2022年3月2日(水)

A会場

口頭発表セッション（一般）

[1-A1] 機器の製造と利用

座長：小澤暁人（産業技術総合研究所）
09:40 ～ 10:40 A会場 (zoom)

[1-A1-01] 業務用空調機における製造段階の環境負荷に関するホットスポット分析
*西澤 孝行[1]、半田 陽一[1]、米田 聡[1]、方 琦[1]、小原 聡[2]、尾下 優子[2]、藤井 祥万[2]、菊池 康紀[2]（1. ダイキン工業株式会社、2. 東京大学）
09:40 ～ 10:00

[1-A1-02] ビッグデータと人工知能を活用した空調機のエネルギー分析
*杉山 弦太[1]、本田 智則[2]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学大学院、2. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所）
10:00 ～ 10:20

[1-A1-03] 電力ビッグデータから見るライフスタイル
*本田 智則[1]、小澤 暁人[1]（1. 国立研究開発法人産業技術総合研究所）
10:20 ～ 10:40

B会場

口頭発表セッション（一般）

[1-B1] 空調

座長：柏倉俊介（立命館大学）
09:40 ～ 10:40 B会場 (zoom)

[1-B1-01] Evaluation of air conditioner focusing on energy consumption and labor productivity
*薛 雲飛[1]、井原 智彦[1]（1. 東京大学）
09:40 ～ 10:00

[1-B1-02] Assessing future emissions of household air conditioning in Southeast Asia through life cycle analysis
*Gonzaga Mark Cel[1]、伊坪 徳宏[2]、井原 智彦[1]（1. The University of Tokyo、2. Tokyo City University）
10:00 ～ 10:20

[1-B1-03] 関与物質総量を用いたエアコンの資源強度評価
*濱砂 圭汰[1]、山末 英嗣[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]（1. 立命館大学）
10:20 ～ 10:40

C会場

口頭発表セッション（一般）

[1-C1] 産業構造

座長：南齋規介（国立環境研究所）
09:40 ～ 10:40 C会場 (zoom)

[1-C1-01] 固定資本内生化モデルによる炭素集約度に着目したマテリアルフットプリント解析
*畑 奨[1,2]、南齋 規介[1]、中島 謙一[1,2]（1. 国立環境研究所、2. 東京大学）
09:40 ～ 10:00

[1-C1-02] 中間財輸出に伴うライフサイクル CO2排出量の推定
*永島 史弥[1]、時任 翔平[2]、土中 哲秀[3]（1. 近畿大学、2. 山形大学、3. 名古屋大学）
10:00 ～ 10:20

[1-C1-03] Identifying household carbon footprints associated with an aging society in the US
*王 家歓[1]、重富 陽介[1]、Chapman Andrew[2]（1. 長崎大学、2. 九州大学）
10:20 ～ 10:40

E会場

口頭発表セッション（一般）

[1-E1] 国際産業連関

座長：岡本隼輔（尾道市立大学）
09:40 ～ 10:20 E会場 (zoom)

[1-E1-01] Building multi-regional physical input-output tables of food products
*Dente Sebastien[1]、Hashimoto Seiji[1]（1. Ritsumeikan University）
09:40 ～ 10:00

[1-E1-02] 国際産業連関表を用いた構造的類似性の抽出および二酸化炭素排出構造の特定
*白新田 佳代子[1]、加河 茂美[2]、近藤 康之[3]（1. 福岡女子大学、2. 九州大学、3. 早稲田大学）
10:00 ～ 10:20

A会場

口頭発表セッション（一般）

[1-A2] 再エネ・水素

座長：藤田壮（東京大学）
11:00 ～ 12:20 A会場 (zoom)

[1-A2-01] 複数の再生可能エネルギーを組み合わせた地域の脱炭素効果の評価システムの検討
*竹中 颯太郎[1]、堀 啓子[1]、岡部 紘樹[1]、藤田 壮[1]、中谷 隼[1]（1. 東京大学）

©日本LCA学会

11:00 ～ 11:20

[1-A2-02] 変動性再生可能エネルギー発電所の発電効率性評価

*中本 裕哉[1]、江口 昌伍[2]、高藪 広隆[3]（1. 大分大学、2. 福岡大学、3. 近畿大学）

11:20 ～ 11:40

[1-A2-03] 変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電併給：製紙工場の例

*山木 亜由美[1]、藤井 祥万[1]、兼松 祐一郎[1]、下野 僚子[1]、菊池 康紀[1]（1. 東京大学）

11:40 ～ 12:00

[1-A2-04] 水素発電・アンモニア発電のライフサイクルCO2排出量の不確実性分析

*小澤 暁人[1]、工藤 祐揮[1]（1. 産業技術総合研究所）

12:00 ～ 12:20

B会場

口頭発表セッション（一般）

[1-B2] プラスチック（1）

座長：中谷隼（東京大学）
11:00 ～ 12:20 B会場 (zoom)

[1-B2-01] 需要と産業構造の変化を考慮したプラスチック資源循環システムの設計と評価

*方 大樹[1]、中谷 隼[1]、藤田 壮[1]（1. 東京大学）

11:00 ～ 11:20

[1-B2-02] 循環型素材を対象とした廃棄物フットプリント

*北見 朋也[1]、西山 雄馬[2]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学大学院、2. 株式会社サエラ）

11:20 ～ 11:40

[1-B2-03] 廃プラスチック熱分解によるフィードストックリサイクルのライフサイクル評価

*野村 祐貴[1]、藤井 祥万[1]、兼松 祐一郎[1]、下野 僚子[1]、菊池 康紀[1]（1. 東京大学）

11:40 ～ 12:00

[1-B2-04] プラスチックから紙への材料代替による環境影響のシナリオ分析

*杜 盈吟[1]、橋本 征二[2]（1. 立命館大学大学院、2. 立命館大学）

12:00 ～ 12:20

C会場

口頭発表セッション（一般）

[1-C2] 環境コミュニケーション

座長：一杉佑貴（産業技術総合研究所）
11:00 ～ 12:20 C会場 (zoom)

[1-C2-01] 物語を用いた環境コミュニケーション手法の提案―情報処理プロセスの違いに着目して

*中野 祐樹[1]、本藤 祐樹[2]（1. 横浜国立大学大学院 環境情報学府、2. 横浜国立大学大学院 環境情報研究院）

11:00 ～ 11:20

[1-C2-02] A scenario analysis of household carbon footprint in Japan from the time-use perspective

*JIANG YIDA[1]、井原 智彦[1]（1. 東京大学）

11:20 ～ 11:40

[1-C2-03] コミュニティサイクルシステムにおける観光客需要に関する研究

*竹井 奏人[1]、磐田 朋子[1]（1. 芝浦工業大学）

11:40 ～ 12:00

[1-C2-04] The life cycle carbon emissions caused by households in Japan:
current status and long-term perspectives

*余 浩然[1]、塚原 建一郎[2]、一杉 佑貴[2]、田原 聖隆[2]、井原 智彦[1]（1. 東京大学、2. 産業総合研究所）

12:00 ～ 12:20

D会場

口頭発表セッション（一般）

[1-D2] COVID-19

座長：伊坪徳宏（東京都市大学）
11:00 ～ 12:20 D会場 (zoom)

[1-D2-01] COVID-19による生活変容がカーボンフットプリントに及ぼす影響は従事する産業ごとに異なるのか？

*吉良 成美[1]、重富 陽介[1]（1. 長崎大学）

11:00 ～ 11:20

[1-D2-02] 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・環境面への直接・間接的な影響評価

*大賀 雄介[1]、中石 知晃[3]、加河 茂美[2]（1. 加河研究室/九州大学、2. 九州大学経済学研究員、3. 九州大学経済学府）

11:20 ～ 11:40

[1-D2-03] 抗体試薬製造におけるマウス腹水法と細胞培養法の環境影響評価

*菊地 俊多[1]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学）

11:40 ～ 12:00

[1-D2-04] モノクローナル抗体製造による環境影響と健康効果の包括的評価

©日本LCA学会

*天沢 逸里[1]、黒田 裕章[1]、岡村 梢[1]、Badr Sara[1]、杉山 弘和[1]（1. 東京大学大学院）

12:00 ～ 12:20

2022年3月3日(木)

A会場

口頭発表セッション（一般）

[2-A1] 輸送

座長：尾下優子（東京大学）
09:20 ～ 10:40 A会場 (zoom)

[2-A1-01] 日本におけるインフラを含めた長距離輸送機関の資源強度分析

*原口 直享[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1]（1. 立命館大学）

09:20 ～ 09:40

[2-A1-02] ミャンマーにおける廃棄自動二輪車の推計及びコスト評価を通じた管理戦略の提言

*村上 原野[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1]（1. 立命館大学）

09:40 ～ 10:00

[2-A1-03] 外航コンテナ船由来の CO_2排出量の変化要因分析

*下津浦 大賀[1]、加河 茂美[3]、中石 知晃[2]（1. 加河研究室/九州大学、2. 九州大学経済学府、3. 九州大学経済学研究院）

10:00 ～ 10:20

[2-A1-04] 自車と後続車の走行に及ぼす影響を考慮した貨物自動車のエコドライブによる CO2削減効果の評価

*杉浦 史弥[1]、井原 智彦[1]（1. 東京大学大学院）

10:20 ～ 10:40

B会場

口頭発表セッション（一般）

[2-B1] バイオマス

座長：中野勝行（立命館大学）
09:20 ～ 10:40 B会場 (zoom)

[2-B1-01] 北海道における木質バイオマスエネルギー利用可能量評価と将来推計

*小野 遼河[1]、福田 陽一朗[2]、藤井 賢彦[1]（1. 北海道大学、2. エネルギー・環境・地質研究所）

09:20 ～ 09:40

[2-B1-02] 国内における微細藻類バイオ燃料生産プロセスのライフサイクル評価

*多積 遼[1]、河野 重行[1]、井原 智彦[1]（1. 東京大学）

09:40 ～ 10:00

[2-B1-03] 木質バイオマスエネルギー事業を対象としたプランニング支援手法の提案

*西田 拓未[1]、木下 裕介[1]、赤松 史光[2]、中塚 記章[2]、梅田 靖[1]（1. 東京大学、2. 大阪大学）

10:00 ～ 10:20

[2-B1-04] 木質原料を用いたバイオガス発電由来のバイオ炭施用による温室効果ガス削減効果

*金井 真也[1]、土井 美奈子[1]、柴田 晃[1]、中野 勝行[1]（1. 立命館大学）

10:20 ～ 10:40

C会場

口頭発表セッション（一般）

[2-C1] 住宅

座長：磐田朋子（芝浦工業大学）
09:20 ～ 10:40 C会場 (zoom)

[2-C1-01] 建物の LCA指針の改定に向けた検討
～指針・ツール・原単位データベースに関する進捗状況～

*小林 謙介[1]、磯部 孝行[2]、鈴木 好幸[3]、外岡 豊[4]、村橋 喜満[5]、木原 勇信[6]（1. 県立広島大学、2. 武蔵野大学、3. 安藤ハザマ、4. 埼玉大学、5. 日鉄物産、6. 鹿島建設）

09:20 ～ 09:40

[2-C1-02] 既存の共同住宅における脱炭素化に向けた取り組みの検討

*竹内 萌生[1]、磐田 朋子[1]（1. 芝浦工業大学）

09:40 ～ 10:00

[2-C1-03] 低層共同住宅のカーボンニュートラルを指向した $LCCO_2$評価手法の提案　その1：低層共同住宅の標準モデルと評価の枠組み

*三井所 清史[1]、清家 剛[2]、磯部 孝行[3]、小林 謙介[4]、渡辺 直哉[5]、山本 正顕[6]、近田 智也[7]（1.（株）岩村アトリエ、2. 東京大学大学院、3. 武蔵野大学、4. 県立広島大学、5. 旭化成ホームズ（株）、6.（株）長谷工コーポレーション、7. 積水ハウス（株））

10:00 ～ 10:20

[2-C1-04] 低層共同住宅のカーボンニュートラルを指向した $LCCO_2$評価手法の提案　その２：評価結果と評価手法の提案

*磯部 孝行[1]、清家 剛[2]、三井所 清史[3]、小林 謙介[4]、渡辺 直哉[5]、山本 正顕[6]、近田 智也[7]（1. 武蔵野大学、2. 東京大学大学院、3.（株）岩村アトリエ、4. 県立広島大学、5. 旭化成ホームズ（株）、6.（株）長谷工

©日本LCA学会

コーポレーション、7. 積水ハウス（株））
10:20 ～ 10:40

D会場

口頭発表セッション（一般）

[2-D1] 影響評価手法

座長：醍醐市朗（東京大学）
09:20 ～ 10:40 D会場 (zoom)

[2-D1-01] Novel SLCA method for measuring more good and less bad social impacts
*Dunuwila Pasan[1]、醍醐 市朗[1]、畑山 博樹[2]、正畠 宏一[3]、田原 聖隆[2]、星野 岳穂[1]（1. 東京大学、2. 国立研究開発法人産業技術総合研究所、3. TCO2株式会社）
09:20 ～ 09:40

[2-D1-02] 聖地巡礼の経済波及効果を考慮した環境・社会影響評価
*堤 哲彦[1]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学）
09:40 ～ 10:00

[2-D1-03] 電気自動車の需要拡大に伴う鉱物資源の環境・社会影響評価
*垣内 冴郁[1]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学院）
10:00 ～ 10:20

[2-D1-04] Development of biodiversity damage assessment in LCIA with the expansion of impact categories.
*劉 潤桭[1]、大橋 春香[2]、松井 哲哉[2]、伊坪 徳宏[1]（1. Tokyo city university 、2. Forestry and Forest Products Research Institute）
10:20 ～ 10:40

E会場

口頭発表セッション（一般）

[2-E1] 資源効率

座長：星野岳穂 （東京大学）
09:20 ～ 10:40 E会場 (zoom)

[2-E1-01] 日本におけるステンレス鋼の物量投入産出表の作成と資源利用効率の評価
*松田 敏明[1]、橋本 征二[1]（1. 立命館大学）
09:20 ～ 09:40

[2-E1-02] 鉛蓄電池とニッケル水素電池の資源効率の評価
*王 俊祥[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1]（1. 立命館大学）
09:40 ～ 10:00

[2-E1-03] Analysis of secondary aluminium flows focusing on mobility transformation in China
*王 彬澤[1]、張 政陽[1]、松八重 一代[1]（1. Tohoku University）
10:00 ～ 10:20

[2-E1-04] 動的マテリアルフロー分析と回帰分析による金属素材の用途別使用済み回収率の推計
*大西 圭祐[1]、武山 健太郎[1]、醍醐 市朗[1]、星野 岳穂[1]（1. 東京大学大学院）
10:20 ～ 10:40

A会場

口頭発表セッション（一般）

[2-A2] 窒素・リン

座長：松八重 一代（東北大学）
11:00 ～ 12:00 A会場 (zoom)

[2-A2-01] Time Series Analysis on Food Phosphorus Footprint of the Indian Subcontinent
*Dhar Aurup Ratan[1]、Oita Azusa[2]、Matsubae Kazuyo[1]（1. Tohoku University、2. National Agriculture and Food Research Organization）
11:00 ～ 11:20

[2-A2-03] IDEAを活用した窒素循環評価のためのデータベース開発
*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）
11:40 ～ 12:00

C会場

口頭発表セッション（一般）

[2-C2] 住宅・都市

座長：村山顕人（東京大学）
11:00 ～ 12:20 C会場 (zoom)

[2-C2-01] 住宅工法のカーボンフットプリント
*今田 青治[1]、加河 茂美[2]、前野 啓太郎[3]（1. 加河研究室/九州大学、2. 九州大学経済学研究院、3. 九州大学経済学府）
11:00 ～ 11:20

[2-C2-02] 工法別住宅の製造・使用段階における環境負荷分析
*松嶋 そら[1]、加河 茂美[1]（1. 九州大学）
11:20 ～ 11:40

[2-C2-03] 日本版 SSP別土地利用シナリオの行政区域別将来推移を対象とした環境影響評価
*山崎 潤也[1]、福山 遼平[1]、似内 遼一[1]、真鍋 陸太郎[1]、村山 顕人[1]（1. 東京大学）

©日本LCA学会

11:40 ～ 12:00

D会場

口頭発表セッション（一般）

[2-D2] 食品（1）

座長：吉川直樹（立命館大学）
11:00 ～ 12:20 D会場 (zoom)

[2-D2-01] 地域の食品小売店や飲食店連携による Upcycled Food研究
～フードロス・食品廃棄の解決に向けた食品副産物の商品化～
*小林 久美子[1]、髙橋 和枝[2]、古谷 勝則[1]（1. 千葉大学、2. 武蔵野大学）
11:00 ～ 11:20

[2-D2-02] インピーダンス測定による冷凍サバの鮮度を考慮した環境負荷評価
*石部 優貴[1]、沖 慧弘[1]、片山 昇[1]、苗 山[1]、堂脇 清志[1]（1. 東京理科大学）
11:20 ～ 11:40

[2-D2-03] 食品廃棄物の処理に関わる環境影響の地域別評価
*中川 友輝[1]、山口 陽平[1]、吉川 直樹[1]（1. 立命館大学）
11:40 ～ 12:00

[2-D2-04] 離島における植物工場導入の意義と課題
*小野 奈都美[1]、佐々木 康人[2]、上門 太郎[1]、伊佐 真賢[1]、田原 聖隆[3]（1.（株）沖縄エネテック、2.（株）サイクル、3.（国研）産業技術総合研究所）
12:00 ～ 12:20

E会場

口頭発表セッション（一般）

[2-E2] 資源利用の環境影響

座長：西嶋大輔（福島大学）
11:00 ～ 12:20 E会場 (zoom)

[2-E2-01] Potential mercury distributions to different sinks in China in response to the Minamata Convention on Mercury
*哈 布尔[1]、藤原 健史[1]、高岡 昌輝[2]（1. 岡山大学、2. 京都大学）
11:00 ～ 11:20

[2-E2-02] リサイクルおよび対策技術導入による銅製錬由来水銀排出量の削減効果：主要国を対象として
*山本 涼太[1]、橋本 征二[1]（1. 立命館大学）
11:20 ～ 11:40

[2-E2-03] 使用済み水銀含有製品からの水銀リサイクルおよび水銀最終処分の環境影響評価
*中野 勝行[1]、光斎 翔貴[1]、山末 英嗣[1]、高岡 昌輝[2]（1. 立命館大学、2. 京都大学）
11:40 ～ 12:00

[2-E2-04] 鉱滓ダム決壊を事例とした鉱物資源サプライチェーンリスク解析モデルの開発
*杉山 智哉[1]、張 政陽[1]、中島 謙一[2]、松八重 一代[1]（1. 東北大学、2. 国立環境研究所）
12:00 ～ 12:20

A会場

口頭発表セッション（一般）

[2-A3] フットプリント

座長：横井崚佑（産業技術総合研究所）
13:20 ～ 14:40 A会場 (zoom)

[2-A3-01] 食料生産と消費の時系列変化に着目した淡水資源需給バランスの要因分析
*山口 陽平[1]、吉川 直樹[1]、橋本 征二[1]、天野 耕二[1]（1. 立命館大学）
13:20 ～ 13:40

[2-A3-02] 世界の水資源利用の持続可能性への責任―日本のウォーターフットプリント分析を事例として
*本下 晶晴[1]、Pfister Stephan[2]、佐々木 貴央[3]、南斉 規介[4]、橋本 征二[3]、横井 崚佑[1]、Finkbeiner Matthias[5]（1. 産業技術総合研究所、2. ETH Zurich、3. 立命館大学、4. 国立環境研究所、5. Technische Universitaet Berlin）
13:40 ～ 14:00

[2-A3-03] 多地域間産業連関分析を用いた生物多様性フットプリント
*髙橋 毅一郎[1]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学）
14:00 ～ 14:20

[2-A3-04] インフォーマルセクターの生産活動を考慮したカーボンフットプリントの実証分析
*三苫 春香[1]、加河 茂美[1]（1. 九州大学）
14:20 ～ 14:40

C会場

口頭発表セッション（一般）

[2-C3] 自治体

座長：橋本征二（立命館大学）
13:20 ～ 14:40 C会場 (zoom)

[2-C3-01] 自治体が提供するごみ分別アプリの利用の状況とその規定因

©日本LCA学会

*湯川 カ[1]、橋本 征二[1] （1. 立命館大学）

13:20 ～ 13:40

[2-C3-02] 地方移住型テレワークの LC-CO_2排出量評価に向けた基礎的研究

*西本 祐司[1]、朴 秀日[1]、加藤 博和[1] （1. 名古屋大学大学院）

13:40 ～ 14:00

[2-C3-03] 地方公共団体のための環境施策効果推計方法の提案

*清水 皓介[1]、磐田 朋子[1] （1. 芝浦工業大学）

14:00 ～ 14:20

[2-C3-04] 自治体の脱炭素化に向けた市民－行政間ギャップの構造分析

*坪井 陸[1]、磐田 朋子[1] （1. 芝浦工業大学）

14:20 ～ 14:40

D会場

口頭発表セッション（一般）

[2-D3] シェアリングエコノミー

座長：天沢逸里（東京大学）

13:20 ～ 14:40 D会場 (zoom)

[2-D3-01] カーシェアリングサービスの拡大に伴う環境への影響

*吉澤 大佑[1]、中本 裕哉[2]、加河 茂美[1] （1. 九州大学、2. 大分大学）

13:20 ～ 13:40

[2-D3-02] 環境負荷低減に向けた意思決定を支援するシェアリングサービスの類型化

*若林 宏[1]、天沢 逸里[1]、平尾 雅彦[1] （1. 東京大学）

13:40 ～ 14:00

[2-D3-03] デジタルカメラの製品サービスシステムの普及に関する LCA

*佐井 以諾[1]、小出 瑠[1,2]、山本 悠久[1]、村上 進亮[1] （1. 東京大学、2. 国立環境研究所）

14:00 ～ 14:20

[2-D3-04] 環境影響評価と消費者分析に基づくサステイナブルな衣服シェアリングサービス設計

*吉田 樹[1]、天沢 逸里[1]、木見田 康治[1]、平尾 雅彦[1] （1. 東京大学）

14:20 ～ 14:40

E会場

口頭発表セッション（一般）

[2-E3] ステークホルダーエンゲージメント

座長：井原智彦（東京大学）

13:20 ～ 14:20 E会場 (zoom)

[2-E3-01] 国内外の主要企業における CO2の削減貢献量算定に係る取組状況の整理を通した考察

*高野 惇[1]、越智 崇充[1] （1. デロイトトーマツコンサルティング合同会社）

13:20 ～ 13:40

[2-E3-02] 企業連携による資源循環モデルの CO_2排出量削減効果―中部地域における製造業を対象として

*柴原 尚希[1,2]、小林 弘幸[2]、神崎 昌之[2]、乾 大樹[2]、矢野川 紘斗[2] （1. 中部大学、2. 一般社団法人サステナブル経営推進機構）

13:40 ～ 14:00

[2-E3-03] 肉代替食品選択に対する情報提供効果の評価－消費者特性評価およびスーパーマーケットにおける実証実験－

*佐久間 夏美[1]、栗栖 聖[1]、福士 謙介[1] （1. 東京大学）

14:00 ～ 14:20

A会場

口頭発表セッション（一般）

[2-A4] エネルギー

座長：藤井実（国立環境研究所）

15:00 ～ 16:40 A会場 (zoom)

[2-A4-01] 地域特性を考慮する脱炭素シナリオの計画システムについての研究

*岡部 紘樹[1]、藤田 壮[1]、堀 啓子[1]、中谷 隼[1]、牧 誠也[2]、五味 馨[2] （1. 東京大学、2. 国立環境研究所）

15:00 ～ 15:20

[2-A4-02] 電力部門におけるグローバルサプライチェーンの環境効率性分析

*前野 啓太郎[1]、中石 知晃[1]、高藪 広隆[2]、加河 茂美[1] （1. 九州大学、2. 近畿大学）

15:20 ～ 15:40

[2-A4-03] 日本版シュタットベルケ実現に向けた成立要因分析

*沢口 葉月[1]、磐田 朋子[1] （1. 芝浦工業大学）

15:40 ～ 16:00

[2-A4-04] 業務用太陽熱給湯システムの地域・業種別 CO_2削減効果

*大津 太伸[1]、本藤 祐樹[1] （1. 横浜国立大学）

16:00 ～ 16:20

[2-A4-05] 工場名称データを用いたテキストマイニング手法による熱需要を持つ産業の抽出法の検討

*牧 誠也[1]、大西 悟[1]、藤井 実[1]、後藤 尚弘[2] （1. 国立環境研究所、2. 東洋大学）

©日本LCA学会

16:20 ～　16:40

B会場

口頭発表セッション（一般）

[2-B4] 食品（2）

座長：高橋和枝（武蔵野大学）
15:00 ～ 16:40　B会場 (zoom)

[2-B4-01] 外食産業で食品廃棄物への対応について
*NGUYEN VANDOAI[1]、高橋 和枝[1]（1. 武蔵野大学大学院）
15:00 ～　15:20

[2-B4-02] チルド食品配送サービスのライフサイクルCO_2排出量推計
*山田 尚史[1]、加藤 博和[1]（1. 名古屋大学）
15:20 ～　15:40

[2-B4-05] 日本酒のライフサイクル影響評価
*村本 麻里花[1]、伊坪 徳宏[1]、御林 洋志[2]（1. 伊坪研究室、東京都市大学、2. 株式会社Clear）
16:20 ～　16:40

C会場

口頭発表セッション（一般）

[2-C4] プラスチック（2）

座長：松本亨（北九州市立大学）
15:00 ～ 16:40　C会場 (zoom)

[2-C4-01] 産業廃棄物系プラスチックの都道府県単位での将来推計及び地域内・地域間のフロー構造の分析
*稲葉 陸太[1]、東 修[2]、岡本 大作[2]、中谷 隼[3]、根本 康男[2]、山口 直久[2]、藤山 淳史[4]、菊池 康紀[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）
15:00 ～　15:20

[2-C4-02] 行政報告データを活用した廃プラスチックフロー推計手法の検討
*范 学周[1]、叢 日超[1]、藤山 淳史[1]、松本 亨[1]（1. 北九州市立大学）
15:20 ～　15:40

[2-C4-03] Optimizing Industrial Plastic Waste Collection System Applying AI Technique
*叢 日超[1]、藤山 淳史[1]、松本 亨[1]（1. 北九州市立大学）
15:40 ～　16:00

[2-C4-04] 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とシナリオ設計
*平田 一馬[1]、中谷 隼[1]、藤田 壮[1]（1. 東京大学）
16:00 ～　16:20

[2-C4-05] 線形計画法を用いたバイオマスプラスチック導入に向けたプラスチック資源利用システム設計
*黒田 裕章[1]、天沢 逸里[1]、中谷 隼[1]、平尾 雅彦[1]（1. 東京大学）
16:20 ～　16:40

D会場

口頭発表セッション（一般）

[2-D4] 再エネ・ネガティブエミッション

座長：所千晴（早稲田大学）
15:00 ～ 16:40　D会場 (zoom)

[2-D4-01] 洋上風力発電における EVを用いた蓄電池の導入に関する研究
Research on the introduction of storage batteries using electric vehicles in offshore wind power generation
*山瀬 雄太[1]、磐田 朋子[1]（1. 芝浦工業大学）
15:00 ～　15:20

[2-D4-02] 洋上風力発電事業に影響を与える外部要因の定量的評価に関する研究
*高石 涼平[1]、磐田 朋子[1]（1. 芝浦工業大学）
15:20 ～　15:40

[2-D4-03] 廃太陽光パネルの資源循環に着目したライフサイクル評価
兵法 彩[1]、諏訪 出[1]、竇 毅[1]、所 千晴[2,1]、*菊池 康紀[1]（1. 東京大学、2. 早稲田大学）
15:40 ～　16:00

[2-D4-04] 蓄電システム導入による産業都市への再生可能エネルギー最大化の検討
*松崎 耀[1]、藤山 淳史[2]、松本 亨[3]（1. 北九州市立大学大学院、2. 北九州市立大学、3. 北九州市立大学）
16:00 ～　16:20

[2-D4-05] 直接空気回収技術（ DAC）のライフサイクル評価
*鈴木 隼斗[1]、森本 慎一郎[2]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学、2. 産業技術総合研究所）
16:20 ～　16:40

E会場

口頭発表セッション（一般）

[2-E4] 自動車

座長：木下裕介（東京大学）
15:00 ～ 16:40　E会場 (zoom)

©日本LCA学会

[2-E4-01] V2Xシステム導入が CO2排出量に与える影響検討

*各務 文雄[1]、星野 真樹[1]、磯部 眞弓[1]、川澄 えみ[1]、池添 圭吾[1]、鈴木 健太[1] （1. 日産自動車株式会社）

15:00 ～ 15:20

[2-E4-02] Scenario analysis of sustainable circulation system of traction lithium-ion batteries

*陶 福偉[1]、木下 裕介[1]、梅田 靖[1] （1. 東京大学）

15:20 ～ 15:40

[2-E4-03] 種子島における電気自動車と再生可能エネルギー連携システムの評価

*五十嵐 和樹[1]、栗島 英明[1]、菊池 康紀[2] （1. 芝浦工業大学、2. 東京大学）

15:40 ～ 16:00

[2-E4-04] 地域特性および車両特性の影響要因を考慮した中量輸送機関の CO_2排出量の評価

*山田 祐磨[1]、加藤 博和[1]、朴 秀日[1] （1. 名古屋大学）

16:00 ～ 16:20

[2-E4-05] モビリティ革命の低炭素性評価の方法論

*朴 秀日[1]、加藤 博和[1]、森田 紘圭[2] （1. 名古屋大学、2. 大日本コンサルタント株式会社）

16:20 ～ 16:40

2022年3月4日(金)

A会場

口頭発表セッション（一般）

[3-A1] 金属リサイクル評価

座長：河尻耕太郎（産業技術総合研究所）
09:20 ～ 10:40 A会場 (zoom)

[3-A1-01] AIによる革新的実験計画法と将来技術のLCA評価の組合せによる多目的エコデザイン最適化：アルミニウムのアップグレードリサイクルプロセスの事例

*河尻 耕太郎[1]、小林 三千夫[2] （1. 産業技術総合研究所、株式会社エイゾス、2. 産業技術総合研究所）

09:20 ～ 09:40

[3-A1-02] 複数の合金種を含む素材を対象とした閉ループリサイクルの評価指標の構築

*武山 健太郎[1]、醍醐 市朗[1]、星野 岳穂[1] （1. 東京大学）

09:40 ～ 10:00

[3-A1-03] 金属素材の水平リサイクルの促進に向けたリサイクル原料利用率の評価手法と各種スクラップの分類

*鈴木 太一[1,2]、醍醐 市朗[1]、星野 岳穂[1] （1. 東京大学、2. 株式会社UACJ）

10:00 ～ 10:20

[3-A1-04] Definition of process boundaries for calculation of recycling indicators for recycling modelling in LCA

*Panasiuk Daryna[1]、Liu Junxi[1]、Dunuwila Pasan[1]、Daigo Ichiro[1] （1. University of Tokyo）

10:20 ～ 10:40

C会場

口頭発表セッション（一般）

[3-C1] 建設

座長：小林謙介（県立広島大学）
09:20 ～ 10:40 C会場 (zoom)

[3-C1-01] 建設部門産業連関表誘発 CO2排出量分析とその応用

*外岡 豊[1]、村橋 喜満[2]、小林 謙介[3]、磯部 孝行[4] （1. 埼玉大学、2. 日鉄物産(株）、3. 県立広島大学、4. 武蔵野大学）

09:20 ～ 09:40

[3-C1-02] カーボンニュートラル社会と整合的なセメント・コンクリート循環構造の解明

*渡 卓磨[1]、Cao Zhi[2] （1. 国立環境研究所、2. アントワープ大学）

09:40 ～ 10:00

[3-C1-03] 窓断熱改修促進のための消費者選好分析

*伊集院 日向[1]、磐田 朋子[1] （1. 芝浦工業大学）

10:00 ～ 10:20

[3-C1-04] 工場へのアンケート調査に基づく合板及びLVLの製造段階における CO_2排出量推定

*竹内 直輝[1]、平井 康宏[1] （1. 京都大学）

10:20 ～ 10:40

D会場

口頭発表セッション（一般）

[3-D1] 生活

座長：栗栖聖（東京大学）
09:20 ～ 10:40 D会場 (zoom)

[3-D1-01] 持続可能な消費のための中古製品利用拡大に向けた考察

*文 多美[1]、田原 聖隆[2]、栗栖 聖[1] （1. 東京大学、2. 産業技術総合研究所）

09:20 ～ 09:40

[3-D1-02] 在宅テレワークにおける自然換気と知的生産性の関係に関する研究

©日本LCA学会

*岡田 雄人[1]、磐田 朋子[1] （1. 芝浦工業大学）

09:40 ～ 10:00

[3-D1-03] 環境効率指標を用いた対面授業とリモート授業の比較

*菅野 真哉[1]、磐田 朋子[1] （1. 芝浦工業大学）

10:00 ～ 10:20

[3-D1-04] サステイナブルファッション実現のための衣服リサイクルシステム設計

*平尾 雅彦[1]、天沢 逸里[1]、水口 能宏[2]、古川 雅敏[2]、佐久本 太一[2]、宮坂 信義[3] （1. 東京大学、2. 日揮ホールディングス（株）、3. 帝人（株））

10:20 ～ 10:40

A会場

口頭発表セッション（一般）

[3-A2] 農業

座長：林清忠（食品産業技術総合研究機構 ）
11:00 ～ 12:20 A会場 (zoom)

[3-A2-01] 有機養液栽培によるミニトマトの糖度・収量・環境負荷の複合比較

*藤森 開[1]、竹本 岬[1]、大平 希[1]、古屋 俊樹[1]、苗山[1]、堂脇 清志[1] （1. 東京理科大学）

11:00 ～ 11:20

[3-A2-02] リーダ農家と一般コメ農家のライフサイクル温室効果ガス排出量の比較

*レオン 愛[1] （1. 国立研究開発法人　国際農林水産業研究センター）

11:20 ～ 11:40

[3-A2-03] バイオ炭の農地施用がもたらす GHG削減効果の推計方法

*湯 龍龍[1]、林 清忠[1] （1. 農業・食品産業技術総合研究機構）

11:40 ～ 12:00

[3-A2-04] Prospective Environmental Cost Changes by New Materials in Products: a Case of Microfibrillated Cellulose in Paper Packaging Boxes

*Lavilla Ariel[1]、井原 智彦[1] （1. 東京大学）

12:00 ～ 12:20

C会場

口頭発表セッション（一般）

[3-C2] マテリアルフロー

座長：本下晶晴（産業技術総合研究所）
11:00 ～ 12:20 C会場 (zoom)

[3-C2-01] 金属生産に伴う将来の温室効果ガス排出量と気候変動目標との関係

*横井 崚佑[1]、渡 卓磨[2]、本下 晶晴[1] （1. 産業技術総合研究所、2. 国立環境研究所）

11:00 ～ 11:20

[3-C2-02] 施策実施とその製品寿命への影響をリンクさせた製品のストック・フローおよび環境負荷の推計モデルの構築

*西嶋 大輔[1]、小口 正弘[2] （1. 福島大学、2. 国立環境研究所）

11:20 ～ 11:40

[3-C2-03] 耐久消費財の製品サービスシステムを通じたサーキュラーエコノミーのもたらす温室効果ガス削減効果と LCA手法の系統的文献レビュー

*小出 瑠[1,2,3]、村上 進亮[2]、南齋 規介[1] （1. 国立環境研究所、2. 東京大学、3. 地球環境戦略研究機関）

11:40 ～ 12:00

[3-C2-04] 耐久消費財のフロー推計ツールの開発

*山本 悠久[1]、村上 進亮[1]、藤井 雄介[1]、小口 正弘[2] （1. 東京大学、2. 国立環境研究所）

12:00 ～ 12:20

2022年3月2日(水)

D会場

口頭発表セッション（特別）

[1-D1] 環境教育

座長：栗島英明（芝浦工業大学）
09:40 ～ 10:40 D会場 (zoom)

[1-D1-01] ライフサイクル思考を取り入れた保育者向け環境教育プログラムの開発

*大嶋 織江[1]、松本 真哉[2] （1. 横浜国立大学大学院環境情報学府、2. 横浜国立大学大学院環境情報研究院）

09:40 ～ 10:00

[1-D1-02] 総合的な探究の時間の指導におけるライフサイクル思考の導入

*松本 真哉[1]、平山 世志衣[2]、水野 建樹[2]、山口 真也[3] （1. 横浜国立大学、2. 横浜LCA環境教育研究会、3. 神奈川県教育委員会）

10:00 ～ 10:20

[1-D1-03] 総合討論

10:20 ～ 10:40

2022年3月4日(金)

B会場

口頭発表セッション（特別）

©日本LCA学会

[3-B1] カーボンニュートラル社会における資源問題（1）

座長：光斎翔貴（立命館大学）
09:20 ～ 10:20 B会場 (zoom)

[3-B1-01] 鉄鋼生産構造の変化に伴う資源効率の変化
*柏倉 俊介[1]、光斎 翔貴[1]、山末 英嗣[1]（1. 立命館大学）
09:20 ～ 09:40

[3-B1-02] 日本における鉄鋼資源循環
*北山 未央[1]、桑名 奈美[1]、小野 透[1]（1. 日鉄総研株式会社）
09:40 ～ 10:00

[3-B1-03] 鉄鋼製品のクローズドループリサイクル
*礒原 豊司雄[1,5]、渡壁 史朗[2,5]、牧 剛司[3,5]、北山 未央[4,5]、桑名 奈美[4,5]、齋藤 龍司[5]、青木 宗太[5]、渡部 拓海[5]（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. 日鉄総研株式会社、5. 一般社団法人日本鉄鋼連盟）
10:00 ～ 10:20

口頭発表セッション（特別）

[3-B2] カーボンニュートラル社会における資源問題（2）

座長：山末英嗣（立命館大学）
11:00 ～ 12:00 B会場 (zoom)

[3-B2-01] マイクロ波炉を用いた分散型リサイクルシステムの導入によるエネルギー削減量の評価
*小崎 啓太[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

[3-B2-02] 採掘活動から見たバイオマス発電の資源強度分析
*寒川 友香子[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1]（1. 立命館大学）
11:20 ～ 11:40

[3-B2-03] 次世代自動車の普及に伴う資源使用量の変化
*滝本 響[1]、光斎 翔貴[1]、渡 卓磨[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1]（1. 立命館大学）
11:40 ～ 12:00

2022年3月3日(木)

B会場

公募企画セッション

[2-B2] 材料代替効果のための LCA課題

オーガナイザー：田原聖隆（産業技術総合研究所）、醍醐市朗（東京大学）
11:00 ～ 12:20 B会場 (zoom)

[2-B2-01] 材料代替効果のための LCA 課題
11:00 ～ 12:20

公募企画セッション

[2-B3] カーボンニュートラルに向けた森林管理と資源利用

オーガナイザー：菊池康紀（東京大学）
13:20 ～ 14:40 B会場 (zoom)

[2-B3-01] カーボンニュートラルに向けた森林管理と資源利用
13:20 ～ 14:40

2022年3月4日(金)

D会場

公募企画セッション

[3-D2] 循環型社会形成のための指標開発と環境・経済・社会の統合的評価

オーガナイザー：橋本征二（立命館大学）
11:00 ～ 12:20 D会場 (zoom)

[3-D2-01] 循環型社会形成のための指標開発と環境・経済・社会の統合的評価
11:00 ～ 12:20

2022年3月2日(水)

P1会場

ポスターセッション

[1-P1] ポスターセッション(1)
14:40 ～ 15:40 P1会場 (zoom)

[1-P1-01] 日本 LCA学会学生交流ネットワーク 2021年度活動報告
*鬼頭 みなみ[1]、前野 啓太郎[1]、大津 太伸[2]、岡部 紘樹[3]、松田 敏明[4]（1. 九州大学、2. 横浜国立大学、3. 東京大学、4. 立命館大学）

[1-P1-02] 電気自動車の使用年数及び走行距離に基づいたリチウムイオンバッテリーの二次利用の可能性
*渡邊 一史[1]、橋本 征二[1]（1. 立命館大学）

[1-P1-03] 日本における廃プラスチックリサイクルの環境･経済･社会影響の統合的評価
*李 佰鑫[1]、近藤 康之[1]（1. 早稲田大学）

[1-P1-04] 居住に関わる3R行動の資源使用量削減効果の評価
*管 哲平[1]、橋本 征二[1]（1. 立命館大学）

[1-P1-05] 南海トラフ巨大地震における災害廃棄物量の推

©日本LCA学会

計と広域的仮置場への運搬の検討：関西圏を対象として

*西出 朱里[1]、吉田 英立[2]、谷川 寛樹[2]、橋本 征二[1]（1. 立命館大学、2. 名古屋大学大学院）

[1-P1-06] 電気自動車の需要拡大に伴う鉱物資源の環境・社会影響評価

*垣内 冴郁[1]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学院）

[1-P1-07] 太陽光パネルの普及に伴う廃ガラスフローのシナリオ分析

*堀部 翔[1]、橋本 征二[1]（1. 立命館大学）

[1-P1-08] 小型家電の各種回収方法の効率性

*板垣 翔太[1]、橋本 征二[1]（1. 立命館大学）

[1-P1-09] ポストコロナ社会における航空産業の2050年CO_2排出削減目標に関する達成経路分析

*鬼頭 みなみ[1,2]、高藪 広隆[3]、南斉 規介[2]（1. 九州大学、2. 国立環境研究所、3. 近畿大学）

[1-P1-10] 食料需要が誘発する農業における水資源への負荷の分析

*月岡 葵[1]、松嶋 そら[2]、加河 茂美[3]（1. 九州大学、2. 九州大学経済学府、3. 九州大学経済学研究院）

[1-P1-11] ビッグデータと人工知能を活用した空調機のエネルギー分析

*杉山 弦太[1]、本田 智則[2]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学大学院、2. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所）

[1-P1-12] データ包絡分析を用いた都道府県間における画像診断機器（ CT・ MRI）の最適配分の検討

*牛島 大悟[1]、中石 知晃[2]、三苫 春香[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）

[1-P1-13] 感染症対策がテレワークのエネルギー消費に与える影響評価

*HAO HUI[1]、吉村 彰大[1]、松野 泰也[1]（1. 千葉大学）

[1-P1-14] 住民の省エネ行動促進のための施策設計に向けた温室効果ガス削減ポテンシャル分析：島根県海士町の例

*兵法 彩[1]、菊池 康紀[1]（1. 東京大学）

[1-P1-15] 天敵製剤と代替餌を使用したナス施設栽培のLCA

*志村 もと子[1]、林 清忠[2]、湯 龍龍[2]（1. 農研機構西日本農業研究センター、2. 農研機構農業環境研究部門）

[1-P1-16] コンテナ船における主要会社によるCO_2排出量の推計

*後藤 真直[1]、下津浦 大賀[1]、加河 茂美[1,2]（1. 九州大学、2. 九州大学経済学研究院）

[1-P1-17] 製造業サプライチェーンの環境効率性分析と構造変化が与える影響分析

*高藪 広隆[1]（1. 近畿大学）

[1-P1-18] 脱炭素社会に向けた持続可能な都市構造の分析

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

[1-P1-19] Life Cycle Assessment for recycling food wastes by food banks in China

*季 楽箪[1]、吉村 彰大[1]、松野 泰也[1]（1. 千葉大学）

[1-P1-20] コロナ期におけるライフスタイルの変化が環境と経済に与える影響

*吉住 寛人[1]、中石 知晃[2]、加河 茂美[3]（1. 九州大学、2. 九州大学経済学府、3. 九州大学経済学研究院）

ポスターセッション

[1-P2] ポスターセッション(2)

15:50 ～ 16:50 P1会場 (zoom)

[1-P2-01] 日本 LCA学会学生交流ネットワーク 2021年度活動報告

*鬼頭 みなみ[1]、前野 啓太郎[1]、大津 太伸[2]、岡部 紘樹[3]、松田 敏明[4]（1. 九州大学、2. 横浜国立大学、3. 東京大学、4. 立命館大学）

[1-P2-02] 土石系資源の物量投入産出表の作成と資源利用効率の評価

*千葉 優衣[1]、橋本 征二[1]（1. 立命館大学）

[1-P2-03] 東京都市大学におけるカーボンフットプリントの算定

*渡邉 駿介[1]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学）

[1-P2-04] 建築分野におけるカーボンプライシングや自然資本会計の活用に関する検討
～事例建物の内部コスト・外部コストの削減対策導入による効果と評価の課題～

*望月 唯香[1]、藤田 あゆ[1]、東 弘菜[1]、小林 謙介[1]（1. 県立広島大学）

[1-P2-05] 岸和田だんじり祭のカーボンフットプリント

*村田 龍生[1]、河本 一誠[2]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学、2. リマテックR&D株式会社）

[1-P2-06] 環境負荷低減に向けた意思決定を支援するシェアリングサービスの類型化

*若林 宏[1]、天沢 逸里[1]、平尾 雅彦[1]（1. 東京大学）

[1-P2-07] COVID-19による生活変容がカーボンフットプリントに及ぼす影響は従事する産業ごとに異なるのか？

*吉良 成美[1]、重富 陽介[1]（1. 長崎大学）

[1-P2-08] 一般廃棄物中の食品廃棄物量及び食品ロス量の推計：滋賀県を対象として

*GE YICHEN[1]、橋本 征二[1]（1. 立命館大学）

[1-P2-09] 廃棄物処理業における熱中症の危険性及び労働

©日本LCA学会

強度の傾向
*岡本 宗一郎[1]、曹 剣飛[1]、橋口 伸樹[1]、児玉 耕太[1]、橋本 征二[2]（1. 立命館大学大学院、2. 立命館大学）

[1-P2-10] 廃太陽光パネルの資源循環に着目したライフサイクル評価
*兵法 彩[1]、諏訪 出[1]、竇 毅[1]、所 千晴[2,1]、菊池 康紀[1]（1. 東京大学、2. 早稲田大学）

[1-P2-11] 中高層住宅および非住宅分野への木材活用による森林資源蓄積量への影響
*若林 國久[1]、小林 謙介[1]、原田 郁美[1]、田中 小雪[1]（1. 県立広島大学）

[1-P2-12] 建築分野におけるカーボンプライシングや自然資本会計の活用に関する検討
～先進的な集合住宅モデルを対象とした内部コスト・外部コストの影響分析～
*東 弘菜[1]、望月 唯香[1]、藤田 あゆ[1]、小林 謙介[1]（1. 県立広島大学）

[1-P2-13] 広島県庄原市西城地域における CO_2排出量が少ないニューツーリズムの検討
*田中 小雪[1]、原田 郁美[1]、若林 國久[1]、小林 謙介[1]、岡崎 優子[2]、平井 正澄[3]（1. 県立広島大学、2. 特定非営利活動法人　西城町観光協会、3. 庄原市西城自治振興区）

[1-P2-14] テレワークが環境と経済に与える影響
*木村 聡[1]、大賀 雄介[1]、加河 茂美[2]（1. 九州大学、2. 九州大学経済学研究院）

[1-P2-15] 線形計画法を用いたバイオマスプラスチック導入に向けたプラスチック資源利用システム設計
*黒田 裕章[1]、天沢 逸里[1]、中谷 隼[1]、平尾 雅彦[1]（1. 東京大学）

[1-P2-16] 教育現場における ICT活用に伴うペーパーレス化が環境に与える影響
*西藤 和佳[1]、三苫 春香[2]、加河 茂美[3]（1. 九州大学、2. 九州大学大学院経済学府、3. 九州大学大学院経済学研究院）

[1-P2-17] 環境影響評価と消費者分析に基づくサステイナブルな衣服シェアリングサービス設計
*吉田 樹[1]、天沢 逸里[1]、木見田 康治[1]、平尾 雅彦[1]（1. 東京大学）

[1-P2-18] 建築分野における利用するバックグラウンドデータの差異が評価結果に及ぼす影響の検討
～3EIDと IDEAを用いた分析～
*水野 皓太[1]、小林 謙介[1]、山田 優吾[1]（1. 県立広島大学）

[1-P2-19] バイオ燃料と燃料電池を用いた大型トラックの環境影響評価
その１　バイオ燃料と軽油との比較
*久地樂 昌紀[1]、武田 克彦[2]、佐野 慶一郎[2]、河西 純一[2]、大井 康寛[3]、八木田 浩史[4]、佐々木 彩音[5]、深井 晶央[5]（1. 関東学院大学大学院、2. 関東学院大学、3. 元関東学院大学、4. 日本工業大学、5. いすゞ自動車株式会社）

ポスターセッション

[1-P3] ポスターセッション(3)

17:00 ～ 18:00 P1会場 (zoom)

[1-P3-01] 日本 LCA学会学生交流ネットワーク 2021年度活動報告
*鬼頭 みなみ[1]、前野 啓太郎[1]、大津 太伸[2]、岡部 紘樹[3]、松田 敏明[4]（1. 九州大学、2. 横浜国立大学、3. 東京大学、4. 立命館大学）

[1-P3-02] インピーダンス測定による冷凍サバの鮮度を考慮した環境負荷評価
*石部 優貴[1]、沖 慧弘[1]、片山 昇[1]、苗 山[1]、堂脇 清志[1]（1. 東京理科大学）

[1-P3-03] 直接空気回収技術（ DAC）のライフサイクル評価
*鈴木 隼斗[1]、森本 慎一郎[2]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学、2. 産業技術総合研究所）

[1-P3-04] Applying Natural Language Processing to Support Scenario Structuring for Sustainable Futures
*高 天正[1]、木下 裕介[1]、梅田 靖[1]（1. 東京大学）

[1-P3-05] 食品廃棄物発生量の規定因～社会基盤とライフスタイルに着目して
*高杉 晃司[1]、橋本 征二[1]（1. 立命館大学）

[1-P3-06] IDEA海外版の構築~IDEA Ver.3.1を用いた世界平均データベースの検討~
*山本 大夢[1]、半田 歩夢[1]、前田 天士[1]、小林 謙介[1,2]、藤井 千陽[2]、横田 真輝[2]、田原 聖隆[2]、Chun Yoonyoung[2]（1. 県立広島大学、2. 産業技術総合研究所）

[1-P3-07] 新型コロナウィルス禍における鉄道のカーボンフットプリント
*升川 晴陽[1]（1. 東京都市大学）

[1-P3-08] 有機養液栽培によるミニトマトの糖度・収量・環境負荷の複合比較
*藤森 開[1]、竹本 岬[1]、大平 希[1]、古屋 俊樹[1]、苗山[1]、堂脇 清志[1]（1. 東京理科大学）

[1-P3-09] 自然災害が環境と経済に与える影響
*岡 寛彰[1]、加河 茂美[2]、今田 青冶[1]（1. 九州大学、2. 九州大学経済学研究院）

©日本LCA学会

[1-P3-10] 食品ロス起源のライフサイクル CO_2排出とその変化要因の分析

*尾辻 勇太[1]、加河 茂美[1]（1. 九州大学）

[1-P3-12] 国際貿易構造の変化が CO_2排出に与える影響

*庄田 朋申[1]、前野 啓太郎[2]、加河 茂美[3]、下津浦 大賀[1]（1. 九州大学、2. 九州大学経済学府、3. 九州大学経済学研究院）

[1-P3-13] 建築分野におけるバックグラウンドデータベースの構築
～既往文献を活用したデータ作成方法の検討～

*中村 亘佑[1]、小島 陸[1]、小林 謙介[1]（1. 県立広島大学）

[1-P3-14] 長期環境家計簿でみる消費者のライフスタイルおよび省エネ技術変化の効果分析

*板 明果[1]、鷲津 明由[2]（1. 東北学院大学、2. 早稲田大学）

[1-P3-15] バイオマス由来樹脂による炭素ストック量分析：セルロース繊維強化樹脂の自動車への導入における例

*松田 侑樹[1]、兼松 祐一郎[1]、下野 僚子[1]、菊池 康紀[1]（1. 東京大学）

[1-P3-16] オリンピックと環境（４） 大会後における環境面での課題

*高橋 和枝[1]（1. 武蔵野大学）

[1-P3-17] 菜食主義者を対象とした環境フットプリント

*有馬 悠人セニカ[1]（1. 東京都市大学）

[1-P3-18] SDG報告に見る金属産業の SDGsへの関わり方

*畑山 博樹[1]（1. 産業技術総合研究所）

[1-P3-19] 容器包装の環境情報開示による消費者行動の分析

*橋本 岳大[1]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学）

[1-P3-20] バイオ燃料と燃料電池を用いた大型トラックの環境影響評価
その２ 燃料電池と軽油との比較

*久地樂 昌紀[1]、武田 克彦[2]、佐野 慶一郎[2]、河西 純一[2]、大井 康寛[3]、八木田 浩史[4]、佐々木 彩音[5]、深井 晶央[5]（1. 関東学院大学大学院、2. 関東学院大学、3. 元関東学院大学、4. 日本工業大学、5. いすゞ自動車株式会社）

M会場

オープニング

[1-M1] オープニング

09:00 ～ 09:30 M会場 (zoom)

[1-M1-01] オープニング

09:00 ～ 09:30

基調講演

[1-M2] 基調講演

13:20 ～ 14:20 M会場 (zoom)

[1-M2-01]「脱炭素社会の構築に向けた政府のグリーンイノベーション戦略の最近の動向」

田中 哲也（経済産業省 大臣官房審議官（産業技術環境局担当））

13:20 ～ 14:20

2022年3月4日(金)

M会場

学会賞受賞者講演、クロージング

[3-M] 学会賞受賞者講演、クロージング

13:20 ～ 15:40 M会場 (zoom)

[3-M-01] 日本 LCA学会賞表彰式

司会/座長 橋本征二 先生

プレゼンター 本藤祐樹 会長

13:20 ～ 13:40

[3-M-02] 受賞者講演①【奨励賞】持続可能な食料システムを目指したライフサイクル評価

*吉川 直樹[1]（1. 立命館大学）

13:40 ～ 13:55

[3-M-03] 受賞者講演②【論文賞】リマニュファクチャリング技術の適用による鉱山機械部品の LCA事例研究

*金澤 智尚[1]（1. 日立建機株式会社／千葉大学）

13:55 ～ 14:10

[3-M-04] 受賞者講演③【特別賞】 IT機器の欧州環境フットプリントへの取り組み

*並河 治[1]（1. (株)日立製作所）

14:10 ～ 14:25

[3-M-05] 受賞者講演④【功績賞】持続可能なリン資源管理に向けたライフサイクル思考の適用

*松八重 一代[1]（1. 東北大学）

14:25 ～ 14:40

[3-M-06] 受賞者講演⑤【功績賞】技術開発のための LCA

*福島 康裕[1]（1. 東北大学）

14:40 ～ 14:55

[3-M-07] クロージング

15:05 ～ 15:40

©日本LCA学会

口頭発表セッション（一般）

[1-A1] 機器の製造と利用

座長：小澤暁人（産業技術総合研究所）

2022年3月2日(水) 09:40 〜 10:40 A会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-A1-01] 業務用空調機における製造段階の環境負荷に関するホットスポット分析

*西澤 孝行[1]、半田 陽一[1]、米田 聡[1]、方 琦[1]、小原 聡[2]、尾下 優子[2]、藤井 祥万[2]、菊池 康紀[2] （1. ダイキン工業株式会社、2. 東京大学）

09:40 〜 10:00

[1-A1-02] ビッグデータと人工知能を活用した空調機のエネルギー分析

*杉山 弦太[1]、本田 智則[2]、伊坪 徳宏[1] （1. 東京都市大学大学院、2. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所）

10:00 〜 10:20

[1-A1-03] 電力ビッグデータから見るライフスタイル

*本田 智則[1]、小澤 暁人[1] （1. 国立研究開発法人産業技術総合研究所）

10:20 〜 10:40

©日本LCA学会

業務用空調機における製造段階の環境負荷に関するホットスポット分析

Hotspot analysis of environmental load at the manufacturing stage of commercial air conditioners

○西澤孝行*[1)]、半田陽一[1)]、米田聡[1)]、方琦[1)]、小原聡[2)]、尾下優子[2)]、藤井祥万[2)]、菊池康紀[2)]

Takayuki Nishizawa, Youichi Handa, Satoru Yoneda, Qi Fang, Satoshi Ohara, Yuko Oshita, Shoma Fujii, Yasunori Kikuchi

1) ダイキン工業株式会社, 2) 東京大学

* takayuki.nishizawa@daikin.co.jp

1. はじめに

空調機の脱炭素化については、空調機のライフサイクル GHG 排出量に占める割合が大きい[1]ことから、主に使用時の電力消費に着目した効率化が進められてきた。一方で、電力消費に起因する GHG 排出量は再生可能エネルギーの普及により大幅に減少する可能性がある。また、需要の増加に伴う素材の価格高騰や資源枯渇のリスク、サーキュラーエコノミーの進展による規制やバージン材の価格変動なども想定される。このような状況下で、空調機メーカーが社会的責任を果たしつつ、将来リスクに備えるためには、資源消費の観点や製造段階や廃却段階の環境負荷についても考慮していく必要がある。

本研究では業務用空調機を対象に、製造段階に注目した LCA を実施し、ホットスポットを特定することにより、材料置換や資源循環など環境負荷を低減するために今後取り組むべき課題を検討した。

2. 方法

2.1 評価対象

表 1 に示す業務用空調機の代表機種（国内生産）を対象に、システム 1 組あたりの環境負荷を算出した。熱交換器については、配管が銅である従来型のクロスフィンチューブ型と配管を銅からアルミに置き換えたアルミマイクロチャネル型の比較を行った。

表 1　対象機種のシステム構成

		室外機	室内機
外観			
台数	[台/組]	1	4
主要部品構成	圧縮機	スクロール型	—
	熱交換器	クロスフィンチューブ型／アルミマイクロチャネル型	クロスフィンチューブ型
	冷媒	R410	—

2.2 評価手法

評価範囲は製造から廃棄段階（ただし回収から中間処理まで）とし、特に製造段階の環境負荷についての詳細な分析を行う。インベントリ分析は素材重量や使用年数などのフォアグラウンドデータと IDEA v2 を用いて行い、気候変動（kg-CO_2 eq.）、資源消費（kg-Sb eq.）、統合化（JPY）の 3 指標で評価を行った。データが不足している部分については、JEITA（電子情報技術産業協会）[2]、ecoinvent version 3.71 の製造プロセスデータなどを引用して算出した。

3. 評価結果及び考察

製造段階を対象とした分析の結果、全ての評価項目に対して熱交換器の環境負荷が最も高い結果となった。これは熱交換器の素材自体の負荷が大きい為であり、特に気候変動についてはアルミが、資源消費については銅の影響が大きい事が確認された。また、従来構造であるクロスフィンチューブ型とアルミマイクロチャネル型の比較では、材料代替により資源消費への影響は大幅に減少させることができるが、気候変動への影響を増加させる結果となった。この気候変動への影響を低減するためには、例えば低負荷なエネルギーで精錬された低炭素アルミ材やアルミ再生材の使用を検討する必要がある。

4. まとめ

本研究により、製造段階の環境負荷が高い要素部品が特定され、低減方法を検討することができた。今後は資源循環など使用後の素材の取り扱いや材料選択も考慮した上で、最適な環境負荷低減方法について検討を継続する。

5. 引用文献

1) ダイキン工業株式会社: ダイキングループサステナビリティレポート (2021)

2) JEITA: “統計資料”, JEITA, （オンライン）, 入手先 <https://www.jeita.or.jp/japanese/>, （参照 2020-12-12）

ビッグデータと人工知能を活用した空調機のエネルギー分析

Energy Analysis of Air Conditioners Using Big Data and Artificial Intelligence

○杉山弦太*[1)]、本田智則[2)]、伊坪徳宏[1)]
Genta Sugiyama, Tomonori Honda, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学, 2)国立研究開発法人産業技術総合研究所
* g2183115@tcu.ac.jp

1. はじめに

日本政府は「2050 年カーボンニュートラル」を宣言し、地球温暖化対策計画の中で日本全体の温室効果ガス(以下 GHG)排出量を 2030 年までに 2013 年度比で 46%削減する目標を掲げている。中でも家庭部門は各部門中最大である 66%の排出削減が求められている[1)]。

一方で、家庭部門の GHG 排出源のおおよそ半分は電力によるものであるが、利便性・快適性を追求する国民のライフスタイルの変化や、社会構造変化の影響によって年々エネルギー消費量は増加しており[2)]、2030 年までに家庭部門の GHG 排出量を半分以下にするためには、機器の効率化のみならず、消費者のライフスタイルの見直しによる行動変容が必須である。

空調機の GHG 排出量の 9 割は使用段階の電力消費が占めており[3)]、家電の中でも空調機は特に気候やライフスタイルによって消費電力が変動するが[4)]、空調機の環境影響評価における使用段階の算出は日本産業規格(以下 JIS)の東京をモデルとした規格値[5)]が用いられているため、実際の空調利用実態を反映した算定が行われていないのが現状である。

2. 研究目的

本研究では空調機ビッグデータを分析することで実際の空調利用実態に即したエネルギー分析を行い、今後の気温上昇による冷暖房需要の変化と、それに伴う電力消費量及び GHG 排出量についての分析を行う。

また、地域毎の利用実態の違いを分析し、将来気候モデルを基に、家庭部門の排出削減目標の達成に向けて必要な削減量と、取るべき行動について検討を行う。

3. 研究方法

3.1 エネルギー分析

70972 台分の 1 分毎空調機稼働データのうち、2019 年 1 月から 2020 年 12 月までのデータの欠損率が 50%以下の機種をランダムに 100 台抽出し、空調機利用実態の分析と JIS 規格値との乖離について検証した。空調機の年間消費電力量の算出は定格冷房 4.0 k W の機種と仮定し、電力消費による CO_2 排出量は東京電力の 2020 年度の CO_2 排出係数である 0.441kg-CO_2/kWh を使用し算出した。

また、気温データと空調機の消費電力データを基に気温感応度を算出し、気温が 1℃変化した時に消費電力量がどの程度変動するかについて二次多項式による重回帰分析を行った。

3.2 地域推定

空調機ビッグデータには使用場所の位置情報が含まれておらず、そのままでは地域間の気候やライフスタイルによる使用実態の違いを把握することができない。

そこで、空調機ビッグデータに含まれている外気温データと気象庁の気温データの類似度を基に使用地域を推定するモデルを作成し、ビッグデータに地域推定モデルを適用することで位置情報を付与する。

地域推定モデルの作成にあたり、全国の気象観測所データをモデル作成用データとし、モデルの検証用データには建築学会の 2003 年の住宅データを使用した。

全国の気象観測所で測定された年間の 1 時間毎気温データを k-Means 法によって 5 つのクラスターに分類した結果を正解ラベルとし、建築学会のデータを同じく 5 つのクラスターに分類した際の推定精度を両データに含まれる観測所情報を基に検証する。

推定精度の検証方法として、建築学会のデータに含まれる各住宅の最寄気象観測所情報を基に全国の気象観測所データと照合し、正解ラベルと建築学会データの分類結果が一致していれば正解として評価を行った。

4. 研究結果

4.1 エネルギー分析

空調機ビッグデータから空調稼働日数と空調利用時間を算出した結果、実績値は東京をモデルとした JIS の規格値と比較して約 40%から 50%程度にとどまることが分かった。(表 1)

JIS 規格での消費電力量は年間約 1100kwh、CO_2 排出量は約 500 kg-CO_2 となったが、実績値の平均では消費電力量は約 400kwh、CO_2 排出量は 180 kg-CO_2 と、JIS 規格の約 30%程度にとどまることが分かった。

今回分析した実績値はまだ位置情報が不明であるため、位置情報を付与し、地域毎の気候による空調実態の把握を行っていくことが今後の課題となる。

表 1. 空調稼働日数､利用時間の実績値と規格値の比較

	実績値(100 台平均) (最大値)	JIS[5]
年間稼働日数	157 日 (313 日)	295 日
年間冷房日数	86 日 (195 日)	135 日
年間暖房日数	90 日 (201 日)	160 日
日平均利用時間(通年)	8.7 h (24 h)	18 h
年間冷房時間 (h)	834 h (3757 h)	1569 h
年間暖房時間 (h)	534 h (3026 h)	2707 h

次に空調機ビッグデータの外気温データと消費電力データから、外気温の変動による消費電力の変化について分析した結果、22℃を閾値として消費電力量が増加することが分かった(式 1, 図 2)。

冷房需要と考えられる 40℃以上の消費電力に比べ、暖房需要と考えられる 0℃以下の消費電力のばらつきが大きいが、これは空調機以外の暖房機器を使用していることによる空調稼働率の違いに起因するものと考えられる。

$$y = 0.0009932 \times x^2 - 0.04088188 \times x + 0.61679948$$

※ y：消費電力, x：外気温(℃) ― (式 1)

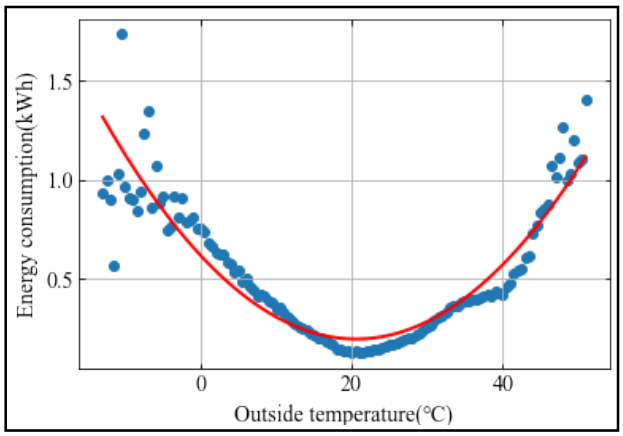


図 2. 消費電力実績に基づく気温感応度と回帰曲線

また、空調機ビッグデータには外気温が 50℃以上となるデータがあるが、日射の影響でセンサーの観測温度が実温度よりも高温になっていると考えられるため、適切な分析のために日射の影響を回避もしくは補正する方法を検討していく必要がある。

4.2 地域推定

気象観測所の気温データを 5 つのクラスターに分類するモデルを作成し、建築学会のデータにモデルを適用した結果図 3 のように分類することができた。図 3 中の丸印が気象観測所の箇所、逆三角形の印が建築学会データの位置を示しており、推定精度は 95%であった。

今回モデルの検証用データとして用いた建築学会のデータは観測地点が東北、関東、九州の一部の地域に偏っているため、今後は今回のデータに含まれていない地点の気温推移からの地域推定についても検討が必要である。

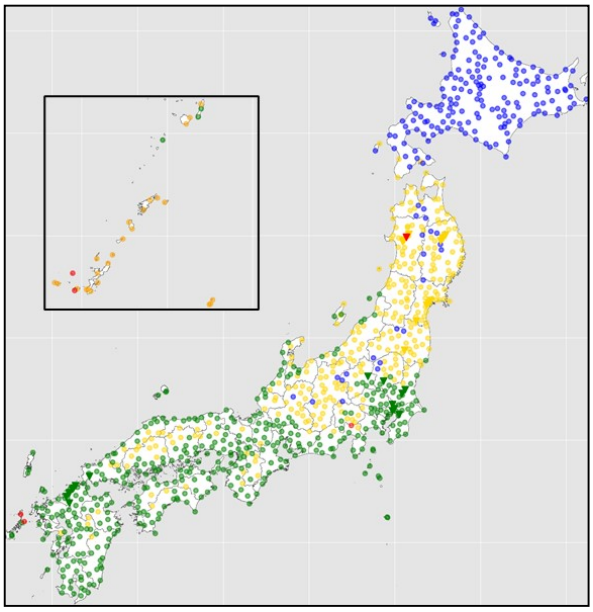


図 3. 気温データのクラスタリング結果

5. 今後の展望

空調機ビッグデータ分析により、空調利用実態と規格値が乖離していることが確認できた。また、地域推定については年間の気温推移データから入力データの地域を推定できることが確認できた。

今後はクラスター数や、推定精度の検証方法について検討を行い、地域推定モデルを用いて空調機ビッグデータへ位置情報を付与する。そして、得られた位置情報を基に地域別の空調利用実態の解明と、将来のエネルギー消費量、GHG 排出量の推計を行い、カーボンニュートラル達成に必要な削減量を算出することでライフスタイルの検討を行っていく。

6. 引用文献

1) 環境省：”地球温暖化対策計画”, (2021)
2) 経済産業省：”令和 2 年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書 2021)”, (2021)
3) 内山知重, 日本 LCA 学会誌, 11(2), (2015), pp114-120.
4) 高田亜佐子ほか：” 第 6 回日本 LCA 学会研究発表会”, 東北大学, (2010), pp.145-145
5) 日本工業規格, “JISC9612：2013 ルームコンディショナ”, (2013)

電力ビッグデータから見るライフスタイル

Lifestyle analysis based on electricity big data

○本田智則*[1)]、小澤秋田[1)]
Tomonori Honda, Akito Ozawa
1) 国立研究開発法人産業技術総合研究所
* tomonori-honda@aist.go.jp

1. はじめに

2020 年 10 月に開催された国会で「2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことが宣言された。これを受け、2021 年 10 月には地球温暖化対策計画が改定され閣議決定された。地球温暖化対策計画では、2030 年度までに 2013 年度比 46%の温室効果ガス排出削減目標が掲げられた。部門別に見ると、産業部門では 38%、業務その他部門では 51%、運輸部門では 35%の削減目標となっているが、その中でも最も高い削減率目標となったのが家庭部門の 66%削減であった。こうした状況から、家庭部門における温室効果ガス排出削減は喫緊の課題となっている。

家庭部門における温室効果ガス排出削減においては、エネルギー源の脱炭素化が期待されるところではあるが、2030 年目標達成においては、設備更新を伴う電源等エネルギー源の脱炭素化のみによって目標達成を行うことは困難である。そのため、エネルギー消費量自体の削減、すなわち省エネが重要な課題となっている。特に、家庭部門の温室効果ガス排出起因のうち 45.1%と最も大きな割合を占める電力の省エネが重要である。

一般に省エネを実現するための手法として経済的インセンティブの誘導によって省エネへの誘導を行うことが一般的である。例えば、家庭用太陽光発電システム導入による余剰売電制度や消費電力量の少ない照明である LED 照明の導入、住宅の空調負荷を低減するための断熱性能向上、低消費電力型の冷蔵庫等買電への買い換え促進と行ったものが該当する。しかしながら、こうした経済的インセンティブの誘発による省エネ施策については、理論上は当然省エネが実現することが想定される一方、真に省エネが実現されているかについては十分に検討されていない。その理由は、プライバシー性の高い家庭内の省エネ行動をデータとして分析することが困難であったためである。

2. 本研究の目的

本研究では、HEMS/スマートメータといった各家庭に設置され、時系列データとして取得可能な消費電力実態データを収集することによって、家庭における省エネ施策が真にエネルギー消費量の低減に効果があったのかについて定量的に検証することを目的として研究を実施した。研究実施にあたっては、住宅メーカーから提供を受けた、約 5 万世帯、7 年分の 1 時間毎消費電力データを用いて分析を行った。

3. 消費電力データによるライフスタイル可視化

研究実施にあたり、図 1 に示すように消費電力実態データの可視化を行った。図 1 は 1 セルを一時間の消費電力量として、24 セルで 1 日を示している。それを横に 7 日分、168 列、縦に 52 列並べることで、1 年の消費電力量の変化を示している。これを様々な形で集計することによって、ライフスタイルの変化を読み解くことが可能になる。図 2 は北海道電力管内と関西電力管内とう気象区分の異なる地域の消費電力パターンを可視化した結果である。

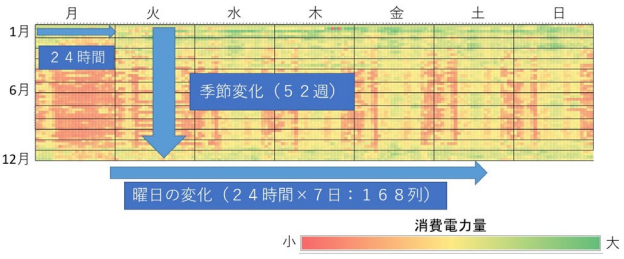


図 1　消費電力データの可視化例

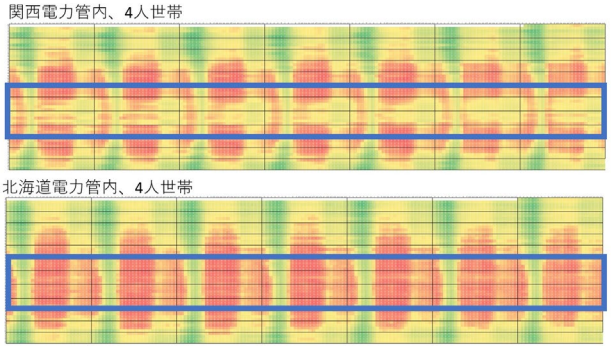


図 2　地域によるパターンの違い

4. 報告内容

報告では、消費電力実態データを用いることによって既存制度として、固定価格買取制度における余剰売電制度、住宅の高断熱かと行った省エネ施策の電力消費量削減効果について定量的な分析結果を報告する。

謝辞

本研究成果は JST 科研費 [18H04155, 26241033,18K14171]からの助成を受けて実施した内容を含みます。

口頭発表セッション（一般）

[1-B1] 空調

座長：柏倉俊介（立命館大学）

2022年3月2日(水) 09:40 〜 10:40 B会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-B1-01] Evaluation of air conditioner focusing on energy consumption and labor productivity

*薛 雲飛[1]、井原 智彦[1] （1. 東京大学）

09:40 〜 10:00

[1-B1-02] Assessing future emissions of household air conditioning in Southeast Asia through life cycle analysis

*Gonzaga Mark Cel[1]、伊坪 徳宏[2]、井原 智彦[1] （1. The University of Tokyo、2. Tokyo City University）

10:00 〜 10:20

[1-B1-03] 関与物質総量を用いたエアコンの資源強度評価

*濱砂 圭汰[1]、山末 英嗣[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1] （1. 立命館大学）

10:20 〜 10:40

©日本LCA学会

Evaluation of air conditioner focusing on energy consumption and labor productivity

○薛雲飛*[1)]、井原智彦 [1)]
Yunfei Xue, Tomohiko Ihara
1) 東京大学
* 8886262718@edu.k.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

Global climate change has increased the heat load in urban areas, posing health and productivity risks to millions of people. Air conditioning as a solution to protect urban populations from excessive heat exposure creates the challenge of increasing electricity consumption and greenhouse gas emissions, exacerbating climate change[1)]. In addition, the direct heat rejected from the air conditioning unit, adds to street level heat and therefore the urban heat island effect[2)]. On the other hand, air conditioning does protect workers from heat stress providing cooler spaces, thus protecting labor productivity and bringing economic benefits[3)]. But air conditioner's mitigating effect on loss of labor productivity rarely quantified by economic value. This study aims at assessing the cost-benefit analysis of air conditioning including electricity use as its demerit and mitigation of loss of labor productivity as its merit.

2. Methodology

2.1 Energy consumption

This study uses CM-BEM to calculate the indoor temperature and energy consumption of air conditioning. The model is composed of two sub models which are canopy model (CM) and building energy model (BEM). The model describes the feedback process, which is composed of the impact on a building's air-conditioning energy-demand from the weather inside an urban canopy and the effects of exhaust heat on the external environment[4)]. In the simulation, Tokyo's 23 wards are divid into 2457 urban districts according to the 4th mesh. Among them, 500 districts are selected as office-building districts based on the land and building usage.

2.2 Work efficiency

Kim et al[5)] showed the relationship between indoor temperature and work efficiency as in (1) and also measured the average comfort temperature to be 25°C in Seoul.

$$P=(-0.0035\cdot T^3+0.1840\cdot T^2-2.6171\cdot T+56.264)/51.8 \quad (1)$$

Where P represents work performance, T represents indoor temperature.

Li Lan[6)] pointed out that the relationship developed between thermal sensation and performance can be a useful tool to predict productivity loss due to thermal discomfort in the cost-benefit calculations pertaining to indoor environments. Hom B et al[7)] showed the average comfort temperature in the office buildings was found to be 25.4°C in Tokyo and Yokohama area. Both Kim and Hom B used the same questionnaire (ASHRAE 7-point Likert scale).

Therefore in this study, Kim's results are modified according to the difference of average comfort temperature between Tokyo and Seoul. The relationship between working efficiency and indoor temperature used in this study is expressed as (2).

$$P=(-0.0035\cdot(T-0.4)^3+0.1840\cdot(T-0.4)^2-2.6171\cdot(T-0.4)+56.264)/51.8 \quad (2)$$

Where P represents work performance, T represents indoor temperature.

2.3 Economic value of labor productivity loss

In this study, Cobb-Douglas production function is used to represent the conversion relationship between work performance decline and economic loss. The Cobb-Douglas production function is showed as (3), which is widely used to represent the technological relationship between the amounts of two inputs (particularly physical capital and labor) and the amount of output that can be produced by those inputs.

$$Y=AK^{\beta k}L^{\beta l} \quad (3)$$

Where Y represents total production, L represents labor input, K represents capital input, A represents total factor productivity.βk and βl are the output elasticities of capital and labor, respectively.

Due to the decline of work performance caused by high temperature, capital input and current technical level remain unchanged, so the only reduction is labor input, i.e. L. Referring to the manufacturing industry, the value of βk is 0.75[8)]. Therefore, the relationship between work performance and economic loss is as (4).

$$EL = 6172 \times [(1-P)\times n \times h]^{0.75} \quad (4)$$

Where EL represents economic loss, P represents work performance, h represents working hours, n represents number of workers. The labor productivity per worker of Tokyo's 23 wards is JPY6,172 per hour.[9)] The number of

workers in each urban district is from population and houses of Japan 2015[10], and the working hours are from the statistical results of Statistics Division, bureau of general affairs.[11]

3. Current results

Fig. 2. shows the relationship between indoor temperature and work performance. When the indoor temperature reaches 25.55 ℃, the work performance is the highest. As the indoor temperature increased to above or decreased to below 25.55 ℃, it was shown that the work performance relatively decreased.

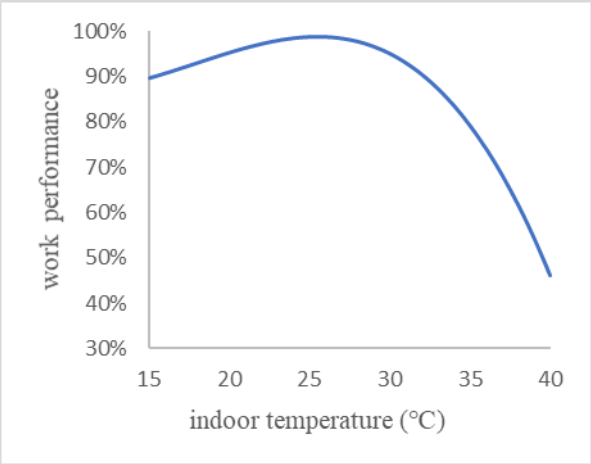


Fig. 2. Relationship between indoor temperature and work performance

Fig. 3. shows the average work performance of a district in summer. Where AC represents the room with air conditioning on, while non-AC represents the room without air conditioning on. It can be found that when the air conditioner is on, the work performance can be maintained at a high level all day, while when the air conditioner is not on, the work performance will be significantly reduced, and there will be a very large reduction at noon. On average, air conditioning can improve work performance by 5-7% in summer. If the set temperature of the air conditioner is adjusted, the protection effect on work performance will be more significant.

Take this district which has 505 workers as an example, the labor productivity gap between opening and closing AC can reach JPY4,103,309 in July. Table.1 shows the working hours of this district.

In this study, we hope to complete the simulation of other districts to obtain the economic losses of the Tokyo's 23 wards. Thus, the protective effect of air conditioning on labor productivity can be correctly evaluated and valued. In addition, we hope to find the optimal office set point temperature to address the trade-off problem between the labor productivity enhancing perspective and the energy saving perspective in office buildings.

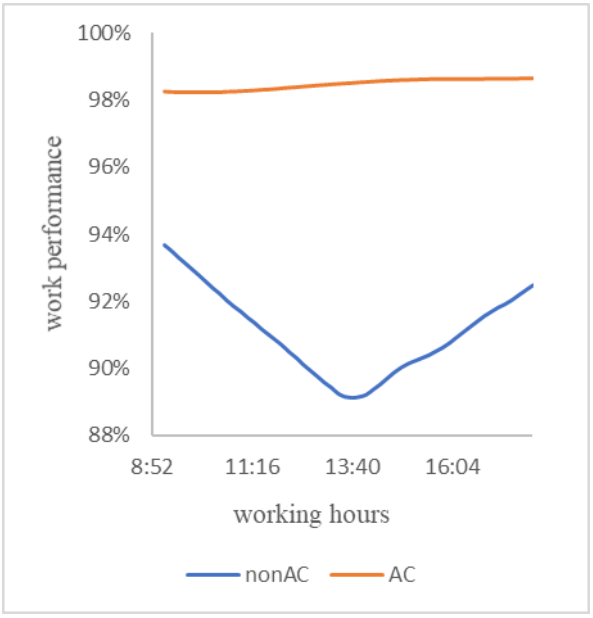


Fig. 3. Average work performance in summer.

District 533923172	Number of workers	Working hours
Full time job	349	161
Part time job	156	86

Table.1 Working hours of district-533923172.

引用文献

1) Karin Lundgren, Tord Kjellstrom,Sustainability (5), (2013) , pp.3116-3128
2) Liu, J.; Ma, F.; Li, Y. Adv. Mater. Res. (2011), pp.250–253
3) Kjellström, T.; Holmer, I.; Lemke, B. Glob. Health Action 2009, pp.46-51
4) Tomohiko Ihara, Yukihiro K, Kazutake A, Yutaka G, Hiroaki K, Applied Energy, (1), (2008), pp.12-25
5) Hakpyeong Kim, Taehoon Hong, Applied Energy, (276), (2020).
6) Li Lan, Pawel Wargocki, Zhiwei Lian, Energy and Buildings, 43(5), (2011), pp.1057-1062
7) Hom B. Rijal, Michael A. Humphreys & J. Fergus Nicol, 45(7), (2017) , pp.717-729
8) Paul H. Douglas, Journal of Political Economy , 84(5) (1976), pp. 903-916
9) 公益財団法人日本生産性本部
10) 国勢調査（2015 年）人口移動集計及び就業状態等基本集計に関する事項
11) 東京都総務局統計部

Assessing Future Emissions of Household Air Conditioning in Southeast Asia through Life Cycle Analysis

○マークセル エストパレ ゴンザガ*1)、伊坪徳宏 2), 井原智彦 1)
Mark Cel Estopare Gonzaga, Norihiro Itsubo, Tomohiko Ihara
1) 東京大学, 2) 東京都市大学
* mark.gonzaga@s.k.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

Climate change and global warming are increasingly becoming major concerns globally, especially as countries are found to continuously fail from stopping the growth of their greenhouse gas (GHG) emissions [1]. Although several countries have ratified multilateral environmental agreements and planned to reduce emissions of GHGs, we are still seeing challenges to decarbonization, especially in the replacement of more efficient appliances and electronics [2]. To achieve reduction targets, many countries develop GHG reduction pathways, one of which include strategies to reduce emissions in the building sector. Within the residential building sector, space heating and cooling is found to contribute the most to emissions and environmental impact as it utilized the most energy among household activities [2,3,4]. However, although there are many studies in energy systems, there are far fewer studies in air conditioning and refrigerating systems [5,6]. Moreover, most of these studies do not consider factors expected to change through time especially during the operating stage of the air conditioning unit.

In Southeast Asia, projected economic growth and rising temperatures are seen to be major triggers in the increase of penetration of air conditioners in the future [7]. Since ownership in the region remains low at the present, there is a strong potential for market growth in the next decades as households buy their first air conditioner or additional units in their homes. Thus, it is becoming more important to develop strategies in the region to ensure that the increase in cooling demand will not lead to unprecedented increase in emissions in the future.

The study considers future changes in the cooling demand, grid emission factors, energy efficiency of the air conditioning units, and refrigerant and refrigerant charges used over a 30-year period, from 2020 to 2050.

2. Methodology

This study focuses on six Southeast Asian countries Indonesia, Philippines, Malaysia, Singapore, Thailand and Viet Nam based on data availability and since the six countries account for more than 95% of the energy demand of Southeast Asia [5].

Two major activities include modeling future cooling demand and the refrigerant usage in the six countries to determine expected future emissions from electricity usage and refrigerant leakage. Since emissions during the operating stage normally account for majority of the emissions for an air conditioner [8], other lifecycle stages' emissions were not calculated in this study.

2.1 Modeling Cooling Demand

Cooling demand in SEA is expected to increase in the future due to economic growth and rising temperature and humidity in the region [7]. This increase in cooling demand is modeled using Isaac et.al's final energy consumption model [9]:

$$FE = HH \times Pen \times UEC / Efficiency\ Change \quad (1)$$

where FE, HH, Pen, and UEC are final energy, number of households, penetration, and unit energy consumption, respectively.

In this model, data on the number of households were taken from the United Nations' population projection [10] and household size [11] estimations. Penetration is a function of availability and climate maximum saturation, which are variables modeled based on the availability of air conditioners in various countries at different gross domestic product (GDP) per capita values, and the degree of penetration of air conditioners in the United States of America (USA) given a cooling degree day (CDD). This assumes that USA has the maximum penetration of air conditioner globally. Thus, this variable considers both income based on GDP per capita and cooling degree days. Finally, unit energy consumption represents the energy usage per household annually and was modeled using USA CDD and income values.

GDP per capita values until 2020 and projections until 2025 were taken from World Bank [12]. The same GDP growth rates were assumed to project values until 2050. Cooling degree days of each country were calculated using temperature information from different weather stations, accessed through National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [13]. For the calculation, a base temperature of 18°C was used and this was compared with at

least hourly temperature readings per weather station per country.

2.2 Modeling Refrigerant Usage

Modeling of future refrigerant usage was done based on available historical information on percentages of refrigerant usage [14,15] and the existence of policies that prohibit or favor the use of specific refrigerants.

For this study, only the refrigerants R22, R410A, R407C, and R32 were considered since these represent the most used refrigerants in the countries of study.

Regardless of refrigerant type, the same rate of leakage and topping up activities were assumed.

2.3 Calculating Emissions

Emissions from electricity usage was calculated using the projected cooling demand, national average air conditioner energy efficiencies, and the projected grid emission factors for each country.

Emissions from refrigerant usage was calculated using amount of refrigerant leaked yearly and the global warming potential (GWP-100) values of each refrigerant.

At this point in the study, only those emissions arising from the operational stage were considered.

3. Results and Discussion

Projected emissions from electricity use were calculated for each country until 2050 as shown in Figure 1.

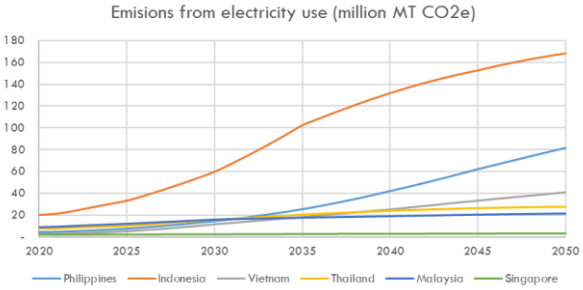


Figure 1. Emissions from electricity usage (Operation stage)

This shows that Indonesia has the highest emissions from electricity use among the Southeast Asian countries despite its low penetration. As driven by economic growth, penetration is expected to increase in all countries and this increase is felt to a greater degree in Indonesia and the Philippines because of both countries' high population. In fact, in 2032, the Philippines would overtake the other countries aside from Indonesia in terms of emissions from electricity use as air conditioner penetration increases in the country.

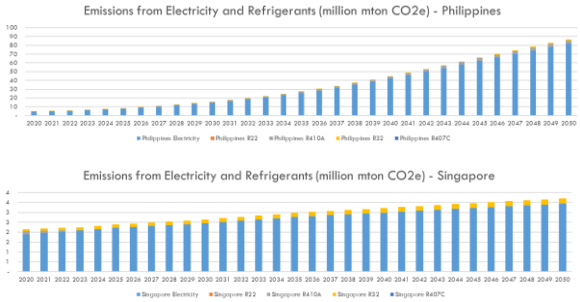


Figure 2. Emissions from both electricity use and refrigerant leakage in Philippines and Singapore

When including emissions from refrigerants, however, it becomes evident as in Figure 2 that electricity use contributes the most emissions. The graph for the Philippines represents the trend for countries including Indonesia and Malaysia with no ongoing concrete plans to adapt a refrigerant with lower GWP. On the other hand, the graph for Singapore represents those with policies (or evidence thereof) that prefer R32, including Thailand and Viet Nam.

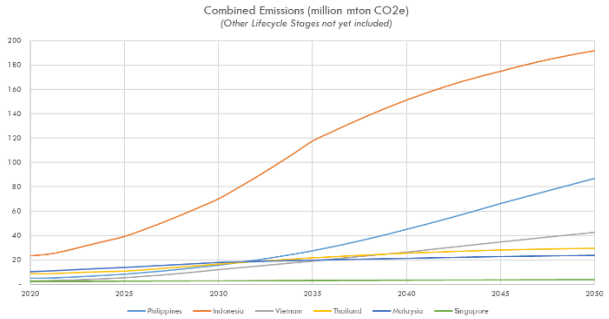


Figure 3. Combined emissions from electricity and refrigerant

Figure 3 shows that the trend for combined emissions mimics that for electricity use, further cementing that it has a greater impact than refrigerant usage.

Going forward, the results would be used to model future scenarios that explore potential air conditioner replacement pathways, especially those that serve to address the greater issue of electricity usage. In addition, regardless of its lower impact, the scenario would also consider future refrigerant type and technology to be used to ensure that the advances made in this front will continue and improve.

Supporting Information

References

[1] Emissions Gap Report 2019. (2019). http://www.un.org/Depts/Cartographic/english/htmain.htm

[2] Annual Energy Outlook 2018 (2018). US Department of Energy. http://www.eia.gov/outlooks/aeo

[3] 2009 Building Energy Data Book (2010). US Department of Energy. http://buildingsdatabook.eere.energy.gov/docs/xls_pdf/2.1.5.pdf

[4] Chau, C. K., Leung, T. M., & Ng, W. Y. (2015). A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings. In Applied Energy (Vol. 143, Issue 1, pp. 395–413). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023

[5] Li, Y., Nian, V., Li, H., Liu, S., & Wang, Y. (2021). A life cycle analysis techno-economic assessment framework for evaluating future technology pathways – The residential air-conditioning example. Applied Energy, 291(March), 116750. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116750

[6] Wang, Y., Liu, S., Nian, V., Li, X., & Yuan, J. (2019). Life cycle cost-benefit analysis of refrigerant replacement based on experience from a supermarket project. Energy, 187, 115918. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.115918

[7] International Energy Agency (IEA). (2019). The Future of Cooling in Southeast Asia. The Future of Cooling in Southeast Asia, October. https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling-in-southeast-asia

[8] Almutairi, K., Thoma, G., Burek, J., Algarni, S., & Nutter, D. (2015). Life cycle assessment and economic analysis of residential air conditioning in Saudi Arabia. Energy and Buildings, 102, 370–379. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.004

[9] Isaac, M., & van Vuuren, D. P. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. Energy Policy, 37(2), 507–521. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.051

[10] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Population Prospects 2019, Online Edition. Rev. 1

[11] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). Database on Household Size and Composition 2019

[12] World Bank. International Comparison Program, World Development Indicators database. Eurostat-OECD PPP Programme.

[13] NOAA Integrated Surface Data (ISD) accessed on 25 November 2021 from https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/.

[14] ASEAN SHINE. Promotion of higher efficiency air conditioners in ASEAN: a Regional Policy Roadmap. 2015.

[15] CLASP. (2019). COOLING IN A WARMING WORLD: Global Markets & Policy Trends. January.

関与物質総量を用いたエアコンの資源強度評価

Contradictory relationship between improving energy efficiency and increasing renewable energy in air conditioners

○濱砂圭汰※1)、光斎翔貴 1)、柏倉俊介 1)、山末英嗣 1)
Keita Hamasuna, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue
1）立命館大学
＊ rm0155vk@ed.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

気候変動に伴い，健康維持や快適な生活のためにはエアコンはより必要不可欠となってくる[1]．IEA によると，世界のエアコン設置台数は，2020 年の 16 億台から 2050 年までに 56 億台に増加すると予想されており[3]，人口増加や開発途上国の経済発展によるエアコンの需要拡大が見込まれている．

エアコンの需要増加に伴い、エネルギー消費量の大幅な増加が懸念されている[3]．冷却による GHG 排出量は、2019 年に比べて 2030 年には 2 倍、2100 年には 3 倍になると見込まれている[4]．そこで，エアコンに関わるエネルギー問題を解決するために，機器のエネルギー効率向上と再生可能エネルギーの割合増加が注力されてきた．

しかしその背後では，製品のエネルギー効率向上に従い，製造段階における投入資源が増加しているという問題も発生している[5]．そこで，稼働時における機器の省エネ化と再エネ増加により，高効率機種が製品寿命内において製造段階における投入資源の増加分をカバーできるかどうかを判断するために，Breakeven point（BEP）の観点から評価する必要がある．BEP とは元々経営学の概念としてビジネスで用いられており，係る費用を収益でカバーでき，損益がゼロになってこれ以降は利益が出るという時間のことである．この概念を資源に当てはめることで，異なるエネルギー効率の機種間において投入した資源増加分の相殺にかかる時間を分析することが可能となる．しかし，これまで BEP と製品寿命の観点からエアコンの資源量を評価した例はほとんどない．

これらを鑑みて，本研究では，採掘活動量という視点から資源を評価する指標の 1 つである関与物質総量(TMR)を用い，機器のエネルギー効率向上と再エネ増加に伴うエアコンの BEP の変化を製品寿命の観点から評価することを目的とする．

2. 研究手法

2.1 TMR の推定

BEP を推定するために，エアコンの製造段階と使用段階における TMR を推定する必要がある．製造段階の TMR[kg-TMR]を T_p，エアコンの各組成を i，各組成の質量[kg]を w_i、各組成の TMR 係数[kg-TMR/kg]を t_i とすると，T_p は以下の式で表すことができる．

$$T_p = \sum(t_i \times w_i) \qquad (2.1)$$

使用段階については，電力の TMR 係数[kg-TMR/kWh]を t_e，1 年間の消費電力量[kWh/year]を I，使用年数を x[year]とすると，年間の使用段階の TMR，T_o [kg-TMR/year]は以下の式で表すことができる

$$T_o(x) = t_e \times I \times x \qquad (2.2)$$

年間消費電力は JIS 規格(JIS C 9612:2013)の条件に基づいて計算した．エネルギーミックスは経年変化を考慮する．

最終的にエアコンの TMR[kg-TMR/year]，T は年数 x の関数として以下のように表すことができる．

$$T(x) = T_p + T_o(x) \qquad (2.3)$$

2.2 Breakeven point の推定

2018 年に製造されたエアコンの高性能モデル（以下，モデル H）とコンシューマーモデル（以下，モデル C）を対象とし，BEP の観点から TMR を比較した． エアコンの性能を表す指標である APF はモデル H が 6.8，モデル C が 5.7 である．BEP は，以下の式で表すことができる．

$$t_r = \frac{T_{ph} - T_{pc}}{T_{oc} - T_{oh}} \qquad (2.4)$$

ここで，t_r は Breakeven point（年），T_{ph} はモデル H の T_p，T_{pc} はモデル C の T_p，T_{oc} はモデル C の T_o，T_{oh} はモデル H の T_o を意味する．BEP は，エアコンの使用状況やエネルギーミックスによって変化する．日本の平均使用年数である 14.1 年[6]を基準とし，この年数と BEP の関係性を分析する．

3.結果

2018 年に製造されたエアコンの製造段階と使用段階での TMR を図 1 に示す．製造段階の時点では，モデル C の TMR（2720kg-TMR）はモデル H（4761kg-TMR）より低い．これはモデル H のエネルギー効率を高めるために

銅に代表される採掘強度の高い資源が多く投入されていることに起因している．しかし，使用段階を考慮すると TMR は 10.5 年で逆転している．これは，2 つのモデルのエネルギー効率の違いによるものである．BEP が日本の平均使用年数は 14.1 年を下回るため，資源の観点からはモデル H の使用が望ましいと言える．

また，経時的に傾きが緩やかになっていることがわかる．これは再生可能エネルギーの割合増加により年間の資源量が減少していることが起因する．

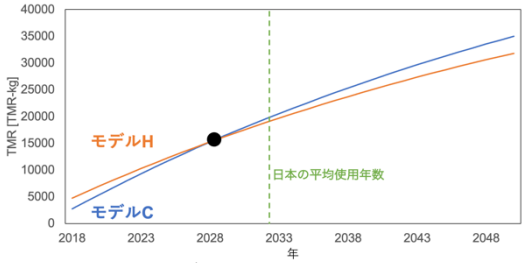


図 1 各モデルの総 TMR と BEP

4. 考察

上記で示されたように BEP は，エネルギーミックスにより変化する．特に，今後再生可能エネルギーの割合増加による電力の TMR 係数の減少に伴い，BEP は大きく変化すると考えられる． また，図 1 の結果は JIS 規格の基づき 1 日 18 時間の使用を想定しているが，各家庭や各部屋の使用状況は様々であり，BEP の決定に影響を及ぼすと考えられる．

そこで，エネルギーミックスと使用時間による BEP への影響を明確化するために，2019 年，2030 年，2050 年のエネルギーミックスにおいて 1 日あたりの使用時間別にその関係性を評価した．結果を図 2 に示す．各年のエネルギーミックスごとの BEP が平均使用年数を超える 1 日あたりの使用時間はそれぞれ，2019 年で 13 時間，2030 年で 15 時間，2050 年で 20 時間であった．このことから，1 日の使用時間と BEP は反比例していることがわかる．また，エネルギーミックスの経年変化による再生可能エネルギーの割合増加に伴い，BEP は上昇傾向にあることがわかった．

BEP はエアコンのエネルギー高効率化に伴い短くなるが，エネルギーミックスの変化によっては長くなるという相反関係が見られた．BEP の観点から，高効率の電化製品が必ずしも低効率の電化製品に優るとは限らない可能性がある．

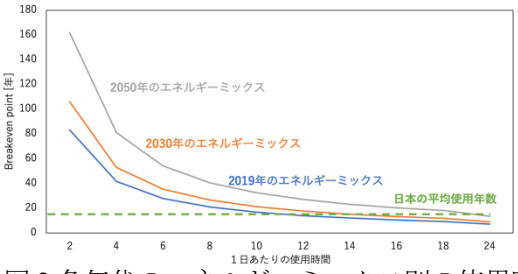


図 2 各年代のエネルギーミックス別の使用時間を考慮した Breakeven point

5. 結言

本研究では日本におけるエアコンを例に，資源負荷を対象としてエアコンにおけるエネルギー効率向上と再エネ増加の相反関係を製品寿命と BEP の観点から評価した．

エアコンの高効率化に伴い消費電力は低下しているが，エネルギーミックスの変化によっては、BEP の観点から高効率の電気製品が必ずしも低効率の電化製品に優るとは限らない可能性があることが示唆された．よって今後，BEP の観点から利用者の属性に合わせた電化製品選択を助言することが求められる．

6. 参考文献

[1] UNIVERSTY OF BIRMINGHAM, "DEFINING THE ENERGY CONUNDRUM OF COOLING FOR ALL," A cool world, 2018.
[2] United Nations Information Centre, "World Population Estimate 2019 Edition," available at https://www.unic.or.jp/news_press/features_backgrounders/33798/ (accessed 16.05.2021) (in Japanese), 2019.
[3] International Energy Agency, "The Future of cooling," available at: https://www.iea.org/futureofcooling/ (accessed 16.05.2021), 2018.
[4] Unated Nations, "What you should know about sustainable cooling," (accessed 16.05.2021), 2019.
[5] T. Kitajima, H. Sawanishi, M. Taguchi, K. Torihara, O.Honma, N. Mishima "A Proposal on a Resource Efficiency Index for EEE"
[6]資源エネルギー庁，エアコンディショナーの現状について

口頭発表セッション（一般）

[1-C1] 産業構造

座長：南齋規介（国立環境研究所）

2022年3月2日(水) 09:40 〜 10:40 C会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-C1-01] 固定資本内生化モデルによる炭素集約度に着目したマテリアルフットプリント解析

*畑 奨[1,2]、南齋 規介[1]、中島 謙一[1,2] （1. 国立環境研究所、2. 東京大学）

09:40 〜 10:00

[1-C1-02] 中間財輸出に伴うライフサイクル CO2排出量の推定

*永島 史弥[1]、時任 翔平[2]、土中 哲秀[3] （1. 近畿大学、2. 山形大学、3. 名古屋大学）

10:00 〜 10:20

[1-C1-03] Identifying household carbon footprints associated with an aging society in the US

*王 家歓[1]、重富 陽介[1]、Chapman Andrew[2] （1. 長崎大学、2. 九州大学）

10:20 〜 10:40

©日本LCA学会

固定資本内生化モデルによる
炭素集約度に着目したマテリアルフットプリント解析

Material footprint analysis by fixed-capital endogenization focusing on carbon-intensity

○畑奨*[1)2)]、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. 緒言

現代社会における生産やサービスは、生産設備、インフラ、耐久消費財などの固定資本に支えられており、そこには膨大な資源が投入されている。資源の採掘、精錬が気候変動に与える影響は大きく[1)]、固定資本形成による資源消費と炭素排出の関係を把握することは、気候変動目標に沿った資源管理政策にとって極めて重要である。そこで本研究では、日本の産業連関表（IO）をもとに資本利用に伴う資源消費を内包した MF（Capital-embodied MF）を算出し、生産活動と固定資本形成の 2 つのサプライチェーン効果に構造分解する。固定資本形成のカテゴリー別に資源消費と炭素排出の関係性を分析することで、固定資本形成が脱炭素化と整合する資源管理に及ぼす影響を明らかにする。

2. 方法

2.1 固定資本内生化産業連関モデル

本研究では Nansai et al.[2)]の手法を参考に固定資本を内生化した IO を作成し、式(1)によって Capital-embodied MF (**R**)を算出する。

$$\mathbf{R} = \mathbf{M}(\mathbf{I} - \mathbf{A}^{\mathrm{K}})^{-1}\mathbf{y} + \mathbf{W} \qquad (1)$$

$$\mathbf{A}^{\mathrm{K}} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \qquad (2)$$

ここで、**M** は単位生産あたりの直接資源消費量、**Y** は最終需要、**W** は最終需要に対する資源の直接投入量である。また、**A** は投入係数行列を表し、**B**、**C** はそれぞれ単位生産あたりの固定資本形成への財の投入、単位生産あたりの固定資本の消費を表す。$\mathbf{A}^{\mathrm{K}}$は固定資本を内生化した投入係数である（式(2)）。

また、式(1)における **M** を単位生産あたりの炭素排出量 **e** に置き換えることで、固定資本の影響を内包したカーボンフットプリント（Capital-embodied CF）を求めることができる。

2.2 使用データ

本研究では日本の 2015 年産業連関表(JIOT)[3)]から、投入係数 **A** および最終需要 **Y** を取得する。なお、最終需要については家計消費を対象とする。固定資本行列 **B**、**C** は固定資本マトリクス[3)]をもとに作成する。固定資本マトリクスは、116 種の資本財ごとに各部門が 1 年間に行なった固定資本形成の内訳が記述された、JIOT の付帯表である。

単位生産あたり直接資源消費量 **M** は、国内天然資源、循環利用資源、輸入資源、輸入製品を対象としている。各種統計からそれぞれの消費および輸入量を取得し、46 種の資源種ごとに単位生産あたりの直接資源消費量を定義する。

単位生産あたり炭素排出量 **e** は 3EID[4)]より取得する。

2.3 構造分解分析

生産活動と資本形成に伴う資源消費を分解して把握するため、構造分解分析[5)]を行う。116 部門の固定資本を 9 つのカテゴリーに分類し、それぞれの固定資本を形成するサプライチェーンを経由して生じる MF $\bar{\mathbf{p}}_g(g = 1 \ldots 9)$を分解して求める（式(3)）。

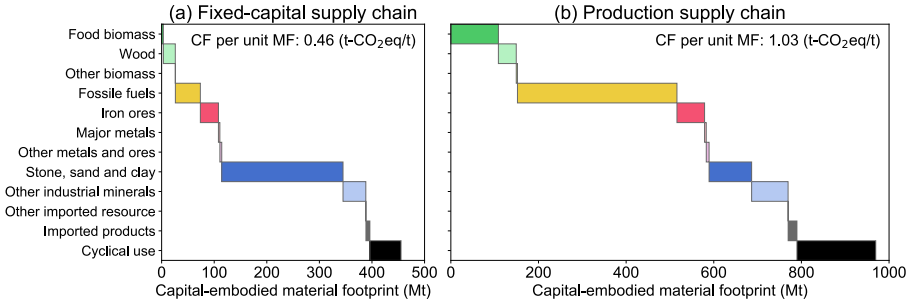


図 1 家計消費が誘発する固定資本内包型マテリアルフットプリントの構造分解

$$\mathbf{R} = \bar{\mathbf{p}}_0 + \sum_{g=1}^{9} \bar{\mathbf{p}}_g + \mathbf{My} + \mathbf{W} \qquad (3)$$

ここで、Capital-embodied MF (**R**) における $\bar{\mathbf{p}}_0 + \mathbf{My} + \mathbf{W}$ を「生産サプライチェーン効果」、$\bar{\mathbf{p}}_g$ を「固定資本サプライチェーン効果」と定義する。

3. 結果

図 1 は家計消費が誘発する Capital-embodied MF を資源種別およびサプライチェーン別に示している。家計消費によって、455Mt もの MF が固定資本サプライチェーンを経由して誘発されており（図 1a）、これは生産サプライチェーンの半分に匹敵する（図 1b）。また、固定資本サプライチェーンを経由して排出される CF は 208 t-CO_2eq で、MF あたりの CF は 0.46 t-CO_2eq/t である。資源消費に占める化石燃料の割合が支配的な生産サプライチェーン（図 1b）の約半分の炭素強度を、固定資本サラプライチェーンが有していることは注目に値する。これは、化石燃料以外の炭素排出強度が高い資源である木材、鉄鉱石およびその他金属資源が消費されていることに起因する。

図 2 では家計消費によって誘発される Capital-embodied MF の上位 20 部門を、生産サプライチェーン効果と固定資本サプライチェーン効果に分解して示している。この 20 部門には、固定資本サプライチェーンの割合が大きい部門が多数含まれている。その代表例が 291: House rent (imputed house rent) であり、173Mt の MF のうち 61%が固定資本サプライチェーンから生じている。住宅に関連した部門のほか、固定資本サプライチェーンの割合が 50%を超えている部門は、輸送関連サービス、学校教育、情報通信サービスである。

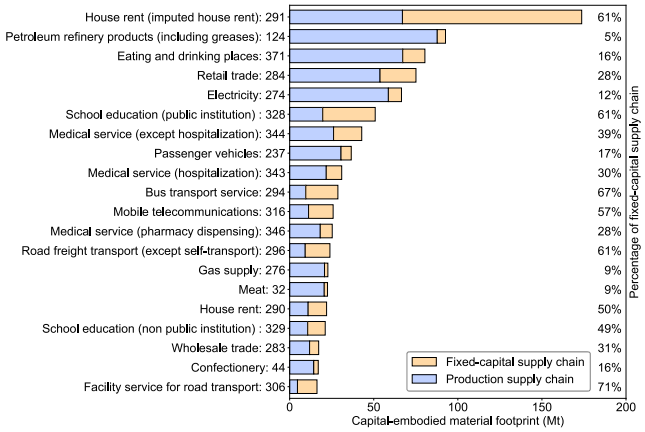


図 2 家計消費が誘発する固定資本内包型マテリアルフットプリントの上位 20 部門

固定資本サプライチェーンが誘発する 455Mt の Capital-embodied MF を 9 つの固定資本カテゴリーに構造分解すると、サービス産業の固定資本が誘発する MF (167Mt) が全体の 37%を占めることが分かった。（図 3）また、サービス産業の固定資本サプライチェーンは MF あたりの CF も高強度であることも特筆すべきである。このことは、サービスのための固定資本を管理することが、資源消費と炭素排出の削減に十分な効果があることを示唆する。また、MF あたりの CF が最も高いのは製造業と農業の固定資本である。

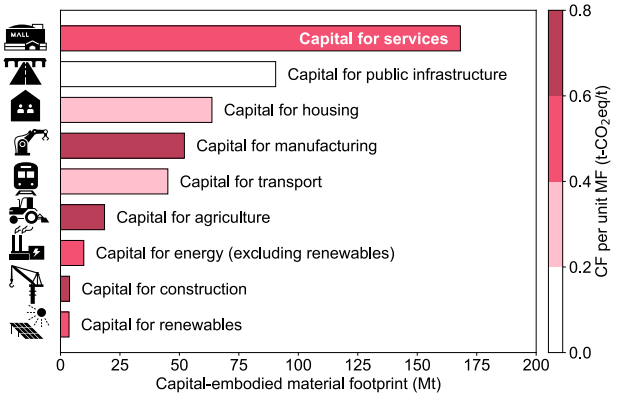


図 3 9 つの固定資本サプライチェーン毎の家計消費が誘発する固定資本内包型マテリアルフットプリント

4. 結言

固定資本サプライチェーンを経由して、炭素排出強度の高い資源消費が誘発されていることを明らかにした本研究は、固定資本側の対策が資源管理による脱炭素化には不可欠であることを示した。サービス産業の固定資本をはじめとする、炭素集約的な固定資本への生産・消費の依存を断ち切ることができるかが重要である。そのためには、既存の生産サプライチェーンに重点を置いた資源管理策を、固定資本サプライチェーンを統合的に取り込んだ制度に拡大する必要がある。

5. 参考文献

1) IRP. *Global Resource Outlook 2019*; Nairobi, Kenya, 2019.
2) K. Nansai et al, *Journal of Cleaner Production,*16(4), (2008), pp538-548
3) 総務省：平成 27 年（2015 年）産業連関表 https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/2015/io15_00001.html
4) K. Nansai, *Embodied energy and emission intensity data for Japan using input-output tables (3EID)*; 2019
5) K. Nansai et al, *Environmental Science and Technology*, 43(12), (2009), pp4241-4246

Identifying household carbon footprints associated with an aging society in the US

○Jiahuan Wang*[1)], Yosuke Shigetomi[1)], Andrew Chapman[2)]
1) Nagasaki University, 2) Kyushu University
* bb53621017@ms.nagasaki-u.ac.jp

1. Background

Because of increasing concern about the recent global climate change and its driving factor, "carbon footprint (CF)" has been utilized to estimate contributions of final consumption to global climate change. In this regard, our daily activities (i.e., household consumption) are the major driver of CF. CF of household consumption; household CF, varies among individuals depending on a person's location, habits, and personal choices [1)]. Besides, demographic shifts (e.g. aging population) impact the structure of household consumption, resulting in changes in household CF [2)].

The United States (U.S.) is the nation with the largest CF on the globe, and there have been numerous studies analyzing the U.S. household CF [3)]. However, to our knowledge, there is no literature concerning the relationship between household CF and household generations. Although the U.S. receives a lot of immigrants from the other nations and the aggregate population seems like increasing, in less than two decades, the older adults are projected to outnumber kids for the first time in U.S. history [4)].

This study, therefore, identifies the differences in household CF structures across age groups and estimates the impact of the future demographic trend on the household carbon footprint in the U.S.

2. Methods

Multi-regional input-output (MRIO) analysis is an accounting and modeling approach relying on regional economic input-output tables and inter-regional trade matrices, depicting the monetary flows to and from each sector within and between the interlinked economies and thus revealing each sector's entire supply chain. This study employed EXIOBASE 3 [5)] to estimate the U.S. household CF. EXIOBASE was developed by harmonizing and detailing supply-use tables for a large number of countries, estimating emissions and resource extractions by industry, providing time-series MRIO tables, and the environmental impacts associated with the final consumption of product groups.

To identify the relationship between the U.S. household CF and demographic structures, we utilized the Consumer Expenditure Surveys (CES) program by The Bureau of Labor Statistics that allows for using the household expenditures for demographic characteristics of consumers in the U.S.. First, we created the concordance matrix for mapping the consumption items on CES onto the commodity sectors on EXIOBASE 3. Second, the per-household consumption expenditures for the seven age groups of the householder (1: 24 and younger, 2: 25-34, 3: 35-44, 4: 45-54, 5: 55-64, 6: 65-74, 7: 75 and older) were obtained through the optimization procedure proposed in the previous study [2)]. Finally, the household CF by age group in 2011 was estimated by multiplying the CF intensity based on EXIOBASE 3 by the consumption expenditures. Direct CO_2 emissions from households, such as driving a car and fueling for heating, were calculated based on the U.S. energy statistics.

Further, by a combination of the future number of households by age group [6)], we also estimated the impact of the demographic shift on the U.S. household CF from 2018 to 2038.

3. Results and Discussion

The highest annual consumption expenditure per household among the seven age groups was accounted for 59.5×10^3 EURO, which was engendered by the 35-44 years-old households, followed closely 58.9 thousand EURO, by the 45-54 years old households. However, the largest consumption expenditure per capita was diverse that accounted for 37.3×10^3 EURO by the 75 and older years-old households.

Figure 1 shows the total CFs across the seven age groups for the 12 categories that are aggregated from 200 products on EXIOBASE 3. The trend in the CF was different from that in the consumption expenditure as explained above. The highest CF per household in the 45-54 years-old households was accounted for 36.5 t-CO_2eq, followed by 33.7 t-CO_2eq with the 35-44 years-old households The highest CF per capita was seen in the 55-64

years-old households by 14.0 t-CO_2eq. When looking at the differences by category, "transport, post, and telecommunications" contributed the most to the CF for all the households, ranging from 6.5 to 13.0 t-CO_2eq. The age group with the highest CF per household for "transport, post, telecommunications" was shown by the 45-54 years-old households, which are more likely to travel frequently with larger family members. "Utilities" that includes electricity, gas, water services, etc. was the second dominant category for the CF, ranging from 5.4-7.2 t-CO_2eq among age groups. Same as "transport, post, and telecommunications", the age group with the highest CF per household for "utilities" was the 45-54 years-old households.

Figure 2 depicts that the CFs of 3 locational sectors ("domestic supply chain", "imported (foreign supply chain)", and "direct") by householder age group in 2011. Domestic CFs are more significantly higher than imported, due to the more abundant domestic resources in the U.S. The age group with the highest CF per household was the 45-54 years-old households, at 39.5 t-CO_2eq, followed by the 35-44 years-old households and the 55-64 years-old households, at 36.5 t-CO_2eq and 35.9 t-CO_2eq, respectively.

Figure 3 illustrates the estimation of total CFs from 2011 to 2038 for 12 categories influenced by changes in the number of households during the same period. The increasing trend was shown until 2038 and the total CF would reach 4510 Mt-CO_2eq, which increased by 780 Mt-CO_2eq compared to 2011. In all the years, "transport, post, and telecommunications" emitted the largest share of total CF, by around 35%. We also estimated the trends in the CFs per household by age group. Of which the most significant variation was shown by the 75 and older years-old households, increasing by 386 Mt-CO_2eq (+132%) from 2011.

Apart from Japan where is a mostly homogeneous nation, the U.S. is a nation of immigrants as well as confronting an aging society. This study assumes the composition of races in the age groups is fixed from 2011 as a base year of consumption expenditures. Therefore, future variations in the racial composition should be also considered. We will clarify the relationship between races and CFs in future studies.

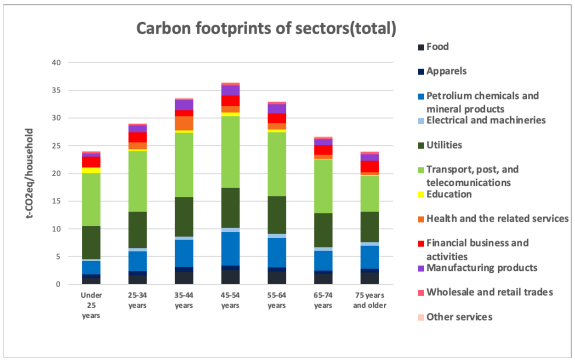


Fig. 1. Compositions of the household CF for 12 categories by householder age group in 2011.

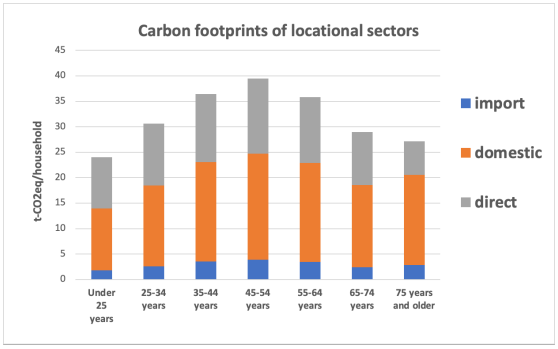


Fig. 2. Compositions of the household CF of three locational sectors by householder age group in 2011.

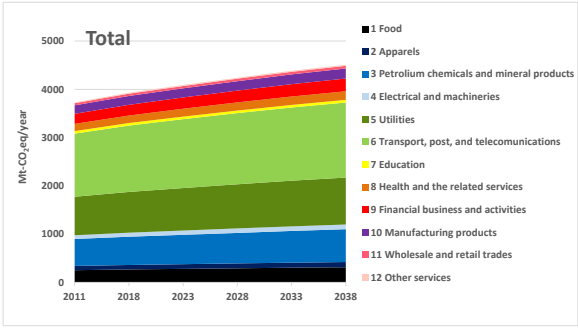


Fig. 3. A trend in the total household CF for 12 categories from 2018 to 2038.

4. References

1) Matthews, S.H. et al. (2008) *Environ. Sci. Technol.* 42, 5839–5842.
2) Shigetomi, Y. et al. (2014) *Environ. Sci. Technol.* 48, 6069-6080.
3) Feng et al. (2021) *J. Clean. Prod.* 278, 123994.
4) U.S. Census Bureau, accessed 3 January 2022. U.S. BUREAU OF LABOR STATISTICS, accessed 3 January 2022.
5) Stadler, K. et al. (2018) *J. Ind. Ecol.* 22(3), 502–515.
6) JCHS (2018) Updated Household Growth Projections: 2018-2028 and 2028-2038.

口頭発表セッション（一般）

[1-E1] 国際産業連関

座長：岡本隼輔（尾道市立大学）

2022年3月2日(水) 09:40 〜 10:20 E会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-E1-01] Building multi-regional physical input-output tables of food products

*Dente Sebastien[1]、Hashimoto Seiji[1]（1. Ritsumeikan University）

09:40 〜 10:00

[1-E1-02] 国際産業連関表を用いた構造的類似性の抽出および二酸化炭素排出構造の特定

*白新田 佳代子[1]、加河 茂美[2]、近藤 康之[3]（1. 福岡女子大学、2. 九州大学、3. 早稲田大学）

10:00 〜 10:20

©日本LCA学会

Building multi-regional physical input-output tables of food products

○Sebastien M.R. Dente*[1)], Seiji Hashimoto[1)]
1) Ritsumeikan University
* sdente@fc.ritsumei.ac.jp

1. Introduction

Food is essential to human development and human well-being and is a core element of the sustainable development goals. Food production nonetheless impacts the environment through its land and water use, the transformation of phosphorus and nitrogen cycles, and its carbon emissions. Keeping these impacts within planetary boundaries is fundamental to the advent of a sustainable food production and consumption system. The present study shows how to construct a multi-regional physical input-output table (mPIOT) from international statistics which enable to trace the becoming of food from harvesting areas to place of consumption.

2. Methodology

2.1 The FAO supply use accounts

The basic information used for the building of the mPIOT is the supply utilization accounts of Food Agriculture Organization (FAO) [1]. These accounts provide the inputs and outputs of 456 products for 170 countries. The inputs include the import, production and stock variation of food products. The outputs account for the post-harvest loss, the part of production reused as seeds, and distinguish between exports, non-food, food and feed consumption. The database also provides for each item the amount processed further into other food products. However, the becoming of food items is not specified.

2.2 The modeling of food processing

The food network was modeled by building a relation model between the FAO products. The food products were classified as follows using a typology of food processing.

- 1:1 describes processes simply modifying the food product.
- 1:n describes processes decomposing the input food product into several other food products. Milling is an example of such process (cf. Fig.1)
- n:1 describes process aggregating food products into a single product
- n:n describes complex process combining multiple food inputs into multiple food products.

The process losses were then calculated by applying mass balance principle to the comparison of inputs and outputs.



Fig 1: A decomposition process (1:n)

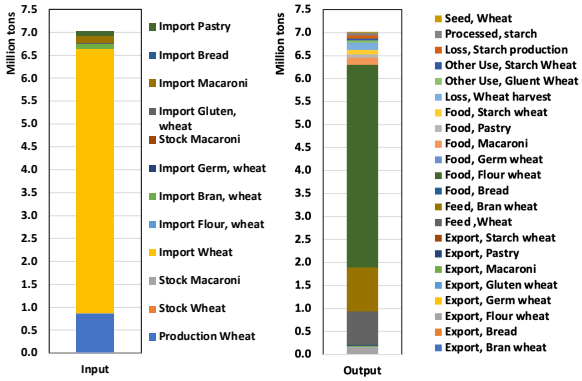


Fig 2: Wheat supply chain balance in Japan (2014)

2.3 The modeling of trade

The connection between domestic food supply chains was done by decomposing the imports and exports statistics of the supply utilization accounts [1] into countries of origin and destination. For this purpose, the detailed trade matrix of the Food and Agriculture Organization was used [2].

3. Results and Discussion

The calculation steps provide an input-output framework of basic food item supply chain for each country. Fig. 2 presents such framework for the wheat supply chain in Japan. Most of the transformation occurred in Japan as the import of complex products accounts for 5 % of the input. Food and feed represent 67% and 24 % of the wheat output. Losses amount to 3.4 % and are associated for 70% to post-harvest loss and 30% to starch production.

Acknowledgement: This research was supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (19H04345).

Reference:

[1] Food Agriculture Organization. Supply Utilization Accounts. https://www.fao.org/faostat/en/#data/SCL.
[2] Food Agriculture Organization. Detailed Trade Matrix. https://www.fao.org/faostat/en/#data/TM

国際産業連関表を用いた構造的類似性の抽出
および二酸化炭素排出構造の特定

Extraction of structural similarities and identification of carbon emission structure using the International Input-Output tables

○白新田 佳代子*[1)]、加河 茂美[2)] 、近藤 康之[3)]
Kayoko Shionitta, Shigemi Kagawa, Yasushi Kondo
1) 福岡女子大学, 2) 九州大学, 3) 早稲田大学
* k.shironitta@fwu.ac.jp

1. はじめに

地球温暖化問題の深刻化から温室効果ガスの削減が求められているが、日本国内・世界全体での温室効果ガスの排出量は増える一方である。温室効果ガス削減に対する国際的な枠組みは一人当たり国民所得のような経済発展度を基準とした限定的な枠組み（ex. 京都議定書）と国単位の枠組み（ex. 国内の政策やパリ協定）が行われてきたものの、世界各国における産業構造や消費構造などの複合的な経済構造の変化を考慮した枠組みについての議論は依然として十分には行われておらず、排出移転の問題を解決するには至っていない。

生産技術や運輸・通信技術の成長等を背景に、各国の経済構造の変化は先進国や途上国問わず多様化している。経済構造の変化や発展パターンを分析することは、今後の世界各国の経済成長を予想するだけでなく、世界の環境負荷などの問題を解決するための手段として有効であると考えられる。そこで本研究では、スペクトラルクラスタリング[1,2]を国間の経済構造の類似性に適用することでグループ化する方法を提案する。さらに本研究は各グループの二酸化炭素排出構造に着目し、二酸化炭素排出に対して構造的な類似性が果たす役割について議論する。

2. 研究手法

2.1 類似性の定式化

産業連関表の投入係数行列を用いて2国間の構造的な類似性を定義する。*s*国の産業*i*への*s*国および*s*国以外の産業*j*からの中間投入を$z_{ij}^{s} = \sum_r z_{ij}^{rs}$として定義する（$i, j = 1, \dots, N$; $r, s = 1, \dots, C$）。ここで、output vectorを$\boldsymbol{x}^{s} = \left(x_j^{s}\right)$としたとき、技術係数は$b_{ij}^{s} = z_{ij}^{s}/x_j^{s}$として定義される。$b_{ij}^{s}$は*s*国の*i*産業が1単位生産するときに必要とする*j*産業の国産投入量および輸入投入量の合計を表している。すなわち、技術係数行列$\mathbf{B}^{s} = \left(b_{ij}^{s}\right)$は*s*国の生産構造を表すものである。s国とr国の技術係数行列$\mathbf{B}^{s}$ 、$\mathbf{B}^{r}$の類似度k_{sr}を次の(1)式で定式化する。

$$k_{sr} = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{B}^{s}-\mathbf{B}^{r}\|}{\sigma^{2}}\right) \qquad (1)$$

2.2 スペクトラルクラスタリングの適用

次に、(1)式で得られた経済構造の類似性を基準にグループ化を行う類似行列$\mathbf{K} = (k_{sr})$と定義すると、この類似行列**K**は重み付き隣接行列とみなすことが出来る。*i* 国の重み付き次数は(2)式で計算される。

$$d_s = \sum_r k_{sr} \qquad (2)$$

対角成分に重み付き次数d_sを持つ対角行列**D**とすると、次の(3)式より基準化ラプラシアン行列$\mathbf{L}^{*}$が得られる。

$$\mathbf{L}^{*} = \mathbf{D}^{\frac{1}{2}}(\mathbf{D}-\mathbf{K})\mathbf{D}^{\frac{1}{2}} \qquad (3)$$

(3)式の基準化ラプラシアン行列$\mathbf{L}^{*}$の固有値問題から得られる第2固有ベクトルを $\mathbf{y} = (y_s)$とし、$y_s > 0$ となる頂点をグループA、$y_s < 0$ となる頂点を集合Bとしグループ化を行う。またクラスタリングの最適なグループ数はモジュラリティ・インデックス[3)]から決定される。本研究ではグループ数は2として分析を行った。本分析で適用したスペクトラルクラスタリングおよびモジュラリティ・インデックスに関するより詳細な理論については、参考文献[1-3]を参照されたい。

2.3 キーセクター分析

2.2で得られたグループの特徴的な構造を見るため、キーセクター分析を行う。本研究では、対象国の影響力係数・感応度係数を推計し、グループの平均的な影響力係数と感応度係数からキーセクターの特定を行った。さらに、各国の二酸化炭素排出のキーセクターを特定するため、環境影響を考慮した影響力係数・感応度係数の推計を行った。

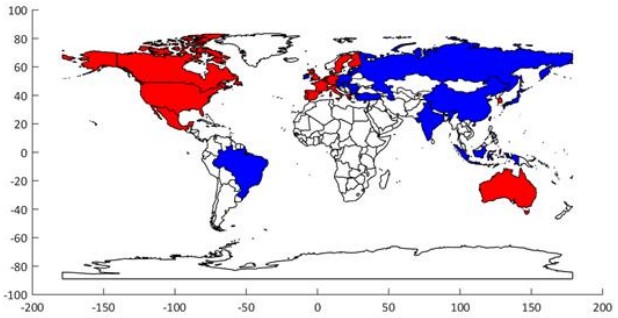
3. データ

本研究では、世界産業連関表 The World InputOutput Database (WIOD)[4]より、1995 年から2009 年における多地域間産業連関表を使用した。この多地域間産業連関表は41 カ国（Rest of the world を含む）35 産業部門からなる。本多地域間産業連関表は1995 年価格基準に実質化されている。なお、各国の経済構造は多地域産業連関表の該当箇所より取り出して分析を行った。

4. 結果

4.1 経済類似性に基づくグループの特定

本研究は1995年のグループを基準に分析を行った。1995 年世界40カ国についてクラスタリング分析を行った結果を図1にまとめた。**グループ**Aは属する国はアメリカ、カナダ、西欧諸国（イギリス、フランス、ドイツなど）、メキシコ、オーストラリア、韓国等から構成されたのに対し、**グループ**B はロシア、東欧諸国、アジア諸国、ブラジル等から構成された。



■ グループA ■ グループB

図1. 1995年の経済構造の類似性に基づいたグループ

4.2 キーセクターの特定

図2は、1995年における2つグループの環境影響を考慮した影響力係数と感応度係数を推計し、キーセクター分析を行った結果である。なお、環境影響を考慮した影響力係数と感応度係数は、技術係数を用いたレオンチェフ逆行列に排出集約度ベクトルを前から乗じて得られる環境型レオンチェフ逆行列より推計した。

影響力係数と感応度係数が共に1を超えている事象に分類される部門は、そのグループの排出構造に強い影響を与える部門であると言える。図2より、グループA、Bにおいて、部門18（電気・ガス・水道）の影響力係数および感応度係数が非常に大きい点が共通している。この事象に分類される部門は部門18以外にも共通した部門が多数存在する（ex. 部門11 非金属鉱物）。ただし、共通する部門でもその影響力・感応度に大きな差がある部門が存在する。例えば、部門8（化石燃料および核燃料）や部門20（水上輸送）はグループAがより強い影響力と感応度を持つ傾向にあった。反対に、部門9（化学製品）や部門12（非金属および加工金属）はグループBがより強い影響力と感応度を持つ傾向にあった。また、影響力係数と感応度係数が共に1を超えている事象に分類される部門の中には、グループBにしか見られない特徴的な部門として家事代行サービス（部門35）があった。キーセクターとなる部門はグループ間で共通する部門が見られたが、その中でも影響力および感応度に差があり、グループの特徴が確認された。

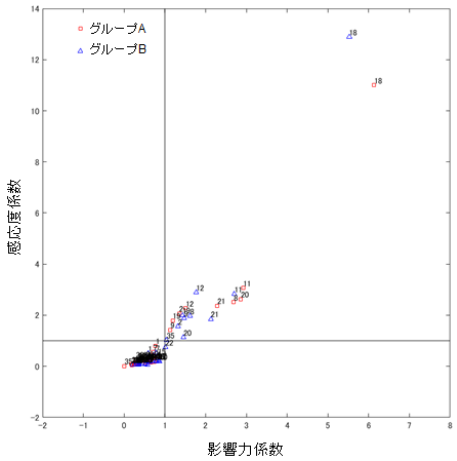


図2. 1995年のグループに基づく キーセクター分析の結果

5. 考察と結論

本研究で定義された手法より、構造類似性に基づいたグループ分けを行い、各グループのキーセクターの特定を行った。本会では、本結果を踏まえ、経済構造の類似性と排出削減の国際的な枠組みについて包括的に議論を行う。

6. 引用文献

1) Shi J., Malik J.: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(8), (2000), pp888-905
2) Ng A.Y., Jordan M.I., Weiss Y.: Advances in Neural Information Processing Systems 14, (2001)
3) Kagawa S., Suh S., Kondo Y., Nansai K.: Economic Systems Research, 25, pp265-286
4) Timmer M. P., Dietzenbacher E., Los B., Stehrer, R. de Vries, G. J.: Review of International Economics, 23, (2015), pp575-605

口頭発表セッション（一般）

[1-A2] 再エネ・水素

座長：藤田壮（東京大学）

2022年3月2日(水) 11:00 〜 12:20 A会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-A2-01] 複数の再生可能エネルギーを組み合わせた地域の脱炭素効果の評価システムの検討

*竹中 颯太郎[1]、堀 啓子[1]、岡部 紘樹[1]、藤田 壮[1]、中谷 隼[1]（1. 東京大学）

11:00 〜 11:20

[1-A2-02] 変動性再生可能エネルギー発電所の発電効率性評価

*中本 裕哉[1]、江口 昌伍[2]、高藪 広隆[3]（1. 大分大学、2. 福岡大学、3. 近畿大学）

11:20 〜 11:40

[1-A2-03] 変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電併給：製紙工場の例

*山木 亜由美[1]、藤井 祥万[1]、兼松 祐一郎[1]、下野 僚子[1]、菊池 康紀[1]（1. 東京大学）

11:40 〜 12:00

[1-A2-04] 水素発電・アンモニア発電のライフサイクル CO2排出量の不確実性分析

*小澤 暁人[1]、工藤 祐揮[1]（1. 産業技術総合研究所）

12:00 〜 12:20

©日本LCA学会

複数の再生可能エネルギーを組み合わせた
地域の脱炭素効果の評価システムの検討

Evaluation System for Local Decarbonization Effect by Utilizing Renewable Energy

○竹中颯太郎*[1)]、堀啓子[1)]、岡部紘樹[1)]、藤田壮[1)]、中谷隼[1)]
Sotaro Takenaka, Keiko Hori, Hiroki Okabe, Tsuyoshi Fujita, Jun Nakatani
1) 東京大学
* takenaka-sotaro@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

2015年の国連サミットにおけるSDGs提唱、パリ協定を境に、国内での脱炭素社会に向けた取り組みは加速している。2050年カーボンニュートラル実現の宣言以降、2021年には地球温暖化対策推進法[1)]が改正され、地域再エネ事業を推進するための計画・認定制度が創設された。また地域脱炭素ロードマップ[2)]が策定され、2030年カーボンニュートラルを達成する先行地域を全国100箇所以上指定することなどが計画されている。このように脱炭素社会に向けた取り組みは国レベルだけではなく、地域レベルでの施策も求められている。

また、第6次エネルギー基本計画[3)]では、日本における産業・民生部門の最終エネルギー消費量の約6割は熱利用であり、熱エネルギーの供給源であるガスの脱炭素化は重要であると述べられている。そのために、工場排熱等の未利用エネルギーの活用に向けた取り組み強化が求められている。

そこで本研究では、ごみ処理施設の排熱供給について検討し、需要側の立地誘導などの地域の需給マネジメントを行うことによる、熱供給可能量やCO_2排出削減量を評価した。

2. 方法

2.1 研究の全体像

本研究の全体像と計算フローを図 1 に示す。

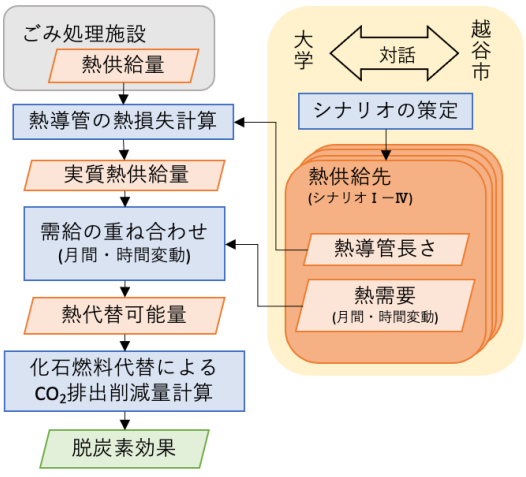


図 1 研究の全体像と計算フロー

本研究は、埼玉県越谷市を対象に、埼玉県東南部地域 5 市 1 町の可燃ごみを集約処理する、東埼玉資源環境組合第一工場ごみ処理施設からの熱供給の可能性について検討した。

排熱を有効利用するために、複数の熱供給先を組み合わせたいくつかの熱供給シナリオを設定した。シナリオごとに、需要と供給の月間・時間変動パターンを分析した。そして、それらを重ね合わせることで供給可能量を算定し、化石燃料の代替による CO_2 排出削減量を評価した。

2.2 排熱供給の現状と熱供給シナリオの設定

対象としたごみ処理施設では、蒸気タービン(定格 12.0MW×2 基)による発電と、低圧蒸気―温水熱交換器(4GJ/h×2 基) による温水を用いた排熱供給を行なっている。排熱により熱せられた温水は現状、農業技術センター、老人福祉施設、老人福祉センター・温水プールの 3 施設 (以降、既存 3 施設と呼ぶ) に供給され、暖房、給湯に用いられている。熱供給を重視すれば、既存 3 施設よりも多くの熱供給先に供給できる容量があるので、熱供給量を増やすことを想定した。

今回設定した熱供給シナリオの一覧を表 1 に示す。

表 1 熱供給シナリオ一覧

シナリオ	熱供給先					
	既存 3 施設	市立病院 ごみ処理施設周辺に移転		いちご農園 ビニールハウス 16 棟		増設
	暖房 給湯	暖房 給湯	冷房	暖房	冷房	暖房
Ⅰ	○					
Ⅱ	○	○				
Ⅲ-1	○	○		○		
Ⅲ-2	○	○				○
Ⅲ-3	○					○
Ⅳ-1	○	○	○	○	○	
Ⅳ-2		○	○	○	○	

熱供給シナリオの設定にあたって、越谷市の担当者との対話や現地調査を通して、実現可能性のある熱供給先を選定した。また、熱需要の時間変動特性を考慮して需要平準化を図ることを目的に、夜間に需要がある施設を熱供給先として選定した。その結果、熱供給先は、既に熱供給を行なっている 3 施設 、市立病院、いちご農園の 3 箇所になった。

市立病院は現状、ごみ処理施設から約 2km に位置する。越谷市担当者より、老朽化により移転の可能性が示唆されたため、清掃工場に隣接する運動公園に移転すると想定した(シナリオⅡ)。

いちご農園については、ごみ処理施設から約 500m に位置する越谷いちごタウンに熱供給すると想定した。越谷いちごタウンは現状ビニールハウスが 8 棟立地しているが、5 年以内に隣接地に現状と同規模のいちご農園が開業予定のため、現状と開業予定の農園を合わせてビニールハウス 16 棟に熱供給すると想定した(シナリオⅢ-1)。また、熱供給可能量に合わせて、いちご農園をさらに増設することも検討した(シナリオⅢ-2,3)。

最後に、現状温水供給を行っているが、温熱需要のみでは夏期に熱需要が供給可能量を大きく下回る。従って、蒸気吸収式冷凍機と冷水管を新たに設置して、夏期は蒸気により冷水を生成し、市立病院の冷房需要を満たすと同時に、新たにいちご農園における夏いちごの栽培を行うシナリオも設定した。(シナリオⅣ)

2.3 計算フローの詳細

熱供給量については、現行の熱交換器を用いた最大の熱量を供給できるものとし、熱導管の熱損失を差し引いて実質熱供給量とした。熱損失量は、シナリオごとに設置する熱導管長さを設定し、中村ら [4]の手法を用いて算定した。

熱需要量とその変動パターンについては、越谷市の提供資料等を活用して過去の実績値を用いて算出した。時間変動パターンは、温水プール稼働日と休日(月曜日)の需要差が大きいことから、その 2 つに分類した。

そして、熱の需給の月間・時間変動を重ね合わせ、需要が供給を超えない分を熱供給可能量として積算することで年間の熱供給可能量を算定した。最後に、いちご農園への熱供給は重油の代替として、その他の熱供給は都市ガスの代替として、それぞれ既存の燃料を代替することによる CO_2 排出削減量を評価した。

3. 結果

需給の月間変動、時間変動の重ね合わせの結果の一例を図 2、3 に示す。熱の需給の月間・時間変動を重ね合わせることで、シナリオⅠ(BAU)の熱代替可能量が 12,978GJ/年であると算定できた。従って、都市ガス代替による CO_2 排出削減量が 664t-CO_2/年であると評価できた。このように、各シナリオで CO_2 排出削減量を評価した。

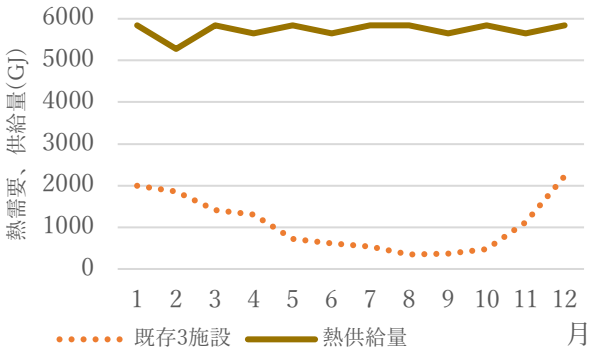


図 2 シナリオⅠ(BAU)の需給の月間変動パターン

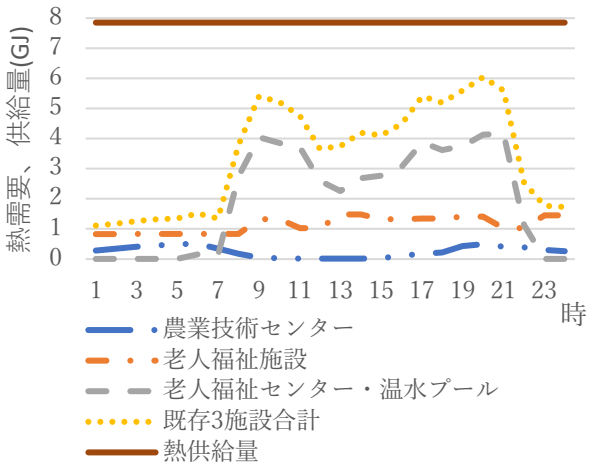


図 3 シナリオⅠ(BAU)の需給の時間変動パターン (温水プール稼働日、12 月)

謝辞

データを提供頂いた越谷市関係者、日本環境技研(株)各位をはじめ関係者に謝意を表する。また、本研究は文科省委託研究 21-3-398(研究代表藤田壮)の一環としておこなわれた。

引用文献

1) 環境省,地球温暖化対策の推進に関する法律の一部を改正する法律案の閣議決定について,(オンライン),入手先 < https://www.env.go.jp/press/109218.html>, (参照 2021-11-14)
2) 環境省:“地域脱炭素ロードマップ”, (2021)
3) 経済産業省:“エネルギー基本計画”, (2021)
4) 中村亮介,河村勉, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 9, (2013), pp61-64

変動性再生可能エネルギー発電所の発電効率性評価

○中本裕哉*[1)]、江口昌伍[2)]、高藪広隆[1)]
1) 大分大学, 2) 福岡大学, 3)近畿大学
*y-nakamoto@oita-u.ac.jp

1. はじめに

脱炭素社会の実現に向け日本では, 電源構成比に占める再生可能エネルギーの割合を, 2019年の18.5%から2030年には36～38%へと引き上げることが提案されている(METI, 2021)。この2030年に向けての大幅な再生可能エネルギー普及拡大のロードマップにおいて, 変動性再生可能エネルギー(VRE)の果たす役割は非常に大きい(METI, 2021)。VREの効率性を評価した先行研究に目を向けると, Data Envelopment Analysis (DEA)が幅広く用いられている(Chachuli et al., 2020)。しかしながら, DEAを用いた既存のVRE発電所の効率性評価(Wang and Sueyoshi, 2017)のほとんどは, 年次データを用いた分析であるため, その分析結果からは年間を通しての平均的な傾向しか明らかになっておらず, 気象条件の季節性が発電効率性に与える影響は明らかになっていない。季節によって気象条件が大きく異なる国では, より詳細なデータに基づくVRE発電所の発電効率性分析によって有効な効率性の改善策を得ることができるだろう。

本研究では太陽光発電所および風力発電所の月次データに, Eguchi et al. (2021)で提案されたメタフロンティアDEAフレームワークを適用することで, 気象条件の季節性や発電所の立地が発電効率性に与える影響の定量化を試みる。本研究によってVRE発電所の非効率性を推計し, 今後のVRE発電施設の立地・運営計画と, それらを最大限に活用する方策について議論する。

2. 研究手法

本研究ではslacks-based measure (SBM)モデルを用いることで複数の投入産出要素を考慮した効率性評価を行う(Tone, 2001)。投入指向型SBMモデルに基づくDecision making unit (DMU) kの発電効率性は下式の通り計算できる。

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \rho = 1 - \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{s_i^-}{x_{ik}} \\ s.t. \quad & \boldsymbol{x}_k = \boldsymbol{X}\boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{s}^-, \\ & \boldsymbol{y}_k = \boldsymbol{Y}\boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{s}^+, \\ & \boldsymbol{\lambda} \geq \boldsymbol{0}, \boldsymbol{s}^- \geq \boldsymbol{0}, \boldsymbol{s}^+ \geq \boldsymbol{0}. \end{aligned} \tag{1}$$

ここで, $\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{y}_k$はそれぞれDMU kの投入, 産出ベクトルを表す。$\boldsymbol{X}$ ($\boldsymbol{Y}$)は全てのDMUの投入(産出)要素で構成される投入(産出)行列である。$\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{s}^-, \boldsymbol{s}^+$はそれぞれDMU kに関するウェイトベクトル, 投入スラック, 産出スラックを示す。(1)式の最適解を$(\rho^*, \boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{s}^{-*}, \boldsymbol{s}^{+*})$とすると, ρ^*は投入・産出スラックをもとに算出される効率性値であり, もし$\rho^* = 1$ならば, DMU kは効率的な投入産出構造を持つ。もし$\rho^* < 1$ならば, DMU kは非効率であり, 投入の超過分$\boldsymbol{s}^{-*}$を削減することで効率性の改善が可能である。

(1)式から得られるMeta efficiencyを用いてMeta inefficiency (MTI)を次のように定義する。

$$MTI = 1 - \rho \tag{2}$$

もし$MTI = 0$ならば, そのDMUは効率的な投入産出構造を持つ。一方で, もし$MTI \neq 0$ならば, そのDMUは非効率であり, 投入の超過分を削減する余地がある。Eguchi et al. (2021)を参考に, MTIは下式の通りInter-temporal effect (ITE), Seasonal effect (SSE), Technical effect (TCE)はそれぞれ次のように分解できる(図1)。

$$MTI = ITE + SSE + TCE \tag{3}$$

(3)式ではDMUのMTIが以下3つの要因に分解されることを示している: ITEは発電所の時系列的効果(e.g., 発電システムの経年劣化)を示す; SSEは発電所の季節的効果(e.g., 日射量や風速などの季節性)を示す; TCEは発電所の技術的効果(e.g., 太陽電池モジュールの出力(質), システム系統の管理体制, 過積載率)を示す。

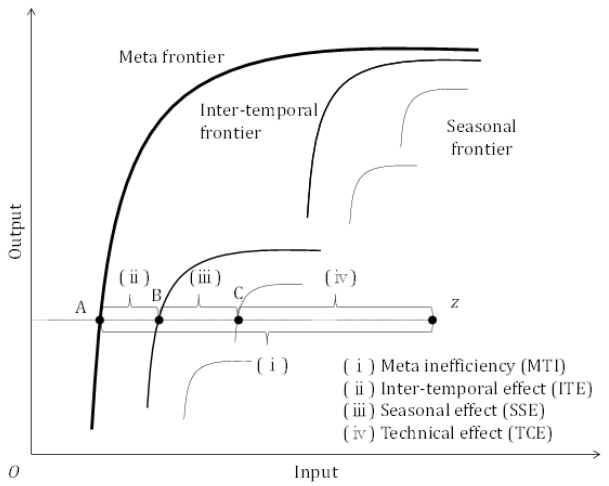


図1: Illustration of multi-hierarchy meta-frontier DEA.

3. データ

本研究は定格出力が2,000kW以上である(i.e., 特別高圧), 日本の事業用太陽光発電所および事業用風力発電所を分析対象とし, 分析期間は2016年4月から2020年3月である。本稿では太陽光発電所に関する結果のみを記述している。本研究では2つの投入要素: 月間日射量, 発電モジュール容量と, 1つの産出要素: 月間発電実績を発電効率性評価に用いる。図2は本研究の分析対象となる太陽光発電所($n = 160$)の所在地と規模を示している。全国的に満遍なく所在しているが, 特に比較的日射量の多い太平洋側や山陽地域, 九州の沿岸部に多く所在している。

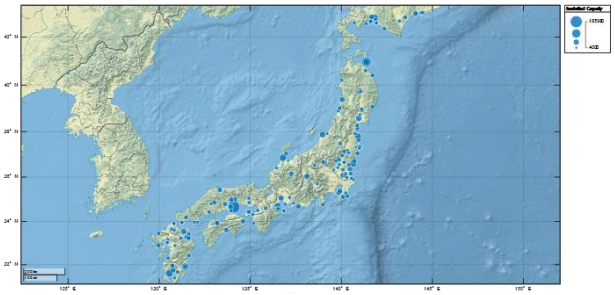


図2: PV power plants' location.

4. 分析結果と考察

図3は, それぞれのDMUについて推計されたMTI, ITE, SSE, TCEを月別にまとめた箱ひげ図を示している。MTIの中央値が最も大きいのは2019年12月における0.740である。これは当該発電所が非効率であり, 実際の投入量とメタフロンティアを基準とした理想的な投入量の間には74.0%と大きなギャップがあることを示している。また, 2019年度の各月におけるMTIの中央値に注目すると, それぞれ(Apr: 0.540; May: 0.472; Jun: 0.580; Jul: 0.631; Aug: 0.591 ; Sep: 0.606; Oct: 0.670; Nov: 0.676; Dec: 0.736; Jan: 0.729; Feb: 0.674; Mar: 0.590)である。このことは, 日射量が比較的少ない冬季と6月の雨季には非効率性が大きくなり一方で, 日射量が比較的多い春季や夏季には非効率性が小さくなる傾向があることを示している。この傾向は他の年度においても観察されるが, 年によっては異常気象などの影響を受けるため多少のばらつきがある点は注意すべきである。

また, SSEはMTIと同様に日射量が比較的少ない冬季や雨季に大きくなる一方で, 日射量が比較的多い春季や夏季には非効率性が小さくなることを示している(図3)。さらに, 11月から2月にかけての冬季においてSSEのバラツキが大きいことに注意されたい。これは積雪地域に所在するDMUが, 降雪により発電量が減少することで非効率性が比較的大きくなることに起因すると考えられる。SSEに加えて, TCEもまた, 発電所の非効率性のソースになっている。

要約すると本研究では, メタフロンティアDEAフレームワークを, VRE発電所の月間発電実績データに適用することで, 発電所のMTIを推計しその非効率性の要因を特定した。結果から, 太陽光発電所に関して春季や夏季の日射量が多い時期の非効率性が低く, 雨季や冬季の非効率性が高いことが明らかになった。本会では、本研究で明らかになった季節別・地域別の発電効率性の傾向をもとに、日本の電力需給バランスの安定化に向けた施策を議論する

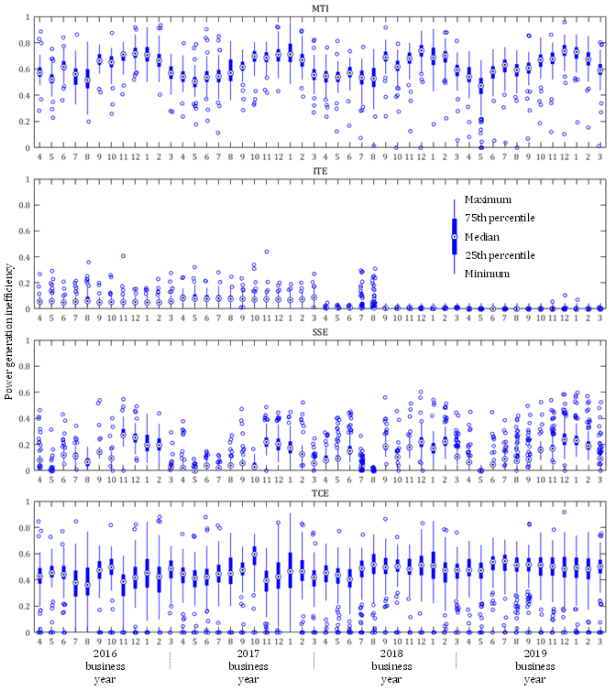


図3: Boxplot of inefficiency scores for each month (PV).

参考文献

1) Chachuli, F.S., et al. (2020). *J Renew Sustain Energy,* 12.
2) Eguchi, S., et al. (2021) *Renew Sustain Energy Rev*, 138: 110562.
3) Ministry of Economy, Trade and Industry, エネルギー基本計画（素案）の概要, 2021. (https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/046/046_004.pdf)
4) Tone, K. (2001) *Eur J Oper Res*, 164: 195–209.
5) Wang, D.D. and Sueyoshi, T. (2017) *Appl Energy*, 188: 45–55.

謝辞

本研究はJSPS科研費 19K20511, 20K22124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。

変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電併給：製紙工場の例

Cogeneration system installing thermal energy storage for controlling variable renewable energy: A case study of paper mills

○山木亜由美*[1)]、藤井祥万[1)]、兼松祐一郎[1)]、下野僚子[1)]、菊池康紀[1)]
Ayumi Yamaki, Shoma Fujii, Yuichiro Kanematsu, Ryoko Shimono, Yasunori Kikuchi
1) 東京大学
* ykikuchi@ifi.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

持続可能な社会の構築に向け、導入が進む変動性再生可能エネルギー（VRE）による発電は調整力が必要であり、系統への接続回答保留問題や出力抑制といった課題が顕在化している。需要に応じたエネルギー供給が可能な蓄エネルギー（蓄エネ）技術を用いた対策として、成熟した技術の組合せで実現可能な蓄熱技術（TES）の導入検討がされており、日本での導入ポテンシャルが大きな風力と TES の組合せとして、風力由来の回転エネルギーで発生させた熱を蓄熱し需要に応じてタービンで発電する風力熱発電が提案されている[1)]。また、環境性や社会経済性の向上を目指した産業共生において、産業同士だけでなく産業と地域の共生として、地域資源の木質バイオマスを製造業で使用し、余剰に生成した熱と電力を周辺地域に供給することで温室効果ガス（GHG）を削減できることがわかっている[2)]。VRE を調整するための TES を導入し、製造業とその周辺地域で利用できれば製造業と周辺地域の両方でカーボンニュートラルを実現できると考えられる。

本研究では、製紙工場に TES と風力を導入することを想定して、製紙工場とその周辺地域でカーボンニュートラルを実現するためのエネルギーシステムを設計することを目的とする。製紙工場では、化石燃料や廃棄物燃料、製紙副産物である黒液を用い、自家発電用のボイラやタービンで熱電併給を行っている。TES と風力を、生産能力 2000 t/d 規模の製紙工場に導入することを想定し、近隣の風力を有効活用するシステムの検討がされており、TES や風力の導入規模を適切に設定することで GHG を削減できることがわかっている[3)]。製紙工場と、TES および近隣の風力の組み合わせによる VRE を用いた電力供給インフラを仮定し、エネルギー収支のシミュレーションによる TES と風力の導入評価をする。

2. 研究手法

図 1 に、本研究で検討する TES により風力を接続した製紙工場のエネルギーシステムを示す。既存工場の

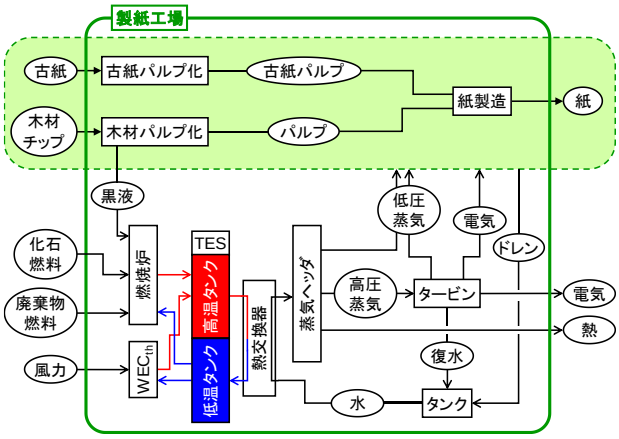


図 1 風力と蓄熱技術を導入した製紙工場のエネルギーシステム（既報より一部抜粋改変[3)]）

ボイラに代わり、燃料を燃焼する炉と、風力から熱を生成する風力熱変換器（WEC$_{th}$）、蓄熱材である溶融塩を保存する高温・低温タンクを導入する。低温タンク中の溶融塩は燃焼炉や風力で加熱され、高温タンクに貯蔵される。高温タンク中の溶融塩はその顕熱を、熱交換器を介して蒸気に変換し、低温タンクに戻される。発生した蒸気はタービンに導入され発電する。抽気および背圧タービンの排蒸気は製紙プロセスに供給する。蓄熱された余剰熱で売電または売熱をした。売電では、出力を一定にするため、TES で蒸気生成量を調整すると仮定した。売熱は、地域熱供給による製紙工場のある市内の冷暖房と給湯用の熱を対象とし、業務施設、商業施設、宿泊施設、医療施設の熱需要量[4)]から推算した 1 時間単位の熱需要の変化に合わせて供給するとした。風力の接続規模は、都道府県別の風力導入ポテンシャル[5)]を市の面積で按分し、市内の全風力導入ポテンシャルを製紙工場に接続することとした。

100～7000 t/d の生産能力を持つ全国の製紙工場[6)]を対象に、生産量や再エネの導入ポテンシャル、動力設備の性能・燃料種[7)]を文献に基づいて設定し、TES の導入規模を仮定して製紙工場のエネルギー収支を 1 時間単位で計算し、可能となる最大の売電量または売熱

量を求めた。既存モデル [3]に基づき、自家発電用ボイラと同等の設備能力である燃焼炉を負荷100%で保ち、蓄熱量が上限に達した場合は風力由来の熱の利用を優先して、各製紙工場で使用されている燃料を石炭、重油、廃棄物、黒液の順で削減するとした。

LC-GHG は、製紙工場で 1 年間に発生する排出量を求めた。システムバウンダリには、TES と WEC_{th} の製造から廃棄と、紙の製造段階を含め、既存設備である製紙工場は除外した。売電した電力はミドル電源である石炭火力発電を代替するとし、売熱は C 重油や都市ガス由来の熱需要を代替すると仮定した。導入に適した蓄エネ技術を選択するため、他の蓄エネ技術として、蓄電池（リチウムイオン電池、LIB）と水素貯蔵を導入した時の比較も行った。

3. 結果と考察

3.1 各製紙工場での売電・売熱量と LC-GHG

生産能力が異なる複数の製紙工場を対象に TES の導入規模を設計変数とし、各製紙工場からの売電・売熱可能量と、1 年間の生産活動に起因する LC-GHG を求めた。TES の導入量が増加すると売電・売熱量は増加したが、TES を過剰に導入すると、過剰な TES からの放熱により温度が低下し、売電・売熱量は減少した。LC-GHG は売電・売熱により減少したが、過剰な TES を導入すると、TES と WEC_{th} の建設・廃棄による GHG が売電・売熱による GHG 削減量を上回り、LC-GHG は増加した。TES からの電力や熱の出力制御により、需要に合わせたエネルギー出力が可能となった。

3.2 蓄エネルギー技術の比較

TES、LIB、水素貯蔵を導入した時の売電量、LC-GHG、資源消費量（ARD）を求めた。蓄エネ技術の導入量が多い時は、LIB の LC-GHG と ARD が大きく、TES か水素貯蔵の方が適しているといえるが、LC-GHG は水素貯蔵が小さく、ARD は TES の方が小さいため、トレードオフの関係であった。そのため、TES か水素貯蔵を選択する時には、導入する地域の水素や熱の需要の有無を考慮することが有効だと考えられる。

3.3 周辺地域を含めた製紙工場ごとの比較

製紙工場の生産能力と、売電・売熱量、LC-GHG を比較した。生産能力の大きい製紙工場の方が高出力のボイラがあるため、売電・売熱量は増加傾向にあり、工場と売電・売熱用のエネルギー供給に対応するため、より多くの蓄熱材が必要となった。LC-GHG も、現状の製紙工場と同様、生産能力の大きい工場の方が多くなった。一部の製紙工場では、TES と WEC_{th} の製造・廃棄や紙の生産による GHG 排出量よりも、売電による GHG 削減量が上回り、LC-GHG が負になった。

製紙工場に導入する TES と風力の規模は、エネルギー供給における製紙工場に持たせる役割により変わる。GHG 削減や、災害時などのエネルギー供給拠点として電力や熱の供給拠点化といった役割に加え、VRE の導入ポテンシャルも考慮して地域全体でエネルギー供給体制を決める必要がある。蓄エネ技術を導入したエネルギーシステムの計画を促進するため、対象地域では、本研究の検討結果や他地域の実績を参考にして、蓄エネ技術の導入を促す地域のエネルギー政策が立案されることが望ましい。地域や工場の要求に応じて、エネルギー供給力や LC-GHG などを評価して評価結果を共有し、VRE や蓄エネ技術の導入案を作成する。現状のエネルギーシステムから、VRE を導入したエネルギーシステムに変えることで、工場と周辺地域が一体となってカーボンニュートラルを実現することが可能となる。蓄エネなどの新たな設備導入による雇用が発生し、経済循環を活発化させることで地方創生にもつなげられる。VRE と蓄エネ技術を導入したエネルギーシステムにより、製造業と地域のカーボンニュートラルと地方創生を実現することが期待できる。

4. まとめ

日本全国に分布する製紙工場に TES と風力を導入することを想定し、製紙工場から売電または売熱をすることで VRE 由来の電力の安定供給源になる可能性を評価した。製紙工場に TES と風力を導入することで LC-GHG を削減できることを示せ、製紙工場とその周辺地域でカーボンニュートラルを実現するためのエネルギーシステムを設計することが可能となった。

引用文献

1) Okazaki T., Shirai Y., Nakamura T.: Renewable Energy, 83, (2015), pp 332-338
2) Kikuchi Y., Kanematsu Y., Ugo M., Hamada Y., Okubo T.: Journal of Industrial Ecology, 20, (2016), pp 276-288
3) Yamaki A., Kanematsu Y., Kikuchi Y.: Energy, 205, (2020), pp 118056
4) 国土技術政策総合研究所: "低炭素・水素エネルギー活用社会に向けた都市システム技術の開発", (2014)
5) 環境省: "令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書", (2021)
6) 例えば、王子製紙春日井工場: 紙パ技協誌, 71, (2017), pp 927-934
7) 火力原子力発電技術協会, "火力原子力発電所設備要覧（平成 29 年改訂版）", 火力原子力発電技術協会, 東京, (2017)

水素発電・アンモニア発電のライフサイクル CO_2 排出量の不確実性分析

Uncertainty Analysis of Life Cycle CO_2 emissions from Power Generation using Hydrogen and Ammonia

○小澤暁人*[1)]、工藤祐揮[1)]
Akito Ozawa, Yuki Kudoh
1) 産業技術総合研究所
* akito.ozawa@aist.go.jp

1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けて、水素・アンモニア（NH_3）は燃焼時に CO_2 を排出しないクリーン燃料として注目を集めている。日本は水素・NH_3 関連の技術開発を先導しており、2017 年 12 月に策定した「水素基本戦略」[1)]において水素社会実現に向けた水素・NH_3 の供給から利用に至る基本戦略を示している。供給面については、国際的なサプライチェーンの開発が、水素・NH_3 を大量、安定的かつ低コストに供給する手段として重要視されている。一方で利用面については、水素発電・NH_3 発電が再エネの大量導入に不可欠な調整電源・バックアップ電源としての役割を果たしつつ、低炭素化を図るための手段として注目されている。低炭素な水素社会を実現するためには、技術開発・実証と並行した技術評価、すなわち水素・NH_3 関連技術が実用化したときの CO_2 排出削減効果を評価することが求められる。前述の通り水素・NH_3 は燃焼時に CO_2 を排出しないが、製造・貯蔵・輸送段階において CO_2 排出が生じるため、サプライチェーン全体での CO_2 排出量を評価する必要がある。ここで水素・NH_3 サプライチェーンの構成技術の多くは開発中であり、実用化時の性能には不確実性が存在する。水素・NH_3 のサプライチェーンを対象としたライフサイクルインベントリ（LCI）分析に関する研究は複数報告[2-5)]されているが、これらの研究では技術性能の不確実性が考慮されていない。そこで本研究ではモンテカルロ法を用いて、水素・NH_3 サプライチェーンを対象に技術性能の不確実性を考慮した LCI 分析を実施する。そして水素発電・NH_3 発電のライフサイクル CO_2 排出量（LC-CO_2）を評価することで、水素・NH_3 サプライチェーンの低炭素化に向けた方策を検討する。

2. 分析の前提条件

- フォアグラウンドデータには文献調査などによって得られたプロセスデータを、バックグラウンドデータには IDEA を用いた。
- 水素サプライチェーンは豪州・ノルウェー・UAE の再エネを利用した水電解水素製造、エネルギーキャリア（液体水素（LH_2）またはメチルシクロヘキサン（MCH））製造・貯蔵・海上輸送、再水素化で構成される。水素発電には水素-LNG 混焼発電・水素専焼発電を想定する。
- 再エネ由来水素サプライチェーンで、ベースケースでは再エネ水素製造以外の海外プロセスに投入される電力はすべて系統電力とした。低炭素ケースでは、すべての海外プロセスに投入される電力を、再エネ水素製造と同じ再エネ電力で供給することを想定した。
- NH_3 サプライチェーンは UAE の再エネまたは天然ガスを利用した NH_3 製造・貯蔵・海上輸送・再気化で構成される。天然ガス由来 NH_3 製造では CCS によるプロセス CO_2・煙道 CO_2 の回収オプションを想定した。NH_3 発電には NH_3-石炭混焼発電・NH_3-LNG 混焼発電・NH_3 専焼発電を想定する。
- 比較対象の火力発電は石炭火力・LNG 火力の 2 種類を想定し、それぞれについて CCS による煙道 CO_2 の回収オプションを想定した。
- モンテカルロシミュレーションを実施するにあたり、サプライチェーンを構成する各プロセスのエネルギー消費や CO_2 原単位を不確実なパラメタとみなし、LC-CO_2 を確率的に算出した。各パラメタの確率分布には正規分布または三角分布を想定した。モンテカルロシミュレーションは Oracle 社の Crystal Ball で実装し、計算回数は 100,000 回とした。

3. 分析結果

図 1 に水素発電の LC-CO_2 を示す。LH_2 を用いる場合、水素液化プロセスでの電力消費量の不確実性が LC-CO_2 全体に大きな影響を与える。特に水素専焼発電において、不確実性の影響は顕著である。水素液化時に CO_2 原単位の小さい再エネ電力やノルウェーの系統電力を利用することで、不確実性の影響を回避することができる。これにより水素専焼発電の LC-CO_2 を CCS 付 LNG 火力発電以下にすることが可能である。一方で MCH を用いる場合は、LH_2 を用いる場合と比べてケース間の違いは小さい。これは MCH 脱水素時の燃料消費が LC-CO_2 に大きく寄与しているためである。本分析では MCH 脱水素時の熱源として C 重油を想定したが、仮に近傍のプラントから排熱を供給することが可能であれば LC-CO_2 を大幅に削減する子が期

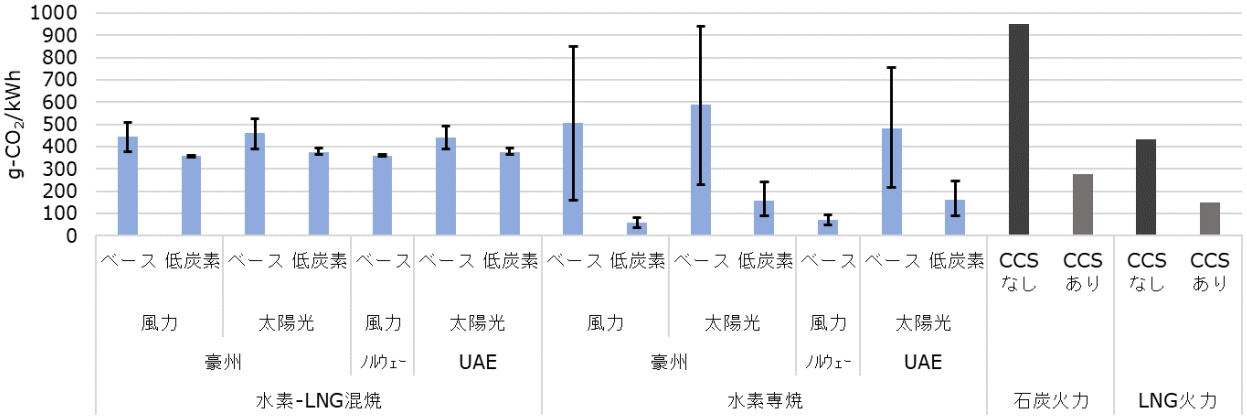
待できる。

図 2 に NH_3 発電の LC-CO_2 を示す。NH_3-LNG 混焼発電の場合、低炭素プロセスで製造した NH_3 を利用することで混焼による CO_2 削減効果が確認できる。また NH_3 専焼発電と LNG 火力発電を比較した場合、CCS 付きで製造した NH_3 専焼発電の方が CCS 付 LNG 火力発電よりも LC-CO_2 が小さい。上記の結果は、NH_3 製造プロセスでは発電所と比べて排出される CO_2 濃度が高く CCS の適用に適しているためである。

引用文献

1) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議: “水素基本戦略”, (2017), p.35
2) Wulf C., Kaltschmitt M.: Sustainability, 10, (2018), 1699
3) Ren L., Zhou S., Ou X.: Energy, 209, (2020), 118482
4) Ozawa A., Kudoh Y., Kitagawa N., Muramatsu R.: Int. J. Hydrogen Energy, 44, (2019), pp.11219–11232
5) Chisalita D.A., Petrescu L., Cormos C.C.: Renew. Sustain. Energy Rev., 130, (2020), 109964

(a) LH_2 をエネルギーキャリアとした場合



(b) MCH をエネルギーキャリアとした場合

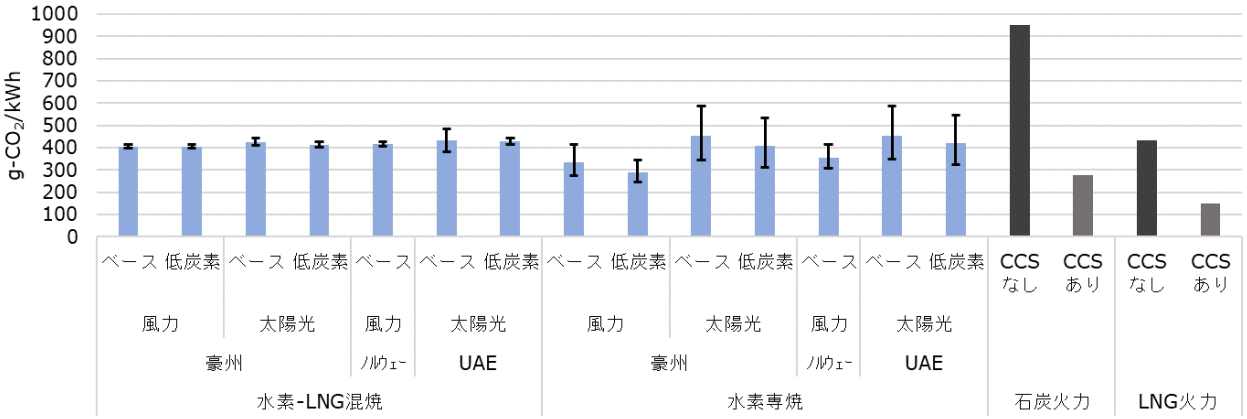


図 1 水素発電の LC-CO_2 排出量

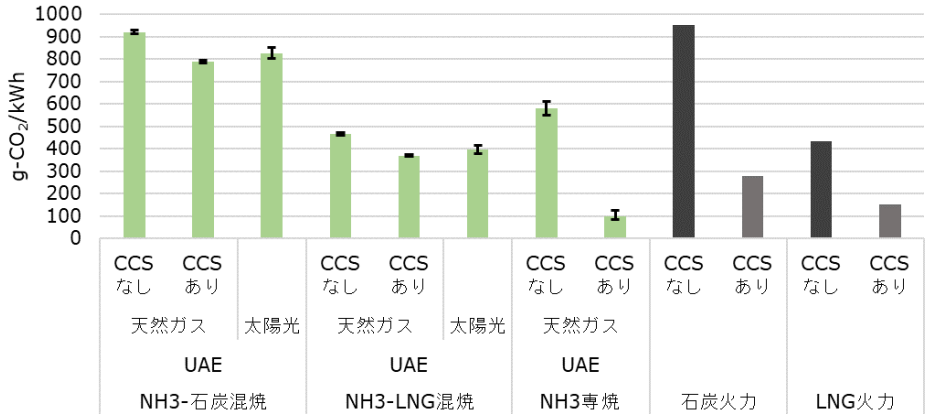


図 2 NH_3 発電の LC-CO_2 排出量

口頭発表セッション（一般）

[1-B2] プラスチック（1）

座長：中谷隼（東京大学）

2022年3月2日(水) 11:00 〜 12:20 B会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-B2-01] 需要と産業構造の変化を考慮したプラスチック資源循環システムの設計と評価

*方 大樹[1]、中谷 隼[1]、藤田 壮[1] （1. 東京大学）

11:00 〜 11:20

[1-B2-02] 循環型素材を対象とした廃棄物フットプリント

*北見 朋也[1]、西山 雄馬[2]、伊坪 徳宏[1] （1. 東京都市大学大学院、2. 株式会社サエラ）

11:20 〜 11:40

[1-B2-03] 廃プラスチック熱分解によるフィードストックリサイクルのライフサイクル評価

*野村 祐貴[1]、藤井 祥万[1]、兼松 祐一郎[1]、下野 僚子[1]、菊池 康紀[1] （1. 東京大学）

11:40 〜 12:00

[1-B2-04] プラスチックから紙への材料代替による環境影響のシナリオ分析

*杜 盈吟[1]、橋本 征二[2] （1. 立命館大学大学院、2. 立命館大学）

12:00 〜 12:20

©日本LCA学会

需要と産業構造の変化を考慮した
プラスチック資源循環システムの設計と評価

Design and evaluation of resource circulation system of plastics considering changes in the demand and the industrial structure

○方大樹 [1)]、中谷隼*[1)]、藤田壮 [1)]
Daiki Kata, Jun Nakatani, Tsuyoshi Fujita
1) 東京大学
* nakatani@env.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

2021 年、日本ではプラスチック資源循環促進法が成立し、2022 年より施行されることが決まった。2019 年のプラスチック資源循環戦略と合わせて、よりプラスチック問題に対する動きが加速したと言える。廃プラスチックの排出抑制及び再資源化を加速するための環境配慮設計、ワンウェイプラスチックの更なる削減や分別回収の拡大が主な方針として掲げられている。

これまでのリサイクル法では、容器包装のみが分別回収の対象とされてきたが、今後はその範囲が拡大されリサイクル対象量は増加すると期待される。しかし、その一方で他国への廃プラスチック輸出が減少している中、国内では再生原料の受け入れ先が乏しく資源循環が円滑に進むか不透明と言わざるを得ない。しかし、プラスチックの資源循環は、プラスチックだけで完結するわけではない一方で、再生品を受け入れる動脈産業は脱炭素に向けてそれぞれ動き出しており、受入ポテンシャル量は変化していくと考えられる。

本研究では、リサイクルに係る動脈産業の生産及び技術動向にも注視しながら廃プラスチックの受入容量を設定していくことにより、将来的な産業構造の変化にも対応できる物質循環システムの設計を行う。マテリアルリサイクル(MR)だけでなく、ケミカルリサイクル(CR)やエネルギーリカバリー(ER)も含めて、様々な指標から各リサイクル手法への最適な廃プラスチックの配分を検討する 。

2. 分析方法

2.1 線形計画モデル

廃プラスチック資源循環システムの全体概要は図 1 のように示すことができる。中央部で示されている線形計画では、排出元の家庭もしくは各産業からの排出量及び組成、各リサイクル手法の受入容量を前提条件としてシナリオ分析を行った上で、選別工程を含めた各リサイクル手法に対する配分を変数とし、線形計画手法を用いて GHG 排出量を最小化する、またはリサイクル率を最大化する等、資源循環システムの様々な方向性を提示する。なお、外生的リサイクルはシステム設計の中で外生的に条件を与えるリサイクルで、鉄鋼産業によるケミカルリサイクル及びガス化が該当する。一方、プラスチックのサプライチェーンに係るマテリアルリサイクルや石油化学産業における熱分解を内生的リサイクルと呼称する。

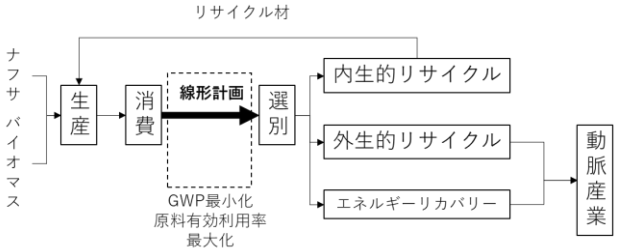


図 1. 廃プラスチック資源循環システムの全体概要

<目的関数>

$\max or \min S = \sum_j \sum_r \left(\sum_i m_{i,j} \cdot s_{i,r,r2,t} + (1 - d_{i,r1,r}) \cdot s_{i,r1,r} \right) \cdot x_{r1,r2,j}$ …(1)

<変数(配分係数)>

$x_{r1,r2,j}$

<制約条件>

$0 \leq x_{r1,r2,j} \leq 1$ …(2)

$\sum_j \sum_i m_{i,j,t} \cdot x_{r1,r2,j} \cdot d_{i,r1,r2} \leq C_r$…(3)

$\sum_j \sum_i m_{i,j,t} \cdot x_{r1,r2,j} \cdot y_{i,r1,r2} \cdot d_{i,r1,r2} \leq C'_r$…(4)

$\sum_{r1,r2} x_{r1,r2,j} \leq 1$…(5)

i: 樹脂の種類（汎用+その他）、j: 排出セクター t: 年
r: リサイクル・リカバリー手法
(r1 は主となる手法、r2 は残渣処理として扱われる手法)
m: 廃プラスチック排出量(変動を考慮)
s: 各指標の原単位 d: 選別率 y:最終製品収率
C: 各リサイクル手法の廃プラスチック受入容量
C': 各リサイクル手法で生成される製品の生産可能量

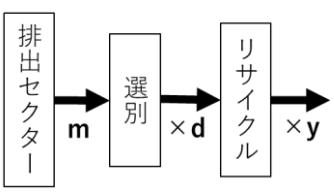


図 2. 選別率と最終製品収率

2.2 指標の定義

プラスチックの資源循環全体の最適な形を探るにあたって、2 つの指標を設定した。1 つ目は LCA によって評価した GHG 排出量である [1]。2 つ目は量的な観点からリサイクル率を指標として用いる。具体的には、方 [2]で開発した原料有効利用率の定義を適用し、燃料ではなく原料として有効利用されたとみなせる割合を把握するための手法で、樹脂もしくはその他の化学製品に直接再生するものから、還元剤として利用されるような間接的な利用についても含めた。

2.3 受入容量について

内生リサイクルについては、当該年のプラスチック需要量から算出した。要求品質が重要となるマテリアルリサイクルについては、当該品質の要求量に混合率、つまり異なる樹脂成分の含有がどこまで許容されるかについて掛け合わせることで算出することが可能である。一方で、熱分解等のケミカルリサイクルについては、樹脂の種類の区別について考慮することが難しいため、全需要量に対する混合許容量を把握した。

外生リサイクルについては、鉄鋼やアンモニア、セメント等の最終製品の生産量と各リサイクルに対する投入率、さらに工場等への普及率を掛け合わせることによって算出した。

例として、鉄鋼に関しては高炉の稼働状況についてシナリオ分析を行うが、想定される粗鋼生産量と転炉鋼要求比率 [3]と転炉要求量を算出後、稼働高炉の組み合わせを検討した。その後、新技術の相互影響と普及率を考慮した上で、リサイクル手法の受入容量を求めた。エネルギーリカバリーについては、RPF 及びセメント焼成は、これらを使用する製紙産業及びセメント産業の生産量動向に加え、環境負荷削減に向けたこれらの使用比率を考慮した。一方で焼却発電については、火力発電における発電量に対する許容率を決め、発熱量を用いて式(4)のように制約条件とした。

2.4 樹脂生産

樹脂生産は現状のナフサに加えて、内生リサイクルによる再生材やバイオマスが原料となる。ナフサ生産については、石油精製全体から影響を受けると捉えた。本研究では、原油からの連産品で比率の高いガソリン需要の動向を、乗用車の保有状況予測から算出し、ガソリンの使用量が削減されるにつれて、石油化学に投入されるナフサの供給量も減っていくものと仮定した。

3. 結果

GHG 排出量(G)及びリサイクル率(R)について、各産業の動向が網羅的な脱炭素化を優先するシナリオ(D)と、廃プラスチックを積極的に使用するシナリオ(P)で 2030 年を対象年として整理すると、図 3 のようになる。

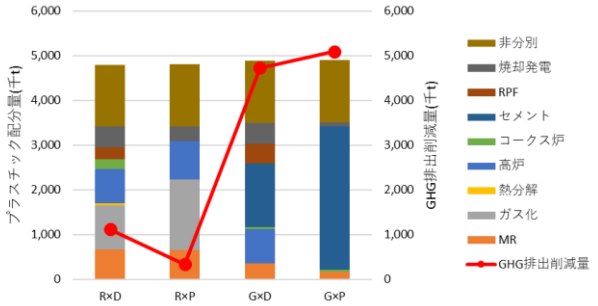


図 3. GHG 排出量最小化・リサイクル率最大化の配分

両シナリオにおける受入容量の平均値で比較を行った場合、網羅的な脱炭素政策を優先することによってリサイクル率については効果が 11%程度低下する一方、GHG 排出量は 7%程度の低下となった。また、対象とする指標を GHG 排出量からリサイクル率に変換することで、脱炭素への貢献が大幅に減少してしまうことも明らかになった。

また、指標間では受入先の配分比率に大きな差異が生じた。これは、後者の指標において、エネルギー利用分が全く考慮されていないために発生しているものであり、原料としての有効利用が脱炭素に向けた手法の全てではないことも示唆された。

4. 今後の展開

本研究では、プラスチックの最適な資源循環を探るための枠組みを示すとともに、周辺の動脈産業による影響を反映させることの有用性を示すことが可能だった。一方で、受入容量以外への反映が行われておらず、ここで用いているプラスチックの物質フローデータ [4]を、時間的な変動について検討していく必要がある。また、新規導入が検討されている技術のインベントリデータ等についても検証が不十分である点が存在するため、引き続き更新を検討していかなければならない。

5. 引用文献

1) 産業技術総合研究所: “IDEA”
2) 方ら: 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2019.
3) 河瀬ら: 土木学会論文集G(環境), 71(5), 383-391, 2015.
4) Nakatani et al, PNAS, 117(33), 19844-19853

循環型素材を対象とした廃棄物フットプリント

Waste footprint for recyclable materials

北見朋也*[1)]、西山雄馬 [2)]、伊坪徳宏 [1)]
Tomoya Kitami, Yuma Nishiyama, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学　2)株式会社サエラ
* g2183109@tcu.ac.jp

1. 背景

2021 年度に環境省が発行した「環境白書」では現在の線形経済から、循環型経済へ移行する事で資源の消費を抑えることを目標として記載していた。特にプラスチックに関しては、店頭回収をするなど具体的な方法まで記載がなされており、重要度が高い事が伺える。また、同資料内にて廃棄物の最終処分場の現状について記載があった。近年では、緩やかながらも最終処分場の残余容量が減少し続けている。これらの問題は、資源循環を促進する手段を用いる事で影響を低減する事ができると考えられている。

2. 研究目的

LCA の手法である「LIME3」の廃棄物による環境影響を評価するための手法の更新、開発を行う。具体的には、日本における廃棄物の被害係数である「一次生産」、「生物多様性」、「社会資産」への評価係数の更新を行いつつ、循環型社会に適応した廃棄物評価の係数を開発する。また、更新、開発を行った係数を用いて再生材を用いた製品の LCA を行う。

3. 研究方法

本研究では、「LIME3」における、日本の廃棄物による被害係数として一次生産、生物多様性、社会資産への係数の更新を行う。係数更新に必要な情報として最終処分場の埋立面積と体積、廃棄物の重量・体積換算データ、廃棄物の処分費用などのデータを元に更新を行う。

またケーススタディとして再生プラスチックを利用した傘を対象に LCA を行う。

表 1： LCA 研究方法

評価対象	従来品（検討中）	再生プラ傘
機能単位	ビニール傘一本	傘一本分（使用回数参考）
計算範囲	原材料調達段階～廃棄段階	
算定式	インベントリ＝Σ（活動量×原単位） 特性化＝Σ（インベントリ×活動量）	
原単位	IDEAver2.3（検討中）	
影響領域	地球温暖化、廃棄物	

4. 結果

「LIME3」における廃棄物の影響評価係数の内、「社会資産」への影響の更新を行う事ができた。「社会資産」の評価式は以下の通りである。

$$ユーザーコスト=\{1/(1+r)^{n}\}\times R$$

r は利子率、n は処分場の残余年数、R は最終処分価格を示している。令和元年度に、1m3 の埋立て廃棄物が排出され、安定型の処分場で処理をした場合、環境白書より残余年数は 21.4 年、処分費用は関東地域協議会が公表している産業廃棄物処分価格より、12500 円と設定を行い、利子率は 3%と想定するとユーザーコストは約 6640 円/m3 という結果となった。

令和元年度最終処分場のデータと日本産業廃棄物処理振興センターが公表している廃棄物の体積変換係数を用いて廃棄物が処分場に与える影響を以下の図に表した。

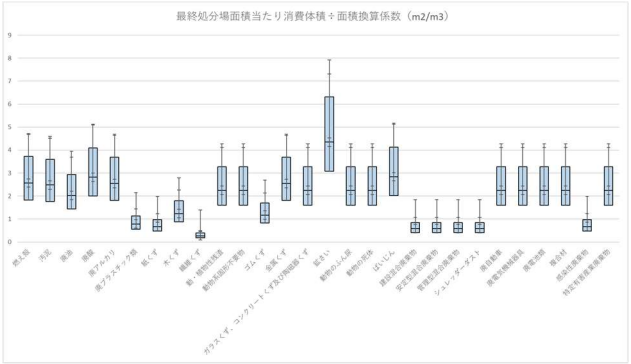


図 1：廃棄物別の占有面積分布図

図 1 では一般廃棄物を対象に、全国の最終処分場に対して、1m2 当たり体積の消費量を分布図として表した。廃棄物の中でも鉱さいによる影響が一番大きい結果となった。鉱さいは中央値が 4.35 として、75%値 6.31、25%値 3.08 となり、処分場圧迫へ影響が大きいことが判明した。その他の廃棄物では、次いでばいじん、廃酸による影響が大きい結果となった。今回の結果では、各種廃棄物の重量体積変換係数によって消費する面積を求めたため、結果の妥当性を検証する

ために廃棄物ごとに最終処理方法の確認が必要である。

ケーススタディは現在一次データを収集中であり、環境影響は評価中である。

5. 課題

今回作成した廃棄物の被害係数値を、LIME2 の同係数と比較することで、妥当性があるかの検証が必要である。

今回の研究にて求めた被害係数から各廃棄物ごとの評価係数を求めると共に、廃棄場所によっての影響の違いを分析していくことで、地域別の廃棄物処理の影響の特徴を分析していく必要がある。

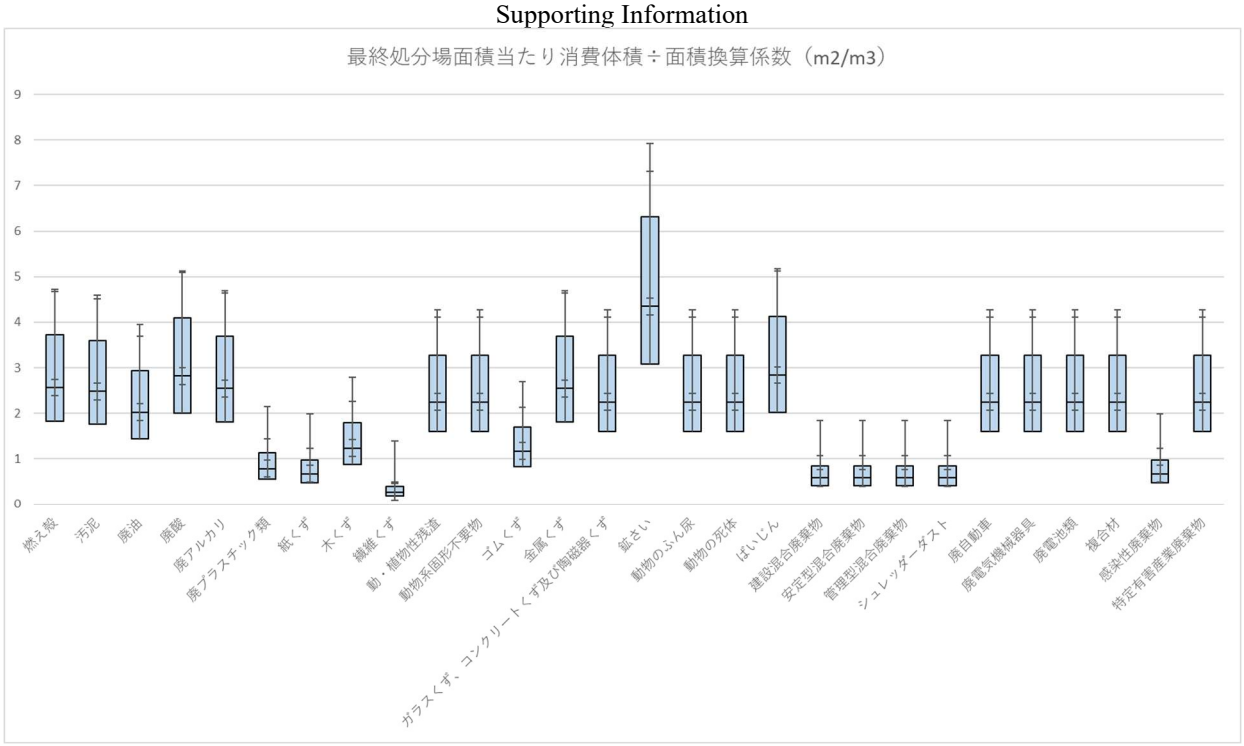
今後の検討事項として、廃棄物ごとの処分量データより日本全体、各地域にて廃棄物による影響がどのように発生しているかを分析していきたい。

ケーススタディを行うために、1 次データの収集と整理をする必要がある。

6. 参考文献

1) 「環境白書」 環境省 2021 年 環境省_環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書 (env.go.jp)
2) 一般廃棄物処理事業実態調査 令和元年一般廃棄物処理実態調査結果
3) 日本産業廃棄物処理振興センター 廃棄物重量・体積換算係数
4) 「日本のプラスチックリサイクルの現状と課題」 2019 年 株式会社旭リサーチセンター 日本のプラスチックリサイクルの現状と課題 (asahi-kasei.co.jp)
5) 「第四次循環型社会形成推進基本計画」 2018 年 環境省 第四次循環型社会形成 J (env.go.jp)
6) 「LIME3 - グローバルスケールの LCA を実現する環境影響評価手法」伊坪徳宏 一般社団法人産業環境管理協会

Supporting Information



S 図 1：廃棄物別の占有面積分布図

廃プラスチック熱分解によるフィードストックリサイクルのライフサイクル評価

Life Cycle Assessment of Feedstock Recycling via Waste Plastic Pyrolysis

○野村祐貴*[1)] 、藤井祥万[1)] 、兼松祐一郎[1)] 、下野僚子[1)]、菊池康紀[1)]
Yuki Nomura, Shoma Fujii, Yuichiro Kanematsu, Ryoko Shimono, Yasunori Kikuchi
1) 東京大学
* ykikuchi@ifi.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

化石資源を再生可能資源によって代替するにはエネルギーだけでなく化成品原料の代替が必要となる。エネルギー用途については再生可能エネルギーで代替できる可能性がある一方で、プラスチックなどの化成品利用の代替にはバイオマスの利用や、プラスチック廃棄物を再びプラスチック原料として利用するフィードストックリサイクル（化学原料化）[1)]などが考えられる。石油の消費量を削減するにはこれらの燃料利用と材料利用の代替を同時に進める必要がある。

本研究では廃プラスチック熱分解を用いた化学原料化システムについてフローモデルを作成し、その物質収支とエネルギー収支についての分析を行うことで原油の化学原料代替の LCA を行う。

2. 廃プラスチックの化学原料化システム

本研究ではプラスチックの化学原料化技術のうち熱分解を用いたものとして、「触媒分解」[2)]と「共熱分解」[3)]について、既存の製油所プロセスデータ[4)]をもとにモデルを作成しその導入効果を分析する。

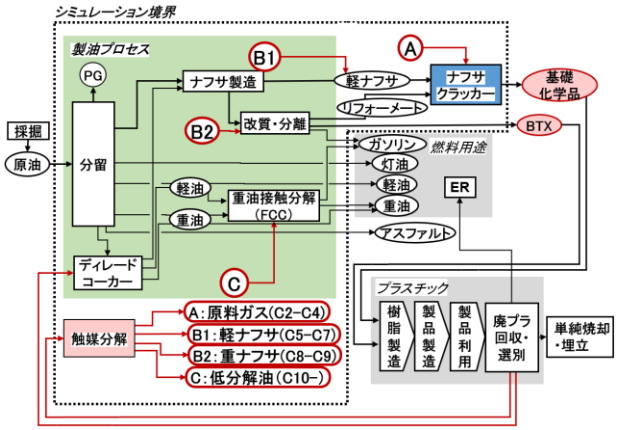


図 1 触媒分解及び DC での共熱分解を含めたプラスチックのライフサイクル

触媒分解ではプラスチックに触媒を作用させて熱分解を制御することでプラスチック原料となる成分を選択的に得る。プラスチックの熱分解生成物のうち C2-3 程度の低分子化学品は分離精製によってプラスチック原料として利用できる。C5-7 程度の軽ナフサに相当する成分はナフサ分解によって化学原料へ、C7-9 程度の重ナフサ成分は改質後にナフサ分解へ送る。重質な低分解油成分は重油接触分解（FCC）プロセスに投入される。

共熱分解では製油所の減圧残渣（VR）熱分解処理に用いられるディレードコーカー（DC）にプラスチックを導入することを想定する。図 1 に想定するライフサイクルを示す。原油及び廃プラから石油連産品及び低分子化学品を生産する Gate-to-Gate LCA モデルを作成した（図 2）。触媒分解プロセス・製油プロセス・ナフサ分解精製プロセスそれぞれについての収率及びプロセスインベントリデータを収集し、フロー分析を実施する。

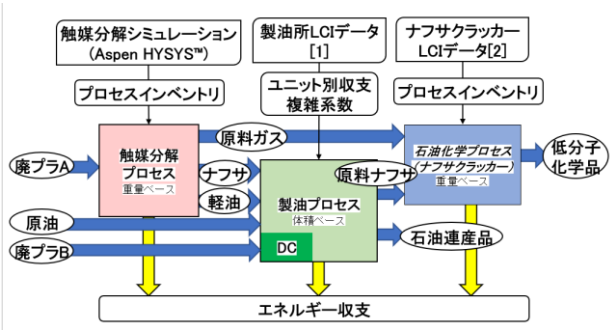


図 2 化学原料化システムの Gate-to-Gate LCA モデルの概形

3. 計算モデル

3.1 触媒分解プロセス

廃プラ触媒分解は技術開発途上のプロセスであるため、溶媒量比や収率などを仮定して Aspen HYSYS™を用いてプロセスシミュレーションを実施しプロセスインベントリを取得する。廃プラを分解し生成物を原料ガス・軽ナフサ・重ナフサ・低分解成分に分離するまでのプロセスモデルを作成することで廃プラ処理量当たりの各成分収率と消費エネルギーを計算する。

3.2 製油所プロセス

製油所の既往の LCI データ[4)]から製油所内の各操作ユニットの配置や収率・複雑係数及び製油所全体のインベントリデータを抽出し、製油所内ユニット間のマテリアルフローをシミュレートする計算モデルを作成した。各フローにおける原油由来とプラスチック由来の流量を追跡して計算することで、製品中に含まれるプラスチック由来成分の割合を計算する。

製油所のユニットプロセスについてそれぞれ処理量の上限を設定することで、それらを超えないように原油及びプラスチックの投入量を調整することができる。

3.3 共熱分解

共熱分解は製油所ユニットの一つである DC で行われるが、その際の収率はシナジー効果によって混合比に対して非線形になる [3]。本モデルではある混合比での収率と非混合での収率を組み合わせて DC の収率を決定している。

3.4 ナフサ分解・精製分離

ナフサクラッカーではナフサを熱分解し分離精製することで低分子化成品を生産する。ナフサクラッカーの既往のデータ [5,6]からナフサ分解の収率とインベントリデータを引用し、ナフサ分解及び触媒分解由来原料ガス中の化成品の分離精製にかかる消費エネルギーを推計した。原料ナフサにはナフサ分解及び分離精製の、触媒分解由来の原料ガスには製品精製の環境負荷がかかる。

4. フィードストックリサイクルの LCA

4.1 インベントリ分析

ある原油処理量の製油所設備に対して触媒分解及び DC に投入するプラスチックの量を変化させ、製品種別生産量と製造原単位、プラ処理量当たりの環境負荷を計算した。
その結果触媒分解へのプラ投入によって製油所への原油投入量を削減し、燃料油に対してナフサ製品をより多く生産するような製品バランスの変化が見られた。また各製品の製造原単位の環境負荷も削減された。また DC へのプラ投入については触媒分解と比べて製品バランスや環境負荷の変化が小さかった。

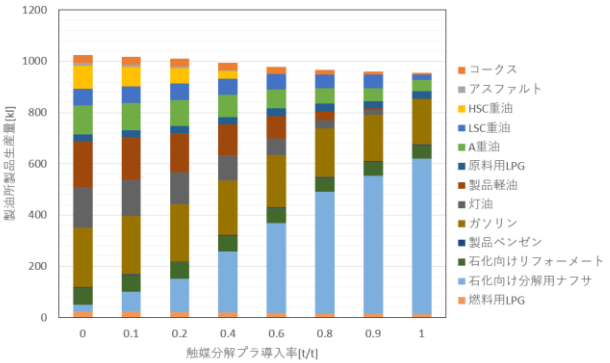


図 3 プラスチック触媒分解の導入による石油連産品収量の変化

4.2 ライフサイクル評価

本モデルでは触媒分解・共熱分解を導入した際の原油・廃プラ投入量に対する各種石油連産品・化成品の収量や製造にかかる環境負荷・廃プラ由来成分含有量などを計算ことができる。これらに投入する原油・廃プラにかかるインベントリデータを加えることで Cradle-to-Gate の LCA を行うことができる。

投入された廃プラに由来する成分がどの製品にどれだけ含まれるかを計算できるため、化学原料化としての効果を評価することができる。

また、製品バランスの変化から将来予想される石油連産品の需要の変化やエネルギー技術と組み合わせることで、燃料利用と化成品利用の双方から石油利用量の削減を議論することができる。

5. 結言

本研究では化学原料化によって化学原料の一部を代替した際に起きる変化をシミュレーションした。今回の結果から、プラスチックの導入によって原油投入量及び製品の環境負荷を削減し、また燃料油の収率が減り材料原料となる分解用ナフサが増えるように石油連産品の製品バランスを変化させることができた。

一方でその変化の割合は設備容量と原油及びプラスチック投入量に大きく左右され、製油所全体に対して処理量の少ない DC での共熱分解では製品バランスや環境負荷の変化が小さかった。。現状の原油処理量に対する廃プラスチックの回収量や既設の DC 処理量には限界があるため、現状の製油所システムへの導入では製品バランスへの影響は少ないが、プラスチックリサイクルによる環境負荷低減効果には期待できる。

燃料油及び化学原料の代替による環境負荷での評価だけでは化学原料化そのものの効果が評価しきれない。社会システム全体におけるエネルギー需要と化学原料需要の変化について将来のエネルギー技術やバイオ由来化学品製造技術などと組み合わせてプラスチック樹脂の化学原料化技術の意義を評価していくべきである。

引用文献

1)M.G.Davidson, R.A.Furlong, M.C.McMaus : Journal of Cleaner Production, 293, (2021), 126163
2)A.J.Martin et al. : Chem, 7 (6), (2021), pp.1393-1680
3)M. Brebu et al. : Fuel, 89 (8), (2010), pp.1911-1918
4)石油連盟：石油製品の LCI データ概要, (2003)
5)プラ処理協：石油化学製品の LCI データ調査報告書, (1999)
6)S.M. Sadrameli, A.E.S. Green : J. Anal. Appl. Pyrolysis, 73, (2005), pp.305–313

プラスチックから紙への材料代替による環境影響のシナリオ分析

Scenario analysis of environmental impact caused by material substitution from plastic to paper

○DU Yingyin[1)]、橋本征二[2)]
Yingyin Du, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学大学院　2) 立命館大学
* rv0073vi@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

プラスチック製品(以下、プラ製品)は機能性に優れ大変便利なものであるが、不適正な管理や不法投棄による海洋汚染、燃焼による CO_2排出などの課題がある。こうした問題に対応するため、主として使い捨て製品に使われているプラスチックを他の素材に代替する取り組みが行われるようになっている。筆者らは、いくつかの使い捨てプラ製品を紙製品で材料代替した際の環境影響をライフサイクルアセスメント(LCA)で評価してきたが [1)]、本研究では、これまでの評価結果を精査した上で、プラ製品を紙製品に代替することが、日本全体としての環境影響にどのような影響を与えるかを分析した。

2. 方法

2.1 個別製品の LCA の概要 [1)]

対象とした製品は、皿、ランチボックス、コップ、ストロー、お菓子袋、お箸袋、おかずカップ、緩衝材(2 種)、レジ袋(紙袋)、A4 ホルダー、飲料容器である。プラ製品、紙製品のそれぞれについて、その生産段階及び廃棄段階を対象とし、その容量(cm^3)、長さ(cm)、面積(cm^2)等を機能単位とした。環境影響評価は、日本版被害算定型影響評価手法(LIME2)の環境影響項目を対象とした。ソフトウェアとして MiLCA、データとして IDEA ver2.3 を用いたが、プラスチックの廃棄プロセス(焼却)における回収電力フローは削除し分析を行った。本研究では、既報 [1)] における各種設定について微調整を行った。

2.2 材料代替による環境影響のシナリオ分析

日本で消費されているレジ袋、レジ袋以外の包装用フィルム、硬質フィルム、小型(1~399ml)ペットボトル、中型(400~699ml)ペットボトル、大型(700ml 以上)ペットボトルを対象とし、これらを紙製品に 50%代替したとき、日本全体でどのような変化がもたらされるかについて分析した。具体的には、それぞれ、本研究で対象としたレジ袋、お菓子のパッケージ、ランチボックス、飲料容器の LCA 結果を用いて、代替によるマクロな影響を検討した。

3. 結果と考察

3.1 各環境影響の要因

プラ製品と紙製品の環境影響の評価結果を図 1 に示す。縦軸はプラ製品の環境影響に対する紙製品の環境影響の比を対数で示している。A4 ホルダーで、紙製品の富栄養化と土地利用(改変)の値がプラ製品より小さくなったが、これは紙の設定が他の紙製品と異なるためである。また、緩衝材 A で、紙製品の環境影響がプラ製品より全体的に非常に大きかった原因としては、同じ機能を持つ紙製品の重量がプラ製品より 10 倍ほど大きかったことがある。

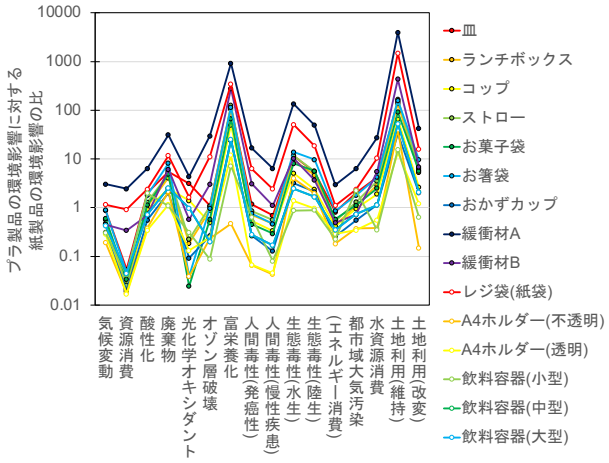


図 1 プラ製品に対する紙製品の環境影響の比

3.2 材料代替による環境影響

レジ袋、レジ袋以外の包装用フィルム、硬質フィルム、小型・中型・大型ペットボトルの 50%が紙製品に代替された場合、約 243 万 t の CO_2 を削減する効果があると推計された。また、資源消費は、アンチモン換算量で約 520t、48%削減される結果となった。人間毒性(発癌性)はベンゼン換算量で 571t 削減され、これをタバコの本数に換算すると最大 476 千億本となった。これは、2020 年の販売数量の 481 倍に相当する。エネルギー消費量は 354 億 MJ 削減され、原油換算で 5.75 百万バレルとなり、約 1.6 日分の原油需要量に相当する量であった。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金(20H04384)による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

1) 杜盈吟、橋本征二：プラスチックから紙への材料代替の環境影響評価：対象製品の拡張、第 32 回廃棄物資源循環学会研究発表会、B5-5-O、2021

口頭発表セッション（一般）

[1-C2] 環境コミュニケーション

座長：一杉佑貴（産業技術総合研究所）

2022年3月2日(水) 11:00 〜 12:20 C会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-C2-01] 物語を用いた環境コミュニケーション手法の提案―情報処理プロセスの違いに着目して

*中野 祐樹[1]、本藤 祐樹[2] （1. 横浜国立大学大学院 環境情報学府、2. 横浜国立大学大学院 環境情報研究院）

11:00 〜 11:20

[1-C2-02] A scenario analysis of household carbon footprint in Japan from the time-use perspective

*JIANG YIDA[1]、井原 智彦[1] （1. 東京大学）

11:20 〜 11:40

[1-C2-03] コミュニティサイクルシステムにおける観光客需要に関する研究

*竹井 奏人[1]、磐田 朋子[1] （1. 芝浦工業大学）

11:40 〜 12:00

[1-C2-04] The life cycle carbon emissions caused by households in Japan: current status and long-term perspectives

*余 浩然[1]、塚原 建一郎[2]、一杉 佑貴[2]、田原 聖隆[2]、井原 智彦[1] （1. 東京大学、2. 産業総合研究所）

12:00 〜 12:20

©日本LCA学会

物語を用いた環境コミュニケーション手法の提案
—情報処理プロセスの違いに着目して

A proposal for environmental communication method using narrative:
Focusing on differences in style of information processing

○中野祐樹 [1)]、本藤祐樹 [1)]
Yuuki NAKANO, Hiroki HONDO
1) 横浜国立大学大学院

1. はじめに

我々の社会が抱えるエネルギー・環境問題の解決に向けて、これまで様々なコミュニケーション手法が提案されてきた。これらは確かに一定の効果を有するものの、人々の行動を変容させるためには未だ不十分であることが指摘されている。その原因のひとつに、これまでの取り組みが人間の情報処理プロセスに注意を払っていないことが挙げられる。ここで言う情報処理プロセスとは、与えられた情報から何らかの推論や意思決定を行うまでの一連の過程を指す。本研究では、我々の情報処理プロセスの違いに着目することで、今後の環境コミュニケーションに向けた検討を行う。

2. 本研究の着眼点

二重過程理論によれば、我々が提示された情報を処理するプロセスには、図 1 のように自動的かつ直感的なプロセス（システム 1）と熟慮的かつ論理的なプロセス（システム 2）のふたつが存在している [1)]。従来の環境コミュニケーションでは、科学的事実や統計的データなどを中心に構成される論理的な説明文形式の情報が主に提供されてきた。したがってこれまでは、提示した情報がシステム 2 で処理されることを前提としてきたとみなすことができる。これに対して、システム 1 での処理にも焦点を当てることで、より効果的な環境コミュニケーション手法の提案につなげることができると期待される。

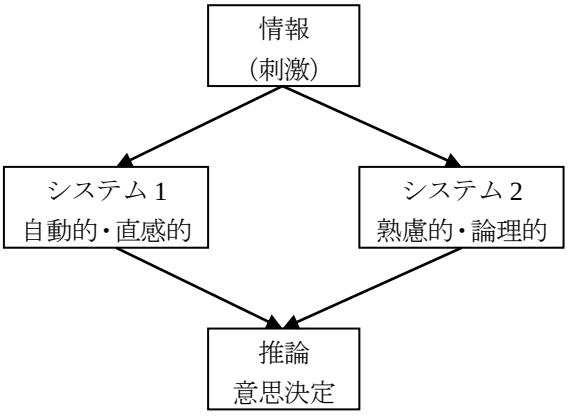


図 1 ふたつの情報処理プロセス

そこで、システム 1 で処理される情報として物語形式の情報に着目する。物語とは、登場人物の特定の体験を時間的な経過とともに描写した表現の形態を指す。物語を通じた情報提供は、これまで主に健康コミュニケーションの領域で進められてきた。一例として、予防接種によって主人公が病気に感染するのが防がれたというあらすじの物語によって予防接種を推奨したり、アルコールの過剰摂取によって登場人物が体調を害するという筋書きの物語を通じて過度の飲酒を抑制したりといった試みが行われている。従来の健康コミュニケーションでは、病気に関するリスクや確率を定量的に示した統計的な情報が主に用いられてきたが、物語形式の情報は感情に訴求することで態度や行動により大きな影響を与えることができると報告されている [2)]。ただし、エネルギー・環境に関するトピックを題材として物語形式の情報を提供した事例は少ないため、その有効性は明らかでない。

以上を踏まえて本研究では、気候変動に関する説明文形式の情報と物語形式の情報が、行動意図や政策受容性にどのような影響を与えるか明らかにすることを目的とする。

3. 方法

実験の概要を図 2 に示す。実験はインターネット上で、18 歳以上のモニター登録者 2,121 人を対象に行われる。はじめに事前調査を行った後、気候変動に関する情報資料を説明文型または物語型のいずれか一方の形式で提示し、それを読んだ上で事後調査への回答を求める。

ふたつの情報資料の内容は、気候変動に伴う日本の将来予測 [3)]に基づく。いずれも気候変動が 2100 年の日本に及ぼす影響を挙げ、CO_2 削減や再エネ活用の重要性を説いているという点では共通するが、その表現方法が異なる。説明文型の情報では「第一に…、第二に…、第三に…」という構成で論理的に議論が展開されていく。一方で、物語型の情報では主人公が未来から読者に話しかけているという設定に基づいて、会話の中で口語的に説明が行われる。また、「家の屋根が宙を

舞う」などのドラマティックな描写や、「ザーザー」「ゴォォォ」などの擬声語や擬態語を多く用いている。両情報資料に形式以外の差異は生じないよう配慮し、含まれる内容や文字数などは可能な限り同一になるよう留意している。

実験では情報資料を読む前後で質問紙調査を 2 回行う。事前調査では、参加者の特性として移入傾向、直感性、関心を 6 件法により測定する。移入傾向とは小説や映画の世界観への入り込みやすさを指し、直感性とは普段の意思決定で直感に頼る程度を意味する。

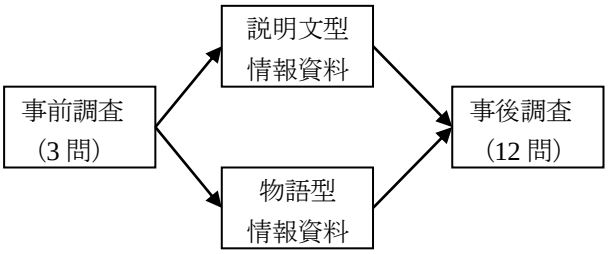


図 2 実験の概要

事後調査では初めに、情報資料の内容を十分に理解したか否かを確認するための正誤問題への回答を求める。以下の分析では、これに正答した者のみを有効回答として取り扱う。つづいて、情報資料の分かりやすさ、情報資料を読んで生じた気候変動への不安や恐怖、緊迫感や責任感や罪悪感の程度を 5 件法によって測定する。加えて、行動意図（CO_2 の削減、情報の探索、議論への参加）と政策受容性（炭素税の導入、再エネ税）を同様に測定する。

4. 結果と考察

4.1. 情報形式による影響

情報形式が与える影響を明らかにするため、説明文形式の情報資料を提示した群(n=449)と物語形式の情報資料を提示した群(n=459)とで事後調査の平均得点を比較する。図 3 に示すように、物語型情報を提示した群の方がすべての項目で平均得点は高く、両群の差異はいずれも統計的に有意である（有意水準 5%）。図では省略している恐怖、緊迫感、罪悪感についても同様に有意な差が認められる。この結果は、物語型の情報資料は説明文型の情報資料よりも分かりやすいと評価されることを表している。また、不安や責任感を強く喚起し、行動意図や政策受容性をより大きく向上させることを意味している。以上より、エネルギー・環境問題に関する情報提供において物語形式の情報を用いることで、行動意図や政策受容性に大きな影響を与えることができる可能性が示唆される。

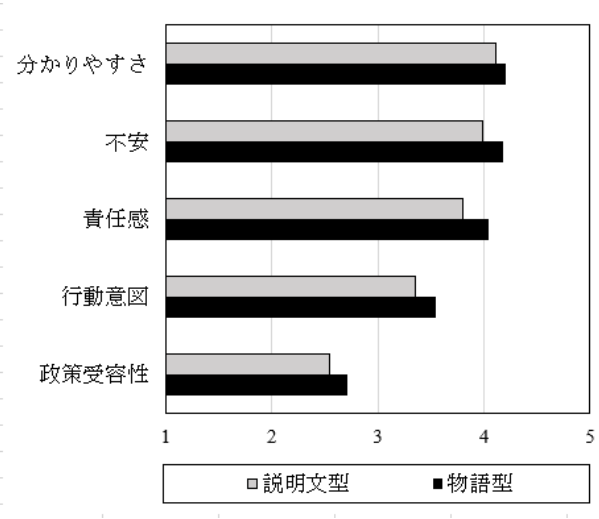


図 3 説明文型情報資料と物語型情報資料の比較

4.2. 参加者の特性による影響

つづいて上述の傾向が参加者の特性に依存するか否かを明らかにするための分析を行う。ここでは移入傾向と関心について報告する。事前調査の得点によって、参加者を移入傾向・関心が高い群と低い群に二分する。

移入傾向の低い群では説明文型と物語型との間で政策受容性に有意な差が見られないのに対し、移入傾向が高い群では物語型の方が高い政策受容性を導いている。したがって、物語を活用した情報提供は、対象者にストーリーの世界観に没入しやすい傾向がある場合に特に有効な方策となると推察される。

また関心について、関心の低い群では物語型の方が政策受容性を高く導いているのに対し、関心の高い群では情報形式による政策受容性の有意な差異が認められない。これより、物語を通じた情報提供は対象者の話題への関心が低い場合に特に有効となると言える。

5. おわりに

本研究では、これまで着目されてこなかったシステム 1 と呼ばれる自動的・直感的な情報処理プロセスに焦点を当て、物語形式での情報提供が与える影響について分析している。今後は、物語型の情報が人々に影響を与えるメカニズムを明らかにするなど、知見をより一層深めていくことが求められる。

【引用文献】
1) Kahneman, “Thinking, Fast and Slow”, Penguin (2012)
2) 中野祐樹，本藤祐樹：日本エネルギー学会誌，100 (11)，(2020)
3) 文部科学省, 気象庁:“日本の気候変動 2020”(2020)
【謝辞】本研究は、三井物産環境基金(R18-0042)ならびに JSPS 科研費(19K12457)の支援を受けている。また、調査にご協力戴いた皆様に謝意を表する。

A scenario analysis of Japanese household carbon footprint toward 2050

○姜怡達*1)、井原智彦 1)
Yida Jiang, Tomohiko Ihara
1) 東京大学
* yida.jiang@s.k.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

Japan had pledged to reduce its greenhouse gas (GHG) emissions by 46 percent in fiscal year 2030 reach complete carbon neutrality by 2050 [1], a significant leap from the previous Nationally Determined Contribution (NDC) targets of reducing emissions 26 percent by 2030 and 80 percent by 2050 under the Paris Agreement. Such an ambitious target would require joint efforts of decarbonization from a broad range of economic sectors, especially the household sector, which is a major driver of societal GHG emissions. To assess the mitigation potential in the household sector of Japan, in this study a scenario analysis is conducted from the perspective of household consumption, accounting for the probable changes in household socioeconomic and demographic characteristics, improvements in energy efficiency enabled by innovative technologies, and household consumption behavior changes.

2. Methodology

The scenarios are built on a categorical basis, with behavior changes in the consumption of each category assumed for all scenarios. Baseline forecasts of the GHG emissions in 2050 is first obtained using the STL-ARIMA model, which combines the Seasonal-Trend decomposition using LOESS (STL) [2] and the AutoRegressive Integrated Moving Average (ARIMA) model. The forecasts are then adjusted considering the impacts of external factors including changes in the socioeconomic and demographic profiles of households, producing the business-as-usual (BAU) scenario. On top of the BAU scenario, technological factors, mainly the application of innovative technologies, and category-specific consumption behavior changes, which include the adoption of innovative technologies, are assumed to various extents to construct the behavior change scenarios. In addition to the BAU scenario, three scenarios, with three different degrees (low, medium, high) of consumption behavior change, are proposed.

2.1 Data

Time series data of monthly household expenditures is obtained from the Family Income and Expenditure Survey (FIES) [3], a monthly survey of household expenditures on about 500 items of consumption conducted on Japanese households in all 47 prefectures. Data on non-single households in the 47 capital cities of all prefectures during the period from January 2000, to December 2019 – before the occurrence of the COVID-19 pandemic, is selected for modeling, in order to remove the impacts on forecasting accuracies as the COVID-19 pandemic altered household consumption patterns since January 2020. Data on GHG intensity of expenditure of consumption items is derived by matching the items in the 2011 Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan Using Input-Output Tables (3EID) [4] with FIES items. GHG emissions resulting from household consumption are obtained my multiplying the expenditures on an item with its corresponding GHG intensity of expenditure.

2.2 The STL-ARIMA time series model

STL decomposes a time series into trend components, seasonal components, and residuals. This relationship can be expressed as:

$$Y_v = T_v + S_v + R_v \tag{1}$$

where Y_v, T_v, S_v, and R_v denote the time series data, the trend component, the seasonal component, and residual, respectively. The ARIMA model is then applied to the trend components T_v. The ARIMA (p,d,q) model can be expressed by the following equation:

$$\begin{aligned} X_t &= (1-B)^d Y_t \\ Y_t &= c + \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \cdots + \phi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t \\ &\quad + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} \\ &\quad + \theta_q \varepsilon_{t-q} \end{aligned} \tag{2}$$

where X_t represents the concerned time series; Y_t

represents the time series used to obtain X_t by differencing; B is the lag operator; ϕ_p , θ_q are coefficients of the ARIMA model; ε_t is the white noise; c is a constant. A total of 10 STL-ARIMA models, corresponding to the 10 consumption categories, are applied to the GHG emissions time series of each category. The Akaike Information Criteria (AIC) is used for selecting the values of p, d, q that maximize the likelihood of each model.

2.3 Scenario building

2.3.1 Socioeconomic and demographic factors

Socioeconomic and demographic characteristics include household size, income, age, and car ownership, the projections of which towards 2050 are provided mainly by government ministries. For household income, we assume that the changes are proportional to the changes in GDP per capita, for which the projections by OECD [5] are adopted. A regression analysis is performed on categorical household expenditures and the selected socioeconomic and demographic characteristics, provided by the microdata of 2014 National Survey of Family Income and Expenditure [5]. The results are shown in Table S1 and are used for adjusting the forecasts by category made by the STL-ARIMA model.

2.3.2 Technological factors

Technological factors include emission coefficients of electricity, switching from internal combustion engine vehicles (ICEVs) to battery electric vehicles (BEVs) or fuel cell vehicles (FCVs), and the energy efficiency of household appliances. Emissions coefficients in 2050 (0.23 $kgCO_2/kWh$) are extrapolated from the 2030 Ministry of Environment goal of 0.37 $kgCO_2/kWh$ [6]. Projections of the rates of switching to BEVs or FCVs are based on the goal of "Electrified Vehicle (xEV) Strategy" set by the Ministry of Economy, Trade and Industry [7]. Emissions from electricity by BEVs/FCVs are estimated to be 0.49 times of emissions from ICEVs assuming that the required dynamic outputs are the same.

2.3.3 The BAU scenario

The BAU scenario assume changes in only built by adjusting the forecasts obtained directly from the STL-ARIMA models using the projected changes in the socioeconomic and demographic characteristics of households. The BAU scenario thus does not include the impacts of technological factors and consumption behavior change of households. Table S2 summarizes the changes in emissions under the BAU scenario.

2.3.4 Category-specific behavior change scenarios

Building upon the BAU scenario, category-specific behavior changes at small, medium, and large levels were assumed for all 10 consumption categories. The consumption behavior changes include 1) reducing meat consumption (Food) with rebound effect of 50% based on Grabs' findings [8], 2) switching to energy efficient residential buildings (Housing, Furniture and household utensils, Fuel, electricity, and water), 3) purchasing building equipment with higher energy efficiency (Fuel, electricity, and water), 4) recycling of clothing and footwear items (Clothes and footwear), 5) switching from ICEVs to BEVs/FCVs (Transportation and communication), 6) switching to less carbon-intensive leisure and cultural services (Culture and recreation, Other). A summary of the corresponding rates of emission mitigation is shown in Table S3.

3. Results and discussion

Figure S1 shows the curves of categorical changes in per capita carbon footprint under each scenario. For the BAU scenario, by 2050 an average person in Japan is estimated to emit 3.775 tCO_2e/cap per year, down by 11.9% from the level of emissions in 2019 (4.286 tCO_2e/cap). Meanwhile, emissions are expected to be 3.034 tCO_2e/cap (-29.2%), 2.844 tCO_2e/cap (-33.7%), and 2.664 tCO_2e/cap (-37.8%) for the small, medium and large behavior change scenarios. As part of its goal to reach carbon neutrality by 2050, Japan had set its midterm emission reduction target of 46% by 2030. Nevertheless, our results show that even for the largest behavior change scenario the reduction rate of emissions would not meet the goal. More stringent mitigation efforts at the producers' side, along with more drastic consumption behavior change than the scenarios proposed in this study, are therefore required in order to reach the desired emission cuts.

Supporting Information

References

[1] Ministry of Economy, Trade and Industry. Green Growth Strategy Through Achieving Carbon Neutrality in 2050. June 18, 2021.

[2] Cleveland, R.B., et al., 1990. J. Off. Stat. 6, 3–73.

[3] 総務省統計局, 家計調査.

[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）.

[5] 総務省統計局, 社会生活実態調査.

[6] 環境省, 電気事業分野における地球温暖化対策の進捗状況の評価結果について.

[7] Ministry of Economy, Trade and Industry. Japan Promotes Electrified Vehicle (xEV) Strategy ahead of 2050. November 20, 2018.

[8] Grabs, 2015. Ecol Econ 116:270–279.

Table S1 Results of the regression on household expenditures using socioeconomic and demographic characteristics of households.

Category	size	sex	age	Income (million JPY)	car	const	R^2	Adjusted R^2	Per capita monthly expenditures in 2014 (JPY)
Food	-3,032.12***	-418.59**	1,432.27***	365.66***	-524.88***	14,158.35***	0.098	0.098	27170.71
Housing	-1,478.46***	1,080.04***	-387.17***	9.52	-1,623.87***	9,984.20***	0.010	0.010	7982.845
Fuel, electricity, and water	-611.57***	497.51***	474.04***	-59.70***	30.81	2,980.42***	0.088	0.088	7604.603
Furniture and household utensils	-539.13***	247.49***	229.96***	105.15***	140.44**	1,389.10***	0.023	0.023	3867.364
Clothes and footwear	-772.91***	889.64***	-16.72	320.47***	-113.81*	1,934.70***	0.043	0.043	5220.084
Medical care	-665.42***	100.41	465.59***	85.98***	-211.54***	1,623.35***	0.034	0.034	4511.715
Transportation and communication	-2,377.22***	15.01	-226.99***	499.66***	4,105.85***	10,111.79***	0.017	0.017	14289.96
Education	728.16***	860.65***	-268.93***	175.11***	-217.87***	-1,019.17***	0.034	0.034	2634.728
Culture and recreation	-1,948.08***	524.10***	472.39***	457.19***	437.87***	5,444.33***	0.057	0.057	10688.28
Other	-3,744.61***	1,087.58***	764.01***	1,278.88***	740.60***	8,551.89***	0.037	0.037	18029.71

*: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001.

Table S2 Estimated changes in emissions under the BAU scenario corresponding to the socioeconomic and demographic characteristics of households by 2050.

	Size	Age	Income	Car	Total
Food	3%	4%	4%	0	11%
Housing	6%	-4%	0%	0	2%
Fuel, electricity, and water	2%	5%	-2%	0	5%
Furniture and household utensils	4%	5%	8%	0	16%
Clothes and footwear	4%	0%	17%	0	21%
Medical care	4%	8%	5%	0	18%
Transportation and communication	5%	-1%	10%	0	14%
Education	-8%	-8%	19%	0	2%
Culture and recreation	5%	3%	12%	0	21%
Other	6%	3%	20%	0	29%

Table S3 Assumed categorical behavior changes in consumption under the small, medium, and large behavior change scenarios.

	Small	Medium	Large	Remark
Food	-10%	-30%	-50%	Reduction rates in meat consumption
Housing	-10%	-15%	-20%	Rates of switching to energy efficient residential buildings
Fuel, electricity, and water	-10%	-15%	-20%	Emission reductions under different rates of switching to energy efficient residential buildings
Furniture and household utensils	-10%	-15%	-20%	Emission reductions under different rates of switching to energy efficient residential buildings
Clothes and footwear	-10%	-30%	-50%	Recycle rates of clothes and footwear
Transportation and communication	-50%	-75%	-100%	Rates of switching from ICEVs to BEVs/FCVs
Transportation and communication	-5%	-10%	-15%	Reduction rates in emissions due to remote work
Culture and recreation	-5%	-10%	-15%	Reduction rates in emissions due to switching to less carbon-intensive goods or services
Other	-5%	-10%	-15%	Reduction rates in emissions due to switching to less carbon-intensive goods or services

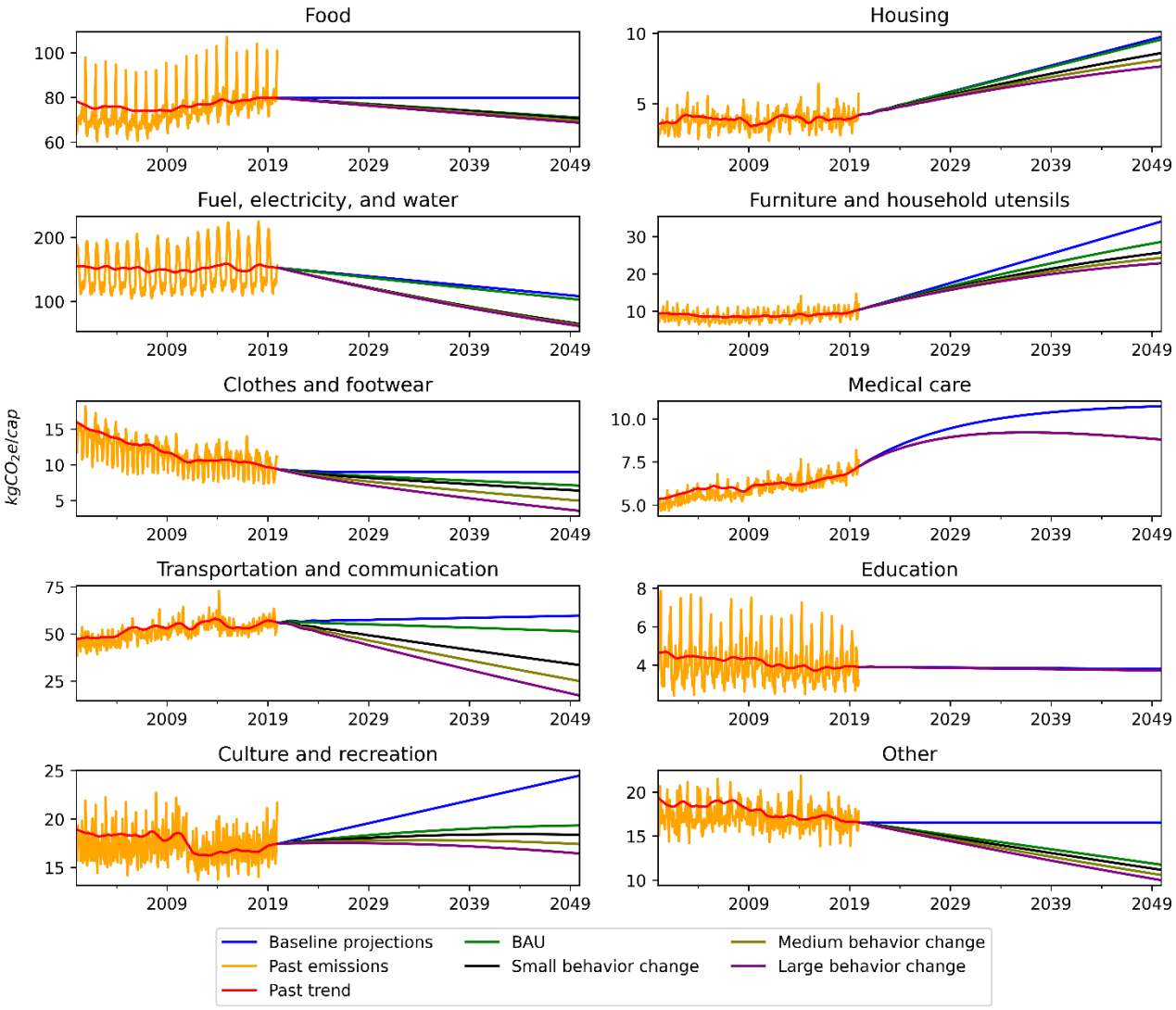


Figure S1 Curves of the projected emissions under the BAU, small, medium, and large behavior change scenarios.

コミュニティサイクルシステムにおける観光客需要に関する研究

Study on tourist demand analysis in community cycle system

○竹井奏人*[1)]、磐田朋子[1)]
Kanato Takei, Tomoko Iwata
1) 芝浦工業大学
* br18066@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

近年、新たな移動手段として、コミュニティサイクル（Community Cycle System,以下 CCS）の導入が世界各国で進められている。日本国内の CCS 導入都市数は年々増加し、国土交通省[1)]によると、2019 年 3 月 31 日時点で 225 都市が導入に至っている。多くの都市が導入する背景には、「観光戦略の推進」や「地域の活性化」、「環境負荷の軽減」など多くの目的があり、各都市が抱える課題解決に繋がる活用が期待される。その一方で、国内に導入され始めてから 10 年以上が経過した現在、CCS の導入効果を評価する必要があるとされているが、分析を実施している都市は 4 割程度に過ぎず、具体的な分析項目としては、利用者の満足度評価が中心となっている。そのため、今後の導入効果の分析について、「非定期利用者」や「観光団体との連携」に関する導入効果を把握したいという都市が多い[2)]ことからも、観光客などの来訪者による利用について明らかにすることが求められる。

そこで本研究は、CCS の観光客需要に影響する要因を分析し、CCS における観光目的利用者の需要予測モデルを提案することを目的とした。

2. 研究手法

2.1 研究対象

本研究では、観光目的の CCS 利用が多い石川県の金沢レンタサイクル「まちのり」をケーススタディの対象として選定した。現在、「まちのり」は市内に約 50 箇所のポートが設置されるまでに拡大しているが、本研究では、2010 年 8 月 21 日（土）から 10 月 20 日（水）までの 61 日間で実施された社会実験で得られたデータ[3)]を用いる。したがって、需要予測モデルも現行の「まちのり」ではなく、社会実験における運用に合わせて設定・作成した。また、本研究の対象は観光目的の利用者であるため、駅等の他目的の利用者が多数いると想定されるポートは分析から除外し、観光スポット付近にある 7 ポートについてのみ需要予測を行った。

2.2 影響要因の分析

はじめに、(1) ポート間の距離 (2) ポート付近の観光スポットへの来場者数 (3) ポート地点への交通利便性　の 3 つを観光目的の CCS 需要に影響する要因として想定した。対象地域の調査および社会実験結果の分析を踏まえ、これらの 3 つのうち、CCS の利用回数に影響すると考えられる要因について重回帰分析を行った。その結果を基に、影響要因から予測した各ポートへの返却率を推計し、シミュレーションに用いた。

2.3 シミュレーション

本研究では、artisoc のマルチエージェントシミュレーションを使用した。社会実験と同程度の利用者が発生したとき、前述した影響要因から推計された各ポートへの返却率に従って利用者を行動させると、社会実験結果とどれだけの差が出るかを検証した。なお、このシミュレーションでは、より観光目的の利用率が高くなる日曜日の利用に限定して評価をした。

3. 結果

3.1 社会実験の分析結果

（1）ポート間の距離

各ポート間の距離と返却回数の散布図を図 1 に示す。貸出ポートから返却ポートまでの最短経路での距離をポート間距離、各ポートへの返却回数をポート間の利用回数とし、7 ポートからできる 49 個の組み合わせ分をプロットした。ポートによっては距離に関係なく利用回数が少ない箇所もあるが、特に 1～2.5km の移動に多く利用される傾向にあることが明らかになった。

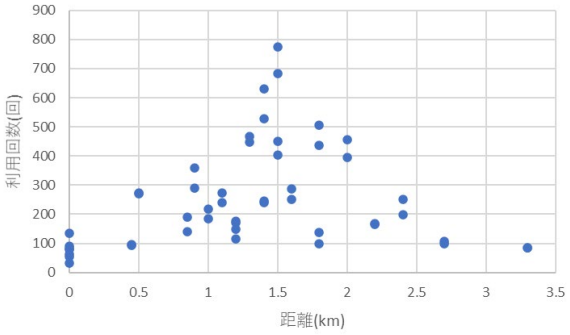


図 1　ポート間距離と利用回数

（2）ポート付近の観光スポットへの来場者数

ポート付近に複数の観光スポットがある場合は最も観光客数が多い箇所を代表とし、各ポート 1 つだけ観

光スポットを充てるものとした。また、用いる観光客数のデータは、社会実験が行われた 2010 年に集計されたものを使用するが、観光客数を集計していない箇所については、予想される仮の数値を代用した。各ポート付近の観光スポットへの来場者数と返却回数の散布図を図 2 に示す。サンプル数は少ないが、ポート付近の来場者数が多いほど、ポートへの返却回数も多い傾向にあることが明らかになった。

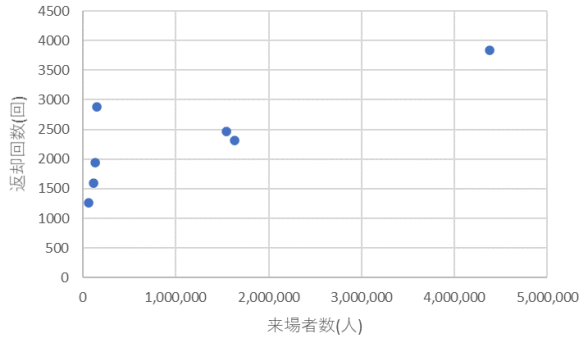


図 2　付近の観光スポットへの来場者数と返却回数

(3) ポート地点への交通利便性

交通利便性については、各ポート付近に路線バスのバス停があることに加え、コインパーキングなどの駐輪場も非常に充実していることから、いずれのポート地点も交通利便性が高い環境にあったことが明らかになった。これは、公共交通機関への乗換が便利である地点へのポート設置が意図されていたことが反映される結果となった。このことから、「まちのり」においては、ポート地点への交通利便性はポートの需要（利用回数）には影響がないものと仮定した。

(4) 重回帰分析

(1) から (3) の結果より、ポート間の距離とポート付近への来場者数を各ポートの利用回数の説明変数として重回帰分析を行った。得られた回帰式を式 1 に示す。なお、あるポート A からポート A'への移動回数を $Y_{A\text{-}A'}$[回/日]、ポート間の距離を X_1[km]、ポート A' 付近の観光スポットへの来場者数を X_2[人/日]とした。

$$Y_{A\text{-}A'}=-1.664X_1+5.391X_1^2+1.460\times10^{-4}X_2+0.627 \quad (式\ 1)$$

この回帰式より、ポート A からポート A'に向かう確率 $Z_{A\text{-}A'}$を以下の式 2 で推計し、マルチエージェントシミュレーションに用いた。

$$Z_{A\text{-}A'}=Y_{A\text{-}A'}/Y_A \text{ の総貸出回数} \quad (式\ 2)$$

3.2 シミュレーション結果と考察

シミュレーション結果 5 回の平均値と社会実験の結果を比較したものを表 1 に示す。これより、多くのポート間で実際の社会実験結果と誤差の少ない集計結果が得られ、距離と付近の観光スポットへの来場者数による CCS ポートの需要予測の有効性が示唆された。一方で、「にし茶屋街」と「東山」のポートに関しては、総返却回数に比較的大きな誤差が見られた。この結果の一因として、観光スポットへの来場者数データの精度が低いことが考えられる。先に挙げた 2 つのポートは、3.1 の(2)で前述した仮の数値を代用した箇所に該当するため、正確な来場者数が把握できれば誤差は小さくなると考えられる。また、実際には、今回検討しなかった観光スポットや食事処などへ行くための利用も多数含まれるため、一つのポートにつき、観光客が訪れる可能性のある箇所を複数考慮し、精度を上げることが今後の課題として挙げられる。

さらに、作成したシミュレーションモデルのうち、再配置業務にかかる所要時間、運搬台数、自転車の初期設置台数のパラメータを変え、感度分析を行った。その結果、1 日の総利用回数について、一度の再配置で運搬する台数を 4 台から 8 台に増やすと約 4.6%増加し、自転車が不足しやすいポートの初期設置台数を 10 台から 20 台に増設することで、約 8.9%増加することが明らかになった。

表 1　シミュレーション結果（社会実験との差）

利用回数/日（社会実験との差）		返却ポート							
		武蔵	香林坊	21世紀美術館	長町緑地	にし茶屋街	兼六園	東山	合計
貸出ポート	武蔵	3.6(1.65)	9(-1.10)	8.2(-2.77)	9.4(3.16)	8.2(4.54)	9.4(0.64)	9.6(-5.22)	57.4(0.90)
	香林坊	6.6(-3.11)	0(-1.37)	6.2(3.14)	2(-0.08)	5.6(3.11)	6.8(0.91)	6.2(1.89)	33.4(4.49)
	21世紀美術館	8.4(-1.07)	4.8(0.66)	1.6(-0.11)	5.4(0.65)	5(-0.20)	6(0.13)	5.6(-4.28)	36.8(-4.22)
	長町緑地	5.4(-0.04)	2.4(0.41)	6.4(2.39)	0(-1.77)	3.8(-4.00)	4.8(1.09)	2.2(0.03)	25(-1.89)
	にし茶屋街	6(2.40)	4.2(0.36)	3.4(-1.93)	4.6(-1.68)	1.2(0.51)	3(0.01)	0.6(-1.24)	23(-1.58)
	兼六園	8.6(-1.15)	6(0.79)	5(-0.89)	5.8(2.57)	8.4(6.23)	1.4(0.23)	7.6(-6.03)	42.8(1.75)
	東山	12.6(-4.15	7.6(2.18)	10.6(2.02)	3.4(1.08)	0.8(-1.06)	9.8(-1.62)	1.8(-1.13)	46.6(-2.68)
	合計	51.2(-5.47	34(1.95)	41.4(1.85)	30.6(3.92)	33(9.11)	41.2(1.39)	33.6(-15.98)	265(-3.23)

4. 引用文献

1) 国土交通省:“シェアサイクルに関する現状と課題”, 第 1 回シェアサイクルの在り方検討委員会配付資料, 入手先 <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/sharecycle/pdf01/03.pdf>, (参照 2021-12-28)

2) 国土交通省 中西賢也 : “コミュニティサイクルの取組等について”, 街路・連立・新交通 コミュニティサイクルの取組, 入手先 <https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_gairo_fr_000030.html> , (参照 2021-12-28)

3) 片岸将広 : “金沢レンタサイクル「まちのり」の効果と展望”, 入手先 <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00039/201105_no43/pdf/370.pdf>, (参照 2021-12-28)

口頭発表セッション（一般）

[1-D2] COVID-19

座長：伊坪徳宏（東京都市大学）

2022年3月2日(水) 11:00 〜 12:20 D会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-D2-01] COVID-19による生活変容がカーボンフットプリントに及ぼす影響は従事する産業ごとに異なるのか？

*吉良 成美[1]、重富 陽介[1] （1. 長崎大学）

11:00 〜 11:20

[1-D2-02] 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・環境面への直接・間接的な影響評価

*大賀 雄介[1]、中石 知晃[3]、加河 茂美[2] （1. 加河研究室/九州大学、2. 九州大学経済学研究員、3. 九州大学経済学府）

11:20 〜 11:40

[1-D2-03] 抗体試薬製造におけるマウス腹水法と細胞培養法の環境影響評価

*菊地 俊多[1]、伊坪 徳宏[1] （1. 東京都市大学）

11:40 〜 12:00

[1-D2-04] モノクローナル抗体製造による環境影響と健康効果の包括的評価

*天沢 逸里[1]、黒田 裕章[1]、岡村 梢[1]、Badr Sara[1]、杉山 弘和[1] （1. 東京大学大学院）

12:00 〜 12:20

©日本LCA学会

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・環境面への直接・間接的な影響評価

The economic and environmental impacts of the COVID-19 through inbound demand

○大賀雄介*、中石知晃、加河茂美

Yusuke Oga,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

oga.yusuke.452@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景・目的

新型コロナ流行による訪日外国人の減少は、インバウンド需要の減少を通して日本に経済的損失と環境的便益をもたらした。日本は、2012 年以降訪日外国人を積極的に誘致する政策を成功させ、2020 年以降さらに成長させていく見込みであった（観光庁、2016)。しかし、新型コロナウィルスによる影響で2020年訪日外客数は4,115,900人(前年比-87.1%)と激減した(JNTO、2021)。

一方で、パリ協定において厳しい排出削減目標を掲げた日本にとって、新型コロナの流行は追い風にもなっている。実際に、環境省の速報値によると 2020 年の CO_2 排出量は 2019 年と比較して 5.1%減少している。これは、2013 年以降最も大きな減少幅となった(環境省、2021)。

本研究は、産業連関分析モデルを用いて、訪日外客数の減少が日本の経済面・環境面に直接・間接的に与えた影響を定量化することを目的とする。また、推計結果をもとに、ポストコロナ社会における観光産業の持続可能なあり方について議論する。

2. 分析手法・使用データ

まず、新型コロナウィルスの流行による経済面・環境面への影響を明らかにするために、新型コロナウィルスが流行した現実の 2020 年を「コロナありシナリオ」（以後「ありシナリオ」)、流行しなかった半日の2020 年を「コロナなしシナリオ」(以後「なしシナリオ」)として作成する。「ありシナリオ」では、実際の 2020 年訪日外客数(JNTO、2021)に 2019 年の一人当たり旅行消費単価(観光庁、2020)を乗じた結果を旅行消費額として算出した。「なしシナリオ」では、訪日外客数のデータが存在しないため、指数平滑法を用いて2020 年における訪日外客数を推計した。具体的には、JNTO(2021)から入手できる2003 年から 2019 年までの訪日外客数のデータを推計される回帰式を用いて、2020 年訪日外客数を外挿推計した。以上で得られた訪日外客数の推計値に、2019 年の一人当たり旅行消費額を乗じることでなしシナリオの旅行消費額を推計した。旅行消費額を訪日外国人によってもたらされる直接的効果として、産業連関分析によって直接効果(最終需要)から間接効果を算出した。この時、総務省の2015 年度産業連関表を追加データとして用いた(総務省、2019)。計算式は以下の通りである。

$$\mathbf{L} = \left[\mathbf{I} - \left(\mathbf{I} - \widehat{\mathbf{M}}\right)\mathbf{A}\right]^{-1} \quad (1)$$

ここで、**L**は非競争輸入型レオンチェフ逆行列、**I**は単位行列、**A**は投入係数行列、$\widehat{\mathbf{M}}$ は輸入係数行列を示している。このとき、訪日外国人による最終消費**f**に伴う直接間接的な産業への生産波及効果は下の(2)式で推計することができる。

$$\mathbf{q_1} = \mathbf{L} \times \mathbf{f} \quad (2)$$

さらに、本研究では所得波及効果という部分まで算出する(国土交通省、2015)。所得波及効果は下の(3)式を用いて算出する。

$$\mathbf{q_2} = \mathbf{L} \times \mathbf{C} \times \mathbf{V} \times \mathbf{L} \times \mathbf{f} \quad (3)$$

ここで、 **C**は家計消費性向列ベクトル、**V**は雇用者所得係数行ベクトルを示している。ここまでで、「ありシナリオ」、「なしシナリオ」それぞれにおいて、訪日外国人の消費が日本にもたらす経済面の直接生産波及効果・間接生産波及効果・所得波及効果を算出できる。

次に、推計した経済面の直接効果・間接効果・所得波及効果を得るために必要な経済活動がもたらす CO_2 排出量を算出する。これには国立環境研究所が作成・公開している 3EID(国立環境研究所、2002)の部門別の CO_2 排出係数原単位データを用いる 。この部門別の排出係数を経済面の直接生産波及効果・間接生産波及効果・所得波及効果に乗じることによって、訪日外国人の消費に伴う CO_2 排出量を推計した（式(4、5)参照)。

$$\mathbf{g_1} = \hat{\mathbf{e}} \times \mathbf{L} \times \mathbf{f} \quad (4)$$

$$\mathbf{g_2} = \hat{\mathbf{e}} \times \mathbf{L} \times \mathbf{C} \times \mathbf{V} \times \mathbf{L} \times \mathbf{f} \quad (5)$$

「ありシナリオ」、「なしシナリオ」それぞれにおける経済面（インバウンド収益）の直接・間接・所得波及効果、環境面（CO_2排出量）の直接・間接・所得波及効果が算出される。「なしシナリオ」のインバウンド収益・CO_2排出量から「ありシナリオ」のインバウンド収益・CO_2排出量を引いて出てくる差が、新型コロナウィルス流行によって生じた経済的損失であり、環境的便益であるといえる。これらを詳細に分析・比較することで、新型コロナウィルス流行がインバウンド市場にどのような経済的損失と環境的便益を与えたかを分析する。

3. 結果・考察

図1と2はそれぞれ両シナリオの差として推計された経済的損失・環境的便益を示している。コロナ流行による訪日外国人の減少が、インバウンド市場を通して日本全体に12.6兆円の損失額と、16,517kt-CO_2のCO_2排出の削減をもたらしたことがわった。

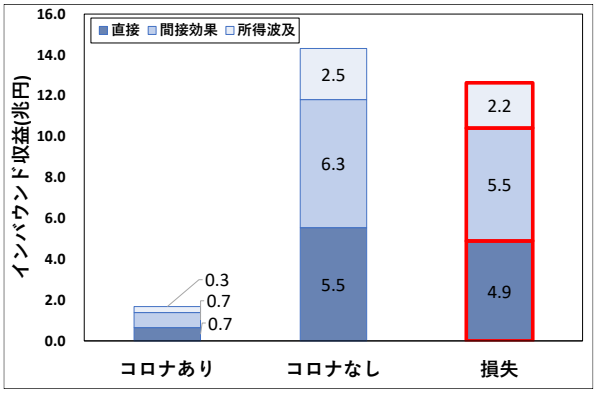


図1　各シナリオ別直接間接的インバウンド収益及び推計された経済的損失

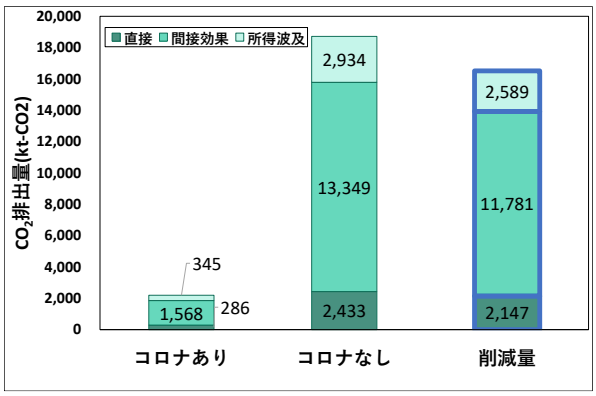


図2　各シナリオ別CO_2排出量及び推計された環境的便益

図3と4は経済的損失・環境的便益がそれぞれ大きかった上位10産業を示している。経済面では宿泊、飲食サービスが最も大きな損失を出している。また、4番目に損失が大きいのは化粧品・歯磨部門であることがわかった。これは、日本で化粧品・香水を大量に消費していた中国人訪日客が激減したことが原因である。環境面では、事業・自家発電の減少がCO2排出量の削減の大きな要因となっていた。追加的に計算したところ、失われた電力需要の約56%は宿泊・飲食サービスによるものであることがわかった。

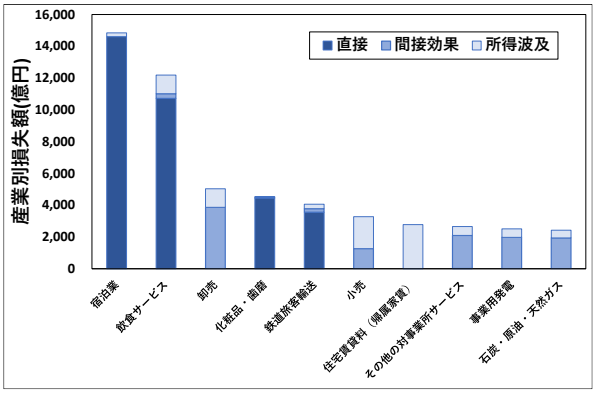


図3　産業別の損失額上位10部門

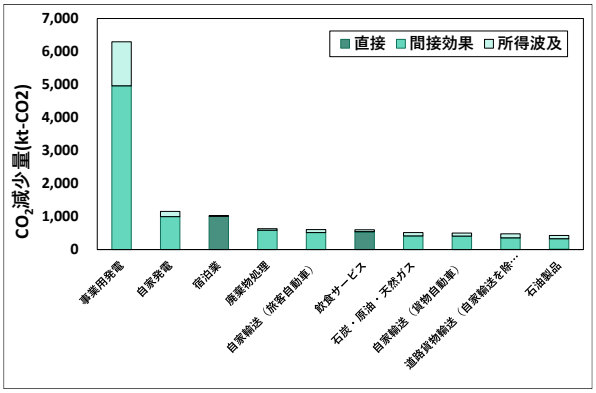


図4　産業別のCO_2減少量上位10部門

4. 参考文献

1) 国土交通省観光庁(2016), 明日の日本を支える観光ビジョン
2) JNTO 日本政府観光局(2021), 国籍/月別訪日外客数
3) 環境省(2021), 温室効果ガス排出・吸収量等の算定と報告～温室効果ガスインベントリ等関連情報～
4) 国土交通省観光庁, 訪日外国人の消費動向　訪日外国人消費動向調査及び分析2019年次報告書
5) 総務省(2019), 平成27年(2015年)産業連関表
6) 国土交通省観光庁(2015), 旅行・観光産業の経済効果に関する調査研究報告書
7) 国立環境研究所(2002), 産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）

抗体試薬製造におけるマウス腹水法と細胞培養法の環境影響評価

Environmental Impact Assessment of Mouse Ascites and Cell Culture Methods for Antibody Reagent Production

○菊地俊多*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Shunta Kikuchi,Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学
* g1862021@tcu.ac.jp

1. 背景

EU では 2023 年までに化粧品の為の動物実験の世界的禁止を目指す決議を採択[1)]している。実験動物の利用は製品開発における全体課題であり、全利用目的の 10.97%は医薬品生産である。

2. 研究目的

本研究では、抗フィブリン, モノクローナル抗体試薬製造に関する環境評価を、LCA 手法を用いて定量的に比較・評価した。試薬業界及び実験動物を使用する産業における脱動物化を推進する目的として、抗体試薬製造について環境へのインパクトを算出する。

3. 研究方法

3.1 評価対象

「A 製品」は、血液凝固に関わる繊維状因子であるフィブリンを認識するモノクローナル抗体である。機能単位を 20,000mg(検査 10~11 万回分)の抗体試薬製造とし、影響領域は、気候変動、水資源消費とする。製造プロセスの活動量は試薬製造メーカーから 1 次データを入手した。

3.2 評価範囲

図 1 にシステム境界を示す。細胞の培養工程から廃棄工程とし、マウスの飼育は 2 工程に分かれる。

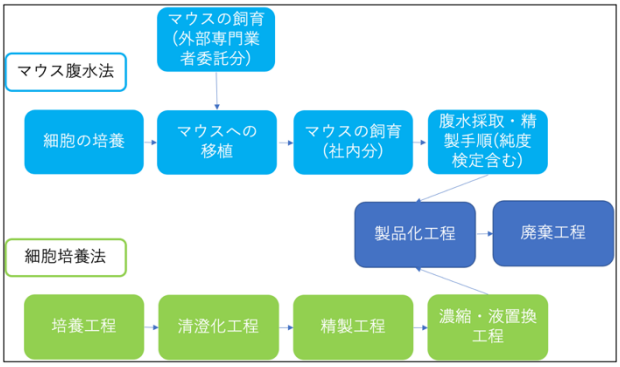


図 1 システム境界

3.3 算定手法

本研究での影響領域の算定には原単位法を使用し、活動量には前述のインベントリデータを用いた。原単位は金額ベースに 3EID(産業技術総合研究所)と IDEA(Invnentory Database for Lifecycle Analysis) Version2.0(産業技術総合研究所,以下 IDEA)を組み合わせて算出した。特性化係数には、Water Inventory DB(東京都市大学)と LIME2 を用いた。また、成分不明な溶媒の GHG 排出量には文献[2)]の CO_2Incin. kg CO_2 の値を採用している。

4. 結果

4.1 気候変動

抗体試薬製造における GHG 排出量の算定結果を図 2 に示す。細胞培養法の GHG 排出量は合計で 1.80.E+01t-CO_2eq で、マウス腹水法の合計 3.96.E+01t-CO_2eq と比較して GHG 排出量を半減するものと評価された。マウス腹水法はマウスを飼育してから抗体試薬の原料を製造するのに対し、細胞培養法は市販の培地から同量の抗体試薬の原料を製造でき、有効成分の生産性を向上できるためである。各工程における影響の内訳として、マウス腹水法ではマウスの飼育が購入前後で全体排出量の約 46%を占めた。これは飼料を 2 工程で 290kg 消費しているためである。一方、細胞培養法では、清澄化工程の負荷が相対的に大きく、廉価な濾過装置への切り替え等を行うことが CO2 排出量のさらなる抑制に寄与するものと期待される。

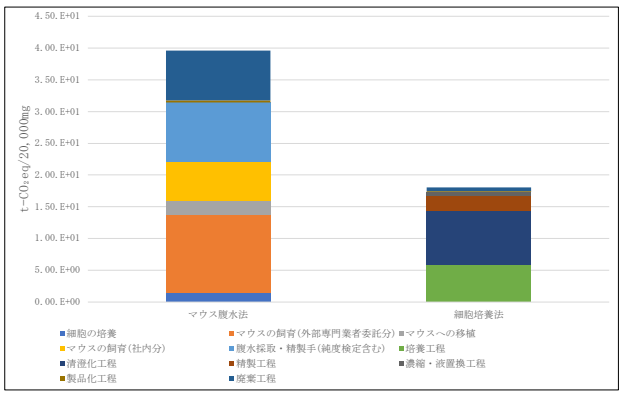


図 2 抗体試薬製造における GHG 排出量結果比較

4.2 水資源消費

抗体試薬製造における水資源消費量の算定結果を図3に示す。細胞培養法の水消費総量は1.48.E+03 ㎥であり、マウス腹水法の総量1.84.E+04 ㎥と比較して9割以上の水消費量を削減することが分かった。これは、マウス腹水法はマウスを出産から飼育するまでに給餌・摂水に大量な水を必要とするためである。

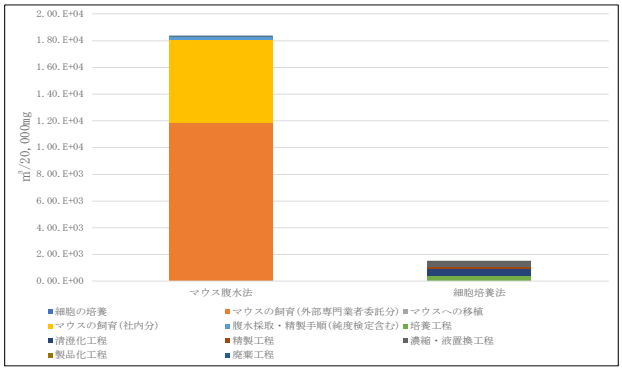


図3 抗体試薬製造における水資源消費量結果比較

5. 議論

本研究では、料金ベースに加えて物量ベースの算定も行った。GHG排出量の算定結果を図4に示す。脱動物化による排出量削減率は料金ベースとの差異は少ないが、全体GHG排出量が20%程度になった。これは純水の使用において、料金ベースでは上水道から価格換算するのに対し、IDEAには製品コードに純水が存在するためである。また、物量ベースでは作業用具に対応するIDEAの製品コードが存在せず、素材重量が製品重量として反映されているためである。

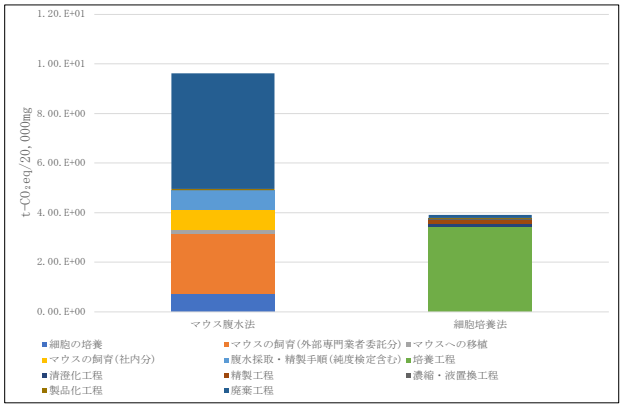


図4 抗体試薬製造における物量ベース算定でのGHG排出量結果比較

1次データを基に、両算定法に関して投入分のみ考慮したカテゴリ別に算定したものを図5に示す。物量ベース算定の試薬に関して、大量に溶媒を使用するマウス腹水法では影響が小さく、投入量が少ない細胞培養法では大きな変化は無かった。しかし、細胞培養法で投入量が多い作業用具の影響が小さく算出されていた。また、両製造法において物量ベース算定の全体GHG排出量が削減した分、電力使用の影響が相対的に大きくなっている。バイオ産業における専門性の高い試薬及び作業用具の評価が算定ベース毎のGHG排出量割合に波及していることが分かる。

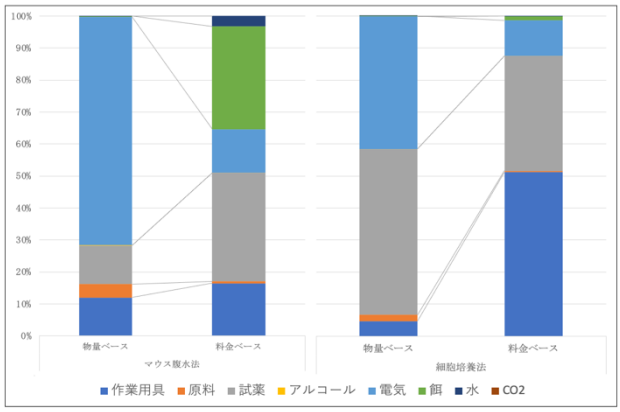


図5 抗体試薬製造におけるGHG排出量カテゴリ・算定ベース別結果比較

6. 結論

本研究では、マウス腹水法と細胞培養法を対象に抗体試薬製造における、GHG排出量と水資源消費量の評価を行った。料金ベース、物量ベースの算定双方で細胞培養法の方がマウス腹水法よりもGHG排出量が小さく、水資源消費量でも抗体試薬の製造における脱動物化は環境側面で推奨できることが分かった。検査1回当たりでは、GHG排出量：マ 0.38kg,細 0.17kg、水資源消費量：マ 175.02ℓ,細 14.10ℓであった。

また、1次データをカテゴリ別にした場合、採用した原単位の種類により影響が大きく変化したため、医療、製薬の環境評価に対応するデータベース拡充が求められる。

引用文献

1) EUROPEAN COMMISSION: ”Seventh Report on the Statistics on the Number of Animals used for Experimental and other Scientific Purposes in the Member States of the European Union”, (2013)

2) Michael J. Raymond et al., “LCA approach to the analysis of Solvent waste issues in the pharmaceutical industry”, Journal of Green Chemistry, ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY, (2010), p.1826-1834

モノクローナル抗体製造による環境影響と健康効果の包括的評価

Holistic assessment of monoclonal antibody production

○天沢逸里*[1)]、黒田裕章[1)]、岡村梢[1)]、Sara Badr[1)]、杉山弘和[1)]
Eri Amasawa, Hiroaki Kuroda, Kozue Okamura, Sara Badr, Hirokazu Sugiyama
1) 東京大学
* aamasawa@pse.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

医薬品は現代社会を根底から支えると同時に環境汚染の排出源であり、その環境影響は巡り巡って人間健康にも影響を及ぼす。医薬品の環境影響を LCA で把握することは国際ガイドラインにおいても重要視されているが[1)]、インベントリデータの欠如などから、既往研究は評価範囲や事例数の上で限定的である。例えば、20 の医薬品有効成分の cradle-to-gate LCA[2)]を発表した既往研究では、影響評価指標は温室効果ガス排出量(Greenhouse gas emissions; GHG) に留まる。医薬品が関連しうる重要な環境影響として、相反関係が懸念される人間健康への影響は評価事例がない。

医薬品のうちでも近年市場が急速に拡大しているのがバイオ医薬品である。バイオ医薬品の代表例であるモノクローナル抗体（monoclonal antibody; mAb）製剤は、ガンや慢性リウマチといった重篤な疾患の治療に用いられるほか、新型コロナウィルスの治療薬としても注目されている。mAb は多大な健康効果をもたらすと同時に、高額な薬価でも有名である。例えば mAb の一つであるオブジーボ®は、2018 年時点で 100 mg あたり 17 万-36 万円であった[3)]。薬を必要とする患者がアクセスできるようにするために、生産効率の向上が望まれるとともに、mAb がもたらす環境影響と健康効果との総合評価が必要である。

本研究では、mAb の環境影響と健康効果の包括的評価を目的に、mAb の培養工程に伴う環境影響と、治療がもたらす健康効果を比較した。比較評価は製造方式として４つのシナリオに対して行い、さらにそれぞれの環境影響と運転コストに対して感度分析をした。なお、本発表の成果は論文として発表している[4)]。

2. 方法

本研究は LCA から mAb 培養プロセスの環境影響を算出し、mAb を用いた治療により回避できる障害調整生命年 (Disability-Adjusted Life Year; DALY) から健康効果を定量化した。また、経済評価として LCA と同じシステム境界における運転費を算出した。

2.1 LCA

本 LCA の目的は mAb 製造による費用対効果―環境影響としてのコストと経済コスト対健康効果―を包括的に評価することである。mAb 製造は、上流と呼ばれる培養工程と、下流と呼ばれる精製工程に大きく分かれる。本 LCA は製造プロセス全体の中でも主要なコスト要因として知られる培養工程を対象とした。mAb の培養方式は、培地を供給し続ける Fed-Batch 方式が一般的だが、培地供給と mAb の抜き取りを連続的に行う Perfusion 方式も盛んに研究されている。装置にも、ステンレス製定置装置を用いる従来型のマルチユース技術 (MUT) のほか、培地ごとに樹脂製装置を使い捨てるシングルユース技術 (SUT) が実用化されている。本研究は**表1**に示す 4 つのシナリオを評価対象とした。**表1**が示すように、培養方式と培養装置の特徴により生産効率が異なり、年間培養回数が変わる。

機能単位は日本における抗体医薬品需要を満たすこととし、基準フローは mAb の一種であるニボルマブ（オブジーボ®）の 2018 年の使用量 37.6 kg-mAb とした。システム境界は培養工程の原材料調達から廃棄までを含めるが、細胞株の構築と不純物は省略した。環境影響評価には LIME2 を用い、15 の影響領域における分析に加え、人間健康の統合指標である DALY と単一指標の Eco-Index を算出した[5)]。経済性は、基準フローにおける運転費から評価した。

各製造シナリオの反応器の容量を求めるために、基準フローを満たし、DALY と運転費が最小となる反応器の容量を求める最適化問題を設定した。最適化問題は培養プロセスモデル[6)]を用いて解いた。

表 1 製造シナリオ

製造シナリオ	培養日数 (日 batch^{-1})	切替日数 (日 batch^{-1})	年間培養回数 (batch year^{-1})
FB/SUT	14	1	24
P/SUT	60	1	5
FB/MUT	14	7	17
P/MUT	60	7	5

FB: Fed-Batch; P: Perfusion; SUT: Single-use technology; MUT: Multi-use technology

2.2 費用対効果の感度分析

mAb 製造の環境影響と運転費の関係（i.e., 費用対効果）を改善するための施策を明らかにするために、培

養工程の設計変数を用いて感度分析を行った。数ある設計変数の中でも、細胞特性である最大倍加速度(μ_{max})と抗体生産速度 (Q_p)、そして電力原単位が大きく影響することが LCA から分かったため、それら 3 変数の費用対効果への影響を分析した。

3. 結果

3.1 mAb 製造の環境影響と健康効果

図1(a) に示すように、環境影響は最大で 1.6×10^{-2} DALYs $year^{-1}$ であったのに対し、抗体治療による健康効果（オブジーボ®換算）は 138×10^{3} DALYs $year^{-1}$ であり、mAb は少ない環境影響で多大な健康効果を生み出していることが示唆された。各製造シナリオにおいて、培養工程の攪拌や空調に関わる電力が 7 割-9 割を占めた。Eco-Index による評価では、人間健康からの寄与が 6 割を占めた。mAb 培養の環境影響は人間健康への被害が特に大きいと解釈できる一方で、人間健康は他の保護対象と比べて一番多くのカテゴリエンドポイントを集約するため、手法由来とも考えられる。

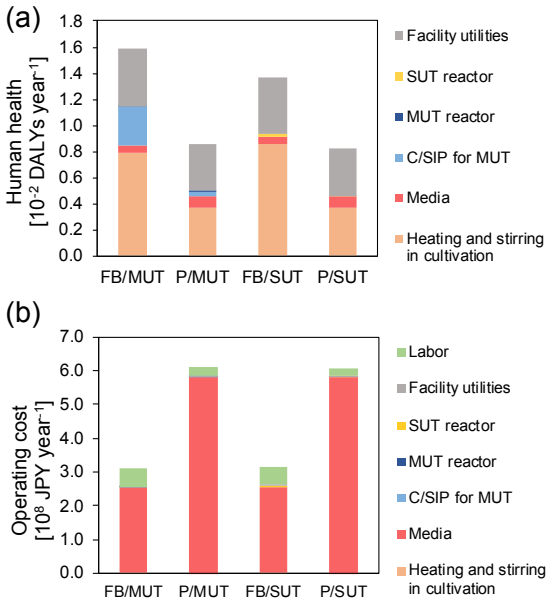


図 1 mAb 製造における(a)環境影響と(b)運転費（論文 [4] から抜粋）

3.2 運用コスト

全シナリオで培地原料費が約 9 割を占め、培地を多く消費する Perfusion 方式が Fed-Batch 方式の約 2 倍の運転費がかかることがわかった（**図1(b)**）。また、運転費と DALY 換算の環境影響を比較することで、製造方式間でのトレードオフが明らかになった。**図 1** に示すように、Perfusion 方式は健康被害が最小になる一方で、運転費は最大となること、また、FB/MUT は健康被害が最大となるが、運転費は最小になることが、それぞれ分かった。

さらに、培養装置よりも培養方式が環境影響と運転コストを決定づけることも分かる。Perfusion 方式は培地の消費量から運転コストがかさむが、生産効率の高さから環境影響は Fed-Bach 方式よりも少ない。培養装置では、MUT は反応器を再利用するための洗浄・滅菌作業が環境影響に寄与するが、その差は製造方式による差よりも小さい。

3.3 感度分析

感度分析の結果、μ_{max} や Q_p で表される細胞特性を向上することで、運転費と環境影響を大きく改善できることが明らかになった。さらに、全ての電力源を天然ガス由来に変えると、1%程度の運転費増加で、DALY 換算の環境影響は 50%以上削減できることがわかった。細胞特性の向上と電力源の切り替えを比較すると、Q_p の向上が費用対効果を一番高めることがわかった。

4. おわりに

mAb 製造による環境影響、mAb の治療効果、そして運転コストを 4 つの製造シナリオで包括的に定量評価することにより、mAb の持続可能な生産と消費に向けた指針を示すことができた。今後、精製工程や製剤化も含むサプライチェーン全体への展開や、実際のプロセス設計への応用を進めていくことが望まれる。

謝辞

本研究は、AMED JP20ae0101064、JP20ae0101058、JP17ae0101003 の支援を受けた。

引用文献

1) Jiménez-González C., Poechlauer P., Broxterman Q. B., Yang B.-S., Am Ende D., Baird J., Bertsch C., Hannah R. E., Dell'Orco P., Noorman H., et al.: J. Org. Process Res. Dev. 15, (2011), pp 900−911
2) Parvatker A. G., Tunceroglu H., Sherman J. D., Coish P., Anastas P., Zimmerman J. B., Eckelman M. J.: ACS Sustainable Chem. Eng. 7, (2019), pp 6580−6591
3) 小野薬品工業株式会社: "オプジーボの動向", (オンライン), 入手先 <https://www.ono.co.jp/sites/default/files/ja/ir/library/financial_results/presen/20210512_4.pdf>, (参照 2020-9-2)
4) Amasawa E., Kuoda H., Okamura K., Badr S., Sugiyama H.: ACS Sustainable Chem. Eng. 9 (42), (2021), pp 14012-14-21
5) Itsubo N., Inaba A.: JLCA Newsletter, Life-Cycle Assessment Society of Japan, (2012)
6) Badr S., Okamura K., Takahashi N., Ubbenjans V., Shirahata H., Sugiyama H.: Comput. Chem. Eng. 153, (2021), pp 107422

口頭発表セッション（一般）

[2-A1] 輸送

座長：尾下優子（東京大学）

2022年3月3日(木) 09:20 〜 10:40 A会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-A1-01] 日本におけるインフラを含めた長距離輸送機関の資源強度分析

*原口 直享[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1] （1. 立命館大学）

09:20 〜 09:40

[2-A1-02] ミャンマーにおける廃棄自動二輪車の推計及びコスト評価を通じた管理戦略の提言

*村上 原野[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1] （1. 立命館大学）

09:40 〜 10:00

[2-A1-03] 外航コンテナ船由来の CO_2排出量の変化要因分析

*下津浦 大賀[1]、加河 茂美[3]、中石 知晃[2] （1. 加河研究室/九州大学、2. 九州大学経済学府、3. 九州大学経済学研究院）

10:00 〜 10:20

[2-A1-04] 自車と後続車の走行に及ぼす影響を考慮した貨物自動車のエコドライブによる CO2削減効果の評価

*杉浦 史弥[1]、井原 智彦[1] （1. 東京大学大学院）

10:20 〜 10:40

©日本LCA学会

日本におけるインフラまで考慮した長距離輸送機関の資源強度

Resource intensity of long-distance transportation considering infrastructure: A case study in Japan

○原口直亨*[1)]、光斎翔貴[1)]、柏倉俊介[1)]、山末英嗣[1)]
Naotaka Haraguchi, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue
1）立命館大学
* rm0155hf@ed.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

経済発展に伴い都市開発が進み，様々な輸送機関が生活基盤の 1 つとして人々を支えてきた．現在も日本を含め多くの国で輸送システムの発展・維持のためインフラストラクチャー（以下インフラとする）整備が行われており，それに伴って多くの資源が投入されている (1).

大量の資源が投入されている輸送部門において，有限な資源を効率的に活用する循環型社会の形成が求められている (3)．効率的な資源利用形態を把握するためには，種々の輸送機関とそれに伴うインフラを統合した上で，ライフサイクルの視点から分析する必要がある．しかし，資源に着目して研究している既存研究の多くは，これらを別々に資源ストック量の観点から製造または整備段階を重点的に算出しており (4)，ライフサイクルの観点を踏まえた統合的な分析はなされていないのが現状である．

ライフサイクルの観点から使用される資源量を定量化するために本研究では，資材の採掘段階まで遡って資源使用量を包括的に評価する指標の一つである関与物質総量(Total Material Requirement, TMR)に注目した (5)．TMR は直接・間接の物質投入だけでなく，隠れたフローも評価することができる．本研究では，長距離輸送機関が充分に発達している日本を対象に，TMR を用いてライフサイクルの視点からインフラを含めた種々の長距離輸送機関における資源強度を分析した．

2. 研究手法

2.1 関与物質総量（TMR）

本研究では，採掘活動量を定量化できる指標として関与物質総量（TMR）を用いて，各輸送機関のインベントリデータを基に各輸送機関の 1 台当たりの TMR 値を算出した．各輸送機関に関して，製造段階，使用段階，メンテナンス段階，インフラ整備段階の 4 段階に分けそれぞれの計算を行った．
TMR は以下の式(1)より求められる．

$$T = \sum (k_i X_i) \qquad (1)$$

T : TMR [kg-TMR]
k_i: 物質 i における TMR 係数
X_i : 物質 i の使用量

2.2 資源強度

本研究では輸送機関の資源強度を「輸送機関が 1 kg を 1 m 運ぶ際の TMR」と定義した．本研究における資源強度は小さいほど環境負荷が小さい．人間 1 人の重量を 60 kg と仮定し，各輸送機関の平均乗車率から，その輸送機関の輸送量を推定した．各輸送機関の資源強度は式(2)より算出した．

$$Q = \frac{Q_{\mathrm{p}} + Q_{\mathrm{o}} + Q_{\mathrm{m}} + Q_i}{1000mK} \qquad (2)$$

Q: 1 kg を 1 m 運ぶ際の TMR[kg-TMR/kg/m]
Q_p : 製造段階の TMR 値[kg-TMR]
Q_o : 使用段階の TMR 値 [kg-TMR]
Q_m : メンテナンスの TMR 値 [kg-TMR]
Q_i : インフラの TMR 値 [kg-TMR]
m : 定員重量 [kg]
K : 生涯走行距離 [m]

2.3 対象とした輸送機関

本研究では，バスを含む自動車，鉄道，航空，海上の 4 種類の輸送手段を対象とした．それぞれの輸送機関の概要を表 1 に示す．メンテナンスに関しては，メンテナンスの際に交換した部品などのリサイクルは考えないものとし，交換後は破棄すると仮定した．

表 1　輸送機関の詳細

輸送手段	輸送機関	燃料
自動車	ガソリン車	ガソリン
	ハイブリッド車	ガソリン
	電気自動車	電気
	燃料電池自動車	水素
	バス	ディーゼル
鉄道	新幹線	電気
航空	航空機（Al 主体）	ジェット燃料
	航空機（CFRP 主体）	ジェット燃料
海上	旅客フェリー	A,B,C 重油

2.4 対象となるインフラストラクチャー

本研究では，考慮するインフラを役割別に分類するため，大きく運用段階と燃料供給段階の 2 段階で考慮した．まず運用段階においてより詳細な分類をするため，物流業界で用いられている「node」と「link」を参考にした．node とは，輸送機関が停まるまたは乗客が乗り降りする場所と定義する．link とは，node と node を結ぶ輸送機関の通り道と定義する．node と link の詳細については表 2 に示す．

表 2　運用段階の詳細分類

輸送機関	node	link	link 補助
ガソリン車	駐車場	道路	橋 トンネル 標識 信号
ハイブリッド車			
電気自動車			
燃料電池車			
バス			
新幹線	駅	線路	橋 トンネル 信号
航空機	空港		
旅客フェリー	港		

次に燃料供給段階においては，燃料を輸送機関に供給する供給設備と燃料を貯蓄するタンクの 2 つに分類した．鉄道に関して，燃料を貯蓄する施設を独自に保有しているか不明なためこれは考慮しないこととした．詳細な情報については表 3 に示す．

表 3 燃料供給段階の詳細分類

輸送機関	供給設備	タンク
ガソリン車	ガソリンスタンド	地下タンク
ハイブリッド車		
電気自動車	電気ステーション	
燃料電池車	水素ステーション	圧縮機
バス	ガソリンスタンド	地下タンク
新幹線	架線	
航空機	地下パイプ	タンク
旅客フェリー	地下パイプ	タンク

3. 結果と考察

各輸送機関において対応するインフラの資源使用量を図 1 に示す．乗用車のインフラにおける link の値が支配的な結果となった．日本全土の道路を考慮し，台数で加重平均したことに起因すると考えられる．

輸送機関別でみると，それぞれで影響しているものが異なった．自動車に関しては道路を示す link の影響がほとんどであった一方，新幹線に関しては，山や川を越えるために多くの橋やトンネルが整備されているため link 補助の影響を大きく受けることが分かった．

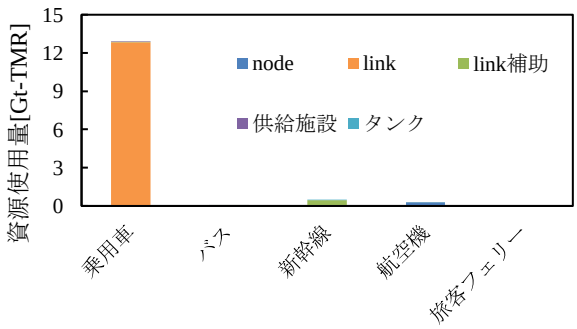


図 1 インフラにおける資源使用量

次にインフラを加味した各輸送機関の資源強度の結果を図 2 に示す．新幹線が最も低い資源強度を示し，バス，航空機，ガソリン車，燃料電池自動車，ハイブリッド車，旅客フェリー，電気自動車と順に値が大きくなる．

各輸送機関別にみると，乗用車と新幹線では資源強度においてインフラの影響は無視できないことが分かった．一方で，バス，航空機，旅客フェリーに関しては，輸送機関の使用段階が資源強度において支配的であることがわかる．これは，乗用車や新幹線に比べて燃費が悪く，燃料の生涯使用量が多くなることに起因すると考えられる．

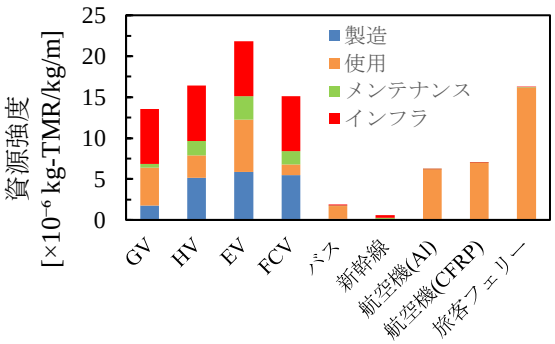


図 2 インフラも含めた資源強度

4. まとめと今後の展望

本研究では，インフラも含めた各長距離輸送機関の資源強度を評価した．比較分析を通して，資源強度において新幹線が最も低く，電気自動車が最も高い輸送機関であることが分かった．一度に多くの人を運び，生涯距離の長い航空機と旅客フェリーは使用段階が輸送機関全体の資源強度に大きく影響した．また，乗用車と新幹線でのインフラ製造段階は無視できない結果となった．今後，各輸送機関の寿命や水素やバイオマスのような次世代燃料などより社会に即した形で資源強度を議論する必要がある．また，国により輸送システムは異なるため資源強度にも影響すると考えられる．資源を効率的に利用する上で，各国の資源強度を分析することは重要であると考える．

5. 引用文献

1). Greer　F., Rakas　J.,Horvath　A. Airports and environmental sustainability: a comprehensive review. s.l. : Environ. Res. Lett.15(10), 2020.
2.) 経済産業省資源エネルギー庁. エネルギー白書. 2020.
3). Ghisellini P., Cialani C.,Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. s.l. : Journal of cleaner production 114, pp.11-32 , 2016.
4). Mhatre P., Gedam V.,Unnikrishnan S. Material circularity potential for construction materials – The case of transportation infrastructure in India. s.l. : Resources Policy 74, 2020

ミャンマーにおける廃棄自動二輪車の推計及びコスト評価を通じた管理戦略の提言

Techno-economic assessment of recycling obsolete two-wheelers in Myanmar

○村上原野*[1)]、光斎翔貴[1)]、柏倉俊介[1)]、山末英嗣[1)]

Genya Muarkami, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Ymasue

1) 立命館大学

* rm0139kf@ed.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

ミャンマーにおいて、人口の急増、ライフスタイルの変化などにより、自動二輪車の需要が高まってきている[1)]。このような需要の増加はアジア諸国からの中古自動二輪車の輸出入量の増加を誘発する。2019 年現在、ミャンマー国内で生産されている自動二輪車に関する報告はなく、他国からの輸入に頼っている現状がある[2)]。中古製品の寿命は新しい製品より短いため、ミャンマーで廃棄される使用済み自動二輪車の数は短期的に増加することが予想され、急速な対応が必要であると考えられる。

既存研究において、様々な製品に対して廃棄物推定モデルの開発が行われた[3)4)]。その研究の多くでは、製品の廃棄予測を行うために、ポピュレーションバランスモデルなどのモデルが使用されているが、既存研究で用いられているモデルは異なる世代の所有者を考慮していない。ミャンマーのような中古製品を多く輸入している国で廃棄予測を行う上で，中古製品の短くなった寿命を考慮するために、既存のモデルを拡張する必要がある。

また、コスト評価を通じて、ミャンマーで廃棄された自動二輪車の適切な管理戦略を議論することも大切である。使用済み自動二輪車の廃棄量推計は、廃棄物処理におけるコストと収益の計算に使用することが可能であり、適切な管理戦略の設計に貢献することが期待される。

そこで、本研究では、中古品として使用し始めるため寿命が短くなっていることを考慮した上で、ミャンマーにおける 2040 年までの自動二輪車の廃棄台数予測を行った。そして、ミャンマーで廃棄された使用済み自動二輪車に対して、コスト評価を通じた管理戦略の提言を行った。

2. 研究手法

2.1 東南アジアの自動二輪車フロー

ミャンマーに輸入されている自動二輪車の台数データは UN comtrade[5)]を用いて推計した。このデータは中古新車の区別はされていない。将来輸入される自動二輪車の予測に関しては、2014 年から 2020 年の増加量の傾きで 2021 以降も増加すると仮定して将来の輸入量を算出した。

2.2 寿命分析

本研究では、自動二輪車の平均寿命は、既存研究[6)]から 20.3 年とし、一人目の平均使用年数は 12.1 年、二人目は 8.2 年とした。ミャンマーに入ってきた段階での平均残余寿命は、平均寿命(20.3 年)から各国で新車として使用された年数を引いた年数になる。

2.3 廃棄台数の推計

廃棄台数を予測するためには、使用年数分布を把握しなくてはならない。使用年数には様々な定義があり、本研究においては「製品の出荷時点から最終保有者が使用済み製品として排出する時点までの期間」とした。推計方法には，小口らの推計方法を参考に行った[7)]。

推計に使用したワイブル分布関数は，式(1)で表される。

$$W(y) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{y}{\bar{y}}\right)b \times \{\Gamma(1+\frac{1}{b})\}^b\right] = 1 - R(y) \quad (1)$$

$\bar{y}$は平均使用年数、b は形状パラメータ。$R(y)$は生産から y 年経過した自動二輪車の残存率である。

自動二輪車の廃棄台数は、田崎らによって提案されたポピュレーションバランスモデルを用いて算出した[8)]。ポピュレーションバランスモデルは、保有台数 N、出荷台数 P、廃棄台数 W の関係より表され式(2)に示す。

$$N_t - N_{t-1} = P_t - W_t \quad (2)$$

ポピュレーションバランスモデルで推計した出荷台数より、次年の廃棄台数の予測が可能になる。このようにして、廃棄台数と出荷台数を各年毎に順番に繰り返し求めることにより、将来の廃棄台数の推計を行った。

この調査では、他の国からミャンマーに輸入されたすべての二輪車がそれぞれ 1 人目、2 人目、3 人目の所有者として使用されると仮定した 3 つのシナリオを使用する。

3. 結果

ミャンマーにおける自動二輪車の廃棄台数予測を図 1 に示す。グラフの結果から、3 つのシナリオにおいて、ミャンマーで廃棄された自動二輪車の数は、年々増加すると予想される。

また、3 つのシナリオに基づくと、ミャンマーで廃棄され

る自動二輪車の数は灰色の範囲内であり、この結果の信頼性の誤差範囲は±41%である。この誤差範囲は、輸入された自動二輪車の所有者の世代が異なると、廃棄予測の値に大きな影響を与えることを示している。例えば、2040 年において、「Import(3rd)」のシナリオでの廃棄台数（1,784,000 台）は、「Import(1st)」のシナリオでの廃棄台数（742,000 台）に比べて 2.4 倍になることが予測される。

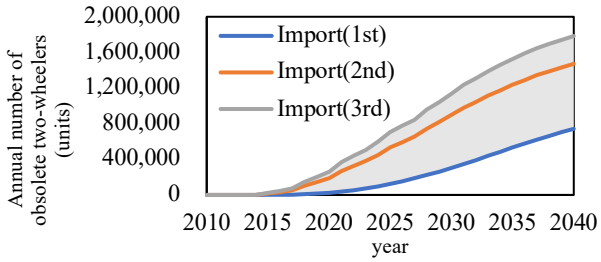


図１　ミャンマーにおける使用済み自動二輪車の廃棄台数予測

4.　考察

３つのシナリオにおける、ミャンマーで廃棄された自動二輪車の廃棄物処理におけるコストと収益を算出した結果を図 2 に示す。

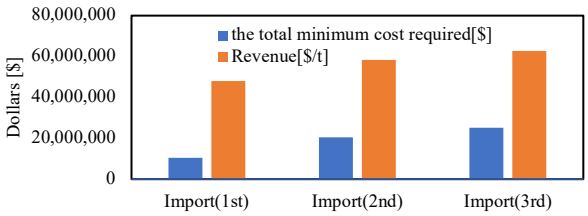


図２　ミャンマーで廃棄された自動二輪車の廃棄物処理におけるコストと収益

これらの結果に基づいて、本研究では収集率の影響を評価した。本研究における収集率とは、年間に廃棄された廃棄物のうち、適切に処理された廃棄物の割合である。各シナリオの廃棄量に対して経済的利益を生み出すには、それぞれ少なくとも 21.4%(Import 1st)、34.2%(Import 2nd)、38.9%(Import 3rd)を収集する必要がある。東アジアにおける回収率は 25%に近いが、ミャンマーなどの中央アジアと南アジアではまだ 0%である [9]。

ミャンマーの回収率が低い理由として、廃棄物回収のシステムが確立されていないことが挙げられる。管理システムの例として、日本では、自動車リサイクルについては購入者が必要な資金を拠出し、生産者が責任をもって有害物質を回収する等の取組みを実施している [10]。ミャンマーにおいても、こうした「生産者責任」として、適正な処理の在り方、適正な処理を推進していく方策を検討していく必要があると考えられる。また、廃棄予測の不確実性が大きいことから、リサイクル会社の新規参入のリスクも大きいこともあり、生産者が責任をもって使用済みバイクを回収することが重要である。

5.　結言

本研究ではミャンマーで廃棄される自動二輪車の廃棄台数予測、またその廃棄物に対するコスト評価を通じた処理戦略の提言を行った。発表では、かつて行ったカンボジアの分析結果との比較を報告する

6.　引用文献

1) S. Takahashi, T. M. Nguyen, C. Takayanagi, G. Suzuki, T. H. Le, H. Matsukami, V. Pham, T. Kunisue and S. Tanabe, "PCBs, PBDEs and dioxin-related compounds in floor dust from an informal end-of-life vehicle recycling site in northern Vietnam: contamination levels and implications for human exposure,," Journal of Material Cycles and Waste Management October 2017, Volume 19, Issue 4, pp 1333–1341, 2017.
2) E. Takinami, "2019 Myanmar Motorcycle Industry Report - Possibility of deregulation of driving in Yangon and potential of Japanese manufacturers-," Mynamr Survey Reserch, 22 42 2019. [Online].
3) S. Kim, M. Oguchi, A. Yoshida and A. Terazono, "Estimating the amount of WEEE generated in South Korea by using the population balance model," Waste Management, 33 (2), pp.474-483, 2013.
4) X. Y. Guo and K. Yan, "Estimation of obsolete cellular phones generation: A case study of China," Science of the Total Environment, 575, pp.321-329, 2017.
5) UN comtrade https://comtrade.un.org/(2020-5-21)
6) D. Kurogi, S. Kosai, G. Murakami, L. Phong, N. Quang, T. Huy and E. Ymasue, "Estimating the generation of recycled metals from obsolete motorcycles in Vietnam for ELV management," Journal of Material Cycles and Waste Management
7) 小口正弘，亀屋隆志，田崎智宏，玉井伸明，谷川昇: 廃棄物学会論文誌,17(1),(2006),pp.5
8) 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
9) H. Arduin. R, Grimaud. G, M. Leal. J, Pompidou.S, Charbuillet. C, Laratte.B, Alix. R and Perry. N, "Influence of scope definition in recycling rate calculation for European e-waste extended producer responsibility," Waste Management Volume 84, Pages 256-268 , 2019.
10) 株式会社 NTT データ経営研究所，「質の高いインフラシステム海外展開促進事業」ミャンマー国における自動車リサイクル事業の展開可能性調査

外航コンテナ船由来の CO_2 排出量の変化要因分析

Factor Decomposition Analysis of Changes in CO_2 Emissions from Container Shipping

○下津浦大賀*[1)]、加河茂美[2)]、中石知晃[3)]
Taiga Shimotsuura, Shigemi Kagawa, Tomoaki Nakaishi
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学経済学研究院, 3) 九州大学経済学府
* shimotsura.taiga.359@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

1.1 国際海運の経済的な重要性の高まり

現在、重量ベースでみると世界の貿易の大半は海上輸送によりまかなわれており、グローバル化に伴い、海上輸送の経済的な重要性は増す一方である。船での輸送と聞くと、自動車輸送や航空輸送に比べて単位輸送あたりの環境負荷が小さいと言われるが、国際海運からの CO_2 排出量は年々増加傾向にあり、International Maritime Organization (IMO) によると、2050 年には 2008 年の約 90~130%に増加すると予想される[1)]。また、世界全体の CO_2 排出量に占める国際海運由来の CO_2 排出量は約 2%程度で推移しており、国際海運由来の環境負荷は決して小さいものではない。これほど多くの CO_2 排出量をもつ国際海運は、その重量等の理由で航空やそのほかの輸送手段に代替することが難しく、国際海運自体の CO_2 排出量削減が急務となっている。

1.2 国際海運の温室効果ガス排出規制

現在、国際海運由来の CO_2 排出量に対する規制はなく、IMO により出された、2050 年に 2008 年比で総 CO_2 排出量を 50%削減するという温室効果ガス削減目標のみである。この削減目標も 2018 年に定められたものであり、この削減目標に向けた具体的な規制及び政策はまだ策定されていない。そこで、本研究は IHS Markit 社の提供する Seaweb 及び Seaweb Movements データ[2)]を用いてミクロの船舶データの作成を試み、国際海運の中で最も燃料消費量の多いコンテナ船の実際の輸送活動データからボトムアップ的に CO_2 排出量を推計し、その変化要因を特定する。また、国際海運由来の温室効果ガス削減目標を達成するために鍵となる要因の特定と必要な政策について分析し、議論する。

2. 研究方法

2.1 CO_2 排出量の推計

鈴木 (2009)[3)]の燃料推計式を用いて(1)式のように各コンテナ船の単位距離当たりの燃料消費量を推計し、その原単位に渡航履歴から得た港間の距離をかけ合わせることで、燃料消費量を推計する。

$$F = k_0 \cdot [DSP - (1 - k_1 \cdot LF) \cdot DWT] \cdot DSP^{-\frac{1}{3}} \cdot V^2 \quad (1)$$

ここで、F（Fuel）は単位距離あたりの燃料消費量（kg/km）を表し、DSP（Full Load Displacement）は船舶の満載排水量（t）、DWT（Deadweight Tonnage）は船舶の載貨重量トン（t）、LF（Load Factor）は TEU 基準の消席率、V（Velocity）は航行速度（km/h）である。また、k_0及びk_1は鈴木 (2009)によって推計されたパラメーターであり、それぞれk_0=6.87×10^{-5}、k_1=0.65 である。

2.2 コンテナ船の CO_2 排出量の要因分解分析

Tian *et al.* (2021)[4)]の要因分解式を参考に要因分解分析を行う。本研究は、(2)式のようにコンテナ船由来の CO_2 排出量を距離、生産性、燃料強度の 3 要因に分解し、CO_2 排出量と各要因の変化を分析する。

$$CO_{2i}^T = D_i^T \times \frac{K_i^T}{D_i^T} \times \frac{CO_{2i}^T}{K_i^T} = D_i^T \times P_i^T \times CI_i^T \quad (2)$$

ここで、i はコンテナ船のオペレーション会社を、T は年を表す添字である。CO_2 は CO_2 排出量を表し、D は航行距離（kn）、K は最大輸送活動量（ton-mile）、P は生産性、CI は炭素強度を表す。

2.3 Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI)

本研究では、LMDI 法[5)]を用いて、要因分解分析で分解した 3 要因が CO_2 排出量のどれほどの変化に寄与したかを(3)式のように分析する。

$$\Delta CO_{2i} = CO_{2i}^T - CO_{2i}^0 = \sum \frac{CO_{2i}^T - CO_{2i}^0}{\ln CO_{2i}^T - \ln CO_{2i}^0} \ln\left(\frac{D_i^T}{D_i^0}\right) + \sum \frac{CO_{2i}^T - CO_{2i}^0}{\ln CO_{2i}^T - \ln CO_{2i}^0} \ln\left(\frac{P_i^T}{P_i^0}\right) + \sum \frac{CO_{2i}^T - CO_{2i}^0}{\ln CO_{2i}^T - \ln CO_{2i}^0} \ln\left(\frac{CI_i^T}{CI_i^0}\right) \quad (3)$$

以上のように、要因分解分析と LMDI 法を組み合わせることで、コンテナ船の CO_2 排出量削減の鍵となる要因の抽出を行う。

3. データ

本研究では、船舶のデータに関しては Seaweb 及び Seaweb Movements のデータを使用し、CO_2 排出原単位

のデータに関しては、Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)のデータ [6]を使用した。

また、本研究では主要なコンテナ船のオペレーター会社に対して分析を行う。研究対象期間としては、IMOが温室効果ガス削減目標を出した 2018 年から 2020 年とする。本要旨では、そのうち日本最大（世界第 6 位）のコンテナ船オペレーター会社である Ocean Network Express (ONE) 社に対する結果と考察のみを記載する。

4. 結果

4.1 CO_2 排出量推計の結果

図 1 は ONE 社のコンテナ船由来の CO_2 排出量の推計結果の推移を示している。図 1 より、2018 年から 2020 年の ONE 社の CO_2 排出量は約 10Mt-CO_2 程度で推移した。また、2018 年から 2020 年にかけて約 0.5Mt-CO_2 増加し、2019 年から 2020 年にかけては COVID-19 の影響で約 0.2Mt-CO_2 減少したことが分かる。

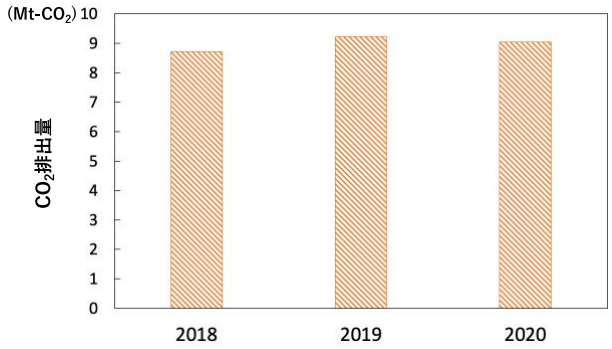


図 1. ONE 社のコンテナ船由来の CO_2 排出量の推移

4.2 要因分解分析（LMDI）による分析結果

図 2 は CO_2 排出量と分解された各要因の 2018 年を基準とした変化率を示している。また、図 3 は LMDI 法による各要因の CO_2 排出量の変化に対する寄与度の推移を示している。図 2 より、航行距離及び生産性は 2019 年には増加したが、2020 年には減少したことがわかる。燃料強度に関しては、2018 年から 2020 年にかけて減少を続け、合計約 2%減少したことがわかる。

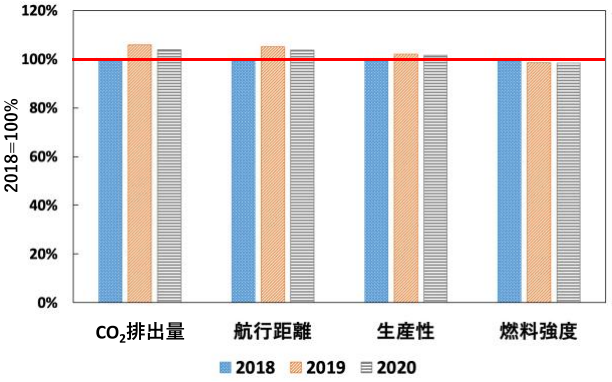


図 2. 2018 年を基準とした各要因の経年変化率

図 3 より、ONE 社の 2018-2020 年の距離の変化は CO_2 排出量の増加に寄与し、その寄与度は最大であった。生産性の増加は CO_2 排出量の増加に寄与し、燃料強度の減少は CO_2 排出量の減少に寄与したことが分かる。2019-2020 年では、距離、生産性、燃料強度の 3 要因全てが CO_2 排出量の減少に寄与したことが分かる。

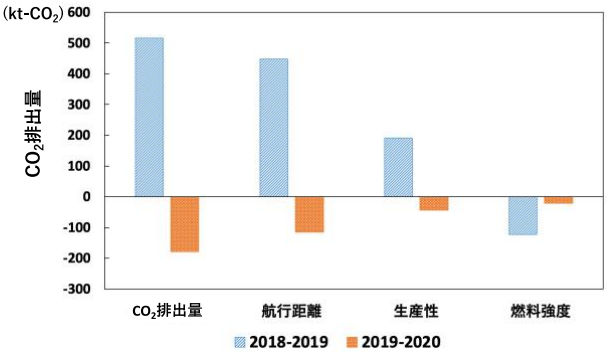


図 3. LMDI による分析の結果

5. 結論

CO_2 排出量の変化に対する距離の寄与度が最大であることから、今後コンテナ船由来の CO_2 排出量を削減するためには、航行距離を短くすることが重要である。従って、より大きな船舶を最大限に活用し、航行回数を減らすべきだと考える。

本会では、主要なコンテナ船オペレーター会社（10 社）の 2018 年から 2020 年の CO_2 排出量推計し、比較する。また、要因分解分析を行った結果の比較を行い、それぞれの会社に対し適切な脱炭素化政策について発表を行う。

6. 引用文献

1) International Maritime Organization (IMO): “Forth IMO Greenhouse Gas Study”, (2020)
2) IHS Markit: Seaweb, Seaweb Movements, (2021)
3) 鈴木武: 国土技術政策総合研究所資料, 494, (2009), pp.2-5.
4) T. Goh, S. Zhong, B. W. Ang, B. Su, S. H. Ng, K. Chai: Energy Policy, 154, (2021), 112
5) B. W. Ang: Energy Policy, 33, (2005), pp.867-871.
6) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): “IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, Institute for Global Environmental Strategies (IGES)”, (2006)

自車と後続車の走行に及ぼす影響を考慮した
貨物自動車のエコドライブによるCO_2削減効果の評価

Evaluation of CO_2 reduction effect by eco-driving with freight vehicles considering the impact on driving of preceding vehicles and following vehicles

○杉浦史弥*[1)]、井原智彦[1)]
Fumiya Sugiura, Tomohiko Ihara
1) 東京大学大学院
* 4018053022@edu.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

自動車の利用に伴う環境負荷は非常に大きく、国内のCO_2排出量の約17%を運輸部門による排出が占めている[1)]。自動車の環境負荷低減に向けた方策としてこれまでは車両の技術開発などのハード面からの取り組みが重点的に行われてきたが、近年はエコドライブをはじめとしたソフト面での取り組みが注目されている。現段階では一般の運転者にエコドライブの実施を奨励する取り組みはほとんど行われていないが、一方で一部を対象としたものは既に進められている。東京都トラック協会は2006年からグリーン・エコプロジェクト[2)]において貨物運送事業者を対象にエコドライブ活動を推進する取り組みを行なっており、現在のところ都内の貨物自動車の約20%がエコドライブを実施している。取り組みの過程で、間地ら[3)]は貨物自動車でのエコドライブの実施が燃料消費量と交通事故リスクを低減させることを実測データから明らかにした。

また、加藤ら[4)]はエコドライブの効果は実施する車両だけでなく周囲の車両にも波及し燃料消費量を低減することをシミュレーションによって明らかにした。一方で、こういった研究は普通乗用車を主眼としたものが主であり、貨物自動車での実施を想定した研究は少ない。そこで本研究では貨物自動車でのエコドライブ実施が自車と後続車のCO_2排出量に及ぼす影響を交通流シミュレーションによって明らかにする。

2. 研究手法

2.1 交通流シミュレータの選択

本研究ではドイツ航空宇宙センター（DLR）開発の交通流シミュレータSUMO(Simulation of Urban MObility)を用いる。SUMOは車両や運転者の特性を詳細に定義することができ、シミュレーション結果の出力方法も多様である。加えて、オープンソースであることから他のシミュレータと比較してユーザーによる改良が盛んに行われており、使用している先行研究も非常に多い。

2.2 道路ネットワークの定義

都内において、日常的に貨物自動車の通行が一定程度あり、道路交通センサス[5)]の詳細なデータが存在する道路から検討した。そのうえで、交通容量がエコドライブの効果に及ぼす影響を評価するために片側1車線の道路と片側2車線以上の道路をシミュレーションの対象とし、一般国道16号町田市相原町付近と環状7号線北区足立区境付近を選定した。各地点の地図データをOpenStreetMap[6)]から地図データ編集ソフトのNETEDITにインポートし、シミュレーション時に投入する全ての車両が対象の道路を走行するように一部の道路を削除することで直線6 kmとそれに直結した道路から構成される図1、2の道路ネットワークを作成した。

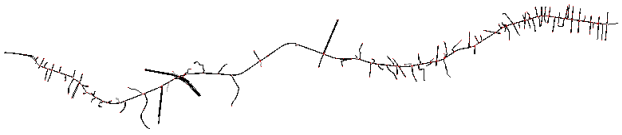


図1 片側一車線の道路ネットワーク



図2 片側二車線以上の道路ネットワーク

2.3 車両の定義

エコドライブの定義については、津川らをはじめとした先行研究[7)]を参考に①加速度の抑制②最高速度の抑制の2点に絞った。具体的な数値はそれらに加えてエコドライブ普及連絡会が発表しているエコドライブのすすめ[8)]を参考に表1のように設定した。車両重量や寸法はトヨタ自動車のカローラ、いすゞ自動車のフォワード、ギガのものを使用した[9)10)]。

表1 加速度と最高速度の定義

	加速度	最高速度
通常走行	2.6 m/s²	22.2 m/s (79.9 km/h)
エコドライブ	1.1 m/s²	16.6 m/s (59.8 km/h)

2.4 投入台数の設定

混雑度がエコドライブの効果に及ぼす影響を評価するため、道路交通センサス[5]の各地点における24時間自動車類交通量から1時間当たりの交通量が最大、最小となる時間帯のデータをもとにして投入台数を表2のように決定した。また、全車両のうち大型車が占める割合は実測データから20%とした。その中で、日本自動車工業会による運輸事業者のトラック保有状況のデータ[11]から4トンクラスと10トンクラスの車両を1:1で投入することとした。

金成らの研究[12]においてエコドライブの混入率によっては周囲の車両の燃費が悪化することが示唆されている。それを踏まえ、現在東京都内の貨物自動車の約20%がエコドライブを実施しているという事実をもとにエコドライブを実施する貨物自動車の割合が0%、20%、100%となる3つの場合を想定し、表3のようにそれぞれをシナリオA、B、Cとした。

表2 各道路ネットワークへの投入台数

片側1車線		片側2車線以上	
非混雑時	混雑時	非混雑時	混雑時
375台/h	1500台/h	750台/h	3600台/h

表3 エコドライブ実施率によるシナリオ分け

0%	シナリオA
20%	シナリオB
100%	シナリオC

2.5 シミュレーションのモデル

タイムステップは1ステップ1秒であり、シミュレーション当たり3,600ステップとした。Pythonのスクリプトを用いてランダムに作成したルートを各車両に与え、一定の間隔で道路ネットワーク上に投入されるようにした。

CO_2排出量はINFRASによって作成されているHBEFAv3[13](The Handbook Emission Factors for Road Transport)を用いたモデルに基づいて算出される。

3. 結果

結果をSupporting Informationに示す。

3.1 貨物自動車のCO_2排出量

図S1において、各シナリオの貨物自動車1台当たりのCO_2排出量を比較する。片側1車線の道路においては、シナリオBのエコドライブ実施車両はシナリオAと比較すると混雑状況に関わらずCO_2排出量が約30%減少した。一方で通常走行車両では約5%増加した。シナリオCのエコドライブ実施車両はAの通常走行車両よりCO_2排出量が約10%少なかったものの、Bのエコドライブ実施車両よりも約15%増加した。

片側2車線以上の道路においては、混雑状況に関わらずシナリオBの通常走行車両のCO_2排出量はAと比較して約2%減少した。一方で混雑時ではエコドライブ実施車両CO_2排出量が通常走行車両を約2%上回った。シナリオCのエコドライブ実施車両のCO_2排出量は混雑状況に関わらず最も少なかった。

3.2 普通乗用車のCO_2排出量

図S2でエコドライブを実施しなかった普通乗用車について見ると、非混雑時の片側2車線の場合に限っては実施率が高くなるほど1台当たりのCO_2排出量は少なくなり、シナリオAからCで約3%減少した。一方で、それ以外のすべての場合でCO_2排出量が増加し、混雑時の片側2車線以上の道路ではシナリオCはAと比べ約5%増加した。

3.3 総CO_2排出量

図S3を見ると、エコドライブの実施率が高まるほど総CO_2排出量は減少している。一方でこれはエコドライブを実施した貨物自動車での減少によるものであり、前節で指摘したようにエコドライブを実施しない普通車のCO_2排出量は減少していない。

3.4 旅行速度

図S4で旅行速度の変化を見てみると、混雑時の速度低下が著しく、片側1車線道路の場合でシナリオAからCで約6%の低下がみられた。一方で非混雑時の速度の変動は非常に小さく、片側2車線以上の道路ではシナリオAからCの間で約1%の低下にとどまった。

4. 考察・今後の課題

エコドライブの実施が自車や後続車に及ぼす影響が混雑度や交通容量に応じて変化することが示唆された。金成らの研究[12]において、加速度や最高速度の抑制はCO_2排出量の削減に効果的である一方で旅行速度の著しい低下は負の影響を及ぼすことが指摘されている 。本研究においても、交通容量に関わらず混雑時にエコドライブの実施率が高まると旅行時間が著しく低下しCO_2排出量が増加している。エコドライブ実施車両の混入が通常走行の普通車のCO_2排出量を低減したのは非混雑時の片側2車線以上の道路のみであった。この条件では交通容量の大きさと交通量の少なさから十分に車間距離を維持できたために加減速の回数が減少し、旅行速度低下が緩やかになったと考えられる。反対に片側1車線の道路においてシナリオCのエコドライブ実施車両のCO_2排出量がBのものを上回った理由としては、車線数の都合により追い越しをおこなえない状況で異なる加速度や巡航速度の車両の混入率が高まるにつれて加減速の回数が増加し、交通の流れが悪化したと推察される。

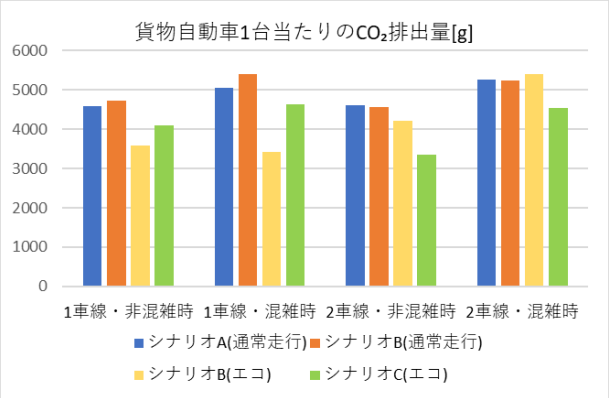
本研究でCO_2排出量の算定に使用したHBEFAベースのモデルは対象の車両の挙動から計算を行うものであるため、道路の勾配や、前方の車両との車間距離に応じた空気抵抗の変化が考慮できていない。より現実に近い結果を得るためにはモデルの選定や改良が必要であると考えられる。また、道路ネットワークにおいては信号の系統制御が行われておらず実際よりも停止の機会が多くなっていると考えられ、シミュレーション環境の正確さにも改善の余地があるといえる。

5. 引用文献

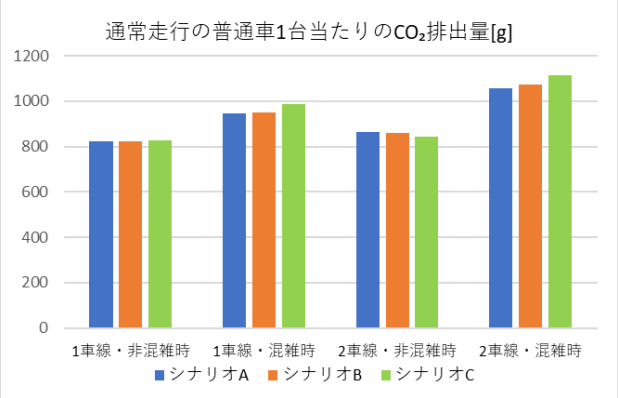
引用文献についてはSI-2に記載

Supporting Information

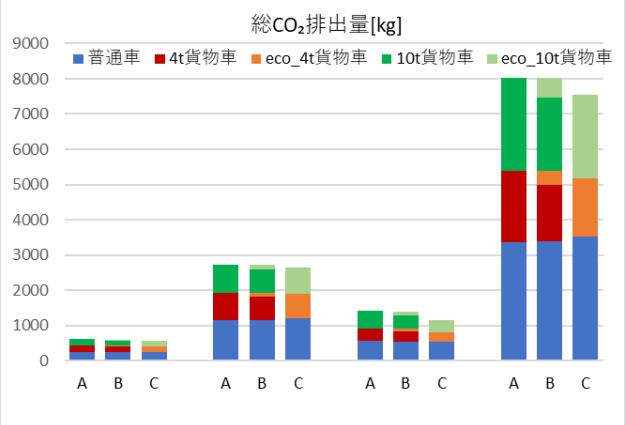
SI-1 シミュレーションの結果



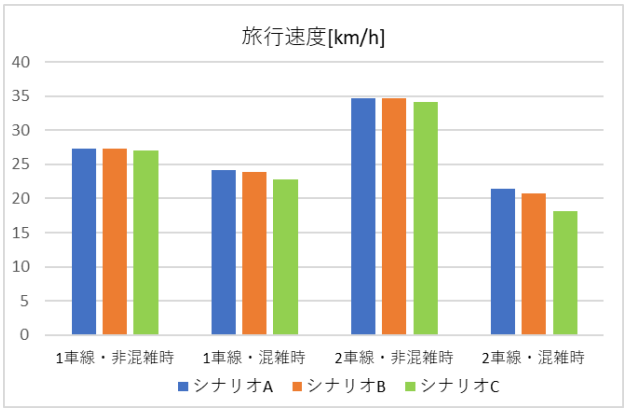
図S1 貨物自動車のCO_2排出量



図S2 通常走行の普通車のCO_2排出量



図S3 総CO_2排出量



図S4 旅行速度

SI-2 引用文献

1) 国立環境研究所: 日本の温室効果ガス排出量データ,<https://www.nies.go.jp/gio/archive/ghgdata/index.html>, (2022/01/10参照)
2) 東京都トラック協会 : グリーン・エコプロジェクト, <http://www.tta-gep.jp>, (2022/01/10参照)
3) 間地寛, 神谷仁巳, 小林大, 大聖泰弘 : 自動車技術学会論文集, 39(6), (2008), pp265-270
4) 加藤秀樹, 鈴木勉, 佐藤祥路, 安藤良輔, 近藤美則 : エネルギー・資源学会論文誌, 37(1), (2016), pp27-33
5) 全国道路・街路交通情勢調査 一般交通量調査, <https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/>,(2022/01/10参照)
6) OpenStreetMap,<www.openstreetmap.org>,(2022/01/10参照)
7) 津川俊輔, 鈴木貢 : 情報処理学会研究報告, 72(8), (2018)
8) 環境省 : エコドライブ10のすすめ, <https://www.env.go.jp/air/car/ecodrive/susume.html>, (2022/01/10参照)
9) トヨタ自動車 : トヨタカローラ主要諸元表, <https://toyota.jp/corolla/feature/?padid=from_corolla_top_navi-menu_feature >, (2022/01/10参照)
10) いすゞ自動車: 主要諸元 車両外観図 旋回軌跡図, <https://www.isuzu.co.jp/support/data/>, (2022/01/10参照)
11) 一般社団法人 日本自動車工業会: 2020年度 普通トラック市場動向調査, <https://release.jama.or.jp/sys/news/detail.pl?item_id=1937>, (2022/01/10参照)
12) 金成修一, 花房比佐友, 林誠司, 平井洋, 木村真, 米沢三津夫, 堀口良太, 田中伸治, 大口敬, 小根山裕之, 桑原雅夫 : 生産研究, 64(2), (2012), pp255-258
13) HBEFA,<https://www.hbefa.net/e/index.html>,(2022/01/10参照)

口頭発表セッション（一般）

[2-B1] バイオマス

座長：中野勝行（立命館大学）

2022年3月3日(木) 09:20 〜 10:40 B会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-B1-01] 北海道における木質バイオマスエネルギー利用可能量評価と将来推計

*小野 遼河[1]、福田 陽一朗[2]、藤井 賢彦[1] （1. 北海道大学、2. エネルギー・環境・地質研究所）

09:20 〜 09:40

[2-B1-02] 国内における微細藻類バイオ燃料生産プロセスのライフサイクル評価

*多積 遼[1]、河野 重行[1]、井原 智彦[1] （1. 東京大学）

09:40 〜 10:00

[2-B1-03] 木質バイオマスエネルギー事業を対象としたプランニング支援手法の提案

*西田 拓未[1]、木下 裕介[1]、赤松 史光[2]、中塚 記章[2]、梅田 靖[1] （1. 東京大学、2. 大阪大学）

10:00 〜 10:20

[2-B1-04] 木質原料を用いたバイオガス発電由来のバイオ炭施用による温室効果ガス削減効果

*金井 真也[1]、土井 美奈子[1]、柴田 晃[1]、中野 勝行[1] （1. 立命館大学）

10:20 〜 10:40

©日本LCA学会

北海道における木質バイオマスエネルギー利用可能量評価と将来推計

The Availability Evaluation and Future Estimation of Woody Biomass Energy in Hokkaido

○小野遼河*[1)]、福田陽一朗[2)]、藤井賢彦[1) 3)]
Ryoga Ono, Yoichiro Fukuda, Masahiko Fujii
1) 北大院環境, 2) 道総研エネ環地研, 3) 北大院地球環境
* rhym210129@eis.hokudai.ac.jp

1.はじめに

近年、日本における木質バイオマス発電所の基数は増加傾向にある。しかし 2022 年 1 月現在、外国から輸入した木質チップやパーム椰子殻を燃料として利用する施設が、国内で稼働する木質バイオマス発電全体の設備容量の 6 割強、このうち固定価格買取制度(FIT)認定容量の 9 割強[1)]を占めており、国内の木質バイオマス資源の発電利用は限定的である。外材を利用することにより、大量かつ安価にエネルギー源を得られる一方で、過去に 2 度起こったオイルショックと同様に、国外の情勢不安により、価格の高騰や、供給安定性への影響が出ることが懸念される[2)]。そこで、国内における木質バイオマスエネルギーによって、どの程度エネルギーを賄うことが可能であるかを検討する必要がある。また、日本では少子高齢化による人口減少により、2050 年の国内総人口は 2015 年比で約 20%減となると推計されている[3)]。それに伴いエネルギー需要の減少も考えられる。そこで、人口ひいてはエネルギー需要の減少を考慮した将来推計が必要である。

本研究では、カーボンニュートラルの取り組みの目標年とされている 2050 年[4)]までの既存の木質バイオマス発電所における木質バイオマスの利用状況を明らかにするために、資源量とエネルギー需要を推計し、木質バイオマスをエネルギー利用した際の経済性と環境性を評価した。

2.研究手法

2.1 研究対象地

離島を除く**北海道全域**を対象地域として設定した。北海道は、日本で最も森林面積が大きく、木質バイオマスが豊富に存在する。また、北海道内には木材の利用を想定した大型の発電所が 4 ヶ所存在する。そこで、本研究では、道内に存在する大型の木質バイオマス発電所における木質バイオマス(森林間伐材、製材工場からの端材・廃材、建築廃材、果樹剪定枝、公園剪定枝)の利用を想定した。

2.2 集計方法

ユニバーサル横メルカトル座標系において縦横各 1 km のメッシュを作成し、各メッシュにおける木質バイオマス資源の資源量を低位発熱量(MJ/年)ベースで推計し集計した。さらに、メッシュ毎のバイオマスの利用にかかるコスト(JPY/年)と二酸化炭素発生量(CO_2/年)を計算した。利用コストの計算はフルコストアセスメント (FCA)、二酸化炭素発生量はライフサイクルアセスメント (LCA)でそれぞれ推計した。利用する資源の量と場所の選択は構築したモデルを基に行なった。また、発電所の建設から廃棄までの一連の流れも FCA、LCA を利用し推計した。本研究における、FCA、LCA のシステム境界を図 SI1 に示す。

2.3 バイオマス利用量、利用地選定モデル

各メッシュにおける資源利用コストを低位発熱量で除して得られる発熱量あたりコスト(JPY/MJ)が最も小さい 1 km メッシュから順に利用すると仮定した。利用する資源の累積熱量が各発電所において発電に必要とする資源の総熱量を上回った時点での累積コスト及び二酸化炭素発生量を算出した。発電所において発電に必要とする資源の総熱量は、北海道における電力需要量に北海道の全発電所の出力に対する木質バイオマス発電所の出力の比を乗じ、その値に木質バイオマス発電所における発電効率[5)]で除することにより算出した。将来における発電所必要熱量は 2020 年における必要熱量に人口比を乗ずることで推計した。モデルの使用言語は Python 3.8.12 を用いており、主な数値計算モジュールとして Pandas 1.3.4、NumPy 1.20.3 を用いた。構築したモデルの構造図を図 SI2 に示す。

2.4 各バイオマス資源量の推計方法

2.4.1 森林間伐材

森林間伐材発生量は次の式で推計した。

$$w_{Forest\text{-}part}=A_{Forest}\times\alpha \quad (1)$$

ここで、$w_{Forest\text{-}part}$は各森林における森林間伐材発生量(m^3/年)、A_{Forest}は各森林面積(ha)、αは森林間伐材発生量原単位(m^3/(ha･年))である。本研究では、針葉樹、広葉樹と人工林、天然林それぞれ 4 通りの森林形態が存在すると仮定して森林間伐材の推計を行なった。

2.4.2 製材工場からの端材・廃材

製材工場からの端材･廃材発生量は次の式で推計した。

$$w_{Factory\text{-}part}=W_{Factory}\times\frac{A_{Factory}}{\sum A_{Factory}} \quad (2)$$

ここで、$w_{Factory\text{-}part}$は各製材工場における製材の発生量(m^3)、$A_{Factory}$は各製材工場の敷地面積(m^2)であり、$\sum A_{Factory}$は北海道内の製材工場の敷地面積の総和である。北海道における端材・廃材発生量である$W_{Factory}$は北海道における製材発生量に、全国における製材発生量に対する端材・廃材発生量の比を乗ずることで算出した。製材所は JAS 認定製材所 [6] のみを対象とした。

2.4.3 建築廃材

建築廃材発生量は次の式で推計した。

$$w_{Construct\text{-}part,\,i}=W_{Construction}\times\frac{A_{Construct,\,i}}{\sum A_{Construct,\,i}} \quad (3)$$

ここで、$w_{Construct\text{-}part,\,i}$は各メッシュ i における建築廃材発生量(kg/年)、$A_{Construct,\,i}$は各メッシュ i における建物用地の面積(ha)、$\sum A_{Construct,\,i}$は北海道全域の建物用地の面積の総和である。北海道の建築廃材発生量である$W_{Construction}$は新築、増築・改築、解体に伴う延べ床面積変化量(m^2/年)とそれぞれに対応した廃材発生量原単位(kg/m^2)を乗ずることで算出した。

2.4.4 果樹剪定枝

果樹剪定枝発生量は次の式で推計した。

$$w_{Fruit\text{-}part,\,ij}=W_{Fruit}\times\frac{A_{Fruit,\,ij}}{\sum A_{Fruit,\,ij}} \quad (4)$$

ここで、$w_{Fruit\text{-}part,\,ij}$は各行政区域 j におけるメッシュ i の果樹剪定枝発生量(t/年)、$A_{Fruit,\,ij}$は各行政区域 j におけるメッシュ i の果樹園の面積(ha)、$\sum A_{Fruit,\,ij}$は各行政区域 j におけるメッシュ i の果樹園の面積の総和である。北海道全体の果樹剪定枝発生量であるW_{Fruit}は果樹種毎の面積(ha)と果樹種に対応した果樹剪定枝発生量原単位(t/(ha･年))を乗ずることで算出した。

2.4.5 公園剪定枝

公園剪定枝発生量は次の式で推計した。

$$w_{Park\text{-}part}=W_{Park}\times\frac{A_{Park}}{\sum A_{Park}} \quad (5)$$

ここで、$w_{Park\text{-}part}$は各都市公園における公園剪定枝発生量(t/年)、A_{Park}は各都市公園の面積(ha)、$\sum A_{Park}$は北海道における都市公園面積の総和である。北海道全体の公園剪定枝発生量であるW_{Park}は都市公園面積(ha)と公園剪定枝発生量原単位(t/(ha･年))を乗ずることで算出した。原単位は札幌市における公園剪定枝発生量を札幌市における都市公園面積で除した値を用いた。

2.5 発電所のコスト、二酸化炭素発生量の推計方法

研究対象とする木質バイオマス発電所はいずれも FIT が適用され、現在稼働中の発電所である。また、本研究において対象とする木質バイオマスを用いた発電所は木質バイオマスのみを用いた発電所(以後、木質バイオマス発電所)、木質と石炭を混合して用いる発電所(以後、混焼バイオマス発電所)の 2 種類が存在する。建設、廃棄コスト算出時、混焼バイオマス発電は木質バイオマス発電と比較して低予算で事業が実施できるため、それぞれ別の推計方法を適用した。

木質バイオマス発電所の建設、廃棄コストは先行研究の推計方法 [7]に従った。混焼バイオマス発電所の建設、廃棄コストは石炭火力発電所のコスト推計方法に従った。建設、廃棄に伴う二酸化炭素発生量は各バイオマス発電所の敷地面積と建設、廃棄時に発生する二酸化炭素量原単位(CO_2/ha)を乗ずることにより推計した。発生した灰の処理コストは両発電所において 20000 (JPY/t) [7] とした。

3.構築モデルによる計算結果

結果報告は学会発表時に行う。

4.引用文献

1) NPO 法人バイオマス産業社会ネットワーク(BIN): バイオマス白書 2020, (オンライン), 入手先 <https://www.npobin.net/hakusho/2020/topix_01.html> (参照 2021-1-08)
2) Chen W-M., Kim H., Yamaguchi H.: Energy Policy, 74, (2014), pp 319-329
3) 国立社会保障・人口問題研究所: “日本将来推計人口(平成 29 年推計)”, (オンライン), 入手先 <https://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2017/pp_zenkoku2017.asp> (参照 2022-01-11)
4) 環境省: “2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて”, (オンライン), 入手先 <https://www.env.go.jp/earth/2050carbon_neutral.html> (参照 2021-1-08)
5) Frombo F., Minciardi R., Robba M., Rosso F., Sacile R.: Biomass and Bioenergy, 33, (2009), pp 372-383
6) 農林水産省: “北海道製材生産企業一覧表 JAS 認定”, (オンライン),入手先 <https://www.woodplaza.or.jp/seizai.pdf> (参照 2021-1-06)
7) 柳田高志, 吉田貴紘, 久保山裕史, 陣川雅樹: 日本エネルギー学会誌, 94, 311-320 (2015)

Supporting Information

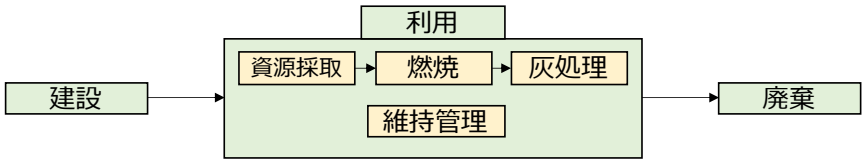


図 SI1 システム境界

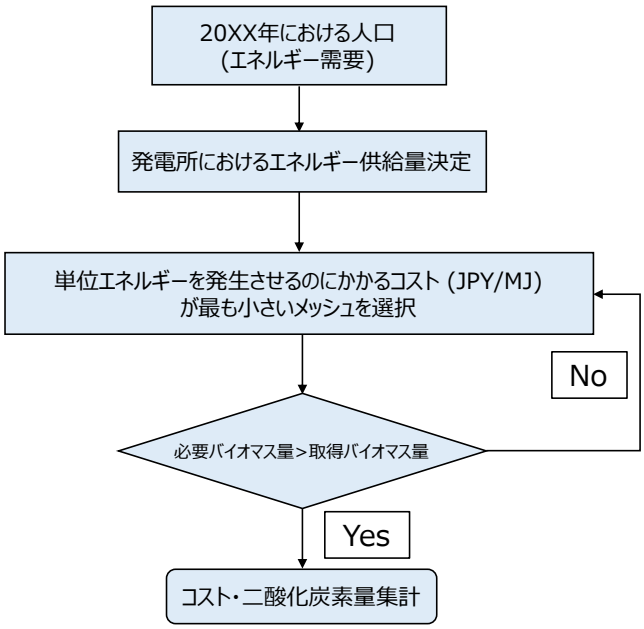


図 SI2 モデルの構造図

国内における微細藻類バイオ燃料生産プロセスのライフサイクル評価

Life Cycle Assessment of Microalgae Biokerocine Production Process in Japan

○多積遼*[1)]、河野重行[2)]、井原智彦[3)]
Ryo Tazumi, Shigeyuki Kawano, Tomohiko Ihara
1)東京大学システム創成学科, 2)東京大学フューチャーセンター推進機構,
3) 東京大学大学院新領域創成科学研究科
* tazumi-ryo046@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. 背景と目的

1.1 背景

日本政府は 2020 年 10 月に 2050 年カーボンニュートラルを目指すことを宣言し、様々な取り組みを行っている。ここで日本の 2019 年度の各部門における CO_2 排出量を見ると、運輸部門が 2 億 600 万トンで全体の 18.6%を占めている。その多くを占める自動車に関しては、ハイブリッド車や電気自動車など CO_2 削減に向けて技術開発が進んでいる一方で、航空機は電気、水素、ディーゼルなどの代替燃料を使用することができないことが課題である。

そこで注目されているのが微細藻類由来のバイオケロシン（バイオジェット燃料）である。バイオ燃料は培養プロセスで CO_2 を吸収するため、化石燃料と比べて温室効果ガスの排出が少ない。さらに、現在多く利用されているトウモロコシなどは食糧と競合するが、微細藻類は土地の利用も少なく食糧と競合しない。また、非常に高い光合成効率をもち、他の目的に適さないような土地でも栽培できることが知られている[1)]。現在、微細藻類由来のバイオケロシンは、工業的に生産・利用されるまでには技術が進んでいない。様々なプロセスが検討されている状況であるが、我々の知る限りでは国内でライフサイクル評価を厳密に行なっている研究は見られなかった。

1.2 目的

微細藻類の培養からバイオケロシンの精製までのライフサイクル評価をすることで、プロセスにおける CO_2 排出削減のために各プロセスの現状と課題を探る。

2. 手法

2.1 プロセスフロー

プロセスは大まかに、培養・回収・抽出・精製の 4 段階に分けられる。培養プロセスは、*Parachlorella kessler*i の重イオンビーム照射変異体の薄層光バイオリアクター (T-PBR) での培養を想定した。その後、遠心分離、または凝集剤によって水分量を減らした藻類を回収する。油脂の抽出プロセスは破砕後にヘキサンによるか、または水熱液化 (HTL) による処理を想定しており、流動接触分解 (FCC) でクラッキングし、水素添加処理・上流を経てバイオケロシンを中液化する。プロセスフローを図 1 にまとめた。

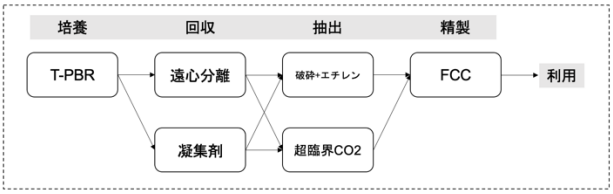


図 1 プロセスフロー

2.2 システム境界

本研究で考慮した主なエネルギー入力は、上記のプロセスに関連するエネルギーである。また、精製されたバイオケロシンを利用した際に排出される CO_2 に関してもシステム境界に含まれている。

2.3 インベントリ

2.3.1 培養プロセス

Takeshita ら(2018)によると、*P. kessleri* は油脂を高濃度に蓄積し、培養途中で窒素を欠乏させることによって、重イオンビーム照射変異体であれば油脂を藻体乾燥重量あたり 66 %蓄積する。培養は 150 L の T-PBR で行われ、CO_2 はバブリングで与えるものと大気中から吸収するもののどちらもが供給源となった。供給した CO_2 は LCA の際、排出量から差し引いている。また、培地は尿素を窒素源とする UP 培地を利用した[2)]。

2.3.2 回収プロセス

Dassy ら(2013)によると、電力を動力源とする遠心分離で微細藻類を回収する際、最も回収率が高いのは流量 0.94 L/min の場合であり、94 %であった[3)]。Divakaran ら(2002)によると、キトサンを用いて藻類を凝集すると、pH7 で最も藻類が沈降し、約 90 %の回収率であった[4)]。以上の 2 つのプロセスを使用した LCA をそれぞれ実施することで、どちらのプロセスの方が CO_2 排出量を少なくできるかを検証した。

2.3.3 抽出プロセス

Brentner ら(2011)の論文を参考に、破砕後ヘキサンで

抽出するプロセスと HTL 処理による抽出プロセスの入出力データを得た[5]。これら 2 つのプロセスを採用し、LCA により比較した。

2.3.4 精製プロセス

Pujan ら(2013)によると、藻類油を流動床接触分解することによって、石油系ジェット燃料と性質の近いバイオケロシンが元の重量の 41 %の収率で回収できた。その際、元の重量の 14 %のバイオディーゼルも回収できたとされている[6]。

2.3.5 その他のプロセス

ディーゼルの利用の際に排出される CO_2 は、1.992 kg-CO_2/kg である[7]。各プロセスの入力エネルギーの生産の際に排出される CO2 に関しては、日本国内のインベントリデータベースとして、IDEA を参照した。電力のデータは国内の 2014 年度のものを利用している。

3. 結果

回収と抽出のプロセスで 2 通りずつ、合計 4 通りの LCA を実施し、最も CO_2 排出量の少ないプロセスの組み合わせを検証した。以下 4 通りのシナリオを A, B, C, D とする。

A は、回収は遠心分離、抽出は破砕・ヘキサンである。B は、回収は遠心分離、抽出は HTL である。C は、回収は凝集剤、抽出は破砕・エチレンである。D は、回収は凝集剤、抽出は HTL である。

以下の表 1 に、A, B, C, D について生産から利用までの CO_2 排出を計算した LCA の結果を載せる。機能単位はバイオケロシン 1 kg とした。

表 1　LCA の結果

シナリオ	CO_2 排出量（kg）
A	27.16
B	24.83
C	16.81
D	14.92

4 つを比較すると、A, B の CO_2 排出量が多く、C, D の CO_2 排出量が少ないため、遠心分離のプロセスは CO_2 排出量を増やすことがわかる。同様に、B よりも A、D よりも C の方で排出量が多いため、破砕・エチレンによる抽出は CO_2 排出量を増やすことがわかる。

また、最も良い結果であった D について、その内訳を図 2 に示す。D の中で最も大きい CO_2 の排出源は、発電に関わっていた。その他も発電の影響は大きく、D のプロセスはプロセス全体を通して電力使用量が 13.17 kWh である一方、A のプロセスではそれが 18.91 kWh であり、電力使用量の違いが CO_2 排出量の違いの主な理由であることがわかる。

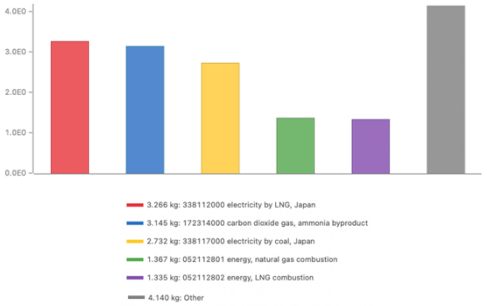


図 2 シナリオ D の CO_2 排出内訳

4. 考察

今回検討したプロセスの中では、凝集剤を利用した回収、HTL による抽出を採用したプロセスフローが最も CO_2 排出が少なかった。一方、バイオケロシン 1 kg を生産するライフサイクルで CO_2 の排出量が 14.92 kg であることは課題であり、電力使用を減らすことを中心に今後プロセスの改善が必要であろう。

謝辞

本研究の遂行にあたり、東大・新領域の三谷啓志教授、細川聡子学術専門職員に大変お世話になった他、他大学や企業の方々にも快くインタビューさせていただいた。ここに記して謝意を表します。

引用文献

1) Marcin Dębowski, Marcin Zieliński, Joanna Kazimierowicz, Natalia Kujawska, Szymon Talbierz: Sustainability, 12 (23), (2020)
2) Tsuyoshi Takeshita, Ivan Nedyalkov Ivanov, Kenshiro Oshima, Kotaro Ishii, Hiroki Kawamoto, Shuhei Ota, Tomokazu Yamazaki, Aiko Hirata, Yusuke Kazama, Tomoko Abe, Masahira Hattori, Kateřina Bišová, Vilém Zachleder, Shigeyuki Kawano: Algal Reserch, 35, (2018), pp.416-426
3) Adam J. Dassey, Chandra S. Theegala: Bioresource Technology, 128, (2013), pp.241-245
4) Ravi Divakaran and V.N. Sivasankara Pillai: Journal of Applied Phycology, 14, (2002), pp.419-422
5) Laura B. Brentner, Matthew J. Eckelman, Julie B. Zimmerman: Environ. Sci. Technol, 45 (16), (2011), pp7060-7067
6) Robert Pujan, Stephanie Hauschild, Arne Gröngröft: Fuel Processing Technology, 167, (2013), pp.582-607
7) 環境省:"燃料別の二酸化炭素排出量の例", 環境省, （オンライン）, 入手先 <https://www.env.go.jp/council/16pol-ear/y164-04/mat04.pdf>, （参照 2022-1-11）

木質バイオマスエネルギー事業を対象としたプランニング支援手法の提案

Proposal of a planning support method for woody biomass energy business

○西田拓未*[1)]、木下裕介 [1)]、中塚記章 [2)]、赤松史光 [2)]、梅田靖 [1)]
Takumi Nishida, Yusuke Kishita, Noriaki Nakatsuka, Fumiteru Akamatsu, Yasushi Umeda
1) 東京大学, 2) 大阪大学
* nishida@susdesign.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

脱炭素社会の実現や豊富な森林資源の有効活用，地域社会の活性化といった観点から，木質バイオマスのエネルギー利用が有望視されており [1)]，日本各地で木質バイオマスエネルギー事業が展開されている．2012年に始まった再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT）を契機に，木質バイオマスの発電利用が急速に拡大した．木質バイオマス発電事業は，FIT の利用により，持続可能性を確保できている事例が多く見られる一方で，熱利用・熱電併給事業では，持続可能性を確保できていない事例が散見される [2)]．しかし，中長期的（例えば，10~20 年程度）に持続可能な木質バイオマスエネルギー事業のプランニングを試みようとすると，既存研究ではプランニングするのための知識やノウハウはが十分に十分に体系化されていないこと，不確実性が事業に及ぼす影響が十分考慮できていないことが大きな課題である．

これらの課題に対して，本研究の目的は，環境面・経済面で中長期的に持続可能な木質バイオマスエネルギー事業を実現するために，そのプランニング支援手法を提案することである．

2. 関連研究

木質バイオマスエネルギーの研究対象は幅広く，木質バイオマスのエネルギー利用についての評価･分析，数理的手法を用いたエネルギーシステムの最適設計を対象とした研究がよく見られる．

Tabata ら [3)]は，LCA（Life Cycle Assessment）を用いて，木質バイオマス発電のサプライチェーン全体のコストと環境負荷についての評価を行った．Kishita ら [4)]は，持続可能な木質バイオマス発電事業の設計条件を明確にすることを目的として，将来の不確実性を考慮したシナリオ分析手法を提案した．Saghaei ら [5)]は，木質バイオマス発電のサプライチェーンを設計する際に，コストの最小化とロバスト性の確保を目的として，機会制約を組み合わせた 2 段階の確率的混合整数非線形計画法（MINLP）を提案した．

一方で，持続可能な木質バイオマスエネルギー事業を実現するために，導入地域・施設の現状に応じたプランニングが求められる．しかし，プランニングに着目した研究はほとんど行われていない．

3. 木質バイオマスエネルギー事業のプランニング支援手法の構築

3.1 本研究のアプローチ

本研究では，持続可能な木質バイオマスエネルギー事業を実現するためのプランニング支援手法を提案するために，以下のアプローチをとる．(a) 事業をプランニングするための知識やノウハウの体系化のために，熟練コンサルタントへのインタビューや現地視察などの事例調査を実施する．(b) 複数の選択肢の比較，将来の不確実性への対応のために，シナリオ分析の考え方を用いた事業プランニングの支援手法を構築する．

先行研究 [6)]において，木質バイオマスエネルギー事業のプランニングの手順やポイントの聞き取りを目的として，国内の 3 事業者の熟練コンサルタントへのインタビューを実施し，その結果からプランニングプロセスを，Step 1: 問題設定，Step 2: 現状分析と事業ビジョンの作成，Step 3: 事業条件の設定，Step 4: 事業案の評価・比較の 4 ステップで形式化した．

形式化したプランニングプロセスをもとに，シナリオ分析の考え方を用いたプランニング支援手法を構築した（図 1 参照）．本手法では，プランニング項目リストへの回答を事業シナリオの要素として用いる．また，作成した事業シナリオの内容をもとにシミュレーションを実行し，経済性および環境性，不確実性が事業に及ぼす影響を評価する．

3.2 プランニング項目リスト

文献調査，事例分析，事業者へのインタビューの結果をもとにして，木質バイオマスエネルギー事業のプランニングを行う上で必要な項目を 32 個抽出し，それらをまとめたプランニング項目リストを作成した（表 S1 参照）．

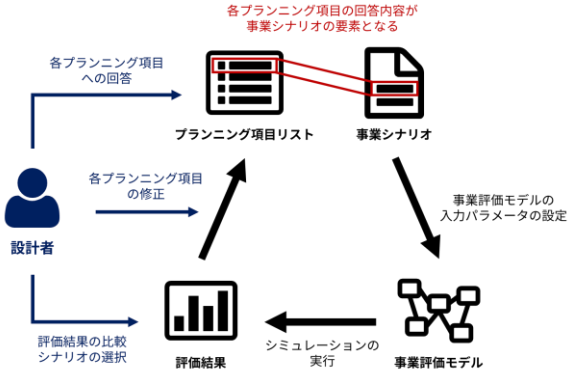


図 1 木質バイオマスエネルギー事業のプランニング支援手法の概要

3.3 事業シナリオ

複数の事業案の比較，不確実性が事業に及ぼす影響の評価を支援することを目的として，事業の前提条件，事業目的，事業条件，事業の評価結果を記述する事業シナリオを定義した．事業シナリオは，文書情報と事業パラメータリストで構成される，.

3.4 事業評価モデル

事業の経済性および環境性を評価できるようにすることを目的として，木質バイオマスエネルギー事業の事業評価モデルを作成した．事業評価モデルでは，木質バイオマスエネルギー事業のマネーフロー，エネルギーフロー，マテリアルフローをモデル化した．

3.5 木質バイオマスエネルギー事業プランニング支援システムの開発

本研究では，提案手法に沿ったプランニングの実行を支援することを目的として，支援システムを開発した（図 S1 参照）．本システムは，プランニングプロセスに沿ったプロセスの実行，事業シナリオの作成・評価・比較を支援することができる．

4. ケーススタディ

提案手法および開発した支援システムの検証を行うことを目的として，徳島県の集合住宅における木質バイオマス地域熱供給事例を用いたケーススタディを実施した．著者らが事例調査により収集した情報・データを用いて，提案手法に沿ったプランニングを行った．

本ケーススタディでは，著者らが提案手法に沿ったプランニングにより．使用する燃料と機器構成の条件を変えた 3 つの事業シナリオを作成した．各事業シナリオの概要を表 1 に示す．続いて，著者らは作成した各事業シナリオの経済性および環境性評価を行った．また，著者らは，集合住宅の入居率が事業性に影響を与える変動要因であると考え，入居率の変動の不確実性が事業に及ぼす影響の評価を行った．経済性評価（図 2 参照）について，シナリオ A，C では，入居率の低下とともに，収支が悪化しているが，シナリオ B では，入居率 50%の場合に収支が最も良くなるという結果が得られた．また，シナリオ C では，熱供給機器の導入費用を住宅購入価格に加算することで，事業全体の収支を黒字にできることが明らかとなった（図 S2 参照）．環境性評価（図 3 参照）について，入居率の低下とともに，CO_2 排出量が減少するという結果が得られた．

本ケーススタディでは，経済性および環境性ともに優れているという理由からシナリオ C を選択した．

表 1 作成した事業シナリオの概要

シナリオ	事業概要
A	重油ボイラによる熱供給
B	ペレットボイラによる熱供給
C	チップボイラによる熱供給

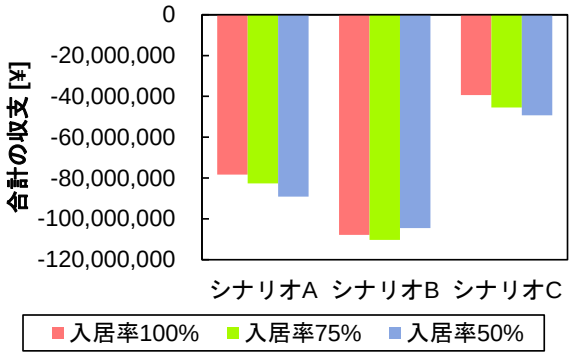


図 2 経済性評価の結果

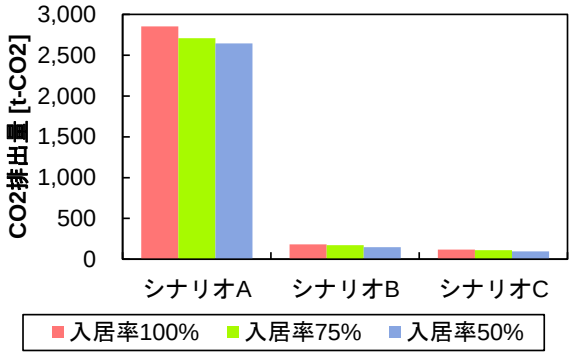


図 3 環境性評価の結果

5. まとめと今後の課題

本研究では，持続可能な木質バイオマスエネルギー事業のためのプランニング支援手法を提案した．加えて，提案手法に沿ったプランニングの実行を支援するための支援システムを開発した．また，徳島県の集合住宅における木質バイオマス地域熱供給事業を対象としたケーススタディを実施し，提案手法の有効性を確認できた．

今後の課題として，実際のプランニングの現場で，本提案手法を用い，その有効性を検証することが挙げられる．

なお，本研究は科研費（19KT0008）の支援を受けたものである．

引用文献

1) Yoshioka T., Hirata S., Matsumura Y., Sakanishi K.: Biomass and Bioenergy, 29, (5), (2005), pp. 336-346
2) NPO 法人バイオマス産業社会ネットワーク:“バイオマス白書 2021 ウェブサイト版”， 入手先 <https://www.npobin.net/hakusho/2021/index.html>, (参照 2021-12-16)
3) Tabata T., Okuda T.: Energy, 45, (2012), pp. 944-951
4) Kishita Y., Nakatsuka N., Akamatsu F.: Journal of Cleaner Production, 142, (2017), pp. 1471-1485
5) Saghaei M., Ghaderi H., Soleimani H.: Energy, 197, (2020), 117165
6) 西田拓未，木下裕介，中塚記章，赤松史光: 第 16 回日本 LCA 学会研究発表会, (2021), pp. 319-321

表 S1 プランニング項目リスト

プロセス	分類	プランニング項目
問題設定	事業概要の設定	対象地域および導入対象は何か？ エネルギーの供給形態は何か？ エネルギーの供給用途は何か？ 事業の開始年は？ 事業の終了年は？
	事業目的の設定	事業の目的は何か？
	ステークホルダーの特定	メインステークホルダーは誰か？ ステークホルダーは誰か？ 各ステークホルダーの役割は何か？
現状分析とビジョン作成	エネルギー需要の分析	望ましい熱出力の範囲はどれくらいか？ 望ましい発電出力の範囲はどれくらいか？ 必要な蓄熱槽の容量はどれくらいか？ 必要な燃料の貯蔵容量はどれくらいか？
	燃料の供給可能性の調査	供給可能な木材はどこから手に入れるか？ 供給可能な木材の種類は何か？ 供給可能な木材の区分は何か？ 供給可能な木材の量は年間どれくらいか？
	資金の調達可能性の調査	利用できる補助金制度には何があるか？ どこから融資を受けられるか？
	事業ビジョンの作成	KPIs とそれらの達成目標は何か？ ビジョンのストーリーラインは何か？
事業条件の設定	燃料の選定	どのような燃料を用いるのか？
		燃料の加工方法は何か？
		燃料の輸送手段は何か？
	機器の選定	どの機器を導入するのか？
	不確実性の特定	想定される不確実性は何か？
	運転管理条件の決定	運転監視は有人と無人のどちらか？
		メンテナンスの頻度はどれくらいか？
	資金調達方法の決定	どの補助金を受けるか？
		どのような融資を受けるか？
	ビジネスプランの作成	どのようなサービスを提供するか？
		どのような収益構造を想定するか？

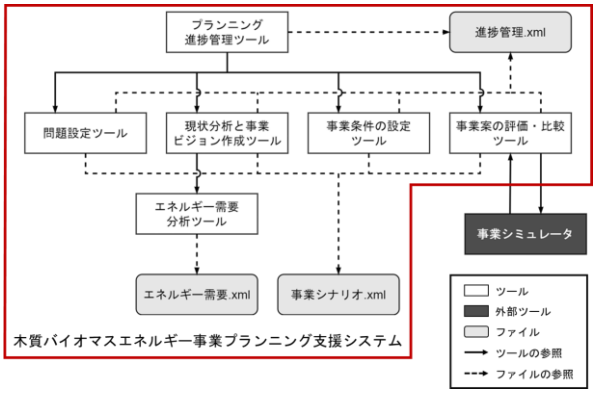


図 S1 木質バイオマスエネルギー事業プランニング支援システムの構成

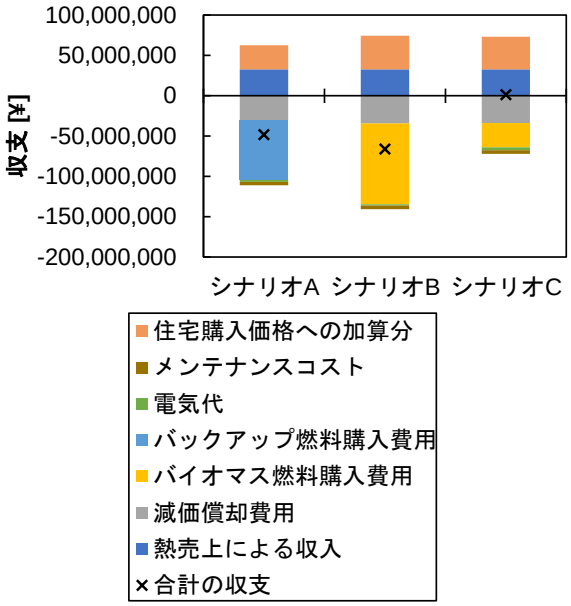


図 S2 熱供給機器の導入費用を住宅購入価格に加算した場合の経済性評価の結果（入居率 100%）

木質原料を用いたバイオガス発電由来のバイオ炭施用による温室効果ガス削減効果

Greenhouse gas emission reduction by biochar farming from biogas generation using wood materials

○金井真也 [1)]、土井美奈子 [1)]、柴田晃 [1)]、中野勝行*[1)]
Masaya Kanai, Minako Doi, Akira Shibata, Katsuyuki Nakano
1) 立命館大学
* nakanok@fc.ristumei.ac.jp

1. 緒言

バイオマスは大気中のCO_2を吸収して成長したものである。バイオマスを原料として製炭された炭をバイオ炭と呼ぶ。バイオ炭に含まれる炭素は難分解性であるため、土壌貯留することでCO_2を長期間にわたり大気中から隔離することができる。しかし、バイオ炭の製炭から施用に至るまでにCO_2が排出される。そのためバイオ炭施用に伴う温室効果ガス（GHG）削減効果を定量的化させるには、土壌貯留効果から製炭および施用時に発生するGHG排出量を差し引く必要がある。

そこで本発表では木質原料を用いたバイオガス発電による発電および製炭時の GHG 排出量を定量化した結果を報告する。そして、農地施用時に発生する GHG 排出量および炭素固定効果の評価を行う。

2. 方法

2.1 システム境界と機能単位

GHG 削減貢献量は LCA 日本フォーラムの温室効果ガス排出量算定ガイドライン [1)]を参考にして評価した。システム境界は下記に示す 2 ケース設定した（図 1）。

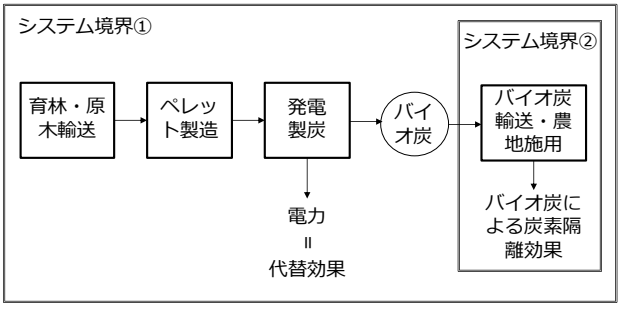


図 1 システム境界

システム境界①はバイオガス発電に使用される木質バイオマスの育林から製炭、農地施用までとした。システム境界②はバイオガス発電所で製炭されたバイオ炭の輸送から農地施用までとした。2020 年 12 月時点において、複数のバイオガス発電施設にてバイオ炭は副産物として発生しており、一部は産業廃棄物として処分されている。そのたバイオ炭は未利用材と考え、J クレジット方法論 [2)]ではシステム境界②が採用されている。

システム境界①における主製品は電力である。そこで、発電製炭までのプロセスの環境負荷を電力とバイオ炭の間で熱量基準を用いて配分評価するケース（①-A）、価格基準で配分するケース（①-B）、配分をせずシステム境界を拡張したケース（①-C）の 3 つのパターンで評価を行なった。

機能単位はバイオ炭 1kg の鉱質土壌農地への施用とした。

2.2 データ収集

フォアグラウンドデータは 3 か所のバイオガス発電プラントの協力を得て収集した。ペレット製造時および発電・製炭時におけるエネルギー、副資材等の使用量、生産量等の活動量データを収集した。

近隣より原木を調達しているため、輸送距離は 20km とした。バイオ炭の輸送距離は 50km とした。どちらの輸送も 2 トントラックで輸送されると仮定し評価をした。ペレット製造プラントは発電所と併設されているとした。

バイオ炭の価格は、バイオ炭を利用する農家の希望価格 5 円/kg、現在の平均市場価格 100 円/kg、製炭者の希望販売価格 250 円/kg とした。ただし、これら価格は著者らによるヒアリング調査に基づくもので、一般的な値ではない。発電された電力は FIT 制度の売電価格を参考にし、24 円/kWh とした。

バイオ炭施用時の燃料消費量は農業用免税軽油消費基準量より 0.0035L/kg-バイオ炭と仮定した。

バックグラウンドデータベースは LCA インベントリーデータベース IDEA ver3.1[3)]を用いた。

バイオ炭の炭素含有率は製炭時の温度や湿度によって左右されるため、J クレジット方法論 [2)]の基準である 52％で算定した。ただし、上方値（70％）と下方値（45％）における値を感度分析した。100 年後の炭素残存率は 65%[2)]とした。

3. 結果と考察

3.1 システム境界①の評価（配分前）

算定結果を図 2 に示した。発電による系統電力代替効果が-34.2kg-CO2e あり、最も結果に影響を及ぼした。バイオ炭の農地施用による貯留効果は 1.24kg-CO2e であった。育林・原木輸送、ペレット輸送にそれぞれ 0.38、0.45kg-CO2e の排出量があった。

バイオ炭利用を含むバイオマスを用いたガス化発電のシステム全体では温室効果ガス排出量削減に寄与していることが明確となった。

3.2 システム境界①の評価（配分後）

配分後の算定結果を図 3 に示した。熱量基準で配分を行った場合、システム全体では炭素含有率 70%、52%、45%それぞれで 1.58kg-CO2e、1.15kg-CO2e、0.98kg-CO2e の削減効果があると算定された。温室効果ガス排出量はペレット製造時が最も多く、0.031kg-CO2e であった。熱量基準で配分を行った場合においても、木質原料を用いたバイオガス発電由来のバイオ炭施用による GHG 削減は有効である評価された。

価格基準で評価を行った場合、設定する価格により炭素貯留による GHG 削減効果が変動することがわかった（図 3）。バイオ炭価格を 5 円とした場合、システム全体で炭素含有率 70%、52%、45%でそれぞれ 1.64kg-CO2e、1.21kg-CO2e、1.04kg-CO2e の削減効果があると算定された。

一方、バイオ炭価格を 250 円とした場合のシステム全体での効果は炭素含有率が 70%、52%、45%でそれぞれ 1.54kg-CO2e、1.11kg-CO2e、0.94kg-CO2e の削減効果があると算定された。

価格基準で評価した場合、バイオ炭単価を高くすると電力から GHG 排出量をより多く負担するようになる。しかし、いずれの価格においても貯留効果が大きく上回る結果となった。

3.3 システム境界②の評価

バイオマス発電所から発生するバイオ炭は廃棄物だと考え、上流側をカットオフした評価範囲とすると、炭素含有率が 70%、52%、45%でそれぞれ 1.64kg-CO2e、1.21kg-CO2e、1.05kg-CO2e の削減効果があると算定された。本事例においては何れの配分方法（上流カットオフを含む）においても結果に大きな違いは発生しなかった。バイオガス発電所由来のバイオ炭の LCA をする場合、実務上は上流側をカットオフするシステム境界②で算定しても結果に大きな違いが生まれないことが示唆された。

謝辞

本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「農林水産分野における炭素吸収源対策技術の開発（農地土壌の炭素貯留能力を向上させるバイオ炭資材等の開発）」JP J008722 の補助を受けて行った。また、データ提供をくださったバイオナス発電事業者の方々に感謝する。

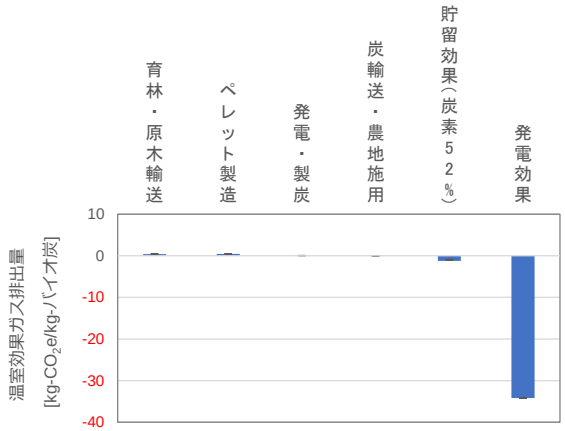


図 2 システム境界①（配分前）における温室効果ガス排出量

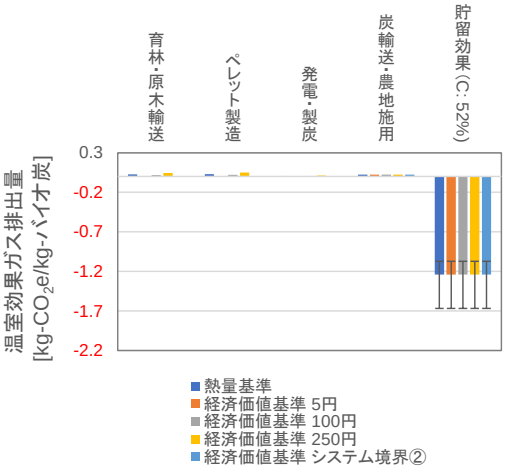


図 3 システム境界①（配分後）およびシステム境界②の温室効果ガス排出量

引用文献

1) LCA 日本フォーラム：“ライフサイクルアセスメント（LCA）による Carbon Removal and Recycling (CR2) Technologies の温室効果ガス排出量算定ガイドライン 第 2.4 版”，(2020)，pp. 1-17
2) J クレジット制度事務局 (2021) バイオ炭の農地施用 AG-004, ver.1.2
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 LCI（2021）データベース IDEA version 3.1.0

口頭発表セッション（一般）

[2-C1] 住宅

座長：磐田朋子（芝浦工業大学）

2022年3月3日(木) 09:20 〜 10:40 C会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-C1-01] 建物の LCA指針の改定に向けた検討 〜指針・ツール・原単位データベースに関する進捗状況〜

*小林 謙介[1]、磯部 孝行[2]、鈴木 好幸[3]、外岡 豊[4]、村橋 喜満[5]、木原 勇信[6]（1. 県立広島大学、2. 武蔵野大学、3. 安藤ハザマ、4. 埼玉大学、5. 日鉄物産、6. 鹿島建設）

09:20 〜 09:40

[2-C1-02] 既存の共同住宅における脱炭素化に向けた取り組みの検討

*竹内 萌生[1]、磐田 朋子[1]（1. 芝浦工業大学）

09:40 〜 10:00

[2-C1-03] 低層共同住宅のカーボンニュートラルを指向した $LCCO_2$評価手法の提案 その1：低層共同住宅の標準モデルと評価の枠組み

*三井所 清史[1]、清家 剛[2]、磯部 孝行[3]、小林 謙介[4]、渡辺 直哉[5]、山本 正顕[6]、近田 智也[7]（1.（株）岩村アトリエ、2. 東京大学大学院、3. 武蔵野大学、4. 県立広島大学、5. 旭化成ホームズ（株）、6.（株）長谷工コーポレーション、7. 積水ハウス（株））

10:00 〜 10:20

[2-C1-04] 低層共同住宅のカーボンニュートラルを指向した $LCCO_2$評価手法の提案 その２：評価結果と評価手法の提案

*磯部 孝行[1]、清家 剛[2]、三井所 清史[3]、小林 謙介[4]、渡辺 直哉[5]、山本 正顕[6]、近田 智也[7]（1. 武蔵野大学、2. 東京大学大学院、3.（株）岩村アトリエ、4. 県立広島大学、5. 旭化成ホームズ（株）、6.（株）長谷工コーポレーション、7. 積水ハウス（株））

10:20 〜 10:40

©日本LCA学会

建物の LCA 指針の改定に向けた検討

～指針・ツール・原単位データベースに関する進捗状況～

Study on the Revision of LCA Guidelines for Buildings

Progress on guidelines, tools, and intensity database

○小林謙介*[1)]、磯部孝行[2)]、鈴木好幸[3)]、外岡豊[4)]、村橋喜満[5)]、木原勇信[6)]

Kensuke Kobayashi, Takayuki Isobe, Yoshiyuki Suzuki, Yutaka Tonooka, Yoshimitsu Murahashi, Isanobu Kihara

1) 県立広島大学 2) 武蔵野大学 3) 安藤・間 4) 埼玉大学 5) 日鉄物産 6) 鹿島建設

*kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. はじめに

LCA の建築分野における活用は、以前にも増して重要となっている。例えば、環境ラベルを活用した建築資材や建築物の情報開示、環境配慮型建築物の設計、ESG の観点などからも環境負荷削減を考える上で LCA の実施が不可欠となっている。わが国の建築分野では、日本建築学会が建物の LCA 指針[1)]を公表しているが、直近は 2013 年に刊行されたものとなっている。2013 年以降の情報発信は主としてウェブサイト[2)]で行っている。一方、建築を取り巻く LCA の活用状況は大きく変化してきており、多様な評価ニーズにこたえるためにも、建物の LCA 指針も改定が必要な状況と認識しており、これらの内容も含め改定版を出版することで検討を行っている。

本報告では、日本建築学会 地球環境委員会傘下の LCA 小委員会において検討が進められている建物の LCA 指針の改定に向けた検討内容を報告する。本指針は、主として指針、原単位データベース、評価ツールで構成されているため、それぞれの内容を報告する。

2. 基本的な考え方

LCA を用いた建築物の評価には、多様な目的が存在する。本指針では、LCA 実施者が自身の評価目的に応じて必要な要件を取捨選択して評価できるよう、基本的な考え方（指針）を整備する方針である。また、指針を踏まえ、評価作業を軽減できるようツールや原単位データベースを提供することを目的に検討を行っている。

3. 指針

2013 年の出版以降、指針に関する追加の情報として「建築物の LCA 実施における評価の目安（案）」を公表[3)]し、本評価の目安（案）を改善することを検討している。

検討にあたっては、2013 年以降、大きく進展した国内外の動向を踏まえることも重要と認識している。建築物等に関する主要な規格等について整理すると、表 1 の様になり、これらも踏まえつつ検討している。

具体的には、建物 1 棟（1 戸）あたりの評価を念頭におき、プロセスの考え方、機能単位の考え方、評価の限界などについて整理する方針である。また、資材製造・施工・運用などのプロセス別に、収集すべきフォアグラウンドデータの内容、フォアグラウンドデータの情報源（フォアグラウンドデータの収集・設定において有益となる資料等の情報源）の例示、5 章で述べる評価ツール（一般建築版、戸建住宅版）での評価の考え方などを示す計画である。

表 1 国内外の建築に関わる規格の例

	国際標準	欧州
全て	ISO14040、44 あらゆる製品・サービスのLCA -原則・枠組み、要求事項・指針 ISO14025 タイプⅢ環境宣言	
建築・建材	ISO21930 建築製品の環境宣言	EN15804、15804+A2 持続可能な建設工事 -製品の環境宣言（のPCR）など EN15978 持続可能な建設工事 -建物の環境性能の評価方法

4. 原単位データベース

2013 年に公表された原単位（AIJ-LCA_DB）は、2005 年の産業連関表をもとに作成された原単位である。産業連関表は既に 2011 年、2015 年版が公表されている。産業連関表をベースに作成された原単位データベースとして、3EID (Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan Using Input-Output Tables)[4)]の 2015 年版が公表されている。そのため、本データベースを活用して更新することを検討している。ただし、生産工程の大部分を海外で行っている建材（例：アルミ圧延製品）は、主要な建材を対象に、別途海外分を考慮したプロセスデータを作成することを想定している。更に、より詳細なデータの整備が必要と判断されるデータは別途作成することも検討する。また、産業連関表の物量表・生産額表などを用いて単価データベースなどを構

築し、物量あたりの評価が容易に実施できるよう検討を行っている。このほか、別途検討されている建築物・建材に関するプロセスデータの作成状況を踏まえ[5]、可能な範囲でこれらのデータベースに盛り込むことを検討する予定である。

一方、2005 年版の原単位も 3EID も主として温室効果ガスの排出量を算出することに主眼を置いており、マルチクライテリアでの評価は難しい。また、いずれもデータ数は産業連関表の部門数によって決定づけられるため 400 前後であり、その中で建築物の評価に用いられる項目は極めて限定的である。そのため、多様な評価のニーズにこたえるため、専門的に評価を行いたい場合は IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis)[6][7]ほかを利用する。

2005 年版原単位、3EID（2015 年版）、IDEA Ver.3.1 の特徴を表 2 に示す。それぞれは作成方法やデータの細かさなどが異なっており、同じ建物を評価しても結果が異なる。それぞれのデータベースを用いることによる評価結果の差異に関する分析は文献[8]で報告する。

表 2 原単位データベースの特徴

名称	AIJ-LCA (2005)	3EID (2015)	IDEA Ver.3.1
作成主体	日本建築学会	国立環境研究所	産業技術総合研究所
データ数	約400	約400	約4700（分類数は約1800）
情報源	統計（2005年産業連関表）	統計（2015年産業連関表）	統計、実測、論文・報告書、理論計算値など
評価範囲	原材料、エネルギー、サービス、インフラなど、すべての活動を含む	原材料、エネルギー、サービス、インフラなど、すべての活動を含む	原則として原材料、エネルギー
品質	全て同じ情報源（産業連関表）を用い、データの代表性、地理的有効範囲（日本平均）などの品位は高い。またデータ作成方法の一貫性がある。	全て同じ情報源（産業連関表）を用い、データの代表性、地理的有効範囲（日本平均）などの品位は高い。またデータ作成方法の一貫性がある。	情報源が異なるため、データごとに品質が異なる。代表性、完全性、地理・技術的有効範囲などが、きわめて品質が高いものもあれば、逆のものもある。
対象物質	6種類（エネルギー、CO_2、SO_2、NO_2、CH_4、N_2O）	8種類（エネルギー、CO_2、CH_4、N_2O、HFCs、PFCs、SF_6、NF_3）	1000種類近い環境負荷物質
他の特徴	独自の計算方法を用いており、主要輸入材の影響が考慮されている	国内完結型（国内温室効果ガス排出量の報告値に一致）と外洋輸送を含めたものが公開	2020年に海外版（輸出入が盛んな14か国を暫定）も公表
価格	LCA指針に同封	無料公開	有償

5. 評価ツール

建物の LCA 指針の中で評価ツールが提供されている。当該ツールには一般建築版（2013 年版では AIJ-LCA&LCW_ver.5.00）、戸建住宅版（同 AIJ-LCA&LCW-DH_Ver.2.00）がある。これらのツールの改定作業を進めている。

改定の具体的な例を示すと、2015 年版原単位データベースの更新に伴い、ツールで利用する原単位の更新を行っている。また、2012 年まで公表されていた各種のデータの年次の更新も実施する。例えば入力-1 シートの建設物価指数データベースの更新が挙げられ、建築物物価指数月報[9]や接続産業連関表[10]などを用いて直近年のデータベースを整備する。このほか、入力-3 シートのエネルギー消費量の集計表も最新の建築研究所のエネルギー消費量計算プログラム[11]の出力結果から転記しやすいように入力シートの改善を図っている。

6. まとめ

日本建築学会において検討が進められている、建物の LCA 指針の改定に向けた検討の進捗を報告した。主として指針、原単位データベース、評価ツールで構成される。指針は、すでに公表されている評価の目安（案）に海外動向、データ収集の際に有益となる情報源などを盛り込む。原単位データベースは 3EID（2015 年版）をベースとし、建築物の評価で重要な資材は個別に作成して公開を予定している。また詳細に評価したい LCA 実施者に向けては IDEA を活用することを想定する。評価ツールも、データの年次の更新など改善を図る。

7. 謝辞

本内容は、日本建築学会 地球環境委員会 LCA 小委員会で議論されている内容です。本稿の作成にあたり委員の皆様から多大なご協力を賜りました。記して謝意を表します。

8. 参考文献

1) 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一改訂版、2013.2
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/
3) 日本建築学会 地球環境委員会 LCA 小委員会:建築物の LCA 実施における評価の目安（案）、2019.3
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、https://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/page/what_is_3eid.htm
5) 中村ら : 建築分野におけるバックグラウンドデータベースの構築～既往文献を活用したデータ作成方法の検討～、日本 LCA 学会研究発表会、2022.3
6) 産業技術総合研究所 IDEA ラボ : IDEA Ver.3 、https://riss.aist.go.jp/idealab/
7) 山本ら : IDEA 海外版の構築~IDEA Ver.3.1 を用いた世界平均データベースの検討~、日本 LCA 学会研究発表会、2022.3
8) 水野ら : 建築分野における利用するバックグラウンドデータの差異が評価結果に及ぼす影響の検討～3EID と IDEA を用いた分析～、日本 LCA 学会研究発表会、2022.3
9) 建設物価調査会 : 建設物価指数月報、https://www.kensetu-bukka.or.jp/business/so-ken/shisu/bukka_shisu/sb-list/
10) 総務省 : 平成 17-23-27 年 接続産業連関表、https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/index.htm
11) 建築研究所 : 建築物のエネルギー消費性能に関する技術情報、https://www.kenken.go.jp/becc/

低層共同住宅のカーボンニュートラルを指向した $LCCO_2$ 評価手法の提案

その 1：低層共同住宅の標準モデルと評価の枠組み

The proposal of $LCCO_2$ evaluation method about orienting carbon neutral of apartment Part 1 : The base models of apartment and the frame work of evaluation method

○三井所清史*[1)]、清家剛[2)]、磯部孝行[3)]、小林謙介[4)]、渡辺直哉[5)]、山本正顕[6)]、近田智也[7)]
Kiyoshi Minsho, Tsuyoshi Seike, Takayuki Isobe, Kensuke Kobayashi, Naoya Watanabe, Masaaki Yamamoto, Toshiya Chikada
1) ㈱岩村アトリエ, 2) 東京大学大学院, 3) 武蔵野大学, 4) 県立広島大学, 5) 旭化成ホームズ㈱, 6) ㈱長谷工コーポレーション, 7) 積水ハウス㈱
* miisho@iwamura-at.com

1. はじめに

2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、各産業界で活発に議論され、具体的な取組みが出てきている。建築分野は、資材調達、運用、廃棄のライフサイクルをとおし、多くの産業と関連し裾野が広い産業であり、カーボンニュートラルへの貢献が求められる分野の一つである。建築分野では、以前よりネットゼロエネルギーハウス（ZEH）や、より先導的な取り組みとして 2010 年より戸建の LCCM（ライフサイクルカーボンマイナス）住宅の開発など、住宅部門を中心にカーボンニュートラルに貢献しうる様々な施策が打ち出されている。ただし、建築分野全体でカーボンニュートラルを目指すためには、戸建住宅だけではなく、他の建築物への展開も求められる。そこで本研究では戸建の LCCM 住宅の拡張版とし、戸建住宅に近い用途・規模である低層共同住宅を対象に LCCM の実現可能性を検証し、$LCCO_2$ 判定ツールを開発した。

本報では、低層共同住宅の標準モデルの設定条件と評価の枠組みについて報告する。

2. 本報告の構成

2.1 低層共同住宅の標準モデルの設定方法

共同住宅は木造、S 造（鉄骨造）、RC 造（鉄筋コンクリート造）の構造種別、想定世帯規模や世帯数などによって住戸プランが大きく異なる。そこで、本研究では低層共同住宅を対象に、文献調査により低層共同住宅の住戸プランを調査し、各種住戸プランを参考に LCCM 低層共同住宅の標準モデルを設定した。

2.2 評価の枠組み

現在、日本サステナブル建築協会が提供している $LCCO_2$ 判定ツール[1)]は、戸建住宅を対象に開発されている（以下、戸建住宅ツール）。戸建住宅と共同住宅では建物の特徴が異なるため、評価の方法も建物の特徴に合わせた枠組みを設定する必要がある。本研究では戸建住宅と共同住宅とで評価上、異なる点を整理し、共同住宅の条件に合わせた評価の枠組みを設定した。

3. 低層共同住宅の標準モデル

低層共同住宅の標準モデルの設定にあたり、LCCM 共同住宅の先行事例、公営住宅や民間共同住宅の標準プランに関する調査報告書などにより標準となる住戸プラン、住戸数、階数、共用部方式などを定めた。

3.1 共同住宅の標準プラン

共同住宅の標準プランとして省エネルギープログラムの標準モデルプラン、災害復興住宅の標準住宅、LCCM を達成した共同住宅の事例を調査した。共同住宅は様々な住戸タイプが存在しているが、LCCM の実現性、プランの一般性を踏まえ、東日本大震災時に建設された災害公営住宅の住戸プランを参考に住戸面積 60 ㎡程度、2 階建て 6 戸、共用部が外片廊下型の住棟を標準プランとして定めた。

3.2 低層共同住宅の標準モデル

低層共同住宅の標準プランを参考にして作成した標準モデルを図 1、建物の仕様を表 1 に示す。いずれの構造も断熱等性能等級 4 を想定した。木造、S 造は外壁材、内壁の仕上げ材を共通とし躯体のみを木材、鉄骨として捉え標準モデルとした。RC 造は、木造、S 造と工法が異なることから外壁、内壁、断熱材などは RC 造独自の仕様とした。なお設備仕様は共有である。

4. 低層共同住宅の評価の枠組み

本章では戸建住宅と共同住宅の違いを整理し、低層共同住宅の評価の枠組みを定めた。

4.1 戸建住宅と共同住宅の違い

戸建て住宅と共同住宅の主な違いを表 2 に整理した。共同住宅は一つの住棟において複数の住戸が存在するため、扉、ユニットバス、キッチン、トイレなどの設備が住戸数に比例して投入される。また、戸建住宅ツールでは 1 世帯 4 名の居住人数を想定し、水消費に係る CO_2 排出量を計上しているが、低層共同住宅の標準モデルでは住戸面積が 57.96 ㎡であることから、1

世帯 3 名を想定した。更に共用部設備による CO_2 排出量を計上する必要がある。

4.2 低層共同住宅 $LCCO_2$ 判定ツールの評価の枠組み

低層共同住宅 $LCCO_2$ 判定ツール作成に当たっては、既存の戸建住宅ツールの評価の枠組みを踏襲することした。ただし、低層共同住宅の標準モデルの特徴に合わせ、資材投入に係る $LCCO_2$ を、面積当たりまたは戸数当たりで算定する部位に分類した。水の消費量は 1 世帯 4 人の想定を 1 世帯 3 人に変更した。また、共用設備のエネルギー消費による CO_2 を算入することとし、低層共同住宅版の評価の枠組みを整備した。

5. まとめ

本報では、戸建の LCCM 住宅の拡張版として共同住宅を対象に、低層の共同住宅に限定し標準モデルを定めた。加えて、戸建て住宅と共同住宅の違いを整理し、低層共同住宅版の評価の枠組みについて定めた。

謝辞

本研究は、LCCM 住宅・建築研究開発委員会（委員長：村上周三東京大学名誉教授、副委員長：伊香賀俊治慶応大学教授、副委員長：清家剛東京大学教授）の事業により行われた研究である。ここに謝意を表す。

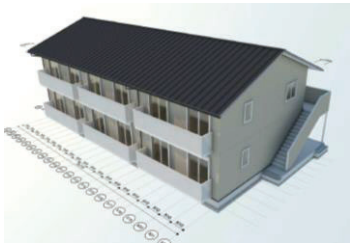
引用文献

1) 日本サステナブル建築協会, LCCM 住宅に関する研究, https://www.jsbc.or.jp/research-study/lccm.html, （アクセス参照日：2022.01.11）

＜低層共同住宅の平面プラン＞



＜木造・S 造＞



＜RC 造＞



図 1 低層共同住宅の標準モデル（2F 平面図、3D 外観図）

表 1 低層共同住宅の標準モデルの建物仕様

	木造	S 造	RC 造
躯体工法	軸組	軸組（重量鉄骨）	壁式
基礎	ベタ基礎（地耐力 Fe=30KN / ㎡）		
外壁　仕上	モエンサイディング		吹付タイル
断熱	グラスウール 24 k 100mm		ウレタン A 種 40mm
内壁	石膏ボード＋クロス張り		
界壁	石膏ボード 12.5 両面 + グラスウール 24 k 100mm		石膏ボード 12.5 両面 + 躯体
天井	石膏ボード + クロス張り		
屋根　仕上	ガルバリウム		アスファルトシート防水
断熱	グラスウール 14k 100mm		押出ポリスチレンフォーム 60mm

表 2 低層共同住宅版 $LCCO_2$ 評価の枠組み

項目	戸建住宅	共同住宅	低層共同住宅版 $LCCO_2$ 判定ツールへの反映
戸数	1 戸	複数戸	住戸数を反映できる評価（建設・維持・更新・廃棄時、運用時）
1 世帯当たりの構成人員	4 人	3 人	水消費に係る CO_2 排出量 4 人/世帯 → 3 人/世帯
建設、修繕・更新、解体時の CO_2 データベース（DB）	面積当たりの DB	世帯数、面積当たりの DB	扉、ユニットバス、設備など戸数に対応し CO_2 排出量を計上

低層共同住宅のカーボンニュートラルを指向した $LCCO_2$ 評価手法の提案

その２：評価結果と評価手法の提案

The proposal of $LCCO_2$ evaluation method about orienting carbon neutral of apartment Part 2 : The results and the proposal of evaluation method

○磯部孝行*[1)]、清家剛[2)]、三井所清史[3)]、小林謙介[4)]、渡辺直哉[5)]、山本正顕[6)]、近田智也[7)]
Takayuki Isobe, Tsuyoshi Seike, Kiyoshi Minsho , Kensuke Kobayashi, Naoya Watanabe, Masaaki Yamamoto, Toshiya Chikada
1) 武蔵野大学, 2) 東京大学大学院, 3) ㈱岩村アトリエ, 4) 県立広島大学, 5) 旭化成ホームズ㈱, 6) ㈱長谷工コーポレーション, 7) 積水ハウス㈱
* t_isobe@musashino-u.ac.jp

1. はじめに

その 2 では、その 1 の低層共同住宅を評価対象としライフサイクルカーボンマイナス（以下 LCCM）の概念に基づいた LCA と $LCCO_2$ 評価手法の提案を行う。

2. 本報告の構成

2.1 本研究における LCA の概要

本研究では低層共同住宅の LCCM の実現可能性を検証する評価手法の確立を目指し、低層共同住宅の LCA を行う。評価のバウンダリは建設（資材製造を含む）、修繕・改修、運用、解体とし、環境負荷は CO_2 排出量のみを評価の対象とした。

2.2 建設、修繕・改修、解体の LCA

その 1 で報告した標準モデルから各構造の資材投入量を拾い出し、日本建築学会が提供している AIJ-LCA ツール、CO_2 データベースを用い、建設、修繕・改修、解体プロセスの CO_2 排出量を評価した。また、建物の耐用年数を 90 年とし各部材の耐用年数と維持・修繕に係る負荷を表 1 のとおり設定した。

2.3 運用時の LCA

運用時の評価は建築物省エネ法に準拠したエネルギー消費性能の算定プログラム[1)]を用い 1 年間の一次エネルギー消費量を算定し 0.512kg-CO_2 / kWh の電力原単位で CO_2 排出量を評価した。上記プログラムの入力データである各性能、設備等は表 2 とおり設定した。

2.4 低層共同住宅の $LCCO_2$ 評価

低層共同住宅の $LCCO_2$ 評価は、建設、修繕・改修、解体のプロセスと運用時の CO_2 排出量を集計し、更に、太陽光発電パネルの設置を考慮した。太陽光発電は発電量を CO_2 削減とし、製造分は 3 年分のペイバックタイムと仮定し、発電量の 3 年分を排出量とした。LCCM の適合判定は、上記、各プロセスの CO_2 排出量の合計値と創エネに伴う CO_2 削減相当分を比較し、CO_2 削減量が CO_2 排出量より大きくなれば LCCM 適合と判定する。本検証では 32kW の太陽光発電パネルの設置を想定し、LCCM の適合を判定した。ここでは太陽光発電パネル 1kW あたりの発電量を 1,000kWh/年と仮定した。

表 1 低層共同住宅の LCA における設定条件

部材	維持・修繕	更新頻度
基礎、躯体	0%	更新なし
外壁、屋根	建設時の 1%/年	維持・修繕レベル低：11 年 維持・修繕レベル高：75 年
内装仕上げ	建設時の 1%/年	15 年、20 年の 2 種有
その他設備等	建設時の 1%/年	30 年

表 2 運用プロセスの設定条件

	標準	高性能な設備	より高性能な設備
UA 値	0.87	0.60	0.50
暖房/冷房	エアコン	エアコン:区分（い）	エアコン:区分（い）、高効率コンプレッサー
換気	ダクト式第二種、第三種換気設備、比消費電力=0.11(W/(m³/h))、換気回数=0.5 回/h		
熱交換	評価しない		
給湯/浴室	ガス従来型給湯機	ガス潜熱回収型給湯器、その他省エネ対策採用	
照明	白熱灯以外	LED、他の制御全て採用	

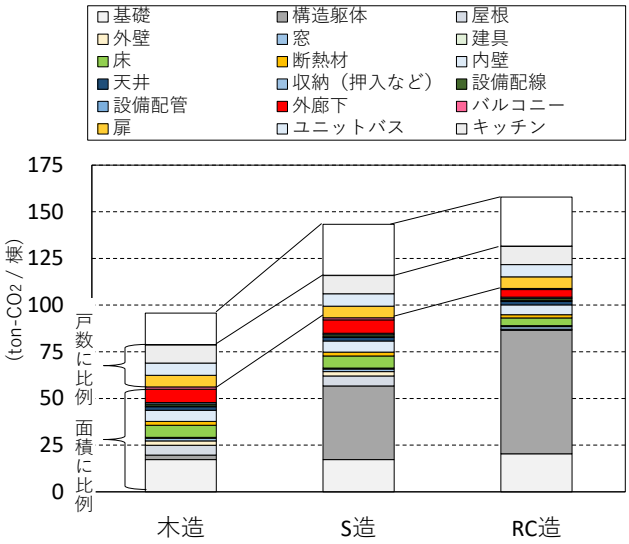


図 1 各構造の建設時 CO_2 排出量

3. 低層共同住宅の LCA

3.1 低層共同住宅の建設、修繕・改修、解体の LCA

各構造の建設プロセスの CO_2 排出量を図 1 に示す。木造が 96ton-CO_2/棟と最も小さく、S 造が 143ton - CO_2/

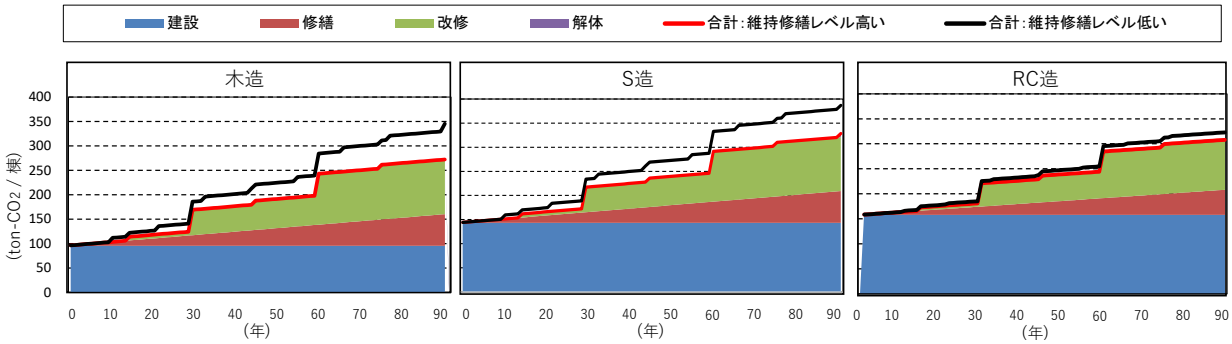


図 2 各構造の建設、修繕・改修、解体に関する CO_2 排出量

棟、RC 造が 158ton-CO_2/棟となった。次に、修繕・改修、解体を含めた結果を図 2 に示す。外壁・屋根の維持・修繕レベルが高い場合、90 年目の CO_2 排出量は木造が最小で 272ton-CO_2/棟となる。維持・修繕レベルが低い場合、S 造が最大で 329ton-CO_2/棟となり、主要因は S 造の維持・修繕に係る CO_2 排出量が大きい点であった。S 造は 39.5 ton-CO_2/棟、RC 造は 66ton-CO_2/棟と両構造は躯体の CO_2 排出量が大きくなった。

3.2 低層共同住宅の運用時の CO_2 排出量

運用時の CO_2 排出量の結果を図 3 に示す。省エネ基準に準じた仕様の場合、16ton-CO_2/棟・年、より高性能な設備を導入した場合、11ton-CO_2/棟・年となった。

3.3 低層共同住宅の $LCCO_2$ 評価

低層共同住宅の $LCCO_2$ の結果を図 4 の上図に示す。「標準」の場合、木造は 1,757ton-CO_2/棟、S 造は 1,804ton-CO_2/棟、RC 造は 1,804ton-CO_2/棟となる。「より高性能な設備」の場合、各構造で 420ton-CO_2/棟削減される。$LCCO_2$ の収支の図 4 の下図に示す。木造は「より高性能な設備」と「高性能な設備」の場合で LCCM 適合となる。S 造、RC 造は「より高性能な設備」の場合のみ LCCM 適合となる。

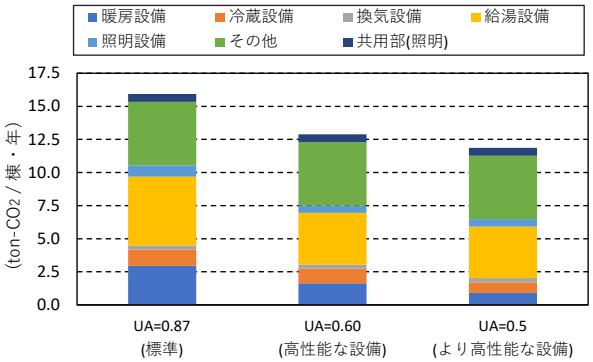


図 3 各性能の運用時における CO_2 排出量

4. まとめと評価手法の提案

本研究では低層共同住宅を対象に LCCM の実現可能性を検証した。その結果 32kW の太陽光発電パネルを設置した場合、断熱性能を確保しより高性能な設備の導入により LCCM への適合を確認できた。戸建版 $LCCO_2$ 判定ツールをベースに、本報の各プロセスのデータとその 1 の評価の枠組みに従い低層共同住宅版 $LCCO_2$ 判定ツールの開発を進めていく予定である。

謝辞

本研究は,LCCM 住宅・建築研究開発委員会（委員長：村上周三東京大学名誉教授、副委員長：伊香賀俊治慶応大学教授、副委員長：清家剛東京大学教授）の事業で行われた研究である。ここに謝意を表す。

引用文献

1）建築研究所, 住宅に関する省エネルギー基準に準拠したプログラム, https://www.kenken.go.jp/becc/,

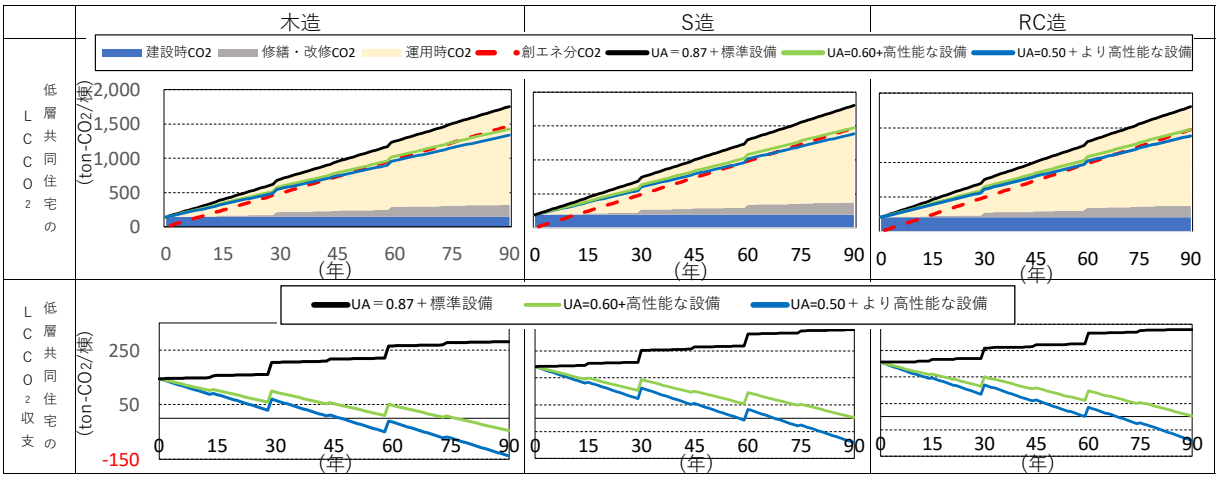


図 4 低層共同住宅の $LCCO_2$（上図）と $LCCO_2$ 収支（下図）

口頭発表セッション（一般）

[2-D1] 影響評価手法

座長：醍醐市朗（東京大学）

2022年3月3日(木) 09:20 ～ 10:40 D会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-D1-01] Novel SLCA method for measuring more good and less bad social impacts

*Dunuwila Pasan[1]、醍醐 市朗[1]、畑山 博樹[2]、正畠 宏一[3]、田原 聖隆[2]、星野 岳穂[1]（1. 東京大学、2. 国立研究開発法人産業技術総合研究所、3. TCO2株式会社）

09:20 ～ 09:40

[2-D1-02] 聖地巡礼の経済波及効果を考慮した環境・社会影響評価

*堤 哲彦[1]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学）

09:40 ～ 10:00

[2-D1-03] 電気自動車の需要拡大に伴う鉱物資源の環境・社会影響評価

*垣内 冴郁[1]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学院）

10:00 ～ 10:20

[2-D1-04] Development of biodiversity damage assessment in LCIA with the expansion of impact categories.

*劉 潤桭[1]、大橋 春香[2]、松井 哲哉[2]、伊坪 徳宏[1]（1. Tokyo city university 、2. Forestry and Forest Products Research Institute）

10:20 ～ 10:40

©日本LCA学会

聖地巡礼の経済波及効果を考慮した文化創作物の環境・社会影響評価

Environmental and Social Impact Assessment of Cultural Contents Considering the Economic Ripple Effect of Visits to Drama Location

○堤哲彦*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Akihiko Tsutsumi, Norihiro Itsubo
1）東京都市大学
＊ g1862040@tcu.ac.jp

1. はじめに

国土交通省が発行した報告によれば、観光業の成長と共に環境負荷の増大が懸念されており、環境と観光業を両立させる必要性が指摘されている。観光客受入の持続可能性を脅かす要素として「観光資源の毀損」と「生活環境の悪化」の２つがあり、観光によって得られた経済効果による富を再配分して観光により誘発される環境影響を抑制することが不可欠である。
美術や映画、アニメなどの創作物の価値については UNESCO が中心となって文化 GDP[2)] を提唱しており、文化活動によって産み出される付加価値の可視化に向けた国際的な取り組みが見られる。しかし、文化 GDP には創作物の制作や展示等に関する価値を含める一方で、映画やアニメ等の上映後に視聴者が舞台を訪問するといった聖地巡礼による影響を含めていない。
本研究ではドラマ一作品を対象に製作から放送、放映後をライフサイクルと捉えて、全体の環境・経済影響を評価し、文化 GDP と LCA の関係性について考察することを目的とした。

2. 研究目的

本研究では、文化創作物のライフサイクルを対象とした環境・経済側面の分析を実施して、制作、放映、放映後の環境影響、経済波及効果の定量的な関係について検討を行う。さらに、得られた結果より、特に放映後に視聴者による活動が全体の影響にどの程度寄与するかについて併せて考察を行って、当該部分を評価に含めることの重要性について検証する。

3. 研究方法

本研究では NHK 大河ドラマ「真田丸」の作品制作から放映後のイベント（旅行、聖地巡礼）までの環境・経済影響の評価を行う。システム境界（図 1）に示す、「制作」「放映」「放映後」を評価に含めた。制作においては信州上田観光協会より、制作においては放送局による報告データから、放映後に関する情報は長野経済研究所による報告より活動量データを得た。これらを基に金額基準の GHG 排出原単位を乗じてカーボンフットプリントを算定した。また、放映中の環境負荷量には、視聴者のテレビ利用に伴う CO2 排出量を算定した。

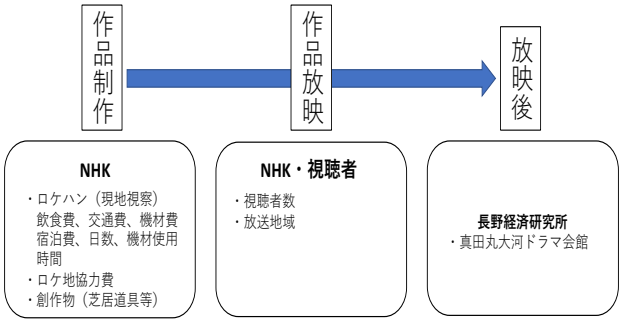


図 1 システム境界

4. 結果と考察

4.1 カーボンフットプリント

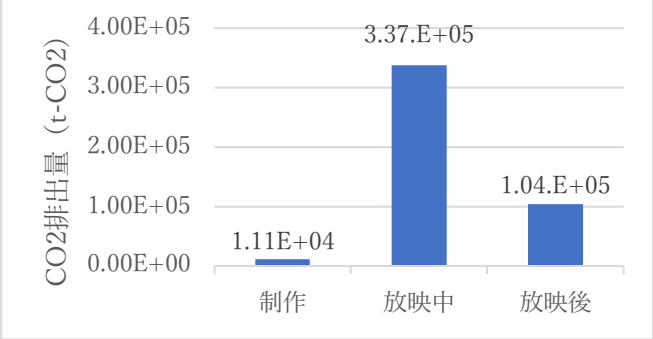


図 2 各過程の CO2 排出量

表 1　1 話・1 人当たりの CO2 排出量

過程	CO2 排出量/（人・回）
制作	6.12.E-03kg-CO2
放映中	1.87.E-01kg-CO2
放送後　日帰り	3.92E+01kg-CO2
放送後　宿泊者	1.70E+02kg-CO2

図２は本研究で対象とした全ての過程で排出された CO2 排出量の結果を表した。総量は約 45 万トンと推計され、その 7 割程度が放映時における負荷が占めた。これは、放送中での視聴者によるテレビの環境負荷量が大きいことによる。これに次いで放送後の負荷が大

きく、全体の 2 割を超えた。放送後の寄与は文化 GDP では算定対象外であるが、環境側面でみると一定の寄与があることが示された。表 1 では 1 作品並びに 1 人当たりの排出量を示した。放映時は視聴者の人数が重要な要素であるが、放映後は訪問人数と合わせて、ひとり当たりの訪問時の CO2 排出量が相対的に多いことがわかる。つまり、訪問者の数を増やすことが付加価値の創出に強く影響する一方で、滞在時の活動や購入物品によってカーボンフットプリントの算定結果は大きく変動し得る。

4.2 作品制作

表 2 は作品制作費に対応する 3EID 部門「映像・音声・文字情報制作」における原単位の寄与した上位を表したものとなっている。制作における電力消費が一番寄与しており、その次にコマーシャルなどといった配給に寄与している。

表 2 原単位寄与

事業用電力	1.38E-01
映像・音声・文字情報制作	8.66E-02
自家輸送（旅客自動車）	7.19E-02
その他（合計）	4.80E-01

4.3 作品放映

図 4 ではリアルタイムにて視聴した全 50 話の CO2 排出量と年末に放送された 4 部に分けての総集編における CO2 排出量の結果を表した。結果の通り、毎週視聴している方が総集編に比べ 65 倍もの環境負荷があることが結果として分かった。この差は平均視聴率から見ると、全 50 話は約 16%、総集編は 3%と視聴率の差が大きく起因している。

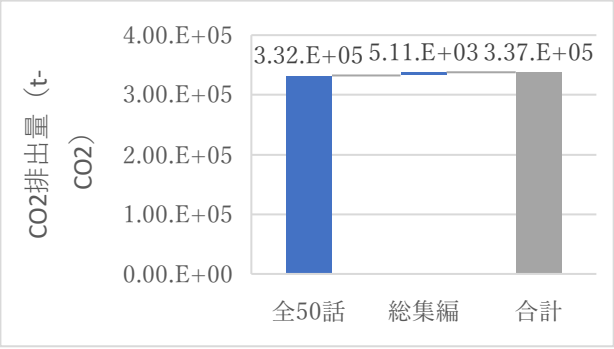


図 4 視聴者の CO2 排出量

4.4 放映後

放送中に開催された大河ドラマ会館の参加者を対象とした算定結果を図 5 に示した。宿泊者の負荷が 8.5 万トンであるのに対して、日帰りの来場者は約 2 万トンであり、宿泊者の負荷が大きかった。両者の間では移動の負荷が特に差が大きかった。長野県内 での移動は車を利用する割合が 6 割を占めており、県外からの移動でもマイカーを用いる割合が高いことが移動の負荷の影響を大きくする要因として考えられた。また、日帰りも宿泊も土産に関する負荷が大きかった。これは、【NHK 大河ドラマ「真田丸」による経済波及効果推計業務報告書】[3] から観光客に関わる消費金額を利用したものであるため、今回の評価対象に必ずしも合致するものではない。一次データの入手により信頼性を向上させることが課題である。

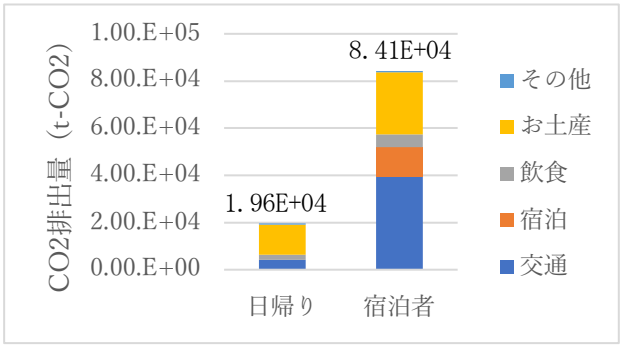


図 5 旅行者の CO2 排出量

5. まとめ・課題

作品の環境影響は視聴者によるものが大きく、観光業は全体の 3 割程度であるということが結果として算出された。本研究は 2016 年の 1 年間を範囲としており、聖地巡礼における観光の一過性を加味すると視聴率の環境負荷は相当高いものであると推測される。

また本研究の課題として 2 つあげられる。①観光客の対象を国内としていることである。海外からの観光客を加味していないため、環境負荷はより増加するものと考えられる。②NHK 関係のデータは情報開示が難しいことから公表されているデータのみでの推計として本研究を進めている。特に放映については、機材の詳細が不明のため算定に含んでいない。

6. 引用文献

1) 環境と観光の両立のための持続可能な観光客受入手法に関する調査業務 ―報告書―
2) 平成 30 年度「文化行政調査研究」文化芸術の経済的・社会的影響の数値評価に向けた調査研究
3) NHK 大河ドラマ「真田丸」による経済波及効果推計業務報告書

電気自動車の需要拡大に伴う鉱物資源の環境・社会影響評価

Environmental and Social Impacts assessment caused by the Growing Demand for Electric Vehicles

○垣内冴郁*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Sayaka Kakiuchi, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学
* g2183105@tcu.ac.jp

1. はじめに

世界の温室効果ガスの排出量のうち、自動車、トラック、バスなどあらゆる形態の道路交通からのガソリンやディーゼル燃焼による輸送 CO_2 が約 16%を占め、その内、旅客輸送は全体の 60%を占める[1)]。

また Electric vehicle(以下 EV)における LCA(Life Cycle Assessment)では、製造段階までの環境負荷が大きい[2)]。EV 数 は 2030 年に 2 億 3000 万台に達するという予測がされており、欧州を中心に 2030 年を目途にガソリン車・ディーゼル車への規制が予定されている。EV シフトによる各部品の需要拡大は、原材料調達の段階に多大な影響を与えると予想されている。

現在の EV 製造技術においてレアメタルは欠かせない存在であるが、レアメタルの利用は大きなリスクを抱えている。特にリチウムイオン電池に使われるコバルトは、コンゴ民主共和国(コンゴ民)から多くの調達がされており、児童労働、作業の危険性などの社会的リスクが報告されている[3)]。また、EV へのシフトは社会的リスクの深刻化に繋がる可能性があるだけでなく、採掘に伴う自然資本の消失も懸念されている。このように、バッテリーで利用されるレアメタルの需要拡大は、自然・人間・社会資本の悪化に寄与し得る。2015 年あたりから EV と社会影響に関する論文数は増えてきているが、これら全ての影響を適切に評価する手法は見当たらない。

2. 研究目的

本研究では EV シフトによる将来への環境影響と、それに伴う児童労働を代表とした社会影響を E-LCA(Environmental-LCA)と S-LCA(Social-LCA)の手法を用いて考察することを目的とする。また、2012 年のリオ+20 で提示された新国富指標を用いて、経済学による人的資本を算出し、包括的な EV シフトによるトレードオフの関係を考察していく。

3. 研究方法

3.1 環境影響評価

ISO14040 に沿い、インベントリ分析と影響評価を行う。インベントリ分析では、内燃機関(ICE)について自動車 LCA の既存研究をベースに LCA ソフトウェア SimaPro に入力し解析をする。また各業界専門家へのヒヤリングや多地域間産業連関表 MRIO を用いて EV のインベントリを作成し、需要増加による環境・社会分析を行う。

3.2 社会影響評価

データベースと解析については、S-LCA の手法として注目されている SHDB(Social Hotspots Database)と PSILCA(A Product Social Impact Life Cycle Assessment)の 2 つを用いる。

今回は SHDB を使用した既存文献[4)]をベースに容量 52.9kWh、質量 314.3kg のリチウムイオン電池パックについて算定を行った。(表 S1)また、既存文献から(1)「中国で生産(CN-focused production)」・(2)「ドイツで生産(DE-focused production)」・(3)「原材料の調達をリスクが低い国から輸入する、責任ある調達シナリオ(Responsible raw materials)」の 3 つのシナリオを参考にした。原材料は産出国の上位 3 国に割り当てられており、現在におけるサプライチェーンを仮想している。この 3 シナリオに追加して、(4)「アメリカで全てのサプライチェーンを網羅した(USA- focused production)」場合と、(5)「2021 年に確認できたアメリカで生産・製造が可能なサプライチェーンシナリオ(USA(NREL) - focused production)」(表 S2)の計 5 つを算出した。またアメリカのサプライチェーンシナリオを作成するにあたって、NREL の NAATBatt Lithium-Ion Battery Supply Chain Database[5)]を参照し、現在のアメリカにおいてのサプライチェーンを確認した。

4. 研究結果

4.1 シナリオ 1,2,3 の算定結果

算定結果として貧困、児童労働、汚職、職業上の有害物質と危険の 4 つのリスクカテゴリについて取り上げる。リチウムイオン電池のサプライチェーン構成要素である、原材料、コンポーネント、セル生産、バッテリーパックの 4 段階に沿って、それぞれのシナリオごとに表示したのが図 1 になる。(児童労働以外の図は SI の図 S1 を参照)全体として中国に生産の焦点をおい

たサプライチェーンはリスク時間が高い。図 1 よりシナリオ1,2 を比べてみると、セル製造では約 15 分の 1、バッテリーパック製造では約 20 分の 1 に児童労働のリスク時間が抑えられている。つまり、中国でセルとバッテリーパックを生産するよりも、ドイツで生産する場合では全体として約 3 割以上のリスク時間を減らすことができる。

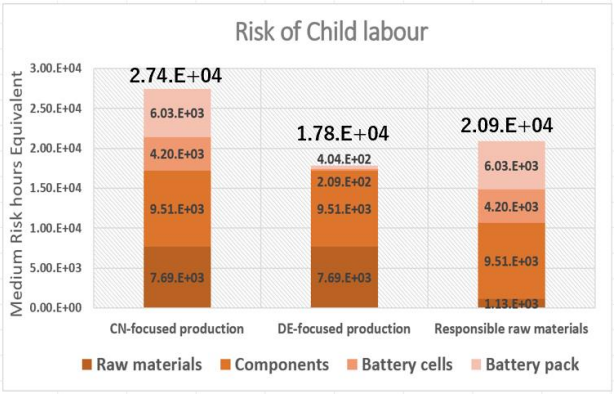


図 1 児童労働リスク時間（シナリオ 1, 2, 3）

またシナリオ 2,3 を比べてみると原材料調達段階において大きな差がみられた。単純に生産量が多い国々からの調達ではなくリスク時間が低い国から調達することにより、原材料段階におけるリスク時間が約 7 分の 1 に抑えられる。他のリスクカテゴリにも同様の傾向がみられ、セルとパックの生産を中国からドイツにシフトすることと、原材料の調達をリスクの低い国から行うことによって、トータルのリスク時間は大幅に削減できると考えられる。

4.2 シナリオ 4,5 の算定結果

こちらについても 4 つのリスクカテゴリについて取り上げ、サプライチェーン構成要素 4 段階に沿って、それぞれのシナリオごとに表示した。(図 2) (SI の図 S2 を参照)

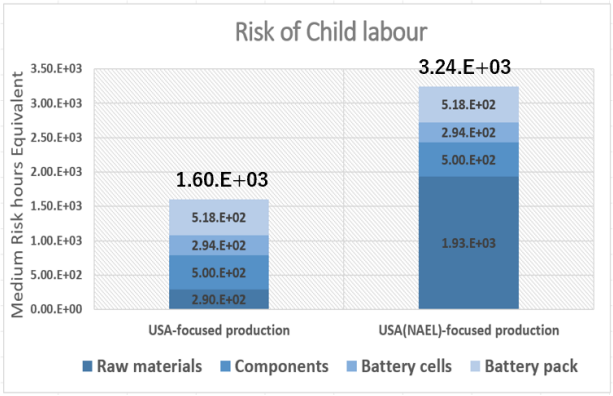


図 2 児童労働リスク時間（シナリオ 4, 5）

シナリオ 4,5 のリスク時間結果は、シナリオ 1,2,3 と比べると大きく減った。つまり、サプライチェーン全体をリスク時間の低い国で一貫して行うことによりリスク時間も小さくなる。また、シナリオ 4 と 5 を比べてみると原材料調達段階において、リスク時間に大きな差が出た。

5. まとめ

責任ある原材料調達を行うことによって、大きくリスク時間を減らせることが分かった。また、アメリカに注目したサプライチェーンシナリオの結果は中国・ドイツ・責任ある調達のいずれのシナリオよりも、リスク時間が低かった。しかし、アメリカのシナリオで比べると原材料調達におけるシナリオの差異により、大きな差がみられ、これにより、重大なリスクが銅やグラファイト、マンガン、コバルトといった原材料調達の段階に起因することが確認できた。

6. 課題と今後の展望

今回は既存文献をベースにシナリオを追加し検討を行った。課題として、SHDB にはコンゴ民のデータは存在していないので、隣国であるザンビアに変更し算定を行っている。算定結果値が、どれ程乖離しているかは検討の余地があり、今回の結果はコバルト生産の社会背景をできるだけ近似した値を表している。次に想定シナリオについてである。EV シフトには多くのリチウムイオン電池が必要であり、原材料を他国から輸入する必要性や価格を優先した取引が行われる可能性がある。

今後は既存研究や E-LCA で作成するインベントリから ICE の社会影響評価を行い、また今回算定結果をもとに EV の社会的リスクを算出していく。

7. 引用・参考文献

1) Our World in Data,:“Sector by sector; where do global greenhouse gas emissions come from? ”(2020)
2) Goldman Sachs:“ New era in Co2 regulation: EVs to be tested across life cycle, not only on running performance”(2019)
4) Amnesty International: “THIS IS WHAT WE DIE FOR”(2016)
5) Thies C. , Kieckhäfer K., Spengler T.S. ,Sodhi M.S., 26th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, LCE 2019, “Assessment of social sustainability hotspots in the supply chain of lithium-ion batteries”(2019)
6)NREL: “NAATBatt Lithium-Ion Battery Supply Chain Database”入手先<https://www.nrel.gov/transportation/li-ion-battery-supply-chain-database.html>(参照 2022-1-09)

Supporting Information

表 S1_算定条件

算定対象	リチウムイオン電池パック
機能単位	1 個(容量 52.9kWh、質量 314.3kg)
算定ソフト	Sima Pro9.1.0.8
リスクカテゴリ (一部抜粋)	Poverty, Child Labor, Occ Tox& Haz,Corruption
手法	Social Hotspots 2018 All Factors

表 S2_算定条件

段階	プロセス	サプライチェーン構成 アメリカ国内のみ	2021 年現在
バッテリーパック	・バッテリーパック製造	USA100%	USA100%
	・パックコンテナ製造	USA100%	USA100%
	・BMS 製造	USA100%	USA100%
バッテリーセル	・セル生産	USA100%	USA100%
コンポーネント	・負極集電体製造	USA100%	USA100%
	・負極活物質製造	USA100%	USA100%
	・セパレータ製造	USA100%	USA100%
	・電解液の製造	USA100%	USA100%
	・正極活物質製造	USA100%	USA100%
	・正極集電体製造	USA100%	USA100%
	・セル容器製造	USA100%	USA100%
原材料	・銅の生産	USA100%	CL56%,PE25%,CN19%
	・グラファイト生産	USA100%	CN76%,IN15%,BR9%
	・ポリエチレンの生産	USA100%	USA100%
	・炭酸リチウムの生産	USA100%	USA100%
	・硫酸ニッケル製造	USA100%	USA100%
	・硫酸コバルトの生産	USA100%	USA100%
	・硫酸マンガン製造	USA100%	USA100%
	・アルミニウムの生産	USA100%	ZA53%,CN25%,AU22%
	・シリコン製造	USA100%	CN83%,RU9%,CA8%
		USA100%	USA100%

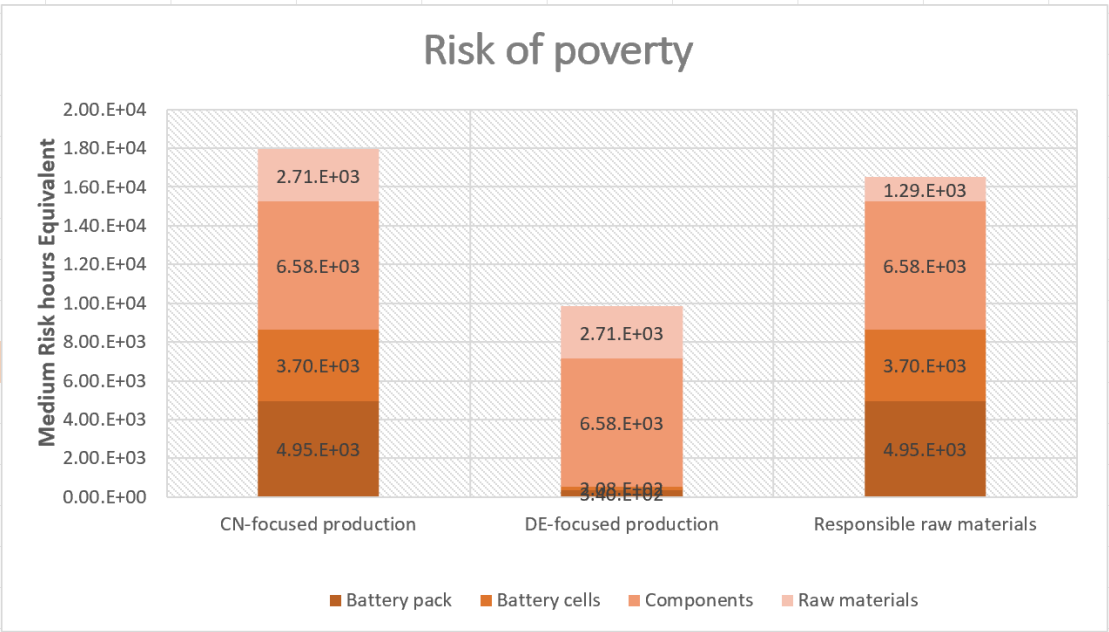


図 S1.1_中国・ドイツ・責任ある調達の算定結果(Risk of poverty)

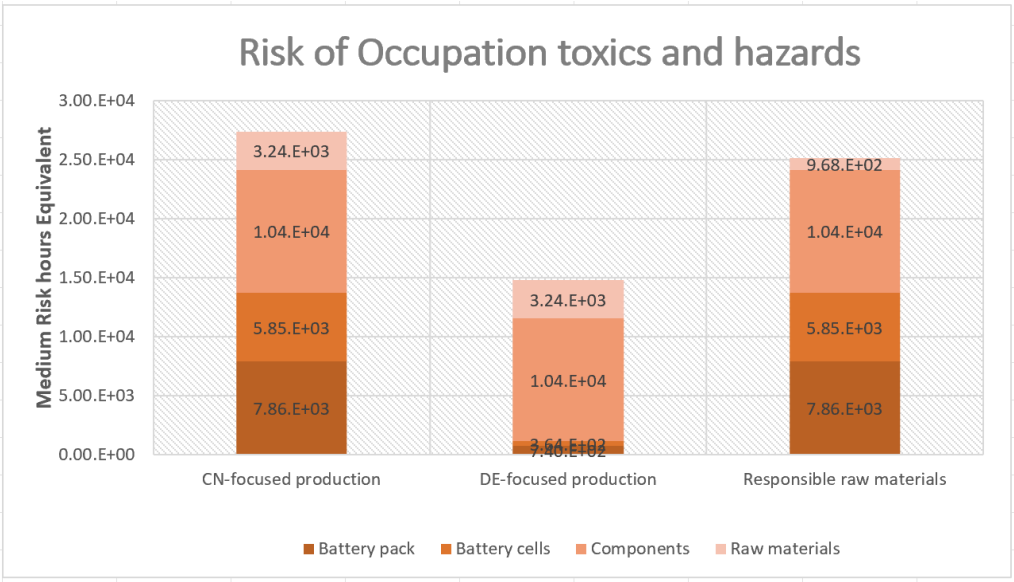


図 S1.2_中国・ドイツ・責任ある調達の算定結果(Risk of occupation toxics and hazards)

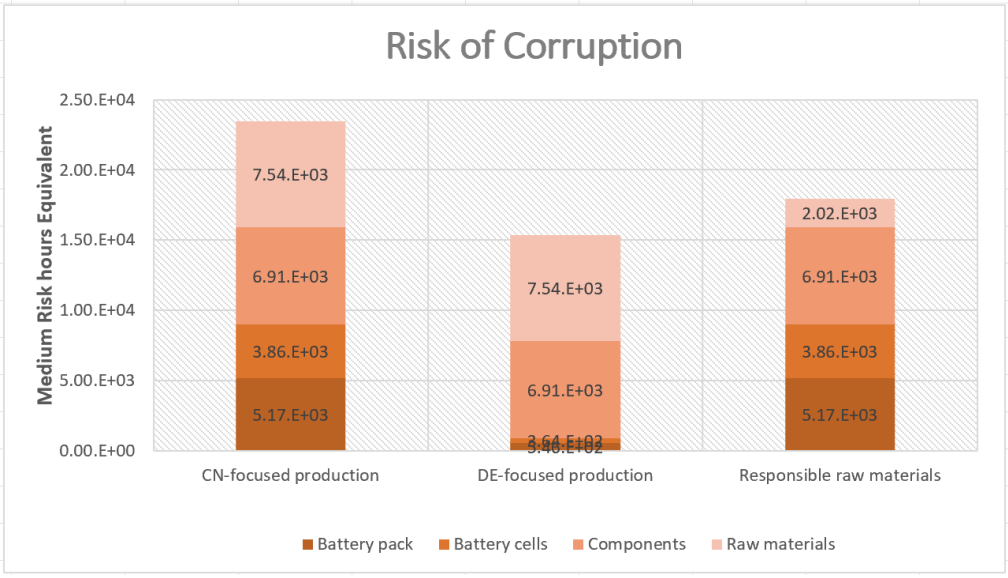


図 S1.3_中国・ドイツ・責任ある調達の算定結果(Risk of corruption)

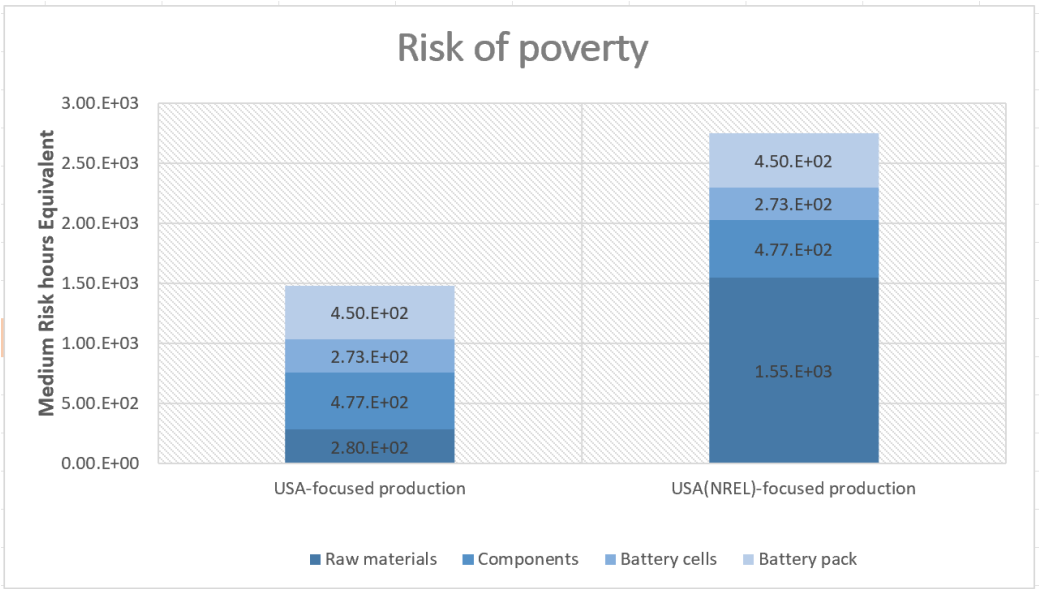


図 S2.1_アメリカ 2 シナリオの算定結果(Risk of poverty)

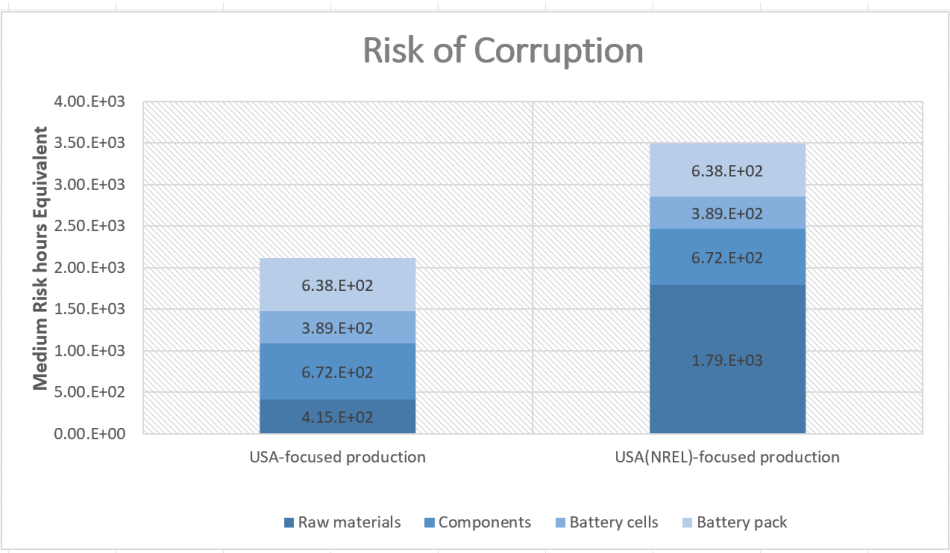


図 S2.2_アメリカ 2 シナリオの算定結果(Risk of corruption)

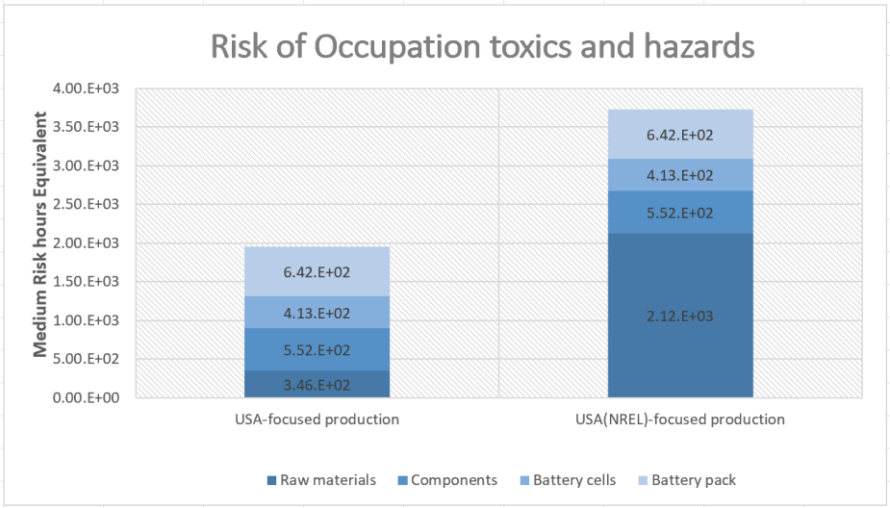


図 S2.3_アメリカ 2 シナリオの算定結果(Risk of occupation toxics and hazards)

Development of biodiversity damage assessment in LCIA with the expansion of impact categories.

Runya Liu[1)*], Haruka Ohashi [2)], Tetsuya Matsui [2)], Norihiro Itsubo[1)]
1) Tokyo city university, 2) Forestry and Forest Products Research Institute
* g2193107@ tcu.ac.jp

1. Introduction

1.1 Background

In aim of achieving the SDGs further step to the Aichi target, contributing the Kunming declaration, which is essential to lead the world approaching to the sustainably development. [1][2] The heightened focus of biodiversity, with which ecosystem in symbiosis to the human well-being has highly concerned by the world. However, how to grasp the dynamic change of the biodiversity along with the expanding anthropogenic activities and predicting for the future alarm accurately are still need effort. As far as the development has been improved in the field of Life cycle assessment (LCA), from which the LIME2 has already offered the insight for assessing the biodiversity, nevertheless, there still exist necessities to be further refined, in order to broaden the potentials meeting the demand for the efficiency and cooperation across boundary. [3]

1.2 research background

By means of revising the prior researches, some of research have already stepping in with an eye to the diversity of impact categories menu. At the same time, the insufficiencies are also going clearer:

1.) As for the metrics of biodiversity in field of LCIA are lack of the agreement to the performance, which is still under disputed. Thus, the related methodology and models are hard to be moved forward to meet the need of new environmental issues.

2.) The species record in LIME3 is limited, considering as large range record as possible to control the estimation is next essential topic.

3.) The impact category is under explored; the conventional menu could not be well responded enough.

1.3 Objectives

According to the variety of the gaps between, the objectives of this study are:

1.) Broaden the range of midpoints category menu towards biodiversity loss. In order to clarify the relations between potential impacts categories and biodiversity, that could be more comprehensively to see and more visualizable to be managed in corresponding to certain stages for a rather scientific decision-making.

2.) Comparing to the conventional metrics of potential disappear fraction (PDF) and EINES, the metric that used in the LIME under the same model, discussing the scientific performance of each metric to offer an effective reference for the future exploration in field of Life cycle impact assessment (LCIA). [4][5]

3.) Including the species record as much as possible in the evaluation, ideally including the both terrestrial and ocean species and give the experimental results based on the ecological modelling by applying the species distribution model. [6] (dataset: GBIF/OBIS as reference) [7][8]

2. Methodology

2.1 Research pathway

In this research, we applying the life cycle impact assessment with integrated the species distribution model to conduct the evaluation of the impact from the anthropogenic activities to the biodiversity change. With the prior research posed the comprehensive insight for this pathway, we further expanding the scale for both spatial and sample size. The research has been attributed to several steps (Figure.1): Firstly, in order to have an overview with the state-of-art development for which research has concerned the biodiversity with LCIA methodology, listing up the midpoint categories as the potential menu that will be further carry out in the stage. Secondly, we collected the related the information such as the data and key threshold for constraint the affection to the biodiversity change, gathering above input to the modelling. Considering the characteristics of the SDM, we choose to generate the evaluation under the MaxEnt. Finally, we predict the potential habitat change under different impact categories to construct the characterization factors for each impact category items. Comparing the results with other metrics proving the scientific performance in assessing the issue of biodiversity within the framework of LCIA.

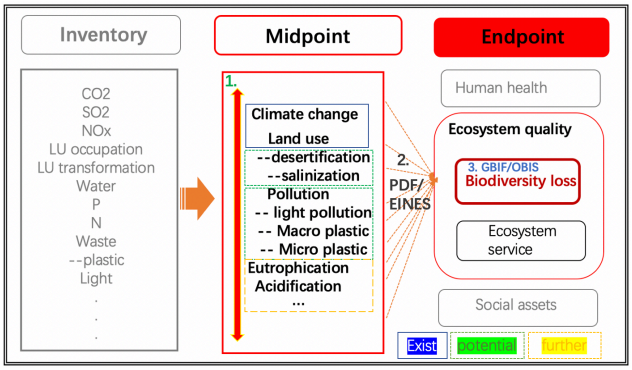


Figure 1. The research framework

2.2 Metrics construction

The main characterization factors for this research is based on the expected increasing in the number of extinction species (EINES), which is defined s the reciprocal of the number of years until extinction. [5] By referring the construction of prior study, we simply draft the formula as follows:

$$ER_{New} = \frac{(\frac{1}{T_{ii}} - \frac{1}{T_i})}{Env_{ii} - Envi}$$

ER_{New}: Extinction risk for target environmental impact categories with one period.
T_i: Time to extinction for the base scenario
T_{ii}: Time to extinction for the contrast scenario.
Env_i: Environmental condition for the base scenario.
Env_{ii}: Environmental condition for the contrast scenario.

3. Results

So far, we have been carrying out the first stage work for doing the LCIA methodology revising especially considering the research which covered the biodiversity evaluation. (The survey table is included in the SI)
In this survey, 60% of approach have focused on the global scale(n=10). The impact categories for biodiversity have collected 15 items, two newly concerned area (marine plastic, deep seafloor), in which the Climate change, land use and terrestrial acidification have higher agreement, 50% out of total. The metrics of PDF with SAR popular approach with the widest use (60%, n=10).
It is clear that the model approach limited the actual biodiversity status that hard to be revealed, which should be refined in the future work. Along with development of methodology and evaluation assessing the biodiversity in the LCIA. There are growing booming for the investigation to the impact categories. Although some researches have evaluating the new items with different pathway, there are still not mutual enough due to the quantitative way and lack of the consensus from the ecology aspect. Thus, the necessity for refreshing the category going urged.

4. Conclusion

The consensus between LCIA and ecology should be highly concerned in the near future while evaluating the impact from the human economic activities. By applying the ecological way for modelling with the observational data would be a comprehensive way for achieving the target.
In this study, we aim to explore deeper in branch of biodiversity by applying the concept of LCIA, filling out the blank and further promoting the development, the final results are expected to be applied in LCIA help to mitigate the daedal environmental impacts, formulate the alternative solutions among the different issues, strengthen the potential applicable range to the future challenges.

5. Reference

[1] IPBES (2019): Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 1148 pages. https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673
[2] The Kunming Declaration from the High-Level Segment of the UN Biodiversity Conference 2020 (Part 1) https://www.cbd.int/doc/c/df35/4b94/5e86e1ee09bc8c7d4b35aaf0/kunmingdeclaration-en.pdf
[3] Itsubo, Norihiro, and Atsushi Inaba. "LIME 2." JLCA Newsl Life-Cycle Assess Soc Japan 16 (2012).[2] Inaba, A., Itsubo, N. Preface. Int J Life Cycle Assess 23, 2271–2275 (2018). https://doi.org/10.1007/s11367-018-1545-6
[4] Jolliet, O., Müller-Wenk, R., Bare, J. et al. The LCIA midpoint-damage framework of the UNEP/SETAC life cycle initiative. Int J LCA 9, 394 (2004). https://doi.org/10.1007/BF02979083
[5] Tang, L., Higa, M., Tanaka, N. et al. Assessment of global warming impact on biodiversity using the extinction risk index in LCIA: a case study of Japanese plant species. Int J Life Cycle Assess 23, 314–323 (2018). https://doi.org/10.1007/s11367-017-1319-6
[6] Elith, Jane, and John R. Leathwick. "Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time." Annual review of ecology, evolution, and systematics 40 (2009): 677-697.
[7] GBIF.org (2021), GBIF Home Page. Available from: https://www.gbif.org [8.12.2021]
[8] OBIS (2021) Ocean Biodiversity Information System. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. www.obis.org.[8.12.2021]

Supporting information (The summary of the literature review)

year			ReCiPe2016	LC-impact	Impact-world	stepwise	EcoScarcity	ILCD	LUCAS	LIME3	No.2	No.12
			2016	2020	2019	2009	2013	2013	2007	2018	2019	2021
			Huijbregts et al.	Verones et al.	Bulle et al.	weidema et al	Frischknecht et al.		Cécile Bulle et al.	Itsubo et al	John S. Woods+,	Nils Préat et al.
group												
	scale	Global	●	●	●	●	●		*	●		●
		Regional	●	●	●		●	●	*		●	
	Impact category for biodiversity	Climate change	●	●					●	●		
		global warming				●						
		photochemical ozone formation	●	●	●				●			
		terrestrial acidification	●	●	●	●			●			
		freshwater acidification			●				●			
		freshwater eutrophication	●	●	●	●						
		terrestrial entrophication				●			●			
		freshwater ecotoxicity	●	●	●	●						
		marine ecotoxicity	●	●		●						
		terestrial ecotoxicity	●			●			●			
		resource consumption								●		
		land use occupation	●		●	●	●			●		
		land use transformation	●		●		●			●		
		water use	●									
		marine eutrophication		●	●							
		others.		● land stress ● water stress	● water availability				● ozone layer reduction		●	●
		new emerge category									●	●
												● deep seafloor
		midpoint stage									● macroplastic pollution	
		inventory stage										
	metrics/indicaotrs		PDF	PDF	PDF	BATHY	Ecopoint	PDF	PDF.PAF.Species richness	EINES	PAF	PDF
	unit		PDF/yr	PDF/yr	PDF/yr	Biodiversity adjusted hactare year		PDF/yr	Species richness/area	EINES/species/kg	PAF/g/km2	
	model	SAR	●	●	●	●		●		●		
		MaxEnt										
		others										
		quantitative										
		qualitative										
	Species taxon/volume:									216 species Japanese vascular plants	5 taxon	(wildfinder database)
	Note:			The CF obtained two types: the marginal and average/linear; the former covers less categories compare to the latter; (circle shows latter); the model adopted the classical SAR and matrix SAR	biodiversity impact was not the endpoint stage.	1 BAHY = 10,000 PDF m2 years; the development based on the ecoindicator99		The method was based on the ReCiPe				
	remainder			the calculation for each impact categories are detailed should learn it again.								

口頭発表セッション（一般）

[2-E1] 資源効率

座長：星野岳穂 （東京大学）

2022年3月3日(木) 09:20 〜 10:40 E会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-E1-01] 日本におけるステンレス鋼の物量投入産出表の作成と資源利用効率の評価

*松田 敏明[1]、橋本 征二[1] （1. 立命館大学）

09:20 〜 09:40

[2-E1-02] 鉛蓄電池とニッケル水素電池の資源効率の評価

*王 俊祥[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1] （1. 立命館大学）

09:40 〜 10:00

[2-E1-03] Analysis of secondary aluminium flows focusing on mobility transformation in China

*王 彬澤[1]、張 政陽[1]、松八重 一代[1] （1. Tohoku University）

10:00 〜 10:20

[2-E1-04] 動的マテリアルフロー分析と回帰分析による金属素材の用途別使用済み回収率の推計

*大西 圭祐[1]、武山 健太郎[1]、醍醐 市朗[1]、星野 岳穂[1] （1. 東京大学大学院）

10:20 〜 10:40

©日本LCA学会

日本におけるステンレス鋼の物量投入産出表の作成と資源利用効率の評価

Construction of physical input-output table for stainless steel in Japan and evaluation of its resource use efficiency

○松田敏明*[1)]、橋本征二[1)]
Toshiaki Matsuda, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* rv0063hp@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

循環型社会や循環経済の進捗を計測する指標においては、循環利用率やリサイクル率が重要な指標の 1 つとなっているが、循環利用量やリサイクル量の計測には任意性があり、客観的な数値とはなりにくい。これについて Hashimoto らは物質循環の 6 つの指標を提案し、日本の木材資源を対象にその適用例[1)]を示している。これについては、谷畑ら[2)]が農業系バイオマス、松田ら[3)]が鉄鋼材を対象とした評価を行っており、様々な物質について同様の検討を行うことが有益であると考えられる。

例えば、ステンレス鋼は耐食性に優れ様々な製品に使用されている。しかし、我が国は、これに含まれるクロムやニッケルといった希少金属元素を海外からの輸入に依存しており、資源の安全保障といった観点からも、国内での循環利用を促進することが求められる。

本研究では、日本におけるステンレス鋼を対象として、物質循環の 6 つの指標を適用し、その資源利用効率を評価した。また、ステンレス鋼の物質フローを体系的に記述するため、物量投入産出表を作成した。

2. 方法

2.1 物質循環の 6 つの指標と対象期間

物質循環の 6 つの指標は、直接物質投入量(DMI)、使用済み製品再生利用率(URRUP)、物質使用効率(MUE)、物質使用時間(MUT)、使用済み製品再資源化率(RRUP)、国内排出物量(DPO)で構成される[1)]。本研究ではこれを用いてステンレス鋼の資源利用効率を評価した。対象期間は 1970 年度から 2015 年度とした。

2.2 物量投入産出表

列方向を経済活動部門、行方向を製品・資源・廃棄物部門として物量投入産出表を作成した。原材料消費量やスクラップ消費量などの物質の投入が正の値、製品生産量や廃棄物発生量などの物質の産出が負の値で記述される。本研究では、ステンレス鋼の物質フローに対し、ステンレス鋼総量、クロム成分のみ、ニッケル成分のみの 3 種類の表を作成した。物質フローの推計に使用したデータは、ステンレス鋼板用途別受注統計、経済産業省生産動態統計年報(鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編)、財務省貿易統計等である。

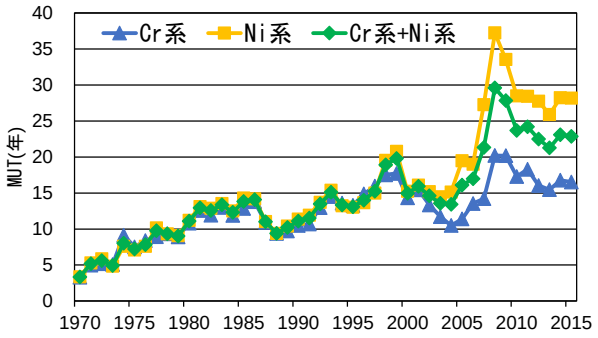


図 1　ステンレス鋼の物質使用時間(MUT)の推移

3. 結果と考察

本要旨では、物質循環の 6 つの指標のうち、ステンレス鋼の MUT の推計結果を示す(図 1)。本研究において MUT は、対象年度におけるステンレス鋼のストック量を同年度の最終製品投入量で除すことにより推計した。1970 年度から 2015 年度にかけて、ステンレス鋼の MUT は増加傾向であることが示された(1970 年度 : 3.3 年、2015 年度 : 22.8 年)。また、クロム系またはニッケル系ステンレス鋼のみについて同様の推計を行った結果、ニッケル系ステンレス鋼に比べクロム系ステンレス鋼は MUT が短いことが示された。これは、近年、ニッケル系ステンレス鋼の最終製品投入量のうち、船舶用やその他輸送機用などといった製品寿命の長い用途への投入量、及び同用途への投入量の割合が増加しているのに対し、クロム系ステンレス鋼においては、同用途への投入量やその割合が減少しているためと考えられる。

物量投入産出表の詳細やその他の指標の推計結果については学会当日に報告する。

謝辞 : 本研究は、環境研究総合推進費(JPMEERF20193002)、科学研究費補助金(19H04329)による成果である。

参考文献

1) Hashimoto, S et al: Resources, Conservation and Recycling, 40(3), pp.201-223, 2004
2) 谷畑佑典ら : 第 14 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、p.308、2019
3) 松田敏明ら : 第 15 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、p.368、2020

鉛蓄電池とニッケル水素電池の資源効率の評価
Evaluation of the resource efficiency of lead-acid batteries and nickel-metal hydride batteries

○王俊祥*[1)]，光斎翔貴[1)]、山末英嗣[1)] 柏倉 俊介[1)]
Wang junxiang, Syoki Kosai, Eiji Yamasue
[1)]立命館大学
rm0177vh@ed.ritsumei.ac.jp

1.緒言

各国の自動車産業の高速な発展に伴い，自動車の電動化が急速に進展している．国際エネルギー機関[1]によると, 2050 年における自動車の普及台数は 2000 年の約４倍に増加すると予測されていることから，多量の車載用電池が必要になると考えられる．

中でも，鉛蓄電池（LAB）はその安定した化学性質と優れたコストパフォーマンスから世界中の内燃機関自動車のみならず，電気自動車に代表される次世代自動車に使われている. また, ニッケル水素電池（Ni-MH）は安全性と長寿命性からハイブリッド車に多く使用されている．

これまで，車載用電池の製造においてクリティカルな鉱物資源の使用の観点から資源問題が注目されてきた．特に，車載用リチウムイオン電池は多くの研究の分析対象となっており, 既存研究 [２]によると, 車載用リチウムイオン電池の資源使用量はその重量に対し約 200 倍の資源が製造過程において投入されていることが報告されている．一方，鉛蓄電池やニッケル水素も多くの天然資源が投入されているのに対して，その定量的評価はほとんどいない．そこで本研究では，既存研究 [２]にならい，資源効率の指標である関与物質総量 (Total Material Requirement: TMR)を用いて，車載用鉛蓄電池とニッケル水素電池の資源効率を評価することを目的とする．TMR とは 1 kg の素材を製造するために必要となる資源使用量[kg-TMR/kg]のことを指す指標である．TMR は直接・間接の物質投入だけでなく，いわゆる隠れたフローも評価する指標であり，採掘活動に伴う物質量から資源への依存度を可視化できる．

2.研究手法

2.1. 天然鉱石由来

天然資源由来のバージン材を用いた際の鉛蓄電池とニッケル水素電池の 1 kWh 当たりの TMR 係数は式(1)より求められる. この時, TMR_iはバージン材i の TMR 係数（kg-TMR/kg），W_iはバージン材iの投入量（kg），Pは電池の容量（kWh）を指す.

$$TMR = \frac{\Sigma(TMR_i \times W_i)}{P} \qquad 式1$$

鉛蓄電池とニッケル水素電池の製造に関わるインベントリデータは[3]と[4]より得た.

2.2. 都市鉱山由来

次に，都市鉱山由来の二次材料を用いた際の鉛蓄電池とニッケル水素電池の製造における TMR 係数を評価する. 本研究で想定している使用済み Ni-MH の処理プロセス[6]では，リユースとリサイクル[7]を考慮する. 特に, リユースでは使用済みの Ni-MH の再利用可能なモジュールを再利用し，残りをバージン材からつくられる新たなモジュールで補うプロセスを想定している.

次に，本研究で想定している使用済み LAB のリサイクルでは乾式製錬プロセスと湿式製錬プロセス[5]の二つの回収方法を考慮した.

リサイクルプロセスにおける TMR の算出過程において，出力材料に主産物以外にも複数の副産物が存在する場合では資源使用量を分配する必要がある．ここではアロケーションの手法として, 資源使用量TMR の経済的価値による分配を仮定している．出力材料 k の重量と単位金額をそれぞれB_k (kg), D_k(円/kg), 配分率をr_kとする．配分率r_kの関係式を以下に示す.

$$r_k = \frac{B_k D_k}{\sum(B_k D_k)} \qquad 式2$$

続いて, 出力材料 k の TMR 係数TMR_k (kg-TMR/kg) は以下の関係式で示せる.

$$TMR_k = \frac{(\Sigma(TMR_i \times W_i) - \sum B_k) \times r_k + B_k}{B_k} \qquad 式3$$

3.結果と考察

天然鉱石由来と都市鉱山由来の車載用 LAB の資源効率に関する結果を図 1 に示す．内訳については，新規車載用 LAB において材料が 85%, エネルギーが 15%を占めている. エネルギーは生産における電力である. Pb が主な成分であり，重量ベースでは 60%，TMR ベースでは 81%を占めている.

バージン材を使った新規車載用 LAB に比べて，乾式・湿式リサイクルより得られた二次材を主体とした車載用 LAB の TMR は 57%以上減少する結果となり，湿式法で得られた Pb を使用することがより資源効率を高める結果となった.

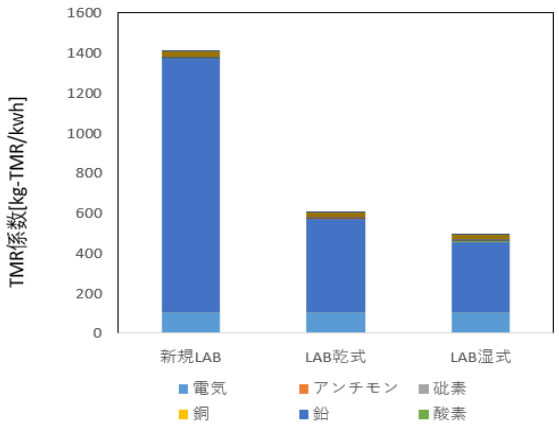


図 1　天然鉱石由来と都市鉱山由来における車載用 LAB の TMR

天然鉱石由来と都市鉱山由来の車載用 Ni-MH の資源効率に関する結果を図 2 に示す．新規車載用 Ni-MH において材料が 98%, エネルギーが 2%を占めている．重量ベースでは，Ni, La,がそれぞれ重量の 42%, 10%を占めているのに対し，TMR ベースでは 55%，25%を占めている．これは La 鉱石の鉱石品位が低く , Ni の TMR 係数 (260kg-TMR/kg) と比較して La の TMR 係数 481(kg-TMR/kg) が高いことに起因する．

リユースとリサイクルを経て製造された Ni-MH では新規車載用 Ni-MH と比べて 47%，26%減少している．これは Ni の TMR がそれぞれ 50%と 41%を減少したことに起因する．リサイクルに比べリユースの資源効率がより高いことから，リユースを経た上でリサイクルに移行する必要性が示唆された ．

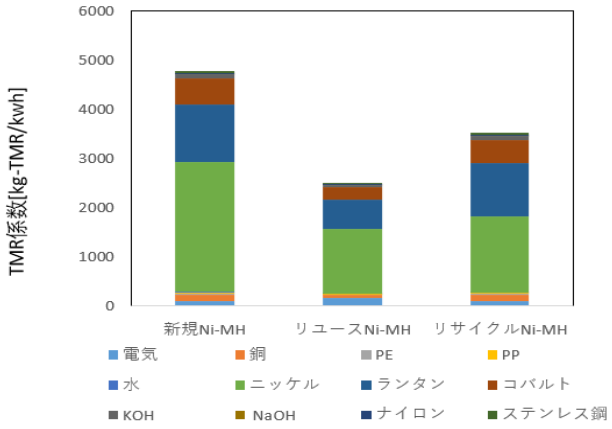


図 2 天然鉱石由来と都市鉱山由来における車載用 Ni-MH の TMR

しかし，得られた結果は鉱石の採掘地の異なる特徴により変化すると考えられる．そこで本研究では Ni-MH に使われるランタンに対して異なる採掘地の採掘活動量を使い Ni-MH への影響を分析を検証した．図 3 に分析の結果を示す．これより採掘活動量が少ない採掘地から得たランタンを Ni-MH に使用することで Ni-MH の資源使用量が大きく下がることが分かる．

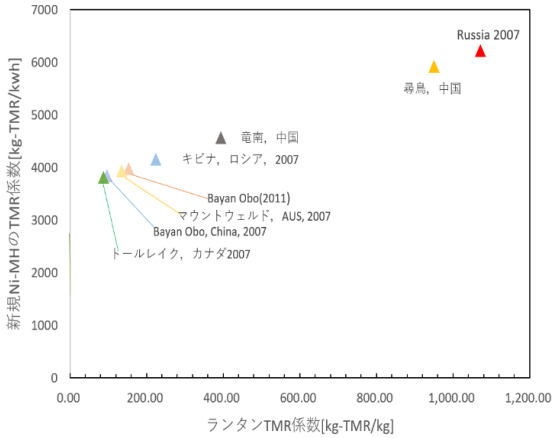


図 3 採掘地別のランタンと Ni-MH の TMR 係数との関係

4 まとめと今後の展望

本研究では，TMR を用いて，天然鉱石由来と都市鉱山由来の LAB と Ni-MH の製造に伴う資源使用量を定量化し，資源効率の評価を行った．今後の研究では，LAB と Ni-MH の製造とリサイクルで排出した温室ガスと SO2 も考慮して総合的な評価を行う．

参考文献

1) International Energy Agency, "Global EV outlook 2017," IEA, 2017.
2) Natural resource use of a traction lithium-ion battery production based on land disturbances through mining activities Shoki Kosai , Ukyo Takata , Eiji Yamasue ELSEVIER Journal of Cleaner Production Volume 280, Part 2, 20 January 2021, 124871
3) SUBAT: Sustainable Batteries. Final Report; SSPI-CT-2003-502490 Deliverable D 34; Final Report－EU ProjectN502490. Available online: https://www.battery-electric.com/subatdocs/WP6-031.pdf
4) https://www.peve.jp/product/nimh/(accessed on 28 June 2021)
5) Developments in electrochemical processes for recycling lead–acid batteries Sze-yin Tan1 , David J. Payne2 , Jason P. Hallett1 and Geoffrey H. Kelsall Current Opinion in Electrochemistry 2019, 16:83–89
6) Shuoyao Wang Jeongsoo Yu Kazuaki Okubo Life cycle assessment on the reuse and recycling of the nickel-metal hydride battery ournal of Industrial Ecology 2021;1-14. DOI: 10.1111/jiec.13126
7) Wang. S, J. Yu, and K.Okubo. 2021. Life Cycle Assessment on the Reuse and Recycling of Nickel-Metal Hydride Battery: Fleet-Based Study on Hybrid Vehicle Battery from Japan. Journal of Industrial Ecology 2021Journal of Industrial Ecology DOI: 10.1111/jiec.1312

Analysis of secondary aluminium flows focusing on mobility transformation in China

○Binze Wang*[1)]、Zhengyang Zhang[1)], Kazuyo Matsubae[1)]
1) Tohoku University
*wang.binze.q8@dc.tohoku.ac.jp

1. Introduction

Aluminium (Al) is the most important nonferrous metal widely used globally and especially in China. Greater demand for Al especially for wrought Al alloys in automobiles is being driven by the penetration of next-generation vehicles and lightweighting trends. As an essential material resource, the production of secondary Al can save 95% of the energy and reduce the environmental impacts compared with the production of primary Al [1)]. In order to improve resource efficiency and ensure resource sustainability, analysis of anthropogenic stocks and flows of Al is significant.

Existing models usually focus on primary Al as the starting point of flows [2-4)]. While the detailed flows of secondary Al in the waste management are not identified clearly in the previous researches, such as alloy types, the metal dissipation as deoxidizers, and dross occurrence. Hatayama et al. (2012) assessed China's Al flows by alloy types based on the next-generation vehicles' development, but they didn't consider the influence of vehicle lightweighting in China[5)].

In this study, the secondary Al flows in China for the year 2019 were estimated, and the impacts of the collection improvement, dismantling application, and high-tech facilities in the sorting process for the end-of-life vehicles' recovery on the flows were evaluated. Moreover, Al demands by alloy types in the automobile industry have been assessed according to the development of the next-generation vehicles and lightweight trends. A comparison of supply with demand is used to estimate the potential that primary Al required in the automobile industry can be reduced by secondary Al production.

2. Materials and Methodology

2.1 Material flow analysis

In this study, the material flow analysis was applied to the estimation of Al flows in China. The flows of Al include production by processing, use, net addition to stock, collection of discarded products, scrap processing, import, export, and materials leaving the system as losses.

The material loss rate of Al in each process was derived from the previous studies[2,4,6)]. The generation of old Al scrap is composed of domestic Al products after 12-17 years of service[3,7)]. And the generated rate of new Al scrap is 7% of the domestic primary Al production this year[8)]. Data related to the primary Al is obtained from CNMIA[9)], and the import and export of Al scraps are obtained from GACC[10)]. We assume that there is no stock in each process in this study, thus input flows are equal to output flows plus loss flows.

2.2 Scenarios setting

In this study, we divide the automobile industry with other sectors to assess the impacts of the improvements for end-of-life vehicles' recovery. No improvement scenario is set as the blank control. Four scenarios related to the collection improvement, dismantling application, and alloy sorting are considered. The collection rate of end-of-life vehicles can be improved from 42% to 95%; some vehicle components with wrought alloys could be dismantled as shown in Table 1; mixed shredded Al can be sorted into 8 categories of alloys with 90% success rate[11)].

Vehicles analyzed in this study only include passenger cars. One scenario about the development of the next-generation vehicles and lightweight trends is set based on previous researches and reports[12-13)]. The demands for Al in the passenger cars can be calculated by multiplying the vehicle output by the average Al demand per vehicle.

Table 1. Dismantling rate for scraped vehicles' components[11)]

Low dismant-ling	100% of wheels, 10% of closures, 50% of bumpers and crash boxes, 0% of heat shields, 100% of body parts, and 0% of other engine components.
High dismant-ling	100% of wheels, 80% of closures, 75% of bumpers and crash boxes, 50% of heat shields, 100% of body parts, and 75% of other engine components.

3. Results and discussions

3.1 The secendary aluminium flows in China

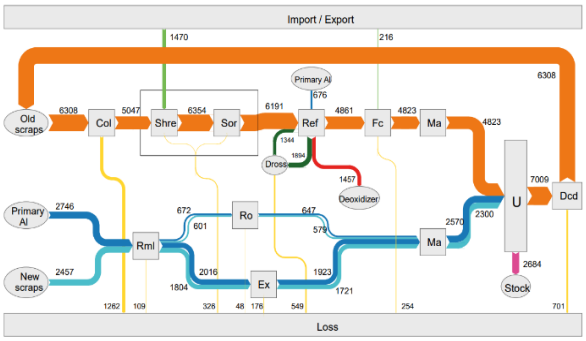


Figure 1. Sankey diagram of secondary aluminium flows in China in 2019. Numbers show the size of flows in Kt (thousand tons). U: Use; Dcd: Discard; Col: Collection; Shre: Shredding; Sor: Sorting; Ref: Refining; Fc: Foundry casting; Ma: Manufacturing; Rml: Remelting; Ro: Rolling; Ex: Extrusion.

As shown in Figure 1, in 2019, 6,308 Kt of old Al scrap and 2,457 Kt of new Al scrap entered the Chinese economy. Together with 3,422 Kt of primary Al ingots and 1,686 Kt of imported scraps, those added up to a total of 12,187 Kt of processed Al. Through the recovery process, 7,123 Kt of secondary Al was produced for further use, including 67.71% casting alloys and 32.29% wrought alloys. About 1,457 Kt of Al was generated as deoxidizers. The total loss rate of secondary Al flows is equal to 36.54%. The biggest material loss occurs in the end-of-life products collection process due to the underdeveloped waste management system and the lack of legislation in China.

3.2 Resource sustainability

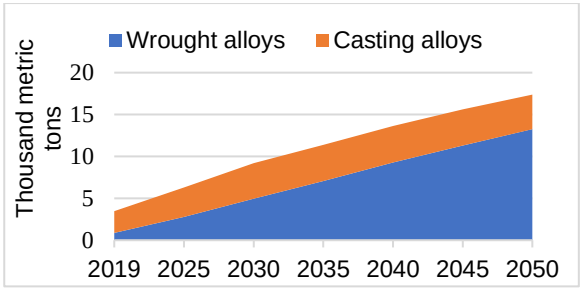


Figure 2. Estimated automotive aluminium demand in China, by alloy type

As shown in Figure 2, demand for Al in passenger cars will increase due to the development of the next-generation vehicles and lightweight trends. The amount of wrought Al alloys required in passenger vehicles was estimated to increase from 950 Kt in 2019 to 13,261 Kt in 2050, nearly increasing by 14 times. But the demand for casting Al alloys only increase 1.6 times, increasing from 2,599 Kt in 2019 to 4,120 Kt in 2050. Therefore, it is significant to ensure the supply of wrought Al alloys to meet the mobility transformation in China.

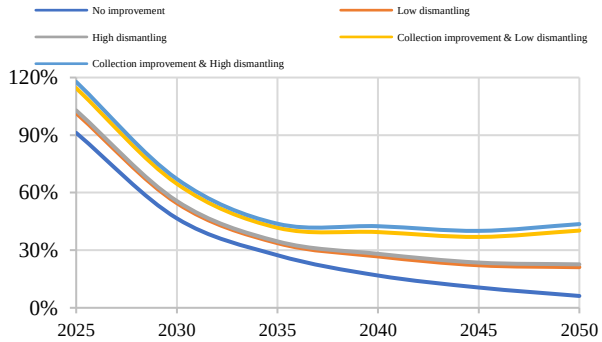


Figure 3. Potential of secondary aluminium production to reduce primary aluminium required in the automobiles (focus on wrought alloys)

As shown in figure 3, compared with no improvement scenario, alloy sorting and low or high dismantling application can increase the potential of recycling Al scraps as secondary Al and reduce primary Al requirement in passenger vehicles from 6% to 21% or 23% in 2050, respectively. The simultaneous use of the collection improvement, alloy sorting, and low or high dismantling can increase the potential from 6% to 41% or 44% in 2050, respectively. The development of the next-generation vehicles and lightweight trends lead to higher automotive demands for wrought Al alloys in the future, thus the collection improvement, dismantling strategy, and alloy sorting are essential to alleviate resource shortage and improve the resource sustainability of wrought Al alloys.

4. Conclusion

This study analyses the stocks and flows of secondary Al in China, evaluates the demands for Al resource by alloy types in China's automobile industry, and estimates the potential of recycling scrap Al to reduce primary Al required for vehicles. According to these results, there are two recommendations to improve the resource sustainability: 1) Improving collection efficiency of Al scraps by closing small enterprises in China to expand secondary Al industry concentration, enacting related legislations, and providing subsidy for end-of-life vehicles' recovery to improve enterprises' operation efficiency and people's recycling enthusiasm. 2) Applying dismantling strategy and high-tech facilities in sorting process to recycle end-of-life vehicles to separate wrought alloys from old scraps and realize "alloys to alloys" recycling.

5. References

1) Ding et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals 22(10), (2012). 2908–2915.
2) Chen et al. Resources, Conservation and Recycling 54(2010). 557–570.
3) Dai et al. Journal of Cleaner Production 226(2019), 793-804.
4) Ding et al. Journal of Cleaner Production 133(2016). 1167–1180.
5) Hatayama et al. Resources, Conservation and Recycling 66(2012). 8–14.
6) Zheng et al. (2010). Central South University.
7) Mole. Resources, Conservation and Recycling. 26(1999). 91-113.
8) Li et al. Resources Policy. 65(2020), 101573.
9) China Nonferrous Metals Industry Association. 2000-2021. The Yearbook of the Nonferrous Metals Industry of China.
10) General Administration of Customs of China. 2000-2021.
11) Lovik et al. Environmental Science and Technology. 48(2014). 4257−4265.
12) International Aluminium Institute. (2019).
13) Innovation center for energy and transportation. (2019).

動的マテリアルフロー分析と回帰分析による金属素材の用途別使用済み回収率分析手法の構築

Methodology for Identifying End-of-Life Recycling Rate of Metals by Dynamic Material Flow Analysis and Regression Analysis

○大西圭祐*[1)]、武山健太郎[1)]、 醍醐市朗[1)]、星野岳穂[1)]
Keisuke Onishi, Kentaro Takeyama, Ichiro Daigo, Takeo Hoshino
1) 東京大学
* onishi@mfa.t.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

金属素材のリサイクルは、一次資源の消費と廃棄物処理を回避できることから、環境負荷を低減する役割を担っている。リサイクル推進の進捗を評価する上では、使用済み製品に含まれている素材のうち、リサイクルされることなく散逸している量を推計することが重要であると考えられる。この散逸の過程は素材・用途別で異なり、例えば建築用途として基礎杭に用いられる鉄鋼材の一部は、そもそも使用済み製品として回収されず残置されることがある一方で、電気機械用途に用いられる電池に含まれるリチウムは、使用済み製品として回収されても殆どリサイクルされていない。このようなリサイクルにおける散逸を評価するための指標としては、使用済み素材が二次資源として回収された割合を示すEnd-of-Life Recycling Rate（EoL-RR）が望ましいと考えられている[1)]。これは、排出された使用済み製品に含まれる素材の量（排出量）に対する、実際にリサイクルされた素材の量の割合として定義される[2)]。素材・用途別のEoL-RRを推計することで、素材・用途別の散逸量を明らかにすることができる。これによって、素材・用途別に施策を検討し、より効果的なリサイクル促進手法を実施することが可能になると考えられる。しかしながら、回収された金属スクラップは由来となる用途が区別できないことから、既存研究では[3)]、素材の回収量は用途を区別することなく推計されてきた。そこで本研究では、金属素材の素材・用途別EoL-RR分析手法を構築することを目的とする。

2. 素材・用途別EoL-RRの推計手法

2.1 手法の概要

本研究においては、統計が十分に整備されている日本の複数の金属素材を評価対象とした。1つの国に閉じた分析においては、EoL-RRは排出量に対する老廃スクラップ回収量の比として定義される[3)]。そこで、本手法では素材の全用途の回収量の合計を被説明関数、素材の用途別排出量を説明関数とした回帰分析を行うことにより、用途別回収量を推計する手法を構築した。また、回帰分析を行う上で、既存手法[3)]では、素材の用途別排出量の推計結果の持つ不確実性が比較的大きいため、最終的に得られるEoL-RRの不確実性も大きくなってしまう点が不十分であった。そのため、本手法では、不確実性の小さな用途別排出量推計のために、動的マテリアルフロー分析の手法を再構築した。

以上のように、本手法は、老廃スクラップ回収量と用途別排出量を推計するサブモデル１と、サブモデル１で得られた結果から回帰分析により素材・用途別EoL-RRを推計するサブモデル２から構成される。

2.2 サブモデル１

老廃スクラップ回収量は、スクラップ需要量から、自家発生スクラップ量、スクラップ輸入量、加工スクラップ量を引くことで計算できることが知られている[3)]。一方で排出量は、動的マテリアルフロー分析によって推計されてきた[3)]。用途別排出量の推計は、製品寿命分布を用いた推計[3)]とした。製品寿命分布の設定においては、不確実性を低減するための手法が複数提案されている[3)]。しかしながら、これまではそれぞれの手法が各用途に適用できる要件が明らかになっていなかった。本手法では、これらの手法から用途ごとに排出量の不確実性が最も低くなる手法を選択できる動的マテリアルフロー分析手法の体系化を行なった。

2.3 サブモデル２

EoL-RRは使用済み製品の回収率(CR: Collection Rate)と使用済み製品からの単体分離率(ER: Efficiency Rate)との積で表される[2)]。このうちCRは、共通の用途に使われる金属で同じ値になると考えられる。t年の素材mの老廃スクラップ回収量$C(t,m)$は、式1で表される。

$$C_m(t) = \sum_i G_{im}(t) * CR_i(t) * ER_{im}(t) \quad \cdots (1)$$

ここで、iは用途を、$G_{i(t,m)}$、$CR_{i(t)}$、$ER_{i(t,m)}$は、それぞれ退役量、CR、ERを表す。サブモデル１で求めた

老廃スクラップ回収量と、係数CR_i、ER_iから求めた老廃スクラップ回収量の平均二乗偏差を目的関数として、非線形回帰分析を行い目的関数の最小化を行うことで、用途別にCR_iとER_{im}を推計することとした。

3　EoL-RRの推計

3.1 評価対象の設定

EoL-RR の値は、国ごとに大きく異なると考えられるため、統計が比較的整備されている日本のみを評価対象地域とした。評価期間は、データの得られた 2002 年度から 2016 年度までとした。評価対象とする金属素材は、(1)実際にリサイクルされていること、(2)他の金属素材と共通する用途をもつこと、(3) 素材全体の EoL-RR の推計に必要な情報が入手可能であること、の 3 つの条件に、鉄鋼材、銅素材、アルミニウム素材、亜鉛（鋼材めっき用途に限る）、亜鉛ダイカスト、鉛素材の 6 素材を選択した。用途分類は、建築、土木、産業機械、電気機械、家事機、自動車、他輸送機、容器、電力、その他の 10 用途に分類した。

3.2 EoL-RR の推計結果

構築した手法を用いて、素材・用途別のEoL-RRを推計した。2016年度のCRおよびERの素材・用途別推計結果を図１に示す。図で示されている各素材・用途のCRとERの積が、その素材・用途のEoL-RRを表している。図中の曲線は等EoL-RR線であり、図中左下にプロットされている素材・用途ほどEoL-RRが低く、改善の必要性が高いと言える。

この結果から、CRが全ての用途に対して50%を超えているのに対して、ERは素材・用途によって10%未満の非常に低い値を取っていることが分かった。特に、EoL-RRが10%を下回っている素材・用途では全ての場合においてERが10%を下回っている。このことから、素材・用途別のEoL-RRの向上のためには、製品をより素材ごとに単体分解しやすいような設計にするなどして、対象とする素材・用途のERを向上させるような施策を取ることが望ましいと考えられた。

3.3 重み付けによるリサイクルの評価

リサイクルのマテリアルフローを各素材・用途で統合して評価するために、鉱石の関与物質総量ore-TMR (Total Materials Requirement)を用いた。結果を図２に示す。散逸した使用済み素材のore-TMRの大部分は、使用済み製品の未回収分に由来していた。これは、ore-TMR換算した際には鉄鋼材と銅素材の関与が全体の大部分を占めており、かつこの２素材のERが高いためであると考えられる。このことから、社会全体のore-TMRを削減するためには、法整備などでCRを向上させるような施策が特に有効であることが考えられる。

4　結言

本研究では、金属素材の素材・用途別 EoL-RR 分析手法を構築した。また、それを用いて実際に、素材・用途別 EoL-RR の推計を行なった。その結果、ER の改善が求められる素材・用途が多く認められる一方で、社会全体の ore-TMR 削減のためには CR の向上が重要であることが分かった。

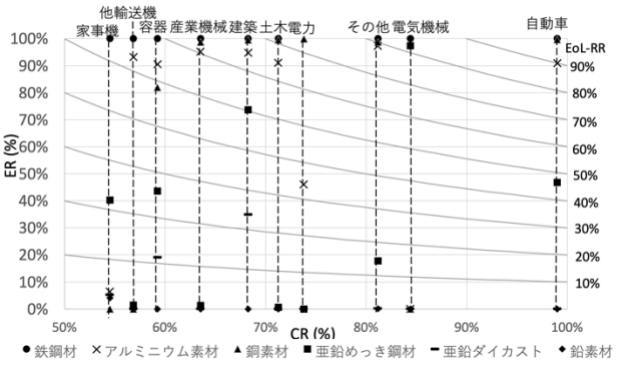


図１　2016 年度における各素材・用途の CR および ER

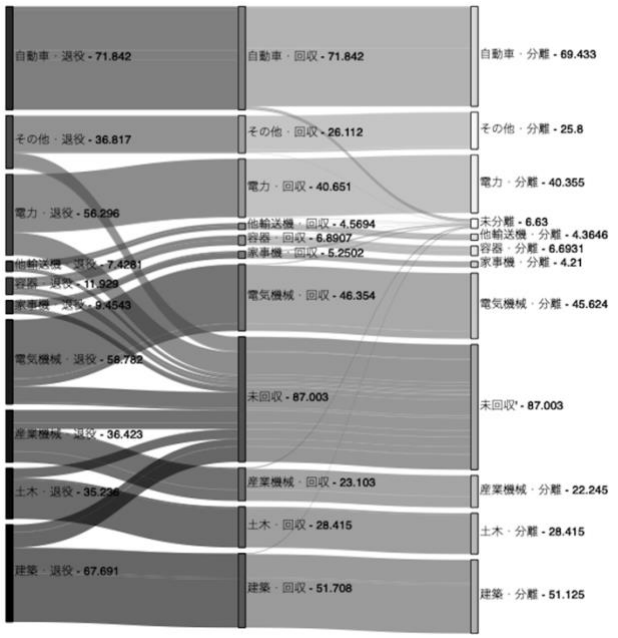


図２　2016 年度におけるリサイクルのマテリアルフロー（TMR 換算）[million ton]

引用文献

1) J. Artherton,: Int J LCA, 12, (2007), pp 59-60
2) UNEP International Resource Panel. Recycling rates of metals - A Status Report. Group (2011).
3) I. Daigo et al.: Environ. Sci. Technol. 49, (2015), pp 8691-8696

口頭発表セッション（一般）

[2-A2] 窒素・リン

座長：松八重 一代（東北大学）

2022年3月3日(木) 11:00 〜 12:00 A会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-A2-01] Time Series Analysis on Food Phosphorus Footprint of the Indian Subcontinent

*Dhar Aurup Ratan[1]、Oita Azusa[2]、Matsubae Kazuyo[1] （1. Tohoku University、2. National Agriculture and Food Research Organization）

11:00 〜 11:20

[2-A2-03] IDEAを活用した窒素循環評価のためのデータベース開発

*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）

11:40 〜 12:00

©日本LCA学会

Time Series Analysis on Food Phosphorus Footprint of the Indian Subcontinent

○Aurup Ratan Dhar*[1)], Azusa Oita[2)], Kazuyo Matsubae[1)]
1) Tohoku University, 2) National Agriculture and Food Research Organization
* aurup.ratan.dhar.p2@dc.tohoku.ac.jp

1. Introduction

Phosphorus (P) is an essential element for all living organisms. With 80% of global P consumed as fertilizers, the agriculture sector acts as the largest user of P. However, only 20% of mined P is actually consumed as food[1]. Excessive P in water is known to result in both environmental and health problems. The P footprint explains the P loss to the environment. P use efficiency (PUE) of crop cultivation and religious dietary cultures largely influence the P footprint of food[2].

The Indian subcontinent (ISC), consisting of India, Bangladesh, Pakistan, Sri Lanka, Nepal, and Bhutan, is well-known to be the world's most religiously diverse region. From the current population of this region, 35.9% are Muslims, 34.6% are Hindus, 25.9% are Buddhists, 2.1% are Christians, and 1.5% of the population align themselves with other religions[3]. The dietary restrictions and food traditions of these religions considerably influence the food P footprint[2]. The Indian cropping system is characterized with a low PUE[4]. Therefore, increasing crop cultivation PUE at food production-level and adopting a diet with a low P footprint under the rules and traditions of each religions are important for sustainable P management. In this study, we estimated the historical food P footprint of the ISC and predicted that towards the 2050s under different scenarios.

2. Data and Methods

The food consumption cultures of Muslims, Hindus, Buddhists, and Christians were considered. Food supply and consumption data were collected for the period 1961–2013[5].

2.1 Calculation of food P footprint

A religion-sensitive P-Calculator method was used to estimate the food P footprint of the ISC. The food P footprint was estimated as the sum of the food production and the food consumption P footprints. The food production P footprint of each food item per capita in each religious community was calculated by multiplying 'the amount consumed by the community', 'the ratio of P content in the food item', and 'virtual P factor (VPF) of the food item, i.e., P loss per unit P intake'[2]. The food consumption P footprint for the same entity was calculated by multiplying 'the amount consumed by the community', and 'the ratio of P content in the food item'.

2.2 Assessment of scenarios

A long short-term memory recurrent neural network approach[6] of the machine learning method was applied to establish benchmarks with the following scenarios: i) the business as usual (*BAU scenario*), and ii) increase in the crop cultivation PUE by 30% and altering the food share to the healthy EAT-Lancet reference diets[7] considering religious dietary guidelines (*PUE_EAT scenario*).

3. Results and Discussion

The consumed P was the highest in cereals followed by "oil crops and pulses" and "milk and dairy products". Being vegetarians, Hindus and Buddhists intake no P from "meat and offal", eggs, and "fish and seafood" (Figure 1). With a decline in the crop cultivation PUE from 92% in the 1960s to 50% in the 2010s (Figure 2) due to overfertilization, improper use of other production inputs, and low P recycling and recovery rates, the food P footprint of the ISC increased slightly from 0.91 kg-P capita^{-1} year^{-1} in the 1960s to 1.18 kg-P capita^{-1} year^{-1} in the 2010s (Figure 3). Buddhists had the lowest food P footprint consistantly while Christians were found to have the highest (Figure 4). The food P footprint of the ISC would increase by nearly 5% in the 2050s for the *BAU scenario*, but it would decrease by about 19% for the *PUE_EAT scenario* (Figure 5).

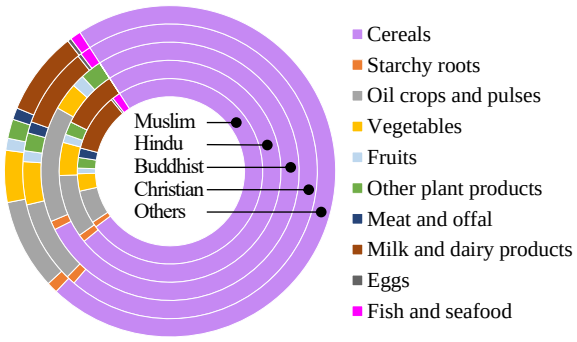


Figure 1. P consumed from food by religion.

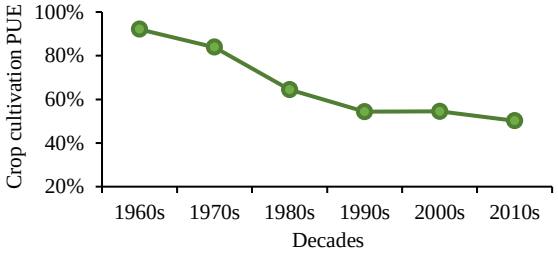


Figure 2. Crop cultivation PUE over decades.

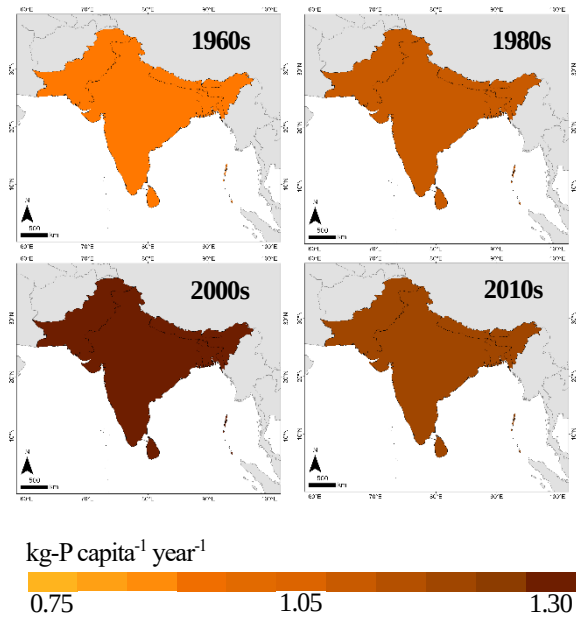


Figure 3. Observed food P footprints.

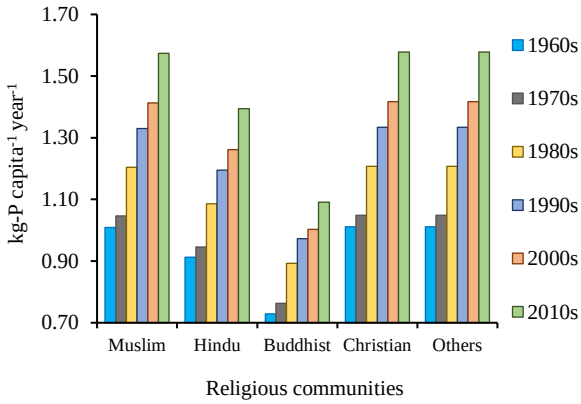


Figure 4. Food P footpints of people based on religion.

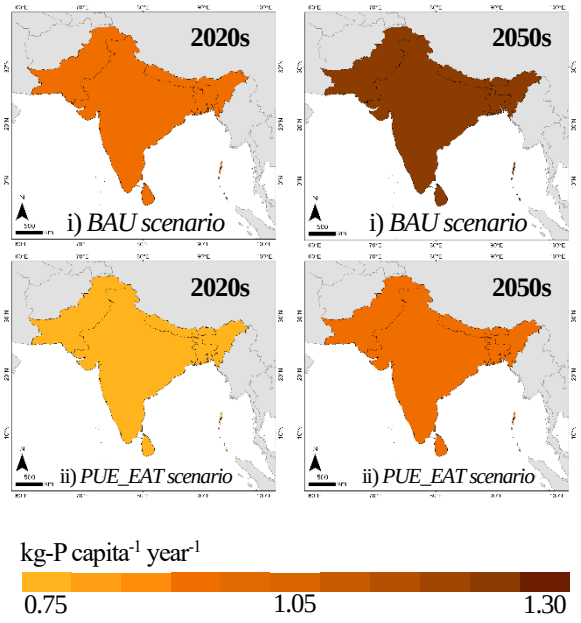


Figure 5. Expected food P footprints.

For practical implementation of the *PUE_EAT scenario* to reduce food P footprint of the ISC, we suggest to increase the crop cultivation PUE at the production-level and adopting a healthy diet at the consumption-level which safeguard the daily nutritional requirements with minimum P loss from food. Increasing the crop cultivation PUE is necessary to lower the VPFs, hence, it is urgent to increase farmers' knowledge about crop-specific appropriate time, rate, and place of fertilizer application. To secure individual's daily calorie requirement of 2500 kcal capita^{-1} day^{-1} as prescribed in EAT-Lancet planetary health diet, we recommend decreasing the consumption of cereals, starchy roots, and "milk and products" while increasing the consumption of "oil crops and pulses", vegetables, fruits, and "other plant products" in such ratios that support cultural food taboos of the religious communities.

There are several assumptions and limitations of this study which need to be acknowledged. We assumed that at least three-fourth of the population who identified with considered religious faiths strictly follows the dietary guidelines of those faiths. We did not consider any type of unpredicted shock in the future preditction. It should also be noted that changing dietary habits to a religion-sensitive healthy diet is challenging.

4. Conclusion

We conclude that increasing crop cultivation PUE and adopting EAT-Lancet reference diet with our recommended religion-sensitive alterations in food daily food composition would reduce the food P footprint of the ISC. The findings highlighted the need for actions to increase crop cultivation PUE through enhancing farmers' knowledge and more widely adopting efficient fertilization measures, and promoting religiously compatible diet with less P loss in the environment.

5. References

1) Metson G.S., Cordell D., Ridoutt B.: Front. Nutr., 3, (2016), 35
2) Dhar A.R., Oita A., Matsubae K.: Nutrients, 13 (6), (2021), 1926
3) Hackett C., Grim B.J., Stonawski M., Skirbekk V., Potančoková M., Abel G., "The global religious landscape: A report on the size and distribution of the world's major religious groups as of 2010", 2012
4) Dwivedi B.S., Singh V.K., Shekhawat K., Meena M.C., Dey A.: India Journal of Fertilizers, 13 (8), (2017), pp. 20-41
5) FAOSTAT: "Food balances (old methodology and population)", Food and Agriculture Organization of the United Nations, (online), available at <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBSH>, (reference 2019-09-17)
6) Le X.H., Ho H.V., Lee G., Jung S.: Water, 11 (7), (2019), 1387
7) Willett W., Rockström J., Loken B., Springmann M., Lang T., Vermeulen S., Garnett T., et al.: The Lancet, 393, (2019), pp. 447-492

IDEA を活用した窒素循環評価のためのデータベース開発

Development of Database for Nitrogen Cycle Assessment 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.ichisugi@aist.go.jp

1. 背景

プラネタリーバウンダリーで議論された窒素は近年の人口増加と経済発展に伴い過大消費されることが問題視されている。これは不活性な空気中の窒素を化学肥料や化学繊維といった化学製品へ人為的に利用したことにより、燃料燃焼における燃料成分中の窒素が酸化することによる NO x の排出と空気中の窒素が酸化されることによる NOx が排ガスに含まれ、有害物質として大気中に放出されることや、排水に含まれる窒素化合物が有害物質として水圏に放出されることに起因する。この問題を解決するため、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構のムーンショット型研究開発事業では、「産業活動由来の希薄な窒素化合物の循環技術創出―プラネタリーバウンダリー問題の解決に向けて」[1)]にて、窒素化合物の無害化・資源化を実現するための窒素を循環させる技術が開発されている。具体的には、工場の排ガス中の NOx や排水中の有機体窒素・NH4+をアンモニアに資源化し、再利用する技術である。この技術を導入することで、窒素化合物の排出による環境負荷をどの程度削減できるかを定量的に分析することが求められる。さらに技術を導入する際の環境負荷と運用する際のエネルギー利用や資源消費といった環境負荷が大きくならないことが重要である。したがって、直接的な影響に加え、間接的な影響まで含んだライフサイクル全体の分析が必要である。そのためには、製品のライフサイクル全体で窒素の投入量と産出量の収支を把握し、窒素による環境負荷を定量化するためのデータベースが必要となる。。

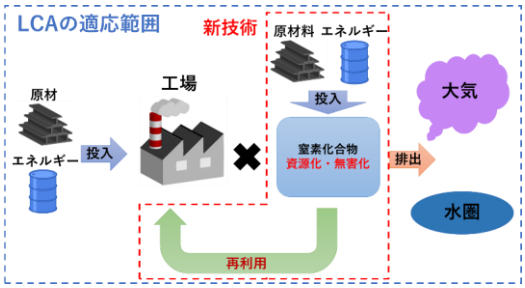


図 1 窒素循環技術導入の LCA 適応範囲

そこで、本研究では、これまで開発してきたインベントリデータベース IDEA[2)]におけるプロセスデータの窒素投入量、産出量を的確に整備することで、必要な窒素量を把握し、排出される窒素の環境負荷を定量的に分析するためのデータベースを開発することを目的とした。

2. 研究方法

2.1 評価対象

本研究が対象とする循環技術は工場から排出される窒素を還元する技術なので、工業製品のプロセスを対象とした。なかでも、窒素を資源として投入するプロセスがある、化学工業を対象とした。現状の IDEA は約 4700 項目のプロセスを格納しており、化学製品は約 700 項目である。

2.2 物質収支の整備

図 2 は IDEA のプロセスデータを図示したものである。製品を作るために投入される項目である原材料、エネルギー、サービスを入力フローとし、完成した製品とそれに伴う、副産物、環境負荷物質、廃棄物を出力フローとする。それぞれの入出力に該当する項目が窒素を含んでいる場合、その含有率を求めることで、窒素の入力量と出力量を求め、最終的にその差分から収支を得る。ただし、窒素量の収支がとれても、他の物質の収支も合うことが必要である。そうでなければ、プロセス全体での収支が合わなくなってしまう。そこで、窒素の収支に加え、プロセス全体の物質の収支（マスバランス）、炭素、リン、水の収支も確認した。

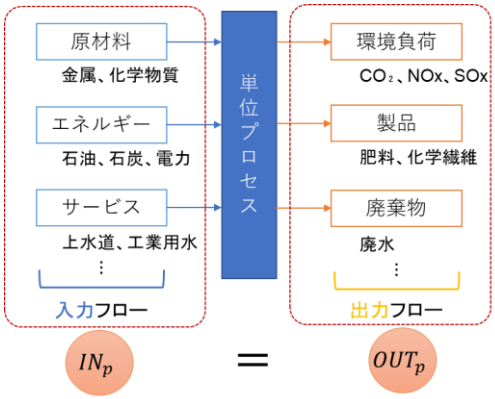


図 2 窒素循環技術導入の LCA 適応範囲

図３はナイロン 66 のプロセスを図示したものである。材料であるアジピン酸、ヘキサメチレンジアミン（HDMA）、プロセス水に対し、製品であるナイロン 66 と副産物として生成される水の物質収支をとる。この入力と出力における窒素の含有量を求めることにより、窒素の入力量と出力量を求めることができる。この差分をとることで、窒素の収支を得る。物質の生成に利用される冷却水の入力量と廃水の出力量の差分で、水の収支を確かめた。エネルギーとして投入される電力、重油エネルギーに関しては、ナイロン 66 の物質収支の対象外とする。これは、電力であれば発電のプロセス、重油エネルギーであれば、重油の燃焼のプロセスで物質収支を確認するからである。したがって、ナイロン 66 のプロセスで物質収支の対象とするのは、材料と冷却水の入力、製品、副産物、廃水とする。（図 3 の赤枠）

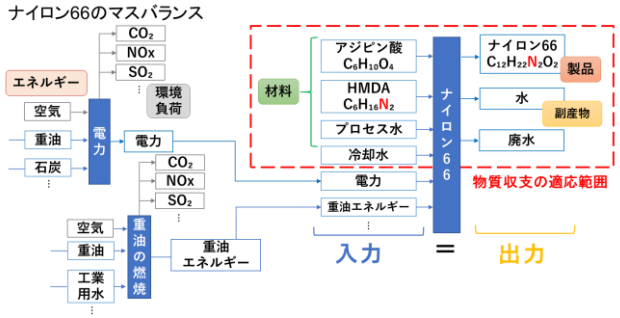


図 3 ナイロン 66 のプロセス

3. 研究結果

表 1 はナイロン 66 の物質収支を示した結果である。マスバランスは材料と製品、副産物の物質収支である。入力量と出力量が一致しており、差分が 0 となっているので、収支がとれていることを表す。同様に、炭素、窒素の含有率から各々の入力量と出力量から、物質収支がとれていることがわかる。また、プロセスに入力される水の収支がとれていることも確認した。このように、各プロセスで、プロセス全体の物質収支がとれることを確認しながら、窒素の入力量と出力量の情報を整備した。

表 1 ナイロン 66 の物質収支結果

チェック項目	単位	入力	出力	差分	検証
マスバランス	[kg]	1.1592	1.1592	0.0000	○
炭素（C）	[kg]	0.6372	0.6372	0.0000	○
窒素（N）	[kg]	0.1239	0.1239	0.0000	○
リン（P）	[kg]	-	-	-	–
水	[m³]	1.1200	1.1200	0.0000	○

※リンは含まれないため“-”と表示した

4. 課題

これまで実施してきた化学工業における物質収支の課題として、空気を投入するプロセスにおける物質の構成比がある。材料として投入される空気中の窒素がどれくらいの割合で物質に利用されるのかを定量的に示す必要がある。さらに、燃焼で物質を生成するプロセスでは、燃焼に利用される酸素と物質に取り込まれる酸素の割合を定量化する必要がある。生成する際の温度などが条件によって異なり、空気を投入するプロセスでの物質構成比を一律にするのが困難なため、プロセスごとにデータを整備していく必要がある。

各プロセスから排出される有害物質に関しては、PRTR が対象としている物質に関しては、事業所の排出報告データから、プロセスに紐づけて排出量を計上しているが、その排出に関する入力データを決めることが、課題となっている。

5. まとめ

現状、このような方法でプロセスデータの確認を行いながら整備している。これにより、製品の環境負荷を計算する際に窒素の入出力が定量的に示すことができ、開発している循環技術の導入に際して間接的な窒素の動向までも分析することが可能となる。特にこれまで考慮されてこなかった大気中の窒素の取込量も把握できることが新しい。

最終的には、これらのデータからどのプロセスでの窒素の取込量が多く、排出量が多いのかが分析できる。これより、どのプロセスに窒素循環技術を導入するかを適切に判断することへ貢献できる。

引用文献

1) 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 2022-1-11）
2) インベントリデータ（IDEAv3.1）, 産業技術総合研究所, 入手先, (オンライン), ＜ https://www.aist-riss.jp/softwares/40166/＞（参照 2022-1-11）

口頭発表セッション（一般）

[2-C2] 住宅・都市

座長：村山顕人（東京大学）

2022年3月3日(木) 11:00 〜 12:20 C会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-C2-01] 住宅工法のカーボンフットプリント

*今田 青冶[1]、加河 茂美[2]、前野 啓太郎[3] （1. 加河研究室/九州大学、2. 九州大学経済学研究院、3. 九州大学 経済学府）

11:00 〜 11:20

[2-C2-02] 工法別住宅の製造・使用段階における環境負荷分析

*松嶋 そら[1]、加河 茂美[1] （1. 九州大学）

11:20 〜 11:40

[2-C2-03] 日本版 SSP別土地利用シナリオの行政区域別将来推移を対象とした環境影響評価

*山崎 潤也[1]、福山 遼平[1]、似内 遼一[1]、真鍋 陸太郎[1]、村山 顕人[1] （1. 東京大学）

11:40 〜 12:00

©日本LCA学会

住宅工法のカーボンフットプリント

Carbon Footprint of Housing Construction Methods

○今田青冶*[1)]、前野啓太郎[2)]、加河茂美[3)]
Seiya Imada, Keitare Maeno, 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
* imada.seiya.104@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

住宅に代表される建築部門は、日本のエネルギー起源 CO_2 の各部門の排出量の約 4 割を占めており[1)]、将来的な気候変動の緩和に向けて当該部門への対策は極めて重要である。実際に日本政府は、ネット・ゼロ・エネルギーハウス(ZEH)と呼ばれる、主に断熱化による住宅の環境負荷低減を目指している[2)]。

しかし、この取り組みは、近年重要視されているライフサイクルの観点[3)]から見ると、使用段階にのみ着目している。今後、建築部門の環境負荷低減を目指すためには、建築部門の排出量を工法別にライフサイクルの観点から評価し、各工法の特徴とそれに付随する固有のグローバルサプライチェーンに合わせた CO_2 削減策が必要である。

よって、本研究は住宅の工法別の製造過程に焦点を当てた LCA を行い、木造住宅と非木造住宅について適切な CO_2 排出の低減を提案することを目的としている。

2. 分析手法

本研究は、多地域産業連関分析を用いて、木造住宅と非木造の製造過程と、その製造に付随するグローバルサプライチェーンに焦点を当てた CO_2 排出分析を行う。以下(1)式を用いて推計を行った。

$$\mathbf{q} = \mathbf{eL}\hat{\mathbf{f}} \qquad (1)$$

qは、木造住宅、非木造住宅のそれぞれに対する最終需要に伴って排出される各国各部門からの直接間接 CO_2 量を表すベクトルである。**e**は、各国各部門の直接 CO_2 排出係数を表すベクトルになっている。また、**L**は、レオンチェフ逆行列を表し、$\hat{\mathbf{f}}$は、最終需要ベクトルを対角した行列を表している。

総務省が公表している日本の産業連関表には住宅やビル、橋などの建築・建設部門全体の国内生産額が記載されているため、住宅の建築工法に焦点を当てる本研究において、そのデータは不適である。そのため、本研究に用いている最終需要$\hat{\mathbf{f}}$は、国土交通省が公表している一般建築部門取引表の工法別の国内生産額・中間取引額を利用している。

しかし、この取引額は国産材と輸入財が混合された状態で計上されているため、各国各部門からの輸入中間財の取引額が不明である。そのため本研究は、世界多地域産業連関表(189 ヵ国 26 部門)を用いて交易係数を推計し、その交易係数を一般建築部門取引表の中間財の取引額に乗じることで、中間財の購入額を国産材と輸入財に分けたものを最終需要**f**と見立てている。

3. データ

Eora Database[4)]の 2015 年におけるデータ(189 ヵ国、26 部門)から、世界多地域産業連関表を収集し、直接 CO_2 排出係数、レオンチェフ逆行列を推計した。
一般建設部門取引表[5)](2015 年、生産価格)

4. 結果・考察

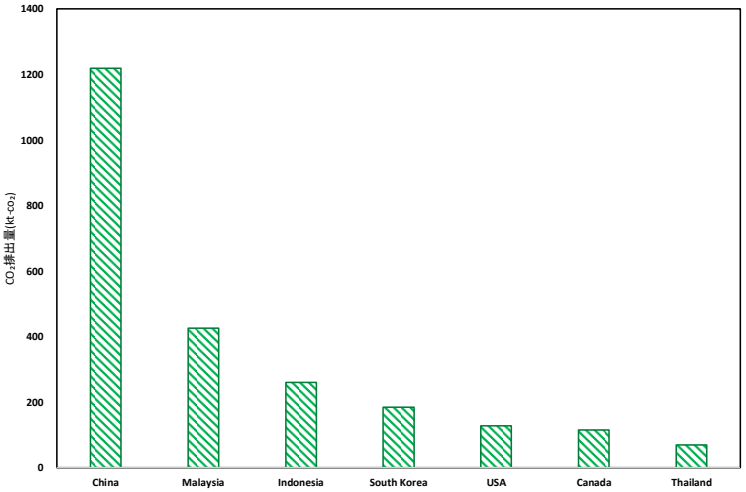


図 1. 日本の木造住宅に対する最終需要に伴い排出される各国からの CO_2 量(2015 年)

図 1 から日本の木造住宅に対する最終需要に伴い排出される CO_2 量は、中国、マレーシア、インドネシアの順に多いことが読み取れる。中でも、中国からの CO_2 排出量は、二番目に排出量の多いマレーシアの約 3 倍と突出して大きい。また、中国からの排出量は国外からの排出量の約 4 割を占めていることからも、日本の木造住宅の生産は、中国に対して、非常に多くの CO_2 排出を誘発していることが分かる。

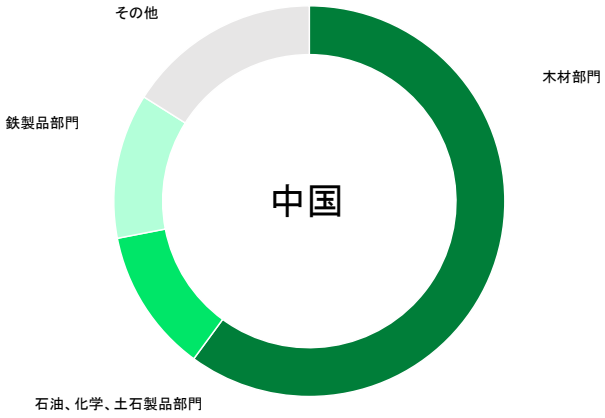


図 2. 中国の産業別の排出内訳

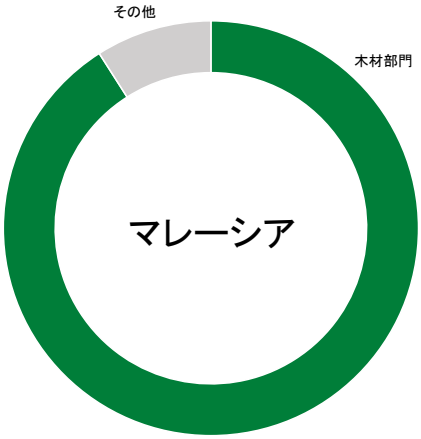


図 3. マレーシアの産業別の排出内訳

図 2 と図 3 から、日本の木造住宅に対する最終需要に伴い排出される CO_2 量の産業別の内訳が分かる。中国からの CO_2 排出量は、木材部門、石油・化学・土石製品部門からの順に多いことが読み取れる。また、マレーシアからの CO_2 排出量のほとんどが木材部門からの排出となっていることも読み取れる。

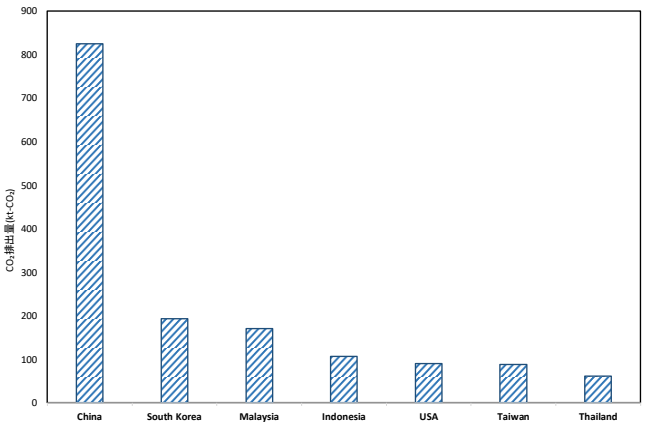


図 4. 日本の非木造住宅に対する最終需要に伴い排出される各国からの CO_2 量(2015 年)

図 4 から、日本の非木造住宅に対する最終需要に伴い排出される CO_2 量は、中国、韓国、マレーシアの順に多いことが読み取れる。中でも、中国は木造住宅と同様に一番多くの排出量となっており、二番目に排出量の多い韓国の約 4 倍と突出して大きい。また、中国からの排出量は国外からの排出量の約 4 割を占めていることから、中国に対して非常に多くの CO_2 排出を誘発していることが分かる。

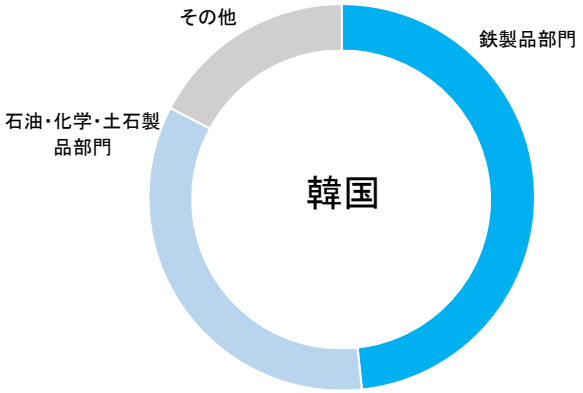


図 5. 韓国の産業別の排出内訳

図 5 から、日本の木造住宅に対する最終需要に伴い排出される CO_2 量の産業別の内訳が分かる。韓国からの CO_2 排出量は、鉄製品部門、石油・化学・土石製品部門の順に多いことが読み取れる。

木造住宅と非木造住宅に共通して、排出量の多くをアジアの国々が占めているのは、取引コストが欧州に比べて低いので、取引量が増えたことが要因だと考えられる。

木造住宅に焦点を当てると、マレーシアなどの発展途上国の多くは木材部門が多くの排出割合を占める傾向にある。

非木造住宅に焦点を当てると、韓国などの先進国は、鉄製品部門や石油・化学・土石製品部門などの割合が高い傾向にある。

本会では、推計結果をより詳細に考察し、各工法に適切な CO_2 排出の低減の提案を行う。

引用文献

1) 国土交通省(2021),住宅･建築物の省エネ･省 CO_2 施行と ZEH 等に関する支援事業の動向
2) 経済産業省資源エネルギー庁(2015),ZEH(ネット・ゼロ・エネルギーハウス)に関する情報公開について
3) パリ協定、2015
4) Lenzen et al.(2013), *Economic Systems Research*, **25**, pp, 20-49.
5) 国土交通省(2015) ,産業連関表

工法別住宅の製造・使用段階における環境負荷分析
Environmental Impacts of Construction Methods

○松嶋　そら[1)*]、加河　茂美[2)]
Sora Matsushima, Shigemi Kagawa
1)九州大学経済学府
2)九州大学経済学研究院
*matsushima.sora.343@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

CO_2 排出量を部門別に見ると、地球温暖化対策計画では家庭部門の CO_2 排出量を 39%、業務その他部門の CO_2 排出量を 40%削減することが目標として掲げられている（環境省、2019）[1]。住宅・建築物に特に関連する部門は、家庭部門、及び業務その他部門に含まれており、過去 20 年間で、その CO_2 排出量は増加傾向にある。また建築・建設産業は、コンクリートや鉄骨などをはじめ、天然資源を大量に消費する産業でありエネルギー消費および排出量が大きい産業であるといわれている(Horvath, 2004; Ding, 2004)[2][3]。炭素制約下において、建築部門の環境負荷を抑える取り組みは必要不可欠である。

建築部門の環境負荷を評価する先行研究としては Yang et al. (2019)[4]が挙げられるが、プロセスベースで技術面による建築物の環境評価を行うというものであり、住宅建築について社会全体の産業構造を考慮し推定していない。また、静学分析による分析に比べ、住宅の寿命を推計し将来の住宅の動態を予測するような研究は少ない。建築部門における環境負荷を抑えることが必要であり、住宅の着工・解体というフローを考慮した動学分析による検討は重要であると考えられる。

そこで、本研究は、国土交通省の住宅着工滅失データ、不動産会社の築年数データを用いて建築物の寿命関数を統計的に特定し、ストック・フローモデルを用いて推計される新規の住宅着工件数を求め、住宅の寿命変化と性能変化が住宅のライフサイクル CO_2 排出量に与える影響を包括的に分析できるフレームワークを開発するとともに、その住宅トレンドのシナリオが CO_2 排出量に与える影響を分析する。これらの結果から、住宅のライフサイクルを考慮した CO_2 排出削減政策について議論する。

本研究の目的は、精度の高い住宅のライフサイクル CO_2 排出量の推計を行うためのフレームワークを提案し、それを用いた住宅トレンドのシナリオ分析を行うことで、住宅のライフサイクルを考慮した CO_2 排出削減政策について提言することである。

2. 研究手法

建設部門に特化した環境産業連関分析フレームワークを用いて製造時の直接・間接 CO_2 排出量を推計する。 t 年における住宅工法 i の直接・間接 CO_2 排出量 $Q(t,i)$ を下式(1)で推計する。

$$Q(t,i) = \mathbf{e}(t,i) \cdot \mathbf{L}(t) \cdot \mathbf{f}(t,i) \quad (1)$$

ここで、$\mathbf{e}(t,i)$ は t 年における商品生産起源の部門別直接 CO_2 排出係数ベクトルであり、$\mathbf{L}(t)$ はレオンチェフ逆行列を表す。また、$\mathbf{f}(t,i)$ は t 年におけるある工法 i の住宅の最終需要ベクトルを示す。

次いで、国土交通省から得られる古家の築年数データから、最尤法を用いて住宅の寿命分布の尤度およびパラメーターを計算した。寿命分布としては正規分布、ガンマ分布、ワイブル分布、レイリー分布、対数正規分布を想定している。次いで、これらの分布から、もっとも当てはまりのよいものを赤池情報量基準（AIC）によって特定する。AIC による特定は以下の式(2)で計算される。

$$AIC = -2lnL + 2n \quad (2)$$

ここで、L は尤度を示す。また、n はパラメーターの数を示している。

また、本会では得られた寿命関数に基づくストック・フローモデルから推計される住宅の新規着工件数と住宅トレンド要因（住宅建築工法、住宅性能など）を組み合わせることによって、住宅タイプごとのストック・フロー量の将来推計を行う。住宅の平均寿命の変化、住宅性能の変化などを考慮することによって、住宅建築からのライフサイクル CO_2 排出量の削減ポテンシャルの分析を行う。最終的に、住宅のライフサイクルを考慮した CO_2 排出削減政策について提言する。

3. データ

本研究では、国立環境研究所による環境負荷原単位データブック（3EID）の GHG 直接排出量（2005, 2011, 2015）、国土交通省による平成 17-23-27 年接続産業連関表および建設部門分析用産業連関表の住宅建築木造・SRC 造・RC 造・S 造・CB 造の投入量（2005, 2011, 2015）を用いた。また、古家のデータについては、「土地総合情報システム」国土交通省「古家つき土地の着工年および取引年データ」を用いた。

4. 結果

図 1 によると、住宅建築の製造時におけるカーボンフットプリントは 2005 年においておよそ 2200 万トンであり、2011 年には 4000 万トン、2015 年には 4500 万トンである、というようにして推移している。どの年においても、木造住宅の排出している CO_2 が最も多いことが明らかである。ただし、一戸あたりの推計値ではないということに留意されたい。

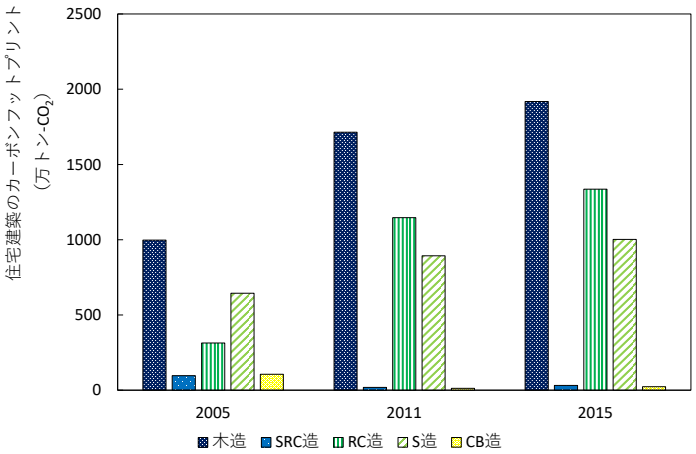


図 1　住宅建築のカーボンフットプリント

続いて、住宅の運用段階におけるカーボンフットプリントを推計するために、第一段階として、住宅の寿命関数の推定を行った。まず、収集した古家データにおける古家の寿命は、図 2 のヒストグラムに表されるように、最大で 80 年、最頻値は 30~40 年となっている。このデータを用いて、住宅の寿命関数の推計を行ったところ、表 1 の通り、正規分布が最も AIC の値が小さく、当てはまりがよいことがわかった。その正規分布についてのパラメータは、平均 μ が 34.99、標準偏差 σ が 13.35 となった。

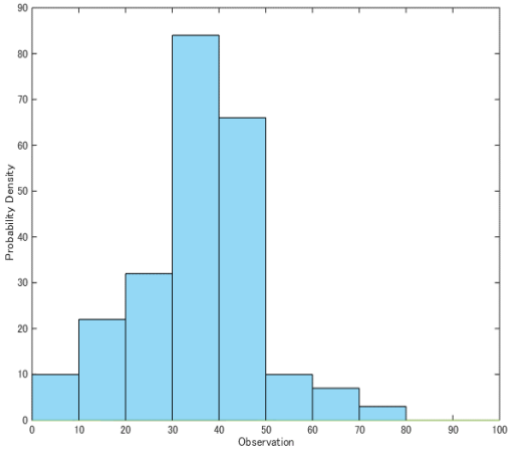


図 2　古家の寿命のヒストグラム

分布	正規分布	ガンマ分布	ワイブル分布	レイリー分布	対数正規分布
位置パラメータ	μ (34.99)				μ (3.42)
形状パラメータ		δ (3.78)	α (2.66)		
尺度パラメータ	σ (13.35)	ε (9.25)	β (38.79)	ξ (26.48)	σ (0.7)
AIC	1880.86	1976.5	1913.54	1937.52	2102.72

表 1　寿命関数とパラメータ、AIC

5. まとめ

住宅の製造時におけるカーボンフットプリントは年々増加しており、工法別にみると、木造建築が最も大きい。

続いて、運用段階のカーボンフットプリントについては、現段階では住宅の寿命関数の推定を行った。古家データを用いて推計したところ、正規分布が最も当てはまりの良い分布であることがわかった。

本会では、推計した寿命関数を用いて、ストック・フローモデルにより住宅の運用段階のカーボンフットプリントを推計した上で、寿命の変化などを考慮したシナリオ分析を行い、政策提言を行う予定である。

6. 参考文献

[1] 環境省 (2019)「住宅・建築物に係る二酸化炭素の排出量及び削減量について」
https://www.env.go.jp/council/06earth/y0614-03/mat02.pdf
[2] Horvath (2004) Construction Materials and the Environment, ANNU REV ENV RESOUR 29, 181‑204.
[3] Ding(2005) The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities, International Journal for Housing Science and Its Applications 29, 57-69.
[4] Yang (2019) Modelling of energy consumption and carbon emission from the building construction sector in China, a process-based LCA approach Energy Policy 134, 110949

日本版 SSP 別土地利用シナリオの行政区域別将来推移を対象とした環境影響評価

Environmental Impact Assessment of land use transition by administrative divisions based on Japanese version of SSP scenarios

○山崎潤也*[1)]、福山遼平[1)]、似内遼一[1)]、真鍋陸太郎[1)]、村山顕人[1)]
Junya Yamasaki, Ryohei Fukuyama, Ryoichi Nitanai, Rikutaro Manabe, Akito Murayama
1) 東京大学
* j.yamasaki@up.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

気候変動影響等の研究においては世界共通の将来シナリオである SSP（shared socio-economic pathways：共有社会経済パス）が用いられており、Wu らは日本版 SSP 別に農作物の収益最大化等を考慮した将来の土地利用推移を予測している[1)]。この知見は我が国の中長期的な土地利用計画の策定に資する可能性があるが、それには各シナリオに対する環境影響量の算定等の多面的な評価が必要である。そこで本報では被害算定型 LCIA 手法 LIME3 を活用し、SSP 別の将来的な土地利用推移を対象とした行政区域（基礎自治体）別の環境影響評価を行った結果を報告する。

2. 方法

本報では、Wu らの土地利用シナリオデータを評価対象とする[1)]。同データは 2015 年から 2100 年までの 5 年毎の日本国土全域に対して、0.05 度メッシュ（約 5km 四方）毎の土地利用比率を示すものである。シナリオは SSP1（持続可能）、SSP2（中庸）、SSP3（地域分断）、SSP4（格差）、SSP5（化石燃料依存）の 5 種であり、気候変動緩和策・適応策の成功度等に応じた将来発展像を反映している。土地利用区分は国土数値情報のものを参照しており、農用地については作物種（6 作物×灌漑・天水）が設定されている。同データの将来予測フローは、第一に SSP 別人口シナリオの推移に基づいて各年のメッシュ毎の「建築用地」の増減が決定され、第二に余った土地に対して土地利用配分モデル AIM/PLUM-Japan を用いて経済収益を最大化するように各作物・植林面積の空間割付が行われている（詳細は関連論文参照のこと）。なお、同データはメッシュ毎に集計されているが、本報ではこれを基礎自治体毎のデータに変換して参照した。SSP1 と SSP3 の各土地利用面積の推移を図 SI.1、図 SI.3、図 SI.4 に示す。

一方、環境影響評価においては被害算定型 LCIA 手法 LIME3 を活用した[2)]。LIME3 は「地球温暖化」「土地利用」等の環境影響領域毎に統合化係数が設けられており、各インベントリデータに対してそれを積和することによって統合的な環境影響量「Eco-index USD（単位：US ドル）」を金額指標で算定することができる（評価枠組みを図 SI.2 に示す）。本報では「土地利用」の影響領域のみを評価対象とし、各土地利用面積に「生物多様性」「一次生産」の統合化係数を積和して各年の環境影響量を算定した。本報では参照データの性質上、土地利用の「維持」のみを評価対象とする。土地利用シナリオデータと LIME3 の土地利用区分は表 1、表 2 のように割り当てた。

表 1 土地利用区分対応表（生物多様性）

土地利用シナリオデータ	LIME3	統合化係数 [US$/m^2]
水稲	田	1.15×10^{-2}
砂糖作物、その他雑穀、油量作物、その他作物、麦類	その他農用地	3.38×10^{-2}

表 2 土地利用区分対応表（一次生産）

土地利用シナリオデータ	LIME3	統合化係数 [US$/m^2/yr]
水稲、砂糖作物、その他雑穀、油量作物、その他作物、麦類	農耕地	5.27×10^{-3}
建物用地、幹線交通用地、他用地、ゴルフ場	建築用地（社会基盤）	4.16×10^{-2}
牧草地	放牧地	3.35×10^{-3}

3. 結果

第一に、日本全域の環境影響量の推移を図 1 に示す。左の図に着目すると、2015 年（基準年）の総影響量は 20.1 億ドルとなり、いずれのシナリオでも年ごとに数値が減少する傾向となった。これらの総影響量は中央の図に示されるように「建築用地」が占める割合が大きく、「建築用地」は人口減少に伴って縮小傾向にあることが結果に反映された。SSP 別に着目すると、SSP3（地域分断）は非持続可能な将来像であるが、それ故に人口減少および建築用地の縮小が顕著であり、結果として将来の環境影響量が最も小さい結果となった。

第二に、全国市区町村別の SSP1（持続可能）と SSP3（地域分断）における環境影響量の変化率を図 2 に示す。結果をみると、いずれの年代の変化率においても概ね全国的に影響量が減少傾向にあり、前述の理由により SSP3 の方が SSP1 よりも減少幅の大きい自治体が多いことが示された。図 SI.1 と図 SI.2 を踏まえると

「建築用地」は東北地方や四国地方の減少が先行している傾向にあり、また「田」「その他農用地」も元々の分布に応じて全国的に減少傾向にあることが示された。

図 SI.1 等に示される通り、本報の参照データにおける「建築用地」「田」などの減少分は主に「植林」「荒地他」に割り付けられているが、しかし LIME3 ではこれらの区分を正確に評価できないため、本報では評価対象外としている。土地利用分野の包括的な評価に向けて、これらの区分を含めた細分化された評価体系の構築が必要であることが示唆された。

4. 結論

本報では日本版 SSP 別土地利用シナリオを対象とした環境影響評価を行い、SSP のいずれのシナリオにおいても将来的に環境影響量が減少傾向にあることを示した。また、土地利用計画の観点としては増加する荒地のマネジメントが重要であることが示唆された。

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（JPMEERF20S11817）により実施した。ここに謝意を表する。

引用文献

1) Wu, W., et al.: Assessment of Bioenergy Potential and Associated Costs in Japan for the 21st Century, *Renewable Energy*, 162, (2020), pp.308-321　2) 伊坪徳宏 他：LIME3 －グローバルスケールの LCA を実現する環境影響評価手法, 一般社団法人産業環境管理協会, (2018), p.286

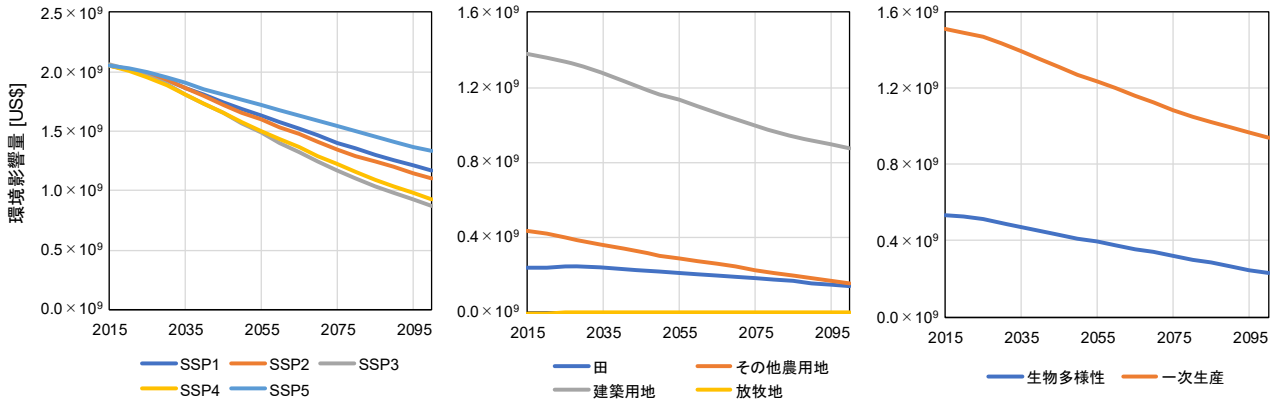


図 1 日本全域の環境影響量の推移（左から SSP 別、SSP1 の土地利用別、SSP1 の保護対象別）

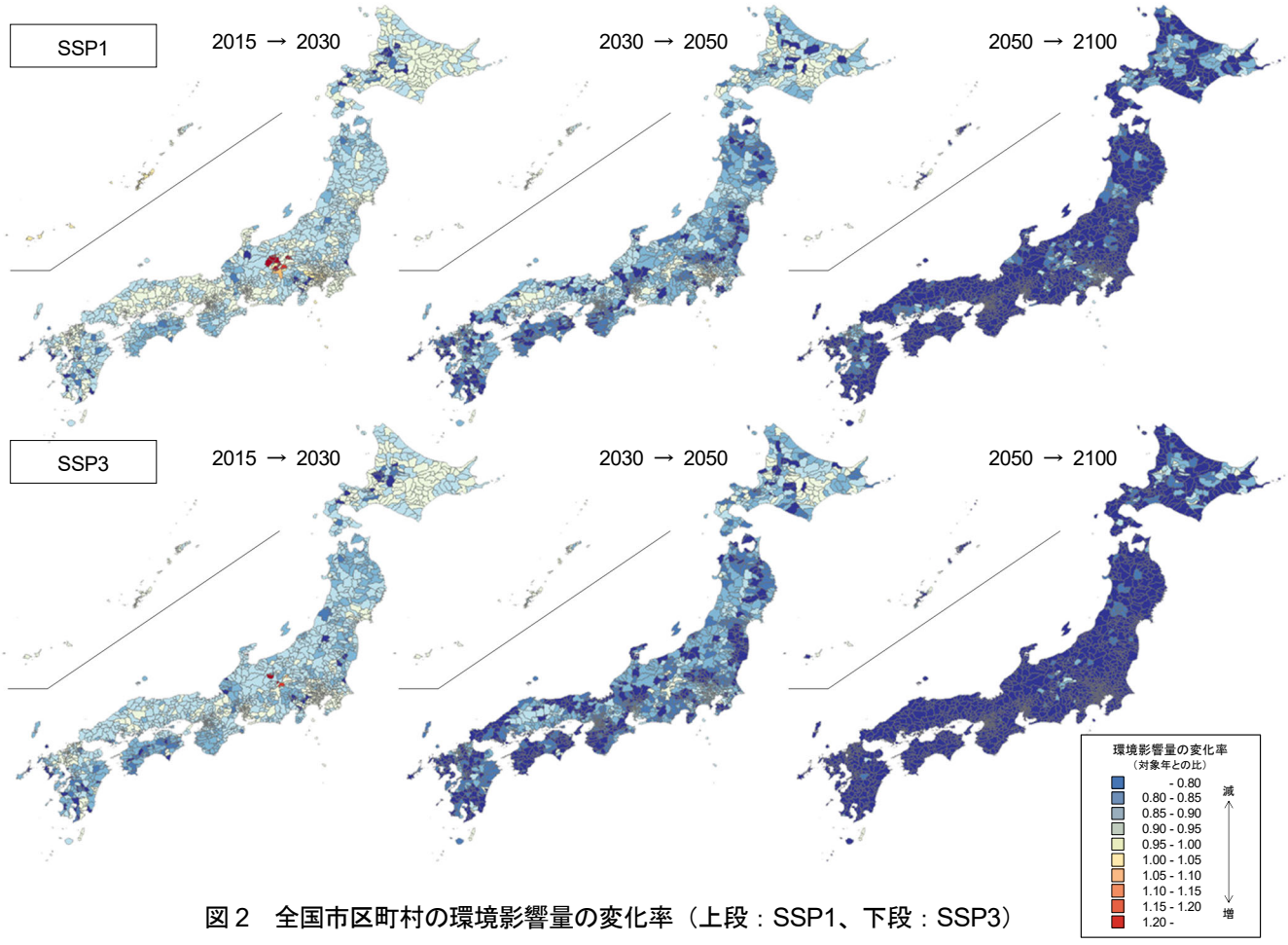


図 2　全国市区町村の環境影響量の変化率（上段：SSP1、下段：SSP3）

Supporting Information

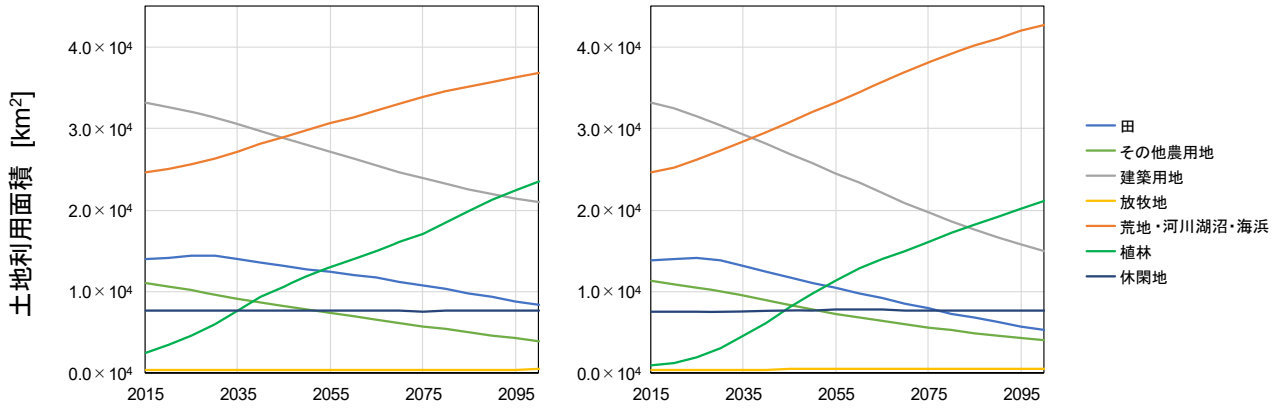


図 SI.1　日本全域の各土地利用面積の推移（左図：SSP1、右図：SSP3）
（「森林」を除く）

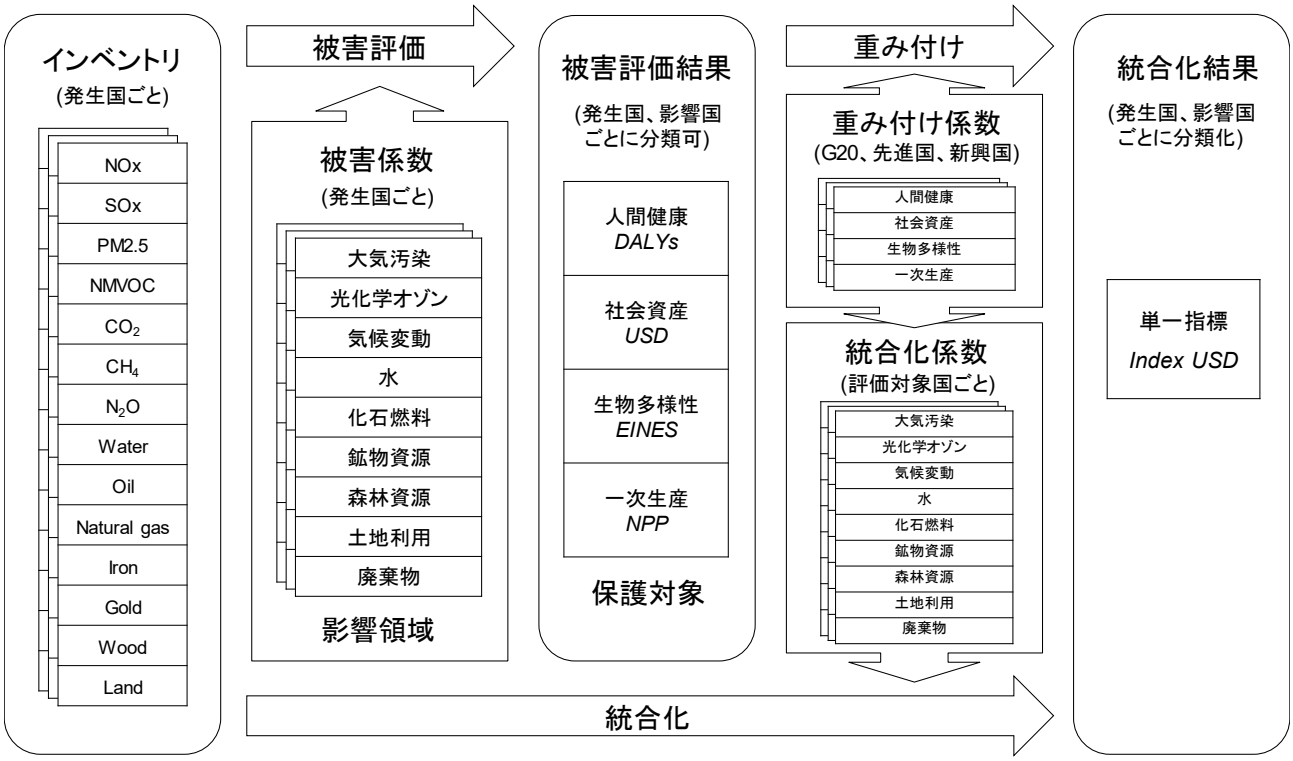


図 SI.2　LIME3 の評価枠組み

Supporting Information

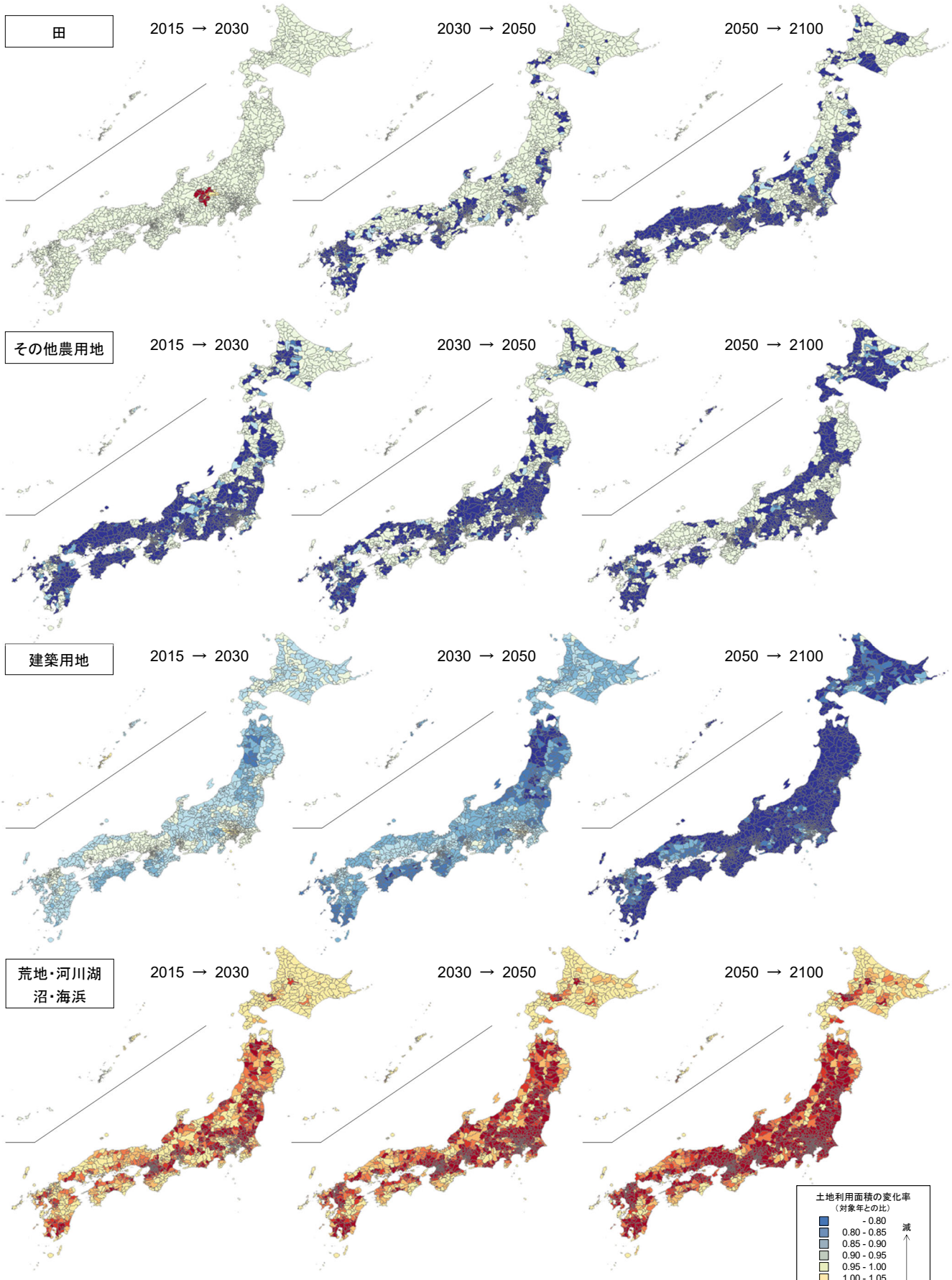


図 SI.3　全国市区町村の各土地利用面積の変化率（SSP1）
（一段目：田、二段目：その他農用地、三段目：建築用地、四段目：荒地他）

Supporting Information

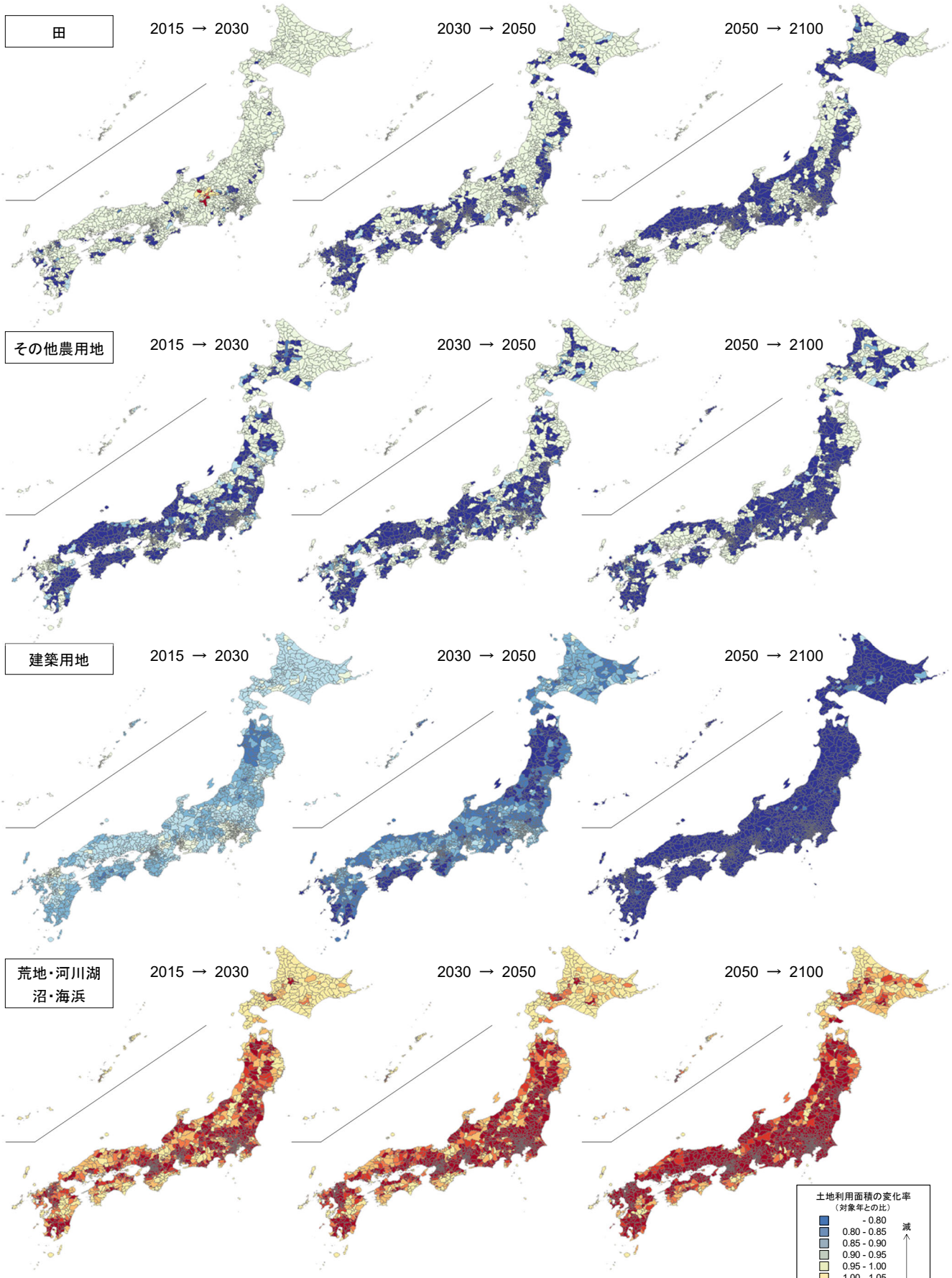


図 SI.4　全国市区町村の各土地利用面積の変化率（SSP3）
（一段目：田、二段目：その他農用地、三段目：建築用地、四段目：荒地他）

口頭発表セッション（一般）

[2-D2] 食品（1）

座長：吉川直樹（立命館大学）

2022年3月3日(木) 11:00 〜 12:20 D会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-D2-01] 地域の食品小売店や飲食店連携による Upcycled Food研究 〜フードロス・食品廃棄の解決に向けた食品副産物の商品化〜

*小林 久美子[1]、髙橋 和枝[2]、古谷 勝則[1]（1. 千葉大学、2. 武蔵野大学）

11:00 〜 11:20

[2-D2-02] インピーダンス測定による冷凍サバの鮮度を考慮した環境負荷評価

*石部 優貴[1]、沖 慧弘[1]、片山 昇[1]、苗 山[1]、堂脇 清志[1]（1. 東京理科大学）

11:20 〜 11:40

[2-D2-03] 食品廃棄物の処理に関わる環境影響の地域別評価

*中川 友輝[1]、山口 陽平[1]、吉川 直樹[1]（1. 立命館大学）

11:40 〜 12:00

[2-D2-04] 離島における植物工場導入の意義と課題

*小野 奈都美[1]、佐々木 康人[2]、上門 太郎[1]、伊佐 真賢[1]、田原 聖隆[3]（1.（株）沖縄エネテック、2.（株）サイクル、3.（国研）産業技術総合研究所）

12:00 〜 12:20

©日本LCA学会

地域の食品小売店や飲食店連携による Upcycled Food 研究

～フードロス・食品廃棄の解決に向けた食品副産物の商品化～

Upcycled Food Research through Cooperation with Local Food businessed - Commercialization of Food Byproducts to Solve Food Losses and Waste -

○小林久美子*[1)]、高橋和枝[2)]、古谷勝則[1)]
Kumiko Kobayashi, Kazue Takahashi, Katsunori Furuya
1) 千葉大学, 2) 武蔵野大学
* kkobayashi998@chiba-u.jp

1. はじめに

Upcycled Food（アップサイクルフード）は、「これまで人間の消費に至らなかった食材を使用した検証可能なサプライチェーンで調達・生産された、環境に良い影響を与える」商品・食用飲用商品である。

食べられるのに廃棄されている食品の活用によるフードロスや食品廃棄の対応策として近年注目され、諸外国を中心に研究が進んでいる。

食品副産物（以下 副産物）の商品化は日本でも、山崎パン株式会社のパン製造工場で発生するパンの耳を使った「ちょいパクラスク」[1)]やキッコーマンソイフーズの豆乳製品を製造する際に発生するおからを乾燥させた「おからパウダー」[2)]ほか、大手食品企業の生産部門での取り組み事例は多い。しかし、小規模食品事業者を対象にした研究・実例がほとんどない。

2019 年夏より 2020 年 2 月の事前調査では、東京都台東区の商業地域にある28店舗で7種類の副産物を発見した。また、リサイクルするにはコストと手間がかかるため、ほとんどがゴミとして廃棄されていたことが課題であったが、これら副産物の活用の可能性があると考える。

また、小規模店舗は地域社会に根付いた地域コミュニティーの重要なステークホルダーであり、地域社会が持続可能であるためには小規模な事業者の行動や連携が不可欠である。

そこで、小規模食品事業者を対象に、店舗経営の過程で発生する副産物を活用した Upcycled Food を製造・販売できるかを検証する実証実験をおこなう。

具体的には、小規模食品小売店や飲食店で廃棄されている副産物を利用した商品を地域内の店舗で販売し、その結果をライフサイクルアセスメントで環境影響評価するとともに、地域の店が持続可能な利益を得られるかどうかを検証する。

同時に本研究は、製造から販売までの二酸化炭素排出量と食品廃棄量の抑制など、環境への有効性を検証するとともに、企業として利益の確保に持続可能性があるかを検証し、副産物を主に、地域内の食品資源の利益を伴う利用方法を明らかにすることが目的である。

そのため、SDGs のターゲット 12.3[3)]に掲げられている食品廃棄物の半減や生産・サプライチェーンの食品の損失を減らし、Upcycled Food として副産物が利益に結びつく商材となる可能性は非常に高いと考えている。

2. Upcycled Food について

米国の Upcycled Food Association(以下 UFA)[4)]が 2020 年春に世界に先駆けて発表した定義 [5)]によれば、Upcycled Food とは、「これまで人間の消費に至らなかった食材を使用し、検証可能なサプライチェーンで調達・生産され、環境に良い影響を与えるもの」で、5 つの要素から構成されている。

① 通常であれば食品廃棄物として処理されているような原材料の使用
② 付加価値のある製品
③ 人間が消費するもの
④ 検証可能なサプライチェーン
⑤ どの原材料がアップサイクルされているかをラベルに表示

この定義や要素は一般家庭向けではなく、企業におけるフードロスや食品廃棄の課題解決及び、持続可能な経営のために定められたものと考えられる。

UFA によれば、食べられるのに廃棄されていた食品を利用することで、経営面では、新しい顧客獲得や商品価値とブランドの向上がみこまれ、環境面では食品廃棄量の抑制、食品ロスの解決や二酸化炭素排出の削減につながると述べられている。

また、UFA では 2020 年 5 月に Upcycled Food Certification Standard（アップサイクルフード認証基準）[6)]を公開し、アメリカ国内での販売に限定した認証制度を推進している。

3. 実証研究の概要と評価方法

3.1 研究の対象地と期間

対象地域は東京都台東区の商業地で副産物の実態調査の対象地域として実証実験をおこない、実験期間は

2022 年の 7 月から 12 月の 6 ヶ月間とする。

3.2 研究の手順

第一段階として、上述した Upcycled Food 認証制度の条件に沿って、実態調査で明らかになった副産物を原材料にした食品の製造レシピを作成した。レシピ作成の必須条件として長期保存が可能であることと、原材料はできる限り地元または近郊の地域から調達することとした。

第二段階では作成したレシピを元に原材料を調達しテスト製造をおこなった。せんべいやクッキー類など水分が少なく長期保存が可能なものが販売可能な商品として製造できた。

第三段階は製造場所と販売方法の決定で、菓子製造認可のある NPO や菓子店へ製造を依頼する。販売については製造場所となる菓子店や副産物の提供店、土産店など地域内で販売可能な店舗で対面販売をおこなう。

地域の店や NPO など、さまざまなステークホルダーとの連携を図り、食品をはじめとする資源を循環させる仕組みを広げていく。

原材料や製造品の運搬方法は徒歩または自転車を使うことを原則とした。

3.3 評価方法

商品製造から販売までの工程と商品の販売結果に対し、環境および経済面の 2 つの視点で評価をおこなう。

環境面では食品廃棄量や二酸化炭素等排出量の抑制効果をライフサイクルアセスメントにより評価し、経営面では利益の確保が持続的に可能であるかを検証する。

4. 現在の課題と今後について

新型コロナウイルス感染症の影響により、当初、2020 年 7 月に予定していた実証実験の実地時期が一年半以上にわたり滞っていることが最大の課題である。

しかし、数種のレシピが完成し、製造場所も決定した。2022 年夏の実施に向け準備を進めており、複数の店舗が関わりを持ち、地域の食品資源を循環させていくコミュニティとなっている。

本研究の実地はこれからであるが、今後出てくる課題へ対応しながら、継続的な研究をおこない、地域食品資源の循環システムの構築に必要な基礎となるものを見つけ出し、地域コミュニティーがフードロス・食品廃棄の削減をはじめとする地球環境への貢献とともに、経済活動の協働を促し、持続可能な社会の形成を目指していく。

5. 引用文献

Web サイト
山崎製パン株式会社：“ちょいパクラスク”，ランチパックスペシャルサイト，（オンライン），入手先 < https://www.lunch-pack.jp/related.html>，（参照 2021-10-15）
キッコーマン株式会社：“廃棄物の削減と再利用”，企業の社会的責任，（オンライン），入手先 < https://www.kikkoman.com/jp/csr/environment/activity/recycle.html>，（参照 2021-12-28）
外務省：“我々の世界を変革する：持続可能な開発のための 2030 アジェンダ（仮訳）”, Ministry of Foreign Affairs of Japan，（オンライン），入手先 <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000101402.pdf>，（参照 2020-10-15）
UPCYCLED FOOD ASSOCIATION：“Upcycled Food Association, foundation, and Certification”，Upcycled Food Association，（オンライン），入手先 < https://www.upcycledfood.org>，（参照 2021-10-01）
UPCYCLED FOODS DEFINITION Task Force：“Defining Upcycled Foods”, Defining Upcycled foods,（オンライン），入手先 <https://chlpi.org/wp-content/uploads/2013/12/Upcycled-Food_Definition.pdf >，（参照 2021-09-16）
Upcycled Certification Standards Committee：“The Upcycled Food Standard”，Upcycled Certification Standard-Version1，（オンライン），入手先 < https://static1.squarespace.com/static/606ce580b6b9b6777f470253/t/60c9672dc219224d15b84851/1623811901655/Upcycled+Certification+Standard_June+2021.pdf>，（参照 2020-09-20）

インピーダンス測定による冷凍サバの鮮度を考慮した環境負荷評価

Environmental Impact Assessment of Frozen Mackerel Considering Freshness by Impedance Measurement

○石部優貴*[1)]，沖慧弘[1)]，片山昇[1)]，苗山[1)]，堂脇清志[1)]

Yuki Ishibe, Akihiro Oki, Noboru Katayama, Shan Miao, Kiyoshi Dowaki

1）東京理科大学

*7418010@ed.tus.ac.jp

1. はじめに

今日において、さまざまな魚類などの水産物は消費者に届くまで冷凍によるコールドチェーンによって輸送されている。冷凍による輸送では、冷蔵に比べて鮮度低下を押さえることができる[1)]。

しかしながら一方で、冷凍保存によって鮮度を保持してもその後の解凍段階によって著しく鮮度は低下してしまう可能性がある。なお、解凍時の鮮度低下の要因として、タンパク質の自己消化と ATP の消費が挙げられる。ATP が死後に消費された後、肉中で H^+が生成され pH が低下する[2)]。pH の低下に伴って、タンパク質分解酵素の活性化や自己消化を引き起こす酵素が活性化される[3)]。活性化した酵素がタンパク質をアミノ酸に分解し肉質を劣化させ、ドリップに含まれるアミノ酸が鮮度低下と共に増加する。これに伴って非電解質である細胞膜が破壊され、電解質である細胞液が溶出されて解凍後にはドリップとして流出する。そのため鮮度低下と共に電解質の組織液が広がりイオン伝導性が増し、インピーダンスが低くなる[4)]。このことから、インピーダンスによって鮮度を評価することが可能である[5)]。

本研究では、ドリップと鮮度の関係に着目し、交流電流を用いた肉中のインピーダンス法による鮮度評価を行った。すなわち、鮮度低下やイオン伝導性増加の要因となる細胞膜の劣化、あるいは自己消化による品質劣化の測定と環境影響について分析を行うこととした。なお、対象産物は冷凍サバとした。この理由として、特に、サバは死後に自己消化しやすいという特徴があり、刺身などの生食での扱いが難しく、適切な鮮度評価が求められることによる。

また本研究では、一般家庭での消費を想定し、家庭内での一般的な解凍方法の候補となる電子レンジ、自然解凍、冷蔵、もしくは水による解凍方法によるシナリオで分析を行うこととした。一方で、これらの解凍時においても環境負荷に影響を与える直接・間接のエネルギー投入が行われ、これらの投入と品質との相互関係があることが想定される。例えば、電子レンジの加熱解凍や冷蔵庫による低温解凍では、電力投入が想定されるが、特に冷蔵庫の利用においては、その消費電力量が電化製品部門の内訳で最も大きな割合を占めている[6)]。また、家庭部門全体では燃料種別で見ると、電気による CO_2排出量が最も大きいとの報告もある[7)]。すなわち、他の生鮮食料品に関しても影響を検証する意味でも、環境負荷と品質との相互関係を分析することの意義はあろう。

2. 研究概要

2.1 解凍方法

本研究では、市販の冷凍サバ(原産国:日本)を用いて実験を行った。解凍は室内での自然解凍、冷蔵庫(SJ-D14B-W, シャープ株式会社製)での解凍、浸水解凍それぞれを各 12 時間放置した。浸水解凍に関しては、切り身を密封パックに入れて水(2.32L)の中に沈めて解凍を行った。また、電子レンジ(RE-T3,シャープ株式会社製)では 1 分間解凍を行った。

2.2 インピーダンス測定

各解凍後の肉に、5mm 間隔でニクロム線を冷凍サバに 5mm 差し込み、インピーダンス測定器(ケミカルインピーダンスアナライザ IM3590,日置電機株式会社製)を用いて、四端子法によってインピーダンスを測定した。周波数は 1kHz,10kHz,100kHz、電圧は 10mV,50mV[8)]の計 6 通りの組み合わせにより計 72 回測定を行った。なお、本研究では、ニクロム線間の距離について、同部位の切り身を用いたこともあり、極端に距離を変えない限りは大きなインピーダンスの変化は見られなかった。

2.3 環境評価

機能単位はサバの切り身約 1 個分の可食部の重さ 60g の解凍 1 分当たりとした。冷凍製品の鮮度低下の最も大きな要因は解凍段階であり、本研究では家庭における解凍を想定しているため、システム境界を解凍段階とした(SI に示した図 S1 参照)。また本研究で用いたサバは同様の保存方法をとっており解凍段階において異なる解凍方法を比較するため、解凍段階で排出される GHG 排出量を考慮した。なお、電子レンジと冷蔵解凍に関しては、解凍

に要したGHG排出量をSimapro ver9.2.0.1で算出し、浸水解凍は水道水1m³当たりCO_2 253g[9]として算出した。

浸水解凍に関しては、使い捨ての密封パックを用いているため、密封パックの原料採掘から廃棄までのGHGを考慮することとした(SIに示した図SI2 参照)[10]。その他の解凍法では、繰り返し使用可能な容器を用いたため1度の解凍における環境負荷は考慮しないことに注意されたい。

3. 結果

3.1 インピーダンス測定結果

4通りの解凍後の切り身60gに対して電圧10mVと50mVで周波数1kHz,10kHz,100kHzの交流電流を流し、同じ組み合わせで3回ずつ計測した平均値を示した(図1参照)。50mVについてはSIに示した図S3を参照されたい。

インピーダンス結果から、冷蔵解凍での鮮度が最も良く、次いで浸水、自然解凍、電子レンジとなった。このことから、低温で緩やかな解凍を行うことで鮮度低下を抑えることができた。

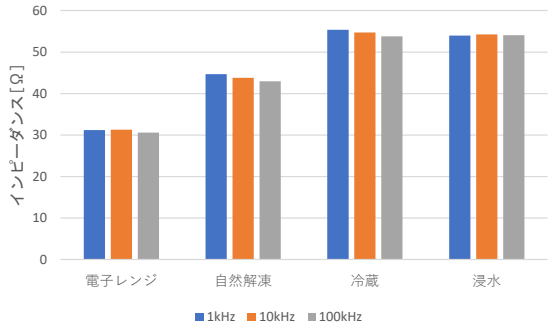


図1 10mVにおけるインピーダンス

3.2 環境影響分析評価

次に各解凍に要したGHG排出量はSIに示した式(1),(2),(3)によって算出した。ここで算出した結果、電子レンジで最も多くGHGが排出され、浸水解凍の約21.6倍、冷蔵解凍の約28.7倍となった(図2 参照)。

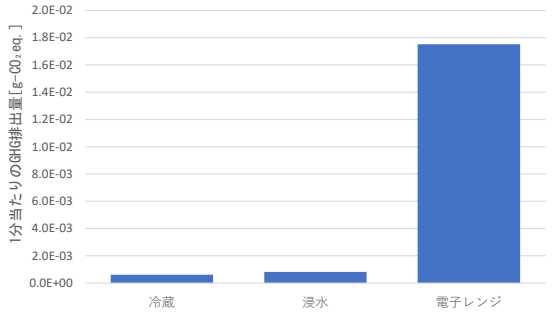


図2 1分当たりのGHG排出量

3.3 解凍後の鮮度とGHG排出率

SIに示した式(4),(5),(6)によって解凍に要した1分当たりのGHG排出量に対する解凍後のインピーダンスを算出した(SIに示した図S4 参照)。

図S4より、解凍に要したGHGあたりのインピーダンスは冷蔵解凍が最も大きな値を示した。値は冷蔵が電子レンジの約50.2倍、浸水の約1.3倍となった。

4.まとめ

今回、冷凍サバを対象に鮮度,GHG排出量を評価した。この結果、鮮度低下を軽減するためには温度を低くする必要があり、鮮度が良い解凍方法ほど解凍が終わるまでのGHG排出量が大きい。しかしながら、1分あたりのインピーダンスに対するGHG排出効率は冷蔵解凍が最も大きく、鮮度も低下しにくく1分当たりのGHG排出量も少ない。また、自然解凍は電子レンジより鮮度の低下が小さく、GHGを排出しないため、解凍時間は必要ではあるものの環境負荷の面において優位な解凍手段である。

参考文献

1) 中澤奈穂,綿律子,田中竜介,岡野利之,福島英登,前田俊道,岡崎惠美子,福田裕: 日本冷凍空調学会論文集,(2014),pp29-37
2) 福田裕,柞木田善治,新井健: 日本水産学会誌,50(5),(1984),pp.845-852
3) 橋本加奈子,山下倫明: “千葉県水産総合研究センター研究報告”,(2017),(11),pp.39-40
4) 加藤宏郎,坂口守彦,大井康之,丸尾信,豊田薫: 農業機械学会誌,62(3),(2000),pp.76-83
5) 加藤宏郎,坂口守彦,大井康之,丸尾信,豊田薫: 農業機械学会誌,62(5),(2000),pp.59-69
6) 全国地球温暖化防止活動推進センター:”課程からの二酸化炭素排出量(2019 年度)”,(オンライン),入手先<https://www.jccca.org/download/13337>(参照2021-12-1)
7) 川原博満:” 家庭における CO2 削減・省エネ対策をご提案 ～うちエコ診断のご紹介～”,(オンライン),入手先<https://chubu.env.go.jp/to_2012/data/1217ac.pdf>(参照 2021-12-1)
8) 松井武夫,原清,高瀬明,稲垣耕一: 日本獣医師会雑誌,(1954),pp.266-269
9) 東京都水道局:”くらしと水道”,(オンライン),入手先<https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/kurashi/co2.html>(参照 2021-12-1)
10) 新保雄太,中谷隼,栗栖聖,花木啓祐:”日本 LCA 学会”, 第 5 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集,(2010),pp.394-395

Supporting Information

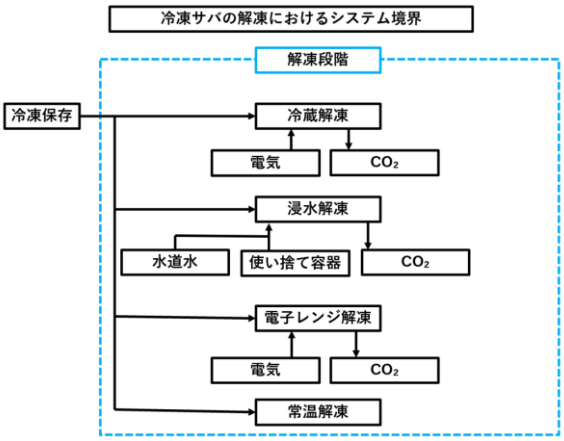


図 S1 解凍段階のシステム境界

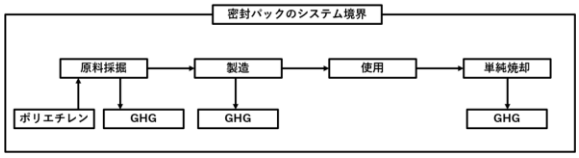


図 S2 密封パックのシステム境界

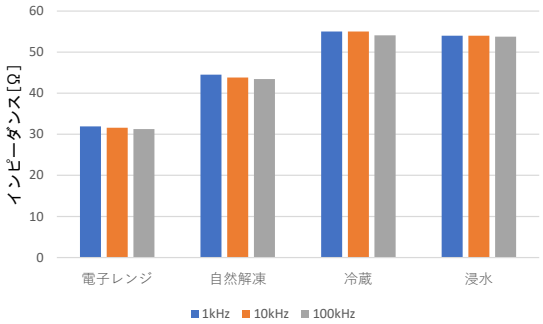


図 S3 50mV におけるインピーダンス

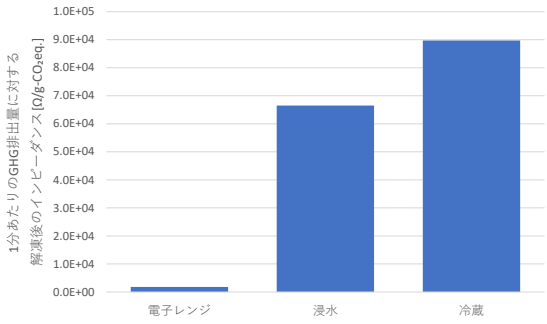


図 S4 1 分当たりの GHG 排出量に対する
解凍後のインピーダンス

表 S1 インベントリデータ

項目	値	単位
サバの体積	57	cm^3
サバの質量	60	g
室内温度	22	℃
冷蔵庫容積	318,600	cm^3
冷蔵庫消費電力	397	W
冷蔵庫温度	4	℃
電子レンジ容積	117,530	cm^3
電子レンジ消費電力	0.114	W
水の体積	2.32	L
水の平均温度	15.1	℃

表 S2 10mV におけるインピーダンス

10mV												
	電子レンジ			自然解凍			冷蔵			流水		
1kHz	31.2	31.73	30.7	44.27	44.9	44.8	55.34	54.35	56.49	53.2	54.6	54.1
10kHz	31.16	31.37	31.3	43.03	43.46	44.92	54.37	54.52	55.31	53.29	54.82	54.62
100kHz	30.31	30.59	30.92	42.17	43.52	43.21	53.53	54.2	53.6	52.51	55.31	54.33

表 S3 50mV におけるインピーダンス

50mV												
	電子レンジ			自然解凍			冷蔵			流水		
1kHz	32.11	32.23	31.44	44.31	44.79	44.52	55.47	54.38	55.21	53.32	53.52	55.13
10kHz	31.74	31.81	31.21	42.95	45.16	43.41	54.74	54.49	55.91	53.58	53.69	54.78
100kHz	31	31.04	31.77	42.08	44.7	43.65	54.3	54.18	53.78	53.38	53.02	54.97

GHG に関する式

A[g-CO_2eq.]=1 分あたりの冷蔵庫による GHG 排出量

$$= \frac{\text{サバの体積}[cm^3]}{\text{冷蔵庫の容積}[cm^3]} \times 12\text{ 時間の冷蔵庫による GHG 排出量[g-}CO_2\text{eq.]} \times \frac{1}{720} \quad (1)$$

B[g-CO_2eq.]=機能単位あたりの電子レンジによる GHG 排出量

$$= \frac{\text{サバの体積}[cm^3]}{\text{電子レンジの容積}[cm^3]} \times \text{電子レンジによる GHG 排出量[g-}CO_2\text{eq.]} \quad (2)$$

C[g-CO_2]= 1 分あたりの浸水解凍による GHG 排出量

$$= \text{解凍に用いた水の体積[m}^3\text{]} \times \text{水道水による } CO_2\text{排出量[265g-}CO_2\text{/m}^3\text{]} \times \frac{1}{720} \quad (3)$$

$X[\Omega/g - CO_2eq.] = 1$ *分あたりのGHG排出量に対するインピーダンス*

$$= \frac{\text{冷蔵解凍後のインピーダンス}[\Omega]}{A[g-CO_2eq.]} \quad (4)$$

$Y[\Omega/g - CO_2eq.] = 1$ *分あたりのGHG排出量に対するインピーダンス*

$$= \frac{\text{電子レンジ解凍後のインピーダンス}[\Omega]}{B[g-CO_2eq.]} \quad (5)$$

$Z[\Omega/g - CO_2] = 1$ *分あたりのCO_2排出量に対するインピーダンス*

$$= \frac{\text{浸水解凍後のインピーダンス}[\Omega]}{C[g-CO_2]} \quad (6)$$

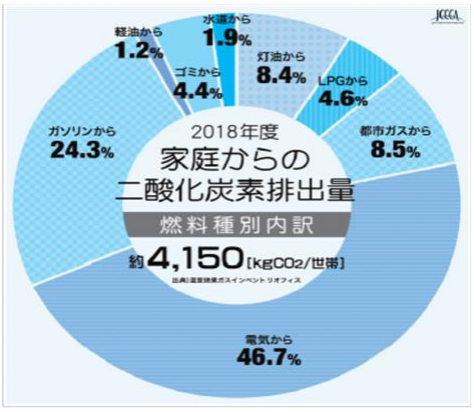


図 S5 家庭における燃料別 CO_2 排出率

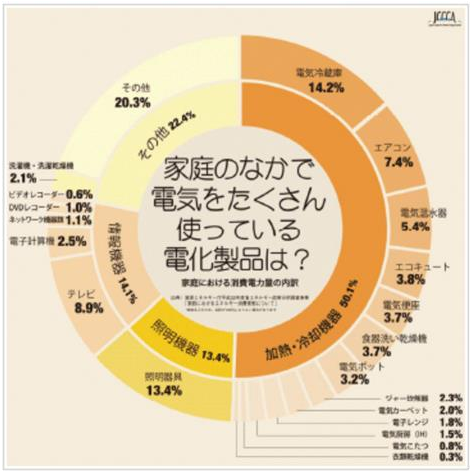


図 S6 家庭における製品別電力使用率



図 S7 冷凍サバ



図 S8 浸水解凍



図 S9 冷蔵解凍



図 S10 電子レンジ解凍



図 S11 自然解凍



図 S12 インピーダンス測定

食品廃棄物の処理に関わる環境影響の地域別評価

Regional assessment of environmental impacts related to food waste treatment

○中川友輝[*1)]、山口陽平[1)]、吉川直樹[1)]
Tomoki Nakagawa, Yohei Yamaguchi, Naoki Yoshikawa
1)　立命館大学
[*]rv0070pe@ed.ritsumei.ac.jp

1.　はじめに

近年、食品廃棄物のリサイクル量は増加傾向にあるが、一般廃棄物における焼却・埋立処理の割合が未だに多く、多量の温室効果ガス排出による環境影響が懸念されている。また経済面において、4 人家族 1 世帯あたり年間約 6 万円の損失額が発生しており、食品廃棄物の排出・処理は環境だけでなく経済にも影響を及ぼしている。既往研究では楠部ら[1)]が食品リサイクルの動向について明らかにしたが、食品廃棄物の処理による環境影響やコストに関する既往研究はほとんど見受けられない。そこで本研究では、全国の各市区町村を対象とした分析により、EPA（米国環境保護庁）が提唱するフードリカバリーヒエラルキー（以下 FRH）の各処理法（飼料化、エネルギー利用、堆肥化、焼却）を想定した場合の環境影響と、それに伴うライフサイクルコストを評価する。

2.　方法

2.1 再生利用と焼却の比較

本研究では FRH の再生利用（飼料化、エネルギー利用、堆肥化）と焼却処理を環境影響とライフサイクルコストで評価・比較を行う。環境影響については温室効果ガス（以下 GHG）排出量とする。また、FRH のエネルギー利用は本研究においてメタン発酵による発電として扱う。

2.2 食品廃棄物量の推計

市区町村ごとで発生する産業廃棄物量と一般廃棄物量をそれぞれ推計する。産業廃棄物量の推計では松井ら[2)]の手法を用いる。食品廃棄物等の発生量が従業者数に比例するものと仮定し、産業小分類別の食品廃棄物等の発生量を当該業種の従業者数で除して産業小分類別の従業者 1 人あたり食品廃棄物等の発生原単位を算出した。次に、この発生原単位に市町村別・小分類別の従業者数を乗じることで各産業小分類別の食品廃棄物量を算出し、合算することで市区町村ごとの産業廃棄物量を推計する。一般廃棄物量の推計についても食品廃棄物等の発生量が人口に比例するものと仮定する。全国の家庭から排出される食品廃棄物総量を全国人口で除して 1 人あたりの食品廃棄物発生原単位を算出し、これに市区町村ごとの人口を乗じることで推計する。なお、どちらの発生原単位も市区町村で一定と仮定する。最後に産業廃棄物量と一般廃棄物量を合算し、各市区町村の食品廃棄物量として GHG 排出量、ライフサイクルコストの推計に用いる。

2.3 GHG 排出量の算出

再生利用と焼却処理の製品システムを図 1 に示す。本研究では廃棄物の収集・運搬段階、各処理法による処理段階、リサイクル品の輸送段階までのプロセスを対象に GHG 排出量を求める。収集・運搬段階においては牧ら[3)]の修正グリッドシティモデルを用いて算出する。各処理法による処理段階では LCA を用いて算出する。機能単位は食品廃棄物 1t とする。食品廃棄物 1t から生産されるリサイクル品は柚山ら[4)]を参考に、それぞれ飼料が 222kg、発電が 583MJ、堆肥が 360kg と想定し、再生利用の処理に用いる投入資材もそれらに準拠するデータを使用した。また、リサイクル品は飼料が配合飼料、発電が電力、堆肥が化成肥料の代替品とし、代替効果も考慮する。焼却処理については安田[5)]の廃棄物焼却に伴う GHG 排出量のデータを参考にし、食品廃棄物 1t あたりの排出量に修正した。リサイクル品の輸送段階ではエコリーフ環境ラベルプログラムの認定 PCR[6)]を参考に輸送距離を推定し、トラック輸送による GHG 排出量を算出する。

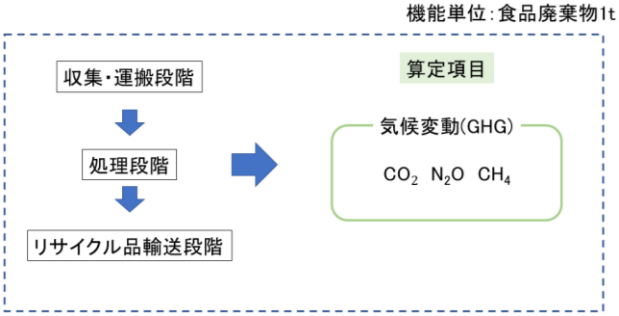


図 1　再生利用と焼却処理のシステム

2.4 ライフサイクルコストの算出

本研究では 20 年間のライフサイクルコストを算出する。再生利用に関しては、LCA で用いた投入資材データ[4)]にそれぞれ単価や年額が記載されているため、それらのデータを用いた。焼却処理に関しては大和ら[7)]のごみ焼却施設の建設単価と運営単価をそれぞれ用いた。建設費に 20 年間の人件費を加えたものと、20 年間で発生す

る食品廃棄物量に 1t あたりの処理コストを乗じたものをそれぞれ合算することで各市区町村の 20 年間ライフサイクルコストを算出する。そして再生利用と焼却処理のライフサイクルコストをそれぞれ比較した。なお、市区町村ごとの地域特性は加味していない。

3. 結果

3.1 GHG 排出量の算出結果

食品廃棄物 1t あたりの GHG 排出量を図 2 に示す。図 2 より、処理のみの場合は、焼却処理に対して飼料化、メタン発酵、堆肥化のいずれも減少する結果となった。また再生利用の代替効果を考慮した場合、どの再生利用でも 100kg-CO_2eq 程度の削減が見込める結果となった。

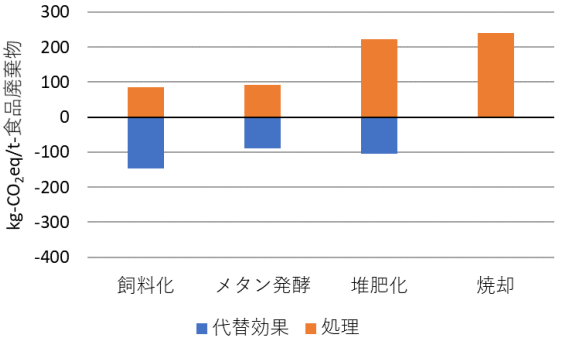


図 2 食品廃棄物 1t あたり GHG 排出量

3.2 ライフサイクルコストの算出結果

再生利用と焼却処理の 20 年間ライフサイクルコストを比較した結果を図 3 に示す。図 3 より、どの図においても青色の部分が多くなっており、焼却処理よりも再生利用のライフサイクルコストが高いことを意味する。地図の分布を見る限り、コスト削減がマイナスの市区町村は人口が少なく、それに伴って 20 年間で排出される食品廃棄物量も少なく推計された地域に多く見られる。この原因としては、約 3000t-食品廃棄物以下において焼却処理のライフサイクルコストが再生利用に比べて低くなったことが挙げられる。すなわち市区町村ごとでそれぞれ食品廃棄物を再生利用する場合、人口の少ない地域では赤字に陥りやすいことがいえる。

4. まとめ

GHG 排出量の結果より、焼却処理よりも再生利用をした方が排出量を抑えられることがわかった。またライフサイクルコストの算定結果より、食品廃棄物量が多い（約 3000t 以上）市区町村では再生利用の方がコストを低減できるが、少ない市区町村（約 3000t 以下）では焼却処理の方がコストを低減できることがわかった。これらの結果から、市区町村単位で再生利用の処理施設を運用した場合、GHG を大幅に削減できるが、ある一定以下の食品廃棄物量だとコスト面で困難な地域が多いことがいえる。

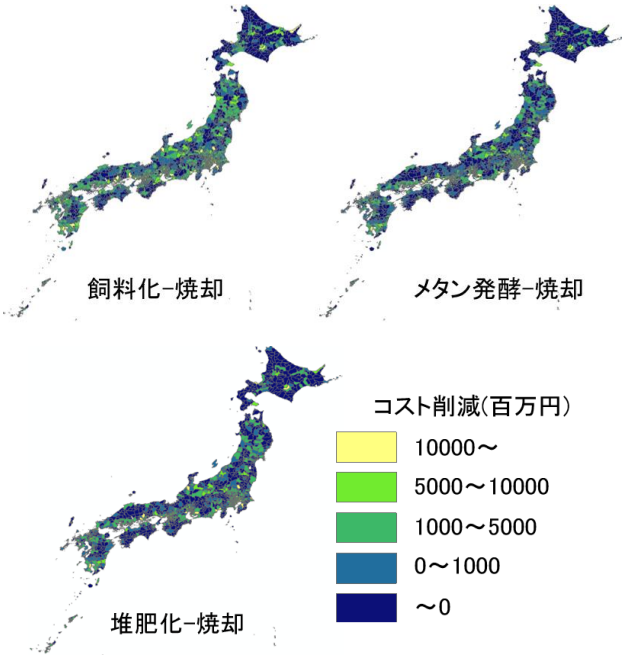


図 3 再生利用と焼却処理のライフサイクルコスト比較

今後の課題としては、コスト面で焼却処理の方が優位になっている市区町村をどのように考慮するかが挙げられる。周辺の市区町村で 1 つの処理施設を共有した場合なども想定して分析を進めたい。また、収集・運搬段階とリサイクル品輸送段階の計算も進めて、プロセス全体での再生利用と焼却・埋立の GHG 排出量とライフサイクルコストの比較を行い、市区町村での最適な処理法を検討していきたい。

参考文献

1) 楠部孝誠，高月紘: 廃棄物学会誌，18(2)，(2007)，pp.120-128
2) 松井康弘，桐生侑恵: 第 31 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集(2020)，pp.33-34
3) 牧誠也，大西悟，藤井実，後藤尚弘，五味馨: 廃棄物資源循環学会論文誌，30，(2019)，pp.153-165
4) 柚山義人，生村隆司，小原章彦，小林久，中村真人: 農業工学研究所技報，204，(2006)，pp.61-103
5) 安田憲二:廃棄物学会誌，8(6)，(1997)，pp.432-437
6) 一般社団法人サステナブル経営推進機構: “認定 PCR 一覧”，エコリーフ環境ラベルプログラム，入手先 <https://ecoleaf-label.jp/>，（参照 2022-01-09）
7) 大和裕治，古保里俊夫，岩永宏平: 第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集(2015)，pp.357-358

口頭発表セッション（一般）

[2-E2] 資源利用の環境影響

座長：西嶋大輔（福島大学）

2022年3月3日(木) 11:00 ～ 12:20 E会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-E2-01] Potential mercury distributions to different sinks in China in response to the Minamata Convention on Mercury

*哈 布尔[1]、藤原 健史[1]、高岡 昌輝[2] （1. 岡山大学、2. 京都大学）

11:00 ～ 11:20

[2-E2-02] リサイクルおよび対策技術導入による銅製錬由来水銀排出量の削減効果：主要国を対象として

*山本 涼太[1]、橋本 征二[1] （1. 立命館大学）

11:20 ～ 11:40

[2-E2-03] 使用済み水銀含有製品からの水銀リサイクルおよび水銀最終処分の環境影響評価

*中野 勝行[1]、光斎 翔貴[1]、山末 英嗣[1]、高岡 昌輝[2] （1. 立命館大学、2. 京都大学）

11:40 ～ 12:00

[2-E2-04] 鉱滓ダム決壊を事例とした鉱物資源サプライチェーンリスク解析モデルの開発

*杉山 智哉[1]、張 政陽[1]、中島 謙一[2]、松八重 一代[1] （1. 東北大学、2. 国立環境研究所）

12:00 ～ 12:20

©日本LCA学会

リサイクルおよび対策技術導入による銅製錬由来水銀排出量の削減効果：主要国を対象として

Reduction of mercury emissions from copper smelting through recycling and introducing countermeasure technology in major countries

○山本涼太*[1)]、橋本征二[1)]
Ryota Yamamoto, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* rv0072hs@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

銅は重要な資源の一つであるが、銅の製錬工程では微量の水銀が大気に排出される。銅鉱石に含まれる水銀の大気排出量を減らすためには、銅のリサイクルを推進するとともに、水銀排出に関する対策技術を導入することが有効である。本研究では、主要国を対象として、将来の銅需要量の変化に伴って製錬由来の水銀排出量がどのように変化するかを推計し、銅のリサイクルや水銀大気排出対策技術の導入を行った場合の削減効果を評価した。

2. 方法

2.1 銅の動的 MFA

本研究では、下式を用いて 2021～2050 年の銅の需要量の推計を行なった。

$$I_t = S_t - S_{t-1} + O_t \qquad (1)$$

ここで、I_tはt年における銅の投入量(＝需要量)(t/year)、S_tはt年末での銅のストック量(t)、O_tはt年における銅の廃棄量(t/year)である。2021～2050 年の銅のストック量S_tについては、Hatayama ら[1)]の推計手法を用いた。この推計手法では 1 人あたり銅ストック量の飽和値を設定する必要があるが、中国については先進国の飽和値を参考に、その(A)平均値、(B)最大値、(C)最小値を用いるシナリオを設定した。なお、計算過程で必要な銅ストック量は、1960～2014 年については、Maung ら[2)]の推計値を用い、2015～2020 年については独自に推計を行った。

2.2 銅製錬由来の水銀排出量の推計

2.1 で推計された銅の需要量に基づき、下式を用いて 2050 年までの水銀大気排出量を推計した。

$$E_t = (I_t \times Z_t) \times (1 - R_t) \times C_t \times d_t \times D_t \times (1 - r_t) \quad (2)$$

ここで、E_tはt年における水銀大気排出量(g-Hg/year)、I_tはt年における銅需要量(t/year)、Z_tはt年における銅需要量に対する銅製錬量の比(-)、R_tはt年における銅のリサイクル率(-)、C_tはt年における電気銅 1t の生産に用いられる銅精鉱量(t/t)、d_tはt年での銅鉱石中の水銀含有量(g-Hg/t)、D_tは溶融スラグに含まれる水銀を考慮した分配係数(-)、r_tはt年における大気排出水銀の除去率(-)である。

銅リサイクルと水銀排出削減技術の有効性を評価するために、R_tとr_tが(I) 2050 年まで変化しない、(II) R_tのみ上昇、 (III) r_tのみ上昇、(IV) R_tとr_tがともに上昇するケースについて水銀大気排出量を推計した。

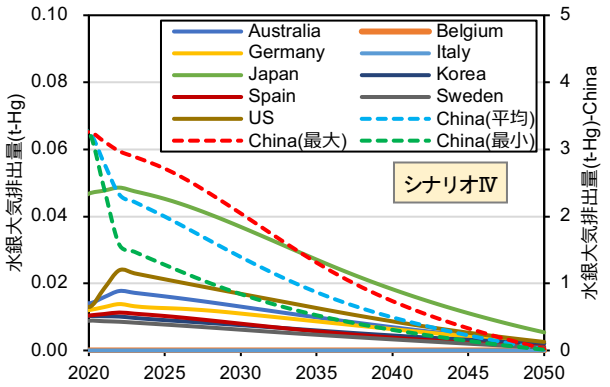


図 1　主要国の水銀大気排出量の推計結果(China は右軸)

3. 結果と考察

対象とした主要先進国の 2050 年における銅需要量の合計値は約 7.2Mt と推計された。また同年の中国におけるシナリオ A、B、C での銅需要量はそれぞれ約 10.1Mt、約 14.7Mt、約 6.4Mt と推計された。シナリオIVにおける各国の銅製錬由来水銀大気排出量の推計結果を図 1 に示す。中国では飽和値シナリオによって水銀大気排出量が大きく変動した。シナリオIにおいては2050 年の推計値が2022 年の値と比べて増加した国があったが、II～IVのケースにおいては、全ての国で減少した。特にシナリオIII、IVの中国では、いずれの飽和値シナリオにおいても 99%以上の減少となった。これは、現状の中国における水銀除去率が他の国と比べて低い(削減ポテンシャルが大きい)ためであると考えられる。また、シナリオII及びIIIの対象国の 2050 年における水銀大気排出量の合計値(中国は平均値シナリオ)は、それぞれシナリオIに対して 39%減、98%減と推計された。銅リサイクルによって水銀排出を削減できるが、BAT である水銀排出削減技術の導入による削減効果がより大きいことが示唆された。

謝辞：本研究は、環境研究総合推進費(JPMEERF 20S20604)の成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

1) Hatayama, H. et al.: Environ. Sci. Technol., 44, 6457-6463, 2010
2) Maung, K.N. et al.: Environ. Sci. Technol., 51, 3824-3832, 2017

鉱滓ダム決壊を事例とした鉱物資源サプライチェーンリスク解析モデルの開発

Development of IO-based model for supply chain risk analysis focusing on Tailing dam failure at mining sites

○杉山智哉*[1)]、張政陽[1)]、中島謙一[2)]、松八重一代[1)]
Tomoya Sugiyama, Zhengyang Zhang, Kenichi Nakajima, Kazuyo Matsubae
1) 東北大学, 2) （国研）国立環境研究所
* sugiyama.tomoya.q3@dc.tohoku.ac.jp

1. 背景

脱炭素社会構築に向けて、現に、電動機を動力源とした電動車(xEV)の普及拡大が進んでいる[1)]。2020 年には世界の電動車のストック台数が 1000 万台になり、2020 年新車登録台数のうち、3 分の 2 は Battery Electric Vehicle(BEV)が占めた[2)]。自動車の電動化に不可欠な電池の一つにリチウムイオン電池があるが、2020 年の車載用リチウムイオン電池の世界市場規模は、容量ベースで 167.5GWh である。今後も市場規模は拡大を続け、2030 年には 1,809GWh になると予測されている[3)]。リチウムイオン電池には、重要鉱物資源であるリチウム、コバルトをはじめ、銅、ニッケル、アルミニウムの鉱物資源が使用されている[4)]。これら鉱物資源のサプライチェーン(SC)を寸断するイベントは 2010 年を機に増加傾向にあり、22 の鉱物資源を対象にした研究では、1967 年から現在に至るまで、SC 寸断イベントは 448 件発生しているという結果もある[5)]。また、鉱物資源 SC の上流に着目すると、採掘活動に伴う土地改変[6)]、生物多様性の損失[7)]といった環境問題や、児童労働、違法採掘等の社会問題も生じている[8)]。近年は、これだけにとどまらず、自然災害の発生頻度と影響力ともに増加しているため、国・産業へもたらす影響も甚大である[9)]。

複雑化した SC の構造把握や可視化は容易ではなく、資源の調達・供給の SC を包括的に捉えるツール・モデルの作成が十分に進んでいないという課題がある。これまで、マテリアルフロー分析と多地域間産業連関（MRIO）分析によって、鉱物資源の流れを定量解析した研究[6)]や、SC を寸断する供給リスクの抽出・整理[5)]が行われてきた。しかし、鉱業国で発生する災害がもたらす鉱山周辺地域への影響が直接・間接的に SC を通じて他国へどの程度の影響を及ぼすのか、資源集約財を使用している資源消費国・先進国は、どの程度の責任を負うべきなのか、定量的に把握することが難しく、十分に測ることができていなかった。

そこで、本研究では、鉱山周辺地域で発生する鉱滓ダムの決壊事故を事例に挙げ、鉱物資源 SC リスク解析モデルの開発を行った。

2. 研究方法

2.1 SC リスク表の作成

本研究では、ある発生確率のもとで、鉱山周辺で望ましくない事象の発生により、何らかの被害を周辺地域にもたらしたものを「リスク」と定義する。抽出したリスク情報から、「国$k_i\ (i = 1,2,\cdots,n)$で起こるリスク要因$R_i(i = 1,2,\cdots,s)$が産業$l_i(i = 1,2,\cdots,m)$へ与える制約$Z_{R,l}^{k}(i = 1,2,\cdots,q)$」という形に変換する。ここで、制約$Z$を産業別生産額$X$で除したものを制約行列$\omega$とすると、$t$年間のうちに国$k$で起こるリスク要因$R$が$l$産業に与える制約$Z$を産業別生産額$X$で重み付けしたものは、$\omega_{Z,l}^{k}$と表すことができる〔式(1)参照（10 年分のリスク情報を抽出した場合）〕。

最終的に、各国分を統合し、SC リスク表を完成させる。

$$\omega_{Z,l}^{k} = \sum_{t=1}^{10}\sum_{R=1}^{s} Z_{R,l}^{k} \left(\sum_{t=1}^{10} X_{t:l}^{k}\right)^{-1} \quad (1)$$

2.2 MRIO モデルの拡張

既存の産業連関モデル[12)]により、Aを投入係数行列、$(I-A)^{-1}$はレオンチェフ逆行列、Fは最終需要とすると、最終需要 1 単位を満たすために、直接・間接的に引き起こされる生産額 Xは(2)式のように表すことができる。

$$X = (I-A)^{-1}F \quad (2)$$

既存の産業連関モデルの仕組みを用いて、本研究で作成した SC リスク表の接続を行う。最終需要 1 単位を満たすために制約Zが各国・各産業へ直接・間接的に与える影響Wは(3)式のように示すことができる。$\omega_{Z,l}^{kl}$は(1)式で作成したものである。

$$W = \omega_{Z,l}^{kl}(I-A)^{-1}F \quad (3)$$

2.3 鉱物資源 SC リスクの解析

ここでは、対象とするリスク事例を 1928 年から 2020 年までに鉱山周辺地域で発生した鉱滓ダムの決壊事故とした。リスク情報は、Web ページ[10)]、論文 Lyu et al., 2019[11)]から鉱山周辺地域の鉱滓ダム決壊事故による犠牲者数を抽出した。既存の多地域間産業連関モデルは、2014 年の WIOT[13)]を使用した。WIOT は、国民経済計算から得られた生産、付加価値、貿易、消費等を基準

に経年変化を追跡した分析に使用可能である[9]。2.1 で抽出した犠牲者数が、どの国の自動車産業にどれほどの責任が割り当てられるのかを(3)式を用いて算出した。この際、$\omega_{z,l}^{kl}$は(4)、(5)式によってそれぞれ定め、各国に割り当てられる犠牲者数Wを 2 通りの方法で算出した。(4)、(5)式によって算出した(3)式で示した犠牲者数WをそれぞれW_1、W_2とする。

$$\omega_1 = \frac{\textit{犠牲者数（人）}}{\textit{鉱業部門の生産額（百万ドル）}} \quad (4)$$

$$\omega_2 = \frac{\textit{犠牲者数（人）}}{\textit{国全体の生産額（百万ドル）}} \quad (5)$$

3. 結果

(3)、(4)式によって算出した日本、米国、中国の自動車産業の 1000 億ドル（おおよそ 10 兆円）の需要に対する犠牲者数の割り当てW_1は、それぞれ 3.2 人、2.1 人、8.2 人という結果になった。このうち Rest of the world(ROW)を除く国で発生した犠牲者数の責任分は各国それぞれ、1.4 人、1.5 人、7.1 人にあたる。

同様に、(3)、(5)式によって、各国それぞれの犠牲者数割り当てW_2を算出した。日本、米国、中国の順に、0.2 人、0.1 人、0.4 人という結果になった。このうち Row を除く国で発生した犠牲者数の責任分は各国それぞれ、0.03 人、0.04 人、0.25 人にあたる。

4. 考察

W_1については、鉱滓ダム決壊による犠牲者数だけを見ると中国が一番多いが、日本、米国が負う犠牲者数の責任分で、一番占める割合が高いのは、ブルガリアの事故によるものであった。米国は自国と他国で発生した犠牲者数が同等程度の構成比になっている。このことから、犠牲者数が多いから自動車産業が負う犠牲者数の責任割り当ても多いとは一概には言えない。また、中国が負う責任分の内訳は、8 割が自国で発生した犠牲者数となった。

W_2の結果から、犠牲者数だけを見ると、ブラジル 294 人、メキシコ 77 人なのに対し、米国の自動車産業に割り当てられる犠牲者数は、メキシコ 17%、ブラジル 14%という構成になり、メキシコで発生した犠牲者数の方が占める割合が高くなった。これは、メキシコの鉱業部門への生産誘発額が 2 番目に高いため、構成比が犠牲者数の多い順と逆転したことが考えられる。中国に関しては、W_1の結果よりもさらに自国で発生した犠牲者数が約 9 割を占めることになった。

ここで、算出したW_1とW_2の差を測り、鉱業部門生産額が国全体の生産額に占める割合との比較を行った。

表 1 の「犠牲者数の差」は、W_1とW_2の犠牲者数の差を示しており、「鉱業部門の割合」は、各国の国全体の生産額に占める鉱業部門の生産額を割合で示したものである。国全体の生産額に占める鉱業部門生産額の割合が高い国ほど、各国の生産誘発額に割り当てられる犠牲者数の差が大きくなることがわかった。

本研究によって、災害による鉱業国への被害と資源消費国の関連を可視化することができた。ただし、制約行列ωの更なる精緻化が必要である。

表 1 各国の生産誘発額に配分された犠牲者数の差と鉱業部門の生産額が全体に占める割合の比較

	犠牲者数の差（人）	鉱業部門の割合（%）
日本	1.3	0.4
米国	1.5	2.2
中国	6.9	3.9

引用文献

1) 経済産業省: “2050 年カーボンニュートラル社会実現 に向けた鉱物資源政策”, 資源エネルギー庁 資源・燃料部, 入手先 <https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/kogyo/pdf/007_03_00.pdf>, （参照 2022-01-05）
2) IEA: “Trends and developments in electric vehicle markets”, Global EV Outlook 2021, 入手先 <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/trends-and-developments-in-electric-vehicle-markets>, （参照 2022-01-11）
3) 矢野経済研究所: “車載用リチウムイオン電池世界市場に関する調査を実施（2021 年）”, 2020-2021 年版 車載用リチウムイオン電池市場の現状と将来展望, 入手先 <https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/2671>, （参照 2022-01-11）
4) Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F., & Pavel, C., "Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU - a Foresight Study", (2020), pp 19
5) Hatayama, H., & Tahara, K., *Resources Policy*, *55*, (2018), pp96–102
6) Nakajima, K., Nansai, K., Matsubae, K., Tomita, M., Takayanagi, W., & Nagasaka, T., *STOTEN*, *586*, (2017), pp730–737
7) Wiedmann, T., & Lenzen, M., *Nature Geoscience*, *11*(5), (2018), pp314–321.
8) 谷口正治, Journal of MMJ, 131, (2015), pp588-591
9) World Economic Forum: "The Global Risks Report 2021: 16th Edition", (2021)
10) WISE Uranium: " Chronology of major tailings dam failures", 入手先＜https://www.wise-uranium.org/mdaf.html＞, (参照 2022-01-08)
11) Zongjie Lyu , Junrui Chai ., Zengguang Xu .,Yuan Qin ., & Jing Cao.,Advances in Civil Engineering, (2019), pp18
12) 総務省:"産業連関分析のための各種係数の内容と計算方法", 産業連関分析について, 入手先＜https://www.soumu.go.jp/main_content/000666727.pdf＞, (参照 2021-12-22)
13) University of groningen: "WIOD2016 Release", Groningen Growth and Development Centre, 入手先＜http://www.wiod.org/home＞, (参照 2022-01-11)

口頭発表セッション（一般）

[2-A3] フットプリント

座長：横井崚佑（産業技術総合研究所）

2022年3月3日(木) 13:20 〜 14:40 A会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-A3-01] 食料生産と消費の時系列変化に着目した淡水資源需給バランスの要因分析

*山口 陽平[1]、吉川 直樹[1]、橋本 征二[1]、天野 耕二[1]（1. 立命館大学）

13:20 〜 13:40

[2-A3-02] 世界の水資源利用の持続可能性への責任―日本のウォーターフットプリント分析を事例として

*本下 晶晴[1]、Pfister Stephan[2]、佐々木 貴央[3]、南斉 規介[4]、橋本 征二[3]、横井 崚佑[1]、Finkbeiner Matthias[5]（1. 産業技術総合研究所、2. ETH Zurich、3. 立命館大学、4. 国立環境研究所、5. Technische Universitaet Berlin）

13:40 〜 14:00

[2-A3-03] 多地域間産業連関分析を用いた生物多様性フットプリント

*髙橋 毅一郎[1]、伊坪 徳宏[1]（1. 東京都市大学）

14:00 〜 14:20

[2-A3-04] インフォーマルセクターの生産活動を考慮したカーボンフットプリントの実証分析

*三苫 春香[1]、加河 茂美[1]（1. 九州大学）

14:20 〜 14:40

©日本LCA学会

食料生産と消費の時系列変化に着目した淡水資源需給バランスの要因分析

Decomposition Analysis of Water Supply-Demand Balances Focusing on Time Series Change in Food Production and Consumption

○山口陽平*[1)]、吉川直樹[1)]、橋本征二[1)]、天野耕二[1)]
Yohei Yamaguchi, Naoki Yoshikawa, Seiji Hashimoto, Koji Amano
1) 立命館大学
* y-ymagch@fc.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

食料の生産と消費は多量の淡水資源を要する。今後、人口増加や経済発展に伴う食料生産・消費の拡大により、世界全体の淡水需給逼迫度が強まる恐れがある。既往文献[1)]では、世界規模で淡水需給逼迫度の時系列変化の要因が分析されているが、その変化は淡水取水量と淡水利用可能量の変化率として分析されており、各々の変動要因の分析はなされていない。既往文献[2)]において、要因分解分析を適用して灌漑用水必要量の時系列変化の要因が世界規模で分析されているが、淡水需給逼迫度の分析はなされていない。本研究では、食料の生産と消費に着目し、淡水資源必要量と淡水需給逼迫度の各々について時系列変化の要因を分析する。

2. 研究手法

2.1 生産ベースと消費ベースの淡水資源必要量

本研究では、対象期間を 2001-2018 年 (基準年 : 2001 年)、対象国を 226 カ国、対象品目を 78 品目とした。各国の食料需給収支は、食料需給量の基礎データを FAOSTAT の食料需給表とし、国内生産量と輸入量の和から、国内消費量と輸出量の和を差し引き、その差を在庫変動量として推計した。国内消費は中間需要 (飼料用と加工品原料用)、最終消費 (食用)、種子用、その他利用、廃棄物から構成される。貿易相手国別の輸入量は、FAOSTAT の輸入統計を基礎データとし、輸入統計の欠損値を同データベースの輸出統計より補填した。RAS 法を用いた収束計算により、世界全体の輸入量の和と輸出量の和が品目別に整合するように各国間の食料貿易量を補整し、品目別に食料貿易収支を推計した。食料需給収支と食料貿易収支は各時点別に分析した。なお、食料需給量の各項目、および食料貿易量は、対象年別に当該年の前後 3 年平均値を用いた。

本研究では、天水と灌漑用水を対象に、生産ベース (食料生産) と消費ベース (食料消費) の淡水資源必要量[3)]を water footprint により分析する。淡水消費原単位を用いて、国内生産量と最終消費量をそれぞれ、生産ベースと消費ベースの淡水資源必要量に換算する。農作物については、作物の栽培段階の直接消費水のみを評価範囲とする。畜産物については、栽培段階における飼料作物の直接消費水、家畜の飲料用水、飼育環境の維持に必要な直接消費水を評価範囲とする。なお、灌漑用水必要量については、灌漑効率を加味して取水量ベースとして評価した。また、各年の淡水消費原単位は基準年と当該年の間の単収の変化を加味して設定した。単収は FAOSTAT の生産統計から取得した。

2.2 淡水需給逼迫度の要因分解式

本研究では、淡水資源供給可能量に対する生産ベース灌漑用水必要量の比として、淡水需給逼迫度 *WBI* を分析した。*WBI* の強度は、既往文献[4)]を参考に、Low (*WBI* < 0.3)、Moderate (0.3 ≤ *WBI* < 0.6)、High (0.6 ≤ *WBI* < 1.0)、Very High (*WBI* ≥ 1.0)の 4 段階に設定した。

淡水需給逼迫度の変動に対する要因別の寄与の大きさは、*t* 年の淡水需給逼迫度 *WBI*(*t*)と基準年の淡水需給逼迫度の世界平均値 *WBI*(0)との差 *ΔWBI*(*t*)に完全分解分析[5)]を適用して分析した (次式(1)～(3)を参照)。

$$WBI_k = \frac{POP_k}{TRWR_k - EFR_k} \cdot \frac{TFR_k + DUADW_k}{AWW_k} \cdot \frac{GDP_k}{POP_k} \cdot \frac{WR_k^{PB,Blue}}{GDP_k} \quad (1)$$

$$\frac{WR_k^{PB,Blue}}{GDP_k} = \sum_j \left[\frac{WR_{j,k}^{PB,Total}}{GDP_k} \cdot \frac{WFI_{j,k}^{Green}}{WFI_{j,k}^{Total}} \cdot \frac{\left(WFI_{j,k}^{Blue}/IRE_{j,k}\right)}{WFI_{j,k}^{Green}} \right] \quad (2)$$

$$\frac{WR_k^{PB,Total}}{GDP_k} = \frac{PRO_k}{GDP_k} \cdot \frac{PRO_{j,k}}{PRO_k} \cdot \frac{WFI_{j,k}^{Total}}{UCF_j} \quad (3)$$

j : 食料品目、*k* : 生産国、*PB* : 生産ベース、*Green* : 天水、*Blue* : 灌漑用水、*Total* : Total water (天水と灌漑用水の和)、*POP* : 人口、*TRWR* : 淡水資源賦存量、*EFR* : 環境流量、*TFR* : 総淡水消費量、*DUADW* : 農業排水直接利用量、*AWW* : 農業用水取水量、*GDP* : 国内総生産 (GDP)、*WR* : 淡水資源必要量、*WFI* : 淡水消費原単位、*IRE* : 灌漑効率、*PRO* : 国内生産、*UCF* : 熱量換算係数を表す。(1)式の各要因は、第 1 項 : 1 人あたり淡水資源賦存量 (ΔF1)、第 2 項 : 産業構造 (ΔF2)、第 3 項 : 1 人あたり GDP (ΔF3)、第 4 項 : GDP あたり灌漑用水必要量 (ΔF4) を表す。(2)式の各要因は、第 1 項 : GDP あたり Total water 必要量、第 2 項 : 天水依存の割合、第 3 項 : 天水と灌漑用水の比を表す。(3)式の各要因は、第 1 項 : GDP あたり国内生産量、第 2 項 : 生産品目シェア、第 3 項 : Total water 消費原単位を表す。

3. 結果と考察

3.1 淡水需給逼迫度の時系列変化

図 1 は縦軸に 2018 年時点の淡水需給逼迫度、横軸に基準年の淡水需給逼迫度をとった強度分布図である。各強度は 2018 年時点のものであり、両軸とも淡水需給逼迫度の対数変換値をとった。同図では、各要因に関するデータの利用可能性を加味し、149 カ国を対象とした。2018 年時点の淡水需給逼迫度は、基準年と比較して世界全体で上昇傾向にあることがわかる。

図2に灌漑用水必要量の上位10カ国および日本を対象に、基準年から 2018 年までの淡水需給逼迫度の時系列変化の様子を示す。一部の期間で淡水需給逼迫度に減少傾向が見られるが、各国とも基準年から 2018 年にかけて淡水需給逼迫度が上昇傾向にあることがわかる。

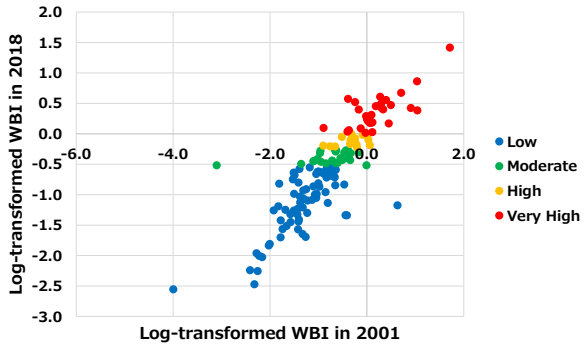


図 1 淡水需給逼迫度の強度分布 (2018 年)

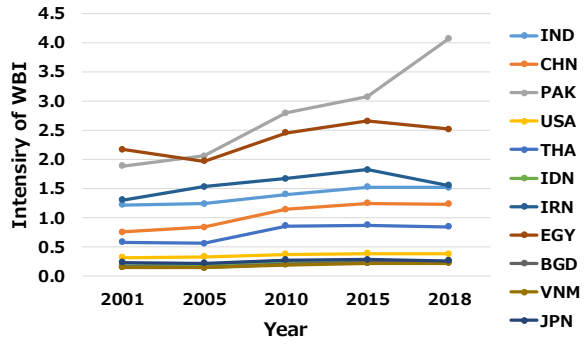


図 2 淡水需給逼迫度の時系列変化 (2001-2018 年)

3.2 淡水需給逼迫度の要因分析

図3は基準年と2018年時点の淡水需給逼迫度を比較し、主要な上昇要因別の国数を 2018 年時点の強度別に示したものである。同図の対象国数は、図 1 と同様である。主要な上昇要因として GDP あたり灌漑用水必要量 (ΔF4) を示す国が最も多く、50カ国が該当した。これらの国では、GDP あたり灌漑用水必要量によって淡水需給逼迫度が高められている恐れがある。

図 4 は基準年と 2018 年の 2 時点間を対象に、図 2 の 11 カ国について、淡水需給逼迫度の変動要因を図示したものである。GDP あたり灌漑用水必要量が主要な上昇要因となった国は 8 カ国である。これらの国では、経済成長に伴う灌漑用水必要量の増加によって、淡水需給逼迫度が高められている可能性が示唆された。

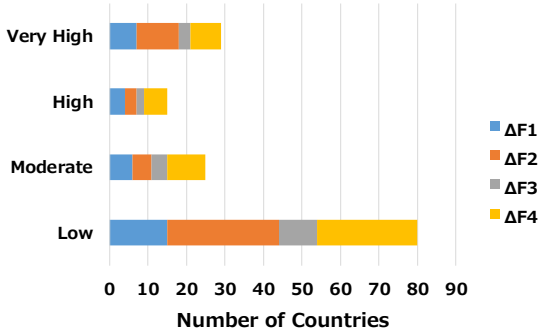


図 3 淡水需給逼迫度の上昇要因 (2018 年)

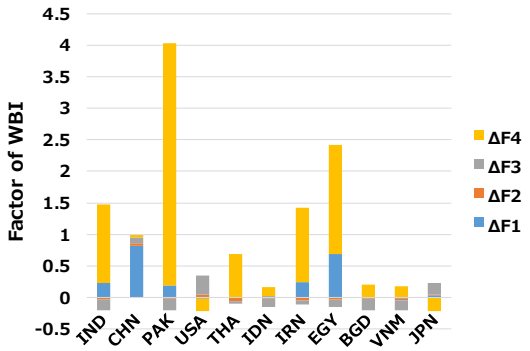


図 4 淡水需給逼迫度の変動要因 (2018 年)

4. まとめ

2018 年時点の淡水需給逼迫度は、基準年 (2001 年) と比較して世界全体で上昇傾向にあることがわかった。また、世界の 50 カ国では、GDP あたり灌漑用水必要量によって、淡水需給逼迫度が高められている可能性が示唆された。なお、学会当日は消費ベースの淡水資源必要量についても報告する予定である。

5. 引用文献

1) Huang Z., Yuan X., Liu X.: J. Hydrol., 601, (2021), 126658.
2) Ma C., Yang Z., Xia R., Song J., Liu C., Mao R., Li M., Qin X., Hao C., Jia R.: Resour. Conserv. Recycl., 172, (2021), 105665.
3) Yamaguchi Y., Yoshikawa N., Amano K., Hashimoto S.: Sustainability, 13 (14), (2021), 7856.
4) Smakhtin V., Revenga C., Döll P.: “Taking into account environmental water requirements in global-scale water resources assessments”, (2004), pp. 1-24.
5) 三科善則, 室町泰徳: 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 67 (5), (2011), pp. I_89-I_100.

インフォーマルセクターの生産活動を考慮した カーボンフットプリントの実証分析

Empirical Analysis of Carbon Footprint Considering Production Activities of Informal Sector

○三苫春香*[1)]、加河茂美 [1)]
Haruka Mitoma, Shigemi Kagawa
1) 九州大学
* mitoma.haruka.648@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

フォーマルセクターとインフォーマルセクターの生産活動によって構成される二重の経済システムは発展途上国や新興国の代表的な特徴である。インフォーマルセクターの定義は各国や各機関で様々であるが、それらの定義に共通する特徴として、小規模で伝統的な生産活動と規制の不完全さが挙げられる。インフォーマルセクターは政府の管理下に置かれていないことが多く、その生産活動の実態は統計データによって捉えることが困難である。そのため汚染物質の排出規制を含む様々な規制が機能しにくい状況下にあり、環境問題への寄与が懸念される。このようなインフォーマルセクター個々の生産活動は小さい一方で、膨大な数が存在し、インフォーマルセクター全体では発展途上国や新興国における GDP の約 3 分の 1 を占め、また人口の約 70%を雇用している [1)]ことから、無視できない存在となっている。本研究ではインフォーマルセクターの生産活動に伴う環境負荷を明らかにし、それがどのようなサプライチェーンで発生するのか明らかにすることで発展途上国や新興国における CO_2 を始めとする汚染物質の排出削減策について議論することを目的とする。

2. 研究手法とデータ

2.1 分析対象

本研究では 2016 年を対象としたインドにおける実証分析を行う。インドは中国、アメリカに次ぐ世界第三位の CO_2 排出国である一方で、近年においてもインフォーマルセクターの生産活動は GDP の約 50%を占め人口の約 90%を雇用している [2)]。

※データの入手可能性の問題から本研究はインドの製造業のインフォーマルセクターのみを分析対象とする。

2.2 使用データ

＜経済活動に関するデータ＞

Supply Use Table of India (2016)[3)]

National Accounts Statistics (NAS)[2)]

＜CO_2 排出量に関するデータ＞

EXIOBASE3 satellite account (2016)[4)]

Biswas et al. (2018)[5)]

2.3 分析データベースの作成

本研究では、インド国内産業連関表（図 1）をフォーマルセクターおよびインフォーマルセクターの生産活動に分割することで図 2 のような構造の産業連関表を作成した。生産額ベクトル、付加価値ベクトルおよび最終需要ベクトルは NAS[2)]のデータから計算し、フォーマルセクターとインフォーマルセクター間の中間取引行列についてはこれらのデータを制約として、RAS 法 [6)]により推計した。RAS 法は産業連関表の行列のバランス調整の手法であり、産業連関表のアップデートに用いられることが多いが、本研究では Dietzenbacher et al. (2012)[7)]に倣い未知の行列の推計に応用している。

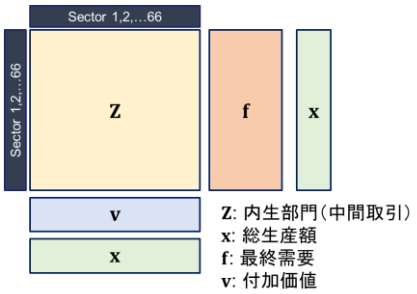


図 1　分割前の産業連関表の構造

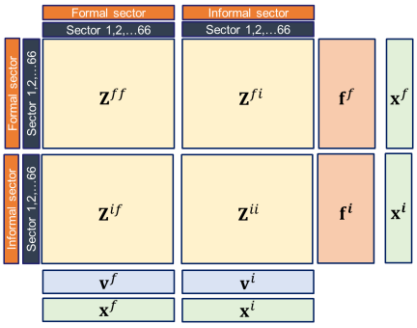


図 2　分割後の産業連関表の構造

ここで図 2 中の添え字 *f* はフォーマルセクター、*i* はインフォーマルセクターを示す。

2.4 サプライチェーンの可視化

本研究ではまず、以下の式で示される単位構造モデル[8]を応用し、s 部門への最終需要が中間取引を通じて誘発する CO_2 排出量を示す行列 $\mathbf{Q}^s$ を推計する。

$$\mathbf{Q}^s = \hat{\mathbf{e}}\mathbf{A}\mathbf{L}\widehat{\mathbf{f}^s}$$

$\hat{\mathbf{e}}$:生産額当たりのCO_2排出量(CO_2排出係数)、$\mathbf{A}$: 投入係数行列
$\mathbf{L}$: レオンチェフ逆行列、$\mathbf{f}^s$: 部門sの最終需要ベクトル

次に、推計した $\mathbf{Q}^s$ について、各部門を頂点、取引（行列の要素）を重み付きの辺としてグラフ化することで、インド国内の CO_2 排出に大きく寄与するサプライチェーンにおいてインフォーマルセクターがどのように寄与しているのか明らかにした。

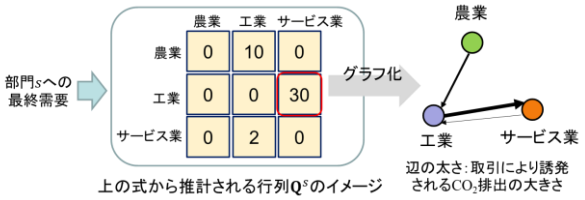


図 3 サプライチェーン可視化の手順

3. 結果

3.1 総 CO_2 排出量

フォーマルセクターから排出される総 CO_2 排出量は約 19 億トン、そのうち製造業から排出される CO2 排出量は約 6 億トンであり、インフォーマルセクターの製造業から排出される CO_2 排出量は約 1 億トンであった。インフォーマルセクターの製造業から排出される CO_2 排出量はフォーマルセクター全体の約 5%、製造業に対しては約 17%に相当する。

3.2 CO_2 排出量への寄与が大きいサプライチェーンにおけるインフォーマルセクターの寄与

下の図 4 は、中間取引を通じて最も多くの CO_2 排出量を誘発している Construction 部門を最終需要としたサプライチェーンにおいて、CO_2 排出量に大きく寄与する上位 50 個の取引を可視化したものである。図中の黄色の点はフォーマルセクター、青色の点がインフォーマルセクターを示しており、インフォーマルセクターが含まれる取引は青色で示されている。また矢印の太さおよび濃淡でそれぞれの取引が誘発する CO_2 排出量の大きさが示されている。図 4 に示された 50 個の取引が誘発する総 CO_2 排出量は約 3 億 7000 万トンであり、そのうち約 4400 万トン(約 12%）がインフォーマルセクターを含む取引から誘発されている。図中には、Other non-metallic mineral product 部門および Basic iron and steel 部門のインフォーマルセクターが含まれており、特に Other non-metallic mineral product 部門のインフォーマルセクターから Construction 部門への取引が CO_2 排出量に非常に大きく寄与していることが分かる。これらの結果から、インド国内の CO_2 排出削減に向けて、インフォーマルセクターにも踏み込んだ政策が必要であると考えられる。

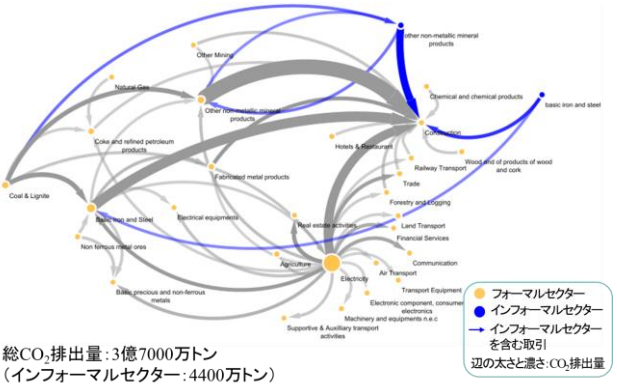


図 4 Construction 部門のサプライチェーン

4. 引用文献

1) Ohnsorge, Franziska, and Shu Yu, (eds).: “The Long Shadow of Informality: Challenges and Policies” (2021)
2) Ministry of Statistics and Programme Implementation: “National Accounts Statistics of India” <https://www.mospi.gov.in/web/mospi> (参照 2021-12-23)
3) Ministry of Statistics and Programme Implementation: “Supply Use table 2015-2016” <https://www.mospi.gov.in/web/mospi> (参照 2021-12-23)
4) Stadler et al.: J.Ind.Ecol, 22 (3), (2018)
5) Biswas et al.: “Greenhouse Gases Emission Estimates for the Informal Manufacturing Industry of India” (2018)
6) Miller and Blair, ”Input–OutputAnalysis: Foundations and Extensions,2nd edn.”, Cambridge University Press,Cambridge, UK, (2009)
7) Dietzenbacher et al./Journal of Environmental Economics and Management 64 (2012)
8) Kagawa et al.: Glob Environ Change 35, (2015)

口頭発表セッション（一般）

[2-C3] 自治体

座長：橋本征二（立命館大学）

2022年3月3日(木) 13:20 〜 14:40 C会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-C3-01] 自治体が提供するごみ分別アプリの利用の状況とその規定因

*湯川 力[1]、橋本 征二[1]（1. 立命館大学）

13:20 〜 13:40

[2-C3-02] 地方移住型テレワークの LC-CO_2排出量評価 に向けた基礎的研究

*西本 祐司[1]、朴 秀日[1]、加藤 博和[1]（1. 名古屋大学大学院）

13:40 〜 14:00

[2-C3-03] 地方公共団体のための環境施策効果推計方法の提案

*清水 皓介[1]、磐田 朋子[1]（1. 芝浦工業大学）

14:00 〜 14:20

[2-C3-04] 自治体の脱炭素化に向けた市民－行政間ギャップの構造分析

*坪井 陸[1]、磐田 朋子[1]（1. 芝浦工業大学）

14:20 〜 14:40

©日本LCA学会

自治体が提供するごみ分別アプリの利用の状況とその規定因

Status and determinant factors of the use of waste separation applications provided by local governments

○湯川力*[1)]、橋本征二[2)]
Riki Yukawa, Seiji Hashimoto
1)立命館大学大学院　2)立命館大学
* rv0073hv@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

家庭のごみ出しにおいては、ごみ収集日の確認ミスやごみの出し忘れなど様々な課題があり、近年多くの自治体でごみ分別アプリ（以下、アプリ）の導入や導入の検討がなされるようになっている。しかし、アプリ利用者のアプリ利用頻度、ダウンロード率は低い傾向にある。本研究では、アプリを使用している人、使用したことのある人、使用したことがない人の意識構造を明らかにし、アプリの利用を促進する策を検討した。また、便利な機能、必要な機能、改善すべき機能などを明らかにした。

2. 方法

1）意識構造の分析モデルの設計

アプリの利用に関わる意識構造を明らかにするため、広瀬の環境配慮行動モデル[1)]をベースに、アプリ利用の行動意図形成モデルを作成した。

2）アンケート調査

ごみ対策に関わる目標意図、アプリ利用行動に対する評価、アプリ利用の行動意図等を把握するためアンケート調査を行った。アプリ導入自治体の市民のうち、アプリを使用している人／使用したことのある人／使用したことのない人それぞれ300名、合計900名を対象とした。

3）分析方法

アンケート結果より因子分析を行い、アプリ利用の行動意図をもたらす影響因子を抽出した。抽出した因子をアプリ利用の行動意図形成モデルにあてはめ、パス解析を行った。また、便利な機能、必要な機能、改善すべき機能等を集計した。

3. 結果と考察

本要旨では、因子分析、パス解析の結果を示す。

1）因子分析の結果

SPSS Statistics 27 を用いて因子分析（主因子法、Kaiser の正規化を伴うバリマックス法）を行った結果、ごみ対策に関わる目標意図、及びアプリ利用の行動意図に関わる意見については、「目標意図（ごみ減量）」「目標意図（資源化）」「目標意図（環境保全）」「アプリ利用の行動意図」の 4 つの因子、アプリ利用行動に対する評価に関わる意見については、「アプリ機能の有効性評価」「アプリ利用の有効性評価」「アプリ利用の実行可能性評価」「アプリ利用の便益評価」の 4 つの因子が抽出された。

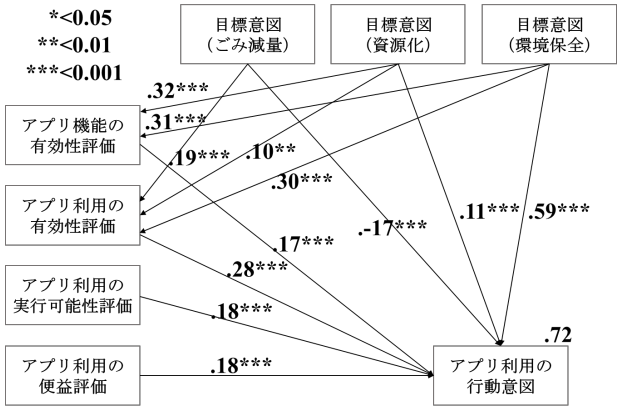


図１　アプリ利用の行動意図形成モデルの分析結果

2）パス解析の結果と考察

SPSS Amos 27 Graphics を用いて、アプリ利用の行動意図形成モデルに基づきパス解析を行った。図 1 の矢印上の数値は各因子が目標意図、行動意図にどの程度影響を与えているかを表したパス係数であり、図に示されたパス係数は全て 0.1%、1%水準で有意であった。「アプリ利用の行動意図」の形成に強く影響を与える因子として「目標意図（環境保全）」「アプリ利用の有効性評価」が示唆された。アプリ利用の行動意図を形成するためには、ごみ対策が環境の保全に繋がることを意識した環境教育を行うこと、アプリ内にこうした情報、知識を掲載することが有効であると考えられる。また、アプリを使うことでごみの減量や正しい分別につながること、災害時などの緊急時に適切にごみ排出ができるようになること等を自治体が宣伝することで、「アプリ利用の有効性評価」が高まり、アプリ利用の行動意図が形成されると考えられる。さらに、「目標意図（環境保全）」は、「アプリ機能の有効性評価」や「アプリ利用の有効性評価」にも影響を与えており、間接的にもアプリ利用の行動意図に影響を与えている。

その他の考察や、便利な機能、必要な機能、改善すべき機能等の集計結果は学会当日報告する。

謝辞：本研究は、環境研究総合推進費(JPMEERF20193005)による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

1）広瀬幸雄：環境と消費の社会心理学、名古屋大学出版会、1995

地方移住型テレワークの LC-CO_2 排出量評価に向けた基礎的研究

Basic research for evaluation of LC-CO_2 emission of telework with migration to rural area

○西本祐司*[1)]、朴秀日[2)]、加藤博和[2)]
Yuji Nishimoto, Suil Park, Hirokazu Kato
1) 名古屋大学大学院環境学研究科,2) 名古屋大学大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター
* ynishimoto@urban.env.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

近年、ICT（Information and Communication Technology）の発展や、多様で柔軟な働き方への関心の高まりを受けて、テレワークを活用した地方移住などの新たな生活様式が生まれており、全国に多数の事例が存在している。

一方で、テレワークの CO_2 排出量評価に関する既往研究は未だ不十分であり、地理的および気象的差異を考慮するなど、より多くの研究が必要であるとされる[1)]。

2. 研究の目的

本研究では、地方部へ移住しテレワーク（在宅勤務・サテライトオフィス勤務）を行うワークライフスタイルを「地方移住型テレワーク」と定義し、地方移住型テレワークのライフサイクルの CO_2 排出量（LC-CO_2 排出量）評価手法確立への示唆を得ることを目的とする。

著者ら（2022）[2)]は、テレワークを活用した地方移住の低炭素性を評価するための推計手法を開発した。しかしこの手法は、LC-CO_2 排出量を検討できていない。そこで本稿では、地方部のサテライトオフィスと勤務者への調査を実施し、これを用いてサテライトオフィスでの業務の LC-CO_2 排出量原単位を試算する。さらに、感度分析を行うことで、サテライトオフィスでの業務の LC-CO_2 排出量評価に影響する要因を考察する。

3. LC-CO_2 排出量原単位試算方法

サテライトオフィスでの業務の LC-CO_2 排出量試算フローを図 1 に示す。本稿では、図中の試算項目に示す 5 項目について、LC-CO_2 排出量を試算し考察する。このため、実際に地方部のサテライトオフィスを対象に調査を実施し、これに基づきモデルケースを設定した。なお現時点では、建物や設備の廃棄による CO_2 排出量は考慮していない。

試算手法は、オフィス建設・オフィス設備製造時の CO_2 排出量をインベントリ分析によって導出する。オフィス設備は、机・椅子、事務機器、PC、空調機を評価対象とした。その他は、著者ら（2022）[2)]を用い、図中の試算手法に示すとおり導出する。

モデルケースの設定条件を表 1 に示す。図中の凡例に示す各パラメータに対して、これらの値を用いることで、サテライトオフィスでの業務の LC-CO_2 排出量原単位を試算する。ここで、オフィス所在地や構造は、調査対象としたサテライトオフィスに準ずるものとした。これは、今後の追加調査により他のモデルケース

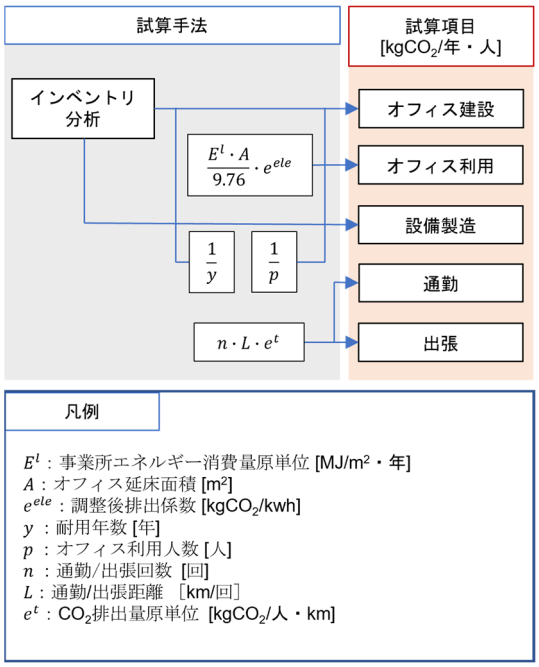


図 1 サテライトオフィスでの業務の LC-CO_2 排出量試算フロー

表 1 モデルケースの設定条件

記号	値	記号	値
E^l	1,047 [3)]	A	90
e^{ele}	0.457 [4)]	y	（オフィス） 50
y	（机・椅子） 5	y	（事務機器） 10
y	（PC） 5	y	（空調機） 10
p	10	n	（通勤） 245
n	（出張） 6	L	（通勤） 10
L	（出張） 291	e^t	（自動車）0.130[5)]
e^t	（電車） 0.017 [5)]	出張手段	電車
通勤手段	自動車	出張先	東京駅
オフィス所在地	福島県会津若松市		
オフィス構造	木造平屋建て		

を設定することで、サテライトオフィスの構造や、地理的および気象的差異を考慮した分析を行うためである。

4. 試算結果

4.1 LC-CO_2 排出量原単位

試算結果を図 2 に示す。LC-CO_2 排出量原単位は、912[kg-CO_2/年・人]となった。今回のモデルケースでは、オフィス利用と通勤による CO_2 排出量が大部分を占める結果となった。

しかし、今回のモデルケースで小さい割合となっている出張は、出張距離や利用交通手段によって、大きく増加することが予想される。このため、今後予定している他のモデルケースの試算結果との比較が必要である。

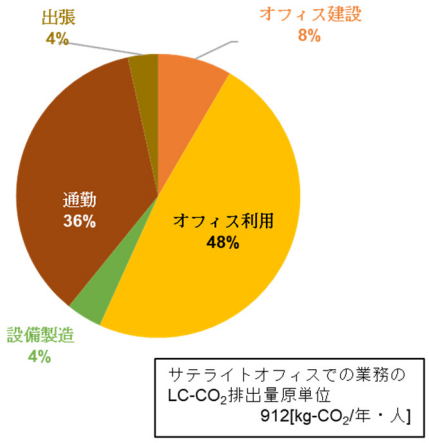


図 2　LC-CO_2 排出量原単位と構成割合

4.2 感度分析

分析結果を図 3 に示す。ここでは、試算に用いた各変数を設定値から±40%の範囲で増減させることで、各変数の影響度を示した。この中で最大値を示したものは、オフィス利用人数を削減したケースであった。今回の分析では、オフィス建設や空調・コピー機などの LC-CO_2 排出量をオフィス利用人数で除すことにより、1 人あたりの LC-CO_2 排出量を試算しているため、人数の影響度は大きなものとなっている。

一方、最小値を示したものは、オフィスの延床面積を削減したケースであった。オフィスの延床面積は、建設時の CO_2 排出量や空調エネルギー消費量などに直接的に影響を及ぼすため、サテライトオフィスの LC-CO_2 排出量評価において、特に注目すべき項目であると考えられる。さらに、通勤距離の増減も高い影響度を示している。これは、図 2 に示すように、通勤による CO_2 排出量が、サテライトオフィスでの業務の LC-CO_2 排出量の中で高いシェアを持っていることに起因すると考えられる。このことから、地方移住型テレワークの低炭素性を高める上では、職住近接を推し進めることが有効である。

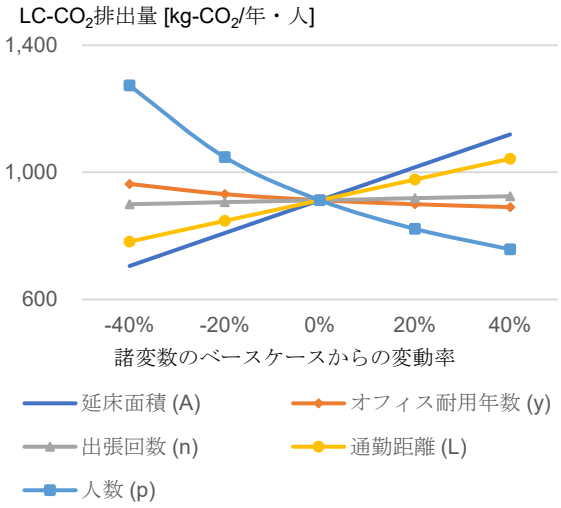


図 3　感度分析結果

5. おわりに

今後は、追加調査によって他のモデルケースを設定することで、サテライトオフィスの規模による影響や、地理的および気象的差異を考慮した分析を行う。

さらに、勤務者へのヒアリング調査を通して、移動手段・時間や余暇時間の過ごし方の変化など、地方移住型テレワークのリバウンド効果を試算に含めることを予定している。

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（JPMEERF20201G01）により実施した。

引用文献

1) William O'Brien・Fereshteh Yazdani Aliabadi : Energy and Buildings, 225, (2020), pp.2-13
2) 西本祐司ほか（印刷中）:環境共生, 38(1), (2022)
3) 一般社団法人日本ビルエネルギー総合管理技術協会:"建築物エネルギー消費量調査報告第 43 報," (2021)
4) 東北電力 :"2020 年度の CO_2 排出実績（速報値）について," 入手先<https://www.tohoku-epco.co.jp/enviro/picup/co.html>,（参照 2022-01-12）
5) 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 2022-01-12

地方公共団体のための環境施策効果推計方法の提案

Proposal of a method for estimating the effects of environmental measures for local governments

○清水皓介*、磐田朋子
Kosuke Shimizu, Tomoko Iwata
芝浦工業大学
* br18051@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

地域脱炭素ロードマップ[1]によると、2050年のカーボンニュートラルの実現に向けては、2030年までの全国の各地域における取組みが重要である。現在、政府が提言している2030年までのCO_2削減目標とそれを実現するための部門ごとの施策に関する「地球温暖化対策計画」に即して、各地方公共団体は「実行計画」を策定し、それに基づいて様々な環境施策に取り組んでいる。しかし、実行計画における施策によるCO_2削減量を推計する際、策定マニュアルに基づいて、国の地球温暖化対策計画に載っている施策効果の数値を世帯数やストック数の割合で按分して推計を行っていることから、国の策定マニュアルにはない地域施策のCO_2削減量を推計できない、あるいは不適切な指標をやむを得ず使用している事例が見られる。

そこで本研究では、地方公共団体の実行計画における各施策について、CO_2削減量の推計手法の改善案を提示することを目的とし、定量的な指標に基づいた施策効果の推計を行った。ケーススタディーとして、「埼玉県地球温暖化対策実行計画（第２期）（区域施策編）[2]」記載の施策についてCO_2削減量の推計を行った。

2. 本研究が対象とする施策の選定

本研究でCO_2削減効果の推計を行う施策は、施策効果の推計が行われていないもの、国の地球温暖化対策計画においても施策の指標が不明瞭なもの、国の球温暖化対策計画と県の実行計画に差異があるものとした。具体的には、「分野横断的対策　住宅用太陽光発電の普及促進」、「家庭部門　省エネ家電への買換え促進」、「運輸部門　次世代自動車の普及促進」の計3つの施策についてCO_2削減量の推計を行った。

3. 施策効果の推計方法と推計結果

3.1 分野横断的対策　住宅用太陽光発電の普及促進

自家消費型太陽光発電の普及促進は、地域の脱炭素化に向けて大きな期待がされている一方で、現状の国による実行計画策定マニュアルには計算手法が記載されていない。そのため本研究では、埼玉県内における普及率を入力すればCO_2削減量が推計される計算ロジックを構築した。表1に計算例として、戸建住宅への普及を促進した場合のCO_2削減量推計結果を示す。

普及率を算出するにあたり、国立社会保障・人口問題研究所の都道府県別の世帯数の将来推計値[3]に、過去の住宅・土地統計[4]に基づき予想された新規着工数および滅失数から算出した世帯数に対する戸建住宅数（統計誤差99.17%）を乗じることで、埼玉県における戸建数の将来推計を行った。

次に、１戸あたりの年間予想発電量を設定した。本研究では、システム容量４kW、総合設計係数0.88、日射強度１とし、平均日射量は埼玉県さいたま市における真南、傾斜角10°の年平均日射量[5]を用いて、年間予想発電量を算出した結果（4792.3 kWh/年）を用いた。

本計算ロジックにより、例えば2030年において戸建新築着工の6割に自家消費型太陽光発電の導入を目指す目標を掲げた場合の全住宅における普及率や発電量、CO_2削減量といった詳細な推計値を示すことが可能となった（表1）。

表１　住宅用太陽光発電普及効果の推計結果（戸建）

（ただし、過去の導入率は全国の割合と同様、埼玉県内戸建ストックに対する導入対策は加味せず、電力の排出係数は2013年0.57→2030年0.37に設定した。）

年	2013	…	2019	…	2025	…	2030
新築着工に対する普及率	-		14%		39%		60%
全戸建に対する普及率	5.9%		9%		12%		15%
年間発電量（GWh/年）	461.9	…	742.1	…	954.5	…	1215
CO2排出削減量（万t-CO2/年）	26.3		37.1		40.9		45.0

3.2 家庭部門　省エネ家電への買換え促進

埼玉県の実行計画に記載されている内容に基づいて、冷蔵庫・エアコン・テレビの買換え促進によるCO_2削減効果を推計する計算ロジックを開発した。なお、国の実行計画策定マニュアルでは省エネ家電として洗濯乾燥機などが想定されており、現在埼玉県実行計画ではこの数値を代用している状況にある。表2に計算例として、冷蔵庫の買換えを促進した場合のCO_2削減量推計結果を示す。

冷蔵庫の区分別ストック台数を算出するにあたり、埼玉県の世帯数に、家庭部門のCO_2排出実態統計調査

[6]に基づく製造時期別・容量別の構成比将来推計結果を乗じることで推計を行った。次に、過去の省エネ性能カタログ [7]における冷蔵庫の年間電力消費量データに基づき、買換え後として想定した最新の省エネ性能カタログ値との差分を買換え時 1 台当たりの年間省エネルギー量として算出した（なお、推計結果が過大評価にならないよう、2016 年以降の冷蔵庫の買換えによる省エネ量は 0 とした）。

本計算ロジックにより、例えば 2030 年までに 2005 年以前の冷蔵庫は 100%買換え、2006~2015 年の冷蔵庫に関しては 70%買換えを目指す目標を掲げた場合の省エネルギー量と CO_2 削減量の推計値を示すことが可能となった。また、エアコン・テレビに関しても冷蔵庫と同様の推計手順および買換え目標値で推計した結果、2030 年において、エアコンの買換えによる CO_2 削減効果は 8.6 万 t- CO_2/年、テレビの買換えによる CO_2 削減効果は 2.79 万 t- CO_2/年と示された。

表 2　冷蔵庫の買換え促進効果推計結果

年	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
2005年以前の冷蔵庫買い替え割合	0%	16%	32%	48%	64%	80%	84%	88%	92%	96%	100%
2006年~2015年の冷蔵庫買い替え割合	0%	8%	16%	24%	32%	40%	46%	52%	58%	64%	70%
省エネ量（1000kWh/年）	0	39078	78156	117235	156313	195391	206402	217413	228424	239435	250446
排出係数	0.49	0.48	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.39	0.38	0.37
CO2削減量（万t-CO2）	0	1.86	3.63	5.30	6.89	8.38	8.61	8.81	8.99	9.14	9.27

3.3 運輸部門 次世代自動車の普及促進

次世代自動車への買換え促進効果については、現状の国による実行計画策定マニュアルにも計算手法が記載されているものの、燃料種や燃費が異なるハイブリッド車や電気自動車、燃料電池自動車などが混合されている。しかしながら特に電気自動車は、地域における自家消費型太陽光発電の普及に伴い地域の蓄電池として活用される可能性があることから、車種別に普及促進効果を算出できるよう改良する必要がある。そこで本研究では、埼玉県の乗用自動車ストック台数における各種次世代自動車の割合（普及率）を目標値として入力すれば CO_2 削減量が推計される計算ロジックを構築した。

具体的には、まず次世代モビリティガイドブック 2019[8]のカタログに記載されている燃費（WLTC モード。JC08 モードから WLCT モードの変換係数は 0.87 とした）が 2030 年までに 25.9%線形的に改善されるものとして、車種別に 2030 までの燃費を想定した（燃費改善率は、2019 年のガソリン乗用車の平均燃費 19.6 km/L 及び 2030 年の燃費基準推定値 25.4 km/L を元に推計）。さらに、想定した車種別の燃費に車種別のエネルギーCO_2 排出原単位を乗じることで、車種別 1km 走行あたりの CO_2 排出量を推計した。

次に、過去の統計を元に 2030 年までのストック台数を対数近似で推計し、ストック台数に対する新車販売台数の割合（直近 3 年の平均値）を乗じることで 2030 年までの新車販売台数を推計した。そして、指標となる“2030 年における車種別の新車販売台数に占める次世代自動車の割合”を任意に設定し（図 1 は 70%想定）、2020 年実績（全国値）から線形的に達成されていくものとして、車種別の新車販売台数を推計した。また、廃車台数は、過去の統計より普通・小型乗用車はストック台数の 7.1%、軽乗用車は 5.35%とした。過去の次世代自動車の普及割合は全国の割合と同様とした。年間平均走行距離は約 7000km とした。

本計算ロジックにより CO_2 削減量を推計した結果を表 3 に示す。

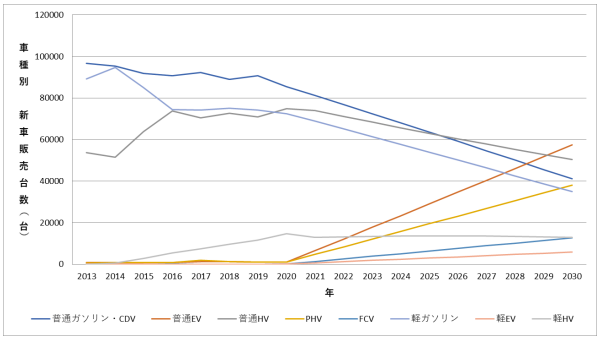


図 1　車種別新車販売台数の将来推計結果例

表 3　環境対応車の普及促進効果推計結果例

年			2013年	…	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年	2029年	2030年
保有車種別台数	普通・小型	ガソリン・CDV	60%	…	46%	45%	44%	42%	41%	40%	38%	37%	35%	34%	33%
		EV	0%		0%	0%	1%	1%	2%	2%	2%	4%	5%	6%	7%
		HV	0%		15%	16%	17%	18%	19%	19%	19%	19%	19%	19%	19%
		PHV	0%		0%	0%	1%	1%	1%	2%	2%	3%	3%	4%	5%
		FCV	0%		0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	2%
		ガソリン	33%		35%	34%	34%	34%	34%	33%	33%	32%	31%	31%	30%
	軽	EV	0%		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%
		HV	0%		3%	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	5%	5%
CO2削減量（2013年比）（万t-CO2）			0	…	-51.3	-58.0	-64.8	-71.8	-78.8	-85.8	-92.9	-100.1	-107.2	-114.3	-121.4

4. おわりに

埼玉県の実行計画における一部施策について、定量的指標を用いて CO_2 削減量を推計した。施策の実現性向上や、地域ごとの目標値を設定できるようにするためにも、定量的指標を用いた CO_2 削減量の推計、及び推計を行うための地域の調査・統計は必要である。

引用文献

1)内閣府：“地域脱炭素ロードマップ”，(2021)
2)埼玉県温暖化対策課：“埼玉県地球温暖化対策実行計画（第２期）（区域施策編）”，(2020)
3)国立社会保障・人口問題研究所：“日本の世帯数の将来推計（都道府県別推計）”
4)総務省：“平成 10-30 年 住宅・土地統計”
5)NEDO：“日射量データベース”
6)環境省：“平成 31 年度家庭部門の CO2 排出実態統計調査（家庭 CO2 統計）”
7)資源エネルギー庁：“省エネ性能カタログ”，(2011 年-2021 年)
8)環境省：“次世代モビリティガイドブック 2019”

自治体の脱炭素化に向けた市民－行政間ギャップの構造分析

Structural Analysis of the Citizen-Government Gap for Decarbonization of Municipality

○坪井陸*、磐田朋子
Riku Tsuboi, Tomoko Iwata
芝浦工業大学
* br18071@ shibaura-it.ac.jp

1　背景

2050 年のカーボンニュートラルに向けて自治体においても脱炭素化が求められており、脱炭素宣言（ゼロカーボンシティ宣言）を表明した自治体が急激に増加している。 排出量ゼロに向け、各自治体は脱炭素化のための行政施策（名称：地球温暖化対策実行計画など）の計画案を策定している。

本研究で対象とする川崎市においても、鉄鉱業などの製造業が立地する国内有数の温室効果ガス排出地域でありながら 2020 年 11 月に脱炭素戦略としてかわさきカーボンゼロチャレンジ 2050 を策定し、脱炭素化に向けて意欲的な取組みが行われている。かわさきカーボンゼロチャレンジ 2050 では基本的な考え方として「消費行動のムーブメントから社会を動かし脱炭素社会の実現を目指す」ことを掲げており、市民一人一人の行動変容が主軸の一つとして提案されている。他のゼロカーボンシティ宣言を表明した自治体においても、基本軸として市民の行動変容を掲げており、脱炭素社会の実現に向けて市民の協力が不可欠であることは共通の認識となっている。しかしながら、こういった脱炭素宣言に関する市民の認知度は低く、実現に向けたより一層の市民参画が求められている。

欧州では脱炭素社会の実現に向けた市民参画を促す民主的手法の一つとして気候市民会議が開催され始めている。気候市民会議とは、無作為で選ばれた市民が脱炭素について討議し、市に対して市民目線で考察した施策（市民提言）を提出することを目的とした会議であり、実効性の高い施策の提案に貢献するだけでなく、市民が脱炭素を“自分事”として捉える意識改革にも貢献している。欧州では 2020 年にフランスで実施され、政府の気候変動対策に市民提案が反映されたことを皮切りに、イギリスでも実施された。日本では 2020 年に小規模ながら札幌市において気候市民会議が実施され、より規模の大きな市民会議として 2021 年に川崎市においても実施された（脱炭素かわさき市民会議）。本報では、2021 年 5 月から 6 回に渡り開催された脱炭素かわさき市民会議[1)]における議論内容や提案内容の推移を分析することにより、市民目線での脱炭素社会実現に向けた施策のニーズを明らかにすると共に、行政案（川崎市地球温暖化対策推進基本計画[1)] ：2021 年 11 月改訂）とのギャップを明らかにすることを目的とした。

2　研究の方法

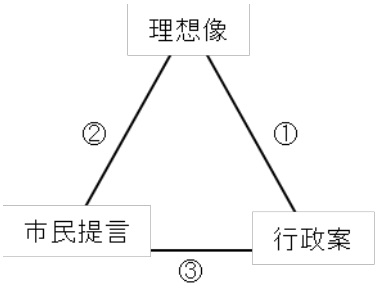
2.1　ギャップの定義

本報で扱う「ギャップ」とは、脱炭素に対して市民-行政の重要視するポイント・理想が違う点のことを指す。このギャップが生じていることで、行政案に対して市民が積極的に参加しにくい点や支持されにくい現状となり、双方の協力的な脱炭素への行動が実現されにくいと考える。本報では脱炭素に対しての双方に生じるギャップとして以下 2 点を分析の対象とした。

・脱炭素に向けて重要視する施策の違い（行政案で重要視する施策と、市民が重要視する施策の違い）
・施策の実行手段の違い（例えば市は家の断熱に義務化の施策を出すが、市民は補助金を望む、など）

2.2　分析の手法

脱炭素社会に関する行政と市民間に生じるギャップを可視化するために構造分析を行った（図 1）。



図中①は、行政と市民が描く脱炭素社会の将来像のギャップを示す。具体的には、市民会議で議論された将来の「理想像」と川崎市行政が描いた「理想像」を比較することにより明らかにする。図中②では、「理想像」を実現するために市民が提案した「市民提言」について、6 回の議論を通じた市民意識の変化をアンケート結果に基づき分析する。③では、「市民提言」と脱炭素に関する「行政案（川崎市地球温暖化対策推進基本計画）」を比較することにより、そのギャップ

を明らかにする。以上の３つの手段を踏むことで、ギャップを構造的に可視化し、分析を行った。

分析手法としては、CO_2削減策を要因別に表すことのできる茅恒等式を用いた。茅恒等式とは、CO_2削減要因に着目して分類するものである（式１）。式１に基づくCO_2削減策とは、第１項は人口減少、第２項は我慢の省エネ、第３項はエネルギー必要量を減らす、第４項はエネルギー効率を上昇させる、そして第５項は炭素強度を下げる（再エネの利用など）ことを目的とするCO_2削減策である。ギャップの分析において、茅恒等式を用いることにより、施策がどのような手段でCO_2削減につながるかわかりやすく提示することを可能とした。

$$CO_2\text{排出量} = \text{人口} \times \frac{\text{生活の満足度}}{\text{人口}} \times \frac{\text{エネルギー必要量}}{\text{生活の満足度}} \times \frac{\text{エネルギー消費量}}{\text{エネルギー必要量}} \times \frac{CO_2\text{排出量}}{\text{エネルギー消費量}}$$

・・・式１

3　分析結果

脱炭素かわさき市民会議では、3 分野（移動、住まい、消費）に分かれて、それぞれ市民提案が討議された。本報では、その中の「住まい」分野について明らかとなったギャップを示す。

3.1　①脱炭素の理想像のギャップ

①では、市民と行政の脱炭素社会のイメージの違いについて分析を行った。結果としては、双方が大体同じ脱炭素社会を描いており、目指す理想像について相違は少なかった。図２が市民の理想のイメージ図を表し、図３が川崎市の理想図である。



図２　市民理想像 [1)]



図３　川崎市の理想像 [2)]

3.2　②市民意見・推移のギャップ

１回目と２回目のアンケート結果を図 SI に示す。各項目名の A が１回目、B が２回目の結果を表している。この結果から、１回目の投票と２回目の投票の間に複数回熟議の場があり、施策の理解度や市民の考え方が変化したと推測された。また、図 SI の１A・１B を比較すると、義務化から義務化努力に変化しており、投票結果が賛成多数に変化したと推測される。このように、熟議を経て市民間の合意形成が進み、提言内容が変化することが示された。最終的な市民提言では、第３項の削減を目的とした提言が最も多く、次いで第５項が多い結果となった。以下に、市民提言の茅恒等式での分類結果を示す。

【市民提言の分類結果（括弧内の記号は図 SI に対応】
第３項（2B,3B,4B,5B,6B,12B,14B,16B,17B,18B）
第４項（13B,15B）
第５項（1B,7B,8B,9B,10B,11B,13B）

3.3　③市民提言と行政施策のギャップ

③では、市民提言と川崎市の行政案の比較を行った。一例ではあるが、項目ごとに双方の施策を下の図の表１にまとめた。双方を比較すると、行政施策に比べ市民提言のほうが実現させるための手法について具体的な実現を意識した施策提案をしていることが、双方の相違点として明らかとなった。

表１　　市民提言と行政施策の比較例

対象		施策内容
ZEH	市民提言	新築住宅に対して ZEH・ZEM 基準の適合義務化を視野に入れた誘導策を推進する
	行政施策	建築物を ZEH 化する
省エネ	市民提言	新築住宅・賃貸物件に対して省エネ性能表示の義務化を推進
	行政施策	民生部門の建築物の省エネ化を推進

4　結言

本報では、脱炭素社会の市民と行政間に生じるギャップに対して、構造的に分析を行った。その結果、行政と市民とで目指す理想に大きな相違点がないことや、脱炭素に対しての議論を重ねることで施策や脱炭素への理解度が変化すること、行政の施策に比べて市民提言のほうが実施主体や実施対象を具体的に示していることが分かった。今後の課題として、施策に対する年代や性別など市民の属性による考え方の違いや議論を通じた考え方の変化について分析する必要がある。

5　引用文献

1) “2050 年脱炭素かわさきの実現に向けて”，脱炭素川崎市民会議，入手先
＜https://cdn.goope.jp/61503/211203132814-61a99cdeb802b.pdf＞，（2022-01-11）
2) “川崎市地球温暖化対策推進基本計画の改定について”，川崎市，入手先
<https://www.city.kawasaki.jp/300/page/0000133741.html>　,(2022-01-11)

Supporting Information

参考 1.　市民提言に関する投票結果の推移 [1)]

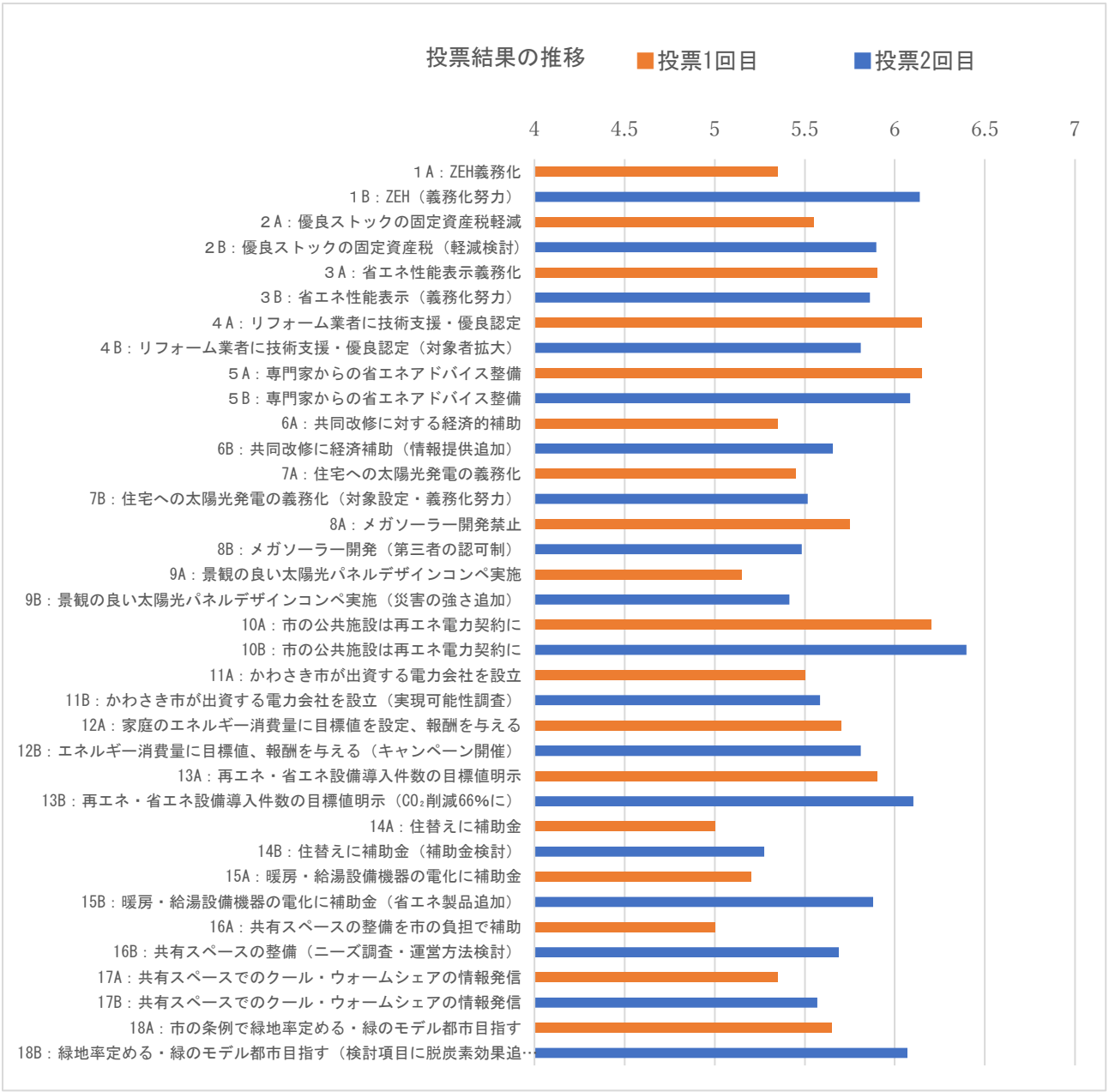


図 S1　投票結果の推移

（ただし、1 回目の投票は全 6 回中 4 回目の市民会議後に実施、2 回目の投票は 6 回目の市民会議後に実施された。投票は、市民提言案の内容について賛成度を 7 段階で示す方法で行われた。評価スケールは、「1：推進すべきでない～7：積極的に推進すべき」である。各市民提言案の詳細は参考 2 に示す。）

参考 2.　投票対象となった市民提言内容の詳細（A：1 回目投票時、B：2 回目投票時）[1)]

1A：市の条例で、新築住宅は ZEH・ZEM（ゼロエネルギーハウス・マンション）認定のみとする規制をかける。
1B：新築（建替えを含む）住宅に対して ZEH・ZEM（ゼロエネルギーハウス・マンション）基準の適合義務化を視野に入れた誘導策を推進する。
2A：優良ストック（長寿命、省エネ）の固定資産税を軽減する。
2B：優良ストック（長寿命、省エネ、快適性）の定義を整理した上で、固定資産税を軽減などの優遇策の検討を開始する。
3A：新築住宅および賃貸物件の省エネ性能表示を義務化する。
3B：新築住宅および賃貸物件に対して省エネ性能表示の義務化を推進する。
4A：市内のリフォーム業者に対する技術支援と優良業者の認定を行う。
4B：市内のリフォーム業者および太陽光発電／太陽熱給湯業者に対して、研修等の技術支援と優良業者の認定を行う。
5A：専門家による省エネアドバイスを市民が容易に得られる仕組みを整備する。
5B：専門家による省エネアドバイスを市民が容易に得られる仕組みを整備する。
6A：複数の住宅による共同改修に対する経済的補助を行う。
6B：複数の住宅による共同改修を促すために、賃貸住宅経営者組合や集合住宅管理組合等に対する情報提供や経済的支援を行う。
7A：全住宅に対して、太陽光発電の設置を市の条例で義務づける。耐用年数内に費用回収できない見込みの場合は、設置費用に対して経済的支援を行う。
7B：太陽光発電や太陽熱給湯の設置効果に応じて全住宅を対象に推奨レベルを設定し、推奨レベルの高い住宅から設置義務化を視野に入れて設置を促進する。
8A：市が定めた緑地におけるメガソーラーの開発は、市の条例で禁止する。※市民が残したいと考える緑地にメガソーラー等が建設されることを防ぐ。
8B：市内におけるメガソーラーの開発は第三者委員会を設置した上で市の許認可制とする。
9A：：景観に適した太陽光パネルのデザインコンペを実施する。
9B：災害に強く景観に適した太陽光パネルのデザインコンペを実施する。
10A：市の公共施設は再エネ電力契約に切り替える。
10B：市の公共施設は再エネ電力契約に切り替える。
11A：かわさき市が出資する電力会社を設立する。
11B：地域のステークホルダー（利害関係者）の意見を取り入れながら、かわさき市が出資する地域新電力会社設立の実現可能性を調査する。
12A：家庭のエネルギー消費量に目標値を設定し、目標達成家庭に対して報酬を与える（表彰、報奨金や地域省エネポイントなど）。
12B：家庭のエネルギー消費量削減のキャンペーンを定期的に開催し、目標達成家庭に対して報酬を与える（表彰、報奨金や地域省エネポイントなど）ことで、省エネの川崎モデルを構築する。
13A：2030 年時の CO2 排出 60%削減（2013 年度比）を可能とする再エネ／省エネ設備導入件数を、戸建・集合住宅それぞれについて目標値として明示する。
13B：2030 年時の CO2 排出量 66%削減（2013 年度比）を可能とする再エネ／省エネ設備導入件数を、戸建・集合住宅それぞれについて市全体の目標値として明示する。
14A：ライフステージの変化に応じた住替えに補助金を出す。
14B：ライフステージの段階に合わせた住み替えの誘導が可能かどうか、検討を開始する。
15A：暖房・給湯設備機器の電化に補助金を出す。
15B：暖房・給湯設備の電化や省エネ製品への買い替えを支援する。
16A：地域住民が仕事や交流の場として利用できる共有スペースの整備を市の費用負担で進める。
16B：共有スペースの利用による住宅の CO2 削減を実現するために、地域住民の仕事や交流の場として利用できる共有スペースのニーズ調査を行った上で、公共施設の再整備および省エネ改修を含めた共有スペース創出および暮らしの CO2 削減を目指した運営方法について検討を始める。
17A：共有スペースを活用したクール／ウォームシェアを市民に促すための情報発信を行う。
17B：共有スペースを活用したクール／ウォームシェア（複数人数が冷暖房の効いた空間を共有し、個別の冷暖房を節約すること）を市民に促すための情報発信を行う。
18A：市の条例で緑地率を定めて、①住宅地の緑化推進（戸建・集合問わず）、②街路樹の整備（増加）、③空き家・空き地の緑地化（アウトドア施設、公園などへ）、④どの地区も徒歩圏内に芝生等のある公園を整備の 4 点を行ない、（工業都市だけど）緑のモデル都市を目指す。
18B：都市計画を検討する市の委員会の検討項目に、脱炭素効果と緑地率を入れ、①住宅地の緑化推進（戸建・集合問わず）　②街路樹の整備（増加）　③空き家・空き地の緑地化（アウトドア施設、公園などへ）　④どの地区も徒歩圏内に芝生等のある公園を整備　の４点を推進することで「緑の工業モデル都市」を目指す。

口頭発表セッション（一般）

[2-D3] シェアリングエコノミー

座長：天沢逸里（東京大学）

2022年3月3日(木) 13:20 〜 14:40 D会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-D3-01] カーシェアリングサービスの拡大に伴う環境への影響

*吉澤 大佑[1]、中本 裕哉[2]、加河 茂美[1] （1. 九州大学、2. 大分大学）

13:20 〜 13:40

[2-D3-02] 環境負荷低減に向けた意思決定を支援するシェアリングサービスの類型化

*若林 宏[1]、天沢 逸里[1]、平尾 雅彦[1] （1. 東京大学）

13:40 〜 14:00

[2-D3-03] デジタルカメラの製品サービスシステムの普及に関する LCA

*佐井 以諾[1]、小出 瑠[1,2]、山本 悠久[1]、村上 進亮[1] （1. 東京大学、2. 国立環境研究所）

14:00 〜 14:20

[2-D3-04] 環境影響評価と消費者分析に基づくサステイナブルな衣服シェアリングサービス設計

*吉田 樹[1]、天沢 逸里[1]、木見田 康治[1]、平尾 雅彦[1] （1. 東京大学）

14:20 〜 14:40

©日本LCA学会

カーシェアリングサービスの拡大に伴う環境への影響

Effects of Expanding Car Sharing Services on the Environment

○吉澤大佑*[1)]、中本裕哉 [2)]、加河茂美 [1)]
Daisuke Yoshizawa, Yuya Nakamoto, Shigemi Kagawa
1) 九州大学, 2) 大分大学
* yoshizawa.daisuke.506@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

2015 年 12 月に採択されたパリ協定 [1)]では、世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃よりも十分低く保つとともに、1.5℃に抑える努力を追求することが示され、21 世紀後半には人為起源の温室効果ガス排出量を正味ゼロにすることが明記されている。また 2018 年 10 月の IPCC による 1.5℃特別報告書 [2)]では、平均気温上昇を 1.5℃に抑えるためには CO_2 排出量を 2030 年までに 45%削減し、2050 年頃には正味ゼロにする必要があると指摘されている。

世界的な脱炭素化を背景に、日本においても、2020 年 9 月に「2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことが宣言された [3)]。日本国内の CO_2 排出量を部門別に考えると、運輸部門は全体の 18.6%を占めており [4)]、その排出責任は大きい。さらに運輸部門の中では乗用車からの排出が 45.9%であり [4)]、2050 年カーボンニュートラルにむけて乗用車からの CO_2 排出を削減することは非常に重要である。経済産業省などによるカーボンニュートラルに向けた自動車政策検討会は、2050 年カーボンニュートラルに向けて、車の使い方の変革が必要であると指摘している [5)]。今後予想される自動車の進化の中でも、カーシェアリングサービスは車の使い方を最も大きく変える方法であり、カーシェアリングサービスの普及が環境に与える影響を把握することは極めて重要である。しかしながら、未だカーシェアリングサービスの普及が低炭素社会に果たす役割を定量的に評価する研究は少ない。

そこで、本研究においては、カーシェアリングサービスの普及に伴う乗用車のライフサイクル CO_2 排出量の分析フレームワークを提案すると共に、カーシェアリングサービスが存在しなかった場合 (BAU シナリオ) と、ある割合でカーシェアリングサービスの利用者が増加していく普及シナリオとを比較することによって、カーシェアリングサービスの CO_2 排出削減効果を明らかにし、2050 年カーボンニュートラルに向けた政策提言を行うことを目的とする。

2. 研究方法

2.1 シナリオ設定

いま、車の寿命分布に従ってマイカーの所有者が乗用車を手放したときに、一部の所有者は新たなマイカーを購入せず、カーシェアリングサービスを利用しはじめることを考える。研究対象期間は 2009 年から 2018 年の 10 年間とする。このとき、カーシェアリングサービスが選択される割合は、当該期間で徐々に増加し最終年にρ%に到達すると仮定する。すなわち、ρは最終年（2018 年）におけるカーシェアリングサービス選択割合の到達目標といえる。本研究では、ρ=0%を BAU シナリオ、ρ=1%、2%、…、10%の 10 本を普及シナリオとし、計 11 のシナリオを設定する。

2.2 新車販売台数の推計

i年目$(1 \le i \le 10)$のカーシェアリングサービス選択割合は$(i/10)\cdot(\rho/100)$と表すことができるので、BAU シナリオの新車販売台数を$B_0(i)$とすると、カーシェアリング普及シナリオにおいて、i年目にマイカーを手放してカーシェアリングサービスの利用を選択した新規会員数$C(i)$は(1)式で得られる。

$$C(i) = \frac{i}{10}\cdot\frac{\rho}{100}B_0(i) \quad (1)$$

この新規会員数$C(i)$（すなわち、i年目のマイカーの新規販売台数の減少分）を用いて、i年目のマイカーの新車販売台数$B_m(i)$は(2)式のように表せる。

$$B_m(i) = B_0(i) - C(i) = \left(1 - \frac{i}{10}\cdot\frac{\rho}{100}\right)B_0(i) \quad (2)$$

すなわち、カーシェアリングサービスが存在しない場合の新車販売台数$B_0(i)$から、カーシェアリングサービスが選択されたことによる新車販売台数の減少分（$C(i)$と等しい）を差し引くことによって、カーシェアリングサービスが普及した場合のマイカーの新車販売台数を推計できる。

また、i年目においては、$\theta(i)$人の会員が 1 台の車をシェアすると仮定すると、シェアカーの新規購入台数$B_s(i)$は、新規会員数$C(i)$をそのシェアカー1 台当たり会員数$\theta(i)$で割ることで、(3)式のように推計できる。

$$B_s(i) = \frac{C(i)}{\theta(i)} \quad (3)$$

すなわち、$\theta(i)$人がカーシェアリングサービスへの利用に切り替えた際にシェアカーが 1 台増加するとして、i年目のシェアカーの新規購入台数を推計する。

2.3 乗用車のストック・フロー分析

以上のような方法で毎年の新車販売台数を推計し、その新車販売台数を用いてストック・フロー分析を行うことで 2009 年から 2018 年にかけてのマイカーおよびシェアカーの総保有台数を推計した。推計には Nakamoto and Kagawa(2021)[6]によって開発された乗用車の一般化ストック･フローモデルを利用した。

2.4 CO_2 排出量の推計

乗用車 1 台に由来する走行起源の年間 CO_2 排出量 $e_{travel}(i)$、乗用車 1 台あたりの製造起源の CO_2 排出量 $e_{manuf.}$、乗用車 1 台あたりの廃棄起源の CO_2 排出量 $e_{dispose}$ を用いることで、乗用車全体のライフサイクル CO_2 排出量 $Q(i)$ は(5)式のように推計できる。ただし $D(i)$ は i 年目の廃棄車両数である。

$$Q(i) = e_{manuf.}B(i) + e_{dispose}D(i) + \sum_{k=1}^{i} e_{travel}(k)B(k) \quad (5)$$

なお、全ての乗用車はガソリン車として CO_2 排出量を推計した。毎年の平均燃費と、マイカーの走行距離に関しては Nishijima(2016)[7]を参考に推計した。またシェアカーの年間走行距離は毎年 34,549km とした。

3. 結果

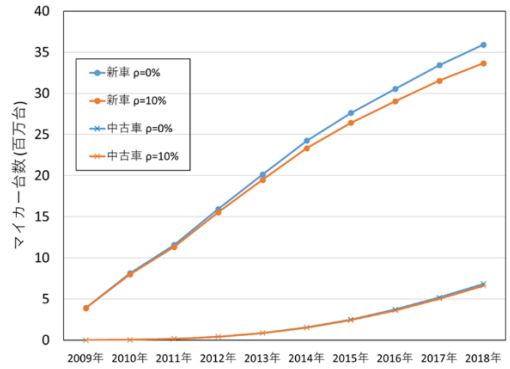


図 1. マイカーの総保有台数

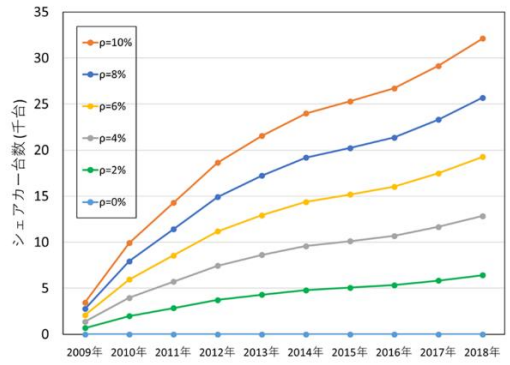


図 2. シェアカーの総保有台数

図 1 および図 2 は、各シナリオにおけるマイカーおよびシェアカーの総保有台数の変化を示している。カーシェリング普及シナリオ（ρ=10%）では、BAU シナリオと比較して、マイカーの新車は 227 万台（約 6%）の減少であったのに対し、シェアカーの増加は約 32,000 台であった。また図 3 はカーシェリング普及シナリオ（ρ=10%）における乗用車全体での CO_2 排出量の変化を示している。マイカーの減少に比べてシェアカーの増加が少ないため、全体では 600 万 t の CO_2 が削減されることが明らかとなった。

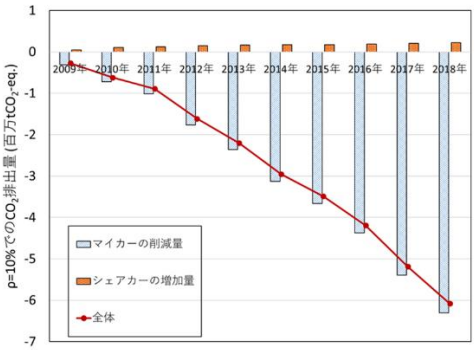


図 3. 乗用車からの CO_2 排出量の変化

引用文献

1) 外務省：“パリ協定”，外務省 HP，（オンライン），入手先 <https://www.mofa.go.jp/mofaj/ila/et/page24_000810.html>，（参照：2021 年 11 月 17 日）
2) IPCC：“SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5℃”，（2018）
3) 首相官邸：“第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説”，首相官邸 HP，（オンライン），入手先 <https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html>，（参照：2021 年 11 月 17 日）
4) 国土交通省：“運輸部門における二酸化炭素排出量”，国土交通省 HP，（オンライン），入手先 <https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html>，（参照：2021 年 11 月 17 日）
5) 経済産業省：“第 5 回 カーボンニュートラルに向けた自動車政策検討会”，経済産業省 HP，（オンライン），入手先 <https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/carbon_neutral_car/pdf/005_03_00.pdf>，（参照：2021 年 9 月 21 日）
6) Nakamoto, Y., Kagawa, S.: *Journal of Industrial Ecology*, (2021), in Press
7) Nishijima, D.: *Journal of Environmental Management*, 181, (2016), pp.582-589

環境負荷低減に向けた意思決定を支援するシェアリングサービスの類型化

Typology of sharing services to support decision-making for reducing environmental impacts

○若林宏*[1)]、天沢逸里[1)]、平尾雅彦[1)]
Hiroshi Wakabayashi, Eri Amasawa, Masahiko Hirao
1) 東京大学
* h-wakabayashi@pse.t.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

シェアリングサービス(以下シェアリング)は車や自転車等の移動に関係するものから傘や衣服等にまで扱う範囲を広げている。複数の消費者が製品にアクセスできるため、消費者が個々に製品を所有するよりも必要な製品数が減少することで環境影響が低減することが期待されている。しかし、消費者の製品へのアクセス方法等が変化することによる環境影響増加要因などがあることから、シェアリングが本当に環境影響低減に繋がるかは明らかではない[1)]。

これまでに、外野は自転車シェアリングにおいて需要の偏りを解消するための自転車の再配置が大きな環境影響を引き起こすことを示した[2)]。天沢らは、自動車と書籍のシェアリングを所有権・提供者・提供されるサービスに基づき分類し、自動車は効率的な走行、書籍は製品へのアクセス方法が環境影響低減に重要であると結論付けた[1)]。

このように対象製品を限定した既往研究は多い。しかし、消費者の行動は多種多様であることや環境影響低減に重要である条件が製品によって異なる。よって、製品ごとに異なる製品特徴(使用場所など)とサービス形態(配送など)、消費者行動(使用頻度など)を類型化することで、シェアリングが環境影響を低減する条件を体系的に整理する必要がある。類型化ごとに環境影響と経済影響を評価することで、まだシェアリングが提供されていない製品に対しても環境影響低減のために必要なサービス形態や消費者行動がわかるようになる。

2. 研究目的・方針

本研究の目的は環境影響低減に向けた意思決定を支援するシェアリングサービスの類型化である。はじめに本研究の概念図を**図 1** に示す。

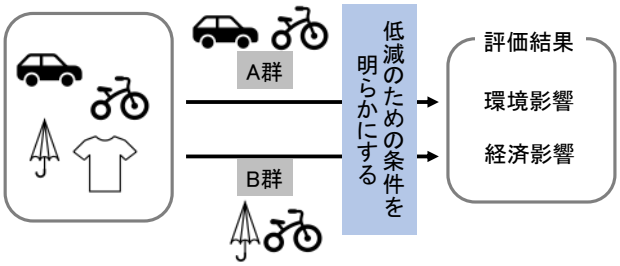


図 1 研究の概念図

社会で運用されている複数のシェアリング事例を分析し、分類する基準(分類の軸と呼ぶ)を設定する。選択された製品群において環境影響・経済影響に影響を及ぼす設計変数を特定し、環境影響低減のための条件を明らかにし類型化する。これにより、消費者にとってはシェアリングを導入する際の自身の行動、事業者にとってはサービス設計の指針になる。また、シェアリングを社会システムに導入する際の政策策定支援も可能となる。

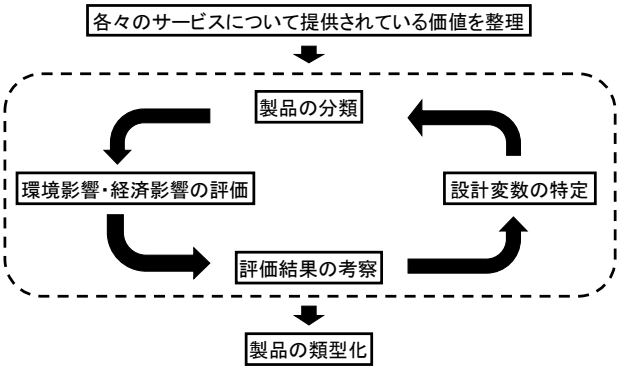


図 2 研究方針

図 2 に示すように第一に、消費者が消費に至るための事業者が提供している価値を整理する。第二に、提供価値に基づき製品群を何で分類するかを設定する。そして環境影響と経済影響の評価をし、シェアリングの設計変数を特定する。再検討が必要な場合には再度同じサイクルを辿り、最終的には環境影響低減を目標とした製品の類型化へと繋げる。

3. 提供価値の整理

消費者がサービスの何処に魅力を感じ、利用に至るのかによって類型化が可能だと考え、シェアリングの提供価値と消費者の意思決定の関係を分析した。国内で展開されているシェアリングを WEB 上で調査した結果を**表 S1** に示した。サービスの提供価値を既往研究に従い、提供される価値の対象[3)](人と物)と提供している内容[4)](時間と空間と心理的効用と経済的効果)の二つの観点で分類した。その結果を**表 S2** に示す。

4. 製品の分類

4.1 分類の軸設定

整理した提供価値を基に設定した分類の軸を**表 S3** に示す。分類の軸に従い製品を分類し、環境影響と経済影響を評価した。例えば傘と自転車では製品の再配置が発生する。これには「外でのみ使う」等の共通する製品特徴がある。分類の軸に「製品を使う場所」があったことから、分類の軸は独立ではないと考えられる。よって、分類の軸同士の関係を

考えた上で製品を分類する必要があると判断し、整理した提供価値を再度製品特徴、消費者行動、サービス形態に選別した上で関係性を明らかにする必要があると考えた。

4.2 製品特徴・消費者行動・サービス形態の選別

整理した提供価値を製品特徴・消費者行動・サービス形態(3 つを要素と呼ぶ)に選別し、更にライフサイクルフローから製品群を分類できると考えられる項目を加えた。この様にして得られた項目を**図 S1** に示す。これらの 3 要素の関係性を分析し環境影響と経済影響の低減のための条件を明らかにする。

5. 環境影響・経済影響評価

評価にあたり、システムバウンダリと評価式を設定した。カーシェアリング(以下カーシェア)の評価式に記されている項目をシステムバウンダリに加え、具体的な式を**表 S4** に例として示す。また、製造廃棄に関わる GHG、ガソリンの 1L あたり GHG 等は文献値[5,6]を参考とした。計算するにあたり、設定した値は**表 S5** に示す。

6. 類型化手法と設計変数の特定

6.1 類型化手法

製品特徴と、製品特徴を踏まえた消費者行動、サービス形態の関係を明らかにし、更に同じ経路を辿るサービス群の中で評価結果の比較を行うことで設計変数を特定する。対象製品の類型化結果の一覧を**表 S6** に示す。

本章では**図 S1** で挙げた消費者行動の項目の一つである「シェアリングにより、消費者行動が変わりうる」を例にとり、具体的な分析手法を検討する。本項目は、製品を所有せずにシェアリングによって消費する際に料金が安い等の理由により消費頻度などが変わりうることを意味する。そのため、本項目は「製品自体、なくても大丈夫」という製品特徴が挙げられる。そして消費者行動が変わることで環境影響、経済影響の両者の評価結果が変化する。よって、**図 3** のように製品特徴、消費者行動、評価結果を関連づけることが可能である。

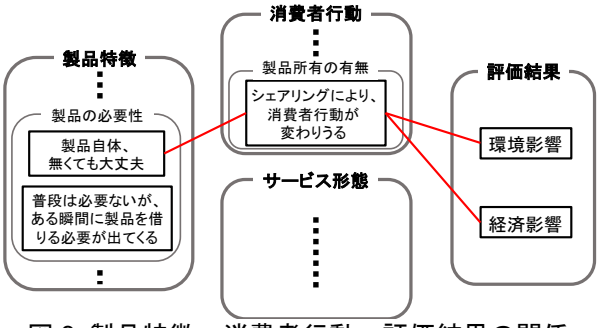


図 3 製品特徴、消費者行動、評価結果の関係

6.2 設計変数の特定

表 S6 で「シェアリングにより、消費者行動が変わりうる」が選択されたサービスとして、カーシェアと自転車シェアリング(以下バイクシェア)があるため、これらの比較検討を行った結果を**図 4** に示す。

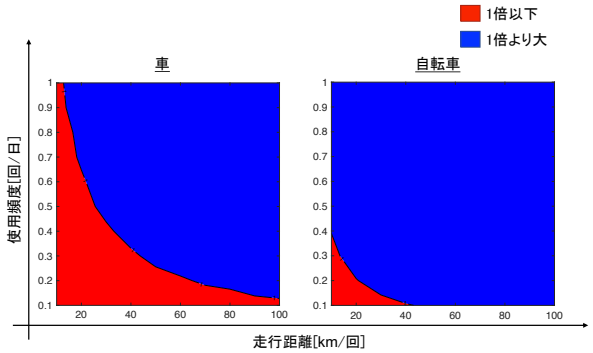


図 4 車と自転車の比較

図 4 では、消費者行動の代表的な変数である「使用頻度」と「一回あたりの走行距離」がシェアリングにより変化した時に GHG 排出量が何倍になるかを示した。所有時の値を使用頻度=0.1 回/日、走行距離=10 km/回で固定した。グラフによれば、カーシェアの方がバイクシェアに比べると消費者行動の変化によって GHG 排出量が逆転しにくいことがわかる。これは「製品の製造廃棄による GHG 排出量」に対する「使用時に排出される GHG 排出量」の比に関係しており、車の方がその比が小さいためである。よって、「シェアリングにより、消費者行動が変わりうる」という項目では「製造廃棄 GHG」に対する「使用による GHG」の割合が GHG 排出量の逆転が起こりうるか否かの設計変数となることがわかった。経済影響でも「本体代金」に対する「使用による料金」の比が逆転のための設計変数であることがわかった。

このように、選択された製品同士を比較することで、設計変数を特定することが可能である。それぞれの結果を用いることでシェアリングにおいて各製品特徴を持つ製品に対して環境影響低減のために望まれる行動がわかるようになる。

7. 結言

シェアリングの提供価値を製品特徴と、製品特徴を踏まえた消費者行動、サービス形態に選別し選択された製品群におけるシェアリングの環境影響、経済影響の設計変数を整理することで製品群を類型化した。比較のために走行距離を車と自転車で揃えたが、今後は実態に合った比較検討も必要になる。

引用文献

1) Amasawa E., et al.: J. Clean. Prod., 242, (2020), 118487
2) 外野圭太: 東京大学, 卒業論文, (2018)
3) Lovelock C.: J. Mark., 47(3), (1983), pp.9-20.
4) Murdick R., Render B., Russell S., “Service Operations Management”, Allyn and Bacon, Boston, (1990), p.4
5) 産業技術総合研究所: “LCI データベース IDEA Ver.2.2”
6) 環境省:”算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧”, 温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度説明会資料, (2019), p.53

supporting

表 S1 参考サービス一覧

サービス名	提供製品	サービス概要	URL
タイムズカーシェア	自動車	ネットで近くの車を予約。同じ場所に返却。	https://share.timescar.jp/about/movie.html
ドコモ バイクシェア	自転車	駅等に配置されている。専用区画ならどこでも返却可。	https://docomo-cycle.jp/
aircloset	カジュアル衣服	衣服を自宅まで配送。サブスクリプション。	https://www.air-closet.com
RENCA	フォーマル衣服	着物等のレンタルサービス。店頭受け取りも可。	https://renca.jp
アイカサ	傘	駅等に配置されている。専用BOXに返却。	https://www.i-kasa.com
CHARGE SPOT	モバイルバッテリー	コンビニ等に配置されている。専用機器に返却。	https://www.chargespot.jp
CLAS	家具・家電	家具家電を1ヶ月単位で借りられる。自宅まで配送。	https://clas.style
airbnb	民泊	個人間のやりとりの仲介サイト。世界中に存在。	https://www.airbnb.jp/d/howairbnbworks
そらのした	アウトドア用品	キャンプ用品等のレンタルサービス。1泊単位で借りられる。	https://www.soranoshita.net/html/rental_guide.html

表 S2 シェアリングの提供価値

	時間を提供	空間を提供	心理的効用を提供	経済的効果を提供
物を対象	メンテナンス/廃棄	保管		
人を対象	商品選択が必要ない	プライベートな空間	様々な製品との出会い/万が一に備えて	pay per use/サブスクリプション

表 S3 整理した提供価値と設定した分類の軸の関係

シェアリングの提供価値	**分類の軸**
メンテナンス	製品を借りる期間 製品を使う場所
廃棄	廃棄にあたり申請が必要か否か
保管	製品の大きさ
製品選択の必要がない 様々な製品との出会い 万が一に備えて	嗜好性が高い物か否か
pay per use サブスクリプション	使用頻度
配送	製品へのアクセス
使用	使用におけるエネルギー消費

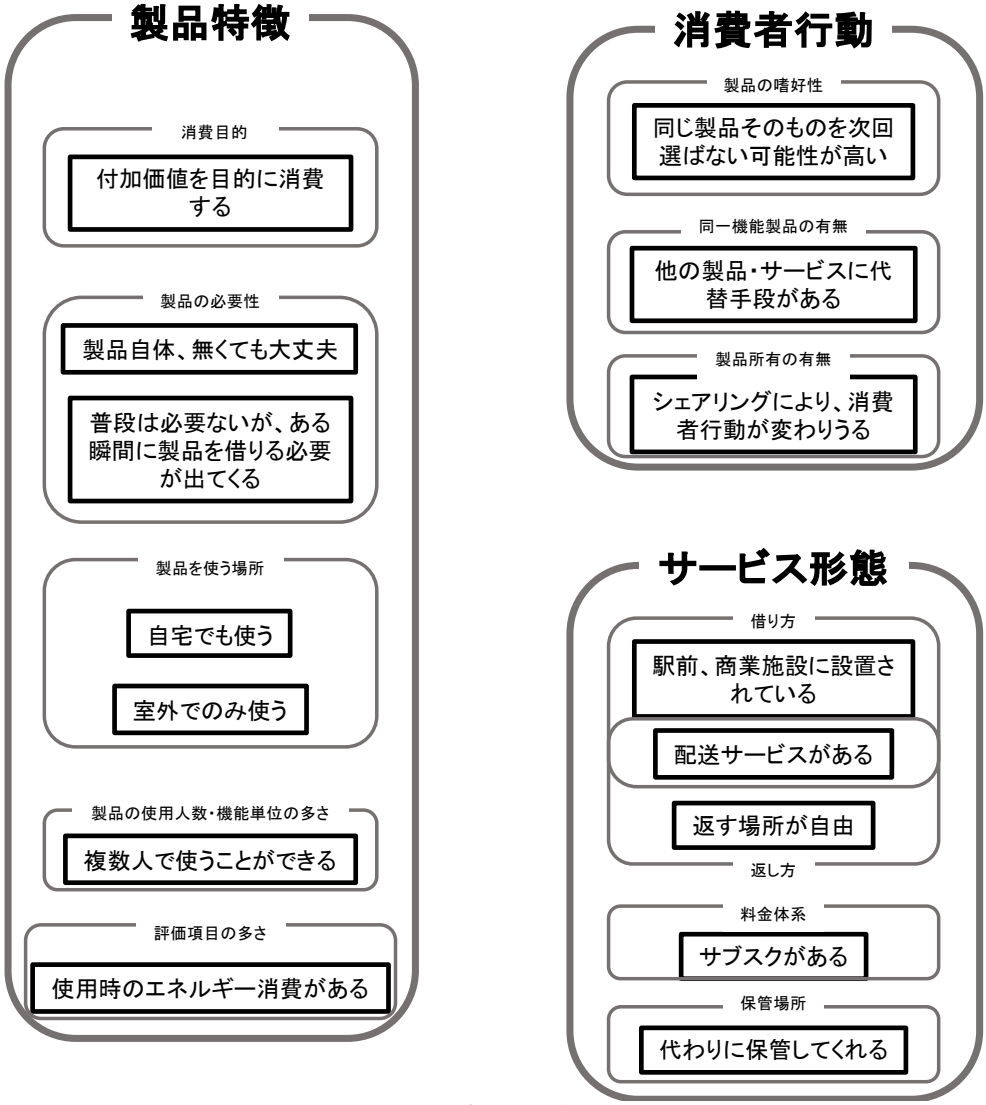


図 S1 挙げられた各要素

表 S4 カーシェアの評価式

	環境影響[kg-CO2eq/km・人]
製造	(製造GHG[kg-CO2eq / 個])/(1日あたり使用回数 [回/日・人]×目的集団の人数[人]×製品寿命[日])÷(乗車人数[人]×走行距離[km/回])
使用	(走行距離[km/回])/(燃費[km/L])×ガソリン1LあたりGHG[kg-CO2eq/L]÷(乗車人数[人]×走行距離[km/回])

	経済性評価式[円/km・人]
初期コスト	(車体価格[円])/(1日あたり使用回数[回/日・人]×目的集団の人数[人]×製品寿命[日])÷(乗車人数[人]×走行距離[km/回])
車検代	(車検代[円])/(1日あたり使用回数[回/日・人]×目的集団の人数[人]×車検間隔[日])÷(乗車人数[人]×走行距離[km/回])
駐車代	(駐車場代[円])/(1日あたり使用回数[回/日・人]×目的集団の人数[人]×支払い間隔[日])÷(乗車人数[人]×走行距離[km/回])
ガソリン代	(走行距離[km/回])/(燃費[km/L])×ガソリン1Lあたり価格[円/L] ÷(乗車人数[人]×走行距離[km/回])

表 S5 カーシェアで設定した固定値一覧

環境影響評価		
車	製造廃棄[kg-CO2/台]	7550[5]
	製品寿命[日]	3650
	燃費[km/L]	20
	ガソリンGHG[kg-CO2/L]	2.32[6]

経済影響評価		
車	購入価格[円/台]	1500000
	法定点検[円/24ヶ月]	47950
	24ヶ月点検[円/24ヶ月]	60000
	駐車場料金[円/月]	20000
	製品寿命	3650
	ガソリン代[円/L]	150
	カーシェア料金[円/時間]	880
	相乗り料金[円/km]	10

表 S6 類型化結果一覧

		タイムズカーシェア	ドコモバイクシェア	aircloset	RENCA	アイカサ	CHARGE SPOT	CLAS	airbnb	そらのした
消費者行動	同じ製品そのものを次回選ばない可能性が高い	×	×	○	×	×	×	○	○	×
	他の製品・サービスに代替手段がある	○	○	×	×	×	×	×	○	×
	シェアリングにより、消費者行動が変わりうる	○	○	×	×	×	×	○	○	×
サービス形態	駅前、商業施設に設置されている	×	○	×	×	○	○	×	×	×
	配送サービスがある	×	×	○	○	×	×	○	×	○
	返す場所が自由	×	○	×	×	○	○	×	×	×
	サブスクがある	×	○	○	×	○	×	×	×	×
	代わりに保管してくれる	○	○	○	○	○	○	○	○	○

環境影響評価と消費者分析に基づく
サステイナブルな衣服シェアリングサービス設計

Designing sustainable fashion rental services based on life cycle assessment and consumer analysis

○吉田樹*[1)]、天沢逸里[1)]、木見田康治[1)]、平尾雅彦[1)]
Tatsuki Yoshida, Eri Amasawa, Koji Kimita, Masahiko Hirao
1) 東京大学
* t-yoshida@pse.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

近年、ファストファッションの台頭により、大量の衣服が安価で製造･販売されるようになったと同時に、衣服の生産や廃棄による環境負荷が問題となっている。世界ではファッション業界で年間 790 億 m^3 の水を消費し、29 億 t の温室効果ガス(GHG)を排出していると推定されている[1)]。衣服のライフサイクルからの環境負荷を削減するにあたり、衣服シェアリングが注目されている。既往研究では、衣服シェアリングにより 1 着の着用回数は増え着用当たりの製造の環境負荷は削減できるが、輸送による環境負荷は増える可能性が示唆された[2)]。また、特定の製品を対象とし、統計平均や仮定に基づく消費行動による分析を行った研究もあるが[3)]、どんな衣服に対しても、そして実際の消費行動を踏まえても環境負荷を削減できるかは明らかになっていない。環境面以外の利点として、衣服シェアリングは様々な衣服を着用できる点や、ハイブランドの衣服を安価に着用できる点がある。これらの利点は消費者の嗜好性に関連するため、どのような嗜好性を持った消費者が、どのような製品・サービスをシェアリングに求めているのか、消費者ニーズを含めたシェアリングサービスを設計することが必要である。そこで本研究の目的を、環境影響評価と消費者分析に基づき、環境負荷の低減と消費者満足度の充足を両立したサステイナブルな衣服シェアリングサービス設計とした。

2. 研究方針

本研究では、まず環境影響評価を実施するために、様々な衣服を対象とし様々な消費行動でのシナリオ分析を可能とする衣服シナリオ分析モデルを構築する[4)]。次に消費者分析としてアンケート調査を行い、シェアリングに求める製品特徴・サービス特徴と消費者の特徴を明らかにする。**図 1** に示すように、ドレスは「クリーニング代が高い」、ドレスをシェアリングするサービスは「クリーニング・洗濯不要」など、消費者が捉えている衣服と製品特徴の結びつき、サービスとサービス特徴の結びつきを分析し、消費者が求める製品特徴とサービス特徴の組合せを明らかにする。

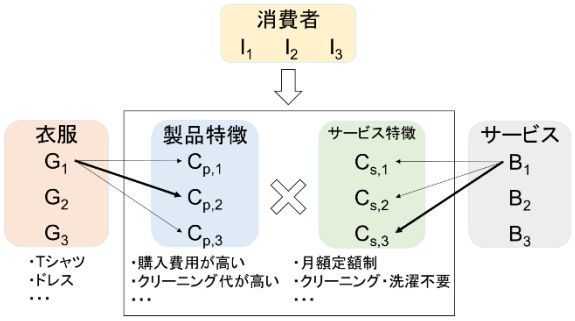


図 1 消費者分析項目の概念図

さらに製品特徴とサービス特徴の組合せを求める消費者の特徴を明らかにする。消費者分析の結果をシナリオ設定に組み込み環境影響評価を行うことで、サステイナブルな衣服シェアリングサービスを設計する。

3. 消費者分析

3.1 アンケート調査

どのような消費者がどのような衣服をどのようなサービスでシェアリングを選好するか調査するため、アンケート調査を行った。アンケート調査の質問例を**表 S1** に示した。なお、製品特徴やサービス特徴の項目は文献調査により抽出した。アンケートは 20 歳以上の男女を対象に 1049 名の回答を収集した。

3.2 アンケート分析

シェアリングしてみたい衣服を選択した人の中で各製品特徴、サービス特徴を選択した人の割合を用いて、k-means 法[5)]で衣服をクラスタリングした。

表 1 製品特徴のクラスタリング

製品特徴でのクラスター	クラスターに含まれる衣服
洗濯の負担はなく、衛生面が気になる	スカート、ワンピース/オールインワン、スポーツウェア、マタニティウェア
着る機会が少なく、購入費用が高い	ドレス、スーツ
洗濯の手間がかかり、保管場所を節約できる	ニット/セーター
着る機会は多いが、衛生面が気にならない	Tシャツ/カットソー、シャツ/ブラウス
シーズンが限られていて、クリーニング代が高い	ドレスシャツ/ワイシャツ、ジャケット、コート

製品特徴のクラスタリング結果を**表 1** に、サービス特徴のクラスタリング結果を**表 S2** に示す。これによ

り、シェアリングしてみたい衣服の製品特徴とサービス特徴の組合せを明らかにした。次に消費者の特徴を明らかにするため、上記の衣服をシェアリングしてみたいと回答した人とそうでない人が衣服を購入する際に重視する項目に違いがあるか、クラスカルウォリス検定を用いて有意水準 5%で検定した。検定結果を**表 S3** に示す。ドレス、スーツをシェアリングしてみたいと思う人はデザイン、流行、価格、着心地、持っている衣服のバリエーションを重視する人であると分かった。アンケート調査から製品特徴とサービス特徴、消費者の特徴の組合せを明らかにした。

4. 環境影響評価

消費者分析に基づく環境影響評価の一例として、ドレスをシェアリングした場合の評価結果を示す。シナリオ設定の詳細を**表 S4** に示した。アンケートのドレス所有時とシェアリングする場合の消費行動の回答を用いて GHG 排出量を算出した。機能単位を着用当たりとして所有とシェアリングを比較することで、製造と廃棄の GHG 排出量の削減効果、輸送と洗濯の GHG 排出量の増加量を評価した。ドレスのシェアリングサービスは、求めるサービス特徴である「ペイパーユース」、「クリーニング・洗濯不要」、「注文後すぐ着られる」、「バリエーションが豊富」、「自分に合うサイズがある」を想定した。ペイパーユースとは着用回数や期間に応じて料金を支払うサービスである。サービス特徴とシナリオ変数の関係を**表 S5** に示した。

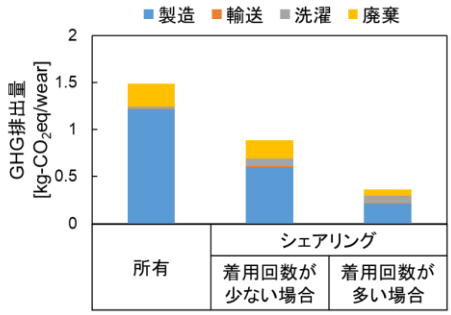


図 2 ドレスの評価結果

図 2 に評価結果を示した。ドレス所有時の 1 着の廃棄までの着用回数は少ないため、GHG 排出量は大きくなった。一方、シェアリングの場合、衣服を多く用意する必要のあるサービス特徴である「バリエーションが豊富」、「自分に合うサイズがある」ことを想定した影響で 1 着の着用回数は減るものの、シェアリングでは短い期間の貸し出しで着用するため、廃棄までの着用回数は多くなった。ペイパーユースでは借りても着用しないことは起こりにくいと想定した。そこで、1 回のシェアリングでの着用回数を、アンケート回答の 1 回のシェアリングでの着用回数の平均の±1 回の範囲と設定し、着用回数が最も多い場合と最も少ない場合で GHG 排出量を算出した。1 回のシェアリングでの着用回数が最も少ない場合でも所有時より 1 着の着用回数は多く、今回のシナリオでは GHG 排出量はシェアリングの方が小さくなった。

5. 衣服シェアリングサービス設計

環境影響評価の結果から設計したドレスのシェアリングサービスを**表 2** に示す。

表 2 ドレスのシェアリングサービス

製品	ドレス
消費者	デザイン、流行、価格、着心地、 持っている衣服のバリエーションを重視する
サービス特徴	「ペイパーユース」 「クリーニング・洗濯不要」 「注文後すぐ着られる」 「バリエーションが豊富」 「自分に合うサイズがある」

表 2 に示すサービス特徴は環境面でも GHG 排出量の削減効果があるため、このような衣服シェアリングサービスを設計することで環境負荷の低減と消費者満足度の充足を両立することが可能である。

6. おわりに

衣服シナリオ分析モデルを構築し、アンケート調査による消費者分析を行った。消費者分析の結果からシナリオを設定して環境影響評価を実施した。一例としてドレスをシェアリングした場合の結果を示し、ドレスのシェアリングサービス設計の例を提案した。今後は、評価指標として水資源消費量での評価や、衣服シェアリング事業者の視点から評価を行うことで、サービスの実現可能性の議論が望まれる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP18K18232 により実施した。

引用文献

1) Kirsi N., *et al.* : Nature Reviews Earth & Environment, 1 (4), (2020), pp. 189-200
2) Zanami B., *et al.* : J Clean. Prod., 162, (2017), pp. 1368-1375
3) Piontek F., *et al.* : CIRP, 80, (2019), pp. 417-421
4) 吉田樹, 天沢逸里, 平尾雅彦: “第 16 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集” (2021)
5) 栗原伸一, “入門統計学 検定から多変量解析・実験計画法まで”, オーム社, 東京, (2014), p. 261

Supporting Information

表 S1　アンケート調査の質問例

I.	消費者属性	・年齢 ・性別など
II.	衣服を購入する際に 重視する項目	・10項目について5段階のリッカート尺度 例.デザイン (1.まったく重視しない ～ 5.とても重視する)
III.	シェアリングしてみたい衣服	・15種類の衣服の中から選択 ・所有時の消費行動 ・選んだ理由として製品特徴を8種類の中から複数選択 ・シェアリングするサービスに求める特徴を10種類の中から複数選択 ・シェアリングする場合の消費行動
IV.	シェアリングしたくない衣服	・15種類の衣服の中から選択 ・所有時の消費行動 ・選んだ理由として製品特徴を8種類の中から複数選択 ・もしシェアリングするとしたらサービスに求める特徴を11種類の中から複数選択 ・もしシェアリングするとしたときの消費行動

表 S2　サービス特徴のクラスタリング

サービス特徴でのクラスター	クラスターに含まれる衣服
好みのブランドを着られる、 コーディネートしてくれる	スカート
月額定額制、 注文後すぐ着られる	Tシャツ/カットソー、 ドレスシャツ/ワイシャツ
手元に長期間置ける	ワンピース/オールインワン、 ニット/セーター、シャツ/ブラウス、 ジャケット、コート
ペイパーユース、 クリーニング・洗濯不要、 自分に合うサイズ	スポーツウェア、ドレス、スーツ
クリーニング・洗濯不要と 注文後すぐ着られることは 求めない	マタニティウェア

表 S3　衣服を購入する際に重視する項目の検定結果

	デザイン	ブランド	流行	価格	機能性	素材	耐久性	着心地	持っている衣服のバリエーション	エシカル消費
スカート										
ワンピース/オールインワン									*	
スポーツウェア					*					
マタニティウェア			*						*	
ドレス、スーツ	*		*	*				*	*	
ニット/セーター	*						*			
Tシャツ/カットソー	*	*	*							*
シャツ/ブラウス	*									*
ドレスシャツ/ワイシャツ	*	*								
ジャケット、コート			*						*	*

＊：違いがある項目、オレンジ：選択した人はそうでない人より重視する、水色：選択した人はそうでない人より重視しない

表 S4　ドレスのシナリオ設定

	所有	シェアリング	
繊維	ポリエステル100%		
消費者への輸送手段	トラックでの宅配		
廃棄年数 [年]	9.0	2.0	
廃棄までの着用回数 [回]	11.7	多い場合 68.2	少ない場合 23.4
洗濯頻度 [wash/wear]	1		
洗濯方法	家庭での水洗い	業務用水洗い	
廃棄手段	焼却		

表 S5　サービス特徴とシナリオ変数の関係

サービス特徴	変数
ペイパーユース	1回のシェアリングでの着用回数：±1回
クリーニング・洗濯不要	洗濯方法：業務用水洗い
注文後すぐ着られる	発送期間：1日
バリエーションが豊富	衣服の種類：1.7倍
自分に合うサイズがある	衣服の種類：1.7倍

口頭発表セッション（一般）

[2-E3] ステークホルダーエンゲージメント

座長：井原智彦（東京大学）

2022年3月3日(木) 13:20 ～ 14:20 E会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-E3-01] 国内外の主要企業における CO2の削減貢献量算定に係る取組状況の整理を通した考察

*高野 惇[1]、越智 崇充[1]（1. デロイトトーマツコンサルティング合同会社）

13:20 ～ 13:40

[2-E3-02] 企業連携による資源循環モデルの CO_2排出量削減効果―中部地域における製造業を対象として

*柴原 尚希[1,2]、小林 弘幸[2]、神崎 昌之[2]、乾 大樹[2]、矢野川 紘斗[2]（1. 中部大学、2. 一般社団法人サステナブル経営推進機構）

13:40 ～ 14:00

[2-E3-03] 肉代替食品選択に対する情報提供効果の評価 －消費者特性評価およびスーパーマーケットにおける実証実験－

*佐久間 夏美[1]、栗栖 聖[1]、福士 謙介[1]（1. 東京大学）

14:00 ～ 14:20

©日本LCA学会

国内外の主要企業における CO2 の削減貢献量算定に係る取組状況の整理を通した考察

Implications from a Literature Review of Avoided Emission Reporting in Private Sector

○高野　惇*[1)]、越智　崇充 [1)]
Jun Kono, Takamichi Ochi
1) デロイトトーマツコンサルティング合同会社
* jkono@tohmatsu.co.jp

1. 背景

地球温暖化による気候変動危機への対応として、COP26 において産業革命以前と比べ全世界の平均気温の上昇を 1.5℃以内へ抑制するための取組推進が合意され [1)]、その実現に向けた企業活動を通した CO_2 の排出削減が急務となっている。

企業活動による CO_2 排出量の算定について、これまで様々な関連する規格が策定されている。代表的なものとしては ISO14040[2)] を中心とした Life Cycle Assessment (LCA)に係る算定が挙げられるものの、従来は生産活動による環境への負の影響の可視化に係る取組が進められてきた。他方、2050 年のネットゼロ達成に向けては脱炭素イノベーションの促進に資する可能性がある排出削減に係る貢献量(以下、「削減貢献量」と称す。）などの正の側面を伝える手法が重要となる。

2. 削減貢献量に関する国際動向

CO_2 の削減貢献量に係る国際的な取組としては、電気及び電子技術分野の国際規格である IEC TR 62726[3)] が挙げられる。また、化学産業を対象とした製品の削減貢献量の算定手法として ICCA（International Council of Chemical Associations）と WBCSD (World Business Council for Sustainable Development)が共同で作成した“The Essential Role of Chemicals”[4)]も公開されている。国内の取組としては、日本 LCA 学会 [5)]及び経済産業省 [6)]が国内の幅広い企業・団体を対象としたガイドラインを公開している。

これらの算定に係るガイドラインが整備されているものの、企業に削減貢献量に係る取組が Scope1-3 の算定などと比べ本格化していない現状が見受けられる。こうした状況の改善に向けては、削減貢献量の算定結果の活用方法の明確化が一案として考えられる。そのため、本調査では国内外の先進企業の事例調査を通して、削減貢献量の算定について類型化を行った。

また、削減貢献量の算定結果については、ベースラインの設定方法に依拠することから、これらの設定方法及び算定結果のコミュニケーション方法に留意が必要となる。特に、グリーンウォッシング（環境に配慮しているように見せかけて、実態はそうではない事例）に関する批判が懸念される場合には、企業のレピュテーションリスクとなることから細心の注意が必要となる。本調査では、算定結果に係る第三者検証の実施状況を整理し、併せてコミュニケーション方法に関する調査を踏まえ、注意すべきポイントや求められる方策などを考察した。

3. 手法

国内外の削減貢献量の算定実施企業の調査方法については、ICCA ガイドラインに関するケーススタディ集、経団連によるケーススタディ集などの既存の算定ガイドラインに基づく算定事例に加え、J-Stage、International Journal of Life Cycle Assessment、Google Scholar などの学術論文や、ブラウザのキーワード検索にて調査を実施した。その調査結果を対象として、削減貢献量の実施目的や活用方法、情報提示方法、第三者検証の実施状況などについて、公開情報を基に情報収集を行った。

4. 結果

4.1. 算定の類型

対象企業における削減貢献量の算定に係る実施状況を整理した結果、以下の類型となった。

- 評価対象：Product、Project、Entity
- 対象ステークホルダー：内部、外部
- 結果の宣言：自己宣言、第三者保証

「評価対象」は削減貢献量の算定対象、「対象ステークホルダー」は結果の報告対象、「結果の宣言」は算定結果の外部公表時の種類を指す。上記の類型について、実施状況を以下の図 1 に整理した。なお、各社への類型の付与については、それぞれ 1 つずつ行った。

公開情報を基に整理した結果、削減貢献量の算定については Entity 単位、外部ステークホルダー、自己宣言がそれぞれの類型の最多となり、それぞれ 64%、57%、88%となった。

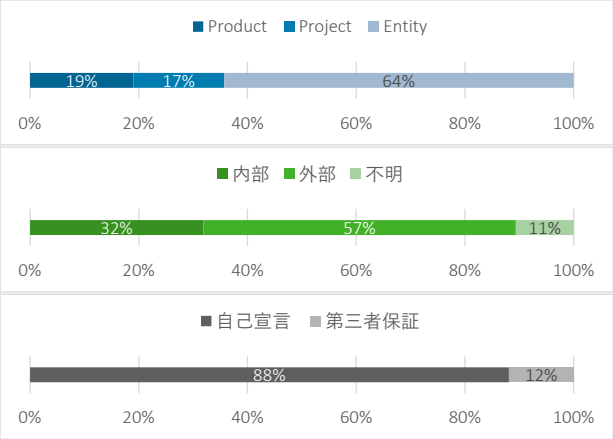


図 1　各種類型の実施状況

4.2. 削減貢献量に係る第三者保証

調査対象企業において、削減貢献量の算定結果に係る第三者検証の実施状況を整理した。その結果、削減貢献量の検証については、LCA 専門家によるレビューパネルを設置し、それぞれの算定に関して検証を行っているケースが見られた。なお、削減貢献量の検証と称してはいないものの、対象製品の比較 LCA に係る検証を実施する企業も散見された。

また、企業単位での削減貢献量の算定に関連する取組については、GHG プロトコルや ISO14064-2 等の削減貢献量を対象とはしていない既存の規格を活用した Scope1-3 などの環境データに係る第三者検証に留まっており、削減貢献量の検証が確認できないケースが見られた。

5. 考察

本調査結果では、削減貢献量の算定結果は主に企業の環境活動を対外的に PR に活用されている結果となった。現在、ESG 投資などで重視される指標の一つとして、GHG プロトコルに基づいた Scope1-3 の排出量の算定結果がある。ただし、これらの枠組みでは企業活動による環境への悪影響という、負の側面での評価となることから、特定の行動を抑制する傾向が強い特性を持つと考えられる。他方、削減貢献量については企業活動による正の側面の評価となり、環境イノベーションの促進の一助となり得る。2050 年のネットゼロ達成に向けては、既存技術の最大限活用を通して排出量をできるだけ早期の削減が重要となり、削減貢献量の算定により、これらの技術・サービスの普及への後押しともなり得る。

ただし、削減貢献量の算定結果の提示方法については、留意が必要となる。例えば、WRI (World Resource Institute)のレポートでは、対外的な PR に際して削減貢献量の結果を自社排出の相殺として計上することを原則として禁止している [7]。そのため、これらに留意しない場合には、国内外市場よりグリーンウォッシュとして批判され、企業のブランド価値低下のリスクとなり得る。上記より、削減貢献量はあくまでも他者の削減であることとし、自社の排出削減分としての計上は避けることが望まれる。

削減貢献量の算定結果に係る第三者検証については、電気・電子製品に限定される IEC の規格を除き、汎用的に活用可能な国際規格が現時点では不足していることから、実施が少ない状況となっている。グリーンウォッシュのリスク低減にも資する削減貢献量の第三者検証に向けては、汎用的な規格の整備が求められる。

6. 結論

国内外企業における削減貢献量の算定について調査をしたところ、外部ステークホルダーに向けた Entity 単位の削減貢献量の算定結果を自己宣言として公開している事例が多い結果となった。削減貢献量の算定結果の第三者検証については、実施事例が少なく、グリーンウォッシュのリスク低減に向け削減貢献量に係る汎用的な規格の整備が求められる。

7. 引用文献

1) UNFCCC, “Glasgow Climate Pact”, (2021)
2) ISO, “ISO 14040:2006 Environmental management Life cycle assessment Principles and framework”, (2006)
3) IEC, “IEC TR 62726, (2014)
4) ICCA, WBCSD, “The Essential Role of Chemicals”, (2017)
5) 日本 LCA 学会, “温室効果ガス排出削減貢献量算定ガイドライン”, (2015)
6) 経済産業省, “温室効果ガス削減貢献量定量化ガイドライン”, (2018)
7) WRI, “Estimating and Reporting the Comparative Emissions Impacts of Products”, (2019)

企業連携による資源循環モデルの CO_2 排出量削減効果
—中部地域における製造業を対象として—

The Effect of Material Circulation Model with Corporate Alliance on CO_2 Emission Reduction: Cases of the Manufacturing Industry in the Chubu Region of Japan

○柴原尚希*[1),2)]、小林弘幸[2)]、神崎昌之[2)]、乾大樹[2)]、矢野川紘斗[2)]
Naoki SHIBAHARA, Hiroyuki KOBAYASHI, Masayuki KANZAKI, Daiki INUI, Hiroto YANOGAWA
1)中部大学，2) 一般社団法人サステナブル経営推進機構
* shibahara@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

カーボンニュートラル社会への移行が求められる中、その実現のためのビジネスモデルとして、サーキュラーエコノミーへの期待が高まっている。日本の中部地域は、多様な製造業の集積に加え、資源の有効活用に前向きなプレーヤーの存在が強みとなり、関係者の連携によるサーキュラーエコノミー推進のポテンシャルが高い地域である。

本稿では、中部地域における製造業を対象に、具体的な資源循環型ビジネスモデルに関する取り組みを紹介するとともに、その事業実施に伴う CO_2 排出量の削減効果を検証する。

2. 中部地域の実態

経済産業省中部経済産業局（受託者：一般社団法人サステナブル経営推進機構）[1)]は、「中部地域における循環経済（サーキュラーエコノミー）の実現に関する実態調査および検討」結果を 2021 年 3 月に公表した。以下に示すような、サーキュラーエコノミー移行に資する取り組みや、さらなる加速に向けた課題等がまとめられている。

2.1 中部地域の強みと先進的な取り組み

中部地域には、多様なものづくり産業が集積しており、製造業の占める割合が高い。特に、輸送用機械の全国シェアは 4 割を超えており、出口産業（資源利用、再資源化資源発生）の集積を背景に、それを支える素材（金属、プラスチック、化学溶剤、繊維）について、動脈・静脈産業事業者が連携した先進的な取り組みが確認できる。

以下に、具体的な先進事例を列挙する。

- 金属分野：Train to Train アルミリサイクル等
- プラスチック分野：Car to Car プラスチックリサイクル等
- 化学溶剤分野：使用済溶剤の精製リサイクル
- 繊維分野：古衣料マテリアルリサイクル

2.2 資源循環モデルの環境性能評価

資源産業はエネルギー集約的であるため、循環性の観点だけでなく、カーボンニュートラルにも貢献することが重要であるという有識者からの意見がある一方で、取り組む企業側からは、

- 環境にやさしいと思って事業を行っているが、確証はない。評価・検証をしてほしい。
- 投資家は企業を定量的に評価したいため、指標等が必要である。
- 資源循環と CO_2 排出低減がトレードオフになる可能性もあるので、評価の仕方が難しい。

といった課題が挙げられている。日本のものづくりの強みを評価できる環境性能評価手法の検討が必要であり、ケーススタディの積み重ねが重要である。

3. 資源循環モデルの CO_2 排出量削減効果の算定

前章を踏まえ、アルミニウム分野と繊維分野を対象にビジネスモデルを想定し、その事業実施に伴う CO_2 排出量の削減効果を検証する。なお、CO_2 排出量算定結果の具体的な数値は投稿時点で精査中であるため、本稿への記載は避けた。

3.1 アルミニウム分野

(1) ビジネスモデルの概要

アルミニウム分野では、使用者・資源事業者・製造者の三者が連携することで Train to Train などの先進的な循環型ビジネスモデルを既に構築している。本実証事業では、金属の破砕選別の技術革新が工程の簡略化につながり、事業者間の連携によって循環が成立しているというモデルの特徴を、自動車部品に展開する。概要を図 1 に示す。

現状では、素材メーカーから自動車部品メーカーに対して再生材ビレットの供給が行われているが、リターン材の使用率が低い。そこで、金属リサイクラーと精錬事業者を経由することで、リサイクル率を上げることを意図したモデルである。

(2) CO_2 排出量削減効果

金属リサイクラーと精錬事業者において破砕や溶湯のエネルギー消費が新たに発生し、工程が増えることにより輸送距離も増加する。一方、再生材ビレットの供給増加に伴うアルミニウム新塊使用量が減少するため、全体として CO_2 排出量の減少が見込まれる（図 2）。

3.2 繊維分野

(1) ビジネスモデルの概要

繊維分野では、自動車メーカーから排出された従業員用制服等の古衣料を地元事業者との連携によって、新たに自動車用防音部品として再利用する取り組みが行われている。本実証事業では、地域で排出される繊維工程内端材や古衣料について、地場産業である反毛事業者及びフェルト事業者、大手自動車メーカー、地域自治体等も含めた連携による循環利用を検討する。概要を図 3 に示す。

(2) CO_2 排出量削減効果

古衣料を使用せずに自動車部品を製造する場合と比べると、実証事業では古衣料の回収・再生処理のプロセスが追加される。一方、古衣料の廃棄処理が回避されるとともに、地産地消型の材料調達となることで輸送距離が減少する。そのため、全体として CO_2 排出量の減少が見込まれる（図 4）。

4. まとめ

本稿では、中部地域におけるアルミニウム分野、繊維分野を対象に、資源循環型ビジネスモデルの概要を紹介し、その事業実施に伴い CO_2 排出量が削減する見通しを示した。

アルミニウム分野では、工程内だけではなく市中の様々なスクラップから高度選別されたアルミニウムを供給することで、アルミニウム新塊使用量や副資材使用量の減少によるさらなる CO_2 排出量削減が図れる。

繊維分野では、古衣料の使用割合の増加による CO_2 排出量削減の余地がある。そのためには、従業員用制服だけでなく、一般消費者から大量に廃棄されている古衣料の活用が考えられる。

いずれの場合も、システム境界の拡張によりデータ収集が煩雑になることから、デジタル技術の活用によるトレーサビリティのより一層の浸透に期待したい。

引用文献

1) 経済産業省中部経済産業局，一般社団法人サステナブル経営推進機構：“「中部地域における循環経済（サーキュラーエコノミー(CE)）の実現に関する実態調査および検討」調査報告書”，(2021)

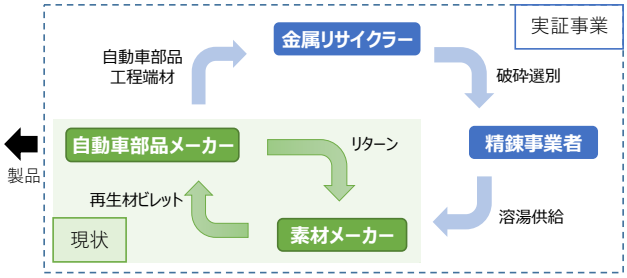


図 1　ビジネスモデルの概要（アルミニウム分野）

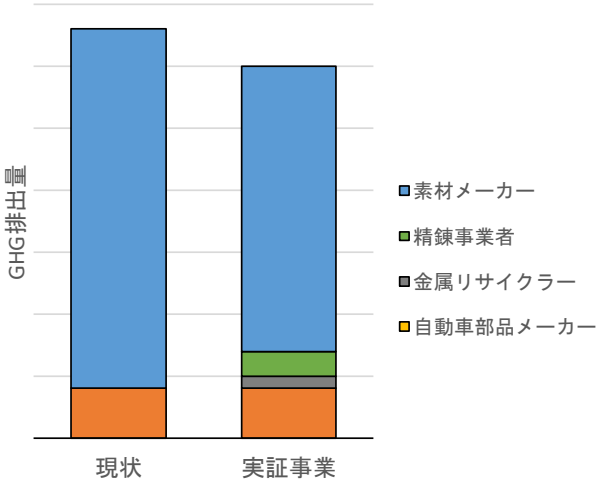


図 2　事業実施に伴う CO_2 排出量削減イメージ（アルミニウム分野）

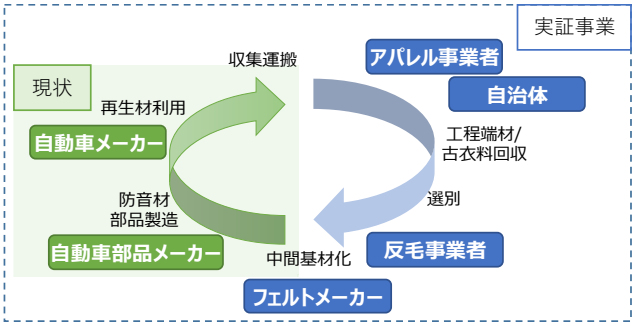


図 3　ビジネスモデルの概要（繊維分野）

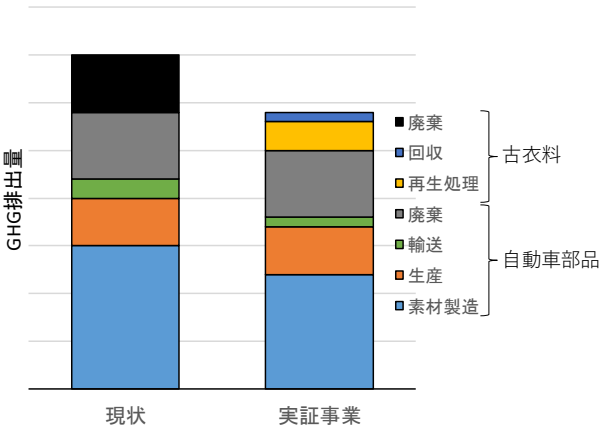


図 4　事業実施に伴う CO_2 排出量削減イメージ（繊維分野）

肉代替食品選択に対する情報提供効果の評価
–消費者特性評価及びスーパーマーケットにおける実証実験–

Information Provision on Meat Alternatives combined with Consumer Analysis and Demonstration Trial at Supermarket Stores

○佐久間夏美*[1)]、栗栖聖[1)]、福士謙介[1)]

Natsumi Sakuma, Kiyo Kurisu, Kensuke Fukushi

1) 東京大学

* sakuma@env.t.u-tokyo.ac.jp

1. 肉代替食品と持続可能な食生活

持続可能な食生活には、植物性食品を中心とした低環境負荷かつ健康に資する食生活や、家畜への抗菌剤の適切利用および動物福祉に配慮した食品の選択などがある[1-3]。また、近年広がっている大豆ミートなどの肉代替食品も持続可能な食生活に向けた選択肢のひとつとなる。しかし、持続可能な食生活への消費者の認識は未だ低く、食選択には様々な要因が作用しているため行動変容は難しい課題である。本研究では、食の持続可能性に関する異なる内容の情報が消費者意図や意識へ与える効果と、食志向や価値観が情報効果に与える影響を明らかにすることで、消費者の肉代替食品選択支援に有効となる情報提供のあり方を明らかにすることを目的とした。

2. 手法

表 1 に示す 4 つの調査において、提供する情報内容を精査すると共に、異なるターゲット層や提供場面を検討した。

表 1. 調査構成と概要

	期間 (すべて 2021 年)	対象者	n	調査手法
I	1/15 - 1/23	日本全国	16	ｵﾝﾗｲﾝ ｲﾝﾀﾋﾞｭｰ
II	6/05 - 6/09	東京都	2,312	ｵﾝﾗｲﾝｱﾝｹｰﾄ
III	10/29 - 11/04	代替食品購入者	487	ｵﾝﾗｲﾝｱﾝｹｰﾄ
IV	11/13 - 11/14	イオン店舗客	709	店頭実験

調査 I「食選択要因と情報提供影響の探索」および調査 II「情報提供効果評価と行動モデル構築」では、調査対象者に食選択要因について尋ねると共に、情報提供を行い、情報後の食選択行動意図等を調査した。提供した情報は、動物性食品の環境負荷、抗菌剤の適切利用、動物福祉と飼育法、植物性タンパク質の健康メリット、植物性タンパク質の紹介・取り入れ方である。調査 I では全ての内容を全参加者に提供し、調査 II では情報提供しないコントロールグループと上記 5 種類の情報を個別に提供する全 6 グループを設定した。調査 III「関心層へ詳細情報提供」では、大豆ハンバーグや大豆ミンチなどの肉代替食品購入経験者に対し、情報提供および情報への感想や行動意図等のアンケート調査を行った。提供情報内容は、大豆および肉に関する環境負荷の定量的比較も含めた詳細な環境情報および健康情報である。イオングループの WAON 会員における購入履歴より過去 3 ヶ月以内に肉代替食品の購入がある全国消費者を対象にオンライン調査を実施した。調査 IV「スーパーマーケットでの情報提供実験および販売」は 1 都 3 県のイオン・イオンスタイル 10 店舗において、調査 III で使用した環境情報および健康情報の簡易版を提供し、情報の感じ方(Q1)、店頭での情報提供の感想(Q2)、店頭で他に知りたい情報(Q3)を調査した。大豆ミンチの売り場にて B5 パネル 2 枚（図 1)を用いた情報提供を行い、推奨販売員による声掛け(図 2)やポスター掲示および放送による案内により、アンケートへの協力を呼び掛けた。回答者には類似商品を景品として提供した。



図 1. 店頭実験における情報提供パネル

（内容筆者策定、デザインはイオントップバリュ株式会社による）



図 2. 店頭情報提供の様子（秦野店）

3. 結果

3.1 情報提供効果評価と行動モデル構築 (調査 II)

5 種の提供情報の中では、特に環境情報および健康情報が、肉消費を減らす行動をはじめとする持続可能な食選択行動意図への影響が大きかった。行動意図への規定因を明確にするため、共分散構造解析(SEM)によるモデル化を行った。行動モデルの例として環境情報を提供したグループにおける「肉の消費を減らす」行動意図を目的変数とした SEM の結

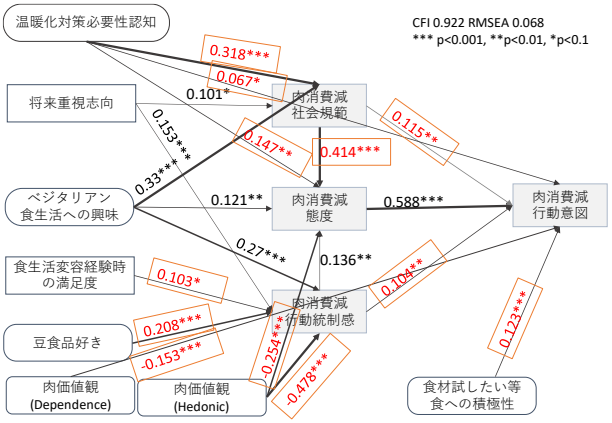


図 3 肉消費を減らす行動意図モデル(環境情報グループ)

果を図 3 に示す。囲みのあるパス値(赤字)は情報提供が無いグループと比較して影響が強いパスである。肉に対する価値観、温暖化対策の必要性認知、色々な食材を試したいといった志向と、特に社会規範の行動要因への影響が強くなっている。

3.2 代替食品購入経験者への情報提供 (調査 III)

代替食品購入経験者に対し、提供した環境および健康の各情報に対し、①印象、②わかりやすさ、③商品の魅力を感じたか、④環境と商品の結びつきを感じたか、の 4 点を 6 件法で尋ねた。選択肢の 6 段階中 2~3 段階目に高い評価が①～④の 4 項目平均で 64%を占めた。また、健康情報の評価は環境情報より平均して 6 段階中 0.25 段階高かった。情報提供後、62%の回答者が植物性タンパク質を取り入れたい又は積極的に取り入れたいと答えた。回答者の取り入れたい/入れたくない理由を図 4、図 5 に示した。自由回答には環境負荷が低いことへの感想の他、価格、種類、原材料や添加物に対する要望が多かった。発表時には志向との関連結果も交えて報告する。

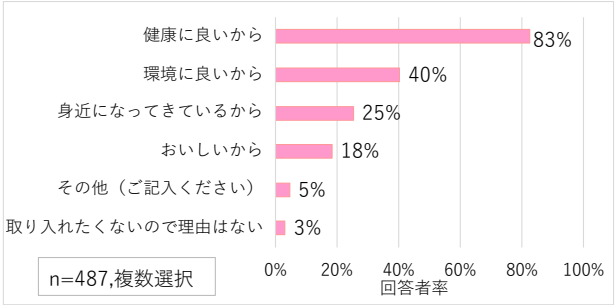


図 4 植物性タンパク質を取り入れたい理由

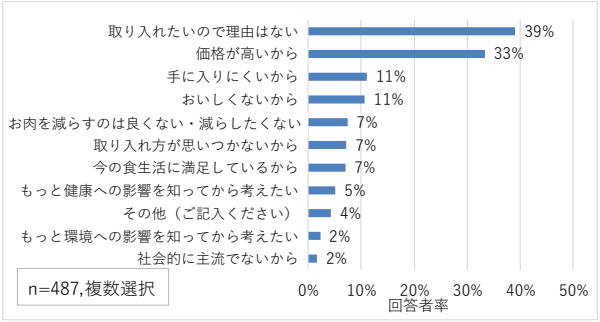


図 5. 植物性タンパク質を取り入れたくない理由

3.3 スーパーマーケットにおける実証実験

提供した情報に対する感想 (Q1)は調査 III と同じ①～④の項目全てにおいて 6 段階中 1~2 段階目に高い評価が 55%以上と高かった。「店頭で情報提供されることへの感想」では、表 2 にあるように、「健康に対して知れることが、環境について知れることよりやや高く評価された。「他に知りたい情報」では表 3 の通りレシピと味が突出して多く選ばれていた。

表 2 店頭情報提供感想上位 4 回答 n=709

商品に興味を持つきっかけになる	64%
健康に対してできることを知れるのは嬉しい	48%
食品選びの判断材料になる	41%
環境に対してできることを知れるのは嬉しい	41%

表 3 他に知りたい情報上位 4 回答 n=709

レシピや使い方に関する情報	60%
味に関する情報	35%
原材料に関する情報	18%
特にない	13%

また、Q1 の 4 項目評価の関連性の分析結果より、情報を十分理解できたかどうかが評価全体に重要な影響を持っていた。Q1 の回答を用いたクラスタ分析より、情報評価傾向ごとの代替食品への興味を見ると、魅力を高く評価していると、印象や分かりやすさが中程度の評価でも商品興味やレシピへの興味は高い。一方で、情報内容は理解したが魅力評価が低い人は、味への興味が比較的高い傾向が見られた。

4. 結論

本研究は持続可能な食選択及び肉代替食品に関しての、環境と健康情報を中心とした情報提供をオンラインと店頭で行った。調査 III と調査 IV では健康情報の方が環境情報と比較して関心や判断要素としての重要度が高いが、環境情報も関心を持って受け取られた。情報内容が店頭での商品の魅力の認識に結びつかなかった消費者も見られ、特に味・価格に対する懸念が商品の魅力を感じない要因と考えられた。レシピと味に関する情報は店頭と購入経験者ともに幅広い消費者で関心が高かった。大豆食品ならではの魅力をレシピや味の面でも情報提供内容に入れることで大豆の肉代替食品の受容度を上げることができるのではないかと考えられた。

謝辞

本研究は科研費（JP20K12279）と日本学術振興会研究拠点形成事業-B. アジア・アフリカ学術基盤形成型により助成を受けた。調査にご協力いただいたイオントップバリュ株式会社はじめ関係者各位に厚く御礼申し上げます。

引用文献

1) FAO, WHO: “Sustainable Healthy Diets-Guiding Principles”, (2019)
2) OECD, FAO: “Guidance for Responsible Agricultural Supply Chains”, (2017)
3) Tang et al : Lancet Planet Heal, 1 (8) , pp.e316-e327

口頭発表セッション（一般）

[2-A4] エネルギー

座長：藤井実（国立環境研究所）

2022年3月3日(木) 15:00 〜 16:40 A会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-A4-01] 地域特性を考慮する脱炭素シナリオの計画システムについての研究

*岡部 紘樹[1]、藤田 壮[1]、堀 啓子[1]、中谷 隼[1]、牧 誠也[2]、五味 馨[2] （1. 東京大学、2. 国立環境研究所）

15:00 〜 15:20

[2-A4-02] 電力部門におけるグローバルサプライチェーンの環境効率性分析

*前野 啓太郎[1]、中石 知晃[1]、高藪 広隆[2]、加河 茂美[1] （1. 九州大学、2. 近畿大学）

15:20 〜 15:40

[2-A4-03] 日本版シュタットベルケ実現に向けた成立要因分析

*沢口 葉月[1]、磐田 朋子[1] （1. 芝浦工業大学）

15:40 〜 16:00

[2-A4-04] 業務用太陽熱給湯システムの地域・業種別 CO_2削減効果

*大津 太伸[1]、本藤 祐樹[1] （1. 横浜国立大学）

16:00 〜 16:20

[2-A4-05] 工場名称データを用いたテキストマイニング手法による熱需要を持つ産業の抽出法の検討

*牧 誠也[1]、大西 悟[1]、藤井 実[1]、後藤 尚弘[2] （1. 国立環境研究所、2. 東洋大学）

16:20 〜 16:40

©日本LCA学会

地域特性を考慮する脱炭素シナリオの計画システムについての研究

Planning System for Decarbonized Future Scenarios Considering Regional Characteristics

○岡部紘樹*[1)]、藤田壮[1)]、堀啓子[1)]、中谷隼[1)]、牧誠也[2)]、五味馨[2)]
Hiroki Okabe, Tsuyoshi Fujita, Keiko Hori, Jun Nakatani, Seiya Maki, Kei Gomi
1) 東京大学, 2) 国立環境研究所
* okabe@env.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

脱炭素社会について、国際連合による持続可能な目標(SDGs)の合意やパリ協定の策定を受けて、日本国内でも脱炭素社会への転換への議論が本格化してきている。2018 年に制定された第 5 次環境基本計画では、地域資源を補完・支援する自立した分散型社会を形成する地域循環共生圏を構築することが提示され、持続可能な将来に向け、6 次産業などの高付加価値型の農業、食品加工業、観光業、地域エネルギー業等の整備が期待されている[1)]。さらに、「2050 年カーボンニュートラル」実現の宣言及び、2030 年度温室効果ガス排出量目標を 2013 年度排出量の 46%減とする閣議決定を受け、関連する政策の策定が進み、地方での再生可能エネルギー(以下、再エネ)による電力供給施設の大量導入と火力発電施設等の規模縮小等が検討される[2,3)]。

一方で、再エネの導入には関連産業等新しい地域産業の誘致が必要であり、生産消費チェーン等地域経済構造の転換が必要視されている。地域経済の再構築には、現状の地域特性を解析し、利害関係者間で意見共有をしながら市民参加型の新事業に取り組み、現状解析をもとに将来シナリオの設定を行うことが必要となる。日本の地方都市を対象に、地域活性化を目的として現状を解析しシナリオ算定を試行する研究事例として、将来目標を基に産業や人口に関するシナリオを設定した統合評価分析事例[4,5)]や、現状の構造を前提に経済波及効果を診断した産業連関分析事例[6,7)]等が挙げられるが、両者を総合したシナリオ設定には発展の余地がある為、地域の現状評価を受けて外生変数を設定し将来推計を行う地域実装を進める支援となる研究が有効であると考える。

脱炭素目標の達成に向け、将来の脱炭素技術の導入についての実現可能性、及び導入時の地域社会の持続可能性の評価を行い、実現可能なロードマップの提示が喫緊の課題となる。発電時の時間変動が大きい再エネの大量導入時の電力需給制御を考慮した、地域の産業導入シナリオを構築することが必要となる。

本研究では、大規模火力発電所が立地する地域での再エネを主体とする新たな地方経済の構築に焦点をあてる。火力発電等の運用が低減する際の地域活性化のための代替的なシナリオ設計を考え、2030 年度までの野心的な脱炭素目標に加えて、2050 年までの脱炭素社会構築に向けた示唆を与えることを目標する。現状評価と将来目標設定の双方の観点から、地域産業及び再エネ産業の産業集積を検討し、地域特性を考慮する脱炭素シナリオ計画の方法論を構築する。また、再エネの有効活用のために、地域内の電力需給変動の差を定量化し、蓄電を用いた需給差の平準化を検討する。

2. 構築したモデルの構造

本研究の全体フレームの構造図を**図 1** に示す。

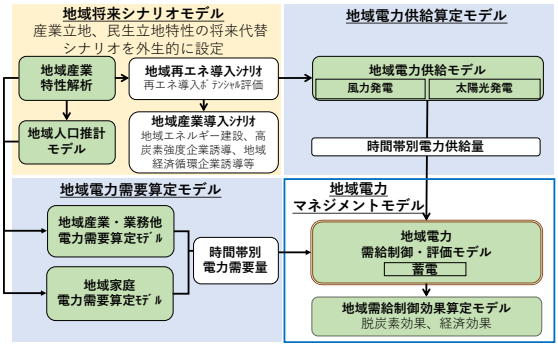


図 1 研究の全体フレームの構築

地域将来シナリオモデルでは、産業連関分析を通して地域産業特性を分析する。尾下ら[6)]の手法を援用し、地域エネルギーに関連する電力部門を拡張した地域産業連関表を構築する。産業構造を明確化することで、地域内で再エネを活用した際に高い脱炭素効果を得ることができる産業を同定する。また産業連関分析を行うことで、導入時に地域内への生産誘発効果が高くなる産業を同定する。さらに**図 2** のように、地域内既存の川上側産業による製品を需要し、かつ地域内既存の川下側産業に向けて自身の製品を販売することができる、生産チェーンの中間部に位置する産業の導入が望ましく、川上側産業の移輸出額及び川下側産業の移輸入額を分析することで導入が望ましい産業を検討する。さらに再エネの導入を前提とするため、再エネの導入ポテンシャルを評価する。地域将来シナリオモデルにおける分析で得られた、脱炭素効果及び生産額誘発効

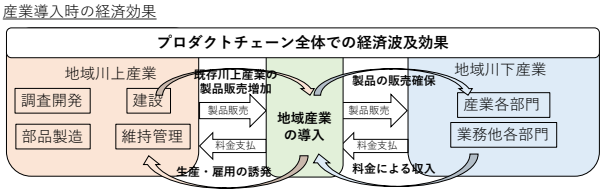


図 2 生産チェーン全体と導入すべき地域産業の関係

果が大きくなるような産業群及び再エネ業の導入を地域将来シナリオとして設計する。地域人口推計モデルについては五味 [4]らが開発した ExSS モデルを利用して、複数の外生条件が与えられた場合の地域の人口や産業生産額を将来推計する。

地域電力需要算定モデルでは、地域の産業別生産額と、SII エネマネオープンデータ [8]の部門別電力需要時間変動係数を用いて、産業、業務他部門における 1 時間ごとの電力需要量を算定する。また、地域人口と家庭の電力需要時間変動データを用いて、家庭部門における 1 時間ごとの電力需要量を算定する。地域電力供給算定モデルでは、太陽光発電と風力発電による 1 時間ごとの電力供給量を算定する。

地域電力マネジメントモデルでは、地域将来シナリオモデルの結果を受けて設計した各シナリオについて、それぞれ 1 時間ごとの電力需給を算定した上で、蓄電による需給制御の効果を GDP や人口、CO_2 排出量を指標として出力し、シナリオ間で比較し評価する。

3. ケーススタディ

福島県新地町を対象にケーススタディを行った結果を示す。当該自治体では(1)地域内に SC 方式の火力発電所が立地しており、将来的な代替シナリオを設定することが有効な地域であり、(2)東日本大震災からの復興の過程で科学的なアプローチで地域活性化を検討した事例があり、(3)エネルギー会社等の利害関係者と意見交換を行う機会があることが特徴となっている。

地域将来シナリオモデルの算定結果により**表 1** に示すシナリオを設計した。ただし S2-S5 の 4 つにおいては、蓄電設備導入量を規模別に 4 段階設定し、合計 19 通りのシナリオについて電力需給の時間変動を求めた。将来推計について、GAMS 36.0.0 を用いて算定を行い、2015 年を基準年として、2050 年まで 5 年ごとの GDP や人口、CO_2 排出量の出力を行い、2030 年の出力結果をもとに議論を行った。出力結果のうち、年間 GDP の将来推計結果は**図 3** の通りとなった。S3、S5 では、産業導入により火力発電の低減を代替し、GDP を維持した。政策提言の検討は学会にて発表する。

表 1 設定したシナリオの一覧

シナリオ	石炭火力発電稼働逓減	再ｴﾈ導入量の増加	産業誘致	
			電子部品+はん用機械製造業	食品製造業
S0:域内石炭火力発電維持ｼﾅﾘｵ				
S1:域内石炭火力発電逓減ｼﾅﾘｵ	○			
S1-a:石炭火力逓減+6次産業ｼﾅﾘｵ	○			○
S2:石炭火力逓減+再エネ発電増加ｼﾅﾘｵ	○	○		
S3:石炭火力逓減+再エネ発電増加+再エネ部品製造誘致ｼﾅﾘｵ	○	○	○	
S4:石炭火力逓減+再エネ発電増加+6次産業導入ｼﾅﾘｵ	○	○		○
S5:石炭火力逓減+再エネ発電増加+再エネ部品製造誘致+6次産業ｼﾅﾘｵ	○	○	○	○

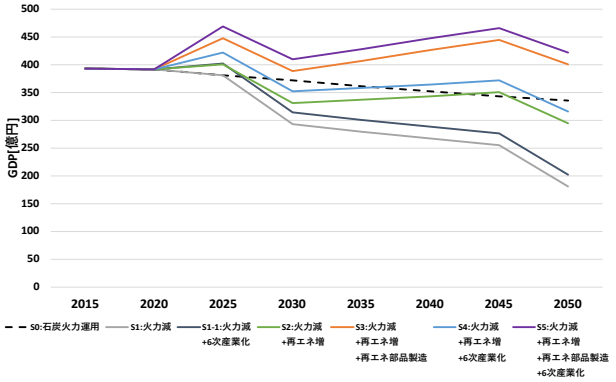


図 3 年間 GDP の推計結果

4. 謝辞

本研究は、文科省委託研究 21-3-398(研究代表藤田壮)の一環として、新地町と国立環境研究所、東京大学の連携協定の下で実施された。地域産業連関表構築手法について助言頂いた東京大学尾下優子氏、家庭の電力需要時間変動データを提供頂いた日本環境技研(株)安達健一氏をはじめ関係者に謝意を表する。

引用文献

1) 環境省：“環境基本計画”，(2018)
2) 環境省：“地域脱炭素ロードマップ”，(2021)
3) 経済産業省：“エネルギー基本計画”，(2021)
4) 五味馨：“地方自治体における低炭素社会シナリオ構築手法の開発に関する研究”，京都大学学術情報リポジトリ，(2010)
5) 五味馨，芦名秀一，藤田壮，増井利彦：土木学会論文集 G(環境)，(2015)，71(6)，pp. II_151-II_162
6) 松本直也，本藤祐樹：日本エネルギー学会誌、90(3)，(2011)，pp.258-267
7) 尾下優子，兵法彩，大内田弘太朗，兼松祐一郎，福島康裕，菊池康紀：日本 LCA 学会誌，(2019)，15(4)，pp. 360-376
8) 環境共創イニシアチブ，"エネマネ"，（オンライン），入手先 <https://www.ems-opendata.jp> ，（参照 2021-10-14

電力部門におけるグローバルサプライチェーンの環境効率性分析

○前野啓太郎*[1)]、中石知晃[1)]、高藪広隆[2)]、加河茂美[1)]
Keitaro Maeno, Tomoaki Nakaishi, Hirotaka Takayabu, Shigemi Kagawa
1) 九州大学, 2) 近畿大学
* maeno.keitaro.0819@gmail.com

1. 研究背景

電力部門は、世界の産業由来 CO_2 排出量の約 40%を占める炭素集約的な部門であり、同部門のグローバルサプライチェーンを通じた生産活動における環境生産効率性の改善は、加速する気候変動緩和のために極めて重要である[1)]。

電力部門の環境生産効率性について、国やプラントレベルで評価した先行研究は数多く存在する[2), 3)]が、それらの研究の多くは電力部門のサプライチェーンを考慮するようなライフサイクルの視点に欠けている。

そこで本研究は、世界多地域産業連関分析とデータ包絡分析(DEA)の統合的なフレームワークを採用し、各国電力サプライチェーンの生産に関する投入（中間財、労働、資本、エネルギー）・産出（生産額、CO_2 排出）構造から、各国電力部門の包括的な生産活動に関する環境生産効率性を定量的に評価し、その改善可能性及び改善方法について議論するための分析を行った。

2. 研究手法

2.1 単位構造モデル

基本的な産業連関モデルに従うと、国oの電力部門に対する最終需要が直接・間接的に誘発する生産要素投入量、または生産要素産出量q_oは、(1)式によって推計できる。

$$q_o = \mathbf{q}(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{f}^o_{ele} \qquad (1)$$

ここで、$\mathbf{q}$は各国各産業における 1 単位の生産に伴う各投入要素（中間財、労働、資本、エネルギー）・各産出要素（生産額、CO_2 排出量）を示す行ベクトルである。$\mathbf{A}$は投入係数行列であり、$(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}=\mathbf{L}$は各国各産業のサプライチェーンを示すレオンチェフ逆行列である。$\mathbf{f}^o_{ele}$は、国oの電力部門に対する最終需要に対応する成分のみ値を持ち、その他の成分は 0 であるベクトルを示す。レオンチェフ逆行列は$\mathbf{L}=(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}=\mathbf{I}+\mathbf{A}+\mathbf{A}^2+\mathbf{A}^3+\cdots$と無限級数展開できるため、(1)式は以下のように表すことができる。

$$q_o = \mathbf{q}(\mathbf{I}+\mathbf{A}+\mathbf{A}^2+\cdots)\mathbf{f}^o_{ele} \qquad (2)$$

単位構造モデル[4)]に従い、(2)式は(3)式のように変形できる。

$$q_o = \mathbf{q}\mathbf{f}^o_{ele} + \mathbf{q}\mathbf{A}\mathbf{L}\mathbf{f}^o_{ele} \qquad (3)$$

ここで、(3)式の第一項、$\mathbf{q}\mathbf{f}^o_{ele}$は国$o$の電力部門に対する最終需要が直接的に誘発した投入産出要素、第二項、$\mathbf{q}\mathbf{A}\mathbf{L}\mathbf{f}^o_{ele}$は、国$o$の電力部門に対する最終需要が間接的に誘発した投入産出要素を示している。(3)式から本研究は、各国電力部門の電力生産段階（直接段階）、グローバルサプライチェーン段階（間接段階）に関して、以下のような投入産出データセットを作成した。

（直接段階）
投入要素：$\mathbf{q}\mathbf{f}^o_{ele}$（中間財、労働、資本、エネルギー）
産出要素：$\mathbf{f}^o_{ele}$（生産額）、$\mathbf{q}\mathbf{f}^o_{ele}$（$CO_2$ 排出量）
（間接段階）
投入要素：$\mathbf{q}\mathbf{A}\mathbf{L}\mathbf{f}^o_{ele}$（中間財、労働、資本、エネルギー）
産出要素：$\mathbf{q}\mathbf{f}^o_{ele}$（一次中間財）、$\mathbf{q}\mathbf{A}\mathbf{L}\mathbf{f}^o_{ele}$（$CO_2$ 排出量）

2.2 データ包絡分析 (DEA)

本研究は、2.1 で作成された投入産出データセットに DEA を適用し、各国電力部門における生産活動の直接・間接段階における環境生産効率性を定量的に評価する。具体的に、本研究は DEA-slack based measure (SBM) モデル[5)]を採用し、分析年における各国電力部門の相対的な環境生産効率性を、0（最も非効率的）から 1（最も効率的）までの基準化されたスコアとして定量化する。このスコアは本質的に、投入当たりの産出（つまり、効率性）に基づく数理計画法により算出される。更に本研究は Global Luenberger productivity index (GLPI)[6)]を採用し、各国電力部門の環境生産効率性の変化について経年分析を行った。

3. データ

本研究は各国電力部門の直接・間接段階における投入産出データセットを作成するため、World Input-Output Database[7),8)]に公開されている世界多地域産業連関表（対象範囲：44 ヵ国、56 産業）の 2000 年 2014 年におけるデータを用いた。

4. 結果

本要旨では、各国電力部門のグローバルサプライチェーンを通じた環境生産効率性評価とその推移について述べる。以下の図 1 (a-d) は、2000 年・2014 年の各年について、各国電力部門の直接・間接段階における環境生産効率性 (Static direct/indirect environmental efficiency: SDEPE/SIEPE) スコアを地理プロットとして示している（赤：効率的、青：非効率的)。

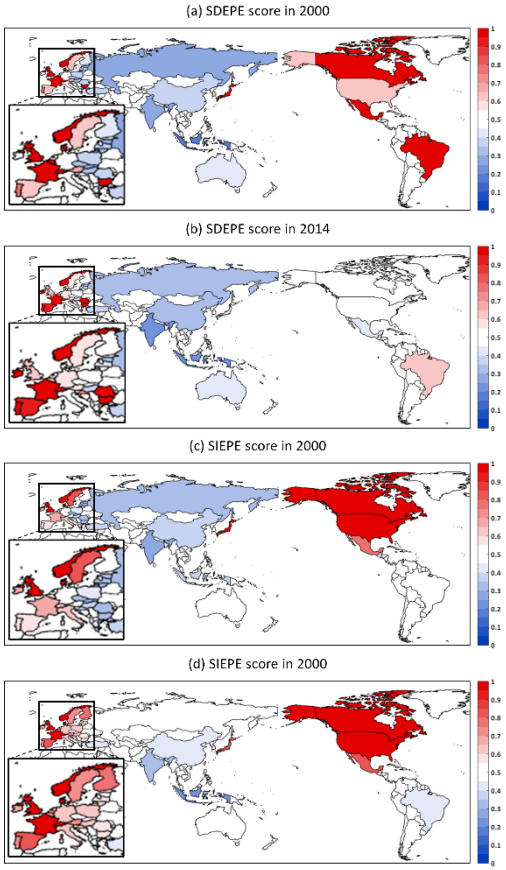


図 1. SDEPE、SIEPE の地理プロット（2000 年･2014 年)

2000 年と 2014 年における各国電力部門の直接段階における環境生産効率性 (SDEPE) スコアの平均値は、それぞれ 0.61 と、0.57 であった。地域別の SDEPE は、2000 年時点では、アメリカ地域が顕著に高く（地域平均：0.91)、これにヨーロッパ地域（平均：0.61)、アジア・オセアニア地域（平均：0.47）が続いた（図 1(a))。一方で、2014 年時点では、ヨーロッパ地域(平均:0.62)が最も高い平均スコアを示し、アメリカ地域（平均：0.50)、アジア・オセアニア地域（平均：0.35）が続く結果となった（図 1(b))。続いて図 1(c-d)から、各国電力部門の間接段階（つまり、グローバルサプライチェーン）における環境生産効率性 (SIEPE) スコアの結果について述べると、各年の世界平均値は、それぞれ 0.55 と、0.67 であった。2000 年時点では、アメリカ地域が顕著に優れており（地域平均：0.82)、ヨーロッパ地域（平均：0.52）とアジア・オセアニア地域 (平均：0.51) はほぼ同水準であった (図 1(c))。2014 年時点ではアメリカ地域 (平均：0.80)、ヨーロッパ地域 (平均：0.69)、アジア・オセアニア地域 (平均：0.51) が続く結果となった (図 1(d))。

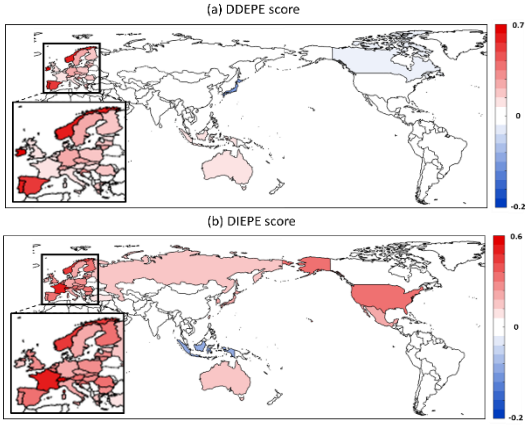


図 2. DDEPE、DIEPE の地理プロット（2000 年･2014 年)

図 2 (a-b) は各国電力部門の直接・間接段階における環境生産効率性の推移を地理プロットとして示している。各国の電力部門における直接段階の環境パフォーマンスの推移（DDEPE スコア）の平均は 0.14 であった。43 ヵ国の中で最も高い DDEPE スコアの改善を経験した国は、アイルランド（スコア：0.66）であり、これにポルトガル（0.57)、ノルウェー（0.53)、スペイン（0.50）が続いた。一方で、DDEPE スコアが-0.51 であったルクセンブルクは、分析期間で最も DDEPE が悪化した国である。ルクセンブルクに次いで、DDEPE が悪化したのは日本(スコア:-0.05)であった(図 1(a))。続いて間接段階について述べると、各国の電力部門における間接段階の環境生産効率性の推移（DIEPE スコア）の平均は 0.23 であった。43 ヵ国の中で、顕著に高い DIEPE スコアを示した国はスイス（スコア：0.57）であった。加えて、フランス(0.49)とノルウェー(0.43)でも比較的大きな改善が観測された。一方で、インドネシア（スコア：-0.09）は、分析期間で唯一 DIEPE スコアが負の値を示し、効率性の悪化を経験した(図 1(b))。

本会では更に、各国電力部門のエネルギーミックスと環境生産効率性の関係に着目した分析の結果について述べ、各国電力部門の環境生産効率性の改善可能性及び改善方法について包括的に議論する。

5. 引用文献

1) International Energy Agency, (2020).
2) Zhou *et al.*, (2012) *Eur. J. Oper. Res.*, 221, 625-635.
3) Nakaishi *et al.*, (2021) *Enegy Econ.*, 102, 105511.
4) Kagawa *et al.*, (2013) *Econ. Syst. Res.*, 25, 265-286.
5) Tone, (2001) *Eur. J. Oper. Res.*, 130, 498-509.
6) Wang *et al.*, (2016) *Ecol. Indic.*, 66, 545-555.
7) WIOD: http://www.wiod.org/database/wiots16.
8) Timmer *et al.*, (2015), *Rev. Int. Econ.*, 23, 575-60

日本版シュタットベルケ実現に向けた成立要因分析

Factor analysis for the realization of Stadtwerke in Japan

○沢口葉月*、磐田朋子
Hazuki Sawaguchi, Tomoko Iwata
芝浦工業大学
* br18047@shibaura-it.ac.jp

1. 緒言

2050 年のカーボンニュートラル社会実現に向けて、地域での脱炭素に向けた取り組みが重要となってきている。2021 年 11 月 30 日時点で、492 自治体が 「2050 年までに二酸化炭素排出実質ゼロ」を表明[1]しており、地域での主体的な取り組みがみられる。

また、近年、ドイツのシュタットベルケをモデルとした、再生可能エネルギーの地産地消とそれによる地域内での経済循環による地域の活性化を目指す動きが高まっている。日本版シュタットベルケのあり方について、“地域資源を活用したエネルギー事業等により一定の収益を確保し、その収益を活用して地域課題の解決に資するまちづくり活動を担う官民で連携した事業体”と提言[2]され、実現に向けた方向性が示されている。日本での実現に向けて、ドイツのシュタットベルケのポイントを整理し、日本版シュタットベルケの候補を挙げ、ポイントと照らし合わせながら、可能性の高い事例を選出している例がある[3]。また、自治体が出資を行う地域エネルギー会社である自治体新電力については、事業展開を行ううえで、地産の電源を確保することや公共施設を含む供給先、実際に地域に利益を還元できていない等といった課題がある[4]。

以上のことから、日本版シュタットベルケの実現に向けて、日本での実現に向けた論点や課題の整理をしている論文は存在するが、全国の地方公共団体において、適している地域はどこなのか、地域の再生可能エネルギーポテンシャルや住民の環境意識などの要因を定量的に評価している研究は見られない。

そこで、本研究では、日本版シュタットベルケ実現に向けた成立要因を数値化した上で、全国 1741 の地方自治体をクラスター分析に基づき整理し、シュタットベルケの成立の可能性が高い地域を明らかにすることを目的とした。

2. 分析方法

2.1 成立要因

本研究では、日本版シュタットベルケ実現に向けた成立要因を、自治体の意欲、再生可能エネルギー事業としての要因、事業の将来性の 3 項目に分類した（表 1 および表 SI）。

まず「自治体の意欲」として、脱炭素に向けた取り組みと同様に、自治体がリーダーシップを持って、推進していく積極性が必要であると考えた。また、地域に根ざした事業を市民に受け入れてもらうため、住民の環境意識が必要だと考えた。

次に「再エネ事業としての要因」として、現在地域で使える再生可能エネルギー供給量がどの程度あるかは、地産の自然エネルギーを使うという観点から重要であると考えた。また、公共施設は負荷率が低く、契約電力が大きいこと、地域貢献度が高いことから、公共施設の需要量も要因であると考えた。また財政力がある自治体は、独自の施策運営がしやすいという点がある。一方で、社会保障やインフラ事業などにお金が多く流出している地域ほど、公共事業をシュタットベルケが担う意義が大きいことから、必要な要因であると考えた。

最後に「事業の将来性」として、自治体が出資する地域エネルギー会社として事業を進めていく上で、自主電源を増やすための再生可能エネルギーポテンシャルおよび電力供給先となる電力需要規模が要因となると考えた。

表 1　実現に向けた要因（詳細は表 SI 参照）

自治体の意欲	①自治体の積極性
	②住民の環境意識
再エネ事業としての要因	③再生可能エネルギー供給量
	④公共施設の電力需要量
	⑤自治体の財政力
	⑥社会保障やインフラ事業に関わる費用
事業の将来性	⑦エネルギー供給先となる電力需要規模
	⑧再生可能エネルギーポテンシャル

2.2 分析方法

非階層的クラスタリング手法（k-means 法）によって、全国 1741 の地方自治体（東京 23 区を含む）を似たような性質を持つ自治体ごとに分類した。分類され

たクラスターごとの平均値を標準化し、5 段階（表 2）で表した。そして、クラスターごとに、自治体新電力をもつ自治体の割合（A）を算出した（表 3）。

表 2　5 段階評価の方法

1～	++	良い
0.5～1 未満	+	やや良い
-0.5～0.5 未満	・	平均並み
-1～-0.5 未満	-	やや良くない
～-1 未満	--	良くない

3. 分析結果

分析の結果（表 3）、クラスター2 は、社会保障の指標は良くないものの、他の指標は評価が良いクラスターとなった。また、各クラスターに属した自治体（表 4）の自治体新電力を持つ自治体の割合を算出したところ、クラスター1 やクラスター9 で割合が高くなった。さらに、再エネ事業としての要因の指標が良いクラスター1、9、11 など、特徴的な分類がなされた。

表 3　クラスター分析の結果
（ただし、①～⑧は表 1 に準ずる）

要因	クラスタ											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
①	・	++	–	・	・	・	–	–	+	・	+	––
②	・	++	––	・	・	・	・	・	・	・	・	––
③	++	++	+	–	–	・	–	––	・	・	+	––
④	+	++	+	–	–	・	–	––	+	・	+	––
⑤	・	++	・	–	・	・	–	–	++	・	++	––
⑥	・	––	–	+	+	++	–	–	––	+	–	・
⑦	+	++	+	–	–	・	––	––	++	・	++	––
⑧	+	++	++	–	–	・	–	––	・	・	・	–
A	33%	100%	9%	6%	7%	4%	5%	3%	31%	18%	0%	2%

表 4　クラスターごとの自治体

No.	自治体
1	津市、北九州市*、宮崎市
2	浜松市*
3	六ヶ所村、いわき市、南相馬市、前橋市、高崎市、名古屋市、松阪市*、伊賀市、岡山市、鹿児島市、霧島市
4	宮古市*、秩父市*、豊後大野市*、他 141 自治体（うち、5 自治体が自治体新電力会社あり）
5	深谷市*、米子市*、日置市*、他 94 自治体（うち、4 自治体が自治体新電力会社あり）
6	静岡市、大阪市、宇部市*、他 25 自治体
7	東松島市*、中之条町*、亀岡市*、他 229 自治体（うち、9 自治体が自治体新電力会社あり）
8	睦沢町*、湖南市*、生駒市*、他 409 自治体（うち、10 自治体が自治体新電力会社あり）
9	秋田市、水戸市、つくば市、宇都宮市、太田市*、富士市、豊橋市*、豊田市、田原市、四日市市、神戸市、倉敷市、福山市*、東広島市*、下関市、熊本市*
10	福島市、千葉市、新潟市*、京都市、長崎市*
11	仙台市、神栖市、市原市、姫路市、大分市
12	上士幌町*、能勢町*、南部町*、他 749 自治体（うち、12 自治体が自治体新電力会社あり）

（ただし、*は自治体新電力会社をもつ自治体を示す）

4. 考察

分析結果より、日本版シュタットトベルケ実現に向けて、クラスター3 は、再エネポテンシャルの指標が良い一方で、住民の環境意識、自治体の積極性の指標がよくない。ただ、環境意識、推進力については、自治体の意識改革や住民への環境教育などによって、伸ばすことができる指標であり、クラスター3 に属する自治体（表 4）はポテンシャルが高いと考える。クラスター1 とクラスター9 は自治体新電力を持つ自治体の割合が高く、クラスター1 やクラスター9 に属しているが、自治体新電力がない自治体もポテンシャルが高いと考える。また、クラスター11 については、指標自体は 9 と似ているものの、自治体新電力をもつ自治体がない。自治体新電力の設立から始めることで、成立しうることが示唆された。

5. 結言

日本版シュタットベルケ実現に向けた要因をクラスター分析に基づき整理した結果、既に良い指標が多くシュタットベルケに適している自治体、意識改革次第ではうまくいく可能性が高い自治体など、今後成立の可能性が高い地域を明らかにすることができた。

今後の課題として、実現に向けて必要だと考えた成立要因の重要度が、指標ごとに異なる可能性がある点が挙げられる。自治体新電力事業やシュタットベルケに関わる専門家・自治体担当者等の有識者へのアンケート調査によって要因の重み付けを行うことで、地方自治体のポテンシャルを算定する必要があると考える。

引用文献

1）環境省：“ゼロカーボンシティ一覧図（2021.11.30）”
2）国土交通省都市局：“エネルギー施策と連携した持続可能なまちづくり事例集”，（2019），pp7-8
3）日本エネルギー経済研究所　山本尚司：“ドイツのシュタットベルケから日本は何を学ぶべきか”,（2018）
4）稲垣憲治, 小川祐貴：国際公共経済研究, 31 号,（2020）, pp15-23

Supporting Information

日本版シュタットベルケ実現に向けた要因（表 1）について、分析に用いたデータの入手先を表 S1 にまとめた。

表 S1

要因	用いた指標・算出方法
①自治体の積極性	カーボンゼロ宣言 →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データを用いた。（2021 年 10 月 29 日時点）
②住民の環境意識	ごみの排出量 →環境省　廃棄物処理技術情報 市区町村集計結果 1 人 1 日あたりのごみ排出量（令和元年度）のデータを用いた。東京都 23 区については、東京都総務局が公表している東京都統計年鑑のごみ・し尿（平成 28～30 年度）より、ごみ排出量を国勢調査の人口（平成 30 年度）で割って算出した。
③再生可能エネルギー供給量	資源エネルギー庁のエリア別の認定及び導入量 B 表市町村別認定・導入量（2020 年 12 月末時点）のデータを用いた。新規認定分と移行認定分の市町村別導入容量を足し合わせて算出した。
④公共施設の電力需要量	総務省 地方財政状況 調査関係資料 公共施設状況調 経年比較表（平成 18 年度～令和元年度)から得られる公共施設の面積に、エネルギー消費原単位をかけて算出した。エネルギー消費原単位は JSBC（一般社団法人日本サステナブル建築協会）の DECC（Data-base for Energy Consumption of Commercial buildings）データの地域別、建物用途別単位延べ床面積当たりの年間一次エネルギー消費量を用いた。
⑤自治体の財政力	歳入占める地方税収の割合 →総務省 地方財政状況調市町村収入の状況（令和元年度）から、歳入総額に占める地方税収の割合を算出した。
⑥社会保障やインフラ事業に関わる費用	歳出に占める公共事業費の割合 →歳出総額は、総務省 市町村別決算状況調（令和元年度）市町村別決算概況データを用いた。公共事業費については、総務省 地方財政状況調査 地方公営企業決算状況調査 歳入歳出決算に関する調より、事業別の歳出額を総計して算出した。
⑦エネルギー供給先となる電力需要規模	環境省の地方公共団体実行計画（区域施策編）策定・実施マニュアル算定手法編を参考に、産業部門、業務その他部門、家庭部門について、資源エネルギー庁の都道府県別エネルギー消費統計のエネルギー種別エネルギー消費量をそれぞれ製造品出荷額・従業員数・世帯数で按分して算出した。
⑧再生可能エネルギーポテンシャル	環境省が提供する「再生可能エネルギー情報提供システム」REPOS から、自治体別情報・ポテンシャル一覧表（全国）のデータを用いた。太陽光 L1_設備容量、陸上風力_設備容量、中小水力河川_設備容量を足し合わせて算出した。

業務用太陽熱給湯システムの地域・業種別 CO_2 削減費用

CO_2 abatement costs of commercial solar water heating systems by region and business type

○大津太伸*[1)]、本藤祐樹[1)]
Takanobu Otsu, Hiroki Hondo
1) 横浜国立大学
* otsu-takanobu-vj@ynu.jp

1. はじめに

近年の地球温暖化問題を受け、CO_2削減のため太陽熱給湯システムの利用が期待されている。このような技術の導入促進のために経済的な支援が必要な場合、CO_2削減の費用対効果が高い導入先から優先的に支援することが効果的である。太陽熱利用という技術は日射量等の気候だけでなく、温水を使用する時間帯によって、導入効果は大きく変化すると考えられる。したがって、気候条件等が異なる地域別、かつ、給湯利用形態が異なる業種別に、CO_2削減の費用対効果を明らかにすることが効果的な支援策の検討に資すると考えられる。しかし、業務用太陽熱給湯システムを対象とした既往の LCA 研究では、地域・業種別に費用対効果を検討した研究は見当たらない。

本研究では、従来型給湯システムをベースラインとして、ライフサイクルの観点から太陽熱給湯システム(SWHS)導入による CO_2削減費用を推計することで、CO_2削減の費用対効果が高い導入条件を明らかにすることを目的する。

2. 研究方法

2.1 前提条件

評価対象とする SWHS は強制循環型太陽熱給湯設備に従来型給湯器を補助熱源として組み合わせたシステムとし、従来型給湯器の燃料は重油・灯油・都市ガス・LPG・電気(ヒーター式)の 5 種を想定した。強制循環型太陽熱給湯設備は、集熱器と貯湯槽が分離しており、熱媒(不凍液)を介して間接的に水を温める仕組みである。その運用には、熱媒を循環させるポンプと貯湯槽の給水管等に取り付けられた凍結防止ヒーターの電力消費が伴う。各機器の耐用年数は 15 年とし、評価範囲は各機器とも製造・設置・運用(15 年間)のライフサイクルとした。

対象業種は給湯需要の大きい病院、ホテル、福祉施設と給湯需要の小さい事務所の計 4 種とし、各建物の規模及び湯使用量はモデル建物法[1)]で使用されるモデル建物の設定とする。1 日の給湯パターンは業種別の 1 時間ごとの給湯負荷データを使用している。また、集熱面積等のシステムサイズは各業種のピーク湯使用量から設定している。

本研究で考慮する地域条件は、日射量、気温、給水温度、電源構成、燃料単価とし、47 都道府県について県庁所在地を代表都市として推計を行う。

2.2 ライフサイクルコスト(LCC)の推計

各システムの LCC は、以下の計算式に従い推計する。

$$LCC_{i,j,k} = IC_{j,k} + \left(H_{i,j,k} \times \omega_{i,j,k}\right) \times Y$$

ここで、IC：初期費用、H：年間燃料消費量、ω：燃料単価、Y：耐用年数、i：都道府県、j：燃料種、k：業種である。IC は事業者へのヒアリングデータや文献を基に推計している。H は清水らの計算モデル[2)]を基に新たに作成したモデルを用いて求めている。このモデルでは、貯湯槽を 5 層に分割した完全混合モデルを用い、下層から給水された水道水を熱交換器によって太陽熱で加熱して上層から温水を使用していく構造を想定している。このモデルに、地域別の日射量、気温、給水温度と業種別の給湯負荷や給湯パターン、システムサイズを入力することで、H が 1 時間間隔で計算される。

2.3 ライフサイクル CO_2 排出量($LCCO_2$)の推計

各システムの $LCCO_2$ は産業連関表と国立環境研究所が公開している 3EID 等を用いて以下の計算式に従い推計する。

$$LCCO_{2,i,j,k} = \sum\left(e^T(I-A)^{-1}F_{j,k} + f_{j,k} \times \varepsilon_{i,j}\right) + \sum\left(H_{i,j,k} \times \varepsilon_{i,j}\right) \times Y$$

ここで、e^T：転置した直接 CO_2 排出原単位ベクトル(3EID)、$(I-A)^{-1}$：レオンチェフ逆行列、F：システムの費用ベクトル(最終需要ベクトル)、f：現場での燃料消費量、ε：燃料の CO_2 排出係数である。上式の第 1 項はシステムを構成する機器の製造・設置に伴う CO_2 排出量であり、F は前述の IC より算出する。

2.4 CO_2 削減費用(AC)の推計

本研究で求める地域・業種別 CO_2 削減費用(AC)は、従来型給湯器の燃料種ごとに以下の式に従い推計する。

$$AC_{i,j,k} = \frac{LCC_{SWHS,i,j,k} - LCC_{Base,i,j,k}}{LCCO_{2,Base,i,j,k} - LCCO_{2,SWHS,i,j,k}}$$

分母はベースラインである従来型給湯器と SWHS の差分(15 年間の CO_2削減量)であり、分子は総費用(15 年間分)の差額である。

3. 結果と考察

表 1 に、病院を例として、燃料種別 CO_2削減費用(重油、LPG)の全国平均値を示す。LPG を用いた従来型給湯器を代替した場合は-35,600[円/t-CO_2]となり、47 都道府県すべての代表都市でも負の値となる。CO_2削減だけでなく総費用も削減されるため、LPG のように単価の高い燃料種の場合は場所を問わず SWHS の導入が効果的である。他方、単価の低い重油の場合は CO_2削減は行われるものの従来よりもコストが高くなる。

図 1 に、重油に焦点をあて、北海道、東京、山梨、鳥取、福岡の病院における地域別 CO_2削減費用を示す。値が小さいほど CO_2削減の費用対効果が高い地域であることを示している。全国平均は 18,600[円/t-CO_2]であるが(表 1)、47 都道府県の値は約 4,600~42,500[円/t-CO_2]と幅を持ち、温暖な南に行くにしたがって CO_2削減費用は小さくなる傾向が認められる。

考慮された地域条件の内、日射量が結果に大きく影響していると考えられる。日射量の多い山梨では給湯需要を太陽熱によって賄える割合(太陽依存率)が高く、日射量の少ない鳥取では太陽依存率が低い。太陽依存率が高いほどより多くの給湯負荷を太陽熱で代替できるため、補助熱源における CO_2排出を削減できる。それ故、山梨の CO_2削減費用は約 7,000[円/t-CO_2]となり、鳥取の約 27,700[円/t-CO_2]に対して小さい。

図 2 に一例として、東京における重油を用いた従来型給湯器を代替する場合の業種別 CO_2削減費用を示す。業種によって異なる給湯パターンと給湯需要の規模が、結果に大きく影響していると考えられる。給湯パターンを見てみると、病院、福祉施設は給湯需要が日中に集中しており、ホテルは朝方と夜間に需要が集中している。太陽熱は日中にのみ熱を供給できるため、日中に需要が集中している場合、温水を使用した分だけ熱を供給することができ、効率よく太陽熱を利用することが出来る。そのため、病院と福祉施設の CO_2削減費用はそれぞれ約 22,500、14,500[円/t-CO_2]となり、ホテルの約 35,400[円/t-CO_2]に対して小さい。また、事務所は日中に需要が集中しているが、給湯需要量が他の業種と比較して小さい。給湯需要が小さいと SWHS の導入によって削減される運用費に対して SWHS の初期費用が大きく、SWHS の LCC は従来型と比較してより大きい。それ故、事務所は日中に需要が集中しているが CO_2削減費用は約 97,000[円/t-CO_2]と他の業種よりも高い。

表 1 燃料種別 CO_2削減費用(病院, 全国平均)(試算値)

燃料種	重油	LPG
平均単価[円/MJ]	1.83	4.37
CO_2削減費用[円/t-CO_2]	18,600	-35,600

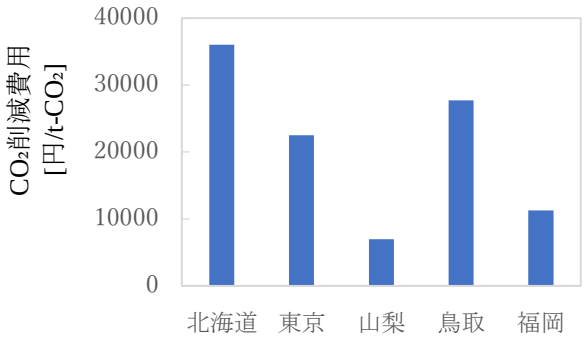


図 1　地域別 CO_2削減費用(病院, 重油)(試算値)

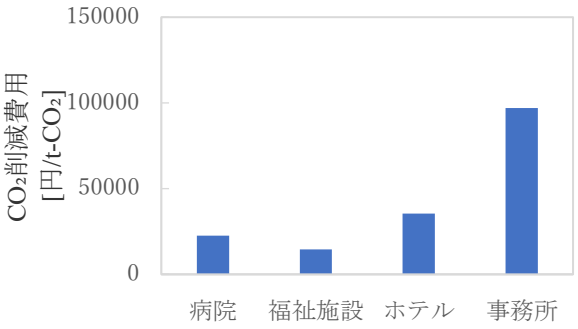


図 2　業種別 CO_2削減費用(東京, 重油)(試算値)

4. 結言

本研究では、業務用太陽熱給湯システムについて地域・業種別にライフサイクル CO_2削減費用を推計した。その結果、安価な燃料を用いた従来型給湯器を代替する際は、温暖で日射量が豊富な地域において、日中に需要が高く、給湯需要の大きい、病院などの業種への導入が効果的であることが示された。

[引用文献]

1)国立研究開発法人建築研究所: “建築物の消費エネルギー性能に関する技術情報”, 国立研究開発法人建築研究所, (オンライン), 入手先 <https://www.kenken.go.jp/becc/>, (参照 2022-01-05)

2)清水恭介, 本藤祐樹, 森泉由恵 : 日本エネルギー学会誌, 97 (5), (2018), pp147-159

工場名称データを用いたテキストマイニング手法による
熱需要を持つ産業の抽出法の検討

Extraction method of industries with heat demand by text mining using factory’s name data

○牧誠也*[1)]、大西悟[1)]、藤井実[1)]、後藤尚弘[2)]
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

廃棄物処理の分野において、一体的なシステムとしてのエネルギー回収の高度化や循環利用の促進が地球温暖化対策並びに資源効率の向上の面から検討が求められている．ただし、エネルギー・資源とも循環利用にはその需要地がどこに立地するかを把握することが必要となる．エネルギーや循環資源の需要地として有望と考えられる産業・工場での需要が把握できることが望ましいが、各業種でエネルギー量や利用可能な循環資源は異なることや工場を市町村よりも詳細に空間的に把握した統計は産業中分類程度までで、エネルギー需要や循環資源需要と必ずしも一致するとは言えない．そのため、エネルギー需要や循環資源利用を対象とし、産業における需要を指定する方法を開発することが循環型社会の形成を行うために重要である．

空間的な需要地の分布に大きな影響を受ける産業熱や化学工業などのように中分類の中でそのエネルギーや資源需要が大きく異なる産業が存在するように産業種ごとに需要特性の異なる循環資源利用の事業実装をするには、詳細な産業種特定及び空間分布を把握する必要がある．そのため、市町村よりも高い解像度で中分類よりも細かい産業・工場の情報が必要であるが、そのような統計は公開されていないため、循環利用の計画を検討する際の情報は限られている．詳細な需要の立地を分析したものとして、秋山ら[1)]や住友ら[2)]によって事業所名からその業態を把握し、都市ストックやエネルギー需要を推定した研究が存在する．循環資源や産業熱利用でも原単位データを整備すれば、同様の方法で空間的な潜在需要の推計が可能と考えられる．

本研究では、エネルギー需要の 1 種として熱を対象に、工場名鑑の名称データをもとに約 20 種の産業種の工場名称データリストを作成し、すべての工場に共通する名称を削除することで各産業種の名称リストデータの作成方法を検討した．

2. 方法

2.1 分析対象とする統計資料及び産業種

本研究ではエネルギー需要の一形態である熱需要、特に 100 度を超える蒸気を使用する産業を対象としてその抽出方法を検討するものとした．対象とする 100 度を超える熱需要をもつ産業種は富士経済による「産業施設におけるエネルギー消費の実態総調査 2017」[3)]をもとに、その他の産業と分類される産業を除く表 1 に示した 20 種を対象とした．対象とした産業のうち①~⑥、⑨~⑪、⑳は細分類もしくは複数の細分類からなり、中分類では扱いきれない産業種である．

表 1　対象とした 20 産業種[3)]から著者作成

①食料品（食材加工）	⑪医薬品
②食料品（調理品（中食））	⑫石油製品･石炭製品
③食料品（調味料）	⑬プラスチック製品
④食料品（パン･菓子）	⑭ゴム製品
⑤飲料･たばこ･飼料（清涼飲料）	⑮窯業･土石製品
⑥飲料･たばこ･飼料（酒類）	⑯鉄鋼業
⑦繊維工業	⑰非鉄金属製品
⑧パルプ･紙･紙加工品	⑱一般機械器具
⑨無機化学	⑲電子部品･デバイス･電子回路
⑩有機化学	⑳輸送用機械器具（自動車）

対象とする産業の名称データとして、日本産機新聞から発行されている全国工場名鑑[4), 5)](以下、名鑑)に記載のある工場名データを用いた．名鑑では関東圏・関西圏・東海圏を対象に工場の名称、業種、製造品目、従業員数などが記載されている．本研究では、名鑑データのうち電子化されている関東圏・関西圏のデータをもとに業種および製造品目から表 1 の各産業の工場名を分類したリストを作成、リストを元に以下の分析を実施した．

2.2 工場名のテキスト分析による対象産業の抽出

2.2.1 工場名を対象とした形態素分析

テキストマイニングには各文字を n 個の文字列ごとに分割して類似度を分析する n-gram 法[1), 2)]や意味のある語句ごとに分割し、その頻度を分析する形態素解析[6)]などの方法が存在する．

本研究では、まず用語の意味から産業種ごとの特性を分析することを目的とし、形態素解析によって頻出用語数を抽出し、その特性を分析するものとした．

2.2.2 全産業に共通するストップワードの選定

工場名をもとに各産業種の工場を分類する場合、「工場」のように、どのような産業であっても共通して頻出する単語が存在する．このような単語は分類する際の妨げとなる．そのため、分析からこのような単語を削除するストップワード処理という方法がなされる．

本研究では、各産業種のデータを結合し、各産業及び全産業における頻出単語のヒストグラムを作成・比較することで分析から除外するストップワードの選定を行った．分析には MATLAB 2020b ver.9.9 の Text Analytics Toolbox ver.1.6 を用いた．

2.2.3 各産業における頻出単語の抽出

ストップワード処理を実施し、各産業の工場名データをもとに 20 個の頻出単語のヒストグラムを作成することで、各産業の抽出に対する使用単語からの分析方法を検討した．

3. 結果・考察

3.1 全産業に共通するストップワードの選定

図 1 は全産業 11549 工場における 50 個の頻出単語を表したものである．このうち、「㈱」「工場」「本社」など赤枠で示した単語は 20 種に分類したどの産業でも頻出し、分類に使用する変数とするには相応しくない単語であるとしてストップワードとした．また、青枠で囲んだ「日本」は頻出数としては多くないが、本研究の対象地が日本国内であることから分類に影響しないものと考え、ストップワードとした．加えて緑枠の「・」はこの単語では意味をなさないので削除した．一方、紫枠である「一」「二」などの漢数字は単語では分類をする際の単語として適していないものの、特定産業の会社名などに含まれることがあるため、ストップワードによる削除を実施しないものとした．

3.2 各産業の頻出単語

表 2 はストップワード処理後に対象とした各産業の頻出単語を抽出したもののうち化学工業である⑨~⑪の頻出単語 5 位までを表したものである．( )内は工場数及び単語の頻出数である．この結果から、同一の中分類内でも医薬品のように頻出単語が異なり、名称から分離ができる可能性が確認された．しかし、その産業も「化学」が多く、名称だけから抽出するには複雑な分類モデルが必要と考えられる．

4. まとめ

本研究では、名鑑データをもとにテキストマイニングによって各産業における産業を特徴づける頻出単語を抽出し、熱需要を持つ産業を工場名から抽出する方法を検討した．その結果、各産業を特徴づける工場名の単語を抽出でき、分類モデルを開発するための教師データリストを作成することができた．

本研究の結果をもとに、n-gram 法と LSTM の結合モデルなどを用いて、工場名テキストや付随する地域等の情報から産業種の推定するモデルを開発するとともに、熱以外の循環利用にも適用できる手続きモデルの構築を行うことが必要と考えられる．

5. 謝辞

本研究は、科研費若手研究(21422079)および（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（1-2003）により実施された．ここに記し、感謝の意を表する．

6. 引用文献

1) 秋山祐樹, 柴崎亮介: GIS-理論と応用, 19(2), (2011), pp.57-67
2) 住友雄太, 古林敬, 中田俊彦: エネルギー・資源学会論文誌, 2015, 36(5), (2015), pp.1-11
3) 株式会社富士経済: 産業施設におけるエネルギー消費の実態総調査 2017
4) 日本産機新聞: 全国製造工場名鑑(関東), 2020
5) 日本産機新聞: 全国製造工場名鑑(関西), 2020
6) 森田哲夫, 入澤覚, 長塩彩夏, 野村和広, 塚田伸也, 大塚裕子, 杉田浩: (2012). 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 68(5), I_315-I_323.

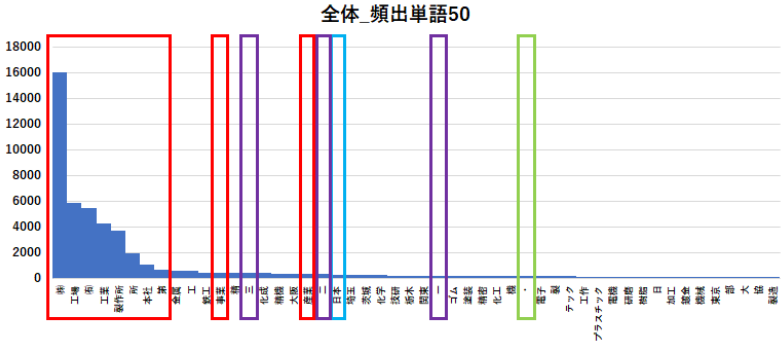


図 1　全産業における上位 50 位の頻出単語

表 2　化学工業の頻出単語

⑨無機化学 (90)	⑩有機化学 (118)	⑪医薬品 (154)
化学(16)	化学(15)	製薬(48)
大阪(9)	化成(15)	薬品(24)
鹿島(5)	鹿島(8)	化学(11)
堺(5)	ケミカル(6)	大阪(8)
茨城(4)	大阪(6)	和歌山(7)

口頭発表セッション（一般）

[2-B4] 食品（2）

座長：高橋和枝（武蔵野大学）

2022年3月3日(木) 15:00 〜 16:40 B会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-B4-01] 外食産業で食品廃棄物への対応について

*NGUYEN VANDOAI[1]、高橋 和枝[1] （1. 武蔵野大学大学院）

15:00 〜 15:20

[2-B4-02] チルド食品配送サービスのライフサイクル CO_2排出量推計

*山田 尚史[1]、加藤 博和[1] （1. 名古屋大学）

15:20 〜 15:40

[2-B4-05] 日本酒のライフサイクル影響評価

*村本 麻里花[1]、伊坪 徳宏[1]、御林 洋志[2] （1. 伊坪研究室、東京都市大学、2. 株式会社Clear）

16:20 〜 16:40

©日本LCA学会

外食産業における食品廃棄物への対応

Dealing with food waste in the food service industry

○グェンヴァンドアイ*、髙橋和枝
Nguyen Van Doai, Kazue Takahashi
武蔵野大学大学院
* t18e0002@tstu.musashino-u.ac.jp

1. はじめに

2021 年 4 月に食品リサイクル法が改正され､「食品廃棄物」の適正処理のため、関連事業者の排出事業者責任の徹底、国による継続的な周知徹底の必要性が明記された。また、業種ごとの発生抑制目標が導入され、消費者庁による自治体の食品ロス削減関連事業の実施など、食品廃棄物の削減に向けた取り組みが国内でも活発化してきている。そのような中で、外食産業でのリサイクルの取組みはまだ不十分と指摘されている。ここで､「食品廃棄物」とは、食品の製造や調理過程で生じる加工残さで、食用にすることができないものや食品の流通過程や消費段階で生じる売れ残りや食べ残しなどのことである。

外食産業では留学生や外国労働者に頼るところが多く、彼らにもリサイクルの必要性や実施方法を理解してもらうことが必要である。一方、日本の外食チェーンは、手頃な価格で様々なメニューを提供していることから、さらなる海外への展開が期待できると考えられる。海外で日本の外食サービスを提供することにより､雇用を増やすといった社会的な貢献だけではなく、高度なリサイクル技術の導入などにより、環境面でも貢献したいと考えている。

2. 研究の目的と手法

2.1 研究の目的

本研究の目的は、外食産業における廃棄物処理の現状およびその環境影響を明らかにすることである。さらに、外国人従事者にもリサイクルなどの環境負荷削減策を理解し、実行するための施策を提案し、その効果を確認する。このような取組みが企業の社会貢献し、社会からの信頼を得るだけではなく、持続可能な社会の形成に寄与すると考えている。

2.2 研究の方法

本研究では、世界・日本国内での廃棄物・廃棄物へのリサイクルを把握するための文献調査を行う他、実際に店舗におけるリサイクル状況の調査を行った。

外国人従業員の環境意識を調査するために、アンケートを実施し、分析した。

外食産業系厨芥類の発生抑制・資源化による環境負荷（温室効果ガス）削減効果を定量的に把握することを目的として LCA を用いて環境影響を評価した。インベントリデータは、現地調査の他、バックグラウンドデータとして、LCI データベース IDEA Version 2.4[1] および「味の素グループ版 CO2 排出係数データベース」[2]の他、生ごみ処理の原単位には、文献値 [3]を用いた。

3. 結果と考察

3.1 食品廃棄物の処理方法と改善策

文献調査より、対象とする廃棄物ごとに適切な処理方法が異なることが明らかとなった。表 1 に主なリサイクル方法をまとめた。

表 1 廃棄物種類別リサイクル方法

種類	性状	肥料	飼料	メタン	油脂・油脂製品	バイオエタノール	バイオディーゼル燃料	その他
茶葉	抽出粕	△	△	△	×	△	×	土壌改良材
調理くず	加工品	○	○	○	×	○	×	
調理加工品	加工品	○	○	○	×	○	×	
原材料	未加工品	△	△	△	×	△	×	
食べ残し	加工品	○	○	○	×	○	×	
廃食油	加熱油脂	×	○	×	○	×	○	工業用原料

◎適している ○利用できる △利用に工夫が必要 ×：利用が難しい

適切なリサイクルを考える際に重要なファクターは、保管、輸送、処理方法である。まず、茶葉、調理くず、調理加工品、食べ残しなどは、可食部がある一方、腐敗や劣化が時間とともに進むことから、他の廃棄物よりも取り扱い難しく、保管の時間、場所を考慮しなければならない。輸送に関しては、排出する事業所や店舗の周辺に、廃棄物を持ち込める処理業者がいるかどうかにかかっている。すなわち、周辺の処理業者を調査し、対応できる廃棄物と排出する廃棄物が合致するかどうかを確認することから始める。次に処理業者への輸送方法については、食品工場のような場合は 1 か所でまとまった量の廃棄物の発生が見込めるが、チェーン店のような場合は 1 店舗からの排出量が少ないため、店舗を巡回して収集運搬をする必要がある。その輸送方法とそれにかかる費用も課題である。処理方法については、主にコストで決定されることが多いが、今後は社会的な立場も考慮し、選択することが必要と

なるであろう。

次に実際に外食産業の担当者にヒアリングを行い、今後の課題について調査した。さらなる食品廃棄物処理を高度化には、まず廃棄の減量と分別・保管への徹底、自社便回収エリアの拡大、飼料・肥料化の高度化、リサイクルループの構築、高効率ゴミ発電など様々な施策が挙げられた。この結果、外食産業において、ビジネスの持続可能性を考える上で、食品廃棄物の問題は喫緊の課題と考えられていることがわかった。

3.2 従業員の環境意識に関する調査

都内の外食チェーン店で働く外国人従業員 249 人に対面でアンケートを行った。実施期間は、2021 年 7 月～8 月の間、都内で外国人従業員が多い店舗において実施した。

主な回答の内、来日前のゴミ分別の状況（図 2）と来日後の状況（図 3）を下記に示す。図より、来日前にゴミの分別をしていなかった従業員であっても、しっかりした指導ができれば、十分に対応できることがわかった。また店舗だけではなく、自宅においてもゴミ分別ができるようになったと答えた従業員は多く、ゴミ分別の習慣化も可能であると考えられる。

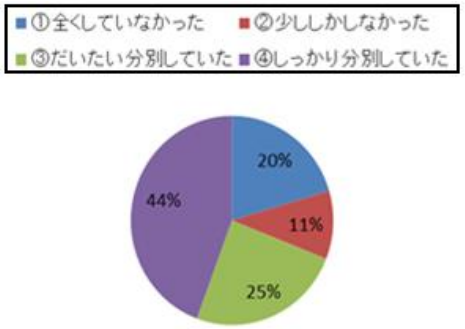


図 2 来日前のゴミ分別の状況

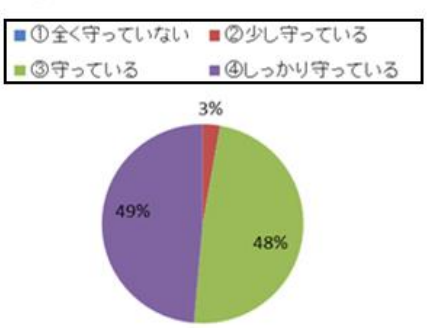


図 3 来日後のゴミ分別の状況

3.3 環境影響評価

機能単位は 1 年間に外食チェーン店で提供した食事とし、地球温暖化への影響を評価した。その結果、食材からの CO_2 排出量が多く、中でも牛肉からの CO_2 が全体の 99%を占めている。一方、生ごみの肥料化によって環境負荷低減の可能性があるが現状では 0.01%程度にとどまっていることがわかった。

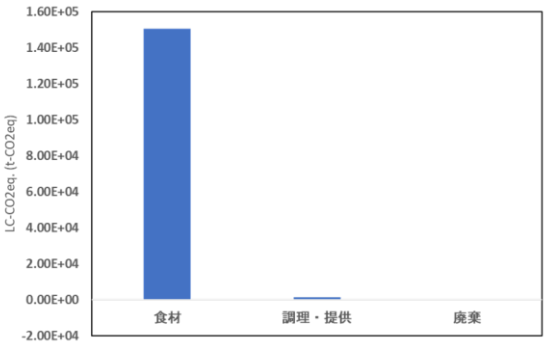


図 4 外食チェーン店のライフサイクル CO_2 排出量

さらに食品廃棄物による負荷排出量削減の方法として客への適切な発注の呼び掛けやサイズ多様化による食べ残し削減などがあり、その効果についても検討中である。

4. 最後に

現在、経済のグローバル化が進んでおり、国内での環境への取組みを日本企業が進出する先の国々にも展開できれば、現地のみならず世界中で循環社会の形成に寄与することができると考える。食品廃棄物を削減することは、将来的には、食材の自給率が低い日本にとっても重要なことになると考えている。

5. 引用文献

1) IDEA Version 2.4, 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、一般社団法人 サステナブル経営推進機構
2) 味の素株式会社、味の素グループ版 CO_2 排出係数データベース、（オンライン），〈https://www.ajinomoto.co.jp/activity/kankyo/pdf/2010/lcco2.pdf＞, (2022-01-10)
3) 食品リサイクルに関する調査、(オンライン), 〈https://www.maff.go.jp/j/budget/yosan_kansi/sikkou/tokutei_keihi/seika_h25/shokusan_ippan/pdf/h25_ippan_213_01.pdf＞, （2022-01-10）

チルド食品配送サービスのライフサイクル CO2 排出量推計

Estimation of life cycle CO2 emission from chilled food distribution service

○山田尚史*[1)]，加藤博和[2)]
Naofumi Yamada, Hirokazu Kato
1)名古屋大学大学院環境学研究科, 2)名古屋大学大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター
* nyamada@urban.env.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

日本のCO_2排出量の約2割を占める運輸部門において、地球温暖化対策計画では 2030 年度に 35%削減（2013 年比）する目標が定められている。運輸部門の中で、国内物流を担っている貨物自動車のCO_2排出量は 36.9%(2019 年度)を占めており、この部門の削減が重要である。

削減策に関する検討の際、各プロセスからどの程度排出されているか、CO_2 排出の構造を把握することが肝要である。物流部分のCO_2削減施策は化石燃料を大量に消費する輸送プロセスを対象としたものが多い。しかし配送サービス全体を見渡すと集荷から最終納品までの間にさまざまな活動が行われている。物流拠点での照明やフォークリフト等の使用による電力使用、梱包資源の使用などが端的な例である。

本研究では、物流のなかでも 5℃から 10℃の低温度帯で管理される食品であるチルド食品に着目し、ライフサイクルを考慮したCO_2(LC-CO_2)の算出を試みる。さらに、CO_2 排出要因への影響要因を関連づけ排出量変化を分析し、CO_2 排出量削減に有効な施策の検討に資する知見を得ることを目的とする。

2. チルド食品の LCI 分析

2.1 研究対象

本研究では中部地方を中心にチルド食品配送事業を展開する事業者(以下、対象事業者)からデータを取得する。取得するデータの詳細を表 1 に示す。

2.2 評価範囲の設定

本研究では1tのチルド食品を1km配送するサービスを機能単位とし、そのLC-CO_2を推計する。

チルド食品がメーカーから納品先へ配送されるまでの輸送・荷役・保管の各プロセスを担う流通活動を評価範囲と設定する。チルド食品配送サービスのシステム境界と簡略な流通フローを図1に示す。

ある期間内のCO_2排出量を輸送トンキロで除したものをチルド食品配送サービスのLC-CO_2排出量とする。対象期間は2021年9月とする。

表 1 評価対象範囲と取得データ

	評価対象範囲	取得データ
輸送	車両製造	車両台数
	燃料消費	軽油消費量
在庫	拠点建設	建設時の資材量
	電力消費	電力消費量

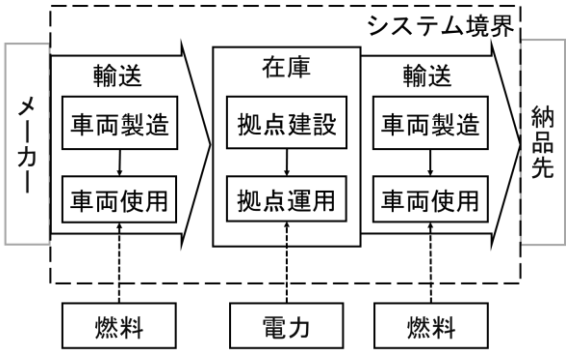


図 1 チルド食品配送サービスの流通フローの概略図とシステム境界

表 2 ライフタイムの設定(ヒアリングより)

	基礎	上部構造物
ライフタイム[年]	35	20

表 3 ライフタイムの設定(ヒアリングより)

ライフタイム[年]	8

表 4 回帰分析の結果

(走行距離)=25.8×(稼働時間)
(26.7)
():t 値、サンプル数:273、R^2=0.747

表 5 燃費の設定

	軽	3t	4t	10t
燃費[km/L]	5.2	5.1	5.8	4.7

2.3 物流拠点におけるCO_2推計方法

2.3.1 拠点建設

建設時の資材量に資材別のCO_2排出原単位[1]を乗じてCO_2排出量を積算し、ライフタイムで除し対象期間に割り当てる。

本研究では、拠点1か所のデータを入手することができたので、その建設時のCO_2排出量を推計し延床面積で除した1㎡あたりの値を作成しCO_2排出原単位として用いる。ライフタイムの設定について表2に示す。

2.3.2 電力消費

電力消費量に小売事業者別排出係数[2]を乗じて算定する。賃借している拠点については電力消費量データがないため、値を推計して補完する。エネルギー消費原単位は、対象事業者が建設した拠点における電力消費量を延床面積で除し1㎡あたりの値をエネルギー消費原単位として用いる。これに延床面積を乗じて電力消費量を算出する。排出係数は環境省が公表している令和2年度の全国平均値[2]を使用する。

2.4 輸送におけるCO_2推計方法

2.4.1 車両製造

トラックの車両製造時の排出原単位[1]に車両数を乗じライフタイムで除すことで、対象期間の排出量を割り当てる(表3)。対象事業者が管理する車両については、全事業とチルド食品配送事業の輸送トンキロの比を乗じてチルド食品配送に割り当てる。対象事業者は輸送作業の一部を外部の事業者に委託している。委託事業を担う車両については、1日あたりの排出原単位を作成し車両別の稼働日数を乗じて推計する。

2.4.2 車両走行

燃料消費量に軽油製造時[1]および使用時[3]のCO_2排出量を乗じて算定する。委託事業での燃料消費量データはなく走行距離に関するデータも大半が欠落しているため、欠落した走行距離を推計し燃費の逆数を乗じて燃料消費量を算出する。走行距離と稼働時間データを用いて、走行距離を目的変数、稼働時間を説明変数とし、切片0で単回帰分析を実施し(表4)、得られた回帰式を用いて欠落したデータを補完する。燃費データは対象事業者が管理する車両から取得したものを用いる(表5)。

2.5 LCI分析の結果と考察

対象事業者によるチルド食品配送サービスのLC-CO_2を推計し、その結果を図2に示す。

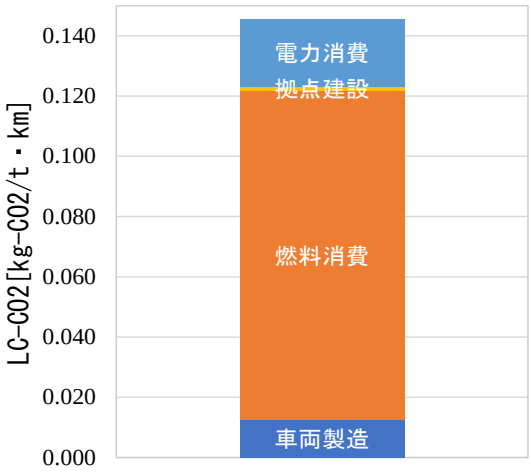


図 2 チルド食品配送サービスの LC-CO2 排出量推計結果

車両の燃料消費プロセスからのCO2排出が大部分を占める一方で、物流拠点の電力消費プロセスからの排出も無視できない。

3. おわりに

本研究では、配送事業者から取得したデータを用いてCO_2を対象にチルド食品配送サービスのLC-CO_2排出量の算定を試みた。その結果、燃料消費に起因する排出が大きい割合を占める一方で、拠点における電力消費起源分も無視できないことがわかった。

今後は、食品をメーカーからいくつかの物流拠点を経由し納品先まで配送するケースと、1 台の車両が複数の納品先へ食品を輸送するケースを想定し、配送サービスの LC-CO_2 排出量を比較・分析する。さらにその結果から、チルド食品配送サービスにおける施策検討のための考察を行う。

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(JPMEERF20201G01)により実施した。

研究の遂行にあたり、対象事業者に多大なご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

引用文献

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 産業環境管理協会 : "LCI データベース 4 version 2.3",
2) 環境省 : "電気事業者別排出係数一覧", (2021)
3) 環境省 : "算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧", 2020)

日本酒のライフサイクル影響評価

Life Cycle Assessment of Japanese rice wine

○村本麻里花*[1)]、伊坪徳宏[1)]、御林洋志[2)]
Marika Muramoto, Norihiro Itsubo, Hiroshi Mibayashi
1) 東京都市大学, 2)株式会社 Clear
* g1862066@ tcu.ac.jp

1. はじめに

農作物の栽培収穫から食品の加工生産、流通、消費、廃棄まで含めた食品システムに関連する温室効果ガス排出量は全体の 1/3 を占める[1)]。一般に、農作物を対象とした LCA 研究は穀物、畜産、酪農が中心で、嗜好品である酒類について分析した例は少なかったが、近年ワインやビールを対象にした分析が行われ、生産者や消費者の関心を高める機会になっている。農林水産省によると近年、日本酒は国内での出荷量が減少傾向にあるが、海外では日本食ブームの影響もあり、輸出額が増加傾向にある[2)]。一方で、日本酒を対象とした LCA はいまだ行われていない。

以上の背景から、本研究では日本酒の CO_2 量の算定を行い、環境側面の現状を把握するとともに、環境負荷低減策の検討を行う。得られた結果は、日本酒と同じ醸造酒であるワインやビールと比較し、原材料や製法等の特徴について考察することを目的とする。

2. 研究概要

2.1 算定方法

本研究の算定には LCA ソフト MiLCAver.2.3 を使用し、日本酒のライフサイクル CO_2 排出量を分析した。使用データは精米歩合 18%の日本酒を製造している酒蔵の方より頂いた 1 次データを使用した。また、比較対象である赤ワインとクラフトビールは論文の 2 次データを用いて算定を行った。

2.2 環境評価

図 S1 にシステム境界を示した。素材製造から廃棄・リサイクルまでとし、機能単位は日本酒 4 合瓶（720mℓ）1 本とした。なお、日本酒を製造する際に使用する機械は算定に含めなかった。精米時に発生する米粉と発酵時に発生する酒粕は配分対象とした。

ワインとビールに関しては、アルコール濃度の違いを考慮して、日本酒 1 本当たりのアルコール量で調整して比較をした。(FU : ワイン、835mℓ　ビール、1663mℓ　日本酒、720mℓ)

また、条件をそろえるため、外装と輸送の工程は除外して評価した。

3. 研究結果

3.1 カーボンフットプリント

カーボンフットプリントは 2.81kgCO_2eq と算定された。

ライフサイクル全体で見ると、「玄米製造」「包装」「外装」の工程で影響が大きいことが分かった。(図 1)

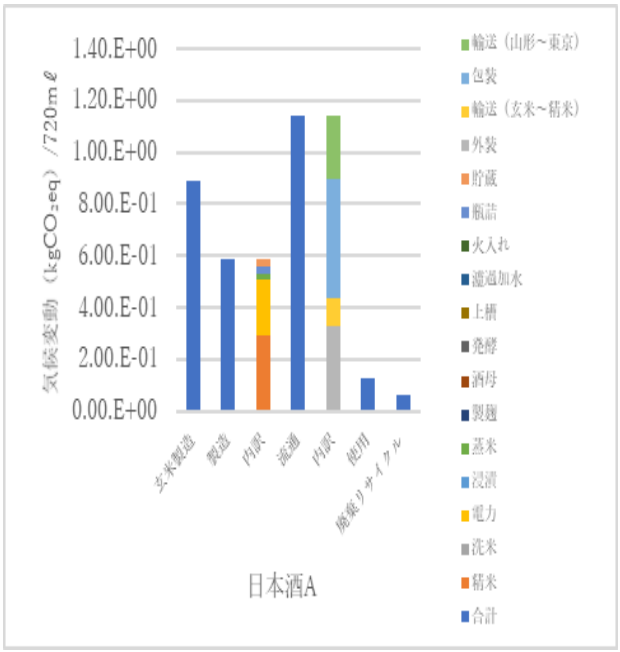


図 1　カーボンフットプリントの算定結果

「玄米製造」は稲の栽培から収穫までに発生する CH_4（生物由来）と、CO_2（化石資源由来）の排出が大きかった。「包装」についてはガラス瓶の製造(400g/4 合瓶）による影響が大きかった。「外装」はカートンや段ボール箱の製造による影響が大きかった。

3.2 ウォーターフットプリント

ウォーターフットプリントは、約 1690ℓの水を消費することが分かった。プロセスごとにみると、「玄米製造」が 8 割以上を占め、「外装」が 1 割ほど占めた。（図 2）

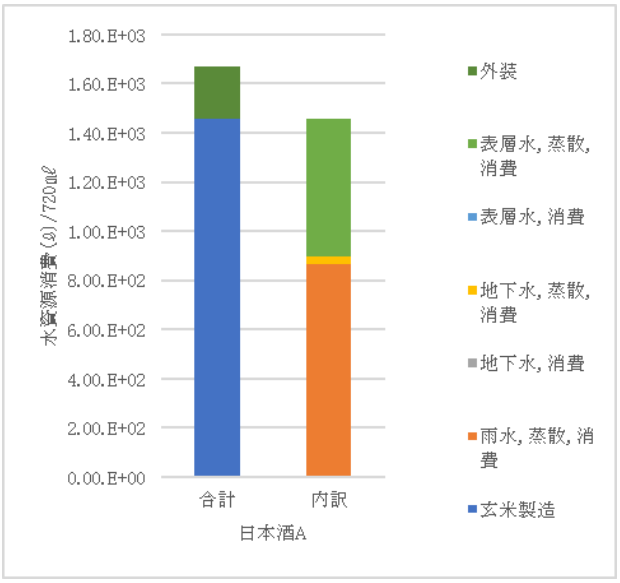


図 2　ウォーターフットプリントの算定結果

「玄米製造」以外では、「包装」「瓶詰」「洗米」の順で水の消費量が多かった。

3.3　他の酒類との比較

赤ワイン、クラフトビール、日本酒のカーボンフットプリントの比較結果を図 3 に示した。ワイン、日本酒、ビールの順で大きかった。

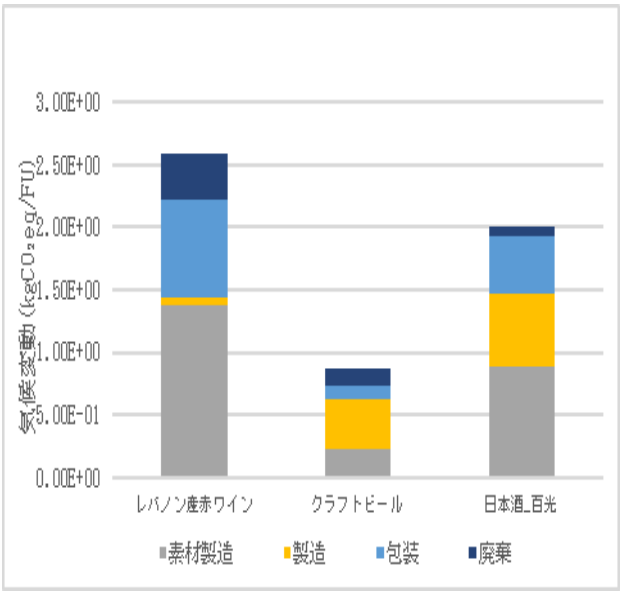


図 3　酒類別にみたカーボンフットプリントの比較

赤ワインは「素材製造」のブドウ製造の段階が最大で、ビールは製造段階での影響負荷が最も大きかった。日本酒は原材料、生産、包装のいずれも大きかった。

製造段階に関しては原料との関係性が深い。ブドウであるワインには糖化工程がなく、原料が穀物であるビールと日本酒は、糖化工程と発酵工程を行う[3)]。そのため、赤ワインの製造工程の環境負荷が最も小さくなった。そのため、赤ワインと日本酒は玄米よりもブドウの方の負荷が大きいが、ワイン製造の負荷が小さいため、総じて日本酒の方が大きくなった。

ビールと日本酒は糖化工程と発酵工程における使用電力はビールの方が大きいが、日本酒特有の精米工程における負荷が大きかった。

4.　結論

本研究では、日本酒を対象にカーボンフットプリントとウォーターフットプリントを行った。カーボンフットプリントでは、素材製造、精米、包装の負荷が大きかった。ウォーターフットプリントでは、素材製造における負荷が大半を占めた。

他の酒類との比較では、ワイン、日本酒、ビールの順に気候変動への影響が大きかった。日本酒のカーボンフットプリントの結果は、ワインやビールに比べて、らいふサイクルステージの偏りが少なかった。それだけ温室糊化ガス削減対策は多岐に分かれる。原材料生産者、日本酒生産者、流通業者、消費者が連携して環境負荷削減に取り組むことが求められる。

5.　課題と限界

本研究では、日本酒の LCA は山形県酒田市の酒造業者より得た一次データにもとづいて分析した。データの精度は高いものと認識されているが、一方で、日本酒の評価としての代表制は低い。米粉と酒粕は経済配分を採用した。配分方法によって結果が変わり得ることに注意を要する。

比較に利用したワインとビールはユーティリティに関する原単位は日本のデータを利用したが、文献値による仮想データに基づくものである。

6.　参考文献

1. 農林水産省、“気候変動と土地 : 気候変動、砂漠化、土地の劣化、持続可能な土地管理、食料安全保障及び陸域生態系における温室糊化ガスフラックスに関する IPCC 特別報告書”、2019 年 8 月 7 日
2. 農林水産省　農産局、“日本酒をめぐる状況”、農林水産省、令和 3 年 9 月
3. 小泉武夫、発酵食品学、東京都、2012、p28-p29

Supporting Information

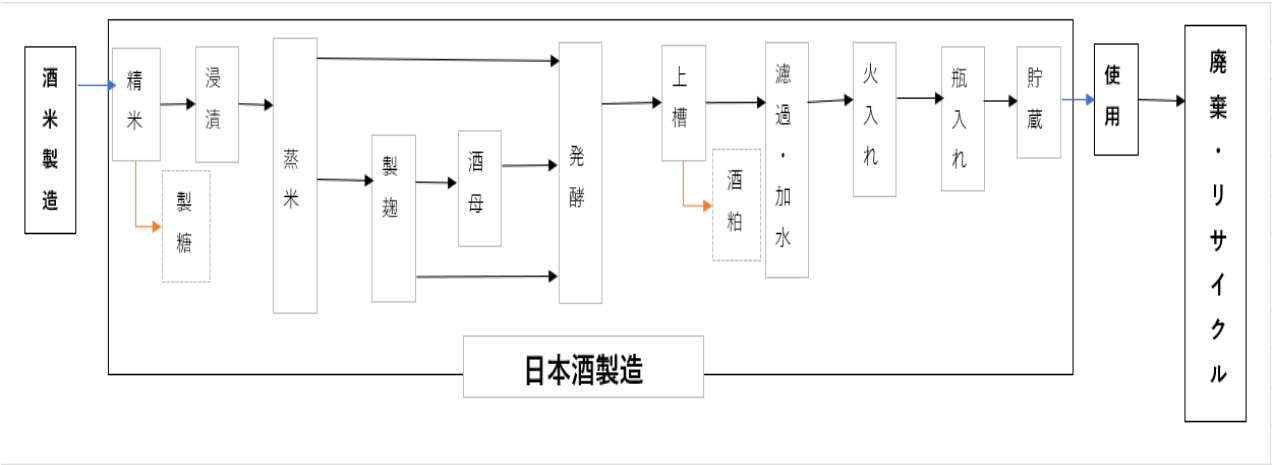


図 S1 システム境界

口頭発表セッション（一般）

[2-C4] プラスチック（2）

座長：松本亨（北九州市立大学）

2022年3月3日(木) 15:00 〜 16:40 C会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-C4-01] 産業廃棄物系プラスチックの都道府県単位での将来推計及び地域内・地域間のフロー構造の分析

*稲葉 陸太[1]、東 修[2]、岡本 大作[2]、中谷 隼[3]、根本 康男[2]、山口 直久[2]、藤山 淳史[4]、菊池 康紀[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）

15:00 〜 15:20

[2-C4-02] 行政報告データを活用した廃プラスチックフロー推計手法の検討

*范 学周[1]、叢 日超[1]、藤山 淳史[1]、松本 亨[1] （1. 北九州市立大学）

15:20 〜 15:40

[2-C4-03] Optimizing Industrial Plastic Waste Collection System Applying AI Technique

*叢 日超[1]、藤山 淳史[1]、松本 亨[1] （1. 北九州市立大学）

15:40 〜 16:00

[2-C4-04] 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とシナリオ設計

*平田 一馬[1]、中谷 隼[1]、藤田 壮[1] （1. 東京大学）

16:00 〜 16:20

[2-C4-05] 線形計画法を用いたバイオマスプラスチック導入に向けたプラスチック資源利用システム設計

*黒田 裕章[1]、天沢 逸里[1]、中谷 隼[1]、平尾 雅彦[1] （1. 東京大学）

16:20 〜 16:40

©日本LCA学会

産業廃棄物系プラスチックの都道府県単位での将来推計及び地域内・地域間のフロー構造の分析

Estimation of emission of industrial waste plastics by prefecture and analysis of their flow structure within and between regions

○稲葉陸太*[1)]、東　修[2)]、岡本大作[2)]、中谷　隼[3)]、根本康男[2)]、
山口直久[2)]、藤山淳史[4)]、菊池康紀[3)]、松本　亨[4)]
Rokuta Inaba, Osamu Higashi, Daisaku Okamoto, Jun Nakatani, Yasuo Nemoto,
Naohisa Yamaguchi, Atsushi Fujiyama, Yasunori Kikuchi and Tohru 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.go.jp

1. 背景と目的

著者らはこれまで、日本で発生する廃プラスチックの約半数を占める産業廃棄物系プラスチック（以下「産廃プラ」）の発生・処理について、都道府県内の詳細なフローや都道府県間のフローの現状を把握・推計してきた。本研究では、産廃プラの将来の発生量を予測するとともに、地域内や地域間のフローに関する構造上の特徴や傾向を比較分析し、高度な選別・リサイクルの新技術を導入する際の施設立地を含む空間配置について検討した。

2. 手法

2.1 都道府県別・業種別の排出量の将来推計

都道府県別産廃プラの発生量の将来推計にあたっては、まず、各都道府県の産業廃棄物処理実態調査[1]から都道府県別・業種別の産廃プラの排出量を抽出した。また、各種統計[2-4]から都道府県別・業種別の活動量指標のデータも抽出・整理し（2005 年度から 2018 年度まで）、欠損データは他年度の傾向等から補完した。また、デフレーター[5]を調整した上で、建設業や製造業の活動量指標の補正を行った。これと他の業種のデータを合わせて都道府県別・業種別の活動量指標を整備した。これを先の排出量から除して活動量指標当たりの排出原単位を導出した。また、過去の傾向から将来の活動量指標を推計し、これに前述の排出原単位を乗じて都道府県別･業種別の廃プラ排出量を推計した。

2.2 地域内・地域間のフロー構造の分析

各都道府県内および都道府県間の産廃プラのフローの分析にあたっては、まず、前述の各都道府県の産業廃棄物処理実態調査[1]のデータを整理し、都道府県別の 2020 年度における排出量を業種別排出量や活動量指標に基づき推計した。つぎに、資源化、減量化、最終処分率などの公表データを活用して、産廃プラの処理状況を推計した。実態調査において処理処分に係る詳細データが公表されている場合、それに基づき 2020 年度の処理フローに係る詳細な内訳を推計した。同データが公表されていない場合は、周辺の都道府県のデータを活用して推計した。さらに、実態調査で県外への搬出に係るデータが公表されている場合、環境省の広域移動データと統合（各都道府県独自の域外移動データを一次処理分、環境省の広域移動データと同データの差分を二次処理分として推計）し、各都道府県内の正味の資源化量、減量化量、最終処分量などを推計した。同データが公表されていない場合、周辺都道府県のデータを活用して、中間処理目的、最終処分目的の移動状況を推計した。以上の手順を図 2 に示す。

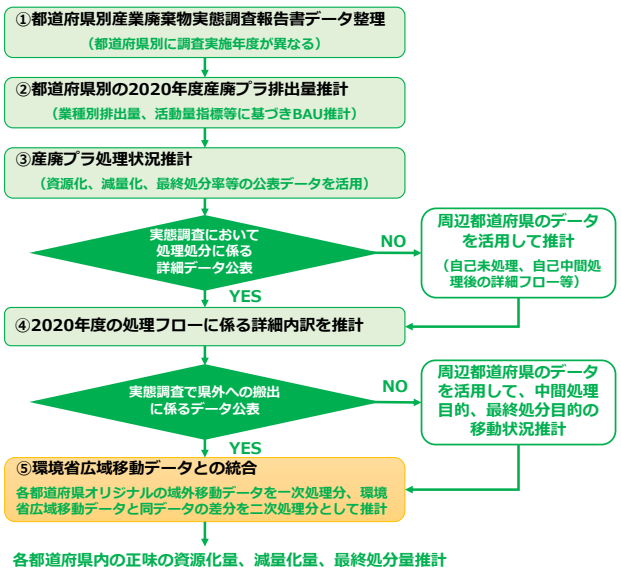


図 2　各都道府県の産廃プラフロー推計手順

3. 結果と考察

3.1 産廃プラ排出量の将来推計値

2.1 で述べた手順にもとづき、都道府県別の産廃プラ排出量を推計値し、過去 10 年間（2011 年から 2020 年まで）の平均の発生量と、将来の変化率（2020 年度

に対する 2035 年度）との関係を分析した（図 3）。その結果、平均の発生量が小さいほど将来の変化率の幅は大きい傾向がみられた。なお、全国集計値での発生量の変化率は 1.8%となった。

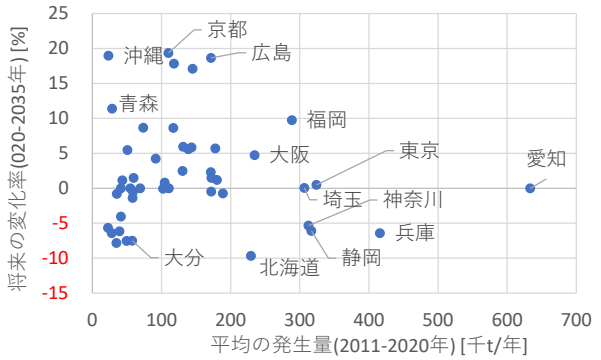


図 3　産廃プラの平均の発生量と将来の変化率

3.2 地域内・地域間の産廃プラのフロー

2020 年度の各都道府県における産廃プラの域内処理、域内外の移動のフローを推計した。その結果、各都道府県内での中間処理量と資源化量の相関は強いことが示された（図 4）。山口県や愛知県の例を除くと中間処理量が大きいほど資源化量は相対的に小さくなる傾向もみられた。

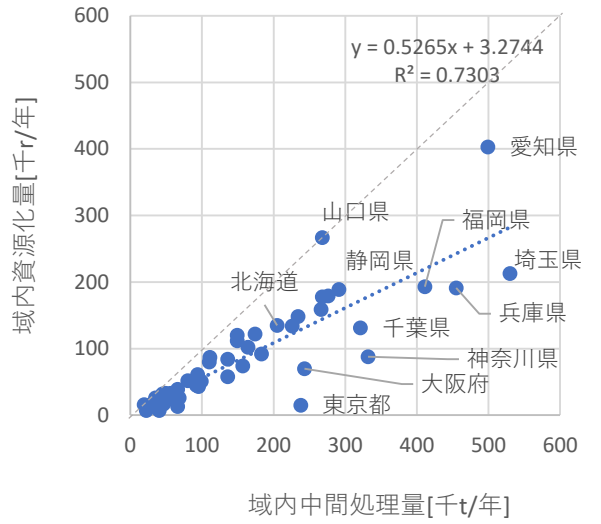


図 4　産廃プラの域内中間処理量と域内資源化量

また、各都道府県での移入率と移出率の関係をみると、ばらつきが大きい結果となった（図 5）。愛知県は平均発生量は最大（図 3 参照）であるが、移入率や移出率が小さく、図 4 の資源化量も大きいことから、県内での処理体制が強いことがうかがえる。発生量が 2 番目に大きい兵庫県は、2035 年には 10%ていどの減少が推計されるが（図 3）、愛知県と比較して移入率が大きく、移出率が小さい（図 5）ことから域内の処理能力は強いが、資源化量は相対的に小さい（図 4）状況である。東京都は中間処理量に対する再資源化量が小さく、移出率も 100%近いことから、再資源化の能力は弱いと考えられる。

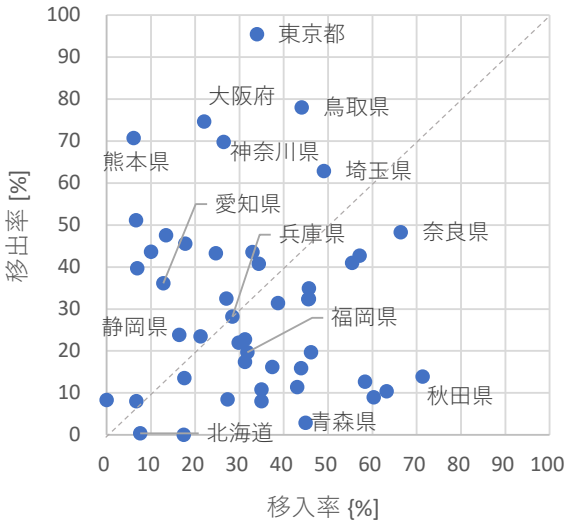


図 5　産廃プラの移入率と移出率

4. まとめ

資源化の比率が小さい地域、および移出率が大きい地域においては、域内資源化の能力の拡大を検討する余地がある。特に、産廃プラの排出量が大きい地域では、将来の減少が予測されていても、社会変化に備えて域内外での資源化の体制の確立が必要である。

域内の詳細フローや域内外の移動フローのさらなる分析や、産廃プラの樹脂種別・品質別のフローの導出、それに基づく各都道府県における新規再資源化技術の導入可能性の検討が今後の課題である。

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」の一部として実施された。

5. 引用文献

1) 各都道府県: “産業廃棄物処理実態調査”
2) 経済産業省: “工業統計”
3) 総務省統計局: “経済センサス”
4) 農林水産省: “畜産物流統計調査”
5) 国土交通省: “建設工事デフレーター”

Optimizing Industrial Plastic Waste Collection System Applying AI Technique

○叢　日超*、藤山　淳史、松本　亨
Richao Cong, Atsushi Fujiyama, Toru Matsumoto
北九州市立大学
* r-cong01@ kitakyu-u.ac.jp

1. Introduction

The total amount of plastic waste generated by Japan in 2017 was approximately 863 million tonnes, of which industrial plastic waste (IPW) accounted for 54%[1]. Understanding the collection potential of IPW in any locality is meaningful for optimizing its recycling system e.g., collection and disposal schedules, vehicle deployment, and personnel arrangements. Thus, there is a need for approaches that enable the accurate prediction of this collection potential and applying for the recycling system.

2. Methodology

2.1 Workflow

The whole workflow is described in SI Figure S1. In the first step, the daily collection demands from collection facilities will be accurately predicted by machine learning approach based on the accumulated "big data" (collection records). Then, a distance-optimized collection route will be detected by Python. Finally, the optimization effect will be evaluated from total traveling distance and CO_2 emissions.

2.2 Data preparation and future prediction on IPW collection demands

The IPW collection amounts were referred to waste manifest data obtained from a local recycling company in Fukuoka Prefecture. This data includes daily collection record on the amount of IPW collected at facility level from April 2018 to September 2020 and covers multiple sectors. Besides that, the climate data from daily weather report was also used in this study due to which may have impacts on the IPW collections. Details on data processing and future prediction by MATLAB please refer to the study[2].

2.3 The capacitated vehicle routing problem (CVRP)

To support the recycling system, 17 target facilities were selected to design a CVRP. The CVRP for an Euclidean-distance optimized collection route will be solved by Python. For that purpose, predicted collection demands on October 1, 2020 and the coordinates of these facilities were prepared previously. Based on the coordinates collected from Google maps, these facilities were mapped as points in Figure 1 by GIS software[3]. To keep the anonymity for the local companies, their locations hereinafter are only shown without references.

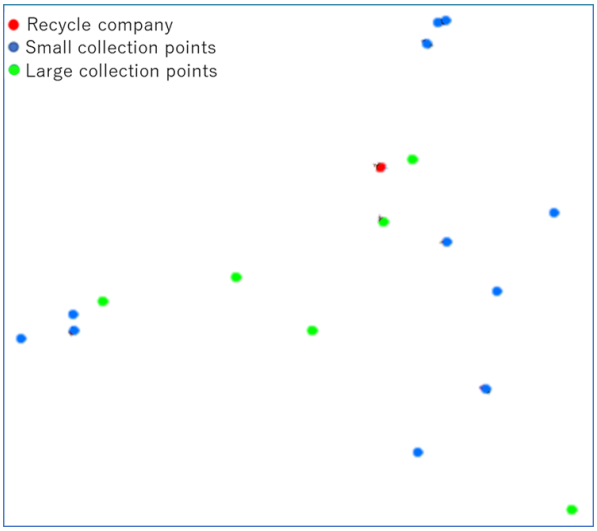


Figure1 The distributions of target facilities. Small collection points show the facilities with low collection demands and large ones show those with high collection demands.

3. Results and discussion

3.1 The predicted collection demands

As reported by the previous study[2], the prediction accuracy on daily IPW collection demand for a supermarket reached to 93.6% (seven days mean) which was reasonable to be applied in CVRP. The predicted collection demands from all 17 facilities on October 1, 2020 are shown in Figure 2.

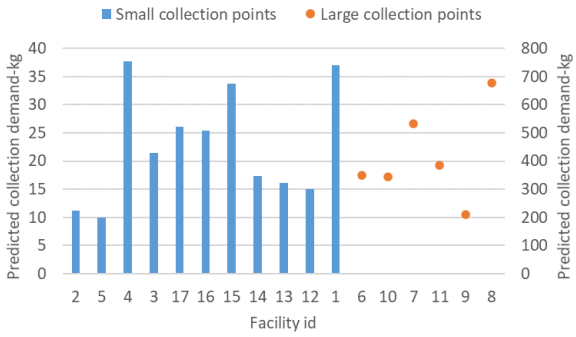


Figure 2 The predicted collection demands (kg) on October 1, 2020 from the target facilities. Large collection points refer to right y-axis.

3.2 The optimized collection routes

As shown in Figure 3, two routes were detected by Python as the optimal solution for collecting IPW from these 17 facilities. The numbers show the facility id (Figure 2). Starting point reflects the recycle company. For comparison, we assumed the real-case including the same facility groups as the optimized case (Figure 4), meanwhile, the collection targets were selected based on the k-nearest neighbor rule (similar to the use of car navigation).

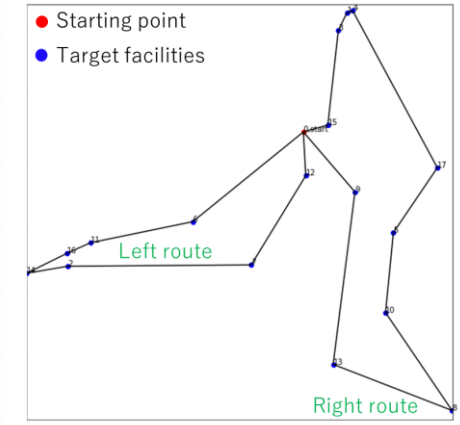


Figure 3 The distance-optimized collection routes detected by Python

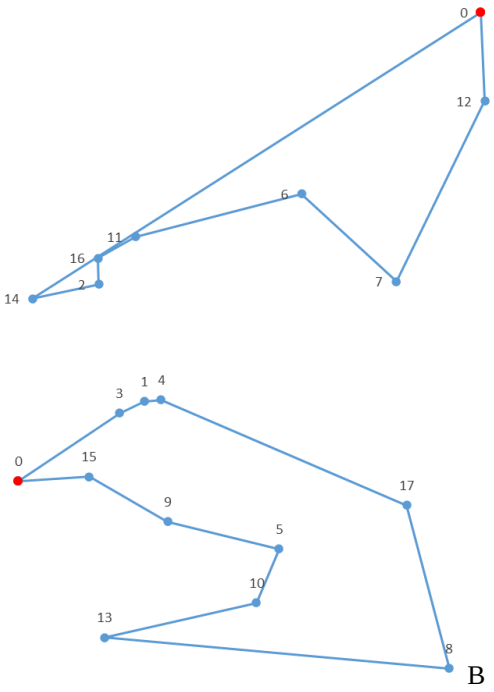


Figure 4 The collection routes before the optimization (assumed real-case): A) left route; B) right route

3.3 The evaluations on the optimization effects

The reduction effects on traveling distance and CO_2 emissions were evaluated as shown in figure 5. Compared to the real-case (total distance: 135.4 km), there was about 2.4 km traveling distance (1.8% of the totals in real case) reduced after the optimization (figure 5A). By the improved ton-kilometer method[4], the reductions of CO_2 emissions from the optimization were estimated about 1.0 kg-CO_2 per collection (figure 5B).

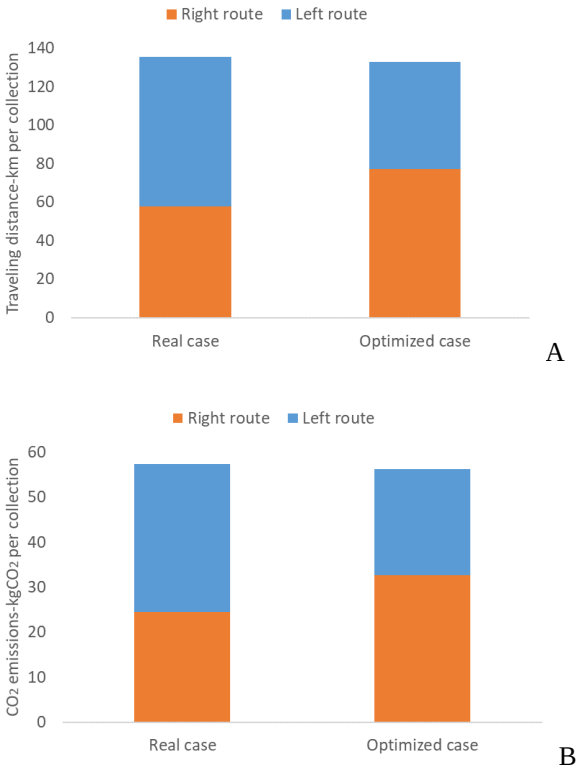


Figure 5 The comparisons between the assumed real-case and the optimized case on: A) traveling distance; B) CO_2 emissions

4. Conclusions

In this study, we proposed an approach to optimize the IPW collection system with the predicted collection demands from collection facilities by AI techniques. The benefits from the optimization per collection were checked from traveling distance (2.4 km reduction, 1.8% of the totals) and CO_2 emissions aspects (1.0 kg-CO_2 reduction). This demonstrates high potential of this method in both economic and environmental aspects. When applying this approach for social CVRPs, it will be better to use observed (real) collection routes for optimization and evaluation.

5. Acknowledgements

This study was supported by the Environment Research and Technology Development Fund (JPMEERF20193005) of the Environmental Restoration and Conservation Agency of Japan.

References

1) Plastic Waste Management Institute, The Material Flow on the Manufacture, Discarding, Recycling, Disposal of Plastic Products, http://www.pwmi.or.jp/data.php?p=panf, (accessed 2021-11-31, in Japanese)
2) Cong R., Fujiyama A. and 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. Japan. J. Human Environ. Symbiosis, 38, (2022), (in press)
3) Cong R., Gomi K., Togawa T., Hirano Y., and Oba M.: How and why did fossil fuel use change in Fukushima Prefecture before and after the Great East Japan Earthquake?. Energy Rep., 8, (2022), pp 1159-1173. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.12.046
4) Cong R., Matsumoto T., Li W., Xu H., Hayashi T. and Wang C.: Spatial simulation and LCA evaluation on the plastic waste recycling system in Tianjin. J. Mater. Cycles Waste Manag., 19(4), (2017) , pp 1423-1436. https://doi.org/10.1007/s10163-016-0538-4

Supporting Information

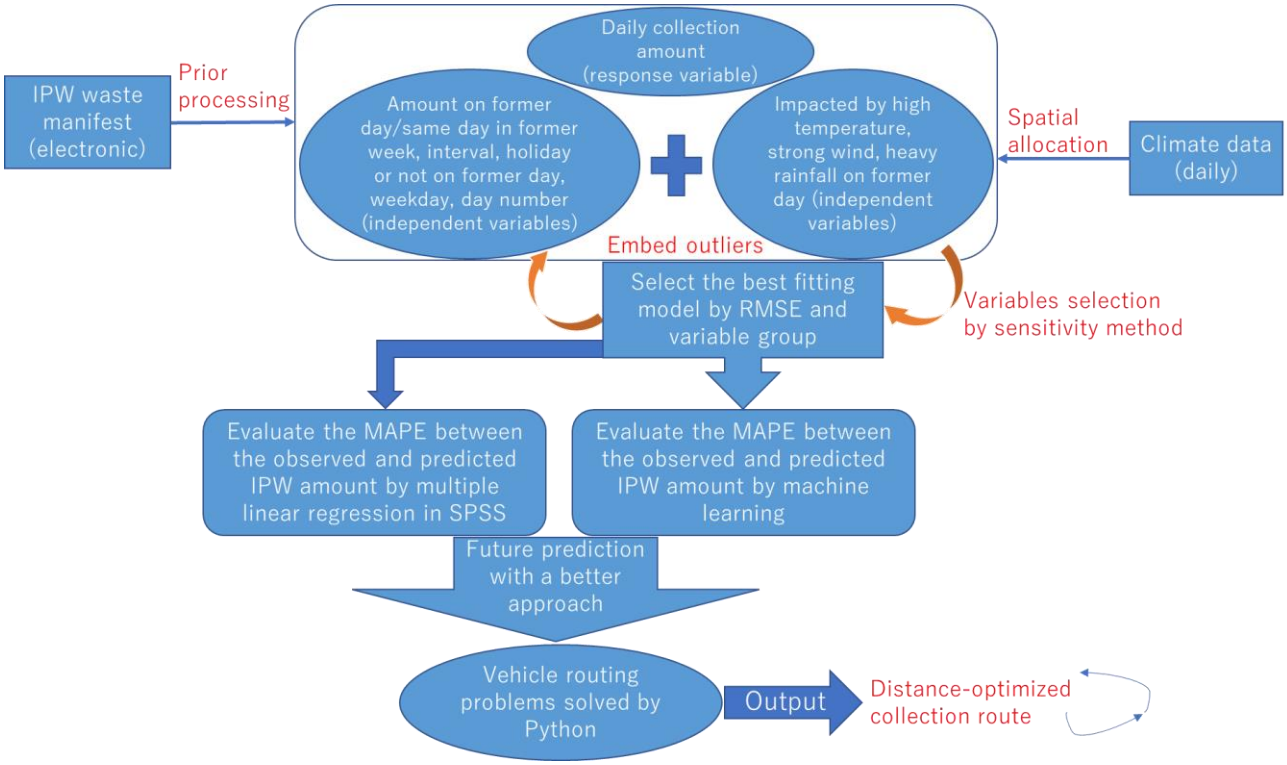


Figure S1 The workflow on the optimizing the collection system by AI techniques

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とシナリオの設計

Estimation of the potential reduction in the usage of single-use plastics and design of reduction scenarios based on material flow analysis

○平田一馬*[1)]、中谷隼[1)]、藤田壮[1)]
Kazuma Hirata, Jun Nakatani, Tsuyoshi Fujita
1) 東京大学
* hirata-kazuma0411@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

プラスチックはその利便性から様々な製品や容器包装に用いられている一方、海洋への流出や化石資源の消費等の問題が世界的に懸念されている。このような背景から日本政府は 2019 年 5 月にプラスチック資源循環戦略を策定し、3R や再生材・バイオマスプラスチックの利用に関して目標値を示している[1)]。しかし様々ある戦略の中でも、2000 年 5 月に成立した循環型社会形成推進基本法でも最も高い優先度が置かれているように、発生抑制、すなわちリサイクルや再生材の利用を推進する以上にプラスチックの利用量自体を減らすことが重要である[2)]。

リデュースに関して、2030 年までに使い捨てプラスチックを 25%削減するという目標値を定めている[1)]。一方で、すでにレジ袋の有料化や各企業による容器包装の薄肉化によってプラスチック利用量を減らす取り組みが行われている。目標値の実現可能性を議論する際には、既に行われている取り組みや、将来的に負荷なく行うことが可能な取り組みによる削減量が、使い捨てプラスチック全体に対してどの程度の影響を与えるのかを調査することが必要不可欠である。2022 年 4 月に施行されるプラスチック資源循環促進法では、数種類の使い捨てプラスチックの無償配布に変わる対応が義務化される[3)]。本研究の目的は、トップダウン的に設定されている目標値と実際に行われているボトムアップ的な取り組みを繋げ、使い捨てプラスチックの削減可能量を推計することである。その上で、25%という目標値の実現可能性について議論し、日本における現実的なプラスチックリデュースシナリオの提案を目指す。

2. 研究手法

2.1 2019 年及び 2020 年の物質フロー

Nakatani *et el.*[4)]では、産業連関表を用いてプラスチックの物質フロー分析を行っている。ここで作成された 2015 年の物質フローを、各種統計を用いて図 1 に示す手順で 2019 年及び 2020 年の物質フローに更新した。そして、2019 年と 2020 年の容器包装プラスチックの物質フローの結果からコロナ前後の変化を見た。

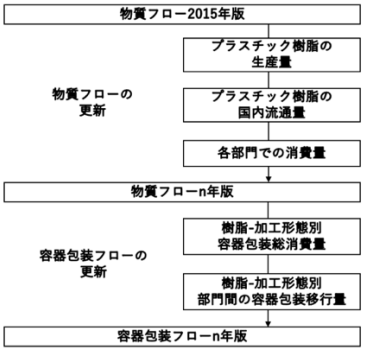


図 1 物質フローの更新方法

2.2 削減可能量の推計

使い捨てプラスチックの削減可能量を推計するために、2 つのシナリオを設定した。1 つ目が政策効果のみを反映するシナリオ（以下「シナリオ 1」とする）であり、レジ袋有料化による削減効果と 2022 年 4 月に施行予定のプラスチック資源循環促進法で定義される予定の使い捨てプラスチック製品からストローとカトラリーの削減効果を推計した[3)]。前者については、当研究室が 2016 年 2 月と 2021 年 2 月に行ったレジ袋の利用と廃棄の実態に関するオンライン調査の結果を用いた。一人当たりレジ袋取得枚数の差に 20 歳以上人口とレジ袋重量を乗じることでレジ袋有料化による削減可能量とした。

2 つ目のシナリオ（以下「シナリオ 2」とする）では、政策効果に加えて現在個々の企業が行っているプラスチック製容器包装の削減取り組みを日本全体で行った場合の削減効果を反映させた。個々の企業の取り組みについては、2020 年度の 3R 改善事例集[5)]や PET ボトルの軽量化事例[6)]を用いた。改善事例集では掲載されている 73 アイテムを包装タイプによって分類し、トップランナー方式にならって各分類の中で最も高い削減率となっているものを「負荷なく削減可能な割合」とした。その上で、包装資

材シェア事典 [7]や富士キメラ総研の資料 [8]を用いて各包装資材の需要量にこの割合を乗じ、それらを足し合わせることで、2019 年の容器包装プラスチック消費量に対する削減可能量を推計した。

3. 結果と考察

2015 年の物質フローの 2019 年、2020 年への更新の結果、プラスチック製容器包装の消費量は 2019 年が 390 万トン、2020 年が 359 万トンと推計された。樹脂-加工形態別では、2020 年は 2019 年に対し HDPE-包装用軟質プラスチックフィルムで 21%の減少となっている。レジ袋の原料は HDPE であることから、他の製品の影響を考慮しても 2020 年 7 月から始まったレジ袋の有料化による削減効果が表れていると考えられる。

次に各シナリオの使い捨てプラスチック削減量、削減率の推計であるが、本研究では削減率導出の分母となる使い捨てプラスチック量を 2019 年のプラスチック製容器包装の消費量及びストローとカトラリーの消費量の和とし計算を行った。推計結果を図２に示す。使い捨てプラスチック消費量は 393 万トン、シナリオ１による削減可能量は 19 万トン、シナリオ２による削減可能量は 45 万トンと推計された。したがって削減率を考えると、シナリオ１は 4.7%、シナリオ２は 11.4%となる。以上より、プラスチック資源循環戦略で設定されている 25%という目標値を達成することは、現状の取り組みのみの積み上げでは困難であると結論づけられる。

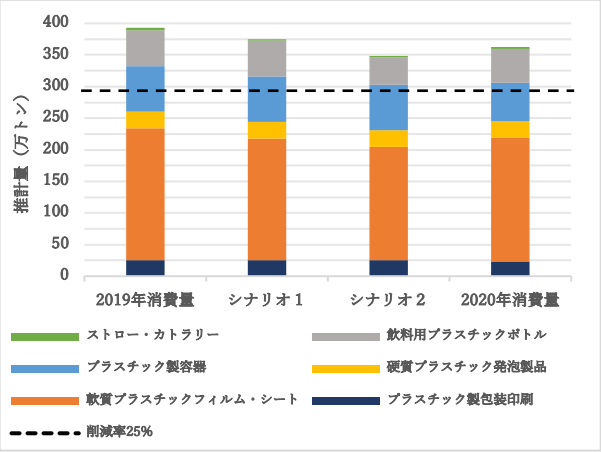


図２ 削減可能量の推計結果

削減率導出方法によって、削減率は大きく変化する。プラスチック容器包装リサイクル推進協議会が出しているプラスチック製容器包装のリデュース率は式１で導出され、2020 年度の実績は 19.2%である [9]。これは会員団体・企業のデータより計算されるため日本全体で考えた本研究とは大きく異なるが、プラスチック資源循環戦略において削減率の計算方法を明確にする必要があると言える。

$$\text{n 年度のリデュース率} = \frac{A}{B} \quad \cdots \text{（式１）}$$

A：2005 年度から n 年度までの累計リデュース率
B：A＋n 年度のプラスチック製容器包装使用量

最後に、使い捨てプラスチック削減は無理なく可能な取り組みでは不十分であり、本研究の今後の展開として野心的な取り組みを考える必要がある。リフィルによって容器包装を不要にすることや、容器包装をプラスチック以外の素材にすることが挙げられるが、削減可能量を推計するのみではなく、LCA 的な観点から環境負荷の差も見る必要がある。

4. 引用文献

1) 消費者庁ほか：”プラスチック資源循環戦略”,（2019）
2) 環境省：”循環型社会形成推進基本法の概要”,入手先 <https://www.env.go.jp/recycle/circul/kihonho/gaiyo.html>,（参照 2022-1-6）
3) プラスチック資源循環小委員会：”プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律施行令案”,入手先 <http://www.env.go.jp/council/03recycle/211122_SS3_1.pdf>,（参照 2022-1-6）
4) Nakatani, J., Maruyama, T., & Moriguchi, Y.: Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(33), (2020), pp.19844-19853
5) プラスチック容器包装リサイクル推進協議会：”プラスチック容器包装３R 改善事例集 2020 年”,（2020）
6) PET ボトルリサイクル推進協議会：”PET ボトルリサイクル年次報告書 2021”,（2021）
7) 日本経済綜合研究センター包装資材チーム,”包装資材シェア事典 2020 年版”,日本経済綜合研究センター,東京, (2021)
8) 富士キメラ総研第一部,”2021 年パッケージングマテリアルの現状と将来展望”,富士キメラ総研,東京, (2021)
9) プラスチック容器包装リサイクル推進協議会：”自主行動計画 2020”,入手先 <https://www.pprc.gr.jp/activity/voluntary-action-plan/images/pprc-vap-2020.pdf>,（参照 2022-1-6）

線形計画法を用いたバイオマスプラスチック導入に向けたプラスチック資源利用システム設計

Linear Programming Approach to Design Plastic Utilization System for Introduction of Biomass-based Plastics

○黒田裕章*[1)]、天沢逸里[1)]、中谷隼[1)]、平尾雅彦[1)]
Hiroaki Kuroda, Eri Amasawa, Jun Nakatani, Masahiko Hirao
1) 東京大学
* h-kuroda@pse.t.u-tokyo.ac.jp

1 緒言

近年、バイオマスプラスチックや生分解性プラスチックの導入に関心が高まっており[1)]、様々な種類のバイオマスプラスチックが開発され、様々な製品への展開が検討されている。しかし、これらをどのように使用・リサイクルすればプラスチックシステム全体の環境負荷の低減につながるかは明らかになっていない。

既往研究では、特定のバイオマスプラスチックに注目したLCA[2)]や、温室効果ガス(GHG) 排出量削減に向けたリサイクル方法の設計[3)]が行われている。しかし、プラスチックシステム全体の環境影響を評価するためには、**図1**に示すようなライフサイクル全体からの議論が必要となる。バイオマスプラスチックの材料特性と製品用途、リサイクル方法の適合性を踏まえた上で、プラスチック利用システム全体を設計する必要がある(**図S1**)。例えば、PHAやPHBHはPEやPPと機械的特性が似ているが、強度や生分解性から農業用ハウスや漁具の製造には不向きであるという特性に注意が必要である。

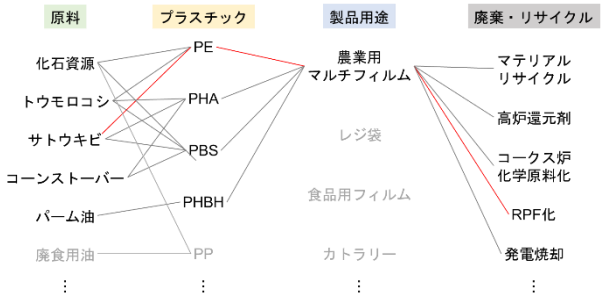


図1 農業用マルチフィルムのライフサイクル例（赤線はGHG排出量が最小となるフローを表す）

本研究はGHG排出量の最小化を行うことでバイオマスプラスチック利用システム設計を行うことを目的としている。材料特性、製品用途、リサイクル方法のマッチングを制約条件とし、線形計画法によってGHG排出量の最小化を行うことで、バイオマスプラスチックの効果的な利用、リサイクル方法について検討した。

2 対象プラスチック、製品用途、リサイクル方法

9種類の化石資源由来プラスチックと12種類のバイオマスプラスチックプラスチックを対象とした(**表S1**)。

製品用途は、日本国内での利用が特定できた、容器包装・コンテナ類、機械・電子機器、家庭用品、建材、輸送、農林水産、その他の計40種類、781万トン/年(廃棄量ベース)を対象とした(**表S2**)。

リサイクル方法はマテリアルリサイクル(MR)、ケミカルリサイクル(CR; 高炉還元剤製造、コークス炉化学原料化、油化、ガス化)、サーマルリカバリー(TR; RPF、セメント原燃料化、発電焼却)を対象とした。

3 プラスチック利用モデル

プラスチック利用システムモデルを構築し、材料特性、製品用途、リサイクル方法のマッチングを制約条件として、線形計画法によってGHG排出量の最小化を行った(**式1**)。モデルはGHG排出量(GHG_{total})の最小化を目的関数とし、素材、製品用途、リサイクル方法ごとの年間プラスチック廃棄量($W_{type,app,EoL}$)を変数とする。材料特性、製品用途、リサイクル方法のマッチングと製品需要(M_{app})の充足を制約条件として構成される。なお、材料特性と製品用途のマッチングは電子商取引サイトや特許情報を調査した。リサイクル適合性はリサイクル事業者の受入可能プラスチック種類を調査した。

製造時のGHG排出量($E_{\mathrm{production}_{type}}$)は文献[1),5)]などから引用し、リサイクル時のGHG排出量($E_{\mathrm{recycle}_{EoL}}$)は文献[4)]を参考に発熱量や還元力から推算することで、ライフサイクルGHG排出量($E_{type,EoL}=E_{\mathrm{production}_{type}}+E_{\mathrm{recycle}_{EoL}}$)を求めた。

以上をモデルに入力することで、GHG排出量が最小となる材料、製品用途、リサイクル方法のライフサイクルパターンが出力される。入力値や制約条件を変更することでシナリオ分析を実施し、バイオマスプラスチックの効果的な利用法とリサイクル方法について検討した。

$$\text{Min.}\quad GHG_{\mathrm{total}}\left(W_{type,app,EoL}\right)=\sum_{type}^{all}\sum_{app}^{all}\sum_{EoL}^{all}W_{type,app,EoL}E_{type,EoL} \qquad \text{(式1)}$$

$$\text{s.t.}\quad \text{matching of producibility and recyclability}$$

$$\sum_{type}^{all}\sum_{EoL}^{all}W_{type,app,EoL}=M_{app}$$

4　評価シナリオ

表 1 に示すシナリオを評価した。2019 年度の実績値をベースケースとし、すべての製品が単一素材で製造できると仮定したシナリオ(シナリオ 1-1) 、機械・電子機器、自動車は複合素材で製造するとしたシナリオ(シナリオ 1-2) 、(**式 2**)の制約条件でリサイクル処理能力(R_{EoL}) を考慮したシナリオ(シナリオ 2) を評価した。

$$\sum_{type}^{all}\sum_{app}^{all} W_{type,app,EoL} \leq R_{EoL} \qquad (式\ 2)$$

表 1 評価シナリオ

	ベースケース	シナリオ1-1	シナリオ1-2	シナリオ2
リサイクル率（TR含む）	85%（2019年実績）	100%	100%	100%
単一/複合素材	複合素材	単一素材	機械・電子機器、自動車は複合素材	機械・電子機器、自動車は複合素材
リサイクル処理能力	2019年実績値	制限なし	制限なし	2020年調査値

5　シナリオ分析結果

5.1　プラスチックフロー

図 S2, S3 にシナリオ 1-2, 2 の分析結果のプラスチックフローを示す。縦軸が年間プラスチック排出量を、横軸は左から、選択されたプラスチックの種類、製品用途、リサイクル方法を表す。各項目を結ぶ線の色はリサイクル方法に対応している。

結果はいずれも、PS や PVC, ABS などはバイオマスプラスチックで代替することが難しく化石資源由来のものが使用され続けるが、PE や PP は Bio-PE や Bio-PP、PHA などに代替することで GHG 排出量が削減できることがわかった。Bio-PE や Bio-PP は既存の PE と PP を代替可能であること、PHA は製造時の GHG 排出量が小さいことから多く選択されたと考えられる。

リサイクル処理能力の制約が無い場合(**図 S2**) 、Bio-PE や Bio-PP を高炉還元剤製造(コークス代替) でリサイクルするフローが多く選択される。これは、石炭を代替することによる GHG 排出量削減効果が大きいためである。一方、リサイクル処理能力の制約を追加すると(**図 S3**) 、Bio-PE や Bio-PP の大半は発電焼却が選択され、PVC や ABS は MR が選択される。これは、CR の処理能力が低いことから発熱量の大きい Bio-PE や Bio-PP は TR が選択される一方、製造時の GHG 排出量が大きい PVC や ABS を優先的に MR するよう、線形計画法による最適化が働くためである。

5.2　GHG 排出量の最小値

図 4 に最小化された GHG 排出量を示す。2019 年度の実績では約 3000 万 t-CO_2eq/年であり、これはすべてのプラスチックを単純焼却するよりも約 1200 万 t-CO_2eq/年削減できているものの、GHG 排出量ネットゼロには及ばない。一方、GHG 排出量を最小化したシナリオでは、約−1500～−250 万 t-CO_2eq/年となり、GHG 排出量ネットゼロ、さらにはネットネガティブを達成できる可能性があることが示された。しかし、リサイクルの処理能力を制約条件として追加する前後 (シナリオ 1-2, 2) を比較すると約 700 万 t-CO_2eq/年増加しており、材料特性、製品用途、リサイクル方法の適切なマッチングと、材料ごとに適したリサイクル処理能力の拡充が必要であると考えられる。

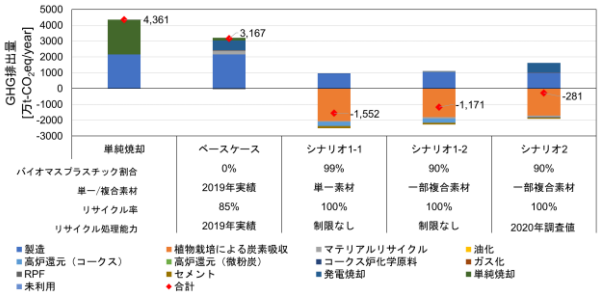


図 4　各シナリオの GHG 排出量

6　考察、まとめ

バイオマスプラスチックを導入することで、材料特性、製品用途、リサイクル方法のマッチングを満たしながら GHG 排出量を大幅に削減できる可能性があることが示された。

プラスチック利用システムの定性的・定量的な設計例として、容器包装が挙げられる。現在は容器包装リサイクル法によって回収されたプラスチックのうち、PE や PP を中心に MR している。しかし、シナリオ分析結果が示すように、製造時の GHG 排出量が大きいプラスチックを MR することが GHG 排出量削減のためには必要である。

ただし、結果には不確実性が存在する。一点目は、GHG 排出量が各種文献値と推算によって求められていることである。二点目は、線形計画法を用いているため GHG 排出量がわずかにでも変化すると選択されるプラスチック、リサイクル方法が変化することである。これらの不確実性を踏まえた上で、プラスチック利用システム設計につなげることが重要である。

参考文献

1) 環境省: “バイオプラスチック導入ロードマップ”, (2021)
2) Amasawa E, et al.: Environ. Sci. Technol, 55 (5), (2021), pp3380-3388
3) Meys R, et al.: Science, 374 (6563), (2021), pp 71-76
4) 海洋プラスチック問題対応協議会: “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)
5) Christian M, et al.: Resour. Conserv. Recycle, 157, (2020), 104750

Supporting Information

表 S1　評価対象プラスチック一覧

	プラスチックの略称	プラスチックの名称
化石資源由来	PE	ポリエチレン
	PP	ポリプロピレン
	PS	ポリスチレン
	PET	ポリエチレンテレフタレート
	PVC	ポリ塩化ビニル
	PA	ポリアミド
	PUR	ポリウレタン
	ABS	アクリロニトリル 、ブタジエン 、スチレン 共重合合成樹脂
	PBAT	ポリブチレンアジペートテレフタレート
バイオマス由来	Bio-PE	バイオマス由来ポリエチレン
	Bio-PP	バイオマス由来ポリプロピレン
	Bio-PET	バイオマス由来ポリエチレンテレフタレート
	Bio-PUR	バイオマス由来ポリウレタン
	Bio-PA	バイオマス由来ポリアミド
	Bio-PBS	バイオマス由来ポリブチレンサクシネート
	Cellulose	セルロース系繊維、酢酸セルロースなど
	PLA	ポリ乳酸
	PTT	ポリトリメチレンテレフタレート
	PHA	ポリヒドロキシアルカン酸
	PHBH	Poly(3-hydroxybutyrate-*co*-3-hydroxyhexanoate)
	Starch	スターチベースドポリマー

表 S2　製品用途ごとの年間プラスチック排出量 S1)と素材・製品用途マッチング

		包装・容器/コンテナ類											機械・電子機器							家庭用品									建材							輸送	農林水産			その他			加工ロス
		指定PETボトル	その他ボトル	食品用フィルム	非食品用フィルム	食品容器（非発泡）	食品容器（発泡）	レジ袋	ショッピングバッグ	ごみ袋	ラミネート紙	コンテナ・パレット	冷蔵庫	洗濯機	エアコン	テレビ	電線被覆材	機械	その他	おむつ	使い捨て飲料カップ	ストロー	カトラリー	タバコフィルター	不織布	家具	その他	パイプ・継手	排水桝・雨樋・窓枠	壁紙	床材	土木建築塗布用途	シーリング材	その他	自動車	農業用マルチフィルム	農業用ハウス	漁具	マイクロビーズ	塗料	接着剤	評価対象外
年間排出量	[万t/年]	59	27	80	16	91	13	22	15	29	25	38	18	9	8	1	19	17	108	30	5	1	1	2	10	3	12	22	4	3	4	4	2	23	32	4	5	2	2	12	5	122
	PE		13			3		22	15	29	25	10					9			4	1							4						6	3	4	2	0	0			
	PP		2	49		59						23	4	7	2	0				11	1	1			5										13							
	PET	59	11	22	15														26		2				4																	
	PS					30	13					4	5	1	3	1		9	11	3	0		1										1				0				
	PVC		0	5									1	1	1	0	10											19	4	3	4			2	2		3					
	ABS												3	0	1	0		4	4															2	3							
	PA			5	1														4															3				0			
	PUR												4					2	2						3							4	2	3	3				0	12	5	
	その他											2	1	1	2	0		3		12				2										4	3	0	1	2	2			
	不明																		61							12								5	1							
素材・用途マッチング	Bio-PUR												○					○	○						○							○	○	○	○				○	○	○	
	CA			○	○	○		○														○	○	○	○										○				○	○	○	
	Bio-PP		○	○		○						○	○	○	○	○				○	○	○			○										○							
	Bio-PET	○	○	○	○														○		○				○																	
	Starch			○	○	○		○		○										○	○	○	○		○										○	○				○		
	Bio-PE		○			○		○	○	○	○	○					○			○	○							○					○		○	○	○	○				
	PLA		○	○	○	○	○	○	○	○									○	○	○	○	○	○	○			○		○					○	○		○	○			
	PTT																								○	○									○							
	PBS		○	○	○			○		○											○	○	○		○										○	○						
	Bio-PA			○	○														○																○				○			
	PBAT		○	○	○			○		○												○	○												○							
	PHA		○	○	○	○		○	○	○										○		○	○		○	○		○		○					○	○			○	○	○	
	PHBH		○	○	○	○		○		○												○	○		○											○						

S1) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社: “平成 31 年度バイオプラスチック導入に 向けた調査及びロードマップ作成に係る 委託業務 報告書”, (2020)

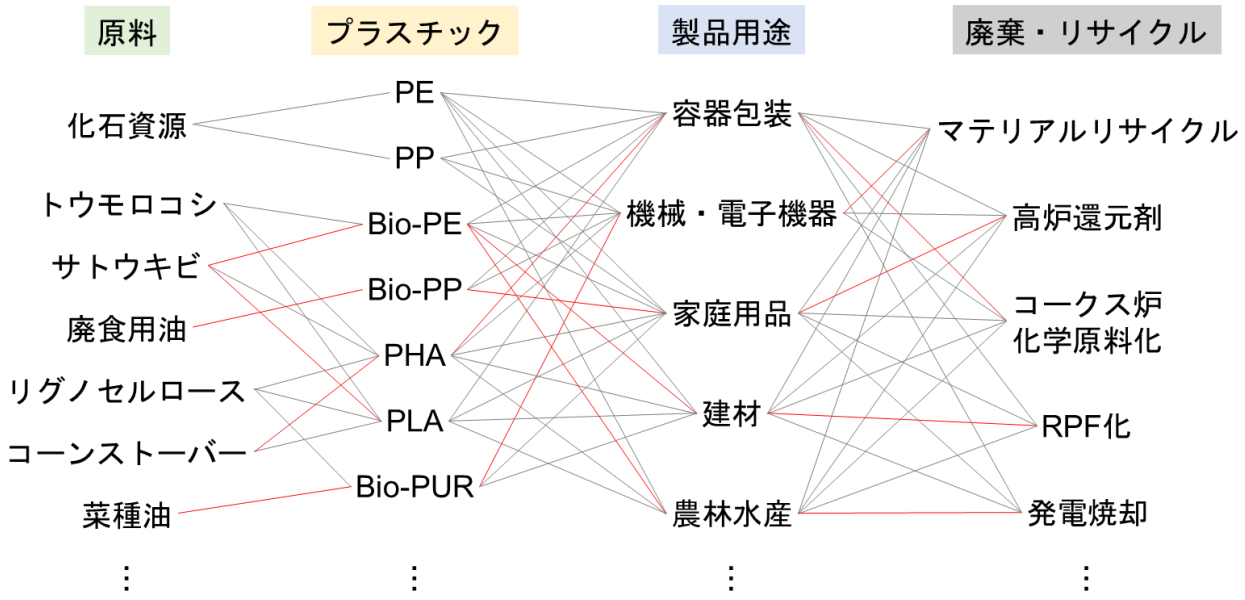


図 S1　プラスチック利用システム全体のライフサイクルフロー

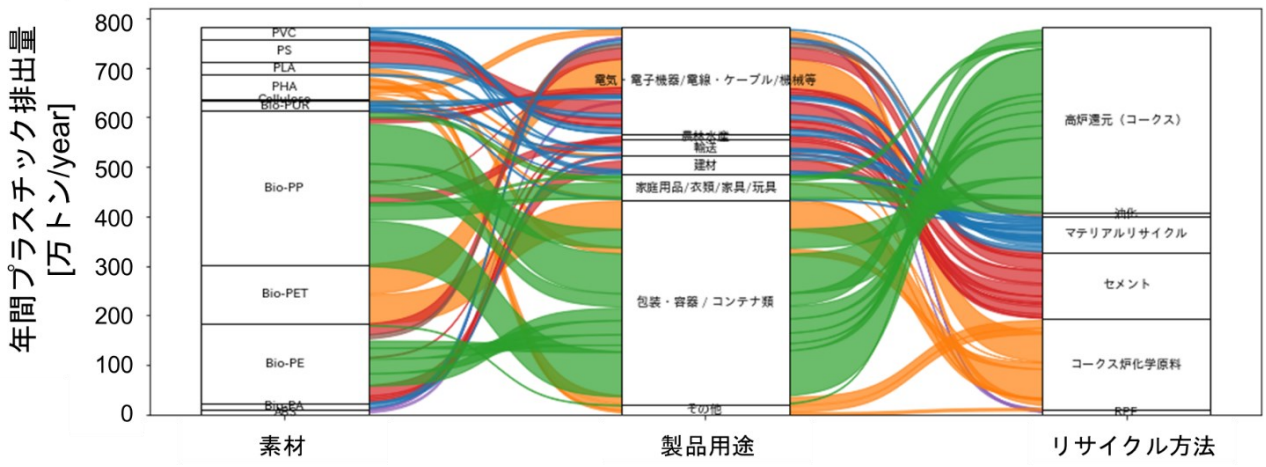


図 S2　GHG 排出量が最小化されたプラスチックフロー(シナリオ 1-2)

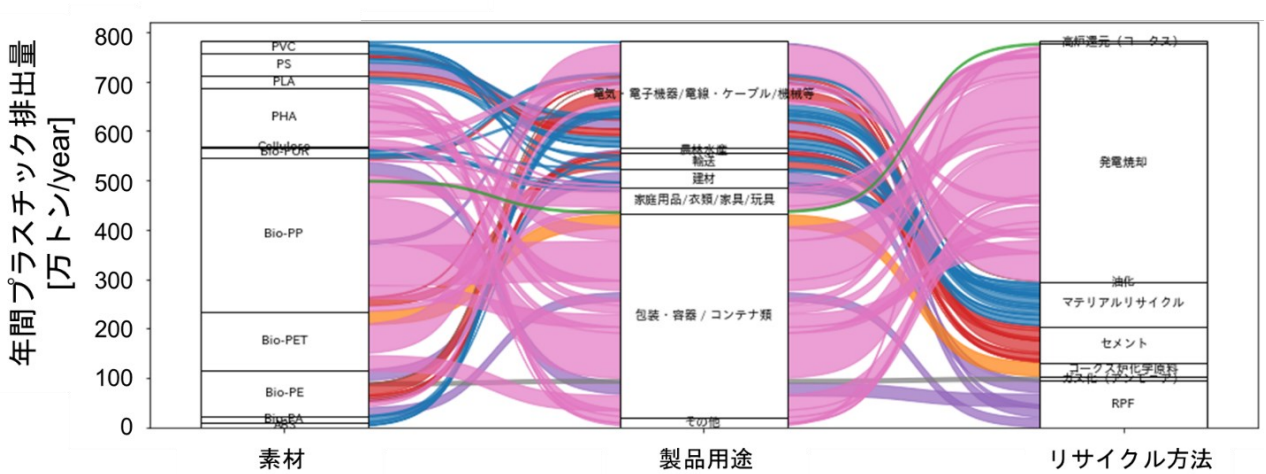


図 S3　GHG 排出量が最小化されたプラスチックフロー(シナリオ 2)

口頭発表セッション（一般）

[2-D4] 再エネ・ネガティブエミッション

座長：所千晴（早稲田大学）

2022年3月3日(木) 15:00 〜 16:40 D会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-D4-01] 洋上風力発電における EVを用いた蓄電池の導入に関する研究

Research on the introduction of storage batteries using electric vehicles in offshore wind power generation

*山瀬 雄太[1]、磐田 朋子[1] （1. 芝浦工業大学）

15:00 〜 15:20

[2-D4-02] 洋上風力発電事業に影響を与える外部要因の定量的評価に関する研究

*高石 涼平[1]、磐田 朋子[1] （1. 芝浦工業大学）

15:20 〜 15:40

[2-D4-03] 廃太陽光パネルの資源循環に着目したライフサイクル評価

兵法 彩[1]、諏訪 出[1]、竇 毅[1]、所 千晴[2,1]、*菊池 康紀[1] （1. 東京大学、2. 早稲田大学）

15:40 〜 16:00

[2-D4-04] 蓄電システム導入による産業都市への再生可能エネルギー最大化の検討

*松崎 耀[1]、藤山 淳史[2]、松本 亨[3] （1. 北九州市立大学大学院、2. 北九州市立大学、3. 北九州市立大学）

16:00 〜 16:20

[2-D4-05] 直接空気回収技術（ DAC）のライフサイクル評価

*鈴木 隼斗[1]、森本 慎一郎[2]、伊坪 徳宏[1] （1. 東京都市大学、2. 産業技術総合研究所）

16:20 〜 16:40

©日本LCA学会

洋上風力発電における EV を用いた蓄電池の導入に関する研究

Research on the introduction of storage batteries using electric vehicles in offshore wind power generation

〇山瀬雄太*、磐田朋子
Yuta Yamase, Iwata Tomoko
芝浦工業大学
* br18110@shibaura-it.ac.jp

1. 緒言

2015 年に行われたパリ協定では脱炭素化、日本のエネルギー自給率を高めていきたいという方針が定められた。日本のエネルギー自給率は上昇傾向ではあるものの、2018 年のデータでは 11.8%であり、海外に依存しているといえる。そのため、エネルギーの自国生産、再生可能エネルギーの促進が重要になってくる。私は、その中でも導入ポテンシャル量の多い風力発電に着目した。風力発電は日本の発電電力量割合で 2019 年のデータでわずか 0.8%である。2030 年度に向けた政策目標でも 1.7%となっており、発電種別の割合は少なめである。しかし、REPOS(環境省の再生可能エネルギー情報提供システム)が提示している経済性を考慮した導入ポテンシャル値は洋上風力発電で、最低シナリオでも 1 年あたり 6168 億 kWh と膨大であることが分かる。しかしながら、この REPOS から出された数値は変電所や送電線等の電気系統の空き容量を考慮しておらず、現実的な数値とはいえない。

また、出力制御のルールというものが存在する。そのため、発電所側は出力をコントロールする必要があり、一部が有効に使われずに捨てられてしまう。その課題を解決するのが蓄電池を設置するということである。

これにより、系統容量の上限を超える場合でも電気を捨てずに貯めておくことができ、再生可能エネルギーとして発電した電気の使用量を増やすことができる。

しかしながら、風力発電機に蓄電池を併設すると高額になってしまうことがわかっている。千住他[1)]は発電電力の平準化、制御器パラメータの最適化と、設備コストが最小となるような蓄電池容量、インバータ容量をシミュレーションにより算出した。その結果の一つとして、定格出力 1[MW]の風力発電機で蓄電池容量は 231[kWh]、設備費用は約 1.18 億円(NaS 電池 700$/kWh、1500$/kW)である。この併設型の蓄電池を大規模に導入することを考えると、設備費が膨大になってしまい、事業者側は蓄電池を用いるメリットがない。そこで私は駐車している EV(電気自動車)を蓄電池として代替することができないかと考えた。毛利他[2)]は自動車の走行及び駐車特性に関する分析で全国の時間帯別駐車、運休台数のシェアを算出した。そこから駐車している車両が一番少ない時間帯でも 83%あることから、これらを活用できる可能性があるのではないかと考えた。ここで、街中に点在する EV に電気を送るために送電網が必要となる。それは既存の使われていない(容量が開いている)ケーブルを使うものとする。送電網をマイクログリッドとし、既存の電線を所有している電力会社から借りる必要があるが、その費用(託送料金)はかかる。

洋上風力発電の蓄電池を街中の点在する EV で代替した事例がない。そのため、本研究では洋上風力発電において、従来の蓄電池を風力発電機に併設するシナリオと新たに提案する蓄電池を EV で代替し、マイクログリッドを使うシナリオのそれぞれにかかる費用を比較する。その上で併設型の蓄電池の費用より既存の電力網の使用料金の方が安くなる発電規模を明らかにすることを本研究の目的とする。

本研究のシナリオでは洋上風力発電を大規模に導入することを前提に置いているため、既存の電力網の下流に電気を流し込み、逆潮流が発生し、下流の電圧が上がってしまい、停電が起きてしまう可能性がある。その課題を解決するために、マイクログリッドに電圧制御器を入れる必要がある。早稲田大学の林研究室[3)]では電圧制御器である LRT、SVR、SVC 蓄電池等の制御ロジックの開発や、リアルタイムで得られる電圧等の計測情報から電圧を高度に管理する手法の開発と評価を行っているため、研究段階ではあるが、システム安定化のための技術として利用する見込みである。

2. 研究手法

2.1 対象地域の設定

目的達成の手段としてのケーススタディとして、実際の地域を選定する必要がある。まず初めに洋上風力発電のため、立地可能であり、海と面している都道府県を選定した。系統の空き容量がないと、新たに発電をすることは難しいため、系統の空き容量があり、かつ平均風速がある程度高い地域である必要がある。そこから全国の系統の空き容量を調査し、平均風速は REPOS の導入ポテンシャルマップを用い、両者を照ら

し合わせながら選定した。選定の結果、宮城県仙台市、名取市付近になった。

対象地の電気系統を調査したところ、使用できそうな発電した電力を変圧する一次変圧器がある変電所が南仙台と東若林の 2 か所存在した。そこを拠点に EV に電気を送ることを想定する。対象地の変電所の空き容量を赤字の数字、送電線の空き容量を黒字で示したものが図 1 である。

風力発電機を設置する場所は平均風速が 7.5[m/s]である離岸距離約 25[km]の地点を想定する。全体のイメージマップを図 2 とする。



図 1 系統、変電所の空き容量マップ

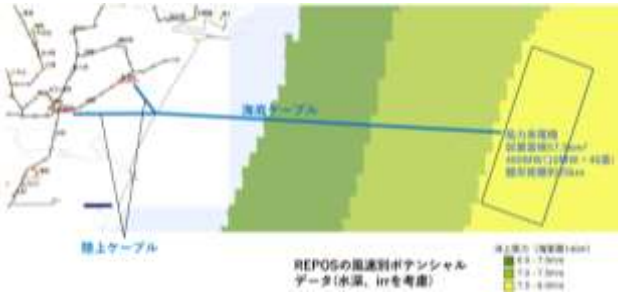


図 2 ケーススタディ全体イメージマップ

2.2 最大発電規模の設定

2 つの一次変圧器のある変電所の空き容量の合計(設置容量)は 466.2[MW]であったため、460[MW]を最大規模とする。また、実績や計画を参考に設定している REPOS の試算条件[4]から設置面積は 57.5[km2]、単機出力 10[MW]、基数は 46 基と設定した。

3. 両シナリオのかかる費用の考察

一般社団法人、日本風力発電協会[5]の確認試験では、風力発電の平均出力は平均風速の約 2.4 乗に比例するという結果が出ている。この値と[1]の文献と本研究の対象地域の平均風速、出力と蓄電池容量が比例するということをもとに計算すると、本研究の対象地域は文献の対象地域の約 6.23 倍の蓄電池容量が必要ということになる。従来の蓄電池を風力発電機に併設するシナリオでは定格出力 1[MW]1 基の風力発電機で設備費用は約 1.18 億円であることから本研究の最大規模の 10[MW]46 基だと約 338 億円になる。しかし、出力と設備費は比例する関係だと言い切ることはできないため、算出の精度を上げる必要がある。

一方、新たに提案する蓄電池を EV で代替し、マイクログリッドを使うシナリオは託送料金は基本料金と電力量料金の合計、460[MW]では 1 か月あたり約 8348 万円かかることがわかった。

この結果から、蓄電池を併設する際の費用はマイクログリッドの託送料金約 34 年分の費用になることがわかった。しかし、併設型の蓄電池は初期費用に加えて維持費用もかかり、使用する NaS 電池の期待寿命は 15 年のため交換の必要がある。このことからマイクログリッドの託送料金の 34 年分よりもさらに多額の費用が掛かってしまうことが考えられる。長期間、洋上風力発電ができる保証は少なく、初期費用が少ないマイクログリッドのシナリオのほうが始めやすくていいのではないかということが考えられる。

4. 今後の予定

前述したように併設型蓄電池の設備費の計算精度を上げる必要がある。また、マイクログリッドシステムにおいて逆潮流の発生による下流の電圧変動、停電の可能性から電圧制御器を用いる必要があるため、その導入コストを考慮する必要がある。

前述の研究手法では最大の出力を想定し、シミュレーションをしているが、各々の設定条件を変えた別のシナリオで分析をする必要がある。シナリオの項目としては EV 普及率の変化、車の保有率の変化、EV1 台あたりの蓄電池使用可能容量の変化を検討する予定である。

5. 引用文献

1) 千住 智信, 菊永 康朗, 與那 篤史, 舟橋 俊久: 電気学会論文誌 B,128(1), (2008), pp321-327
2) 毛利 雄一, 若井 亮太, 橋本 雅道 : 第 55 回土木計画学研究発表会・講演集, pp46-115
3) 林泰弘:“HAYASHI LABORATORY”, 研究紹介, (オンライン), 入手先 <https://www.ilcaj.org/meeting/17th/index.html >, (2022-1-11)
4) “環境省再生可能エネルギー情報提供システム［REPOS(リーポス)］”, 概要資料, (オンライン), 入手先 <https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/Re

newableEnergy/outline.html?energy=wind >
（2022-1-11）

5) “一般社団法人 日本風力発電協会”，風車の制御機能の活用に向けて，（オンライン），入手先 <https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/014_04_00.pdf>
（2022-1-11）

洋上風力発電による騒音被害と事業コストの関係に関する研究

A Study of the Relationship between Noise Damage from Offshore Wind Power and Project Costs

○高石涼平*、磐田朋子
Ryohei Takaishi, Tomoko Iwata
芝浦工業大学
br18057@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

脱炭素社会の実現に向けて洋上風力発電の本格導入が期待されている。導入ポテンシャルは 3 兆 4607 億 kWh と推計され、平成 29 年度世帯当たり年間電気消費量だと約 8 億 71 万 7261 世帯分を賄うことが出来る[1]。一方、地球温暖化対策推進法の基本理念として関係者との密接な連携等を規定した。しかし、地域環境への懸念から反対運動が各地で起きており早急な地域合意形成が必要とされている。反対運動の一因として日本では海外事例と比べて離岸距離が近いことが挙げられる（図 1）。海外の平均離岸距離が 35km であるのに対して、日本では急激に水深が深くなるため、着床型洋上風力発電の離岸距離が近い。その結果、漁業への影響や騒音被害を懸念する反対運動が各地で起こっている。

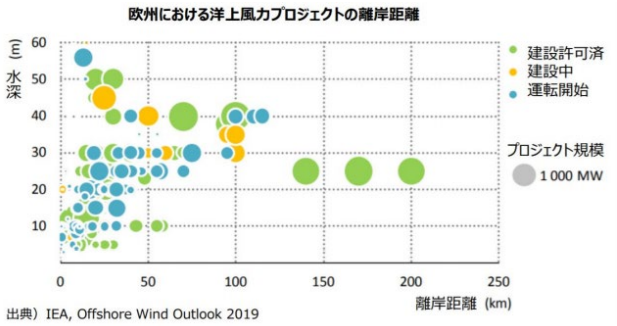


図 1　海外における事例の離岸距離と水深[2]

そこで本研究では、円滑な地域合意形成を支援するために、主たる争点である騒音影響と洋上風力発電事業費の関係を定量的に把握することを目的とした。反対団体の存在や、促進地域に指定されていること、国内で洋上風力発電事業が一定の段階まで進んでいることから、施設規模 4.2MW×20 基で離岸距離は最大で約 2 kmである秋田県能代港での洋上風力発電計画を例として、騒音被害が及び得る範囲と、影響範囲外に風車をセットバックした際の事業費増加率の評価を行った。なお、図 2 に示すように能代港での計画は離岸距離が約 1～2 km、水深が 30m 未満である。

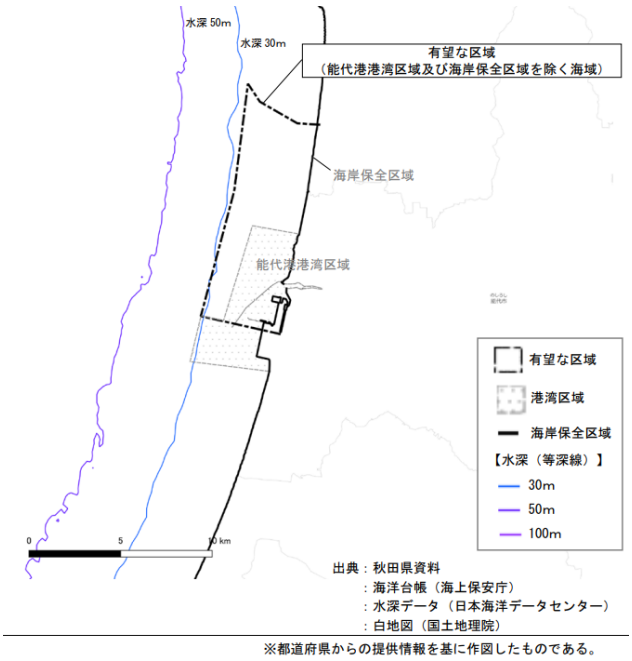


図 2　能代沖海域図[3]

2. 研究手法

2.1 騒音被害の影響の可視化

風車騒音の予測値 L (dB) は式 1[4]に基づき算出した。なお、PWL (dB) を音源のパワーレベル、r (m) を音源からの距離とした。定格出力と音響パワーレベルの関係[5]に基づき、対象地で予定されている定格出力 4.2MW の PWL を 107 dBと推定した。

$$L=PWL-11-20*\log_{10}r \qquad \text{式 1}$$

予測式より算出された値 L を GIS 上で可視化し、能代市の人口統計と重ね合わせることで騒音レベルの違いにより影響範囲がどのように変わるのか、評価を行った。

2.2 事業コストの算出

事業コストはケーブルコスト[6]、建設コストおよび年間維持費[7]の合計とした。建設コストは水深に応じて変化するため、沖合に洋上風力発電をセットバックした際の経済性の悪化について評価した。

3. 結果

3.1 騒音被害の影響範囲

図 3 に騒音影響範囲と人口総数を重ね合わせた結果を示す。本研究では影響が顕著に出ると言われる 40 dBを下回る値として 35 dBまたは 30 dBにまで騒音が低減される範囲を可視化した。

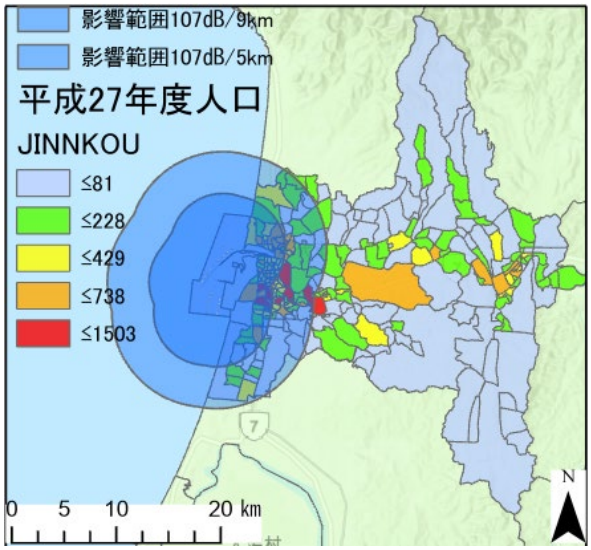


図 3 影響範囲と人口総数の重ね合わせ
（内側の濃い円が 35 dB、外側の薄い円が 30 dB）

その結果、人口の多い地域が影響範囲内に含まれていることが示された。範囲内に含まれる場所を面積で案分すると 30 dB範囲内の人口は 39,163 人である。総人口は 54,730 人であるため約 71.6%が範囲内に含まれることになる。

3.2 事業性評価

ケーブルコストは変電所と風車それぞれを接続すると仮定すると直線距離の合計は 78.2 kmとなり 39.1 億円、建設コストは 14 億 2464 万円、20 年間の維持費は 378 億円と試算された。20 年間の期待売電価格は 1386 億 1283 万円（総発電量は約 962MWh、売電価格は 36 円/kWh として算出）となるため、コスト合計を引くと 20 年間の利益としては約 955 億円となった。

1 km沖合にセットバックするごとに建設コストは約 1 億 1300 万円、ケーブルコストは約 10 億円増加する。しかしながら、図 3 より影響範囲内の人口は 1 kmずつ後退させると大きく減少することが示された。計画から 4 km後退させると範囲内の人口は 19 人まで減少する。

4. まとめ

本研究では能代沖洋上風力発電における騒音影響範囲内の人口と事業コストを算出した。30 dB以上の範囲には人口の約 71.6%が含まれる。1 kmずつ後退させると範囲内の人口は減少していき、4 km後退の時点で 19 人まで減少する。建設コスト、ケーブルコストは 1 km後退させるごとにそれぞれ約 1 億 1300 万円、約 10 億円増加する。

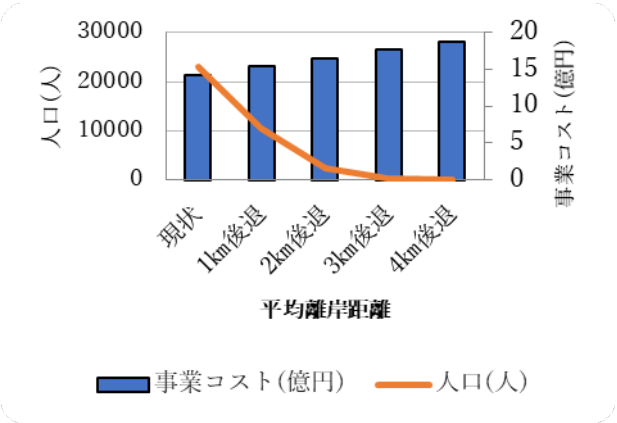


図 3 セットバック時の事業費と影響人口の関係

今後の課題としては、風車を後退しても影響範囲内に含まれる人口が多い場合、経済性を考慮したうえで風車を後退させられる限界はどの程度なのか、浮体式洋上風車を対象にした場合に事業コストの増加具合が今回とどう異なるのかを算出することが挙げられる。

5. 参考文献

1) “2017 年度の家庭のエネルギー事情を知る“, 環境省, 入手先(オンライン)
<www.env.go.jp/earth/ondanka/kateico2tokei/2017/result3/detail1/index.html>2021 年 1 月 5 日
2) “「洋上風力発電の低コスト化」プロジェクトの研究開発・社会実装計画(案)の概要”, 資源エネルギー庁, 入手先(オンライン)<001_04_00.pdf (meti.go.jp)>2021 年 1 月 5 日
3)“資料 5 秋田県八峰町及び能代市沖区域の概要図” 資源エネルギー庁, 入手先(オンライン),
<01_docs05.pdf (meti.go.jp)>2021 年 1 月 5 日
4) “10.1.1.4 低周波音”, 環境省, 入手先(オンライン)<Microsoft Word - 10.1.1(4)低周波音_【終了】.docx (env.go.jp)>2021 年 1 月 5 日
5)“風力発電施設から発生する騒音等の状況”, 環境省, 入手先(オンライン) H27_02siryo_01_02.pdf (env.go.jp)2021 年 1 月 5 日
6) “地域における再生可能エネルギー事業の事業性評価等に関する手引き(金融機関向け)Ver4.1”, 環境省, 入手先(オンライン)<(風力) ver4.1_確定版.pdf (env.go.jp)>2021 年 1 月 5 日
7) “平成 27 年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書”, 環境省, 入手先(オンライン), <h27_whole.pdf (env.go.jp)>
2021 年 1 月 5 日

廃太陽光パネルの資源循環に着目したライフサイクル評価

Life cycle assessment of spent photovoltaic panels focusing on resource circulation

○兵法彩*[1)]、諏訪出[1)]、竇毅[1)]、所千晴[1,2)]、菊池康紀[1)]
Aya HEIHO, Izuru SUWA, Yi DOU, Chiharu TOKORO, Yasunori KIKUCHI
1) 東京大学, 2) 早稲田大学
* heiho-aya@platinum.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

脱炭素社会の実現に向けて太陽光発電（PV）の導入が加速する一方で、製品寿命等による PV パネルの廃棄問題が社会課題となっている。2030 年には製品寿命等による使用済み PV パネルが、確実に増加する見込み[1)]であり、適切な回収・処理・資源循環に向けた技術開発および社会実装に早急に取り組む必要がある。PV パネルの資源循環に向けた技術開発は多岐にわたる[2)]ため、複数の技術を組み合わせた効果的なシステムをライフサイクル思考に基づき評価することが重要となる。本研究は国内で実験・実証が進められている複数の開発技術に着目し、フォアグランドデータに基づくインベントリ分析およびライフサイクル評価を通じて、近い将来に社会実装されうる代替システムの環境影響を明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

市場導入量が上位の多結晶シリコン PV パネル 1module (0.96m^2, 15.48kg, 54 セル)を機能単位とし、原料採掘から PV パネル製造、処理・リサイクル効果までを評価する。図 1 に PV パネルの End of life を示す。要素技術として、アルミフレーム分離[3)]、粗破砕と表面粉砕の二段階で行う分離濃縮、ホットナイフ法によるガラス・EVA 分離[4)]、カバーガラスのリビルドまたはリサイクル、分離後セルの粉砕選別、電気パルス法による金属（Cu、Ag）回収[5)]の適用を想定した。これらの技術は、関係者の協力の下で実験・実証データ（消費電力等）を取得した。バックグラウンドデータは既存の LCA データベースである IDEAv3.1[6)]と Ecoinvent3.6[7)]を用いた。環境影響評価は LIME2[8)]に基づき、気候変動（Life cycle Greenhouse gas; LC-GHG）と資源消費（Life cycle Resource consumption potential; LC-RCP）を算出した。

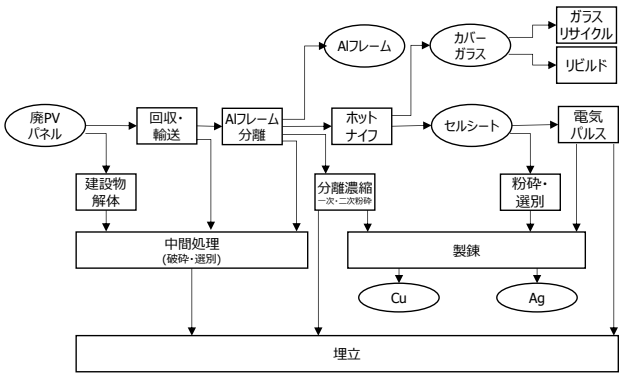


図 1 PV パネルの End of Life（一部簡略）

3. 結果・考察

LC-GHG、LC-RCP ともに従来の処理フローである中間処理・埋立と比べて、代替システムとしての複数のケースで新規技術導入による資源回収効果が認められ、環境負荷が低減することが明らかとなった。一方でこれらの評価は、回収したカバーガラス活用（ガラスリサイクル）や、物理的分離技術（粉砕・選別、電気パルス）で得られる金属濃縮物からの銅・銀再生が製錬で適切に行われることを前提とする。そのため、既存システムでは不確実な受け入れ体制の構築を同時に進めることが重要であることが示唆された。

4. おわりに

廃 PV パネルの資源循環に向け、実験・実証データに基づくライフサイクル評価による概念実証（Proof of Concept）を行った。技術の社会実装を促進するためには、マテリアルフロー分析などによる量的・時間的観点を含めた議論を展開する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、東京都太陽光パネルの高度循環に向けた実証調査および JST 未来社会創造事業（JPMJMI19C7）により実施した。

引用文献

1) 環境省 : “太陽光発電設備リサイクル等の推進に向けたガイドライン(第二版) ”, (2018), 109pp.
2) Y. Kikuchi et al (2020) IJAT, 14(6), 890-908
3) 松本健司 (2020) 産業機械, 840
4) 村越まり (2018) 化学工学会誌, 82(8), 447-449
5) C. Tokoro et al (2020), IJAT, 14(6), 966-974
6) 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 (2021/7/15)
7) ecoinvent (Swiss Centre for Life Cycle Inventories) : “ecoinvent version 3.6”, http://www.ecoinvent.org/database/, (参照 2021-12-22)
8) N. Itsubo, A. Inaba (2012) LIME2 life-cycle impact assessment method based on endpoint modeling, Life-Cycle Assessment Society of Japan, Tokyo, Japan

蓄電システム導入による産業都市への再生可能エネルギー最大化の検討

Study on Maximizing Renewable Energy for Industrial City by Introducing Energy Storage Systems

○松崎耀*[1)]、藤山淳史[2)]、松本亨[2)]
Hikaru Matsuzaki, Atushi Fujiyama, Toru Matsumoto
1) 北九州市立大学大学院, 2) 北九州市立大学
* b0mac007@eng.kitakyu-u.ac.jp

1. 研究背景

北九州市は地球温暖化対策実行計画[1)]において、現在、風力発電推進拠点都市、蓄電システム先進都市、水素製造・供給拠点都市の 3 つのエネルギーの将来像を掲げ、その取り組みが進められている。その中でも、蓄電システム先進都市では、再生可能エネルギーの導入拡大によって生じる再生可能エネルギーの余剰電力による不安定化の影響を抑えるため、蓄電システムの普及を進めることで再生可能エネルギーによる供給電力の安定化ならびに再生可能エネルギーによる 100%電力化を目指している。

2. 研究目的

再生可能エネルギーの普及拡大を図ることを目的に、再生可能エネルギーと蓄電システムを組み合わせた分散型エネルギーシステムの構築に向けた動きが加速している。著者らは先行研究[2), 3)]において、北九州市を対象に、エネルギー需要量と、再生可能エネルギーの最大供給可能量を推計したうえで、二酸化炭素排出量（以下、CO_2）と総コストが最小となる場合の再生可能エネルギーの導入ポテンシャル量を推計することが可能な最適電源構成モデルを構築し、適用してきた。しかし、再生可能エネルギー供給量が電力需要量を上回る時間帯について、蓄電や系統電力への売電の影響についてモデル中で扱えていないという問題を抱えていた。そこで本研究では、先行研究において構築したモデルをベースに、電力需給調整機能としての蓄電システムを付加したモデルへ拡張し、再生可能エネルギーを最大化するための方策について検討することを目的とする。

3. 分析方法

本研究の分析フレームを図 1 に示す。

供給可能量については、風力および太陽エネルギーは天候や時間帯、季節による変動があるため、環境省の 1 時間ごとの風速と日射量データを用いて、陸上風力と洋上風力、太陽光発電の時間帯別の供給可能量を 1 時間毎に推計した。エネルギーの需要量については、民生部門は家庭部門と業務部門を、産業部門は製造部門のみを対象に、電力のみを対象に設定した。

蓄電システムに関して、1 時間ごとの電力需要量と再生可能エネルギーの供給可能量の差をもとに、充放電を行い、その過程で電力が十分に満たなかった場合に系統電力との融通が発生するよう設定した。

推計したデータをもとに、エネルギー需要に対してエネルギーの時間帯別の供給可能量を制約として、環境面としてのCO_2排出量と経済面としてのコストを線形計画法により、それぞれが最小となる電源ベストミックスの算出を行った。

蓄電システムの容量については、再生可能エネルギーの余剰電力量が発生しない規模の蓄電システムが導入されていれば、100%再生可能エネルギーのみで運用を行うことが可能となることから、年間の電力の流れを解析し、蓄電システム容量を設定した。

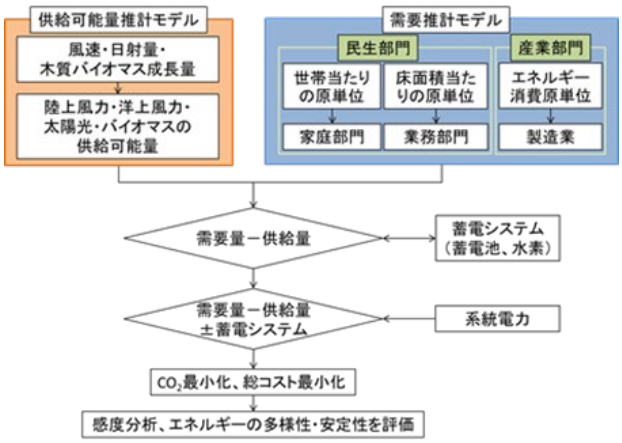


図 1 分析フレーム

4. 結果

北九州市の年間のCO_2排出量最小化、総コスト最小化を行った結果を表 1 に、そのときのエネルギー源別の供給構成を図 2 に示す。

CO_2 排出量を最小化した場合では、洋上風力の割合が約 66%と最も大きな結果となった。陸上風力と太陽光、バイオマス発電は供給可能量の最大ポテンシャルと同じ値となり、全体として約 95%を再生可能エネルギーで賄うことができることがわかった。総コスト最小化においては、系統電力の割合が約 70%と最も大き

な結果となった。再生可能エネルギーは陸上風力、太陽光発電が供給可能量の最大ポテンシャルと同じ値となり、全体として約 30%を賄うことがわかった。

表 1　最適化結果

	CO_2最小化	総コスト最小化
合計	188.1[PJ]	188.1[PJ]
CO_2排出量	572[万t]	2184[万t]
総コスト	664[億円]	502[億円]

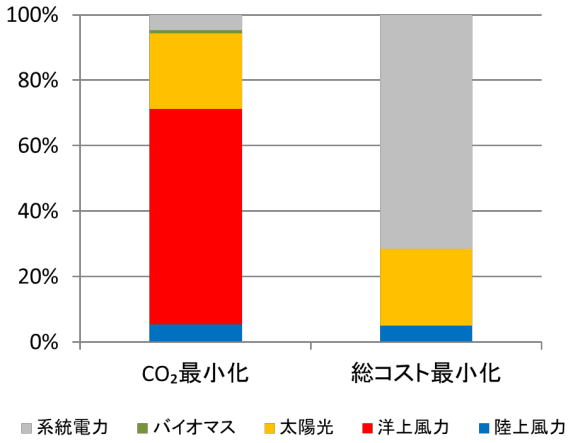


図 2　最適化結果

総コスト最小化の結果をもとに、再生可能エネルギーの余剰電力量が発生しないときに必要となる蓄電システム容量を推計した結果、0.173PJ の蓄電可能容量が必要となることがわかった。0.173PJ の蓄電システムを導入した場合に、系統電力からの電力供給量を最小化した場合のエネルギー源別の供給構成の結果を図 3 に示す。その結果、CO_2 排出量最小化した場合と比較して、より総コストを低減したうえで、CO_2 排出量を削減できる可能性があることが示された。ただし、ここで導入を検討した蓄電システムは、蓄電システムの稼働に伴って発生する CO_2 排出量とコストは考慮されていない。

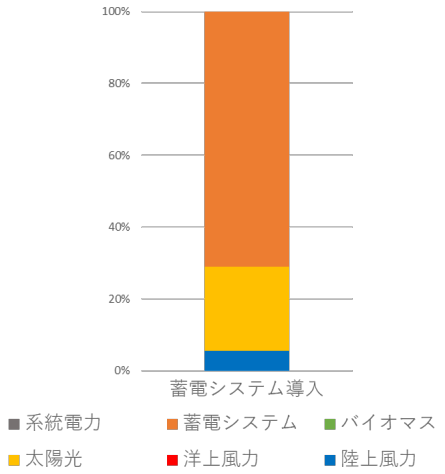


図 3　蓄電システム導入の最適化

5. まとめ

今回、著者らによるこれまでの研究で構築した最適電源構成モデルを電力需給調整機能としての蓄電システムを付加したモデルへ拡張を行い、産業都市における再生可能エネルギーを最大化するために必要な蓄電システム容量について解析した。蓄電システムを導入しないケースにおいて、CO_2 排出量の最小化を行ったケースでは約 95%を、総コストの最小化を行ったケースでは約 30%を再生可能エネルギーが占める結果となった。再生可能エネルギーの余剰電力量が発生しないときの蓄電システム容量を推計した結果、約 0.173PJ であることがわかった。この蓄電システム容量をもとに最適化を行った結果、洋上風力からの余剰電力を蓄電システムに蓄電し、時間を融通して供給することで再生可能エネルギー供給割合を 100%にすることが可能であることが示された。

今後は、蓄電技術の違いを考慮した解析へ展開していくことが課題である。

引用文献

1) 北九州市地球温暖化対策実行計画（2021～2030）
2) 松崎耀，藤山淳史，松本亨：都市レベルエネルギーマネジメントのための最適化モデルの構築と北九州市への適用，2019 年度（令和元年度）土木学会西部支部研究発表会，九州大学
3) 松崎耀，藤山淳史，松本亨：産業都市のエネルギーマネジメントのための最適電源構成モデルの構築，土木学会論文集 G，Vol.76，No.6，pp Ⅱ_189-Ⅱ_197，2020.10

直接空気回収技術（DAC）のライフサイクル評価

Life cycle assessment of Direct Air Capture

○鈴木隼斗*[1)]、森本慎一郎[2)]、伊坪徳宏[1)]
Hayato Suzuki, Shinichirou Morimoto, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学, 2) 産業技術総合研究所
* g2183116@ tcu.ac.jp

1. はじめに

2018 年 IPCC の 1.5℃特別報告書[1)]にて、2050 年において CO_2 排出量 0 を達成するためには、大気中の CO_2 を直接除去する Carbon Dioxide Removal(CDR)技術の利用が不可欠とされている。CDR 技術には植林、及び風化促進など様々な技術があり、その中で大気から直接 CO_2 を回収する技術である Direct Air Capture(DAC)も CDR 技術の 1 つとされている。

現在、世界では 19 の DAC プラントで約 1 万 ton/y の CO_2 が回収[2)]され、貯留、または航空燃料への変換など有効利用されている[4,7)]。国際エネルギー機関(IEA)が示した 2050 年までの Net Zero シナリオでは、2030 年までに DAC の導入規模を 8500 万 t/y までスケールアップ[2)]することが必要と示唆されており、これは、2018 年の世界の CO_2 排出量[3)]の 0.3%程度である。

CO_2 固定発生源排ガスの CO_2 分離回収として、これまで化学吸収法や物理吸着法、及び膜分離法等が導入されているが、それらの技術と比べて、DAC は設置場所に大きな制約を受けないこと、また既存の CO_2 分離回収技術を適用できない運輸・航空部門からの CO_2 排出量も削減可能であることが利点とされている。

2. 研究目的

DAC には液体・固体吸収法、膜分離法などの方法があり、液体吸収と固体吸収法が海外スタートアップ企業にて実証レベルで使用されている[4,7)]。この中で吸収液による DAC は、CO_2 を吸収させた吸収液を再生させるのに多大なエネルギーを消費し、その消費エネルギー由来の CO_2 排出量が多いことが既存研究において明らかになっている[4)]。そのため電力に再エネや焼却場での発電電力の利用、または熱源に地熱や工場廃熱、ヒートポンプを使用する場合などを評価した事例[3)]がみられる。特に、カナダにおいて実証された吸収液による DAC の事例では吸収液の再生時の熱源をメタン燃焼により補っているため、[5)]大気から直接回収した CO_2 は最終的に貯留する際の CO_2 全体の 70%にとどまっており、効率化に向けた更なる検討が必要となっている。

そこで本研究では、吸収液による DAC の吸収液再生に必要な熱、及び DAC システム内の電力をメタンではなく、木質バイオマスから供給することを提案し、DAC の効率化による効果を LCA で分析した。それによって、今後、DAC の社会実装に向けて効率化を図るための基礎データを取得した。

3. 評価対象

本研究では(加)Carbon Engineering 社の KOH を用いた吸収液による DAC（以下、DAC 化学吸収法と記す）を対象に試算を行った。これは以下のプロセスで構成されている；1:空気接触器にて空気中の CO_2 と KOH の中和反応により、CO_2 を炭酸塩 K_2CO_3 として回収する。2: K_2CO_3 から CO_2 を再生するには多大なエネルギーを消費するため、ペレット反応器にて K_2CO_3 とスレイカーからきた $Ca(OH)_2$ の中和反応により $CaCO_3$ を生成し、KOH を再生する。KOH は、空気接触器に再度、循環させ、$CaCO_3$ はスレイカーへ送る。3:スレイカーにて $CaCO_3$ に付着している水分を回収後、$CaCO_3$ は焼成炉へ送る。回収した水分と焼成炉からの高熱を利用して蒸気発生後、スチームタービンにて発電。焼成炉にて分解された CaO と外部から供給された H_2O の中和反応によって $Ca(OH)_2$ を生成後、$Ca(OH)_2$ はペレット反応器へ送る。4:焼成炉にて高温焼成（900℃）された $CaCO_3$ が CO_2 と CaO に分解する。焼成により発生した CO_2 と空気中から回収した CO_2 は液化用に圧縮され、CaO はスレイカーへ送る。

また、本研究でメタンの代わりに使用するバイオマスは、木材チップ、アーモンド殻、などの木質バイオマスとした。LCA 評価範囲は、原料製造～CO_2 回収・圧縮までとし、DAC の設備建設による GHG 排出量は含まないものとした。機能単位は、大気からの CO_2 1ton 回収あたりとした。図 1 に、評価対象のフロー図を示す。

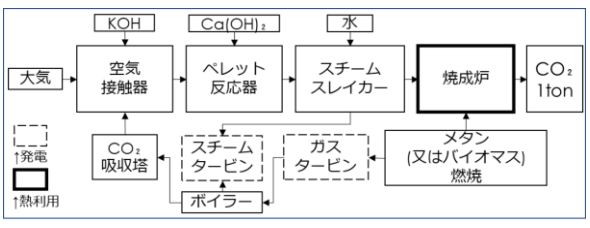


図 1 プロセスフロー

4. 評価方法

既存の DAC 化学吸収法については文献[5,7]を参考に、シミュレーションソフト ASPENPlus を用いて、DAC プロセスのシミュレーションを行い、熱収支と物質収支を計算した。シミュレーション結果から消費電力、熱量、他投入物（メタン、工業用水、KOH、$Ca(OH)_2$）を明らかにし、その値に IDEAVer.2.3[8]から得られた GHG 排出原単位を積算することで DAC の GHG 排出量を計算した。計算結果より得られた DAC プラント運用時の GHG 排出量から、回収した CO_2 を引いた値を、正味の GHG 排出量とした。この計算では、メタンの燃焼によって排出・回収された CO_2 は空気中から直接回収したものではないため、「回収した CO_2」としては計算には含まれない。

一方、本研究で提案するバイオマス利用の DAC 化学吸収法では、既存の DAC プラントに対して電力及び熱を全てバイオマスから供給する。その際に必要なバイオマスの量をプロセスシミュレーションによって計算し、バイオマスの採取時の GHG 排出量を計算した。バイオマス燃焼時に排出される CO_2 は、大気中から固定化されたものとして「回収した CO_2」に含める。それによって DAC 化学吸収法よりも多くの CO_2 を回収し、効率化を図ることができる。

5. 評価結果

既存の DAC 化学吸収法とバイオマスを利用した提案 DAC 化学吸収法の GHG 排出、土地利用に関する比較結果を図 2、図 3 に示す。

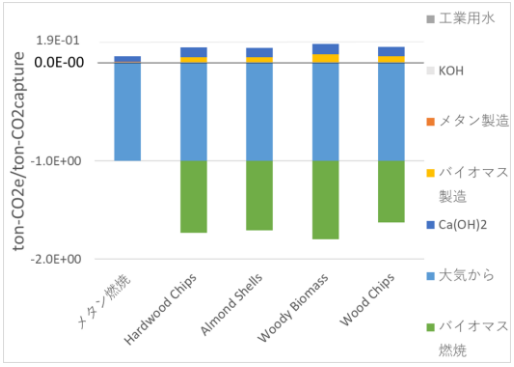


図 2 既存と提案化学吸収法 DAC 比較（GHG 排出）

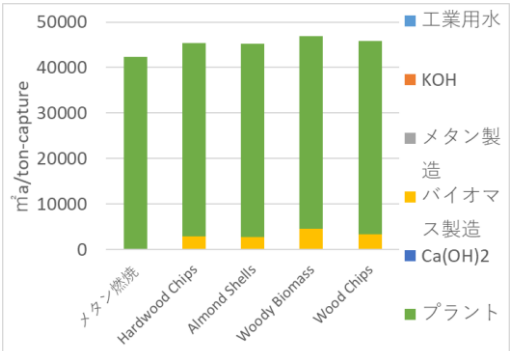


図 3 既存と提案化学吸収法 DAC 比較（土地利用）

図 2 より既存の DAC 化学吸収法による正味の GHG 排出量は-0.9ton-CO_2eq/ton-CO_2capture となった。一方で、メタンの代わりにバイオマスを利用した場合は GHG 排出量が-1.6ton-CO_2eq/ton-CO_2capture となり、GHG 排出量は 0.7 ton-CO_2eq/ton-CO_2capture 少なくなることが分かった。図 3 より既存に比べて提案 DAC 化学吸収法では、木材チップの製造分負荷が加わり、1.1 倍増加した。GHG 削減の代わりに、土地への影響が増加する結果となった。

6. 結論

DAC 運用時に使用する原料製造から、CO_2 1ton を回収・圧縮するプラントの運用段階までを対象に、化学吸収液を用いた DAC の評価を行った。DAC 所内電力及び熱をメタンで補う既存の DAC 化学吸収法に比べてバイオマスを使用した場合 GHG 排出量は 0.7 ton-CO_2eq/ton-CO_2capture 少なくなることが分かった。

本研究は DAC の効率化に向けたシステム研究であり、まだ初期段階である。今後は個体吸着材を用いた方法の評価を行い、プラント建設や、再エネ利用による土地利用への負荷、水消費など、他領域への影響について、選択した回収方法の違いによる環境影響の分析を行う。個体吸着剤法も吸収液法と同じように、CO_2 脱離時のエネルギー消費が最も負荷が大きいことから、省エネルギーのために有価品製造段階の廃熱を利用した固体吸着法について、評価を行う。また、DAC の導入のために最も重要とされるコストについても分析を行う。環境影響とコスト分析後、導入に向けた知見を導出する。

7. 引用文献

1) “IPCC 特別報告書「1.5℃の地球温暖化」”，国際連合広報センター，入手先，（オンライン）<https://www.unic.or.jp/news_press/info/30738/>2021 年 1 月 2 日
2) Sara B 他.: “Direct Air Capture”, (2021)
3) 一般財団法人日本エネルギー経済研究所編, “エネルギー・経済統計要覧 2021”, (2021)
4) Sarah D., Andre B.: nature energy, 6 (5), (2021), pp.203-213
5) JST LCS: 二酸化炭素の Direct Air Capture(DAC)法のコストと評価, （2019）
6) JST LCS: 二酸化炭素の Direct Air Capture(DAC)法のコストと評価, （2020）
7) David W.K 他.: Joule, 2 (8), (2018), pp.1573-1594
8) 国立研究開発法人産業技術総合研究所, サステナブル経営推進機構: LCI データベース IDEA Ver.2.3

口頭発表セッション（一般）

[2-E4] 自動車

座長：木下裕介（東京大学）

2022年3月3日(木) 15:00 〜 16:40 E会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-E4-01] V2Xシステム導入が CO2排出量に与える影響検討

*各務 文雄[1]、星野 真樹[1]、磯部 眞弓[1]、川澄 えみ[1]、池添 圭吾[1]、鈴木 健太[1]（1. 日産自動車株式会社）

15:00 〜 15:20

[2-E4-02] Scenario analysis of sustainable circulation system of traction lithium-ion batteries

*陶 福偉[1]、木下 裕介[1]、梅田 靖[1]（1. 東京大学）

15:20 〜 15:40

[2-E4-03] 種子島における電気自動車と再生可能エネルギー連携システムの評価

*五十嵐 和樹[1]、栗島 英明[1]、菊池 康紀[2]（1. 芝浦工業大学、2. 東京大学）

15:40 〜 16:00

[2-E4-04] 地域特性および車両特性の影響要因を考慮した中量輸送機関の CO_2排出量の評価

*山田 祐磨[1]、加藤 博和[1]、朴 秀日[1]（1. 名古屋大学）

16:00 〜 16:20

[2-E4-05] モビリティ革命の低炭素性評価の方法論

*朴 秀日[1]、加藤 博和[1]、森田 紘圭[2]（1. 名古屋大学、2. 大日本コンサルタント株式会社）

16:20 〜 16:40

©日本LCA学会

V2X システム導入が CO_2 排出量に与える影響検討

Estimation of the impact of introducing the V2X system on CO_2 emissions

各務文雄 [1)]、○星野真樹*[1)]、磯部眞弓 [1)]、川澄えみ [1)]、池添圭吾 [1)]、鈴木健太 [1)]
Fumio Kagami, Maki Hoshino, Mayumi Isobe, Emi Kawasumi, Kengo Ikezoe, Kenta Suzuki
1) 日産自動車株式会社
* maki-hoshino@mail.nissan.co.jp

1. はじめに

2015 年に気候変動枠組条約に加盟する国および地域が参加するパリ協定が合意され、温室効果ガス（以下、GHG）排出量を削減することがこれまで以上に求められており、様々な国、自治体、企業でカーボンニュートラルを目指す宣言が相次いでいる。

カーボンニュートラルを実現するためには、製品の使用段階だけでなく、生産段階を含めたライフサイクル全体における排出量削減が求められる。今後多くの再生可能エネルギーの導入が必要となる一方で、太陽光発電や風力発電は天候や時間により出力が変動するため、需給調整力の向上が課題となっている。

日産自動車は、電動化が GHG 排出量削減に貢献すると考え、走行時に GHG を排出しない電気自動車（以下、EV）を 2010 年よりグローバルに販売してきた。この間、搭載されている電池も 24 kWh から 62 kWh へと大容量化し、「動く蓄電池」としての需給調整力への期待が高まっている [1)]。

一般的に車両から家への放電を Vehicle to Home（V2H）、ビルへの放電を Vehicle to Building（V2B）、電力系統への放電を Vehicle to Grid（V2G）と呼ぶ。これらを総称していうときには，V2X もしくは VGI (Vehicle Grid Integration) と呼ばれており、CO_2 排出量を検討した事例も報告されつつある [2)3)]。

本研究では、太陽光発電（以下、PV）システムおよび V2X システムを導入し、EV を活用した場合を想定し、V2X システム導入が CO_2 排出量に与える影響を検討した。加えて、EV の使われ方の違いによる影響も感度解析として検討した。

2. モデルの設定と算定方法

2.1 対象とした範囲と機能単位

本ケーススタディでは、EV、PV システム、V2H システムの製造、使用段階および家庭での電力消費量を評価範囲とし、「車移動による輸送」および「家庭における電力消費（蓄電機能あり）」との複合機能』を本検討でのシステムの機能とした。

機能単位は、「家庭における消費電力 1 kWh あたりの負荷排出量」とした。

比較対象としては、EV、PV システムが導入されている家庭に、V2H システムの代わりに定置用蓄電池を設置した場合を想定した。定置用蓄電池の容量は、V2H システムを導入した際に EV に蓄電できた容量と同等の容量を蓄電できる容量とした。

2.2 モデル設定

今回の検討に用いた EV 仕様を表 1 に示した。現行 LEAF 相当の容量のバッテリを有する EV を前提とし、また V2H システムにおける放電限界は、SOC 20 kWh と設定した。

表 1 EV 想定仕様

EV	**電池**	リチウムイオン電池
	電池容量	60 kWh
	電費	6 km/kW

PV システムにおける発電性能は、日射データとして 2017 年横浜市の日別実データ（@NEDO 日射量データベース）を用い、4.6 kW PV システムを屋根に設置した家庭を前提とした。

電力需要は、環境省 2 家庭部門 CO_2 調査データ(2018 年)を参照し、家庭電力消費量 7,686 kWh/年とした。1 時間毎の需要プロファイルは、日産従業員の 2017 年実測値データ（1 時間単位別、3 人家族、横浜市在住、4.0 kW PV システム）を参考に、年間の家庭電力消費量が上記と一致するようした。

電力は、系統電力の使用量を最小にするため、PV システムにより発電した電力を優先的に使用するとした。PV システムにより発電した電力をまず家庭で消費し、余剰分を EV に蓄電する。不足分は系統電力で賄うとした。一方、家庭で消費及び EV へ充電しても余剰してしまう場合は、グリッドに戻さずに発電を停止するという前提を置いた。この前提は、将来大量に PV が導入され、系統が混雑していることを想定したものである。また、EV は夜間にフル充電せず、翌日朝の走行に必要な分のみとした。

また、各システムにおける損失についても考慮した。EV の使われ方として通勤車用途で EV を保有する家庭を想定し、ベースラインとして朝 8 時台に出勤し、

日中会社に駐車され、夕方 18 時に帰宅するパターンを想定した(パターン A)。

感度解析においては、EV は通勤に使用されず、平日日中自宅に駐車されており、週末のみドライブに出かけるパターン B、平日朝 7 時台、夕方 18 時台に送迎に使用するパターン C ついて検討を行った。具体的には、表 2 に示す EV 走行距離とした。

表 2 EV の使われ方想定パターン

パターン		EV 走行距離		
		[km/day]		[km/year]
		平日	休日	年間
A	通勤車	38.4	0	10,000
B	週末ドライブ	0	95.9	10,000
C	朝夕送迎	10.0	0	2,600

2.3 算定方法

EV については、リチウムイオン電池を搭載した EV 想定した GREET モデル(2021)における材料使用量を用いて、バックグランドデータとして Ecoinvent 3.7.1 の原単位を用い、一部値がないものについては他のデータベースを使用した。

PV システム、V2H システムについても、Ecoinvent 3.7.1 の値を基本とし、一部値がない場合に他のデータベースを用いて算定した。

比較対象となる定置用蓄電池は、EV に搭載されている電池と同種類のリチウムイオン電池とした。

2.2 のモデルを用いて V2H システム活用による EV への蓄電量から、比較対象となる定置用蓄電池の容量を求めた。EV の使われ方により EV への蓄電量が異なるため、パターン毎に求め、比較対象となる定置用蓄電池容量を表 3 にまとめた。

表 3 比較対象となる定置蓄電池容量

パターン		比較対象となる 定置用蓄電池容量[kWh]
A	通勤車	24.0
B	週末ドライブ	33.9
C	朝夕送迎	28.9

3. 結果および考察

3.1 V2H システム導入による CO_2 排出量への影響

V2H システムの導入は、再生可能エネルギーを有効に活用でき、系統電力の使用を減らせることが期待され、それに伴い CO_2 排出量低減につながると考えられている。

本研究では V2H システム使用段階のみだけでなく製造段階も含めて、その影響を算定した結果、パターン A の通勤車の場合、CO_2 排出量削減量は、僅かであった。通勤車の場合は、平日の日中は会社に駐車されており、V2H システムを活用できないため、PV 余剰分を蓄電できず、休日のみの限定された効果に留まるためである。

V2H システム導入による CO_2 排出量削減効果を十分に得るためには、日中 PV 余剰分を蓄電できることが求められる。

3.2 感度解析：EV の使われ方の違い

日中 PV 余剰分を蓄電できるケースとして、EV を平日は使用せず週末のみドライブで使用するパターン B、また朝夕送迎のみのパターン C について検討した結果、CO_2 排出量低減の効果が十分に認められた。

4. まとめ

V2X システム導入により CO_2 排出量は低減できるが、EV の使われ方によりその効果代は異なるため、より CO_2 排出量低減につながる EV の使い方を考慮し V2X システムを導入していくことが求められる。

また、今後 2050 年カーボンニュートラルに向けて、系統側だけでなく、需要家サイドの再生可能エネルギーの有効活用やデマンドレスポンスなどが必要になってくる。それには、家庭用蓄電池や V2X の導入が有効であるが、その際には、家庭の電力消費、PV の発電量、EV の車としての使用の仕方などを詳細に考慮し、製造段階の CO_2 排出量を含めた最適な手段の導入が求められる。

5. 引用文献

1) 池添圭吾, 林隆介；自動車技術, 73 (10), (2019), pp.92-98
2) Yuki Kudoh, Ryoko Motose, Kiyotaka Tahara and Yutaka Genchi: EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Barcelona, Spain, (2013)

Lei Xua,b, Hasan Ümitcan Yilmazb, Zongfei Wangb, Witold-Roger Poganietza, Patrick Jochemb：Transportation Research Part D, 87, (2020), pp. 102534-102548

Scenario analysis of sustainable circulation system of traction lithium-ion batteries

Fuwei Tao*[1)], Yusuke Kishita[1)], Yasushi Umeda[1)]
1) The University of Tokyo
* tao@susdesign.t.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

Road transportation's electrification is widely considered as a promising way for a decarbonized society. Consequently, electrical vehicles (EVs) have been growing rapidly over the past ten years. Meanwhile, the growing volumes of lithium-ion batteries (LiBs) also lead environmental impacts because the LiB production is a process requiring intensive energy and scarce materials, e.g., lithium, cobalt. On the other hand, achieving a circular economy (CE) can reduce the environmental impact by supplying second-life traction batteries and generate economic value by utilizing residual values of spent batteries [1]. Thus, it has been significant to design a sustainable circulation system of EV LiBs. To date, many researchers employed different emission tools, e.g., life cycle assessment (LCA) and material flow analysis (MFA), to estimate environmental impact of LiBs. However, there is less research focused on estimating influence of the uncertainties in, e.g., customer's concerns over second-life LiBs, which influence the decision-making process for stakeholder and bring critical challenges of second-life battery [2]. Therefore, this study aims to design a method for scenario analysis to support the design of a sustainable circulation system of LiBs.

2. Methodology

2.1 Approach

To clarify the critical factors for stakeholders making decisions, we developed a framework which combines a scenario approach and a traction battery circulation model in our previous research work [3]. Based on this framework, firstly, by collecting the data through literature review, interviews, workshop, and questionnaire, we can describe the different scenarios assuming possible developments in the future. Secondly, to quantitatively estimate each of the described scenarios from the environmental viewpoint, we develop a traction battery circulation model using life cycle simulation (LCS) [4]. The model consists of life cycle model of traction battery and market models for the new and second-life traction batteries (see Figure 1). In the life cycle model of LiBs, we select direct reuse, refurbishment, repurposing, recycling as the life cycle options. Additionally, in the market model, we consider new EV market, LiB replacement market, and LiB repurposing market, e.g., second-life LiBs used in energy storage system, to cover the demand for the new and second-life traction LiBs. Therefore, we simulate the dynamic interaction between market demand, LiBs' life cycles, and life cycle CO_2 emissions ($LCCO_2$) for each of the scenarios.

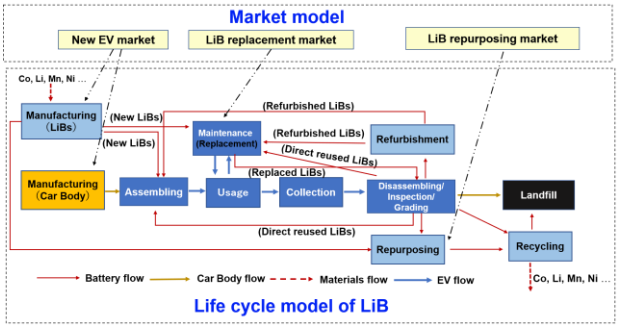


Figure 1 Traction battery circulation model updated from [3]

2.2 Procedure for scenario analysis of second-life traction battery circulation system

We define the procedure for scenario analysis of traction LiBs which is defined in four steps, and the details of each step are described below based on our previous work [5].

(1) Problem settings: identify the problem to be solved in the analysis, define the specification of traction battery, and specify the time horizon, region of interest, and the goals to be achieved.

(2) Data acquisition: collect sufficient inventory data via various means (e.g., literature reviews, interviews, questionnaires, and workshops) so that the life cycle scenarios of LiBs can be undertaken from the environmental viewpoints (e.g., $LCCO_2$).

(3) Scenario description: describe life cycle scenarios based on the traction battery circulation model shown in Figure 1 .

(4) Scenario evaluation: evaluate and compare the scenarios described in step (3) in terms of the number of different types of LiBs, $LCCO_2$.

3. Case study

We conducted a case study for Japanese traction LiB market based on the procedure proposed in Section 2.2, to show the effectiveness of the method.

3.1 Problem settings

In this paper, we selected a Japanese automotive company and a second-life LiB provider as the main actors. The simulation period was set at 30 years from 2021 to 2050. The specifications of the traction battery for EVs can be found in a report [6]. In addition, the goals of the scenario analysis were to clarify (I) the key drivers and how these key drivers affect potential CO_2 emissions, and (II) the potential reduction of CO_2 in Japan because of the development of a sustainable circulation system of traction LiBs.

3.2 Data acquisition

To quantify the environmental impact using life cycle simulation, we conducted data acquisition for product data, process data, and regional data through the means of literature review, workshop, and questionnaire. For the questionnaire, we collected the customer preference of second-use LiBs for battery replacement.

3.3 Scenario description

To extract the key factors, we used the uncertainty of the factors and the impact on the environment as the measure. Based on this method and internal discussion, we extracted the acceptance for second-use LiBs as the key driver. Therefore, we described two scenarios - (A) baseline scenario, where a business-as-usual situation is assumed, and (B) circular scenario, where a situation with a high acceptance for second-use LiBs is assumed.

(A) Baseline scenario: The preference of EV buyers and EV users for second-use LiBs within 30 years is the same as the current level. Additionally, the preference data for battery replacement is based on the questionnaire results. However, in this scenario, EV buyers will not accept EVs equipped with second-use LiBs, but only buy those with new LiBs.

(B) Circular scenario: The acceptance of second-use LiBs by EV buyers and EV users is high due to additional CE policies and increased environmental awareness. Therefore, second-use LiBs can be assembled with the body, and EV buyers will accept EVs equipped with second-use LiBs at a lower price. As discussed by the authors, the preference for second-use LiB for battery replacement is set at 50% for refurbished LiBs and 30% for direct reuse LiBs.

3.4 Scenario evaluation

Based on the simulation on the life cycle simulator, the simulation result for LiBs numbers of each type of LiBs in 30 years is shown in Figure 2. Regarding the $LCCO_2$ in both scenarios, the total emissions in 30 years are 278Mt in the baseline scenario while 262 Mt in the circular scenario, which reduces 5.76% from the baseline scenario.

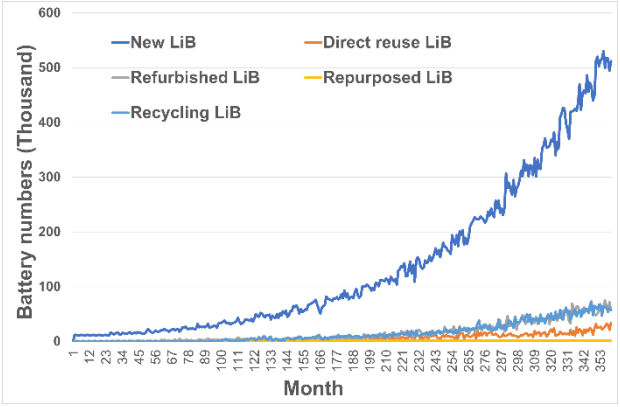


Figure 2 Numbers of each type of LiBs (circular scenario)

4. Discussion and conclusion

The simulation result shows that the number of second-use LiBs is increasing along with the diffusion of EVs. Additionally, the CO_2 emissions in the circular scenario is lower than the baseline scenario since second-used LiBs are reused in new EVs and battery replacement due to the high acceptance from customers.

This paper proposed a method for scenario analysis to support the design of a sustainable circulation system of LiBs. Future work includes conducting what-if analysis to clarify effective measures to support decision-making for stakeholders.

This research is supported by Scientific Research (19KT0008), the Japan Society for the Promotion of Science and Asahi Group Foundation. The second author, Yusuke Kishita, acknowledges the support from the Ritsumeikan Global Innovation Research Organization.

5. Reference

[1] Bobba S, Mathieux F, Blengini GA.Conservation and Recycling, (145), (2019), pp279–291

[2] Richa K. (2016) (University of Cambridge), (Doctoral dissertation)

[3] Fuwei T, Kishita Y, Scheller C, Blömeke S, Umeda Y. Procedia CIRP, (2022)

[4] Umeda Y, Nomura A, Tomiyama T. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing (14), 2000, pp 149–161

[5] Kishita Y, Ohishi Y, Uwasu M, Kuroda M, Takeda H, Hara K. Journal of Cleaner Production, (126), 2016, pp 607–619.

[6] Marklines AIP. Nissan LEAF Teardown: Lithium-ion Battery Pack Structure n

種子島における電気自動車と再生可能エネルギー連携システムの評価

Evaluation of Vehicle-to-Grid system using renewable energy for Tanegashima

○五十嵐和樹*[1)]、栗島英明[1)]、菊池康紀[2)]
Kazuki Igarashi, Hideaki Kurishima and Yasunori Kikuchi
1) 芝浦工業大学, 2)東京大学
* ab18006@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

近年、様々な分野で脱炭素社会に向けた取り組みが行われている。脱炭素社会の実現には再生可能エネルギーの導入が不可欠であるが、再生可能エネルギーの発電量の一部を抑制する出力抑制が行われている地域も存在する。その解決策として、近年急速に普及している電気自動車(EV)を蓄電池の代替として用いるVehicle-to-Grid(以下、V2G)の可能性が指摘されている。V2Gの導入により、昼間の電力余剰時にEVに蓄電し、夜間に放電することで、再生可能エネルギーの出力抑制量と夜間の火力発電量の2つを削減でき、再生可能エネルギーの普及に大きく貢献する可能性がある。

そこで本研究では、自動車のEVへの転換が進む2040年を想定し、日本で最初の出力抑制が行われた種子島において、EVに需要を超えた分の再生可能エネルギー電力を蓄電・利用するV2Gシステムについて評価を行う。

2. 研究方法

2.1 自動車の予測

V2Gシステムの評価に当たり、まず種子島の自動車に関する調査を行った。なお、本研究では公共交通、乗用車、軽自動車を研究対象とし、トラックはEV化されないものと仮定する。

ガソリンの消費量は、Kikucni etal.(2020)[1)]で推計された値より9,655 kL/yearとした。軽油のバス分の消費量は、路線バス等の公共交通が大半を占めると予測し、種子島における路線バスやコミュニティバスの運行状況より算出し、64 kL/yearとした。

2040年時点でのガソリンの消費量と自動車保有台数は、人口減少に比例すると仮定した。また、バスはEVに100%代替されているものとし、乗用車と軽自動車のEV代替率、電力余剰が生じやすい10時～16時の間のEVの系統接続率の二つの指標を変化させ評価を行った。

2.2 電力需給の予測

2.2.1 電力需給予測の概要

島内の電力需給状況を把握するため、島内で稼働している火力発電(内燃力発電)および太陽光、風力を利用した再生可能エネルギーの年間発電量を1時間ごと(8,760時間分)に推計した。年間電力需要量も、後述の方法で1時間ごとに推計した。

2.2.2 太陽光発電

太陽光発電の発電量の計算は、JIS C 8907(太陽光発電システムの発電量推計方法)を参考にした。日射量や気温のデータは、NEDOが公開している9年分(2010～2018年)の時別平均値(METPV-20)を利用した。本研究では、太陽光パネルはすべて南向き、傾斜角は種子島における年間最適角である28度で設置してあるものとした。

2.2.3 風力発電

風力発電の発電量の予測は、日立製作所製の2000kW級風車のパワーカーブを使用した。風速に関しては、気象庁が公開している8,760時間分の地上風速データを入手し、(1)式を用いて上空風速に変換した値を用いた。

$$Vz = Vr\left(\frac{Z}{Zr}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

ここで、Vzは高さZにおける風速、Vrは高さZrにおける風速、Zは地上からの高さ、Zrは基準高さ、nは地上面補正係数であり、今回は4とした。

2.2.4 電力需要予測

種子島の電力需要は、Kikuchi etal.(2014)[2)]の季節別・休日平日別・時別の電力需要をもとに、独自に推計した電力需要と月別気温の相関関係による補正係数を乗じ、発電量と同様に8,760時間分の年間電力需要を予測した。

2.2.5 出力抑制量の算出

出力抑制量については、前述の電力需要の50%を最低火力発電量とし、太陽光発電と風力発電との合計が電力需要を上回る場合、余剰分は出力抑制を行ったものとみなし、その量を記録した。

2.3 シミュレーションの仮定条件

シミュレーションの仮定条件を以下に述べる。

EV 代替率は、普通乗用車、小型乗用車、軽自動車の車種ごとに EV に置き換わった割合を示し、0～100%まで 20%刻みで設定した。

10～16 時における接続率は、10～16 時に電力系統に接続される EV の比率を示し、20～60%で検討した。充電量は、1 時間ごとの太陽光発電量比に応じて電力系統から受け取り蓄電するものと仮定した。

10～16 時に接続される EV は、蓄電容量の 5 割を充電し、3 割を夜間に放電、2 割を走行に使用するものとし、それ以外の時間帯に接続された EV に関しては、走行した 2 割分の充電しか行わないものとする。

バスは運行状況を調査し、10 時～16 時に接続できる台数を予測し、接続できるバスは蓄電容量のすべてを充電し、充電量のすべてを夜間に放電するものとした。

3. 結果と考察

島内に現在導入されている再生可能エネルギーの発電容量のまま 2040 年に V2G システムを導入した際のシミュレーション結果を表 1 に示す。

バスのみをすべて EV で代替した場合、本来出力抑制されるはずだった再生可能エネルギーの一部がバスに蓄電され、他の時間帯に利用されたことで、まったく代替しない場合と比べて年間の火力発電量は減少し、CO_2 も削減された。

一方、EV の代替率が上昇するにつれて年間 CO_2 削減率は上昇していくものの、年間の火力発電量は増加してしまう結果となった。つまり、EV の導入によるガソリン使用量の削減による CO_2 減少効果は大きいものの、最大電力需要が上昇することで、火力発電の稼働量が増加してしまい、十分な CO_2 削減効果は得られないことを表している。また、火力発電量の増加は、電力供給がひっ迫する恐れがあることも表しているため、EV への代替と同時に再生可能エネルギーの導入量も進めていく必要がある。ただし、スペースの都合上詳細は割愛するが、変動性の高い太陽光発電の導入量を増やすと、出力抑制量が増加してしまうことになったため、太陽光発電以外の再生可能エネルギーの導入を検討する必要がある。

4. おわりに

本研究の検討から、種子島に V2G システムを導入することで CO_2 削減効果が得られることが示された。しかし、EV への過剰な代替は電力需給がひっ迫する恐れがあることも示された。したがって、EV への代替と同時に再生可能エネルギーの導入も進めていく必要がある。

一方で、シミュレーションの条件の設定上、天候不順により出力抑制が行われない日であっても 10～16 時の間に充電を行ってしまう設定となっているため、余剰電力量に応じて接続率を変動させるなど、シミュレーションのさらなる改良が必要である。

表 1 シミュレーション結果

EV 代替率	10～16 時における接続率	年間火力削減量 (MWh)	年間 CO_2 削減率 (%)
0%		0	0.0
0% (バスのみすべて代替)		1,643	2.0
20%	20%	-1,330	3.2
	40%	-781	3.9
	60%	-376	4.3
40%	20%	-4,870	3.8
	40%	-4,028	4.8
	60%	-3,645	5.2
60%	20%	-8,615	4.2
	40%	-7,802	5.1
	60%	-7,552	5.4
80%	20%	-12,472	4.4
	40%	-11,827	5.2
	60%	-11,658	5.3
100%	20%	-16,442	4.5
	40%	-15,950	5.1
	60%	-15,833	5.2

5. 参考文献

1) Yasunori Kikuchi, Miwa Nakai, Yuichiro Kanematsu, Kazutake Oosawa, Tatsuya Okubo, Yuko Oshita and Yasuhiro Fukushima: Sustainability Science, 15, (2020), pp1473-1494.
2) Yasunori Kikuchi, Seiichiro Kimura, Yoshitake Okamoto and Michihisa Koyama: Applied Energy, 132, (2014), pp586-601

地域特性及び車両特性を考慮した 中量輸送機関のライフサイクル CO_2 排出量の評価

Evaluation of Life-Cycle-CO_2 emission from medium-capacity transportation considering regional and vehicle characteristics

○山田祐磨*[1)]、加藤博和[2)]、朴秀日[2)]
Yuma Yamada , Hirokazu Kato , Suil Park
1)名古屋大学工学部環境土木・建築学科
2)名古屋大学大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター
*yyamada@urban.env.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

日本の運輸部門の CO_2 排出量は人間活動起源全体の約2割を占める。主な削減策の一つとして旅客交通の自動車から公共交通への転換がある。日本の中規模都市においては、バスでは輸送力が不足し、鉄道は採算面の問題で導入が難しいなどの理由から、それらの中間の需要を満たす中量輸送機関が注目されている。

加えて、公共交通への転換による CO_2 削減効果を評価することは、環境面からの適切性を評価する上で不可欠である。しかし中量輸送機関にはさまざまな種類があり、また地形・気候などの地域特性によってパフォーマンスも異なる。そのため自治体がどの輸送機関を導入するかを環境面から検討する際は、導入地域の地形・気候条件を含めた評価が必要である。

2. 研究の目的

本研究は、中量輸送機関の導入による CO_2 排出量の把握、及び地形・気候・需要(地域特性)による影響と輸送機関ごとの車両性能の違いによってどのように変化するかを定量的に示すことを目的とする。

まず既存の主な中量輸送機関を対象とし、ライフサイクルを考慮した CO_2 排出原単位を整備する。その後、勾配や回生、気温などの要因が電力消費量に与える影響を分析・整理し、それらの影響も考慮した中量輸送機関の CO_2 排出量評価を行う。

3. 中量輸送機関の SyLC-CO_2 排出量評価

3.1 SyLC-CO_2 原単位について

本研究では、中量輸送機関をインフラと車両から構成されるシステムとして扱い、これらシステム全体を対象としたライフサイクル環境負荷(System Life Cycle Environmental Load : SyLCEL)によって評価する。

中量輸送機関システムのライフサイクルを、1) 車両の製造段階、2)インフラの建設段階、3)車両の走行段階、4)インフラの維持・運用段階に分け、輸送機関 m の SyLC-CO_2 排出量 E を式(3.1)で推計する

$$E^m = \left(\frac{V_c^m}{T_V{}^m \times \mathrm{P}}\right) + \left(\frac{V_r^m}{p}\right) + \left(\frac{I_c^m}{T_I{}^m \times P}\right) + \left(\frac{I_r}{P}\right) \quad (3.1)$$

V_c：車両製造時 CO_2 排出原単位，V_r：走行時 CO_2 排出原単位，I_c：インフラ建設時 CO_2 排出原単位，I_r：インフラ運用時 CO_2 排出原単位，T：ライフタイム[day]，P：輸送量[人 km /day]，p：車両1台あたりの乗車人数[人]

なお、車両及び廃棄段階の CO_2 排出量は総量と比べて微量であることが既往研究[1)2)]により示されており、本研究においても同様に含めないとする。

3.2 各輸送機関の SyLC-CO_2 排出量計算

図 1 に仮想区間(10km)における各輸送機関の SyLC-CO_2 排出量推計結果を示す。輸送量の大小による違いを示すため LRT, モノレールの輸送量[3)]を参考に、1[day]あたり輸送量を設定①：6,000[人/day]、設定②：30,000[人/day]と設定し推計を行った。ただし、本稿では軌道部は単線とし、輸送量の増加によるインフラ投入量の増加は考慮していない。

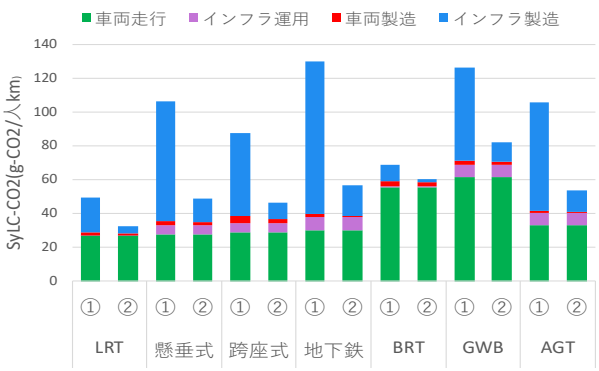


図 1 各輸送機関の SyLC-CO_2 排出量推計結果

輸送量が小さい場合(①)は、インフラ建設分と車両走行分の全体に占める割合が大きい。それに対し輸送量が大きい場合(②)、車両走行分が SyLC-CO_2 排出量のほとんどを占める。これは SyLC-CO_2 において人 km あたりインフラ建設時 CO_2 排出量が輸送量の増加に伴い減少するのに対し、車両走行時 CO_2 排出量は輸送量によらず一定であるためである。

1[day]あたり輸送量[人/day]が増加するにつれてインフラ建設分の人 km あたり SyLC-CO_2 排出量は減少し、1[day]あたり輸送量が 20,000[人/day]以上の範囲で各車両走行

時 CO_2 排出量が SyLC-CO_2 排出量全体の 50%以上を占めるようになる。

4. 地域特性の影響分析

本章では、車両走行分に影響に与える気候条件や車両特性、勾配などの走行条件の SyLC-CO_2 を推計する。事業者から取得したデータを用いて地域特性、車両特性などの影響要因による走行時の電力消費量原単位[kWh/km]（以降、走行原単位）の変化を分析する。

まず、回生による CO_2 排出量への影響分析を行った。ただし、電車の回生率は、抵抗器の性能だけではなく、列車の発着タイミングなどにも左右されるため、輸送機関ごとの値を設定するのが難しい。そこで各輸送機関の走行原単位が回生の影響により減少した場合の SyLC-CO_2 排出量を推計し、減少前と比較する。ただし回生による走行原単位の減少率は、事業者（LRT, 跨座式モノレール）への回生率と電力消費量のヒアリング結果をもとに 10[%]減少と 30[%]減少した場合を設定した。

これらの推計結果を図 2 と図 3 に示す。ただし、他の輸送機関との比較のしやすさから跨座式モノレール・AGT・地下鉄, LRT の CO_2 排出量を示した。

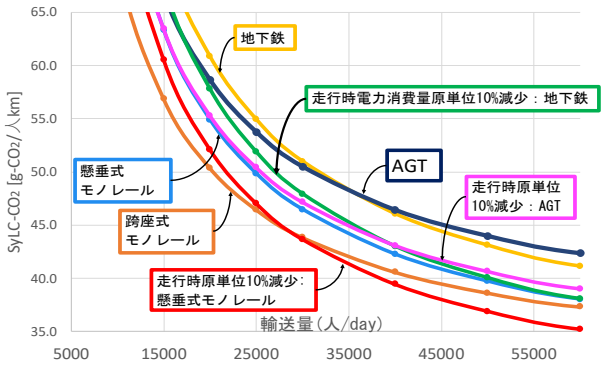


図 2 走行原単位減少（10%）による SyLC-CO_2 の変化

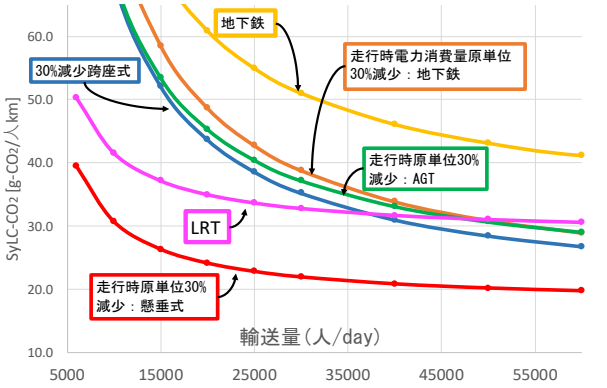


図 3 走行原単位減少（30%）による SyLC-CO_2 の変化

図 2 に示すように各輸送機関の走行原単位[kWh/km]が 10[%]減少した場合、輸送量 6,000~60,000[人/day]の範囲では、SyLC-CO_2 が減少前と比べて 3~9[%]減少した。一方、図 3 に示すように走行原単位が 30[%]減少した場合、SyLC-CO_2 が減少前と比べて 10~27[%]減少した。これによって車両の回生機能（走行原単位を 10～30[%]減少させる場合）は SyLC-CO_2 排出量に 5~30[%]程度の影響を与えることがわかった。さらに、図 2,3 より回生の有無や回生率によっては、輸送機関の SyLC-CO_2 排出量の大小の逆転が十分起こりうることがわかった。

なお、本研究でおこなったヒアリング調査の対象輸送機関は、蓄電設備が無い機関や運行本数が比較的多くない機関であったが、その他の設備や運行状況によっては回生による SyLC-CO_2 削減効果がさらに増加する可能性が考えられる。

5. おわりに

本研究では、旅客運輸事業者から取得したデータを用いて想定区間での各中量輸送機関の SyLC-CO_2 排出原単位を整備し、CO_2 排出量を推計した。さらに、車両の回生による走行時電力消費量原単位[kWh/km]削減効果の SyLC-CO_2 排出量に与える影響の分析を行った。

その結果、車両走行分が SyLC-CO_2 全体の大きな割合を占め、その割合は輸送量の増加に伴い増加することがわかった。加えて、回生による走行原単位[kWh/km]の減少効果は中量輸送機関の車両走行時 CO_2 排出量だけでなく SyLC-CO_2 排出量にも無視できない影響を及ぼすことがわかった。

しかし、本稿で考慮した回生などの車両性能だけではなく、勾配や積雪などの地域特性や走行条件も輸送機関の走行時電力消費量に影響を与えると考えられる。

今後は、これらの影響と電費との関係を分析する。これによって様々な地域における中量輸送機関の導入検討において、地域特性を考慮した環境面からの評価に資することができる。

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（JPMEERF20201G01）により実施した。

6. 参考文献

1) 長田基弘, 渡辺由紀子, 柴原尚希, 加藤博和：LCA を適用した中量輸送機関の環境負荷評価, 土木計画学研究・論文集（2004）, No23,pp355-363
2) 渡辺由紀子, 長田基弘, 加藤博和：波及効果を考慮した LRT システム導入の環境負荷評価, 第 1 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, (2005), pp90-91
3) 国土交通省 “平成 30 年度鉄道統計年報(1)-1 運輸成績表（数量）”, 鉄道統計年報, (オンライン), 入手先 <https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk2_000051.html>（参照 2022-01-07）

モビリティ革命の低炭素性評価の方法論

A methodology for low-carbon assessment of the mobility revolution

○朴秀日*[1)]、加藤博和[1)]、森田紘圭[2)]
Suil Park、Hirokazu Kato、Hiroyoshi Morita
1) 名古屋大学大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター
2) 大日本コンサルタント株式会社中部支社
* suil@urban.env.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

日本国内の温室効果ガス排出総量の約2割を占める運輸部門においては、排出量削減のために、技術・車両・運行形態の革新を図るのみならず、移動の変更を伴う交通システム全体の改善が必要不可欠である。一方、近年はICTやエネルギー等に関する新技術の活用に伴い「モビリティ革命」が起きつつあり、特にCASE（Connected・Automated・Shared・Electrification）と呼ばれる自動車の根本的な変革が予想される。また、MaaS（Mobility as a Service）の登場とともに、これらを基盤とした交通モード間の連携が注目を浴びている。しかし、モビリティ革命をもたらす新たな技術・サービスの環境負荷に関する学術的・客観的な評価や検討はほとんど行われていない。

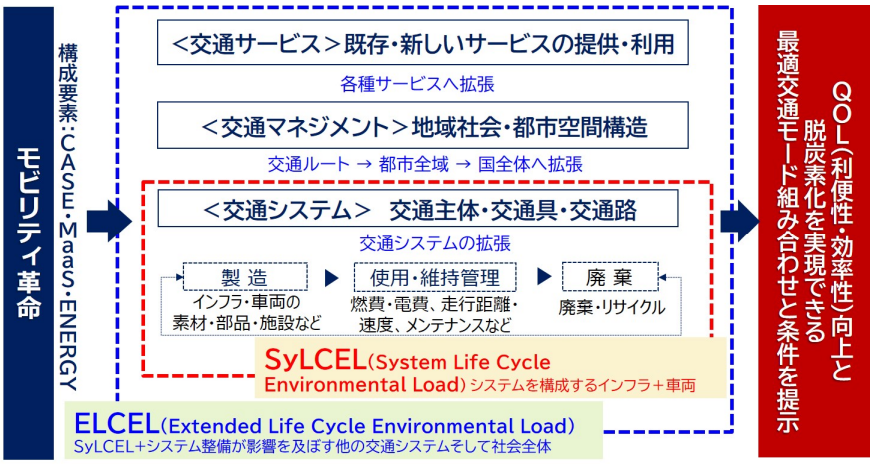


図１　フレームワーク

そこで著者らは「モビリティ革命が脱炭素化を実現するための条件」を明らかにする手法の確立を目指して研究を進めている。本稿では、研究で開発しようとしている評価手法の概要について紹介する。

2. 研究の目的

本研究では、交通システムに様々な交通具・技術・サービスを導入した場合の低炭素性変化を LCA（Life Cycle Assessment）を用いて把握し、さらに需要・供給状況や、インフラ整備・エネルギー技術等の要因による変化も考慮できる評価手法を開発する。これを実際の都市に当てはめ交通システムの低炭素性を評価するとともに、シームレスな移動も同時に実現することで、QOL 向上にも資する交通システムのあり方を見いだす方法論を確立することを目的とする。

3. LC-CO_2 排出量の評価手法

3.1 フレームワーク

本研究のフレームワークを図 1 に示す。著者らは、通常の LCA では個別に評価される車両やインフラをまとめて一体的な交通システムとして扱う SyLCEL（System Life Cycle Environmental Load）による評価を行ってきた。さらに、交通システム利用・走行状況を反映させ、交通社会資本整備に影響を受ける他の交通手段や活動まで評価を拡張した範囲（バウンダリー）でのライフサイクル（LC）環境負荷を ELCEL（Extended Life Cycle Environmental Load）と呼び、道路整備や新規鉄軌道整備時における CO_2 排出量変化の評価手法を構築し実例に適用してきた。これらの評価手法を援用・拡張し、次世代モビリティツール（交通具）・技術・サービスの評価に用いる。そのために、各対象についてプロセスツリーを作成しそれに沿ってライフサイクルにわたる CO_2 排出量（LC-CO_2 排出量）を特定化し、CO_2 排出量変動要因とその関係性を整理する。さらに、LCA に基づく各種交通具・技術・サービスの低炭素性評価手法を構築する。

まず、都市内の各種交通手段（自転車・電動アシスト自転車・電動キックボード・原付・自動車（GV/EV/HV）・BRT・LRT・その他の中大量輸送機関など）の LC-CO_2 排出原単位を収集・整備し、CO_2 排出量を推計・比較する。その結果を踏まえ、交通需要・輸送量等の条件に応じて導入・転換が環境負荷削減にとって有効かどうかを SyLCEL および ELCEL の値で評価し、さらに感度分析を通じて不確実性を考慮でき

る方法論を構築する。これをベースに、各地域の特性や車両特性・走行条件を考慮可能な低炭素性を評価できるようにする。その上で、地域公共交通への導入および転換の検討時、各地域別・交通手段別に低炭素化効果を客観的に把握できる簡易評価手法を提示する。

3.2 LCA に基づく CO_2 排出量変動要因の整理

モビリティ革命に資する新技術・サービスのうち主なものとして、モード「交通具：電気・水素自動車、超小型モビリティ、グリーンスローモビリティ、電動バス、自律走行バス」、サービス「交通路：カーシェアリング、ライドシェアリング、バイク・サイクルシェアリング、モード連携サービス、貨客混載サービス」、ライフスタイル「交通主体：リモートワーク、フレキシブルオフィス、EC・デリバリー、オンライン診療」を抽出する。各項目の概要と普及・実装状況を整理し、それらの組み合わせによる CO_2 排出量変動の主要因を、製造から廃棄までの LC に着目して把握するために LC-プロセスツリーを構築する。これを用いると、交通具・技術・サービスの導入によって交通起源の CO_2 原単位・排出量が変動する要因について、外生要因である交通需要や燃料源、さらにこれらを規定する社会経路を含め、技術要因・地域要因・行動変容要因・内外的要因などの分析が可能となる。

3.3 評価に必要となるデータ整備および分析方法

抽出した項目および次世代モビリティツールやシステム・サービスを LC プロセスツリーに適用し、必要なデータを入力することで SyLC-CO_2 排出量を推計することができる。ここで評価範囲は「車両」（交通具）および「インフラ」（交通路）の製造・建設段階から、運行・運用にかかる維持・管理段階、廃棄段階までの一連の過程である。車両の LCA は「製造」「使用・維持管理」「廃棄」の各段階からなる。「製造」段階は「素材・部品・車体」の製品製造とする。「使用・維持管理」段階は「燃費・電費」「走行距離・速度」「メンテナンス」など、「廃棄」段階は「廃棄」「リサイクル」とする。「インフラ」の場合は、「建設」「維持・運用」の段階とする。

これら各段階の評価に標準的に使用できる LC-CO_2 排出原単位については、既に整備されているものを文献などから収集するとともに、ヒアリング調査を通じて素材・部品の情報・データを収集し、LCI データベース IDEA を用いて製造時の原単位を整備する。

走行時の原単位については、次世代モビリティツールの公表情報・データがほとんどないため、ヒアリング調査による実測データ入手や実車両の電費計測試験を通じて Well to Wheel 原単位を整備する。これを用いて地域に応じた利用状況・車両・走行条件などにおける CO_2 排出原単位・排出量を整備・推計し、それらの組み合わせを比較・分析する。適用例として、乗用車から鉄道・路線バス等の中大量公共交通への転換を進めるため、端末交通機関としてシェア型のパーソナルモビリティを導入する際、利用距離別・利用人数別・乗用車種類別に導入前後の低炭素性を、中大量公共交通と端末交通機関を合わせた交通システム全体で把握できる。加えて、地域性（季節・気候・気温・冷暖房使用・積雪量等）、走行条件（回生・勾配・加減速・線形等）や乗車人数（輸送量）の変化など、様々な条件を考慮して CO_2 排出量を推計することができる。

3.4 LCA に基づく CO_2 排出量の簡易推計手法

以上の考え方を踏まえ、次世代モビリティツールや ICT・エネルギー技術、およびそれらの組み合わせである交通システムの導入が低炭素化に貢献するかどうかを、客観的・定量的に評価できる簡易推計手法を構築する。これにおいては、導入によって変化する要因を「確実に生じるもの」と「不確実なもの」に分け、交通システムの LC の各段階における CO_2 排出量の変化を地域別に把握する。これは導入する技術・システムや、利用者数（交通需要）などの地域特性によって大きく異なる不確実性を意識して把握することで、結果の精度を考慮した評価を行うためである。

4. 今後の進め方

コロナ禍によりライフスタイルが大きく変化し、これに伴う交通活動は終息後も縮小・質的変化が予測されることから、その対応も踏まえたモビリティ革命推進の方向性を探ることが必要である。そのため、今後は、今後の公共交通および交通共有形態の変化を念頭に、複数モードを組み合わせた交通システムの評価と都市に与える影響を評価する。

また、自治体および交通事業者（供給者）と使用者（需要者）の所有・共有形態とビジネス（ステークホルダー）が大きく変化していく中で、モビリティサービスに関して、より多段階で環境評価・認証を行う仕組みの構築とその普及が必要不可欠と想定される。そのための脱炭素性能認証制度を構築することを目指す。

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（JPMEERF20201G01）により実施した。

口頭発表セッション（一般）

[3-A1] 金属リサイクル評価

座長：河尻耕太郎（産業技術総合研究所）

2022年3月4日(金) 09:20 ～ 10:40 A会場 (zoom)

Zoomはこちら

[3-A1-01] AIによる革新的実験計画法と将来技術の LCA評価の組合せによる多目的エコデザイン最適化：アルミニウムのアップグレードリサイクルプロセスの事例

*河尻 耕太郎[1]、小林 三千夫[2] （1. 産業技術総合研究所、株式会社エイゾス、2. 産業技術総合研究所）

09:20 ～ 09:40

[3-A1-02] 複数の合金種を含む素材を対象とした閉ループリサイクルの評価指標の構築

*武山 健太郎[1]、醍醐 市朗[1]、星野 岳穂[1] （1. 東京大学）

09:40 ～ 10:00

[3-A1-03] 金属素材の水平リサイクルの促進に向けたリサイクル原料利用率の評価手法と各種スクラップの分類

*鈴木 太一[1,2]、醍醐 市朗[1]、星野 岳穂[1] （1. 東京大学、2. 株式会社UACJ）

10:00 ～ 10:20

[3-A1-04] Definition of process boundaries for calculation of recycling indicators for recycling modelling in LCA

*Panasiuk Daryna[1]、Liu Junxi[1]、Dunuwila Pasan[1]、Daigo Ichiro[1] （1. University of Tokyo）

10:20 ～ 10:40

©日本LCA学会

AIによる革新的実験計画法と将来技術のLCA評価の組合せによる多目的エコデザイン最適化：アルミニウムのアップグレードリサイクルプロセスの事例

A Proposal of Multi-Objective Eco-Design by combination of Artificial Intelligence and Ex-Ante LCA: A Case Study of Upgrade Recycling Process of Aluminum

○河尻耕太郎*[1, 2], 小林三千夫[1,2], 戸次洋一郎[3], 寺田大将[4], 堀田善治[5]
Kotaro Kawajiri, Michio Kobayashi, Yoichiro Betsuki, Daisuke Terada, Zenji Horita
1) 株式会社エイゾス, 2) 産業技術総合研究所, 3)株式会社UACJ, 4)千葉工業大学, 5)九州工業大学
* kotaro-kawajiri@aist.go.jp

1. はじめに

近年、研究開発段階の将来技術（Emerging technology）のLCAは、近年Ex-ante LCAとして、手法論という観点でホットトピックの一つである。研究開発段階の将来技術は、小規模で非効率な装置を使用している等が原因で、大規模実用化された既存技術と比較して、機能単位当たりの環境負荷が著しく大きい。したがって、ラボスケールのインベントリデータをそのまま用いてLCAを実施すると、実用化スケールの既存技術と比較して、機能単位当たりの環境負荷は数倍から数千倍、場合によっては10^6倍になる場合もある。したがって、研究開発を効率化することが出来れば、環境負荷を効率的に削減できる。

工学的な研究開発の多くは、生産物を評価する複数の目的変数に対して、最適な製造条件（入力）を探索する多入力多目的システムの最適化を目的とする。仮に、入力パラメータがi個、各入力パラメータに対してN通りの条件を設定すると、実験条件の組合せはN^i通り存在する。したがって、入力パラメータの数が増加すると、その組合せの数は幾何級数的に増加し、最適解の探索が困難になる。さらに、目的変数が複数存在し、トレードオフの関係にある場合、それら複数の目的変数を同時に最適化する最適解を、N^iの組合せの中から探索することは、人力では難しい。

我々は、複数の人工知能の手法を組合せ、前述のような多入力多目的システムの最適解を簡易に探索することを可能とする、革新的実験計画法を提案した（図1参照）[1]。革新的実験計画法により、必要最小限の実験データを通じて、複雑な多入力多目的システムの最適解を簡易に探索することが可能となり、研究開発効率を飛躍的に向上することが可能である。

本稿では、前述の革新的実験計画法と将来技術のLCA評価を組合せ、アルミニウムのアップグレードリサイクルプロセスに適用し、材料の機能のみならず、コストや環境負荷も考慮して多目的最適化した事例について紹介する。

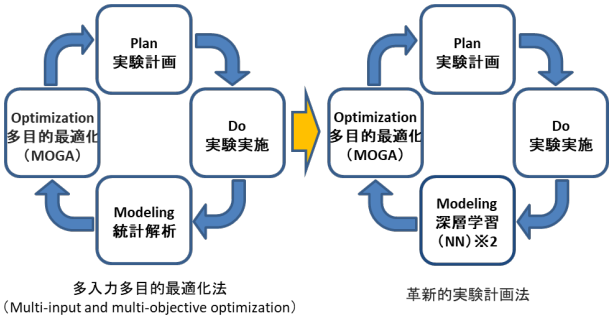


図1. 革新的実験計画法

2. 方法

本稿では、前述の革新的実験計画法を、アルミニウムリサイクルの加工熱処理技術に適用した。加工熱処理は、不純物濃度の高い素材に対して、加熱やひずみ加工を施すことで、素材中の不純物による化合物相を破砕し、不純物による素材の機能低下を防ぐ技術である。本技術によって、ある程度不純物濃度が高くても、バージン材と同等程度の機能を有する再生アルミ材を製造できれば、その環境負荷削減効果は大きい。

本研究では、前述の加工熱処理プロセスの実験データを元に、実験データからインベントリデータを作成し、得られたインベントリデータからコスト・環境影響を評価した。また、素材の強度や延性などは、別途評価を行った。

LCA評価の条件は次のとおりである。

- 機能単位：再生アルミ1kg
- 評価項目：環境影響（LIME2の13の特性化、4つの被害評価、1つの統合評価）、コスト
- バックグラウンドデータ：IDEA v.2

スケール効果分析として、加工熱処理の加熱処理に

ついて、既存の装置情報を元に、実験条件の加熱温度から消費電力を推計するとともに、スケール効果を考慮して大規模実用化時の消費電力を推計した。

今回、NN の学習に使用した実験パラメータを表 1 に示す。表 1 に示された実験パラメータに対して、18 の実験条件と結果の実験データを用いて、NN の学習を行った。なお、溶体化処理の温度と時間、高圧スライド加工時の付与圧力は一定のため、NN を学習させるためのインプットデータからは除外した。また、多目的最適化では、Hardness、TS、PS、Elongation は全て最大化し、LCA 評価で得られた温室効果ガス（GHG）とコストは最小化するように、多目的遺伝的アルゴリズム（MOGA）によるインプットの最適化を行った。

表 1. 実験パラメータ

		項目名	単位
実験条件（インプット）	不純物濃度	Si	%
		Fe	%
		Mg	%
	溶体化処理	Temp.	℃
		Time	min
	高圧スライド加工	Pressure	GPa
		Length	mm
	時効処理	Temp.	℃
		Time	min
実験結果（アウトプット）		Hardness	Hv
		TS	MPa
		PS(0.2%)	MPa
		Elong.	-

3. 結果

MOGA によって得られた結果を図 2 に示す。図 2 では、Hardenss を横軸に、他の 5 つの各目的変数をそれぞれの最大値（TS : 461 MPa, PS : 393MPa, Elong : 0.67, GHG : 0.66 kg-CO2, コスト : 180JPY）で除した数値を縦軸に示す。

今回の実験条件の範囲では、GHG とコストはほとんど変化しなかった。この原因は、エネルギー消費の大きな溶体化処理の条件や、高圧スライド加工の圧力などの条件が一定であり、他のパラメータを変化させても、GHG やコストにはほとんど影響がないためである。特に GHG については、バージン材のアルミニウムの GHG 排出量は 10 kg-CO2eq 程度であることを考えると、その 10 分の 1 以下であり、仮に今回の技術によってバージン材相当の機能が担保されるのであれば、環境負荷という観点で優位性が高い。したがって、今回の条件の範囲においては、GHG やコストは無視して、素材の機能のみに着目して最適化を実施すればよいことが示された。

一方で、それらの条件によって、得られた再生アルミの機能は大きく変動した。基本的に、Hardness、TS、PS は同時に最大化出来るが、Elongation は前述の 3 つの目的変数とトレードオフの関係にあり、4 つの目的変数を同時に最大化することが出来ないことが示された。この結果は、一般的に素材の強度と延性はトレードオフの関係にあるという基本的な特性にそったものであり、AI の解析結果の妥当性が示されている。したがって、本プロセスを最適化するためには、今回得られた最適な条件群の中から、ターゲットとなる素材の仕様に合わせて、強度に関する 3 つの目的変数と、延性に関する 1 つの目的変数のバランスの良い条件を選択する必要がある。

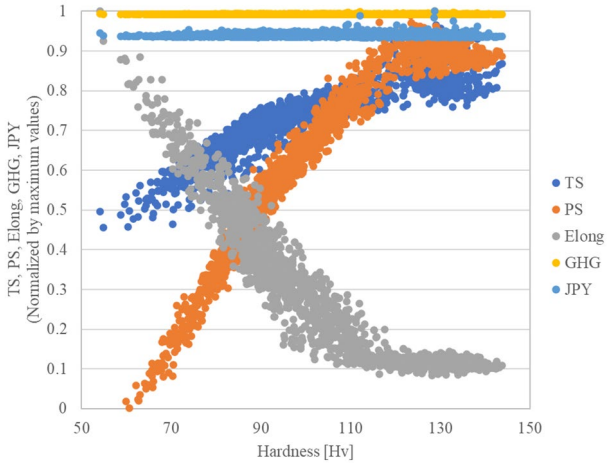


図 2. MOGA による多目的最適化

4. 結論

本稿では、革新的実験計画法と将来技術の LCA 評価の手法を組合せ、アルミニウムの加工熱処理技術のプロセス条件最適化に適用した。18 回の実験データから、素材の機能、環境負荷、コストを同時に最適化する条件を探索した。

今後、本手法により将来技術の研究開発効率を飛躍的に向上させるとともに、研究開発段階の環境負荷を削減できる。

5. 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）の助成事業の結果得られたものです。

6. 引用文献

1) 河尻耕太郎，濱川滉大，早瀬仁則，小阪亮，西田正浩: 日本品質管理学会第 122 回研究発表会要旨集，(2020) ， pp 97-100.

複数の合金種を含む素材を対象とした閉ループリサイクルの評価指標の構築

Evaluation method for closed-loop recycling system of material with multi-alloy types

○武山健太郎[*1)]、醍醐市朗[1)]、星野岳穂[1)]
Kentaro Takeyama, Ichiro Daigo, Takeo Hoshino
1) 東京大学
* takeyama@mfa.t.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

天然の鉱物資源はその採掘においては、様々な環境負荷や社会的影響を生じる可能性がある[1)]。また、埋蔵量は有限であり、昨今の国際的な金属資源需要の急増に伴い、将来的に現存の資源埋蔵量のみでは、その需要を賄うことができないと予測されている[2)]。このため、資源の持続的利用の観点から循環利用への関心が高まっている。素材のリサイクルは、「閉ループリサイクル」と「開ループリサイクル」の2つに大別できる。「閉ループリサイクル」は、素材固有の特性がリサイクルの前後で変化しないリサイクルであり、「開ループリサイクル」はリサイクルの前後で素材の固有の特性が変化するリサイクルである[3)]。どちらの形態のリサイクルにおいても、資源消費量の削減が可能であると考えられるが、開ループリサイクルにおいては、スクラップ中の不純物元素含有量が高い場合や、スクラップの発生量が需要可能量を超えた場合、回収可能なスクラップの全量が有効に利用できない可能性が指摘されている[4)]。そのため、将来にわたり素材の循環利用によって資源消費量の削減のためには、素材の閉ループリサイクルの促進が望ましいと考えられる。

素材のリサイクルシステムの効率性を評価するための指標としてEoL-RR (End-of-Life Recycling Rate)が提案されている[5)]。EoL-RRは排出された使用済み製品に含まれる素材の量に対する、実際にリサイクルされた素材の量の比として定義される[5)]。EoL-RRは素材が対象システムから散逸する量を減少させることを目標とした評価指標として適切な指標であると考えられる。

金属は、純金属のまま社会で用いられることはほとんどなく、様々な元素を添加し、合金としてそれぞれ求められる特性を発現している。そのため、求められる機能によっては、添加合金成分が不純物と同様にリサイクルの制約となることがある。このため、金属素材においては、合金種別に区別してリサイクルシステムの効率の評価をすることが望ましいと考えられる。しかしながら、先行研究において、素材全体もしくは元素を対象としたEoL-RRは推計されている[4)]ものの、対象とする素材が内包する複数の合金種を区別して閉ループリサイクルの評価がされてこなかった。そこで、本研究では、素材の閉ループリサイクルシステムの効率性を評価する指標の構築を目的とした。

2. 手法

素材Aが合金A_1、A_2の2つの合金種を内包する場合のマテリアルフローの概略図を図1に示す。先行研究[5)]においては明示されていなかった合金A_1のスクラップの合金A_2製造への投入フローをp_{A1}と置いた。図1に示したフロー量を用いて、合金A_1の閉ループリサイクル率(Closed-loop recycling rate, CL-RR)を式1で、EoL-RRを先行研究[5)]に基づき式2で定義した。合金A_1のCL-RRは使用済み製品に含まれる合金A_1の量d_{A_1}に対する、合金A_1製造に投入される合金A_1のスクラップの量$m_{A_1}+j_{A_1}$の比として、合金A_1のEoL-RRは使用済み製品に含まれる合金A_1の量d_{A_1}に対する、合金A_1のスクラップ回収量g_{A_1}の比として定義した。

$$CL\text{-}RR_{A_1} = (m_{A_1} + j_{A_1})/d_{A_1} \quad (1)$$

$$EoL\text{-}RR_{A_1} = g_{A_1}/d_{A_1} \quad (2)$$

本報告では、ケースとしてアルミニウム素材のリサイクルに着目した。アルミニウム素材は、その合金元素の含有量によって合金元素濃度が約5%以下の展伸材ならびに合金元素濃度が15%程度の鋳造材の2種類に大別される。展伸材に分類されるアルミニウム合金には様々な合金系が存在しており、それぞれの特性に合わせて様々な用途に使用されている。使用済み製品からの回収プロセスにおいては、合金系ごとの分離が不十分なことや異素材がスクラップ回収時に混入することによって、アルミニウム合金スクラップに含まれる元素の種類とその量を厳密に明らかにするのは困難

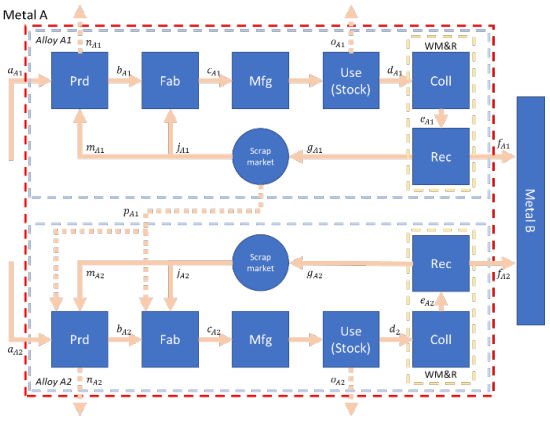


図1 マテリアルフローの概略図

である。そのため、現在は展伸材の閉ループリサイクルが制限され、鋳造材への開ループリサイクルが主になっている。自動車は今後脱炭素のために電動車に転換される潮流になっていることから、鋳造材の主たる用途先であるエンジンブロック等の自動車用内燃機関に資する部品の需要が減少すると予測されている [4]。これは、先の開ループのリサイクル先の需要減少となり、発生する展伸材のスクラップの一部が有効に利用できなくなることが予測される。そのため、展伸材の閉ループリサイクルを促進することが望まれる。アルミニウム合金について合金種ごとに CL-RR および EoL-RR を推計するためには、合金種別のスクラップ回収量及びそのリサイクルフローのデータが必要となる。これは前報告 [6]に基づき、2016 年の日本国内におけるアルミニウム合金のスクラップ回収量及びリサイクルフローデータを作成した。

3. 結果および考察

2016 年のアルミニウム合金の CL-RR および EoL-RR を表 1 に示す。対象とする合金の区分は Ashby の Taxonomy of the materials and their attributes[7]に基づき決定した。アルミニウム合金に関しては、組成によって決定される subclass と別に、その加工法による区分（展伸材、鋳造材）があり得るため、組成によって決定された subclass と加工法によって決定された subclass を設定し、それぞれの subclass について CL-RR および EoL-RR を推計した。加工法に基づく subclass の CL-RR と組成に基づく subclass の CL-RR はその値に大きな差異がみられる。この差異の要因となるのは飲料缶由来のスクラップのリサイクルである。飲料缶用途は、3000 系、5000 系が使用されており、この 2 つの合金系が混合した状態で 3000 系、5000 系の製造に使用されている。そのため、5000 系スクラップが 3000 系展伸材の製造に、3000 系スクラップが 5000 系展伸材の製造に投入されている。加工法に基づく subclass においては、両方とも展伸材へのリサイクルであるため、閉ループリサイクルされた量に含まれる。一方、組成に基づく subclass においては、同一の合金系にリサイクルされないため、閉ループリサイクルされた量には含まれない。対象とする素材のリサイクルの望ましいリサイクルや評価の目的によって素材の区分、階層の決定が重要である。

ISO 14044 において、閉ループリサイクルの定義の一つとして「使用済み素材が同一の製品用途へとリサイクルされる」と記載されている [3]。この製品視点での閉ループリサイクルについても、使用済み製品に含まれる対象素材の量と同一用途に投入されたリサイクル素材の量の比を製品の視点の閉ループリサイクル率 (Product Closed-Loop Recycling Rate; p-CL-RR)として定義する。自動車製品の p-CL- RR はすべての産業で最大の 73.2%を示した。これは、アルミニウム合金のカスケードリサイクル先である鋳造材の最大の需要用途であるエンジンブロックを含むためと考えられた。一方、組成に基づく subclass の CL-RR の向上に寄与している飲料缶用途の p-CL-RR は 39.0%と低い値を示した。これは生産された 3000 系展伸材の 81%が再度飲料缶用途に使用されるためと考えられた。この値は生産された鋳造材の 91%が自動車製品に再度使用されるのに比べて低い値になっている。そのため、合金種の閉ループリサイクルを促進するための指標としては、素材に着目した CL-RR が適していると考えられた。

表 1 アルミニウム合金の CL-RR, EoL-RR

Subclass		CL-RR		EoL-RR
Process	Composition	Process	Composition	
Wrought alloy	1000 type	29.3%	13.5%	54.6%
	2000 type		0.0%	75.3%
	3000 type		44.3%	81.8%
	4000 type		0.0%	82.8%
	5000 type		1.1%	72.5%
	6000 type		29.5%	78.7%
	7000 type		0.0%	50.9%
	Other		0.0%	17.0%
Cast alloy	Cast alloy	80.6%	24.9%	80.9%
	Diecast alloy		55.7%	80.4%

4. 結言

本報告では、素材の閉ループリサイクル率 CL-RR の定義を行い、アルミニウム合金の閉ループリサイクルの評価をケーススタディとして実施した。CL-RR はアルミニウム合金全体を対象とした EoL-RR や製品視点での閉ループリサイクル率 p-CL-RR を用いた評価と比較し、素材の閉ループリサイクルを促進するための評価指標として適していると考えられる。一方で、対象とする素材の区分、階層によって、閉ループリサイクルに含まれる範囲が変化してしまうため、対象とする素材の区分、階層の決定手法の構築が求められる。

5. 引用文献

1) UNEP, Global material flows and resource productivity, (2016)
2) 原田幸明, 島田正典, 井島清: 日本金属学会誌, 71-10, (2007), 831-839
3) International Organization for Standardization: ISO 14044, (2006)
4) H. Hatayama, I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Adachi, Resour. Conserv. Recycl., 66, (2012), 8-14
5) T.E. Graedel, et al., J. Ind. Ecol., 15, (2011), 355-366
6) 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, On-line, 2021, 1-D2-01
7) M. Ashby, “Materials Selection in Mechanical Design, Fourth Edition”, Elsevier, Oxford, (2011), p.100

金属素材の水平リサイクルの促進に向けたリサイクル原料利用率の評価手法と各種スクラップの分類

Evaluation method of recycled content and classification of scraps to promote closed loop recycling of metals

○鈴木太一*1) 2)、醍醐市朗 1)、星野岳穂 1)
Taichi Suzuki, Ichiro Daigo and Takeo Hoshino
1)東京大学, 2)株式会社 UACJ
* suzuki-taichi@uacj.co.jp

1. 緒言

気候変動対策の一環や循環型経済の達成に向けた取り組みとして、最終製品のみならず材料レベルに至るまで、リサイクルの実態を対外的に主張することの重要性が高まっている。リサイクルの度合いを計る指標の一つとしてリサイクル原料利用率(recycled content, RC)が良く知られている。これは ISO14021 に規定されており、材料中に使用されたリサイクル原料の重量比を百分率で表したものである。RC に関して、最終製品の廃棄後のリサイクルを促すものではないとする批判 1) 2)や、環境モデリングや各種議論においてこの指標を用いるべきでないとする主張 3)があるが、直感的に理解しやすい指標であることから、実用的には数多く使用されている 4)。しかしながら、本指標は ISO14021 においてもシステム境界や計算式が詳細に規定されておらず、RC の計算において数値が過剰に大きく計算される懸念がある。そこで本研究では、金属材料に適したリサイクル原料利用率の評価手法の確立を目的とし、手法の構築に際しては再利用されるスクラップについて新たな分類を定義した。

2. 方法

RC は一次原料とリサイクル原料の合計重量を分母、リサイクル原料の重量を分子として百分率で表される(Figure 1)。ただし前述の通りシステム境界やスクラップの区別について不明確な点が残る。本研究では、RC の計算にあたり複合材や塗装材等でない均質な材料(uniform material)を対象としてまずシステム境界を定め、スクラップの分類を行った上で計算式を構築した。

2.1 システム境界の設定

RC 値は一般に下記 2 つのどちらかが要求される。

① 事業者または工場単位での生産材料の RC 値
② 特定の個別材料の RC 値

①についてシステム境界は Figure 2 のように事業者や工場内の全てのプロセスおよび製造する全ての材料を含むように設定される。これにより、材料製造時に工場内で発生するスクラップ(in-house scrap)がシステム境界の外に排出されることなく再び利用されるため、RC の分母からも分子からも除外され、計算を簡略化できる。なお ISO14021 は①と同様に事業者や工場単位での RC の計算を前提としていると考えられる。

②についてシステム境界は Figure 3 のように原料投入工程を起点として事業者や工場内における当該材料の製造プロセスを含み、下流プロセス側へ任意に拡張できるよう設定される。ただしより厳密な RC を計算するためには、システム境界を可能な範囲で狭く設定することが望ましい。このとき、工場内にシステム境界を設定することによりシステム境界を跨いで投入される in-house scrap が存在することとなる。既存のスクラップの分類では、このようなスクラップと境界内で循環利用されるスクラップとを区別できない。そこで、次に材料製造時に利用されるスクラップについて新たに分類を行った。

2.2 スクラップの分類

スクラップの分類については、ISO14044 にて同一製品システムへのリサイクルおよびリサイクル時の材料特性の変化の観点から次のように規定されている。

1) *Product closed – Material closed*: 同一製品システム内でリサイクルされ、材料特性に変化がない
2) *Product open – Material closed:* 同一製品システム内でリサイクルされず、材料特性に変化がない
3) *Product open – Material open:* 同一製品システム内でリサイクルされず、材料特性が変化する

これらは最終製品の使用寿命後、いわゆる End-of-Life 後の old scrap リサイクルを対象とした分類と考えられる。そこで製品製造時に発生する new scrap を対象とした分類を、同一材料システムへのリサイクルおよびリサイクル時の材料特性の変化の観点から新たに定義した。なお *Scrap internal – Material open* は実用上非現実的であるため、分類から除外した。

i) *Scrap internal – Material closed*: 同一材料システム内でリサイクルされ、材料特性に変化がない
ii) *Scrap external – Material closed:* 同一材料システム内でリサイクルされず、材料特性に変化がない

iii) *Scrap external – Material open:* 同一材料システム内でリサイクルされず、材料特性が変化する

本分類は in-house scrap に対しても適用可能である。In-house scrap の中で別ロットの同一材料に再度投入されるものは i)に、他の材料に投入されるものは同一工場内でも材料のシステム境界を跨ぎ投入されるため ii)に分類される。なお iii)は工場内での再利用が困難なスクラップであり、通常は他事業者に売却されるか廃棄処分される。

2.3 リサイクル原料利用率の計算式

設定したシステム境界およびスクラップ分類に基づき、材料製造の事業者または工場単位でのリサイクル原料利用率(RC_w)の計算式を式(1)のように構築した。

RC_w (%) = (B+C) / (A+B+C) ×100　　－(1)

A: 一次原料の合計重量

B: リサイクル原料の合計重量

C: 追加処理を施した in-house scrap, iii)の重量

A は一次原料、B は old scrap と new scrap の合計重量である。投入原料中に一次原料とリサイクル原料の混合材を含む場合、それぞれの重量を求め A と B に個別に計上する。in-house scrap のうち i), ii)はシステム内に含まれるため計算から除外された。C に関し iii)は前述の通り通常は売却または廃棄されるが、これに対し何らかの追加処理(additional effort)を施すことで材料製造時の投入原料として *Mateial closed* リサイクルできた場合、売却または廃棄されていたスクラップの再利用により投入される一次原料が代替されたことになる。このためリサイクル原料としてのカウントが可能と考えられ、追加処理を施した iii)を C として分母および分子に計上する。ここで追加処理とは廃棄物と原料の分離等の処理に留まらず、スクラップ配合を前提とした材料開発や規格の変更等も含むものと考えた。

次に特定の個別材料のリサイクル原料利用率(RC_i)の計算式を式(2)のように構築した。

RC_i (%) = (B+C+D') / (A+B+C+D) ×100　　－(2)

D: in-house scrap, i) ii)の合計重量

D': in-house scrap, i) ii)に含まれるリサイクル原料

RC_i の計算では i) ii)の in-house scrap も考慮する必要がある。i) ii)の発生元となる材料が一次原料とリサイクル原料の混合により構成されていた場合は、その材料の RC を乗じてリサイクル原料の重量 D'を求め、分子に加える。ここで D が当該材料自身の in-house scrap i)のみである場合、D' = D×RC_i となる。これを式(2)に代入して計算すると分母および分子から D が消去され、RC_w と RC_i が一致することとなる。

3. 結果と考察

本研究では、RC 導出のためのシステム境界ならびに工場内で発生するスクラップの分類を定義し、事業者や工場単位および個別材料のリサイクル原料利用率の評価手法として計算式を構築した。個別材料の RC は本研究にて初めて定義されたものであり、均質であれば全ての金属材料に適用でき、厳密な RC の計算が可能となった。

なお複合材料、例えば複層材や塗装材についてはそれぞれの構成層における RC を個別に求め、各層の重量との加重平均より複合材料としての RC を求めることができると考えられる。

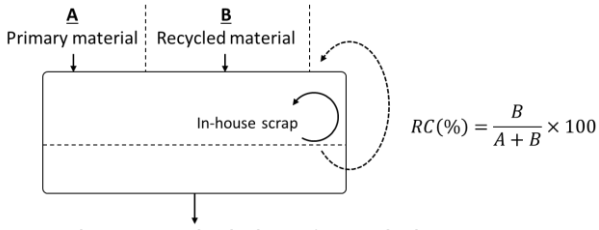


Figure 1 Calculation of recycled content.

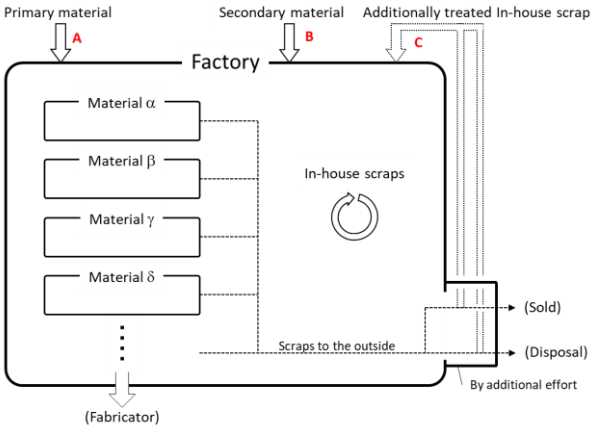


Figure 2 System boundary setting, in a factory level.

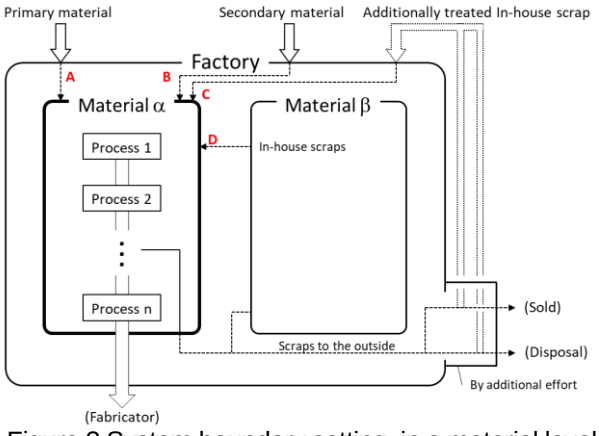


Figure 3 System boundary setting, in a material level.

引用文献

1) Graedel T. E. et al.: J. Ind. Ecol., 15 (3), (2011), pp.355–366

2) Frees N.: Int. J. LCA, 13 (3), (2008), pp.212–218

3) Atherton J.: Int. J. LCA, 12 (1) (2007), pp59–60

4) Apple Inc.: "Environmental Progress Report", (2021), pp.33-39

リサイクルモデリングに用いるリサイクル指標の計算におけるプロセス境界の定義

Definition of process boundaries for calculation of recycling indicators for recycling modelling in LCA

○パナシュク　ダリナ*[1)]、劉　俊希[1)]、ドウヌウイラ　パサン[1)]、醍醐　市朗[1)]
Daryna Panasiuk, Junxi Liu, Pasan Dunuwila, Ichiro Daigo
1) 東京大学
* panasiuk@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

Different allocation approaches and methods are applied to model material recycling in the inventory analysis of life cycle assessment. The choice of approach or method for recycling allocation has influence on the results of LCA, giving a benefit to the use of a recycled material or to the recovery of materials at the end of life (EoL) of a product. Both recycled content and EoL recycling rate are important parameters for calculation results of each allocation method, as shown in Table 1[1)].

Table 1 Parameters impacting the result of calculation with different allocation methods [1)]

Method	Recycled content	Recycling rate
Simple cut-off	X	(X)
Economic cut-off	X	(X)
Cut-off plus credit	X	X
0/100		X
100/0	X	X
50/50 methods	X	X
Quality-adjusted 50/50	X	X
Circular Footprint Formula	X	X
Price-based allocation	X	X
Price-based substitution	X	X
Price-elasticity methods	X	X
Allocation at the point of substitution	X	X

The life cycle inventory (LCI) analysis for recycling accounts for the avoided environmental burden due to recovery and recycling of materials that replaces primary production. The consideration of losses during the recovery and the share of virgin and recycled content in the product ensures physical realisim. Despite of the importance of parameters related to recycling modeling for LCA results, their justified estimation is not provided, except for steel [2)]. To address the applicability of allocation formulas to different metals, this paper discusses the associated parameters from three perspectives: appropriate material production process boundary, data sources for parameter estimation and application to product LCA. The aim is to present a guidance on the calculation of recycling parameters, to underline available data sources and their limitations.

2. Material production process boundary

The boundary for calculation of the recycling parameters is explained based on the graphical representation of a typical life cycle of a metal-containing good, shown in Figure 1. Metal production refers to all processes from mining to metal refining. Refined metal (flow *e*) undergoes casting and finishing process, like rolling and extrusion to produce finished metal products (*f*). Both processes generate home scrap that is recovered (c_1 and c_2). During manufacturing of final good, process scrap is generated (*d*) during cutting, forming, etc. Use process corresponds to the product lifetime. Finally, once discarded from use, metals may be separated, sorted and recovered at end-of-life stage.

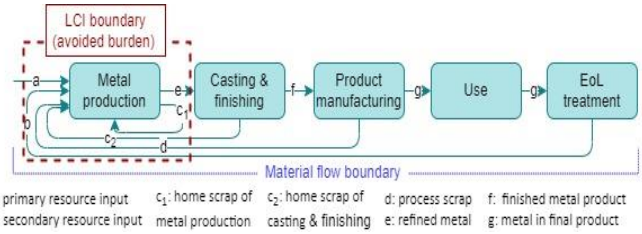


Figure 1 Typical life cycle of metal-containing good

Parameter "recycled content" (*S*) is used to to reflect how much primary material is avoided by recycling. Worsteel methodology argues that the best approximation for the primary material replacement by scrap is metal semi-product, i.e. slab[2)]. This assumprtion is not appropriate because the boundary includes casting & finishing, which are not avoided by recycling. Thus, the boundary for calculation of *S* for the avoided burden should include only the metal production process, where the recovered metal substitutes primary resources. This boundary means that home scrap from casting and finishing also contributes to the calculation of *S*, which was previously excluded[2)]. Based on Figure 1, the theoretical eq. 1 is proposed for the calculation of recycled content:

$$S = \frac{b}{a + b + c_2 + d} \quad (1)$$

Parameter "metallic yield" (*Y*) reflects the efficiency of the process:

$$Y = \frac{e}{a + b + c_2 + d} \quad (2)$$

EoL recycling rate (R) reflects the share of recovered metal compared to the discrarded quantity:

$$R = \frac{b}{g} \quad (3)$$

3. Data sources for parameter estimation

Material Flow Analysis (MFA) is widely used to provide a knowledge of material life cycle from material production to waste management. Previously, it was demonstrated that MFA can be used to estimate *S, Y* and *R* on the material level[3]. This estimation provided average values for metals, considering the input of new scrap. It concluded that MFA studies can be a trustable source of information for the recycling indicators, if system boundary is adapted to objectives of LCI modeling.

4. Application of the calculation to product LCA

The application of the propsed equations to a product-oriented LCI requires a careful consideration of new scrap generation. Indeed, from material perspective, new scrap (c_1, c_2 and d), is recycled within same material cycle, while from product perspective, it is difficult to define whether it will be recycled in the same product system. The origin of process scrap is ususally unknown, as it is a traded commodity. The recyling of new scrap does not offset the burden of material production, because its generation does not replace primary resources. On the other hand, the generation of new scrap contributes to the environmental burden of casting & finishing and manufacturing. The consideration of the environmental burden of new scrap in product-oriented LCI modeling depends on the objective and associated boundary. When metal production and final good manufacturing are considered as one process chain, the system is approximated to closed loop recycling (or open loop without changes in inherent properties): new scrap is recycled internally within the system and allocation can thus be avoided. When the production of metal products is not included in the focus of a study, process scrap is a dependent co-product of the manufacturing process and its environmental impact must be evaluated. The calculation of the environmental impact of co-product depends on the modeling approach of product-oriented LCA – attributional or censequential. Generally, for attributional LCA partitioning is recommended, but for recycled co-products cut-off is suggested[4]. In consequential LCA, system expantion is applied. Substitution modeling is appropriate for process scrap, due to its constrained supply; environmental benefit is allocated to the supply side[4].

Assuming that metal production and final good manufacturing are considered as one process chain, eq. 1 can be simplified:

$$S = \frac{b}{a + b} \quad (4)$$

Based on eq. 4, values for recycling parameters were calculated from same MFA studies as for material perspective[3]. Values of the recycling parameters for vehicle light-weighting metals are summarized in table 2. These values represent average values for all materials.

Table 2 MFA-based estimation of recycling parameters

Target materials	Recycled content	Metallic yield	Recycling rate
Steel	0.24	0.89	0.85
AHSS	0.24	0.89	0.85
Cast iron	0.17	0.99	0.85
Wrought aluminum	0.05	0.97	0.84
Cast aluminium	0.473	0.97	0.84
Magnesium alloy	0	0.95	0

The recycled content of different parts may vary. For instance, flat steel products (used for vehicle body panels) are mainly produced from primary resources, while long products – from secondary resources[5]. Current steel MFA studies do not have sufficient resolution to define part-specific recycled content. For aluminum there is no dependance between recycled content and production process, as MFA distinguishes flows of cast and wrought aluminum. However, parameters calculated based on MFA studies would reflect average conditions of geographical and temporal boundary. To overcome the limitation of averaged data, material manufacturers' data must be requested.

5. Conclusions

To contribute to the applicability of allocation methods for recycling, this contribution defines process boundaries for the estimation of recycling parameters for metals (steel, cast iron, wrought/ cast aluminium, magnesium). Product LCA requires to consider the burden associated with the generation of process scrap, while generation and recovery of home scrap can be approximated to a close loop recycling. Material flow analysis is a source for the calculation of average parameters values but lacks resolution for part-specific recycled content.

References

1) Ekvall T., Albertsson G. S., Jelse K.: Final project report 2020:5, (2020), p. 138.
2) Worldsteel: "Life cycle inventory methodology report for steel products", (2017), p. 40.
3) Panasiuk D., Takeyama K., Daigo I., Hoshino T.: 第１６回日本 LCA 学会研究発表会 (2021)、C000178.
4) Schrijvers, D.; Loubet, P.; Sonnemann, G.: Sustainability 12, (2020), 5587.
5) Arens M., Worrell E., Eichhammer W., Hasanbeigi A., Zhang Q.: J Clean Prod. 163, (2017), pp 84–98.

口頭発表セッション（一般）

[3-C1] 建設

座長：小林謙介（県立広島大学）

2022年3月4日(金) 09:20 〜 10:40 C会場 (zoom)

Zoomはこちら

[3-C1-01] 建設部門産業連関表誘発 CO2排出量分析とその応用

*外岡 豊[1]、村橋 喜満[2]、小林 謙介[3]、磯部 孝行[4] （1. 埼玉大学、2. 日鉄物産(株）、3. 県立広島大学、4. 武蔵野大学）

09:20 〜 09:40

[3-C1-02] カーボンニュートラル社会と整合的なセメント・コンクリート循環構造の解明

*渡 卓磨[1]、Cao Zhi[2] （1. 国立環境研究所、2. アントワープ大学）

09:40 〜 10:00

[3-C1-03] 窓断熱改修促進のための消費者選好分析

*伊集院 日向[1]、磐田 朋子[1] （1. 芝浦工業大学）

10:00 〜 10:20

[3-C1-04] 工場へのアンケート調査に基づく合板及び LVLの製造段階における CO_2排出量推定

*竹内 直輝[1]、平井 康宏[1] （1. 京都大学）

10:20 〜 10:40

©日本LCA学会

建設部門産業連関表誘発 CO_2 排出量分析とその応用

Analysis and Applications of Induced CO_2 Emissions from Construction Sector in Japan

○外岡豊*1)、村橋喜満 2)、小林謙介 3) 、磯部孝行 4)
Yutaka Tonooka,Yoshimitsu Murahashi,Kensuke Kobayashi,Takayuki Isobe
1) 埼玉大学, 2) 日鉄物産, 3）県立広島大学,4)武蔵野大学
ytonooka@gmail.com

1. はじめに

筆者等は日本の産業連関表を用いたエネルギー消費量、温室効果ガス（CO_2,CH_4,N_2O）、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 年表から行って来た。またこれを建設部門産業連関表に組み込んで建物用途別、土木工事種類別の誘発排出量推計も行って来た。今回は 2015 年建設部門表を用いた誘発 CO_2 排出量推計結果とその応用について発表する。

2. 誘発排出量の推計

産業連関表を用いた誘発 CO_2 排出量の推計に際しては基本表を用いる。2015 年表では 509 行×391 列からなる基本表の投入額表、産出額表、物量表が推計の基礎となる。排出量推計に用いるエネルギー投入量は産業連関表物量表からも得られるが、物量表は投入金額から統一単価で逆算した二次加工値であるため、それよりエネルギーバランス表詳細表を用いた方が正確である。この CO_2 排出量は政府公表の温室効果ガス排出量と一致する値である。ただし航空輸送等の国内概念が産業連関表では少し違うためその分全国計は一致しない。今回の推計では独自推計によらず３EID(国立環境研）推計を引用した。この推計ではエネルギー消費量、CO2 排出量はエネルギーバランス表値であり完全燃焼仮定でエネルギーバランス表詳細表の炭素表から 44/12 倍して CO_2 排出量としている。非エネルギー起因排出量は FCCC パリ協定の国別排出量現況値である日本国温室効果ガスインベントリ報告書の値を用いている。これも政府公表の温室効果ガス排出量と一致する値である。

誘発排出量の算定に際しては様々な計算方法があるが、ここでは、(国産仮定)外洋輸送部門による国外排出量を含む値を用いた。その際、いわゆる逆行列計算を行うため正方化され行と列の品目数が少ない方に統一され 390 部門別に推計されている。ここで 391 列が 39 列に１つ減っているのは 380 行 4611001 事業用電力、274 列 461101 事業用火力発電、275 列 461102 事業用発電(火力発電を除く)が行の側に従って 274 列と 275 列が統合されるためである。

3. 建設部門表接合

建設部門産業連関表は建設部門が 73 部門、投入品目は基本表と同じ 509 行であるが、うち建設部門と対応するのは内生部門 229 行で、これに 230 行 7000000 内生部門計、粗付加価値部門 11 行が加わり、242 行 97000000 国内生産額を加えて 242 部門である。建設部門は中間計を含む区分体形になっているが、建築と土木及び補修の 3 大区分から構成されている。建築は建物用途別、住宅と非住宅、木造と非木造に大別される部門構成で、金額だけでなく着工床面積も併記されているので床面積当排出量を算出できる。土木部門は公共事業、農林関係公共事業、その他の土木建設に大別される構成となっており、公共事業の内訳は道路、河川・下水道・その他の 2 区分からなる。上水道、工業用水道はその他の土木建設に含まれる。建築は民間と公共建築という区分はないが、土木では公共事業の管轄官庁別が基本の区分体系になっている。2015 年表では建設補修は中間消費として扱われ、それ以外は固定資本形成として扱い、そこを明確に区分するようになっている。今回の計算ではこの 73 建設部門への 242 部門の投入金額をもとにその誘発 CO_2 排出量を求め、100 万円当誘発排出量と建築部門に関しては床面積当値も推計した。

４．推計結果

建築 84 百万 t CO_2、土木 72 百万 t CO_2、建築土木合計 1.7８億 t CO_2 (建設補修・中間投入を含む) の誘発排出量であった。

住宅に関して床面積当誘発 CO_2 排出量を木造、非木造別に比較すると木造の誘発 CO_2 排出量が低い傾向が顕著であった。木造在来住宅 368kg CO_2/m2 に対し RC(鉄筋コンクリート)在来住宅は 1,065kg CO_2/m2 で 3 倍近い。これが俗称マンションの集合住宅であった場合、階段、廊下等の共有部分を 15%として居住室床面積当で概算すると 1,253kg CO_2/m2 となり 3.4 倍になる。居室が狭いいわゆるワンルームマンションでは単位床面積当の壁体量が相対的に多いのでさらに誘発 CO_2 排出量は大きいであろう。

非住宅に関しては RC 造事務所 1,463kg CO_2/m2 に対して SRC 事務所 1,173kg CO_2/m2 の方が誘発排出量

が低い逆転傾向が見られたが、同様に S(鉄骨)造事務所は 757kg CO_2/m2 とさらに低い傾向であった。これについては近年業務建物が大型化、高層化しており、高層建物程床面積当誘発 CO_2 排出量が低いとする仮説に立てばこの傾向を説明できる。基礎地盤が３０ｍとして杭の部分の鉄筋コンクリート投入量が大きいが高層化すると地上部の割合が増えて基礎部分の大きな排出量の影響が薄められた結果、高層建物の方が床面積当平均誘発 CO_2 排出量が低くなるのであろうと解釈している。

補修工事は建築補修 22 百万 t CO_2、中間投入建築・土木補修合計 12 百万ｔ CO_2 あり、かなりの量である。高度成長期に建設された既存建物等、今後の補修工事の増大が見込まれるので排出削減上注視すべき部分である。

産業連関表は最近値でも 2015 年表であるが着工床面積は 2020 年度まで得られる。着工床面積は年々減少傾向にあり、固定資産調書から得られる既存建築床面積に対する着工床面積は住宅 1.2%、業務建物 1.5%、工場等含む全体で 1.3%であり、相対的には小さい。それでも建設誘発 CO_2 排出量は 2015 年で 1.78 億 t CO_2 あり、2015 年度温室効果ガス排出量 13.21 億 t CO_2 の 13%にもなっている。

なお、上記推計結果は次に述べる補正推計前の値である。補正推計後は数値が少し修正される可能性がある。

５．補正推計

誘発排出量推計において逆行列計算に際し行列の方正化を行なっているため建材の鉄鋼製品の誘発 CO_2 排出量原単位が一律の値しか得られない。超高層用の高強度転炉鋼と RC 用の鉄筋が同じ原単位になってしまう。これでは建築 LCA 用原単位としては不十分である。そこで各種鉄鋼関連製品の誘発 CO_2 排出量と物量表等から転炉鋼と電炉鋼、普通鋼と特殊鋼の違いが出る補足推計を行った。熱間圧延鋼材の推計例を示す。産連表から得られている全体平均値は 1.864t CO_2/生産 t であるが、高級 H 型鋼用の転炉普通鋼では 2.010、鉄筋用小棒の電炉普通鋼では 1.088 t CO_2/生産 t となり、転炉品は電炉品の 2 倍程度と推計された。妥当な値であろう。主要な素材に関して同様の推計を行う予定である。

６． 建築 LCA への応用

本研究では基礎分析作業として基本表の生産者価格当誘発排出量をまず計算し、統一単価で換算された物量表の固有単位投入量当に換算した値も計算している。物量換算できない品目に関してはやむなく投入金額 100 万円当誘発 CO_2 排出量を算出している。これを LCA 分析に用いる際には購入者価格当に換算しないと使いにくい。基本表産出表から生産者価格と購入者価格の両方が得られるのでそれを用いて購入者当値に換算して用いる。

以前は建築物の LCA では建設分は長寿命想定、例えば 50 年として 50 分の 1 して年間運用エネルギー排出分に加算していたが、2030 年までの削減が肝心とする気候危機を迎えて建設排出は工事期間中に実排出されるものであり、耐用年数分の１加算ではなく運用と一対一評価すべきものと考えている。

表１　熱間圧延鋼材の補正推計　kg CO_2/生産 t

	普通鋼	特殊鋼	平均
転炉鋼	2.010	2.302	2.068
電炉鋼	1.088	1.380	1.178
平均	1.822	2.010	1.864

引用基礎データ

1)国立環境研究所地球環境研究センター：産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）
http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/index_j.htm
2)国立環境研究所地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス：日本国温室効果ガスインベントリ報告書(NIR)
https://www.nies.go.jp/gio/
3) 国土交通省総合政策局情報政策課:建設部門分析用産業連関表,https://www.e-stat.go.jp/statistics/00600920

関連発表

１）村橋喜満,外岡豊:2015 年建設部門産業連関表誘発 CO_2 排出原単位分析,環太平洋産業連関分析学会 第 32 回(2021 年度)大会報告論文,2021.10.30-31
２）村橋喜満,外岡豊:2015 年建設部門産業連関表誘発 CO_2 排出原単位分析, エネルギー・システム・経済・環境コンファレンス第 38 回,2022.1.25-26

付記

73 建設部門別 242 部門別の基本的な推計結果は得られているが、表 1 に示した補正等による、より正確な推計値への精緻化作業を行っており、参考情報の掲載をここではあえて行なっていないが、研究結果提供については、随時相談相談下さい。

カーボンニュートラル社会と整合的なセメント･コンクリート循環構造の解明

Net-zero emission cement and concrete cycle

○渡　卓磨*[1,2)]、Zhi Cao[3)]
Takuma Watari, Zhi Cao
1) 国立環境研究所, 2) シドニー工科大学, 3) アントワープ大学
* watari.takuma@nies.go.jp

1. 背景

コンクリートや金属、プラスチック等の素材は現代社会の基盤である。我々の日常生活は、多種多様な素材を用いたビルやインフラ、車、産業機械、電子機器等によって支えられている。一方、素材の生産活動は CO_2 排出増加の主要な要因の一つとなっている。1995 年から 2015 年にかけて、世界の素材生産活動に伴う CO_2 排出量は 120%増加し、2015 年には約 11 Gt に上る CO_2 排出が生じたと報告されている [1]。その結果、素材生産が CO_2 排出量全体に占める割合は 1995 年の約 15%から 2015 年には約 23%まで増加している。これらの傾向は、カーボンニュートラル社会の実現における素材分野の重要性と共に、その脱炭素化の困難性を明確に示している。

そこで、我々の研究グループでは、素材の生産から利用、廃棄あるいはリサイクルにいたる一連のプロセスを記述するシステムモデルを用いて、カーボンニュートラル社会と整合的な素材循環システムの将来像を明らかにするための研究を実施している。本研究報告では、素材生産に伴う CO_2 排出量の約半分を占めるコンクリートを対象とした研究成果を報告する。

2. 手法

分析の主な実施手順は以下である：

(1) 現在のコンクリート循環構造の解明
(2) コンクリート循環に伴う CO_2 排出/吸収量の同定
(3) 脱炭素シナリオの作成

まず (1) は、セメントや骨材、建設活動等のコンクリート循環に関する断片的な統計データを集約することで実施する。本手順は、質量保存則に基づく、基本的な物質フロー分析 [2] である。

次に (2) は、各プロセスにおけるエネルギー消費と CO_2 排出量を推計する「排出モデル」、ならびにコンクリートの炭酸化に伴う CO_2 吸収量を推計する「物理化学モデル [3,4]」を用いて行う。炭酸化とは、CO_2 がセメント系材料中に拡散し、水和物と反応することで徐々にそのアルカリ性が失われる現象を指す。本研究で開発・利用した物理化学モデルは、表面からの炭酸化の経時的な進行を、物質の拡散に関する基本法則である Fick の第 1 法則に基づいて記述している。この際、使用中のコンクリートおよびモルタルの炭酸化速度係数は、暴露表面積や厚さ、圧縮強度クラス、暴露条件、添加剤、大気中の CO_2 濃度、塗膜および被覆、暴露時間の影響を考慮して調整する。

最後に (3) は、文献レビューを通して全 17 の戦略オプションを選定し、各戦略を一連のモデル変数・パラメータに変換することで実施する。詳細は当日口頭で報告する。

3. 結果

図 1 は 2019 年の日本におけるコンクリート循環と、それに伴う CO_2 排出/吸収量を示している。ビルとインフラ製造の国内需要を満たすために、約 280 Mt のコンクリートおよびモルタルが製造され、それらは約 14%のセメント、約 8%の水、約 78%のバージン骨材、<1%のリサイクル骨材によって構成されていることが示された。

一連のコンクリート循環に伴う CO_2 排出量は、日本全体の約 4%に相当する約 40 Mt と推計され、その 7 割程度がセメント生産に起因することが示された。コンクリートの炭酸化による CO_2 吸収量は約 9 Mt であり、これはコンクリート関連 CO_2 排出量の約 24%、日本全体の約 1%に相当する。紙面の都合上、以降の結果は当日口頭にて報告する。

4. 参考文献

1. Hertwich, E. G. Increased carbon footprint of materials production driven by rise in investments. *Nat. Geosci.* **14**, 151–155 (2021).
2. Cullen, J. M., Allwood, J. M. & Bambach, M. D. Mapping the global flow of steel: From steelmaking to end-use goods. *Environ. Sci. Technol.* **46**, 13048–13055 (2012).
3. Xi, F. *et al.* Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nat. Geosci.* **9**, 880–883 (2016).
4. Cao, Z. *et al.* The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle. *Nat. Commun.* **11**, 1–9 (2020).

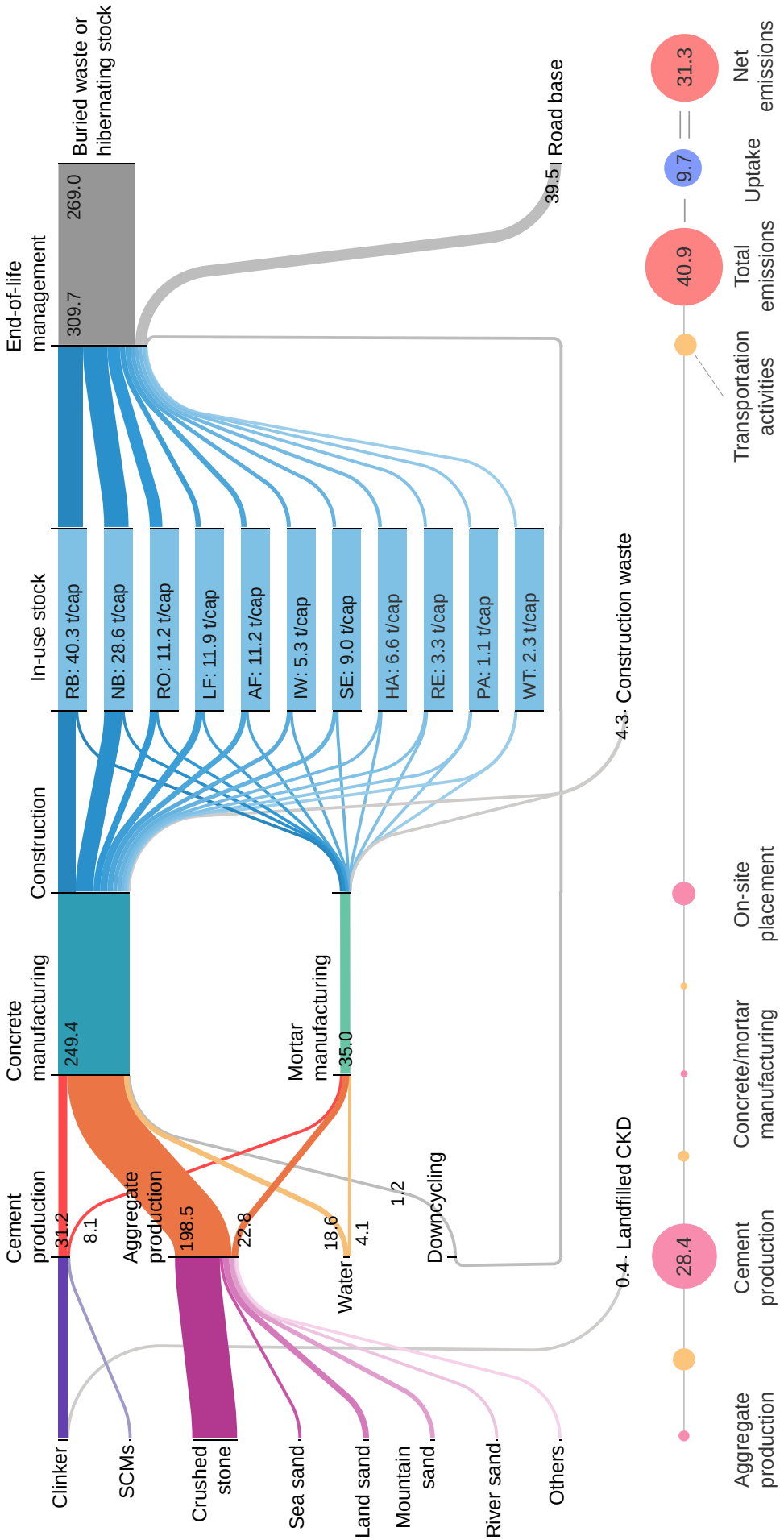


図 1　2019 年の日本におけるコンクリート循環とそれに伴う CO_2 排出/吸収量

注）全てのフローは Mt/year のスケールで表示している。ボックス内に示す社会蓄積量の単位は t/capita であり、フローとは異なるスケールで示している。図下の円の大きさは、コンクリート循環に関連する CO_2 排出/吸収量を Mt-CO_2/year の単位で表示している。SCMs：補助セメント質材料; CKD：セメントキルンダスト; RB：住宅ビル; NB：非住宅用ビル; RO：道路; LF:治山治水; AF: 農林水産 IW：工業用水; SE: 下水道; HA：港湾・空港; RE：鉄道・電力; PA: 公園; WT：廃棄物処理。

窓断熱改修促進のための消費者選好分析

Consumer Preference Analysis to Promote Window Insulation

○伊集院日向*、磐田朋子
Hinata Ijuin, Tomoko Iwata
芝浦工業大学
*br18010@shibaura-it.ac.jp

1. 研究と目的

本研究は、家庭の省エネルギー化に向けて必要な対策の一つである「既存住宅の断熱促進」の先駆けとして、住宅の窓断熱改修促進に関する消費者の選好を分析したものである。

現在、省エネ改修と言えば、例えば太陽光パネルの設置、高効率な給湯器や蓄電池の導入などさまざまな種類があり、これらのような「創エネ」や「エネルギーの直接削減」に係る改修は、消費者に直接経済的なインセンティブが発生するため、需要が高い。

一方、消費者に明確な経済的メリットが少ない「断熱改修」についてはそれらに比べて普及が進んでいない状態にある。特に窓断熱のような小規模な断熱に対しては、家庭ごとに断熱による省エネ効果の大きさが異なることなどから、補助金などに関する融資側が手を出しにくいことも推測される。しかしながら、断熱改修は冷暖房使用量を抑える効果があるため省エネに明確に効果がある。

この研究の目的は、家庭の窓断熱改修促進政策を日本で進めるため、政策や支払手法に係る消費者の選好を調査・分析し、政策づくりを行う行政や住宅リフォームに係る事業者に有効な消費者選好情報を提供することである。なお、窓断熱は外皮の断熱と比べて費用あたりの省エネ効果が大きく（開口部は躯体に比べ熱の出入りが多い）、施工時間が短い、比較的低価格であるといったメリットがあるため、今回の研究では既存住宅の断熱普及の足掛かりとなることを期待して「窓断熱」を対象とした。

2. 研究の方法

本研究の主な方法は、WEB アンケート調査である。結果の分析にはクロス分析、コンジョイント分析（以降 CJT 分析）を用いた。分析結果から、窓断熱の改修に対する潜在的需要を明らかにし、窓断熱の改修促進政策に関する提案を行うことを以て、本研究の目的である消費者選好情報の提供とした。

3. 事前アンケートからの現状分析

断熱改修を行う消費者側のメリットには、「冬暖房時の快適性向上」や「健康増進」等、省エネ以外のメリットも存在する。特に快適性向上については、多くの人々から需要があると考えられる。実際に、事前アンケート「暮らしの CO_2 削減に向けた家庭の将来行動調査（戸建住宅居住者の有効サンプル数 2500 人）」の分析結果からも、リビングの暖房時について「いつも寒く感じる」「時々寒く感じる」と答えた人が合わせて全体の約 51％であった（図 1）。

また、窓断熱に対する意欲については、『窓の大きさ 1 ㎡あたり 2 万円（工事費込み）で二重窓リノベーションできるとしたとき、将来的に窓断熱を希望する』と答えた 人は全体の 43％であった（図 2）。このようなことから、快適性・利便性を目的とした断熱改修の需要は十分あるということがわかった。

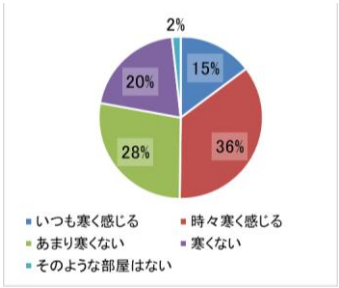


図 1　リビング暖房時の寒さの感じ方

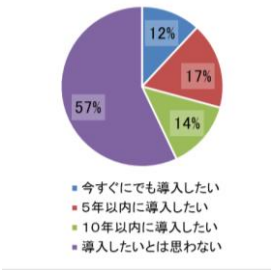


図 2　二重窓リノベに対する意欲

4. アンケート調査の概要

アンケート調査は、北海道・沖縄以外に住む戸建住宅居住者であり、かつ 20 歳以上 70 歳未満で自宅の改修等、金額の大きい買い物の最終判断に関わっており、10 年以内に自宅で窓の断熱リノベーションをやってみたいと思っているという条件を満たすようスクリーニングをかけて令和 3 年 12 月 23－24 日に実施した（有効回答者数 800）。

図 3 に示す質問それぞれの単純集計に加え、【2】断熱に

【1】基本属性
(1) 年齢
(2) 性別
(3) 居住地域
(4) 世帯人数
(5) 家族形態＆家計を支える人の年齢
(6) 世帯年収
(7) 断熱改修経験の有無
(8) 建築完成年
(9) 所有状態
【2】断熱についての質問
(1) 一番の断熱目的
(2) 断熱していない理由
(3) 1.情報提供＆どのくらい知っていたか
(3) 2. どの情報が一番良い印象を受けたか
(4) 回収率、補助金に対する印象
(5) CJT問題＊8
(6) 初期費用×分割払いの選好調査
(7) 規模感に対する印象

図 3　アンケート調査項目

ついての質問 の項目について【1】基本属性によって違いがあるか、それぞれについてクロス分析を行った。また、アンケート内に「断熱や窓断熱についての情報提供」を含めることによって消費者の断熱意欲と情報提供の関連を調査した。さらに、「改修費用」「自宅における必要な設備交換（エアコンなど）の有無」「周りの人の窓断熱状況」「施工事業者の信頼性」「断熱効果に関する実体験の有無」について選好重要度をコンジョイント分析により調査し、回答者の【1】基本属性 による選好の差異、現在のリノベ意欲による上記選好の差異を調査した。今回のアンケートの回答者の分布を図 4～6 に示す。コンジョイント分析における属性と水準を表 1 に示す。調査の詳細は SI を参照されたい。

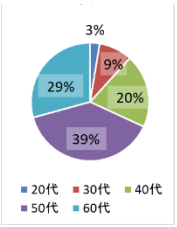


図 4　年代

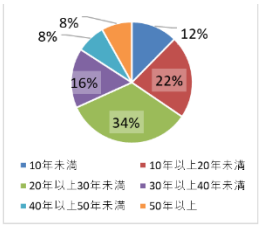


図 5　築年数

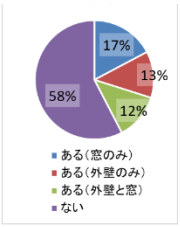


図 6　断熱経験

表 1　CJT 分析における属性と水準

属性	水準1	水準2	水準3	水準4
費用	42.5万円	45万円	47.5万円	50万円
他改修(自宅における必要な設備交換)	あり	なし		
普及(周りの人の窓断熱普及)	あり	なし		
施工事業者信頼性	あり	なし		
実体験(窓断熱効果)	あり	なし		

5. アンケート結果

5.1 窓断熱の改修に対する潜在的需要

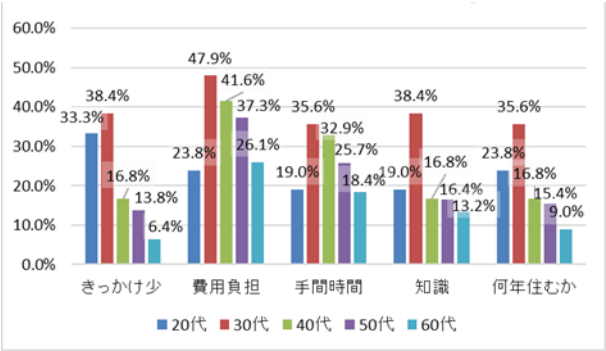


図 7　年齢ごとの「窓断熱を行っていない要因」（アンケート詳細：「窓断熱を意識するきっかけが少ない」「費用の負担が大きい」「手間・時間がかかる」「窓断熱の詳細をよく知らない」「現住宅にあと何年住むかわからない」の 5 項目について、5 段階評価をつけてもらったうち、最高評価の「非常にそうである」と答えた人の割合。）

図 7 に示すように、窓断熱を行っていない理由について、年齢によって違いが表れた。20 代は、他の年齢層に比べきっかけが少ないと感じていることや、30 代はどの項目においても『非常にそうである』と答えた人が多く、特に他年代よりも窓断熱に関する情報不足や将来の転居を懸念し窓断熱に踏み切れない実態が示された。全体としては、20 代を除く全ての年代において費用の負担を理由に挙げており、補助金・融資等による普及促進の政策を考察するうえで重要であると考えられた。

5.2 窓断熱の改修促進政策に関する提案

表 2　提供した断熱メリットに関する情報のうち最も購入意欲を高めた項目（上位 8 つ）

		回答数
全体		800
1	快適性の向上(気温・室温、暖かさの感じ方など)	368
2	光熱費の削減	109
3	遮熱性の向上	67
4	結露の抑制	64
5	ヒートショック対策を含む、健康増進	47
6	遮音性の向上	41
7	遮光性の向上	34
8	特に窓断熱への意欲を高める情報はなかった	23

回答者にとって最も購入意欲を高めた情報項目の上位 8 つを、表 2 に示す。事前アンケートと同様に快適性の向上を求める声が最も多い結果となったが、そのほか快適性向上よりも光熱費の削減や結露の抑制などを最も購入意欲を高めた項目に挙げた回答者が多くいることにも注目したい。

表 3　CJT 分析における各選好重要度

	全データ(n=800)		断熱経験なし(n=461)		断熱経験あり(n=339)	
変数	推定値	限界支払意思額(円)	推定値	限界支払意思額(円)	推定値	限界支払意思額(円)
他改修	-0.016	-2,121	-0.019	-2,134	-0.019	-3,352
普及	0.059	7,711	0.082	8,984	0.010	1,754
施工事業者信頼性	0.966	127,199	1.291	141,710	0.594	104,492
実体験	0.441	58,128	0.536	58,799	0.336	59,102
費用(補助金)	-0.076		-0.091		-0.057	
選択肢固有定数項	-3.735		-4.005		-3.418	

CJT 分析の結果を表 3 に示す。アンケート調査結果を分析したところ、全体として「施工事業者信頼性」と「実体験」に対する選好重要度が大きく、それぞれの限界支払意思額は 12.7 万円、5.8 万円と推計された。

また、断熱経験がない集団とある集団に分けて分析すると、「普及」や「施工事業者信頼性」の選好重要度が大きく異なった。購入決断の際、断熱改修経験がない回答者は、ある回答者に比べて、周りの普及度と施工事業者信頼性を考慮するということがわかった。

6. まとめ

今回実施したアンケートでは、「年齢」などの回答者の基本属性に関する設問と、「窓断熱を行っていない要因」や「窓断熱の意欲を最も高めた情報」などを問う設問の組み合わせにより、窓断熱の基本的な市場調査を行った。加えて、将来有効な窓断熱改修促進のための政策を提案するため、窓断熱改修の購入に関わる消費者選好を調査した。

Supporting Information

はじめに、質問文の流れを記載する。

あなたは、自宅リビングの掃出し窓（床上から天井近くまで高さのある大きな窓､幅 1690mm×高さ 2030mm）2 面を、アルミサッシの単板ガラス窓から樹脂サッシの Low-E 複層ガラス窓に変更することを検討しています。窓断熱のメリットは、前問でお示しした通りです。
予算は 50 万円です。



図 8.　リビングの掃出し窓（幅 1690mm×高さ 2030mm）**2 面**の大きさイメージ（YKK AP 株式会社）

窓断熱による光熱費の削減額は家庭によって大きく異なりますが、今回は目安として、改修前に比べた改修後の冷暖房削減費はおよそ 5 千円/年*とお考え下さい。
（*およそ 5 千円/年の値は、今回検討する 2 重窓に近い、YKK AP 株式会社 ウェブカタログ マドリモ断熱窓戸建て用 より概算）
その時､以下のような購入に関係する条件があります。

① 補助金と費用総額（費用は、工事費込みの値段を指します）
- ・補助金なし、費用総額 50 万円
- ・2.5 万円補助金あり、費用総額 47.5 万円
- ・5 万円補助金あり、費用総額 45 万円
- ・7.5 万円補助金あり、費用総額 42.5 万円

② 自宅における必要な設備交換（エアコン・洗濯機・冷蔵庫等の買い替え、給湯器の交換など）の有無
- ・自宅に必要な設備交換がない
- ・自宅に必要な設備交換がある

—あなたの自宅にいずれかの必要な設備交換があり、その設備交換と同じタイミングで窓断熱改修を行うことができます。

③ あなたの周りの人の窓断熱状況
- ・知り合いに窓断熱改修を行った人はいない
- ・知り合いのほとんどが窓断熱改修を行っている

④ 施工事業者の信頼性
- ・客観的な信頼性△の施工事業者

—比較的新しい施工事業者で、政府の公認は受けていません。その事業者の口コミ 10 件に悪評は見受けられません。
- ・客観的な信頼性〇の施工事業者

—政府の公認を受けた、信頼のおける施工事業者が施工を行います。

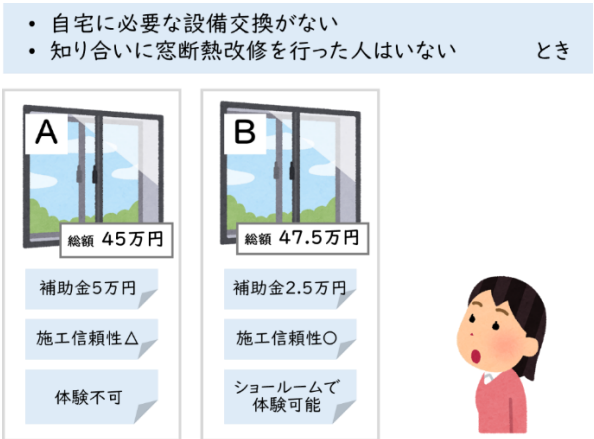
⑤ 断熱窓の実体験
- ・実体験なし

—窓断熱検討の際、窓断熱の快適性を体験できません。
- ・実体験あり

—窓断熱検討の際、滞在・宿泊できるショールームなどによって、窓断熱による快適性を実際に体験することができます。

次の質問 1.～8.には、以上①～⑤の条件がそれぞれ異なるリノベーションプラン A と B が出てきます。8 問それぞれに対して「A を購入する」「B を購入する」「どちらも購入しない」のいずれかの選択肢を選んでください。

質問 1.



（A を購入する･B を購入する･どちらも購入しない）

（以降、同じ形式の質問を全 8 回行った。）

次に、計算方法について、回答結果を用いて Excel にて分析を行った。はじめに、以下のように設定した。

◆ 「プラン A」の確定効用＝
「補助金（費用総額）」属性×「補助金（費用総額）」属性の係数
＋「自宅における必要な設備交換」属性×「自宅における必要な設備交換」属性の係数
＋「あなたの周りの人の窓断熱状況」属性×「あなたの周りの人の窓断熱状況」属性の係数
＋「施工事業者の信頼性」属性×「施工事業者の信頼性」属性の係数
＋「断熱窓の実体験」属性×「断熱窓の実体験」属性の係数

◆ 「プラン B」の確定効用はプラン A と同様に設定

◆ 「どちらも買わない」の確定効用＝
「定数項」×「定数項」の係数

各選択肢がその効用（満足度）によって選ばれ，効用が各属性（説明変数）の係数によって変化するという前提条件に対して，実際に回答者が選んだ選択肢の結果から，その尤度を計算し，尤度が最大になる属性（説明変数）の係数を求めれば，各選択肢の確定効用を決定する各属性（説明変数）の係数の推定値を求めることができることになるとする。

◆ 対数尤度＝

$$\text{対数変換}\left(\frac{\text{指数変換（選ばれた選択肢の確定効用）}}{\text{指数変換（各選択肢の確定効用）の合計}}\right)$$

（Excel 内では、選ばれた選択肢・選ばれなかった選択肢を 0,1 のダミー変数で表した。）

各回答者の各質問に個別の対数尤度を計算し、合計の対数尤度を計算した。

最後に、対数尤度の合計が最大になる属性（説明変数）の係数を Excel のソルバー機能を用いて求め，各選択肢の確定効用を決定する各属性（説明変数）の係数の推定値を出した。

限界支払意志額については、推定値を用いて以下のように算出した。

◆ 限界支払意思額＝
－１×属性の係数推定値÷価格属性の係数推定値

工場へのアンケート調査に基づく合板及び LVL の製造段階における CO_2 排出量推定

Estimation of Carbon Dioxide Emissions in the Manufacturing Process of Plywood and LVL based on a Questionnaire Survey of Factories

○竹内直輝 [1)]、平井康宏* [1)]
Naoki Takeuchi, Yasuhiro Hirai
1) 京都大学
* hirai@eprc.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

合板やパーティクルボードなどの木質材料はカーボンニュートラルの観点から環境負荷の小さい製品であるが、製造時には合成系接着剤が使われており、焼却処理時に化石由来 CO_2 を排出する。この排出量を推定するには、木質材料中の接着剤量を把握することが必要である。しかし統計情報では複数の木質材料用途での接着剤出荷量合計値しか得ることができず、木質材料種類別の接着剤出荷量を把握することができない。そこで本研究では合板と LVL を製造している工場に対し原燃料使用量のアンケート調査を行い、接着剤使用量を把握した。それに加え合板及び LVL の製造段階における CO_2 排出量の推定を行った。

2. 方法

合板及び LVL を製造している日本の工場を対象に 2019 年における原燃料使用量をアンケート調査した。7 社の合板工場と 4 社の LVL 工場より回答を得、合板工場の生産量合計は 2019 年国内普通合板生産量全体の 3 割、LVL 工場の生産量合計は 2019 年国内 LVL 生産量全体の 8 割程度だった。本調査の機能単位は合板または LVL 1 m^3 の製造とした。本調査におけるシステム境界を図 1 に示す。回答で得た電力及び燃料使用量は単板製造と合板・LVL 製造の両方に投入される合計値だが、計算では全て合板・LVL 製造時に投入されると仮定した。

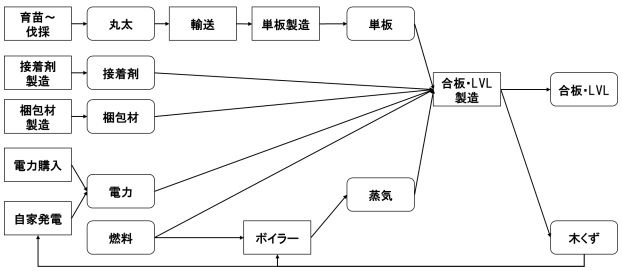


図 1 本調査における合板・LVL 製造過程のフロー図

丸太の育苗から伐採に係る CO_2 排出量推定は樹種別の丸太 CO_2 排出原単位を林野庁報告書 [1)]より利用した。

丸太輸送に係る CO_2 排出量推定は輸送距離を直接聞き取りしていないため、丸太産地～工場近くの丸太流通拠点～工場の経路を Google マップの自動車ルート検索機能を用いて輸送距離を推定した。輸送用トラックの CO_2 排出係数は環境省のマニュアル [2)]を利用した。

接着剤及び出荷用梱包材に係る CO_2 排出量は LCI データベース「IDEA Version2.3」[3)]に収録されている諸物質の CO_2 排出係数を利用した。

電力及び燃料に係る CO_2 排出量は環境省の排出係数一覧 [3)]に掲載されている CO_2 排出係数を利用した。

3. 結果

合板及び LVL の製造過程における CO_2 排出量を各工場について上記プロセスごとに推定した。推定結果を表 1-1, 1-2 に示す。

表 1-1 合板 1m^3 製造当たりのプロセス別 CO_2 排出量

合板	単位	最小	最大	加重平均	標準偏差
丸太伐採	$kgCO_2/m^3$	2.62.E+01	3.53.E+01	2.92.E+01	2.39.E+00
丸太輸送	$kgCO_2/m^3$	2.50.E+01	5.59.E+01	4.40.E+01	1.06.E+01
接着剤	$kgCO_2/m^3$	4.97.E+01	6.43.E+01	5.95.E+01	5.12.E+00
購入電力	$kgCO_2/m^3$	2.50.E+00	8.56.E+01	4.15.E+01	2.58.E+01
燃料	$kgCO_2/m^3$	0	1.30.E+01	5.75.E+00	3.65.E+00
梱包材	$kgCO_2/m^3$	1.17.E-02	1.95.E-01	3.23.E-02	1.04.E-02

表 1-2 LVL 1 m^3 製造当たりのプロセス別 CO_2 排出量

LVL	単位	最小	最大	加重平均	標準偏差
丸太伐採	$kgCO_2/m^3$	2.55.E+01	3.77.E+01	3.28.E+01	4.61.E+00
丸太輸送	$kgCO_2/m^3$	3.29.E+01	2.06.E+02	1.06.E+02	6.58.E+01
接着剤	$kgCO_2/m^3$	5.16.E+01	9.67.E+01	7.25.E+01	1.60.E+01
購入電力	$kgCO_2/m^3$	8.74.E+01	1.27.E+02	1.05.E+02	1.55.E+01
燃料	$kgCO_2/m^3$	4.24.E+00	5.27.E+01	1.26.E+01	1.70.E+01
梱包材	$kgCO_2/m^3$	0	1.97.E-01	5.68.E-02	6.50.E-02

合板及び LVL の生産量当たり CO_2 排出量を表 2 に示す。合板 1 m^3 製造当たり CO_2 排出量は 180 $kgCO_2/m^3$、LVL 1 m^3 製造当たり CO_2 排出量は 329 $kgCO_2/m^3$ と推定された。

表 2 合板・LVL 1 m^3 製造にかかる CO_2 排出量

	単位	最小	最大	加重平均	標準偏差
全体	$kgCO_2/m^3$	120	457	198	66.6
合板	$kgCO_2/m^3$	120	245	180	36.9
LVL	$kgCO_2/m^3$	268	457	329	82.9

4. 考察

本研究と IDEAv2.3 のデータにおける合板 1 m^3 製造における CO_2 排出量を比較した。本研究推定値は IDEA の排出量と比べると丸太の伐採・輸送時の CO_2 排出量が大きく、接着剤や燃料由来の CO_2 排出量が小さいという結果になり、全体として 25%程 CO_2 排出量が低くなった。

丸太の伐採・輸送プロセスについて、丸太の CO_2 排出原単位が IDEA では 10.7 $kgCO_2/m^3$-log であるのに対し、本研究では約 16 $kgCO_2/m^3$-log と 1.5 倍大きい値を用いている点や、IDEA では輸入丸太の輸送を考慮していない点が影響していると考えられる。

接着剤由来の CO_2 排出量について、本研究の値は IDEA の排出量の半分以下という結果になった。IDEA のデータは 2000 年の接着剤実態調査報告書に基づいており、接着剤総投入量は 87.7 kg/m^3 である一方、本研究は 2019 年の合板工場での使用実績に基づいており、接着剤総投入量は 47.3 kg/m^3 となった(表 3)。この違いとして、接着剤実態報告書では用途別出荷量の「合板用」には他の木質材料用途も含まれているために IDEA では過大推計となった可能性や、2000 年時点では CO_2 排出原単位の大きいユリア樹脂系接着剤やメラミン樹脂系接着剤のシェアが大きく、2019 年調査の本研究ではユリア樹脂系接着剤やメラミン樹脂系接着剤の使用量が減少したことが接着剤由来の CO_2 排出量減少に寄与したことが考えられる(表 3)。

表 3 合板 1 m^3 当たり接着剤使用量の比較

		投入量	
	単位	IDEAv2.3	本推定平均値
ユリア樹脂系接着剤	kg/m^3	52.4	1.59
メラミン樹脂系接着剤	kg/m^3	26.3	1.62
フェノール樹脂系接着剤	kg/m^3	9.01	44.1

本研究の合板・LVL 1 m^3 当たり CO_2 排出原単位と既往研究との比較を表 4 に示す。いずれも既往研究と同程度の値となった。

表 4 合板・LVL 1 m^3 当たりの CO_2 排出原単位の比較

合板	原単位 $kgCO_2/m^3$
本研究	180
日本 A[5)]	143
日本 B[5)]	207
日本 C[6)]	190
日本 D[7)]	122
日本 E[8)]	180
日本 F[8)]	190
米国 G[9)]	281
米国 H[9)]	176
カナダ I[10)]	186

LVL	原単位 $kgCO_2/m^3$
本研究	329
米国 J[9)]	408
米国 K[9)]	254
カナダ L[11)]	357

5. 結論

本研究では国産合板及び国産 LVL の製造時における CO_2 排出原単位を推定した。合板は 7 社 9 工場、LVL は 4 工場を調査し、CO_2 排出原単位の加重平均値は合板 180 $kgCO_2/m^3$、LVL 329 $kgCO_2/m^3$ と推定された。この値は国内外の既往研究の値と同程度となった。

6. 参考文献

1) 林野庁木材利用課 平成２７年度木材利用推進・省エネ省 CO_2 実証業務報告書
2) 環境省 温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル ver4.6 https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/manual
3) LCI データベース IDEA ver2.3 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社会と LCA 研究グループ 一般社団法人産業環境管理協会
4) 環境省 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc
5) 住友林業クレスト(2009) 原材料調達段階から生産段階までの温室効果ガス排出量の「見える化」へ : 国産材合板への「カーボンフットプリント」表示を開始. プレスリリース 2009 年 4 月 17 日 https://sfc.jp/information/news/2009/2009-04-17.html
6) 丸玉木材(2015) カーボンフットプリント登録情報 CR-CC03-15001 トドマツ合板
7) 古俣寛隆, 加藤幸浩, 高山光子, 石川佳生 (2010) 製材、集成材および合板製造における温室効果ガス排出量の算出とその方法に関する諸課題. 林産試験場報. 539, 1-5 http://www.hro.or.jp/list/forest/research/fpri/rsjoho/21024010105.pdf
8) 高村秀紀, 吉岡耕 (2017) 生産規模の異なる 2 工場で生産された合板の環境影響の比較. エネルギー・資源学会論文誌. 38(6) 1–8. https://doi.org/10.24778/jjser.38.6_1
9) CORRIM (2020) Library of LCA's on Wood Products https://corrim.org/lcas-on-wood-products-library/
10) Athena Sustainable Materials Institute (2018a) A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Plywood. http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2018/07/CtoG-LCA-of-Canadian-Plywood.pdf
11) Athena Sustainable Materials Institute (2018b) A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Laminated Veneer Lumber (LVL). http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2018/09/CtoG-LCA-of-Canadian-LVL-Manufacture.pdf

口頭発表セッション（一般）

[3-D1] 生活

座長：栗栖聖（東京大学）

2022年3月4日(金) 09:20 〜 10:40 D会場 (zoom)

Zoomはこちら

[3-D1-01] 持続可能な消費のための中古製品利用拡大に向けた考察

*文 多美[1]、田原 聖隆[2]、栗栖 聖[1] （1. 東京大学、2. 産業技術総合研究所）

09:20 〜 09:40

[3-D1-02] 在宅テレワークにおける自然換気と知的生産性の関係に関する研究

*岡田 雄人[1]、磐田 朋子[1] （1. 芝浦工業大学）

09:40 〜 10:00

[3-D1-03] 環境効率指標を用いた対面授業とリモート授業の比較

*菅野 真哉[1]、磐田 朋子[1] （1. 芝浦工業大学）

10:00 〜 10:20

[3-D1-04] サステイナブルファッション実現のための衣服リサイクルシステム設計

*平尾 雅彦[1]、天沢 逸里[1]、水口 能宏[2]、古川 雅敏[2]、佐久本 太一[2]、宮坂 信義[3] （1. 東京大学、2. 日揮ホールディングス（株）、3. 帝人（株））

10:20 〜 10:40

©日本LCA学会

持続可能な消費のための中古製品利用拡大に向けた考察

Consideration for Expanding the Use of Second-Hand Products to Ensure Sustainable Consumption

○文　多美*[1)]、田原　聖隆[2)]、栗栖　聖[1)]
Dami Moon, Kiyotaka Tahara, Kiyo Kurisu
1）東京大学, 2）産業技術総合研究所
* moon@env.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

持続可能な消費に向けて製品の生産・消費・処理段階で環境負荷の低減に役立つ様々な消費行動が消費者に提案されている。その中、中古品の利用は、使わなくなったり要らなくなった製品をそのまま放置・処分せず、他の利用者が使用することで新品を代替し、生産量と最終処分量を抑制する消費行動として認識される。しかし、中古品の利用を消費者に広く受け入れてもらうためには、中古品に対する消費者の認識を把握する必要がある。そこで、新品、中古品の売買、貸借、譲渡を、製品の取得および処分に関わる消費行動の範囲に設定し、これらの消費経験の有無についてアンケート調査を実施した。特に、本研究では、製品の種類によって異なる消費者の消費傾向に注目し、アンケート回答者に製品の種類別に具体的な消費経験の内容を尋ねた。これによって、消費者の製品消費経験から中古品消費の現状を把握し、中古品の利用拡大の方向性について考察する。

2. 研究方法

2.1 対象製品の選定

本研究では196種類の製品を対象とした。「家計調査収支項目分類」をもとに、日常生活の中で主に用いられる製品を「衣服（ハレの日：10種類）、弔事（1種類）、普段着（22種類））、履物（12種類）、かばん類（11種類）、装身具（9種類）、家電（26種類）、工具（5種類）、家具（7種類）、寝具類（11種類）、キッチン用品類（6種類）、家事雑貨（6種類）、保険医療用品（7種類）、スポーツ・楽器・アウトドア（49種類）、本・音楽・ゲーム・おもちゃ（14種類）」の15類型に区分した。ここで、食品類等の非耐久財やサービスは対象製品から除外した。また、CtoC（Consumer to Consumer：個人間取引）による物品の取引が行われるネット上のフリーマーケット（フリマアプリ）で禁じられている製品も対象外にした[1)]。

2.2 アンケート調査

対象製品における消費者の中古品にかかわる消費経験を把握するため、消費者を対象にWEBアンケート調査を実施した。日本全国（47都道府県）に居住する20歳以上の消費者を対象に、各県の年齢・性別構成に（20～79歳）準拠して回答者を選んだ。2021年12月23日～24日で7,000のサンプル（回答率：約56.2%）を取得した。

アンケートでは、まず、196種類の対象製品に対する消費経験有無について尋ねた（複数回答）。中古品の購買・取得にかかわる消費経験については、「新品のみ購入経験がある」、「中古品を買ったことがある」、「ただで譲り受けたことがある」、「リース・レンタルしたことがある」、「ただで借りたことがある」の5項目から回答させた。所有物の売却等の経験に関しては、「持っていたのを売ったことがある」、「ただで譲ったことがある」、「ただで貸したことがある」の3項目を設けた。同時に、「私に関係ないか、興味のない製品である」も選択肢に加えた。これらの項目は、「はい」「いいえ」の二者択一とした。また、消費者の製品購買行動に影響を及ぼす消費要因を把握するため、回答者の製品購買時に重視する点についても尋ねた。具体的には「低価格かつ質の良い製品を選ぶことを心がける」、「気に入った製品が見つかっても、値段が高かったら買うのをやめる」、「買い物をする時は価格を一番重視する」、「ショッピングに出かけたり製品を検索したりすることは楽しい趣味の一つである」、「ショッピングしながら面白い製品を見つけることがとても楽しい」、「ストレス解消や気分転換のためショッピングをすることが多い」、「日常生活において環境にやさしい製品の選択・使用に努める」、「環境に配慮した製品は多少高くても買う」の8項目を設けた。また、コロナ禍の消費行動への影響を見るため、「コロナ禍で生活費を節約するため中古品の購入を考えたり実行したりした」、「コロナ禍で衛生面が気になって中古品の購入・使用を迷う」の2項目を設定した。これらの項目は、「とても当てはまる」～「全く当てはまらない」の6段階からなるリッカートスケールでの回答とした。

3. 結果

3.1 製品の類型別、消費行動の経験

新品のみ購入経験のある回答者割合の平均は、全体

回答者（「関係あるか、興味のある製品である」と回答した者）の 88.6%となった（図 1）。中古品の購入経験、無料で譲り受けた経験、リースまたはレンタル経験、無料で借りた経験の平均割合は、それぞれ 4.0%、4.2%、3.0%、0.8%であった。所有物の売却に関しては、中古品の販売経験、無料で譲った経験、無料で貸した経験の平均割合は、それぞれ 1.6%、1.1%、0.4%であった。種類別にこれら経験割合を見てみると、新品のみ購入の場合、キッチン用品が全体の 95.9%で一番多くみられ、次に寝具類（95.1%）、家具（94.8%）、履物（94.7%）が続いた（図 1）。衣服（ハレの日）の新品のみ購入経験が全体の 56.9%で最も少なかった。中古品の購入と無料で譲り受けた経験の多い製品は、スポーツ・楽器・アウトドア（各 8.9%、6.8%）や本・音楽・ゲーム・おもちゃ（各 9.1%、6.7%）のように趣味に用いる製品群であった。リース・レンタル経験の最も多かったのは衣服（ハレの日）で、全体の 30.2%であった。衣服（ハレの日）の場合、無料で借りた経験も本種別が最も高い割合を示し、全体の 2.9%であった。一方、中古品の販売、無料で譲ったり貸したりする行動に関しては、スポーツ・楽器・アウトドア（各 3.6%、2.4%、0.9%）や本・音楽・ゲーム・おもちゃ（各 3.7%、2.4%、0.9%）等の趣味用品で最も多く見られた。

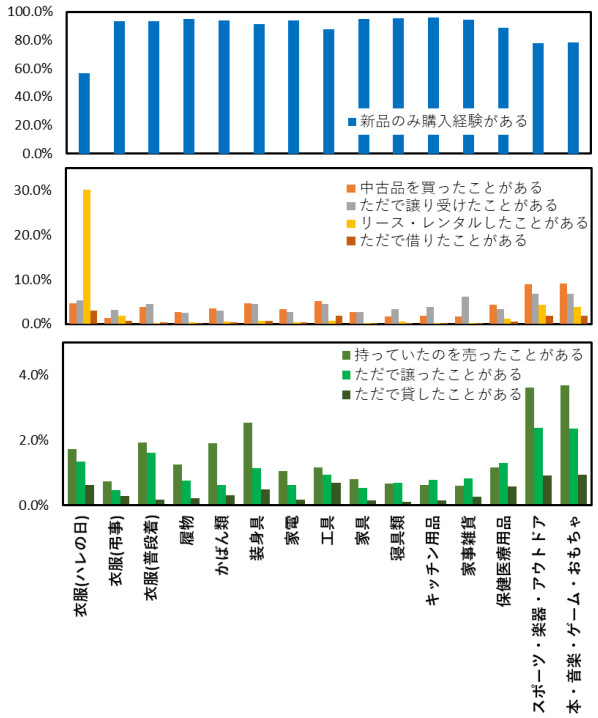


図 1　製品類型別消費経験者の割合 [%]

*対象製品の類型別、「私に関係あるか、興味のある製品である」と回答した者を基準にした。

3.2 製品購買時に重視する消費傾向

製品購買時に重視する消費傾向に関する調査結果を図 2 に示す。ここでは「とても当てはまる」～「全く当てはまらない」を 6～1 に得点化した。「低価格で質の良い製品を選ぶ」の平均得点は 4.2 で、8 項目の中で最も高かった。次いで「気に入った製品が見つかっても値段が高かったら買わない」が 4.0 であった。これに対して、「環境に配慮した製品は多少高くても買う」の平均得点は 2.9 で最も低く、「ストレス解消や気分転換のためショッピングする」も 3.0 と低かった。

コロナ禍での中古品の購入等に関しては、「生活費節約のため中古品を購入・考慮した」と「衛生面が気になって中古品の購入・使用を迷う」の平均得点がそれぞれ 2.6 と 3.5 であり、後者の傾向が強く見られた。

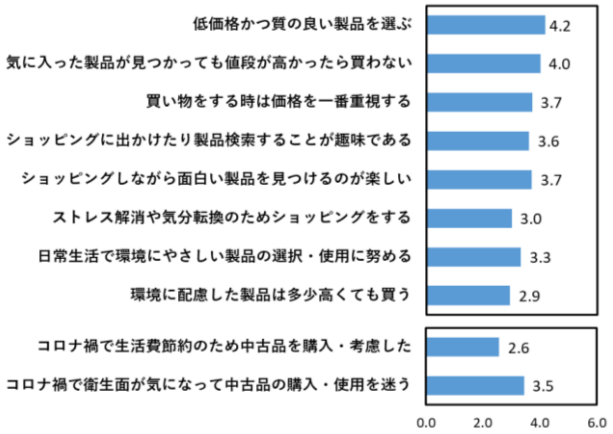


図 2　製品の購買に影響を及ぼす消費傾向（平均）

4. まとめ、及び今後の課題

本研究では、中古品の利用拡大に役立つ取組みを提案するための基礎研究として、製品の種類を考慮した売買等の消費経験と消費者の製品購買時に重視される消費傾向の調査結果をまとめた。分析結果では、回答者は新品購入を日常で基本的な購買行動にしていた。期間限定用品や趣味用品は、他種類より新品経験の割合が低く、中古品の購入やリース・レンタル等の購買経験の割合が高く見られた。回答者は価格と質の両方を重視する購買傾向が見られた。以上を踏まえ、製品種類別中古品の購入等の消費行動の現状と環境面で持続可能な消費行動の確保に向けた中古製品の適切な利用方向へのさらなる分析は今後の作業にしたい。

謝辞

本研究は、株式会社メルカリとインクルーシブ工学連携研究機構との共同研究である価値交換工学の成果の一部である。

引用文献

1) メルカリ：“メルカリガイド＞禁止されている行為”, Mercari, Inc.,（オンライン）, 入手先 <https://www.mercari.com/jp/help_center/getting_started/prohibited_items/>,（参照 2021-10-29）

在宅テレワークにおける自然換気と知的生産性の関係に関する研究

The relationship between natural ventilation and work performance in home telework

○岡田雄人*、磐田朋子
Yuto Okada, Tomoko Iwata
芝浦工業大学
* br18020@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

2020 年初頭に発生した新型コロナウイルスの影響を受けて、在宅テレワークが急速に普及した。テレワークとは勤労形態の一種であり、情報通信技術を用いた場所や時間にとらわれない柔軟な働き方である。総務省のアンケート調査 [1]では、2020 年に「テレワークを導入している」「今後導入する予定がある」と回答した企業の合計が約 6 割に達していた。東京都では 2020 年 4 月の緊急事態宣言以降、テレワークの導入が 50%を上回っていた。これらのことから今後、テレワークの普及がさらに拡大されると予想できる。

在宅時間の増加に伴い、家庭内のエネルギー消費量が増える傾向にある。一方で省エネを目的に自然換気を取り入れると、室内の温度上昇や騒音の侵入などによりパフォーマンスが低下してしまう恐れがある。本研究では、自然換気行動と知的生産性の間にあるトレードオフの関係について、熱負荷シミュレーションに基づき定量的に明らかにすることを目的とした。

2. 研究手法

2.1 モデル概要

本研究では、モデル住宅を建築環境・省エネルギー機構の標準住宅モデルとした。図 1 にモデル住宅の平面図を示す。この住宅を AE-CAD、AE-Sim/Heat を用いてモデル化し、熱負荷シミュレーションを行った。なお、モデル住宅の断熱性能は、生産年齢人口世帯の住居を想定して新省エネ基準(等級 3)とした。使用する気象データは 2005 年から 2010 年までの拡張アメダス気象データである。

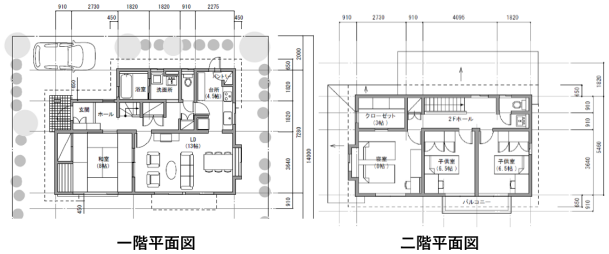


図 1 標準住宅の平面図

2.2 シナリオ

モデル住宅の居住者は 4 人家族世帯を想定した。テレワークがある平日のみを評価対象として、一時間ごとの生活スケジュールを設定した。テレワークは 9 時から 18 時までとし、一時間の昼休憩を設けた。

シナリオの組み合わせとして、テレワークをする部屋をリビングと寝室の二通り設定した。また、室内の熱の出入りや騒音の侵入の割合が大きい開口部に注目し、単層窓と複層窓の二通りで熱負荷計算を行った。さらに通風行動と空調稼働のスケジュールを二通りに分けた。一つは室温を全て空調で制御するものである。もう一方はテレワークの 13 時から 18 時の時間帯で通風を行うものである。空調は人が一人以上その居室にいる場合、冷房設定 25℃で稼働させた。また、騒音レベルのシナリオとして、50dB(騒音あり)と 30dB(騒音なし)の二通りを設定した。以上のように、本研究では計 2^4 通りのシナリオについて熱負荷シミュレーションを行い、自然換気行動と知的生産性の間にあるトレードオフの関係について、定量的に明らかにした。

2.3 評価項目

本研究では、大きく分けて 3 つの項目で評価を行う。一つ目は二酸化炭素排出量とその時の費用についてである。空調機や照明、パソコンの電力消費などから算出する。二つ目は温熱環境評価指数(PMV)による評価である。これは気温や湿度、気流、放射、人体の代謝量、着衣量の六つの要素から成り立つ総合快適指標のことである。-3<PMV<3 の範囲で表され、-0.5<PMV<0.5 が快適範囲とされている。三つ目は知的生産性についてである。知的生産性とは、知的成果物を生み出す効率のことである。知的生産性を構成する室内環境要素は多数存在しているが、その中でも室温と換気量、騒音の三つの要素を対象にした。しかし現在、これを数量的に評価・測定する方法は確立されていない。よって室温と換気量については、過去の実験や研究 [2,3]から得られた関係式を用いて評価を行った。また騒音が知的生産性に及ぼす影響に関しては、特に主観による影響が強いため、関係式が成立していない。よってシナリオで発生する騒音を音の指標に照らし合わせて評価を行う。

3. シミュレーション結果

本報では、テレワークの部屋をリビングで単層窓とし、空調を全て機器で制御するものと一部通風を行うパターンの結果を示す。

図 2 は全空調と一部通風の時で比較した二酸化炭素の排出量である。冷房負荷が一番大きい 8 月では約 12 kg-CO_2 の差があり、最大値となっている。冷房期の合計では、約 40kg-CO_2 の削減が見込める。また図 3 にその時の光熱費を示す。冷房期で約 2600 円の削減が見込める。なお、電気料金は 24.01 円/kWh とした。

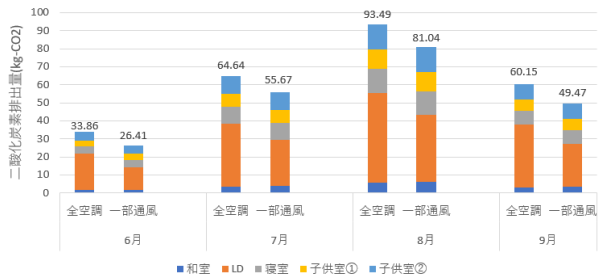


図 2 LD で全空調/一部通風の時の CO_2 排出量比較

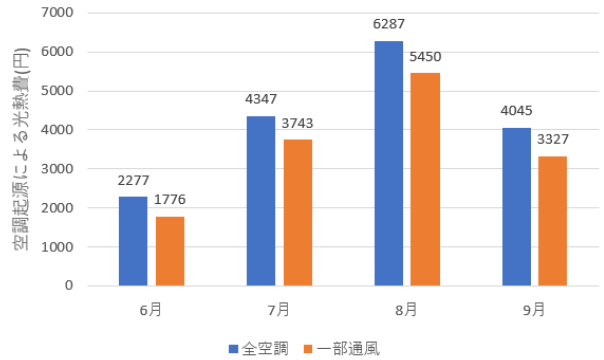


図 3 LD で全空調/一部通風の時の光熱費比較

次に PMV の結果を図 4 に示す。冷房負荷が比較的少ない 6 月と 9 月では、あまり大きな差はみられなかった。しかし冷房負荷が大きくなる 8 月では、0.2 程の差が生まれた。PMV の値が 1.8 を超えると、不快に感じる人が約 60%を超えるようになる [4]。なお、代謝量は 1.5、着衣量は 0.55 で計算を行った。

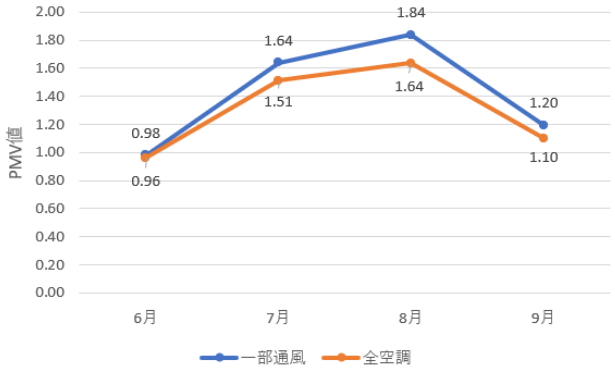


図 4 LD で全空調/一部通風の時の PMV 比較

最後に知的生産性の結果を図 5 に示す。これは室温と換気量を変化させたときの総合的なパフォーマンスの比率となっている。全て空調機で制御する場合であっても、建築基準法にて定められている換気量は確保している。そこから自然換気を取り入れた時の増加量で相対的なパフォーマンスが決定される。室温による作業効率への影響の方が高いため、8 月のパフォーマンス比率では、大きく差が開いている。

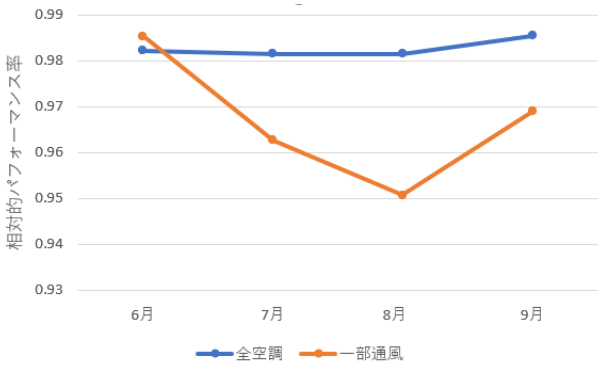


図 5 LD で全空調/一部通風の時のパフォーマンス比較

4. まとめ

通風行動を取り入れると省エネや節約につながるが、快適性やパフォーマンスが落ちてしまう。しかし 6 月の初夏の時期であれば、通風行動によってパフォーマンスが向上し、両立を図ることが可能であることが示唆された。

5. 今後の課題・展望

今回のシミュレーションで得られた結果に基づいて、さらにテレワークをする部屋や窓の性能を変化させることで、それぞれの要素が快適性や知的生産性にどのように影響を与えるのかを分析する必要がある。

また、実際に被験者による快適性や知的生産性の計測を行うことで、シミュレーションとの誤差を検証する必要があると考えられた。

6. 参考文献

1) 総務省:“令和 2 年通信利用動向調査の結果” (2021-6-18) pp5
2) O. Seppanen, W.J.Fisk, Q.H.Lei :“Ventilation and performance in office work” (2005-7-1)
3) O. Seppanen, W.J.Fisk, Q.H.Lei :“Effect of Temperature on Task Performance in Office Environment”(2006)
4) 空気調和・衛生工学会編,“図解 空調・給排水の大百科”,オーム社,(1998/07/24)

サステイナブルファッション実現のための衣服リサイクルシステム設計

Design of garment recycling system for sustainable fashion

○平尾 雅彦*[1)]、天沢 逸里[1)]、水口 能宏[2)]、古川 雅敏[2)]、佐久本 太一[2)]、宮坂 信義[3)]
Masahiko Hirao, Eri Amasawa, Yoshihiro Mizuguchi, Masatoshi Furukawa, Taichi Sakumoto, Nobuyoshi Miyasaka
1) 東京大学, 2) 日揮ホールディングス(株), 3) 帝人(株)
* hirao@chemsys.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

国連「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」では、持続可能な消費と生産パターンの確保を目標としている[1]。「衣食住」は、豊かな生活に欠かせない製品であるが、世界の衣類生産量はこの 20 年で 2 倍に増加し、1 着あたりの着用期間は半分に減った[2]。全世界の温室効果ガス排出量の 8～10 % は衣服産業由来とされ、海洋中のマイクロプラスチックの約35% が繊維由来との報告がある[3]。日本では年間 75.1 万トンの衣服が家庭から手放され、その約 6 割が一般廃棄物として処分されている[4]。衣服のサステイナビリティに資する、認証やグリーン購入、リユースやマテリアルリサイクル、モノマー化などのケミカルリサイクルといった施策や技術は多数実証されているが、持続可能な消費と生産パターンは確立できていない。

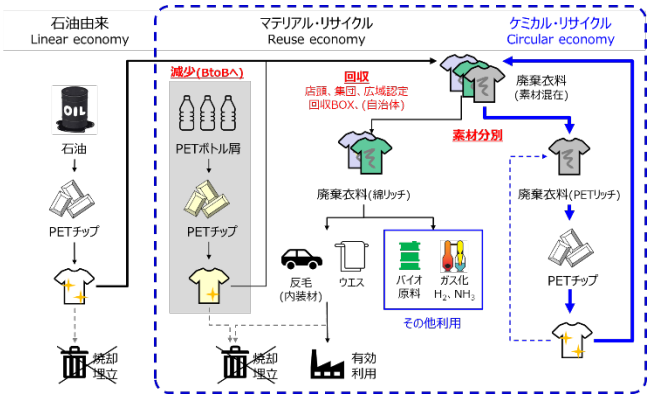


図 1　ポリエステル繊維の循環シナリオ

図 1 は、衣服素材の過半を占めるポリエステル繊維を例とした循環シナリオである。古着回収を行う小売店もあるが、回収後のフローは明確でない。日本には衣服リサイクルの法制度がなく、循環システムのあり方についても整理できていない。実社会における衣服循環の障害を明らかにする必要がある。

本研究では、「生産から流通・消費・リサイクルまでのライフサイクルを通してサステイナブルファッションを実現する」ことをビジョンとし、「ファッションによる人々の生活の質・満足感（ウェルビーイング）を確保すると同時に、繊維・衣服製品のライフサイクルからの環境影響を最小にする」ことを目標とする。

2. 関係者ワークショップによる課題抽出

衣服ライフサイクルに関わる様々なステークホルダーによるワークショップ (WS) を開催し、衣服のサステイナブル化に向けた課題抽出を行い、望まれる社会システムについて議論した。WS 参加者は本研究メンバーに加え、繊維製造、アパレル、ユニフォーム製造・リサイクル、小売り、衣服シェアリング、PET ボトルリサイクルなどの事業者、環境 NPO、家政学研究者などである。

2.1 ワークショップの概要

これまでに、2～2.5 時間のオンライン WS を 4 回開催し、各 WS には 15 名程度が参加した。**表 1** にこれまでに開催した WS の内容をまとめた。第 1 回 WS では繊維産業全般の現状を共有するとともに、課題抽出を行った。第 1 回 WS の結果から、衣服のサステイナブル化に向けた重要課題を見出すとともに、解決に向けた対応策を議論した。さらに、参加者へ個別ヒアリングを実施することで、衣服リサイクルシステム設計に向けた具体的な課題と対応策を抽出した。

表 1 ワークショップの概要

回数	内容・目的
1	繊維産業全般の現状共有と課題抽出
2	ステークホルダー自身のポジションで重要視する 3R 推進課題と対応策の抽出
3	衣服リサイクルを実現するために必要な回収システムについての議論
4	実例から考える回収リサイクルスキームの具体化
–	ステークホルダーへ個別ヒアリング

2.2 WS の結果

図 2 に第 1 回と第 2 回 WS でステークホルダーが指摘した衣服の循環に関わる課題、進行中の対策、提案施策を衣服のライフサイクルステージ別に整理した。

各ステークホルダー自身が関わるライフサイクルステージにおける課題が具体化された。例えば、小売業では販売におけるリサイクル性と顧客満足度のバランス、消費者ではリサイクルの価値のわかりにくさが

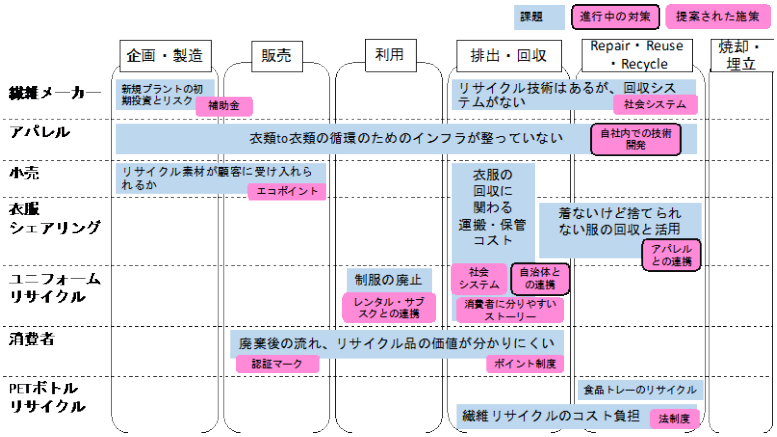


図２　ステークホルダーによる循環に関わるライフサイクル上の課題と施策

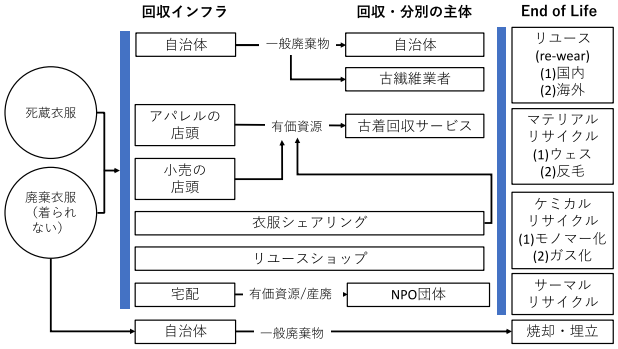


図３ 衣服回収システムの現状分析

課題である。特に、全ステークホルダーから“排出・回収”のライフサイクルステージに何らかの課題が挙がり、中でも消費者からの回収において、多くの課題がある。システムや社会インフラの欠如、リサイクルコスト負担のあり方にも多くの課題が示された。

この結果を受けて、第 3 回と第 4 回では回収スキームに焦点を当てて議論をした。現状で存在する回収インフラと、回収・分別の主体を具体化することができた。**図３**に示すように、回収ルートによって、廃棄物処理法制上で回収衣服の分類が変わること、回収インフラと回収・分別の主体が必ずしも一致しない場合があることが分かった。また、End of Life (EoL) にはいくつかの再資源化ルートが存在し、回収衣服がどのルートに渡るかは、衣服の多様性・多素材性という特徴と回収・分別の主体の判断が鍵となる。

さらに、個別ヒアリングの結果も合わせることで、回収システム構築と運用に関わる具体的な課題も明らかになった。例えば、衣服の状態・素材や再生素材の需要状況によって EoL オプションが変わるため、回収衣服を状態や素材別に分別する必要がある。例えば、リユース可能な衣服は状態が良く再販可能、または海外で需要のある服である。また、ケミカルリサイクルによるモノマー化が可能な素材はポリエステルとナイロンのみであるが、ガス化であれば多くの素材に適用できる。このように、回収した衣服を分別する作業が必須であるが、誰が分別すべきか、誰がそのコストを負担すべきかといった点も課題として挙がった。

回収以外のステージでは、リサイクル素材を製品に使用するという観点で、素材価格の上昇とそれにともなう製品価格の上昇や消費者の再生素材受容性というリスク要因が挙げられた一方、社会的な要請から再生素材率やサステイナブル素材率を経営目標とする方向性も示された。また、長期の繰り返し着用の耐久性やリサイクル性など衣服製品の設計・生産段階での配慮の必要性も挙げられた。

3. 社会制度の検討

社会制度としての衣服リサイクルについても検討を行っている。消費者が排出する製品については、容器包装、家電、自動車などのリサイクル制度がすでに施行されている。製品特徴（多様で多素材など）やサプライチェーンの構造（資源から製品までのチェーンが長い、製造はほとんど海外）などの観点からは、既存の制度と同じ仕組みでは実施に課題が多く、丁寧な議論が必要である。例えば、排出者である消費者の視点からは、自治体による分別回収が期待されるが、自治体の負担を増やさない仕組みの検討が必要である。

4. まとめ

本研究から、衣服循環システムの設計に向けて、ライフサイクル上のステークホルダーにおける課題、特に回収・分別段階の課題を明らかにした。現在の制度上の問題が明らかになった。

今後は、多様な可能性のある循環ルートでの環境影響削減効果のシナリオ分析と最適システムの設計、ステークホルダー連携によるシステム構築の試み、行政との連携による社会制度構築、消費者行動変容のための施策検討などを進めていく。

引用文献

1. United Nations: “Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development”, (2015)
2. Ellen MacArthur Foundation: “A new textiles economy: Redesigning fashion’s future”, (2017)
3. Niinimäki K., et al.: Nat. Rev. Earth Environ., 1, (2020), pp.189–200
4. 日本総合研究所: “環境省　令和２年度　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)

口頭発表セッション（一般）

[3-A2] 農業

座長：林清忠（食品産業技術総合研究機構 ）

2022年3月4日(金) 11:00 ～ 12:20 A会場 (zoom)

Zoomはこちら

[3-A2-01] 有機養液栽培によるミニトマトの糖度・収量・環境負荷の複合比較

*藤森 開[1]、竹本 岬[1]、大平 希[1]、古屋 俊樹[1]、苗 山[1]、堂脇 清志[1] （1. 東京理科大学）

11:00 ～ 11:20

[3-A2-02] リーダ農家と一般コメ農家のライフサイクル温室効果ガス排出量の比較

*レオン 愛[1] （1. 国立研究開発法人　国際農林水産業研究センター）

11:20 ～ 11:40

[3-A2-03] バイオ炭の農地施用がもたらす GHG削減効果の推計方法

*湯 龍龍[1]、林 清忠[1] （1. 農業・食品産業技術総合研究機構）

11:40 ～ 12:00

[3-A2-04] Prospective Environmental Cost Changes by New Materials in Products: a Case of Microfibrillated Cellulose in Paper Packaging Boxes

*Lavilla Ariel[1]、井原 智彦[1] （1. 東京大学）

12:00 ～ 12:20

©日本LCA学会

有機養液栽培によるミニトマトの糖度・収量・環境負荷の複合比較

Combined Comparison of Sugar Content, Yield and Environmental Impact of Mini Tomatoes Grown by Organic Hydroponics

○藤森開*[1)]　竹本岬[1)]　大平希[1)]　古屋俊樹[1)]　堂脇清志[1)]
Kai Fujimori, Misaki Takemoto, Nozomi Ohira, Toshiki Furuya ,Kiyoshi Dowaki
1)　東京理科大学
*7418089@ed.tus.ac.jp

1.　はじめに

2021 年 5 月農林水産省が 2050 年までに有機農業面積を 25%、100 万 ha に拡大することなどを定めた「みどりの食料システム戦略」を策定した[1)]。農業は CO_2 排出の主要な要因であるため脱炭素化・環境負荷軽減を目標としている。しかし、農林水産省の調査によると、約 6 割の一般消費者が有機食品のイメージとして環境負荷をかけていないと答えているが、有機農業は慣行農業と比べて収量が少ないという面があり、収量ベースで比較すると環境負荷が少ないとはいいがたい[2)3)]。

農業における一般的な栽培方法としては、土耕栽培や養液栽培など様々あるが、養液栽培は慣行栽培と比較して多くの収量を期待できることが示唆されている[4)]。このような背景のもと、近年注目されている栽培方法の一つに、有機農業の特徴と養液栽培の特徴を併せ持つ有機養液栽培がある。有機養液栽培では、慣行農業と比較しても収量が同程度確保できると同時に高付加価値な野菜を栽培できる可能性が指摘されている[5)6)]。

したがって本研究では、ミニトマトを対象に有機質肥料の異なる 2 種類の有機養液栽培を実施し、その収量、糖度及び環境影響を調査し有機養液栽培の優位性を検証する。比較要素については以下の事実に基づき設定した。

まず対象の野菜であるトマト(ミニトマト)は農林水産省によって野菜のうち特に消費量が多い指定野菜(14 品目)に定められている。さらに、健康な食生活を送る上での欠かせない食品である野菜は年々消費量が減少しているが減少の中でもトマト(ミニトマト)は消費動向としては高い位置を保持し続けていることから、人気の高い野菜である。また、タキイ種苗株式会社によると消費者の購入するトマトの選び方の第 3 位に味という結果が表れた[12)]。トマトの人気品種ランキングの上位にはフルーツトマト系や酸味の少ない品種が多いことなどから、消費者にとって糖度（甘味）が重要であることがわかる。

次に環境影響については、野菜の LCA に関する先行研究は数多く存在するが、有機養液栽培におけるミニトマトの LCA が行われた例はほとんどなく、新たに調査を行う必要があろう[7)]。

2.　研究概要

2.1　検証する有機養液栽培の種類

有機養液栽培の先行研究として、有機肥料の違いによる有機養液栽培での葉物野菜の品質の調査が存在する[6)]。これによると、鰹煮汁を使用した「ソリュブル」は化学養液栽培と比較して生育は劣るものの、苦味と甘みを示すアミノ酸量が増加したという結果が得られている。しかし、トマトなどの果菜類での品質の差は明らかにされていない。

さらに今回は、わが国で年間 15 万トンの余りが生じ、現在一部は微生物用基質や家畜肥料として用いられているトウモロコシを原料とする製糖工程から生じる副産物であるコーンスティープリカー（CSL）にも注目する。なお、CSL は有機養液土耕栽培や養液栽培に用いられた研究例がある。また、これらのソリュブルや CSL などの易分解性の有機質肥料は養液栽培に適しているとされている[5)8)]。

本研究では、有機質肥料としてソリュブル、及び CSL を使用し有機養液栽培を行い慣行栽培と比較を行うこととした。

2.2　環境影響評価

環境影響評価においては、等価 CO_2 排出量を算出することとした。システム境界は育苗から収穫までとし、機能単位は収量に焦点を当てるためミニトマト 1g 当たりとした。また、インベントリデータは実際に栽培したデータを参考にした（詳細は SI 参照）。

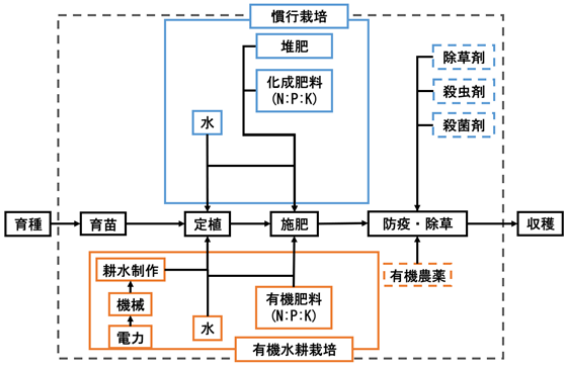


図 1.　システム境界

2.3　収量評価

収量に関しては、ミニトマトの総収量（重さ）、良品果数及び不良果数を調査する。良品果、不良果を判断する基準としては全農による品質基準を使用する[9)]。

2.4　糖度評価

次に、ミニトマトにおいて重要である糖度（Brix）

については、糖度計（アタゴ ATAGO ポケット糖度計 PAL-1 Brix0.0 53.0,株式会社アタゴ製）を用いて分析を行った。

3. 栽培方法

栽培方法については、農研機構の有機質肥料活用型養液栽培マニュアルを参考にし、本学野田キャンパスの温室施設において、設定温度 27℃とし行った[10]。

3.1 耕水工程

有機養液栽培では、栽培を開始する前に培養液として用いることができるように耕水を行う必要がある。ここでは、野中らの研究[11]を参考にミニトマトの栽培における重要な要素である窒素量をソリュブルの添加量と同じになるように、CSL の添加量を設定することとした。なお、ソリュブルが 60 g-N/kg であるため、約 1.8 倍を CSL（33.1 g-N/kg）の添加量とした。

3.2 栽培工程

栽培では、プランター（H185×L245×W653）を使用し、ソリュブル 1g/kg（CSL：1.75～1.84g/kg）＋天然有機カリの懸濁液 1mL/kg（濃度：274g-K/L）を 1 施肥単位とし、定植後、0.5 施肥単位を培養液に毎日添加した。また、第一果房の果実の直径が≧1cm 程度になったのち、0.75 施肥単位/日を添加した。さらに、第二果房の果実が直径 1cm 程度になった後、1 施肥単位/日を添加し、ヘタが上向きに閉じた段階で収穫時期として判断した。

4. 結果

4.1 収量評価結果

2022/1/10 時点では十分な収穫量がなく優位性を検証することはできていないが、慣行栽培のミニトマトに比べて有機養液栽培のミニトマトは直径が 2~5mm 程度大きくなり、重量も 2g 程度重くなっていることを確認した。



図 2. 慣行栽培のミニトマト



図 3. 有機養液栽培（ソリュブル）のミニトマト



図 4. 有機養液栽培（CSL）のミニトマト

5. まとめ

今後十分な収穫量が得られれば、環境影響評価や収量評価及び糖度評価を行い、有機養液栽培の優位性を検証していく予定である。

参考文献

1) 農林水産省：“みどりの食料システム戦略トップページ”，（オンライン），入手先 <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/index.html> （参照 2021/09/19）
2) 農林水産省：“有機農業をめぐる我が国の現状について”，（オンライン），入手先 <https://www.maff.go.jp/primaff/koho/seminar/2019/attach/pdf/190726_01.pdf> （参照 2021/09/19）
3) 外園信吾：“第 5 回日本 LCA 学会”，(2010)，pp316−318
4) Guilherme Lages Barbosa , Francisca Daiane Almeida Gadelha , Natalya Kublik, Alan Proctor , Lucas Reichelm , Emily Weissinger , Gregory M. Wohlleb and Rolf U. Halden：International Journal of Environmental Research and Public Health, （2015），pp. 6879−6891
5) 篠原信：“並行複式無機化法と有機質肥料を使ったトマト養液栽培”，農研機構，（オンライン），入手先 <https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laborat

ory/vegetea/2006/vegetea06-07.html> （参照 2021/09/23）
6) 新野美佐子，三好博子，丹治克男，篠原信：“東北農業研究”，(66)，(2013)，pp。141−142
7) 清水夏樹：“農村計画学会誌”，26，(2007)，pp.365−370
8) 中野明正，川嶋浩樹，佐久間青成，上原洋一，：野菜茶業研究所研究報告，(3)，(2000)，pp.129−136
9) 全農：出荷規格表，(オンライン)，入手先 <https://www.zennoh.or.jp/hr/syukkakikaku/img/kikaku01.pdf> （参照 2021/09/23）
10) 農研機構：“有機質肥料活用型養液栽培マニュアル”，(オンライン)，入手先 <https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/vt_youekisaibai_manual_20140616.pdf> （参照 2021/09/23）
11) 野菜茶業研究所研究：“コーンスティープリカー（CSL）及びメタン消化液（MFC）を利用した有機養液土耕がメロンの $\delta^{15}N$ 値に与える影響”，(2005)，pp．9-14
12) タキイ種苗株式会社：“インフォメーション”，タキイ種苗株式会社（オンライン） <https://www.takii.co.jp/info/news_171005.html> （参照 2022/01/10）

Supporting Information (SI)

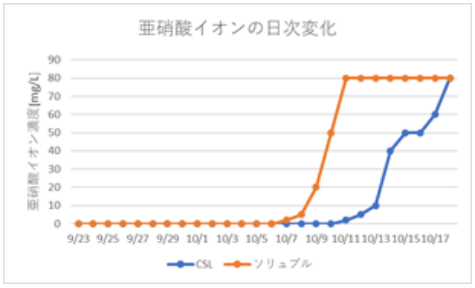


図 S1. 亜硝酸イオンの日次変化

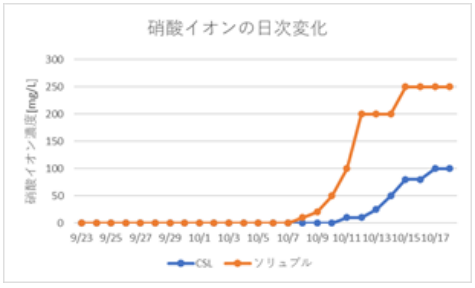


図 S2. 硝酸イオンの日次変化



図 S3. アンモニウムイオンの日次変化



図 S4. 東京理科大学内の温室

表 S1. CO_2排出量

項目	投入物	排出量	単位	出典
エネルギー	電力	0.000496	kg-CO_2eq/kMh	環境省
	水(上水)	0.36	kg-CO_2eq/m^3	環境省
肥料製造	有機肥料(N成分)	3.27	kg-CO_2eq/kg	農林水産省
	有機肥料(P成分)	2.44	kg-CO_2eq/kg	
	有機肥料(K成分)	0.44	kg-CO_2eq/kg	
	化学肥料(N成分)	1.15	kg-CO_2eq/kg	
	化学肥料(P成分)	0.8	kg-CO_2eq/kg	
	化学肥料(K成分)	0.15	kg-CO_2eq/kg	
	石灰石	0.44	kg-CO_2eq/kg	国立環境研究所
	鰹煮汁	0.15	kg-CO_2eq/kg	味の素
	CSL	0.5	kg-CO_2eq/kg	Environmental Management

表 S2. インベントリデータ

項目	投入物	ソリュブル	CSL	慣行栽培	単位
潅水	水	15	15	0	m^2/kg
肥料(堆肥)	有機肥料(N成分)	0	0	0.024	kg/kg
	有機肥料(P成分)	0	0	0.04	kg/kg
	有機肥料(K成分)	0	0	0.024	kg/kg
	化学肥料(N成分)	0	0	0	kg/kg
	化学肥料(P成分)	0	0	0	kg/kg
	化学肥料(K成分)	0	0	0	kg/kg
	鰹煮汁	0.01	0	0	kg/kg
	CSL	0	0.018	0	kg/kg
	石灰	0.15	0.15	0.28	kg/kg
追肥	水	198	179	105	m^2/kg
	化学肥料(N成分)	0	0	0.032	kg/kg
	化学肥料(P成分)	0	0	0	kg/kg
	化学肥料(K成分)	0	0	0.024	kg/kg
	有機肥料(K成分)	0.031	0.031	0	kg/kg
	鰹煮汁	0.031	0	0	kg/kg
	CSL	0	0.0558	0	kg/kg

バイオ炭の農地施用がもたらす GHG 削減効果の推計方法

Estimation methods for GHG reduction effects of biochar applied to agricultural soils

○湯龍龍*、林清忠
Longlong Tang, Kiyotada Hayashi
農業・食品産業技術総合研究機構
*tanglonglong@affrc.go.jp

1. はじめに

バイオ炭の農地施用は農業分野における気候変動緩和策として注目されている。令和 2 年 9 月より、J-クレジット制度において、農地にバイオ炭を施用し、難分解性の炭素を長期間土壌に固定することによる排出削減量をクレジットとして認証できるようになった[1]。合わせて、土壌での貯留量とバイオ炭製造までの付随的排出量の差より GHG 貯留量（クレジット量）の算定方法が定められた[2]。なお、この方法は原則として考慮すべき算定項目を規定したものであり、実際は各項目の算定に多数の影響要因があり（表 1）、不確実性が大きいものと考えられる。

単位バイオ炭施用量あたりの CO_2 貯留量の算定は、主にバイオマス源と炭化温度に影響されることが分かってきた。一方、バイオ炭製造プロセスにおける排出は、バイオ炭の製造方法（炭化設備、製造の規模など）に強く影響される。しかし、これまで、製造方法間で LC-CO_2 の幅が大きいことは触れられているものの、その要因は体系的に整理されていない[3]。さらに、製造までの付随的 CO_2 排出が GHG 貯留量に与える影響も明らかでない。

そこで、本研究では、①文献調査を基に、バイオ炭製造方法別の LC-CO_2 排出量の違いとその影響要因を特定するとともに、②利用率が低い農作物残渣（すき込みを除く）のバイオ炭利用を対象に、製造方法の違いを考慮した GHG 貯留量を試算し、算定における課題を整理する。

表 1 バイオ炭の GHG 貯留量への主な影響要因

	前処理	炭化温度	炭化設備
CO_2 排出/単位量炭製造	バイオマス源 含水率	炭収率	設備種類、規模 余剰エネルギー
CO_2 貯留/単位量炭施用	—	炭素残存率（100 年後）	炭素含有率（炭化方法、バイオマス源）

2. 方法

2.1 バイオ炭製造までの GHG 排出量

バイオ炭製造までの LC-CO_2 は、既存文献を調査して得た。ここでは、既存のレビュー論文[3]で取り上げられる文献を中心に暫定的に整理した 10 文献（53 データセット）を対象とした（SI 表 1）。全対象文献は slow pyrolysis を用いており、バイオ炭が主製品であり、余剰エネルギー（syngas と bio-oil）は CO_2 削減効果としてカウントする。本調査で考慮する GHG は、輸送、炭化プラント製造、前処理、炭化時エネルギー消費、直接排出（CH_4）、余剰エネルギーの代替効果である。ほかの各種削減効果（農地での N_2O 削減、肥料代替、増収効果）と biogenic CO_2 は考慮しない。

また、バイオ炭の製造方法の違いを考慮するために、製造方法を O（開放式簡易型炭化方法）、PS（密閉式炭化炉、中小規模［<1 万トン/年］）、PL（密閉式炭化炉、大規模［≧1 万トン/年］）の 3 種類に分けた。

2.2 農作物残渣由来のバイオ炭の GHG 貯留量の推計

GHG 貯留量の推計方法は以下のように定義した。

$$GHG_{bioc} = M_{bioc} \cdot \left(S_{application} - E_{production}\right) \quad (1)$$

GHG_{bioc} はバイオ炭の年間 GHG 貯留量（ton-CO_2e/year）、M_{bioc} は農作物残渣由来のバイオ炭の年間生産量（ton/year）、$S_{application}$ はバイオ炭の農地施用による CO_2 貯留量（ton-CO_2e/ton-biochar）、$E_{production}$ はバイオ炭製造までの LC-CO_2 排出量（ton-CO_2e/ton-biochar）である。

バイオ炭の年間生産量は以下のように算定した。

$$M_{bioc} = (M_{biom} \cdot F_w \cdot r) \cdot F_{yield} \cdot F_C \cdot F_{perm} \cdot 44/12 \quad (2)$$

M_{biom} は農作物残渣の賦存量（ton/year）、F_{water} は農作物残渣の含水率（-）、r はバイオ炭利用率（-）、F_{yield}、F_C と F_{perm} はそれぞれバイオ炭の収率（-）、バイオ炭の炭素含有率（-）と 100 年後の炭素残存率（-）を指す。農作物残渣（すき込みを除く）は未利用系バイオマスに分類され、現状（2019 年）の利用率は 31%と低く、賦存量は 1200 万トンであった。バイオ炭利用率の設定について、農水省は農作物残渣の賦存量の現状利用率を 2025 年までに 45%増加させる目標を立てており、ここではその増分である 14%がすべてバイオ炭の利用と仮定して、r を 14%とした。農作物残渣の F_{water} は農水省の設定値（0.5）を用いた。F_{yield}、F_C と F_{perm} は IPCC (2019)のデフォルト値を使用した。なお、バイオ炭年間生産量の製造方法の内訳は、情報が得られなかったため、3 つのシナリオを想定した：製造方法が不明の場合、中小規模の炭化炉が多い場合（O: 0.1, PS: 0.7, PL: 0.2）、大規模炭化炉が主である場合（O: 0.1, PS: 0.2, PL: 0.7）である。方法 O は主に途上国の農村に多く用いられるため、いずれも 0.1 と仮定した。

バイオ炭製造までの LC-CO_2 ($E_{production}$)は、文献調査で方法別の値を得た（2.1 節）。農地施用による CO_2 貯留量（$S_{application}$）は、IPCC (2019)の値[4]を使用した。

不確実性は、上記 $E_{production}$ と $S_{application}$ のみを考慮した。前者は調査した文献データの幅を、後者は IPCC が開示する不確実性情報[4]をそれぞれ利用した。

3. 結果と考察

3.1 バイオ炭製造方法別の LC-CO_2

農作物残渣を対象とする文献は、調査した全10文献（52データセット）中、7文献（22データセット）であった。図1にバイオ炭製造方法別の LC-CO_2 とその内訳を示した。開放式簡易型炭化方法（O）は LC-CO_2 が最も大きく、密閉式炭化炉の大規模施設（PL）の値が最小であった。

方法 O は前処理と炭化プロセスで殆どエネルギーを必要としない一方、直接排出（CH_4）の影響が大きかった。方法 PS と PL は直接排出が殆どなく、かつ、余剰エネルギーによる削減効果が得られるため、LC-CO_2 が負値となる。設備の規模が大きいほど、削減効果が顕著であった。

直接排出量の 6 データには、農業残渣（種類は明示されていない）と籾殻が含まれており、籾殻が相対的に小さい。一方、余剰エネルギーの削減効果にも設備の規模間で差が大きかった。これには、余剰エネルギーの量の差と、採用される代替効果（電力、重油、天然ガスなど）の差の双方が含まれる。本調査のサンプル数が少ないため、今後は包括的な文献調査に基づく精緻な解析が求められる。

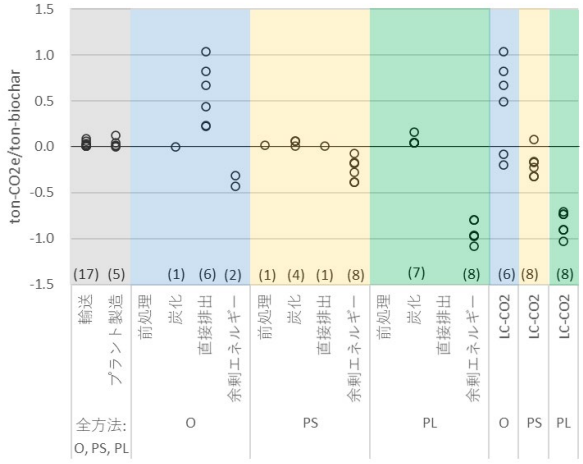


図1 バイオ炭製造方法別の LC-CO_2
（両括弧の数字はデータセット数を示す）

3.2 農作物残渣由来のバイオ炭の GHG 貯留量

農作物残渣賦存量（2019 年）の 14%をバイオ炭として利用する場合の GHG 貯留量を算定し、同量の残渣を野焼きした場合の GHG 排出量と比較した（図2）。なお、野焼きによる CH_4 と N_2O 排出はいずれも 2006 年 IPCC ガイドラインデフォルト値を使用した。その結果、バイオ炭利用の場合、製造方法の違いを考慮に入れて、年間約 37－43 万 ton-CO_2e の貯留量（合計）が見込められ、野焼きの排出量の約 5 倍大きいことが分かった。

GHG 貯留量（合計）の内訳は、土壌貯留量が大きく、製造までの排出量は相対的に小さかった。なお、特に、大規模の炭化設備が主とするシナリオの場合は、余剰エネルギーの代替効果が大きいため、製造までの GHG（負値）は農地貯留の約 1/3 であった。したがって、GHG 貯留量の算定では、土壌貯留量のみではなく、製造までの排出量の推計も重要と言える。また、製造までの LC-CO_2 は製造方法と規模によって大きく異なるため、より精緻な GHG 貯留量を求めるには、バイオ炭年間生産量の総量ではなく、製造方法別生産量がよいと示唆される。

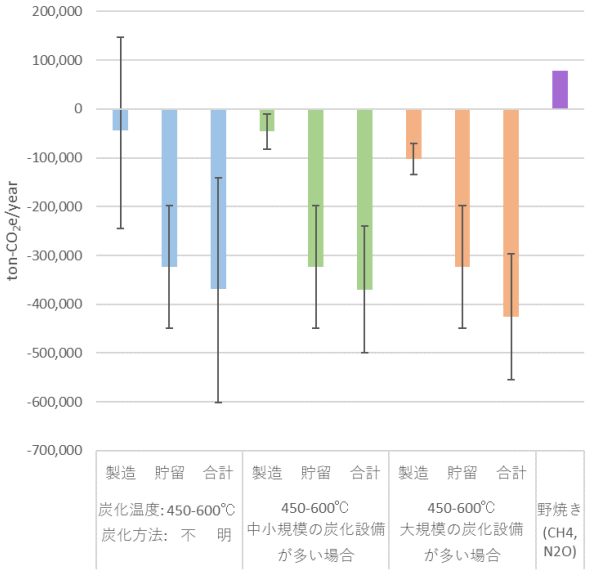


図2 農作物残渣由来のバイオ炭の GHG 削減効果
（幅は 95%信頼区間）

4. まとめ

本研究は文献調査を基に、バイオ炭の LC-CO_2 は製造方法で大きくことなり、その主な影響要因も特定した。なお、調査した文献数が限られているため、結果は一定の傾向が見られたと解釈されるべきである。

また、農作物残渣のバイオ炭利用による GHG 貯留量を推計した結果、製造までの付随的排出量は土壌貯留量より小さいものの、無視できないことが分かった。また、その付随的排出量は製造方法と規模によって大きく異なるため、バイオ炭製造方法の違いを考慮した GHG 貯留量の算定が重要と言える。

参考文献

1) https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/biochar/top.html
2) https://japancredit.go.jp/pdf/methodology/AG-004_v1.0.pdf
3) Matuštík et al.: Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: a review. J. Clean. Prod., 259, (2020), pp 120998
4) IPCC: Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, (2019)

Supporting Information

SI 表１　調査した文献のリスト

1. Hamedani, S.R., Kuppens, T., Malina, R., Bocci, E., Colantoni, A., Villarini, M., 2019. Life cycle assessment and environmental valuation of biochar production: two case studies in Belgium. Energies 12 (11).
2. Brassard, P., Godbout, S., Pelletier, F., Raghavan, V., Palacios, J.H., 2018. Pyrolysis of switchgrass in an auger reactor for biochar production: a greenhouse gas and energy impacts assessment. Biomass Bioenergy 116, 99e105.
3. Munoz, E., Curaqueo, G., Cea, M., Vera, L., Navia, R., 2017. Environmental hotspots in the life cycle of a biochar-soil system. J. Clean. Prod. 158, 1e7.
4. Peters, J.F., Iribarren, D., Dufour, J., 2015. Biomass pyrolysis for biochar or energy applications? A life cycle assessment. Environ. Sci. Technol. 49 (8), 5195e5202.
5. Smebye, A.B., Sparrevik, M., Schmidt, H.P., Cornelissen, G., 2017. Life-cycle assessment of biochar production systems in tropical rural areas: comparing flame curtain kilns to other production methods. Biomass Bioenergy 101, 35e43.
6. Mohammadi, A., Cowie, A.L., Anh Mai, T.L., Brand~ao, M., Anaya de la Rosa, R., Kristiansen, P., Joseph, S., 2017. Climate-change and health effects of using rice husk for biochar-compost: comparing three pyrolysis systems. J. Clean. Prod. 162, 260e272.
7. Hammond, J., Shackley, S., Sohi, S., Brownsort, P., 2011. Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK. Energy Pol. 39 (5), 2646e2655.
8. Ji, C., Cheng, K., Nayak, D., Pan, G., 2018. Environmental and economic assessment of crop residue competitive utilization for biochar, briquette fuel and combined heat and power generation. J. Clean. Prod. 192, 916e923.
9. Roberts, K.G., Gloy, B.A., Joseph, S., Scott, N.R., Lehmann, J., 2010. Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential. Environ. Sci. Technol. 44, 827‑833
10. Leppäkoski, L., Marttila, M.P., Uusitalo, V., Levänen, J., Halonen, V., Mikkilä, M.H., 2021. Assessing the Carbon Footprint of Biochar from Willow Grown on Marginal Lands in Finland. Sustainability, 13, 10097.

Prospective Environmental Cost Changes by New Materials in Products: a Case of Microfibrillated Cellulose in Paper Packaging Boxes

○Ariel Lavilla[1], Tomohiko Ihara[1]
1) The University of Tokyo
* ariel.lavilla@s.k.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

During a product's early stages, much is often unknown to fully anticipate its large-scale environmental impacts. This lack of understanding leads to the maturation of a product or service whose impacts remain scarcely understood. It is only when a product has matured and widely implemented the potential design changes for reduced environmental impact can be identified. By then, technology has often become ingrained and change is slow, if not difficult.

The control dilemma is one challenge in using LCA on new technologies for design and decision-making support[1]. In prospective LCA, practitioners are challenged to identify hotspots and the total environmental impact of technologies with minimal available industrial manufacturing data. Data is crucial in LCA studies as the technique requires an abundance of it in order to properly model and calculate environmental burdens of life cycle stages and products. As such, alongside the push for environmental sustainable alternatives, there is interest in developing tools that could enable the effective application of prospective LCA despite the inherent lack of data characteristic of new technologies.

Microfibrillated cellulose (MFC) is a new material gaining attention for its potential to replace existing materials in a variety of applications. MFC is a derivative of cellulose and is one of the many cellulosic materials currently studied for application in various fields[2]. As MFC is only different from cellulose in size, it has improved properties as either reinforcement or additive without losing the carbon neutrality and biodegradability of naturally occuring cellulose. For these reasons, MFC and other small-scale cellulose derivatives are currently being explored as environmental alternatives to existing materials.

However, as with all emerging technologies, the environmental superiority of MFC compared to mainstream materials remains to be prospective. In a cradle-to-gate study by Hervy et. Al[3], reinforcing epoxy composites with bacterial cellulose and nanofibrillated cellulose resulted to higher GWP and abiotic depletion potential of fossil fuels in comparison to neat PLA and glass fiber/polypropylene composites. The study pointed to the preparation stage of the nanocellulose composite to be more environmentally impactful than mainstream production methods. As such, additional work is needed to understand the environmental impacts of MFC and other cellulose derivatives and to compare with existing materials and products, particularly in cradle-to-grave settings.

In this study, the potential environmental impact of using MFC in packaging applications will be measured and compared to existing production methods. To supplement the relative lack of available MFC manufacturing data, a critical feature of the modelled application is the availability of background data and packaging applications were selected as they have abundant data that can be used to minimize the impacts of minimal MFC manufacturing data. Furthermore, not only is the packaging life cycle simple, MFC in packaging is also actively tested for product applications by several companies. As such, there is both real world and technical basis in selecting packaging applications as a case study in evaluating the environmental impact of MFC adoption.

2. Methods

A comparative cradle-to-grave LCA was conducted between established mainstream food packaging box production and a prospective MFC food packaging box production process. The main difference between the two methods is the composition of the materials that forms the packaging box: by adopting MFC, the required combination of components to achieve comparable physical properties with mainstream boxes changes, resulting to upstream changes, particularly to raw material extraction. Data used to model industrial-scale MFC production were obtained from both journal and patent publications while inventory data for packaging boxes (folding boxboard) were obtained from Ecoinvent 3.6. Data with regards to transportation, refrigeration, and disposal referenced values of the United Kingdom. UK was selected as the geographical boundary as the patent owner of the referenced MFC patent data is located within the region. The selected functional unit for this study is "1000 packages of 213.5g sandwich product consumed, with the sandwich product weighing 200g and the folding boxboard (FBB) package weighing 13.5g."

The impact assessment method used in the study is LIME-3[4].

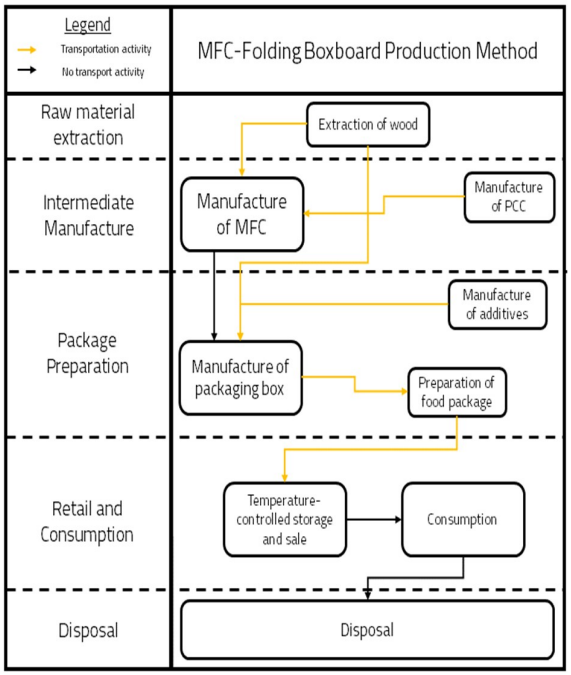


Figure 1. Modelled MFC-packaging box life cycle

3. Results

It was found that majority of the impacts of the mainstream and hypothetical manufacturing processes center on human health and biodiversity loss areas, constituting 96.29% of the overall damages. Water resource use, greenhouse gas emissions, and land transformation by intensive forestry, and air pollution were the most impactful, corresponding to 96.70% of the total impact. Interestingly however, despite having reduced overall environmental impact, greenhouse gas emissions for the hypothetical scenario were higher than mainstream production by 18.55%. The net increase was due to the accounting of biogenic CO_2 in the calculation, as the lowered forest resource cost to produce boxes also corresponded to reduced CO_2 sequestration for tree production. Water resource use and land transformation by intensive forestry saw a reduction on their impacts in the same scenario.

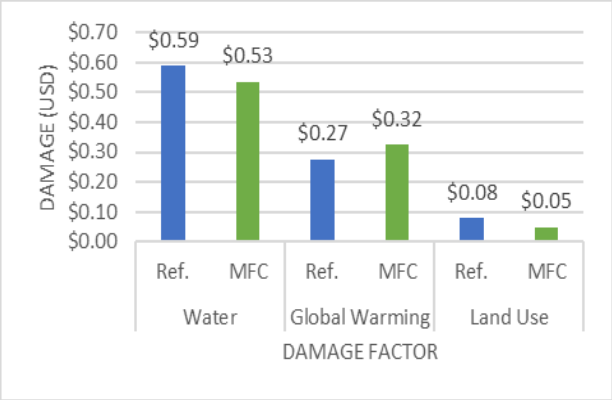


Figure 2. Contributions of the top 3 damage factors for both reference mainstream and MFC packaging box

The hypothetical scenario showed marginal improvement: a 3.45% reduction in overall damages was calculated compared to the mainstream scenario.The processes that contributed the most to the environmental impact were related to manufacturing (40.06%), retail and consumption (15.94%), and disposal (13.50%). However, while MFC in the hypothetical scenario is only applied on the raw material extraction and manufacturing stages, the interaction and relationship of raw material extraction with transportation and manufacturing have elucidated an interesting dynamic between life cycle stages. Burdens of transportation processes experienced reductions to their contribution to the overall impact by as much as 69.59%. The change in transportation is caused by changes in transportation weight requirements: less material requirements for MFC-packaging boxes directly led to less needed weight for transport between raw material extraction and manufacturing stages. As such, lightweighting by MFC was shown to be effective in reducing environmental burdens by reducing transportation burdens in this study. This could mean that, if MFC is functionalized to substitute a wider variety of product compositions, reduction of environmental burdens by lower transportation costs is possible for other products. As such, a possible direction for MFC development is to investigate functionalization by way of chemical processes for similar applications.

The study illustrated the sensitivity of environmental burdens in life cycles: a single change in the manufacturing stage can result to significant changes across other life cycle stages, and therefore affecting their respective impacts. This illustrates that minute manufacturing improvements that majority of cradle-to-gate studies on emerging technologies show only a partial look into the changes in burdens.

A challenge experienced during the conduct of this study is the competency and comprehension requirements on the emerging technology and other related and pertinent fields on the side of the LCA practitioner as the different literature sourced required a certain level of understanding on the relevant principles and language used by different sources.

References

1) Arvidsson, R., Tillman, AM., Sandén, BA., Janssen, M., Nordelöf, A., Kushnir, D., Molander, S.: J. Ind. Ecol, 22 (6), (2007), pp 1286-1294
2) Dufresne, A.: Mater. Today, 16 (6), (2013), pp 220-227
3) Hervy, M., Evangelisti, S., Lettieri, P., Lee, KY.: Compos. Sci. Technol, 118 (1), (2015), pp 154-162
4) Inaba, A., Itsubo, N.: Int J. LCA, 23 (12), (2018), pp 2271–2275

口頭発表セッション（一般）

[3-C2] マテリアルフロー

座長：本下晶晴（産業技術総合研究所）

2022年3月4日(金) 11:00 〜 12:20 C会場 (zoom)

Zoomはこちら

[3-C2-01] 金属生産に伴う将来の温室効果ガス排出量と気候変動目標との関係

*横井 崚佑[1]、渡 卓磨[2]、本下 晶晴[1] （1. 産業技術総合研究所、2. 国立環境研究所）

11:00 〜 11:20

[3-C2-02] 施策実施とその製品寿命への影響をリンクさせた製品のストック・フローおよび環境負荷の推計モデルの構築

*西嶋 大輔[1]、小口 正弘[2] （1. 福島大学、2. 国立環境研究所）

11:20 〜 11:40

[3-C2-03] 耐久消費財の製品サービスシステムを通じたサーキュラーエコノミーのもたらす温室効果ガス削減効果と LCA手法の系統的文献レビュー

*小出 瑠[1,2,3]、村上 進亮[2]、南齋 規介[1] （1. 国立環境研究所、2. 東京大学、3. 地球環境戦略研究機関）

11:40 〜 12:00

[3-C2-04] 耐久消費財のフロー推計ツールの開発

*山本 悠久[1]、村上 進亮[1]、藤井 雄介[1]、小口 正弘[2] （1. 東京大学、2. 国立環境研究所）

12:00 〜 12:20

©日本LCA学会

金属生産に伴う将来の温室効果ガス排出量と気候変動目標との関係

Future greenhouse gas emissions from metal production and climate goals

○横井崚佑*[1)]、渡卓磨[2)]、本下晶晴[1)]
Ryosuke Yokoi, Takuma Watari, Masaharu Motoshita
1) 産業技術総合研究所, 2) 国立環境研究所
* r.yokoi@aist.go.jp

1. はじめに

金属資源は産業の継続および発展に不可欠な資源であるが、安定供給や鉱石品位の低下、採掘および生産に伴う様々な環境問題などが懸念されている。主要な環境問題の一つである気候変動に関しても、金属生産に伴う温室効果ガス (GHG: Greenhouse gas) 排出量は世界全体の排出量の約 10%を占め、金属生産は主要な排出源の一つと考えられている[1)]。今後の人口増加や経済発展によって金属需要のさらなる増加が見込まれている中、気候変動目標の達成に向けて、将来の金属生産に伴う GHG 排出量の予測とその抑制に向けた議論が必要である。

そこで本発表では、広く使用されている主要 6 金属 (アルミニウム、銅、鉄、鉛、ニッケル、亜鉛) を対象に、世界における将来の一次および二次の金属生産量とそれに伴う GHG 排出量を推計する。推計にあたっては気候変動分析でも用いられる将来シナリオである共通社会経済経路 (SSPs: Shared socio-economic pathways) を用いる。気候変動目標としては温度上昇 2℃以下に対応する RCP2.6 の GHG 排出量の推移を用いて、将来の金属生産に伴う GHG 排出量と気候変動目標との関係について議論する。

2. 方法

2.1 将来の金属生産量の推計

まず、世界 231 ヶ国を対象とした 1900-2010 年の 6 金属の投入量データ[2)]をもとに、最終用途比および製品寿命分布を設定して動的物質フロー分析によって経年の使用中ストック量を、各国の所得水準に基づいた 4 グループ別 (高所得、高中所得、低中所得、低所得国) に推計した。次に、一人当たり使用中ストック量が一人当たり GDP の関数として表され、また一定の値で飽和するという仮定のもとに、それぞれの金属に関して最終用途別に経年の各所得グループの一人当たり使用中ストック量と一人当たり GDP を次式のロジスティック曲線にフィッティングして、回帰式を得た。

$$s_{i,j,t} = \frac{s_{sat,i,j}}{1 + \exp(\alpha_{i,j} - \beta_{i,j} g_t)} \quad (1)$$

ここで、$s_{i,j,t}$は金属iの最終用途jのt年における一人当たり使用中ストック量、$s_{sat,i,j}$は金属iの最終用途jの一人当たり使用中ストック量の飽和値 (高所得国における 2010 年のストック分析結果を基に決定)、g_tはt年における一人当たり GDP、$\alpha_{i,j}$および$\beta_{i,j}$はパラメータである。式 1 から得た回帰式をもとに、2100 年までの国別の人口と GDP に関する将来シナリオとして SSPs の 5 つのシナリオを用いて将来の使用中ストック量を推計した。次に、得られた使用中ストック量の推移を満たすように、製品寿命を考慮して将来需要を算定した。最後に、各プロセスにおける歩留まり率および回収率から将来の一次金属生産量 (採掘量) および二次金属生産量 (リサイクル量) を推計した。

2.2 金属生産に伴う温室効果ガス排出量の推計

将来の一次/二次金属生産に伴う GHG 排出量は次式から算定した。

$$C_t = k^p{}_t P_t + k^s{}_t S_t \quad (2)$$

ここで、C_tはt年における GHG 排出量、$k^p{}_t$および$k^s{}_t$はそれぞれt年における一次金属および二次金属の生産の GHG 排出強度、P_tおよびS_tはそれぞれt年における一次金属および二次金属の生産量である。$k^p{}_t$および$k^s{}_t$は、鉱石品位や生産効率の変化を考慮して将来の金属生産の GHG 排出強度を推計した先行研究[3)]を基に、SSPs のシナリオ別の電力構成情報を組み合わせて SSP 別に推計した。

2.3 温室効果ガス排出量抑制に有効な対策の検討

将来における金属生産に伴う GHG 排出量の抑制に有効な対策を検討するために、関連する以下の 4 つのパラメータを変化させて GHG 排出量への影響を調べた：製品の使用年数、リサイクル率、一人当たり使用中ストック量の飽和値、金属生産の GHG 排出強度。変化の割合は全パラメータに関して 10%、20%、30%の 3 通りで、リサイクル率に関しては 100%と仮定したシナリオも検討した。なお、一人当たり使用中ストック量の飽和値に関しては、2010 年の高所得国における使用中ストック量に基づいて決定しているため、高所得国に関して 2011 年から新たな飽和値を適用すると、推計される廃棄量以上に使用中ストック量が減少するという非現実的な結果となる可能性がある。そ

こで、高所得国に関しては 2050 年まで緩やかに飽和値が変化すると仮定した。

3. 結果 [4)]

3.1 将来の金属生産に伴う温室効果ガス排出量

6 金属合計の生産に伴う GHG 排出量の推計結果を単年および累積で**図 1** に示す。これらの結果から世界が将来辿る社会経済経路 (SSP) によって将来の GHG 排出量は大きく変化することが示唆されたが、その一方でどの SSP シナリオにおいても気候変動目標の達成は困難であることが明らかとなった。もっとも気候変動目標の達成に近い SSP1 シナリオにおいても、21 世紀前半において現在の GHG 排出量の最大 1.7 倍まで増加し、最終的に 2100 年における累積の GHG 排出量は気候変動目標達成で求められる累積排出量の約 1.9 倍となっている。6 金属の中で GHG 排出量に対してもっとも寄与が大きいのは鉄であり、特に 21 世紀前半における寄与が大きかった。これらの結果は、金属セクターにおいて気候変動目標を達成するためには、持続可能な社会を描く社会経済経路を辿ることに加えて、追加的な対策が必須であることを示唆している。

3.2 温室効果ガス排出量抑制に有効な対策の検討

もっとも気候変動目標達成に近い SSP1 に関して、各パラメータの改善による GHG 排出量への影響を調べた (**図 2**)。製品の使用年数とリサイクル率の改善については、短期的には GHG 排出量の抑制効果は小さいが、長期的にはその効果が高まった。また、より抑制効果の期待できるパラメータとして GHG 排出強度と一人当たりストック量の飽和値が特定された。しかしどのパラメータについても単一のパラメータの改善のみでは気候変動目標達成は難しく、全パラメータの 20%改善などの、複数の対策を組み合わせて並行して進めていくことの重要性が示唆された。

4. 引用文献

1) IRP: Global Resources Outlook 2019, (2019), Nairobi.
2) Watari and Yokoi: Resour. Policy, 70, (2021), 101968.
3) Van der Voet et al.: J. Ind. Ecol., 23, (2018), 141-155.
4) Yokoi et al.: Energy Environ. Sci. (2022), Advance Article.

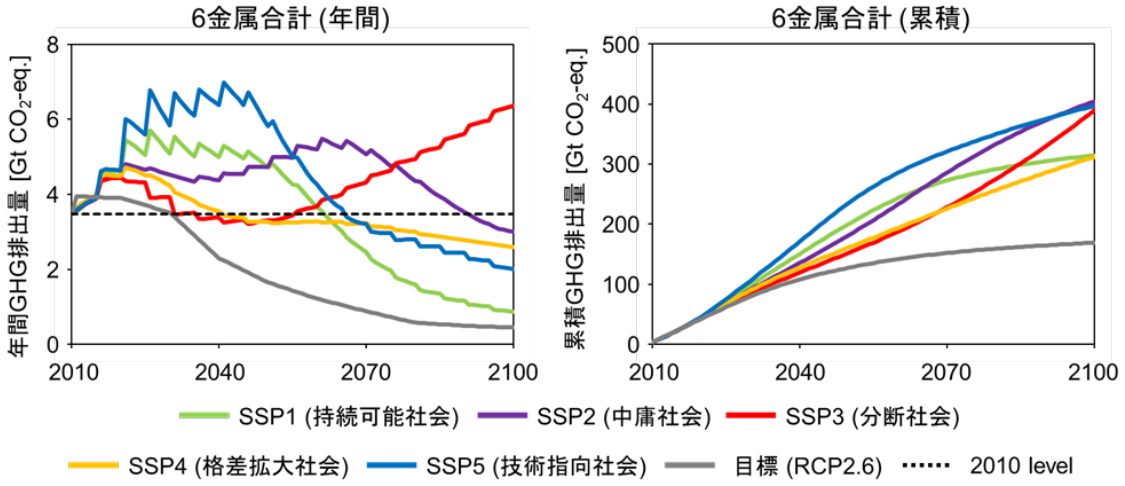


図 1 将来の金属生産に伴う GHG 排出量の推移 (6 金属合計)

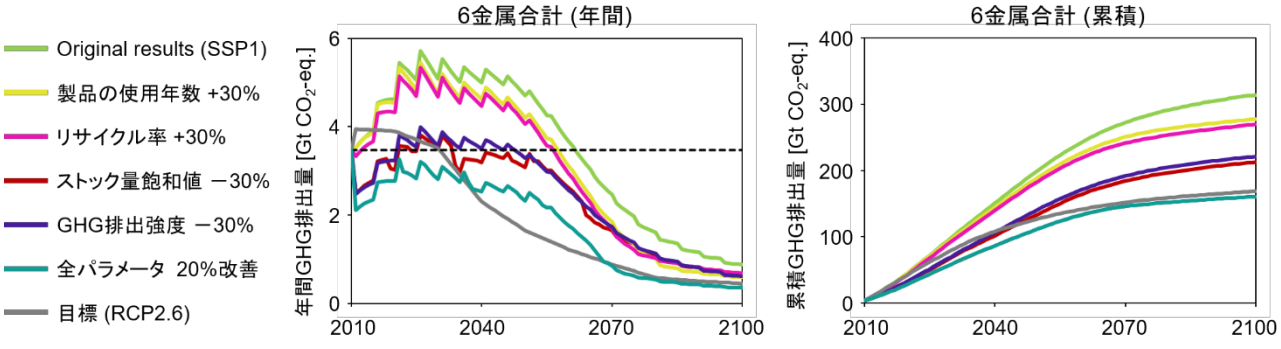


図 2 パラメータ改善による GHG 排出量の変化

施策実施とその製品寿命への影響をリンクさせた製品のストック・フローおよび環境負荷の推計モデルの構築

An estimation framework of product flow and environmental impacts collaborating with effects of policy implementation on product lifetime

○西嶋大輔*[1)]、小口正弘[2)]
Daisuke Nishijima, Masahiro Oguchi
1) 福島大学, 2) 国立環境研究所
* d_nishijima@sss.fukushima-u.ac.jp

1. 研究背景

循環経済（サーキュラー・エコノミー）の実現において、製品の長寿命化は主要な戦略の 1 つとして位置付けられており、それによる環境負荷の削減が期待されている。これまでの先行研究でも、製品寿命の延長によって製品の製造や環境負荷の削減が見込まれることが示唆されている[1,2)]。一方で、製品寿命の延長は、何らかの施策や政策を通じて行われるというのが一般的である。そのため、製品寿命延長による製品のストック・フローや環境負荷への影響を分析するうえでは、施策や政策とそれによる製品寿命の変化を連動させることがより重要である。そのような分析を行った研究として、日本における自動車継続検査を対象にした先行研究は存在する[3)]。しかしこの研究では、新車として買われてから買い替えられるまでの期間という部分的な製品寿命（経済的寿命）についてしか扱っておらず、製品寿命全体についての影響は十分に捉えられていない。また他の研究事例がほとんど無いことから、施策や政策の実施、製品寿命変化、寿命変化による製品ストック・フローや環境負荷への影響を包括的に扱えるような分析フレームワークの構築が有用である。そこで本発表では、消費者が期待する製品寿命の長さを示す期待寿命を対象に、エアコンをケーススタディとして、その期待寿命の高まりによる製品寿命変化、およびその変化による環境負荷への影響について包括的に分析するフレームワークの構築を試みる。

2. 研究手法

本研究では、買い替え選択とその選択に影響を与える要因との関係を定量的に分析する動的離散選択モデル[4,5)]を応用して、はじめに消費者の期待寿命の変化とそれによる製品寿命（買い替え確率）の変化の接続を行う。i 年製エアコンを保有する消費者が t 年（ただし、$i \le t$）でもそのエアコンを買い替えずに「保有する」ことを選択する確率 $\varphi_{i,t}$ を以下の式(1)のように表す。

$$\varphi_{i,t} = \frac{\exp\left\{u_{i,t}^{K} + \beta EV_{i,t}^{K}\right\}}{\exp\left\{u_{i,t}^{K} + \beta EV_{i,t}^{K}\right\} + \exp\left\{u_{i,t}^{R} + \beta EV_{i,t}^{R}\right\}} \quad (1)$$

ここで、β は割引因子、$EV_{i,t}^{K}, EV_{i,t}^{R}$ は動的離散選択モデルでの期待価値関数を表す。また、式(1)中の、「保有する」または「買い替える」を選択する際の効用 $u_{i,t}^{K}, u_{i,t}^{R}$ を、先行研究[6)]を基に以下の式(2)のように設定する。

$$\begin{cases} u_{i,t}^{K} = \theta_0 + \theta_1\left\{\log\left(e_{i,t}\right) - \log\left(e_t^{new}\right)\right\} + \theta_2 ERL_{i,t} \\ u_{i,t}^{R} = \theta_3 \log\left(p_t\right) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、$\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ は動的離散選択モデルのパラメータ、$e_{i,t}$ は t 年における i 年製エアコンの年間電力消費量、e_t^{new} は t 年製エアコンの年間電力消費量、$ERL_{i,t}$ は i 年製エアコンを保有する消費者の t 年における期待余命の年数（あと何年使えると思うか）、p_t は t 年製エアコンの製品価格を示す。次に、期待寿命の変化によるエアコンの製造台数の推計について示す。t 年におけるエアコンの製造台数 B_t は以下の式(3)で推計される。

$$B_t = \bar{S}_t - \sum_{j=t-Y_{\max}}^{t-1} S_{j,t} \quad (3)$$

ここで、$\bar{S}_t$ は t 年におけるエアコンの総保有台数、$Y_{\max}$ はエアコンの最大使用年数、$S_{i,t}$ は i 年製エアコンの t 年における残存台数をそれぞれ示す。$\bar{S}_t$ の値は、世帯数[7)]と 1 世帯当たりのエアコンの保有台数[8)]を基に算出した。$Y_{\max}$ は、利用可能なエアコンの国内出荷台数のデータ[9)]から 47 年と設定した。$S_{i,t}$ については、式(1)で示された保有確率（生存確率）を用いることで、以下の式(4)のように表される。

$$S_{i,t} = \begin{cases} B_i & \text{if } i = t \\ S_{i,t-1} \times \varphi_{i,t} & \text{if } i < t \end{cases} \quad (4)$$

本研究では 2020 年から 2040 年を対象期間として、消費者の期待寿命の延長による製品の生産台数変化を推計する。はじめに、各年のエアコンの国内出荷台数[9)]と 2019 年におけるエアコンの総保有台数を基に推定したワイブル分布での寿命分布から、2019 年での各製造年のエアコンの残存台数を算出した。その後、式(1)

から式(4)を用いて、期待寿命のシナリオごとにエアコンの製造台数を推計した。出荷台数のデータとの整合性の観点から、ベースラインの期待寿命の年数は 18.5 年とした。期待寿命のモデルへの反映については、購入年での式(2)の期待余命 $ERL_{i,t}$ をシナリオごとに設定した期待寿命の値に設定し、その後は 1 年経過するたびに値を 1 ずつ下げ、1 未満となった場合は 0.5 といった形で設定した。動的離散選択モデルのパラメータは、先行研究[6]での 2019 年の買い替え選択を基に推定された値を用いた。製品価格については、価格.com の 2019 年時点の価格データを使用し、2020 年についてはその価格を消費者物価指数で調整した値を、2021 年以降は 2020 年の価格で一定とした。電力消費量については、しんきゅうさん[10]での各製造の年間電力消費量の推移を逆ロジスティック関数で近似させ、その関数を基に推計された値を用いた。推計の簡便性の観点から、冷房能力 2.8kW のエアコンのものを用いて推計した。

3. 研究結果

図 1 はベースラインと期待寿命を 0.5 年から 3 年延長したシナリオでのエアコンの生産台数の推移を示している。図 1 から、期待寿命の延長によって期間全体におけるエアコンの生産台数は減少していることが分かる。これは、期待寿命の延長は、消費者が保有する製品が今までよりも長く使えると思うようになったと解釈でき、それによって製品を長く保有するインセンティブが高まった結果であると考えられる。また対象期間における累計でのエアコンの生産台数を比較すると、ベースラインにおいては 1.764 億台であったのに対し、期待寿命を 1 年延長させた場合は 1.625 億台で、期待寿命を 1 年延長させることで、対象の 21 年間で約 1386 万台のエアコンの生産が抑制され、これはベースラインでの生産台数の約 7.9%と高い割合のエアコンの生産が抑制されることが示された。

4. 考察

期待寿命の高まりは、消費者が製品を使用できると思う年数が以前よりも延長することに対応する。そのため本研究での結果は、例えば長期使用できる製品向けのラベルの提示など消費者に対して長期使用を促すような政策が、製品寿命変化を通じて製品の生産台数をどの程度抑制するかを示す定量的な結果と見なせる。推計方法の精緻化などまだ改善が必要であるが、本研究での分析フレームワークによって、単なる製品寿命の延長ではなく、政策や施策とそれによる製品寿命変化を通じた製品フローへの影響をより連結させた形で分析でき、製品寿命延長に関する政策や施策の効果をより直接的に評価することが可能となる。こうした結果は、買い替え行動や製品の長期使用促進に関する政策の効果を議論するうえで有益な情報となる。本発表では、資源消費量や GHG 排出量への影響に関する結果も示す予定である。

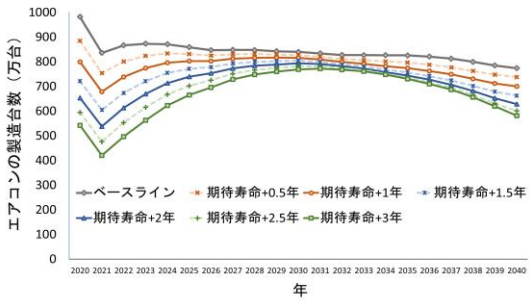


図 1　期待寿命シナリオ別のエアコンの生産台数

5. 引用文献

1) Kagawa, S., Nansai, K., Kondo, Y., Hubacek, K., Suh, S., Minx, Y., Kudoh, Y., Tasaki, T., Nakamura, S., Environ. Sci. Technol., 45(4), (2011), pp 1184–1191.
2) Nishijima, D., J. Environ. Manag., 181, (2016), pp 582–589.
3) Nakamoto Y., J. Environ. Manag., 224, (2018), pp 87–96.
4) Rust, J., Econometrica, 55, (1987), pp 999–1033.
5) Rapson, D., J. Environ. Econ. Manag., 68, (2014), pp 141–160.
6) Nishijima, D., Oguchi, M., Electronics Goes Green 2020+ Proceedings, pp 557–562.
7) 国立社会保障・人口問題研究所 : “将来推計人口・世帯数” 国立社会保障・人口問題研究所（オンライン）, 入手先 <https://www.ipss.go.jp/index.asp>, （参照 2021-12-13）
8) 内閣府 : “主要耐久消費財等の普及・保有状況”（二人以上の世帯・単身世帯）, 消費動向調査（オンライン）, 入手先 <https://www.esri.cao.go.jp/jp/stat/shouhi/menu_shouhi.html>, （参照 2021-12-13）
9) 日本冷凍空調工業会 : “家庭用エアコン（ルームエアコン）国内出荷実績”, 日本冷凍空調工業会（オンライン）, 入手先 <https://www.jraia.or.jp/statistic/detail.html?ca=0&ca2=0>, （参照 2021-11-29）
10) 環境省 : “省エネ製品買換ナビゲーション　しんきゅうさん”, COOL CHOICE（オンライン）, 入手先 <https://ondankataisaku.env.go.jp/shinkyusan/>, （参照 2021-11-29）

耐久消費財のフロー推計ツールの開発

Development of an Estimation Tool of the Flows of Durable Goods

○山本悠久*[1)]、村上進亮[1)]、藤井雄介[1)]、小口正弘[2)]
Haruhisa Yamamoto, Shinsuke Murakami, Yusuke Fujii, Masahiro Oguchi
1) 東京大学, 2) 国立環境研究所
* yamamoto-haruhisa-202@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. 序論

日本では、循環型社会の形成に向けて、2000 年代から各種リサイクル法が運用されるなど、様々な取り組みが実施されてきた。一方、近年になると、製品の循環によって経済価値を生み出すサービスの登場が期待される一方[1)]、プラスチック廃棄物の排出抑制のための規制強化やリチウムイオン電池を含有する製品の混入による静脈産業における発火事故など、製品の循環に関する新たな課題が顕在化している[2)]。そこで、時代の変化に即した製品循環システムを構築するためにも、社会全体での製品のフロー／ストックについて、過去を正確に把握し評価する[3)]だけでなく、過去のデータを参考に様々な将来シナリオを検証すること[4)]が不可欠であり、そのためのツールの開発は有用である。

著者らは、以前実施した消費者アンケート調査などを基に、家電製品を中心とした耐久消費財のフロー／ストック推計ツールの開発を進めている。本発表では、当ツールのフロー／ストック推計モデルの概要、およびその開発状況として複数製品の推定結果を紹介する。

2. ツールの概要

本フロー／ストック推計ツールは、個別製品について、販売～使用～使用済～排出～回収のプロセスの順に製品台数の年ごとでの推計を実施する。各プロセスにおけるパラメタに実証データやシナリオに基づく値を与えることで、様々なシナリオによるフロー／ストックの推計値が得られるように設計されている。

以下の節では各プロセス（販売～使用を除く）について詳述する。なお、R 4.1 上にて本ツールを実装した。

2.1 使用～使用済

ある年y_oに使用済となる製品台数$N_o^{y_o}$を式1で表す。

$$N_o^{y_o} = \sum_{y_s:\, y_s \le y_o} N_s^{y_s} p_o^{y_s}(y_o - y_s + 1) \qquad \text{式 1}$$

$N_o^{y_o}$: y_o年における使用済製品台数
$N_s^{y_s}$: y_s年における販売台数
$p_o^{y_s}(y_o - y_s + 1)$: y_s年に販売された製品がy_o年に使用済となる確率

なお、y_s年に販売された製品はその翌年（$(y_s + 1)$年）以降に使用済になるものと仮定している。

2.2 使用済～排出

ある年y_dに排出される製品台数$N_d^{y_d}$を式 2 で表す。

$$N_d^{y_d} = \sum_{y_o:\, y_o \le y_d} N_o^{y_o} p_d^{y_o}(y_d - y_o) \qquad \text{式 2}$$

$N_d^{y_d}$: y_d年における総排出台数
$N_o^{y_o}$: y_o年における使用済製品台数
$p_d^{y_o}(y_d - y_o)$: y_o年に使用済となった製品がy_d年に排出される確率

なお、y_o年に使用済となった製品は同年から排出されるものと仮定している。

2.3 排出～回収

ある年y_dに排出先c_i（例：不燃ゴミ、小売店による回収、家族への譲渡）へ排出される製品台数$N_{c_i}^{y_d}$を式 3 で表す。

$$N_{c_i}^{y_d} = N_d^{y_d} p_{c_i}^{y_d} \qquad \text{式 3}$$

$N_d^{y_d}$: y_d年における排出先c_iへの排出台数
$N_{c_i}^{y_d}$: y_d年における総排出台数
$p_{c_i}^{y_d}$: y_d年に排出される製品が排出先c_iへ排出される確率

3. ツールの試行

3.1 パラメータの設定

各プロセスにおけるパラメタとして次のデータとそれに基づく値を搭載した。

- 各年の販売台数：
  業界団体による国内出荷台数の自主統計
- 使用済となる確率（使用期間分布）：
  アンケート調査によって収集した使用期間のデータに当てはめたワイブル分布
- 排出される確率（保管期間分布）：
  アンケート調査によって収集した保管期間のデータに当てはめたワイブル分布のほか、保管期間のデータのない製品については、使用済となってから 1 年後の排出率が、アンケート調査から推定された使用済製品の排出率と一致するよう、尺度パラメタを設定したワイブル分布（形状パラメタは 0.8 と仮定）
- 排出先の選択確率：
  アンケート調査によって収集した排出先の割合

なお、使用期間分布は全ての販売年、保有期間分布は全ての使用済年、排出先割合は全ての排出年で共通の値を用いた。

3.2 ケーススタディ 1：薄型テレビ

薄型テレビ（液晶テレビ・プラズマテレビ・有機 EL テレビの総計）について、2019 年における推計されたフローを図 1 に示す（推計に用いたパラメタは表 S1・S2 に示す）。排出された薄型テレビのうち、不用品回収業者によって回収されたものは約 5.1%にとどまり、その他は家電リサイクル法に基づく方法でのリサイクルや、売却・譲渡によるリユースなどがされており、循環利用が進んでいることが示唆された。

なお、2019 年に家電リサイクル法に基づいて指定引取場所にて引き取られた液晶・プラズマテレビの台数が 237.1 万台であったことから、推計値は実績値よりも約 40 万台多い。また、家電リサイクル制度評価検討小委員会にて示された排出台数の推計値は 436 万台であり、本ツールによる推計値は約 150 万台大きな値である。ただし、本ツールでは売却や譲渡などで直接リユースされた製品も排出台数に含んでおり、それらを除くと約 428 万台と概ね等しい値となっている。一方、同委員会にて示された不用品回収業者によって直接回収された台数は約 140 万台と推定されており、本ツールによる推計値は 100 万台以上小さな値となっている。これらの実データ・既存の推計値との差が小さくなるようにパラメタを修正する必要性が考えられる。

3.3 ケーススタディ 2：デジタルカメラ

デジタルカメラについて、2019 年における推計されたフローを図 2 に示す（推計に用いたパラメタは表 S1・S2 に示す）。使用済となったデジタルカメラの約 77%が排出されずに退蔵されたと推計された。また、同年に排出されたデジタルカメラのうち、小型家電リサイクル法に基づいて回収された台数は全体の約 18%にとどまった。このことから、循環利用が潜在的に可能なデジタルカメラは非常に多く、改善が求められる。

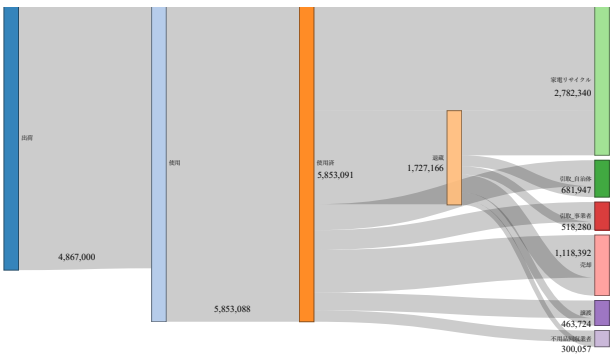


図 1　2019 年における薄型テレビのフロー推計結果

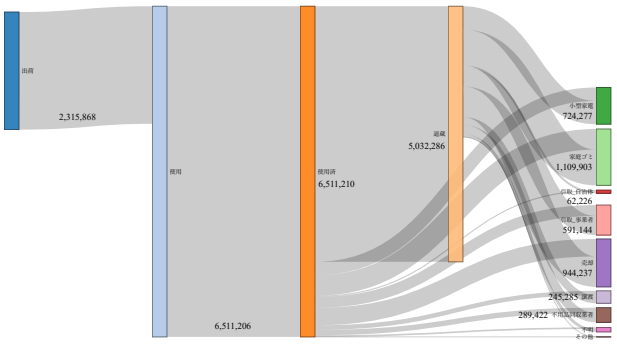


図 2　2019 年におけるデジタルカメラのフロー推計結果

4. 今後の展望

本研究では耐久消費財のフロー／ストックを推計するツールの開発を進めており、これまでに家電製品の過去のフローの推計を実施し、排出台数等に関する実績値や他の推計値との比較を行った。発表では、使用台数に関するデータとの比較結果を示すとともに、複数のシナリオに基づく将来のフロー推計の結果を示し、本ツールの適用可能性について考察する。

なお、本ツールの課題として次の点が挙げられる。

- リユース製品のフローが考慮されていない
- 法人向け製品を家庭向け製品と同様のパラメタを用いて推計している

これらの課題を解決し、日本国内における耐久消費財のより詳細なフロー／ストック推計を実施することが肝要である。

謝辞

データ収集にご協力頂いた関係各位に感謝の意を表する。

引用文献

1) 循環経済ビジョン研究会：“循環経済ビジョン”，経済産業省，（オンライン），入手先 <https://www.meti.go.jp/press/2020/05/20200522004/20200522004-2.pdf>，（参照 2022-1-10）
2) 産業構造審議会：“小型家電リサイクル制度の施行状況の評価・検討に関する報告書”，経済産業省，（オンライン），入手先 <https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/haikibutsu_recycle/kogata_wg/pdf/20200807_01.pdf>，（参照 2022-1-10）
3) 田崎智宏：“家電リサイクル法の実態効力の評価”，(2006)
4) Glöser-Chahoud S., Pfaff M., Walz R., Schultmann F.: J. Clean. Prod., 213, (2019), pp.1313-1321

Supporting Information

表 S1　使用期間分布・保管期間分布のパラメタ

製品	期間の種類	形状パラメタ	尺度パラメタ	平均使用期間	p_d (1)*
薄型テレビ	使用期間	1.14	13.04	11.70	-
	保管期間	0.8 (固定値)	0.78	-	70.5%
デジタルカメラ	使用期間	1.29	9.82	8.61	-
	保管期間	0.50	14.72	-	22.7%

* 製品が使用済となってから 1 年後までに排出される確率を表す

表 S2　排出先の選択率

排出先	薄型テレビ	デジタルカメラ
家電リサイクル	47.4%	-
小型家電	-	17.8%
家庭ゴミ	-	27.4%
引取_自治体	11.6%	1.5%
引取_事業者	8.8%	14.6%
売却	19.1%	23.3%
譲渡	7.9%	6.0%
不用品回収業者	5.1%	7.1%
不明	-	2.2%
その他	-	0.03%

口頭発表セッション（特別）

[1-D1] 環境教育

座長：栗島英明（芝浦工業大学）

2022年3月2日(水) 09:40 〜 10:40 D会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-D1-01] ライフサイクル思考を取り入れた保育者向け環境教育プログラムの開発

*大嶋 織江[1]、松本 真哉[2] （1. 横浜国立大学大学院環境情報学府、2. 横浜国立大学大学院環境情報研究院）

09:40 〜 10:00

[1-D1-02] 総合的な探究の時間の指導におけるライフサイクル思考の導入

*松本 真哉[1]、平山 世志衣[2]、水野 建樹[2]、山口 真也[3] （1. 横浜国立大学、2. 横浜LCA環境教育研究会、3. 神奈川県教育委員会）

10:00 〜 10:20

[1-D1-03] 総合討論

10:20 〜 10:40

©日本LCA学会

ライフサイクル思考を取り入れた保育者向け環境教育プログラムの開発

Development of Environmental Education Program for Childcare Workers based on the Concept of Life Cycle Thinking

○大嶋織江*[1)]、松本真哉[1)]
Orie Oshima, Shinya Matsumoto
1) 横浜国立大学大学院 環境情報学府
* oshima-orie-dz@ynu.jp, matsumoto-shinya-py@ynu.ac.jp

1. 緒言

持続可能社会の実現に向けて、環境教育の重要性がより一層増加している。これまでの環境教育の実践対象は、小学校以上の生徒が中心であった。一方、幼稚園や保育園などの幼児期における環境教育も、主に自然体験型の題材を中心に実施されている[1-5]。私たちは、より感受性に富む幼児期において、幼児が物を大切にする気持ちを、物のライフサイクルへの意識と併せて育むことなどを目標に、保育者向けにライフサイクル思考(LCT)を取り入れた環境教育の題材検討を行い[6]、その内容の検討を続けてきた。本発表では、開発したプログラムの構成内容について報告する。

2. プログラムの内容検討について

以前の発表[6]で、幼稚園や保育園で教育内容として頻度の高いごっこ遊びを活動の一つとして取り入れ、ライフサイクル思考に関係する遊びの題材として、鉛筆や色鉛筆などの製造時に発生するおがくずを原料とした木の粘土である「もくねんさん」[7]を選択することを報告した。ごっこ遊びの内容としては、園での生活及び家庭での生活でも身近な、食べ物に関する内容を検討することを想定した。また、「もくねんさん」に関係して、色鉛筆などの身近な物の一生に関する絵本の読み聞かせを組み込むことも決定した。このような幼児教育を行うために、保育士養成学校で学ぶ学生を、LCT の学びを基礎とした環境教育プログラムの対象とした。今回は、これらの条件を基に、プログラム全体の構成を検討した。プログラムの作成にあたっては、平成 26 年版の環境教育指導資料 幼稚園・小学校編[5]及び2019年版のこども環境白書[8]を参考にした。また、幼児期の教育に関する幼稚園教育要領や保育所保育指針の内容も確認した。これらの内容確認においては、特に、教育要領の領域「環境」のねらいと内容を重視した[9]。

プログラムの対象である学生に対しては、これまでの多くの LCT を取り入れた環境教育で設定されているように、自らの日常生活と環境問題のつながりに気づくことを第一の教育目標としてとして設定した。ただし本プログラムでは、受講生の学びの結果を担当する幼児への教育実践活動に反映することを想定しているため、日常生活としては幼稚園や保育園での生活に重点を置くことにした。また、このプログラムを受講した学生が、LCT の観点から幼稚園や保育園で使用する教材や素材を選択できるようになること、及び SDGs に示された目標に配慮した保育の指導案作成などができるようになることも念頭に、プログラムの教材内容を検討した。

3. プログラムの構成と内容について

この教育プログラムは、幼児に「もくねんさん」を用いた環境教育を実践するために必要な気づきや理解を得るために保育者が学ぶものとして設定している。そのため、今回の発表では、幼児教育の実践内容とその内容に基づくプログラムの内容について説明する。

3.1 幼児向け実践内容について

「もくねんさん」を用いた幼児向けの実践内容について、以下に示す内容に決定した。対象はすでに前回報告した[6]ように 5 歳児(年長児)である。

① パンに関する手遊び
② ライフサイクルに関する絵本の読み聞かせ
③ 「もくねんさん」を用いたパンの製作
④ 「もくねんさん」を用いたごっこ遊び
⑤ ごっこ遊びに使用したパンの再利用

導入部である①には、実践活動で取り組むパンの製作やごっこ遊びに入る前の活動として、幼児教育の現場でよく用いられる手遊び歌を用いた活動を取り入れた。次に、色鉛筆などの身近な物のライフサイクルに関する絵本の読み聞かせを行い、「もくねんさん」を用いたパンやクッキーなどの製作及び製作したパンやクッキーを用いたパン屋さんごっこ遊びへと展開する。最後に、遊びで用いたパンやクッキーに磁石を取り付け、作品を家庭に持ち帰ってマグネットとして利用する内容を考えている。これらの内容を実践するために必要な LCT の内容などを含めた教育プログラムの内容を次に検討した。

3.2 プログラムの内容について

保育者向けに LCT を教育する内容を検討する過程において､以下の項目について注意し内容を決定した。幼児に身近な物のライフサイクルを伝える場合、小学校以上を対象にしている従来の LCT を取り入れた環境教育プログラムで扱われているような内容は難しい。一方で幼児教育においては、物を大切にする気持ちの育成は、古くから重要な教育項目として考えられている。そこで今回のプログラムでは、環境問題の中で地球温暖化に焦点を絞り、園の生活におけるもったいないものや行動と地球温暖化の関係を考える、という内容を LCT の学びの導入部分として設定した。その上で、教育実践活動で取組むパンを対象として、実際の食パンの生産と CO_2 排出の関係を学び、LCT を理解する内容とした。また実践活動で利用する「もくねんさん」の特徴の学びと、それを利用して製作した作品を家庭で再利用することを通して、物のリサイクルや再利用を含めて、物を大切にするということの意味を考えることを学び伝えることができる構成を考えた。このような検討結果を基に、講義中心に進めるプログラムの前半部分と、講義と幼児向け実践内容に関する実践などで構成されるプログラムの後半部分を構成した。講義時間は、前半部分を 60 分、後半部分は 60 分×2 回とした。

プログラムの前半部分では、まず受講生の環境問題への興味関心を確認した後、保育園や幼稚園の一日におけるもったいないもの探しを受講生に考えてもらう。次に、各自がリスト化したもったいないものや行動の中で、地球温暖化に関係しそうなものを選び、その理由と共に考える。この後、地球温暖化に関係する CO_2 の発生に着目して LCT の概念を学び、その後、実例として食パンの製造に関わる CO_2 の排出を学ぶ。

プログラムの後半部分では、まずは身近な製品などの中からリサイクルができる物であることを示すマークを探すことを行う。その上で、鉛筆製造時のおがくずを利用して作られた「もくねんさん」を利用する上で重要な、物を大切にすること、リサイクル以外のリユースとリデュースの事例の確認、及び木材のリサイクルやリユース例などを学ぶ。そして､「もくねんさん」の製造企業である北星鉛筆の鉛筆製造に関する情報[10]などを活用して､「もくねんさん」のライフサイクルを学ぶ。その後に、幼児向けの教育実践として、3.1 で述べた「もくねんさん」を用いたパン屋さんごっこを体験してもらう。最後に、講義時間の配分が可能であれば、SDGs の各目標について概観し、ここまでに学んだ内容と関連する目標について考える。

4. 今後の課題

現在、講義用スライドなどを準備し、実際に講義での検討を進めている。今後は受講生の反応などを反映した教育内容の確認などを含めた教材の改訂を進める予定である。

引用文献

1) 井上美智子：環境教育, 19(1), (2009), pp. 98-105
2) 岡本理子：桜美林論考．自然科学・総合科学研究, 1, (2010), pp. 39-48
3) 鎌田多恵子：盛岡短期大学部紀要, 19, (2009), pp. 27-31
4) 今村光章：環境教育, 21(1), (2011), pp. 59-67
5) 国立教育政策研究所教育課程研究センター : “環境教育指導資料［幼稚園・小学校編］”, 国立教育政策研究所, (オンライン), 入手先 < www.nier.go.jp/kaihatsu/pdf/kankyo_k_n_e.pdf>, (参照 2022-1-7)
6) 大嶋織江, 松本真哉 : “第 15 回日本 LCA 学会研究発表会”, 東京, (2020), pp.166-167
7) 北星鉛筆株式会社 : “「もくねんさん」美術館”,北星鉛筆株式会社, (オンライン), 入手先 < http://www.kitaboshi.co.jp/mokunen/>, (参照 2022-1-7)
8) 環境省: “こども環境白書 2019 年版”, 環境省, (オンライン), <https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/kodomo/h30/index.html >, (参照 2022-1-7)
9) 榎沢良彦, 入江礼子編著, “シードブック保育内容環境 第 3 版”, 建帛社, 東京, (2019) , pp.4-5
10) 北星鉛筆株式会社 : “東京ペンシルラボ”,北星鉛筆株式会社, (オンライン), 入手先 < http://www.kitaboshi.co.jp/pencil-lab/>, (参照 2022-1-11)

総合的な探究の時間の指導におけるライフサイクル思考の導入

Introduction of the Concept of Life Cycle Thinking into Instruction in the Period for Inquiry-Based Cross-Disciplinary Study

○松本真哉*[1)]、平山世志衣[2)]、水野建樹[2)]、山口真也[3)]
Shinya Matsumoto, Yoshie Hirayama, Tateki Mizuno, Shinya Yamaguchi
1) 横浜国立大学, 2) 横浜 LCA 環境教育研究会, 3) 神奈川県教育委員会
* matsumoto-shinya-py@ynu.ac.jp

1. 緒言

持続可能な社会の実現を目指して、ライフサイクル思考(LCT)を取り入れた環境教育の活動が続けられている。このような環境教育の活動は、日本 LCA 学会の立ち上げとほぼ同じくして始まり、その後、環境教育研究会の活動が開始され現在に至っている[1)]。LCT を取り入れた環境教育については、当初は本学会の会員による展開が主流であったが、最近では、他の分野でも LCT の概念を取り入れた教材などが開発され実践されている。いろいろな LCT 関係の教材が増加する一方で、このような教材を教育現場での実践に結び付けることは大きな課題である。LCT を取り入れた環境教育に関する解説[2)]で述べられているように、教育現場で関連教材の継続的な実践機会を確保することや、そのような教材を活用する学校教員を増やすことは難しい。本研究では、通常の教科教育などの機会に LCT を取り入れた教材を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で新たに開始された必履修科目である「総合的な探究の時間」の指導で関連教材を活用し、生徒の探究活動に LCT を活用する方向で検討を進めている[3)]。今回の発表では、当該科目の指導に関する教員向け研修講座で関連教材を活用する方法について検討した結果について報告する。

2. 教材活用の検討

2.1 総合的な探究の時間の特徴と指導の要点

高等学校で 2022 年 4 月から全面実施される「総合的な探究の時間」は、必履修科目であり、これまでの高等学校では一般的では無かった、探究すなわち研究活動を主軸とした科目である。当該科目については、生徒が、能動的な学習により、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活動を通して実現することが改訂版学習指導要領[4)]などで示されている。

2021 年 8 月に公表された当該科目の指導と評価に関する参考資料[5)]では、科目を進める上で、学習活動を通して生徒に育成して欲しい資質と能力が、単元の目標として示されている。その中で、単元において重視する、①知識と技能、②思考力と判断力、表現力など、③学びに向かう力や人間性など、の三つの要素を、個々の生徒に応じて指導することが示されている。

当該科目の実施及び生徒指導については、これまでの高等学校で一般的であった各教科教育の場合と異なる点が多いため、各教育委員会において、教員研修などの支援を実施している。今回研修講座で実践を行った神奈川県教育委員会でも、当該科目の先行実施に伴って、2016 年より、探究活動に関する教員向けの指導力向上講座を継続的に実施している。当該科目の生徒の指導上の課題において、特に教員からの指摘が多い内容は、生徒の探究課題の設定の難しさである。そこで、今回の検討では、前述の単元の目標を意識し、幾つかの製品や食品などのライフサイクルに関係する探究課題への落とし込みを狙った単元の目標例を検討した。その一例として、身近な日用品(タオルなど)を扱う場合の単元の目標を以下に示す。このような単元の目標を念頭に置いて、指導用参考教材の検討と教員研修内容の検討を進めた。

単元の目標例：身近な日用品のライフサイクルにおける二酸化炭素排出の探究活動を通して、その日用品の原料生産や製造、運搬などの多くの過程で二酸化炭素が排出されていることや、使用の過程においても二酸化炭素の排出に結び付くことを理解する。この理解を基に、その日用品の使用について、持続可能な社会形成に向けどのような経済構造や消費者行動変容の変化が必要か、自らの消費行動も含めて考える。(更に、可能であれば、タオルなどの学習対象を扱う家庭科に加え、化学、生物、社会科、英語などの関連する教科連携型学習に展開する。)

2.2 参考教材などの作成

指導用の参考教材として、これまで開発されたタオルの利用とカレーライス[6)]、携帯電話[7)]のそれぞれのライフサイクルと CO_2 排出などに関する資料を基に、当該科目の指導で活用できる内容を追加したポスターを作成した。図 1 にその一例として、タオルの利用に関する CO_2 排出に関するポスターを示す。

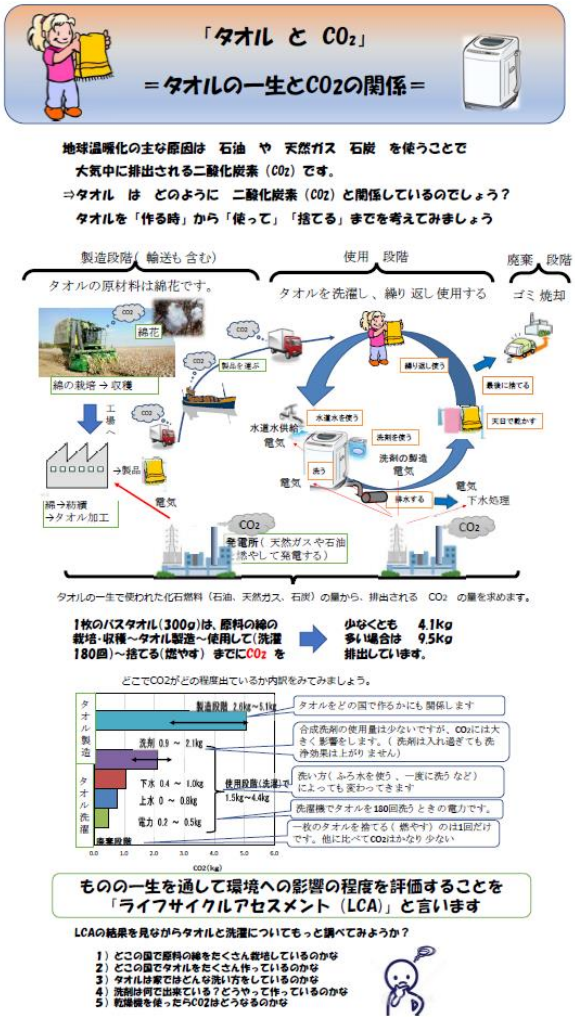


図 1 ポスター教材の例

2.3 教員研修講座の内容検討

ここまでに示した条件などを基に、神奈川県教育委員会が実施する探究活動に係る指導力向上研修講座の内容について検討を進めた。検討を開始した 2021 年春頃には、対応する講座を夏休み後に対面で実施することを想定して内容検討を進めたが、2021 年夏頃の新型コロナウィルスによる緊急事態宣言などの影響もあり、実施時期が 12 月に延期されると同時に、実施方法もオンラインで行うことになった。オンラインで実施することになった結果、当初は講義形式で進める予定であった LCT に関する講義は、横浜 LCA 環境教育研究会が公開している LCA の学習用動画資料[8]による事前学習に変更された。また、身近な製品や行動のライフサイクルを考えるための導入活動として、温暖カードによるカードゲームを導入した。このゲームは 5～6 名の教員グループで実施し、研修の次の内容である身近な製品の一生をグループで考えまとめて発表するグループワークにつなぐ役割を持っている。どちらの活動も生徒の立場になり、探究活動の課題設定を考えるための疑似体験として受講することを前提とした。グループ分けは SDGs、理数系、社会系の課題にそれぞれ関係する探究活動を意識して行い、グループワークの結果発表後の協議及び各グループの振り返り活動の中で、今回の研修で得られた気づきなどを共有する内容で構成した。実際の研修には 32 名の教員が参加し、六つのグループに分かれて活動を進めた。また、カードゲームに約 30 分、その後のグループワークと発表を約 60 分、振り返りや共有作業に約 30 分の時間を設定し、全体で 2 時間 30 分の講座として実施した。

3. 今後の課題

現在、2021 年 12 月に実施した研修におけるアンケートの結果を回収中である。今後、その内容を分析すると共に、次年度以降の当該科目の生徒指導における追跡調査などを行う予定である。

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, 17 (1), (2021), pp. 3-7
2) 松本真哉：日本 LCA 学会誌, 16 (4), (2020), pp. 212-219
3) 松本真哉：“第 15 回日本 LCA 学会研究発表会”, 東京, (2020), pp. 168-169
4) 文部科学省：“高等学校学習指導要領（平成 30 年告示）解説, 総合的な探究の時間編”, 文部科学省, (オンライン), 入手先 <https://www.mext.go.jp/content/1407196_21_1_1_2.pdf>, (参照 2022-01-12)
5) 国立教育政策研究所：“「指導と評価の一体化」のための学習評価に関する参考資料, 総合的な探究の時間編”, 国立教育政策研究所, (オンライン), 入手先 < https://www.nier.go.jp/kaihatsu/pdf/hyouka/r030820_hig_sougou.pdf >, (参照 2022-01-12)
6) 竹内孝曜, 平山世志衣, 田原聖隆, 高田亜佐子, 妹尾理子, 水野建樹：環境教育, 27 (3), (2018), pp. 40-45
7) 平山世志衣, 天野雄太, 大内康弘, 本藤祐樹：日本 LCA 学会誌, 11(4), (2015), pp. 348-358
8) 横浜 LCA 環境教育研究会：“ライフサイクルアセスメント(LCA)”, 横浜 LCA 環境教育研究会, (オンライン), 入手先 < https://www.ylca-lab.org/>, (参照 2022-1-11)

10:20 〜 10:40 (2022年3月2日(水) 09:40 〜 10:40 D会場)

[1-D1-03] 総合討論

©日本LCA学会

口頭発表セッション（特別）

[3-B1] カーボンニュートラル社会における資源問題（1）

座長：光斎翔貴（立命館大学）

2022年3月4日(金) 09:20 〜 10:20 B会場 (zoom)

Zoomはこちら

[3-B1-01] 鉄鋼生産構造の変化に伴う資源効率の変化

*柏倉 俊介[1]、光斎 翔貴[1]、山末 英嗣[1] （1. 立命館大学）

09:20 〜 09:40

[3-B1-02] 日本における鉄鋼資源循環

*北山 未央[1]、桑名 奈美[1]、小野 透[1] （1. 日鉄総研株式会社）

09:40 〜 10:00

[3-B1-03] 鉄鋼製品のクローズドループリサイクル

*礒原 豊司雄[1,5]、渡壁 史朗[2,5]、牧 剛司[3,5]、北山 未央[4,5]、桑名 奈美[4,5]、齋藤 龍司[5]、青木 宗太[5]、渡部 拓海[5] （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. 日鉄総研株式会社、5. 一般社団法人日本鉄鋼連盟）

10:00 〜 10:20

©日本LCA学会

鉄鋼生産構造の変化に伴う資源効率の変化

Changes in resource efficiency associated with changes in the structure of steel production

○柏倉俊介*、光斎翔貴、山末英嗣
Shunsuke Kashiwakura, Shoki Kosai, Eiji Yamasue
立命館大学
* skashiwa@fc.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

鉄鋼業は非常に二酸化炭素の排出量が高い産業として知られている。2020 年度における温室効果ガスの排出量は二酸化炭素換算で 12 億 1300 万トンであったが、鉄鋼業からの排出量は 1 億 5500 万トンであり、全体の 12.8%を占めた。鉄鋼生産において主流の手法である高炉-転炉法においては鉄鉱石を石炭の熱分解によって得られたコークスによって高炉で還元を行って銑鉄を得た後に転炉以降のプロセスにて成分調整を行うが、この高炉における還元は炭素を熱源としてのみではなく還元剤として用いているため、その削減は困難である。そのため、還元剤としての炭素を水素に代替する試みが世界各国で行われている。日本における COURSE50[2]では、高炉に水素を一部投入し、鉄鉱石と固体炭素による吸熱還元反応を代替することで使用するコークスの削減に成功している。上記の高炉転炉法とは別に、直接還元鉄を生産する際の化石燃料を水素に置換する試みも行われている。スウェーデンが中心となっている HYBRIT においては、鉄鉱石の直接水素還元によりスポンジ鉄を得ることに成功している [2]。

これらの水素を用いた新規の還元プロセスは脱炭素目標を達成するにあたりこれからの導入の拡大が見込まれている。その一方で特に還元剤の転換はその背後にある資源採掘量の大幅な変化を引き起こすと考えられる。そこで本報告においては、資源効率の指標として関与物質総量(Total Material Requirement, TMR)を用いて、二酸化炭素の排出量削減を制約条件にした際の資源効率の将来的な変化について推計を行った。

2. 研究手法

2.1 鉄鋼生産量の将来推計

2010 年から 2020 年における鉄鋼生産量については、World Steel Association が発行している Steel Statistical Yearbook を参照した [3]。2050 年までにおける鉄鋼生産量の将来予測については、日本鉄鋼連盟が公開している単調増産シナリオ [4](以降 INC と表記)の他に、中国が 2030 年以降に減産を行うシナリオ [5]（以下 DEC と表記）の 2 種類を採用した。2010 年から 2020 年における鉄鋼生産量の変化の傾向から、INC では 2020 年以降に増産を行う国は中国とインドのみであると仮定した。DEC においては、INC と比較して中国のみが 2030 年以降に減産を行うと仮定した。

2.2 鉄鋼生産方法とその比率の設定

鉄鋼生産方法としては高炉-転炉法、スクラップ-電炉法、DRI-電炉法、水素 DRI-電炉法の 4 種類を想定した。二酸化炭素の排出制約を達成するためのこれらの生産比率については、IEA が公開している 2 種類のシナリオである STEPS(STatEd Policies Scenario)及び SDS(Sustainable Development Scenario)に準拠した [6]。ここで STEPS とは各国政府が既に公開している NDC による場合の削減シナリオ、SDS とは 2100 年に気温上昇を 1.5℃以内にするための削減シナリオである。上記の 2 点とは別に、より究極的に二酸化炭素排出量を削減するシナリオとして、鉄鉱石由来の新規鉄鋼製造を全て DRI に置き換えるシナリオを 2 種類設定した。国と地域は AIM/Enduse モデルに従い 18 の国と 14 の地域に分類し、それぞれの現状における高炉比率が目標値より高い場合には、下記の目標値へ向けて線形的に減少するものとした。

表 1: 各シナリオでの鉄鋼生産比率の現状値と目標値

	2019	2050 STEPS	2050 SDS	W/Z BF-BOF	H_2
BF-BOF /%	70	53	43	0	0
Scrap-EAF /%	22	36	38	50	50
DRI-EAF /%	7	11	19	35	0
H_2DRI-EAF /%	0	0	8	15	50

係数の算出

高炉転炉法、及びスクラップ-電炉法における TMR 係数は山末ら [7]によりそれぞれ 9.9kg-TMR/kg、及び 5.0 kg-TMR/kg と算出されており、本報告においてもこれらの値を採用した。DRI-電炉法及び水素 DRI-電炉法におけるインベントリを整理するために、インベントリデータベースである IDEA 2.3 から粗鋼生産 1 トン当たりの資源投入量から TMR 係数を計算し、電力部分と非電力部分に分離した。電力部分については今後の再生可能エネルギーの更なる利用拡大による TMR 係数の減少分を推計した。

3. 結果および考察

2.1 に記載した手順に従い将来推計を行ったところ、2019 年では 1.85 Gt であった鉄鋼生産量が、2050 年には 2.68Gt へと上昇するのに対し、DEC シナリオでは 2030 年に一旦 1.97Gt まで上昇するもののそこから減産に転じ、2050 年には 1.86 Gt と 2019 年と同水準になると推計された。

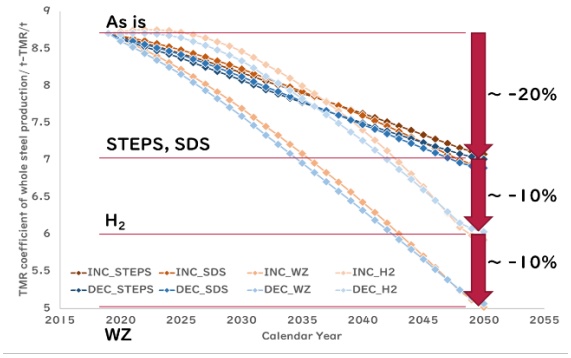
表 2 及び表 3 には、2019 年及び 2050 年の日本における 4 種類の鉄鋼生産方法による TMR 係数を、資源分と電力分に分けて示した。従来型の DRI 及び水素 DRI については、その TMR 係数がそれぞれ 5.38 kg-TMR/kg、及び 11.9 kg-TMR/kg と推計された。特に水素 DRI においては、その還元剤となる水素の製造の際の電力消費分の寄与が非常に大きい [8]。この電力寄与分は再生可能エネルギーの導入に従い大幅に減少するが、2050 年においてもその寄与は 3.1 kg-TMR/kg と非確定大きく、スクラップ-電炉法や従来型の DRI-電炉法と比較しても 3 kg-TMR/kg 程度大きな値となった。

表 2: 各種製鉄法における TMR 係数
（上段: 2019 年　下段: 2050 年）

	BF-BOF	Scrap-EAF	DRI-EAF	H_2DRI-EAF
Materials	9.52	4.18	4.42	4.69
Electricity	0.38	0.82	0.96	7.21
Sum	9.9	5.00	5.38	11.9

	BF-BOF	Scrap-EAF	DRI-EAF	H_2DRI-EAF
Materials	9.52	4.18	4.42	4.69
Electricity	0.16	0.35	0.41	3.10
Sum	9.68	4.53	4.83	7.79

これまでにおいて鉄鋼生産量とその生産比率、及び各種生産方法における TMR 係数が明らかになったため、これらを乗じて TMR を総計し、鉄鋼生産量で除した場合の平均的な TMR 係数の将来的な予測を図 1 に示した。現状を維持する場合と比較して、STEP や SDS においては 2050 年の時点で 2 割程度の TMR が削減される推計結果となった。またこれらの 2 つのシナリオにおいて、SDS は高炉比率の目標値が低い一方で TMR 係数の比較的大きい水素 DRI-電炉法の導入目標比率が相対的に高いためにこの 2 つの寄与が相殺し、全体的な TMR 係数に大きな差異は見られなかった。一方で高炉による生産がゼロになった究極的なケースを想定した場合は、水素 DRI-電炉法の導入比率が高いほど水素生産における電力消費分の TMR の寄与が大きく、TMR の低減効果は大きくないことが示された。



1: TMR 係数の将来推計

4. 結言

鉄鋼生産における将来的な TMR の推計を行った。その結果として、高炉生産の減少は TMR の低減に寄与する一方で、水素を用いた製鉄の拡大による TMR の増大も同時に観測された。これは水電解による水素製造の際の電力消費の寄与と考えられる。

5. 引用文献

1) 環境省：“2019 年度（令和元年度）の温室効果額排出量（確報値）について”，入手先 <https://www.env.go.jp/press/files/jp/116118.pdf> (参照 2022-01-06)
2) Xinyu, Z., Kexin, J., Jianliang, Z., Ziyu, G.: J. Clean. Prod., 306 (2021) 127259.
3) World steel association：“Steel Statistics”，入手先 <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics.html> (参照 2022-01-06)
4) World steel association：“Steel Statistics”，入手先 <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics.html> (参照 2022-01-06)
5) Zhaoling, L., Hanaoka,T.: Resour. Conserv. Recycl.., 161 (2020) 104853.
6) IEA：“Iron and Steel Technology Roadmap”，入手先 <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap > (参照 2022-01-06)
7) 山末研究室：”TMR 係数データベース”, 入手先< http://www.ritsumei.ac.jp/~yamasue/tmr/database.html >（参照 2022-01-06）
8) Vogl, V., Ahman, M., Nilsson., LJ,: J. Clean. Prod., 203(1) (2018) pp.736-745.

日本における鉄鋼資源循環

The circularity of steel in Japan

○北山 未央*、桑名 奈美、小野 透
Mio Kitayama, Nami Kuwana, Toru Ono
日鉄総研株式会社
* kitayama.m.ppk@nsri.nipponsteel.com

1. はじめに

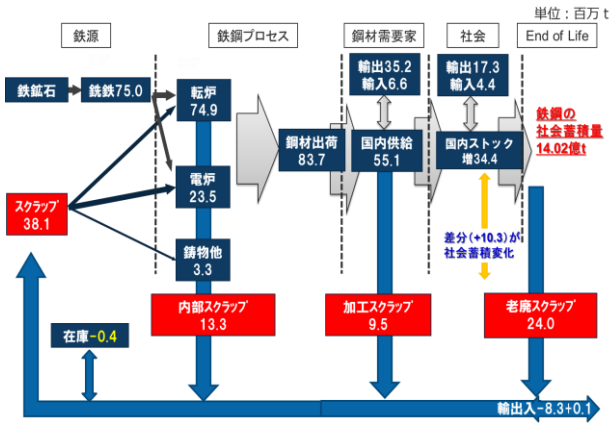
鉄鋼材料は我々の生活や社会インフラを形成するうえで、極めて重要な基礎素材であり、その最大の特徴は優れたリサイクル性にある。①選別が容易（磁気選別可能）、②再生利用のための負荷が低い、③経済合理的なリサイクルシステムが整備されている、④リサイクルによる材料品質低下が生じにくい、⑤多様な製品に再生可能であるといった鉄鋼材料の特性は、同じ素材の原料として無限にリサイクルされる「クローズドループリサイクル」による資源循環を可能としている。スクラップは、鉄鋼資源循環において、極めて重要な役割を果たしている。

2. 日本の鉄鋼資源の活用とその現状

スクラップは、内部スクラップ（自家発生スクラップ）、加工スクラップ、老廃スクラップに大別することができる。内部スクラップは、鉄鋼メーカーの製造工程において発生する。加工スクラップは、鉄鋼材料を使った最終製品（自動車や船舶、容器など）の製造段階で発生する。老廃スクラップは、寿命を終えた最終製品が廃棄されたのち回収される。

2.1 日本における鉄鋼資源のフロー

図1に2019年度の日本の鉄鋼資源のフロー図を示す。内部スクラップが約1330万t、加工スクラップが約950万t、老廃スクラップが約2400万t発生し、そのうち約3810万tが国内で、約830万tが海外で、全量が鉄源として利用されている。



出典：鉄源年報（2021）データを基に日鉄総研作成
図１　2019 年度の鉄鋼資源フロー

2.2 スクラップの流通フロー

スクラップの発生から消費までの一般的な流通フローの概要を図２に示す。内部スクラップは主に発生した製鉄所内で利用され、市中にはほとんど流通しない。加工スクラップ及び老廃スクラップはスクラップ加工処理事業者等の複数の事業者を経由して、経済合理性をもって有価で市中にて取引されている。

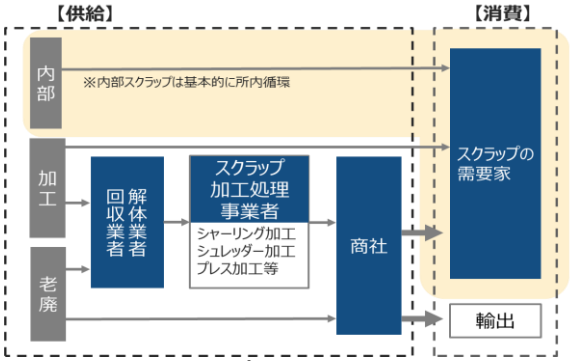


図２　スクラップの流通フローの概要

老廃スクラップについては、リソースによっていくつかの特徴がある。

図３に廃自動車から発生するスクラップの流通フローを示す。自動車の場合、解体事業者によってエアバッグやフロン類など自動車リサイクル法に基づく回収対象物や、モーターやハーネスなどの鉄鋼リサイクルにとって不純物となる部品が取り除かれたのち、残った構造体（ガラと称される）が破砕事業者によってシュレッダー処理され、シュレッダースクラップとして取引される。なお、構造体に含まれるプラスチックや非鉄金属などは、シュレッダー処理の段階で分別回収される。

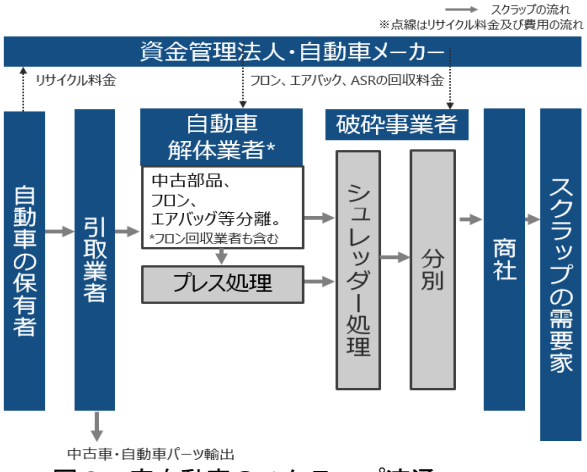


図３　廃自動車のスクラップ流通フロー

図４にビルや工場家屋等の解体構造物から発生するスクラップの流通フローを示す。建築物は、解体現場で一定の裁断、銅線などの分別が行われたのち、スクラップ加工処理事業者に引き渡され、主としてシャーリング（裁断）加工されて、ヘビースクラップとして市中にて取引される。

以上のように、日本のスクラップは様々な商流の中で経済合理性をもって取引されている。

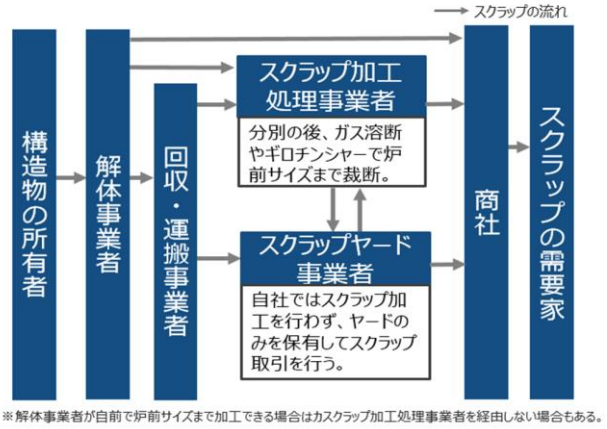
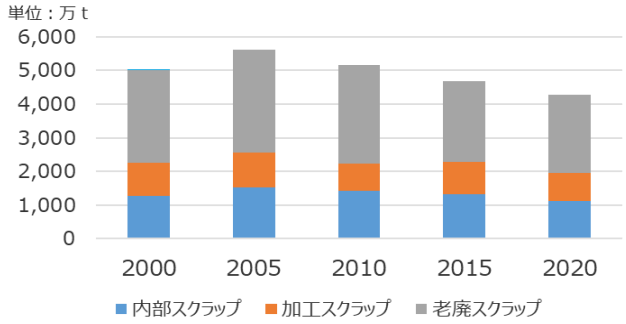


図４　解体構造物のスクラップ流通フロー

3. 現状及び将来のスクラップの需給

3.1 スクラップ需給の現状

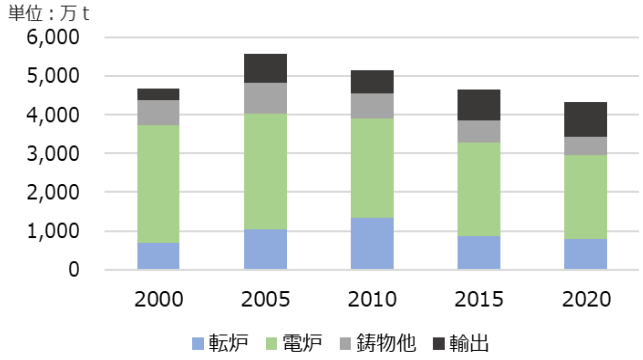
近年の国内スクラップの発生量と消費量をそれぞれ図 5、図 6 に示す。スクラップの発生量は粗鋼生産量の減少、国内鋼材消費の減少によりいずれのスクラップの種類においてもその発生量は減少傾向となっている。



出典：鉄源年報データを基に日鉄総研作成

図５　スクラップ発生量の推移

スクラップの消費量もスクラップの主な消費部門である国内の電炉鋼生産の減少等により、全体量は減少し、スクラップの輸出量が増加傾向となっている。



出典：鉄源年報データを基に日鉄総研作成

図６　スクラップ消費量の推移

3.2 スクラップ需給の将来想定

図 7 に、スクラップ需給の将来想定を示す。国内スクラップの発生量、消費量ともに減少が予想される。

内部スクラップは鋼材/粗鋼生産量と一定の比例関係にある。第 6 次エネルギー基本計画における 2030 年の粗鋼生産前提が 9000 万 t とおかれていることや、国内主要鉄鋼メーカーの中長期経営計画において、国内生産設備の合理化が公表されていることなどから、内部スクラップの発生も減少するものと想定される。

加工スクラップは、国内の鋼材見掛消費との相関、特に、自動車生産量との相関が強いと考えられる。前述の国内粗鋼生産/鋼材生産の減少予測は、国内の鋼材見掛消費の減少を想定していると考えられることから、加工スクラップの発生も減少すると考えられる。

老廃スクラップは、建築物や社会インフラなど比較的寿命の長いものについては鉄鋼材料の社会蓄積量との一定の相関があり、自動車や家電、容器などはそれらを利用する人口との相関が考えられる。日本の鉄鋼蓄積量の増加率は今世紀に入って鈍化しており、また将来日本の人口は減少すると予測されていることから、老廃スクラップの発生も減少するものと考えられる。

スクラップの消費量については、高炉からの電炉シフト及び転炉によるスクラップ消費原単位の上昇が増加要因として考えられる一方、粗鋼生産量の減少は減少要因となる。また、海外における還元鉄（DRI/HBI）生産能力の拡大は、電炉等におけるスクラップとの併用の可能性を高めるものであり、スクラップとの経済的、品質的競合による変動要因となると考えられる。

また、高炉から電炉へのシフトにあたっては、現在国内電炉では生産されていないような製品品質への対応が必要となることから、これらの原料となるスクラップの品位向上のニーズが高まるものと予想される。

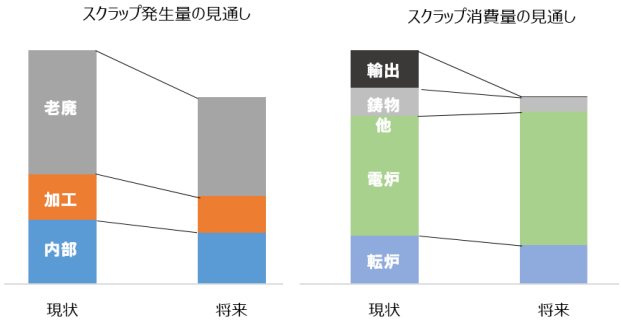


図７　将来のスクラップ需給の見通し

鉄鋼製品のクローズドループリサイクル
Closed-loop recycling of steel products

○礒原豊司雄*[1)5)]、渡壁 史朗[2)5)]、牧 剛司[3)5)]、北山 未央[4)5)]、桑名 奈美[4)5)]、
齋藤龍司[5)]、青木宗太[5)]、渡部拓海[5)]
Toshio Isohara, Shiro Watakabe, Takeshi Maki, Mio Kitayama, Nami Kuwana,
Ryouji Saito, Souta Aoki, Takumi Watanabe
1) 日本製鉄, 2) JFE スチール, 3) 神戸製鋼所, 4) 日鉄総研, 5) 日本鉄鋼連盟
* isohara.4hq.toshio@jp.nipponsteel.com

1. 鉄鋼製品のリサイクル特性

鉄鋼製品は極めてリサイクル性が高く、その製品寿命を迎えた後も、実態として、ほぼ全量がスクラップとして回収され、そのすべてが再生、リサイクルされている[1)]。この優れたリサイクル性は、鉄の以下の特性によるものと考えられる。

（1）選別が容易：主要工業素材では事実上鉄のみが磁気選別が可能で、磁気により鉄のみを簡便かつ確実に選別できる。

（2）再生利用が容易：鉄は基本的には加熱溶融のみで別な鉄鋼製品に再生できる。

（3）有価：鉄スクラップは経済価値があり、補助政策等の支援に頼ることなく、古来より世界的に経済原理にしたがった回収システムが存在している。

（4）不純物除去が容易：鉄鋼製品に添加される成分はもともと微量である上、鉄鋼はそれらの大部分よりも酸化されにくいため、再生時の酸化精錬により、ほとんどの合金成分や混入物を酸化スラグとして除去し、きれいな鉄に戻すことができる[2)]（図 1）。

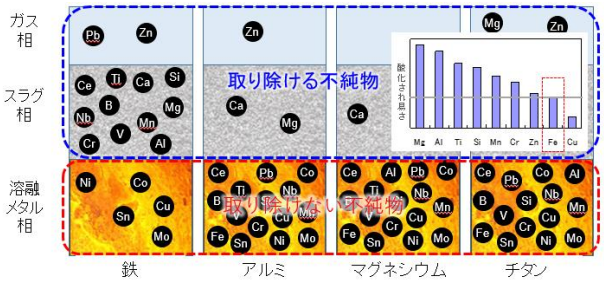


図 1　金属の酸化精錬

鉄鋼製品の素材としてのリサイクルで特徴的なのは、その回収率、リサイクル率の高さもさることながら、上記（4）の性質により、ほぼ全量が用途を選ばずに「何度でも何にでも」再利用され、閉（クローズド）ループリサイクルによる資源循環を形成できる点である。これは、鉄という物質が固有の特性を変えることなくリサイクルできることを示しており、他の多くの素材製品に見られる、部分的かつカスケード的な利用である開（オープン）ループリサイクルとは本質的な違いがある。

ただし、銅などの一部除去できない元素はスクラップ回収時に混入すると鉄の優れた特性を損ねてしまうこともありこれら元素の混入回避は重要である[3)]。

一方、個別の鉄鋼製品のリサイクルについては、開ループリサイクルであると解釈される場合がある。例えば、鋼管が、他製品である H 形鋼にリサイクルされているという捉え方である（図 2）。

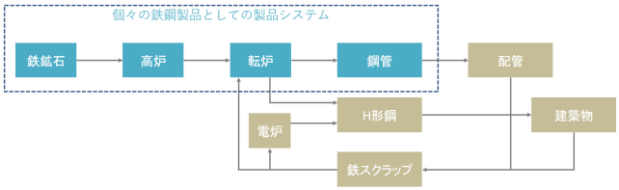


図 2　個々の鉄鋼製品としての製品システム

本稿では、それら解釈の差異が生じる要因について、LCA の考え方の基礎とされている ISO 14044 規格に基づく整理と分析を行う。

2. ISO 14044 規格における閉ループと開ループ

ISO 14044 規格では、リサイクルの扱いについては 4.3.4.3 章「再使用及びリサイクルのための配分手順」で規定されている。4.3.4.3.1 では、「物質の固有の特性の変化を考慮しなければならない」とされ、4.3.4.3.3 で、リサイクルに対して適用できる配分の手順が示され、ここで閉ループ、開ループの概念が以下のように示されている。

「a）閉ループ形の配分の手順は，閉ループ形の製品システムに対して適用される。また，再使用された物質の固有の特性に変化がない場合には，この手順は開ループ形の製品システムにも適用できる。その場合，二次材料の使用が原（一次）材料の使用と置き替わるため，配分の必要がなくなる。しかし，適用可能な開ループ形の製品システムにおける原材料の最初の使用は，b）に概説する開ループ形の配分の手順に従う場合がある。

b）開ループ形の配分の手順は，物質が他の製品システムに再使用され，かつ，その物質の固有の特性が変化を受けるような開ループ形の製品システムに適用される。」

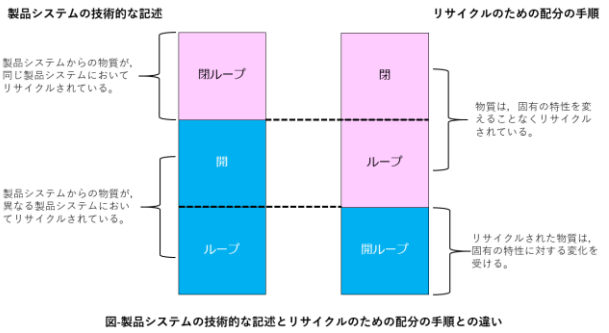


図 3　ISO 14044 規格における閉ループと開ループ

ここで、閉ループリサイクル、開ループリサイクルという用語は使用されておらず、「閉ループ型の配分手順」「閉ループ型の製品システム」という表現が使用されており、図3では左側が「製品システム」を基準とした閉ループリサイクルの定義、右側が「配分の手順」を基準とした閉ループリサイクルの定義を示している。この二つの分類が混乱の一因と考えられる。

図の左側を見ると、「製品システムからの物質が同じ製品システムにおいてリサイクルされている」場合に「閉ループ型の製品システム」に該当すると説明されている。これに対し、図の右側で、「物質が固有の特性を変えることなくリサイクルされている」場合、「閉ループ型の配分手順」を使用すべきとされている。

これから、図の左の「閉ループ型の製品システム」（いわゆる水平リサイクル）を「閉ループリサイクル」としたうえで、鋼管とH形鋼が異なる製品システムであると解釈した場合、このリサイクルシステムは「開ループリサイクル」と評価されることになる。しかし、製品システムをどこで区切るかはLCAの目的に応じて選択されるものであり、鉄鋼製品を鉄鋼素材として考える場合は図4のように異なるシステム境界の設定となる。また、鉄鋼製品は素材としては上述のように「物質が固有の特性を変えることなくリサイクルされている」場合に相当するため、仮に「開ループ型の製品システム」に該当する場合であっても、同規格では「閉ループ型のリサイクルの配分手順」を適用すべきとされている。このように、鉄鋼製品全体を考える場合は、「閉ループ型のリサイクルの配分手順」が適用されるリサイクルシステムとしての「閉ループリサイクル」と考えることが、リサイクルの資源循環への貢献の本質を考えると、より適切であると考えられる。

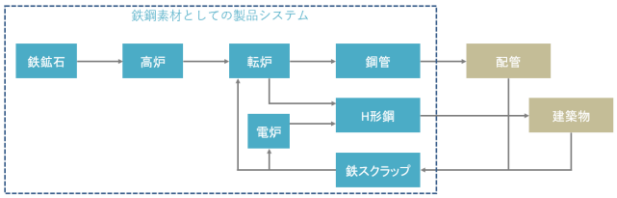


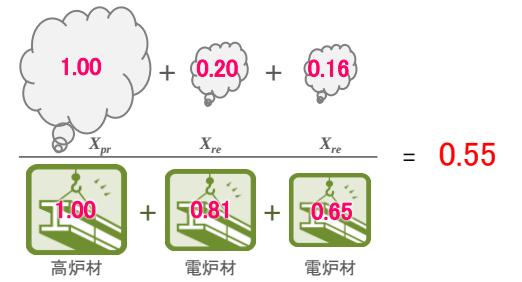
図4　鉄鋼素材としての製品システム

3. 鉄鋼製品のリサイクルを考慮したLCI計算

このように鉄鋼製品は素材として閉ループ形成しているため、鉄鋼製品のライフサイクルインベントリ（LCI）計算は図4の通りスクラップをシステム境界に入れた製品システムとして考えることになっている。

本計算法は世界鉄鋼協会（World Steel Association）が開発したもので、ISO 20915規格およびJIS Q 20915（以下、あわせて20915規格）として発行されている。同規格に定めるLCIの計算法の基本は、鉄鋼製品は全てスクラップリサイクルを通じてライフサイクルがつながっており（図5）[4]、将来にわたり（無限に）リサイクルされるというものである。ここで、

X_{pr}：鉄鉱石からの製造時のLCI
X_{re}：スクラップからの製造時のLCI
R：スクラップ回収率
y：スクラップからの製造時の歩留



高炉材のスクラップ使用率0%、電炉材のスクラップ使用率100%、X_{pr}＝1.0、X_{re}＝0.25、R＝90%、y＝90%の場合

図5　複数ライフサイクルでのLCIの考え方（3回リサイクルの例）

20915規格では鉄鋼製品のLCIの計算法を以下のように規定している（図6左）。

LCI＝A＋B1－B2　　（式1）

A＝天然資源採掘から鉄鋼製品出荷までのLCI

B1＝X_{sc}・M_{sc}　　B2＝X_{sc}・R

X_{sc}＝(X_{pr}－X_{re})・y　　M_{sc}＝スクラップ使用原単位

X_{sc}はスクラップにより環境負荷を低減できる効果でスクラップLCIと呼ぶ。実際の環境負荷低減量B2は、回収されるスクラップ量Rを乗じたX_{sc}・Rになる。

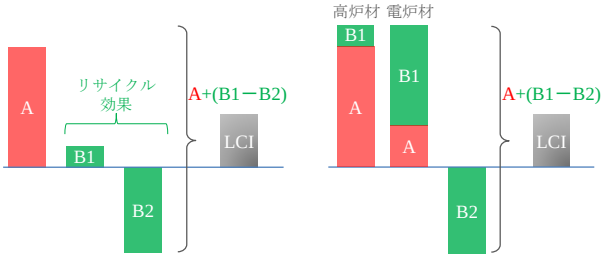


図6　20915規格のLCI計算法

（式1）は、変形すると以下のようになる。

LCI＝A－(B2－B1)＝A－(X_{sc}・R－X_{sc}・M_{sc})

＝A－X_{sc}・(R－M_{sc})　　（式2）

つまり、製造時にスクラップをM_{sc}使用することは、将来Rの量生み出されるはずのスクラップがM_{sc}だけ実質目減りすることになる。

鉄鋼製品は閉ループリサイクルされているのが実態であるため、20915規格に基づくLCI計算が求められる。EPD（Environmental Product Declaration）であるエコリーフの鉄鋼製品のPCR（Product Category Rule）も同規格に準拠し[5]、欧州の建材のPCR規格[6]でもリサイクル効果の反映が要求されている。

4. 引用文献

1) Daigo I. et al.：Environ Sci Tech 49, (2015) 8691
2) 平木岳人ら：第23回廃棄物資源循環学会研究発表会（2012）23_269
3) Daigo I. et al.：ISIJ Int 61, (2021) 498.
4) Amato A., Brirmacombe L., Howard N.：Ironmaking and Steelmaking, 23(3), (1996), pp 235-241
5) サステナブル経営推進機構：エコリーフPCR PA-180000-AW-02、PA-180000-AX-02、PA-180000-AY-02、PA-180000-AJ-03
6) EN 15804:2012+A2:2019

口頭発表セッション（特別）

[3-B2] カーボンニュートラル社会における資源問題（2）

座長：山末英嗣（立命館大学）

2022年3月4日(金) 11:00 ～ 12:00 B会場 (zoom)

Zoomはこちら

[3-B2-01] マイクロ波炉を用いた分散型リサイクルシステムの導入によるエネルギー削減量の評価

*小崎 啓太[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

[3-B2-02] 採掘活動から見たバイオマス発電の資源強度分析

*寒川 友香子[1]、光斎 翔貴[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1] （1. 立命館大学）

11:20 ～ 11:40

[3-B2-03] 次世代自動車の普及に伴う資源使用量の変化

*滝本 響[1]、光斎 翔貴[1]、渡 卓磨[1]、柏倉 俊介[1]、山末 英嗣[1] （1. 立命館大学）

11:40 ～ 12:00

©日本LCA学会

マイクロ波炉を用いた分散型リサイクルシステムの導入によるエネルギー削減量の評価：アルカリマンガン乾電池を例に

Evaluating the reduction of energy consumption by introducing a distributed recycling system with microwave-based heating : Alkaline batteries as a case study

○小﨑啓太*[1)]、光斎翔貴[1)] 柏倉俊介[1)] 山末英嗣[1)]
Keita Kozaki, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Ymasue
1) 立命館大学
* rm0167hk@ed.ritsumei.ac.jp

1 緒言

1.1 研究背景

現在，急激な人口増加・経済成長により様々な製品が大量に生産され消費されている．このような生産・消費形態は多くの廃棄物を排出することから，循環型社会に向けた効率的なリサイクルシステムの構築が重要となっている．

現行のリサイクルシステムは，広域範囲から廃棄物の回収を行い 1 箇所の大規模な処理施設に輸送し処理を行う中央集中型が一般的である．しかし，中央集中型リサイクルでは廃棄物の回収・輸送段階におけるエネルギー消費量が多く，必ずしも効率的であるとは限らない．そこで輸送に関するエネルギー消費の抜本的な解決法として分散型リサイクルが挙げられる．分散型リサイクルとは複数の小規模な処理施設を用い，各地で発生する廃棄物を地域内で回収から最終処理までを完結させるリサイクルシステムである．廃棄物の発生地域と処理施設が近く輸送に関するエネルギー使用量を削減できることが分散型リサイクルの利点であると言える．

分散型リサイクルシステムの概念についてはまだ議論が少なく，プラスチック[1)]や太陽光パネルの廃棄物[2)]といった特定の廃棄物にのみ分析がなされ始めている．エネルギー消費の観点からみた分散型リサイクルの有効性は評価される地域規模や対象物によって異なることから，様々な廃棄物に対し分散型リサイクルの適応可能性について議論することは重要である．

また，水野らによるとマイクロ波を利用した金属リサイクルの可能性や小規模環境下でのエネルギー効率の高さから，マイクロ波炉が分散型リサイクルシステムの確立の基盤となることが示唆されている[3)]．

そこで本研究では廃棄されるアルカリマンガン乾電池に焦点を当て，日本全国の市区町村においてマイクロ波炉を用いた分散型リサイクルを導入した場合のエネルギー削減量の評価を目的とする．

2 手法

2.1 分散型リサイクルと中央集中型リサイクルの評価方法

本研究では，中央集中型のモデルとして国内においてリサイクル目的で回収された廃乾電池を全て一つの処理施設（北海道）で焙焼による亜鉛回収といった最終処理を行った場合を考えている．分散型のモデルとしては市町村区分の地域内で回収された廃乾電池をその地域内で最終処理まで完結させる場合を考えている．これらのモデルにおいて，廃乾電池回収量から推測される輸送及びと加工処理に関するエネルギー消費量の比較を行う．

2.2 廃乾電池回収量の推測

ある特定の市町村の乾電池回収データ[4)]と国内の乾電池リサイクル量から，人口に応じた各市町村の乾電池回収量をモデル化し推測する．

2.3 輸送に関するエネルギー消費量

中央集中型リサイクルシステムについては各地域で回収された乾電池の輸送フローとして，各市区町村の代表地点に集合させた後，全国 45 箇所に設定された回収拠点を経由し，トラックと鉄道によって最終処理施設まで運ぶ流れを仮定しエネルギー消費量を算出する．一方で，分散型リサイクルシステムについては各市区町村の代表地点での最終処理の完結を前提としているため，中央集中型リサイクルシステムにおける市区町村の代表地点から最終処理施設に輸送する過程で消費される輸送エネルギーを分散型リサイクルシステム適用時のエネルギー削減量として評価する．

トラックと鉄道に関するエネルギー消費量の計算にはトンキロ法[5)]を用いる．トラックのエネルギー消費量$E_T[GJ]$については，貨物輸送量$x_T[t \cdot km]$，燃料使用原単位$e_T[L/t \cdot km]$，単位発熱量$f_T[GJ/kL]$より表され以下の式(1)に示す．

$$E_T = x_T \times e_T \times f_T \times \frac{1}{1000} \quad (1)$$

また，鉄道のエネルギー消費量$E_R[GJ]$については，貨物輸送量$x_R[t \cdot km]$，エネルギー使用原単位$e_R[MJ/t \cdot km]$より表され以下の式(2)に示す．

$$E_R = x_R \times e_R \times \frac{1}{1000} \quad (2)$$

2.4　加工に関するエネルギー消費量

回収された乾電池はリサイクル処理施設で焙焼工程などを経て再資源化される．本研究ではリサイクルの機能単位を乾電池に含まれる亜鉛の回収重量 1kg に対するエネルギー消費量と設定する．中央集中型については電気炉，分散型についてはマイクロ波炉を用いて製錬を行うものと仮定し，亜鉛回収率や消費電力，加熱時間などからエネルギー消費量の評価を行う．

3　結果と考察

全国の市区町村に分散型リサイクルを適用した場合のエネルギー削減量を図 1 に示す．ここでは，2017 貨物地域流動調査を基にした JR 貨物の試算[6]を参考に各地方において鉄道輸送とトラック輸送の割合を変化させた．その結果，最終処理施設（北海道）に隣接する 12 箇所の市区町村以外で，分散型リサイクル適用により消費エネルギー量が削減される結果となった．これは年間で約 43,000GJ 削減にあたる．また，関東地方や関西地方においてより多くのエネルギー削減量が見込める結果となった．これは人口の多さにより発生する使用済み乾電池量が多いことに起因する．また，最終処理施設（北海道）から距離が遠い九州地方などにおいてエネルギー削減量が小さくなる理由として，中長距離の輸送においてはトラック輸送に比べてエネルギー効率の良い鉄道輸送が大きな割合を占めていることが考えられる．

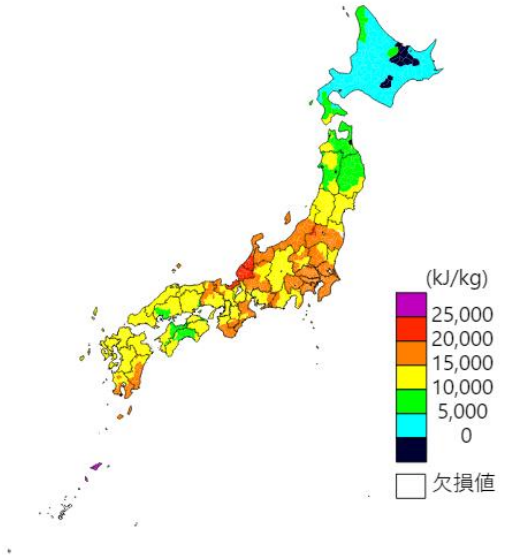


図 1　分散型リサイクルを適応した場合での回収亜鉛 1kg におけるエネルギー削減量

4　まとめと今後の展望

本研究では，アルカリマンガン乾電池のリサイクルにおいて輸送段階と加工段階でのエネルギー消費量を対象に，既存の中央集中型リサイクルシステムに対し，新たに分散型リサイクルシステムを適用した場合のエネルギー削減量の評価を行なった．現在のアルカリマンガン乾電池のリサイクルでは輸送段階において消費されるエネルギーが大きく，分散型リサイクルを適用することにより多くの消費エネルギーが削減されると考えられる．今後は，中央集中型リサイクルおよび分散型リサイクルを適用した場合の CO_2排出量，資源採掘量といった環境的側面における影響評価の他に，経済面での影響評価も考慮する．

5　引用文献

1) M. A. Kreiger, M. L. Mulder, A. G.Glover and J. M. Pearce, ”Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament” Journal of Cleaner Production, 70, pp.90-96, 2014.
2) D. Ravikumar, T. Seager, P. Sinha, M.P. Fraser, S. Reed, E. Harmon and A. Power, ”Environmentally improved CdTe photovoltaic recycling through novel technologies and facility location strategies” Progress in Photovoltaic, 28
3) Mizuno, N.; Kosai, S.; Yamasue, E.; Microwave-based extractive metallurgy to obtain pure metals: A review, Cleaner Engineering and Technology, 5, 100306, 2021
4) 環境省：“市町村等における水銀使用廃製品の回収事例集”，環境省ホームページ（オンライン），入手先<https://www.env.go.jp/recycle/waste/mercury-disposal/1.kaisyujirei.pdf>，（参照 2021-12-27）
5) 一般財団法人省エネルギセンター：“荷主の省エネ推進の手引き”，一般財団法人省エネルギセンターホームページ（オンライン），入手先<https://www.eccj.or.jp/law06/pamph_shipper-guide/ninushitebiki.pdf >，（参照 2021-12-27）
6) JR 貨物：“JR 貨物レポート 2019”，JR 貨物ホームページ（オンライン），入手先<https://www.jrfreight.co.jp/about/csr>，（参照 2021-12-27）

採掘活動から見たバイオマス発電の資源強度分析

Evaluating resource use of biomass power generation from the perspective of mining activities

○寒川友香子*[1)]、光斎翔貴[1)]、柏倉俊介[1)]，山末英嗣[1)]
Yukako Sogawa, Syoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue
1) 立命館大学
* rm0169hi@ed.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

近年，世界の人口増加に伴い，電力需要が拡大している[1)]．従来の主要な発電方法である火力発電は化石燃料を原料としており，その利用において資源枯渇問題や地球温暖化問題が顕在化してきた．そこで化石燃料からの脱却と電源の多様化の観点から近年バイオマス発電が注目されている．バイオマス発電はカーボンニュートラルの観点から再生可能エネルギーの一つとして位置づけられており，使用できるバイオマスの原料や発電技術の種類も多い．そのため，原料の調達方法や電力の需要量など，それぞれの発電状況に適した技術が用いられている．

多くの既存研究において，ライフサイクルの観点からバイオマス発電の環境負荷，特に炭素排出量が分析されてきた[2)3)]．一方で，発電における資源強度に注目した例は少ない．循環経済の達成のためにも資源を含めた議論は必須である．ここでの資源強度とは，バイオマス発電により 1 kWh の電力を発電するため投入が必要となるあらゆる資源の総量を表す．

そこで本研究では，様々な原料および発電法を考慮した上で，バイオマス発電における資源強度の分析を行うことを目的とする．

2. 研究手法

2.1 関与物質総量

本研究では資源強度を評価するために，関与物質総量(TMR, Total Material Requirement)の概念を採用し，バイオマス発電により 1 kWh の電力を得るために必要な採掘活動量を評価した．TMR とは 1 kg の素材を製造するために必要となる総物質量[kg-TMR/kg]のことを指し，直接物質投入量や間接投入物質のみならず隠れたフローを考慮することで採掘活動に伴う物質量から資源への依存度を可視化する指標である．

2.2 計算手法

バイオマス発電による 1 kWh 発電当たりの TMR 係数，T_P[kg-TMR/kWh]は式(1)より求められる．この時，T_iは物質 i の TMR 係数を，W_iは物質 i の投入量を，P は総発電量を指す．

$$T_P = \frac{\Sigma T_i W_i}{P} \qquad \text{式(1)}$$

また，一部のみ発電に使用し，残りは他の用途で使用されるようなバイオマス発電の原料を考慮する場合は，金銭価値の観点からアロケーションを行った．

2.3 評価対象

本研究は日本の新潟県でバイオマス発電を行う場合を仮定し，ライフサイクルステージとして，原料の調達，輸送，荷役，発電所建設を考慮した．

また，現在普及率の高い，森林残渣(RFB)とユーカリを燃料として用いた直接燃焼法[4)5)]，RFB と木質ペレットを用いたガス化[6)7)]，トウモロコシと藻類を用いた発酵[8)9)]の場合におけるバイオマス発電を考慮した．評価対象の分類を図 1 に示す．

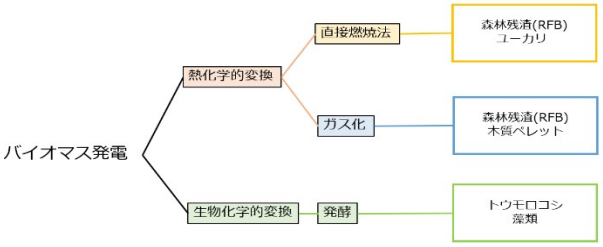


図 1. バイオマス発電の分類

3. 結果・考察

3.1 バイオマス発電の TMR 算出結果

直接燃焼法，ガス化，発酵を行った場合の原料ごとの TMR 算出結果を図 2 に示す．TMR 係数は約 2.5～4.8 kg-TMR/kg となり，発酵(トウモロコシ)，発酵(藻類)，直接燃焼法(ユーカリ)，ガス化(木質ペレット)，ガス化(RFB)，直接燃焼法(RFB)の順に小さくなった．

発電技術ごとに必要な原料の質量の差や輸送手段ごとの燃料消費量の違いに起因して，原料の種類ごとに TMR 係数にばらつきが見られたと考えられる．このた

め，輸送時の TMR はバイオマス発電における資源使用量を定量化する上で無視することはできない．

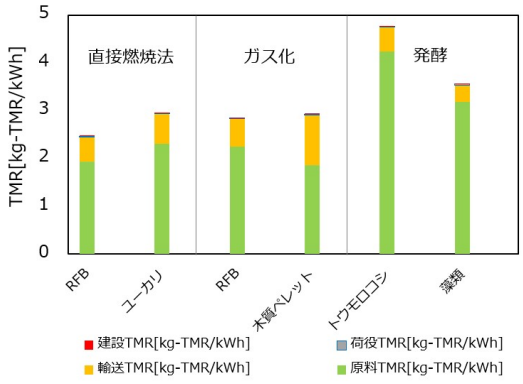


図 2．直接燃焼法，ガス化，発酵におけるバイオマス発電の TMR 係数算出結果

3.2 他発電法との比較

推定されたバイオマス発電における資源強度の良し悪しを明示するために，他発電法との比較を行った．

各発電方法における TMR 係数と CO_2 排出係数の関係を図 3 に示す．この図より，バイオマス発電の CO_2 排出係数には，発電時に使用する原料によって他発電法における最低値から最高値辺りまでのばらつきが見られた．一方，TMR 係数に注目すると，原料にかかわらず他発電法よりも大きな値となることが分かった．この原因としてはバイオマス発電時の燃焼温度が低く，発電効率が低いことが考えられる．

従って，バイオマス発電を推進する上で温室効果対策の面にのみ注目をしていると，その背後で資源をより多く使用してしまう問題が引き起こされると考えられる．

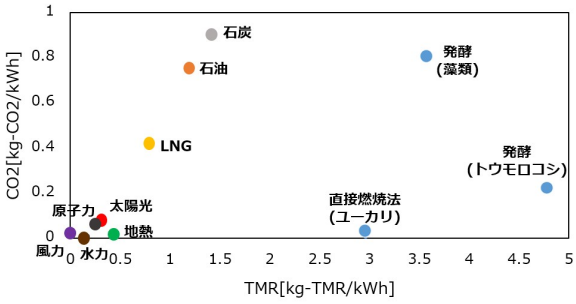


図 3．他発電法との比較

4．今後のまとめと展望

本研究では化石燃料からの脱却として近年注目されている再生可能エネルギーの内，バイオマス発電に焦点を当てて資源使用量の定量化を行った．これよりバイオマス発電は他発電法に比べて資源使用量が多いことが分かった．今後はより広域にわたってデータを収集し，LCA 学会ではバイオマス発電における地域性の違いや土地改変の観点も踏まえた発表を行う．

5．引用文献

1) Enerdata，グローバルエネルギー統計イヤーブック 2020，available at: https://yearbook.enerdata.jp/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html(accessed 06.14.2021)(2020)
2) Mohammad，Fattahi．；Kannan，Govin- dan．；Mehdi，Farhadkhani．；Sustain- able supply chain planning for biomass- based power generation with environ- mental risk and supply uncertainty con- siderations: a real-life case study,In- ternational Journal of Production Re-search，59，pp．3084-3108(2021)
3) Hojat，Ansarinasab．；Mehdi，Mehrpooya．；Milad，Sadeghzadeh．；Life-cycle pane techno-economic analysis of a biomass- assessment (LCA) based biorefinery,Journal of Thermal Analysis and Calorimetry volume，145，pp．1053-1073(2021)
4) Richard，L．Bain．：　Ralph，P．Overend．；Kevin，R. Craig．；Biomass-fired power generation，ScienceDirect，54，　1-3，pp.1-16(1998)
5) Andrei．Briones-Hidrovo．；José．Copa．；Luís A. C．Tarelho．；Cátia．Gonçalves．；Tamíris.Pacheco da Costa．；Ana．Cláudia．Dias．；Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation：Gasification vs．combustion，Journal of Cleaner Production，289，125680(2021)
6) 国立環境研究所，環境技術解説 バイオマス発電 available at：https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=2 (accessed 06.06.2021)
7) Filomena．Ardolino．；Concetta．Lodato．；Thomas F. Astrup．；Umberto．Arena．；Energy recovery from plastic and biomass waste by means of fluidized bed gasification: A life cycle inventory model.Energy，165，pp.299-314(2018)
8) Alvina．Aui．；Wenqin．Li．；Mark．M．Wright．；Techno-economic and life cycle analysis of a farm-scale anaerobic digestion plant in Iowa，Waste Management，89，pp. 154-164(2019)
9) R．Yukesh．Kannaha．；S．Kavitha．；Obulisamy. Parthiba．Karthikeyan．；Eldon R．Rene．；Gopalakrishnan．Kumar．；J．Rajesh Banu．；A review on anaerobic digestion of energy and cost effective microalgae pretreatment for biogas production，Bioresource Technology，332，125055(2021)

TMR からみた次世代自動車の普及に伴う資源使用量の変化

The change in resource usage due to the spread of next-generation automobiles

○滝本響*[1)]、光斎翔貴[1)]、渡卓磨[2)]、柏倉俊介[1)]、山末英嗣[1)]
Hibiki Takimoto, Shoki Kosai, Takuma Watari, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue
1) 立命館大学, 2) 国立環境研究所
* rm0169pp@ed.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

現在，世界人口の増加に伴い，自動車の販売台数も大きく増加している．今後，二酸化炭素排出量削減に向けて，各国では内燃機関自動車から電気自動車や燃料電池自動車といった次世代自動車への転換が予想されている．次世代自動車の普及に伴い，これまで使われてこなかった新たな資源が世界的に必要になると考えられる．

既存研究では，渡らが自動車分野において今後どの程度資源使用量を誘発するかに関して TMR(Total Material Requirement)を用いて評価してきた[1)2)]．TMR は資源使用量を評価する指標の一つであり，直接投入物質量と間接投入物質量に加え，搾取・採掘されるまたは廃棄物として排出される「隠れたフロー」を含むものであり，環境に与える負荷を定量的に表す際に用いる指標の一つである．渡らによると，2050 年にかけて自動車の製造段階および運用段階において資源使用量の上昇傾向が示唆されている．しかし，メンテナンス段階においての資源使用量や，種々のサービス等戦略を取り入れた場合等は加味されておらず，さらなる資源使用量の変化の分析が求められている．

そこで本研究では TMR を用いて製造段階，運用段階およびメンテナンス段階における次世代自動車の資源使用量を定量化し，種々の戦略による資源使用量の低減効果の分析を目的とする．

2. 研究手法

2.1 シナリオ設定

本研究では国際エネルギー機関(IEA)によって提唱されているエネルギーの観点から作られた Reference Technology Scenario(RTS)，2℃ Scenario(2DS)，Beyond 2℃ Scenario(B2DS)の 3 つのシナリオを基に，2050 年までの保有台数の推移を考慮した．RTS とは，現在のエネルギーシステムのままだと仮定し，2100 年までの気温上昇を 2.7℃に抑えるシナリオのことである．2DS とは，メジャーな気候変動緩和シナリオであり，2100 年までの気温上昇を 2℃に抑えるシナリオである．B2DS とは，2060 年までにゼロ・エミッションを達成し，2100 年までの気温上昇を 1.75℃に抑えるシナリオである．

2.2 動的マテリアルフロー分析

世界全体における，内燃機関自動車(ICEV)，ハイブリッド車(HEV)，プラグインハイブリッド車(PHEV)，電気自動車(BEV)，燃料電池自動車(FCV)の販売台数は， 以下の式(1)にあるように，動的マテリアルフロー分析を用いて算出した．これはある t 年における保有台数N_t，販売台数I_t，廃棄台数W_tの関係より表される．

$$N_t - N_{t-1} = I_t - W_t \quad (1)$$

保有台数の実測値は Handbook of Japan[3)]より，前述のシナリオに対応する将来推計値は Energy Technology Perspective 2017[4)]よりデータを得た．廃棄台数の推定にはワイブル分布関数を用いた．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[2)]を適用する．

2.3 関与物質総量 (TMR)

既存研究として光斎らが各自動車の 1 台あたりの TMR を評価してきた[1)]．本研究では，その TMR 値に動的マテリアルフロー分析を通した各種台数をかけあわせることにより，世界全体における資源使用量の変化を分析した．各自動車に関して，製造段階，運用段階，メンテナンス段階の 3 段階に分けそれぞれの段階において分析を行った．t 年における合計の TMR フローをT_t，製造段階の TMR フローをP_t，運用段階の TMR フローをO_t，メンテナンス段階の TMR フローをM_t，車一台あたりの製造時にかかる TMR を p，メンテナンス時にかかる TMR を m，各燃料の TMR 係数を i，一年間に必要な燃料の量を w，メンテナンスが必要な台数をS_tとし，各段階における TMR フローは以下の式(2-5)で表される．

$$T_t = P_t + O_t + M_t \quad (2)$$
$$P_t = I_t \times p \quad (3)$$
$$O_t = N_t \times i \times w \quad (4)$$
$$M_t = m \times S_t \quad (5)$$

3. 結果

それぞれのシナリオにおける TMR フローを図 1 に示す．凡例の(P)は製造段階，(O)は運用段階，(M)はメンテナンス段階のことを指している．すべてのシナリオにおいて世界全体の TMR フローは上昇傾向にあり，2015 年比で 2 倍程度増加することがわかった．RTS では，他の 2 つのシナリオと比較して，ICEV の支配率が大きくなっており，これは燃料の燃焼に伴う運用段階の TMR が支配的であるからである．RTS に比べて 2DS，B2DS ともに資源使用量の低減が見られるもののその効果はわずかである．これは次世代自動車が普及したとしても BEV の製造段階，メンテナンス段階での TMR が支配的であることに起因する．

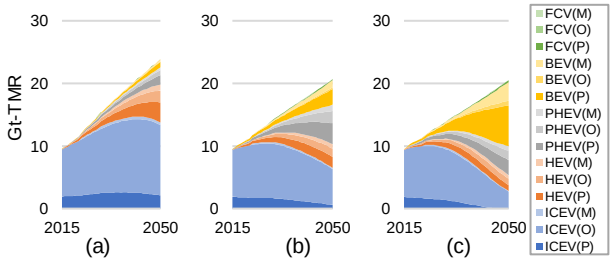


図 1 TMR フロー((a)RTS，(b)2DS，(c)B2DS)

4. 考察

本研究では，地球温暖化対策による再生可能エネルギーの割合増加や次世代自動車の普及が進んだとしても，自動車の資源使用量は上昇する推定結果となり，渡らの先行研究の結果とも一致する．そこで，地球温暖化対策とは別に新たに資源使用量を減らすために特化した戦略が求められる．

そこでここでは，FCV 導入シナリオの作成，各車の長寿命化，カーシェアリングやライドシェアリングの導入の 3 つの戦略を取り入れた場合，自動車の資源使用量がどの程度減少するか分析した．FCV 導入シナリオとは，FCV の 1 台あたりの運用段階における TMR が BEV より低いという光斎らの既存研究[1)]より，次世代自動車の普及展開として FCV を優先的に導入するケースを考え，FCV と BEV の保有台数のデータを入れ替え，動的マテリアルフロー分析を用いて再算出したシナリオのことである．各車の寿命変化については，寿命が 2015 年～2040 年の間で 15 年～18 年[6)]に線形変化すると仮定して算出した．カーシェアリングやライドシェアリングについては，各車の保有台数が 2015 年～2040 年の間で 0%～25%[7)]減少すると仮定して算出した．それぞれのシナリオにおいて，2050 年段階で 27.2%，31.0%，39.5%減少させることができた．特に，カーシェアリングやライドシェアリングによる資源使用量の削減効果が大きいことがわかった．これより，カーシェアリングやライドシェアリングの促進に向けて，さらなる新規サービスの競争力の強化，関連規制の整備や消費者行動の分析が求められる．

5. まとめと今後の展望

本研究では，TMR の観点から，次世代自動車の普及に伴う資源使用量の変化を分析した．何の対策も行わないと，資源使用量は上昇してしまうことがわかった．そこで資源使用量を減少させるため，新たなシナリオの作成，各車の長寿命化，カーシェアリングを導入することにより 2050 年の段階で 27%～40%程度 TMR を削減させることができた．今後リサイクルなどの異なる戦略も考慮し，より包括的な結果を LCA 学会では発表する．

6. 引用文献

1) Shoki Kosai, Natural resource use of gasoline, hybrid, electric and fuel cell vehicles considering land disturbances Volume 166, March 2021, 105256
2) Takuma Watari, Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity, Volume 148, September 2019, Pages 91-103
3) Handbook of Japan's world energy and econnomic statistics
4) IEA, 2017. Energy Technology Perspectives 2017: Catalysing Energy Technology Transformations. OECD, Paris, France.
5) Takuma Watari, Sustainable energy transitions require enhanced resource governance, 3 (2021)
6) Stefan Pauliuk, Global scenarios of resource and emission savings from material efficiency in residential buildings and cars, 8 (20

公募企画セッション

[2-B2] 材料代替効果のための LCA課題

オーガナイザー：田原聖隆（産業技術総合研究所）、醍醐市朗（東京大学）

2022年3月3日(木) 11:00 〜 12:20 B会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-B2-01] 材料代替効果のための LCA 課題

11:00 〜　12:20

©日本LCA学会

公募企画セッション　3 月 3 日（木）11:00〜12:20

材料代替効果定量のための LCA の課題

オーガナイザー：　産業技術総合研究所　田原聖隆
東京大学　醍醐市朗

セッションの趣旨

高強度化による輸送機器用構造材料の軽量化は、輸送機器の燃費向上に寄与する。自動車では、その構造材料をハイテン、アルミニウム合金、マグネシウム合金、CFRP などに代替することにより、軽量化することが検討されている。しかしながら、材料の生産あるいはリサイクルによって誘発される環境負荷と使用時に削減される環境負荷のライフサイクルを通した評価が望まれる。そこで、新構造材料技術研究組合（ISMA）において「新材料の材料代替効果定量技術の開発」のテーマで、自動車のライフサイクルでの環境負荷の最小化を目指すため、材料選択時点において候補材料を比較できる評価手法を現在開発している。さらに、開発した高機能材料の社会実装による効果が材料開発の現場で見える化できたり、材料を変更することによる効果が自動車の設計時に見える化できたりするよう、代替材料を入力することで社会影響等の結果を返すクラウド評価ツールも合わせて開発している。

本セッションでは、現在開発している手法ならびにツールについて報告し、ライフサイクル思考の観点から考慮すべき項目、評価尺度、結果の表現方法について会場にて議論する。

○報告

材料代替効果定量のための LCA 手法の紹介

産業技術総合研究所 田原聖隆

材料代替効果算定ツールの紹介

株式会社ゼロック 松井大輔

○総合討論

司会：産業技術総合研究所 田原聖隆、東京大学 醍醐市朗

【Discussant(予定)】産業技術総合研究所　塚原建一郎、森本慎一郎、畑山博樹、
TCO2　正畠宏一、サステナブル経営推進機構 山岸健　他

公募企画セッション

[2-B3] カーボンニュートラルに向けた森林管理と資源利用

オーガナイザー：菊池康紀（東京大学）

2022年3月3日(木) 13:20 〜 14:40 B会場 (zoom)

Zoomはこちら

[2-B3-01] カーボンニュートラルに向けた森林管理と資源利用

13:20 〜　14:40

©日本LCA学会

カーボンニュートラルに向けた森林管理と資源利用

再生可能資源の一つである森林資源は、樹種によっては数十年掛けて生産されるものであるが、素材やバイオマス原料・燃料として活用可能なものであり、太陽光や風力といった変動性再生可能エネルギーとは異なる特徴をもっている。森林を持続可能とし、適切な管理の下で資源を得るためには、中長期的なビジョンに基づく施業が必要であり、ライフサイクル思考に基づく分析と計画が必須といえる。本企画セッションでは、森林と資源のライフサイクルにまつわる諸課題を整理し、持続可能な管理にむけて必要となる要素を抽出する。

発表予定件数：5 人（10 分×5 人）＋ディスカッション（30 分)、

（住友林業株式会社より講演者)、森林事業の持続可能性と課題（仮）
加用千裕、東京農工大学、日本の森林吸収源の現状と課題
服部順昭、東京農工大学（名誉教授)、林業・林産における持続可能性と課題（仮）
小林謙介、県立広島大学、建築物からみた森林・資源の活用と持続可能性
小井土賢二、森林総合研究所、森林資源の小規模エネルギー利用技術における持続可能性と課題

ディスカッション：(モデレータ） 東京大学　菊池康紀、兼松祐一郎

オーガナイザ：東京大学　菊池康紀 <ykikuchi@ifi.u-tokyo.ac.jp>

公募企画セッション

[3-D2] 循環型社会形成のための指標開発と環境・経済・社会の統合的評価

オーガナイザー：橋本征二（立命館大学）

2022年3月4日(金) 11:00 〜 12:20 D会場 (zoom)

Zoomはこちら

[3-D2-01] 循環型社会形成のための指標開発と環境・経済・社会の統合的評価

11:00 〜　12:20

©日本LCA学会

企画セッション

循環型社会形成のための指標開発と環境・経済・社会の統合的評価

第 4 次循環型社会形成推進基本計画においては、その指標体系が大きく改変され約 120 の指標を用いてその進捗を計測することとなった。同計画では、引き続き検討が必要な課題も合わせて示されたが、主要なものとして、(a)物質ストックの活用を含めたライフサイクル全体での徹底的な資源循環に関する指標、(b)環境・経済・社会の統合的取組に関する指標、(c)指標の国際比較可能性がある。本セッションでは、これらの課題に対応して環境研究総合推進費 3-1902 で行った研究の成果報告を行うとともに、今後の更なる課題等について議論する。

〈報告者〉

橋本征二・松田敏明（立命館大学）／谷川寛樹・山下奈穂（名古屋大学）

「全体概要」「物質フロー・ストックの総合的評価のための指標群の提案と適用」

近藤康之（早稲田大学）／高木重定・中西翔太郎・谷口友莉（みずほリサーチ&テクノロジーズ）

「環境・経済・社会の統合的取組に関する指標と評価手法の検討」

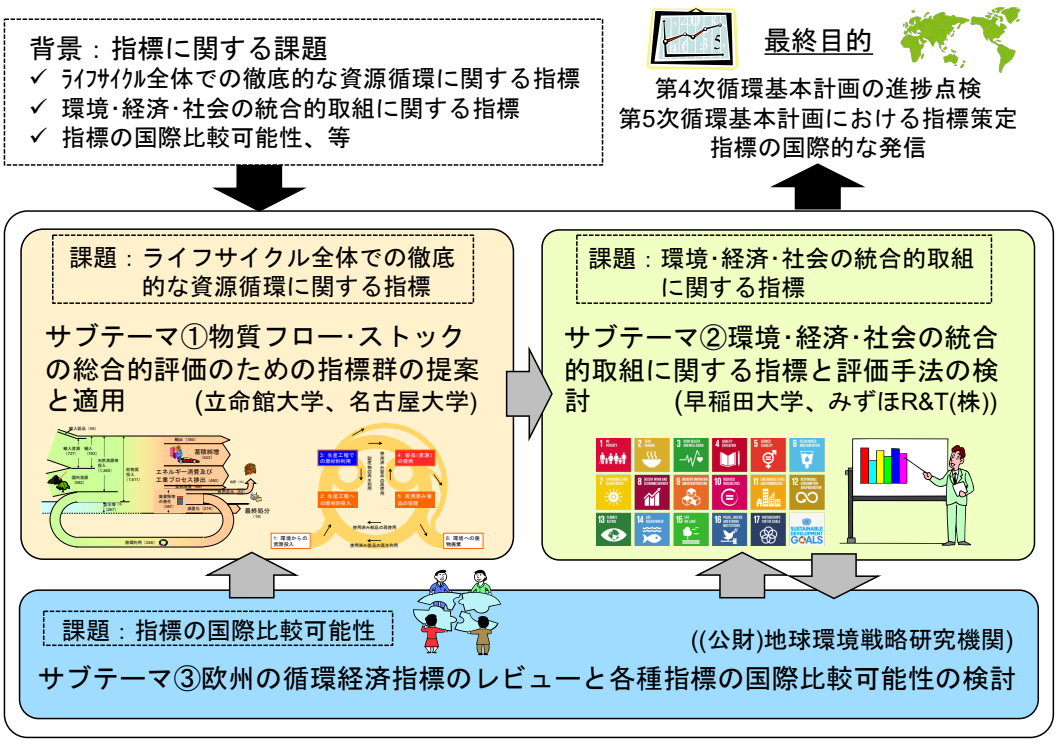
栗生木千佳（地球環境戦略研究機関）

「欧州の循環経済指標のレビューと各種指標の国際比較可能性の検討」

〈討論者〉

本藤祐樹・横浜国立大学

田崎智宏・国立環境研究所



ポスターセッション

[1-P1] ポスターセッション(1)

2022年3月2日(水) 14:40 〜 15:40 P1会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-P1-01] 日本 LCA学会学生交流ネットワーク 2021年度活動報告

*鬼頭 みなみ[1]、前野 啓太郎[1]、大津 太伸[2]、岡部 紘樹[3]、松田 敏明[4] （1. 九州大学、2. 横浜国立大学、3. 東京大学、4. 立命館大学）

[1-P1-02] 電気自動車の使用年数及び走行距離に基づいたリチウムイオンバッテリーの二次利用の可能性

*渡邊 一史[1]、橋本 征二[1] （1. 立命館大学）

[1-P1-03] 日本における廃プラスチックリサイクルの環境･経済･社会影響の統合的評価

*李 佰鑫[1]、近藤 康之[1] （1. 早稲田大学）

[1-P1-04] 居住に関わる3R行動の資源使用量削減効果の評価

*管 哲平[1]、橋本 征二[1] （1. 立命館大学）

[1-P1-05] 南海トラフ巨大地震における災害廃棄物量の推計と広域的仮置場への運搬の検討：関西圏を対象として

*西出 朱里[1]、吉田 英立[2]、谷川 寛樹[2]、橋本 征二[1] （1. 立命館大学、2. 名古屋大学大学院）

[1-P1-06] 電気自動車の需要拡大に伴う鉱物資源の環境・社会影響評価

*垣内 冴郁[1]、伊坪 徳宏[1] （1. 東京都市大学院）

[1-P1-07] 太陽光パネルの普及に伴う廃ガラスフローのシナリオ分析

*堀部 翔[1]、橋本 征二[1] （1. 立命館大学）

[1-P1-08] 小型家電の各種回収方法の効率性

*板垣 翔太[1]、橋本 征二[1] （1. 立命館大学）

[1-P1-09] ポストコロナ社会における航空産業の2050年 CO_2排出削減目標に関する達成経路分析

*鬼頭 みなみ[1,2]、高藪 広隆[3]、南斉 規介[2] （1. 九州大学、2. 国立環境研究所、3. 近畿大学）

[1-P1-10] 食料需要が誘発する農業における水資源への負荷の分析

*月岡 葵[1]、松嶋 そら[2]、加河 茂美[3] （1. 九州大学、2. 九州大学経済学府、3. 九州大学経済学研究院）

[1-P1-11] ビッグデータと人工知能を活用した空調機のエネルギー分析

*杉山 弦太[1]、本田 智則[2]、伊坪 徳宏[1] （1. 東京都市大学大学院、2. 国立研究開発法人 産業技術総合研究所）

[1-P1-12] データ包絡分析を用いた都道府県間における画像診断機器（ CT ・ MRI）の最適配分の検討

*牛島 大悟[1]、中石 知晃[2]、三苫 春香[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）

[1-P1-13] 感染症対策がテレワークのエネルギー消費に与える影響評価

*HAO HUI[1]、吉村 彰大[1]、松野 泰也[1] （1. 千葉大学）

[1-P1-14] 住民の省エネ行動促進のための施策設計に向けた温室効果ガス削減ポテンシャル分析：島根県海士町の例

*兵法 彩[1]、菊池 康紀[1] （1. 東京大学）

[1-P1-15] 天敵製剤と代替餌を使用したナス施設栽培の LCA

*志村 もと子[1]、林 清忠[2]、湯 龍龍[2] （1. 農研機構西日本農業研究センター、2. 農研機構農業環境研究部門）

©日本LCA学会

[1-P1-16] コンテナ船における主要会社による CO_2排出量の推計

*後藤 真直[1]、下津浦 大賀[1]、加河 茂美[1,2] （1. 九州大学、2. 九州大学経済学研究院）

[1-P1-17] 製造業サプライチェーンの環境効率性分析と構造変化が与える影響分析

*高藪 広隆[1] （1. 近畿大学）

[1-P1-18] 脱炭素社会に向けた持続可能な都市構造の分析

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

[1-P1-19] Life Cycle Assessment for recycling food wastes by food banks in China

*季 楽箪[1]、吉村 彰大[1]、松野 泰也[1] （1. 千葉大学）

[1-P1-20] コロナ期におけるライフスタイルの変化が環境と経済に与える影響

*吉住 寛人[1]、中石 知晃[2]、加河 茂美[3] （1. 九州大学、2. 九州大学経済学府、3. 九州大学経済学研究院）

©日本LCA学会

日本 LCA 学会学生交流ネットワーク 2021 年度活動報告

ILCAJ-Student Communication Network Activity report 2021

鬼頭みなみ*[1)]、前野啓太郎 [1)]、大津太伸 [2)]、岡部紘樹 [3)]、松田敏明 [4)]
Minami Kito, Keitaro Maeno, Takanobu Otsu, Hiroki Okabe, Toshiaki Matsuda
[1)]九州大学, [2)]横浜国立大学, [3)]東京大学, [4)]立命館大学
* kito.minami.368@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かつ定量的な評価手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、分離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。

2. 主な活動内容

SCN ではこれまで以下のような活動を行ってきたが、2020 年度以降、新型コロナウイルスの流行により、対面でのイベント・現場見学等は実施できない状況が続いている。新型コロナウイルスの状況次第ではあるが、2022 年度は対面イベントの実施を検討している。

・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。直近の 2019 年度は広島県にある（株）ダイヤエコテック広島廃プラスチック圧縮梱包施設の見学を行った。

・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 Zoom を用いた研究発表会を開催し、計 25 名の学生が研究発表を行った。

・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公演などを通して意見交換会を行う。

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 Meeting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 Meeting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 Meeting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

・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 Researchres Meeting (Ecobalance 会期中)

EcoBalance2016 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などを行う。

・懇親会（随時開催）
研究活動や進路選択、私生活など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. 2021 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（2021 年 9 月 2 日オンライン開催）
本年度の第 13 回ワークショップ 2021 は、9 月 2 日に Zoom を用いたオンラインで開催され、7 研究室から 49 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 13 回ワークショップ 2021 の様子
Zoom にて開催したワークショップには、7 研究室 49 名が参加し、25 件の口頭発表が行われた（図 2）。
本年度は、Zoom のブレイクアウトルーム機能を用いて、パラレルセッションで研究発表会を行った。例年に引き続き、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、学部生が対象）が今年度も引き続き行われ、最優秀発表賞を大賀さん（学部、九州大学）、方さん（修士、東京大学）、優秀発表賞を今田さん（学部、九州大学）、吉澤さん（修士、九州大学）が受賞した。
また、研究発表会の後には、Zoom 上での交流イベントを実施した。新型コロナウイルスの流行により、本年度も対面でのワークショップを開催することはできなかったが、オンラインでも他大学の学生とつながりを持てるように、参加者を少人数グループに分けてイベントを行うなど、工夫して行った。


図 1. ワークショップの様子

3.2. 参加学生からの反応について
ワークショップ終了後、参加者を対象にアンケート調査を実施した。すべての参加者がパラレルセッションでの研究発表会形式の実施は適切であったと回答しており、本年度初めての取り組みであったが、成果があったといえる。パラレルセッションにすることで 1 人当たりの発表時間を確保しつつ、全体の発表時間を短縮することができた点が参加者の満足度を高めた要因であると考えられる。
また、今回のワークショップはオンラインでの開催だったため、参加費・運営費がかからなかった。宿泊を伴わないワークショップであったため、参加のハードルが下がり、学部生～博士課程まで多くの学生が参加することができた。また、開催地までの移動がなかったため、移動に伴う CO_2 排出量を抑制することができた。

電気自動車の使用年数及び走行距離にもとづいた リチウムイオンバッテリーの二次利用の可能性

Possibility of secondary use of lithium-ion batteries based on years of use and mileage of electric vehicles

○渡邊一史*[1)]、橋本征二[1)]
Kazushi Watanabe, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* ce0015kr@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

自動車業界では、CO_2 削減に向けて販売する自動車の脱ガソリン化が進められている。政府の「地球温暖化対策計画(2021 年)」によると、乗用車の新車販売に占める次世代自動車の割合は、2035 年に 100%の目標となっており、HV(Hybrid Vehicle)をはじめ EV(Electric Vehicle)や PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)などの次世代自動車が、ガソリン車に取って代わり普及すると考えられる。このうち、EV と PHEV には電源としてリチウムイオンバッテリー(Lithium-ion Battery, 以下 LiB)が用いられる。LiB は多大なエネルギーを消費して生産されることから、適切にリユースしていくことが有効であるが、それには、将来的な LiB の廃棄量やその状態の把握が必要となる。本研究では使用済み電気自動車に登載されている LiB の状態別の廃棄量の推計を行うとともに、残容量別の結果から、二次利用の可能性について検討した。

2. 方法

2.1 使用年数及び走行距離別の廃棄台数の推計

後述するように、使用済み LiB の残容量は、使用年数と充放電回数の影響を受けることから、EV の使用年数及び走行距離別の廃棄台数を推計した。

2.2 残容量別の使用済み LiB 量の推計

LiB の劣化量について、Xu ら[1)]は以下のモデルを提示している。これは、LiB の時間経過による劣化(式 1)と充放電による劣化(式 2)で構成される。

$$Lt = 1 - \alpha_{sei} e^{-t\beta_{sei} f_d^t} - (1 - \alpha_{sei}) e^{-t f_d^t} \quad (1)$$

$$LN = 1 - \alpha_{sei} e^{-N\beta_{sei} f_{d,1}} - (1 - \alpha_{sei}) e^{-N f_{d,1}} \quad (2)$$

ここで、Lt、LN はそれぞれ 0~1 の間で正規化されており、%表記に直すことで、劣化量を表す。t は時間(秒)、N は充放電サイクル数(-)である。パラメータ値であるα_{sei}、β_{sei}は、 Xu ら[1)]の実験データを用いた。劣化係数である関数f_d^tおよび$f_{d,1}$も、同様に実験データを用いて算出したが、一部条件である使用温度は 20 度とし、電池の使用範囲は最大容量に対して、25%～85%と設定した。また、バッテリー最大容量は 40kWh とした。EV の使用年数及び走行距離別の廃棄台数に、上記で求めた劣化量を乗じることで、残容量別の使用済み LiB 量を推計した。

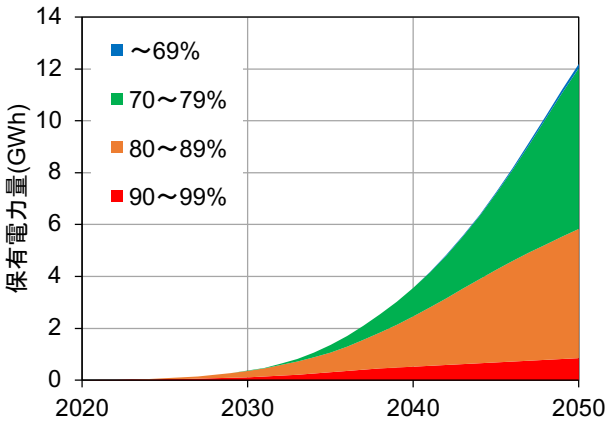


図 1 残容量別の使用済み LiB 量の推計結果

3. 結果と考察

図 1 に、東京主税局「自動車関連税制に関する税収シミュレーション等調査」(2021)における車両の電動化進展シナリオにもとづき、今後の残容量別の使用済み LiB 量(初期の保有電力量で表記)を推計した結果を示す。2030 年以降廃棄量は大きく増大し、残容量が 70～79%、80～89%の使用済み LiB 量がほとんどを占めると推計された。通常の乗用車の使用年数では、主に 70～79%の残容量で廃棄されることになるが、短い寿命で廃棄される乗用車で 80%以上の残容量となった。

使用済み LiB のうち、90%程度の高容量のものは、EV への再使用が有用と考えられる。一方、残容量が 70～89%の使用済み LiB は、再エネの蓄電池や、商業施設などの非常用電源の蓄電池としての活用が考えられる。我が国における蓄電システムのこれまでの累積導入規模は、再エネ併設・系統用で 1.2GWh、家庭用で 2.4GWh、業務・産業用で 6.0GWh 程度であるが[2)]、図 1 で推計された使用済み LiB 量は、これらと比較可能な量となった。

参考文献

1) Xu, B., et al.: Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment, IEEE Transactions on Smart Grid, 9(2), 1131-1140, 2018
2) 経済産業省 : 第 1 回定置用蓄電システム普及拡大検討会、資料 5 蓄電システムをめぐる現状認識、2020

日本における廃プラスチックリサイクルの環境・経済・社会影響の統合的評価

Integrated Assessment of Environmental, Economic, and Social Impacts of Waste Plastic Recycling in Japan

○李佰鑫*[1)]、近藤康之[2)]
Baixin Li, Yasushi Kondo
1) 早稲田大学
* libaixin@akane.waseda.jp

1. はじめに

中国では、2017 年末までに生活由来の廃プラスチック（以下、廃プラ）の輸入を禁止した。日本の主要な輸出国・地域では、廃プラの輸入に関する許可基準の厳格化が進められている。そのため、日本国内での廃プラ回収・処理の検討が重要になっている。

本研究は、日本から輸出されていた廃プラを国内でリサイクルすることにより生じる環境、経済、社会影響を、産業連関分析を応用して統合的に評価した。

2. 研究方法

本研究は、主に平成 27 年（2015 年）産業連関表および付帯表[1)]、3EID[2,3)]、容器包装リサイクル協会資料[4)]を用いて、リサイクルする産業部門・方法の異なるシナリオ（S1–S5）と単純焼却および埋立を行うベースシナリオ（S0）を設定し、比較して評価した。S1–S5 は、5 つの部門（銑鉄、石油製品、化学繊維、プラスチック製品、自家発電）で、コークス炉化学原料化、油化、マテリアルリサイクル、RPF 化を行うシナリオである。さらに、S0 の単純焼却をエネルギー回収を伴う焼却に置き換えたシナリオ S6 も評価した。

廃プラのリサイクルにより生産された二次素材が、リサイクルを行う部門の投入する一次素材を代替すると仮定[5-6)]して、投入係数と CO_2 排出係数を算定した。産業連関分析の標準的なモデルを用いて、各シナリオ下での環境（国内 CO_2 排出量、世界 CO_2 排出量）、経済（所得）、社会（雇用者数、輸入額）に係る指標を算定した。世界 CO_2 排出量の算定には、国産技術仮定を採用した。

各シナリオを S0 と比較して、雇用の維持、海外依存度の低減、所得の維持という制約条件の下で、国内 CO_2 排出削減量の最大化を基準として、統合的評価を実施した。

3. 結果と考察

図 1 は、指標ごとに最良の値で割って基準化した結果を示す。図示された指標値が大きいほど、その指標で測ったパフォーマンスが優れていることを意味する。また、図示された指標値が負値のときは、ベースシナリオよりも劣ることをあらわす。

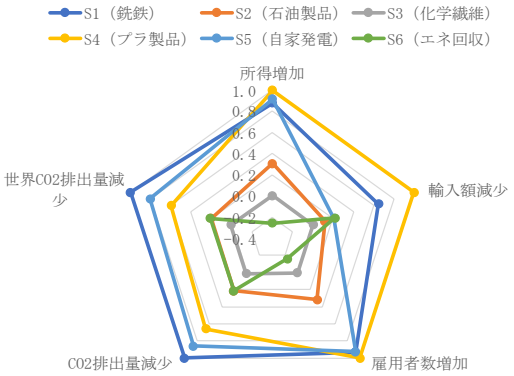


図 1 リサイクルシナリオの比較

本研究の評価基準に従ってシナリオを比較すると、S1（銑鉄）が 5 つシナリオの中で最良である。S2（石油製品）と S3（化学繊維）は、輸出していた廃プラの一部しか受け入れられない。S4（プラ製品）は社会・経済面でのパフォーマンスに優れている。

4. 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（JPMEERF20193002）により実施された。

5. 引用文献

1) 総務省：平成27年（2015年）産業連関表, (2019)
2) 南斉規介：3EID, 国立環境研究所, (参照2021-9-15)
3) Nansai, K., Fry, J., Malik, A., Takayanagi, W., Kondo, N: Resour. Conserv. Recycl., 152, (2020), pp.104-525
4) 日本容器包装リサイクル協会: “プラ製容器包装再商品化手法に関する環境負荷等の検討”, (2007)
5) 幸怡媛，近藤康之：日本LCA学会研究発表会, (2020), pp. 276–277
6) 李勤萱，近藤康之：日本LCA学会研究発表会, (2021), pp. 24–25

居住に関わる 3R 行動の資源使用量削減効果の評価

Evaluation of resource use reduction effect of 3R behaviors related to residence

○管　哲平*[1)]、橋本征二[1)]
Teppei Kan, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* ce0003he@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

大量生産・消費・廃棄型の線形経済から、3Rを基本とした循環経済への移行が求められている。循環経済は、資源効率の向上を目指すものであるが、その手段としての3Rには、製品の使用回避、製品の共有、製品のリユース・長期活用、製品の省資源化、容器包装の省資源化、生産工程の省資源化、再生資源の活用等がある[1)]。本研究では、居住に関わるこれらの3R行動が、居住に関わる資源使用量にどのような影響を与えてきたかを評価した。

2. 方法

資源効率の構造分解式[1)]をもとに、居住に関わる資源使用量を下式のように要因分解した。右辺前半が住宅の建設に関わる資源使用量、後半が住宅のエネルギー使用に関わる資源使用量の要因分解である。

$$RU_{C+E} = RU_C + RU_E$$
$$= P \times \frac{HU_a}{P} \times \frac{UT_a}{HU_a} \times \frac{HC_a}{UT_a} \times \frac{HC_w}{HC_a} \times \frac{CM_w}{HC_w} \times \frac{RU_c}{CM_w}$$
$$+ P \times \frac{EC}{P} \times \frac{EC_w}{EC} \times \frac{RU_E}{EC_w}$$

ここで、RU_{C+E}:居住に関わる資源使用量(t/y)、RU_C::住宅の建設に関わる資源使用量(t/y)、RU_E:住宅のエネルギー使用に関わる資源使用量(t/y)、P:人口(人)、HUa:使用中の住宅の延床面積(㎡)、HTa:住宅の総延床面積(㎡)、HCa:住宅の着工床面積(㎡/y)、HCw:着工住宅の重量(t/y)、CMw:着工住宅に関わる物質使用量(t/y)、EC:住宅のエネルギー使用量(kWh/y)、ECw:住宅のエネルギー使用に関わる物質使用量(t/y)である。これらの変数について、各種統計データを用いるとともに、一部推計を行った。

要因分解式の右辺前半第 1 項は人口、第 2 項は 1 人あたりの住宅床面積、第 3 項は床面積に着目した住宅の稼働率の逆数、第 4 項はおよそ住宅の寿命の逆数、第 5 項は新規着工床面積当たりの建設資材の重量、第 6 項は建設資材重量当たりに必要となる原材料の物質量、第 7 項は建設資材の生産に必要な原材料の物質量に占める天然資源の割合を表す。また、右辺後半第 1 項は人口、第 2 項は 1 人あたりのエネルギー使用量、第 3 項は 1 単位のエネルギーの生産に必要な物質量、第 4 項はエネルギーの生産に必要な物質量に占める天然資源の割合を表す。

要因分解式の右辺の各項が左辺にどれほど寄与しているかを complete decomposition model[2)]を用いて算出した。

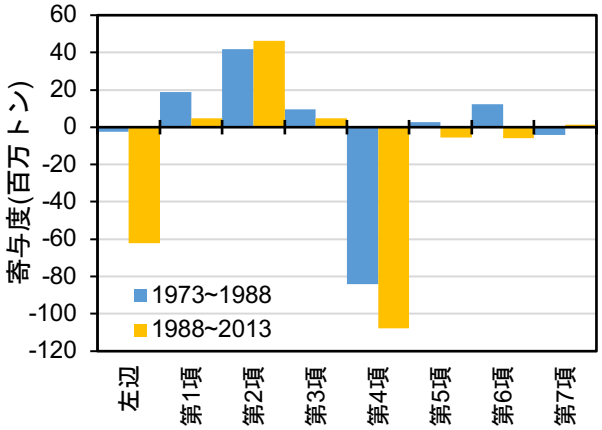


図 1 住宅の建設に関わる各変数の寄与度(1973～2013 年)

3. 結果と考察

住宅の建設に関わる資源使用量について、1973 年から 2013 年の変化に対する各変数(要因分解式右辺前半の各項)の寄与度の暫定的な推計結果を図 1 に示す。この間、住宅の建設に関わる資源使用量は変動しているが、1973～1988 年ではあまり変化がなく、1988～2013 年では約 60 百万トンの削減と推計された。この間、右辺前半第 4 項(住宅の長寿命化)の寄与度が大きくマイナスとなっており、これが住宅の建設に関わる資源使用量の削減に寄与した結果となった。これは、言い換えれば新規住宅着工量の減少が寄与していることになる。一方、第 2 項(1 人あたり住宅床面積の増大)などは資源使用量を増加させる要因になってきたと考えられる。第 6 項、第 7 項については推計上の課題もあり、今後改善を行っていく必要がある。また、要因分解式右辺後半の住宅のエネルギー使用に関わる資源使用量も含めた全体の結果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(19H04329)及び環境研究総合推進費(JPMEERF20193002)による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

1) 橋本征二：情報技術活用による 3R の推進・資源効率の向上と労働力不足・労働環境改善への対応、廃棄物資源循環学会誌、29(3)、pp. 195-201、2018
2) Sun, J.W.: Changes in energy consumption and energy intensity: A complete decomposition model, Energy Economics, 20, pp.85-100, 1998

南海トラフ巨大地震における災害廃棄物量の推計と広域的仮置場への運搬の検討：関西圏を対象として

Estimation of the amount of disaster waste in Nankai megathrust earthquake and examination of transportation to a wide-area temporary storage sites: A case study of Kansai area

○西出朱里*[1)]、吉田英立[2)]、谷川寛樹[2)]、橋本征二[1)]
Akari Nishide, Hidetatsu Yoshida, Hiroki Tanikawa, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学　2) 名古屋大学
* ce0009rk@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

南海トラフ巨大地震における災害廃棄物量は、最大で東日本大震災の約 11 倍[1)]と推計されており、仮置場の確保と迅速な処理が課題となっている。石川ら[2)]は、関西圏において仮置場を広域的に確保するシナリオを府県単位で検討しているが、実際にはより細かい市区町村間での連携について検討する必要がある。本研究では、関西圏を対象に建築物の被害による災害廃棄物発生量を、発生原因(地震・津波)、資材、市区町村別に推計した。また、仮置場の必要面積と利用可能面積を市区町村ごとに推計し、仮置場が大きく不足すると想定される市区町村について、広域的に仮置場を確保することを検討した。具体的には、運搬先との距離とかかる費用を推計することにより、関西圏内の仮置場への輸送の最適化を行った。

2. 方法

2.1 市区町村別災害廃棄物量の推計

関西圏の建物マテリアルストック(木造・非木造別)[3)]の更新データ、震度予想分布データ、津波浸水想定データを GIS 上で重ね合わせ、各メッシュのマテリアルストック量に、当該メッシュの震度・浸水における建物倒壊率(木造・非木造別)を掛け合わせ、建物の倒壊に伴う災害廃棄物量を推計した。

2.2 仮置場の検討

仮置場の必要面積は、下式を用いて市区町村ごとに算出した。建物の解体工事には 2 年を要し、発災後 3 年で処理が完了するものとした。また、発災後の半年間は処理が行われないものとした。

・仮置場必要面積(t)
＝解体工事等により必要となる累積仮置場面積(t)
－ 処理により不要となる累積仮置場面積(t)
・必要となるもしくは不要となる累積仮置場面積(t)
＝累積災害廃棄物発生量(t)もしくは処理量(t)
÷見かけ比重÷積上高さ×(1＋ 作業スペース割合)
・累積災害廃棄物発生量(t)
＝災害廃棄物発生総量／24×t (0≦t≦24)
・累積災害廃棄物処理量(t)
＝1ヶ月の災害廃棄物処理量×(t - 6) (7≦t≦36)

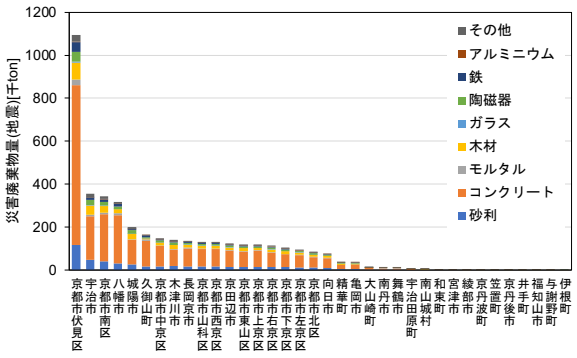


図 1　京都府における災害廃棄物量(地震)の推計結果

2.3 運搬の検討

輸送費の最小化を目的関数とした線形計画モデルにより、最適な広域仮置き輸送量と輸送費の推計を行った。ここで、仮置場に余剰のある市区町村で仮置き可能量まで受け入れるものとした。なお、各自治体の仮置場は各自治体の役所にあるものと仮定した。各自治体の役所間の輸送距離は Google マップにより道路距離で算出した。

3. 結果と考察

本要旨では災害廃棄物量の推計結果を示す。例として、京都府で発生する災害廃棄物量(地震)は、計 414 万トンと推計された。図 1 は、これを市町村別、資材別に示したものである。市区町村別では、京都市伏見区が一番多く、次いで宇治市、京都市南区、八幡市等となった。京都市の一般廃棄物量は約 40 万トン/年であるが、伏見区だけでこれを大きく超える数値となった。京都府北部地域での発生量は少なかった。また、資材別ではコンクリートが約 63%と半数以上を占め、次いで砂利、木材等が多い結果となった。仮置場や運搬の検討結果については学会当日に報告する。

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) 石川湧裕ら：第 13 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、pp.344-345、2018
3) Tanikawa,H. et al: Journal of Industrial Ecology, 19(5), pp.778-791, 2015

電気自動車の需要拡大に伴う鉱物資源の環境・社会影響評価

Environmental and Social Impacts assessment caused by the Growing Demand for Electric Vehicles

○垣内冴郁*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Sayaka Kakiuchi, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学
* g2183105@tcu.ac.jp

1. はじめに

世界の温室効果ガスの排出量のうち、自動車、トラック、バスなどあらゆる形態の道路交通からのガソリンやディーゼル燃焼による輸送 CO_2 が約 16%を占め、その内、旅客輸送は全体の 60%を占める[1)]。

また Electric vehicle(以下 EV)における LCA(Life Cycle Assessment)では、製造段階までの環境負荷が大きい[2)]。EV 数 は 2030 年に 2 億 3000 万台に達するという予測がされており、欧州を中心に 2030 年を目途にガソリン車・ディーゼル車への規制が予定されている。EV シフトによる各部品の需要拡大は、原材料調達の段階に多大な影響を与えると予想されている。

現在の EV 製造技術においてレアメタルは欠かせない存在であるが、レアメタルの利用は大きなリスクを抱えている。特にリチウムイオン電池に使われるコバルトは、コンゴ民主共和国(コンゴ民)から多くの調達がされており、児童労働、作業の危険性などの社会的リスクが報告されている[3)]。また、EV へのシフトは社会的リスクの深刻化に繋がる可能性があるだけでなく、採掘に伴う自然資本の消失も懸念されている。このように、バッテリーで利用されるレアメタルの需要拡大は、自然・人間・社会資本の悪化に寄与し得る。2015 年あたりから EV と社会影響に関する論文数は増えてきているが、これら全ての影響を適切に評価する手法は見当たらない。

2. 研究目的

本研究では EV シフトによる将来への環境影響と、それに伴う児童労働を代表とした社会影響を E-LCA(Environmental-LCA)と S-LCA(Social-LCA)の手法を用いて考察することを目的とする。また、2012 年のリオ+20 で提示された新国富指標を用いて、経済学による人的資本を算出し、包括的な EV シフトによるトレードオフの関係を考察していく。

3. 研究方法

3.1 環境影響評価

ISO14040 に沿い、インベントリ分析と影響評価を行う。インベントリ分析では、内燃機関(ICE)について自動車 LCA の既存研究をベースに LCA ソフトウェア SimaPro に入力し解析をする。また各業界専門家へのヒヤリングや多地域間産業連関表 MRIO を用いて EV のインベントリを作成し、需要増加による環境・社会分析を行う。

3.2 社会影響評価

データベースと解析については、S-LCA の手法として注目されている SHDB(Social Hotspots Database)と PSILCA(A Product Social Impact Life Cycle Assessment)の 2 つを用いる。

今回は SHDB を使用した既存文献[4)]をベースに容量 52.9kWh、質量 314.3kg のリチウムイオン電池パックについて算定を行った。(表 S1)また、既存文献から(1)「中国で生産(CN-focused production)」・(2)「ドイツで生産(DE-focused production)」・(3)「原材料の調達をリスクが低い国から輸入する、責任ある調達シナリオ(Responsible raw materials)」の 3 つのシナリオを参考にした。原材料は産出国の上位 3 国に割り当てられており、現在におけるサプライチェーンを仮想している。この 3 シナリオに追加して、(4)「アメリカで全てのサプライチェーンを網羅した(USA- focused production)」場合と、(5)「2021 年に確認できたアメリカで生産・製造が可能なサプライチェーンシナリオ(USA(NREL) - focused production)」(表 S2)の計 5 つを算出した。またアメリカのサプライチェーンシナリオを作成するにあたって、NREL の NAATBatt Lithium-Ion Battery Supply Chain Database[5)]を参照し、現在のアメリカにおいてのサプライチェーンを確認した。

4. 研究結果

4.1 シナリオ 1,2,3 の算定結果

算定結果として貧困、児童労働、汚職、職業上の有害物質と危険の 4 つのリスクカテゴリについて取り上げる。リチウムイオン電池のサプライチェーン構成要素である、原材料、コンポーネント、セル生産、バッテリーパックの 4 段階に沿って、それぞれのシナリオごとに表示したのが図 1 になる。(児童労働以外の図は SI の図 S1 を参照)全体として中国に生産の焦点をおい

たサプライチェーンはリスク時間が高い。図 1 よりシナリオ 1,2 を比べてみると、セル製造では約 15 分の 1、バッテリーパック製造では約 20 分の 1 に児童労働のリスク時間が抑えられている。つまり、中国でセルとバッテリーパックを生産するよりも、ドイツで生産する場合では全体として約 3 割以上のリスク時間を減らすことができる。

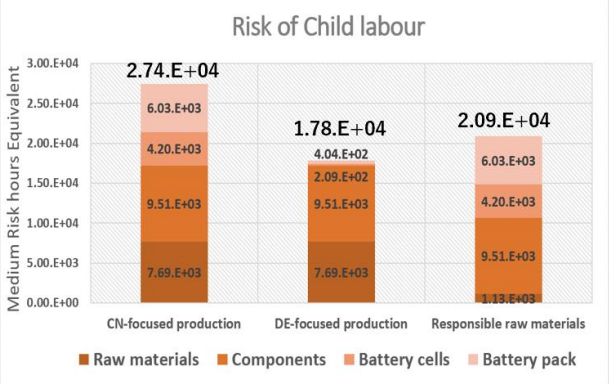


図 1 児童労働リスク時間（シナリオ 1, 2, 3）

またシナリオ 2,3 を比べてみると原材料調達段階において大きな差がみられた。単純に生産量が多い国々からの調達ではなくリスク時間が低い国から調達することにより、原材料段階におけるリスク時間が約 7 分の 1 に抑えられる。他のリスクカテゴリにも同様の傾向がみられ、セルとパックの生産を中国からドイツにシフトすることと、原材料の調達をリスクの低い国から行うことによって、トータルのリスク時間は大幅に削減できると考えられる。

4.2 シナリオ 4,5 の算定結果

こちらについても 4 つのリスクカテゴリについて取り上げ、サプライチェーン構成要素 4 段階に沿って、それぞれのシナリオごとに表示した。(図 2) (SI の図 S2 を参照)

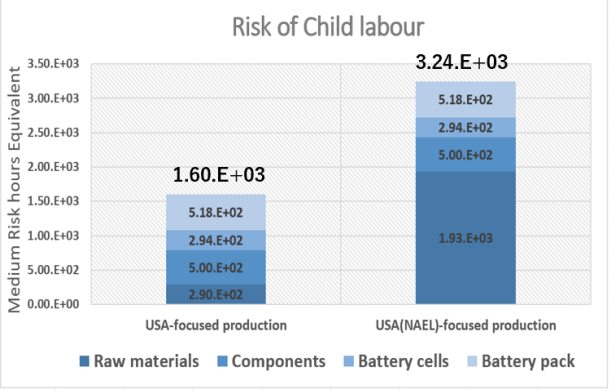


図 2 児童労働リスク時間（シナリオ 4, 5）

シナリオ 4,5 のリスク時間結果は、シナリオ 1,2,3 と比べると大きく減った。つまり、サプライチェーン全体をリスク時間の低い国で一貫して行うことによりリスク時間も小さくなる。また、シナリオ 4 と 5 を比べてみると原材料調達段階において、リスク時間に大きな差が出た。

5. まとめ

責任ある原材料調達を行うことによって、大きくリスク時間を減らせることが分かった。また、アメリカに注目したサプライチェーンシナリオの結果は中国・ドイツ・責任ある調達のいずれのシナリオよりも、リスク時間が低かった。しかし、アメリカのシナリオで比べると原材料調達におけるシナリオの差異により、大きな差がみられ、これにより、重大なリスクが銅やグラファイト、マンガン、コバルトといった原材料調達の段階に起因することが確認できた。

6. 課題と今後の展望

今回は既存文献をベースにシナリオを追加し検討を行った。課題として、SHDB にはコンゴ民のデータは存在していないので、隣国であるザンビアに変更し算定を行っている。算定結果値が、どれ程乖離しているかは検討の余地があり、今回の結果はコバルト生産の社会背景をできるだけ近似した値を表している。次に想定シナリオについてである。EV シフトには多くのリチウムイオン電池が必要であり、原材料を他国から輸入する必要性や価格を優先した取引が行われる可能性がある。

今後は既存研究や E-LCA で作成するインベントリから ICE の社会影響評価を行い、また今回算定結果をもとに EV の社会的リスクを算出していく。

7. 引用・参考文献

1) Our World in Data,:“Sector by sector; where do global greenhouse gas emissions come from? ”(2020)
2) Goldman Sachs:“ New era in Co2 regulation: EVs to be tested across life cycle, not only on running performance”(2019)
4) Amnesty International: “THIS IS WHAT WE DIE FOR”(2016)
5) Thies C. , Kieckhäfer K., Spengler T.S. ,Sodhi M.S., 26th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, LCE 2019, “Assessment of social sustainability hotspots in the supply chain of lithium-ion batteries”(2019)
6)NREL: “NAATBatt Lithium-Ion Battery Supply Chain Database”入手先<https://www.nrel.gov/transportation/li-ion-battery-supply-chain-database.html>(参照 2022-1-09)

Supporting Information

表 S1_算定条件

算定対象	リチウムイオン電池パック
機能単位	1 個(容量 52.9kWh、質量 314.3kg)
算定ソフト	Sima Pro9.1.0.8
リスクカテゴリ (一部抜粋)	Poverty, Child Labor, Occ Tox& Haz,Corruption
手法	Social Hotspots 2018 All Factors

表 S2_算定条件

段階	プロセス	サプライチェーン構成 アメリカ国内のみ	2021 年現在
バッテリーパック	・バッテリーパック製造	USA100%	USA100%
	・パックコンテナ製造	USA100%	USA100%
	・BMS 製造	USA100%	USA100%
バッテリーセル	・セル生産	USA100%	USA100%
コンポーネント	・負極集電体製造	USA100%	USA100%
	・負極活物質製造	USA100%	USA100%
	・セパレータ製造	USA100%	USA100%
	・電解液の製造	USA100%	USA100%
	・正極活物質製造	USA100%	USA100%
	・正極集電体製造	USA100%	USA100%
	・セル容器製造	USA100%	USA100%
原材料	・銅の生産	USA100%	CL56%,PE25%,CN19%
	・グラファイト生産	USA100%	CN76%,IN15%,BR9%
	・ポリエチレンの生産	USA100%	USA100%
	・炭酸リチウムの生産	USA100%	USA100%
	・硫酸ニッケル製造	USA100%	USA100%
	・硫酸コバルトの生産	USA100%	USA100%
	・硫酸マンガン製造	USA100%	USA100%
	・アルミニウムの生産	USA100%	ZA53%,CN25%,AU22%
	・シリコン製造	USA100%	CN83%,RU9%,CA8%
		USA100%	USA100%

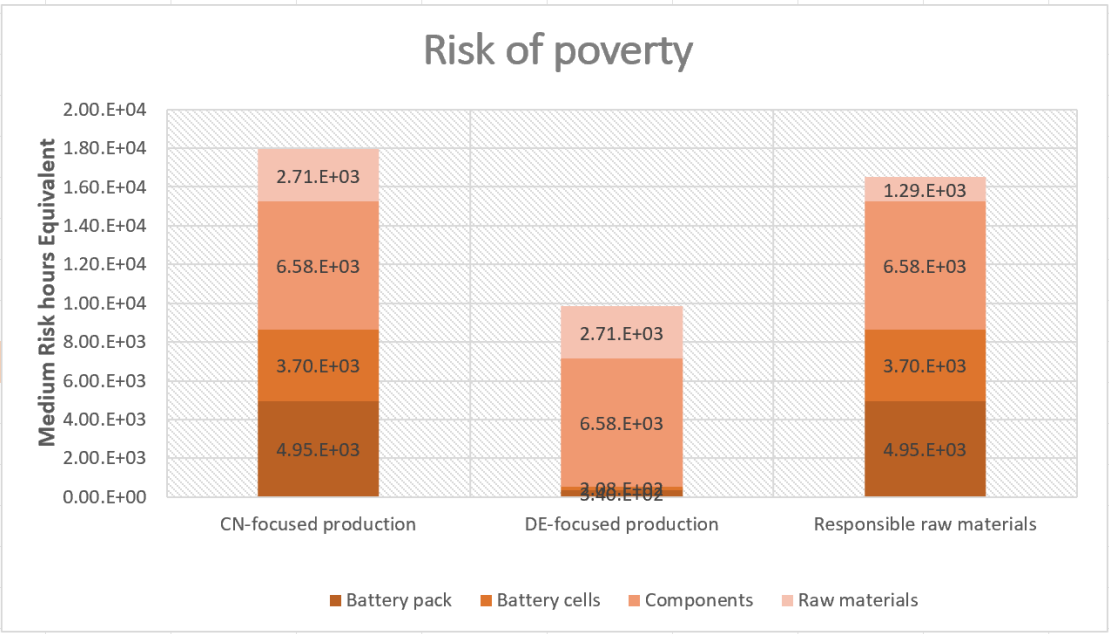


図 S1.1_中国・ドイツ・責任ある調達の算定結果(Risk of poverty)

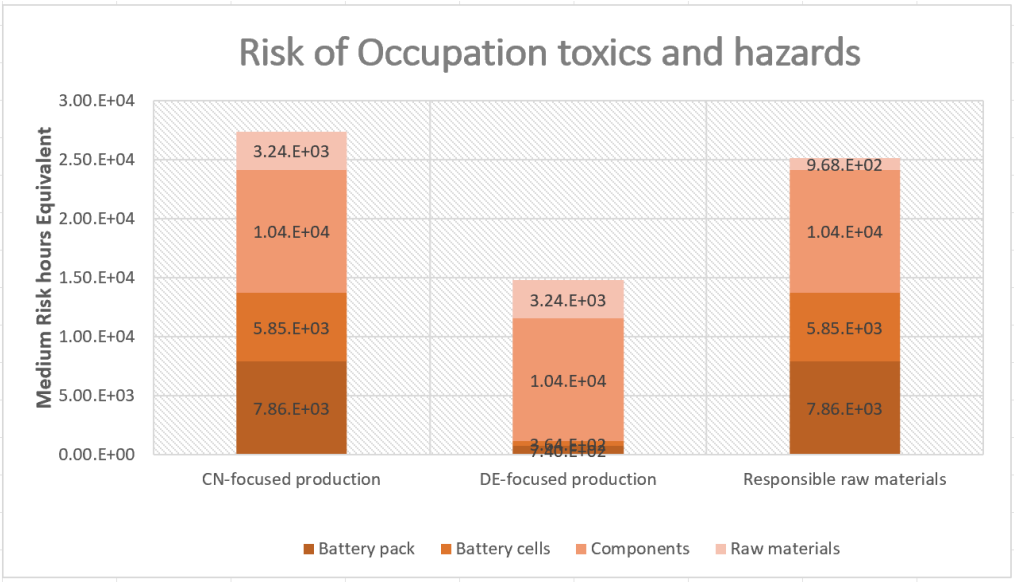


図 S1.2_中国・ドイツ・責任ある調達の算定結果(Risk of occupation toxics and hazards)

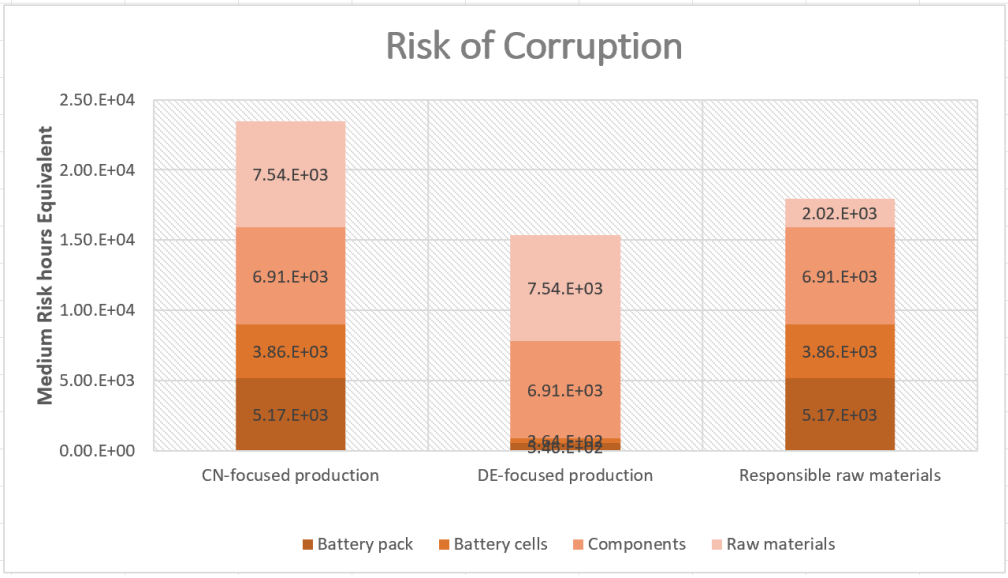


図 S1.3_中国・ドイツ・責任ある調達の算定結果(Risk of corruption)

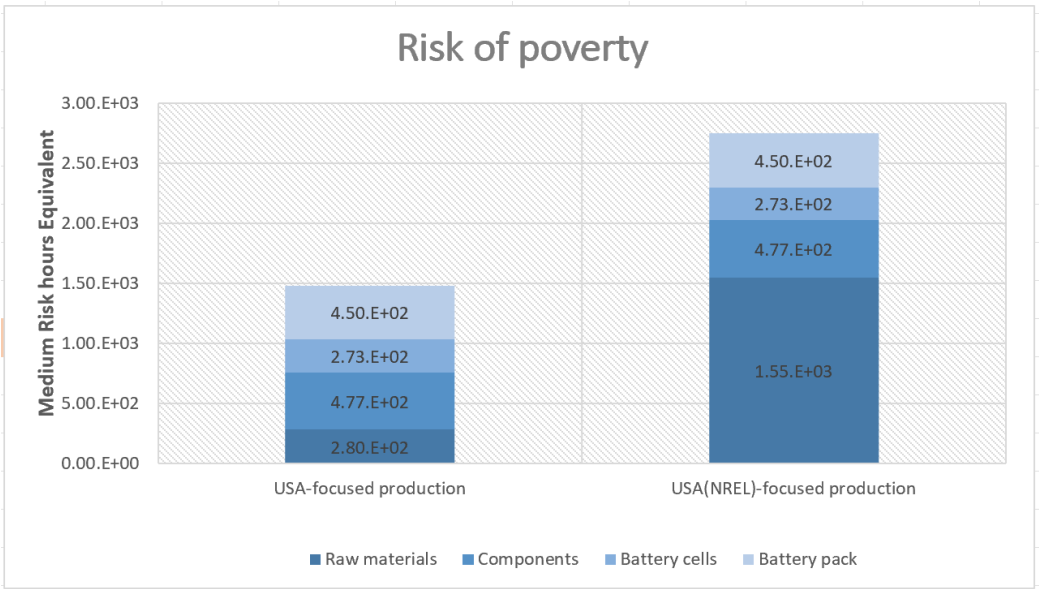


図 S2.1_アメリカ 2 シナリオの算定結果(Risk of poverty)

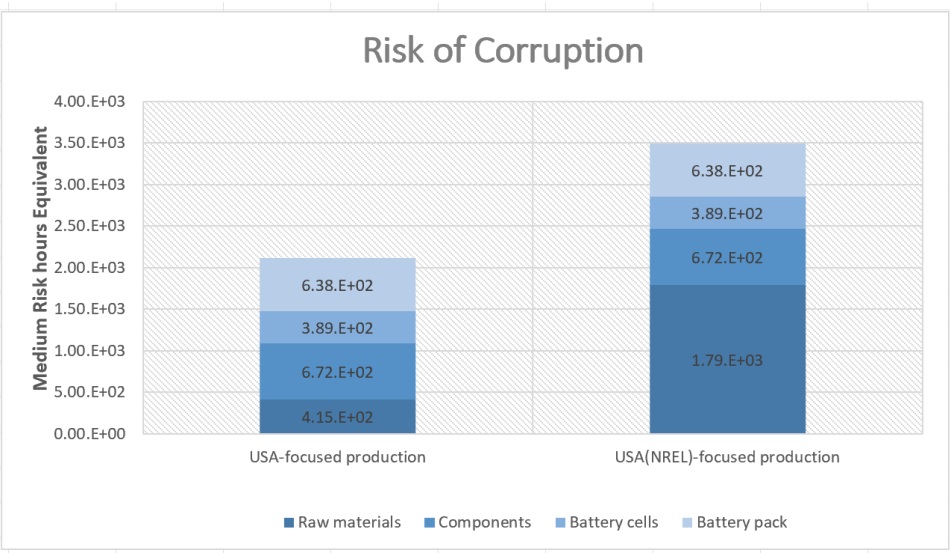


図 S2.2_アメリカ 2 シナリオの算定結果(Risk of corruption)

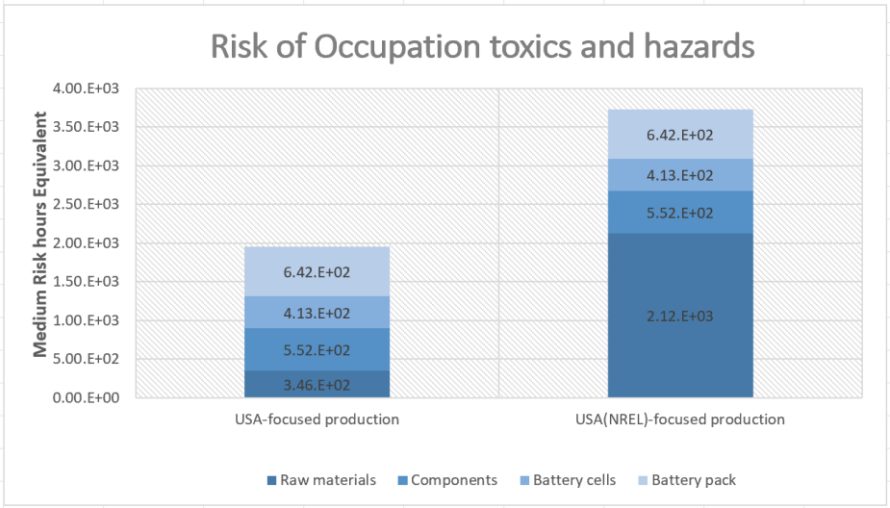


図 S2.3_アメリカ 2 シナリオの算定結果(Risk of occupation toxics and hazards)

太陽光パネルの普及に伴う廃ガラスフローのシナリオ分析

Scenario analysis of glass scrap flows with the spread of solar panels

○堀部翔*[1)]、橋本征二[1)]
Sho Horibe, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* ce0011fk@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

太陽光発電(PV)の導入が大きく進んできたことを受け、PV パネルの大量廃棄に向けた処理体制の構築が必要となっている。PV パネルのリサイクルにはモジュールの重量の約 6 割[1)]を占めるガラスのリサイクルも課題となるが、産業廃棄物の「ガラスくず、コンクリートくず及び陶磁器くず」は、最終処分の比率・量ともに産業廃棄物全体の 3 番目と高く[2)]、PV パネル由来の廃ガラスの増加は、最終処分量にも一定の影響を与える可能性がある。

本研究では、PV パネルの普及を考慮して将来のガラスのマテリアルフローを推計し、ガラスの最終処分量へ与える影響等を検討した。ガラスのマテリアルフローについては、いくつかの研究報告があるが、ガラス製品全般を取り扱ったものは 2013 年を対象とした分析[3)]のみであり、将来の廃ガラスのフローを取り扱ったものは見られない。

2. 方法

2.1 ガラスの物質フロー

推計する物質フローのプロセスは、生産、輸出・輸入、使用、廃棄、有効利用・処分からなる。製品の品目は「生産動態統計 資源・窯業・建材統計編」をもとに設定した。

2.2 1970～2020 年の推計方法とデータ

生産量、輸出・輸入量の推計には、「生産動態統計 資源・窯業・建材統計編」ほか各種統計資料を用いた。また、廃棄量は、製品の品目ごとにワイブル分布を設定し推計した。有効利用・処分は、先行研究[3)]を基に各種係数を設定し推計した。

2.3 2021～2050 年の推計方法とデータ

将来の PV パネルの販売量については、いくつかのシナリオを設定した。PV パネル以外の製品の生産量、輸出・輸入量については、2.2 の推計値に対し指数あるいは対数関数による近似を行い、2021 年から 2050 年までの推移を推計した。

3. 結果と考察

太陽光発電協会「JPEA PV OUTLOOK 2050」(2020)における PV 導入量最大化ケースを用いた際の 2020 年から 2050 年までのガラス需要量の推計結果を図 1 に、廃ガラス発生量の推計結果を図 2 に示す。

図 1 について、PV 用板ガラスの需要量は増大傾向、それ以外の品目の需要量は減少傾向になるものと推計された。ガラス需要量全体に占める PV 用板ガラスのシェアは今後増大し、2050 年にはガラス需要量全体の 20%程度となることが示唆された。

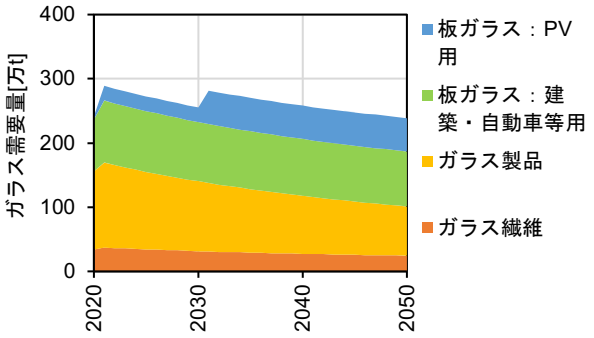


図 1　ガラス需要量の推計結果

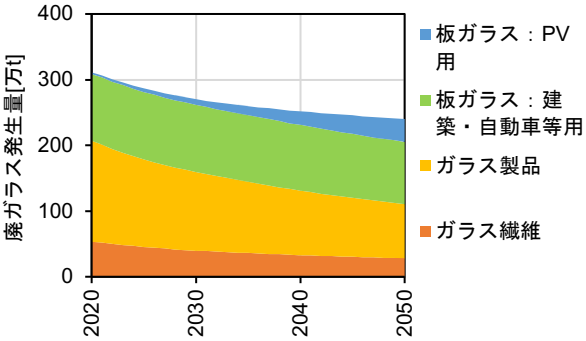


図 2　廃ガラス発生量の推計結果

図 2 について、廃ガラス発生量は全体としては減少していくものの、廃 PV 用板ガラスの発生量は増加していくものと推計された。廃 PV 用板ガラスのシェアは、当面ガラス需要量ほど大きくないものの、2050 年には 15%程度になることが示唆された。

PV パネルの普及はガラスの物質フローに一定の影響を与える可能性があることから十分な対応が必要である。

謝辞：本研究は、環境研究総合推進費(JPMEERF20193002)及び科学研究費補助金(19H04329)による成果である。

参考文献

1) 環境省：太陽光発電設備のリサイクル等の推進に向けたガイドライン第二版、2018
2) 環境省：産業廃棄物排出・処理状況調査報告書令和元年度速報値、https://www.env.go.jp/recycle/waste/sangyo.html、2022 年 1 月 10 日アクセス
3) 環境省：マテリアルリサイクルによる天然資源消費量と環境負荷の削減に向けて 資料編(2/2)、2016

小型家電の各種回収方法の効率性

Efficiency of various collection methods for small home appliances

○板垣翔太*[1)]、橋本征二[1)]
Syota Itagaki, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* ce0000er@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律(小型家電リサイクル法)が施行されて以降、小型家電の回収量や回収実施市町村数は着実に増加してきたが、更なる回収量の増加や未実施市町村における実施促進が課題とされ、市町村における小型家電リサイクルの「改善方策検討の手引き」や「費用便益分析ツール」が作成・公表されている[1)]。費用便益分析を実施する市町村も増えているが、その結果は必ずしも公表されておらず、各種回収方法の効率性に関する情報は十分とは言えない。本研究では、一定数の自治体を対象に、小型家電の各種回収方法の回収費用を推計し、その効率性を比較検討した。

2. 方法

2.1 効率性の評価方法

本研究では、効率性を以下で定義した。

小型家電の回収量 / 小型家電の回収費用 (t/円)

これは、1 円あたりどれだけの使用済み小型家電を回収できているかを示すものである。

2.2 対象とする回収方法と市町村

本研究では、主な小型家電の回収方法として、ボックス回収、ステーション回収、ピックアップ回収、委託回収を対象とした。対象市町村については、近畿地方において、上記の回収方法で小型家電の回収を行っている市町村のうち、1 人当たりの回収量が異なる市町村をそれぞれ 3～5 選定した。本研究では、これらの市町村に対して回収量と回収費用に関する聞き取り調査を行った。

2.3 回収費用の推計方法

回収費用は、①収集運搬人件費、②収集運搬燃料費、③収集運搬車両減価償却費、④各回収方法に関わる費用、⑤小型家電処理費で構成される。

①については、収集運搬を行う職員の年収に収集運搬を行う年間労働時間の比率を乗じて推計した。②については、収集運搬時の車両を設定し、収集ルートから走行距離・必要燃料量を求め、燃料の単価を乗じて推計した。③については、車体の購入費を当該車両の平均寿命で除し、これに年間使用時間の比率を乗じて推計した。なお、①～③について、複数のごみを同時に収集運搬している場合は各ごみの重量比で按分して推計した。

④のうち、ボックス回収については、回収ボックスの減価償却費がある。これは、回収ボックスの総購入費(ないしは製作費)を回収ボックスの寿命(15 年と仮定)で除して推計した。ステーション回収については、ステーション回収備品の減価償却費があり、ボックス回収と同様の考え方で推計した。ピックアップ回収については、ピックアップ人件費がある。これは、ピックアップを行う職員の年収にピックアップを行う年間労働時間の比率を乗じて推計した。⑤については、回収した小型家電を売却した場合には負値となる。小型家電の回収量に 1kg 当たりの金額を乗じて推計した。

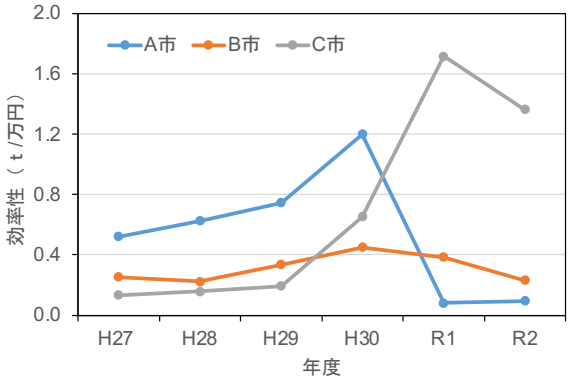


図 1　ボックス回収の効率性

3. 結果と考察

図 1 にボックス回収を行う 3 市町村の年度別効率性の推計結果を示す。A 市においては、平成 30 年度まで小型家電の再資源化業者が収集運搬費用を負担しており、市で収集運搬を行うようになった令和 1 年度より、効率性が大きく下がる結果となった。聞き取り調査の結果では、再資源化事業者における人手不足も影響しており、自治体の回収効率性において、小型家電の収集運搬は大きな影響を与えることが示唆される。C 市においては、市の努力により平成 30 年度以降回収量が大きく増加した。このため、小型家電の売却益も増加して純費用が下がり、効率性が高くなった。回収量を増加させることで効率性を改善できることも示唆される。

ボックス回収以外の回収方法の効率性やその比較検討の結果については学会当日に報告する。

参考文献

1) 環境省：小型リサイクル関連、4. 各種ガイドライン類、https://www.env.go.jp/recycle/recycling/rareметals/index_rel.html

ポストコロナ社会における航空産業の
2050 年 CO_2 排出削減目標に関する達成経路分析

Achieving Pathway to the 2050 Carbon Reduction Target in Aviation Industry

○鬼頭みなみ*[1) 2)]、高藪広隆[3)]、南斉規介[2)]
Minami Kito, Hirotaka Takayabu, Keisuke Nansai
1) 九州大学大学院, 2) 国立環境研究所, 3) 近畿大学産業理工学部
* kito.minami.368@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

新型コロナウイルスの世界的な流行により、全世界で航空需要は激減し、航空産業は大きなダメージを受けているが、IATA（国際航空運航協会）は 2024 年には 2019 年の水準に航空需要は回復すると予測しており、回復後の需要は成長し続ける見込みだ。航空需要回復・成長が予測される一方、IATA は 2050 年の年間 CO_2 排出量を 2005 年の 50%にすることを目標としており（以下、IATA2050 年目標）、航空産業は CO_2 排出量に向けて取り組む必要がある。

先行研究において、飛行時の CO_2 排出量削減には燃費の良い機材の導入が有効で、燃費が改善する場合は、機体の使用年数を短縮することがライフサイクル CO_2 排出量の削減に有効であることが示されている。一方で、機体の導入による排出量削減効果は限定的であり、機体導入に莫大なコストがかかるため、費用対効果が低いことも明らかにされている。

本研究は、日本に着目し、2020～2050 年の CO_2 排出量とコストを推計する。利用可能な排出削減策として、「機材燃費・機体の使用年数・航空需要」に焦点をあて、これらを変化させることで航空産業が 2050 年の排出目標を達成する方策を検討する。

2. 研究手法

IATA の需要回復目安である 2024 年に航空需要（年間総飛行距離）が 2019 年水準に回復し、その後は Boeing の予測に基づき、年間 1.5%ずつ需要が成長すると仮定し、新規機材の燃料強度の改善率（2020 年以降年間 0,1,2%改善）と機体の使用年数（平均寿命から－10～+15 年）を変化させた場合の 2020～2050 年の CO_2 排出量を推計する。使用年数も燃料強度も変化させない場合の CO_2 排出量をベースラインの排出量として設定する。ベースラインと IATA2050 年目標を比較し、現状予測されている需要の成長率の場合に目標が達成可能かどうかを明らかにする。次に目標を達成できなかった場合について、航空需要の成長率を変化させて IATA2050 年目標を達成することができる需要の成長率を特定する。この時の需要の成長率は年間－10～1.5%の間に設定した。t年における飛行時の CO_2 排出量$Q(t)$は次のように求める。

$$Q(t) = B_{new}(t) \times FI(t) \times d(t) \times e + \sum_{i=1}^{t-1} \{B_{new}(t-i) \times FI(t-i) \times d(t) \times e\}$$

$B(t)$はt年の購入機数、$FI(t)$はt年に購入した機体の平均燃料強度、$d(t)$は 1 機あたりの年間飛行距離、eは燃料の排出係数を表している。

また、目標達成にかかるコストとして、機体購入費、燃料費、機会費用の推計を行う。本研究では、需要を変化させることで、ベースラインの飛行距離よりも少なくなった飛行距離に対して 2019 年の単価（総飛行距離÷旅客売上）を乗じたものを機会費用とする。コスト$C(t)$は次のように求める。

$$C(t) = B_{new}(t) \times p_a + \left[B_{new}(t) \times FI(t) \times d(t) + \sum_{i=1}^{t-1} \{B_{new}(t-i) \times FI(t-i) \times d(t)\} \right] \times p_f(t) + LD(t) \times p_{up}$$

p_aは機体価格、$p_f(t)$は燃料価格、$LD(t)$は需要抑制に

よって失われた飛行距離、p_{up}は単価を表している。

3. 結果

3.1 需要を抑制しない場合の年間 CO_2 排出量の推計と IATA2050 目標の比較

図 1 は IATA2050 年目標の排出量と比較するために、燃料強度が年間 2%改善する場合の CO_2 排出量の推移を使用年数のシナリオごとに示している。新規購入機の燃料強度が年間 2%改善する野心的なシナリオにおいても、IATA2050 年目標を達成することはできず、燃料強度の年間 2%の改善と使用年数の変化だけでは排出目標を達成することができないことが分かった。2050 年の排出量が最も少なくなる、使用年数を－10 年して早期に買い替えを行うシナリオ（図 1 赤線）でも、IATA2050 年目標を達成するためには 5.7Mt の削減が必要であることが分かった。

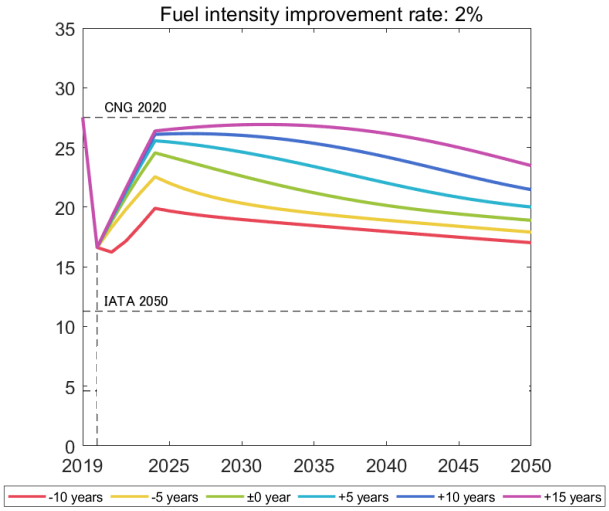


図 1. 需要を抑制しない場合のシナリオごとの年間 CO_2 排出量の推移（Mt）

3.2 IATA2050 年目標を達成するために需要の抑制を行った場合

IATA2050 年目標を達成するために需要の抑制を行った場合、需要を抑制しない場合よりも 2020～2050 年の総飛行距離を 17.6～35.9%抑制する必要があることが分かった。図 2 中のすべての場合で IATA2050 年目標を達成しているが、その中でも最も少ないコストで目標を達成できるのは燃料強度年間 2%改善、使用年数＋10 年の場合であり、31 年間の累積排出量は 601Mt であった。一方で累積排出量が最も少ないのは燃料強度年間 0%改善、使用年数－10 年の場合で、累積排出量は 502Mt であり、コストが最小になる場合よりも累積排出量が約 100Mt 少なくなっている。このことから、同じ年間目標を達成する場合でも、累積排出量で見ると大きな差が生じることが明らかになった。

Scenario name (Fuel intensity improvement rate, Lifetime)		Total distance decreasing rate (%)	Total cost (billion USD)	Cumulative CO_2 emission (million tons)
0%	-10yrs.	33.9	651.8	502.7
	-5yrs.	33.9	552.9	521.0
	±0yr.	33.9	507.3	543.9
	+5yrs.	33.9	481.3	566.4
	+10yrs.	34.6	467.4	580.8
	+15yrs.	35.9	459.9	585.6
1%	-10yrs.	26.4	632.9	503.1
	-5yrs.	27.2	525.2	524.8
	±0yr.	28.0	479.0	550.5
	+5yrs.	28.8	455.2	574.9
	+10yrs.	30.3	445.1	590.3
	+15yrs.	31.8	438.6	600.5
2%	-10yrs.	17.6	610.4	503.1
	-5yrs.	19.5	493.0	528.8
	±0yr.	21.3	446.6	557.7
	+5yrs.	23.9	429.6	579.2
	+10yrs.	25.6	420.8	601.3
	+15yrs.	28.8	422.0	606.0

図 2. IATA2050 年目標達成時の総飛行距離の減少率・総コスト・累積 CO_2 排出量

4. 結論

これらの結果から、IATA2050 年目標は燃料強度の改善と使用年数の変化だけでは達成することが難しく、需要の抑制が必要であることが分かった。目標達成のために航空需要を抑制した場合、累積排出量が少ないシナリオほど目標達成にかかるコストが大きくなるため、航空会社が累積排出量の少ないシナリオを選択する可能性は低い。年間排出目標の IATA2050 目標の達成だけでなく、累積排出量の削減には排出目標の設定を見直す必要がある

参考文献

1) IATA, 2021. COVID-19 An almost full recovery of air travel in prospect. https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/an-almost-full-recovery-of-air-travel-in-prospect/ （参照 2022-1-6）

2) Kito, M, 2021. Impact of aircraft lifetime change on lifecycle CO_2 emissions and costs in Japan. *Ecological Economics*, 188, 107104.

食料需要が誘発する農業における水資源への負荷の分析

Analysis of stress on water resource in agriculture induced by food demand

○月岡葵*1)、松嶋そら 2)、加河茂美 3)
Aoi Tsukioka, Sora Matsushima, Shigemi Kagawa
1) 九州大学, 2)九州大学経済学府, 3) 九州大学経済学研究院
* tsukioka.aoi.532@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景・目的

世界の農業用水は淡水資源利用の 69%を占める。[1)] 世界人口の増大に伴う食料需要の拡大から、農業用水の需要拡大は必至であることが推測される。[2)]食料生産は人の生命維持のために不可欠であり農業用水の安定供給の重要性は高い。ゆえに今後の農業における淡水資源の需給を、世界人口の増加を考慮して慎重に検討する必要がある。

また、2000 年時点の世界の水需要のうち約 2/3 は灌漑用水が占める。[1)]農業用水の使用を検討するにあたり、第一に灌漑農法に使用される水資源の利用状況に着目することが望ましい。現に灌漑農業を実施している地域をはじめ世界各地で水資源へのストレスや水不足が発生しており、人々の生活や環境、生態系への被害が懸念されている。FAO の「The State of Food and Agriculture 2020 」[3)]によれば、32 億人の農家が深刻な水不足にさらされており、そのうち世界人口の 1/6 に値する 12 億人の農家がかなり深刻な水不足にさらされている。淡水資源の中でも灌漑農業で主に用いられる地表水及び地下水資源の適切な管理を見直す必要がある。

国内の食料需要を通じた水消費は、他国の水資源と密接な関係にある。多くの国が自国の食料供給を国内生産の他に他国からの輸入に依存しており、食料輸入を通じた仮想水を考慮する必要性がある。現に日本は年間水使用量の 77%を海外に依存している。[4)]すなわち一国の食糧需要は食料生産による国内での水消費だけでなく、輸入を通じた他国での水消費をも誘発している。よって一国の水資源の使用状態を考察するにあたり世界レベルでの水資源の移動を考慮する必要がある。

以上より水需給逼迫への対策は喫緊の課題となっており、増大する食料需要に対して適切な水資源管理を検討する必要に迫られている。したがって本研究ではまずは食料生産をはじめとする各種産業活動における需要に起因する現状の水資源の使用状況を明らかにすることを目的とする。

本研究では世界多地域間産業連関表を用いてウォーターフットプリントを算出し、世界各国の産業の最終需要が誘発する水消費量を分析する。その上で特に食料需要が誘発する水資源消費に着目し、人口増大地域を中心とした食料需要増大に対する水需給の現状分析及び将来推計を行う見通しである。

2. 分析手法・使用データ

49 の国・地域における 163 産業部門を対象とした世界多地域産業連関表 EXIOBASE version 3 を用いる。ウォーターフットプリントでは水資源消費量を、Blue water、Green water、Grey water の 3 種類の取水源に分けて推定する。本研究では地表水や地下水由来の Blue water を対象として、農業用水のうち特に灌漑用水に焦点を当てて分析した。Green water は降水由来の水資源消費量、Gray water は仮に汚濁物質を含む水一定の水質基準まで希釈するための水資源消費量を示し、今回の推計ではこれらを除外している。EXIOBASE version 3 の Water consumption blue を係数として使用し最終需要が誘発する淡水（すなわち、Blue water）の消費量を推計した。

ある国の最終需要が誘発する、各産業での Blue water 消費量は以下のように計算される。

$$Q = \mathbf{w}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{f}$$

ここで、Q はある国の最終需要によって誘発する世界における産業全体の Blue water 消費量の総量（すなわち、ウォーターフットプリント）、$\mathbf{w}$ は国の産業の生産額 1 単位あたりの Blue water 消費量、$\mathbf{A}$は世界多地域産業連関表の投入係数行列、$(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ はレオンチェフ逆行列、$\mathbf{f}$はある国の最終需要ベクトルを表す。

3. 結果・考察

図 1 は世界全体の産業別ウォーターフットプリントの構成比を示す。小麦の生産におけるウォーターフットプリントの総量が最大の割合（12%）を占め、その他の作物の生産を含めた農業全体の値は約 4 割を占める。小麦のほか野菜・果物・ナッツ類、米、その他穀物が上位を占め、農業の最終需要が誘発する水消費量は全産業の中でも特に影響力が大きい。

また前述のように農業用水が世界の淡水需要量の約 7 割を占めることから、灌漑農業用水の需要がその約

4 割、天水農業用水の需要が残りの約 3 割をそれぞれ占めることが推測される。

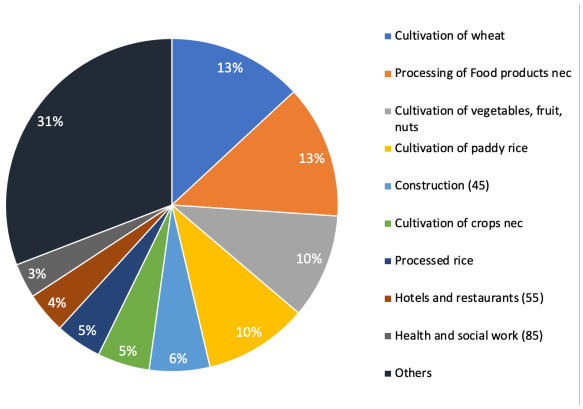


図 1. 世界の産業別ウォーターフットプリントの割合

図 2 はウォーターフットプリントの各国ごとの総量を示す。インドが突出して高い数値をとり中国、米国が次いで上位に位置する。人口の大きさに伴う最終需要の多さが主因と考えられるが、インドより人口規模が大きい中国に比べてインドの数値が大きい点には分析の余地がある。

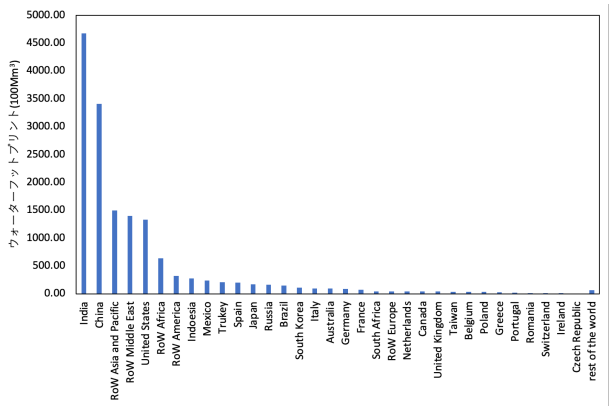


図 2. 国別ウォーターフットプリント

図 3 はインドの産業部門別ウォーターフットプリントの構成比を示す。小麦と米の生産のみで全体の約 5 割を占め、約 7 割(69%)が農業における最終需要が誘発する消費量であった。第二次・三次産業を差し置いて第一次産業におけるウォーターフットプリントが大きいことから、インドでは巨大な人口が生む食料需要を背景に、農作物の最終需要が優先的に生じていると考えられる。インドの食料に関わる産業の中では、食品製造業が小麦・米・その他作物の生産に次いで 4 番目に位置するが、その割合は 6%と微少である。加工食品よりも加工前の食品の需要によって多くの水消費が誘発されていると思われる。

今回の推計では用いた係数が Water consumption blue であることから、地表水及び地下水の消費を分析しており、降水起源の消費は考慮していない。農業を用水の取水源で分類すれば、地表水・地下水を用いる灌漑農業のほか降水を用いる天水農業が存在する。したがって降水起源の green water 消費量について同様に推計し今回の推計結果と合わせて分析することが、農業用水の使用状態の現実に即した把握に役立つ。

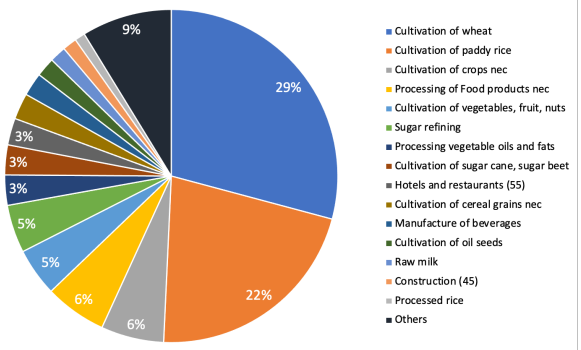


図 3. インドの産業別ウォーターフットプリントの割合

以上の分析を基に、本会では水消費と食料需要の関連について検討し、最終需要の背景となる食文化や生活水準等の要素を加味したさらなる議論を行う。加えて人口増大地域を中心とした食糧需要の拡大による、水消費及び水需給の現状分析及び将来推計を行う。

4. 引用文献

1) UNESCO World Water Assessment Programme, “The United Nations World Water Development Report 2021: VALUING WATER”, UNESCO Digital Library, 入手先< https://www.unesco.org/reports/wwdr/2021/en/download-report>, (参照 2021-12-16)

2) 国際連合広報センター, “世界人口推計 2019 年版：要旨 10 の主要な調査結果(日本語版)”, 国際連合広報センターホームページ, 入手先< https://www.unic.or.jp/news_press/features_backgrounders/33798/ >, (参照 2021-12-16)

3) FAO, “The State of Food and Agriculture 2020”, F A O, 入手先 < https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb1447en/ >, (2021-12-17)

4) JICA, “仮想水でみる途上国依存”, JICA ホームページ, 入手先 < https://www.jica.go.jp/aboutoda/interdependence/jica_databook/01/01-4.html >, （2021-12-20）

ビッグデータと人工知能を活用した空調機のエネルギー分析

Energy Analysis of Air Conditioners Using Big Data and Artificial Intelligence

○杉山弦太*[1)]、本田智則[2)]、伊坪徳宏[1)]
Genta Sugiyama, Tomonori Honda, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学, 2)国立研究開発法人産業技術総合研究所
* g2183115@tcu.ac.jp

1. はじめに

日本政府は「2050 年カーボンニュートラル」を宣言し、地球温暖化対策計画の中で日本全体の温室効果ガス(以下 GHG)排出量を 2030 年までに 2013 年度比で 46%削減する目標を掲げている。中でも家庭部門は各部門中最大である 66%の排出削減が求められている[1)]。

一方で、家庭部門の GHG 排出源のおおよそ半分は電力によるものであるが、利便性・快適性を追求する国民のライフスタイルの変化や、社会構造変化の影響によって年々エネルギー消費量は増加しており[2)]、2030 年までに家庭部門の GHG 排出量を半分以下にするためには、機器の効率化のみならず、消費者のライフスタイルの見直しによる行動変容が必須である。

空調機の GHG 排出量の 9 割は使用段階の電力消費が占めており[3)]、家電の中でも空調機は特に気候やライフスタイルによって消費電力が変動するが[4)]、空調機の環境影響評価における使用段階の算出は日本産業規格(以下 JIS)の東京をモデルとした規格値[5)]が用いられているため、実際の空調利用実態を反映した算定が行われていないのが現状である。

2. 研究目的

本研究では空調機ビッグデータを分析することで実際の空調利用実態に即したエネルギー分析を行い、今後の気温上昇による冷暖房需要の変化と、それに伴う電力消費量及び GHG 排出量についての分析を行う。

また、地域毎の利用実態の違いを分析し、将来気候モデルを基に、家庭部門の排出削減目標の達成に向けて必要な削減量と、取るべき行動について検討を行う。

3. 研究方法

3.1 エネルギー分析

70972 台分の 1 分毎空調機稼働データのうち、2019 年 1 月から 2020 年 12 月までのデータの欠損率が 50%以下の機種をランダムに 100 台抽出し、空調機利用実態の分析と JIS 規格値との乖離について検証した。空調機の年間消費電力量の算出は定格冷房 4.0ｋW の機種と仮定し、電力消費による CO_2 排出量は東京電力の 2020 年度の CO_2 排出係数である 0.441kg-CO_2/kWh を使用し算出した。

また、気温データと空調機の消費電力データを基に気温感応度を算出し、気温が 1℃変化した時に消費電力量がどの程度変動するかについて二次多項式による重回帰分析を行った。

3.2 地域推定

空調機ビッグデータには使用場所の位置情報が含まれておらず、そのままでは地域間の気候やライフスタイルによる使用実態の違いを把握することができない。

そこで、空調機ビッグデータに含まれている外気温データと気象庁の気温データの類似度を基に使用地域を推定するモデルを作成し、ビッグデータに地域推定モデルを適用することで位置情報を付与する。

地域推定モデルの作成にあたり、全国の気象観測所データをモデル作成用データとし、モデルの検証用データには建築学会の 2003 年の住宅データを使用した。

全国の気象観測所で測定された年間の 1 時間毎気温データを k-Means 法によって 5 つのクラスターに分類した結果を正解ラベルとし、建築学会のデータを同じく 5 つのクラスターに分類した際の推定精度を両データに含まれる観測所情報を基に検証する。

推定精度の検証方法として、建築学会のデータに含まれる各住宅の最寄気象観測所情報を基に全国の気象観測所データと照合し、正解ラベルと建築学会データの分類結果が一致していれば正解として評価を行った。

4. 研究結果

4.1 エネルギー分析

空調機ビッグデータから空調稼働日数と空調利用時間を算出した結果、実績値は東京をモデルとした JIS の規格値と比較して約 40%から 50%程度にとどまることが分かった。(表 1)

JIS 規格での消費電力量は年間約 1100kwh、CO_2 排出量は約 500 kg-CO_2 となったが、実績値の平均では消費電力量は約 400kwh、CO_2 排出量は 180 kg-CO_2 と、JIS 規格の約 30%程度にとどまることが分かった。

今回分析した実績値はまだ位置情報が不明であるため、位置情報を付与し、地域毎の気候による空調実態の把握を行っていくことが今後の課題となる。

表 1. 空調稼働日数､利用時間の実績値と規格値の比較

	実績値(100 台平均) (最大値)	JIS[5]
年間稼働日数	157 日 (313 日)	295 日
年間冷房日数	86 日 (195 日)	135 日
年間暖房日数	90 日 (201 日)	160 日
日平均利用時間(通年)	8.7 h (24 h)	18 h
年間冷房時間 (h)	834 h (3757 h)	1569 h
年間暖房時間 (h)	534 h (3026 h)	2707 h

次に空調機ビッグデータの外気温データと消費電力データから、外気温の変動による消費電力の変化について分析した結果、22℃を閾値として消費電力量が増加することが分かった(式 1, 図 2)。

冷房需要と考えられる 40℃以上の消費電力に比べ、暖房需要と考えられる 0℃以下の消費電力のばらつきが大きいが、これは空調機以外の暖房機器を使用していることによる空調稼働率の違いに起因するものと考えられる。

$$y = 0.0009932 \times x^2 - 0.04088188 \times x + 0.61679948$$

※ y：消費電力, x：外気温(℃) ― (式 1)

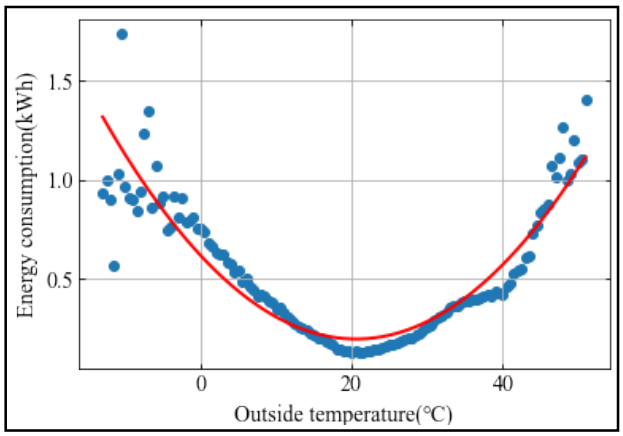


図 2. 消費電力実績に基づく気温感応度と回帰曲線

また、空調機ビッグデータには外気温が 50℃以上となるデータがあるが、日射の影響でセンサーの観測温度が実温度よりも高温になっていると考えられるため、適切な分析のために日射の影響を回避もしくは補正する方法を検討していく必要がある。

4.2 地域推定

気象観測所の気温データを 5 つのクラスターに分類するモデルを作成し、建築学会のデータにモデルを適用した結果図 3 のように分類することができた。図 3 中の丸印が気象観測所の箇所、逆三角形の印が建築学会データの位置を示しており、推定精度は 95%であった。

今回モデルの検証用データとして用いた建築学会のデータは観測地点が東北、関東、九州の一部の地域に偏っているため、今後は今回のデータに含まれていない地点の気温推移からの地域推定についても検討が必要である。

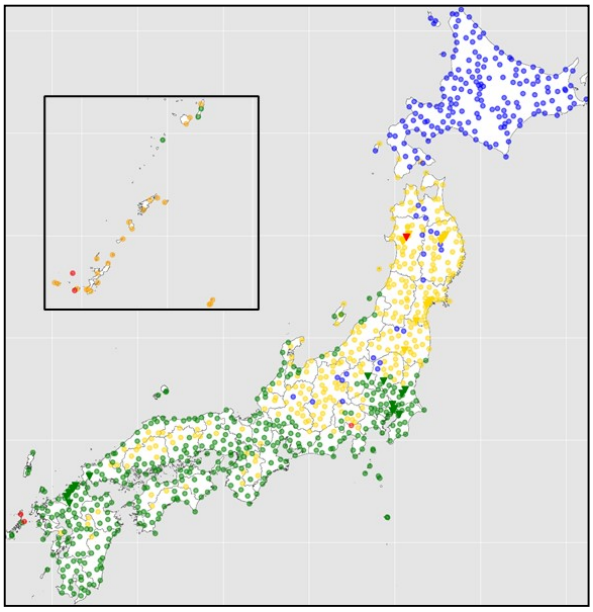


図 3. 気温データのクラスタリング結果

5. 今後の展望

空調機ビッグデータ分析により、空調利用実態と規格値が乖離していることが確認できた。また、地域推定については年間の気温推移データから入力データの地域を推定できることが確認できた。

今後はクラスター数や、推定精度の検証方法について検討を行い、地域推定モデルを用いて空調機ビッグデータへ位置情報を付与する。そして、得られた位置情報を基に地域別の空調利用実態の解明と、将来のエネルギー消費量、GHG 排出量の推計を行い、カーボンニュートラル達成に必要な削減量を算出することでライフスタイルの検討を行っていく。

6. 引用文献

1) 環境省：”地球温暖化対策計画”, (2021)
2) 経済産業省：”令和 2 年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書 2021)”, (2021)
3) 内山知重, 日本 LCA 学会誌, 11(2), (2015), pp114-120.
4) 高田亜佐子ほか：” 第 6 回日本 LCA 学会研究発表会”, 東北大学, (2010), pp.145-145
5) 日本工業規格, “JISC9612：2013 ルームコンディショナ”, (2013)

データ包絡分析を用いた都道府県間における画像診断機器（CT・MRI）の最適配分の検討

Investigation on optimal allocations of diagnostic imaging devices (CT/MRI) among prefectures using data envelopment analysis

○牛島大悟 1)、中石知晃 2)、三苫春香 2)、加河茂美 3)
Daigo Ushijima, Tomoaki Nakanishi, Haruka Mitoma, 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
*ushijima.daigo.599@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景・目的

我が国の平均寿命と健康寿命は共に年々伸びているが [1),2)]、これらの寿命の差にはほとんど変化が見られない。他方で高齢化は進展している。そのため、医療サービス需要は増加しており、それに伴い CT・MRI の導入台数も増加傾向にある [3)]。一方、それらの設置台数は都道府県間でばらついており、台数あたりの検査数と人口あたりの台数には負の相関関係が確認されている [3)]。このことは都道府県レベルでの装置の非効率な運用や配置を意味し、それにより検査を必要とする患者が検査を受けられない、また病院の経営が圧迫される、さらに装置の製造から運転までの環境負荷という観点から過度に環境へ負荷をかけている可能性が考えられる。そこで本研究では、データ包絡分析を用いて CT・MRI の利用・配分・環境効率に関して都道府県レベルで相対的な効率値を算出し、都道府県間での最適配分について分析する。

2. 分析手法・データ

2.1. 分析手法

各都道府県における診療放射線技師数と CT・MRI の導入台数、各装置の期待検査数を投入データ、実施された検査数を産出データとし、単一投入単一産出と三投入一産出におけるデータ包絡分析を用いて生産効率性分析を行う。なお、都道府県iにおける期待検査数EI_iは厚生労働省の「医療機器の効率的な活用について」[3)]で用いられている以下の式で求めるものとする。

$$EI_i = \sum_{a=1}^{9} (q_a^m \cdot p_{i,a}^m + q_a^f \cdot p_{i,a}^f)$$

ここで、aは年齢階級 $(a = 1,2,\cdots,9)$、mは男性、fは女性、q_aは全国の各年代aにおける人口あたりの検査数、$p_{i,a}$は都道府県iにおける各年代aの人口を示す。

2.2. データ

診療放射線技師数は総務省の平成 27 年国勢調査 [4)]、CT・MRI の導入台数は厚生労働省の平成 29 年医療施設（静態・動態）調査 [5)]、各装置における全国の性年齢階級別検査数と実施された検査数は厚生労働省の第 6 回 NDB オープンデータ [6)]、全国と各都道府県の性年齢階級別人口は総務省の平成 31 年住民基本台帳 [7)]より入手した。

3. 結果・考察

ここでは都道府県間で各投入における生産効率性を比較するために単一投入単一産出の結果を示す。

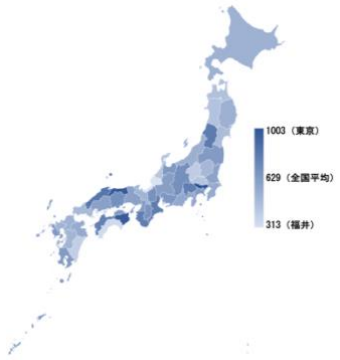


図 1. 技師一人当たりの CT 検査数



図 2. 技師一人当たりの MRI 検査数

図 1 および図 2 はそれぞれ各都道府県における診療放射線技師一人あたりの CT・MRI 検査数である。図 1 より、技師一人あたりの CT 検査数は東京（1003 件）が最も多く、全国平均（629 件）の約 1.6 倍であった。また、最も少なかったのは福井（313 件）で、

東京の約 0.3 倍だった。さらに、図 2 より MRI 検査数も東京（512 件）が最も多く、全国平均（297 件）の約 1.7 倍であった。また、最も少ない検査数も同様に福井（135 件）で東京の約 0.26 倍であった。

図 3 および図 4 はそれぞれ CT・MRI1 台あたりの検査数である。図 3 より CT1 台あたりの検査数は神奈川（3023 件）が最も多く、全国平均（2088 件）の約 1.4 倍だった。また、最も少なかったのは高知（1196 件）で、神奈川の約 0.4 倍であった。一方、図 4 より MRI1 台あたりの検査数も神奈川（2850 件）が最も多く、全国平均（2014 件）の約 1.4 倍だった。また、最も少なかったのは熊本（1483 件）で、神奈川の約半数だった。



図 3. CT1 台あたりの検査数

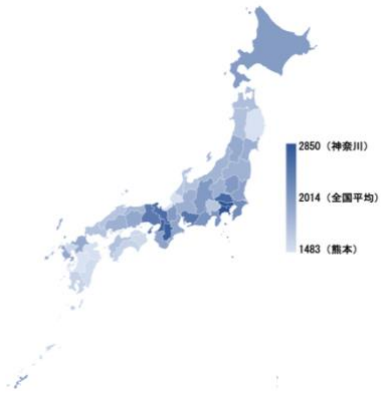


図 4. MRI1 台あたりの検査数

図 5 および図 6 はそれぞれ CT・MRI の期待検査数に対する実際の検査数の割合である。図 5 より期待値よりも最も多く CT 検査が行われたのは岡山（1.15）で、最も少なかったのは秋田（0.77）だった。また、図 6 より期待値よりも最も多く MRI 検査が行われたのは北海道（1.36）で、最も少なかったのは鳥取（0.74）だった。

以上より、一投入一産出における生産効率性は各都道府県でばらつきがみられ、ある投入においては高い効率性を示す都道府県であっても他の投入では低い結果を示すものもあった。本会ではデータ包絡分析を用いて単位の異なる三投入を統合した効率性を算出し、さらに各都道府県がベンチマークとすべき都道府県を明らかにし、CT・MRI の最適配分に関する考察を行う予定である。

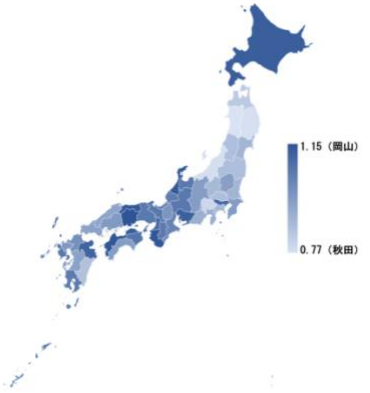


図 5. 期待検査数に対する実際の CT 検査数

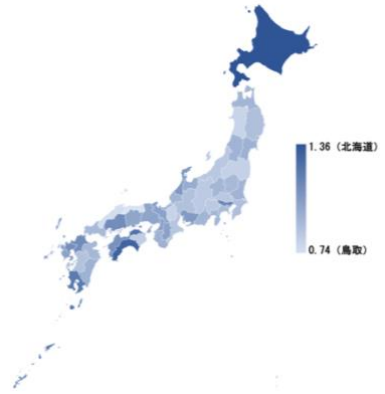


図 6. 期待検査数に対する実際の MRI 検査数

4. 参考文献

(1) 国立社会保障・人口問題研究所：“日本の将来推計人口（平成 29 年推計）”, (2017)
(2) 厚生労働省：“第 11 回健康日本 21（第二次）推進専門委員会資料”, (2018)
(3) 厚生労働省:“医療機器の効率的な活用等について”, (2019)
(4) 総務省：平成 27 年国勢調査, <https://www.e-stat.go.jp/dbview?sid=0003209883>
(5) 厚生労働省：平成 29 年医療施設（静態・動態）調査, <https://www.e-stat.go.jp/dbview?sid=0003295985>
(6) 厚生労働省：第 6 回 NDB オープンデータ, <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000177221_00010.html>
(7) 総務省：平成 31 年住民基本台帳, <https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01gyosei02_02000193.html>

感染症対策がテレワークのエネルギー消費に与える影響評価

Assessing the impact of infectious disease control on energy consumption in telework

○HAO HUI*1)、吉村 彰大 1)、松野 泰也 1)
Kaku Ei, Yoshimura Akihiro, Matsuno Yasunari
1）千葉大学
* kakuei@chiba-u.jp

1. はじめに

新型コロナウイルスの感染拡大に伴って、日本国内でもテレワークが急速に拡大している。感染拡大防止を目的として、人同士の接触を抑制するための厳しい外出・行動制限が求められており、テレワークは対策の柱として期待されている。

日本におけるテレワークは、主に省エネルギーを目的とするものと、感染拡大抑止を目的とするものの 2 種類に分類される。既存研究の多くは省エネルギー目的のテレワークに関するものであり、例えば中西 [1]は、職場で使用する機器の共有性や自宅でのエネルギー消費を考慮した消費量の評価を行い、削減にはフロアー単位での職場の閉鎖が必要であることを指摘した。一方、感染拡大抑止を目的としたテレワークに関する研究では、省エネルギー目的の場合と勤務状態や通勤制約に異なる点が存在することを指摘した研究 [2]はあるが、その際のエネルギー効率の悪化に関する定量的な検討は行われていない。

本研究では、感染対策下でのテレワークについて、様々な規模の企業とオフィスビルを組み合わせたモデルを作成し、業務と通勤におけるエネルギー消費を定量的に評価することで、適切なテレワーク実施バランスを地域レベルで検討することを目的とした。

2. 手法

2.1 企業モデルの設定

文献 [3, 4]から、東京 23 区の大規模ビルと中小規模ビルの延床面積を算出し、表 1 に示す(A)-(C)のモデルを設定した。

オフィス内で人同士の接触による感染を避けるためには、1-2 m の距離を確保する必要があり [5]、一般的なオフィスビルで実施する場合、フロアーのキャパシティが 1/3 となる。本研究では、これを感染対策優先型テレワークとした上で、フロアーをできる限り閉鎖する従来型のテレワークと比較した。さらに、企業間でオフィスをシェアすることでフロアーの利用効率を向上させるパターンも検討するため、表 2 に示す(1)-(3)のパターンを設定した。

表 1 東京都 23 区の業務消費算出モデルの設定

	大規模企業	中規模企業	小規模企業
大規模ビル	2400 人 1 社 (A)	-	-
中小規模ビル	-	60 人程度 3 社 (B)	10 人程度 18 社 (C)

表 2 フロアー利用パターンの設定

	設定	対策内容
(1)	感染対策優先	キャパシティを 1/3
(2)	シェアオフィス活用	(1)+企業間でシェアオフィス利用
(3)	省エネルギー優先	距離を取らず

2.2 業務に起因する電力消費推計

総務省によるテレワークによる電力消費量・コスト削減効果の試算 [6]を元に、表 2 のパターンについてオフィス、および家庭での業務に起因する電力消費を推計し、出勤する社員数による影響を検討した。

2.3 通勤も含めた CO_2 排出量の推計

通勤に起因する CO2 排出量は、人キロ当たりの CO_2 排出原単位 [7]、および東京 23 区の通勤での通勤手段の内訳 [8]を元に推計した。この検討結果と、2.2 で推計した業務に起因する電力消費量を元に、テレワーク全体での CO_2 排出量を推計した。

3. 結果と考察

3.1 業務に起因する電力消費量

表 2 中(B)の事例について、オフィスビルと家庭での業務に起因する電力消費量の推計結果を図 1 に示

す。 省エネルギーを優先した(3)に対し、フロアーの閉鎖が難しい(1)ではエネルギー効率が大きく悪化し、電力消費量が 1.2-1.4 倍となるという結果が得られた。一方、シェアオフィスを活用した(2)の場合、複数の企業による同一フロアーの活用による節電効果が見られた。

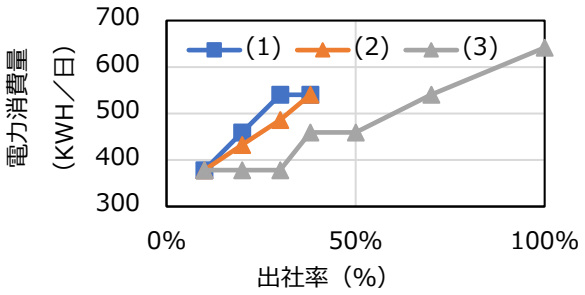


図 1 中小規模ビル(中規模企業入居)の電力消費量

3.2 通勤も含めた CO_2 排出量の推計

東京 23 区に所在する企業がテレワークを実施した際の、業務、および通勤に起因する CO_2 排出量について、企業規模、およびフロアー利用パターンを考慮して計算した結果を図 2 に示す。

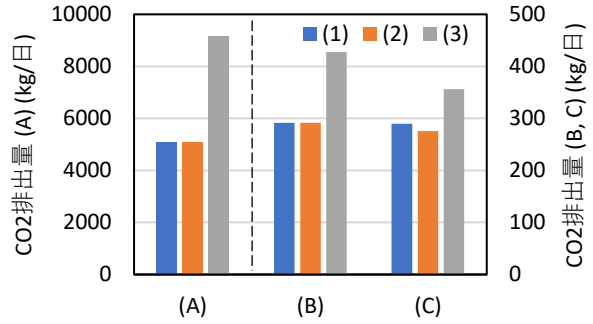


図 2 テレワークによる CO_2 排出量変化

感染対策を優先する場合、出勤する人の割合は企業規模によらず 30-40%とほぼ変わらなかったが、CO_2 削減効果は最も大きい(A)の 45%に対し、(B)で 32%、(C)で 19%にとどまった。 1 社のみが入居している(A)では、どの条件でもフロアーを効率的に利用できるためフロアーの閉鎖が容易な一方、複数の企業が入居する(B)や(C)ではデッドスペースの発生が避けられず、フロアーの閉鎖が難しいことに起因する。また、(C)では全体の削減率は低いものの、多数の企業が同一ビル内に入居していることからシェアオフィスによる省エネ効果が見られた。

上記のモデルから推計した東京 23 区全体の CO_2 排出量は、平常時の 247.15 万トン/年に対し、テレワークの実施で 153.76 万トン/年、シェアオフィスの実施で 149.9 万トン/年となり、感染対策下でも 61～63%程度に削減が可能と推計された。

3.4 今後の展望

国勢調査[8)]の結果から、東京 23 区では鉄道通勤が多くを占める一方、愛知県では車通勤が多く、大阪府では鉄道、車、徒歩が同程度に混在する。自動車の CO_2 排出原単位は鉄道を上回るため、これらの地域ではテレワークにより通勤に起因する CO_2 排出量を大幅に削減できると考えられることから、今後は東京以外の地域における検討も実施する。

引用文献

1) 中西穂高, 日本テレワーク学会研究発表大会予稿集, 13, (2011), pp. 76-81
2) 眞崎昭彦, 日本テレワーク学会研究発表大会予稿集, 12, (2010), pp. 31-36
3) 中小企業庁, 都道府県・大都市別企業数、常用雇用者数、従業者数, (オンライン), 入手先 <https://www.chusho.meti.go.jp/index.html>, (参照 2022-01-05)
4) ザイマックス不動産総合研究所, オフィスピラミッド 2020, (オンライン), <https://soken.xymax.co.jp>, (参照 2022-01-05)
5) 国土交通政策研究所, 国土交通政策研究第 100 号 (オンライン), 入手先 <https://www.mlit.go.jp/pri/index.html >, (参照 2022-01-05)
6) 総務省, 情報通信白書, (オンライン), 入手先 <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/h23.html>, (参照 2022-01-05)
7) 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>, (参照 2022-01-05)
8) e-Stat, 平成 22 年国勢調査, 従業地・通学地による人口・産業等集計, (オンライン), 入手先< https://www.e-stat.go.jp>, (参照 2022-01-05)

住民の省エネ行動促進のための施策設計に向けた温室効果ガス削減ポテンシャル分析：島根県海士町の例

Analysis of greenhouse gas reduction potential for designing policies to promote energy-saving behavior by residents: A case study of Ama Town, Shimane prefecture

○兵法彩*[1)]、菊池康紀[1)]
Aya HEIHO, Yasunori KIKUCHI
1) 東京大学
* heiho-aya@platinum.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

地球温暖化対策の推進において、地方公共団体はその区域の自然的社会的条件に応じた施策策定および実施が求められ、2050 年ゼロカーボンシティ表明など脱炭素社会に向けた動きが加速している[1)]。脱炭素に向けた選択肢は、再生可能エネルギー技術などによる創エネ、蓄電池・電気自動車等による蓄エネ、HEMS などの技術導入・消費者の行動変容による省エネの 3 つに大別される。創エネ・蓄エネでは、自治体の補助制度拡充などが進む一方で、省エネ施策の設計および効果分析は十分に行われていない。本研究は島根県海士町を例に、住民の省エネ行動促進による温室効果ガス削減ポテンシャルを明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

2.1 対象地域

島根県海士町は面積 33.44km^2、人口 2,284 人で日本海に浮かぶ隠岐諸島の中ノ島の全島を町域とする[2)]。海士町の電力は主に島外の西郷発電所（A 重油）で生産[3)]されており、島内の産業連関[4)]を考えると電力消費は島外へのお金の漏れおよび気候変動への影響が大きい。また、家庭のエネルギー消費は 2004 年から 2011 年にかけて 10%増加している[5)]ため、地域内での取り組みとして風力発電や太陽光発電の導入が進められている[3,6)]一方で、住民による省エネが環境・社会経済面において重要な施策になりうると考えた。また海士町の特徴として、全国平均よりも冷蔵庫の保有台数が多い傾向が確認されていた[5)]ことから、本研究は冷蔵庫の省エネ行動促進による効果に着目した。

2.2 質問紙調査

住民票登録データに基づき 1,064 世帯を調査対象として質問紙を 2021 年 9 月 8 日に発送し、9 月 30 日を回答期限とした。質問紙は、基本属性（世帯人数、年齢、職業）、冷蔵庫保有台数、冷蔵庫の種類・大きさ（内容積）・購入時期、冷蔵庫に関する省エネ行動実施状況で構成される。省エネ行動は、設置場所および使い方（詰め込み、開閉回数、開閉時間、温度設定）とした。

2.3 温室効果ガス削減ポテンシャル

家庭向け省エネ関連情報[7)]および省エネ性能カタログ[8)]に基づき、冷蔵庫の買い替えや省エネ行動促進による電力消費の変化量を算出し、電力生産に伴う温室効果ガス排出係数を乗じ削減ポテンシャルを推計する。

3. 質問紙回収・集計

記入済みの質問紙を 550 件回収し、ナンバリング、電子化、データクレンジングを行った。冷蔵庫の平均保有台数は 2.1 台で全国平均の 1.2 台[9)]より大きかった。

4. おわりに

全国調査の傾向[9)]を参考に海士町の特性を分析し、温室効果ガス削減ポテンシャルを算出する。本研究は、地域に適した省エネ施策設計への寄与が期待される。

引用文献

1) 環境省：“地方公共団体における 2050 年二酸化炭素実質ゼロ表明の状況”，https://www.env.go.jp/policy/zerocarbon.html, (参照 2021-12-23)
2) 東洋経済,“都市データパック 2020”, 東京, (2020), p.1108
3) 中国電力ネットワーク：“隠岐ハイブリッドプロジェクト”, https://www.energia.co.jp/nw/safety/facility/okihybrid/project/, (参照 2021-12-23)
4) 海士町:“海士町版産業連関表について”, http://www.town.ama.shimane.jp/about/tokei/post-12.html, (参照 2021-12-23)
5) （株）環境エネルギー総合研究所：“平成 26 年度海士町電力使用量調査業務実施報告書”, (2015), 41pp.
6) （株）海士パワー：“Ama Power”, https://amapower.co.jp/, (参照 2021-12-23)
7) 経済産業省資源エネルギー庁：“家庭向け省エネ関連情報”, https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/howto/kitchen/index.html#1, (参照 2021-12-23)
8) 省エネ型製品情報サイト,“省エネ性能カタログ”, https://seihinjyoho.go.jp/frontguide/catdl.html, (参照 2021-12-23)
9) 環境省：“平成 31 年度家庭部門の CO_2 排出実態統計調査 資料編（確報値）”, 245pp.

天敵昆虫製剤（生物農薬）を使用したハウス栽培の環境影響評価

Life cycle assessment of greenhouse cultivation using natural enemy insects (biopesticide)

○志村もと子*[1)]、林清忠[2)]、湯龍龍[2)]
Motoko Shimura, Kiyotada Hayashi, Longlong Tang
1) 農研機構西日本農業研究センター, 2) 農研機構農業環境研究部門
* shimura@ affrc.go.jp

1. はじめに

近年、天敵を用いて害虫防除を行う生物農薬に農業者や消費者の関心が高まっている。生物農薬は、無農薬・低農薬の農産物が消費者に好まれること、使用者への害や飛散による周囲の被害が少ないこと、薬剤抵抗性病害虫が発生して天敵でしか駆除できない地域が出てきたことからその使用量は増加傾向にある。しかし生物農薬が環境へ与える影響について、その製造過程（人工飼育・増殖）を含めた総合的な影響評価を行った研究は見当たらない。

テントウムシは多くの作物に被害を与えるアブラムシの天敵として知られている。大食漢で１日にアブラムシ 100 頭以上を食べるが、飛翔能力が高いためすぐに作物から離れてしまい、防除効果が低くなるという欠点があった。そこで飛ぶ能力の弱い個体を選抜して遺伝的に飛ばない系統が作られた。既に一般に販売されているアブラムシの天敵製剤「飛ばないテントウムシ[1)]」はナミテントウの個体から劣性遺伝子の作用による飛ばない性質を持つものを選抜交配して作られ、遠くへ移動しないため高い防除効果がある。圃場から逃げ出した際の生態系に及ぼす影響については、在来種の選抜固体であること、飛ばないため移動距離が短いこと、自然界では生存競争力に弱く、繁殖する可能性が低いので危険性は低いとされる。

本研究では「飛ばないナミテントウ」と同じくアブラムシの天敵製剤である寄生蜂「コレマンアブラバチ」の併用例を解析することで生物農薬の影響評価を行う際の注意点を抽出し、化学農薬と生物農薬の環境への影響を比較することを目的とした。その際、放飼後の昆虫の管理方法によって防除効果が異なることにも注目した。

2. 研究の方法

2.1 対象とする栽培・天敵製剤使用の条件

慣行との比較や放飼後の管理の評価を行う作物および栽培方法は、ナスのハウス栽培（半促成栽培）とした。農薬使用パターンは、①慣行区、②天敵区、③天敵＋代替餌区の３区とした。各区の概要を表１に示す。

代替餌を使用するとアブラムシが減ってもナミテントウが飢餓状態にならず生存期間が長くなるため、防除効果が長続きして放飼回数を減らすことができ、化学農薬に比べ割高な天敵購入費を抑えて生産コストを安くできる。今回は代替餌としてアルテミア（ブラインシュリンプ耐久乾燥卵）付き餌ひもの設置と、花粉が餌となるバンカープランツ（スカエボラ、スイートアリッサム）苗を定植するパターンでの解析を行った。

機能単位は施設面積 10a とする。システム領域はナスの栽培から収穫までとし、バンカープランツ苗の定植、代替餌設置を含む。天敵昆虫製造過程は増殖から出荷までとし、系統育成の選抜交配は含まない。

影響評価カテゴリーおよび手法は、地球温暖化(IPCC 2013 GWP100a, v1.03)、と淡水生態毒性(USEtox2.12)とした。農薬使用による水域生態毒性への影響については、散布直後に 74%が土壌に届くとし(PestLCI)、その量を USEtox2.12 に従って算定した農地土壌の生態毒性影響評価係数と乗じて得た。解析ソフトは PRe Consultants 社製の SimaPro ver.9.2.0.1 を使用した。

2.2 天敵製剤の製造

企業でのナミテントウの飼育方法は不明であったため、西日本農業研究センター内で行っていたアブラムシを餌とする飼育方法を評価対象とした。コレマンアブラバチにおいてもナミテントウと同様の方法での飼育とした。飼育には、虫の生育をコントロールするために恒温室をアブラムシの餌となるソラマメ栽培用、アブラムシ飼育用、ナミテントウ飼育用の３部屋が必要である。卵から孵ったナミテントウの幼虫は、直径 9cm、深さ 5cm の円筒形プラスチックケースに 30～40 匹入れて飼育した。中には足場となる不織布を入れた。餌のアブラムシは、ソラマメを播種して育てた培養土入プラスチックケースに添加して繁殖させた。

ナミテントウの発育期間は温度条件によって異なる

表１　アブラムシ用殺虫剤・天敵製剤使用パターン

(10a あたり)	慣行	天敵	天敵＋代替餌
殺虫剤使用回数 (回)	2	0	0
殺虫剤散布用ガソリン (L)	3	0	0
ナミテントウ放飼数 (頭)	0	1,200	400
コレマンアブラバチ放飼数 (頭)	0	1,000	1,000
アルテミア付餌ひも (m)	0	0	60
バンカープランツ (株)	0	0	63

が、25℃では卵が孵るまでに約 3 日、幼虫期間約 10 日、蛹期間約 6 日、計約 19 日で成虫となる。給餌量は成長にしたがって多くなり、餌が不足すると共食いを始めるため注意を要する。出荷は２齢～３齢幼虫で行い、おがくずとともに紙製のボトルに入れられて出荷される。４齢幼虫になると出荷できず廃棄されるが、一部は産卵用に飼育されると思われる。製品の長期保存ができず、出荷タイミングが数日間に限られることから廃棄が生じる可能性は高いが、実際の廃棄率が不明であるため本研究では考慮しなかった。

コレマンアブラバチも同様の方法で飼育されるが、消費するアブラムシ数が少なく成長サイクルも短いため、同規模の施設では生産可能頭数がナミテントウより多くなる。

2.3 天敵製剤の出荷および放飼

天敵製剤出荷用の容器や代替餌の餌ひもの材料データは製造元から入手した。バンカープランツ育苗プロセスは苗作り農家の経営指標を基に作成した。

慣行でのナス栽培方法は、大阪府が作成した経営指標（半促成栽培）を参考にした。ただし、化学農薬の中に天敵に害のある薬剤が含まれていたため、天敵利用時の農薬は実際に生物農薬を使用する農家で使用されていたものとした。

2.4 副産物

昆虫飼育過程の副産物として、使用済培養土、ソラマメ残渣、昆虫の死骸等が発生する。ナス栽培過程では剪定した枝葉や収穫後の残渣等が生じる。産業廃棄物として焼却あるいは埋立てされると思われるが、いずれも発生量は不明であり、今回の解析では考慮しなかった。

3. 結果

3.1 温室効果ガス排出量

ハウス 10a あたりの温室効果ガス排出量を図 1 に示す。地球温暖化への影響は、肥料製造過程、機械製造過程、資材製造過程の順に大きい。天敵使用での排出量は、天敵飼育過程の排出量が農薬製造過程より大きいため、総排出量は慣行より 12%多くなった。しかし、代替餌を使うと放飼数が減るため排出が抑えられ、約 5%の増加にとどまった。

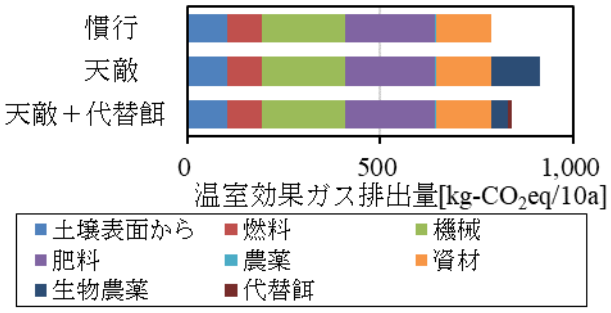


図１　殺虫剤・天敵使用パターンによる温室効果ガス排出量の変動

3.2 農薬による生態毒性

農薬散布によるハウス 10a あたりの生態毒性を解析したところ、慣行栽培で使用される農薬の生態毒性影響は 56,968 PAF.m^3.d/10a であった。

ナミテントウ使用時はアブラムシ用殺虫剤が使用されない分、毒性が減少する。農薬はソラマメ種子やバンカープランツの製造時にも使われるが、その使用量は少なく寄与はわずかであった。ナミテントウ使用時の農薬による生態毒性影響は 42,607 PAF.m^3.d/10a となり、慣行の 75%にとどまった。

4. 考察

殺虫剤の代わりに天敵昆虫を使用した際の温室効果ガス排出量は慣行より増加した。しかし、代替餌を使って放飼後の昆虫の生存期間を延ばすことにより、排出量の増加抑制が可能であった。

また、排出量を削減する方法は他にもいくつか考えられる。増殖に使われる恒温室等の設備や投入エネルギーにはスケールメリットがあると思われ、生産規模が大きくなると単位生産量あたりの負荷が小さくなる。培養土や資材由来の負荷は、その生産地や加工・輸送方法に注意して原材料を選択すれば排出を抑えられる。また、餌のアブラムシ由来の排出は人工餌の開発により削減が可能である。人工餌が開発されれば増殖方法自体が変わる可能性もあり、今後の研究が期待される。

農薬による生態毒性の影響は、天敵使用によって減少した。農薬による毒性は化学農薬に代わる生物農薬の種類が増えるに従い、さらに減少していくと思われる。農薬の生体毒性影響については今後より精緻に評価していく必要がある。

今回の解析では収量は天敵利用で十分な防除効果が得られれば慣行栽培と変わらないと考え、①～③すべて等しいとした。ただし、害虫が薬剤抵抗性を獲得している地域では、化学農薬では防除できず作物の収量、品質が低下する。そのような地域では天敵農薬を使うと収量は慣行より増えるため、単位生産物あたりでみた慣行の環境負荷は相対的に増大すると考えられる。

ナミテントウの飼育過程については実際の飼育方法が不明であることを考慮すべきであるが、天敵昆虫生産の LCA を行う際に必要となるデータ、化学農薬との相違点、解析を行う上での注意点等を示すことができたことは重要であると考える。

引用文献

1)　飛ばないナミテントウ利用技術マニュアル、農研機構近中四農研、<https://www.naro.affrc.go.jp/org/warc/tobaten/image/20150225/warc_manual_tobanai_namitento_usetechnical.pdf>（参照 2022-1-11）

コンテナ船における主要会社による CO_2 排出量の推計

Estimation of CO_2 emissions of major companies in container sector

○後藤真直*[1)]、下津浦大賀[2)]、加河茂美[3)]
Manao Gotou, Taiga Shimotsuura, 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
*gotou.manao.049@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

2018 年における世界全体の CO_2 排出量の約 2.5%は国際海運によるものである。[1)]国際海運の中でもコンテナ船は船腹量において全体の約 17.7%を占めておりドライバルク船、オイルタンカーに次いで 3 番目に大きい。[2)]世界の経済発展と共にコンテナ船による海上輸送量は増加していき[3)]、それに伴い CO_2 排出量も増加していくことが懸念される。

国際海事機関である International Maritime Organization（IMO）は、2008 年比において 2050 年の GHG 排出量を 50%削減し、2030 年の燃費効率を 60%以内に抑えることを GHG 削減目標として定めた。目標達成に向けて IMO は 2013 年に新造船に対し燃費効率における環境規制を行い、2023 年には既存船も規制の対象となる。

しかし、こうした環境規制は船の所有会社に対するものであり、船を運用する海運会社側は直接的な規制の影響を受けない。[4)]加えて、燃費効率の優れた船を多く用いる海運会社は環境的な評価を受けられていない。

本研究では、コンテナ船における主要な運航会社ごとに、2020 年時点での CO_2 排出量を推計し分析を行う。見ていく会社は、2021 年におけるコンテナ船腹量の上位 7 社の船腹量の多い方から順に Maersk Line、MSC、COSCO、CMA-CGM、Hapag-Lloyd、ONE、Evergreen である。[5)]また、ここでは主要会社ごとの排出量の推計の他に、各会社の運用する船舶の平均燃費効率を求める。

2. 研究方法

2.1 CO_2排出量の推計

鈴木（2009）を参考に、ある会社 i が運用する船舶 a の燃料消費量 FO(kg/km)を以下のように求める[6)]。

$$FO_a^i = 6.87 \cdot 10^{-5} \cdot [DSP_a^i - (1 - 0.65 \cdot LF_a^i) \cdot DWT_a^i] \cdot DSP_a^{i\,-\frac{1}{3}} \cdot V_a^{i\,2} \quad (1)$$

ここで、DSP は満載排水量(t)を表し、DWT は載貨重量トン（t）、V は航行速度（km/h）を表す。LF は消席率を表し、70%と仮定する。

次に、ある会社 i の船舶 a による 1 海里当たりの CO_2 排出量を表すQ_a^i(t-CO_2/nm)は以下の式で求まる。

$$Q_a^i = FO_a^i \times 1.852 \times C_{ef} \quad (2)$$

1.852 は 1 海里と 1km の換算のための係数である。C_{ef} は燃料消費による CO_2 の排出原単位(kg/kg)を表し、Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)に基づき、C_{ef}=3.1256 とした。[7)]

次に、ある会社 i の船舶 a による任意の航海データ j での CO_2 排出量を表すQ_{aj}^i(Mt-CO_2)は以下の式で求まる。

$$Q_{aj}^i = Q_a^i \times D_{aj}^i \quad (3)$$

D_{aj}^iはある会社 i の船舶 a による航海 j での航行距離を表す。

最後に、この会社 i による CO_2排出量を表すQ_{total}^i(Mt-CO_2)は以下の式で求まる。

$$Q_{total}^i = \sum_a \sum_j Q_{aj}^i \quad (4)$$

以上の計算を行い、主要会社ごとに実際の輸送活動に基づく CO_2排出量を推計する。

2.2 船舶の平均燃費効率の推計

ある会社 i が運用する船舶 a の燃費効率を表す FE_a^iは以下の式で求まる。

$$FE_a^i = \frac{FO_a^i \times 1.852}{DWT_a^i \times D_a^i} \quad (5)$$

燃費効率FE_a^iは 1 トンを 1 海里運ぶ際の燃料消費量のことを指し、値が小さいほど望ましい。

次に、この会社が運用する船舶の平均燃費効率を表す AFE は以下の式で求まる。

$$AFE = \frac{\sum_a FE_a^i}{\sum_a a} \quad (6)$$

以上の計算を行い、主要会社ごとに運用する船舶の平均燃費効率を求める。

3. データ

本研究は IHS Markit 社の提供する Seaweb 及び Seaweb Movements のデータから、それぞれの主要会社が 2020 年に使用したコンテナ船舶の最大載貨重量、速度等の船舶の個別のデータを用いた。[8)]

また、それぞれの主要会社によるコンテナ船舶の渡航履歴も用いることで、実際の輸送活動に基づくボトムアップ的な CO_2 排出量推計を行う。

4. 結果

7 社の内 5 社の CO_2 排出量推計と運用した船舶の平均燃費効率の計算を行った結果、図 1、図 2 の結果が得られた。図 1 は主要会社の CO_2 排出量と平均燃費効率を表し、図 2 は主要会社の平均燃費効率を CO_2 排出量で割った値と平均燃費効率を表す。

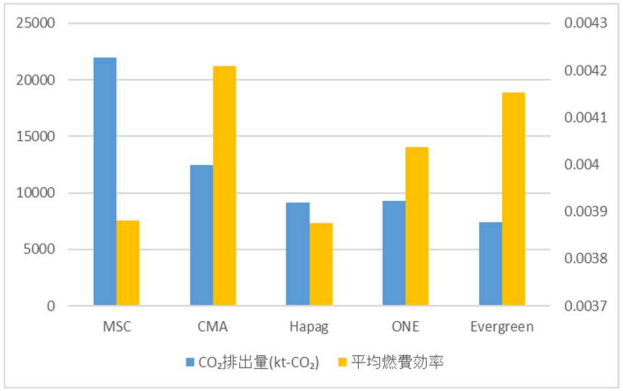


図 1. CO_2 排出量(左軸)と平均燃費効率(右軸)

排出量は MSC＞CMA＞Hapag＞ONE＞Evergreen というコンテナ船における船腹量順と同じになった。

他方で平均燃費効率は低い方から Hapag＞MSC＞ONE＞Evergreen＞CMA という順になった。

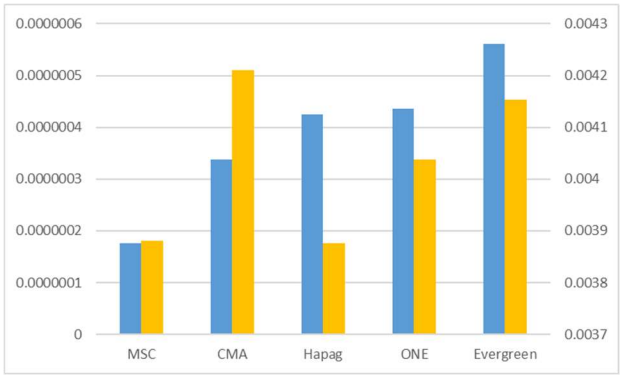


図 2. CO_2 排出量に対する平均燃費効率の比率(左軸)と平均燃費効率(右軸)

排出量に対する平均燃費効率の比率は低い方から MSC＞CMA＞Hapag＞ONE＞Evergreen という順番になり、排出量の多い順と同じになり、平均燃費効率の順位と CO_2 排出量に対する平均燃費効率の比率の順位に差異が生じた。

5. 考察

平均燃費効率の順位と CO_2 排出量の順位に関して、両者に差異が生じたのは、燃費効率の良い船舶の利用頻度が多くても実際には燃費効率の悪い船舶の使用距離が燃費効率の良い船舶よりも長い傾向にあることが原因にあると考える。

6. 引用文献

1) IMO：“Fourth IMO GHG Study 2020 Executive-Summary”, (2021) , pp. 20

2) Equasis：“Equasis Statistics – The World Fleet 2020”, (2021) , pp. 8

3) THE WORLD BANK：“Container poot traffic (TEU: 20 foot equivalent units)”<Container port traffic (TEU: 20 foot equivalent units) | Data (worldbank.org)>

4) THE WORLD BANK：“GDP (current US$)”< GDP (current US$) | Data (worldbank.org)>

5) 国土交通省：“国際海運の気候変動対策の全体像”,(2021), pp. 6

6) 日本海事センター：“日本の海運　SHIPPING NOW 2021-2022”, pp.35,< https://www.jpmac.or.jp/img/relation/pdf/2021pdf-full.pdf>　(参照 2021-12-02)

7) 国土技術政策総合研究所：“コンテナ船および RORO 貨物船の燃料消費量と長距離内航 RORO 貨物船輸送における燃料価格上昇の影響”, (2009), pp. 7

8) IPCC：“2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”　pp. 23 (2021)

9) IHS Markit:　“Seaweb Movements” (2021)

10) IHS Markit:　“Seaweb”　(2021)

脱炭素社会に向けた持続可能な都市構造の分析

Analysis of Sustainable Urban Structures toward a Decarbonized Society

○細島千聖*[1)]、吉澤大佑[1)]、加河茂美[2)]
Chisato Hososhima, Daisuke Yoshizawa, Shigemi Kagawa
1) 九州大学, 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 月のパリ協定の採択により、現在、世界規模で脱炭素化に向けての取り組みがなされており、日本においても、2050 年までにカーボンニュートラルの実現を目指すことが宣言されている。[1)]日本全体でのカーボンニュートラルを達成するためには、各自治体がそれに向けた具体的な政策を推進することが求められるが、地域ごとに土地利用や交通体系等といった都市構造に大きな違いがあることから、脱炭素化に向けて打つべき政策は各自治体で異なるものとなると考えられる。「地域の脱炭素は、地域課題の解決につながる地方創生」[2)]と言われるように、脱炭素化に向けて打たれた独自の政策が、地域の更なる魅力を生み出すことも期待できる。

本研究は、地方部と都市部の構造の違いが自家用車由来の CO_2排出量に与える影響を推計し、CO_2排出削減に効果的な都市構造の観点から考察することで、持続可能な都市の在り方を提言することを目的とする。

2. 研究手法

駅へのアクセシビリティ、高齢者の免許返納率、世帯の自動車保有状況が、自家用車由来の CO_2排出量に与える影響について分析するため、被説明変数y_iをi県における運転手 1 人あたりの年間 CO_2排出量(t-CO_2)、説明変数x_{1i}をi県 ($i = 1,2,\dots,47$) における 1 駅あたりの可住地面積 (km^2)、x_{2i}をi県における 75 歳以上免許返納率 (%)、x_{3i}をi県における 1 世帯あたりの自動車保有台数として重回帰分析を行った。

なお、本研究では、運転手 1 人あたりの年間 CO_2排出量、75 歳以上免許返納率、1 世帯当たりの自動車保有台数は 2020 年度、1 駅あたりの可住地面積については 2021 年のデータを使用している。

3. データ

運転手 1 人あたりの CO_2排出量は、自動車燃料消費量調査[3)]：第 8 表燃料別・都道府県別・25 車別 燃料消費量（ガソリン）(2020 年度版)、第 8 表燃料別・都道府県別・25 車別 燃料消費量 (軽油) (2020 年度版) のデータを用いて推計された。具体的には、運転手 1 人あたりの CO_2排出量は、自家用車のガソリン消費量と軽油消費量にそれぞれの CO_2排出係数[4)]乗じて足し合わせたものを自家用車由来の CO_2排出量とし、それを運転免許統計[5)]から得られる年齢別・種類別・運転免許保有者数（全国及び都道府県別・計）（令和 2 年版）のデータで割ることによって求めた。

1 駅あたりの可住地面積は、緯度経度付き全国沿線別駅データ[6)]から得られる県別の駅数（総数：10,410 駅）(2021 年度版) で県別の可住地面積を割ることによって計算した。なお、可住地面積（＝総面積―（林野面積＋主要湖沼面積））を求めるため、第七十一回日本統計年鑑[7)]：都道府県別面積、2020 年農林業センサス 第 7 巻 農山村地域調査報告書[8)]：林野面積、令和 3 年全国都道府県市町村別面積調[9)]：湖沼面積のデータを用いた。

75 歳以上免許返納率は、運転免許統計[5)]：令和 2 年から得られる都道府県別申請取り消し件数（令和 2 年版）と年齢別・種類別運転免許保有者数（全国及び都道府県別・計）（令和元年版）のデータを用いて、令和元年末時点で免許を保有していた 75 歳以上の高齢者のうち、令和 2 年中に免許を返納した高齢者の割合を求めた。

1 世帯当たりの自動車保有台数は、自動車検査登録情報協会の自動車都道府県別・車種別保有台数表[10)]（2020 年）のデータと、総務省の令和 3 年住民基本台帳人口・世帯数、令和 2 年人口動態（都道府県別）[11)]のデータを用いた。

また、運転手 1 人あたりの年間走行距離については、自動車燃料消費量調査[3)]：第 9 表燃料別・都道府県別・25 車別　走行キロ（ガソリン）(2020 年度版)、第 9 表燃料別・都道府県別・25 車別　走行キロ (軽油) (2020 年度版) のデータの合計を運転免許統計[5)]：年齢別・種類別・運転免許保有者数 (全国及び都道府県別・計)（令和 2 年版）で割ることによって求めた。

4. 結果・考察

4.1. 重回帰分析の結果・考察

重回帰分析より、次の結果が得られた。

$$\hat{y_i} = 0.00896x_{1i} - 0.1037x_{2i} + 0.6007x_{3i} + 1.256$$

まず、i県において、1駅あたりの面積（x_{1i}）が大きくなると、運転手1人あたりの年間CO_2排出量（以下、CO_2排出量）が増加することが分かる。1つの駅がカバーする面積が大きくなるほど、徒歩や自転車でそこまで到達することが困難となり、主な移動手段が自動車となりやすくなるからだと考えられる。

次に、i県において、75歳以上免許返納率が高くなるほど、CO_2排出量は減少することが分かる。免許返納率が高い都道府県は、高齢者が自動車に乗らない生活を選べるほど、公共交通機関が十分に整ってると言える。公共交通機関の整備が十分であれば、個々人が自動車に乗らない生活が可能となるので、自家用車由来のCO_2排出量が減少すると考えられる。

最後に、i県において、1世帯あたりの自動車保有台数が増加するほど、CO_2排出量が増加することが分かる。1世帯あたりの自動車保有台数が増加すると、運転手1人当たりの年間走行距離も増加し、それによってCO_2排出量も増加するということが分かる。

4.2. 都市部と地方部の比較

得られた回帰式に各説明変数x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}に数値を代入し、都市部と地方部で$\hat{y}_i$の平均値それぞれ求め、比較する。なお、今回は都市部を三大都市圏内の都府県（東京圏：東京・神奈川・埼玉・千葉、大阪圏：大阪、京都・兵庫・奈良、名古屋圏：愛知、岐阜、三重）、地方部を三大都市圏外の道県とする。図2は、その結果を表したものである。運転手1人あたりの年間CO_2排出量の推計値の平均値は、都市部よりも地方部の方が0.417 (t-CO_2)多いことが分かる。このことから、脱炭素化を推進するうえで、都市部の構造の方がより効果的であると考えられる。

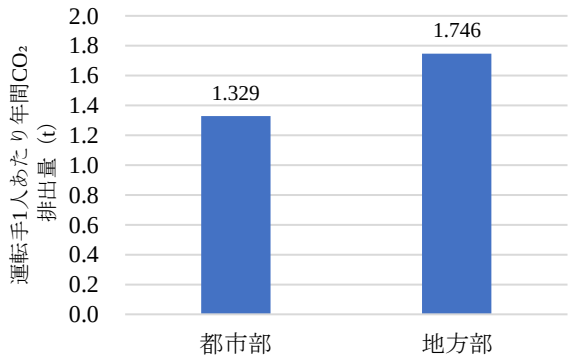


図 2. 運転手 1 人あたり年間 CO_2排出量の都市部と地方部の比較

5. 引用文献

1)環境省：カーボンニュートラルとは，脱炭素ポータル（オンライン）〈 https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/〉（2022.1.11）
2) 内閣府：地方創生施策による脱炭素社会実現に向けた取り組み〈 https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/datsutanso/dai2/siryou3-2.pdf〉（2021.12.20）
3) 国土交通省：自動車燃料消費量調査, e-Stat（オンライン）<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00600370&tstat=000001051698&cycle=8&year=20201&month=0&result_back=1&tclass1val=0>,（2021.11.30）
4) 環境省：算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf>（2021.12.22）
5) 警察庁：運転免許統計<https://www.npa.go.jp/publications/statistics/koutsuu/menkyo.html>（2021.11.30）
6) 一般財団法人日本地図センター：【2021 年度版】 緯度経度付き全国沿線別駅データ<https://net.jmc.or.jp/digital_data_statistics_eki.html>（2021.12.22）
7) 総務省：第七十一回日本統計年鑑令和 4 年<https://www.stat.go.jp/data/nenkan/71nenkan/index.html>（2021.12.8）
8) 農林水産省：農林業センサス第 7 巻農山村地域調査報告書<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=005002098&tstat=000001032920&cycle=7&year=20200&month=0&tclass1=000001147146&tclass2=000001155386&tclass3=000001155488&tclass4val=0>,（2021,12,8）
9) 国土交通省：令和 3 年全国都道府県市区町村別面積調査<https://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/MENCHO/backnumber/GSI-menseki20210701.pdf>,（2021.12.8）
10) 一般社団法人自動車検査登録情報協会：都道府県別・車種別保有台数表<https://www.airia.or.jp/publish/statistics/number.html>（2021.11.28）
11) 総務省：住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数<https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/jichi_gyousei/daityo/jinkou_jinkoudoutai-setaisuu.html>（2021.11.30）

コロナ期におけるライフスタイルの変化が環境と経済に与える影響

Environmental and Economic Impacts of the Lifestyle Changes due to the COVID-19 Pandemic

○吉住寛人*[1)]、中石知晃[2)]、加河茂美[3)]

Hiroto Yoshizumi, 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

yoshizumi.hiroto.427@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景・目的

2020 年の新型コロナウイルスの感染拡大は人々の生活様式に大きな変化をもたらした。例えば、感染拡大防止を図るために、人々の移動は制限され、テレワークが奨励されている。実際に、東京都におけるテレワークの実施率は、2020 年 4 月以降、継続して 50%を超えており、人々の生活はオンラインを中心とした生活へと着実に変化していることが伺える (東京都、2021)。

また、新型コロナウイルスの感染拡大は、人々の移動の流れにも変化を及ぼした。例えば、東京都への人口流入は、1997 年以来、継続して転入超過の状態となってるが、2020 年の人口超過数（31,125 人）は、2019 年のそれ（82,982 人）と比べると、約 60%減となっている(総務省, 2020a)。

これらの背景を踏まえ、本研究では、新型コロナウイルスの流行を契機としたライフスタイルの変化 (特に、人口動態の変化) に着目する。具体的に、コロナウイルスのパンデミックによる人口動向の変化が日本の経済面・環境面に与えた影響について定量的に分析する。

2. 分析手法・使用データ

2.1 分析手法

まず、総務省統計局が提供している住民基本台帳人口移動報告 (総務省, 2021a) から得られる、2015 年から 2020 年までの 47 都道府県の移動前の住所地別転入者数のデータを用い、都道府県間での人口動向を示す隣接行列を作成する。さくせいした隣接行列をグラフ化することで新型コロナウイルス流行前の 5 年間（2015-2019）と流行下（2020 年）の人流ネットワークを可視化する。

続いて、総務省統計局が提供する家計調査（総務省, 2021b）から得られる都道府県別の年間家計消費のデータと国立環境研究所が提供するライフサイクル CO_2 排出原単位（3EID）を作成した隣接行列に応用することで、コロナウイルスのパンデミックによる人口動向の変化が日本の経済面・環境面に与えた影響について分析する。

2.2 データ

データは総務省統計局、住民基本台帳人口移動報告 (総務省、2021a) から 47 都道府県の移動前の住所地別転入者数を入手した。また、地方区分は総務省統計局が提供している家計調査 (総務省, 2021b) における地方区分に基づき、北海道、東北、関東、北陸、東海、近畿、中国、四国、九州、沖縄の 10 地方に分けている。表 1 に詳細な都道府県の地方区分を示す。

表 1. 都道府県の地方区分

北海道	北海道	北陸	新潟		岡山
東北	青森		富山		広島
	岩手		石川		山口
	宮城		福井	四国	徳島
	秋田	東海	岐阜		香川
	山形		静岡		愛媛
	福島		愛知		高知
関東	茨城		三重	九州	福岡
	栃木	近畿	滋賀		佐賀
	群馬		京都		長崎
	埼玉		大阪		熊本
	千葉		兵庫		大分
	東京		奈良		宮崎
	神奈川		和歌山		鹿児島
	山梨	中国	鳥取	沖縄	沖縄
	長野		島根		

3. 結果・考察

図 1 は、2015 年から 2020 年までの日本国内における移動者の推移を表す。

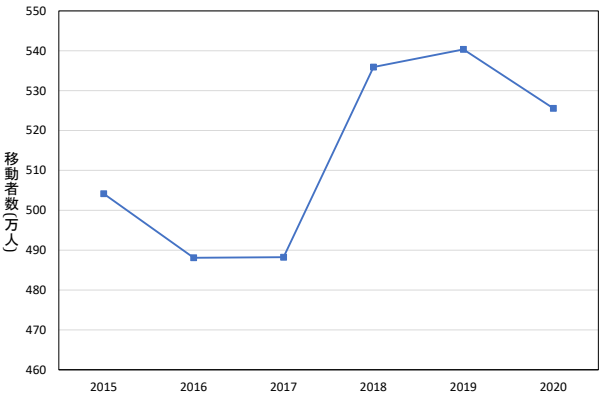


図 1. 年別移動者数の推移（2015 年－2020 年）

図 1 から新型コロナウイルス流行前の 2019 年から流行後の 2020 年にかけて、転入、転出などの移動者数が大きく減少していることが分かる。

次に、47 都道府県を前述した 10 地方に区分した人口動向を、図 2、図 3 で、2020 年、2019 年それぞれ表した。

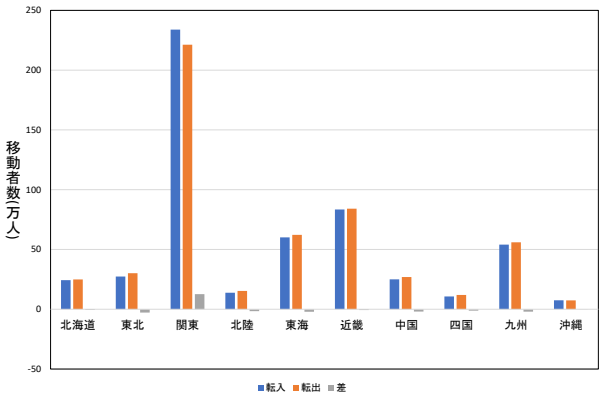


図 2. 地方別人口動向（2019 年）

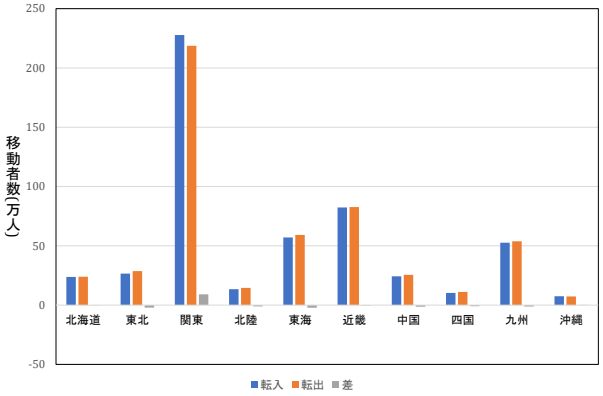


図 3. 地方別人口動向（2020 年）

地方別の移動者の動向をコロナ前後で比較した場合、移動者の総数が減少したことによる、転入、転出の減少が見られた。また、関東地方における転入超過数の減少、その他の地域における転出増加数の減少が見られる。

図 4 は、2019 年と 2020 年での各都道府県の転入超過率の対前年差を表している。図 4 より、人口動向が具体的にどのように変化しているかを詳細に観察することができる。具体的に、日本三大都市と呼ばれる東京、大阪、愛知おいて、転出超過率が高い状態であり、特に東京で転出者が増加傾向にあることが分かる。反対に、関東圏を中心とした、大都市近郊では、転入超過率が増加し、大都市からの人口流入の傾向がある。

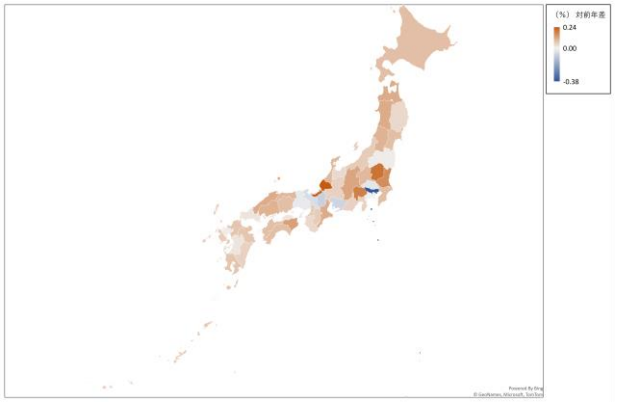


図 4. 都道府県間移動者の転入超過率（2019 年－2020 年）

本要旨では、作成した隣接行列に基づき、47 都道府県を 10 地方に分割し、地方間における人口動向に着目することで、大局的に人口動向の変化を分析した。本会のポスター発表では、行列化したデータを基に、新型コロナウイルスが流行しなかった場合の 2020 年の人口動向を推計する。そして、推計したデータと実際の 2020 年の人行動を各地域の消費性向と掛け合わせることによって、コロナ流行による人口動向の変化が CO_2 排出にどのような影響を与えたかについての考察を中心に行う予定である。

4. 参考文献

1) 総務省統計局 (2021a), 住民基本台帳人口移動報告, (〈https://www.stat.go.jp/data/kakei/index.html〉)
2) 総務省統計局 (2021b), 家計調査, (〈https://www.stat.go.jp/data/idou/index.html〉)
3) 東京都 (2021), (〈https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2021/11/11/12.html〉),テレワーク実施率調査結果
4) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング, (〈https://www.murc.jp/report/rc/column/search_now/sn210614/〉),『コロナ禍の一年、東京一極集中から流出への人口動向の大転換～2020 年度の東京都の人口動向を総括する～』

ポスターセッション

[1-P2] ポスターセッション(2)

2022年3月2日(水) 15:50 ～ 16:50 P1会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-P2-01] 日本 LCA学会学生交流ネットワーク 2021年度活動報告

*鬼頭 みなみ[1]、前野 啓太郎[1]、大津 太伸[2]、岡部 紘樹[3]、松田 敏明[4] （1. 九州大学、2. 横浜国立大学、3. 東京大学、4. 立命館大学）

[1-P2-02] 土石系資源の物量投入産出表の作成と資源利用効率の評価

*千葉 優衣[1]、橋本 征二[1] （1. 立命館大学）

[1-P2-03] 東京都市大学におけるカーボンフットプリントの算定

*渡邉 駿介[1]、伊坪 徳宏[1] （1. 東京都市大学）

[1-P2-04] 建築分野におけるカーボンプライシングや自然資本会計の活用に関する検討

～事例建物の内部コスト・外部コストの削減対策導入による効果と評価の課題～

*望月 唯香[1]、藤田 あゆ[1]、東 弘菜[1]、小林 謙介[1] （1. 県立広島大学）

[1-P2-05] 岸和田だんじり祭のカーボンフットプリント

*村田 龍生[1]、河本 一誠[2]、伊坪 徳宏[1] （1. 東京都市大学、2. リマテックR&D株式会社）

[1-P2-06] 環境負荷低減に向けた意思決定を支援するシェアリングサービスの類型化

*若林 宏[1]、天沢 逸里[1]、平尾 雅彦[1] （1. 東京大学）

[1-P2-07] COVID-19による生活変容がカーボンフットプリントに及ぼす影響は従事する産業ごとに異なるのか？

*吉良 成美[1]、重富 陽介[1] （1. 長崎大学）

[1-P2-08] 一般廃棄物中の食品廃棄物量及び食品ロス量の推計：滋賀県を対象として

*GE YICHEN[1]、橋本 征二[1] （1. 立命館大学）

[1-P2-09] 廃棄物処理業における熱中症の危険性及び労働強度の傾向

*岡本 宗一郎[1]、曹 剣飛[1]、橋口 伸樹[1]、児玉 耕太[1]、橋本 征二[2] （1. 立命館大学大学院、2. 立命館大学）

[1-P2-10] 廃太陽光パネルの資源循環に着目したライフサイクル評価

*兵法 彩[1]、諏訪 出[1]、竇 毅[1]、所 千晴[2,1]、菊池 康紀[1] （1. 東京大学、2. 早稲田大学）

[1-P2-11] 中高層住宅および非住宅分野への木材活用による森林資源蓄積量への影響

*若林 國久[1]、小林 謙介[1]、原田 郁美[1]、田中 小雪[1] （1. 県立広島大学）

[1-P2-12] 建築分野におけるカーボンプライシングや自然資本会計の活用に関する検討～先進的な集合住宅モデルを対象とした内部コスト・外部コストの影響分析～

*東 弘菜[1]、望月 唯香[1]、藤田 あゆ[1]、小林 謙介[1] （1. 県立広島大学）

[1-P2-13] 広島県庄原市西城地域における CO_2排出量が少ないニューツーリズムの検討

*田中 小雪[1]、原田 郁美[1]、若林 國久[1]、小林 謙介[1]、岡崎 優子[2]、平井 正澄[3] （1. 県立広島大学、2. 特定非営利活動法人　西城町観光協会、3. 庄原市西城自治振興区）

[1-P2-14] テレワークが環境と経済に与える影響

*木村 聡[1]、大賀 雄介[1]、加河 茂美[2] （1. 九州大学、2. 九州大学経済学研究院）

[1-P2-15] 線形計画法を用いたバイオマスプラスチック導入に向けたプラスチック資源利用システム設計

©日本LCA学会

*黒田 裕章[1]、天沢 逸里[1]、中谷 隼[1]、平尾 雅彦[1]（1. 東京大学）

[1-P2-16] 教育現場における ICT活用に伴うペーパーレス化が環境に与える影響

*西藤 和佳[1]、三苫 春香[2]、加河 茂美[3]（1. 九州大学、2. 九州大学大学院経済学府、3. 九州大学大学院経済学研究院）

[1-P2-17] 環境影響評価と消費者分析に基づくサステイナブルな衣服シェアリングサービス設計

*吉田 樹[1]、天沢 逸里[1]、木見田 康治[1]、平尾 雅彦[1]（1. 東京大学）

[1-P2-18] 建築分野における利用するバックグラウンドデータの差異が評価結果に及ぼす影響の検討
～3EIDと IDEAを用いた分析～

*水野 皓太[1]、小林 謙介[1]、山田 優吾[1]（1. 県立広島大学）

[1-P2-19] バイオ燃料と燃料電池を用いた大型トラックの環境影響評価
その１　バイオ燃料と軽油との比較

*久地樂 昌紀[1]、武田 克彦[2]、佐野 慶一郎[2]、河西 純一[2]、大井 康寛[3]、八木田 浩史[4]、佐々木 彩音[5]、深井 晶央[5]（1. 関東学院大学大学院、2. 関東学院大学、3. 元関東学院大学、4. 日本工業大学、5. いすゞ自動車株式会社）

©日本LCA学会

(2022年3月2日(水) 15:50 〜 16:50 P1会場)

[1-P2-01] 日本 LCA学会学生交流ネットワーク 2021年度活動報告

*鬼頭 みなみ[1]、前野 啓太郎[1]、大津 太伸[2]、岡部 紘樹[3]、松田 敏明[4] （1. 九州大学、2. 横浜国立大学、3. 東京大学、4. 立命館大学）

©日本LCA学会

土石系資源の物量投入産出表の作成と資源利用効率の評価

Construction of physical input-output table for earth and stone resources and evaluation of its resource use efficiency

○千葉優衣*[1)]、橋本征二[1)]
Yui Chiba, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* ce0008rh@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

我が国の物質フローにおいては、岩石・砂利・砕石、コンクリート塊・アスファルトコンクリート塊などの土石系資源の占める割合が大きく、国全体の天然資源等の投入量や廃棄物等の発生量・処分量に大きな影響を与えてきた。土石系資源の効率的な利用は重要な課題の 1 つであり、更なる対策の検討や取組状況のモニタリングを行うためには、その物質フローを詳細に把握し、その利用状況を適切に評価する必要がある。土石系資源の物質フローについては、様々な研究が報告されているが、そのライフサイクルに渡る物質フローを体系的に記述した例は見られない。また、そのライフサイクルに渡る資源利用効率を評価した研究も見られない。本研究では、土石系資源の物質フローをライフサイクルに渡って推計するとともに、これを体系的に記述した物量投入産出表を作成した。また、推計した物質フローに対して物質循環の 6 つの指標[1)]を適用し、その利用効率を評価した。

2. 方法

2.1 物質フローの推計と物量投入産出表の作成

土石系資源のライフサイクルを原材料生産段階、半製品生産段階、最終製品生産段階、使用段階、廃棄・再資源化段階に分け、各段階における物質の投入量・産出量を推計した。対象物質は建設活動に用いられる非金属鉱物とし、各段階の原材料・製品の分類は各種統計の分類を参考に設定した。推計には、骨材石材需給表、砕石統計年報、セメントハンドブック、生コンクリート統計年報、アスファルト合材統計年報、建設資材・労働力需要実態調査、建設工事受注動態統計調査、建築統計年報、建設副産物実態調査等の統計・調査情報を用いた。

物量投入産出表は、経済活動の部門を列、製品・資源・廃棄物などの部門を行として作成した。原材料等の物質の投入を正の値、製品や廃棄物などの物質の産出を負の値で記述した。

2. 物質循環の 6 つの指標の適用

物質循環の 6 つの指標[1)]は、直接物質投入量(DMI)、使用済み製品再生利用率(URRUP)、物質利用効率(MUE)、物質使用時間(MUT)、使用済み製品再資源化率(RRUP)、国内排出物質量(DPO)で構成され、本研究ではこれを用いて土石系資源の資源利用効率を評価した。

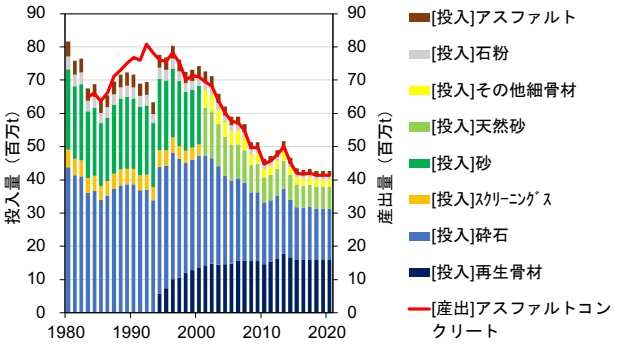


図 1. アスファルト・コンクリート生産段階における投入量と産出量

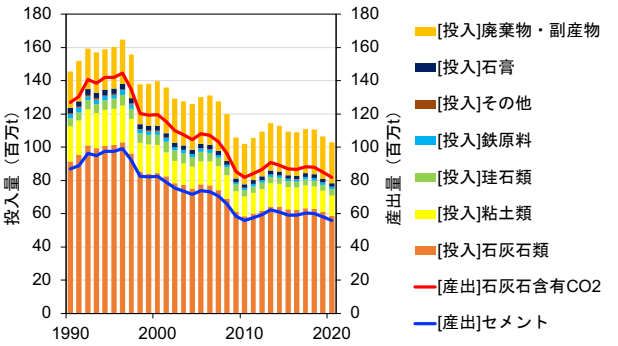


図 2. セメント生産段階における投入量と産出量

3. 結果と考察

図 1、2 にアスファルト・コンクリート及びセメントの生産段階における原材料の投入量と製品の産出量の推計結果を示す。図 1 のアスファルト・コンクリート生産段階については、投入量と産出量がほとんど等しく、整合する結果となった。図2のセメント生産段階については、一部の副産物・廃棄物の燃焼等が考慮できていないが、それを考慮しても投入量が産出量を上回る結果となった。こうした整合性について確認しつつ、土石系資源の物質フロー全体を推計した結果、資源利用効率を評価した結果については、学会当日に発表する。

謝辞：本研究は、環境研究総合推進費(JPMEERF20193002)及び科学研究費補助金(19H04329)による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

1) Hashimoto, S and Moriguchi, Y : Resources, Conservation and Recycling, 40(3), pp.185-200, 2004

東京都市大学におけるカーボンフットプリントの算定

Calculation of Carbon Footprint for Tokyo City University

○渡邉駿介*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Shunsuke Watanabe, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学
＊ g1862077@tcu.ac.jp

1．はじめに

国や自治体がカーボンニュートラルに向けた宣言を行う中、脱炭素社会の構築を先導する大学が気候変動対策を具体的に推進することが望まれている。本研究では日本で初めて ISO14001 の認証登録を受けた東京都市大学が、カーボンニュートラルの実現に向けた基礎資料を提供することを目的に、大学全体のカーボンフットプリントを行う。SCOPE3 に準じた分析を行い、構成員が主体的に取り組むことを想定して学生活動による影響を含めた評価を行う。

2. 研究目的

過去の研究でのカーボンフットプリントは評価対象が学校職員のものがほとんどであった。そこで本研究では学校職員に加えて、可能な限り学生の行動を評価範囲に含めた。学生の通学や購入物品を評価範囲とすることで、より網羅的な分析が可能となり、構成員ごとに GHG 削減のための取り組みへと繁栄しやすいものと考えた。また、比較対象をコロナ禍前後(2019、2020 年)にすることで、新型コロナによる環境負荷量の変化にについて定量的な算定を試みた。

得られた結果と改善案を大学内で共有することで、環境教育及び持続可能な大学経営のための資料として活用するとともに、ISO14001 を初めて取得した大学として、カーボンニュートラルに向けた取組へと展開するための情報基盤として活用されることが期待される。

3. 研究方法

計算方法として大学の評価用に SCOPE１～３を分類し(表１)、各カテゴリの会計データを担当部署より受領した。さらに、これらのデータに金額基準の GHG 排出量を乗じて算定結果を得た。GHG 排出原単位は産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）を使用した。新型コロナによる影響について検証するため、2019 年と 2020 年のデータをキャンパス別に得た。

表１　SCOPE１～３分類

ジャンル	内容
SCOPE1, 2	大学構内、所有車両の燃料消費、大学構内での電力消費量
SCOPE３（カテゴリ 1）	大学、教職員、学生が購入した製品・サービス
SCOPE３（カテゴリ 2）	大学が購入又は取得した資本財の製造・輸送(建物、IT 機器など)
SCOPE３（カテゴリ 3）	大学が購入した燃料・エネルギーの採取・製造・輸送
SCOPE３（カテゴリ 5）	大学の運用時に発生する廃棄物の廃棄・処理(可燃ごみ、不燃ごみ、排水、指定廃棄物)
SCOPE３（カテゴリ 7-1）	教職員の研究及び教育のための出張
SCOPE３（カテゴリ 7-2）	学生の通学
SCOPE３（カテゴリ 8）	リース資産
SCOPE３（カテゴリ１５）	投資

4. 算定結果

4.1 年度別の結果

GHG 排出総量はそれぞれおよそ 1.7 万/年、2.1 万トン/年であり(図 1)、一人当たりに換算すると、2019 年がおよそ 2.2 トン/年、2020 年がおよそ 2.6 トン/年であった(教職員 280 人、学生 7658 人)。合計値としては、コロナ禍で大学立ち入りが抑制されている 2020 年の方が 2019 年に比べて GHG 排出量が増加した。

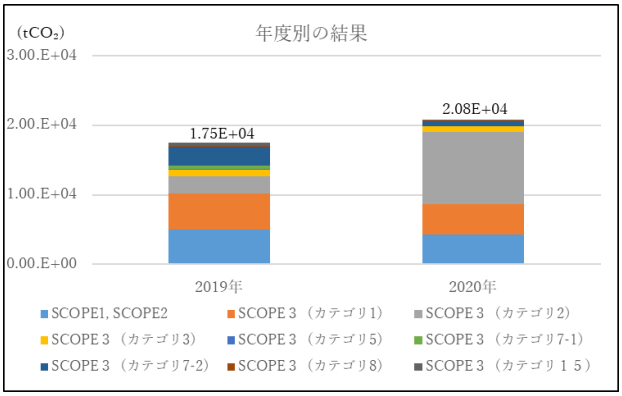


図１　年度別 GHG 排出量

表２　年度別 GHG 排出量　内訳

カテゴリ	2019 年	2020 年
SCOPE1，SCOPE2	4.98.E+03	4.33.E+03
SCOPE３（カテゴリ 1）	5.25.E+03	4.34.E+03
SCOPE３（カテゴリ 2）	2.48.E+03	1.04.E+04
SCOPE３（カテゴリ 3）	9.50.E+02	7.67.E+02
SCOPE３（カテゴリ 5）	4.72.E+01	2.02.E+01
SCOPE３（カテゴリ 7-1）	5.25.E+02	4.27.E+01
SCOPE３（カテゴリ 7-2）	2.68.E+03	6.28.E+02
SCOPE３（カテゴリ 8）	1.29.E+02	1.25.E+02
SCOPE３（カテゴリ 15）	4.92.E+02	1.53.E+02
合計(tCO_2)	1.75.E+04	2.13.E+04

4.2 SCOPE3 カテゴリ 1 について

分類される項目が最も多かった SCOPE3 のカテゴリ 1 について取り上げる。2019 年に比べ 2020 年の GHG 排出量が減少した要因として、高校訪問などの対面機会の減少、昼食や弁当といった食費の減少が考えられる(図 2)。

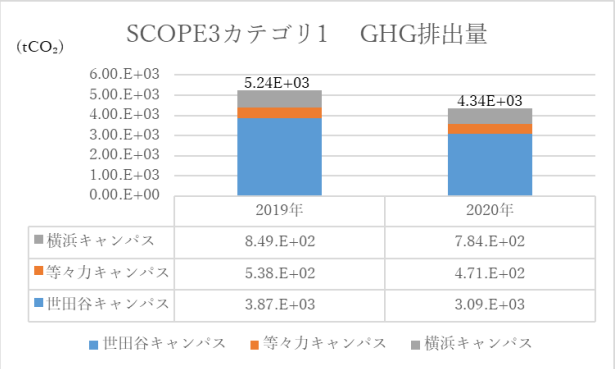


図 2　SCOPE3 カテゴリ 1　キャンパス別 CO_2 排出量

4.3 SCOPE3 カテゴリ 2 について

本研究において結果に大きく影響を与え、2020 年では GHG 排出量のおよそ半分(50%)を占めた SCOPE3 のカテゴリ 2 について取り上げる。この要因としては、等々力キャンパス移転による建設工事、世田谷キャンパスにおける 2019 年の台風による建設補修による影響、オンライン授業への対応(WEB カメラ、照明、ノートパソコン等)やコロナ対応(加湿器、除菌用アルコール、除菌スプレー等)における購入物品の増加が挙げられる(図 3)。また当カテゴリを除けば、他カテゴリは 2019 年の方が概ね GHG 排出量は大きかったため、建設における GHG 排出量の大きさが伺える。

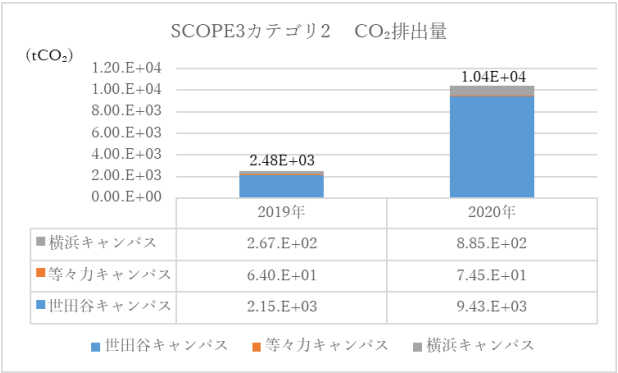


図 3　SCOPE3 カテゴリ 2　キャンパス別 CO_2 排出量

５．結果から分かる取り組むべき課題

SCOPE3 のカテゴリ 1 について、私はコピー用紙の使用を減少させるべきであると考える。2019 年のコピー用紙の購入金額はおよそ 39 万円なのに対し、2020 年はおよそ 185 万円と、大幅に購入金額が増加している。コピー用紙の購入金額を減らすことで廃棄物(SCOPE３，カテゴリ５)の減少にも繋がり、取り組みにおける有用性がある。そこで私は 2 つの取り組みを考えた。1 つ目は古紙回収 BOX の設置による再利用である。片面のみしか使えなかったとしても、必要とする学生は多いはずである。2 つ目は片面のみ使用可能な紙をコピー用紙として再利用である。私は学生のコピー機の印刷ミスをよく見かける。そこで本来新品を買う分の費用を浮かせ、その分印刷ミスの用紙でコピーを行う際に無料で提供するシステムを導入することで、無駄な出費及び廃棄物を減らすことが可能となる。

SCOPE3 のカテゴリ 2 について考えたい。建設は耐用年数を考慮すると 1 年間での GHG 排出量換算の値は小さくなるだろう。そのため私は建設補修に取り組みの重点を置く必要があると思う。建設補修の GHG 排出量を抑えるには、大学側がより環境配慮された委託会社の選択を行うべきであろう。大学側が環境配慮された建設会社を選ぶことで、持続的な環境取り組みに繋がる。設備に関しては短くとも耐用年数が 20 年あるため、20 年後はより設備の環境面での技術向上が望める。

6 引用文献

1)　CFP プログラム CFP とは
<https://www.cfp-japan.jp/about/>
2)　環境省 算定方法・排出係数一覧 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧,<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf>
3)　国土交通省　期待耐用年数の導出及び内外装・設備の更新による価値向上について
<https://www.mlit.go.jp/common/001011879.pdf
>

建築分野におけるカーボンプライシングや自然資本会計の活用に関する検討
-事例建物の内部コスト・外部コストの削減対策導入による効果と評価の課題-
Utilize Carbon Pricing and Natural Capital Accounting in Building
Improvement Effects of Internal and External-Cost and Issues of Evaluation based on Case Study

○望月唯香 [1)]、藤田あゆ [1)]、東弘菜 [1)]、小林謙介*[1)]
Yuika Mochizuki, Ayu Fujita, Hirona Azuma, Kensuke Kobayashi
1) 県立広島大学
* kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. 緒言

近年、政策や事業活動における環境対策の一環として、カーボンプライシングや自然資本会計のような、環境影響の貨幣価値換算を用いた評価が着目されている。しかし、その具体的な評価方法等は議論の最中であり、活用に向けた検討は途上の状況であると認識する。また、国内の CO_2排出量や廃棄物量等において、建築分野は大きな影響を及ぼしている [1)]。

以上を踏まえ、建築分野におけるカーボンプライシングや自然資本会計の活用策を検討することを目的として、8 件の事例建物を用いた評価を行った。本稿では、事例建物のライフサイクルにおいて影響が大きくなり得る投入資材を対象に、内部・外部コストの削減対策を検討し、導入した場合の効果や評価における課題を分析した結果について報告する。

2. 分析方法

はじめに、表 1 の事例建物における投入資材の内部コストと外部コストを算出した。内部コストは、IDEA の換算係数表や積算資料 [2)]等を基に、国内における材料価格の平均値を算出した。外部コストは、カーボンプライシングや自然資本会計を念頭においた試算を行った。具体的に、カーボンプライシングでは、炭素税が導入されている国の中で最も低い日本（289 円/ton-CO_2）と最も高いスウェーデン（15,670 円/ton-CO_2：2017 年時点）の税価格 [3)]が導入された場合を想定し、各国の税価格に CO_2排出量を乗じた。また、自然資本会計では、LIME Ⅱの統合化結果を用いた。

昨年の検討 [4,5)]で、事例建物のライフサイクルにおける内部・外部コストは、製造・運用・改修段階の影響が大きく、投入資材の製法や使用材料の変更等が欠かせないことを示した。また、影響が大きくなり得る投入資材を抽出した結果、木材や鋼材、コンクリート等の主要材料に加えて、石こうボードやエアコン、アルミニウム製品等の影響が大きくなることが分かった。

そこで、IDEA のプロセスデータを用いて、各資材の影響が大きくなる要因を分析すると共に、内部・外部コストの削減対策を検討した。さらに、対策による削減コストを事例建物に反映した場合の効果を算出した。

表1　分析事例建物の概要

建物	主要構造		階数等	延床面積(m²)	資材データ数	耐用年数
A	木造	戸建住宅	地上2階	134	87	30
B	木造	集合住宅	地上2階（計6戸）	331	140	35
C	S造		地上4階（計12戸）	352	325	
D	RC造		地上4階（計12戸）	462	266	
E	木造		地上4階（計12戸）	440	311	
F	RC造				207	
G	木造		地上2階（計6戸）	351	524	
H	RC造	事務所ビル	地上8階・地下1階	7583	478	

3. 結果

3.1　投入資材の改善効果

事例建物において影響が大きくなり得る資材を対象に、各々の削減対策について検討した結果を表 2 に示す。削減対策として、木材（ひき角類、普通合板、集成材）は、乾燥時にバイオマス乾燥を実施すること、鋼材（普通鋼形鋼、普通鋼熱延鋼板）は鉄スクラップを用いて製造すること、コンクリートは高炉セメントを用いて製造すること、アルミニウム製品（住宅用アルミニウム製サッシ、アルミニウム押出品、アルミニウム圧延品）は再生地金を用いて製造すること、石こうボードは排煙脱硫技術を用いて製造することが有効であると考えられた。また、衛生陶器やエアコン等の設備機器に関しては、材料の変更は行わず、加工時の電力を全て太陽光発電によるものと想定してその効果を分析した。

表2　投入資材の削減対策法

資材名	削減対策
ひき角類	バイオマス乾燥の実施
普通合板	バイオマス乾燥の実施
集成材	バイオマス乾燥の実施
普通鋼形鋼	鉄スクラップの利用
普通鋼熱延鋼板	鉄スクラップの利用
生コンクリート	高炉セメントの利用
住宅用アルミニウム製サッシ	再生地金の利用
アルミニウム押出品	再生地金の利用
アルミニウム圧延品	再生地金の利用
石こうボード	排煙脱硫技術の利用
エアコン	太陽光発電エネルギーの利用
衛生陶器	太陽光発電エネルギーの利用

これらの対策による主な資材の内部コスト・外部コストの削減効果を図 1～4 示す。図 1 には普通合板（統合化）、図 2 には普通鋼形鋼（スウェーデン炭素税）、図 3 には生コンクリート（スウェーデン炭素税）、図 4 にはアルミニウム圧延品（統合化）の分析結果を例示している。本検討から、削減対策の導入により外部コストを大きく削減できる可能性があることが示された。また、ケースによっては、材料費である内部コストの削減効果があることも確認できた。

なお、本検討において、改善後の材料費（内部コスト）に関する情報が得られなかった資材（普通鋼形鋼、普通鋼熱延鋼板）については、対策技術の導入による内部コストの変化は考慮せず分析した。また、木材の再造林率は 100%と仮定した。

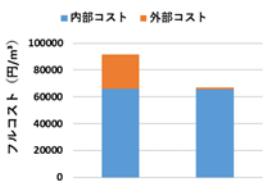


図1　普通合板の削減効果



図2　普通鋼形鋼の削減効果

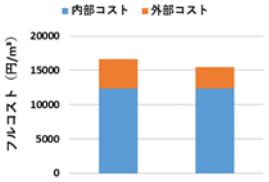


図3　生コンクリートの削減効果

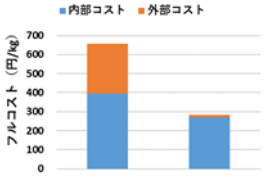


図4　アルミニウム圧延品の削減効果

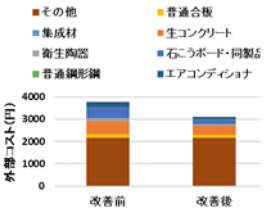


図5　建物Bの削減効果

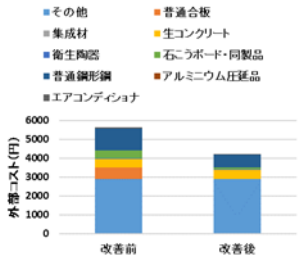


図6　建物Cの削減効果

3.2　事例建物における改善効果

建物のライフサイクルの中で特に削減策の検討が重要になると考えられる製造・改修段階を対象に、表 2 で示した削減対策を導入した場合の効果について分析した。ここでは、木造住宅である建物 B のスウェーデン炭素税の結果（図 5）、S 造住宅である建物 C の統合化の結果（図 6）を例示する。

図 5 の事例では、外部コスト（スウェーデン炭素税）を 20%程度削減でき、フルコストでは 1%程度の削減効果があった。中でも、排煙脱硫技術を用いて製造した石こうボードの効果がその削減率に大きく影響していた。図 6 の事例では、外部コスト（統合化）を 35%程度削減でき、フルコストでは 2%程度の削減効果があった。中でも、木材のバイオマス乾燥の実施による効果が大きかった。

以上にように、一部の投入資材の改善のみでも、建物全体の外部コストを大きく削減できるが可能性があることが分かった。また、フルコストの観点においても、少なからず削減効果があることを確認できた。本検討結果より、資材の製造過程において、材料の代替や製法の変更等の対策を多数加えることによって、さらに大きな効果が期待されると考えられる。

3.3　評価の課題

本検討は概算のため、個別のデータの微妙な差異等を検討するほどの精度は有していないことに注意が必要である。例えば、内部コストの算出において、国内における材料費の平均値を用いていることから、年次等による変化を考慮できていないケースもある。また、表 2 に示した削減対策の実施による資材の性能等への影響は考慮できておらず、今後のさらなる活用に向けては、これらを踏まえた詳細な分析を行う必要がある。

4. まとめ

建築分野におけるカーボンプライシングや自然資本会計の活用策を検討するために、8 件の事例建物を用いた分析を行った。本稿では、事例建物において影響が大きくなり得る投入資材の削減対策方法を検討し、それによる効果を分析した結果について報告した。本検討結果から、投入資材の内部コスト・外部コストの削減対策を導入することにより、事例によっては大きな削減可能性があることが示された。

5. 引用文献

1) 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”, (2013), p.1　2) 一般財団法人 経済調査会, “積算資料”, 東京, (2014, 2020)　3) 環境省：“諸外国における炭素税等の導入状況”, 入手先〈https://www.env.go.jp/policy/tax/misc_jokyo/attach/intro_situation.pdf〉, (参照 2022-01-09)　4) 望月ら：“建築分野における環境影響の貨幣価値換算に関する検討 ～事例建物の投入資材別の支配的要因分析～”, LCA 学会研究発表会, (2021)　5) 藤田ら：“建築分野における環境影響の貨幣価値換算に関する検討 ～事例建物のプロセスごとの内部コスト・外部コストの影響分析～”, LCA 学会研究発表会, (2021)

岸和田だんじり祭のカーボンフットプリント

Carbon footprint of Kishiwada Danziri Festival

○村田　龍生[*1)]、河本　一誠[2)]、伊坪徳宏[1)]
Ryusei Murata, Issei Kawamoto, Norihiro Itsubo
1)東京都市大学, 2)（株）リマテック R&D
＊ g1862065@ tcu.ac.jp

1.　はじめに

LCA は主に製品やサービスを対象として利用されてきたが、近年はイベントを対象にした分析にも活用されている。東京オリンピックパラリンピックでは総排出量が約 300 万トンと推定され、計画見直しなどの排出削減のための取り組みの実施に加えて、事業者と自治体の連携により排出総量を上回る規模でカーボンオフセットが実施された。多様なステイクホルダーが集まるイベントにおいて環境情報を共有することは、連携してプロジェクトを進める良い機会になるものと期待される。大阪では、官民連携で脱炭素社会を実現するための取り組みを強化するためのプラットフォーム、大阪ゼロカーボンファウンデーション(OZCaF)を設置した。同組織の初めての取り組みとして、日本を代表する祭事である岸和田だんじり祭のカーボンフットプリントを行うこととなった[3)]。本発表では、本学が OZCaF と自治体と連携して、岸和田だんじり祭のカーボンフットプリントを実施した結果について報告する[2)]。

2.　研究目的

本研究では、岸和田だんじり祭に関する温室効果ガス(GHG)排出量についてライフサイクルの視点から評価を行う。GHG 排出量算定においては、事業者や自治体関係者との協議を通して極力一次データを修得するとともに、算定結果は関係者に共有し、GHG 排出量を削減するための基礎資料を提示することを目的とした。

3.　算定概要

2013 年度､2019 年度の岸和田だんじり祭を評価対象とする。機能単位は開催期間中の関係者・来場者の参加とした。分析においては、「主催者」､「来訪者」に分けて CO2 排出量を算定した。主催者は岸和田市と運営団体で構成し、来訪者は大阪府内、府外、海外に分類した。システム境界を図 1 に示した。

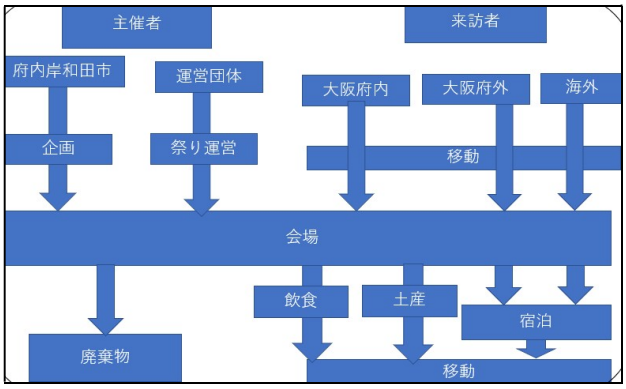


図 1.　本研究のシステム境界

4.　算定方法

4.1.　主催者

主催者に関しては、祭礼団体と観光振興協会による運営関係経費、自治体による廃棄物処理を評価対象とした。祭礼団体の評価においては、岸和田市 A 町の祭礼に関する会計データを基に環境負荷を算定し、これを他の町の環境負荷に拡張した。観光振興協会については、だんじり祭の運営委託費のデータから GHG 排出量を算出した。いずれも支出金額に金額基準の環境負荷原単位を適用して算出した[4)]。一般廃棄物に関しては、自治体より処理量・処理方法、輸送ルート・手段に関する情報を得た後、対応する CO2 排出原単位を乗じて算出した。

4.2.　来訪者

来訪者では、お土産、施設利用、飲食、移動、宿泊を対象とした。来訪者人数と府内外・海外の内訳は主催者の聞き取りデータを利用した。施設利用、飲食、宿泊に関する費用データは 2013 年実施のだんじり祭経済波及効果算定調査より、土産については観光サテライト勘定より得た後、金額基準の GHG 排出原単位を乗じた。移動の算定では大阪府内､大阪府外(近畿地方)、外国人観光客を分類した。大阪府内、大阪府外(近畿地方)の観光客は鉄道を使用し､外国人観光客は鉄道と飛行機を使用するものと仮定した。

5. 算定結果

5.1. 主体別

図 2 に、岸和田だんじり祭のカーボンフットプリント算定結果を示した。ここでは「主催者」、「来訪者」の内訳を合わせて示した。総排出量はおよそ 10,000 トンで来訪者の排出量が相対的に大きかった。

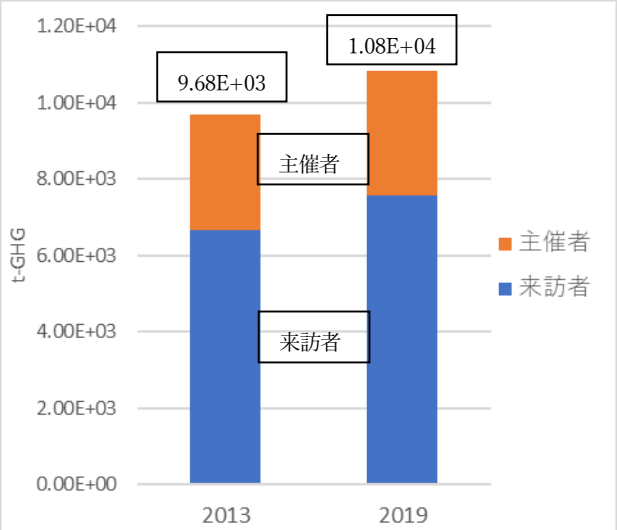


図 2. 岸和田だんじり祭のカーボンフットプリント算定結果(2013、2019 年度)

5.2. 来訪者

図 3 に来訪者の GHG 排出量の内訳を示した。2013 年、2019 年いずれも 7,000 トン前後であり、土産と飲食が大きい点で共通した。土産と飲食はいずれも観光サテライト勘定を基に、日本の観光客が消費するひとり一日当たりの平均消費額を基に算定しているため、必ずしも今回のイベントに特化したものではない点に注意が必要である。また、交通費が上記に比べて相対的に小さかった。これは来場者がいずれも電車での利用を想定したこと、大阪府外の来場者は京都や奈良など近郊の近畿県内からの移動と想定したことが影響した。また、海外からの移動客数は観光拠点の訪問人数より得たが、実際の訪問者数に対して少ない可能性が高い。以上より、交通費に関する環境負荷量は過小評価の可能性がある。

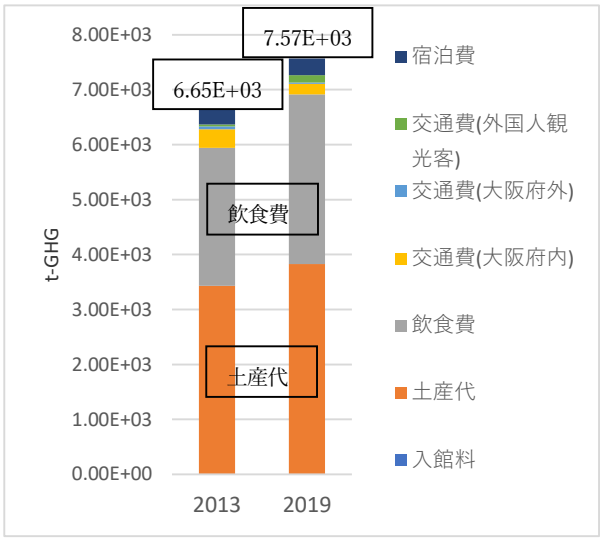


図 3. 来訪者の GHG 排出量の内訳（2013、2019 年度）

6. まとめ・課題

本研究では、岸和田だんじり祭を対象にカーボンフットプリントを行った。主催者と来場者に大きく分けて分析した結果、来場者の負荷が相対的に大きかった。なかでも土産と飲食に関する負荷が大きく、食品の地産地消やフードロスの削減や環境配慮の特産品の開発や土産品のグリーン購入などの実施が有効であるものと考えられた。今回の分析では、来場者の構成や費用、主催者のデータも詳細な分析を行う上で十分でなかったことから、一次データの入手方法についても整備することが課題として認識されたが、産官学連携でイベントのカーボンフットプリント算定を通して、OZCaF 参加団体が CO2 の見える化を推進するための情報を共有する機会が得られたことは相応の意義があったものと考える。

7. 引用文献

1) 環境省　カーボンオフセット. <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/carbon_offset.html>,
2) “岸和田だんじり祭”, <http://www.oda-net.jp/news-backnumber/new/02_0280.pdf>
3) OZCaf 大阪ゼロカーボンファウンデーション. <https://ozcaf.jp/>
4) “産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)”. https://tenbou.nies.go.jp/science/database/detail.php?id=18

環境負荷低減に向けた意思決定を支援するシェアリングサービスの類型化

Typology of sharing services to support decision-making for reducing environmental impacts

○若林宏*[1)]、天沢逸里[1)]、平尾雅彦[1)]
Hiroshi Wakabayashi, Eri Amasawa, Masahiko Hirao
1) 東京大学
* h-wakabayashi@pse.t.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

シェアリングサービス(以下シェアリング)は車や自転車等の移動に関係するものから傘や衣服等にまで扱う範囲を広げている。複数の消費者が製品にアクセスできるため、消費者が個々に製品を所有するよりも必要な製品数が減少することで環境影響が低減することが期待されている。しかし、消費者の製品へのアクセス方法等が変化することによる環境影響増加要因などがあることから、シェアリングが本当に環境影響低減に繋がるかは明らかではない[1)]。

これまでに、外野は自転車シェアリングにおいて需要の偏りを解消するための自転車の再配置が大きな環境影響を引き起こすことを示した[2)]。天沢らは、自動車と書籍のシェアリングを所有権・提供者・提供されるサービスに基づき分類し、自動車は効率的な走行、書籍は製品へのアクセス方法が環境影響低減に重要であると結論付けた[1)]。

このように対象製品を限定した既往研究は多い。しかし、消費者の行動は多種多様であることや環境影響低減に重要である条件が製品によって異なる。よって、製品ごとに異なる製品特徴(使用場所など)とサービス形態(配送など)、消費者行動(使用頻度など)を類型化することで、シェアリングが環境影響を低減する条件を体系的に整理する必要がある。類型化ごとに環境影響と経済影響を評価することで、まだシェアリングが提供されていない製品に対しても環境影響低減のために必要なサービス形態や消費者行動がわかるようになる。

2. 研究目的・方針

本研究の目的は環境影響低減に向けた意思決定を支援するシェアリングサービスの類型化である。はじめに本研究の概念図を**図 1** に示す。

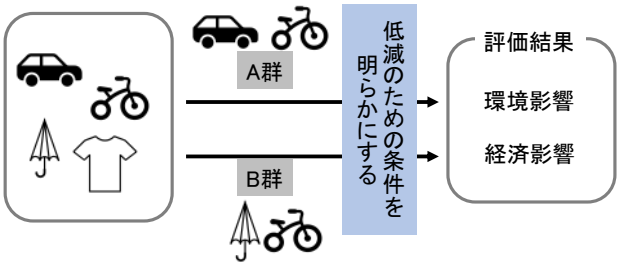


図 1 研究の概念図

社会で運用されている複数のシェアリング事例を分析し、分類する基準(分類の軸と呼ぶ)を設定する。選択された製品群において環境影響・経済影響に影響を及ぼす設計変数を特定し、環境影響低減のための条件を明らかにし類型化する。これにより、消費者にとってはシェアリングを導入する際の自身の行動、事業者にとってはサービス設計の指針になる。また、シェアリングを社会システムに導入する際の政策策定支援も可能となる。

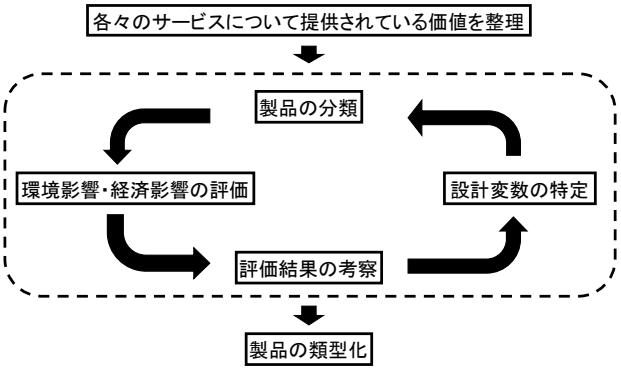


図 2 研究方針

図 2 に示すように第一に、消費者が消費に至るための事業者が提供している価値を整理する。第二に、提供価値に基づき製品群を何で分類するかを設定する。そして環境影響と経済影響の評価をし、シェアリングの設計変数を特定する。再検討が必要な場合には再度同じサイクルを辿り、最終的には環境影響低減を目標とした製品の類型化へと繋げる。

3. 提供価値の整理

消費者がサービスの何処に魅力を感じ、利用に至るのかによって類型化が可能だと考え、シェアリングの提供価値と消費者の意思決定の関係を分析した。国内で展開されているシェアリングを WEB 上で調査した結果を**表 S1** に示した。サービスの提供価値を既往研究に従い、提供される価値の対象[3)](人と物)と提供している内容[4)](時間と空間と心理的効用と経済的効果)の二つの観点で分類した。その結果を**表 S2** に示す。

4. 製品の分類

4.1 分類の軸設定

整理した提供価値を基に設定した分類の軸を**表 S3** に示す。分類の軸に従い製品を分類し、環境影響と経済影響を評価した。例えば傘と自転車では製品の再配置が発生する。これには「外でのみ使う」等の共通する製品特徴がある。分類の軸に「製品を使う場所」があったことから、分類の軸は独立ではないと考えられる。よって、分類の軸同士の関係を

考えた上で製品を分類する必要があると判断し、整理した提供価値を再度製品特徴、消費者行動、サービス形態に選別した上で関係性を明らかにする必要があると考えた。

4.2 製品特徴・消費者行動・サービス形態の選別

整理した提供価値を製品特徴・消費者行動・サービス形態(3 つを要素と呼ぶ)に選別し、更にライフサイクルフローから製品群を分類できると考えられる項目を加えた。この様にして得られた項目を**図 S1** に示す。これらの 3 要素の関係性を分析し環境影響と経済影響の低減のための条件を明らかにする。

5. 環境影響・経済影響評価

評価にあたり、システムバウンダリと評価式を設定した。カーシェアリング(以下カーシェア)の評価式に記されている項目をシステムバウンダリに加え、具体的な式を**表 S4** に例として示す。また、製造廃棄に関わる GHG、ガソリンの 1L あたり GHG 等は文献値[5,6]を参考とした。計算するにあたり、設定した値は**表 S5** に示す。

6. 類型化手法と設計変数の特定

6.1 類型化手法

製品特徴と、製品特徴を踏まえた消費者行動、サービス形態の関係を明らかにし、更に同じ経路を辿るサービス群の中で評価結果の比較を行うことで設計変数を特定する。対象製品の類型化結果の一覧を**表 S6** に示す。

本章では**図 S1** で挙げた消費者行動の項目の一つである「シェアリングにより、消費者行動が変わりうる」を例にとり、具体的な分析手法を検討する。本項目は、製品を所有せずにシェアリングによって消費する際に料金が安い等の理由により消費頻度などが変わりうることを意味する。そのため、本項目は「製品自体、なくても大丈夫」という製品特徴が挙げられる。そして消費者行動が変わることで環境影響、経済影響の両者の評価結果が変化する。よって、**図 3** のように製品特徴、消費者行動、評価結果を関連づけることが可能である。

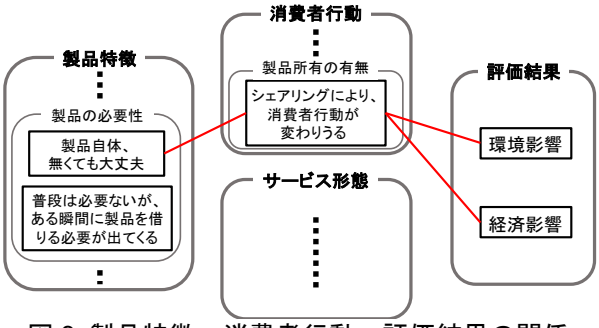


図 3 製品特徴、消費者行動、評価結果の関係

6.2 設計変数の特定

表 S6 で「シェアリングにより、消費者行動が変わりうる」が選択されたサービスとして、カーシェアと自転車シェアリング(以下バイクシェア)があるため、これらの比較検討を行った結果を**図 4** に示す。

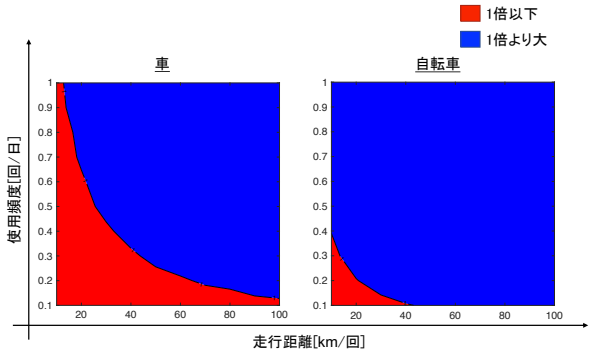


図 4 車と自転車の比較

図 4 では、消費者行動の代表的な変数である「使用頻度」と「一回あたりの走行距離」がシェアリングにより変化した時に GHG 排出量が何倍になるかを示した。所有時の値を使用頻度=0.1 回/日、走行距離=10 km/回で固定した。グラフによれば、カーシェアの方がバイクシェアに比べると消費者行動の変化によって GHG 排出量が逆転しにくいことがわかる。これは「製品の製造廃棄による GHG 排出量」に対する「使用時に排出される GHG 排出量」の比に関係しており、車の方がその比が小さいためである。よって、「シェアリングにより、消費者行動が変わりうる」という項目では「製造廃棄 GHG」に対する「使用による GHG」の割合が GHG 排出量の逆転が起こりうるか否かの設計変数となることがわかった。経済影響でも「本体代金」に対する「使用による料金」の比が逆転のための設計変数であることがわかった。

このように、選択された製品同士を比較することで、設計変数を特定することが可能である。それぞれの結果を用いることでシェアリングにおいて各製品特徴を持つ製品に対して環境影響低減のために望まれる行動がわかるようになる。

7. 結言

シェアリングの提供価値を製品特徴と、製品特徴を踏まえた消費者行動、サービス形態に選別し選択された製品群におけるシェアリングの環境影響、経済影響の設計変数を整理することで製品群を類型化した。比較のために走行距離を車と自転車で揃えたが、今後は実態に合った比較検討も必要になる。

引用文献

1) Amasawa E., et al.: J. Clean. Prod., 242, (2020), 118487
2) 外野圭太: 東京大学, 卒業論文, (2018)
3) Lovelock C.: J. Mark., 47(3), (1983), pp.9-20.
4) Murdick R., Render B., Russell S., “Service Operations Management”, Allyn and Bacon, Boston, (1990), p.4
5) 産業技術総合研究所: “LCI データベース IDEA Ver.2.2”
6) 環境省:”算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧”, 温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度説明会資料, (2019), p.53

supporting

表 S1 参考サービス一覧

サービス名	提供製品	サービス概要	URL
タイムズカーシェア	自動車	ネットで近くの車を予約。同じ場所に返却。	https://share.timescar.jp/about/movie.html
ドコモ バイクシェア	自転車	駅等に配置されている。専用区画ならどこでも返却可。	https://docomo-cycle.jp/
aircloset	カジュアル衣服	衣服を自宅まで配送。サブスクリプション。	https://www.air-closet.com
RENCA	フォーマル衣服	着物等のレンタルサービス。店頭受け取りも可。	https://renca.jp
アイカサ	傘	駅等に配置されている。専用BOXに返却。	https://www.i-kasa.com
CHARGE SPOT	モバイルバッテリー	コンビニ等に配置されている。専用機器に返却。	https://www.chargespot.jp
CLAS	家具・家電	家具家電を1ヶ月単位で借りられる。自宅まで配送。	https://clas.style
airbnb	民泊	個人間のやりとりの仲介サイト。世界中に存在。	https://www.airbnb.jp/d/howairbnbworks
そらのした	アウトドア用品	キャンプ用品等のレンタルサービス。1泊単位で借りられる。	https://www.soranoshita.net/html/rental_guide.html

表 S2 シェアリングの提供価値

	時間を提供	空間を提供	心理的効用を提供	経済的効果を提供
物を対象	メンテナンス/廃棄	保管		
人を対象	商品選択が必要ない	プライベートな空間	様々な製品との出会い/万が一に備えて	pay per use/サブスクリプション

表 S3 整理した提供価値と設定した分類の軸の関係

シェアリングの提供価値	**分類の軸**
メンテナンス	製品を借りる期間 製品を使う場所
廃棄	廃棄にあたり申請が必要か否か
保管	製品の大きさ
製品選択の必要がない 様々な製品との出会い 万が一に備えて	嗜好性が高い物か否か
pay per use サブスクリプション	使用頻度
配送	製品へのアクセス
使用	使用におけるエネルギー消費

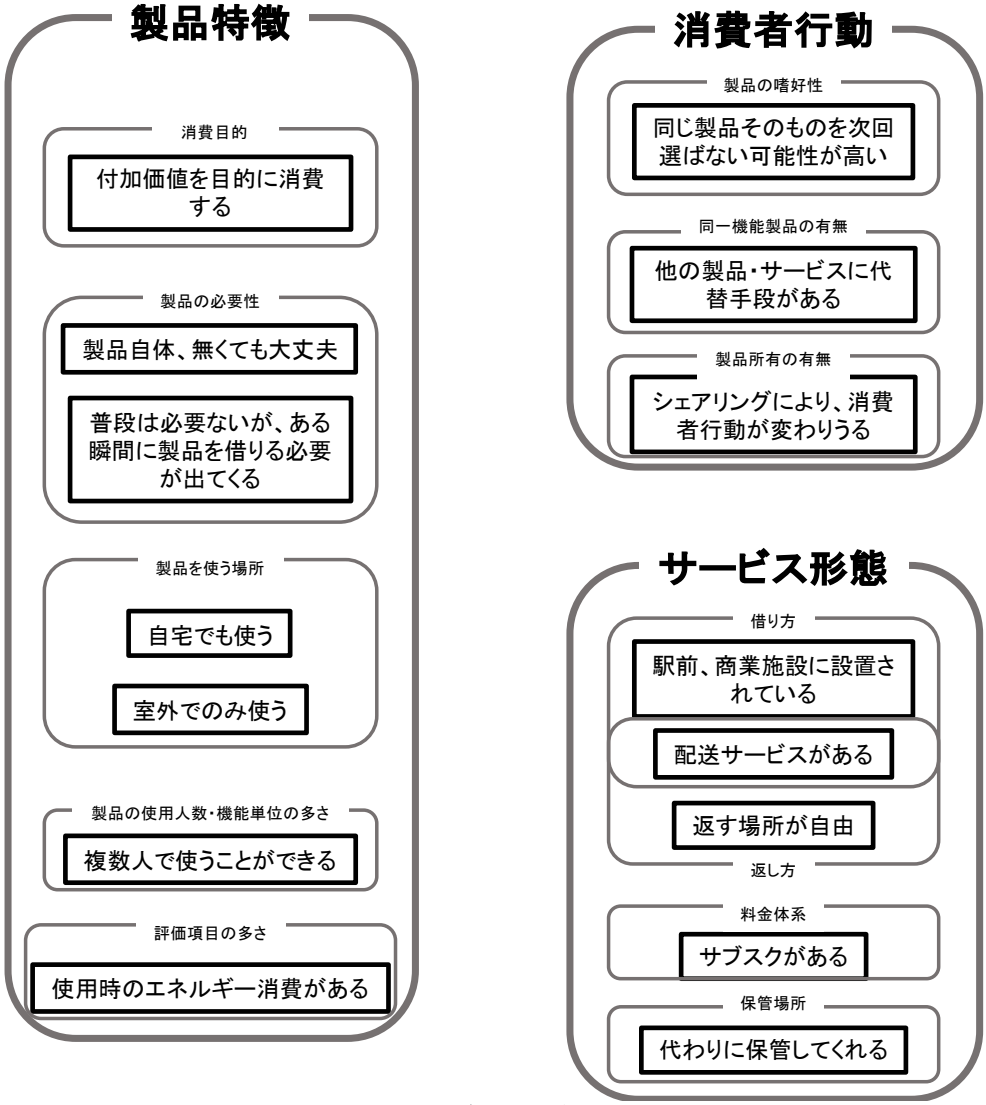


図 S1 挙げられた各要素

表 S4 カーシェアの評価式

環境影響[kg-CO2eq/km・人]

製造	(製造GHG[kg-CO2eq / 個])/(1日あたり使用回数 [回/日・人]×目的集団の人数[人]×製品寿命[日])÷(乗車人数[人]×走行距離[km/回])
使用	(走行距離[km/回])/(燃費[km/L])×ガソリン1LあたりGHG[kg-CO2eq/L]÷(乗車人数[人]×走行距離[km/回])

経済性評価式[円/km・人]

初期コスト	(車体価格[円])/(1日あたり使用回数[回/日・人]×目的集団の人数[人]×製品寿命[日])÷(乗車人数[人]×走行距離[km/回])
車検代	(車検代[円])/(1日あたり使用回数[回/日・人]×目的集団の人数[人]×車検間隔[日])÷(乗車人数[人]×走行距離[km/回])
駐車代	(駐車場代[円])/(1日あたり使用回数[回/日・人]×目的集団の人数[人]×支払い間隔[日])÷(乗車人数[人]×走行距離[km/回])
ガソリン代	(走行距離[km/回])/(燃費[km/L])×ガソリン1Lあたり価格[円/L] ÷(乗車人数[人]×走行距離[km/回])

表 S5 カーシェアで設定した固定値一覧

環境影響評価

車	製造廃棄[kg-CO2/台]	7550[5]
	製品寿命[日]	3650
	燃費[km/L]	20
	ガソリンGHG[kg-CO2/L]	2.32[6]

経済影響評価

車	購入価格[円/台]	1500000
	法定点検[円/24ヶ月]	47950
	24ヶ月点検[円/24ヶ月]	60000
	駐車場料金[円/月]	20000
	製品寿命	3650
	ガソリン代[円/L]	150
	カーシェア料金[円/時間]	880
	相乗り料金[円/km]	10

表 S6 類型化結果一覧

		タイムズカーシェア	ドコモバイクシェア	aircloset	RENCA	アイカサ	CHARGE SPOT	CLAS	airbnb	そらのした
消費者行動	同じ製品そのものを次回選ばない可能性が高い	×	×	○	×	×	×	○	○	×
	他の製品・サービスに代替手段がある	○	○	×	×	×	×	×	○	×
	シェアリングにより、消費者行動が変わりうる	○	○	×	×	×	×	○	○	×
サービス形態	駅前、商業施設に設置されている	×	○	×	×	○	○	×	×	×
	配送サービスがある	×	×	○	○	×	×	○	×	○
	返す場所が自由	×	○	×	×	○	○	×	×	×
	サブスクがある	×	○	○	×	○	×	×	×	×
	代わりに保管してくれる	○	○	○	○	○	○	○	○	○

一般廃棄物中の食品廃棄物量及び食品ロス量の推計：滋賀県を対象として

Estimation of the amount of food waste and food loss in general waste:
Case study of Shiga prefecture

○GE Yichen *[1)]、橋本征二[1)]
GE Yichen, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* ce0015ii@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

世界の食料生産量の3分の1にあたる約13億トンの食料が毎年廃棄されているとされ、日本においても、平成30年度において約2531万トンの食品廃棄物等、約600万トンの食品ロスが発生したと推計されている[1)]。SDGsにおいても食品ロスを半減する目標が掲げられているが、食品ロス量を把握する仕組みは十分確立されていない。調査・推計を行っている自治体も多くはなく、食品ロス削減に関する自治体で取り組みの評価が難しい状態にある。本研究では、一般廃棄物中の食品廃棄物量及び食品ロス量について、複数の推計手法[2)3)]を検討し、これを滋賀県内の市町村に適用して比較考察を行った。

2. 方法

検討した推計手法は、乾重量ベースのごみ組成データを用いる方法(方法1)、湿重量ベースのごみ組成データを用いる方法(方法2)、食品ロス統計データを用いる方法(方法3)である。

2.1 乾重量ベースのごみ組成データを用いる方法

下式[2)]により推計した。

$$FWh=W*(h/100)*(100-\mu)/100*(\eta d/100)*100/(100-\mu f)$$

$$FLh=FWh*\alpha/100$$

ここで、FWh：家庭系食品廃棄物量(t-湿/年)、FLh：家庭系食品ロス量(t-湿/年)、W：可燃ごみ量(t-湿/年)、h：可燃ごみのうち家庭系の割合(%-湿)、μ：可燃ごみの水分の割合(%)、μf：厨芥類の水分の割合(%)、ηd：可燃ごみの厨芥類の割合(%-乾)、α：可燃ごみ中厨芥類のうちの食品ロスの割合(%-湿)である。αは全国平均の値を用いた。

2.2 湿重量ベースのごみ組成データを用いる方法

下式[3)]により推計した。FLhは2.1に同じである。

$$FWh=W*(h/100)*(\eta w/100)$$

ここで、ηw：可燃ごみの厨芥類の割合(%-湿)である。αは自治体独自調査の値を用いた。

2.3 食品ロス統計調査データを用いる方法

下式[2)]により推計した。

$$FLh=\Sigma i\,\beta i*365*Pi$$

ここで、βi：i人世帯の一人一日あたりの食品ロス量(t-湿/人日)、Pi：i人世帯の人口(人)である。βiは食品ロス統計調査の最終調査年度(平成26年度)の値を用いた。

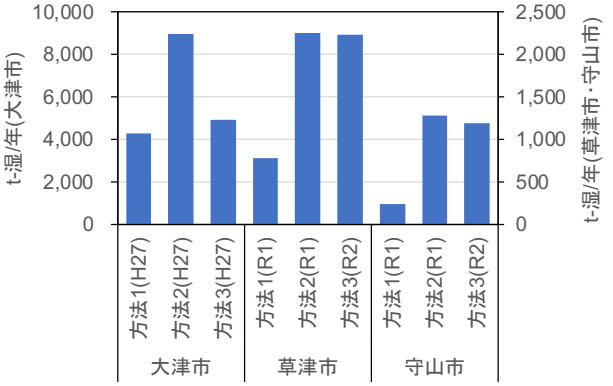


図1 3つの方法による食品ロスの推計結果

3. 結果と考察

3つの方法により食品ロスを推計した結果の一部を図1に示す。大津市については方法1と方法3が、草津市と守山市については方法2と方法3が比較可能な推計結果となった。他自治体でも、方法2と方法3による推計結果が比較的同じレベルとなった。方法1による推計結果は、方法2や方法3の約1/2～1/4の推計結果となったが、その原因として厨芥類の水分割合μfの影響がある。本研究では様々なデータを参考に、μfを69.2%と設定して推計を行ったが、この割合は67～91%[4)]の値を取りうる。本研究で使用した値は、この範囲の中では低めであるが、μfを仮に91%とした場合の推計値は3.4倍になることから、方法1においてはμfの設定が非常に重要となる。方法1は現存するデータを用いて簡易に推計できるメリットがあるが、方法2が最も実態を反映すると考えられる。

謝辞：本研究は、環境研究総合推進費(JPMEERF20193002)、科学研究費補助金(19H04329)による成果である。

参考文献

1) 環境省：食品廃棄物等の利用状況等(概念図)、https://www.env.go.jp/recycle/food/post_5.html 2022年1月アクセス
2) 清圭佑ら：第14回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、p.358、2019
3) 小泉裕靖：廃棄物資源循環学会論文誌、31、pp.47-54、2020
4) 松藤敏彦、石井翔太：廃棄物資源循環学会論文誌、22(6)、pp.382-395、2011

廃棄物処理業における熱中症の危険性及び労働強度の傾向

Tendency and factors of risk of heat stroke and labor in tensity in the waste treatment industry

○岡本宗一郎*[1)]、曹劍飛[1)]、橋口伸樹[1)]、児玉耕太[1)]、橋本征二[2)]
Soichiro Okamoto, Jianfei Cao, Nobuki Hashiguchi, Kota Kodama, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学大学院　2) 立命館大学
* rv0058xp@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

近年、情報通信技術の活用が様々な分野に及んでいるが、廃棄物処理業においてもこれを活用した安全管理の高度化に資する具体的なシステムを構築することが有益と考えられる。令和 2 年現在、廃棄物処理業における労働災害の度数率(100 万延べ実労働時間当たりの労働災害による死傷者数：災害発生の頻度を表す)は全産業平均の約 3.5 倍、強度率(1000 延べ実労働時間当たりの延べ労働損失日数：災害の重さを表す)は全産業平均の約 5.3 倍と非常に高く、具体的には、「墜落・転落」「挟まれ・巻き込まれ」「転倒」などの事故が多く報告されている[1)]。また、夏場における熱中症も多く報告されており[2)]、地球温暖化による気温上昇に伴い熱中症の危険性は今後も増加すると考えられる。筆者ら[3)]はこれまで、廃棄物処理業の作業者を対象として、スマートウェアとそれに装着する計測機器により生体情報を収集し、これを用いて熱中症の危険性と労働強度を計測してきた。本研究では、計測データ量を増やし、廃棄物処理業における熱中症の危険性や労働負荷の傾向について検討した。

2. 方法

2.1 計測システムと実態調査の概要

本研究では、スマートウェアを用いて被験者の生体情報（心拍数、体表温度）を計測するシステム[3)4)]を用いた。本計測システムでは、作業者が着用するスマートウェア(COCOMI®)と計測機器(WHS-1 または WHS-2)にて生体情報を取得する。WHS-1 の場合は計測機器内にデータが蓄積され、WHS-2 の場合は作業者が携帯する補助通信装置(CC2650-STK)にデータが無線送信され、これが転送されて PC サーバにデータが蓄積される。この計測システムを用いて、廃棄物処理施設の作業者（京都市、湖南市）計 82 人・日と廃棄物収集運搬の作業者（豊橋市、草津市、近江八幡市）計 57 人・日を対象とした実態調査を実施した（表 1）。廃棄物処理施設の被験者は、医療系廃棄物の積み下ろし、混合廃棄物の分別、重機による廃棄物の破砕、車両誘導や焼却処理施設のメンテナンスの業務、廃棄物収集運搬の被験者は、家庭系もしくは事業系一般廃棄物の収集運搬の業務に従事していた。実態調査では作業者の生体情報を計測するとともに、周辺環境情報（気温、湿度、WBGT 値）のデータも収集した。

表 1　実態調査の概要

作業者	所在地	期間	被験者
廃棄物処理施設	京都市	2019 年 9 月 4~6 日	4 名
		2020 年 8 月 24~26 日	4 名
	湖南市	2021 年 7 月 6~8 日	6 名
		2021 年 8 月 3~5 日	6 名
		2021 年 8 月 31 日~9 月 2 日	6 名
廃棄物収集運搬	豊橋市	2020 年 1 月 27~29 日	4 名
	草津市	2020 年 10 月 14~16 日	5 名
		2021 年 7 月 14~16 日	3 名
	近江八幡市	2021 年 8 月 24~26 日	5 名
		2021 年 9 月 7~9 日	4 名

2.2 熱中症の危険性の判定

国際標準化機構(ISO9886)[5)]と米国産業衛生専門官会議(ACGIH)[6)]は、心拍数をもとにした熱中症の危険性について、下記に示すようなガイドラインを提示している。これらを用いて熱中症の危険性を判定した。

<ISO9886>　以下をそれぞれ超えてはならない。
・作業中の 1 分間の最大心拍数が(185 – 0.65・年齢)
・持続心拍数が(180 – 年齢)

<ACGIH>　以下の場合、暑熱暴露を中止するよう勧告。
・心拍数が数分間継続して(180 – 年齢)を超える場合
・作業強度がピークに達した後 1 分間経過後の心拍数が 120 以下に戻らない場合

2.3　労働強度の判定

心拍数をもとに下式を用いて労働強度を算出し[7)]、労働強度が 30%以上の場合、身体的な負荷が高く、40%以上の場合、これが 30～60 分間継続する場合は危険、として作業者の身体的負荷を判定した[8)]。

・労働強度 =(作業時心拍数 – 安静時心拍数)/(最大心拍数 – 安静時心拍数)・100
・最大心拍数 =(208 – 0.7・年齢)

3. 結果と考察

ある作業者の労働強度の一日の時間変化を図 1 に示す。労働強度は 0~70%の範囲を変動しているが、労働強度が 30%を超える時間帯がほとんどであり、一日を通して、作業者の身体負荷は高かったと考えられる。一方で、作業者

がアンケートに”しんどいと感じた”と回答した時間帯は13~15時頃のみであった。このことから、実際に数値として確認される身体負荷の高まりと作業者の感覚には差異があると考えられる。アンケートを実施した実態調査（被験者6名，9日間）のデータのうち、労働強度が継続して40%以上となる作業時間は計約800分であったが、そのうち作業者がしんどいと感じた作業時間は約421分であった。すなわち、労働強度が継続して40%以上となる（危険とされる）作業時間のうち、約47%の時間帯で作業者は身体負荷の高まりを感じていなかったことになる。このことから、労働強度や熱中症の危険性を心拍数を用いて常時計測することにより、作業者本人が気づかない身体負荷の高まりや熱中症の危険性に対する第三者からの注意喚起・警告などが可能になると考えられる。

実態調査にてデータ計測を行ったすべての作業者について、一日の作業時間に対して、持続心拍数を超える作業時間の割合を図2に、労働強度40%以上となる作業時間の割合を図3にそれぞれ示す。図の横軸に年齢をとっているが、年齢の高い作業者のほうが熱中症の危険性（持続心拍数を超える作業時間の割合）や身体負荷（労働強度が40%以上の作業時間の割合）が高まる傾向が見られた。また、年齢が低くても労働強度が40%以上となる作業時間の割合が高い作業者も確認された。同じ年齢の作業者であっても労働強度が40%以上となる作業時間の割合に違いがみられ、同一の作業者でも日によって労働強度が40%以上となる作業時間の割合は異なることも確認された。こうしたことからも、スマートウェアを用いて作業者ごとに心拍数を計測し、個人単位で身体負荷の高まりを常時モニタリングすることは、廃棄物処理業における安全管理の高度化に向けて有効な手段の一つであると考えられる。

なお、サンプル数が少なく、値の差もわずかではあるが、廃棄物処理施設での業務よりも廃棄物収集運搬業務のほうが熱中症の危険性（持続心拍数を超える作業時間の割合）は高まる傾向が見られた。本研究では、計139人・日のデータを取得したが、より詳細な分析を行うために、今後もデータの収集を継続していく必要がある。

謝辞：本研究は、環境研究総合推進費(JPMEERF20193005)による成果である。ここに記して深謝する。

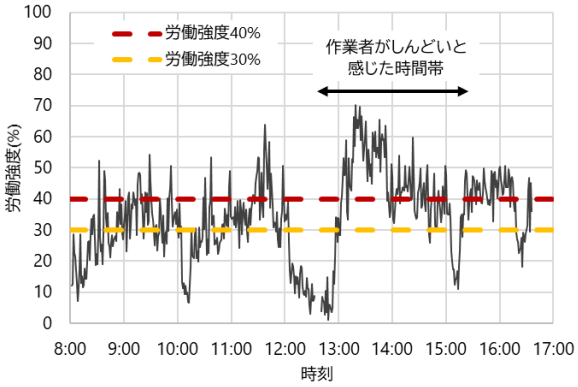


図1　ある作業者の労働強度の時間変化

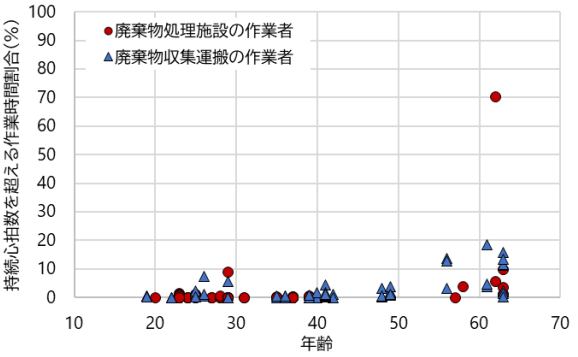


図2　持続心拍数を超える作業時間の割合

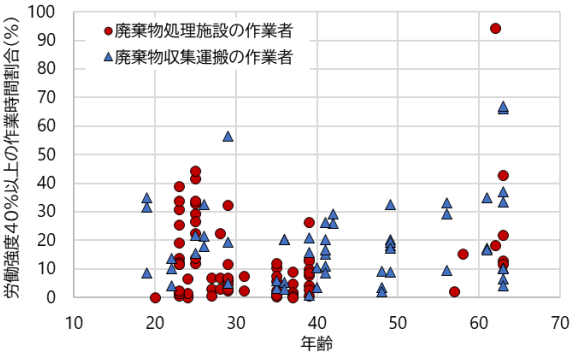


図3　労働強度40%以上の作業時間の割合

参考文献

1) 全国産業資源循環連合会安全衛生委員会：産業廃棄物における労働災害の発生状況、2021
2) 厚生労働省：令和2年 職場における熱中症による死傷災害の発生状況（確定値）、2020
3) 岡本宗一郎ら：スマートウェアを活用した廃棄物処理施設における安全管理の高度化、環境システム計測制御学会誌、25(2/3)、pp.1-7、2020
4) Hashiguchi, N., et al.: Practical judgment of workload based on physical activity, work conditions, and worker's age in construction site, Sensors, 20(13), 3786, 2020
5) ISO: ISO9886; 2004 – Ergonomics - Evaluation of thermal strain by physiological measurements
6) ACGIH: Heat Stress and Strain TLV, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2012
7) Tanaka, H., et al.: Age-predicted maximal heart rate revisited, Journal of the American College of Cardiology, 37(1), pp. 153-156, 2001

Borg, G.: Borg's Perceived Exertion and Pain Scales, Human Kinetics, Champain,IL, 1998

廃太陽光パネルの資源循環に着目したライフサイクル評価

Life cycle assessment of spent photovoltaic panels focusing on resource circulation

○兵法彩*[1)]、諏訪出[1)]、竇毅[1)]、所千晴[1, 2)]、菊池康紀[1)]
Aya HEIHO, Izuru SUWA, Yi DOU, Chiharu TOKORO, Yasunori KIKUCHI
1) 東京大学, 2) 早稲田大学
* heiho-aya@platinum.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

脱炭素社会の実現に向けて太陽光発電（PV）の導入が加速する一方で、製品寿命等による PV パネルの廃棄問題が社会課題となっている。2030 年には製品寿命等による使用済み PV パネルが、確実に増加する見込み[1)]であり、適切な回収・処理・資源循環に向けた技術開発および社会実装に早急に取り組む必要がある。PV パネルの資源循環に向けた技術開発は多岐にわたる[2)]ため、複数の技術を組み合わせた効果的なシステムをライフサイクル思考に基づき評価することが重要となる。本研究は国内で実験・実証が進められている複数の開発技術に着目し、フォアグランドデータに基づくインベントリ分析およびライフサイクル評価を通じて、近い将来に社会実装されうる代替システムの環境影響を明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

市場導入量が上位の多結晶シリコン PV パネル 1module (0.96m^2, 15.48kg, 54 セル)を機能単位とし、原料採掘から PV パネル製造、処理・リサイクル効果までを評価する。図 1 に PV パネルの End of life を示す。要素技術として、アルミフレーム分離[3)]、粗破砕と表面粉砕の二段階で行う分離濃縮、ホットナイフ法によるガラス・EVA 分離[4)]、カバーガラスのリビルドまたはリサイクル、分離後セルの粉砕選別、電気パルス法による金属（Cu、Ag）回収[5)]の適用を想定した。これらの技術は、関係者の協力の下で実験・実証データ（消費電力等）を取得した。バックグラウンドデータは既存の LCA データベースである IDEAv3.1[6)]と Ecoinvent3.6[7)]を用いた。環境影響評価は LIME2[8)]に基づき、気候変動（Life cycle Greenhouse gas; LC-GHG）と資源消費（Life cycle Resource consumption potential; LC-RCP）を算出した。

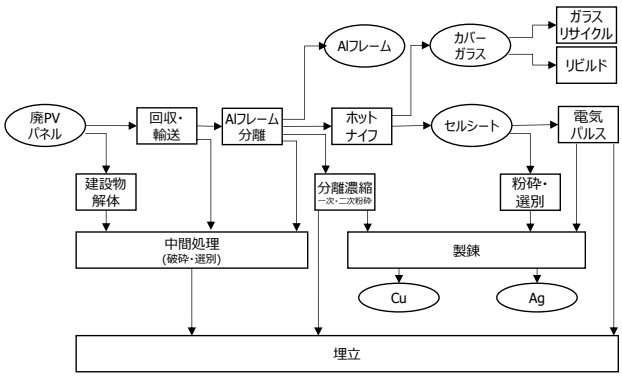


図 1 PV パネルの End of Life（一部簡略）

3. 結果・考察

LC-GHG、LC-RCP ともに従来の処理フローである中間処理・埋立と比べて、代替システムとしての複数のケースで新規技術導入による資源回収効果が認められ、環境負荷が低減することが明らかとなった。一方でこれらの評価は、回収したカバーガラス活用（ガラスリサイクル）や、物理的分離技術（粉砕・選別、電気パルス）で得られる金属濃縮物からの銅・銀再生が製錬で適切に行われることを前提とする。そのため、既存システムでは不確実な受け入れ体制の構築を同時に進めることが重要であることが示唆された。

4. おわりに

廃 PV パネルの資源循環に向け、実験・実証データに基づくライフサイクル評価による概念実証（Proof of Concept）を行った。技術の社会実装を促進するためには、マテリアルフロー分析などによる量的・時間的観点を含めた議論を展開する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、東京都太陽光パネルの高度循環に向けた実証調査および JST 未来社会創造事業（JPMJMI19C7）により実施した。

引用文献

1) 環境省 : “太陽光発電設備リサイクル等の推進に向けたガイドライン(第二版) ”, (2018), 109pp.
2) Y. Kikuchi et al (2020) IJAT, 14(6), 890-908
3) 松本健司 (2020) 産業機械, 840
4) 村越まり (2018) 化学工学会誌, 82(8), 447-449
5) C. Tokoro et al (2020), IJAT, 14(6), 966-974
6) 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 (2021/7/15)
7) ecoinvent (Swiss Centre for Life Cycle Inventories) : “ecoinvent version 3.6”, http://www.ecoinvent.org/database/, (参照 2021-12-22)
8) N. Itsubo, A. Inaba (2012) LIME2 life-cycle impact assessment method based on endpoint modeling, Life-Cycle Assessment Society of Japan, Tokyo, Japan

中高層住宅および非住宅分野への木材活用による森林資源蓄積量への影響
木造化率・再造林率をパラメータとした全国の将来蓄積量推計

Study on Amount of Accumulated Forest Resource from the Use of Wood for Medium- and High-rise Housing and Non-residential Building
Estimation of future forest resource accumulation using the conversion rate to wood and reforestation rate as parameters

○若林國久*[1)]、田中小雪[1)]、原田郁美[1)] 、小林謙介[1)]
Kunihisa Wakabayashi, Koyuki Tanaka, Ikumi Harada, Kensuke Kobayashi
1) 県立広島大学
*k-wakaba@pu-hiroshima.ac.jp

1.はじめに

国内では 2025 年の木材自給率 50%の目標達成(現状 36.6%)に向けて、国産木材のさらなる活用機運が高まっている。建築面でみると、海外では、木造建築物の高層化が進み、わが国でも、木材利用を後押しするため、2000 年の建築基準法改正で、中高層共同住宅のほか、公共建築物をはじめとするオフィスビルや商業施設等の木造化が可能となった。木材の利用拡大が進む一方、供給側では林業の衰退で利用後の再造林は低迷し、将来利用可能な蓄積量の減少が懸念される。森林は木材生産だけでなく、“CO_2蓄積などの地球温暖化緩和.・気候緩和”、“土壌保全・土砂災害防止”、“水源涵養”機能などを担っており、森林の荒廃は将来の資源量減少だけでなく、地球環境に大きな影響を及ぼすことが懸念される。そこで、中高層住宅および非住宅分野の木造化(3 階以上の木造化率：住宅 18%強、非住宅 0.5%強/2017 年)[1)]が進んだ場合の今後 100 年間の蓄積量の推計を行い、木材のライフサイクルを通した森林資源の持続的利用の検討を行った。

2.将来資源量推計方法

2.1 推計方法

人工林の蓄積量と伐採量(8 齢級以上)の差に、成長量と造林量を加えた値を将来蓄積量とした[2)]。蓄積量推計に必要なスギ・ヒノキなどの人工林畜積量は林野庁公開資料(森林林業統計要覧 2020)から、現状の伐採量は 2020 年木材需給表から得た。中高層の住宅・非住宅は階数により木材の使用量が異なるので、木造化に必要な伐採量は 1 式で求めた。

$$Y = \sum_{n=3}^{14} (S_n \cdot V_n) \cdot K_1 \cdot K_2 \qquad (1\text{ 式})$$

Y：伐採量(㎥-立木/年)
S：3 階以上着工床面積(㎡/年)[1)]
V：床面積 1 ㎡当たりの木材使用量(㎥/㎡)[3)]
n：建物の階数で 3 階から 14 階[3)]
K_1：丸太換算係(集成材の値 0.6 を使用)
K_2：立木換算係数(0.9)[4)]

2.2 ケーススタディー

現在木造化されていない 3 階以上の住宅・非住宅分野の木造化率と再造林率をパラメータにケーススタディーした (表 1) 。ケースごとの年間木材消費量は図 1 に示す。

表1 ケーススタディー

条件	ケース①	ケース②	ケース③
現在、木造化されていない3階以上の住宅・非住宅の木造化率	0%（現状）	100%木造化	50%木造化
木造化率の達成時期	－	100年後	
上記以外の年間木材利用量(伐採量)	現状の伐採量を維持		
再造林率	27.4%（現状）	27.4%（現状）	
	－	50%	
	－	70%	
	－	100%	

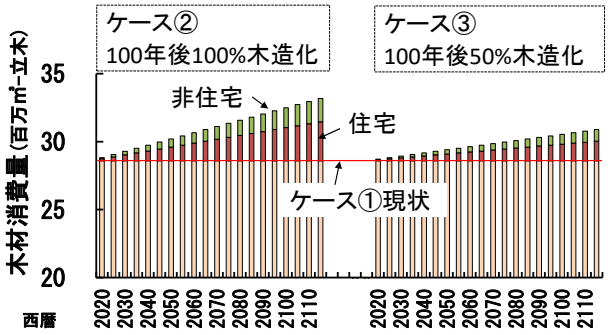


図1 今後100年間の年間木材消費量

3.推計結果

現状の木材消費量を維持しながら、現状の再造林率(27.4%)が続く中で中高層住宅および非住宅分野の木造化を進めた場合の 100 年後の蓄積量を比較した。

3.1 現状(伐採量・再造林率)を継続した場合

再造林率 27.4%のまま伐採を続けた場合、2035 年をピークに漸減し、100 年後の蓄積量は 2020 年の 5 割弱まで減少した(図 2 ケース①)。

3.2 100 年後に木造化率 100%にした場合

100 年後の蓄積量は、再造林率 27.4%の場合、2020 年の 3 割強まで減少し、再造林率 50%の場合は 4 割強まで、再造林率 70%の場合は 5 割強まで、再造林率 100%の場合は 7 割強まで、それぞれ減少する結果となった。再造林率が 50～70%では概ね現状を継続した場合(ケース

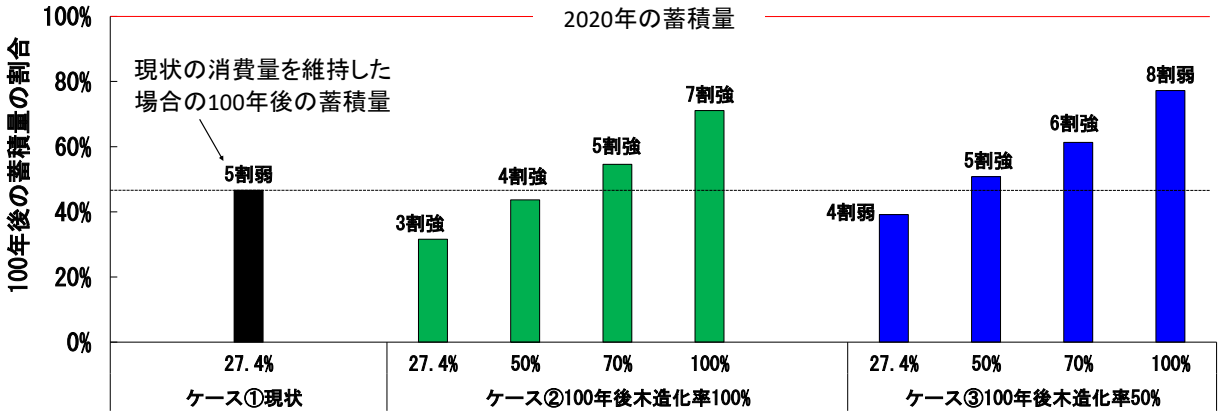


図2 現在の蓄積量を100%とした場合の100年後の蓄積量の割合

①)と資源量は変わらないが、再造林率27.4%のままでは現状を継続した場合の5割強から、さらに3割強まで減少する結果となった(図2ケース②)

3.3 100年後に木造化率50%にした場合

100年後の蓄積量は、再造林率27.4%の場合、2020年の4割弱まで減少し、再造林率50%の場合は5割強まで、再造林率70%の場合は6割強まで、再造林率100%の場合は8割弱まで、それぞれ減少する結果となった。再造林率が50%では概ね現状を継続した場合(ケース①)と資源量は変わらないが、再造林率27.4%のままでは、現状を継続した場合の5割弱から、さらに4割強まで減少する結果となった(図2ケース③)

3.4 木造化拡大の影響

現状の木材消費量を維持しながら、現状の再造林率(27.4%)が続く(ケース①)中で中高層住宅および非住宅分野の木造化を進めた場合の100年間で減少する蓄積量に与える木造化の影響を検討した。

(1)ケース②の場合

現状の木材消費量を維持し、現状の再造林率を続けた場合、100年後の蓄積量は13.8億m³弱減少するが、中高層建築物の木造化により、さらに3.9億m³弱(減少量全体の22%強)減少する結果となった(図3)。

(2)ケース③の場合

現状の木材消費量を維持し、現状の再造林率が続いた場合、100年後の蓄積量は13.8億m³弱減少し、中高層建築物の木造化により、さらに1.9億m³強(減少量全体の12%強)減少する結果となった(図4)。

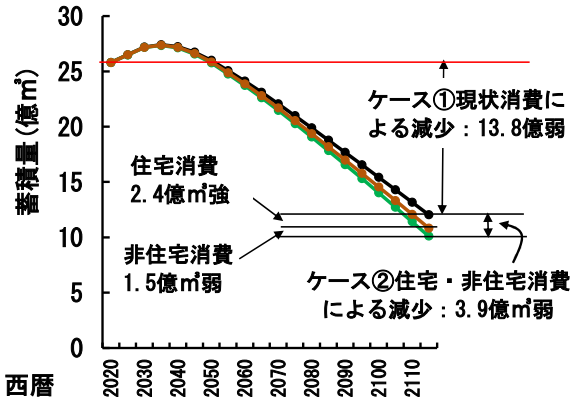


図3 木造化拡大の影響(ケース②/再造林率27.4%)

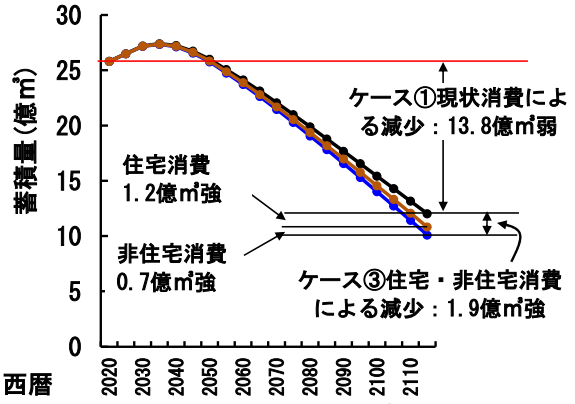


図4 木造化拡大の影響(ケース③/再造林率27.4%)

4.まとめ

本報告では、3階以上の住宅と非住宅の木造化が進んだ場合の今後100年間の蓄積量を推計し、木造建築物の高層化に伴う木材消費量の増加が将来の木材蓄積量に与える影響を検討した。その結果、現状の消費量・再造林率を続けた場合の100年後の蓄積量が2020年の5割弱まで減少するのに対して、中高層建築物の木造化が進んだ場合、さらに、2020年の3割強～4割強まで減少する結果となった。中高層建築物の木造化はおおむね、12～22%程度蓄積量を減少させることが示唆された。一方、再造林率を50%程度まで向上させることで概ね現状の消費を続けた場合の蓄積量を維持できることから蓄積量の減少を緩和するには、温暖化ガス排出量取引などを活用した再造林の促進が重要である。

5.参考文献

1) 非木造建築物の市場規模から木材の潜在市場を探る農林中金総合研究所、2018・9
2) 建築における環境面からの木材の有効利活用に関する研究　全国及び広島県の動態分析、日本建築学会環境系論文集 No.720 pp.255-261、2016.2
3)一般社団法人日本CLT協会事例集(建築)
4)若林ら：第12回日本LCA学会研究発表会 P2-110、P2-112、2017.3

建築分野におけるカーボンプライシングや自然資本会計の活用に関する検討

～先進的な集合住宅モデルを対象とした内部コスト・外部コストの影響分析～

Utilize Carbon Pricing and Natural Capital Accounting in Building
Analysis of internal and external-costs on advanced collective housing models

○東弘菜[1)]、望月唯香[1)]、藤田あゆ[1)]、小林謙介*[1)]
Hirona Azuma, Yuika Mochizuki, Ayu Fujita, Kensuke Kobayashi
1）県立広島大学
*kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. はじめに

近年、環境負荷削減に向けた対策として、環境影響の貨幣価値換算が注目されている。貨幣価値換算の方法として自然資本会計やカーボンプライシングなどへの関心が高まっており、その活用に向けて様々な検討が行われている。また、国内の CO_2 排出量や廃棄物量等において、建築分野は大きな影響を及ぼしている[1)]。

以上を踏まえ、建築分野におけるカーボンプライシングや自然資本会計の活用策を検討することを目的として検討を行った。これまでに、様々な建物におけるケーススタディを実施している[2)3)4)]が、本検討では、2 種類の先進的な住宅を対象とし、外部コストも含めた評価を実施し、環境負荷削減対策による内部・外部コストの削減効果を分析した。

2. 検討概要

2.1 評価対象建物

対象とした住宅は、すでに市場に流通している 2 種類の汎用的な集合住宅である。一つは家族向けの 2 階建ての低層木造集合住宅である（建物①）。太陽光発電システムを搭載することによって ZEH を達成している低環境負荷な建物である。もう一つは単身世帯向けの 4 階建ての集合住宅で、従来の RC 造（鉄筋コンクリート造）で建築した場合（建物③）と木造で建築した場合（建物②）の比較を行った。それぞれの建物の概要を表 1 に示す。いずれも太陽光発電システムを導入した場合、導入しなかった場合、さらに様々な環境負荷削減対策を実施した場合での比較分析を行った。

評価は、新築時の資材投入量は当該建物の積算情報から、施工時のエネルギー消費量は事業者の平均エネルギー消費データを、運用時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基づく計算値[5)]を、改修時は当該事業者の想定耐用年数データを、解体・廃棄時は文献値を用いて評価した。

表 1　分析対象建物

建物	主要構造	階数等	延床面積(m^2)	資材データ数	耐用年数
①	木造	地上2階（計6戸）	351	524	35
②	木造	地上4階（計12戸）	440	311	35
③	RC造			207	35

2.2 評価方法

本検討では、内部コスト（投入資材・エネルギー等の価格）は、IDEA[6)]の換算係数表や積算資料[7)]等を基に、国内における材料価格の平均値を算出した。なお、本検討において労務費は算出が難しかったため考慮していない。外部コストは、カーボンプライシングや自然資本会計を念頭においた試算を行った。具体的に、カーボンプライシングでは、炭素税が導入されている国の中で最も低い日本（289 円/ton-CO_2）と最も高いスウェーデン（15,670 円/ton-CO_2：2017 年時点）の税価格が導入された場合を想定し、各国の税価格に CO_2 排出量を乗じた。また、自然資本会計では、LIME Ⅱ の統合化結果を用いることとした。

3. 分析結果

3.1 建物①（ZEH 達成集合住宅）

図 1 に建物①において、太陽光発電システムを設置しない場合（Case 01）、設置した場合（Case 02）と設置の上様々な削減対策を講じた場合[4)]（Case 03）のフルコストを比較した結果を示す。外部コストは日本の炭素税（温対税）率（以下、日本炭素税）を適用した場合、スウェーデンの炭素税率（以下、スウェーデン炭素税）の場合、自然資本会計を想定した場合に分けて分析を行った。

Case 01 と 02 の差異から、炭素税・自然資本会計ともに太陽光発電を導入することで運用時のコストが生じなくなる一方、新築時・改修時の資材のコストが大きくなることが確認できた。本検討ではライフサイクルでみると、Case 02（太陽光を導入）の方が小さくなった。また Case 03 のように文献[4)]の様々な環境対策を実施すると、さらなる削減効果が期待されることが分かった。なお、日本の炭素税の場合は、外部コストの割合は極めて小さかった。スウェーデン炭素税の場合、フルコストの差異は日本炭素税よりも大きくなる結果となった。自然資本

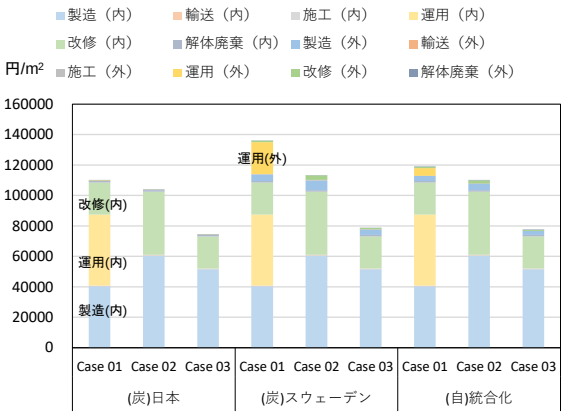


図1　建物①に関する分析結果

会計の場合も、内部コストのみの場合に比べフルコストで評価すると、Case 01~03 の差異が大きくなる結果となった。なお、本検討では、木材の再造林率を 100%と仮定している。文献 [8]にもあるように、再造林率の設定条件次第で結果が大きく変わる可能性もある。

以上から、建物①では太陽光の導入や様々な削減対策の導入により、フルコストの大きな削減につながる可能性が十分にあり得ることが定量的に確認できた。また、外部コスト評価の導入により、内部コストのみの場合よりも優位性が大きくなった。

なお、運用とそれ以外でコストを支払うステークホルダが異なることがある。そこで、運用を除いた場合のフルコストを見ると、Case 01 より Case 02 のほうが大きくなった。Case 03 は Case 01 と同程度となった。

3.2 建物②・③（木造・RC 造の比較）

図 2、3 に、建物②（木造）、③（RC 造）について、建物①と同様に Case 01~03 の結果を示す。本結果から、建物①と同様に、太陽光発電を導入することで運用時のコストが小さくなるが、新築時・改修時のコストが大きくなる結果を確認できた。また、Case 03 に示すように、文献 [4]の様々な環境対策を実施すると、さらなる削減効果が期待されることも確認できた。日本炭素税の場合は、外部コストの割合は極めて小さかった。スウェーデン炭素税の場合、フルコストの差異は日本炭素税よりも大きくなる結果となった。自然資本会計の場合も、内部コストのみの場合に比べフルコストで評価すると、Case 01~03 の差異が大きくなる結果となった。建物③についても同様の傾向を確認することができ、太陽光発電を導入することで運用時のコストが生じなくなる一方、新築時・改修時のコストが大きくなることも確認できた。また、運用を除いた場合、Case 01 より Case 02 のほうが、大きくなるものの Case 03 では Case 01 より小さくなった。

次に、建物②と③を比較すると、内部コストのみで比較すると、いずれも建物③のほうが安価となった。フルコストで評価した場合も③のほうが安価となるが、その差異は小さくなる場合があることも確認でき、条件によっては環境対策が価格面でも優位になりえる可能性があることが確認できた。

4. 評価の限界

本検討はあくまで概算値である。特に、本検討で用いた内部コストは、原則として IDEA の単価などを用いて換算しており、実態の取引価格を十分に反映しきれていない可能性もある。

5. まとめ

建築分野におけるカーボンプライシングや自然資本会計の活用策を検討することを目的として試算を行った。本検討では、2 種類の先進的な住宅を対象とし、外部コストも含めた評価を実施し、環境負荷削減対策による内部・外部コストの削減効果を明らかにすることができた。

6. 参考文献

1) 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、2013.2
2) 望月ら：建築分野における環境影響の貨幣価値換算に関する検討　～事例建物のプロセスごとの内部コスト外部コストの影響分析～、日本 LCA 学会研究発表会、2021.3
3) 藤田ら：建築分野における環境影響の貨幣価値換算に関する検討　～事例建物のプロセスごとの内部コスト外部コストの影響分析～、日本 LCA 学会研究発表会、2021.3
4) 望月ら：建築分野におけるカーボンプライシングや自然資本会計の活用に関する検討 -事例建物の内部コスト・外部コストの削減対策導入による効果と評価の課題-、日本 LCA 学会研究発表会、2022.3
5) 建築研究所：建築物のエネルギー消費性能に関する技術情報、https://www.kenken.go.jp/becc/
6) 産業技術総合研究所 IDEA ラボ：IDEA Ver.3、https://riss.aist.go.jp/idealab/
7) 経済調査会、積算資料、2014.4 および 2020.4
8) 小林ら：森林資源の利活用に関わる建築分野での環境負荷削減策に関する研究、日本建築学会環境系論文集、2019.11

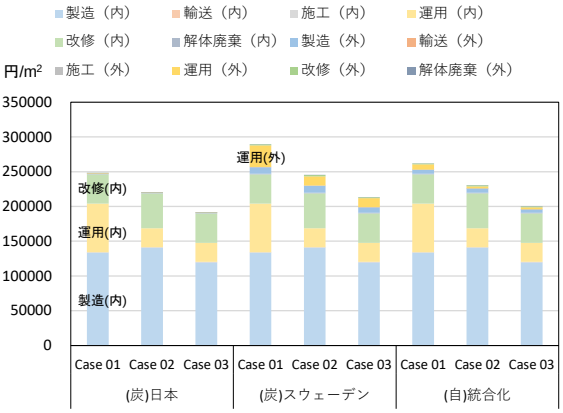


図2　建物②に関する分析結果

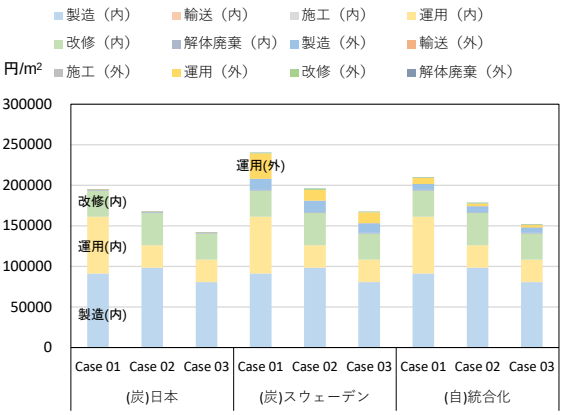


図3　建物③に関する分析結果

広島県庄原市西城地域におけるCO_2排出量が少ないニューツーリズムの検討

Study on New Tourism with Low CO_2 Emissions in Saijo Area Shobara City

○田中小雪[*1)]、原田郁美[1)]、若林國久[1)]、小林謙介[1)]、岡崎優子[2)]、平井正澄[3)]
Koyuki Tanaka, Ikumi Harada, Kunihisa Wakabayasi, Kensuke Kobayashi, Yuko Okazaki, Masasumi Hirai
1)県立広島大学, 2)特定非営利活動法人西城町観光協会, 3)庄原市西城自治振興区
*kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1.はじめに

近年、観光産業は新型コロナウイルス感染症の流行によって大きな打撃を受けている。観光産業は地域の活性化においても重要であり、コロナ禍終息後の観光振興策の検討は不可欠である。また、脱炭素化は喫緊の課題となっており、各産業における CO_2 排出量削減は極めて重要である。これらの背景から、低炭素の視点を加えた新たな観光情報発信は重要な視点と考える。広島県庄原市西城町(以下、西城地域）は自然豊かな観光資源に恵まれており、低環境負荷なツーリズムに適した地域である。一方で、コロナ禍において観光人口の減少及び地域活性の減退が危惧されている。本研究では低炭素を視点に置いた西城地域のニューツーリズムを提案することを目的とし、西城地域における観光資源の精査、移動・食事などに関わる CO_2 排出量の算出を行った。

2.観光資源の精査

2.1 観光資源の特徴

西城地域は豊かな自然環境に恵まれており、道後山や比婆山など豊かな自然を活かした観光資源が多い。そのため、観光活動に関わる CO_2 排出量が少なく、低環境負荷なツーリズムの検討に適している。

2.2 観光資源精査

本検討では観光資源を移動・宿泊・食事・施設の 4 項目に分類して精査を行った。西城地域の観光資源について、西城町観光協会や西城自治振興区など地域関係者と県立広島大学学生で意見交換会を行い、観光資源について整理した。e バイクや JR 芸備線などの移動項目、クロスカントリーやスキーなどの施設項目、やませみやひろしま県民の森などの食事項目、キャンプやホテルなどの宿泊項目の観光資源について整理できた。

2.3 観光資源アンケート

2.2 節で示した精査内容をもとに、西城紫水高校の生徒と県立広島大学学生を対象とした季節別のアンケート調査(複数回答あり)を行った。

アンケートの結果を図 1 に示す。これらの結果から、春や秋は景色や運動が楽しめる観光資源の関心が高い傾向がみられ、夏は涼める場所や施設への関心が高くなる傾向が伺えた。また、冬は寒さを活かしたスキー場などの施設の関心が高くなる傾向がみられた。

3.モデルコースの設定

意見交換会やアンケート結果から得られた情報を参考に観光資源を精査し、熊野神社コース、県民の森コース、猫山・クロカンコース、まちなかコースの 4 つのモデルコースを設定した。いずれのコースも広島駅を出発点とし、各コースで移動・宿泊・食事・施設項目に関わる情報について整理した。

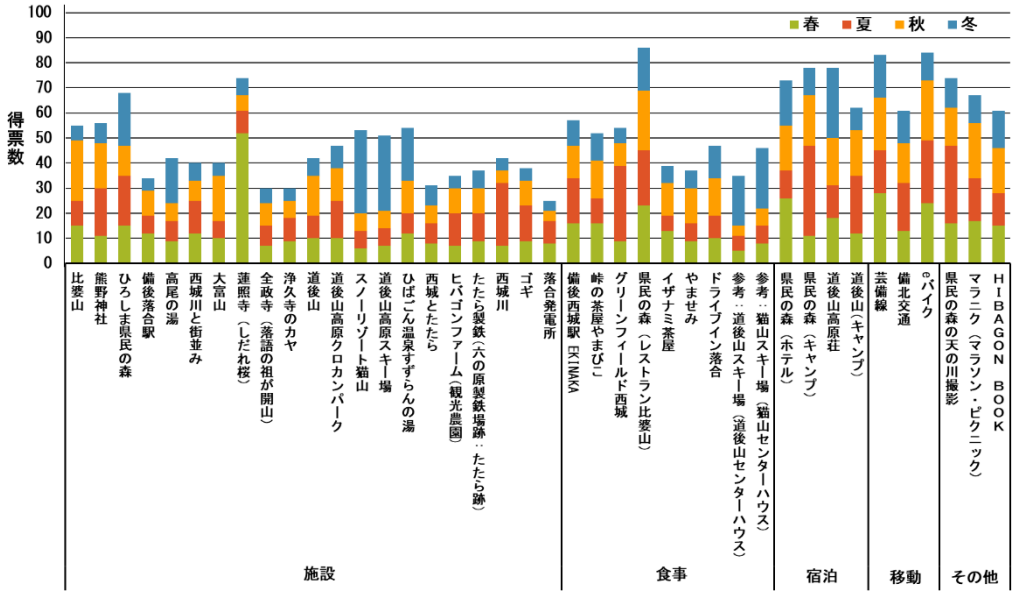


図 1　観光資源アンケート結果

3.1 熊野神社コース

熊野神社、イザナミ茶屋、やませみ(食事処)など熊野神社周辺の観光資源を巡るコースである。

3.2 県民の森コース

キャンプ場、スキー場、レストランなどをそなえた、ひろしま県民の森を中心としたコースである。

3.3 猫山・クロカンコース

道後山高原荘、クロカンパーク、猫山スキー場など道後山地域周辺の観光資源を巡るコースである。

3.4 まちなかコース

蓮正寺や大富山、浄久寺など、西城地域の中心部にある観光資源を巡るコースである。

4.モデルコースの CO_2 排出量の算定

4.1 移動項目の CO_2 排出量の算定

各モデルコースの移動に関わる CO_2 排出量を算出した。本検討における CO_2 排出量の算定は、IDEA Ver.3[1)]を用いて実施した。例として、熊野神社コースの算出結果を表 1 に示す。広島駅から備後西城駅までの経路は自動車、バス、鉄道の 3 つを比較した。また、これ以降の経路の移動手段は自動車と e バイクで比較した。

これらの結果から、自動車、バス、鉄道を比較すると、自動車>バス>鉄道の順となった。また、自動車と e バイクを比較すると、e バイクの方が小さかった。例えば移動手段を自動車から鉄道にすると、CO_2 排出量は自動車の約 13%程度まで削減できるが、自動車よりも待ち時間など移動に要する時間が長くなるといったデメリットが生じる。

表 1　熊野神社コースの移動における CO_2 排出量

広島駅→備後西城駅			備後西城駅→やませみ(8km)	やませみ→熊野神社(4km)	熊野神社→備後西城駅(12km)
移動手段	CO2排出量(kg-CO2/人km)	移動手段	CO2排出量(kg-CO2/人km)		
自動車(113km)	25.72	自動車	1.82	0.91	2.73
バス(113km)	10.97	eバイク	0.13	0.07	0.20
鉄道(118.7km)	3.51				

4.2 食事項目の CO_2 排出量の算定

地域関係者及び関係施設の協力の下、詳細なレシピや食材、食材の産地、調理時のエネルギー消費量など必要なデータについてヒアリング調査を行った。

4.3 宿泊・施設項目の CO_2 排出量の算定

宿泊・施設項目は地域関係者と関係施設の協力の下、各施設でのエネルギー消費量、環境負荷削減策などのヒアリング調査を行った。

5.低環境負荷な行動への変容のための魅力の発信

4 章で算定した結果を示すだけでは、旅行者の行動変容にはつながらないと考えられる。そこで本検討では、低環境負荷な行動への変容に向けた魅力について検討した。例えば、移動については、自動車から鉄道で移動することにより、待ち時間を含む移動に要する時間が増える。その時間を利用し、備後西城駅に併設されている地元のそばを楽しむことを提案する。また JR 芸備線ならではの車窓を紹介することで、行動変容につなげる。そのほか、各項目の主要な内容を表 2 に整理した。

表 2　低環境負荷な行動への変容のための魅力の例

項目	低環境負荷な行動変容のための魅力（例）
移動	①変容：自動車からバス・鉄道・e バイクなどに変容 ②魅力等：待ち時間や移動時間に自然豊かな景観や車窓を楽しめる(鉄道)、道中の立ち寄りを楽しむ(e バイク)
食事	①変容：地場の食材を積極的に利用（輸送負荷の削減） ②魅力等：地場の食材を味わえる、地域の特産物や歴史について知れる
宿泊	①変容：星空を見る、キャンプを行う(県民の森、道後山高原荘)（施設の照明・空調エネルギーなどの削減） ②魅力等：都市部では見ることができない満天の星空を楽しむことができる、キャンプを楽しめる
施設	①変容：大人数での利用(クロカンパーク、スキー場)（一人当たりの CO_2 排出量の削減） ②魅力等：多くの仲間と楽しむことができる
	①変容:燃料としてペレットを利用(すずらんの湯)（消費エネルギー及び CO_2 排出量の削減になる） ②魅力等：広島県内で最も森林資源が豊富な庄原市の状況など理解を深める

6.まとめ

本検討では、西城地域における低環境負荷なツーリズムの提案のため、アンケート等による観光情報精査や各コースの移動に関する環境負荷分析を実施した。アンケートの結果、春や秋は景色や運動が楽しめる観光資源、夏は避暑地やキャンプ場、冬は寒さを活かした娯楽施設に関心が集まった。

これらの結果をもとに各工程の CO_2 排出量を算定した。移動に関する分析において、広島駅から備後西城駅区間の CO_2 排出量は、自動車>バス>鉄道の順だった。また、その他の経路では自動車に比べ e バイクの方が小さかった。また、食事・宿泊・施設についてはヒアリング等を行い、データ収集及び CO_2 排出量の検討を行った。

また、CO_2 排出量の算出だけではなく、低環境負荷な行動の選択により生じる魅力について移動・食事・宿泊・施設の 4 項目で検討し、変容と魅力について整理した。

7. 謝辞

本研究の実施にあたり、西城地域の関係施設の皆様、西城紫水高校の皆様に多大なるご協力を頂きました。記して謝意を表します。

8. 参考文献

1）産業技術総合研究所 IDEA ラボ：IDEA Ver.3、https://riss.aist.go.jp/idealab/

テレワークが環境と経済に与える影響

The economic impact of COVID-19 for telework

○木村聡*[1)]、大賀雄介[2)]、加河茂美[3)]

Satoshi Kimura, Yusuke Oga, 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

kimura.satoshi.868@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景・目的

2020 年は新型コロナウィルスの流行により、人との接触を避けるリモート化が促進された。その結果、自宅で利用するためのパソコンや周辺機器を購入し、インターネット環境を整備する家庭が増加した。[1)]

NHK 放送文化研究所の『世論調査部による国民生活時間調査 2020』によると、2020 年の趣味・娯楽・教養のインターネットに費やした時間は 2015 年と比べ、1 日当たり約 40 分の増加が見られた。[2),3)]

また、総務省統計局の『家計消費状況調査』によると、インターネットを利用した 1 世帯当たり 1 か月間支出の平均は 2020 年が 14557 円であり、2019 年の 12683 円と比べると、13%増加していた。[4)]

この急速なリモート化は、通信機器産業や通信・IT 産業の売り上げ向上に対して影響を与えているが、家庭を通した電気使用量にも変化を与え、環境に大きな影響を与えている

本研究は、リモート化が国民の 1 日における生活時間の使い方にどのような影響を与えているのか、そして、そのような生活時間の変化やリモート化によるインターネット環境の導入がインターネットを利用した家計消費に対してどのような影響を与えているのかについて分析する。

2. 分析手法

NHK 放送文化研究所が提供している『国民生活時間調査』における 2015 年と 2020 年のある行動に対する費やした時間のデータを用いて、テレワークの増加によって国民の生活時間の様態がどのように変化したのかを考察した。

その後、総務省統計局が提供している『家計消費状況調査』における 2015 年から 2020 年までのインターネットを利用した 1 世帯当たり 1 か月間の支出のデータ（22 品目）を用いて、指数平滑法を使用することで、コロナの流行が起こらなかった場合の 2020 年の値を推計した。この推計された 1 世帯当たり 1 か月間の支出を、コロナの影響を受けた 2020 年の実績値と比較し、リモート化が日本の経済面・環境面に与えた影響を詳細に分析する。

3. 使用データ

(1) 総務省統計局：インターネットを利用した 1 世帯当たり 1 か月間の支出（2015～2020）

(2) NHK 放送文化研究所：国民生活時間調査

4. 結果・考察

図 1 は 2015 年から 2020 年にかけて全員平均時間量（時間）が増加した上位 5 項目を、図 2 は 2015 年から 2020 年にかけて全員平均時間量（時間）が減少した上位 5 項目を表している。ここで、全員平均時間量とは、項目における行動を行っていない調査対象となった人々も含めた全員の平均時間量のことを示す。

図 1 と 2 は 2020 年の 10 月 10 日から 11 月 1 日に行われた国民生活時間調査をもとに作成したものであり、同期間は新型コロナウィルスの第 2 波が落ち着き人々の行動が活発になり始めた時期であることに注意されたい。

図 1 を見ると、インターネットに費やす時間が約 40 分と最も増えていることがわかる。これは、リモート化によるインターネット環境の整備が進んでいることが影響している。

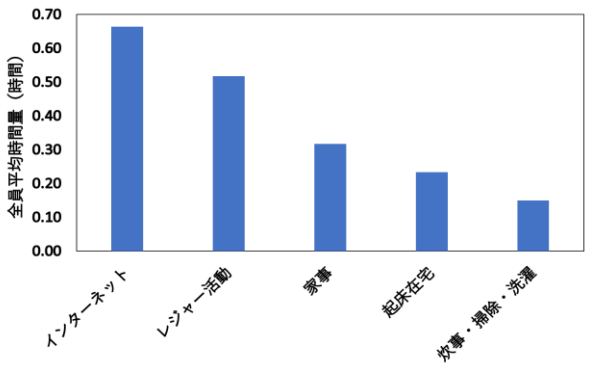


図 1. 全員平均時間量増加（上位 5 項目）

図 2 を見ると、拘束行動や授業・学内の活動など自由

な時間を制限されるような項目で減少していることがわかる。これは、リモート化による在宅時間が増えたことが影響している。

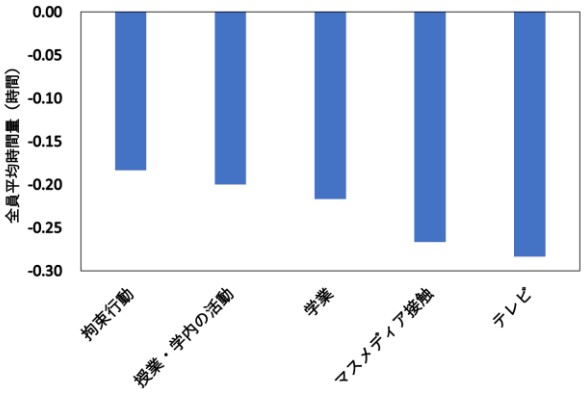


図 2. 全員平均時間量減少（上位 5 項目）

図 3 は「2020 年におけるインターネットを利用した 1 世帯当たり 1 か月間の品目別支出額の実績値」から「2015 年から 2019 年のデータを使用して指数平滑法により推計した 2020 年の予想された品目別支出額の予測値」を差し引いて計算される値の上位 5 品目を示している。この上位 5 品目の支出は新型コロナウィルスの流行によって大きく増加していると考えることができる。その一方で、図 4 はその差がマイナスであった下位 3 品目を示している。

図 3 を見ると、食料品や出前といった外食に行かずに家で食を楽しむという傾向になっていることがわかる。これは、リモート化による在宅の時間が増えていることが影響している。

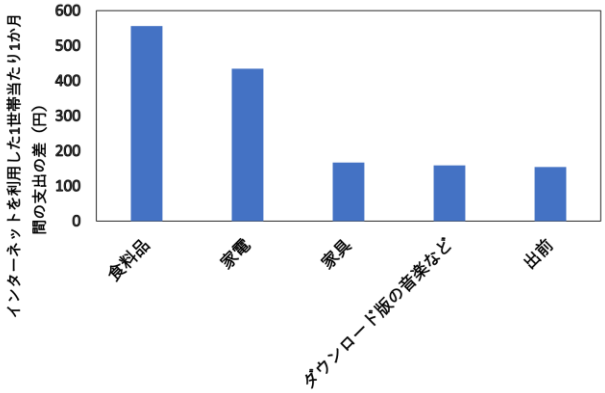


図 3. インターネットを利用した 1 世帯当たり 1 か月間の支出増加分（上位 5 項目）

図 4 を見ると、運賃の減少がしていることがわかる。これは、テレワークによる在宅勤務が影響している。

また、チケットや旅行費など屋外で活動をすることに対しての出費が減少していることがわかる。これは、在宅の時間が増えていることが影響していると考えられる。

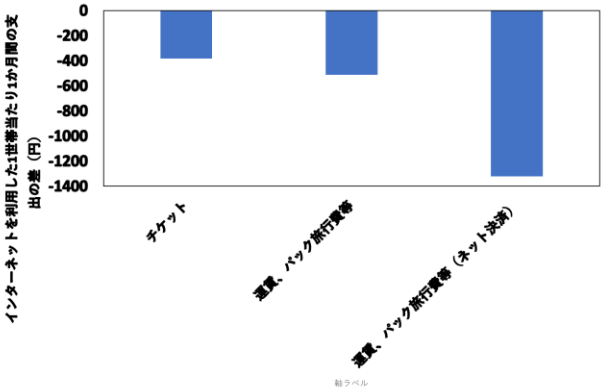


図 4. インターネットを利用した 1 世帯当たり 1 か月間の支出減少分（上位 3 項目）

5. 参考文献

1) SMBC:“グローバル経済と主要産業の動向（2021 年度上半期“（2021）、pp.40
2) NHK 放送文化研究所世論調査部:“国民生活時間調査 2020“（2021）
3) NHK 放送文化研究所世論調査部:“国民生活時間調査 2015“（2016）
4) 総務省統計局:“家計消費状況調査“,(2015～2020)

線形計画法を用いたバイオマスプラスチック導入に向けたプラスチック資源利用システム設計

Linear Programming Approach to Design Plastic Utilization System for Introduction of Biomass-based Plastics

○黒田裕章*[1)]、天沢逸里[1)]、中谷隼[1)]、平尾雅彦[1)]
Hiroaki Kuroda, Eri Amasawa, Jun Nakatani, Masahiko Hirao
1) 東京大学
* h-kuroda@pse.t.u-tokyo.ac.jp

1 緒言

近年、バイオマスプラスチックや生分解性プラスチックの導入に関心が高まっており[1)]、様々な種類のバイオマスプラスチックが開発され、様々な製品への展開が検討されている。しかし、これらをどのように使用・リサイクルすればプラスチックシステム全体の環境負荷の低減につながるかは明らかになっていない。

既往研究では、特定のバイオマスプラスチックに注目したLCA[2)]や、温室効果ガス(GHG) 排出量削減に向けたリサイクル方法の設計[3)]が行われている。しかし、プラスチックシステム全体の環境影響を評価するためには、**図1**に示すようなライフサイクル全体からの議論が必要となる。バイオマスプラスチックの材料特性と製品用途、リサイクル方法の適合性を踏まえた上で、プラスチック利用システム全体を設計する必要がある(**図S1**)。例えば、PHAやPHBHはPEやPPと機械的特性が似ているが、強度や生分解性から農業用ハウスや漁具の製造には不向きであるという特性に注意が必要である。

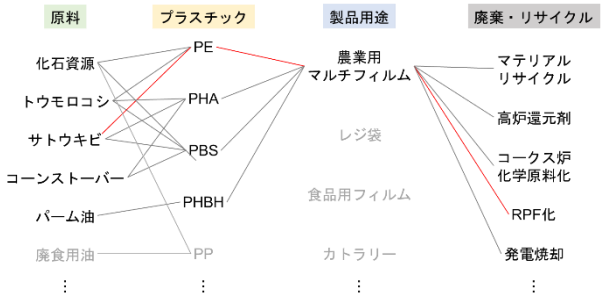


図1 農業用マルチフィルムのライフサイクル例（赤線はGHG排出量が最小となるフローを表す）

本研究はGHG排出量の最小化を行うことでバイオマスプラスチック利用システム設計を行うことを目的としている。材料特性、製品用途、リサイクル方法のマッチングを制約条件とし、線形計画法によってGHG排出量の最小化を行うことで、バイオマスプラスチックの効果的な利用、リサイクル方法について検討した。

2 対象プラスチック、製品用途、リサイクル方法

9種類の化石資源由来プラスチックと12種類のバイオマスプラスチックプラスチックを対象とした(**表S1**)。

製品用途は、日本国内での利用が特定できた、容器包装・コンテナ類、機械・電子機器、家庭用品、建材、輸送、農林水産、その他の計40種類、781万トン/年(廃棄量ベース)を対象とした(**表S2**)。

リサイクル方法はマテリアルリサイクル(MR)、ケミカルリサイクル(CR; 高炉還元剤製造、コークス炉化学原料化、油化、ガス化)、サーマルリカバリー(TR; RPF、セメント原燃料化、発電焼却)を対象とした。

3 プラスチック利用モデル

プラスチック利用システムモデルを構築し、材料特性、製品用途、リサイクル方法のマッチングを制約条件として、線形計画法によってGHG排出量の最小化を行った(**式1**)。モデルはGHG排出量(GHG_{total})の最小化を目的関数とし、素材、製品用途、リサイクル方法ごとの年間プラスチック廃棄量($W_{type,app,EoL}$)を変数とする。材料特性、製品用途、リサイクル方法のマッチングと製品需要(M_{app})の充足を制約条件として構成される。なお、材料特性と製品用途のマッチングは電子商取引サイトや特許情報を調査した。リサイクル適合性はリサイクル事業者の受入可能プラスチック種類を調査した。

製造時のGHG排出量($E_{\mathrm{production}_{type}}$)は文献[1),5)]などから引用し、リサイクル時のGHG排出量($E_{\mathrm{recycle}_{EoL}}$)は文献[4)]を参考に発熱量や還元力から推算することで、ライフサイクルGHG排出量($E_{type,EoL}=E_{\mathrm{production}_{type}}+E_{\mathrm{recycle}_{EoL}}$)を求めた。

以上をモデルに入力することで、GHG排出量が最小となる材料、製品用途、リサイクル方法のライフサイクルパターンが出力される。入力値や制約条件を変更することでシナリオ分析を実施し、バイオマスプラスチックの効果的な利用法とリサイクル方法について検討した。

$$\text{Min.}\quad GHG_{\mathrm{total}}\left(W_{type,app,EoL}\right)=\sum_{type}^{all}\sum_{app}^{all}\sum_{EoL}^{all}W_{type,app,EoL}E_{type,EoL} \qquad \text{(式1)}$$

$$\text{s.t.}\quad \text{matching of producibility and recyclability}$$

$$\sum_{type}^{all}\sum_{EoL}^{all}W_{type,app,EoL}=M_{app}$$

4　評価シナリオ

表 1 に示すシナリオを評価した。2019 年度の実績値をベースケースとし、すべての製品が単一素材で製造できると仮定したシナリオ(シナリオ 1-1) 、機械・電子機器、自動車は複合素材で製造するとしたシナリオ(シナリオ 1-2) 、(**式 2**)の制約条件でリサイクル処理能力(R_{EoL}) を考慮したシナリオ(シナリオ 2) を評価した。

$$\sum_{type}^{all}\sum_{app}^{all} W_{type,app,EoL} \leq R_{EoL} \qquad (式\ 2)$$

表 1 評価シナリオ

	ベースケース	シナリオ1-1	シナリオ1-2	シナリオ2
リサイクル率（TR含む）	85%（2019年実績）	100%	100%	100%
単一/複合素材	複合素材	単一素材	機械・電子機器、自動車は複合素材	機械・電子機器、自動車は複合素材
リサイクル処理能力	2019年実績値	制限なし	制限なし	2020年調査値

5　シナリオ分析結果

5.1　プラスチックフロー

図 S2, S3 にシナリオ 1-2, 2 の分析結果のプラスチックフローを示す。縦軸が年間プラスチック排出量を、横軸は左から、選択されたプラスチックの種類、製品用途、リサイクル方法を表す。各項目を結ぶ線の色はリサイクル方法に対応している。

結果はいずれも、PS や PVC, ABS などはバイオマスプラスチックで代替することが難しく化石資源由来のものが使用され続けるが、PE や PP は Bio-PE や Bio-PP、PHA などに代替することで GHG 排出量が削減できることがわかった。Bio-PE や Bio-PP は既存の PE と PP を代替可能であること、PHA は製造時の GHG 排出量が小さいことから多く選択されたと考えられる。

リサイクル処理能力の制約が無い場合(**図 S2**) 、Bio-PE や Bio-PP を高炉還元剤製造(コークス代替) でリサイクルするフローが多く選択される。これは、石炭を代替することによる GHG 排出量削減効果が大きいためである。一方、リサイクル処理能力の制約を追加すると(**図 S3**) 、Bio-PE や Bio-PP の大半は発電焼却が選択され、PVC や ABS は MR が選択される。これは、CR の処理能力が低いことから発熱量の大きい Bio-PE や Bio-PP は TR が選択される一方、製造時の GHG 排出量が大きい PVC や ABS を優先的に MR するよう、線形計画法による最適化が働くためである。

5.2　GHG 排出量の最小値

図 4 に最小化された GHG 排出量を示す。2019 年度の実績では約 3000 万 t-CO_2eq/年であり、これはすべてのプラスチックを単純焼却するよりも約 1200 万 t-CO_2eq/年削減できているものの、GHG 排出量ネットゼロには及ばない。一方、GHG 排出量を最小化したシナリオでは、約−1500～−250 万 t-CO_2eq/年となり、GHG 排出量ネットゼロ、さらにはネットネガティブを達成できる可能性があることが示された。しかし、リサイクルの処理能力を制約条件として追加する前後 (シナリオ 1-2, 2) を比較すると約 700 万 t-CO_2eq/年増加しており、材料特性、製品用途、リサイクル方法の適切なマッチングと、材料ごとに適したリサイクル処理能力の拡充が必要であると考えられる。

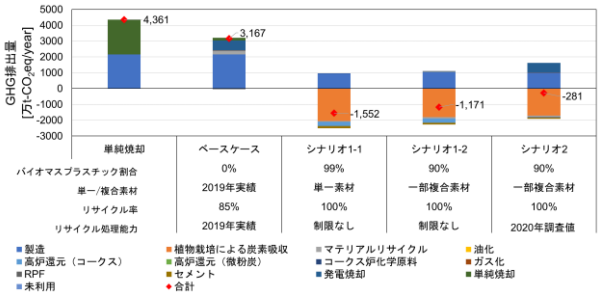


図 4　各シナリオの GHG 排出量

6　考察、まとめ

バイオマスプラスチックを導入することで、材料特性、製品用途、リサイクル方法のマッチングを満たしながら GHG 排出量を大幅に削減できる可能性があることが示された。

プラスチック利用システムの定性的・定量的な設計例として、容器包装が挙げられる。現在は容器包装リサイクル法によって回収されたプラスチックのうち、PE や PP を中心に MR している。しかし、シナリオ分析結果が示すように、製造時の GHG 排出量が大きいプラスチックを MR することが GHG 排出量削減のためには必要である。

ただし、結果には不確実性が存在する。一点目は、GHG 排出量が各種文献値と推算によって求められていることである。二点目は、線形計画法を用いているため GHG 排出量がわずかにでも変化すると選択されるプラスチック、リサイクル方法が変化することである。これらの不確実性を踏まえた上で、プラスチック利用システム設計につなげることが重要である。

参考文献

1) 環境省: “バイオプラスチック導入ロードマップ”, (2021)
2) Amasawa E, et al.: Environ. Sci. Technol, 55 (5), (2021), pp3380-3388
3) Meys R, et al.: Science, 374 (6563), (2021), pp 71-76
4) 海洋プラスチック問題対応協議会: “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)
5) Christian M, et al.: Resour. Conserv. Recycle, 157, (2020), 104750

Supporting Information

表 S1　評価対象プラスチック一覧

	プラスチックの略称	プラスチックの名称
化石資源由来	PE	ポリエチレン
	PP	ポリプロピレン
	PS	ポリスチレン
	PET	ポリエチレンテレフタレート
	PVC	ポリ塩化ビニル
	PA	ポリアミド
	PUR	ポリウレタン
	ABS	アクリロニトリル 、ブタジエン 、スチレン 共重合合成樹脂
	PBAT	ポリブチレンアジペートテレフタレート
バイオマス由来	Bio-PE	バイオマス由来ポリエチレン
	Bio-PP	バイオマス由来ポリプロピレン
	Bio-PET	バイオマス由来ポリエチレンテレフタレート
	Bio-PUR	バイオマス由来ポリウレタン
	Bio-PA	バイオマス由来ポリアミド
	Bio-PBS	バイオマス由来ポリブチレンサクシネート
	Cellulose	セルロース系繊維、酢酸セルロースなど
	PLA	ポリ乳酸
	PTT	ポリトリメチレンテレフタレート
	PHA	ポリヒドロキシアルカン酸
	PHBH	Poly(3-hydroxybutyrate-*co*-3-hydroxyhexanoate)
	Starch	スターチベースドポリマー

表 S2　製品用途ごとの年間プラスチック排出量 S1)と素材・製品用途マッチング

		包装・容器/コンテナ類											機械・電子機器							家庭用品									建材							輸送	農林水産			その他			加工ロス
		指定PETボトル	その他ボトル	食品用フィルム	非食品用フィルム	食品容器（非発泡）	食品容器（発泡）	レジ袋	ショッピングバッグ	ごみ袋	ラミネート紙	コンテナ・パレット	冷蔵庫	洗濯機	エアコン	テレビ	電線被覆材	機械	その他	おむつ	使い捨て飲料カップ	ストロー	カトラリー	タバコフィルター	不織布	家具	その他	パイプ・継手	排水桝・雨樋・窓枠	壁紙	床材	土木建築塗布用途	シーリング材	その他	自動車	農業用マルチフィルム	農業用ハウス	漁具	マイクロビーズ	塗料	接着剤	評価対象外
年間排出量	[万t/年]	59	27	80	16	91	13	22	15	29	25	38	18	9	8	1	19	17	108	30	5	1	1	2	10	3	12	22	4	3	4	4	2	23	32	4	5	2	2	12	5	122
	PE		13			3		22	15	29	25	10					9			4	1							4						6	3	4	2	0	0			
	PP		2	49		59						23	4	7	2	0				11	1	1			5										13							
	PET	59	11	22	15														26		2				4																	
	PS					30	13					4	5	1	3	1		9	11	3	0		1										1				0				
	PVC		0	5									1	1	1	0	10											19	4	3	4			2	2		3				
	ABS												3	0	1	0		4	4															2	3							
	PA			5	1														4															3				0			
	PUR												4					2	2						3							4	2	3	3				0	12	5	
	その他											2	1	1	2	0		3		12				2										4	3	0	1	2	2			
	不明																		61							12								5	1						
素材・用途マッチング	Bio-PUR												○					○	○						○							○	○	○	○				○	○	○	
	CA			○	○	○		○														○	○	○	○										○				○	○	
	Bio-PP		○	○		○						○	○	○	○	○				○	○	○			○										○							
	Bio-PET	○	○	○	○														○		○				○																	
	Starch			○	○	○		○		○										○	○	○	○		○										○	○				○		
	Bio-PE		○			○		○	○	○	○	○					○			○	○							○					○		○	○	○	○	○			
	PLA		○	○	○	○	○	○	○	○									○	○	○	○	○	○	○			○		○					○	○		○	○			
	PTT																								○	○									○							
	PBS		○	○	○			○		○											○	○	○		○										○	○						
	Bio-PA			○	○														○																○				○			
	PBAT		○	○	○			○		○												○	○												○							
	PHA		○	○	○	○		○	○	○										○		○	○		○	○		○		○					○	○			○	○	○	
	PHBH		○	○	○	○		○		○												○	○		○											○						

S1) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社: “平成 31 年度バイオプラスチック導入に 向けた調査及びロードマップ作成に係る 委託業務 報告書”, (2020)

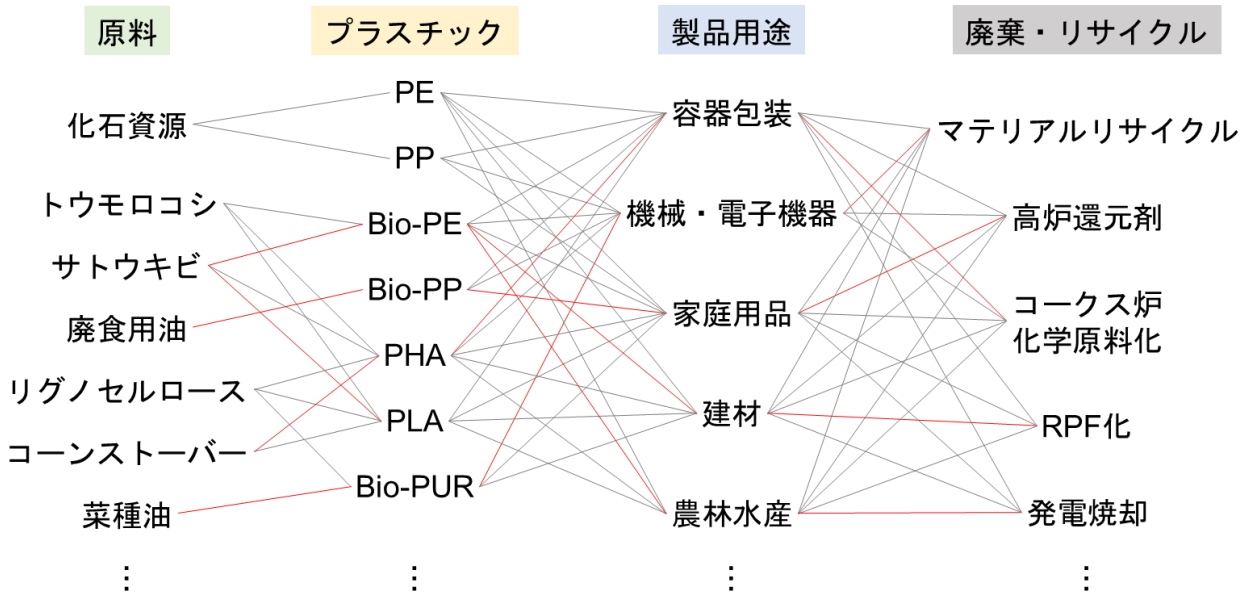


図 S1　プラスチック利用システム全体のライフサイクルフロー

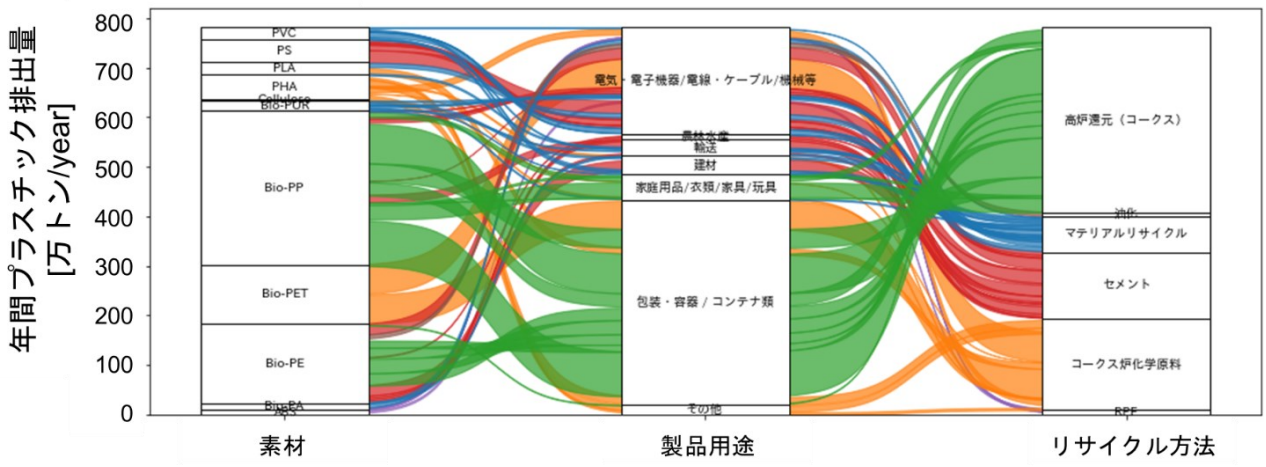


図 S2　GHG 排出量が最小化されたプラスチックフロー(シナリオ 1-2)

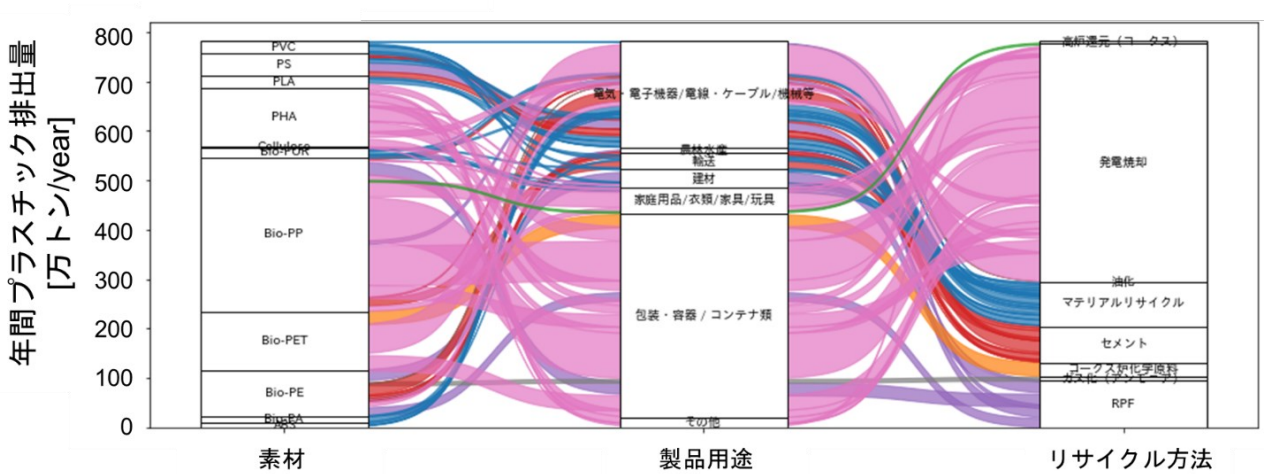


図 S3　GHG 排出量が最小化されたプラスチックフロー(シナリオ 2)

教育現場における ICT 活用に伴うペーパーレス化が環境に与える影響

Environmental Impacts of Goods and Services through Lifestyle

○西藤和佳*[1)]、三苫春香[2)]、加河茂美[3)]
Waka Nishifuji, Haruka Mitoma, Shigemi Kagawa
1) 九州大学経済学部, 2) 九州大学大学院経済学府, 3) 九州大学大学院経済学研究院
* nishifuji.waka.321@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景・目的

近年、パリ協定の目標達成や SDGs の実現に向けた動きが世界中で広がっている。これらの目標達成には政府や企業での取り組みだけでなく個人や各世帯での取り組みが必要不可欠である。家計は冷暖房や家電の使用や自動車の燃料といった直接エネルギー消費だけでなく、紙製品、食品、衣服などの製品を購入することで、製品のサプライチェーンで発生するエネルギー消費を誘発し、間接的にもエネルギーを消費している。したがって低炭素社会や持続可能な社会に実現に向けて、持続可能なライフスタイルへの転換が重要な課題となる。

ライフスタイルは、各国地域・生活水準によって大きく差があり、それに付随して、人々の環境意識や環境負荷に大きな影響を与える。したがって、環境負荷の低減を図るうえで、ライフスタイルの違いを考慮しない画一的な対処策を提示することは好ましいとは言えない。そこで本研究では、各国間のライフスタイルの違いがカーボンフットプリントに与える影響を定量的に分析し、各グループの特性に応じた環境負荷の低減策について議論する。

本研究では以下の順に分析を行う。

① 多地域産業連関表EXIOBASE の家計消費の項から各国のライフスタイルの近似性を測定し、各国をグループに分類する。
② 各国のカーボンフットプリントを算出し、グループ内・グループ間でその値を比較する。

2. 分析手法・使用データ

2.1. 使用データ

本研究では 44 か国 200 製品を対象とする世界多地域産業連関表 EXIOBASE(2018)の家計消費額データを使用する。図 1 は、各国の家計部門の製品別最終需要ベクトルを図示したものである。

	国a	国b	国c
製品1	d_1^a	d_1^b	d_1^c
製品2	d_2^a	d_2^b	d_2^c
製品3	d_3^a	d_3^b	d_3^c

図 1. 各国家計部門の製品別最終需要ベクトル

2.2. 各国におけるライフスタイルの近似性の測定

本研究では以下の式で示されるように、各国の製品別家計消費ベクトル間のユークリッド距離を計算する。

$$S^{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^{200} (d_k^i - d_k^j)^2}$$

ここで、$S^{i,j}$ は、国 i と国 j のライフスタイルとの差を表す指標であり、以後、「ライフスタイルの類似度」と呼ぶ。また、d_k^i は、国 i における製品 k の家計部門での最終需要額を表す。なお国の規模による影響を排するため、d_k^i の値を家計部門の製品最終需要額を人口で除することにより、国民一人当たりの製品最終需要額を求めるケース（ケース 1）と、家計部門の最終需要額全体に占める各製品の最終需要額の比率（すなわち、限界消費性向）を求めるケース（ケース 2）を考えるものとする。図 2 は各国間のライフスタイルの類似度 $S^{i,j}$ で構成される隣接行列を示している。

	国a	国b	国c
国a	0	$S^{a,b}$	$S^{a,c}$
国b	$S^{a,b}$	0	$S^{b,c}$
国c	$S^{a,c}$	$S^{b,c}$	0

図 1. 各国ライフスタイルの類似度の隣接行列

3. 結果・考察

ここでは、日本と諸外国の間のライフスタイルの類似度の結果を示す。

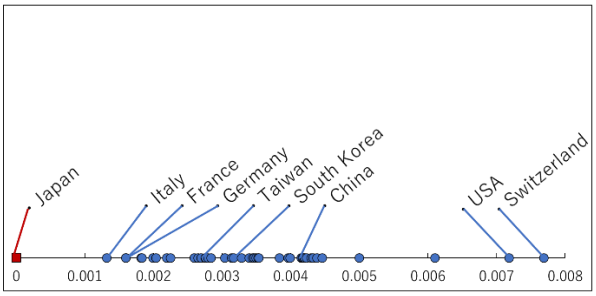


図 2. 国民一人当たりの製品別最終需要に関する日本と各国とのライフスタイルの類似度

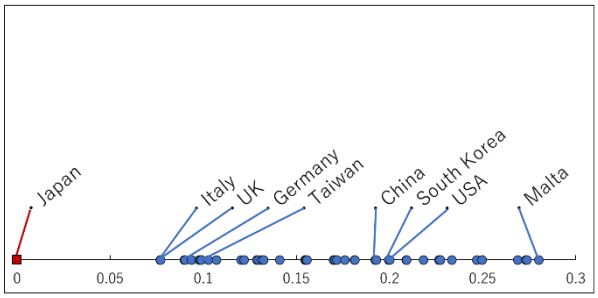


図 3. 限界消費性向に関する日本と各国とのライフスタイルの類似度

日本とライフスタイルの類似度が高いのは、ケース 1 では、イタリア、フランス、ドイツの順、ケース 2 では、イタリア、イギリス、ドイツの順であった。

地理的に近い中国、韓国、台湾のアジア三ヵ国は、どちらのケースにおいても日本とのライフスタイルの類似性は低かった。ただし、今回用いたデータにはアジア地域に属する国は 44 か国中 4 か国のみであるため、一概に日本とアジア諸国のライフスタイルの類似度が低いとは言えない。

一方、下位の国に着目すると、アメリカ・スイスと日本とのライフスタイルの類似性には著しい乖離が見られた。

アメリカと日本のライフスタイルの類似度を低くさせている要因としては、「Health and social work services」の影響が最も大きかった。人口一人当たりの最終需要額でみると、日本は€279 であるのに対し、アメリカは€6733 と約 24 倍であった。アメリカにおいては、公的医療保険制度が存在しないため、国民皆保険制度が確立されている日本と比べ、医療福祉サービスを受けるための自己負担額が非常に大きくなってしまうことが要因である。

スイスと日本のライフスタイルの類似度を低くさせている要因としては、「Real estate services」の影響が最も大きかった。人口一人当たりの最終需要額でみると、日本は€3281 であるのに対し、スイスは€9501 と約 3 倍であった。44 か国中で見てもスイスの最終需要額は高く、2 位のオーストリアと比較して 1.4 倍と他国を大きく引き離している。

4. 今後の方針

本会では、ライフスタイルの類似度に応じて、国のグルーピングの分析結果を示す。そして、EXIOBASE の付帯資料をもとに各国のカーボンフットプリントを推計し、ライフスタイルの違いが各国の環境負荷に与える影響について評価する。

5. 参考文献

1) Tukker, A. & Dietzenbacher, E. *Econ. Syst. Res.* 25(1), 1–19.
2) Wood, R. et al. *J. Ind. Ecol.* 22(3), 553–564.
3) The World Bank, “World Development Indicators” <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators#> (参照 2021-12-28)
4) CEIC, 2021. Population: Taiwan Area. <https://www.ceicdata.com/en/taiwan/population/population-taiwan-area> (参照 2022-1-3)

環境影響評価と消費者分析に基づく
サステイナブルな衣服シェアリングサービス設計

Designing sustainable fashion rental services based on life cycle assessment and consumer analysis

○吉田樹*[1)]、天沢逸里[1)]、木見田康治[1)]、平尾雅彦[1)]
Tatsuki Yoshida, Eri Amasawa, Koji Kimita, Masahiko Hirao
1) 東京大学
* t-yoshida@pse.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

近年、ファストファッションの台頭により、大量の衣服が安価で製造･販売されるようになったと同時に、衣服の生産や廃棄による環境負荷が問題となっている。世界ではファッション業界で年間 790 億 m^3 の水を消費し、29 億 t の温室効果ガス(GHG)を排出していると推定されている[1)]。衣服のライフサイクルからの環境負荷を削減するにあたり、衣服シェアリングが注目されている。既往研究では、衣服シェアリングにより 1 着の着用回数は増え着用当たりの製造の環境負荷は削減できるが、輸送による環境負荷は増える可能性が示唆された[2)]。また、特定の製品を対象とし、統計平均や仮定に基づく消費行動による分析を行った研究もあるが[3)]、どんな衣服に対しても、そして実際の消費行動を踏まえても環境負荷を削減できるかは明らかになっていない。環境面以外の利点として、衣服シェアリングは様々な衣服を着用できる点や、ハイブランドの衣服を安価に着用できる点がある。これらの利点は消費者の嗜好性に関連するため、どのような嗜好性を持った消費者が、どのような製品・サービスをシェアリングに求めているのか、消費者ニーズを含めたシェアリングサービスを設計することが必要である。そこで本研究の目的を、環境影響評価と消費者分析に基づき、環境負荷の低減と消費者満足度の充足を両立したサステイナブルな衣服シェアリングサービス設計とした。

2. 研究方針

本研究では、まず環境影響評価を実施するために、様々な衣服を対象とし様々な消費行動でのシナリオ分析を可能とする衣服シナリオ分析モデルを構築する[4)]。次に消費者分析としてアンケート調査を行い、シェアリングに求める製品特徴・サービス特徴と消費者の特徴を明らかにする。**図 1** に示すように、ドレスは「クリーニング代が高い」、ドレスをシェアリングするサービスは「クリーニング・洗濯不要」など、消費者が捉えている衣服と製品特徴の結びつき、サービスとサービス特徴の結びつきを分析し、消費者が求める製品特徴とサービス特徴の組合せを明らかにする。

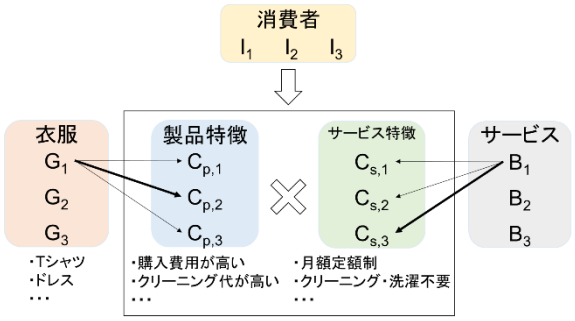


図 1 消費者分析項目の概念図

さらに製品特徴とサービス特徴の組合せを求める消費者の特徴を明らかにする。消費者分析の結果をシナリオ設定に組み込み環境影響評価を行うことで、サステイナブルな衣服シェアリングサービスを設計する。

3. 消費者分析

3.1 アンケート調査

どのような消費者がどのような衣服をどのようなサービスでシェアリングを選好するか調査するため、アンケート調査を行った。アンケート調査の質問例を**表 S1** に示した。なお、製品特徴やサービス特徴の項目は文献調査により抽出した。アンケートは 20 歳以上の男女を対象に 1049 名の回答を収集した。

3.2 アンケート分析

シェアリングしてみたい衣服を選択した人の中で各製品特徴、サービス特徴を選択した人の割合を用いて、k-means 法[5)]で衣服をクラスタリングした。

表 1 製品特徴のクラスタリング

製品特徴でのクラスター	クラスターに含まれる衣服
洗濯の負担はなく、衛生面が気になる	スカート、ワンピース/オールインワン、スポーツウェア、マタニティウェア
着る機会が少なく、購入費用が高い	ドレス、スーツ
洗濯の手間がかかり、保管場所を節約できる	ニット/セーター
着る機会は多いが、衛生面が気にならない	Tシャツ/カットソー、シャツ/ブラウス
シーズンが限られていて、クリーニング代が高い	ドレスシャツ/ワイシャツ、ジャケット、コート

製品特徴のクラスタリング結果を**表 1** に、サービス特徴のクラスタリング結果を**表 S2** に示す。これによ

り、シェアリングしてみたい衣服の製品特徴とサービス特徴の組合せを明らかにした。次に消費者の特徴を明らかにするため、上記の衣服をシェアリングしてみたいと回答した人とそうでない人が衣服を購入する際に重視する項目に違いがあるか、クラスカルウォリス検定を用いて有意水準 5%で検定した。検定結果を**表 S3** に示す。ドレス、スーツをシェアリングしてみたいと思う人はデザイン、流行、価格、着心地、持っている衣服のバリエーションを重視する人であると分かった。アンケート調査から製品特徴とサービス特徴、消費者の特徴の組合せを明らかにした。

4. 環境影響評価

消費者分析に基づく環境影響評価の一例として、ドレスをシェアリングした場合の評価結果を示す。シナリオ設定の詳細を**表 S4** に示した。アンケートのドレス所有時とシェアリングする場合の消費行動の回答を用いて GHG 排出量を算出した。機能単位を着用当たりとして所有とシェアリングを比較することで、製造と廃棄の GHG 排出量の削減効果、輸送と洗濯の GHG 排出量の増加量を評価した。ドレスのシェアリングサービスは、求めるサービス特徴である「ペイパーユース」、「クリーニング・洗濯不要」、「注文後すぐ着られる」、「バリエーションが豊富」、「自分に合うサイズがある」を想定した。ペイパーユースとは着用回数や期間に応じて料金を支払うサービスである。サービス特徴とシナリオ変数の関係を**表 S5** に示した。

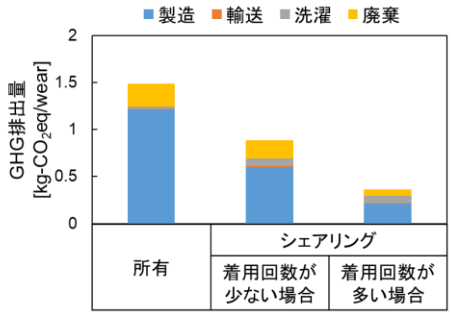


図 2 ドレスの評価結果

図 2 に評価結果を示した。ドレス所有時の 1 着の廃棄までの着用回数は少ないため、GHG 排出量は大きくなった。一方、シェアリングの場合、衣服を多く用意する必要のあるサービス特徴である「バリエーションが豊富」、「自分に合うサイズがある」ことを想定した影響で 1 着の着用回数は減るものの、シェアリングでは短い期間の貸し出しで着用するため、廃棄までの着用回数は多くなった。ペイパーユースでは借りても着用しないことは起こりにくいと想定した。そこで、1 回のシェアリングでの着用回数を、アンケート回答の 1 回のシェアリングでの着用回数の平均の±1 回の範囲と設定し、着用回数が最も多い場合と最も少ない場合で GHG 排出量を算出した。1 回のシェアリングでの着用回数が最も少ない場合でも所有時より 1 着の着用回数は多く、今回のシナリオでは GHG 排出量はシェアリングの方が小さくなった。

5. 衣服シェアリングサービス設計

環境影響評価の結果から設計したドレスのシェアリングサービスを**表 2** に示す。

表 2 ドレスのシェアリングサービス

製品	ドレス
消費者	デザイン、流行、価格、着心地、 持っている衣服のバリエーションを重視する
サービス特徴	「ペイパーユース」 「クリーニング・洗濯不要」 「注文後すぐ着られる」 「バリエーションが豊富」 「自分に合うサイズがある」

表 2 に示すサービス特徴は環境面でも GHG 排出量の削減効果があるため、このような衣服シェアリングサービスを設計することで環境負荷の低減と消費者満足度の充足を両立することが可能である。

6. おわりに

衣服シナリオ分析モデルを構築し、アンケート調査による消費者分析を行った。消費者分析の結果からシナリオを設定して環境影響評価を実施した。一例としてドレスをシェアリングした場合の結果を示し、ドレスのシェアリングサービス設計の例を提案した。今後は、評価指標として水資源消費量での評価や、衣服シェアリング事業者の視点から評価を行うことで、サービスの実現可能性の議論が望まれる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP18K18232 により実施した。

引用文献

1) Kirsi N., *et al.* : Nature Reviews Earth & Environment, 1 (4), (2020), pp. 189-200
2) Zanami B., *et al.* : J Clean. Prod., 162, (2017), pp. 1368-1375
3) Piontek F., *et al.* : CIRP, 80, (2019), pp. 417-421
4) 吉田樹, 天沢逸里, 平尾雅彦: “第 16 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集” (2021)
5) 栗原伸一, “入門統計学 検定から多変量解析・実験計画法まで”, オーム社, 東京, (2014), p. 261

Supporting Information

表 S1　アンケート調査の質問例

I.	消費者属性	・年齢 ・性別など
II.	衣服を購入する際に 重視する項目	・10項目について5段階のリッカート尺度 例.デザイン (1.まったく重視しない ～ 5.とても重視する)
III.	シェアリングしてみたい衣服	・15種類の衣服の中から選択 ・所有時の消費行動 ・選んだ理由として製品特徴を8種類の中から複数選択 ・シェアリングするサービスに求める特徴を10種類の中から複数選択 ・シェアリングする場合の消費行動
IV.	シェアリングしたくない衣服	・15種類の衣服の中から選択 ・所有時の消費行動 ・選んだ理由として製品特徴を8種類の中から複数選択 ・もしシェアリングするとしたらサービスに求める特徴を11種類の中から複数選択 ・もしシェアリングするとしたときの消費行動

表 S2　サービス特徴のクラスタリング

サービス特徴でのクラスター	クラスターに含まれる衣服
好みのブランドを着られる、 コーディネートしてくれる	スカート
月額定額制、 注文後すぐ着られる	Tシャツ/カットソー、 ドレスシャツ/ワイシャツ
手元に長期間置ける	ワンピース/オールインワン、 ニット/セーター、シャツ/ブラウス、 ジャケット、コート
ペイパーユース、 クリーニング・洗濯不要、 自分に合うサイズ	スポーツウェア、ドレス、スーツ
クリーニング・洗濯不要と 注文後すぐ着られることは 求めない	マタニティウェア

表 S3　衣服を購入する際に重視する項目の検定結果

	デザイン	ブランド	流行	価格	機能性	素材	耐久性	着心地	持っている衣服のバリエーション	エシカル消費
スカート										
ワンピース/オールインワン									*	
スポーツウェア					*					
マタニティウェア			*						*	
ドレス、スーツ	*		*	*				*	*	
ニット/セーター	*						*			
Tシャツ/カットソー	*	*	*							*
シャツ/ブラウス	*									*
ドレスシャツ/ワイシャツ	*	*								
ジャケット、コート			*						*	*

＊：違いがある項目、オレンジ：選択した人はそうでない人より重視する、水色：選択した人はそうでない人より重視しない

表 S4　ドレスのシナリオ設定

	所有	シェアリング	
繊維	ポリエステル100%		
消費者への輸送手段	トラックでの宅配		
廃棄年数 [年]	9.0	2.0	
廃棄までの着用回数 [回]	11.7	多い場合 68.2	少ない場合 23.4
洗濯頻度 [wash/wear]	1		
洗濯方法	家庭での水洗い	業務用水洗い	
廃棄手段	焼却		

表 S5　サービス特徴とシナリオ変数の関係

サービス特徴	変数
ペイパーユース	1回のシェアリングでの着用回数：±1回
クリーニング・洗濯不要	洗濯方法：業務用水洗い
注文後すぐ着られる	発送期間：1日
バリエーションが豊富	衣服の種類：1.7倍
自分に合うサイズがある	衣服の種類：1.7倍

建築分野における利用するバックグラウンドデータの差異が評価結果に及ぼす影響の検討

～3EID と IDEA を用いた分析～

Study of the Effect of Differences in Background Data on Evaluation Results Analysis using 3EID and IDEA

○水野皓太[1)]、小林謙介*[1)]、山田優吾[1)]
Kota Mizuno, Kensuke Kobayashi, Yugo Yamada
1）県立広島大学
* kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. はじめに

近年､環境問題への取り組みが活発に行われており、企業の事業活動や製品の環境評価が以前にも増して重要視されている。環境評価においては、環境影響の定量のためにLCAの実施が必要不可欠である。わが国のCO_2排出量の約1/3を占める[1)]といわれる建築分野においてもLCAを用いた解析が不可欠である。建築分野では、建築学会のAIJ-LCA_DB[1)]が用いられるケースがあるほか、産業技術総合研究所のIDEA[2)]、国立環境研究所の3EID[3)]などが用いられるケースもある。これらのデータベースは作成方法が異なる。また、整備されているデータ数はAIJ-LCA_DBや3EIDは約400種類であるのに対し、IDEAは約4700種類と大きく異なる。こうしたことから、それぞれのバックグラウンドデータベースで評価した場合、少なからず評価結果が異なることが予想される。

本研究では、建築物の評価を想定し、それぞれのバックグラウンドデータの差異について検討することで、利用における留意点などを明らかにすることを目的とした。具体的には、主要な建材の原単位の比較を行うとともに、事例建物の評価結果の差異を分析した。

2. 原単位の比較分析

2.1 分析概要

本検討では､建築物に投入される主要資材を対象に、CO_2排出原単位の比較を行った。対象としたデータは、表1に示すIDEA Ver.3.1､Ver.2.2､3EID(2015年版)、AIJ-LCA_DB(建築学会の2005年版産業連関表をもとに作成された原単位）である。なお、3EID、AIJ-LCA_DB（資本形成含めず）は国内のみと海外分を含めた場合の値を比較した。検討では、原則としてIDEAの機能単位に合わせることとし、3EIDは産業連関表の物量表などをもとに単位換算を行った。IDEAと産業連関表の部門の対応関係は､原則としてIDEAで公開されているコンバータを参考にした。

2.2 結果

文献[4)]で実施した検討をもとに、建物で多く利用される資材(出現頻度分析において11建物中4件以上で利用された資材、計76資材）を原単位別に比較したところ、AIJ-LCA_DB（海外消費含む）に対して3EID（外洋輸送含む）が、2倍以上または半分以下となった資材は､76資材中18%程度であった。この結果から多くは極端に大きな差異がないことが確認できた。次にAIJ-LCA_DB、3EID、IDEAを比較した場合、極端に大きく差異がなかった項目の例として、図1にセメント、図2に普通鋼形鋼を挙げる。一方、大きな差異が生じた例として、図3にアルミ圧延製品を示す。アルミ圧延製品は海外での生産に伴うCO_2排出量が大きいため、海外生産分の取り扱いの考え方によって差異が生じたものと考えられる。このほか、図4にプラスチック管を示す。本事例のように、産業連関表の部門に対し、IDEAの多数の項目が対応する関係となるケースが多く、製品によっては大きくなるケースが生じた可能性もある。

表1 原単位の比較

名称	AIJ-LCA (2005)	3EID (2015)	IDEA Ver.3.1
作成主体	日本建築学会	国立環境研究所	産業技術総合研究所
データ数	約400	約400	約4700（分類数は約1800）
情報源	統計（2005年産業連関表）	統計（2015年産業連関表）	統計、実測、論文・報告書、理論計算値など
評価範囲	原材料、エネルギー、サービス、インフラなど、すべての活動を含む	原材料、エネルギー、サービス、インフラなど、すべての活動を含む	原則として原材料、エネルギー
品質	全て同じ情報源（産業連関表）を用い、データの代表性、地理的有効範囲（日本平均）などの品位は高い。またデータ作成方法の一貫性がある。	全て同じ情報源（産業連関表）を用い、データの代表性、地理的有効範囲（日本平均）などの品位は高い。またデータ作成方法の一貫性がある。	情報源が異なるため、データごとに品質が異なる。代表性、完全性、地理・技術的有効範囲などが、きわめて品質が高いものもあれば、逆のものもある。
対象物質	6種類（エネルギー、CO_2、SO_2、NO_2、CH_4、N_2O）	8種類（エネルギー、CO_2、CH_4、N_2O、HFCs、PFCs、SF_6、NF_3）	1000種類近い環境負荷物質
他の特徴	独自の計算方法を用いており、主要輸入材の影響が考慮されている	国内完結型（国内温室効果ガス排出量の報告値に一致）と外洋輸送を含めたものが公開	2020年に海外版（輸出入が盛んな14か国を暫定）も公表
価格	LCA指針に同封	無料公開	有償

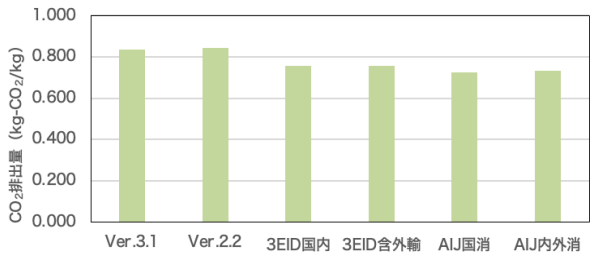


図 1　原単位ごとの比較（セメント）

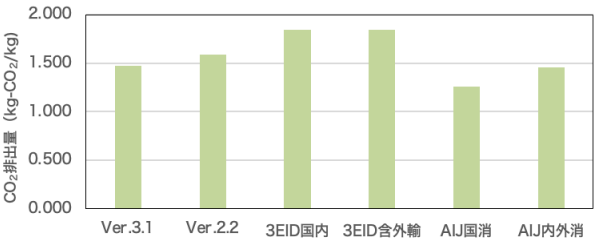


図 2　原単位ごとの比較（普通鋼形鋼）

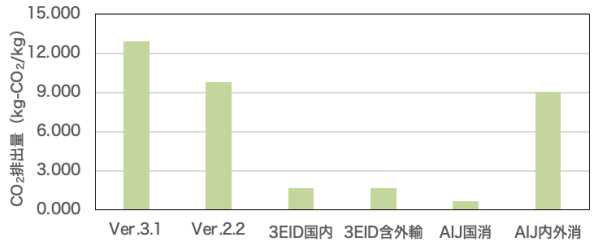


図 3　原単位ごとの比較（アルミニウム圧延製品）

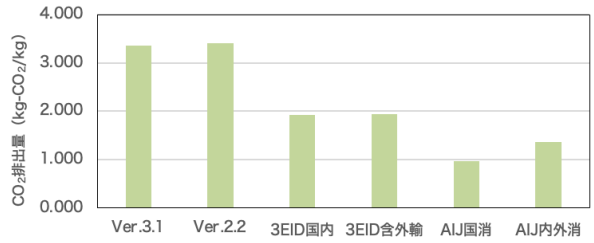


図 4　原単位ごとの比較（プラスチック管、塩ビ）

3. 建物の比較分析

3.1 分析概要

モデル住宅を対象として、それぞれのバックグラウンドデータを用いることによる評価結果の差異を分析した。対象とした住宅は、住宅事業者が市場に供給している木造の集合住宅モデルである。1 棟 6 戸で、延床面積は約 330㎡/棟である。想定している耐用年数は 35 年である。なお、この建物は ZEH を達成している。

評価において、新築時の資材投入量は当該建物の積算情報から、施工時のエネルギー消費量はこの事業者の平均エネルギー消費データを、運用時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基づく計算値[5]を、改修時は当該事業者の想定耐用年数データを、解体・廃棄時は文献値を用いて評価した。

3.2 結果

図 5 に 1 棟全体で 1 年あたりに発生する CO_2 排出量の結果を示す。本建物は ZEH を達成しているが、本図では発電分を控除せず、排出分の結果のみを検討した。AIJ-LCA_DB の海外分を含めた結果をベースに見ると、ライフサイクルでの CO_2 排出量は 6～10.9%程度の差異が生じる結果となった。また、最も支配的な運用時は 5～19%程度の差異が生じ、その主たる要因は電力原単位の差異によるものであった。次いで大きかった新築時資材製造に伴う CO_2 排出量は、9～73%程度の差異が生じた。また改修に伴う CO_2 排出量は 2～59%程度の差異が生じた。

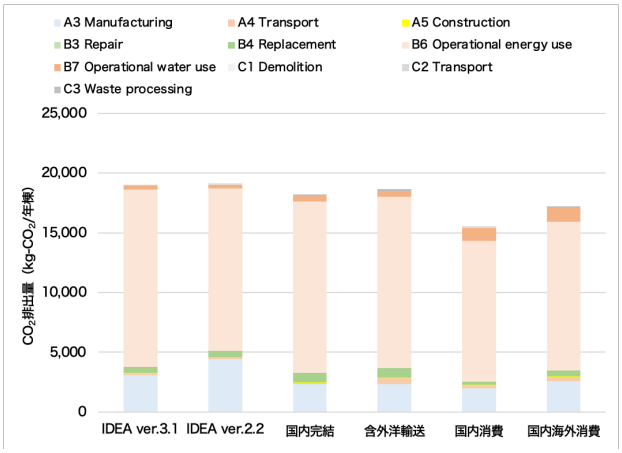


図 5　バックグラウンドデータごとの評価結果

4. まとめ

本研究では、それぞれのバックグラウンドデータの差異について検討することで、利用における留意点などを明らかにすることを目的として、AIJ-LCA_DB、3EID、IDEA を対象として、主要な建材の原単位比較を行った。また、事例建物を対象として、利用するバックグラウンドデータの差異が評価結果に及ぼす影響について分析を行なった。

5. 参考文献

1）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一改訂版、2013.2　2）産業技術総合研究所 IDEA ラボ：IDEA Ver.3、https://riss.aist.go.jp/idealab/　3）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、https://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/page/what_is_3eid.htm　4）小林ら：ニーズ分析を踏まえた建築実務者向け LCA データベースの構築　優先的に作成すべきデータの選定と単位換算データベースの構築、日本建築学会環境系論文集、2021.04　5）住宅に関する省エネルギー基準に準拠したプログラム、https://house.lowenergy

バイオ燃料と燃料電池を用いた大型トラックの環境影響評価

その１　バイオ燃料と軽油の比較

Life cycle assessment of heavy-duty trucks using bio-fuels and fuel cells Part 1 Comparison between bio-fuels and diesel oil

○久地樂昌紀*[1)]、武田克彦[2)]、佐野慶一郎[2)]、河西純一[2)]、大井康寛[3)]、
八木田浩史[4)]、佐々木彩音[5)]、深井晶央[5)]
Masaki Kujira, Katsuhiko Takeda, Keiichiro Sano, Junichi Kasai, Yasuhiro Oi,
Hiroshi Yagita, Ayane Sasaki, Akihisa Fukai
1)　関東学院大学大学院, 2) 関東学院大学, 3) 元関東学院大学,
4) 日本工業大学, 5) いすゞ自動車株式会社
*21J1004@kanto-gakuin.ac.jp

1. はじめに

世界のトラックの 97.8% [1)]は、走行時の燃料に軽油を使用している。燃料に軽油を使用した大型トラック（Diesel トラック、以下、DE トラックと略記する）のライフサイクルにおいて、走行（燃料製造と燃料燃焼）における二酸化炭素 (Carbon dioxide、以下、CO_2 と略記する) 排出量は、約 92% [2)]を占める。

DE トラックの燃料製造における化石資源の大量消費、燃料燃焼に伴う CO_2 の大量排出により、今後、一層、地球温暖化、資源枯渇などの地球問題が深刻になると考えられる。

これらの問題の解決策として、日本では 2050 年にカーボンニュートラルの実現を達成することを目標としており、今後、化石資源に依存しない代替燃料や水素を用いたトラックの実用化が期待される。

本研究では、DE トラックとバイオ燃料トラック（以下 BD トラック）および燃料電池車（FC トラック）での製造から運用までの（廃棄を含まない）生涯シナリオを作成した。また、本報その 1 では DE トラックと BD トラックの比較検討をおこない、次報その 2 では DE トラックと FC トラックの比較検討をおこなう。軽油は原油を中東から輸入し国内精製、バイオ燃料（Bio-fuel 以下 BF）はパーム油を使用し原産国である東南アジアで精製したものを日本国内に輸送する。車両の全ては大型トラックとして、廃棄を除く全ての生涯ライフサイクル CO_2 排出量を評価した。

2. LCA 手法

2.1 LCA 評価範囲

本研究における LCA の評価範囲を図 1 に示す。本研究では、DE トラックと BD トラックは、全て貨物輸送用の大型トラックと設定した。なお、荷台の製造・輸送・組立は、本評価に入れていないが、完成者の走行時には荷台の重量も含まれている。DE・BD トラックの両車の燃費値は本来であれば発熱量が異なるため燃費値も異なるが、本研究では車両における統一の LCA 評価範囲を設定する（表 1）。使用年数 10 年、総走行距離 10 万 km とし、最大積載量 15ton、車両総重量 25ton と仮定した。BF においては軽油と一部混合させ BF 添加率を 0、10、50、80、100%とした。

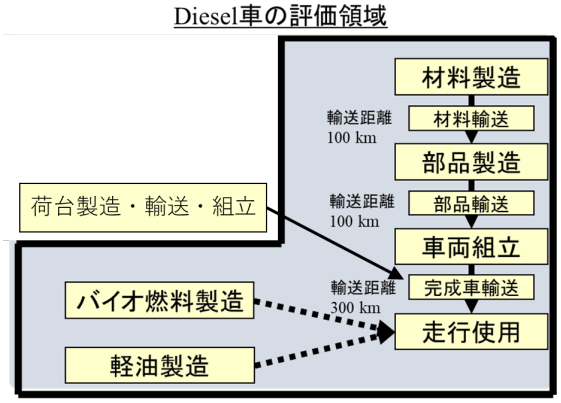


図１　DE トラックと BD トラックの評価範囲

表１　車両仮想スペック

空車重量（t）	10
積載重量（t）	15
総重量（t）	25
全高（mm）	3,800
全幅（mm）	2,490
排気量（cc）	10,000
最大出力（kW）	300
平均燃費（km/L）	4

2.2 Well to Tank（燃料製造段階）

各車両の燃料製造パスでの CO_2 排出量は、下記の各項目の値を積算した。

・DE における燃料製造段階

① 採掘（原油）
② タンカー輸送（原油）：往復距離で算出
③ 石油精製（原油→軽油）
④ タンクローリー輸送（軽油）：往復距離で算出

・BF における燃料製造段階

① 原料栽培（パーム）
② 地域輸送（東南アジア）：往復距離で算出
③ 搾油（パーム→パーム油）：収穫後 24 時間以内
④ BF 転換（エステル化処理）
⑤ 地域輸送（BF）：往復距離で算出
⑥ タンカー輸送（BF）：往復距離で算出
⑦ 軽油と混合し供給

2.3 Tank to Wheel（燃料燃焼段階）

設定燃費値と設定総走行距離から燃料消費量を算出し、それに CO_2 排出量原単位を乗じて算出した。軽油の燃焼の CO_2 排出原単位は、74.3g-CO_2/MJ とした。BF においてはカーボンニュートラル効果を適応し BF 燃焼分の CO_2 排出量は加味しないものとする。

2.4 Well to Wheel（燃料製造から燃焼までの段階）

“Well to Wheel” の CO_2 排出量原単位は、“Well to tank” と “Tank to Wheel” の値を積算した（表 2）。これらの CO_2 排出係数は、文献 [3),4)] から引用した。この CO_2 排出量原単位に、燃料消費量を乗じて総 CO_2 排出量を算出した。

表 2 燃料 1kg と 1MJ 当たり製造の CO_2 排出係数 [3),4)]

	CO_2排出原単位 (kg-CO_2/kg)	CO_2排出原単位 (kg-CO_2/MJ)
軽油	0.27	6.40
	3.18	73.30
BF	0.93	23.20
	0.00	0.00

3. 評価結果と考察

図 2 に各 BF 添加率の各車両におけるライフサイクル全体での総 CO_2 排出量を示す。Well to Tank に着目すると BF 添加率増加に伴い、CO_2 排出量が増加している。これは、BF 製造段階において原料であるパームの栽培やエステル化処理をおこなう際の、CO_2 排出量が寄与している。将来的に BF100%添加となれば、軽油 100%に対して約 70%の CO_2 削減効果が期待できる。電気自動車が注目される中、代替燃料である BF を用いることによる、既存のガソリンスタンドが流用可能であり、新たに水素ステーションや家庭に充電スポットを設置する必要がない。

また BF 添加率増加に伴い、軽油使用量が減少することにより、燃料燃焼時の CO_2 排出量が減少し、カーボンニュートラルの概念より BF 添加率 100%における燃料燃焼時の CO_2 排出量がゼロとなり、CO_2 総排出量が最も低い値となった。

以上のことから、BF を添加することでカーボンニュートラルの概念より CO_2 排出量は低減できるが、BF 製造段階での CO_2 排出も低減させることが今後の課題と考える。

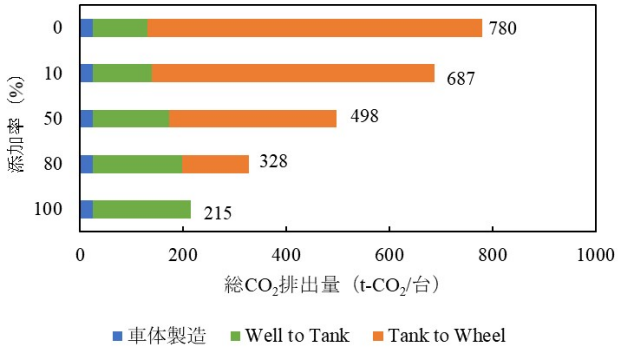


図 2 添加率別仮想 DE・BD トラックの製造及び走行における総 CO_2 排出量

4. おわりに

大型トラックの製造及び走行における総 CO_2 排出量は、BF 添加率 100%による BD トラックが最も低い結果となった。しかし、現状の BF 添加率では約 10%程度の CO_2 削減効果しか得られない。燃料製造段階での CCS（Carbon dioxide Capture and Storage）の実施や近い将来の BF100%の実現が強く望まれる。

引用文献

1) 欧州自動車工業協会（ACEA）「Vehicles in use, Europe」
2) 大井康寛，冨岡佳祐，佐野慶一郎，八木田浩史，小杉信明：第 12 回日本 LCA 学会要旨集，産業技術総合研究所つくばセンター（2017）P.420,P.421
3) 平井晴己，永富悠，中西哲也，洪起源，姜京善，「日本におけるバイオディーゼルの導入について」，IEEJ 2008 年 6 月
4) トヨタ自動車株式会社，みずほ情報総研株式会社，「輸送用燃料の Well-to-Wheel 評価 バイオ燃料を中心とした輸送用燃料製造（Well-to-Tank）における温室効果ガス排出量に関する研究報告書，平成 20 年 12 月

ポスターセッション

[1-P3] ポスターセッション(3)

2022年3月2日(水) 17:00 ～ 18:00 P1会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-P3-01] 日本 LCA学会学生交流ネットワーク 2021年度活動報告

*鬼頭 みなみ[1]、前野 啓太郎[1]、大津 太伸[2]、岡部 紘樹[3]、松田 敏明[4] （1. 九州大学、2. 横浜国立大学、3. 東京大学、4. 立命館大学）

[1-P3-02] インピーダンス測定による冷凍サバの鮮度を考慮した環境負荷評価

*石部 優貴[1]、沖 慧弘[1]、片山 昇[1]、苗 山[1]、堂脇 清志[1] （1. 東京理科大学）

[1-P3-03] 直接空気回収技術（ DAC）のライフサイクル評価

*鈴木 隼斗[1]、森本 慎一郎[2]、伊坪 徳宏[1] （1. 東京都市大学、2. 産業技術総合研究所）

[1-P3-04] Applying Natural Language Processing to Support Scenario Structuring for Sustainable Futures

*高 天正[1]、木下 裕介[1]、梅田 靖[1] （1. 東京大学）

[1-P3-05] 食品廃棄物発生量の規定因～社会基盤とライフスタイルに着目して

*高杉 晃司[1]、橋本 征二[1] （1. 立命館大学）

[1-P3-06] IDEA海外版の構築~IDEA Ver.3.1を用いた世界平均データベースの検討~

*山本 大夢[1]、半田 歩夢[1]、前田 天士[1]、小林 謙介[1,2]、藤井 千陽[2]、横田 真輝[2]、田原 聖隆[2]、Chun Yoonyoung[2] （1. 県立広島大学、2. 産業技術総合研究所）

[1-P3-07] 新型コロナウィルス禍における鉄道のカーボンフットプリント

*升川 晴陽[1] （1. 東京都市大学）

[1-P3-08] 有機養液栽培によるミニトマトの糖度・収量・環境負荷の複合比較

*藤森 開[1]、竹本 岬[1]、大平 希[1]、古屋 俊樹[1]、苗 山[1]、堂脇 清志[1] （1. 東京理科大学）

[1-P3-09] 自然災害が環境と経済に与える影響

*岡 寛彰[1]、加河 茂美[2]、今田 青冶[1] （1. 九州大学、2. 九州大学経済学研究院）

[1-P3-10] 食品ロス起源のライフサイクル CO_2排出とその変化要因の分析

*尾辻 勇太[1]、加河 茂美[1] （1. 九州大学）

[1-P3-12] 国際貿易構造の変化が CO_2排出に与える影響

*庄田 朋申[1]、前野 啓太郎[2]、加河 茂美[3]、下津浦 大賀[1] （1. 九州大学、2. 九州大学経済学府、3. 九州大学経済学研究院）

[1-P3-13] 建築分野におけるバックグラウンドデータベースの構築 ～既往文献を活用したデータ作成方法の検討～

*中村 亘佑[1]、小島 陸[1]、小林 謙介[1] （1. 県立広島大学）

[1-P3-14] 長期環境家計簿でみる消費者のライフスタイルおよび省エネ技術変化の効果分析

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

[1-P3-15] バイオマス由来樹脂による炭素ストック量分析：セルロース繊維強化樹脂の自動車への導入における例

*松田 侑樹[1]、兼松 祐一郎[1]、下野 僚子[1]、菊池 康紀[1] （1. 東京大学）

[1-P3-16] オリンピックと環境（４） 大会後における環境面での課題

*高橋 和枝[1] （1. 武蔵野大学）

[1-P3-17] 菜食主義者を対象とした環境フットプリント

*有馬 悠人セニカ[1] （1. 東京都市大学）

©日本LCA学会

[1-P3-18] SDG報告に見る金属産業の SDGsへの関わり方

*畑山 博樹[1] （1. 産業技術総合研究所）

[1-P3-19] 容器包装の環境情報開示による消費者行動の分析

*橋本 岳大[1]、伊坪 徳宏[1] （1. 東京都市大学）

[1-P3-20] バイオ燃料と燃料電池を用いた大型トラックの環境影響評価
その２　燃料電池と軽油との比較

*久地樂 昌紀[1]、武田 克彦[2]、佐野 慶一郎[2]、河西 純一[2]、大井 康寛[3]、八木田 浩史[4]、佐々木 彩音[5]、深井 晶央[5] （1. 関東学院大学大学院、2. 関東学院大学、3. 元関東学院大学、4. 日本工業大学、5. いすゞ自動車株式会社）

©日本LCA学会

(2022年3月2日(水) 17:00 〜 18:00 P1会場)

[1-P3-01] 日本 LCA学会学生交流ネットワーク 2021年度活動報告

*鬼頭 みなみ[1]、前野 啓太郎[1]、大津 太伸[2]、岡部 紘樹[3]、松田 敏明[4] （1. 九州大学、2. 横浜国立大学、3. 東京大学、4. 立命館大学）

©日本LCA学会

インピーダンス測定による冷凍サバの鮮度を考慮した環境負荷評価

Environmental Impact Assessment of Frozen Mackerel Considering Freshness by Impedance Measurement

○石部優貴*[1)]，沖慧弘[1)]，片山昇[1)]，苗山[1)]，堂脇清志[1)]

Yuki Ishibe, Akihiro Oki, Noboru Katayama, Shan Miao, Kiyoshi Dowaki

1）東京理科大学

*7418010@ed.tus.ac.jp

1. はじめに

今日において、さまざまな魚類などの水産物は消費者に届くまで冷凍によるコールドチェーンによって輸送されている。冷凍による輸送では、冷蔵に比べて鮮度低下を押さえることができる[1)]。

しかしながら一方で、冷凍保存によって鮮度を保持してもその後の解凍段階によって著しく鮮度は低下してしまう可能性がある。なお、解凍時の鮮度低下の要因として、タンパク質の自己消化と ATP の消費が挙げられる。ATP が死後に消費された後、肉中で H^+が生成され pH が低下する[2)]。pH の低下に伴って、タンパク質分解酵素の活性化や自己消化を引き起こす酵素が活性化される[3)]。活性化した酵素がタンパク質をアミノ酸に分解し肉質を劣化させ、ドリップに含まれるアミノ酸が鮮度低下と共に増加する。これに伴って非電解質である細胞膜が破壊され、電解質である細胞液が溶出されて解凍後にはドリップとして流出する。そのため鮮度低下と共に電解質の組織液が広がりイオン伝導性が増し、インピーダンスが低くなる[4)]。このことから、インピーダンスによって鮮度を評価することが可能である[5)]。

本研究では、ドリップと鮮度の関係に着目し、交流電流を用いた肉中のインピーダンス法による鮮度評価を行った。すなわち、鮮度低下やイオン伝導性増加の要因となる細胞膜の劣化、あるいは自己消化による品質劣化の測定と環境影響について分析を行うこととした。なお、対象産物は冷凍サバとした。この理由として、特に、サバは死後に自己消化しやすいという特徴があり、刺身などの生食での扱いが難しく、適切な鮮度評価が求められることによる。

また本研究では、一般家庭での消費を想定し、家庭内での一般的な解凍方法の候補となる電子レンジ、自然解凍、冷蔵、もしくは水による解凍方法によるシナリオで分析を行うこととした。一方で、これらの解凍時においても環境負荷に影響を与える直接・間接のエネルギー投入が行われ、これらの投入と品質との相互関係があることが想定される。例えば、電子レンジの加熱解凍や冷蔵庫による低温解凍では、電力投入が想定されるが、特に冷蔵庫の利用においては、その消費電力量が電化製品部門の内訳で最も大きな割合を占めている[6)]。また、家庭部門全体では燃料種別で見ると、電気による CO_2排出量が最も大きいとの報告もある[7)]。すなわち、他の生鮮食料品に関しても影響を検証する意味でも、環境負荷と品質との相互関係を分析することの意義はあろう。

2. 研究概要

2.1 解凍方法

本研究では、市販の冷凍サバ(原産国:日本)を用いて実験を行った。解凍は室内での自然解凍、冷蔵庫(SJ-D14B-W, シャープ株式会社製)での解凍、浸水解凍それぞれを各 12 時間放置した。浸水解凍に関しては、切り身を密封パックに入れて水(2.32L)の中に沈めて解凍を行った。また、電子レンジ(RE-T3,シャープ株式会社製)では 1 分間解凍を行った。

2.2 インピーダンス測定

各解凍後の肉に、5mm 間隔でニクロム線を冷凍サバに 5mm 差し込み、インピーダンス測定器(ケミカルインピーダンスアナライザ IM3590,日置電機株式会社製)を用いて、四端子法によってインピーダンスを測定した。周波数は 1kHz,10kHz,100kHz、電圧は 10mV,50mV[8)]の計 6 通りの組み合わせにより計 72 回測定を行った。なお、本研究では、ニクロム線間の距離について、同部位の切り身を用いたこともあり、極端に距離を変えない限りは大きなインピーダンスの変化は見られなかった。

2.3 環境評価

機能単位はサバの切り身約 1 個分の可食部の重さ 60g の解凍 1 分当たりとした。冷凍製品の鮮度低下の最も大きな要因は解凍段階であり、本研究では家庭における解凍を想定しているため、システム境界を解凍段階とした(SI に示した図 S1 参照)。また本研究で用いたサバは同様の保存方法をとっており解凍段階において異なる解凍方法を比較するため、解凍段階で排出される GHG 排出量を考慮した。なお、電子レンジと冷蔵解凍に関しては、解凍

に要したGHG排出量をSimapro ver9.2.0.1で算出し、浸水解凍は水道水1m³当たりCO_2 253g[9]として算出した。

浸水解凍に関しては、使い捨ての密封パックを用いているため、密封パックの原料採掘から廃棄までのGHGを考慮することとした(SIに示した図SI2 参照)[10]。その他の解凍法では、繰り返し使用可能な容器を用いたため1度の解凍における環境負荷は考慮しないことに注意されたい。

3. 結果

3.1 インピーダンス測定結果

4通りの解凍後の切り身60gに対して電圧10mVと50mVで周波数1kHz,10kHz,100kHzの交流電流を流し、同じ組み合わせで3回ずつ計測した平均値を示した(図1参照)。50mVについてはSIに示した図S3を参照されたい。

インピーダンス結果から、冷蔵解凍での鮮度が最も良く、次いで浸水、自然解凍、電子レンジとなった。このことから、低温で緩やかな解凍を行うことで鮮度低下を抑えることができた。

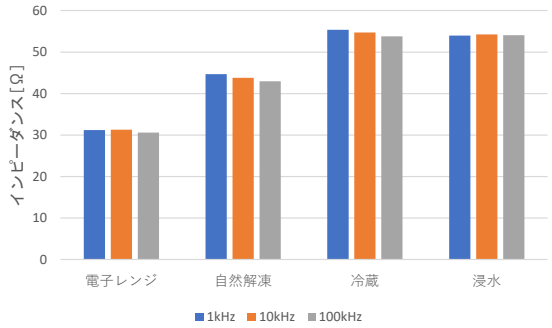


図1 10mVにおけるインピーダンス

3.2 環境影響分析評価

次に各解凍に要したGHG排出量はSIに示した式(1),(2),(3)によって算出した。ここで算出した結果、電子レンジで最も多くGHGが排出され、浸水解凍の約21.6倍、冷蔵解凍の約28.7倍となった(図2 参照)。

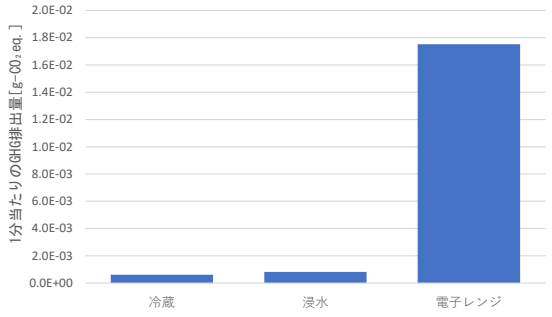


図2 1分当たりのGHG排出量

3.3 解凍後の鮮度とGHG排出率

SIに示した式(4),(5),(6)によって解凍に要した1分当たりのGHG排出量に対する解凍後のインピーダンスを算出した(SIに示した図S4 参照)。

図S4より、解凍に要したGHGあたりのインピーダンスは冷蔵解凍が最も大きな値を示した。値は冷蔵が電子レンジの約50.2倍、浸水の約1.3倍となった。

4.まとめ

今回、冷凍サバを対象に鮮度,GHG排出量を評価した。この結果、鮮度低下を軽減するためには温度を低くする必要があり、鮮度が良い解凍方法ほど解凍が終わるまでのGHG排出量が大きい。しかしながら、1分あたりのインピーダンスに対するGHG排出効率は冷蔵解凍が最も大きく、鮮度も低下しにくく1分当たりのGHG排出量も少ない。また、自然解凍は電子レンジより鮮度の低下が小さく、GHGを排出しないため、解凍時間は必要ではあるものの環境負荷の面において優位な解凍手段である。

参考文献

1) 中澤奈穂,綿律子,田中竜介,岡野利之,福島英登,前田俊道,岡崎惠美子,福田裕: 日本冷凍空調学会論文集,(2014),pp29-37
2) 福田裕,柞木田善治,新井健: 日本水産学会誌,50(5),(1984),pp.845-852
3) 橋本加奈子,山下倫明: “千葉県水産総合研究センター研究報告”,(2017),(11),pp.39-40
4) 加藤宏郎,坂口守彦,大井康之,丸尾信,豊田薫: 農業機械学会誌,62(3),(2000),pp.76-83
5) 加藤宏郎,坂口守彦,大井康之,丸尾信,豊田薫: 農業機械学会誌,62(5),(2000),pp.59-69
6) 全国地球温暖化防止活動推進センター:”課程からの二酸化炭素排出量(2019 年度)”,(オンライン),入手先<https://www.jccca.org/download/13337>(参照2021-12-1)
7) 川原博満:” 家庭における CO2 削減・省エネ対策をご提案 ～うちエコ診断のご紹介～”,(オンライン),入手先<https://chubu.env.go.jp/to_2012/data/1217ac.pdf>(参照 2021-12-1)
8) 松井武夫,原清,高瀬明,稲垣耕一: 日本獣医師会雑誌,(1954),pp.266-269
9) 東京都水道局:”くらしと水道”,(オンライン),入手先<https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/kurashi/co2.html>(参照 2021-12-1)
10) 新保雄太,中谷隼,栗栖聖,花木啓祐:”日本 LCA 学会”, 第 5 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集,(2010),pp.394-395

Supporting Information

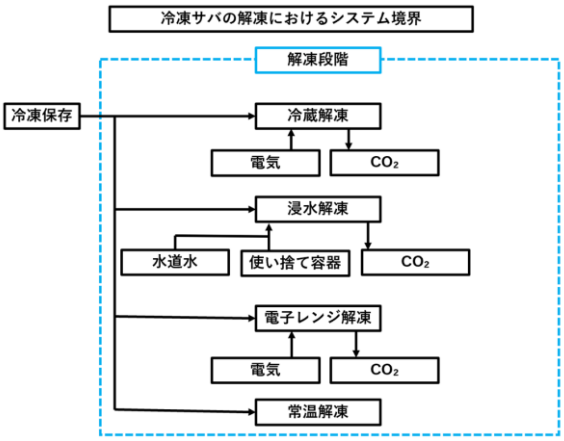


図 S1 解凍段階のシステム境界

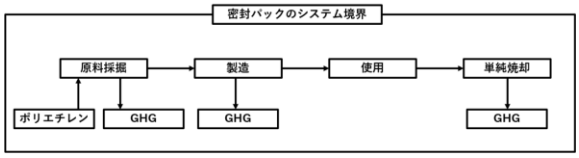


図 S2 密封パックのシステム境界

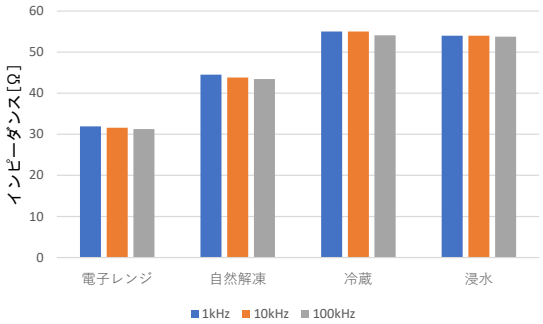


図 S3 50mV におけるインピーダンス

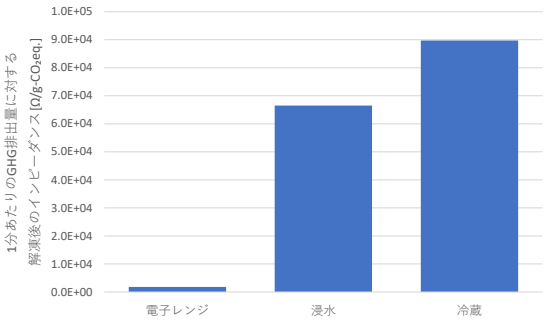


図 S4 1 分当たりの GHG 排出量に対する
解凍後のインピーダンス

表 S1 インベントリデータ

項目	値	単位
サバの体積	57	cm^3
サバの質量	60	g
室内温度	22	℃
冷蔵庫容積	318,600	cm^3
冷蔵庫消費電力	397	W
冷蔵庫温度	4	℃
電子レンジ容積	117,530	cm^3
電子レンジ消費電力	0.114	W
水の体積	2.32	L
水の平均温度	15.1	℃

表 S2 10mV におけるインピーダンス

10mV												
	電子レンジ			自然解凍			冷蔵			流水		
1kHz	31.2	31.73	30.7	44.27	44.9	44.8	55.34	54.35	56.49	53.2	54.6	54.1
10kHz	31.16	31.37	31.3	43.03	43.46	44.92	54.37	54.52	55.31	53.29	54.82	54.62
100kHz	30.31	30.59	30.92	42.17	43.52	43.21	53.53	54.2	53.6	52.51	55.31	54.33

表 S3 50mV におけるインピーダンス

50mV												
	電子レンジ			自然解凍			冷蔵			流水		
1kHz	32.11	32.23	31.44	44.31	44.79	44.52	55.47	54.38	55.21	53.32	53.52	55.13
10kHz	31.74	31.81	31.21	42.95	45.16	43.41	54.74	54.49	55.91	53.58	53.69	54.78
100kHz	31	31.04	31.77	42.08	44.7	43.65	54.3	54.18	53.78	53.38	53.02	54.97

GHG に関する式

A[g-CO_2eq.]=1 分あたりの冷蔵庫による GHG 排出量

$$= \frac{\text{サバの体積}[cm^3]}{\text{冷蔵庫の容積}[cm^3]} \times 12\text{ 時間の冷蔵庫による GHG 排出量[g-}CO_2\text{eq.]} \times \frac{1}{720} \quad (1)$$

B[g-CO_2eq.]=機能単位あたりの電子レンジによる GHG 排出量

$$= \frac{\text{サバの体積}[cm^3]}{\text{電子レンジの容積}[cm^3]} \times \text{電子レンジによる GHG 排出量[g-}CO_2\text{eq.]} \quad (2)$$

C[g-CO_2]= 1 分あたりの浸水解凍による GHG 排出量

$$= \text{解凍に用いた水の体積[m}^3\text{]} \times \text{水道水による } CO_2\text{排出量[265g-}CO_2\text{/m}^3\text{]} \times \frac{1}{720} \quad (3)$$

$X[\Omega/g - CO_2eq.] = 1$ *分あたりのGHG排出量に対するインピーダンス*

$$= \frac{\text{冷蔵解凍後のインピーダンス}[\Omega]}{A[g-CO_2eq.]} \quad (4)$$

$Y[\Omega/g - CO_2eq.] = 1$ *分あたりのGHG排出量に対するインピーダンス*

$$= \frac{\text{電子レンジ解凍後のインピーダンス}[\Omega]}{B[g-CO_2eq.]} \quad (5)$$

$Z[\Omega/g - CO_2] = 1$ *分あたりのCO_2排出量に対するインピーダンス*

$$= \frac{\text{浸水解凍後のインピーダンス}[\Omega]}{C[g-CO_2]} \quad (6)$$

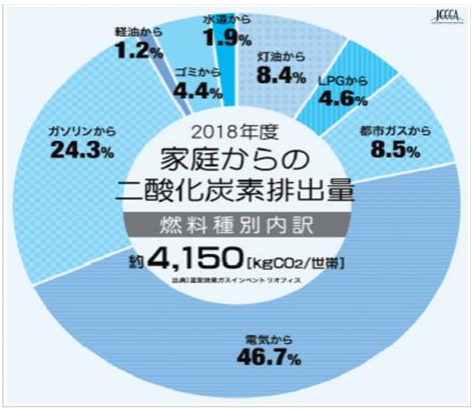


図 S5 家庭における燃料別 CO_2 排出率

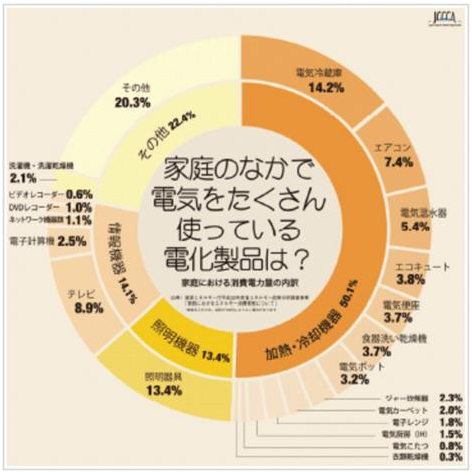


図 S6 家庭における製品別電力使用率



図 S7 冷凍サバ



図 S8 浸水解凍



図 S9 冷蔵解凍



図 S10 電子レンジ解凍



図 S11 自然解凍



図 S12 インピーダンス測定

直接空気回収技術（DAC）のライフサイクル評価

Life cycle assessment of Direct Air Capture

○鈴木隼斗*[1)]、森本慎一郎[2)]、伊坪徳宏[1)]
Hayato Suzuki, Shinichirou Morimoto, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学, 2) 産業技術総合研究所
* g2183116@ tcu.ac.jp

1. はじめに

2018 年 IPCC の 1.5℃特別報告書[1)]にて、2050 年において CO_2 排出量 0 を達成するためには、大気中の CO_2 を直接除去する Carbon Dioxide Removal(CDR)技術の利用が不可欠とされている。CDR 技術には植林、及び風化促進など様々な技術があり、その中で大気から直接 CO_2 を回収する技術である Direct Air Capture(DAC)も CDR 技術の 1 つとされている。

現在、世界では 19 の DAC プラントで約 1 万 ton/y の CO_2 が回収[2)]され、貯留、または航空燃料への変換など有効利用されている[4,7)]。国際エネルギー機関(IEA)が示した 2050 年までの Net Zero シナリオでは、2030 年までに DAC の導入規模を 8500 万 t/y までスケールアップ[2)]することが必要と示唆されており、これは、2018 年の世界の CO_2 排出量[3)]の 0.3%程度である。

CO_2 固定発生源排ガスの CO_2 分離回収として、これまで化学吸収法や物理吸着法、及び膜分離法等が導入されているが、それらの技術と比べて、DAC は設置場所に大きな制約を受けないこと、また既存の CO_2 分離回収技術を適用できない運輸・航空部門からの CO_2 排出量も削減可能であることが利点とされている。

2. 研究目的

DAC には液体・固体吸収法、膜分離法などの方法があり、液体吸収と固体吸収法が海外スタートアップ企業にて実証レベルで使用されている[4,7)]。この中で吸収液による DAC は、CO_2 を吸収させた吸収液を再生させるのに多大なエネルギーを消費し、その消費エネルギー由来の CO_2 排出量が多いことが既存研究において明らかになっている[4)]。そのため電力に再エネや焼却場での発電電力の利用、または熱源に地熱や工場廃熱、ヒートポンプを使用する場合などを評価した事例[3)]がみられる。特に、カナダにおいて実証された吸収液による DAC の事例では吸収液の再生時の熱源をメタン燃焼により補っているため、[5)]大気から直接回収した CO_2 は最終的に貯留する際の CO_2 全体の 70%にとどまっており、効率化に向けた更なる検討が必要となっている。

そこで本研究では、吸収液による DAC の吸収液再生に必要な熱、及び DAC システム内の電力をメタンではなく、木質バイオマスから供給することを提案し、DAC の効率化による効果を LCA で分析した。それによって、今後、DAC の社会実装に向けて効率化を図るための基礎データを取得した。

3. 評価対象

本研究では(加)Carbon Engineering 社の KOH を用いた吸収液による DAC（以下、DAC 化学吸収法と記す）を対象に試算を行った。これは以下のプロセスで構成されている；1:空気接触器にて空気中の CO_2 と KOH の中和反応により、CO_2 を炭酸塩 K_2CO_3 として回収する。2: K_2CO_3 から CO_2 を再生するには多大なエネルギーを消費するため、ペレット反応器にて K_2CO_3 とスレイカーからきた $Ca(OH)_2$ の中和反応により $CaCO_3$ を生成し、KOH を再生する。KOH は、空気接触器に再度、循環させ、$CaCO_3$ はスレイカーへ送る。3:スレイカーにて $CaCO_3$ に付着している水分を回収後、$CaCO_3$ は焼成炉へ送る。回収した水分と焼成炉からの高熱を利用して蒸気発生後、スチームタービンにて発電。焼成炉にて分解された CaO と外部から供給された H_2O の中和反応によって $Ca(OH)_2$ を生成後、$Ca(OH)_2$ はペレット反応器へ送る。4:焼成炉にて高温焼成（900℃）された $CaCO_3$ が CO_2 と CaO に分解する。焼成により発生した CO_2 と空気中から回収した CO_2 は液化用に圧縮され、CaO はスレイカーへ送る。

また、本研究でメタンの代わりに使用するバイオマスは、木材チップ、アーモンド殻、などの木質バイオマスとした。LCA 評価範囲は、原料製造～CO_2 回収・圧縮までとし、DAC の設備建設による GHG 排出量は含まないものとした。機能単位は、大気からの CO_2 1ton 回収あたりとした。図 1 に、評価対象のフロー図を示す。

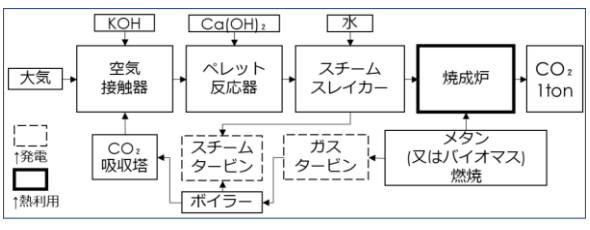


図 1 プロセスフロー

4. 評価方法

既存の DAC 化学吸収法については文献[5,7]を参考に、シミュレーションソフト ASPENPlus を用いて、DAC プロセスのシミュレーションを行い、熱収支と物質収支を計算した。シミュレーション結果から消費電力、熱量、他投入物（メタン、工業用水、KOH、$Ca(OH)_2$）を明らかにし、その値に IDEAVer.2.3[8]から得られた GHG 排出原単位を積算することで DAC の GHG 排出量を計算した。計算結果より得られた DAC プラント運用時の GHG 排出量から、回収した CO_2 を引いた値を、正味の GHG 排出量とした。この計算では、メタンの燃焼によって排出・回収された CO_2 は空気中から直接回収したものではないため、「回収した CO_2」としては計算には含まれない。

一方、本研究で提案するバイオマス利用の DAC 化学吸収法では、既存の DAC プラントに対して電力及び熱を全てバイオマスから供給する。その際に必要なバイオマスの量をプロセスシミュレーションによって計算し、バイオマスの採取時の GHG 排出量を計算した。バイオマス燃焼時に排出される CO_2 は、大気中から固定化されたものとして「回収した CO_2」に含める。それによって DAC 化学吸収法よりも多くの CO_2 を回収し、効率化を図ることができる。

5. 評価結果

既存の DAC 化学吸収法とバイオマスを利用した提案 DAC 化学吸収法の GHG 排出、土地利用に関する比較結果を図 2、図 3 に示す。

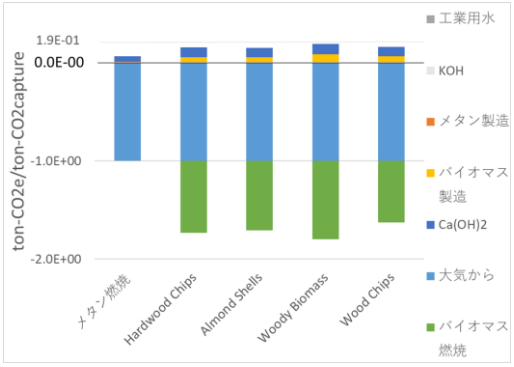


図 2 既存と提案化学吸収法 DAC 比較（GHG 排出）

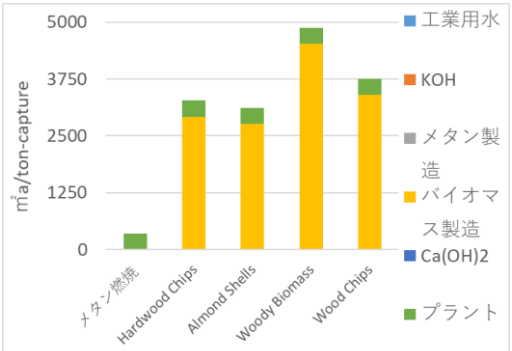


図 3 既存と提案化学吸収法 DAC 比較（土地利用）

図 2 より既存の DAC 化学吸収法による正味の GHG 排出量は-0.9ton-CO_2eq/ton-CO_2capture となった。一方で、メタンの代わりにバイオマスを利用した場合は GHG 排出量が-1.6ton-CO_2eq/ton-CO_2capture となり、GHG 排出量は 0.7 ton-CO_2eq/ton-CO_2capture 少なくなることが分かった。図 3 より既存に比べて提案 DAC 化学吸収法では、木材チップ分が加わり 10～13 倍増加した。GHG 削減の代わりに、土地への影響が増加する結果となった。

6. 結論

DAC 運用時に使用する原料製造から、$CO_2$1ton を回収・圧縮するプラントの運用段階までを対象に、化学吸収液を用いた DAC の評価を行った。DAC 所内電力及び熱をメタンで補う既存の DAC 化学吸収法に比べてバイオマスを使用した場合 GHG 排出量は 0.7 ton-CO_2eq/ton-CO_2capture 少なくなることが分かった。

本研究は DAC の効率化に向けたシステム研究であり、まだ初期段階である。今後は個体吸着材を用いた方法の評価を行い、プラント建設や、再エネ利用による土地利用への負荷、水消費など、他領域への影響について、選択した回収方法の違いによる環境影響の分析を行う。個体吸着剤法も吸収液法と同じように、CO_2脱離時のエネルギー消費が最も負荷が大きいことから、省エネルギーのために有価品製造段階の廃熱を利用した固体吸着法について、評価を行う。また、DAC の導入のために最も重要とされるコストについても分析を行う。環境影響とコスト分析後、導入に向けた知見を導出する。

7. 引用文献

1) “IPCC 特別報告書「1.5℃の地球温暖化」”，国際連合広報センター，入手先，（オンライン）<https://www.unic.or.jp/news_press/info/30738/>2021 年 1 月 2 日
2) Sara B 他.: “Direct Air Capture”, (2021)
3) 一般財団法人日本エネルギー経済研究所編, “エネルギー・経済統計要覧 2021”, (2021)
4) Sarah D., Andre B.: nature energy, 6 (5), (2021), pp.203-213
5) JST LCS: 二酸化炭素の Direct Air Capture(DAC)法のコストと評価, （2019）
6) JST LCS: 二酸化炭素の Direct Air Capture(DAC)法のコストと評価, （2020）
7) David W.K 他.: Joule, 2 (8), (2018), pp.1573-1594
8) 国立研究開発法人産業技術総合研究所, サステナブル経営推進機構: LCI データベース IDEA Ver.2.3

Applying Natural Language Processing to Support Scenario Structuring for Sustainable Futures

Tianzheng Gao*[1)], Yusuke Kishita[1)], Yasushi Umeda[1)]
1) The University of Tokyo
* gao@susdesign.t.u-tokyo.ac.jp

1. Introduction

Many scenarios have been described to address sustainability issues, such as climate change, resource depletion, and energy supply. For example, International Energy Agency (IEA) [1] developed the Net Zero Emissions by 2050 Scenario. Here, scenarios are defined as narrative descriptions of possible futures, generally written in text format and developed through workshops in which a wide range of expertise, ideas, and opinions of experts and stakeholders are collected.

In order to support designing scenarios using computational assistance, Kishita et al. [2] developed the scenario structuring method, which graphically describes the logical structure of a scenario by representing it as nodes and links. Each node is a clause from the scenario and each link is the logical relation between two nodes. Here, a clause is defined as a group of words that contains a subject modified by a predicate.

A structured scenario can provide a better understanding and communication with the stakeholders involved. However, the problem is that the scenario structuring process takes too much time because it requires in-depth reading by humans. To address this problem, we propose a Natural Language Processing (NLP) aided scenario structuring method focused on partially automating the scenario structuring process. The goal is to reduce the overall time cost of scenario structuring.

2. Scenario structuring method [2]

Scenario structuring is an iterative process during which scenarios are re-expressed with some metadata. The scenario structuring process is divided into the following three steps – (1) A scenario is segmented into clauses, (2) The clauses are labeled using pre-defined node types as shown in Table S1, and (3) Two nodes are connected using pre-defined links, which are described in Table S2. An example of a structured scenario is shown in Figure S1.

Due to its iterative nature, scenario structuring requires repetitive in-depth reading of scenario structure builders and is therefore time-consuming.

3. Methodology for partially automating link type classification

We propose an NLP-aided scenario structuring method as shown in Figure S3. In step (1), we automate clause segmentation with regular expression rules based on part of speech. Theoretically, both step (2) and step (3) can be supported by finetuning a pre-trained language model. However, unlike human beings, the machine doesn't have an overall comprehension of the context and can only make use of the semantic information within the input node/node pair when making predictions. On the other hand, step (2) heavily relies on context information. This paper focuses on step (3).

Step (3) sometimes also relies on context information. So, we categorize node pairs into two types, i.e., independent node pairs (those that contain enough information for humans to deduce the link type) and non-independent node pairs (those must work together with context information for humans to deduce the link type). Figure 1 shows an example of a non-independent node pair, where the term 'optimal mix' in the left side node is explained somewhere else in the context.

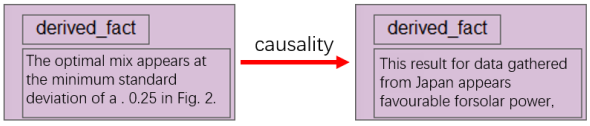


Figure 1 Example of a Non-independent Node Pair

In step (3), we partially automate link type classification by using classifiers developed by finetuning a pre-trained language model ALBERT [3] on independent node pairs. More specifically, the semantic meaning of an input node pair is firstly turned into a vector representation by the ALBERT model and then turned into a class label by a classifier layer. The working principles of finetuning the ALBERT model are illustrated in Figure S2.

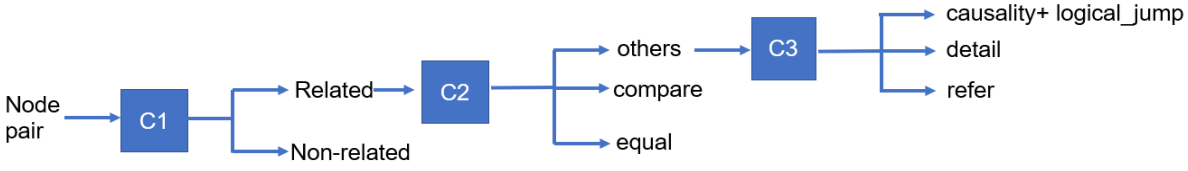


Figure 2 Multi-step Classification Task

Based on the distinguishability between different link types, we design and build three classifiers (C1, C2, and C3) as shown in Figure 2, and set an ambitious target of an F1 score of 90 for them.

4. Experiment

4.1 Data collection and pre-processing

We collected node pairs from 16 scenarios that were manually structured in the authors' previous research. Firstly, we filtered out nodes pairs with at least one node referred to a mathematical equation, literature, figure, or table, since pre-trained language models deal with textual input only. Then we screened out independent nodes only. Finally, we performed data augmentation with back-translation [4] operations. Figure 3 demonstrates a valid back-translation operation, through which the nodes are different from originals but still have the same link type as before. Details of data collection and pre-processing results are described in Table S2.

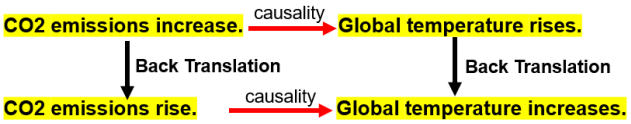


Figure 3 Example of a Valid Back-translation Operation

Since there are no samples annotated as non-related in the structured scenarios, we generated non-related node pairs from related node pairs.

4.2 Results

The performance of the three classifiers is shown in Table 1. The current best F1 scores for C1, C2, and C3 are 86.23, 67.55, 68.00. The performance of C2 and C3 is far from the target value. The F1 score for C1 is significantly higher than that of C2 and C3, indicating detecting the presence of a logical relation is an easier task than telling the differences in relation types.

After data augmentation, the F1 score of C2 and C3 improved from 32.06 to 67.55 (+35.49) and from 47.38 to 68.00 (+20.62) respectively. We don't see significant improvements in the F1 score of C1, which is reasonable because the data for C1 is already balanced and abundant before data augmentation. The data augmentation was effective.

Table 1 Classification Results

Classifier	C1	C2	C3
Before data augmentation	86.09	32.06	47.38
After data augmentation	86.23	67.55	68.00

However, further improving the performance of classifiers remains challenging. The current classifiers don't take into account node types. It is possible to increase the performance of classifiers by introducing classification rules based on node types. Besides, in the case of long scenarios, even a low false-positive prediction rate may bring lots of false-positive predictions, since there are many possible node combinations to be predicted by the classifiers. The effectiveness of classifiers in real-world scenario structuring activities still needs to be examined.

5. Summary

To partially automate the scenario structuring process, three classifiers are built to automatically classify the logical relation between clauses from narrative scenarios into seven pre-defined types, with a current F1 score of 86.23 in telling whether a clause pair is semantically related or not. The F1 scores are 67.55 for the classification between "equal", "compare", and "others", and 68.00 for the classification between "causality+logical_jump", "detail", and "refer".

Future work includes improving the performance of classifiers and conducting a comparative experiment to examine the effectiveness of the proposed NLP-aided scenario structuring method.

This research is supported by Scientific Research (19KT0008), the Japan Society for the Promotion of Science.

6. References

1) International Energy Agency: "World Energy Model", (2021)
2) Kishita, Y., Mizuno, Y., Fukushige, S., Umeda, Y.: Technological Forecasting and Social Change, 160 (120207), (2020)
3) Lan, Z., Chen, M., Goodman, S., Gimpel, K., Sharma, P., Soricut, R.: arXiv preprint, 1909 (11942), (2019)
4) Feng, S Y., Gangal, V., Wei, J., Chandar, S., Vosoughi, S., Mitamura, T., Hovy, E.: arXiv preprint 2105 (03075), (2021)

Supporting Information

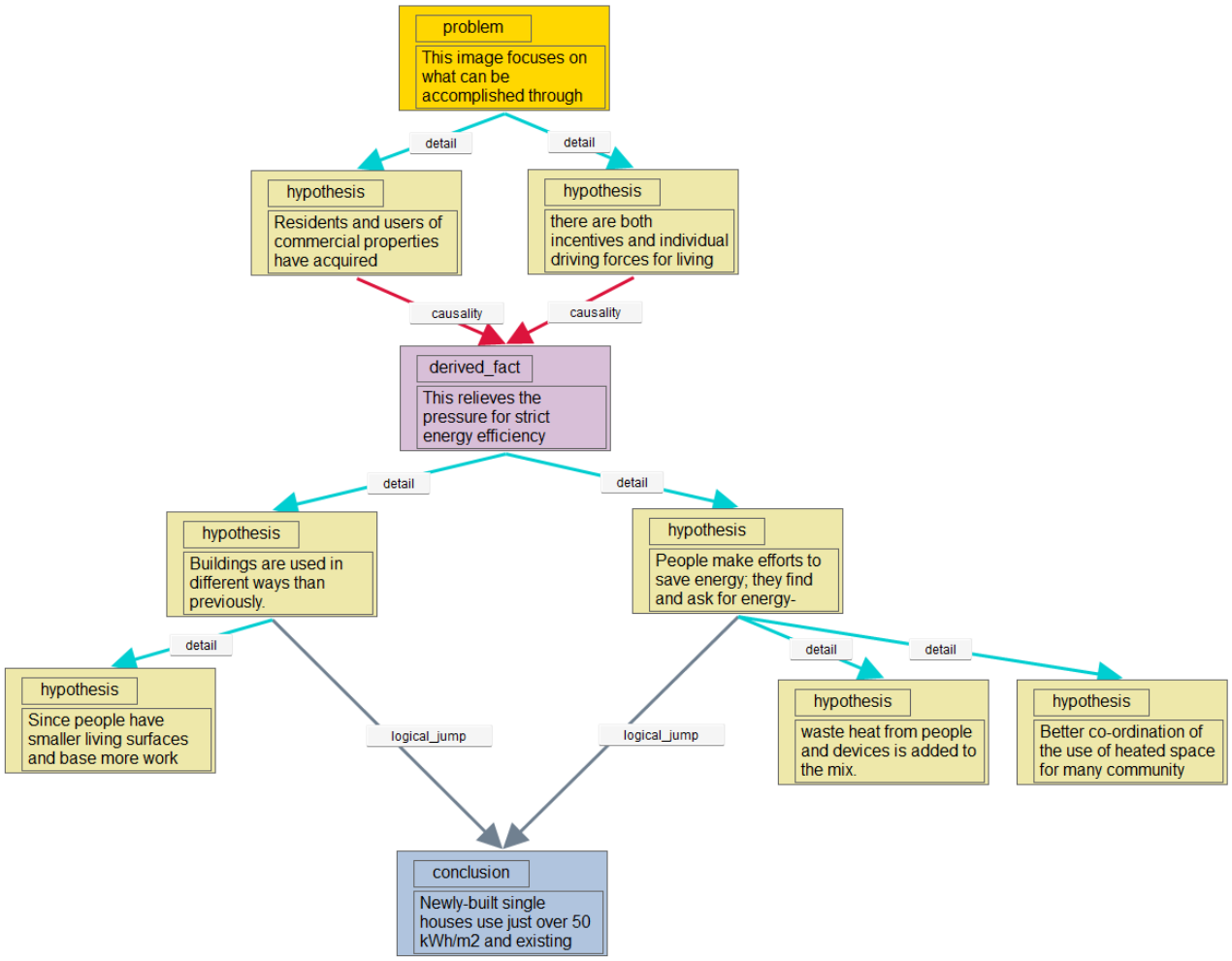


Figure S1 Example of a Structured Scenario[1]

Table S1 Definition of Node Types

Nodes	Definition
problem	A motive for creating a scenario, or a problem to be addressed in a scenario.
conclusion	A conclusion of a scenario.
literature	A report, an article, a book, another scenario, and other literature referred in a scenario.
fact	A historical or scientific fact.
hypothesis	A premise or a hypothesis introduced to a scenario.
derived_fact	A consequence deduced from other nodes in a scenario. A “derived_fact” node derives from other nodes with “causality” links.
action	A strategy, policy, or action, which is taken by stakeholders involved, such as private sector, government, and other individuals.

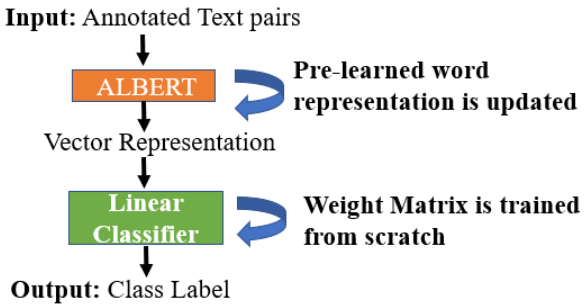


Figure S2 Working Principle of Finetuning ALBERT for a Text Pair Classification Task

[1] The orignal narritive scearnio is developed by Svenfelt, Å., Engström, R., & Svane, Ö. (2011).

Table S2 Definition and Distribution of Link Types

Links	Definition	Number of independent node pairs	Number of non-independent node pairs	Number of independent node pairs after data augmentation
causality(A,B)	A node B is causally deduced from a node A.	220	300	5056
detail(A,B)	A node B is a detailed description of a node A.	648	142	15376
compare(A,B)	A node A is compared with a node B.	142	33	3361
refer(A,B)	A node A refers to a node B.	120	62	2866
equal(A,B)	The content of node A is equal to that of node B.	23	10	2906[2]
logical_jump(A,B)	A node B is derived from a node A with a leap of logic	1102	317	24565
paradox[3](A,B)	The content of a node A is inconsistent with that of a node B.	9	1	NA

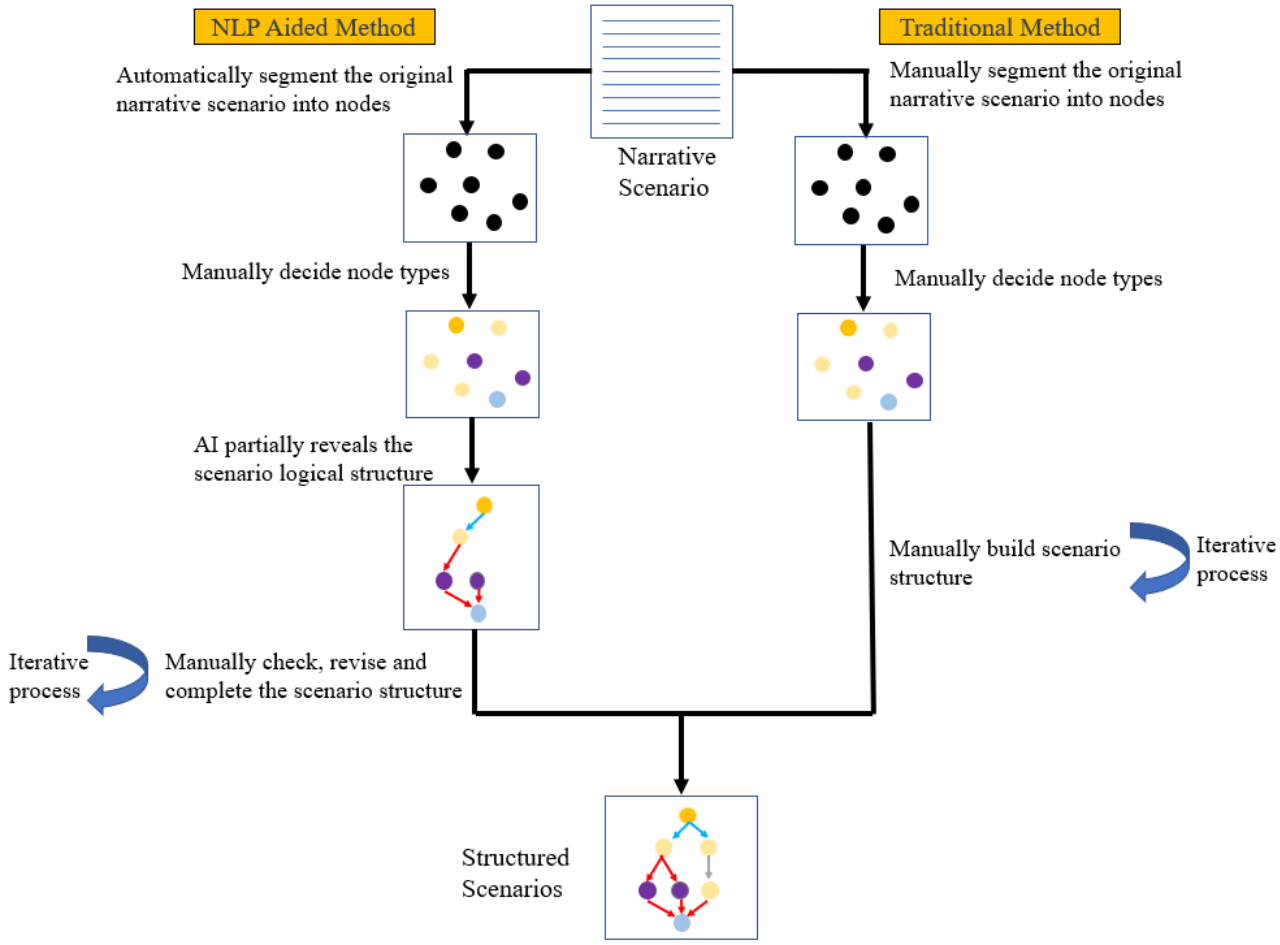


Figure S3 Scenario Structuring at Expression Level: NLP Aided Method and Traditional Method

[2] 2373 out of 2906 node pairs are generated by back-translating individual nodes.
[3] The "paradox" relation is not considered in this study, for its rare appearance.

食品廃棄物発生量の規定因～社会基盤とライフスタイルに着目して

Determinant factors of food waste generation – Focusing on infrastructure and lifestyle

○高杉晃司*[1)]、橋本征二[1)]
Koji Takasugi, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* ce0006vp@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

食品廃棄物量の発生抑制は、SDGs 目標 12 の達成や循環型社会の形成において重要な項目の 1 つである。食品廃棄物の発生量は、自治体によっても様々と考えられるが、その発生原因が明らかとなれば、食品廃棄物の発生抑制策を検討する上でも有益と考えられる。

本研究では、主要都市を対象に家庭系食品廃棄物の発生量を推計するとともに、社会基盤やライフスタイルに関する変数が、どのように食品廃棄物の発生量に影響を与えるかを検討した。

2. 方法

2.1 対象都市と対象食品廃棄物

県庁所在地と政令指定都市を合わせた52都市を対象とした。また、家庭から発生する厨芥類を家庭系食品廃棄物として対象とした。

2.2 食品廃棄物量の推計

対象都市における 1 人当たりの可燃ごみ量や家庭系ごみの割合のデータ(2019)[1)]、焼却施設における可燃ごみの 3 成分や組成(乾ベース)のデータ(2019)[1)]を用いて、対象都市ごとに厨芥類の廃棄量(乾重量)を推計し、これを食品廃棄物の発生量とした。複数の施設を擁する都市では加重平均を用いて水分割合と厨芥類割合を算出した。

2.3 指標の設定

対象都市ごとの社会基盤とライフスタイルの違いに着目し、食品廃棄物量に影響を及ぼしそうな指標の最新データ(2015～2019)を初期段階として設定した。これを表 1 に示す。

2.4 重回帰分析の実施

被説明変数に 1 人当たりの食品廃棄物の発生量、説明変数に表 1 の指標を用いて、重回帰分析を行った。有意でない説明変数を除いて、影響を与える変数を同定した。

表 1 初期段階として設定した指標

平均世帯人数、男女比、単独世帯割合、65 歳以上の単独世帯割合、3 世代世帯割合、平均所得、平均年齢、人口密度、DID 人口密度、昼夜間人口比率、15 歳未満人口割合、15~64 歳人口割合、65 歳以上人口割合、65 歳以上人口割合、施設等の世帯人員割合、一人当たり食料品支出額(飲料、酒類、外食費用を除いた年間食料品支出)、穀類支出額、魚介類支出額、肉類支出額、乳卵類支出額、野菜・海藻支出額、乾物・海藻支出額、果物支出額、油脂・調味料支出額、菓子支出額、酒類支出額、調理食品割合、外食割合、ごみの分別数

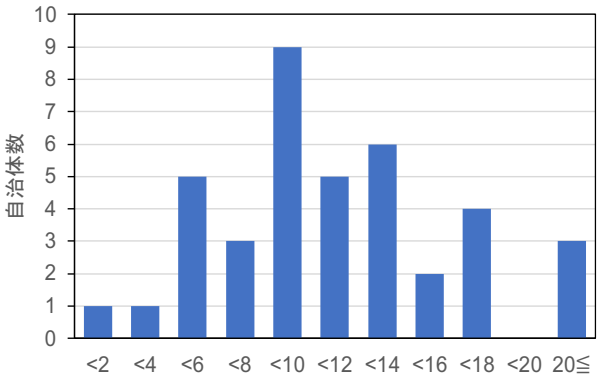


図 1 1 人あたり食品廃棄物量(kg/人・年)の推計結果

3. 結果と考察

3.1 食品廃棄物量の推計結果

対象 52 都市のうち、推計に必要なデータが不足する都市があったため、38 都市について推計した食品廃棄物量の分布を図 1 に示す。可燃ごみ中の厨芥類の比率(乾ベース)が 1～22%であり、発生量の違いはこの影響を主に受けているが、かなりの違いが生じる結果となった。

3.2 重回帰分析の結果

初期段階として設定した29項目を説明変数とした重回帰分析の結果、決定係数(R^2)が 0.7 を超えたことから適合度が高い結果となったが、指標ごとの t 値に注目すると t 値が高い順から、「単独世帯割合」が 2.49、「DID 人口密度」が 2.07、「野菜・海藻支出額」が 1.82、「油脂・調味料」が 1.75 であり、他の指標は 1.70 以下であった。そこで、以上の 4 指標を用いて重回帰分析を行ったところ、決定係数(R^2)は 0.1082 となり、指標ごとの t 値についても t 値が高い順から、「単独世帯割合」が 1.91、「DID 人口密度」が 0.99、「野菜・海藻支出額」が 0.90、「油脂・調味料」が 0.65 となった。指標を 4 つに絞った場合、重回帰式の適合度は大きく下がり、t 値も 2.00 を超える指標がなくなった。初期段階として設定した指標を説明変数とした場合、1 人当たりの家庭系食品廃棄物の発生量は十分説明できない結果となった。追加的な指標の検討や食品廃棄物量の推計誤差の検討等をさらに行っていく必要がある。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金(19H04329)及び環境研究総合推進費(JPMEERF20193002)による成果である。

参考文献

1) 環境省：一般廃棄物処理実態調査結果 令和元年度

IDEA 海外版の構築 ~IDEA Ver.3.1 を用いた世界平均データベースの検討~

Construction of IDEA overseas Ver.3.1 and GLOBAL data

○山本大夢 [1)]、半田歩夢 [1)]、前田天士 [1)]、小林謙介 [1)2)]
藤井千陽 [2)]、横田真輝 [2)]、田原聖隆 [2)] 、Chun Yoonyoung[2)]
Hiromu Yamamoto, Hikaru Hagihara, Ayumu Handa, Kensuke Kobayashi,
Chiharu Fujii, Maki Yokota, Kiyotaka Tahara, Chun Yoonyoung
1) 県立広島大学, 2) 産業技術総合研究所
* kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. はじめに

LCA の実施において、評価に必要なすべてのデータを自ら収集することが理想である。しかし、データの収集作業負荷を軽減するためにバックグラウンドデータベースを用いることが一般的であり、質の高いバックグラウンドデータベースの構築は欠かせない。

わが国の国内を対象としたインベントリデータベースは、IDEA Ver.3.1 [1)]などが開発されてきた。一方、我が国は輸出入が非常に多く、海外での製品生産・サービス等に伴う環境負荷評価も欠かせない。現状では、海外のインベントリデータベースは、網羅的に整備されているものは殆ど無い。特に途上国ではデータベースの整備が十分ではない国も少なくなく、これらが整備されるまでには、相当な時間がかかると思われる。そこで、当面は、現状で整備されている日本のインベントリデータから、可能な限り高い精度で海外の原単位を推計し、評価に用いることで、地域事情が反映できる評価が可能になると考える。

筆者らは、日本のデータから海外のインベントリデータの推計手法を構築することを試みてきた [2) 3) 4)]。

既報の研究では日本の主要貿易国を対象に個別に検討をおこなってきたが、本報ではその他のすべての国を対応するため、世界平均データの構築を行った。

2. 推計手法の概要

本研究の推計手法は、日本のデータベースを用いて海外のデータベースを可能な限り高い精度で推計することを目的としている。図 1 に示すように、本検討では、①電力原単位、②燃焼用燃料構成比、③発電効率・熱効率を対象国のデータに変換することで推計することとした。なお、世界平均データでは④環境対策(硫黄含有量などの燃料の質や脱硫・脱硝など)については現在考慮できていない。

これまでに検討してきた国はすべて IDEA Ver.2.2 を基にしてきたが、世界平均では IDEA Ver.3.1 を基にしている。基本的な推計手法はこれまでと同じであるが、Ver.3.1 は燃料種や環境負荷物質のデータ数が大幅に増加しているためより詳細な分析が可能となった。

①電力原単位は IEA の World Energy Statistics と Extended World Energy Balances を用いて、2015 年のプロセスデータを作成した。結果は図 2 のようになった。

②燃焼用燃料構成比は、World Energy Statistics の部門別燃料消費量をベースに用いた。しかし、本統計は製品項目が 29 しかない。そこで WIOD が出版している世界の産業連関表 [5)]を用いて製品項目の細分化をおこなった。

また、一部の項目は構成比の変換対象から外した。例えば、コークス炉ガス・高炉ガス(BFG)・転炉ガス(LDG)は、コークス炉・高炉・転炉のみで発生する（特定のプロセスのみで発生する）ものである。すなわち、変換することで本来は発生しない・消費されないはずの他の項目でも入出力データに出現する可能性があるからである。また、潤滑油は、多くはマテリアルとして利用され燃焼用に用いられるわけではないために除外した。

③燃焼効率は World Energy Balances を用いて複数の燃料種の平均の燃料燃焼効率データを作成した。このデータは年によってばらつきがあるため 2012 年～2016 年の平均値を用いた。結果は図 3 のようになった。燃焼効率も一部の項目で変換対象から外している。

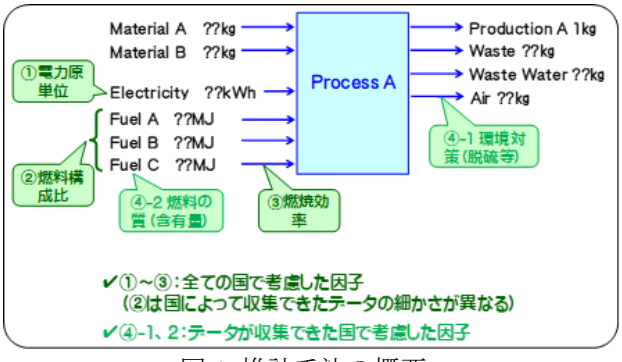


図 1 推計手法の概要

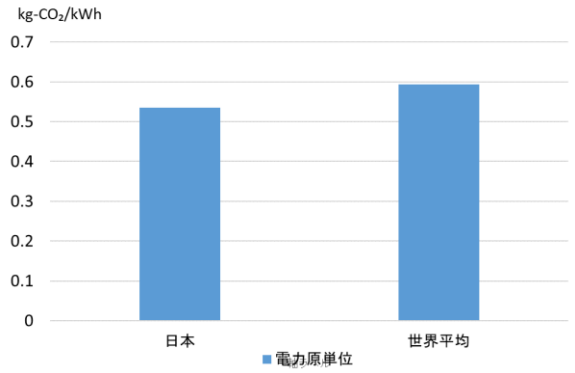


図 2 日本と世界平均の電力原単位

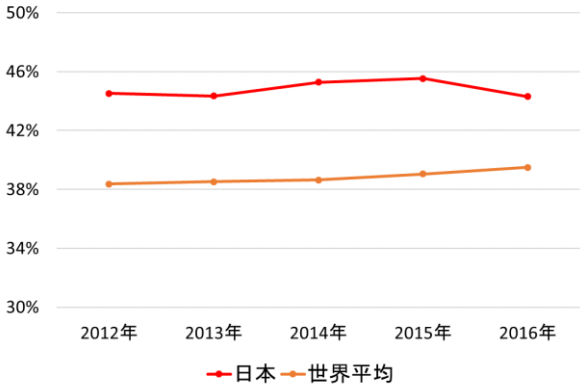


図 3 日本と世界平均の発電・燃焼効率

3. 作成したデータベースの概観

2 章で示した統計を用いて、世界平均の推計インベントリデータの構築を行った。結果は、図 4 のようになった。図 4 は式 1 で求めた CO2 排出原単位の比 R をヒストグラムにまとめたものである。データ区間 1～1.1 とは、IDEA Ver.3.1 に対し原単位が 100～110%の値になっている項目の数を示す。

R＝ICO2w/ICO2j …式 1
ICO2w:世界平均の CO2 排出原単位
ICO2j:日本の CO2 排出原単位

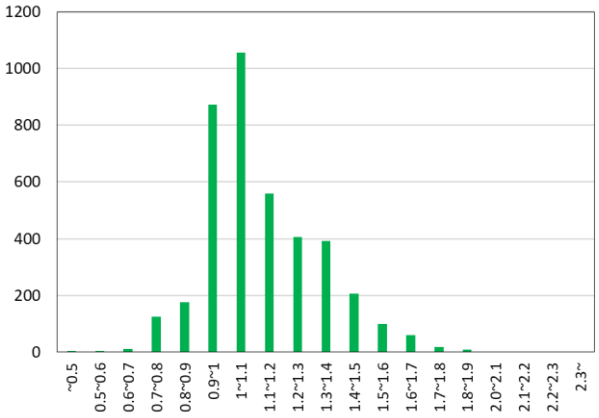


図 4 日本と世界平均データの比

4. データベースの限界

本海外版データベースは、IDEA に収録されている多様な種類のインベントリデータを対象に、一律の手法を用いて構築している。そのため、海外版データベースに含まれるデータは詳細な分析には適さず、あくまで概数としての利用にとどめる必要がある。また、IDEA は日本で生産される製品を前提としているため、海外では生産されていない製品であっても便宜上データが作成される（例：日本なし（果実）、和生菓子、和装製品等）。このように、本手法によって作成されたデータには、精度に限界がある事を十分理解した上で、利用の可否をユーザー自身の責任で判断することが重要である。

5. まとめ

本検討では、IDEA を用いて、可能な限り精度高く海外のインベントリデータを推計する手法を提案した。提案した手法を用いて、IDEA Ver.3.1 を基に世界平均で推計インベントリデータを構築した。今後も順次対象国の拡大を図る予定である。

6. 今後の課題

本手法によって作成されたデータは精度に限界がある。より精度の高いデータを作成するために、より詳細な統計の調査や現地調査による詳細なデータを集めていく必要がある。

また、本報を含め、これまでに構築した推計データベースはすべて輸送による環境負荷を考慮していない。今後は輸送を考慮したデータの整備をしていくことが課題となっている。

謝辞

本成果の一部は JSPS 科研費 16K06615 の助成を受けました。記して謝意を表します。

引用文献

1）産業技術総合研究所・産業環境管理協会：“IDEA”，入手先<http://www.idea-lca.jp/ >

2）小林ら： 海外データの簡易推計手法の構築 主要 12 か国の推計データベースの構築、第 14 回日本 LCA 学会研究発表会

3）小林ら： 海外データの簡易推計手法の構築 すべての国での推計と主要 20 か国での詳細推計、第 15 回日本 LCA 学会研究発表会

4） 小林ら： IDEA 海外版の構築～14 か国のデータベースの構築～、第 16 回日本 LCA 学会研究発表会

5）WIOD： World Input-Output Database，入手先 <https://www.rug.nl/ggdc/valuechain/wiod/?lang=en>

コロナウィルス禍における電車のカーボンフットプリント

Carbon footprint of Trains under the Influence of Coronaviruses

○升川晴陽*1)、伊坪徳宏 1)

Haruaki Masukawa, Norihiro Itsubo

1)東京都市大学

＊ g1862060@ tcu.ac.jp

1. はじめに

気候変動による影響が顕在化するなか、交通機関に対する注目が高まっている。電車の二酸化炭素排出量は、他の交通機関より低いことが認識されているが、これは自家用車に比べて乗車人数が多く、ひとり当たりの環境負荷が相対的に小さくなることによる。しかし、新型コロナ禍により移動が制約されたことで、輸送効率が落ちると移動人キロあたりの CO_2 排出量は増大するものと想定された。そこで、本研究では、公共交通機関である電車とバスに注目して新型コロナの影響を受ける前と後の CO_2 排出量の変化について評価することを目的とする。ただし、旅客鉄道に関する情報はデータ不足から、旅客バスと貨物輸送に注目して算定を行うことにした。

2. 研究目的

本研究では、旅客バスと貨物輸送に関する二酸化炭素排出量を算定することとした。これまでの LCA 研究からバスと貨物輸送は多くの環境負荷は走行段階で発生することから、本研究では使用段階のみに注目することとした。今回は複数年について注目し、新型コロナの影響を受ける前と受けている期間中における違いを把握するとともに、今後非常事態宣言等で移動に制約がかかった時の環境パフォーマンスについて予測するための基礎情報として利用することを想定した。

3. 算定概要

2019 年 1 月から 2021 年 9 月までを評価対象とする。また、機能単位は人キロ、トンキロとする。システム境界は以下のように記載する。

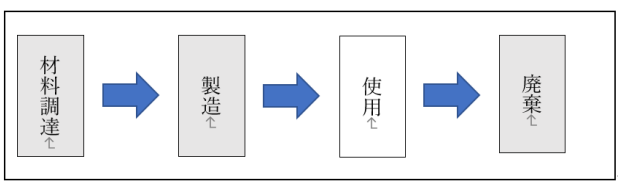


図 1 システム境界

4. 算定方法

4.1. 旅客バス

国土交通省の自動車輸送統計調査より一か月あたりの輸送人キロと軽油消費量を得た後、軽油の消費による CO2 排出係数を消費量に乗じて、その結果を対象期間の輸送人キロで除することで、人キロあたりの CO_2 排出量を算定した。

4.2. 貨物輸送

国土交通省の自動車輸送統計調査より一か月あたりの輸送トンキロと燃料消費量を得た後、燃料の消費による CO_2 排出係数を消費量に乗じて、燃料ごとの結果の和を取った。その結果を対象期間の輸送トンキロで除することで、トンキロあたりの CO_2 排出量を算定した。

5. 算定結果

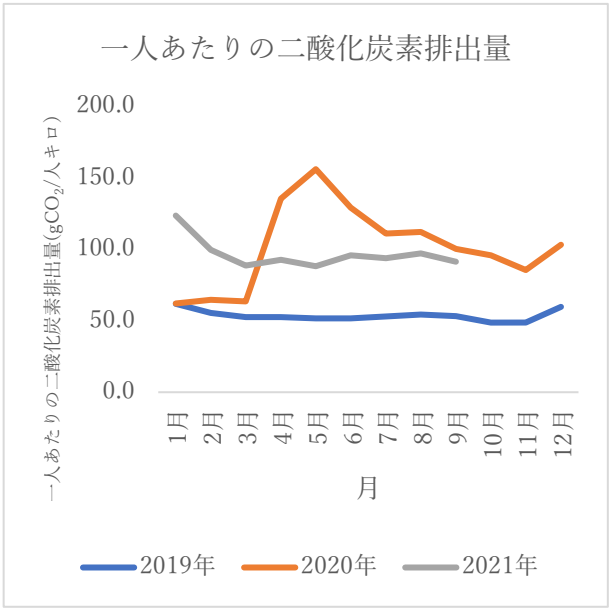


図 1 旅客バス(人キロ当たり)の CO_2 排出量の推移

旅客バスの二酸化炭素排出量の算定結果を図 1 に示した。旅客バスの一人あたりの二酸化炭素排出量を見るとコロナウィルス流行後の 2020 年 4 月以降は 2019 年

の 4 月と比較すると増加したことが分かる。特に 2020 年 5 月に 156.0gCO_2/人キロになっていて、最も二酸化炭素排出量が出している。最も少ない 2019 年 10 月の 48.7gCO_2/人キロになっているため、三倍以上の差があるという結果になった。2020 年 5 月はコロナウィルスの影響によって緊急事態宣言が出たため、外出自粛やテレワーク推進が進めた。それによって、旅客バスの乗車人数が減少したと考えられる。旅客バスの乗車人数が減少したことによって、一人あたりの二酸化炭素排出量は増加したという結果になった。

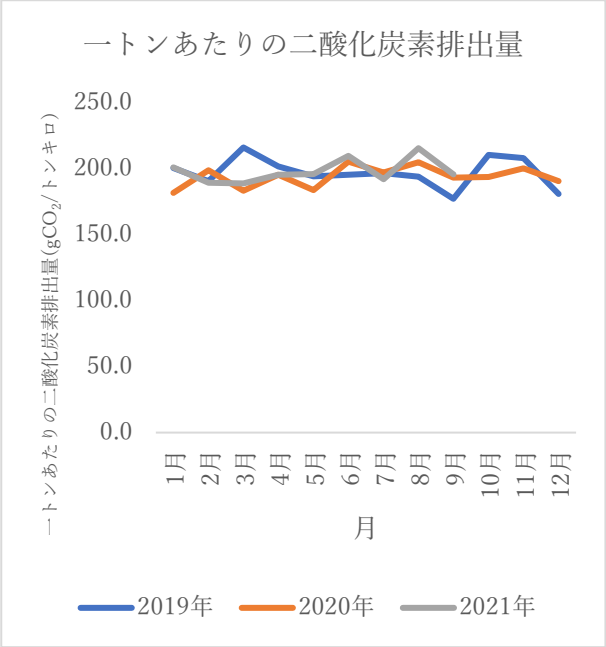


図 2 貨物輸送(トンキロあたり)の CO_2 排出量の推移

貨物輸送の二酸化炭素排出量の算定結果を図 2 に示した。貨物輸送の 1 トンあたりの二酸化炭素排出量を見ると基本的に 200gCO_2/トンキロ前後になった。最も大きかったのは 2019 年 3 月の 216.1gCO_2/トンキロ、最も小さかったのは 2019 年 9 月 177.2 の gCO_2/トンキロになった。コロナウィルス流行後でも外出自粛やテレワーク推進のために運輸が進めていたと考えられる。それによって、貨物運輸のトンキロの二酸化炭素排出量は旅客バスの人キロの二酸化炭素排出量と比べると大きな変動がないことが分かる。

6. まとめ・課題

旅客バスはコロナウィルス流行後に乗車人数が減少したため、一人あたり二酸化炭素排出量が大きく増加した。燃費性能が優れたバスの利用に加えて、乗車定員が少ないバスの利用、本数削減を検討していく必要があると考えられた。

貨物輸送は旅客バスと異なった結果になった。コロナウィルス流行後でも、大きく増加することはなかったため、貨物輸送の需要は大きな変化がなかったことによる。

コロナウィルス禍における電車の影響についてはデータがなかったため、算定することができなかったが、バスと同様、乗車率は大きく落ち込んだことが想定されるため、一人あたり二酸化炭素排出量はバスと同様大きく増加したと想像される。

7. 引用文献

1) “CFP プログラム CFP とは”,<https://www.cfp-japan.jp/about/>
2) “環境省 算定方法・排出係数一覧 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧”,<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf>

有機養液栽培によるミニトマトの糖度・収量・環境負荷の複合比較

Combined Comparison of Sugar Content, Yield and Environmental Impact of Mini Tomatoes Grown by Organic Hydroponics

○藤森開*[1)]　竹本岬[1)]　大平希[1)]　古屋俊樹[1)]　堂脇清志[1)]
Kai Fujimori, Misaki Takemoto, Nozomi Ohira, Toshiki Furuya ,Kiyoshi Dowaki
1)　東京理科大学
*7418089@ed.tus.ac.jp

1.　はじめに

2021 年 5 月農林水産省が 2050 年までに有機農業面積を 25%、100 万 ha に拡大することなどを定めた「みどりの食料システム戦略」を策定した[1)]。農業は CO_2 排出の主要な要因であるため脱炭素化・環境負荷軽減を目標としている。しかし、農林水産省の調査によると、約 6 割の一般消費者が有機食品のイメージとして環境負荷をかけていないと答えているが、有機農業は慣行農業と比べて収量が少ないという面があり、収量ベースで比較すると環境負荷が少ないとはいいがたい[2)3)]。

農業における一般的な栽培方法としては、土耕栽培や養液栽培など様々あるが、養液栽培は慣行栽培と比較して多くの収量を期待できることが示唆されている[4)]。このような背景のもと、近年注目されている栽培方法の一つに、有機農業の特徴と養液栽培の特徴を併せ持つ有機養液栽培がある。有機養液栽培では、慣行農業と比較しても収量が同程度確保できると同時に高付加価値な野菜を栽培できる可能性が指摘されている[5)6)]。

したがって本研究では、ミニトマトを対象に有機質肥料の異なる 2 種類の有機養液栽培を実施し、その収量、糖度及び環境影響を調査し有機養液栽培の優位性を検証する。比較要素については以下の事実に基づき設定した。

まず対象の野菜であるトマト(ミニトマト)は農林水産省によって野菜のうち特に消費量が多い指定野菜(14 品目)に定められている。さらに、健康な食生活を送る上での欠かせない食品である野菜は年々消費量が減少しているが減少の中でもトマト(ミニトマト)は消費動向としては高い位置を保持し続けていることから、人気の高い野菜である。また、タキイ種苗株式会社によると消費者の購入するトマトの選び方の第 3 位に味という結果が表れた[12)]。トマトの人気品種ランキングの上位にはフルーツトマト系や酸味の少ない品種が多いことなどから、消費者にとって糖度（甘味）が重要であることがわかる。

次に環境影響については、野菜の LCA に関する先行研究は数多く存在するが、有機養液栽培におけるミニトマトの LCA が行われた例はほとんどなく、新たに調査を行う必要があろう[7)]。

2.　研究概要

2.1　検証する有機養液栽培の種類

有機養液栽培の先行研究として、有機肥料の違いによる有機養液栽培での葉物野菜の品質の調査が存在する[6)]。これによると、鰹煮汁を使用した「ソリュブル」は化学養液栽培と比較して生育は劣るものの、苦味と甘みを示すアミノ酸量が増加したという結果が得られている。しかし、トマトなどの果菜類での品質の差は明らかにされていない。

さらに今回は、わが国で年間 15 万トンの余りが生じ、現在一部は微生物用基質や家畜肥料として用いられているトウモロコシを原料とする製糖工程から生じる副産物であるコーンスティープリカー（CSL）にも注目する。なお、CSL は有機養液土耕栽培や養液栽培に用いられた研究例がある。また、これらのソリュブルや CSL などの易分解性の有機質肥料は養液栽培に適しているとされている[5)8)]。

本研究では、有機質肥料としてソリュブル、及び CSL を使用し有機養液栽培を行い慣行栽培と比較を行うこととした。

2.2　環境影響評価

環境影響評価においては、等価 CO_2 排出量を算出することとした。システム境界は育苗から収穫までとし、機能単位は収量に焦点を当てるためミニトマト 1g 当たりとした。また、インベントリデータは実際に栽培したデータを参考にした（詳細は SI 参照）。

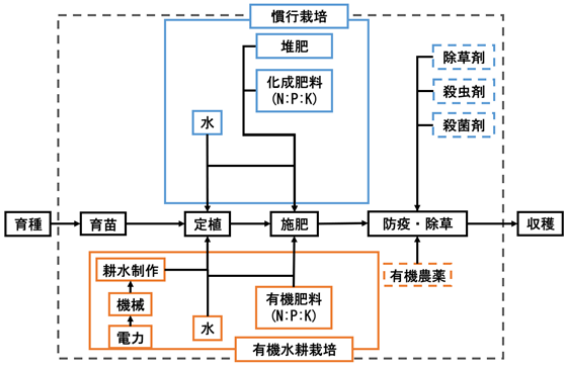


図 1.　システム境界

2.3　収量評価

収量に関しては、ミニトマトの総収量（重さ）、良品果数及び不良果数を調査する。良品果、不良果を判断する基準としては全農による品質基準を使用する[9)]。

2.4　糖度評価

次に、ミニトマトにおいて重要である糖度（Brix）

については、糖度計（アタゴ ATAGO ポケット糖度計 PAL-1 Brix0.0 53.0,株式会社アタゴ製）を用いて分析を行った。

3. 栽培方法

栽培方法については、農研機構の有機質肥料活用型養液栽培マニュアルを参考にし、本学野田キャンパスの温室施設において、設定温度 27℃とし行った[10]。

3.1 耕水工程

有機養液栽培では、栽培を開始する前に培養液として用いることができるように耕水を行う必要がある。ここでは、野中らの研究[11]を参考にミニトマトの栽培における重要な要素である窒素量をソリュブルの添加量と同じになるように、CSL の添加量を設定することとした。なお、ソリュブルが 60 g-N/kg であるため、約 1.8 倍を CSL（33.1 g-N/kg）の添加量とした。

3.2 栽培工程

栽培では、プランター（H185×L245×W653）を使用し、ソリュブル 1g/kg（CSL：1.75～1.84g/kg）＋天然有機カリの懸濁液 1mL/kg（濃度：274g-K/L）を 1 施肥単位とし、定植後、0.5 施肥単位を培養液に毎日添加した。また、第一果房の果実の直径が≧1cm 程度になったのち、0.75 施肥単位/日を添加した。さらに、第二果房の果実が直径 1cm 程度になった後、1 施肥単位/日を添加し、ヘタが上向きに閉じた段階で収穫時期として判断した。

4. 結果

4.1 収量評価結果

2022/1/10 時点では十分な収穫量がなく優位性を検証することはできていないが、慣行栽培のミニトマトに比べて有機養液栽培のミニトマトは直径が 2~5mm 程度大きくなり、重量も 2g 程度重くなっていることを確認した。



図 2. 慣行栽培のミニトマト



図 3. 有機養液栽培（ソリュブル）のミニトマト



図 4. 有機養液栽培（CSL）のミニトマト

5. まとめ

今後十分な収穫量が得られれば、環境影響評価や収量評価及び糖度評価を行い、有機養液栽培の優位性を検証していく予定である。

参考文献

1) 農林水産省：“みどりの食料システム戦略トップページ”，（オンライン），入手先 <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/index.html> （参照 2021/09/19）
2) 農林水産省：“有機農業をめぐる我が国の現状について”，（オンライン），入手先 <https://www.maff.go.jp/primaff/koho/seminar/2019/attach/pdf/190726_01.pdf> （参照 2021/09/19）
3) 外園信吾：“第 5 回日本 LCA 学会”，(2010)，pp316−318
4) Guilherme Lages Barbosa , Francisca Daiane Almeida Gadelha , Natalya Kublik, Alan Proctor , Lucas Reichelm , Emily Weissinger , Gregory M. Wohlleb and Rolf U. Halden：International Journal of Environmental Research and Public Health, （2015），pp. 6879−6891
5) 篠原信：“並行複式無機化法と有機質肥料を使ったトマト養液栽培”，農研機構，（オンライン），入手先 <https://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laborat

ory/vegetea/2006/vegetea06-07.html> （参照 2021/09/23）
6) 新野美佐子，三好博子，丹治克男，篠原信：“東北農業研究”，(66)，(2013)，pp。141−142
7) 清水夏樹：“農村計画学会誌”，26，(2007)，pp.365−370
8) 中野明正，川嶋浩樹，佐久間青成，上原洋一，：野菜茶業研究所研究報告，(3)，(2000)，pp.129−136
9) 全農：出荷規格表，(オンライン)，入手先 <https://www.zennoh.or.jp/hr/syukkakikaku/img/kikaku01.pdf> （参照 2021/09/23）
10) 農研機構：“有機質肥料活用型養液栽培マニュアル”，(オンライン)，入手先 <https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/vt_youekisaibai_manual_20140616.pdf> （参照 2021/09/23）
11) 野菜茶業研究所研究：“コーンスティープリカー（CSL）及びメタン消化液（MFC）を利用した有機養液土耕がメロンの $\delta^{15}N$ 値に与える影響”，(2005)，pp．9-14
12) タキイ種苗株式会社：“インフォメーション”，タキイ種苗株式会社（オンライン） <https://www.takii.co.jp/info/news_171005.html> （参照 2022/01/10）

Supporting Information (SI)

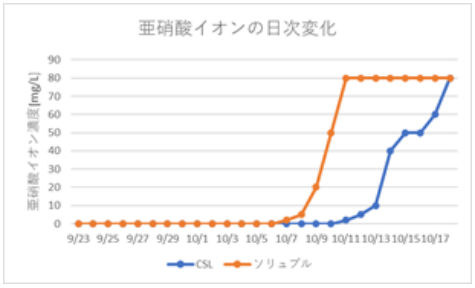


図 S1. 亜硝酸イオンの日次変化

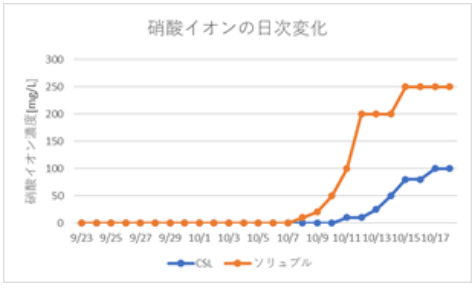


図 S2. 硝酸イオンの日次変化



図 S3. アンモニウムイオンの日次変化



図 S4. 東京理科大学内の温室

表 S1. CO_2排出量

項目	投入物	排出量	単位	出典
エネルギー	電力	0.000496	kg-CO_2eq/kMh	環境省
	水(上水)	0.36	kg-CO_2eq/m^3	環境省
肥料製造	有機肥料(N成分)	3.27	kg-CO_2eq/kg	農林水産省
	有機肥料(P成分)	2.44	kg-CO_2eq/kg	
	有機肥料(K成分)	0.44	kg-CO_2eq/kg	
	化学肥料(N成分)	1.15	kg-CO_2eq/kg	
	化学肥料(P成分)	0.8	kg-CO_2eq/kg	
	化学肥料(K成分)	0.15	kg-CO_2eq/kg	
	石灰石	0.44	kg-CO_2eq/kg	国立環境研究所
	鰹煮汁	0.15	kg-CO_2eq/kg	味の素
	CSL	0.5	kg-CO_2eq/kg	Environmental Management

表 S2. インベントリデータ

項目	投入物	ソリュブル	CSL	慣行栽培	単位
潅水	水	15	15	0	m^2/kg
肥料(堆肥)	有機肥料(N成分)	0	0	0.024	kg/kg
	有機肥料(P成分)	0	0	0.04	kg/kg
	有機肥料(K成分)	0	0	0.024	kg/kg
	化学肥料(N成分)	0	0	0	kg/kg
	化学肥料(P成分)	0	0	0	kg/kg
	化学肥料(K成分)	0	0	0	kg/kg
	鰹煮汁	0.01	0	0	kg/kg
	CSL	0	0.018	0	kg/kg
	石灰	0.15	0.15	0.28	kg/kg
追肥	水	198	179	105	m^2/kg
	化学肥料(N成分)	0	0	0.032	kg/kg
	化学肥料(P成分)	0	0	0	kg/kg
	化学肥料(K成分)	0	0	0.024	kg/kg
	有機肥料(K成分)	0.031	0.031	0	kg/kg
	鰹煮汁	0.031	0	0	kg/kg
	CSL	0	0.0558	0	kg/kg

自然災害が環境と経済に与える影響

The economic and environmental impacts of natural disasters

○岡寛彰*1)、今田青治 2)、加河茂美 3)
Hiroaki Oka, Seiya Imada, 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
oka.hiroaki.355@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景・目的

日本は、台風や地震による被害が多い世界有数の災害大国である。災害は、人命やインフラ設備だけでなく、サプライチェーンを通して経済活動にも大きな影響を与えている。

特に東日本大震災の影響は甚大であり、サプライチェーンの寸断によって、被災地に限らず全国的に生産活動が大きく低下した。[1]実際に、経済産業省が発表したデータによると、東日本大震災が発生した 2011 年 3 月の鉱工業生産指数は、同年前月に比べて 15.5%も減少している [2]。

また東日本大震災は、人の動きにも影響を与えており、岩手・福島・宮城の 3 県の 2011 年 3 月から 2012 年 2 月期の人口転出超過数は、前年同期と比べて 30,789 人も増加した。[3]この震災による人口流出の影響は、労働者数の減少にもつながり、これも生産活動が低下した大きな要因となっていると考えられる。

本研究は、東日本大震災が日本の製造業及び環境に与えた長期的な影響について、震災による被害が最も大きいであろう東北地方に着目しながら議論する。

2. 研究手法

本研究は、東日本大震災が東北地方の製造業に従事する労働者数と生産額、環境に与えた影響を明らかにする。そのために、国立環境研究所が作成・公開している 3EID の部門別 CO_2 排出係数原単位を経済産業省が公開している東日本大震災前の 2010 年から 2019 年までの産業別・都道府県別の製造額に乗じることで、生産に伴う CO_2 排出量を推計する。

3. データ

本研究で用いたデータは以下の通りである。

(1) 工業統計表 [4]
(2) 産業別統計表 [5]
(3) 地域別統計表 [6]
(4) 3EID の部門別 CO_2 排出係数原単位データ [7]

4. 結果・考察

図 1、2、3 はそれぞれ、2010～2019 年の東北地方各県における製造業に従事する労働者数、製造品出荷額、CO_2 排出量の変化を表している。

図 1 から、製造業に従事する労働者数は、震災前の 2010 年から 2011 年にかけてどの東北 6 県においても減少していることが分かる。中でも地震による被害が大きかった福島、岩手、宮城の 3 県において減少が顕著に見られることから、東日本大震災が労働者数にマイナスの影響を与えていることは明らかである。2011 年以降、労働者数は緩やかに上昇しており、いずれの県も震災前もしくはそれ以上の水準にまで回復している。

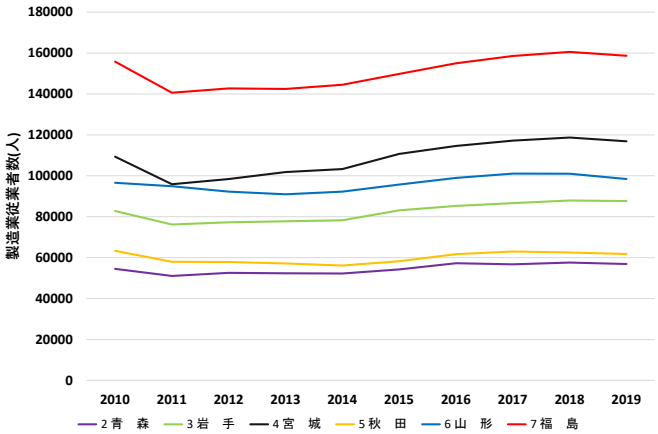


図 1. 東北地方各県の製造業に従事する労働者数の推移

図 2 を見ると、東北地方各県の製造品出荷額の推移も図 1 の労働者数の推移と同様な形を示しており、このことから労働者数と製造品出荷額の間には、ある程度の相関関係が存在する。秋田県と青森県の 2 県に着目してみると、秋田県の方が労働者数が多いのにも関わらず、製造品出荷額に関しては青森県の方が大きいことが分かる。

そして図 3 から、CO_2 排出量に関しても基本的には労働者数・製造品出荷額と同様に 2010 年から 2011 年にかけて減少し、その後は上昇傾向にあることが読み取れる。ここで注目したいのは、宮城県である。製造品出荷額では、福島県の方が大きいのにも関わらず、CO_2 排出量では 2011 年を除いて宮城県が東北地方の中で最も大きい。加えて、宮城県は他県に比べて CO_2 排出量の変化が激しく、震災以降も増加と減少を繰り返していることが分かる。

以下では、秋田県と宮城県の製造品出荷額の産業別内訳を見ながら考察を深めていく。図 4、5 は、それぞれ宮城県・福島県の主要産業別の製造　品出荷額の変化を表している。図 4 から、宮城県全体の CO_2 排出量と石油製品・石炭製品製造業がほぼ同じ形で推移していることが分かり、宮城県の CO_2 排出量において石炭石油業が最も大きな比重を占めてい

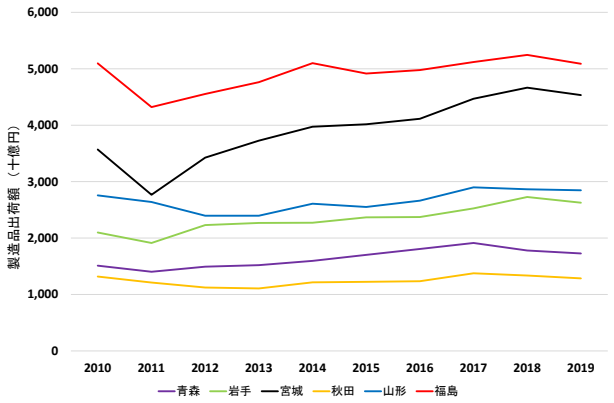


図 2. 東北地方各県の製造品出荷額の推移

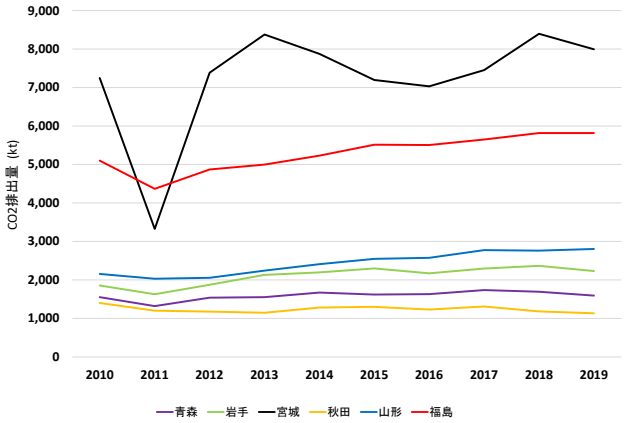


図 3. 東北地方各県の CO_2 排出量の推移

ることが読み取れる。これが宮城県の CO_2 排出量が他県に比べて大きい理由であると考えられる。

輸送用機械器具・生産用機械器具製造業の 2 つの産業に着目してみると、他の産業とは異なり、2010 年から 2011 年の間に出荷額が増加しており、2010 年から 2019 年にかけても大幅に増加していることが分かる。

図 5 を見ると、福島県では、情報通信機械機器製造業と飲料・たばこ・飼料製造業の 2 つの産業が 2010 年から 2019 年にかけて大きく減少していることが分かる。その一方で、化学工業と輸送用機械器具製造業の 2 つが僅かながら上昇傾向にあることが読みとれる。

以上のように 2010 年から 2019 年にかけて 2 県とも産業の構造に何らかの変化が生じていることが分かる。

今回、5 つのグラフから、東日本大震災はサプライチェーンの寸断、労働者数の減少を通して、確実に各県の製造業にマイナスの影響を与えていることが分かった。一方で、落ち込み自体は短期的で、翌年には回復に転じている。しかし、宮城県と福島県の 2 県について製造品出荷額の内訳を見てみると、成長している産業、衰退している産業があり、産業構造が変化していることが読み取れる。

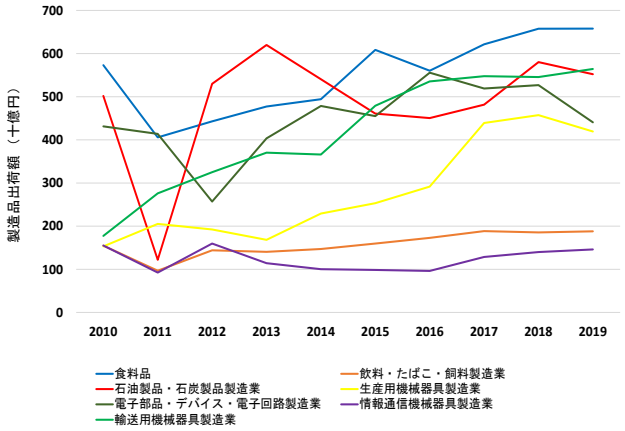


図 4. 宮城県の主要産業における製造品出荷額の推移

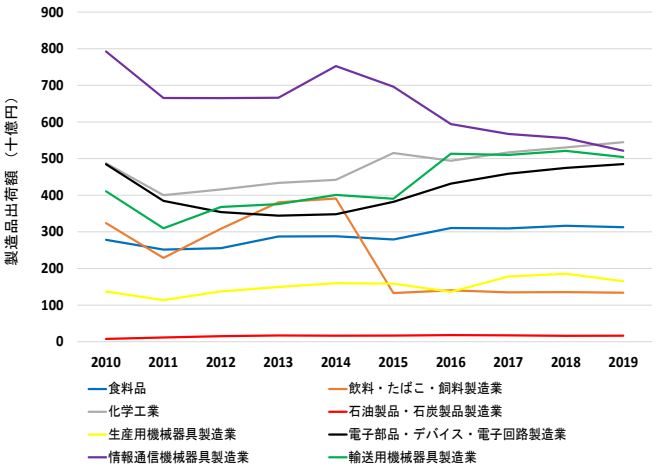


図 5. 福島県の主要産業における製造品出荷額の推移

今後は、この産業構造の変化が東日本大震災の影響によるものなのかそれとも何か別の要因があるのかについて分析し、東日本大震災が産業構造の変化に与えた長期的な影響についても考察を深めていく。

5. 参考文献

1) 内閣府（2011）平成 23 年度年次経済財政報告
2) 経済産業省（2011）震災が鉱工業生産に及ぼした影響について
3) 厚生労働省（2012）東日本大震災が雇用・労働面に及ぼした影響
4) 経済産業省（2010,2012～2014）工業統計表「産業編」データ（第 14・15 表）
5) 経済産業省（2011,2015）平成 24 年・28 年経済センサス-活動調査・産業別集計（製造業）「産業編」統計表データ第 11 表
6) 経済産業省（2016～2019）工業統計表・地域別統計表
7) 国立環境研究所（2022）産業連関表による環境負荷単位データブック(3EID)

食品ロス起源のライフサイクル CO_2 排出とその変化要因の分析

○尾辻勇太*[1)]、緒方鞠[2)]、加河茂美[3)]
Yuta Otsuji, Mari Ogata, 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
* otsuji.yuta.203@ s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景

近年、食品ロスに対し国際的な関心が高まりつつある。食品ロスとは、農林水産省の定義によれば、食糧廃棄のうち、可食部の廃棄を指す。国際連合食糧農業機関（FAO）によると、2017 年には世界で約 13 億 t の食品ロスが発生している。[1)] 日本においても多くの食品ロスが発生している一方で、人口の約 6 分の 1 の人が相対貧困にあるという問題もあり[2)]、加えて発生した食品ロスの廃棄時には CO_2 を排出してしまうという問題もあるため、これらの問題に対処するためには食品ロスの削減が必要である。

このような背景から、SDGs のターゲット 12.3 には「2030 年までに小売・消費レベルにおける世界全体の 1 人当たりの食料の廃棄を半減させ、収穫後損失などの生産・サプライチェーンにおける食料の損失を減少させる」ことが定められている。[3)] 日本も、2019 年の G20 において食糧損失、廃棄を削減する宣言を発表し、2030 年までに家庭及び食品関連事業者から排出される食品ロスを半減させることを目標としている。[4)]しかし、農林水産省の推計によれば、2012 年から 2018 年にかけて、日本の食品ロス量は減少傾向にあるものの、その減少量はわずかなものであり、2018 年度の食品ロス量は家庭部門、事業部門を合わせて 600 万 t にものぼっている。[5)]

これらの課題を踏まえて、本研究では日本における 2014 年から 2018 年の食品ロス量の変化とその要因を品目別に分析する。

2. 研究方法

2.1 ロス率の推計

本研究は、日本における小麦、米、大麦、トウモロコシ、ジャガイモ、卵の 6 品目の食品ロス率を(1)式のように推計する。

$$L_t = \frac{Q_t}{D_t \times P_t} \qquad (1)$$

ここで、t は年を表す添字である。L は食品ロス率を、Q は食品ロス量（千 t）、D は一人当たり国内食品供給量（千 t）、P は人口（千人）を表す。

2.2 食品ロス量の要因分解分析

(2)式のように、前述した 6 品目の食品ロス量を食品ロス率、一人当たり国内供給量、人口の 3 要因に分解し、食品ロス量と各要因の変化を分析する。

$$Q_t = L_t \times D_t \times P_t \qquad (2)$$

なお、(2)式で用いられる t、Q、L、D、P は全て(1)式と同一のものを表す。

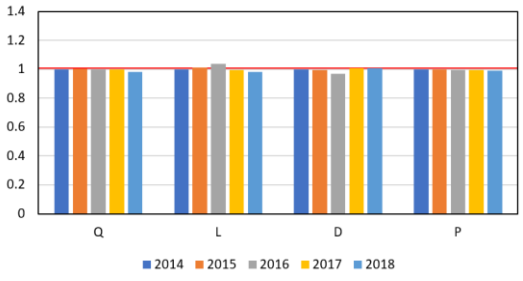
3. 使用データ

本研究の要因分解分析では、小麦、米、大麦、とうもろこし、卵の 6 品目における食品ロス量、国内供給量と、人口については、Food and Agriculture Organization of the United Nations の FAOSTAT Food Balances (2014-2018)のデータ[6)]を使用し、ロス率の推計は上記のデータを使用して行った。

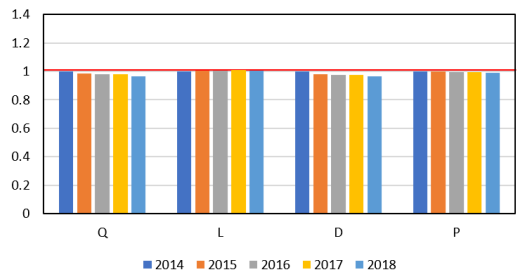
4. 分析結果

図 1 は、2014 年を基準年とした日本の食品ロスの発生量の推移と、分解した各要因の経年変化を表したものである。

(A) 小麦



(B) 米



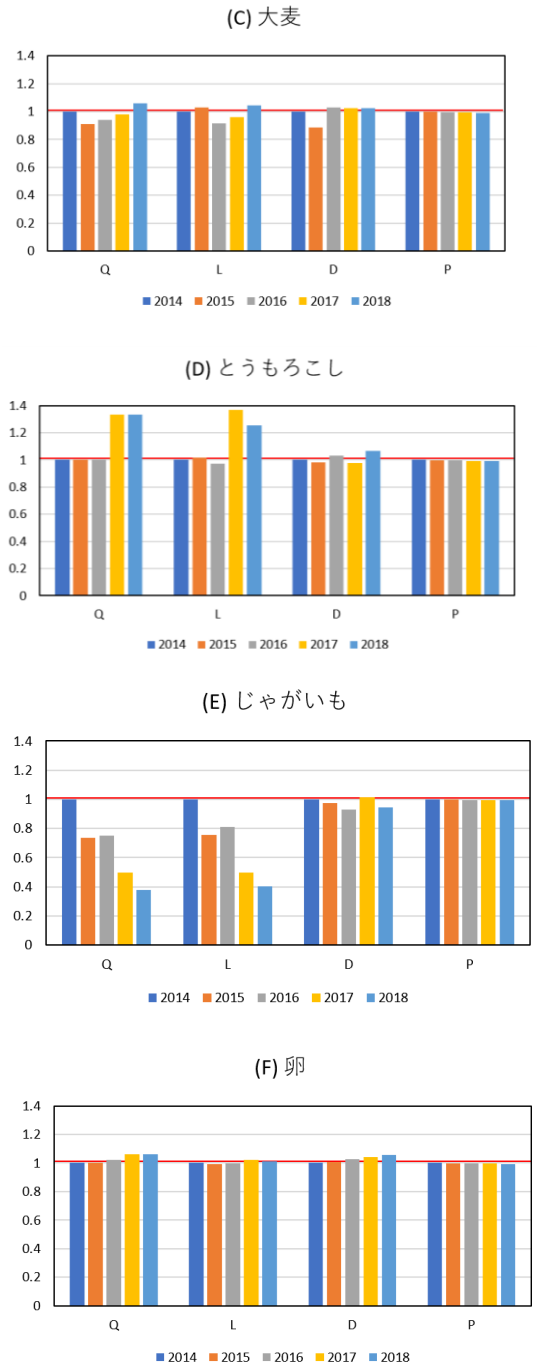


図1　2014年を基準とした各品目における要因の変化

まず、(A)小麦の結果を見ると、ロス量は2014年から2018年にかけてほぼ変化が見られなかった。

次に(B)米の要因分解分析の結果を見てみると、ロス量は2014年から2018年にかけて微減しており、一人当たりの国内供給の減少が食品ロス量の減少に寄与していることが示された。

続いて(C)大麦の結果を見ると、食品ロス量は2015年に1度減少したものの、そこから2018年にかけてふたたび増加していた。2015年における食品ロス量の減少はロス率の低下が寄与しており、2018年の食品ロス量の増加は、1人あたり供給量の増加が寄与していることが読み取れる。

また(D)トウモロコシの結果は、2017年、2018年にロス量が2014年の1.3倍に増加しており、2017年についてはロス率の上昇が、2018年に関してはロス率と一人当たり国内供給量の両方の上昇が、ロス量の増加に寄与していることが読み取れる。

(E)じゃがいもの結果に関しては、ロス量は2014年から2018年にかけて0.37倍にまで減少しており、ロス率の低下が大きく寄与していることがわかる。また、わずかではあるが一人当たり国内供給量の減少もロス量の減少に寄与していることが分かる。

最後に、(F)卵の結果は、一人当たり国内供給量とロス率が微増した影響で、ロス量が2016年から2018年にかけて1.06倍に微増したことが読み取れる。

5. 結論

米、大麦、卵に見られたロス量の微量な変化と、とうもろこし、じゃがいもに見られたロス量の明確な変化に、ロス率、一人当たり国内供給量の変化が共通して寄与していることが明らかになった。従って、食品ロス量を抑えるためにはロス率を減少させ、適切な量を供給し、配分することが必要である。

本会では、LMDIを用いて食品ロス由来のCO_2排出量の要因分析を行い、CO_2排出削減に向けた適切な方策を提言する。

6. 引用文献

(1) 農林水産省：“1.食品ロスの現状を知る”, 入手先＜https://www.maff.go.jp/j/pr/aff/2010/spe1_01.html＞ (参照 2021-12-23)

(2) 消費者庁：“令和2年版消費者白書　第1部第2章第2節⑴食品ロスとは”,　入手先＜https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_research/white_paper/2020/white_paper_131.html#zuhyo-1-2-2-2＞ (参照 2021-12-23)

(3) 農林水産省　外食・食文化課　食品ロス・リサイクル対策室：“食品ロス及びリサイクルをめぐる情勢”,(2021),pp. 4

(4) 農林水産省　外食・食文化課　食品ロス・リサイクル対策室:“食品ロス及びリサイクルをめぐる情勢”,(2021),pp. 5 , pp. 12

(5) 農林水産省　外食・食文化課 食本ロス・リサイクル対策室:“食品ロス及びリサイクルを巡る情勢”, (2021)、pp. 9

(6) Food and Agriculture Organization of the United Nations：“FAOSTAT Food Balances(2014-2018)”, 入手先<https://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS> (参照 2021-12-14)

国際貿易構造の変化が CO_2 排出に与える影響

Impact of Changes in International Trade Structure on CO_2 Emissions

○庄田朋申*[1)]、前野啓太郎[2)]、加河茂美[3)]、下津浦大賀[1)]
Tomomi Shoda, Keitaro Maeno, Kagawa Shigemi, Taiga Shimotsuura
1) 九州大学, 2) 九州大学経済学府, 3) 九州大学経済学研究院
* shoda.tomomi.217@s.kyushu-u.ac.jp

1. 研究背景・目的

運輸部門の CO_2 排出量は、2019 年における世界の総 CO_2 排出量の約 27%を占めており、当該部門の CO_2 排出削減は、将来的な気候目標達成のために極めて重要である[1)]。その中でも船舶部門は、世界の年間温室効果ガス排出量の約 3%を占める[2)]。国際的な貿易ネットワークの発達に伴い海運への需要が高まる中、国際海事機関（IMO）は、適切な政策がなければ船舶部門に関する温室効果ガス排出量は 2050 年までに 50%から 250%増加する可能性があると予測している[3)]。これを踏まえ IMO は、船舶関連の CO_2 排出量を 2050 年までに 2008 年比で少なくとも 50%削減する必要があると述べている[3)]。

本研究は、国際貿易によって誘発されるコンテナ船の移動に着目し、COVID-19 パンデミックによる国際貿易構造の変化が海運ネットワークと環境に与えた影響を分析する。本要旨は、日本の海運企業を代表する Ocean Network Express 社（ONE 社）を対象としたケーススタディの分析結果を報告する。

2. 使用データ

本研究は、分析に用いる基本データとして、IHS 社が提供する Sea-web Movements[4)] を採用した。本データは、世界の主要な海上輸送ルートにおける現在および 10 年間の船舶の詳細な航行履歴が収録されている。具体的に本データは、船名、LR/IMO 番号、船の種類、国・寄港地、出港・入港日、オーナー・オペレーター別の航行履歴を記録している。本研究は、世界合計 6680 個の港と合計 8881 隻のコンテナ船の情報を整理し、ONE 社における 2019 年、2020 年のコンテナ船の航行データを収集した。

3. 研究手法

はじめに本研究は、Sea-web Movements データから、ONE 社が所有する各コンテナ船の最大積載量 m・平均速度 v の情報と、各年における各コンテナ船の航行履歴（出発港 i・到着港 j・港 i-港 j 間航行時間 t_{ij}）を整理し、各コンテナ船の港 i 港-j 間の航行距離 d_{ij} を、以下の(1)式により推計した。

$$\text{航行距離 } d_{ij} = \text{航行時間 } t_{ij} \times \text{平均速度 } v \qquad (1)$$

続いて各船における港 i-港 j 間の輸送活動量 k_{ij} を、以下の(2)式により推計した。

$$\text{活動量 } k_{ij} = \text{航行距離 } d_{ij} \times \text{最大積載量 } m \qquad (2)$$

続いて本研究は、推計した各船各港間の活動量に基づき、出発港を行要素、到着港を列要素に持つ、港間活動量の隣接行列 $\mathbf{G}=\{g_{ij}\}$ を構築した。図 1 に示した隣接行列のイメージを基に説明すると、例えば g_{ij} は i 番目の港を出発し、j 番目の港に到着したコンテナ船の活動量の合計を示している。各列和 $(x_n, n=1, 2, \ldots, N)$ は、各港に到着したコンテナ船の活動量の合計、つまり海運ネットワークにおける各港の入次数を示しており、各行和 $(y_n, n=1, 2, \ldots, N)$ は、各港を出発したコンテナ船の活動量の合計、つまり出次数を示している。隣接行列のすべての要素の和は、各年における全てのコンテナ船の総活動量である。本研究は、2019 年、2020 年における ONE 社コンテナ船の活動を対象とした隣接行列を作成し、COVID-19 パンデミックが国際貿易構造に与えた影響を分析した。

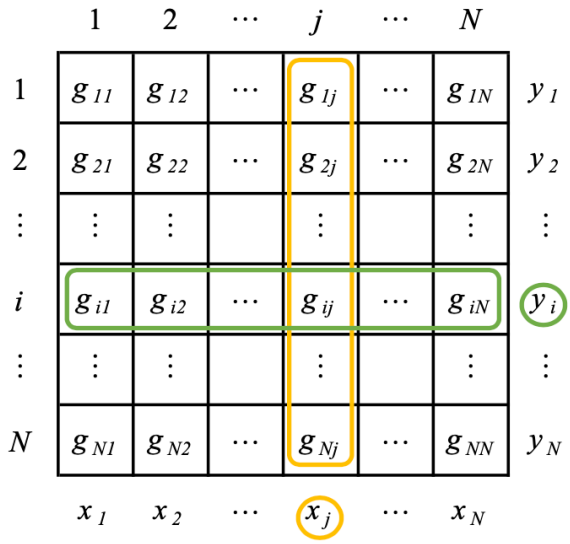


図 1　隣接行列のイメージ図

4. 結果・考察

図 2 は、2019 年、2020 年における ONE 社コンテナ船の総活動量（百万トン・キロ）を表している。図 2 によると、ONE 社におけるコンテナ船の年間活動量は、2019 年から 2020 年にかけて 2%減少した。総活動量から見ると、コロナ禍は ONE 社のコンテナ船総活動量に大きな影響を与えてなかったが、ONE 社の海運ネットワークに大きな変化が見られた。

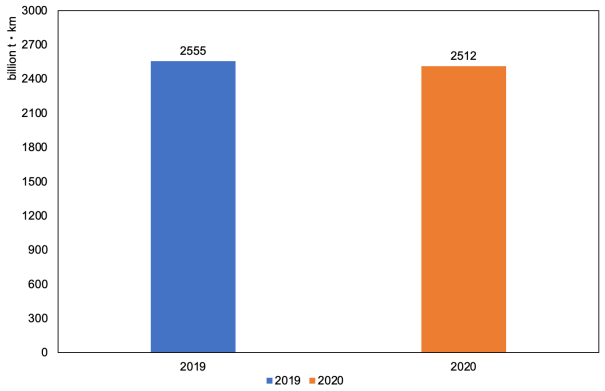


図 2　総活動量

図 3、図 4 は、入次数上位 10 港の入出次数の関係を示しており、横軸は各港の入次数、縦軸は各港の出次数を表している。図 3、図 4 によると、年間総活動量が最も大きかったシンガポールの Pasir Panjang 港における 2020 年の入次数は 2019 年に比べ、約 67% 増加した。スエズ運河とパナマ運河は重要な海上連絡通路として両年において、活動量上位に位置していた。

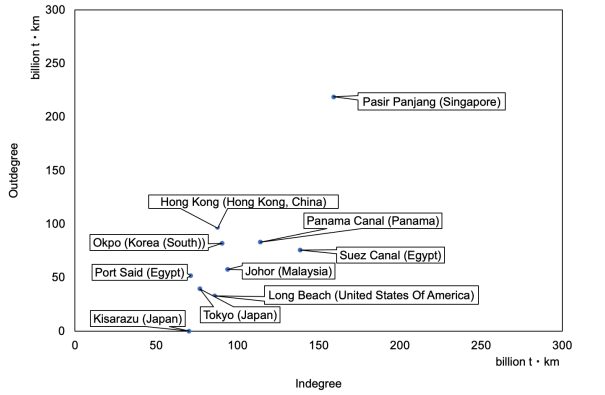


図 3　2019 年入次数上位 10 港の入出次数

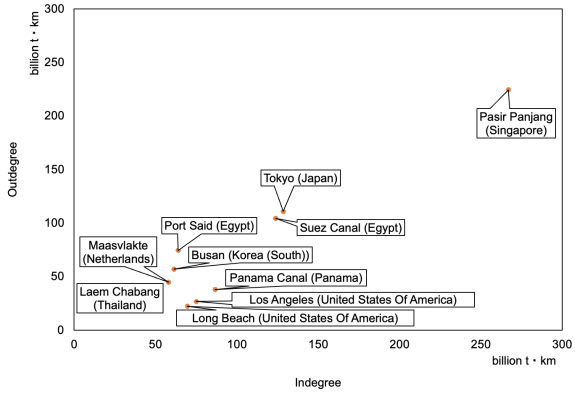


図 4　2020 年入次数上位 10 港の入出次数

分析期間で活動量の増加が最も大きかったのは東京港であり、入次数は 67%増加し、出次数は 180%増加した。また、米国の Los Angeles 港の出次数が 108%増加し、韓国の釜山港の入次数が 174%増加し、出次数が 58%増加した。これらの港は、コロナ禍においても、入出次数共に増加し、貿易の活動量が増加したということを意味している。一方で、韓国の玉浦港と中国の香港港の入出次数共に大幅に減少した。加えて図 3、図 4 から、マレーシアの Johor 港の入出次数が減少した代わりに、タイの Laem Chabang 港の入出次数が増加したことや、オランダの Maasvlakte 港の活動量が多くなったことが読み取れる。

以上の分析から、2019 年から 2020 年にかけて、ONE 社のコンテナ船の移動は、日本から出発する航行が増え、アジア域内の移動が減少し、欧米との貿易量が多くなったことがわかった。

本会ではここまでの分析に加え、2019 年と 2020 年における入次数上位 20 港を中心に、海運ネットワークの可視化を行い、分析期間における港間の繋がりの強さの変化を分析する。最終的にそれらの分析を通じて、コンテナ船の輸送活動がもたらす環境負荷を低減するための貿易政策を提案する予定である。

5. 参考文献

1) IEA (2021), Greenhouse Gas Emissions from Energy: Overview

2) IRENA (2020), Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050

3) IMO (2021), “Cutting GHG emissions from shipping - 10 years of mandatory rules”, https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/DecadeOfGHGAction.aspx (accessed 10 Jan 2022).

4) IHS Maritime & Trade Sea-web Movements Starting using from 2021-present.

建築分野におけるバックグラウンドデータベースの構築

～既往文献を活用したデータ作成方法の検討～

Development of Background Database for Building

Study of data creation methods using existing literature

○中村亘佑[1)]、小林謙介*[1)]、小島陸[1)]
Kosuke Nakamura, Kensuke Kobayashi, Riku Kojima
1）県立広島大学
* kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

１．はじめに

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[1)]。環境負荷削減のためには、環境影響を定量できる LCA の実施が不可欠である。建築物の LCA 実施は、建築物が一品生産で建物毎に評価する必要があること、資材点数が多いことから作業負荷が膨大である。特に現状では、こだわりを反映できるバックグラウンドデータが少ないこと、連鎖の際に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である。こうした背景から、単位換算データやバックグラウンドデータの充実は不可欠である。

本研究では、建築物の LCA 作業負荷の軽減のため、実務者のニーズを踏まえた単位換算データやインベントリデータベースの作成手法を検討し、データベースを構築することを目的とした。中でも、既往研究で分析された優先すべき項目に基づき、既往文献を活用したデータの作成方法の検討とデータベースを構築した。

２．研究方法

２.１. LCA 関連文献の調査

優先すべき項目を、CiNii[2)]で「建築、木材、型枠、製材、合板、集成材、CLT、鉄骨、ALC、タイル、屋根、塗料、ケイ酸カルシウム板、クロス、太陽光発電、エアコン、ダクト、コンクリート」の 18 項目と「LCA」という形で検索した。この 18 項目を検索することで、既往研究で分析された優先すべき項目についての文献を、網羅的に抽出することができる。例えば、コンクリートと検索することで、捨てコンクリートや普通コンクリートの文献も抽出することができる。2010 年以前の文献は IDEA Ver.1 構築時に実施済みの[3)]ため、2010 年以降で検索した。検索した文献について、タイトル、著者、URL などを整理した。

収集文献の概要を捉え、インベントリデータのない文献を除外する一次スクリーニングを実施した。その後、抽出文献を熟読しインベントリデータが記載されていない文献を除外する二次スクリーニングを実施した。

表１ 文献からのデータ抽出方法

作業プロセス	作業の概要
①文献DB整理	インターネット上のCiNiiという検索システムからLCAに関わる文献等のタイトル、著者、URL等をデータベース化 検索の際、「検索項目」と「LCA」という形で検索
②文献収集	データベースをもとに、LCAと直接関係のない文献を除外した上で文献等を収集
③一次スクリーニング	文献の概要を捉え、インベントリデータの記載がされていない文献を除外
④二次スクリーニング	③で抽出された文献を熟読し、インベントリデータの記載がされていない文献を除外し、データを整理
⑤データ収集	抽出対象となったデータごとに、機能単位、出典等を整理し、必要であれば石油等消費構造統計表などからデータを補完する手法を検討
⑥データ入力	インベントリデータ管理シートに取り込んで、バックグラウンドデータとして活用

２．２．インベントリデータベースの構築

二次スクリーニングで抽出された文献から、インベントリデータとして活用できるデータを抽出し、データベースの作成方法を検討した。データベース作成においては、可能な限り日本平均の値に近づける必要があるため、選定した入出力データが不十分と判断される場合、統計（例：石油等消費構造統計表）や他の文献などからデータを補完する手法を検討した。これらの検討で提案した手法に基づき、インベントリデータを作成した。

３．結果

３．１．LCA 関連文献の調査

2.1 で記述した条件で検索したところ、401 文献があった。はじめに、インベントリデータが掲載されているかどうかを判断する一次スクリーニングで 177 文献が抽出された。続いて、掲載されているインベントリデータについて精査する二次スクリーニングで 42 文献が抽出された。すなわち、本検討では対象とした文献の約 1 割からインベントリデータが作成できる可能性があることが分かった。図 1 に各項目の文献数、一次・二次スクリーニング作業でそれぞれ残った文献数と、その全体に対する割合を示す。

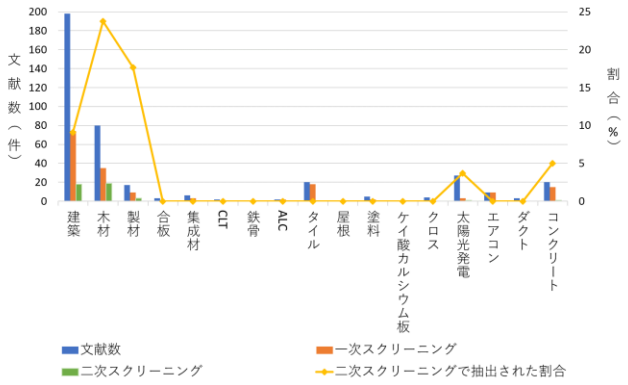


図 1　調査対象文献数と抽出数

3．2．インベントリデータベースの構築

文献に掲載されている情報からインベントリデータを抽出する場合、文献に十分に情報が掲載されていないことが少なくない。例えば資材構成は記載されていても、加工に伴うエネルギー消費量が分からない場合などが挙げられる。また、既往文献では一事例の検討が行われていることが多いが、データベースとしては可能な限り日本平均（少なくとも複数事例の平均）とすることが望ましいと考える。

これらを踏まえ、本インベントリデータベースの構築では、はじめに衛生陶器の事例をもとに作成手法について検討した。その検討した手法を図 2 に示す。衛生陶器の資材と製造時のエネルギー消費量、水消費量は既往文献等[4]から抽出した。便器に使用される各品目の重量のデータにおいて、衛生陶器の日本の平均値に近づけるため、TOTO 株式会社が発行した 2021 年 6 月製品カタログ[5]から便器に使用される資材重量のデータを用いて補完した。補完方法としては、機能部構成素材と構成比を既往文献のデータ[4]を用い、重量は TOTO ネオレストの 6 モデルの平均値を用い、構成比によって各原料の重量を算出した。算出した各原料の構成比、重量、電力などを加えインベントリを整理したものを表 2 に示す。

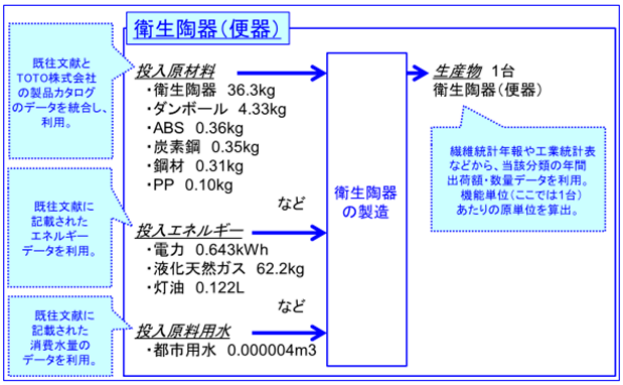


図 2　検討したインベントリデータの作成方法

表 2　衛生陶器のインベントリデータ

陶器部構成原料		重量(kg)（文献4，5）	
衛生陶器		36.3	
機能部構成原料	構成比(%)（文献4）	全体重量(kg)	重量(kg)（文献4，5）
ABS	5.65	6.3（文献5）	0.356
炭素鋼・ユニクロメッキ	2.06		0.130
PE	0.15		0.010
PP	1.60		0.101
紙	0.76		0.048
鋼材	4.96		0.313
ダンボール	68.68		4.327
シール液（ドデカノール）	0.84		0.053
ブチルゴム	1.53		0.096
塩ビ	1.31		0.083
黄銅	0.03		0.002
鋼材・ユニクロメッキ	3.27		0.206
真喰・ニッケルメッキ	0.15		0.010
ステンレス	1.25		0.079
炭素鋼	5.49		0.346
軟銅線材・ユニクロメッキ	0.73		0.046
ブチルゴム	1.53		0.096
計	100		6.300
消費エネルギー		消費量（文献4）	
電力		0.643kWh	
液化石油ガス		0.00857kg	
灯油		0.122L	
液化天然ガス		62.2kg	
都市用水		0.00000457m³	

4．まとめ・今後の展望

LCA 作業負荷の軽減を目的に、実務者のニーズを踏まえたインベントリデータベースの作成手法を検討し、データベースの構築を行った。文献調査では 401 件の文献が得られ、二次スクリーニングまで実施した所 42 件が得られた。また、インベントリデータの整備方法を提案した。今後は、得られた文献と検討した方法によって、インベントリデータベースの構築を進めていきたい。

5．参考文献

1) 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一改訂版、2013.2
2) CiNii、https://ci.nii.ac.jp/
3) 小林ら：IDEA におけるインベントリデータの作成手法、第 5 回日本 LCA 学会研究発表会、2010.3
4) 中川直子ら：高速道路サービスエリアの水回り改善による環境負荷削減、土木学会論文集 B1(水工学)、2012
5) TOTO 株式会社：レストルームカタログ、https://www.catalabo.org/iportal/CatalogViewInterfaceStartUpAction.do?method=startUp&mode=PAGE&volumeID=CATALABO&catalogId=67031460000&pageGroupId=&designID=link&catalogCategoryId=&designConfirmFlg=

長期環境家計簿でみる消費者のライフスタイルおよび省エネ技術変化の効果分析 (2)

Effects of changes in consumer lifestyles and energy-saving technologies in the long-term environmental household account book (2)

○板明果*[1)]、鷲津明由 [2)]
Sayaka Ita, Ayu Washizu
1) 東北学院大学, 2) 早稲田大学
* s.ita@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

1. 研究の目的

2021 年 10 月に閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画では，家庭部門には 2030 年度の省エネルギー量として 1200 万 kL の目標が与えられ, 2015 年の計画における目標値 1160 万 kL が一層強化されている。そしてそれを達成するための方策としては，ゼロ・エネルギーハウス(ZEH)等による住宅の省エネルギー化，高効率給湯器の導入，高効率照明の導入，トップランナー制度等によるエアコンや家電製品の省エネ性能の向上, 家庭用エネルギーマネジメントシステム(HEMS)等を用いた徹底的なエネルギー管理の実施のほか，クールビズの励行や家庭エコ診断の徹底が挙げられている。このように最新のスマートエネルギー技術利用と国民の行動変容によって家庭の省エネを一層強化することが目指されている。2030 年の確実な目標達成に向けては，様々な対策を，PDCA サイクルを回して着実に定着させていく必要がある。その際，PDCA における検証・評価の具体的手段として，産業連関的環境家計簿分析を提案する。本研究ではまず，これまでの家庭による行動変容と技術変化の相乗効果を検証するために，1990 年から 2020 年までの長期産業連関的環境家計簿を時系列で整備し，その変化の要因分解を行ったのでその結果を報告する。

2. 分析方法

2.1産業連関的環境家計簿

産業連関的環境家計簿とはエネルギー消費に限らず家計が消費するすべての消費財について，そのサプライチェーン上の CO_2 排出をカウントすることで，家計消費による CO_2 排出構造を見える化したデータベースである。本研究では総務省「家計調査」と 3EID をリンクし，1990～2020 年の 5 年おきに，各年の家計消費が引き起こす CO_2 排出量(t-CO_2eq，ただし 1990 と 95 年は t-CO_2)を，家計調査の品目別に整理し，長期産業連関的環境家計簿データベースを作成した。また，各年の家計調査分類を時系列で比較可能なように整理した上，各分類に対応する各年の CPI も作成した。

2.2 分析モデル

2.1 節で作成したデータベースを用いて，次の手順で，家計による CO_2 排出構造の長期時系列変化の要因分解を行った [1)]。

【分析手順】

(1) 家計調査の時系列共通分類で集計した名目の消費支出金額系列を実質化する。
(2) 家計調査の時系列共通分類に集計した環境家計簿(品目別消費による CO_2 誘発排出量)の計算結果を，(1)で計算した品目別実質消費金額で除し，家計調査の時系列共通分類ベースの実質 CO_2 排出点数(各財の消費 1 単位当たりの CO_2 誘発排出量)の系列を作成する。
(3) (1)，(2)のデータを用いて，以下の要因分解分析を行う。

$$\Delta E_{t,t+1} = E_{t+1} - E_t = \boldsymbol{e}'_{t+1}\lambda_{t+1}\boldsymbol{c}_{t+1} - \boldsymbol{e}'_t\lambda_t\boldsymbol{c}_t = (\boldsymbol{e}'_{t+1}\lambda_{t+1}\boldsymbol{c}_{t+1} - \boldsymbol{e}'_t\lambda_{t+1}\boldsymbol{c}_{t+1}) + (\boldsymbol{e}'_t\lambda_{t+1}\boldsymbol{c}_{t+1} - \boldsymbol{e}'_t\lambda_t\boldsymbol{c}_{t+1}) + (\boldsymbol{e}'_t\lambda_t\boldsymbol{c}_{t+1} - \boldsymbol{e}'_t\lambda_t\boldsymbol{c}_t) \quad (1)$$

ここで E_t は t 年の家計消費が誘発する CO_2 排出量，$\boldsymbol{e}'_t$ は t 年の各財の CO_2 排出点数を示す行ベクトル，$\boldsymbol{c}_t$ は t 年の 1 家計あたり消費総額，λ_t は t 年の家計消費構成比を示す列ベクトルである．この式によって，家計消費が誘発する CO_2 排出量の 2 時点間の全変化分が，①消費構成比の変化による影響(第 3 項)，②消費総額の変化による影響(第 2 項)，③排出点数の変化による影響(第 1 項)の 3 つの要因に分けられる。

3. 結果

3.1長期時系列環境家計簿の推計結果

図 1 によれば，1990～2020 年の 1 世帯当たり平均年間 CO_2 排出量(全世帯平均)は約 11～12t-CO_2 で推移している。1995 年をピークとして 1 世帯当たり平均年間 CO_2 排出は減少傾向である。費目別に誘発排出量を見ると，食料支出からはやや増加の傾向，電気代支出か

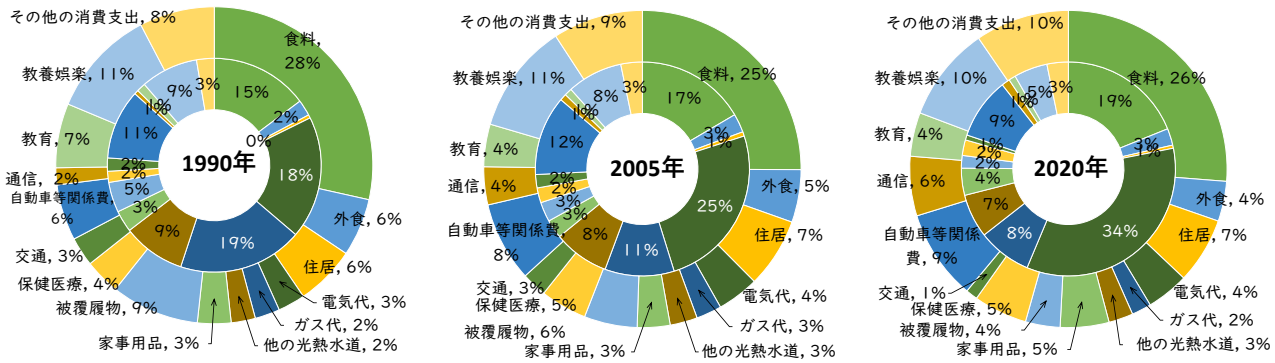


図 2 家計消費支出額構成比(外円)と各消費支出項目別 CO_2 排出量構成比(内円)

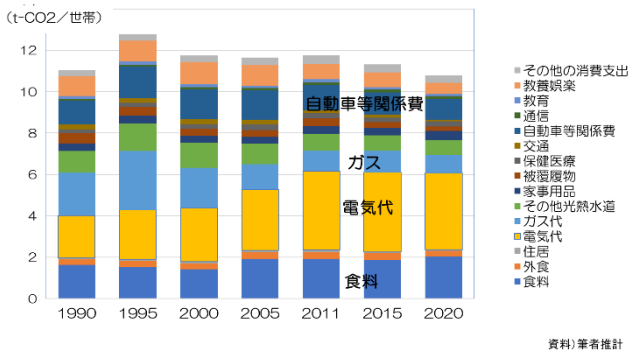


図1 1世帯当たり年間平均CO_2排出量の推移

らは大きな増加傾向に対し，ガス支出からは大幅減少の傾向，自動車等関係費はやや減少の傾向である。

また，図 2 によれば，食料支出や電気代は消費支出額構成比が減少しているものの CO_2 排出構成比が大幅に増加しているのに対し，自動車等関係費は消費支出額構成比が増加している一方 CO_2 排出が減少しており，①品目別消費構成比の変化と②CO_2 排出点数の変化の進度に差があると推察される。

3.2 要因分解

3.1 節でみた家計消費が誘発する CO_2 排出構造の変化を，(1)式により，消費構成比の変化，消費総額の変化および，CO_2 排出点数の変化による影響に要因分解した結果を，図 3～4 に示す。消費構成比と消費総額の変化はライフスタイルの変化を，CO_2 排出点数の変化はテクニカルな要因変化を反映していると考えられる。

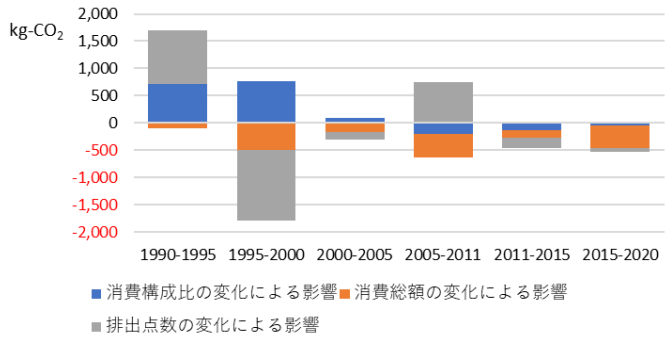


図 3 要因分解の結果(消費支出)

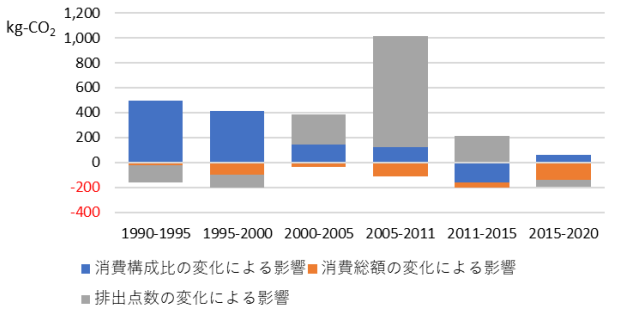


図 4 要因分解の結果(調理食品)

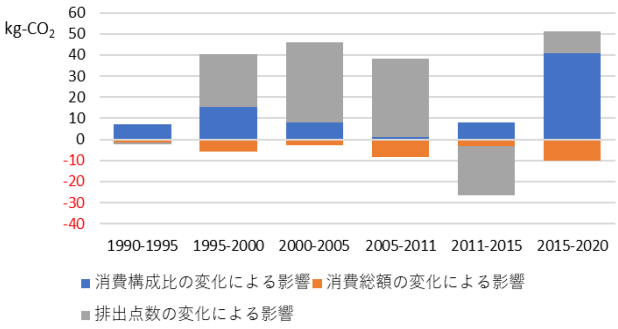


図 5 要因分解の結果(電気代)

4. おわりに

環境家計簿の長期時系列分析の結果，家庭消費に起因する CO_2 誘発排出量の変化を説明する要因として，消費支出全体で見ると CO_2 排出点数の変化の効果が大きい。1990 年代は消費構成比の変化が CO_2 排出を増やす要因であったが，2000 年代以降は消費総額の減少により CO_2 排出も減少した。調理食品は最近の消費構成比の変化の要因が，電気代は 2005 年から 11 年にかけての CO_2 排出点数の変化要因が特に大きい。今後は，消費構成比や消費総額の変化，CO_2 排出点数の変化との相乗効果を注意深く分析する。

5. 引用文献

1) 篠崎 美貴，中野 諭，鷲津 明由: 産業連関, 13 (3), (2005), pp 40-51

オリンピックと環境（４）

大会後における環境面での課題

Instructions for Preparing the Proceeding on the ILCAJ Annual Meeting

○髙橋和枝*
Kazue Ichino Takahashi
武蔵野大学
* kazutaka@ Musashino-u.ac.jp

1. はじめに

2021 年 7 月から 9 月にかけて、第 32 回オリンピック競技大会（2020/東京）および東京 2020 パラリンピック競技大会（以下、東京大会）が当初の予定から約 1 年遅れで開催されたが、新型コロナウィルス感染拡大による緊急事態宣言下で行われた大会は、様々な面で異例づくめであった。環境への影響として、観客の移動、大会関係者や観客による廃棄物の増加、暑さ対策のための資源・エネルギー消費量の増大、交通機関による大気環境の悪化、水辺競技による水質汚濁等が懸念され、それぞれ対策が実施されたが、その効果についても検証が必要である。

東京大会は計画段階から持続可能性に配慮することに重点が置かれており、「持続可能性に配慮した運営計画」が策定され、3 つの報告書「進捗状況報告書」（2019 年）[1]、「持続可能性大会前報告書」（2020 年 4 月）[2] および「持続可能性大会後報告書」（2021 年 12 月）[3] が公開されている。報告書中では、大会の環境対策とその効果、さらにカーボンフットプリント（CFP）を活用した CO_2 排出量としての評価結果も公開されており、特に大会後の報告書では 196.2 万 t-CO_2 の総排出量があったことが開示されている。同時に、この大会ではクレジットによる 438 万 t-CO_2 のカーボンオフセットを取り入れた結果、「カーボンマイナス大会」が実現できたとしている。

一方、報告書には記載されていない事項として、大会終了後の大会関連施設の再利用やリサイクルがある。まだ未確定な部分も多いが、東京都の試算によれば、大会後の運営費としてオリンピックアクアティクスセンターが 6 億 3800 万円、カヌー・スラローム会場が 1 億 8600 万円等の赤字が推定されており、その負担は将来に亘って、国民が担わされ続けることになる。このような経済的な負担だけではなく、大会後の関連施設の維持・管理、さらに廃棄・リサイクルの各段階で、環境への影響が生じると考えられる。すなわち、長いスパンでみた大会後の環境影響について検討が必要であると考えている。

さらに、東京大会をきっかけとした市民の環境意識の高まりについても報告書で報告されているが、学生へのアンケートによれば、あまり意識が変わったという実感がもてないという回答が多数あった。

そこで、市民の視点から今後の大会の環境への影響を再検証し、今後の在り方について課題を発見、解決策を提案することを目的として研究を行っている。

2. 研究方法

一般市民の意識を調査するため、インターネットアンケートを行った。アンケートは商用インターネットアンケートサービス（NTT コムオンライン・マーケティングソリューション提供）を用いて、東京大会後の 2021 年 11 月に行った。その結果、20 代から 70 代以上までの全国 248 人から有効回答を得ることができた。

3. 結果と考察

3.1 大会関連施設および周辺地域の環境影響

CFP の試算結果は下記の図のようであった。

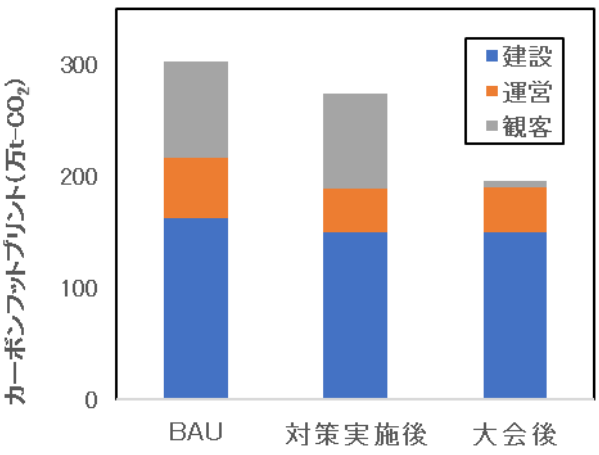


図 1 東京大会の CFP 推計値の推移
（報告書[3] を元に著者が作成）

観客試合の実施等により、観客由来の CFP は大幅に減少したが、建設・運営に関わる CFP は当初の想定通りであった。CFP の削減効果が高かったと予想されるのは、主に航空機による海外からの移動である。

一方､国立競技場は建築段階で 31.2 万 t-C02 を排出したと試算されており、さらに用途を変更して使用する場合、改築が必要となり新たな環境負荷が発生することから、今後も注視すべきと考えている。

大会期間前から大会後の生態系への影響については、東京大会の関連施設が集中する有明地区で、廃棄物、鳥類、植生、水質などを現場調査しているが、目立った変化は認められなかった。一方、釣ヶ崎のウミガメについて、産卵数が少なく時期が遅いという変化があったという報告があり、大会との関連を検証する必要があると考えられる。

3.1 暑さ対策

暑さ対策の一環として、マラソン選手と沿道の観客を守るため、国道 5.6km（2021 年 6 月時点）および競技場周辺等の都道 157km(2021 年 3 月時点)の遮熱性舗装が施工された[3)]。飯田らによれば[5)]、遮熱性舗装は温度低減効果があるだけではなく、舗装道路の寿命のばすことからCO_2排出量も低減できることが試算された。しかしながら、オリンピックのマラソンは北海道で行われ、昨年、比較的低温であった 9 月に行われたパラリンピックでのみ使用されたため、結果論ではあるが、暑さ対策としてここまでする必要があったのかということは再検証すべきと考えている。また車道だけではなく歩道まで遮熱性を付与する方が、大会後の暑さ対策としては、有効であったと考えている。

3.2 市民の環境意識改

一般市民へのアンケートでは、東京大会による環境影響と推定される項目を選択してもらった。結果を図 2 に示す。

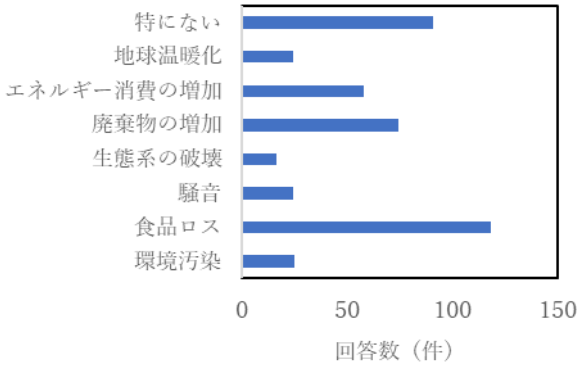


図 2 アンケート結果

図 2 より、報道でも取り上げられた食品ロスの問題を指摘する回答が約半数を占めており、続いて廃棄物の増加、ネルギー消費量増大の順であった。一方、「持続可能なオリンピック・パラリンピック競技会」に重要と思われる項目を問うと、第一位の「人権・労働人権・労働、公正な事業慣行」（31%）に対して「気候変動対策」とする人は 16%であり、環境に対する意識が高まったとするのは部分的な見方であるとも考えられる。

4. 最後に

東京大会開催期間中、市民団体としてCO_2排出量の削減や吸収に貢献する活動を推進し、その削減量も報告されている。実際、本学でも小型家電リサイクルを推進し､「みんなのメダルプロジェクト」に参加したが、イベントが終わった後、活動は下火となり、始めるよりも継続することの方が難しいと痛感している。

世界に目を向けると、大会終了後、競技場や跡地を有効活用している例も多いが、その一方で、芝が荒れ放題になったオリンピックベースボールセンター（アテネ　2004）や放置され廃墟化したマラカナンスタジアム（リオデジャネイロ　2016）等の報告もあり、東京大会で建設した施設の利用方法、維持管理、リサイクル・廃棄の方法次第では、折角、築いてきた持続可能性大会が将来の重荷となることが予想される。今後も大会会場となり注目集めた日本がどう変容していくのか注目していきたいと考えている。

5. 引用文献

1) 東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会：Sustaianability Progress Report 持続可能性進捗報告書、(2019）, 158pp.
2) 東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会：Sustaianability Pre-Games　Report 持続可能性大会前報告書、(2020）, 239pp.
3) 東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会：Sustaianability Post-Games　Report 持続可能性大会後報告書、(2020）, 160pp
4) IDEA Version 2.4, 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、一般社団法人 サステナブル経営推進機構
5) 飯田、髙橋、國岡、細川：第 15 回日本 l CA 学会研究会発表会講演要旨集、東京,(2020), pp.414-415

第17回日本LCA学会研究発表会

菜食主義者を対象とした環境フットプリント

有馬 悠人セニカ*1)

1）東京都市大学

※ 本発表の要旨は、所定の期日までに提出されませんでした。

SDG 報告に見る金属産業の SDGs への関わり方

Metals Industry's Involvement into the SDGs in their SDG Reporting

畑山博樹*[1)]
Hiroki Hatayama
1) 産業技術総合研究所
* h-hatayama@aist.go.jp

1. 緒言

ESG 投資の拡大や持続可能な開発目標 (SDGs) の採択により、自社の活動が環境、経済、社会に及ぼす影響をバリューチェーン全体で把握することが企業にもとめられている。とりわけ金属産業では、紛争鉱物や Social License to Operate といった ESG 課題が資源の利用可能性に直結しており、これらの課題への対応を SDG 報告などの形で市場に示すことが一層重要となっている。その一方で、金属産業のような BtoB 企業は SDG 報告が進んでいないことが指摘されている [1)]。金属産業の SDGs に対する現状の認識を分析するとともに、SDGs への実際のインパクトとのギャップを示すことで、ESG 課題の解決や SDGs 達成に向けた実効性のある取り組みを促すことが可能である。

本研究では、世界の主要金属メーカーの SDG 報告を分析し、(1) 金属産業が 17 の目標との関係性をどのように認識しているか (2) 生産する金属による関係性の違いはあるかを明らかにした。これらの分析を通して、金属産業の SDG 報告の課題と、今後 SDGs の達成により深く関与するための方策を示した。

2. 研究手法

2.1 分析対象

金属メーカーによる SDG 報告の事例を収集するため、世界の粗鋼生産量上位 50 社および 9 種の非鉄金属の主要メーカー各 10 社程度について、環境報告書やウェブサイトを調査した。2019 年 9 月時点で SDG 報告を実施している企業はのべ 76 社で、全体の半数であった（表 1)。なお、いくつかの企業は異なる金属の主要メーカーとしてそれぞれ考慮されており、SDG 報告の正味企業数は 61 である。

表 1　SDG 報告の実施企業数（括弧は調査企業数）

鉄鋼	13 (50)	金	8 (10)
銅	7 (10)	銀	7 (10)
アルミニウム	8 (14)	白金族元素	8 (11)
ニッケル	6 (9)	シリコン	7 (13)
亜鉛	6 (10)	レアアース	6 (15)
		計	76 (152)

2.2 企業と 17 目標との関係強さの評価

組織と各目標の関係性の定量化は、組織に属する人へのアンケートを通じた試みが行われてきた [2,3)]。それに対し本研究では、SDG 報告の中で各目標に関係づけられた企業の活動数を客観的指標として採用した。SDG 報告の形式は様々であるが、図 1 に示す処理によって企業活動と関係目標のデータセットを作成することで、目標ごとの活動数を計上した。そして、金属(m)産業と目標 g の関係強さ $R(m,g)$を、式 1 によって算定した。

$$R(m,g) = \frac{1}{N_m}\sum_i \frac{N_{i,g}}{\sum_g N_{i,g}} \times 17 \qquad (1)$$

ここで、N_m は金属 m の分析対象企業数、$N_{i,g}$ は企業 i が目標 g に関係づけている活動数を示す。各 m について g に対応して 17 の $R(m,g)$が算定されるが、その平均は 1 となり、より大きな値を示す目標が m 産業において相対的に関係が強いとみなすことができる。

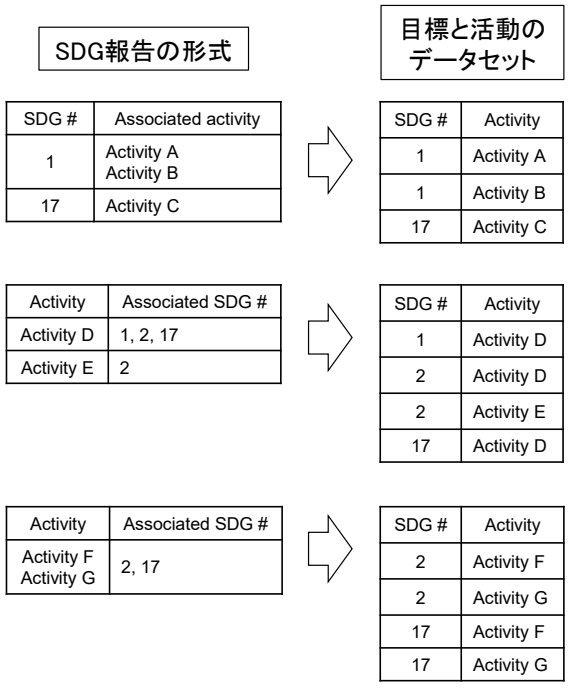


図 1　企業活動と SDGs のデータセット作成

3. 結果

3.1 金属産業と 17 目標の関係性：全体傾向

図 2 に、金属産業と SDGs との関係強さ *R(m,g)*を企業の生産金属別に示す。金属産業が強い関係を認識しているのは目標 8（成長・雇用），目標 3（保健）,目標 12（生産・消費）であった。他方、目標 14（海洋資源）、目標 2（飢餓）、目標 1（貧困）に対しては、自社の貢献を示すのに苦慮している様子が明らかになった。これは、既存文献 [1]に示されている全産業の傾向と概ね一致するものである。しかし、他の産業では目標 15（陸上資源）の優先順位が低いのに比べ、金属産業は比較的高い関心を有していると言える。また、目標 3 と目標 6（水・衛生）、目標 1 と目標 2 といった共通の背景を持つ目標は、SDG 報告の中で同時に言及される機会が多いことが示された。さらに、目標 9（イノベーション）は目標 7（エネルギー）と同時に言及される機会が多い一方で目標 3、目標 6、目標 14、目標 15 との機会は少ないといった、SDG 報告の中での目標間の親和性とトレードオフも明らかになった。

3.2 金属間の関係性の違いに見る SDG 報告の現状

図 2 は、金属産業の内でも鉄鋼メーカーが目標 12 に対して強い関係性を、目標 1、目標 2 に対して弱い関係性を有していること示している。鉄鋼メーカーは原料である鉄鉱石を資源開発企業から購入して調達しており、原料の安定供給に向けた取り組みや意識が目標 12 と紐づけられている。その反面、様々な ESG 課題が生じている資源開発のローカルコミュニティに関しては、直接的なステークホルダーと捉えられていない。それに対して銅では、資源開発企業が同時に素材メーカーとしての役割を担っている。従って、ローカルコミュニティにおける目標 1、目標 2 の達成はメーカーが直面する課題と位置付けられており、関係が強く意識されていると考えられる。このようなサプライチェーンの企業構造の影響は、白金族元素とシリコンにも同様に表れている。従って、現状の SDG 報告は各企業が直接的に関与している環境やステークホルダーへの影響が強く反映されており、SDG 報告に求められる「バリューチェーンにおける SDGs のマッピング」[4]が十分には実施されていないことが示唆された。

4. 結言

金属産業の SDG 報告において関連が強く認識されていたのは、目標 8、目標 3、目標 12 であった。関係性を生産金属別に分析した結果、現状の金属産業の SDG 報告ではバリューチェーン全体の影響の把握が十分になされていないことが示唆された。このような影響の把握と定量化に関して、LCA の親和性は高い。SDGs への貢献領域の特定や貢献量の定量化が Social LCA 手法等の発展により可能となれば、SDGs 達成に向けた実効性の高い取り組みを強く後押しできると期待される。

謝辞

本成果は、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（JPNP14014）の結果得られたものである。

引用文献

1) KPMG, “How to report on the SDGs”, (2016).
2) van Zanten J.A., van Tulder R.: J. Int. Bus. Policy, 1, (2018), pp. 208-233.
3) Mansell P., Philbin S.P., Konstantinou E.: Adm. Sci., 10, (2020), pp. 55-93.
4) GRI, “SDG Compass: The Guide for Business Action on the SDGs.”, (2015), p.12.

	SDG #																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
鉄鋼	0.30	0.29	1.06	1.25	0.77	1.17	1.20	1.97	1.68	0.56	0.81	1.80	1.13	0.22	0.38	1.00	1.42
銅	1.04	0.72	1.61	1.01	1.07	0.85	0.27	2.09	0.57	1.19	0.97	1.04	1.18	0.55	0.81	1.34	0.67
アルミニウム	0.57	0.84	1.06	1.06	1.08	0.80	0.88	1.72	1.29	0.67	1.03	1.33	1.37	0.64	0.67	0.73	1.24
ニッケル	0.68	0.49	2.12	0.77	0.90	1.39	0.58	2.27	0.87	0.98	0.47	1.20	0.78	0.24	1.15	1.10	1.00
亜鉛	0.49	0.41	1.62	0.54	0.99	0.90	0.64	2.17	0.84	0.98	0.92	1.92	0.89	0.79	1.04	1.32	0.54
金	0.51	0.42	2.30	1.27	0.81	1.80	0.89	2.45	1.14	0.49	0.42	1.12	0.78	0.14	0.83	0.40	1.22
銀	0.57	0.45	1.98	1.29	0.84	1.37	1.01	2.19	0.95	0.85	0.54	1.14	0.88	0.55	0.99	1.22	0.19
白金族元素	1.16	0.39	2.19	0.51	0.39	1.42	0.78	2.35	1.40	0.99	0.57	1.03	1.10	0.31	0.98	0.67	0.75
シリコン	0.10	0.16	1.41	0.42	1.00	0.57	2.31	2.42	2.64	0.29	0.31	1.95	1.71	0.20	0.39	0.63	0.49
レアアース	0.48	0.41	1.76	0.70	1.11	0.68	0.78	1.70	1.09	0.73	0.85	2.31	1.50	0.58	0.89	0.71	0.72

強 ← → 弱

図 2　SDG 報告における 17 目標との関係性（生産金属別）

容器包装の環境情報開示による消費者行動の分析

Analysis of consumer behavior through disclosure of environmental information on containers and packaging

○橋本岳大*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Takahiro Hashimoto, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学
* g1862052@ tcu.ac.jp

1. 背景

わが国の経済は、高度成長期以後、今日まで「大量生産・大量消費・大量廃棄」によって発展してきた。この経済システムによって生み出された廃棄物は増大の一途をたどり、廃棄物を埋め立てる最終処分場が足りなくなる事態も生じた。このため、廃棄物の発生を抑制するとともに、廃棄物をリサイクルすることによって廃棄物の減量を図ることが重要となり、特に一般廃棄物のうち容量で約 60.1%、重量で約 20.1%を占める容器包装廃棄物の処理が緊急の課題となった。容器包装リサイクル法[1)]の特徴は、従来は市町村だけが全面的に責任を担っていた容器包装廃棄物の処理を、消費者は分別して排出し、市町村が分別収集し、事業者（容器の製造事業者・容器包装を用いて中身の商品を販売する事業者）は再商品化（リサイクル）するという、3 者の役割分担を決め、3 者が一体となって容器包装廃棄物の削減に取り組むことを義務づけた。

消費者には、市町村が定める分別ルールに従ってごみを排出することが求められている。環境負荷について消費者の理解・認識が必要となっている。

2. 研究目的

本研究では、容器は内容物の保護に利用できる一方で消費後は廃棄物となるため、環境影響低減の対象として注目されることが多い。一般にカーボンフットプリントは内容物も含めた形で表示するため、容器包装に関する環境意識を高めるための情報源として十分でないものと考えられた。容器包装を対象にした LCA 結果をエコイベント、エコマーケットにて消費者に開示することによる消費者の購入行動への影響について分析することを目的とする。

3. 算定概要

本研究の評価対象は、商品リスト(紙類、プラスチック、缶類、)の原材料から製造までのライフサイクルであり、機能単位は商品として売られている容器包装全体でライフサイクル評価を行う。

また、システム境界（図 1）は以下のように記載する。

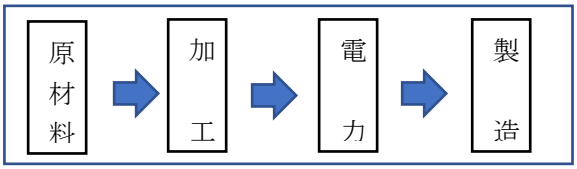


図 1 システム境界

4. 算定方法

本研究では、エコマーケットで展示する商品リスト一覧の重量測定を行った。原材料製造については、研究論文[2)]・ハウス食品[3)]がホームページに記載している二次データを活用した。加工については三菱化学東セロ株式会社[4)]が記載している製品情報の二次データを活用した。

また、紙については 8 割以上の紙を使って製造された容器包装を評価し、缶については再生を考慮した評価を行う。

5. 算定結果

5.1 容器包装の算定結果

図 2 は紙、プラスチック、缶を使って製造された容器包装の CO2 排出量である。容器包装ごとにそれぞれの特徴がみられる。

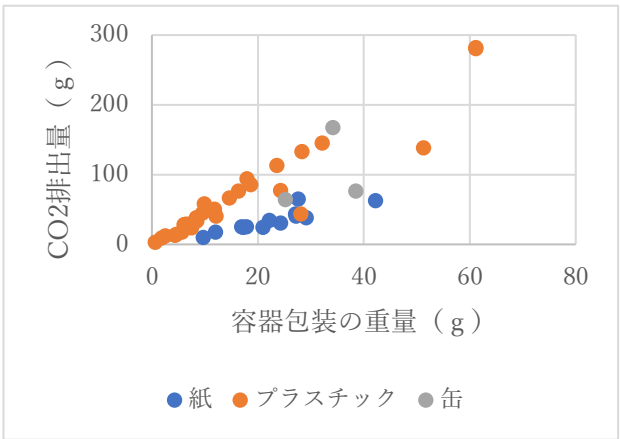


図 2 容器包装の散布図

5.2 紙の算定結果

図 2 の紙の結果から、紙の容器包装は重量がプラス

チックと比べて重量が重く、環境負荷が小さいことがわかる。容器包装の中で、包装の重量は２番目に小さく、最も環境負荷が小さいことがわかり、右肩上がりのグラフになっている。

5.3 プラスチックの算定結果

図 2 のプラスチックの結果から、プラスチックの容器包装は重量が軽いものから重いものがあり、お菓子類の包装は軽く、日用品類の包装は重かった。最も大きい CO2 排出量は 280g であった。紙と比べて傾きが大きく、包装の重量が重くなるほど環境負荷は大きくなる。

5.4 缶の算定結果

図 2 の缶の結果から、再生を考慮した缶の容器包装の重量は重く紙と比べて CO2 を多く排出する。最も CO2 を排出した缶は缶の重量が 34g の 2 番目に重い缶であることがわかる。この理由としては、製造している缶の種類が異なるためである。缶の種類には二種類あり、ティンフリースチール缶とブリキ缶がある。ティンフリースチール缶では、1 kg製造するのに CO2 を 2.4kg 排出するのに対し、ブリキ缶では、1kg 製造するのに約 10kg の co2 を排出する。また、缶の蓋部分で使用しているアルミは 1kg 製造するのに 9.1kg の co2 を排出する。

5.5 プラスチックと紙の箱ひげ図

図 3 は、プラスチックと紙の容器包装の箱ひげ図である。プラスチックの平均値は 70.5g であり、紙の平均値は 33.6g であった。また、プラスチックの四分位範囲は 67.5g であり、紙の四分位範囲は 17.5g であった。プラスチックの容器包装は CO2 排出量が多いものから小さい容器包装まであることがわかり、紙の容器包装は CO2 排出量が小さい容器包装が多いことがわかる。全体的にプラスチックは紙よりも CO2 排出量は多く、容器包装を製造するさいの環境負荷は非常に大きいことがわかる。

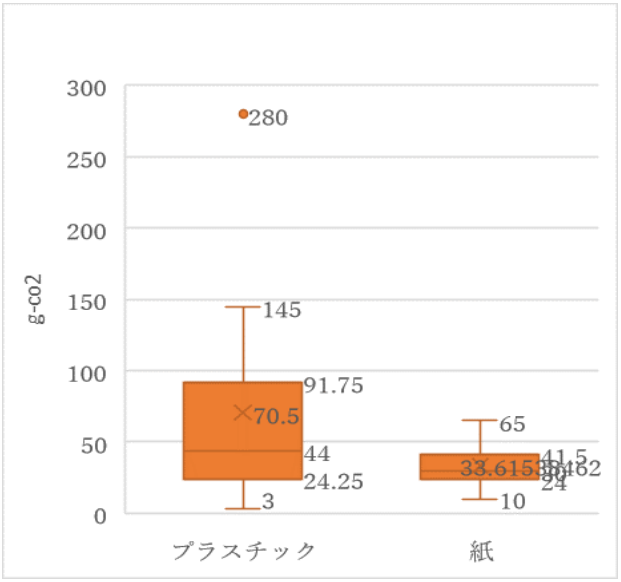


図 3 プラスチックと紙の箱ひげ図

6. まとめ・課題

容器包装の種類で最も CO2 を排出するのはプラスチックであることが分かった。しかし、再生を考慮しない場合では、缶類が最も CO2 を排出する。

また、CO2 排出量には容器包装の重さが非常に密接にかかわっていくことがわかった。容器包装の重さが重ければ重いほど CO2 排出量は多くなり、それは全ての容器包装に関係している。つまり、環境負荷の小さい容器包装を製造するためには、容器包装の軽量化が必要なものであり、今後は容器包装の軽量化を試みることが重要であると感じる。

今回の算定では、缶のサンプル数が非常に少なかった。サンプル数を増やし、精度の高い平均値をだして各容器包装の比較を行うことでより説得力のある結果を出せるように感じた。また、この結果をイベントにて展示を行い消費者の行動がどのように変わるかを見ていきたい。

7. 参考文献

1) 環境省,3R 容器包装リサイクル法の概要
2) ハウス食品株式会社,パッケージをつくるには
3) 三井化学東セロ株式会社,包装フィルム,2021
4) 間俊彦,白土猛康,鈴木一人,長谷川浩,山島隆志,中川善博,石井謙二,伊坪徳宏, 印刷工業会における紙製容器包装 LCI データの作成,日本 LCA 学会,2008

バイオ燃料と燃料電池を用いた大型トラックの環境影響評価

その２　燃料電池と軽油との比較

Life cycle assessment of heavy-duty trucks using bio-fuels and fuel cells Part 2 Comparison between fuel cells and diesel oil

○久地樂昌紀*1)、武田克彦 1)、佐野慶一郎 2)、河西純一 2)、大井康寛 3)、
八木田浩史 4)、佐々木彩音 5)、深井晶央 5)
Masanori Kujira, Katsuhiko Takeda, Keiichiro Sano, Yasuhiro Oi, Junichi Kasai,
Hiroshi Yagita, Ayane Sasaki, Akihisa Fukai
1)　関東学院大学大学院, 2) 関東学院大学, 3) 元関東学院大学
4) 日本工業大学　5) いすゞ自動車株式会社
* m21J1004@kanto-gakuin.ac.jp

1. はじめに

前報と同様にディーゼルトラック (Diesel Truck、以下、DE トラックと略記) の走行による環境負荷は大きく、今後、環境負荷の低いトラックの実用化が課題である。

本研究では、DE トラックと水素を燃料とする仮想燃料電池トラック (Fuel Cell Truck、以下、仮想 FC トラックと略記) の両ケースのシナリオを作り、大型トラックの製造と走行における総 CO_2 排出量を算出した。併せて、仮想 FC トラックの燃料電池にて用いる水素の製造方法を①天然ガスの改質、②二酸化炭素の回収、貯留 (Carbon dioxide Capture and Storage、以下、CCS と略記) を実施した場合での天然ガスの改質、③再生可能エネルギー由来の電力を使用した水電解として、総 CO_2 排出量を比較した。

2. LCA 手法

本研究における仮想 FC トラックの最大出力は、500kW (スタック最大出力) とし、平均燃費は、21km/kg-H_2 とし、その他は前報の DE トラックと同一と仮定した。本研究の LCA 評価範囲を図 1 に示す。なお、荷台の製造・輸送・組立は、本評価に入れていないが、完成車の走行時には荷台の重量も含まれている。

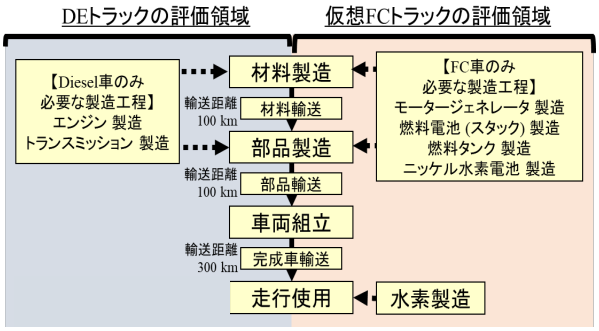


図１　DE トラックと仮想 FC トラックの評価範囲

図 2 は前述した仮想 FC トラックでの水素製造の 3 種のシナリオの評価範囲を示している。天然ガスの改質方法は水蒸気改質、精製方法は圧力スイング吸着法 (PSA, Pressure Swing Adsorption) とした。

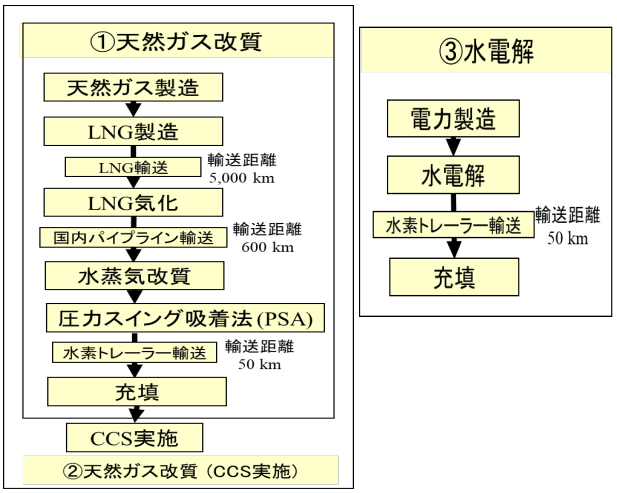


図 2 水素の製造による 3 つのシナリオの評価範囲

使用した水素 1kg と 1MJ 当たり製造の CO_2 排出係数を表 1 に示す。これら CO_2 排出係数は文献 [2)-4)] から引用した。

表 1　水素 1kg と 1MJ 当たり製造の CO_2 排出係数

水素製造方法	CO_2 排出原単位 (kg-CO_2/kg-H_2)	CO_2 排出原単位 (kg-CO_2/MJ)
①　天然ガス改質 (現状)	13.3 [1)]	0.11 [1)]
②　天然ガス改質 (CCS 実施)	6.42 [2)]	0.05 [2)]
③　水電解 (再生可能エネルギー由来電力を使用)	3.63 [3),4)]	0.03 [3),4)]

DE トラック及び仮想 FC トラックの製造と走行の総 CO_2 排出量は、各工程で投入される資源、エネルギー量に製造時の CO_2 排出係数[5]を乗じ、合算した。

3. LCA 結果及び考察

仮想 FC トラックの製造及び走行における総 CO_2 排出量を図 3 に示す。

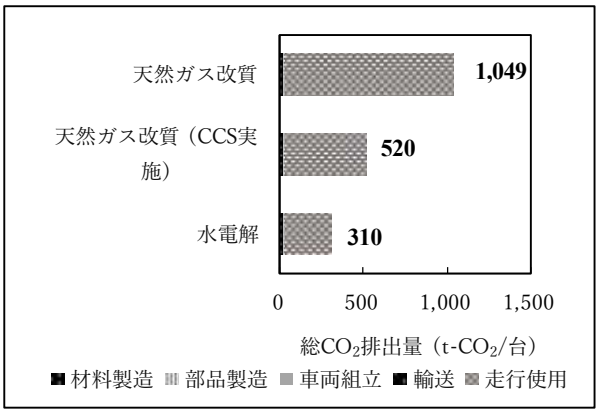


図3 仮想 FC トラックの製造と走行における総 CO_2 排出量

総 CO_2 排出量は、水電解が一番低い結果となった。これは、原料の製造工程が無いことと、水電解時に、再生可能エネルギー由来の電力を使用しているためと考えられる。CCS を実施した天然ガス改質の総 CO_2 排出量は、CCS を実施しなかった天然ガス改質よりも低い結果となった。これは CO_2 を地中に埋めることにより大気中に排出される CO_2 量が減少するためと考えられる。

前報のバイオディーゼルトラック (以下、BD トラックと略記する) の LCA 結果を基に、本報では、DE トラック、BD トラック、仮想 FC トラックの LCA 結果を表 2 に示す。総 CO_2 排出量は、軽油へのバイオ燃料 (Bio-fuel、以下、BF と略記) 添加率及び水素製造方法によって、大きく異なる結果となった。特に BF 添加率 100%は、BF 添加率 10%と比較し、69%の CO_2 排出量が削減される。

仮想 FC では、現状の天然ガス改質水素（製造）利用は、DE の軽油（製造と燃焼）利用より、総 CO_2 排出量が 25%ほど大きい計算値となった。天然ガス改質水素の製造時に CCS を行うことで、CO_2 排出量は、半分ほど減り、DE 軽油利用より、31%減る値となった。再生可能エネルギーを用いる水電解による水素製造では、CCS を実施しなかった天然ガス改質と比較し、70%以上の CO_2 排出量が削減される。

4. おわりに

大型トラックの製造及び走行における総 CO_2 排出量は、BF 添加率 100%による BD トラックが最も低値となった。次いで、再生可能エネルギーによる水電解水素を用いる仮想 FC トラックが低い結果となった。

表 2 大型トラック 3 車種の LCA 結果

工程	BD トラック CO_2 排出量 (kg-CO_2/台)	DE トラック CO_2 排出量 (kg-CO_2/台)	仮想 FC トラック CO_2 排出量 (kg-CO_2/台)
材料製造	19	19	24
部品製造	5.8	5.8	12
車両組立	0.13	0.13	0.13
輸 送	0.60	0.60	0.59
燃料製造	113 (BF 添加率 10%)	105	1,000 (天然ガス改質)
	147 (BF 添加率 50%)		483 (天然ガス改質+CCS 実施)
	189 (BF 添加率 100%)		273 (水電解)
燃料燃焼	0	649	0
合 計	687 (BF 添加率 10%)	780	1,049 (天然ガス改質)
	498 (BF 添加率 50%)		520 (天然ガス改質+CCS 実施)
	215 (BF 添加率 100%)		310 (水電解)

今後は、BF 添加率の向上と水素製造の環境負荷低減での進展が重要であると考える。

引用文献

1) トヨタ自動車株式会社、みずほ情報総研株式会社「輸送用燃料の Well To Wheel 評価」p.87
2) SCSK 株式会社「Ricardo Comparative WTT Analysis for Different Fuels」
3) みずほ情報総研株式会社「水素のライフサイクル温室効果ガス排出量評価について」
4) 国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター「カーボンフリー水素の経済性と CO_2 排出量（Vol.2）」
5) Sphera Solutions, Japan ㈱ LCA ソフトウェア GaBi

オープニング

[1-M1] オープニング

2022年3月2日(水) 09:00 〜 09:30 M会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-M1-01] オープニング

09:00 〜　09:30

©日本LCA学会

09:00 〜 09:30 (2022年3月2日(水) 09:00 〜 09:30 M会場)

[1-M1-01] オープニング

©日本LCA学会

基調講演

[1-M2] 基調講演

2022年3月2日(水) 13:20 〜 14:20 M会場 (zoom)

Zoomはこちら

[1-M2-01]「脱炭素社会の構築に向けた政府のグリーンイノベーション戦略の最近の動向」

田中 哲也 （経済産業省　大臣官房審議官（産業技術環境局担当））

13:20 〜　14:20

©日本LCA学会

学会賞受賞者講演、クロージング

[3-M] 学会賞受賞者講演、クロージング

2022年3月4日(金) 13:20 ～ 15:40 M会場 (zoom)

Zoomはこちら

[3-M-01] 日本 LCA学会賞表彰式

司会/座長 橋本征二 先生

プレゼンター 本藤祐樹 会長

13:20 ～ 13:40

[3-M-02] 受賞者講演① 【奨励賞】持続可能な食料システムを目指したライフサイクル評価

*吉川 直樹[1] （1. 立命館大学）

13:40 ～ 13:55

[3-M-03] 受賞者講演② 【論文賞】リマニュファクチャリング技術の適用による鉱山機械部品の LCA事例研究

*金澤 智尚[1] （1. 日立建機株式会社／千葉大学）

13:55 ～ 14:10

[3-M-04] 受賞者講演③ 【特別賞】 IT機器の欧州環境フットプリントへの取り組み

*並河 治[1] （1. (株)日立製作所）

14:10 ～ 14:25

[3-M-05] 受賞者講演④ 【功績賞】持続可能なリン資源管理に向けたライフサイクル思考の適用

*松八重 一代[1] （1. 東北大学）

14:25 ～ 14:40

[3-M-06] 受賞者講演⑤ 【功績賞】技術開発のための LCA

*福島 康裕[1] （1. 東北大学）

14:40 ～ 14:55

[3-M-07] クロージング

15:05 ～ 15:40

©日本LCA学会

13:20 〜 13:40 (2022年3月4日(金) 13:20 〜 15:40 M会場)

[3-M-01] 日本 LCA学会賞表彰式

司会/座長 橋本征二 先生

プレゼンター 本藤祐樹 会長

©日本LCA学会

持続可能な食料システムを目指したライフサイクル評価

Life Cycle Assessment Toward Sustainable Food System

○吉川直樹*[1)]
Naoki Yoshikawa
1) 立命館大学
* n-yoshik@fc.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

このたび栄誉ある「日本 LCA 学会　奨励賞」を受賞することとなった。業績題目は「食およびエネルギー分野におけるライフサイクル的思考の適用に関する研究」で、それが示すように、筆者は狭く深くというよりは広く浅く研究を展開してきたように思われる。そのなかでも最も力を入れてきたのが食の分野であると認識しているので、本稿ではそちらに絞ってこれまでの研究を紹介したい。

食料システムにおける温室効果ガス排出量は人為由来の排出の約 3 分の 1 を占めると推計され [1)]、食にまつわる環境負荷は人間活動の中でも大きなインパクトがある。食料システムをライフサイクルの観点からとらえると、土地利用改変（森林伐採等）、食料生産、食品加工、輸送、調理、廃棄などのプロセスを経るが、それらの環境負荷削減対策も、生産側の視点、消費者側の視点を含む様々な選択肢が考えられる。筆者は、持続可能な食料システムを実現するためには、ライフサイクル思考に基づいて環境負荷の排出実態を明らかにしたうえでその対策を評価・検討することが重要であると考え、研究を行ってきた。

2. 食材および農業技術の LCA

食料システムにおける環境負荷を評価するためには、農業などの食料生産プロセスを考慮することが不可欠である。筆者らは、これまで複数品目の食材のインベントリ―データを整備する研究や、環境保全型農業の LCA に取り組んできた。

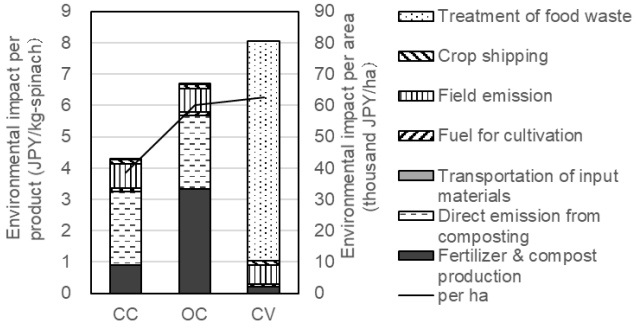
2.1 食材レベルのインベントリデータ整備 [2)]

研究当時（2005 年頃、筆者の修士研究）は食材に関する積み上げ型データベースが必ずしも十分でなかったことから、統計データ等に基づいて野菜・果物 24 品目を対象にインベントリデータを整備した。ここでは、農業生産段階のみならず消費地までの輸送や調理、非可食部の廃棄までを考慮してライフサイクル温室効果ガス(GHG)排出量を推計した。算定にはできるだけ季節別のデータを用い、その差異を明らかにするとともに、調理による栄養ロスを加味した環境効率（栄養素摂取量あたりのライフサイクル GHG 排出量）もあわせて検討・試算した。

2.2 環境保全型農業の LCA

生産プロセスに関わる環境負荷削減の手段の一つに有機栽培や特別栽培等の環境保全型農業がある。LCA によるこれらの農業技術の評価については複数の事例があるが、さらに知見の蓄積が必要な段階である。筆者らは、多様な環境保全型農業の効果を明らかにすべく、複数の事例に基づいて LCA のケーススタディを実施してきた。たとえば、水稲の特別栽培 [3)]、茶の自然栽培 [4)]、食品リサイクル堆肥による有機ホウレンソウ栽培 [5)]などである。

有機ホウレンソウ栽培の事例においては、地域での資源循環を念頭に、食品リサイクル工程、廃棄物処理工程、さらに農作業の慣行栽培との違いを明示的に考慮して環境負荷の削減効果と経済波及効果を評価した（図 1）。有機性廃棄物の堆肥化においては化学肥料との代替効果を前提に評価がなされることが多いが、堆肥のもたらす機能は単なる栄養成分の供給にとどまらないことから、これらの機能を適切に評価する手法が今後必要であろう。



※CC：大規模堆肥化、OC：オンサイト堆肥化、CV：焼却

図 1　廃棄物処理−農業生産システムの環境影響

3. 食料消費および食料システムへのライフサイクル思考の適用

持続可能な食料システムについて考えるには、食料生産レベルや食材レベルの検討も重要であるが、同時に消費者行動レベル、あるいは食料消費全体のマクロ的な評価も必要である。筆者らは、主に日本の食料消費や家計行動を対象に分析を行ってきた。

3.1 食料システムにおける環境負荷の評価

2.1 節で紹介した食材レベルのインベントリデータをもとに日本の青果物消費における環境負荷を推計したうえで、消費者が関係しうる複数の環境負荷削減策（地産地消・旬産旬消など）における GHG 削減ポテンシャルを推計した[6]。GHG 排出量の大幅な削減を図るには単一の対策では不十分であり、複数の対策を組み合わせることではじめて実現可能であることを示した（図 2）。

GHG 排出量以外に関わる研究では、農業による寄与が大きい水資源に着目し、水資源消費の概念を加えた新たなエコロジカル・フットプリント指標による日本の食料消費の評価[7]、また世界を対象として食料貿易を考慮した淡水資源需給バランスの評価[8][9]も行っている。

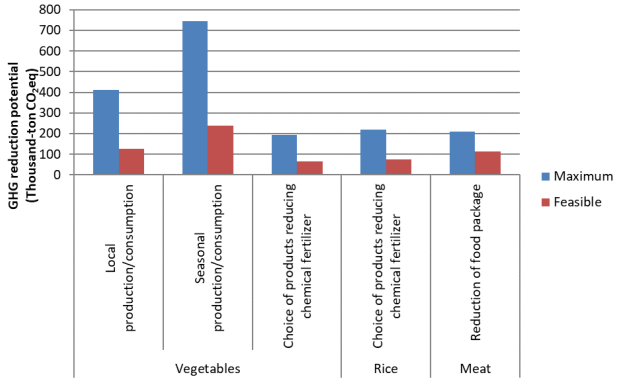


図 2　青果物消費における GHG 削減ポテンシャル

3.2 食料消費を含む家計行動の環境負荷分析

食料消費の構成（すなわち「何を食べるか」）が食料システムの環境負荷を決定する主因であるとの認識のもと、消費者（家計）行動に伴う環境負荷の分析にも取り組んでいる。食料消費は長期的には世帯構成や年齢構成の変動による影響を受けるため、それらの要因を加味した評価に取り組んだ。

1990 年から 2000 年までの日本における食料消費に伴う二酸化炭素排出量を推計したうえで、この期間の環境負荷の変化要因を要因分解により明らかにした[10]。外食由来の環境負荷の増加は世帯構造の変化と環境負荷原単位の変化が、総菜・弁当など中食由来の環境負荷の増加は世帯構成に依存しない支出構造の経年的変化が影響していることが明らかになっている（図 3）。一方で、食生活の転換に伴う食以外の消費へのリバウンドを捉えるには、食料消費を含む家計消費全般を対象とした分析[11]も必要になるであろう。

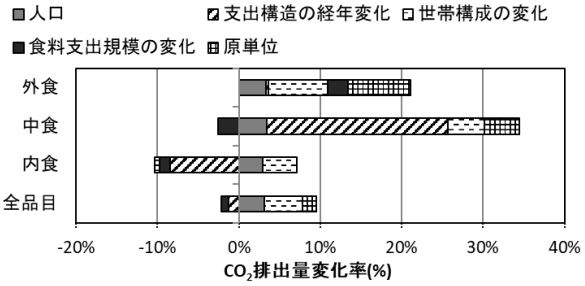


図 3　食料消費に伴うライフサイクル GHG 排出量の変化要因（1990 年～2000 年）

4. おわりに

筆者は食料システムにおける環境負荷とその削減について幅広く研究に取り組んできた。一方で、得られた知見が体系化されているとはいいがたい。今後は各トピックについて研究の深化を目指すとともに、ライクサイクル思考に基づいて個別の食料生産技術から消費のレベルまでを統合した評価分析手法の構築に取り組み、持続可能な食料システムを目指した意思決定に貢献したい。

謝辞

本学会賞に推薦いただいた先生方、ならびに筆者の研究活動にご協力、ご指導ご鞭撻をいただいた全ての皆様に深く御礼申し上げます。

引用文献

1) Tubiello, FN et al.: Environ. Res. Lett, 16, (2021), 065007
2) 吉川直樹，天野耕二，島田幸司: 環境システム研究論文集， 35 ， (2007) ， pp 499-509
3) 椛島裕美枝，吉川直樹: 日本 LCA 学会誌，6 ，(2010) ， pp 229-233
4) 吉川直樹，伊川健一，辻航己，降簱駿汰，天野耕二: 第 14 回日本LCA学会研究発表会講演要旨集，(2019) ， pp 160 -161
5) Naoki Yoshikawa，Tomoya Matsuda，Koji Amano: Int. J. LCA, 26, (2021), pp 963-97
6) Naoki Yoshikawa，Natsumi Fujiwara，Junko Nagata，Koji Amano: Applied Energy, 162, (2016), pp 1564-1570
7) 吉川直樹，押川由希，天野耕二，島田幸司: 環境システム研究論文集， 38 ，(2010) ，pp 213-220
8) Yohei Yamaguchi，Naoki Yoshikawa，Koji Amano，Seiji Hashimoto: Sustainability， 13 (14) ，(2021) ，7586
9) 山口陽平，田村賢人，吉川直樹，天野耕二，橋本 征二: 日本 LCA 学会誌，14 ，(2018) ，pp 21-35
10) 吉川直樹，天野耕二，島田幸司: 環境情報科学　学術研究論文集, 25，(2011) ，pp 125-130
11) 吉川直樹，天野耕二，島田幸司: 日本 LCA 学会誌 5 ，(2009) ，pp 252-261

リマニュファクチャリング技術の適用による鉱山機械部品の LCA 事例研究

LCA Case Study by Applying Remanufacturing Technology for Mining Machinery Parts

○金澤智尚*[1), 3)]、松本光崇[2)]、吉本光宏[1)]、菅原道雄[1)]、吉村彰大[3)]、松野泰也[3)]

Tomohisa Kanazawa, Mitsutaka Matsumoto, Mitsuhiro Yoshimoto,

Michio Sugawara, Akihiro Yoshimura, Yasunari Matsuno

1) 日立建機(株), 2) 産業技術総合研究所, 3) 千葉大学

* t.kanazawa.zn@hitachi-kenki.com

1. 緒言

持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals, SDGs）の達成に向けた取り組みとともに循環経済に根ざした取り組みが世界的な課題となっている[1)]。我が国では 3R を環境施策の主な一つとし推進しているが、広くはリユースに分類されるリマニュファクチャリング（再生）は、サブパーツの再利用による省資源化と高い経済性を持つことから、経済と環境の両立を可能とする手段の一つとして注目を集めている。

近年、再生分野は、米国で約 5 兆円（2011 年）、欧州で約 4 兆円（2015 年）もの市場規模があり、産業界への経済的影響も大きく、雇用創出の機会も増えることが示唆されている[2,3)]。また再生市場の規模として、約 16%と比較的大きな割合を占める建設・鉱山機械は、都市や資源採掘において必要不可欠な設備である。特に、鉱山機械の場合は、ほぼ 365 日休みなく稼働しているため、定期的なオーバーホールが必要となり、その際の休車時間ならびに部品のメンテンスコスト低減に再生品が大きく寄与している[4,5)]。

一方、建設・鉱山機械に関する再生をテーマをとした環境性評価の既存研究は、少ないのが現状である。Jun らの研究では、建設機械の油圧シリンダなどの各内訳部品の重量や材質のデータを基に素材の特性化係数等を掛け合わせて LCA を試算した例や、建設機械本体の重量から素材の特性化係数を掛け合わせた LCA の研究例があるが、加工や熱処理といった下流工程を含めた詳細な LCA の検証には至っていない[6,7)]。

以上より本研究では、再生品の需要が高く環境負荷の影響が高いと見込まれる鉱山機械部品を対象に、製造段階や再生段階での詳細な実データおよび発電手法の違いなどの地域毎に変動するパラメータも加味した上で環境性評価を行った。本研究では、鉱山機械部品の地球温暖化ポテンシャル（Global warming potential, GWP）および資源消費を評価対象とした。特に、歯車部品のリマニュファクチャリング技術を開発したことによる、環境影響を定量的に評価し、その有用性を確かめることを目的としている[8)]。

2. 評価手法

2.1 目的と評価範囲の設定

本研究の評価対象は、高額かつスクラップ率の高い歯車部品とした。対象機体は、日立建機（株）製の EX2600 シリーズを選定した。本機体には 2 個の旋回減速機と 2 個の走行減速機を有している。各減速機の構成図を図 1 に示す。更に、表 1 にはこれらの部品に用いられている歯車部品の点数および一個当たりの重量、材質を示す。

評価対象の歯車部品は、各減速機に組み込まれ、モータからの動力を減速することにより、トルクへ変換する機能を有する。機能単位は、鉱山機械の寿命（稼働時間）とした。鉱山機械は、納車から廃棄まで概ね 60,000 hr であるため、60,000 hr までに部品が複数回使用されることを条件とした。一方で、各減速機の寿命は、共に約 20,000 hr/1 サイクルである。よって鉱山機械のライフサイクルにおける減速機の交換回数は、2 回を前提とした。評価パターンは、以下の 3 ケースを設定した。ケース 1 では、全サイクルにおいて新品部品にて対応する。ケース 2 では、2 サイクル目以降に、再生品を用いるとし（歯車の再利用率 30%）、ケース 3 では、2 サイクル目以降に、再生技術が適用された再生品を用いる事とした（歯車の再利用率 65%）。

本評価におけるシステム境界は、素材の製錬から、鍛造、熱処理および浸炭、機械加工を経て歯車部品が製造されるまでの工程、歯車部品の輸送、歯車部品を減速機に組付け後、試験、塗装を経て減速機部品を製造するまでの工程、および廃棄工程である。

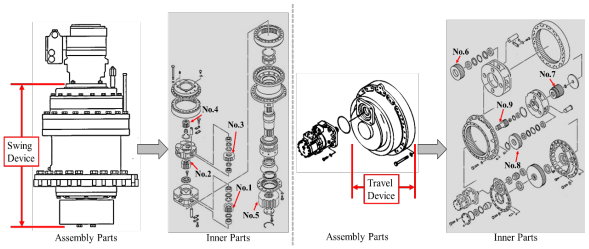


図 1 旋回減速機(左),走行減速機(右)の構成部品

表 1 旋回・走行減速機の対象とした歯車部品

No.	Swing device	pcs / Assy	Weight [kg / 1 pcs of gear]	Material
1	Gear1	4	14	Special Steel
2	Gear2	1	28	
3	Gear3	3	146	
4	Gear4	1	9	
5	Gear5	1	146	

No.	Travel device	pcs / Assy	Weight [kg / 1 pcs of gear]	Material
6	Gear6	4	58	Special Steel
7	Gear7	1	85	
8	Gear8	3	48	
9	Gear9	1	27	

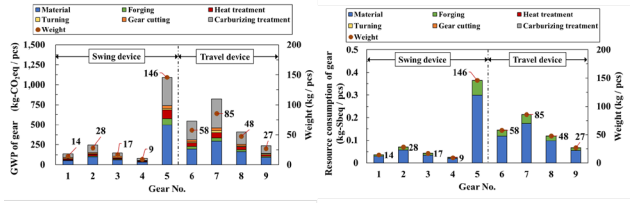
2.2 インベントリ分析

インベントリ分析では、歯車製造および再生工程に必要な原材料および排出されるエネルギーなどのバックグラウンドデータに関して、IDEA Ver 2.02 を用いた [9]。フォアグラウンドデータは、各業者および製造工程での調査を行い、環境負荷項目に関するリストを作成した。GWP の特性化係数には、IPCC2013 の 100a データを用い [10]、資源消費に関しては、LIME2 のデータを使用した [11]。

3. 結果

3.1 部材および歯車製造工程の環境影響評価

各歯車の部材から歯車製造までの工程における GWP と資源消費の試算結果を図 2(a),(b)に示す。図 2(a)の GWP の結果では、製錬工程が全体の 4 割を占めていた。一方で、図 2(b)の資源消費については、製錬工程で概ね 8 割となり、残りの 2 割を鍛造工程が占めていた。本結果より、特殊鋼製造に要する資源消費の影響が大きいことが示された。また最も環境負荷の大きい No.5 の歯車は、GPW で総計 1,060 kg-CO_2 eq/pcs となり、資源消費に関しては、総計 0.36 kg Sb-eq/pcs となった。



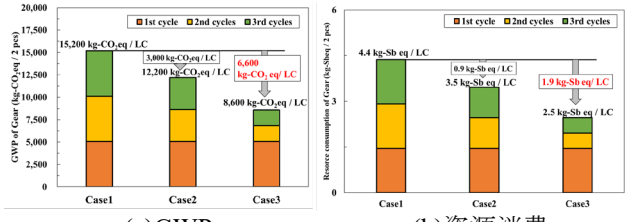
(a)GWP　　(b)資源消費

図 2 歯車製造工程における GWP および資源消費

3.2 総合評価

図 4(a),(b)は、鉱山機械の納車から廃棄までの全ライフサイクル当たりの GWP ならびに資源消費を機体に搭載されている旋回減速機の個数分（2 個当たり）で試算した結果である。

図 3(a)では、ケース 1 で 15,200 kg-CO_2 eq / LC に対し、ケース 2 で 12,200 kg-CO_2 eq / LC、ケース 3 で 8,600 kg-CO_2 eq / LC と最大 6,600 kg-CO_2 eq / LC の低減が見込まれる。資源消費に関しては、図 3（b）より、ケース 1 で 4.4 kg Sb-eq/LC ならびにケース 2 で 3.5 kg Sb-eq/LC、ケース 3 で 2.5 kg Sb-eq/LC の排出がそれぞれ想定され、最大 1.9 kg Sb-eq/LC の低減が予想される。



(a)GWP　　(b)資源消費

図 3 一機体あたりの旋回減速機の歯車に関するライフサイクル GWP と資源消費

4. 結言

機体一台当たり（旋回、走行減速機）のライフサイクル全体での環境負荷について、全サイクルで新品を使用したケース 1 に対し、再生品（再生技術を適用）にて運用するケース 3 では、GWP で約 20 ton-CO_2 eq / LC、資源消費で約 5.4 kg Sb-eq / LC の低減効果が見込まれることが示唆された。これは、再生技術の適用により、部品の再利用率が向上し、スクラップ量の低減に繋がり、素材の製錬や熱処理といった環境負荷の大きな工程を省くことが可能となるためである。

既存研究では、本研究の様な再生技術の適用を含めた環境影響までを詳細に定量評価した研究は見受けられない。一方で本研究の課題としては、評価対象が歯車部品と限定的であったため、評価対象の部品を更に広げ、鉱山機械全体の LCA や稼働状態も加味した検討を行うことも必要である。

引用文献

1) UNEP-IRP (2018): Re-defining value - The manufacturing revolution: Remanufacturing, refurbishment, repair and direct reuse in the circular economy, 41-50
2) Nasr N., (2019): Remanufacturing in the circular economy, Scrivener Publishing, MA, 9, 88-90
3) United States International Trade Commission (USITC) (2012): Remanufactured Goods: An overview of the US and Global Industries, Markets, and Trade, (332-525), 2-1 – 2-11
4) Weetman C., (2017): A Circular Economy Handbook for Business and Supply Chains, Kogan Page Limited, London, 310-312
5) 酒井忠雄 (1999): 精密工学会誌, 65 (3), 373-376
6) Jun Y., Kang H., Jo H., Baek C., Kim Y. (2019): Procedia Manufacturing, 33, 288-295
7) Jun Y., Jo H., Kim Y., Kang H., Hwang Y., Kim Y. (2020): Procedia Manufacturing, 43, 620-626
8) 金澤智尚, 吉本光宏, 畑典仁, 早川正夫, 目黒奨, 廣戸孝信, 松下能孝 (2019): 歯車の再利用可否判定方法および歯車の再利用可否判定システム, 特願 2019-233454
9) IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis), IDEA Ver 2.02(online), 入手先＜http://idea-lca.com＞, (参照 2019-11-5)
10) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Forth Assessment Report Climate Change 2007,(online),入手先 <https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/tssts-2-5.html#table-ts-2>, (参照 2020-6-1)
11) LIME (Life-cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling), LIME2 (online), 入手先,＜https://lca-forum.org/database/impact/＞, (参照 2020-12-08)

IT 機器の欧州環境フットプリントへの取り組み

Efforts to address the EU Environmental Footprint of IT Equipment

○並河治*[1)]
Osamu NAMIKAWA
1) (株)日立製作所
* osamu.namikawa.wk@hitachi.com

1. はじめに

2013 年 11 月から 2018 年 4 月の期間、欧州委員会・環境総局の取り纏めで行われた欧州環境フットプリントパイロットテストに技術事務局として参加し、IT 機器（ストレージ）を対象に製品別評価ルール（Product Environmental Footprint CategoryRule, PEFCR）を策定しました。欧州委員会からの厳しい要求の下、PEFCR を最終的に承認を受けて発行することに成功しました。これらの一連の活動をワークショップ等の活動を通し、国内関係者に情報共有すると共に欧州環境フットプリントへの関心を高めました。2018 年以降も、バッテリーパイロット経験者らとの電気電子コンソーシアムを組み、技術諮問委員会などへ参画するなど継続的に活動しました。それにより、2024 年から車載バッテリーのカーボンフットプリントの表示義務化、2027 年からは一定以上の製造時・廃棄時に CO2 排出のある蓄電池の市場へのアクセス制限に活用する、といった欧州委員会の政策に発展しております。

2. 欧州環境フットプリント

欧州環境フットプリントの背景と概要については SI を参照してください。

2.1 欧州環境フットプリントパイロットテスト

欧州委員会は環境フットプリントを欧州の政策策定に適用するため、製品区分、企業セクターごとに評価ルールを策定する活動を“パイロットテスト“と称し 2013 年に開始しました [1)]。欧州委員会はパイロットテスト事業の期間中は環境フットプリントと政策策定を関連付ける議論を禁止し、評価手法自体の技術論点の検討と開発に集中することを求めました。

欧州委員会により設定されたパイロットテストの位置付けを図 S2 に示します。

欧州委員会はパイロットテスト事業に参加する団体、企業を公募しました。表 S2 に製品の環境フットプリントに参加したパイロット [1)]を、表 S3 に組織の環境フットプリントに参加したパイロット [1)]を示します。

パイロットテスト事業の中では欧州委員会は各パイロットに対して評価ルールの開発、代表的モデルの策定、コミュニケーション方法の提案の三つを求めました。それらの内容については SI を参照してください。

欧州委員会により設定されたパイロットテスト事業での PEFCR の策定手順を図 S3 に示します。

パイロットテスト事業の中で欧州委員会が一番強く求めたのは“あいまいさ”を取り除きより良い製品や企業を普及させることに評価手法が十分な科学的根拠に基づいていることです。そのために、LCA の ISO でも規定されている比較主張(Comparative assertion)や比較(Comparison)を可能とする事です。

そのため欧州委員会は、比較主張をカテゴリごとの評価ルール(PEFCR, OEFSR)の策定、データソースやデータ精度の厳密な規定(Data Needs Matrix : DNM)、欧州委員会自身によるデータセットの提供、などを推進しました。

そうしたパイロットテストに日本の電機・電子業界から「IT 機器パイロット技術事務局」として参画をしました。背景としては、グローバル市場での環境性能情報開示ルールのデファクト化や、関連政策/制度適用での対応への懸念がありました。また、将来的な製品やサービスへの環境側面の付加価値付け、関連対応の模索もありました。

参加に際しては、企業が対応できるような実効的な製品の環境影響評価・情報開示方法を提案する事や、パイロット事業後の欧州委員会における将来の政策/制度適用の情報収集や対応の準備などを視野に入れる、さらには電機・電子業界内でも情報/課題等を共有するといった目的がありました。国内では、カーボンフットプリントやエコリーフプログラムに関連して、IT 機器分野の製品カテゴリールール開発に協力してきましたが、国際的ルール開発についてはチャレンジでした。

「IT 機器パイロット技術事務局」が対象とした製品カテゴリーは「IT equipment, Storage」です。

IT 機器評価（PEFCR 策定）の適用対象を図 S4 に示します。パイロット期間のスケジュールと取り組み実績を図 S5 に示します。

2.2 欧州環境フットプリントの政策移行期間

欧州委員会は 2018 年以降、政策移行期間(Transition Phase)として政策/制度への適用を検討しています。具体的には、IPP(Integrated product policy)/SCP(Sustainable Consumption and Production) action plan/ CE(Circular Economy) Package に基づいた検討を Circular Economy Tools and instruments として行い、分野別の 8 つのクラスタ（電気電子、化学、中間製品、アパレル・靴、小売り、建築、食品・飲料、エネルギー生産と伝送）が形成され各パイロット経験者も政策検討の場に参加しています。欧州委員会は政策を通して欧州の持続可能性を高めることを目ざしています。

LCA はライフサイクル全体を扱う包括的な評価手法であるため多くの評価要素や評価技術を必要としています。そのため、現時点ではある一定の制約条件のもとに活用されることも必要であると考えられます。その中には、LCA を適用する政策、その政策が対象とする製品、その製品に関わるステークホルダ、などが挙げられます。それらの活動の中では、受け手の文化や理解を含めたコミュニケーションを考えることも、政策適用の際には評価手法の科学的根拠の十分性と共に重要な要素であると考えられます。

図 S6 は現在欧州で実施されている規制がどの様なアプローチ [2)]で導入されているかを示します。

政策移行期間には PEFCR/OEFSR の更なる検討を欧州委員会・環境総局による運営で継続されます。そのための技術的な共通課題の検討は技術諮問委員会(Technical Tdvisor Board : TAB)が継続されます。その活動の中では、パイロット参加技術事務局等での自主開発への期待、コンサルタントの活用、各国・地域の既存/開発 PCR との連携等が模索されます。欧州委員会の環境総局は移行期間での新たなルール開発に関する検討にも着手します。

それらの活動は、2024 年から車載バッテリーのカーボンフットプリントの表示義務化、2027 年からは一定以上の製造時･廃棄時に CO2 排出のある蓄電池の市場へのアクセス制限に活用する、といった欧州委員会の政策に発展しております。

3. おわりに

今回は欧州環境フットプリントに IT 機器パイロットテスト技術事務局としての活動から得られた経験と情報を紹介しました。

欧州委員会は、欧州環境フットプリントパイロットテストを通して製品と組織（セクター）別の評価ルール（PEFCR/OEFSR）が策定しました。あわせて、データベース開発機関・事業者からの二次データを買い上げて環境フットプリント算定用の共通データセットも準備しました。環境フットプリントパイロットテストは 2018 年 4 月までで完了し､政策移行期間が始まり環境フットプリントの政策適用検討が開始されました。

そのような欧州環境フットプリントパイロットテストに技術事務局として参加し、国内では一連の活動をワークショップ等の活動を通し、関係者に情報共有すると共に欧州環境フットプリントへの関心を高めました。2018 年以降の政策移行期間も、バッテリーパイロット経験者らとの電気電子コンソーシアムを組み、技術諮問委員会などへ参画するなど継続的に活動しました。

LCA は製品やサービスの資源採取から廃棄までのすべてのライフサイクルからの環境影響を評価する手法であり、ライフサイクル全体を通したより環境負荷の少ない製品やサービスの開発に貢献しています。加えて、LCA の政策策定適用も試みられています。今後もますます多くの国や地域、製品に対し LCA の政策適用が求められ、進むと考えられます。それに向け、十分な科学的根拠に基づいた LCA 手法の開発が継続して求められます。

さいごに､欧州環境フットプリント IT 機器パイロットテスト技術事務局の活動を 4 年半にわたり継続し完了出来た事、およびその後の活動に対しサポートを頂いた多くの方々に感謝いたします。

引用文献

1) 欧州委員会 : 2013/179/EU: Commission Recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations Text with EEA relevance (2013)
2) http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013H0179

Supporting Information

この度は第 13 回日本 LCA 学会学会特別賞を頂きありがとうございました。

「IT 機器の欧州環境フットプリントへの取り組み」は、欧州委員会・環境総局の取り纏めで行われた欧州環境フットプリントパイロットテストに、「欧州環境フットプリント IT 機器パイロットテスト技術事務局」として参加したコンソーシアムとしての活動であり、メンバと所属(当時)は、(株)日立製作所：並河 治、熊澤孝明、日本電気(株)：中山憲幸、富士通(株)：篠村理子、在原 悟、(株)東芝：竹山典男 [S1)]、池田理夫 [S2)]、小林由典、(国研)産業技術総合研究所：田原聖隆、(一社)日本電機工業会：齋藤 潔、前田智佐子 [S3)]、(一社)産業環境管理協会：神崎昌之 [S4)]、山岸健 [S4)]、中野勝行 [S5)]、みずほ情報総研(株) （現：みずほリサーチ&テクノロジーズ（株)）：柴田昌彦、古島 康、内田裕之、在欧日系ビジネス協議会：中井章仁、佐々木晋哉、(*現所属：S1）（公財）地球環境センター、S2）AGC（株)、S3）三菱電機（株)、S4）（一社）サステナブル経営推進機構、S5）立命館大学）となります。

欧州環境フットプリントの背景

2011 年に欧州では、資源効率ロードマップ(Resource Efficiency Roadmap) [S6)]が策定され、2020 年に向けた資源効率の野心的マイルストーンを設定しました。資源効率ロードマップでは、市民や公的機関が資源効率の優れた製品を選ぶことにインセンティブを与えるために、適切で明確な環境情報の提供を目ざしています。欧州委員会は、現状では生産者と消費者の間には環境情報の提供において“あいまいさ”が存在すると考え、この“あいまいさ”を取り除くことを狙っています。

引き続き、2013 年にはグリーン製品のための単一市場(SMGP：Single Market for Green Products) [S7)]が策定されました。欧州委員会は、「製品と組織の環境性能に関するより良い情報を促進する、グリーン製品のための単一市場の構築」と題した勧告文書 [S8)]を発行し、欧州議会と欧州理事会へ伝達しました。そこでは、欧州各国および各企業に対し、製品の環境フットプリント(Product Environmental Footprint (PEF) Guide)と組織の環境フットプリント(Organisation Environmental Footprint (OEF) Guide)の 2 つの方法論の利用促進を提案しています [S9)]。

図 S1 にこれらの欧州環境活動 [S10)]を示します。

欧州環境フットプリントの概要

環境フットプリントは既存の LCA 手法に基づいていますが、つぎの二つの特徴があります。

一つ目の特徴として、より厳格なルールを導入すること、また、製品カテゴリごとにルールを定めることにより、そのカテゴリの中であれば異なる製品間の評価結果が比較可能であると考えていることが挙げられます。製品間の比較可能性により、消費者に対しグリーンな選択の促進を目ざしています。そのため、欧州委員会は環境フットプリントには、透明性を確保した比較可能性を追求し、情報開示による選択的購買の促進とあわせ、欧州各国への単一手法の導入によるコストの回避とビジネス機会の拡大をねらっています。

二つ目の特徴として、気候変動のみを環境影響領域として対象とするのではなく 16 の環境影響領域を対象とすることにより、例えば電気電子機器が使用時に消費する電力に加え素材製造時や廃棄リサイクル時の資源といった側面への取り組みを求めていることが挙げられます。

表 S1 に環境フットプリントの 16 の影響領域と評価手法 [S11)]を示します。

引用文献

S6) 欧州委員会 : Resource Efficiency Roadmap (2011)
S7) http://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/index_en.htm
S8) 欧州委員会 : Single Market for Green Products (2013)
S9) http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/
S10) 欧州委員会 : Building the Single Market for Green Products (2013)
S11) http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52013DC0196



図 S1　欧州環境活動

表 S1　環境フットプリントの 16 の影響領域と評価手法

Impact category	Indicator	Unit	Recommended default LCIA method	Robustness
Climate change	Radiative forcing as Global Warming Potential (GWP100)	kg $CO_{2\ eq}$	Baseline model of 100 years of the IPCC (based on IPCC 2013)	I
Ozone depletion	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg $CFC\text{-}11_{\ eq}$	Steady-state ODPs as in (WMO 1999)	I
Human toxicity, cancer*	Comparative Toxic Unit for humans (CTU_h)	CTUh	USEtox model (Rosenbaum et al, 2008)	III/interim
Human toxicity, non-cancer*	Comparative Toxic Unit for humans (CTU_h)	CTUh	USEtox model (Rosenbaum et al, 2008)	III/interim
Particulate matter	Impact on human health	disease incidence	PM method recomended by UNEP (UNEP 2016)	I
Ionising radiation, human health	Human exposure efficiency relative to U^{235}	kBq $U^{235}_{\ eq}$	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)	II
Photochemical ozone formation, human health	Tropospheric ozone concentration increase	kg $NMVOC_{\ eq}$	LOTOS-EUROS model (Van Zelm et al, 2008) as implemented in ReCiPe 2008	II
Acidification	Accumulated Exceedance (AE)	mol $H+_{\ eq}$	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, Terrestrial	Accumulated Exceedance (AE)	mol $N_{\ eq}$	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, Freshwater	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg $P_{\ eq}$	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Eutrophication, Marine	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg $N_{\ eq}$	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II

Ecotoxicity, freshwater*	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTU $_e$)	CTUe	USEtox model, (Rosenbaum et al, 2008)	III/interim
Land use	Soil quality index Biotic production Erosion resistance Mechanical filtration Groundwater replenishment	Dimensionless (pt) kg biotic production kg soil m^3 water m^3 groundwater	Soil quality index based on LANCA (Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016)	III
Water use	User deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m^3 world $_{eq}$	Available WAter REmaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Resource use, minerals and metals	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg Sb $_{eq}$	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002.	III
Resource use, fossils	Abiotic resource depletion – fossil fuels (ADP-fossil)	MJ	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002	III

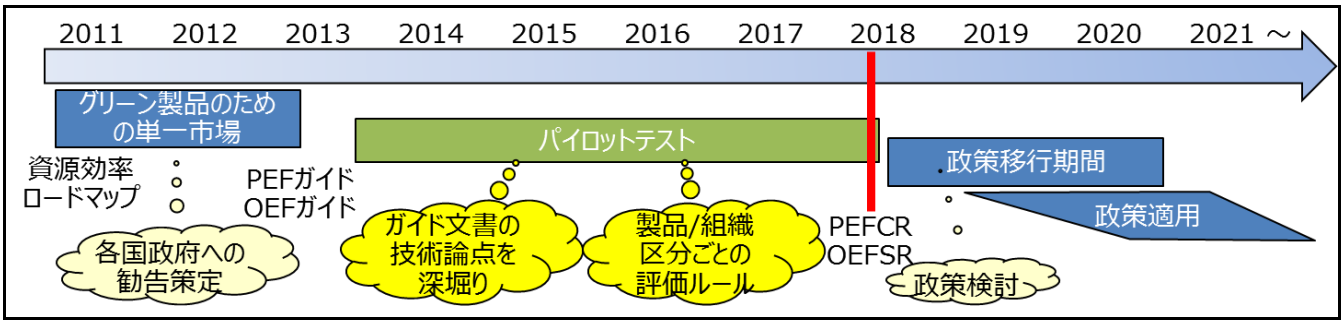


図 S2　パイロットテストの位置付け

表 S2　製品の環境フットプリントに参加したパイロット

製品（PEFCR）	
食品以外	食品
IT 機器（ストレージ）	ビール
UPS*	乳製品
太陽光発電パネル*	オリーブオイル*
二次電池	飲用水
塗料	パスタ
金属（鋼）板*	ワイン
靴（革製を除く）*	ペットフード
紙製中間製品*	家畜用飼料
建築用断熱材*	
冷温水供給パイプ*	
T シャツ*	
家庭用液体洗濯洗剤*	食肉（休止：アロケーション）
革製品	コーヒー（休止：サブカテゴリ）
文房具（休止：プロジェクトマネジメントの複雑さ）	海産魚（休止：二次データの不足）

表 S3　組織の環境フットプリントに参加したパイロット

組織（OEFSR）
小売業
銅製品製造業
家庭用衛星用品製造業（休止：参加者不足）

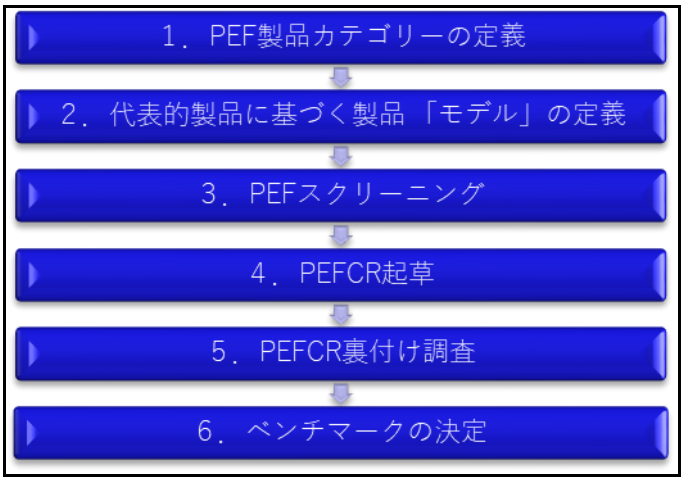


図 S3　　PEFCR の策定手順

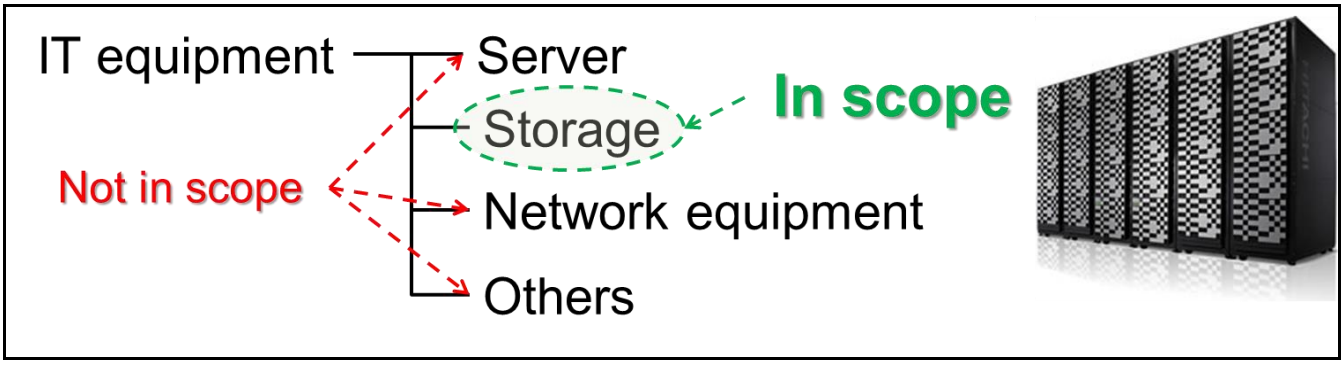


図 S4　　IT 機器評価（PEFCR 策定）の適用対象

パイロットテスト事業の中では欧州委員会は各パイロットに対して以下の開発を求めました。

一つ目に、製品区分ごとに評価ルール(Product Environmental Footprint Category Rule : PEFCR)、および、企業セクターごとに評価ルール(Organisation Environmental Footprint Sector Rule : OEFSR)の開発です。それにより同等な機能を満たす製品の比較、比較主張を可能にすること、および、再現可能性、整合性、関連性、および効率を向上させます。

二つ目に、製品区分および企業セクターごとに代表的モデル(Representatative Model)の策定です。これを欧州市場全体の仮想平均モデルとみなすことにより、例えばこのモデルよりも良い評価結果を持つ製品や企業を選択することを可能とします。

三つ目に、コミュニケーション方法の提案です。これには B2B(企業間取引)、B2C(企業対消費者間取引)の双方を意識し、ラベルを含むことが求められました。ただし、コミュニケーションに関しては最終的には評価方法論の利用目的によりコミュニケーション方法が異なり、政策とも関与すると欧州委員会が判断をし、パイロットテストの範囲から外されました。



図 S5　スケジュールと取り組み実績

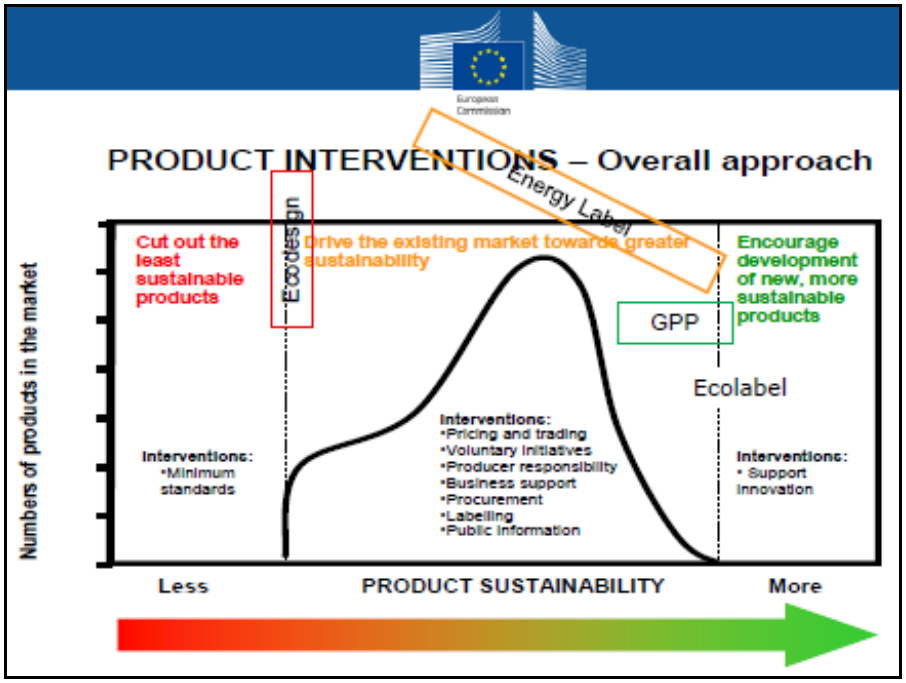


図 S6　既存の欧州環境政策アプローチ

14:25 ～ 14:40 (2022年3月4日(金) 13:20 ～ 15:40 M会場)

[3-M-05] 受賞者講演④ 【功績賞】持続可能なリン資源管理に向けたライフサイクル思考の適用

*松八重 一代[1] （1. 東北大学）

©日本LCA学会

技術開発のための LCA

LCA for Technology Development

○福島　康裕*[1)]
Yasuhiro Fukushima
1) 東北大学
* fuku@tohoku.ac.jp

1. はじめに

この度は栄えある功績賞をいただくことになった。一人では到底今日に至ることはなかったと思う。まず冒頭に、関係各位への感謝の意を示したい。

私はこれまで、エネルギー技術[1,7,12,13]、リサイクル技術[3,4,15]、環境保護技術[8]、食糧生産技術[6,11]、化学物質生産技術[2,10]、およびこれらの複合技術[5]のライフサイクル思考による評価と設計を行う中で、必要となる新たな手法、アプローチを提案してきた。研究成果は、LCA でシナリオ評価を行う方法の分類[14]、複数の技術の相互作用に着目したシナリオのモデル化手法[7,9,10,12,13]、LCA の結果を技術開発の目標設定や開発戦略の策定に用いるための演繹的（バックキャスティング的）手法[1,2,3,4,6,11]などを含む。今回の受賞は「ライフサイクル思考を導入したシナリオ分析による意思決定手法の体系化」という業績課題によるものであった。意思決定、システム設計、複雑なシステム的側面を考慮した意思決定を行うための実用的手法を体系化し、技術の社会実装を目指すプロセスをライフサイクル思考(LCT)で支援可能であることを示してきたことを評価していただいた。本講演では、これらを踏まえつつ、今後さらに探求を進めようと考えている技術開発における意思決定のための LCA について述べたい。

2. 意思決定と LCA

意思決定とは「最適な」選択肢を選んで決めることだという[16]。システムの俯瞰法のひとつである LCT を取り入れた意思決定ができれば、人間の活動と環境、資源、そして生物の健全さの関係を理解し、持続的で豊かなものにしていけそうだ。そもそも意思決定に役立つとはどういうことだろうか。意思決定の際には、何を選ぶかだけでなく、選択肢の作り方を含む、意思決定過程全般を良いものとする必要がある。良い意思決定をしても悪い結果になってしまうこともあれば、その逆もありうるのが意思決定である。であっても、良い意思決定を行い、「大きな想定外」をなくしていくことは大事である。また、良い意思決定過程を経ていれば、背景として想定した文脈や仮定、感度解析などを通じてシステムの理解が進んでおり、状況の変化があっても、素早く適切な対応をとることができる。

3. LCA が逆効果にならないために

LCA を取り入れることで、環境を改善し、資源利用を持続可能なものにし、人間と生態系の健全さを増すことを意図した、良い意思決定をしたいわけだが、どのような場合にそれが逆効果になるだろうか。

逆効果を産んでしまうパターンの一つは LCA に過度に時間がかかり、これによって意思決定のタイミングが遅れてしまう場合だ。実際には、もたもたしている間に大した役割を果たさずに従来通り意思決定が行われ、逆効果までは生まない。違いを出すためには、限られた情報と時間の中で選択肢のスクリーニングや感度解析を効果的に用いて、適切なレベルでの意思決定ができるかが鍵である。

もう一つの可能性はスコープの取り方を間違える（狭くとりすぎる）ことで、魅力的な選択肢を生成できないという弊害が生じうる。バイオエタノールを製造するのに、所与の品種、製糖プロセスがあり、そこからの廃糖蜜を前提にして最適な発酵手法などを選ばれてきた。そこに、品種改良や営農操作まで含めた選択肢を検討することで、根本的に生産性が高い選択肢を得ることができる。プラスチックリサイクルについても、特定の技術を基点としてシステム設計をすると、混合プラスチックから特定の樹脂を選別するプロセスまでは考えても、参照プロセス、評価プロセスともに、目的ではない方の選別されなかった樹脂のリサイクル方法まで含めた最適なリサイクル方法の組み合わせは考えず、全てのエネルギー回収が前提となることがある。これでは重要な選択肢（技術選択と選別パターン）が見過ごされてしまう可能性がある。選別方法とリサイクル技術の組み合わせを網羅的に探索してやることで、当該技術の特徴や必要な改善要求レベルを明らかにできる可能性がある。

また、不適切な仮定を置いてしまうことも、意思決定を混乱させる可能性がある。カーボンニュートラル(CN)な世の中を実現したいのに、現状の生産方法による温室効果ガス排出量を LCI データベースから引用して、これを指標として計算していては、現在における効率的な排出削減方法は議論できても、CN な社会でものづくりをするために必要な技術システムの開発指針は得られない。化石資源の不使用を制約条件とし、

CN な電力や水素の入手を前提としながらも、それらは非常に高価になり手に入りにくいことを想定し、省エネルギーで固定した炭素を省エネルギーで長く使うシステムの設計に寄与する指標を用いる必要がある。GWP 以外の影響項目が大事になってくる。

また、「カーボンニュートラルの達成は必須か」と考える方もいるだろう。CN の追求の挙句負け組になってしまわないために当然の疑問である。では、ニュートラルまでは行かないが化石資源を現時点ほど使わないというビジョンに基づいた設計指標とその適用方法を提示していく必要がある。要は、ありうる将来の極端な姿を複数描いて、その将来における技術が満たすべき制約条件と目的指標のもとに設計を進め、適切に感度解析をすることで、技術開発やその選択を行うことが肝要である。このように、ありうる将来の姿を見落とさないことも重要だ。

4. 未来社会を形作る技術の開発に貢献するために

現在行われる LCA では、機能単位をどう置くかが大事であり、その単位あたりの環境負荷を計算するのが一般的である。選択肢を作り、比較を行う際にも、機能単位が何かを明確にし、「公平な」比較を行うことが求められる。しかし、この公平性は計算の都合上の公平性で、わかりやすい結果を提示するための仕掛けにすぎない。これにはこれで今後も役割があることは確かだ。だが、本当に揃える必要があるのは、設計しようとする将来を規定するビジョン固有の制約条件や、物質収支やエネルギー収支などの物理的制約条件である。例えば、CN という将来に向けた設計を行うのであれば、化石資源は使えない、土地の面積には限りがある、使える水の量には限りがある、などの制約条件を揃え、その下で駆動される生産体系を評価する必要がある。例えば、バイオマスの LCA では農地面積をそろえ、生産物量は揃えない計算を行うことがあるが、これはその一例と考える。そのような評価事例を体系化し、将来のビジョンの達成を前提とした技術の評価と選択に資する手法やデータベースを提供していくような仕事ができないかと思案しているところである。

5. おわりに

初めにも述べた通り、研究はひとりではできず、学生時代も、その後海外（台湾）にいた期間も、そして帰国後これまでの７年間余も、仲間に多くを教わり、一緒に成果を積み上げてくることができた。以降も、本講演で挙げるような研究に一緒に取り組んでいただける方とはぜひご一緒したいし、この講演を受けて、いずれかの切り口で先んじて取り組まれる方がいても良いと思う。技術開発の場では LCA への期待は大きいが、担い手が圧倒的に不足している。近年の強い要請に応じ、ライフサイクル思考で持続可能な未来を実現するための取り組みを、一段と加速する一助になればと思い、たいへん僭越ながら背伸びをして講演させていただきたいと思っている。

また、技術開発だけでは持続可能な社会は実現できない。政策研究、消費の研究との実効性のある連動を目指したいし、これらを下支えする教育や、利害関係者たちとの共創の実践的取り組み、そしてこれらを担う次世代の人材の育成など、どれにも世界に先んじて、あるいは連携して共に取り組まねばならない。個別の力では研究環境の良い海外のチームに伍することが難しくても、学会を装置として活用し、連携の取り組みで勝負したい。そして技術のイノベーションの現場において LCA を専門家でなくても使えるツールとし、社会に役立てていければと思う。

6. 引用文献

1) Fukuda T., Fukushima Y., Chen I.-C., Ohno H.: J Chem Eng Japan, 54(11), (2021), pp. 593-602
2) Ohno H., Ikhlayel M., Tamura M., Nakao K., Suzuki K., Morita K., Kato Y., Tomishige K., Fukushima Y.: Green Chem, 23(1), (2021), pp.457-469
3) Lu J., Kumagai S., Fukushima Y., Ohno H., Kameda T., Saito Y., Yoshioka T.: Ind Eng Chem Res, 59(45), (2020), pp.20112-20122
4) Lu, J., Kumagai S., Ohno H., Kameda T, Saito Y., Yoshioka T., Fukushima Y: Resour Conserv Recycling, 151, (2019), 104500
5) 福島康裕, 中村遼太郎, 大野肇, 小原聡, 菊池康紀, 大内田弘太朗, 寺島義文, 服部太一朗, 杉本明: 日本 LCA 学会誌, 14(4), (2018), pp. 302-318［論文賞受賞］
6) Teah, H.Y., Fukushima, Y., Onuki, M.: Sustainability, 7(9), (2015), pp.12386-12401
7) Chen, I.-C., Kikuchi, Y., Fukushima Y., Sugiyama H., Hirao M: Environ Prog & Sustain Energ 2015, 34 (3), 832-840.
8) Fukushima Y., Tan Y. S.: J Clean Prod, 74, (2014), pp.172-182
9) Chen I.-C., Fukushima Y., Kikuchi Y., Hirao M.: Int J Life Cycle Assess, 17 (2), (2012), pp. 119-125
10) Chen I.-C., Fukushima Y., Kikuchi Y., Hirao M.: Int J Life Cycle Assess, 17 (3), (2012), pp.270-276
11) Fukushima Y., Chen S.-P.: Int J Life Cycle Assess 14(7), (2009), pp.639-655
12) Kuo Y.-M., Fukushima Y.: J Air and Waste Manag Assoc, 59(3), (2009), pp.360-372
13) Fukushima Y., Shimada M., Kraines S., Hirao M., Koyama M.: J Power Sources, 131(1-2), (2004), pp. 327-339
14) Fukushima Y., Hirao M.: , Int J Life Cycle Assess, 7(6), (2002), pp.317-329
15) 福島康裕, 平尾雅彦: 電気学会論文誌 C (電気・情報・システム部門誌), 118-C(9), (1998), 1250-1256
16) R. T. Clemen, Making Hard Decisions: An Introduction to Decision Analysis 2nd Edition, 1997.

15:05 〜 15:40 (2022年3月4日(金) 13:20 〜 15:40 M会場)

[3-M-07] クロージング

©日本LCA学会