま捨ててしまうことがありますか。
食品ロス削減意識	食品産業や家庭において食べ残しや食品の廃棄が発生していることに関して、日頃からどの程度「もったいない」と感じることがありますか。
食品ロス削減努力	あなたは、どの程度、食べ残しを減らす努力をしていますか。
1 日 3 食	家では、1 日三食いずれも決まった時間に食事をとっていた。
家族との食事	家では、家族と一緒に食事をとっていた。
農林漁業体験	家、学校、地域などで、田植え、野菜の収穫など食の生産に関する体験活動をした。
学校での食育講話	学校で、先生から食に関する話を聞いたり、指導を受けたりした。
食の話	食事中に、家族と食についての話をした。
食事の工夫	家族は、あなたが食べやすいよう料理を工夫してくれた。
好き嫌いの矯正	家族は、あなたに対して嫌いなものでも何とかして食べさせようとした。

2.2 重回帰モデル

上記のアンケート調査の回答を用いて、目的変数を

食品ロス削減意識（または、努力・行動）、説明変数を、様々な食育指標とした重回帰モデルを構築する。尚、説明変数の食育指標には、成長期（小学校、中学校、高校時代）の各段階における、1 日 3 食、農林漁業体験、学校での食育講話などの経験の度合いが含まれる。また、制御変数には、所得、性別、年齢、パートナーの有無、学歴、普段の食生活など食育及び食品ロス削減に関係がある項目が考慮された [4,5]。

3. 結果と考察

3.1 アンケート結果

図 1 には、食品ロス削減意識、努力、行動の回答結果を示す。図 1 によると、各指標の中央値はそれぞれ、食品ロス削減意識（5）、削減努力（4）、削減行動（2）であった。これらの 3 つの指標の順位相関（小数点第二位の四捨五入）は、意識と努力のみ 5%水準で統計的に有意で値は 0.582 となった。

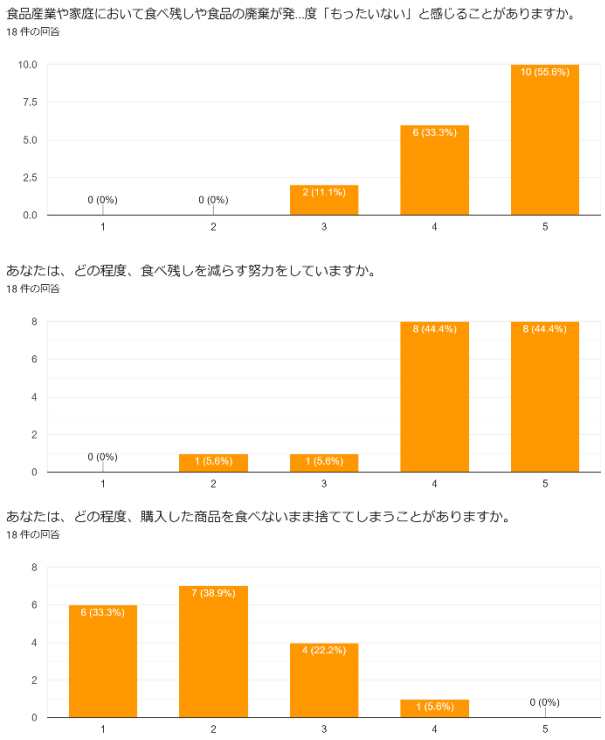


図 1 食品ロス削減意識、努力、行動のアンケート結果

3.2 スピアマンの順位相関検定

表 2（a-c）には、被説明変数である 3 つの食品ロス削減指標（意識・努力・行動）と説明変数である食育指標（小・中・高）間のスピアマンの順位相関係数が有意性と共に記されている。表 2（a）より、小学校における先生の話と食品ロス削減意識及び努力との間に有意な正の相関があることが分かった。また、小学校における食事の工夫と食品ロス削減努力の間にも有意な正の相関がみられた。一方で、中学校、高校における食育指標と食品ロス削減意識・努力・行動との間には有意な関係はみられなかった。

4. 結論と考察

今回得られた結果より、小学生時代に先生から食育講話を聞くことによって成人以降の食品ロス削減意識及び努力が高まり、小学生における家庭での食事の工夫することによって成人以降の食品ロス削減努力が高まる可能性が示唆された。しかし、小学生におけるその他の食育指標と食品ロス削減意識、努力、行動との間や中高時代における食育指標と食品ロス削減意識、努力、行動との間には有意な相関が確認されなかった。

尚、本相関分析の結果は、制御変数が含まれていないことに注意する必要があり、これらを考慮した重回帰モデル（もしくは順序ロジスティック回帰モデル）を構築することで本要旨とは異なった結果が得られる可能性がある。本会では、本要旨で示した結果に加え、データサンプル数を拡大した重回帰モデルによる分析結果についても報告予定である。

表 2 ピアマンの順位相関検定の結果

（a）被説明変数と小学校での食育指標の相関

変数		三食_小	家族_小	体験_小	先生_小	話_小	工夫_小	好き嫌い_小
意識	相関係数	0.25	-0.195	0.161	0.501*	0.333	0.465	-0.098
	p値	0.334	0.453	0.538	0.041	0.192	0.06	0.709
努力	相関係数	0.057	-0.217	0.24	0.517*	0.466	0.56*	0.053
	p値	0.827	0.402	0.353	0.033	0.059	0.019	0.839
行動	相関係数	-0.386	-0.25	0.153	-0.219	-0.195	-0.282	0.147
	p値	0.126	0.334	0.557	0.399	0.454	0.272	0.573

（b）被説明変数と中学校での食育指標の相関

変数		三食_中	家族_中	体験_中	先生_中	話_中	工夫_中	好き嫌い_中
意識	相関係数	0.183	-0.3	0.045	0.256	0.27	0.386	-0.286
	p値	0.483	0.241	0.864	0.322	0.294	0.126	0.266
努力	相関係数	-0.079	-0.351	0.066	0.258	0.389	0.317	-0.215
	p値	0.763	0.167	0.801	0.317	0.122	0.215	0.407
行動	相関係数	0.087	-0.029	0.054	-0.295	-0.13	-0.087	0.028
	p値	0.739	0.911	0.836	0.25	0.618	0.739	0.916

（c）被説明変数と高校での食育指標の相関

変数		三食_高	家族_高	体験_高	先生_高	話_高	工夫_高	好き嫌い_高
意識	相関係数	-0.066	0.017	-0.207	0.093	0.148	0.481	-0.238
	p値	0.801	0.949	0.425	0.722	0.57	0.051	0.358
努力	相関係数	-0.067	-0.013	-0.097	-0.388	0.183	0.116	-0.139
	p値	0.799	0.961	0.711	0.124	0.483	0.658	0.595
行動	相関係数	0.401	0.15	-0.032	-0.112	-0.159	-0.06	0.024
	p値	0.111	0.567	0.904	0.67	0.542	0.819	0.926

* p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001

引用文献

1) FAO: “Global food losses and food waste: Extent, causes, and prevention,” Rome, Italy, (2011), pp.1–29
2) 消費者庁消費者教育推進課食品ロス削減推進室：“食品ロス削減関係資料”，（2024），pp.1–99
3) Machida D.: nutrients, 14(7), (2022), pp.3639
4) Lima R., Yu A., Liu Q., Liu J.: Food security, 16, (2024), pp. 867–881
5) Qi D., Roe B.E.: PLoS ONE 11(7), (2016), pp. e0159250

Supporting Information

表 S1 アンケート項目

項目	質問	回答
食品ロス削減意識	食品産業や家庭において食べ残しや食品の廃棄が発生していることに関して、日頃からどの程度「もったいない」と感じることがありますか。	1（全く感じていない）~5（いつも感じている）
食品ロス削減努力	あなたは、どの程度、食べ残しを減らす努力をしていますか。	1（全くしていない）~5（必ずしている）
食品ロス削減行動	あなたは、どの程度、購入した商品を食べないまま捨ててしまうことがありますか。	1（全くない）~5（よくある）
実家暮らし	あなたは実家暮らしですか。	はい（実家暮らし）、いいえ（一人暮らし、シェアハウス等）
所得	年間総収入（バイト代、仕送りを含む）はどのくらいになりますか。	0~50 万円、50~100 万円、100~150 万円、150~200 万円、200 万円以上
年齢	あなたは何歳ですか。	数値入力
性別	あなたの性別を教えてください。	男性、女性
結婚	あなたは結婚していますか、恋人がいますか。	既婚である、恋人・パートナーがいる、いない
学歴	現在の学年、就学状況について教えてください。	学部 1 年、学部 2 年、学部 3 年、学部 4 年以上、修士 1 年、修士 2 年以上、博士 1 年、博士 2 年、博士 3 年以上
自由時間	あなたの自由時間は 1 日平均何時間ありますか。	1 時間未満、1 時間以上 2 時間未満、2 時間以上 3 時間未満、3 時間以上 4 時間未満、4 時間以上 5 時間未満、5 時間以上 6 時間未満、6 時間以上 7 時間未満、7 時間以上 8 時間未満、8 時間以上 9 時間未満、9 時間以上 10 時間未満、10 時間以上
暮らしのゆとり	現在のあなたの暮らしについて、どの程度ゆとりがありますか。	1（全くゆとりがない）~5（とてもゆとりがある）
時間的ゆとり	あなたは日々の生活に、どの程度時間的なゆとりを感じますか。	1（全くゆとりがない）~5（とてもゆとりがある）
健全な食生活	あなたは、日頃から健全な食生活を実践することをどの程度心掛けていますか。	1（全く心掛けていない）~4（常に心掛けている）
朝食	あなたはふだん朝食を食べますか？	ほとんど食べない、週に 2~3 食べる、週に 4~5 食べる、ほとんど毎日食べる
孤食	あなたは、1 日の全ての食事を 1 人で食べることはありますか。この中から 1 つ選んでください。	ほとんどない、週に 1 日程度ある、週に 2~3 日ある、週に 4~5 日ある、ほとんど毎日
1 日三食（小・中・高）	家では、1 日三食いずれも決まった時間に食事をとっていた。	1（全く当てはまらない）~5（非常に当てはまる）
家族と食事（小・中・高）	家では、家族と一緒に食事をとっていた。	1（全く当てはまらない）~5（非常に当てはまる）
農林漁業体験（小・中・高）	家、学校、地域などで、田植え、野菜の収穫など食の生産に関する体験活動をした。	1（全く当てはまらない）~5（非常に当てはまる）
食育講話（小・中・高）	学校で、先生から食に関する話を聞いたり、指導を受けたりした。	1（全く当てはまらない）~5（非常に当てはまる）
食の話（小・中・高）	食事中に、家族と食についての話をした。	1（全く当てはまらない）~5（非常に当てはまる）
食事の工夫（小・中・高）	家族は、あなたが食べやすいよう料理を工夫してくれた。	1（全く当てはまらない）~5（非常に当てはまる）
好き嫌いの矯正（小・中・高）	家族は、あなたに対して嫌いなものでも何とかして食べさせようとした。	1（全く当てはまらない）~5（非常に当てはまる）

経済的嗜好性が環境保護行動に与える影響

The Role of Economic Preferences in Pro-Environmental Behaviors

○原口恭輔*[1)]、中石知晃[2)]
Kyosuke Haraguchi, Tomoaki Nakaishi
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学研究院
* haraguchi.kyosuke.477@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

SDGs の 12 番目の目標は、「つくる責任、つかう責任」であるが、これが示すように、近年、生産者だけでなく、消費者に対しても環境保護への努力が強く求められるようになっている。例えば、製品市場においては、消費者側が環境負荷の低い財やサービスを優先的に選択する「グリーン購入」を通して、法的な規制によらない、市場における選択という側面から事業者の環境保護への取り組みを促す可能性が指摘されている[1)]。しかしながら、行政が補助金や法規制を通してこうした行動を消費者に促していくという既存の方法には多大なコストを要する欠点があったため、「ナッジ」という手法が注目されるようになった。ナッジとは、人に強制することなく、良い選択をさせることを促す手法を指し、前述した方法に比べると費用対効果が高いことが利点である。

既存研究では、ナッジなどの活用をするための土台として消費者の環境保護行動について理解を得るべく、経済的嗜好性と環境保護行動のとの関係が調べられている。例えば、Lades et al.（2021）[2)]では、一日再生法を用いたアンケート調査を用いた分析で、利他性のみが毎日の環境保護行動に有意に影響を与える経済的嗜好性であることが示された。上記の既存研究では、忍耐や現在バイアスなどの 7 つの経済的嗜好性について分析を行われているが、他の経済的嗜好性が影響している可能性を示唆する研究もある。例えば、van Horen et al.（2018）[3)]では、経済実験により、競争のシステムが向自己的な人の持続可能な行動を促進することが示された。

以上の背景を踏まえて、本研究では、効果的なナッジのシステムの構築の土台を作るために、競争を中心とした経済的嗜好性が、様々な環境保護行動に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. データと分析手法

2.1 アンケート調査

アンケート調査を通じて、個人の経済的嗜好性と環境保護行動への取り組みへの自己評価について調査した。調査は九州大学の学生を対象に、2024 年 11 月 18 日から 2024 年 11 月 24 日まで行われた。

経済的嗜好性については、忍耐、現在バイアス、リスク選好、利他性、正の互恵性、負の互恵性、信頼の 7 つを Lades et al.（2021）[2)]と Falk et al.（2018）[4)]を基に質問を作成し、リッカート尺度を用いた定性的な質問と、支払う金額などを数値で答える定量的評価を織り交ぜる形で計測した。また、競争は、Fallucchi et al.（2020）[5)]の方法に従い定性的な質問で計測した。

環境保護行動については、15 種類の環境保護行動について、普段の取り組みの頻度の自己評価を 5 段階のリッカート尺度で計測した。

回答者の社会属性については、既存研究[3)]に従い、性別、世帯人数、結婚や恋人の有無、健康不安、年収に加え、数学能力の自己評価についても調査した。

2.2 分析手法

アンケート結果をもとに、個人の経済的嗜好性が環境保護行動に与える影響を分析するために順序ロジスティック回帰分析を行った。被説明変数は、15 個の環境保護行動に対する普段の取り組みの頻度の自己評価であり、環境行動 15 個それぞれに対してモデルを構築した。説明変数は、経済的嗜好性であり、Lades et al.（2021）[2)]と Falk et al.（2018）[4)]を基に、アンケートで得た結果を加工したものを用いた。また、制御変数として性別、世帯人数、結婚や恋人の有無、健康不安、年収、数学能力の自己評価を用いた。

3. 結果と考察

以下では、15 種類の環境保護行動に関する回帰の結果を、4 つのグループに分けて表に示すとともに考察を行う。尚、分散拡大係数（VIF）の値によると、説明変数間での多重共線性は懸念されなかった。

表 1 には、主に消費に関して店頭での意思決定に係る 4 種類の環境保護行動（具体的に、「(1) レジ袋や使い捨てカトラリーをもらわない」、「(2) 過剰包装製品を避ける」、「(3) 地産地消を心がける」、「(4) 無駄な買い物をしない」）の取組みを被説明変数とした結果が示されている。表 1 によると、有意ではないが競争が環境保護行動に正の影響を与える傾向にあるとともに、利他性が (2) ～ (4) の環境保護行動に有意な正の影響を与えることが分かる。

表 S1（SI 参照）には、主にリサイクルやエネルギーの節約の推進に係る 5 種類の環境保護行動（具体的に、「(5) 省エネ製品の購入」、「(6) リサイクル製品の購入」、「(7) ごみの分別や減量、リサイクル」、「(8) 電気・水道・ガスなどの節約」、(9)「公共交通機関や自転車などの利用」）の取組みを被説明変数とした結果が示されている。表 S1 によると、有意ではないが競争が (5) ～ (9) の環境保護行動に負の影響を与えることや、(9) の環境保護行動にリスク選好が 5%の有意水準で負の影響を与えることがわかる。

表 2 には、主に環境問題への社会的支援に係る 3 種類の環境保護行動（具体的に、「(10) 環境問題に取り組む企業や組織の商品やサービスを選択」、「(11) 環境問題に取り組む組織や団体への支援」、「(12) 地域の清掃活動やボランティア活動への参加」）の取組みを被説明変数とした結果が示されている。有意な項目はないが、利他性と競争はいずれも環境保護行動に正の影響を与える傾向にあり、忍耐、正の互恵性、負の互恵性、信頼が負の影響を与えるという点がモデル間で共通している。

表 S2（SI 参照）には、 その他の環境保護行動（具体的に、「(13) ものを長く使う」、「(14) 電力会社の変更や自宅への太陽光パネルの設置」、「(15) 環境問題に取り組む政治家への投票」）の取組みを被説明変数とした結果が示されている。これらの結果については、危険確率が極めて高く考察が困難である。

表 1 店頭での意思決定に係る環境保護行動

モデル	(1)	(2)	(3)	(4)
忍耐	5.367	0.865	−2.400	−3.998*
	(0.669)	(0.907)	(0.222)	(0.058)
現在バイアス	1.547	4.989	1.756	3.599**
	(0.933)	(0.147)	(0.261)	(0.031)
リスク選好	−4.411	−1.773	−1.690	−5.953**
	(0.852)	(0.863)	(0.445)	(0.05)
利他性	3.340	12.728*	5.929**	7.504***
	(0.804)	(0.097)	(0.013)	(0.008)
正の互恵性	7.068	9.589	−1.823	−5.864**
	(0.592)	(0.264)	(0.326)	(0.014)
負の互恵性	1.677	−4.430*	−2.845	−0.899
	(0.857)	(0.076)	(0.169)	(0.394)
信頼	−4.063	−7.633	−3.157	−4.516
	(0.675)	(0.28)	(0.315)	(0.125)
競争	3.218	6.170	4.903	4.630
	(0.897)	(0.573)	(0.141)	(0.181)

注）***,**,*はそれぞれ 1%,5%,10%水準で有意を表し、カッコ内は P 値を表す。制御変数として、性別、世帯人数、結婚・恋人の有無、数学能力の自己評価、収入をコントロールしている。

表 2 環境問題への社会的支援に係る環境保護行動

モデル	(10)	(11)	(12)
忍耐	−3.322	−1.563	−2.557
	(0.869)	(0.568)	(0.592)
現在バイアス	−0.348	−1.343	0.974
	(0.978)	(0.509)	(0.672)
リスク選好	0.061	−0.259	−5.821
	(0.998)	(0.949)	(0.117)
利他性	5.508	1.537	6.417
	(0.872)	(0.678)	(0.199)
正の互恵性	−5.916	−0.744	−0.906
	(0.401)	(0.845)	(0.764)
負の互恵性	−10.994	−5.850	−1.137
	(0.258)	(0.132)	(0.683)
信頼	−7.098	−5.949	−5.633
	(0.766)	(0.226)	(0.224)
競争	10.651	4.510	8.919
	(0.743)	(0.3)	(0.214)

注）***,**,*はそれぞれ 1%,5%,10%水準で有意を表し、カッコ内は P 値を表す。制御変数として、性別、世帯人数、結婚・恋人の有無、数学能力の自己評価、収入をコントロールしている。

4. 結論と今後の展望

本研究では、独自のアンケート調査データに計量経済学的アプローチを適用することで競争を中心とした経済的嗜好性が、様々な環境保護行動に与える影響を分析した。分析の結果、競争は、環境保護行動に有意に影響を与えるとはいえないことと、経済的嗜好性の影響の受け方が類似する環境保護行動が存在していることが明らかになった。今後の展望としては、サンプルサイズを増やし、より質の高いモデルを作るとともに、主成分分析を用いて客観的な環境保護行動のグループ分けを行いたい。

引用文献

1) 環境省:“環境白書”，環境省，入手先< https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h12/12100.html>，（参照 2025-1-7）
2) Lades L.L., Laffan, K., Weber, T.O.: Ecological Economics, 183, (2021), pp.106977
3) van Horen F., van der Wal, A., Grinstein, A.: Journal of Environmental Psychology, 59,(2018), pp.16-25
4) Falk, A., Becker, A., Dohmen, T., Enke, B., Huffman, D., Sunde, U.: The Quarterly Journal of Economics, 133(4), (2018), pp.1645-1692
5) Fallucchi, F., Nosenzo, D., Reuben, E.: Journal of Economic Behavior & Organization, 178, (2020), pp.402-423

Supporting Information

表 S1 リサイクルやエネルギーの節約の推進に係る環境保護行動

モデル	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
忍耐	0.991	0.482	11.846*	0.773	−2.801
	(0.864)	(0.959)	(0.063)	(0.669)	(0.306)
現在バイアス	−2.128	−4.016	2.035	2.884	1.284
	(0.418)	(0.691)	(0.392)	(0.31)	(0.556)
リスク選好	0.683	−1.205	−1.613	4.751	-4.724**
	(0.949)	(0.921)	(0.627)	(0.206)	(0.011)
利他性	1.882	4.076	−2.998	3.781	2.641
	(0.761)	(0.896)	(0.298)	(0.139)	(0.14)
正の互恵性	−1.526	1.377	5.438	4.365	2.256
	(0.906)	(0.943)	(0.15)	(0.2)	(0.472)
負の互恵性	−2.263	−1.355	1.163	−1.454	3.481*
	(0.706)	(0.861)	(0.542)	(0.639)	(0.055)
信頼	14.114	10.623	5.087	0.374	−2.648
	(0.306)	(0.69)	(0.212)	(0.937)	(0.505)
競争	−2.432	−3.646	−6.853	−2.066	−0.875
	(0.766)	(0.865)	(0.357)	(0.425)	(0.629)

注）***,**,*はそれぞれ 1%,5%,10%有意であることを表し、カッコ内は P 値を表す。また、制御変数として、性別、世帯人数、結婚・恋人の有無、数学能力の自己評価、収入をコントロールしている。

表 S2 その他の環境保護行動

モデル	(13)	(14)	(15)
忍耐	2.601	−1.972	10.230
	(1)	(0.998)	(0.977)
現在バイアス	−5.494	−0.791	−7.712
	(0.998)	(0.998)	(0.969)
リスク選好	1.589	−4.633	−12.120
	(1)	(0.994)	(0.971)
利他性	−7.478	−0.296	9.675
	(0.999)	(1)	(0.967)
正の互恵性	−3.871	−2.520	2.864
	(0.999)	(0.996)	(0.991)
負の互恵性	5.520	0.778	3.533
	(0.991)	(0.999)	(0.988)
信頼	12.428	0.346	−9.416
	(0.997)	(1)	(0.985)
競争	−3.883	6.603	−3.018
	(1)	(0.992)	(0.993)

注）***,**,*はそれぞれ 1%,5%,10%有意であることを表し、カッコ内は P 値を表す。また、制御変数として、性別、世帯人数、結婚・恋人の有無、数学能力の自己評価、収入をコントロールしている。

福島原発事故が川内原発周辺地域に与えた影響

The Impact of the Fukushima Daiichi Accident on Land Prices near the Sendai Nuclear Power Plant in Kagoshima Japan

○鍛治屋智啓*[1)]、中石知晃 [2)]
Tomoihro Kajiya, Tomoaki Nakaishi
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学研究院
*kajiya.tomohiro.540@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

原子力発電はカーボンニュートラル達成に向けて重要な選択肢の 1 つである。原発は CO_2 の排出量を抑えながら安定的な電力供給ができるという利点がある。一方で、事故リスクも高く、その潜在的な費用は高い。実際に、2011 年 3 月に起きた福島原発事故は原発周辺地域に大きな影響を与え、その事故処理費用は推定 21 兆円にも上った [1)]。

事故による直接的な損害（放射能汚染）はよく試算されているが、原発の外部性という間接的な影響はあまり考慮されていない。Rosen（1974）[2)]は公共施設の建設やサービス供給による外部性は地価に反映されることを明らかにした。また、Bauer et al.（2017）[3)]は福島原発事故によってドイツの原発から 5 ㎞以内の住宅価格が減少し、地域経済の衰退およびエネルギー政策の転換につながったことを明らかにした。ここで、これらの研究は日本で起きた原発事故がドイツやアメリカの原発周辺地域の住宅価格に与えた影響を推定したものであることを注意する必要がある。言い換えれば、原発への近接性が周辺地域に与えた日本特有の影響については依然として明らかにされていない。

本研究では、福島原発事故による日本の原発周辺地域の地価の変化についてヘドニックアプローチに基づく調査を行った。具体的に、国土交通省による土地総合情報システムの不動産取引データを基に差分の差（Difference in Difference：DID）分析を実施した。分析の結果、原発周辺地域の地価は、事故後に追加的に約 7.2%上昇することが明らかになった。

2 研究手法

本研究では、ヘドニックアプローチに基づく DID 分析を実施する。1 平方メートルあたりの地価を自然対数としたヘドニック価格方程式は以下で定義される：

$$Y_{ijt} = X_{ijt} + \gamma NPP_{ij} + \delta\left(NPP_{ij} \times Fuk_t\right) + D_j + D_t + \epsilon_{ijt} \quad (1)$$

ここで、iは取引、jは都市、tは年次を表す。被説明変数であるY_{ijt}は取引された土地の㎡単価を表す。NPP_{ij}は各原発の近くでおこなわれた取引を表すダミー変数であり、Fuk_tは東日本大震災の福島原発事故が起きた 2011 年以降の取引を表すダミー変数となっている。X_{ijt}は、土地属性が地価に与える影響を制御するための変数ベクトルであり、土地の用途、土地の形状、面積などの変数が含まれている。D_jは都市固定効果、D_tは年次固定効果、ϵ_{ijt}は誤差項である。事故による処置効果は δ となっており、これは原発周辺の地域と原発から遠い地域の平均取引価格の福島第一原発事故前後の変化の違いをとらえている。

3. データ

本研究では、国土交通省の「土地総合情報システム」から得られた不動産データ [4)]と「国土数値情報」の町・大字レベルの緯度経度データから計算した距離データ [5)]をマッチングしたデータを使用している。被説明変数となる 1 ㎡あたりの取引価格単価は、不動産取引データの取引価格総額を面積（㎡）で割ったものである。被説明変数に取引価格を選んだのは、取引価格の方が公示地価よりも実際の土地需要や取引動向を反映しているからである。公示地価は不動産鑑定士によって決められる地価であり、放射能汚染のような前例のない事象が発生した直後に、その影響をどのように評価するかは実際のところ明らかでない [6)]。

分析の対象地域は、川内原発と玄海原発周辺の宅地（土地）となっている（図 S1 参照）。分析期間は、2010 年第 1 四半期から 2011 年第 4 四半期までとなっている。使用する変数の記述統計を以下の表 1 に示す。

表 1 記述統計

	原発事故前		原発事故後		DID
	0-50 (km)	50-100 (km)	0-50 (km)	50-100 (km)	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
取引価格	5.05	3.59	5.43	3.73	2.35
(千/㎡)	(6.21)	(4.68)	(6.35)	(5.00)	(-1.82)
面積	3.32	3.66	3.28	3.82	-0.21
(百/㎡)	(2.95)	(3.15)	(3.04)	(3.22)	(0.01)
前面道路	6.97	6.65	6.84	6.76	-0.24
幅(㎡)	(4.76)	(4.33)	(4.35)	(4.50)	(-0.58)

住宅地	0.84	0.84	0.85	0.83	0.02
(%)	(0.37)	(0.36)	(0.36)	(0.37)	(-0.02)
観測数	1446	3437	1189	2554	8626

注）数値は平均値、カッコ内は分散。

4. 結果

表 1 によると、平均取引価格は原発から 50km 圏内の土地（+3760 円）、50km 以上離れた土地（+1402 円）と、ともに、福島原発事故の前後と比較して上昇した。そして、これら 2 つの差の差、すなわち無条件差分（DID）推定値は+2357 円である。しかし、この推定値は統計的に有意とは言えないものである。

表 2 は、取引価格と原発からの距離、および土地のその他の特性の回帰結果を示している。(1) 列は処置群を 0～50km とし、(2) 列は原子力災害対策指針で定められている避難区域を処置群とした分析結果となっている。避難区域は paz、upz、ppa の 3 種類が定められており、それぞれ原発から 0～5km、5～30km、30km～50km 圏内となっている（図 S2 参照）。(1) の分析において、処置効果の係数は正で、統計的に有意であった。推定された係数 0.072 は福島原発事故後、原発から 50km 圏内の地価が約 7.2%上昇したことを意味している。(2) の分析では、paz に対する処置効果の係数は負、ppa に対する処置効果の係数は正となり、統計的に有意であった。これは、福島原発事故後に、paz 圏内では、地価が約 55.9%減少し、反対に ppa 圏内では、9%増加したことを示している。

表 2 差分の差分析の結果

	(1)	(2)
Treatment group	Within50km	paz upz ppa
within50×Fukushima	0.072***	
	(0.026)	
paz×Fukushima		-0.559**
		(0.265)
upz×Fukushima		-0.010
		(0.044)
ppa×Fukushima		0.090***
		(0.027)
Land specification	Y	Y
Time F.E.	Y	Y
City F.E.	Y	Y
Adjusted R Square	0.686	0.686

注）*, **, ***, 10% 5% 1%水準で有意。カッコ内は地域単位でクラスタリングされた標準誤差。

図 1 では、処置群と対照群の平行トレンドが検定されている。具体的に、ここでは、福島原発事故から 1 四半期、2 四半期、3 四半期前のダミー変数と within50km の交差項をモデルに追加した分析を行った。図 1 によると、交差項の係数はすべて有意でない。これにより、福島第一原発事故前に処置群と対照群の取引価格が異なるトレンドを辿っていたという証拠は見つからない。さらに、処置効果が時間の経過で、どのように変化したのかについても調査した。福島原発事故後のダミー変数と within50km との交差項の係数は、事故から 3 四半期後のみ有意に正となった。

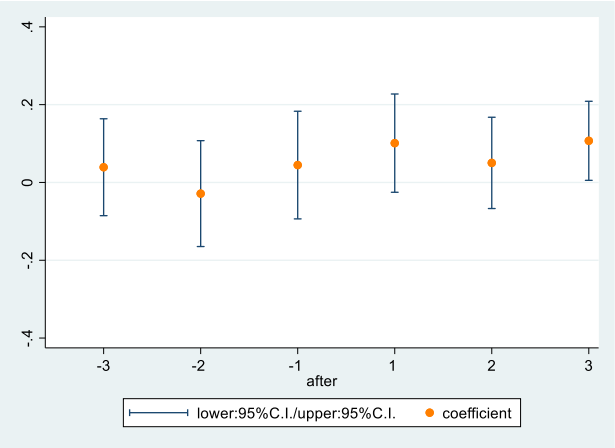


図 1 イベントスタディの結果

5. まとめ

本研究では、福島原発事故は川内・玄海原発から 50km 以内で地価を上げる影響をもたらしたことが明らかになった。5km 以内の地域では、地価が大幅に減少し、被害総額は 1m^2 あたり 7785.86 円となり、30～50km 圏内では 1m^2 あたり 5583.40 円増加するという地理的な異質性も確認することができた。

引用文献

1) Takizawa H.: “Current Status of Japan’s Nuclear Power”, (2021), pp.1–39
2) Rosen S.: J. Polit. Econ., 82(1), (1974), pp.34–55
3) Bauer T.K., Braun S.T., Kvasnicka M.: J. Urban Econ. 99, (2017), pp.94–106
4) 国土交通省：”不動産価格（取引価格・成約価格）情報の検索・ダウンロード”, 不動産情報ライブラリ, 入手先 <https://www.reinfolib.mlit.go.jp/realEstatePrices/ >, （参照 2024-1-16）
5) 国土交通省：”位置参照情報”, 国土数値情報ダウンロードサイト, 入手先< https://nlftp.mlit.go.jp/>, （参照 2024-1-16）
6) Kawaguchi D., Yukutake N.: J. Urban Econ., 99, (2017), pp.148–160

Supporting Information

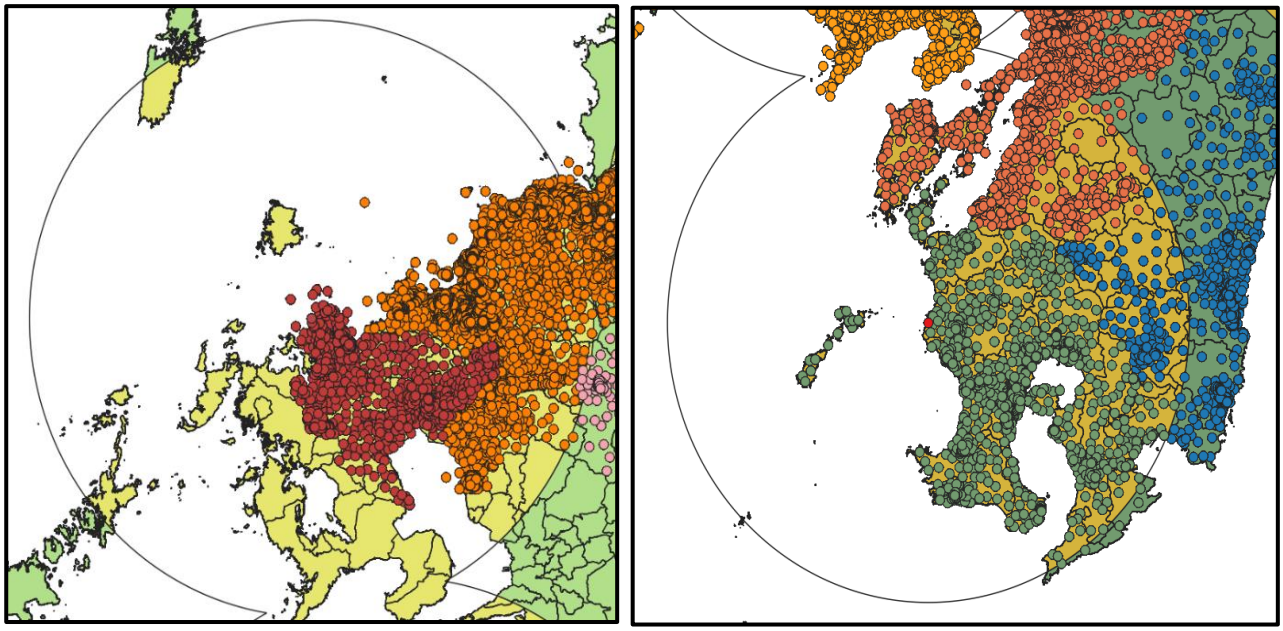


図 S1 川内原発・玄海原発周辺 50km 以内の地域

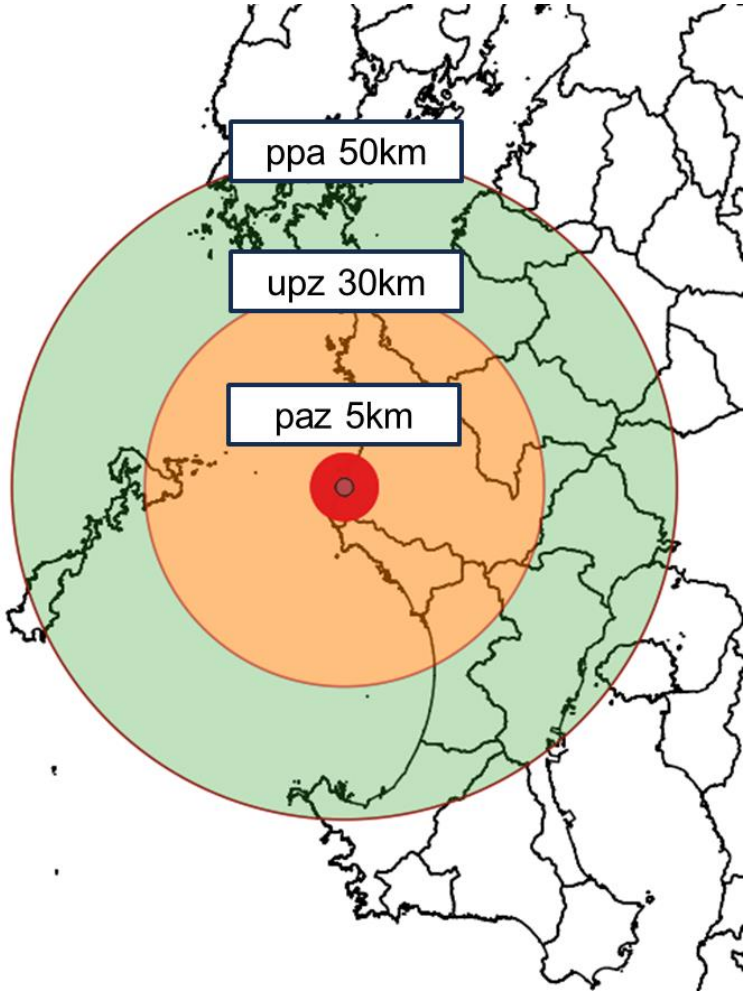


図 S2 paz upz ppa の範囲図

鉄道用ゴム材料の環境影響評価手法の検討

Examination of the method of evaluation of environmental influence of rubbers for railway

○ 半坂征則，太田達哉[*1)]
Masanori Hansaka, Tatuya Oota
1)　（公財）鉄道総合技術研究所
*) hansaka.masanori.46@rtri.or.jp

１．はじめに

今世紀後半までの脱炭素社会の実現のために適切な環境影響評価手法に基づく脱炭素化対策の設計・実施が求められている。今後新たに開発した材料や鉄道固有の対象に対しても適切に環境影響評価が行えるようにするために、市販のソフトや既公開情報に頼らず独力により環境影響評価が行えるようにする必要がある。このため、昨年度までに軽量化による省エネルギー効果が期待される炭素繊維強化材料の母材として使用されるケースが多いエポキシ樹脂を対象に、材料の合成反応の熱化学方程式に注目したエネルギー量ならびにそれに基づく CO_2 排出量の算出方法を検討し、概ね市販ソフト[1)]以下、「市販ソフトA」と称する)による値と一致することを報告した[2)]。一方、鉄道用高分子材料の中で、ゴム材料は車両用防振ゴム等様々な重要な用途で使用されており、環境影響評価手法の整備のための必要性・緊急性が高い。そのため、本年度では鉄道用ゴム材料について独力で環境負荷を算出する手法の検討を行い、その結果について報告する。なお、本検討では材料製造に伴うエネルギー量と CO_2 排出量（厳密には材料単位質量当りの量を求めているが、本稿では「単位質量当り」の記述は省略する）のみを対象とする。

２．対象とするゴム材料

鉄道用ゴム材料の中で現状使用量が最大級で重要度も高いのが天然ゴムであるが、市販ソフトAでは材料プロセスとして天然ゴム素材は扱っていず、製造過程の途中生成品であるラテックスのみを扱っている。その詳細な理由は不明だが、天然ゴムは自然由来の材料であり現状材料製造に要する環境負荷に対する自然由来の寄与の算出手法が確立していない等の理由が考えられる。独力で環境負荷を求める場合でも天然ゴムの自然由来による寄与を推定する手法は見出せていず、今後の課題としたい。

このため、合成ゴムを対象とするが、合成ゴムの中では鉄道用として重要度が高く市販ソフトAでも扱っているスチレンブタジエンゴム（SBR）を対象とする。

３．環境負荷の計算方法

3.1　エネルギー量

昨年度までの検討結果を踏まえ、まずは次の方法により SBR のエネルギー量を求める。

> SBR を構成する全分子の結合エネルギーを求めるのではなく原料を抽出する化石資源の採掘に要するエネルギー量の計算は市販ソフト A を援用する。その後の合成過程に要するエネルギー量を合成反応の熱化学方程式を考慮した方法に基づき計算し上述の資源採掘エネルギー量に加算する。

SBR の合成に関しても様々な方法があるが、本検討では文献(3)を参照して標準的と考えられる方法を想定する。それによれば、SBR はコールタール（ナフタレン等の様々な芳香族炭化水素物質等からなる化石資源だが、文献(3)に記載の物質を計算対象とする）から抽出したベンゼン、エチレンを原料とするスチレンと天然ガス（メタンを主成分とする）等から抽出したブタンを原料とするブタジエンの重合反応から製造される。図１に文献(3)に基づく SBR の主要な合成過程を模式的に示す。この合成過程に基づき上述の方法で SBR のエネルギー量を計算した。

3.2　CO_2 排出量

現状 CO_2 排出量を直接独立で求める手法は見出せておらず、本検討では次の手法によるものとする。

> 市販ソフト A により CO_2 排出量とエネルギー量の比（CO_2 排出係数）を求め、その値を 3.1 で算出したエネルギー量に乗じる。

この方法に基づき、SBR の CO_2 排出量について次の２種類の計算値を算出した。

計算値 A)　SBR のエネルギー量に市販ソフト A で求めた SBR の排出係数を乗じる。

計算値 B)　SBR のエネルギー量に市販ソフト A で求めたエポキシ樹脂の排出係数を乗じる（比較のため）。

4． 計算結果と考察

エポキシ樹脂と SBR について、図 2 にエネルギー量、図 3 に CO_2 排出量の計算結果を示す。図 2，3 ともに市販ソフト A より直接求めた SBR のエネルギー量と CO_2 排出量も合わせて示す。本稿では市販ソフト A の権利上の事由からエネルギー量、CO_2 排出量ともにエポキシ樹脂の市販ソフト A の値を 1 とした比で示す。このように SBR のエネルギー量の計算値は概ね市販ソフト A 値に一致し、提案手法により鉄道用ゴム材料のエネルギー量も評価できることがわかった。一方、SBR のエネルギー量は市販ソフト A 値、計算値ともにエポキシ樹脂のエネルギー量の市販ソフト値の 0.6 以下である。

図 3 より CO_2 排出量に関しても計算値 A は市販ソフト値 A に概ね近い値であることが認められる。一方、SBR の CO_2 排出量は市販ソフト A 値、計算値ともにエポキシ樹脂の市販ソフト A 値の 7 割以下である。その主な理由として、SBR のエネルギー量がエポキシ樹脂のエネルギー量より小さいことが考えられる。ただし、SBR の CO_2 排出係数はエポキシ樹脂より若干大きい（ともに市販ソフト A の結果による）。これまで市販ソフト A の結果の分析により、エポキシ樹脂などのような硬質材料より合成ゴムのような軟質材料の方が概して CO_2 排出係数が高い結果が得られているが、その理由は特定できていない。材料の CO_2 排出量を独力で計算する手法の開発と合わせて今後の課題としたい。

5．まとめ

本検討の結果、以下の知見を得た。

(1) 昨年度までに提案した市販のソフトや既公開情報によらず独力で材料のエネルギー量を計算する手法を鉄道でも重要度が高いスチレンブタジエンゴム(SBR)にも試行した結果、計算値は概ね市販ソフト A に近い値を示し、提案手法が鉄道用ゴム材料にも適用可能であることがわかった。

(2) SBR の CO_2 排出量について、(1)で求めたエネルギー量に 市販ソフト A による CO_2 排出係数を乗じることで概ね計算できることがわかった。

6．引用文献

1) （一社）サステナブル経営推進機構，LCA 計算ソフトウェア MiLCA (IDEA ver 3.3.0 を使用)
：https://www.milca-milca.net/index.php
2) 半坂征則：鉄道用樹脂材料の LCA 手法の検討，第 19 回日本 LCA 学会研究発表会(ポスターセッション) (2023)
3) 建林賢司：合成ゴムー新版ー，日刊工業新聞社，pp.5-40 (1976)

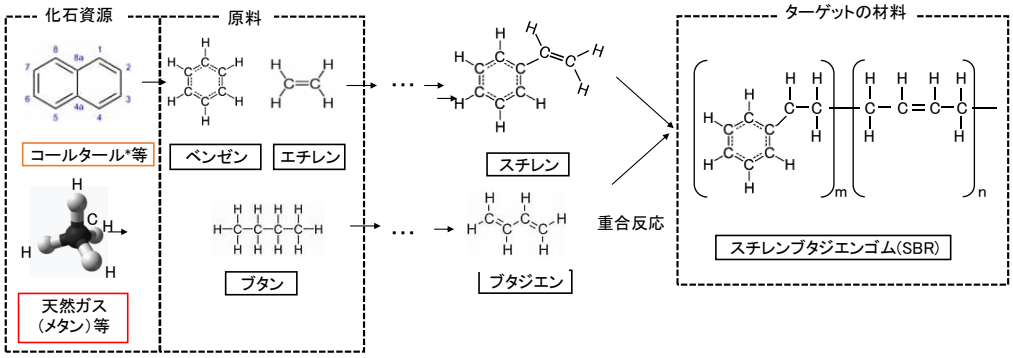


図 1　SBR の主要な製造（合成）過程）

*) コールタールはフェノール等種々の物質からなるが本図では代表してナフタレンの構造を示す。

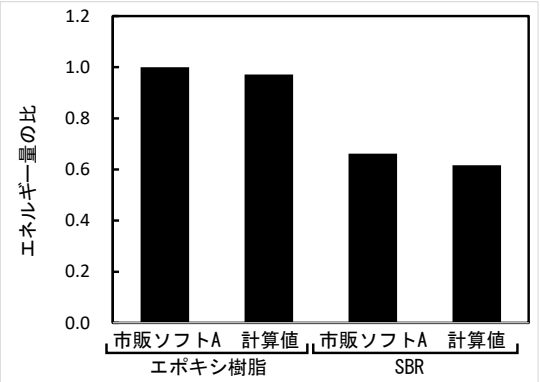


図 2　SBR と エポキシ樹脂のエネルギー量

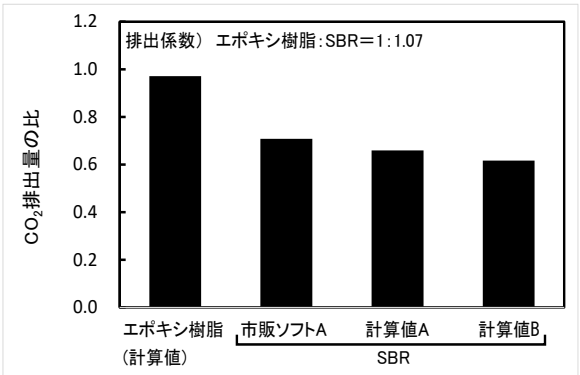


図 3　SBR と エポキシ樹脂の CO_2 排出量

ポスター発表セッション

2025年3月6日(木) 16:00 ~ 17:00 P1会場：2161大競技室（1F）

[2-P2] ポスターセッション（2）

[2-P2-01]
日本LCA学会学生交流ネットワーク　2024年度活動報告
*大賀 雄介[1]、吉良 成美[2]、杉山 弦太[3]、盛本 怜太郎[2]、長谷川 慶信[4]、中村 晃大[5] (1. 九州大学院経済学府経済システム専攻、2. 立命館大学理工学研究科、3. 早稲田大学創造理工学研究科、4. 東京大学工学系研究科、5. 横浜国立大学大学院環境情報学府)

[2-P2-02]
電気自動車用二次電池のサーキュラーエコノミー指標の提案
*小林 哲郎[1]、原 昌司[1]、佐々木 厳[1]、岩田 隆道[1]、増田 仁郎[2]、上田 貴康[2]、田原 聖隆[3]、松本 光崇[3]、高尾 尚史[1]、石田 栄治[2]、永井 隆之[2] (1. 豊田中央研究所、2. トヨタ自動車、3. 産業技術総合研究所)

[2-P2-03]
健康で文化的な最低限度の生活におけるライフサイクル環境負荷の解析
*森 信光[1]、吉良 成美[1]、重富 陽介[1] (1. 立命館大学)

[2-P2-04]
食品間の投入産出収支を考慮した淡水資源必要量の推計
*山口 陽平[1]、吉川 直樹[2,1]、天野 耕二[1]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学、2. 滋賀県立大学)

[2-P2-05]
傘シェアリングの環境負荷評価
*田邉 康裕[1]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学)

[2-P2-06]
Evaluating the Sustainability of New Energy Vehicles: A Life Cycle Assessment of Vehicles Using Entropy-Weighted TOPSIS Methods
*趙 幹博[1]、山末 英嗣[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1] (1. 立命館大学)

[2-P2-07]
都市の緑化と犯罪
*石津 莉子[1]、中石 知晃[2]、鍛冶屋 智哲[1] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済学研究院)

[2-P2-08]
農業用ハウスへのフィルム型太陽電池導入によるCO_2削減効果
*中村 晃大[1]、田口 潤[1]、新井 智[1]、本藤 祐樹[1] (1. 横浜国立大学)

[2-P2-09]
世界43か国の自動車製造部門の環境生産効率性分析
*寺岡 梨佐子[1]、中石 知晃[2] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済学研究院)

[2-P2-10]
中国における電気自動車からの使用済み電池のリサイクルモデル分析
*劉 衡一[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1] (1. 立命館大学)

[2-P2-11]
訪日外国人の国別・目的別カーボンフットプリント

©日本LCA学会

*立石 荘太[1]、中石 知晃[2] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済学研究院)

[2-P2-12]
中国におけるSAF燃料の安定供給性評価

*熊 子寅[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1]、鬼頭 みなみ[2] (1. 立命館大学、2. 福岡工業大学)

[2-P2-13]
水害リスクが地価に与える影響

*有田 ことみ[1]、鍛冶屋 智啓[1]、中石 知晃[2] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済学研究院)

[2-P2-14]
実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析
～マルチクライテリアでの評価に基づく投入資材の環境負荷削減策の検討～

*梶谷 凌聖[1]、三河 大志[1]、矢澤 華英[1]、小林 謙介[1]、鈴木 好幸[2]、田中 洋介[2] (1. 県立広島大学、2. 安藤ハザマ)

[2-P2-15]
自然との繋がりが個人の環境保護行動に与える影響

*川久保 凜太郎[1]、中石 知晃[2]、鍛冶屋 智啓[1] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済学研究院)

[2-P2-16]
清掃サービスにおける環境負荷の算定

*渡部 篤[1]、小林 静夫[1] (1. 二幸産業株式会社)

[2-P2-17]
講演取消

[2-P2-18]
バイオ生産の原料となる糖の化学合成技術の環境影響評価

*田畑 裕[1,2]、小原 聡[1]、兼松 祐一郎[1]、Teah Heng Yi[1]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学、2. 大阪大学)

[2-P2-19]
ESG情報開示及びパフォーマンスが資本コストに与える影響

*奥田 かんな[1] (1. 九州大学)

[2-P2-20]
プラスチック循環フローにおけるバイオマス（割当）原料の投入の影響の分析

*仲嶋 翼[1]、平田 一馬[1]、村上 茉奈美[1]、植田 洋行[1]、橋本 征二[2] (1. 三菱ＵＦＪリサーチ＆コンサルティング株式会社、2. 立命館大学)

[2-P2-21]
ガリウムの関与物質総量（TMR）の算定

*早川 賢信[1]、王 彬澤[1]、張 政陽[1]、松八重 一代[1] (1. 東北大学)

[2-P2-22]
多地域間産業連関モデルを用いた年代別家計カーボンフットプリントの解析：韓国の少子高齢化に注目して

*岩元 晟洋[1]、王 家歓[2]、昔 宣希[3]、重富 陽介[4] (1. 長崎大学環境科学部環境科学科、2. 立命館大学理工学研究科、3. 長崎大学水産・環境科学総合研究科、4. 立命館大学理工学部環境都市工学科)

[2-P2-23]
炭素強度と炭素情報の開示が資本コストに及ぼす影響 : 多数国の企業を対象に

©日本LCA学会

*宇仁 菜々子[1] (1. 九州大学)

[2-P2-24]

建材一体型太陽光発電 (BIPV*) ガラスの環境影響評価

*Building-Integrated PhotoVoltaics

*橘 ゆう子[1]、内田 健太[2]、芳村 泰生[3]、勝本 覚成[1]、小川 貴之[1]、河田 禎史[2]、宮嵜 俊幸[1]、盤指 豪[2] (1. AGC株式会社 環境安全品質本部、2. AGC株式会社 事業開拓部、3. AGC株式会社 建築ガラスアジアカンパニー)

[2-P2-25]

脱炭素社会に向けた最適な都市形成

*竹田 彩香[1]、伊藤 久志[1]、細島 千聖[2]、加河 茂美[3] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済学府、3. 九州大学経済学研究院)

[2-P2-26]

金融機関における投融資ポートフォリオのLCA

*西谷 直輝[1]、高橋 沙織[2]、増岡 宏和[2]、大久保 寛基[1]、伊坪 徳宏[3] (1. 東京都市大学大学院、2. 農林中央金庫、3. 早稲田大学)

[2-P2-27]

船舶の平均寿命の変化がもたらす包括的な環境影響評価

*下津浦 大賀[1] (1. 九州大学)

[2-P2-28]

大学生協食堂における食品ロス削減取組により損失を回避できた食品ロスの環境負荷

*久祢田 珠暉[1]、河嵜 唯衣[2]、赤松 利恵[3] (1. お茶の水女子大学人間文化創成科学研究科、2. お茶の水女子大学SDGs推進研究所、3. お茶の水女子大学基幹研究院自然科学系)

[2-P2-29]

Copper stock, demand, scrap, and secondary reserves in Southeast Asian countries

*Le ThiVan[1]、Dente Sebastien[2]、Hashimoto Seiji[2] (1. Ritsumeikan University Graduate School、2. Ritsumeikan University)

[2-P2-30]

日本の銅資源使用国責任論における生物多様性評価

*関口 輝[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1]、村上 進亮[2] (1. 立命館大学、2. 東京大学)

[2-P2-31]

有機系廃棄物の亜臨界水処理のLCA

*田中 佑海汰[1]、山本 貴光[2]、廣瀬 健[2]、丸山 雄平[3]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学、2. SANYOホールディングス （株）、3. アーキテクツ・スタジオ・ジャパン（株）)

[2-P2-32]

日本の食事メニューを対象とした環境・健康影響評価

*杉山 弦太[1]、小野田 章人[2]、新居 紗知[2]、古田 千恵[2]、中村 恵治[3]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 味の素株式会社 食品研究所、3. 味の素株式会社 R&B企画部)

[2-P2-33]

植物油製造プロセスへの資源活用技術導入に向けたライフサイクル評価

*渡邉 有希人[1]、兼松 祐一郎[1]、Teah Heng Yi[1]、廣森 浩祐[2]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学、2. 東北大学)

[2-P2-34]

©日本LCA学会

上流下流を考慮したサプライチェーン排出勘定の提案

*時任 翔平[1] (1. 山形大学)

[2-P2-35]

ロシア-ウクライナ危機がもたらすサプライチェーンの再構築と環境負荷の変化

*樋口 将義[1]、中石 知晃[2] (1. 九州大学経済学部、2. 九州大学経済学研究院)

[2-P2-36]

成層圏エアロゾル注入による気候変動と大気汚染のトレードオフ分析

*持田 祐行[1]、永島 達也[2]、湯 龍龍[3]、伊坪 徳宏[4] (1. 東京都市大学、2. 国立研究開発法人国立環境研究所、3. 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、4. 早稲田大学)

[2-P2-37]

日本におけるタングステンの二次埋蔵量の評価

*門田 創真[1]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学)

[2-P2-38]

燃料電池アシスト自転車の環境影響評価及び稼働率変化に対する感度分析

*江澤 朋哉[1]、片山 昇[1]、堂脇 清志[1] (1. 東京理科大学)

[2-P2-39]

クリーン燃料を用いた内燃機関自動車の資源採掘量評価

*生田 光[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1] (1. 立命館大学)

[2-P2-40]

IDEA海外版の構築
～温室効果ガス以外の環境負荷物質についての構築手法の検討～

*川上 冬真[1]、稲場 一愛[1]、小林 謙介[1]、藤井 千陽[2]、横田 真輝[2]、田原 聖隆[2] (1. 県立広島大学、2. 産業技術総合研究所)

[2-P2-41]

Mechanisms and pollution characteristics of heavy metal flow in China's non-ferrous metal industry

*Li Na[1]、Gao Chengkang[1]、You Huan[1]、Dente Sebastien[2]、Hashimoto Seiji[2] (1. Northeastern University (China)、2. Ritsumeikan University)

[2-P2-42]

早生桐を利用した内装材におけるライフサイクル評価

*山口 実友[1]、大澤 悠[2]、内藤 茂樹[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. パナソニックハウジングソリューションズ株式会社)

[2-P2-43]

自動車部品のリマニュファクチャリングを対象とした環境影響評価

*一沢 直起[1]、増井 慶次郎[2]、古川 慈之[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 産業技術総合研究所)

[2-P2-44]

環境問題を考慮してキャリアを選ぶのは誰か？東京大学学生を対象とした質問紙調査

*秋山 知也[1]、水野 那奈子[1]、中村 明日香[1]、井上 賢志[1]、杉浦 麻緒[1]、中谷 郁斗[1] (1. 東京大学)

[2-P2-45]

動的マテリアルフロー解析による銅資源利用から見た電化効果の演繹的検討

*島田 陽生[1]、八木原 昂輝[1]、大野 肇[1]、福島 康裕[1] (1. 東北大学)

©日本LCA学会

[2-P2-46]
リチウムイオン電池の再生を対象とした環境影響評価

*鈴木 瑛也[1]、兵法 彩[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 東京都市大学)

[2-P2-47]
自由貿易化に伴うCO_2排出量変化の分析

*東ケ﨑 暖太[1]、永田 あい[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

[2-P2-48]
化学物質を対象とした淡水生物種の絶滅リスク評価手法の開発

*村本 麻里花[1]、内藤 航[2]、加茂 将史[2]、本下 晶晴[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 産業技術総合研究所)

[2-P2-49]
動的マテリアルフロー解析を用いたバイオマス導入ロードマップの提案

*上門 莉久[1]、大野 肇[1]、八木原 昂輝[1]、福島 康裕[1] (1. 東北大学)

[2-P2-50]
2020年廃棄物産業連関表の推計及び廃棄物フットプリントの試算

*深田 淳史[1]、近藤 康之[1]、一杉 佑貴[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 産業技術総合研究所)

[2-P2-51]
国内旅行の持続的発展に向けたインベントリ分析

*大神 亮[1]、兵法 彩[1] (1. 東京都市大学)

[2-P2-52]
炭素源の持続可能性を考慮したバイオマス由来プラスチックのフロー解析

*千田 康太[1]、ティア ヘンイ[1]、兼松 祐一郎[1]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学)

[2-P2-53]
プロセス事故の直接・間接ヒト健康影響を考慮したライフサイクル影響評価手法の構築

*川原 大知[1]、稗貫 峻一[1,2]、中山 穣[1]、鈴木 智也[1]、三宅 淳巳[1]、伊里 友一朗[1] (1. 横浜国立大学、2. 電力中央研究所)

[2-P2-54]
ロシア-ウクライナ戦争による人工物と自然に対する影響評価

*林 冬喜[1]、Tomer Fishman[2]、劉 致煒[3]、山下 奈穂[3]、白川 博章[3]、谷川 寛樹[3]、佐久間 東陽[4]、劉 潤桓[1]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. ライデン大学、3. 名古屋大学、4. 木更津工業高等専門学校)

[2-P2-55]
業務部門におけるスマートメーターデータを用いたエネルギー需要予測手法の検討

*鈴木 大空斗[1]、磐田 朋子[1]、吉岡 剛[1] (1. 芝浦工業大学)

[2-P2-56]
熱海市の渋滞緩和に向けた観光客の交通手段に関する選好調査

*菊地 亮太[1] (1. 芝浦工業大学)

©日本LCA学会

ポスター発表セッション

2025年3月6日(木) 16:00 ~ 17:00 P1会場：2161大競技室（1F）

[2-P2] ポスターセッション（2）

[2-P2-01] 日本LCA学会学生交流ネットワーク　2024年度活動報告

*大賀 雄介[1]、吉良 成美[2]、杉山 弦太[3]、盛本 怜太郎[2]、長谷川 慶信[4]、中村 晃大[5] (1. 九州大学院経済学府経済システム専攻、2. 立命館大学理工学研究科、3. 早稲田大学創造理工学研究科、4. 東京大学工学系研究科、5. 横浜国立大学大学院環境情報学府)

キーワード：日本LCA学会、学生交流ネットワーク

LCA学会の学生交流ネットワーク(通称：SCN)は、LCA研究に携わる学生間のつながりを強化することを目的として2009年に設立された。コロナ・パンデミック禍の苦境も乗り越えたSCNは、今年8月の「夏の工場見学・ワークショップ」において、過去最多の53名学生の参加を記録した。また、11月のEcoBalance国際会議において、Young Researchers' Workshopの企画・運営を行なった。本会におけるポスター発表では、SCNのこれまでの歩みと今年度の活動についての詳細な報告を行う。

©日本LCA学会

電気自動車用二次電池のサーキュラーエコノミー指標の提案

A Circular Economy Indicator for Batteries of Electric Vehicles

○小林哲郎*[1)]、原 昌司[1)]、佐々木厳[1)]、岩田隆道[1)]、増田仁郎[2)]、上田貴康[2)]、
田原聖隆[3)]、松本光崇[3)]、高尾尚史[1)]、石田栄治[2)]、永井隆之[2)]
Tetsuro Kobayashi, Masashi Hara, Tsuyoshi Sasaki, Takamichi Iwata, Yoshiro Masuda, Takamichi Ueda,
Kiyotaka Tahara, Mitsutaka Matsumoto, Hisaaki Takao, Eiji Ishida, Takayuki Nagai
1) 豊田中央研究所, 2)トヨタ自動車, 3) 産業技術総合研究所
* tetsuro@mosk.tytlabs.co.jp

1. 緒言

現在、自動車の電動化と再エネの導入が進み、それらに用いられるリチウムイオン二次電池（以下、LIB）の需要が急激に増加すると予測されている[1)]。LIB の製造には、Li、Ni、Co、Cu といった希少資源が必要であり、それら資源の採掘活動は拡張され、例えば Ni は、将来的に需要量に対して供給量が不足するシナリオも示されている[2)]。よって、電池内の資源を循環・再利用し、有効に活用することが望まれ、本研究では、これらに対する貢献度を表すサーキュラーエコノミー指標（電池 CE 指標）を提案する。

2. 電池 CE 指標の提案

提案する電池 CE 指標では、「循環における散逸資源価値量」（環境負荷）と「電池の生涯電力量」（電池の価値）の 2 つの尺度で評価する。電気自動車(Battery electric vehicle, BEV)用二次電池を対象として、それらの計算方法を定め、試行計算を実施した。計算における機能単位は電池が有する電力量(kWh)とした。

2.1 循環における散逸資源価値量

電池製造時に投入される資源と、使用後のリサイクル時にリカバリーされる資源を考慮する。資源毎の環境負荷係数として TMR(Total Material Requirement)係数[3)]を用いた。また、原田ら[4)]に倣い、品質等によって決まる価値係数も考慮した。製造時に投入される *InFlowTMR* と、使用後にリサイクルによりリカバリーされ得る *OutFlowTMR* を、各々、(1), (2)式により計算する。ここで、TMR_i、$Mass_i$、$MatValue_i$ は各々、資源・材料 i の TMR 係数、質量、価値係数である。$MatValue_i$ は、例えば、バージン材を 1 として 0～1 で表す。$Mass_i$、$MatValue_i$ に付された(')は投入側を、(")はリカバリー側を示す。そして、*MatValueDissipation* を(3)式により計算する。*MatValueDissipation* は、循環できずに散逸される資源・材料の“価値”を意味する。なお、*OutFlowTMR* は、現時点では実績値ではなく、ポテンシャルとしての見込み値を想定している。そして、これらを電池のエネルギー(kWh)あたりで計算する。

$$InFlowTMR = \sum_{i=1}^{n} TMR_i \times Mass'_i \times MatValue'_i \quad (1)$$

$$OutFlowTMR = \sum_{i=1}^{n} TMR_i \times Mass''_i \times MatValue''_i \quad (2)$$

$$MatValueDissipation = InFlowTMR - OutFlowTMR \quad (3)$$

2.2 電池の生涯電力量

電池の価値は種々考えられるが、ここでは寿命に関係する生涯電力量とした。生涯電力量の求め方は、CFP (Carbon footprint)を計算する上で、欧州電池規則[5)]や経産省の蓄電池のサステナビリティに関する研究会[6)]でも提示されているが、本研究では電池の劣化を考慮し、次の①～③の 3 通りで計算することを提案する。計算における計算式、パラメータ等を Supporting Information にまとめた。各生涯電力量(kWh)は車載電池の初期電力量 En_{bat_ini}(kWh)で規格化して計算する。

① 製造・出荷時に期待される生涯電力量(*NLE*)；電池を保証する総走行距離 L_g、車両の平均電費 Eef_{ave}、および、回生等による稼働補正係数 C_{bat} を用いて(S1)式から計算する。

② 車載で一度使用済みとなり、再利用(リユース)する際に残された生涯電力量(*NSE*)；リユース時の SOH (State of health)である SOH_p と、それまでの走行距離 L_p を用いて(S2)～(S4)式から電池の劣化速度係数 a を求め、その a と EOL (End of life)時の SOH である SOH_{EOL} を用いて(S5)～(S7)式から求める。電池劣化の推移はサイクル数に対するルート則[7)]に従うと仮定している。

③ リユース時に電池を回復処理[8)]する場合の残された生涯電力量(*NSE'*)；回復処理後の SOH である SOH_R を用いて(S8)式より求める。

2.3 試行計算の条件

LIB として NMC(111)電池（正極 $LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$）と LFP 電池（正極 $LiFePO_4$)を対象として、循環における散逸資源価値量の試行計算を行った。既報を参照して、電池の材料構成比[9)]と製造エネルギー[10)]を設定し、OutFlow 側は、資源リサイクルと材料リサイクルの 2 通りのケースで計算した。生涯電力量と合わせて、

試行計算における計算範囲と仮定、設定値等を Supporting Information に記した。

3. 結果

3.1 循環における散逸資源価値量

散逸資源価値量の結果を図 1 に示す。製造時の投入(InFlowTMR)側のみで比較すると(図 1 a))、NMC(111)電池の方が、LFP 電池よりも環境負荷が大きいが、リサイクル時のリカバリー(OutFlowTMR)側を差し引く場合、資源リサイクルでは逆転し(図 1 b))、材料リサイクルではほぼ同等になる(図 1 c))ことが示された。

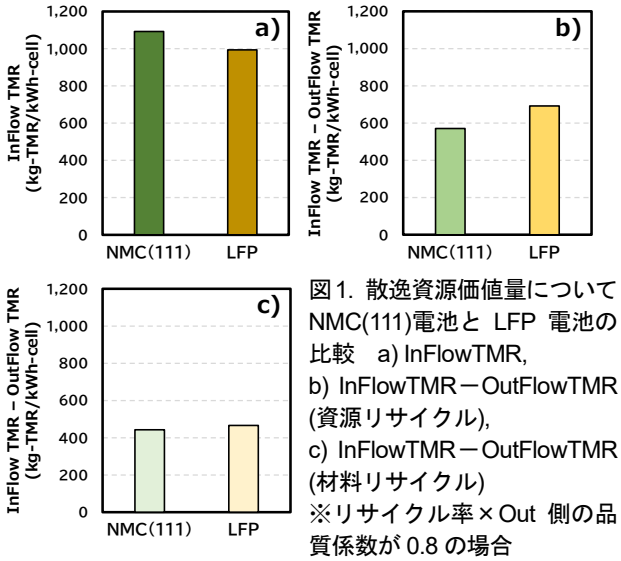


図 1. 散逸資源価値量について NMC(111)電池と LFP 電池の比較　a) InFlowTMR, b) InFlowTMR－OutFlowTMR (資源リサイクル), c) InFlowTMR－OutFlowTMR (材料リサイクル) ※リサイクル率×Out 側の品質係数が 0.8 の場合

3.2 電池の生涯電力量

製造・出荷時の生涯電力量は、電池保証の総走行距離が 16 万 km、20 万 km の場合、各々、323、404 と見積もられた。また、リユース時に残された生涯電力量の結果を図 2 に示す。図の横軸は、リユース時における走行距離を示し、図中の線の色はリユース時の SOH を示す。実線と破線は、各々、回復処理の無と有を示す。同じ SOH であっても、それまでの走行距離によって電池の劣化が異なり、その後に残された生涯電力量は大きく異なることが示された。また、図中の黄土色線以上では、出荷時に電池保証で想定された劣化よりも小さく、より長く使用でき得ることを表す。

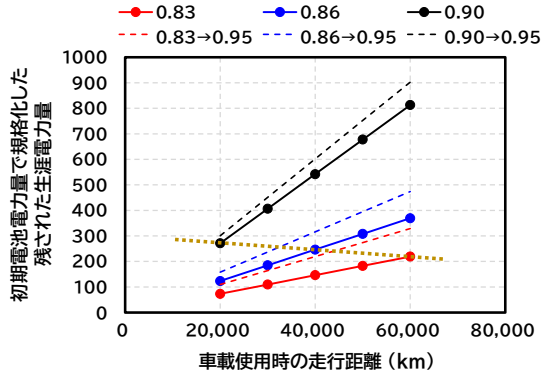


図 2. リユース時に残された電池の生涯電力量
リユース時の SOH ； 赤) 0.83、青) 0.86、黒) 0.90
実線）回復処理なし、破線）各々SOH を 0.95 まで回復処理した場合、黄土色点線）走行距離 16 万 km、SOH＞70%を保証する時の劣化速度を想定する場合

4. まとめ

サーキュラーエコノミーへの貢献度を評価する電池 CE 指標の計算方法を提案し、試行計算を行った。「循環における散逸資源価値量」では、InFlow 側を小さくすることに加えて、OutFlow 側を高める努力が重要となる。「電池の生涯電力量」では、特にリユース時に SOH のみからではなく、走行実績から電池の劣化速度を推定することで、より適切に残された生涯電力量を相対的に比較できると考える。また、本指標では、回復処理による効果分も定量的に計算することができる。

本指標にはまだ課題があると認識している。しかしながら、本指標の考え方を一つの案として、更に発展させることで、電池の製造・リサイクルの高効率化、電池の長寿命化とリユースを促進させ、サーキュラーエコノミー型社会につなげる一助としたい。

引用文献

1) IEA: Global Supply Chains of EV Batteries, 入手先 <https://www.iea.org/reports/global-supply-chains-of-ev-batteries>, (参照 2022-8-24)
2) JOGMEC: “令和 4 年度カーボンニュートラル実現に向けた鉱物資源需給調査”, 2022 年 11 月 10 日
3) 片桐ほか: NIMS-EMC 材料環境情報データ No.18 “概説 資源端重量（Total Material Requirement ; TMR）”, 2009 年 3 月
4) Halada, K., et al.: Int. J. of Automation Technology, 16 (6), (2022), pp.684-695.
5) European commission: Batteries for electric vehicles - carbon footprint methodology, 入手先 <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13877-Batteries-for-electric-vehicles-carbon-footprint-methodology_en>, (参照 2024-5-7)
6) 経産省: 第 4 回蓄電池のサステナビリティに関する研究会, 入手先 <https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/chikudenchi_sustainability/004.html>, (参照 2023-4-27)
7) Gasper, P., et al.: J. Electrochem. Soc. 168, (2021), 020502
8) Ogihara, N., et al.: Joule, 8 (5), (2024), pp.1364-1379
9) Park, K., et al.: ACS Sustainable Chem. Eng., 9, (2021), pp.8214-8221, Supporting Information
10) Ellingsen, L.A.-W., et al.: J. industrial Ecology, 18 (1), (2014), pp.113-124, Supporting Information, p.S-17

Supporting Information
電気自動車用二次電池のサーキュラーエコノミー指標の提案

散逸資源価値量の試行計算における計算範囲と仮定

InFlowTMR

範囲）・パックは含めず、セルのみの構成材料を対象
・製造時の副材(製品に残らない中間材)は対象外
・製造エネルギー分の TMR を含める

仮定）・製造時の歩留は 1 （工程端材を散逸させない）
・品質係数（MatValue’）は 1 とする

OutFlowTMR

範囲）・リサイクル処理に用いる副材やエネルギーを考慮しない
・資源リサイクルと材料リサイクル の 2 パターンで計算
資源リサイクル； Ni, Mn, Co, Li, Cu, Al, Fe
材料リサイクル； $LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$, $LiFePO_4$, Cu, Al

感度解析）電池内の材料に対してリサイクルできる材料の重量割合を“リサイクル率”とする。そして、リサイクル率×品質係数(MatValue”)が 0~1 として、パラメータスタディを実施。

生涯電力量計算のパラメータと試行計算時の設定値

記号	意味	試行計算時設定値, 式
NLE *NLE’*	搭載電池の初期電力量(kWh)で規格化した全生涯電力量	(S1)式 (S6)式
NPE	搭載電池の初期電力量(kWh)で規格化した一次(車両)使用時の総電力量	(S2)式
NSE *NSE’*	搭載電池の初期電力量(kWh)で規格化したリユース時に残された生涯電力量	(S7)式 (S8)式
En_{bat_ini}	車載電池の初期電力量 (kWh)	71.4
Eef_{ave}	車両の平均電費 (km/kWh)	7.63
C_{bat}	電池の稼働補正係数 （回生時の電池稼働等を考慮）	1.1
L_g	車両で電池保証する車両総走行距離 (km)	160,000 or 200,000
SOH_g	車両で電池保証する下限SOH	0.7
cn_g	電池保証範囲にて全生涯における正味の充放電サイクル数 (回)	(S5)式
L_p	一次(車両)使用における実総走行距離 (km)	20,000 ~ 60,000
SOH_p	一次(車両)使用後のSOH	0.83, 0.86, 0.90
cn_p	一次(車両)使用期間中の正味の充放電サイクル数 (回)	(S3)式
a	サイクル数に対する劣化速度係数	(S4)式
SOH_{EOL}	電池のEOL時のSOH	0.7
SOH_R	回復処理後のSOH	0.95

生涯電力量の計算式

①製造・出荷時の生涯電力量 *NLE*

$$NLE = \frac{C_{bat} \times L_g}{Eef_{ave} \times En_{bat_ini}} \quad (S1)$$

②リユース時に残された生涯電力量 *NSE*

$$NPE = \frac{C_{bat} \times L_p}{Eef_{ave} \times En_{bat_ini}} \quad (S2)$$

$$cn_p = \frac{3 \times NPE}{(1 + 2 \times SOH_p)} \quad (S3)$$

$$a = \frac{1 - SOH_p}{\sqrt{cn_p}} \quad (S4)$$

$$cn_g = \left(\frac{1 - SOH_{EOL}}{a}\right)^2 \quad (S5)$$

$$NLE' = \frac{cn_g \times (1 + 2 \times SOH_{EOL})}{3} \quad (S6)$$

$$NSE = NLE' - NPE \quad (S7)$$

③リユース時に回復処理した場合に残された生涯電力量 *NSE’*

$$NSE' = NLE' - \frac{\left(\frac{1 - SOH_R}{a}\right)^2 \times (1 + 2 \times SOH_R)}{3} \quad (S8)$$

※ここで *NLE’*は(S6)式より、a は(S4)式より

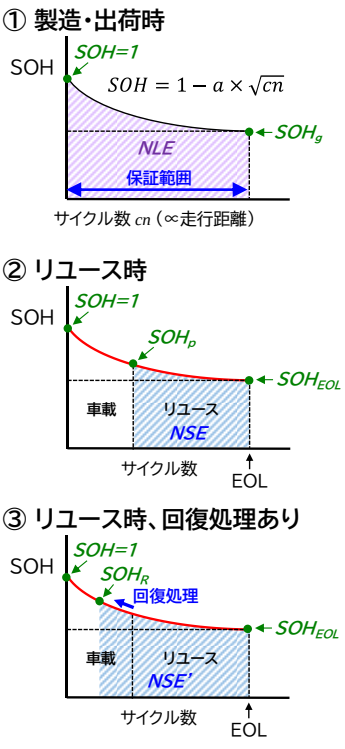


図 S1. 生涯電力量の計算イメージ

健康で文化的な最低限度の生活におけるライフサイクル環境負荷の解析

Quantifying life cycle environmental burdens for a minimum standard of wholesome and cultured living in Japan

○森信光*[1)], 吉良成美 [1)], 重富陽介 [1)]
Nobuaki Mori, Narumi Kira, Yosuke Shigetomi
1) 立命館大学
* ce0068fi@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

地球温暖化の要因となる温室効果ガス (greenhouse gases: GHG) の削減が世界規模で目指される中、財・サービスのライフサイクルGHG排出量 (carbon footprint: CF) を定量化する有用性が注目されている。これに基づくと、家計消費由来のCF (以下、家計CF) は日本をはじめとする多くの先進国における GHG 排出量の主な要因である。その中で、持続可能な社会構築や政策設計の基盤材料の一つとして、社会的に脆弱な立場にある低所得世帯や障碍者世帯の CF 構造の解明に向けた研究も行われている [1-2]。

そこで本研究では、日本における健康で文化的な生活を送るために生じる環境負荷の下限値を定量化することを目的とする。「健康で文化的な最低限度の生活」の定義には、Decent Living Standard (DLS)[3] をはじめとする多様な概念が存在するが、ここでは国内の生活保護制度に注目し、その対象世帯における家計 CF を算定する。すなわち、生活保護世帯の一人あたり平均家計 CF を最低限発生する GHG 排出量の下限値と考慮することで、現在の GHG 削減目標との関係について考察することを狙いとする。

2. 方法

2.1. 生活保護世帯と一般世帯の消費支出の特定

本研究で対象とする世帯属性は、単身および二人以上の一般世帯、低収入世帯 (単身 : 100 万円未満、二人以上 : 200 万円未満)、生活保護世帯の 6 つである。生活保護世帯の消費支出は厚生労働省が発行する社会保障生計調査から、一般世帯と低収入世帯の消費支出は総務省が発行する家計調査年報からそれぞれ参照した。これらの統計から、主要な 10 項目 (以下、大項目) とそれらをさらに分類した 50 項目 (以下、小項目) の消費支出データをそれぞれ用いた。

「保健医療」については、健康保険や医療扶助 (生活保護受給者が必要な医療費を現物給付する制度) があるため、実質的な消費支出を算出する必要がある。そこで、一般世帯と低収入世帯については、厚生労働省の医療費負担割合 [4] と総務省の人口推計値から平均自己負担率を定めた。生活保護世帯については、厚生労働省の医療扶助実態統計から生活保護受給者が利用した一人当たりの医療費を直接利用した。

2.2. 間接排出の推計方法

上述した世帯属性別の家計 CF における間接排出量については、環境産業連関分析に基づいて式(1)にしたがって算出した。

$$\mathbf{Q} = \mathbf{e}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{f} \quad (1)$$

ここで、$\mathbf{e}$は単位生産あたりの直接 GHG 排出量ベクトル、$(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$はレオンチェフ逆行列、$\mathbf{f}$は最終需要ベクトルを表す。$\mathbf{q} = \mathbf{e}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$は、環境負荷原単位データブック (3EID) [5] による購入者価格による内包型 GHG 排出原単位を利用した。$\mathbf{f}$は各世帯属性の消費支出額を用いた。しかしながら、3EID に記載されている部門別環境負荷原単位は 390 に及ぶ一方、各世帯の消費支出における小項目は 50 と相違がある。そこで、部門整合を行って後者に整合する排出原単位を新たに作成した。このとき、式(2)に基づき、小項目に対応する 3EID の部門における家計消費を重みづけとして加重平均を用いた。

$$q_k^{\mathrm{new}} = \frac{\sum_i q_i f_i^{\mathrm{household}}}{\sum_i f_i^{\mathrm{household}}} \quad (2)$$

ここでkは対応する小項目、$i \in k$は 3EID における商品部門、を表す。q_k^{new}は求めた各消費項目に基づく CF 原単位、$f_i^{\mathrm{household}}$は 3EID の部門に基づく家計消費額を表す。

本研究では、式(1)、(2)により家計の最終需要由来の CF、$Q_k^{\mathrm{household}}$を式(3)のように推計した。

$$Q_k^{\mathrm{household}} = q_k^{\mathrm{new}} f_k^{\mathrm{household}} \quad (3)$$

2.3. 直接排出の推計方法

次に、前節では考慮されていない家計からの直接排出量については、経済産業省による総合エネルギー統計と、各産業がどの程度の物量を他の産業と取引しているかを示す産業連関表に付帯の物量表を用いた。

まず、総合エネルギー統計の炭素単位表から得た家庭部門における灯油、LPG、都市ガス、ガソリン、軽

油の炭素排出量に、それぞれ炭素と二酸化炭素の分子量の比 (44/12) を乗じることで、CO_2 排出量に換算した。次に、その値を物量表上で対応する各部門の家計消費支出額で除して、各部門の直接排出係数とした。得られた直接排出係数を、2.2.で求めた内包型 GHG 排出原単位に足し合わせることで、家計からの直接排出を含めた CF 原単位を算定した。

2.4. 一人あたり CF の平均値と削減目標値

一般世帯と生活保護世帯の家計 CF における一人あたりの平均値を、それぞれ単身と二人以上の世帯数、二人以上世帯の平均人数を考慮して算出した。また、家計 CF の解析対象年は、社会保障生計調査の最新データの 2022 年と、2021 年の地球温暖化対策計画で掲げられた 2030 年度目標の基準年に近い 2013 年の両年とした。両年の各世帯の一人あたり平均家計 CF を比較することで、約 10 年の経過における消費構造の変化に伴う CF への影響を考察する。

CF の削減目標値は、明確に定められていないため、ここでは地球温暖化対策計画 [6]を目標とする 2030 年の国内 GHG 総排出量 (2013 年度比 46%減) と先行研究 [6] が示す家計消費と政府支出の医療費の割合の合計 (68.1%) を利用した。両者の数値を乗じて同年の将来推計人口で除したものを、一人あたり家計 CF の目標値 (以後、「2030 年目標値」とする) と定義した。

3. 結果と考察

2013 年値と 2022 年値の世帯属性別一人あたり家計 CF 構造の算定結果を図に示す。両年の結果を比較すると、一般世帯と生活保護世帯では減少傾向 (一般世帯: 9.23 t-CO_2eq/人から 8.61 t-CO_2eq/人、生活保護世帯: 6.92 t-CO_2eq/人から 6.12 t-CO_2eq/人) が見られたが、低収入世帯では増加傾向 (6.11 t-CO_2eq/人から 6.56 t-CO_2eq/人) であった。また、世帯属性や世帯人数によらず、6 つすべての世帯で「2030 年目標値」 (4.58 t-CO_2eq/人) を上回った。したがって、現状のサプライチェーン構造においては、生活保護に準じた消費パターンであっても、GHG 削減目標値の達成水準に到達しないことが示唆される。

一般世帯と生活保護世帯の間で見られた特徴としては、特に「光熱・水道」 (一般世帯: 34%、生活保護世帯: 61%) 、「交通・通信」 (一般世帯: 38%、生活保護世帯: 8%) における全体の CF に対するシェアの乖離が見られた。「光熱・水道」では世帯人数による違い (一般単身世帯: 4.49 t-CO_2eq/人、一般二人以上世帯: 2.69 t-CO_2eq/人) が要因と考えられる。これは、単身世帯が冷暖房や照明等の「電気代」による CF (一般単身世帯: 2.24 t-CO_2eq/人、一般二人以上世帯: 1.43 t-CO_2eq/人) を一人で負担するためである。「交通・通信」では世帯属性による違い (一般世帯: 3.26 t-CO_2eq/人、生活保護世帯: 0.52 t-CO_2eq/人) が大きい。これは、生活保護世帯では原則として自家用車の所持が認められないため、「自動車関係費」による CF (一般世帯: 3.03 t-CO_2eq/人、生活保護世帯: 0.25 t-CO_2eq/人) が少ないためである。また、「保健医療」は生活保護世帯が一般世帯より CF が大きい特徴が見られた (一般世帯: 0.25 t-CO_2eq/人、生活保護世帯: 0.38 t-CO_2eq/人)。

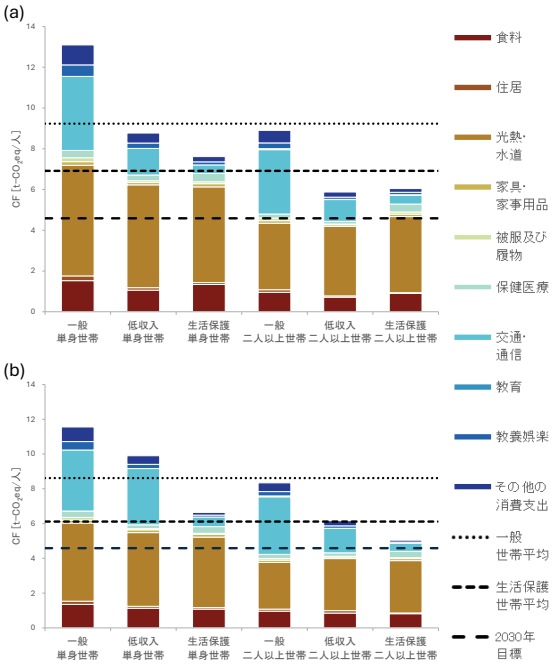


図. 各世帯属性の年間一人当たり CF 構造
(a) 2013 年 (b) 2022 年

より詳細な結果と考察については、本学会発表において報告する。

引用文献

1) Ivanova and Middlemiss (2021) ***Nat. Energ.***, 6(12), 1188–1197.
2) Kalaniemi et al. (2020) ***Environ. Sci. Policy***, 114, 377-383.
3) Rao et al. (2017) ***Soc. Indic. Res.***, 138, 225–244.
4) 厚生労働省 (2024) 医療費の自己負担, https://www.mhlw.go.jp/bunya/shakaihosho/iryouseido01/info02d-37.html
5) 南斉規介 (2019) 産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)
6) 環境省 (2021) 地球温暖化対策計画
7) Nansai et al. (2012) ***Environ. Sci. Technol.***, 46(1), 155–163.

食品間の投入産出収支を考慮した淡水資源必要量の推計

Estimating water requirement considering input and output balances among food products

○山口陽平*[1)]、吉川直樹[2), 1)]、天野耕二[1)]、橋本征二[1)]
Yohei Yamaguchi, Naoki Yoshikawa, Koji Amano, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学, 2) 滋賀県立大学
* y-ymagch@fc.ristumei.ac.jp

1. はじめに

世界全体の淡水取水量に占める農業用水の割合[1)]は約 70 %であり、食料生産は多量の淡水資源を必要とする。これまでに既往文献[2), 3)]において様々な地域規模で淡水資源必要量の分析がなされてきたものの、網羅的な食品間の投入産出収支の分析はなされていない。

本研究では、食品間の投入産出収支を考慮した淡水資源必要量を推計することを目的とする。

2. 研究手法

本研究の対象期間は 2000 年から 2020 年までとし、対象国を 195 か国、対象品目を 78 品目とした。世界全体の輸入量の総和が輸出量のそれと整合するように各国間の貿易量を品目別に補整し、食料需給を推計した。

本研究では、天水と灌漑用水を対象に、water footprint により淡水資源必要量を分析した。灌漑利用率を加味して天水消費量と灌漑用水消費量を推計し、灌漑用水消費量は灌漑効率で除して取水量ベースに換算した。最終消費に関わる淡水資源必要量は最終消費量に消費国の淡水消費原単位を乗じて推計した。輸入量は輸入国の淡水消費原単位、輸出量は輸出国の淡水消費原単位をそれぞれ乗じて淡水資源量へ換算し、前者から後者を減じて淡水資源輸入量を推計した。淡水消費原単位は収量の基準年比を加味することにより、また灌漑効率はその変化率を 0.15 %/年と仮定した上で既存モデル[4)]により、それぞれの時間変化を考慮した。

農作物については栽培段階の淡水消費を対象とし、一部の品目には加工段階の淡水消費も含まれる。畜産物については飼料の栽培段階の淡水消費と家畜の飲料用水、飼育環境維持に要する淡水消費を対象とした。

3. 結果と考察

図 1 によると、アジアの淡水資源輸入量は 2000 年では 469 km^3、2020 年では 1,654 km^3 まで達しており、2000 年から 2020 年にかけて急激に増加した。輸入相手地域別ではアジアからの輸入シェアが最も高く、2000 年では約 40 % (190 km^3) であったが、2020 年には約 48 % (797 km^3) まで拡大した。

図 2 によると、アジアの最終消費に関わる淡水資源必要量は2000年時点で3,177 km^3であることに対して、2020 年時点では 4,457 km^3 まで増加した。この期間にアジアでは人口が 37.1 億人から 46.3 億人まで増加しており、人口増加による最終消費の増加を満たすために輸入が拡大した可能性がある。

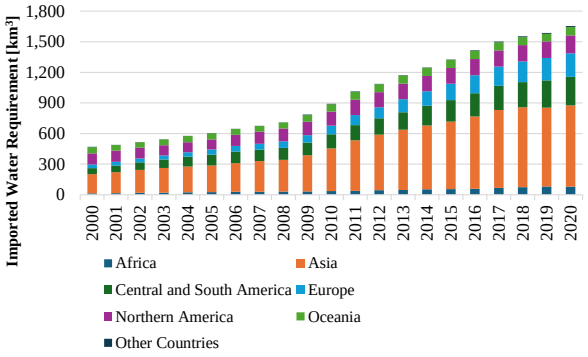


図 1 淡水資源輸入量 (アジア)

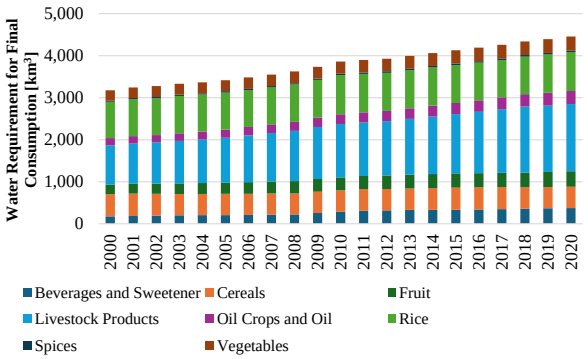


図 2 最終消費に関わる淡水資源必要量 (アジア)

今後、生産・輸入作物の用途を加味した淡水資源必要量の分析が必要である。学会当日は食品間の投入産出収支を考慮した分析についても報告する予定である。

謝辞

本研究は日本学術振興会 (JSPS) 科研費 (JP 22K18073) による助成と立命館グローバル・イノベーション研究機構 (R-GIRO) の支援を受けた。

引用文献

1) Shen et al.: Hydrol. Sci. J., 53 (1), (2008), pp. 11-33.
2) Novoa et al.: Sci. Total Environ., 869, (2023), 161526.
3) Sturla et al.: Sustain. Prod. Consum., 44, (2024), pp. 208-220.
4) Hanasaki et al.: Hydrol. Earth Syst. Sci., 17 (7), (2013), pp. 2375-2391.

傘シェアリングの環境負荷評価

Assessing environmental load of umbrella sharing

○田邉康裕*[1)]、橋本征二[1)]
Yasuhiro Tanabe, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* ce0061sp@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

プラスチック廃棄物問題は、近年重要な環境課題の1つであり、取り上げられる話題の 1 つがビニール傘の廃棄物問題である。傘の年間消費量は 1 億 2000～3000 万本、そのうちビニール傘等の使い捨て傘の消費量は8000 万本とされる[1)]。こうした課題への対応として注目されているのが傘のシェアリングサービスである。その環境負荷削減効果について、環境省[2)]は、傘のシェアリングにより、購入しなくてよくなったビニール傘 1 本分の環境負荷を削減効果として示している。しかしながら、その傘は1 回限りの利用ではなく、その後も利用されると考えられる。本研究では、傘のシェアリングを利用することによって、傘に関わる環境負荷がどう変化するのかを検討した。特に、シェア傘の利用により、社会全体の傘の本数を減らせているかどうかに着目した。

2. 方法

2.1 シェア傘利用者へのヒアリング調査と利用者・非利用者へのアンケート調査

傘のシェアリングサービスの利用状況について把握するため、シェア傘利用者を対象としたヒアリング調査を行った。シェア傘を利用する理由、シェア傘を利用する前の雨天時の行動、傘の所有本数等について聞いた。また、ヒアリング調査をもとに、シェア傘の利用者・非利用者を対象としたアンケート調査を行った。

2.2 環境負荷の評価

シェア傘を利用することにより、社会全体の傘の本数が減ることが環境負荷の削減効果と考え、社会全体の傘の本数の変化に着目した分析を行った。傘に関する CO_2 排出量は、下式で計算される。

$$E = \sum_i N_i \times LCA_i \div T_i$$

ここで、Eは傘に関する1人1年あたりのCO_2排出量(CO_2/年・人)、N_iは 1 人あたりの傘の種類 i の所有本数(本/人)、LCA_iは傘の種類 i のライフサイクル CO_2 排出量(CO_2/本)、T_iは傘の種類 i の寿命(年)である。i は、シェア傘、ビニール傘、布傘、折りたたみ傘である。

本研究では、N_iをアンケート調査により把握し、LCA_iについては、傘を分解して各素材の重さを計測する等して傘の種類ごとに LCA を実施した。計算には、MiLCA v3、AIST-IDEA_v3.3 を使用した。

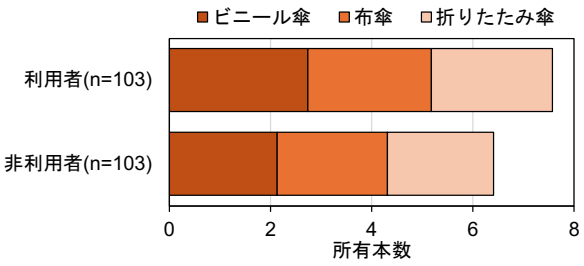


図 1　シェア傘の利用者・非利用者の傘の所有本数

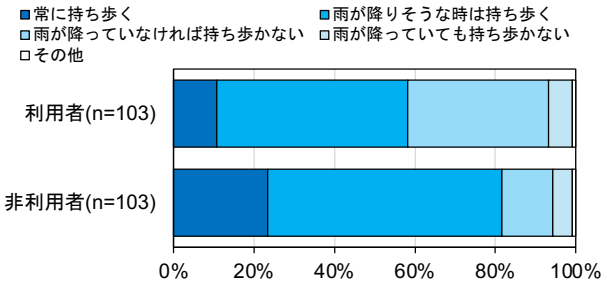


図 2　シェア傘利用者・非利用者の傘の所持状況

3. 結果と考察

3.1 シェア傘利用者・非利用者へのアンケート調査

シェア傘利用者・非利用者の傘の所有本数を図 1、傘の所持状況を図 2 に示す。シェア傘利用者の所有本数が少なくなるとの仮説を立てていたが、結果としては逆となった(図 1)。シェア傘利用者の中にも傘を常に持ち歩いている人、雨が降りそうであれば持ち歩く人が一定数存在し(図 2)、必ずしも傘の所有本数を減らすことに繋がっていない可能性が示唆された。

3.2 環境負荷の評価

1 本あたりのシェア傘、ビニール傘、布傘、折りたたみ傘の CO_2 排出量は、シェア傘で大きく、折りたたみ傘でやや小さくなった。シェア傘ではプラスチックを多く用いており、その生産時・廃棄時の CO_2 排出量が大きい結果となった。傘の所有本数・寿命を考慮した 1 人 1 年あたりの CO_2 排出量については学会当日報告する。

謝辞：本研究は科学研究費補助金(22H03805)による成果である。

引用文献

1) アイカサ：アイカサ HP、https://www.i-kasa.com/、2024 年 7 月 5 月アクセス
2) 環境省：3R 原単位の算出方法、2012

Sustainability Assessment of Next-Generation Vehicles: Life Cycle Assessment of Vehicles Using Entropy Weight-Weighted TOPSIS Method

○ZHAO HANBO*, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue
立命館大学
*gr0623rf@ed.ritsumei.ac.jp

1. Introduction

The extensive use of fossil fuels has led to problems such as climate change, air pollution, and fossil energy shortages, posing severe challenges to the sustainable development of human society. The transportation sector is a particularly significant area of fossil fuel consumption, accounting for 25% [1] of global energy-related carbon emissions, and urgently needs technological innovations to reduce dependence on fossil fuels, such as the development of new types of passenger vehicles [2]. Compared with traditional internal combustion engine vehicles (ICEVs), battery electric vehicles (BEVs) [3] Hydrogen Internal Combustion Engine(H2ICE) and fuel cell vehicles (FCVs) [4] not only help reduce reliance on fossil fuels but also reduce greenhouse gas emissions, alleviating environmental pressure. As a result, the demand for new energy transportation is continuously increasing and has become an important solution to global environmental issues.

However, there are still differences among the three vehicles in terms of environmental aspects. Research indicates that the environmental impact of BEVs mainly depends on the electricity source, while FCVs are reliant on the hydrogen production method. If hydrogen is produced from fossil fuels, it could increase the environmental impact. Different hydrogen production pathways have a significant impact on the environmental performance of FCVs [5]. In terms of economics. The economic differences between BEVs, H2ICEs, and FCVs during the production and usage phases, considering factors such as the initial investment cost, fuel costs, maintenance costs, and salvage value, have been studied. Research indicates that although the fuel costs of FCVs are higher, their economic performance may improve with advancements in hydrogen production technologies [6]. In terms of social aspects. Social acceptance of BEVs, H2ICEs, and FCVs is often influenced by factors such as technological awareness, cultural preferences, and market maturity. BEVs, with their more mature technology and well-established infrastructure, have higher acceptance in many markets. In contrast, H2ICEs and FCVs are relatively new to consumers, and due to the limited hydrogen infrastructure, they may face lower social acceptance [7].

From the above, it can be observed that there are still differences among the three vehicles in terms of environmental, economic, and social aspects.Therefore, it is necessary to incorporate environmental, economic, and social dimensions into the life cycle analysis to comprehensively evaluate the overall sustainability of a product or technology[8].

Therefore, to address the differences and issues mentioned above, this paper compares FCV, H2ICE, and BEV from three dimensions: environmental, cost, and social. The collected relevant data and information need to undergo life cycle assessment (LCA). Subsequently, the entropy weight TOPSIS method is applied to integrate these three dimensions, providing evaluation data on life cycle sustainability, and ultimately comparing the advantages and disadvantages of the three vehicle types.

2. Methodology

2.1Environmental Aspect:

The environmental factors influencing electric vehicles, fuel cell vehicles, and hydrogen internal combustion engine vehicles mainly include global warming, acidification, particulate matter, energy consumption, and toxic gases. By using the GREET software to simulate the emissions and energy consumption of the refueling life cycle for three types of vehicles, as well as the production phase, material consumption, and corresponding emissions of electric vehicles, fuel cell vehicles, and hydrogen internal combustion engine vehicles [9, 10, 11], the well-to-wheel (WTW) stage environmental pollutant emissions for the three vehicle types can be obtained, as shown in Table 1.

Table 1 The life cycle Environmental of FCVs, H2ICEs, and BEVs

Vehicle type	FCV	BV	H_2ICE
CO2 (kg/hkm)	3627.5	3406.9	4574.6
CH4 (kg/hkm)	0.0323	7.9578	0.0832
SOx (kg/hkm)	0.0031	7.9578	0.0146
N2O (kg/hkm)	2.40×10^-4	1.60×10^-4	9.53×10^-4
CO (kg/hkm)	0.0049	0.0033	0.0492
PM2.5 (kg/hkm)	2.41×10^-4	5.00×10^-4	0.0016
VOC (kg/hkm)	0.0017	9.31×10^-4	0.0832
Total Energy (K=MJ/hKM)	9.649×10^7	4.167×10^7	1.538×10^7

2.2Cost Aspect:

In terms of cost, the life cycle cost of a vehicle includes both the costs incurred by the company and the costs ultimately passed on to consumers in the purchase price. To evaluate the total life cycle cost of vehicles, it is necessary to consider the cost-related stages involved throughout the vehicle's life cycle. Based on references [12, 13], Table 2 is provided.

Table 2 The life cycle costs of FCVs, H2ICEs, and BEVs.

Vehicle type	FCV	BV	H_2ICE
Fuel tank	126,750 円	—	126,750 円
Electric motor	202,800 円	156,000 円	202,800 円
Inverter	32,500 円	26,000 円	32,500 円
WTW	793,000 円	845,000 円	793,000 円
Battery	390,000 円	1,300,000 円	390,000 円
Fuel cell system	2,066,350 円	650,000 円	2,066,350 円
Vehicle body	338,000 円	325,000 円	390,000 円
Vehicle cost from the company's perspective			
Acquisition cost	5100 円	4600 円	5000 円
Government subsidies	-1500 円	-500 円	-1500 円
Energy cost	522.5 円	1236 円	522.5 円
Repair and maintenance cost	2600 円	2600 円	2600 円
Disposal value	-5100 円	-4000 円	-5100 円

Vehicle cost from the consumer's perspective			
Total cost	5048.4 円	10,398.9 円	4,988.1 円

2.3Social aspects

The social life cycle assessment method can establish an evaluation framework by investigating the social impacts of automobiles and preliminarily defining the social evaluation system. Social impacts primarily refer to the positive or negative effects caused by the automobile production process on certain stakeholders within society. By understanding these social impacts and identifying the affected stakeholders, a social indicator evaluation framework can be constructed. From a social perspective, in combination with current evaluation methods, the main stakeholders of automobiles can be selected, including workers, local communities, society, consumers, and the government. With reference to Tbale 3, the impact categories, subcategories, evaluation indicators, and inventory data for these five stakeholders throughout the entire automobile life cycle are identified. The data obtained may be qualitative, but it can be converted into quantitative data using a predefined framework, ultimately allowing for a quantitative assessment of the social aspects of the automobile life cycle.

Table 3 Social Indicator Evaluation Framework

Stakeholder	Impact category	Subcategory	Evaluation indicator	Inventory data
Workers Consumers Local communities Society Government	Human rights Working environment Health and safety Cultural heritage Management Socioeconomic impact	Fairness in the design of the salary structure Fairness in the promotion system The potential to increase local employment opportunities Safety of product use Contribution of the automotive industry to the national GDP Corruption risk within the company Security and privacy of usage information The ability to quickly source raw materials locally ...	T----- Quantitative indicators. S------ Semi-quantitative indicators L-------- Qualitative indicators	VH----- Very high (5 points) H----- High (2 points) M------ Medium (0 points) L------ Low (-2 points) VL----- Very low (-5 points)

2.4 Entropy Weight-TOPSIS

The entropy weight-TOPSIS method is a multi-criteria comprehensive evaluation approach that combines the entropy weight method and TOPSIS technique. The entropy weight method calculates the information entropy of each criterion to determine objective weights, avoiding subjective bias. TOPSIS evaluates the performance of alternatives by comparing their distances to the ideal solution and the negative ideal solution. The calculation process includes data normalization, entropy weight computation, construction of ideal and negative ideal solutions, distance calculation, and relative closeness determination. Finally, alternatives are ranked based on their comprehensive scores.

3. Results and Discussion

The environmental, cost, and social evaluations of EVs, FCVs, and H2ICEs from the same region and different brands have been explained earlier. Based on the analysis from Table 1, 2., 3, environmental, cost, and social data were obtained and calculated using the entropy weight and TOPSIS methods.

The comparison of the three vehicles' performance is shown in Figure 4

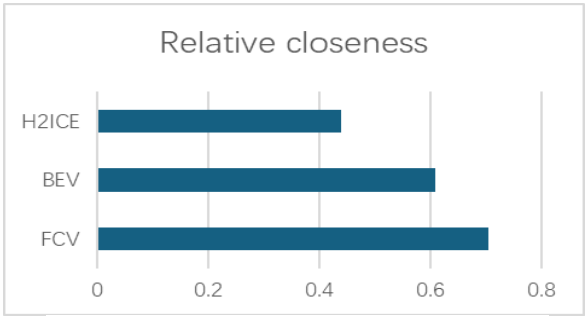


Figure 4 Normalized Life Cycle Sustainability Assessment Decision Data

Environmental Aspect:Since this study mainly focuses on raw material production and vehicle operation stages, during the production phase, the environmental impact of FCVs is nearly the same as that of BEVs. However, during the operation phase, FCVs mainly consume hydrogen, which leads to much lower environmental pollution compared to BEVs, which directly consumes electricity. Overall, FCVs have an advantage in the environmental dimension.

Cost Aspect:This analysis considers the full life cycle costs from both the consumer and enterprise perspectives. The initial purchase cost and later maintenance costs of BEVs are relatively high. However, due to significant government subsidies for BEVs and their lower energy costs during operation, the overall cost is lower than that of gasoline vehicles.

Social Aspect:FCVs do not have the same advantages as BEVs in the social dimension. From the comprehensive analysis of survey results, among the five stakeholders, hydrogen energy vehicles are more favored by the government. In other aspects, FCVs and H2ICEs do not have clear advantages over BEVs.

4. Conclusions

Based on the study, BEVs and H2ICEs are less sustainable than FCVs due to FCVs' significant environmental advantages. The TOPSIS method assigns high weight to environmental factors, reflecting experts' emphasis on environmental impact in lifecycle sustainability.

Social surveys show H2ICEs and FCVs perform worse socially than BEVs because BEVs have more developed enterprise systems meeting workers' needs. H2ICEs and FCVs, being newer, lack maturity in employee benefits and mechanisms.

Consumers also prefer BEVs, viewing them as more technologically mature and safer.H2ICEs and FCVs are currently affordable due to low disposal costs and government subsidies. However, as they gain acceptance, reduced subsidies will likely increase consumer costs.

FCVs should aim to minimize adverse impacts in the future, ensuring their sustainability develops positively.

5. References

1） International Energy Agency. Global energy & CO2 status report 2019[R/OL].[2021-01-28]

2） HWANG J J. Sustainability study of hydrogen pathways for fuel cell vehicle applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 19: 220-229

都市の緑化と犯罪

Urban Greening and Crime

○石津莉子*[1)]、中石知晃[2)]
Ishizu Riko, Tomoaki Nakaishi
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学研究院
*ishizu.riko.367@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

地球温暖化の進行に伴い、緑地がもたらす温暖化抑制機能に注目が集まっている。都市部における緑化の推進は、環境、健康、経済、社会といった幅広い側面で様々な恩恵をもたらす。例えば、環境面ではヒートアイランド現象の緩和や大気浄化、健康面では心理的安定の促進や運動機会の提供、経済面では不動産価値の向上やエネルギーコストの削減、社会面ではコミュニティ形成や犯罪抑止効果が挙げられる。

本研究では、都市緑化がもたらす効果の中でも健康面と社会面に焦点を当て、特に心理的安定を介した犯罪抑止効果について検証を行う。既存研究において、緑地が心理的安定をもたらすことは広く認識されているが、それが犯罪発生数の抑制にどの程度寄与するかについては、十分な実証がなされていない[1)]。本研究の目的は、都市緑化が犯罪発生数に与える影響を定量的に評価し、都市計画や政策立案への示唆を提供することである。

具体的に、本研究では、警察庁が提供する全国の犯罪発生数データを被説明変数とし、緑地面積を含む都市環境データや犯罪発生に影響を与え得る社会経済的要因を説明変数とした回帰分析を実施した。分析の結果、緑化率の高い地域では、犯罪発生数が有意に低下する傾向が確認された。本研究の成果は、持続可能な都市開発や住民福祉の向上を目指す政策において、緑地整備の効果的な活用を促すエビデンスとなり得る。

2. 既存研究

犯罪と心理の関係性においては、犯罪者の心理的要因以上に、周辺環境が犯罪行動に大きな影響を与えることが明らかにされている[1)]。一方、都市緑化と犯罪の関係については、これまでに多くの研究が行われており、その効果は地域や条件によって異なる。

例えば、フィラデルフィアを対象とした研究では、都市の緑化が精神的疲労を軽減し、ストレスを緩和することで、暴力的行動の心理的前兆を抑制する効果が確認されている[2)]。また、南半球を対象とした大規模な研究では、緑地面積が 1%増加するごとに暴力犯罪が 1.2%、財産犯罪が 1.3%（0.8～1.8%）減少するという統計的な結果が示されている[3)]。

一方で、日本国内における同様の実証研究は殆ど行われておらず、緑地と犯罪抑制効果の関係性についての知見は限られる。本研究では、このギャップを埋めるべく、日本の都市を対象とした実証分析を行い、都市緑化が犯罪抑止に与える影響について検証する。

3. 研究手法とデータ

3.1 分析モデル

都市の緑化が周辺地域の犯罪件数にどのような影響を及ぼしているのかを分析するために、以下のモデル式に基づいて回帰分析を行った：

$$Crime_{yp} = \beta_0 + \beta_1 Green_{yp} + X_{yp} + \varepsilon \qquad (1)$$

ここで、被説明変数$Crime_{yp}$は、p県におけるy年の犯罪件数を、説明変数$Green_{yp}$は、p県におけるy年の緑化面積（㎡）を、X_{yp}は、p県におけるy年の犯罪件数に影響を及ぼす制御変数のベクトルを指す。具体的な制御変数としては、面積（㎢）、人口密度（人/㎢）、平均年収（万円）、雇用者比率（%）、15 歳未満人口比率（%）、大学進学率（%）を考慮する。εは誤差項を表す。

3.2 使用データ

被説明変数である犯罪件数には、警察庁の犯罪統計[4)]を、緑地面積については、総務省の社会・人口統計体系[5)]をそれぞれ利用した。制御変数である人口密度と面積は、総務省の社会生活統計指標[6,7)]から、平均年収、雇用比率、15 歳未満人口比率、大学進学率については、統計でみる都道府県の姿 2024[8,9)]からそれぞれ入手した。各変数の記述統計は下の表 1 を参照。

表 1 記述統計

変数	平均	S.D.	最大	最小
緑地面積（㎡）	3977	3504	20944	768
面積（㎢）	7769	11709	83457	1862
人口密度（人/㎢）	656	1214	6444	67
平均年収（万円）	5407	549	6220	4215
雇用比率（%）	80.2	2.4	84.9	74.7
15 歳未満人口（%）	12.1	1.1	16.9	9.8
大学進学率（%）	6.5	9.0	41.2	0.3

注：S.D.は標準偏差。

4. 結果と考察

表 2 は、前節の（1）式による回帰分析の結果を示している。表 2 の 3 から 8 行目には、制御変数の推計パラメータ、標準誤差、t 値、p 値がそれぞれ示されている。具体的に、大学進学率については、犯罪発生数を有意水準 10%で 30.509 減少させるという結果が得られた。これは、セルフコントロールや倫理観の強化、経済的機会の増加、犯罪リスクの低いライフスタイルの確立、社会的ネットワークの形成が犯罪抑制に寄与している可能性を示唆している。

表 2 の 9 行目には、本研究が最も注目する緑地面積の推計パラメータ、標準誤差、t 値、p 値が示されている。緑地面積については、犯罪発生数を有意水準 10%で 0.002 減少させる結果が得られた。これは、地域コミュニティの強化、心理的なリラックス効果、公園利用の活性化による監視効果、さらには環境デザインによる防犯効果が寄与している可能性を示している。

表 2 回帰係数の推計結果

変数	係数	標準誤差	t 値	p 値
切片	80.757	62.636	1.289	0.205
雇用者比率	-0.363	0.927	-0.391	0.698
面積	0.000	0.000	1.691	0.099
人口密度	-0.001	0.002	-0.343	0.733
年間収入	-0.002	0.003	-0.446	0.658
大学進学率	-30.509	16.822	-1.814	0.077
15 歳未満人口	0.442	1.464	0.302	0.764
緑地面積	-0.002	0.001	-1.823	0.076

5. 結論と限界、今後の課題

本研究では、全国の都道府県における基本データと犯罪発生数のデータを用いて、犯罪発生数と緑地面積との関係を分析した。その結果、緑地面積が増加することで犯罪発生数が 0.002 件減少することが示され、緑化が犯罪抑止に寄与する可能性が確認された。

しかし、本研究で使用したデータは都道府県単位の広域的なものであり、緑化施策が実施される多くの場面では、市町村単位や個別の自治体やデベロッパーによる取り組みが中心である。このため、都道府県単位での回帰分析結果は、緑化と犯罪の関係性を完全に説明するものではない。

今後の課題として、市町村単位の緑地データや犯罪データを用いた詳細な回帰分析を行う予定である。まずは福岡県を対象とし、市町村ごとの緑地データを独自に作成する。福岡県内には市町村別の緑地データが存在しないため、国土交通省の都市地域土地利用データ [10]を基に、GIS ソフトウェアを利用して緑地関連のメッシュデータを抽出し、市町村ごとの緑地率を算出する。この独自データを用いることで、より精緻で整合性の高い分析結果を得られると考えられる。

引用文献

1) 岡本英生, 老田彩央里, 河野荘子：犯罪心理学研究, 61 (1), (2023), pp.15–24
2) Wolfe M.K., Mennis J.: Landscape and Urban Planning, 108 (2–4), (2012), pp.112–122
3) Venter Z.S., Shackleton C., Faull A., Lancaster L., Breetzke G., Edelstein I.: Science of The Total Environment, 825, (2022), pp.154005
4) 警察庁：“犯罪統計”，警察庁捜査支援分析管理官，（オンライン），入手先 <https://www.e-stat.go.jp/dbview?sid=0003195002>,（参照 2024-11-20）
5) 総務省：“社会・人口統計体系 都道府県データ 基礎データ-居住”，総務省統計局,（オンライン），入手先 <https://www.e-stat.go.jp/statistics/00200502>,（参照 2024-11-20）
6) 総務省：“社会生活統計指標-都道府県の指標-2024-家計”，総務省統計局,（オンライン），入手先 <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&stat_infid=000040133612>,（参照 2024-11-20）
7) 総務省：“社会生活統計指標-都道府県の指標-2023-教育”，総務省統計局,（オンライン），入手先 <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&stat_infid=000040019819>,（参照 2024-11-20）
8) 総務省：“統計で見る都道府県の姿 2024-人口・世帯”，総務省統計局,（オンライン），入手先 <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&stat_infid=000040133641>,（参照 2024-11-20）
9) 総務省：“統計で見る都道府県の姿 2024-労働”，総務省統計局,（オンライン），入手先 <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&stat_infid=000040133646>,（参照 2024-11-20）
10) 国土交通省：“都市地域土地利用細分”，国土交通省,（オンライン），入手先 <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b-u.html>,（参照 2024-12-19）

農業用ハウスへのフィルム型太陽電池導入による CO_2 削減効果

CO_2 Reduction Effects of Introducing Film Type Solar Cells in Agricultural Greenhouses

○中村晃大*[1)]、田口潤[1)]、新井智[1)]、本藤祐樹[1)]
Kota Nakamura, Jun Taguchi, Satoshi Arai, Hiroki Hondo
1) 横浜国立大学
*nakamura-kota-xv@ynu.jp

1. 緒言

2050 年のカーボンニュートラル実現のために、再生可能エネルギーの積極的な活用が期待されている。その中で、近年技術開発が進められているペロブスカイト太陽電池(PSC)が注目されている。PSC は、軽量且つ柔軟性に優れ、建物の壁面や耐荷重性の低い屋根など、従来のシリコン型 PV では取り付けが困難な場所への設置が可能となるため、今後の導入が期待されている。その導入先の 1 つとして農業用ハウスが挙げられるが、PSC を農業用ハウスへ導入した際の CO_2 排出削減効果に関する評価は十分に行われていない。

本研究ではフィルム型 PSC を農業用ハウスへ設置したことによる CO_2 排出削減効果を明らかにすることを目的とする。農業用ハウスの主な電力消費源の 1 つである、ヒートポンプにより消費される電力の電源を、系統電源から PSC に切り替えることに伴うライフサイクル(LC)CO_2 削減可能量について分析する。

2. 研究方法

2.1 農業用ハウス及び PSC の設定

本研究では、複数の文献に基づき、農業用ハウス及び導入する PSC の前提条件を設定した。

農業用ハウスは、文献[1)]を参考として、表 1.に示す通りに設定した。なお、暖房需要の設定にあたっては、文献[1)]に掲載されている実績値に基づき、PSC 設置に伴う遮光による日射量の減少を考慮した。図 1.に農業用ハウスの概略図を示す。

表 1. 農業用ハウスの前提条件

導入地域	栃木県那須塩原市
作物	イチゴ
仕様(形状) [ ] 内は 1 棟当たりのサイズ	かまぼこ型　6 連棟 [軒高 2.0 m, 天高 3.05 m, 間口(横幅)4.4 m, 奥行 43 m]
表面積	1581 [m^2]
斜面部分の面積	1271 [m^2]
暖房供給装置	ヒートポンプ
暖房需要	27122 [kWh/年]
加温時期	11 月～4 月
暖房電力消費量	ヒートポンプのみを考慮

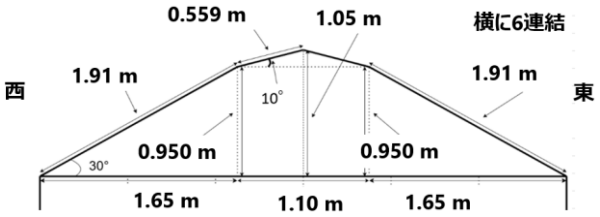


図 1. 農業用ハウスの概略図

一方、PSC の前提条件は、その本体に関する諸条件は主に文献[2)]、導入地域の年間日射量は文献[3)]に基づいて設定した。なお、日射量の設定は、PSC の設置方角・傾斜角を考慮して推計を行っている。PSC の前提条件について、表 2.に示す。

表 2. 導入する PSC の前提条件

製造方式	インクジェット方式
PSC のタイプ	フィルム型
導入面積	509 [m^2]
変換効率	11.4 [%]
システム出力係数	80 [%]
出力	46.4 [kW]
年間日射量	1303 [kWh/(m^2・年)]
設備利用率	14.9 [%]
使用年数	20 [年]

2.2 LCCO₂排出削減量の推計

本研究では、フィルム型 PSC の製造及び使用段階をライフサイクルとして、以下の通りに、フィルム型 PSC を農業用ハウスへ設置することに伴う LCCO₂ 排出削減量の推計を行った。

2.2.1 PSC 製造時の CO_2 排出量の推計

本研究では、文献[2)]を参考として、PSC 製造時における CO_2 排出原単位の推計を行った。推計は、MiLCA ver2.3[4)]を利用し、式(1)に従って行った。

$$e_{PSC} = \frac{\sum (I_i \times e_i)}{S} \quad (1)$$

e_{PSC} : フィルム型 PSC の CO_2 排出原単位, I : 投入物質・エネルギーの投入量, i : 投入物質・エネルギーの種類, e: CO_2 排出原単位, S : 導入面積

2.2.2 PSC 導入に伴う $LCCO_2$ 排出削減量の推計

農業用ハウスにおける PSC 発電量の算出方法は式(2)の通りに表せる。

$$P = S \times PR \times E \times SI \times LT \quad (2)$$

P：発電量, S：導入面積, PR：システム出力係数, E：変換効率, SI：年間日射量, LT：使用年数

次に、暖房電力需要の算出方法は式(3)の通りである。

$$暖房電力需要 = 暖房需要 / COP(暖房) \quad (3)$$

COP(暖房)：暖房定格 COP

また、$LCCO_2$ 排出削減量は、式(4)の通りに表せる。

$$\Delta CO_2 = e_{系統電力} \times \Delta P - (e_{PSC} \times S + e_{PCS}) \times P' / P \quad (4)$$

ΔCO_2：$LCCO_2$ 排出削減量, $e_{系統電力}$：系統電力の排出原単位, ΔP：PSC 導入前の系統電力消費量 - PSC 導入後の系統電力消費量, P'：発電した電力のうち暖房に消費される電力量, e_{PSC}：PSC の CO_2 排出原単位, S：PSC 導入面積、e_{PCS}：パワコン製造による CO_2 排出量

なお、本研究では、発電された電力のうち、余剰電力については全量売電すると仮定しているが、売電に伴う系統電力の削減は、$LCCO_2$ 排出削減量において考慮していない。

3. 結果と考察

フィルム型 PSC の製造段階における、単位面積当たりの CO_2 排出原単位は 40.35 [kg-CO_2/m^2]で、そのうち電力消費に由来する排出量は 34.35 [kg-CO_2/m^2]であり、全体の約 85%を占めることが明らかになった。この結果より、PSC の製造段階における電力消費の効率化や電源の脱炭素化の推進が、CO_2 排出量のより少ない PSC の開発実現につながると言える。

次に、図 2.に各月における時間帯別の発電量と暖房電力需要の差の関係を示す。

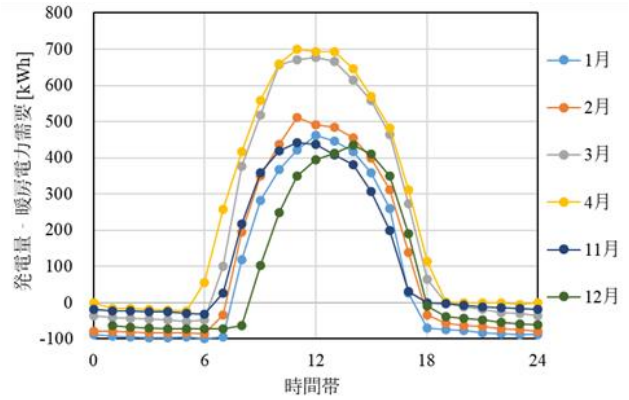


図 2. 時間帯別の発電量と暖房電力需要の差の関係

図 2.から、夜間は暖房需要が増加するが PSC による発電が行われないため電力が不足する一方、昼間には電力が供給過剰となっていることが分かる。本研究では、余剰電力は全て売電するという仮定の下で推計を実施したが、今後の研究においては、売電以外に電力の有効活用法を検討することが鍵であると考えられる。

次に、農業用ハウスへのフィルム型 PSC 導入に伴う $LCCO_2$ 排出削減量の推計結果を表 4.に示す。

表 4. 推計結果

発電量(年間)	60.4 [MWh]
余剰電力量(年間)	59.1 [MWh]
暖房電力需要量(年間)	5.12 [MWh]
発電量の内 暖房消費電力量(年間)	1.32 [MWh]
賄える割合	25.7 [%]
$LCCO_2$ 排出削減量(20 年)	13.2 [t-CO_2]

- 余剰電力量 = 発電量 - 暖房消費電力量
- 賄える割合 = 暖房消費電力量 / 暖房電力需要量

以上より、売電分を考慮しない場合、$LCCO_2$ 排出削減量は、PSC の使用期間 20 年間の合計で 13.2 [t-CO_2]であることが明らかになった。

4. 結言

本研究では、フィルム型 PSC を農業用ハウスに導入した際の $LCCO_2$ 削減可能量を定量化した。他方、一部のデータについては、今後精緻化の検討を行うことが必要である。また、本研究の想定の下では、農業用ハウスで利用されない余剰電力が多い。したがって今後は、夏期の冷房需要等、PSC の発電パターンに適合したハウス内の他の電力需要を考慮する予定である。また、余剰電力をハウス周辺の施設等との連携により活用した際の、地域脱炭素への貢献についての検討等が求められる。

5. 引用文献

1) 渡辺真由美, 三木昴史, 藤井清佳, 遠藤和子：農業経営研究, 第 61 巻, 第 2 号,（2023）, pp. 37-42
2) T. Okoroafor et al.: Journal of Cleaner Production 373 (2022) 133665.
3) NEDO：持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指（2023）
4) SuMPO： MiLCA v2.3（2021）

6. 謝辞

本研究は、JST 低炭素社会実現のための社会シナリオ研究事業 JPMJCN2302 による支援を受けている。

世界 43 か国の自動車製造部門の環境生産効率性分析

Environmental Efficiency Analysis of Automotive Sectors in 43 countries

○寺岡梨佐子*[1)]、中石知晃 [2)]
Risako Teraoka, Tomoaki Nakaishi
1) 九州大学経済学部, 2) 経済学部経済学研究院
* teraoka.risako.613@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

地球温暖化は、人間活動による温室効果ガス排出の増加により深刻化している。2011～2020 年の世界の地表面温度は平均 1.09℃上昇しており、特に陸上での上昇幅が顕著である [1)]。人間生活に不可欠な道具である自動車は世界中で生産、利用され大量の CO_2 排出の原因となっている。Stephan et al. (2019)[2)]によれば、自動車業界の 2018 年のカーボンフットプリントは世界全体の年間温室効果ガス（GHG）排出量の 9%を占め、VW 社の試算では平均的な同社の車両 1 台の生産において 6.5t の CO_2 が排出され、その多くがサプライチェーンに由来する。また、電気自動車の普及に伴い、性能向上の一方で材料製造にかかる CO_2 排出量の増加も懸念されている。このように、自動車部門の脱炭素化は、地球温暖化対策において重要な課題である。

本研究の目的は、各国の自動車製造部門の生産効率を環境的観点から定量的に評価し、その経年変化を分析することである。既存研究では、Timmer et al. (2015)[3)] により国際産業連表を用いた自動車産業の生産効率の分析が行われており、ヨーロッパが自動車 GDP の面で優位であることが示されているが、環境効率を考慮した分析は行われていない。また、藤井ら（2007）[4)] による研究では、日本国内の自動車製造企業を対象とした環境効率性の分析が行われたが、国レベルでの比較分析は欠けている。本研究では、国際産業連表のデータを用いて、国ごとの自動車製造部門の環境生産効率性を分析し、脱炭素化に向けた改善の方向性を示すことを目指す。

2. 研究手法

環境生産効率性を測る指標の作成には、Charnes et al.（1978）[5)]によって提案されたデータ包絡分析（Data Envelopment Analysis: DEA）を用いる。DEA は、複数の意思決定主体（Decision Making Units: DMUs）の投入・産出データを基に生産フロンティアを推計し、推計された生産フロンティアと DMU 間の相対距離に基づき各 DMU の相対的な効率性スコア（最低値 0；最高値 1）を評価するノンパラメトリック手法である。

具体的に、本研究で使用する投入指向型 DEA モデルは、以下の分数計画問題として定式化できる：

$$\text{Max. } \theta_k = \frac{u_1 y_{1k} + u_2 y_{2k} + \cdots + u_s y_{sk}}{v_1 x_{1k} + v_2 x_{2k} + \cdots + v_m x_{mk}}$$

$$\text{s.t. } \frac{u_1 y_{1j} + u_2 y_{2j} + \cdots + u_s y_{sj}}{v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \cdots + v_m x_{mj}} \leq 1 \ (j = 1,2,\ldots,n)$$

$$v_1, v_2, \ldots, v_m \geq 0, u_1, u_2, \ldots, u_s \geq 0$$

ここで、x_{mk} と y_{sk} は、評価対象である k 番目の DMU の m 個目の投入と s 個目の産出をそれぞれ示す。v_m と u_s は、それぞれ m 番目の投入と s 番目の産出に乗じられる可変ウェイトである。θ_k は k 番目の DMU の効率性スコアのあたいを示し、n は評価対象の DMU の総数である。

3. データ

本研究では、国際産業連関表（World Input Output Database: WIOD）[3)]及び付帯の環境勘定から入手したヨーロッパ諸国を中心とした代表的な 43 か国の自動車、トレーラー、セミトレーラーの製造に関する投入産出データを分析に利用した。データは、2000 年及び 2014 年の 2 期間を利用し、効率性の変化を経年評価する際にのみ、これらをプールした 86 のサンプルで分析を行った。

具体的な投入要素としては、エネルギー（TJ）、従業員数（thousands people）、中間投入（millions of US$）、名目資本ストック（millions of US$）、二酸化炭素排出量（kt）の 5 つを、産出要素としては GDP（millions of US$）の 1 つをそれぞれ考慮した。

4. 結果

4.1 2000 年及び 2014 年の環境生産効率性

図 1 及び図 2 には 2000 年及び 2014 年の各国自動車製造部門の環境生産効率性スコアがそれぞれ示されている。ここで、色が濃い国ほど、効率性がよいことを示す。また、スコアが 1.00 の国は、最も環境生産効率性が良い国であり、1.00 以下のスコアの国は改善の余地がある国である。

図 1、図 2 から北米、ヨーロッパ地域において環境生産効率性のスコアが高い国が多く、アジア地域ではスコアが高い国は多くないことが分かる。特に、北米地域のアメリカ合衆国、カナダ、メキシコは 2000 年、2014 年の両年とも環境生産効率が最も高い国である。

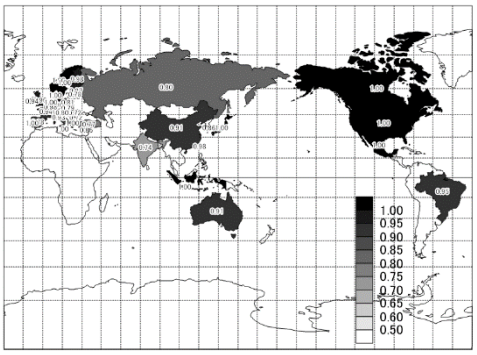


図 1 各国の環境生産効率性スコア（2000 年）

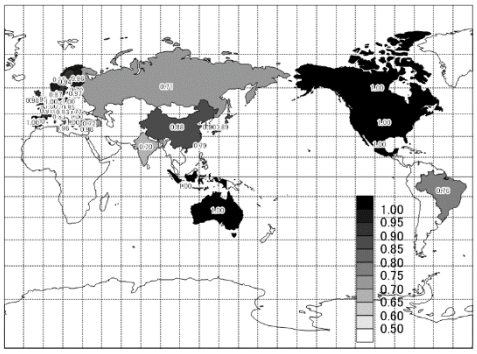


図 2 各国の環境生産効率性スコア（2014 年）

4.2 環境生産効率性スコアの変化（2000–2014 年）

図 3 は、2000 年から 2014 年にかけての国別の環境生産効率性の経年変化を示している。具体的に、赤い部分は効率性スコアが上昇もしくは変化しなかった国で、青い部分は効率性スコアが下がった国である。図 3 より、2000 年より環境生産効率が良くなった、あるいは変化していない国が大半を占めていることがわかる。実際に、43 か国中環境生産効率性が下がったのは 9 か国のみで、特に下がり幅が大きかったのはロシアの-0.11 である。

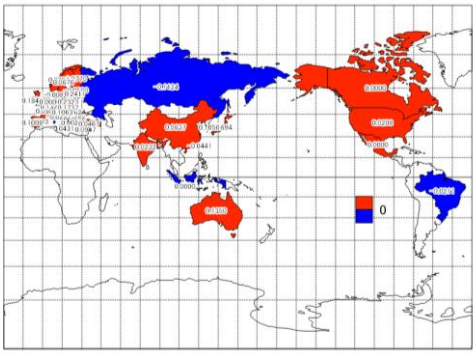


図 3 環境生産効率性スコアの変化（2000－2014 年）

5. 考察

上記の結果から、各国の環境生産効率性は、基本的上昇あるいは維持されており、国の個別の事情等が環境生産効率性に影響を与えていると考えられる。また、2000 年と 2014 年の単年の効率性を比較すると、ヨーロッパ地域や北米地域の環境生産効率性が良い一方で、アジア地域に関しては、上記 2 地域に比べ環境生産効率性があまり良いとは言えない。使用データがヨーロッパ地域の国のデータが豊富にある一方で、西アジアやアフリカ、南米、オセアニアなどの諸地域の国のデータに欠けるため、地域での生産拠点の集積についてはっきりと断言はできないが、北米 3 か国、ヨーロッパ諸国のデータを見ると生産拠点が密集している地域は環境生産効率性が良い傾向にある可能性があると思われる。また、先行研究 [3]にある通り、ヨーロッパ地域が自動車の生産の中心地と言えそうだが、北米の生産効率の良さは無視できない。

6. 総括と今後の展望

単年の環境生産効率性や環境生産効率性スコアの変化の結果からヨーロッパ地域や北米地域ではその域内で加工、組み立てができることや従業員の流動が起やすいことから環境生産効率性が高い国が多いと考えられる。一方でアジア地域は国同士に距離があり、言語も異なる国の集まりであるのでヨーロッパ地域や北米地域と比べると国同士の協力による自動車生産や従業員の流動が活発でないため環境生産効率性もそれほど高くないと考えられる。今回は地理的な要素を省いて研究していることから生産拠点が近いことによる環境生産効率性への影響を考慮できていないが、今後の研究では地理的な要因を考慮して環境生産効率性が良い工場立地について調べる予定である。

参考文献

1) IPCC [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, (2023), pp.1–34
2) Stephan, B., Lee, I., Kim, J: “CRASHING THE CLIMATE HOW THE CAR INDUSTRY IS DRIVING THE CLIMATE CRISIS”, Greenpeace East Asia and Greenpeace Germany, Seoul, South Korea, Hamburg, Germany, (2019), pp.1–38
3) Timmer, M.P., Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R., de Vries, G.J.: Review of International Economics, 23, (2015), pp.575–605
4) 藤井秀道, 金子慎治, 川原博満, 金原達夫: 環境システム研究論文, 35, (2007), pp.265–271
5) Charnes, A., Cooper, W.W., Rhodes, E.: European Journal of Operational Research, 2, (6), (1978), pp.429–444

中国における電気自動車からの使用済み電池のリサイクルモデル分析

Recycling Model Analysis of Used Batteries from Electric Vehicles in China

○劉衡一*[1)]、光斎翔貴[1,2)]、柏倉俊介[1,2)]、山末英嗣[1,2)]
Hengyi Liu, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue
1) 立命館大学, 2) 総合地球環境学研究所
* rm0215pe@ed.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

現代社会では，環境保護と気候変動が世界的な関心事となっている．深刻化する気候危機は，従来のエネルギー利用の在り方を見直し，持続可能な解決策を積極的に模索する動きを促している．このような背景の中で，電気自動車はゼロエミッション，低騒音，高エネルギー効率という特徴を持ち，交通分野におけるグリーンな転換を推進する重要な役割を果たしている．

電気自動車の急速な普及に伴い，環境への新たな課題も浮かび上がっている．特に電気自動車用バッテリー（EV-LIB）の廃棄問題は，社会全体の大きな関心事となっている．廃棄された EV-LIB には，$LiCoO_2$，$LiMn_2O_4$，$LiNiO_2$などの正極材料や，$LiPF_6$などの有毒で腐食性の電解質が含まれており，これらには重金属が含まれていることが多い．不適切な処理やリサイクル率の低さによって，土壌や水資源が汚染されるだけでなく，潜在的な社会的リスクを引き起こす恐れもある[1)]．電気自動車の発展を推進する一方で，廃棄された EV-LIB の回収や再利用を適切に進めることは，持続可能な社会を実現する上で非常に重要な課題となっている．

廃棄 EV-LIB による問題を解決するために，多くの研究が廃棄バッテリーの数量を予測し[2)]，政府と企業間の最適な政策や補助金の方策はゲーム理論を用いて分析している[3)]．これらの研究は，各方面の利益を調和させ，資源の有効活用と環境の持続可能な発展を目指すとともに，社会的および経済的利益の最大化を実現することを目的としている．

しかし，中国国内のさまざまな企業が採用している異なる回収方式，材料回収効率，およびそのコストについては，明確な比較分析がまだ行われていない．したがって，本研究の目的は，既存の研究で提供されている廃棄 EV-LIB に関するデータや，中国国内の動力電池回収利用に関する報告に基づく各回収モデルにおける企業の材料回収率および電池分解効率などのデータを統合し，電池回収の循環モデルを体系的に分析することである．この分析を通じて，回収システムの最適化に寄与することを目指す．

2. 研究手法

本研究は，既存の研究で収録された中国国内主流の電動自動車用バッテリー（三元系リチウム電池およびリン酸鉄リチウム電池）の総搭載量（GWh）[2)]を利用し，中国の新エネルギー車型録に収録された車両のバッテリー重量とバッテリーパックの総エネルギーを組み合わせて，平均バッテリーエネルギー密度（Wh/kg）を算出した．このエネルギー密度をもとに，三元系リチウム電池およびリン酸鉄リチウム電池の回収可能重量（トン）を推定した．

中国国内市場は規模が非常に大きい一方で，現在も統一されたバッテリー回収モデルや退役バッテリーの完全回収メカニズムは確立されておらず，多くの非正規企業が廃棄バッテリーを回収して利益を得ている[3)]ため，回収過程において規範化の課題が残っている．現行市場の回収モデルおよび政策要件を踏まえ，本研究では国内の主な回収方式を図 1 のように,「垂直統合モデル」と「水平分散モデル」の 2 つのモデルに分類した．垂直統合型モデルは，本研究において，単一の電池タイプを集中的に回収し，材料のリサイクルを行うモデルとして定義されている．一方，水平分散型モデルは，複数種類の電池を回収し，それぞれの材料をリサイクルするモデルとして定義している．さらに，現在の正規企業の市場占有率を基に，推定された回収可能バッテリー重量（トン）をこれらの企業に比例配分し，各バッテリーパック内の材料比率および国内の異なる回収モデルにおける材料回収率を用いて，各回収モデルで回収可能な材料量を算出する．

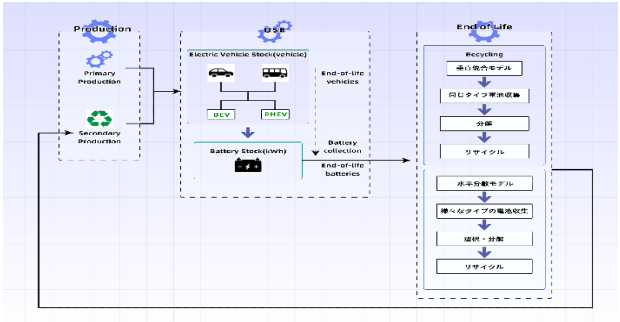


図 1　回収モデル

3. 結果

垂直統合型モデルは主に単一の電池タイプを集中し

て製造・回収し，自社で生産した廃棄電池の回収に重点を置くため，高い専門性と特化性を備えている．本研究では，このモデルの特徴を反映する正規企業の公式サイト [4]で公表されている年間バッテリー回収処理量および各材料の回収率データをもとに計算を行い，このモデルにおける回収データを算出した．その結果は図 2 に示されており，垂直統合型モデルにおける各材料の回収量に示されている．

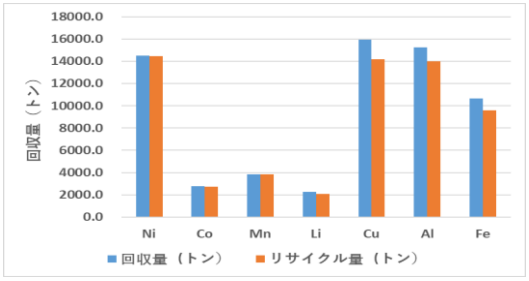


図 2　垂直統合型モデル

その他の正規企業は水平分散型モデルに基づき電池回収を行っている．本研究では，水平分散型モデルを複数種類の電池を回収し，それぞれの材料をリサイクルするモデルとして定義している．調査により国内では，カスケード利用および電池回収の両方の資格を持つ企業が 11 社，電池回収資格のみを持つ企業が 60 社存在していることがわかった [5]．

そこに推定された回収可能な電池総量から垂直統合型モデルの回収電池量を差し引いた後，残りの廃棄電池数をこれら 11 社の双資格企業と 60 社の電池回収企業に，企業数および企業資格に基づいて 2：8 の割合で比例配分した．計算結果として，図 3 は双資格企業による材料回収量を，図 4 は単一資格企業による材料回収量を示した．

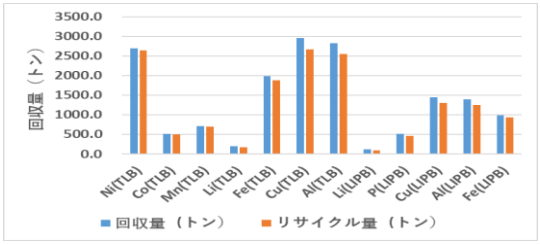


図 3　11 社の材料回収・リサイクル量

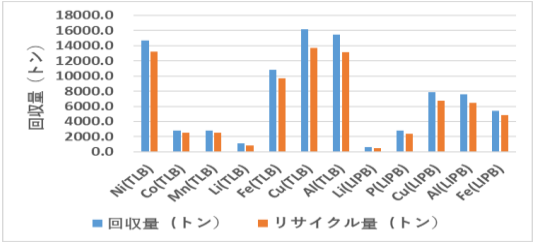


図 4　60 社の材料回収・リサイクル量

4.　考察

垂直統合型モデルを採用する企業は単一の電池タイプを集中的に回収しているため，回収効率が高い．水平分散型モデルを採用する 11 社の双資格企業および 60 社の単資格企業の回収状況と比較すると，垂直統合型モデルの総回収量はこれら企業の総和に比べて少ないものの，リチウム，ニッケル，コバルトなどの電池正極材料の回収量においては他社とほぼ同等である．一方で，電池外装材料（アルミニウムや銅など）の回収量は，垂直統合型モデルはこれら企業の総和と比べて明らかに少ない．

これまでの研究結果により，垂直統合型モデルは電池製造に必要な重要材料の回収効率が高いことが示された．一方，水平分散型モデルの回収量は多いものの，複数種類の電池を混合回収するため，材料のリサイクル率が単一タイプに比べて低いことがわかった．このため，重要材料の効率的な回収には垂直統合型モデルが有利であることがわかった．

5.　今後の計画

電池回収システムにおいて，解体効率は回収成果に影響を与える重要な要素の一つである．次の研究計画では，垂直統合型モデルと水平分散型モデルを基に，三元系リチウム電池やリン酸鉄リチウム電池などの異なる電池タイプが解体時間，コスト，材料回収率 [6]において回収モデルに与える影響を重点的に比較する．

6.　引用文献

1) Kai Meng, Guiyin Xu, Xianghui Peng, Kamal Youcef-Toumi, Ju Li,”Intelligent disassembly of electric-vehicle batteries: a forward-looking overview”,Resources, Conservation and Recycling,182, 106207, 2022
2) Yufeng Wu, Liuyang Yang, Xi Tian, Yanmei Li, Tieyong Zuo,”Temporal and spatial analysis for end-of-life power batteries from electric vehicles in China”,Resources, Conservation and Recycling,155,104651,2020
3) Zhao, X., Peng, B., Zheng, C. et al. “Closed-loop supply chain pricing strategy for electric vehicle batteries recycling in China.” Environ Dev Sustain 24, 7725–7752 ,2022.
4) CATL 寧徳時代，入手先<https://www.catl.com>
5) 2024 年中国動力電池回収業界市場展望予測研究報告（簡易版），入手先 <https://www.askci.com/news/chanye/20240726/09011327219556738560 1322_4.shtml>
6) L. Lander, C. Tagnon, V. Nguyen-Tien, E. Kendrick, Robert J.R. Elliott, Andrew P. Abbott, Jacqueline S. Edge, Gregory J. Offer,”Breaking it down: A techno-economic assessment of the impact of battery pack design on disassembly costs”,Applied Energy,2023

訪日外国人の国別・目的別カーボンフットプリント

Carbon Footprint of Foreign Visitors to Japan From Country and Purpose Perspective

○立石荘太*[1)]、中石知晃[2)]
Sota Tateishi, Tomoaki Nakaishi
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学研究院
* tateishi.sota.739@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景と目的

近年、日本ではインバウンドが成長戦略の柱として位置づけられ、2020 東京オリンピック・パラリンピックを筆頭に第 2 次安部政権発足以降、様々な取り組みが行われてきた。インバウンド増加による大きな経済効果が期待され、コロナ禍後のインバウンド増加・回復に向け、観光庁を中心にインバウンド旅行者の誘致促進が行われている[1)]。

一方で、日本の観光産業における脱炭素化は進んでいないのが現状である。2015 年のパリ協定以降各産業で脱炭素化が進み、観光産業では 2021 年にグラスゴー宣言が発表され、観光における脱酸素化の動きがみられたが、日本からの参加は日本からの参加は未だに三団体にとどまっている[2)]。

このような背景を踏まえて、本研究では、訪日外国人による旅行の環境負荷を推計し、環境負荷が低く満足度の高い旅行のモデルの作成を目的とする。

2. データと分析手法

本研究では、観光庁によるインバウンド消費動向調査（旧訪日外国人消費動向調査）[3,4)]と国立研究開発法人国立環境研究所による産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）[5)]の 2 つのデータをもとに分析を行う。インバウンド消費動向調査は、訪日外国人を対象に観光庁が実施したアンケート調査であり、訪日目的、滞在中の支出、旅行満足度などのデータが含まれている。また、3EID には、産業連関表をもとに算出された環境負荷原単位が含まれており、1 単位の生産活動に伴う GHG 排出（t-CO_2eq）を推計することができる。

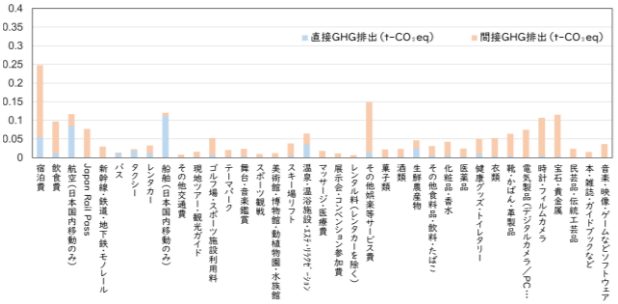
具体的に、本研究では、インバウンド消費動向調査に含まれる滞在中の支出と 3EID の環境負荷原単位（2015 年）を掛け合わせることで旅行の環境負荷を推計する。この際に、調査対象を国別・目的別に属性分けし、各集団の消費行動の傾向や環境負荷の特徴を調査する。さらに、インバウンド消費動向調査[6)]の個票データに含まれる旅行満足度の項目では、訪日外国人の旅行満足度が 7 段階でスコア付けされており、この平均スコアを使って各国の環境負荷 1 単位当たりの旅行満足度を調査する。

3. 結果と考察

3.1 訪日外国人 1 人当たりのカーボンフットプリント

図 1 は、訪日外国人全体を対象に、1 人当たりの環境負荷を推計したものである。図 1(a)では観光目的、図 1(b)では業務目的の訪日外国人についてそれぞれ環境負荷を推計している。図 1(a)、図 1(b)ともに主な GHG 排出源は宿泊業であることが読み取れる。原因としては宿泊に関する支出が大きいことや環境負荷原単位が比較的大きい（37 品目中 8 位）ことが影響していると考えられる。また、両者を比較すると、環境負荷の総排出量に関しては業務目的の旅行のほうが大きいことが分かるが、これは宿泊や宝石・貴金属、時計・フィルムカメラなどの項目への支出に関して差があることが原因だと考えられる。

（a）訪日外国人 1 人当たりの環境負荷（観光目的）



（b）訪日外国人 1 人当たりの環境負荷（業務目的）

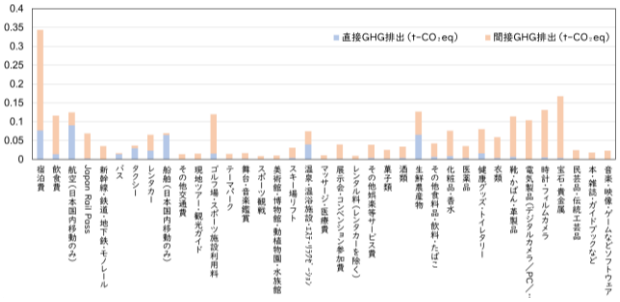
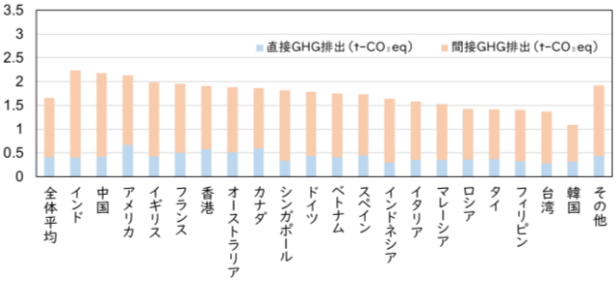


図 1. 訪日外国人 1 人当たりの環境負荷（全体平均）

図 2 は、訪日外国人を国別に分類し、1 人当たりの環境負荷を推計したものである。図 1 同様、図 2(a)では観光目的、図 2(b)では業務目的の訪日外国人についてそれぞれ環境負荷を推計している。図 2(a)より観光目的ではインドや中国が、図 2(b)より業務目的では台湾や香港が高い環境負荷を排出していることが読み取れる。原因として

は、これらの国の旅行単価が極端に高く、平均の約 1.25 倍の支出を行っていることが挙げられる。特に支出が大きい品目は、衣類、靴・かばん、電気製品・時計などである。また、船舶や温泉など環境負荷原単位が大きい産業への支出が大きい点も原因の 1 つであると考えられる。

（a）訪日外国人 1 人当たりの環境負荷（観光目的）



（b）訪日外国人 1 人当たりの環境負荷（業務目的）

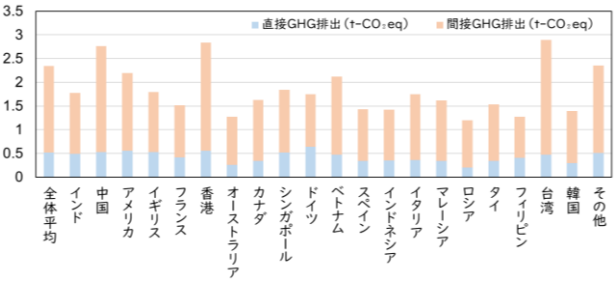


図 2. 訪日外国人 1 人当たりの環境負荷（国別）

3.2 旅行満足度と環境負荷の関係

図 3 は、観光目的の訪日外国人における環境負荷 1 単位（t-CO_2eq）当たりの旅行満足度を示したものである。インドネシアや台湾、韓国などアジアの国々が上位に位置しているが、これは各国の旅行満足度に大きな差がみられず、観光目的で訪日する際の旅行単価が低いことが大きく反映された結果だと考えられる。一方でカナダについては、船舶、温泉などの項目に加え、生鮮農産物の項目における環境負荷の排出が大きく、環境負荷 1 単位当たりの満足度が低い結果となった。生鮮農産物の環境負荷が大きい国としてほかにフィリピンやインドが挙げられるが、いずれの国もアンケート対象者における長期滞在者の割合が高いという共通点があることがわかった。

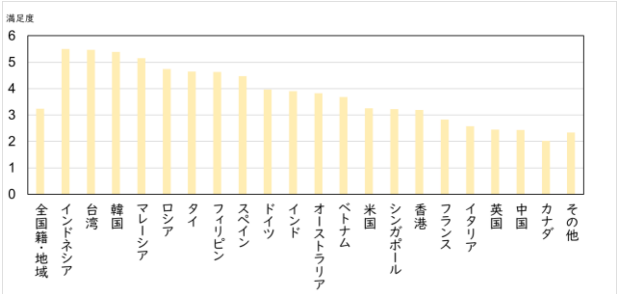


図 3. 環境負荷 1 単位当たりの旅行満足度（国別）

4. 結論と政策提言、今後の展望

本研究では、訪日外国人の旅行により発生した環境負荷の推計を行った。推計の結果、国別・目的別ともに環境負荷排出のホットスポットが宿泊業であることがわかった。また、環境負荷の排出に関して、交通機関は直接排出が、その他の産業では間接排出が大きいこと、業務目的の旅行に関する環境負荷が大きいこと、船舶や温泉など環境負荷原単位が大きい産業への需要の差が環境負荷の大きさの差を生み出していることなどがわかった。

以上を踏まえて、宿泊業に関しては地産地消の推進による食品流通システムの見直しなど、間接的な環境負荷を減らすことが重要であると考えられる。また、交通機関に関しては、使用回数を抑えるために、より環境負荷の低い移動手段の奨励、具体的には電車やバスなどの公共交通機関をより多くの外国人に利用してもらえるようなキャンペーンの実施などが必要である。また、業務目的の旅行に関しては、リモートワークの推進などにより旅行の必要性を見直し、減らしていくことが必要である。

今後の展望としては旅行満足度の詳細な分析を行いたい。今回行った分析では、国ごとの満足度の平均スコアを用いたが、平均スコアに国ごとの差があまり見られなかったこと、アンケートの回答数が少ない国や回答がない項目があったことなど改善点がみられた。そのため、対象を国から個人に変更し、個人の環境負荷排出と旅行満足度の関係を調査するとともに、環境負荷が低く、旅行満足度の高いモデルケースの作成を行いたい。

参考文献

1) 経済産業省: “通商白書 2023 (p.195)”, 経済産業省 HP, 入手先<https://www.meti.go.jp/report/tsuhaku2023/whitepaper_2023.html> ,（参照 2025-01-08）
2) 日本交通公社: “今後の観光文化創造に貢献する研究領域（観光文化 252 号）(p.39)”, 日本交通公社 HP, 入手先< https://www.jtb.or.jp/book/wp-content/uploads/sites/4/2022/02/bunka252.pdf>,（参照 2025-01-08）
3) 観光庁: “訪日外国人消費動向調査”, 観光庁 HP, 入手先< https://www.mlit.go.jp/kankocho/tokei_hakusyo/gaikokujinshohidoko.html>,（参照 2024-01-16）
4) 観光庁: “インバウンド消費動向調査”, 観光庁 HP, 入手先< https://www.mlit.go.jp/kankocho/tokei_hakusyo/gaikokujinshohidoko.html>,（参照 2024-01-19）
5) 南斉規介: “産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID)”, 国立環境研究所, 入手先<https://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/datafile/index.htm>（参照 2025-01-08）
6) 観光庁: “インバウンド消費動向調査個票データ 2024 4-6 月期”, 観光庁 HP, 入手先< https://www.mlit.go.jp/kankocho/tokei_hakusyo/gaikokujinshohidoko.html>

中国における SAF 燃料の安定供給性評価

Assessment of the stability of SAF fuel supply in China

○XIONGZIYIN*[1, 2)]，光斎翔貴[1, 2)]，柏倉俊介[1, 2)]，鬼頭みなみ[3)]，山末英嗣[1, 2)]
Xiong Ziyin， Shoki Kosai， Shunsuke Kashiwakura， Kitou Minami， Eiji Yamasue
1) 立命館大学， 2) 総合地球環境学研究所， 3) 福岡工業大学
* rm0215kx@ed．ritsumei．ac．jp

1. 緒言

2023 年 7 月，世界の気温は 1940 年以来の最高値を記録し，地球温暖化防止のために温室効果ガス，特に二酸化炭素の排出削減が不可欠である[1]．航空業の温室効果ガス排出量は全体の 2%と大きくはないが，成長率が他の交通手段より速く，将来的な増加が懸念される[2]．さらに，高高度での排出は地上の 3～4 倍の温室効果をもたらす．ICAO の予測によれば，対策を講じなければ 2050 年までに航空業からの二酸化炭素排出量が世界全体の 25%を占める可能性があると予想されている．

航空業界における二酸化炭素排出量削減に向けて IATA は 2050 年までの CO2 削減の 65%を Sustainable Aviation Fuel (SAF)に依存すると予測している[3]．中でも中国は世界第 2 位の航空市場であり，2025 年までに新たに 136 の空港を追加し，民間輸送空港は計 320 箇所に達する予定である[4]．航空業の二酸化炭素排出量は現在中国全体の約 1%だが，輸送量の増加に伴い，SAF の適切な普及がなければ排出削減の課題は深刻化すると考えられている．現在，SAF 生産技術の中でも最も商業化が進んでいるのがエステル類および脂肪酸類の加水分解技術（HEFA）であり，本研究ではその原料となる都市勇気固体廃棄物，廃食用油脂，農業廃棄物，林地残材に注目する．中国の SAF 産業はまだ初期段階であり，政策，技術，生産能力，原料供給，コストなど多くの課題が存在する．これまでの中国における SAF 利用の既存研究では[9]，SAF の技術路線や原料供給の可能性が研究されており，SAF が航空業の脱炭素化に重要な役割を果たすことがわかっているものの，2050 年に向けて，中国における SAF 燃料の需要に対して，果たして SAF 燃料が安定的に供給できるかどうかは分析されておらず不透明なままである．本研究では，中国の SAF 燃料の安定供給にむけて SAF 燃料の原料の生産能力について分析を行うことで，将来の中国における SAF 燃料の利用に関する実現可能性を明らかにすることを目的とする．

2. 研究手法

2．1 中国における現状の SAF の生産能力と原料の利用可能量調査

本研究では，中国国内における現状の SAF の生産可能施設における所在地，年間生産量や稼働状況をデスクリサーチよりデータを集める．

2．2 中国における未来 SAF 原料量の推計

本研究では，システムダイナミクスモデルを利用し，まずは中国における将来の SAF 原料量である都市有機固体廃棄物発生量と食用油の消費量を予測した．VENSIM ver.10 を用いて 2010 年から 2050 年までのシステムダイナミクスモデルを構築し，構築したシステムダイナミクスモデルを用いて都市生活ごみ発生量，1 人当たりのごみ日発生量，食用油消費量などの指標を予測した．

本モデルの入力データは，主に 2010 年から 2023 年の間に中国統計局が発行した「2023 年都市・農村建設統計年鑑」[5]と，中国食用油学会が発行した「2022 年中国における穀油の生産・販売および輸出入の状況」[6]に基づいている．これらの歴史データを分析することにより，対応する入力データを算出したものである．都市有機固体廃棄物及び廃食用油脂のシステムダイナミクスモデルは以下の図１，図２に示す．

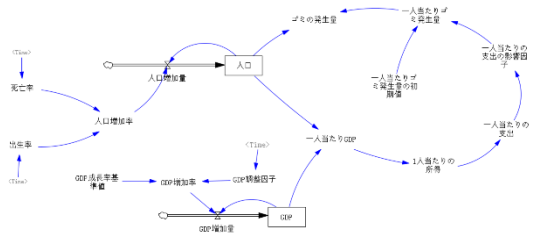


図 1 都市有機固体廃棄物のシステムダイナミクスモデル

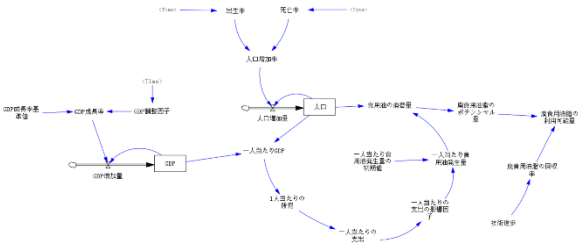


図 2 廃食用油脂のシステムダイナミクスモデル

3. 結果と考察

2023 年の中国における SAF 生産に原料のポテンシャル量は合計 44850 万トンと推定され，年間で製造可能な SAF の量は約 4787 万トンと計算された．Deloitte の予測によれば[10]，2050 年の中国における SAF 燃料の目標値は 8610 万トンに及ぶ．しかし，2023 年時点の SAF 製造可能量を基準とすると，将来的な需要を満たすことは難しいことがわかった．これを踏まえて，将来分析結果を以下に示す．

中国の都市有機固体廃棄物の発生量の予測結果を図 4 に示す．四角は中国の生活ゴミ発生量の実測値を示し，円形は推定値を表している．これらは非常に高い一致度を有していることが分かる．過去データと比較した結果，相対誤差はすべて 5%以内であり，許容範囲内の誤差といえる．2024 年以降は緩やかに減少すると見込まれる．2030 年には中国のゴミ発生量が 3.17 億トンになり，2050 年には 2.84 億トンになると予測している．

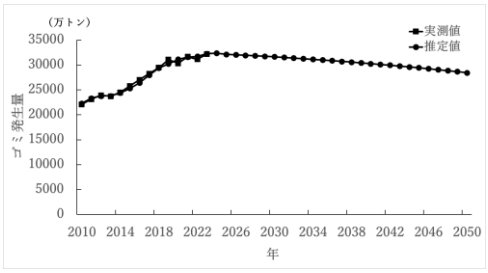


図 4 推定の都市有機固体廃棄物発生量

中国の食用油の消費量の予測結果を図 5 に示す．四角は中国の生活ゴミ発生量の実測値を示し，円形は推定値を表している．これらは非常に高い一致度を有していることが分かる．過去実測値と比較した結果，推定値との相対誤差はすべて 5%以内であり，許容範囲内の誤差といえる．食用油の消費量に政府が公開した廃食用油脂生成率 17.5%をかけると廃食用油脂のポテンシャル量になる．予測によれば，2030 年には中国の廃食用油脂ポテンシャル量は 704 万トン，2050 年には 633 万トンとなる．

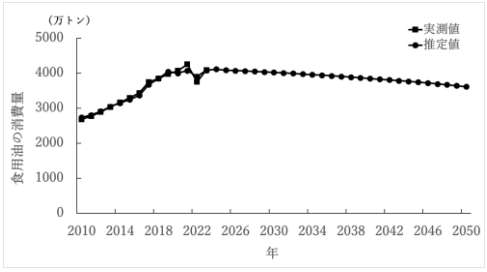


図 5 推定の食用油の消費量

本研究により，システムダイナミックスを利用して将来の廃食用油脂と都市有機固体廃棄物を予測した．しかし，図 4 と図 5 の予測によると都市有機固体廃棄物発生量と生活ゴミ発生量は今後減少傾向にあり，SAF 原料のポテンシャル量も減少する可能性が高い．従って，将来的には他の SAF 原料製造方法の研究が重要となる．

4. 結言

本研究では，中国における SAF の生産能力生産と原料の利用可能量を調査し，システムダイナミックスにより都市有機固体廃棄物発生量と食用油の消費量を推計した．これより将来，中国における SAF 原料のポテンシャル量が減少する可能性が高いことがわかった．今後は，システムダイナミクスモデルを利用し，残りの 2 つの原料である農業廃棄物と林地残材について予測を行い，最終的に HEFA 法を用いて製造される SAF 燃料の生産量を予測し，将来的に原材料が不足した場合，海外から輸入するか技術革新を行うかなどの解決方法を分析することを目指す．

引用文献

1) WMO. Greenhouse gas bulletin: another year another record[EB/OL] .（2021−10−25）[2023−08−27] .
2) An official website of the European Union「Reducing emissions from aviation」
3) IATA「Our Commitment to Fly Net Zero by 2050」
4) National Development and Reform Commission Civil Aviation Administration of China 「National Civil Transport Airport Layout Plan」
5) China Statistical Yearbook (2023) 「National Bureau of Statistics of the People's Republic of China」
6) Wang Ruiyuan 「my country's grain and oil production, sales, import and export in 2022」China Cereals and Oils Association, Vol. 48, No. 6, 2023
7) Tang Rui, Wang Chen, Chen Yameng, et al.2019. System dynamics prediction and control system for urban domestic waste in Xiamen. Journal of Environmental Sciences, 39(6): 2071-2078.
8) China Industrial Development Promotion Association Biomass Energy Industry Branch 「How much forestry residues can be made into green methanol in the country? 」2024-08-12
9) Institute of Energy, Peking University「THE PRESENT AND FUTURE OF SUSTAINABLE AVIATION FUELS IN CHINA」2022. 10
10) Deloitte 「Sustainable Aviation Fuels (SAF) in China Checking for Take-off」July 2023

水害ハザードマップが地価に与える影響

Impact of flood hazard maps on land prices

○有田ことみ*[1)]、鍛治屋智啓[1)]、中石知晃[2)]
Kotomi Arita, Tomohiro Kajiya, Tomoaki Nakaishi
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学研究院
* arita.kotomi.627@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

近年、地球温暖化の進展が自然災害の増加をもたらしており、とりわけ水害の被害は顕著である。日本では時間雨量 50 ㎜を超える短時間強雨の発生回数が約 30 年間で約 1.4 倍増加した。また、平成 29 年 7 月九州北部豪雨では、朝倉市から日田市北部において観測史上最大の雨量を記録した[1)]。今後、短時間豪雨の発生回数および降水量が増加することが予測され、さらなる洪水被害の拡大が危惧される。

洪水は､外水氾濫と内水氾濫の 2 種類に分類される。外水氾濫は、海や河川の水が堤防から溢れる洪水、内水氾濫は、下水道が機能不全に陥りマンホールや排水溝から溢れて起きる洪水である。都市化が進展する近年、内水氾濫の被害の割合は増加しており、一層災害予測の重要性が高まっている。

災害予測には、ハザードマップが多く用いられる。令和 2 年から不動産取引時にハザードマップを用いて所在地について説明することが義務化され、周知されるようになった。しかし、この説明義務は、外水氾濫のハザードマップのみに課され、内水氾濫ハザードマップの作成及び説明義務はない。令和 4 年時点で、外水氾濫のハザードマップ整備率が 86%であるのに対し、内水氾濫は僅か 7%となっており、整備不足が浮き彫りとなっている[2)]。

経済学的な視点からは、水害リスク情報提示が地価の変動に与える影響が注目されている。例えば、既存研究の小出ら（2022）[3)]では、被説明変数である地価の変化率に「公示地価」（国土交通省）を用い、説明変数を「洪水浸水想定区域」（国土交通省）とした回帰分析が行われた。その結果、ハザードマップの情報開示によって、該当地域に立地する住宅地、商業地の地価が引き下げられたことが明らかとなった。また、森ら（2016）[4)]でも似た形式で回帰分析が行われたが、居住者が認知している水害リスクと土地自体が持つリスクには齟齬がある可能性が示唆され、小出ら（2022）[3)]の結果とは異を呈した。

これらの既存研究では、洪水（外水氾濫）、土砂災害リスクの提示による周辺地価への損害が分析されたが、内水氾濫リスクの提示による周辺地価への損害については依然として明らかでない。そこで、内水氾濫ハザードマップが整備された地域の住民に内水氾濫リスクが適切に周知されているのかを明らかにすることで、政府や自治体の防災対策の強化、都市計画の改善、また、住民の防災意識の向上、避難行動の促進をめざすことを本研究の狙いとする。

2. 研究手法

本研究では、ヘドニックアプローチに基づいた重回帰分析を実施する。ヘドニックアプローチとは、公共施設の建設やサービスの供給による負の外部性が、販売価格に反映されることを前提とし、負の外部性の金銭的価値を販売価格の変化額によって推計する手法である[5)]。本研究では、住民が認知する内水氾濫リスクが内水ハザードマップの公表によってどのように変化したのかを地価の変化から読み取る。

実際に使用する回帰モデル式は以下の通りである：

$$P_{ij} = \beta_0 + \beta_1 IFA_{ij} + \beta_2 AIFA_{ij} + \boldsymbol{\gamma X_{ij}} + U_{ij} \quad (1)$$

ここで、iは取引、jは土地を表す。被説明変数であるP_{ij}は、取引された土地の家賃＋共益費で表された住宅価格を表す。IFA_{ij}及び$AIFA_{ij}$は、それぞれ内水氾濫地域と内水氾濫地域に隣接する地域を指し、それぞれ該当地域に立地する住宅を 1 とするダミー変数として加えている。$\boldsymbol{X_{ij}}$は、土地属性が住宅価格に与える影響を制御するための変数ベクトルであり、駅への徒歩所要時間、築年数、階数、床面積が含まれる。U_{ij}は誤差項である。推計するパラメータはβ_0、β_1、β_2、γであり、注目すべきは、内水氾濫地域、隣接地域の該否が住宅価格に及ぼす限界的影響を示すβ_1及びβ_2の値である。

3. データ

本研究では、物件検索サイト「ホームメイト」の物件データを利用する[6)]。ここでは、賃貸物件、テナント・店舗物件の取引について、令和 6 年 11 月 20 日現在の建物名、住所（番地レベル）、床面積、築年数、家賃等の情報が提供されている。

対象地域は、令和 6 年現在福岡県内で内水ハザードマップが地理データとして公表されている博多駅周辺地域（博多区中央街、博多駅前 1~4 丁目、博多駅東 1~3 丁目、博多駅南 1~3 丁目、住吉 1~5 丁目、美野島 1~4 丁目、祇園町、比恵町）である（図 1 参照）。また、今

回は賃貸物件に限定し、57 件の有効サンプルサイズで分析を実施した。内水ハザードマップについては、「内水氾濫想定区域図（国土交通省）」[7]を用いる。

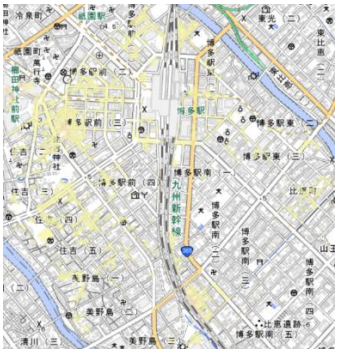


図 1 博多駅周辺：内水浸水想定区域図

内水氾濫リスクは、浸水深別にデータが存在するが、今回の分析対象では、浸水深 0.0~0.5m のエリアのみに物件があるため浸水深 0.0~0.5m のエリアに立地しているかどうかを表すダミー変数を採用している。各物件が内水氾濫地域内もしくは隣接しているかについては、内水浸水想定区域図に物件の住所を照合させて調査し、その後、物件データとマッチングした。使用するすべての変数の記述統計を表 1 に示す。

表 1 記述統計

	平均	S.D.	最小	最大
家賃＋共益費（万円）	7.72	2.28	3.90	12.60
駅への徒歩時間（分）	11.61	3.64	3.00	20.00
築年数（年）	17.77	10.15	2.00	5.00
階数（階）	7.19	3.75	1.00	15.00
面積（m²）	31.01	9.10	20.00	56.21

注）S.D.は標準偏差。

4. 結果と考察

表 3 は、回帰分析による分析結果を示している。まず、内水氾濫地域ダミー（IFA_{ij}）、内水氾濫隣接地域ダミー（$AIFA_{ij}$）に注目する。IFA_{ij}の係数は 0.113 であった。つまり、内水氾濫地域に存在する物件の価格は平均的に 1130 円上昇する。しかし、この結果は有意ではなかった。次に、$AIFA_{ij}$の係数は 0.069 となった。つまり、内水氾濫隣接地域に存在する物件の価格は平均的に 690 円上昇する。しかし、この結果も有意とはならなかった。これらの結果から、内水氾濫ハザードマップが整備された地域の住民に内水氾濫リスクが適切に周知されているとはいえないことが分かる。制御変数については、駅への徒歩時間が 1%水準、築年数、床面積が 0.1%水準で統計的に有意であった。

表 3 推計されたパラメータ

	係数	t 値
切片	4.313***	5.048
内水氾濫地域ダミー	0.113	0.246
内水氾濫隣接ダミー	0.068	0.173
駅への徒歩時間（分）	-0.130**	-3.066
築年数（年）	-0.060***	-4.081
階数（階）	0.064	1.585
面積（m²）	0.177***	10.308

注）*は 5%、**は 1%、***は 0.1%水準で有意であることを示す。

5. 結論と今後の展望

本研究では、住民が認知する内水氾濫リスクが内水ハザードマップの公表によって変化したのかどうかを、住宅情報サイトより入手した物件データをもとに構築した独自のヘドニック価格モデルを用いて評価した。結果として、内水氾濫地域、隣接地域の項目は有意な結果が得られず、内水氾濫ハザードマップが整備された地域の住民に内水氾濫リスクが適切に周知されていないことが分かった。今回の分析では対象、期間ともに限定的であったため、今後の研究では、日本全国を対象とした分析を行っていく予定である。また、差分の差分析をおこない、内水ハザードマップの公開による物件価格への純粋な影響の推定も検討する。

引用文献

1) 国土交通省：“近年の降雨及び内水被害の状況、下水道整備の現状について”，(2019)，pp.1–26
2) 内閣府：“令和 4 年版 防災白書 附属資料 45 ハザードマップの整備状況”防災情報のページ，（オンライン），入手先< https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r04/honbun/3b_6s_45_00.html>，（参照 2024-11-20）
3) 小出桂晴，西崎健司，須藤直日本銀行ワーキングペーパーシリーズ, 22-J-10, (2022), pp.9–15
4) 森英高，西村洋紀，谷口守：公益社団法人日本都市計画学会 都市計画報告集, 14, (2016), pp.278–280
5) Rosen S.: J. Polit. Econ., 82(1), (1974), pp.34–55
6) ホームメイト．“賃貸マンション・アパート物件検索サイト”，東建コーポレーション，（オンライン），入手先< https://www.homemate.co.jp >，（参照 2024-11-20）
7) 国土交通省：“位置参照情報”，国土数値情報ダウンロードサイト，（オンライン），入手先< https://nlftp.mlit.go.jp/>，（参照 2024-1-16）

実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析

～マルチクライテリアでの評価に基づく投入資材の環境負荷削減策の検討～

Study on Environmental Impact Analysis of Buildings Based on Analysis of Actual Buildings -Consideration of Measures to Reduce the Environmental Impact of Input Materials Based on Multi-Criteria Evaluation -

○梶谷凌聖[1)]、三河大志[1)]、矢澤華英[1)]、小林謙介*[1)]、鈴木好幸[2)]、田中洋介[2)]
Ryosei Kajitani, Hiroshi Mikawa, Hanae Yazawa, Kensuke Kobayashi, Yoshiyuki Suzuki, Yousuke Tanaka
1) 県立広島大学, 2) 安藤ハザマ
* kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. 背景・目的

我が国のCO_2排出量の約３分の１は住宅・建築物に関連しており、その負荷削減策を実施することが不可欠である。環境負荷の削減のためには、多様な環境負荷物質を総合的に環境影響評価できる LCA の活用が欠かせない。一方、建築分野は資材投入量が多いため、１物件の算定で多くの時間と労力が必要である。こうしたことから、過去の複数の建物を分析し、その傾向をとらえるとともに、データベースを整備することで、特に設計初期段階での対策の検討が効率的に行えるようになる。

以上を踏まえ、著者らの一連の研究[1,2)ほか]では、実建物の躯体・仕上げ材を対象としたマルチクライテリアでの環境負荷分析を行っている。本報告では、支配的要因の解析結果を基に主要建材のホットスポット分析を行い、環境負荷物質の削減策の検討を行った。

2. 研究概要

本検討では、日本国内における実建物95件を対象とし、物流や生産、事務所、学校など大きく 6 つの用途区分に分けて検討した。対象としたプロセスはA1-5、B3・4、C1-4 である。いずれも詳細は田中らの報告に示した[1)]。評価は IDEA Ver.3.4.1 を用いて実施した。

3. 研究方法と結果

3.1 資材別での分析概要

三河らの報告[2)]では、実建物の用途・段階別に、投入資材ごとのCO_2排出量や統合化の分析を行った。統合化（LIME3）の分析の例を表１に示す。CO_2排出量分析では、全用途共通して寄与率の高い資材は、生コン、鉄骨などであった。統合化では、全用途共通して生コン、鉄骨、石こうボードなどの寄与率が高かった。用途別では、物流・生産施設ではシャッタなど、事務・庁舎、学校、病院ではサッシ類など、ホテル・マンションでは木製窓枠などが高かった。

3.2 段階別での分析

寄与率が 1%以上だった資材について、段階別の環境負荷排出量の内訳分析を行った（図１：事務・庁舎の例）。統合化（LIME3）ではポルトランドセメント、鉄骨、溶融亜鉛メッキ鋼板などはA1～3、サッシ、シリコーンゴムなどはB3・B4、埋立の割合が大きい板ガラスなどはC4 の寄与率が高かった。

表１　統合化結果における寄与率上位３資材

用途	A1-3	B3	B4	C4
物流施設	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小形棒鋼	シャッタ 亜鉛めっき鋼板 その他板ガラス	シャッタ 亜鉛めっき鋼板 石膏ボード	石膏ボード 外装用ライナ， 段ボール原紙 ロックウール
生産施設	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小形棒鋼	シャッタ 金属製サッシ ビル用アルミニウム製サッシ	亜鉛めっき鋼板 石膏ボード 軽量鉄骨	石膏ボード 生コンクリート 外装用ライナ， 段ボール原紙
事務・庁舎	鉄骨 生コンクリート 普通合板	金属製サッシ 住宅用アルミニウム製サッシ シャッタ	石膏ボード プラスチック床材 普通合板	石膏ボード 生コンクリート その他板ガラス
学校	生コンクリート 普通合板 鉄骨	ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ 住宅用アルミニウム製サッシ	石膏ボード ビル用アルミニウム製サッシ 軽量鉄骨	石膏ボード 生コンクリート 普通合板
病院	生コンクリート 普通合板 鉄骨	ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ 石膏ボード	石膏ボード 軽量鉄骨 ビル用アルミニウム製サッシ	石膏ボード 生コンクリート 普通合板
ホテル・マンション	生コンクリート 鉄骨 普通鋼小形棒鋼	木製窓枠 乾燥桁材 金属製サッシ	石膏ボード 軽量鉄骨 プラスチックシート	石膏ボード 普通合板 木製窓枠

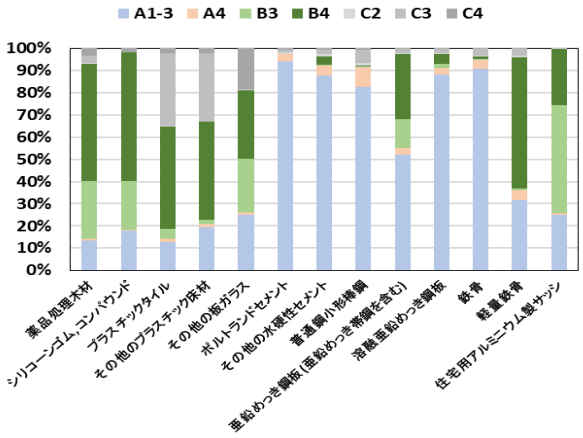


図１　統合化の資材別・段階別内訳

3.3 ホットスポット分析

建築物のライフサイクルにおいて支配的となる資材の解析結果に基づき、主要 22 建材の環境影響ごとにホットスポット分析を行った（一例として SI 図１に石こうボードの結果を示す）。さらに、影響が大きい環境負荷物質・環境影響に焦点をあて、資材製造の製造工程別の詳細な分析を行った。一例として図２にシャッタの結果を示す。シャッタで支配的となったのは、アルミニウム押出し品の製造工程だった。アルミニウム押出し品に注目して更に上流工程を分析した結果、アルミニウム一次地金の製造工程の影響が大きいことが確認できた。アルミニウム一次地金の輸入品投入量は 28%とオーストラリアが最も多く、そこでは電解製錬によって純粋なアルミニウムに精練されていた。この電解製錬の工程で大量の電力を必要とするが、その多くが化石燃料による発電だったためと考えられる。その他削減策として、リサイクルの促進、部品の長寿命化等が考えられる。

3.4 削減対策の例

これらの分析結果に基づき、資材別・段階別の削減対策について検討した。あくまで一例であるが、表 1 に示す内容などが対策として考えられる。材料メーカーの製造時のエネルギー利用の工夫、設計時の建物の長寿命化、施工、修繕・更新時の端材の削減などが求められる。また、全材料共通して解体・廃棄時のいっそうの分別回収およびリサイクルなどが重要である。

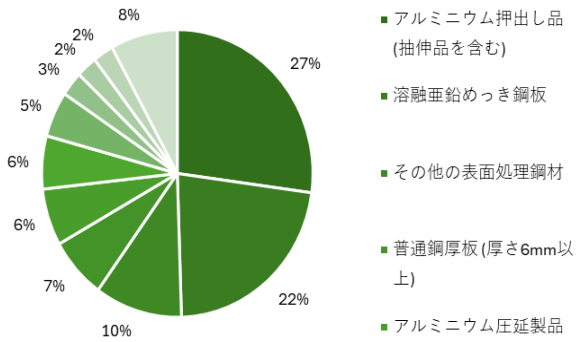


図２　シャッタ　統合化（LIME3）上位５項目

４．まとめ

95 件の実建物の躯体・仕上げ材を対象とした支配的要因の解析結果を基に、主要建材のホットスポット分析を行い、環境負荷物質の削減策の検討を行った。はじめに事務・庁舎を例に寄与率 1%以上の資材の段階別内訳を分析した。次に主要資材の製造工程別の主な環境負荷の発生原因の検討を行った。これらの結果から、主要資材を対象に、資材別・段階別に削減策を検討した。

５．参考文献

1）田中ら：実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析、LCA 学会研究発表会、2025.3
2）三河ら：実建物分析に基づく建築物の環境負荷分析、LCA 学会研究発表会、2025.3

表２　材料種別環境負荷削減策の例

材料の種類	材料メーカ	設計	施工	修繕・更新	解体・廃棄
セメント・コンクリート	・セメントクリンカ製造時の燃料代替（一般炭からの変更）	・建物の長寿命化 ・可能な箇所のB種・高炉セメント等への変更 ・設計情報の保存（解体時に投入状況がわかるように伝達）	・残コンの削減（歩留まりの向上） ・アジテータ車の効率的な利用		・いっそうの分別回収およびリサイクル（特に埋立回避）
鉄鋼製品	・可能な範囲で自家発燃料の代替・再生可能エネルギー利用 ・製品によっては不純物（鉄以外の製品）の分解容易性の工夫	・建物の長寿命化 ・可能な場合、電炉による鋼材の利用？ ・設計情報の保存（解体時に投入状況がわかるように伝達）	・施工時の端材の削減（歩留まりの向上） ・調達方法の工夫（輸送負荷の削減）		・いっそうの分別回収およびリサイクル（特に埋立回避）
石こうボード	・可能な範囲で、低負荷な石こう原料の選択（排脱石こうなど） ・廃石こうボードのいっそうの活用	・部材の長寿命化 ・設計情報の保存（解体時に投入状況がわかるように伝達） ・乾式工法などによる解体時の分別回収容易性	・施工時の端材の削減（歩留まりの向上）	・修繕・更新の端材の削減（歩留まりの向上） ・道連れ解体の回避	・いっそうの分別回収およびリサイクル（特に埋立回避） →乾式工法の選択
アルミ系建材	・可能な範囲で二次地金の活用 ・低CO2、脱硫等の環境対策が実施されている施設の選択 ・不純物（ビスなど）の分解容易性の工夫	・部材の長寿命化 ・設計情報の保存（解体時に投入状況がわかるように伝達）		・修繕・更新時の道連れ解体の回避	・いっそうの分別回収およびリサイクル（特に埋立回避）
木材（型枠）	・適切な管理が行われた木材の利用（林業事業者は適切な再造林） ・乾燥工程における天然乾燥・人工乾燥の場合は再生可能エネルギーの利用	・より環境負荷の小さい製品の選択（材料の種類の変更）	・施工時の端材の削減（歩留まりの向上）		・いっそうの分別回収およびリサイクル（特に埋立回避）
木材（一般建材）	・適切な管理が行われた木材の利用（林業事業者は適切な再造林） ・乾燥工程における天然乾燥・人工乾燥の場合は再生可能エネルギーの利用 ・製品製造時の歩留まりの向上	・部材の長寿命化 ・設計情報の保存（解体時に投入状況がわかるように伝達） ・より環境負荷の小さい製品の選択	・施工時の端材の削減（歩留まりの向上）	・修繕・更新の端材の削減（歩留まりの向上） ・道連れ解体の回避	・いっそうの分別回収およびリサイクル（特に埋立回避）
プラスチック系素材	・製品製造時の歩留まりの向上	・部材の長寿命化 ・設計情報の保存（解体時に投入状況がわかるように伝達） ・より環境負荷の小さい製品の選択	・施工時の端材の削減（歩留まりの向上）	・修繕・更新の端材の削減（歩留まりの向上） ・道連れ解体の回避	・いっそうの分別回収およびリサイクル（特に埋立・単純焼却の回避）

Supporting Information

評価条件

A1-3　建築物の積算データ

A4　建設副産物実態調査

A5　他建物の実績値

B3・B4　BELCA の建築物のライフサイクルマネジメント

用データ集を用いて修繕量、更新回数を算出

C1-4　建設副産物実態調査

	CO2排出量	気候変動	LIME3	LIME3	LIME3	LIME3	LIME3	LIME2	LIME2	LIME2	LIME2	LIME2
	kg-CO2	kg-CO2eq	人間健康	社会資産	生物多様性	一次生産	統合化	人間健康	社会資産	生物多様性	一次生産	統合化
石こうボード、同製品	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
石こう, りん酸副生	70%	70%	79%	70%	68%	19%	72%	84%	78%	81%	38%	80%
生石灰	15%	16%	10%	15%	15%	1%	12%	6%	5%	0%	5%	3%
りん鉱石, 輸入品	9%	9%	37%	9%	9%	0%	23%	44%	10%	0%	1%	16%

SI 図１　石こうボードのホットスポット分析

SI 表 1　CO_2排出量分析での寄与率上位 10 資材

用途	A1-3	B3	B4	C4
物流施設	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小形棒鋼 溶融亜鉛めっき鋼板 ポルトランドセメント その他の水硬性セメント コンクリート成形パネル 亜鉛めっき鋼板（亜鉛めっき帯鋼を含む） シャッタ 遠心力鉄筋コンクリートくい（パイル）	シャッタ 亜鉛めっき鋼板 その他板ガラス アスファルト混合物 ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ・ドア 塩化ビニリデン樹脂 コンクリート成形パネル 石こうボード、同製品 溶融亜鉛めっき鋼板	シャッタ 亜鉛めっき鋼板 石膏ボード 軽量鉄骨 溶剤系合成樹脂塗料 軽油の燃焼エネルギー 金属製サッシ・ドア プラスチックタイル アスファルト混合物 ポリウレタン，軟質	普通合板 生コンクリート 木製フローリング コンクリート成形パネル 再生骨材，路盤材用 その他の水硬性セメント 遠心力鉄筋コンクリートくい（パイル） ポルトランドセメント 溶融亜鉛めっき鋼板 ALC パネル
生産施設	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小形棒鋼 ポルトランドセメント その他の水硬性セメント 溶融亜鉛めっき鋼板 ALC パネル 亜鉛めっき鋼板（亜鉛めっき帯鋼を含む） プラスチック棒 石こうボード、同製品	シャッタ 金属製サッシ ビル用アルミニウム製サッシ 亜鉛めっき鋼板（亜鉛めっき帯鋼を含む） アルミニウム板材，建材用 シリコーンゴム，コンパウンド ステンレス鋼 塩化ビニリデン樹脂 石こうボード、同製品 その他の板ガラス	亜鉛めっき鋼板 石膏ボード 軽量鉄骨 ステンレス鋼 シリコーンゴム，コンパウンド 溶剤系合成樹脂塗料 アルミニウム板材，建材用 シャッタ 金属製サッシ・ドア プラスチックタイル	生コンクリート 外装用ライナ，段ボール原紙 薬品処理木材 再生骨材，路盤材用 その他の水硬性セメント 石こうボード、同製品 遠心力鉄筋コンクリートくい（パイル） ポルトランドセメント コンクリート成形パネル アスファルト
事務・庁舎	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小形棒鋼 ポルトランドセメント その他の水硬性セメント 石こうボード、同製品 その他のプラスチック床材 軽量鉄骨 溶融亜鉛めっき鋼板 亜鉛めっき鋼板（亜鉛めっき帯鋼を含む）	金属製サッシ 住宅用アルミニウム製サッシ その他板ガラス シャッタ シリコーンゴム，コンパウンド アルミニウム圧延製品 石こうボード、同製品 亜鉛めっき鋼板（亜鉛めっき帯鋼を含む） プラスチックタイル その他のプラスチック床材	プラスチック床材 石膏ボード 軽量鉄骨 プラスチックタイル シリコーンゴム，コンパウンド その他の板ガラス 溶剤系合成樹脂塗料 金属製サッシ・ドア ポリウレタン，軟質 アルミニウム圧延製品	普通合板 薬品処理木材 生コンクリート パーティクルボード 木質フローリング 住宅建築用木製組立材料 集成材 遠心力鉄筋コンクリートくい（パイル） その他の水硬性セメント 再生骨材，路盤材用
学校	生コンクリート 鉄骨 普通鋼小形棒鋼 ビル用アルミニウム製サッシ 石こうボード、同製品 軽量鉄骨	ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ シャッタ 住宅用アルミニウム製サッシ 石こうボード、同製品	石膏ボード 軽量鉄骨 ビル用アルミニウム製サッシ ポリウレタン，軟質 金属製サッシ・ドア 溶剤系合成樹脂塗料	普通合板 木製フローリング 生コンクリート 木製窓枠 集成材 床板 住宅建築用木製組立材料

	その他の水硬性セメント 普通合板 溶融亜鉛めっき鋼板 金属製サッシ・ドア	ポリウレタン，軟質 シリコーンゴム，コンパウンド 亜鉛めっき鋼板（亜鉛めっき帯鋼を含む） アルミニウム板材，建材用 普通鋼形鋼（鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む）	プラスチックタイル シリコーンゴム，コンパウンド その他の板ガラス 塩化ビニリデン樹脂	特殊合板（集成材を除く） パーティクルボード 中質繊維板（MDF）
病院	生コンクリート 鉄骨 普通鋼小形棒鋼 石こうボード、同製品 ポルトランドセメント その他の水硬性セメント ビル用アルミニウム製サッシ 軽量鉄骨 金属製サッシ・ドア アスファルト混合物	ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ 板ガラス 石こうボード、同製品 シャッタ シリコーンゴム，コンパウンド 塩化ビニリデン樹脂 亜鉛めっき鋼板（亜鉛めっき帯鋼を含む） 気泡コンクリート製品 ポリウレタン，軟質	石膏ボード 軽量鉄骨 プラスチックシート 金属製サッシ・ドア ビル用アルミニウム製サッシ プラスチックタイル ポリウレタン，軟質 シリコーンゴム，コンパウンド 気泡コンクリート製品 その他のプラスチック床材	普通合板 生コンクリート 集成材 再生骨材，路盤材用 その他の水硬性セメント ポルトランドセメント 遠心力鉄筋コンクリートくい（パイル） 気泡コンクリート製品 アスファルト ロックウール、同製品
ホテル・ マンション	生コンクリート 鉄骨 普通鋼小形棒鋼 石こうボード、同製品 軽量鉄骨 溶融亜鉛めっき鋼板 その他の水硬性セメント 遠心力鉄筋コンクリートくい（パイル） ポルトランドセメント その他の板ガラス	金属製サッシ 石膏ボード その他板ガラス ビル用アルミニウム製サッシ 住宅用アルミニウム製サッシ アルミニウム板材，建材用 木製窓枠 塩化ビニリデン樹脂 プラスチックシート，厚さ0.2mm以上で軟質のもの アルミニウム押出品，小型	石膏ボード 軽量鉄骨 プラスチックシート アルミニウム板材，建材用 プラスチックタイル 塩化ビニリデン樹脂 その他の板ガラス 溶剤系合成樹脂塗料 木製窓枠 塩化ビニル樹脂	普通合板 木製窓枠 薬品処理木材 乾燥桁材 木質フローリング 石こうボード、同製品 中質繊維板（MDF） 一般製材，4桁 生コンクリート 陶石

SI 表２　統合化での寄与率上位 10 資材

用途	A1-3	B3	B4	C4
物流施設	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小形棒鋼 溶融亜鉛めっき鋼板 ポルトランドセメント その他の水硬性セメント コンクリート成形パネル 普通合板 亜鉛めっき鋼板（亜鉛めっき帯鋼を含む） シャッタ	シャッタ 亜鉛めっき鋼板 その他板ガラス アスファルト混合物 ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ・ドア 普通合板 コンクリート成形パネル 塩化ビニリデン樹脂 石こうボード、同製品	シャッタ 亜鉛めっき鋼板 石膏ボード 普通合板 溶剤系合成樹脂塗料 軽量鉄骨 金属製サッシ・ドア 軽油の燃焼エネルギー プラスチックタイル アスファルト混合物	石膏ボード 外装用ライナ，段ボール原紙 ロックウール 生コンクリート その他の板ガラス 生石灰 普通合板 塩化ビニリデン樹脂 溶剤系合成樹脂塗料 鉄骨
生産施設	鉄骨 生コンクリート 普通鋼小形棒鋼 普通合板 ポルトランドセメント その他の水硬性セメント 溶融亜鉛めっき鋼板 亜鉛めっき鋼板（亜鉛めっき帯鋼を含む） ALC パネル 石こうボード、同製品	シャッタ 金属製サッシ ビル用アルミニウム製サッシ 亜鉛めっき鋼板（亜鉛めっき帯鋼を含む） アルミニウム板材，建材用シリコーンゴム，コンパウンド 石こうボード、同製品 ステンレス鋼 塩化ビニリデン樹脂 住宅用アルミニウム製サッシ	亜鉛めっき鋼板 石膏ボード 軽量鉄骨 ステンレス鋼 アルミニウム板材，建材用シリコーンゴム，コンパウンド シャッタ 溶剤系合成樹脂塗料 金属製サッシ・ドア ビル用アルミニウム製サッシ	石膏ボード 生コンクリート 外装用ライナ，段ボール原紙 ロックウール、同製品 普通合板 けい酸カルシウム保温材 その他の板ガラス 溶剤系合成樹脂塗料 塩化ビニリデン樹脂 生石灰
事務・庁舎	鉄骨 生コンクリート 普通合板 普通鋼小形棒鋼 ポルトランドセメント 石こうボード、同製品 その他の水硬性セメント その他のプラスチック床材 軽量鉄骨 溶融亜鉛めっき鋼板	金属製サッシ 住宅用アルミニウム製サッシ シャッタ その他の板ガラス シリコーンゴム，コンパウンド 薬品処理木材 アルミニウム圧延製品 石こうボード、同製品 木製窓枠 亜鉛めっき鋼板（亜鉛めっき帯鋼を含む）	石膏ボード プラスチック床材 普通合板 軽量鉄骨 プラスチックタイル シリコーンゴム，コンパウンド 薬品処理木材 その他の板ガラス 溶剤系合成樹脂塗料 金属製サッシ・ドア	石膏ボード 生コンクリート その他板ガラス ロックウール、同製品 普通合板 けい酸カルシウム保温材 その他のプラスチック床材 プラスチックタイル 溶剤系合成樹脂塗料 塩化ビニル樹脂
学校	生コンクリート 普通合板 鉄骨 普通鋼小形棒鋼 ビル用アルミニウム製サッシ 石こうボード、同製品	ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ 住宅用アルミニウム製サッシ シャッタ 石こうボード、同製品	石膏ボード ビル用アルミニウム製サッシ 軽量鉄骨 普通合板 ポリウレタン，軟質 一般製材，４桁	石膏ボード 生コンクリート 普通合板 ロックウール、同製品 その他の板ガラス 陶磁器製タイル，４桁 溶剤系合成樹脂塗料

	軽量鉄骨 その他の水硬性セメント 金属製サッシ・ドア 溶融亜鉛めっき鋼板	ポリウレタン，軟質 木製窓枠 シリコーンゴム，コンパウンド 一般製材，4桁 アルミニウム板材，建材用	木質フローリング 金属製サッシ・ドア 溶剤系合成樹脂塗料 プラスチックタイル	塩化ビニリデン樹脂 一般製材，4桁 建築用合成樹脂エマルション水系塗料,
病院	生コンクリート 普通合板 鉄骨 普通鋼小形棒鋼 石こうボード、同製品 ポルトランドセメント ビル用アルミニウム製サッシ その他の水硬性セメント 軽量鉄骨 金属製サッシ・ドア	ビル用アルミニウム製サッシ 金属製サッシ 石膏ボード その他の板ガラス 普通合板 シャッタ 木製窓枠 シリコーンゴム，コンパウンド 塩化ビニリデン樹脂 亜鉛めっき鋼板（亜鉛めっき帯鋼を含む）	石膏ボード 軽量鉄骨 ビル用アルミニウム製サッシ プラスチックシート，厚さ0.2㎜以上で軟質のもの 金属製サッシ・ドア 普通合板 乾燥桁材 プラスチックタイル シリコーンゴム，コンパウンド ポリウレタン，軟質	石膏ボード 生コンクリート 普通合板 ロックウール、同製品 その他の板ガラス 陶磁器製タイル，4桁 プラスチックシート，厚さ0.2㎜以上で軟質のもの けい酸カルシウム保温材 塩化ビニリデン樹脂 溶剤系合成樹脂塗料
ホテル・ マンション	生コンクリート 鉄骨 普通鋼小形棒鋼 普通合板 石こうボード、同製品 軽量鉄骨 溶融亜鉛めっき鋼板 薬品処理木材 その他の水硬性セメント 遠心力鉄筋コンクリートくい（パイル）	木製窓枠 乾燥桁材 金属製サッシ 石こうボード、同製品 その他の板ガラス ビル用アルミニウム製サッシ 住宅用アルミニウム製サッシ アルミニウム板材，建材用 薬品処理木材 塩化ビニリデン樹脂	石膏ボード 軽量鉄骨 プラスチックシート 薬品処理木材 木製窓枠 アルミニウム板材，建材用 普通合板 プラスチックタイル 乾燥桁材 木質フローリング	石膏ボード 普通合板 木製窓枠 薬品処理木材 遠心力鉄筋コンクリートくい（パイル） 乾燥桁材 木質フローリング コンクリート成形パネル その他の板ガラス ロックウール、同製品

自然との繋がりが個人の環境保護行動に与える影響

The Role of Connection with Nature in Pro-Environmental Behaviors

○川久保凜太郎*[1)]、中石知晃[2)]
Rintaro Kawakubo, Tomoaki Nakaishi
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学研究院
* kawakubo.rintaro.138@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、地球温暖化や森林破壊、生物多様性の喪失といった様々な環境問題が地球規模で深刻化している。実際に、2011～2020 年の世界平均気温は 1850～1900 年よりも 1.09℃高くなっており、また、1960 年から 2019 年の過去 60 年間で世界の森林面積は 8,173 万 ha（約 2%）減少した[1,2]。これらの問題を緩和するには、企業や政府による取り組みに加え、リサイクルの推進やエネルギー消費の削減といった個人レベルでの環境保護行動の促進が不可欠である。

個人の環境保護行動を決定する要因として、環境意識、社会規範、経済的インセンティブや心理的要因など様々なものが挙げられる。例えば、Lades et al.（2021）の研究では、個人の持つ利他性が、Casalo et al.（2019）の研究では、個人の主観的な環境知識が環境保護行動を促進することが明らかにされている[3,4]。

本研究では、従来の要因に加え、自然との繋がりと個人の環境保護行動の間の関係性に着目する。具体的に、既存研究を参考に作成した独自のアンケート調査データに基づく重回帰モデルを構築し、自然との繋がりが個人の環境保護行動に与える影響及びそのメカニズムについて統計的に検証する。

2. 既存研究

一部の既存研究では、自然への訪問頻度や自然との距離などの自然との繋がりは環境保護行動と正の相関があることが明らかにされている。例えば、Alcock et al.（2020）[5]の英国の 2 万人以上の消費者データに基づく研究では、自然との距離及び自然への訪問頻度が地元食材の購入などの環境配慮行動の決定要因であることが明らかにされている。また、Martin et al.（2020）[6]の同じ英国の 5000 人弱の消費者を対象とした研究でも同様に、自然との接触、自然とのつながりが自然保護のボランティア活動などの環境保護行動を促進することが明らかにされている。

3. データと分析手法

3.1 アンケート調査

九州大学経済学部の 2、3、4 年生を対象に行われる「経済・経営学基本演習」と「経済・経営学演習」の講義の受講生を対象に、グーグルフォームを利用した環境保護行動と自然との繋がりに関するアンケート調査を実施した。実施日は 2024 年 11 月 23 日及び 12 月 12 日であり、得られた有効回答数は 43、サンプルの男女比は 31:12 であった。表 1 は、個人の自然との繋がりの数値化において利用した主要なアンケート項目である。全てのアンケート項目については表 S1 を参照。

表 1 アンケート項目（一部抜粋）

項目	質問（5 段階リッカート尺）
愛着度 1	あなたは自然に対して親しみを感じていますか。
愛着度 2	あなたは最寄りの自然に対して親しみを感じていますか。
自然の質への満足	あなたは最寄りの自然に対してどの程度満足していますか。
自然訪問	過去 12 か月に、平均してどのくらいの頻度で自宅以外の屋外（公園、森林、海岸など）で余暇を過ごしましたか。数分から 1 日中まで何でも構いません。また、近所でも遠方でも構いません。
経験量	生まれてから 12 歳になるまでに、自然環境とのふれあい（休息・リフレッシュ・森林浴など）をどの程度行いましたか。近所でも遠方でも構いません。

3.2 実証モデル

自然との繋がりが個人の環境保護行動に与える影響を明らかにするため、本研究では、以下の 2 つの回帰モデルを構築した：

$$PEB_i^{pub} = \beta_0 + \boldsymbol{\beta_1 Green_i} + \boldsymbol{\beta_2 X_i} + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$PEB_i^{pri} = \beta_0 + \boldsymbol{\beta_1 Green_i} + \boldsymbol{\beta_2 X_i} + \varepsilon_i \quad (2)$$

ここで、PEB_i^{pub}とPEB_i^{pri}は、個人iの環境保護行動の取り組みを示す変数、$\boldsymbol{Green_i}$は、個人iの自然との繋がりを示す変数ベクトル、$\boldsymbol{X_i}$は、個人iのその他の制御変数ベクトル、β_0は定数項、ε_iは誤差項であり、注目するのは$\boldsymbol{\beta_1}$の推計パラメータである。

目的変数であるPEB_i^{pub}とPEB_i^{pri}は、5 段階リッカ

ート尺で回答された 6 種類ずつの環境保護行動の算術平均としてそれぞれ定義される。具体的に、PEB_i^{pub}は、近隣地域の美化活動への参加や環境問題に取り組む組織や団体への支援といった公的な環境保護行動への取り組みの程度を表す変数であり、PEB_i^{pri}は、公共交通機関の利用や節電、節水といった私的な環境保護行動への取り組みの程度を表す変数である。12 種類の環境保護行動の分類は、既存研究[5]に従って行った。

説明変数である$\boldsymbol{Green_i}$は、先述したアンケート調査で得られた個人の自然との繋がりを示す 5 種類の変数の値をそれぞれ採用した。その他の制御変数としては既存研究[5,6]に従い、年齢や所得、就労状況などの自然との繋がりと環境保護行動の双方に影響を与えるとされる項目を採用した。詳細については SI を参照。

4. 結果と考察

表 2 に、被説明変数として公的環境保護行動を用いた際の推計結果を示す。表 2 より、自然訪問が 1 段階増加すると個人の公的環境保護行動は 0.624 ポイント増加するという結果が得られ、これは 1%水準で有意であった。また、有意ではないが、愛着度 1、愛着度 2、自然の質への満足度の増加は公的環境保護行動を減少させるといった結果が得られた。

表 2 自然との繋がりと公的環境保護行動の関係

説明変数	係数（p 値）
愛着度 1	-0.046（0.822）
愛着度 2	-0.176（0.220）
自然の質への満足	-0.070（0.670）
自然訪問	0.624***（0.001）
経験量	-0.043（0.783）
制御変数	省略

注）***は 1%水準で有意であることを示す。

表 3 に被説明変数として私的環境保護行動を用いた際の推計結果を示す。表 3 でも同様に、有意ではないが自然訪問の増加は私的環境保護行動を増加させ、愛着度 1、愛着度 2、自然の質への満足度の増加は私的環境保護行動を減少させるという結果が得られた。

表 3 自然との繋がりと私的環境保護行動の関係

変数	係数（p 値）
愛着度 1	-0.072（0.724）
愛着度 2	-0.036（0.797）
自然の質への満足	-0.050（0.761）
自然訪問	0.058（0.734）
経験量	0.139（0.375）
制御変数	省略

これらの結果から、公的・私的環境保護行動共に自然訪問によって促進される一方で、自然への愛着や満足度は行動を抑制する傾向が示された。これにより、愛着や満足度が現状維持への安心感を生み出し、積極的な行動を阻害する可能性が考えられる。また、幼少期の自然経験量は公的環境保護行動を減少させる一方で私的環境保護行動を増加させ、経験が内向的な行動を促進しやすいと考えられる。環境保護行動を促進するには、自然訪問を奨励するとともに、愛着や満足度が行動に与える影響を緩和する施策が必要である。

5. 結論と今後の展望

本研究では、自然との繋がりが個人の環境保護行動に与える影響を明らかにするため、九州大学の学生を対象にアンケート調査を実施し、分析を行った。その結果、自然訪問が公的・私的環境保護行動共に促進する一方で、自然への愛着や満足度は公的・私的環境保護行動共に抑制することが示された。愛着や満足度が現状維持への安心感を生むことで、積極的な行動を妨げる可能性があると考えられる。また、幼少期の自然経験は内向的な行動を促進しやすいことも示された。

今後の展望として、より多様な社会的属性を持つ被験者を中心にサンプルサイズを拡大する必要がある。また、地理情報システム（GIS）ソフトウェアを利用した居住地域における緑被率を算出することで、個人の自然との繋がりを客観的に評価することもできる。

引用文献

1) 文部科学省及び気象庁:“IPCC 第 6 次評価報告書第 1 作業部会報告書 政策決定者向け要約 暫定訳”,（2021）, pp.1-33
2) Estoque R.C.:“過去 60 年で世界の森林面積は日本列島 2 つ分消失 - 熱帯産林産物への依存の低減と低所得国の能力強化が重要 - ”，森林総合研究所,（オンライン），入手先 <https://www.ffpri.affrc.go.jp/press/2023/20230221-02/index.html>,（参照 2025-01-08）
3) Lades K., Laffan K., Weber T.: Ecol. Econ., 183, (2021), pp.106977
4) Casalo L., Escario J., Rodriguez-Sanchez C.: Resour. Conserv. Recycl., 149, (2019), pp.56-64
5) Alcock I., White M., Pahl S., Duarte-Davidson R., Fleming L.: Environ. Int., 136, (2020), pp.105441
6) Martin L., White M., Hunt A., Richardson M., Pahl S., Burt J.: J. Environ. Psychol., 68, (2020), pp.101389

Supporting Information

表 S1 アンケート調査項目の詳細

性別	あなたの性別を教えてください。
年齢	あなたは何歳ですか。
結婚	あなたは結婚していますか、または恋人・パートナーがいますか。
人生の満足度	あなたは自分の人生全体にどの程度満足していますか。
カントリルラダー	階段を想像して下さい。それぞれの段には、一番下が 0、一番上が 10 までの番号が振られています。階段の一番上は、あなたにとって考えられる最高の人生を表し、一番下は考えられる最悪の人生を表しています。今現在、あなたは自分がその階段のどの段に立っていると思いますか。
幸福度	あなたは普段どの程度幸福を感じていますか。
健康状態	あなたは自分自身を健康だと感じていますか。
世帯人員	あなたの世帯人員を教えてください。
就労状況	あなたは現在仕事やアルバイトに就いていますか。
所得	あなたの年間総収入（バイト代、仕送りを含む）はどのくらいになりますか。(万円)
可処分所得	あなたが平均して月単位で自由に使えるお金の額を教えてください。(万円)
環境意識（主観）	次の環境問題について、あなたはそれぞれどの程度問題意識を持っていますか。
環境知識（主観）	次の環境問題について、あなたはそれぞれどの程度知識がありますか。
時間的余裕	あなたは日々の生活の中で時間的余裕をどの程度感じますか。
金銭的余裕	あなたは日々の生活の中で金銭的余裕をどの程度感じますか。
忍耐	あなたは将来より多くの利益を得るために、今の自分にとって有益な何かをあきらめることにどの程度前向きですか。
利他性	あなたが 1000 円出すと 9 万 9000 円が補助され 計 10 万円が、見知らぬ貧しい人、もしくは親しい貧しい人に渡されるとします。あなたは、以下の１～３のうちどの選択肢を選びますか。
教育水準	あなたの学年を選んでください。(在学を含む)
緑被率	あなたの郵便番号を教えてください。※居住地から自然への距離の測定に使用します
愛着度 1	あなたは自然に対して親しみを感じてますか。
愛着度 2	あなたは最寄りの自然に対して親しみを感じてますか。
自然の質への満足	あなたは最寄りの自然の質についてどの程度満足していますか。
自然訪問	過去 12 か月間に、平均してどのくらいの頻度で自宅以外の屋外（公園、森林、海岸など）で余暇を過ごしましたか。数分から 1 日中まで何でも構いません。また、近所でも遠方でも構いません。
経験量	生まれてから 12 歳になるまでに、自然環境とのふれあい（休息・リフレッシュ・森林浴など）をどの程度行いましたか。近所でも遠方でも構いません。
環境保護意識	あなたは次の環境保護活動についてどの程度重要だと考えていますか。
環境保護行動	あなたは次の環境保護活動についてどの程度取り組んでいますか。

清掃サービスにおける環境負荷の算定

Calculating the environmental impact of cleaning services

〇*渡部 篤[1)]、小林 静夫[1)]
Atsushi Watanabe, Shizuo Kobayashi
1) 二幸産業株式会社
＊ a-watanabe@nikoh-sng.co.jp

1. 背景

経済活動に因る環境への影響について国際社会では数十年前から問題として取り上げており、最近はパリ協定やSDGsの採択にて解決すべき課題と目標が設定され、国内では東京証券取引所がコーポレートガバナンスコードにて企業が環境問題を含む「サステナビリティ課題」にどのように取り組むべきかについて言及している。

弊社の業務である清掃サービスは、生活環境を清潔に保ち、健康で快適な生活を送るために欠かせず、その対象範囲はオフィス、商業施設や病院、工場等、幅広く、日常的に見られることであるが、LCAとしての先行研究はほとんどないのが実態である。

清掃サービスは清潔で衛生的な環境を作り出すが、その過程で大量の水を消費し、化学物質を含む洗剤の使用があり、環境負荷を生じさせている。一方で、清掃サービスで消費する水や電力は建物の所有者が負担することが一般的なことから、清掃業者が自分たちの作業にて自然資源を消費しているという意識は残念ながら希薄になる傾向がある。

本研究においては、清掃サービスの環境負荷を定量化し自らの経済活動の環境負荷を認識するとともに、削減ポテンシャルを提案できるようにすることを目的とした。

2. 調査対象範囲

2.1 清掃業の概要と評価対象

清掃業者が提供するサービスは、部屋や廊下、トイレ等を毎日のように清掃する「日常清掃」と日常清掃では対応できない床へのワックス塗布や窓ガラス清掃を行う「定期清掃」の２つに分けられ、本研究では、日常清掃を評価対象とした。

日常清掃は、掃除機やほうき等による除塵と、布巾やモップによる拭き上げが主な作業である。

今回は日常清掃にて清掃業者が標準的に実施している作業による①消費する水の量②使用する洗剤の量③消費電力量④ゴミ袋等消耗品の量を計測し、GHG排出量として算定した。なお、モップ等の清掃用具の耐用期間は長いため、寄与度が少ないと判断し範囲外とした。

2.2 データの収集

建物の用途によって評価対象に差が出る可能性を考慮し、大学施設及び大型商業施設にて、清掃サービスで消費する水量、洗剤量、消費電力量及びゴミ袋等の消耗品使用量の情報を収集した。

建物概要・収集したデータはSIに示す。

なお、清掃手順や使用する道具は指定し、責任者が継続的に指導しているため、消費の個人差は考慮していない。

3. 計測方法と計算方法

3.1 計測方法

3.1.1 水の消費量

①水栓の場合　水栓を一定の流量で開け、計量カップを使って一定時間で吐出される水量を測定し、１秒あたりの水栓の吐出量Q（水量）を求め、各作業者の水栓の使用時間ｔを測定した。１秒あたりの吐出量と使用秒数を乗じて、水の消費量を求めた。

②便器の場合　洗浄水量は計量できないため、便器メーカーの公表値を使用した。

③センサー付きの場合（洗面所）感知あたりの吐出量を計量カップで計った。

3.1.2　洗剤の使用量

作業手順にて洗剤が入ったポンプのプッシュ数は１回と決められており、１プッシュ当たりの吐出量は1mlであった。

3.1.3　電力の消費量

充電式のコードレス掃除機を使用していたため、掃除機を利用した時間ではなく、バッテリーを充電する時間を計測対象とし、ワットモニターにて充電器の消費電力を計測した。

3.1.4　消耗品の消費量

１年間の消耗品の発注量を消費した量とみなし、納品業者の請求書から数量を確認した。

3.2 計算方法

作業手順をもとに、仕上げ材を大別した床の面積と、大便器・小便器・洗面台・給湯シンクの数を単位として計算を行った。

3.2.1　硬質床

硬質床の作業手順は、①コードレス掃除機で除塵する②フラットモップで水拭きをする、となっており、①はコードレス掃除機の消費電力量②は水の消費量を計測した。

①消費電力量(kWh)÷清掃対象の面積(m2)

②　消費水量(ml)÷清掃対象の床面積(m2)

3.2.2 カーペット床

カーペット床の作業手順は、コードレス掃除機で除塵するのみとなり、コードレス掃除機の消費電力量を計測した。

消費電力量(kWh)÷清掃対象の床面積(m2)

3.2.3　大便器

大便器の作業手順は、①便器内に洗剤を噴霧する②ブラシで擦る③洗浄ボタンを押し、洗剤と汚れを水で流す④便座裏を専用布巾で拭き上げる⑤④とは別の布巾で便座、蓋及び便器まわりを拭き上げる、となっており、①使用した洗剤の量および③水の消費量を計測した。

①1プッシュあたり噴霧量(ml)×プッシュ回数

③　メーカーの公表値(ml)×使用回数

3.2.4 小便器

小便器の作業手順は、①便器内に洗剤を噴霧する②ブラシで擦る③洗浄ボタンを押し、洗剤と汚れを水で流す④便器を専用布巾で拭き上げる、となっており、①使用した洗剤の量、③水の消費量を計測した。

①1 プッシュあたり噴霧量(ml)×プッシュ回数

④　メーカーの公表値(ml)×使用回数

3.2.5 洗面台及び給湯シンク

洗面台の作業手順は、①ボウル内に洗剤を噴霧する②スポンジで擦る③水栓を開き、洗剤と汚れを水で流す④全体を布巾で拭き上げる、となっており、①使用した洗剤の量、③水の消費量を計測した。

①1 プッシュあたり噴霧量(ml)×プッシュ回数

③　消費水量(ml)

3.2.6 机上

机上の作業手順は、布巾で水拭きするのみとなり、水の消費量を計測した。

消費水量(ml)÷清掃対象の部屋の床面積(m2)※

※机の面積ではなく、部屋の床面積を使用した

3.2.7　GHG の算出方法

活動量は、作業で消費した水、消耗品の購入金額及び電力は消費電力量とし、産業連関表（金額）ベースの排出原単位を乗じた。

CO2 排出量=活動量(円)×原単位(t-CO2eq/円)

CO2 排出量=活動量(kWh)×原単位(t-CO2eq/円)

4.　清掃サービスにおける計測結果

計測した結果の一部は次頁の SI に示す。

面積あたり、台あたりの水の消費量に、建物の用途による大きな差は認められなかった。また、電力消費量に差があったが、使用したコードレス掃除機の充電器のワット数に起因するものであった。

さらに、水の消費の半分以上は大便器の清掃によるものである。古い大便器は 10L/回、新しい節水タイプの大便器は 3.8L/回の水消費量となっており、今後、改修工事で消費量を大幅に減らせる可能性がある。

表 1. 温室効果ガスの排出量（単位：$t\text{-}CO_{2eq}$）

使用した活動量	大学施設	商業施設
①契約金額に基づく	37.56	24.11
②実測に基づく	12.15	18.70
②/①	32%	78%

表１に、計測した結果をもとに、GHG 排出量を算出した結果を示した。この結果から、以下のことがわかった。

・温室効果ガスの排出量を比較するため、産業連関表（金額）ベースを排出原単位に、日常清掃の受注金額を活動量として乗じたものと、実測の消費量を活動量として乗じたものを算出したところ、どちらの建物も実測の方が少なく、大学施設は 32%、商業施設は 78%であったが、建物サービスには電気設備や空調設備の管理等も含まれており、契約金額で単純に比較するには、それらの計測データも必要となる。

・面積あたり、台あたりの数値の精度を上げることで、容易に他の建物での清掃から発生する環境負荷の量が計算できるようになると思われるが、サンプル数が少ないので、もっと増やして精度を高める必要がある。併せて、清掃サービスから GHG 排出量を削減する手段を実現するための研究を行っていく予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、株式会社ゼロボードの支援により行いました。心より感謝を申し上げます。

参照文献

環境省　サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出等の算定のための排出原単位データベース（Ver.3.4）

Supporting Information

表 2. 建物概要

用途	清掃床面積	清掃員数	総労働時間
大学施設	61,101㎡	34 人	30,075h/年
商業施設	8,142㎡	34 人	25,876h/年

表 3. 面積あたり・台あたりの水および電力消費量

対象		大学施設	商業施設
水	硬質床	29.09mL/㎡	30.06mL/㎡
	洗面台	978.50mL/台	893.72mL/台
電力	硬質床	1.38E-04kWh/㎡ (67W)	4.30E-05kWh/㎡ (20W)

表 4. 水の消費量の内訳

対象	商業施設	
	t/年	割合
大便器	754.05	76%
小便器	135.04	14%
洗面台	42.36	4%
その他	62.71	6%
計	994.16	100%

バイオ生産の原料となる糖の化学合成技術の環境影響評価

Life cycle assessment of chemical sugar synthesis for biomanufacturing

○田畑裕*[1,2]、小原聡[1]、兼松祐一郎[1]、Teah Heng Yi[1]、菊池康紀[1]
Hiro Tabata, Satoshi Ohara, Yuichiro Kanematsu, Heng Yi Teah, Yasunori Kikuchi
1) 東京大学, 2) 大阪大学
* tabata-hiro@platinum.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

グルコースやフルクトースなどの糖は、人類の食料生産を支える基幹物質として、また化学品のバイオ生産における基質として極めて重要である。現在、糖は水と CO_2 を原料として光合成（農業）によって作られている。しかし、膨大な燃料や化成品の需要に対し糖の生産量は十分ではなく、バイオ生産への過度な利用の拡大は食料需要との競合を招く。そうした背景のもと、このエネルギー源である糖を触媒化学的に合成するという取り組みが注目を集めている[1]。この手法はバイオマス糖が依拠する光合成（農業）プロセスと比べ圧倒的に高速、かつ消費地生産が可能であり、また土地や水といった資源消費を大幅に抑制できることから、バイオ生産における原料供給の課題解決が期待される。そこで本研究では、本技術をバイオ生産に応用展開する上での課題を明らかにするため、各プロセスに必要なエネルギーや環境影響の評価を行った。

2. 研究方法

糖の化学合成は、ホルムアルデヒドを触媒存在下において加熱することで糖が生成する反応（ホルモース反応[2]）の利用を想定した。機能単位は合成された糖 1 kg とし、システム境界は原料の調達と糖の合成反応、触媒の除去および生成物の濃縮を含むものと定義した。

物質およびエネルギー収支は化学量論方程式と反応のエネルギー消費に基づいて計算した。糖の収率は既報[3]の常微分方程式による反応モデルを MATLAB で数値的に解くことで算出した。インベントリデータは文献やデータベース IDEA ver.3.4.1 に基づき作成し、インパクト係数には LIME2 を用いた。

3. 結果と考察

環境影響評価を行った結果、気候変動や酸性化、土地利用を含む多くの評価指標において、糖液の濃縮プロセスが大きな影響を与えることが明らかになった。これは、濃縮過程において溶媒である水を蒸発させるのに多くのエネルギーを必要とするためである。そこで、ホルモース反応をバッチプロセスからセミバッチプロセスに変更した時のエネルギーの使用量を計算した。ホルモース反応は自己触媒反応であるため、反応開始後に基質であるホルムアルデヒドを継続的に添加することで反応を持続させることが可能である。計算を行った結果、バッチプロセス（最終糖濃度約 4.5%）からセミバッチプロセス（最終糖濃度 20%）に引き上げることで、濃縮に必要なエネルギーを約 80%削減可能であることが確かめられた。

続いて、原料であるホルムアルデヒドの調達について、①化石燃料を用いた従来の生産法、および②CO_2 の水素化によって得られるメタノールを用いた新規の生産法[4]の二通りでその環境影響を比較した。その結果、②は水素生産および糖合成反応、濃縮に必要なエネルギーを再生可能エネルギーによって賄った場合、気候変動への影響を従来法よりも減少させることが可能であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、バイオ生産に用いる糖の化学合成プロセスの環境影響評価を行った。その結果、バッチプロセスでは糖液の濃縮に大きなエネルギーを要するためセミバッチプロセスの開発が不可欠であること、気候変動への影響を低減する上では再生可能エネルギーの導入を前提とした CO_2 資源化技術の採用が有効であることが確かめられた。今後は、プロセスシミュレーションを用いたより詳細なシステム設計、バイオ生産との接合も含めた環境影響評価を行う。

謝辞

本研究は JSPS 科研費(JP24K23916)および NEDO「カーボンリサイクル実現を加速するバイオ由来製品生産技術の開発／データ駆動型統合バイオ生産マネジメントシステム(Data-driven iBMS)の研究開発」(JPNP20011)の成果を含んでいる。東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は、三井不動産(株)、積水ハウス(株)、東日本旅客鉄道(株)、豊田通商(株)からの寄付で活動している。

引用文献

1) S. Cestellos-Blanco, et al., *Joule*, **2022**, *6*, 2304–2323.
2) A. Butlerov, *C. R. Acad. Sci.*, **1861**, *53*, 145-147.
3) R. F. Socha & A. H. Weiss, J. Catal., **1981**, *67*, 207-217.
4) J. Puhar, et al., *J. Clean. Prod.*, **2022**, *377*, 134537.

ESG 情報開示及びパフォーマンスが資本コストに与える影響

Impact of ESG Disclosure and Performance on Cost of Capital

○奥田かんな*[1)]、藤井秀道[1)]
Kanna Okuda, Hidemichi Fuji
1) 九州大学
* okuda.kanna.192@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、企業の社会的責任や持続可能性に対する関心が急速に高まり、企業の財務情報に加え、非財務情報が投資家や他のステークホルダーにとって重要な意思決定要因となっている。特に環境（Environment）、社会（Social）、ガバナンス（Governance）の 3 つの要素を意味する ESG は、企業の長期的な価値創造能力を示す重要な指標とされ、多くの企業がこの ESG 情報を開示するようになってきている。

日本においては「企業内容等の開示に関する内閣府令等の改正」により、2023 年 3 月期以降に発行される有価証券報告書の中に「サステナビリティに関する考え方及び取組」の項目が新設された。これによって上場企業は自社のサステナビリティに対する方針や対応について、投資家に説明する義務を負うこととなった。

加えて、2023 年 3 月に東京証券取引所より公表された「資本コストや株価を意識した経営」の推進も、日本企業の非財務資本に関する経営戦略に大きな影響を与えている。

従来、投資家は企業の財務指標を主な評価基準としてきた。しかし、気候変動や社会的不平等、企業統治の欠如など、グローバルな課題が顕在化する中で、投資家は現在、ESG 問題にますます関心を寄せており、そのため ESG の開示やパフォーマンスは、企業の長期的な価値創造の指標の一つとなっている。しかし、投資家は企業の ESG に対する評価に依然として困難を抱えており、また、企業が ESG 情報を開示する際には、不透明性や基準の不統一といった問題が存在している。

また、ESG に関する研究は欧米を中心に進んでいるものの日本における実証研究は依然として少ない[1)]。

2. 研究目的

本研究では、企業の ESG に関する取り組みが、企業の資本調達コスト（以下、資本コスト）に与える影響を明らかにすることを目的とする。本研究の理論的背景として、エージェンシー理論、ステークホルダー理論、シグナリング理論の 3 つが挙げられる。これら経済理論に基づいて ESG パフォーマンスが資本コストに与える影響をについて検証する。

エージェンシー理論、ステークホルダー理論、シグナリング理論は、企業の ESG パフォーマンスが資本コストに与える影響を説明する上で重要な理論である。エージェンシー理論では、株主と経営者の利益相反を解消する手段として ESG の取り組みが重視され、経営者に ESG 指標を報酬に組み込むことが企業価値向上につながるとされている。

ステークホルダー理論では、企業が株主だけでなく従業員や顧客など多様な利害関係者に責任を負い、ESG への取り組みがブランド価値や従業員の士気を高め、長期的な競争優位性を築く手段とされる。

また、シグナリング理論では、企業が積極的に ESG 情報を開示することで、社会的責任を果たしている姿勢を市場に示し、投資家や顧客の信頼を獲得しながら競争力を強化できると説明される。

3. 分析手法とデータ

本研究の分析対象は日本の上場企業であり、対象期間は 2015 年から 2022 年である。これらについて Refinitiv Eikon データベースより財務・非財務データを取得した。

分析モデルではパネルデータ分析を利用する。被説明変数は企業の資本コストとし、証券市場を通じた資本調達のコストを表す株主資本コスト（CoE）、銀行などの間接金融を通じた資本調達コストを表す負債コスト（CoD）、CoE と CoD を資本と負債の金額で加重平均した加重平均資本コスト（WACC）を採用した。

説明変数には ESG パフォーマンススコアを利用した。ESG パフォーマンススコア(Performance)は環境、社会、ガバナンスについて、それぞれのパフォーマンスを評価したものであり 0 から 100 を取る。

本研究では、先行研究[2)]を参考に、ESG パフォーマンスの向上が企業の資本コストを長期的に低減させる可能性を検証するために、t 年の環境パフォーマンスが t+1 年、t+2 年、t+3 年の資本コストに与える影響についても分析を行った。

また、本分析では先行研究を参考に、コントロール変数として、利益率（ROA）、財務レバレッジ、時価簿価比率、企業規模を利用した[3)]。

4. 分析結果

表 1 から表 3 にかけて、固定効果モデルによるパネルデータ分析の結果を示す。表 1 は環境、表 2 は社会、表 3 はガバナンスに関するパフォーマンスを説明変数として用いたモデルの結果である。コントロール変数の結果は省略している。

表 1 より、環境パフォーマンスと CoE の間に正に有意な関係がみられる。ステークホルダー理論の観点からみると、企業が環境パフォーマンスを向上させる取り組みを強化する際、株主以外の他のステークホルダーに対する配慮が優先される可能性があり、株主の利益が相対的に軽視されていると受け取られたことが、資本コストの上昇につながったと考えられる。

一方で、表 2 及び表 3 から、社会及びガバナンスに関するパフォーマンスが資本コストに与える影響は確認することが出来なかった。

表 1　環境パフォーマンスと各資本コストの関係

	CoE	CoD	WACC
EnvPerformance	0.011***	0.001	0.003
Observation	3,051	3,051	3,051

注：*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

表 2　社会パフォーマンスと各資本コストの関係

	CoE	CoD	WACC
SocPerformance	0.004	0.001	0.005
Observation	495	495	495

注：*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

表 3　ガバナンスと各資本コストの関係

	CoE	CoD	WACC
GovPerformance	-0.008	0.001	-0.001
Observation	340	340	340

注：*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

次に、表 1 より統計的に有意な関係性が見られた環境パフォーマンスについて、長期的な影響を考慮した分析結果として表 4 を示す。表 4 より t 年の環境パフォーマンスが資本コスト与える影響の経年変化をみると t+0 では正に有意となっているが、t+3 ではマイナスで有意となっている。

この結果を解釈するための理論的背景としてステークホルダー理論が挙げられる。t+0 で正の影響となった点については、環境パフォーマンスの実施に伴う初期の設備投資や運営コストの増加が事業リスクとして投資家に認識される点が挙げられる。

その一方で長期的には、環境への取り組みが効率的な資源利用による収益性向上として評価される側面が指摘できる。環境パフォーマンスを改善することで、ステークホルダーは将来の環境規制導入などで「長期的に企業価値を毀損するようなリスクが低下する」と判断する。その結果、投資家からの支持を得やすくなることから証券市場における資本調達コストを削減することが期待できる。

表 4　長期的の効果を考慮した場合の環境パフォーマンスと株主資本コスト（CoE）の関係

	t+0	t+1	t+2	t+3
EnvPerformance	0.011***	0.003	-0.003	-0.008**
Observation	3,051	2,599	2,183	1,775

注：*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

5. 結論

本研究より、環境パフォーマンスは短期的に資本コストを上昇させる効果があるが、長期的には資本コストを低減させる効果が期待できることが示唆された。資本コストは企業価値の創造を達成する上で、その引き下げが求められる重要な要素である。長期における企業の持続可能な価値創造を達成するための政策を考える上で、本研究結果から得られた知見は有用な情報の一つとして活用されることが期待できる。

一方で社会やガバナンスを説明変数としたモデルでは、資本コストに対する統計的有意な影響を確認することは出来なかった。この点は、分析可能なサンプル数が少ない点が理由の一つとして挙げられる。

6. 参考文献

1) 湯山智教 ”ESG 投資とパフォーマンス―SDGs・持続可能な社会に向けた投資はどうあるべきか”, きんざい, 東京, (2020), p. 248.
2) Dohrmann, M., Martinez-Blasco, M., Moring, A., & Cuadros Margarit, J.: Environmental performance and firm performance in Europe: The moderating role of board governance. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 31(6), (2024), pp.5863–5880
3) Shen, S., Xie, J., Fujii, H., Keely, A.R., Managi, S.: Does environmental materiality matter to corporate financial performance: Evidence from 34 countries. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management* (forthcoming), (2025).

プラスチック循環フローにおけるバイオマス（割当）原料の投入の影響の分析

Analysis of the impact of bio-based (-attributed) feedstock introduction in the plastic circulation flow

○仲嶋翼*[1)]、平田一馬[1)]、村上茉奈美[1)]、植田洋行[1)]、橋本征二[2)]
Tsubasa Nakajima, Kazuma Hirata, Manami Murakami, Hiroyuki Ueda, Seiji Hashimoto
1) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社, 2) 立命館大学
* tsubasa.nakajima@murc.jp

1. はじめに

日本政府は、2030 年度に 46%の GHG 排出削減（2013 年比）及び 2050 年にネット・ゼロを実現する目標を掲げている。廃棄物分野で最大の温室効果ガス（GHG）排出源である廃プラスチックの焼却・原燃料利用に伴う GHG 排出に対する対策の一つとしてバイオマスプラスチック（bio-based plastics）があり、地球温暖化対策計画[1)]において、対策評価指標として 2030 年度に 197 万トンの国内出荷量及びそれによる 209 万トンの GHG 排出削減見込量が設定されている。

国内の GHG 排出量は IPCC ガイドラインに準拠して算定され、「温室効果ガス排出・吸収目録（GHG インベントリ）」として取りまとめられている。我が国では、GHG インベントリの算定[2)]においてバイオマスプラスチックを考慮している。具体的には、バイオマスプラスチック製品の出荷量データを基に、バイオマス割合、製品寿命及び焼却率を踏まえて各年に焼却されるバイオマスプラスチック製品量が推計され、その焼却に伴う CO_2 排出を控除している。しかし、考慮されるバイオマスプラスチック製品は原則として一次製品のみであり、PET ボトルのリサイクル品以外の二次製品は考慮されていない。また、近年登場したマスバランス方式によりバイオマス由来特性が割当られたプラスチック（以下、バイオマス割当プラスチック（bio-attributed plastics））についても考慮の対象となっていない。

バイオマスプラスチックの特長の 1 つは、植物等が吸収した炭素で構成され、その焼却は実質的に大気中の CO_2 濃度を増加させないことである。その意味では、バイオマスプラスチックの本質的な価値は、バイオマスプラスチック（の原料）が製造された時点で生じており、以降、それをどの用途に使用しても効果は変わらない。しかしながら、国の政策上の指標である GHG 排出量・吸収量は GHG インベントリに基づくことから、バイオマスプラスチックの効果は焼却段階で発現することになる。すなわち、政策的にはバイオマスの考慮はいわゆる-1/+1 ルールではなく-0/+0 ルールに基づいているといえる。

よって、ある年に投入されたバイオマスの効果がいつ、どの程度生じるかは製品寿命やリサイクル性に応じて変化しうるため、バイオマスプラスチックをどの用途に使用するかは政策的に重要な点になる。

2. 研究目的

本研究では、単純化したモデルを用いて、プラスチックの経時的な循環の流れにおけるバイオマス（割当）プラスチックの投入及び排出・焼却のダイナミクスを推計し、その利用用途によって政策指標上の GHG 削減効果がどのように生じるかを解析することを目的とした。

3. 方法

3.1 使用したモデルの概要

4 区分の製品寿命（短、中、長、超長）と 3 区分のリサイクル性（低、中、高）の組み合わせからなる計 12 製品のモデルを構築した。ある年の市場需要量に対して、前年の廃プラからリサイクルされた再生材を使用し、それでも不足する分をバージン材として化石資源またはバイオマスから新規供給する。また、各製品は寿命到達後に排出され、設定されたリサイクル率に応じて再生利用されるものとした。リサイクルされなかった分が焼却に向かい、その年の CO_2 発生量につながる。以上の概要を図 1 に示した（図中では寿命が超長の製品は割愛した）。

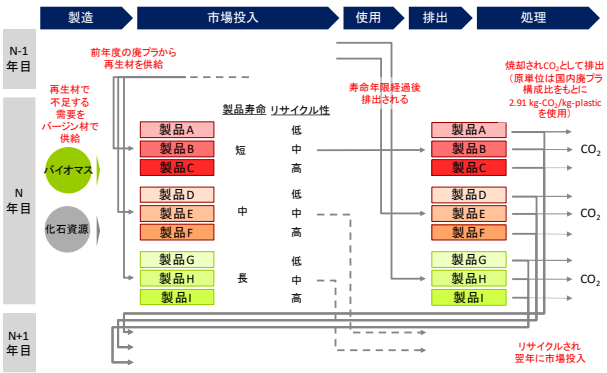


図 1 モデルの概要

3.2 パラメータ設定及び変数

製品の市場投入量（需要量）は、2023 年に計 9,300 千トンとし、各年の市場投入量は人口動態を考慮して

設定した。製品別の内訳は表 1 に示すとおり。

表 1 市場投入量（需要量）に関する設定

			製品寿命			
			短	中	長	超長
寿命の設定値			0 年	5 年	15 年	50 年
市場投入量（2023 年）[千トン]			4,200	2,100	2,400	600
	リサイクル性	低	1,400	700	800	200
		中	〃	〃	〃	〃
		高	〃	〃	〃	〃

各製品のリサイクル率（製品化量ベースであり、廃プラの回収率も含む）は、10 年ごとに表 2 のように設定し、途中年は按分した。

表 2 リサイクル率（製品化量ベース）の設定

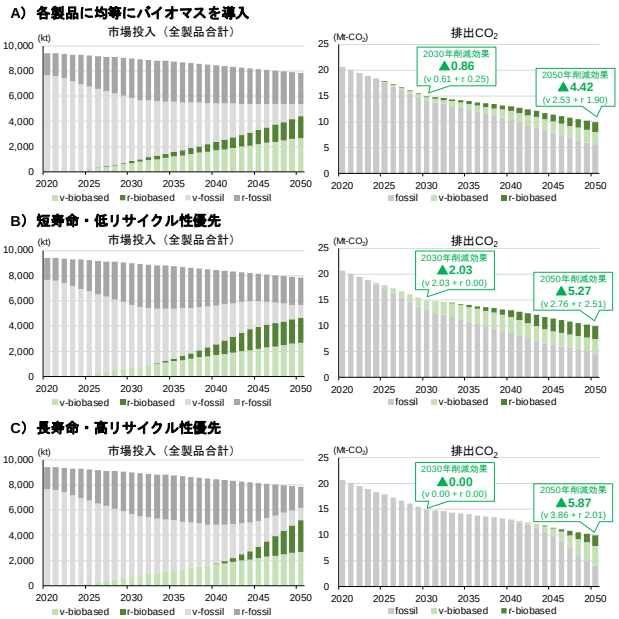
リサイクル性	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年～
低	0%	0%	0%	30%
中	0%	45%	60%	60%
高	60%	75%	75%	75%

バイオマスプラスチック（バージン材）の投入は、単純化のために 2023 年までは 0 トンとし、2024 年に 100 千トンを投入し、それ以降 2050 年まで投入量を毎年 100 千トンずつ増加させるものとした。その上で、製品間での配分の仕方を変数とした。

4. 結果

バイオマスプラスチックを優先的に導入する製品を変えた複数のシナリオで推計を行った。図 2 に、A) 各製品に均等にバイオマスを導入、B) 短寿命・低リサイクル性優先、C) 長寿命・高リサイクル性優先の 3 シナリオの結果を示す。なお、超長寿命製品は排出が 2050 年以降になり政策目標に寄与しないため、いずれのシナリオでもバイオマスの投入はなしとした。

推計の結果、2030 年の目標（約 2 百万トン-CO_2 を削減）と 2050 年のカーボンニュートラル目標の達成はそれぞれ相反する方針が必要であることが分かった。すなわち、2030 年目標に対してはバイオマスプラスチックを短寿命かつ低リサイクル性製品に優先的に使用することが望ましく、2050 年目標に対しては長寿命かつ高リサイクル性の用途から導入していくことが望ましい。



※1 いずれのシナリオでも超長寿命製品へのバイオマス投入はなし
※2「v-」はバージン材、「r-」はリサイクル材を示す

図 2 推計結果（一部）

また、上記 3 シナリオでは、2050 年のバイオマスプラスチック由来 CO_2 のうち約 3～5 割が二次製品に由来することが分かった。GHG インベントリにおいて二次製品中のバイオマスプラスチックを考慮できる仕組みの必要性が今後高まっていくと考えられる。

加えて、2050 年の削減効果が最大のシナリオ C)でも 410 万トン-CO_2/年が排出される。ネット・ゼロ達成には、さらなるリデュース、リサイクル率向上、バイオマスプラスチックの追加導入等の対策が必要であり、それでも残る GHG 排出は CCUS での対策が求められる。

本会では、バイオマス割当プラスチックの解析も追加して報告するとともに、今後の GHG インベントリにおけるバイオマスプラスチックの考慮方法について、解析結果より得られる示唆を提示し議論を行う。

5. 謝辞

本研究は環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20243004）により実施した。

6. 引用文献

1) 地球温暖化対策計画（令和 3 年 10 月 22 日閣議決定）
2) 環境省：”温室効果ガス排出・吸収量等の算定と報告”，環境省ウェブサイト、入手先 <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/methodology/waste.html>，（参照 2025-01-21）

ガリウムの関与物質総量（TMR）の算定

An Approximate Estimation of Total Material Requirement of Gallium

○早川賢信*[1)]、王彬澤[1)]、張政陽[1)]、松八重一代[1)]
Kenshin Hayakawa, Wang Binze, Zhengyang Zhang, Kazuyo Matsubae
1) 東北大学
* hayakawa.kenshin.p1@dc.tohoku.ac.jp

1. 背景・目的

近年のデジタル化やグリーン化の進展に伴い、鉱物資源の需要や重要性が高まっている。ガリウムは、半導体や電子デバイスに不可欠であり、デジタル社会の基盤を支える重要鉱物の一つである。ガリウムは主にアルミニウム製錬と亜鉛製錬の副産物として回収され、莫大なアルミニウム生産力を有す中国が世界のガリウム生産量の 98%を占めている。また、中国は、世界中からガリウムの主原料となるボーキサイトや亜鉛鉱石を輸入し、ガリウム生産を行っているため、鉱石採掘に係る物質総量に起因する環境問題が懸念されている。例えば、ボーキサイト採掘による尾鉱ダムの決壊や赤泥による水質汚染などが報告されている。

本研究では、金属材料の関与物質総量を求める上で最も影響の大きいとされる鉱石採掘に係る「隠れた物質フロー」に焦点を当て、ガリウム生産の原料となるボーキサイトと亜鉛鉱石採掘に伴う土石・岩石分の ore-TMR（鉱石分の関与物質総量）を算定することを目的とした。

2. 研究方法

・2.1 関与物質総量（鉱石分）の算定

関与物質総量は式（1）で得られ、図 1 にアルミニウムを例にした関与物質総量の概念[1,2]を示した。

関与物質総量（TMR）＝∑(直接投入物質量) ＋∑(間接投入物質量) ＋∑(隠れた物質フロー量)　　（1）

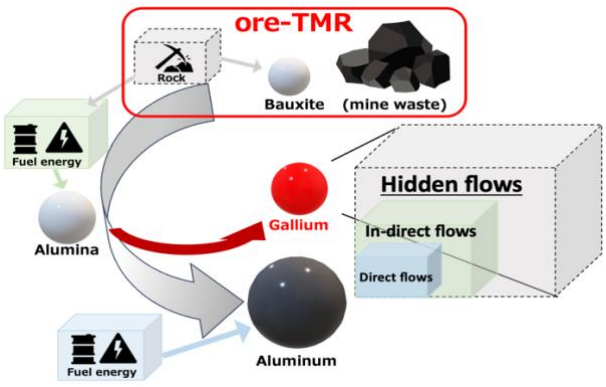


図 1 関与物質総量(TMR)の概念図

金属材料の関与物質総量には、製錬・精製工程で投入される燃料や物質、さらにはエネルギー源として間接投入される物質も含むデータとして提示されることが望ましい。しかし、製錬等におけるエネルギー関係の間接投入データの整備が不十分なため、本研究では鉱石分のみに限定した。すなわち、1 単位（ここでは 1t) 分の金属を得るための精鉱に関与する粗鉱、ズリ、剥土等の採掘土石の総量を ore-TMR（鉱石分の関与物質総量）として算定し、式（2）から算出した。

$$\text{ore} - \text{TMR} = \sum \text{全採掘量} \;/\; \sum \text{粗鉱量} \qquad (2)$$

$$\text{全採掘量} = \text{粗鉱量} + \text{廃土石量} \qquad (3)$$

ガリウムはアルミニウム精錬と亜鉛製錬の副産物であるため、ガリウム分が負担する ore-TMR を算定するために、粗鉱に含まれるガリウム含有率データを用いてガリウム潜在供給量を定義した。そして、廃土石量は主金属と副産物の価格によって配分することで、ガリウム分が負担する廃土石量として定義した。

・2.2　研究対象とデータ

2022 年の中国におけるガリウム生産に伴う ore-TMR 算出に向け、中国のボーキサイト輸入国、亜鉛鉱石輸入国と中国国内のボーキサイト生産量と亜鉛鉱石生産量を研究対象国とする。各国の生産量データは S&P Global より入手可能なデータのみを対象とした。また、本研究では上層にある土石を取り除いて鉱石を取り出す露天掘りによる採掘法のみを対象とし、鉱石の部分まで穴を掘り採掘する坑内掘りによる関与物質総量は考慮していない。

2.2.1　ボーキサイト

2022 年の中国のボーキサイト輸入統計より、98%をオーストラリア、ギニア、インドネシアから輸入していることが分かった。そのため、この 3 カ国と中国を含めた 4 カ国のボーキサイト生産量を基に、ガリウム潜在供給量と廃土石量を算出した。ボーキサイト中に含まれるガリウムの含有率は地域ごとに文献調査を行い、より正確なデータを入手することができた。また、剥土比データは先行研究[3]より入手した。

2.2.2　亜鉛鉱石

2022 年の中国の亜鉛鉱石輸入統計より、全輸入量の 0.5%未満の国を除く 13 カ国と中国の含む 14 カ国の亜鉛鉱石生産量を基に、ガリウム潜在供給量と廃土石量を算出した。対象 14 カ国のうち、S&P Global より生産量データが入手可能な鉱山を対象に、露天掘りで採掘を行っていることが確認できた鉱山を調査対象とした。そして対象鉱山の剥土比データを収集し、廃土石量を推定した。亜鉛に含まれる地域ごとのガリウム含有率データは、先行研究[4]に基づき 50ppm をグローバル平均値として採用した。

3.　結果

3.1 ボーキサイト

ガリウム潜在供給量と価格配分した廃土石量データは、以下図 2 に示す。最もガリウム潜在供給量が高いのはギニアの Sangaredi の 1172t となり、価格配分した廃土石量が最も高いのは中国の Pingguo で 1012kt という値となった。そして、ボーキサイト生産に起因するガリウム 1t あたりの ore-TMR は、中国が 2789t/t と 4 ヵ国中で最も高く、インドネシアが 65t/t で最も低いという結果となった。

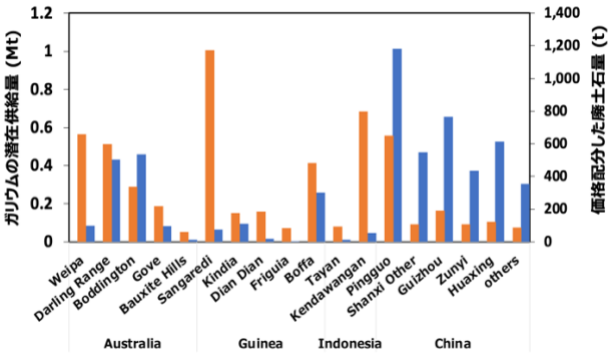


図 2　ボーキサイト生産に起因するガリウム潜在供給量と価格配分した廃土石量

3.2　亜鉛鉱石

ガリウム潜在供給量と価格配分した廃土石量は以下図 3 に示す。最もガリウム潜在供給量が高いのはオーストラリアで 60.65t となり、価格配分した廃土石量も最も高いのはオーストラリアで 109.99kt という値となった。そして、亜鉛生産に起因するガリウム 1t あたりの ore-TMR は、オーストラリアが 1814t/t と 13 ヵ国中で最も高く、サウジアラビアが 30t/t で最も低いという結果となった。

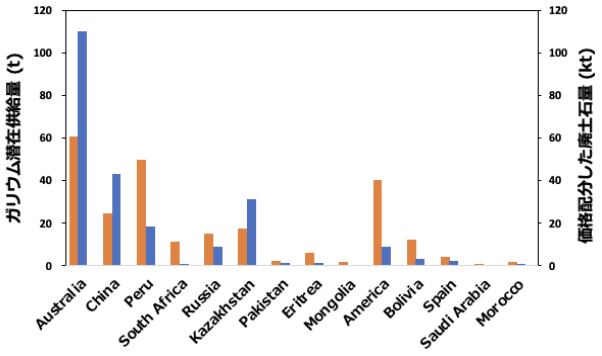


図 3　亜鉛鉱石生産に起因するガリウム潜在供給量と価格配分した廃土石量

4.　まとめ

ガリウムの ore-TMR（鉱石分の関与物質総量）の算定のために、ボーキサイト生産と亜鉛鉱石生産に起因するガリウム潜在供給量と価格配分した廃土石量の算出を行った。いずれも対象地域によって差が見られ、その差が ore-TMR の差に繋がる結果となった。これは、剥土比が地域によって大きく異なることから採掘時に発生する廃土石量に起因することが推測された。また、中国の国内採掘から海外輸入に移行している背景から、今後はボーキサイト・亜鉛鉱の生産国における関与物質総量が高くなることが懸念される。なお、今後は採掘のみならず製錬・精製過程に起因する関与物質総量の算定も行うことが課題である。

5.　引用文献

1. 原田幸明、井島清、片桐望、大蔵隆彦(2001).日本金属学会誌, 65 (7), pp564-570.

2. Watari, T., McLellan, B. C., Giurco, D., Dominish, E., Yamasue, E., & Nansai, K. (2019). Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity. *Resources, Conservation and Recycling*, *148*, 91-103.

3. Worsley Alumina (Boddington) Operation , Mining Intelligence and News (オンライン), 入手先 <https://miningdataonline.com/property/304/Worsley-Alumina-(Boddington)-Operation.aspx> (参照 2024-12-10)

4. Lu, F., Xiao, T., Lin, J., Ning, Z., Long, Q., Xiao, L., ... & Chen, H. (2017). Resources and extraction of gallium: A review. *Hydrometallurgy*, *174*, 105-115.

建材一体型太陽光発電 (BIPV) ガラスの環境影響評価

Environmental Impact Assessment of Building-Integrated Photovoltaic Glass

○*橘 ゆう子*[1)]、内田 健太[2)]、芳村 泰生[3)]、勝本 覚成[1)]、小川 貴之[1)]、河田 禎史[2)]、
宮嵜 俊幸[1)]、盤指 豪[2)]
Yuko Tachibana, Kenta Uchida, Taiki Yoshimura, Tadahiro Katsumoto, Takayuki Ogawa,
Teizi Kawada, Toshiyuki Miyazaki, Go Banzashi
1) AGC 株式会社 環境安全品質本部, 2) AGC 株式会社 事業開拓部,
3) AGC 株式会社 建築ガラスアジアカンパニー
* yuko.tachibana@agc.com

1. はじめに

世界的な脱炭素の流れ及び日本では政府による 2050 年カーボンニュートラル達成に向けた方針、再生可能エネルギーの買取制度等により、太陽光発電(PV)システムの設備設置は大きく増加した。一方で、大規模な地上設置型 PV システムは、豪雨の際の土砂崩れによる崩落や自然の景観が損なわれる等の課題も顕在化してきている。そのような中、建材一体型太陽光発電(BIPV)システムは、建物の窓や壁などの建材に太陽光発電の機能を付与するもので、設置・利用にあたり大規模な土地改変や土地利用を伴わない利点がある。

BIPV の発電システムとしての価値に加え、土地改変・土地利用を伴わないことによる価値、即ち生物多様性や一次生産など自然資本への影響が小さいと期待される価値を明確化すべく、ライフサイクル環境影響評価手法 LIME を用い自然資本への影響を評価した。

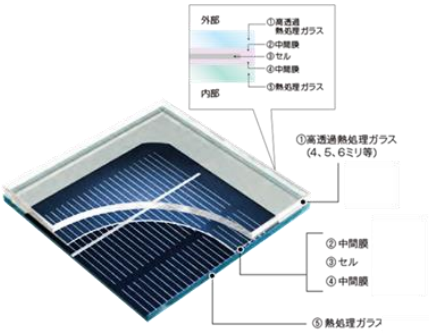


図 1 BIPV の構成例 [1)]



図 2 BIPV 施工例 [2)]
（左：建物外観, 右：BIPV 施工部 屋内より撮影）

2. 評価対象・評価方法

BIPV 弊社製品及び施工事例について、LIME 2 による評価を行った。代表的な BIPV の構成 [1)]を図 1 に、BIPV を施工した建物外観及び BIPV 施工部外観の一例 [2)]を図 2 に示す。合わせガラスの中間層に PV セルを封入した建材一体型であり、建材としての強度を有するとともに、自由な PV セル配置等によりデザイン性が高い特徴を持つ。評価を行った、原材料調達から廃棄までの工程概略を図 3 に示す。図 2 写真とは異なるが、実際の BIPV 製品・施工実例で使用した、ガラス原材料・PV パネル部材(PV セル:単結晶 Si タイプ)・施工部材のデータを用い、LIME2 による評価を行った。

比較として、地上設置型 PV システムについても LIME2 による評価を行った。パネル単位面積あたりの PV セル配置面積は、上記評価を行った BIPV と同様とした。他のパネル構成部材については環境省資料 [3)]を、地上設置に用いられる鋼製架台部材等については、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託による太陽光発電システムに関する実証事業の成果物資料 [4)]を参照した。

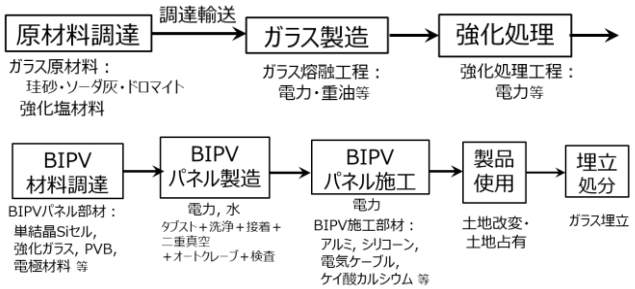


図 3 BIPV 工程概略の一例

3. 評価結果

LIME2 特性化評価結果を図 4 に示す。両者とも PV パネル製造工程の環境影響が大きく、これは単結晶 Si セル製造工程における環境影響が大きいことに起因する。また地上設置型 PV パネルではアルミフレーム使用の影響も大きい。施工部材においては、BIPV はアルミ部材とともに耐火ボード(ケイ酸カルシウム)の使用量

が多いこと、地上設置型 PV では鋼製架台の重量が大きいことによる影響が大きい。

被害評価及び統合化結果を表 1 及び表 2 に示す。地上設置型 PV については、土地改変・土地利用(20 年)の影響も考慮した。原料調達～廃棄までのライフサイクルにおいて、統合化した被害金額は、BIPV では地上設置型システムの約 1/3 と算定された。さらに BIPV は建物壁面等の設置のため太陽光の入射角度が最適条件でなく、発電量が地上設置型システムの約 70%となることを考慮すると、発電電力あたりの統合化した被害金額は、BIPV では地上設置型システムの約 2/3 と算定された。

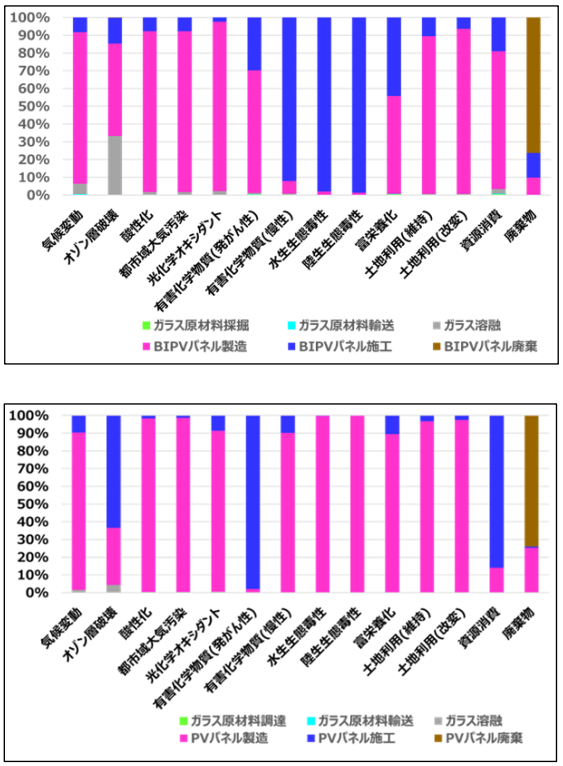


図 4　LIME2 特性化評価結果
（上図：BIPV，下図：地上設置型 PV）

表 1　BIPV の LIME2 被害評価結果・統合化結果
(パネル 1m² あたり)

	被害評価				統合化
	人間健康	社会資産	生物多様性	一次生産	
	DALY	JPY	EINES	kg-DW	JPY
ガラス原料採掘	3.66E-07	1.79E+00	9.06E-14	1.75E-02	9.25E+00
ガラス原料輸送	5.09E-07	3.22E+00	2.96E-14	1.31E-02	1.17E+01
ガラス溶融	1.15E-05	4.27E+01	3.24E-13	1.67E-01	2.22E+02
BIPVパネル製造	4.33E-04	9.55E+02	4.31E-11	2.39E+01	8.95E+03
BIPVパネル施工	3.82E-05	1.76E+02	6.64E-11	1.92E+00	1.78E+03
BIPVパネル廃棄	1.65E-07	5.25E+02	4.22E-12	8.56E-01	7.07E+02
合計	4.84E-04	1.70E+03	1.14E-10	2.69E+01	1.17E+04

表 2　地上設置型 PV の LIME2 被害評価結果
及び 統合化結果 (パネル 1m² あたり)

	被害評価				統合化
	人間健康	社会資産	生物多様性	一次生産	
	DALY	JPY	EINES	kg-DW	JPY
ガラス原料採掘	1.17.E-07	5.74.E-01	2.90.E-14	5.61.E-03	2.96.E+00
ガラス原料輸送	1.63E-07	1.03E+00	9.47E-15	4.19E-03	3.75E+00
ガラス溶融	3.67.E-06	1.37.E+01	1.04.E-13	5.36.E-02	7.10.E+01
PVパネル製造	6.33E-04	1.47E+03	1.41E-10	3.48E+01	1.43E+04
PVパネル施工	1.91E-05	3.18E+02	1.41E-10	1.32E+00	2.70E+03
PVパネル施工時土地改変			4.45E-10	1.86E+02	1.49E+04
PVパネル利用時土地利用(20年)				5.10E+01	2.36E+03
PVパネル廃棄	1.65E-07	5.25E+02	4.22E-12	8.56E-01	7.07E+02
合計	6.56E-04	2.33E+03	7.31E-10	2.74E+02	3.50E+04

4.　まとめ・今後

BIPV についてライフサイクル環境影響評価手法 LIME を用いて自然資本への影響を評価し、土地改変・土地利用を伴わない利点が定量的に示された。なお本検討では、地上設置型システムにおける、送電に伴う電力損失や、設置の際に必要な基礎工事の影響等を評価に含めていない。今後これらの影響も評価に含め検討したい。

5.　謝辞

本研究の LIME 評価にあたり、一般社団法人 企業と生物多様性イニシアティブ JBIB の自然資本評価 WG にて、早稲田大学伊坪徳宏教授に多大なご指導を頂きました。深く御礼申し上げます。

引用文献

1) AGC 硝子建材：”Products（製品情報）サンジュール®”,AGC 硝子建材,（オンライン）,入手先 <https://www.agc-gk.com/bldg/products/sunjoule/>,（参照 2025-1-22）

2) AGC：”サンジュール® ZEB への活用事例”, AGC,（オンライン），入手先 <https://www.asahiglassplaza.net/products/sunjoule/special2/>,（参照 2025-1-22）

3) 環境省：“再生可能エネルギー発電設備の廃棄・リサイクルに係わる現状及び課題について” p23, 環境省（オンライン），入手先 <http://www.env.go.jp/council/content/03recycle03/000183808.pdf>,（参照 2025-1-22）

4) 奥地建産株式会社・一般社団法人太陽光発電協会：”地上設置型太陽光発電システムの構造設計例 -鋼製架台-” p12, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO),（オンライン），入手先 <https://www.nedo.go.jp/content/100895024.pdf>,（参照 2025-1-22）

船舶の平均寿命の変化がもたらす包括的な環境影響評価

Comprehensive Environmental Impact Assessment of Changes in Vessel Lifespan: The Case of Japanese Maritime Transport

○下津浦大賀*[1)]
Taiga Shimotsuura
1) 九州大学
* shimotsura.taiga.359@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

国際海運は、2040 年までに 2008 年比で 70%以上という非常に野心的な温室効果ガス削減目標のもと、運航時に CO_2 を直接排出しない次世代船舶の早期導入を目指している [1)]。一方で、その急速な導入やそれに伴う既存船の早期廃棄（寿命が来る前の廃棄）を考慮したライフサイクルアセスメント（LCA）の観点は見過ごされている [2)]。加えて、寿命変化による CO_2 排出削減効果を、他の要因（例えば燃費改善や船舶の大きさの最適化等）による効果と比較した研究は未だ存在せず、船舶の寿命変化の分析とそのほかの CO_2 排出削減策の分析との間にはギャップが存在する。

そこで、本研究では日本の国内海上輸送をケーススタディとして、船舶のライフサイクル段階別に寄与度を測定する構造分解分析（SDA）手法を新たに提案する。本 SDA を平均寿命ベースラインのシナリオに適用することで、カーボンフットプリント（CF）変化に寄与したステークホルダーを明らかにする。加えて、同 SDA を平均寿命を±5 年変化させたシナリオにも適用することで、CF 変化の差（つまり、寿命変化による影響）を明らかにする。最後に、寿命変化による CF 変化に対する影響及び CF 変化に寄与したステークホルダーを基に政策提言を行う。

2. 研究方法

2.1. 動的システムに基づく船舶ストックの推計

本研究ではコンテナ船の寿命関数を特定した先行研究 [3)]に基づき、0年に製造された船舶がt年に退役する確率（$F(t)$）が平均を 23.97、分散を 6.58 とする正規分布に従うと仮定する。上記のパラメータから、船舶の平均寿命のベースライン（$\bar{\mu}$）は 23.97 年となる。

ここで、0年に製造された船舶のt年における累積残存確率は、$\varphi(t) = 1 - F(t)$として定式化できる。ただし、本研究では全ての船舶が同じ残存確率に従うと仮定した。以上の仮定を基に、t年における船舶のストック隻数（$S(t;\bar{\mu})$）は、船舶の平均寿命$\bar{\mu}$におけるt年の新規製造隻数（$B(t;\bar{\mu})$）、i年に製造された船舶のt年における累積残存確率（$\varphi(t-i;\bar{\mu})$）を用いることで以下の(1)式から求めることができる。

$$S(t;\bar{\mu}) = B(t;\bar{\mu}) + \sum_{i=1}^{t-i} \varphi(t-i;\bar{\mu})\, B(i;\bar{\mu}) \quad (1)$$

また、船舶の平均寿命を±5年変化させた場合（すなわち、平均寿命をμとした場合）の船舶ストック隻数（$S(t;\mu)$）も(1)式と同様に推計する。

2.2. 海上輸送由来カーボンフットプリントの推計

2.1 で推計された船舶ストックに基づき、本研究では、2005 年から 2022 年にかけての国内海上輸送における船舶製造時・船舶に用いられる燃料製造時・船舶修理時・運航時由来の CO_2 排出量（本研究におけるカーボンフットプリント、CF）を(2)式のように推計する。

$$CF(t;\mu) = \underbrace{Q^{ves}(t;\mu) + Q^{fuel}(t)}_{Manufacturing\ stage} + \underbrace{Q^{rep}(t;\mu)}_{Repair\ stage} + \underbrace{Q^{ope}(t)}_{Activity\ stage} \quad (2)$$

ここで、$Q^{ves}(t;\mu)$、$Q^{fuel}(t)$、$Q^{rep}(t;\mu)$は、それぞれ船舶の平均寿命μにおけるt年の船舶製造、船舶に用いられる燃料製造、船舶修理によって直接・間接的に誘発される CO_2 排出量を表し、環境拡張型産業連関分析によって推計する。また、$Q^{ope}(t)$は、t年における運航時の CO_2 排出量を表しており、t年の国内海上輸送由来の燃料消費量データに CO_2 排出係数を乗じることで求める。(2)式からわかる通り、本研究では、日本の国内海上輸送由来の CF として、船舶の廃棄段階以外の全てのライフサイクル由来の CO_2 排出量を推計した。

2.3. 国内海上輸送由来の CF に対する包括的な SDA

本研究では、LMDI 法を用いることで、2.2 で推計された CF のうち、2005 年から 2015 年における変化に対し(3)式のような包括的な構造分解分析（SDA）を適用する。本研究における SDA の分解構造については図 1 を参照されたい。

$$\Delta CF = \Delta E + \Delta L + \Delta F^{ves} + \Delta F^{fuel_A} + \Delta F^{fuel_C} + \Delta F^{rep} + \Delta S + \Delta D + \Delta C + \Delta LF + \Delta\lambda + \Delta CI \quad (3)$$

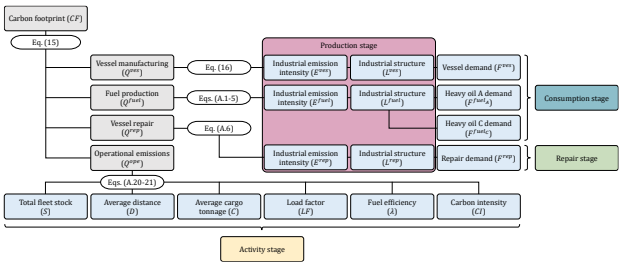


図 1. 本研究における SDA の分解構造

3. 結果と考察

図 2 は、2005 年から 2022 年にかけて平均寿命を±5 年変化させた場合の累積 CF を、平均寿命ベースラインによる買い替えサイクルを基準に示す。寿命延長した場合の CF の推移の上部にある緑の領域は、寿命延長により増える既存船に対する修理の需要をそのほかの船舶の水準の 30 倍（新規造船価格の約 60%程度）にまで増加させた場合の CF の変化を示す。

図 2 から、平均寿命の買い替えサイクルによる CF に比べて、寿命短縮した場合は、CF は 2005 年から 2022 年の 17 年間で約 3.5 Mt-CO_2（2022 年単年の CF の約 34%）増加する一方、寿命延長した場合は、約 2.5 Mt-CO_2（2022 年単年の CF の約 24%）減少することがわかる。また、寿命延長した場合、寿命延長により増える既存船舶に対する修理の需要が 30 倍に増加したとしても、CF は累計約 1.7 Mt-CO_2（2022 年単年の CF の約 17%）減少することがわかる。

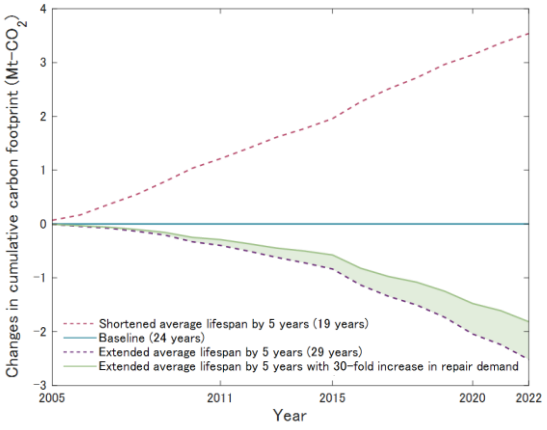


図 2.寿命変化による CF の累積の差の推移
（平均寿命ベースラインを基準）

次に、図 3 は 2005 年から 2015 年にかけての、平均寿命ベースラインでの買い替えサイクル時における CF 変化に対する SDA の結果を示す。図 3 をライフサイクル段階別にみると、消費要因及び修理要因の CF 増加への寄与（それぞれ 0.57 Mt-CO_2、0.05 Mt-CO_2）を生産要因及び活動要因の CF 減少への寄与（それぞれ 1.0 Mt-CO_2、0.93 Mt-CO_2）が上回ったことがわかる。従って、造船会社及び海運会社（それぞれ生産段階、活動段階における主要なステークホルダー）によって CF が減少したことが明らかになった。

図 3 のうち、CF 削減に大きく寄与した生産・活動段階について考察すると、最も CF の削減に寄与した生産段階では、直接 CO_2 排出係数（**e**）、産業構造（**L**）のどちらも大きく CF の減少に寄与し、寄与度はそれぞれ約 0.53 Mt-CO_2、約 0.50 Mt-CO_2 であった。従って、造船会社（生産段階における主要なステークホルダー）のサプライチェーンマネジメントが CF 削減に対し大きな役割を持つことが明らかになった。

また、生産段階の次に CF 削減に寄与した活動段階では、燃費改善や炭素強度の改善ではなく、船舶ストックの再構成（総ストック隻数の減少、大型船舶の増加による輸送距離の減少）が、海上輸送由来の CF 削減に大きく寄与した。従って、海運会社に代表される活動段階では、次世代船舶の導入だけでなく、運航方法の改善も生産段階と同等の役割を持ち、次世代船舶の導入と運航方法の改善のどちらも重要であることが示唆される。

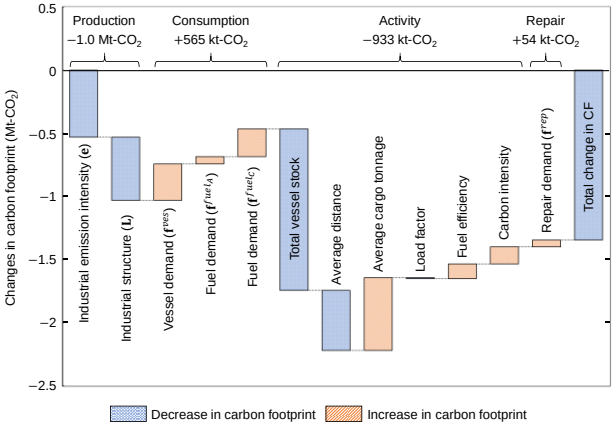


図 3. 2005 年から 2015 年にかけての日本の海上輸送由来 CF に対する SDA の結果
（平均寿命ベースライン）

本会では、この結果に加えて船舶の寿命変化による CF への影響を分析することで、寿命変化の影響と図 3 の各要因の寄与度を比較し、海上輸送由来の CF 削減策としての船舶の寿命変化の是非について議論する。

4. 引用文献

1) International Maritime Organization (IMO), *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*, (2023).
2) International Maritime Organization (IMO), 2018. *Guidelines on Lifecycle GHG Intensity of Marine Fuels (LCA Guidelines).*
3) T. Shimotsuura, *Journal of Environmental Management*, 365, 121558. (2024).

有機系廃棄物の亜臨界水処理の LCA

LCA of subcritical water treatment for organic waste

田中佑海汰*[1)]、山本貴光 [2)]、廣瀬健 [2)]、丸山雄平 [3)]、橋本征二 [1)]
Yuta Tanaka, Takamitsu Yamamoto, Takeshi Hirose, Yuhei Maruyama, Seiji Hashimoto
1)立命館大学, 2)SANYO ホールディングス(株), 3)アーキテクツ・スタジオ・ジャパン(株)
* ce0043rv@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

プラスチックや厨芥などの有機系廃棄物については様々な処理・再資源化の方法があるが、いずれも品質の劣る廃棄物の再資源化や処理後残渣の取り扱いが課題となっている。また、近年では、廃棄物の処理・再資源化についても、温室効果ガス排出削減への貢献が重要となっている。本研究では、有機系廃棄物の処理・再資源化に関する上記の課題に対応するものとして、亜臨界水処理を対象とした LCA を実施し、これを焼却処理等と比較した。亜臨界水処理の LCA については、外口ら [1)]、山本ら [2)]の報告があるが、本研究は、医療系廃棄物の処理を対象としてエネルギー回収を考慮している点等が異なる。

2. 方法

2.1 機能単位とシステム境界

本研究では、医療系廃棄物の 1 トンの処理を機能単位とした。対象とする医療系廃棄物は 100%プラスチックごみと仮定し、これを亜臨界水処理もしくは焼却処理するものとした。双方の処理について、施設の建設、運用、廃棄物の燃焼、エネルギー回収の各段階について、CO_2 排出量および CO_2 排出回避量を算出した。エネルギー回収については、亜臨界水処理では生成物の燃料利用、焼却処理では発電を想定した。

2.2 CO_2 排出量・回避量の算出方法

施設の建設段階については、建設に必要な建材量に各建材の CO_2 排出原単位を乗じて集計し、これを耐用年数、年間処理量で除して、処理 1 トンあたりの CO_2 排出量とした。運用段階については、処理 1 トンあたりの電力消費量、燃料消費量、水消費量にそれぞれの CO_2 排出原単位を乗じて集計し、処理 1 トンあたりの CO_2 排出量とした。燃焼段階については、廃プラスチックの処理量に、廃プラスチック燃焼時の CO_2 排出原単位を乗じて算出した。エネルギー回収段階については、亜臨界水処理の生成物量にその発熱量を乗じ、同等熱量の石炭を代替するものとして(セメント製造時に燃料利用するものとして)、また、焼却処理による発電量に電力の CO_2 排出原単位を乗じて、CO_2 排出回避量を算出した。各処理技術に関わるデータを収集し、CO_2 排出原単位は AIST-IDEA_v3.4[3)]、環境省 [4)]の値を用いた。

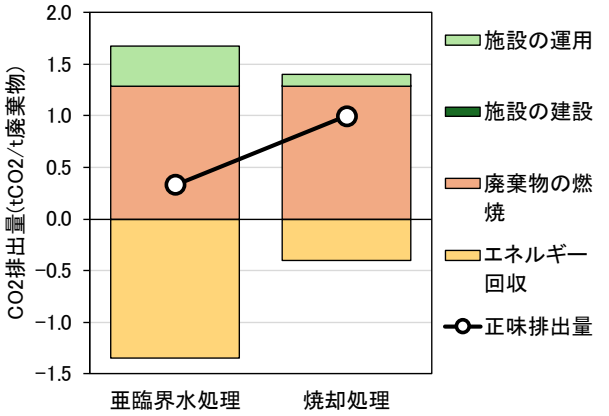


図 医療系廃棄物(廃プラスチック)の処理 1 トンあたりの CO_2 排出量

3. 結果と考察

医療系廃棄物(廃プラスチック)の処理 1 トンあたりの CO_2 排出量の試算結果を図に示す。亜臨界水処理において運用段階の排出量が多くなったが、これは、亜臨界水処理が主に電力を多く消費するためである。なお、亜臨界水処理では、排水処理や燃料利用前の脱塩素化などのプロセスも考慮する必要があるが現時点ではこれらを考慮できていない。また、亜臨界水処理において、生成物を石炭代替の燃料として利用した場合の CO_2 排出回避量は、亜臨界水処理及び燃料利用に係る CO_2 排出量の約 8 割に相当し、生成物の二次利用が CO_2 排出量の削減に大きく寄与することが示された。正味の CO_2 排出量も焼却処理を下回った。なお、本試算では生成物の発熱量を廃プラスチックと同じと仮定していることや、医療系廃棄物や生成物の含水のばらつきの影響にも留意する必要がある(本試算ではそれぞれ 50%、30%と設定)。

引用文献

1) 外口絵理子ら：第 7 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、pp.172-173、2012
2) 山本貴光ら：第 19 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、2-D2-03、2024
3) 産業施術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ：LCI データベース AIST-IDEA_v3.4_日本語版
4) 環境省：温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧、2024

日本の食事メニューを対象とした環境・健康影響評価

Environmental and Health Impact Assessment of Japanese Diet Menus

○杉山弦太*[1)]、小野田章人[2)]、新居紗知[2)]、古田千恵[2)]、中村恵治[3)]、伊坪徳宏[1)]
Genta Sugiyama, Akito Onoda, Sachi Nii, Chie Furuta, Keiji Nakamura, Norihiro Itsubo
1) 早稲田大学, 2) 味の素株式会社食品研究所, 3) 味の素株式会社 R&B 企画部
* g.sugiyama@aoni.wasesda.jp

1. はじめに

食料システムの改善によって世界の栄養状態は大きく改善された。一方で、不健康な食事の増加によって生活習慣病の健康リスクが増加している。加えて、現在の食料システムは複数の環境領域に対する影響が大きく、持続不可能であると報告されている。

食料生産や食事に関する環境影響評価は盛んに行われており、畜肉に由来する環境負荷が大きいことが明らかになっているが、摂食による健康への影響を含めて統合的に評価している事例は限られている[1)]。

本研究では、日本の食事メニューを対象として、食材の生産から調理までの環境影響と、食事に含まれる食品・栄養素摂取による健康影響の統合評価を行い、健康で持続可能な食事の提案を行う。

2. 研究方法

2.1 データ収集と前処理

本研究では味の素株式会社の「レシピ大百科」[2)]に掲載されている 12,438 件のメニューを対象に、食材の分量、調理手順、栄養素情報などを収集した。料理 1 人前(1 皿)当たりを機能単位とするため、記載分量が「20 個」「作りやすい分量」等の 1 人前換算が不可能なメニューは除外し、残りの 9,429 メニューを食材レベルで日本食品標準成分表(第八訂)増補 2023 年[3)]と、IDEAv3.4.1 データベースに対応付けた。メニュー単位で体系的に分析するため、最も使用量が多い食材をメイン食材として、各メニューを表 S1 に示す食品群に分類するとともに、表 S2 に示した主食・主菜・副菜・汁物の 4 つの料理カテゴリにも分類した[4)]。

2.2 環境健康評価

システム境界は食材の生産から調理・調理時廃棄物の廃棄までとし、二次データには IDEAv3.4.1 を用いた。炊飯器や電子レンジ、ガスコンロの電力・ガス消費量は省エネ型製品情報サイト[5)]から単位時間・回数あたり消費量を推定し、各メニューの調理時間とかけ合わせて算出した。廃棄物は食品標準成分表[3)]の廃棄率を用いて推定し、全量埋立処理と仮定した。気候変動、オゾン層破壊、大気汚染、光化学オキシダント、水消費の五つの影響領域について、特性化手法に LIME2、被害評価手法に LIME3 を用いて障害調整生存年数(以下 DALY)へ換算した。

2.3 栄養健康評価

食品・栄養摂取による健康影響について、Life Cycle Initiative のライフサイクル影響評価指標および手法に関する世界ガイドライン(以下 GLAM)で提示されている「Dietary risk factors (DRFs)」[1)]を利用して DALY の指標で算出した。DRFs はアメリカの食品成分表に基づく定義で 15 項目の食事リスク係数が開発されているため、本研究では日本の定義と合致した表 S3 に示す 11 項目を対象に評価を実施した。なお、係数がプラスの場合は健康寿命の損失、マイナスの場合は健康寿命の延伸効果を示すものとして扱う。

3. 研究結果

以降では、日本の食文化に基づく四つの料理カテゴリ（主食、主菜、副菜、汁物）のうち、栄養素の供給源として利用しやすい主菜に該当する 3,772 メニューを代表例として解析し、メニュー数の多い野菜、魚介、鶏肉、豚肉、牛肉の五つの分類に着目した。その他の分類群の結果については図 S1、S2 に示す。

図 1 に示したメニュー別の環境健康影響では、牛肉メインメニューが最も高い値を示しており、25%値でさえ他のメニュー群の最大値よりも大きい結果となった。一方、その他のメニュー群の中央値は同程度であるが、ばらつきの大きさにわずかに違いがみられ、中でも鶏肉メインメニューはばらつきが最も小さく、最大値も最も低い結果となった。

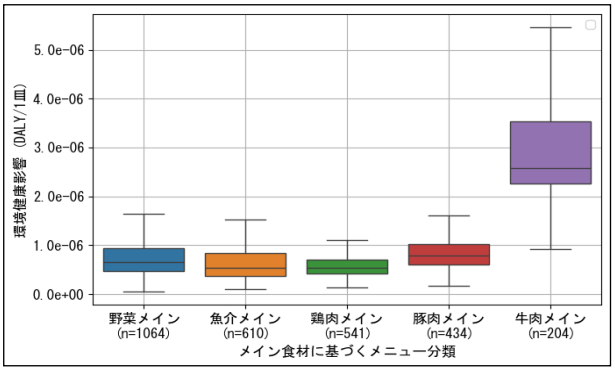


図 1. 主菜カテゴリのメニュー分類別環境健康影響

図 2 に示したメニュー別の栄養健康影響では、牛肉メインメニューの健康影響が最も大きく、次いで豚肉メインメニューの影響が大きくなっている。鶏肉と魚介メインのメニューは 0 付近から負にかけて分布するメニューが 75%以上を占めており、健康リスクが低い、あるいは健康上の便益があるメニューが多いことが示された。野菜メインメニューは幅が非常に広く、摂取する食品や栄養素によって大きくバランスが変化する可能性が示唆された。

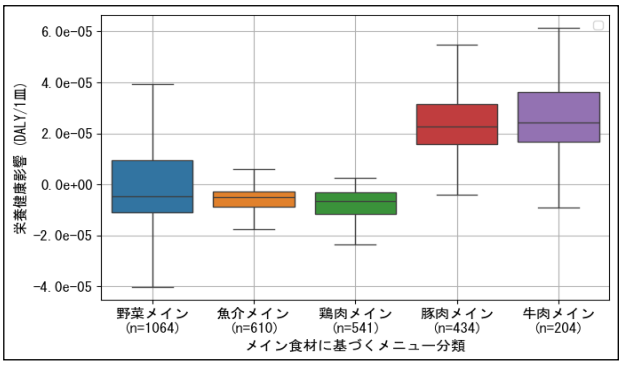


図 2. 主菜カテゴリのメニュー分類別栄養健康影響

図 3 では、各分類の統合健康影響の最小値と最大値にあたるメニューを代表として抽出した。抽出されたメニューの詳細については表 S4 に示す。野菜・魚介・鶏肉メインの最小メニューにおいては、正味の値を表す赤丸が示す通り、明確に健康寿命延伸の効果が示唆された一方で、最大メニューでは加工肉や塩の増加に加えて、野菜や食物繊維の摂取量が減少したことで DALY が増加し正値に転じている。

豚肉や牛肉メインのメニューでは赤肉に起因する健康影響が大きいことがわかる。一方、最小メニューにおいては種実類の摂取による DALY 低減効果が特に大きく、正味の影響では赤肉摂取による DALY を相殺して負値に転じている。

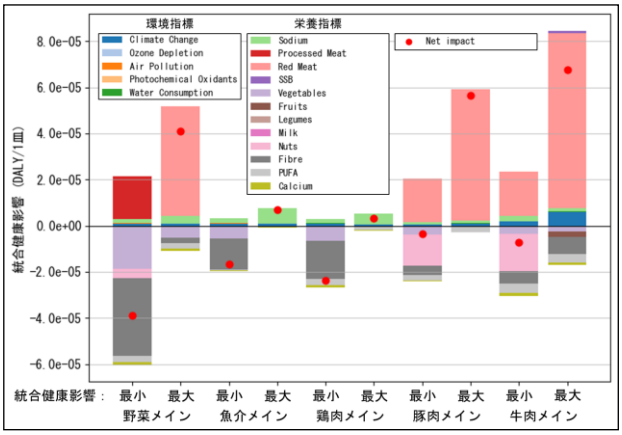


図 3. 分類別代表メニューの統合健康影響

4. 考察

図 S3 からわかる通り、一般的に単一のメニューに魚介類と肉類が混在することはなく、肉類メニューでも鶏肉と牛肉などが混在することはない。そのため、魚介・鶏肉メインのメニューは比較的ばらつきが小さく、食物繊維や塩分摂取による DALY 低減/増大効果が正味の影響に直結したと考えられる。

今回考慮した食事リスクの中で、種実類は DALY 低減効果が 2 番目に大きく、ピーナッツやごまが種実類にあたる。ごまは日本で古来から利用されており、1 人当たり消費量も世界 2 位であるため、追加摂取への文化的・心理的障壁は少ないと考えられる。

結果として、動物性タンパク質が多く必要な場合は鶏肉・魚介類を中心とし、野菜や種実類を取り入れながら塩分を控えめに仕上げることが健康的で持続可能な食事の実現に有効であることが示唆された。

5. 今後の展望

本研究では日本の 9,429 メニューを対象として、材料調達・調理・廃棄時の環境影響と栄養摂取による健康影響を統合した健康影響評価を実施した。

限界点として、DRFs は食品分類レベルの粒度であり、同じ食品分類中の種類の違いは考慮できていないため、過大・過小評価となっている可能性がある。

課題点として、今回算定した環境影響は人間健康に関する領域のみであり、食料の評価において議論されている土地利用や生態系の観点は含めていない。

今後は単一のメニュー評価だけでなく、複数メニューを組み合わせた献立単位での評価を行うことで、より日本の食文化に即した提案を行う。また、環境影響については生物多様性への影響も併せて評価を行い、トレードオフの関係性について分析を行っていく。

6. 引用文献

1) Katerina S. Stylianou, Victor L. Fulgoni III, Olivier Jolliet.: nature food, (2), (2021), pp616-627
2) 味の素株式会社: ”レシピ大百科”, 味の素株式会社, (オンライン), 入手先＜ https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/>, (参照 2025-1-15)
3) 文部科学省: “日本食品標準成分表（八訂）増補 2023 年”, (オンライン), 入手先＜ https://www.mext.go.jp/a_menu/syokuhinseibun/mext_00001.html>, (参照 2024-11-30)
4) Furuta Chie e al.: Frontiers in Nutrition, 9, (2022)
5) 経済産業省資源エネルギー庁: “省エネ型製品情報サイト”, 省エネ型製品情報サイト, (オンライン), 入手先< http://seihinjyoho.go.jp/>, (参照 2024-11-15)

Supporting Information

表 S1. 日本食品標準成分表の食品番号に基づく食品群分類表

大分類	番号	中分類	番号	小分類	番号
穀類	1	米・加工品	1	米	1
				米加工品	2
		小麦・加工品	2	小麦粉類	3
				パン類（菓子パンを除く）	4
				菓子パン類	5
				うどん 中華めん類	6
				即席中華めん	7
				パスタ	8
				その他の小麦加工品	9
		その他の穀類・加工品	3	そば・加工品	10
				とうもろこし・加工品	11
				その他の穀類	12
いも・でんぷん類	2	いも・加工品	4	さつまいも・加工品	13
				じゃがいも・加工品	14
				その他のいも・加工品	15
		でんぷん・加工品	5	でんぷん・加工品	16
砂糖・甘味類	3	砂糖・甘味類	6	砂糖・甘味類	17
豆類	4	大豆・加工品	7	大豆(全粒)・加工品	18
				豆腐	19
				油揚げ類	20
				納豆	21
				その他の大豆加工品	22
		その他の豆・加工品	8	その他の豆加工品	23
種実類	5	種実類	9	種実類	24
野菜類	6	緑黄色野菜	10	トマト	25
				にんじん	26
				ほうれん草	27
				ﾋﾟｰﾏﾝ	28
				その他の緑黄色野菜	29
		その他の野菜	11	キャベツ	30
				きゅうり	31
				大根	32
				たまねぎ	33
				はくさい	34
				その他の淡色野菜	35
		野菜ジュース	12	野菜ジュース	36
		漬け物	13	葉菜漬け物	37
				たくあん・その他の漬け物	38
果実類	7	生果	14	いちご	39
				柑橘類	40
				バナナ	41
				りんご	42
				その他の生果	43
		ジャム	15	ジャム	44
		果汁・果汁飲料	16	果汁・果汁飲料	45
きのこ類	8	きのこ類	17	きのこ類	46
海藻類	9	海藻類	18	海藻類	47
魚介類	10	生魚	19	あじ いわし類	48
				さけ ます	49
				たい かれい類	50
				まぐろ かじき類	51
				その他の魚類	52
				貝類	53
				いか たこ類	54
				えび かに類	55
		魚介加工品	20	魚介（塩蔵 生干し 乾物）	56
				魚介（缶詰）	57
				魚介（佃煮）	58
				魚介（練り製品）	59
				魚肉ハム ソーセージ	60
肉類	11	畜肉	21	牛肉	61
				豚肉	62
				ハム ソーセージ類	63
				その他の畜肉	64
		鳥肉	22	鶏肉	65
				その他の鳥肉	66
		肉類（内臓）	23	肉類（内臓）	67
		その他の肉類	24	鯨肉	68
				その他の肉加工品	69
卵	12	卵類	25	卵類	70
乳	13	牛乳・乳製品	26	牛乳	71
				チーズ	72
				発酵乳・乳酸菌飲料	73
				その他の乳製品	74
		その他の乳類	27	その他の乳類	75
油脂類	14	油脂類	28	バター	76
				マーガリン	77
				植物油脂	78
				動物油脂	79
				その他の油脂	80
菓子類	15	菓子類	29	和菓子類	81
				ケーキ・ペストリー類	82
				ビスケット類	83
				キャンディ類	84
				その他の菓子類	85
嗜好飲料類	16	アルコール飲料	30	日本酒	86
				ビール	87
				洋酒・その他	88
		その他の嗜好飲料	31	茶類	89
				コーヒー・ココア	90
				その他の嗜好飲料	91
調味料・香辛料類	17	調味料	32	ソース	92
				しょうゆ	93
				塩	94
				マヨネーズ	95
				みそ	96
				その他の調味料	97
		香辛料・その他	33	香辛料・その他	98
調理済み食品	18	調理済み食品	34	調理済み食品	99

表 S2. レシピの食材・栄養素構成に基づくカテゴリ分類表

食事カテゴリ	カテゴリ番号	該当件数	特徴	メニュー例
主食	**1**	84	エネルギーが 400kcal 未満であり、野菜が 50g 未満かつタンパク質が 6g 未満	ご飯、パン
	2	559	エネルギーが 400kcal 未満であり、かつ野菜が 50g 以上またはたんぱく質が 6g 以上	赤飯、ハンバーグ
	3	144	エネルギーが 400kcal 未満であり、かつ野菜が 50g 以上またはたんぱく質が 6g 以上であり、汁気がある	うどん、そば
	4	1334	エネルギーが 400kcal 以上であり、かつ野菜が 50g 以上またはたんぱく質が 6g 以上	カレーライス親子丼
	5	131	エネルギーが 400kcal 以上であり、かつ野菜が 50g 以上またはたんぱく質が 6g 以上であり、汁気がある	ラーメン
主菜	**6**	1301	食材重量が 120g 以上、かつたんぱく質が 6g 以上	焼き魚、ステーキ、焼き鳥
	7	1901	食材重量が 120g 以上、かつ野菜が 50g 以上	野菜炒め
	8	570	食材重量が 120g 以上、かつ野菜が 50g 以上であり、汁気がある	鍋
汁物	**9**	338	野菜が 50g 未満かつたんぱく質が 6g 未満	豆腐の味噌汁
	10	285	野菜が 50g 以上かつたんぱく質が 6g 未満	ミネストローネスープ
	11	646	タンパク質が 6g 以上	豚汁
副菜	**12**	1816	前記条件のどれも満たさない単品料理、かつ野菜が 50g 以上、エネルギーが 100kcal 以上、もしくはたんぱく質が 6g 以上	ほうれん草のおひたし
	13	325	前記条件のどれも満たさない単品料理	漬物
古田ら(2022)[4]に記載の表から引用、筆者により一部改変				

表 S3. Dietary Risk と日本の国民健康栄養調査の対応表

食事リスク	Stylianou ら(2021)[1]における定義	国民健康栄養調査対応項目の食品群番号及び栄養素項目名	DALY 係数 (DALY/g)
vegetables	Fresh, frozen, cooked, canned, or dried vegetables, excluding legumes, salted or pickled vegetables, juices, and starchy vegetables	25~33,35,46,47*	-3.7E-08
calcium	Calcium from all sources	カルシウム**	-1.0E-05
fibre	Fiber from all sources	食物繊維**	-1.4E-06
fruits	Fresh, frozen, cooked, canned, or dried, excluding fruit juices and salted or pickled fruits	39~43, 44*	-1.5E-07
legumes	Fresh, frozen, cooked, canned, or dried legumes	18, 23*	-1.1E-07
milk	Milk (including non-fat, low-fat, and full-fat milk) but excluding plant derivatives	71*	-1.3E-08
procmeat	Meat preserved by smoking, curing, salting, or addition of chemical preservatives	63*	3.4E-07
redmeat	Beef, pork, lamb, and goat but excluding poultry, fish, eggs, and all processed meats	61,62,64*	3.8E-07
nuts	Nut and seed foods	24*	-1.8E-06
pufa	Omega-6 fatty acids from all sources	n-6 系脂肪酸**	-5.9E-07
Sodium	Dietary sodium from all sources	ナトリウム**	1.7E-06

* (出典) 令和４年国民健康・栄養調査 第５表の１ 食品群別摂取量 - 食品群，年齢階級別，平均値，標準偏差，中央値 - 総数，１歳以上
** (出典) 令和４年国民健康・栄養調査 第１表の１ 栄養素等摂取量 - エネルギー・栄養素等，年齢階級別，平均値，標準偏差，中央値 - 総数，１歳以上

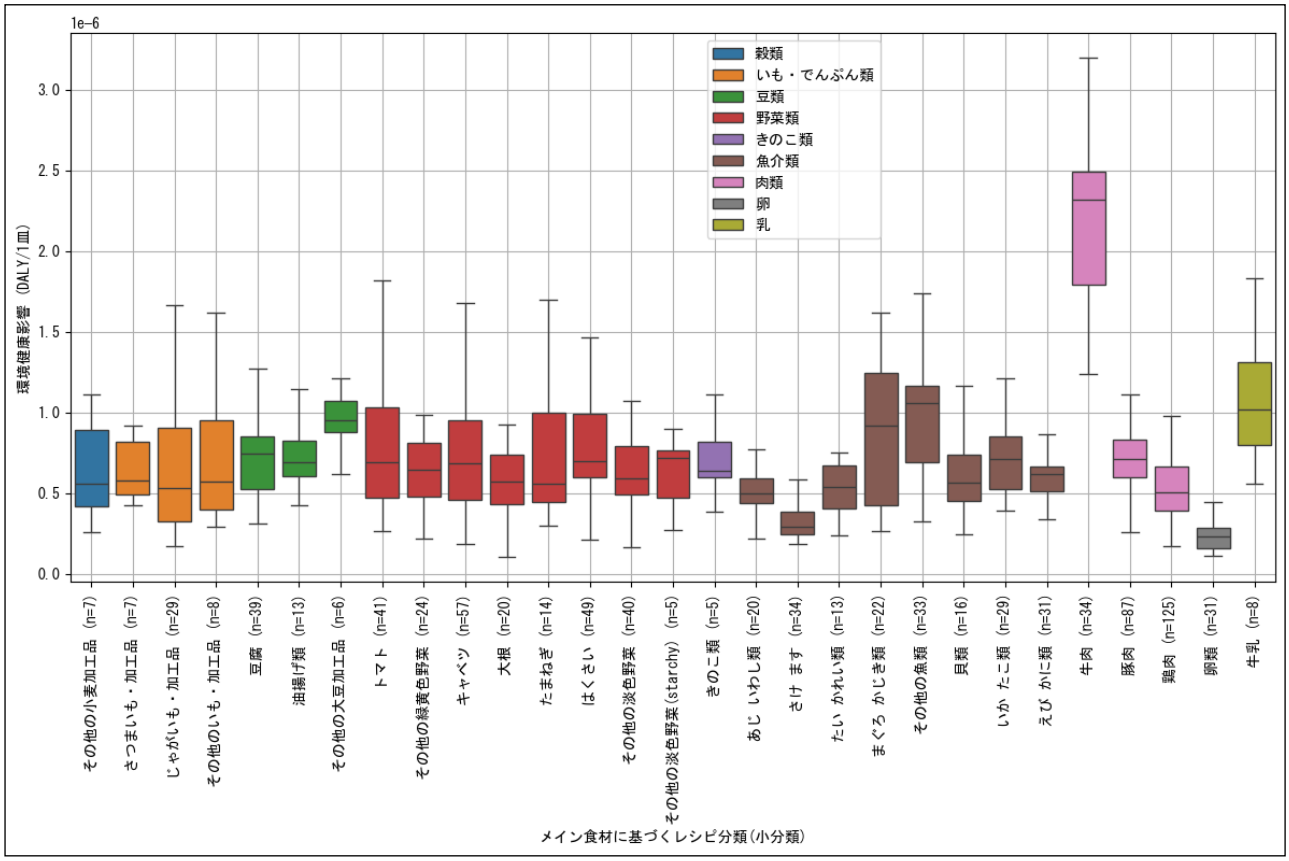


図 S1. 主菜カテゴリのメニュー分類別環境健康影響 (小分類レベル)

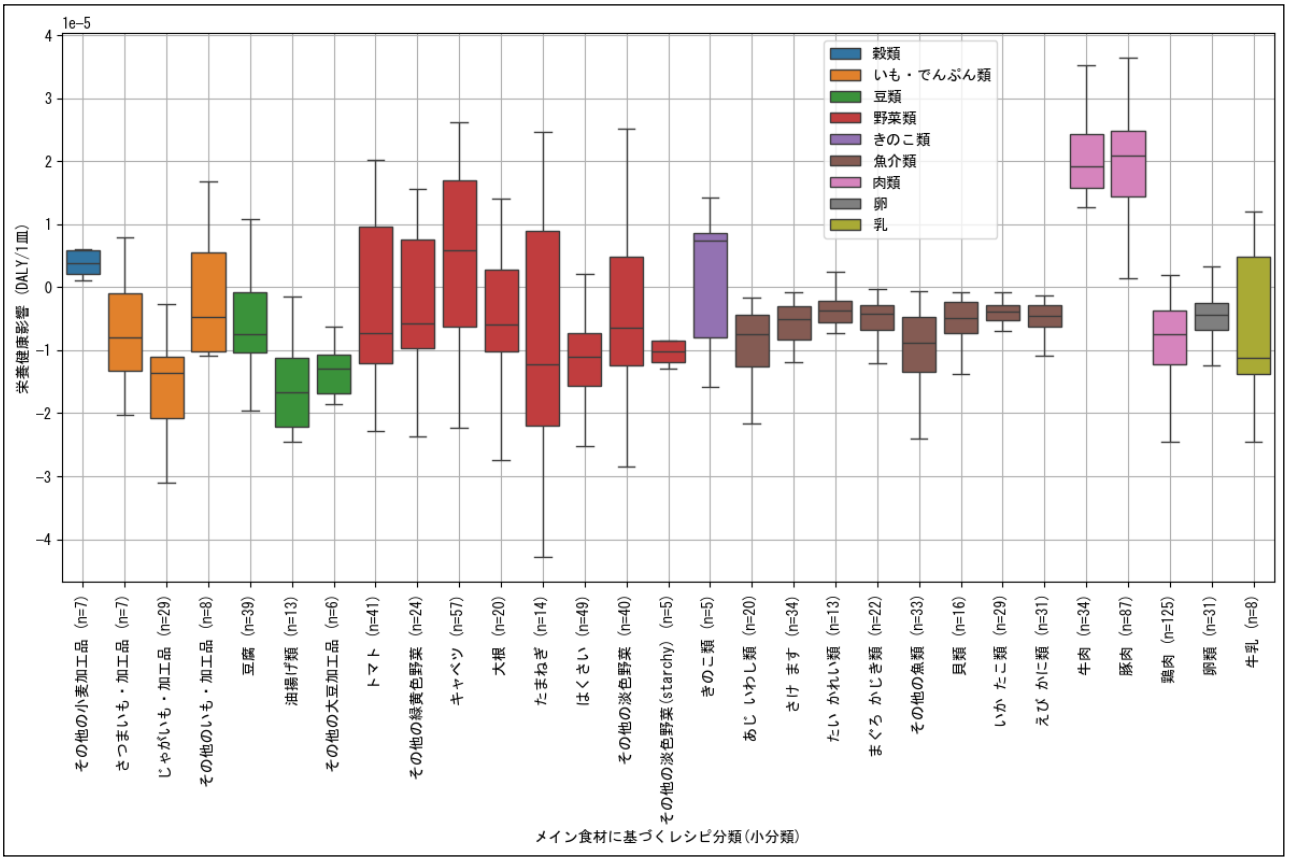


図 S2. 主菜カテゴリのメニュー分類別栄養健康影響 (小分類レベル)

表 S4. 分類群別代表レシピのレシピ名および掲載先 URL[2)]

分類名	レシピ名	URL
野菜メイン_最小	カラフルポトフ	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/706603/
野菜メイン_最大	大根と豚バラ肉のラフティ	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/621186/
魚介メイン_最小	たらとじゃがいものトマト煮込み	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/709530/
魚介メイン_最大	魚介の塩焼き	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/700169/
鶏肉メイン_最小	トマト鍋	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/706985/
鶏肉メイン_最大	鶏チャーシュー	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/802120/
豚肉メイン_最小	豚しゃぶサラダのピーナッツソース	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/700709/
豚肉メイン_最大	トンテキ	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/706433/
牛肉メイン_最小	彩りチャプチェ	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/702867/
牛肉メイン_最大	芽キャベツとスペアリブのカレー	https://park.ajinomoto.co.jp/recipe/card/260006/

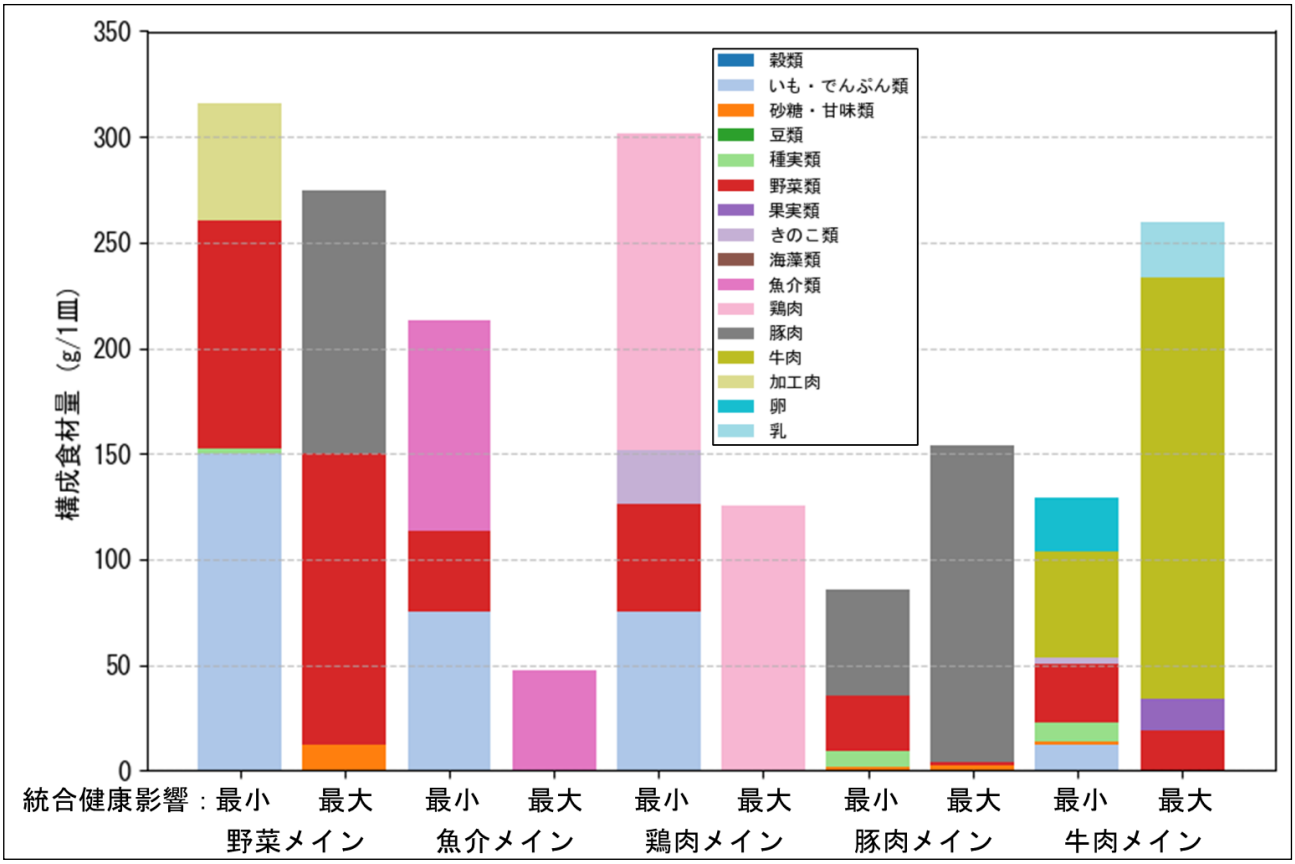


図 S3. レシピ分類別代表レシピの構成食材内訳

植物油製造プロセスへの資源活用技術導入に向けたライフサイクル評価

Life cycle assessment for introducing resource-utilizing technologies into vegetable oil mill process

○渡邉有希人[1)]、兼松祐一郎[1)]、Teah Heng Yi[1)]、廣森浩祐[2)]、菊池康紀*[1)]
Yukito Watanabe, Yuichiro Kanematsu, Heng Yi Teah, Kosuke Hiromori, Yasunori Kikuchi
1) 東京大学, 2) 東北大学
* ykikuchi@ifi.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

植物資源は脱化石資源の実現に向けて最大限活用することが期待されている。植物油工場は様々な地域に分布し、その精製工程では、化石燃料由来のエネルギーを使用して有効活用されていない廃棄物を多く生み出している。環境負荷低減に向けてこのような地域資源活用技術の導入を進めていくことが課題である[1)]。

本研究では、植物油製造プロセスにおける環境負荷低減を目的として、プロセスシミュレーションのモデルを構築し、LCA を実施した。導入技術の一例としてエネルギーを脱炭素化するために木質バイオマスの熱電併給 (CHP: Combined Heating and Power)の導入を想定し、技術導入前後での環境負荷を比較した。

2. 方法

2.1 植物油製造プロセスのモデリング

一般に、植物油製造プロセスでは菜種などの油分の多い油糧作物は圧搾・抽出工程を経て、大豆などの油分の少ない油糧作物は抽出工程のみを経て原油と脱脂粕に分離される。その後、脱ガム工程では温水を加えリン脂質がガム質として分離され、脱酸工程では酸と塩基を加えることにより、遊離脂肪酸が分離される。脱色工程では活性白土で色素などを吸着して、脱臭工程で高温の水蒸気を吹き込むことにより有臭成分や揮発成分が分離され、食用の精製油が製造されている。

これらプロセスで製造される植物油の LCA を行うために、文献に基づいて物質収支とエネルギー収支の計算ができるモデルを構築した。原料由来の成分には油分、水分、繊維分、リン脂質、遊離脂肪酸、色素、有臭成分、その他を、プロセス中で添加する薬品としてヘキサン、リン酸、苛性ソーダ、活性白土を考慮した。原料の油糧作物の成分比および主に各工程での分離比率[2)]に基づいて植物油製造プロセスの物質収支を、植物油の製造全体のエネルギー原単位[3)]から配分比率に基づいて各工程に分割[4)]することでエネルギー収支のモデル化を行った。

2.2 木質バイオマス CHP のモデリング

木質バイオマス CHP は間伐材などのバイオマスを燃料とした熱電併給システム[5)]であり、植物油製造プロセスへの導入を想定してモデルを構築した。

2.3 インベントリ推算と GHG 排出量の評価

評価範囲は油糧作物の栽培と製造プロセスとした。油糧作物の栽培のインベントリデータとして IDEA ver3.4.1 を参照した。製造プロセスは本研究のモデルでインベントリを推算して、GHG 排出量を計算した。また、脱脂粕を利用した飼料等の副産物については、飼料生産を代替とするとみなし、GHG 排出量を控除した。

3. 結果と考察

植物油製造プロセスでは油糧作物の栽培の負荷が大きな割合を占め、製造プロセスのみに着目すると圧搾及び抽出工程の熱及び電力が大きな負荷となった。また、木質バイオマス CHP の導入によりエネルギー消費に起因する GHG 排出量を低減できることがわかった。

4. 結言

植物油製造プロセスへの木質バイオマス CHP の導入により、GHG 排出量を製造プロセスでは 6 割程度削減できるが、ライフサイクル全体で見ると 1 割程度となり、油糧作物の栽培への対策の必要性が示唆された。

謝辞

本研究は、JST COI-NEXT(JPMJPF2003)の支援を受けている。東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は、三井不動産(株)、積水ハウス(株)、東日本旅客鉄道(株)、豊田通商(株)からの寄付で活動している。

引用文献

1) Kikuchi Y. et al.: Sustainability Science, 15, (2020), pp.1473-1494
2) 後藤直宏編, “油脂製造の知識”, 幸書房, 東京, （2022）, pp.61-104
3) 藤田重文編, “化学プロセス集成”, 東京化学同人, 東京, （1970）, pp. 959-967 など
4) JICA: “ポーランド国 省エネルギー計画マスタープラン調査最終報告書”, （1999）, pp. 1–24 など
5) 藤井照重編, “コージェネレーションの基礎と応用”, コロナ社, 東京, （2004）, pp. 178-225 など

上流下流を考慮したサプライチェーン排出勘定の提案

New supply-chain emission accounting for upstream and downstream spillovers

○時任翔平 1)
Shohei Tokito
1) 山形大学
s.tokito@human.kj.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

炭素排出の推計において、企業や産業、国などの政策対象からの直接排出だけでなく、その生産に関わるサプライチェーン全体からの間接排出を考える必要がある。国際化が進みサプライチェーンが複雑に広がっていく中で、国際産業連関表を用いることでグローバルな間接排出を容易に計算できるようになった。しかし既存の産業連関分析を用いた間接排出計算では、レオンチェフモデルを用いた消費者基準勘定 [1]か、ゴッシュモデルを用いた収入基準勘定 [2]の様な、政策対象のサプライチェーンにおける上流もしくは下流どちらかの間接排出にしか焦点を当てていない。本研究では産業連関分析におけるこれら 2 つのモデルを用いたサプライチェーン全体の排出量計算方法を提案する

2. 手法

本研究では 189 地域 26 産業を含む多地域産業連関表である Eora [3]を用いた。ここで $r,s=\{1,2,\dots,189\}$、$i,j=\{1,2,\dots,26\}$とし、中間財取引行列を$\mathbf{Z}=\left(z_{ij}^{rs}\right)$、最終需要行列を$\mathbf{y}=(\sum_s y_i^{rs})$、付加価値行ベクトルを$\mathbf{v}=(v_i^r)$、総産出ベクトルを$\mathbf{x}=(x_i^r)$とおく。また、国$r$での財$i$の生産 1 単位当たりにおける CO_2 排出量をd_i^rとし、CO_2 排出係数行ベクトルを$\mathbf{d}=(d_i^r)$とする。

2.1 レオンチェフモデルを用いた当該産業の上流における直接間接 CO_2 排出量の計算

国sにおける財jの生産 1 単位当たりに対する国rの財iの需要を投入係数a_{ij}^{rs}、とおくと、投入係数行列$\mathbf{A}=\mathbf{Z}\hat{\mathbf{x}}^{-1}$を用いて、各国の最終需要がサプライチェーンを通して上流に誘発する全ての CO_2 排出量Eは$E=\mathbf{d}(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{y}=\mathbf{dLy}$で求まることが知られている [1]。ここで、$\mathbf{I}$は単位行列、$\mathbf{L}=(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}$はレオンチェフ逆行列であり、需要に関する全てのサプライチェーン経路を内包している。また、投入係数行列$\mathbf{A}$において国rの財iに関する要素を 0 にした行列を$\overline{\mathbf{A}_i^r}$とした時、全てのサプライチェーン経路における国$r$での中間財もしくは最終財$i$の生産の上流における排出量は仮想抽出法を用いて以下の様に求まる [4]。

$$E^{HEM,L}=\mathbf{d}\{\mathbf{L}-(\mathbf{I}-\overline{\mathbf{A}_i^r})^{-1}\}\mathbf{y}=\mathbf{d}(\mathbf{L}-\overline{\mathbf{L}_i^r})\mathbf{y}. \quad (1)$$

ここで$\overline{\mathbf{L}_i^r}=(\mathbf{I}-\overline{\mathbf{A}_i^r})^{-1}$であり、国$r$の財$i$を含まない全てのサプライチェーン経路を表している。

2.2 ゴッシュモデルを用いた当該産業の下流における直接間接 CO_2 排出量の計算

国rにおける財iの生産 1 単位当たりに対する国sの財jへの供給を産出係数行列$\mathbf{B}=\hat{\mathbf{x}}^{-1}\mathbf{Z}=\left(b_{ij}^{rs}\right)$とおくと、各国の経済活動により供給される財のサプライチェーン下流での生産過程で発生する全ての CO_2 排出量Eは$E=\mathbf{v}(\mathbf{I}-\mathbf{B})^{-1}\mathbf{d}'=\mathbf{vGd}'=\mathbf{dLy}$で求まることが知られている [2]。ここで$\mathbf{G}=(\mathbf{I}-\mathbf{B})^{-1}$であり、ゴッシュ逆行列と呼ばれる。レオンチェフモデルと同様に$\overline{\mathbf{B}_i^r}$、$\overline{\mathbf{G}_i^r}$を定義すると、全てのサプライチェーン経路における国rでの中間財もしくは最終財iの生産の下流における排出量は

$$E^{HEM,G}=\mathbf{v}(\mathbf{G}-\overline{\mathbf{G}_i^r})\mathbf{d}'. \quad (2)$$

2.3 2 つのモデルから同一経路の排出量を抽出

上の 2 つの排出量評価は条件に該当する全てのサプライチェーン経路の排出を足し合わせることによって計算されている。ここで、レオンチェフモデルにおける価格影響評価とゴッシュモデルにおける波及効果の評価は同じであることが証明されており、ゴッシュモデルによる計算はレオンチェフ逆行列を用いて行うことができる [5]。これにより式(1-2)において同一の経路からの排出を抽出し、2 つの和から除くことで国rにおける財iが含まれるサプライチェーンの上流と下流両方で起こる CO_2 排出量を計算することができる。

3. 結果と考察

表 1 は日本における産業ごとのサプライチェーン全体の排出量ランキングとその内訳である。1 列目から順に直接排出、上流排出、下流排出、上流下流両方に当該産業が入る経路からの排出（DC）、サプライチェーン全体の排出である。最も大きい排出量は電力であるが、そのほとんどは当該産業自身から排出されるものであり、他産業への誘発は金融が最も大きい。特に下流への誘発は上流への誘発の 3 倍近くあり、投資先などでの排出について考える必要がある。石油化学系も下流での排出が大きく、特に中国における電力や電気機械での排出が大きかった。一方で電気機械や教育

においては上流への排出誘発が最も大きく、自身からの排出は小さいため、炭素税などを活かした政策が有効であろう。

表 1 日本産業におけるサプライチェーン排出量ランキングと直接排出、上流下流誘発の内訳

Sector (Japan)	Direct kt-CO_2	Upstream kt-CO_2	Downstream kt-CO_2	DC kt-CO_2	SupplyChain-based kt-CO_2	ratio
Electricity, Gas and Water	562157	40114	40515	442	643228	37%
Finacial Intermediation and Business Activities	132445	116736	319771	23946	592897	34%
Electrical and Machinery	86558	167238	139682	2357	395835	23%
Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral P	51636	137849	160254	6376	356116	21%
Education, Health and Other Services	58232	204890	37645	3347	304114	18%
Construction	73372	113161	55972	3384	245888	14%
Metal Products	29126	103251	95651	1357	229385	13%
Wholesale Trade	30849	37146	139180	1342	208517	12%
Transport	10317	66478	80885	1826	159507	9%
Transport Equipment	28711	91580	26084	636	147012	9%
Post and Telecommunications	15342	24310	54103	648	94403	5%
Wood and Paper	20428	27431	41583	410	89851	5%
Public Administration	19566	67268	1377	40	88251	5%
Food & Beverages	28552	41253	12065	437	82308	5%
Retail Trade	18291	35834	16431	152	70707	4%
Hotels and Restraurants	16288	48338	5513	3	70142	4%
Re-export & Re-import	1	54989	10	0	55000	3%
Other Manufacturing	8735	20921	17478	135	47269	3%
Mining and Quarrying	2906	14426	23231	117	40680	2%
Agriculture	7477	13891	13313	237	34917	2%
Others	2194	11210	21348	114	34866	2%
Textiles and Wearing Apparel	6829	8838	9102	15	24784	1%
Recycling	1396	3089	7176	9	11670	1%
Maintenance and Repair	1028	1673	2928	1	5630	0%
Fishing	860	1538	1528	2	3929	0%
Private Households	54	332	147	0	533	0%

図 1 はサプライチェーンを通した誘発先とその排出量を示しており、日本の産業が含まれるサプライチェーン経路の他国産業から発生する排出量において、日本の上流での排出が大きければ赤、下流での排出が大きければ青になっている。ほとんどの国において日本よりも上流での排出が大きく、特に資源産出国での上流排出が大きい。一方でメキシコ、ヨーロッパ、アジア諸国においては下流での排出が大きい。特に電気機械、石油化学、金融、金属の下流誘発が大きかった。

4. 課題と展望

本発表では日本の産業のサプライチェーン全てに対する誘発排出量と誘発先の分析を対象とした。産業ごとに排出誘発の傾向は異なるが、これは国レベルでも大きく異なる [2)]。Marques et al. (2012) ではノルウェーなどの自国は再生可能エネルギーを利用しているが、化石燃料を輸出することで下流で大きな排出が起こっている国に着目している。本研究成果は消費者基準、所得基準、生産者基準の排出勘定を包括的に比較することができ、サプライチェーン全体への責任の大きい国・産業のランキングや、国・産業ごとに上流/下流での排出比率が大きい産業群などのグルーピングなどを通し、これまでの研究よりもより広い視点での評価や政策提言を行っていく。

引用文献

1) Peters, G., Minx, J., Weber, C., Edenhofer, O.: PNAS, 21, (2011), pp. 8903–8908
2) Marques A., Rodrigues J., Lenzen M., Domimgos T.: Ecol. Econ., 84, (2012), pp. 57–65
3) Lenzen, M., Kanemoto, K., Moran, D., Geschke, A.: Econ. Syst. Res., 25(1), (2013), pp. 20–49
4) Tokito, S., Nagashima, F., Hanaka, T.: J. Clean. Prod., 435, (2024), 140487
5) Oosterhaven, J.: “Rethinking Input-Output Analysis”, Springer, Switzerland, (2019), pp. 87–104

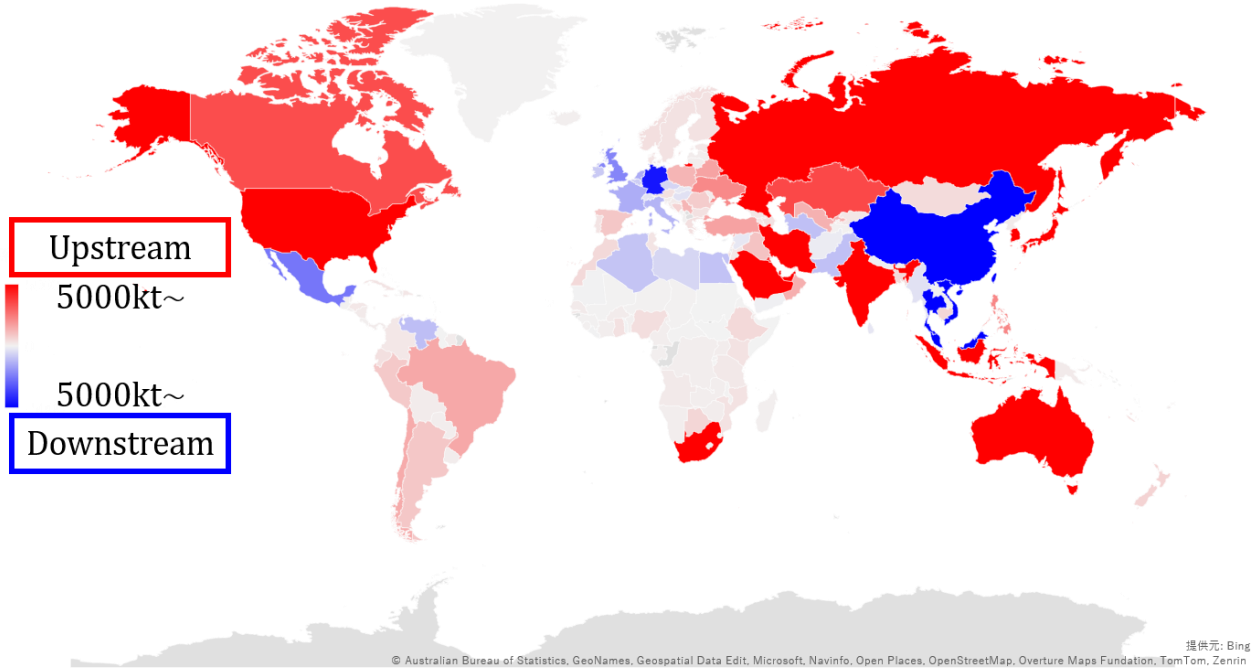


図 1 日本の産業の生産により上流（赤）、下流（青）で CO_2 排出を誘発する国とその排出量

ロシア-ウクライナ危機がもたらすサプライチェーンの再構築と環境負荷の変化

Supply Chain Restructuring and Changes in Environmental Burden Caused by the Russia-Ukraine Crisis

○樋口将義*[1)]、中石知晃[2)]
Masayoshi Higuchi, Tomoaki Nakaishi
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学研究院
*higuchi.masayoshi.264@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

ロシアによるウクライナ侵攻により、欧州連合（EU）やG7をはじめとする先進国が制裁措置としてロシア産天然ガスからの脱却を図っている。日本もその一員であり、天然ガスの輸入量の1割をロシアに依存している日本にとっても大きな影響が及ぶとされている（経済産業省, 2022）[1)]。このようなサプライチェーンの再構築が強いられる状況下において、各国はサプライチェーンのレジリエンスを強化し柔軟に対応できる体制を整えることが求められている。

加えて、SDGsに代表される世界的な環境保全への取り組みになぞらえて、サプライチェーンの再構築にも持続可能性が求められている。原材料の選定から生産、商品の販売まで各プロセスにおいて環境への配慮が求められ、環境負荷を最小限に抑えることが目標とされている[2)]。しかし、持続可能なサプライチェーンの構築は時に経済的損失を伴う。近年はこのような活動を評価するESG投資が注目されているものの、企業にとっては利益追求が一番であるため、環境保全への貢献によって利益減少が見込める場合この貢献を後回しする企業も少なくない。

上記の点を踏まえ、本研究の目的は、ロシアーウクライナ危機に由来するサプライチェーンの再構築によって生じる環境負荷の変化を推計し、環境保全と経済的成功を両立させた新たなサプライチェーンの構築へ向けた提言を行うことである。具体的に、本要旨では、他地域産業連関分析の枠組みを用いた日本の最終需要に基づくエネルギーフットプリント（energy footprint: EF）とカーボンフットプリント（carbon footprint: CF）の推計を行い、各フットプリントにおけるロシアの重要性について国別・産業別に議論する。

2. 研究手法とデータ

2.1 エネルギー消費係数とCO_2排出係数の作成

2.1.1 エネルギー消費係数ベクトルの作成

エネルギー消費係数ベクトル（$\mathbf{e}$）の作成には、国際産業連関表（World Input Output Database: WIOD）[3)]の取引基本表及び付帯の環境勘定のデータを用いる。具体的に、環境勘定から入手した44か国の部門別総エネルギー消費量（Rest of the Worldを含む）を、取引基本表の各国の部門別総生産額（millions of US dollar）で除すことで、エネルギー消費係数ベクトル$\mathbf{e} = (e_{ij})$を作成する。ここで、e_{ij}はi国におけるj部門の単位生産に伴うエネルギー消費量（TJ）を表す。

2.1.2 CO_2排出係数ベクトルの作成

CO_2排出係数ベクトル（$\mathbf{q}$）の作成には、上述したエネルギー消費係数ベクトル（$\mathbf{e}$）の作成と同様の方法を用いる。具体的に、WIODに付帯の環境勘定における44か国の部門別CO_2排出量データを利用し、i国のj部門の単位生産に伴う排出量（kt）を表すCO_2排出係数ベクトル$\mathbf{q} = (q_{ij})$を作成する。

2.2 EF及びCFの推計モデル

基本的な産業連関モデル[4)]に従うと、新規に発生した最終需要$\Delta\mathbf{f}$を満たすために、必要となる財・サービスの生産に由来する直接・間接的なエネルギー消費量（i.e., EF）及びCO_2排出量（i.e., CF）は、以下の（1）及び（2）式によりそれぞれ推計できる：

$$\mathbf{EF} = \hat{\mathbf{e}}\mathbf{L}\Delta\mathbf{f} \quad (1)$$

$$\mathbf{CF} = \hat{\mathbf{q}}\mathbf{L}\Delta\mathbf{f} \quad (2)$$

ここで、$\mathbf{EF}$、$\mathbf{CF}$は最終需要に伴い発生する各国各部門における直接・間接的なエネルギー消費量とCO_2排出量を表す。また、$\hat{\mathbf{e}}$と$\hat{\mathbf{q}}$は前述したエネルギー消費係数ベクトルとGHG排出係数ベクトルの対角化行列を、$\mathbf{L}$はレオンチェフ逆行列を、$\Delta\mathbf{f}$は（本研究では日本の）最終需要ベクトルをそれぞれ表す。

3. 結果と考察

図1〜2は、上記（1）、（2）式を用いて推計された日本の最終需要に由来する各国での総エネルギー消費量と総CO_2排出量が示されている。図1より、日本のEFに占める割合が大きい国として中国、韓国、ロシア等が挙げられ、ロシアでのエネルギー消費は日本のEF全体の2%を占めている。また、図2より、日本のCFに占める割合が大きい国としては中国、ロシア、アメリカ等が挙げられ、EFと同様に、ロシアでのCO_2排出は日本のCFの約2%を占める。日本のCFに

おけるロシアに対する依存度は、中国には劣るものの非常に高いと言える。そのため、ロシアが絡んだサプライチェーンの再構築は日本にとって環境負荷の面から非常に重要であると考えられる。各国での総エネルギー消費量、CO_2排出量の詳細については S1 を参照。

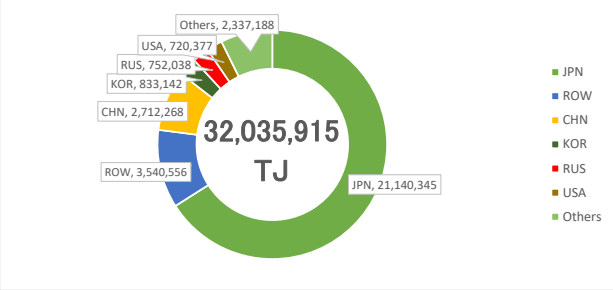


図 1 日本の最終需要が誘発する国別のエネルギー消費量（TJ）の内訳

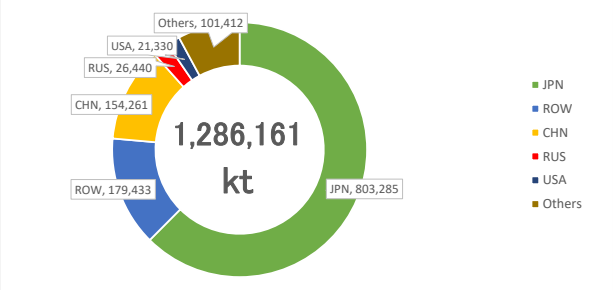


図 2 日本の最終需要が誘発する国別の CO_2 排出量（kt）の内訳

図 3 及び図 4 には、日本の最終需要が誘発するロシア国内での部門別エネルギー消費量及び CO_2 排出量が示されている。図 3 によると、日本の最終需要は、ロシア国内のコークス及び石油精製製品の製造、電気・ガスといった部門におけるエネルギー消費を誘発しており、ロシア産天然ガスからの脱却が、日本の EF の変化に与える影響は大きいと考えられる。

図 4 によると、日本の最終需要は、ロシア国内の電気・ガス、金属生成、採掘・採石業といった部門からの CO_2 排出を誘発していることが分かる。電気やガスといったロシアへの依存度が高い産業による CO_2 排出量が多いため、サプライチェーンの再構築による環境負荷への影響は大きいと考えられる。

4. 結論

本研究では、他地域産業連関分析の枠組みにおいて、日本からの最終需要に由来するエネルギー消費量と CO_2 排出量を推計し、ロシアの天然ガスやエネルギー産業からの脱却を想定した環境負荷の変化について議論した。各フットプリントにおけるロシア自体への依存度や、ロシア国内の電気やガス部門への依存度の大きさを考えると、日本のサプライチェーンの再構築は環境負荷に大きな影響が及ぶ可能性がある。

本会では、日本に限らず他国の最終需要に基づく EF 及び CF の推計結果についても報告し、ロシア産天然ガスからの脱却を踏まえた低環境負荷サプライチェーンの構築に資する政策提言に繋げる予定である。

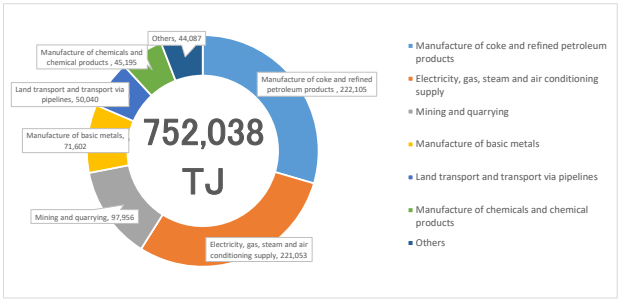


図 3 日本の最終需要が誘発するロシア国内での部門別エネルギー消費量（TJ）の内訳

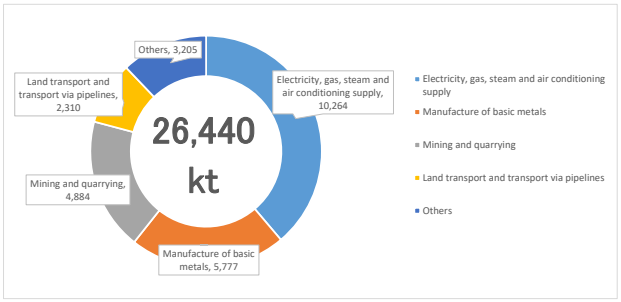


図 4 日本の最終需要が誘発するロシア国内での部門別 CO_2 排出量（kt）の内訳

参考文献

1) 経済産業省：“ウクライナ侵攻等を踏まえた資源・燃料政策の今後の方向性”, (2022)
2) Wearth：「サステナブル・サプライチェーンとは？話題の理由と、関連深い ESG 投資」,（オンライン）, 入手先＜サステナブル・サプライチェーンとは？話題の理由と、関連深い ESG 経営｜Wearth＞,（参照 2025-01-06）
3) Timmer, M. P., Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R. and de Vries, G. J.,: Review of International Economics, 23, (2015), pp.575–605
4) Miller R.E., Blair P.D.: Input-Output Analysis: Foundations and Extensions, second edition, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., (2009)

表 S1. 日本の最終需要の国別 EF 及び CF

	総エネルギー消費量(TJ)
Japan	21,140,345
Rest of the World	3,540,556
China	2,712,268
South Korea	833,142
Russia	752,038
United States	720,377
India	311,281
Taiwan	298,560
Australia	286,586
Indonesia	257,343
Canada	200,623
Germany	143,692
Brazil	124,559
Netherlands	90,714
France	84,908
Italy	58,856
Spain	57,624
United Kingdom	56,438
Mexico	43,261
Norway	41,266
Belgium	38,105
Turkey	32,564
Finland	29,202
Sweden	26,766
Poland	22,927
Denmark	21,677
Greece	19,021
Austria	12,805
Czech Republic	12,767
Switzerland	12,480
Hungary	9,434
Romania	7,633
Portugal	7,330
Bulgaria	5,900
Ireland	4,917
Slovakia	4,120
Lithuania	3,957
Croatia	2,816
Estonia	2,603
Slovenia	1,450
Luxembourg	1,231
Latvia	1,037
Malta	452
Cyprus	282

	総CO2排出量(kt)
Japan	803,285
Rest of the World	179,433
China	154,261
Russia	26,440
United States	21,330
South Korea	18,986
Australia	12,967
Taiwan	11,732
Indonesia	11,290
India	10,543
Canada	6,260
Germany	5,332
Brazil	4,484
United Kingdom	2,443
France	1,983
Italy	1,753
Mexico	1,743
Spain	1,404
Netherlands	1,390
Denmark	1,274
Turkey	1,186
Poland	1,082
Norway	690
Belgium	672
Finland	611
Czech Republic	441
Austria	440
Sweden	436
Romania	263
Switzerland	262
Hungary	255
Ireland	229
Bulgaria	202
Greece	198
Portugal	180
Slovakia	160
Lithuania	118
Estonia	115
Croatia	81
Slovenia	67
Luxembourg	60
Latvia	39
Malta	26
Cyprus	17

日本におけるタングステンの二次埋蔵量の評価

Assessment of secondary tungsten reserves in Japan

門田創真*[1)]、橋本征二[1)]
Soma Kadota, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
ce0055ps@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

レアメタルの1つであるタングステン(W)は、高融点、高沸点で、化学的に比較的安定しており、電気抵抗が比較的大きい。また、炭化タングステンや鉄タングステン合金は、非常に硬度が高く、摩擦熱に耐えることができる。このような特徴から、電球のヒィラメント、切削工具などの工具の材料、装甲を打ち抜くための砲弾、X線を遮断するための材料などの用途で利用されている。W は産業上も重要性が高いことから、リサイクルの推進が望まれる金属であり、二次資源・都市鉱山としての評価を行っておくことが有益である。本研究では、日本における W のフロー・ストックを推計し、W の二次資源のうち循環利用可能な量、すなわち二次埋蔵量の評価を行った。

2. 方法

2.1 二次資源の類型

本研究では、Hashimoto et al,[1)]が提案する類型を用いて評価を行った。この枠組みにおいて二次資源は、その物質の存在状況に関わる知識、および回収の収益性の 2 軸によって分類される。二次埋蔵量とは、存在状況に関わる知識が豊富でかつ回収の収益性が高い二次資源である。

2.2 タングステンの使用量・貿易量・再生利用量

JOGMEC のマテリアルフロー、経済産業省機械統計年報、財務省貿易統計、既存研究[2)3)4)]のデータを用いて、W の物質フローを推計した。対象製品は、超硬工具、特殊鋼、電気・電子部品、化学の 4 分野である。

2.3 タングステンの蓄積量及び二次埋蔵量の推計

W の蓄積量及び二次埋蔵量は、Maung et al.[5)]の推計方法を参考に下式で算出した。

$$WS(t) = \Sigma a \Sigma i \{WUa(i) \cdot Ra(t-i)\}$$

$$WSR(t) = WS(t) \cdot r(t)$$

ここで、$WS(t)$は t 年における W の蓄積量(ton)、$WUa(i)$は i 年における製品 a としての W の使用量(ton/y)、$Ra(y)$は製品 a の y 年後の残存率(-)でワイブル関数、$WSR(t)$は t 年における W の二次埋蔵量(ton)、r(t)は t 年における W の二次埋蔵率(–)である。

2.4 二次埋蔵率の推計方法

二次埋蔵率 r(t)は経済社会に蓄積された W のうち、経済的に回収可能な W の比率であり、二次埋蔵量を推計するための係数である。W の回収量を廃棄量で除することにより算出した。

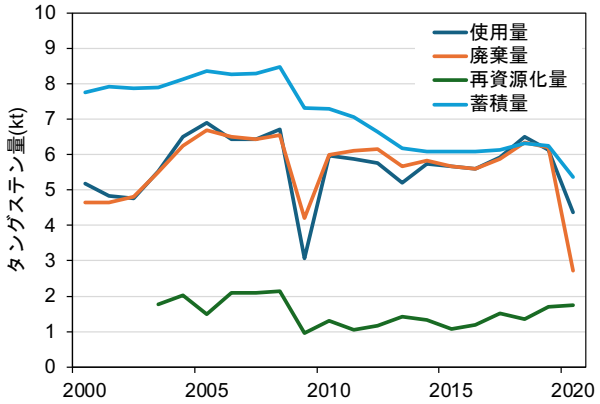


図 タングステンの使用量・廃棄量・再資源化量・蓄積量

3. 結果と考察

W の使用量・廃棄量・再生利用量の推計結果を図に示す。使用量については、その約7〜8割が超硬工具であり、2009 年のリーマンショック時及び 2020 年の COVID-19 時に大幅に減少したが、それ以外はほぼ一定と推計された。廃棄量については、使用量の 7〜8 割を占める超硬工具の寿命を 1 年としていることから、その動向は使用量と似た結果となった。再資源化量については、リーマンショックで半分程度に減少したものの徐々に回復し、2020 年時点では以前の水準に戻っているものと推計される。廃棄量に対する再資源化率は概ね 20〜30%となり、二次埋蔵率$r(t)$にはこの値を用いる。主要用途の寿命が短いため蓄積量も多くなく、近年は減少傾向にあると推計された。二次埋蔵量を含む二次資源の類型を適用した結果については学会当日に報告する。

引用文献

1) Hashimoto et al.: Proc. 8th Int. Conf. EcoBalance, C-08, 2008
2) Leal-Ayala, D.R. et al.: Resources, Conservation and Recycling, 103, pp.19-28, 2015
3) Ermelinda M. Harper: Journal of Industrial Ecology, 12(5-6), pp.768-784, 2008
4) Ermelinda M. Harper et al: Environmental Science and Technology, 42(10), pp3835-3842, 2008
5) Maung, K,N, et al.: Environmental Science and Technology, 51(7), pp.3824-3832, 2017

燃料電池アシスト自転車の環境影響評価及び稼働率変化に対する感度分析

Environmental impact of fuel cell-assisted bicycles and sensitivity analysis of changes in operating time

○江澤朋哉*[1)]、片山昇[1)]、堂脇清志[1)]
Tomoya Ezawa, Noboru Katayama, Kiyoshi Dowaki
1) 東京理科大学
*7423504 @ ed.tus.ac.jp

1. 序論

固体高分子形燃料電池（PEFC）は化学的に電気エネルギーを取り出すため、サイズや温度に対して、通常の使用範囲では、変換効率に影響を及ぼさない。また、既に導入されているシステムにおいても、耐用年数が長く、長期間運用する用途に対して利用価値が高い。そこで本研究は、PEFC アシスト自転車(H-bike)での導入を想定し、従来のリチウムイオンバッテリーを搭載したアシスト自転車(E-bike)と運用面を考慮し、環境指標を用いて比較した。なお、水素は下水汚泥由来のグリーン水素の利用を想定し、貯蔵を水素吸蔵合金とした。また、ここでの評価指標は GWP 及び ADP を対象とし、それぞれのバッテリーの劣化を考慮した評価を行った。

2. 手法

2.1 システム境界

システム境界を図 1 に示す。E-bike にはリチウムイオンバッテリー(Li-ion)の製造及び、充電される電力が含まれる。また H-bike には下水汚泥から製造するグリーン水素を水素吸蔵合金タンク(MH)に貯蔵し、それを PEFC で駆動させるバッテリー(MH-PEFC)を想定する。

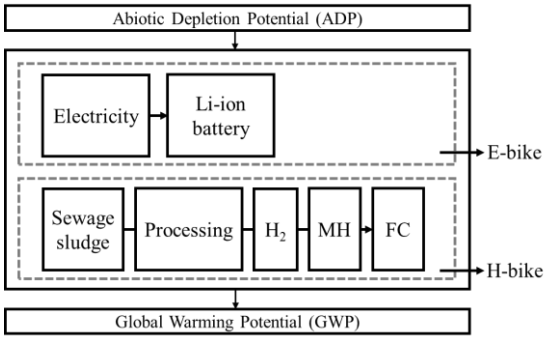


図１：システム境界

また機能単位は E-bike 及び H-bike の 5 年間における使用とする。また、稼働率に関する感度分析を実施するためのシナリオ(表 1)を設定した。なお、E-bike 及び H-bike は平たん路を一定速度で走行するものとし、その際の消費電力は 50 W とする。

表１：各シナリオ

シナリオ	稼働率 [h/day]	電力消費率 [Wh/day]
A	0.25	12.5
B	0.5	25
C	1	50
D	2	100
E	4	200

E-bike と H-bike のバッテリー容量に対する構成部材を表２に示す。

表２：E-bike と H-bike の構成部材と規模

構成デバイス	E-bike	H-bike
Li-ion [Wh]	306	-
PEFC [W]	-	300
MH[g]	-	2280

詳細なインベントリデータは表 S1 に記載する。

2.2 バッテリーの劣化

本研究では、ライフサイクルの視点からバッテリーの劣化を考慮した。まず、Li-ion の劣化による容量損失Q_{loss}[%]は、充放電サイクルと経年劣化によって引き起こされ、式(1)でモデル化されており[1]、これに基づいて性能劣化を考慮した。各パラメータは表 S2 に記載する。

$$Q_{loss_cycle} = (a \cdot T^2 + b \cdot T + c)\exp[(d \cdot T + e) \cdot I_{\mathrm{rate}}] \cdot Ah_{throughput} + A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \cdot D^{0.5} \quad (1)$$

ここで充・放電時の C レートはそれぞれ 0.33 及び 0.16 とし、SOH が 70%になったときにバッテリーを交換するものとした。なお各シナリオの交換までの日数と機能単位内での交換回数は表３のようになる。

表３：シナリオごとの交換回数

シナリオ	日数	交換回数
A	-	0
B	-	0
C	1625	1.1
D	1325	1.4

E	975	1.9

次に MH-PEFC については、運転時間中の触媒の酸化等により過電圧が増加する。結果、所定の電流に対する電圧が低下し、発電効率が低下することで水素の消費量が増加する。ここでは、栃木ら[2]の劣化モデルをもとに、電圧の低下を式(2)のように線形近似した。

$$V = -2.0^{-6} \cdot t + 0.7157 \quad (2)$$

ここで、MH-PEFC のシナリオごとの稼働時間と電圧の低下は表４のようになる。なお、MH は 1000 回程度の吸脱着が可能であることに注意されたい。

表４：燃料電池稼働時間及び劣化後の電圧

シナリオ	稼働時間 [h]	初期電圧 [V]	劣化後電圧 [V]
A	465	0.7157	0.7149
B	913	0.7157	0.7139
C	1825	0.7157	0.7121
D	3650	0.7157	0.7084
E	7300	0.7157	0.7011

ここから、MH-PEFC のライフサイクル期間での水素消費量は以下のように計算される。

まず、PEFC の効率は式(3)のように表される。

$$\eta(t) = \mu_f \times \frac{V_c(t)}{V_{OCV}} \quad (3)$$

ここで、μ_fは燃料電池のストイキ比、$V_c(t)$[V]はセル電圧、$V_c(t)$[V]は開放起電圧である。本研究ではストイキ比は 0.95、開放起電圧は 1.18 V とする。

次に、電圧低下を考慮した水素の消費量$H_{2_{total}}$[MJ]は以下の式で表される。

$$H_{2_{total}} = \frac{1}{2} \times t \times \left(\frac{P_{FC}}{\eta_0} + \frac{P_{FC}}{\eta(t)} \right) \times 3600 \quad (4)$$

ここで、η_0は初期の発電効率、P_{FC} [W]は燃料電池の出力である。

3. 結果

以上の条件に従って、各シナリオに対する H-bike と E-bike の環境影響指標の比較を行った。

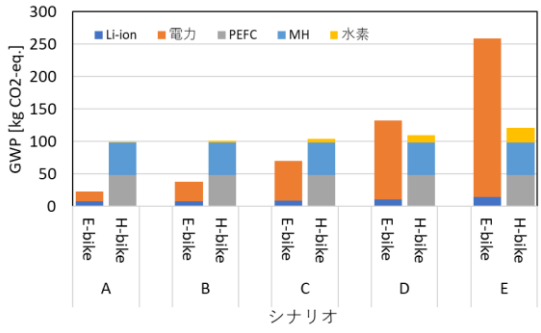


図２：シナリオごとの GWP

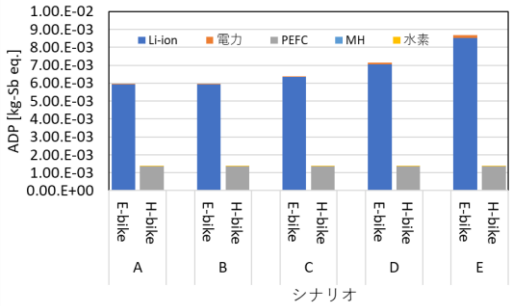


図３：シナリオごとの ADP

まず GWP において、シナリオ A、B、C と D、E では E-bike と H-bike の GWP が逆転した(図２)。また、E-bike においては電力が GWP の大部分を占め、割合はシナリオ A~E で 66~94%と 28 ポイント増加しており稼働率に対する影響は大きい。一方 H-bike では水素が占める割合は 1~19%と 18 ポイント増加し、唯一変化するインベントリデータであるものの、稼働率に対する影響は E-bike 程大きくない。また、稼働率 1 h/day の増加に対する GWP の増加傾向は両自転車とも線形であり、E-bike の場合は約 62.8 kg-CO_2-eq.であるが、H-bike の場合は約 5.7 kg-CO_2-eq.と大きな差がある。そのため、シナリオ D、E ではそれぞれ 727 日目、1455 日目で GWP の逆転が生じた(図 S1)。また ADP において、全てのシナリオで E-bike より H-bike の方が小さくなった(図３)。両自転車においてバッテリー製造が占める割合は 98%以上であり、E-bike では Li-ion の劣化による交換が発生したため、稼働率 1 h/day の増加に約 8E-4 kg-Sb eq.増加した。一方 H-bike は、MH-PEFC の交換が発生しなかったため、稼働率 1 h/day の増加に対する ADP の増加は約 7E-7 kg-Sb eq.に留まった。

4. 結論

本研究では、E-bike と H-bike について、搭載する Li-ion と PEFC の劣化を考慮した 5 年間の環境負荷について、稼働率の観点から感度分析を実施した。その結果、変化率の差異から GWP では E-bike と H-bike の値に逆転が生じ、2 h/day 以上の稼働率において H-bike が優位となった。また ADP においては稼働率に関わらず H-bike が優位であり、変化率については E-bike のほうが大きい結果となった。

5. 引用文献

1) John Wang, Justin Purewal, Ping Liu, Jocelyn Hicks Garner, Souren Soukazian, Elena Sherman, Adam Sorenson, Luan Vu, Harshad Tataria, Mark W. Verbrugge, Journal of Power Sources, 269 (2014) 937-948
2) Shota Tochigi, Kiyoshi Dowaki, Energies, (2023), 16(4), 198

Supporting Information

表 S1 にインベントリデータを示す。

表 S1：インベントリデータ

PEFC Stack[S1]	Input (kg/W)	
	NAFION	7.0×10^{-3}
	Platinum	7.5×10^{-8}
	Graphite	4.5×10^{-3}
	Polyvinylidene chloride (PVDC)	1.1×10^{-3}
	Aluminum	3.0×10^{-4}
	Chromium steel	1.0×10^{-4}
	Glass fires	1.0×10^{-4}
	Carbon black	8.0×10^{-8}
	Steel product	3.7×10^{-3}
	Polyethene high-density granulate (HDPE)	1.5×10^{-3}
	Chromium steel	1.1×10^{-3}
	Cast iron component	8.0×10^{-4}
	Aluminum	7.5×10^{-4}
	Polypropylenes granulate (PP)	2.5×10^{-4}
Li-ion battery	Input(kg/kWh)	
	Battery, Li-ion, rechargeable, prismatic {GLO}| market for | APOS, U	
MH	Input (g/MH tank)	
	Mischmetal {GLO}| production, primary | APOS, U	
Hydrogen	Input(m^3/s)	
	Bio H_2 from sewage sludge [S2]	
Electricity	Input(kWh)	
	Electricity, high voltage {JP}| market for | APOS, U	

表 S2 に式(1)のパラメータを示す。

表 S2：パラメータ

パラメータ	値
a	8.61E-6, 1/Ah-K^2
b	-5.31E-3, 1/Ah-K
c	7.63E-1, 1/Ah
d	-6.7E-3, 1/K-(C-rate)
e	2.35, 1/(C-rate)
f	14,867, 1/$day^{1/2}$
I_{rate}	C レート
D	Days
E_a	24.5, kJ mol^{-1}
R	8.3145, J mol^{-1} K^{-1}
T	K

なお、$Ah_{throughput}$[Ah]は充放電における累積の電荷量である。

図 S1 に、各シナリオにおける GWP の時間的推移の示す。

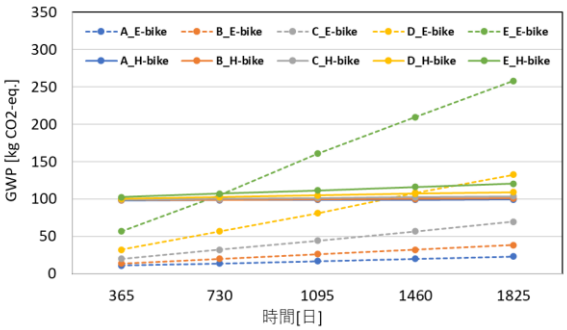


図 S1：各シナリオにおける GWP の時間的推移

＜引用文献＞

S1) Chen Z S, Lam J S L (2022), Transportation Research, Part D 103 103192

S2) Kako S, Seo Y, Dowaki K, Kameyama M, Proc. Conf. Biomass, (2019), Sci. p 137–138

IDEA 海外版の構築
～温室効果ガス以外の環境負荷物質についての構築手法の検討～

Development of IDEA regionalized type
Methods for environmentally hazardous substances other than greenhouse gases

○川上冬真[1)]、稲場一愛[1)]、小林謙介[*1)2)]、藤井千陽[2)]、横田真輝[2)]、田原聖隆[2)]
Toma Kawakami, Chinari Inaba, Kensuke Kobayashi, Chiharu Fujii, Maki Yokota, Kiyotaka Tahara
1) 県立広島大学, 2) 産業技術総合研究所
* kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1.背景と目的

環境に対して関心の高まっている現代社会において、製品の環境負荷を効率的に低減させることが求められている。そのためには、LCA の実施が不可欠である。LCA の実施には関連する全てのデータを収集することが理想であるが負担が大きく困難であるため、バックグランドデータを用いて評価することが一般的である。

また、日本には海外製品が多くあり、それらの評価を可能にすることも必要である。そのためには海外のバックグラウンドデータの網羅的な整備が必要である。そこで、これまでに世界平均および日本において輸入の多い国の上位 8 割程度を占める 18 か国を対象に、IDEA 海外版を構築してきた。但しこれらは主として GHG 関連原単位をターゲットとしていた。一方、GHG 関連以外の原単位の精度は GHG 関連原単位ほどの精度は十分ではないのが現状である。そこで本研究では、各国の NOx、SOx、PM2.5 を中心とした GHG 以外の環境負荷物質の推計手法について検討を行い、海外のバックグラウンドデータを充実させることを目的とした。排出量などのデータがある国の原単位を求めて日本の原単位に対する比をとり技術係数として作成することを目的とした。中でも上述の 18 か国に注力して検討した。

2.推計方法

本検討では化石燃料起因の燃焼時の SOx、NOx などの原単位を推計した。はじめに、①IDEA Ver.3.3 海外版を用いて、公表されている対象国・地域の原単位と日本の原単位の比をとり、現状の原単位の状況を分析した。次に、脱硫率や脱硝率などが考慮された環境負荷物質の排出量と化石燃料由来の発電電力量から 54 か国の②化石燃料由来の電力原単位を求めた。さらに③排出原単位との相関を分析することで、データを得られなかった 54 か国以外の国の推計手法の検討を行った。本検討では、各国に共通して存在する一人あたり名目 GDP や名目 GDP で相関を検討した。

①現状分析

LCI データ：14 項目、LIME2：18 項目、LIME3：5 項目、その他：1 項目で日本の原単位に対する比を分析した。これらを踏まえ、脱硫率と脱硝率を考慮したデータを得る方法を検討した。

②化石燃料由来の排出原単位

環境負荷物質の排出量を化石燃料由来の発電電力量で除し、1kWh あたりの排出量（g）を求めた。環境負荷物質の排出量は、OECD の Air Emissions 関連統計[1)] から 54 か国分のデータを入手した。発電電力量は、IEA の World Energy Statistics(2019 年)[2)] を用いた。2019 年のデータを用いたのは、これまでの IDEAver.3.3 を用いた研究では 2019 年のもので検討を行ってきたためである。

③排出原単位との相関分析

IMF[3)] の GDP データから 54 カ国の排出原単位と一人あたり名目 GDP（2019）や名目 GDP(2019)の散布図を作成し、その相関からデータを得られなかった国について推計方法の検討を行った。

3.結果と考察

①現状分析

図 1 の結果から NOx 排出量について海外は日本に対して非常に大きいことが確認できた。SOx においても日本に対して排出量が多くなっていた。これは、海外のデータでは脱硫率、脱硝率が考慮できていないことが主要な要因である。

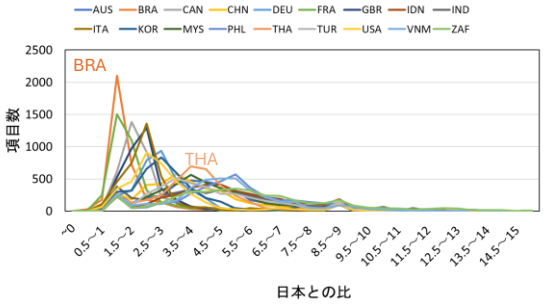


図 1　NOx 原単位の比

②化石燃料由来の排出原単位

54 か国の CO、NH_3、NMVOC、NOx、PM2.5、PM10、SOx の 7 つの物質の、化石燃料による電力原単位を得た。18 か国の内からは、8 か国の原単位を得た。

③排出原単位との相関分析

NOx、PM2.5、SOx と一人当たり名目 GDP の相関を分析した結果を図 2～5 に示す。SOx について別の指標と相関を分析した結果を図 6、図 7 に示す。これらの結果から、いずれも高い相関を得ることはできなかったが、L 字に分布しているものも見られた。この特徴からいくつかにグルーピングするなどして技術係数を提案、または近似式から推計するなどして、原単位を得ることができる

と考える。本検討では、GDP との相関から技術係数などを推計することとした。

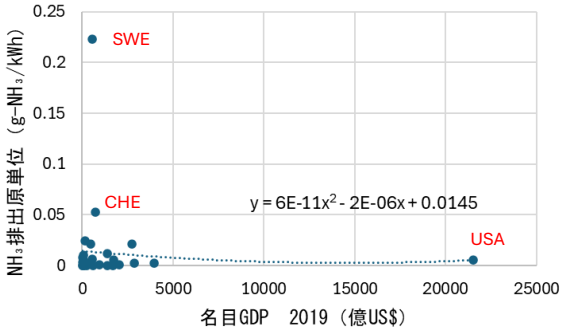


図 2　NH_3と名目 GDP の相関

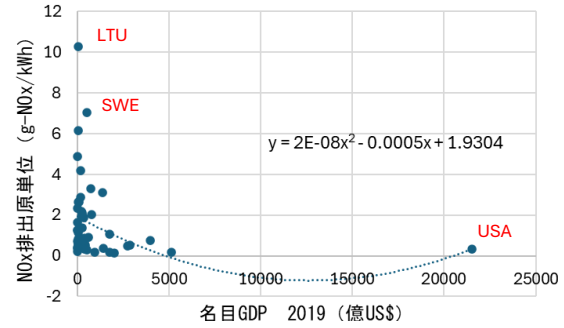


図 3　NOx と名目 GDP の相関

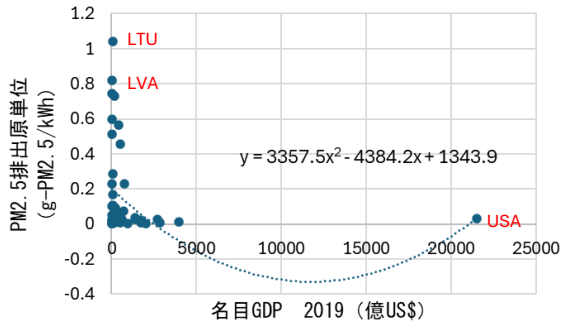


図 4　PM2.5 と名目 GDP の相関

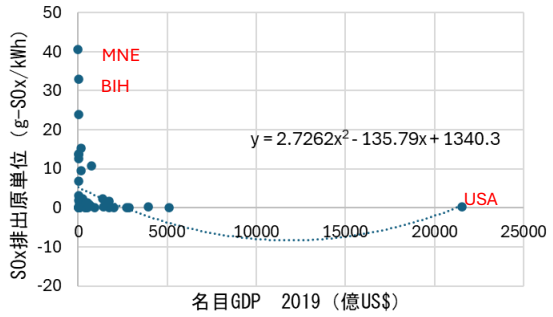


図 5　SOx と名目 GDP の相関

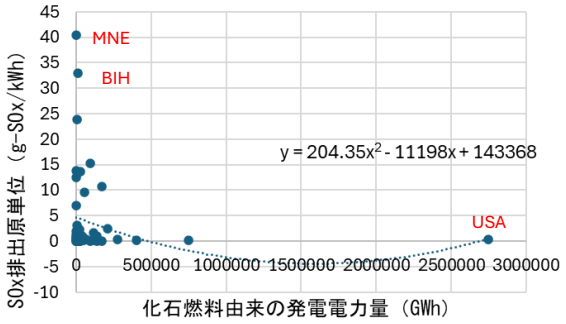


図 6　SOx と化石燃料由来の発電電力量の相関

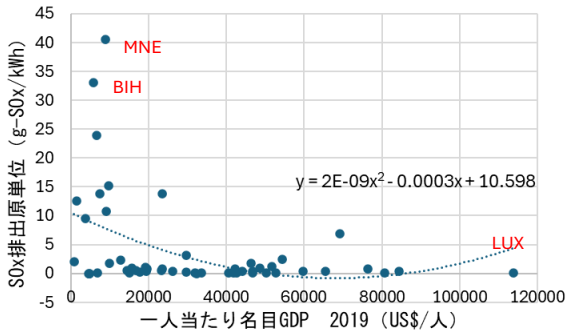


図 7　SOx と一人当たり名目 GDP の相関

4.今後の課題

得られた分析結果をもとに、脱硫や脱硝等に関する技術係数の検討を行う。また今回は GDP との相関を見たが、他の因子の検討も行う。

5.まとめ

IDEA 海外版の拡充を目的に、特に GHG 以外の原単位の充実を目的として検討を行った。現状分析によって、海外のデータでは脱硫率、脱硝率が考慮されていないことによる影響を確認できた。排出原単位を推計し、その原単位と GDP の相関を分析することで技術係数の作成を試みた。今後、より適切な指標がないか検討が必要である。また技術係数の作成方法についても更なる検討が必要である。

6.参考文献

1) OECD：Air emissions - Air pollutants Inventories, 入手先
〈https://data-explorer.oecd.org/〉
2) IEA：World Energy Statistics, 入手先
〈https://www.oecd-ilibrary.org/statistics〉
3) IMF：GDP per capita, current prices, 入手先
〈https://www.imf.org/external/datamapper/NGDPDPC@WEO/OEMDC/ADVEC/WEOWORLD〉

早生桐を利用した内装材におけるライフサイクル評価

Life cycle assessment of interior materials using early-ripening paulownia

○山口 実友*[1)]、大澤 悠[2)]、内藤 茂樹[1)]、伊坪 徳宏[1)]
Miyu Yamaguchi, Osawa Yu, Shigeki Naito, Norihiro Itsubo
1) 早稲田大学, 2) パナソニックハウジングソリューションズ株式会社
* miyu18@ruri.waseda.jp

1. はじめに

2050 年の脱炭素社会達成に向けて、エネルギー消費量の約 3 割を占める建築分野では、木材利用による低炭素化が注目されている。木材では、樹木が成長過程で吸収した CO_2 を炭素として蓄積し、建物に固定することができるため、持続可能な炭素循環サイクルを形成できる。本研究では、密度が小さく多孔質なため軽量で断熱性や吸放湿性に優れ、日本では古来より箪笥のような家具などに使用されてきた桐のうち、成長が早く炭素固定効率の高い「早生桐」を非住宅向け床材に利用し、植物の炭素固定を考慮した内装材のライフサイクル影響評価を行うことで、樹木の炭素固定による CO_2 除去が与える環境負荷削減効果とネガティブエミッション貢献度を明確化することを目的としている。

2. 方法

2.1. 研究方法

本研究では、非住宅(オフィスや店舗)向けの床材を評価対象として算定を行った。評価対象は、植林-伐採-輸送-製造-施工-使用-廃棄までで、影響領域は、気候変動気候変動(IPCC 2021 GWP 100a)・土地利用とした。

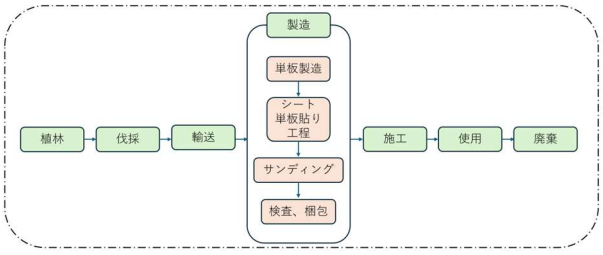


図 1 システム境界

本研究では、床材の輸送から施工に関しては、パナソニックハウジングソリューションズ株式会社(PHS社)製のオフィス向け床材を対象にした調査で実測された 1 次データを使用し、”植林から伐採”と”使用から廃棄・改修”に関しては、論文から引用した 2 次データと組み合わせて使用する。また、主材料である合板に関しては、スギ、早生桐の 2 種類の合板を用いたシナリオから環境影響を評価する。機能単位は、床材 $1m^2$ あたりとし、算定には、IDEA ver3.4 を用いた。

2.2. 算定方法

本研究では、最も多用されている式(1)をベースに算定を行った。

$$CO_2\text{固定量} = \text{気乾済み木材体積} \times \text{木材密度} \times \text{炭素含有率} \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

3. 算定結果

3.1. 炭素固定量と GHG 排出量の比較

スギ合板、早生桐合板を用いた床材の GHG 排出量の算定結果を図 2 に示す。また、廃棄のシナリオは、埋め立てで統一した。

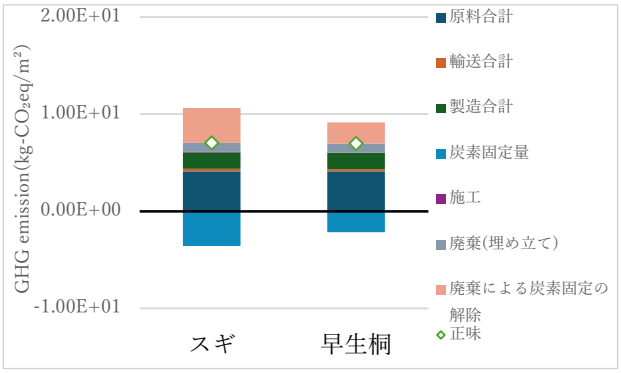


図 2 床材(スギ), 床材(早生桐)の GHG 排出量の比較

スギ合板を用いた床材の GHG 排出量は、7.02(kg-CO_2eq/m^2)、早生桐合板を用いた床材の GHG 排出量は、6.97(kg-CO_2eq/m^2)となった。早生桐は桐と同様に密度が小さいため、式(3.1)を用いた結果、早生桐合板を用いた床材は、スギ合板を用いた場合より炭素固定量は小さいが、軽量なため、輸送に係る GHG 排出量も小さくなった。

3.2. 廃棄・改修方法の違いによる GHG 排出量の比較

床材の廃棄・改修方法の違いによる GHG 排出量の比較を図 3 に示す。廃棄方法については、廃棄木材を分別し、破砕して埋め立てることを想定した。また埋め立ての代わりに、廃チップでパーティクルボードを生

成する場合と廃チップを燃焼してバイオマス発電に活用する場合についても試算を行った。改修方法に関しては、一般的な床の改修で全面が貼り換えられることが主流であるのに対し、PHS 社のオフィス向け床材は不具合が生じた部分について 1 ピース単位から交換（一部貼り替え）が可能であり、本要旨では施工面積の 10 分の 1 を貼り換えることを想定して試算した。

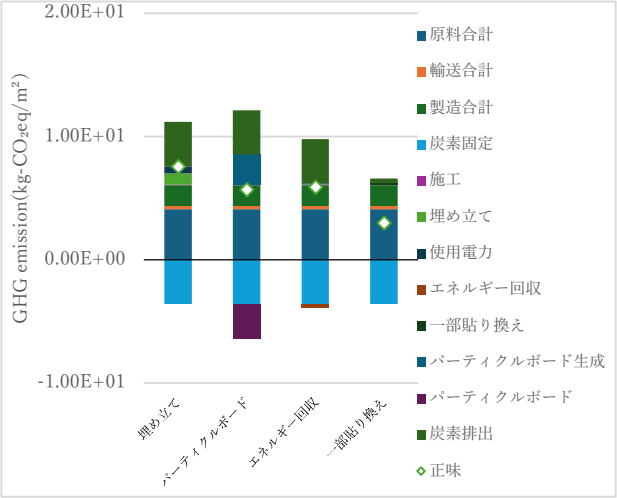


図 3 床材（スギ合板）の廃棄による GHG 排出量の比較

試算の結果、廃棄方法の影響については、埋め立てをパーティクルボード生産あるいはエネルギー回収にすることで GHG 排出を削減できる結果となった。改修方法については、一部貼り換えによって GHG 排出を抑制でき、入退去時の改修における GHG 排出の削減が期待できる結果となった。

3.3. 土地利用面積の比較

次に、スギ合板、早生桐合板を用いた床材の原料の土地利用面積の算定結果を図 4 に示す。

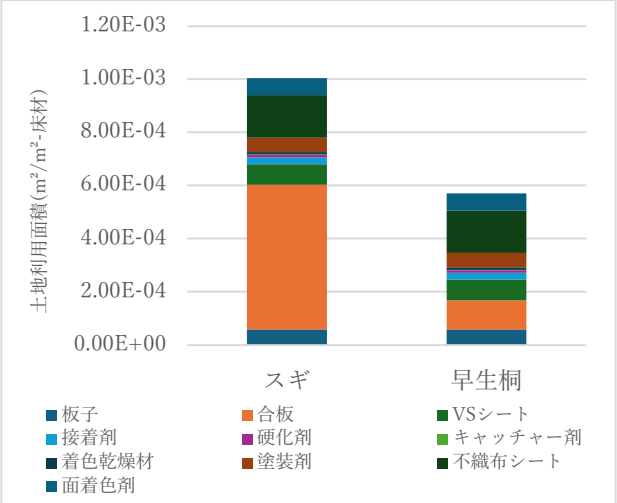


図 4 床材（スギ），床材（早生桐）の土地利用面積の比較

スギ合板を利用した床材の原料の土地利用面積は 10.0E-04(m^2/m^2-床材)、早生桐合板を利用した床材の原料の土地利用面積は 5.70E-04(m^2/m^2-床材)となった。早生桐はスギの 4.93 倍の速さで成長するため、合板の土地利用面積は 1/4.93 へ小さくなる。そのため、床材の原料の土地利用面積を 43.0%削減できる。

4. まとめ

木材を内装材などの建材として同じ単位面積に施工した場合、早生桐は密度が小さいため、他の密度の大きい木材に比べて、床材への炭素固定量は少ない。しかし、輸送時の GHG 排出量が小さいため、全体の GHG 排出量はわずかに小さくなることがわかった。また、早生桐は森林循環サイクルが早いことから、原料の土地利用面積を削減することができる。早生桐を建材に活用することで、自然環境への影響を小さく保ちながら且つ効率的に大気中の炭素を固定できる可能性を確認できた。

したがって早生桐の活用については、軽量性・断熱性・吸湿性などの特徴を活かした新たな商品の開発および利用の拡大によって、既存のスギなどの木材利用と相乗した脱炭素などの環境貢献が図れると考えられる。例として、早生桐の高い断熱性を活かした、空間の温度調節のために必要なエネルギーの削減をしながら、高い吸音性を活かした、居住快適性の向上などを同時に達成できる床材や壁材などが期待できる。

また床材の廃棄・改修方法については、部分的に改修する方法はオフィスや店舗のような入退去が頻繁に行われる領域での GHG 排出抑制を期待できる。

5. 今後の展望

早生桐は二次林であり、近年植林を経て普及が進んでいる。今回の結果は、一次林と二次林の違いが反映されていないため、その違いを考慮した環境影響評価を実施することが課題である。

6. 引用文献

鈴木誠一：“早生桐植林地の土壌調査及びバイオマス調査”，（2019），pp. 1−15

環境問題を考慮してキャリアを選ぶのは誰か？

東京大学学生を対象とした質問紙調査

Who chooses a career with the environment in mind?
A questionnaire survey of students at the University of Tokyo

○秋山知也*[1)]、水野 那奈子[1)]、中村 明日香[1)]、井上 賢志[1)]、杉浦 麻緒[1)]、中谷 郁斗[1)]
Tomoya Akiyama, Nanako Mizuno, Asuka Nakamura, Kensi Inoue, Mao Sugiura, Ikuto Nakaya
1) 東京大学
* tomotate26@gmail.com

1. 序論

1.1 社会的ジレンマとしての環境問題の解決

ハーディンの「コモンズの悲劇」の考え方に則ると、地球環境は公共財としての性質を持つため、個々人にとっては、自らは環境問題の解決に貢献せず、他者の貢献に「ただ乗り」することが短期的には合理的な選択となる[1)]。しかし、このような行動が広がると、環境問題は解決できない。この問題を解決するには、個人にとって環境問題への貢献が合理的になるように、制度を導入したり、技術を発展させたりする必要がある[2)]。それを実現するには、環境負荷の低い技術や行動様式を単に「受容」するだけでなく、その人のキャリアを通じて、つまり仕事や研究を通じて、問題解決に主体的に貢献する人を増やしていくことが欠かせない。

1.2 キャリア選択行動と大学教育

では、求職者（日本では主に学生）は、キャリア選択時に環境問題をなぜ、どのように考慮しているのだろうか？関連した日本でのインタビュー調査は行われているものの[3)]、研究はほとんど蓄積していない。

ここで注目すべきは、新卒一括採用が主流な日本においては、大学教育が学生のキャリア選択に影響を与えやすいと考えられることである。例えば、大学で環境問題についての授業を取った人や、環境問題に関連する研究に携わった人は、環境問題をより深刻に考え、キャリア選択にもより環境問題を意識するようになる可能性がある。さらに、大学は学生の海外留学を促し日本とは違う視点で環境問題に触れさせることや、大学キャンパス内でのライフスタイルをより持続可能にすることで、学生の環境問題への意識、ひいてはキャリア選択行動に影響を与える可能性もある。

本研究では、東京大学の学生 427 名を対象とした質問紙調査を行い、学生がどのように環境問題を考慮しているのか、それをどのような要因が説明するかについて分析を行い、大学教育の改善などについての示唆を得ることを目指す。

2. 方法

2.1 参加者

2024 年 12 月 24 日から 2025 年 1 月 20 日の期間に、学務システムの掲示板（UTAS）を通じて、東京大学の学生を募集した。日本語での回答者は 378 名、英語での回答者は 49 名の合計 427 名が回答した。なお、学部生は 202 人、大学院生等は 225 名だった。

2.2 被説明変数

以下の質問項目で被説明変数を測定した。

キャリア選択での考慮

あなたは自身のキャリア形成を考える際、「環境問題」を考慮していますか？（6 件法のリッカート法尺度で測定、「まだキャリアについてあまり考えていない」という選択肢も用意）

なお、参加者がどのように環境問題を考慮しているのかを探るため、以下のような質問も尋ねた。

具体的な考慮方法

具体的にどのように考慮していますか？当てはまるものを全て選択してください。

① 就職する企業を選ぶ際に、環境問題の改善に貢献できる企業かどうか、を考慮する
② 就職する企業を選ぶ際に、環境問題が深刻化すると業績が悪化しそうな企業かどうか、を考慮する
③ 環境問題の解決に直接関与できる業種やキャリアを選ぶ
④ その他　（自由回答）

2.3 説明変数

参加者のキャリア選択行動等に影響を与えうる要素として以下を、主にリッカート法尺度で測定した。

(1) 自身の研究テーマと環境問題との関連性
(2) 大学の講義受講を通じた環境問題の学習
(3) 海外滞在経験の長さ
(4) 環境問題に対する不安
(5) 将来世代に貢献する動機（レガシー動機）
(6) 環境問題への世間の注目についての信念
(7) 将来を考える際の時間軸の長さ
(8) 出身地での自然との触れ合いの多さ
(9) 環境問題を認知する時期の早さ

これらの変数に加えて、大学内での環境行動を取っているか、大学内の環境に関するプロジェクトなどを認知しているかなどについても計測した。

3. 結果と考察

まず、参加者の多くがキャリア選択において環境問題を考慮していることが分かった。「どちらかと言えば考慮している（4）」「ある程度考慮している（5）」「最も重要な要素として考慮している（6）」と答えた参加者の合計は、約 48％ と半数近くにのぼる（図1）。

その中の 約 67 % が、「就職する企業を選ぶ際に、環境問題の改善に貢献できる企業かどうか、を考慮する」と回答した一方で、「就職する企業を選ぶ際に、環境問題が深刻化すると業績が悪化しそうな企業かどうか、を考慮する」という回答した人は約 23%にとどまった。これは、企業への就職を通じて環境問題の解決に貢献しようと考えている参加者は多い一方で、企業の成長性を判断する視点として環境問題を考慮している回答者は少なかったことを示唆している。ただし、本質問紙調査に協力する時点で、普通の学生よりも環境問題への関心が高かった可能性があり、これらの結果に対する解釈には慎重さが求められる。

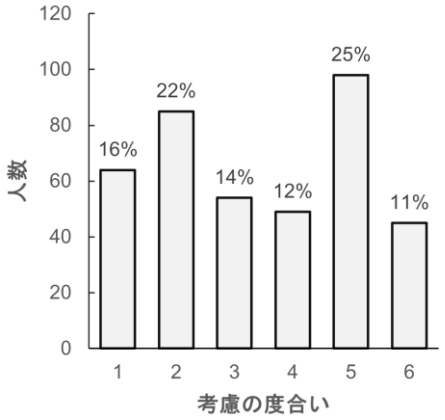


図 1. 環境問題のキャリア選択での考慮
数値が大きいほど考慮の度合いも大きい。

また、研究テーマが環境問題と関連している人ほど、キャリア選択で環境問題を考慮する正の相関関係（r = 0.53）も見られ、環境に関する研究活動を増やすことが、研究活動以外の分野でも、学生の環境問題への考慮を増やし、環境問題の解決に貢献する可能性も示唆された。本発表時には、他にどのような変数がキャリア選択の考慮の程度に関連しているかついて、さらに分析を行う予定である。

4. 引用文献

1) Hardin, G: Science, 162 (3859), (1968), pp.1243-1248
2) Heckathorn, D. D: Rationality and society, 1(1), (1989), pp.78-100.
3) 長谷川路子： 第 26 回環境情報科学学術研究論文発表会，東京，(2012)，pp. 219-224

動的マテリアルフロー解析による銅資源利用から見た電化効果の演繹的検討

Deductive Consideration of Electrification Effect from the Perspective of Copper Resource Utilization by Dynamic Material Flow Analysis

○島田陽生*[1)]、八木原昂輝 [1)]、大野肇 [1)]、福島 康裕 [1)]
Haruki Shimada, Koki Yagihara, Hajime Ohno, Yasuhiro Fukushima
1) 東北大学
* shimada.haruki.t6@dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

近年、脱炭素社会の実現に向けて、電化の必要性が高まっている。一方で、電化を実現するための資源消費の増加が懸念される。電化がもたらす温室効果ガス排出削減の評価においては、化石燃料で駆動する製品を、電気で駆動する製品に置き換え、それに伴い「製品を使用する際」の排出量についての評価は容易であるが、製品製造プロセスの変化や、原料の変化に伴う原料供給のサプライチェーンの変化などにより、「同じ量の製品を供給する際」の排出が増減する可能性がある。とりわけ、銅はその導電性の高さから、電線などに多く利用され、電気で駆動する製品に多く用いられるため、その需要増加に伴う排出の増加が懸念される。

本研究では、ケーススタディとして銅に着目し、日本における電化に伴う需要増加による GHG 排出量増加を定量化することで、電化がもたらすべき環境影響低減効果を演繹的に定量化することを目的とする。

2. 手法

2.1.動的 MFA 手法を用いた銅の需要動態把握

一般に、国内における銅原料は、チリを主な産地とする輸入された銅精鉱と、市中で発生するスクラップに大別される。銅需要増の想定において、スクラップ発生量増も同時に起こることが予想される。市中スクラップ由来の銅供給量と需要の差分を銅精鉱必要量と考えることで、銅需要増加による排出量増加の定量化を試みた。

本研究では図 1 に示す銅の循環モデルに基づき、銅の動的マテリアルフロー解析を行った。モデルは 5 つの段階 A)精鉱の精錬段階, B)銅製品の製造段階, C)銅製品の使用段階, D)利用済み銅製品由来の銅スクラップの処理段階, E)スクラップからの銅の回収段階に分けられる。ここで、C)では使用されない在庫、散逸、EoL 時の未回収による損失が、D),E)ではそれぞれ歩留まりによる損失が生じる。また、B)における損失は工程内でリサイクルされる。

t 年に投入された銅精鉱は、t 年の内に A)で電気銅へ加工され、B)で銅製品へと加工されて C)へ投入される。t 年に投入された銅製品は t+1 年から EoL を迎え、D)及び E)を経て、二次電気銅に加工される。二次電気銅は t+2 年に B)で銅製品へ加工され、再度 C)へ投入される。C)に存在する銅をストックと定義した。

加えて、銅製品は固有の寿命分布をもつ 6 つの製品グループに分類されるとし、C)ではワイブル分布に基づいた銅製品の寿命が考慮され、確率的に使用段階から銅が流出する。表 1 にそのパラメータを示す。
銅の輸出入については、銅の素材としての輸出入(直接輸出入)、製品に含まれる形での輸出入(間接輸出入)、スクラップの輸出入を考慮した。

2001~2021 年におけるモデルへの銅精鉱の投入量、直接輸出入量、スクラップ輸出入量は鉱物資源マテリアルフロー[1)]に基づき、2000 年時点で銅ストックの総量及び間接輸出入量は、国内に投入される銅製品のうち、一定割合が輸入及び輸出されるとして決定し、その割合は醍醐らによる先行研究 [2)]に基づくとした。

2.2. 時系列予測モデル: ARIMA を用いた将来予測

動態把握の結果を基に、時系列予測モデル: ARIMA モデル [3)]を用いて、国内の銅ストック総量の将来予測を行った。具体的には、2001~2021 年のトレンドが維持されるという仮定のもと、2022 年以降の製品グループ

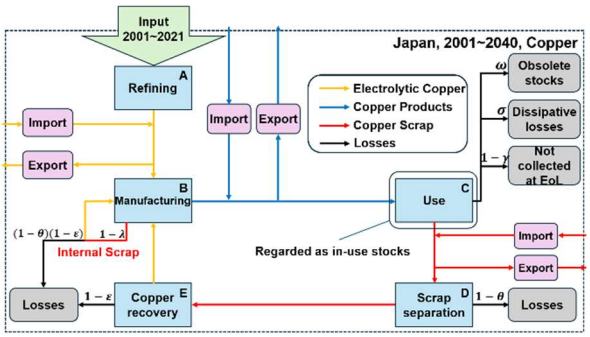


図 1 日本における銅の循環モデル [2)4)]

表 1 ワイブル分布のパラメータ設定値 [2)]

Product groups	μ (avarage lifetime) [year]	α (shape parameter)	β (scale parameter)
Telecommunication & Electrical Power	17.5	3.5	19.4
Electrical Machine	12.8	3.5	14.2
Non electr. Machine	12.0	3.5	13.3
Building & Construction	44.9	1.7	50.4
Other Copper products	10.0	3.5	11.1
Automobile	10.5	3.5	11.7

別のストック量の推移を予測し、これを銅の需要が増加しないシナリオ(BAU)とした。2022 年以降の銅の輸出量についても、ARIMA モデルを用いて輸出形態ごとに予測を行った。モデルの各変数(p,d,q)について、p,q は 0~2、d は 1~2 の間で変化させ、AIC(赤池情報量基準)が最小となった変数の組み合わせを最適なモデルであるとした。予測の精度の観点から、2040 年までを評価範囲とした。

2.3. 銅精鉱必要量増加による排出量増加の定量化

BAU に対し、2022 年以降銅の需要が年次 0.1 %~5.0 %増加するケースを考慮した。それぞれに対し、将来にわたる銅精鉱の必要量を算出し、2022~2040 年における正味の銅精鉱必要量増加を算出した。これを銅精鉱製造の排出係数[5]と掛け合わせることで、2001~2040 年における銅需要増時の排出量を算出し、BAU との差分を電化がもたらすべき GHG 排出量削減効果と定義した。このとき、仮に銅精鉱の品位は期間を通して 27.9%[1]であるとし、排出係数は 2012~2021 年における日本の銅精鉱輸入元[2]の割合の平均を用いて決定した。

3. 結果と考察

図 2 は BAU シナリオにおける、2001~2040 年での製品グループ別銅ストック量の推移を表す。国内におけるストックは徐々に減少していることがわかる。特に電気機械が大きく減少している。これは、予測の基準となった 2001~2021 年において、電気機械部門の間接輸出が増加傾向にあったことに起因する。この原因として、国内工場の海外への移転に伴い、電気機械を中心とした銅を含む製品が海外へ流失していること、他の先進国と比較して日本の電化が遅いこと、日本の人口が減少しつつあることなどが挙げられる。

また、図 3 は BAU と、2022 年以降銅の需要が増加するケースについて、代表として年次 1, 2, 3, 4, 5 %増加する場合の国内の銅ストック量の推移を表す。1%増加ケースが 2022 年以降も 2001~2021 年の銅ストック量を殆ど維持するのに対し、2%以上のケースでは、2022 年以降急速に銅ストック量が増加するのがわかる。

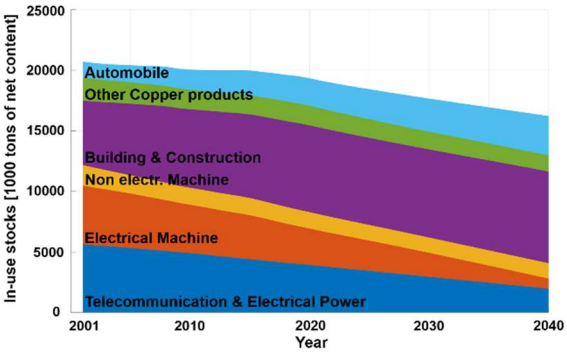


図 2　BAU における銅ストック量の推移

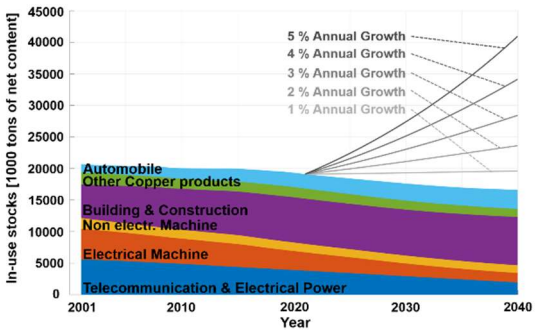


図 3　銅需要増加ケースにおける銅ストック量推移

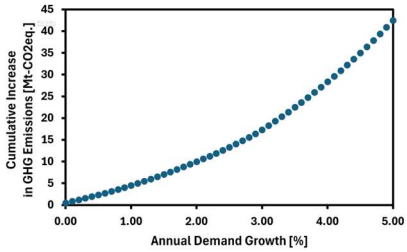


図 4　銅需要増加と累積 GHG 排出量増加

図 3 に示した結果と排出係数を基に、2001~2040 年における年次 0.1 %~5.0 %の銅需要増加に対応する累積 GHG 排出量を算出すると(図 4)、今回想定した最大の銅需要増加である年次 5 %ケースと BAU との比較において、GHG 排出量の差は約 42 Mt-CO_2eq.となった。この値を電化による排出削減が上回れば、銅精鉱の消費を増やしてでも電化を進める価値があると考えられる。

4. 結言

今回の検討では BAU と銅需要増加シナリオの排出の差分を電化がもたらすべき排出削減効果として求め、各銅需要変化における基準値が得られた。今後この値の現実味を評価するには、電化による排出削減量の定量化が必要である。また、銅のリサイクルシステムや鉱石の品位、電力の排出係数の時系列的変化の考慮を行うことでモデルの精緻化を図る。

謝辞

本研究の推進に当たり、東京大学 醍醐市朗准教授より助言をいただいた。

参考文献

1) JOGMEC：“鉱物資源マテリアルフロー 銅 ”2004~2022”，
2) Daigo, I. *et al*., *Resour. Conserve. Recycl.* **53**, 208-217 (2009),
3) Hyndman, R.J., & Athanasopoulos, G. (2021) Forecasting: principles and practice, 3rd edition, OTexts: Melbourne, Australia. OTexts.com/fppjp.
4) Klose, S. *et al*., *J. Ind. Ecol.* **25**, 979-993 (2021),
5) IDEA Database. Ministry of the Environment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). Version 2.3. (2013).

自由貿易化に伴う CO_2 排出量変化の分析

The Impact of Free Trade in Carbon Footprint

○東ケ﨑暖太*[1)]、永田あい[2)]、加河茂美[3)]
Haruta Togasaki, Ai Nagata, Shigemi Kagawa
1) 九州大学, 2) 九州大学経済学府, 3)九州大学経済研究院
* togasaki.haruta.550@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

経済がグローバル化した現在、グローバルバリューチェーンの構造は大きく変化している[1)]。脱炭素化社会を実現するにあたって、この構造変化が環境に与える影響を分析する意義は大きい。特に自動車産業は、グローバルバリューチェーン内で重要な役割を果たすだけでなく、自動車バリューチェーンを通じて各国の CO_2 排出量にも大きく寄与している。この際、自動車産業の国際競争力が自動車バリューチェーン全体の CO_2 排出量にどのような影響を与えるかという点は重要な研究課題となる。

本研究では、2000 年から 2014 年にかけて世界 43 カ国・地域の自動車産業の国際競争力と、これらの自動車産業の生産に伴って、43 カ国・地域の 56 産業から波及的に発生した付加価値および CO_2 排出量の分析を行う。本研究は、自動車産業の国際競争力の変化がこれらの国々の間の貿易、産業構造、および CO_2 排出量に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. 分析手法・データ

2.1. 分析手法

本研究では、2000 年から 2014 年における 43 の国・地域における 56 の産業部門を対象とした世界多地域産業連関表を用いて分析を行う。各年における各国の自動車産業の国際競争力を示す指標として、顕示比較優位指数（RCA）を以下の(1)式により推計した。

$$RCA_i^k(t) = \frac{X_i^k(t)/X_T^k(t)}{X_i^W(t)/X_T^W(t)} \quad (1)$$

ここで、$RCA_i^k(t)$は、t年におけるk国i産業の顕示比較優位指数を示す。$X_i^k(t)$は、t年におけるk国i産業の輸出額を示し、$X_T^k(t)$は、t年におけるk国の総輸出額を示す。また、$X_i^W(t)$は、t年における世界全体のi産業の輸出額を示し、$X_T^W(t)$は、t年における世界全体の総輸出額を示す。

次に、基本的な産業連関モデルに従って、2014 年の各国の自動車産業の生産に伴って直接・間接的に発生する付加価値を以下の(2)式により推計した。

$$\mathbf{u}_i^k = \hat{\mathbf{v}}(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{f}_i^k \quad (2)$$

ここで、$\mathbf{u}_i^k$はk国i産業の生産に伴って各国各産業から直接・間接的に発生する付加価値を表すベクトルである。$\hat{\mathbf{v}}$は各国各産業の生産に伴う付加価値係数ベクトルを対角化したものである。$\mathbf{I}$は単位行列、$\mathbf{A}$は中間投入係数行列を表し、$(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}$は生産波及構造を示すレオンチェフ逆行列を表す。$\mathbf{f}_i^k$は$k$国$i$産業の最終需要ベクトルを表す。本研究における最終需要ベクトルは、対象国の自動車産業に対応する成分にのみ、対象国の自動車産業の生産額の値を持ち、その他の成分は 0 であるベクトルである。

同様に、2014 年の各国の自動車産業の生産に伴って直接・間接的に発生する CO_2 排出量を以下の(3)式により推計した。

$$\mathbf{q}_i^k = \hat{\mathbf{e}}(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{f}_i^k \quad (3)$$

ここで、$\mathbf{q}_i^k$はk国i産業の生産に伴って各国各産業から直接・間接的に発生する CO_2 排出量を表すベクトルである。$\hat{\mathbf{e}}$は各国各産業の生産に伴う CO_2 排出係数ベクトルを対角化したものである。

2.2. データ

本研究では、2000 年から 2014 年における 43 の国・地域における 56 の産業部門を対象とした世界多地域産業連関表及びその付帯票を用いた[2)3)]。世界多地域産業連関表に関しては、2014 年価格で実質化が行われた接続表のデータを用いた[4)]。

3. 結果

図 1 は、2014 年における自動車産業の RCA 上位 5 カ国の、2000 年から 2014 年における RCA の推移を示したものである。2014 年における自動車産業の国際競争力が最も高かった上位 5 カ国は、ハンガリー、チェコ共和国、ドイツ、日本、メキシコであった。ハンガリー、チェコ共和国、メキシコは欧州や北アメリカの自動車製造における生産拠点としての地位を強化しており、国際競争力の高さに繋がっていると考えられる。

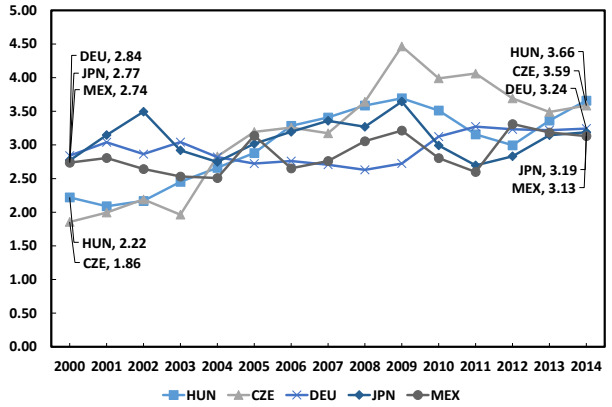


図 1. 2014 年における自動車産業の RCA 上位 5 カ国の RCA 推移（2000-2014 年）

図 2 と図 3 は、それぞれ 2014 年の RCA 上位 5 カ国の自動車産業の生産に伴って、世界各国各産業から波及的に発生した付加価値の内訳と、CO_2 排出量の内訳を示したものである。図 2 と図 3 に示すように、これらの国々では、2014 年の自動車産業の生産に伴って、「電気、ガス、蒸気および空調供給」部門から波及的に発生した付加価値の量と CO_2 排出量が最大であった。

図 4 は、2014 年の RCA 上位 5 カ国の自動車産業に関して、付加価値あたりの CO_2 排出量（環境効率性）を示したものである。先進国である日本は付加価値あたりの CO_2 排出量が比較的多いが、ハンガリー、チェコ、ドイツの欧州 3 カ国の付加価値あたりの CO_2 排出量は比較的少なかった。

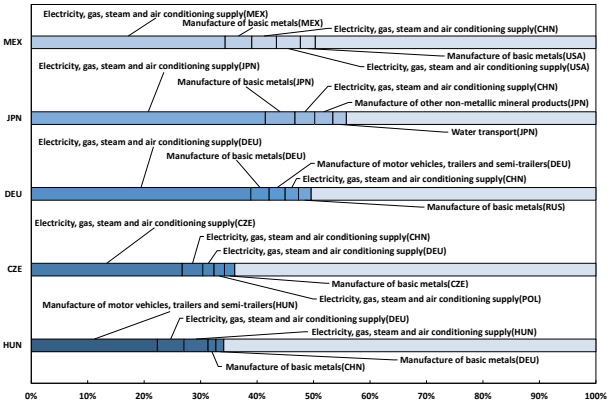


図 2. RCA 上位 5 カ国の自動車産業の生産に伴って、世界各国各産業から波及的に発生した付加価値の内訳（2014 年）

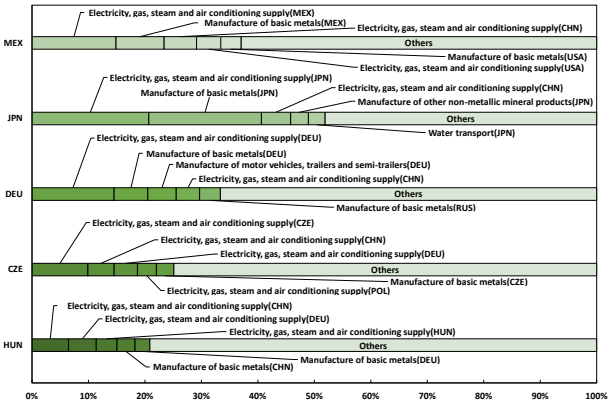


図 3. RCA 上位 5 カ国の自動車産業の生産に伴って、世界各国各産業から波及的に発生した CO_2 排出量の内訳（2014 年）

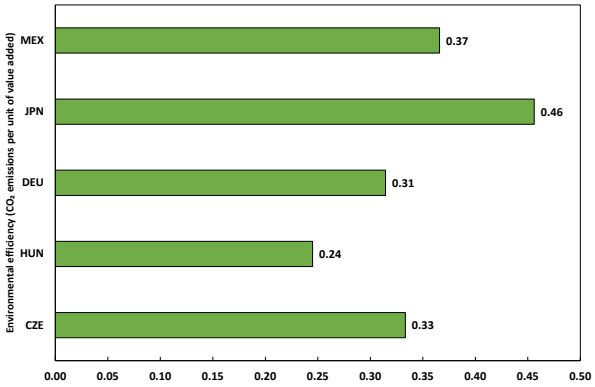


図 4. RCA 上位 5 カ国の自動車産業の環境効率性（2014 年）

本会では、以上の結果に加えて、環境効率性と RCA の相関関係についての議論を行う予定である。

4. 引用文献

1) 藤川清史: "付加価値貿易と CO_2貿易の構造変化―国際産業連関分析の応用―." 経済研究所所報 4, (2024), 51-67.
2) Dietzenbacher *et al.*: *Economic Systems Research*, 25, (2013), 71-98.
3) Timmer *et al.*: *Review of International Economics*, 23, (2015), 575-60.
4) Tokito *et al.*: *Spatial Economic Analysis*, (2024), 1-15.

動的マテリアルフロー解析(d-MFA)を用いた バイオマス導入ロードマップの提案

Development of a Biomass Introduction Roadmap Using Dynamic Material Flow Analysis

○上門莉久*[1)]、大野肇[1)]、八木原昂輝[1)]、福島康裕[1)]
Riku Uejo, Hajime Ohno, Koki Yagihara, Yasuhiro Fukushima
1) 東北大学
* uejo.riku.p5@dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

現代の化石資源由来のプラスチックが主体のサプライチェーンにおいて、エネルギー回収を伴う焼却(ER)が廃プラスチック処理の多くを占める中で、低炭素排出かつ循環構築に向けて樹脂の形を保ち再形成を行うマテリアルリサイクル(MR)、化学的分解を介して原料化を行うケミカルリサイクル(CR)への転換が求められる。加えて、炭素資源の持続可能な獲得と、カーボンオフセットの観点から、バイオマスプラスチック(BP)の導入も推進されている[1)]。長瀬らによる先行研究[2)]では、プラスチックリサイクル単体ではプラスチック産業のカーボンニュートラル化を達成できないことが指摘された。したがって、BP 導入によるさらなる排出削減が期待される。本研究では、BP 導入による資源循環、排出削減効果を定量的に評価するため、現状のプラスチック産業に BP が導入され、循環システムに乗る様子を長瀬らの動的マテリアルフロー解析の拡張により長期的に可視化し、1955 年から 2050 年までのプラスチックフローの中で 2023 年から BP を導入するようなシナリオを考え、プラスチックのライフサイクル全体での GHG 排出量を評価した。

2. 手法

2.1 動的マテリアルフロー解析

本研究では、MaTrace モデル[3)]を複数年の素材流入を考慮可能な形式に拡張し[2)]、中谷ら[4)]の国内の用途別別樹脂需要量に基づいて計算を行った。モデルの詳細は既報[2)]に譲る。

2.2 BP の導入

本研究では導入する BP の種類として現状でも一部生産されているバイオ PE に注目した。また、バイオ PE と従来型の化石資源由来の PE は処理方法が同じであり、それに伴う必要資源量や GHG 排出量も同じであると仮定した。

環境省が策定したプラスチック資源循環戦略[1)]では、2030 年までに 200 万トンの BP 導入を目指している。目標へ向けて最大限のバイオ PE を導入できるよう、

表 1 バージン樹脂製造の原単位

	バイオ PE	化石 PE
熱エネルギー [MJ/kg]	7.74	8.60
電力 [kWh/kg]	0.586	0.148
直接排出 [kg-CO_2eq/kg]	-3.1	1.09

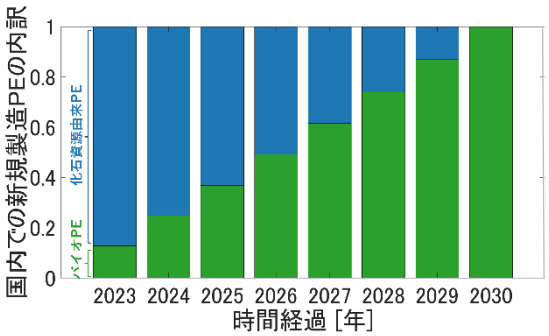


図 1 国内で新規に製造される PE の化石資源由来とバイオマス由来の割合の時間変化に伴う仮定

本研究ではバイオ PE の国内導入量を日本バイオプラスチック協会のデータから得た 2019 年におけるデータ[5)]を基に、割合ベースで 2030 年までに製造するバージンプラスチックがすべてバイオマス由来のものに置き換わるよう線形的に増加させた(図 1)。この割合を、各年の PE 需要から MR や CR を介して製造されるリサイクル PE 供給量を差し引いたバージン樹脂需要量にかけ合わせることで、各年のバイオ PE 導入量を決定した。

2.3 シナリオ設定

プラスチック処理方法は MR、CR、ER、単純燃却・埋め立てを想定した。処理方法は 2022 年まで共通とし、2023 年以降から処理割合(分配比)が異なるシナリオの 4 つを考えた。現状の日本の処理状況を反映し、2022 年時点での処理割合を継続する Case 1、各年 10%ずつ MR または CR の処理割合を増加させる Case 2 および 3、2023 年以降 ER のみを行う Case 4 を想定した。化石資源由来のプラスチックのみを想定した先行研究[2)]では、Case 2, Case 3, Case 1, Case 4 の順により少ない

GHG 排出量を達成できることがわかっている。本研究ではさらに 2023 年以降段階的な BP 導入なし(-1)、あり(-2)として区別した。

2.4 GHG 排出量算出方法

GHG 排出量は熱エネルギー(化石燃料由来)および電力の消費に伴う排出と、直接排出の 3 つのカテゴリに分けて計算を行い、それらを合計することで算出した。また、再生可能エネルギーへの移行による電力原単位の低下を時系列的に考慮した。

バイオマスによる炭素吸収分はバイオ PE の製造段階の直接排出のカテゴリにおいてマイナスで計上しており、バイオ PE の燃焼による炭素排出分は正の排出として計算した。化石由来 PE(化石 PE)とバイオ PE のバージン樹脂製造にかかる原単位（表 1）については、先行研究[6]を参照した。また、ER とプラスチック以外に再生される製品の代替による排出控除を考えた。

3. 結果及び考察

バイオ PE の導入により、すべてのシナリオでバイオ PE 導入なしと比較して、GHG 排出量をさらに削減できることが確認された(図 2)。特に Case 2 や Case 3 と比較して Case 1 および Case 4 では、バイオ PE 導入による GHG 排出削減効果が大きいことがわかった(図 2)。これは、Case 2、Case 3 のリサイクル由来 PE 量が Case 1、Case 4 に比べ大きく、バージンプラスチック製造量が減少し、その分、BP の導入量が減ることに由来する。また、Case4-2 が Case1-1 よりも少ない GHG 排出量を 2030 年までに達成できることが確認された。一方で、Case 1 にバイオ PE を導入しても Case 3-1 の GHG 排出量を下回ることができず、同様に Case 3 にバイオ PE を導入しても、Case 2-1 の GHG 排出量を下回ることができないことが確認された。このことから、プラスチック循環型社会に向けて、BP 導入よりも優先してリサイクルを促進させるべきであると言える。

さらに、Case 3 は Case 2 に比べ、BP 導入による GHG 排出削減効果が大きいことがわかった。 これは、CR ではプラスチック以外の化学品への炭素の散逸によるロスが生じていることから、リサイクル由来 PE 量が MR より少なく、より多くのバージンプラスチックを必要とすることに起因する。CR と BP 生産は再生可能な化学原料を供給する技術として共通する部分があるため、生成物の特徴を活かした、より排出量を削減可能な再生可能炭素の供給先を検討することも重要であると考えられる。

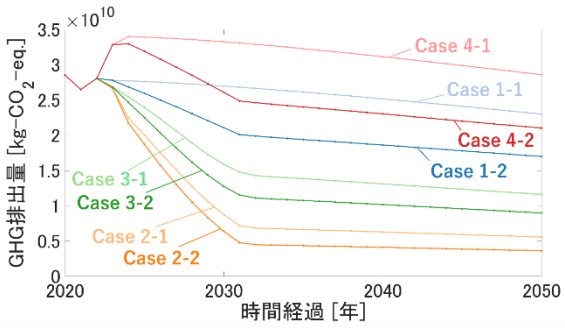


図 2　各シナリオにおける GHG 排出量の経時変化

また、最小の GHG 排出量であった Case 2-2 においてもネットゼロを達成できなかったため、プラスチック産業のカーボンニュートラルの実現には、PE のみならず、他の樹脂種へのバイオマスの導入が不可欠であることがわかった。

4. 本研究の課題

すべての化石資源由来のプラスチックをドロップインプラスチックであるバイオ PE に置き換えたが、その他のドロップインプラスチックや、ポリ乳酸（PLA）などの化学構造が異なる BP については考慮していない。また、バイオ PE の検討では化石資源由来のプラスチックと BP のリサイクル処理割合を同じと仮定し、同じプロセスで処理されると仮定できたが、ドロップインプラスチックではない BP は既存のリサイクルインフラにおいて処理不可能である可能性がある。このようなバイオマス由来の樹脂種に対するリサイクル手法についても知見を獲得し、モデル内に組み込む必要がある。

5. 結言

本研究では、バイオ PE の導入が、排出削減に与える影響を評価した。

今後の課題として、BP 以外のドロップインプラスチックや化学構造が異なるプラスチックの導入も考慮する必要があり、さらに、リサイクル過程での化学的な挙動の違いを考慮したモデルの構築が求められる。これらの問題に対処しながら、プラスチック資源循環の進展と GHG 排出削減の最大化を目指す必要がある。

参考文献

1) 環境省. プラスチック資源循環戦略. 2019.
2) 長瀬陽亮ら: 日本 LCA 学会, 宇都宮, (2024), 2-P1-28.
3) Nakamura, S. *et al.*, *Environ. Sci. Technol.*, **48**, 7207-7214(2014).
4) Nakatani, J. *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **33**, 19844-19853(2020).
5) 日本バイオプラスチック協会「バイオプラスチック概況」（環境省　バイオプラスチック導入ロードマップ検討会（第 1 回）資料 2-1、 令和 2 年 5 月）
6) F. Adom. *et al.*, *Environ. Sci. Technol.*, **48**, 14624-14631(2014).

2020 年廃棄物産業連関表の推計及び廃棄物フットプリントの試算

Estimation of 2020 Waste Input-Output Table and Waste Footprint

○深田淳史*[1)]、近藤康之 [1)]、一杉佑貴 [2)]、伊坪徳宏 [1)]
Atsushi Fukada, Yasushi Kondo, Yuki Ichisugi, Norihiro Itsubo
1) 早稲田大学 2) 産業技術総合研究所
* a.fukada@fuji.waseda.jp

1. はじめに

2024 年 5 月、サーキュラーエコノミーの実現に向けた定量評価手法を示す国際規格 ISO 59020 が発行された。同規格は、製品・サービスの循環性評価の重要性を強調しており、廃棄物もそのうちの重要な観点として挙げられた。これに伴い、廃棄物の流れを産業間で把握する廃棄物産業連関表は、循環型経済の推進に向けた政策立案や企業戦略の基盤としての重要性を増していると考えられる。

本研究は、最新の統計に基づき日本国内の 2020 年版の廃棄物産業連関表を推計し、廃棄物フットプリントの観点からサーキュラーエコノミーの実現に向けて新たな提案を行う。

2. 研究方法

2.1 2020年廃棄物産業連関表の概要

本研究において推計対象とする 2020 年廃棄物産業連関表（以下、2020 年 WIOT）の雛形を図 1 に示す。

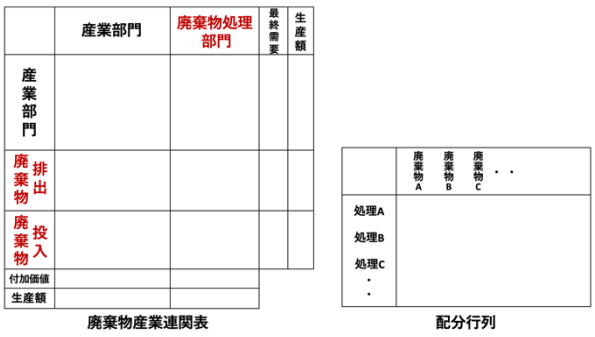


図 1 2020 年廃棄物産業連関表の雛型

図 1 の 2020 年 WIOT の本表（左側）について、本表では、国内の各産業からの廃棄物排出量および各産業への廃棄物投入量（再生利用量）を重量データで推計した。また、従来の産業連関表の産業部門「廃棄物処理」を「焼却」や「埋立」などの廃棄物処理部門に細分化し、内生部門の一部として表を拡張した。そして、図 1 右側の配分行列は、本表に並列される廃棄物種と廃棄物処理部門に対応しており、排出された廃棄物のうち各産業へ直接投入（再生利用）されないものに対して、各廃棄物処理部門が処理する量を割合で推計したものである。

本研究の 2020 年 WIOT では、産業部門を従来の産業連関表の中分類に対応した 108 部門とし、廃棄物処理部門を 60 部門程度に細分化して推計した。また、廃棄物種は国の定義に則った産業廃棄物 19 種と、それらの中間処理によって排出される焼却灰や乾燥汚泥などの処理残渣及び回収資源を対象に推計した。なお、本研究において一般廃棄物は推計の対象外である。

2.2 産業廃棄物の部門別種類別排出量の推計

産業廃棄物の部門別種類別排出量の推計は、環境省が公開する統計「産業廃棄物の排出及び処理状況等」[1)]（以下、産廃統計）の 2020 年度実績データを利用した。この統計では日本標準産業分類に基づいて業種別種類別の産業廃棄物排出量が公開されている。そのため、日本標準産業分類と産業連関表の中分類を照合し、必要に応じて 2020 年産業連関表の国内生産額による廃棄物排出量の按分を行った。これにより、産業廃棄物 19 種における 2020 年 WIOT の業種別種類別排出量を推計した。

2.3 配分行列と部門別種類別廃棄物投入量の推計

まず、排出された産業廃棄物のうち各産業へ直接投入されるものについては、産廃統計の産業廃棄物種別の直接再生利用量のデータを利用し、2020 年 WIOT の部門別種類別廃棄物投入量として推計した。

次に、総排出量の約 80%を占める産業廃棄物が直接投入されず、中間処理されるプロセスについて、本研究では自治体への調査によって得られた近年の産業廃棄物処理実績データを基に、各産業廃棄物に対する配分行列の値を推計した。そして、この値を基点とし、産業廃棄物種ごとに図2のような廃棄物処理フローの定量分析を行った。

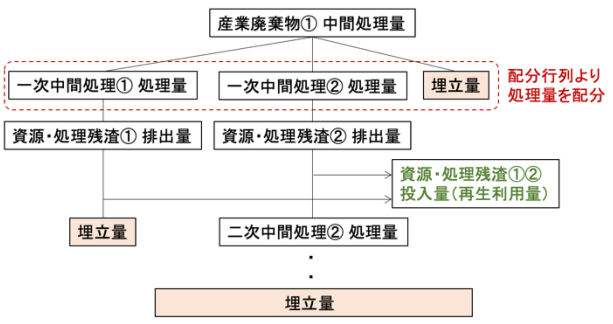


図 2 廃棄物処理フロー分析の概要

この廃棄物処理フロー分析は主に環境省の「廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用量実態調査報告書」[2]から得たデータを利用し、推計した資源及び処理残渣の再生利用量（図2 緑字）とその用途を2020WIOTの部門別種類別廃棄物投入量に反映した。

2.4 廃棄物フットプリントの試算

式(1)に示す2020年WIOTの廃棄物産業連関分析により、最終需要Yの廃棄物フットプリントを試算した。

$$Waste\ Footprint = \mathrm{D_w}(\mathrm{I}-\mathrm{A})^{-1}\hat{\mathrm{Y}} \qquad (1)$$

（$\mathrm{D_w}$:部門別種類別廃棄物直接排出係数行列、I：単位行列、A：投入係数行列、$\hat{\mathrm{Y}}$ ：最終需要を対角成分とした対角行列）

$\mathrm{D_w}$は2.2節で推計した部門別種類別の産業廃棄物排出量から算出した19×108の行列、そして$(\mathrm{I}-\mathrm{A})^{-1}$及び$\hat{\mathrm{Y}}$も同様に2020年WIOTの産業分類に対応した108×108の行列である。よって、式(1)より算出される廃棄物フットプリントは19×108の行列となる。

3. 結果

3.1 廃棄物フットプリント

廃棄物フットプリントの試算の1つとして、式(1)を用いて3つの最終需要部門の値（国内最終需要計、輸出計、輸入計）ごとに産業廃棄物排出誘発量を算定した。その結果を13部門分類に集計したものが図3である。なお、輸入計は最終需要部門において一般に負の値であるが、本試算では誘発量の規模の理解を容易にするため正の値に変換して計算した。また、鉱業の国内最終需要計における在庫純増の値の影響で、一部負の排出誘発量となった。

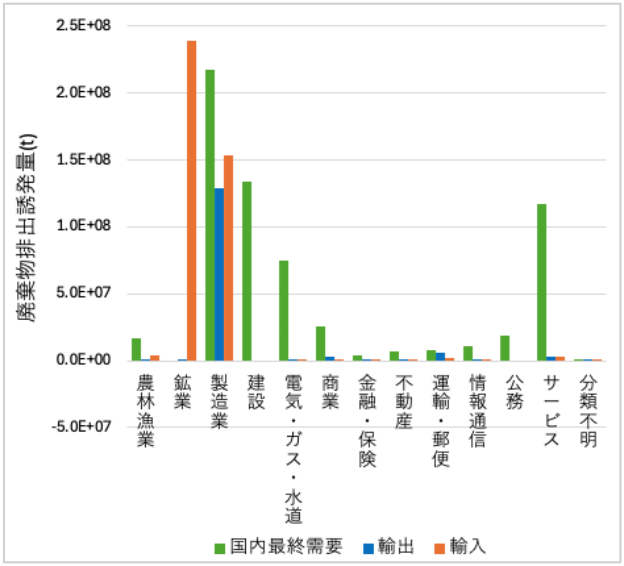


図3 産業別最終需要部門別の産業廃棄物排出誘発量

図3の結果より、国内最終需要に由来してサプライチェーン全体における廃棄物排出を多く誘発するのは製造業、公務・サービス、建設などの産業であり、これら3部門の排出誘発量はそれぞれ1億トンを超えている。また、特に製造業に関しては、日本の貿易を支える主要な産業であることから、その輸出入の動向が廃棄物排出に与える影響も大きい。

そして、図3においてもう一つ注目すべき点は、鉱業の輸入による廃棄物排出誘発量が2億5,000万トン近くと最も大きいことである。本試算は競争輸入型の廃棄物産業連関分析であるため、この結果は「日本の鉱業が海外から輸入した資源を仮に国内のものと同じ技術で採掘した場合に想定される廃棄物排出誘発量」を表し、その点では廃棄物排出の実情とは異なる。しかし2億5,000万トンという排出誘発量はかなり大きく、実際の日本国内の2020年産業廃棄物年間排出量合計がおおよそ3億8,000万トンであることからもその規模の大きさがうかがえる。

4. まとめ及び今後の展望

これまでに述べたように、まず本研究では主に環境省が公開する日本の産業廃棄物に関する統計データを集め、2020年WIOTを推計した。また、この表を用いた廃棄物排出誘発量の試算結果から、日本の鉱業が輸入に依存しているために、その過程で海外では既に大量の廃棄物が排出されている可能性が高いことが示唆された。このように、廃棄物産業連関表を用いて分析することで、今までの日本国内の産廃統計からは得られなかった新たな提言を示すことができると考えられる。

本研究の今後に関して、2020年WIOTのデータ精度は、まだ改善の余地が大いにある。例えば、廃棄物処理部門ごとに中間需要額を詳しく分析し、各処理部門の特徴を明確に反映させることで、廃棄物処理に伴う環境影響をより精度良く分析できると考えられる。また、現状の産業廃棄物に加えて一般廃棄物も推計の対象に含めることで、例えば、動植物性残渣の排出業種に該当しない飲食店等や最終消費者に対して、食品廃棄物に関する効果的な提言が可能になると考えられる。

5. 参考文献

1) 環境省, “産業廃棄物の排出及び処理状況等”, Available: https://www.env.go.jp/recycle/waste/sangyo.html . [アクセス日: 2025/1/6]
2) 環境省,”廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用量実態調査報告書”, Available: https://www.env.go.jp/content/000127243.pdf [アクセス日: 2025/1/6]

国内旅行の持続的発展に向けたインベントリ分析

Inventory analysis for the sustainable development of domestic tourism.

○大神亮 [1),兵法彩*1)]
Ryo Ogami, Aya Heiho
1) 東京都市大学
* heiho@tcu.ac.jp

1. 背景

1.1.社会的背景

国内旅行を含む観光業は、ここ数十年程で着実に成長し、最近は多くの国で経済活動における戦略部門となっている。2009 年から 2013 年までの地球規模の温室効果ガス排出量において観光業は、世界で 5 番目に汚染の多い活動である。そのため、今後、観光業に対する環境影響度の評価に対する研究は需要度を増しており、政策および環境意識の促進に向けての概念に基づく持続可能な発展と技術開発が手を携えるようなイノベーションにより、新たな観光戦略を開発することが必要とされる。そこで、低炭素観光の持続可能な発展を、促進できるような効果の発見が今、期待されている。

1.2.学術的背景

観光に関する環境影響評価の先行研究（Campos、Gallego、Villanueva ら、2023）では、ライフサイクルアセスメントという環境影響評価の手法を用いて、出発地から目的地までの移動、宿泊、ケータリング、そしてその帰りの観光活動のすべての段階を考慮して観光が環境に与える影響の総合的かつ具体的な評価を実施して、さまざまな科学によって得られた文献を精査し、二酸化炭素排出量に基づいた多くの研究があることを示している。この先行研究では、ライフサイクルアセスメントから交通機関、宿泊施設並びに観光活動が調査された。この観点から、単に環境指標だけでなく、より多くの環境指標も評価された。よって、この手法により、環境負荷の分析が可能になる。

2.研究目的

この研究の目的は、環境負荷のおもな要因がどこにあるかを探ることであり、旅行における移動についての改善点は何かを追求して、環境負荷になりやすい影響を考慮した旅行とは何かを見つけ出すことである。そして、観光に関する利害関係者や交通や宿泊の観点からでも環境負荷を把握して、旅行に関する全ての事柄を考慮した旅行にするために今何が出来るのかを調べることでもある。

3. 研究方法

移動、食事、宿泊、観光を中心とする旅行全体での GHG の排出量を算出するために、まず、旅行のコースを決め、往復の移動手段、宿泊先、観光地などを定める。次に原単位表を見て、使う原単位を決め、推計式を求めて、その出した推計式を用い、実際に計算を行う。それから、計算を進めていく中で、移動手段、宿泊、観光地、食事、サービスでの二酸化炭素の排出量の高い傾向にあるパターンと低い傾向にあるパターンを比べて、計算した 2 つのパターンの差を明らかにして、結果にまとめる。最後に、その結果をもとに考察して、今後、持続可能性の高い旅行計画にするには今何が出来るのかを見つけ出す方法を考える。

ここで、次の旅行プランを計画した。
日程：4 泊 5 日
旅行先：九州方面
宿泊施設：パターン A：リゾートホテル、パターン B：ビジネスホテル
人数：3 名
食事回数：朝 4 回、昼 5 回、夜 4 回
交通起点：東京駅
拠点駅：博多駅
乗り物：パターン A：飛行機、パターン B：東海道・山陽新幹線

移動手段は、以下のとおりである。
「＝＝」・・・バス
「→→→」・・・飛行機
「～～～」・・・船
「＋＋」・・・鉄道
「・・・・」・・・徒歩

行程表

パターン A
1 日目
東京駅＝＝羽田空港→→→福岡空港＝＝《佐賀》大魚神社＝＝ときめきフルーツバス停通り経由＝＝《長崎》長崎にっしょうかん（泊）

2 日目
ホテル＝＝長崎平和公園＝＝島原港～～熊本港＝＝《熊本》熊本城＝＝《鹿児島》指宿シーサイドホテル（泊）
3 日目
ホテル＝＝長崎鼻＝＝知覧＝＝《宮崎》青島グランドホテル（泊）
4 日目
ホテル＝＝高千穂＝＝《熊本》瀬の本高原＝＝《大分》湯布院＝＝《福岡》キャナルシティ　福岡ワシントンホテル（泊）
5 日目
ホテル＝＝博多周辺観光＝＝福岡空港 →→→羽田空港＝＝東京駅

パターン B
1 日目
東京駅＋＋博多駅＋＋江北駅＋＋多良駅・・・・《佐賀》大魚神社・・・・多良駅＋＋諫早駅＋＋長崎駅＋＋大波止電停・・・・《長崎》アパホテル　長崎出島（泊）
2 日目
ホテル・・・・大波止電停＋＋平和公園電停・・・・長崎平和公園・・・・平和公園電停＋＋浦上駅＋＋長崎駅＋＋諫早駅＋＋多比良駅・・・・多比良港～～長洲港・・・・長洲駅＋＋熊本駅＋＋熊本城・市役所前電停・・・・《熊本》熊本城・・・・熊本城・市役所前電停＋＋熊本駅＋＋鹿児島中央駅＋＋天文館通電停＋＋《鹿児島》アパホテル　鹿児島天文館（泊）
3 日目
ホテル・・・・天文館通電停＋＋鹿児島中央駅＝＝仙巌園＝＝鹿児島駅＋＋宮崎駅＋＋青島駅・・・・《宮崎》青島・・・・青島駅＋＋宮崎駅＋＋延岡駅・・・・アパホテル　宮崎延岡中央（泊）
4 日目
ホテル・・・・延岡駅＝＝高千穂＝＝延岡駅＋＋大分駅＋＋由布院駅・・・・《大分》湯布院・・・・由布院駅＋＋久留米駅＋＋博多駅＋＋渡辺通駅・・・・《福岡》アパホテル　福岡渡辺通駅前（泊）
5 日目
ホテル＋＋博多周辺観光＋＋博多駅＋＋東京駅

4.結果

今回行った研究では、移動では、新幹線と飛行機の GHG 排出量の差がかなり広がっていることがわかった。つまり、旅行の中の交通に環境に対する影響が大きいと思う。ここで、特に飛行機の環境配慮の問題があり、飛行機が GHG を比較的大量に排出することである。飛行機が GHG を削減し、機能性を改善すれば、より旅行が、ほぼすべてのところで快適さが増していくと考えられる。ホテルに関しては、リゾートホテルの方が若干 GHG 排出量ではビジネスホテルよりも大きいことがわかるが、ホテルでの食事をつけて考えても、リゾートホテルの方が少し高い傾向にあることがわかる。その他の食事も。2・3 泊目でのパターン A・パターン B での滞在地域が異なること以外は、GHG 排出量に関してはほぼ変わらない結果となった。土産物に関しても、パターン A・B ともに同じ物品を購入しているため GHG の排出量の差はない。その他の移動・宿泊時に利用したサービスや旅行中での廃棄物に関しては、利用するサービスや宿泊施設の設備によって大きく変わっているが、廃棄物の量としてはパターン A・B どちらも同じ量で考えて GHG の排出量を計算した。

5.まとめ

持続可能性がますます高く求められている現在、国際的に旅行の見直しの必要性が高まっていることにより、東京から九州方面への国内旅行を対象として今回の研究を行うこととしたが、実際に LCA を行って、環境負荷に関する値の計算をすることで、今後の改善点や展望が見えていくと予想されている。特にこれからの時代は本研究の結果より、往復の移動の交通機関とホテルでの利用サービスでの GHG 排出量が大きいという結果が出たことから、移動手段の車両や機材の改善やサービスの低炭素化の推進が、今の時代に求められている。

引用文献

Anxin Xu, Chao Wang, Decong Tang ， Weijiao Ye : Ecological Indicators Volume 144, November 2022, 109476, p1－p11
Author links open overlay panel Cristina Campos, Jara Laso , Jorge Cristóbal , Pere Fullana-i-Palmer, Jaume Albertí , Margalida Fullana , Ángel Herrero , María Margallo , Rubén Aldaco: Science of The Total Environment, Volume 845, 1 November 2022, 157261,p1－p14
Cristina Campos, María Gallego, Pedro Villanueva, Jara Laso, Ana Cl´ audia Dias, Paula Quinteiro, Sara Oliveira, Jaume Albertí, Pere Fullana-i-Palmer, Lela M´ elon, Ilija Sazdovski, Merc` e Roca, Ram´ on Xifr´ e, María Margallo, Rub´ en Aldaco: Science of The Total Environment, Volume 896, 20 October 2023, 166242,p1－p11
LCI データベース IDEA version3.4 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ/
読売旅行、【羽田空港発】 決定版！まるごと九州 7 県総めぐり ,https://www.yomiuri-ryokou.co.jp/r/tour-detail/244399205%60HND0/ ,［2025 年 1 月 21 日閲覧］

炭素源の持続可能性を考慮したバイオマス由来プラスチックのフロー解析

Flow Analysis of Biomass-Based Plastics Considering Carbon Source Sustainability

○千田康太*1)、ティア ヘンイ 1)、兼松祐一郎 1)、菊池康紀 1)
Kota Chida, Heng Yi Teah, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi
1) 東京大学
*chida-hanaike@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

バイオマス由来/リサイクル由来プラスチックは、従来の石油プラスチックの代替素材としてその導入拡大が検討されている。これらのプラスチックが環境影響に及ぼす影響については盛んに研究が行われている。例えば個々の種類のプラスチックに関してライフサイクルアセスメント(LCA)を用いて環境負荷や経済性を評価し、従来の石油由来プラスチックと比較を行ったケーススタディは多く存在する[1,2]。しかしながら、これらの導入が環境や社会に真に正の影響を与えるかどうかについては未だに明らかではない。また、原料として用いられるバイオマスの種類や樹脂製造プロセス、地理的バウンダリといったライフサイクルの違いによって影響評価にばらつきが生じている他、複数の樹脂を導入した際に現在の社会における素材や技術の選定に及ぼす環境影響などを包括的かつ定量的に評価した研究はほとんど存在しない。更にプラスチックにおける炭素の通りうるフローの全体像が明らかでないため、プラスチックのライフサイクルステージに関与する各ステークホルダー間のつながりが弱く、持続可能社会に向けて柔軟にライフサイクルを設計することが難しいという現状にある。

本研究では、まずバイオマスやリサイクル由来炭素を原料とするプラスチックの導入によって生じうる、炭素のライフサイクル全体の変化を明らかにする。その上でフロー解析を通じて環境影響や炭素源の再生可能性の観点からライフサイクルの評価を行い、バイオマス由来プラスチックの導入に向けた原料や樹脂の種類、EoL(End of Life)手法の適切な組み合わせを明らかにする。

2. フロー解析手法

2.1 評価対象・評価指標

本研究では日本の容器包装用途プラスチックに限定してケーススタディが実施された。評価対象として既存の石油由来プラスチック (PE, PP, PS, PET) に加えて、バイオマス由来プラスチックとして Bio-PE, Bio-PP, Bio-PET, PEF , PHA, PLA が設定された。PHA, PLA, PEF はバイオマス由来プラスチックとして現在製造量が多いもしくは製造技術が確立されている種類が[3]、Bio-PE, Bio-PP, Bio-PET は既存の汎用石油由来プラスチック製品を、同じ物性を有するバイオマス由来製品で代替することを想定して設定された。

評価指標は、環境影響評価の指標に GHG 排出量が、ライフサイクル内の炭素の再生可能性を定量化する指標としてシステム内の石油由来樹脂の量が設定された。

2.2 システム領域

はじめに計量書誌分析によって文献のクラスタリングを実施し、評価対象とする樹脂や技術についてのキーワードが抽出された。次に得られたキーワードを基にプラスチックの既存文献の調査を実施し、各プラスチックについて原料、製造手法、用途、EoL 手法についての情報が商用化されていないものを含めて収集され、プラスチックライフサイクルのスーパーストラクチャ[4]の作成が行われた。

容器包装プラスチックのフロー解析におけるシステム領域はこのスーパーストラクチャを基に構築された。バイオマス由来プラスチックの原料としてサトウキビ、テンサイ、トウモロコシ、パーム油、微細藻類が検討された。EoL 手法のオプションとしては焼却と埋立に加え、サーマルリサイクル、closed-loop でないケミカルリサイクル、closed-loop なマテリアルリサイクルが考慮された。

2.3 モデル構築

最適化のために、線形計画法のアプローチが用いられた。環境影響と炭素の再生可能性の目的関数はそれぞれ式(1), (2)のように定義され、それぞれ計算が行われた。式中の各プロセスの GHG 排出量原単位やインベントリデータは主に文献から収集された。

制約条件として、技術の実現可能性(存在しな

GHG emission:

$$\text{Min. } G_{total} = \sum_{mat}^{all}\sum_{tech}^{all}\sum_{resin}^{all} M_{mat,tech,resin}E_{mat,tech,resin} + \sum_{resin}^{all}\sum_{EoL}^{all} M_{resin,EoL}E_{resin,EoL} \quad (1)$$

Percentage of renewable carbon:

$$\text{Min. } W_{total} = \sum_{\text{mat}}^{fossil}\sum_{tech}^{all}\sum_{resin}^{all} M_{mat,tech,resin} + w \cdot G_{total} \text{ ただし } w \cdot G_{total} \ll M_{mat,tech,resin} \quad (2)$$

M: 製品樹脂の質量, E: GHG 排出量原単位, , w: 重みづけ係数

いフローの場合、$M = 0$)、原料であるバイオマス各種の供給可能量、製品樹脂の需要、そして各EoL手法の処理可能容量が考慮された。バイオマスの供給上限は現在の各原料の製造量の比率に基づいて設定された。製品樹脂の需要については、現在のPE, PP, PS, PETの容器包装用途における消費量(製造量に等しいと仮定)がそれぞれ推計され[5]、プラスチックが社会全体で満たすべき機能と定められた。再生可能炭素由来プラスチックによって代替が行われてもその機能が変化しないと仮定された。別種の樹脂による代替の際には、既存のバイオマス由来プラスチックと石油由来プラスチックの環境影響の比較に関する先行研究[6,7]に基づいて、同体積の樹脂が同等の機能を有するとして計算が行われた。EoL手法の処理可能上限については、現在の処理量のデータに基づいて決定された。この研究では、制約条件の変化によるライフサイクルの変化を可視化するために、バイオマス供給可能量とマテリアルリサイクル処理可能量の制約条件の値を変化させる2つのケース(それぞれCase-bio, Case-recycleとする)が検討された。

3. 結果・考察

フロー解析の結果から、原料供給、バイオマスの炭素吸収、樹脂製造、EoLなど多くのライフサイクルステージが容器包装プラスチック全体の総GHG排出量に大きく寄与していることが示された。このことから、ライフサイクル全体の設計が必要と考えられる。

Case-bioの結果から、GHG排出量と炭素の再生可能性の観点における、バイオマスの利用可能性の拡大に従うシステム内の炭素の流れの変化が明らかとなった。GHG排出量と炭素の再生可能性のいずれの結果おいてもBio-PETとPHAがそれぞれPETとPSを代替素材として優先的に導入されることが分かった。これは、代替による負荷削減効果の大きい樹脂に対応している。炭素の再生可能性を評価指標とした場合では、バイオマスの導入量増加にしたがって、GHG排出量が増加するトレードオフが生じる場合があることが観察された。したがってバイオマスの導入による持続可能なシステムを設計していく上で、環境影響と再生可能性の均衡を慎重に探る必要があると考えられる。また、このケースにおいて完全な脱化石には約2Mtの再生可能炭素が必要であり、さらにシステム全体の炭素の内リサイクル由来のものはわずか4%程度であった。これはリサイクルの許容量が現在のスケールに基づいて設定されているためである。現実的な脱化石の達成にはリサイクルの寄与をさらに拡大させバイオマス資源の投入量を減少させていくべきであると考えられる。

Case-recycleの結果から、リサイクルの許容量拡大に伴って優先されるマテリアルリサイクルの順序が明らかとなった。しかしながら、GHG排出量の観点からはPP, PET, PHAの順でリサイクルに投入すべきであるのに対し、再生可能性の観点からはPE, PET, PPの順であった。バイオマスの投入での議論と同様、両指標の重要性を議論したうえで判断する必要がある。また、リサイクル容量を増加させてもある値でフローは変化しなくなり、完全な脱化石は実現しなかった(リサイクル由来炭素の割合=約30-40%)。これは、マテリアルリサイクルによる再生品の品質の低下に起因する。このことから、システム内の再生可能性を高める上では、バイオマスも継続的に導入規模を拡大していく必要があるといえる。

4. 結言

本研究では、バイオマス由来/リサイクル由来炭素の導入に向けて、日本の容器包装用途のプラスチックライフサイクルにおけるフロー解析手法が開発され、環境影響・炭素の再生可能性の観点から評価がなされた。その結果、バイオマス供給量やリサイクル許容量などが限られた制約条件の中で優先して製造・リサイクルすべき樹脂の種類やその効果が可視化され明らかとなった。また、GHG排出量の少ない脱化石システムを実現する上で、バイオマス利用拡大とリサイクルの規模拡大の両立が求められることも明らかとなった。

構築されたフロー解析の基盤は評価対象や技術、変数が変化しても適用可能である。したがって、今後の研究では、考慮できていない用途や樹脂の種類、そしてプロセスへとモデルを拡充していくことでより広範にわたるフロー解析を行い、将来的なシステムの変化を考慮したシナリオ分析を通じて持続可能性の高いライフサイクルを設計していくことが望まれる。

謝辞

本研究はNEDO委託事業(JPNP20012)、JST COI-NEXT共創の場形成支援プログラム(JPMJPF2003)、科学研究費助成事業(23K21780)の成果を一部含む。
東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は、三井不動産(株)、積水ハウス(株)、東日本旅客鉄道(株)、豊田通商(株)からの寄付で活動している。

引用文献

1) Amasawa, E. et al., Environ. Sci. Technol., 55(5), (2021), pp.3380–3388
2) Gursel, I. V. et al., Sci. Total Environ., 2021, 793(1)
3) European Bioplastics, Bioplastics market development update 2023, (オンライン) <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics-market-development-update-2023-2/>, (参照: 2025-01-20)
4) Fukushima, Y., J. Life Cycle Assess. Jpn., 10(3), (2014), pp.206-212
5) プラスチック循環利用協会, プラスチックリサイクルの基礎知識, (2024)
6) Rattana, S., & Gheewala, S. H., JREE, 10, (2019), pp.9-17
7) Choi, B. et al., Sustainability, 10(7), (2018), 2369

プロセス事故の直接・間接ヒト健康影響を考慮したライフサイクル影響評価手法の構築

Development of Life Cycle Impact Assessment Method Considering Direct and Indirect Human Health Impacts of Process Accidents

○川原大知*[1)]、稗貫峻一[1,2)]、中山穣[1)]、鈴木智也[1)]、三宅淳巳[1)]、伊里友一朗[1)]
Daichi Kawahara, Shunichi Hienuki, Jo Nakayama, Tomoya Suzuki, Atsumi Miyake, Yu-ichiro Izato
1) 横浜国立大学, 2) 電力中央研究所
* kawahara-daichi-gm@ynu.jp

1. 背景・目的

化学製品の製造プロセスは、爆発・火災事故のリスクを内包しており、事故により周辺の人々、構造物等に対して即時に甚大な被害をもたらす。しかし、多くのライフサイクル影響評価(LCIA)は、事故が発生しないことを想定した定常時の製造活動に係る影響を評価している。また、欧州環境毒性化学学会が提案したLCIA で考慮すべき影響領域のリスト[1)]にも事故が挙げられており、LCIA における事故の重要性が指摘されている。事故を考慮した LCIA 実施のためには、安全対策の効果を定量化し、定常的な健康・環境影響と事故による影響の両面を包括的に低減する上で重要な情報を提供する手法構築が必要となる。

これまでに我々は、プロセス事故を考慮した LCIA 実施に向けて、①事故により生成・放出される化学物質量の推算と LIME の被害係数の組み合わせによる事故時の環境への化学物質放出に伴う長期的なヒト健康影響を分析する手法[2)]や、②事故による従業員・周辺住民の人命・健康への物理的な影響を障害調整生命年(DALY)により算出する手法[3)]を構築してきた。これらの手法は DALY を用いて、事故により環境中に放出された化学物質が引き起こす直接のヒト健康影響の定量分析を可能にした。さらに、事故時の防災・減災対応、事故後の廃棄物処理、復旧作業等の波及的に発生する活動に伴う間接的な影響を総合した分析の重要性を示してきた。そこで本研究では、爆発・火災による構造物への影響範囲、影響強度の推定方法[4)]と、LIME の被害係数との組み合わせにより、事故の間接ヒト健康影響を DALY により算定する手法を構築する。

2. 事故の間接ヒト健康影響の定量分析手法

本研究で構築した分析手法のフローを図 1 に示す。まず、分析対象施設とその周辺の環境をモデル化し、条件を設定する。この段階において、使用されている資源の種類、場所、量を設定する。次に、イベントツリー分析(ETA)を実施し、漏洩発生後の事象進展を設定し、事故シナリオを構築する。その後、次の(a)-(c)により、事故の間接ヒト健康影響を分析する。

(a) 爆発・火災事故の影響度解析

漏洩する物質の性状やプロセス条件から、影響度算出モデル式[4)]を用いて爆発・火災の影響範囲と強度を推定する。例えば、爆発の場合は最大過圧とインパルスを算出する。その強度の影響への暴露による構造物の損傷確率は Probit 関数を用いて算出できる。構造物を対象とした Probit 関数には損傷度合いに応じて Collapse, Major, Minor の 3 種類が存在し[4)]、それぞれ構造物の 100%, 50%, 10%が損傷するとして計算した。

(b) 事故後の活動を通じたインベントリの推算

(a)で算出した各地点での構造物の損傷確率および損傷度合いと、その地点における各資源の使用量の積から、現場で発生する廃棄物発生量および復旧時に要する資源量を推算する。これらのデータをフォアグラウンドデータとして、IDEA を用いてそれらの活動の実施に係る上流まで遡ったインベントリを算出する。

(c) 間接ヒト健康影響の算定

(b)の結果と LIME の被害係数の積から、DALY を指標に事故による間接ヒト健康影響を算出する。

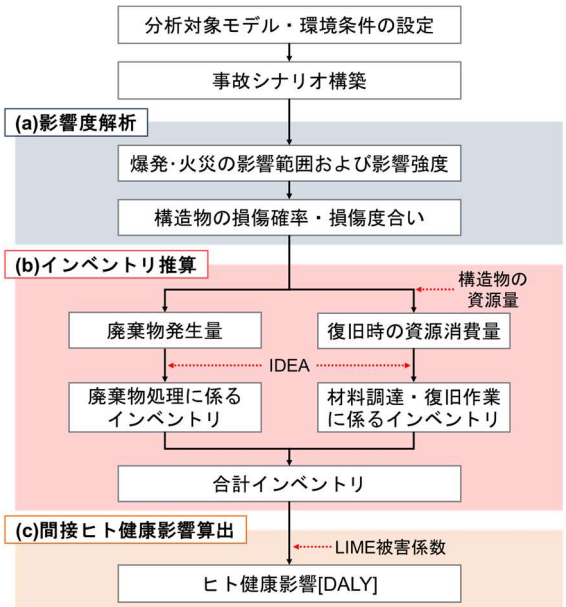


図 1 事故の間接ヒト健康影響分析手法の全体フロー

3. 事例検討 : 仮想水素ステーションの爆発・火災事故

3.1 前提条件

本研究では、仮想の水素ステーション(HRS)および周囲の街を設定し、構築した手法を適用する事例検討を実施した。まず、プロセスからの水素漏洩を想定し、爆発・火災による間接影響として周辺構造物の損傷により発生する廃棄物の処理および復旧作業に伴う資源消費を推算した。また、比較対象として既往の手法 [3] を適用し、事故の直接影響である死傷者も分析した。

HRS の機器構成や配置は、周辺の人の死亡リスクを分析した既往研究 [5]のモデルを参照した。また、HRS 周辺環境として図 2 のような仮想の木造建物が並ぶ町を設定し、モデル化した。これらの建物は 10 m 四方から成り、HRS 敷地外に一定間隔で配置されていると仮定した。建物 1 軒あたりの使用資源量はコンクリート 16 ton、木材 8 ton、ガラス 1 ton、鉄 1 ton とし、建物の中心を代表座標として考えた。建物 1 軒あたりの建設費は 500 万円と仮定した。また、各建物の代表座標に 2 人ずつ人が存在すると仮定した。事故の影響範囲および影響強度の推定には HyRAM+ [6]を用いた。

3.2 結果・考察

本稿では、重大な事故シナリオである水素の大規模漏洩による爆発の分析結果を示す。事故による直接・間接のヒト健康影響の分析結果は図 3 のようになった。事故の直接影響が最も大きく 0.76 DALY の損失であった。また、間接影響では復旧時に係る影響が 0.04 DALY であり、廃棄物処理に係る影響は微小であった。検討したシナリオでは直接影響が支配的であった。ただし、本稿の結果は暫定のものであり、今後結果は変わる可能性があるが、本検討を通じて、DALY を指標に事故の直接・間接ヒト健康影響の両方を総合した分析が可能であることが示された。

4. まとめ

本研究では、プロセス事故の間接ヒト健康影響の分析手法を構築し、手法を HRS からの水素漏洩・爆発の事故シナリオに適用した。事例検討を通じて、事故により間接的に発生するヒト健康影響を DALY で算出可能であることが示され、プロセス事故の直接・間接影響の両方を考慮した LCIA の実施が可能となった。今後は、水素漏洩による火災を含めた他の事故シナリオの詳細な分析や、安全対策による影響低減効果の分析を実施する予定である。

5. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K15409 の助成を受けて実施された。

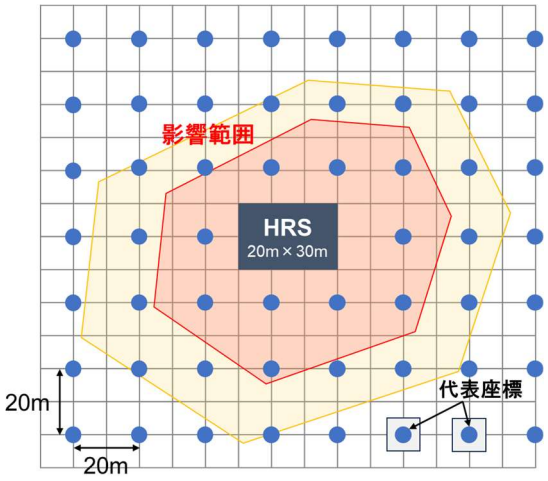


図 2 HRS 周辺の建物のモデル化

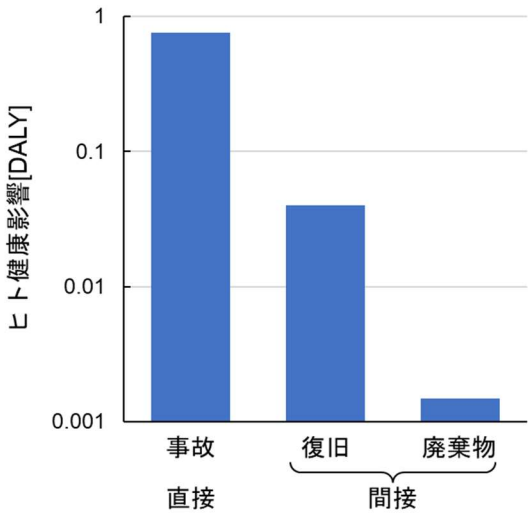


図 3 水素漏洩・爆発による直接間接のヒト健康影響

引用文献

1) Society of Environmental Toxicology and Chemistry: Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment (1996)
2) 川原大知, 中山穣, 稗貫峻一, 鈴木智也, 伊里友一朗, 三宅淳巳: 安全工学シンポジウム 2023, 東京, (2023), pp.282-285
3) Kawahara D., Hienuki S., Nakayama J., Suzuki T., Izato Y., Miyake A.: Ecobalance2024, Sendai, (2024), 1-3F-2
4) CCPS: Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis Second ed. American Institute of Chemical Engineers (2000)
5) Suzuki T., Shiota K., Izato Y., Komori M., Sato K., Takai Y., Ninomiya T., Miyake A.: Int. J. Hydrog. Energy, 46(11), (2021), pp.8329-834
6) Ehrhart B.D., Hecht E.S., Schroeder B.B.: Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 5.1 Technical Reference Manual. Sandia Report SAND2023-14224 (2023)

業務部門におけるスマートメーターデータを用いたエネルギー需要予測手法の検討

Study of energy demand forecasting method using smart meter data in the commercial sector

○鈴木大空斗*[1)]、磐田朋子[1)]、吉岡剛[1)]
Takuto Suzuki, Tomoko Iwata, Tsuyoshi Yoshioka
1) 芝浦工業大学
* br21024@ shibaura-it.ac.jp

1. 背景と目的

近年太陽光発電の導入量が増加している。一方で、自家消費型太陽光発電では、発電量が需要家の自家消費量を上回った場合、需要家から系統へ電力を送る逆潮流が発生する。この逆潮流の増加は系統内の電圧を上昇させ系統圧迫を起こす可能性があり精密機器の故障や停電といった危険性がある。逆潮流の発生量は、太陽光発電からの余剰電力によって発生するため、需要側の需要量を時刻別に把握することが必要である。しかし、需要家においては電化が進むことや省エネルギー化が進むなど電力需要量の増減があり、これは需要側の選択によって左右されるため不確定である。特に業務部門は統計として整備されたエネルギーデータがなく、地域の将来的な電力需要を予測するうえでの障壁となっている。また、配電網における電圧上昇の有無を検討するためには、現実社会と同様に需要家によってバラツキのある電力需要を表現するためのデータベースが必要となる。

そこで本研究では、業務部門における多様な業種について、既存統計情報等をベースとした仮想エネルギー需要生成モデルを作成し、需要家によってばらつきのある時刻別エネルギー需要量をシミュレーション上で表現する試みを行った。さらに、将来的にエネルギー需要の増減に影響を与える可能性のある複数のシナリオを設定し、業務部門の需要家における電力需要の増減を推計するためのモデル開発を目的とした。

2. 研究手法

2.1 仮想エネルギー需要モデルの作成

需要家ごとの需要量の違いを表現するモデルとして本研究ではマルコフ連鎖を用いて仮想需作成を行った。マルコフ連鎖は以下の特徴が挙げられる。

・状態の遷移を確率で決定し需要を作成する
・少ない元データから作成できる
・実行ごとに異なるデータを作成できる

状態遷移確率算出の元データとして、日本サスティナブル建築協会の DECC（Data-base for Energy Consumption of Commercial buildings）データにおける LEVEL3 データ（時刻別 1 次エネルギー消費量）を用いた。さらに本研究では、仮想エネルギー需要モデルで生成した時刻別エネルギー需要量を、実際のスマートメーターデータ(電力データ)と比較して大きな乖離がないか確認した。

2.2 シナリオ設定

本研究では、以下の 2 つのシナリオを設定した。

(1) 電化シナリオ：不確定な増減について、燃料転換によりガスから電気に切り替わり電力消費量が増加するシナリオ
(2) 省エネシナリオ：機器更新などにより省エネルギー化が進んだ新しい機器に切り替わり電力消費量が減少するシナリオ

2.3 用途別エネルギー需要の推計手法

電化や省エネの推進に伴う将来的な電力需要増減の推計を行うためには、仮想エネルギー需要の用途別燃料別内訳を知る必要がある。しかし DECC データは含まれる情報は単位延床面積当たりの 1 次エネルギー消費量の合計値となっている。そこで本研究では、空気調和衛生工学会の CASCADE-Ⅳを用いて 1 次エネルギー消費量を用途別燃料種別のエネルギー消費量に分解した。また、仮想エネルギー需要モデルの検証用に用いる。スマートメーターデータについても、CASCADE-Ⅳで使用されているエネルギー負荷割合から電力とガスの比率を求め、ガス需要および 1 次エネルギー消費量を推計した

2.4 機器構成について

本研究における設備機器については国土技術政策総合研究所資料「非住宅建築物の外皮・設備設計仕様とエネルギー消費性能の実態調査」を参考に、業種及び延べ床面積別での機器構成を作成した。

各機器の COP 値について、ガス給湯は 0.8、電気給湯はヒートポンプ式を想定して 2.0 とした。また、冷暖房は延床面積の規模によって導入設備が異なる。本研究では、延床面積 2000 ㎡以上 10000 ㎡未満の需要家については中央制御式の冷暖房システムが 90%の確率で導入されているとし、中央制御式空調の代表としてガス吸収式冷房の COP を 1.33、ガスボイラ暖房の COP を 0.81 と設定した。その他の需要家については個別空調システムを想定し、電気冷暖房の COP を 2.85 と設定した。なお電力については、１次エネルギーから２次エネルギーへの変換係数を、0.4 とした。

3. 結果・考察

3.1 仮想需要の作成

マルコフ連鎖を用いて作成した仮想需要について事務所延床面積 2000 ㎡以上 10000 ㎡未満１月の仮想需要として、生成した仮想需要から 5 件を抜粋し元データの平均値と比較を行った結果を図 1 に示す(以降も同区分での結果を示す)。図 1 からは異なる形の需要曲線がいくつも見られることが分かる。仮想需要の曲線が平均付近に集中していないのは他の業種や延べ床面積区分と比較して元データの数が豊富であり特定の需要曲線に確率が集約されていないことが要因であると考えられる。また、電力消費量のみのスマートメーターデータからガス需要を推計し、作成した仮想需要と比較した。スマートメーターデータの需要曲線(図 1 中「スマメ」)は元データの平均値と一致しているわけではないが、仮想需要の分布範囲には収まっており同じ面積区分におけるバラつきの範疇を逸脱していないことが確認できた。この結果に基づき、仮想需要は将来の需要推計を行うにあたって信頼できると判断し、シナリオ別での需要予測を行った。なお、3.2 章以降のシナリオ別需要予測には、本研究ではピーク時の需要がスマートメーターデータに最も近い図 1 の No1 を抜粋した。

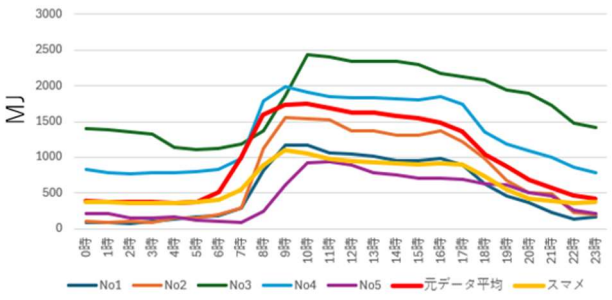


図 1　事務所 1 月仮想エネルギー需要(MJ/h)

3.2 電化シナリオ

機器構成リストに基づいて熱源機器を電化させた結果を図 2 に示す。電化前の電力消費量（図 2 中「電化前」）と比較すると、熱源負荷の高い時間帯の電力消費量が約 2 倍になるなど系統へ与える影響が大きいことが示された。一方で日中の需要が大きいため太陽光発電との相性が良く導入と電化を同時に進めることができれば系統へ与える影響を緩和することが期待できる。

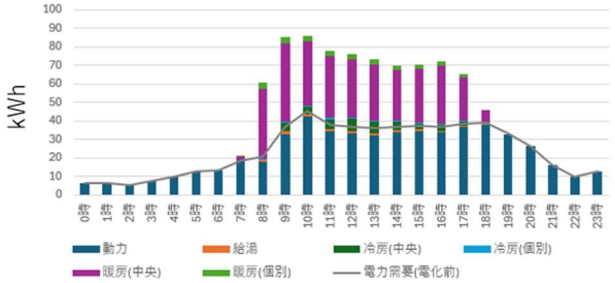


図 2　電化前後の電力消費量推計結果(kWh/h)

3.3 省エネシナリオ

省エネシナリオでは先ほど電化したエネルギー消費量に対して、省エネによる削減率に基づき電力消費量を減少させた。削減率については IAE の「超長期エネルギー技術ロードマップ」を参考に設定した。動力については複数の基準があったが、占める割合が大きい照明設備のうち数値が一番小さいものを最低ラインとして設定した。その結果、各用途の削減率は動力:0.6、空調：0.6、給湯：0.7 であるとした。

省エネルギー機器導入後の電力消費量の変化を図 3 に示す。省エネルギー機器導入前の電力消費量(図 3 中「省エネ前」)と比較した結果、特に全体でも占める割合が大きい動力と暖房の需要が高い時間帯では省エネによる影響が大きいことが示された。また、省エネ化をすることで電化によって大きくなった系統への影響を抑え電力消費量の増加を緩やかにする効果が期待できる。

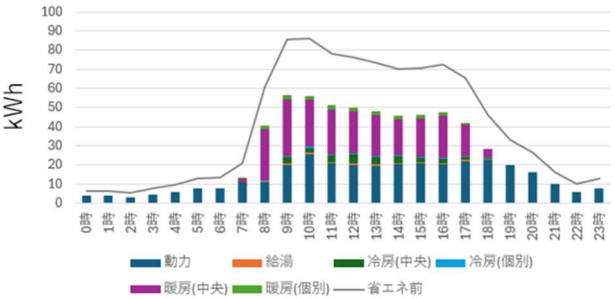


図 3　省エネ化前後の後電力消費量推計結果(kWh/h)

4. 今後の展望

本研究では業種ごとに焦点を当て同一の機器構成で検討を行った。しかし現実では需要家ごとに機器構成が異なる可能性が高い。より詳細な系統への影響や需要側での対策を講じるためには多様な機器構成や業種を複数組み合わせた需要の推計が必要である。

熱海市の渋滞緩和に向けた観光客の交通手段に関する選好調査

Survey on Tourist Transportation Preferences to Ease Traffic in Atami City

○菊地亮太*[1)]、磐田朋子[1)]、吉岡剛[1)]
Ryota Kikuchi, Tomoko Iwata, Tsuyoshi Yoshioka
1) 芝浦工業大学
*br21013@shibaura-it.ac.jp

1. 研究の背景と目的

令和 5 年の観光立国推進基本計画では観光業が成長戦略の柱とされ、地域経済の成長が期待されている。一方で、多くの観光地では観光客の自家用車利用による渋滞や駐車場不足が課題となっている。熱海市でも観光客の約 35%が自家用車を利用し、駅周辺の渋滞が住民生活に影響を与えている。 本研究では、電動アシスト自転車、電動キックボード、マイクロカーといったマイクロモビリティの導入により、熱海市の交通渋滞を緩和する可能性を探る。観光客の属性や利用意思を調査し、効率的な移動手段としての導入条件を検討することで、観光交通の効率化を目指す。

2. 研究方法

2.1 アンケート調査

過去 10 年以内に熱海市を訪れた観光客に対し、2025/1/16-17 にオンラインアンケート調査を実施した（表 1）。アンケートでは、観光客の年齢、性別、グループ人数、利用した交通手段などの基本的な情報を収集するとともに、移動手段としてのマイクロモビリティ利用について調査を行った。その際、安全面に関する参考情報として道路の斜度や移動距離、想定される所要時間などを提示し、具体的な条件を考慮したうえで利用意思を確認した。

表 1　アンケート属性

分類	内容	人数	割合（%）
年代別構成	20-30代	206	33.3
	40-50代	206	33.3
	60歳以上	206	33.3
性別構成	男性	349	56.5
	女性	269	43.5
	計	618	100

2.2 マイクロモビリティ利用意思と利用条件の分析

収集したアンケートデータをもとに、マイクロモビリティ利用意思の有無や利用意向に影響を与える要因を分析した。年代別にクロス集計や統計的分析を行い、年代ごとの傾向を明らかにした。調査地域は熱海駅から銀座商店街、銀座商店街から起雲閣、熱海ロープウェイ麓駅とした（図 1）。



図 1 調査地域（赤枠）

2.3 マイクロモビリティ導入のシナリオ設計

アンケート結果をもとに、観光客の導線や利用意向を考慮し、マイクロモビリティのポート設置場所や導入可能なエリアを設定した。これらの情報を地図上に可視化し、これにより期待される渋滞緩和や、観光地の利便性向上の可能性を検討した。

3. 研究結果と考察

3.1 現状分析

3.1.1 観光客の交通手段の選択

自家用車（マイカー）の利用率は 45.1%と最も高く、次に JR 在来線、新幹線となった（図 2）。自家用車の利用理由として「熱海での移動が快適だから」（66.2%）「荷物が多いから」（43.8%）が挙げられた。

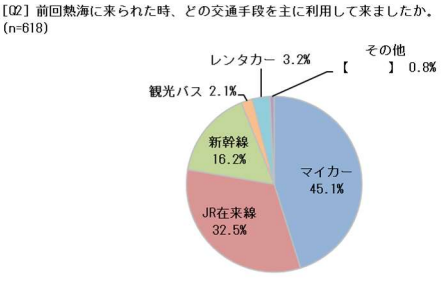


図 2　熱海までの交通手段

3.1.2　自家用車利用の課題

自家用車利用の課題として、渋滞(46.2%)や駐車場不足(35.1%)があげられた（図３）。

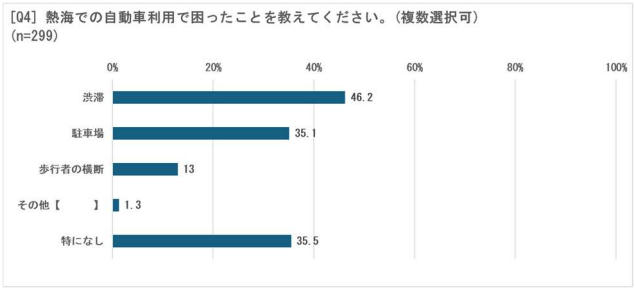


図 3　自家用車利用の課題

3.1.3　徒歩やバスを選ぶ観光客の特徴

熱海駅-銀座商店街や銀座商店街-各観光地までどの交通手段を使用するかという質問では半数以上の人がバスやタクシーではなく徒歩を選択した。これらの理由には、「景色を楽しみたい」「街歩きをしたい」などの観光の目的が背景にあった。

3.2 マイクロモビリティの利用意思

3.2.1　電動アシスト付き自転車の利用意思

全体の 64.1%が興味を示している一方で、実際の利用は 26.9%にとどまり、多くが関心止まりとなっている。利用しない理由として「徒歩や現地モビリティで十分」(39.9%) や「交通事故のリスク」(31.1%) が挙げられ、安全性と利便性の向上が課題である。また、若年層は料金、高齢層は安全性への懸念が顕著で、ターゲットごとの対策が必要であることがわかった。

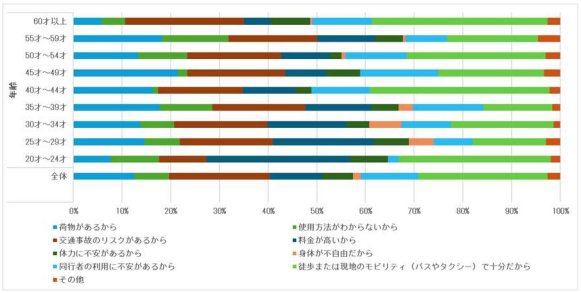


図 4　電動アシスト付自転車を使用しない理由

3.2.2　電動キックボードの利用意思

電動キックボードの利用率は 8.7%と低く、電動アシスト付自転車（26.9%）よりも人気がない。「興味もなく、使用しない」が 59.0%を占め、抵抗感が強いことがわかる。主な理由は「交通事故のリスク」(47.3%) や「徒歩や現地のモビリティで十分」(33.3%) で、安全性への懸念や代替手段の充実が利用を妨げている。また、特に 40 代以上では 16 歳未満の同行者の存在が使用制限要因として挙げられた。若年層は料金、高齢層は安全性への不安が課題であることがわかった。

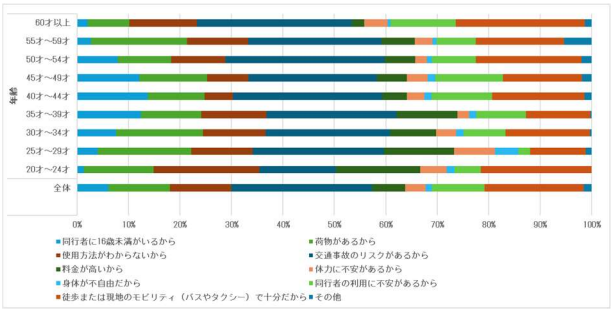


図 5　電動キックボードを使用しない理由

3.2.3　マイクロカーの利用意思

マイクロカーの利用率は 18.2%で、電動アシスト付自転車（26.9%）に次ぎ、電動キックボード（8.7%）より大幅に高い。興味を持つ層も 48.1%と半数近くに達し、幅広い層に受け入れられている。「使用しない」理由は「徒歩や現地モビリティで十分」(44.3%) が最多で、「交通事故のリスク」(25.2%)、「料金が高い（20.5%）が続く。高齢層は代替手段に満足する傾向が強く、20 代では「普通免許がない」(19.9%) が目立つ。免許不要の選択肢拡大が若年層の需要喚起につながる可能性があり、世代ごとの課題に応じた施策が鍵となる。

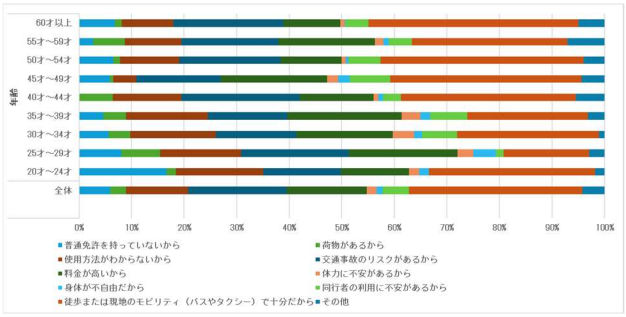


図 6　マイクロカーを使用しない理由

4.　結論と今後の展望

本研究により、マイクロモビリティ導入に興味を持つ人が過半数を占めることが明らかになったが、年齢が上がるにつれて安全性への懸念が高まる点や、免許の有無や同行者の年齢制限などで利用できない場合がある点が課題として挙げられた。熱海の観光客層は幅広いため、それぞれのニーズに応じたモビリティ選択や、安全性と利便性を両立した施策が今後の課題として挙げられた。

ポスター発表セッション

2025年3月6日(木) 17:00 ~ 18:00 P1会場：2161大競技室（1F）

[2-P3] ポスターセッション（3）

[2-P3-01]
日本LCA学会学生交流ネットワーク　2024年度活動報告
*大賀 雄介[1]、吉良 成美[2]、杉山 弦太[3]、盛本 怜太郎[2]、長谷川 慶信[4]、中村 晃大[5] (1. 九州大学院経済学府経済システム専攻、2. 立命館大学理工学研究科、3. 早稲田大学創造理工学研究科、4. 東京大学工学系研究科、5. 横浜国立大学大学院環境情報学府)

[2-P3-02]
植物由来炭素の導入による製油連産品のインベントリ分析
*黒田 裕章[1]、兼松 祐一郎[2]、中野 勝行[3]、兵法 彩[4]、菊池 康紀[2] (1. 三菱UFJリサーチ＆コンサルティング株式会社、2. 東京大学、3. 立命館大学、4. 東京都市大学)

[2-P3-03]
Environmental impact from technological transitioning of air conditioners in the case of Southeast Asia
*アズランカミル アクアハキム[1] (1. 立命館大学)

[2-P3-04]
日本から途上国への中古車輸出に伴う化学物質のヒト健康リスクと温室効果ガス排出量の統合的評価
*小林 諒真[1]、東海 明宏[1]、中久保 豊彦[1]、小口 正弘[2]、今泉 圭隆[2] (1. 大阪大学、2. 国立環境研究所)

[2-P3-05]
講演取消

[2-P3-06]
Rethinking Diverse Co-product Utilization from Oil Palm Industry through Waste Valorization
*高 怡惟[1]、Teah Heng Yi[1]、Kanematsu Yuichiro[1]、Kikuchi Yasunori[1] (1. 東京大学)

[2-P3-07]
人口移動が都市の発展と環境に与える影響
*井上 海璃[1]、上原 将[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

[2-P3-08]
人工光型植物工場トマト生産のGHG排出量評価
*服部 昭子[1]、細川 隆史[1] (1. 富士フイルム株式会社)

[2-P3-09]
軽量ベンダブルなシリコン/ペロブスカイトタンデム太陽電池の環境影響評価
*濱口 隆太[1]、石川 亮佑[2]、橋本 瑠李[1]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 東京都市大学)

[2-P3-10]
家庭部門におけるスマートメーターデータを用いたエネルギー需要予測手法の検討
*町田 智基[1] (1. 芝浦工業大学)

[2-P3-11]
水不足の深刻化と食料生産システムの環境負荷に関する考察

©日本LCA学会

*比嘉 春香[1]、吉田 萌世[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

[2-P3-12]
航空産業のカーボンニュートラル達成と持続可能な航空運航実現に向けた課題
*鬼頭 みなみ[1] (1. 福岡工業大学)

[2-P3-13]
セルロース繊維複合材料のライフサイクル設計における品質機能展開の応用
*杉之原 大和[1]、兼松 祐一郎[1]、Teah Heng Yi[1]、斎木 祐子[1]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学)

[2-P3-14]
食システムの脱炭素化に向けた飲食店における食材調達先とメニュー開発行動分析
*鈴木 智子[1]、天沢 逸里[1]、WU YINGLEI[2]、栗栖 聖[2] (1. 早稲田大学　カーボンニュートラル社会研究教育センター、2. 東京大学　工学系研究科　都市工学専攻)

[2-P3-15]
サッカー産業が地域経済や雇用、環境に与える影響
*山下 善資[1]、戸田 遥香[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

[2-P3-16]
木質バイオマスエネルギー事業を対象とした非専門家向けプランニング支援システムの開発
*山口 裕太[1]、木下 裕介[1]、中塚 記章[2]、赤松 史光[2]、柳田 高志[3] (1. 東京大学、2. 大阪大学、3. 森林総合研究所)

[2-P3-17]
為替変動が日本のインバウンド消費に与える影響分析
*吉田 大翔[1]、都留 惇嗣[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

[2-P3-18]
スクラップ種数の変化が鉄鋼循環に伴う環境負荷に与える影響の推計
*武山 健太郎[1]、星野 岳穂[1] (1. 東京大学)

[2-P3-19]
ソーシャルLCAにおける児童労働による健康影響の定量化方法
*丸岡 広大[1]、渕上 智子[1]、中野 勝行[1] (1. 立命館大学)

[2-P3-20]
国連自動車基準調和世界フォーラムにおける自動車LCAの国際調和手法の開発
*鈴木 徹也[1] (1. 一般財団法人日本自動車研究所)

[2-P3-21]
日本における水素発電のライフサイクル評価
*赤見 廉[1]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学)

[2-P3-22]
植物細胞農業による培養米生産の環境影響評価
*竹中 夏史[1]、菊地 怜[3]、松本 萌人[2]、井岡 隼人[3]、加用 千裕[1]、五十嵐 圭介[2] (1. 東京農工大学大学院農学府、2. 東北大学大学院農学研究科、3. 東北大学農学部)

[2-P3-23]
砂のクリティカリティ分析
*奥 啓熙[1]、山末 英嗣[1]、光齋 翔貴[1] (1. 立命館大学)

©日本LCA学会

[2-P3-24]
マスバランス方式が適用されたグリーンスチールに関する認知と適切な情報提供内容の検討
*牛久保 直哉[1]、橋本 征二[1]、Dente Sébastien[1] (1. 立命館大学)

[2-P3-25]
乳幼児用品のシェアリングを対象とした環境影響評価：ベビーベッドの例
*前田 梨香[1]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学)

[2-P3-26]
Domestic Carbon Sourcing Through Forestry Management Considering Wood-Based Material and Energy Production Pathways
* 紫怡[1]、Teah Heng Yi[1]、兼松 祐一郎[1]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学)

[2-P3-27]
死亡率を考慮した食料生産分析における影
響
*粂川 遥海[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1]、松八重 一代[2]、林 健太郎[3] (1. 立命館大学、2. 東北大学、3. 総合地球環境学研究所)

[2-P3-28]
持続可能な食への移行に向けたLCT教材の開発と試行
*WU YINGLEI[1]、栗栖 聖[1]、福士 謙介[1] (1. 東京大学)

[2-P3-29]
低GWP・可燃性代替冷媒を対象とした環境影響・火災事故リスク評価
*安藤 伊吹[1]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学)

[2-P3-30]
社会学理論を基盤としたライフサイクル持続可能性評価（LCSA）に向けた検討
―― 文理融合研究の試み：バイオエコノミーを事例として ――
*木村 元[1] (1. 桜美林大学 リベラルアーツ学群 環境学専攻)

[2-P3-31]
気候変動による陸域生物種の絶滅リスクマップの作成
*橋本 瑠李[1]、平田 晶子[2]、大橋 春香[2]、湯 龍龍[3]、劉 潤桓[1]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 国立研究開発法人　森林研究・整備機構　森林総合研究所、3. 国立研究開発法人　農業・食品産業技術総合研究機構)

[2-P3-32]
講演取消

[2-P3-33]
講演取消

[2-P3-34]
廃プラスチックの地域別フロー構造の比較と資源化可能性の検討
*稲葉 陸太[1]、東 修[2]、小川 佳代子[2]、岡本 大作[2]、中谷 隼[3]、松本 亨[4] (1. 国立環境研究所、2. 株式会社エックス都市研究所、3. 東京大学、4. 北九州市立大学)

[2-P3-35]
再資源化を考慮した銅製錬のライフサイクル環境評価
*鈴木 綾乃[1]、立本 海[2]、折笠 広典[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. JX金属株式会社)

©日本LCA学会

[2-P3-36]
LCAを用いた温泉地域における有機性廃棄物処理のシナリオ分析

*中川 凌汰[1]、吉川 直樹[1] (1. 滋賀県立大学)

[2-P3-37]
A Life Cycle Assessment of Keke Napep (Tricycles) in Nigeria

*Isah Mohammed[1]、張 政陽[1]、松八重 一代[1] (1. Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University)

[2-P3-38]
第16回エコバランス国際会議におけるカーボンニュートラルおよびサーキュラーエコノミーの取組

*中谷 隼[1]、吉川 直樹[2]、重富 陽介[3]、齋藤 優子[4]、張 政陽[4]、松八重 一代[4] (1. 東京大学、2. 滋賀県立大学、3. 立命館大学、4. 東北大学)

[2-P3-39]
解体による部品表作成とICP分析を用いた電子機器のライフサイクル評価

*松永 彩那[1]、柏尾 南壮[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. Fomalhaut Techno Solutions)

[2-P3-40]
新規技術導入の社会経済的価値の分析方法の提案：CNF技術を例に

*尾下 優子[1]、稗貫 峻一[2]、兼松 祐一郎[1]、西嶋 大輔[3]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学、2. 電力中央研究所、3. 福島大学)

[2-P3-41]
LCAを用いた金融機関によるエンゲージメント効果分析

*伊澤 璃矩[1]、加藤 正裕[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 三菱UFJ信託銀行株式会社)

[2-P3-42]
講演取消

[2-P3-43]
DX推進の影響を見据えた国内観光業のサプライチェーン社会・環境影響の解析

*奥田 先葉[1]、重富 陽介[1] (1. 立命館大学)

[2-P3-44]
Life Cycle Assessment and Feasibility Analysis of a Sustainable CCTS Network in Taiwan's Taihsi Basin

*WU TSAIWEI[1]、吳 政岳[2]、謝 秉志[2]、八木原 昂輝[1]、大野 肇[1]、福島 康裕[1] (1. 東北大学、2. 台湾成功大学)

[2-P3-45]
建築分野におけるLCAデータベースの構築～既往の論文や報告書等の公開情報を活用したインベントリデータの構築～

*大竹 舜太[1]、小林 謙介[1]、河北 美来[1] (1. 県立広島大学)

[2-P3-46]
車載用リチウムイオン電池の資源循環に向けたリサイクル技術の包括的整理

*兵法 彩[1]、菊池 康紀[2] (1. 東京都市大学、2. 東京大学)

[2-P3-47]
航空業界の脱炭素化に向けたSAFの導入についての検討

©日本LCA学会

*村部 さくら[1]、津田 薫[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

[2-P3-48]
講演取消

[2-P3-49]
衛星画像および深層学習を組み合わせた全球採掘領域モニタリング

*廣田 琳治[1]、佐久間 東陽[1,2]、山野 博哉[2,3]、南齋 規介[2]、中島 謙一[2,3] (1. 木更津工業高等専門学校、2. 国立環境研究所、3. 東京大学)

[2-P3-50]
Exploring global flood risk and its potential propagation through international trade

*Mtibaa Slim[1]、Maeno Keitaro[1]、Islam Kamrul[1]、Motoshita Masaharu[1] (1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

[2-P3-51]
Life cycle assessment of mechanical recycling and utilization for plastic bags of uncontaminated post-industrial polyethylene film in Japan

*KIM AHDO[1]、Zahari Teuku Naraski[2]、枝吉 宣輝[3]、Chou Pin Juo[3,4]、山本 寿樹[3]、Chou Pin Yen[3,4]、齋藤 敬[1]、McLellan Benjamin[2] (1. 京都大学 総合生存学館、2. 京都大学 エネルギー科学研究科、3. 株式会社esa、4. Chuang Tieh Machine)

[2-P3-52]
Analyzing material flows in Pakistan based on input-output table

*アーメド ザミール[1]、Teah Heng Yi[1]、Kanematsu Yuichiro[1]、Kikuchi Yasunori[1] (1. The University of Tokyo)

[2-P3-53]
環境配慮行動を促す仕掛けによる環境負荷削減効果

*髙橋 和枝[1]、星川 真菜[1] (1. 武蔵野大学)

[2-P3-54]
半導体材料に着目した水消費と水枯渇への影響

*田中 幸希[1]、張 政陽[1]、松八重 一代[1] (1. 東北大学)

[2-P3-55]
デジタルプラットフォーム型サーキュラーエコノミー事業におけるコンセプト設計支援手法の開発

*河本 凌志[1]、経沢 正邦[1,2]、木下 裕介[1] (1. 東京大学、2. KDDI総合研究所)

[2-P3-56]
加工スクラップの発生と消費を考慮したライフサイクルインベントリ分析手法

*鈴木 太一[1,2]、劉 俊希[2]、醍醐 市朗[2] (1. 株式会社UACJ、2. 東京大学)

©日本LCA学会

ポスター発表セッション

2025年3月6日(木) 17:00 ~ 18:00 P1会場：2161大競技室（1F）

[2-P3] ポスターセッション（3）

[2-P3-01] 日本LCA学会学生交流ネットワーク　2024年度活動報告

*大賀 雄介[1]、吉良 成美[2]、杉山 弦太[3]、盛本 怜太郎[2]、長谷川 慶信[4]、中村 晃大[5] (1. 九州大学院経済学府経済システム専攻、2. 立命館大学理工学研究科、3. 早稲田大学創造理工学研究科、4. 東京大学工学系研究科、5. 横浜国立大学大学院環境情報学府)

キーワード：日本LCA学会、学生交流ネットワーク

LCA学会の学生交流ネットワーク(通称：SCN)は、LCA研究に携わる学生間のつながりを強化することを目的として2009年に設立された。コロナ・パンデミック禍の苦境も乗り越えたSCNは、今年8月の「夏の工場見学・ワークショップ」において、過去最多の53名学生の参加を記録した。また、11月のEcoBalance国際会議において、Young Researchers' Workshopの企画・運営を行なった。本会におけるポスター発表では、SCNのこれまでの歩みと今年度の活動についての詳細な報告を行う。

©日本LCA学会

植物由来炭素の導入による製油連産品のインベントリ分析

Inventory analysis of oil refinery products introducing plant-derived carbon

○黒田裕章*[1)]、兼松祐一郎[2)]、中野勝行[3)]、兵法彩[4)]、菊池 康紀[2)]
Hiroaki Kuroda, Yuichiro Kanematsu, Katsuyuki Nakano, Aya Heiho, Yasunori Kikuchi
1) 三菱 UFJ リサーチ＆コンサルティング株式会社, 2) 東京大学, 3) 立命館大学, 4) 東京都市大学
* hiroaki-kuroda@murc.jp

1. 背景

化学産業におけるカーボンニュートラル達成には化石由来原料の削減が必要であり[1)]、植物油や使用済み廃食用油のような植物由来原料や、廃プラスチックの熱分解油等のリサイクル原料が製油所で使用され始めている。特に、バイオマス原料の使用は既に実用化されており、持続可能な航空燃料（SAF）の製造にも活用されている。

既往研究では、原油原料と植物由来原料では得られる製油製品の種類と量が異なることが報告されているものの、製油所の一部のプロセスにおける分析にとどまっており[2)]、製油所全体における植物由来原料の流れは解析されていない。また、植物原料の違いによって製品の環境負荷が大きく異なることも示されている[3)]ことから、化学産業のカーボンニュートラル達成のためには、植物を原料とした製油連産品の収量分析とその環境影響の評価が必要である。

そこで、本研究は、化石資源由来炭素と植物由来炭素を区別した製油連産品のインベントリ分析を目的とした。インベントリ分析を行うために、石油精製プロセス、石油化学プロセス及び植物油の前処理から成る製油所フローモデルを開発し、フロー解析を行った。

2. 製油所フローモデル開発

2.1 システム境界の設定

新規原料製造、製油所に植物油を投入するための前処理、製油連産品及び基礎化学品の製造を行う石油精製・石油化学プロセスを対象とした。基礎化学品からプラスチック等の化学製品の製造は含まない。

石油精製プロセスでは、原油を原料として、LPG、ナフサ、ガソリン、航空燃料、灯油、軽油、重油等が製造される。ここで得られたナフサは石油化学プロセスの原料として使用され、オレフィンや BTX（ベンゼン、トルエン、キシレン）等の基礎化学品が製造される。

植物油は脂肪酸とグリセリンがエステル結合したグリセライドで構成されており、石油精製プロセスへの投入にあたっては、エステル結合を分解することが望ましい。よって、植物油の脱酸素によりエステル結合を分解してから常圧蒸留装置に投入するパターンと、植物油を製油所内の水素化装置に直接投入することでエステル結合を分解するパターンの 2 つが想定される。本要旨では、前者（植物油を脱酸素して常圧蒸留装置に投入する事例）を紹介する。

2.2 植物原料の選択

植物油により、グリセライドの脂肪酸組成が異なる。今回は、以下の異なる特徴を持つ[4)]３つの植物油を対象とした。

- 大豆油：オレイン酸やリノール酸等、炭素数 18 の脂肪酸を多く含む
- なたね油：オレイン酸やリノール酸等、炭素数 18 の脂肪酸と、炭素数 22 のエルカ酸を同程度含む
- パーム核油：炭素数 12 のラウリン酸を多く含む

後述する製油所モデルにおいては、脂肪酸の炭素数が 1～4 の場合は LPG 留分、5～9 の場合はナフサ留分、10～13 の場合は灯油留分、14～19 の場合は軽油留分、20～24 の場合は重質軽油留分、25 以上の場合は常圧残油留分とみなした。

2.3 製油所モデルにおける定数の設定

石油精製プロセス及び石油化学プロセスの構成や各単位操作における成分収率、通油量あたりの CO2 排出量は文献[5,6)]から設定した。各単位プロセスの処理可能量は、実通油量[5)]を稼働率[7)]で除して設定した。なお、本モデルは循環型ケミカルリサイクルの評価のために開発されたモデル[8)]をもとに、植物油の投入が可能なよう作成した。

植物油の前処理（植物油の脱酸素）における入出力及び収率については、既往研究[3)]をもとに設定した。

2.4 炭素源を区別したフロー解析

開発した精油所モデルを用いて、原油及び植物油の炭素源を区別したフロー解析を行った。原油及び植物油の投入量を変数、基礎化学品の製造量が最大となるよう目的関数を設定した。各単位操作の処理可能量を制約条件とした。なお、原油と植物油の混合割合に関する制約条件は設けていない。目的関数や制約条件を変えることで、様々な条件下でのフロー解析も可能で

ある。

2.5 温室効果ガス（GHG）排出量の算定

GHG 排出量の算定における機能単位は、製油連産品 1kg の製造とした。石油精製及び石油化学プロセスにおける GHG 排出量は、通油量あたりの CO_2 排出量 [5] に、製油連産品 1kg の製造に必要な各プロセスの通油量を乗じることで算定した。原料の生産及び植物油の前処理については別途算定した。

3. 結果

以下に、常圧蒸留装置に植物油を投入した場合のフロー解析結果を紹介する。投入する植物油により、得られる製油連産品の種類と量が異なることが明らかになった。これは、常圧蒸留装置へ原料を投入すると、精製工程を経て、留分（炭素数）に応じてガソリンや灯油、軽油等の製油連産品へと変換されるためである。基礎化学品の収量を最大化するためには、石油化学プロセスの原料となるナフサの収量を高めることが重要である。よって、原料におけるナフサ留分や、軽質留分、重質軽油留分等の割合が重要になる。

今回はフロー解析における目的関数を基礎化学品の製造量の最大化と設定したが、実際にはガソリンや航空燃料（特に SAF）の需要が見込まれることから、フロー解析における制約条件や目的関数を変更することで、より現実的なシナリオ分析が可能となる。

3.1 大豆油を常圧蒸留装置に投入した場合

植物由来炭素の多くは軽油に移行した。これは、大豆油は軽質留分を多く含むためである。軽油脱硫、接触改質、BTX 抽出の処理量が上限に達しているため、これらの装置の処理能力を拡充することで、さらなる大豆油の投入が可能になると考えられる。

3.2 なたね油を常圧蒸留装置に投入した場合

植物由来炭素の多くはガソリン、軽油、A 重油に移行した。これは、なたね油は軽質留分及び重質軽油留分を多く含むためである。大豆油のように多く含まれる留分が特定の留分に偏っていないため、軽油脱硫や減圧軽油脱硫の処理量は上限に達しておらず、接触改質や BTX 抽出、ガソリン製造に関連するアルキレーションの処理量が上限に達している。なたね油の投入量を増やすためには、これらの装置の処理能力の増強が必要になる。

3.3 パーム核油を常圧蒸留装置に投入した場合

フロー解析における最適化計算の条件では、パーム核油を使用せず、原油のみを使用した方が基礎化学品の収量が多くなった。これは、パーム核油は灯油留分や軽質留分が中心であり、基礎化学品の原料となるナフサ留分が得られにくいためだと考えられる。

4. 結言

製油所における植物由来原料の導入において、炭素源を区別したモデルを開発し、フロー解析及び GHG 排出量の算定を行った。投入する植物油により、得られる製油連産品の種類と量が異なることが明らかになった。基礎化学品の収量を最大化するためには、ナフサの収量を増やす、つまり、原料におけるナフサ留分や、軽質留分、重質軽油留分等の割合が重要になる。また、解析結果から、処理能力が不足する単位操作も明らかになった。これにより、植物原料のさらなる活用に向けて増強が必要となる単位操作を特定することができるようになった。

謝辞

本研究は、環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20243004）により実施した。

引用文献

1) F. Meng et al., Proc. Natl. Acad. Sci., 120(8), (2023)
2) Pinho, A. de R et al., Fuel Processing Technology, 229, (2022)
3) Yasunori Kikuchi et al., Process Saf. Environ. Prot., 166, (2022)
4) 公益財団法人日本油脂検査協会, ”食用植物油脂の脂肪酸組成”, (2023)
5) 一般財団法人石油エネルギー技術センター, “令和３年度燃料安定供給対策に関する調査（製油所の競争力に係る技術動向に関する調査）調査報告書”, (2022)
6) 石油連盟, “石油製品の LCI データの概要”, (2003)
7) ENEOS 株式会社, “第 24 表 原油処理能力・処理量・稼働率の推移”
8) 中村拓真ほか, “炭素循環を考慮した廃プラスチック循環型ケミカルリサイクルの評価” 第 19 回日本 LCA 学会研究発表会, (2024)

東南アジアにおけるエアコンの技術移行の環境影響分析

Analyzing environmental impact of technological transitioning in air conditioners in the case of Southeast Asia

アクアハキム　アズランカミル*[1)]，光斎翔貴[1)]，柏倉俊介[1)]，山末英嗣[1)]
Akma Hakeem Azlan Kameel, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue
1) 立命館大学
*rm0256hi@ed.ritsumei.ac.jp

1. Introduction

In this era of modern technologies, space cooling has become the biggest consumer of household energy consumption. This is especially true for tropical regions near the equator with warm to high year-round temperatures. The higher the temperature is, the more energy it takes to cool down and unfortunately, global warming is only making the situation worse. At the same time, it is well known that air-conditioning utilizes environmentally harmful Chlorofluorocarbons in their refrigerants. However, given innovations such as inverter air-conditioning and the development of less harmful refrigerants, the global warming potential caused by air conditioning can be decreased.

There are studies–[(1)] that have investigated the benefits of advancements and innovations in mitigating the negative impacts caused by certain technologies. For cooling technologies, recent innovations such as inverter model and R32 refrigerants have been shown to decrease the global warming potential caused by AC. However, there remains a gap especially in understanding the change that transitioning to newer technologies has on the environmental impact of AC. The purpose of this research is to evaluate the potential environmental impact caused by ACs in southeast Asia while taking into consideration the transition of AC technology in the region

2. Research method

2.1 Functional unit and system boundary

In this study, the environmental impact of air conditioners was evaluated in the production, operation, and disposal stages. Environmental impact was measured as global warming potential (GWP) of a 20-yearlong gap, comparing emissions to that of CO_2, with a functional unit of kg CO_2-eq.

2.2 Evaluation subjects

The main subjects of this study are split-type room air conditioners in ASEAN countries. Data for GWP20 caused by the AC equipment, refrigerants as well as their electricity consumption were collected from previous studies and the AIST-IDEA database [(2)].

2.3 Estimating the adoption of AC

To estimate the number of produced, operating and disposed ACs in the ASEAN region, a dynamic Material Flow Analysis (dMFA) was conducted. This dMFA distinguishes between two AC model classifications, namely non-inverter (nINV) R410a and inverter (INV) R32. **Table 1.** shows the properties between the two classifications used in this study.

Table 1 AC classifications

	nINV R410a	INV R32
AC type	Non-inverter	Inverter
Refrigerant	R410a	R32
Refrigerant charge	1 kg	0.77 kg
Average lifespan	10.5 years	15 years

Data for the adoption rate between these two distinctions were provided by an AC manufacturing company. The estimated number of operating AC was also collected from a survey conducted by the Japan Refrigeration and Air conditioning Industry Association (JRAIA)-[(3)]. Using other relevant data such as population and average household size, the estimated adoption rate of AC in each country could be calculated.

To estimate future values, a bass model was used to predict the future number of operating AC, and a Weibull distribution was used for the number of disposed AC. As a result of the dMFA, it becomes possible to approximate the number of produced AC and more importantly, the share of nINV R410a and INV R32 AC in the market.

2.4 Assessing environmental impact

To highlight the effect that different energy mixes have on the GWP20 emissions of ACs, this study calculates the GWP20 caused by each kWh of electricity produced separately for each country. Data for the energy mix were obtained from the International Energy Agency (IEA)-[(4)] and the GWP20 caused by each energy source comes from the Ecoinvent–[(5)] database. The electricity consumption by INV R32 AC is calculated as 65% that of the nINV R410a AC-[(6)]. Future energy mix was set to the latest data.

At the same time, the increasing usage rate of ACs due to rising global temperatures was also considered. This is done by finding the relationship between household electricity consumption and the change in outdoor temperatures. Cooling degree days-[(7)] of base 24 degrees Celsius was used to measure temperature changes. Recent data-[(8)] done by surveys in Singapore was used. In this study, the relationship between AC electricity consumption and outdoor temperatures was estimated using linear regression, adjusting for the base electricity consumption caused by other electrical appliances. This value was assumed to be the same for all other countries in ASEAN.

As for the refrigerants, their impact was measured separately between the operating stage and the disposal stage. The annual leakage rate of the refrigerant was set to 10%. The recovery rate of the refrigerant during the disposal stage was conservatively set to 0%[(9)]. Therefore,

any refrigerant that was not emitted in the production stage, would be emitted during the disposal stage.

3. Results and discussion

3.1 AC adoption behavior

Figure 1 shows the estimated share of AC types in countries of ASEAN. Most countries have a share of INV R32 above 60% by 2020. Countries like Malaysia, Indonesia and especially Myanmar are slower to better technologies. A robust pre-existing market for nINV R410a AC and the large size of the market could be reasons as to why the transition is slow for these countries.

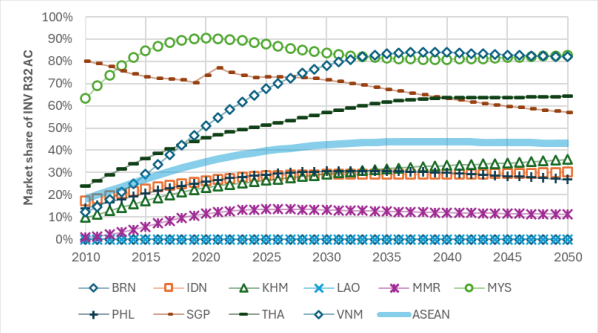


Figure 1 Estimated share of INV R32 ACs in countries of ASEAN

3.2 GWP20 emissions by country.

Figure 2 shows the GWP20 of AC caused by each country per capita. According to this, clear groupings appear where the average person in Vietnam and Thailand causes high GWP20, followed by Malaysia and Singapore, and the other countries even further below that. The source of the increase is a mix between electricity production sources, number of people per AC and other countries being more sensitive to rising temperatures.

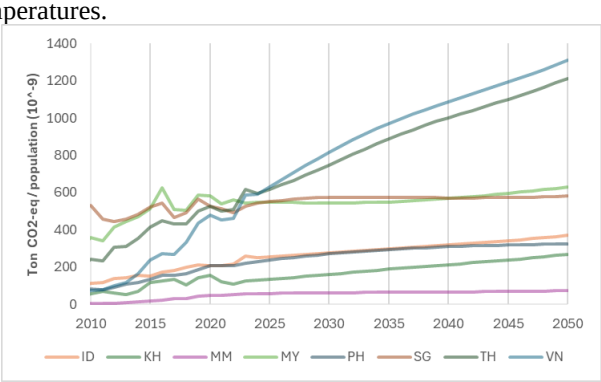


Figure 2 GWP20 by AC per capita

3.3 GWP20 of the average AC

Figure 3 shows the annual GWP20 of an average AC unit in ASEAN. Variation in the results correlates with the temperature rise. GWP20 caused by electricity consumption of AC accounts for more than 60% of total emissions. Furthermore, as of 2024, about 85% of total emissions occur in the operating stage and is expected to reach 91% by 2050. By that time, GWP20 emissions caused by AC in the ASEAN region will reach 1000 Mton CO2-eq,

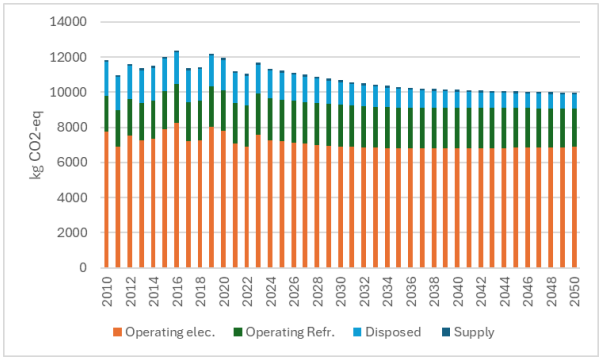


Figure 3 Annual GWP20 emissions of an average AC unit in ASEAN

4. Summary and future prospects

The share of INV R32 AC is expected to increase to 80% of all AC in ASEAN. However, even with that fact, the emission of the average AC in ASEAN will stagnate around 10000 kg CO2-eq in GWP20. This problem highlights the importance of using greener energy sources while adopting more efficient AC technologies. In the future, different energy scenarios should be considered when predicting future emissions for AC emissions. Scenarios should be based off sustainable development goals pledged by each nation.

5. References

1) McNeil, M. A., & Letschert, V. E. (2010a). Modeling diffusion of electrical appliances in the residential sector.
2) Japan Refrigeration and Air conditioning Industry Association (2015,2019,2022). Estimates of World Air Conditioner Demand
3) IDEA Ver.3.4.1 (2024 September 02). National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Research Institute of Science for Safety and Sustainability, Research Laboratory for IDEA"
4) IEA (International Energy Agency) (2019) Southeast Asia Energy Outlook.
5) Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, [online] 21(9), pp.1218–1230.
6) Siriwardhana, M., & Namal, D. D. (2017). Comparison of energy consumption between a standard air conditioner and an inverter-type air conditioner operating in an office building. SLEMA Journal, 20(1–2), 1. https://doi.org/10.4038/slemaj.v20i1-2.5
7) Degree days calculated accurately for locations worldwide. Degree Days.net. (2024 December 02). https://www.degreedays.net/
8) Tariff information. Electricity Tariff Singapore. (2024 December 02). https://www.spgroup.com.sg/our-services/utilities/tariff-information
9) Daikin (2024). Sustainability Report 2024

Rethinking Diverse Co-product Utilization from Oil Palm Industry through Waste Valorization

○Gao Yiwei[1)], Teah Heng Yi[1)], Kanematsu Yuichiro[1)], Kikuchi Yasunori[1)]
1) 東京大学
*gaoyiwei728@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

In oil palm industry, palm oil is generated as primary product associated with an abundance of wastes from processes of plantation, palm oil mill, palm oil refinery and utilization. These wastes are mainly biomass materials and can be valorized through thermochemical or biochemical conversion and other processes to produce green energy and value-added products[1)]. With the increasing global demand for palm oil[2)], waste generation from palm oil production processes is also increasing. Therefore, it is necessary to consider the environmental performance of waste valorization.

Previous life cycle assessment (LCA) study on oil palm industry waste valorization have mostly focused on the technologies and processes of single or several specific oil palm-derived biomass waste valorization pathways to assess their greenhouse gas (GHG) emission and environmental impacts[3)]. However, a single pathway may only optimize the environmental or economic benefits of that pathway, while ignoring the optimization potential of the entire system.

To offer a comprehensive evaluation, this study aims to map an overall system of waste valorization start from plantation in the process of palm oil production and examines the environmental performance impacts of the entire oil palm system. The results are intended to provide insights for valorization choices from stakeholders and potential improvement in technologies of oil palm waste valorization under some practical scenarios.

2. Method

We established a cradle-to-grave palm oil supply chain with material flow, incorporating other wastes and covering stages from plantation to utilization.

We set 193 kg of refined palm oil (RPO) produced from 1 ton of fresh fruit bunch (FFB) as the functional unit, with processes including palm oil production and waste treatment before directly releasing the biomass into the environment as the benchmark. From these processes, biomass waste oil palm trunk (OPT) and oil palm frond (OPF) are from plantations, palm kernel shell (PKS), empty fruit bunch (EFB), mesocarp fiber (MF) and palm oil mill effluent (POME) are from palm oil mills, palm fatty acid distillate (PFAD) is from a palm oil physical refinery, and used cooking oil (UCO) is from utilization. For waste valorization, OPT, OPF, EFB, PKS, and MF are utilized to produce electricity and heat through the process of pyrolysis, POME is utilized to produce biogas through the process of anaerobic digestion, PFAD is processed into biodiesel, and UCO is converted into both biodiesel and sustainable aviation fuel (SAF) through hydrotreatment. These palm oil production and biomass valorization processes are included in the system boundary.

Scenarios are set to show the environmental and economic value of different pathways from various feedstocks to value-added products: (S1) Palm oil production with full waste valorization, (S2) Palm oil production with plantation waste valorization, (S3) Palm oil production with palm oil mill waste valorization, (S4) Palm oil production with palm oil refinery waste valorization, (S5) Palm oil production with used cooking oil valorization. The wastes that are not valorized will be treated as the benchmark.

3. Result and Discussion

3.1 Result

Material flow tracks and quantifies the outputs of products and wastes throughout the process. Through waste analysis, suitable methods for valorization can be identified. Optimizing waste utilization reduces emissions, and fully utilizing waste facilitates the design of a zero-waste system. In the case study, most feedstock is transformed into biomass waste, which offers significant potential for valorization. And currently, we mainly consider the pathway of converting biomass into energy or fuel.

For the life cycle assessment result, we mainly focus on the indicator GWP100 from the IPCC 2013 method to show the impact of climate change. The result of

environmental load of each scenario shows the main contributor of GWP100 are energy input in each process and waste treatments in all scenarios. Energy input includes electricity, natural gas and diesel. Besides, waste treatment refers to the direct release of waste into the environment after simple treatment to meet emission standards. During the waste treatment process, landfill waste decomposes during anaerobic decomposition or aerobic composting, releasing CO_2. And part of the carbon is emitted in the form of methane (CH_4) under anaerobic conditions, it will eventually be converted into CO_2 in the atmosphere. The benchmark has relatively low CO_2 emissions attributed to energy input, implying that all waste valorization processes are the main cause of GHG emissions caused by energy input. S4 has a relatively low environmental load due to the mass of PFAD, the waste needed to be valorized, is only a little. Also, the combustion of carbon in the waste will release CO_2 in the process of waste incineration.

Economic value is also calculated to show how the product from waste performs. We searched market prices of all products from reference and multiplied by the mass of the products. Products in S1 has highest economic value but highest environmental load, because S1 involves all of pathways in system boundary. In S2-S5, S2 and S5 has relatively highest economic value because S2 produced large amount of power and heat, and sustainable aviation fuel has high market price.

3.2 Discussion

The results provide the environmental and economic performance of waste valorization in each scenario, and highlight the interaction between environmental impact of production pathways and economic value of products. Among them, the reason why energy occupies large CO_2 emissions is that production of energy is all generated by fossil fuels, which will bring large GHG emissions compared to other clean energy. Electricity and heat derived from woody biomass waste can be used within defined scenarios which can help realize resource circularity in oil palm industry, while the surplus energy can be sold to create economic benefits. Also, the result can provide suggestions to stakeholders based on scenarios with high economic value and low environmental load, especially S2 and S3.

4. Conclusion

The LCA modeling in this study shows the situation using biomass waste to generate value-added product especially green energy and biofuel under specific technologies with extra economic value and low environmental load.

However, the system boundary defined in this LCA study mainly focus on using waste to generate energy and biofuel. The biomass waste has other potential utilization such as construction materials, chemicals, nutrients and so forth which can be involved in overall picture using system expansion approach in the future.

Acknowledgement

This study is financially supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP22KK0169.

Reference

1) Okolie, J. A., Epelle, E. I., Tabat, M. E., Orivri, U., Amenaghawon, A. N., Okoye, P. U., & Gunes, B.: Process Saf Environ, 159, 323–344, (2022).
2) Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M: Agricultural Production. Our World in Data, (2023).
3) Nur Izzah Hamna A. Aziz, Marlia M. Hanafiah: Renew Energ, 145, Pages 847-857, (2020).

人口移動が都市の発展と環境に与える影響

The Impact of Population Migration on Urban Development and the Environment

井上海璃*[1)]，上原将[2)]，加河茂美[3)]
Kairi INOUE, Sho UEHARA, Shigemi KAGAWA
1)九州大学経済学部，2)九州大学経済学府,3)九州大学経済学研究所
*inoue.kairi.992@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

現在、日本では東京一極集中が問題となっている。東京一極集中とは、東京都や周辺地域に人口や産業、経済活動が過度に集中している現象を指す。東京一極集中が進むと、ヒートアイランド現象や交通量の増加等による大気汚染の深刻化などの環境問題が懸念されている。東京都は、2050 年までに CO_2 排出量を実質ゼロにするという目標を掲げており、東京一極集中の是正は重要な課題である。

このような状況のなか、内閣府の「デジタル田園都市構想」では、2027 年までに東京圏から地方への年間の転出超過数を 1 万人 [1)]とすることを目標としている。本研究では、まず、東京都からの年間の転出超過者が 1 万人となるために重要な要因を特定する。次に東京都の人口変動による最終需要の変化が、東京都内の CO_2 排出に与える影響を分析することで、東京一極集中是正策による CO_2 排出削減ポテンシャルの定量化を行う。本研究は東京都と地方の持続的な発展に貢献できる政策提言を行うことを目的とする。

2. 研究手法

本研究では、まず人口移動の要因特定のために重回帰分析を行う。これにより東京都からの年間の転出超過数を 1 万人とするために必要な措置の検討を行う。次に産業連関分析を用いて、東京都から人口が 1 万人転出超過することによる CO_2 排出変化量を定量化することで、東京一極集中是正策による東京都内の CO_2 排出削減ポテンシャルの推計を行う。

(1) 人口移動要因特定のための重回帰分析

$$y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \varepsilon \quad (1)$$

ここで、yを各都道府県における年次の転出入者数、x_1を各都道府県における全産業産出額に占める第一次産業産出額割合、x_2を各全産業産出額に占める第二次産業産出額割合、x_3を全産業産出額に占める第三次産業産出額割合、x_4を都道府県の 1 人当たり県民所得、 x_5を各都道府県の人口密度とする。εは平均がゼロの正規分布に従う誤差項である。

(2) 東京都から人口が 1 万人転出超過することによる CO_2 排出変化量の定量化

$$\Delta Q = eL\Delta f \quad (2)$$

ここでは、ΔQを東京都内の最終需要が変化することによる東京都内の直接・間接的な CO_2 排出変化量、eを CO_2 排出係数ベクトル、Lをレオンチェフ逆行列、Δfを東京都内の最終需要の変化を表すベクトルとする。

3. 結果・考察

3.1 重回帰分析の結果

表 1 は最小二乗法により推定された重回帰分析の結果である。

結果から全産業に占める第一次産業の産出の割合が 1 単位増えると最も大きく人口が増加するということがわかる。また一人当たり県民所得と人口密度は有意であり、所得や人口密度が高い都市へ人口が移動する傾向があることが読み取れる。

表 1.　重回帰分析の結果

	係数
第一次産業産出額割合	2984.60***
	(4.80)
第二次産業産出額割合	2105.76***
	(3.69)
第三次産業産出額割合	2505.69***
	(4.46)
一人当たり県民所得	12.64***
(千円)	(18.02)
人口密度(千人/km^2)	2618.94 ***
	(10.48)
R^2	0.8294

注)アスタリスク(*)は 1 個で$p<0.05$,2 個で$p<0.01$,3 個で$p<0.001$ であることを表し、それぞれの推定パラメータが 5%水準,1%水準,0.1%水準で統計的に有意であることを示す。括弧内の数値は各パラメータの t 値を表す。観測数は 470 である。

表 2 は 2011 年から 2020 年にかけての各年における東京都への転入超過数と、東京都からの転出超過数 1 万人を達成するために、46 道府県で増加させる必要のある一人当たり県民所得である。たとえば、2011 年には、東京都の転入超過数 44,482 人に 1 万人加えた 54,482 人が 46 道府県へ転出することが目標となっている。そのために各道府県の一人あたりの県民所得 9 万 4 千円増加させる必要があることがわかった。

表 2.　46 道府県での一人当たり県民所得の増加目標

(年)	東京都への転入超過数(人)	46 道府県で増加させる必要のある 1 人当たり県民所得(千円)
2011	44,482	94.00
2012	56,497	114.72
2013	70,172	138.32
2014	73,280	143.69
2015	81,696	158.21
2016	74,177	145.23
2017	75,498	147.51
2018	82,774	160.07
2019	86,575	166.62
2020	38,374	83.461

4.2 CO_2 排出量の定量化とその内訳

1 万人が転出することによる東京都の CO_2 削減量の合計は 47,932t-CO_2 であり、図 1 がその内訳を示す。

図 1 は、電力・食料・通信・交通といったライフラインでの部門の割合が大きいといえる。特に電力が 16000t-CO_2 排出し、全体の 34%という最大の割合を占めることがわかった。ただし本研究では、電力の最終需要の増加量を 0 として評価したため最終需要に電力を加えるとさらに大きな値となることが考えられる。

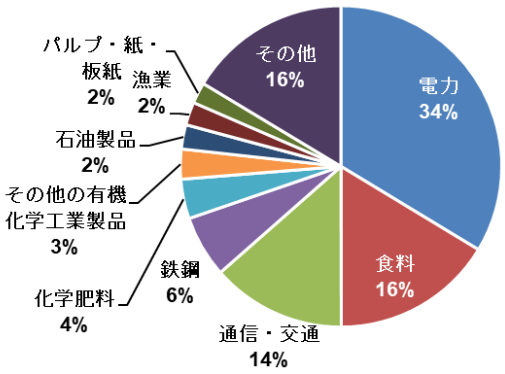


図 1.　転出超過で削減できる CO_2 の内訳

5. 参考文献

1)日本経済新聞社(2022,12,16) 東京圏から地方移住者 1 万人　デジタル田園都市の戦略案

2)e-Stat(2025) 住民基本台帳人口移動報告長期時系列表

3)内閣府経済社会総合研究所(2024)　県民経済計算(平成 23 年度－令和 3 年度)

4) e-Stat(2025)　人口推計　長期時系列データ

5)国土交通省国土地理院(2020)　令和 2 年全国都道府県市区町村別面積調(1 月 1 日時点)

6)東京都総務局統計部(2021)　東京都産業連関表(平成 27 年)

7)東京都総務局統計部(2024)　都民のくらしむき　東京都生計分析調査報告

8)国立環境研究所(2022)　ライフサイクル CO_2 排出原単位(3EID)

人工光型植物工場トマト生産の GHG 排出量評価

Evaluation of GHG emissions from production of tomatoes in PFAL

○服部昭子*[1)]、細川隆史[1)]
Akiko Hattori, Takafumi Hosokawa
1) 富士フイルム株式会社
* akiko.hattori@ fujifilm.com

1. はじめに

人工光型植物工場は、再生可能エネルギーを用いることで GHG 排出量の抑制、肥料及び水の使用量削減など、環境負荷低減が可能とされている。しかし、植物工場生産における環境負荷の定量的評価は、葉物野菜で GHG 排出量評価が行われているのみで[1,2)]、未だ十分に実施されていない。植物工場生産の適用品目が拡大していく中で、既にイチゴを含む果菜類の生産が開始されており、今後は果菜類生産における環境性能把握も重要となってくることが想定される。

本研究では、世界の野菜生産量最多であるトマトの人工光栽培システムを構築[3)]し、本栽培システムに関する環境性能評価の第一段階としてライフサイクルアセスメントによる GHG 排出量を評価した。また、既存の施設園芸 (国内) でのトマト栽培による GHG 排出量と比較することで、植物工場果菜生産の現状レベルとポテンシャルを示した。

2. 方法

2.1 GHG 排出量評価の算定範囲

人工光型植物工場生産及び比較対象である施設園芸栽培ともに、播種～収穫までの栽培プロセスを算定範囲とした (図 1)。保管や梱包など栽培方法に依存しないプロセスについては、算定範囲から除外した。また、植物工場建屋は現時点で標準と言えるものがなく算定が困難であることから、建造物については評価対象から外している。

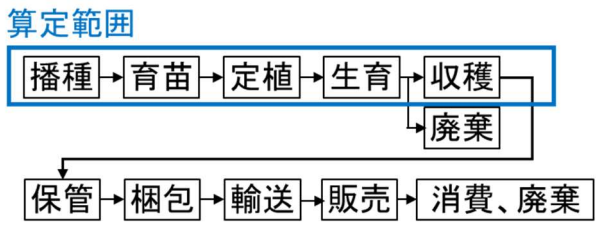


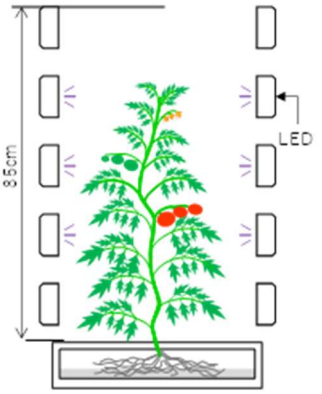
図 1 算定範囲

2.2 人工光型植物工場生産

3 段密植栽培が可能な栽培システムを構築し (図 2)、表 1 に示す栽培条件にて繰り返し栽培試験を実施した (累計収量 390 kg)。栽培試験を通して表 2 に示す項目の平均消費量データを取得し、それをもとに各項目の GHG 排出量を算出した。算出にあたり、排出原単位データベース AIST-IDEA ver3.3 を使用した。

2.3 国内施設園芸栽培

AIST-IDEA ver3.3 から算定範囲に該当する項目の GHG 排出量を抽出した。



栽培株数：10 株/unit
×8unit
株間距離：15cm

図 2 人工光栽培システム模式図

表 1 栽培条件

項目	条件
品種	桃太郎ヨーク®（タキイ種苗）
栽培型	低段（3 段 4 果管理）
水耕方式	点滴
明/暗期	16/8 hrs
明期光強度	500 μmol/m²/s
光波長	赤，青，白，遠赤色の 4 色構成
温度	27 ℃/19 ℃
湿度	70 %
CO_2 濃度	1,000 ppm
養液	協和製ハイポニカ液肥 ～500 倍希釈（EC1.2 dS/m）

表 2 平均消費量データ取得項目

項目	内容
LED 消費電力・空調電力	東京電力標準
水	純水
肥料	協和製ハイポニカ液肥
主要資材	ロックウール
CO_2 施用	液化炭酸ガスボンベ

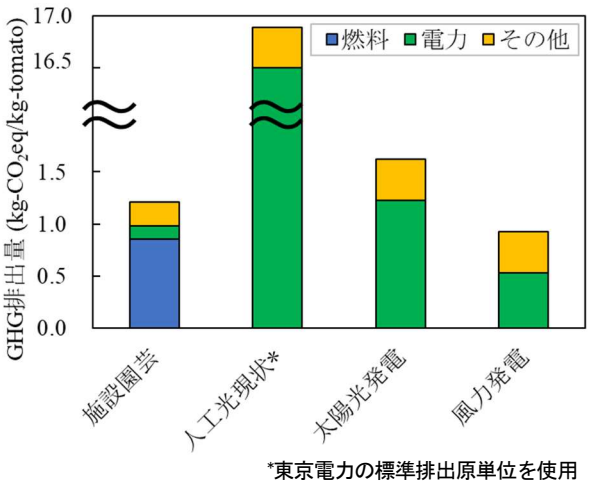


図 3 GHG 排出量算出結果

3. 結果・考察

人工光型植物工場でのトマト生産における GHG 排出量を算出した結果、約 17 kg-CO2 eq/kg-tomato であった。現状では施設園芸の約 14 倍の GHG を排出していることが明らかになった (図 3)。一方、植物工場は GHG 排出の大半が電力起因であり、使用電力種を変更することで施設園芸同等以下の排出量まで低減可能な見込みである。また、電力種以外についても使用する水、CO_2、資材の観点で植物工場生産ではさらに排出量を低減できる余地が残されている。

4. まとめ

播種～収穫までの栽培プロセスを算定範囲と定め、人工光トマト栽培及び国内施設園芸トマト栽培の GHG 排出量を比較した結果、現システムの人工光トマト栽培では施設園芸の約 14 倍の GHG を排出することが明らかになった。一方、GHG 排出の主要因は電力であり、再生可能エネルギーの導入により施設園芸以下まで GHG 排出を低減できる可能性を見出した。

栽培設備 (建屋) 等も含めた算定範囲の拡張及び、土地利用・水使用量抑制効果に関する定量評価については残課題である。

引用文献

1) 椎名武夫ほか: 第 6 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集，仙台，(2011)，pp.260-262
2) Saneyuki Kawabata, Yi Chieh Lan: AHC2023 The 4th Aisan Horticultural Congress, Tokyo, (2023), p169
3) 細川隆史，服部昭子: 園芸学会令和 5 年度春季大会研究発表，滋賀，(2023)，p123

家庭部門におけるスマートメーターデータを用いた エネルギー需要予測手法の検討

Study on energy demand forecasting methods using smart meter data in the residential sector

○町田智基*[1)]、磐田朋子[1)]、吉岡剛[1)]
Tomoki Machida, Tomoko Iwata, Tsuyoshi Yoshioka
1) 芝浦工業大学
* br21044@shibaura-it.ac.jp

1. 背景と目的

近年、従来の太陽光パネルに比べ、薄型・軽量で柔軟性を持つ新型太陽光パネルが開発された。これにより、建物の壁面や窓など設置困難な場所にも導入が可能となり、太陽光発電のさらなる普及が期待される。しかし、太陽光発電の導入拡大に伴い、発電量が需要量を上回ることで余剰電力が発生する懸念がある。余剰電力が電力系統へ逆潮流する頻度が増えると、電圧上昇や電力制御の困難化など電力システムを維持する上で大きな障害となることが懸念されている。

一方、需要家おいては、電化や省エネルギー化等の進展状況に応じて電力需要が増減するため、配電網への影響を評価するには、現実社会と同様に需要家ごとにばらつきのある時刻別電力需要を表現するためのデータベースが必要となる。スマートメーターデータ（以下「スマメデータ」）は時刻別の電力需要量を計測することが可能であるが、電化等の影響を把握するために必要となるガスなどの熱需要については把握が困難な状況にある。そこで本研究では、スマメデータを基に、家庭ごとのばらつきを考慮しつつ、電力需要と熱需要を含めた家庭全体のエネルギー需要をシミュレーションで表現することを試みた。その上で、将来的に家庭の電力需要量に影響し得る複数のシナリオを設定し、それぞれの条件を考慮したシナリオ別のエネルギー需要予測を行うことを目的とした。

2. 研究手法

2.1 使用データ

家庭部門の電力需要データとして、表 1 に示す「住宅形態、延床面積、契約電力」の区分で入手した関東郊外地域のスマメデータの世帯平均値電力需要データ（30 分間隔計測値）を使用した。

表 1 住宅属性の区分

住宅形態	延床面積	契約電力	気温
戸建住宅	~100㎡	1~2kW 3~4kW 5~10kW	夏日（最高気温 25~30℃） 真夏日（最高気温 30~35℃） 猛暑日（最高気温 35℃~） 冬日（最低気温 ~0℃） 通常時（上記の範囲外の気温）
	100~150㎡		
	150~200㎡		
	200~300㎡		
	300㎡ ~		
集合住宅	~25㎡		
	25~50㎡		
	50~75㎡		
	75~100㎡		
	100㎡ ~		

このスマメデータを区分ごとに整理し、日単位で気温条件別「夏日、真夏日、猛暑日、冬日、通常時」に分類し、それぞれの区分における電力需要の予測に活用した。

2.2 仮想電力需要の予測方法

スマメデータを活用して、仮想の電力需要予測を行った。この予測には Python(ver3.11.7)を使用し、マルコフ連鎖モデルの手法を基に仮想電力需要自動生成プログラムを開発した。マルコフ連鎖とは、現在の状態が直前の状態だけに依存する確率モデルであり、限られたデータから多様なパターンを生成できる特徴を持つ。この特徴を活かし、需要家ごとの電力需要のばらつきを反映させるために本手法を採用した。電力需要予測の全体的なフローを図 1 に示す。

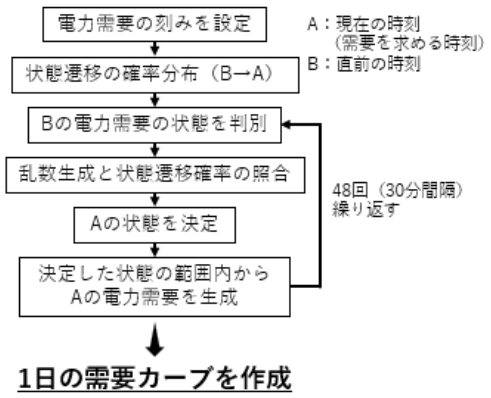


図 1 電力需要予測のフロー図

2.3 エネルギー源・用途別需要の予測方法

シナリオ分析の準備として、2.2 で得られた電力需要データを基に、エネルギー源別（電気、ガス、灯油）および用途別（暖房、冷房、給湯、厨房、動力他）の需要予測を行った。環境省「家庭部門の CO2 排出実態統計調査」を基に、使用データの地域性を考慮して、エネルギー源の組み合わせを 6 ケースに絞った（表 2）。使用設備として、暖房にルームエアコンと FF 暖房機（灯油を燃料とする暖房機器）、冷房にルームエアコン、給湯に電気ヒートポンプとガス従来型給湯機と灯油従来型給湯機、厨房にガスコンロを想定した。

表 2 使用エネルギーの組み合わせ

	暖房	冷房	給湯	厨房	動力他
case1	灯油	電力	灯油	ガス	電力
case2	灯油	電力	電力	ガス	電力
case3	灯油	電力	ガス	ガス	電力
case4	電力	電力	灯油	ガス	電力
case5	電力	電力	ガス	ガス	電力
case6	電力	電力	電力	ガス	電力

2.4 シナリオ別エネルギー需要予測の設定

現状のエネルギー需要を基に、本研究では使用設備を全て電力由来にする「電化シナリオ」と、効率性の優れた機器に切り替える「省エネシナリオ」の 2 つを設定して需要予測を行った。

3. 分析結果と考察

3.1 仮想電力需要の予測

予測結果の例として、マルコフ連鎖を用いて「住宅形態：戸建住宅」「延床面積：150～200 ㎡」「契約電力：3～4kW」「夏日」を設定項目として 1 日の電力需要カーブを作成した結果を示す。電力需要を 100 パターン生成し、図 2 には、そのうちの 10 パターンの電力需要カーブと予測平均、およびスマメデータの実測値を示した。

マルコフ連鎖を用いた仮想電力需要自動生成プログラムが実際の電力需要に則しつつも、需要家ごとの違いを表現できていることが確認できた。

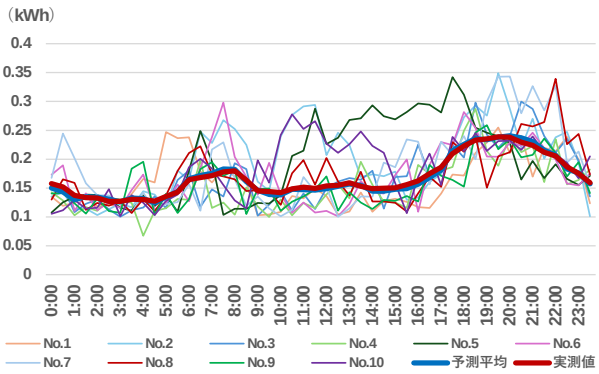


図 2 夏日の仮想電力需要予測

3.2 エネルギー源・用途別需要の予測

予測結果の例として、3.1 に示した条件下において表 2 に示すケース別にエネルギー源と用途別の需要量を予測した結果を図 3 に示す。

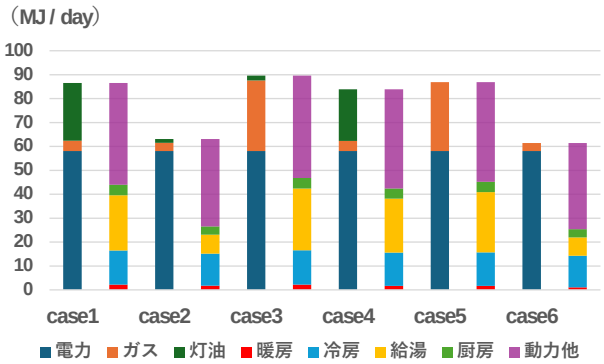


図 3 夏日のパターン別需要予測

case2 と case6 は他のパターンと比較して需要量が約 20MJ 少なく、給湯設備にエネルギー効率の高い電気ヒートポンプを想定したため、全体のエネルギー需要量削減に繋がったと考えられる。一方、他のパターンはほぼ同値であり、給湯設備の違いが需要量に影響を与えていることが示唆される。

3.3 シナリオ別エネルギー需要の予測

図 4 に 3.2 の用途別需要量を基準とした、電化シナリオと省エネシナリオのエネルギー需要予測結果を示す。「空調、給湯、厨房」の削減率は、「超長期エネルギー技術ロードマップ」[1]を基に「空調 40%、給湯 30%、厨房 30%」に設定し、「動力」では「照明 60%、テレビ 70%、冷蔵庫 50%」の削減率を設定した。

case2 と case6 の電化シナリオは削減率が 5%以下と変化が小さい。他のケースでは、電化シナリオで約 23%、省エネシナリオで約 30%の削減率を示し、どのケースでも省エネシナリオの削減率の方が高かった。電化は脱炭素を重視する一方、省エネはエネルギー消費の削減が主目的なため、削減率に差が生じたと考える。

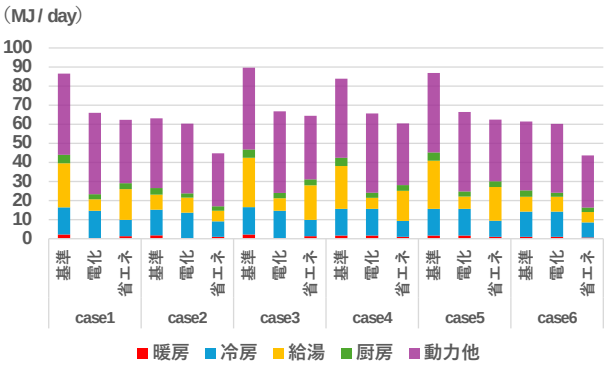


図 4 夏日のシナリオ別用途別エネルギー需要予測

4. 結論と今後の課題

本研究では、スマメデータを基にマルコフ連鎖を活用し、シナリオ別のエネルギー需要予測を実施した。マルコフ連鎖により、需要家ごとのばらつきを再現し、複数のエネルギー消費パターンの生成が可能となった。このアプローチにより、将来のエネルギー需要に関する幅広いパターンを予測できることが期待される。

今回は気温別に需要予測を行ったが、平日・休祝日や気象状態など需要パターンに違いが生じる要因は他にも存在する。また、シナリオに関しても EV 導入や断熱強化といった要素も考慮すべきであり、エネルギー需要予測の精度を向上させるには多様な条件下での分析が求められる。

5. 参考文献

1) 一般財団法人エネルギー総合工学研究所：“超長期エネルギー技術ロードマップ　民生分野ロードマップ解説”, (2007 年)

セルロース繊維複合材料のライフサイクル設計における品質機能展開の応用

Application of Quality Function Deployment in life cycle design of cellulose fiber composites

○杉之原大和[1)]、兼松祐一郎[1)]、Teah Heng Yi[1)]、斎木祐子[1)]、菊池康紀*[1)]
Yamato Suginohara, Yuichiro Kanematsu, Teah Heng Yi, Yuko Saiki, Yasunori Kikuchi
1）東京大学
* ykikuchi@ ifi.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

化石資源からバイオマスなどの再生可能資源への移行は、気候変動や資源枯渇への対策のひとつとして重要性を増している。マテリアル用途での活用が期待されるバイオマス資源としてセルロースが挙げられる。セルロースは植物成分の乾燥重量の約50%を占めており、大気中の二酸化炭素が固定化された再生可能な素材である。[1)]セルロース系原料から機械解繊や化学処理を経て作られるセルロースナノファイバー(CNF：Cellulose nanofiber)は高機能材料としての利用が見込まれており、プラスチックに導入した複合材料が開発されている。しかし製造時の消費エネルギーは大きく[2)]、ライフサイクルを通して環境負荷を評価する必要がある。CNFは、様々な製造プロセスによって生産が可能であり、それぞれ異なる物性を持つ材料が得られる。これまでCNF製造技術の比較分析を可能にするための類型化は試みられてきたが、これら枠組みは物性や用途との関連付けが不十分なまま、技術的側面に重点を置いている。本研究は、セルロース繊維複合材料のライフサイクル設計に向けて、物性・用途・環境負荷を考慮した統合的分析を行う。その上でCNFの材料特性と最終製品の要求品質を論理的に階層化し対応関係を調査することができる品質機能展開（QFD）の応用可能性を検討する。

2. セルロース繊維複合材料のライフサイクル設計に向けた評価手法

TEMPO酸化法(TO法)、パルプ直接混練法(PD法)および新規プロセスであるリアクティブプロセッシング法(RP法)の3種類の製造プロセスを評価・調査対象とした。TO法はTEMPOを酸化触媒として用い、セルロース繊維同士の静電的反発を生じさせ機械解繊を容易にする手法である。PD法は、リグニン含有パルプを化学修飾により表面を疎水化させ、樹脂との混練と同時にセルロースの微細化を行うことで、アセチル化CNF強化樹脂を製造する手法である。[3)]RP法は予めパルプの解繊を行った後に添加剤を用い、混練と同時に化学反応を進行させる新規プロセスである。CNF材料の環境影響およびその特徴を把握するためPD法、TO法に関しては文献調査を行い、RP法に関しては実地調査に基づき原料調達から製造までのLCAを行った。またCNFの用途適合性評価は分野によって大きく異なる特徴を持つ。構造材用途では、剛性等の物性値による定量的評価が可能で、明確な評価基準が確立されている。一方、化粧品や医療用途などの機能性用途では、物性値のみでは評価が困難であり、実使用条件下での性能評価や実証実験が必要となる。特にナノ材料としてのCNFは特性が完全には解明されていない部分も存在するため、ある程度の不確実性を含んだ機能評価に基づく比較を行う必要がある。このような特徴を踏まえ、本研究では厳密に定義された物理化学的特性の定量評価と、用途における不確実性を含む定性・半定量評価の両方を用いた統合的評価を実施する。

3. セルロース繊維複合材料製造技術に関するLCAケーススタディ

RP法によるCNF複合材料の製造に関して、実地調査に基づくインベントリ分析を行った。10wt%のCNFを配合したBio-PE（以下10wt%CNF/Bio-PEと表記）と10wt%CNF/PPの2種類の材料について、実験室スケールから連続生産までの各段階におけるGHG排出量を評価した。分析の結果、全工程において解繊工程の電力消費が最も大きな割合を占めることが明らかとなった。しかしながら、実験室スケールから連続生産へのスケールアップに伴い、この解繊工程の単位あたり消費電力量は約2/3程度まで低減されることが確認された。特に、ロット切替え等で発生する材料ロスを最小限に抑えられる完全連続生産を想定した場合、消費電力量は大きく低下する結果となった。また、原料選択による環境負荷への影響も顕著に表れた。バイオポリ

エチレンを採用した場合、原料由来の GHG 吸収効果[4]により、製品ライフサイクル全体での GHG 排出量が大幅に低減された。

4. セルロース繊維複合材料の物性・用途・環境負荷を関連付けた分析

4.1 CNF 複合材の物性とその環境負荷

前項にて基材樹脂が異なるセルロース繊維複合材料製造にかかる環境負荷が明らかとなったが、これは樹脂 1 kg あたりの製造原単位であり、各複合材料の物性の違いは考慮されていない。材料間比較を行うには実際の用途を想定した機能単位の工夫が必要になる。構造材料として広く使用されている 10wt%タルク/PP を基準材料とし機能単位を「1kg の 10wt%タルク/PP と同等の曲げ弾性率 E を発揮する材料」と定義した。(補正後 GHG_対象材料)＝(GHG_対象材料)×(E_基準材料)/(E_対象材料) と書ける。物性値と製造原単位を分析した結果、PD 法および RP 法においては基材樹脂に CNF を混錬すると曲げ特性が向上する傾向があるが、環境負荷においても CNF 混練率が増加したことによる物性の上昇により機能単位当たりの GHG 排出量が下がっていた。実際の製品適用の際は剛性を重視する製品ならばこれら CNF 複合材料は物性・環境負荷ともに有利だと分かった。対して TO 法に関しては CNF 混練率とともに強度が減少した。TOCNF が有する多量の COOH 基により疎水性樹脂中で凝集が生じやすく、凝集体の形成が物性の低下を引き起こしたと考えられる。環境負荷においても CNF 混練率の上昇とともに GHG 排出量は増加した。

4.2 CNF 複合材の用途を考慮した分析

CNF 材料の想定される用途[5]を衛生基準の高さという指向性をもって順序付けた。すなわち衛生基準の高いほうから医療品、食品、化粧品、軟質パッケージ、硬質パッケージ、家電製品、自動車部材を対象とした。各最終製品の製造にかかる GHG 排出量を従来材料を基準として相対評価した。それに基づき剛性などの物性値が採用基準となる構造材用途と製品化した際に発現する機能により材料選択される機能性用途とを環境負荷により紐づけて分析した。洗濯機の脱水受け用途では、従来からガラス繊維強化樹脂が使用されているため比較的環境負荷が高く、それゆえ CNF 複合材料への転換による相対的な GHG 排出量の増加は小さい結果となった。一方、収納ボックスなどの硬質パッケージ用途では、要求される機械的特性が比較的低く、従来材料として PP が使用されている。そのため、CNF の導入は従来比 GHG 排出の増加を招くことが明らかとなった。特筆すべき点として、化粧品用途における TOCNF の応用では、チキソトロピー性により優れた塗布性が付与される。また、医療用途における創傷被覆材としての応用では、従来材料である HDPE や PVA と比較して高い生体適合性を実現できる。これらの用途では環境負荷は増加するものの、材料の高機能化により付加価値が創出される。現状では環境負荷とトレードオフの関係にあるが創出される付加価値が十分に大きい場合、CNF 製品の実用化は十分に検討に値する。以上の分析を基に材料特性と最終製品の要求品質を整理し、対応関係を調査した。

5. 結言

本研究ではセルロース繊維複合材料のライフサイクル設計向けて、ライフサイクル思考に基づき物性と用途を関連付けた評価を行うことで QFD の活用可能性を検討した。CNF 材料の製造にかかる環境負荷や物性値に関しては文献調査や現場調査からデータおよび知見を収集した。CNF が利用可能と考えられる様々な用途を衛生基準の高さという指標で半定量化することで議論した。CNF 複合材料の物性は基材樹脂から向上し、製品使用を想定した機能単位においては環境負荷も低減する場合があると分かった。機能性用途においては環境負荷の増加が認められるが、その増加は製品の革新的な機能性によって正当化される可能性があるため高付加価値製品としての位置づけが適切だと考えられる。このような情報を基に CNF 材料に対し QFD を活用することで CNF 製造において専門家が暗黙的に把握していた品質・機能・特性の連関を明示的に整理し体系化することに役立てることができると考えられる。

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務 (JPNP20009)の成果を含む。

引用文献

1) 吉田隆, “セルロースナノファイバー研究と実用化の最前線”, エヌ・ティー・エヌ, (2021).
2) N. Lavoine, et al.: Carbohydr. Polym., 2012, 90(2), pp735-764
3) Y. Kanematsu, et al.: ACS Sustainable Chem. Eng., 2021, 9(31), pp 10444-10452
4) Y. Kikuchi, et al.: J. Chem. Eng. Japan, 2013, 46(4), pp319-325
5) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO): “セルロースナノファイバーの市場および技術動向調査”, (2022)

食システムの脱炭素化に向けた飲食店における食材調達先とメニュー開発行動分析

Food ingredients procurement and menu development in restaurants for food system decarbonization

○鈴木智子*[1)]、天沢逸里[1)]、WU YINGLEI[2)]、栗栖聖[2)]
Tomoko Suzuki, Eri Amasawa, Yinglei Wu, Kiyo Kurisu
1) 早稲田大学, 2) 東京大学
* t.suzuki42@kurenai.waseda.jp

1. はじめに

食システムは全世界の温室効果ガス(GHG)排出量の3割を占めると報告され[1)]、食産業の脱炭素化が急務である。食システムのライフサイクルにおけるGHG排出量は食材の生産がホットスポットであること[2)]を踏まえると、農林・水産に至る分野で脱炭素に向けた施策を打つと同時に、それらを選択し、調達に繋げる必要がある。

これまで、家庭内食を中心に消費者の環境配慮された食材に対する選好に関して多くの研究がなされてきたが[3)]、外食産業における調達に関しては不透明な部分が多い。既往研究はグルメ観光といった飲食における地産地消への消費者選好[4)]に関する事例であり、飲食店内においてどのような基準で食材の調達先が選択されるのかは明らかではない。同時に、飲食店のメニューは店を特徴づけ、消費者選好との接点を生み出し、何を調達するかを決定づける。そこで本研究では、外食産業における調達先の選択とメニュー開発におけるプロセスを明らかにすることで、脱炭素化に資する行動の現状と行動変容に向けた阻害要因を抽出することを目的とした。具体的には、食材調達とメニュー開発において脱炭素化に向けて飲食店が取りうる行動を文献から整理した上で、現状どんな選択行動が取られているのか、そしてその理由をアンケートとインタビュー調査から分析する。

2. 研究手法

外食産業における食材調達とメニュー開発の実態を調査するにあたり、本研究ではまず文献調査を実施した。その上で首都圏と地方（長野県）の飲食店に構造化アンケートと半構造化インタビューを実施し、質的分析により現状の選択行動とその要因、そして脱炭素化との関連を分析した。

2.1. 食材調達の市場調査および文献調査

現状の外食産業における食材調達のルートを統計情報および文献から調査した。さらに、文献調査から、食システムの脱炭素化に向けて飲食店が食材調達と、メニュー開発において取りうる選択行動を抽出した。

2.2. アンケート・インタビュー調査

(1) 対象飲食店

本研究は、食材調達やメニュー開発に裁量権を持つ、フランチャイズではないファミリーレストランやカジュアルレストラン（客単価が700円以上2,000円未満の飲食店[5)]）を主な対象とした。また農業の盛んな地域と首都圏とでの違いを検討するため、長野県内及び東京都内のレストラン14件に行った。協力店は機縁法に基づいて募集し、調査は2024年10月～2025年1月にかけて実施した。

(2) アンケート・インタビュー概要

まず構造化アンケートを実施し、その後アンケート結果に基づいて非構造化インタビューを実施することで選択行動に対する理由を掘り下げた。アンケートでは、①食材を仕入れる際に重視する項目、②食材（米、小麦、野菜、肉類、水産物、その他）の主な仕入れ先、③メニューへの写真・アレルギー・原材料情報の掲載やサイズ設定、④食品ロス削減についての取り組みについて質問した。インタビューでは、①仕入れ先選択の理由、②メニュー開発の頻度や方法、③ヴィーガンやハラルに対応しているかどうかについて質問した。アンケートとインタビューは飲食店での現地調査またはオンライン会議ツールを用いて実施した。

2.3. 分析手法

量的データに関しては統計分析を実施し、傾向の抽出を試みた。インタビューから得た質的データに関しては、Grounded Theoryに基づき、特徴的な単語をコード化、分類し、分析した。

3. 結果と考察

本稿では、文献調査の結果と、アンケートとインタビュー分析結果の一部を議論する。

3.1. 飲食店における食材調達と脱炭素化施策

農林水産省総合食料局の調査から[5)]、食材別（穀物、野菜、畜産物、水産物）と全品目合計において食材調達の51%～88%を市場と卸売業者の合計が占めること

がわかった。小売業からの調達は、他の食材は10%に満たないのに対し、野菜は26%を占めた。本研究が対象とするファミリーレストランとカジュアルレストランについても同様に、市場と卸売業者からの食材調達が合計で半分以上を占めた。

3.2. 協力店属性

表 1 インタビューした外食店の分類

飲食店のジャンル･コンセプト	数
菜食	4
カフェ	3
洋食	2
フレンチ、イタリアン、郷土料理、カレー、和食	1

インタビューに協力いただいた店舗で提供される料理の種類やインタビューから把握したコンセプトから表1のように分類した。環境配慮に直結することからか、4店舗の菜食レストランがインタビューに応じた。協力店のその他の属性として、従業員数が5人未満の店舗が6件、5〜9人の店舗が5件、10〜19人の店舗が2件、20人以上の店舗が1件だった。長野県の飲食店は7件、東京都内は7件であった。

3.3. アンケート・インタビュー結果

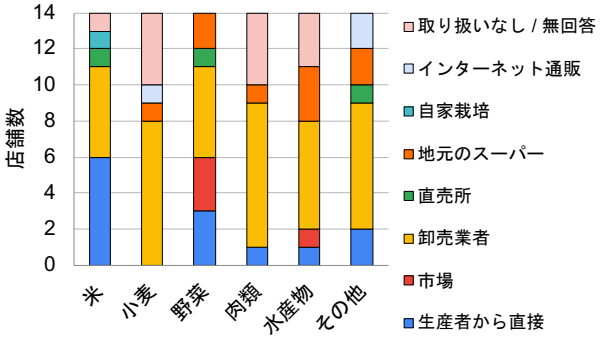


図 1 食材の主な仕入れ先

図1に示すように農産物において生産者から直接購入する割合が高かった。また米や野菜と比べて、小麦や肉、水産物については卸売業者からの購入が多く、産地へのこだわりのある店舗が少なかった。

食材を仕入れる際に重視する項目として9つの選択肢（価格、品質、生産者、生産地（ブランド）、安定供給、国産品、環境負荷、特にない、その他）から最大3つを選んでもらったところ、図2に示すように品質、価格、生産者の順に回答が多かった。さらに、そのうちで最も重視する項目とその理由では、販売価格の制約があるため「価格」を重視する傾向が高く、安心安全なものを提供したい、できるだけ地元の生産者から直接購入したい等の理由で「品質」「生産者」と続いた。

仕入の際に重視する項目に関わらず、長野県内の全てのレストランで地元の食材を積極的に使用すると回答があった。地元の農産物を選択することは、価格、品質、生産者のいずれも満たしうることが示唆された。

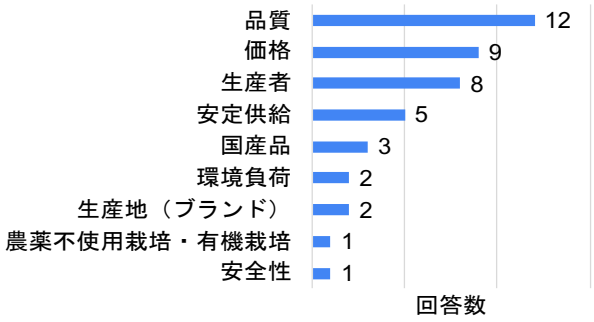


図 2 食材を仕入れる際に重視する項目（3つ）

さらに、メニュー開発に関しては、季節のメニューや、定番メニューの付け合わせに旬の食材を取り入れている店が多いことがわかった。個人経営の店舗が多かったこともあり、臨機応変にメニューを変えたり、余りそうな食材を活用して日替わりメニューで余りそうな食材を活用したメニューを提供したり、付け合わせやおすすめメニューにアレンジしたりして食品ロスの削減に取り組んでいた。

4. おわりに

これまでの調査から、食材へのこだわりの強弱があることがわかった。こだわりの少ない食材については、価格とのバランスも必要だが、より環境負荷の少ないものへの切り替えが可能であるポテンシャルが高い。今後は、それぞれの仕入れ先ごとの環境負荷についても検討していく。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）戦略的国際共同研究プログラム（SICORP）JPMJSC23E1の支援を受けた。

引用文献

1) Crippa M., Solazzo E., Guizzardi D., et al.: Nature Food, 2, (2021), pp 198-209
2) Springmann M., Clark M., Mason-D'Croz D., et al.: Nature, 562, (2018), pp 519-525
3) Hoek A.C., Pearson D., James S.W., et al.: Food Quality and Preference, 52, (2017), pp 94-106
4) Murphy J., Smith S.: International Journal of Hospitality Management, 28(2), (2009), pp 212-220
5) 農林水産省総合食料局：外食産業に関する基本調査結果（2009）

サッカー産業が地域経済や雇用、環境に与える影響

Impact of the soccer industry on the local economy, employment and environment

○山下善資*[1)]、戸田遥香[1)]、加河茂美[1)]
Ryosuke Yamashita, Haruka Toda, Shigemi Kagawa
1) 九州大学
*yamashita.ryousuke.818@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

近年、日本国内における地方経済の衰退化が進行している中、日本のプロサッカーリーグであるJリーグは地域に根ざした活動を展開しており、観客動員や観光客の増加を通じて地域経済へと多大な貢献を果たしている。

例えば、岐阜県にあるFC岐阜の事例では、プロサッカーチームの存在が地域経済に与える便益が評価され、地域活性化の一助となっていることが報告されている。[1)]直近10年間での観客動員数は増加傾向を示しており、2024年には過去最高である1,193万人を記録しているように、国内において注目される重要な産業となっている[2)]。一方で、産業の発展に伴う参加人口の増加によって、試合開催に伴う観客や選手の移動、スタジアムの電力消費が引き起こすCO_2排出量の増加のような環境負荷も重要な課題である。

そこで、観戦者が地域経済に与える波及効果や環境負荷を定量的に評価することは、スポーツ産業が地方経済の活性化に果たす具体的な役割を解明する上で重要であり、観光や消費活動を通じた地域振興の可能性を示す点で意義がある。また、環境負荷に関する分析は、持続可能な観戦モデルを構築するための重要な役割を果たす。

本研究では、クラブチームのリーグ変動が地域経済や環境に与える影響を定量的に分析し、サッカー産業の発展可能性と直面し得る環境課題を明らかにすることで、持続可能なリーグ運営の在り方を提案することを目的とする。

2. 分析手法

2.1 アビスパ福岡のホーム試合に伴う観客の観光消費額ベクトルの推計

本研究では、2015年に下位リーグであるJ2、2016年に上位リーグであるJ1に所属していたアビスパ福岡の観客を対象に分析を行った。対象とする観客は、『アビスパ福岡』の本拠地である福岡で開催された試合を観戦した人々である。

まず、t年におけるホーム観客による福岡県内での観光消費額ベクトル$\mathbf{f}_t^h$を下式(1)によって推計した。

$$\mathbf{f}_t^h = \left(f_{t,i}^h\right) = \left(y_i^{day} \times s_t \times r\right) \quad (1)$$

ここで、$f_{t,i}^h$はt年におけるホーム観客（h）による福岡県内でのi産業（本研究では、飲食業）への消費額、y_i^{day}は福岡県への日帰り観光客一人当たりのi産業（本研究では、飲食業）への観光消費額、s_tはt年における年間総観客数、rはスタジアムにおけるホーム観客席の割合である。$\mathbf{f}_t^h$はホーム観客（h）による飲食業への消費額のみ値に持つ消費ベクトルを示す。同様に、t年におけるアウェー観客による福岡県内での観光消費額$\mathbf{f}_t^a$を下式(2)によって推計した。

$$\mathbf{f}_t^a = \left(f_{t,i}^{a,stay}\right) = \left\{y_i^{a,stay} \times s_t \times (1-r)\right\} \quad (2)$$

ここで、$f_{t,i}^{a,stay}$はt年におけるアウェー観客による福岡県内でのi産業（本研究では、飲食業と宿泊業）への消費額、$y_i^{a,stay}$は福岡県への宿泊観光客一人当たりのi産業（本研究では、飲食業と宿泊業）への観光消費額を示す。

2.2 アビスパ福岡のホーム試合による経済効果の推計

本研究では、産業連関分析を用い、t年の試合観戦者による観光消費が福岡県内にもたらす経済波及効果x_tを下式(3)で推計した。

$$x_t = (\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}(\mathbf{f}_t^h + \mathbf{f}_t^a) = \mathbf{L}\mathbf{f}_t \quad (3)$$

ここで、$\mathbf{I}$は単位行列、$\mathbf{A}$は福岡県の各産業の中間投入係数行列、$\mathbf{L}$はレオンチェフ逆行列、$\mathbf{f}_t$はアビスパ福岡のホーム試合に伴う観客の観光消費額ベクトルである。

2.3 アビスパ福岡のホーム試合による直接間接 CO_2 排出量の推計

t年の試合観戦者による観光消費に起因する直接間接CO_2排出量qを下式(4)で推計した。

$$q_t = \mathbf{e}\mathbf{L}\mathbf{f}_t \quad (4)$$

ここで、$\mathbf{e}$は日本の産業別直接CO_2排出係数ベクトルである。

3. データ

(1) J LEAGUE Data Site[2)]
(2) 平成27年(2015年)福岡県産業連関表[3)]
(3) 産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)[4)]
(4) 平成27年福岡県観光入込客推計調査[5)]

4. 結果・考察

年間の総観客数は2015年が182,540人、2016年

が 218,576 人であった 。2015 年は 21 試合、2016 年は 17 試合と試合数が異なるものの、1 試合あたりの平均観客数は約 50%増加した（図 1 を参照）。

経済波及効果については、2015 年のホーム観客による波及効果は約 7.2 億円、アウェー観客によるものは約 16.6 億円で、合計 23.8 億円だった。一方、2016 年はホーム観客が約 8.3 億円、アウェー観客が約 20.3 億円で、合計 28.6 億円となり、前年比で約 4.8 億円（20.2%）増加した。特に、アウェー観客の経済波及効果が大きく、2016 年における一人当たりの経済波及効果は、ホーム観客が 4,789 円だったのに対し、アウェー観客は 45,589 円で、ホーム観客の約 10 倍であった。経済波及効果の項目内訳については、飲食サービスや宿泊の他に、商業や食料品の項目が上位に見られた（図 2）。

次に、CO_2 排出量については、2015 年の総排出量が 2,983t-CO_2、2016 年は 3,602t-CO_2 で、619t-CO_2（20.8%）増加した。内訳としては、2015 年は県内観客による排出量が約 700t-CO_2、県外観客による排出量が約 2,300t-CO_2 で、2016 年はそれぞれ約 810t-CO_2 と約 2,800t-CO_2 であった。特にホーム観客による排出量が全体の約 77%を占め、環境負荷が高いことが示された。また、二酸化炭素の排出量項目内訳については、電力部門による排出が全体の約 78%を占めており、次いで宿泊業、自家輸送部門の順に CO_2 排出量が大きいことが明らかになった。（図 3 を参照）。

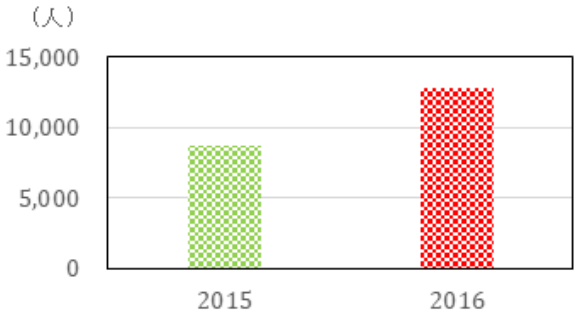


図 1：1 試合あたりの観客数

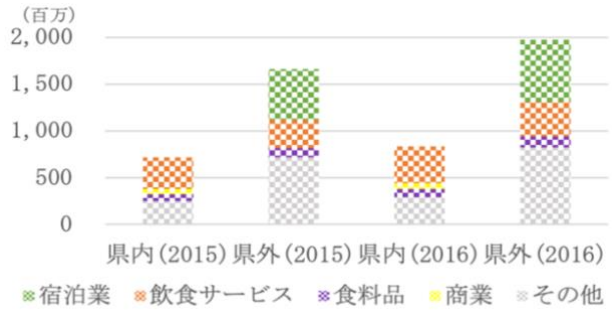
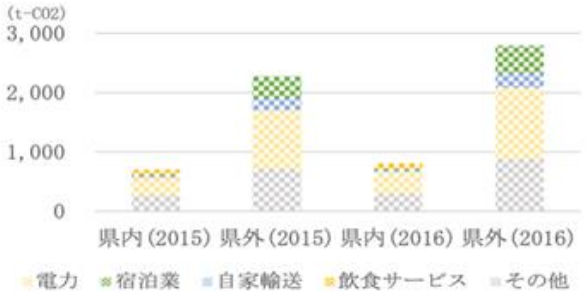


図 2：観客による経済波及効果とその内訳

結果から、アビスパ福岡の J2 から J1 への昇格は、観客動員や福岡県の経済に対しポジティブな働きをする一方で、二酸化炭素の排出量を増加させたことが明らかとなった。特に、ホームの観客と比較してアウェーの観客による経済波及効果が非常に高く、また、二酸化炭素の排出量も多いということが明らかになり、持続可能なリーグ運営において着目すべきポイントであると言える。



本会では、これらの詳細な結果について発表し、サッカー産業を活用した持続可能な発展について議論を行う予定である。

5. 引用文献

1) 大石希, 浅岡朝泰, 高木朗義, 北浦康嗣 (2011). プロサッカーチームによる地域活性化の便益評価～FC 岐阜・大分トリニータを対象として～. 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.4, pp.197-208.
2) J.LEAGUE Data Site, "J.LEAGUE Data Site," < https://data.j-league.or.jp/SFTP01/ >, （参照 2025-01-13）
3) 福岡県, 「福岡県産業連関表（平成 27 年）」,<hhttps://ckan.opengovernmentdata.org/dataset/401000_sangyourenkanhyou_h27>, （参照 2025-01-13）
4) 国立環境研究所, 「産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）」, <https://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/index_j.htm >,(参照 2025-1-13)
5) 福岡県,「平成 27 年福岡県観光入込客推計調査」, < https://www.pref.fukuoka.lg.jp/contents/kanko27.html >, (参照 2025-1-13)

為替変動が日本のインバウンド消費に与える影響分析

The Impact of Exchange Rate Fluctuations on Inbound Consumption in Japan

○吉田大翔*[1)]、都留惇嗣[2)]、加河茂美[3)]

Hiroto Yoshida, Junji Tsuru, Shigemi Kagawa

1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学府, 3)九州大学経済学研究院

* yoshida.hiroto.297@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

新型コロナウイルスの影響を受ける前の 2019 年において、日本の観光業の付加価値額は 11.2 兆円であり、GDP の 2.0%を占めていた[1)]。

特にインバウンド市場の成長が著しく、訪日外国人観光客の消費は日本経済に重要な影響を与えている。訪日外国人旅行者数の推移を見ると、2011 年から 2019 年にかけて右肩上がりで上昇しており、2019 年には過去最高の 3,188 万人を記録した。2020 年からは新型コロナウイルスの影響で訪日外国人観光客は大幅に減少したが、新型コロナウイルスが収束した 2023 年には東アジアを中心に大きく増加し、2,507 万人まで回復した[2)]。

本研究では、日本のインバウンド市場に着目し、2017 年における 37 の国・地域に関するデータを用いて、為替変動およびビザの有無が訪日外客数にどの程度影響を与えるかを分析する。さらに、推計結果を基に経済波及効果を評価し、観光業の持続的な成長に向けた知見を提供する。

2. 研究手法

訪日外客数に与える影響を分析するために、(1)式のようなグラビティモデルを応用した重回帰モデルを定式化した。

$$\log(y_i) = \alpha_0 + \alpha_1 x_{1i} + \alpha_2 x_{2i} + \alpha_3 \log(Pop_i) + \alpha_4 \log(Dis_i) + \varepsilon_i \qquad (1)$$

ここでは、y_iをi国における訪日外客数、x_{1i}を一人あたり支出指数（ppp,日本=100）、x_{2i}をビザダミー（ビザが必要な場合 1 の値を取り、不要な場合は 0 の値を取る）、Pop_iをi国の人口、Dis_iを日本と目的国の首都間距離とする。また、ε_iは平均が 0 の正規分布に従う誤差項を表す。

(1)式のパラメータの推計結果を基に 1 人当たり支出指数およびビザダミーの限界効果を求め、それぞれの要素が 1 単位増加すると、訪日外客数の増減にどれほど影響するかを検証する。さらに、その訪日外客数の増減数に一人あたりの国別訪日外国人消費単価と掛け合わせ、直接的な経済効果を測る。一人あたり支出指数とビザ訪日外客数に与える限界効果を求める式を以下に表す。

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_{ni}} = \alpha_n \cdot exp(\alpha_0 + \alpha_1 x_{1i} + \alpha_2 x_{2i}) \cdot (Pop_i)^{\alpha_3} \cdot (Dis_i)^{\alpha_4} \qquad (2)$$

($n = 1$： 支出指数の限界効果を表し、$n = 2$: ビザダミーの限界効果を表す。)

3. データ

訪日外客数のデータは、JNTO 日本政府観光局の「国籍/月別訪日外客数」[3)]のデータを用いている。1 人当たり支出指数（日本=100）のデータは Word Bank Group の 1 人当たり支出指数、ppp ベース（米国=100）[4)]より算出している。ビザのデータは外務省の「ビザ免除国・地域」[5)]より入手した。日本、目的国の人口のデータは Word Bank Group のデータベース[population, total][6)]より用いている。 都市間距離のデータは、Google Map より入手した。 訪日外国人消費単価のデータは観光庁の「訪日外国人消費動向調査」における第 6 表国籍・地域別 1 人 1 回当たり旅行消費単価[7)]より用いている。

4. 結果・考察

4.1 重回帰分析

図 1 は(1)式から推計した訪日外客数の予測値と観

測値の散布図を表したものである。点群が 45 度線上に近い形で分布しているため、モデルの適合性は高いことを示している。

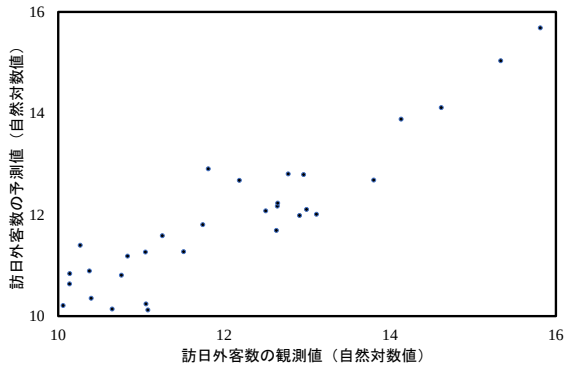


図 1. 訪日外客数の推計値の散布図（自然対数値）

表 1. 重回帰モデルの推計パラメータ

相手国の支出指数	0.0186*** (0.0047)
相手国のビザダミー	-0.9413* (0.4434)
相手国の人口	0.7524*** (0.0957)
首都間距離(km)	-2.4715*** (0.2343)

表 1 は、推定されたパラメータであり、括弧内の数値は標準誤差を示している。いずれのパラメータも 1%で統計的に有意であることが分かった。を示している。ここで、推計パラメータの有意確率pに関して、アスタリスク(*)は$p < 0.05$、アスタリスク(**)は$p < 0.01$、アスタリスク(***)は$p < 0.001$であることを表していることに注意されたい。

4.2 経済効果

(2)式に(1)式によって得られた係数をそれぞれ代入し、購買力平価指数およびビザダミーの限界効果を算出し、その値に各国 1 人当たりの消費単価と掛け合わせ、経済効果を測る。前者は上位 5 か国、後者は今回調査でビザが必要であった上位 5 か国の結果を以下の図 2 と 3 で表す。

図 2 より、相手国の支出指数が 1 単位増えると、一番多い国では約 200 億円もの経済効果があることから、為替の影響はインバウンド消費に与える影響は大きいということが分かる。

図 3 より、ビザ必要国が不要になった場合の経済効果は中国が約 1.1 兆円と圧倒的に大きく、観光 GDP の約 1 割に相当する。2 番目に大きいインドは約 540 億円､3 番目のフィリピンは 340 億円であり、ビザの影響もかなり大きいことが分かる。

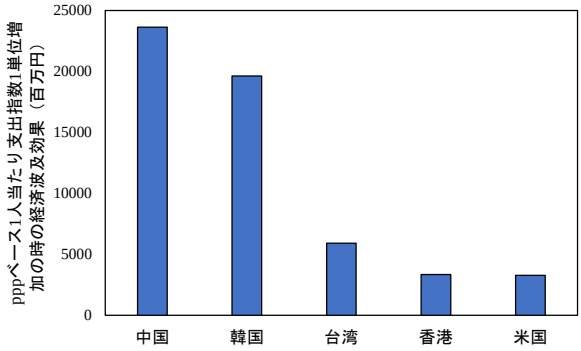


図 2. 1 人当たり支出指数 1 単位増加時の経済効果

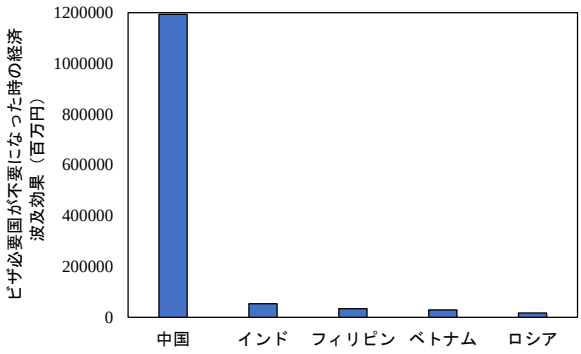


図 3. ビザ必要国が不要になった時の経済効果

参考文献

1) 観光庁(2023 年)　令和 5 年版観光白書について
2) 観光庁(2024 年)　観光白書令和 6 年版
3) JNTO 日本政府観光局(2003 年−2024 年)　時系列推移表、国籍/月別訪日外客数
4) Word Bank Group(2017 年)　1 人当たり支出指数、ppp ベース（米国=100）
5) 外務省　ビザ免除国・地域
6) Word Bank Group（1960 年-2023 年）　World Development Indicators, [population total]
7) 観光庁（2017 年）「訪日外国人消費動向調査」

スクラップ種数の変化が鉄鋼循環に伴う環境負荷に与える影響の推計

Environmental impact change in steel recycling considering scrap sorting intensity

○武山健太郎*[1)]、星野岳穂[1)]
Kentaro Takeyama, Takeo Hoshino
1) 東京大学
* takeyama@mfa.t.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

鉄鋼材は世界で最も消費されている金属素材であり、CO_2 排出量の大きな産業である。鉄鋼材の生産プロセスは鉄鉱石を原料とした高炉-転炉法とスクラップを原料とした電炉法に大別される。電炉法は高炉-転炉法に比べ、CO_2 排出量が小さいため、カーボンニュートラルの達成に向けて電炉法による粗鋼生産割合の上昇が望まれる。現在のリサイクルプロセスにおいては、鉄スクラップは母材である鉄元素の原料としての用途が多くを占めており、鉄スクラップ中の合金元素は有効に利用されていない。鉄スクラップ中の合金元素の有効利用によって、特殊鋼への合金元素添加用途の一次資源の消費量および誘発する環境負荷の削減が可能であると考えられる。

先行研究において、鉄スクラップ中の合金元素の有効利用のために、合金組成によるソーティングの導入が提案されている [1)]。一方で、アルミニウム合金のリサイクルにおいては、スクラップのソーティングはある一定以上の精緻さでは天然資源投入量と CO_2 排出量削減効果が上昇しないことが指摘されている [2)]。鉄鋼材のリサイクルにおいても同様の現象が生じる可能性がある。そのため、本研究においては、スクラップ種数をパラメータとして考慮した最適化モデルを用いて最も環境負荷の小さくなるスクラップ種数および鉄スクラップのリサイクルフロー、誘発する環境負荷の推計を行うことを目的とする。

2. 手法

本研究では、先行研究で提案されている ONBAR (Optimisation Number of Bins in Aluminum Recycling) モデル [2)]を鉄鋼材に対しての適用を行った。ONBAR モデルとは、外生的に与えたスクラップ種数に対して環境負荷が最小となるスクラップのリサイクル経路を明らかにする非線形最適化モデルである。ONBAR モデルにおいては、同一の合金種であればその生産に使用される原料によらず同一の組成で生産されることを想定した分析が行われている。一方で、鉄鋼材の場合、電炉普通鋼などの再生素材への意図しない合金元素の蓄積が生じていることが指摘されており [3,4)]、再生素材はある一定の合金濃度の幅を有していると考えられる。そのため、本研究においては、スクラップを主原料とする素材に対して合金濃度の幅を許容する拡張を行い、所与のスクラップ種数に対して再生素材の合金組成の幅を考慮した最も環境負荷の小さくなるリサイクル経路の推計を行った。

分析対象は 2005 年の日本国内における鉄鋼材とした。対象元素は母材である Fe に加え、Cr, Ni, Mo, Mn を考慮した。モデルへの入力である「由来製品別合金種別スクラップの発生量」「合金種別生産量」は動的マテリアルフロー分析と WIO-MFA (Waste Input-Output Material Flow Analysis)モデル [3)]を用いて推計した。「合金種別生産量」については、電炉での生産のみを考慮した。

また、転炉鋼および電炉特殊鋼の組成は WIO-MFA から推計される合金組成を用い、合金元素濃度の幅は許容しないと仮定した。一方で、電炉普通鋼の組成は対応する産業規格において定められている合金元素濃度の上限と下限を用いて合金濃度の幅を定めた。不純物として扱われる元素については、定められた上限値と 0 を下限値として合金元素の幅を定めた。

本研究においては、環境負荷として温室効果ガス (Greenhouse Gases, GHG) 排出量を対象とし分析を行った。鉄鋼材の製造プロセスにおいて合金元素の添加には純金属ではなくフェロアロイなどが用いられるが、本研究では純金属を用いて合金元素の添加を行うと仮定し、環境負荷の評価を行った。

3. 結果および考察

図 1 に 2005 年の日本国内において選別するスクラップ種数を 1 から 9 まで変化させた際の鉄鋼循環に伴う GHG 排出量の変化を示す。GHG 排出量はスクラップ種数が 5 以上の場合に最小の 57.5 Mt-CO_2eq となった。これは、合金元素の添加用の天然資源の投入量が最小かつ、未使用スクラップの発生量が最小となっているため、これ以上精緻なソーティングを行った場合においても、CO_2 排出量が減少しないためである。この結果より、鉄鋼材においてもアルミニウム合金同様にスクラップのソーティング導入による GHG 排出量低減効果が飽和するスクラップ種数があることが確認できた。

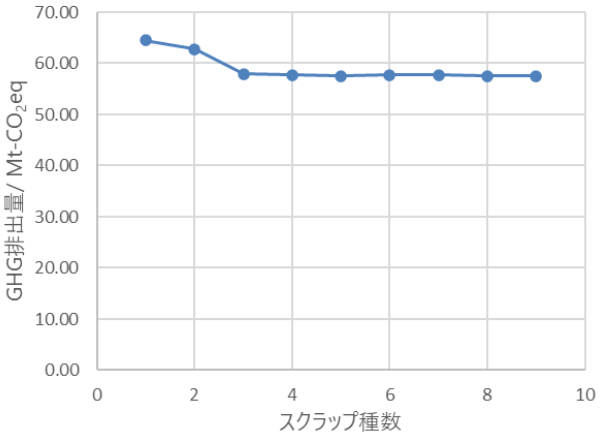


図 1 スクラップ種数の変化による GHG 排出量の変化

図 2 にスクラップ種数が 5 の場合のリサイクルフローを示す。現在のリサイクルプロセスと同様に Ni を含むステンレス鋼が 1 つのスクラップ種にソーティングされ、Ni を含むステンレス鋼の製造に利用されていることが読み取れる (図 2 におけるスクラップ種 4)。また、その他のスクラップ種は主に Mn の濃度によってソーティングが基準になっている。これは、電炉で生産される特殊鋼に対して Mn の濃度の幅を許容しておらず、多くの鋼種において Mn がスクラップ利用のボトルネックになっていることに起因している。また、これによりスクラップ中の Mn 総量が電炉における Mn の需要量を超過しているため、未利用スクラップが発生している。今後の研究においては、より未利用スクラップ発生量を削減するために、全生産プロセスでの生産量を対象として電炉と転炉の生産量比率を含めた分析が必要であると考えられる。

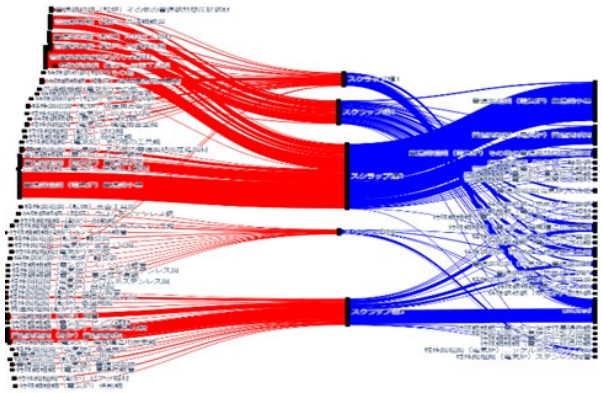


図 2 スクラップ種 5 におけるリサイクルフロー

4. 結言

外生的に与えたスクラップ種数に対して環境負荷が最小となるリサイクル経路を明らかにするモデルである ONBAR モデルを再生素材の合金濃度に幅を考慮した拡張を行い、鉄鋼材リサイクルに対して適用した。アルミニウム同様に GHG 排出量が低下しなくなるスクラップ種数が存在し、鉄鋼材の場合は 5 であることが明らかとなった。また、ソーティングにおいては、Ni を含むステンレス鋼の分離を除くと Mn 濃度を基準としてソーティングが望ましいことが明らかとなった。一方で、GHG 排出量原単位やプロセス歩留まりに起因する不確実性が存在するため、より精緻な分析に基づいたソーティング基準の策定が必要である。

参考文献

1) H. Ohno, et al., Environ. Sci. Technol., 51 (22), 2017, 13086-13094
2) J. Pedneault, et al., J. Ind. Ecol., 27 (3), 2023, 977-992
3) H. Ohno, et al., J. Ind. Ecol., 18 (2), 2014, 242-253
4) I. Daigo, et al., ISIJ Int., 57 (2), 2017, 388-393

ソーシャル LCA における児童労働による健康影響の定量化方法

Quantification Methods for Health Impacts of Child Labor in Social LCA

○丸岡広大 [1*)]、渕上智子 [1)]、中野勝行 [1)]
Kodai Maruoka, Tomoko Fuchigami, Katsuyuki Nakano
1) 立命館大学
* ps0588rf@ed.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

児童労働（5～17 歳）は世界で 1 億 6,000 万人に上り、そのうち 70%は農業部門を占めると推計されている [1)]。児童労働をしている 32.9%が危険な労働（Hazardous work）に従事しており、そのうち 43.6%が学校に通っていない [1)]。危険な労働とは、地下作業や長時間労働、危険な機械の使用などであり、子どもの身体的・精神的発達に深刻な影響を及ぼす。教育を受ける権利を奪われ、貧困の連鎖から抜け出せない構造がある。このように、子どもの健康や寿命、教育機会、そして基本的人権が著しく損なわれる児童労働は国際社会が解決すべき重大な問題である。

サプライチェーンを通じた社会的リスクを評価する技法としてソーシャル LCA（S-LCA）があるが、現在多くの S-LCA 事例ではソーシャルパフォーマンス評価が用いられているため、定量的な評価できない。一方、ソーシャルリスク評価では定量評価をするものの、その評価手法は未成熟である。そこで、本研究では児童労働に伴う健康リスクに着目し、ソーシャルリスク評価に利用可能な健康リスク手法について検討した。

2. 方法

2.1 影響経路の検討

児童労働による健康リスクとして、教育による長期的なリスクと労働災害といた短期的なリスクが考えられる [2)]。これらの関係を図 1 に示した。児童労働は教育の機会を奪うため、将来の経済基盤構築に影響を及ぼす。そして、経済的収入と教育レベルは寿命に影響があることが知られている [2,3)]。また、適切な医療サービスの利用など、保健衛生に関する知識不足も健康リスクを増加させる。児童労働は喫煙、飲酒など、不適切な習慣を生むことも知られている [2)]。

労働災害は一般的な労働者においても発生しているが、不十分な知識・経験しか持たない子供が危険な環境下においては労災の発生率も高く、平均余命も高いため、損失する障害調整生命年（DALY）が高くなる。

2.2 潜在的な障害調整生存年（pDALY）の損失の推計

Fassa (2003)は各国の就学率と GNP を説明変数とし、障害調整生命年（DALY）を目的変数とする重回帰式を提案した。そこで、本報では当該式を用いて教育機会を失うことによる潜在的な DALY(pDALY)の損失を推計した。児童労働の各種労働災害の記録より児童労働に伴う DALY も推計されている [2)]。これら既往研究による DALY 推計値を用いて潜在的な DALY の推計を行う。当該 DALY は死亡（YLL）と障害（YLD）を別にしているため、それぞれ別にして分析を実施した。

本報告では児童労働の課題が指摘されている農作物（コーヒー、バナナ、パーム、ココア豆）を評価対象として選定した。pDALY の推計は次式で実施した。

$$pDALY_i = Child \times \alpha\beta\gamma\varepsilon \times \frac{Prod_i}{Prod_{Total}} \times daly \quad (1)$$

ここで、$pDALY_i$: 農作物 i の潜在的な DALY [年]、*Child*: 子供の人口 [人]、α: 児童労働の割合 [-]、β: 危険な労働に従事する割合 [-]、γ: 非登校の割合 [-]、ε: 農業に従事する児童労働の割合 [-]、$Prod_i$: 農作物 *i* の年間生産額 [USD]、$Prod_{Total}$: 農業生産額 [USD]、*daly*: 児童労働一人当たりの DALY [年/人] である。

各国の年齢別人口より児童労働の定義に当てはまる 5～17 歳の人口を抽出した。児童労働の割合は World Bank データベースより調査データの存在する各国の最新年のデータを用いた。データがない国は同地域・同所得レベル国の加重平均値を用いた。中国のみ個別文献値 [6)]（7.74%）を用いた。危険な労働に従事する割合と非登校の割合はそれぞれ一律 32.9%[1)]、43.6%[1)]とした。農業に従事する児童労働の割合は一律 70%[1)]とした。各農作物の生産額、国別農業生産額は FAO 統計 [7] より抽出した。教育および労働災害に伴う DALY は文献値 [2)]を用いた。

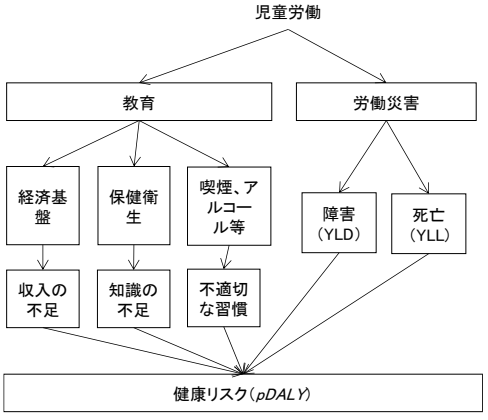


図 1 児童労働から健康リスクへの影響経路

3. 結果と考察

各農作物の pDALY を図 2 に示した。バナナが最もリスクが高く、次いでパーム、コーヒー豆、ココア豆と続いた。主には教育由来の pDALY が最も多かった。労災（障害）由来の pDALY は非常に少なかった。国によって就学率向上に伴う DALY 減少係数は異なるため、労災由来と教育由来の割合は製品によって異なる結果となった。国別の健康リスク分析結果を図 3 に整理した。コーヒー豆の場合はベトナムが 21%、インドとエチオピアが 12%であった。生産量で 29%を占めるブラジルのリスクは低く、4%であった。バナナはインドが 34%と最もリスクが高く、次いでタンザニア（16%）、フィリピン（12%）と続いた。生産量と比べると、インドとフィリピンのリスクがより高いといえる。パームはインドネシアが 77%と圧倒的高い数値であった。マレーシアは 9%であった。ココア豆はコートジボワールが 69%と過半を占め、次いでカメルーンが 12%であったため、これらの国でのリスクが高いと評価された。

4. まとめ

複数の影響経路で発生しうる健康リスクに対して、DALY を用いることで統合的な評価ができた。製品ごとに児童労働に起因する健康リスクの高い国を特定するだけでなく、例えバナナが相対的にリスクが高いなど、定量的な評価が可能となった。しかし、本報で用いた児童労働に伴う DALY は 2003 年の文献に基づいており、データが古い。さらに、当該 DALY の算出方法も推計に基づいたものである。より新しく、またより論理的妥当性のある DALY の検討が今後必要である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 22K12491 の助成を受けた。

引用文献

1) ILO and UNICEF: “Child labour: global estimates 2020, trends and the road forward”, (2021)
2) Fassa A.G.: “Health benefits of eliminating child labour ”, (2003)
3) Raghupathi V., and Raghupathi W.: Archives of Public Health, 78, (2020), 20
4) UN: “World Population Prospects 2024”, （オンライン）, 入手先< https://population.un.org/wpp/>, （参照 2025-1-16）
5) Wold Bank: “World Development Indicators”, (2024), （オンライン）, 入手先< https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators >, （参照 2025-1-16）
6) Tang et al.: China Economic Review, 51, (2018), pp.149-166
7) FAO: “FAO stat”, （オンライン）, 入手先 <https://www.fao.org/faostat/>, （参照 2025-1-16）

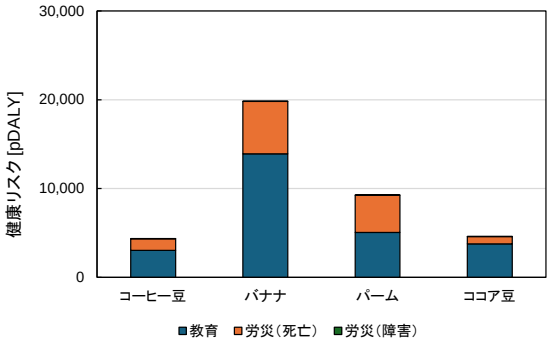
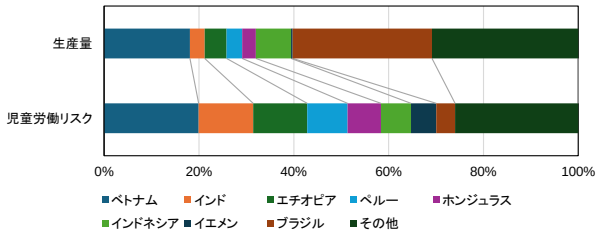
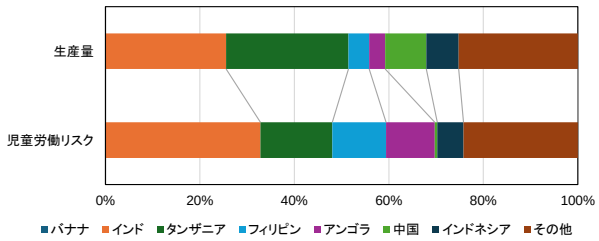


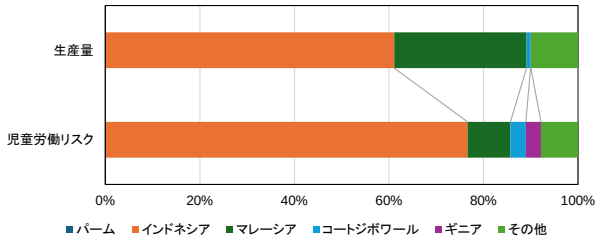
図 2 健康リスク（pDALY）の内訳と規模



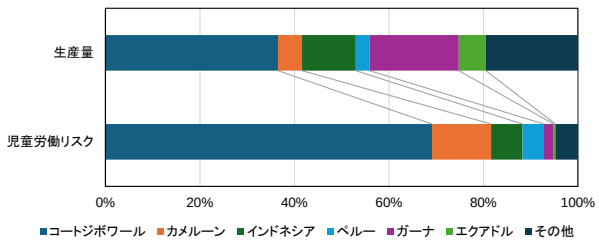
(a) コーヒー豆



(b) バナナ



(c) パーム



(d) ココア豆

図 3 国別の生産量と健康リスク（pDALY）

国連自動車基準調和世界フォーラムにおける
自動車 LCA の国際調和手法の開発

Development of an internationally harmonized LCA methodology for automobiles at the UN World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations

○鈴木徹也*[1)]
Tetsuya Suzuki
1) 一般財団法人日本自動車研究所
* stetsuya@jari.or.jp

1. はじめに

地球温暖化への対応は喫緊かつ重要な課題であり、脱炭素化は世界的な潮流となっている。運輸部門は、世界の GHG 排出とエネルギー消費の主な要因の 1 つであり、その大部分を道路交通が占めている。

自動車のカーボンニュートラルを実現するためには、使用段階の燃料/電力消費だけでなく、生産や廃棄・リサイクル段階も含めたライフサイクル全体での GHG 排出量を客観的に評価することが重要である。そして、比較可能性や一貫性を備えた包括的な CFP 値を入手できるようにするには、国際的に統一された LCA 手法を定義・開発することが望ましい。LCA 国際規格として ISO 14040[1)] が 2006 年に発効しており、自動車メーカー等は既に、同規格に準拠した様々な LCA 結果を公表している。しかし、ISO 14040 では、LCA を実施するための調査範囲や前提条件は、自動車メーカーなどの実施者が決定すべきとされており、各実施者が独自の手法で LCA を実施している。よって、グローバルな事業活動を展開する自動車産業向けに設計された国際的に調和された LCA 手法が求められている。

そこで、日本の国土交通省は、自動車の環境・安全基準が世界的に議論・策定されている国連欧州経済委員会自動車基準調和世界フォーラム（UNECE/WP.29）において、公平で国際調和された LCA 手法を策定すべきであると 2021 年 6 月に提案した。そして、WP.29 の専門分科会の 1 つである GRPE（排出ガスとエネルギー）では、第 86 回会議（2022 年 10 月）において自動車 LCA を専門とする非公式作業部会（IWG：Informal Working Group）を設置することを決定した。これを受け、2022 年 10 月に第 1 回 Automotive LCA（A-LCA）IWG が沖縄で開催され、日本と韓国による共同議長体制で議論を進めることを決定した。第 87 回 GRPE（2023 年 1 月）では、議論の進め方を定義した Terms of Reference（ToR：付託事項）[2)] 案を審議した。その後、本案は合意され本格的な議論が開始された。

本報告では、WP.29 における自動車 LCA の国際的に調和された手法の開発状況について説明する。

2. 議論の状況

2.1 A-LCA IWG の概要

A-LCA IWG の全体的な作業内容は、ToR に定義されている。A-LCA IWG の目的は、まずは地球温暖化への対応を優先すべく、自動車のライフサイクル GHG 排出量について、国際的に調和された手法を透明性と一貫性の原則を尊重して開発することである。この算出手法は、WP.29 に参加している各国の政策立案に活用でき、エネルギー使用量も考慮しながら自動車産業からの GHG 排出量を削減することを促すことができる。ただし、エネルギー政策は各国に依存するため、WP.29 で一般的に議論される強制力のある自動車基準とはせず、ガイドラインに留める。

手法開発において、ISO 14040 をはじめとする既存の規格を活用する。例えば、目的と調査範囲の設定では、機能単位、システム境界、配分手順など所定の項目をカバーする、インベントリ分析においては、データ品質要件として時間的範囲、地理的範囲、技術的範囲、精度、完全性など所定の項目を満たすこととする。また、開発する手法は、自動車産業の複雑なサプライチェーンを考慮し、正確さと作業量のバランスを取るものとする。

A-LCA IWG のタイムラインとして、2015 年 6 月に GRPE、2025 年 11 月に WP.29 において国連決議を採択することが合意された。ただし、ToR の承認後に WP.29 関連会議の全体スケジュールが変更され、それぞれ 2015 年 10 月、2026 年 3 月にずれ込む予定である。

2.2 サブグループの構成

A-LCA の手法開発では、ライフサイクルの多岐に渡る専門性が必要となる。GRPE には通常、燃費や排出ガスなど自動車技術に関する専門家が多く参加してい

るが、それ以外の分野（例えば燃料製造やリサイクルなど）に関する専門家の知見も必要となる。そこで、A-LCA IWG の傘下に小規模で機動的に専門的な議論を進めるためのサブグループ（SG）を設置することが、第 6 回 A-LCA IWG（2023 年 4 月）で合意された。サブグループの構成を図 1 に示す。

	担当領域	リーダー
SG1	Overarching aspects	IWG Leading Team
SG2	Material & Material recycling	日本
SG3	Parts & Vehicle production	韓国、中国、OICA、CLEPA
SG4	Use	欧州委員会、OICA、AVERE
SG5	End of Life	日本、中国
SG6	Fuel & Energy Cycle	日本、AVERE
SG7	Drafting	フランス、OICA

OICA：国際自動車工業連合会／CLEPA：欧州自動車部品工業会
AVERE：欧州電気自動車協会

図 1 A-LCA IWG における SG の構成

2.3 レベルコンセプト

A-LCA の手法開発の大きな方向性について、A-LCA IWG で重要な論点とされたのは、自動車メーカーが実測できる 1 次データの可用性である。例えば、車両製造段階において、製造工場での実際の使用電力量が把握できれば、製造段階の GHG 排出量の精度は向上する。一方で、自動車サプライチェーンは複雑であり、その全てにおいて製造段階の 1 次データを取得することは困難である。

この課題への対応策として、1 次データの適用範囲に応じて 4 段階のレベル分けを行う「レベルコンセプト」が韓国から提案された。レベル 1 は統計等からの 2 次データを使用し、レベルが上がるにつれてメーカー特有の 1 次データの適用範囲を広げるというものである。第 8 回 A-LCA IWG（2023 年 5 月）で、この韓国提案の採用が決定したが、ライフサイクルの全ての段階で一様に適用できるのか、A-LCA 手法の適用先を定義することにならないか、手法が複数になるのではないかなどの意見もあり、IWG および各 SG で現在も議論が続いている。

2.4 各サブグループの進捗

包括的課題を担当する SG1 では、対象車種は Category 1-1（乗用車）をベースラインとすることで合意した。対象 GHG は IPCC AR6 の GWP100 に準じることに合意したが、水素も含めるか議論中である。そのほか、インフラの扱い、データ品質要件なども包括的課題として挙がっているが、専門性が高いため他の SG でも並行して議論している。

素材製造を担当する SG2 では、材料リスト、システム境界などが合意され、素材製造時のリサイクルの扱いなど議論中の項目もあるが、ドラフティングが進んでいる。

部品・車両製造を担当する SG3 は、データ品質評価、1 次データシェア、輸送、廃棄などが合意されドラフティングが進んでいるが、カットオフ基準や代表車両などは議論中である。

使用を担当する SG4 では、機能単位、システム境界、エネルギー消費、メンテナンス、代表車両等について細かい部分は議論中であるが、コンセプトは合意されドラフティングが進んでいる。フロン類等のリーケージについては、コンセプトレベルで議論中である。

廃棄・リサイクルを担当する SG5 では、リサイクルモデリング、境界条件、セカンドライフ部品の扱いなどほとんどの項目が合意され、ドラフティングが進んでいる。

燃料・エネルギーサイクルを担当する SG6 では、エネルギーモデリングについてドラフティングが進んでいるが、レベルコンセプト、水素、間接的土地利用変化などが議論中である。

SG7 はドラフティングを担当するため、第 16 回 A-LCA IWG（2024 年 9 月）から正式に活動を開始した後、ドラフティングの共通手順と基本フォーマットを各 SG に提供した。各 SG から提供されたドラフトの確認および統合作業を進めている。

3. まとめ

WP.29 の GRPE に設置された A-LCA IWG における自動車 LCA の国際調和手法の開発状況について、概要を説明した。A-LCA IWG は 2025 年 2 月まで 20 回、SG についても SG1 と SG7 以外はほぼ毎月開催され、かなり精力的に議論が進められている。日本は共同議長ならびに複数の SG リーダーを務めるなど積極的に関与しており、次の主要なマイルストーンである第 92 回 GRPE（2025 年 3 月）での Informal Documents の提出に向けて、一層貢献していきたい。

引用文献

1) ISO: "ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework", (2006)
2) UNECE："(A-LCA) Latest version of draft Terms of References (ToRs)", (2023) <https://unece.org/transport/documents/2023/01/informal-documents/lca-latest-version-draft-terms-references-tors>, （参照 2025-1-15）

日本における水素発電を対象としたライフサイクル GHG 排出量算定

Life Cycle GHG Emissions Assessment for Hydrogen Power Generation in Japan

○赤見廉*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Ren Akami, Norihiro Itsubo
1) 早稲田大学
* ren_akami1002@fuji.waseda.jp

1. はじめに

日本は自国のエネルギー政策の基本的な方向性を示すために、S+3E（Safety, Energy Security, Economic Efficiency, Environment）の考え方を軸としたエネルギー基本計画を策定している。2021 年には第 6 次エネルギー基本計画を策定し、2050 年カーボンニュートラルの実現や気候変動対策を視野に入れた現状のエネルギー課題とその克服方法について取りまとめている。第 6 次エネルギー基本計画では、火力発電の脱炭素化のために水素・アンモニア発電を利用するものとし、水素をカーボンニュートラル実現に必要不可欠な 2 次エネルギーとして注目している。2024 年 12 月に公開された第 7 次エネルギー基本計画（案）においても、この水素への期待には変化がない。しかしながら、日本において水素を導入することによる脱炭素効果の試算結果は少ない。以上の背景から、水素の脱炭素技術としての商用利用に先立ち、S+3E の Environment に当たる環境負荷は最優先で定量評価する必要がある。

そこで本研究では、水素のエネルギー利用による脱炭素効果を日本における水素発電を対象としたライフサイクル GHG 排出量算定によって可視化することを目的としている。

2. 研究方法

2.1 算定対象

本研究の算定対象は、海外で製造後日本まで輸送した水素、およびその水素による発電で得た電力である。したがって、機能単位は製造された水素 1 kg あたり、および発電された電力 1 kWh あたりとしている。水素は海外の適地で石炭ガス化（オーストラリア褐炭も考慮）や天然ガス改質、水電解などの手法で製造された複数種類を考慮した。これらの水素は CCS の活用や再生可能エネルギー由来の電力を利用することによって、ブルーまたはグリーン水素として扱うものとした。また製造された水素は、液化水素やアンモニア、液体有機水素キャリアなどの輸送キャリアに変換され、日本まで海上輸送されるものとしている。日本に輸送された水素は輸送キャリアからの脱水素処置が行われ、その後小規模 CGS 水素専焼発電によって熱と電気に変換される。

2.2 システム境界

システム境界には、水素製造の原料調達から、各手法による水素製造、水素の輸送キャリアへの変換、水素の海上輸送、輸送キャリアからの脱水素処置、水素発電による熱電獲得までを含んでいる。

システム境界中の「各手法による水素製造」には、ブルー水素とするための CCS 利用による追加排出や、グリーン水素とするために設置した再エネ電力設備製造による追加排出も考慮している。同様に「水素の海上輸送」には、輸送船への積荷および揚荷に要する電力排出も考慮している。

また、各プロセス間の細かな輸送や仮貯蔵などによる排出は、全体への影響が極めて小さいものとしてシステム境界に含めていない。

2.3 使用データ

使用データに関しては、算定対象となる水素サプライチェーンが商用段階に達してないことや秘密保持の観点等から 1 次データの入手が困難であったため、ヒヤリングデータを先行研究由来の文献値および実証試験公開レポート由来の 2 次データで補完している。原単位データベースには IDEA v3.4 を使用した。

また、システム境界中の「水素の海上輸送」では、各水素輸送キャリアの海上輸送について、固有の原単位データが確立されていないため、液化水素なら LNG、アンモニアなら LPG、液体有機水素キャリアなら石油というように、性状の似た物質のタンカー輸送と仮定することで算定を行っている。

3. 算定結果

本要旨では、算定結果の一部を詳細なシナリオ設定とともに紹介する。以下に示す結果は、オーストラリア褐炭ガス化と CCS によって製造されたブルー水素と、それを液化水素にて海上輸送し、日本で発電した際の電力のライフサイクル GHG 排出量である。

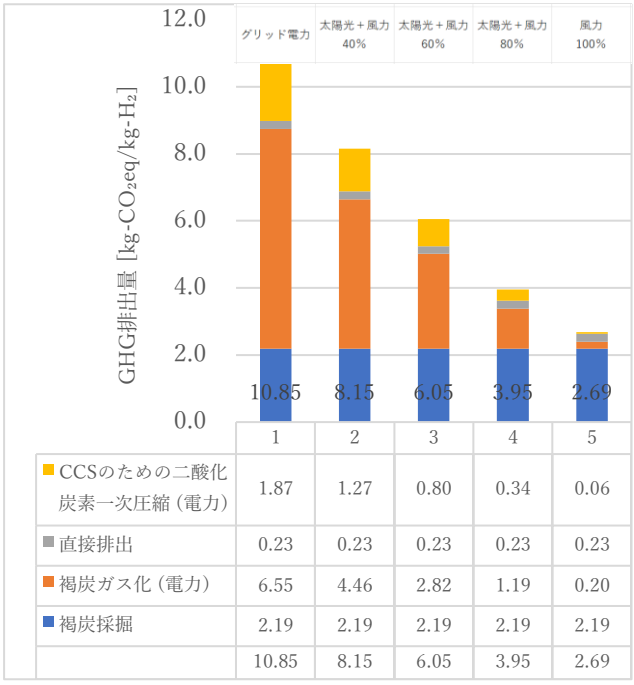
詳細な技術条件について、CCS は 95%回収と 90%回収の 2 段階で行うことで実質 99%回収としている。水素の液化に要する電力は水素 1 kg あたり 11.9 kWh または 6.0 kWh で考慮している。海上輸送中の液化水素のボイルオフ条件は 1 日あたり 1%、0.3%、0.1%のいずれかで考慮

している。また、全プロセス中で使用する電力原単位の電源構成について、太陽光と風力の合計割合が現在のグリッド電力の該当値から 40%、60%、80%と上昇し、最終的に風力 100%となる場合の排出量削減効果について比較した。

3.1 水素製造プロセスまでの GHG 排出量

水素基本戦略において、1 kgの水素製造におけるWell to Production GateのGHG排出量で、3.4 kg-CO_2eq以下の水素が低炭素水素であると設定されたことから、ここではその観点で検討する。

以下のグラフは水素製造装置出口までの水素1 kgあたりのGHG排出量を示している。



	1	2	3	4	5
CCSのための二酸化炭素一次圧縮（電力）	1.87	1.27	0.80	0.34	0.06
直接排出	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
褐炭ガス化（電力）	6.55	4.46	2.82	1.19	0.20
褐炭採掘	2.19	2.19	2.19	2.19	2.19
	10.85	8.15	6.05	3.95	2.69

図1 水素1 kgあたりのGHG排出量

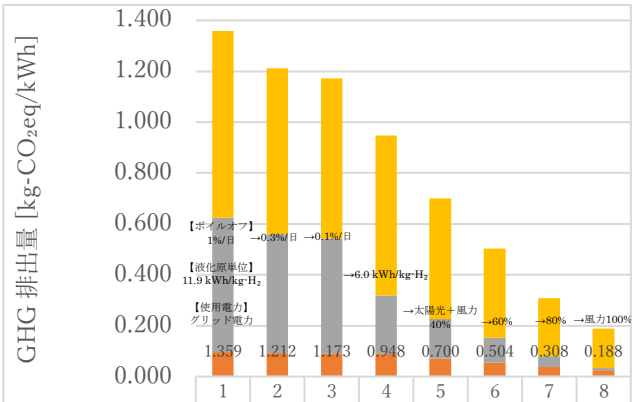
シナリオ1の結果より、水素製造にグリッド電力を用いた場合、CCSによりブルー水素としていても、水素1 kgあたりのGHG排出量が10.85 kg-CO_2eqとなり、水素基本戦略における低炭素水素要件は満たしていないことがわかる。

またシナリオ2、3、4の結果より、太陽光および風力電力の合計割合を40%、60%、80%と増やしても同様に低炭素要件は満たさなかった。

最終的にシナリオ5の結果より、水素製造時の使用電力を100%風力とすることで、水素1 kgあたりのGHG排出量が2.69 kg-CO_2eqとなり、低炭素水素要件を満たした。したがって、低炭素水素の製造には再エネ電力の導入が必須であると考えられる。

3.2 水素発電による電力の GHG 排出量

次に上記の水素による発電で得た電力のGHG排出量について検討する。以下のグラフは発電された電力1 kWhあたりのGHG排出量を示している。



	1	2	3	4	5	6	7	8
水素製造段階	0.734	0.651	0.629	0.629	0.473	0.351	0.229	0.156
水素液化段階	0.528	0.468	0.453	0.228	0.155	0.098	0.041	0.007
水素輸送段階	0.092	0.087	0.086	0.086	0.067	0.050	0.032	0.021
発電所建造段階	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
合計排出量	1.359	1.212	1.173	0.948	0.700	0.504	0.308	0.188

図2 電力1 kWhあたりのGHG排出量

シナリオ4の結果より、液化水素輸送中のボイルオフ条件や水素液化時に要する電力量条件が将来の目標水準を達成した場合でも、ライフサイクル中の使用電力にグリッド電力を用いた場合には、電力1 kWhあたりのGHG排出量が0.948 kg-CO_2eqと非常に高い値となるため、火力発電の代替として機能していないことがわかる。

対してシナリオ7, 8の結果より、ライフサイクル中の使用電力の80%以上を再エネ電力とした場合には、電力1 kWhあたりのGHG排出量が0.308 kg-CO_2eq以下となり、火力発電の排出係数を下回るために、代替となり得る可能性を示唆している。

4. 今後の展望

今後の展望として、エネルギー基本計画のS+3Eにおけるる Economic Efficiencyに関わる経済負荷の定量的評価として、コスト評価も行う予定である。経済負荷については、安定供給性も評価できるという点で、Energy Securityに関する評価も行えていると考えられ、GHG排出量算定と合わせてより総合的な視点を持った評価になると思われる。

5. 参考文献

1) 経済産業省, “水素基本戦略”, Available: https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_2.pdf [アクセス日: 2025/1/6]
2) 経済産業省,”第6次エネルギー基本計画”, Available: https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf [アクセス日: 2025/1/6]

マスバランス方式が適用されたグリーンスチールに関する認知と適切な情報提供内容の検討

Perception and appropriate Information provision regarding green steel to which mass balance approach is applied

○牛久保直哉*[1)]、田中大介[1)]、Sébastien Dente[1)]、橋本征二[1)]
Naoya Ushikubo, Daisuke Tanaka, Sébastien Dente, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
*ce0053ek@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

企業がサプライチェーン全体の脱炭素化を進める中、CO_2 排出量の低い鉄鋼材＝グリーンスチールに対する需要が高まっているが、製鉄プロセスの脱炭素化は容易ではなく、製鉄プロセスにおける排出削減量を証書化し、製品に付与することで CO_2 排出量が低い鉄鋼材と見なす「証書タイプ」[1)]のグリーンスチール＝「マスバランス方式(以下 MB 方式)」を適用したグリーンスチール[2)]も提供されるようになっている。しかしながら、MB 方式の考え方は需要家にとって分かりにくく、情報の受け手に誤解を与える可能性がある[1)]。本研究では、適切なコミュニケーションに資することを目的として、「グリーンスチール」及び「鉄鋼材の MB 方式」に対する情報の受け手の認知を分析し、MB 方式が適用されたグリーンスチールに対する理解を促進するために有益な情報を明らかにした。

2. 方法

2.1 メンタルモデル・アプローチ

上記目的のため、メンタルモデル・アプローチを用いた。これは、対象とする題材に対して、情報の受け手と専門家の知識や概念を図式化し、それらを比較することで、情報の受け手がその題材を理解するために有益な情報内容を抽出する手法[3)]であり、以下の手順で実施した。

2.2 専門家のメンタルモデルの作成

「グリーンスチール」及び「鉄鋼材の MB 方式」について、これらに関する文献を対象に、ⓐ専用ソフトウェア(KH coder)を使用いたテキスト分析、ⓑ生成AI(ChatGPT、Google Gemini、Copilot)を用いたテキスト分析を行い、これらの結果を比較・統合し、専門家のメンタルモデルを作成した。

2.3 情報の受け手のメンタルモデルの作成

同じ 2 つの用語について、投資家や一般消費者を対象にオンラインでインタビュー調査を実施し、情報の受け手のメンタルモデルを作成した。インタビュー調査では、これらの用語の定義や捉え方等について質問した。

2.4 提供すべき情報内容の抽出

作成した専門家及び情報の受け手のメンタルモデルを比較し、提供すべき情報内容の抽出を行った。

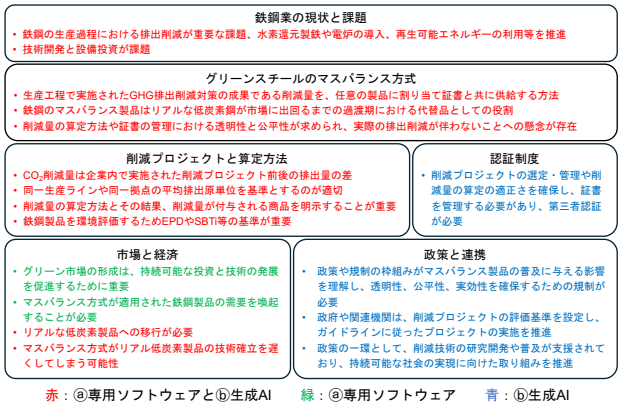


図 「鉄鋼材の MB 方式」に関する専門家のメンタルモデル

3. 結果と考察

「鉄鋼材の MB 方式」に関する専門家のメンタルモデルの作成結果を図に示す。ⓐ専用ソフトウェアとⓑ生成AI の結果を統合した結果、「鉄鋼材の MB 方式」に関する構成概念として、①鉄鋼業の現状と課題、②グリーンスチールの MB 方式の概要・役割・懸念点、③MB 方式の適用のための削減プロジェクトと算定方法、④認証制度、⑤市場と経済、⑥マスバランス方式導入に向けた政策と連携、が抽出された。②では実際の排出削減が伴わないことへの懸念、⑤では、リアル低炭素製品の製造のための技術確立を遅くしてしまう可能性が含まれた。情報の受け手のメンタルモデルについては、要旨執筆時点でインタビュー調査を実施中であり、その結果及び提供すべき情報提供内容については、学会当日に報告する。

謝辞：本研究は、環境省・(独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20243004)による成果である。

引用文献

1) 西田裕子：グリーンスチールの市場形成にむけて、自然エネルギー財団、2024
2) 日本鉄鋼連盟：マスバランス方式を適用したグリーンスチールに関するガイドライン Version 2.0、2023
3) 小杉素子ら：メンタルモデル作成マニュアル、電力中央研究所調査資料、Y03917、2004

乳幼児用品のシェアリングを対象とした環境影響評価：ベビーベッドの例

Environmental impact assessment of baby items sharing: a case of crib

○前田梨香*[1)]、橋本征二[1)]
Rinka Maeda, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
ce0023er@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

近年、モノや空間、移動手段、スキルなどの多様なモノ・サービスを共有するシェアリングが広がりを見せている。環境省は「モノや空間等の資源の効率的な活用による天然資源投入量や廃棄物発生量の削減、移動手段や空間の共有等によるCO_2排出量の削減といった環境面の効果」[1)]が期待されるとしている。しかしながら、環境面での帰結には様々な議論がある[2)]。本研究では、様々なシェアリングサービスの中でも、需要期間が短く、シェアリングによる環境影響の削減効果が期待される乳幼児用品、本稿ではベビーベッドを対象として、その環境影響を評価した。

2. 方法

2.1 機能単位とシステム境界

本稿では、ベビーベッドの所有時とシェアリング時を比較し、1 乳児が 1 年間利用することを機能単位とした。ベビーベッドの寿命は 10 年、シェアリング時は 1 つのベビーベッドを使用した人数をシナリオとして設定した。所有時、シェアリング時ともに、原材料の製造・輸送、製品の配送、使用、廃棄の段階を対象とし、これに加え、シェアリング時は回収、メンテナンスも対象とした。

2.2 使用データ・設定

(1) 原材料の製造･輸送:ベビーベッドの製品情報から、製品部品の原材料、各材料の重さと製造地等を設定した。主要な原材料である木材については、産地を確認し陸上及び海上輸送距離を設定した。詳細がない部品については、一般的な重さを想定するとともに、輸送距離を仮定した。
(2) 配送・回収：配送・回収距離については変数とし、いくつかのケースを想定した。
(3) 使用・メンテナンス：所有時は水拭き、シェアリング時はエタノール消毒することとした。
(4) 廃棄：破砕・選別を行い廃棄するものとした。

2.3 環境影響評価項目とデータ

本稿では、主要な原材料が木材であることを考慮し、エネルギー消費・土地利用・廃棄物・酸性化・資源消費・気候変動を環境影響評価項目とした。計算には LCA ソフトウェアの MiLCAv3、データベースとして IDEAv3.3 を用いた。

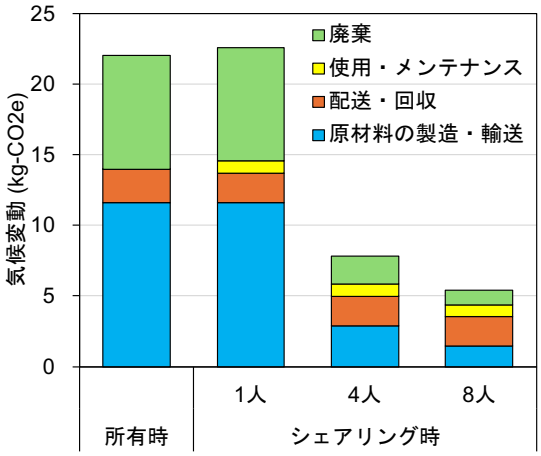


図　各シナリオの気候変動への影響

3. 結果と考察

各シナリオの気候変動への影響を図に示す。原材料の製造・輸送段階における影響は、使用する乳児 1 人あたりとなるため、シェアリングの人数が増えることで減少する結果となった。配送・回収段階における影響については、今回所有時、シェアリング時で同じような輸送距離の想定となっているためほとんど差がないが、想定が変わっても各シナリオの相対的な結果に大きな影響はないと考えられる。使用・メンテナンス段階については、シェアリングの人数に関わらずメタノール消毒が追加となるが影響は大きくなかった。廃棄段階の影響については、原材料の製造・輸送段階と同様、使用する乳児 1 人あたりとなるため、シェアリングの人数が増えることで減少した。

本稿で対象としたベビーベットのシェアリングについては、その利用人数が増えることで環境影響が減少するという単純な結果となるが、玩具等についてはサブスクリプションのサービスも登場している。この場合の評価は、提供される機能の変化も伴っており、今後こうした検討が必要である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金(22H03805)による成果である。

引用文献

1) 環境省：環境白書、日経印刷、2018
2) 天沢逸里ら：日本 LCA 学会誌、15(2)、pp.161-173、2019

Domestic Carbon Sourcing Through Forestry Management Considering Wood-Based Material and Energy Production Pathways

○Ziyi Han[1)], Heng Yi Teah[1)], Yuichiro Kanematsu[1)], Yasunori Kikuchi[1)]
1) The University of Tokyo
* Zzzhan@chemsys.t.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

Forests are essential for mitigating climate change, serving as both carbon sinks and sources of renewable materials. In Japan, insufficient forest management has resulted in a suboptimal age class distribution of forests, with many mature trees left aging and remained unattended, while the plantation of new trees are inadequate.[1)] This constrains the downstream utilization of domestic woody biomass, both currently and in the future. It also increases the reliance on imported wood products, lowering the resource self-sufficiency. To address these challenges, a systematic approach would be required to identify and enhance the opportunities of emission reduction during the transformation of forest resources to usable products along the forest value chain. This strategy would promote a sustainable use of domestic wood resources, in which a long-term forest health and productivity is ensured, while the reliance on imported materials is reduced.

In this study, we aim to elucidate the potential changes in the environmental performance of utilizing the increased domestic wood resources produced from forestry management activities to replace the imported materials, to provide a broader implication of the environmental benefits and challenges associated with enhancing domestic wood resources.

2. Methodology

To identify the opportunities of GHG reduction along forest value chain, we conducted a simulation of long-term carbon balance in forest management and forest resources utilization. The simulation incorporated the material flows of woody biomass across five modules, which includes two wood supply modules (forestry management and wood processing) and three wood utilization modules (construction material production, biomass energy generation, and biochemical conversion). Then, we explored how substituting imported wood materials with domestic wood resources across various applications would affect greenhouse gas (GHG) emissions. Moreover, we examined how a shift toward self-sufficient domestic wood resources would influence the life cycle environmental performance of the forest value chain.

2.1 Domestic wood supply

To simulate the long-term growth of forests and the derived roundwood supply under active forestry management, we designed a model that represents the transitioning from the current forest age class distribution to a more balanced uniform distribution within 100-year simulation period.[2)] The transition is achieved by forestry management activites such as harvesting, thinning, and replantation. The model also tracks the material flow of woody biomass from forest stock to harvested wood, which is then processed by sawmills to produce three major wood products: timber, plywood, and wood chips.

2.2 Wood utilization

When allocating the domestic roundwood supply, priority is placed on meeting the 100% self-sufficiency for timber and plywood for wood construction. The rest of the roundwood are accounted for wood chips for either bioenergy generation or biochemical conversion. For bioenergy generation, wood chips are used as feedstock combined heat and power (CHP) generation plants. For biochemical production, dry woody biomass undergoes thermochemical conversion[3)] to produce hydrocarbons that serve as energy carriers, including hydrogen, jet fuels and biodiesel.

For imported wood products, the system boundary encompasses overseas production, overseas transportation (both by truck and by shipment), and the transportation by truck in Japan. The material flow of imported wood products is derived from official import data records. Timber and plywood are considered for imported wood construction materials. For imported bio-based fuel materials, six different products are included, comprising both wood-based and non-wood-based fuels that are directly used in CHP.

The overall GHG emissions for the imported materials can be described by Eq. (1).

$$\mathrm{GHG}_{domestic} = \mathrm{GHG}_{production} + \mathrm{GHG}_{transportation,truck} \quad (1)$$

where $\mathrm{GHG}_{domestic}$ is the total GHG emissions of domestic wood products, $\mathrm{GHG}_{production}$ is the GHG emissions from production, and $\mathrm{GHG}_{transportation,truck}$ is the GHG emissions from domestic transportation by truck.

The overall GHG emissions for the imported materials can

be described by Eq. (2) as below.

$$\mathrm{GHG}_{imported} = \mathrm{GHG}_{production} + \sum_{i=1}^{3} \mathrm{GHG}_{transportation,i} \quad (2)$$

where $\mathrm{GHG}_{imported}$ is the total GHG emissions of imported material, $\mathrm{GHG}_{production}$ is the GHG emissions from production, and $\mathrm{GHG}_{transportation,i}$ is the GHG emissions from transportation, with index *i*=1, 2, 3 indicating domestic transportation (*i*=1), overseas transportation by truck (*i*=2), and overseas transportation by shipment (*i*=3).

The substitution of imported products is functional based. For example, domestic wood chips are employed to match the total theoretical maximum potential energy provided by imported fuel materials, and domestic biochemicals can substitute their imported fossil-based alternatives in transportation.

3. Results and discussion

The simulation of long-term carbon balance in forest and forestry management has demonstrated that a continuous active forestry management strategy would result in an overall decrease in carbon fixation effect in the forest. This is due to efforts to adjust the forest age class distribution, where mature trees are harvested, thereby reducing the presence of trees with high carbon sequestration capacity.

The changes in GHG emissions that result from substituting imported wood products by their domestic alternatives are calculated by accounting for the avoided emissions resulting from the use of domestic wood instead of imported wood. We use composite curves, similar to attainable region graphs, to represent the avoided emissions,[4] considering the constraints of self-sufficiency rates and the availability of woody biomass.

Our results revealed that the additional woody biomass from forest and forestry management will make up for the reduced carbon sequestration effect by extensively substituting imported resources. The substitution of both woody construction materials and woody biomass co-firing feedstock can contribute to GHG emission reduction significantly, as switching to local sourcing can avoid long-distance transport.

Our results indicated that forestry management does not necessarily lead to improved carbon fixation in the forest, nor does it always enhance the overall reduction of GHG emissions, as forestry activities themselves also contribute to GHG emissions. Therefore, the overall contribution to GHG reduction is limited when considering only the supply side of wood resources. As such, it is essential to integrate both the supply and downstream utilization of wood resources to clarify the environmental benefits of the forestry management strategy through a more comprehensive approach.

4. Conclusion

Simulating the long-term carbon balance and the avoided emissions from substituting imported wood products with domestic wood resources enables the clarification of the environmental benefits of promoting utilization of domestic wood resources throughout the full forestry value chain. Our study can provide insights on the selection of pathways at forest management and forest resource utilization aiming at maximizing carbon mitigation in the forestry sector, which would support the policymakers and relevant industry stakeholders for a more comprehensive forestry management and biomass application planning in Japan in the future.

Acknowledgement

This work was supported by JST SPRING, Grant Number JPMJSP2108. The activities of the Presidential Endowed Chair for “Platinum Society” at the University of Tokyo are supported by Mitsui Fudosan Corporation, Sekisui House, Ltd., East Japan Railway Company, and Toyota Tsusho Corporation.

References

1) Forestry Agency, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Japan: “Annual Report on Forest and Forestry in Japan, Fiscal Year 2022 (Summary),” (2022), p10.
2) Oosawa, K. *et al.*, Forestry and Wood Industry, in "Energy Technology Roadmaps of Japan", ISBN13: 9784431559498 (2016)
3) Corradini, L. *et al.*, Simulation-based design of regional biomass thermochemical conversion system for improved environmental and socio-economic performance, Comput. Aided Chem. Eng., **52**, 2361-2366, (2023)
4) Chen, I.-C., Fukushima, Y., Kikuchi, Y., & Hirao, M.: *Int. J. LCA,* **17**(2), (2012), pp.119–125.

死亡率を考慮した畜肉生産の資源消費分析

Resource consumption analysis of meat production considering mortality rate

○粂川遥海*[1,3]，光斎翔貴[1,3]，柏倉俊介[1,3]，山末英嗣[1,3]，松八重一代[2]，林健太郎[3]
Harumi Kumekawa, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue，Kazuyo Matsubae , Kentaro Hayashi
1) 立命館大学,2)東北大学,3)総合地球環境学研究所
* rm0201fe@ed.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

世界的な人口増加傾向に伴って，食料需要も増加していくことが想定される．増加する食料需要を満たすために，食資源環境や資源の観点から効率的に生産する必要がある．そのため，これまでの食料生産に関する LCA での研究において肉や魚といった食材に関する分析が行われてきた．

本研究では既存研究での食材に関わる LCA に生産おける問題点として，食材によって分析範囲が異なる点に注目した．農場ごとの収量から分析する野菜類と異なり，豚や牛といった畜産類は動物単位での資源負荷分析のみ注目しており，農場ごとの飼育過程で発生する病気や事故による動物の死亡の影響まで考慮に含んだ分析は，あまり多くは見られない．その要因として，畜産類は野菜類と異なり，移牧など農場単位での評価が困難であることが一つの要因であり，現状では死去した家畜類の影響は無視されていると考えられる．特に死去した動物に与えられた飼料などの資源の影響は注目されてこなかった．

そこで本研究では，野菜類での収量と同様に，死亡した動物に与えた飼料まで統合し，食料生産段階における資源負荷を分析することを目的とする．

2. 研究手法

2.1 関与物質総量（TMR）

本研究では主に注目されてきた地球温暖化係数 GWP の分析に加えて，食料生産過程での資源負荷を定量化する上で資源負荷を示す指標の一つである関与物質総量（TMR, Total Material Requirement）を用いた．TMR とは，製品やサービスを生産するために必要となる直接・間接的な物質投入量に加えて隠れたフローも考慮に入れ，採掘活動量として評価することができる指標である．ここで重さをはじめとした機能単位あたりの TMR を TMR 係数と表現する．投入資源の TMR 係数と重量をそれぞれM_xと Z_x，製品の TMR 係数と重量をそれぞれ M_yとZ_yとすると以下の式（1）が成り立つ[1]．

$$M_y = \frac{\sum(M_x \times Z_x)}{Z_y} + 1 \qquad (1)$$

2.2 死亡率を統合した TMR 推計

死亡率の統合に際し，山末らが[2] 換算した食材 y の TMR 係数M_y[kg-TMR/kg]に死亡した動物に与えられた資源の統合を行う．死亡した動物に与えられた総資源の TMR 係数と使用量をそれぞれS_x[kg-TMR/kg, kg-TMR/kWh]，K_x [kg,kWh]，実際に出荷された食材R_y[kg]とすると死去の影響を統合した食材の TMR 係数D_y[kg-TMR/kg]を以下の式（2）のように定めた．

$$D_y = \frac{\sum(S_x \times K_x)}{R_y} + M_y \qquad (2)$$

月齢別の死亡数が確認できた畜産動物においては死亡時の年齢までを考慮に含め，分析を行った．

また，本研究では比較対象として死亡した畜産動物の温室効果ガス排出係数 GWP への影響も分析した．

2.3 評価対象

本研究で評価対象とする畜産食材は食用肉牛[3-4], 肉豚[5]，ブロイラー[6]とするまた，肉用牛は飼育頭数，死去頭数の影響が大きいため交雑種，黒毛和種，褐毛和種に分類し，死亡した畜産動物に与えられた TMR を推定した．また，農場単位での規格外野菜などの影響から廃棄された野菜への投入資源量を推定し[7]，廃棄された野菜への TMR と野菜の TMR 係数を比較した．

3 結果

棄率を含んだ野菜の TMR 係数を図１に示す．野菜類は農場単位で収量から評価をされている．図１の赤で示された指標が廃棄された野菜に投入された資源消費量である．図１の結果から，特にナスやきゅうりといった野菜類においても廃棄された資源を無視してしまうと野菜を生産するごとに資源負荷量の推定値に差が生まれてしまうことがわかる．緑で示した生産過程での肥料や燃料の投入量が大きな野菜類が赤で示した廃棄された野菜類に対して多くの資源を投入していることがわかる．しかし，生産過程における資源の使用量が近い数値であっても，気温などの要因から夏季に生産される野菜類は廃棄野菜に投入される資源が多いことがわかる．この結果から，食材の生産過程だけでなく，生産環境や状況によって起こる廃棄率の違いについて考慮に含めることが必要だと考えられる．

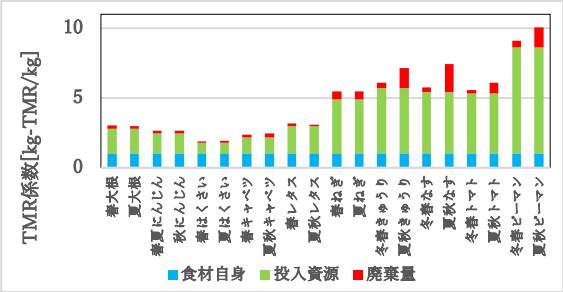


図1　野菜の廃棄率を考慮した TMR 係数

死亡率の影響を含んだ畜産食材の TMR 係数，GWP を図２に示す．図における赤で示した数値が死亡した畜産類への投入量分である．図２から，TMR，GWP ともに死亡した動物に与えられた資源を統合するとわずかながらに増加することがわかった．TMR において，黒毛和種など投入が多い動物などが死亡した動物への投入資源負荷量も比較的大きな数値を示した．対して，GWP は投入された資源量だけでなく，豚のように死亡率が大きな動物もわずかながらに大きな数値を示すことが確認できる．

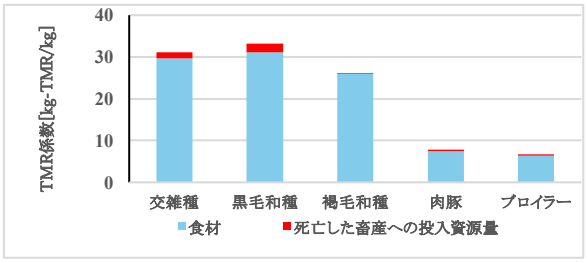


図 2　畜産の死亡率を考慮した TMR 係数

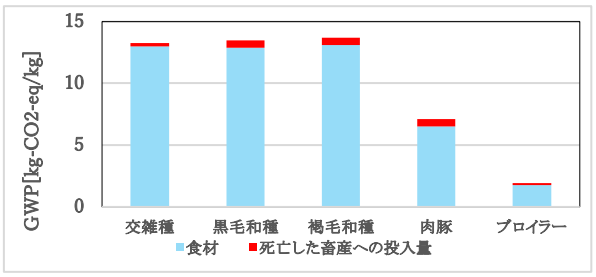


図 3　畜産の死亡率を考慮した GWP

4 考察

図 4 は図 2 の結果をふまえ，牛肉，豚肉，ブロイラーの年間生産量から死亡した肉に与えられた年間資源消費量である [8]．図 2 の結果から，死亡した畜産動物に与えられた資源の影響は青で示した各畜産動物の生産過程における飼料投入や燃料消費などと比較すると小さな影響である．しかし，図４の結果から，年間の生産数に対して，数万トンを超える資源が死亡した畜産動物に与えられることがわかる．交雑種であればおよそ 9000t を超える精肉を生産できるだけの資源が廃棄されていることがわかる．この結果から，効率的な食料生産が求められる現状において，死亡した畜産動物に対して与えられた資源は無視できない要因であることが考察できる．

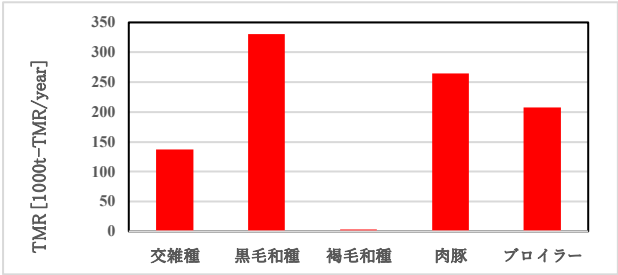


図 4 死亡した畜産動物に与えられた年間資源負荷量

5　まとめと今後の展望

本研究では，TMR を用いて死亡した畜産動物を中心に分析を行った．その結果，牛を中心に死亡した畜産動物に与えられた飼料による資源負荷量は食材生産過程において無視できない要因であることが確認できた．

今後は畜産動物の死体の処理に必要な資源など，処理時に生じる影響も統合していくことを目的とする．

6　引用文献

1) Eiji YAMASUE， Shoki KOSAI and Shunsuke KASHIWAKURA,” Indicators for Land Disturbance Evaluation: on the Total Material Requirement “Journal of Life Cycle Assessment, Japan , Vol.18 No.4 October 2022
2) 山末英嗣，光斎翔貴，マクレランベンジャミン，松八重一代: 日本 LCA 学会誌 14 (2) ，(2018)，pp146–157
3) 家畜改良センター, “牛の個体識別情報検策サービス”（オンライン），入手先＜https://www.id.nlbc.go.jp/top.html?guid=on＞，(参照 2024-10)
4) 木村信熙，“和牛４品種生産と経営の動向”，畜産技術 2017 年１月号
5) 小原愛, “日本のブロイラー生産における福祉的飼育法の提案”，(2015)，東北大学大学院農学研究科博士論文
6) 日本養豚協会，”基礎調査全国集計結果”,(平成 21 年度)，(参照 2024-12)
7) 政府統計の総合窓口(e-stat)，“作物統計調査”，(2023) ，(参照 2024-12)
8) 肉用牛・食肉政策の現状と課題の整理，入手先＜https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/tikusan/attach/pdf/241023-20.pdf＞（参照 2024-08）

低 GWP・可燃性代替冷媒を対象とした環境影響・火災事故リスク評価

Environmental Impact and Fire Accident Risk Assessment for Lower GWP and Flammable Alternative Refrigerant

○安藤伊吹*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Ando Ibuki, Itsubo Norihiro
1) 早稲田大学
* ibuki.33585@asagi.waseda.jp

1. 研究目的

地球温暖化に伴い、冷凍機や空調機の世界的な需要の増加が見込まれており、これらの環境負荷低減に向けて、機器の高効率化による消費電力の削減とともに、冷媒の大気放出による地球温暖化影響の対策強化が求められている。冷媒に関しては HFC 系冷媒の生産量・消費量の段階的な削減に関するモントリオール議定書キガリ改正が 2016 年に採択され、より温暖化影響の小さい冷媒の選定と移行といった対策が国際的に進められている。

家庭用空調機用途については、現行の R32 冷媒を代替可能な実用的な次世代冷媒はまだ見出されていないが、特に欧州において、GWP が低いことと、フッ素系冷媒を避ける観点から、プロパン（R290）を候補冷媒として推す動きが加速している。プロパンの大気放出時の温暖化影響はほぼゼロであるが、強燃性冷媒に分類されるため、温暖化影響と安全性はトレードオフの関係にある。現在の家庭用空調機に利用される冷媒の環境、安全性の観点から見た推移を図 1 に整理する。

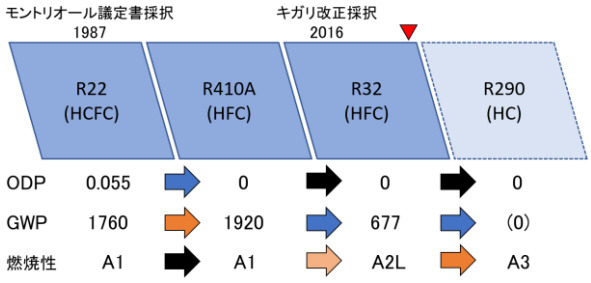


図 1 日本の家庭用エアコンにおける冷媒移行

また栗山[1)]は家庭用冷蔵庫を対象に、コンジョイント分析を用いて温暖化対策と安全性の社会的効果を評価しており、両者がトレードオフの関係にあるときは温暖化改善の社会的効果よりも事故による損害の方が上回る可能性が高いと結論づけている。

本研究では家庭用空調機の機器ライフサイクルにおける環境影響評価を行い、その結果と火災事故リスクに関する情報を提供しアンケート調査を行うことで、可燃性冷媒を導入した製品の安全対策の検討に貢献することを目的とする。

2. 環境影響評価

2.1 研究方法

本研究では冷房能力 2.8kW 家庭用空調機 1 台を算定対象とした LCA を行う。家庭用空調機のライフサイクルのうち、「素材・部品製造」「製品製造」「流通」「使用」「廃棄・リサイクル」をシステム境界に含める。新冷媒を導入した機器のデータは公開されていないため、従来の冷媒(R32)を使用した家庭用空調機のデータを、性能係数を考慮した調整により、冷媒を R290 に変更した際の環境影響をライフサイクルの視点から評価する。評価対象の主な構成について表 1 に示す。

表 1　評価対象の構成

ライフステージ	項目	R32 機器	R290 機器
素材・部品製造	冷媒	R32 (0.95kg)	R290 (0.50kg)
	冷媒漏出感知センサ	無し	有り
	配管	4 分管	5 分管
	主要機器 (熱交換器・圧縮機)	同一	
使用	使用年数	13 年	
	冷媒漏洩率	2%/年	
	消費電力	同一	
廃棄・リサイクル	冷媒処理	適正処理 (破壊)	大気放出
	冷媒回収率	40%	

R290 に変更した際の変更点について、本研究では安全装置と室内・室外連絡配管経を考慮し、熱交換器や圧縮機などその他の部分は同一とした。また、消費電力についても、冷媒の物性値から R290 は性能が低下し消費電力が増加すると考えられるが、製品設計を想定した定量的評価が現時点で困難であったため、本研究では同一としている。

2.2 結果

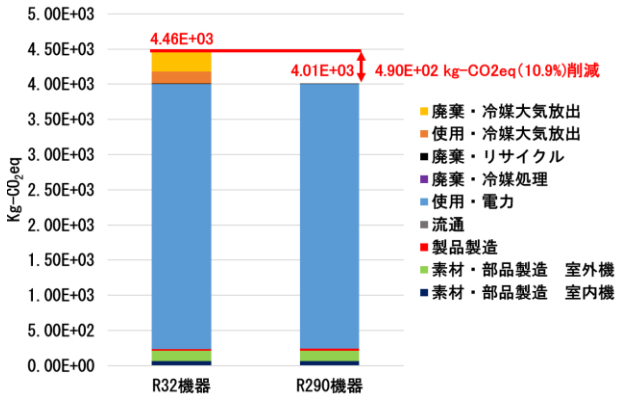


図 2 家庭用空調機 1 台の LC-GHG 排出量

GHG 排出量の 85%~95%を消費電力が占めており、R32 機器と R290 機器の GHG 排出量の大きな差異は冷媒の大気放出による影響である。しかし、本算定では「R290 の性能特性」と「冷媒影響低減対策効果」を考慮できていないため、R290 機器の消費電力と冷媒回収率の影響を把握するためにパラメトリックスタディを行う。

2.3 考察

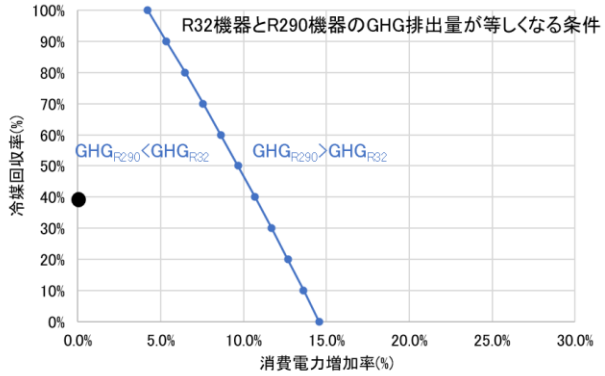


図 3 消費電力増加率と冷媒回収率の PS

パラメトリックスタディを行った結果、R290 機器の消費電力が 10.7%増加することで、GHG 排出量の大小が逆転することがわかった。また、消費電力増加が 10%の場合、冷媒回収率が 10%向上することでも GHG 排出量の大小が逆転することがわかった。R290 機器の性能は製品設計に依存し、それよって製品の大きさやコスト、資源利用量なども変化するため、今後はより製品化された時と近い条件での算定を検討して環境影響評価を行う。

3. コンジョイント分析

可燃性冷媒を導入した空調機の安全性評価について、火災発生確率や火災発生時の被害規模などについて様々な検討が行われている。本研究では、それらの情報と環境経済学の知見を用いて、コンジョイント分析を行うことを検討する。栗山[1)]によるとコンジョイント分析では他属性の評価対象を属性単位で評価することが可能になる。環境影響と火災リスクという異なる属性について、限界支払意思額を算出することで消費者がそれぞれのリスクに対してどれだけの危機感を持っているのか定量的に評価し、安全に導入するためにどれだけのリスクを削減するべきかを示すことが可能になる。分析を行う際に設定した属性と水準について表 2 に示す。

表 2　属性および水準一覧

属性	水準 1	水準 2	水準 3	水準 4
価格	10 万円	15 万円	20 万円	25 万円
対応畳数（冷房能力）	6 畳（2.2kW）	8 畳（2.5kW）	10 畳（2.8kW）	12 畳（3.6kW）
電気料金（kWh/月）	1200 円/月（40kWh/月）	1350 円/月（45kWh/月）	1500 円/月（50kWh/月）	1650 円/月（55kWh/月）
温暖化	120%	100%	80%	60%
危険性（火災発生件数）	100 台/年	10 台/年	1 台/年	

4. 結論・今後の展望

環境影響評価では、可燃性冷媒にすることで冷媒の大気放出による温暖化が削減されるが、冷媒性能特性や冷媒影響低減対策効果を検討すると、削減幅は小さくなることが考察された。また栗山[1)]では、温暖化対策と安全性の社会的効果がトレードオフの関係にある時は、温暖化改善の社会的効果よりも事故による損害の方が上回る可能性が高いと結論づけられている。

今後の展望として、コンジョイント分析を行うことで、消費者の環境意識の改善や対象機器が変わったことによる変化を考慮した結果を示し、安全対策の検討に貢献する。

5. 引用文献

1)　栗山浩一: “コンジョイント分析による地球温暖化と安全性の経済評価”, (2005),　The Waseda journal of political science and economics, 358, p.60-82

社会学理論を基盤としたライフサイクル持続可能性評価(LCSA)に向けた検討 ― 文理融合研究の試み：バイオエコノミーを事例として ―

A Consideration toward the Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) based on Sociological Theory: an Attempt at the Humanities and Sciences-Integrated Research taking Bioeconomy as a Case

○木村元*[1)]
Hajime Kimura
1) 桜美林大学 リベラルアーツ学群 環境学専攻
* kimura_h@obirin.ac.jp

1. はじめに

環境面のみならず社会面や経済面も含めた総合的な影響評価をおこなう LCSA（ライフサイクル持続可能性評価）の機運が高まっている [1), 2)]。これまでの日本 LCA 学会誌における LCSA に関連した議論では，社会学(者)の LCSA への貢献が期待されているものの [3), 4)]，社会学理論を基盤とした LCSA の議論は（管見の限り）行われていない。本研究は，社会学 [5)]，LCA [6)]，バイオエコノミー [7)] の各分野において研究実績をもつ著者が，LCSA への貢献を目指して推進するものである。

2. 研究目的

LCSA の原則を体系的に論じた文書『Principles for the application of life cycle sustainability assessment』[8)]における結論部分に述べられた今後の課題は，主に，環境・経済・社会の３つの次元のあいだの相互関係の扱いや，個々の評価手法（LCA，LCC，S-LCA）の統合にある。本研究は，このような今後の課題への対応として１つの選択肢を提供することを目指す。具体的には，当該文献でも提案される学際的なアプローチを用いた，統合性を重視した LCSA 手法の構築を研究目的とする。

3. 基本的な考え方

上述の課題の根幹には，従来の LCSA の枠組みが基盤とする持続可能性のモデルがある。環境・経済・社会の３本柱で表現されることの多い，この代表的な持続可能性のモデルには，実のところ，環境・経済・社会のあいだの相互関係を記述する理論が備わっていないことが指摘されている [9)]。この課題に対応するための鍵となるアプローチの１つは，環境・経済・社会のあいだの相互関係を記述する社会（学）理論の基礎の上に，LCSA 手法を構築することにあると考えられる。なお，著者は最近，２つの代表的な社会学理論に基づいて，環境・経済・社会のあいだの相互関係を記述する統合的な理論を構築した [5)]。この社会学理論は，気候変動，生物多様性の損失，その ESG 投資との関連等現代的課題をめぐるダイナミクスの分析を可能とする。

4. 「バイオエコノミー」を事例として

バイオエコノミーは，バイオマス（生物資源）やバイオ技術を活用した産業群の拡がりや経済活動の全般を指す包括的な概念である。各国政府は，SDGs に象徴される社会課題解決を志向した産業へと転換すべく，そのビジョンとしてバイオエコノミー戦略を策定している。しかし，同戦略の推進に伴う負の影響，例えば，バイオ由来製品の生産に必要な生物資源の乱獲による生物多様性への影響なども同時に懸念されている [2), 7)]。加えて，経済成長を重視する同戦略の限界を踏まえ，プラネタリー・バウンダリーなどの制約下での社会的ニーズの充足を重視する代替案も提案されている [10)]。このように，資源や技術の活用のあり方だけでなく，社会構造のあり方も左右する要素を伴いうる同戦略に関し，適切な意思決定に貢献する LCSA が期待される。

引用文献

1) Ferreira V., Fabregat-Aibar L., Pié L., Terceño A.: Environ. Impact Assess. Rev. 96, (2022), 106842
2) 木村元：富山大学紀要，5，（2024），pp.20-35
3) 青柳みどり : 日本 LCA 学会誌, 8(3),（2012）, p.243, pp.258-264
4) 伊坪徳宏 : 日本 LCA 学会誌，8(2),（2012），pp.161-169
5) 木村元 : 環境社会学研究，28,（2022），pp.122-139
6) 木村元, 渡邉絵里子, 久保利晃, 内田裕之, 河西亮, 反町俊哉, 増本隆夫, 坪山良夫, 伊坪徳宏, 沖大幹：水利科学，340(58, 5),（2014），pp.74-88
7) 木村元, 加藤都「第２章第１節 勃興するバイオエコノミー」, 山本一彦監修 “バイオものづくりへの挑戦ーバイオファウンドリの成功戦略”, 中央経済社，東京,（2022），pp.8-19
8) Valdivia S. et al.: Int. J. LCA, 26, (2021), pp.1900-1905
9) Purvis B. et al.: Sustain. Sci., 14, (2019), pp. 681–69
10) Giuntoli J. et al.: “Exploring new visions for a sustainable bioeconomy”, (2023), EU JRC132650

気候変動による陸域生物種の絶滅リスクマップの作成

Creating extinction risk map of terrestrial ecosystems due to climate change

○橋本瑠李*[1)]、-平田晶子[2)]、-大橋春香[2)]、-湯 龍龍[3)]、-劉 潤楹[1)]、-伊坪徳宏[1)]
Ruri Hashimoto Akiko Hirata Haruka Ohashi Longlong Tang Liu Runya Norihiro Itsubo
1) 早稲田大学
2) 国立研究開発法人 森林研究・整備機構　森林総合研究所
3) 国立研究開発法人　農業・食品産業技術総合研究機構
* fifth10969@ruri.waseda.jp

1. はじめに

IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)[1)]によると気候変動が生物多様性に与える影響は深刻であり、現在進行している生物多様性の損失に対する迅速かつ効果的な対策を講じることが急務とされている。特に限られた地域に生息する脆弱な種や固有種に大きな影響を与えているため、気候変動と生物多様性の関係を定量的に評価し、将来の種の絶滅リスクを予測する研究が進められている。

現在、気候変動による生物多様性への影響に関する世界規模の評価が行われているが、TNFD (Taskforce on Nature-related Financial Disclosures)[2)]のガイドラインでは、より高い地域解像度での評価の必要性が求められている。しかし、LCA の手法では地域の特性を考慮した詳細な評価はまだ限られているため、グリッドレベルでの評価は重要となる。これらの評価は、特定の地域や種が気候変動リスクにどの程度さらされているかを正確に把握することが可能であるため、適切な保護戦略を策定するための基盤となる。

2. 研究目的

RCP シナリオに基づき、将来の気候変動シナリオが陸域生物種の絶滅リスクにどのように影響するかを定量的に評価し、全球レベルでグリッドごとの絶滅リスク分布からホットスポットを推定する。

3. 研究方法

3.1 現在と将来の生息域予測

各生物種の生息域分布予測データは、SDM (Species Distribution Modeling) を用いることで得る。SDM とは統計的なモデルであり、生物種の分布変化を予測するために使用されている。本研究では SDM の 1 つである MaxEnt を用いて、両生類、爬虫類、鳥類、哺乳類、植物の 5 つの生物群の全 8428 種を対象に、ベースラインと将来の生息域の変化の予測を実施した。予測年は、ベースラインが 2005 年、将来が 2040 年、2060 年、2080 年、2100 年である。また、将来予測で用いた経済シナリオは SSP3-RCP7.5 であり、GCM (Global Climate Model) は GFDL、IPSL、MRI の 3 つである。これらの予測では、各生物種の生息域モデリングにより、ベースラインと将来の正確な生息域面積を推定し、生息域の変化より絶滅リスク及び被害係数を算出することができる。

3.2 絶滅リスクの推定

種ごとの絶滅リスク (ER) [-/year] は、Tang[3)]らより各生物種が絶滅するまでの年数 (t) の逆数として定義される。t は式 (1) の通りである。

$$t_i = T \times \left\{ \frac{\ln\left(K / C_{i,baseline}\right)}{\ln\left(C_{i,future} / C_{i,baseline}\right)} \right\} \qquad (1)$$

t_i : 生物種 i が絶滅するまでの年数
T : ベースラインから将来までの年数
K : 絶滅閾値 (1 cell)
$C_{i,baseline}$: ベースラインの分布セル数
$C_{i,future}$: 将来の分布セル数

種ごとの ER を式(2)に示す。ただし R はベースラインと将来の生息域変化の割合を示す。

$$\begin{cases} ER_i = 1/t_i, R \neq 0 \\ ER_i = 0, R = 0 \end{cases} \qquad (2)$$

3.3 空間分布

各生物種の ER の空間分布を推定するために、変化した生息域のグリッドセルに割り当てることで、グリッドセルあたりの絶滅リスクを推定した。[4)]ただし、グリッドは 0.25×0.25 である。

4. 結果

ベースラインと将来の生息域変化の予測から得た結果の例として、GCM の GFDL におけるベースラインと 2100 年までの全 8428 種の生息域変化を図 1 に示す。

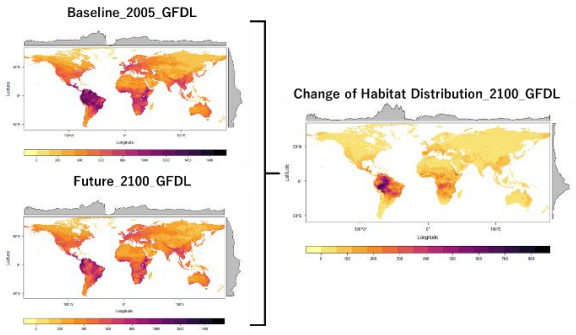


図.1. GFDL における種数の差分 (2005-2100)

図 1 より、南アメリカ大陸で生息域に大きな変化があることが分かる。他の GCM である IPSL や MRI に関しても図 1 と類似した生息域変化の傾向が見られた。

生息域変化から 2005 年から 2100 年における絶滅リスク ER の空間分布を図 2 に示す。全球における絶滅リスクの値は 4.15 であり、これは 1 年間に 8428 種中 4.15 種が絶滅するリスクがあることを示す。また、この絶滅リスクの値を E/MSY (Extinction Million Species Year) という、100 万種の生物種が存在すると仮定した時に 1 年間で何種絶滅するかを示す指標に換算すると、493 [E/MSY] であった。空間分布より、南アメリカやオセアニアにおける絶滅リスクが高い傾向にあることが分かる。

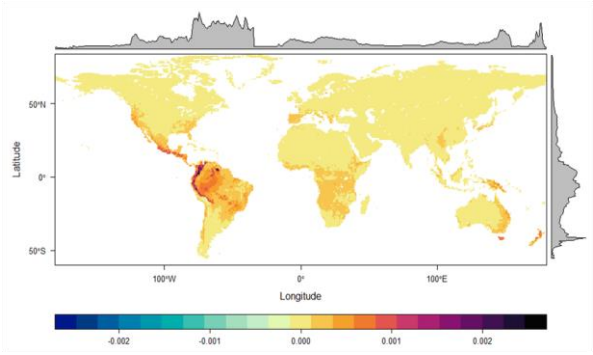


図 2. GFDL における ER の空間分布 (2005-2100)

また、3 つの GCM における 2005 年から 2100 年までの全球レベルの ER の値と EMSY の値を以下の表 1 に示す。3 つ GCM の中で値に小さい差があり、比較的 IPSL のシナリオの絶滅リスクが高い傾向にあることが分かる。

表 2. 各 GCM の ER 及び E/MSY の値

	GFDL	IPSL	MRI
ER	4.15	4.45	3.29
E/MSY	493.05	528.13	390.71

また、各生物群の全球レベルの絶滅リスクの値を表 2 に示す。鳥類の絶滅リスクが生物群の中で最も大きな値を示すことが分かる。これは鳥類の評価対象が他の生物群と比較して非常に多いことが理由と考えられる。また、ほとんどの生物種では将来の生息域が減少するためリスクが増えるが、いくつかの種では将来の生息域が増加するためリスクがマイナスになる場合があった。特に鳥類に多く、これは移動範囲が広い種であるため、将来予測される生息域も広範囲になるからであると考える。

表 2. GFDL における各生物群の ER (2005-2100)

生物群	種数	ER [species/year]
		GFDL
両生類	509	0.33
鳥類	4796	2.18
哺乳類	1137	0.54
植物	1605	0.95
爬虫類	381	0.16

5. まとめ

SSP3-RCP7.5、GCM シナリオ GFDL におけるベースライン (2005 年) と将来 (2100 年) の生息域変化から全球レベルのグリッドセルごとの絶滅リスク ER の空間分布を示した。

今後は得られた ER から被害係数の算出や評価対象の種数の拡張をしていく方針である。

6. 引用文献

1) IPBES, https://www.ipbes.net/. (2024).
2) TNFD, https://tnfd.global/, (2024).
3) Tang, L. et al., “Assessment of global warming impact on biodiversity using the extinction risk index in LCIA : a case study of Japanese plant species”, (2024).
4) Runya, L. et al., “Predicting the Global Extinction Risk for 6569 Species by Applying the Life Cycle Impact Assessment Method to the Impact of Future Land Use Changes”, Sustainability 2024, (2024).

廃プラスチックの地域別フロー構造の比較と資源化可能性の検討

Comparison of regional flows structure of waste plastics and consideration of their recycling possibility

○稲葉陸太*[1)]、東　修[2)]、小川佳代子[2)]、岡本大作[2)]、中谷　隼[3)]、松本　亨[4)]
Rokuta Inaba, Osamu Higashi, Kayoko Ogawa, Daisaku Okamoto, Jun Nakatani, Toru Matsumoto
1) 国立環境研究所, 2) 株式会社エックス都市研究所, 3) 東京大学, 4) 北九州市立大学
* inaba.rokuta@nies.fo.jp

1. はじめに

廃プラスチック（以下「廃プラ」）の再生原料としての需要は今後ますます増加することが予想され、これまで再資源化されていないポテンシャル量を把握するために物質フロー分析が必要である。ここで、廃プラフローの構造には地域差があると考えられるが、既存研究の対象は国全体あるいは特定地域が大半であった。

このような背景から、これまで著者らは、廃プラの都道府県別の地域内の詳細フローや地域間の移動の構造について分析してきた[1,2)]。本研究では、産業廃棄物系の廃プラ（以下「産廃プラ」）の地域内外にわたる詳細フローを都道府県別に推計する。それに基づき、地域毎のフロー構造を比較し、最終処分等に仕向けられている廃プラの資源化可能性についても考察する。

2. 手法

本研究では、産廃プラについては環境省や都道府県が公表している産廃実態調査や、活動量指標に関する統計データ等を収集・整理し、それに基づき地域内外の管理フローを推計した。都道府県毎に各種管理プロセスの名称やデータ上の順序が異なる場合、名称や順序を統一させた。その上で、図 1 に示すような廃プラスチックのフローの構造を地域間で比較し、その特徴や傾向を把握した。具体的には、処理・処分方法や最終処分の内訳に着目して地域間の比較を行った。

3. 結果

東北および関東の各地域における産廃プラの処理・処分方法の内訳を各々図 2 と図 3 に示す。東北において、最終処分割合は宮城で最大、減量化割合は青森で最大、マテリアルリサイクル（MR）はいずれの県でも約 20%であった。関東においては、東京の中間処理目的の移出の割合が極めて大きく、MR では栃木における割合が、エネルギー回収（ER）では栃木と埼玉において割合が大きいことが示された。また、最終処分は群馬において顕著に大きかった。圏域では、東北と比べて関東の中間処理目的の移出の割合が大きく、最終処分が小さいことが示された。

また、東北および関東の各地域における産廃プラの最終処分の内訳を各々図 4 と図 5 に示す。東北において、直接最終処分（域内の直接最終処分と、域外からの最終処分目的の移入の合計）は福島において最大であり、宮城がそれに次いだ。東北全体では、直接分が最終処分の過半を占めていた。関東においては、群馬と千葉の最終処分目的移入の割合、栃木や茨城での残さ埋立の割合が大きかった。また、埼玉、東京、神奈川はほとんどが最終処分目的の移出であった。圏域を比較すると、関東では直接埋立はほとんどなく、最終処分目的の移入が最大の割合であった。

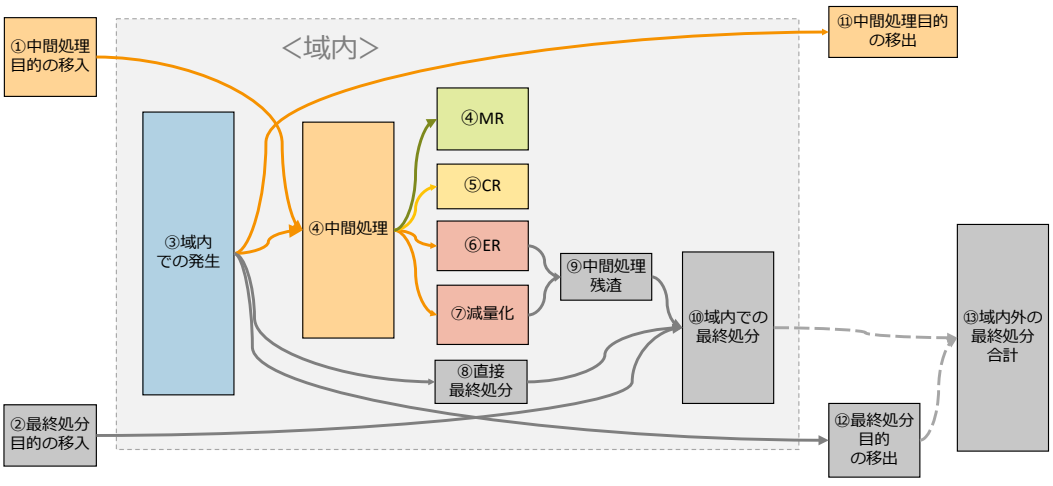


図 1　産廃プラの地域内外のフロー構造（現状）

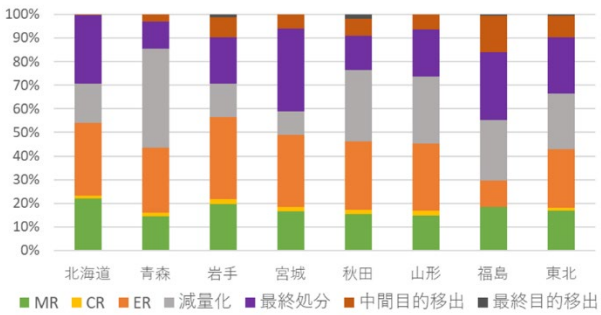


図２　処理・処分（図１の④～⑧）の内訳（東北）

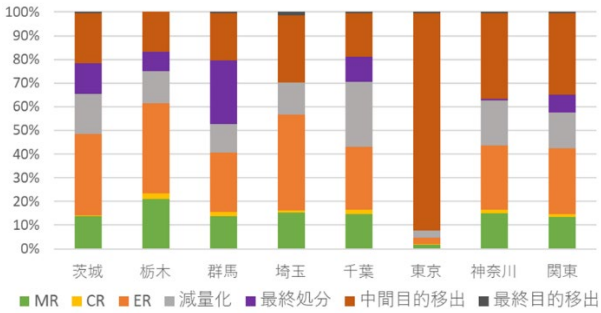


図３　処理・処分（図１の④～⑧）の内訳（関東）

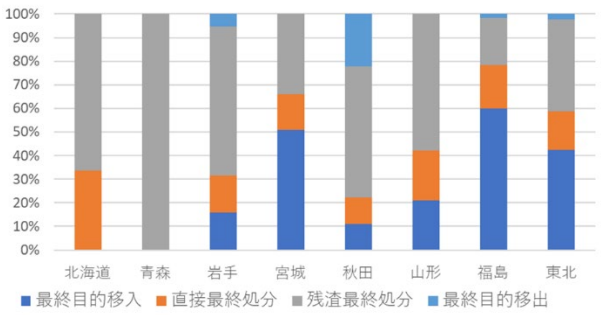


図４　最終処分（図１の②⑧⑨⑫）の内訳（東北）

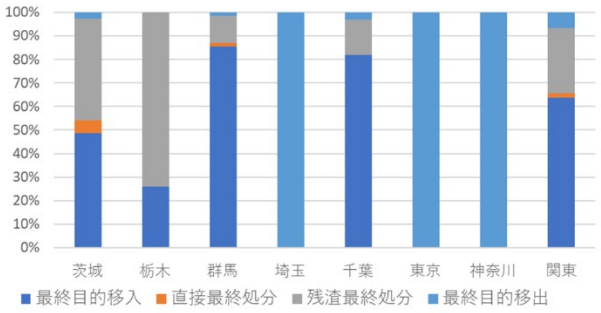


図５　最終処分（図１の②⑧⑨⑫）の内訳（関東）

4. まとめ

処理・処分方法の内訳では、関東、特に東京からの中間処理目的の移出は顕著に大きく、いずれの地域でも MR やケミカルリサイクル（CR）の割合は依然として小さく、最終処分、減容化、ER から CR や MR 等の資源化へのシフトが必要である。最終処分の内訳については、関東では群馬と千葉の最終処分目的の移入が大きく、ER や資源化へのシフトの可能性が示された。例えば、高度選別の導入により産廃プラの品質が向上するならば、より高品位のプラスチック原料に対応する処理・処分方法にシフトする対策案（図 6 参照、赤字・赤線が図 1 の現状からの変更部分）も想定できるが、その場合でもフロー構造を含む地域性を考慮する必要があり、今後の課題である。

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の研究事業「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」において実施された。

引用文献

1) Inaba R., Higashi O., Okamoto D., Nakatani J., Nemoto Y., Yamaguchi N., Fujiyama A., Kikuchi Y., Matsumoto T.: Proceedings of the 15th Biennial Conference on EcoBalance, (2022)
2) 稲葉陸太, 東修, 岡本大作, 中谷隼, 根本康男, 山口直久, 藤山淳史, 菊池康紀, 松本亨: 第 33 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同発表会講演原稿, (2022) pp.35-36

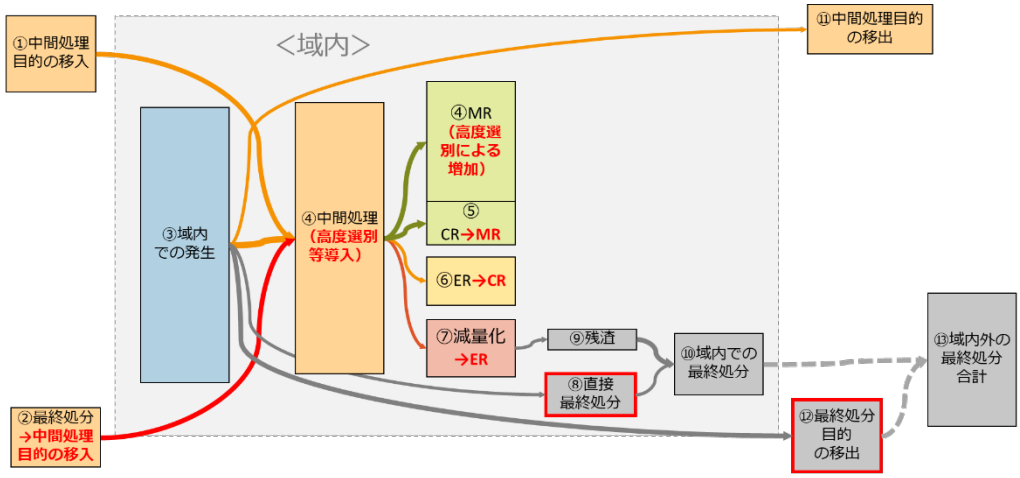


図６　産廃プラの地域内外のフロー構造（対策案）

LCA による温泉地域における有機性廃棄物の処理のシナリオ分析

Scenario Analysis of Organic Waste Treatment in Hot Spring Areas Using LCA

○中川凌汰*[1)]、吉川直樹 [1)]
Ryota Nakagawa、 Naoki Yoshikawa
1) 滋賀県立大学
* to12rnakagawa@ ec.usp.ac.jp

1.はじめに

地球温暖化の解決において、二酸化炭素排出を抑制することは必要不可欠である。また、持続可能な社会を構築していくため、様々な産業における環境負荷を軽減する必要がある。中でも近年、旅館・ホテル業界において、環境に配慮する要素が高まってきている 。ホテル・旅館から低減すべき環境負荷の一つとして旅館等の宿泊施設から排出される生ごみが挙げられる。旅館等の宿泊施設からの食品残渣等の発生量は約 441kg/日と言われており、排出量は大きい [1)]。また、宿泊施設は温泉地域に多く、全体の約 2 割である 1 万 3050 軒が温泉地域に立地している [2)]。さらに温泉地域の特性を利用し、メタン発酵の加温プロセスにおいて温泉廃熱を利用する研究 [3)]がある。本研究では、 LCA から温泉地域における生ごみの望ましい処理方法をシナリオ分析から評価する。

2.研究手法

2.1 ヒアリング調査

研究対象地域を黒川温泉とする。対象地域関係者に対して、生ごみ排出量や温泉廃湯量、現在の取り組みの成果についてのヒアリング調査を行う。

2.2 LCA 分析

本研究では、LCI データベース IDEAver3.1.0 を用いて LCA 分析を実施する。メタン発酵の影響を比較評価するために、生ごみの利用方法を、メタン発酵(温泉熱利用)、メタン発酵(温泉熱利用なし)、焼却、RDF(ごみ固形燃料)化、堆肥化方式の 5 つのシナリオに分けて評価する。影響領域としては、気候変動、オゾン層破壊、酸性化、富栄養化、資源枯渇の 5 つで評価する。

インベントリ分析を行う上で、環境負荷を詳細に分析するため IDEA を用いる。調査範囲の設定で、本研究では生ごみの処理フローについて、５つのシナリオに分けてシステム境界を設定する。メタン発酵について、田島ら [3)]のメタン発酵システムのシステム境界をもとに、温泉廃熱を利用したメタン発酵(温泉熱利用)シナリオを設定した。投入エネルギーを温泉熱とし、食品廃棄物の運搬からメタン生成、

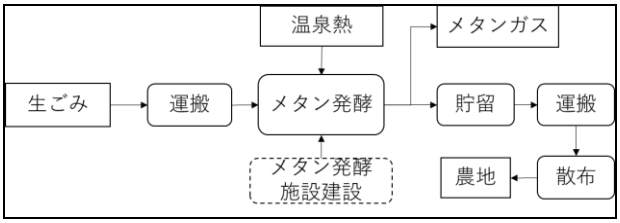


図 1 メタン発酵(温泉熱利用)のシステム境界

発酵残渣(メタン消化液)の処理までを範囲とした。メタン発酵システムの資材等の製造・運搬過程もこの範囲に含めた。メタン発酵(温泉熱利用)を図 1 に示す。他のシナリオも同様に設定した。

インベントリデータにおける収集・運搬に関しては、都市ごみ処理システムの分析・計画・評価 [4)]を参考にした。その結果をもとに IDEA を用いて環境負荷を推計し、処理フロー・熱利用については、システム境界における収集・運搬以外の環境負荷を柚山ら [5)]を参考に推計した。メタン発酵についてはメタンガス・堆肥、堆肥化については堆肥、RDF 化については売電を代替効果として考慮した。

3.結果

3.1 ヒアリング調査

生ごみ量の推計、温泉廃湯の活用方法を模索するため、黒川温泉地域 4 つの旅館、黒川温泉観光旅館協同組合において、ヒアリング調査を行った。調査の結果、1 年間の生ごみ排出量は、約 108t と推計できた。南小国町バイオマス都市構想 [6)]から廃棄物系バイオマスの家庭系生ごみが 136 t であることが分かった。これらより、機能単位を「黒川温泉地域で 1 年間に発生する有機性廃棄物の処理」とする、南小国町の家庭で発生する 136t と温泉旅館で発生する 108t の計 244t とした。また、本研究では、温泉熱を利用しているため、澤部ら [7)]を参考に必要な温泉廃湯量を求めた。温泉廃湯の温度としてはヒアリング調査より、温泉廃湯の温度 40℃前後とわかった。その結果、必要な温泉廃湯量は約 31.9L/分になった。これより、対象地域である黒川温泉の温泉廃湯量でメタン発酵(温泉熱利用)は稼働可能である。

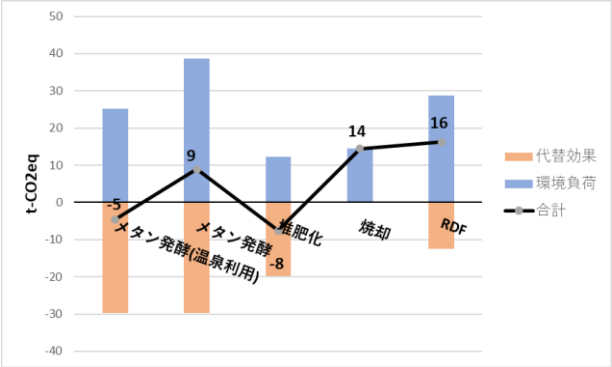


図 2　各シナリオにおける気候変動影響

3.2 各シナリオの LCA 分析

環境影響評価の気候変動影響について図 2 に示す。他のシナリオも同様に評価した。環境影響評価として、気候変動影響、富栄養化において堆肥化が最も環境負荷を抑えられることが分かった。また、オゾン層破壊、酸性化、資源枯渇についてはメタン発酵(温泉熱利用)が最も環境負荷を抑えられる結果となった。メタン発酵の温泉熱有無では、温泉熱利用のほうがどの影響領域においても環境負荷が少なくなっており、特に気候変動、資源枯渇では約 3 分の 1 まで抑えられる結果になった。

環境影響総合評価では、 4 つの保護対象に対して各インパクトカテゴリーが与える影響を被害額に換算し、統合化を行った。その結果を図 3 に示す。環境影響評価では､堆肥化が最もポテンシャルが高く、被害額が低いことが分かった。メタン発酵(温泉熱利用)も被害額が低くはなったが､堆肥化には及ばなかった。しかし、温泉熱を利用することによる効果は明確に表れ、約 3 分の 1 削減することに成功していた。焼却、RDF 化については、メタン発酵(温泉熱利用)と比較すると約 4 倍の被害額が出ていた。堆肥化が最も低くなった要因として、一つの影響領域である地球温暖化(気候変動)が低かったことが挙げられる。また、地球温暖化(気候変動)、富栄養化以外の影響領域では、メタン発酵(温泉熱利用)が最も低くなっており、富栄養化はメタン発酵と比べても差がなかったことから、気候変動を抑えることが環境への影響を削減する最も効果的な方法だと考えられた。温泉熱の有無による環境への影響については、メタン発酵における加温プロセスにおいて多くの環境負荷を排出していることが考えられた。RDF 化については、生ごみを乾燥させる過程で多くの環境負荷を排出したのが、影響していると考えられた。

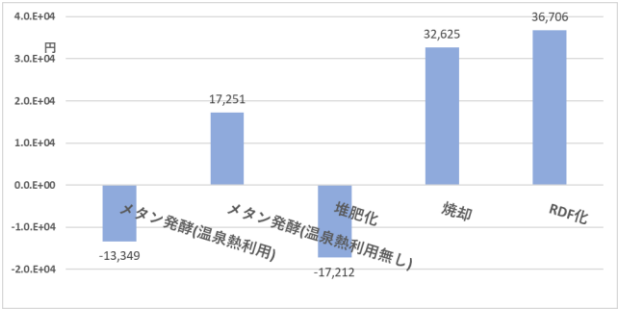


図 3 統合化結果

4.結論

ホテル・旅館業界の生ごみ処理方法として、堆肥化を提案する。堆肥化は他のシナリオに比べて、環境負荷を最も抑えられた。影響領域においても地球温暖化(気候変動)、富栄養化の領域で最も環境負荷を抑えられている。また、メタン発酵(温泉熱利用)はその他の環境領域において、最も環境負荷を抑えられていた。統合化においてもメタン発酵(温泉熱利用)は堆肥化には少し劣ってはいたが､被害額はマイナス収支になっていたため、持続可能な地域を実現していくにあたり、メタン発酵(温泉熱利用)も望ましい方法である。

今後の展望と課題として、本研究では生ごみの収集において、家庭系と事業系を分けず回収することにしていたため、本来の収集方法ではない。また、運搬・収集において処理施設までの距離をメタン発酵、堆肥化については、明確に位置を指定せずおおよその距離として算出していた。そのため近隣住民への被害や運搬・収集の効率を考慮できていなかった。その点をふまえ、ヒアリング調査や GIS 分析などを実施することで明確な推計を検討していきたい。

5.参考文献

1)上岡瞳,金谷健：ホテルにおける食品リサイクルの実施実態の把握,土木学会論文 G(環境),pp59-69(2012)
2)経済産業省：ライフサイクルアセスメント〈https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/3r_policy/policy/pdf/text_2_3_a.pdf〉2024-12-11
3)田島亮介,鈴木崇司,多田千佳：温泉熱を利用した小規模メタン発酵システム導入の環境影響評価,第 7 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集,pp.2-43 (2012)
4)松藤敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価,技報堂出版(2005)
5) 柚山義人,生村隆司,小原章彦,小林久,中村真人:バイオマス資源化技術の性能・コスト評価,農業工学研究所技報,pp.61-103(2006)
6)南小国町バイオマス産業都市構想〈https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_sangyo_toshi/attach/pdf/240229-5.pdf〉2024-12-15
7) 澤部孝一,澤田紗奈,鍋島美奈子,中尾正喜,三毛正仁,康尚義,西岡真稔：温泉と排湯を利用した熱源水ネットワークシステムの構築,学術講演論文集,10 巻(2016)

A Life Cycle Assessment of Keke Napep (Tricycles) in Nigeria

Mohammed Engha Isah*, Zhengyang Zhang, Kazuyo Matsubae
Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University,
*isah.mohammed.engha.r2@dc.tohoku.ac.jp

1. Introduction

Keke NAPEP (tricycles) are an important mode of transportation across Nigeria, plying routes where traditional public transport doesn't operate. Conventional tricycles are mostly fossil fuel-powered, posing risks to the environment and human health. In response to these concerns, electric tricycles have been promoted as alternatives. Nonetheless, there is a dearth of knowledge on the environmental impacts of conventional and electric tricycles especially on how electric tricycles can eliminate tailpipe emissions (Chernyshev et al., 2018; Weiss et al., 2015).

Life cycle assessment (LCA) as a tool for assessing the environmental impact of human activities has contributed to sustainability and sustainable development globally. LCA allows for the comparison as well as identify environmental alternatives, detect hotspots, avoid burden shifting and understand the trade-off between impact categories (Huijbregts et al., 2017). In the transportation sector, it has been applied to compare mobility alternatives (Hawkins et al., 2012).

Therefore, this study aims to assess and compare the environmental impacts of electric and internal combustion engine tricycles in Nigeria utilising primary data through collaboration with the National Automotive Design and Development Council (NADDC) and the National Agency for Science and Engineering Infrastructure (NASENI). The two motorcyles are TVS from India and a made in Nigeria electric Keke NAPEP. Life Cycle Inventory (LCI) is provided for the production, operation and end-of-life stage, offering a transparent alternative to the outdated and less detailed motorcycle datasets currently available. The results are discussed and recommendations on system improvements are given to support the decarbonization of the transport sector in Nigeria.

2. Methodology

2.1. Goal and scope definition

The goal of this study is to establish and compare the environmental impacts of an electric bettery and internal combustion tricycles in Nigeria so that system improvements and better-informed policy decisions can be made.

2.1.1. Product systems and functional unit

The two tricycles are TVS and NASENI electric Keke. They were selected based on their representative sales numbers and comparable technical specifications such as weight, engine power and driving range.

2.1.2. System boundary

The system boundaries span from cradle to grave. The motorcycle production, operation, maintenance and end-of-life are foreground processes, which use motorcycle specific data from this research. Background processes such as the material production or waste treatment processes are modeled based on external databases.

2.1.3. Life Cycle Impact Assessment methodology

For this study, the ReCiPe impact assessment method with a hierarchical approach is adopted. The choice on the method is premised on the fact that it is one most robust that is commonly applied to transportation LCAs.

3. Results

The results of the analysis will be analyzed in line with ISO 14040.

4. Conclusion

The comparative LCA will establish a detailed LCI and the environmental impacts of two common tricycles in Nigeriam demonstrating the importance of the importance of LCAs which avoids burden shifting.

References

V.V. Chernyshev, A.M. Zakharenko, S.M. Ugay, T.T. Hien, L. H. Hai, A.S. Kholodov, …, K.S. Golokhvast. Morphologic and chemical composition of particulate matter in motorcycle engine exhaust Toxicol Rep, 5 (2018), pp. 224-230, 10.1016/j.toxrep.2018.01.003

M. Weiss, P. Dekker, A. Moro, H. Scholz, M.K. Patel
On the Electrification of Road Transportation - A Review of the Environmental, Economic, and Social Performance of Electric Two-Wheelers, vol. 41, Transportation Research Part D-Transport and Environment (2015), pp. 348-366, 10.1016/j.trd.2015.09.007

M.A.J. Huijbregts, Z.J.N. Steinmann, P.M.F. Elshout, G. Stam, F. Verones, M. Vieira, M. Zijp, A. Hollander, R. van Zelm ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Int. J. Life Cycle Assess., 22 (2) (2017), pp. 138-147, 10.1007/s11367-016-1246-y

T.R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez, A.H. Strømman Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. J. Ind. Ecol., 17 (1) (2013), pp. 53-64, 10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x

第 16 回エコバランス国際会議における カーボンニュートラルおよびサーキュラーエコノミーの取組

Carbon Neutral and Circular Economy Initiatives at the 16th International Conference on EcoBalance

○中谷隼*[1)]、吉川直樹[2)]、重富陽介[3)]、齋藤優子[4)]、張 政陽[4)]、松八重一代[4)]
Jun NAKATANI, Naoki YOSHIKAWA, Yosuke SHIGETOMI, Yuko SAITO, Zhengyang ZHANG, Kazuyo MATSUBAE
1) 東京大学、2) 滋賀県立大学、3) 立命館大学、4) 東北大学
*nakatani@env.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

第 16 回エコバランス国際会議（EcoBalance 2024）が、2024 年 11 月 3 日から 7 日の期間、仙台国際センターにおいて開催された。EcoBalance 2024 では、カーボンニュートラルおよびサーキュラーエコノミーの取組として、それぞれ開催に伴う温室効果ガス（GHG）排出のカーボンオフセットと、使い捨てプラスチックの水平リサイクルを実践した。まず、会場の電力消費やバンケットなどの食材、参加者の移動および宿泊に伴う GHG 排出量を算定し、地域創生に貢献するオフセットプロジェクトを選定してクレジットを購入した。また、ケミカルリサイクルによる再生成分を含むカトラリーを昼食やバンケットで提供した後、食品容器とともに回収してケミカルリサイクルによって再生した。本発表では、これらの取組の実施方法と結果について報告する。

2. クレジットの購入によるカーボンオフセット

まず、開催に伴う GHG 排出量を算定するため、オープニングにおいて QR コードでアクセスする形で参加者にアンケートへの協力を依頼した。国内外からの参加者に対して、出発地、交通手段、宿泊数などを質問し、196 名から有効回答を回収した。アンケートの回答を集計するとともに、会場における電力消費、バンケットおよびランチにおける食事の提供のデータを収集し、インベントリデータベース IDEA[1)] の原単位を用いて GHG 排出量を算定した（**表 1**）。

表 1　EcoBalance 2024 の開催に伴う GHG 排出量の算定結果［t-CO_2 eq］

会場関係	会場の電力消費	2.1
	ランチ	6.5
	バンケット（食材）	3.3
交通・宿泊関係	参加者の国内移動	11.2
	参加者の宿泊	53.2
合計		76.4

上記の GHG 排出量のうち 28.0 t-CO_2 eq は、東北地方で創出された水田中干およびバイオ炭、森林吸収によるクレジット購入でオフセットすることとした（2025 年 2 月中に無効化処理が完了する予定）。購入したカーボンクレジットを創出したプログラムについて、地域とのつながりも含め、**図 1** のようなパネルを掲示して参加者に情報発信した。カーボンオフセットの取組については、オープニングでもスライドを用いて参加者に情報発信した。

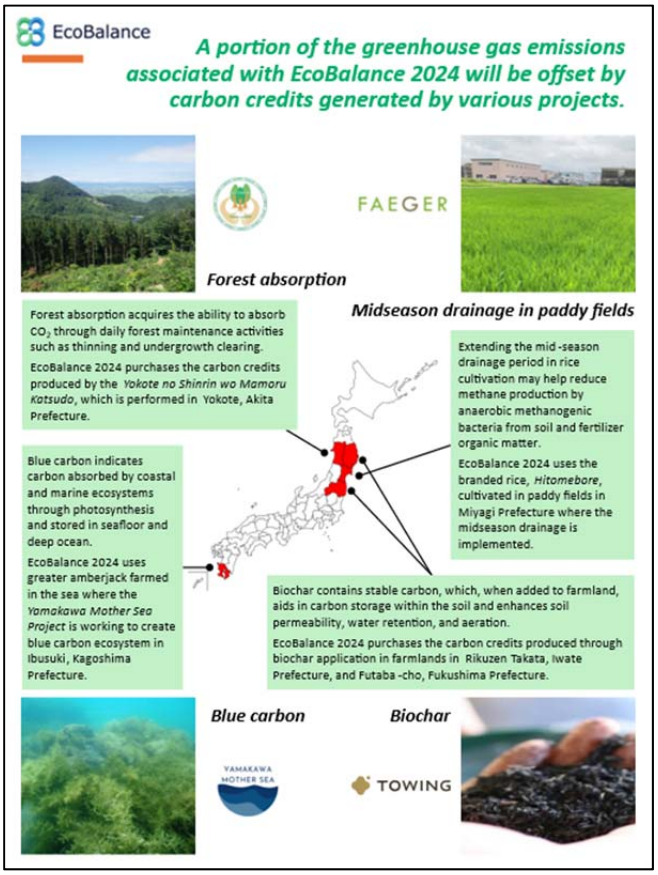


図 1　会場内で掲示されたオフセットプロジェクトの紹介

さらに、バンケットにおいて、カーボンオフセットプログラムが実施されている宮城県の水田および農地において収穫および生産された米と野菜を使用した料理を提

供した。また、ブルーカーボンのプロジェクトが実施される予定の漁場からカンパチを調達し、同様にバンケットの料理に使用した。

3. 使い捨てプラスチックの水平リサイクル

会期中のランチ（11 月 4 日～6 日）およびバンケット（5 日）では、ケミカルリサイクルによる再生成分を含有したポリスチレン（PS）製の使い捨てカトラリー（箸およびスプーン）を提供した。これらと PS 製の使い捨て食品容器（6 日のみ提供）を分別回収し、千葉県のケミカルリサイクルのプラントまで輸送された。



図 2　ランチ会場で掲示された回収対象物の案内



図 3　ランチ会場で回収された PS 製のカトラリー

回収対象のカトラリーおよび食品容器を**図 2** のようなパネルで掲示し、回収ボックスおよび**図 3** の写真のような形で分別回収した。回収ボックスはバンケット（5 日）にも設置し、PS 製のカトラリーを回収するとともに、リサイクルの取組をパネルで掲示した。

また、回収されたカトラリーや食品容器が、どのようにリサイクルされ、どのような製品にリサイクル可能か、ブースを設置して情報発信した。さらに、このケミカルリサイクルによる GHG 排出量の削減効果については、ポスター発表[2)] で定量的に示された。

回収対象のカトラリーおよび食品容器について、品目ごとに提供数と回収数を数えることで、正確な回収率を算定した（**表 2**）。その結果、いずれの品目についても非常に高い回収率を達成することができた。

表 2　PS 製の使い捨てカトラリーおよび食品容器の提供数および回収数と回収率

			提供数	回収数	未使用	未回収	回収率
11月4日	昼食	箸	1,000	759	215	26	97%
11月5日	昼食	スプーン	300	255	14	31	89%
	バンケット	箸	2,000	850	1,074	76	92%
		スプーン	700	622	0	78	89%
11月6日	昼食	箸	1,000	684	291	25	96%
		スプーン	14	13	0	1	93%
		ランチボックス	352	331	0	21	94%
		スープ丼	358	348	0	10	97%

4. おわりに

今回のような学会全体でカーボンニュートラルおよびサーキュラーエコノミーに配慮した取組を実践し、その成果を可視化する試みは、著者らが事前に調査した限り、本研究分野に関わる環境系の国内外の学会においても実施されてきていなかった。今後のサステナブルな学会運営に向けた一つの事例となることを期待したい。

謝辞　今回のカーボンニュートラルおよびサーキュラーエコノミーの取組は、観光庁による「国際会議の開催効果拡大実証」の支援を得た。また、それらの実施に当たり、それぞれ農林中央金庫、丸紅の松浦裕一郎氏および丸紅経済研究所の宮森映理子氏と栗名奈美氏には多大なる貢献をいただいた。ここに、謝意を表する。

引用文献

1) 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ：LCI データベース IDEA Ver. 3.3（2023）
2) Miyamori, E. & Kuwana, N.: Environmental impact assesment for chemical recycling of polystyrene cutlery in Sendai, *EcoBalance 2024*, P-535 (2024)

新規技術導入の社会経済的価値の分析方法の提案：CNF 技術を例に

A study for socio-economic values of introducing new technologies: A case of CNF technology

○尾下優子*[1)]、稗貫峻一 [2)]、西嶋大輔 [3)]、兼松祐一郎 [1)]、菊池康紀 [1)]
Yuko OSHITA, Shunichi HIENUKI, Daisuke NISIJIMA, Yuichiro KANEMATSU, Yasunori KIKUCHI
1) 東京大学, 2) 電力中央研究所, 3) 福島大学
* y_oshita@ifi.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

新規技術の導入により持続可能な社会を構築するためには、技術の環境性だけではなく社会経済性についても注意する必要がある。社会経済性については、技術導入に伴うサプライチェーン（SC）上流への影響、つまり産業連関分析を用いた生産波及効果が分析されることが多い [1)]。技術導入における産業構造、付加価値産出構造、雇用構造、他地域・他国との取引構造の変化を分析するためには、この分析も重要であるが、今後の技術開発においては、SC の下流に対しての影響も重要である。なぜなら、これまで化石資源かつ輸入資源であったものが、技術開発によって脱炭素資源、循環資源、国産資源に置き換えられる可能性があり、それらの価値が十分に評価されなければ、相対的に SC 上流への影響力の小さな初期材料開発の価値は過小評価になる危険性がある。一方で、SC 下流への影響の分析手法は発展途上であり、議論の必要性がある。

本研究では、自然・国産資源の活用が可能なセルロースナノファイバー（CNF）技術を例に、SC 下流への影響の評価手法の提案と分析結果を紹介する。

2. 分析手法

2.1 サプライチェーン下流への影響の分析手法

SC 上流への影響と同様に、SC 下流への影響も産業連関分析を用いて分析を行う。まず、SC 下流への影響とは何かであるが、当該製品 i を直接間接的な材料として生産される製品 j の付加価値の当該製品 i の貢献分（貢献付加価値額）として定義づける。この時、当該製品 i の投入量や投入額がどれだけ少額であっても製品 j の生産プロセス上必須の材料であれば、製品 j の付加価値は 100%当該製品 i の貢献分だと考えることも可能である。しかし、その投入が技術的に必須か否か、また技術的な重要度を判断することは困難である。一方で、直接間接的な投入がある場合は製品 j の付加価値は当該製品 i の貢献として 100%計上と設定すると、ほとんどの製品の貢献付加価値額がすべての産業の付加価値額の合計、つまり日本の GDP と同じ値となってしまい、製品間の比較や技術導入の価値を分析するためには不適当である。

そこで、材料投入額（単価×量）は、生産プロセスでの重要性を一定程度表しているという仮定に立ち、製品 j の年間付加価値額を、製品 j を 1 単位生産する際に直接間接的に投入される当該製品 i の額、つまり産業連関分析のレオンチェフ逆行列 [2)]の値に基づいた比率で按分することで、当該製品 i の製品 j に対する貢献付加価値額とする。この計算を全製品に対して行い、合計したものが、対象地域産業構造に対する当該製品 i の年間の貢献付加価値額となる。

2.2 CNF を例にした将来技術の評価分析手法

2.1 の手法を用いて将来技術を分析するためには、当該技術がどのような製品にどの程度使用されるのかを設計する必要がある。本研究では、高機能性樹脂への適用が期待されている CNF 技術を対象に、タルク強化樹脂（化石資源由来ポリプロピレン＋タルク）と代替する、CNF 強化樹脂（化石資源由来ポリエチレン＋CNF）として実証データ [3)]をもとに設計を行った。導入する製品は、乗用車とルームエアコンであり、代替量は、乗用車については安全性等を考慮した上で代替が可能なパーツの合計量 [3)]、ルームエアコンについては全樹脂量 [4)]とし、新規出荷台数の 50%が置き換わると仮定し、タルク強化樹脂と CNF 強化樹脂の場合の国産材料から作られる貢献付加価値額の比較を行った。ただし、CNF は 100%国産の木質資源から生産されると設定している。

3. 結果と考察

分析の結果、CNF 技術の導入により、国産資源由来の貢献付加価値が大幅に増加することが確認され、CNF 技術の導入は付加価値の国内循環構造の強化、資源リスクへの耐性・強靭性を高める可能性があることが確認された。また、国産資源という意味では再生資源も国産資源であり、それらとの関係性の整理も必要である。今後は、これらの結果をどのように産業界、消費者、政策と紐づけていくかを検討していく必要がある。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20009）および日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（C）21K12336）、科学技術振興機構共創の場形成支援プログラム（COI-NEXT:JPMJPF2003：「ビヨンド・"ゼロカーボン"を目指す”Co-JUNKAN”プラットフォーム」研究拠点）の成果を含んでいる。東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は、三井不動産(株)、積水ハウス(株)、東日本旅客鉄道(株)、豊田通商(株)からの寄付で活動している。

引用文献

1) 尾下ら，日本 LCA 学会誌, 15(4), 360-376, (2019).
2) Miller, R.E, and Blair, P.D., Input–output analysis: foundations and extensions, Cambridge University Press, Cambridge (2009).
3) 環境省, 京都プロセスで製造したアセチル化セルロースナノファイバー強化バイオ PE の社会実装評価成果報告書：令和2年度脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業, (2021).
4) 家電製品協会、2022 家電リサイクル年次報告書, (2023).

台湾の台西盆地における持続可能な CCTS ネットワークのライフサイクルアセスメントと実現可能性分析

Life Cycle Assessment and Feasibility Analysis of a Sustainable CCTS Network in Taiwan's Taihsi Basin

○吳采薇*[1)]、吳政岳[2)]、謝秉志[2)]、大野肇[1)]、八木原昂輝[1)]、福島康裕[1)]

Tsai-Wei Wu, Cheng-Yueh Wu, Bieng-Zih Hsieh, Hajime Ohno, Koki Yagihara, Yasuhiro Fukushima

1) 東北大学, 2) 台湾成功大学

* tsai-wei.wu.b5@tohoku.ac.jp

1. Introduction

In the International Energy Agency (IEA)'s latest Net Zero Roadmap proposed in 2023 [1)], the contribution of CCUS (Carbon capture, utilization, and storage) to emissions reductions in power generation by 2050 is expected to be around 40%. In the International Renewable Energy Agency's 1.5 ºC Scenario [2)], a scale of 3.1 $GtCO_2$/year of CCS (Carbon capture and storage) should be implemented. However, compared to North America and Europe, where CCS development was driven by enhanced oil recovery and funding from the European Commission respectively, CCS is significantly underdeveloped in the Asia Pacific region. Further study is warranted on the topic of CCS in this particular geographical area in order to foster the ultimate objective of attaining a state of net zero emissions. In this study, a network of CO_2 capture, transport and storage (CCTS) in Taiwan will be discussed. Current analysis will focus on the life cycle impact analysis (LCIA) in different scenarios of CO_2 storage.

2. Method

2.1 Scope Definition

The scope of the complete network will include CO_2 capture from energy sectors in Taiwan, CO_2 transport either via pipelines, vehicles or ships, and CO_2 injection. In this manuscript, the analysis was conducted without accounting for CO_2 capture since the scenarios setting as illustrated in 2.3 are irrelevant with CO_2 capture methodology. The saline aquifer in the coastal area to the west of Taiwan was proved to show a large potential for CO_2 storage with a full capacity of around 40 Gt of CO_2 [3)]. As it is more feasible to construct facilities for CO_2 storage closer to the seashore, a 50 km offshore storage site with a capacity of 1.5 Mt/yr [4)] was assumed in the discussion of different transportation routes. Furthermore, a Reservoir Simulation was conducted to provide potential storage site information onshore and offshore of Taichung, where the largest coal-fired power plant in Taiwan is located. Life cycle CO_2 emissions were calculated based on the data from the Reservoir Simulation as a basis for comparison in the future.

2.2 Data Collection

OpenLCA was used and connected to ecoinvent database (v3.6). Inventory data of the construction of CO_2 storage site is mostly from literature [5)] with modification according to different scenarios. EF 3.1 [6)] was used as the LCIA methodology in this study and only climate change impacts were shown in the result section.

2.3 Scenario Settings and Assumptions

2.3.1 Discussion of different transport options in possible offshore CO_2 storage supply chain

Two scenarios were included in this part: ship transport and subsea pipeline transport. The scope included onshore temporary storage, connection and pumping system, transport by either ship or pipeline, subsea injection and decommissioning. Assumptions are as follows: the depth of storage is 2660 m under seabed; fuel used in ship transport is heavy fuel oil; LNG ship in ecoinvent database was used for the ship transport case; project life is 25 years. Moreover, while electricity grid mix in Taiwan was used for both cases, electricity grid in 2030 was used as a future estimation for comparison.

2.3.2 Life Cycle CO_2 emission for CO_2 storage based on Reservoir Simulation

The Reservoir Simulation using GEM compositional simulator [7)] was conducted for two storage sites: an onshore site based on the location of demo project in Taichung coal-fired power plant, and an offshore site 9 km outwards the onshore site via pipeline transportation. It was assumed that CO_2 was injected into both sites at the same time with a project life of 20 years. The data used in this study is shown in Table 1. Electricity grid in 2030 was used in LCIA in this analysis.

3. Result and Discussion

Comparisons of climate change impact for different transport

options can be seen in Figure 1. Transition to greener energy grid will significantly reduce the climate change potential. When using the planned 2030 grid mix of electricity in Taiwan, using pipeline transport will be a greener option when the distance of offshore storage site is larger than 30 km.

Table 1. Data from Reservoir Simulation

ONSHORE SITE			
WELL	**Depth (m)**	**Injection Pressure (kPa)**	**Injection Rate (10^4 ton/yr)**
#1	2704.5	33477.9	72.8
#2	2776.9	34968.6	77.8
OFFSHORE SITE			
#1	2286.3	28427.6	56.7
#2	2358.7	29915.8	63.9

Although the results showed that climate change impact of using ship is slightly lower than using pipeline when the offshore distance is less than 30 km for whichever electricity grid, it was reported that the transportation cost of using pipelines near the seashore is extremely lower than that of using ships for transport [8]. Considering the initiation of the CCS demo project in Taichung coal-fired power plant, and the following potential expansion of the storage sites using pipelines due to less cost, life cycle CO_2 emission analysis was conducted in the scope as described in 2.3.2 based on the data of Reservoir Simulation.

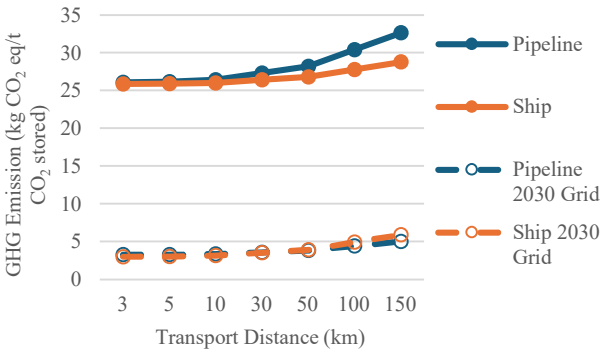


Figure 1. Climate change impact by different transport options

As shown in Table 1, the injection rates were set to be under 1 MT/yr per well, and they were different according to the injection pressure depending on the certain rock formation. With an injection rate of around 1.5 MT/yr and 1.2 MT/yr for onshore and offshore sites respectively, the climate change impact of onshore and offshore storage sites based on Reservoir Simulation is shown in Figure 2.

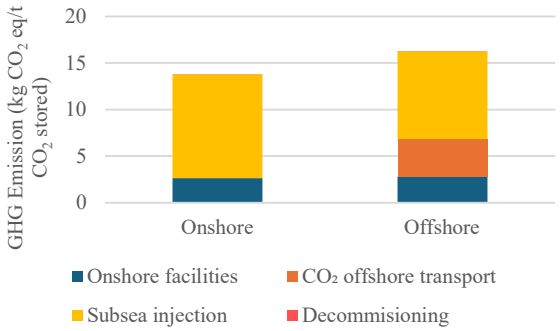


Figure 2. Climate change impact of onshore and offshore storage sites based on Reservoir Simulation

Offshore storage site leads to a 15% higher GHG emission compared to onshore storage site, apparently because of the offshore transport emissions. The advantage of offshore CO_2 storage lies in the less interference for human activities. However, when it comes to the practical implementation, the cost and potential extra environmental impacts must be taken into account as well.

4. Conclusion

This study focuses on the life cycle CO_2 emissions in different CO_2 storage scenarios. CO_2 offshore transport will definitely cause extra emissions. CCTS network considering both the cost and other environmental impacts should be properly developed in the future.

5. Reference

1) IEA: “CCUS Policies and Business Models: Building a Commercial Market.”, (2023)
2) IRENA: “World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5°C Pathway.”, (2024)
3) 林殿順 et al.: 土木水利, 50 (6), (2023), pp.79-86
4) Gentile, V. et al.: “Carbon footprint of the Northern Lights JV CO_2 transport and storage value chain.”, (2024)
5) Burger, J. et al.: Int. J. Greenhouse Gas Control, 132, (2024), pp.104039
6) The Environmental Footprint (EF) v3.1 LCIA method released by the Joint Research Centre (JRC) of the European Commission in July 2022.
7) Hsieh, B. Z. et al.: Energy Procedia, 37, (2013), pp.4698-4711
8) Geological Carbon Dioxide Storage Technology Research Association: “Practical Guidance for Geological CO_2 Storage: Phase 02 Site Selection”, (2021)

建築分野における LCA データベースの構築

～既往の論文や報告書等の公開情報を活用したインベントリデータの構築～

Construction of LCA database in the building sector

~ Construction of inventory data using publicly available information such as previous papers and reports~

○大竹舜太*[1)]、河北未来[1)]、小林謙介[1)]

Shunta Otake, Mirai Kawakita, Kensuke Kobayashi

1)　県立広島大学

*kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1.研究背景、目的

日本の CO_2 排出量において建築分野は全体の約 1/3 を占めている。そのため環境負荷削減が必要不可欠であり、LCA の実施が欠かせない。LCA 実施時の課題として、評価対象の資材数が多く作業負荷が膨大になること、連鎖するバックグラウンドデータ整備が不十分であること、投入資材の単位とバックグラウンドデータの機能単位が一致せず単位換算の作業時間がかかることなどが課題に挙げられる。こうした背景から、建築分野向けのバックグラウンドデータの充実が不可欠となる。

本研究では、建築物の LCA 実施作業の効率化のため、既報[1)]を踏まえ、主要建材等を対象に既往の研究論文、報告書等の公開情報を調査・整理し、これらからインベントリデータを作成する。それにより、建築分野の LCA データベースの充実を図り、LCA 実施時の作業負荷を軽減することを目的とした。

2.インベントリデータの作成方法

昨年度の報告[1)]で抽出した、建築物の評価において利用頻度が高い資材や環境影響が大きくなることが多い資材 18 分野などを対象に、既往文献の収集を行い、インベントリデータの抽出可能性について検討した。また、抽出可能と判断したデータをもとにインベントリデータを構築した。本研究の具体的手順を表 1 に示す。

表 1 本研究の実施手順の概要

番号	作業プロセス	作業内容
①	既往文献の収集	CiNiiにて「対象材料」と「LCA」で検索 LCAと直接関係のない文献は除外 収集文献はデータベースとして整備
②	1次スクリーニング	文献の概要を把握 →インベントリデータの記載がない文献は除外
③	2次スクリーニング	②により抽出された文献を熟読 →インベントリデータへ活用可能データを整理

はじめに、学術データベースの CiNii を用いて文献検索を行った（表 1 の①）。本研究では、既往研究結果を基にした、「建築、木材、型枠、製材、合板、集成材、CLT、鉄骨、ALC、タイル、屋根、塗料、ケイ酸カルシウム版、クロス、太陽光発電、エアコン、ダクト、コンクリート」を対象として、文献[1)]では実施していなかった 2023 年～2024 年の文献調査を行った。これに加え、新たに、バックグラウンドデータが不足している「施工、解体、廃棄」を対象として、2010 年～2024 年の文献調査を行った。

次に収集された文献を対象に 2 段階のスクリーニングを行った。一次スクリーニング（表 1 の②）では文献の中にインベントリデータに関連しそうな図表が含まれているかを確認する作業を行い、文献の概要を把握した上でデータの抽出の可否を検討した。また二次スクリーニング（表 1 の③）では一次スクリーニングで抽出された文献のうち入力データ（原材料、エネルギー）と出力データ（廃棄）の有無を確認する作業を行い、文献を熟読した上でインベントリデータの抽出できない文献を除外した。

最後にスクリーニングによって抽出された文献から、抽出したインベントリデータの妥当性を確認するためにバックグラウンドデータである IDEA に連鎖して単位換算、CO_2 排出量を算出し、論文中に記載されている CO_2 排出量と IDEA を用いて算定した結果とを比較した。

3.研究結果

3.1 データの作成対象文献の抽出

文献調査、2 段階のスクリーニングの結果、1 次スクリーニングで 111 件、2 次スクリーニングで 8 件の文献が抽出できた。そのため本年度の検討においてインベントリデータ作成の活用可能性があると判断した文献は 8 文献であった。

3.2 文献抽出によるインベントリデータ作成時の課題

(1) バックグラウンドデータへの連鎖に関する課題

本検討では、収集したプロセスデータに IDEA を連

鎖して原単位化を試みたが、その際、IDEA のどの項目に連鎖すべきか判断が難しい項目が少なくなかった。特に、大きな分類で集約された項目（例えば、普通鋼小棒、鉄骨などが含まれると思われる項目）が鋼材として掲載されているようなケースがあった。この場合、主要材料が文中から読み取れる場合はその原単位を連鎖し、不明な場合は IDEA の 4 桁（評価範囲が広い）を連鎖するなどした。

(2) 完全性が不十分な場合の課題

文献に記載されている情報のみからでは、プロセスデータの完全性が不十分と思われるケースが散見された。例えば、資材構成のみで、エネルギー投入がない場合、特定の環境負荷物質が放出されていると予想されるが、情報が掲載されていいない場合などがある。この場合は、石油等消費構造統計表をはじめとする各種の統計などの公開情報から補完することを検討した。

(3) 機能単位設定に関する課題

例えば、工業塗装に関する文献には、塗膜重量と投入資材量が記載されており、平面 1m^2 あたりを機能単位と設定しインベントリデータの作成を試みたが、文献に記載がないことから、塗膜 1 kgあたりを機能単位に設定してインベントリデータを作成した。しかし、実務において塗膜 1 kgあたりの原単位を用いるニーズは少ないと予想される。これらのことから、機能単位の単位換算などに関するデータベースの充実も課題である。

3.3 作成したインベントリデータ

上記の課題の検討を踏まえて 6 文献がデータベース化に活用可能だと判断した。今回の検討では、施工・解体に関するデータが多かった。

このほか、加えて現時点で把握している企業等のインターネット上に公開されている資料のインベントリデータ作成への活用の可否も検討し、1 資料を抽出した。さらに、廃棄物の分野の文献が少なかったため、環境報告書等 9 資料を収集した。本研究では、これらの 10 資料もインベントリデータ作成の対象とした。

以上の 6 文献と 10 資料から 28 件インベントリデータベースを作成した。これらから、一連の研究で 296 件のインベントリデータを作成した。

4. まとめ

本研究では建築分野の LCA データベースの充実を図り、LCA 実施時の作業負荷を軽減するために実建物によるインベントリデータの作成を行った。またインベントリデータの作成を行うために、建築・建材に関する文献検索を実施し、収集した文献を 2 段階のスクリーニングによって抽出し、同時にデータベース化における課題の検討を行った。その結果、6 文献と 10 資料から 28 件インベントリデータベースを作成した。その結果、一連の研究で過去に作成したインベントリデータと合わせて 296 件のインベントリデータを作成できた。

5. 参考文献

1) 河北、大野、小林：建築分野における LCA データベースの構築　～建材の利用頻度分析と既往文献を活用したインベントリデータの作成～、第 19 回日本 LCA 学会研究発表会、2024.3

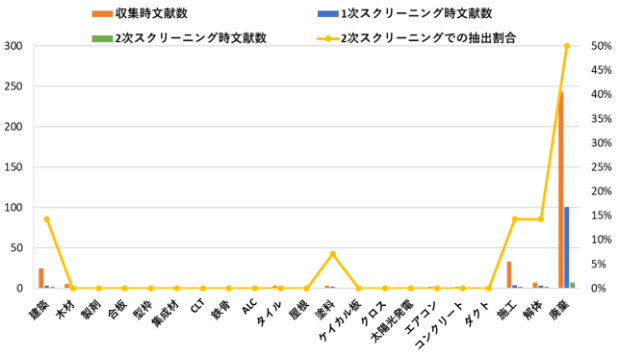


図 1 調査対象の文献数及びインベントリデータ作成に活用する文献数とその割合

表 2　作成したインベントリデータの例

検索ワード	作成したインベントリデータ
施工	機械/法面緑化工事の施工 汚泥処理/単独処理事業 MOE 汚泥処理/単独処理事業 MAFF 汚泥処理/共同処理事業汚泥受入 汚泥処理/共同処理移動式脱水車の導入
解体	精密解体/解体資材の荷役、基礎解体 ミンチ解体/建物及び基礎解体
資料	作成したインベントリデータ
環境影響評価書案 中央防波堤内側埋立地灰溶ごみ処理量 （東京二十三区清掃一部事務組合）	中防不燃ごみ処理センター 粗大ごみ粉砕処理施設 破砕ごみ処理施設 灰溶融施設
環境影響評価書案 世田谷清掃工場建替事業 （東京二十三区清掃一部事務組合）	ごみ/世田谷清掃工場
環境影響評価書 光が丘清掃工場建替事業、目黒清掃工場建替事業、太田清掃工場整備事業、杉並清掃工場建替事業 （東京二十三区清掃一部事務組合）	ごみ/光が丘清掃工場 ごみ/目黒清掃工場 ごみ/太田清掃工場　第 1 期工事完了後 ごみ/太田清掃工場　第 2 期工事完了後 ごみ/杉並清掃工場
環境影響評価書の概要 北清掃工場建替事業、（仮称）新ごみ焼却施設整備事業 （東京二十三区清掃一部事務組合）	ごみ/北清掃工場 ごみ/(仮称)新ごみ焼却施設
廃棄物処理・リサイクル事業に伴う環境影響評価書、要約書	産業廃棄物/A 工場焼却炉 産業廃棄物/B 工場焼却炉 産業廃棄物/新施設

リチウムイオン電池の資源循環に向けたリサイクル技術の包括的整理

Comprehensive review of recycling technologies for resource circulation of lithium-ion batteries

○兵法彩*[1)]、菊池康紀[2)]
Aya HEIHO, Yasunori Kikuchi
1) 東京都市大学, 2) 東京大学
* heiho@tcu.ac.jp

1. はじめに

リチウムイオン電池（LiB）は、エネルギー密度が高く、自己放電率が低く、サイクル寿命が長い等の特徴を有しており様々な製品への適用が増加している。特に、電気自動車（EV）への普及が拡大したが、リチウムやコバルトなどの希少金属の供給に関する懸念が資源問題となっている。

そのため、急速にLiBのリサイクル技術の開発が行われており、それらのライフサイクル評価も多数実施されてきている。LiBリサイクル技術は、乾式製錬、湿式製錬、ダイレクトリサイクル、バイオリーチングに大別され、それらを組み合わせたリサイクルシステムの提案も行われてきている。しかしながら、機能単位の設定や評価範囲、評価指標は研究毎に設定され、それぞれに開発・評価された技術の比較は困難な状況にある[1)]。米塚らはLiBのライフサイクル設計を目的として、将来的にとりうる多数のプロセスの組み合わせを示した「スーパーストラクチャ」を構築し、実装可能なプロセスの技術評価を可能とした[2)]。

国内外でLiBのクローズドループリサイクルに向けた技術開発が加速する一方で、現段階で社会実装に最も近い技術およびライフサイクル設計はまだ十分に行われていない。そこで本研究は、直近で公表されている資料・文献を参考に、商業・実証・ラボスケールでの各種技術開発動向を包括的に整理し、それらをマッピングしたスーパーストラクチャを作成することで、将来性LCAへの貢献を目指す。具体的には、ACCUREC社の報告書（Comparative study of Li-ion battery recycling processes）および国内で進んでいるリサイクルの取り組み事例を包括的に整理することで、それぞれのリサイクルシステムの特徴を明らかにする。

2. 研究方法

既報のデータに基づき、乾式製錬、湿式製錬、ダイレクトリサイクルの位置づけや組み合わせを整理する。国内の技術開発動向は主にグリーンイノベーション基金（NEDO）事業」の成果報告書を参考にする。電池を材料にまで再資源化し、新規の電池製造に利用するリサイクルシステムに加え、リパーパスやリユースの動向・実際の事例に関しても整理を行う。

3. おわりに

近年、循環経済（サーキュラエコノミー）の構築に向けて、車載用リチウムイオン電池（LiB）のライフサイクル管理が重要とされ、国内外でリサイクル技術開発および個々の技術のライフサイクル評価が求められている。本研究は、公表されている資料・文献を参考に、商業・実証・ラボスケールでの各種技術開発動向を包括的に整理し、社会実装可能な技術マッピングとしてのスーパーストラクチャを作成に取り組んだ。技術特性を俯瞰的に捉えることで、技術システムの位置づけが明らかとなり、ライフサイクル評価による技術間比較を行うことで、社会実装の加速に貢献することが期待される。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）（JPNP21026）の一部成果を含んでいる。東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は、三井不動産株式会社、積水ハウス株式会社、東日本旅客鉄道株式会社、豊田通商株式会社からの寄付で活動している。

引用文献

1) Ana Mariele Domingues, Ricardo Gabbay de Souza: Next Sustainability, 3, (2024), 100032
2) Tomoya Yonetsuka, Ayumi Yamaki, Aya Heiho, Yuichiro Kanematsu, Heng Yi Teah, Yasunori Kikuchi: Computer Aided Chemical Engineering, 53, (2024), 1417-1422
3) Reiner Sojka, Qiaoyan Pan, Laura Billmann, “Comparative study of Li-ion battery recycling processes”, ACCUREC Recycling GmbH, https://accurec.de/wp-content/uploads/2021/04/Accurec-Comparative-study.pdf, 参照日 2025-01-29
4) 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）“リチウムイオン電池、日本の非鉄各社が進めるリサイクルへの取り組み”, https://mric.jogmec.go.jp/reports/current/20230904/178929/, 参照日 2025-01-29

航空業界の脱炭素化に向けたSAFの導入についての検討

Firm-Level Heterogeneity in CO_2 Emissions in International Aviation: The Case of Japan

○村部 さくら*1)、津田 薫 1)、加河 茂美 1)
Sakura Murabe, Kaoru Tsuda, Shigemi Kagawa
1)九州大学
* murabe.sakura.395@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

地球温暖化対策として、世界各国で様々な分野において脱炭素化が進められている。2022年の日本の運輸部門におけるCO_2排出量は、全体の18.5%を占めており、そのうち航空部門は5%を占めている[1]。また、グローバル化に伴い、航空旅客輸送の需要は増加し続けている。特に国際線からのCO_2排出量は、世界的な航空需要の拡大を考慮すると、対策を講じなければ増加すると予想される。しかし、日本の国土交通省が推計しているCO_2排出量には、国際線からの排出量が含まれていない。そのため、航空業界における脱炭素化を推進するためには、国内線と国際線の両方からのCO_2排出量を推計することが不可欠である。本研究の目的は、本国の主要な航空会社である日本航空 (JAL)と全日本空輸 (ANA)の国際線の発着地域別の CO_2排出量を推計し、持続可能な航空燃料(Sustainable Aviation Fuel: SAF)の導入計画について、有効な政策の提案を行うことである。

2. 分析手法

2.1 JALおよびANAの国際直行便による直接CO_2排出量推計

本研究では、JALとANAが運航する国際直行便からの直接的なCO_2排出量について会社別・発着地域別に分析を行う。(1)式を用いて直接的なCO_2排出量の推計を行った。

$$q^r = ed^r f^r c^r \quad (1)$$

ここで、q^rは2023年の路線rの運行によって排出される直接 CO_2 排出量を表す。また、eはジェット燃料油の直接 CO_2 排出係数を表しており、d^rは路線cにおける片道飛行距離を表し、f^rは路線rの合計運行便数を表す。また、c^rは路線rに使用される機材の燃費を表している。国土交通省による2023年国際線就航状況[2]を基に、発着地域については「米大陸」、「アジア」、「ヨーロッパ」、「オセアニア」の4通りに分類を行った。なお、本研究では、航空機の燃料タンクは満タンであり、すべての座席が埋まっていると仮定した。

2.2 JALおよびANAの国際直行便による乗客1人当たりCO_2排出量の推計

1飛行における乗客1人あたりの直接 CO_2排出量を下式(2)によって推計した。

$$p^r = ed^r f^r c^r / s^r \quad (2)$$

ここで、p^rは2023年の路線rの乗客1人あたりCO_2排出量を表す。また、s^rは、路線rに使用される機材の座席数にJALおよびANAが公表している2023年の発着地別搭乗率[3,4]を乗じた値を表している。

3. データ

本研究では、直接CO_2排出係数のデータを国立環境研究所による環境負荷原単位データブック（2015 年版）[5]より取得する。国際線の路線、便数、使用機材は、国土交通省の 2023 年国際線就航状況[2]と JTB パブリッシングによる JTB 時刻表[6]より取得し、機材に関する情報は ANA のホームページ[7]より取得した。また、飛行距離については国際民間航空機関(International Civil Aviation Organization: ICAO) の値を使用した[8]。

4. 結果・考察

本研究で推計された 2023 年の運行便数は JAL が 44,000 便、ANA が 38,000 便であった。推計された JAL と ANA 両社の国際線における直接CO_2出量は11.4Mt-CO_2であり、その内訳は JAL が 5.69Mt-CO_2、ANA が 5.72Mt- CO_2であった。結果より、ANA は JAL より運航便数が少ないにもかかわらず、総CO_2排出量が多いという実態が明らかになった。

図1は、直接CO_2排出量と年間運行便数を、会社別・発着地域別に示している。図1より、ANAの米大陸発着便からのCO_2排出量が最も多いことがわかった。また、ANAの米大陸便は、JALの米大陸便よりも運行便数が少ないにも関わらず、CO_2排出量が多いこともわかった。これは、飛行距離が他地域と比較して長いことや、ANAが燃費の悪い大きな機材を使用していることが大きく影響していると考えられる。

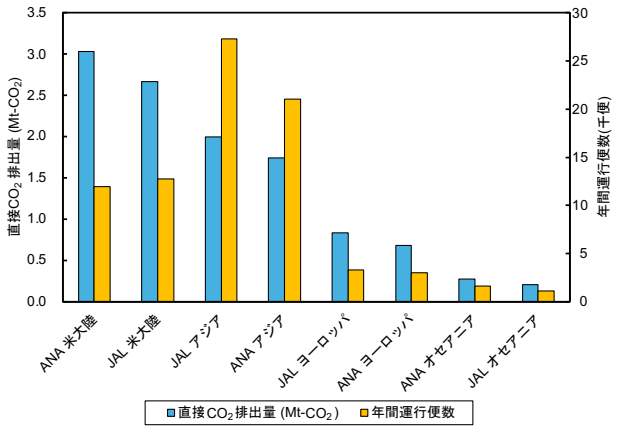


図 1. JAL・ANA の国際線からの直接 CO_2 排出量と年間運行便数

図 2 は、JAL と ANA における 1 便あたりの平均座席数と燃費を示している。図 2 より、全ての地域発着便で、座席数では ANA が JAL を上回っている。燃費においても、米大陸を除き、ANA が JAL を上回っていることがわかる。米大陸便以外では ANA が JAL よりも効率的な機体を使用している一方、米大陸便の圧倒的な燃費の悪さが、ANA の CO_2総排出量が多くなる原因となっていると考えられる。

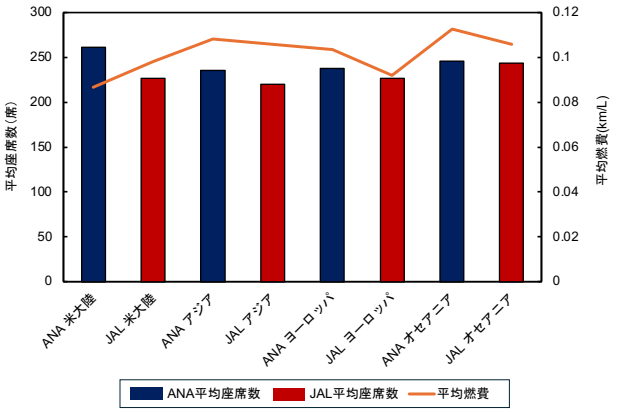


図 2. JAL・ANA の 1 便あたり平均座席数と燃費

図 3 は、1 便における乗客 1 人あたりの CO_2排出量を表している。図 3 より、JAL のヨーロッパ便が、最も 1 人あたりの CO_2排出量が多いことが読み取れる。一方で、ヨーロッパ以外の地域発着便と全路線平均は、いずれも ANA の方が多いことがわかる。これは、JAL と比較して、ANA はアジア路線の平均飛行距離が長いことと、オセアニアの搭乗率が低いことが影響していると考えられる。

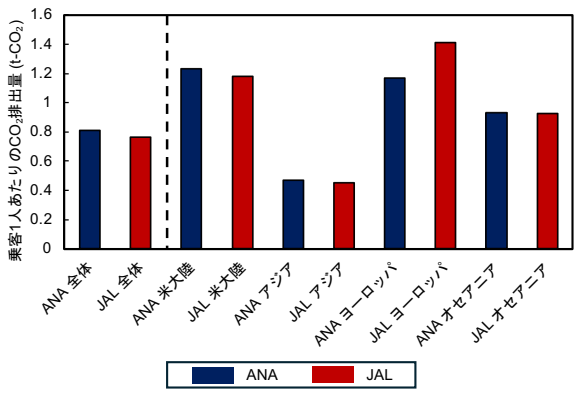


図 2. JAL・ANA の 1 便における乗客 1 人あたりの CO_2排出量

以上より、JAL および ANA の国際線からの直接的な CO_2排出量の会社や発着地域による違いがわかった。本会では、さらに詳細な分析や、間接的な CO_2排出量の推計を行い、持続可能な航空燃料（SAF）の効果的な導入計画について提案を行う予定である。

5. 引用文献

1) 国土交通省, 運輸部門における二酸化炭素排出量, <https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html >, （参照 2025-01-18）

2)国土交通省, 国際線就航状況(2023 年), <https://www.mlit.go.jp/koku/content/001627897.pdf, https://www.mlit.go.jp/koku/content/001709380.pdf >, （参照 2025-01-18）

3) 日本航空, JAL グループ国際線輸送実績 <https://press.jal.co.jp/ja/items/uploads/添付資料_JGN24008_JAL グループマンスリーレポート%282024 年 4 月%29.pdf >, （参照 2025-01-18）

4) 全日本空輸, 2023 年度月次輸送実績, 全日本空輸 HP, <https://ssl4.eir-parts.net/doc/9202/ir_material/206831/00.pdf>, （参照 2025-01-18）

5)国立環境研究所 地球環境研究センター,(2015) 3EID 産業連関表による環境負荷原単位データブック,< https://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/datafile/embodied/2015/390.html>

6) JTB パブリッシング, JTB 時刻表 2023 年 4 月号, 2023 年 11 月号 国際線航空ダイヤ

7)全日本空輸, 機種・シートマップ, <https://www.ana.co.jp/ja/jp/guide/prepare/seatmap/international/ >, （参照 2025-01-18）

8) International Civil Aviation Organization (ICAO), ICAO Carbon Emissions Calculator, ICAO HP, <https://www.icao.int/environmental-protection/Carbonoffset/Pages/default.aspx >, （参照 2025-01-18）

衛星画像および深層学習を組み合わせた全球採掘領域モニタリング

Monitoring of global mining area using satellite imagery and deep learning

○廣田琳治*[1)]、佐久間東陽[1,2)]、山野博哉[2,3)]、南齋規介[2)]、中島謙一[2,3)]
Rinji Hirota, Asahi Sakuma, Yamano Hiroya, Nansai Keisuke, Nakajima Kenichi
1) 木更津工業高等専門学校, 2) 国立環境研究所,3) 東京大学
* scc24c07@inc.kisarazu.ac.jp

1. はじめに

経済成長に伴う鉱物資源需要の増加は、今後も継続すると予測される。一方で、鉱物資源の生産および消費は、気候変動、生物多様性の損失、環境汚染等の環境問題を引き起こす[1)]。このため、これらの問題は、UNEP より提唱される「The Triple Planetary Crisis」と密接に関連しており、地球の将来を左右する重要な要素である。このような背景のもと、近年では経済成長を資源消費から切り離し、資源を循環的に活用する Circular Economy (CE) への移行が国際的に進められている[2)]。この目標の達成には鉱物資源サプライチェーン全体にわたる環境影響評価が不可欠である[1)]。

鉱物資源採掘段階における環境影響は、単位鉱物資源産出量あたりの採掘面積で表される土地改変強度に基づいて評価される[3,4)]。一般的に採掘面積の推定は 2 時期の衛星画像を用いた目視判読によって行われるが[5)]、この方法は高精度である一方、多大な労力を要する。

このため、画像解析技術を適用した自動的な採掘領域推定法の開発が進められている。しかしながら、既往研究では適用に鉱物種や土地被覆帯による制約を抱えており[4,6)]、全球規模での採掘領域推定法の開発には未だ至っていない。

以上の背景を踏まえ、本研究では、全球規模での採掘領域推定手法の開発に向けた第一段階として、衛星画像と深層学習技術を組み合わせることで、全球採掘領域推定における課題を明らかにすることを目的とする。本研究で得られた知見は、鉱物資源採掘段階における環境影響評価の高度化に寄与するとともに、CE の実現に貢献するものである。

2. 方法

2.1 対象領域

Tang et al.(2023)[5)]が整備した全球採掘領域ポリゴン(73943 ポリゴン)を対象領域として選定した。その後、10 km 以内に隣接するポリゴンを同士を同一サイトとみなして、全 4927 サイトに集約した。また、全球土地被覆図(Copernicus Global Land Cover Layers)を用いて、すべてのサイトを 5 つの土地被覆帯(Forest, Grass land, Agricultural land, Urban, Bare)に分類した。

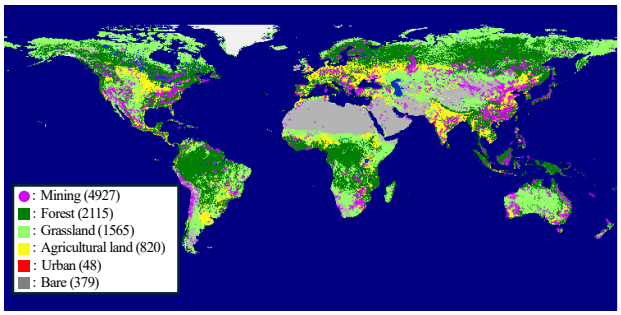


図 1 対象領域と土地被覆毎のサイト数

表 1 使用衛星画像

Date of observation	Satelliete	Sensor	Resolution(m)	Spectal Band
2000/01/01~2000/12/31	Landsat-5	TM	30	B1-B5,B7,QA_PIXEL
2000/01/01~2000/12/31	Landsat-7	ETM+	30	B1-B5,B7,QA_PIXEL
2021/01/01~2021/12/31	Landsat-8	OLI/TIRS	30	B2-B7,QA_PIXEL

2.2 Landsat 衛星画像および採掘領域ポリゴンの整備

2000 年時の採掘領域ポリゴンを土地被覆帯毎に 30 サイトずつ作成した(Urban では 10 サイト分作成した)。また、サイト毎に Landsat 衛星画像を四方に 19.2 km（1280 × 1280 pix）を取得領域として取得した(表 1)。

2.3 前処理

QA-PIXEL に格納された CF-Mask アルゴリズムの値を用いて Landsat 衛星画像の雲画素にマスク処理を施した。次に、雲マスク後の画像からサイトごとに年間最小値合成画像を作成し、それを 50 %オーバーラップをもたせて 640 × 640 pix に切り出した。

2.4 モデル構築

2021 年における Landsat-8 衛星画像および採掘領域ポリゴンを教師データとして、採掘領域推定モデルを画像セグメンテーションアルゴリズムである U-Net を用いて構築した。

2.5 精度検証

2000 年における Landsat-5、Landsat-7 衛星画像および採掘領域ポリゴンを検証データとして、モデルの採掘領域推定性能の評価を行った。この時、推定性能の評価には Precision, Recall, F1-score, False Negative を用いた。また、評価指標はピクセル単位で計算した。

表 2 衛星画像および土地被覆毎の領域推定性能比較

Satellite	Landcover	F1-score	Precision	Recall	Satellite	Landcover	F1-score	Precision	Recall
Landsat-5	Overall	0.265	0.712	0.163	Landsat-7	Overall	0.227	0.781	0.132
	Forest	**0.457**	0.771	**0.325**		**Forest**	**0.460**	0.830	**0.318**
	Grass land	0.336	**0.826**	0.211		Grass land	0.243	0.818	0.142
	Agricultural land	0.400	0.729	0.275		Agricultural land	0.344	**0.831**	0.217
	Urban	0.134	0.382	0.080		Urban	0.098	0.378	0.056
	Bare	0.113	0.506	0.064		Bare	0.123	0.679	0.068

3. 結果と考察

モデルの推定性能評価結果を表 2、採掘領域推定の例を図 2 に示す。表 2 から、モデルは既往の植生域での採掘領域分類性能[4]（F-score＝0.8）と比較して大きく劣っていた。また、評価指標の分析および結果の可視化より、モデルは採掘領域を過小評価する傾向（Precision＞Recall）が示唆された（表 2、図 2）。そこで、モデルが採掘領域を非採掘領域と誤分類した割合である False Negative Rate（FNR）を採掘領域の規模ごとに算出したところ(図 3)、小規模（1000 pix 以下）の採掘領域で FNR が上昇することが示された。小規模領域における性能低下ついては、画像の分解能や切り取り幅の影響が考えられる。例えば画像幅の縮小は、小規模オブジェクトの推定性能の向上に貢献できる。しかしながら、大規模なオブジェクトの推定性能の低下を招く恐れがある。ここで、一般的に鉱物資源採掘による環境影響を考える上では、大規模採掘領域での推定性能が重要である。したがって、スケール間の異なるオブジェクトの推定に優れるモデルの開発が採掘領域推定において非常に重要であると考えられる。

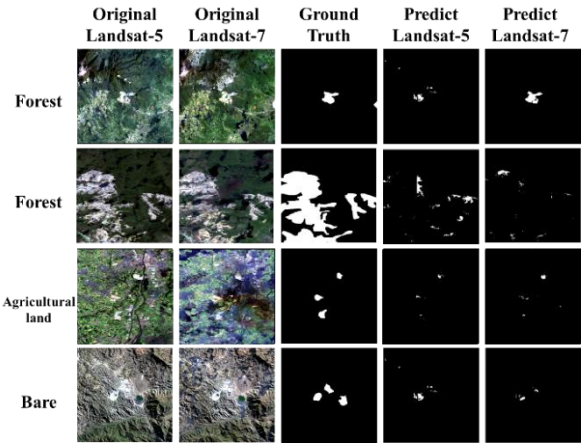


図 2 Landsat-5,7 における採掘領域推定結果

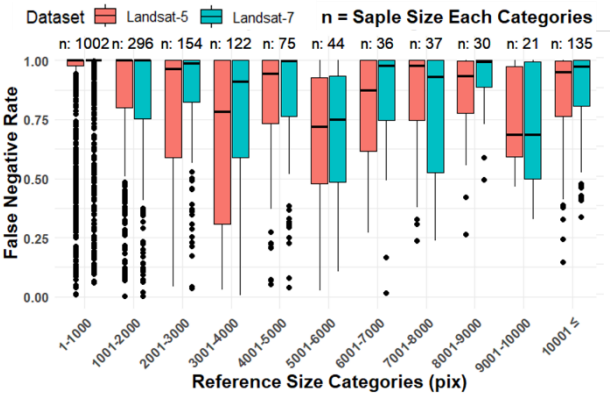


図 3 採掘領域の規模毎の採掘領域推定結果

4. まとめ

本研究では、衛星画像と深層学習を組み合わせ、全球規模の採掘領域推定への適用可能性を検討した。その結果、推定性能は実用段階には至らなかったものの、全球規模での採掘領域推定での課題を確認することができた。今後は、採掘領域の規模によらず領域推定を可能にする方法に着目して研究を進めていく。

5. 引用文献

1) Takuma W et al.: Resources, Conservation and Recycling, Vol.164, (2021), 105107
2) Gustavo M et al.: Resources, Conservation and Recycling, Volume 146, (2019), pp. 452-461
3) Yasunori I et al.: Resources, Conservation and Recycling, Vol.134, (2018), pp. 361-366
4) 佐久間東陽:“農業・鉱業による環境影響の評価および対策に向けた土地利用時空間変化の衛星リモートセンシングに関する研究”, (2021)
5) Tang, L., Werner, T. T.: Communications Earth & Environment, **4** (1), (2023), pp. 134
6) 廣田琳治他.:リモートセンング学会第 76 回学術講演会論文集, (2024),pp. 125-126

Life cycle assessment of mechanical recycling and utilization for plastic bags of uncontaminated post-industrial polyethylene film in Japan

○ Ahdo Kim *[1)‡], Teuku Naraski Zahari [2)‡], Nobuteru Edayoshi [3)], Pin Juo Chou [3), 4)], Toshiki Yamamoto [3)], Pin Yen Chou [3), 4)], Kei Saito [1)], Benjamin McLellan [2)]

1) Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability, Kyoto University, 2) Graduate School of Energy Science, Kyoto University, 3) esa Inc., 4) Chuang Tieh Machine

* kim.ahdo.62m@st.kyoto-u.ac.jp

‡ Ahdo Kim and Teuku Naraski Zahari contributed equally to this work as first authors.

1. Introduction

Global warming and environmental issues, driven by human activities (IPCC, 2023), are exacerbated by the mass production and consumption of materials like petroleum-based plastics. In 2022, Japan produced 4.4 million tons of polyethylene (PE) and polypropylene (PP), with 54% used in films and sheets (JPIF, 2022). Japan relies heavily on thermal recycling (61% in 2021, PWMI, 2022).

Studies typically focus on post-consumer plastics, which require decontamination and increase environmental impacts (Suzuki et al., 2022). This study examines the mechanical recycling of uncontaminated post-industrial plastic waste (Repla™) in Japan, comparing it to virgin and bio-polyethylene. Results show Repla™ is more environmentally sustainable, even surpassing bio-plastics, challenging Japan's bioplastics roadmap.

2. Methodology

This study condcuted LCA based on ISO 14040.

2.1 Goal, Scope, and System Boundary

This study aimed to assess the environmental impacts of three polyethylene feedstocks used in plastic bag production. The scope covered feedstock sourcing, transport, processing, and production. Two functional units were defined: 1 ton of plastic pellets and 1 ton of plastic bags. A cradle-to-gate approach excluded the end-of-life stage, as plastic bags often cannot be recycled due to quality constraints.

The system considered three feedstocks: Virgin-PE, Bio-PE, and Repla™, each as a 50:50 mix with Virgin-PE to ensure product quality. Tests confirmed 50:50 ratios were optimal for Repla™. Bio-PE, blended similarly, aligned with Japanese policies favoring bio-based content. Six scenarios were analyzed, combining production locations (Japan and Vietnam) and feedstock mixes.

2.2 Inventory Analysis

Feedstock-specific processes were analyzed. Repla™, sourced from post-industrial waste in Japan, required minimal decontamination and involved cutting, extrusion,

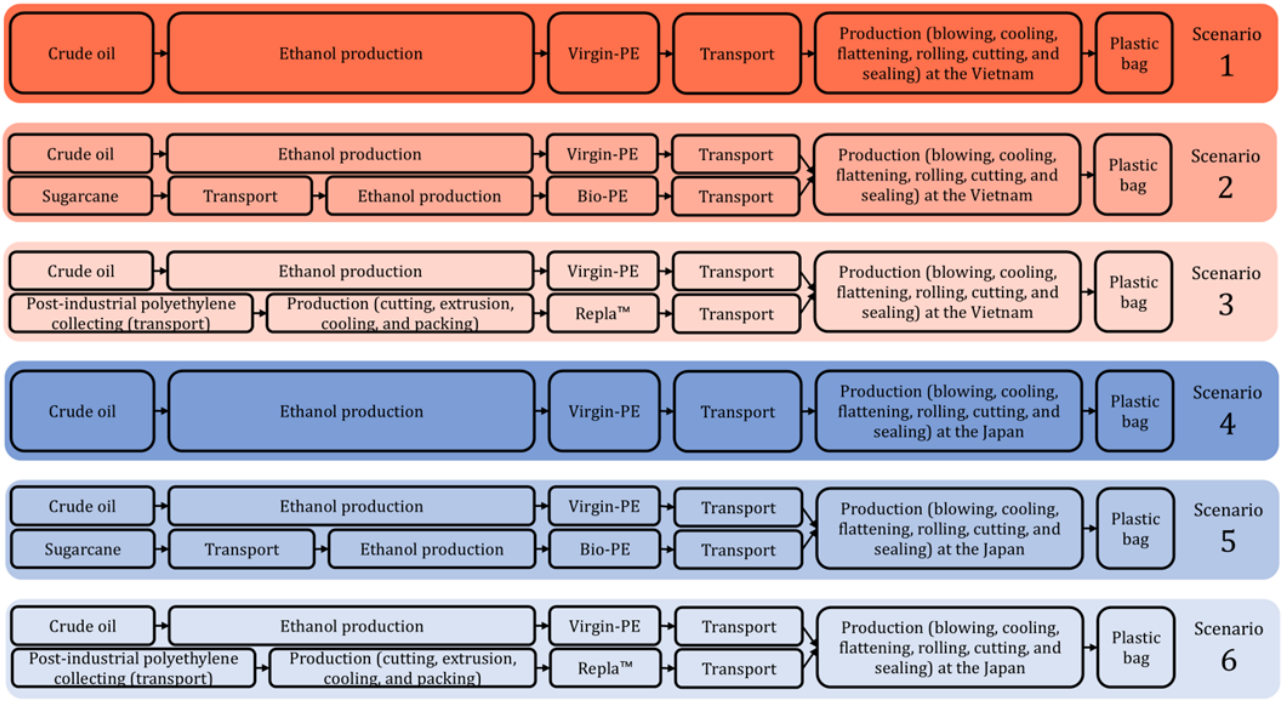


Figure 1 System Boundary of this study encompasses from raw material to end-product production (cradle-to-gate)

cooling, and packing. Bio-PE, made from Brazilian sugarcane, involved fermentation and conversion to bio-polyethylene before export to Japan or Vietnam. Virgin-PE, derived from petroleum, used ecoinvent database data.

Data were compiled in SimaPro (v9.4.0.2, ecoinvent v3.8, 2021), and inventory data for the feedstocks had been invenstigated through direct measuring and literature analysis.

2.3 Impact Assessment

The ReCiPe method was used for midpoint and endpoint assessments. Three categories were highlighted: global warming (GW), fossil resource scarcity, and human carcinogenic toxicity. Global warming was prioritized due to its urgency, fossil resource scarcity assessed fossil-derived resource reduction, and carcinogenic toxicity addressed health impacts. Full results are in the main text.

3. Results

Repla™ demonstrated significantly lower environmental impacts compared to alternatives

At the product level, a 50:50 mix of Repla™ and Virgin-PE yielded significantly better results than alternatives, reducing GW, carcinogenic toxicity, and fossil resource use by 38%, 43%, and 45%, respectively, compared to Virgin-PE alone. While production location impacted emissions slightly, the material mix had a far more substantial effect on reducing environmental burdens. Scenario 6, involving a 50:50 mix of Repla™ and Virgin-PE in Japan, demonstrated the lowest impacts overall.

These findings highlight Repla™'s superior sustainability profile and emphasize the critical role of material mix in minimizing environmental impacts.

4. Conclusions

Recycling post-industrial plastic waste offers significant environmental benefits over virgin-PE and Bio-PE, especially in terms of global warming potential, human carcinogenic toxicity, and fossil resource scarcity. Repla™ outperformed both, emitting 84% less CO2 and consuming 93% less oil than virgin-PE. Scenario analysis indicated that switching from diesel to cleaner alternatives and using 100% renewable electricity for Repla™ could further improve sustainability, though large-scale implementation would face challenges.

This study demonstrates that post-industrial plastic recycling could replace less sustainable disposal methods, with future research needed on mechanical properties, economics, and multiple recycling cycles.

References

1) Intergovernmental Panel On Climate Change: "Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," 1st ed., Cambridge University Press, (2023), https://doi.org/10.1017/9781009157896
2) The Japan Plastics Industry Federation (JPIF): "The Japan Plastics Industry Federation Statistics," (online), URL https://www.jpif.gr.jp/statistics/, (access 2023-08-14)
3) Plastic Waste Management Institute (PWMI): "An Introduction to Plastic Recycling in Japan," (online), URL https://www.pwmi.or.jp/english/, (access 2023-08-14)
Suzuki, G., Uchida, N., Tuyen, L.H., Tanaka, K., Matsukami, H., Kunisue, T., Takahashi, S., Viet, P.H., Kuramochi, H., Osako, M.: "Mechanical recycling of plastic waste as a point source of microplastic pollution," Environmental Pollution, 303, (2022), Article No. 119114, https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119114

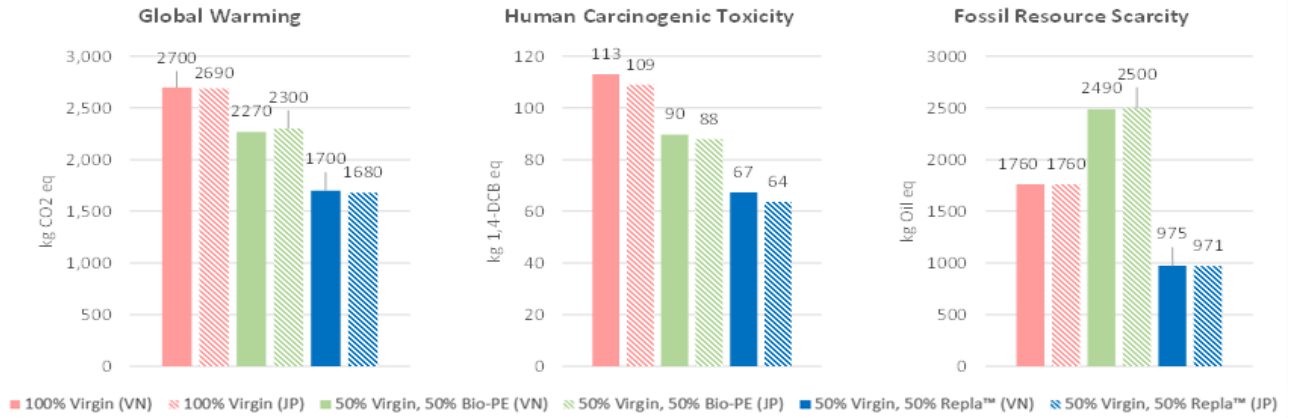


Figure 2 Effect of changing production location on the selected indicators for different material mix

Analyzing material flows in Pakistan based on input-output table

○Zameer Ahmed[*1)], Heng Yi Teah[1)], Yuichiro Kanematsu[1)], Yasunori Kikuchi[1)]

1) The University of Tokyo

*zameerahmedwassan@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

As a developing nation, Pakistan aligns with global emission reduction targets while pursuing sustainable development. Despite a low per capita carbon footprint (0.98 metric tons), it ranks among the top 10 climate-vulnerable countries1. Between 1971 and 2020, CO_2 emissions rose from 18 to 217 million tons, with total GHG emissions reaching 438 million tons CO_2-eq by 2021. The energy sector, dominated by fossil fuels, contributes 211 million tons CO_2-eq, worsening emissions and hindering sustainable energy transitions[1,2].

Policy inefficiencies, lack of sub-sector level carbon intensity data, and heavy reliance on fossil fuels hinder Pakistan's progress in reducing CO_2 emissions. To analyze the material flow of energy across sectors and their associated emissions, aiming to contribute to global climate change mitigation efforts. This study provides an overview of strategies to reduce fossil fuel dependence, enhance industrial energy efficiency, and explore alternative energy options. It also includes an analysis of CO_2 emissions derived from energy consumption.

2. Methodology

2.1 IOT-MFA

IOT-MFA Input-Output Tables (IOT) and Material Flow Analysis (MFA) are essential tools for evaluating emissions and resource flows. The integration of Input-Output Tables (IOT) with Material Flow Analysis (MFA) enables the linkage of economic activities to physical material and energy flows. This combined approach provides a comprehensive framework for evaluating resource efficiency, emissions, and the environmental impact of supply chains[3]. Input-Output Tables to analyze material flows, aiding the study of sectoral emissions and energy transitions[4].

2.2 Material Flow of Energy

The data collection for the energy material flow inventory starts by tracing energy flows from production sources, such as raw gas, coal, and crude oil, through processing stages like refineries and power stations, to various end-use sectors, including industrial, transport, and domestic, using government-published reports. This approach enables detailed tracking of energy utilization across sectors, assessing emissions, and identifying opportunities for resource optimization. It provides a comprehensive framework for evaluating energy transitions and efficiency improvements, with a focus on data-driven analysis rather than visual representation at this stage.

3. Preliminary Results and Discussion

We have analyzed Pakistan's energy material flow, covering domestic production, imports (raw gas, coal, crude oil, hydropower, nuclear, and renewables), and sectoral distribution. Preliminary findings indicate that 14% of energy is consumed in the domestic sector, 22% in the industrial sector (including 9% for coal and brick kiln production), and 21% for transport, with energy losses accounting for 21% of the total flow. Electricity generation data reveals that 58.3% of electricity is derived from fossil fuels, underscoring the need to expand renewable energy for emission reductions. On the consumption side, the industrial sector consumes 31,600 GWh, emphasizing the importance of energy efficiency to lower carbon intensity. Our assessment of major CO_2-emitting sectors highlights the textile sector emitting 40,120 kt-CO_2 (primarily from electricity and coal) and contributing 8.5% to GDP. The non-metallic minerals sector emits 91,714 kt-CO_2 from coal and mineral extraction, signaling a critical need for targeted emission reduction strategies in these key areas.

4. Conclusion

This study provides key insights into emissions and resource analysis derived from the material flow of energy in Pakistan. The country's heavy reliance on fossil fuels makes the energy sector the highest contributor to CO_2 emissions. Notably, the textile and mineral extraction sectors are the leading contributors, underscoring the urgent need to integrate renewable energy sources such as solar, wind, and hydropower to reduce emissions and promote sustainable energy use.

In this research, we analyze energy distribution using Material Flow Analysis (MFA) and calculate direct CO_2 emissions from 15 major sectors, excluding electricity generation. Our study aims to assist policymakers and industry stakeholders in fostering a deeper understanding of the relationship between energy efficiency and CO_2 emissions. For future work, we plan to expand the study by incorporating energy consumption and emissions from electricity generation, along with additional industrial sectors, to provide a more comprehensive assessment of Pakistan's energy landscape and its environmental impact.

Reference

1. International Monetary Fund. Middle East and Central Asia Dept.: "Pakistan: Selected Issues," IMF Staff Country Reports, 2022 (027), (2022), pp. 33-40

2. Zia U. u. R., Aslam H., Zulfiqar M., Ullah S.: Int. J. Renewable Energy Development, 12 (4), (2023), pp. 677-690

3. Wiedmann T., Wilting H. C., Lenzen M., Lutter S., Palm V.: Ecological Economics, 70 (11), (2011), pp. 1937-1945

4. Nakamura Shinichiro, A Practical Guide to Industrial Ecology by Input-Output Analysis, Springer Cham, 2023

環境配慮行動を促す仕掛けによる環境負荷削減効果

The Environmental impact of Environmentally Conscious Behavior Induced by Nudging

○髙橋和枝*、星川真菜
Kazue I. Takahashi, Mana Hoshikawa
武蔵野大学
* kazutaka@musashino-u.ac.jp

1. はじめに

持続可能な社会を築くためには、一般消費者の意識や行動、ライフスタイルを環境に配慮したものに変えていくことが必要である。しかし実際には、不便さを感じるような行動は選択されにくく、さらに、定着させることは難しい。

例えば、ペットボトルのボトル（素材：ポリエチレンテレフタレート）、ラベル（同：ポリプロピレン、再生ポリエチレンテレフタレートなど）、キャップ（同：ポリプロピレン、ポリエチレンなど）の材料が異なる部品別に分別回収をすることは、リサイクルを推進する上で有効である。しかし、分別には手間がかかる、捨て方がよくわからないなどの理由で、分別をしない人が多いことが指摘されている[1]。一方、階段とエレベータが設置された建物内で「2 アップ 3 ダウン」などと書かれた省エネルギーや健康増進を目的としたポスターを目にすることがあるが、見慣れてしまうと、あまり効果があるとは言い難い。

そこで、環境に配慮した行動を自然と促すようなナッジ理論を用いた新たな「仕掛け」を考案し、その効果を把握するための実証実験を行うともに、行動変容による環境負荷削減効果について LCA を用いた定量化を検討した。

2. 研究方法

2.1 実証実験

2.1.1 ペットボトルの分別回収

キャップの分別を促すことを目的として、図 1 に示したような額縁のような回収箱を作製した。中の幅はキャップがぎりぎり入るサイズとすることで、同じ向きに並べることができる。ペットボトルのキャップには様々な色・模様がついているため、多数のキャップが集まると、ドット絵のような模様ができる仕掛けである。

この回収箱の実証実験は、2023 年 7 月の 7 日間、キャンパス内にある既存ボトル回収箱（計 7 台）の上部に設置することで行った。また、仕掛け設置前後の変化については、回収されたボトルのキャップの有無および回収キャップの数をカウントすることにより把握した。



図 1　ペットボトル分別回収の仕掛け

2.1.2 階段利用の促進

階段の利用に関しては、キャンパス内で、階段の場所を示すポスターとともに、階段の蹴込み板部分に短編小説の 1 節ずつを貼り（図 2）、小説を読みながら階段を上る仕掛けを設置した。効果の把握については、仕掛け設置前後のエレベータおよび階段の利用者数を 1 時間、計測することにより行った。


図 2　階段利用の仕掛け

2.2 LCA による環境影響評価

初期の環境評価として GHG 排出量を選択し、また、評価にあたって原単位には、IDEA ver.3.4.1 を使用した[2]。

3. 結果と考察

3.1 ペットボトルの分別回収

キャップが分別されたボトルの割合を回収されたボトル総数に対する割合として求めた（図 3）。総数 566 本のペットボトルを調査した結果、設置前と比較して、7 か所すべてで分別率が向上したことがわかった。仕掛け設置前の分別率は、最高でも約 17%であったが、仕掛け設置後には 36%以上のキャップが分別回収されていた。同時に 201 個のキャップを収集することができた。

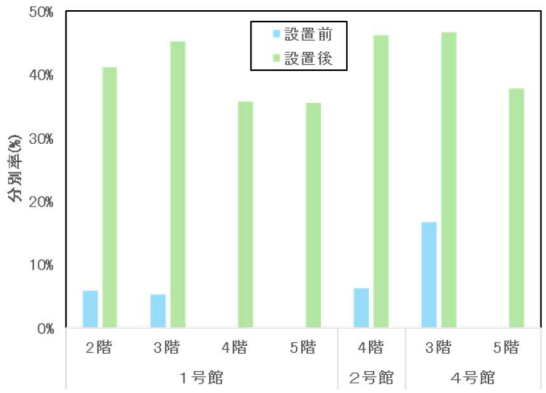


図 3　ペットボトル分別回収の変化

3.2 階段利用

仕掛け設置前後の階段利用者の変化を図 4 に示す。対象とした通行者は、設置前後ともに約 140 名であり、階段を利用した人数は、設置前後で、6%から 18%に増加し、仕掛けにより、階段利用を促す効果が一定程度、あることが明らかになった。また仕掛けを見て階段を選択した利用者へのヒアリングでは、小説を読むことに夢中になり、必要以上に階段を上ってしまったという意見もあった。またエレベータの往復回数は 37 回から 32 回に減少した。

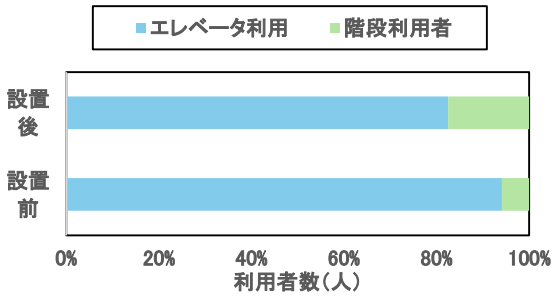


図 4 エレベータ・階段利用の変化

3.3 環境負荷削減効果

ペットボトルの分別回収による環境負荷削減効果を把握するため、下記のようなシナリオについて試算した。

未分別の場合：キャップは焼却処分
　　バージン材料の製造
分別の場合：　回収・リサイクル
　　製造に再生材料を使用

回収したキャップの 1 個当たりの重量を平均重量から 3.2g とし、材料をポリプロピレンと仮定して試算した結果、最大、約 60%の CO2 排出量の削減が期待できることが分かった。しかしながら、実際には、キャップ製造には様々な種類のプラスチック材料が使用されており、またバージン材料と同じ品質の再生材料になるという仮定には無理があるため、さらに詳細なデータを集めた上での評価が必要であると考えている。

一方、階段利用の仕掛けによる環境負荷削減効果については、移動した階数、頻度、乗り合わせる人数など様々な要因が関係するため定量化には、さらなるデータが必要であることがわかった。

4. 最後に

地球温暖化の影響が身近に感じられる昨今、環境に配慮した行動が望ましいことに異を唱える人は少ない。しかしながら、環境にも人にもやさしい行動をとることは難しい。今回の提案した仕掛けはその行動変容を促すきっかけにはなるが、その行動が習慣化し、仕掛けを除去した後もその効果が持続性するかどうかは調査できていない。さらに効果的に環境負荷削減に役立つ仕掛けを提案し、効果を定量的に把握したい。

5. 引用文献

1) 一般社団法人 全国清涼飲料連合会: “ペットボトルに関する消費者意識調査 2022”, 入手先〈https://www.j-sda.or.jp/news/2022/06/08/post-598/〉, （参照　2025-01-21）
2) IDEA Ver.3.4.1(2024/09/02) 国立研究開発法人産業技術総合研究所　安全科学研究部門　IDEA ラボ

半導体材料に着目した水消費と水枯渇への影響

Water Scarcity Footprint of Semiconductor Materials

○田中幸希*[1)]、張 政陽[1)]、松八重 一代[1)]
Kouki Tanaka, Zhengyang Zhang, Kazuyo Matsubae
1) 東北大学
* koki.tanaka.s4 @dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

半導体はAI等の新技術を支える存在である反面、製造におけるエネルギー、 水、化学薬品等の大量消費に起因する地球温暖化や水枯渇への影響といった環境的負荷を無視することはできない。TSMC台湾工場の干ばつによる操業への影響が話題を集め[1)]、半導体製造工場が引き起こす水枯渇への関心が高まり学術の分野においても包括的な研究がなされた[2)]。しかし現状半導体材料に関する水枯渇への影響について研究はあまり進んでいない。 半導体の主要材料であるシリコンウェハとその原料である高純度ポリシリコン(HPS)はその高度な生産工程において超純水(UPW)等の水を大量に消費する。さらにHPSの原料となる金属シリコンやシリカ製造の水消費そのものは比較的少ないものの、中国やアメリカでおよそ半分が製造され[3,4)]、水に豊かとは言えない国での生産という視点から水枯渇への影響が懸念される。 このように半導体材料の筆頭格であるシリコンウェハサプライチェーン(シリコンウェハSC)は水枯渇に寄与している可能性がある。これを解明するに当たってはシリコンウェハSCがどのように世界で展開されているか把握する必要がある。そこで本研究では、資源SC同定手法の開発、並びにこれをシリコンウェハSCに応用して地理的解像度の高いシリコンウェハSC同定を行う。そしてミッドポイントLCAによる評価を通して、 2021年の同材料生産に紐付く水消費ならびに水枯渇を明らかにする。

2. 手法

2.1 SC解析

本研究では資源SC同定に関して2つの手法を新規に提案する。特定のSCを全体の流通から抽出する遡及分析と全体の流通が不明の状態から需給間の関係値に基づきこれを推定する関係性に基づいた流通の推定について以降で記載する。

2.1.1 遡及分析

資源xの全体のSCから国i(i=1,⋯,n)の特定の製品j (j=1,⋯,m)を経て最終消費される資源xのSCを抽出する。資源xは国i間の製品j間で流出入(T)する他にプロセスj間外からの流入、そして流入を行う。これをOとし、資源xの全体のSCをT, Oそして最終需要FDとして整理表現することで、この最終需要が誘発する国iの各製品j (j=1,⋯,m)の生産量を遡及的に分析することが可能となる。国i製品jにおける流出入量は以下のように数式で表現が可能である。

$$\text{総流入}_{i_n} = T_{i_(n-1)\rightarrow i_n} + \sum_{c(c\neq 1)} T_{c_n\rightarrow i_n} + \text{II}_{i_n} + \text{IL}_{i_n}$$
$$\text{総流出}_{i_n} = \sum_{c(c\neq 1)} T_{i_n\rightarrow c_n} + \text{OI}_{i_n} + \text{OL}_{i_n} + \text{FD}_{i_n}$$

総流入量と総流出量は等しいためこれらをVとして、またTを総流入量で除した各投入係数行列をA_T, として定義する。さらに国i製品jの最終製品製造に対する必要投入量(歩留まりの逆数)Y_{i_j}を対角成分に持つ$\text{diag}(Y_{i_j})$を用いると、最終需要FDが牽引する各国各製品への総流量ベクトルV_{FD}は以下のように表現できる。

$$\mathrm{A_T}\cdot \mathrm{V} + \mathrm{OI} + \mathrm{OL} + \mathrm{FD} = \mathrm{V}$$
$$(\mathrm{I} - \mathrm{A_T})^{-1}\cdot(\mathrm{OI} + \mathrm{OL} + \mathrm{FD}) = \mathrm{V}$$
$$\mathrm{V_{FD}} = \mathrm{diag(Y)}\cdot(\mathrm{I} - \mathrm{A_T})^{-1}\cdot \mathrm{FD}$$

V_{FD}は各国各製品への総流量を示すため、生産量(X)の算出のためには各投入係数行列A_Tを用いてV_{FD}の配分を行う。

$$\mathrm{X} = \mathrm{A_T}\cdot \mathrm{diag(V_{FD})}$$

本手法の詳細は補足にて記述する。

2.1.2 関係性に基づいた流通の推定

流通が不明という状況下、販売者i (i=1,⋯,n)から購入者j (i=1,⋯,m)への流通量Z_{ij}を求める手法として関係性に基づいた流通の推定を提案する。販売もしくは購入のいずれかに沿って理想流通量Z^I_{ij}を設定する。購入構成に重点が置かれる場合、販売者と購入者の関係性を購入構成に反映し、理想流通量Z^I_{ij}を設定する。これを基準としてラグランジェ未定乗数法もしくはRAS法を用いて、各流通量Z_{ij}を最適化していく。本手法の詳細は補足に後述する。

2.2 2.1.3 本研究への適用

シリコンウェハはシリカの採掘から、金属シリコン、HPSを経て製造される。シリカから金属シリコンそしてHPSとして消費されるまでのSCは遡及分析によって、金属シリコンからシリコンウェハへの流通は関係性に基づいた流通の推定によって分析を行った。本研究では、資本関係および国際関係を需給間の関係性の変数として採用した。販売者と購入者それぞれに

とっての理想流通量を策定し、ラグランジュ未定乗数法と RAS 法という 2 種類の解析手法を用いた計 4 通りの組み合わせについて解析を実施した。また、鉱山や工場の製造能力を基に、シリコンウェハ SC の理論的な解像度を拠点レベルにまで高めた。

2.3 水枯渇への影響評価

シリコンウェハの各製造プロセスの水インベントリデータを整備した。3.1.3 にて解明した鉱山、工場レベルまで地理的解像度を高めたシリコンウェハ SC と組み合わせることで水消費の場所と量を同定し、AWARE[5]を用いて水枯渇への影響評価を実施した。AWARE では世界中の各流域それぞれに水枯渇への影響を 0.1 (豊富)から 100 (枯渇)までの値として表した特性化係数(CF)が付与され、 これと水消費量(WR)と掛け合わせることで水枯渇フットプリント(WSF)が算出される。シリコンウェハ SC 全体の WR と WSF そして、材料 i に紐づく WSF を WR で除すことで求まる生産流域の平均的な CF_i さらに製造企業ごとのシリコンウェハ 1 枚が抱える WSF を算出することでシリコンウェハ SC の水枯渇への影響を多角的に解析した。

3. 結果

2021 年全世界のシリコンウェハ製造 SC に起因する WR は 108 Mt, WSF は 267Mt であった。図 2 に WR, CF, WSF を網羅的に表現した。

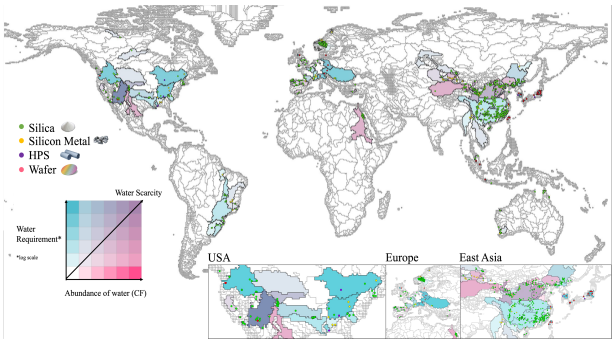


図 1. 2021 年のシリコンウェハ製造に起因する水への影響

WSF は WR と CF に分解可能であり、 図 1 にて青い流域は WR が大きいものの CF は小さいことを、ピンク色の流域はその逆を示す。 これらが重なる紫色の流域では WSF が大きくなり、アメリカ北東部, 西部, 東ヨーロッパ等で WSF の値が目立った。また、材料 i の生産流域の平均的な CF_i に関して、シリカや金属シリコンといった比較的上流の材料では 9.7 と 20.1, 一方で HPS やシリコンウェハーといった比較的下流の材料では 0.8 と 2.8 という結果であった。
最後に、製造企業ごとのシリコンウェハ 1 枚が抱える WSF を材料別に積み上げた結果を図 2 に示す。

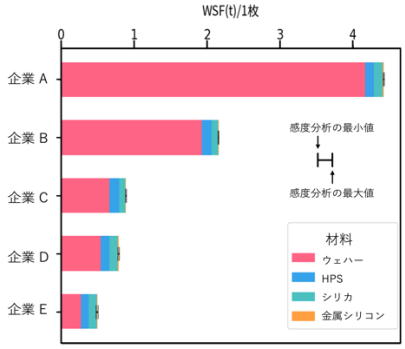


図 2. 各社のシリコンウェハ 1 枚が内包する WSF

流通戦略と最適化手法に関する 4 通りの組み合わせそれぞれにおいて需給間の関係値の変数を変更させた時に取りうる最大、最小値そして平均値とその構成を積み上げ棒グラフに示した. シリコンウェハー製造段階の寄与がいずれの会社においても半数を上回る。

4. 考察

2016 年の第 4 四半期における半導体製造の WR, WSF はそれぞれ 965, 12000 Mt であった[4]。これと比較するとシリコンウェハ SC の占める水枯渇への影響は半導体製造のそれと比較すると小さいことがわかった。しかし $CF_{シリカ}$ や $CF_{金属シリコン}$ が CF_{HPS} や $CF_{シリコンウェハ}$ より 4 倍以上大きいことから、最上流付近の原材料は先端材料よりも”水”について考慮された製造拠点の立地がなされにくいことが示唆された。さらに半導体製造工程や先端材料の生産における水への意識は年々高まりをみせ、技術の需要が高まっている一方、最上流付近の原材料ではそのような技術の波及は弱く削減ポテンシャルは高くない。将来的に水枯渇への影響の加速が懸念される。

5. 引用文献

1) Yang S.: “台湾で干ばつ深刻化、世界の半導体不足に拍車も”, THE WALL STREET JOURNAL, (オンライン), 入手先< https://jp.wsj.com/articles/the-chip-shortage-is-bad-taiwans-drought-threatens-to-make-it-worse-11618599196 > (参照 2025-1-20)
2) Frost K. and Hua I.: Water Resour. Ind., 22, (2019), pp. 100-115
3) USGS: “Advance Data Release of the 2021 Annual Tables”, (2022)
4) USGS: “U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2022”, (2023), pp.150-151
5) Boulay AM. *et. al.*: Int. J. LCA, 23, (2018), pp.368-378

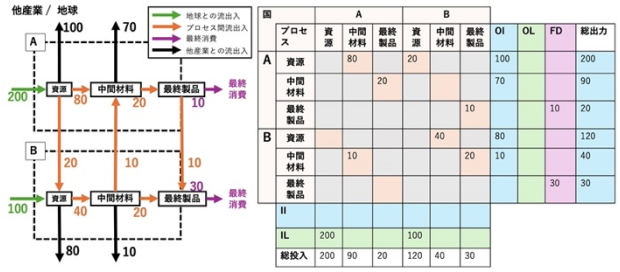
Supporting Information

1. 遡及分析

資源 x の全体 SC を T, OL , IL, OI , II, FD として表現することで, 最終需要が誘発する各製品 j (j=1,…,m)での生産量を訴求的に分析することが可能となる. 資源 x が製品 1 から m までを順番にたどり最終消費される場合を考える. 国 i の製品 j に流入する経路を以下の 3 つに定義する.

・他産業, 地球からの流入(T)
・国 i での製品 j-1 からの流入(II), 国内生産
・国 h (h≠i)の製品 j からの流入(IL), 輸入

国 h (h≠i)の製品 j-1 を輸入したものが必ずしも全て国 i でのプロセス j にて消費されるわけではないためこのような定義を行った. これにより輸入材と国内材の非競争的な利用を表現することができる. 具体的に国 i(i=A, B)の特定のプロセス j (j=資源, 中間材料, 最終製品)に渡る資源 x の SC を同定してみる. 図 S-1 左図のように国 i の製品 j に資源 x が流入しており, それを行列形式で表現したものが図 S-2 の右図である. 国 A の中間材料は自国内の資源からの生産と国 B からの中間材料の輸入から構成されている.



国		A			B			OI	OL	FD	総出力
	プロセス	資源	中間材料	最終製品	資源	中間材料	最終製品				
A	資源		80		20			100			200
	中間材料			20				70			90
	最終製品						10			10	20
B	資源					40		80			120
	中間材料		10				20	10			40
	最終製品									30	30
II											
IL		200			100						
総投入		200	90	20	120	40	30				

図 S-1. 資源 X 流通の具体例

ロスが発生しないとして (歩留まりが 1 である)仮定する時, Y は単位行列となる. そして本文 3.1.1 で記載した手法を用いることで, 図 S-1 左図の資源 x の全体 SC から最終消費に駆動される国 A, B それぞれの資源, 中間材料, 最終製品の生産量を図 S-2 のように抽出することができる.

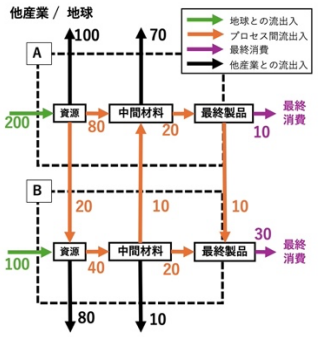


図 S-2. 最終消費が駆動する資源 x の SC

2. 関係性に基づいた流通の推定

販売者 i から購入者 j への理想流通量 Z^I_{ij} の設定方法について記載する. “理想”とは販売者もしくは購入者にとって関係性が深い相手と積極的に取引（販売/購入）することを指し, まず販売者, 購入者のどちらにとっての理想を設定するかを考えなくてはならない. 購入者の立場から理想流通量 Z^I_{ij} を設定する場合を考えると, 販売者 i 購入者 j 間の関係性に基づいて購入者 j の総購入量 Z^I_j を R_{ij} の割合で分配していく. R_{ij} を関係性の変数$x_1 \cdots x_n$とそれに作用する関数 f を用いて以下のように表現する.

$$R_{ij} = f(x_1 \cdots x_n)$$

本研究では“企業の国籍の一致”, “資本関係の存在”をそれぞれ変数 X_1, X_2 とし, 以下のような関数を導入した. 例えば企業である販売者 i と購入者 j に資本関係がある場合, x_2 ($0< x_2 <1$)という変数を max 関数に与える.

$$f = \max(X_1, X_2)$$

$$X_h = \begin{cases} x_h\ (ij\text{の需給間にて}h\text{の関係性がある場合}) \\ 0 \end{cases}$$

$R_{ij} \neq 0$ である場合, j の総購入量(Z^I_j)と R_{ij} との積を理想流通量 Z^I_{ij} として割り当てる. 一方で $R_{ij} = 0$ である場合は j の販売総量(Z^I_j)の未割り当て分を均等に配分する. これにより関係性に基づく流通と他の関係性のない ij 間の流通は多角化するという流通戦略を表現することができる. 購入者の立場で理想流通量 Z^I_{ij} を設定するため, 販売者 i の理想流通量 Z^I_{ij} の総量と既定の総販売量(Z^I_i)が不一致となる. そこで RAS 法, ラグランジェ未定乗数法を用いて, 理想流通量 Z^I_{ij} を基準としながらも i の理想流通量 Z^I_{ij} が i の販売総量(Z^I_i)に一致するように最適化を実施し流通量 Z_{ij} を算出していく. ラグランジェ未定乗数法では流通量 Z_{ij} と理想流通量 Z^I_{ij} の離率の総和 f を最小にするようにして最適化を行った.

$$f = \Sigma_i \Sigma_j \left(\frac{z_{ij} - z^I_{ij}}{z^I_{ij}}\right)^2$$

制約条件

$$g_j = Z^I_j - \Sigma_i z_{i,j} = 0$$

$$h_i = Z^I_i - \Sigma_j z_{i,j} = 0$$

Z_{ij} : iからjへの流通量
Z^I_j : jの総購入量
Z^I_i : iの総販売量
z^I_{ij} : iからjの理想流通量

$$L = \frac{1}{2} \Sigma_i \Sigma_j \left(\frac{z_{ij} - z^I_{ij}}{z^I_{ij}}\right)^2 + \lambda_j(\Sigma_i z_{ij} - z^I_j) + \mu_i(\Sigma_j z_{ij} - z^I_i)$$

また, 本研究では制約の都合上、非負条件をつけることができないため本研究ではラグランジェ未定係数法で得た解を再度, 非負条件の元非線形計画問題によって最適化する手法を採用した.

加工スクラップの発生と消費を考慮した

ライフサイクルインベントリ分析手法

Methodology of life cycle inventory analysis considering generation and consumption of new scrap

○鈴木太一*1) 2)、劉俊希 2)、醍醐市朗 2)
Taichi Suzuki, Junxi Liu and Ichiro Daigo
1) 株式会社 UACJ, 2) 東京大学
* suzuki-taichi@uacj.co.jp

1. はじめに

金属材料は資源としての利用価値が高く、金属スクラップが回収され、再び利用される仕組みが市場として成り立っている。使用済み (end-of-life, EoL) 製品に由来する老廃スクラップ (old scrap) のリサイクルにかかる効果と環境負荷の定量評価に関する議論は成熟しており、適用できる様々なライフサイクルインベントリ (Life Cycle Inventory, LCI) 分析手法が提案されている。ライフサイクルでの環境に関わる物理的な入出力フローの記述を目的とすると Attributional life cycle assessment (ALCA, 帰属的 LCA) が、環境に関わるフローの変化の記述を目的とすると Consequential LCA (CLCA, 帰結的 LCA)が、それぞれ適用される [1]。金属材料の生産には、製造段階に由来する加工スクラップ (new scrap) も用いられる [2]。LCA の先行研究における加工スクラップの発生と消費にかかる取り扱いは、二つに整理される [3]。一つ目は、加工スクラップを製造段階で発生する廃棄物 (waste) と見なし、発生元のプロセスにかかる入出力のフローを製品のみに配分する考えである。二つ目は、加工スクラップを製造段階で発生する共産物 (co-product) と見なし、発生元のプロセスにかかる入出力のフローを、製品と加工スクラップに比例配分する考えである。しかし、加工スクラップの取り扱いは廃棄物とも共産物とも定まっていない。加えて、多くの先行研究では加工スクラップは同一システム内でリサイクルされると扱っており、開ループでリサイクルされる加工スクラップを対象としていない。しかしながら、実用的には、開ループでリサイクルされる加工スクラップも一定数存在する。こうした加工スクラップを対象に、リサイクルおよびその効果を定量評価し、対象システム全体の環境負荷の計上に及ぼす影響を明らかにできる手法の確立が必要である。

本研究では、加工スクラップの発生および消費を考慮し、リサイクルの効果を定量評価するための LCI 分析手法を構築することを目的とした。

2. 方法

2.1 評価のモデルケース

代表的な金属材料のうちアルミニウム材料を対象に、環境負荷の評価のためのモデルケースを設定した。モデルケースのフローを Fig.1 に示す。ここでは簡単のため、2 つの異なるシステム間での加工スクラップのやり取りを考える。システム 1 では、天然資源のみを消費して主製品が生産される。製造段階で発生した加工スクラップは、システム外で回収され、リサイクルされる。システム 2 では、天然資源に加えて、システム 1 で発生した加工スクラップを消費して主製品が生産される。システム 2 から発生した加工スクラップもシステム外で回収されリサイクルされるが、本モデルケースでは評価対象としない。なお、いずれのシステムでも老廃スクラップは用いられないと仮定する。このモデルケースでは、材料製造 (fabrication) のうち成分を最終決定するプロセスを、二次資源が天然資源に代替するプロセスとした。具体的には、アルミニウム圧延材料を対象として、圧延スラブの鋳造プロセスを前記の代替するプロセスとした。

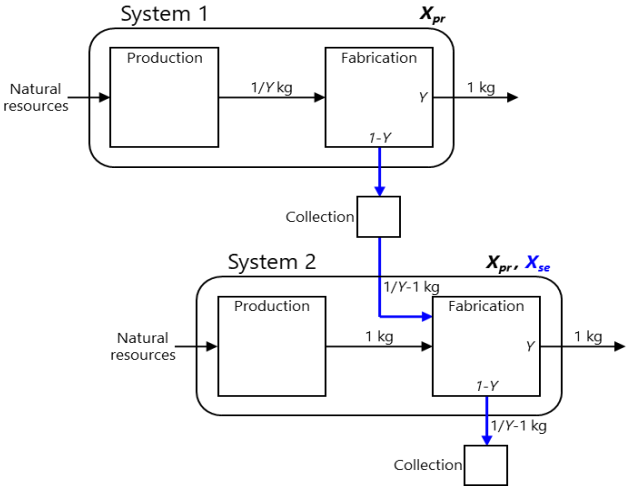


Fig.1 Schematic image of flows in model case.

2.2 加工スクラップを共産物と扱う場合の評価手法

加工スクラップを共産物として扱うと、加工スクラップと主製品は単位重量あたりで同じ環境負荷を負う。ALCA の考え方に基づけば、材料生産の環境負荷は、対象システムへの入出力のフローを計上し定量評価される。カットオフ手法と同様の考え方ではあるが、加工スクラップが共産物である点でカットオフ手法とは異なる。混乱を避けるため、本研究では「ALCA に基づく評価手法」と呼称する。

CLCA の回避効果手法では、二次資源がリサイクルされなかった場合を想定して回避効果を算出する。しかし、加工スクラップを共産物として扱った場合、加工スクラップが生産プロセスにかかる環境負荷を負ったまま最終処分される状況を想定することは困難である。従って、この場合には CLCA による評価を行うことができない。

2.3 加工スクラップを廃棄物と扱う場合の評価手法

加工スクラップを廃棄物として扱うと、生産プロセスにかかる入出力のフローは全て主製品に配分される。ALCA では、カットオフ手法を適用できる。ここで、加工スクラップを対象として回避効果を定量化する。システム 1 の生産プロセスの歩留まりを Y とおく。天然資源由来の原料のみを用いて 1 kg の材料生産が行われるとき、システム 1 では、1/Y-1 kg の加工スクラップが発生する。システム 2 では、加工スクラップにより天然資源の消費が回避され、1/Y-1 kg の加工スクラップと 1 kg の天然資源由来の原料を用いて、1 kg の材料生産が行われる。これらから、リサイクルされなかった場合とリサイクルされた場合の差分をとることで、実際の材料生産を考慮した回避効果 X_{avoid} が式 (1) で表現される。

$$X_{avoid} = (1 - Y)\left(X_{pr} - X_{re}\right) \quad (1)$$

X_{pr}: 天然資源からなる材料 1 単位の生産に伴い誘発される環境負荷

X_{re}: 二次資源からなる材料 1 単位の生産に伴い誘発される環境負荷

Y: 材料生産プロセスの歩留まり

このようにして求めた X_{avoid} は、対象の製品ライフサイクル間で配分される。加工スクラップの発生元であるシステム 1 に回避効果を配分した場合、システム 1 およびシステム 2 で 1 単位の材料生産に伴い誘発される環境負荷 $X_{LCI,\,sys\,1}$ と $X_{LCI,\,sys\,2}$ は、式 (2), (3) で表わされる。これは、既存研究の End-of-life recycling method [4] と合致するものである。

$$X_{LCI,sys\,1} = Y \cdot X_{pr} + (1 - Y)X_{re} \quad (2)$$

$$X_{LCI,sys\,2} = X_{pr} \quad (3)$$

$X_{LCI,\,sys\,1}$: システム 1 で材料 1 単位の生産に伴い誘発される環境負荷

$X_{LCI,\,sys\,2}$: システム 2 で材料 1 単位の生産に伴い誘発される環境負荷

また、加工スクラップの消費先であるシステム 2 に回避効果を配分した場合の $X_{LCI,\,sys\,1}$ と $X_{LCI,\,sys\,2}$ は、式 (4) および (5) で表わされる。これは、既存研究の Waste mining method [4] と合致するものである。

$$X_{LCI,sys\,1} = X_{pr} \quad (4)$$

$$X_{LCI,sys\,2} = Y \cdot X_{pr} + (1 - Y)X_{re} \quad (5)$$

3. 考察

加工スクラップを共産物として取り扱った場合には、CLCA に基づく定量評価を行うことができない。ALCA に基づく評価を行う場合も、発生した加工スクラップを全て追跡する必要がある。このように、加工スクラップを共産物として取り扱った場合には様々な制約が課され、限定的な条件下でしかリサイクルの状況を定量評価することができない。他方、加工スクラップを廃棄物として扱った場合には、ALCA と CLCA のどちらに基づく評価でも行え、評価の目的に応じて適した手法を選定できる。従って、手法選定の自由度と実用性の観点から、開ループでリサイクルされた加工スクラップを廃棄物として取り扱うことが妥当であると考えられる。

4. おわりに

本研究では、加工スクラップの発生および消費を考慮し、リサイクルの効果を定量評価するための LCI 分析手法を構築した。今後、本手法を適用した評価結果の妥当性を検証する。また、加工スクラップの取り扱いについては、さらなる議論が望まれる。

5. 引用文献

1) Daigo I.: J. LCA. Jpn., 19 (2) (2023), pp.64-71
2) Suzuki T. and Daigo I.: Sustainability, 16 (2024), 6933
3) Kim H. C. and Wallington T.J.: Environ. Sci. Technol., 47 (12), (2013), pp.6089–6097
4) Schrijvers D.L. et al.: Int. J. LCA., 21 (7) (2016), pp.976–993

口頭発表セッション

2025年3月7日(金) 9:20 ~ 10:40 A会場：2451中講義室（4F）

[3-A1] エネルギー製品

座長：平尾 雅彦 (東京大学)

9:20 ~ 9:40

[3-A1-01]

軽量ベンダブルなシリコン/ペロブスカイトタンデム太陽電池の環境影響評価

*濱口 隆太[1]、石川 亮佑[2]、橋本 瑠李[1]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 東京都市大学)

9:40 ~ 10:00

[3-A1-02]

建材一体型太陽光発電(BIPV*)ガラスの環境影響評価

*Building-Integrated PhotoVoltaics

*橘 ゆう子[1]、内田 健太[2]、芳村 泰生[3]、勝本 覚成[1]、小川 貴之[1]、河田 禎史[2]、宮嵜 俊幸[1]、盤指 豪[2] (1. AGC株式会社 環境安全品質本部、2. AGC株式会社 事業開拓部、3. AGC株式会社 建築ガラスアジアカンパニー)

10:00 ~ 10:20

[3-A1-03]

家庭用太陽光パネルの資源循環の重視度とその要因の調査分析

*山本 悠久[1]、小口 正弘[1]、三成 映理子[1]、MUHAMAD AfifFaiq[1]、GUIDA Yago[2] (1. 国立研究開発法人国立環境研究所、2. リオデジャネイロ連邦大学)

10:20 ~ 10:40

[3-A1-04]

部材の生涯性能を考慮した新規LCA手法の提案とリチウムイオン電池用一酸化ケイ素負極の環境影響評価

*前 智太郎[1]、Teah Heng_Yi[1,2]、平尾 雅彦[1,2]、野田 優[1] (1. 早稲田大学、2. 東京大学)

©日本LCA学会

建材一体型太陽光発電 (BIPV) ガラスの環境影響評価

Environmental Impact Assessment of Building-Integrated Photovoltaic Glass

○*橘 ゆう子*[1)]、内田 健太[2)]、芳村 泰生[3)]、勝本 覚成[1)]、小川 貴之[1)]、河田 禎史[2)]、
宮嵜 俊幸[1)]、盤指 豪[2)]
Yuko Tachibana, Kenta Uchida, Taiki Yoshimura, Tadahiro Katsumoto, Takayuki Ogawa,
Teizi Kawada, Toshiyuki Miyazaki, Go Banzashi
1) AGC 株式会社 環境安全品質本部, 2) AGC 株式会社 事業開拓部,
3) AGC 株式会社 建築ガラスアジアカンパニー
* yuko.tachibana@agc.com

1. はじめに

世界的な脱炭素の流れ及び日本では政府による 2050 年カーボンニュートラル達成に向けた方針、再生可能エネルギーの買取制度等により、太陽光発電(PV)システムの設備設置は大きく増加した。一方で、大規模な地上設置型 PV システムは、豪雨の際の土砂崩れによる崩落や自然の景観が損なわれる等の課題も顕在化してきている。そのような中、建材一体型太陽光発電(BIPV)システムは、建物の窓や壁などの建材に太陽光発電の機能を付与するもので、設置・利用にあたり大規模な土地改変や土地利用を伴わない利点がある。

BIPV の発電システムとしての価値に加え、土地改変・土地利用を伴わないことによる価値、即ち生物多様性や一次生産など自然資本への影響が小さいと期待される価値を明確化すべく、ライフサイクル環境影響評価手法 LIME を用い自然資本への影響を評価した。

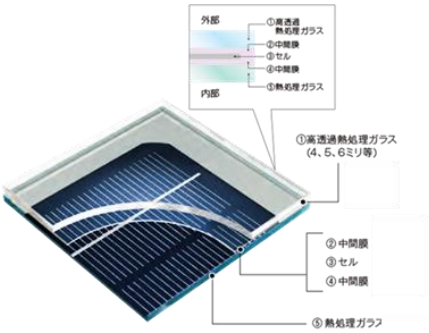


図 1 BIPV の構成例 [1)]



図 2 BIPV 施工例 [2)]
（左：建物外観, 右：BIPV 施工部 屋内より撮影）

2. 評価対象・評価方法

BIPV 弊社製品及び施工事例について、LIME 2 による評価を行った。代表的な BIPV の構成 [1)]を図 1 に、BIPV を施工した建物外観及び BIPV 施工部外観の一例 [2)]を図 2 に示す。合わせガラスの中間層に PV セルを封入した建材一体型であり、建材としての強度を有するとともに、自由な PV セル配置等によりデザイン性が高い特徴を持つ。評価を行った、原材料調達から廃棄までの工程概略を図 3 に示す。図 2 写真とは異なるが、実際の BIPV 製品・施工実例で使用した、ガラス原材料・PV パネル部材(PV セル:単結晶 Si タイプ)・施工部材のデータを用い、LIME2 による評価を行った。

比較として、地上設置型 PV システムについても LIME2 による評価を行った。パネル単位面積あたりの PV セル配置面積は、上記評価を行った BIPV と同様とした。他のパネル構成部材については環境省資料 [3)]を、地上設置に用いられる鋼製架台部材等については、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託による太陽光発電システムに関する実証事業の成果物資料 [4)]を参照した。

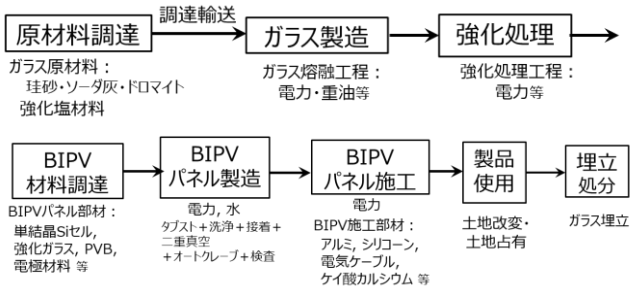


図 3 BIPV 工程概略の一例

3. 評価結果

LIME2 特性化評価結果を図 4 に示す。両者とも PV パネル製造工程の環境影響が大きく、これは単結晶 Si セル製造工程における環境影響が大きいことに起因する。また地上設置型 PV パネルではアルミフレーム使用の影響も大きい。施工部材においては、BIPV はアルミ部材とともに耐火ボード(ケイ酸カルシウム)の使用量

が多いこと、地上設置型 PV では鋼製架台の重量が大きいことによる影響が大きい。

被害評価及び統合化結果を表 1 及び表 2 に示す。地上設置型 PV については、土地改変・土地利用(20 年)の影響も考慮した。原料調達～廃棄までのライフサイクルにおいて、統合化した被害金額は、BIPV では地上設置型システムの約 1/3 と算定された。さらに BIPV は建物壁面等の設置のため太陽光の入射角度が最適条件でなく、発電量が地上設置型システムの約 70%となることを考慮すると、発電電力あたりの統合化した被害金額は、BIPV では地上設置型システムの約 2/3 と算定された。

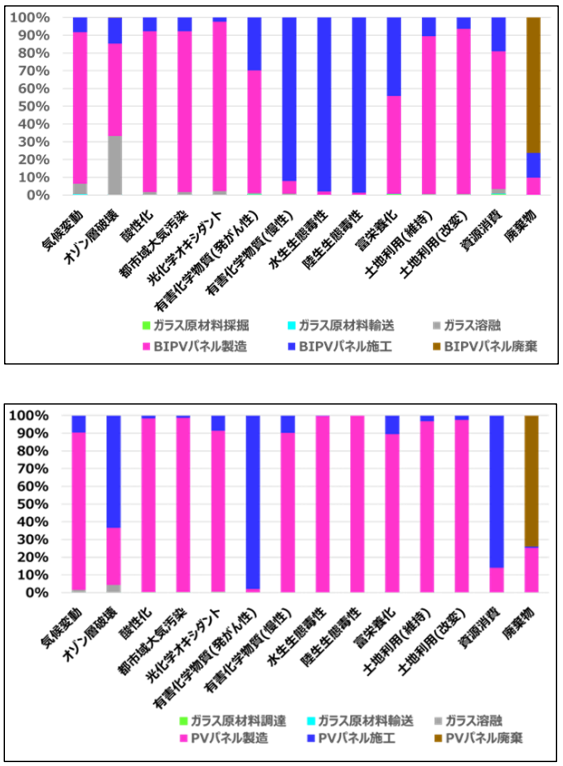


図 4　LIME2 特性化評価結果
（上図：BIPV，下図：地上設置型 PV）

表 1　BIPV の LIME2 被害評価結果・統合化結果
(パネル 1m² あたり)

	被害評価				統合化
	人間健康	社会資産	生物多様性	一次生産	
	DALY	JPY	EINES	kg-DW	JPY
ガラス原料採掘	3.66E-07	1.79E+00	9.06E-14	1.75E-02	9.25E+00
ガラス原料輸送	5.09E-07	3.22E+00	2.96E-14	1.31E-02	1.17E+01
ガラス溶融	1.15E-05	4.27E+01	3.24E-13	1.67E-01	2.22E+02
BIPVパネル製造	4.33E-04	9.55E+02	4.31E-11	2.39E+01	8.95E+03
BIPVパネル施工	3.82E-05	1.76E+02	6.64E-11	1.92E+00	1.78E+03
BIPVパネル廃棄	1.65E-07	5.25E+02	4.22E-12	8.56E-01	7.07E+02
合計	4.84E-04	1.70E+03	1.14E-10	2.69E+01	1.17E+04

表 2　地上設置型 PV の LIME2 被害評価結果
及び 統合化結果 (パネル 1m² あたり)

	被害評価				統合化
	人間健康	社会資産	生物多様性	一次生産	
	DALY	JPY	EINES	kg-DW	JPY
ガラス原料採掘	1.17.E-07	5.74.E-01	2.90.E-14	5.61.E-03	2.96.E+00
ガラス原料輸送	1.63E-07	1.03E+00	9.47E-15	4.19E-03	3.75E+00
ガラス溶融	3.67.E-06	1.37.E+01	1.04.E-13	5.36.E-02	7.10.E+01
PVパネル製造	6.33E-04	1.47E+03	1.41E-10	3.48E+01	1.43E+04
PVパネル施工	1.91E-05	3.18E+02	1.41E-10	1.32E+00	2.70E+03
PVパネル施工時土地改変			4.45E-10	1.86E+02	1.49E+04
PVパネル利用時土地利用(20年)				5.10E+01	2.36E+03
PVパネル廃棄	1.65E-07	5.25E+02	4.22E-12	8.56E-01	7.07E+02
合計	6.56E-04	2.33E+03	7.31E-10	2.74E+02	3.50E+04

4.　まとめ・今後

BIPV についてライフサイクル環境影響評価手法 LIME を用いて自然資本への影響を評価し、土地改変・土地利用を伴わない利点が定量的に示された。なお本検討では、地上設置型システムにおける、送電に伴う電力損失や、設置の際に必要な基礎工事の影響等を評価に含めていない。今後これらの影響も評価に含め検討したい。

5.　謝辞

本研究の LIME 評価にあたり、一般社団法人 企業と生物多様性イニシアティブ JBIB の自然資本評価 WG にて、早稲田大学伊坪徳宏教授に多大なご指導を頂きました。深く御礼申し上げます。

引用文献

1) AGC 硝子建材：”Products（製品情報）サンジュール®”,AGC 硝子建材,（オンライン）,入手先 <https://www.agc-gk.com/bldg/products/sunjoule/>,（参照 2025-1-22）

2) AGC：”サンジュール® ZEB への活用事例”, AGC,（オンライン），入手先 <https://www.asahiglassplaza.net/products/sunjoule/special2/>,（参照 2025-1-22）

3) 環境省：“再生可能エネルギー発電設備の廃棄・リサイクルに係わる現状及び課題について” p23, 環境省（オンライン），入手先 <http://www.env.go.jp/council/content/03recycle03/000183808.pdf>,（参照 2025-1-22）

4) 奥地建産株式会社・一般社団法人太陽光発電協会：”地上設置型太陽光発電システムの構造設計例 -鋼製架台-” p12, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO),（オンライン），入手先 <https://www.nedo.go.jp/content/100895024.pdf>,（参照 2025-1-22）

家庭用太陽光パネルの資源循環の重視度とその要因の調査分析

Household perception on the importance of resource circulation of their photovoltaic panels and its factors

○山本悠久*[1)]、小口正弘[1)]、三成映理子[1)]、MUHAMAD AfifFaiq[1)]、GUIDA Yago[2)]
Haruhisa Yamamoto, Masahiro Oguchi, Eriko Minari, AfifFaiq Muhamad, Yago Guida
1) 国立環境研究所, 2) リオデジャネイロ連邦大学
* yamamoto.haruhisa@ nies.go.jp

1. 序論

脱炭素社会の実現のため、再生可能エネルギーの一層の導入が目指されている。太陽光発電も、2012 年度の FIT 制度の開始以降、住宅系と事業系を問わず急速に拡大を続けている。一方、太陽光発電に用いられる太陽光パネルは、その寿命に達し始める 2030 年代以降、最大で約 50 万トンもの量が使用済みとなると推計される。循環経済への移行も急がれる中、使用済みとなる太陽光パネルの資源循環も大きな課題である。

太陽光パネルの資源循環に関する制度の整備状況に関して、日本では環境省によるリユースおよびリサイクルのガイドラインの公開や、10kW 以上の発電事業者を対象に廃棄等費用積立制度の導入が行われてきた。しかし、EU 諸国や韓国、台湾と異なり、メーカーや発電事業者に対するリサイクルの義務的制度は、政府の審議会にて検討されているものの、現時点では存在しない。よって、使用済み太陽光パネルが資源循環されるか否かは、その所有者たる事業者や家庭の意思決定に依るため、彼らの太陽光パネルの資源循環に対する意向を明らかにし、それを高める必要がある。

しかし、事業者や家庭を対象に太陽光パネルの廃棄や資源循環に関する認識や意向を調査した事例はほとんどない。既存の調査も、太陽光発電事業者[1)]や太陽光パネルを設置した家庭（以下「設置家庭」）[2)]に対する太陽光パネルの撤去意向の調査、あるいは設置家庭以外を含む一般消費者に対する太陽光パネルの廃棄やリサイクルに関する認識の調査[3)]であり、設置家庭が太陽光パネルの資源循環をどの程度重視して撤去業者を選択するかなどを具体的に調査した例はない。

そこで、本研究では、家庭用太陽光パネルに着目し、その資源循環を促す施策を検討するために、設置家庭へアンケート調査を行い、太陽光パネルの資源循環（リユースやリサイクル）の重視度やその要因を分析した。

2. 研究手法

2.1 アンケート調査

調査会社の登録モニターを対象に、ウェブアンケート調査を次の通り実施した。

- 調査時期：2023 年 3 月 20 日
- 調査対象者：次の項目の全てに該当する者
  - 日本在住の 18 歳以上の男女であること
  - 持ち家の一戸建てである自宅などに太陽光パネルを設置している家庭に属すること
  - その設置の際にその意思決定にかかわったこと
- サンプル数：600 名（アンケート配布数：54,263 名、スクリーニング回収数：4,839 名）

アンケート調査では次の項目などについて尋ねた。

- 家庭の情報：世帯年収、同居者の続柄ごとの人数（詳細な回答者・家庭の属性の分布は表 S1 に示す）
- 太陽光パネルを設置した理由
- 太陽光パネルの検査・メンテナンスの経験・意向
- 太陽光パネルの撤去・処分に関する情報を得た経験
- 太陽光パネルに不具合が生じて撤去する場合の、太陽光パネルの撤去業者の選定方法
- （撤去業者やその条件を自ら調査や検討などして選定する場合）撤去業者の各条件の重視度（5 段階リッカート尺度）：下にその一部を示す。
  - （不具合がない部分があれば）太陽光パネルがリユースされること
  - 太陽光パネルがリサイクルされること
  - 業者が国や自治体などの認定を受けていること
  - 費用が少ないこと

2.2 分析手法

アンケート結果に基づき、太陽光パネルの資源循環の重視度の観点から回答者を次の 2 群に分類した。

- 「循環積極層」：撤去業者やその条件などを自ら調査あるいは検討し、かつ太陽光パネルがリユースされることとリサイクルされることの少なくとも一方を「重視する」あるいは「やや重視する」回答者（資源循環を行う撤去業者を自ら積極的に選択する可能性が高いと想定される層）
- 「循環非積極層」：「循環積極層」以外の回答者（資源循環を行う撤去業者を自ら積極的に選択しようとするわけではないと想定される層）

これらの回答者分類と関連のある変数を、カイ二乗検定および残差分析によって分析した（有意水準 5%）。

3. 研究結果

3.1 撤去業者に関する考え方

撤去業者を選択する方法を尋ねた結果（図 1 a）、6 割程度が業者の条件を考慮して業者を選択するのに対し、4 割近くは、太陽光パネルの資源循環の如何などにかかわらず、初めに相談した太陽光パネルの設置業者やメーカーの紹介する撤去業者を無条件に選択するとわかった。また、撤去業者の条件を考慮する回答者による各条件の重視度を確認すると（図 1 b）、太陽光パネルがリユースあるいはリサイクル（資源循環）されることを「重視する」あるいは「やや重視する」と回答した家庭はそれぞれ半数強であり、半数近くは資源循環を重視しているわけではなかった。そして、資源循環を行う撤去業者を自ら積極的に選択する可能性が高いと想定される「循環積極層」の割合は、撤去業者の条件を考慮する回答者の 63.3%、したがって全体の 38.0%と 4 割未満にとどまった。残りの 6 割以上の家庭からの太陽光パネルが資源循環されるような追加的な施策の必要性が示唆される。

一方、国や関連団体のガイドラインを遵守していることや、国などの認定を受けていることは資源循環と同様に半数以上が重視していたが、強く重視している家庭の割合は資源循環を重視する家庭の割合より多かった。また、業者が良く信頼できることや、太陽光パネルの処理にかかる費用が少ないことは、それらを重視する家庭が約 7 割に及び、重視する家庭の割合が資源循環を重視する家庭の割合より多いことがわかった。

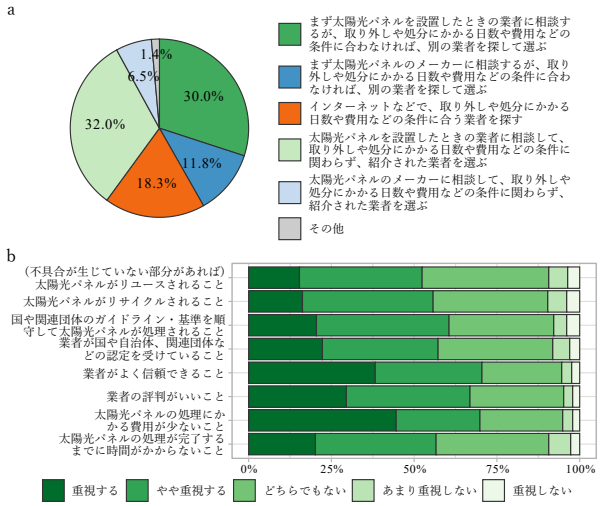


図 1 撤去業者の選択方法 (a) と撤去業者に関する各条件の重視度(b)

3.2 太陽光パネルのリサイクルの重視度の要因分析

「循環積極層」と「循環非積極層」の分類と関連のある要因を分析した結果（表 S3）、年代や世帯人数などの回答者や家庭の属性はいずれも有意な関連がなかった。一方、太陽光パネルの設置・利用・撤去に関する経験や考え方（詳細な分布は表 S2 に示す）のうち、

- 環境へのやさしいため太陽光パネルを設置したか
- 太陽光パネルの検査・メンテナンスの経験・意向
- 太陽光パネルの撤去・廃棄に関する情報を収集・入手した経験

が有意に関連していると示された。具体的には、環境にやさしいため太陽光パネルを設置した家庭（図 2a）、太陽光パネルの検査・メンテナンスを実施した経験がある、あるいは実施を検討している家庭（図 2b）、そして太陽光パネルの撤去や廃棄に関する情報を自ら調べた、あるいは受動的にでも情報を入手した経験のある家庭（図 2c）は、そうでない家庭よりも「循環積極層」の割合が高い傾向があると明らかになった（表 S4）。

特に、太陽光パネルの検査やメンテナンスを実施した経験はないが実施を検討している家庭、および太陽光パネルの撤去や廃棄に関する情報を受動的にでも入手した経験のある家庭についても、検査やメンテナンスを検討していない家庭や情報を入手した経験のない家庭よりも「循環積極層」の割合が高いと示された。このことから、太陽光パネルの検査・メンテナンスの重要性に関する情報や撤去・廃棄に関する情報を提供することで、家庭が太陽光パネルの資源循環をより重視するようになり、資源循環を自ら選択する可能性が高まることが示唆される。このような情報提供によって実際にどの程度家庭による資源循環の重視度を高められるかを明らかにすることが今後求められる。

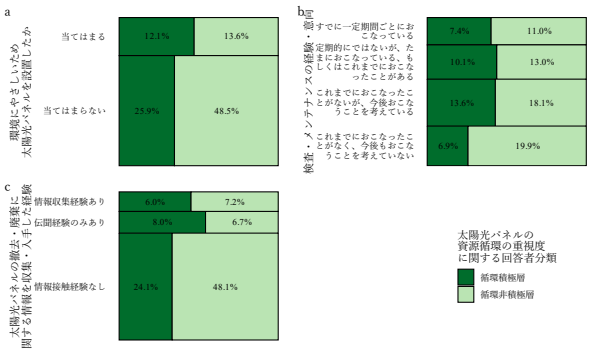


図 2 太陽光パネルの資源循環に関する回答者分類とその他の要因との関連

引用文献

1) 福田陽一朗, 山口勝透, 朝倉賢:“第 18 回日本 LCA 学会研究発表会”, オンライン, (2023), pp.1-A2-03
2) Murakami S., Yamamoto H., Toyota, T.: Sustainability, 13 (19), (2021), pp. 10507.
3) Daniela-Abigail H.L., Tariq R., El Mekaoui A., Bassam A., De Lille M. V., Ricalde L. J., Riech I.: Sustain. Cities Soc., 77, (2022), pp.103539.

Supporting Information

表 S1 回答者やその家庭の基礎属性の分布

属性	属性の詳細	割合	属性	属性の詳細	割合	属性	属性の詳細	割合
性別	男性	69.4%	年代	20 代以下	2.9%	世帯年収	200 万円未満	5.1%
	女性	30.2%		30 代	12.5%		200 万円以上 250 万円未満	2.9%
	その他	0.4%		40 代	21.7%		250 万円以上 300 万円未満	2.0%
地方	北海道	1.6%		50 代	28.8%		300 万円以上 400 万円未満	8.1%
	東北地方	8.1%		60 代	25.0%		400 万円以上 500 万円未満	11.2%
	関東地方	34.9%		70 代以上	9.2%		500 万円以上 600 万円未満	10.3%
	中部地方	19.0%	世帯人数	1 人	5.4%		600 万円以上 750 万円未満	12.8%
	近畿地方	17.5%		2 人	22.6%		750 万円以上 1000 万円未満	16.8%
	中国地方	6.7%		3 人	27.5%		1000 万円以上 1500 万円未満	9.2%
	四国地方	4.3%		4 人	23.9%		1500 万円以上 2000 万円未満	3.4%
	九州地方	7.8%		5 人	8.3%		2000 万円以上	2.2%
				6 人	4.9%		わからない・覚えていない・回答しない	15.9%
				7 人以上	7.4%			

表 S2 太陽光パネルの設置・利用・撤去に関する設問項目への回答の分布

変数名	詳細	割合	変数名	詳細	割合	変数名	詳細	割合
太陽光パネルの撤去・廃棄に関する情報を収集・入手した経験	情報収集経験あり	13.2%	検査・メンテナンスの経験・意向	すでに一定期間ごとにおこなっている	18.4%	環境にやさしいため太陽光パネルを設置したか	当てはまる	25.7%
	伝聞経験のみあり	14.6%		定期的にではないが、たまにおこなっている、もしくはこれまでにおこなったことがある	23.1%		当てはまらない	74.3%
	情報接触経験なし	72.2%		これまでにおこなったことがないが、今後おこなうことを考えている	31.6%			
				これまでにおこなったことがなく、今後もおこなうことを考えていない	26.8%			

表 S3 太陽光パネルの資源循環の重視度との関連に関するカイ二乗検定の結果

変数名	性別	年代	居住地方	世帯人数	世帯年収	太陽光パネルの撤去・廃棄に関する情報を収集・入手した経験	検査・メンテナンスの経験・意向	環境にやさしいため太陽光パネルを設置したか
p 値	0.938	0.734	0.497	0.743	0.237	< 0.001	0.004	0.012

表 S4 残差分析の結果

変数	項目	循環非積極層	循環積極層
環境にやさしいため太陽光パネルを設置したか	当てはまる	13.6% (-2.62)	12.1% (2.62)
	当てはまらない	48.5% (2.62)	25.9% (-2.62)
検査・メンテナンスの経験・意向	すでに一定期間ごとにおこなっている	11.0% (-0.51)	7.4% (0.51)
	定期的にではないが、たまにおこなっている、もしくはこれまでにおこなったことがある	13.0% (-1.54)	10.1% (1.54)
	これまでにおこなったことがないが、今後おこなうことを考えている	18.1% (-1.61)	13.6% (1.61)
	これまでにおこなったことがなく、今後もおこなうことを考えていない	19.9% (3.60)	6.9% (-3.60)
太陽光パネルの撤去・廃棄に関する情報を収集・入手した経験	情報収集経験あり	7.2% (-1.37)	6.0% (1.37)
	伝聞経験のみあり	6.7% (-3.28)	8.0% (3.28)
	情報接触経験なし	48.1% (3.62)	24.1% (-3.62)

※ カッコ外の値は当該セルに対応する回答者が回答者全体に占める割合を、カッコ内の値は調整済み残差を表す。

口頭発表セッション

2025年3月7日(金) 11:00 ~ 12:20 A会場：2451中講義室（4F）

[3-A2] 自動車材料

座長：伊坪 徳宏 (早稲田大学)

11:00 ~ 11:20

[3-A2-01]

自動車部品のリマニュファクチャリングを対象とした環境影響評価

*一沢 直起[1]、増井 慶次郎[2]、古川 慈之[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 産業技術総合研究所)

11:20 ~ 11:40

[3-A2-02]

再生段階を含む自動車用材料のLCA

*川邊 渉[1]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学)

11:40 ~ 12:00

[3-A2-03]

材料の環境インパクト評価計算手法の基盤構築（第１報）

*藤井 尚人[1]、小那覇 安則[1]、古沢 透流[1] (1. 本田技術研究所)

12:00 ~ 12:20

[3-A2-04]

環境影響評価に向けた自動車用材料グローバル情報ネットワーク基盤の構築

*古沢 透流[1]、小那覇 安則[1]、伊藤 剛[1] (1. 株式会社本田技術研究所)

©日本LCA学会

再生段階を含む自動車材料の LCA

Life Cycle Assessment of Materials for Automobiles including Recycling Scenarios

○川邊渉*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Wataru Kawabe, Norihiro Itsubo
1) 早稲田大学
* wataru35@fuji.waseda.jp

1. はじめに

資源の安定供給や環境負荷の低減のために、サーキュラーエコノミーの実現に向けた取り組みは非常に重要である。その中でも日本の主力産業であり、多くの資源を利用している自動車業界では、2005年の自動車リサイクル法の施行から積極的にリサイクルが行われている。今後はさらにマテリアルリサイクルの割合を増やしていくなど、さらなる取り組みの推進が必要となる。また、今後のサーキュラーエコノミー実現に向けた方針を検討するために、定量的な環境影響を評価することが求められている。

本研究では自動車の材料について、特にリサイクル段階に着目し、各材料業界の将来的なロードマップを踏まえたシナリオの考察・評価を行った。

2. 研究手法

2.1 将来シナリオの決定

本研究では自動車の金属材料に関して、SSP シナリオを考慮したシナリオに加えて、各材料業界において、カーボンニュートラル実現に向けて検討されている状況を踏まえた将来シナリオを2020年、2030年、2040年、2050年についてそれぞれ検討した。

2.2 Premise を用いた将来予測

本研究では、環境影響に関して、科学的・経済的・社会的な要因を統合的に分析するためのモデルである統合評価モデル（以下、IAM）に基づいた分析を行える Premise[1)]というツールを用いて、環境影響評価を行った。Premise は IAM を ecoinvent に組み込むことで、年ごとの SSP シナリオを踏まえた ecoinvent のデータベースを作成し、そのデータベースを用いて評価を行うことで SSP シナリオを考慮した将来予測 LCA を行うことが可能となる。ここでは、IAM は REMIND、データベースは ecoinvent 3.10、算定ツールは SimaPro 9.6 をそれぞれ使用した。

2.3 各材料業界でのカーボンニュートラルに向けた取り組みの実装

自動車材料の将来予測をするにあたり、2.1.1 で示した Premise による評価では、現行のプロセスをもとにした評価であるため、各材料業界が示す、カーボンニュートラルに向けたシナリオとはかけ離れた結果となる。そこで、今回対象となる鉄・アルミ・銅について各業界が設定しているロードマップ[2)3)]を含めたシナリオを考案した。

2.4 Circular Footprint Formula を用いた評価

欧州委員会が主導する環境フットプリント[4)]内で定義されている Circular Footprint Formula（以下、CFF）を用いて評価を行う。（式 1）

$$(1-R_1)E_V + R_1\left(AE_{recycled} + (1-A)E_V \times \frac{Q_{sin}}{Q_p}\right) + (1-A)R_2\left(E_{recyclingEoL} - E_V^* \times \frac{Q_{Sout}}{Q_P}\right) \quad (1)$$

R_1, R_2：原材料調達および使用後段階のリサイクル率

A：リサイクル材の環境負荷およびその削減効果を供給者と需要者に配分する際の配分係数

E_V：バージン材の調達に係る環境負荷量

$E_{recycled}$：原材料調達段階のリサイクル材の生成に係る環境負荷量

$E_{recyclingEoL}$：使用後処理段階におけるリサイクル材の生成プロセスに係る環境負荷量

E_V^*：リサイクル材により代替されると考えられるバージン材の調達に係る環境負荷量

$\frac{Q_{sin}}{Q_p}$, $\frac{Q_{Sout}}{Q_P}$：原材料調達および使用後段階におけるリサイクル材の品質を係数化したもの

3. 結果

ここで、Premise により算出した 2050 年の結果に加え、鉄鋼業界のロードマップより、CCS、大型電炉の導入を想定したシナリオを考えた。①Premise のみのシナリオ②高炉・転炉プロセスのすべてに CCS が導入されたシナリオ③高炉・転炉プ

ロセスの半数に CCS が導入され、残りは電炉プロセスに代替されたシナリオ、④高炉・転炉プロセスがすべて電炉プロセスに代替されたシナリオの 4 シナリオの結果の比較は図 2 の通りであった。

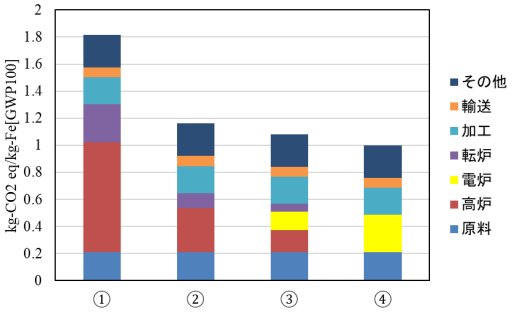


図 1　鉄の 4 つのシナリオの$\boldsymbol{E_V}$値

Premise により算出した 2050 年の結果に加え、アルミ業界のロードマップより、再生可能エネルギーの普及が進んだことを想定したシナリオとの比較は図 3 の通りであった。またこの時、電力構成は 2050 年の日本で想定されている値を用いた。

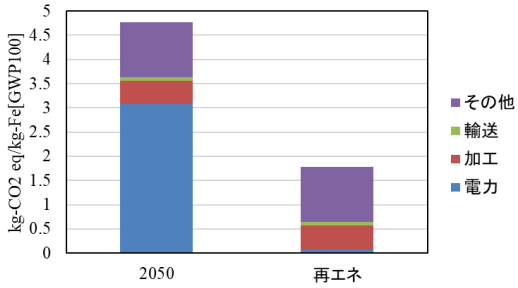


図 2　アルミの 2 つのシナリオの$\boldsymbol{E_V}$値

ここで、鉄・アルミ・銅のシナリオごとのパラメータ$\boldsymbol{E_V}$の値を用いて、CFF による計算を行う。守秘義務の関係上$\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{R_1}$, $\boldsymbol{R_2}$, $\frac{Q_{sin}}{Q_p}$, $\frac{Q_{Sout}}{Q_P}$の具体的な値については示せないため結果のみとなるが、それぞれの 2020 年~2050 年の傾向として、$\boldsymbol{A}$は 2050 年まで各材料共に低い値である。$\boldsymbol{R_1}$は各材料も 2050 年に向けて上昇傾向にあり、$\boldsymbol{R_2}$, $\frac{Q_{sin}}{Q_p}$, $\frac{Q_{Sout}}{Q_P}$はいずれの材料もすでに成熟した値である。

これらの値を用いて ICE, EV のモデル車種一台あたりの CFF の計算結果を示す。またこの時、業界シナリオについて、鉄は CCS や電炉大型化のどちらかが極端に導入されたシナリオよりも実現可能性が高いと考えられることから、③のシナリオを採用した。また、銅は日本の 2050 年の電力構成を反映した結果を用いた。

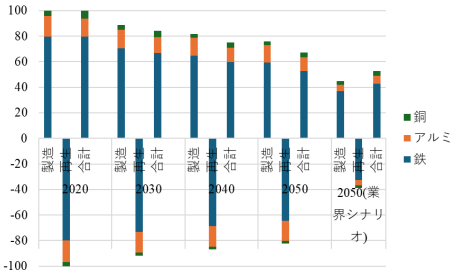


図 3　ICV 1 台当たりの算定結果(2020 年比)

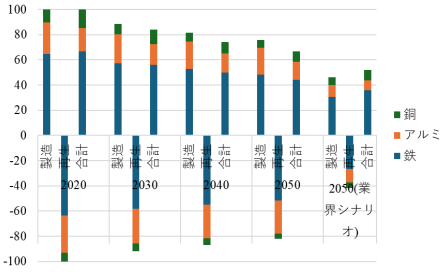


図 4　EV 1 台当たりの算定結果(2020 年比)

4.　まとめ

本研究では、自動車材料に着目し、各材料業界の動向を捉えながらシナリオごとの将来的な算定を行った。業界シナリオの結果では 2020 年比でどちらも 50%近くの削減となった。$\boldsymbol{E_V}$が小さくなるとリサイクル効果も小さくなってしまうことがわかる。近穂は再生可能エネルギーの普及を前提として、他のプロセスでの電化の推進などによりさらなる削減も期待できる。今後樹脂などを含め、自動車全体の材料評価へと発展させていきたい。

5.　引用文献

1) R. Sacchi, T. Terlouw, K. Siala, A. Dirnaichner, C. Bauer, B. Cox, C. Mutel, V. Daioglou, G. Luderer: Renewable and Sustainable Energy Reviews, volume 160, (2022)

2) 一般社団法人日本鉄鋼連盟：“カーボンニュートラルに向けた日本鉄鋼業の取り組みと GX-ETS への意見について”，入手先〈https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/carbon_pricing_wg/dai1/siryou4.pdf〉

3) 経済産業省：“2050 年カーボンニュートラルに向けたアルミニウム圧延業界のビジョン（基本方針）”〈https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/kagaku_wg/pdf/2023_01_07_02.pdf〉

4) European Commission：“Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method”, (2019), pp.65-74

材料の環境インパクト評価手法の基盤構築（第 1 報）

Establishment of Foundation for Methods to Evaluate Environmental Impact of Materials (First Report)

○藤井尚人*[1)]、小那覇安則[1)]、古沢透流[1)]
Naoto Fujii, Yasunori Onaha, Toru Furusawa
1) 株式会社本田技術研究所
* naoto_fujii@ jp.honda

1. 背景

現在、世界各国で気候変動以外の環境リスクへの関心が高まっており、その対応が求められている。世界経済フォーラムでは気候変動に起因する異常気象を短期リスクとして提示しているが、長期的なリスクにおいては生物多様性の損失や天然資源の枯渇など、気候変動から発展しうる環境影響をリスクとして挙げている[1)]。2022 年の CBD（Convention of Biological Diversity ） COP15 においては、昆明・モントリオール生物多様性枠組が採択され、生物多様性保全に向けた定量的な目標が設定された[2)]。同枠組みの中では事業者に事業活動に伴う環境影響の評価・開示を求めることが記述されている。

事業活動や製品・技術に対する環境影響の評価手法として LCIA（Life Cycle Impact Assessment）が多く活用されている。ライフサイクルにおける環境影響を評価していく中で、特にエンドポイントの評価においては対象地域により環境影響が大きく異なることがわかっており、評価手法によっては評価対象地域の違いにより被害係数が 100 倍以上異なる[3)]。そのため、グローバルにサプライチェーンを有する事業者においては、地域性反映の有無により評価結果が大きく異なる可能性があることから、LCIA 評価への地域性反映影響の把握は極めて重要である。

本研究では重要鉱物資源を多く含むリチウムイオン電池の製造をケーススタディとし、インベントリ分析を通した地域性の感度分析の実施と地域性の適用範囲による LCIA 評価結果に対する影響の検討を行った。

2. 実験方法

2.1 評価対象

地域性の反映手法の検討のために、二次データを用いたケーススタディを行った。評価対象は ecoinvent 3.9[4)]に格納されている”battery cell production, Li-ion, NMC811”を対象とし、システム境界は原材料の取得からセルの組み立て後の充放電確認テスト完了までとした。Fig.1 にシステム境界を示す。

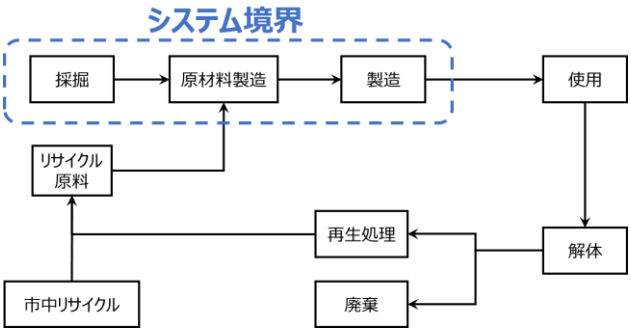


Fig.1 本研究のシステム境界

2.2 LCIA 評価手法

評価手法として、日本で開発された LIME3(Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling 3)[3)]を採用した。LIME3 は世界各国の環境負荷影響を考慮した影響領域ごとの被害係数が設定されているため、環境被害の地域性影響の検証が可能である[3)]。評価は LIME3 で設定されている 4 つのエンドポイント (人間健康、生物多様性、社会資産、一次生産)に対する統合化評価を行った。

2.3 地域性反映領域の設定

地域性の反映対象を抽出するために、まずグローバル平均の評価を行った。Fig.2 に”battery cell production, Li-ion, NMC811”のグローバル平均データの統合化評価結果を示す。

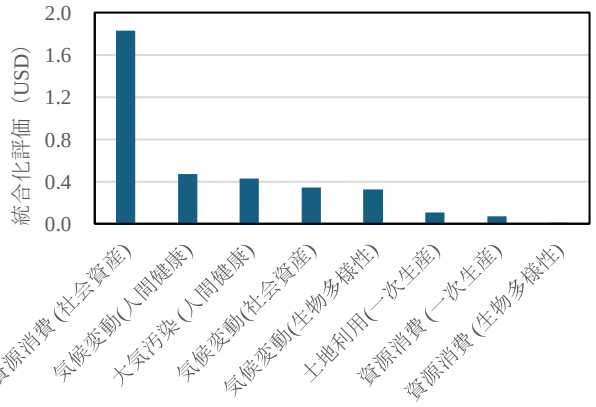


Fig.2 リチウムイオン電池の統合化評価結果

Fig.2 の結果から、リチウムイオン電池における環境負荷は資源消費による社会資産影響が被害全体の51%を占めることがわかった。本研究では最も被害影響が大きい資源消費による社会資産影響を地域性反映対象として設定した。また、インベントリデータの解析結果から資源消費に大きな影響を及ぼしている鉱物資源の特定を行った。資源消費に対するインベントリ影響のパレート図を Fig.3 に示す。Fig.3 のパレート図では Copper、Nickel の影響が大きく、その後、天然ガス、Chromium、Cobalt、iron と続いた。本研究では Fig.3 に示す被害影響が小さいインベントリから順に地域性を反映させていった場合の感度分析および 2.4 項に示す製造国変化時に生じる資源輸入国の変化が及ぼす LCIA 評価結果への影響を分析した。

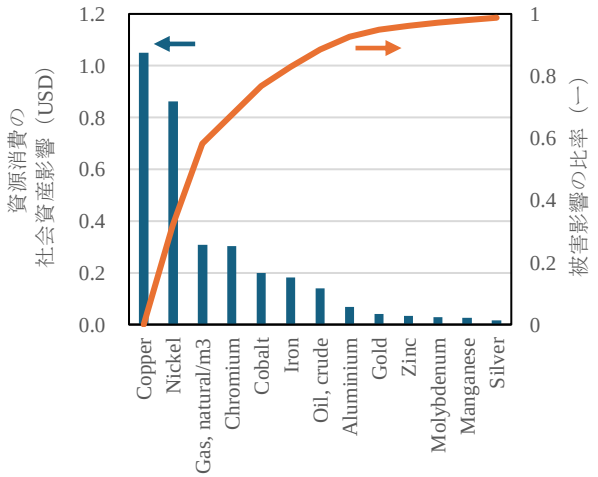


Fig.3 資源消費の社会資産影響における
インベントリのパレート図

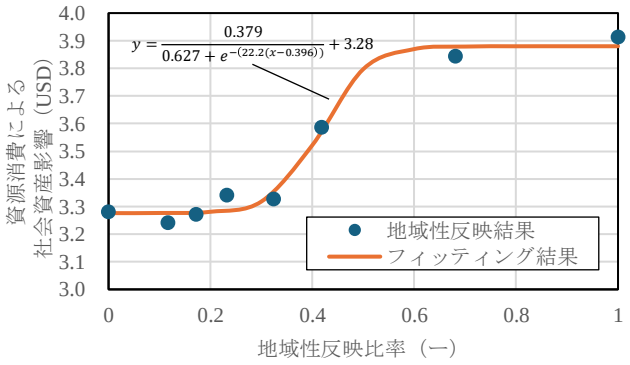
2.4 地域性のシナリオと反映手法

Fig.3 で示した資源消費の社会資産影響に寄与するインベントリに対して、LIME3 に設定されている国別の被害係数を乗じ、環境被害の地域性影響を評価した。地域性シナリオとしてリチウムイオン電池は日本、中国、アメリカで生産されることを仮定した。電池の製造・組み立ては上記三ヵ国で行われ、Fig.3 に示した対象鉱物の採掘は日本、中国、アメリカの輸入統計に沿った地域で行われるものとした。環境被害の評価は以下の手順で実施した。まず各国の対象鉱物の国内生産/輸入割合と被害係数による加重平均をとり、鉱物ごとの被害係数を算定した。その後、算定した被害係数をインベントリの活動量に乗じ、環境被害を算出した。

3. 研究結果

代表として、日本の地域性反映影響の結果を Fig.4 に示す。Fig.4 のプロットは、被害影響が小さいインベントリから順に地域性を反映していった際の、評価結果の変化を示している。Fig.4 の地域性反映結果は 3.3 USD から 3.9 USD まで変化した。得られた地域性反映結果にパラメーターフィッティングを行い、地域性反映影響の定式化を試みた。同定した関数において、地域性反映比率が 1 と 0 の場合、社会資産影響の評価結果におよそ 19%の差が生じた。また、地域性反映比率が 0.6 以上になると 3.9 USD に収束する結果となった。

Fig.4 地域性の反映感度分析結果



4. 結言

本研究ではリチウムイオン電池の資源消費による地域性影響の感度分析を行った。その結果、地域性反映比率を 0.6 以上とすれば、環境被害が一定値へ収束し、充分地域性を反映できると示された。今回の報告では膨大な量のインベントリ、および環境被害の一部のみに焦点を当てて地域性の反映を行ったが、今後はさらに地域性の影響範囲を検証するとともにより効率的な地域性反映手法の構築を検討する。

5. 参考文献

1) 世界経済フォーラム：”The Global Risks Report 2025”, (2025), pp.15, 44
2) 環境省：” 昆明・モントリオール生物多様性枠組”,生物多様性,(オンライン),入手先< https://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/treaty/gbf/kmgbf.html>
3) 伊坪徳宏, 稲葉敦, “LIME3 改訂増補 グローバルスケールの LCA を実現する環境影響評価手法”, 丸善出版, (2023)
4) ecoinvent：”ecoQuery”,ecoinvent database,(オンライン)入手先< https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9/cutoff>

環境影響評価に向けた自動車用材料
グローバル情報ネットワーク基盤の構築

Construction of global information network for environmental evaluation of automotive material

○古沢透流*[1)]、伊藤剛[1)] 小那覇安則[1)]
Toru Furusawa, Tsuyoshi Ito, Yasunori Onaha
1) 株式会社　本田技術研究所
* toru_furusawa@jp.honda

1. はじめに

近年、環境配慮型社会の実現に向けて、国内外の自動車業界では車両一台の CFP 評価や基準作成が盛んになっている[1)2)3)]。しかし、評価対象となる車両は、駆動形式の種類や構成部品の多さ、工場における様々な製造工程、そしてサプライチェーンの深い階層によって成り立っている。また、新技術開発フローにおいても、初期の戦略や企画段階から量産上市後の認証対応まで、評価の目的に応じて確からしさや算定条件が異なる。その中で、車両一台に用いられる材料は数百種類以上あり、それぞれの原材料の採掘や栽培から、輸送、製造までのプロセス、再生材やバイオ材の適用、製造技術の進化など、複雑な属性情報を有している為、材料原単位の設定が容易ではない。各種ソフトウェアベンダーのツールに材料情報の設定機能が見られるものの[4)]、自動車部品に適した使い方、国内外の業界プラットフォーム[5)]への材料情報の反映方法、そして CFP 以外の環境インパクト評価[6)]への拡張が現状の課題として挙げられる。

2. 研究目的

本研究では、自動車業界において環境影響評価に必要となる材料のグローバル情報を連携した基盤を構築して開発効率を向上すること、また、業界の協調と競争領域を明確化して、材料を用いた環境負荷削減や社会課題の早期解決へ貢献することを目的とする。

本稿では、まず車両開発に用いられる様々な材料名称や情報の違いを、CFP 用の材料分類にマッチングさせる手法とその結果について報告する。

3. 方法

3.1 自動車用材料情報の抽出

自動車開発では、開発初期段階から BOM (Bill of Materials)に構成材料を設定して仕様の検討が行われる。また量産上市後は、使用した化学物質の開示法規の為、Fig.1 に示される自動車会社と取引先の部品会社を含めて国際的に共通利用されている IMDS(International Material Data Sheet)[7)]に部品構成材料と化学物質情報を入力する。

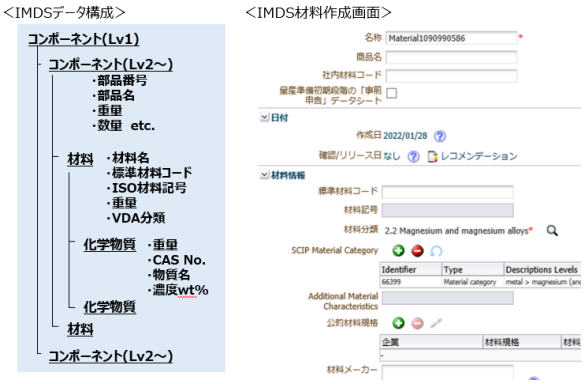


Fig.1 IMDS の材料情報

一方、LCA において、材料の原単位に関するインベントリ情報がデータベース化されているが[8)9)]、Fig.2 のようにプロセス情報が統一化されておらず、グローバルで異なる形式となっている。そのためユーザーが適切なデータを選択し判断できる仕組みが必要となる。

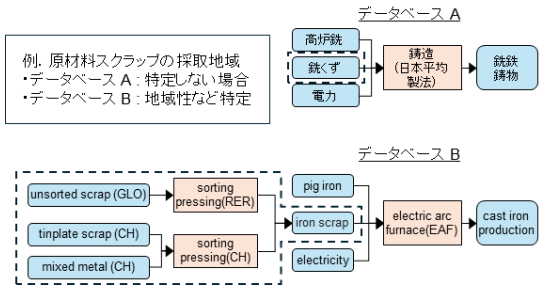


Fig.2 材料原単位プロセス情報の比較イメージ

Fig.3 に、自動車材料情報と環境影響評価の繋がりを示す。材料研究を目的の出発点とした場合、開発、量産段階では用いる材料情報が異なり、また業界基準との連携や多面的な指標化といった複雑な繋がりが判る。このような多様な繋がりを有する材料情報を用いて、CFP や環境影響評価を行う為には、属性情報の繋がりをネットワーク化して、マッチング管理する技術を構築することにより、今後も更に拡がる複雑さを根本的に解決できるものと考えた。

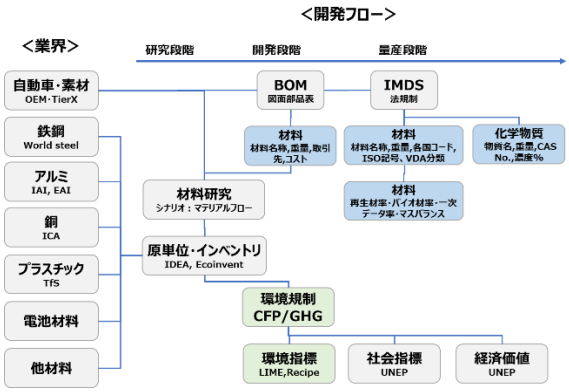


Fig.3 自動車材料情報と環境影響評価の繋がり

3.2 材料情報マッチング手法

（1）コンセプト

現状有用となるツール化と将来のありたい姿を達成する二段階で検討した。

・Step.1：経験知＋ID マッチング

・Step.2：学習機能 AI マッチング

Step.1 では、材料情報のこれまでの属性使用履歴を収集登録し、CFP 算定に必要な材料分類を割当てた。また新たな材料名称など既存の履歴情報に割当てられない場合には、デジタル ID を起点としてマッチング可能なアルゴリズムを作成した。国内外のデータ共通性を考慮すると、IMDS の材料データは自動車会社・部品会社間で、そして国際的にも共通利用されている。その中で、CAS No.は法規上明記が必須で組成情報を有する為、ID と設定した。Step.2 では、得られた課題を反映し、また将来の拡張性を考慮して、材料分類の効率化や信頼性の向上を目指す。

（2）マッチングプログラム

実際の車両の IMDS データを用いた。また、材料規格、ISO 記号、材料辞書（過去の材料名称を予め CFP 用の材料分類に登録）を用いて一致検索させた。一致しない材料については、VDA 分類と IMDS の CAS No.から化学組成による材料分類を行った。ツールとして Excel マクロプログラムを作成した。Fig.4 にフロー図を示す。

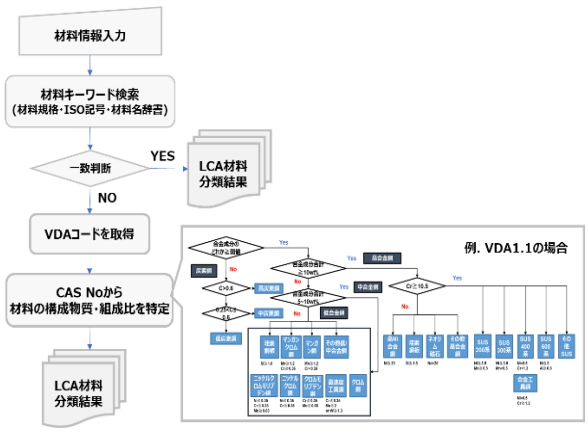


Fig.4 材料分類マッチングプログラム

4. 結果と考察

（1）マッチング結果

車両部品を構成する約 67,000 行の材料名称から CFP 算定用の材料分類に全てマッチングすることができた。Fig.5 に結果の一部を示す。

材料名称	CFP材料分類（マッチング結果）
Electrical steel sheets	電磁鋼板
C1020-1/2H	OFC（無酸素銅）
A5052	アルミ展伸材（板）
Plastics PUR	化石資源由来 その他熱硬化樹脂
Chip	その他無機材
ACRYL	化石資源由来 合成ゴム
CopperC1220	銅条（TPC）
Polyethylene	PE
PP-GF30	PP
DC01	冷延鋼板
AD12.1	アルミダイキャスト材
DUMMY	炭素鋼棒鋼・線材
PBT−GF25	PBT
A6061BD-T8	アルミ押出材
…	…

Fig.5 部品材料名称と CFP 材料分類の一致結果

（2）効果と課題

膨大な自動車部品材料データからツールを用いて CFP 用材料分類へ変換が出来た。一方、今後の課題として、計算時間の短縮と分類精度の両立、材料加工プロセスや調達の上流側の詳細な属性情報の考慮、指標の多様化に伴う不確かさへの対応が挙げられる。

5. まとめ

現状の自動車部品に用いられる材料情報から、経験知と ID マッチング手法を併せて CFP 材料分類のツール化ができた。デジタル ID に、国内外で共通性が高い IMDS CAS No.を用いた。その結果、材料分類に対応した原単位を乗じて CFP 算出が可能となりユーザーに有用なツールとなった。

今後、材料技術に対する環境影響評価に対して、業界協調と競争領域を明確にし、多様化する材料データの効率的かつ信頼性の高いグローバルネットワーク基盤の構築を推進する。

6. 参考文献

1) https://www.jama.or.jp/operation/ecology/LCA/index.html
2) https://www.japia.or.jp/work/kankyou/lciguideli
3) https://wiki.unece.org/pages/viewpage.action?pageId=172852228
4) https://www.ipoint-systems.com/
5) https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/digital_architecture/ouranos.html
6) https://lca-forum.org/about/project/lime/
7) https://public.mdsystem.com/ja/web/imds-public-pages
8) https://riss.aist.go.jp/idealab/
9) https://ecoinvent.org/

口頭発表セッション

2025年3月7日(金) 9:20 ~ 10:40 B会場：2455中講義室（4F）

[3-B1] 建築（3）

座長：岩下 博哉 (一般社団法人サステナブル経営推進機構)

9:20 ~ 9:40

[3-B1-01]

CASBEE戸建におけるLCCO2評価に関するデータベースの更新とその影響

*磯部 孝行[1]、清家 剛[2]、秋元 孝之[6]、中野 淳太[7]、三井所 清史[3]、近田 智也[4]、長岡 輝徳[4]、渡辺 直哉[5]、林 哲也[8] (1. 武蔵野大学、2. 東京大学大学院、3. 岩村アトリエ、4. 積水ハウス、5. 旭化成ホームズ、6. 芝浦工業大学、7. 法政大学、8. 積水化学工業)

9:40 ~ 10:00

[3-B1-02]

建築の段階に応じたBIM連携LCA算定モデルの提案
～簡易算定モデル・詳細算定モデル～

*掛上 恭[1]、石津 旭[1] (1. 住友林業株式会社)

10:00 ~ 10:20

[3-B1-03]

欧米のグリーンビルディング認証におけるLCA・EPDの活用と今後

*大淵 知至[1]、林 昌明[2]、伊藤 聖子[1]、鶴田 祥一郎[1]、岩下 博哉[1] (1. 一般社団法人サステナブル経営推進機構、2. 一般社団法人グリーンビルディングジャパン)

10:20 ~ 10:40

[3-B1-04]

建築・建設分野における製品の環境情報開示の動向ー欧州規則における開示項目に着目してー

*南野 萌花[1]、伊藤 聖子[1]、鶴田 祥一郎[1]、岩下 博哉[1] (1. 一般社団法人サステナブル経営推進機構)

©日本LCA学会

CASBEE 戸建における $LCCO_2$ 評価に関するデータベースの更新とその影響

Update of database about $LCCO_2$ on CASBEE for New Detached Houses

○磯部孝行[*1)]、清家剛[2)]、秋元孝之[3)]、中野淳太[4)]、三井所清史[5)]、近田智也[6)]、長岡輝郎[6)]、渡辺直哉[7)]、林哲也[8)]

Takayuki Isobe, Tsuyoshi Seike, Takashi Akimoto, Junta Nakano, Kiyoshi Minsho, Toshiya Chikada, Akirou Nagaoka, Naoya Watanabe, Tetsuya Hayashi

1) 武蔵野大学, 2) 東京大学大学院, 3) 芝浦工業大学, 4) 法政大学, 5) 岩村アトリエ, 6) 積水ハウス, 7) 旭化成ホームズ, 8) 積水化学工業

* t_isobe@musashino-u.ac.jp

1. はじめに

建築分野は建物のライフサイクルをとおし多様な産業と関連し、カーボンニュートラルへの貢献が求められる分野である。その中で、日本建築学会の LCA ツール（AIJ-LCA ツール）、データベース(AIJ データベース)が 2024 年 3 月に改定され、近年、建物の LCA の考え方も整理され、以前と異なる点もある。既存の CASBEE すまい（戸建）（CASBEE 戸建）の $LCCO_2$ データは、改定前の AIJ-LCA ツール、AIJ データベースを基礎データとし用い、国内消費を評価範囲に設定したデータとなっている。そのため、最新の AIJ-LCA ツール・データベース、考え方に合わせ CASBEE 戸建の $LCCO_2$ 評価に係るデータ更新を進めている。

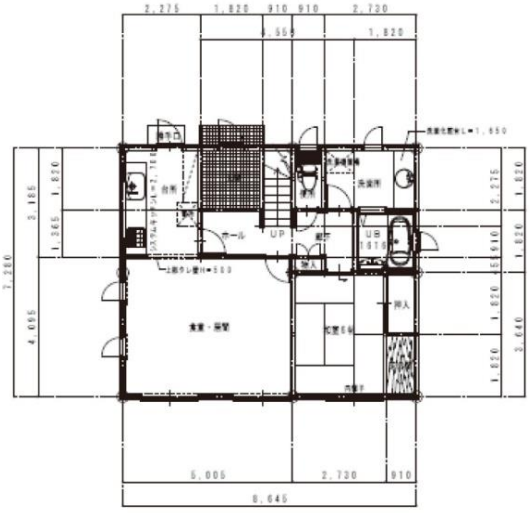
2. CASBEE 戸建とデータ更新の概要

2.1 CASBEE 戸建の $LCCO_2$ 評価

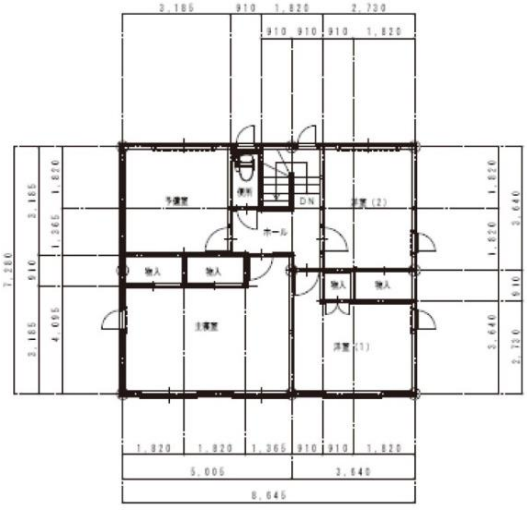
CASBEE 戸建は戸建住宅の設計内容に基づき総合的な環境性能を評価するツールである。その評価項目の一つとして $LCCO_2$ がある。CASBEE 戸建の $LCCO_2$ 評価は、建設段階、修繕・更新・解体段階と居住段階に分けられる。建設段階、修繕・更新・解体段階は、標準的な戸建住宅（延床面積 125.8m^2）を想定した住宅モデル(図 1)に基づき AIJ-LCA ツールを用い建設段階、修繕・更新・解体段階の CO_2 排出量を算定し、データベース化している。上記、CO_2 排出量データを用い、SI にある諸条件を設定し算定される。居住段階は「住宅に関する省エネルギー基準に準拠したプログラム」より得られた一次消費エネルギー量の結果を用い、CO_2 原単位を乗じ算定される。これら、建設段階、修繕・更新・解体段階、居住段階の CO_2 排出量の合計値が CASBEE 戸建での $LCCO_2$ となる。算定方法の詳細は既往文献[1)]を参照いただきたい。

2.2 $LCCO_2$ 評価に係るデータ更新と検証内容

CASBEE 戸建の $LCCO_2$ 評価に係るデータ更新は、



1F 平面図



2F 平面図

図 1 戸建住宅の標準モデル(平面図)

主に建設段階、修繕・更新・解体段階の CO_2 排出量データである。更新内容は、評価範囲を国内消費支出から国内＋海外消費支出に変更したほか、最新の AIJ-LCA ツール及び AIJ データベース[2)]より算定された

CO_2 排出量のデータへの更新を進めている。本報では木造を対象に、上記、得られた CO_2 排出量の更新データを改定データ②（国内＋海外消費支出）とし、更新前、改定データ①（国内消費支出）の $LCCO_2$ を比較しデータ更新に伴う評価結果への影響を明らかにする。

3. 更新データと検証内容

3.1 建設、修繕・更新・解体段階の CO_2 排出量

更新前、改定データ①（国内消費支出）、改定データ②（国内＋海外消費支出）の評価結果を図 2 に示す。

更新前と改定データ①を比較すると、改定①の建設段階の CO_2 排出量が大きくなるが修繕・更新・解体段階の CO_2 排出量が小さくなるため、トータルでの CO_2 排出量は 6.0kg- CO_2/年 m^2 と同程度となる。

更新前と改定データ②を比較すると、改定②の建設段階の CO_2 排出量は 3.2kg- CO_2/年 m^2 と更新前の 1.5 倍程度大きくなり、修繕・更新・解体段階の CO_2 排出量も 4.75kg- CO_2/年 m^2 と 1.2 倍程度大きくなる。

3.2 $LCCO_2$ と ZEH、LCCM に関する検証

ここでは 3.1 で示した建設、修繕・更新・解体段階と居住段階を含めた $LCCO_2$ を簡易に評価するために標準的なエネルギー基準を参照する BEI の考え方を用い ZEH、LCCM 達成の条件を整理した。評価結果を図 3 に示す。居住段階を含む $LCCO_2$ の結果（再エネ等を除く）をみると更新前、改定①の居住段階が 8 割を占めることが分かった。他方、改定②の居住段階の CO_2 排出量は同値ではあるが 7 割を占めることが分かった。

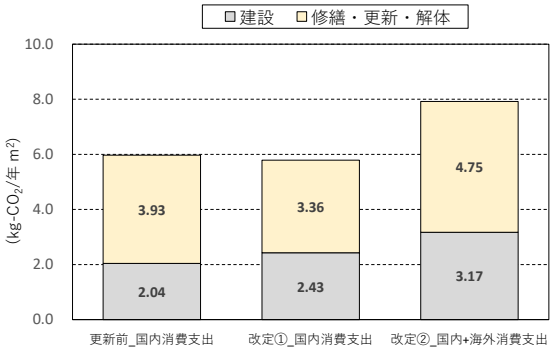


図 2 建設、修繕・更新・解体の CO_2 排出量(木造)

4. まとめ

現在、CASBEE 戸建の $LCCO_2$ 評価に係る CO_2 データ更新（改定②_国内+海外消費支出）を進めている。本報では建設、修繕・更新・解体段階の CO_2 排出量データの更新に伴い、CASBEE 戸建から得られる $LCCO_2$ は、更新前の $LCCO_2$ より大きな結果となる。また、LCCM の達成条件も更新前よりも PV の容量として 0.5 kW ほど厳しい条件となることが明らかとなった。

謝辞

本検証にご支援いただいたみなさまに謝意を表す。

引用文献

1) 近田智也：LCA 学会誌, 13(2), (2017), pp.118-125
2) 日本建築学会 : AIJ-LCA ツール(戸建住宅版) ,2024, Ver3.02

	ZEH（BEI0.8）			LCCM（BEI0.8）		
	更新前_国内消費支出	改定①_国内消費支出	改定②_国内+海外消費支出	更新前_国内消費支出	改定①_国内消費支出	改定②_国内+海外消費支出
建設	2.76	3.15	3.89	3.36	3.76	4.54
修繕・更新・解体	3.93	3.36	4.75	3.93	3.36	4.75
居住（消費）	31.89	31.89	31.89	31.89	31.89	31.89
居住（再エネ等）	-21.71	-21.71	-21.71	-39.44	-39.88	-41.21
LCCO2収支	16.87	16.69	18.82	-0.26	-0.87	-0.03
PV容量(kW)	4.9	4.9	4.9	8.9	9.0	9.4

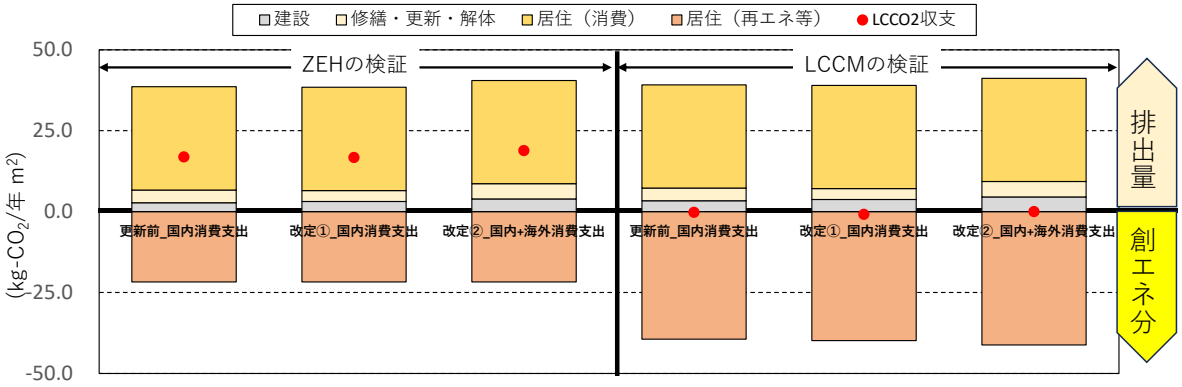


図 3 $LCCO_2$ 及び ZEH と LCCM に関する検証結果（木造）※図中の数値は kg-CO_2/年 m^2

Supporting Information

補足情報として更新を予定している CASBEE 戸建の木造の CO_2 排出量に係る情報を示す。本データは 2025 年 1 月時点の更新予定のデータであり、今後、CASBEE 戸建の改訂に合わせ CO_2 排出量のデータも更新される可能性がある。

表 S1 「Q_H2.1.1　躯体」の採点結果と CO_2 評価条件の対応表

レベル	基準	CO_2 評価の条件
レベル 1	(該当するレベルなし)	ー
レベル 2	(該当するレベルなし)	ー
レベル 3	日本住宅性能表示基準「3-1 劣化対策等級(構造躯体等)」における等級1を満たす。	躯体･基礎の寿命 30 年
レベル 4	日本住宅性能表示基準「3-1 劣化対策等級(構造躯体等)」における等級2を満たす。	躯体･基礎の寿命 60 年
レベル 5	日本住宅性能表示基準「3-1 劣化対策等級(構造躯体等)」における等級3を満たす。	躯体･基礎の寿命 90 年

表 S2 「Q_H2.1.2　外壁材、Q_H2.1.3　屋根材、陸屋根」の採点結果と CO_2 評価条件の対応表

レベル	基準	CO_2 評価の条件
レベル 1	耐用性が 12 年未満しか期待されない	交換周期 11 年
レベル 2	12～25 年未満の耐用性が期待される。	交換周期 18 年
レベル 3	25～50 年未満の耐用性が期待される。	交換周期 37 年
レベル 4	50～100 年の耐用性が期待される。	交換周期 75 年
レベル 5	(加点条件をみたせば選択可能)	レベル 4 と同じ

表 S3 「Q_H2.2.2　維持管理の計画・体制」による外壁材、屋根材の耐用年数の補正

		Q_H2.2.2 維持管理の計画･体制			加減年数
		レベル 3	レベル 4	レベル 5	
Q_H2.1.2 Q_H2.1.3	レベル 1	11 年	11 年	11 年	なし
	レベル 2	12 年	18 年	24 年	6 年
	レベル 3	25 年	37 年	49 年	12 年
	レベル 4	50 年	75 年	100 年	25 年
	レベル 5	50 年	75 年	100 年	25 年

表 S4　木造の「建設」段階の CO_2 排出量　(単位：kg-CO_2/年㎡)

Q_H2.1.1 躯体		
レベル 3	レベル 4	レベル 5
9.52	4.76	3.17

表 S5　木造の「修繕・更新・解体」の CO_2 排出量　(単位：kg-CO_2/年㎡)

		Q_H2.1.1 躯体								
		レベル 3			レベル 4			レベル 5		
		Q_H2.2 維持管理の計画･体制			Q_H2.2 維持管理の計画･体制			Q_H2.2 維持管理の計画･体制		
Q_H2.1.2 外壁	Q_H2.1.3 屋根	レベル 3	レベル 4	レベル 5	レベル 3	レベル 4	レベル 5	レベル 3	レベル 4	レベル 5
レベル 1	レベル 1	4.88	4.88	4.88	6.27	6.27	6.27	7.13	7.13	7.13
	レベル 2	4.88	4.41	3.92	6.27	5.80	5.80	7.13	6.66	6.50
	レベル 3	3.92	3.92	3.92	5.56	5.56	5.33	6.50	6.19	6.19
	レベル 4, 5	3.92	3.92	3.92	5.33	5.33	5.33	6.19	6.03	6.03
レベル	レベル 1	4.88	4.33	3.79	6.27	5.73	5.73	7.13	6.59	6.40

2	レベル2	4.88	3.85	2.83	6.27	5.25	5.25	7.13	6.11	5.77
レベル2	レベル3	3.92	3.38	2.83	5.56	5.01	4.78	6.50	5.63	5.46
	レベル4, 5	3.92	3.38	2.83	5.33	4.78	4.78	6.19	5.49	5.30
レベル3	レベル1	3.79	3.79	3.79	5.45	5.45	5.18	6.40	6.04	6.04
	レベル2	3.79	3.30	2.83	5.45	4.98	4.71	6.40	5.57	5.40
	レベル3	2.83	2.83	2.83	4.75	4.75	4.23	5.77	5.09	5.09
	レベル4, 5	2.83	2.83	2.83	4.50	4.50	4.23	5.46	4.93	4.93
レベル4, 5	レベル1	3.79	3.79	3.79	5.18	5.18	5.18	6.04	5.86	5.86
	レベル2	3.79	3.30	2.83	5.18	4.71	4.71	6.04	5.38	5.23
	レベル3	2.83	2.83	2.83	4.47	4.47	4.23	5.40	4.91	4.91
	レベル4, 5	2.83	2.83	2.83	4.23	4.23	4.23	5.09	4.75	4.75

以上

建築の段階に応じたBIM連携LCA算定モデルの提案
～簡易算定モデル・詳細算定モデル～

Proposal for BIM-linked LCA calculation models for different stages of construction
～ Simple and detailed calculation models ～

○掛上恭*1)、石津旭1)
Takashi Kakegami, Akira Ishizu
1) 住友林業
*1) KAKEGAMI_takashi@star.sfc.co.jp

1. はじめに

住友林業は、国際規格に準拠した建築用 LCA ツール「One Click LCA 日本版」を販売代理店として提供している[1)]。One Click LCA には BIM 連携により LCA 算定を実施できるプラグイン機能（拡張プログラム）があり、効率的、かつ建築の段階に応じた LCA 算定が可能となっている。基本設計初期段階における簡易 BIM モデルと、実施設計段階における詳細 BIM モデルを整備したので報告する。

1.1 建築の各段階における BIM 連携での LCA 算定

建築の各段階で BIM 連携による LCA 算定が可能であるが、検討段階・算定目的・LCA 算定結果の活用方針により算定方法やモデルの作り方も変わる。

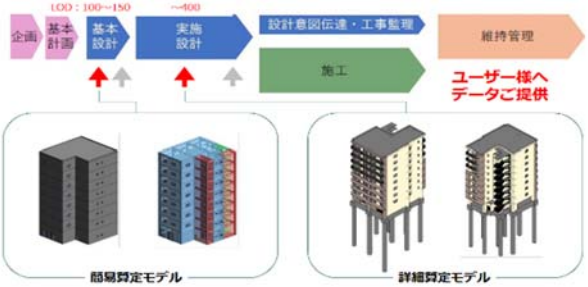


図1　BIM 連携による LCA 算定

2. 簡易 BIM モデルによる算定

基本設計初期段階では、躯体が確定する前の段階で、簡易 BIM モデルでスタディを行ない、デザインの方向性を決めるのが有効である。

2.1 簡易 BIM モデルによる算定事例

対称建物は、8階建、鉄骨造のオフィス。BIM は Revit を用いた。BIM モデルの詳細度を LOD という指標であらわすと100～150程度。各部位を構成要素毎に作成せず、部位毎の複合原単位（簡易算定用）を紐付けする。例えば壁の場合、下地鋼材と石膏ボードと塗装仕上等の要素に分けないシンプルな BIM モデルとなる。

2.1.1 算定フローと設定ファイル

算定フローを図2に示す。BIM 上でモデル形状を作成する他、既存の BIM モデルをアレンジして利用できる。また、One Click LCA の簡易算定[2)]用の設定ファイル（予め資材と原単位を紐付した設定条件を保存したファイル）を用いることで効率的かつ他用途でも同様の算定が可能となる。設定確認後、BIM データをプラグイン機能を用いて One Click LCA へ移行し LCA 算定を行なう。



図2　簡易算定モデルのフローと設定ファイル

2.1.2 条件設定

各部位の算定単位は、柱･梁･階段を長さ（m）、壁･屋根･床･窓･ドアを面積（m2）とした。 外壁の場合、外壁下地と外装を組合せて複合原単位を設定。床の場合は、床スラブと床仕上げと天井仕上げを組合せて設定。基礎と設備は、床面積から算定するように設定している。

表1　各部位の算定単位と原単位（簡易算定）

カテゴリー	【紐付原単位】：CD3D用複合原単位	単位	算定
構造基礎	-	-	-
構造柱	【柱（躯体）＋耐火被覆】	m	○
構造フレーム（梁）	【梁（躯体）＋耐火被覆】		
階段	【階段躯体 ＋ 床仕上 ＋ 天井仕上】		
壁	【外壁下地】【外装材】/【内壁】	m2	
屋根	【屋根スラブ】【屋根仕上】【天井仕上】		
床 ※	【床スラブ】【床仕上】【天井仕上】		
窓	【外部開口部（窓）】		
ドア	【外部建具】/【内部建具】		

※ 基礎･設備を床面積から算定

2.1.3 簡易 BIM モデルによる LCA 算定結果

資材別ライフサイクル全体の排出量を示す。

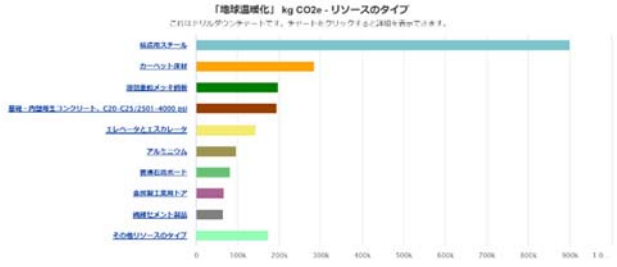


図3　排出の多い資材ランキング（簡易算定）

（算定範囲：A1-4・B3-5・C2-4）

構造用スチール、メッキ鋼板、コンクリートが上位に来ていることがわかる。また、カーペットは更新と廃棄時の焼却分が大きいため、ライフサイクル全体で上位となっている。

2.1.4 Revit における LCA 算定結果

算定結果を BIM に戻すと、各資材の CO2排出量がランキングにより5色で色分けされる。図4では、柱・梁の鉄骨部分が赤く表示され、排出量が大きいことがわかる。これらの算定結果表示をもとに削減検討が可能となる。

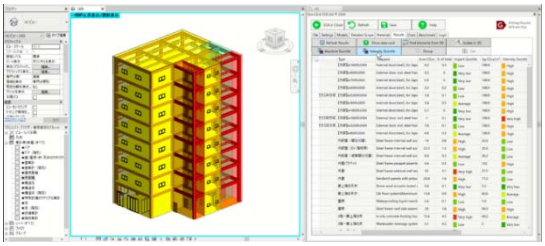


図4　算定結果の表示（BIM）

3. 詳細 BIM モデルによる算定

実施設計段階では、詳細 BIM モデルで高い精度で算定を行ない、その後原単位の入れ替えによる削減検討を行うのが有効である。

3.1 詳細 BIM モデルによる算定事例

建物は、9階建、集合住宅、RC 造のモデル。BIM モデルの詳細度を LOD という指標であらわすと400程度。各部位を要素毎に分割したモデルを作成し、構成資材毎の原単位を用いて紐付する。窓など複合原単位も併用する。

3.1.1 条件設定

各部位の算定単位は、基礎・柱・梁・階段を体積 。壁・屋根・天井・床を面積とした。窓は枠長さから算定する方法もあるが分割せず面積で算定した。鉄筋など、部品を作成しない資材は、合計の体積からエクセルで算定する方法と、BIM のマスという部品を用いて算定することができる。

表2　各部位の算定単位と原単位（詳細算定）

カテゴリー	【紐付原単位】：構成資材毎	単位	算定
構造基礎（杭・立上部）	【コンクリート】【断熱材】※コンクリートは全て強度別	m3	○
構造柱	【コンクリート】【タイル・塗装】		
構造フレーム（梁）	【コンクリート】【タイル・塗装】		
階段	【コンクリート】		
手摺	【ステンレス鋼材】	m	
壁（外壁）	【コンクリート】【タイル・塗装】【断熱材】	m2	
壁（内壁）	【LGS】【ボード】【クロス】		
屋根	【アスファルト防水】【塗装】【断熱材】		
天井	【軽天】【ボード】【クロス】		
床	【コンクリート】【下地・ボード】【防振材】【床仕上】【断熱材		
窓	【外部開口部（窓）】：複合原単位		
ドア	【鋼製建具】/【木製建具】		
■モデル化していない部材（エクセル、もしくはマスで算定）			
鉄筋／LGSと同層の断熱材	【鉄筋】/【断熱材】	m3	○

青文字：単位変換原単位（or 複合原単位）を作成

3.1.2 単位換算原単位・複合原単位

モデルで再現が難しい部材は、メーカー情報をもとに単位変換した原単位を作成した。

LGS の場合は、スタッドのタイプ、間隔、長さをパラメータとして m2当り重量を算出し、単位変換した原単位を作成。これら参考情報はユーザーへ提供し、代表的複合資材は One Click LCA に登録した。

3.1.3 詳細 BIM モデルによる LCA 算定結果

資材別の排出量のランキングを図5に示す（算定範囲：A1-4・B3-5・C2-4）。上位にはコンクリートが強度別に並んだ。



図5　排出の多い資材ランキング（詳細算定）

3.1.4 削減検討事例

算定結果を Revit に戻し削減検討を行った。一般的なコンクリートを低炭素コンクリートに置き換え、エンボディドカーボンを比較した結果を示す（図6）。トータルで245トン-CO2e（約12%）の削減可能性を示す結果となった。

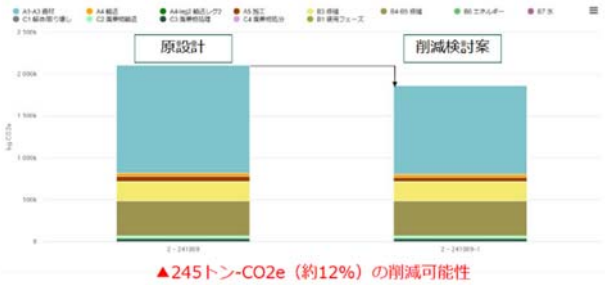


図6　算定結果比較事例

BIM モデルによる LCA 算定により、効率的な削減検討の可能性を示した。

4. 課題と今後の対応

効率的かつ精緻な LCA 算定の普及に貢献することで、脱炭素化を支援していきたいと考えている。

引続き以下の課題に取り組んでいく予定である。

①予め資材と原単位を紐付したテンプレートの整備
②原単位の初回紐付の簡易化、複合原単位の拡充
③算定事例の拡充（Revit・Archicad）

5. 引用文献

1) 住友林業：OneClickLCA 日本版 HP, 入手先 <https://sfc.jp/treecycle/value/oneclicklca.html>,（参照2025-1-20）
2) 掛上恭, 石津旭：第20回日本 LCA 学会研究発表会, 宇都宮,（2024）, 建築 LCA 簡易算定ツールにおける日本モデルの提案, 2-P1-42

欧米のグリーンビルディング認証における LCA・EPD の活用と今後

The Use of LCA and EPD in Western Green Building Certifications and Their Future

○大淵知至*[1)]、林昌明[2)]、伊藤聖子[1)]、鶴田祥一郎[1)]、岩下博哉[1)]
Kazushi Ofuchi, Masaaki Hayashi, Satoko Ito, Shoichiro Tsuruta, Hiroya Iwashita
1) 一般社団法人サステナブル経営推進機構, 2) 一般社団法人グリーンビルディングジャパン
* ofuchi@sumpo.or.jp

1. はじめに

近年、気候変動を始めとした環境負荷の排出量が多い建築分野において、環境負荷低減を第三者が評価するグリーンビルディング認証（GB 認証）の需要が高まっている。欧米の GB 認証においては、建築物の建設に係る建築資材（建材）における調達や製造等に伴う環境負荷（エンボディドカーボン（EC））を算定・低減することで評価される。

ISO 規格に則った LCA 手法による環境影響の算定結果に対して第三者検証を行う環境製品宣言（EPD）を用いた EC の算定が評価項目として組み込まれ、更には、EPD の数値を用いた比較による EC の低減度合いも評価され、建材の LCA 算定・EPD 取得の需要が高まっている。

一方で、日本国内の GB 認証では、EPD を用いた EC の算定・低減に関する評価の導入は欧米に後れをとるものの、国土交通省の下、日本国内でも建材の脱炭素化の推進が始まっている。

本報では、欧米の GB 認証における EPD の活用実態を調査し、日本における今後の EC 算定・低減の評価に用いられる EPD の普及に向けた方策について検討結果を報告する。

2. 代表的なグリーンビルディング認証

代表的な GB 認証として世界各国で活用されている米国の LEED と英国の BREEAM では、EC の算定・低減が評価項目として実装､検討されている｡本項では、それら 2 つの GB 認証について整理することとした。LEED 及び BREEAM について 2.1、2.2 項に示す。

2.1 LEED

2.1.1 概要

LEED は、米国の非営利団体 USGBC が運営するビルト・エンバイロメントの環境性能を評価する GB 認証プログラムである。建築物の種類・用途別に定められた必須条件を満たし、各任意項目の加点ポイントの合計に応じて、PLATINUM（80 ポイント以上）、GOLD（60 ポイント以上）、SILVER（50 ポイント以上）、CERTIFIED（40 ポイント以上）の 4 段階の認証レベルで評価される。

2.1.2 EPD の活用実態

現在、LEED の評価基準として LEEDv4.1 が主に用いられ、次版として、建築物及び建材の更なる脱炭素化や生物多様性等を重要課題として挙げる LEEDv5 の開発が進み、2025 年内の完成が目指されている。現時点で公開されている最新の LEEDv5 ドラフト版[1)]を基に、EC の算定・低減に関する評価項目を整理し、評価項目を表 1 に示す。

表 1　EC の算定・低減に関する評価項目

カテゴリー	評価項目	条件	点数
材料と資源	エンボディドカーボンの評価と定量化	必須	－
材料と資源	エンボディドカーボンの低減	任意	1～6
材料と資源	建材の環境影響の開示と最適化	任意	1～5

LEEDv5 ドラフト版では、LEEDv4.1 と比べ、建築物全体の EC の定量評価が必須化され、低減度合いがより重視されている。例えば、低減度合いによる評価については、構造体のみならず、非構造体の対象となる建材も追加され、獲得できるポイントは、LEEDv4.1 の 2 倍以上へと更新されている。日本における EC 算定・低減を整理するため、LEED における EC 算定と低減について以下に整理する。

2.1.2.1 EC の評価と定量化

設計時の建築物全体の EC 算定が必須条件とされ、少なくともコンクリート、断熱材等の 9 種の建材を算定対象に含まなければならず、各建材の製造段階までの GHG 排出量を算定することが最低限必要となる。

2.1.2.2 EC の低減

実際に施工される建材の EC を算定し、比較による環境負荷の低減度合いによって、ポイントを獲得できる任意項目である。主要な構造材、外壁、ハードスケープ材料を対象に、5 つの環境影響を EPD 等で開示することが求められ、更にベースラインとの比較による EC の低減度合いによって、点数が加算される。

2.1.2.3 建材の環境影響の開示と最適化

非構造材の建材を対象に、気候変動、人間の健康等の 5 つの分野から、基準に適した情報開示を行うことでポイントを獲得できる。気候変動において、EPD による環境情報開示や EPD による環境負荷の 15%以上の低減を示すことで、点数が加算される。

2.2 BREEAM

2.2.1 概要

BREEAM は、英国 BRE によって設立された建築物や建材の環境パフォーマンスを評価する GB 認証である。建築物の種類・用途別に定められた基準を満たし、各評価項目のクレジットの合計に応じて、Outstanding（85 クレジット以上）、Excellent（70 クレジット以上）、Very good（55 クレジット以上）、Good（45 クレジット以上）、Pass（30 クレジット以上）の 5 段階の認証レベルで評価される。

2.2.2 EPD の活用実態

BREEAM の新築建築物の評価基準である BREEAM New construction [2)]では、建材の環境影響を評価するための基準を示しており、EPD を利用することで、より高いクレジットを得られる。

2.2.2.1 建物の LCA

建築物の設計・建設・使用・廃棄の各段階での環境影響を EPD を用いて評価を行う。EPD のデータを基に環境負荷の小さい建材を選定する等、環境負荷の低減度合いに基づいて最大 7 クレジットを獲得できる。

2.2.2.2 EPD

製品固有の EPD を有する 20 種以上の建材を建築物に使用することで、最大 1.5 クレジットを獲得できる。

3. 日本における GB 認証と EPD の活用実態

日本においては、2001 年に国土交通省支援の下で開発された建築環境総合性能評価システムである CASBEE が、主な GB 認証として活用されている。

CABEE の評価では、ZEB や ZEH 等の建築物の使用時における省エネルギー化を重視し、建築物の使用時に発生する環境負荷（オペレーショナルカーボン）の低減に大きく貢献してきている。

一方で、EC に関する評価項目は含まれず、EC の算定・低減や、そのデータとして必要な EPD の取得に対するインセンティブが働いていない状況にある。

他方、産官学の連携により、建築物の脱炭素化の促進を目的としたゼロカーボンビル推進会議が設置され、日本国内における EC の算定・低減に向けた取り組みに対する機運が高まりを見せつつある。それに伴い、EPD の取得に向けた整備が加速しているものの、ツール開発の遅れ、低減効果を見える化する枠組みのコンセンサスが無い等の課題があるのが現状である。

4. EPD の普及に向けた具体的方策の検討

欧米の GB 認証で、より一層位置づけが重視される EPD の普及は、EC 算定・低減に欠かせないものである。本項では、海外事例等を参考に、EPD の普及に向けた具体的方策について、下記 3 点を提案する。

4.1 EPD 専用算定ツール

EC 算定には、各建築物件の建材に関する環境情報開示が必要となることから、EPD の量産体制の構築が必要と考える。GCCA では、コンクリートを始めとする 5 種類のドラフト EPD を作成する算定ツールが開発され、各 EPD・PCR の規定に準拠した形で、各建築物件に活用されている。日本では、LCA 算定ツールは数多くあるが、EPD 取得に特化した量産向けの専用ツールが少ないのが現状であり、開発が必要と考える。

4.2 環境負荷の低減を評価する枠組み

EC の低減を示すためには、信頼性・透明性の高い環境情報である EPD 同士を比較し、環境影響の低減に関する情報を正確に伝える枠組みが最低限必要と考える。米国の EPD プログラムオペレーター UL Solutions では、対象となる EPD を業界平均値または旧製品仕様の EPD と比較する Optimization Credit program が開始され、建材の環境影響の低減に関するレポートが開示されている。日本においても SuMPO 環境ラベルプログラムにおいて、CFP の低減量を示す枠組みが存在し、同様に EPD による評価手法を開発し、環境影響の低減に関する情報開示を行うべきと考える。

4.3 業界平均 EPD

各企業が取得する EPD 同士の比較は、比較条件の整合や秘匿情報の開示の観点から正確な比較を行うことが難しく、比較対象として各建材の工業会が業界平均として環境情報を開示することが重要と考える。NRMCA や RFCI では、業界平均 EPD を取得し、個社 EPD の低減努力を示す際のベンチマークとしても活用されている。日本の EPD でも業界平均値で取得可能だが、工業会がより積極的に所属企業に働きかけ、業界平均 EPD 取得に向けた取り組みが必要と思われる。

5. 結論

欧米においては、GB 認証に加え、建材に関する公共調達制度や製品規制等での EPD 活用が進んでおり、大きなインセンティブが働いている。日本においても、国土交通省の下、EC の評価と建築物の脱炭素化の促進を目的に、EPD 取得に向けた議論が加速している。

今後、より EPD を普及させ、インセンティブを高めるには、ツールベンダーや EPD プログラムオペレーター、工業会の取り組みは欠かせない。

6. 引用文献

1)USGBC:“LEED v5 BD+C Public Comment 2”, USGBC, (オンライン)< https://www.usgbc.org/>, (参照 2025-1-13)
2)BRE:“BREEAM V6 New Construction”, BREEAM, (オンライン), <https://bregroup.com/>(参照 2025-1-21)

建築・建設分野における製品の環境情報開示の動向

―欧州規則における開示項目に着目して―

Trends in Declaration of Product Environmental Information in the Construction Sector -Focusing on Requirements in European Regulations-

○南野萌花*[1)]、伊藤聖子[1)]、鶴田 祥一郎[1)]、岩下 博哉[1)]
Minamino Moeka, Satoko Ito, Shoichiro Tsuruta, Hiroya Iwashita
1) 一般社団法人サステナブル経営推進機構
* minamino@sumpo.or.jp

1. はじめに

近年の社会情勢の変化を背景に、経済安全保障の観点からサーキュラーエコノミーへの移行が求められており、GHG 削減だけでなく、資源管理と効率化の必要性が高まっている。特に世界の温室効果ガス排出量の約 21%を占める建設分野においては[1)]、資源循環の重要性が高い。実際、欧州では 2019 年にグリーンディール政策を発表し、建設製品規則（以下、「CPR」という。）で環境情報開示の義務化が進められている。

一方、現在法規則や標準規格等で用いられる環境情報開示は、資源循環に関する評価が不足しているとの指摘がある[2)]。そこで本報では、欧州規則とその他の枠組みにおける資源に関する開示項目に着目し、資源循環評価の可能性について分析、整理した結果について報告する。

2. 方法

本報では、欧州の環境情報開示に関する法制度の全体像を把握し、CPR で求められる LCIA 情報と、環境製品宣言（以下、「EPD」という。）における欧州の建設工事の持続可能性に関する規格である EN15804＋A2 の開示項目を基に整理、分析を行った。

3. 欧州における環境情報開示の枠組み

欧州では、2019 年にグリーンディール政策と呼ばれる、2050 年のカーボンニュートラル達成、サーキュラーエコノミーの推進、経済成長と環境負荷のデカップリングを目指す戦略が発表された。この政策の一環として、持続可能な製品の性能要件を定める EU エコデザイン規則（以下、「ESPR」という。）が 2024 年に発行された。さらに、製品分野ごとの具体的な要求事項が ESPR の下で策定され、建材分野においては CPR が適用される。CPR では、製品が要求される基準や規格を満たしていることを証明するための文書である性能宣言（以下、「DoP」という。）の発行が義務付けられている。

4. CPR における必須開示項目と資源循環性

CPR では DoP において、製品のライフサイクルに関する定量的な環境情報の記載が必須化され、段階的に気候変動を含む 19 領域の LCIA 情報の開示が求められる。この中から、資源消費に関連する項目を表 1 に示した。

非生物資源枯渇-鉱物（ADP-element）は、鉱物などの再生不可能な物質の過剰抽出による資源枯渇の程度をアンチモンの希少性に応じて示され、非生物資源枯渇-化石（ADP-fossil）は、石油、天然ガスなどの化石資源の枯渇の程度を示す指標である。また、水の使用についても開示が求められ、代表的な評価手法として、利用可能な水の残量を踏まえた水消費の影響を表す「AWARE」がある。

これらの数値が低いことは、一次資源や水資源の消費が少ないことを示唆し、サーキュラーエコノミーにおいて重要である。一方、これらの指標は資源枯渇の評価であるため、次の製品システムへの再資源化の程度、前の製品システムからの二次資源の使用量について把握が難しい。

したがって、資源消費の評価は可能だが、LCIA 情報からは資源循環性を評価するための十分な指標が含まれていないと考えられる。

表 1 CPR 必須開示項目抜粋

項目
非生物資源枯渇-鉱物
非生物資源枯渇-化石
水の使用

5. EN15804＋A2 における開示項目

CPR において多領域評価が用いられているのは、特に欧州で EPD が普及していることが背景にある。また、欧州では建築分野における EPD 取得に関する要件が規定されている、欧州の建設工事の持続可能性に関する規格である EN15804＋A2 の追加準拠を行った

EPD が広く一般的に用いられている。CPR には LCIA 情報に関する EN15804＋A2 の参照について明記はされていないが、EN15804＋A2 の LCIA 情報と一致することから CPR における LCIA 情報は EN15804＋A2 を参照していると考えられる。

EN15804＋A2 には、LCIA 情報に加えて、資源に関する開示項目として資源利用とアウトプットフローに関する定量評価項目が含まれていることから、LCIA 情報以外の項目における資源循環に関する評価について整理を行った。資源利用とアウトプットフローの項目を表2と表3にそれぞれ示した。資源利用については、対象製品のライフサイクルにおける再生可能資源の使用量や、前の製品システムからの資源利用の程度を開示することが出来る。また、アウトプットフローの項目では、対象製品がどの程度二次資源として後の製品システムに提供されているかを確認することが出来る。

しかしながら、資源利用及びアウトプットフローは、前後の製品システムにおける資源循環性を評価することが出来る一方、投入された二次資源が前の製品システムでの利用に対してどの程度同品質を保持しているか、また、二次材料として排出される材料が、今後の製品システムにおいて同等の品質で利用されるかについては評価できない。さらに、比較可能性の観点からは、情報の受け手が複数の項目を総合的に考慮し、対象製品の資源循環性の程度を判断する必要があるという課題が残る。

表 2 資源利用

項目	単位
再生可能一次エネルギー	MJ
再生可能一次資源	MJ
非再生可能一次エネルギー	MJ
非再生可能一次資源	MJ
二次材料	kg
再生可能二次エネルギー	MJ
非再生可能二次エネルギー	MJ
回収エネルギー	MJ
淡水の消費量	m^3

表 3 アウトプットフロー

項目	単位
再利用可能な成分	kg
リサイクル用資材	kg
エネルギー回収用材料	kg
エネルギーアウトプット	MJ per energy carrier

6. 結果と今後の課題

本報では、CPR の LCIA 情報、EN15804＋A2 における資源利用とアウトプットフローにおける資源循環性の評価可能性について整理を行い、資源枯渇の程度や、前後の製品システムにおける資源の活用に関する評価は可能である一方、資源循環性の評価には課題が残るという結果となった。

このような状況の中、製品の資源循環性を単一指標で表すサーキュラリティ指標に関する研究が行われている。実際、世界各国の EPD プログラム運営機関が加盟する連合組織である Eco Platform においても、エレン・マッカーサー財団が開発した MCI や、Enel X と ICMQ が開発した NCI 等の特性化モデルを中心として、EPD へのサーキュラリティ指標の導入に向けた検討が開始された [3)]。

現時点でサーキュラリティ指標に関する国際的に合意の取れた手法は存在せず、信頼性の高い環境情報開示を実現するための EPD の枠組みや、法規制へのサーキュラリティ指標の導入には、一定の時間を要することが予想される。資源循環性の適切な評価には、リサイクル材の品質や、リサイクルしやすさの考慮など、複数の視点を統合する必要があるため、これらを単一指標に落とし込むには様々な課題を解決する必要がある。

しかし、世界規模でカーボンニュートラルとサーキュラーエコノミーの実現が求められる中、資源循環性を評価するサーキュラリティ指標の開発と社会実装に向けた取組みが、持続可能な社会の実現に貢献すると期待される。

引用文献

1) IPCC: “Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, (2022), p. 100
2) Anna Hallberg: “Development of a Product Circularity Indicator Suitable for the EPD-scheme of Construction Products”, (2023), p. 11
3) Eco platform: “Task Group Circular Economy”, (2024), p.1

口頭発表セッション

2025年3月7日(金) 11:00 ~ 12:40 B会場：2455中講義室（4F）

[3-B2] 建築（４）

座長：磯部 孝行 (武蔵野大学)

11:00 ~ 11:20

[3-B2-01]

建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討 ～検討の全体像と多様な評価を可能とするツールの開発～

*小林 謙介[1]、磯部 孝行[2]、天石 文[3]、木原 勇信[4]、鈴木 好幸[5] (1. 県立広島大学、2. 武蔵野大学、3. 大成建設、4. 鹿島建設、5. 安藤ハザマ)

11:20 ~ 11:40

[3-B2-02]

建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討 ～複合原単位の充実とその利用拡大に向けて －躯体工事−～

*鈴木 好幸[1]、天石 文[2]、木原 勇信[3]、磯部 孝行[4]、小林 謙介[5] (1. 株式会社安藤・間、2. 大成建設株式会社、3. 鹿島建設株式会社、4. 武蔵野大学、5. 県立広島大学)

11:40 ~ 12:00

[3-B2-03]

建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討　～複合原単位の充実とその利用拡大に向けて －仕上工事−～

*天石 文[1]、鈴木 好幸[2]、木原 勇信[3]、磯部 孝行[4]、小林 謙介[5] (1. 大成建設（株）、2. （株）安藤・間、3. 鹿島建設（株）、4. 武蔵野大学、5. 県立広島大学)

12:00 ~ 12:20

[3-B2-04]

建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討　～複数建物における評価事例～

*木原 勇信[1]、磯部 孝行[2]、鈴木 好幸[3]、天石 文[4]、小林 謙介[5] (1. 鹿島建設株式会社、2. 武蔵野大学、3. 株式会社 安藤・間、4. 大成建設株式会社、5. 県立広島大学)

12:20 ~ 12:40

[3-B2-05]

スマートメータデータを利用した世帯単位での短期電力需要予測モデルの開発

*大野 優剛[1,2]、本田 智則[2]、大西 元輝[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 国立研究開発法人産業技術総合研究所)

©日本LCA学会

建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討

～検討の全体像と多様な評価を可能とするツールの開発～

Development of tools applicable to various needs of environmental assessment of buildings -Overview of study and development of tools applicable to various assessments-

○小林謙介*[1)]、磯部孝行[2)]、天石文[3)]、木原勇信[4)]、鈴木好幸[5)]
Kensuke Kobayashi, Takayuki Isobe, Aya Amaishi, Isanobu Kihara, Yoshiyuki Suzuki
1) 県立広島大学, 2) 武蔵野大学, 3) 大成建設, 4) 鹿島建設, 5) 安藤ハザマ
* kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. はじめに

建築分野における LCA の活用は、以前にも増して重要となっている。わが国の建築分野では、日本建築学会 地球環境委員会 LCA 小委員会（以降、本小委員会）から建物の LCA 指針[1)]が公表されている。直近では 2024 年 3 月にて改定版が出版されている。改定版では、建築物の評価のガイドライン（指針）、原単位（AIJ-LCA 原単位データベース）、評価ツール（AIJ-LCA ツール）などの内容が改定された。しかし建築分野における多様な LCA の評価ニーズには十分にこたえきれていないと認識している。こうした状況を踏まえ、改定版公表後も継続的に活動を行っている。そこで本報告では、出版後の活動内容について報告する。

2. 活動の全体像

本小委員会の活動の全体像を図 1 に示す。3 月の改定版公表後は、原単位の改善・拡充、評価ツールの拡充などを中心に活動を行っている。具体的に、原単位は、建材を中心としたプロセスデータの拡充を行った[2, 3)]。また、評価ツールは公表した評価ツールでの計算事例などの充実を図った[4)]。さらに、改定されたツールでは対応できない、多様な評価ニーズにこたえるための補助ツール（IDEA 用評価ツール）[5)]の改定も行った。本報告では、IDEA 用評価ツールの構築について述べる。

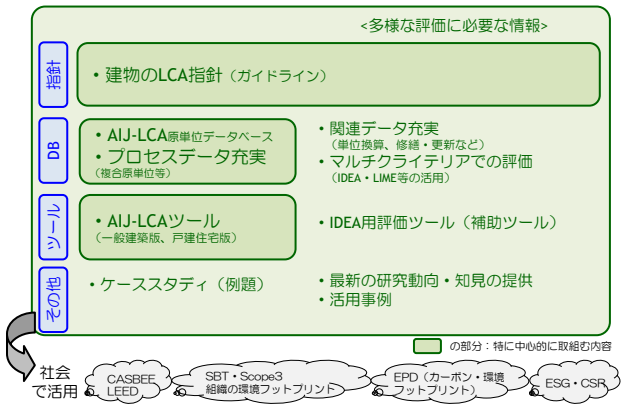


図 1 LCA 小委員会の活動の全体像

3. IDEA 用評価ツールの構築

3.1 開発コンセプト

建物の LCA 指針における現行のツール（AIJ-LCA ツール）では、評価を効率的に実施するために、様々な過程条件を設定して算定を行っている部分もある。また AIJ-LCA データベース（2015 産業連関表ベース）を用いる形となっている。しかし、専門的に多様な環境影響を評価したい実施者には、評価目的が適切に反映される形で詳細な評価ができることや、多様な影響を評価できる IDEA を活用できるようなツールを提供することも重要である。そこで、できるだけ作業負荷を小さくする形で IDEA を用いた評価を可能とする評価ツールの開発を試みた。

(1) 基準案と対策案の 2 種類の比較分析

本ツールでは、建物の LCA ツールと同様に、1 つの建物のみでも評価できるだけではなく、基準案と対策案の 2 種類を同時に評価して、結果を分かりやすく比較できるようにした。

(2) ISO の要求事項に準拠した記述子の記入

LCA の実施方法は、ISO14040、ISO14044、ISO21930 などに規格がある。実施条件について ISO が要求している記載項目はやや漠然としている。そのため、建築物や建材を評価することを想定して、具体的な記入項目を設定した。

(3) 分析の自由度

本ツールはエクセルで作成されており、その計算過程もすべて表示される。途中の計算結果などを用いて分析したい場合などは、これらの結果を適切に活用することで、様々な解析を行うことができる。

(4) 様々な活動で活用可能な分析が可能

LCA を活用した環境情報の発信は、環境ラベル、環境配慮設計、CSR 活動など様々な側面で行われている。しかし、これらは評目的や評価価範囲が一致しないこともある。それぞれ別々に評価作業を行うことは、評価作業労力を膨大させる。そこで、本ツールでは、一度詳細に評価を行えば、最低限の設定変更でそれぞれに適用できる計算結果を導くことができるような工夫を行った。

表 1 ツールの構成

シート名	シートの概説	1種類の対象物の評価	2種類の対象物の比較
設定_記述	ISO14040、44に極力沿う形で評価の条件を記述するシート	○	○
設定_条件	特に建築分野の評価において重要な、設定条件を個別に評価するため、その設定値を入力するシート。	△	△
設定_分類	評価結果を集計する際の分類を定義するためのシート。デフォルトでは、AIJ-LCAツールの分類が入力されている（ユーザが変更可能）。また、環境ラベル、ISO21930の分類も入力されている。	△	△
設定_フロー	評価におけるフロー図を貼り付けるためのシート。	△	△
基準案_入力	収集したフォアグラウンドデータを入力し、IDEAに連鎖するためのシート。	○	○
基準案_根拠	収集したデータの根拠を明記するためのシート。		
基準案_結果	計算した結果が表示されるシート。	*	*
対策案_入力	2種類の対象物を比較分析する際の対案のデータを入力するシート。		○
対策案_根拠	収集したデータの根拠を明記するためのシート。		○
対策案_結果	計算した結果が表示されるシート。		○
基・対_比較	基準案と対策案の検討結果のグラフが表示されます。		*
原単位_作成	自分で原単位を追加したい場合に、対象となる製品等の入出力データを入力するためのシート。	必要に応じて利用	
原単位_DB	本ツールの評価で用いられる原単位データベース（IDEAだけではなく自ら追加したデータも反映したデータベース）		
原単位_IDEA	IDEA Ver.3のデータ	IDEA Ver.3（エクセル版）をコピーして貼り付け	

○：必ず入力が必要、△：必要に応じて入力が必要、＊：入力内容に応じて結果が表示

具体的には、入出力データが入力されていても、その入力データを評価対象にするかを選択でき、対象にしない場合はその旨を選択するだけで簡単に評価対象外にできるような工夫を行った。

3.2 ツールの構成

3.2.1 構成の概要

ツールの構成を表 1 に示す。本ツールは主な利用方法として 2 通りの利用方法を想定している（もちろん、これ以外の視点での利用も可能である）。一つは、1 種類の建物の評価を行い、その削減策などを検討するケースである。もう一つは 2 種類の建物の評価を行い（例えば基準案と対策案の比較検討）その削減効果などを分析するケースである。それぞれの目的に応じて利用するシートが異なる。

3.2.2 主要なシートのイメージ

算定におけるメインの一つとなるのはフォアグラウンドデータの入力とバックグラウンドデータの連鎖である。これは「入力」シートで実施する（SI-図 1）。SI-図 1 の①でフォアグラウンドデータを入力し、②で入力されたデータを評価に用いるかどうかを設定する。③でバックグラウンドデータを設定する（原単位のコードを貼り付ける）と④に算定結果が表示される。

また結果は、「結果」シートなどで表示される（SI-図 2）。選択した環境負荷物質、影響評価、被害評価、統合化の結果などが一覧で表示されるようになっている。また、2 種類の建物を比較する場合は「比較」シートで任意の環境負荷物質・環境影響を対象に比較できる結果が表示される（SI-図 3）。

4. まとめ

建物の LCA 指針出版後の活動の全体像について述べた。また様々なニーズに対応できるツール（IDEA 用評価ツール）の開発内容について述べた。本ツールは、本小委員会のウェブサイト（ http://news-sv.aij.or.jp/tkankyo/s5/index.html ）から公表されている。現段階では、最低限の機能が実施できるにとどまっており、改善の余地は大いにあると認識している。それを踏まえた上でご活用いただければ幸いである。

5. 謝辞

本研究活動にあたり、日本建築学会 地球環境委員会 LCA 小委員会の関係各位に多くのご協力を頂きました。記して謝意を表します。

6. 参考文献

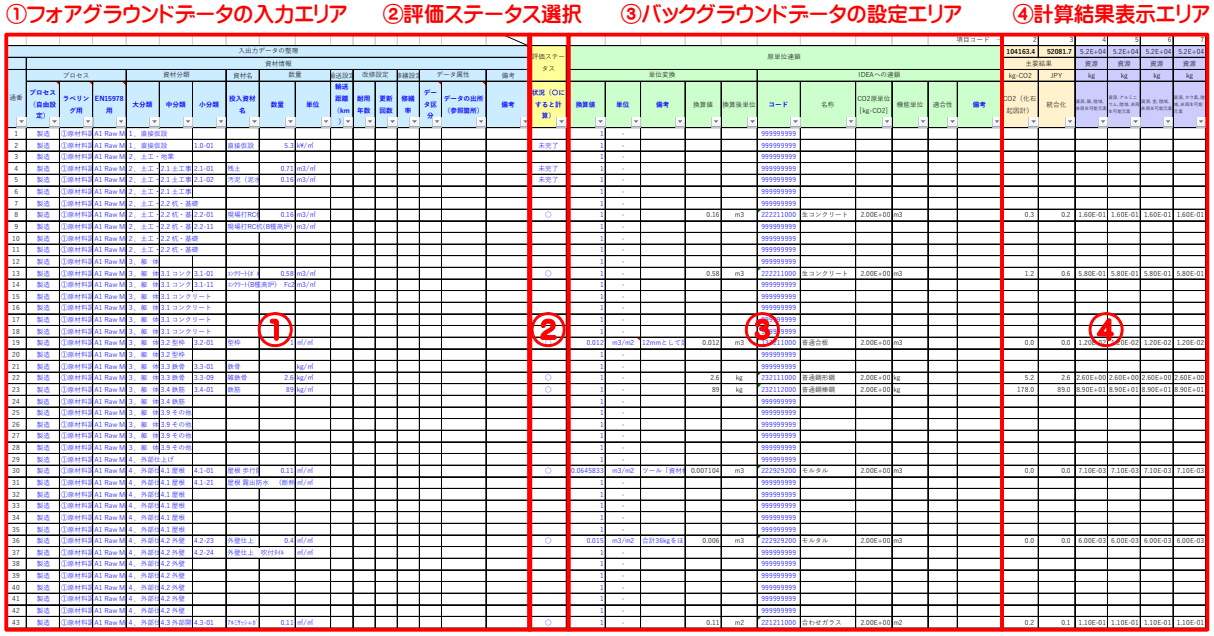
1) 日本建築学会：建物の LCA 指針 改定版、2024.3　2) 鈴木ら：建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討　～複合原単位の充実とその利用拡大に向けて　－躯体工事–～、LCA 学会研究発表会、2025.3　3) 天石ら：建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討　～複合原単位の充実とその利用拡大に向けて　－仕上工事–～、LCA 学会研究発表会、2025.3　4) 木原ら：建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討　～複数建物における評価事例～、LCA 学会研究発表会、2025.3　5) 小林ら：建築分野における多様な環境コミュニケーションを支援する評価ツールの開発、日本 LCA 学会研究発表会、2020.3

Supporting Information

ツールにおける主要なシートのイメージ（本文 3.3.2 に関連）

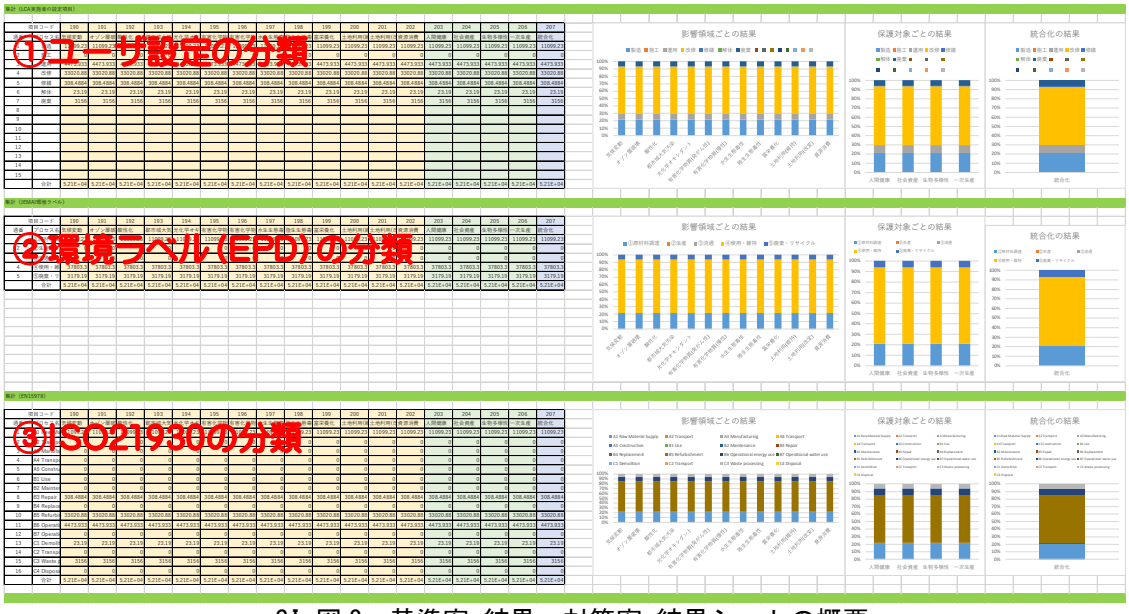
本 SI では、本ツールにおける主要なシートのイメージを示す。

フォアグラウンドデータの入力とバックグラウンドデータの連鎖などは、「入力」シートで実施する。そのイメージは以下のとおりである。①のエリアでフォアグラウンドデータを入力し、②の列で入力されたデータを評価に用いるかどうかを設定する。③のエリアでバックグラウンドデータを設定する（IDEA のコードを貼り付ける）と、④のエリアに算定結果が表示される。



SI-図 1　基準案_入力・対策案_入力シートの構成

次に結果の表示イメージについて述べる。「結果」シートは、評価結果を、①ユーザ設定、②環境ラベル、③ISO21930 の分類で表示することができるシートである。結果は環境負荷物質・環境影響領域ごとに表示され、右端には影響領域・保護対象・統合化のグラフが表示される。



SI-図 2　基準案_結果・対策案_結果シートの概要

基準案と対策案の 2 種類を評価する場合、「基・対_比較」シートにおいて、その比較結果を分析することができるシートである。ユーザが設定した分類に基づいて評価結果が表示できる。



SI-図 3　基・対_比較シートの概要

＊いずれの図も原単位はダミーで入れており、結果は正しいものではない（あくまでもイメージを示すためのものである）。

建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討

～複合原単位の充実とその利用拡大に向けて　－躯体工事－～

Development of tools applicable to various needs of environmental assessment of buildings
~ Enhancement and expansion of application of unit process data - building frame - ~

○鈴木好幸[*1)]、天石文[2)]、木原勇信[3)]、磯部孝行[4)]、小林謙介[5)]
Aya Amaishi, Yoshiyuki Suzuki, Isanobu Kihara, Takayuki Isobe, Kensuke Kobayashi
1) 株式会社安藤･間, 2) 大成建設株式会社, 3) 鹿島建設株式会社, 4) 武蔵野大学, 5) 県立広島大学
* suzuki.yoshiyuki@ad-hzm.co.jp

1. はじめに

建築分野における LCA の活用に向けて、日本建築学会 LCA 小委員会から建物の LCA 指針（以下、LCA 指針）が発刊され、2024 年 3 月に改定版が出版されている。先報[1)]で報告したとおり、建築分野における多様な LCA の評価ニーズに応えるため、同小委員会では、LCA 指針出版後においても LCA 活用推進に向けた様々な活動を継続している。

本稿では、その活動の一環として複合原単位の充実とその利用拡大に向けた検討状況について報告する。本検討では、LCA 指針で整備されている複合原単位をベースに、実務で扱いやすくより実態に即したプロセスデータとするための検討と、さらに LCA 指針に同封されている算定ツール（以下、AIJ-LCA ツール）以外にも広く展開可能な情報となるように国内の代表的なインベントリデータベースの一つである AIST-IDEA コードへの連鎖例を整理した。

なお、複合原単位とは、インベントリ分析のユニットプロセスデータのことであり、建築材料ごとの製造プロセスにおける入出力データを収集し、それに AIJ-LCA データベース（以下、AIJ-DB）などの原単位を乗じて整備したものを LCA 指針では複合原単位と称している。なお、本稿では、今回検討した複合原単位のうち躯体工事に関して報告し、仕上工事は後報[2)]により報告する。

2. 複合原単位（躯体）の充実とその利用拡大に向けた検討

2.1 コンクリート

建設産業における主要な建材の一つであるコンクリートは、レディーミクストコンクリート（以下、生コン）とコンクリート製品に大別される。生コンは、工場で製造された半製品状態のコンクリートが最終的な利用場所である建設現場に運ばれて最終製品である部材を構築するという独特のマテリアルフローを有することが特徴である。既報[3)]でも示したように、コンクリートは、強度ごとに投入される資材の比率が変わり、一般には強度が高いほどセメント量が多くなることで CO_2 排出量が大きくなるため、複合原単位では強度ごとのプロセスデータを整理している。

強度にはいくつかの考え方が存在し、現行の AIJ-LCA ツール v6.03 で登録されている複合原単位（以下、現行版）では、建物の構造上必要な強度の指標である設計基準強度（以下、Fc）ごとに整理されている。しかし、実務において発注者は、温度条件などを考慮したうえで Fc を満足するため構造体強度補正値（以下、S 値）を加えた保証強度、いわゆる呼び強度で生コン工場に発注するため、積算情報でも呼び強度で整理されることが一般的である。そのため、今回検討した複合原単位（以下、検討版）では、Fc だけでなく呼び強度も仕様欄に示すこととした。但し、高強度コンクリートについては、生コン工場や認定仕様ごとに S 値が異なるため Fc のみ記載した。

また、資材構成においても、現行版ではコンクリートの主要な構成材料として、セメント、骨材、水を設定しているが、骨材は砂・砕砂のような細骨材と、砂利・砕石のような粗骨材に分けられる。それらの材料は厳密には製造プロセスが異なることから分解して整理した。さらに、各資材の投入量についても、現行版では 2006 年版の LCA 指針のツール開発時に資源循環型住宅技術開発プロジェクト[4)]と協働で検討されたケーススタディの実施における設計・積算情報を基にした個別の調査値が用いられているが、より実態に即した数値の例を示しながら数値の根拠を明確にするため、検討版では生コン工場における実配合を調査した報告[5)]による数値を参考に再設定した。

現行版による強度別のコンクリート 1m³ あたりの CO_2 排出原単位と検討版の比較を図 1 に示す。普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（以下、N コン）と高炉セメント B 種を使用したコンクリート（以下、BB コン）ともに普通強度域の Fc36 までは現行版が若干小さい値を示しており、現行版では Fc30 から Fc36 にかけて強度が高くなっているにも関わらず CO_2 排出原単位はほぼ横ばいの推移となっている。BB コンは建築工事において高強度領域で使用される実績が現状少ないため、高強度コンクリートは N コンのみ

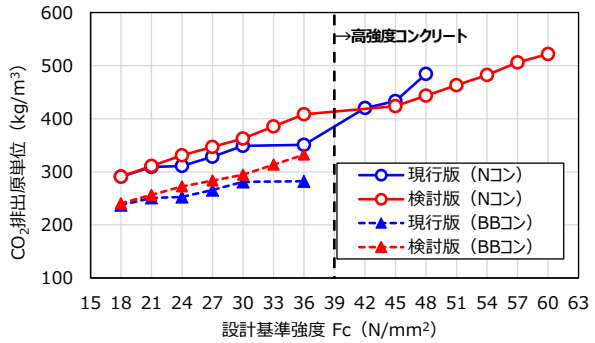


図 1　現行版と検討版のコンクリートの CO_2 排出原単位の比較

を整理しているが、現行版では普通強度域から高強度領域にかけて変化量が大きくなっている。それに対して検討版では、強度と CO_2 排出原単位が比較的綺麗な比例関係となっていることが分かる。これは、検討版では同一の情報源から資材投入量を設定したことが影響していると推察される。

2.2 鉄骨、鉄筋

コンクリートと同様に主要な建材である鉄鋼製品について、LCA 指針 2024 年版では製造方法（転炉法、電炉法）とその環境負荷の違いについて社会的関心が高まっていることを受け、製造方法の違いの影響を考慮した原単位の推計手法が提案されている。それらの原単位は、LCA 指針に同封の AIJ-DB 中に個別作成データとして単位物量あたりの排出原単位の推計値が整理されているが、現行版には製造方法の違いに関するデータは登録されていない。これは、複合原単位は AIJ-LCA ツール内で整理されており、AIJ-LCA ツールで用いる原単位では購入者価格ベースの排出原単位が必要になるが、製造方法別の各製品の購入単価については明確な根拠がないことなどから AIJ-LCA ツールの原単位として取り込まれていないためである。

これまでは、実務での積算段階において鉄骨の製造方法が詳細に指定される例はそれほど多くないと推察されるが、前述のような社会的関心の高まりから、近年、設計者や施主側から環境負荷低減のため極力電炉製品を多く使用するように要求されるケースが高まってきており、そういったケースに対応できるように検討版には転炉法と電炉法の鉄骨の原単位の項目を示した。ただし、AIJ-LCA ツールで使用する際には原単位シートに各製造方法の鋼材原単位を個別に追加しなければならず、その際に購入単価の設定が必要になる。適切な購入単価が得られない場合は、産業連関表の算出表から得られる鉄骨の購入者価格の計算値をそのまま使用する方法も考えられるが、製造方法が異なっても価格が変わらないという仮定をおいていることを認識したうえで慎重に使用する必要がある。

鉄筋については、そのほとんどが転炉法により製造されていることから、製造方法の違いについては整理していない。実務に置いても積算時に物量ベースで示されることが多く、単位換算の必要もないことからそのまま使用することが可能である。一方で、建築工事で比較的多く使用されるワイヤーメッシュについては、径やピッチなどが異なる製品が m^2 単位で示されることが多いため、検討版では利便性向上のため複数の仕様を追加した。

2.3 検討版複合原単位の充実と利用拡大に向けて

表 S1 に検討版のコンクリートの複合原単位の例を、表 S2 に鉄骨と鉄筋の複合原単位の例を示す。また、複合原単位を AIJ-LCA ツール以外の多様な評価手法等に広く活用されることを想定して、各資材構成に対応する AIST-IDEA コードへの連鎖の例を示した。AIJ-LCA ツールで用いている産業連関表ベースの原単位に比べて、AIST-IDEA は製品コード数が多く、対象としている環境影響領域も多いため、より細かく資材構成別の影響を考慮しようとする場合や、マルチクライテリア評価を行う場合など、LCA の目的に応じて複合原単位を広く活用されることを期待したい。

3. まとめ

本稿では、複合原単位の充実とその利用拡大に向けた検討状況について報告した。建築分野で LCA を広く活用しやすくするうえで複合原単位の整備は非常に重要であり、今後もその充実を図っていきたい。

既報 [3] や AIJ 指針の 4 章においても明記しているように、コンクリートをはじめとする各建材の多くは、多様な条件で仕様が決まることが多く、一義的な数値を示すことが困難であり、検討版の複合原単位はあくまでプロセスデータの参考値の位置づけであることに留意する必要がある。

4. 謝辞

本研究活動にあたり、日本建築学会 地球環境委員会 LCA 小委員会の関係各位に多くのご協力を頂きました。記して謝意を表します。

5. 参考文献

1) 小林謙介ほか，建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討～検討の全体像と多様な評価を可能とするツールの開発～，第 20 回 LCA 学会研究発表会，2025.3
2) 天石文ほか，建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討～複合原単位の充実とその利用拡大に向けて　－仕上工事－～，第 20 回 LCA 学会研究発表会，2025.3
3) 鈴木好幸ほか，建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討～複合原単位の充実とその利用拡大に向けて　－躯体工事－～，第 19 回 LCA 学会研究発表会，2024.3
4) 佐藤正章ほか，建物の資源循環性評価に関する研究，日本建築学会大会学術講演会梗概集，2004.8
5) 辻大二郎ほか，実コンクリート配（調）合から試算したコンクリート材料由来の CO_2 排出量，コンクリート工学年次論文集，2024

Supporting Information

表 S1　複合原単位例（コンクリート 1）

No.	仕様	単位	資材構成	AIJ-LCA原単位ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ_ver.1.02対応			AIST-IDEA Ver.3.4.1_日本語版対応			備考	出典
				資材量（単位あたり）	行ｺｰﾄﾞ	行部門名称	資材量（単位あたり）	IDEA製品コード	IDEA製品名		
	普通強度コンクリート（ポルトランドセメント）										
躯体-1	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ)　Fc＝18N/mm2（呼び強度21）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	275 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	275 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		資材量は出典1参考
			天然砂	874 kg	622011	砂利・採石	874 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	949 kg	622011	砂利・採石	949 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	176 kg	0000000	その他	0.176 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程				IDEAでは直接対応するコードなし エネルギー投入量を収集することで考慮可能	
躯体-2	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ)　Fc＝21N/mm2（呼び強度24）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	300 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	300 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	846 kg	622011	砂利・採石	846 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	955 kg	622011	砂利・採石	955 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	176 kg	0000000	その他	0.176 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-3	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ)　Fc＝24N/mm2（呼び強度27）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	326 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	326 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	819 kg	622011	砂利・採石	819 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	961 kg	622011	砂利・採石	961 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	176 kg	0000000	その他	0.176 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-4	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ)　Fc＝27N/mm2（呼び強度30）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	345 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	345 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	813 kg	622011	砂利・採石	813 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	952 kg	622011	砂利・採石	952 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	175 kg	0000000	その他	0.175 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-5	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ)　Fc＝30N/mm2（呼び強度33）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	365 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	365 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	807 kg	622011	砂利・採石	807 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	942 kg	622011	砂利・採石	942 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	175 kg	0000000	その他	0.175 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-6	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ)　Fc＝33N/mm2（呼び強度36）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	394 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	394 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	780 kg	622011	砂利・採石	780 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	946 kg	622011	砂利・採石	946 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	175 kg	0000000	その他	0.175 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-7	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ)　Fc＝36N/mm2（呼び強度40）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	423 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	423 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	753 kg	622011	砂利・採石	753 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	951 kg	622011	砂利・採石	951 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	175 kg	0000000	その他	0.175 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
	高強度コンクリート（ポルトランドセメント）			kg							
躯体-8	高強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ)　Fc＝45N/mm2	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	442 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	442 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	869 kg	622011	砂利・採石	869 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	881 kg	622011	砂利・採石	881 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	178 kg	0000000	その他	0.178 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-9	高強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ)　Fc＝48N/mm2	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	466 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	466 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	852 kg	622011	砂利・採石	852 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	878 kg	622011	砂利・採石	878 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	178 kg	0000000	その他	0.178 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-10	高強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ)　Fc＝51N/mm2	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	491 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	491 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	835 kg	622011	砂利・採石	835 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	875 kg	622011	砂利・採石	875 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	178 kg	0000000	その他	0.178 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-11	高強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ)　Fc＝54N/mm2	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	516 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	516 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	819 kg	622011	砂利・採石	819 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	872 kg	622011	砂利・採石	872 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	178 kg	0000000	その他	0.178 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-12	高強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ)　Fc＝57N/mm2	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	546 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	546 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	798 kg	622011	砂利・採石	798 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	869 kg	622011	砂利・採石	869 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	178 kg	0000000	その他	0.178 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-13	高強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ)　Fc＝60N/mm2	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	566 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	566 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	785 kg	622011	砂利・採石	785 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	867 kg	622011	砂利・採石	867 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	178 kg	0000000	その他	0.178 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					

表 S1　複合原単位例（コンクリート 2）

No.	仕様	単位	資材構成	AIJ-LCA原単位ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ_ver.1.02対応			AIST-IDEA Ver.3.4.1_日本語版対応			備考	出典
				資材量（単位あたり）	行ｺｰﾄﾞ	行部門名称	資材量（単位あたり）	IDEA製品コード	IDEA製品名		
	普通強度コンクリート（高炉セメントB種）										
躯体-14	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(高炉B種)　Fc＝18N/mm2（呼び強度21）	m3	高炉セメントB種	280 kg	2521011b	セメント（B種高炉）	280 kg	212119200pJPN	高炉セメント, B種, JPN		
			天然砂	862 kg	622011	砂利・採石	862 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	952 kg	622011	砂利・採石	952 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	174 kg	0000000	その他	0.174 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-15	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(高炉B種)　Fc＝21N/mm2（呼び強度24）	m3	高炉セメントB種	307 kg	2521011b	セメント（B種高炉）	307 kg	212119200pJPN	高炉セメント, B種, JPN		
			天然砂	832 kg	622011	砂利・採石	832 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	958 kg	622011	砂利・採石	958 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	174 kg	0000000	その他	0.174 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-16	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(高炉B種)　Fc＝24N/mm2（呼び強度27）	m3	高炉セメントB種	334 kg	2521011b	セメント（B種高炉）	334 kg	212119200pJPN	高炉セメント, B種, JPN		
			天然砂	803 kg	622011	砂利・採石	803 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	964 kg	622011	砂利・採石	964 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	175 kg	0000000	その他	0.175 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-17	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(高炉B種)　Fc＝27N/mm2（呼び強度30）	m3	高炉セメントB種	353 kg	2521011b	セメント（B種高炉）	353 kg	212119200pJPN	高炉セメント, B種, JPN		
			天然砂	798 kg	622011	砂利・採石	798 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	953 kg	622011	砂利・採石	953 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	175 kg	0000000	その他	0.175 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-18	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(高炉B種)　Fc＝30N/mm2（呼び強度33）	m3	高炉セメントB種	371 kg	2521011b	セメント（B種高炉）	371 kg	212119200pJPN	高炉セメント, B種, JPN		
			天然砂	793 kg	622011	砂利・採石	793 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	942 kg	622011	砂利・採石	942 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	175 kg	0000000	その他	0.175 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-19	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(高炉B種)　Fc＝33N/mm2（呼び強度36）	m3	高炉セメントB種	403 kg	2521011b	セメント（B種高炉）	403 kg	212119200pJPN	高炉セメント, B種, JPN		
			天然砂	762 kg	622011	砂利・採石	762 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	946 kg	622011	砂利・採石	946 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	175 kg	0000000	その他	0.175 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-20	普通強度ｺﾝｸﾘｰﾄ(高炉B種)　Fc＝36N/mm2（呼び強度40）	m3	高炉セメントB種	435 kg	2521011b	セメント（B種高炉）	435 kg	212119200pJPN	高炉セメント, B種, JPN		
			天然砂	731 kg	622011	砂利・採石	731 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	951 kg	622011	砂利・採石	951 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	175 kg	0000000	その他	0.175 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
	低炭素型コンクリート										
躯体-21	低炭素型コンクリート（高炉A種相当）Fc24N/mm2（呼び強度27）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	261 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	261 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN	調合は普通コンクリートを参考に、セメントに対して高炉スラグ微粉末20%置換 高炉スラグ微粉末の環境影響を考慮していないため、必要に応じて個別収集が必要	
			高炉スラグ微粉末	65	0000000	その他					
			天然砂	819 kg	622011	砂利・採石	819 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	961 kg	622011	砂利・採石	961 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	176 kg	0000000	その他	0.176 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					
躯体-22	低炭素型コンクリート（高炉C種相当）Fc24N/mm2（呼び強度27）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	98 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	98 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN	調合は普通コンクリートを参考に、セメントに対して高炉スラグ微粉末20%置換 高炉スラグ微粉末の環境影響を考慮していないため、必要に応じて個別収集が必要	
			高炉スラグ微粉末	228	0000000	その他					
			天然砂	819 kg	622011	砂利・採石	819 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	961 kg	622011	砂利・採石	961 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	176 kg	0000000	その他	0.176 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			生コン製造工程		2522022 x	生コン製造工程					

表 S1　複合原単位例（コンクリート 3）

No.	仕様	単位	資材構成	AIJ-LCA原単位ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ_ver.1.02対応			AIST-IDEA Ver.3.4.1_日本語版対応			備考	出典
				資材量（単位あたり）	行ｺｰﾄﾞ	行部門名称	資材量（単位あたり）	IDEA製品コード	IDEA製品名		
	PCコンクリート躯体										
躯体-23	PCコンクリート　Fc＝36N/mm2	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	423 kg	2521011p	ｾﾒﾝﾄ（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	423 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN	調合は普通コンクリートを参考	
			天然砂	753 kg	622011	砂利・採石	753 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	951 kg	622011	砂利・採石	951 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	175 kg	0000000	その他	0.175 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			PC製造工程		2523011x	PC製造工程					
			鉄筋	150 kg	2621014	普通鋼小棒	150	222114000mJPN	普通鋼小形棒鋼, JPN	鉄筋量は参考値、取付金物等は含まない	
躯体-24	PCコンクリート　（Fc=36N/mm2）（鉄筋なし）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	423 kg	2521011p	ｾﾒﾝﾄ（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	423 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	753 kg	622011	砂利・採石	753 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	951 kg	622011	砂利・採石	951 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	175 kg	0000000	その他	0.175 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			PC製造工程		2523011x	PC製造工程					
躯体-25	PCコンクリート　（Fc=42N/mm2）（鉄筋なし）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	435 kg	2521011p	ｾﾒﾝﾄ（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	435 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	830 kg	622011	砂利・採石	830 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	904 kg	622011	砂利・採石	904 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	177 kg	0000000	その他	0.177 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			PC製造工程		2523011x	PC製造工程					
躯体-26	PCコンクリート　（Fc=45N/mm2）（鉄筋なし）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	442 kg	2521011p	ｾﾒﾝﾄ（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	442 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	869 kg	622011	砂利・採石	869 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	881 kg	622011	砂利・採石	881 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	178 kg	0000000	その他	0.178 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			PC製造工程		2523011x	PC製造工程					
躯体-27	PCコンクリート　（Fc=48N/mm2）（鉄筋なし）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	466 kg	2521011p	ｾﾒﾝﾄ（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	466 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	852 kg	622011	砂利・採石	852 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	878 kg	622011	砂利・採石	878 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	178 kg	0000000	その他	0.178 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			PC製造工程		2523011x	PC製造工程					
躯体-28	PCコンクリート　（Fc=51N/mm2）（鉄筋なし）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	491 kg	2521011p	ｾﾒﾝﾄ（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	491 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	835 kg	622011	砂利・採石	835 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	875 kg	622011	砂利・採石	875 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	178 kg	0000000	その他	0.178 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			PC製造工程		2523011x	PC製造工程					
躯体-29	PCコンクリート　（Fc=54N/mm2）（鉄筋なし）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	516 kg	2521011p	ｾﾒﾝﾄ（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	516 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	819 kg	622011	砂利・採石	819 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	872 kg	622011	砂利・採石	872 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	178 kg	0000000	その他	0.178 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			PC製造工程		2523011x	PC製造工程					
躯体-30	PCコンクリート　（Fc=57N/mm2）（鉄筋なし）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	546 kg	2521011p	ｾﾒﾝﾄ（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	546 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	798 kg	622011	砂利・採石	798 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	869 kg	622011	砂利・採石	869 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	178 kg	0000000	その他	0.178 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			PC製造工程		2523011x	PC製造工程					
躯体-31	PCコンクリート　（Fc=60N/mm2）（鉄筋なし）	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	566 kg	2521011p	ｾﾒﾝﾄ（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	566 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN		
			天然砂	785 kg	622011	砂利・採石	785 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砂利・採石）	867 kg	622011	砂利・採石	867 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	178 kg	0000000	その他	0.178 m3	361100000mJPN	上水道, 4桁, JPN		
			PC製造工程		2523011x	PC製造工程					

出典１：辻大二郎ほか，実コンクリート配（調）合から試算したコンクリート材料由来の CO_2排出量，コンクリート工学年次論文集，2024

表 S2　複合原単位例（鉄骨、鉄筋）

No.	仕様	単位	資材構成	AIJ-LCA原単位ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ_ver.1.02対応			AIST-IDEA Ver.3.4.1_日本語版対応			備考	出典
				資材量（単位あたり）	行ｺｰﾄﾞ	行部門名称	資材量（単位あたり）	IDEA製品コード	IDEA製品名		
	鉄骨										
躯体-32	鉄骨	kg	鉄骨	1 kg	2621011	普通鋼形鋼	1 kg	244111000pJPN	鉄骨, JPN		
躯体-33	鉄骨（転炉法）	kg	鉄骨	1 kg	2621011a	普通鋼形鋼(転炉法)	1 kg	222112201pJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), 転炉法, JPN		
躯体-34	鉄骨（電炉法）	kg	鉄骨	1 kg	2621011b	普通鋼形鋼(電炉法)	1 kg	222112202pJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), 電炉法, JPN		
躯体-35	雑鉄骨	kg	鉄骨	1 kg	2621011	普通鋼形鋼	1 kg	244111000pJPN	鉄骨, JPN		
躯体-36	ボルト	kg	鉄骨	1 kg	2899011	ボルト・ナット・リベット及びスプリング	1 kg	248111000pJPN	ボルト、ナット, JPN		
躯体-37	耐火被覆(柱：ｹｲ酸板)	m2	土石製品 ガラス繊維	12.8 kg 1.6 kg	2599021 2512011	その他の建設用土石製品 ガラス繊維・同製品	0.036 m3	219929200pJPN	けい酸カルシウム保温材, JPN	36mm＊比重0.4*構成率0.89 36mm*比重0.4*構成率0.11 IDEAではけい酸カルシウム保温材にガラス繊維も含まれる	
躯体-38	耐火被覆(梁:湿式)	m2	岩綿 砂（モルタル用） セメント（モルタル用）	13.0 kg 4.2 kg 1.4 kg	2599099 622011 2521011	その他の窯業・土石製品 砂利・採石 セメント	13 kg 4.2 kg 1.4 kg	219111000pJPN 054118101pJPN 212119000pJPN	ロックウール、同製品, JPN 砂・砂利・玉石, JPN その他の水硬性セメント, JPN	31mm＊比重0.6*構成率0.7 31mm＊比重0.6*構成率0.225 31mm＊比重0.6*構成率0.075	
躯体-39	耐火被覆(ﾛｯｸｳｰﾙ吹付 t30:半湿式)	kg	ロックウール t30	8.4 kg	2599099	その他の窯業・土石製品	8.4 kg	219111000pJPN	ロックウール、同製品, JPN		
躯体-40	耐火被覆(巻付け耐火被覆材(ﾛｯｸｳｰﾙ) t20)	kg	ロックウール	1.6 kg	2599099	その他の窯業・土石製品	1.6 kg	219111000pJPN	ロックウール、同製品, JPN		
躯体-41	デッキプレート	m2	鋼材	14.4 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	14.4 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN		
	鉄筋										
躯体-42	鉄筋	kg	鉄筋	1 kg	1611011	製材	1 kg	222114000mJPN	普通鋼小形棒鋼, JPN		
躯体-44	PC鋼線	kg	鋼材	1 kg	1611011	製材	1 kg	247914000pJPN	PC鋼より線, JPN		
躯体-45	ﾜｲﾔｰﾒｯｼｭ（φ6.0-100×100）	m2	鋼材	4.4 kg	1611011	製材	4.4 kg	247911000pJPN	鉄製金網 (溶接金網、じゃかごを含む), JPN		
躯体-46	ﾜｲﾔｰﾒｯｼｭ（φ3.2-50×50）	m2	鋼材	2.5 kg	1611011	製材	2.5 kg	247911000pJPN	鉄製金網 (溶接金網、じゃかごを含む), JPN		
躯体-47	ﾜｲﾔｰﾒｯｼｭ（φ6.0-50×50）	m2	鋼材	8.9 kg	1611011	製材	8.9 kg	247911000pJPN	鉄製金網 (溶接金網、じゃかごを含む), JPN		
躯体-48	ﾜｲﾔｰﾒｯｼｭ（φ6.0-150×150）	m2	鋼材	3.1 kg	1611011	製材	3.1 kg	247911000pJPN	鉄製金網 (溶接金網、じゃかごを含む), JPN		

注）上記で示した複合原単位例は検討中の成果の一部を抜粋したものである。

建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討

～複合原単位の充実とその利用拡大に向けて　－仕上工事－～

Development of tools applicable to various needs of environmental assessment of buildings
~ Enhancement and expansion of application of unit process data -finishing material- ~

○天石文[*1)]、鈴木好幸[2)]、木原勇信[3)]、磯部孝行[4)]、小林謙介[5)]
Aya Amaishi, Yoshiyuki Suzuki, Isanobu Kihara, Takayuki Isobe, Kensuke Kobayashi
1) 大成建設株式会社, 2) 株式会社安藤･間, 3) 鹿島建設株式会社, 4) 武蔵野大学, 5) 県立広島大学
* amiay-00@ pub.taisei.co.jp

1. はじめに

日本建築学会 LCA 小委員会では、2024 年 3 月に発行した「建物の LCA 指針　－温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール－　改定版」において、2015 年産業連関表に基づく CO_2 等の原単位データである AIJ-LCA 原単位データ及び LCA 計算ツールである AIJ-LCA & LCW_ver.5.01.xls も改定し、提供した。

昨年度本大会において報告したとおり [1)]、改定版の AIJ-LCA & LCW_ver.6.0.xls（最新は ver.6.03、以下、AIJ-LCA ツール）では、比較的採用頻度の高い建材を中心に複合原単位の例を掲載した。しかしながら欧州では建築製品に対して GHG 算定だけではなく、評価する環境影響項目を多様化する流れがあることなどから、今後は AIJ-LCA 原単位だけでなく、マルチクライテリア評価が可能な他の原単位データベースの利用機会の増加の可能性を考慮し、本ツールのインベントリデータの更なる充実化と AIST-IDEA コードへの連鎖の案を示すこととした。本報告は、本大会における別報「建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討～複合原単位の充実とその利用拡大に向けて　－躯体工事－～」に引き続き、仕上工事における建築資材について報告する。

2. 仕上材複合原単位の充実

2.1 複合原単位による LCA の効率化

建物に用いられている多様な建材の多くは、建材と原単位が 1:1 で連鎖することができず、建材の構成材料ごとに原単位を連鎖させて計算することになる。このため AIJ ツールでは、評価に必要な建材を構成材料ごとに原単位に連鎖させて複合化することで、その建材の原単位（複合原単位）として評価に用いる方法を提案している [2)]。

2.2 複合原単位の充実

仕上材では、同一の建材を複数の規格・仕様で用いることがあるため、特に採用頻度の高い建材については、これまでの AIJ-LCA ツールにおける‘ある 1 つの仕様の例示’から‘採用頻度の高い仕様の例示’へ内容を拡大し、効率化と精度向上を図った。複合原単位の資材構成については、既往文献 [2)-3)]やメーカーヒアリング等に基づいた。下記にその例を示す。

①石膏ボード

内装の壁や天井に用いられる石膏ボードは種類や厚みの違いによって規格が多岐にわたるが、その中でも特に採用頻度の高い規格（種類・厚みの組合せ）について示す。

表 1 石膏ボード仕様の充実化

AIJ-LCA ツール_ver.6.03	本報告
石膏ボード t12.5	石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t9.5
	石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t12.5
	石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t15
	強化石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t15
	強化石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t21

②LGS

石膏ボードの下地で使用される LGS は鋼材の規格、設置間隔の組合せによって複数の仕様がある。使用数量が大きくなるため、天井、壁ともに仕様の充実化を図った。

表 2 LGS 仕様の充実化（壁）

AIJ-LCA ツール_ver.6.03	本報告
W65 @455 二重貼 捨貼用	W50 @303　直貼用
	W65 @455 二重貼 捨貼用
	W65 @303　直貼用
	W100 @455 二重貼 捨貼用
	W100 @303　直貼用

③間仕切

間仕切は基本的に石膏ボードと LGS の組合せで仕様が設定されるが、石膏ボードの規格、枚数、面数及び LGS の仕様などによって複数のパターンがある。これらに対しては、積算資料の規格や仕様に記載された項目ごとに建材の数量を拾うことで算定可能だが、効率化を図るため、頻出パターンとして想定される仕様

に対して複合原単位の例を示した。

④鋼材

手摺や下地材、補強材など多くの場面で鋼材が使用されているが、材料の違い（スチール、ステンレス、アルミなど）、形状の違い（形鋼、鋼板、鋼管など）、規格（サイズ）の違いによって多種多様である。これらに対して全てを複合原単位として登録することは現実的ではないため、数量や原単位連鎖の例を示した。

⑤既存複合原単位の詳細検討

多様な環境評価を行う上で、製品と一致する原単位がない場合、複数材料から構成されている建材は、材料の構成単位に分解して材料レベルで原単位と連鎖することが望ましい。そのような観点から、ALC パネルやシステムキッチン等について、メーカーヒアリングを基に詳細検討を行った。システムキッチンについては、これまでの木製家具のみからなる複合原単位から、天板やシンク、レンジフードなどの構成材レベルでの詳細な複合原単位とすることができた。

2.3 複合原単位の利用拡大に向けて

今回検討した複合原単位の例について、Supporting Information として表 S1 から S7 に示す。各資材への原単位の連鎖については、AIJ-LCA ツールの他、マルチクライテリア評価での利用が想定される AIST-IDEA[4] への連鎖例についても示している。

産業連関表ベースの AIJ-LCA 原単位の連鎖を AIST-IDEA コード連鎖に変更しようとした場合、AIST-IDEA に付属資料として用意されている AIST-IDEA 製品コードと産業連関表の基本分類の対応表を使用することができるが、ここに示されない建築関連の製品も多数あることから、十分に検討する必要がある。

また、AIJ-LCA データベースと AIST-IDEA では、機能単位の異なるケースがある。AIJ-LCA データベースで用いられる機能単位の多くは「kg」であるが、AIST-IDEA では、例えば木材関連では製品によって「m^3」、「m^2」、「kg」と異なる。

ガラスについては「普通・板ガラス」に対して機能単位に「2mm 換算箱」が用いられており、この換算箱について“1 換算箱は、厚さ 2mm、面積 9.29m^2 の板ガラスの数量をあらわす単位 [5]”と説明されている。このため、厚さ及び面積に応じた換算が必要である。

3. まとめ

LCA 指針の改定に際して既に複合原単位の充実化を図っていたが、建物 LCA に対するニーズの高まりを受けて、今回更に多様なケースを想定した複合原単位の充実化と AIST-IDEA を用いたマルチクライテリア評価への利用拡大に向けた検討を行った。

建物 LCA の効率化には複合原単位の整備が重要となるが、本ツールに掲載の複合原単位については、建築資材種類やその資材構成・重量、連鎖する原単位において、あくまでも参考例としての位置付けであり、その利用等においては実施者の判断において適切になされる必要がある。

4. 謝辞

本研究の実施にあたっては、日本建築学会地球環境委員会 LCA 小委員会の関係各位、並びに各建材メーカーに多大なるご協力を頂きました。記して謝意を表します。

5. 引用文献

1) 天石文ほか：日本 LCA 学会，宇都宮，(2024)，pp.358-365
2) 一般社団法人 日本建築学会，“建物の LCA 指針－温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール－ 改定版”，丸善出版，東京，(2024)，p44-51
3) 天石文ほか：日本 LCA 学会，つくば，(2023)，pp.317-322
4) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ，“LCI データベース AIST-IDEA Ver.3.4.1”，(2024)
5) （一社）板硝子協会：“統計と調査”（オンライン），<https://www.itakyo.or.jp/data/report/production_c.html>，（参照 2025-12-06）

Supporting Information

表 S1　複合原単位例（仕上材 1）

・本表では新規複合原単位及び原単位（AIJ-LCA、AIST-IDEA）連鎖についての例示を目的としているため、AIJ-LCAツール（一般建築版）_ver.6.03の資材（コード）全ての掲載は行っておらず、また異なる分類で表記している。

・AIST-IDEA Ver.3.4.1_日本語版において原単位の機能単位が「円」のものについては、換算の例示が困難なため空欄としている。

No.	仕様	単位	資材構成	AIJ-LCA原単位ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ_ver.1.02対応			AIST-IDEA Ver.3.4.1_日本語版対応			備考	出典
				資材量（単位あたり）	行ｺｰﾄﾞ	行部門名称	資材量（単位あたり）	IDEA製品コード	IDEA製品名		
	既製コンクリート工事										
仕上-1	外壁PCコンクリート　(Fc36N/mm2、t150)	m3	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	63 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	63 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN	躯体PCｺﾝｸﾘｰﾄ参照	
			天然砂	113 kg	622011	砂利・採石	113 kg	054118201pJPN	山砂, 骨材用, JPN		
			天然骨材（砕石）	143 kg	622011	砂利・採石	143 kg	054118000mJPN	採石、砂・砂利・玉石, JPN		
			回収水	26 kg	0000000	その他	円	079411000pJPN	上・工業用水道, JPN	化学混和剤考慮なし	
			PC製造工程		2523011 x	PC製造工程	-	-			
			鉄筋	23 kg	2621014	普通鋼小棒	23 kg	222114000mJPN	普通鋼小形棒鋼, JPN	鉄筋量は参考値	
仕上-2	外壁ALC t125	m2	ｾﾒﾝﾄ	15 kg	2521011	セメント	15 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN	IDEA製品:212913200pJPN	ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ（参考値）
			けい石	40 kg	622011	砂利・採石	40 kg	054149000pJPN	天然けい砂 (含むがいろ目けい砂), JPN	(ALCパネル, JPN)	
			生石灰	7.5 kg	0000000	その他	7.5 kg	219311000pJPN	生石灰, JPN		
			アルミ	0.1 kg	2711031	アルミニウム（再生を含む。）	0.1 kg	239912000pJPN	アルミニウム・同合金粉, JPN		
			鉄筋	3.8 kg	2621014	普通鋼小棒	3.8 kg	222114000mJPN	普通鋼小形棒鋼, JPN		
			ALC製造工程		2523011 x	PC製造工程	-	-			
仕上-3	押出ｾﾒﾝﾄ成形板 t60（ｽﾁｰﾙ下地含む）	m2	押出ｾﾒﾝﾄ成形板	66 kg	2523011	セメント製品	66 kg	212319200pJPN	コンクリート成形パネル, JPN		
			ｽﾁｰﾙ下地	10 kg	2621011	普通鋼形鋼	10 kg	222112000mJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), JPN		
	防水工事										
仕上-4	歩行防水　(押えｺﾝ、断熱材含む)	m2	押さえｺﾝｸﾘｰﾄ t60	141 kg	2522011p	生コン（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	0.06 m3	212211000pJPN	生コンクリート, JPN		
			溶接金網	4.4 kg	2623011	普通鋼冷間仕上鋼材	4.4 kg	247911000pJPN	鉄製金網 (溶接金網、じゃかごを含む), JPN		
			ｱｽﾌｧﾙﾄ防水	11 L	2111019	その他の石油製品	11 kg	171122000pJPN	アスファルト, JPN		
			ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑt35	0.9 kg	2211013	プラスチック発泡製品	0.9 kg	184219100pJPN	ポリウレタン, 硬質ウレタンボード, JPN	25kg/m3	
仕上-5	露出防水（断熱材含む）	m2	ｱｽﾌｧﾙﾄ防水	15 L	2111019	その他の石油製品	15 kg	171122000pJPN	アスファルト, JPN		
			ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑt35	0.9 kg	2211013	プラスチック発泡製品	0.9 kg	184219100pJPN	ポリウレタン, 硬質ウレタンボード, JPN	25kg/m3	
仕上-6	ｼｰﾄ防水　(塩ﾋﾞ系)	m2	塩ﾋﾞ系ｼｰﾄ	2.9 kg	2211011	プラスチックフィルム・シート	2.9 kg	163521000pJPN	塩化ビニル樹脂, JPN		
			接着剤	1.1 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	1.1 kg	163600000mJPN	合成ゴム, 4桁, JPN		
仕上-7	塗膜防水（ｳﾚﾀﾝ系）	m2	塗膜防水	3.3 kg	2072011	塗料	3.3 kg	184111100pJPN	ポリウレタン, 軟質, JPN		出典１
仕上-8	塗布防水（ｹｲ酸質系）	m2	塗布防水	1.4 kg	2072011	塗料	1.4 kg	212119000pJPN	その他の水硬性セメント, JPN		出典１
仕上-9	ｺｰｷﾝｸﾞ 10×10（ｼﾘｺﾝ系）	m	ｼﾘｺﾝ系	0.1 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	0.1 kg	163529201pJPN	シリコーンゴム, コンパウンド, JPN	1020kg/m3	出典４
仕上-10	ｺｰｷﾝｸﾞ 10×10（変性ｼﾘｺﾝ系）	m	変性ｼﾘｺﾝ系	0.1 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	0.1 kg	163529113pJPN	変性ポリフェニレンエーテル樹脂, JPN	1307.5kg/m3	出典１
仕上-11	ｺｰｷﾝｸﾞ 10×10（ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ系）	m	ﾎﾟﾘｳﾚﾀﾝ系	0.1 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	0.1 kg	184111100pJPN	ポリウレタン, 軟質, JPN	1090kg/m3	出典１
仕上-12	ｺｰｷﾝｸﾞ 10×10（ﾎﾟﾘｻﾙﾌｧｲﾄﾞ系）	m	ﾎﾟﾘｻﾙﾌｧｲﾄﾞ系	0.1 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	0.1 kg	184111100pJPN	ポリウレタン, 軟質, JPN	1350kg/m3	出典１
仕上-13	ｺｰｷﾝｸﾞ 10×10（ﾎﾟﾘｲｿﾌﾞﾁﾚﾝ系）	m	ﾎﾟﾘｲｿﾌﾞﾁﾚﾝ系	0.1 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	0.1 kg	163113102pJPN	イソブチレン, JPN	1080kg/m3	出典５
仕上-14	ｺｰｷﾝｸﾞ 10×10（ｱｸﾘﾙ樹脂ｴﾏﾙｼﾞｮﾝ系）	m	ｱｸﾘﾙ樹脂ｴﾏﾙｼﾞｮﾝ系	0.2 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	0.2 kg	164411200pJPN	建築用アクリル樹脂エナメル, 溶剤系, 白, JPN	1530kg/m3	出典６
	石工事										
仕上-15	床仕上　石（下地ﾓﾙﾀﾙ含む）	m2	石 t25	65 kg	622011	砂利・採石	65 kg	054118100pJPN	採石, JPN		
			砂（ﾓﾙﾀﾙ用）	66 kg	622011	砂利・採石	66 kg	054118101pJPN	砂・砂利・玉石, JPN	IDEA製品:212919200pJPN(モル	
			ｾﾒﾝﾄ（ﾓﾙﾀﾙ用）	16 kg	2521011p	セメント（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	16 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN	タル, JPN)	
仕上-16	壁仕上　石（ｽﾁｰﾙ下地含む）	m2	石 t25	65 kg	622011	砂利・採石	65 kg	054118100pJPN	採石, JPN		
			ｽﾁｰﾙ下地	4 kg	2621011	普通鋼形鋼	4 kg	222112000mJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), JPN		
	タイル工事										
仕上-17	外床　磁器ﾀｲﾙ（２丁掛、下地ﾓﾙﾀﾙ含む）	m2	ﾀｲﾙ t9.5	18 kg	2531011	建設用陶磁器	1 m2	214600000mJPN	陶磁器製タイル, 4桁, JPN		
			砂（ﾓﾙﾀﾙ用）	8 kg	622011	砂利・採石	8 kg	054118101pJPN	砂・砂利・玉石, JPN	IDEA製品:212919200pJPN(モル	
			ｾﾒﾝﾄ（ﾓﾙﾀﾙ用）	10 kg	2521011	セメント	10 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN	タル, JPN)	
	木工事										
仕上-18	製材（ヒノキ）	m3	製材	440 kg	1611011	製材	1 m3	121100000mJPN	一般製材, 4桁, JPN		出典１
仕上-19	製材（スギ）	m3	製材	380 kg	1611011	製材	1 m3	121100000mJPN	一般製材, 4桁, JPN		出典１
仕上-20	製材（マツ）	m3	製材	520 kg	1611011	製材	1 m3	121100000mJPN	一般製材, 4桁, JPN		出典１
仕上-21	製材（クロマツ）	m3	製材	580 kg	1611011	製材	1 m3	121100000mJPN	一般製材, 4桁, JPN		出典１
仕上-22	製材（ベイマツ）	m3	製材	490 kg	1611011	製材	1 m3	121100000mJPN	一般製材, 4桁, JPN		出典１
仕上-23	製材（スギ-板類）	m3	製材-板類	380 kg	1611011	製材	1 m3	121111000pJPN	板類, JPN		出典１
仕上-24	製材（スギ-ひき割類）	m3	製材-ひき割類	380 kg	1611011	製材	1 m3	121112000pJPN	ひき割類, JPN		出典１
仕上-25	製材（スギ-小割）	m3	製材-小割	380 kg	1611011	製材	1 m3	121112200pJPN	小割, JPN		出典１

表 S2　複合原単位例（仕上材 2）

No.	仕様	単位	資材構成	AIJ-LCA原単位ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ_ver.1.02対応			AIST-IDEA Ver.3.4.1_日本語版対応			備考	出典
				資材量（単位あたり）	行ｺｰﾄﾞ	行部門名称	資材量（単位あたり）	IDEA製品コード	IDEA製品名		
仕上-26	製材 (スギ-ひき角類)	m3	製材-ひき角類	380 kg	1611011	製材	1 m3	121113000pJPN	ひき角類, JPN		出典 1
仕上-27	合板	m3	合板	542 kg	1611021	合板	1 m3	122211000pJPN	普通合板, JPN		出典 3
仕上-28	合板 t12	m2	合板 t12	6.5 kg	1611021	合板	0.01 m3	122211000pJPN	普通合板, JPN		
仕上-29	合板 t15	m2	合板 t15	8.1 kg	1611021	合板	0.02 m3	122211000pJPN	普通合板, JPN		
仕上-30	MDF	m3	MDF	691 kg	1611021	合板	691 kg	122619200pJPN	中質繊維板 (MDF), JPN		出典 3
仕上-31	MDF　t9	m2	MDF　t9	6.2 kg	1611021	合板	6.2 kg	122619200pJPN	中質繊維板 (MDF), JPN		
仕上-32	MDF　t21	m2	MDF　t21	14.5 kg	1611021	合板	14.5 kg	122619200pJPN	中質繊維板 (MDF), JPN		
仕上-33	CLT	m3	CLT	500 kg	1611021	合板	1 m3	122211000pJPN	普通合板, JPN		ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ（参考値）
仕上-34	LVL	m3	LVL	542 kg	1611021	合板	1 m3	122211000pJPN	普通合板, JPN		出典 3
仕上-35	集成材	m3	集成材	500 kg	1611021	合板	1 m3	122311000pJPN	集成材, JPN		ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ（参考値）
仕上-36	ﾊﾟｰﾃｨｸﾙﾎﾞｰﾄﾞ t15	m2	ﾊﾟｰﾃｨｸﾙﾎﾞｰﾄﾞ	8.9 kg	1611021	合板	1 m2	122511000pJPN	パーティクルボード, JPN	596kg/m3	出典 3
	屋根及びとい工事										
仕上-37	金属屋根（ｶﾗｰ鉄板）	m2	鋼板 t1.0	15.5 kg	2812011	建築用金属製品	15.5 kg	222112000mJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), JPN		
仕上-38	折板葺き（ｶﾞﾙﾊﾞﾘｳﾑ鋼板 t0.8）	m2	ｶﾞﾙﾊﾞﾘｳﾑ鋼板 t=0.8	18.4 kg	2812011	建築用金属製品	18.4 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	H=90	
仕上-39	断熱二重折板葺（t0.8+t0.6）	m2	ｶﾞﾙﾊﾞﾘｳﾑ鋼板	17.4 kg	2812011	建築用金属製品	17.4 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN		出典 7
			ｸﾞﾗｽｳｰﾙ	1.5 kg	2512011	ガラス繊維・同製品	1.5 kg	211711000pJPN	ガラス短繊維、同製品, JPN		
仕上-40	角波ｻｲﾃﾞｨﾝｸﾞ t0.6	m2	めっき鋼板	6.0 kg	2812011	建築用金属製品	6.0 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN		出典 7
仕上-41	断熱ｻﾝﾄﾞｲｯﾁﾊﾟﾈﾙ t35	m2	塗装鋼板	8.5 kg	2812011	建築用金属製品	8.5 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	働き幅2種の平均	ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ(参考値)
			ﾎﾟﾘｲｿｼｱﾇﾚｰﾄﾌｫｰﾑ	2 kg	2211013	プラスチック発泡製品	2 kg	163429135pJPN	ポリメチレンポリフェニルポリイソシアネート (PMPPI), JPN		
仕上-42	耐火断熱サンドイッチパネル t50	m2	鋼板	9.6 kg	2812011	建築用金属製品	9.6 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	働き幅2種の平均	
			ロックウール	7 kg	2599099	その他の窯業・土石製品	7 kg	219111000pJPN	ロックウール、同製品, JPN		
			石膏ﾎﾞｰﾄﾞ	1.3 kg	2599021	その他の建設用土石製品	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
仕上-43	VP管（φ100）	m	VP管（φ100）	3.4 kg	2211012	プラスチック板・管・棒	3.4 kg	181211200pJPN	プラスチック管, 塩化ビニル, JPN		
仕上-44	VU管（φ100）	m	VU管（φ100）	1.7 kg	2211012	プラスチック板・管・棒	1.7 kg	181211200pJPN	プラスチック管, 塩化ビニル, JPN		
仕上-45	SGP管（100A）	m	SGP管（100A）	12.2 kg	2622011	普通鋼鋼管	12.2 kg	222313000mJPN	普通鋼めっき鋼管, JPN		出典 2
仕上-46	SUS竪樋（φ105 t0.8）	m	SUS竪樋（φ105 t0.8）	2.1 kg	2621016	特殊鋼熱間圧延鋼材	2.1 kg	223114000mJPN	ステンレス鋼, JPN		出典 2
	金属工事										
仕上-47	有孔折板床	m2	有孔折板床	22.8 kg	2812011	建築用金属製品	22.8 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN		
仕上-48	アルミルーバー	m2	アルミ製品	11.4 kg	2729021d	アルミニウム圧延製品（形材）	11.4 kg	233211204pJPN	アルミニウム板材, 建材用, JPN		ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ(参考値)
仕上-49	アルミルーバー（内部）	m2	アルミ製品	6.5 kg	2729021d	アルミニウム圧延製品（形材）	6.5 kg	233211204pJPN	アルミニウム板材, 建材用, JPN		ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ(参考値)
仕上-50	笠木（歩行防水・ｱﾙﾐ既製品）	m	ｱﾙﾐ部材	4.3 kg	2729021d	アルミニウム圧延製品（形材）	4.3 kg	233211204pJPN	アルミニウム板材, 建材用, JPN		
			ｾﾒﾝﾄ製品(押出成形板)	6 kg	2523011	セメント製品	6 kg	212319200pJPN	コンクリート成形パネル, JPN		
			ｱｽﾌｧﾙﾄ防水	6 L	2111019	その他の石油製品	6 kg	171122000pJPN	アスファルト, JPN		
仕上-51	内周水切（歩行防水・ｱﾙﾐ既製品）	m	ｱﾙﾐ部材	3.7 kg	2729021d	アルミニウム圧延製品（形材）	3.7 kg	233211204pJPN	アルミニウム板材, 建材用, JPN		
			ｾﾒﾝﾄ製品(押出成形板)	6 kg	2523011	セメント製品	6 kg	212319200pJPN	コンクリート成形パネル, JPN		
			ｱｽﾌｧﾙﾄ防水	6 L	2111019	その他の石油製品	6 kg	171122000pJPN	アスファルト, JPN		
仕上-52	サッシアンカー	個	サッシアンカー	0.03 kg	2812011	建築用金属製品	円	242912000pJPN	建築用金物, JPN		出典 2
仕上-53	普通鋼形鋼	kg	普通鋼形鋼	1 kg	2621011	普通鋼形鋼	1 kg	222112000mJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), JPN		
仕上-54	普通鋼鋼板	kg	普通鋼鋼板	1 kg	2621012	普通鋼鋼板	1 kg	222118000mJPN	普通鋼中板・薄板 (厚さ6mm未満でローモ板、電気鋼板を含む), JPN		
仕上-55	鋼板（スチール t2.3）	m2	鋼板（スチール）	18.1 kg	2621012	普通鋼鋼板	18.1 kg	222118000mJPN	普通鋼中板・薄板 (厚さ6mm未満でローモ板、電気鋼板を含む), JPN		出典 2
仕上-56	普通鋼小棒	kg	普通鋼小棒	1 kg	2621014	普通鋼小棒	1 kg	222114000mJPN	普通鋼小形棒鋼, JPN		
仕上-57	特殊鋼熱間圧延鋼材	kg	ステンレス	1 kg	2621016	特殊鋼熱間圧延鋼材	1 kg	223114000mJPN	ステンレス鋼, JPN		
仕上-58	ステンレス板 t2.0	m2	ステンレス板 t2.0	15.9 kg	2621016	特殊鋼熱間圧延鋼材	15.9 kg	223114000mJPN	ステンレス鋼, JPN		
仕上-59	普通鋼鋼管	kg	普通鋼鋼管	1 kg	2622011	普通鋼鋼管	1 kg	222113000mJPN	普通鋼管材, JPN		
仕上-60	普通鋼冷間仕上鋼材	kg	普通鋼冷間仕上鋼材	1 kg	2623011	普通鋼冷間仕上鋼材	1 kg	222212000mJPN	普通鋼冷延鋼板 (冷延ローモ板、再生仕上鋼板を含む), JPN		
仕上-61	めっき鋼材	kg	めっき鋼材	1 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	1 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN		
仕上-62	溶融亜鉛メッキ鋼板 t0.6	m2	溶融亜鉛メッキ鋼板 t0.6	5 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	5 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN		
仕上-63	ガルバリウム鋼板 t0.6	m2	ガルバリウム鋼板 t0.6	4.9 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	4.9 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN		
仕上-64	フッ素樹脂塗装鋼板 t1.0	m2	フッ素樹脂塗装鋼板	8.2 kg	2621012	普通鋼鋼板	8.2 kg	222118000mJPN	普通鋼中板・薄板 (厚さ6mm未満でローモ板、電気鋼板を含む), JPN		出典 2
仕上-65	高耐食ﾒｯｷ鋼板 t1.2	m2	高耐食ﾒｯｷ鋼板	9.5 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	9.5 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN		出典 2

表 S3　複合原単位例（仕上材 3）

No.	仕様	単位	資材構成	AIJ-LCA原単位ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ_ver.1.02対応			AIST-IDEA Ver.3.4.1_日本語版対応			備考	出典
				資材量（単位あたり）	行ｺｰﾄﾞ	行部門名称	資材量（単位あたり）	IDEA製品コード	IDEA製品名		
仕上-66	縞鋼板 t4.5	m2	縞鋼板	37.0 kg	2812011	建築用金属製品	37.0 kg	222118000mJPN	普通鋼中板・薄板 (厚さ6mm未満でローモ板、電気鋼板を含む), JPN		出典２
仕上-67	山形鋼（ｽﾁｰﾙ、L-30×30×3）	m	山形鋼	1.36 kg	2621011	普通鋼形鋼	1.36 kg	222112000mJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), JPN		出典２
仕上-68	角型鋼（ｽﾁｰﾙ、□-100×100×3.2）	m	角型鋼	9.52 kg	2621013	普通鋼鋼帯	9.52 kg	222216000mJPN	冷間ロール成型形鋼, JPN	普通鋼鋼帯では加工分含まず	出典２
仕上-69	軽みぞ形鋼（ｽﾁｰﾙ、C3.2×100×50）	m	軽みぞ形鋼	4.76 kg	2621013	普通鋼鋼帯	4.76 kg	222216000mJPN	冷間ロール成型形鋼, JPN	普通鋼鋼帯では加工分含まず	出典２
仕上-70	リップ溝形鋼（ｽﾁｰﾙ、C2.3-60×30×10）	m	リップ溝形鋼	2.25 kg	2621013	普通鋼鋼帯	2.25 kg	222216000mJPN	冷間ロール成型形鋼, JPN	普通鋼鋼帯では加工分含まず	出典２
仕上-71	FB（ｽﾁｰﾙ、t9×50）	m	FB（ｽﾁｰﾙ）	3.53 kg	2621011	普通鋼形鋼	3.53 kg	222112000mJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), JPN		出典２
仕上-72	FB（SUS、t6×50）	m	FB（SUS）	2.38 kg	2621016	特殊鋼熱間圧延鋼材	2.38 kg	223114000mJPN	ステンレス鋼, JPN		出典２
仕上-73	ﾒﾀﾙﾗｽ（平ﾗｽF500）	m2	ﾒﾀﾙﾗｽ	0.5 kg	2621013	普通鋼鋼帯	円	244511000pJPN	メタルラス, JPN	普通鋼鋼帯では加工分含まず	出典８
仕上-74	ｱﾙﾐ圧延製品（ｱﾙﾐ製品）	kg	ｱﾙﾐ圧延製品	1 kg	2722021	アルミ圧延製品	1 kg	233211000pJPN	アルミニウム圧延製品, JPN		
仕上-75	鋳鉄品	kg	鋳鉄品	1 kg	2631031	鋳鉄品	1 kg	225100000mJPN	銑鉄鋳物 (鋳鉄管、可鍛鋳鉄を除く), 4桁, JPN		
	建具工事										
	<アルミ製建具>										
仕上-76	ｱﾙﾐｻｯｼ+ｶﾞﾗｽ10mm（単層-FIX）	m2	ｱﾙﾐ部材	7 kg	2729021d	アルミニウム圧延製品（形材）	7 kg	233212202pJPN	アルミニウム押出品, 小型, JPN	IDEA製品:244312000pJPN(ビル用アルミニウム製サッシ, JPN)	
			ｽﾁｰﾙ部材	1.2 kg	2621011	普通鋼形鋼	1.2 kg	222112000mJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), JPN		
			ｶﾞﾗｽ t10	25 kg	2511011	板ガラス	0.5 2mm換算箱	211111000pJPN	普通・変り板ガラス, JPN		
仕上-77	ｱﾙﾐｻｯｼ+ｶﾞﾗｽ10mm（単層-回転窓）	m2	ｱﾙﾐ部材	12 kg	2729021d	アルミニウム圧延製品（形材）	12 kg	233212202pJPN	アルミニウム押出品, 小型, JPN	IDEA製品:244312000pJPN(ビル用アルミニウム製サッシ, JPN)	
			ｽﾁｰﾙ部材	1.7 kg	2621011	普通鋼形鋼	1.7 kg	222112000mJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), JPN		
			ｶﾞﾗｽ t10	25 kg	2511011	板ガラス	0.5 2mm換算箱	211111000pJPN	普通・変り板ガラス, JPN		
仕上-78	ｱﾙﾐｻｯｼ嵌殺+ｶﾞﾗｽ8mm（集合住宅用）	m2	ｱﾙﾐ部材	5.2 kg	2729021d	アルミニウム圧延製品（形材）	5.2 kg	233212202pJPN	アルミニウム押出品, 小型, JPN	IDEA製品:244312000pJPN(ビル用アルミニウム製サッシ, JPN)	
			ｽﾁｰﾙ部材	0.8 kg	2621011	普通鋼形鋼	0.8 kg	222112000mJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), JPN		
			ｶﾞﾗｽ t8	20 kg	2511011	板ガラス	0.4 2mm換算箱	211111000pJPN	普通・変り板ガラス, JPN		
仕上-79	ｱﾙﾐｻｯｼ引違+ｶﾞﾗｽ6mm（集合住宅用）	m2	ｱﾙﾐ部材	9 kg	2729021d	アルミニウム圧延製品（形材）	9 kg	233212202pJPN	アルミニウム押出品, 小型, JPN	IDEA製品:244312000pJPN(ビル用アルミニウム製サッシ, JPN)	
			ｽﾁｰﾙ部材	0.8 kg	2621011	普通鋼形鋼	0.8 kg	222112000mJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), JPN		
			ｶﾞﾗｽ t6	15 kg	2511011	板ガラス	0.3 2mm換算箱	211111000pJPN	普通・変り板ガラス, JPN		
仕上-80	ｱﾙﾐｶﾞﾗﾘ（外部）	m2	ｱﾙﾐｶﾞﾗﾘ	18.7 kg	2722021	アルミ圧延製品	18.7 kg	244312000pJPN	ビル用アルミニウム製サッシ, JPN		ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ(参考値)
	<鋼製建具等>										
仕上-81	鋼製扉（SD）	m2	SD	36 kg	2812011	建築用金属製品	36 kg	244322000pJPN	金属製サッシ・ドア, JPN		
仕上-82	軽量鋼製扉（LSD）	m2	LSD	17 kg	2812011	建築用金属製品	17 kg	244322000pJPN	金属製サッシ・ドア, JPN		
仕上-83	ｼｬｯﾀｰ	m2	ｼｬｯﾀｰ	47 kg	2812011	建築用金属製品	47 kg	244512000pJPN	シャッタ, JPN		
仕上-84	木製扉	m2	木製扉	8.25 kg	1711021	木製建具	1 枚	133111200pJPN	内装建具 (木部のみ), JPN		
	ガラス工事										
仕上-85	ｶﾞﾗｽ t10	m2	ｶﾞﾗｽ t10	25 kg	2511011	板ガラス	0.5 2mm換算箱	211111000pJPN	普通・変り板ガラス, JPN		
	カーテンウォール工事										
仕上-86	ｶﾞﾗｽｶｰﾃﾝｳｫｰﾙ　単層ｶﾞﾗｽ	m2	ｶﾞﾗｽ　t10	25 kg	2511011	板ガラス	0.5 2mm換算箱	211111000pJPN	普通・変り板ガラス, JPN		
			ｱﾙﾐ部材	15 kg	2722021	アルミ圧延製品	15 kg	244312000pJPN	ビル用アルミニウム製サッシ, JPN		
			ｽﾁｰﾙ部材	3 kg	2621011	普通鋼形鋼	3 kg	222112000mJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), JPN		
			耐火ﾎﾞｰﾄﾞ　25 t	1 kg	2599021	その他の建設用土石製品	0.025 m3	219929200pJPN	けい酸カルシウム保温材, JPN		
仕上-87	ｱﾙﾐｶｰﾃﾝｳｫｰﾙ	m2	ｱﾙﾐ部材	21 kg	2729021d	アルミニウム圧延製品（形材）	21 kg	244312000pJPN	ビル用アルミニウム製サッシ, JPN		
			ｽﾁｰﾙ部材	5 kg	2621011	普通鋼形鋼	5 kg	222112000mJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), JPN		
			耐火吹付材	0.7 kg	2599099	その他の窯業・土石製品	0.7 kg	219111000pJPN	ロックウール、同製品, JPN		
	塗装工事										
仕上-88	塗装	m2	塗装	0.3 kg	2072011	塗料	0.3 kg	164400000mJPN	塗料, 4桁, JPN		
仕上-89	塗装　対候性塗料	m2	対候性塗料	0.5 kg	2072011	塗料	0.5 kg	164411200pJPN	建築用アクリル樹脂エナメル, 溶剤系, 白, JPN		出典２
仕上-90	塗装　耐火塗料	m2	耐火塗料	1.2 kg	2072011	塗料	1.2 kg	164414000pJPN	溶剤系合成樹脂塗料, JPN		出典２
仕上-91	塗装　合成樹脂調合ﾍﾟｲﾝﾄ（鉄鋼面）	m2	合成樹脂調合ﾍﾟｲﾝﾄ（鉄鋼面）	0.3 kg	2072011	塗料	0.3 kg	164415204pJPN	建築用合成樹脂エマルション水系塗料,, JPN		出典２
仕上-92	塗装　合成樹脂ｴﾏﾙｼﾞｮﾝﾍﾟｲﾝﾄ	m2	合成樹脂ｴﾏﾙｼﾞｮﾝﾍﾟｲﾝﾄ	0.4 kg	2072011	塗料	0.4 kg	164415204pJPN	建築用合成樹脂エマルション水系塗料,, JPN		出典２
仕上-93	塗装　木材用塗料	m2	木材用塗料	0.2 kg	2072011	塗料	0.2 kg	164414000pJPN	溶剤系合成樹脂塗料, JPN		出典２

表 S4　複合原単位例（仕上材 4）

No.	仕様	単位	資材構成	AIJ-LCA原単位ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ_ver.1.02対応			AIST-IDEA Ver.3.4.1_日本語版対応			備考	出典
				資材量（単位あたり）	行ｺｰﾄﾞ	行部門名称	資材量（単位あたり）	IDEA製品コード	IDEA製品名		
	内外装工事										
	<外部>										
仕上-94	外壁仕上　吹付ﾀｲﾙ	m2	吹付ﾀｲﾙ	3.1 kg	2072011	塗料	3.1 kg	164415204pJPN	建築用合成樹脂エマルション水系塗料,, JPN		
仕上-95	ｽﾚｰﾄ板（小波）	m2	ｽﾚｰﾄ板	11.1 kg	2523011	セメント製品	1 m2	212911200pJPN	波型セメントスレート, JPN		
	<内部　床>										
仕上-96	床仕上　ﾀｲﾙｶｰﾍﾟｯﾄ	m2	ﾀｲﾙｶｰﾍﾟｯﾄ	7 kg	2211011	プラスチックフィルム・シート	1 m2	182311000pJPN	プラスチックタイル, JPN		
仕上-97	床仕上　長尺ｼｰﾄ	m2	長尺ｼｰﾄ t2.5	3 kg	2211011	プラスチックフィルム・シート	1 kg	182319000pJPN	その他のプラスチック床材, JPN		
			接着剤	0.2 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	0.2 kg	169412000pJPN	セルロース系接着剤、プラスチック系接着剤, JPN		
仕上-98	床仕上　ﾘﾌﾄﾀｲﾙ	m2	床ﾀｲﾙ t2.0	4.3 kg	2211011	プラスチックフィルム・シート	1 m2	182311000pJPN	プラスチックタイル, JPN		
			接着剤	0.2 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	0.2 kg	169412000pJPN	セルロース系接着剤、プラスチック系接着剤, JPN		
仕上-99	床仕上　塗装	m2	塗料	0.3 kg	2072011	塗料	0.3 kg	164400000mJPN	塗料, 4桁, JPN		
仕上-100	床仕上　塗料（薄膜型）	m2	塗料	0.5 kg	2072011	塗料	0.5 kg	164415000pJPN	水系合成樹脂塗料, JPN	水性ｴﾎﾟｷｼ樹脂系	ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ（参考値）
仕上-101	床仕上　塗料（厚膜型）	m2	塗料	3.4 kg	2072011	塗料	3.4 kg	164414000pJPN	溶剤系合成樹脂塗料, JPN	ｴﾎﾟｷｼ樹脂系	ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ（参考値）
仕上-102	床仕上　防塵塗料	m2	防塵塗料	0.2 kg	2072011	塗料	0.2 kg	164415000pJPN	水系合成樹脂塗料, JPN	水性ｱｸﾘﾙ樹脂系	ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ（参考値）
仕上-103	床仕上　ｺﾝｸﾘｰﾄ打増(ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ、ｔ150)	m2	ｺﾝｸﾘｰﾄ t150	323 kg	2522011p	生コン（ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞ）	0.15 m3	212211000pJPN	生コンクリート, JPN		
仕上-104	床仕上　ｺﾝｸﾘｰﾄ打増(高炉ｾﾒﾝﾄ、t150)	m2	ｺﾝｸﾘｰﾄ t150	323 kg	2522011b	生コン（Ｂ種高炉）	0.15 m3	212211000pJPN	生コンクリート, JPN		
仕上-105	床仕上　ﾌﾛｰﾘﾝｸﾞ	m2	化粧合板	4.5 kg	1611021	合板	0.01 m3	122212000pJPN	特殊合板（集成材を除く), JPN	IDEA製品:122811200pJPN(木質	
			特殊ｸｯｼｮﾝ材	18 kg	1611021	合板	0.03 m3	122212000pJPN	特殊合板（集成材を除く), JPN	フローリング, JPN)	
			接着剤	0.8 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	0.8 kg	169412000pJPN	セルロース系接着剤、プラスチック系接着剤, JPN	合板542kg/m3として	
仕上-106	床仕上　ﾌｪﾙﾄ+ｶｰﾍﾟｯﾄ	m2	ｶｰﾍﾟｯﾄ	3 kg	1519021	じゅうたん・床敷物	1 m2	119319000pJPN	その他の繊維製床敷物、同類似品, JPN		
			ﾌｪﾙﾄ	1 kg	1519021	じゅうたん・床敷物	1 kg	115711000pJPN	フェルト・不織布, JPN		
			接着剤	0.2 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	0.2 kg	169412000pJPN	セルロース系接着剤、プラスチック系接着剤, JPN		
仕上-107	ソフト巾木	m	ソフト巾木	0.1 kg	2211012	プラスチック板・管・棒	0.1 kg	182319000pJPN	その他のプラスチック床材, JPN		
仕上-108	ｴｷｽﾊﾟﾝﾄﾞﾒﾀﾙ	m2	ｴｷｽﾊﾟﾝﾄﾞﾒﾀﾙ	13.7 kg	2812011	建築用金属製品	円	244519000pJPN	その他の建築用金属製品, JPN	XG21	出典13
	<内部　壁・間仕切>										
仕上-109	壁仕上　ﾋﾞﾆｰﾙｸﾛｽ	m2	ｸﾛｽ	1 kg	2211011	プラスチックフィルム・シート	1 kg	182211000pJPN	プラスチックシート, 厚さ0.2mm以上で軟質のもの, JPN		
			接着剤	0.2 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	円	169419000pJPN	その他の接着剤, JPN		
仕上-110	石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t9.5	m2	石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t9.5	1 m2	2591099c	石膏ボード（m2-9.5㎜）	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		出典１
仕上-111	石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t12.5	m2	石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t12.5	1 m2	2591099d	石膏ボード（m2-12.5㎜）	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
仕上-112	石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t15	m2	石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t15	11.9 kg	2599021	その他の建設用土石製品	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		出典１
仕上-113	強化石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t15	m2	強化石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t15	13 kg	2599021	その他の建設用土石製品	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		出典14
仕上-114	強化石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t21	m2	強化石膏ﾎﾞｰﾄﾞ t21	18.1 kg	2599021	その他の建設用土石製品	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		出典14
仕上-115	ｹｲｶﾙ板 t6	m2	ｹｲｶﾙ板 t6	5.8 kg	2599021	その他の建設用土石製品	0.006 m3	219929200pJPN	けい酸カルシウム保温材, JPN		出典15
仕上-116	ﾌﾚｷｼﾌﾞﾙﾎﾞｰﾄﾞ t5.0	m2	ﾌﾚｷｼﾌﾞﾙﾎﾞｰﾄﾞ t5.0	9.4 kg	2599021	その他の建設用土石製品	1 m2	212911201pJPN	平板フレキシブルセメントスレート, JPN		出典15
仕上-117	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ成形板 t50	m2	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ成形板 t50	1.6 kg	2512011	ガラス繊維・同製品	1.6 kg	211711000pJPN	ガラス短繊維、同製品, JPN		
仕上-118	軽鉄壁下地 W50 @303　直貼用	m2	LGS	4.8 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	4.8 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	出典１
仕上-119	軽鉄壁下地 W65 @455　二重貼（捨貼)用	m2	LGS	3.8 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	3.8 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	出典１
仕上-120	軽鉄壁下地 W65 @303　直貼用	m2	LGS	5.1 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	5.1 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	出典１
仕上-121	軽鉄壁下地 W100 @455　二重貼（捨貼)用	m2	LGS	4.3 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	4.3 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	
仕上-122	軽鉄壁下地 W100 @303　直貼用	m2	LGS	5.9 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	5.9 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	出典１
仕上-123	壁下地　PB (GL工法)	m2	PB　t12.5	1 m2	2591099d	石膏ボード（m2-12.5㎜）	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
			接着剤	3.0 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	円	169419000pJPN	その他の接着剤, JPN		
仕上-124	壁下地　LGS+PB（片面）	m2	PB　t12.5	1 m2	2591099d	石膏ボード（m2-12.5㎜）	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
			LGS 下地	5.1 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	5.1 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	
仕上-125	間仕切下地　LGS+PB（両面）	m2	PB　t12.5	1 m2	2591099d	石膏ボード（m2-12.5㎜）	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
			LGS 下地	5.1 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	5.1 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	
			PB　t12.5	1 m2	2591099d	石膏ボード（m2-12.5㎜）	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		

表 S5　複合原単位例（仕上材 5）

No.	仕様	単位	資材構成	AIJ-LCA原単位ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ_ver.1.02対応			AIST-IDEA Ver.3.4.1_日本語版対応			備考	出典
				資材量（単位あたり）	行ｺｰﾄﾞ	行部門名称	資材量（単位あたり）	IDEA製品コード	IDEA製品名		
仕上-126	内部防火区画　ALC t100	m2	ｾﾒﾝﾄ	12 kg	2521011	セメント	12 kg	212111000pJPN	ポルトランドセメント, JPN	IDEA製品：212913200pJPN	ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ（参考値）
			けい石	32 kg	622011	砂利・採石	32 kg	054149000pJPN	天然けい砂 (含むがいろ目けい砂), JPN	(ALCパネル, JPN)	
			生石灰	6 kg	0000000	その他	6 kg	219311000pJPN	生石灰, JPN		
			アルミ	0.04 kg	2711031	アルミニウム（再生を含む。）	0.04 kg	239912000pJPN	アルミニウム・同合金粉, JPN		
			鉄筋	2.8 kg	2621014	普通鋼小棒	2.8 kg	222114000mJPN	普通鋼小形棒鋼, JPN		
			ALC製造工程		2523011 x	PC製造工程	-	-			
仕上-127	耐火間仕切（片面）　PB t36+LGS	m2	PB (t15+t21)	28.1 kg	2591099a	石膏ボード（kg）	2 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
			LGS 下地	4.3 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	4.3 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	
仕上-128	耐火間仕切（両面）　PB t36+LGS+PB t36	m2	PB (t15+t21)	28.1 kg	2591099a	石膏ボード（kg）	2 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
			LGS 下地	4.3 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	4.3 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	
			PB (t15+t21)	28.1 kg	2591099a	石膏ボード（kg）	2 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
仕上-129	遮音間仕切（片面）　PB t25+LGS+GW	m2	PB (t12.5+t12.5)	2 m2	2591099d	石膏ボード（m2-12.5㎜）	2 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
			LGS 下地	4.3 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	4.3 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	
			ｸﾞﾗｽｳｰﾙ t50	1.2 kg	2512011	ガラス繊維・同製品	1.2 kg	211711000pJPN	ガラス短繊維、同製品, JPN	24kg/m3	
仕上-130	遮音間仕切（両面）　PB t25+LGS+GW+PB t25	m2	PB (t12.5+t12.5)	2 m2	2591099d	石膏ボード（m2-12.5㎜）	2 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
			LGS 下地	4.3 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	4.3 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	
			ｸﾞﾗｽｳｰﾙ t50	1.2 kg	2512011	ガラス繊維・同製品	1.2 kg	211711000pJPN	ガラス短繊維、同製品, JPN	24kg/m3	
			PB (t12.5+t12.5)	2 m2	2591099d	石膏ボード（m2-12.5㎜）	2 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
仕上-131	耐火ｼｰﾙ 10×10	m	ｼﾘﾙ化ｱｸﾘﾚｰﾄ系	0.1 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	0.1 kg	163529113pJPN	変性ポリフェニレンエーテル樹脂, JPN	1430kg/m3	出典2
	<内部　天井>										
仕上-132	天井　岩綿吸音板ｼｽﾃﾑ天井	m2	岩綿吸音板 t15	6 kg	2599099	その他の窯業・土石製品	1 kg	219111000pJPN	ロックウール、同製品, JPN		
			LGS	3.6 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	3.6 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	
仕上-133	天井　LGS+PB+岩綿吸音板	m2	岩綿吸音板 t12	4.8 kg	2599099	その他の窯業・土石製品	4.8 kg	219111000pJPN	ロックウール、同製品, JPN		
			PB　t9.5	1 m2	2591099c	石膏ボード（m2-9.5㎜）	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
			LGS	3.4 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	3.4 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	
仕上-134	天井仕上　ﾋﾞﾆｰﾙｸﾛｽ	m2	ｸﾛｽ	1 kg	2211011	プラスチックフィルム・シート	1 kg	182211000pJPN	プラスチックシート, 厚さ0.2mm以上で軟質のもの, JPN		
			接着剤	0.2 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	円	169419000pJPN	その他の接着剤, JPN		
仕上-135	岩綿吸音板 t15	m2	岩綿吸音板 t15	6 kg	2599099	その他の窯業・土石製品	6 kg	219111000pJPN	ロックウール、同製品, JPN		
仕上-136	木毛セメント板 t20	m2	木毛セメント板 t20	25 kg	2523011	セメント製品	0.6 枚	212912000pJPN	木材セメント製品 (パルプセメント板、木片セメント板を含む), JPN	910×1820	
仕上-137	天井下地　LGS+PB	m2	PB　t9.5	1 m2	2591099c	石膏ボード（m2-9.5㎜）	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
			LGS	3.4 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	3.4 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	
仕上-138	天井下地　LGS+ｱﾙﾐﾊﾟﾈﾙ	m2	ｱﾙﾐﾊﾟﾈﾙ	12 kg	2729021a	アルミニウム圧延製品（板材）	12 kg	233211204pJPN	アルミニウム板材, 建材用, JPN		
			LGS	3.4 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	3.4 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	
仕上-139	軽鉄天井下地 25型 捨貼用 @360　H≦1000	m2	LGS	4 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	4 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	出典 1
仕上-140	軽鉄天井下地 25型 直貼用 @300　H≦1000	m2	LGS	4.2 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	4.2 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	出典 1
仕上-141	軽鉄天井下地 19型 捨貼用 @360　H≦1500	m2	LGS	3.4 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	3.4 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	出典 1
仕上-142	軽鉄天井下地 19型 直貼用 @300　H≦1500	m2	LGS	3.6 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	3.6 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	
仕上-143	軽鉄天井下地 19型 化粧貼用 @225　H≦1500	m2	LGS	4.1 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	4.1 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN	IDEA製品：244112000pJPN（軽量鉄骨,JPN）	出典 1
仕上-144	天井 廻り縁　塩ﾋﾞ製	m	塩ﾋﾞ製	0.04 kg	2211012	プラスチック板・管・棒	0.04 kg	181111200pJPN	プラスチック板, 塩化ビニル, JPN		
仕上-145	天井 廻り縁　ｱﾙﾐ製	m	ｱﾙﾐ製	0.05 kg	2729021a	アルミニウム圧延製品（板材）	0.05 kg	233211204pJPN	アルミニウム板材, 建材用, JPN		

表 S6　複合原単位例（仕上材 6）

No.	仕様	単位	資材構成	AIJ-LCA原単位ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ_ver.1.02対応			AIST-IDEA Ver.3.4.1_日本語版対応			備考	出典
				資材量（単位あたり）	行ｺｰﾄﾞ	行部門名称	資材量（単位あたり）	IDEA製品コード	IDEA製品名		
	<その他>										
仕上-146	ｽﾀｲﾛﾌｫｰﾑ t25	m2	ｽﾀｲﾛﾌｫｰﾑ t25	0.8 kg	2211013	プラスチック発泡製品	0.8 kg	163517105pJPN	発泡ポリスチレン (EPS), JPN	30kg/m3	
仕上-147	ｽﾀｲﾛﾌｫｰﾑ t50	m2	ｽﾀｲﾛﾌｫｰﾑ t50	1.5 kg	2211013	プラスチック発泡製品	1.5 kg	163517105pJPN	発泡ポリスチレン (EPS), JPN	30kg/m3	
仕上-148	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ (24k) t25	m2	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ (24k) t25	0.6 kg	2512011	ガラス繊維・同製品	0.6 kg	211711000pJPN	ガラス短繊維、同製品, JPN	24kg/m3	
仕上-149	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ (24k) t50	m2	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ (24k) t50	1.2 kg	2512011	ガラス繊維・同製品	1.2 kg	211711000pJPN	ガラス短繊維、同製品, JPN	24kg/m3	
仕上-150	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ (32k) t25	m2	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ (32k) t25	0.8 kg	2512011	ガラス繊維・同製品	0.8 kg	211711000pJPN	ガラス短繊維、同製品, JPN	32kg/m3	
仕上-151	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ (32k) t50	m2	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ (32k) t50	1.6 kg	2512011	ガラス繊維・同製品	1.6 kg	211711000pJPN	ガラス短繊維、同製品, JPN	32kg/m3	
仕上-152	ﾛｯｸｳｰﾙ t50	m2	ﾛｯｸｳｰﾙ t50	6 kg	2599099	その他の窯業・土石製品	6 kg	219111000pJPN	ロックウール、同製品, JPN	120kg/m3	小委員会調べ
仕上-153	吹付ﾛｯｸｳｰﾙ	m3	吹付ﾛｯｸｳｰﾙ	300 kg	2599099	その他の窯業・土石製品	300 kg	219111000pJPN	ロックウール、同製品, JPN	300kg/m3	出典９
仕上-154	押出法ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑ	m3	押出法ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑ	25 kg	2211013	プラスチック発泡製品	25 kg	163517105pJPN	発泡ポリスチレン (EPS), JPN	25kg/m3	出典10
仕上-155	硬質ｳﾚﾀﾝﾌｫｰﾑ	m3	硬質ｳﾚﾀﾝﾌｫｰﾑ	35 kg	2211013	プラスチック発泡製品	35 kg	184219200pJPN	硬質ウレタンフォーム, JPN	35kg/m3	出典11
仕上-156	ﾌｪﾉｰﾙﾌｫｰﾑ	m3	ﾌｪﾉｰﾙﾌｫｰﾑ	27 kg	2211013	プラスチック発泡製品	27 kg	163511000pJPN	フェノール樹脂, JPN	27kg/m3	出典12
	ユニット及びその他工事										
仕上-157	OAﾌﾛｱ（ｾﾒﾝﾄ）	m2	ｺﾝｸﾘｰﾄ製品	48 kg	2523011	セメント製品	円	212300000mJPN	コンクリート製品, 4桁, JPN		ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ(参考値)
			支持脚	1.6 kg	2812011	建築用金属製品	円	244500000mJPN	建築用金属製品 (サッシ，ドア，建築用金物を除く), 4桁, JPN		
仕上-158	OAﾌﾛｱ（ｱﾙﾐ）	m2	ｱﾙﾐﾊﾟﾈﾙ	14 kg	2722021	アルミ圧延製品	14 kg	233211204pJPN	アルミニウム板材, 建材用, JPN		
			支持脚	1.6 kg	2812011	建築用金属製品	円	244500000mJPN	建築用金属製品 (サッシ，ドア，建築用金物を除く), 4桁, JPN		
仕上-159	OAﾌﾛｱ（ｽﾁｰﾙ）	m2	ｽﾁｰﾙ部材	10.4 kg	2812011	建築用金属製品	10.4 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN		ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ(参考値)
			充填材	20.0 kg	2599021	その他の建設用土石製品	0.01 m3	212919200pJPN	モルタル, JPN	ﾓﾙﾀﾙ2.1t/m3として	
			支持脚	1.6 kg	2812011	建築用金属製品	円	244500000mJPN	建築用金属製品 (サッシ，ドア，建築用金物を除く), 4桁, JPN		
仕上-160	OAﾌﾛｱ（ｳｯﾄﾞｺｱ）	m2	ｽﾁｰﾙ部材	16.4 kg	2812011	建築用金属製品	16.4 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN		ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ(参考値)
			ﾊﾟｰﾃｨｸﾙﾎﾞｰﾄﾞ	6.1 kg	1611021	合板	1 m2	122511000pJPN	パーティクルボード, JPN		
			支持脚	1.6 kg	2812011	建築用金属製品	円	244500000mJPN	建築用金属製品 (サッシ，ドア，建築用金物を除く), 4桁, JPN		
仕上-161	床仕上　ﾌﾘｰｱｸｾｽﾌﾛｱ（樹脂）	m2	樹脂	10.3 kg	2211012	プラスチック板・管・棒	10.3 kg	182319000pJPN	その他のプラスチック床材, JPN		
仕上-162	ｶﾞﾗｽｽｸﾘｰﾝ	m2	ｽﾁｰﾙ部材	20 kg	2621011	普通鋼形鋼	20 kg	222112000mJPN	普通鋼形鋼 (鋼矢板、リム・リングバー、サッシバーを含む), JPN		
			ｶﾞﾗｽ t12	30 kg	2511011	板ガラス	0.6 2mm換算箱	211111000pJPN	普通・姿り板ガラス, JPN		
仕上-163	ﾄｲﾚﾌﾞｰｽ（ﾊﾟﾈﾙ）	m2	ﾄｲﾚﾌﾞｰｽ	13.5 kg	1611021	合板	13.5 kg	122619200pJPN	中質繊維板 (MDF), JPN		ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ(参考値)
	集合住宅										
仕上-164	住宅　天井下地　ﾀﾞｲﾗｲﾄ　9.5ｔ	m2	ﾀﾞｲﾗｲﾄ　t9.5	8.7 kg	2599099	その他の窯業・土石製品	8.7 kg	219111000pJPN	ロックウール、同製品, JPN		
仕上-165	住宅　天井下地　木枠+PB	m2	製材	2.25 kg	1611011	製材	0.01 m3	121112000pJPN	ひき割類, JPN	製材380kg/m3として	
			PB　t9.5	1 m2	2591099c	石膏ボード（m2-9.5㎜）	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
仕上-166	住宅　床仕上　ﾌﾛｰﾘﾝｸﾞ	m2	合板 t12	6.6 kg	1611021	合板	0.012 m3	122811200pJPN	木質フローリング, JPN		
仕上-167	住宅　床仕上　ｸｯｼｮﾝﾌﾛｱ	m2	ｸｯｼｮﾝﾌﾛｱ	2 kg	2211011	プラスチックフィルム・シート	1 m2	182311000pJPN	プラスチックタイル, JPN		
仕上-168	住宅　床仕上　畳	m2	合成畳	8.1 kg	2211013	プラスチック発泡製品	0.6 畳	328211000pJPN	畳, JPN	1.62m2/畳として	
仕上-169	住宅　床下地　合板	m2	合板 t12	6.6 kg	1611021	合板	0.01 m3	122211000pJPN	普通合板, JPN	合板542kg/m3として	
仕上-170	住宅　床下地　ﾊﾟｰﾃｨｸﾙﾎﾞｰﾄﾞ t20	m2	ﾊﾟｰﾃｨｸﾙﾎﾞｰﾄﾞ t20	12 kg	1611021	合板	1 m2	122511000pJPN	パーティクルボード, JPN		
仕上-171	住宅　壁仕上　壁紙	m2	壁紙	0.8 kg	2211011	プラスチックフィルム・シート	0.8 kg	182211000pJPN	プラスチックシート, 厚さ0.2mm以上で軟質のもの, JPN		
仕上-172	住宅　壁仕上　ｽﾁｰﾙﾊﾟﾈﾙ	m2	鋼板	12.6 kg	2623021	普通鋼めっき鋼材	12.6 kg	224111210mJPN	溶融亜鉛めっき鋼板, JPN		
仕上-173	住宅　壁下地　ﾀﾞｲﾗｲﾄ　9.5ｔ	m2	ﾀﾞｲﾗｲﾄ　t9.5	8.7 kg	2599099	その他の窯業・土石製品	8.7 kg	219111000pJPN	ロックウール、同製品, JPN		
仕上-174	住宅　壁下地　木枠	m2	製材	2.3 kg	1611011	製材	0.01 m3	121112000pJPN	ひき割類, JPN	製材380kg/m3として	
仕上-175	集合住宅　住戸間仕切	m2	繊維混入石膏板	76.4 kg	2599021	その他の建設用土石製品	1 m2	219212000pJPN	石こうボード、同製品, JPN		
			GW 24K t25	0.6 kg	2512011	ガラス繊維・同製品	0.6 kg	211711000pJPN	ガラス短繊維、同製品, JPN		
仕上-176	ﾊﾟﾙｺﾆｰ隔て板（ｹｲｶﾙ板 t5）	m2	ｹｲｶﾙ板　ｔ5	4.5 kg	2599021	その他の建設用土石製品	4.5 m3	219929200pJPN	けい酸カルシウム保温材, JPN		
仕上-177	ﾊﾟﾙｺﾆｰ手摺（ｱﾙﾐ）	m	ｱﾙﾐ部材	0.8 kg	2729021b	アルミニウム圧延製品（管材）	0.8 kg	233211204pJPN	アルミニウム板材, 建材用, JPN		
仕上-178	集合住宅　玄関扉	m2	金属製建具	55.9 kg	2812011	建築用金属製品	55.9 kg	244322000pJPN	金属製サッシ・ドア, JPN		
仕上-179	集合住宅　内部建具（軽量）	m2	木製建具	2 kg	1711021	木製建具	1 枚	133111200pJPN	内装建具 (木部のみ), JPN		
仕上-180	集合住宅　収納用合板	m2	合板 t15	8.3 kg	1611021	合板	0.02 m3	122212000pJPN	特殊合板（集成材を除く), JPN	合板542kg/m3として	
仕上-181	集合住宅　収納用ＭＤＦ化粧板	m2	MDF t15	8.3 kg	1611021	合板	8.3 kg	122619200pJPN	中質繊維板 (MDF), JPN		
仕上-182	集合住宅　人工大理石	m2	合成樹脂	20 kg	2211012	プラスチック板・管・棒	20 kg	163513000pJPN	メラミン樹脂, JPN		

表 S7　複合原単位例（仕上材 7）

No.	仕様	単位	資材構成	AIJ-LCA原単位ﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ_ver.1.02対応			AIST-IDEA Ver.3.4.1_日本語版対応			備考	出典
				資材量（単位あたり）	行ｺｰﾄﾞ	行部門名称	資材量（単位あたり）	IDEA製品コード	IDEA製品名		
仕上-183	集合住宅　ﾕﾆｯﾄﾊﾞｽ	個	FRP	450 kg	2211015	強化プラスチック製品	450 kg	184400000mJPN	強化プラスチック製容器・浴槽等, 4桁, JPN	1418ｻｲｽﾞ	ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ（参考値）
			ｼｰﾘﾝｸﾞ	1 kg	2079011	ゼラチン・接着剤	1 kg	163529113pJPN	変性ポリフェニレンエーテル樹脂, JPN	変性ｼﾘｺﾝ1308kg/m3として	
仕上-184	集合住宅　ｼｽﾃﾑｷｯﾁﾝ	台	天板	27 kg	2051011	熱硬化性樹脂	27 kg	163513000pJPN	メラミン樹脂, JPN	ｼｽﾃﾑｷｯﾁﾝW2400,H2250	ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ（参考値）
			水栓	6 kg	2899031	配管工事付属品	6 kg	233112000pJPN	黄銅伸銅品, JPN		
			シンク	3 kg	2899091	金属プレス製品	3 kg	223114000mJPN	ステンレス鋼, JPN		
			木製下台･吊戸棚	162 kg	1711011	木製家具・装備品	0.3 m3	122212000pJPN	特殊合板（集成材を除く), JPN	合板542kg/m3として	
			コンロ	31 kg	2891011	ガス・石油機器及び暖厨房機器	1 台	243211000pJPN	ガスこんろ, JPN		
			レンジフード	23 kg	3251021	民生用電気機器（除エアコン）	1 台	293212000pJPN	換気扇, JPN		
仕上-185	集合住宅　洗面化粧台	台	天板	10.5 kg	2599099	その他の窯業・土石製品	10.5 kg	163513000pJPN	メラミン樹脂, JPN	洗面化粧台W1180,H2250	ﾒｰｶｰﾋｱﾘﾝｸﾞ（参考値）
			水栓	4 kg	2899031	配管工事付属品	4 kg	233112000pJPN	黄銅伸銅品, JPN		
			ボウル（陶器）	12 kg	2531011	建設用陶磁器	円	214111000pJPN	衛生陶器（附属品を含む), JPN		
			木製下台･収納	83 kg	1711011	木製家具・装備品	0.2 m3	122212000pJPN	特殊合板（集成材を除く), JPN	合板542kg/m3として	
			ﾐﾗｰ	20 kg	2511011	板ガラス	0.4 2mm換算箱	211111000pJPN	普通・変り板ガラス, JPN		
	外構										
外構-1	ｱｽﾌｧﾙﾄ舗装	m2	ｱｽﾌｧﾙﾄ舗装	120 kg	2121021	舗装材料	円	174111000pJPN	アスファルト舗装混合材、タール舗装混合材 (アスファルトブロック、タールブロックを含む), JPN		

【出典】

出典欄が空欄の項目は、”AIJ-LCAツール(一般建築版）_ver.6.03.xlsm”の複合原単位に掲載済み

出典１：単位換算データベース Ver.2.00

出典２：天石 文､小林 謙介　建築物の新築時における資材のバックグラウンドデータの検討　第１８回日本LCA学会研究発表会講演要旨集（2023年）

出典３：建築物に利用した木材に係る炭素貯蔵量の表示に関するガイドライン（林野庁、https://www.rinya.maff.go.jp/j/mokusan/mieruka.html）

出典４：https://www.cemedine.co.jp/architecture/products/8060pro.html

出典５：http://210.148.210.226/hamatite/products/adhesive/building/02.html

出典６：https://www.cemedine.co.jp/architecture/products/mejiseal.html

出典７：https://www.sankometal.co.jp/products/list/detail.php?p=573

出典８：https://www.daishin.co.jp/product/metal_lath.php

出典９：https://www.taiheiyo-m.co.jp/pdf_catalog/downLoad.php?mode=catalog&cataNum=25

出典10：https://www.epfa.jp/xps/the_xps/jis/

出典11：https://www.jufa-urethane.org/koshitsu_polyurethanefoam/primary_characteristic/

出典12：https://www.asahikasei-kenzai.com/akk/insulation/gene/lineup/neoma_standard.html

出典14：https://yoshino-gypsum.com/special/hosoku/list_jis

出典15：https://www.chiyoda-ute.co.jp/form_download/download_exe/pdf/catalog_keikaru-sogou.pdf

建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討

～複数建物における評価事例～

Development of tools applicable to various needs of environmental assessment of buildings

- Case Studies of Multiple Buildings-

○木原勇信*[1)]、磯部孝行[2)]、鈴木好幸[3)]、天石文[4)]、小林謙介[5)]
Isanobu Kihara, Takayuki Isobe, Yoshiyuki Suzuki, Aya Amaishi, Kensuke Kobayashi
1. 鹿島建設株式会社、2. 武蔵野大学、3. 株式会社 安藤・間、4. 大成建設株式会社、5. 県立広島大学
＊ isanobu@kajima.com

1. はじめに

本報では、前報[1)]にて報告した建築物の評価のガイドライン（指針）、原単位（AIJ-LCA 原単位データベース）、評価ツール（AIJ-LCA ツール）等[2)]を用いて、複数建物での評価事例について報告する。

2. 評価概要

2.1 検討対象

対象建物を表 1 に示す。A ビル、B ビル、C ビルは、小規模、中規模、大規模の主用途が事務所ビルである。空調熱源は、A ビル、B ビルは個別空調方式、C ビルは地域冷暖房方式である。C ビルは外部からの熱供給をうけているため、空調熱源設備は、評価対象外としている。いずれの建物も BELS 認証を取得しており、省エネルギーに配慮した建物である。

表 1 検討対象の建物概要

	Aビル	Bビル	Cビル
主用途	事務所	事務所	事務所
構造	S造	S造	S造、SRC造
延床面積(㎡)	10,000	26,000	146,000
地上階	11	13	19
地下階	-	1	4
空調熱源方式	個別空調方式	個別空調方式	地域冷暖房方式

2.2 評価項目

温室効果ガス（以下、GHG）の評価を、以下の 3 つの指標とした。③については、②の GHG の原単位から一部の HFCs 等の対象要素を除くことにより、排出原単位を作成することで求めた。

① CO_2：AIJ-LCA ツールを用いて評価し、CO_2 と入力 4 シートで評価対象となる項目を GHG 排出量として評価

② GHG：AIJ-LCA で公開されている GHG をそのまま用い、7 ガスを対象に CO_2 換算して評価（なお、AIJ-LCA ツールの入力-4 シートでは温暖化影響を評価しない）

③ GHG(HFCs・SF6 別)：GHG として、7 ガスを対象とするが、AIJ-LCA 原単位データベースから冷凍機・温湿調整装置の HFCs、開閉制御装置の SF6、民生用エアコン等の HFCs を控除し、これらは入力-4 シートで算定して評価

2.4 評価期間

評価期間は、建物の建設から運用、廃棄までとした。建物寿命による評価の影響をなくすため、いずれの建物も建物寿命を 60 年間として評価した。

2.5 評価手法

評価にあたり、AIJ-LCA 原単位データベース 2015 年産業連関分析データ版 Ver1.0.2 の CO_2 排出原単位、GHG 排出原単位を用いた。システム境界は、国内+海外支出とした。

算出には、AIJ-LCA ツール ver6.0.3 を用いた。現行の AIJ-LCA ツールでは、評価項目②、③には対応していないため、AIJ-LCA の GHG 排出原単位を用いて、AIJ-LCA ツールを更新し、評価した。

3. 評価結果

3.1 総量の傾向

延床面積あたりの年間の GHG 排出量を図 1 に示す。評価項目毎に総量を比較すると、①：120～141kg-CO_2e/(㎡・年)、②：153～168kg-CO_2e/(㎡・年)、③：134～151 kg-CO_2e/(㎡・年)となり、A～C のケースで②＞③＞①の順となり、同じ傾向であった。また、①に対する②の比率は、A:1.17、B：1.22、C：1.19、①に対する③の比率は、A:1.06、B:1.07、C：1.07 となった。GHG 排出量の総量は、評価項目による違いがあっても、同程度の比率で影響を受けることが分かった。

3.2 内訳の傾向

表 2 に、新築工事に対する各項目の比率を示す。

設計監理、建替工事についてはいずれの建物も評価項目①～③で同じ傾向であった。

修繕については、いずれの建物においても、評価項目①と③は同程度の割合だった。②は①、③よりも 0.1

程度大きい傾向となった。ここで、修繕とは、建物の運用時の経年で劣化する外壁の補修や設備機器の部品交換を示す。②の修繕が①、③より大きくなる要因としては、冷凍機・温湿調整装置、民生用エアコン等の修繕時における HFC s の漏洩の効果が影響しているものと推測される。

改修工事については、評価項目①と③は同程度の割合となった。②は①、③よりも 0.4 程度大きい傾向となった。修繕と同様に、要因として冷凍機・温湿調整装置、民生用エアコン等の交換時における HFC s の漏洩の効果が影響しているものと推測される。

エネルギーについては、A ビルと C ビルでは 3.87～4.74、B ビルについては 1.84～2.17 となり、各要素の中でエネルギー消費の占める割合が最も大きい。また、B ビルは A ビル、C ビルに比べ、エネルギー消費の占める割合が小さいのは、他のビルに比べ、エネルギー消費量が小さいうえに、新築工事の排出量が大きいことに起因するものと考えられる。

廃棄処分については、いずれの建物も評価項目①～③で同じ傾向であった。

フロン漏洩については、いずれの建物も評価項目①、③では同じ傾向にあった。②については、既に冷凍機・温湿調整装置、民生用エアコン等の機器の新築工事、修繕、改修工事に HFCs の影響が含まれており、フロン漏洩の評価項目は 0 として計上している。

4. まとめ

事務所ビルを対象に、建物の建設から廃棄までの GHG 排出量を評価した。評価項目の違いにより、GHG 排出量の総量は、②GHG ＞ ③GHG（HFCs・SF6 別）＞ ①CO_2 の順になった。また、排出量の内訳については、ばらつきはあるものの①～③の評価項目の違いによらず同じ傾向であった。

5. 謝辞

本研究活動にあたり、日本建築学会 地球環境委員会 LCA 小委員会の関係各位に多くのご協力を頂きました。記して謝意を表します。

6. 参考文献

1) 小林ら：建築物の多様な環境評価ニーズに対応できるツールの検討～検討の全体像と多様な評価を可能とするツールの開発～、LCA 学会研究発表会、2025.3
2) 日本建築学会：建物の LCA 指針 改定版、2024.3

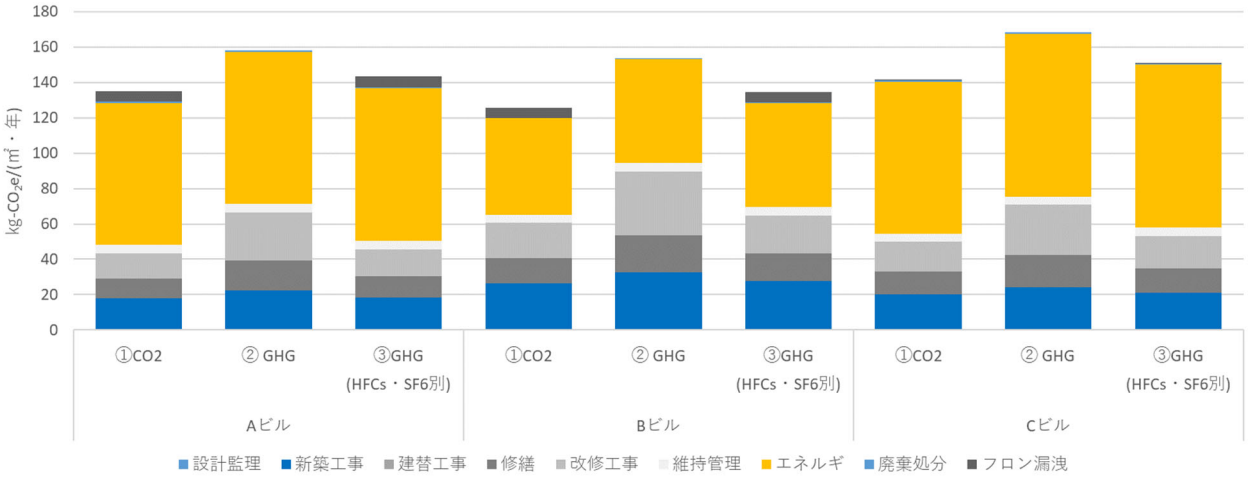


図 1 延床面積あたりの年間 GHG 排出量（60 年）

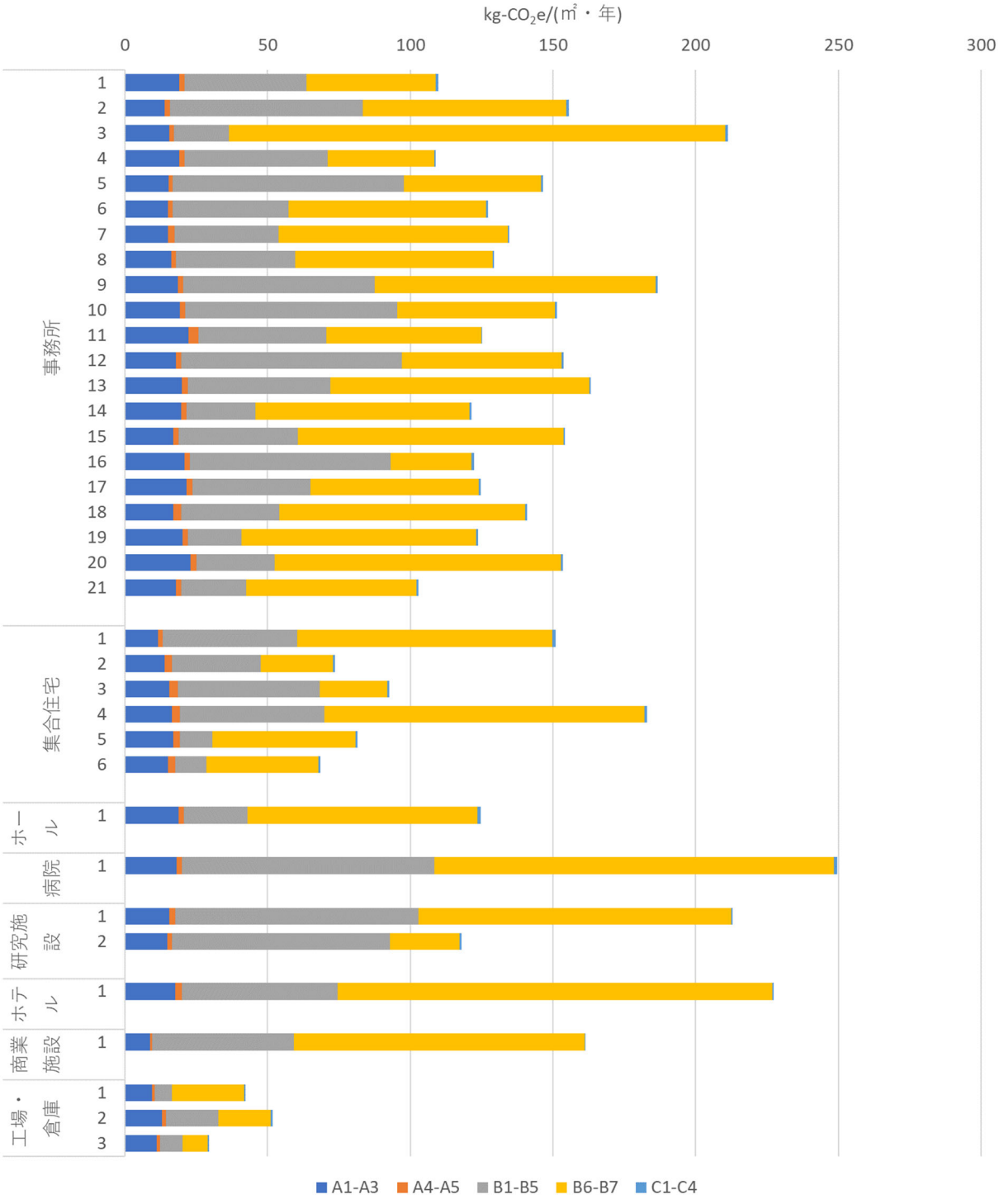
表 2 延床面積あたり GHG 年間排出量の内訳（各ケースの新築工事を基準）

	Aビル			Bビル			Cビル		
	①CO_2	② GHG	③GHG (HFCs・SF6別)	①CO_2	② GHG	③GHG (HFCs・SF6別)	①CO_2	② GHG	③GHG (HFCs・SF6別)
設計監理	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
新築工事	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
建替工事	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
修繕	0.64	0.75	0.65	0.56	0.67	0.58	0.67	0.76	0.68
改修工事	0.83	1.23	0.84	0.78	1.12	0.79	0.86	1.20	0.90
維持管理	0.26	0.23	0.28	0.17	0.15	0.18	0.21	0.19	0.22
エネルギ	4.59	3.89	4.74	2.11	1.84	2.17	4.40	3.87	4.49
廃棄処分	0.04	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.04
フロン漏洩	0.35	0.00	0.34	0.22	0.00	0.21	0.02	0.00	0.01

Supporting Information

建物用途別の年間 CO_2 排出量の検討事例

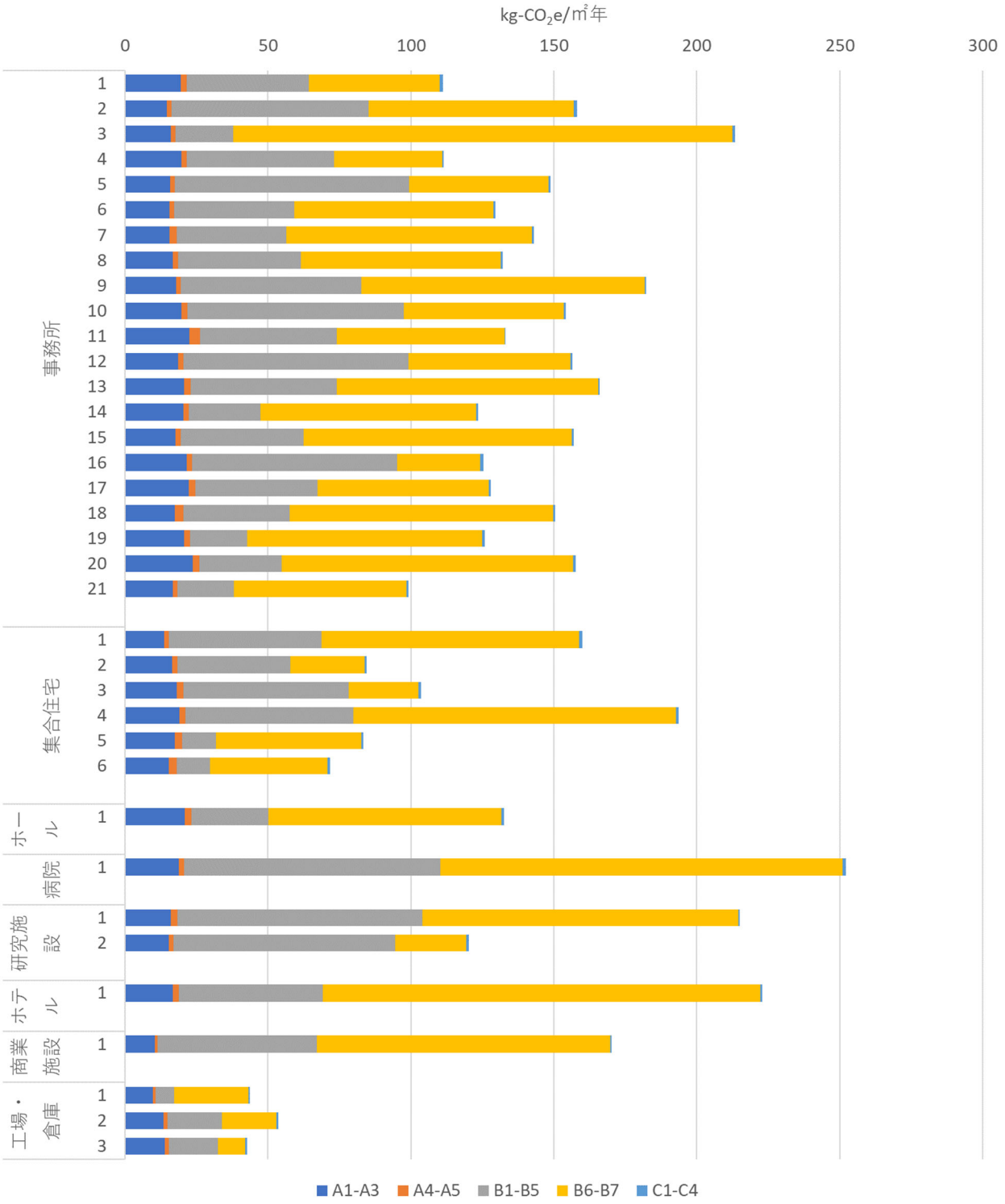
2.2 評価項目①の原単位を用いた建物用途別の CO_2 排出量排出量を示す。検討にあたり、(一財) 住宅・建築 SDGs 推進センターにて開発された J-CAT 2024.10 正式版の標準算定法を用いた。用途ごとに延床面積の昇順に検討ケースを記載している。なお、2.1 の A ビルは本ケースの事務所 7、B ビルは事務所 11、C ビルは事務所 18 に該当する。凡例の各項目は、それぞれ A1-A3：資材製造、A4-A5：施工、B1-B5：使用(フロン漏洩等、維持保全、修繕、更新・交換、改修)、B6-B7：使用(エネルギー消費、水消費)、C1-C4：解体を示す。



SI-図 1　建物用途別の延床面積あたりの年間 CO_2 排出量（60 年）

建物用途別の年間 GHG 排出量の検討事例

2.2 評価項目③の原単位を用いた建物用途別の温室効果ガス排出量を示す。検討にあたり、(一財) 住宅・建築 SDGs 推進センターにて開発された J-CAT 2024.10 正式版の標準算定法を用いた。用途ごとに延床面積の昇順に検討ケースを記載している。なお、2.1 の A ビルは本ケースの事務所 7、B ビルは事務所 11、C ビルは事務所 18 に該当する。凡例の各項目は、それぞれ A1-A3：資材製造、A4-A5：施工、B1-B5：使用(フロン漏洩等、維持保全、修繕、更新・交換、改修)、B6-B7：使用(エネルギー消費、水消費)、C1-C4：解体を示す。



SI-図 2 建物用途別の延床面積あたりの年間 GHG 排出量（60 年）

口頭発表セッション

2025年3月7日(金) 9:20 ~ 10:40 C会場：2313中講義室（3F）

[3-C1] 建材

座長：田原 聖隆 (産業技術総合研究所)

9:20 ~ 9:40

[3-C1-01]

戸建て住宅の断熱材に関するGHG排出量の評価～第1報 LCA手法によるエンボディドカーボンの評価～

*吉田 吏志[1]、松本 里紗[1]、小森 英芳[2]、今泉 直人[2]、石原 孝芳[3] (1. 株式会社LIXIL LHT 技術研究所、2. 株式会社LIXIL LHT サステナビリティ企画推進部、3. 株式会社LIXIL LHT ZEH推進事業部)

9:40 ~ 10:00

[3-C1-02]

戸建て住宅の断熱材に関するGHG排出量の評価 ～第2報 LCA手法によるオペレーショナルカーボンとホールライフカーボンの評価～

*松本 里紗[1]、吉田 吏志[1]、小森 英芳[2]、今泉 直人[2]、石原 孝芳[3] (1. 株式会社LIXIL LHT 技術研究所、2. 株式会社LIXIL LHT サステナビリティ企画推進部、3. 株式会社LIXIL LHT ZEH推進事業部)

10:00 ~ 10:20

[3-C1-03]

研究開発段階の非焼成セラミックス建材を対象とした温室効果ガス排出削減量の概算

*柴原 尚希[1]、新井 修[1]、山本 涼子[1,2]、中村 晟一朗[2] (1. 中部大学、2. 株式会社フルハシ環境総合研究所)

10:20 ~ 10:40

[3-C1-04]

供給量を考慮したセメントのCO_2排出低減方法の評価

*桐野 裕介[1]、新見 龍男[2]、河合 研至[3] (1. 太平洋セメント株式会社、2. 株式会社トクヤマ、3. 広島大学)

©日本LCA学会

戸建て住宅の断熱材に関する GHG 排出量の評価

～第 1 報 LCA 手法によるエンボディドカーボンの評価～

Evaluation of GHG Emissions from Insulation Materials for Detached Houses - 1st report : Evaluation of Embodied Carbon Using LCA Method -

○吉田吏志*[1)]、松本里紗[1)]、小森英芳[2)]、今泉直人[2)]、石原孝芳[3)]
Satoshi Yoshida, Risa Matsumoto, Hidefusa Komori, Naoto Imaizumi, Takayoshi Ishihara
1) LIXIL LHT 技術研究所, 2) LIXIL LHT サステナビリティ企画推進部, 3)LIXIL LHT ZEH 推進事業部
* satoshi07.yoshida@ lixil.com

1. はじめに

近年、人間活動に起因する気候変動が問題となっており、環境規制に対する企業活動の指標として、LCA や GHG 排出量の定量的な算出が求められている。

筆者らは既報[1)]にて、戸建住宅用の窓に関する GHG 排出量を定量化しているが、壁・天井・床などの断熱材における GHG 排出量の算出はされていなかった。そこで、本研究は、断熱材種や断熱材の厚みによる GHG 排出量の違いを評価した。第 1 報ではエンボディドカーボンについて、第 2 報ではオペレーショナルカーボンとこれらを合わせたホールライフカーボンについて、算出方法と結果を示す。

2. LCA 算出方法

2.1 算出対象の仕様

比較する基準の断熱材は、平成 25 年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説[2)]の平成 11 年基準に準拠した地域毎の断熱材とし、評価対象の断熱材は、ウレタンフォームの厚みを変えた 4 水準で LIXIL 社製品を想定した仕様とした。表 1 に基準の断熱材、表 2 に評価対象の断熱材種類と厚みと熱貫流率を示す。熱貫流率は室内壁の石膏ボードや外壁を含めた値を表す。床の仕様は基準が床断熱で、評価対象は LIXIL 社の仕様に合わせ基礎断熱とした。

表 1 基準断熱材の種類と厚みと熱貫流率

地域	外壁	天井	床	基礎(外気に接する部分・その他)
1,2	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ24K 125mm 0.35W/㎡K	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ13K 294mm 0.17W/㎡K	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ24K 124mm 0.32W/㎡K	ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑ3種 98mm・34mm 0.71・0.93W/㎡K
3	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ16K 77mm 0.53W/㎡K	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ13K 176mm 0.28W/㎡K	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ16K 125mm 0.36W/㎡K	ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑ3種 98mm・34mm 0.71・0.93W/㎡K
4	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ16K 75mm 0.54W/㎡K	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ13K 175mm 0.28W/㎡K	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ16K 80mm 0.56W/㎡K	ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑ3種 47.8mm・22mm 0.99・1.13W/㎡K
5,6,7	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ16K 76mm 0.54W/㎡K	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ10K 171mm 0.27W/㎡K	ｸﾞﾗｽｳｰﾙ16K 82mm 0.55W/㎡K	ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑ3種 47.8mm・22mm 0.99・1.13W/㎡K

表 2 評価断熱材の種類と厚みと熱貫流率

略称	外壁	天井	基礎(立上り部・底盤部*)
UF81	硬質ｳﾚﾀﾝﾌｫｰﾑ 81mm 0.36W/㎡K	硬質ｳﾚﾀﾝﾌｫｰﾑ 80mm 0.24W/㎡K	ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑ 100mm・50mm 0.3W/mK
UF93	硬質ｳﾚﾀﾝﾌｫｰﾑ 93mm 0.32W/㎡K	硬質ｳﾚﾀﾝﾌｫｰﾑ 100mm 0.19W/㎡K	ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑ 100mm・50mm 0.3W/mK
UF100	硬質ｳﾚﾀﾝﾌｫｰﾑ 100mm 0.30W/㎡K	硬質ｳﾚﾀﾝﾌｫｰﾑ 100mm 0.19W/㎡K	ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑ 100mm・50mm 0.3W/mK
UF145	硬質ｳﾚﾀﾝﾌｫｰﾑ 145mm 0.16W/㎡K	硬質ｳﾚﾀﾝﾌｫｰﾑ 100mm 0.19W/㎡K	ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑ 100mm・50mm 0.3W/mK

＊基礎の断熱材の底盤部は室内側立上り部から900mm設置

2.2 評価単位と算定単位

評価範囲は、基準の断熱材と評価対象の各断熱材に関わる原料調達、製造、運搬、廃棄までとし、既報[1)]と同様に、LCA 全体への関与が軽微な施工や解体プロセスは、評価範囲から除外した。算定単位は、戸建て住宅 1 戸に利用される断熱材とし、自立循環型住宅[3)]を想定して設定した。また、断熱材は主原料だけでなく、構成されるパネル単位での算定とした。表 3 に基準の断熱材の 1 住戸当たりの各部材重量を示す。基準断熱材のグラスウールは袋に入れて、テープで貼られるなど、製品仕様や施工方法は様々だが、本研究では、袋やテープの利用をなしで算出した。また、パネルの木材は評価断熱材と同様にパーチクルボードを採用した。

表 3 基準の断熱材の各部材重量

各部材名称	部材重量［kg/戸］			
	1,2地域	3地域	4地域	5,6,7地域
グラスウール	882.9	481.0	420.8	326.8
パーチクルボード	788.6	788.6	738.3	738.3
ポリスチレンフォーム	8.4	8.4	4.4	4.4

表 4 に温暖地における評価対象の断熱材の 1 住戸当たりの各部材重量を示す。ウレタンフォームは厚みが増すほど重量が大きくなる一方、その他部材は設置面積に依存される為、断熱材の厚みが変わっても、重量が同じ値となる。また、寒冷地における各部材重量は、住宅の総窓面積が小さくなる分だけ、外壁材面積が大きくなるが、ここでの数値の記載は省略する。

表 4 温暖地における評価対象の断熱材の各部材重量

各部材名称	部材重量［kg/戸］			
	UF81	UF93	UF100	UF145
ウレタンフォーム	411.2	493.8	514.2	639.5
パーチクルボード	738.3	738.3	738.3	738.3
断熱気密パッキン(PE)	4.6	4.6	4.6	4.6
断熱気密パッキン(EPDM)	3.8	3.8	3.8	3.8
ライナー紙	14.1	14.1	14.1	14.1
アルミライナー紙(紙)	20.5	20.5	20.5	20.5
アルミライナー紙(アルミ泊)	2.0	2.0	2.0	2.0
フレキネジ	0.8	0.8	0.8	0.8
ポリスチレンフォーム	67.3	67.3	70.2	70.2

2.3 原料調達の GHG 排出量算出

原料調達の GHG 排出量について、基準の断熱材は歩留まりを考慮していない表 3 の各部材重量に、各 GHG 排出原単位を用いて算出した。また、評価対象の断熱材は、歩留まりを考慮した原料使用量にする為、LIXIL 社の 2022 年度の生産実績を用い、表 4 の各部材使用量に応じた重量と、各 GHG 排出原単位を用いて算出した。ウレタンフォームの原料はイソシアネート・ポリオール・発泡剤（HFO）で算出した。各 GHG 排出原単位は、IDEA ver3.1[4]とポリウレタン原料のインベントリ分析 [5]と発泡剤の物性 [6]の数値を用いた。GHG 排出量を算出する際に用いた地球温暖化係数は IPCC2013 の 100 年値 [7]を用いた。

2.4 製造の GHG 排出量算出

製造の GHG 排出量は、基準の断熱材の主原料であるグラスウールは IDEA ver3.1[4]の GHG 排出原単位が原料調達工程と製造工程で分かれていない為、原料調達と合わせて算出した。評価対象の断熱材は、2.3 章と同様 LIXIL 社生産実績に基づく、生産量とユーティリティの使用量から、IDEAver3.4[8]の再生可能エネルギーの GHG 排出原単位を用いて算出した。

2.5 運搬の GHG 排出量算出

運搬の GHG 排出量は、断熱材と構成パネルと梱包材の重量と輸送距離を設定し、トラックの GHG 排出原単位 [4]を用いて算出した。

2.6 廃棄物処理段階における GHG 排出量算出

戸建て住宅において、使用後に廃棄物となる断熱材の取り扱いは、解体業者によって異なるが、今回は基準の断熱材・評価対象の断熱材ともに全て埋立て廃棄を想定して、GHG 排出量原単位 [4]を設定し、GHG 排出量を算出した。

3. 算出結果

基準の断熱材と評価対象の断熱材における原料調達・製造・運搬・廃棄各段階の GHG 排出量算出結果として、寒冷地域を表 5 に、温暖地域を表 6 に示す。

表 5 寒冷地における各段階の GHG 排出量

断熱水準		GHG排出量［kg-CO_2eq/戸］				
		原料調達	製造	運搬	廃棄	合計
基準	1,2地域	2,359		222	407	2,988
	3地域	1,318		170	310	1,798
評価	UF81	722	48	176	322	1,269
	UF93	786	51	188	343	1,367
	UF100	813	52	191	349	1,405
	UF145	914	57	208	381	1,560

表 6 温暖地における各段階の GHG 排出量

断熱水準		GHG排出量［kg-CO_2eq/戸］				
		原料調達	製造	運搬	廃棄	合計
基準	4地域	1,145		155	282	1,582
	5,6,7地域	902		142	259	1,304
評価	UF81	704	45	168	306	1,223
	UF93	766	49	178	326	1,319
	UF100	793	49	181	332	1,355
	UF145	887	54	198	362	1,501

寒冷地の 1,2,3 地域、および温暖地の 4 地域において、評価対象の断熱材は、基準の断熱材より、合計の GHG 排出量が小さくなった。これは、基準断熱材が熱貫流率を上げる為に、主原料であるグラスウールの使用量を多くする必要があり、重量が増したことがひとつの要因と考える。温暖地の 5,6,7 地域においては、UF81,UF93,UF100 が基準の断熱材とほぼ同等の結果となった。UF145 は基準より大きい値となったが、UF100,UF145 の断熱材は寒冷地仕様で温暖地に利用されることはほとんどない。

4. 結論

本論文では、生産実績を用い、出来る限り正確に商品固有のエンボディドカーボンの GHG 排出量を算出した。結果、寒冷地では基準の断熱材より評価対象の断熱材が小さくなり、温暖地では同等の値となった。本結果を用い、次報でオペレーショナルカーボンと統合したホールライフカーボンを算出する事で、各地域に適した環境負荷の少ない断熱材種や厚みを評価する。

引用文献

1) 吉田吏志ほか, 空気調和・衛生工学会 学術講演論文集, 福井, (2023), pp 189-192
2) 平成 25 年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説 II 住宅, (2023), pp609-614
3) 自立循環型住宅への設計ガイドライン, 建築環境・省エネルギー機構, (2005)
4) LCI データベース IDEA ver3.1, 国立研究開発法人産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ, 一般社団法人サステナブル経営推進機構, (2021)
5) (有)産業技術研究センター, ポリウレタン原料のインベントリ分析報告書, (2003), pp46-55
6) アキレス株式会社, アキレスエアロン FR-FO, https://www.achilles.jp/product/catalog/airlon-fr-fo/pdf/airlon-fr-fo.pdf, (参照 2025-01)
7) 政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change:IPCC)第 5 次報告書, (2013), 100 年値
8) LCI データベース IDEA ver3.4, 国立研究開発法人産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ, 一般社団法人サステナブル経営推進機構, (2024)

戸建て住宅の断熱材に関する GHG 排出量の評価 ～第 2 報
LCA 手法によるオペレーショナルカーボンとホールライフカーボンの評価～

Evaluation of GHG Emissions from Insulation Materials for Detached Houses
- 2nd report : Operational and Whole Life Carbon Assessment Using LCA method -

○松本里紗*[1)]、吉田吏志[1)]、小森英芳[2)]、今泉直人[2)]、石原孝芳[3)]
Risa Matsumoto, Satoshi Yoshida, Yoshifusa Komori, Naoto Imaizumi, Takayoshi Ishihara
1) LIXIL LHT 技術研究所, 2) LIXIL LHT サステナビリティ企画推進部, 3) LIXIL LHT ZEH 推進事業部
* risa1.matsumoto@lixil.com

1. はじめに

地球規模での気候変動が深刻化する中、建築分野においても原料調達から廃棄までの環境負荷低減効果を具体的に示すライフサイクルアセスメント(LCA)は重要な手段と言える。本報では、戸建て住宅における各建材のライフサイクルの環境負荷を定量的に評価するため、使用段階に焦点を当て、既報[1)]の手法と同様に、住宅全体でなく各建材単体の熱損失を用いた GHG 排出量(オペレーショナルカーボン)を算出する。具体的には、断熱材単体の種類や厚みによるオペレーショナルカーボンの違いについて示す。さらに、地域別に最適な断熱材を明らかにするため、前報[2)]で算出したエンボディドカーボンの結果を統合し、ホールライフカーボンとして環境負荷を定量的に評価する。

2. LCA 算出方法

2.1 算出対象の仕様

今回算出対象とした断熱材の種類とそれらの性能値は、前報[2)]と同様とした。

2.2 オペレーショナルカーボンの算出方法

戸建て住宅におけるオペレーショナルカーボンを、居住期間 30 年間[3)]の暖冷房に起因する消費電力から算出した。暖冷房の消費電力は、温熱環境シミュレーションプログラム AE-Sim/Heat[4)]にて算出した熱負荷を基に、H25 基準解説書[4)]の第四章「暖冷房設備」に示されるルームエアコンディショナーの消費電力量に換算することで算出した。対象とした住宅モデルは、自立循環型住宅[5)]とし、地域は 1-7 地域 (1 地域:士別、2 地域:札幌、3 地域:盛岡、4 地域:長野、5 地域:仙台、6 地域:東京、7 地域:鹿児島)とした。住宅の断熱性能は、H25 基準解説書[6)]の平成 11 年基準を参考に地域毎に設定し、換気は全て非熱交換換気の機械換気とした。ルームエアコンのエネルギー消費効率の区分は全て「(ろ)」とし、容量可変型コンプレッサーは搭載なしとした。気象条件は拡張アメダス気象データ 2020 年版(標準年)を使用し、生活・機器スケジュールは、住宅事業建築主判断基準の解説[6)]と同様に設定した。

上記により算出した暖冷房の消費電力は住宅全体の電力消費量となる。本研究では、断熱材からの熱損失(今回は、外壁・床/基礎・天井)と、各部屋の空調性能値 COP から、断熱材のみが影響する暖冷房消費電力を算出し、CO_2 排出係数[7)]を乗じてオペレーショナルカーボンを算出した。空調している部屋の断熱材の熱損失は、AE- Sim/ Heat[4)]の出力データから、1 時間ごとの断熱材の貫流熱量を基に算出した。空調していない部屋の断熱材の熱損失は、空調している部屋との境界(間仕切壁や室内ドア等)における熱損失量のうち、空調していない部屋の断熱材に相当する熱損失割合を算出することで求めた。空調性能値 COP は、H25 基準解説書[6)]に基づき、各部屋の空調機負荷率と外気温から 1 時間ごとに算出した。なお、本研究では、暖房時に断熱材から得られる日射や、冷房時に室温より外気温が低い場合に断熱材から外気へ逃げる熱は、空調の電力消費削減に寄与するとみなし、その影響を考慮している。

3. 算出結果

3.1 オペレーショナルカーボンの算出結果

地域別の各断熱材のオペレーショナルカーボンの結果を表 1 に示す。全地域において UF145 が最もオペレーショナルカーボンが少ない結果となった。しかし、温暖な地域ほど、UF145 に次いでオペレーショナルカーボンが少なくなる条件(1,2 地域は基準断熱材、3-7 地域は UF100)との差が縮小する。具体的には、2 地域では、その差が約 22% (4,270kg -CO_2eq/戸・30 年)であるのに対して、6 地域では、約 7% (192kg -CO_2eq/戸・30 年)でほぼ同等となった。これは、寒冷地では UF145 の低い熱貫流率がオペレーショナルカーボンの削減に大きく寄与する一方、温暖

地では外気温の上昇に伴い、熱貫流率の低さによる効果が減少するためと考えられる。

表 1 各断熱材のオペレーショナルカーボン

断熱材種略称	GHG排出量[kg-CO_2eq/戸・30年]						
	1 地域	2 地域	3 地域	4地域	5地域	6地域	7地域
	士別	札幌	盛岡	長野	仙台	東京	鹿児島
基準断熱材	25,994	18,268	7,371	6,906	5,258	3,961	3,039
UF81	30,396	21,268	6,768	5,799	4,553	3,102	2,317
UF93	27,894	19,430	6,391	5,500	4,356	2,974	2,211
UF100	27,012	18,786	6,167	5,198	4,141	2,830	2,128
UF145	20,474	13,998	5,218	4,387	3,591	2,638	1,990

3.2 ホールライフカーボンの算出結果

評価対象の断熱材における地域別のホールライフカーボン(原料調達・製造、運搬、使用、廃棄の GHG 排出量の合計)の結果を表 2 に示す。また、2 地域(札幌)と 6 地域(東京)における段階別の GHG 排出量を図 1 および図 2 に示す。

表 2 各断熱材の GHG 排出量

断熱材種略称	GHG排出量[kg-CO_2eq/戸・30年]						
	1 地域	2 地域	3 地域	4地域	5地域	6地域	7地域
	士別	札幌	盛岡	長野	仙台	東京	鹿児島
基準断熱材	28,981	21,256	9,169	8,488	6,562	5,265	4,342
UF81	31,664	22,536	8,036	7,022	5,776	4,325	3,540
UF93	29,261	20,797	7,758	6,819	5,675	4,293	3,530
UF100	28,417	20,191	7,572	6,553	5,496	4,185	3,483
UF145	22,035	15,559	6,779	5,888	5,092	4,139	3,491

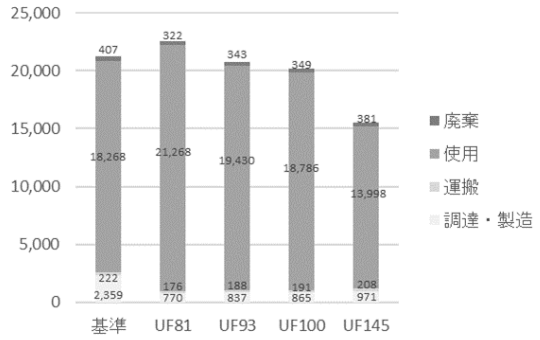


図 1 2 地域(札幌)の断熱材の GHG 排出量

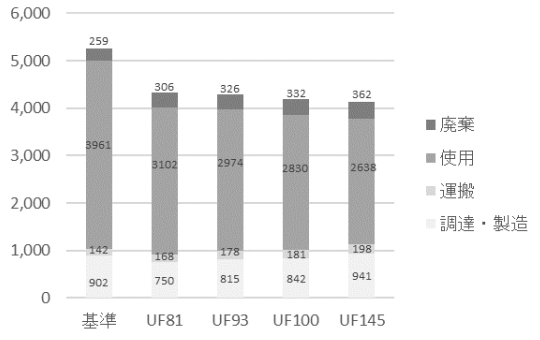


図 2 6 地域(東京)の断熱材の GHG 排出量

結果として、1-6 地域においては UF145、7 地域は UF100 が最もホールライフカーボンが少なかった。これは、寒冷地ではオペレーショナルカーボンが小さい UF145 のホールライフカーボンが少なくなり、温暖地になるほどオペレーショナルカーボンの他条件との差が小さくなるため、7 地域では、エンボディドカーボンが UF145 より小さい UF100 のホールライフカーボンが少なくなった。つまり、7 地域では、UF100 と UF145 のエンボディドカーボンとオペレーショナルカーボンの増減差を比較すると前者の影響分が大きくなったと考える。また、図 1,2 の段階別の内訳をみると、全体に占めるオペレーショナルカーボンの割合は、暖冷房需要の大きい 2 地域に比べ暖冷房需要の少ない 6 地域が小さくなった。

4. まとめ

本研究では、LCA を用いて断熱材の環境負荷を評価する手法を構築し、断熱材種や地域別など様々な条件下での GHG 排出量を定量化した。今回設定した条件下においては、エンボディドカーボンは GHG 排出原単位が低く部材重量が少ない UF81[2)]、オペレーショナルカーボンは断熱性能が高い UF145 が最も少なかった。また、ライフサイクル全体で見ると、オペレーショナルカーボンの影響が大きく、1-6 地域は UF145、7 地域では UF100 が最も小さくなったが、温暖な地域になるほど UF145 の優位性が縮小していることが明らかになった。これは、高い断熱性能を持つ UF145 が温暖地では過剰性能となる可能性を示唆しており、地域の特性を考慮した断熱材選定の重要性を示している。地域ごとに最適な断熱材を選定可能になることで、環境負荷低減効果の最大化と資源の効率的な利用を両立でき、その結果、住宅の省エネルギー化が促進すると考える。一方で、本研究には課題も残る。今回は、断熱材の経年劣化を考慮していないため、算出されたオペレーショナルカーボンは過小評価されている可能性が高い。断熱材の種類により、経年劣化速度が異なるため、正確な評価には経年劣化の考慮が不可欠であろう。

本研究は、LCA を用いた断熱材評価の一つの試みであるが、今後環境負荷を考慮した建築材の選択と利用を促進し、持続可能な社会の構築に繋がることを期待する。

5. 引用文献

1) 吉田吏志ほか: 空気調和・衛生工学会 学術講演論文集,福井, (2023), pp 189-192
2) 吉田吏志ほか: 日本 LCA 学会 講演要旨集, 広島, (2025, 投稿中)
3) 財団法人ベターリビング:長持ち住宅の手引き, (2023), p2,
4) (株)建築環境ソリューションズ：建築環境シミュレーションプログラム
5) 自立循環型住宅への設計ガイドライン, 建築環境・省エネルギー機構, (2005)
6) 平成 25 年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説II住宅, (2013)
7) 電気事業低炭素社会協議会, 「2021 年度 CO2 排出実績（確報値）について」,(2023)

研究開発段階の非焼成セラミックス建材を対象とした温室効果ガス排出削減量の概算

Estimation of Greenhouse Gas Emission Reductions for Non-fired Ceramic Building Materials in the Research and Development Phase

○柴原尚希*[1)]，新井修[1)]，山本涼子[1),2)]，中村晟一朗[2)]
Naoki SHIBAHARA, Shu ARAI, Ryoko YAMAMOTO, Seiichiro NAKAMURA
1)中部大学，2)株式会社フルハシ環境総合研究所
* shibahara@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

セラミック建材は、ガスを燃料として高温で焼成することから、製造の際の温室効果ガス排出量が大きいことが知られている。その課題を解決するため、焼成が不要な非焼成セラミックスの開発が始まっている。曲げ強度や断熱性などに優れた性能を発揮し、タイルや断熱材としての製品化を見込んでいる。

開発中の技術の成熟度を客観的に評価する指標として、技術成熟度（Technology Readiness Level: TRL）がある。基礎研究や応用研究に該当する TRL レベル 1～3 の段階については、LCA 実施例は多く、研究開発段階で不確実性の大きい要素にシナリオを設定した既往研究のほか、システム境界や使用するバックグラウンドデータの既定値などを記載したライフサイクル CO_2 簡易評価のガイドライン[1)]も公開されている。本研究の事例で扱っている非焼成セラミックスは、ラボレベルの製造からより実用的な試作に進む段階であり、実証研究に該当する TRL レベル 4～5 の段階である。この段階にある新規技術の評価にどのような課題があるかの検討は、十分とは言えない。

そこで本研究では、研究開発段階にある非焼成セラミックスを使用した建材を対象に、従来の製造方法と比べ温室効果ガス排出量が削減されるかどうか概算する。また、大量生産段階にない新規製品の評価に関する課題を整理する。

2. ケーススタディの概要と温室効果ガス算定方法

非焼成セラミックタイル（以下、非焼成という。）および従来のセラミックタイルのライフサイクルフローを図 1 に示す。評価対象範囲は、原材料調達、製造、および出荷のための輸送とし、施工段階以降は同じ工程と見なし比較対象に含めない。

非焼成セラミックタイルの原材料は、マグネシア、リン酸塩と珪砂である。混合機で混合した原材料に水を加え、型に入れて養生し製造する。養生は常温でも可能で、釉薬塗布後も加熱が不要である。一方、従来のセラミックタイルの原材料は粘土や長石、カレットで、原材料を混合する工程の後に乾燥や約 1,400℃の高温での焼成が必要となる。

非焼成のインベントリデータについては、メーカーへのヒアリング調査によって収集した。比較対象である従来のセラミックタイルについては、湯淺ら[2)]および Tukul and Srichandr[3)]を参照し、従来のセラミックタイル(1)、(2)（以下、従来(1)、従来(2)という。）を設定した。比較のため、輸送は 3 つのケースで共通のシナリオを設定し、従来(1)の文献[2)]にない釉薬塗布後の焼成には従来(2)のインベントリデータを使用した。

影響領域として地球温暖化を対象とし、LCA ソフトウェア MiLCA を使用して各温室効果ガスの合計を CO_2 等価量で算定した。算定単位は、タイル 1 kg あたりとした。

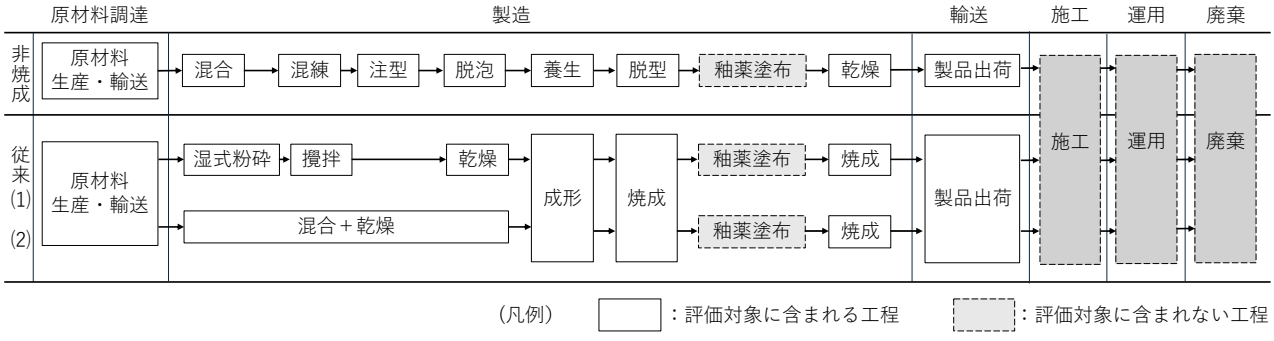


図 1　セラミックタイルのライフサイクルフロー

3. 温室効果ガス排出削減量の算定結果

非焼成セラミックタイルと従来のセラミックタイルそれぞれについて、原材料調達～輸送段階の温室効果ガス算定結果を図 2 に示す。製造工程は、焼成工程（釉薬塗布後の焼成を含む）が不要なために非焼成の方が、従来(1)および(2)と比較して 6 割以上小さい排出量となったが、原材料調達段階の排出量が大きく、全体としてはほぼ同程度の排出量となった。

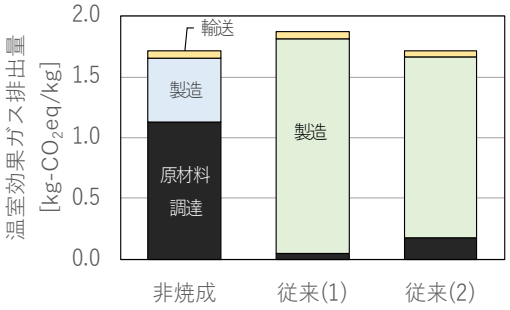


図 2　温室効果ガス排出量算定結果

4. 新規製品の評価に関する課題と結果への影響

4.1 バックグラウンドデータの適合性

原材料のリン酸塩については、データベースよりバックグラウンドデータとして「りん酸ナトリウム」を選択し算定したところ、それが非焼成の原材料調達段階の排出量が従来と比べて大きくなる主な要因であった。そのため、この数値を 200%まで変動させて感度分析を実施したところ、125%で非焼成の方が従来よりも温室効果ガス排出量が大きく算定された（図 3）。

新規製品では、最適なバックグラウンドデータがデータベースに整備されているとは限らず、その選択いかんで結論が逆転する可能性があることが示唆された。

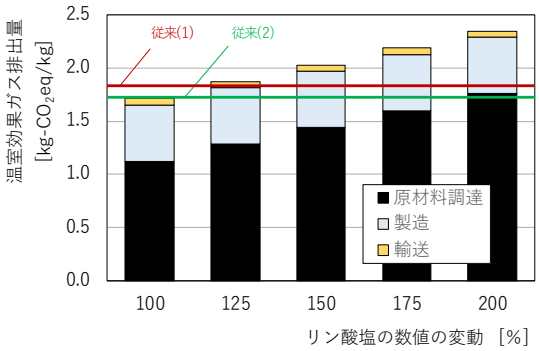


図 3　バックグラウンドデータに関する感度分析

4.2 電力消費効率の実証段階からの変化

実際の導入環境に近い生産体制が整えば、生産機器の大型化による電力消費量の増加や、大量生産による電力消費の効率化が見込まれるため、現時点での電力消費量の正確な予測は難しい。非焼成の製造段階の電力消費量を 60～140%で変動させて感度分析を実施したところ、140%で非焼成の方が従来よりも温室効果ガス排出量が大きく算定された（図 4）。

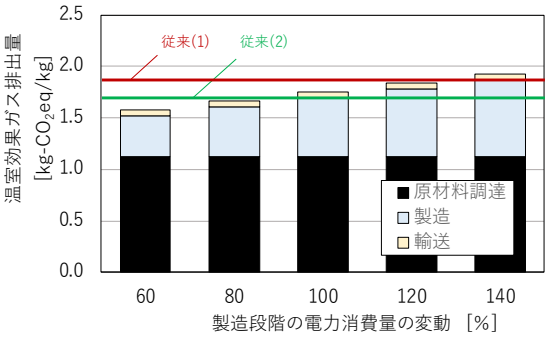


図 4　製造段階の電力消費量に関する感度分析

4.3 輸送距離およびリサイクル材使用率の設定

輸送段階においては、主に関東への納入を想定して輸送距離を設定したが、実際には納入先の多様化が考えられる。また、非焼成は使用済みタイルをリサイクルして原材料の珪砂の代替品として使用できるが、その使用割合等は検証中である。ただし、珪砂調達および輸送段階からの排出量が全体に占める割合は小さく、結果への影響は大きくないと見込まれる。

5. まとめ

非焼成セラミックタイルの原材料調達から製造、輸送にわたる温室効果ガス排出量を算定した。従来のセラミックタイルと比較して、温室効果ガス排出量は同程度であった。研究開発段階であることから、今後製品化や大量生産が進めば、温室効果ガス排出量を低減させる余地は十分にあると考えられる。一方で、原材料のバックグラウンドデータの未整備、製造工程におけるエネルギー利用の効率性、納入先やリサイクル材利用率が未定であることを、大量生産段階にない製品の評価における課題として整理し、それらが結果に与える影響も検討した。

引用文献

1) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：“研究開発初期段階の新規技術を対象としたライフサイクル CO_2 排出量の簡易評価ガイドライン”，(2023)
2) 湯淺和博，鶴崎敬大，山崎成：日本建築学会環境系論文集，82(741)，(2017)，pp.949-955
3) Tukul, N. and Srichandr, P.: JCS-Japan, 118(10), (2010), pp.887-894

謝辞

本研究は、「経済産業省 成長型中小企業等研究開発支援事業（Go-Tech 事業）」の助成を受け、株式会社喜多村より情報提供をいただいた。

供給量を考慮したセメントの CO_2 排出低減方法の評価

Assessment of CO_2 reduction method for cement considering supply volume

○桐野裕介*[1)]、新見龍男[2)]、河合研至[3)]
Yusuke Kirino, Tatsuo Shinmi, Kenji Kawai
1) 太平洋セメント株式会社, 2) 株式会社トクヤマ, 3) 広島大学
* yusuke_kirino@taiheiyo-cement.co.jp

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、セメント産業では 2050 年までのロードマップを策定し、各種 CO_2 削減技術の開発と社会実装を進めている[1)]。CO_2 排出原単位の小さい代替材料（以下、混合材）によってセメントの一部を置き換える技術は、有望な CO_2 削減技術の一つとして位置付けられており、比較的早期かつ低コストで実現できる技術として、今後さらに拡大していくことが期待されている。

日本国内で現在最も利用されている混合材は、鉄鋼製造工程から副産物として得られる高炉水砕スラグであり、日本政府の策定した地球温暖化対策計画においても、その利用拡大が計画されている。一方、高炉水砕スラグの大部分はすでに混合材として活用されており[2)]、追加使用できる量は多くない。また、高炉方式による鉄鋼製造は CO_2 排出量が多く、電炉方式等への移行が進められているため[3)]、その進展に伴って高炉水砕スラグの供給量は今後減少していくものと考えられる。そのため、高炉水砕スラグによる CO_2 排出削減量を正確に評価するためには、将来の供給量を考慮することが必要となる。また、他の混合材に関しても将来の供給量は変動する可能性が考えられるものの、これらの観点まで考慮して CO_2 排出削減量を評価した事例[4)]は少なく、混合材の詳細まで考慮した事例は無い。

本研究では、セメントの混合材の現在及び 2050 年における供給量を見積もると共に、国内全体でのセメントの CO_2 排出削減効果を評価することを目的とした。

2. 評価方法

評価の指標として、混合材によってポルトランドセメントを置き換えた場合の CO_2 排出削減効果を求めた。評価対象とした混合材は、高炉水砕スラグ、石炭灰（フライアッシュ）、石灰石とし、現時点での供給量がセメントと比較して著しく少ない材料は対象としなかった。

評価対象の機能を同等とするため、混合材のセメントへの混合率は、主要な用途であるコンクリートの圧縮強度を概ね一定にできる範囲までとし、JIS 及び標準情報案の混合率の最大値とした。システム境界は、天然原料の採掘から構成材料の製造までとし、各材料の CO_2 排出原単位は日本コンクリート工学会のデータベース[5)]を用いた。なお、高炉水砕スラグ及び石炭灰は共製品であるものの、本研究では配分を行わず、カットオフした場合の評価を行った。

セメント及び混合材の現在の供給量に関しては各種統計資料[2),6)-8)]を元に 2022 年の値を用いた。2050 年の供給量に関しては、主製品であるセメント及び石灰石は 2022 年と同等と仮定した。一方、副産物である高炉水砕スラグ及び石炭灰に関しては、将来の鉄鋼製造[2)]及びエネルギー受給分析の成長実現シナリオ[9)]を元に、高炉（銑鉄）及び石炭火力発電の生産量から現在と同じ比率でそれぞれの副産物が発生すると仮定した。副産物の用途は、現在の比率と同一である場合（シナリオ１）と日本国内の用途を優先し、輸出量が減少した場合（シナリオ２）の二種類を想定した。

3. 結果と考察

混合材の供給量の推定値を図 1 に示す。高炉水砕スラグは、2022 年の混合材としての使用実績は最も多いもの、埋立量及び他産業の使用量が少なく、混合材に転用できたとしても追加使用できる量は最も少なかった。また、2050 年の高炉水砕スラグの供給量はシナリオごとに大きく異なり、シナリオ１では半分程度に減少するものの、シナリオ２では国内の供給量は維持された。これは海外での現在の使用量が多く、その輸出量が大きく減少したことによる。石炭灰は、2022 年の

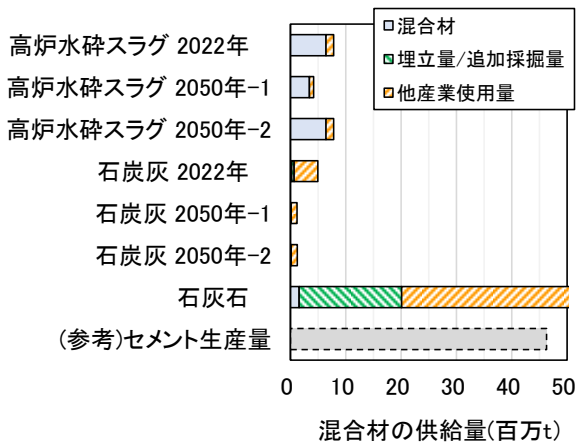


図 1 混合材の供給量

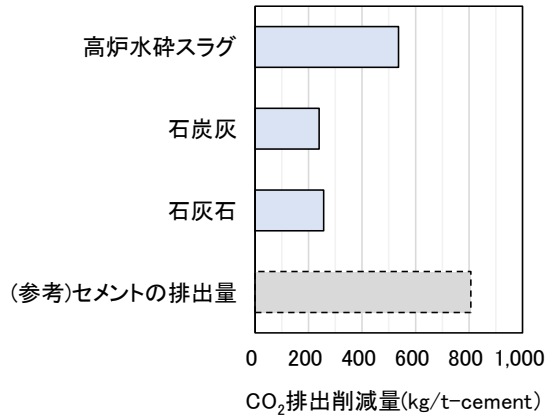


図 2 セメントあたりの CO_2 排出削減量

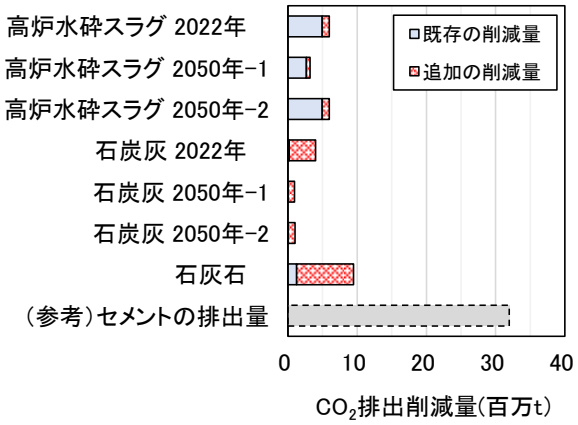


図 3 国内全体の CO_2 排出削減量

混合材としての実績は少ないもの、追加使用できる量は比較的多かった。一方、2050 年の石炭灰の供給量は大幅に減少した。これは、想定したシナリオで石炭火力発電の比率が大きく減少したことによる。石灰石は、2022 年の混合材としての使用実績は比較的多かった。また、追加使用できる量は最も多く、供給面からは石灰石の追加使用が重要であると考えられる。

混合材によるセメントあたりの CO_2 排出削減量を図 2 に示す。セメントあたりの CO_2 排出削減量では、高炉水砕スラグが最も大きかった。これは、高炉水砕スラグの反応性が高く、コンクリートの圧縮強度への寄与率が高いため、セメントあたりの混合率を高くできることによる。石炭灰と石灰石については、コンクリートの圧縮強度への寄与が同程度であることから、セメントあたりの CO_2 排出削減量も同程度となった。

国内全体の混合材による CO_2 排出削減量の推定値を図 3 に示す。本研究で想定したシナリオにおける混合材の供給量による削減量を「既存の削減量」、混合材以外の用途を混合材に転用した場合の削減量を「追加の削減量」と定義した。セメントあたりの結果（図 2）と大きく異なり、石灰石による追加の削減量が最も多い結果が得られた。これは石灰石の供給量が非常に多いことから（図 1）、セメントあたりの混合率の最大まで石灰石を使用できることによる。一方、高炉水砕スラグの CO_2 排出削減量は 2022 年の実績では最も多いものの、追加の削減量は多くなかった。また、2050 年では、シナリオによって異なるものの、2022 年と同等から半減程度の排出削減量となることが分かった。石炭灰に関しては、2022 年の追加の削減量は比較的大きいものの、2050 年では大きく減少することが分かった。これは、石炭火力発電の比率が減少し、石炭灰の供給量が大幅に減少したことによる（図 1）。なお、2050 年の分析結果は不確実性が大きいことから、他のシナリオを用いた感度分析を行う必要もあると考えられる。

4. まとめ

現在及び将来の混合材によるセメントの CO_2 排出削減量を国内全体の供給量を考慮して推定した。その結果、CO_2 排出削減量はセメントあたりの評価と国内全体の評価では大きく異なる結果が得られることが分かった。前者の評価では高炉水砕スラグが最も大きいものの、後者の評価では石灰石が最も大きく、国内全体の CO_2 排出を削減するには石灰石の活用拡大が重要であることが示唆された。また、2050 年の混合材による CO_2 排出削減量は想定するシナリオによって異なる結果が得られることが判明し、複数のシナリオ分析が重要であると考えられた。

引用文献

1) Global Cement and Concrete Association: Concrete Future – The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete, (2021)
2) 鐵鋼スラグ協会: 鉄鋼スラグ統計年報, (2023)
3) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構: 鉄鋼業における二酸化炭素排出削減に係る動向と原料炭需要への影響等調査, (2022)
4) Watari T. et al.: Nat. Commun., 13, (2022), 4158
5) 日本コンクリート工学会: セメント・コンクリートの環境影響評価に関する研究委員会報告書, (2024)
6) セメント協会: セメントの LCI データ, (2023)
7) 石灰石鉱業協会: 石灰石の生産・出荷推移, (2024)
8) 一般財団法人カーボンフロンティア機構: 石炭灰全国実態調査報告書, (2024)
9) 地球環境産業技術研究機構, “2050 年カーボンニュートラルに向けた我が国のエネルギー需給分析”, 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会, (2024)

口頭発表セッション

2025年3月7日(金) 11:00 ~ 12:20 C会場：2313中講義室（3F）

[3-C2] プラスチック（３）

座長：中谷 隼 (東京大学)

11:00 ~ 11:20

[3-C2-01]

産業連関表を用いたプラスチックの物質フロー分析による新型コロナウイルス感染症の流行が食品容器包装の利用に与えた影響の解明

*中谷 隼[1]、美浦 瑶子[1]、藤田 壮[1] (1. 東京大学)

11:20 ~ 11:40

[3-C2-02]

プラスチックの再生利用拡大に寄与する新たな認証制度に関する検討

*友部 優紀[1]、加藤 英仁[1]、小出 理博[1]、小林 弘幸[1]、鶴田 祥一郎[1] (1. 一般社団法人サステナブル経営推進機構)

11:40 ~ 12:00

[3-C2-03]

COVID-19 拡大前後における家計食料消費に伴う容器包装プラスチック使用量の変化

*吉川 直樹[1]、中谷 隼[2]、大津 朱絵[3]、山口 陽平[3]、小泉 裕靖[4]、天野 耕二[3] (1. 滋賀県立大学、2. 東京大学、3. 立命館大学、4. 東京都環境科学研究所)

12:00 ~ 12:20

[3-C2-04]

買物袋における紙およびバイオマスプラスチックへの転換に関するライフサイクル思考

*兼松 祐一郎[1]、大塚 彩美[1]、Heng Yi Teah[1]、齊藤 純[2]、菊池 康紀[1] (1. 東京大学、2. 豊田通商株式会社)

©日本LCA学会

COVID-19 拡大前後における
家計食料消費に伴う容器包装プラスチック使用量の変化

Changes of Plastic Packaging Usage Associated with Household Food Consumption Across Supply Chain Before and After the Spread of COVID-19 in Japan

○吉川直樹[*1)]、中谷隼[2)]、大津朱絵[3)]、山口陽平[3)]、小泉裕靖[4)]、天野耕二[3)]
Naoki Yoshikawa, Jun Nakatani, Akie Otsu, Yohei Yamaguchi, Hiroyasu Koizumi, Koji Amano
1) 滋賀県立大学, 2) 東京大学, 3) 立命館大学, 4) 東京都環境科学研究所
* yoshikawa.n@ses.usp.ac.jp

1. はじめに

世界的にプラスチック廃棄物への関心が高まる状況において、サプライチェーンを通じた資源の適正管理が求められる。プラスチックの用途は多岐にわたるが、特に容器包装プラスチックの使用と廃棄には消費行動が大きく関連する。そのため、消費の変化による物質フローへの影響を捉えることは重要である。

2020 年以降の COVID-19 拡大下では、人々の消費行動は大きく変化した。衛生用品の需要増加に加えて、食料消費においても、外食の落ち込みに伴うテイクアウト、内食市場への回帰などの変化が見られたが、このことは、プラスチックの需要にも影響をもたらしたと考えられる。

既往研究において、Imuro and Tabata[1)] はウェブアンケート調査により消費者のテイクアウト容器の廃棄の変化と、その処理に伴う二酸化炭素排出量を推計した。Winton ら[2)]はイギリスにおける COVID-19 によるロックダウン前後の消費者による容器包装廃棄物使用量を分析し、ロックダウンの間、食品に関わる容器包装廃棄物が有意に増加していることが確認された。これらの研究は、家庭からの廃棄物のみに着目したものである。一方で筆者ら[3)]は産業連関法をベースとしたマテリアルフロー分析手法を用いて、COVID-19 によるプラスチック廃棄物への影響を日本の食料消費全体にわたって推計した。しかし、コロナ禍が一定の終息をみた以降も、消費行動の一部は構造的変化として継続しているものと考えられる。

そこで、本研究では COVID-19 拡大前後の一定期間を対象とし、家計食料消費に伴い直接・間接に使用される容器包装プラスチック（以下、容器包装プラ）量を推計することで、消費行動の変化による影響を分析する。

2. 研究方法

2.1 前提条件

本研究では、筆者ら[3)]による日本の家計消費を対象として容器包装プラ使用量の推計モデルを用いた。COVID-19 が 拡大していた期間を含む 2018~2023 年の 6 年間を分析の対象期間とする。食料消費を評価対象とし、それ以外の支出や、個人のこづかいによる食料の消費は推計に含まれていない。

2.2 推計方法

本研究で用いたモデル[3)]は、Nakatani ら[4)]による日本におけるプラスチックのマテリアルフローモデルをベースとしている。Nakatani ら[4)]では、産業連関分析に基づき、製品プラスチックおよび容器包装プラのフローを推計している。本稿のモデルでは、容器包装プラのみを対象とするとともに、産業連関表の「飲食店」部門を、市場規模の調査資料[5)]を参考に「飲食店（店内）」と「飲食店（テイクアウト・デリバリー）」に分割し、推計を行った。

2015 年産業連関表に基づくマテリアルフローより、各産業から家計に流入する容器包装プラを直接使用、家計消費に伴いサプライチェーン上流で使用される容器包装プラを間接使用と定義した。家計消費金額あたりの各使用量を式(1)(2)を用いて推計した。

$$e_j^{\mathrm{direct}} = \frac{\left(Q_{jf}^{HD} + Q_{jf}^{HM}\right) + \left(Q_{rf}^{HD} + Q_{rf}^{HM}\right) \cdot \frac{m_{jr}}{X_r}}{F_j + m_{jr} + m_{js} + \sum_{t=1}^{7} m_{jt}}, \quad (1)$$

$$e_j^{\mathrm{indirect}} = \frac{\hat{q}_j \cdot F_j + q_r \cdot m_{jr} + q_s \cdot m_{js} + \sum_{t=1}^{7} q_t \cdot m_{jt}}{F_j + m_{jr} + m_{js} + \sum_{t=1}^{7} m_{jt}}, \quad (2)$$

ここで、e_j^{direct}は産業 j からの家計購入金額あたり直接容器包装プラ使用量、Q_{jf}^{HD}とQ_{jf}^{HM}はそれぞれ産業 j から家計部門 f に流入する国内生産由来容器包装プラ量および輸入由来容器包装プラ量、m_{jr}は産業 j の家計消費に伴う商業マージン額、X_rは商業部門の国内生産額、F_jは産業 j からの生産者ベースの家計購入金額、j は内生部門、r は小売部門、s は卸売部門、t は運輸部門（7 部門）である。また、e_j^{indirect}は産業 j からの家計購入金額あたり間接容器包装プラ使用量、q_jは他産業部門から部門 j への生産金額あたり容器包装プ

ラ流入量、$\hat{q}_j$は式(3)のベクトル$\hat{\boldsymbol{q}}$における j 番目の要素である。

$$\hat{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{q}^T \cdot (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})^{-1} \quad (3)$$

ここで、$\boldsymbol{q}$はq_jを要素とするベクトルである。

このe_j^{direct}とe_j^{indirect}に、消費者物価指数[6]を用いて2015年基準に調整した食料消費金額[7]を乗じ、容器包装プラ使用量を推計した。

3. 推計結果

対象期間における容器包装プラ使用量（直接と間接の合計、家計の飲料消費を除く）を図1に示す。緊急事態宣言が発令された2020年と2021年においては、1人あたり年間使用量は平均6.34kgであった。2018年と2019年の平均と比べ実質支出金額は2.2%減少したが、使用量は2.5%の微増となった。支出項目ごとの内訳としては、調理食品の占める割合が比較的高く、同期間で9.3%増加しているとともに、肉類や魚介類などの生鮮食材由来の使用量も若干増加した。一方で外食は19%減少した。また、2022年2023年の平均使用量は、2018年と2019年の平均比で＋0.6%と、ほぼ同水準となった。外食に伴う容器包装プラ使用量が一定水準まで戻っていることに加え、調理食品由来の使用量がCOVID-19拡大前に比べて若干増加したためである。

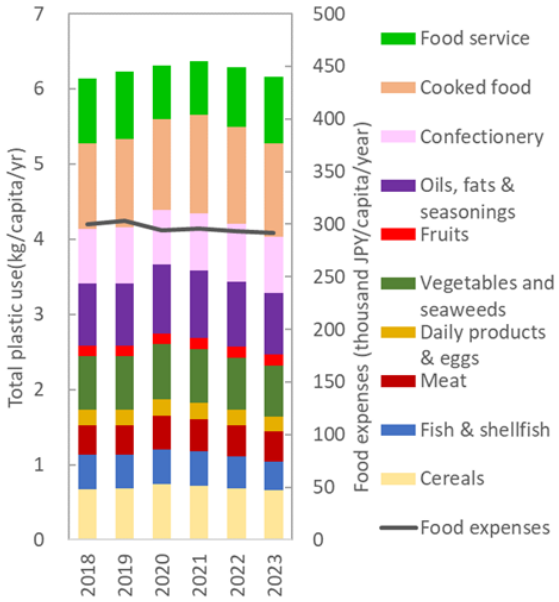


図1 支出項目別容器包装プラ使用量の推移

図2に、消費形態（内食、中食、外食）別、直接・間接別の 1 人あたり年間容器包装プラ使用量の結果（家計の飲料消費を除く）を示す。直接使用量の変化は合計使用量よりも大きく、2020年・2021年の平均を2018年・2019年の平均と比べると7.5%増加していた。飲食店テイクアウト・デリバリーの増加がこの変化の一因である。プラ使用量全体に占める割合自体は少ないものの、同期間において72.6%増加した。一方で飲食店（店内飲食）の減少に伴う間接使用の減少により、全体としての使用量が微増にとどまっていることがわかる。2018年・2019年と2022年・2023年を比較すると、直接排出は平均で3.2%増加した。飲食店テイクアウト由来の使用量は2020年～2021年の間に急増して以降同程度の水準を維持しており、中食・外食由来の直接使用量が直接使用量全体に占める比率は期間を通じて上昇傾向にあることがわかった。

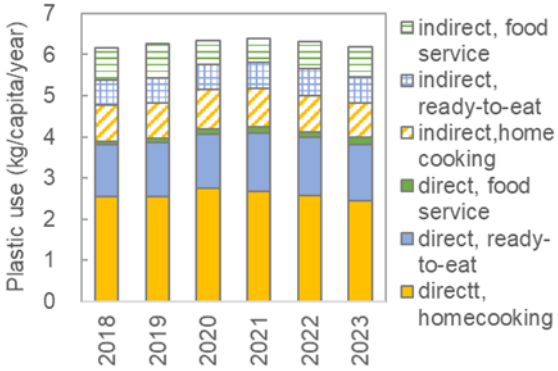


図2 消費形態別、直接・間接別容器包装プラスチック使用量の推移

4. まとめ

本研究では、COVID-19 拡大前後における家計の食料消費に伴う容器包装プラ使用量を推計した。コロナ禍の一定の終息に伴い、それ以前の消費状況にも戻りつつある品目もある一方、飲食店テイクアウト等の変化の継続により容器包装プラ使用量に占める家計の直接使用の割合が高まっていることがわかった。今後は継続的な推計によって中長期的な変化を把握することや、世帯・個人属性別に推計する等、より精緻な分析を行うことが課題である。

引用文献

1) Iimuro M., Tabata T: J. Mater. Cycles Waste Manag. 26, (2024), pp.591–601.
2) Winton D., Marazzi L., Loiselle S.: Sci Total Environ, 849, (2022),15767
3) 吉川直樹，大津朱絵，山口陽平：第19回日本LCA学会講演要旨集，宇都宮，(2024)
4) Nakatani J., Maruyama T., Moriguchi Y.: Proc Natl Acad Sci USA, 117, (2020), pp.19844–19853
5) 株式会社富士経済：“外食産業マーケティング便覧No.3”，（2021, 2022, 2023）
6) 総務省：消費者物価指数，入手先＜https://www.stat.go.jp/data/cpi/>，（参照 2024-10-18）
7) 総務省：家計調査，入手先＜https://www.stat.go.jp/data/kakei/>，（参照 2024-10-18）

買物袋における紙およびバイオマスプラスチックへの転換に関するライフサイクル思考

Life cycle thinking of shopping bag in the transition to paper and biomass plastics

○兼松祐一郎*[1)]、大塚彩美[1)]、Heng Yi Teah[1)]、齊藤純[2)]、菊池康紀[1)]
Yuichiro Kanematsu, Ayami Otsuka, Heng Yi Teah, Jun Saito, Yasunori Kikuchi
1) 東京大学, 2) 豊田通商株式会社
* kanematsu@platinum.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

プラスチックの廃棄物や化石資源消費の問題が着目され、食料品や衣類などの小売業では買物袋の有料化および脱プラスチック化、バイオマス材料の活用などが活発になっている。植物資源由来の紙製品への転換も盛んだが、紙の製造プロセスにおける環境影響は決して小さくなく、袋 1 枚に使われる材料の質量は紙袋の方が大きくなるため、慎重な検討が必要と言える。また、プラ袋は買物での使用後にごみ袋として再利用できるため、レジ袋有料化後には専用ごみ袋の需要が増している。本研究では、買物袋を化石由来プラから紙やバイオプラへ転換する際の影響や課題をライフサイクル思考によって明らかにする。

2. 買物袋のライフサイクル

2.1 紙袋とプラ袋の製造プロセス

紙袋はロール状のクラフト紙を原料として、印刷ありのものはフレキソ印刷を経て、製袋機によって持ち手の接着と成形が行われて紙袋の形状となる。プラ袋はポリエチレン(PE)ペレットと添加剤を混合後、インフレーション工程によって筒状の原反とする。製袋機で持ち手部分などを切り抜いてレジ袋などの形状とする。切り抜かれた部分は再ペレット化されて原料となるので加工ロスはない。各工程の年間電力消費量、添加剤や接着剤などの資材消費量、廃棄物量を調査し、インベントリ分析に用いた。

2.2 買物袋とごみ袋の利用シナリオ

一週間あたりの買い物とごみ捨ての量と回数を仮定し、それらを満たすような買物袋とごみ袋の利用シナリオを複数設定して GHG 排出量の比較を行った。買い物にはポリエステル製のマイバッグ、化石由来またはバイオ由来の PE 製レジ袋、紙袋が利用可能であるとした。PE 製レジ袋は買物での利用後にごみ袋として利用可能であるが、マイバッグと紙袋はそれができない。この不足分は PE 製ごみ袋を新規に購入するとした。また、マイバッグと紙袋では水気のある製品などの包装にロール状の薄い PE 袋(ロール袋)を追加的に使用するケースも想定した。

3. ライフサイクル GHG 排出量の評価

3.1 袋 1kg および袋 1 枚における評価

紙袋、化石 PE 袋、バイオ PE 袋について、まず各 1kg の袋について、製造プロセスや添加物製造、廃棄物処理等を含めたライフサイクル GHG 排出量の比較を行った。紙およびバイオ PE では原料作物の成長時の CO_2 吸収を考慮し、排出量は化石 PE 袋＞紙袋＞バイオ PE 袋となった。

次に袋 1 枚あたりの比較を行った。様々なサイズの製品の中で体積が同等のものを比較すると、約 20L の大型の袋では紙袋の質量はプラ袋に対して約 5 倍、約 2.5L の小型の袋では約 10 倍であった。1 枚あたりの GHG 排出量では、いずれのサイズでも紙袋>>化石 PE 袋＞バイオ PE 袋となった。

3.2 利用シナリオ間の比較

1 週間の買物とごみ捨てに必要な袋の需要をマイバッグ、化石 PE、バイオ PE、紙の袋の組合せで充足するシナリオ間で比較を行った。買物袋としてマイバッグ、紙袋を主に用いるシナリオではごみ袋として PE 袋を追加で購入する必要があるため、PE 製レジ袋を購入してごみ袋にも転用するシナリオに比べて GHG 排出量が大きくなった。いずれの場合もごみ袋として PE 袋が必要となるが、それが化石 PE の場合もバイオ PE の場合も、傾向は同じであった。

4. おわりに

買物袋の用途において、一部ではすでに紙袋への転換が進んでいるが、GHG 排出量の観点からは総じてプラ袋のほうが優れている結果となった。ごみ袋としての再利用も考慮すると、さらにプラ袋は有利となった。今後、温暖化以外の影響項目や、小売店や消費者による買物袋の選択において効果的な LCA 結果の提示方法などの面でも議論を進めていく。

謝辞

東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は、三井不動産(株)、積水ハウス(株)、東日本旅客鉄道(株)、豊田通商(株)からの寄付を受け活動している。

口頭発表セッション

2025年3月7日(金) 9:20 ~ 10:40 D会場：2317中講義室（3F）

[3-D1] 企業（2）

座長：磯部 眞弓 (（株）ゼロボード)

9:20 ~ 9:40

[3-D1-01]

企業の組織GHG排出量と製品CFPの相関分析

*深井 晶央[1]、磯部 眞弓[1]、陳 怡靜[1] (1. （株）ゼロボード)

9:40 ~ 10:00

[3-D1-02]

地方自治体と連携したCFP削減効果評価制度の推進と社会普及

*楢崎 桃子[1]、中澤 克仁[1]、鶴田 祥一郎[1] (1. 一般社団法人サステナブル経営推進機構)

10:00 ~ 10:20

[3-D1-03]

第三者認証型CFP包括算定制度を通じた企業内算定と検証の在り方の検討

*神谷 優大[1]、シンウン ニカンドラ[1]、澤村 翔太[1]、中澤 克仁[1]、鶴田 祥一郎[1] (1. 一般社団法人サステナブル経営推進機構)

10:20 ~ 10:40

[3-D1-04]

地理情報を考慮した環境影響評価　LCAのTNFDへの活用

*大橋 憲司[1] (1. 株式会社資生堂)

©日本LCA学会

企業の組織 GHG 排出量と製品 CFP の相関分析

Correlation analysis between corporate GHG emissions and product CFP

○深井晶央*[1)]、磯部眞弓[1)]、陳怡靜[1)]、相勝[2)]
Akihisa Fukai, Mayumi Isobe, Ching Chen, Masaru Ai
1) （株）ゼロボード　ゼロボード総研,
2) 妙中鉱業（株）
* akihisa.fukai@zeroboard.jp

1. はじめに

地球温暖化への対応が喫緊の課題となりつつある中で、カーボンニュートラルへの対応が企業活動においても重要な位置付けとなってきており、各企業は組織の GHG 排出量を GHG プロトコル[1)]に基づき算定し、公表することは、一般的になりつつある。

GHG プロトコルにおいて GHG 排出量は、直接排出: Scope 1、間接排出 Scope 2、サプライチェーンからの排出量 : Scope 3 で分類される。各組織の直接的に関与できる Scope1、2 の削減に向けては各社取り組みを進めている企業が増えてきているとともに、Scope3 の製品に関わる排出量への注目度がますます高くなってきている。

2. 本研究の目的

企業の組織算定のニーズが高まってくる中で、Scope 3 の Cat.1（購入した製品・サービス）が事業に対して影響が大きいため GHG 算定においても重要な要素となる。Cat.1 の算定精度を上げるために、サプライチェーン間での製品 CFP 算定が重要になるが、CFP の対応を実施することはハードルが高いのが実情である。サプライチェーン上での CFP 値を受け渡すには課題が多いことから組織算定のデータから按分することで製品の排出量を推計するケースも増えてきている。

本研究では組織算定のデータから按分した擬似的な製品 CFP 値と積み上げ手法による CFP 値の結果を比較分析し、製品算定普及の課題に対する一助となることを目的としている。

3. 製造業における Scope3 Cat.1 の関係

本研究では事業活動における原材料調達の寄与度が高い製造業に着目し Scope 3 と製品 CFP の GHG 排出量の相関を分析する。

図 1 では製造業における GHG 排出量の内訳の傾向と Scope3 Cat.1 の占める割合をグラフで示した。

Scope3 の割合が高く、中でも Cat.1（原材料調達）の寄与度が高いことがわかる。特に素材関連産業などサプライチェーンの上流に位置するセクターの Cat.1 の影響はさらに大きくなる傾向にある。

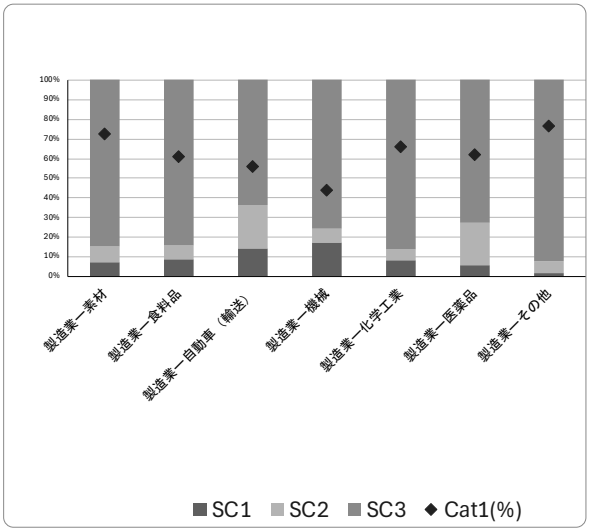


図 1　Scope1、2、3 の内訳と Cat.1 の占める割合

4. 組織の GHG 排出量データについて

今回利用した組織の GHG 排出量データについては、Zeroboard[2)] に登録された企業の GHG 排出量のデータを解析した。登録されたデータの多くは GHG プロトコルに整合した算定によるものになる。

Scope1、2 では、物量（燃料、電力使用量等）把握による 1 次データで算定することが多いが、Scope3 に関しては 3EID を活用したコストからの計算が主流となっている。そのため、算定の精度や物価などの外的要因で算定結果が左右されるなどの課題があり、Scope3 の中で影響が大きな活動に対しては物量データを用いた算定方法に切り替える企業も増えてきている。

5. 比較方法について

比較分析の対象としてフェロモリブデンの Cradle to Gate の CFP 算定結果を利用した。CFP の詳細については SI に示す。この製品製造に関わる実データを用い、組織算定のデータから按分した擬似的な CFP 値と業界ガイドライン[3)]を基に 2 次データは IDEA3.4 を用いて、積み上げ法で算定した CFP 値を比較し、1 次データの把握方法の差による結果の変動を分析した。

6. コストでの算定（3EID）と物量での算定（IDEA）

における GHG 算定の比較

組織算定におけるコストベースの計算から物量データに切り替えた際のGHG排出量の変化を以下に示す。

表 1 コストと物量による算定の比較

	2023 年度実績　(tCO2)		
	コスト	コスト（調整）	物量
Scope 1	22	22	22
Scope 2	36	36	36
Scope 3 Cat.1	327,388	26,188	18,212
Scope 3 Cat.3	12	12	12
Scope 3 Cat.4	232	232	6,248
Scope 3 Cat.5	250	250	54
合計	327,941	26,741	24,584

各カテゴリーをコストベースで計算した場合、購入した原材料などの単価により、比較できないほどの突出した数値が算定されることがわかる、本研究で一部の原材料の単価を調整した数値を利用し、比較分析を行う。

7. 製品の GHG 算定結果の比較

7.1 コストベースの算定（3EID）と物量ベースの算定（IDEA）における GHG 算定の比較

コストベースの算定と物量ベースの算定では原材料の係数で、乖離があり今回の算定で利用した係数の乖離率は平均で 75.8%となり、3EID での算定結果の方が 25%程度 GHG 排出量の高い結果となった。

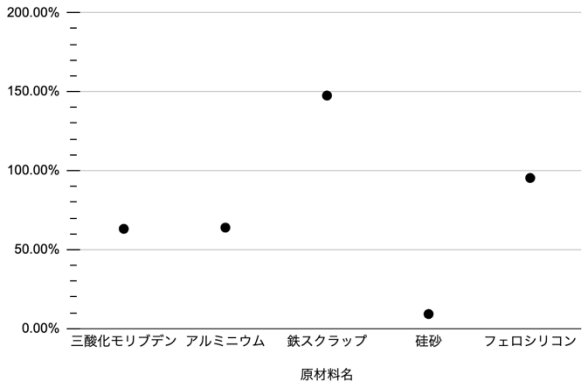


図 2　原材料別のコストと物量の乖離率

7.2 算定方法による CFP 値の比較

積み上げによる CFP の値と組織算定の按分から試算した結果を比較した。組織算定に関しては、コストのみで算定したものと主要な項目は物量にて算定した結果から按分したものを準備し比較した。

表 2　算定方法による CFP 値（kgC02e/kg）

積み上げ	組織算定（物量）	組織算定（コスト）
3.7	10.3	11.2

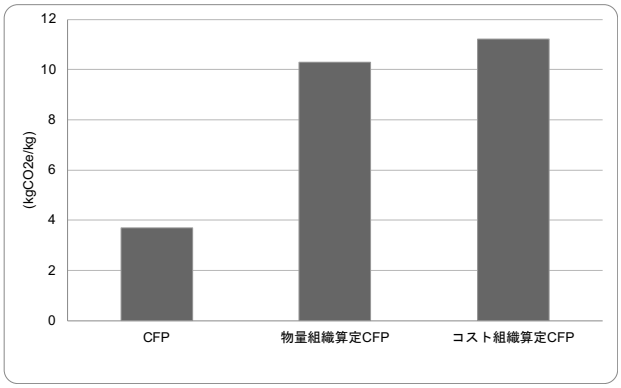


図 3　CFP 値と組織按分算定の比較

8. 結果

コスト算定から CFP を算定した場合、積み上げでの CFP 値を比較して、3.03 倍の結果となった。今回の分析で組織算定からの按分値は価格変動などの影響が大きく、全体として数値が大きくなる傾向が見られた。積み上げ法にて CFP の算定を実施することで精度の高い結果が得られることがわかる。

9. まとめ

Scope3 の算定方法は、現状、コストベースで算定されることが多く、精度の面で課題も残ることは事実である。今後の GHG 削減を具体的に行うフェーズにおいては GHG の排出量が精度高く示せているかにも着目し、GHG 排出量の寄与度が高い項目は LCA 手法を活用するなど、より精度の高い実績管理方法をとることが重要になる。

本研究においては単一事例からの分析となったが今後、N 数を増やし相関分析に着手したい。

引用文献

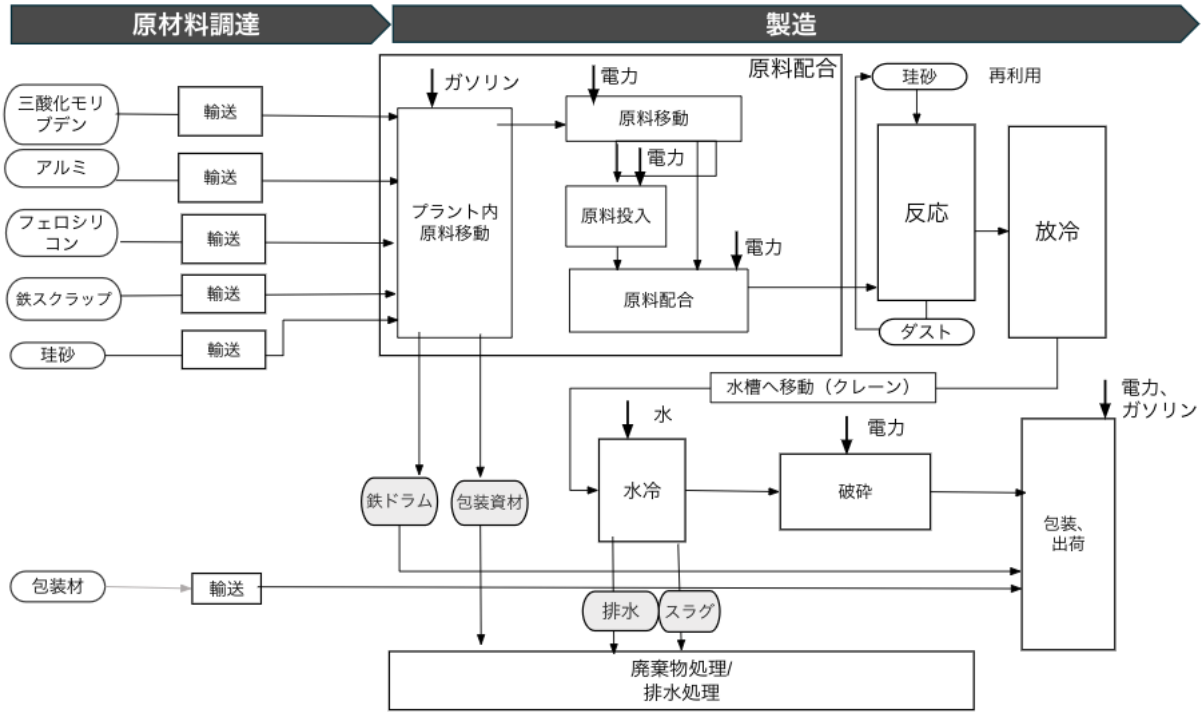
1) GHG Protocol：”GHG Protocol”, GHG Protocol,（オンライン）,入手先＜http://www.ghgprotocol.org＞,（参照 2024-01-21）
2) （株）ゼロボード：”Zeroboard”,（株）ゼロボード,（オンライン）, 入手先＜https://zeroboard.jp/＞,（参照 2025-01-21）
3) PE INTERNATIONAL：“Harmonization of LCA Methodolgies for Metals Version 1.01”, PE INTERNATIONAL,（オンライン）, 入手先 ＜https://www.imoa.info/HSE/LCI/HarmonizationofLCAMethodolgiesforMetals05Feb2014-Version101.pdf?m=1392809136>,（参照 2025-01-21）

Supporting Information

図 S1　CFP 対象製品：フェロモリブデン



図 S2　フェロモリブデン製造工程フロー図



地方自治体と連携したCFP削減効果評価制度の推進と社会普及

Promoting and disseminating the assessment system of CFP reduction effect in cooperation with local governments

○楢崎桃子*[1)]、中澤克仁[1)]、鶴田祥一郎[1)]
Momoko Narasaki, Katsuhito Nakazawa, Shoichiro Tsuruta
1) 一般社団法人サステナブル経営推進機構
* narasaki@sumpo.or.jp

1. はじめに

2050年カーボンニュートラル実現に向け、Scope3等の環境情報の開示や、製品・サービスの生産から廃棄までのライフサイクル全体で排出されるCO_2等の温室効果ガス（カーボンフットプリント、以下CFP）の可視化及び削減が重要である。サプライチェーン全体での取り組みが求められる中、中小企業ではCFPの算定スキルや社内の算定・検証体制の構築においてコストやリソースの側面から取り組むことが難しいという課題がある。

川崎市では、川崎市の特徴・強みである優れた環境技術や産業を活かした地球規模でのCO_2削減を推進するため、「川崎CNブランド等推進協議会（以下、協議会）」によって「川崎CNブランド」及び「川崎メカニズム認証制度」が運営されている[1)]。両制度ともに、川崎市内の事業者が開発・製造する製品・技術、サービスによるCO_2削減への貢献度をライフサイクル全体で評価する制度である。

製品・技術等が社会に普及することによって削減される温室効果ガス排出量は「削減貢献量」と呼ばれる。WBCSD（持続可能な開発のための世界経済人会議）によって提唱され、企業の環境配慮行動を製品・技術等の普及による温室効果ガス削減への貢献度からも評価することができ、企業の環境配慮行動へのモチベーション向上につながる概念として注目され始めている。

本稿では、2013年度から両制度の支援を行ってきた当機構の実績をもとに、本制度を活用したCO_2削減効果の評価制度の特徴及び社会普及の状況分析と、それをもとに考案した今後の展望について報告する。

2. 算定・検証方法

川崎CNブランドへの認定・川崎メカニズム認証制度における域外貢献量の認証を取得するためには、事業者による申請書の提出、事前検証人による事前検証、第三者レビュー、審査部会・協議会での審査を要する。第三者性の高い検証を担保している他、協議会で策定した「検証実施手順」「検証判断基準」に基づいた検証を行うことで、品質を保った検証を実現している。また、申請書の作成にはCO_2削減効果を示すための機能単位・シナリオ設定、データ収集を要するため、CO_2算定の知見や体制が十分に整っていない事業者の負担を軽減することを目的に、LCAの専門知識を有する第三者機関による申請書作成支援を行っている。

各制度の算定・検証方法は以下の通りである。

2.1 川崎CNブランド

「川崎CNブランド」は、製品・技術等のライフサイクルにおける各段階において、従来製品・サービスと比較した際にCO_2削減効果があり、カーボンニュートラル（CN）に貢献するものをブランドとして認定・表彰する制度である。申請事業者は「川崎CNブランド応募要領」「川崎CNブランド算定ガイドブック」に則って申請製品・技術等のCO_2削減効果の算定を行い、事前検証人及びレビューアーによる検証で適合判定を受ける必要がある。

2.2 川崎メカニズム認証制度

「川崎メカニズム認証制度」は、川崎市域外でのCO_2削減への貢献度を定量評価し、信頼性のある数値として認証する制度である。域外貢献量は、ライフサイクル評価に基づく川崎市域外での正味のCO_2削減量、川崎市における削減寄与率、川崎市域外への普及量の積によって算出される。削減寄与率は産業連関表に基づき設定されている。「川崎メカニズム認証制度応募要領」「域外貢献量算定ガイドライン」に則って算出されたCO_2削減効果について、川崎CNブランド同様に事前検証人及びレビューアーによる検証で適合判定を受ける必要がある。

3. 制度の社会普及の状況

3.1 認定製品数

「低CO_2川崎ブランド」では2009～2022年度の14

年間で 126 件、「川崎 CN ブランド」としては 2024 年度までに 17 件の製品・技術等が認定されている。「川崎メカニズム認証制度」では 2013～2024 年度までの 12 年間で 39 件の域外貢献量が認証されている。

3.2 認定・認証取得事業者

低 CO_2 川崎ブランド及び川崎 CN ブランド、川崎メカニズム認証制度の認定・認証を取得した製品の開発・製造元事業者の企業規模は図 1 の通りである。低 CO_2 川崎ブランド及び川崎 CN ブランドにおいては中小企業の製品も多く認定されているものの、精緻なデータ収集等を要する川崎メカニズム認証制度においても、中小企業の認証取得に向けた支援が必要であると考えられる。

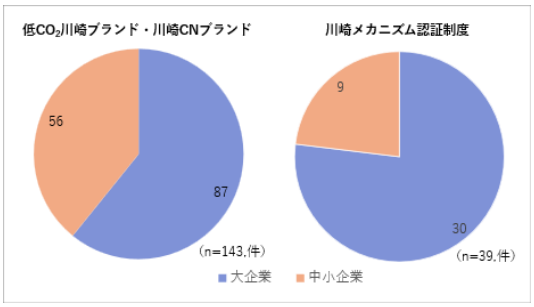


図 1 認定・認証取得製品
開発・製造元事業者　企業規模

3.3 申請事業者による制度活用

認定・認証を取得した製品・技術等は、協議会のポスターや展示会等で情報発信されるほか、自社の PR や CSR・カーボンニュートラルに向けた取り組みへの活用が可能である。

また、申請事業者は認定・認証取得に向けた支援を無償で受けることが可能である。そのため両制度は、CO_2 算定の知識や経験、またはコストに懸念がある事業者にとっても、環境配慮行動に取り組む契機として有用である。

4. 今後の展望

4.1 全国展開の提案

今後の展望として、川崎市の制度を先例とし、地方自治体と連携した地域事業者の CO_2 削減効果の評価スキームの全国展開を提案する（スキーム図は図 2 参照）。地方自治体と連携した地域単位でのスキーム構築によって、地域事業者のモチベーション向上だけでなく地域の産業振興やカーボンニュートラルへの取り組みの PR が可能となる。

まずは川崎市同様に工業地帯に位置する自治体数ヵ所での構築を検討する。各自治体にある産業振興財団・公社が申請事業者の支援や CO_2 削減効果の検証、審査を担い、全国連絡協議会を設置することで各自治体の知見集約や制度の品質統一化を図る。

また、CO_2 排出量算定に関する知見を有する組織や人材の育成、支援・検証・審査の品質を統一するための文書類の整備を行う必要があると考える。

5. まとめ

川崎市では、「川崎 CN ブランド」「川崎メカニズム認証制度」の運営により、市内事業者の CO_2 削減効果の評価、さらには市内全体での CO_2 削減に取り組んでいる。専門機関による伴走支援、第三者性・専門性の高い検証スキームの構築により、あらゆる市内事業者の CO_2 削減行動の評価・促進を実現している。

このように事業者の環境配慮行動促進にとって地方自治体の連携は有効的であり、川崎市の取り組みを先例として全国にこのような仕組みを展開することで、地域を発端とした日本全体でのカーボンニュートラルへの貢献が可能になると考える。

6. 引用文献

1) 川崎 CN ブランド等推進協議会：川崎 CN ブランド・川崎メカニズム認証制度, <https://www.k-co2brand.com>, (参照 2024-01-21)

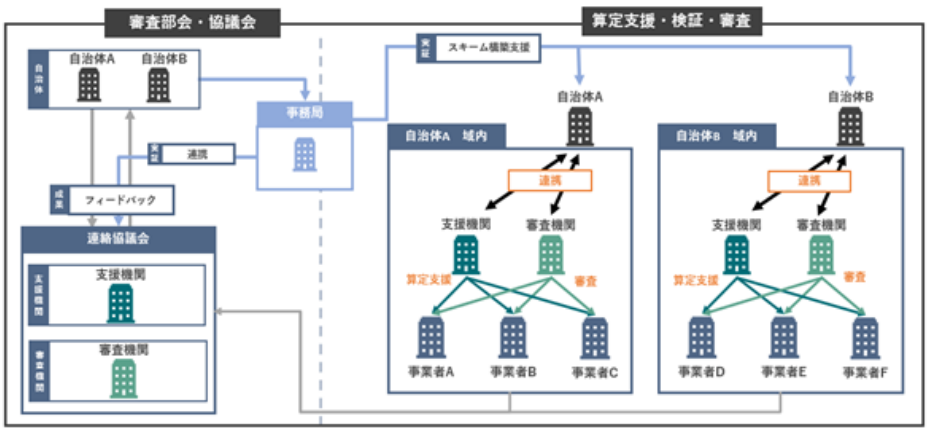


図 2　自治体内での脱炭素支援スキームイメージ

第三者認証型 CFP 包括算定制度を通じた企業内算定と検証の在り方の検討

Study on In-house Calculation and Verification by the CFP Management System

○神谷 優大*[1)]、シンウン ニカンドラ [1)]、澤村 翔太 [1)]、中澤 克仁 [1)]、鶴田 祥一郎 [1)]

Yuta Kamiya, Shin Woong Nikandra, Shota Sawamura, Katsuhito Nakazawa, Shoichiro Tsuruta

1) 一般社団法人サステナブル経営推進機構

* kamiya@sumpo.or.jp

1. はじめに

カーボンニュートラル対応のため、Scope3 の算定開示の需要も高まると同時に、製品カーボンフットプリント（以降、CFP）の情報開示がますます求められるようになっている。それに伴い、信頼性の高い CFP の需要も拡大しており、サプライチェーン全体で迅速な対応が求められている。こうした需要に応えるため、2020 年にサービス提供を開始した「第三者認証型 CFP 包括算定制度」では、企業が自社の製品やサービスについて信頼性の高い CFP 情報開示を行うことを後押ししている [1)]。

本制度では、算定と内部検証を高い精度で実施するために、マネジメントシステム及び社内算定ルールを構築する。それにより、企業は情報開示に迅速に対応できるだけでなく、環境配慮設計にも取り組むことができる。

現在のビジネスモデルを超えることを目指すのであれば、まずは企業自身が情報開示に関する知識や経験の蓄積を積むことが重要である。本報では、本制度を通じて企業が得られる効果について述べ、社内算定と検証の在り方ついて報告する。

2. 第三者認証型 CFP 包括算定制度について

2.1 制度概要

本制度は、制度運営事務局である（一社）サステナブル経営推進機構が、企業の算定・検証を含むマネジメントシステムの妥当性を認証する仕組みである。本制度では、次の三点の構築を企業に求めている。図 1 に示す三点である。まず、(1) マネジメントシステムの構築では、算定と検証の仕組みをはじめ、組織としてカーボンニュートラルを達成していくための体制構築を行うことを求めている。その一環として社内ガイドラインとしてマネジメントシステムの運用を定めることを要求している。次に、(2) 企業内で統一して運用する CFP 算定ルール（Internal Product Category Rule、以降 I-PCR）の構築、最後に (3) 算定した CFP を検証する内部検証体制を整えることを要求している。

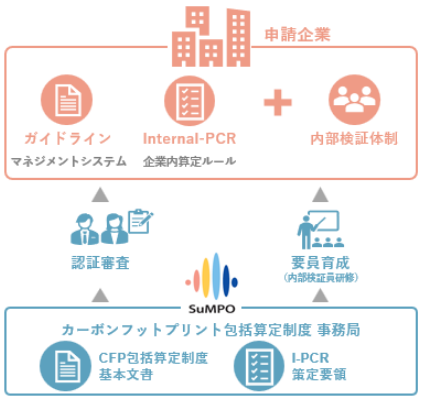


図 1　第三者認証型 CFP 包括算定制度の概要

本制度の狙いは、算定と検証の仕組みを含んだマネジメントシステムの構築を通じた、情報開示のための強い社内基盤を構築することである。図 2 に示すように、マネジメントシステムを構築することで、自社製品の CFP を迅速かつ継続的に算定でき、積極的な情報開示ができる。さらに、カーボンニュートラルに向けた取り組みの具体的な取り組みや環境配慮設計を加速させることも可能である。

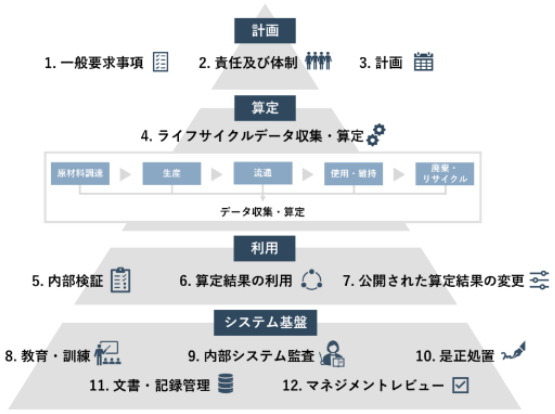


図 2　マネジメントシステム概要

2.2 社内算定ルールの構築

本制度では、申請企業は I-PCR を作成することを制度取得の条件としている。I-PCR には自社独自のデータ収集ルールやサイトごとの基準等、自社の状況を具体的に反映した I-PCR の構築が求められる。図 3 に示

すように、申請企業は制度が指定する I-PCR 策定要領に基づき、社内算定ルールの構築を行う。I-PCR 策定要領は、ISO14040 並びに ISO14044 に準拠しており透明性を担保している。

本制度の特徴は２点ある。まず、先進的な取り組みも算定ルールに含むことができるとしている。I-PCR 策定要領では、CFP 算定におけるマスバランスアプローチの活用や再エネ証書の活用などを示している。これらは LCA での活用において国際的な合意が取れていないまたは議論が生まれる手段であるものの、それらを申請企業が妥当な用い方をできるよう指南している。

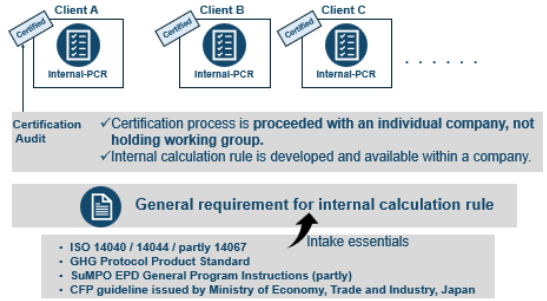


図３ Internal-PCR 策定イメージ [2)]

2.3 内部検証体制

本制度では CFP 算出のためには内部検証の過程を経ることを必須としている。検証員は制度が指定する研修プログラムの受講、試験への合格していることを必須とすることで、検証員の力量を担保している。なお、図 4 に示すように、管理責任者、内部システム監査員を設けることで、試験に合格した内部検証員が検証を行っているか、検証を経て算定結果が取り扱われているか等を検証体制としての機能も担保している。

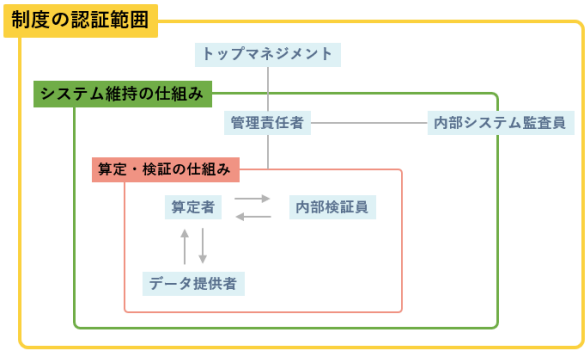


図４ 社内体制図

3. 算定と検証の在り方と課題

サプライチェーンで連携した CFP 算定と検証の仕組みづくりが課題として挙げられる。具体的には、自社の範疇を超えた段階で発生する製品やサービスの削減効果の反映が課題であり、本制度では考慮しきれていない。例えば、サーキュラーエコノミーが高まる中、再資源化事業者と素材メーカーの連携は不可欠であるものの、素材メーカーと再資源事業者間の連携が可能である制度ではない。サプライチェーンでのカーボンニュートラル達成のためには、関連するステークホルダーの連携ができる制度設計が重要である。

同時に、Science Based Targets Network やサーキュラーエコノミー等、自然資本に関連した情報開示対応が求められる中、CFP に加え、資源消費等の他領域評価への対応が重要であるが、本制度は CFP のみに留まっている。他方、実務における課題として、多領域評価に関する社内検証の蓄積がまだまだ少なく、多領域評価を検証できる内部検証員の人材確保及び力量担保が課題である。

4. 最後に

2020 年にサービス提供を開始した本制度では、取得企業も増加しており、CFP に係る情報開示では実績を蓄積してきた。しかしサーキュラーエコノミーをはじめ、CFP を超えた情報開示に関する需要拡大が見込まれているため、本制度のマネジメントシステムを通じた算定と検証の仕組みを多領域評価に応用していくことは効果的だろう。他方、社内に多領域評価を検証できる人材の育成は課題であり、本制度を通じて人材を育成することも重要である。マネジメントシステムの構築、人材育成を通じて CFP を超えた情報開示が期待される。

引用文献

1) （一社）サステナブル経営推進機構：“SuMPO/第三者認証型カーボンフットプリント包括算定制度とは”，（一社）サステナブル経営推進機構, <https://sumpo.or.jp/scheme/about.html>,（参照 2025-01-16）

2) Kamiya, Y., Sawamura, S., Shin Woong N., Nakazawa, K., Tsuruta, S: The 16th Biennial International Conference on EcoBalance 2024, Sendai, (2024).

地理情報を考慮した環境影響評価 ― LCA の TNFD への活用

Life Cycle Assessment with Considering Geographic Information Application of LCA to TNFD

○大橋憲司
Kenji Ohashi
株式会社資生堂
kenji.ohashi@shiseido.com

1. 背景

世界経済フォーラムは、グローバルリスクレポート 2024 のなかで、「極端な気象現象」「地球システムの重大な変化」に次いで「生物多様性の損失と生態系の崩壊」「資源の枯渇」を世界経済に対する長期のリスク要因として警鐘を鳴らしている。こうした背景から TNFD は、生物多様性や資源など、自社の事業と自然との関係性と、それに伴うリスクと機会について把握し、また必要に応じて緩和や適応措置を施すことによりレジリエンスを高めることを企業に求めている。

LCA は、経済活動に伴う生物多様性への影響側面を評価しうる強力なツールであるが、放射強制力の変化に対して一様に取り扱われる GHG 排出と比べ、生物多様性や自然に関わる問題は、地域単位の無数の問題が集合して全球的な問題を形成しているという点で大きく事情が異なっている。特に、農産物や農産物を加工した素材の生物多様性評価においては、同じ作物を利用した場合であっても、栽培国／地域により反収や農地開発の実態が大きく異なることから、地理情報を考慮することが極めて重要であり、影響評価手法の一つである LIME3 では、国／地域別の被害係数が用意されている。しかしながら実際の評価の際に、個別のプロセスごとに適切に国／地域別の係数を適用することは、その煩雑さのため実務上困難であった。

本研究では、そうした課題の解決を目的として、一般的な LCA の手順であるインベントリ分析の後で、貿易統計や農業統計などを用いてインベントリに地理情報を付与するとともに、栽培国／地域にあわせて値を補正した。付与した地理情報に基づいて国／地域別の被害係数を採用し、影響評価を実施することにより、影響評価結果の地図上での可視化を試みた。

2. 方法

2.1 評価対象と範囲

株式会社資生堂の 2023 年の化粧品事業を評価対象とした。GHG プロトコルが定めるスコープ 1、スコープ 2、スコープ 3 に関わる活動を「原材料調達」「生産（直接操業）」「流通」「使用」「廃棄」「その他」に再構成し、評価を実施した。

2.2 2 次データおよび影響評価手法

2 次データについては IDEA v3.1 を用いた。影響評価は LIME3 増補版により実施した。

2.3 農作物加工品への地理情報の付与

当社が調達する原料のうち、農作物から加工した油脂、脂肪酸、高級アルコール、界面活性剤、保湿剤、アルコールなどについて、調達量および成分の分子構造に加え、取引先へのヒアリング調査の結果をもとに素材となっている作物種および作物量を特定した。脂肪酸や保湿剤の一種であるグリセリンのように複数の植物油から生産可能な成分においては、生産量、輸入量、価格、植物油ごとの脂肪酸組成分布をもとに入手可能性と生産可能性を考慮した。

次に、調達国および作物ごとに FAOSTAT[1)]の貿易マトリクスを用いて、輸入元となる国／地域を特定した。油脂加工品については、作物の状態での輸入量に加えて、油脂として輸入された量についても作物相当量に換算して、輸入元となる国／地域ごとに作物量を求めた。なお、油脂として輸入している場合であっても、輸入元の国／地域で当該作物を栽培していない場合（海外から作物を輸入して搾油し輸出している場合）については、その国／地域の寄与を考慮しないこととした。また、調達国／地域においても当該作物の生産が行われている場合には、調達国／地域の生産量から輸出量を差し引いた値を調達国の寄与分とした。取引先へのヒアリング調査により、栽培国／地域が特定される場合には、ヒアリング結果を優先して採用した。

なお、詳細な製造過程の推測が困難な原料（植物エキス類、天然香料など）については、こうした地理情報の付与とインベントリの補正を実施していない。

2.4 土地利用および土地転換のインベントリ補正

輸入元の国／地域ごと、作物ごとに FAOSTAT の生産量および栽培面積をもとに反収を求め、2.3 で計算した作物相当量を反収で除することで土地利用面積を求めた。また、輸入元の国／地域ごと、作物ごとに、2001 年から 2021 年までの 20 年間の農地面積の年間平均増加量を 2021 年における作物生産量で除したものを、

作物重量あたりの森林からの土地転換面積とした。農地面積の減少がみられる作物があった場合には当該作物からほかの作物への転作が起こったものとみなし、農地減少面積の総和を、農地面積が増加した作物ごとに増加面積の比率に応じて割り振る形で土地転換面積から控除した。

2.5 水消費のインベントリ補正

2.3 で求めた輸入元の国／地域ごとの作物量と、Water Footprint Network の報告[2]をもとに、作物栽培における雨水および灌漑水の消費量を求めた。同報告書では、表層水および地下水を合わせて Blue water としていることから、同一プロセスとして IDEA に登録されている「資源, 蒸散_表層水, 水圏, 消費」と「資源, 蒸散_地下水, 水圏, 消費」のインベントリ量比に応じて表層水と地下水に按分した。

3. 結果

通常どおり、プロセスごとの活動量に IDEA のインベントリ量を乗じた場合の森林からの土地転換面積と、FAOSTAT をもとに国／地域ごとの農地面積推移により評価した土地転換面積を図 1 に、生物多様性の評価結果（EINES）を図 2 に示す。

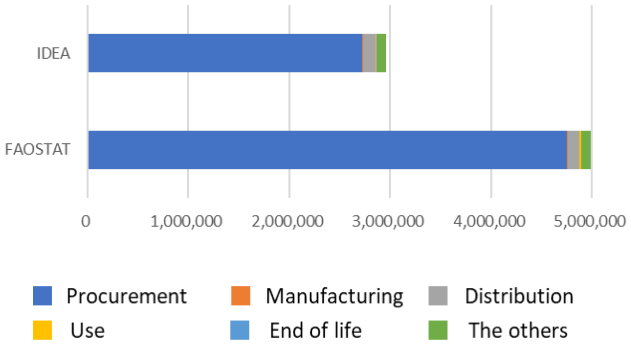


図 1　森林からの土地転換面積（m^2）

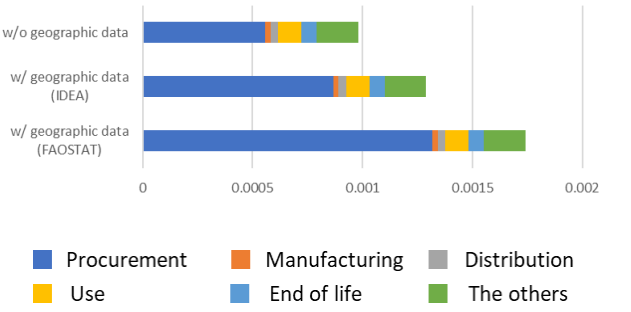


図 2　生物多様性被害（EINES）

生物多様性の評価にあたっては、地理情報を付与しない通常の評価（ケース 1）、地理情報のみを付与しインベントリの大きさを補正しない評価（ケース 2）、地理情報を付与しつつインベントリを補正した評価（ケース 3）を行った。ケース 1 とケース 2 の違いは、国／地域による被害係数の大きさの違いに起因するものであり、ケース 2 とケース 3 の違いはインベントリの大きさ（森林からの土地転換面積）の違いによるものである。インベントリの大きさだけでなく栽培地によっても評価結果に大きな差が生まれ、生物多様性評価に地理情報を考慮することの重要性が示唆される結果となった。今回の評価では、対象作物の非生産国からの輸入については評価対象から除外したが、そうした国からの輸入量は生産国からの輸入量に比べて限定的であり、評価全体への影響は軽微であった。

4. 最後に

本報告において、以下の 4 点の課題について議論を深めたい。

(1) LCA の手順に地理情報を外挿することの適切性
(2) 地理情報を外挿する方法論
(3) 地理情報に基づくインベントリ修正方法の適切性
(4) LCA と TNFD シナリオ分析（事業の持続性評価）の性質の同一性／相違性

一般的に LCA では、副産物を生産するプロセスの評価においては、全体の環境影響を主産物と副産物との間で按分することが通例である。一方で、例えば事業の継続ないし成長において一定量の主産物が不可欠な場合には、当該量の主産物を生産するに足るプロセスおよび原料の確保が必要となる。それによる環境影響全体が事業継続においてリスクとなりえるかという視点が求められる点が、一般的な LCA と TNFD シナリオ分析との相違点と言えるかもしれない。

本研究により、従来の LCA の手順に地理情報を付与することにより、生物多様性に関する評価結果と、その解釈の解像度を大きく高めることができる確証を得た。統計データを活用することで網羅性を担保しながら、取引先ヒアリングの割合を増やすことで評価結果の信頼性を向上させ、さらには認証原料への切り替えやトレーサビリティの明確化といった企業努力による生物多様性被害の低減効果やレジリエンスの改善効果を示すことにより、企業とステークホルダー間のコミュニケーションに LCA は新たな役割を担いうるものと確信する。

引用文献

1) FAOSTAT, https://www.fao.org/faostat/en/#home
2) M. M. Mekonnen *et al.* (2010) Value of Water Report: 47: The green, blue and grey water footprint of farm crops and derived crop products

口頭発表セッション

2025年3月7日(金) 11:00 ~ 12:20 D会場：2317中講義室（3F）

[3-D2] 電子部品

座長：松八重 一代 (東北大学)

11:00 ~ 11:20

[3-D2-01]

半導体用シリコンウェハのインベントリデータに関する現状分析と課題整理

*畑山 博樹[1]、竹本 創[1]、内田 紀行[1]、片岡 祥[1]、山木 雄大[1] (1. 産業技術総合研究所)

11:20 ~ 11:40

[3-D2-02]

解体による部品表作成とICP分析を用いた電子機器のライフサイクル評価

*松永 彩那[1]、柏尾 南壮[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. Fomalhaut Techno Solutions)

11:40 ~ 12:00

[3-D2-03]

半導体材料に着目した水消費と水枯渇への影響

*田中 幸希[1]、張 政陽[1]、松八重 一代[1] (1. 東北大学)

12:00 ~ 12:20

[3-D2-04]

半導体製造のCVDプロセス材料に着目したカーボンエミッションの試算

*竹本 創[1]、山木 雄大[1]、Nguyen Thuy[1]、畑山 博樹[1]、岡田 直也[1]、片岡 祥[1]、深沢 正永[1]、右田 真司[1]、内田 紀行[1] (1. 産業技術総合研究所)

©日本LCA学会

半導体用シリコンウェハのインベントリデータに関する現状分析と課題整理

Current Status of Inventory Data for Semiconductor Silicon Wafer Production

○畑山博樹*[1)]、竹本創[1)]、内田紀行[1)]、片岡祥[1)]、山木雄大[1)]
Hiroki Hatayama, Soh Takemoto, Noriyuki Uchida, Sho Kataoka, Takehiro Yamaki
1) 産業技術総合研究所
* h-hatayama@aist.go.jp

1. はじめに

社会のデジタル化とグリーン化を進めるうえで、デジタル産業のサプライチェーン排出量削減がもとめられている。半導体製造の Scope3 では、原材料調達の 15%をシリコンウェハが占めると推計されており[1)]、GHG 削減に向けたプロセス改善が期待されている。しかし、ウェハ製造における GHG 排出のホットスポット分析に必要となるインベントリデータは精査されていない。本研究では、既存のデータベースや文献に示されているシリコンウェハのプロセスインベントリ情報を整理した。そして、それら情報に基づいた GHG 排出量の算定結果の比較から、インベントリデータの課題を明らかにした。

2. シリコンウェハ製造のシステムとプロセス

半導体は、シリコンウェハ上に回路を形成して数百のチップを作成し、それらを分離、パッケージングして製造される。本研究では、ウェハ製造のシステムを、①珪石の融解、還元による金属シリコンの製造②トリクロロシランを経て高純度化する Siemens 法による高純度多結晶シリコンの製造③Chochralski 法（CZ 法）によるロッド状の単結晶シリコンの製造④ロッドをスライスしてのシリコンウェハ製造の 4 つのプロセスに分割してインベントリの分析を行った（図 1）。

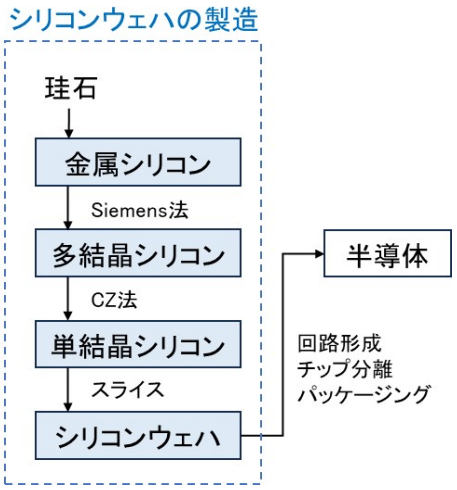


図 1 シリコンウェハ製造のシステムとプロセス

太陽電池向けのウェハは純度 6N～9N で多結晶シリコンも用いられるのに対し、半導体製造に用いられるのは 11N 以上の単結晶シリコンであり、高純度化・単結晶化のための追加的なエネルギー投入が生じている。

3. 利用可能なインベントリデータ

ウェハ製造のプロセスインベントリデータの整備状況を、インベントリデータベース ecoinvent (v3.10)、Sphera MLC (v2024.2)、IDEA (v3.4)および公開文献を対象に調査した。ecoinvent には太陽電池用と半導体用の別にウェハのデータが存在しており、半導体用は図 1 の 4 つのプロセスを遡及してのデータの確認が可能な構造となっている。IDEA は太陽発電用のウェハのデータのみが提供されており、主原料として金属シリコンが直接投入されている。MLC は金属シリコンのデータは存在するが、高純度化されたシリコンやウェハのデータは提供していない。また、半導体やウェハ製造の GHG 排出量算定は業界や学術研究としても取り組まれているが、プロセスインベントリを確認できる文献は限定的であった[2)]。

4. GHG 排出量算定の課題

整理したインベントリ情報を基にウェハの GHG 排出量を算定した結果、いずれの場合でも多結晶シリコン製造、単結晶シリコン製造のプロセスでの電力に大部分が起因していた。しかしながら、想定されている電力消費量は情報源によって差があり、GHG 排出原単位に大きく影響している。また、電力以外で寄与が大きい投入材料にも違いがみられた。既存のプロセスデータはいずれも 2000 年代の技術情報を参考に作成されており、ウェハサイズの増加や製品化歩留も考慮した近年の技術情報の反映が、近年のウェハ製造プロセスの環境影響を正しく評価するために必要と考えられる。

引用文献

1) Nagapurkar, P., Nandy, P., Nimbalkar, S., 2023. *Sustainability* 16, 218.
2) Fan, M., Yu, Z., Ma, W., Li, L., 2021. *Silicon* 13, 3177–3189.

半導体材料に着目した水消費と水枯渇への影響

Water Scarcity Footprint of Semiconductor Materials

○田中幸希*[1)]、張 政陽[1)]、松八重 一代[1)]
Kouki Tanaka, Zhengyang Zhang, Kazuyo Matsubae
1) 東北大学
* koki.tanaka.s4 @dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

半導体はAI等の新技術を支える存在である反面、製造におけるエネルギー、 水、化学薬品等の大量消費に起因する地球温暖化や水枯渇への影響といった環境的負荷を無視することはできない。TSMC台湾工場の干ばつによる操業への影響が話題を集め[1)]、半導体製造工場が引き起こす水枯渇への関心が高まり学術の分野においても包括的な研究がなされた[2)]。しかし現状半導体材料に関する水枯渇への影響について研究はあまり進んでいない。 半導体の主要材料であるシリコンウェハとその原料である高純度ポリシリコン(HPS)はその高度な生産工程において超純水(UPW)等の水を大量に消費する。さらにHPSの原料となる金属シリコンやシリカ製造の水消費そのものは比較的少ないものの、中国やアメリカでおよそ半分が製造され[3,4)]、水に豊かとは言えない国での生産という視点から水枯渇への影響が懸念される。 このように半導体材料の筆頭格であるシリコンウェハサプライチェーン(シリコンウェハSC)は水枯渇に寄与している可能性がある。これを解明するに当たってはシリコンウェハSCがどのように世界で展開されているか把握する必要がある。そこで本研究では、資源SC同定手法の開発、並びにこれをシリコンウェハSCに応用して地理的解像度の高いシリコンウェハSC同定を行う。そしてミッドポイントLCAによる評価を通して、 2021年の同材料生産に紐付く水消費ならびに水枯渇を明らかにする。

2. 手法

2.1 SC解析

本研究では資源SC同定に関して2つの手法を新規に提案する。特定のSCを全体の流通から抽出する遡及分析と全体の流通が不明の状態から需給間の関係値に基づきこれを推定する関係性に基づいた流通の推定について以降で記載する。

2.1.1 遡及分析

資源xの全体のSCから国i(i=1,⋯,n)の特定の製品j (j=1,⋯,m)を経て最終消費される資源xのSCを抽出する。資源xは国i間の製品j間で流出入(T)する他にプロセスj間外からの流入、そして流入を行う。これをOとし、資源xの全体のSCをT, Oそして最終需要FDとして整理表現することで、この最終需要が誘発する国iの各製品j (j=1,⋯,m)の生産量を遡及的に分析することが可能となる。国i製品jにおける流出入量は以下のように数式で表現が可能である。

$$\text{総流入}_{i_n} = T_{i_(n-1)\to i_n} + \sum_{c(c\neq 1)} T_{c_n\to i_n} + \text{II}_{i_n} + \text{IL}_{i_n}$$
$$\text{総流出}_{i_n} = \sum_{c(c\neq 1)} T_{i_n\to c_n} + \text{OI}_{i_n} + \text{OL}_{i_n} + \text{FD}_{i_n}$$

総流入量と総流出量は等しいためこれらをVとして、またTを総流入量で除した各投入係数行列をA_T, として定義する。さらに国i製品jの最終製品製造に対する必要投入量(歩留まりの逆数)Y_{i_j}を対角成分に持つ$\text{diag}(Y_{i_j})$を用いると、最終需要FDが牽引する各国各製品への総流量ベクトルV_{FD}は以下のように表現できる。

$$\mathrm{A_T}\cdot \mathrm{V} + \mathrm{OI} + \mathrm{OL} + \mathrm{FD} = \mathrm{V}$$
$$(\mathrm{I} - \mathrm{A_T})^{-1}\cdot(\mathrm{OI} + \mathrm{OL} + \mathrm{FD}) = \mathrm{V}$$
$$\mathrm{V_{FD}} = \mathrm{diag(Y)}\cdot(\mathrm{I} - \mathrm{A_T})^{-1}\cdot \mathrm{FD}$$

V_{FD}は各国各製品への総流量を示すため、生産量(X)の算出のためには各投入係数行列A_Tを用いてV_{FD}の配分を行う。

$$\mathrm{X} = \mathrm{A_T}\cdot \mathrm{diag(V_{FD})}$$

本手法の詳細は補足にて記述する。

2.1.2 関係性に基づいた流通の推定

流通が不明という状況下、販売者i (i=1,⋯,n)から購入者j (j=1,⋯,m)への流通量Z_{ij}を求める手法として関係性に基づいた流通の推定を提案する。販売もしくは購入のいずれかに沿って理想流通量Z^I_{ij}を設定する。購入構成に重点が置かれる場合、販売者と購入者の関係性を購入構成に反映し、理想流通量Z^I_{ij}を設定する。これを基準としてラグランジェ未定乗数法もしくはRAS法を用いて、各流通量Z_{ij}を最適化していく。本手法の詳細は補足に後述する。

2.2 2.1.3 本研究への適用

シリコンウェハはシリカの採掘から、金属シリコン、HPSを経て製造される。シリカから金属シリコンそしてHPSとして消費されるまでのSCは遡及分析によって、金属シリコンからシリコンウェハへの流通は関係性に基づいた流通の推定によって分析を行った。本研究では、資本関係および国際関係を需給間の関係性の変数として採用した。販売者と購入者それぞれに

とっての理想流通量を策定し、ラグランジュ未定乗数法と RAS 法という 2 種類の解析手法を用いた計 4 通りの組み合わせについて解析を実施した。また、鉱山や工場の製造能力を基に、シリコンウェハ SC の理論的な解像度を拠点レベルにまで高めた。

2.3 水枯渇への影響評価

シリコンウェハの各製造プロセスの水インベントリデータを整備した。3.1.3 にて解明した鉱山、工場レベルまで地理的解像度を高めたシリコンウェハ SC と組み合わせることで水消費の場所と量を同定し、AWARE[5]を用いて水枯渇への影響評価を実施した。AWARE では世界中の各流域それぞれに水枯渇への影響を 0.1 (豊富)から 100 (枯渇)までの値として表した特性化係数(CF)が付与され、 これと水消費量(WR)と掛け合わせることで水枯渇フットプリント(WSF)が算出される。シリコンウェハ SC 全体の WR と WSF そして、材料 i に紐づく WSF を WR で除すことで求まる生産流域の平均的な CF_i さらに製造企業ごとのシリコンウェハ 1 枚が抱える WSF を算出することでシリコンウェハ SC の水枯渇への影響を多角的に解析した。

3. 結果

2021 年全世界のシリコンウェハ製造 SC に起因する WR は 108 Mt, WSF は 267Mt であった。図 2 に WR, CF, WSF を網羅的に表現した。

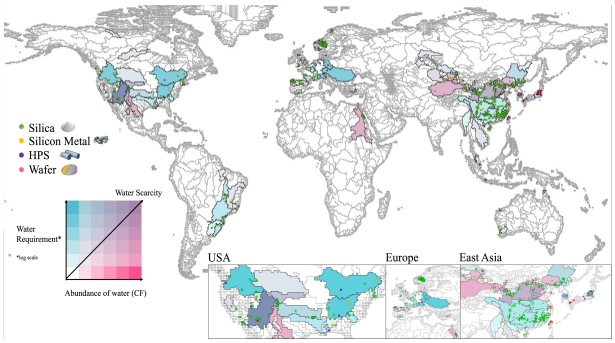


図 1. 2021 年のシリコンウェハ製造に起因する水への影響

WSF は WR と CF に分解可能であり、 図 1 にて青い流域は WR が大きいものの CF は小さいことを、ピンク色の流域はその逆を示す。 これらが重なる紫色の流域では WSF が大きくなり、アメリカ北東部, 西部, 東ヨーロッパ等で WSF の値が目立った。また、材料 i の生産流域の平均的な CF_i に関して、シリカや金属シリコンといった比較的上流の材料では 9.7 と 20.1, 一方で HPS やシリコンウェハーといった比較的下流の材料では 0.8 と 2.8 という結果であった。
最後に、製造企業ごとのシリコンウェハ 1 枚が抱える WSF を材料別に積み上げた結果を図 2 に示す。

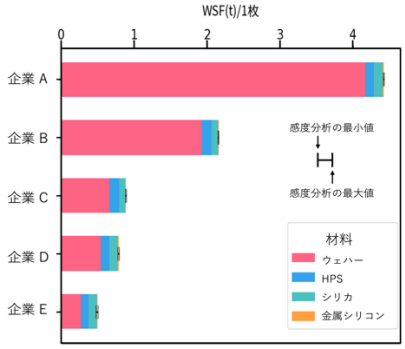


図 2. 各社のシリコンウェハ 1 枚が内包する WSF

流通戦略と最適化手法に関する 4 通りの組み合わせそれぞれにおいて需給間の関係値の変数を変更させた時に取りうる最大、最小値そして平均値とその構成を積み上げ棒グラフに示した. シリコンウェハー製造段階の寄与がいずれの会社においても半数を上回る。

4. 考察

2016 年の第 4 四半期における半導体製造の WR, WSF はそれぞれ 965, 12000 Mt であった[4]。これと比較するとシリコンウェハ SC の占める水枯渇への影響は半導体製造のそれと比較すると小さいことがわかった。しかし $CF_{シリカ}$ や $CF_{金属シリコン}$ が CF_{HPS} や $CF_{シリコンウェハ}$ より 4 倍以上大きいことから、最上流付近の原材料は先端材料よりも”水”について考慮された製造拠点の立地がなされにくいことが示唆された。さらに半導体製造工程や先端材料の生産における水への意識は年々高まりをみせ、技術の需要が高まっている一方、最上流付近の原材料ではそのような技術の波及は弱く削減ポテンシャルは高くない。将来的に水枯渇への影響の加速が懸念される。

5. 引用文献

1) Yang S.: “台湾で干ばつ深刻化、世界の半導体不足に拍車も”, THE WALL STREET JOURNAL, (オンライン), 入手先< https://jp.wsj.com/articles/the-chip-shortage-is-bad-taiwans-drought-threatens-to-make-it-worse-11618599196 > (参照 2025-1-20)
2) Frost K. and Hua I.: Water Resour. Ind., 22, (2019), pp. 100-115
3) USGS: “Advance Data Release of the 2021 Annual Tables”, (2022)
4) USGS: “U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2022”, (2023), pp.150-151
5) Boulay AM. *et. al.*: Int. J. LCA, 23, (2018), pp.368-378

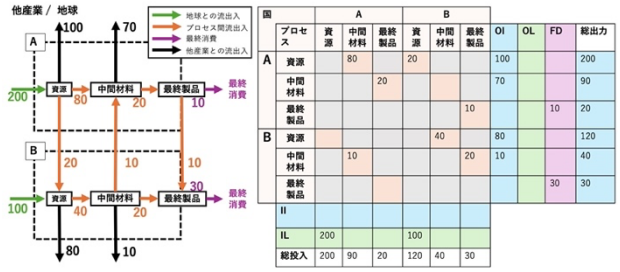
Supporting Information

1. 遡及分析

資源 x の全体 SC を T, OL , IL, OI , II, FD として表現することで, 最終需要が誘発する各製品 j (j=1,⋯,m)での生産量を訴求的に分析することが可能となる. 資源 x が製品 1 から m までを順番にたどり最終消費される場合を考える. 国 i の製品 j に流入する経路を以下の 3 つに定義する.

・他産業, 地球からの流入(T)
・国 i での製品 j-1 からの流入(II), 国内生産
・国 h (h≠i)の製品 j からの流入(IL), 輸入

国 h (h≠i)の製品 j-1 を輸入したものが必ずしも全て国 i でのプロセス j にて消費されるわけではないためこのような定義を行った. これにより輸入材と国内材の非競争的な利用を表現することができる. 具体的に国 i(i=A, B)の特定のプロセス j (j=資源, 中間材料, 最終製品)に渡る資源 x の SC を同定してみる. 図 S-1 左図のように国 i の製品 j に資源 x が流入しており, それを行列形式で表現したものが図 S-2 の右図である. 国 A の中間材料は自国内の資源からの生産と国 B からの中間材料の輸入から構成されている.



国		A			B			OI	OL	FD	総出力
	プロセス	資源	中間材料	最終製品	資源	中間材料	最終製品				
A	資源		80		20			100			200
	中間材料			20				70			90
	最終製品						10			10	20
B	資源					40		80			120
	中間材料		10				20	10			40
	最終製品									30	30
II											
IL		200			100						
総投入		200	90	20	120	40	30				

図 S-1. 資源 X 流通の具体例

ロスが発生しないとして (歩留まりが 1 である)仮定する時, Y は単位行列となる. そして本文 3.1.1 で記載した手法を用いることで, 図 S-1 左図の資源 x の全体 SC から最終消費に駆動される国 A, B それぞれの資源, 中間材料, 最終製品の生産量を図 S-2 のように抽出することができる.

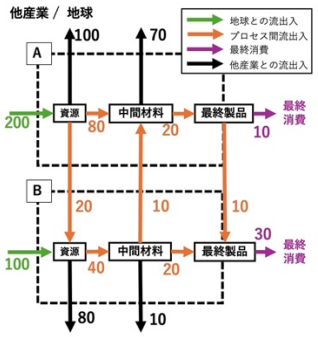


図 S-2. 最終消費が駆動する資源 x の SC

2. 関係性に基づいた流通の推定

販売者 i から購入者 j への理想流通量 Z^I_{ij} の設定方法について記載する. “理想”とは販売者もしくは購入者にとって関係性が深い相手と積極的に取引（販売/購入）することを指し, まず販売者, 購入者のどちらにとっての理想を設定するかを考えなくてはならない. 購入者の立場から理想流通量 Z^I_{ij} を設定する場合を考えると, 販売者 i 購入者 j 間の関係性に基づいて購入者 j の総購入量 Z^I_j を R_{ij} の割合で分配していく. R_{ij} を関係性の変数$x_1 \cdots x_n$とそれに作用する関数 f を用いて以下のように表現する.

$$R_{ij} = f(x_1 \cdots x_n)$$

本研究では“企業の国籍の一致”, “資本関係の存在”をそれぞれ変数 X_1, X_2 とし, 以下のような関数を導入した. 例えば企業である販売者 i と購入者 j に資本関係がある場合, x_2 ($0< x_2 <1$)という変数を max 関数に与える.

$$f = \max(X_1, X_2)$$

$$X_h = \begin{cases} x_h\ (ij\text{の需給間にて}h\text{の関係性がある場合}) \\ 0 \end{cases}$$

$R_{ij} \neq 0$ である場合, j の総購入量(Z^I_j)と R_{ij} との積を理想流通量 Z^I_{ij} として割り当てる. 一方で $R_{ij} = 0$ である場合は j の販売総量(Z^I_j)の未割り当て分を均等に配分する. これにより関係性に基づく流通と他の関係性のない ij 間の流通は多角化するという流通戦略を表現することができる. 購入者の立場で理想流通量 Z^I_{ij} を設定するため, 販売者 i の理想流通量 Z^I_{ij} の総量と既定の総販売量(Z^I_i)が不一致となる. そこで RAS 法, ラグランジェ未定乗数法を用いて, 理想流通量 Z^I_{ij} を基準としながらも i の理想流通量 Z^I_{ij} が i の販売総量(Z^I_i)に一致するように最適化を実施し流通量 Z_{ij} を算出していく. ラグランジェ未定乗数法では流通量 Z_{ij} と理想流通量 Z^I_{ij} の離率の総和 f を最小にするようにして最適化を行った.

$$f = \Sigma_i \Sigma_j \left(\frac{z_{ij} - z^I_{ij}}{z^I_{ij}}\right)^2$$

制約条件

$g_j = Z^I_j - \Sigma_i z_{i,j} = 0$

$h_i = Z^I_i - \Sigma_j z_{i,j} = 0$

Z_{ij} : iからjへの流通量
Z^I_j : jの総購入量
Z^I_i : iの総販売量
z^I_{ij} : iからjの理想流通量

$$L = \frac{1}{2} \Sigma_i \Sigma_j \left(\frac{z_{ij} - z^I_{ij}}{z^I_{ij}}\right)^2 + \lambda_j(\Sigma_i z_{ij} - z^I_j) + \mu_i(\Sigma_j z_{ij} - z^I_i)$$

また, 本研究では制約の都合上、非負条件をつけることができないため本研究ではラグランジェ未定係数法で得た解を再度, 非負条件の元非線形計画問題によって最適化する手法を採用した.

半導体製造の CVD プロセス材料に着目したカーボンエミッションの試算

Estimation of carbon emissions focused on CVD process materials for semiconductor manufacturing

○竹本創*[1)]、山木雄大[1)]、Nguyen Thuy[1)]、畑山博樹[1)]、岡田直也[1)]、片岡祥[1)]、深沢正永[1)]、右田真司[1)]、内田紀行[1)]

Soh Takemoto, Takehiro Yamaki, Nguyen Thuy, Hiroki Hatayama, Naoya Okada, Sho Kataoka, Masanaga Fukasawa, Shinji Migita, Noriyuki Uchida

1) 産業技術総合研究所

* takemoto.soh@aist.go.jp

1. 緒言

半導体製造において NF_3、CF_4 や WF_6 などのフッ素系ガスは、微細構造を形成するための成膜やエッチングプロセスそして製造装置内部のクリーニングなどに用いられており、欠かすことができない[1)]。とりわけ NF_3 や CF_4 ガスなどは地球温暖化係数 (GWP)が高いことが知られており、これらの使用量を把握し環境に配慮した製造を行うことが重要である[2)]。また半導体製造は、これらのプロセスガスを大量に使用し、かつ、ほとんど廃棄することを特徴とする産業で、環境負荷を評価するために、ガスの使用量とガス自体の製造に係る CO_2 排出量＝カーボンフットプリント(CFP)の定量的評価が必須である。

ガス使用量については、各製造拠点で目的の半導体製品に応じた様々な使い方がされている中、製造プロセスをモデル化し使用量の算出手法を確立することが必須である。また半導体製造に用いられるプロセスガスは、特殊なものも多く、CFP のデータベースに掲載されていない場合も多い。データベースに記載のあるガスについても、半導体は不純物の混入を忌避する産業である性質上、99.99%から 99.999%へ高純度化されたガスが利用されていることから、高純度化のコストも CFP に反映させる必要がある。現在、これら半導体プロセスガスの CFP を算出することが課題となっている。

本研究では、トランジスタやメモリなどの半導体に最先端からレガシーの技術世代まで幅広く用いられる、タングステン(W)の成膜に注目した。具体的には WF_6 ガスを用いた Thermal Chemical Vapor Deposition (熱 CVD)プロセスにおいて、CVD 装置の参考にしたモデルプロセスの構築とガス使用量を算出した。加えて WF_6 の製造に係る CFP を化学プロセスシミュレーションにより算出し、W 薄膜の熱 CVD プロセスにおけるプロセスガスの CO_2 排出量の評価手法の確立を目指す。

2. CVD プロセスの解析

2.1 CVD プロセスのモデル化

図 1 に W 薄膜の CVD プロセスモデルを示す。装置内のガス反応室に WF_6、NF_3、Ar、SiH_4、H_2、N_2 を導入し、加熱ランプを用いたステージ上で、Si ウエハ上に枚葉式で成膜、その後、反応室内のクリーニング等を行う。プロセスは以下の 4 つのステップに大別でき、①～④を、複数回繰り返す。

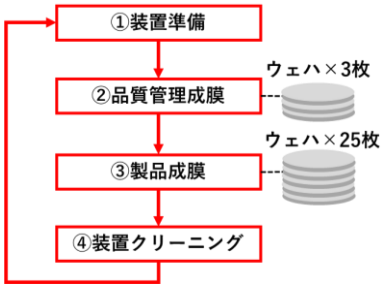


図 1 W 薄膜の CVD プロセスモデル

① 装置準備

WF_6、Ar、SiH_4、H_2、N_2 を使用して、反応室の内壁面等に、厚さ 600 nm の W 膜を被覆するモデルとした。これはパーティクルや不純物がウエハへ付着することを防ぐために必要なプロセスである。

② 品質管理成膜

WF_6、Ar、SiH_4、H_2、N_2 を使用して、厚さ 300 nm の W 膜を 3 枚のウエハ上へ成膜するモデルとした。これは製品成膜前に膜の成膜速度と品質を検査するために必要なプロセスであると共に、製品の 1 枚目の膜厚が変動する事が多い事から安定化の為にも必要である。

③ 製品成膜

WF_6、Ar、SiH_4、H_2、N_2 を使用して、厚さ 300 nm の W 膜を 25 枚の Si ウエハ上に成膜するモデルとした。

④ 装置クリーニング

NF_3、Ar、N_2 を使用して、反応室の内壁面等の残存物等を除去(クリーニング)し、「①装置準備」の前の初期状態へ戻すモデルとした。

2.2 ガス使用量の評価

図 2 に、W プロセス全体に使用されるガスの体積比率と質量に換算した比率を示す。図 1 に示したプロセスモデルを用い、各ステップにおける使用量を積算して求めた。主にキャリアガスや希釈ガスとして使用されている Ar の使用量が最も多く、次いで H_2、N_2、NF_3 となった。一方で、質量という観点では、分子量が 297.83 の WF_6 が約 9%の比率を占めた。熱 CVD で使用している WF_6 のプロセスレシピから、WF_6 の使用効率（W 薄膜の成膜に寄与した WF_6 と廃棄された WF_6 の割合）を計算したところ、約 17%となり、残りの 8 割以上の WF_6 を廃棄していることになる。

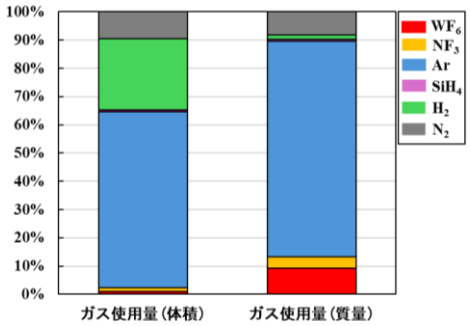


図 2 プロセスガスの使用量（体積、質量）割合

2.3 ガスの CO_2 排出量の評価

表 1 に示す CFP データと図 2 のガス使用量から求めた W プロセス全体で排出される CO_2 は、①～④のトータルで 6.7 kg であった。図 3 は、各プロセスガスの CO_2 排出量の比率である。NF_3 が最も影響が大きく 50%以上を占める。次いで Ar と WF_6 であり、NF_3 を含めこれらを合計すると 98%を占める。これらのガス使用量の低減や、ガス製造に係る CFP を低減したグリーンなプロセスガスを使用することで、総排出量を低減する対策が有効である。特に NF_3 は、他の半導体製造プロセスでも多用される販売量が多いガスであり、クリーニング効率の向上や頻度削減などの対策をすることで、半導体製造全体で CO_2 排出を抑える効果が高い。

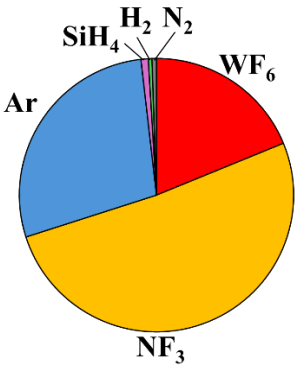


図 3 各プロセスガスの CO_2 排出量の比率

表 1 プロセスガスの製造に係る CFP データ

	計算に用いたデータベース
WF_6	本研究で算出 [3]
NF_3	162319205pJPN 三フッ化窒素, AIST-IDEA Ver.3.4[4]
Ar	Argon production, liquid - RoW - Argon, liquid, ecoinvent 3.11
SiH_4	Silane (approximation) RER, MLC Database Premium - Chemicals 2024, LCA for Experts,
H_2	162312000mJPN 水素ガス AIST-IDEA Ver.3.4[4]
N_2	Industrial gases production, cryogenic air separation - RoW - nitrogen, liquid, ecoinvent 3.11

3 高純度化した WF_6 の CFP を用いた解析

3.1 高純度化した WF_6 の CFP の評価

本研究では、WF_6 の CFP として、12.9 kg-CO_2/kg-WF_6 を算出した [3]。しかし、実際の半導体製造プロセスで用いられるガスは、高純度精製プロセスに係る CFP を考慮する必要がある。そのため、現在、高純度化した WF_6 の CFP について化学プロセスシミュレーションを用いて評価を進めている。図 4 に WF_6 の高純度精製プロセスを示した。

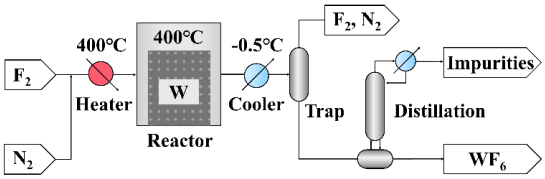


図 4 WF_6 の高純度精製プロセス [5,6]

3.2 CO_2 排出量の再評価

高純度化した WF_6 の CFP を用いた、CO_2 排出量の再評価の詳細は、当日発表予定である。

4 まとめ

モデル化した W 薄膜の熱 CVD プロセスにおけるガス使用量を算出した。さらに、プロセスガスの製造に係る CFP データを用いてプロセス全体での CO_2 排出量を算出し、各ガスの寄与を明確にした。この手法は、半導体製造の CO_2 排出量の低減方法の探索に有効である。

引用文献

1) フッ素化学入門−先端テクノロジーに果たすフッ素化学の役割−日本学術振興会・フッ素化学第 155 委員会−編三共出版株式会社(2004) p297～303
2) L. Boakes, et al., imec, “Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of CMOS Logic Technologies” IEDM 2023
3) 竹本創, Nguyen Thuy, 畑山博樹, 岡田直也, 片岡祥, 内田紀行, 山木雄大：“分離技術会年会 2024”，くにびきメッセ, (2024), 講演要旨集 p.48
4) IDEA Ver.3.4(2024/04/30) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ
5) 公開特許公報(A) 平 1-234301「ガス状金属弗化物の製造方法」三井東圧化学株式会社
6) フッ素化学入門−基礎と実験法−日本学術振興会・フッ素化学第 155 委員会−編日刊工業新聞社 (1997) p114 図 3.35

口頭発表セッション

2025年3月7日(金) 9:20 ~ 10:40 E会場：2321中講義室（3F）

[3-E1] 生物多様性

座長：湯 龍龍 (農業食品産業技術総合研究機構)

9:20 ~ 9:40

[3-E1-01]

水消費に伴う生物多様性への影響を評価するミッドポイントモデル：RESCUE

*本下 晶晴[1]、Islam Kamrul[1]、Boulay Anne-Marie[2]、Pfister Stephan[3]、Verones Francesca[4]、Finkbeiner Matthias[5] (1. 産業技術総合研究所、2. CIRAIG、3. ETH Zurich、4. NTNU、5. Technische Universitaet Berlin)

9:40 ~ 10:00

[3-E1-02]

Drowning biodiversity: The impact of water consumption on global riverine fish species

*Islam Kamrul[1]、Pierrat Eleonore[2]、Verones Francesca[3]、Pfister Stephan[4]、Motoshita Masaharu[1] (1. Research Institute of Science for Safety and Sustainability, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan、2. Quantitative Sustainability Assessment Division, Department of Environmental and Resource Engineering, Technical University of Denmark、3. Industrial Ecology Programme, Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology、4. Institute of Environmental Engineering, ETH Zürich)

10:00 ~ 10:20

[3-E1-03]

Location-based global biodiversity LCIA damage factor development—Under future Land use change impact

*劉 潤桓[1]、大橋 春香[2]、平田 晶子[2]、湯 龍龍[3]、寺崎 康介[4]、松井 哲哉[2]、伊坪 徳宏[1] (1. Waseda University、2. Forestry and Forest Products Research Institute Forestry and Forest Products Research Institute, Forest Research and Management Organization、3. Institute for Agro-Environmental Sciences, National Agriculture and Food Research Organization、4. MS&AD InterRisk Research & Consulting, Inc.)

10:20 ~ 10:40

[3-E1-04]

気候変動による陸域生物種の絶滅リスクマップの作成

*橋本 瑠李[1]、平田 晶子[2]、大橋 春香[2]、湯 龍龍[3]、劉 潤桓[1]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. 国立研究開発法人　森林研究・整備機構　森林総合研究所、3. 国立研究開発法人　農業・食品産業技術総合研究機構)

©日本LCA学会

水消費に伴う生物多様性への影響を評価する ミッドポイントモデル：RESCUE

Biodiversity loss associated with water consumption in the global supply chain of Japan and its responsibility analysis

○本下晶晴*[1)]、Kamrul Islam[1)], Anne-Marie Boulay[2)], Stephan Pfister[3)], Francesca Verones[4)], Matthias Finkbeiner[5)]
Masaharu Motoshita, Kamrul Islam, Anne-Marie Boulay, Stephan Pfister, Francesca Verones, Matthias Finkbeiner
1) 産業技術総合研究所, 2) CIRAIG, 3) ETH Zurich, 4) NTNU, 5) Technische Universitaet Berlin
* m-motoshita@aist.go.jp

1. はじめに

自然関連財務情報開示タスクフォース（TNFD）など事業による自然への影響や依存への評価に対する社会的ニーズが高まっており、その中でも水ストレスはその重要な評価項目となっているだけでなく、生物多様性や生態系サービスとの関わりも深い。LCA において水消費に伴う影響を評価するモデルは様々なモデルが開発されており[1)]、特にミッドポイントの評価では AWARE[2)] が UNEP Life Cycle Initiative による推奨モデル[3)] として広く用いられている。一方で AWARE は水資源を必要とするすべてのユーザーへの影響をモデル化したものであり、生態系への影響との関わりを明確に評価できるものとはなっていない。そこで、AWARE の開発者としてその基本的なコンセプトを共通としつつ、生態系への影響に焦点を当てた評価に利用できる新たなミッドポイントモデルとその評価指標を開発した。本発表では水資源消費に伴う生物多様性への影響に特化したミッドポイントモデルとして開発した RESCUE（Restoring Sustainable water for Conserving aqUatic Ecosystem）モデルについてその特徴や既存モデルとの違いなどについて紹介する。

2. 生態系影響に特化したミッドポイントモデル

2.1 RESCUE モデルの基本概念

RESCUE の基本概念としては、ある流域に存在する利用可能な自然流量（Available water resources）のうち、当該流域の月平均流量、年平均流量と当該月における自然流量の関係から一定量の自然流量を水域生態系の保全に必要な環境用水量（Enviornmental Water Requirement : EWR）を定義する点において AWARE と共通している。AWARE では人間社会を含めた必要な水資源料を考慮するため、ここから当該流域における人為的水消費量（Human Water Consumption: HWC）を差し引くことで、すべてのユーザーが利用可能な水として残っている水資源量（Remaining water）を求めることで当該流域における水ストレス度を評価しているが、RESCUE では生態系への影響のみが評価対象であるため、人為的水消費量は考慮しない。そのため、水域生態系の保全に必要な水資源量として人間が利用可能な水資源量として環境容量（Regional Carrying Capacity: RCC）を定義した既報[4)]に従い、利用可能な自然流量から EWR を差し引き残っている水資源量である RCC と HWC を比較することで、RCC を超過した水消費量を特定し、人為的活動に伴って過剰に消費された水域生態系保全に必要な水資源量を特定する。RESCUE では RCC を超過して過剰消費された水消費量の絶対値そのものと、EWR に対する過剰水消費量の比率で水域生態系へのストレス度を表現する指標の 2 つの評価方法を提供する。

<過剰消費量>

$$CF_{i,m} = \begin{cases} (HWC_{i,m} - RCC_{i,m})/HWC_{i,m}, & HWC_{i,m} > RCC_{i,m} \\ 0 & , HWC_{i,m} < RCC_{i,m} \end{cases} \quad (1)$$

<ストレス指標>

$$CF_{i,m} = \begin{cases} (HWC_{i,m} - RCC_{i,m})/EWR_{i,m}, & HWC_{i,m} > RCC_{i,m} \\ 0 & , HWC_{i,m} < RCC_{i,m} \end{cases} \quad (2)$$

$CF_{i,m}$:流域 i、月 m における RESCUE 影響評価係数
$HWC_{i,m}$: 流域 i、月 m における人為的水消費量 HWC
$RCC_{i,m}$: 流域 i、月 m における環境容量 RCC
$EWR_{i,m}$: 流域 i、月 m における環境用水量 EWR

RESCUE の概念図を Supporting Information の図 S1 に示す。また基本は月レベルでの分析となっているが月別の HWC で加重平均したものを年平均の影響評価係数として提供する。

2.2　影響評価係数算定に用いたデータ

影響評価係数の算定に際して必要となる自然流量データおよび人為的水消費量は水循環モデル WaterGAP 2.2d[5]の 2015 年推計データを用いた。WaterGAP2.2d ではグリッドレベルで自然流量、水消費量が推定されているため、AWARE の地理的解像度に従い世界約 11,000 の流域レベルに集約した。EWR および RCC は Pastor ら[6]、Motoshita ら[4]の方法に従って算定した。

3. 水消費による水域生態系への潜在影響

RESCUE の影響評価係数（ストレス指標）の分布を図 1 に示す。アメリカ西部および南部、欧州南西部、アフリカ北部、中東・中央アジア、豪州東部においてストレス度が高く、ストレス度が 0 以上（EWR の過剰消費が起こっている）の流域は世界全体の水消費量の約 67%を占めている。既報[7]において消費活動に伴って世界のサプライチェーンで誘発する水消費量のうち 6 割以上を海外において誘発している日本としては、水域生態系への潜在的影響は無視し得ないといえる。

図 2 には世界の各流域における水消費量（横軸）とそれに RESCUE の影響評価係数（ストレス指標）を乗じた影響評価結果（縦軸）の関係を示す。基本的には水消費量とそれに伴う水域生態系への潜在的影響の大きさは比例関係にあるが、流域間でのばらつきも大きいため、水消費量だけでなく水消費がどこで起こっているのかを特定し、その流域における水域生態系へのストレス度を考慮した影響評価が重要である。

4. RESCUE の活用方法と AWARE との違い

RESCUE では 2 つの影響評価係数を提供している。式（1）で表されている過剰消費量に関わる影響評価係数は、水消費量を乗じることでその流域における水消費のうち RCC を超えて EWR を使い込んでいる過剰な水消費量そのものを評価することができる。すなわち、評価対象となる人間活動のために必要な水消費として、水域生態系に必要な水量から搾取している水資源量となり、その意味がわかりやすい。また、式（2）で表されるストレス指標では、インベントリとしての水消費量に乗じた結果は各流域における水域生態に必要な水資源量に対して過剰に消費している割合で重み付けをした水消費量となる。前述の絶対量としての過剰な水消費量だけでは、同じ過剰水消費量であってもその流域の EWR の大きさによって水域生態系へのストレス度は異なることを考慮できない。そのため、両者を併用することで、意味のわかりやすい総量としての過剰な水消費量を把握しつつ、水域生態系へのストレス度が高い地域での水消費量がどれだけあるのかをストレス指標により把握することがこのモデルの有効な使い方であるといえる。

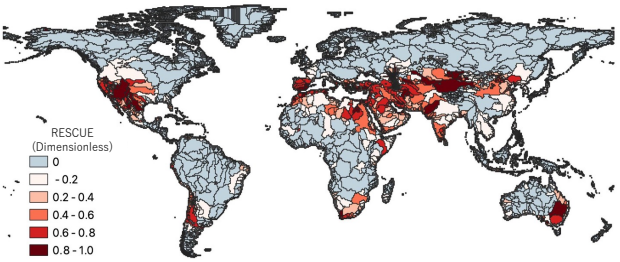


図 1　RESCUE モデルの影響評価係数（ストレス指標）の地理的分布

また、AWARE との違いとして、AWARE では HWC が RCC を超える場合、他のユーザーに残っている水資源量が 0 となるため最大値の影響評価係数（デフォルトでは 100）が設定されており、どれだけ EWR を使い込んでいても同じ影響として評価されてしまう（図 S3 参照）。一方で RESCUE では HWC が RCC を超えない場合は影響は 0 となっているが、どれだけ RCC に近づいているかによって水域生態系への将来的なリスクをみることはできない（図 S4 参照）。そのため両者の特性を活かして補完的に使うことが有効な活用方法である。

5. 引用文献

1) 本下ら: 日本 LCA 学会誌, 11(3), (2015), p 246-256
2) Boulay et al. : Int. J. Life Cycle Assess., 23, (2018), pp 368-378
3) UNEP, Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators, volume 1, UNEP, (2016), p 164
4) Motoshita et al.: Environ. Sci. Technol., 54(14), (2020), pp 9083-9094
5) Mueller Schmied et al.: Geosci. Model Dev., 14(2), (2021), pp 1037-1079
6) Pastor et al.:Hydrol. Earth Syst. Sci., 18(12), (2014), pp 5041-5059
7) Motoshita et al.: Resour. Conserv. Recycl., 196, (2023), p 107055

Supporting Information

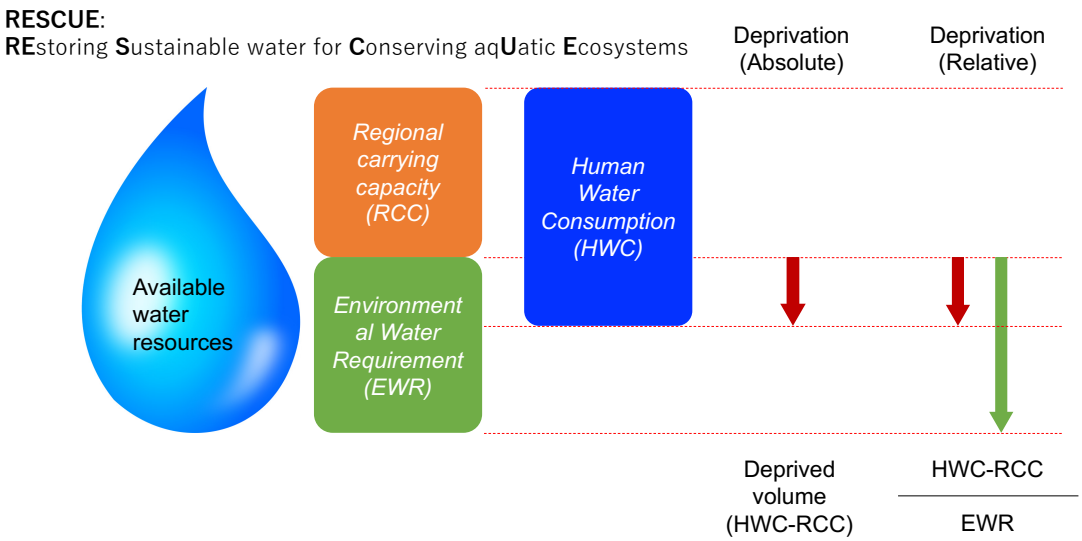


図 S1　RESCUE モデルの概念図

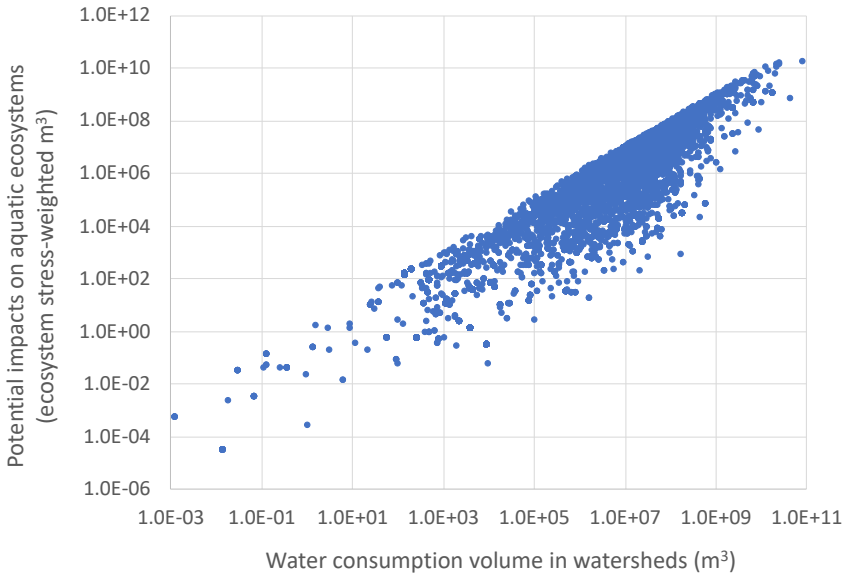


図 S2　流域別の水消費量（横軸）と水消費量に RESCUE のストレス指標を乗じた影響評価結果（縦軸）の関係

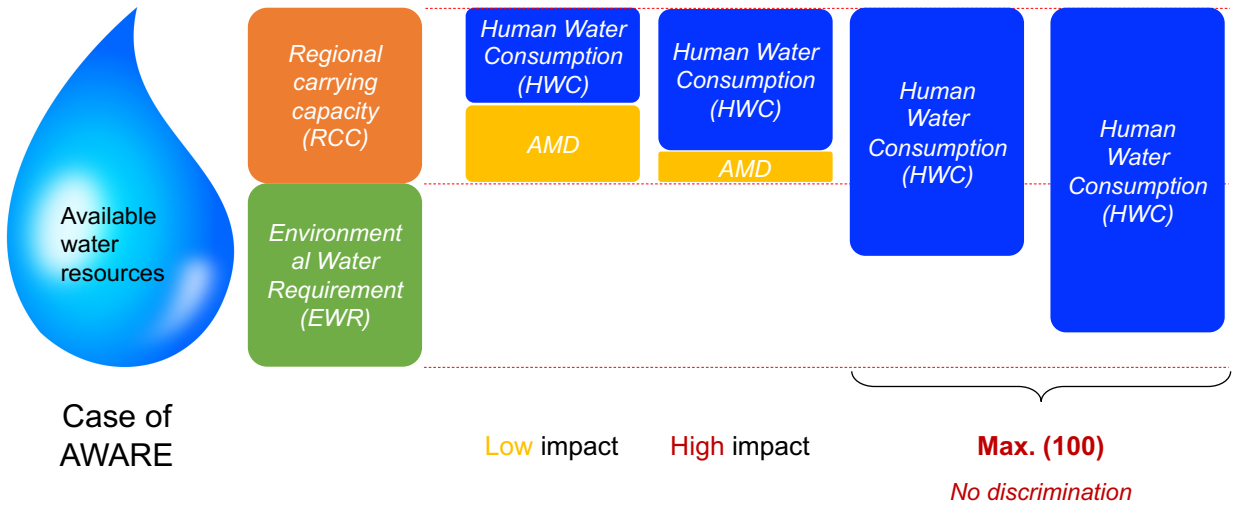


図 S3　AWARE モデルで評価しているもののイメージ図（4 つのケース別）

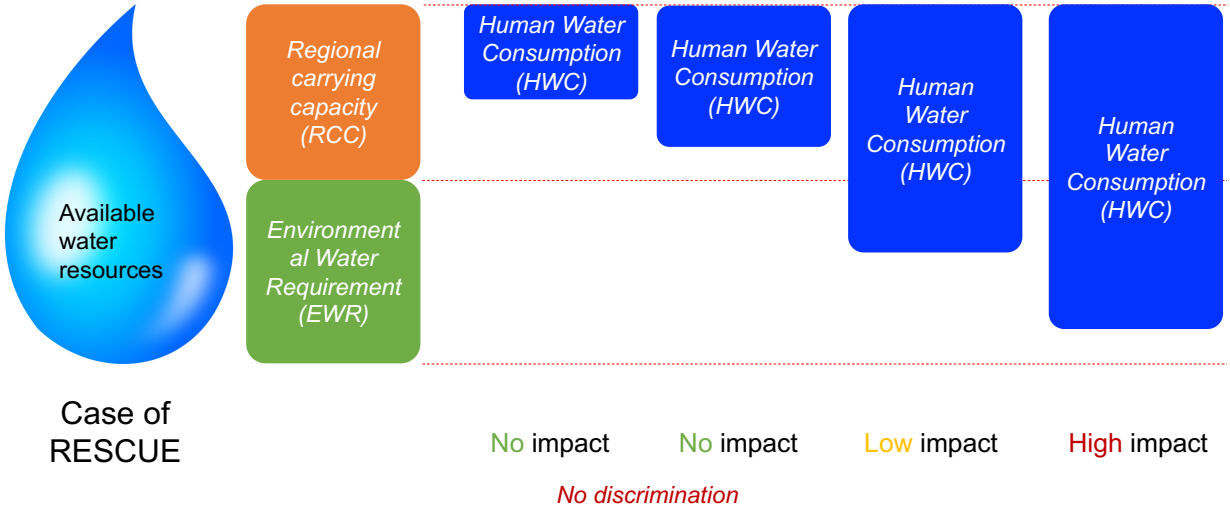


図 S4　RESCUE モデルで評価しているもののイメージ図（4 つのケース別）

Drowning biodiversity: The impact of water consumption on global riverine fish species

○Kamrul Islam*[1)]、Eleonore Pierrat[2)]、Francesca Verones[3)]、Stephan Pfister[4)]、Masaharu Motoshita[1)]

1) Research Institute of Science for Safety and Sustainability, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 16-1 Onogawa, Tsukuba, 305-8569 Ibaraki, Japan

2) Quantitative Sustainability Assessment Division, Department of Environmental and Resource Engineering, Technical University of Denmark, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark

3) Industrial Ecology Programme, Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Høgskoleringen 5, 7491 Trondheim, Norway

4) Institute of Environmental Engineering, ETH Zürich, John-von-Neumann-Weg 9, 8093 Zürich, Switzerland

* kamrul-islam@aist.go.jp

1. Introduction

The Anthropocene epoch has seen unprecedented changes to the global water cycle, with a four-fold increase in water demand over the last 50 years, leading to severe freshwater biodiversity losses (Damiani et al., 2021; Pierrat et al., 2023). Despite covering only 0.01% of Earth's surface, freshwater ecosystems support 9.5% of all known animal species (Balian et al., 2008). However, freshwater species populations have declined by 84% since 1970, with over 30% of fish species now facing extinction risks (Pierrat et al., 2023; Burkhead, 2012).

Flow modifications and river discharge alterations are among the most persistent threats to freshwater biodiversity (Reid et al., 2019). Approximately 65% of global river discharge is under moderate to high threat (Vörösmarty et al., 2010), yet a focus on human water security often overshadows it. Existing life cycle impact assessment (LCIA) methods, such as ReCiPe and Impact World+ (Huijbregts et al., 2017; Bulle et al., 2019), account for biodiversity loss from land use and climate change but lack direct links to ecosystem damage from water consumption (Damiani et al., 2018).

To address this, Pierrat et al. (2023) developed characterization factors (CFs) to quantify freshwater biodiversity loss by relating species richness to river discharge. Using these CFs and WaterGAP 2.2d hydrological data (2000–2016), this study assesses the impact of human water consumption on global riverine fish species. By analyzing both average and maximum water consumption scenarios, we aim to provide insights into how freshwater use influences aquatic biodiversity, supporting more sustainable water management strategies.

2. Materials and methods

This study assesses the impact of water consumption on global riverine fish species using the WaterGAP 2.2d hydrological model. The dataset spans from 2000 to 2016 and provides estimates of human water consumption across different sectors—domestic, industrial, livestock, and irrigation—at a watershed level. To determine freshwater overconsumption, we compared human water consumption with the regional carrying capacity, which was estimated by subtracting environmental water requirements from the available freshwater resources.

To quantify biodiversity impacts, we applied the CF developed by Pierrat et al. (2023), which estimates the loss of riverine fish species due to water use. These CFs incorporate both regional and global perspectives by considering species-discharge relationships and extinction probabilities. The assessment was conducted at a watershed level to capture spatial variations in biodiversity loss.

Additionally, we examined the impact of agricultural water consumption on riverine fish species by integrating crop-specific water use data with CFs. The study highlights the relative contributions of different crops and countries to freshwater biodiversity loss. Using FAO trade data, we also explored the role of international trade in driving these impacts.

3. Results and discussion

Our analysis shows that maize (34%) and wheat (15%) contribute the most to freshwater biodiversity loss due to their intensive water consumption. Other major contributors include sugar cane, rice, and barley (16% collectively). These high-impact crops, especially when grown in water-stressed regions, place significant pressure on freshwater ecosystems, leading to species loss.

The Potentially Disappeared Fraction (PDF) of species, which quantifies biodiversity loss due to water use, reveals a critical trade-off between nutrient adequacy and ecosystem

impact. Despite being a primary calorie source, Maize has one of the highest PDF values, indicating severe threats to riverine fish biodiversity. Similarly, soya beans and rice provide high nutritional value, but while soya beans contribute significantly to biodiversity loss, rice has a lower impact. Conversely, barley, sorghum, potatoes, and cassava have low PDF values and low nutrient adequacy, suggesting they exert less pressure on biodiversity and contribute less to global nutrition.

This study underscores the urgent need for targeted water conservation strategies for high-impact crops, ensuring a balance between agricultural productivity and freshwater biodiversity preservation. Policymakers should prioritize sustainable water management practices, particularly in regions where excessive water use drives species loss beyond ecological thresholds.

4. Conclusions

This study underscores the significant impact of crop water consumption on riverine fish species, with maize and wheat emerging as major contributors. The findings highlight the complex interplay between nutrient adequacy and environmental impact, emphasizing the need for sustainable agricultural practices. Geographical disparities in impact call for targeted interventions in high-impact regions. Overall, the study contributes valuable knowledge for policymakers and researchers striving to balance food security and preserving freshwater biodiversity.

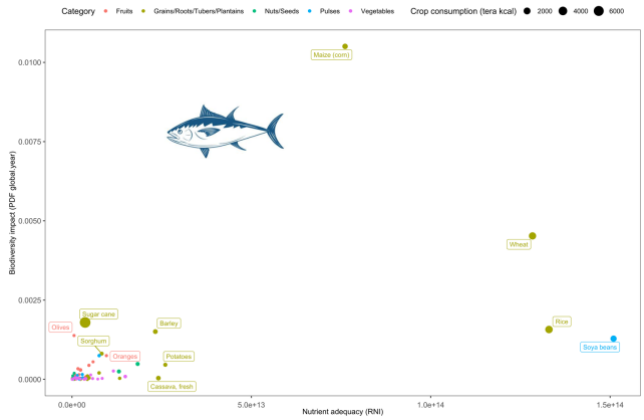


Figure 2. The relationship between nutrient adequacy of crops and impact of crop water consumption on riverine fish species. Note that the size of the bubble denotes the magnitude of energy provision from each crop consumed globally.

5. References

1) Balian, E.V., Segers, H., Lévèque, C., Martens, K.: Hydrobiologia, 595, (2008), pp 627–637.
2) Burkhead, N.M.: BioScience, 62, (2012), pp 798–808. Damiani, M., Roux, P., Loiseau, E., Lamouroux, N., Pella, H., Morel, M., Rosenbaum, R.K.: Sci. Total Environ., 782, (2021), p 146664.
3) Pierrat, E., Barbarossa, V., Núñez, M., Scherer, L., Link, A., Damiani, M., Verones, F., Dorber, M.: Sci. Total Environ., 854, (2023), p 158702.
4) Reid, A.J., Carlson, A.K., Creed, I.F., Eliason, E.J., Gell, P.A., Johnson, P.T.J., Kidd, K.A., MacCormack, T.J., Olden, J.D., Ormerod, S.J., Smol, J.P., Taylor, W.W., Tockner, K., Vermaire, J.C., Dudgeon, D., Cooke, S.J.: Biol. Rev., 94, (2019), pp 849–873.
5) Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Liermann, C.R., Davies, P.M.: Nature, 467, (2010), pp 555–561.
6) Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., Van Zelm, R.: Int. J. Life Cycle Assess., 22, (2017), pp 138–147.
7) Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A.-M., Bourgault, G., De Bruille, V., Cao, V., Hauschild, M., Henderson, A., Humbert, S., Kashef-Haghighi, S., Kounina, A., Laurent, A., Levasseur, A., Liard, G., Rosenbaum, R.K., Roy, P.-O., Shaked, S., Fantke, P., Jolliet, O.: Int. J. Life Cycle Assess., 24, (2019), pp 1653–1674.
8) Damiani, M., Núñez, M., Roux, P., Loiseau, E., Rosenbaum, R.K.: Int. J. Life Cycle Assess., 23, (2018), pp 2071–2088.

Location-based global biodiversity LCIA damage factor development—Under future land use change impact

○Runya Liu[*1)], Haruka Ohashi[2)], Akiko Hirata[2)], Longlong Tang[3)], Kousuke Terasaki[4)], Tetsuya Matsui[2)], Norihiro Itsubo[1)]

1)Waseda University, 2) Forestry and Forest Products Research Institute Forestry and Forest Products Research Institute, Forest Research and Management Organization, 3) Institute for Agro-Environmental Sciences, National Agriculture and Food Research Organization, 4) MS&AD InterRisk Research & Consulting, Inc.

* runya.liu@aoni.waseda.jp

1. Introduction

Following the adoption of the Kunming-Montreal Biodiversity Framework at the COP15 conference in 2022 [1], there has been increased attention on global ecosystem security and the loss of biodiversity. The Global Assessment Report published by IPBES further reveled the drivers affecting global biodiversity and ecosystems [2]. Among these drivers, land use change is identified as the primary and most direct factors triggering habitat alteration and fragmentation. Currently, there are numerous assessment methods and indicators for evaluating the impact of land use changes on biodiversity across spatial and temporal scales. However, existing research findings and user feedback indicate that current methodologies and technologies still possess certain limitations. Methodologically, the indicators and methods developed vary considerably in their temporal and spatial scales due to differing study scopes. Mainstream approaches primarily emphasize historical impact assessments, while there is considerable potential for methodologies addressing future scenarios. For downstream users, the relevance and clarity of indicators are essential in current methodologies. Future research should prioritize the development of precise, visual indicators and integrate policy frameworks to improve insights into ecosystems and biodiversity. This study aims to create indicators for long-term assessments, utilizing extinction rate metrics from the Millennium Ecosystem Assessment and establishing damage factors based on future land use changes with high spatial resolution.

2. Methodology

In this study, we introduced the Maximum Entropy model (MaxEnt), a commonly utilized Species Distribution Model (SDM) in ecology [3]. Its primary principle is based on the maximum entropy principle in statistics, which posits species distribution under the constraints of given observational data and environmental variables. Occurrence data for species were retrieved from the Global Biodiversity Information Facility (GBIF), assessing a total of 6,569 biological species across five taxonomic groups in the initial phase [4]. Land use data were sourced from the high-resolution, long temporal scale LUH2 dataset. In alignment with the objectives of this research, we evaluated the changes in species distribution ranges due to land use alterations at two time points: the present (2015) and the future (2100 SSP1-RCP2.6) [5]. We assumed that climate parameters remain constant in future scenarios, with only land use parameters varied. The methodology for assessing extinction risk (ER) （species/year） has been thoroughly detailed in the results of Liu et al. (2024) [5]. For the calculation of extinction rates (E/MSY) in each grid cell (c), we first extrapolated the results of the 6,569 species to encompass the globally described 460,000 species by taxonomic group ($\sum Species_{taxon,IUCN}$) registered in IUCN, subsequently calculating the overall extinction rate [7].

$$Extinction\ Rate_{c,taxon,IUCN} = \frac{ER_{c,taxon,IUCN}}{\sum Species_{taxon,IUCN}} \cdot 1{,}000{,}000$$

In this study, we define the damage factor for each grid cell (DF_c) based on the increase in extinction rates ($Extinction\ Rate_c$) resulting from the marginal effect of land use, thus exhibiting a relatively linear characteristic. The damage factor for each grid cell is determined by calculating the total extinction rate for 5 taxa ($Extinction\ Rate_c$) within the grid divided by the total area of land use change ($\Delta\ Area_c$). We assessed land use changes by comparing the proportions of individual land use types at two time points within each grid cell. (unit：E/MSY /km^2)

$$DF_c = Extinction\ Rate_c / \Delta\ Area_c$$

3. Results

We first present the global distribution of extinction rates (Figure S1a). Due to the non-linear predictions of the MaxEnt model regarding environmental parameters, land use changes can have both positive and negative impacts on different species. The positive impact is reflected in the expanded future spatial distribution of species, resulting in habitat gain, which contributes to the negative trend in extinction rates (Figure S1c). The distribution map of positive extinction rates is shown in Figure S1b. The global net extinction rate is approximately 487.15 E/MSY, with a total positive extinction

rate of 626.24 E/MSY and a negative extinction rate of -139 E/MSY. The negative extinction rates predominantly arise from avian species, with about 67.5% of the 3,791 assessed bird species exhibiting negative extinction rates. Figure 1a illustrates the damage factors calculated within a grid resolution of approximately 0.25 arc-degrees (unit: E/MSY/km²). Global DF ranges from -1.81 to 19.26 E/MSY/km², highlighting significant regional disparities. Negative DF trends are concentrated in northern and inland areas, while positive DF hotspots are more prevalent along continental margins, such as southern China, Southeast Asia, and coastal Australia in the Asia-Pacific region. In the Americas, higher DF values are observed in southern North America and the eastern regions. These areas face elevated extinction risks due to future land use changes and exhibit increased extinction rates due to their rich biodiversity.

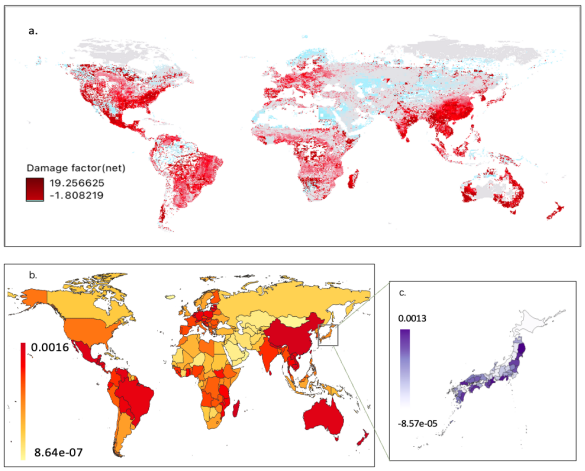


Figure 1 a. Biodiversity damage factor on a grid cell based. b. Regional damage factor. c. Prefectural-based damage factor.

Additionally, we have highlighted the advantages of this research, which allow user to summarize specific damage factors for particular regions based on varying assessment scopes. For instance, Figure 1b presents the average positive-only damage factors for each region as representative values. The average DF across countries ranges from 8.64E-07 to 1.6E-03 E/MSY/km². Among the top ten countries with the highest DF values, 80% are classified as global biodiversity hotspots area. Most of these nations are developing countries that, despite their high biodiversity richness, face threats to local biodiversity due to inadequate policies and protection, leading to land-use changes and overexploitation. In Figure 1c average damage factors at the prefectural level in Japan. Japan's regional distribution is uniquely shaped by its elongated north-south topography, with a range of -8.36E-06 to 1.3E-03 E/MSY/km². Higher values are predominantly found in eastern Japan and along its coastline. This distribution pattern aligns to some extent with the richness of vascular plants.

4. Conclusion

Unlike traditional Life Cycle Impact Assessment (LCIA) methodologies, our innovation is highlighted by the incorporation of extinction rates to establish damage factors within LCIA. This approach prioritizes species extinction over mere disappearance, enabling a clearer assessment of biodiversity in line with sustainable development policies. The extinction rate provides essential insights for biodiversity evaluations, focusing on damage factors for long-term assessments. Ultimately, our extinction rate can be incorporated into policies and benchmarks to bolster biodiversity conservation initiatives.

The research so far addressed some limitations. Firstly, predicting land use change solely relies on existing land cover data from the SSP1-RCP2.6 scenario for 2100, making damage factor characteristics rely on future scenario definitions. Furthermore, there is insufficient advancement in LCIA regarding nonlinear damage factors. Until this issue is resolved, we are limited to the marginal effect concept concerning damage factors.

Reference

[1] Convention on Biological Diversity. The Kunming–Montreal Global Biodiversity Framework (CBD, 2022).

[2] IPBES. Global Assessment Report on Biodiversity Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity Ecosystem Services; Brondizio, E.S., Settele, J., Díaz, S., Ngo, H.T., Eds.; IPBES Secretariat: Bonn, Germany, 2019; 1148p.

[3] Steven J. Phillips. 2017. A Brief Tutorial on Maxent. Available from url: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/. Accessed on 2025-1-17.

[4] GBIF. GBIF Occurrence Download. 2020. Available online: https://www.gbif.org/

[5] Hurtt, G.C.; Chini, L.; Sahajpal, R.; Frolking, S.; Bodirsky, B.L.; Calvin, K.; Doelman, J.C.; Fisk, J.; Fujimori, S.; Klein Goldewijk, K.; et al. Harmonization of Global Land Use Change and Management for the Period 850–2100 (LUH2) for CMIP6. Geosci. Model Dev. 2020, 13, 5425–5464.

[6] Liu, R., Ohashi, H., Hirata, A., Tang, L., Matsui, T., Terasaki, K., ... & Itsubo, N. (2024). Predicting the Global Extinction Risk for 6569 Species by Applying the Life Cycle Impact Assessment Method to the Impact of Future Land Use Changes. Sustainability, 16(13), 5484.

[7] IUCN Background & History. Available online: https://www.iucnredlist.org/about/background-history

Supporting Information

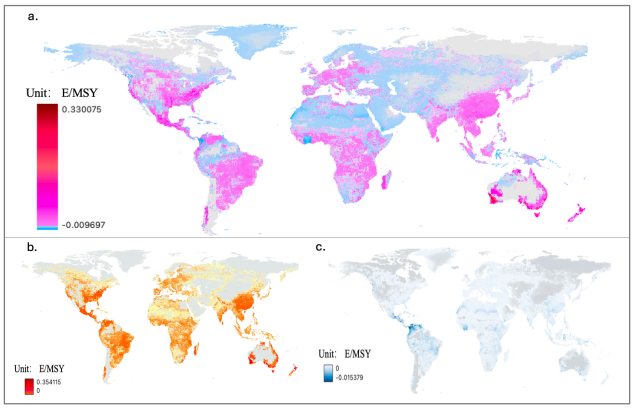


Figure S1. a. Global extinction rate distribution(net). b. Positive extinction rate. c. Negative extinction rate.

気候変動による陸域生物種の絶滅リスクマップの作成

Creating extinction risk map of terrestrial ecosystems due to climate change

○橋本瑠李*[1)]、-平田晶子[2)]、-大橋春香[2)]、-湯 龍龍[3)]、-劉 潤楹[1)]、-伊坪徳宏[1)]
Ruri Hashimoto Akiko Hirata Haruka Ohashi Longlong Tang Liu Runya Norihiro Itsubo
1) 早稲田大学
2) 国立研究開発法人 森林研究・整備機構　森林総合研究所
3) 国立研究開発法人　農業・食品産業技術総合研究機構
* fifth10969@ruri.waseda.jp

1. はじめに

IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)[1)]によると気候変動が生物多様性に与える影響は深刻であり、現在進行している生物多様性の損失に対する迅速かつ効果的な対策を講じることが急務とされている。特に限られた地域に生息する脆弱な種や固有種に大きな影響を与えているため、気候変動と生物多様性の関係を定量的に評価し、将来の種の絶滅リスクを予測する研究が進められている。

現在、気候変動による生物多様性への影響に関する世界規模の評価が行われているが、TNFD (Taskforce on Nature-related Financial Disclosures)[2)]のガイドラインでは、より高い地域解像度での評価の必要性が求められている。しかし、LCA の手法では地域の特性を考慮した詳細な評価はまだ限られているため、グリッドレベルでの評価は重要となる。これらの評価は、特定の地域や種が気候変動リスクにどの程度さらされているかを正確に把握することが可能であるため、適切な保護戦略を策定するための基盤となる。

2. 研究目的

RCP シナリオに基づき、将来の気候変動シナリオが陸域生物種の絶滅リスクにどのように影響するかを定量的に評価し、全球レベルでグリッドごとの絶滅リスク分布からホットスポットを推定する。

3. 研究方法

3.1 現在と将来の生息域予測

各生物種の生息域分布予測データは、SDM (Species Distribution Modeling) を用いることで得る。SDM とは統計的なモデルであり、生物種の分布変化を予測するために使用されている。本研究では SDM の 1 つである MaxEnt を用いて、両生類、爬虫類、鳥類、哺乳類、植物の 5 つの生物群の全 8428 種を対象に、ベースラインと将来の生息域の変化の予測を実施した。予測年は、ベースラインが 2005 年、将来が 2040 年、2060 年、2080 年、2100 年である。また、将来予測で用いた経済シナリオは SSP3-RCP7.5 であり、GCM (Global Climate Model) は GFDL、IPSL、MRI の 3 つである。これらの予測では、各生物種の生息域モデリングにより、ベースラインと将来の正確な生息域面積を推定し、生息域の変化より絶滅リスク及び被害係数を算出することができる。

3.2 絶滅リスクの推定

種ごとの絶滅リスク (ER) [-/year] は、Tang[3)]らより各生物種が絶滅するまでの年数 (t) の逆数として定義される。t は式 (1) の通りである。

$$t_i = T \times \left\{ \frac{\ln\left(K / C_{i,baseline}\right)}{\ln\left(C_{i,future} / C_{i,baseline}\right)} \right\} \qquad (1)$$

t_i : 生物種 i が絶滅するまでの年数
T : ベースラインから将来までの年数
K : 絶滅閾値 (1 cell)
$C_{i,baseline}$: ベースラインの分布セル数
$C_{i,future}$: 将来の分布セル数

種ごとの ER を式(2)に示す。ただし R はベースラインと将来の生息域変化の割合を示す。

$$\begin{cases} ER_i = 1/t_i, R \neq 0 \\ ER_i = 0, R = 0 \end{cases} \qquad (2)$$

3.3 空間分布

各生物種の ER の空間分布を推定するために、変化した生息域のグリッドセルに割り当てることで、グリッドセルあたりの絶滅リスクを推定した。[4)]ただし、グリッドは 0.25×0.25 である。

4. 結果

ベースラインと将来の生息域変化の予測から得た結果の例として、GCM の GFDL におけるベースラインと 2100 年までの全 8428 種の生息域変化を図 1 に示す。

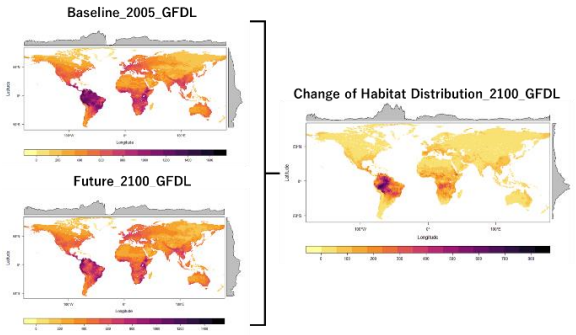


図.1. GFDL における種数の差分 (2005-2100)

図 1 より、南アメリカ大陸で生息域に大きな変化があることが分かる。他の GCM である IPSL や MRI に関しても図 1 と類似した生息域変化の傾向が見られた。

生息域変化から 2005 年から 2100 年における絶滅リスク ER の空間分布を図 2 に示す。全球における絶滅リスクの値は 4.15 であり、これは 1 年間に 8428 種中 4.15 種が絶滅するリスクがあることを示す。また、この絶滅リスクの値を E/MSY (Extinction Million Species Year) という、100 万種の生物種が存在すると仮定した時に 1 年間で何種絶滅するかを示す指標に換算すると、493 [E/MSY] であった。空間分布より、南アメリカやオセアニアにおける絶滅リスクが高い傾向にあることが分かる。

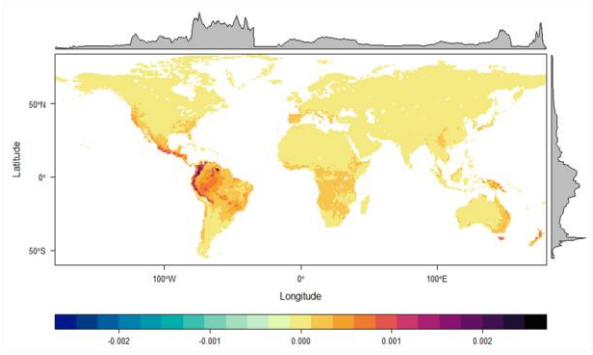


図 2. GFDL における ER の空間分布 (2005-2100)

また、3 つの GCM における 2005 年から 2100 年までの全球レベルの ER の値と EMSY の値を以下の表 1 に示す。3 つ GCM の中で値に小さい差があり、比較的 IPSL のシナリオの絶滅リスクが高い傾向にあることが分かる。

表 2. 各 GCM の ER 及び E/MSY の値

	GFDL	IPSL	MRI
ER	4.15	4.45	3.29
E/MSY	493.05	528.13	390.71

また、各生物群の全球レベルの絶滅リスクの値を表 2 に示す。鳥類の絶滅リスクが生物群の中で最も大きな値を示すことが分かる。これは鳥類の評価対象が他の生物群と比較して非常に多いことが理由と考えられる。また、ほとんどの生物種では将来の生息域が減少するためリスクが増えるが、いくつかの種では将来の生息域が増加するためリスクがマイナスになる場合があった。特に鳥類に多く、これは移動範囲が広い種であるため、将来予測される生息域も広範囲になるからであると考える。

表 2. GFDL における各生物群の ER (2005-2100)

生物群	種数	ER [species/year]
		GFDL
両生類	509	0.33
鳥類	4796	2.18
哺乳類	1137	0.54
植物	1605	0.95
爬虫類	381	0.16

5. まとめ

SSP3-RCP7.5、GCM シナリオ GFDL におけるベースライン (2005 年) と将来 (2100 年) の生息域変化から全球レベルのグリッドセルごとの絶滅リスク ER の空間分布を示した。

今後は得られた ER から被害係数の算出や評価対象の種数の拡張をしていく方針である。

6. 引用文献

1) IPBES, https://www.ipbes.net/. (2024).
2) TNFD, https://tnfd.global/, (2024).
3) Tang, L. et al., “Assessment of global warming impact on biodiversity using the extinction risk index in LCIA : a case study of Japanese plant species”, (2024).
4) Runya, L. et al., “Predicting the Global Extinction Risk for 6569 Species by Applying the Life Cycle Impact Assessment Method to the Impact of Future Land Use Changes”, Sustainability 2024, (2024).

口頭発表セッション

2025年3月7日(金) 11:00 ~ 12:20 E会場：2321中講義室（3F）

[3-E2] サーキュラーエコノミー指標

座長：兵法 彩 (東京都市大学)

11:00 ~ 11:20

[3-E2-01]

システムトランジションとライフサイクル思考をふまえたサーキュラーエコノミーの指標枠組みの開発とグローバルレベルのモニタリング状況

*田崎 智宏[1] (1. 国立環境研究所)

11:20 ~ 11:40

[3-E2-02]

電気自動車用二次電池のサーキュラーエコノミー指標の提案

*小林 哲郎[1]、原 昌司[1]、佐々木 厳[1]、岩田 隆道[1]、増田 仁郎[2]、上田 貴康[2]、田原 聖隆[3]、松本 光崇[3]、高尾 尚史[1]、石田 栄治[2]、永井 隆之[2] (1. 豊田中央研究所、2. トヨタ自動車、3. 産業技術総合研究所)

11:40 ~ 12:00

[3-E2-03]

欧州バッテリー規則におけるCircular Footprint Formulaの算定事例とそのあり方について

*八柳 就[1] (1. 株式会社LCAエキスパートセンター)

12:00 ~ 12:20

[3-E2-04]

再資源化を考慮した銅製錬のライフサイクル環境評価

*鈴木 綾乃[1]、立本 海[2]、折笠 広典[2]、伊坪 徳宏[1] (1. 早稲田大学、2. JX金属株式会社)

©日本LCA学会

電気自動車用二次電池のサーキュラーエコノミー指標の提案

A Circular Economy Indicator for Batteries of Electric Vehicles

○小林哲郎*[1)]、原 昌司[1)]、佐々木厳[1)]、岩田隆道[1)]、増田仁郎[2)]、上田貴康[2)]、
田原聖隆[3)]、松本光崇[3)]、高尾尚史[1)]、石田栄治[2)]、永井隆之[2)]
Tetsuro Kobayashi, Masashi Hara, Tsuyoshi Sasaki, Takamichi Iwata, Yoshiro Masuda, Takamichi Ueda,
Kiyotaka Tahara, Mitsutaka Matsumoto, Hisaaki Takao, Eiji Ishida, Takayuki Nagai
1) 豊田中央研究所, 2)トヨタ自動車, 3) 産業技術総合研究所
* tetsuro@mosk.tytlabs.co.jp

1. 緒言

現在、自動車の電動化と再エネの導入が進み、それらに用いられるリチウムイオン二次電池（以下、LIB）の需要が急激に増加すると予測されている[1)]。LIB の製造には、Li、Ni、Co、Cu といった希少資源が必要であり、それら資源の採掘活動は拡張され、例えば Ni は、将来的に需要量に対して供給量が不足するシナリオも示されている[2)]。よって、電池内の資源を循環・再利用し、有効に活用することが望まれ、本研究では、これらに対する貢献度を表すサーキュラーエコノミー指標（電池 CE 指標）を提案する。

2. 電池 CE 指標の提案

提案する電池 CE 指標では、「循環における散逸資源価値量」（環境負荷）と「電池の生涯電力量」（電池の価値）の 2 つの尺度で評価する。電気自動車(Battery electric vehicle, BEV)用二次電池を対象として、それらの計算方法を定め、試行計算を実施した。計算における機能単位は電池が有する電力量(kWh)とした。

2.1 循環における散逸資源価値量

電池製造時に投入される資源と、使用後のリサイクル時にリカバリーされる資源を考慮する。資源毎の環境負荷係数として TMR(Total Material Requirement)係数[3)]を用いた。また、原田ら[4)]に倣い、品質等によって決まる価値係数も考慮した。製造時に投入される *InFlowTMR* と、使用後にリサイクルによりリカバリーされ得る *OutFlowTMR* を、各々、(1), (2)式により計算する。ここで、TMR_i、$Mass_i$、$MatValue_i$ は各々、資源・材料 i の TMR 係数、質量、価値係数である。$MatValue_i$ は、例えば、バージン材を 1 として 0～1 で表す。$Mass_i$、$MatValue_i$ に付された(')は投入側を、(")はリカバリー側を示す。そして、*MatValueDissipation* を(3)式により計算する。*MatValueDissipation* は、循環できずに散逸される資源・材料の“価値”を意味する。なお、*OutFlowTMR* は、現時点では実績値ではなく、ポテンシャルとしての見込み値を想定している。そして、これらを電池のエネルギー(kWh)あたりで計算する。

$$InFlowTMR = \sum_{i=1}^{n} TMR_i \times Mass'_i \times MatValue'_i \quad (1)$$

$$OutFlowTMR = \sum_{i=1}^{n} TMR_i \times Mass''_i \times MatValue''_i \quad (2)$$

$$MatValueDissipation = InFlowTMR - OutFlowTMR \quad (3)$$

2.2 電池の生涯電力量

電池の価値は種々考えられるが、ここでは寿命に関係する生涯電力量とした。生涯電力量の求め方は、CFP (Carbon footprint)を計算する上で、欧州電池規則[5)]や経産省の蓄電池のサステナビリティに関する研究会[6)]でも提示されているが、本研究では電池の劣化を考慮し、次の①～③の 3 通りで計算することを提案する。計算における計算式、パラメータ等を Supporting Information にまとめた。各生涯電力量(kWh)は車載電池の初期電力量 En_{bat_ini} (kWh)で規格化して計算する。

① 製造・出荷時に期待される生涯電力量(*NLE*)；電池を保証する総走行距離 L_g、車両の平均電費 Eef_{ave}、および、回生等による稼働補正係数 C_{bat} を用いて(S1)式から計算する。

② 車載で一度使用済みとなり、再利用(リユース)する際に残された生涯電力量(*NSE*)；リユース時の SOH (State of health)である SOH_p と、それまでの走行距離 L_p を用いて(S2)～(S4)式から電池の劣化速度係数 a を求め、その a と EOL (End of life)時の SOH である SOH_{EOL} を用いて(S5)～(S7)式から求める。電池劣化の推移はサイクル数に対するルート則[7)]に従うと仮定している。

③ リユース時に電池を回復処理[8)]する場合の残された生涯電力量(*NSE'*)；回復処理後の SOH である SOH_R を用いて(S8)式より求める。

2.3 試行計算の条件

LIB として NMC(111)電池（正極 $LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$）と LFP 電池（正極 $LiFePO_4$）を対象として、循環における散逸資源価値量の試行計算を行った。既報を参照して、電池の材料構成比[9)]と製造エネルギー[10)]を設定し、OutFlow 側は、資源リサイクルと材料リサイクルの 2 通りのケースで計算した。生涯電力量と合わせて、

試行計算における計算範囲と仮定、設定値等を Supporting Information に記した。

3. 結果

3.1 循環における散逸資源価値量

散逸資源価値量の結果を図 1 に示す。製造時の投入(InFlowTMR)側のみで比較すると(図 1 a))、NMC(111)電池の方が、LFP 電池よりも環境負荷が大きいが、リサイクル時のリカバリー(OutFlowTMR)側を差し引く場合、資源リサイクルでは逆転し(図 1 b))、材料リサイクルではほぼ同等になる(図 1 c))ことが示された。

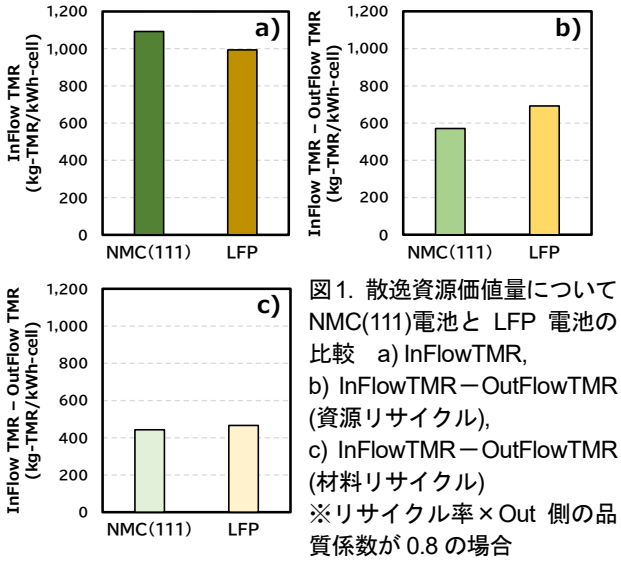


図 1. 散逸資源価値量について NMC(111)電池と LFP 電池の比較　a) InFlowTMR, b) InFlowTMR－OutFlowTMR (資源リサイクル), c) InFlowTMR－OutFlowTMR (材料リサイクル) ※リサイクル率×Out 側の品質係数が 0.8 の場合

3.2 電池の生涯電力量

製造・出荷時の生涯電力量は、電池保証の総走行距離が 16 万 km、20 万 km の場合、各々、323、404 と見積もられた。また、リユース時に残された生涯電力量の結果を図 2 に示す。図の横軸は、リユース時における走行距離を示し、図中の線の色はリユース時の SOH を示す。実線と破線は、各々、回復処理の無と有を示す。同じ SOH であっても、それまでの走行距離によって電池の劣化が異なり、その後に残された生涯電力量は大きく異なることが示された。また、図中の黄土色線以上では、出荷時に電池保証で想定された劣化よりも小さく、より長く使用でき得ることを表す。

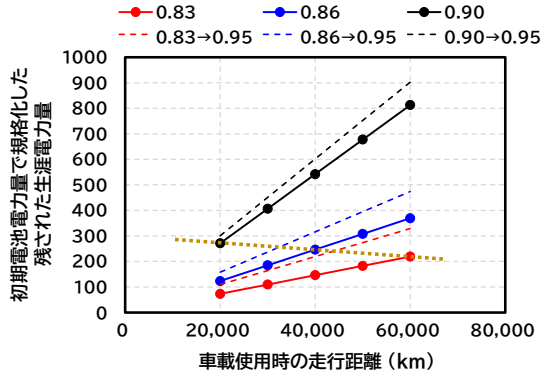


図 2. リユース時に残された電池の生涯電力量
リユース時の SOH ； 赤) 0.83、青) 0.86、黒) 0.90
実線）回復処理なし、破線）各々SOH を 0.95 まで回復処理した場合、黄土色点線）走行距離 16 万 km、SOH＞70%を保証する時の劣化速度を想定する場合

4. まとめ

サーキュラーエコノミーへの貢献度を評価する電池 CE 指標の計算方法を提案し、試行計算を行った。「循環における散逸資源価値量」では、InFlow 側を小さくすることに加えて、OutFlow 側を高める努力が重要となる。「電池の生涯電力量」では、特にリユース時に SOH のみからではなく、走行実績から電池の劣化速度を推定することで、より適切に残された生涯電力量を相対的に比較できると考える。また、本指標では、回復処理による効果分も定量的に計算することができる。

本指標にはまだ課題があると認識している。しかしながら、本指標の考え方を一つの案として、更に発展させることで、電池の製造・リサイクルの高効率化、電池の長寿命化とリユースを促進させ、サーキュラーエコノミー型社会につなげる一助としたい。

引用文献

1) IEA: Global Supply Chains of EV Batteries, 入手先 <https://www.iea.org/reports/global-supply-chains-of-ev-batteries>, (参照 2022-8-24)
2) JOGMEC: “令和 4 年度カーボンニュートラル実現に向けた鉱物資源需給調査”, 2022 年 11 月 10 日
3) 片桐ほか: NIMS-EMC 材料環境情報データ No.18 “概説 資源端重量（Total Material Requirement ; TMR）”, 2009 年 3 月
4) Halada, K., et al.: Int. J. of Automation Technology, 16 (6), (2022), pp.684-695.
5) European commission: Batteries for electric vehicles - carbon footprint methodology, 入手先 <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13877-Batteries-for-electric-vehicles-carbon-footprint-methodology_en>, (参照 2024-5-7)
6) 経産省: 第 4 回蓄電池のサステナビリティに関する研究会, 入手先 <https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/chikudenchi_sustainability/004.html>, (参照 2023-4-27)
7) Gasper, P., et al.: J. Electrochem. Soc. 168, (2021), 020502
8) Ogihara, N., et al.: Joule, 8 (5), (2024), pp.1364-1379
9) Park, K., et al.: ACS Sustainable Chem. Eng., 9, (2021), pp.8214-8221, Supporting Information
10) Ellingsen, L.A.-W., et al.: J. industrial Ecology, 18 (1), (2014), pp.113-124, Supporting Information, p.S-17

Supporting Information
電気自動車用二次電池のサーキュラーエコノミー指標の提案

散逸資源価値量の試行計算における計算範囲と仮定

InFlowTMR

範囲）・パックは含めず、セルのみの構成材料を対象
・製造時の副材(製品に残らない中間材)は対象外
・製造エネルギー分の TMR を含める

仮定）・製造時の歩留は 1 （工程端材を散逸させない）
・品質係数（MatValue’）は 1 とする

OutFlowTMR

範囲）・リサイクル処理に用いる副材やエネルギーを考慮しない
・資源リサイクルと材料リサイクル の 2 パターンで計算
資源リサイクル； Ni, Mn, Co, Li, Cu, Al, Fe
材料リサイクル； $LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$, $LiFePO_4$, Cu, Al

感度解析）電池内の材料に対してリサイクルできる材料の重量割合を“リサイクル率”とする。そして、リサイクル率×品質係数(MatValue”)が 0~1 として、パラメータスタディを実施。

生涯電力量計算のパラメータと試行計算時の設定値

記号	意味	試行計算時設定値, 式
NLE *NLE’*	搭載電池の初期電力量(kWh)で規格化した全生涯電力量	(S1)式 (S6)式
NPE	搭載電池の初期電力量(kWh)で規格化した一次(車両)使用時の総電力量	(S2)式
NSE *NSE’*	搭載電池の初期電力量(kWh)で規格化したリユース時に残された生涯電力量	(S7)式 (S8)式
En_{bat_ini}	車載電池の初期電力量 (kWh)	71.4
Eef_{ave}	車両の平均電費 (km/kWh)	7.63
C_{bat}	電池の稼働補正係数 （回生時の電池稼働等を考慮）	1.1
L_g	車両で電池保証する車両総走行距離 (km)	160,000 or 200,000
SOH_g	車両で電池保証する下限SOH	0.7
cn_g	電池保証範囲にて全生涯における正味の充放電サイクル数 (回)	(S5)式
L_p	一次(車両)使用における実総走行距離 (km)	20,000 ~ 60,000
SOH_p	一次(車両)使用後のSOH	0.83, 0.86, 0.90
cn_p	一次(車両)使用期間中の正味の充放電サイクル数 (回)	(S3)式
a	サイクル数に対する劣化速度係数	(S4)式
SOH_{EOL}	電池のEOL時のSOH	0.7
SOH_R	回復処理後のSOH	0.95

生涯電力量の計算式

①製造・出荷時の生涯電力量 *NLE*

$$NLE = \frac{C_{bat} \times L_g}{Eef_{ave} \times En_{bat_ini}} \quad (S1)$$

②リユース時に残された生涯電力量 *NSE*

$$NPE = \frac{C_{bat} \times L_p}{Eef_{ave} \times En_{bat_ini}} \quad (S2)$$

$$cn_p = \frac{3 \times NPE}{(1 + 2 \times SOH_p)} \quad (S3)$$

$$a = \frac{1 - SOH_p}{\sqrt{cn_p}} \quad (S4)$$

$$cn_g = \left(\frac{1 - SOH_{EOL}}{a}\right)^2 \quad (S5)$$

$$NLE' = \frac{cn_g \times (1 + 2 \times SOH_{EOL})}{3} \quad (S6)$$

$$NSE = NLE' - NPE \quad (S7)$$

③リユース時に回復処理した場合に残された生涯電力量 *NSE’*

$$NSE' = NLE' - \frac{\left(\frac{1 - SOH_R}{a}\right)^2 \times (1 + 2 \times SOH_R)}{3} \quad (S8)$$

※ここで *NLE’*は(S6)式より、a は(S4)式より

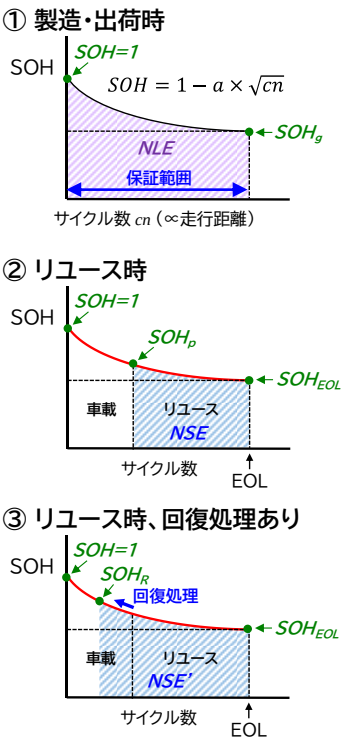


図 S1. 生涯電力量の計算イメージ

欧州バッテリー規則における Circular Footprint Formula の算定事例とそのあり方について

Calculation examples and the approach of the Circular Footprint Formula under the European Battery Regulation

○八柳就*[1)]、神崎 昌之[1)]、山岸 健[1)]
Shu Hachiyanagi, Masayuki Kanzaki, Ken Yamagishi
1)株式会社 LCA エキスパートセンター
* s_hachiyanagi@lca-expert.co.jp

1. はじめに

LCA の算定手法は、多くの場合でカットオフ手法（cut-off approach）[1)]が適用されている。カットオフ手法とは、二次材料の回収後及び供給前のプロセスが評価対象製品のシステムから切り離され、消費する二次資源の上流での負荷はゼロとし、回収された二次資源の影響を考慮しない算定方法を示す。ただし、将来的なリサイクルの効果を表現する場合等は、別の算定手法が必要となる。

2023 年 8 月に改定された欧州バッテリー規則[2)]では、バッテリーのカーボンフットプリント（以下、「CFP」という）の算定及びその報告が義務付けられている。算定においては、欧州委員会が公開している製品環境フットプリントの実施ガイダンス（Product Environmental Footprint Category Rules Guidance ver6.3,PEFCR）の中で定められている Circular Footprint Formula（以下、「CFF」という）を用いた算定が必須とされている。

CFF とは、リサイクル材の使用や将来リサイクルされる可能性などへの対応を考慮した算定手法（回避効果手法）である。しかしながら、CFF は二次資源の割合、リサイクルされる材料の割合等を示す係数が設定された複雑な算定式のため、算定に係る負担が大きいと考えられる。

そこで本研究では、LCA 算定において、資源循環とカーボンニュートラルの両立における、実現性の高いリサイクル効果の定量化方法を検討することを目的とし、CFF の適用有無による算定結果の分析を行った。

2. 研究方法

2.1 対象とした範囲と機能単位

本研究では、算定に用いる式や CFF に用いる係数の差異による算定結果への影響を確認するため、電気自動車用バッテリーに使用されるすべての材料を算定対象とはせず、電気自動車用バッテリーセルに使用されるアルミニウムのみを算定対象とした。なお、CFF の適用の有無による効果を分析するため、原材料調達段階、EoL 段階のみを算定対象とした。

算定に使用する活動量データは文献値[3)]とする。機能単位は車載用バッテリーパック 1 個あたりとした。

2.2 評価プロセス

本研究では①CFF を適用した算定（バージン材が投入され、二次資源として回収されない場合）、②CFF を適用した算定（リサイクル材が投入され、使用後も二次資源として回収される場合）、③カットオフ手法を適用した算定の 3 パターンで試算を行うこととした。

算定に使用した CFF は以下の(1)原材料投入(Material input)、(2)セルのリサイクル(Cell recycling)である。本研究では、バッテリーセルに用いられているアルミニウムを対象としているため、原材料調達段階、バッテリーセルのリサイクルに係る 2 種の式を用いることとした。CFF には係数が設定されており、①は欧州バッテリー規則委任規則案の中で設定されているデフォルト値を使用、②は条件に合わせ係数を設定した。

$$(1)\cdots\sum_{Mat}\left[\left(1-R_{1_Mat}\right)\cdot E_{V_Mat}+R_{1_Mat}\cdot\left(A_{Mat}\cdot E_{recycled_Mat}+\left(1-A_{Mat}\right)\cdot E_{V_Mat}\cdot\frac{Q_{Sin_Mat}}{Q_{P_Mat}}\right)\right]$$

$$(2)\quad\cdots+R_{Return}\cdot\sum_{Mat}\left[\left(1-A_{Mat}\right)\cdot R_{rec,\,c_Mat}\cdot\left(E_{recEoL_Mat}-E^{*}_{V_Mat}\cdot\frac{Q_{Sout_Mat}}{Q_{P_Mat}}\right)\right]$$

また、算定に用いるデータベースは IDEA を使用した。本研究における影響領域は欧州バッテリー規則同様、気候変動とした。

3. 結果及び考察

3.1 原材料調達段階の算定結果

原材料調達段階の算定結果を図 1 に示した。CFF を適用した①及び②とカットオフ手法を適用した③において、使用する二次材料の割合の増加に合わせて、GHG 排出量が減少する傾向が確認された。CFF を適用

する場合と比較し、カットオフ手法を適用した算定のほうが二次資源の使用における GHG 排出量の減少傾向が大きいことが確認された。CFF では、リサイクル材の供給側と使用側の間で排出と間接的な排出削減効果を配分するための配分係数（A_{Mat}）が設定されており、二次資源の供給前のプロセスにおける排出も算定結果に含まれていることから、上述の傾向が出ていると解釈される。

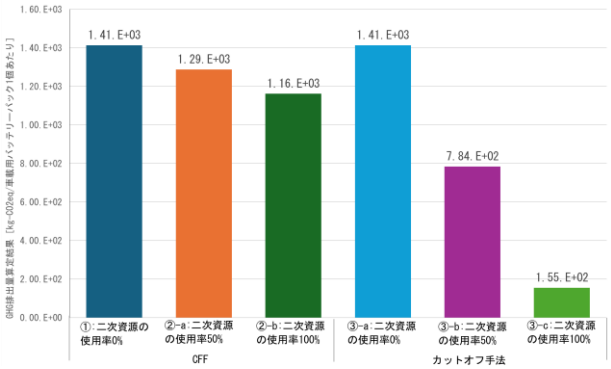


図 1　原材料調達段階（式(1)）の算定結果

3.2 EoL 段階の算定結果

EoL 段階の算定結果を図 2 に示した。CFF を適用した①及び②では、リサイクルされる材料割合の増加に合わせて、GHG 排出量が減少した。カットオフ手法を用いた③では、リサイクルされる材料の割合の増加に合わせて、GHG 排出量が増加する傾向が確認された。

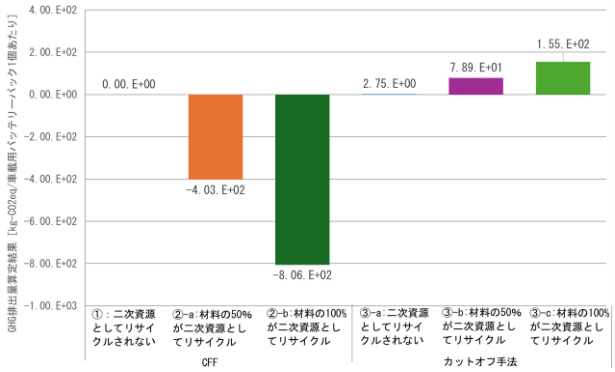


図 2　EoL 段階（式(2)）の算定結果

3.3 原材料調達段階と EoL 段階の算定結果を加味した結果の分析

原材料調達段階と EoL 段階の算定結果を合算した結果を図 3 に示した。CFF、カットオフ手法の両者の算定結果の合計値に大きな差異はなく、差異が出るのは二つのライフサイクル段階における配分の仕方である。CFF は今後の材料のリサイクル技術の普及にあわせてリサイクル効果のインセンティブの度合いを設定できるため、資源循環に関わる表現の自由度がより高い手法であると解釈される。

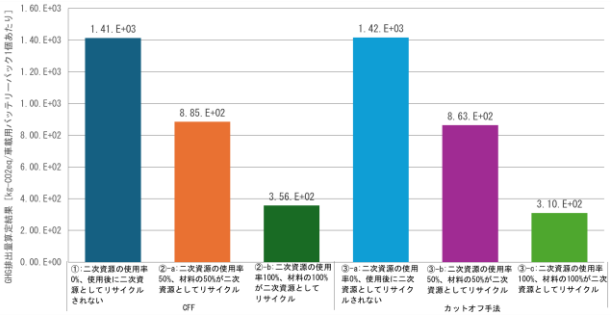


図 3　原材料調達段階、EoL 段階の算定結果の合計値

4. おわりに

CFF とカットオフ手法を用いて GHG 排出量分析を行った結果、算定手法の違いによる算定結果への影響を確認し、カットオフ手法と比較して、CFF ではリサイクル材の使用や将来リサイクルされる場合の効果を配分のパラメータによって調整できることを確認した。

CFF は、式の複雑性、係数の意味を理解しなければならない等の観点より、算定に係る負荷が大きかった。今後、CFF の適用がデファクトスタンダード化し、CFF を用いて LCA 算定を行う場合、算定ツールの作成等が有効的と考えられる。

また、CFF はあくまで欧州の環境政策の中で設定されている算定式であり、算定式内で設定されている係数は欧州における活動、技術をもとに設定されているため、日本を含めた欧州域外の活動について算定する場合、各国の活動、技術を算定結果に反映できない可能性があるといった課題も挙げられる。

5. 参考文献

1) 醍醐 市朗: 日本 LCA 学会誌,19 (2), (2023), pp.64-71
2) 欧州委員会：Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC (Text with EEA relevance),An official EU website,（オンライン），入手先＜https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj＞,（参照 2025-1-14）
3) Xin Sun, Xiaoli Luo, Zhan Zhang, Fanran Mang, Jianxin Yang : Journal of Cleaner Production, 273, (2020),123006

口頭発表セッション

2025年3月7日(金) 9:20 ~ 10:40 F会場：2333小講義室（3F）

[3-F1] フットプリント

座長：中野 勝行 (立命館大学)

9:20 ~ 9:40

[3-F1-01]

1961年から2021年における日本の食料窒素フットプリントの変遷要因分析

*種田 あずさ[1]、川島 一真[2]、仁科 一哉[3]、花岡 達也[3] (1. 農研機構、2. 三菱ＵＦＪリサーチ＆コンサルティング、3. 国立環境研究所)

9:40 ~ 10:00

[3-F1-02]

IDEAを活用した窒素フロー分析

*一杉 佑貴[1]、塚原 建一郎[1]、田原 聖隆[1] (1. 国立研究開発法人産業技術総合研究所)

10:00 ~ 10:20

[3-F1-03]

物量に基づいた水処理設備製造における温室効果ガス排出量評価手法

*和田 賢明[1]、中野 勝行[2]、斉藤 博之[1]、高岡 佑介[1]、松浦 純子[1]、石川 浩朗[1] (1. 栗田工業株式会社、2. 立命館大学)

10:20 ~ 10:40

[3-F1-04]

米国への移民流入・流出がカーボンフットプリントに与える影響分析

*戸田 遥香[1]、西藤 和佳[1]、加河 茂美[1] (1. 九州大学)

©日本LCA学会

1961 年から 2021 年における日本の食料窒素フットプリントの変遷要因分析

Factor Analysis of Changes in the Food Nitrogen Footprint of Japan from 1961 to 2021

○種田あずさ*[1)]、川島一真[2)]、仁科一哉[3)]、花岡達也[3)]
Azusa Oita, Kazumasa Kawashima, Kazuya Nishina, Tatsuya Hanaoka
1) 農研機構, 2) 三菱ＵＦＪリサーチ＆コンサルティング, 3) 国立環境研究所
* a.oita@affrc.go.jp

1. はじめに

農地に肥料等として投入された窒素の多くは、食品として摂取するまでに窒素化合物として環境中に放出される。窒素ガスを除く窒素化合物は反応性窒素と総称され、大気や水質の汚染、地球温暖化等の原因となる。そのため、2022 年の国連環境総会では、加盟国に「2030 年までに窒素廃棄物の顕著な削減」を奨励する、持続可能な窒素管理に関する決議が採択された。これを受けて、2024 年には、日本における「持続可能な窒素管理に関する行動計画」が策定されるなど、持続可能な窒素管理の必要性が高まっている。

食料やモノ・サービスの消費が、そのライフサイクルを通じてどの程度窒素負荷をかけているのかを示す指標に窒素フットプリントがある[1)]。既往研究[2,3)]では、日本の食料窒素フットプリント（NF）は、1990 年代半ばまでは増加傾向、その後は 2010 年代前半にかけて減少から横ばい傾向であることが報告され、その理由は、肉類の摂取量が増加し続けていることと、窒素利用の効率化と肉類以外の消費量の減少であることが示されている。しかし、この食料 NF の変化要因のそれぞれがどの程度寄与しているかは明らかになっていない。

本研究では、日本の食料 NF の経年変化に対する食品群別摂取量の変化、窒素利用の効率性、輸入率の 3 要因の寄与について分析した。

2. 方法

2.1 食料窒素フットプリントの算出

1961 年から 2021 年を対象期間とし、既往研究[3)]と同様の方法で以下の通り算出した。

まず、食品として摂取した消費窒素（CN）について、食品分類（i）・年別に、タンパク質重量当たりの窒素量を 16%として、一人当たり年間食料タンパク質供給量（SP）と消費者レベルでの食品廃棄率[3)]（a）を用いて式(1)により算出した。SP は、国際連合食糧農業機関（FAO）の食料需給表（2010 年以前は旧データベース、2011 年以降は新データベース）の細分類のうち、SP の値がある 86 分類の値を用いた。次に、食料 NF について、CN に対する「食料生産の過程で環境中に排出された反応性窒素の比率」である仮想窒素係数（VNF）と、輸入率（b）、下水除去率（w）とを用いて、式(2)により算出した。国産品の VNFj と輸入品の VNFf は 2013 年以前については既往研究値[3)]、2014 年以降については既往研究[3)]と同様に求めた値を用いた。輸入率は、FAO の食料需給表の国内生産量の値を「国内生産量に輸入量を加えて輸出量で引いた値」で除して求め、100%を超過する場合は 100%とした。他の要因に着目するため、下水除去率（w）については、0%で固定した。

$$CN_i = SP_i \times 0.16 \times (1 - a_i) \quad (1)$$

$$NF = \sum_i^{83}[CN_i \times \{VNFj_i \times (1 - b_i) + VNFf_i \times b_i\} + CN_i \times (1 - w)] \quad (2)$$

2.2 要因解析

各要因に着目した食料 NF については、2000 年を基準年とし、変化要因以外を基準年値に固定して算出した。摂取食品変化は食品廃棄率、VNF、輸入率を、VNF 変化はタンパク質供給量と輸入率を、輸入率変化はタンパク質供給量、食品廃棄率、VNF の値を固定した。

3. 結果

1961 年から 2013 年までの食料 NF 解析では、乳製品、牛肉、豚肉の寄与が大きかった（図 1）。基準とした 2000 年の日本の食料 NF は 21.4 kgN/人/年であった。

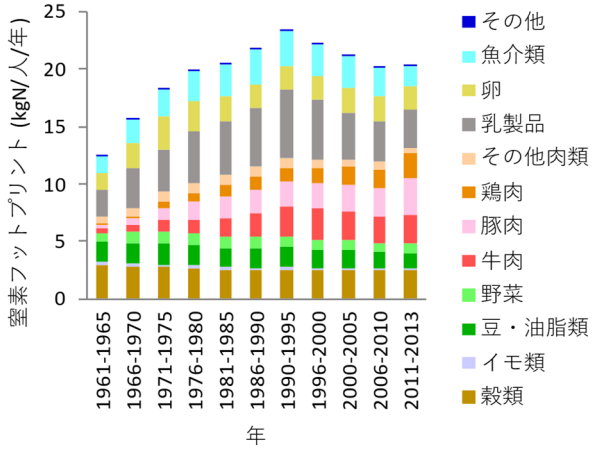


図 1 食料窒素フットプリントへの各食品群の寄与

この食料 NF の値は、下水処理による窒素除去率を考慮すると 1.5 kgN/人/年低い 19.9 kgN/人/年であり、

欧州の中位国（17 kgN/人/年～24 kgN/人/年）[1]と同程度である。また、肉食の多い米国（28 kgN/人/年）や豪州（32 kgN/人/年）より低く[1]、インド（11.4 kgN/人/年）やタンザニア（14 kgN/人/年）等より高い[1,3]。2014 年以降の結果については、発表の中で紹介する。

各年と基準年との日本の食料 NF の差分について要因別にみると、食料全体では、摂取食品の変化が最も大きく寄与し、基準年に対して NF を減少させていた（図 2）。

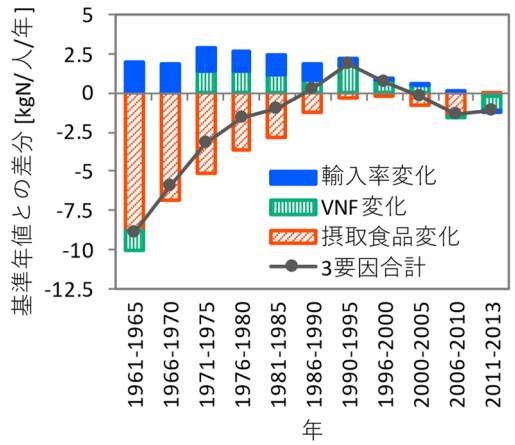


図 2 食料窒素フットプリントに対する 3 要因の寄与

各要因をみると、摂取食品のみを変化させた場合の食料 NF は、全体としては 1960 年代から 2000 年のピークまで増加した後、減少傾向に転じ、さらに横ばい傾向となった。一方、豚肉・鶏肉に関してはその後も増加傾向が続いた（図 3）。

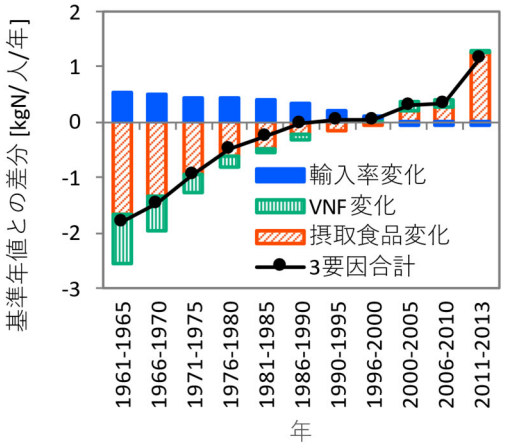


図 3 豚肉窒素フットプリントに対する 3 要因の寄与

VNF を変化させた場合の食料 NF は、緩やかではあるものの、1960 年代から 1973 年まで増加した後、上下にやや変動し、1990 年代後半から減少傾向となった。穀類・魚介類では 1960 年代から 1980 年代前半まで増加傾向、肉類では 2005 年頃まで増加傾向が続いた。

一方で、乳製品では 1960 年代後半から 1980 年代前半と 1990 年代後半から 2000 年代前半にかけて顕著に減少傾向を示し、卵では 1960 年代から 1970 年代前半まで大きく増加した後、1970 年代後半から 1980 年代後半にかけて大きく減少した。

輸入率のみを変化させた場合の食料 NF は、全体としては、2000 年ごろまで僅かに減少した後、横ばいとなった。肉類においては、2000 年ごろまで、特に 1980 年代以降に輸入率が増加し、これにより国産物の VNF と比べて低い輸入 VNF の割合が増え、食料 NF の減少傾向が見られた。

4. 考察

1960 年代から 1990 年半ばにかけての食料 NF 増加の主要因は、経済成長や食の欧米化に伴って豚肉・鶏肉を中心とする肉類需要が増加したことと示唆された。加えて、肥料使用量増加等による窒素利用効率の低下も食料 NF を増加させていた。その後、肥料使用の適正化が進み、タンパク質摂取量もやや減少傾向であるため、食料 NF が漸減している。これらの 2 要因と対照的に、輸入は、2013 年までのほぼ全期間において食料 NF の低減要因となっていた。輸入品の増加は、国内での窒素負荷低下をもたらすものの、根本的な負荷削減には、輸入相手国での生産プロセス改善や、技術移転による窒素管理の効率化が必要である。本研究の手法では、輸入品の VNF は各食品群・年別に中国・インド・日本の平均値を用いているが、これを肉類など重要な食品群について輸入相手国別に設定し、詳細な VNF を用いることで、解析を精緻化し、具体的な対策の検討が可能となる。

食料 NF 低減には、食生活において窒素負荷の低い食品へのシフトをすることが重要であるが、同時に、低窒素飼料の導入や土壌窒素のモニタリング強化などによる窒素利用効率の改善とや、消費者レベルでの食品ロスの削減、日本の輸入相手国での生産における窒素負荷低減への取組にも配慮する必要がある。

5. 謝辞

本研究は環境省・（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20235001）により実施した。

6. 引用文献

1) Shibata, H., et al.: Ambio, 46 (2), (2017), pp 129–142
2) Oita, A., Nagano, I., Matsuda, H.: Ambio, 47, (2018), pp. 318–326
3) Oita, A., Wirasenjaya, F., Liu, J., Webeck, E., Matsubae, K.: Resour. Conserv. Recycl., 157, (2020), 104752

IDEA を活用した窒素フロー分析

Nitrogen flow analysis using IDEA

○一杉佑貴*[1)]、塚原建一郎[1)] 田原聖隆[1)]
Yuki Ichisugi, Kenichiro Tsukahara, Kiyotaka Tahara
1) 国立研究開発法人　産業技術総合研究所
*y0110.ichisuig@aist.go.jp

1. 背景

2019 年の国連環境総会[1)]にて持続可能な窒素管理について決議が採択され、2030 年までに環境に影響を及ぼす反応性窒素: Nr (Reactive Nitrogen)（窒素ガス以外の窒素化合物（NO、N_2O など））の排出を削減することに国家規模で取り組むことが推奨された。これを受けて、日本では 2024 年 9 月に「持続可能な窒素管理に関する行動計画」[2)]が策定された。この中では、農作物の栽培時に投入する化学肥料が水圏に流れることによる水質汚濁の影響や、カーボンニュートラルの実現に向けた燃料としてのアンモニア利用時の大気環境への排出抑制について指摘された。その対策をするために、まずは窒素の入力と出力でバランスのとれたマテリアルフローを把握することが重要であることが指摘された。

その対策として、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のムーンショット型研究開発事業[3)]にて、産業技術総合研究所では排出される反応性窒素を有効活用する窒素循環技術の開発が進められてきた。これは、工場から排出される反応性窒素をアンモニアに変換して、再利用するという技術である。この技術を導入するにあたり、窒素入力の多いところを把握し、反応性窒素の排出が多いところに技術導入を検討する必要がある。したがって、本研究では、国内の窒素フローを把握するため、IDEA のプロセスデータにおける窒素の入出力量を整備し、製品ごとの年間生産量を考慮した、年間窒素入出力量を整備した。これまで整備してきた化学工業製品の窒素データ[4)]をもとに、化学工業製品を原材料として入力する繊維業やプラスチックなどを対象にデータ整備した。

2. 研究方法

本研究では、製品ごとの入出力項目に対する窒素入出力量を整備するため、AIST-IDEA v3.4[5)]のインベントリデータベースをもとに窒素入出力量の整備を行った。

2.1 製品ごとの窒素含有量と入出力量の整備

図 1 はプロセスデータをもとに作成した単位製品あたり窒素の入出力量を図示した概念図である。図中の製品 A を 1kg 製造するために、入力データとして材料 a，材料 b と空気、エネルギーの入力を表し、出力データとして製品 A と製造段階で排出される CO_2 や N_2O など環境負荷物質の出力を表した。

ここで、入出力項目ごとに窒素含有率を整備する。原材料のうち化学式の式量が明確なものや、組成が明確なものは、原材料の重量中の窒素量で窒素含有率を算出する。環境中から投入される空気は、空気中の重量比で窒素含有率を算出した。製品の物質構成比が明確な場合は、製品重量中の窒素量で窒素含有率を算出する。そうでない場合は、原材料に含まれる窒素投入量から、環境中に排出される窒素との差分を、製品に含まれる窒素量として窒素含有率を整備した。

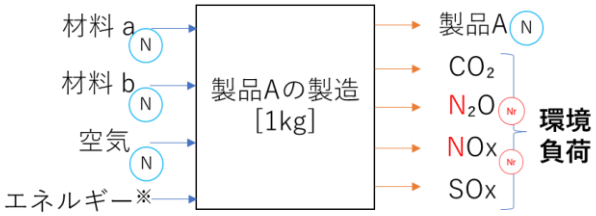


図 1　単位製品あたり窒素量の概念図

窒素のバランスは、原材料に含まれる窒素量と環境中から取り込む窒素量の和が、製品に含まれる窒素量と環境中に排出される窒素量の和が等しくなることで取れるようにした。

2.2 窒素フローの把握

IDEA のプロセスデータにおける中間フローの入出力の項目から、製品同士の入出力の関係図を作成することができる。図 2 はアンモニアを起点とした製品の関係図である。空気中の窒素を取り込んで製造されるアンモニアは、硝酸、尿素、アクリロニトリルなどの原材料になる。さらに、硝酸は医薬品、尿素は化学肥料の原材料として入力される。このような関係図を積み上げることにより、窒素がどの原材料に含まれ、どの製品に含まれるという関係図を作成することが可能となる。この関係図において、最終製品の年間生産量を考慮することで、必要な原材料が算出され、窒素を含む製品がどれくらい窒素を含む原材料を年間で入力するのかという情報を得ることができる。このように、

単位製品あたりのプロセスデータから得られる製品同士の関係図から、年間生産量を考慮することにより、年間の窒素フローを把握できるようにした。

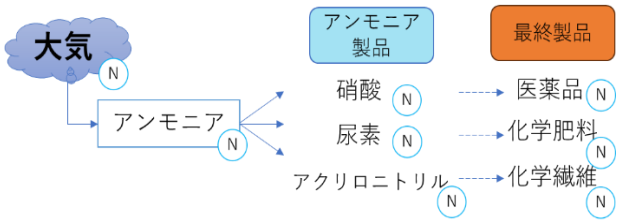


図 2　アンモニア起点の入出力関係図

3. 研究結果

図 3 は窒素データを整備したプロセスデータに 2015 年の年間生産量を考慮した、アンモニア起点の窒素フローを図示したものである。化学工業のアンモニアに利用されるアンモニアは 1,800 [kt-N]と推計され、硝酸や尿素などアンモニアを原材料とする化学製品に投入されることが可視化された。製品ごとの窒素バランスについては、硝酸を例に赤枠で書き出した。原材料のアンモニアとして入力される窒素量と硝酸に含まれる窒素量、脱硝される窒素量、N_2O として環境中に排出される窒素量を出力として可視化することができた。また、化学工業から、化学繊維として繊維業へ入力される窒素量､化学肥料として農業に投入される窒素量､樹脂としてプラスチック製品に投入される窒素量を可視化することができた。

4. まとめ

本研究では IDEA のプロセスデータにおける入出力量から窒素バランスの取れたデータを整備し、年間生産量を考慮することで窒素フローを可視化することができた。今後はさらに他の産業の窒素量を整備することで、国内全体の窒素フローを可視化し、最終的に窒素循環技術の導入先を検討する。

謝辞

本研究は、NEDO のムーンショット型研究開発事業によって得られた成果である。

引用文献

1) UNEA, “Proceeding, Report, ministerial declaration, resolution and decisions UNEA5.2”, （オンライン）入手先 <https://www.unep.org/environmentassembly/unea-5.2/proceedings-report-ministerial-declaration-resolutions-and-decisions-unea-5.2>, （参照 2025-1-21）
2) 環境省: “持続可能な窒素管理に関する行動計画”, (2024 年)
3) ムーンショット型研究開発事業, 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（オンライン）, 入手先 <https://www.nedo.go.jp/content/100923466.pdf>, （参照 2025-1-21）
4) 一杉佑貴, 塚原建一郎, 田原聖隆.: “第 19 回日本 LCA 学会研究発表会”, 宇都宮大学（2024）,pp.382-383
5) AIST-IDEA v3.4, 産業技術総合研究所, 入手先, (オンライン), ＜https://riss.aist.go.jp/idealab/＞（参照 2025-1-21）

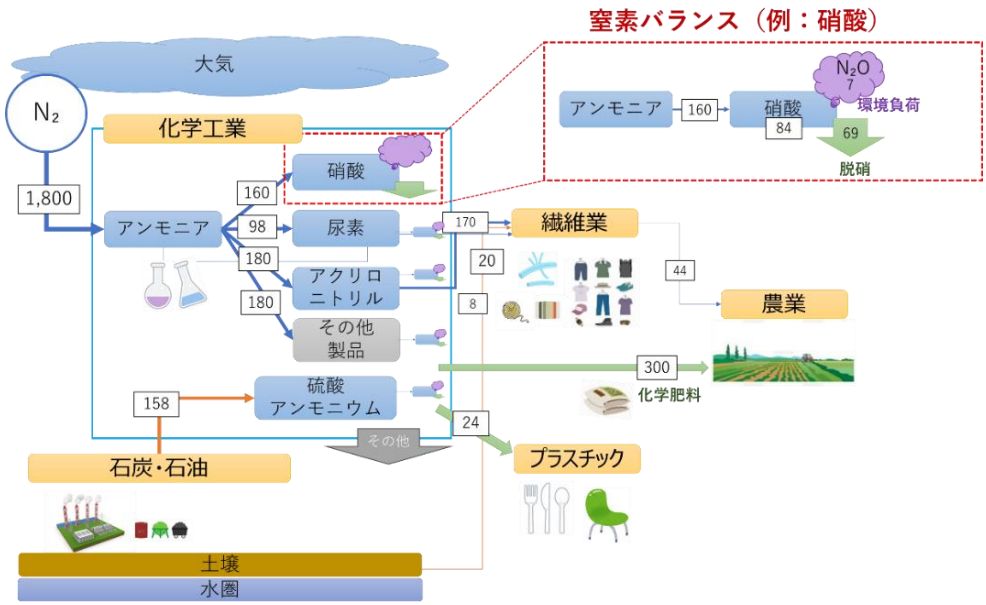


図 3　アンモニア起点の窒素フロー図（2015 年）[kt-N]

物量に基づいた水処理設備製造における温室効果ガス排出量評価手法

Evaluation methods for Greenhouse Gas emission in the Water Treatment System construction based on the weight.

○和田賢明*[1)]、中野勝行 [2)]、斉藤博之 [1)]、高岡祐介 [1)]、松浦純子 [1)]、石川浩朗 [1)]
Takaaki Wada, Katsuyuki Nakano, Hiroyuki Saito, Yusuke Takaoka, Junko Matsuura, Hiroaki Ishikawa
1) 栗田工業株式会社, 2) 立命館大学
* t.wada56@kurita-water.com

1. はじめに

水処理設備製造における温室効果ガス(GHG)排出量の算出は、平成 14 年度発行の環境調和型水処理技術ガイドラインで、産業連関表を用いた金額に基づく算出法が報告されている。しかし、金額に基づく算出法では、付加価値の高い水処理設備の GHG 排出量がより高く算出され、技術進化の方向性を示唆出来る算出方法としては課題が残る。

そこで筆者らは物量に基づく評価を行うため、IDEA Ver.3.4 を用いて水処理設備製造時の GHG 排出量を算定したところ、水処理設備において特に支配的な項目は、鉄加工品である水処理製缶および配管ラックであることが分かった。ただし、IDEA には多数の製品が登録されているもののデータの粒度の違いから厳密に合致する原単位は存在せず、あくまで適当だと思われる原単位を選択したうえでの算定結果である。

そこで本調査は、特に支配的な項目である水処理製缶および配管ラックにおいてより実態に沿った値で算出するために、製作に係る GHG 排出量を調査し新たな原単位を定義することを目的とした。

2. 調査手法

2.1 製作プロセス

水処理製缶および配管ラックの製作プロセスを以下に示す。

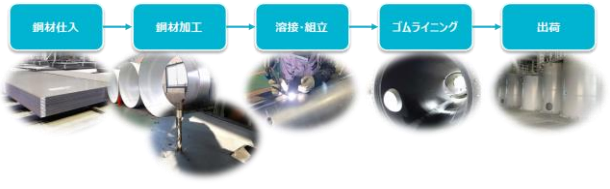


図 1-1　製缶の製作プロセス

鋼材を仕入れ、穴あけ・切断・曲げ等の鋼材加工をした後、溶接・組立を行う。その後、ゴムライニング処理を行い製品が完成する。なお、水処理製缶はゴムライニング処理を施す場合とそうでない場合があるが、水処理設備として重要なイオン交換塔等はゴムライニング処理を施すため、本調査の対象とした。

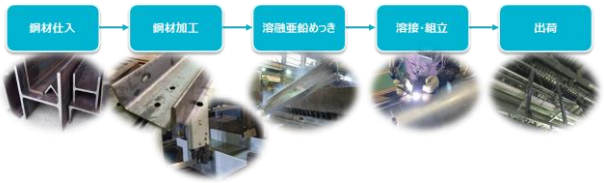


図 1-2　配管ラックの製作プロセス

鋼材を仕入れ、穴あけ・切断・曲げ等の鋼材加工をした後、溶融亜鉛めっき処理を行う。その後、溶接・組立を行い製品が完成する。なお、配管ラックも製缶同様、溶融亜鉛めっき処理を施す場合とそうでない場合があるが、当社では配管ラックには溶融亜鉛めっき処理することを標準としているため、本調査の対象とした。

2.2 評価範囲

本調査では鋼材加工、溶接・組立、ゴムライニング、溶融亜鉛めっきの工程を対象に現地調査を行い、一次データを収集した。システム境界は資源採取から水処理製缶および配管ラックの製作までとした。

2.3 調査データ

フォアグラウンドデータとして原材料の重量および加工に係る電力・燃料使用量を収集した。バックグランウドデータとして IDEA Ver.3.4 を用いて、製缶および配管ラック 1kg あたりの GHG 排出量に換算し、内訳を整理した。

3. 結果と考察

3.1 水処理製缶 1kg あたりの GHG 排出量

水処理製缶 1kg あたりの GHG 排出量について、それぞれの排出原単位を以下に示す。

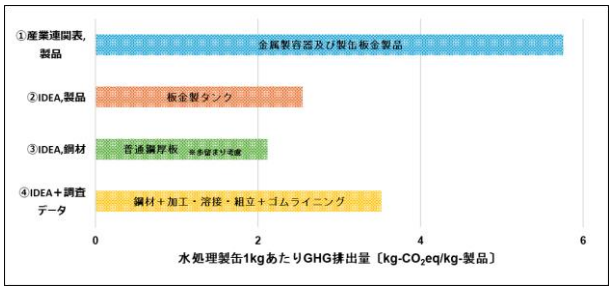


図 2-1　水処理製缶 1kg あたりの GHG 排出量

ここで、金額ベースの数値(①)と物量ベースの数値(②または③)を比較すると、金額ベースの数値は物量ベースの数値に比べて約 2 倍大きいことが分かる。このように、金額ベースの数値は過大に算出されることがあるばかりか、低炭素型など付加価値の高い製品の GHG 排出量が見かけ上高く算出されるため、IDEA 等を用いた物量に基づく評価を行うことが望ましいと考える。

また、物量ベース同士(②～④)を比較すると、今回の調査データ(④)は、製缶に該当すると考えられる製品(②)とも、水処理製缶の主の資材である鋼材(③)とも異なる数値となった。差異の要因として、②ではゴムライニング分が、③では鋼材加工とゴムライニング分が勘案されていないためである。しかし、実際には鋼材加工やゴムライニングの影響を無視することはできないため、今回の調査結果を基に算出した 3.52kg-CO_2eq/kg-製品という数値を水処理製缶の原単位として新たに定義し、算出時に活用することとする。

なお、調査結果を基に水処理製缶製作プロセスにおける入出力データを整理すると、単位プロセスデータは以下のように示すことができる。

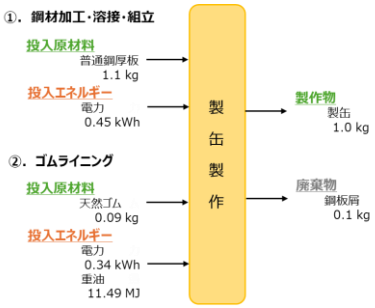


図 2-2　水処理製缶の単位プロセスデータ

3.2 配管ラック 1kg あたりの GHG 排出量

配管ラックについても製缶と同様の調査を行ったところ、以下の結果を得た。なお、言及すべき事項は前項の製缶と同様であるため、ここでは調査データをもとに定義した原単位と入出力データの結果のみを示す。

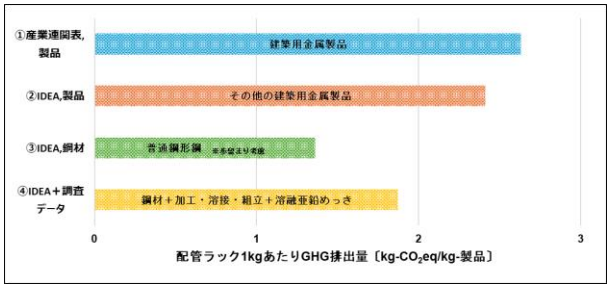


図 3-1　配管ラック 1 kg あたりの GHG 排出量

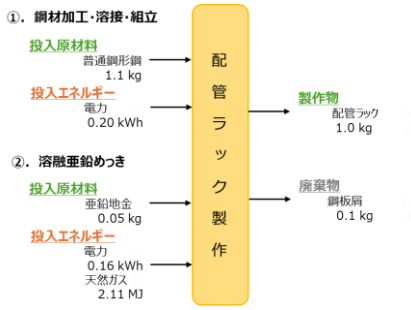


図 3-2　配管ラックの単位プロセスデータ

配管ラックの原単位として、1.87kg-CO_2eq/kg-製品という数値を得た。

4. まとめ

IDEA には多数の製品が登録されているもののデータの粒度の違いから水処理設備製造に全て合致する原単位は存在しないため、本調査では特に影響の大きい水処理製缶および配管ラック製作に係る GHG 排出量を調査した。その結果、水処理製缶および配管ラックの原単位はそれぞれ 3.52kg-CO_2eq/kg-製品、1.87kg-CO_2eq/kg 製品と算出し、これらの数値を新たな原単位として定義した。今回定義した原単位は、IDEA に登録されている原単位では考慮されていない鋼材加工やゴムライニング、溶融亜鉛めっきに係る GHG 排出量についても勘案しており、より実態に沿った値で水処理設備製造時の GHG 排出量を算出することが可能になると考える。

5. 今後の展望

水処理設備の GHG 排出量を金額ではなく物量に基づく評価手法で算出することで、付加価値の高い水処理設備の GHG 排出量が見かけ上高く算出されてしまう課題を解決し、適正な評価が可能となる。ユーザやメーカが水処理設備を選択する際、本調査結果が幅広く利用されることによって、低 GHG 水処理設備の技術進化および普及を期待する。

6. 謝辞

本調査にあたり、各製作業者さまより多数のデータ提供を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

引用文献

1) 産業技術総合研究所安全科学研究部門 IDEA ラボ：LCI データベース IDEA Ver.3.4,(2024)
2) 経済産業省：平成 14 年度環境調和型水処理技術ガイドライン調査報告書,(2003)
3) 一般社団法人 LCA 推進機構,基礎から学ぶ LCA(ライフサイクルアセスメント) ～LCA の実施と活用～,(2023)

口頭発表セッション

2025年3月7日(金) 11:00 ~ 12:20 F会場：2333小講義室（3F）

[3-F2] シェアリング、グリーン購入

座長：天沢 逸里 (東京大学)

11:00 ~ 11:20

[3-F2-01]

シナリオ分析を用いたサービス志向型サーキュラーエコノミービジネス改良設計支援

*澤田 雄生[1]、木下 裕介[1]、木見田 康治[1]、天沢 逸里[2]、鈴木 修[3] (1. 東京大学、2. 早稲田大学、3. 株式会社クラス)

11:20 ~ 11:40

[3-F2-02]

Environmental outcomes of the sharing economy: Integrating consumer choice and product circulation modeling using a bike-sharing case study

*Clemm Christian[1]、Watanabe Tatsuki[1]、Kishita Yusuke[1] (1. The University of Tokyo)

11:40 ~ 12:00

[3-F2-03]

乳幼児用品のシェアリングを対象とした環境影響評価：ベビーベッドの例

*前田 梨香[1]、橋本 征二[1] (1. 立命館大学)

12:00 ~ 12:20

[3-F2-04]

グリーン購入法適合製品の調達によるGHG削減効果の試算

*オ ルガ[1]、宮本 拓郎[2] (1. 早稲田大学、2. 関東学院大学)

©日本LCA学会

シナリオ分析を用いたサービス志向型サーキュラーエコノミービジネス改良支援手法の提案

Proposal of an improvement support method for service- oriented circular economy business using scenario analysis

○澤田雄生*[1)]、木見田康治[1)]、天沢逸里[2)]、鈴木修[3)]、木下裕介[1)]
Yusei Sawada*[1)], Koji Kimita[1)]、Eri Amasawa[2)]、Osamu Suzuki[3)]、Yusuke Kishita[1)]
1) 東京大学, 2) 早稲田大学, 3) 株式会社クラス
* sawada-yusei1588@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

サーキュラーエコノミーの実現に向けて、顧客に対して必要な製品機能やサービスを提供することで、価値創出とライフサイクル全体の環境負荷削減の両立を図るビジネスが注目を集めている。このようなビジネスを、本研究ではサービス志向型サーキュラーエコノミー（SoCE）ビジネスと呼ぶ。例として、衣服レンタルや家具・家電レンタルが挙げられる。これらのビジネスの特徴として、デジタルプラットフォームを活用した事例が多い。そこから得られる顧客情報や注文情報などの取引データは、事業性と環境性の向上のために製品の循環率を改善する目的などで活用されている。しかし、これらのデータを活用することで、ユーザの受容性や選好を考慮しながら SoCE ビジネスを環境的・経済的な観点から改良するための方法論は確立していない。これに対して本研究では、データ活用に基づく SoCE ビジネス改良プロセスの開発を目的とする。ここでは、データに基づいて作成する SoCE ビジネス評価モデルと既存事例を用いて作成した改良シナリオを組み合わせることによって、SoCE ビジネスの改良を支援する。提案手法の有効性を検証するため、家具家電レンタルビジネスに対する事例分析を実施する。

2. データ活用に基づく SoCE ビジネス改良支援手法

2.1 アプローチ

本研究では、データ活用に基づく SoCE ビジネス改良支援プロセスの開発を目的とする。プロセスの流れとしては、環境性と事業性に関する目標を設定した上で、改良箇所の特定、改良案の作成、改良案の評価を繰り返すことで、設定目標の達成を目指す。

このプロセスを実行する際の課題として、(1) 様々な改良案を生成すること、(2) 改良案にともなう顧客の需要変化を推計し、さらにその結果に応じた環境性・事業性に対する効果を評価すること、が挙げられる。これらの課題に対して、本研究では図 1 のアプローチをとる。すなわち、(1)に対しては SoCE ビジネスの事例と SoCE ビジネスパターン[1)]を用いて改良シナリオを作成する。(2)に対しては、データに基づいて SoCE ビジネス評価モデル（2.2 節参照）を作成する。SoCE ビジネス評価モデルは、顧客モデルと製品ライフサイクルモデルの 2 つのサブモデルから構成する。

2.2 SoCE ビジネス評価モデルの作成

2.2.1 SoCE ビジネスに対する顧客モデル

SoCE ビジネスにおいて、ユーザが複数の製品を比較して 1 つの製品を選択するプロセスをモデル化する。本研究では、条件付きロジットモデル (Conditional Logit Model)[2)]を用いる。考慮すべき製品属性（例えば、価格やサイズ）を決定した上で、製品ごとの効用に基づいて選択確率を算出する。ユーザiが製品jを選択する際の効用関数U_{ij}は以下のように定義される。

$$U_{ij} = \sum_{k \in K} \beta_k x_{kj} + \epsilon \quad (1)$$

ここで、Kは製品の特徴の集合、kは製品ごとの様々な属性、βは特徴kに対応する回帰係数、xは製品jの特徴kに対応する値、ϵは誤差項を表す。

2.2.2 顧客モデルと製品ライフサイクルの接続

LCS[3)]を用いて、対象ビジネスの製品ライフサイクルをプロセス（例えば、製造、使用、回収、修理など）の連鎖としてモデル化する。使用プロセスでは、顧客モデルを用いて顧客による製品選択をモデル化する。つまり、顧客モデルによって算出した製品の選択確率に応じて、顧客は複数の製品群から 1 つの製品を選択する。式(1)の回帰係数を同定するため、ならびに、ワイブル分布を用いた製品の使用期間と故障率を推計するために取引データを活用する（図 1 参照）。

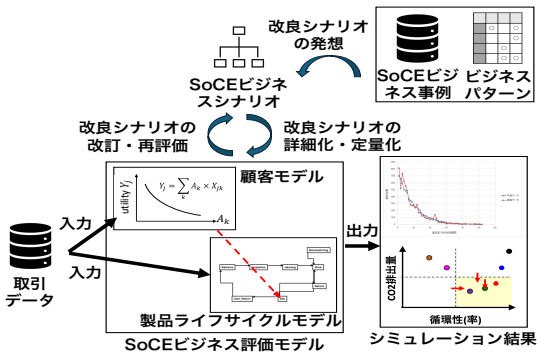


図1 提案手法の全体像

3. ケーススタディ

3.1 問題設定

提案手法を用いて、洗濯機のレンタルビジネスを対象としたケーススタディを実施した。事業者から提供された取引データを用いて、机上検討として対象ビジネスの改良シナリオを作成した。環境性の指標として、本稿ではCO2排出量と循環率に着目した。ここで、循環率は「1年間における顧客への製品提供台数のうち中古品による提供台数の割合」と定義した。レンタルに使われる洗濯機は、種類（縦型、ドラム式）、洗濯容量、メーカに応じて8つの製品群に分けた。式(1)の顧客モデルでは、製品属性kとして洗濯機の種類、洗濯容量、年式、レンタル価格、メーカを採用した。また、対象ビジネスの需要が増加傾向にあることから、注文件数の過去実績データをBassモデル[4]に適用することによって将来の成長率を推計した。評価の対象期間は2025年度から2029年度の5年間とした。

3.2 実行結果

現状ビジネスの継続を想定したベースラインシナリオと改良シナリオの2本を作成した。ベースラインでは、レンタル事業者が仕入れた洗濯機が顧客にレンタルされ、使用されたのちに返却、検品、分解洗浄されたのちに倉庫に保管されて再びレンタルされる。製品の故障・動作不良が発見された場合には修理が行われる。これに対して、改良シナリオではレンタル事業者が家電メーカと連携することで、耐久性とリペアのしやすさを向上した製品設計に変更した状況を想定した。その結果、長寿命化した洗濯機を扱うことで新規の仕入れ台数を削減する効果が期待できる。

洗濯機を仕入れてから廃棄するまでの年数をベースラインシナリオでは5年、改良シナリオでは6年と設定した。改良シナリオでは、ベースラインシナリオで製品の故障・動作不良によって廃棄される製品のうち50%が修理によって再利用できると仮定した。

CO2排出量と循環率の評価結果を、それぞれ図2、図3に示す。それぞれベースラインシナリオでの循環率、CO2排出量を100%として表した。

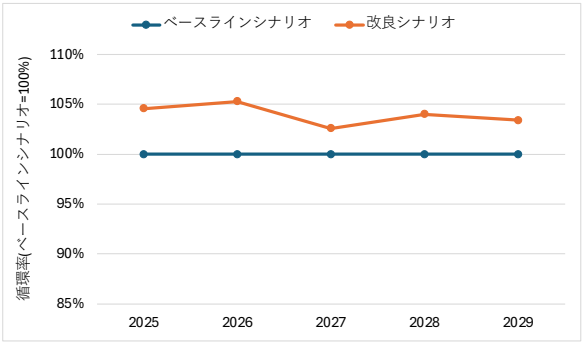


図2 循環率の評価結果(2025～2029年度)

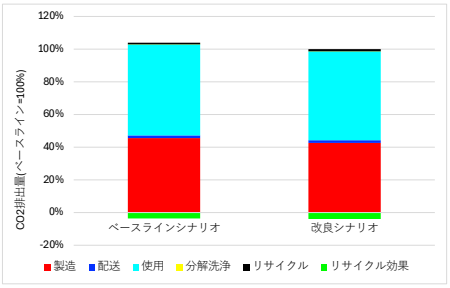


図3 CO2排出量の評価結果(2025年～2029年度)

ベースラインシナリオと比べて、改良シナリオではCO2排出量が4.5%少なくなった。改良シナリオの2025～2029年の循環率は、ベースラインシナリオに対して2.6%～5.3%の改善となった。2本のシナリオで注文件数に占める各製品群の割合を比較した結果、大きな差はなく、洗濯機を長寿命化しても顧客の需要に対する影響は小さい結果となった。

以上のとおり、提案手法によって一連の改良プロセスを回せることを確認した。すなわち、SoCEビジネスパターンを用いて改良シナリオを作成し、SoCEビジネス評価モデルを用いて、CO2排出量と循環率の観点から2本のシナリオを評価できた。顧客モデルとライフサイクルモデルを組み合わせることで、注文実績データに基づいて顧客の製品選択を考慮してシナリオを評価できた。

一方で、顧客の選好をより詳細に分析するため、サービスを利用しない選択肢を顧客モデルに組み込むことが今後の研究課題である。他には、シナリオに対する事業性の評価、複数の顧客セグメントを考慮した顧客モデルの高度化が今後の研究課題として挙げられる。

4. まとめ

本研究では，SoCEビジネス改良支援手法を開発した。また、その検証のため家具家電レンタルビジネスを対象としたケーススタディを実施した。今後の課題として、シナリオに対する事業性評価が挙げられる。

本研究は環境省・(独)環境再生保全機構環境研究総合推進費（JPMEERF20223R04）の支援を受けた。

5. 引用文献

1) 兒玉拓海ほか: 第19回日本LCA学会研究発表会公演要旨集, 宇都宮 (2024).
2) Schmidheiny, K., Brulhart, M.: Journal of Urban Economics, vol. 69, no. 2, pp. 214–222, Mar. 2011.
3) Umeda, Y., Nonomura, A., Tomiyama, T.: Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Vol. 14, No. 2, pp. 149-161, 2000.
4) Bass, F.M.: Manag. Sci., vol. Vol. 15, no. No. 5, pp. 215–227, 1969.

乳幼児用品のシェアリングを対象とした環境影響評価：ベビーベッドの例

Environmental impact assessment of baby items sharing: a case of crib

○前田梨香*[1)]、橋本征二[1)]
Rinka Maeda, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
ce0023er@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

近年、モノや空間、移動手段、スキルなどの多様なモノ・サービスを共有するシェアリングが広がりを見せている。環境省は「モノや空間等の資源の効率的な活用による天然資源投入量や廃棄物発生量の削減、移動手段や空間の共有等によるCO_2排出量の削減といった環境面の効果」[1)]が期待されるとしている。しかしながら、環境面での帰結には様々な議論がある[2)]。本研究では、様々なシェアリングサービスの中でも、需要期間が短く、シェアリングによる環境影響の削減効果が期待される乳幼児用品、本稿ではベビーベッドを対象として、その環境影響を評価した。

2. 方法

2.1 機能単位とシステム境界

本稿では、ベビーベッドの所有時とシェアリング時を比較し、1 乳児が 1 年間利用することを機能単位とした。ベビーベッドの寿命は 10 年、シェアリング時は 1 つのベビーベッドを使用した人数をシナリオとして設定した。所有時、シェアリング時ともに、原材料の製造・輸送、製品の配送、使用、廃棄の段階を対象とし、これに加え、シェアリング時は回収、メンテナンスも対象とした。

2.2 使用データ・設定

(1) 原材料の製造･輸送:ベビーベッドの製品情報から、製品部品の原材料、各材料の重さと製造地等を設定した。主要な原材料である木材については、産地を確認し陸上及び海上輸送距離を設定した。詳細がない部品については、一般的な重さを想定するとともに、輸送距離を仮定した。
(2) 配送・回収：配送・回収距離については変数とし、いくつかのケースを想定した。
(3) 使用・メンテナンス：所有時は水拭き、シェアリング時はエタノール消毒することとした。
(4) 廃棄：破砕・選別を行い廃棄するものとした。

2.3 環境影響評価項目とデータ

本稿では、主要な原材料が木材であることを考慮し、エネルギー消費・土地利用・廃棄物・酸性化・資源消費・気候変動を環境影響評価項目とした。計算には LCA ソフトウェアの MiLCAv3、データベースとして IDEAv3.3 を用いた。

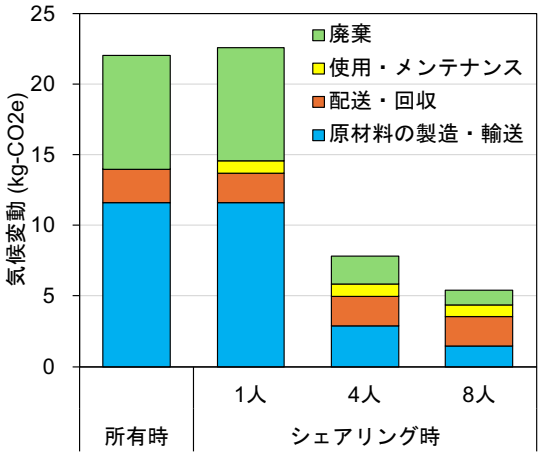


図　各シナリオの気候変動への影響

3. 結果と考察

各シナリオの気候変動への影響を図に示す。原材料の製造・輸送段階における影響は、使用する乳児 1 人あたりとなるため、シェアリングの人数が増えることで減少する結果となった。配送・回収段階における影響については、今回所有時、シェアリング時で同じような輸送距離の想定となっているためほとんど差がないが、想定が変わっても各シナリオの相対的な結果に大きな影響はないと考えられる。使用・メンテナンス段階については、シェアリングの人数に関わらずメタノール消毒が追加となるが影響は大きくなかった。廃棄段階の影響については、原材料の製造・輸送段階と同様、使用する乳児 1 人あたりとなるため、シェアリングの人数が増えることで減少した。

本稿で対象としたベビーベットのシェアリングについては、その利用人数が増えることで環境影響が減少するという単純な結果となるが、玩具等についてはサブスクリプションのサービスも登場している。この場合の評価は、提供される機能の変化も伴っており、今後こうした検討が必要である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金(22H03805)による成果である。

引用文献

1) 環境省：環境白書、日経印刷、2018
2) 天沢逸里ら：日本 LCA 学会誌、15(2)、pp.161-173、2019

学会賞受賞者講演、クロージング

2025年3月7日(金) 13:20 ~ 15:40 M会場：2143大講義室（1F）

[3-M1] 学会賞受賞者講演、クロージング

司会 / 座長：並河 治（日立製作所）

13:20 ~ 13:35

[3-M1-01]

日本LCA学会賞表彰式

13:35 ~ 13:55

[3-M1-02]

奨励賞①

叢 日超 (北九州市立大学)

13:55 ~ 14:15

[3-M1-03]

奨励賞②

稗貫 峻一 (電力中央研究所)

14:15 ~ 14:35

[3-M1-04]

学会功労賞

原田 幸明 (一般社団法人サステイナビリティ技術設計機構)

14:35 ~ 14:40

休憩

14:40 ~ 15:40

[3-M1-05]

クロージング

©日本LCA学会

ライフサイクルアセスメントと最適化理論の統合的な利用による脱炭素システムの設計と評価

Designing and evaluations of decarbonization-oriented systems by integrating the life cycle assessment and optimization theory

○叢　日超
Richao Cong
北九州市立大学
r-cong01@kitakyu-u.ac.jp

1. はじめに

近年環境問題において、脱炭素というキーワードが注目され、ライフサイクル思考に基づく社会設計が緊急の課題となった。図 1 が示すように筆者は多角度的に研究を実施してきた。最初に、廃プラスチックのリサイクルシステムのライフサイクルアセスメント（LCA）を契機に、様々な数理モデリング手法を学んできた。その後、GIS 解析や AI 技術などの応用による廃棄物の処理・エネルギー供給システムの低炭素化研究に力を注いできた。今回の奨励賞受賞に際し、これまでの研究成果とこれからの展望について述べる。

2. 研究内容

2.1 廃棄物処理システム関連

最初の研究では、廃プラのリサイクルシステムを対象に、組成調査、収集運搬のための輸送シミュレーション、物質フロー分析、LCA といった内容を中心に研究した [1)]。更に、廃プラの収集・運搬システムを対象に Grid City Model（GCM）の適用による環境面・経済面の多目的最適化 [2)] を実施し、また GCM と空間解析の統合可能性を示した。近年では、AI 技術を用いた廃棄物発生・回収需要量の将来予測手法 [3, 4)]を開発し、さらに最適化理論の社会的実用を目指して将来予測・ルート最適化を統合化したシステム [5)]を提案した。最近では、革新的資源循環技術の開発による日本の廃プラスチックリサイクルシステムの将来設計に関して、LCA と最適化理論の統合的運用による廃プラスチックリサイクルの技術選択モデルを開発した [6)]。関連手法の応用として、食品販売量の事前予測とロス削減への提案 [7)]や、下水処理量と汚泥発生量の連携的将来予測手法 [8)]などの研究テーマにも力を注いできた。

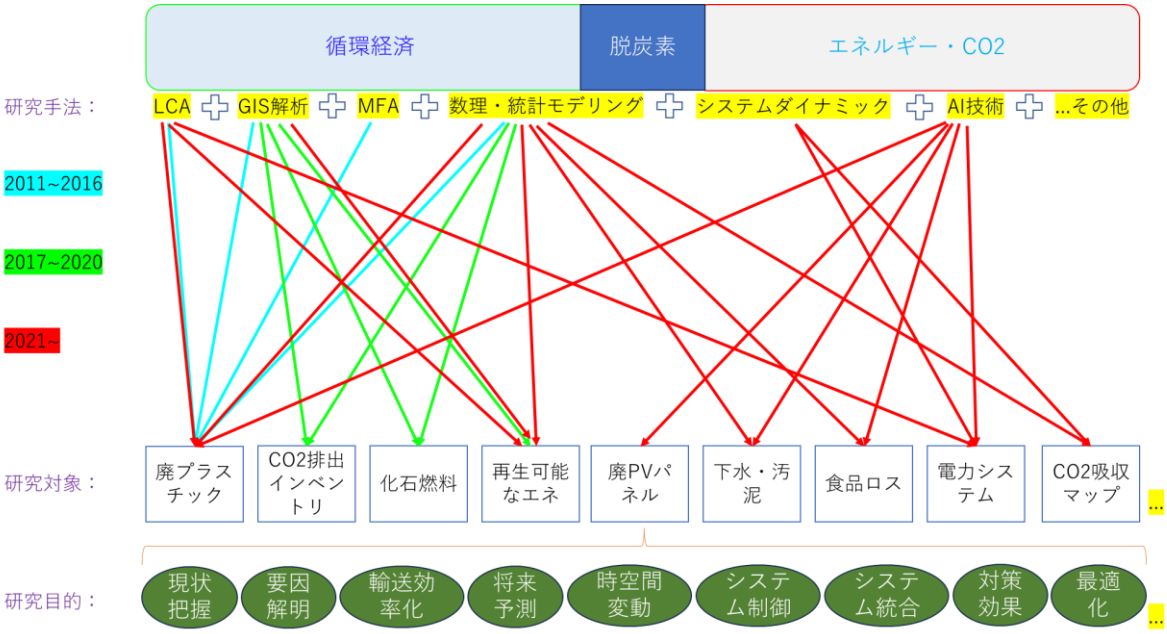


図 1　これまで研究の経緯

2.2 都市の空間解析関連

ボトムアップ手法を用いて東京都を始め、日本の大都市における人為起源の CO_2 排出量インベントリマップ [9)]を開発し、公開までに至った。この手法の発展的

活用として、東日本大震災前後の福島県における化石燃料消費量の時空間的変化を３次メッシュで分析し、その変動の要因について感度分析法を用いて研究した[10]。更に、福岡県における森林・土壌によるカーボンシンクの詳細化推定と高解像度マッピング、ネットカーボン目標の実現に関する将来シナリオ分析[11]といった研究に取り組んできた。

2.3 エネルギーシステム関連

エネルギーシステムの強靭化と低炭素化を指向し再生可能エネルギーの導入促進が求められているが、蓄電システムの最適制御により系統電力網に負荷をかけないことが期待されている。そのために、ライフサイクル視点から見てCO_2排出量が最小となるエネルギー供給システムの最適化[12]を時間レベルで挑戦した。また、地域間エネルギー供給システムの連携や再エネ100%の実現のためのロードマップの提示[13]など、タイムリーな課題にも取り組んでいる。

3. 今後の展望

各セクターにおける経済と脱炭素の両立が急務となっている。今後は、LCA を中心とするライフサイクル的思考を念頭に、循環経済とカーボンニュートラルの融合した分野に対して、より深く社会的に実用性のある研究をしていきたいと考えている。

謝辞

本研究に関わる一連の活動にご協力いただいたすべての皆様、本奨励賞の選定をはじめ学会の運営に携わる皆様に、深く御礼申し上げます。

引用文献

1) Cong R., Matsumoto T., Li W., Xu H., Hayashi T., Wang C.: Spatial simulation and LCA evaluation on the plastic waste recycling system in Tianjin, J. Mater. Cycles Waste Manag, Vol. 19(4), (2017), pp 1423-1436. https://doi.org/10.1007/s10163-016-0538-4
2) 叢日超, 松本亨, 徐鶴, 李文超, 中国大都市の家庭系廃プラスチック収集・運搬システムの最適化: 天津市のケーススタディ, 土木学会論文集 G（環境), 72(5), (2016）, pp 65-72. http://doi.org/10.2208/jscejer.72.I_65
3) Cong R., Fujiyama A., Matsumoto T.: Collection of Industrial Plastic Waste During the COVID-19 Pandemic A Case Study of the Wholesale and Retail Trade Sector in Fukuoka Prefecture, J. Human Environ. Symbiosis, 38(1), (2022), pp 46-55. https://doi.org/10.32313/jahes.38.1_46
4) 叢日超, 藤山淳史, 松本亨, AI 技術による産業系廃プラスチックの回収需要量の予測−複数施設を対象に−, 環境科学会誌, 35(5), (2022), 237-247.
5) 叢日超, 藤山淳史, 松本亨, AI 技術による産業系廃プラスチック回収システムの統合化, 環境科学会誌,35(5), (2022), pp 248-257.
6) Cong R., Fujiyama A., Matsumoto T.: Optimization of Plastic Recycling System and Technology Development Could Accelerate Decarbonization: A Case Study from Japan, Waste Manag., 175, (2024), pp 110-120. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.12.045
7) 呉嘉楠, 叢日超, 松本亨, 李雅娟, 食品ロス削減に向けた食品の発注精度向上に関する研究, 環境共生, 40(1), (2024), pp 47-54. https://doi.org/10.32313/jahes.40.1_47
8) Cong R., Oyunchimeg T., Fujiyama A., and Matsumoto T.: How Should AI Technique Support Wastewater Treatment and Sludge Management? A Case Study from Mongolia, E-book to be published by Springer for EcoDesign 2023, (in press).
9) 叢日超, 東京都における化石燃料起源二酸化炭素排出量推定値の 1×1km データ, ver.1.0, （2021）, 国立環境研究所 地球環境研究センター, https://doi.org/10.17595/20210129.001
10) Cong R., Gomi K., Togawa T., Oba M.: How and Why Did Fossil Fuel Use Change in Fukushima Prefecture before and after the Great East Japan Earthquake?, Energy Rep., 8(3), (2022), pp 1159-1173. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.12.046
11) Cong R., Fujiyama A., Matsumoto T.: Carbon Sink Quantification Aids for Achieving the Zero-emission Goal: A Case Study in Japan, Energy Rep., 8(9), (2022), pp 8-17. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.102
12) Cong R., Fujiyama A., and Matsumoto T.: Green energy management system built by AI technique to support the regional sustainable development in Japan, Adv. Transdiscipl. Eng., 38, (2023), pp 3-10. https://doi.org/10.3233/ATDE230266.
13) Cong R., Fujiyama A., Matsumoto T.: An Optimal Scheme Assists the Municipalities in Fukuoka, Japan in Achieving their Goal of 100% Renewable Energy Supply and Future Decarbonization, Energy Nexus, 13(33), (2024), pp 100277. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100277

LCA の現在・過去・未来

The Present, Past and Future of LCA

○原田幸明
Kohmei Halada
(国研)物材機構名誉研究員、(一社)サステイナビリティ技術設計機構代表理事
* halada@susdi.org

1. 現在

ライフサイクルアセスメント（LCA）は、製品やサービスの全過程における環境負荷を定量的に評価する手法として、現在、持続可能な社会の実現に不可欠な基盤となっている。カーボンフットプリント（CFP）は、LCA の枠組みに基づき、製品のライフサイクル全体での温室効果ガス（GHG）排出量を CO_2換算で算定し、可視化する手法である。 GHG プロトコルは、企業や組織の GHG 排出量を算定･報告する国際基準であり、特にサプライチェーン全体の排出量を評価する際に LCA の手法が活用されている。さらに、GHG 排出削減貢献ガイドラインでは、製品や技術が GHG 排出削減にどの程度寄与するかを、LCA を用いてライフサイクル全体で定量的に示すことが推奨されている。

これらの手法やガイドラインは、LCA を基盤とすることで、製品やサービスの環境影響を包括的かつ定量的に評価し、GHG 排出削減の取り組みを効果的に推進する役割を果たしている。また、EU のタクソノミーでは、持続可能な経済活動の分類基準として LCA が組み込まれ、企業の環境情報開示が求められている。カーボンクレジット市場においても、LCA は温室効果ガス排出量の正確な算定に不可欠であり、信頼性の高いクレジットの創出に寄与している。さらに、研究開発プロジェクトや助成金の申請においても、LCA 評価が求められるケースが増加しており、製品のライフサイクル全体での環境影響評価が重視されている。

このように、LCA は金融機関の投資判断や企業の環境戦略、研究開発の評価基準として広く活用され、持続可能な社会の実現に寄与するようになってきた。

他方で、このような LCA の役割の広がりは、LCA に新たな課題を突きつけている。それは、各 LCA が特定の目的や範囲に基づいて実施されるため、評価基準や前提条件が異なることにより異なる LCA 間での比較は困難であるという問題である。一方で、社会からは客観的かつ統一的な環境評価が求められており、LCA はその専門家が理解しているようなコミュニケーションツールとしてではなく、客観的な環境指標として社会的に期待されているのである。

2. 過去

LCA が環境負荷の評価手法として初めて用いられたのは 1969 年にアメリカのコカ・コーラ社が飲料容器のリターナブル瓶とアルミ缶の環境影響を評価するため、ミッドウエスト研究所に調査を委託しエネルギーと資源消費の解析を行ったところから始まった [1]。その後 1971 年に SETAC が設立され、毒物学的視点からの環境排出が取り入れられ、さらに 1984 年のスイス連邦環境局(BUWAL)が包装容器への適用を行いその適用対象を広めるのと相まって、英国 Bousted らによるエネルギー分析的手法の明確化で、科学性を持った手法としての枠組みが整ってきた。

社会的に展開する大きな機会となったのは 1992 年のリオの環境サミットであり、そこでは経済と環境の取り組みの一体化の必要性が新たな視点として強調されたが、その際経済のコストに対応しうる環境の定量化手法として LCA に期待が寄せられたのである。

この時点ではライフサイクルシンキングという点では同じ視点であるものの、チェックリスト型 LCA やスコア型 LCA 等も残っていたが、その後の国際標準化の議論が進む中で、SETAC の取り入れた環境影響評価をエネルギー解析的手法でシステム記述を行う現在の LCA が主流になっていき、1997 年に ISO14040 として発行された。

重要なことは、この段階では LCA は「発展途上の手法である」ことを確認しながら、その社会要請の緊要さに応える形で議論が進められたことである。そのため LCA の用途も極力比較主張を避け、自らの環境改善行為を定量化して主張する、すなわち、コミュニケーションツールとしてのルールづくりが重視された。その典型が scope & definition の部分であり、実施する LCA の目的を限定し、システム境界の自己定義を明確に宣言させるなどの手段を織り込んで、透明な議論(コミュニケーション)を可能にするように注力されたのである。こうして進められてきた ISO-SETAC 型の自己表現 LCA の流れと、現在社会が LCA 的手法をもちいてできるであろうと期待している環境負荷の客観的定量化は、一見同様に見えるが、実際は異なる目的と要件を持つものだったのである。LCA に必要なデータを揃えるのは難しい。その現実を踏まえながら、コミ

ュニケートするためのルールを積見上げてきたのが ISO-SETAC 型の LCA であり、理想的に全データを客観的に把握できるものとしての科学的数値化を期待しているのが現在の社会的要請であるといえる。

3. 未来

未来の前に、1990 年代から現在までの間に何が起こっているかを見ておこう。一つはデータ開示の進展である。当時は稀だった環境報告書が今や当たり前のものとなり、さらには金融関係の要請で非財務情報として環境への取組の開示が求められるようになった。また技術情報も知財戦略の変化から保護するものではなく開示し利用する方向にシフトしている。1990 年代では開示が憚られていた情報も今は積極的な開示対象になっているものも多い。

もう一つの大きな変化は、データマイニング技術の飛躍的進展である。いまやインターネットによって多くのデータやその出典が検索可能になっている。さらに大規模言語処理型 AI の出現は、検索方法がわからなかった情報もビッグデータから取り出すことも可能となり、さらには関連データや明示的なシステムの情報をもとに妥当性のあるデータを推定することも可能になっている。

この変化を認識するならば、従来困難とされていたユニバーサルなデータ取得・構築が可能となる時代が来ている。

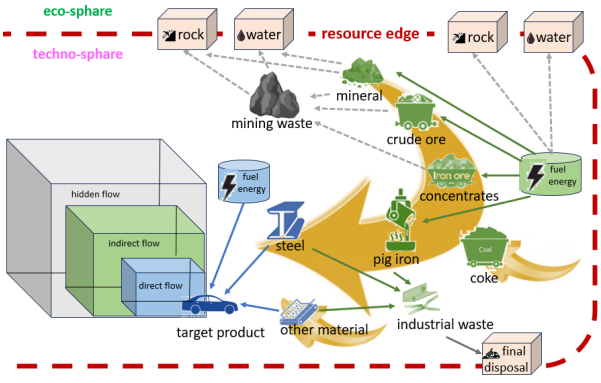


Fig.1 資源端までのユニバーサルシステムの構成

Fig.1 に示すのは、その可能性の一つであり、システム境界を自己定義ではなく、資源端まで広げた共通の境界で LCA を設定する新たな可能性である。これまでは LCA の目的やデータ収集能力に合わせて indirect flow の途中にシステム境界を入れていたが、これからは hidden flow も組み入れたユニバーサルなものとして共通のシステム境界のもとでの議論も可能になる。

実は、あまり定義を明確にされないシステム境界もある。それはサブシステムの記述の中に見られる。

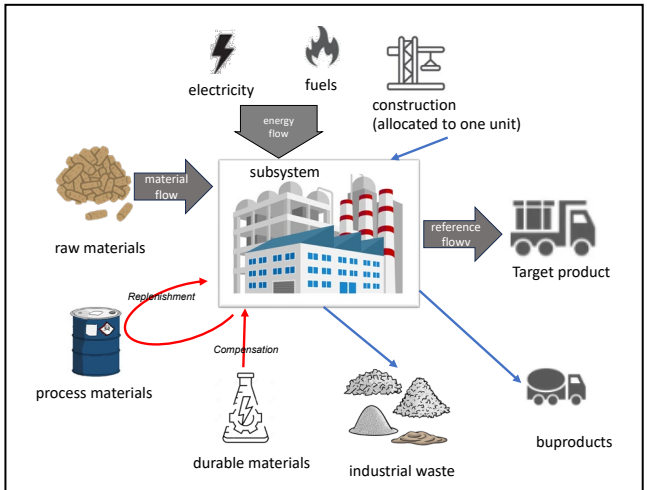


Fig.2 サブシステムの入出力対象

Fig.2 に示すのはサブシステムのデータ収集対象である。この対象は隠れたシステム境界とも言えるが、その明示の仕方は曖昧であり、同じ LCA の中でも異なっている。とくに赤で示したプロセス物質の循環補充や耐久物の劣化補填などは量が少ないので無視されがちだが、対象単位の製造環境負荷が大きい場合が多く実は重要な要素である。このようなサブシステム記述もユニバーサルに統一されうるのである。

これらを実現するには大規模言語処理型の AI を活用する必要があるが、架空のデータの生成を防ぐために、あらたな原則を構築する必要があるであろう。例えば。

① 架空データの混入を防ぐプロンプティングの設定
② プロセスの専門家とのコラボレーションの必須化
③ オープン・アクセス・データとして批判、更新可能性の担保

などが挙げられる。

筆者は、この 3 つの原則をもとに多言語処理系 AI を活用し、すべての元素に対して CFP と TMR(関与物質総量)を求め、その算定に用いた全データを Web 上に公開し[2]、この LCA が新しい時代を迎えていることを実証した。 30 年余の時を経て、LCA は今、コミュニケーションツールの枠を超え、客観性を持つ科学になろうとしている。

参考文献

1) 森下研：“第 2 回日本 LCA 学会研究発表会”，東京大学，(2007)，pp2.頁-8 頁
2)SusDI：“TMR and TCFP”，LCA をはじめてみよう，（オンライン），入手先 <https://lca.sdgoods.net/tmr-tcfp/>，(参照 2025-02-07)