第12回日本LCA学会研究発表会

講演要旨集

2017年3月1日(水)－3日(金)

つくば

産業技術総合研究所 つくばセンター

第 12 回日本 LCA 学会研究発表会開催案内

第 12 回日本 LCA 学会研究発表会ウェブサイトの URL
http://ilcaj.org/meeting/12th/index.html

主　　催：日本ＬＣＡ学会

共　　催：国立研究開発法人産業技術総合研究所

日　　時：2017 年 3 月 1 日（水）～ 3 月 3 日（金）

会　　場：産業技術総合研究所つくばセンター つくば中央 共用講堂（茨城県つくば市東 1-1-1）

最新の情報は、上記ウェブサイトをご覧ください。

発表形式：口頭発表およびポスター発表

口頭発表の発表時間は、1 件あたり 20 分（発表 12 分、質疑 7 分、発表者交代 1 分）です。口頭発表は、登壇者の PC を会場のプロジェクターに接続しての発表となります。発表者は各自 PC をご準備ください。詳細は、研究発表会ウェブサイトの「口頭発表」をご覧ください。

ポスターセッションは、P 会場（共用講堂 1 階ホワイエ）で開催いたします。ポスターの掲示は、ポスターセッション当日の 3 月 2 日（木）12:40 からポスターセッション開始時刻（15:40）までにお願いします。A0 サイズ（84 cm × 119 cm）のポスターが掲示できる十分なスペースを用意しています。詳細は、研究発表会ウェブサイトの「ポスター発表」をご覧ください。ポスターは、ポスターセッション当日の 18:00 までに発表者が回収して下さい。

口頭発表における注意事項：

・次の発表者は、前の講演が終わる前に講演者席に移り、PC をプロジェクターに接続して待機してください。
・発表関係者および実行委員会以外の方は、講演スライドの撮影をご遠慮ください。
・会場内静粛維持のため、CD-ROM 版要旨集は、あらかじめパソコンにコピーしてからお使いください。

ポスター発表のコアタイム制について：

2 時間のポスターセッション中、1 時間ずつのコアタイム（発表者が待機する時間帯）を設けています。発表する・聴講するポスターのコアタイムをご確認ください。コアタイムの振り分け方は下記の通りです。

・ポスター番号が奇数のポスターは、コアタイム A（15:40 ～ 16:40）です。
・ポスター番号が偶数のポスターは、コアタイム B（16:40 ～ 17:40）です。

それぞれのポスター番号は、プログラムおよびポスターボード上部の札でご確認ください。

発表者は、指定されたコアタイム中は必ずご自身のパネルの前で発表してください。学生優秀ポスター発表審査にエントリーしている方は、指定されたコアタイムに自分のポスター前で待機していない場合、表彰の対象外となりますのでご注意ください。また、自分のコアタイムには必ず目立つ所に名札を付けてください。

要旨集：会期前にウェブサイト上で Web 版講演要旨集を公開しています。また、有料の CD-ROM 版および印刷版講演要旨集を 2 月 3 日（金）までに申し込まれた方は、研究発表会期間中に受付でお受け取りください。

無線 LAN：会場内では、研究発表会参加者向けにビジター用無線 LAN サービスを提供しております。無線 LAN へのアクセスにより、Web 版講演要旨集が閲覧可能です。

交 流 会：研究発表会 2 日目のポスターセッション終了後の 3 月 2 日（木）18:00 から、厚生センター食堂にて交流会を開催します。本研究発表会に参加登録頂いた方については、交流会参加費は無料です。

学生優秀発表の表彰：学生会員による研究発表の中から、審査により優秀な発表を表彰します。表彰式は研究発表会のクロージングで実施します。会場は、A 会場（共用講堂 1 階講堂）です。なお、演題登録時に表彰審査にエントリーし、登録した登壇者が学生会員であり、各締切期日を守り、参加登録した学生が実際に登壇した発表を審査対象とします。審査の詳細は、研究発表会ウェブサイトの「学生優秀発表」をご覧下さい。

交通案内

●つくばエクスプレス つくば駅 A3 出入口前、「つくばバスターミナル 4 番のりば」より
・関東鉄道バス「荒川沖駅（西口）行（並木経由）」、「学園並木循環」、「桜ニュータウン行」または「学園南循環（右回り）」乗車→「並木二丁目」下車（所要時間約 10 分、270 円）

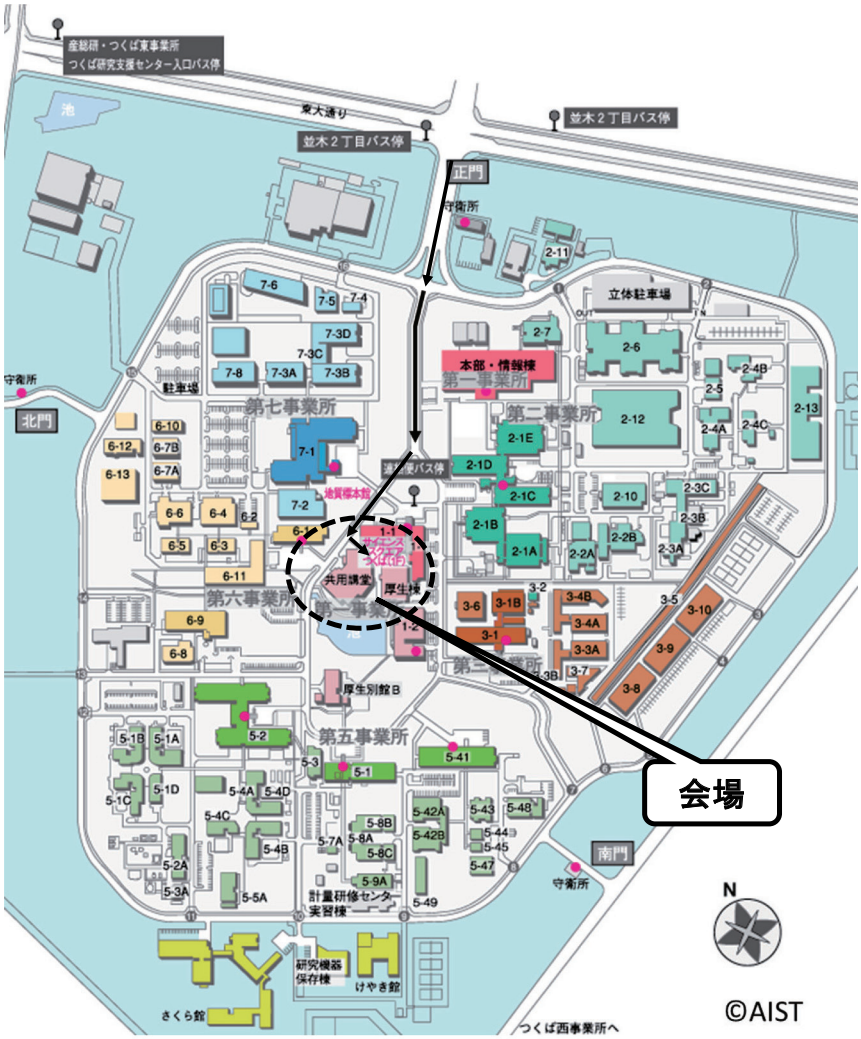
● JR 常磐線 荒川沖駅西口前、「西口 4 番のりば」より
・関東鉄道バス「筑波大学中央行」または「つくばセンター行（並木経由）」乗車→「並木二丁目」下車（所要時間約 15 分、280 円）

●東京駅八重洲南口前、「東京駅 JR 高速バスターミナル」より
・常磐高速バス（JR バス関東・関東鉄道）「つくば号（つくばセンター・筑波大学行）」乗車→「並木二丁目」下車（所要時間約 60 分、1,180 円）

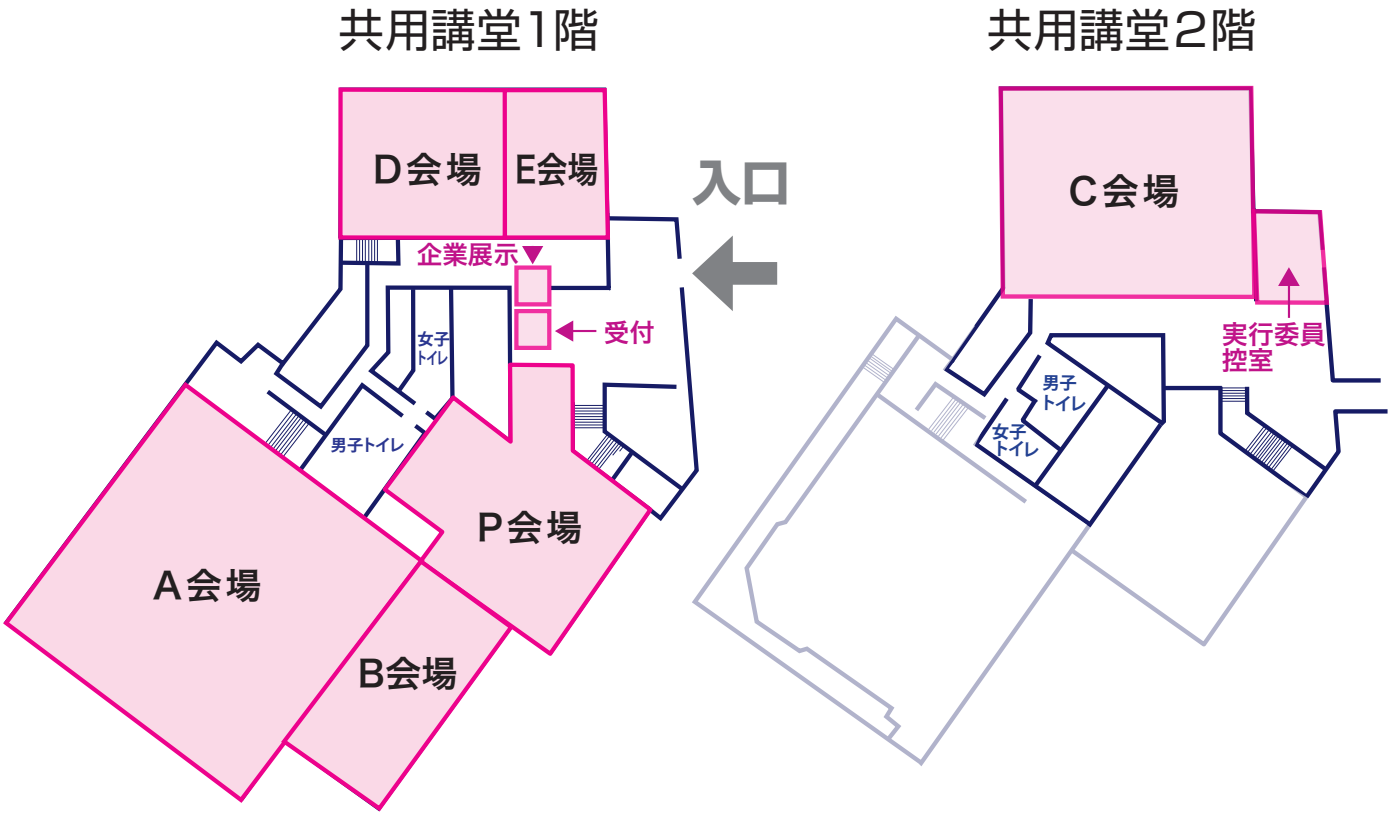
乗車時間は目安です。
詳細は、以下のウェブサイトを参照してください。
国立研究開発法人産業技術総合研究所 つくばセンター（つくば中央）
http://www.aist.go.jp/aist_j/guidemap/tsukuba/center/tsukuba_map_c.html

敷地案内マップ

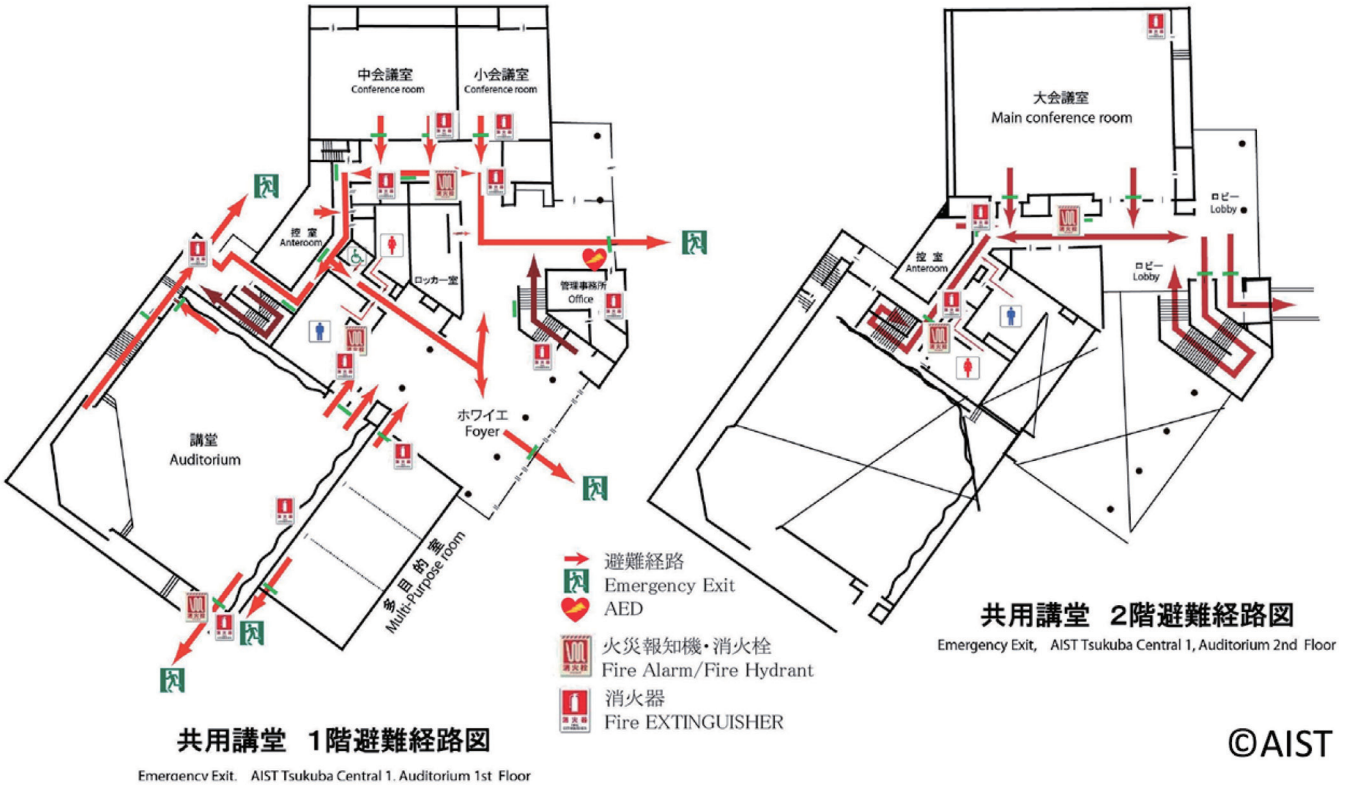
産業技術総合研究所つくばセンター
つくば中央 共用講堂
〒 305-8561 茨城県つくば市東 1-1-1
中央第 1



会場案内図



共用講堂避難経路図



第 12 回日本ＬＣＡ学会研究発表会　実行委員会名簿

実行委員長	産業技術総合研究所	田原 聖隆
副委員長	産業技術総合研究所	塚原 建一郎
副委員長	産業技術総合研究所	畑山 博樹
実行委員	東京大学	井原 智彦
	日本環境協会	大澤 亮
	農業・食品産業技術総合研究機構	荻野 暁史
	産業技術総合研究所	小澤 暁人
	神戸大学	尾下 優子
	ライオン	加藤 久仁子
	国立環境研究所	河井 紘輔
	東京大学	菊池 康紀
	プリプレス・センター /elsa	北村 祐介
	芝浦工業大学	栗島 英明
	産業技術総合研究所	玄地 裕
	福島大学	小井土 賢二
	早稲田大学	近藤 康之
	県立広島大学	小林 謙介
	富士通研究所	塩田 哲義
	産業環境管理協会	仲井 俊文
	横浜国立大学	稗貫 峻一
	立命館大学	吉川 直樹
事務局	株式会社シーエーティー	室井 るみの
	株式会社シーエーティー	清水 祐子
	株式会社シーエーティー	大竹 敬子
	株式会社シーエーティー	吉村 祐子
	株式会社シーエーティー	津田 祥子

第12回日本LCA学会研究発表会
プログラム タイムテーブル

1日目　3月1日(水)

	A会場	B会場	C会場	D会場	E会場
9:40-10:00	持続的な資源利用	再生可能エネルギー	コミュニケーション	製品LCA(1)	建築・住宅
10:00-10:20					
10:20-10:40					
10:40-11:00					
11:00-11:20	休憩				
11:20-11:40	交通	水素・燃料電池	食品廃棄物	廃棄物(1)	
11:40-12:00					
12:00-12:20					
12:20-13:20	昼休み				
	A会場				
13:20-14:20	基調講演				
14:20-14:40	移動				
14:40-15:00	資源リスク	気候変動の緩和策と適応策	バイオ燃料	廃棄物(2)	自動車
15:00-15:20					
15:20-15:40					
15:40-16:00					
16:00-16:20					
16:20-16:40	休憩				
16:40-17:00	鉄鋼	水	データベース	災害	食と一次産業(1)
17:00-17:20					
17:20-17:40					
17:40-18:00					

2日目　3月2日(木)

	A会場	B会場	C会場	D会場	E会場
9:40-10:00	SDGs	素材の利用効率	特別セッション：ホットスポット分析(1)	消費者(1)	木材
10:00-10:20					
10:20-10:40					
10:40-11:00					
11:00-11:20	休憩				
11:20-11:40	特別セッション：環境教育(1) 環境配慮行動	食と一次産業(2)	特別セッション：ホットスポット分析(2)	消費者(2)	エネルギーシステム
11:40-12:00					
12:00-12:20					
12:20-12:40					
12:40-13:40	昼休み				
13:40-14:00	特別セッション：環境教育(2) 学校	食と一次産業(3)	LCTの地域への実装	人間健康	国際貿易
14:00-14:20					
14:20-14:40					
14:40-15:00					
15:00-15:20					
15:20-15:40	休憩				
	P会場				
15:40-16:40	ポスターセッション1　*コアタイムA:奇数番号				
16:40-17:40	ポスターセッション2　*コアタイムB:偶数番号				
17:40-18:00	移動				
18:00-	交流会(厚生棟1F　厚生センター食堂)				

3日目　3月3日(金)

	A会場	B会場	C会場	D会場	E会場
9:40-10:00	バイオマス(1)	パリ協定	特別セッション：組織のLCAと削減貢献量評価(1) 素材・部品・プロセスの貢献	製品LCA(2)	
10:00-10:20					ストック・フロー(1)
10:20-10:40					
10:40-11:00					
11:00-11:20	休憩				
11:20-11:40	バイオマス(2)	生物多様性	特別セッション：組織のLCAと削減貢献量評価(2) 製品・サービスの貢献	廃棄物(3)	ストック・フロー(2)
11:40-12:00					
12:00-12:20					
12:20-12:40					
12:40-13:40	昼休み				
	A会場				
13:40-15:05	学会各賞受賞記念講演				
15:05-16:00	クロージング				

全体セッション プログラム

1日目(3月1日(水))

A 会 場

13:20-14:20	**【基調講演】** **プラチナ構想からみたライフサイクル思考への提言** …… 小宮山宏氏（三菱総合研究所，プラチナ構想ネットワーク）	ii

3日目(3月3日(金))

A 会 場

13:40-13:55 **奨励賞**	**意思決定支援を指向したライフサイクルアセスメントと多様な手法の統合手法の研究** …… 中谷隼（東京大学）	446
13:55-14:10 **論文賞**	**家庭用太陽熱給湯器のエネルギー収支とライフサイクル CO_2 排出量** …… 門倉宏子（横浜国立大学）、本藤祐樹（横浜国立大学）	448
14:10-14:25 **論文賞**	**太陽光発電システムへの心理的近接性が省エネルギー意識・行動に及ぼす影響** …… 藤本ひかり（横浜国立大学）、本藤祐樹（横浜国立大学）、弘中雄介（横浜国立大学）	457
14:25-14:45 **功績賞**	**交通分野へのライフサイクル思考の適用** …… 加藤博和（名古屋大学）	470
14:45-15:05 **功労賞**	**LCA の国内基盤構築と国際的地位確立への貢献** 稲葉敦（工学院大学）	
15:05-16:00	**クロージング**	

パラレルセッション プログラム

1日目（3月1日(水)）

◎は登壇者

9:40 ～ 11:00

◆ A 会場 ＜持続的な資源利用＞

座長：**橋本征二（立命館大学）**

9:40-10:00 **A1-01**	**循環型社会、Circular Economy の先に見えるもの** ◎原田幸明（物材機構）	2
10:00-10:20 **A1-02**	**希少金属の需要の増大と社会的持続可能性との関係の評価** ◎塚本尚（京都大学），南斉規介（国立環境研究所），東野達（京都大学）	4
10:20-10:40 **A1-03** *(P2-066)*	**インジウムの需給バランスから見た太陽光パネルリサイクルの意義** ◎高柳達（立命館大学），中島謙一（国立環境研究所），村上進亮（東京大学），橋本征二（立命館大学）	6
10:40-11:00 **A1-04** *(P2-076)*	**半導体産業に着目した窒素のマテリアルフロー分析** ◎片桐究（東北大学），松八重一代（東北大学），竹田修（東北大学），朱鴻民（東北大学），長坂徹也（東北大学）	8

◆ B 会場 ＜再生可能エネルギー＞

座長：**森泉由恵（横浜国立大学）**

9:40-10:00 **B1-01**	**離島における海洋温度差発電（OTEC）の効果と影響** ◎小野奈都美（沖縄エネテック），池上康之（佐賀大学），岡村盡（ゼネシス），中村幸雄（久米島町），伊藝聡（沖縄エネテック），伊佐真賢（沖縄エネテック），田原聖隆（産業技術総合研究所）	10
10:00-10:20 **B1-02**	**LCA 手法に基づくメキシコ・テワンテペク地峡における風力発電の環境影響・コストの統合指標による解析** ◎幸村仁麿（京都大学），東野進（京都大学）	12
10:20-10:40 **B1-03** *(P2-053)*	**地域単位での地中熱ヒートポンプのライフサイクル CO_2 削減効果** ◎早乙女裕紀（横浜国立大学），本藤祐樹（横浜国立大学），森泉由恵（横浜国立大学）	14
10:40-11:00 **B1-04**	**太陽熱利用システムの基礎自治体別 CO_2 削減コスト** ◎清水恭亮（横浜国立大学），本藤祐樹（横浜国立大学），森泉由恵（横浜国立大学）	16

◆ C 会場 ＜コミュニケーション＞

座長：**文多美（東京大学）**

9:40-10:00 **C1-01** *(P2-030)*	**消費者の環境配慮製品選択を促す情報表示の設計** ◎石川奈那（東京大学），文多美（東京大学），平尾雅彦（東京大学）	18
10:00-10:20 **C1-02**	**食料品の購買による CO_2 排出量の傾向と削減策に関する一考察** ◎中島寛則（名古屋市環境科学調査センター）	20
10:20-10:40 **C1-03**	**新たな食品表示制度下における環境コミュニケーションの提案** ◎藤原なつみ（立命館大学），吉川直樹（立命館大学）	22
10:40-11:00 **C1-04**	**食意識・環境意識が消費者のライフサイクル環境情報に対する評価に与える影響** ◎吉川直樹（立命館大学），天野耕二（立命館大学）	24

◆ D 会場 ＜製品 LCA(1)＞

座長：**菊池康紀（東京大学）**

9:40-10:00 **D1-01** *(P2-041)*	**森林保全を考慮したピアノの環境影響評価** ◎渡邊杜人（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	26
10:00-10:20 **D1-02** *(P2-040)*	**電子書籍端末による読書習慣と満足度の変化を考慮した、読書における環境影響評価** ◎天沢逸里（東京大学），井原智彦（東京大学），花木啓祐（東京大学）	28

10:20-10:40
D1-03
(P2-024)
UV 印刷を対象とした環境影響評価 …… 30
◎川島雄介（東京都市大学), 内田弘美（東洋インキ SC ホールディングス), 富川恵子（東洋インキ SC ホールディングス), 伊坪徳宏（東京都市大学）

10:40-11:00
D1-04
東京染小紋ネクタイのライフサイクルアセスメント調査 …… 32
◎田村賢祐（NTT アドバンステクノロジ), 佐々木重邦（武蔵野大学), 十村勝（NTT アドバンステクノロジ), 北原康雄（NTT アドバンステクノロジ）

◆ E 会場 ＜建築・住宅＞

座長：**小澤暁人（産業技術総合研究所）**

9:40-10:00
E1-01
建築分野における LCA の活用実態と課題 …… 34
◎小林謙介（県立広島大学), 磯部孝行（武蔵野大学), 阿保ことり（県立広島大学), 新家佑城（県立広島大学), 佐藤整央（県立広島大学）

10:00-10:20
E1-02
2011 年版産業連関表を用いた建築実務者向け原単位データベースの構築 CO_2 排出量およびエネルギー消費原単位の開発状況 …… 36
◎外岡豊（埼玉大学), 小林謙介（県立広島大学), 前田拓生（高崎商科大学）

10:20-10:40
E1-03
住宅の高性能化による建設廃棄物への影響に関する研究 …… 38
◎磯部孝行（武蔵野大学), 小林謙介（県立広島大学）

10:40-11:00
E1-04
(P2-085)
高断熱住宅の普及に影響する地域特性を考慮した自治体の評価手法の提案 …… 40
◎石戸拓朗（慶應義塾大学), 伊香賀俊治（慶應義塾大学), 川久保俊（法政大学), 鈴木健太郎（慶應義塾大学), 山崎潤也（慶應義塾大学), 大束開智（慶應義塾大学）

11:20 ～ 12:20

◆ A 会場 ＜交通＞

座長：**井上麻衣（産業技術総合研究所）**

11:20-11:40
A1-06
(P2-098)
資源消費と大気汚染を考慮した鉄道車両の環境フットプリント …… 42
◎岩倉湧也（東京都市大学), 伊坪徳宏（東京都市大学）

11:40-12:00
A1-07
Effective speed 指標を用いた交通機関の環境性能評価手法の提案 …… 44
◎河合一輝（名古屋大学), 加藤博和（名古屋大学）

12:00-12:20
A1-08
ライフサイクル思考に基づく海外再エネ起源水素の自動車用燃料しての位置付けの検討 …… 46
◎工藤祐揮（産業技術総合研究所), 北川直美（産業技術総合研究所), 村松良二（産業技術総合研究所), 井上麻衣（産業技術総合研究所), 小澤暁人（産業技術総合研究所), 玄地裕（産業技術総合研究所）

◆ B 会場 ＜水素・燃料電池＞

座長：**小井土賢二（福島大学）**

11:20-11:40
B1-06
産業連関表を用いた水素エネルギーシステムのライフサイクル雇用分析 …… 48
◎稗貫峻一（横浜国立大学), 野口和彦（横浜国立大学）

11:40-12:00
B1-07
(P2-055)
2 段 PSA と酸化金属を用いた複数段でのバイオ水素の低温脱硫システムの環境評価 …… 50
◎黒田祥平（東京理科大学), 堂脇清志（東京理科大学）

12:00-12:20
B1-08
(P2-054)
LCA 分析を考慮した家庭用 SOFC-CGS における環境的統合化指標の提案 …… 52
◎佐藤聖史（東京理科大学）

◆C 会場 <食品廃棄物>

座長：天野耕二（立命館大学）

11:20-11:40 **C1-06**	**食品廃棄物のリサイクルによる環境便益評価** ◎岡橋拓哉（九州大学），加河茂美（九州大学）	54
11:40-12:00 **C1-07** *(P2-010)*	**外食産業を対象にした食品ロスと廃棄物の環境影響評価** ◎小川俊治（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	56
12:00-12:20 **C1-08**	**大学キャンパスを中心としたバイオマス有効利用シナリオの検討** ◎細川裕（立命館大学），吉川直樹（立命館大学），天野耕二（立命館大学）	58

◆D 会場 <廃棄物 (1)>

座長：稲葉陸太（国立環境研究所）

11:20-11:40 **D1-06**	**下水処理 - 藻類培養統合プロセスにおける導入技術選択に資するライフサイクルアセスメント** ◎鈴木征史（東北大学），大野肇（東北大学），福島康裕（東北大学）	60
11:40-12:00 **D1-07**	**セメント直接原料化の見直しに向けた脱水汚泥資源化オプションの比較評価** ◎中久保豊彦（お茶の水女子大学），小池夏帆（お茶の水女子大学）	62
12:00-12:20 **D1-08**	**廃棄物焼却熱の産業利用システムでの主体間 GHG アカウンティング配分手法の検討** ◎大西悟（東京理科大学），YiDou（国立環境研究所），藤井実（国立環境研究所），稲葉陸太（国立環境研究所）	64

14:40 ～ 16:20

◆A 会場 <資源リスク>

座長：醍醐市朗（東京大学）

14:40-15:00 **A1-16** *(P2-074)*	**責任あるニッケル資源利用に向けたサプライチェーンリスク要因解析** ◎佐々木翔（東北大学），松八重一代（東北大学），中島謙一（国立環境研究所），村上進亮（東京大学），長坂徹也（東北大学）	66
15:00-15:20 **A1-17** *(P2-067)*	**包括的なリスク要因抽出に基づいた銅のサプライチェーンリスク解析** ◎山﨑裕貴（東北大学），松八重一代（東北大学），中島謙一（国立環境研究所），村上進亮（東京大学），長坂徹也（東北大学）	68
15:20-15:40 **A1-18** *(P2-107)*	**生産資源の安定的供給に向けたクリティカリティ評価手法の構築** ◎中駄将人（東京大学），醍醐市朗（東京大学），後藤芳一（東京大学），畑山博樹（国立研究開発法人 産業技術総合研究所）	70
15:40-16:00 **A1-19**	**供給障害事象に基づく鉱物資源の供給リスク指標開発** ◎高橋裕也（東京大学），村上進亮（東京大学）	72
16:00-16:20 **A1-20**	**事例分析に基づいた資源リスク評価手法の検討** ◎畑山博樹（産業技術総合研究所），田原聖隆（産業技術総合研究所）	74

◆B 会場 <気候変動の緩和策と適応策>

座長：内田裕之（みずほ情報総研）

14:40-15:00 **B1-16**	**気候変動の緩和策と適応策を対象としたライフサイクル影響評価** ◎伊坪徳宏（東京都市大学），湯龍龍（農研機構），小野雄也（東京大学），小関康雄（東京都市大学），正畠浩一（TCO2），内田裕之（みずほ情報総研），古島康（みずほ情報総研），沖大幹（東京大学）	76
15:00-15:20 **B1-17**	**メタ分析を駆使した電力のライフサイクル評価** ◎八坂慶仁（TCO2 株式会社），正畠宏一（TCO2 株式会社），伊坪徳宏（東京都市大学）	78
15:20-15:40 **B1-18**	**植物を対象とした CO_2 の生物種絶滅リスク係数の開発** ◎湯龍龍（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構），大橋春香（国立研究開発法人森林総合研究所），松井哲哉（国立研究開発法人森林総合研究所），田中信行（東京農業大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	80
15:40-16:00 **B1-19**	**共通社会経済シナリオ SSP を用いた CO_2 の健康被害係数の開発** ◎湯龍龍（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構），古島康（みずほ情報総研株式会社），伊坪徳宏（東京都市大学）	82

16:00-16:20 **B1-20**	**気候変動適応策としての浄水器を対象とした費用便益分析** ◎小関康雄（東京都市大学），森孝（浄水器協会），伊坪徳宏（東京都市大学）	84

◆C 会場 <バイオ燃料>

座長：**大野肇（東北大学）**

14:40-15:00 **C1-16**	**LCA に基づく新バイオディーゼル製造プロセスのイノベーション支援モデル** ◎陳怡靜（東北大学大学院工学研究科 化学工学専攻），彭劭琳（東北大学大学院工学研究科 化学工学専攻），北川尚美（東北大学大学院工学研究科 化学工学専攻），大野肇（東北大学大学院工学研究科 化学工学専攻），福島康裕（東北大学大学院工学研究科 化学工学専攻）	86
15:00-15:20 **C1-17** *(P2-058)*	**藻類バイオマスを用いた航空機の環境影響評価** ◎根本知亜記（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	88
15:20-15:40 **C1-18**	**バイオ燃料の持続可能性評価に関する研究** **地方自治体の廃食用油 BDF 化事業の環境面および経済面の評価** ◎王任卓（早稲田大学大学院），納富信（早稲田大学大学院）	90
15:40-16:00 **C1-19**	**バイオ燃料の持続可能性評価に関する研究** **地方自治体の廃食用油 BDF 化事業の社会面の評価** ◎王任卓（早稲田大学大学院），納富信（早稲田大学大学院）	92
16:00-16:20 **C1-20**	**総合討論**	

◆D 会場 <廃棄物 (2)>

座長：**大西悟（東京理科大学）**

14:40-15:00 **D1-16** *(P2-095)*	**Development of municipal solid waste collection system in Jalalabad city, Afghanistan** ◎ BawarMohammad Jamal（立命館大学），橋本征二（立命館大学）	94
15:00-15:20 **D1-17**	**ライフサイクル処理単価による廃棄物処理施設の最適寿命の推定** ◎稲葉陸太（国立環境研究所），田崎智宏（国立環境研究所）	96
15:20-15:40 **D1-18** *(P2-091)*	**人口減少社会における一般廃棄物処理施設のマネジメント** ◎渡辺梓（立命館大学），橋本征二（立命館大学）	98
15:40-16:00 **D1-19** *(P2-094)*	**中国広東省における建築廃棄物の持続可能な管理に着目した廃棄物産業連関表の構築** ◎董岩（東北大学），松八重一代（東北大学）	100
16:00-16:20 **D1-20**	**総合討論**	

◆E 会場 <自動車>

座長：**工藤祐揮（産業技術総合研究所）**

14:40-15:00 **E1-16**	**日本における CAFE 基準と CO_2 排出量の関係分析** ◎金子満來（九州大学），加河茂美（九州大学）	102
15:00-15:20 **E1-17** *(P2-099)*	**自動車の技術変化と素材に着目した資源需要分析** ◎松井健裕（東北大学），松八重一代（東北大学），山末英嗣（立命館大学），長坂徹也（東北大学）	104
15:20-15:40 **E1-18** *(P2-097)*	**電気自動車用リチウムイオン電池のリユース及びリサイクルにおける技術選択支援** ◎阿部将宜（東京大学），杉山弘和（東京大学），平尾雅彦（東京大学）	106
15:40-16:00 **E1-19**	**HV と EV の優位性を分ける経済・環境・技術条件の可視化** ◎原卓也（豊田中央研究所）	108
16:00-16:20 **E1-20** *(P2-096)*	**全日本学生フォーミュラ大会参加車両の環境影響評価** ◎越田悠揮（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	110

16:40 ～ 18:00

◆ A 会場 <鉄鋼>

座長：**山末英嗣（立命館大学）**

16:40-17:00 **A1-22** *(P2-072)*	**日本における鉄鋼材中の不純物元素濃度の決定要因の解明** ◎太田暁（東京大学大学院），醍醐市朗（東京大学大学院），後藤芳一（東京大学大学院）	112
17:00-17:20 **A1-23** *(P2-073)*	**日本とオランダにおける鉄スクラップへの不純物元素混入源の比較** ◎纐纈将太（東京大学），醍醐市朗（東京大学大学院），後藤芳一（東京大学大学院）	114
17:20-17:40 **A1-24** *(P2-071)*	**動的 MFA を用いた鉄鋼循環に伴う Ni および Cr の散逸削減可能性の推算** ◎武山健太郎（東北大学），大野肇（東北大学），松八重一代（東北大学），中島謙一（国立環境研究所），近藤康之（早稲田大学），長坂徹也（東北大学）	116
17:40-18:00 **A1-25** *(P2-064)*	**関与物質総量を用いた日本の鋼材生産に関わる採掘活動量の定量化** ◎小柳津顕（立命館大学），CraviotoJordi（立命館大学），中島謙一（国立環境研究所），松八重一代（東北大学），村上進亮（東京大学），山末英嗣（立命館大学）	118

◆ B 会場 <水>

座長：**小関康雄（東京都市大学）**

16:40-17:00 **B1-22** *(P2-103)*	**気候変動の適応策を思考した節水トイレの環境影響評価** ◎岡崎真優子（東京都市大学），佐々木秀樹（パナソニック株式会社），伊坪徳宏（東京都市大学）	120
17:00-17:20 **B1-23** *(P2-104)*	**逆浸透法を用いた海水淡水化施設の環境影響評価** ◎黒川賢治（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学），小関康雄（東京都市大学），大熊那夫紀（一般財団法人造水促進センター），杉本和明（一般財団法人造水促進センター）	122
17:20-17:40 **B1-24**	**合意形成に基づいた 水利用による影響評価モデルの開発** **ー UNEP/SETAC ライフサイクルイニシアチブと WULCA からの推奨 ー** BoulayAnne-Marie（CIRAIG），PfisterStephan（ETH Zurich），◎本下晶晴（産業技術総合研究所）	124
17:40-18:00 **B1-25**	**環境産業連関表を用いた 2000 ～ 2011 年までのベトナムにおける経済・環境影響の構造分析** ◎ NguyenThi Hoa（Graduate School of Engineering, Osaka University）	126

◆ C 会場 <データベース>

座長：**中野勝行（産業環境管理協会）**

16:40-17:00 **C1-22**	**IDEA データとの連結による JLCA データベースの有用性向上** **電線業界を例として** 柴原尚希（産業環境管理協会），◎仲井俊文（産業環境管理協会），神崎昌之（産業環境管理協会），中野勝行（産業環境管理協会），田原聖隆（産業技術総合研究所），村松良二（産業技術総合研究所），橋本大（電線総合技術センター），小坂裕（電線総合技術センター）	128
17:00-17:20 **C1-23**	**IDEA マトリックスを利用した社会経済用データベースの開発** ◎塚原建一郎（産業技術総合研究所），田原聖隆（産業技術総合研究所）	130
17:20-17:40 **C1-24** *(P2-062)*	**産業連関分析を用いた日本におけるマテリアルフットプリントの評価基盤の構築と活用** ◎永野健太（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	132
17:40-18:00 **C1-25** *(P2-021)*	**PRTR 対象物質に着目したケミカルフットプリントデータベースの開発** ◎小藤直（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	134

◆ D 会場 <災害>

座長：**中谷隼（東京大学）**

16:40-17:00 **D1-22**	**災害廃棄物処理のインベントリデータの作成** ◎田畑智博（神戸大学），佐伯孝（富山県立大学）	136
17:00-17:20 **D1-23**	**災害廃棄物の広域処理に対する住民の受容意識と方略** ◎蔡佩宜（神戸大学），田畑智博（神戸大学）	138

17:20-17:40 **D1-24** *(P2-093)*	**災害廃棄物処理システムの環境的、経済的評価方法の開発** ◎若林陽平（神戸大学）	140
17:40-18:00 **D1-25**	**南海トラフ巨大地震が与える地域経済網と炭素排出管理への影響解析** ◎畑樊（京都大学），南斉規介（国立環境研究所），加河茂美（九州大学），東野達（京都大学）	142

◆E 会場 <食と一次産業 (1)>

座長：荻野暁史（農業・食品産業技術総合研究機構）

16:40-17:00 **E1-22**	**食品残渣堆肥を活用した農作物栽培のライフサイクル評価** ◎松田朋也（立命館大学），吉川直樹（立命館大学），天野耕二（立命館大学）	144
17:00-17:20 **E1-23** *(P2-005)*	**リンの施肥による増収効果に着目したリン資源の環境効率評価** ◎野木茜（立命館大学大学院），村上進亮（東京大学），粟生木千佳（立命館大学大学院，地球環境戦略研究機関），橋本征二（立命館大学）	146
17:20-17:40 **E1-24** *(P2-006)*	**低炭素農法を目的としたカーボンフリー CO_2 を用いた野菜の生産性向上及び LCA 解析** ◎井手啓介（東京理科大学），堂脇清志（東京理科大学），北畑信隆（東京理科大学）	148
17:40-18:00 **E1-25** *(P2-004)*	**農産物の新たな複合的環境指標の提案** ◎渡辺泰子（東京理科大学），堂脇清志（東京理科大学）	150

2日目（3月2日(木)）

◎は登壇者

9:40 ～ 11:00

◆ A 会場 <SDGs>

座長：平尾雅彦（東京大学）

9:40-10:00 **A2-01** *(P2-043)*
労働に注目したソーシャル LCA 用データベース開発 …… 154
◎唐戸将大（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）

10:00-10:20 **A2-02** *(P2-044)*
SLCA を用いた綿製衣料品の製造過程における労働問題のホットスポット分析 …… 156
◎土屋潔浩（東京大学），井原智彦（東京大学）

10:20-10:40 **A2-03** *(P2-079)*
OECD 加盟国内における都市品質と住民の生活満足度の関係 …… 158
◎藤田省一郎（慶應義塾大学），伊香賀俊治（慶應義塾大学），村上周三（建築環境・省エネルギー機構），川久保俊（法政大学），山崎潤也（慶應義塾大学），鈴木健太郎（慶應義塾大学）

10:40-11:00 **A2-04** *(P2-082)*
持続可能な開発目標の理念に基づく新興国を対象とした都市品質格差の時系列評価 …… 160
◎邉見隼人（慶應義塾大学），伊香賀俊治（慶應義塾大学），村上周三（建築環境・省エネルギー機構），川久保俊（法政大学），山崎潤也（慶應義塾大学），藤田省一郎（慶應義塾大学）

◆ B 会場 <素材の利用効率>

座長：重富陽介（長崎大学）

9:40-10:00 **B2-01**
素材のための新しい LCA の枠組み構築 …… 162
◎醍醐市朗（東京大学），中島謙一（国立環境研究所），山末英嗣（立命館大学），松八重一代（東北大学），畑山博樹（産業技術総合研究所），小林能直（東京工業大学）

10:00-10:20 **B2-02** *(P2-077)*
金属材料の耐腐食性機能の定量評価手法の構築 …… 164
◎吾妻優美（東京大学），醍醐市朗（東京大学），後藤芳一（東京大学）

10:20-10:40 **B2-03**
日本の各都道府県の資源蓄積量を考慮した環境効率性指標の構築とその応用 …… 166
◎江口昌伍（九州大学）

10:40-11:00 **B2-04**
日本における鉄鋼材料の環境影響、エネルギー消費と機械的特性の相互関係分析：データ包括解析（DEA）手法 …… 168
◎ CraviotoJordi（立命館大学）

◆ C 会場 <特別セッション：ホットスポット分析 (1)>

座長：田原聖隆（産業技術総合研究所）

9:40-10:00 **C2-01**
グリーン購入推進に向けたホットスポット分析の評価手法の構築と社会実装 …… 170
◎伊坪徳宏（東京都市大学），田原聖隆（産業技術総合研究所），近藤康之（早稲田大学），佐野裕隆（日本環境協会），神崎昌之（産業環境管理協会）

10:00-10:20 **C2-02**
IDEA における環境負荷項目の拡充 …… 172
電離放射線および PRTR 対象物質
◎田原聖隆（産業技術総合研究所），藤井千陽（産業技術総合研究所），高田亜佐子（産業技術総合研究所），紀平茂雄（S&R）

10:20-10:40 **C2-03**
廃棄物産業連関表の推計とホットスポット分析への応用 …… 174
◎近藤康之（早稲田大学），立尾浩一（日本環境衛生センター），溝田健一（日本環境衛生センター），池本久利（日本環境衛生センター），中村愼一郎（早稲田大学）

10:40-11:00 **C2-04**
日本の LCA 評価基盤に基づくホットスポット分析手法の開発とケーススタディ …… 176
◎鈴木春生（東京都市大学），一杉佑貴（東京都市大学），村主さとみ（東京都市大学），近藤康之（早稲田大学），田原聖隆（産業技術総合研究所），藤井千陽（産業技術総合研究所），有間俊彦（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）

◆ D 会場 <消費者 (1)>

座長：鷲津明由（早稲田大学）

9:40-10:00 **D2-01** *(P2-033)*
産業連関表と家計支出統計の接続表を用いたカーボンフットプリントの GHG 排出削減効果の推計 … 178
◎環野真紀（東京大学），浅野康仁（京都大学），井原智彦（東京大学）

10:00-10:20 **D2-02**	**家庭における時間帯別省エネポテンシャルの推計ー社会生活基本調査を用いてー** ◎平湯直子（武蔵野大学），鷲津明由（早稲田大学）	180
10:20-10:40 **D2-03** *(P2-102)*	**家計消費とプラネタリー・バウンダリー：淡水利用について** ◎佐々木貴央（立命館大学），本下晶晴（産業技術総合研究所），南斉規介（国立環境研究所），橋本征二（立命館大学）	182
10:40-11:00 **D2-04** *(P2-032)*	**消費者の生活価値観と環境配慮行動の関係** ◎木村大（千葉工業大学），柴田清（千葉工業大学）	184

◆ E 会場 ＜木材＞

座長：**服部順昭（東京農工大学）**

9:40-10:00 **E2-01**	**将来の国産材需給と木質バイオマス発電所の立地適性** ◎大澤一岳（東京大学，和歌山県），徐夢荷（東京大学），兼松祐一郎（東京大学），大久保達也（東京大学），菊池康紀（東京大学）	186
10:00-10:20 **E2-02** *(P2-109)*	**樹種別を考慮した木材のインベントリデータベースの開発** ◎土屋成（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	188
10:20-10:40 **E2-03** *(P2-042)*	**パルプ紙とストーンペーパーの環境影響評価** ◎阪西達矢（工学院大学），本下晶晴（国立研究開発法人産業技術総合研究所），田原聖隆（国立研究開発法人産業技術総合研究所），稲葉敦（工学院大学）	190
10:40-11:00 **E2-04**	**バックグラウンドデータベースの違いによる LCA 結果への影響** **パーティクルボードのケーススタディ** ◎中野勝行（産業環境管理協会），瀧川充朗（日本繊維板工業会），田原聖隆（産業技術総合研究所），安藤恵介（東京農工大学），服部順昭（東京農工大学）	192

11:20 ～ 12:40

◆ A 会場 ＜特別セッション：環境教育 (1) 環境配慮行動＞

座長：**北村祐介（elsa）**

11:20-11:40 **A2-06** *(P2-035)*	**ライフサイクル思考の学びが環境配慮行動の意思決定過程に与える影響 -2-** ◎田髙初奈（横浜国立大学），平山世志衣（特定非営利活動法人横浜 LCA 環境教育研究会），高岡由紀子（グリーン購入ネットワーク），津田祥子（日本 LCA 学会），水野建樹（特定非営利活動法人横浜 LCA 環境教育研究会），松本安生（神奈川大学），松本真哉（横浜国立大学）	194
11:40-12:00 **A2-07** *(P2-034)*	**ライフサイクル思考と環境配慮行動の関係性を探る** **ライフサイクル思考の測定尺度の開発** ◎森健太朗（横浜国立大学），本藤祐樹（横浜国立大学）	196
12:00-12:20 **A2-08**	**日常の中の自然な働きかけによる環境配慮行動の促進** **心理的近接性を高める 2 種の介入実験** ◎弘中雄介（横浜国立大学），本藤祐樹（横浜国立大学）	198
12:20-12:40 **A2-09**	**環境ラベル認知度から見る消費者特性** ◎藤澤美恵子（金沢大学）	200

◆ B 会場 ＜食と一次産業 (2)＞

座長：**小原聡（アサヒビール）**

11:20-11:40 **B2-06** *(P2-002)*	**導入シナリオ分析のための植物工場モデリング** ◎冨永華子（東京大学），兼松祐一郎（東京大学），大久保達也（東京大学），菊池康紀（東京大学）	202
11:40-12:00 **B2-07** *(P2-011)*	**適切化技術によるトマトの食品損失削減シナリオに関する環境インパクト評価** ◎吉沢慎（東京理科大学）	204
12:00-12:20 **B2-08** *(P2-016)*	**新冷媒を用いた野菜のコールドチェーンにおける品質維持方法の提案** ◎大野彰之（東京理科大学），堂脇清志（東京理科大学）	206

12:20-12:40 **B2-09** *(P2-003)*	**機能の分析による食品容器包装のライフサイクル設計** …… ◎横川直毅（東京大学），杉山弘和（東京大学），平尾雅彦（東京大学）	208

◆ C 会場 ＜特別セッション：ホットスポット分析 (2)＞

座長：**伊坪徳宏（東京都市大学）**

11:20-11:40 **C2-06**	**エコマーク認証基準の策定におけるホットスポット分析手法の導入に関する検討** …… ◎佐野裕隆（日本環境協会），鈴木春生（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学），田原聖隆（産業技術総合研究所），近藤康之（早稲田大学）	210
11:40-12:00 **C2-07**	**タイプⅢ環境宣言と環境ホットスポット分析の相互活用に関わる考察** …… ◎神崎昌之（産業環境管理協会），片岡顯（産業環境管理協会），根岸華子（産業環境管理協会），伊藤聖子（産業環境管理協会），石塚明克（産業環境管理協会），伊坪徳宏（東京都市大学），田原聖隆（産業技術総合研究所）	212
12:00-12:20 **C2-08** *(P2-105)*	**環境・社会側面を対象とした日本版ホットスポット分析手法の開発と活用** …… ◎一杉佑貴（東京都市大学），村主さとみ（東京都市大学），鈴木春生（東京都市大学），藤井千陽（国立研究開発法人 産業技術総合研究所），田原聖隆（国立研究開発法人 産業技術総合研究所），近藤康之（早稲田大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	214
12:20-12:40 **C2-09**	**総合討論**	

◆ D 会場 ＜消費者 (2)＞

座長：**加河茂美（九州大学）**

11:20-11:40 **D2-06**	**訪日外国人の消費行動が CO_2 排出量に与える影響** …… ◎柴田睦美（九州大学），加河茂美（九州大学），白新田佳代子（九州大学）	216
11:40-12:00 **D2-07** *(P2-022)*	**アパレル産業における消費者嗜好を考慮した環境影響評価** …… ◎酒匂郁輔（東京理科大学）	218
12:00-12:20 **D2-08** *(P2-027)*	**レガシーと持続可能性を考慮したイベント評価手法の開発と活用** …… ◎池田雄貴（東京都市大学），越川延明（セレスポ），伊坪徳宏（東京都市大学）	220
12:20-12:40 **D2-09**	**総合討論**	

◆ E 会場 ＜エネルギーシステム＞

座長：**栗栖聖（東京大学）**

11:20-11:40 **E2-06**	**ICT サービスの導入がわが国のエネルギー需要と二酸化炭素排出量の削減に及ぼす影響** …… ◎棟居洋介（東京工業大学），上野捷（東京工業大学），鶴見真子（東京工業大学），張暁曦（NTT ネットワーク基盤技術研究所），折口壮志（NTT ネットワーク基盤技術研究所），飯橋真輔（NTT ネットワーク基盤技術研究所）	222
11:40-12:00 **E2-07**	**オールドニュータウンの更新に合わせたエネルギーマネジメント技術導入可能性の検討** …… ◎長尾和哉（名古屋大学），加藤博和（名古屋大学）	224
12:00-12:20 **E2-08** *(P2-088)*	**マイクログリッドによる CO_2 削減効果から見た街区構成と生活スケジュールの評価** …… ◎佐藤惇（東京大学大学院），栗栖聖（東京大学大学院），花木啓祐（東京大学大学院）	226
12:20-12:40 **E2-09**	**使用条件の異なる家庭用エネルギー機器によるコスト・CO_2 排出量** …… ◎小澤暁人（産業技術総合研究所），工藤祐揮（産業技術総合研究所），田原聖隆（産業技術総合研究所）	228

13:40 ～ 15:20

◆ A 会場 <特別セッション：環境教育 (2) 学校>

座長：松本真哉（横浜国立大学）

13:40-14:00 **A2-13**	印刷を対象としたライフサイクルすごろくのコンテンツ開発と実践の事例 ～カーボンオフセットの選択肢を加えて～ ◎北村祐介（elsa，プリプレス・センター），藤永颯人（東京都市大学），小藤直（東京都市大学），海老原誠治（資源と環境の教育を考える会「エコが見える学校」，三信化工），高岡由紀子（資源と環境の教育を考える会「エコが見える学校」，グリーン購入ネットワーク），西尾チヅル（資源と環境の教育を考える会「エコが見える学校」，筑波大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	230
14:00-14:20 **A2-14**	ライフサイクル・TMR・生活・文化を通じた環境プログラム、事例と行動変容 学びと遊びに関する受容性 ◎海老原誠治（資源と環境の教育を考える会「エコが見える学校」，三信化工株式会社），高岡由紀子（資源と環境の教育を考える会「エコが見える学校」，グリーン購入ネットワーク），堀川悦夫（佐賀大学），西尾チヅル（資源と環境の教育を考える会「エコが見える学校」，筑波大学）	232
14:20-14:40 **A2-15**	小中学校におけるライフサイクル思考に基づく環境教育プログラム 雨水で育てる緑のカーテンを使った７年間の実践記録 ◎笠井利浩（福井工業大学），荒木史代（福井工業大学）	234
14:40-15:00 **A2-16**	高校生の主体的学びが地域の持続可能性に及ぼす効果 愛媛県内子町におけるヒューマンソーシャルライフサイクル分析（その 2） ◎中口毅博（芝浦工業大学）	236
15:00-15:20 **A2-17** *(P2-036)*	ライフサイクル思考に基づく環境教育実施による体系的な思考力に対する影響 ◎森正敬之（東京都市大学），北村祐介（elsa），伊坪徳宏（東京都市大学）	238

◆ B 会場 <食と一次産業 (3)>

座長：吉川直樹（立命館大学）

13:40-14:00 **B2-13**	交雑種および乳用種を用いた肉用牛生産の温室効果ガス排出量 ◎荻野暁史（農業･食品産業技術総合研究機構），山下恭広（農業･食品産業技術総合研究機構），長田隆（農業・食品産業技術総合研究機構）	240
14:00-14:20 **B2-14**	有機的管理による国産グラスフェッドビーフの環境影響評価 ◎堤道生（農業･食品産業技術総合研究機構），小野泰（北里大学），小笠原英毅（北里大学），寶示戸雅之（北里大学）	242
14:20-14:40 **B2-15**	日本の漁業部門の環境生産性分析 ◎敷田和哉（九州大学），加河茂美（九州大学）	244
14:40-15:00 **B2-16**	大規模料理レシピ解析による「食」に関わる関与物質総量の算定 ◎石井裕剛（京都大学），BenjaminMcLellan（京都大学），山末英嗣（立命館大学）	246
15:00-15:20 **B2-17**	ビール醸造副産物由来の肥料を活用したゴルフコース管理における農薬削減効果のライフサイクル評価 ◎林清忠（農業・食品産業技術総合研究機構），北川隆徳（アサヒグループホールディングス株式会社），御影佳孝（アサヒグループホールディングス株式会社），高崎智子（アサヒグループホールディングス株式会社）	248

◆ C 会場 <LCT の地域への実装>

座長：栗島英明（芝浦工業大学）

13:40-14:00 **C2-13**	ライフサイクル思考の社会実装：種子島の例 ◎菊池康紀（東京大学），尾下優子（神戸大学），福島康裕（東北大学）	250
14:00-14:20 **C2-14** *(P2-001)*	植物資源利活用に向けた農工横断型プロセスモデリング ◎大内田弘太朗（東京大学），冨永華子（東京大学），牟田侑樹（東京大学），兼松祐一郎（東京大学），大久保達也（東京大学），菊池康紀（東京大学）	252
14:20-14:40 **C2-15**	砂糖・バイオエタノール逆転生産プロセスの導入による GHG 排出削減効果 ◎福島康裕（東北大学），小原聡（アサヒグループホールディングス），大内田弘太朗（東京大学），菊池康紀（東京大学）	254
14:40-15:00 **C2-16**	気象変動を考慮したバイオマス利用システムの製品 LCA のありかた ◎中村遼太郎（東北大学），大内田弘太朗（東京大学），菊池康紀（東京大学），小原聡（アサヒグループホールディングス），大野肇（東北大学），福島康裕（東北大学）	256

15:00-15:20 **C2-17** イノベーション支援ツールとしての LCA …… 258
◎福島康裕（東北大学）

◆ D 会場 ＜人間健康＞

座長：**湯龍龍（農業・食品産業技術総合研究機構）**

13:40-14:00 **D2-13** 内生型構造経路分析を用いたアジア地域における炭素質エアロゾルの排出分析 …… 260
◎永島史弥（九州大学），加河茂美（九州大学），南斉規介（国立環境研究所）

14:00-14:20 **D2-14** *(P2-045)* 室内空気質汚染と一般大気汚染を対象としたライフサイクル健康影響評価手法の開発 …… 262
◎枝廣あかり（東京都市大学），湯龍龍（農業環境技術研究所），伊坪徳宏（東京都市大学）

14:20-14:40 **D2-15** *(P2-048)* 地域性を考慮した飛行機騒音の健康影響評価 …… 264
◎山本遼（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）

14:40-15:00 **D2-16** *(P2-047)* ジャカルタにおける睡眠困難の実態把握とエアコン導入効果の定量化 …… 266
草間蓮（東京大学），◎井原智彦（東京大学）

15:00-15:20 **D2-17** *(P2-046)* 日常生活における低線量被曝を対象とした健康影響評価 …… 268
◎寺本麻実（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）

◆ E 会場 ＜国際貿易＞

座長：**南斉規介（国立環境研究所）**

13:40-14:00 **E2-13** 中国からの輸出に起因する二酸化炭素排出量の多地域産業連関分析 …… 270
◎劉倩（早稲田大学），近藤康之（早稲田大学）

14:00-14:20 **E2-14** 低炭素社会シナリオに応じた国際資源フローの将来推計手法の開発 …… 272
◎森岡涼子（国立環境研究所），津田宏治（東京大学），中島謙一（国立環境研究所），南斉規介（国立環境研究所）

14:20-14:40 **E2-15** *(P2-101)* 国際貿易を考慮した食料消費に関わる淡水資源需給バランスの将来シナリオ評価 …… 274
◎山口陽平（立命館大学），田村賢人（立命館大学），吉川直樹（立命館大学），橋本征二（立命館大学），天野耕二（立命館大学）

14:40-15:00 **E2-16** 世界経済における二酸化炭素排出貿易のネットワーク分析 …… 276
◎時任翔平（九州大学），加河茂美（九州大学）

15:00-15:20 **E2-17** 各国の自動車寿命と自動車市場の変化が世界のライフサイクル CO_2 排出量に与える影響 …… 278
◎中本裕哉（九州大学），加河茂美（九州大学）

3日目（3月3日(金)）

◎は登壇者

9:40 ～ 11:00

◆ A 会場 <バイオマス (1)>

座長：兼松祐一郎（東京大学）

9:40-10:00 **A3-01** *(P2-049)*
低圧バイオメタノール合成システムのインパクト評価 …… 282
◎石山智之（東京理科大学），布浦鉄兵（東京大学），堂脇清志（東京理科大学）

10:00-10:20 **A3-02** *(P2-059)*
バイオガソリン製造用触媒の設計への LCA の適用 …… 284
◎奥山泰世（昭和シェル石油），小池充（昭和シェル石油），田村正純（東北大学大学院），中川善直（東北大学大学院），今井章雄（昭和シェル石油），冨重圭一（東北大学大学院），福島康裕（東北大学大学院）

10:20-10:40 **A3-03**
バイオマス由来 PET 製造における CO_2 排出量の検討 …… 286
◎仙波壽朗（飯田女子短期大学），稲葉敦（工学院大学）

10:40-11:00 **A3-04**
日本の環境効率算定に向けて：バイオマス製品の環境影響の評価 …… 288
◎ DENTESebastien M.R.（立命館大学），加用千裕（東京農工大学），粟生木千佳（地球環境戦略研究機関），田原聖隆（国立研究開発法人産業技術総合研究所），橋本征二（立命館大学）

◆ B 会場 <パリ協定>

座長：近藤康之（早稲田大学）

9:40-10:00 **B3-01** *(P2-081)*
2050 年に向けた日本の産業のシナリオ検討 …… 290
◎玄地裕（産業技術総合研究所），稲葉敦（工学院大学）

10:00-10:20 **B3-02**
世界の構造変化が CO_2 排出に果たす役割 …… 292
◎白新田佳代子（九州大学），岡本隼輔（尾道市立大学）

10:20-10:40 **B3-03**
「一億総活躍社会」におけるパリ協定達成への課題 …… 294
◎重富陽介（長崎大学），南斉規介（国立環境研究所），加河茂美（九州大学），東野達（京都大学）

10:40-11:00 **B3-04**
世界各国の生産性向上が二酸化炭素排出に与える影響 …… 296
◎高藪広隆（九州大学）

◆ C 会場 <特別セッション：組織の LCA と削減貢献量評価 (1) 素材・部品・プロセスの貢献>

座長：本下晶晴（産業技術総合研究所）

9:40-10:00 **C3-01** *(P2-116)*
産業連関分析を活用した組織の環境フットプリント評価手法の開発 …… 298
◎村主さとみ（東京都市大学），一杉佑貴（東京都市大学），田原聖隆（国立研究開発法人 産業技術総合研究所），近藤康之（早稲田大学），伊坪徳宏（東京都市大学）

10:00-10:20 **C3-02**
組織のウォーターフットプリント分析を目的とした新規ツールの開発 …… 300
◎大橋憲司（株式会社資生堂），ムルンテムールン（株式会社資生堂），高橋透（アサヒグループホールディングス株式会社），木下順次（イオン株式会社），能勢泰祐（積水化学工業株式会社），高橋拓（大日本印刷株式会社），水谷敦司（株式会社竹中工務店），吉村祐美（東洋製罐株式会社），田村光範（株式会社日立製作所）

10:20-10:40 **C3-03**
組織単位の環境パフォーマンス評価による環境側面の抽出事例報告 …… 302
◎山﨑啓之（TOTO）

10:40-11:00 **C3-04**
アズビルグループの環境施策におけるマテリアリティ抽出に向けた組織の LCA の活用 …… 304
◎秦野弘（アズビル），永山綾子（アズビル），木村重夫（アズビル）

◆ D 会場 <製品 LCA(2)>

座長：井原智彦（東京大学）

9:40-10:00 **D3-01** *(P2-037)*
HDD と SSD を対象とした環境影響評価 …… 306
◎山崎有平（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）

10:00-10:20 **D3-02**
パナソニックにおける製品・サービスによる CO_2 削減貢献量算定・開示の取組み …… 308
◎佐々木秀樹（パナソニック），東山信幸（パナソニック）

10:20-10:40 **D3-03** *(P2-019)*
カイコによる検査薬を対象とした環境影響評価 …… 310
◎立原航揮（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学），鈴木健夫（シスメックス株式会社），一口毅（シスメックス株式会社），宇佐美昭宏（シスメックス株式会社）

10:40-11:00 **D3-04**	**未来技術の環境影響評価手法の開発：革新的な炭素繊維の製造手法のケース** ◎河尻耕太郎（産業技術総合研究所）	312

◆E 会場 <ストック・フロー (1)>

座長：**小口正弘（国立環境研究所）**

10:00-10:20 **E3-02**	**耐久財の製品寿命分析に関する研究動向** ◎西嶋大輔（九州大学，国立環境研究所），加河茂美（九州大学），小口正弘（国立環境研究所）	314
10:20-10:40 **E3-03** *(P2-060)*	**部品の段階まで考慮したプラスチックのマテリアルフローの分析と寿命関数の推定** ◎丸山多聞（東京大学），中谷隼（東京大学），森口祐一（東京大学）	316
10:40-11:00 **E3-04** *(P2-083)*	**水銀排出による世界各国の健康影響評価** ◎佐藤祐也（東京都市大学），小野雄也（東京大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	318

11:20 ～ 12:40

◆A 会場 <バイオマス (2)>

座長：**稗貫峻一（横浜国立大学）**

11:20-11:40 **A3-06** *(P2-050)*	**植物への CO_2 施用を考慮した PSA の LCA 評価** ◎永石平（東京理科大学），井手啓介（東京理科大学），亀山光男（ジャパンブルーエナジー），堂脇清志（東京理科大学）	320
11:40-12:00 **A3-07**	**福井県あわら・坂井地域における木質バイオマス熱供給事業の温室効果ガス削減効果** ◎柴原尚希（産業環境管理協会），高城玲奈（アルファフォーラム），大城謙治（マルツ電波），酒井洋美（坂井森林組合），小林靖尚（アルファフォーラム），西川浩一（坂井森林組合），壁谷武久（産業環境管理協会）	322
12:00-12:20 **A3-08**	**バイオガス発電事業の温室効果ガス削減効果の事前評価に向けた簡易ツールの作成** ◎兵法彩（横浜国立大学，東京大学），本藤祐樹（横浜国立大学），森泉由恵（横浜国立大学）	324
12:20-12:40 **A3-09**	**総合討論**	

◆B 会場 <生物多様性>

座長：**林清忠（農業・食品産業技術総合研究機構）**

11:20-11:40 **B3-06** *(P2-020)*	**土地利用の変化と生物多様性の減少：森林植生による生物多様性の違いを考慮した影響評価** ◎植屋純平（立命館大学），橋本征二（立命館大学）	326
11:40-12:00 **B3-07**	**空間的環境フットプリント分析** ◎金本圭一朗（信州大学），MoranDaniel（Norwegian University of Science and Technology）	328
12:00-12:20 **B3-08**	**生態系サービスの LCA への導入可能性：農業生産システムの総合的評価枠組みの構築を意図した批判的再検討** ◎湯龍龍（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構），神山和則（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構），林清忠（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構）	330
12:20-12:40 **B3-09**	**企業の意思決定のための自然資本プロトコルとライフサイクルアセスメントの活用** ◎山岸健（産業環境管理協会）	332

◆C 会場 <特別セッション：組織の LCA と削減貢献量評価 (2) 製品・サービスの貢献>

座長：**稲葉敦（工学院大学）**

11:20-11:40 **C3-06**	**用紙数量を活動量とする印刷物及び印刷会社の LCA 手法の開発** ◎中村洋之（大日本印刷株式会社）	334
11:40-12:00 **C3-07**	**持続可能な森林から作られる認証紙と非認証紙の違いによる社会的なインパクト評価** ◎佐々木弘道（サンメッセ株式会社）	336

12:00-12:20 **C3-08**	**ビジネスにおける LCA 情報の意思決定への適用** **組織の LCA とウォーターフットプリントを応用したビジネスリスク評価** ◎大橋憲司（株式会社資生堂）	338
12:20-12:40 **C3-09**	**総合討論**	

◆ D 会場 ＜廃棄物 (3)＞

座長：**福島康裕（東北大学）**

11:20-11:40 **D3-06**	**廃棄物マネジメントと統合した都市共生システムの低炭素評価及び費用便益分析** ◎孫露（Department of Environment Systems, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies (NIES)), 田崎智宏（Department of Environment Systems, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies (NIES)), 藤井実（National Institute for Environmental Studies (NIES)), 大西悟（Tokyo University of Science）	340
11:40-12:00 **D3-07** *(P2-092)*	**東南アジアにおける家電製品の素材リサイクルによる TMR 削減ポテンシャル評価** ◎山末英嗣（立命館大学), 安永玲華（京都大学), JordiCravioto（立命館大学）	342
12:00-12:20 **D3-08**	**紙おむつのクローズドリサイクルの LCA と業界内カーボンオフセット方法論の考察** ◎田口直（北九州市立大学), 本田雄暉（北九州市立大学), 松本亨（北九州市立大学), 長武志（トータルケア・システム株式会社）	344
12:20-12:40 **D3-09**	**総合討論**	

◆ E 会場 ＜ストック・フロー (2)＞

座長：**森口祐一（東京大学）**

11:20-11:40 **E3-06**	**人為的炭素滞留・循環構造の体系的検討** ◎大野肇（東北大学), 佐藤博一（東北大学), 福島康裕（東北大学）	346
11:40-12:00 **E3-07** *(P2-065)*	**主要国における二次亜鉛資源の類型** ◎ MaungKyaw Nyunt（Ritsumeikan University), LwinCherry Myo（Ritsumeikan University), 橋本征二（Ritsumeikan University）	348
12:00-12:20 **E3-08** *(P2-111)*	**提供サービスに基づいた物質ストック変遷の分析** ◎河村洋佑（東京大学大学院), 醍醐市朗（東京大学大学院), 後藤芳一（東京大学大学院）	350
12:20-12:40 **E3-09**	**総合討論**	

ポスターセッション プログラム

2日目（3月2日(木)）15:40-17:40（コアタイムA：15:40-16:40、コアタイムB：16:40-17:40）

P会場

A	P2-001 *(C2-14)*	**植物資源利活用に向けた農工横断型プロセスモデリング** …… ◎大内田弘太朗（東京大学），冨永華子（東京大学），牟田侑樹（東京大学），兼松祐一郎（東京大学），大久保達也（東京大学），菊池康紀（東京大学）	252
B	P2-002 *(B2-06)*	**導入シナリオ分析のための植物工場モデリング** …… ◎冨永華子（東京大学），兼松祐一郎（東京大学），大久保達也（東京大学），菊池康紀（東京大学）	202
A	P2-003 *(B2-09)*	**機能の分析による食品容器包装のライフサイクル設計** …… ◎横川直毅（東京大学），杉山弘和（東京大学），平尾雅彦（東京大学）	208
B	P2-004 *(E1-25)*	**農産物の新たな複合的環境指標の提案** …… ◎渡辺泰子（東京理科大学），堂脇清志（東京理科大学）	150
A	P2-005 *(E1-23)*	**リンの施肥による増収効果に着目したリン資源の環境効率評価** …… ◎野木茜（立命館大学大学院），村上進亮（東京大学），粟生木千佳（立命館大学大学院，地球環境戦略研究機関），橋本征二（立命館大学）	146
B	P2-006 *(E1-24)*	**低炭素農法を目的としたカーボンフリー CO_2 を用いた野菜の生産性向上及び LCA 解析** …… ◎井手啓介（東京理科大学），堂脇清志（東京理科大学），北畑信隆（東京理科大学）	148
A	P2-007	**農業系バイオマスの物質フローと循環利用率** …… ◎谷畑佑典（立命館大学）	354
B	P2-008	**タイにおける食品残渣を原料としたバイオガスプラントのライフサイクルコスト分析** …… ◎小井土賢二（福島大学），竹内一佐枝（名古屋大学），長谷川達也（名古屋大学）	356
A	P2-009	**温州ミカン栽培の環境影響評価** …… **慣行法と周年マルチ点滴灌水同時施肥法の比較** ◎志村もと子（農研機構西日本農業研究センター），高橋英博（農研機構西日本農業研究センター），渡邊修一（農研機構西日本農業研究センター），松森堅治（農研機構西日本農業研究センター），笠原賢明（農研機構西日本農業研究センター），清水裕太（農研機構西日本農業研究センター）	358
B	P2-010 *(C1-07)*	**外食産業を対象にした食品ロスと廃棄物の環境影響評価** …… ◎小川俊治（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	56
A	P2-011 *(B2-07)*	**適切化技術によるトマトの食品損失削減シナリオに関する環境インパクト評価** …… ◎吉沢慎（東京理科大学）	204
B	P2-012	**環境保全型農業による水稲栽培のインパクト評価** …… ◎青芳樹（茨城大学），内田晋（茨城大学）	360
A	P2-013	**寿司チェーン店におけるサプライチェーンを通じた環境配慮** …… ◎有見亜佐土（横浜国立大学），種田あずさ（横浜国立大学），松田裕之（横浜国立大学）	362
B	P2-014	**宇都宮市内の小・中学校を対象とした食育の取り組みの実態調査** …… ◎菱沼竜男（宇都宮大学），大森玲子（宇都宮大学）	364
A	P2-015	**フードロス削減有効策におけるフードバンクの有用性の検証** …… ◎塚原直樹（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	366
B	P2-016 *(B2-08)*	**新冷媒を用いた野菜のコールドチェーンにおける品質維持方法の提案** …… ◎大野彰之（東京理科大学），堂脇清志（東京理科大学）	206
A	P2-017	**途上国における食生活変化に伴う温室効果ガス・フットプリント変化量の定量評価ーパラオ共和国を対象としてー** …… ◎清水喬文（名古屋大学），中村晋一郎（名古屋大学），飯田晶子（東京大学），中谷隼（東京大学），小野雄也（東京大学），加藤博和（名古屋大学）	368
B	P2-018	**有機薄膜太陽電池による日本のトマト施設栽培からの LC-CO_2 排出量の削減** …… ◎レオン愛（京都大学），FarzanehHooman（京都大学），山末英嗣（立命館大学），石原慶一（京都大学）	370
A	P2-019 *(D3-03)*	**カイコによる検査薬を対象とした環境影響評価** …… ◎立原航揮（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学），鈴木健夫（シスメックス株式会社），一口毅（シスメックス株式会社），宇佐美昭宏（シスメックス株式会社）	310

B	P2-020 *(B3-06)*	**土地利用の変化と生物多様性の減少：森林植生による生物多様性の違いを考慮した影響評価** …… 326 ◎植屋純平（立命館大学），橋本征二（立命館大学）
A	P2-021 *(C1-25)*	**PRTR 対象物質に着目したケミカルフットプリントデータベースの開発** …… 134 ◎小藤直（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）
B	P2-022 *(D2-07)*	**アパレル産業における消費者嗜好を考慮した環境影響評価** …… 218 ◎酒匂郁輔（東京理科大学）
A	P2-023	**家庭洗濯における超濃縮液体洗剤の環境負荷低減効果の評価** …… 372 ◎山口庸子（共立女子短期大学），中村弥生（共立女子短期大学）
B	P2-024 *(D1-03)*	**UV 印刷を対象とした環境影響評価** …… 30 ◎川島雄介（東京都市大学），内田弘美（東洋インキ SC ホールディングス），富川恵子（東洋インキ SC ホールディングス），伊坪徳宏（東京都市大学）
A	P2-025	**印刷物のカーボンフットプリント** …… 374 ◎牛久深雪（工学院大学），稲葉敦（工学院大学）
B	P2-026	**旅行商品のタイプⅠラベル認証基準の作成** …… 376 ◎末吉普（工学院大学），稲葉敦（工学院大学）
A	P2-027 *(D2-08)*	**レガシーと持続可能性を考慮したイベント評価手法の開発と活用** …… 220 ◎池田雄貴（東京都市大学），越川延明（セレスポ），伊坪徳宏（東京都市大学）
B	P2-028	**イベントにおける CO_2 排出量の算定方法の検討** …… 378 ◎阿部由夏子（工学院大学），稲葉敦（工学院大学）
A	P2-029	**国際基準による内子町のグリーンツーリズムの評価** …… 380 ◎西口光（芝浦工業大学），中口毅博（芝浦工業大学）
B	P2-030 *(C1-01)*	**消費者の環境配慮製品選択を促す情報表示の設計** …… 18 ◎石川奈那（東京大学），文多美（東京大学），平尾雅彦（東京大学）
A	P2-031	**消費と水銀排出量との関係** …… 382 ◎市川拓也（立命館大学）
B	P2-032 *(D2-04)*	**消費者の生活価値観と環境配慮行動の関係** …… 184 ◎木村大（千葉工業大学），柴田清（千葉工業大学）
A	P2-033 *(D2-01)*	**産業連関表と家計支出統計の接続表を用いたカーボンフットプリントの GHG 排出削減効果の推計** 178 ◎環野真紀（東京大学），浅野康仁（京都大学），井原智彦（東京大学）
B	P2-034 *(A2-07)*	**ライフサイクル思考と環境配慮行動の関係性を探る** …… 196 **ライフサイクル思考の測定尺度の開発** ◎森健太朗（横浜国立大学），本藤祐樹（横浜国立大学）
A	P2-035 *(A2-06)*	**ライフサイクル思考の学びが環境配慮行動の意思決定過程に与える影響 -2-** …… 194 ◎田髙初奈（横浜国立大学），平山世志衣（特定非営利活動法人横浜 LCA 環境教育研究会），高岡由紀子（グリーン購入ネットワーク），津田祥子（日本 LCA 学会），水野建樹（特定非営利活動法人横浜 LCA 環境教育研究会），松本安生（神奈川大学），松本真哉（横浜国立大学）
B	P2-036 *(A2-17)*	**ライフサイクル思考に基づく環境教育実施による体系的な思考力に対する影響** …… 238 ◎森正敬之（東京都市大学），北村祐介（elsa），伊坪徳宏（東京都市大学）
A	P2-037 *(D3-01)*	**HDD と SSD を対象とした環境影響評価** …… 306 ◎山崎有平（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）
B	P2-038	**クラウドシステムの CO_2 削減効果の研究** …… 384 ◎近藤優貴（工学院大学），稲葉敦（工学院大学），並河治（日立製作所），前川均（日立製作所），諸星勝（日立製作所）
A	P2-039	**ICT の社会的価値の評価方法の開発** …… 386 ◎武田明日花（工学院大学），稲葉敦（工学院大学），並河治（日立製作所），前川均（日立製作所）
B	P2-040 *(D1-02)*	**電子書籍端末による読書習慣と満足度の変化を考慮した、読書における環境影響評価** …… 28 ◎天沢逸里（東京大学），井原智彦（東京大学），花木啓祐（東京大学）
A	P2-041 *(D1-01)*	**森林保全を考慮したピアノの環境影響評価** …… 26 ◎渡邊杜人（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）
B	P2-042 *(E2-03)*	**パルプ紙とストーンペーパーの環境影響評価** …… 190 ◎阪西達矢（工学院大学），本下晶晴（国立研究開発法人産業技術総合研究所），田原聖隆（国立研究開発法人産業技術総合研究所），稲葉敦（工学院大学）

A	P2-043 *(A2-01)*	労働に注目したソーシャル LCA 用データベース開発 ◎唐戸将大（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	154
B	P2-044 *(A2-02)*	SLCA を用いた綿製衣料品の製造過程における労働問題のホットスポット分析 ◎土屋潔浩（東京大学），井原智彦（東京大学）	156
A	P2-045 *(D2-14)*	室内空気質汚染と一般大気汚染を対象としたライフサイクル健康影響評価手法の開発 ◎枝廣あかり（東京都市大学），湯龍龍（農業環境技術研究所），伊坪徳宏（東京都市大学）	262
B	P2-046 *(D2-17)*	日常生活における低線量被曝を対象とした健康影響評価 ◎寺本麻実（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	268
A	P2-047 *(D2-16)*	ジャカルタにおける睡眠困難の実態把握とエアコン導入効果の定量化 草間蓮（東京大学），◎井原智彦（東京大学）	266
B	P2-048 *(D2-15)*	地域性を考慮した飛行機騒音の健康影響評価 ◎山本遼（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	264
A	P2-049 *(A3-01)*	低圧バイオメタノール合成システムのインパクト評価 ◎石山智之（東京理科大学），布浦鉄兵（東京大学），堂脇清志（東京理科大学）	282
B	P2-050 *(A3-06)*	植物への CO_2 施用を考慮した PSA の LCA 評価 ◎永石平（東京理科大学），井手啓介（東京理科大学），亀山光男（ジャパンブルーエナジー），堂脇清志（東京理科大学）	320
A	P2-051	三重県南伊勢町のバイオマス利活用について ◎甲斐穂高（鈴鹿工業高等専門学校），中道隆広（長崎総合科学大学），石橋康弘（熊本県立大学）	388
B	P2-052	水素利用システムの CO_2 排出削減量の検討 ◎樋口尚輝（工学院大学），稲葉敦（工学院大学）	390
A	P2-053 *(B1-03)*	地域単位での地中熱ヒートポンプのライフサイクル CO_2 削減効果 ◎早乙女裕紀（横浜国立大学），本藤祐樹（横浜国立大学），森泉由恵（横浜国立大学）	14
B	P2-054 *(B1-08)*	LCA 分析を考慮した家庭用 SOFC-CGS における環境的統合化指標の提案 ◎佐藤聖史（東京理科大学）	52
A	P2-055 *(B1-07)*	2 段 PSA と酸化金属を用いた複数段でのバイオ水素の低温脱硫システムの環境評価 ◎黒田祥平（東京理科大学），堂脇清志（東京理科大学）	50
B	P2-056	色素増感太陽電池の導入ポテンシャルおよび環境・経済性評価 ◎関谷知治（立命館大学），吉川直樹（立命館大学），天野耕二（立命館大学）	392
A	P2-057	産業連関表を用いた技術導入の社会経済性分析 ―種子島を例に― ◎兵法彩（東京大学），尾下優子（神戸大学），大野肇（東北大学），中井美和（東京大学），福島康裕（東北大学），菊池康紀（東京大学）	394
B	P2-058 *(C1-17)*	藻類バイオマスを用いた航空機の環境影響評価 ◎根本知亜記（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	88
A	P2-059 *(A3-02)*	バイオガソリン製造用触媒の設計への LCA の適用 ◎奥山泰世（昭和シェル石油），小池充（昭和シェル石油），田村正純（東北大学大学院），中川善直（東北大学大学院），今井章雄（昭和シェル石油），冨重圭一（東北大学大学院），福島康裕（東北大学大学院）	284
B	P2-060 *(E3-03)*	部品の段階まで考慮したプラスチックのマテリアルフローの分析と寿命関数の推定 ◎丸山多聞（東京大学），中谷隼（東京大学），森口祐一（東京大学）	316
A	P2-061	触媒開発・設計に向けたライフサイクルアセスメント ◎川音侑輝（東北大学），福島康裕（東北大学），大野肇（東北大学）	396
B	P2-062 *(C1-24)*	産業連関分析を用いた日本におけるマテリアルフットプリントの評価基盤の構築と活用 ◎永野健太（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	132
A	P2-063	産業連関マテリアルフロー解析を用いた製品由来炭素固定量の時系列定量分析 ◎佐藤博一（東北大学），大野肇（東北大学），福島康裕（東北大学）	398
B	P2-064 *(A1-25)*	関与物質総量を用いた日本の鋼材生産に関わる採掘活動量の定量化 ◎小柳津顕（立命館大学），CraviotoJordi（立命館大学），中島謙一（国立環境研究所），松八重一代（東北大学），村上進亮（東京大学），山末英嗣（立命館大学）	118
A	P2-065 *(E3-07)*	主要国における二次亜鉛資源の類型 ◎ MaungKyaw Nyunt（Ritsumeikan University），LwinCherry Myo（Ritsumeikan University），橋本征二（Ritsumeikan University）	348

B	P2-066 *(A1-03)*	インジウムの需給バランスから見た太陽光パネルリサイクルの意義 …… 6 ◎高柳達（立命館大学），中島謙一（国立環境研究所），村上進亮（東京大学），橋本征二（立命館大学）
A	P2-067 *(A1-17)*	包括的なリスク要因抽出に基づいた銅のサプライチェーンリスク解析 …… 68 ◎山﨑裕貴（東北大学），松八重一代（東北大学），中島謙一（国立環境研究所），村上進亮（東京大学），長坂徹也（東北大学）
B	P2-068	非金属鉱物を対象とした日本の環境効率の評価 …… 400 ◎田中大介（立命館大学），DENTESebastien M. R.（立命館大学），粟生木千佳（立命館大学大学院，地球環境戦略研究機関），橋本征二（立命館大学）
A	P2-069	日本における白金族金属類二次埋蔵量評価 …… 402 ◎福谷大樹（立命館大学），橋本征二（立命館大学）
B	P2-070	低炭素発電技術に使用される金属のクリティカリティ評価 …… 404 ◎宮本渉（立命館大学），橋本征二（立命館大学）
A	P2-071 *(A1-24)*	動的 MFA を用いた鉄鋼循環に伴う Ni および Cr の散逸削減可能性の推算 …… 116 ◎武山健太郎（東北大学），大野肇（東北大学），松八重一代（東北大学），中島謙一（国立環境研究所），近藤康之（早稲田大学），長坂徹也（東北大学）
B	P2-072 *(A1-22)*	日本における鉄鋼材中の不純物元素濃度の決定要因の解明 …… 112 ◎太田暁（東京大学大学院），醍醐市朗（東京大学大学院），後藤芳一（東京大学大学院）
A	P2-073 *(A1-23)*	日本とオランダにおける鉄スクラップへの不純物元素混入源の比較 …… 114 ◎纐纈将太（東京大学），醍醐市朗（東京大学大学院），後藤芳一（東京大学大学院）
B	P2-074 *(A1-16)*	責任あるニッケル資源利用に向けたサプライチェーンリスク要因解析 …… 66 ◎佐々木翔（東北大学），松八重一代（東北大学），中島謙一（国立環境研究所），村上進亮（東京大学），長坂徹也（東北大学）
A	P2-075	社会における物質の滞留時間を考慮した蓄積物質使用効率指標の提案 …… 406 ◎八柳有紗（立命館大学），谷川寛樹（名古屋大学），橋本征二（名古屋大学）
B	P2-076 *(A1-04)*	半導体産業に着目した窒素のマテリアルフロー分析 …… 8 ◎片桐究（東北大学），松八重一代（東北大学），竹田修（東北大学），朱鴻民（東北大学），長坂徹也（東北大学）
A	P2-077 *(B2-02)*	金属材料の耐腐食性機能の定量評価手法の構築 …… 164 ◎吾妻優美（東京大学），醍醐市朗（東京大学），後藤芳一（東京大学）
B	P2-078	発表キャンセル
A	P2-079 *(A2-03)*	OECD 加盟国内における都市品質と住民の生活満足度の関係 …… 158 ◎藤田省一郎（慶應義塾大学），伊香賀俊治（慶應義塾大学），村上周三（建築環境・省エネルギー機構），川久保俊（法政大学），山崎潤也（慶應義塾大学），鈴木健太郎（慶應義塾大学）
B	P2-080	地区別の人口動向を考慮した新築および既存住宅数と自治体による二酸化炭素排出量割合の違いの将来推計 …… 408 ◎堀星至（東京大学大学院），石河正寛（国立環境研究所），松橋啓介（国立環境研究所），田崎智宏（国立環境研究所）
A	P2-081 *(B3-01)*	2050 年に向けた日本の産業のシナリオ検討 …… 290 ◎玄地裕（産業技術総合研究所），稲葉敦（工学院大学）
B	P2-082 *(A2-04)*	持続可能な開発目標の理念に基づく新興国を対象とした都市品質格差の時系列評価 …… 160 ◎邉見隼人（慶應義塾大学），伊香賀俊治（慶應義塾大学），村上周三（建築環境・省エネルギー機構），川久保俊（法政大学），山崎潤也（慶應義塾大学），藤田省一郎（慶應義塾大学）
A	P2-083 *(E3-04)*	水銀排出による世界各国の健康影響評価 …… 318 ◎佐藤祐也（東京都市大学），小野雄也（東京大学），伊坪徳宏（東京都市大学）
B	P2-084	超高齢社会の進展が自治体のごみ処理システムにおよぼす環境的影響の評価 …… 410 神戸市でのケーススタディ ◎小田実紀（神戸大学），蔡佩宜（神戸大学），田畑智博（神戸大学），片桐恵子（神戸大学）
A	P2-085 *(E1-04)*	高断熱住宅の普及に影響する地域特性を考慮した自治体の評価手法の提案 …… 40 ◎石戸拓朗（慶應義塾大学），伊香賀俊治（慶應義塾大学），川久保俊（法政大学），鈴木健太郎（慶應義塾大学），山崎潤也（慶應義塾大学），大束開智（慶應義塾大学）

B	P2-086	**低炭素型家庭ごみ処理システムの研究** ◎出口明日香（工学院大学），稲葉敦（工学院大学），田中浩二（e.s.feed 株式会社）	412
A	P2-087	**都市規模やインフラ条件に応じて適用可能なエネルギー回収型廃棄物処理システムの評価フレームの構築** ◎田代颯馬（和歌山大学），松田雄太郎（和歌山大学），中尾彰文（和歌山大学），山本祐吾（和歌山大学），吉田登（和歌山大学），靏巻峰夫（和歌山工業高等専門学校）	414
B	P2-088 *(E2-08)*	**マイクログリッドによる CO_2 削減効果から見た街区構成と生活スケジュールの評価** ◎佐藤惇（東京大学大学院），栗栖聖（東京大学大学院），花木啓祐（東京大学大学院）	226
A	P2-089	**Scenarios of phosphorus flow from agriculture and domestic wastewater in Myanmar** ◎ LwinCherry Myo（Ritsumeikan University），村上真理（Ritsumeikan University），MaungKyaw Nyunt（Ritsumeikan University），橋本征二（Ritsumeikan University）	416
B	P2-090	**南海トラフ巨大地震における災害廃棄物仮置場の検討** ◎水谷一平（立命館大学），立尾浩一（日本環境衛生センター），橋本征二（立命館大学）	418
A	P2-091 *(D1-18)*	**人口減少社会における一般廃棄物処理施設のマネジメント** ◎渡辺梓（立命館大学），橋本征二（立命館大学）	98
B	P2-092 *(D3-07)*	**東南アジアにおける家電製品の素材リサイクルによる TMR 削減ポテンシャル評価** ◎山末英嗣（立命館大学），安永玲華（京都大学），JordiCravioto（立命館大学）	342
A	P2-093 *(D1-24)*	**災害廃棄物処理システムの環境的、経済的評価方法の開発** ◎若林陽平（神戸大学）	140
B	P2-094 *(D1-19)*	**中国広東省における建築廃棄物の持続可能な管理に着目した廃棄物産業連関表の構築** ◎董岩（東北大学），松八重一代（東北大学）	100
A	P2-095 *(D1-16)*	**Development of municipal solid waste collection system in Jalalabad city, Afghanistan** ◎ BawarMohammad Jamal（立命館大学），橋本征二（立命館大学）	94
B	P2-096 *(E1-20)*	**全日本学生フォーミュラ大会参加車両の環境影響評価** ◎越田悠揮（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	110
A	P2-097 *(E1-18)*	**電気自動車用リチウムイオン電池のリユース及びリサイクルにおける技術選択支援** ◎阿部将宜（東京大学），杉山弘和（東京大学），平尾雅彦（東京大学）	106
B	P2-098 *(A1-06)*	**資源消費と大気汚染を考慮した鉄道車両の環境フットプリント** ◎岩倉湧也（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	42
A	P2-099 *(E1-17)*	**自動車の技術変化と素材に着目した資源需要分析** ◎松井健裕（東北大学），松八重一代（東北大学），山末英嗣（立命館大学），長坂徹也（東北大学）	104
B	P2-100	**トラックの車両重量別の LCA 研究** 大井康寛（関東学院大学），冨岡佳祐（関東学院大学），◎佐野慶一郎（関東学院大学），八木田浩史（日本工業大学），小杉信明（いすゞ自動車）	420
A	P2-101 *(E2-15)*	**国際貿易を考慮した食料消費に関わる淡水資源需給バランスの将来シナリオ評価** ◎山口陽平（立命館大学），田村賢人（立命館大学），吉川直樹（立命館大学），橋本征二（立命館大学），天野耕二（立命館大学）	274
B	P2-102 *(D2-03)*	**家計消費とプラネタリー・バウンダリー：淡水利用について** ◎佐々木貴央（立命館大学），本下晶晴（産業技術総合研究所），南斉規介（国立環境研究所），橋本征二（立命館大学）	182
A	P2-103 *(B1-22)*	**気候変動の適応策を思考した節水トイレの環境影響評価** ◎岡崎真優子（東京都市大学），佐々木秀樹（パナソニック株式会社），伊坪徳宏（東京都市大学）	120
B	P2-104 *(B1-23)*	**逆浸透法を用いた海水淡水化施設の環境影響評価** ◎黒川賢治（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学），小関康雄（東京都市大学），大熊那夫紀（一般財団法人造水促進センター），杉本和明（一般財団法人造水促進センター）	122
A	P2-105 *(C2-08)*	**環境・社会側面を対象とした日本版ホットスポット分析手法の開発と活用** ◎一杉佑貴（東京都市大学），村主さとみ（東京都市大学），鈴木春生（東京都市大学），藤井千陽（国立研究開発法人 産業技術総合研究所），田原聖隆（国立研究開発法人 産業技術総合研究所），近藤康之（早稲田大学），伊坪徳宏（東京都市大学）	214
B	P2-106	**地方自治体の森林管理方法の評価** ◎鶴田将貴（工学院大学），稲葉敦（工学院大学）	422

A	P2-107 *(A1-18)*	生産資源の安定的供給に向けたクリティカリティ評価手法の構築 …… 70 ◎中駄将人（東京大学），醍醐市朗（東京大学），後藤芳一（東京大学），畑山博樹（国立研究開発法人 産業技術総合研究所）
B	P2-108	海外インベントリデータの簡易推計手法の構築 …… 424 IDEA への反映 ◎小林謙介（県立広島大学），中野裕貴（県立広島大学），中井健士郎（県立広島大学），藤井千陽（産業技術総合研究所），横田真輝（産業技術総合研究所），田原聖隆（産業技術総合研究所）
A	P2-109 *(E2-02)*	樹種別を考慮した木材のインベントリデータベースの開発 …… 188 ◎土屋成（東京都市大学），伊坪徳宏（東京都市大学）
B	P2-110	広島県内市町村における森林資源の利用状況と将来資源量の検討 …… 426 県北部自治体におけるケーススタディー ◎若林國久（県立広島大学），坂神槙一（県立広島大学），山本綾香（県立広島大学），小林謙介（県立広島大学）
A	P2-111 *(E3-08)*	提供サービスに基づいた物質ストック変遷の分析 …… 350 ◎河村洋佑（東京大学大学院），醍醐市朗（東京大学大学院），後藤芳一（東京大学大学院）
B	P2-112	将来の木材需要を考慮した森林資源量の試算 …… 428 ◎山本綾香（県立広島大学），坂神槙一（県立広島大学），若林國久（県立広島大学），小林謙介（県立広島大学）
A	P2-113	インベントリ分析における評価精度向上に関する検討 …… 430 IDEA Ver.2 を用いた住宅における多様な環境負荷物質の誤差分析試算 ◎恒川智美（県立広島大学），小林謙介（県立広島大学），田原聖隆（産業技術総合研究所）
B	P2-114	近年の木材パルプ平均使用回数の推計 …… 432 ◎肖瀚（立命館大学），橋本征二（立命館大学）
A	P2-115	京都産材を用いた木製治山ダムによる環境保全・地域活性化の効果検証 …… 434 ◎長井翔太朗（立命館大学），橋本征二（立命館大学）
B	P2-116 *(C3-01)*	産業連関分析を活用した組織の環境フットプリント評価手法の開発 …… 298 ◎村主さとみ（東京都市大学），一杉佑貴（東京都市大学），田原聖隆（国立研究開発法人 産業技術総合研究所），近藤康之（早稲田大学），伊坪徳宏（東京都市大学）
A	P2-117	工学院大学生協の Scope3 …… 436 ◎松本奈々（工学院大学），高野須悠人（工学院大学，e.s.feed 株式会社），稲葉敦（工学院大学），田中浩二（e.s.feed 株式会社）
B	P2-118	Scope3 から組織の LCA への展開ツールの開発 …… 438 ◎山田要（工学院大学），稲葉敦（工学院大学），本下晶晴（国立研究開発法人産業技術総合研究所），田原聖隆（国立研究開発法人産業技術総合研究所）
A	P2-119	工学院大学の SCOPE3 …… 440 ◎高野須悠人（工学院大学），松本奈々（工学院大学），田中浩二（e.s.feed 株式会社），稲葉敦（工学院大学）
AB	P2-SCN	日本 LCA 学会学生交流ネットワーク 2016 年度活動報告 …… 442 ◎江口昌伍（九州大学），横井崚佑（東京大学），田髙初奈（横浜国立大学），伊藤亮太（横浜国立大学），一杉佑貴（東京都市大学），高柳達（立命館大学）

1日目
(3/1)

1日目　3月1日（水）　A会場

13:20 – 14:20　**K-1 プラチナ構想から見たライフサイクル思考への提言**

小宮山宏氏（三菱総合研究所，プラチナ構想ネットワーク）

プラチナ社会から見たライフサイクル思考への提言

Proposal for lifecycle thinking from the perspective of a Platinum Society

○小宮山　宏*[1)]
Hiroshi Komiyama
1）三菱総合研究所
* komiyama@mri.co.jp

1. 人類史の転換期

現在、私達人類は転換期を生きている。産業革命の飽和、人工物の飽和、長寿化の三点の指標により転換期の状況を示した上で、新たな将来ビジョンとしてのプラチナ社会について述べる。

1.1 産業革命の飽和

世界の一人当たりGDP、CO2濃度の変化を図1に示す。約200年前の産業革命がこの状況を一変させ、生産性を飛躍的に増大させた。産業革命が普及した国は先進国になりCO2を大量に排出し、一人当たりGDPが増加した。有限の地球の中で産業革命とそれに伴う豊かさが飽和しつつあることが、現在を歴史的転換期と位置づける第一の背景である。

1.2 人工物の飽和

一人当たりの自動車台数を図2に示す。日本は0.45～0.48台であるが、他の先進国もほぼ同じ値の約0.5台であることに気づく。すなわち、先進国は2人に1台の自動車を持った時点で保有台数が飽和している。現在、日本には6,000万台の自動車がある。これが定常状態であるから、廃車台数だけ新車が売れる。自動車は約12年で廃車になることから、6,000万台を12で割った値の500万台が新車の需要となるはずであり、現在、日本の平均的な内需はこの値で推移している。途上国も飽和に向かっている。中国に10年遅れてインドが飽和し、アフリカ諸国もそれに続くであろう。この人工物の飽和が、歴史的転換期の第二の背景である。

1.3 長寿化

前掲の図1に人類の長寿化の様子も示した。20世紀初頭からの1世紀あまりの間に、世界の平均寿命が31歳から70歳にまで延びたことが分かる。食料確保に不安を持たず、長寿が常識化した時代を人類が史上初めて経験していることが、転換期である第三の背景である。

1.4 21世紀のビジョン「プラチナ社会」

社会が食や自動車に代表される物質的豊かさを求める時代には、豊かさに直結するGDPは社会の目標として適切であった。しかし、先進国ではすでにGDPで多くの人の充足感を得ることはできない。人類史的転換期における先進国では、クオリティー・オブ・ライフ（QOL）の向上を社会目標とすべきだと考える。量的な豊かさをほぼ達成した先進国に加えて、あと数年で量的豊かさを獲得するだろう中国などの途上国が求めるものも、やはりクオリティである。GDPを直接目標とせず、QOLを求めることが新しいビジネスを生み出し、結果的にGDPも増大させる。このためには、ビジョンが必要である。

量的に豊かで、高いQOLを享受できる社会、そうした来るべき社会をプラチナ社会と定義する。ただ長生きするのではなく、自立した長生き、健康な長生き、社会に参加できる長生きという、広い意味でいう誇りある人生を個人が送ることが可能な社会が求められている。誇りを持って輝くという意味で、そのような社会をプラチナ社会と呼ぶ。

プラチナ社会の必要条件を図3に示す。エコロジー、資源の心配がないこと、だれでも参加できること、雇用があること、自由な選択などが挙げられる。

2. プラチナ社会とラフサイクル思考

プラチナ社会において新たな需要を生み出す分野、つまり創造型需要として、省エネルギー、再生可能エネルギー、都市鉱山が挙げられる。ここでは都市鉱山を取り上げ、ライフサイクル思考との関係を延べる。

2.1 都市鉱山

日本には地下資源が少ない。しかし、リサイクルによって金属資源の自給が可能だと考えられる（図4参照）。

2015年、世界全体の鉄鋼生産量は16億トンであった。鉄鉱石を還元して高炉で作った量は12億トン、スクラップから作った量は4億トン、つまりリサイクル鉄はすでに鉄鋼生産量の四分の一に達している。スクラップからの鉄鋼生産のエネルギー消費は、鉄鉱石からの生産と比べ、理論的には27分の1、実際の生産でも3分の1にすぎない。アルミは理論値８３分の１、

実際の生産で３０分の１である。スクラップは鉱石よりエネルギー的に優れた資源なのである。

人工物の飽和とは、廃棄量と新たに必要な製造量が等しいこと、すなわち都市鉱山に必要十分な蓄積があることを意味する。必要十分量があること、省エネルギーになること、この二点が金属リサイクルの合理性の根拠である。

1.2 で人工物の飽和という概念を述べたが、自動車の数もビルの数も飽和しているので、新しいものを作るときは同じ量を壊すことになる。自動車であれば 500 万台壊して 500 万台を作る。ただし、この 500 万台は回収されており、捨ててはいない。自動車会社によれば、鉄の回収に加えて、磁石は小さいものまで全て回収している。自動車 500 万台を壊して 500 万台を新しく造ることは、都市鉱山に必要十分な資源があることを意味する。これが、人工物が飽和した先進国の特徴である。すなわち、鉱物資源は新たに買う必要はなくなるのである。

2.2　ライフサイクル思考への提言

2.1 に示したように、プラチナ社会において資源の自給を考える場合は、ライフサイクル思考を前提として考えている。一方、LCA の場合、部分最適化の観点から個別の製品やシステムの分析は行われているものの、日本全体を俯瞰した持続可能性への取組みは十分ではないと見受けられる。

今後は、日本全体を俯瞰した LCA を実現していくことで、戦略的観点からみた日本全体の持続性社会の構築に LCA を活かすべきである。

日本は、少なくとも 70%の自給率を目指し、優れた技術力によって世界を牽引すべきなのである。この実現に向けて、LCA の取組みを進めていただきたい。

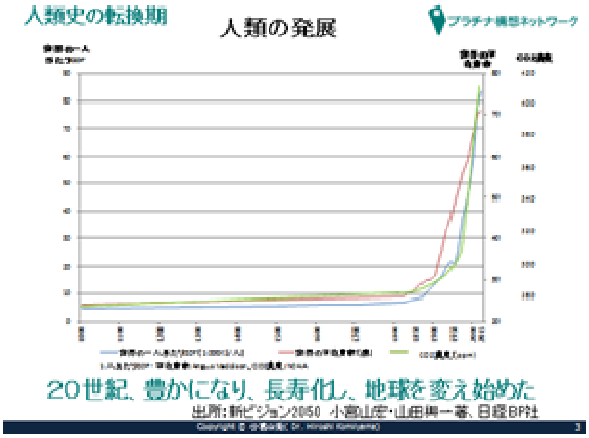
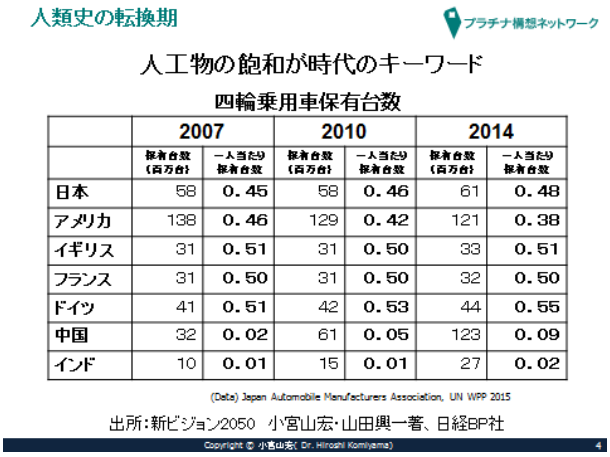


図１　人類の発展



	2007		2010		2014	
	保有台数（百万台）	一人当たり保有台数	保有台数（百万台）	一人当たり保有台数	保有台数（百万台）	一人当たり保有台数
日本	58	0.45	58	0.46	61	0.48
アメリカ	138	0.46	129	0.42	121	0.38
イギリス	31	0.51	31	0.50	33	0.51
フランス	31	0.50	31	0.50	32	0.50
ドイツ	41	0.51	42	0.53	44	0.55
中国	32	0.02	61	0.05	123	0.09
インド	10	0.01	15	0.01	27	0.02

(Data) Japan Automobile Manufacturers Association, UN WPP 2015

図２　四輪自動車保有台数

図３　プラチナ社会の必要条件

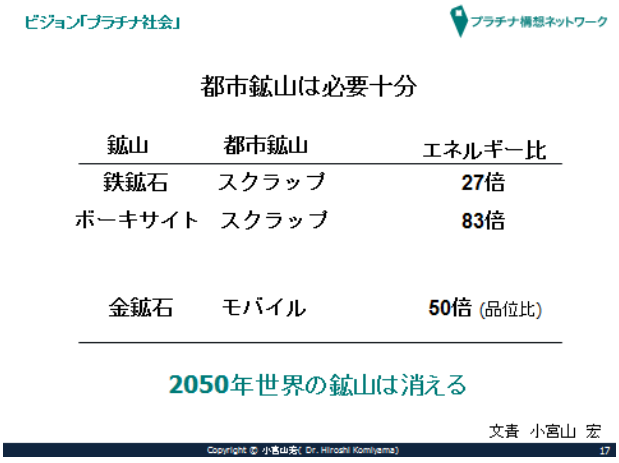


図４　都市鉱山は必要十分

タイムテーブル

1日目　3月1日(水)

<table>
<tr><th></th><th>A会場</th><th>B会場</th><th>C会場</th><th>D会場</th><th>E会場</th></tr>
<tr><td>9:40-10:00</td><td rowspan="4">持続的な資源利用</td><td rowspan="4">再生可能エネルギー</td><td rowspan="4">コミュニケーション</td><td rowspan="4">製品LCA(1)</td><td rowspan="4">建築・住宅</td></tr>
<tr><td>10:00-10:20</td></tr>
<tr><td>10:20-10:40</td></tr>
<tr><td>10:40-11:00</td></tr>
<tr><td>11:00-11:20</td><td colspan="5">休憩</td></tr>
<tr><td>11:20-11:40</td><td rowspan="3">交通</td><td rowspan="3">水素・燃料電池</td><td rowspan="3">食品廃棄物</td><td rowspan="3">廃棄物(1)</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>11:40-12:00</td></tr>
<tr><td>12:00-12:20</td></tr>
<tr><td>12:20-13:20</td><td colspan="5">昼休み</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="5">A会場</td></tr>
<tr><td>13:20-14:20</td><td colspan="5">基調講演</td></tr>
<tr><td>14:20-14:40</td><td colspan="5">移動</td></tr>
<tr><td>14:40-15:00</td><td rowspan="5">資源リスク</td><td rowspan="5">気候変動の
緩和策と適応策</td><td rowspan="5">バイオ燃料</td><td rowspan="5">廃棄物(2)</td><td rowspan="5">自動車</td></tr>
<tr><td>15:00-15:20</td></tr>
<tr><td>15:20-15:40</td></tr>
<tr><td>15:40-16:00</td></tr>
<tr><td>16:00-16:20</td></tr>
<tr><td>16:20-16:40</td><td colspan="5">休憩</td></tr>
<tr><td>16:40-17:00</td><td rowspan="4">鉄鋼</td><td rowspan="4">水</td><td rowspan="4">データベース</td><td rowspan="4">災害</td><td rowspan="4">食と一次産業(1)</td></tr>
<tr><td>17:00-17:20</td></tr>
<tr><td>17:20-17:40</td></tr>
<tr><td>17:40-18:00</td></tr>
</table>

循環型社会、Circular Economy の先に見えるもの

Beyond Circular Economy and Sound Circulation Society

○原田幸明
Kohmei HALADA
物質・材料研究機構

1. はじめに

2015 年の 12 月欧州委員会は資源効率(Resource Efficiency)の取り組みの重要な柱として Circular Economy を打ち出した。その後、富山 G7 環境サミットや G7 資源効率国際シンポジウムなどの国際的取り組みが進むとともに国内的にも本学会の Circular Economy 研究会などの主催による数度のシンポジウムが開催され、「Circular Economy とはなにか」がかなり鮮明になってきた。本稿は、それらの議論を経て明らかになってきた Circular Economy の目指すものを述べるとともに、それが我が国がこれまで目指してきた循環型社会との対比を明確にする。そして、その結果、いわゆる静脈産業に対する影響について述べるとともに、これからのグローバルな展開の在り方について考察する。

2. 資源効率改善を循環による経済活性で!

Circular Economy はそもそもヨーロッパの活力の創出を目指す Europe2020 の 7 つの旗のひとつである Resource Efficiency を推進するものとして打ち出されたものであり、環境政策というより経済政策という側面が強い。また、我が国では、「資源・環境」と「地球温暖化対策」を対置してそのリンケージがしばしば議論されるが、これは我が国の環境対策予算の多くが「エネルギー特会」という財源措置でなされるための特殊事情であり、欧州においては Resource Efficiency を推し進めることの重大な要素が気候変動対策であり、その意味では全力で地球環境問題へと立ち向かえる論理的構成はできてやーおり、リサイクルの効果を CO2 削減で説明せねばならないような馬鹿げた現象は起きない。むしろ、気候変動対策を大きく推し進めるための経済的モチベーションを経済と結びやすい”資源”についてその効率改善として与えていく、そしてそのアクションの方向として Circular Economy を打ち出しているとして見るべきである。

経済的モチベーションを与えるという意味でこの Circular Economy はヨーロッパ的に将に時宜を得ている。グローバルな製品生産はいまやアジアの国々の後景を拝するようになり、国内には若年労働者の雇用が減少しているなど、どこに経済の打開の方向を見出すのかが問われている。そのような中で持続可能と一社会という国際的にも先頭を切れる長期目標を与えつつ、循環をビジネスにするということでヨーロッパ内の新規需要と産業を掘り起こす。またそのための措置として、「資源税」などの施策を、「保護主義」などとの批判を受けることなく打ち出していく。そしてその結果として、短期的には、域外から調達される資源とその廃棄物である CO2 の少ない社会が形成され、長期的にはそれがグローバル・スタンダードとなればよいのである。

すなわち、Circular Economy は環境政策ではなく、環境をモチベーションにする経済政策であるとみておく必要がある。

3. 日本式循環型社会との違い

Circular Economy はそのまま直訳すれば「循環経済」であり、これが特に我が国では大きな誤解を与えている。前にもみたように Circular Economy のポイントは「経済」であり、「循環」は目標ではなくモチベーションの置き場である。

それに対して、我が国の「循環型社会」は、大量の廃棄物の発生を循環することによって抑えるということに動機づけられた社会形成の目標なのである。すなわち我が国の循環型社会は循環型の社会システムを造ることによって廃棄物などの問題を解決しようとする「問題解決型」であるのに対して、Circular Economy は”系外から資源を取り入れない”手法の代表として「循環」という言葉を使っているにすぎず、「循環」システムの構築が問題解決であるということには重きを置いていない。この部分が特に我が国の企業にはわかりにくく、かつ、「ヨーロッパは口先だけだ」という安易な理解を生むのである。

図 1 はアメリカで作成された図であるが、Circular Economy の特長をよく表している。様々な「循環」があるように見えるが、その多くは reuse の形態を分けたものであり、むしろ co-use や share といった循環より所有に関わる部分の盛り込みが新しい。さらに循環ループの前に product design が入っており、そこでは regenerate の供給とともに”build to last”(しっかりしたものをつくる)ということがうたわれている。そして Circular Economy のアクションプランには”durability (耐久性)”の言葉が随所に登場する。

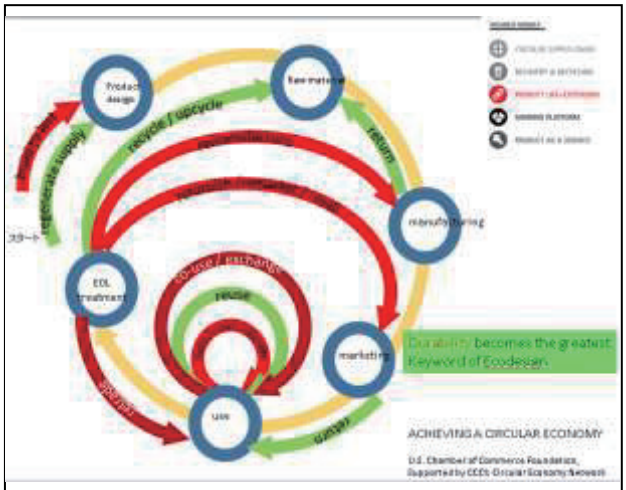


図 1　Circular Economy における循環

「長寿命」はこれまでエコデザインのコンセプトの中では重視されつつ、「循環」の概念に入りにくかったために比較的後景に置かれてきた概念であった。それを Circular Economy は大々的に取り上げている。「しっかりしたものをつくる産業を保護し、それをメンテナンスする産業を育成する」これが Circular Economy のメッセージである。

とすれば、日本の循環型社会モデルとは大きく異なってくる。図 2 にその対比を示した。

	3R (日本式循環型社会)	CE(Circular Economy)
目的	最終処分の減量 (アウトプット)	資源効率の改善 (インプット)
利得	社会の経済外負担の軽減	多資源消費大規模製造とは異なる新規の投資対象の形成
主な手段	再資源化	使用済み製品の高度多様再利用
使用済製品	再資源化の対象	使うべき対象
主な主体	リサイクラー、製造業の環境担当	使用サービス提供者、中小の製品化業

図 2　日本式循環型社会と Circular Economy

ひとことで言うと、日本の循環型社会は廃棄物を削減する静脈産業に視点がいっているが、欧州の Circular Economy は製品の利用とメンテナンスを通じて形成される毛細血管的な代謝の活性に重点を置いている。

4. Circular Economy は「循環経済」か?

ここまで来ると Circular Economy を「循環経済」と訳すことで起きるミスディレクションは明らかであろう。そもそも循環の「循」とは「ものに寄り添ってまわる」、「環」とは「かこむ」ことであり、「循環」は社会システムの外周を形成する大きなループを「静脈」としてつくることを意味している。これは日本式循環型社会にとってはまさに適語であった。しかし欧州の Circular Economy は、むしろ毛細血管のように体内に製品とサービスのビジネスを行き渡らせようと狙っている。むしろ「循環」というよりは「代謝」に近い発想である。さらにいうならば、あまねく(遍)めぐる(廻)ということで「遍廻」社会と呼ぶのがふさわしいかもしれない。

5. 「循環」に付加価値を与える

実は「循環」以上に「経済」がミスディレクションを与えているのかもしれない。日本語の「経済」は「経世済民」からくるマクロ概念であり、economy は家政からくるミクロ概念であるとよく言われる。日本的にとらえると経済は社会の構造であり、循環システムをそれに乗せて回すことになる。しかし circular economy はむしろミクロな動機づけの要素が大きい。既存経済の枠組みではなく、「循環」に新たな付加価値をつけてビジネスを生み出そうとするところにポイントがある。

現に、今でも”同じ性能”のものが”同じ価格”で提供されたにらリサイクル物と非リサイクル物では前者が選ばれる傾向になってきている。ただ現在の既存経済の枠組みでは”同じ性能”を追求することを放棄して”安い価格”で取引することになる。それに対して”同じ性能”まで持っていくことで「持続可能性」に対する付加価値分を引き出しうる economy へという意識が circular Economy の中にある。しかもそれを消費行動の中に求めるのではなく、投資行動のなかに形成しようとしているところをよく見ておくべくべきである。

6. Mottainai の経済化

このように循環型社会は持続可能社会に向けたひとつの社会的ソリューションへの努力でありそれを現行経済の上にどのように着地させるかという努力が払われてきたが、Circular Economy は逆に「持続可能性」という価値を経済の中にもちこんで新たな経済活性の種にしようとしている。

そのために、実現力は日本の方が高い。ﾘﾏﾆｭﾌｧｸﾁｬﾘﾝｸﾞもアイシンが世界の先進例であり、産業共生の典型例は日本のセメント産業である。しかし、それをコンセプチャルに展開し投資行動に影響を与え、経済の枠組みそのものを書き換えていくには至っていない。欧州がそれを書き換えることができたなら、結局はその要素に組み込まれていくだけになろう。しかし Circular Economy のモチベーションが欧州という地域経済の活性化である限り、そこにはおのずと限界がある。

解決力のある日本からコンセプトは発信できていないか? 実はできている、Circular Economy の中に述べられていること、これはわれわれが「勿体ない」という言葉で語るそのものである。しかも、その「勿体ない」は「欧州域のため」というような孤立主義的要素は全くなく、人間の活動域が拡大し世界が小さくなった今、世界中に発すべき言葉である。「Mottainai の経済化」これこそ、小さな地球を救うためにいまわれわれが取り組まねばいけない課題である。

希少金属資源の需要の増大と社会的持続可能性との関係の評価

Evaluation of relationship between global demand for critical metals and sustainability using social indicators

○塚本尚*[1)]、南齋規介[2)]、東野達[1)]
Nao Tsukamoto, Keisuke Nansai, Susumu Tohno
1) 京都大学，2) 国立環境研究所
* tsukamoto.nao.32s@st.kyoto-u.ac.jp

1. 研究背景と目的

エネルギー分野における持続可能な発展には再生可能エネルギーを始めとする新エネルギー技術の普及が不可欠である[1)]。新エネルギー技術の導入によって温室効果ガスの排出抑制が期待される一方で、燃料電池やモーターなどの核となる技術に投入される希少金属の需要増加が見込まれる。こうした資源需要の拡大は資源採掘量の増加のみならず、採掘現場で生じる汚染物質や土地改変等の環境負荷の増大を招く。資源消費と環境的課題との因果関係を定量的に解明する既存研究は少なくなく、環境的側面から見た資源消費の持続可能性の検証は進展しつつあると言えよう[2)]。

一方、資源消費と社会影響との関係に目を向けると、採掘拡大に伴う土地の権利や人権において、採掘国に負の影響をもたらすことが懸念されている。よって、持続可能な発展に求められる多岐に渡る社会的課題と資源消費とのつながりを網羅的に洞察するアプローチの開発と実証研究の必要性は高いと考えらえる。加えて、将来の見通しという点では、希少金属を含め金属の将来需要の推計[3)]とそれに起因する環境負荷の変化に着目した研究は存在するが[4)]、社会影響を示唆する研究はない。

そこで本研究では、資源需要と持続可能な発展に向けて克服すべき社会的課題との関連性を検討し、その関係性を定性的に明らかにする。さらに、資源需要が誘引する資源採掘国の社会影響の将来変化を定量的に考察する。なお、資源のうちでもとりわけ新エネルギー技術に不可欠な希少金属を対象とする。

2. 研究手法

2.1. 社会的課題とその影響指標の選定

本研究では、考慮すべき社会影響の枠組みとして、国連が掲げている持続可能な開発目標（以下、SDGs と記す）の 17 項目のうち、社会的課題に対する目標である 8 項目を取りあげ、各目標を観察するグローバル指標を抽出した[5)]。社会的課題に対する目標の 8 項目と、それに対応するグローバル指標は SI の表 S1 に記した。

2.2. 資源採掘量と社会影響指標との関係性

金属の採掘量と社会影響指標との関係を明らかにするため、ポアソン回帰分析を用いて選択した指標と採掘量との関係性及びその影響度を確認し、金属ごとに考察を深めるべき社会影響の優先付けを行った。 説明変数として、一人あたりの GDP 及び、希少金属 10 種 (Li, RE, Co, Pd, Ta, Pt, Ni, W, Cr, Mo)，ベースメタル 5 種 (Al, Cu, Fe, Zn, Pb)及び Au の年間採掘量の計 17 変数を設定し、式(1)の回帰式を用いた。なお，yは回帰式の目的変数で社会影響の定量的指標を、x_iは回帰式の説明変数で一人あたりの GDP 及び各金属の採掘量を、a_iは係数、εは誤差を表す。

$$y = \exp\left(a_0 + \sum_{i=1}^{17} a_i x_i + \varepsilon \right) \quad (1)$$

データは 2000 年、2005 年及び 2011 年の 3 年分の 189 か国の各数値を用いた[5)]。ただし，データの入手が困難な指標に関しては 3 年分未満のデータで分析を行った。

2.3. システムダイナミクスによる資源採掘と社会影響の関係評価

本研究では、希少金属の採掘と社会影響との相互的で複雑な関係を可視化し、動的な関係を明らかにするためにシステムダイナミクス[6)]（以下、SD と記す）を用いる。まず、 2.2 で述べた回帰分析によって更に関係性を追うべき金属種を抽出し、その金属の主な採掘国一国をシステム境界とする。 そして、ターゲットとなった金属の採掘と社会影響との関係性を因果ループ図によって定義する。本研究における SD 図は、3 つの部門（採掘を含めた資源部門、経済部門[7)]、社会部門）によって構成される。次に、 各部門において要素間の関係式の導出を行う。 その後、希少金属需要の将来推計データを入力値として、社会影響指標の将来推計値を算出し、 回帰分析によって得られた回帰係数との比較を行い妥当性の検討を行う。

3. 結果と考察

表 S1 の SDGs の 8 項目の中の 12 個の社会指標で、回帰分析に十分なデータが存在している指標に関して分析を行った結果、Ta や Pd をはじめ多くの希少金属種の採掘量と各指標との間で、目標を悪化させる関係が見られた。それらの結果のうち特に p 値が高かったものに関しては SI の図 S1 にまとめた。

また、図 1 の通り、12 個の指標について各金属の回帰係数の符号を見てみると、Pd や Ta，Co，Pt，Au は多くの指標に対して悪化させる関係があることがわかった。つまり、これらの金属の採掘が増加することで、SDGs の達成を妨げ、持続可能でない状態になる可能性がある。

Pt は採掘量の増加によって多くの社会指標から見た持続可能性を悪化させる関係を示すが、近年の新エネルギー技術に多く利用されており、資源の持続可能性という観点からも重要な金属と位置づけられている [7]。そこで、世界一の Pt 産出国である南アフリカの Pt 採掘に関わる社会影響をケーススタディとして SD モデルを作成した。図 2 は、Pt 採掘による資源部門への影響 [7]及び社会・経済影響の因果ループ図である。本モデルでは、Pt 採掘と貧困（指標：1.99$以下で暮らす人口）や教育（指標：学校に通っていない子どもの人数、読み書きできる成人の数）、児童労働（指標：採掘に関わる児童労働の人数）等との関わりが反映されている。

図 2 から、金属の採掘の影響が社会・経済に影響を与え、各部門内でフィードバックを形成しながら、資源部門に返ってくる、または他部門に影響を与える様子が分かった。これらのフィードバックには影響を強化するループと影響を抑制するループが存在する。資源と経済にまたがるフィードバックでは、Pt の採掘が増加すると、収入が増え採掘意欲を増大させ更に採掘を増加させるループが存在する一方で、採掘の増加に伴い、雇用が増えその分のコストが増えるために利益が減り採掘を縮小させるループが存在する。また、採掘で得た資金が周辺地域の雇用機会を増やして貧困を改善し、教育や健康水準を上げる影響が見られる。

このモデルを用いて、今後南アフリカでの Pt 採掘量の増加シナリオに従って、社会影響指標の変化を定量的にシミュレーションした結果を発表する。

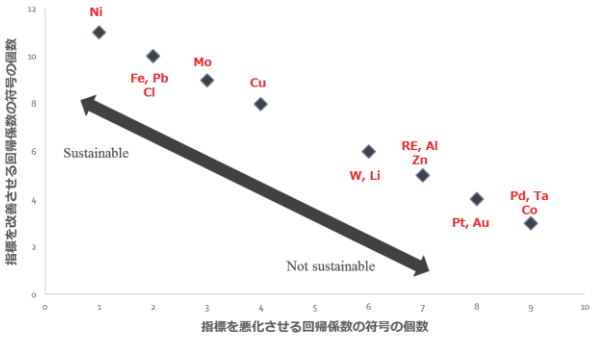


図 1　各金属の SDGs の 12 個の社会指標に対する回帰係数の符号の個数（符号の意味については SI の S2 を参照）

4. 参考文献

1) 馬場洋三：“金属資源レポート”，JOGMEC, (2009), pp.546-551
2) Ferreira H., Leite M.G.P.: J. Cleaner Prod., 108, (2015) , pp.1081-1091
3) Alonso E., Sherman A.M., Wallington T.J., Everson M.P., Field F.R., Roth R., Kirchain R.E.: Environ. Sci. Technol., 46, (2012), pp. 3406−3414
4) Golev A., Scott M., Erskine P.D, Ali S.H., Ballantyne G.R.: Resources Policy, 41, (2014), pp. 52-59
5) The World Bank Group: “World Bank Open Data”, The World Bank Group, 入手先 <http://data.worldbank.org/>, （参照 2016-12-09）
6) Auerhahn K.: J. Crim. Justice, 36, (2008), pp. 293–300
7) Sverdrup H.U., Ragnarsdottir K.V.: Resour. Conserv. Recy., 114, (2016), pp.130-152

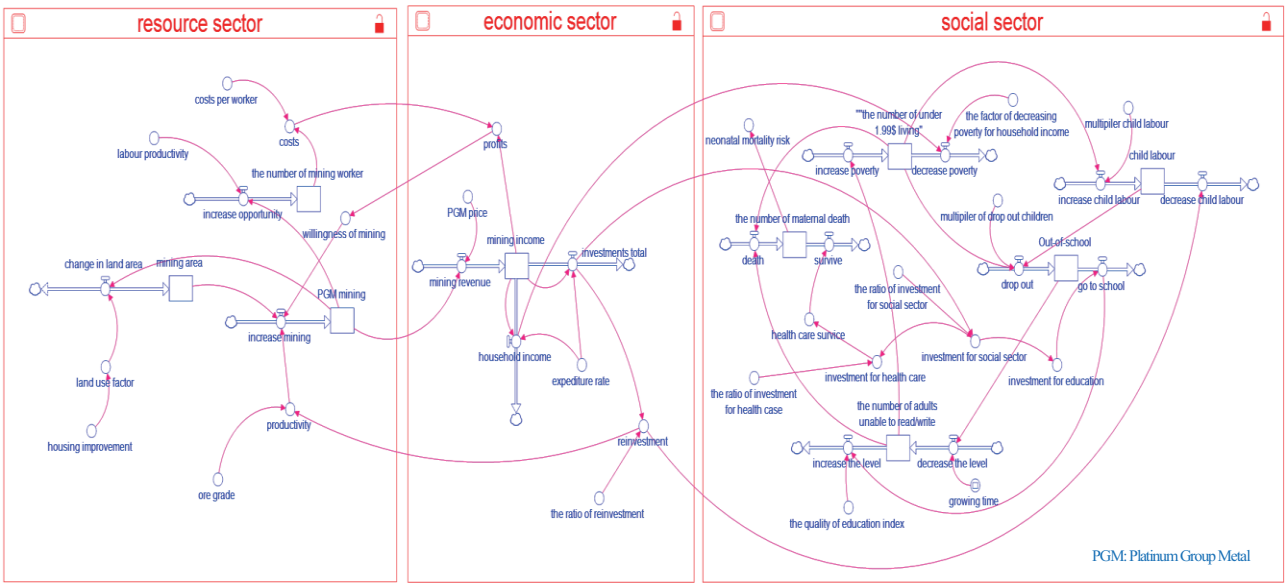


図 2　Pt 採掘による影響の因果ループ図

Supporting Information

表 S1 社会的課題に対する持続可能な開発目標の 8 項目

目標番号	目標内容	指標例
目標1	貧困の改善	1日1.9ドル以下で生活している人の割合、年齢に対して低身長である子の割合、都市におけるスラム人口の割合
目標2	飢餓、食糧問題の改善	十分栄養が与えられて人の数および割合、5歳未満の子のうち成長が年齢に達してない子の割合、5歳未満のこどものうち、肥満である子の割合
目標3	健康的な生活の確保	乳幼児死亡率、妊産婦死亡率、HIV感染率
目標4	質の高い教育の提供	初等教育の年に学校に通っていない子どもの割合、読み書きや数学の最低限の中等教育を受けたこどもの割合、身体的や情緒的に発育が順調な幼児の割合
目標5	ジェンダー平等及び女子のエンパワーメント	15歳以下で、および18歳以下で結婚した女性の割合、議会における、女性の議席の割合、賃金なしで働く女性の割合
目標6	水と衛生の利用可能性の向上	清潔な水資源が利用できる割合、改良された水資源を利用している人の割合、改良された衛生施設を利用している人の割合
目標8	完全かつ生産的な雇用の推進	失業率、労働者1人あたりのGDP（労働生産性）
目標11	包摂的、安全な、住みやい、持続可能な都市の構築	都市におけるスラム人口の割合、人口成長率に対する土地開発率の割合、都市におけるパブリックスペース及びグリーンスペースの割合

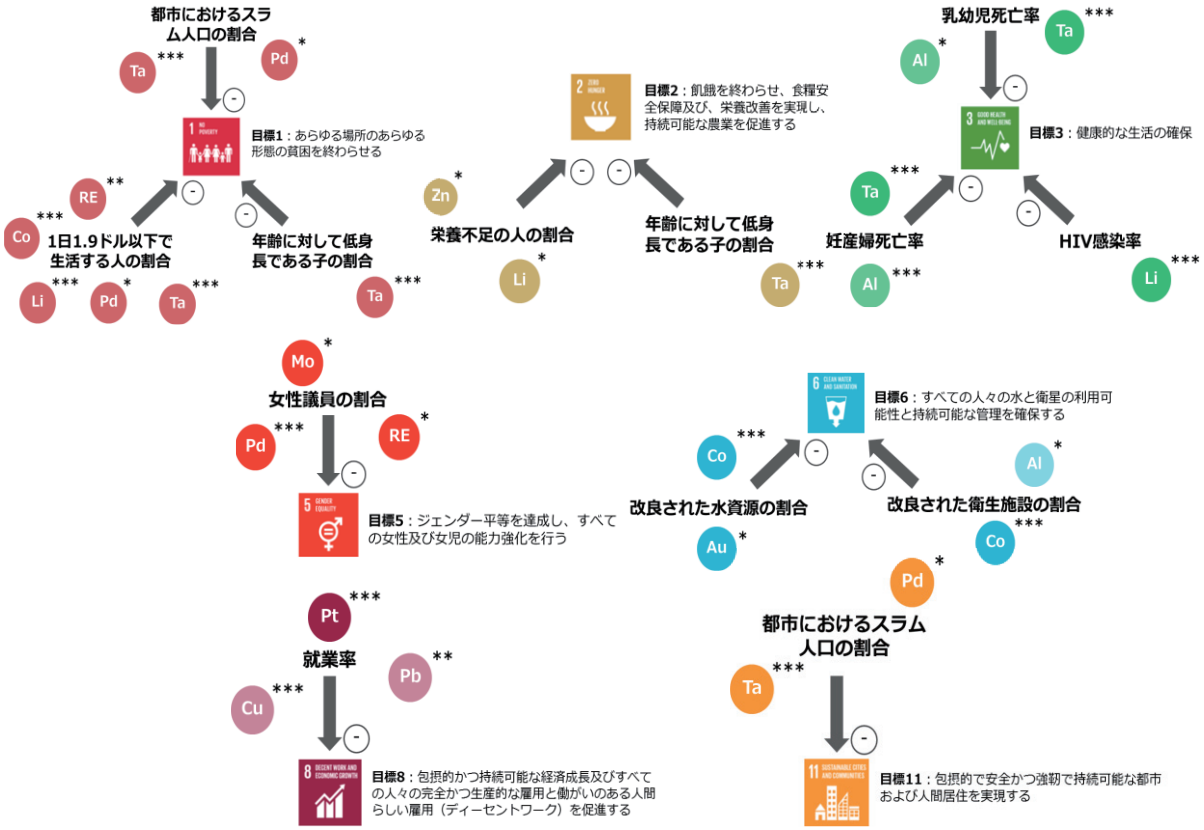


図 S1　SDGs の 12 個の社会指標と金属の採掘量との相関性

S2 図 1 の符号の意味と解釈

回帰分析の目的変数である指標 y には、それ自体の値が増加すると正の影響(sustainable)が大きくなることを示す指標（例えば就業率など）と、その逆で値が増加するとより負の影響(Not sustainable)を示す指標（例えば乳幼児死亡率など）とが混在している。したがって、金属採掘量の増加による正の影響が認められた場合、指標によって回帰係数の正負の符号は異なる。図 1 では、全 12 個の各 y に関する回帰分析に対して、説明変数である金属の採掘量が増加すると正の影響を示す回帰係数の全個数を縦軸に、負の影響を示す係数の全個数を横軸とした。よって、右下の金属種ほど、その金属の採掘量が増加すると負の影響が現れる指標が多くなる。

インジウムの需給バランスから見た太陽光パネルリサイクルの意義

Significance of solar panel recycling from the viewpoint of supply and demand balance of indium

○髙柳達*[1)]、中島謙一[2)]、村上進亮[3)]、橋本征二[1)]
Satoru Takayanagi, Kenichi Nakajima, Shinsuke Murakami, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学、2) 国立環境研究所、3) 東京大学
*rv0020ki@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

環境負荷の小さな自然エネルギーの開発及び利用が年々増加している。特に、太陽光発電は、固定価格買取制度によって、企業のみならず多くの一般住宅で導入されるようになった。こうした太陽光発電の普及は、太陽光パネルに必要なレアメタルの需要の増加及び近未来における使用済み太陽光パネルの排出の増加を意味する。既存研究[1)ほか]では、廃棄されたシリコン系（Si 系）太陽光パネルから Si を取り出し、新パネルの製造に使用するクローズドループ・リサイクルの評価などが行われているが、今後も Si 系太陽光パネルが大きなシェアを維持する可能性は低い。また、化合物系や有機物系太陽光パネルでは様々なレアメタルが使用されていることから、使用済みパネルに含まれる金属を有効利用できれば、レアメタル資源の安定供給の一翼を担うことも期待される。

筆者らは既報[2)]において、日本国内の太陽光発電に注目して関連元素の今後の需給バランスの検討を行ったが、太陽光パネル以外に使用される関連元素についてのより詳細な検討が課題となっていた。本研究では、可採年数の短いインジウム（In）に着目し、太陽光パネル以外の用途への需要も含めて、使用済み太陽光パネルからの In 回収の意義について検討した。

2. 方法

2.1 対象とする使用用途及び製品

In の国内消費内訳[3)]をもとに、対象とする使用用途及び製品を表 1 のとおり設定した。

2.2 製品の国内生産量及び国内出荷量のシナリオ設定

まず、過去の国内生産量及び出荷量について、以下の通り算出した。パチンコ、パチスロ、太陽光パネル以外の製品に関しては、2003 年からの国内生産量、販売量、輸出量のデータ[4)5)ほか]を用い、国内出荷量は販売量から輸出量を差し引くことで算出した。パチンコ、パチスロについては、受注生産が主で輸出入がほとんどないことから、2003 年からの販売量[6)]を国内生産量及び出荷量とした。また、太陽光パネルに関しては、既報[2)]を用いた。

次に、2016 年以降の国内生産量のシナリオについて、以下の通り設定した。パチンコ、パチスロ、太陽光パネル以外の製品に関しては、経済成長率と同様に増加すると仮定し設定した。パチンコ、パチスロに関しては、後述する国内出荷量のシナリオを国内生産量のシナリオとした。また、太陽光パネルに関しては、既報[2)]における国内導入量のシナリオを国内生産量のシナリオとした。

表 1　対象とする使用用途及び製品

用途	製品
FPD 用 ITO ターゲット材	テレビ
	カーナビゲーション
	携帯電話
	パーソナルコンピューター
	デジタルカメラ
	パチンコ
	パチスロ
化合物半導体	太陽光パネル

また、2016 年以降の国内出荷量のシナリオについて、以下の通り設定した。パチンコ、パチスロ、太陽光パネル以外の製品に関しては、まず、過去の世帯または人口あたりの保有台数[7)ほか]についてロジステック回帰を行い、将来の世帯または人口あたりの保有台数を算出して、これに将来世帯数または人口[8)ほか]を乗じることで将来の保有台数を推計した。次に、各年における製品の廃棄量を計算し保有量から差し引くことで各年の国内出荷量のシナリオとした。また、パチンコに関しては、過去の人口に占めるパチンコ参加人口[9)ほか]の割合についてロジステック回帰を行い、将来のパチンコ参加人口割合を算出して、これに将来人口[8)ほか]と参加人口あたり販売台数を乗じることで国内出荷量のシナリオとした。パチスロについては、パチスロ／パチンコの販売台数の比率をパチンコの国内出荷量のシナリオに乗じることで国内出荷量のシナリオとした。太陽光パネルについては、既報[2)]の国内導入量のシナリオを国内出荷量のシナリオとした。

2.3 インジウムの需要量・廃棄量の推計

以上をもとに、In の需要量・廃棄量を下式により推計した。

$$DE(t) = \sum_i P_i(t) * \varepsilon_i(t) \,/\, \alpha_i\,(t) \qquad \cdots(1)$$

$$DI(t) = \sum_{n,i} S_i(n) * \varepsilon_i(n) * D_i(t-n) \qquad \cdots(2)$$

ここで、DE(t)は t 年における In の需要量(t)、$P_i(t)$は t 年における製品 i の国内生産量(台)、$\varepsilon_i(t)$は t 年に生産・出荷

された製品 i における In の含有率(t/台)、$\alpha_i(t)$は t 年に生産･出荷された製品 i の製造時における In の歩留まり(–)、DI(t)は t 年における In の廃棄量(t)、$S_i(t)$は t 年における製品 i の国内出荷量(台)、$D_i(t\text{-}n)$は用途 i の t-n 年後の廃棄率(–)である。$\varepsilon_i(t)$については文献[10)11)ほか]、$\alpha_i(t)$については文献[12) ほか]を参考に、$D_i(t\text{-}n)$についてはワイブル関数[13)]を用いて設定した。

2.4　インジウムの需給バランスの検討

ここで検討する需要量は国内生産において使用される In の量（国内需要量）、供給量は国内で廃棄される太陽光パネルに含まれる In の量（国内供給量）とする。需給バランスの検討では、(1)式における In の需要量と(2)式における In の廃棄量のうち太陽光パネルに含まれる In の廃棄量（供給量）のバランスを検討した。

3.　結果と考察

ここでは、2003年から2050年までのInの廃棄量（図1）及びInの需給バランス（図2）を示す。

Inの廃棄量（図1）に関しては、当面TVからの廃棄量が最も大きく、次にPCからの廃棄量が大きいが、2030年代から、使用済み太陽光パネルからの廃棄量が急増する結果となった。その量は、その他の製品からの合計廃棄量の約7倍（2050年）にもなり、大きな割合を占めるようになると考えられる。

Inの需給バランス（図2）について見ると、2010年頃まではTVでの需要量が大きかったが、これは2011年の地デジ化に向け、国内でのFPD製造が急増したためである。地デジ化の完了以降、TVでの需要量が激減している。その一方、2012年にスタートした固定価格買取制度の影響で、2010年代から太陽光パネルでの需要量が大幅に増加している。本研究における太陽光パネル導入の高位シナリオでは、2030年代から太陽光パネルでの需要がその他の製品での需要量の2倍以上となっており、太陽光パネルを国内で生産するとすれば、多くのInが必要になると考えられる。図1に示すようにInの廃棄量が最も大きい太陽光パネルからの廃棄量（供給量）と全体でのIn需要量を比較すると、太陽光パネルからの廃棄量（供給量）は、2050年に向けてInの国内需要量の約25%を占めるようになり、使用済み太陽光パネルからのInの回収は、一定の意義を持つものと考えられる。

なお、本研究では、ITOターゲット材を使用する電気電子機器7種類を対象としたが、他の製品（デジタルビデオなど）にも相当量のInが使用されていると考えられる[12)]。今後は、対象電気電子機器を増やし、より包括的に需給バランスを検討することが重要である。また、近年、発光ダイオード（LED）の利用が増加している。LEDは寿命が長いため、短期的にはその廃棄量は小さいと考えられるが、LEDの需要増加に伴い、生産段階でのIn需要量は増加すると考えられる。今後は、LEDを考慮に入れた需給バランスの検討も必要である。

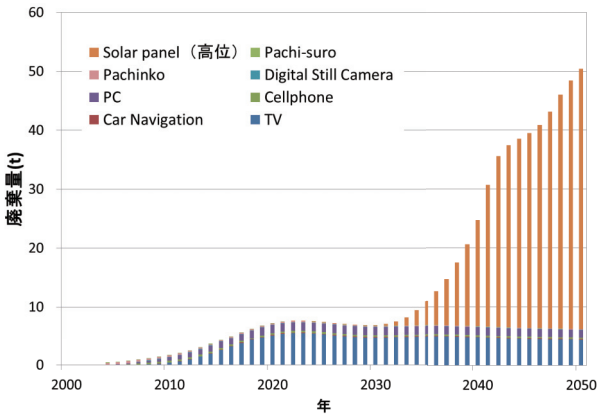


図1　Inの廃棄量

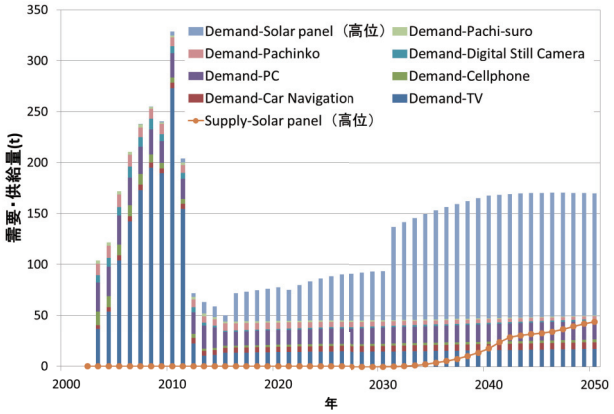


図2　Inの需給バランス

謝辞：本研究は、環境省環境研究総合推進費（1-1402）及び科学研究費補助金（26281056）による成果である。

参考文献

1) 岡島敬一、内山洋司：日本 LCA 学会誌、5(4)、521-528、2009
2) 高柳達、中島謙一、村上進亮、橋本征二：第 10 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、252-253、2015
3) JOGMEC: 鉱物資源マテリアルフロー、2015
4) 経済産業省：生産動態統計年報、機械統計
5) 財務省：貿易統計
6) 一般社団法人パチンコ・トラスティ・ボード：パチンコ・パチスロ産業関連データ、2016
7) 内閣府：消費動向調査、主要耐久消費財等の保有及び買替え状況
8) 国立社会保障･人口問題研究所：日本の将来推計人口、2012
9) 公益財団法人日本生産性本部：レジャー白書、2015
10) 環境省：使用済み小型家電からのレアメタルの回収及び適正処理に関する研究会とりまとめ、2011
11) シャープ株式会社：液晶パネルからのインジウムの回収技術、2007
12) 中島謙一、横山一代、中野加都子、長坂徹也：日本金属学会誌、72、99-104、2008
13) 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、50-60、2006

半導体産業に着目した窒素のマテリアルフロー分析

Material flow analysis on nitrogen focused on semiconductor industry

○片桐　究*[1]、松八重　一代[1]、竹田　修[1]、朱　鴻民[1]、長坂　徹也[1]
Kiwamui Katagiri, Kazuyo Matsubae, Osamu Takeda, Zhu Hongmin, Tetsuya Nagasaka
1) 東北大学
* Kiwamu.katagiri.r5@dc.tohoku.ac.jp

1　背景

半導体は「産業の米」と呼ばれるほど、現代社会に必要不可欠なものであり、パソコン、携帯電話、家電製品、自動車など様々な所で用いられている。半導体産業において、窒素ガスや窒素化合物は、重要な産業ガスであり、例えば窒素はキャリアガスや希釈ガスとして､アンモニアはドーピングガスとして、三フッ化窒素は洗浄ガスとして使用されている。2015 年の半導体の世界市場は 3350 億 USD にも上ると推計され[1)]、今後数十年でさらに成長することが見込まれており、それに伴って窒素や窒素化合物ガス等の半導体用高純度ガスの需要も国際的に増加することが予想される。また、LED (Light emitting diode)や高出力 RF(Radio friquency)パワーアンプへ利用される窒素化合物半導体市場の成長も著しく[2)]、その市場の急激な成長は産業ガス、特に窒素源としてのアンモニアの更なる需要の増加を引きおこす。アンモニアは主にハーバーボッシュ法によって、大気中の窒素から製造される[3)]。原料となる窒素は地球上ではありふれたものであるが、半導体用高純度のアンモニアを製造する設備や拠点は限られている。そのため半導体の持続的な生産や確保には、高品位のアンモニアや窒素ガスの安定確保ならびに、生産体制の弾力性改善が求められる。アンモニア製造の主要なプロセスであるハーバーボッシュ法は高温高圧化での反応により、多大なエネルギーを消費し、二酸化炭素を大量に発生させる。また洗浄プロセスから排出される三フッ化窒素は温室効果ガスとしても知られ、半導体産業の温暖化ガス排出削減の観点からもこれらの窒素含有ガスの管理は重要である。さらに窒素はリンやカリウムと並ぶ生物にとって必要不可欠な栄養素のひとつであり、工業生産だけでなく農業生産プロセスにとっても重要な元素である。農業分野において肥料として生産効率の向上のカギを握っており、一方で化学工業分野においてはアンモニアとして、化学製品を生み出すための主要生産物である。このような背景から、本研究では半導体産業に着目したマテリアルフロー分析を行った。対象年は 2012 年とし、窒素のマテリアルフロー分析（MFA）および、半導体産業に着目したアンモニアや他の窒素化合物ガス MFA を行った。その後、半導体生産技術の変化による窒素フローの変遷を推計し、現代と将来における窒素の弾力性の改善について議論した。

表 1 半導体産業で使用される主なガス

ガス名称	主な用途
窒素	キャリアガス・希釈ガス
アンモニア	窒化処理・ドープ処理
三フッ化窒素	エッチング
亜酸化窒素	酸化被膜の作製
一酸化窒素	酸化被膜の作製
二酸化窒素	酸化被膜の作製
トリメチルアミン	エッチング
N-メチル-2-ピロリドン	洗浄・フォトレジストシンナー

2　半導体産業と窒素

半導体産業は半導体素子や集積回路の製造が主要であり[2)]、そのプロセスにおいて使用される主な窒素および窒素化合物ガスは表 1 で示すような用途で用いられる。主な用途はキャリアやドープ、酸化膜の作製、エッチング等であり、窒素ガスは不活性ガスとしてキャリアや希釈の用途に使われる。これらの多くは最終的に環境に排出されると考えられ、アンモニア以外の窒素化合物ガスも同様である。一方で窒素源としてはアンモニアが用いられていることから[4)] 半導体産業から蓄積にまわる窒素のほとんどがアンモニア由来であることが推測される。窒化物半導体はシリコン系半導体と比較するとまだ市場規模は小さいが､蛍光灯の代替として用いられる LED 等にも用いられていることから今後需要が増大することが予測されている。窒化物半導体として主にあげられるのはⅢ-Ⅴ族窒化物半導体と呼ばれる､窒化ガリウム（GaN）､窒化インジウム（InN）､窒化アルミニウム（AlN）およびその混晶である。窒化物半導体は広いバンドギャップを持つため、絶縁耐性が高く、それを活かした低損失で高出力の電子デバイスへの利用が期待されている。窒化物半導体製造過程

ではシリコンのそれと比べ、より多くのアンモニアを用いるため、半導体産業に向かう窒素ガス需要は窒化物半導体市場規模によって変動することが予想される。

3　窒素フロー解析

3.1　分析方法

対象年は 2012 年とし、日本国内を対象範囲とした部門は食料分野、工業分野および廃棄物・環境分野に分類した。分析をおこなうにあたり財務省貿易統計、食料需給表、化学工業統計年報等を参照した。

3.2　結果

3.2.1　国内窒素フロー

図 1 に 2005 年 [2]および 2012 年の日本における窒素全体の流入量（国内外から食料・飼料および化学工業に流入する量）並びにその内訳を示す。2012 年において、およそ 1200kt の窒素が、漁業や家畜や輸入を通して、食料や飼料として流入していた。これは 2005 年の流入量の 1400kt と比較すると減少しており、主な要因は漁業および輸入分野の減少によるものである。一方、化学産業分野には、アンモニアとして 201kt が海外から、国内生産として 832kt が入ってきている。2005 年はそれぞれ 178kt と 1085kt であり、輸入の割合が増加していることが示唆されている。主な輸入先はインドネシアやオーストラリアであった。

3.2.2　半導体産業と国内窒素フロー

2005 年から 2012 年にかけて食料・飼料への流入、国内アンモニア生産量およびアンモニア以外の窒素化合物の輸入量の縮小が見られたが、アンモニアの輸入量は増加していた。しかし図 2 に示すようにアンモニアの国内での経済活動の規模の縮小は見られず、また図 3 に示した半導体産業においても大きな収縮は見られなかったが、LED に代表される光学系半導体素子については拡大していた。このことから、

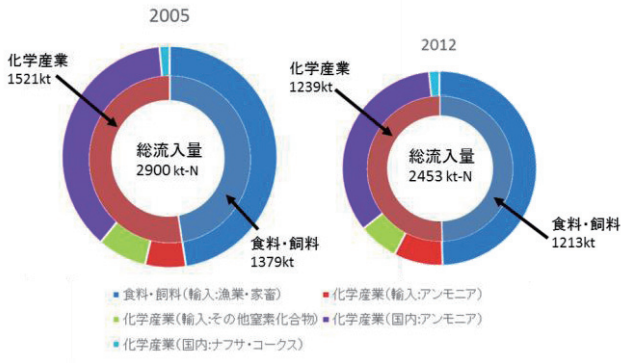


図 1　日本への窒素の総流入量および内訳 [4-6)]

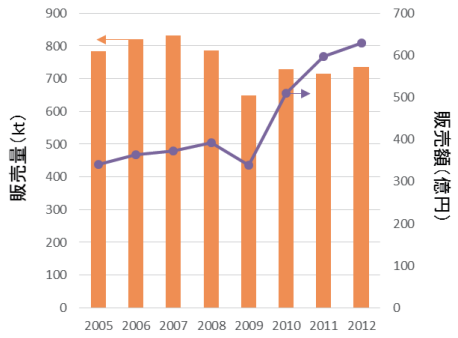


図 2 日本のアンモニア販売量および販売額 [6)]

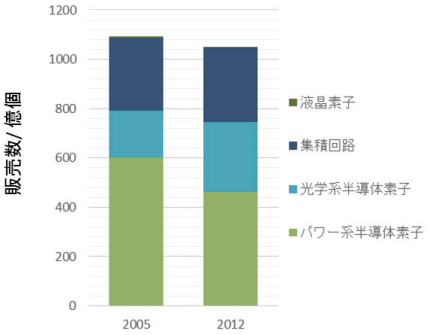


図 3 2005 年と 2012 年の半導体材料販売数 [8)]

今後、半導体産業の需要増大による窒素需要の増大、アンモニアの需要増大が予想される。

4　考察

窒素資源のマテリアルフローを作成する準備段階として日本への窒素の流入量を算出した。日本への流入量は全体として減少していたが、国内におけるアンモニアとしての経済規模は増大していた。この増大の原因の一つとして半導体産業内での需要が考えられ、今後需要が伸びる可能性の大きい窒化物半導体を含めて、詳細な窒素の流れを追い、窒素の入手や排出について検討の必要がある。

5　参考文献

1) 電子情報技術産業協会 :”第 20 回世界半導体会議（WSC）の開催および結果について”, (2016)
2) 富士キメラ総研: “2015 有望電子部品材料調査総覧（下巻）, (2015), 富士キメラ総研
3) 国立科学博物館:”技術の系統化調査報告　第 12 集”, (2008)
4) Amano H., Sawaki N.,Akasaki I., Toyoda Y.: Appl. Phys. Lett., 48(5), (1986), pp.353-355
5) 貿易統計、財務省
6) 食料需給表、農林水産省
7) 化学工業統計年報、経産省
8) 溝口修史, 松八重一代, 南齋規介, 中島謙一, 稲葉陸太, 長坂徹也,第 9 回日本 LCA 学会研究発表会, 豊洲, (2014), pp. 102-103
9) 機械統計年報、経産省

離島における海洋温度差発電（OTEC）の影響と効果

Effect and impact of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) in a remote island

○小野奈都美*[1)]、池上康之[2)]、岡村盡[3)]、中村幸雄[4)]、伊佐真賢[1)]、伊藝聡[1)]、田原聖隆[5)]
Natsumi Ono, Yasuyuki Ikegami, Shin Okamura, Yukio Nakamura, Masataka Isa, Satoshi Igei, Kiyotaka Tahara
1)沖縄エネテック, 2) 佐賀大学, 3) ゼネシス, 4) 久米島町, 5) 産業技術総合研究所
* n-ono@o-enetech.co.jp

1. はじめに

沖縄県の離島地域では、主に重油を燃料としたディーゼル発電機による発電がおこなわれている。しかしながら、燃料費の高騰や地球環境に与える影響への懸念から、近年再生可能エネルギーの導入が積極的に検討されている。

久米島は沖縄本島の西に位置する人口 8,000 人程度の離島であり、島の電力は主にディーゼルエンジン発電により供給されている。同島では海洋深層水利用産業が盛んであり、100 kW の海洋温度差発電（以下 OTEC）の実証試験設備による発電が 2013 年から開始された。OTEC は表層と深層の海水の温度差により発電するシステムであり、年間を通じて表層水温が高い低緯度地域では高緯度地域よりも発電ポテンシャルが高く、他の再生可能エネルギーと比較して安定した発電が可能である。このことから OTEC は、負荷変動の影響を受けやすく再生可能エネルギーの導入に課題が多い沖縄県の離島で、安定的な電源として有望視されている。久米島では現在、1MW の発電プラント導入および発電後の海水を他の産業で多段的に利用するシステムを「久米島モデル」として提唱し、実現へ向けて検討を進めている。

我々は、久米島モデルが提案する OTEC を中心とした海洋深層水複合利用システムの環境、社会影響を包括的に評価することを目標とし、本研究では 1 MW OTEC が導入された場合の環境に対する影響と効果を評価することを目的として、LCA を実施した。ここでは主に気候変動に対する影響を評価対象とし、CO_2 排出量とエネルギー収支を、島の主要電源であるディーゼル発電をメインに従来の発電システムと比較することで、離島における影響と効果を定量的に算定した。

2. 方法

2.1 評価対象と範囲

本研究で想定した OTEC 発電システムの概略を図 1 に、OTEC 発電システムの想定条件を表 1 に示す。本研究では 1 MW の陸上設置式 OTEC の建設から運用、廃棄までを評価範囲とし､設備耐用年数を 30 年とした。取水配管について、取水管は口径 1.2～1.4 m の高密度ポリエチレン製とし、深層水取水管は水深 700m、表層水取水管は水深 20m に敷設することとした。
発電システムについて、発電方式はクローズドサイクル、作動流体はアンモニアとし、熱交換器の主原料はチタン鋼材を用いた。

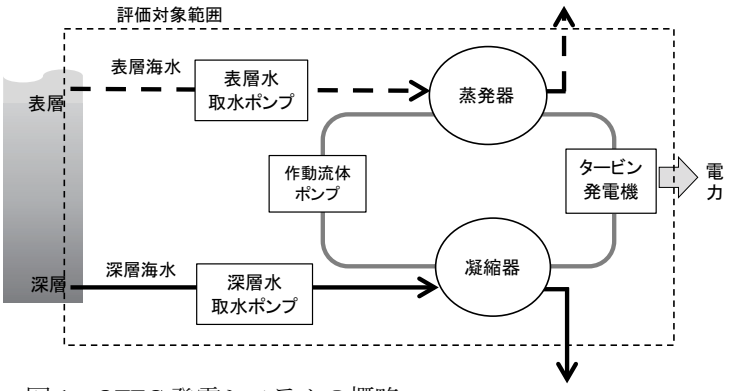


図 1　OTEC 発電システムの概略

表 1　OTEC 発電システムの想定条件

項目	単位	数値
発電端出力（年間平均）	kW	1,660
所内率	%	39.8
送電端出力（年間平均）	kW	1,000
設備利用率	%	85.6
年間発電量	MWh	7,493
耐用年数	年	30

2.2 比較対象

比較対象とする発電システムは、久米島の基幹電源であるディーゼルエンジン発電機による内燃力発電（最大出力 18.5MW）とし、年間発電電力量を 54,000 MWh[1]、耐用年数を 30 年、燃料は C 重油とし、燃料消費率は 0.23g/kWh[2] とした。また、その他の発電方式について、参考値を既存文献より引用した。

2.3 インベントリデータ

素材、機器製造、輸送、発電システムの建設に関する CO_2 排出量及び投入エネルギー量はインベントリデータベース IDEAv2 の原単位データを参照した。また、取水管の建設に係る CO_2 排出量は国土技術政策総合研究所の原単位データ[3] を参照し、エネルギー量は CO_2 排出量の比率より概算した。

なお、OTEC 発電設備の保守修繕など運用に伴う

CO_2 排出量は、試算されている建設費と維持管理費の割合から、建設に伴う CO_2 排出量の 0.8 % / 年とした。

3. 結果と考察

OTEC 建設に伴う CO_2 総排出量は 6.21×10^6 kg-CO_2 であり、エネルギー消費量は 1.02×10^8MJ であった。いずれも素材、機器製造に伴う排出・消費量が多く、配管系の割合が全体の 5 割以上を占めた。配管系の内訳を見ると、排出・消費量の 98 %以上が取水管の製造に係るものであった。一方、発電システムにおいては熱交換器が多くの割合を占めた（図 2）。

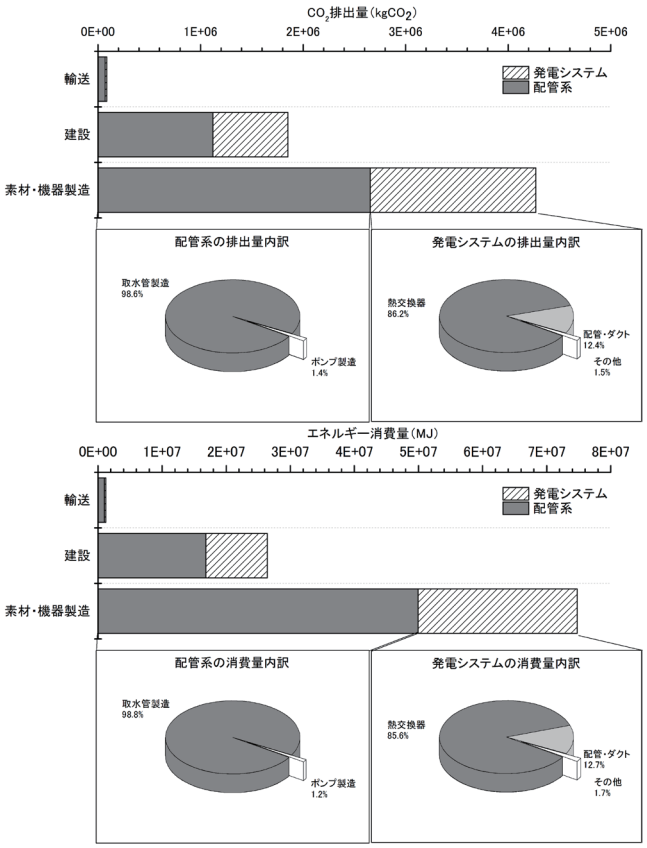


図 2　OTEC 建設に伴う CO_2 排出量及びエネルギー消費量の内訳

1MW OTEC における 1kWh あたりの CO_2 排出量はディーゼル発電と比較して格段に低く、他の発電方式と比較しても高い値ではない。10MW の浮体式 OTEC とはほぼ同程度であると算定された（表 2）。ディーゼル発電における CO_2 排出量は、そのほとんどが C 重油の燃料消費に由来するものである。久米島内で 1MW OTEC のディーゼル発電に対する CO_2 ペイバックタイム（CO_2PT）を計算すると、1.23 年となる。参考として太陽光や風力などの CO_2PT が、太陽光で 2.08～4.17 年 [4]、風力で 0.99～1.36 年 [5] と試算されている（表 2）ことから考えると、久米島における 1MW OTEC の導入は、同島の CO_2 排出量抑制において高い効果が得られるものと考えられる。

またエネルギーペイバックタイム（EPT）は、想定される設備使用年数（30 年）に対して格段に短くなっている。このことから 1MW OTEC は久米島における電源として高い性能を持つものと考えられる。参考として、過去に検討された OTEC やその他の発電方式と比較すると、本研究結果は 2.5MW の陸上式や 10MW の浮体式 OTEC より短く、風力発電よりはやや長いが、太陽光発電とは同程度であった（表 2）。

以上のことから、1MW OTEC は CO_2 排出削減効果、エネルギー効率ともに他の発電方式と遜色なく、久米島における持続可能なエネルギー源として高い効果が期待できると考えられる。

表 2　1MW OTEC とその他の発電方式における CO_2 排出量及びエネルギー収支の比較

	CO_2排出量	CO_2PT	EPT
	g-CO_2/kWh	年	年
OTEC(1MW)	42.9	1.23	1.86*
火力（ディーゼル）発電	831.0	-	-
陸上式OTEC（2.5MW）[6, (7**	119.0	3.12****	4.5
浮体式OTEC（10MW）[8	42.8	no data***	3.76
陸上式OTEC（100MW）[6, (7**	1.4	0.32****	0.46
浮体式OTEC（100MW）[8	12.4	no data***	1.14
太陽光発電[4	46.4～86.8	2.08～4.17	1.41～3.38
風力発電（陸上式）[5**	約25～34	0.99～1.36	0.56～0.79

*：資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」のエネルギー源別標準発熱量（受電端）[9]を基に算定。
**：廃棄段階は含まれていない。
***：CO2ペイバックタイムは算出されていない。
****：石油火力に対するペイバックタイム。

4. まとめと課題

OTEC はスケールメリットが大きいことが特徴である。しかし環境面では、1MW 規模のシステムでも大規模の OTEC 及び他の発電方式と同程度のエネルギー効率と CO_2 排出抑制効果が見込まれ、とりわけ発電効率が悪く化石燃料への依存が深刻な離島地域では、高い効果が得られることが示唆された。さらに陸上式 OTEC では、発電後の海水を他の産業で利用することで、特に影響が大きい取水管敷設の環境影響が按分されると考えられ、1MW OTEC におけるエネルギー効率及び CO_2 排出抑制効果の評価が変わる可能性がある。

久米島モデルではエネルギー自給と島の産業振興を両立するシステムが検討されているが、これによる環境負荷の低減も効果として期待される。今後、本モデルに対する包括的な影響評価の中で、その効果と課題についても明らかにしていきたい。

5. 引用文献

Supporting Information に記載

Supporting Information

【引用文献】

1) 沖縄電力株式会社：“離島における再生可能エネルギー発電設備の連系に関する説明会（資料）” http://www.okiden.co.jp/shared/pdf/whats_new/2014/140529_03.pdf （2016-12-22 参照）

2) (一社) 日本内燃力発電設備協会編, “自家用発電設備専門技術者講習テキスト”, (一社) 日本内燃力発電設備協会 ,東京, (2013), p.3-17.

3) 国土技術政策総合研究所：“社会資本 LCA 用環境負荷原単位一覧表” （2016-12-15 参照） http://www.nilim.go.jp/lab/dcg/lca/top.htm

4) みずほ情報総研株式会社: 太陽光発電システムのライフサイクル評価に関する調査研究, 平成 19～20 年度 NEDO 成果報告書（2009）

5) 天野耕二, 海老原美里： 環境システム研究論文発表会講演集, 29 (2007), pp89-94.

6) 田原聖隆, 小島紀徳, 稲葉敦：化学工学論文集 23(1), (1997), pp88-94.

7) 田原聖隆, 堀内都雄, 小島紀徳：MACRO REVIEW 6(2), (1993), pp35-43.

8) Aalbers, R. R. D.： Diss. TU Delft, Delft University of Technology, (2015).

9) 資源エネルギー庁 : “エネルギー源別標準発熱量及び炭素排出係数の改訂について（平成 27 年 4 月 14 日）” http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/carbon.html （2016-12-28 参照）

LCA 手法に基づくメキシコ・テワンテペク地峡における風力発電の環境影響・コストの統合指標による解析

Integrated Indicator Analysis of Environmental Impacts and Cost of Wind Energy in Isthmus of Tehuantepec, Mexico through LCA

○幸村仁麿*1)、東野 達 1)
Niima Komura, Susumu Tohno
1) 京都大学,
* niimak22@gmail.com

1. Introduction

Isthmus of Tehuantepec is located in Southern Mexico in the State of Oaxaca. The region`s wind resource is expected to be enough to supply the entire electricity demand of Mexico. A national project “Mareña Renovable” started in 2004 got stopped by the resistance from local community due to the environmental concerns. Mexican government pledged to reduce 22% of its greenhouse gas emission by 2030. Therefore, developing suggestions for how to deal with environmental problems for wind energy projects in Isthmus of Tehuantepec is in urgent need. These recommendations may be useful to assist future projects of wind energy in other regions with similar environmental contexts as well as contribute to meet the Paris agreement.

2. Research Objective

The first objective of this research is to quantitatively assess which type of wind power is most suited within Isthmus of Tehuantepec through integrated (energy-environment-economy) assessment under the same condition. Then we identify how each and every engineering material contributes to overall life cycle impact of wind turbine and offer environmentally-friendly alternatives for the materials used in the turbine.

3. Methods and Assumptions

50MW onshore/offshore Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) and 50MW Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) are chosen for the integrated assessment. Offshore wind power is presumed to be installed 30 m deep sea water located around 30 km from the shore. In terms of environmental aspect, life cycle assessment (LCA) using SimaPro 8 software is implemented to provide embodied energy and CO_2 as well as environmental impact factors of EcoIndicator 99 methodology. The boundary of environmental assessment covers extraction/manufacturing of raw material, construction and operation/maintenance. Life time of the three wind powers is assumed to be 20 years. Economic simulations are run with system Advisor Model program funded by the United States Department of Energy to provide data related with the cost and energy production of the wind power. Merging the data of two simulations allows to calculate energy payback time and CO_2 emitted per kWh. Finally, single score is obtained by transforming several indicators to monetary unit in order to evaluate overall performance between the three wind powers.

4. Results

4.1 Integrated Assessment

The result of environmental, economic and energy assessment are illustrated within supporting information (Figures S1-S4 and Tables S1-S2).

With an assumption that feed in tariff in Mexico is 20 euro/kWh and decommissioning cost of wind power is 5% of total installation cost[1)], following equation is used to determine the single score expressed as monetary unit for integrated assessment:

$$\text{Single score(M\$/year)} = \frac{\text{(Life time retribution)-(External cost+Decommisionig cost)}}{\text{Life time}} \quad (1)$$

Here, environmental impact was converted to external cost and uncertainty in external cost for Eco-Indicator 99 ranged from 2.83 to 6.71 euro/point[2)].

Figure 1 indicates that VAWT onshore is less profitable compared to the two HAWTs. Overlap in scores between HAWT onshore and offshore is due to the large uncertainty in external cost. Overall, HAWT is more profitable than VAWT within Isthmus of Tehuantepec.

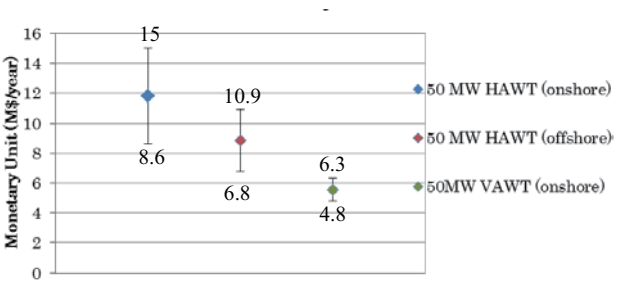


Figure 1: Results of integrated assessment expressed as single score of monetary unit

4.5 Proposal of New Materials

This phase suggests new materials and process routes that will eventually diminish life cycle impact values (Eco-Indicator 99 single score) with assuring the structural needs and functional requirements. Reducing the environmental burden benefits the local community and allows more smooth installation of the wind farm within Isthmus of Tehuantepec. For the government, it contributes to accomplish their goal of having 35% of country's power from renewable energy source by 2024. For the investors, reductions of environmental impact calculated by Eco-Indicator 99 mean increase in monetary unit single score (Eq. (1)) and further attract the investment towards wind farm.

Extraction and manufacturing stage contributes approximately all of energy flow (see Figure S5 illustrating 99.2% contribution of this stage in total impact of 50MW HAWT offshore from SimaPro 8 software). The main contributors of the stage are extraction and manufacturing of foundation, nacelle, tower, ancillary and rotor. Therefore, it is essential to look at the individual materials within above 5 parts to determine which material causes most environmental burden.

Rashedi et al. conducted life cycle impact assessment of foundation, nacelle, tower ancillary and rotor. They showed copper exposes most adverse effect on the environment with distinct difference amongst all the materials. In order to reduce total wind farm impact, it is significant to replace copper material with other alternative materials. HAWT onshore and offshore farms use copper in cable, and winding material of generator and transformer[3]. Substitute of copper should satisfy the requirements of high electrical conductivity and low price which copper has. Better substitute can be explored from database of Cambridge Engineering Selector (CES) as shown in Figure 2. Based on CES, two requirements above are suggested as:

$$\rho_{elr} \leq 3 \times 10^{-8}\ \Omega m \quad (2)$$

$$C_m \leq 5 \cdot {}^{USD}/_{kg} \quad (3)$$

ρ_{elr} indicates electrical resistivity and C_m represents material cost per kg. Based on eqs. (2) and (3), "aluminum commercial purity, 1-0, wrought" appears as a substitute material. Its electrical resistivity is 2.7×10^{-8} Ω m and price is 1.65 USD/kg. Density is one third of copper alloys. Mass, cost and LCA impact can be evaluated by using the data of aluminum alloy but more in depth assessment is necessary since there are other materials that may need to be replaced.

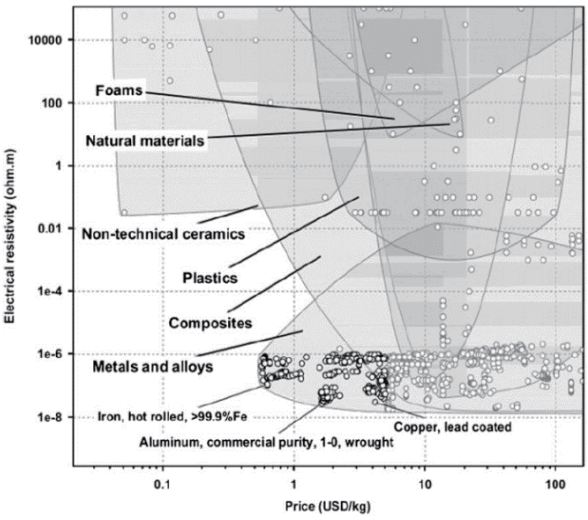


Figure 2: Material selection chart in terms of electrical resistivity versus unit price[3)]

References:

1) NEDO：再生可能エネルギー技術白書　第 2 版　－再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋－，（オンライン），入手先 <http://www.nedo.go.jp/content/100544818.pdf>,（参照 2016-7-15）

2) Teixeira, R, & Section, E.: Developing a Methodology to Integrate Private and External Costs and Application to Beef Production Method/Approach, Conf. on LCA in the Agri-Food Sector, Zurich 1990210. (2008).

3) Rashedi, A., Sridhar, I. & Tseng, K.J.: Renew. Susutain. Energy Rev. 21, (2013), pp.89-101

Supporting Information

1) Environmental Assessment

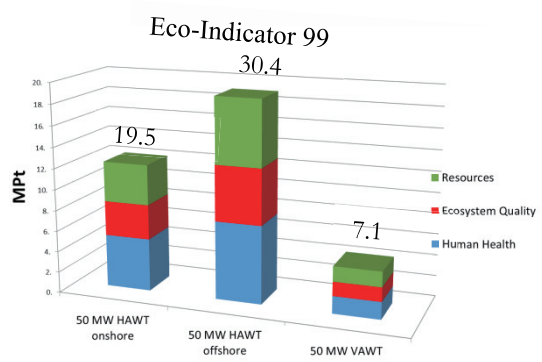


Figure S1: Eco-Indicator 99 points of 3 wind farms

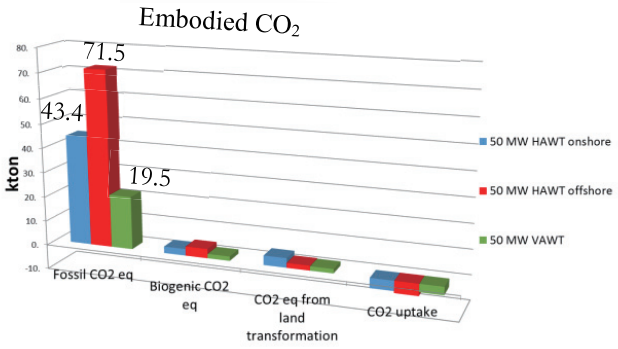


Figure S2: Embodied CO_2 of 3 wind farms

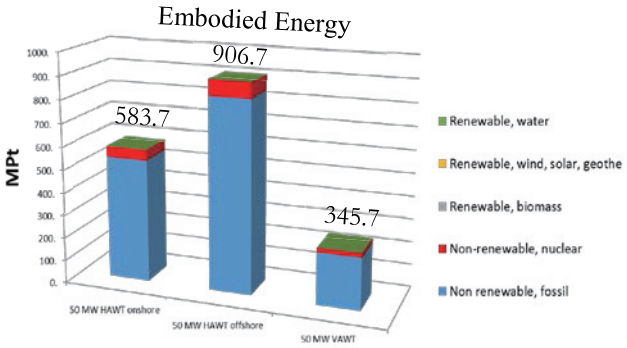


Figure S3: Embodied Energy of 3 wind farms

2) Economic Assessment

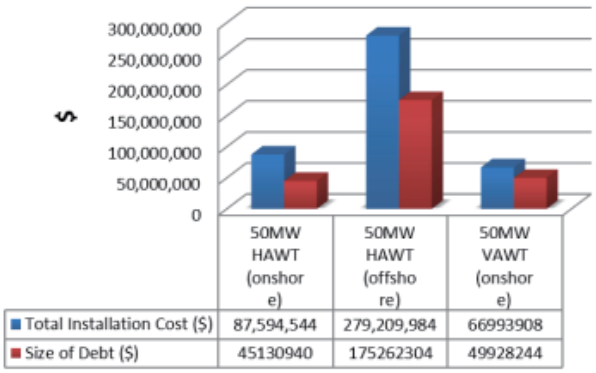


Figure S4: Total installation cost and size of debt of 3 wind farms

Table S1: Levelized cost of electricity of 3 wind farms

Type of Wind Farm	Levelized Cost of Electricity ($/kWh)
50MW HAWT (onshore)	0.067
50MW HAWT (offshore)	0.18
50MW VAWT (onshore)	0.13

3) Energy Assessment

Table S2: Results of energy assessment

	Energy Production (GW/years)	Energy Pay Back Time (years)	Energy Return on Investment	Capacity Factor (%)
50MW HAWT (Onshore)	121.7	7.5	2.7	27.8
50MW HAWT (Offshore)	130.7	4.5	4.4	29.8
50 MW Vertical Axis Wind Turbine	54.6	4.5	4.4	12.6

4) Network Representation of Overview of Life Cycle of Wind Power

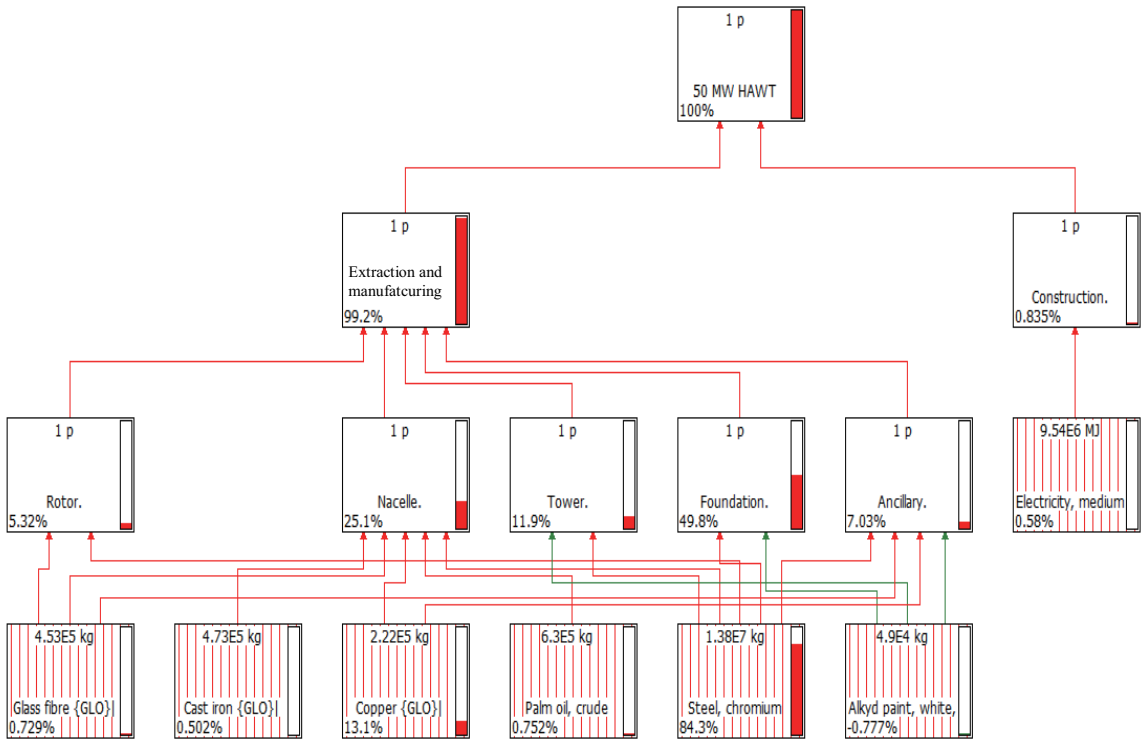


Figure S5: Flow representation of life cycle of 50MW HAWT offshore using single score of Eco-Indicator 99. Operation and maintenance stage is cut off due to negligible contribution.

地域単位での地中熱ヒートポンプのライフサイクル CO_2 削減効果

Life cycle CO_2 reduction effect of ground-source heat pumps on a regional basis

○早乙女裕紀*[1)]、本藤祐樹[1)]、森泉由恵[1)]
Hiroki Soutome, Hiroki Hondo, Yue Moriizumi
1) 横浜国立大学
* soutome-hiroki-yd@ynu.jp

1. はじめに

日本では、民生部門の CO_2 排出量が増加傾向にある。その排出量の過半は熱需要が起因であり、熱源を化石燃料から再生可能エネルギーへ転換することが求められている。再生可能エネルギーのひとつである地中熱は昼夜間又は季節間の温度変化の小さい地中の熱的特性を活用したエネルギー[1)]であり、これを活用した地中熱ヒートポンプシステム(GSHPs)の導入が期待されている。

しかし、GSHPs の CO_2 削減効果は、それを導入する地域の特性（例えば、熱需要の違いや既存の利用機器の違い）に依存するため、その導入効果は地域によって異なると考えられる。加えて、GSHPs の導入では大掛かりな地中熱交換井掘削工事が必要となり、空気熱源式ヒートポンプ(ASHPs)などの従来技術に比べて、設置時の CO_2 排出量が多いと予想される。したがって、ライフサイクル全体を考慮して削減効果を評価する必要がある。

本研究の目的は、建設から廃棄までのライフサイクル全体を考え、業務部門において GSHPs が既存技術を代替した場合の CO_2 削減効果を地域別に推計し、導入効果が高い地域を明らかにすることである。本要旨では、その第一段階として、運用時での CO_2 削減効果についての推計結果を示す。

2. 研究方法

2.1 推計対象

業務部門の空調を対象に、ASHPs をベースラインに設定して、GSHPs 導入による CO_2 削減効果を都道府県別に推計した。

業務部門は、表 1 に示すように、「エネルギー白書 2016」を参考に 9 業種に分類した。その上で、各業種の建物ではその特性に依存して空調需要が変わるため、業種毎にモデル建物を想定した。このモデル建物は、建築研究所が Web 上に公開している「モデル建築法入力支援ツール Ver.2.2」におけるモデル建物および、後述する「エネルギー消費性能計算プログラム(非住宅版)Ver.2.2」(以下、Web プログラム)のサンプルとして示されている建物を使用した。
本要旨では、事務所・ビル業種に関する結果を示す。

表 1　業種とモデル建物の対応

業種	モデル建物
事務所・ビル	事務所
デパート	大規模物販
卸・小売業	小規模物販
飲食業	飲食店
学校	幼稚園、学校、大学
ホテル・旅館	ビジネスホテル、シティホテル
病院	総合病院、クリニック
劇場・娯楽場	講堂
その他サービス	事務所

2.2 運用時の CO_2 削減量(相対値)の推計方法

GSHPs と ASHPs の運用時における CO_2 削減量(相対値)の推計式を式(1)に示す。

$$S_i = \frac{(E_{AS,i} - E_{GS,i})e_i}{(E_{AS,北海道} - E_{GA,北海道})e_{北海道}} \quad (1)$$

S: 運用時の CO_2 削減量(相対値)、
E: 電力消費量、e:電力の CO_2 排出原単位、
AS: ASHPs、GA: GSHPs、i: 48 都道府県

今回の推計では、まず Web プログラムを使用し、GSHPs と ASHPs の運用による年間の単位面積あたり電力消費量を算出した。次に、GSHPs の電力消費量から ASHPs のそれを差し引くことにより、GSHPs 導入に伴う電力削減量を算出した。それに電力の CO_2 排出原単位を掛けることで、GSHPs 導入による CO_2 削減量を推計した。今回は、北海道の電力削減量ならびに CO_2 削減量を 1 として、各都道府県の相対値を結果として示す。

2.2.1 単位面積当たりの電力消費量の推計

電力消費量の推計では、Web プログラムを使用して、GSHPs と ASHPs の運用による電力消費量を推計した。このプログラムは、建物の特性と導入する空調機器の性能を入力すると、その建物の年間の空調機器の運用によるエネルギー消費量が算出されるプログラムである。このプログラムでは地域差を考慮した推計が可能で、省エネルギー基準により定められた 8 地域に対する値が算出できる。この地域区分は気候の違いに基づき定められており、地域ごとの気候の差を考慮することが可能になる。ただし、

本来この地域区分は市区町村レベルで定められている。今回は都道府県ごとに定めるため、各県の県庁所在地の市区町村を都道府県の地域に設定し、電力消費量の推計を行った。

Web プログラムにより推計された電力消費量を建物の総床面積で割ることにより、単位床面積あたりの値に変換した。

2.2.2 電力削減量の推計

推計された GSHPs の電力消費量から ASHPs のそれを差し引き、GSHPs 導入による電力削減量を求めた。なお、後述する結果の表では、北海道に導入した場合の電力削減量を 1 として、他都府県の削減効果を相対値として示す。

2.2.3 CO_2 削減量の推計

最後に、電力削減量に、環境省から公表されている電力の CO_2 排出原単位を掛け、CO_2 排出削減量を算出した。電力削減量と同様に相対値に変換し、結果を示す。

3. 結果と考察

図 1 は、北海道（寒冷）、東京都（中間）、沖縄県（温暖）に GSHPs を導入した際の電力削減量（試算値）を比較している。北海道の削減量を 1 とすると、東京都は約 0.7、沖縄県は 0.2 に満たないと推計され、GSHPs は寒冷地域において高い削減効果を発揮すると言える。このような結果の理由として第一に、寒冷な地域ほど暖房需要が大きく、電力消費量が大きいためである。第二に、寒冷地域では暖房時における室温と気温の差が大きく、ASHPs の効率が低下し電力消費量が多くなることが挙げられる。

図 2 に、都道府県別の CO_2 削減量の相対値（試算値）を示す。関東地方と中国地方は気候区分が同じである、つまり冷暖房需要を同一としているが、関東地方と比べて中国地方の削減量が大きい。このことは各都道府県の電力の CO_2 排出原単位の違いに起因する。例えば、栃木県と広島県は同じ気候区分であるため電力削減量は同じであるが、栃木県と広島県の電力の CO_2 排出原単位はそれぞれ 0.505 と 0.706 [kg-CO_2/kWh]であるため、栃木県に比べ広島県の CO_2 削減量が大きい。さらに、長野県と愛媛県を比較すると、電力削減量に関しては長野県の方が大きいが、CO_2 削減量に関しては愛媛県の方が大きい（図 2）という逆の結果になった。これも、愛媛県の電力の CO_2 排出原単位は 0.676[kg-CO_2/kWh]と、長野県の 0.497[kg-CO_2/kWh] に比べて大きいことに起因する。

以上のことから、GSHPs 導入に伴う CO_2 削減効果は、気温などの自然条件と電力インフラなどの社会条件に依存して、地域によって異なることが示された。

4. おわりに

本研究では GSHPs の運用時の CO_2 削減効果を都道府県別に示し、その地域差を示した。

今後、機器の製造、設置、廃棄段階も含めライフサイクル全体での GSHPs の導入効果を推計する。また、ASHPs 以外の空調機器（重油ボイラーなど）を考慮して地域ごとにベースラインを設定し、事務所・ビル以外の業種も含めて業務部門全体での都道府県別 CO_2 削減効果を明らかにする予定である。

謝辞

本研究の実施において、地中熱利用促進協会ならびに関連事業者の皆様には多大なご協力をいただいた。ここに謝意を表する。なお、本研究は環境省「平成 28 年度再生可能エネルギー導入効果情報に関する基礎検討」より支援を受けた。

引用文献

1) 地中熱利用促進協会：”地中熱とは?”,地中熱利用促進協会,(オンライン),入手先 <http://www.geohpaj.org/introduction/index1/howto>,(参照 2017-1-3)

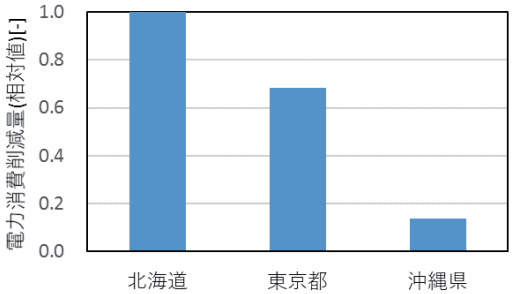


図 1　3 都道県の電力削減量の相対値(試算値)

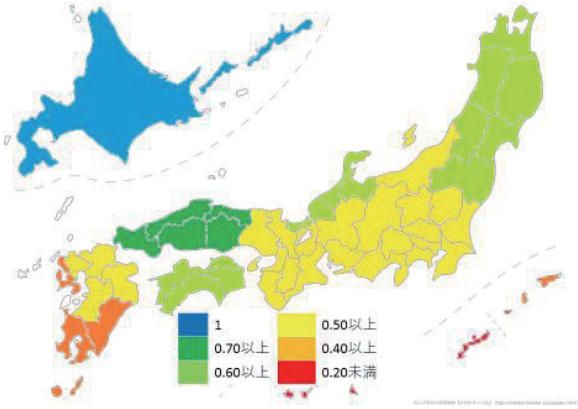


図 2　都道府県別 CO_2 削減量の相対値(試算値)

太陽熱利用システムの基礎自治体別 CO_2 削減コスト

CO_2 reduction costs by installing solar thermal systems on a municipal basis

○清水恭亮*[1)]、本藤祐樹 [1)]、森泉由恵 [1)]
Kyosuke Shimizu, Hiroki Hondo, Yue Moriizumi
1) 横浜国立大学
* simizu-kyousuke-dy@ynu.jp

1. はじめに

民生部門のエネルギー消費の約40%は熱需要であり、太陽熱利用システム導入による CO_2 削減効果が期待されている。それ故に、太陽熱利用システムのライフサイクル CO_2 分析 [1)]がなされ、その削減効果が検討されてきたが、現実の温暖化対策の策定では費用対効果に関する情報が不可欠である。太陽熱利用システムの費用対効果は導入地域の自然･社会条件に依存するため、導入地域によって費用対効果は異なると考えられる。

本研究では、地域特性を考慮して太陽熱利用システムの CO_2 削減コストを基礎自治体別に推計し、比較検討することを目的とする。本稿では、その第一段階として､神奈川県内の基礎自治体の戸建住宅を対象とし、太陽熱温水器導入による CO_2 削減コストの推計結果を報告する。

2. 研究方法

本稿では、熱の用途を給湯のみとし、従来型給湯機器による給湯システム（CWH）をベースラインとして、太陽熱給湯システム（SWH）導入による CO_2 削減コストを基礎自治体別に推計した。太陽熱給湯システムとしては、集熱器と貯湯槽が一体となっている太陽熱温水器に補助熱源として従来型給湯機器を組み合わせたシステムを対象とした。

2.1 評価対象と範囲

評価期間を 15 年間とし、各機器の評価範囲は、製造･設置･運用段階を考慮したライフサイクルとした。

給湯熱負荷は、世帯人員数を 1 人~6 人以上の 6 区分設定し、各世帯人員数における標準的な給湯量と横浜市における月平均給水栓温度からそれぞれ推計した。

2.2 機器・熱源の設定

太陽熱温水器は、年間の太陽依存率が 50%となるような集熱器面積および貯湯槽容量を有するものとし、作成したシミュレーションモデルを用いて、地域の日射量と気温の違いを考慮し､基礎自治体別に設定した。

また、従来型給湯機器は灯油・LPG・都市ガス・電気を熱源とする 4 機種を想定し、各機種のシステム効率は文献 [2)]より引用した。

太陽熱温水器と従来型給湯機器の耐用年数は、それぞれ 15 年と 10 年に設定した。

2.3 コストの推計

各システムのライフサイクルコスト（LCC）は、以下に示す式に従い推計した。

$$LCC_{i,j,k} = BC_{i,j,k} + IC_{i,j} + MC_{i,j} + E_{i,j,k} \times P_{i,j}$$

BC：本体費用，IC：設置費用，MC：保守費用
E：従来型給湯機器のエネルギー消費量
P：エネルギー単価
i：基礎自治体，j：エネルギー種，k：世帯人員数

太陽熱温水器の BC は、メーカーのカタログ価格より、集熱器単価および貯湯槽単価を推計し、各基礎自治体における集熱器面積および貯湯槽容量を乗じて算出した。従来型給湯機器は、各機器の単価 [3)]より BC を設定した。IC および MC は、各機器とも事業者へのヒヤリング調査などを基に設定した。ただし、従来型給湯機器の耐用年数は 10 年と想定したので、15 年間で 1.5 台必要であるとして費用を補正した。また、本稿では割引率をゼロとしてコストを推計した。

従来型給湯機器のエネルギー消費量は、年間の給湯熱負荷をシステム効率で除して推計し、エネルギー単価は、各エネルギー種について 2011 年~2013 年の平均単価を基礎自治体別に設定した。

2.4 CO_2 排出量の推計

各システムのライフサイクル CO_2 排出量（$LCCO_2$）は、全国版産業連関表と国立環境研究所が公表している 3EID などを使用し､以下に示す式に従い推計した。

$$LCCO_{2,i,j,k} = \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{f}_{i,j,k} + E_{i,j,k} \times e_j$$

$\boldsymbol{e}$：CO_2 排出原単位（3EID），T：転置
$(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}$：レオンチェフ逆行列
$\boldsymbol{f}$：最終需要額ベクトル，e：CO_2 排出係数

上式の第 1 項は、システムを構成する機器の製造・設置・保守に伴う CO_2 排出量であり、$\boldsymbol{f}$ は先述の BC、IC、MC より作成した。

第 2 項は、従来型給湯機器のエネルギー消費に伴う CO_2 排出量である。CO_2 排出係数の設定については、灯油・LPG・都市ガス・電気（東京電力）の排出係数は環境省 [4)]の値を用い、それらの製造による排出は平均単価と 3EID の CO_2 排出原単位より推計した値を用いた。

2.5 CO_2 削減コストの試算

基礎自治体別 CO_2 削減コスト（RC）は、以下に示す

式に従いエネルギー種別世帯人員数別に求めた。

$$RC_{i,j,k} = \frac{LCC_{SWH,i,j,k} - LCC_{CWH,i,j,k}}{LCCO_{2,CWH,i,j,k} - LCCO_{2,SWH,i,j,k}}$$

分母は CO_2 削減量であり、CWH と SWH の $LCCO_2$ の差分とし、分子は正味費用であり、SWH と CWH の LCC の差分とした。

次に、平均的な戸建住宅における基礎自治体別 CO_2 削減コストは、神奈川県の家庭部門のエネルギー種別消費量 [5]および地域別給湯機器所有状況 [6]などから推計した従来型給湯機器所有比率と世帯人員数別世帯数比率 [6,7]で加重平均したものとし、以下に示す式に従い試算した。

$$\sum_{j,k} RC_{i,j,k} \times O_{i,j} \times H_{i,k}$$

O：従来型給湯機器所有比率，H：世帯数比率

ただし、電気式給湯機器を太陽熱温水器の補助熱源として用いるのは現実的ではないため、上式で考慮するエネルギー種は、灯油・LPG・都市ガスとした。

3. 結果と考察

図 1 は、平均的な戸建住宅における太陽熱給湯システム導入に伴う CO_2 削減コストを基礎自治体別に推計した結果を示している。CO_2 削減コストの試算値を基礎自治体別に色分けしており、薄い色の基礎自治体ほど CO_2 削減コストの値が小さいことを表している。

CO_2 削減コストが負の値をとる場合、SWH 導入により、CO_2 削減と同時に金銭的な利益も得ることが可能であることを意味する。本稿の結果では、全ての基礎自治体において CO_2 削減コストは負の値を示しており、投資回収期間は評価期間（15 年）よりも短い 8.4 年～13.2 年という結果になった。

神奈川県は LPG・都市ガスによる給湯が 80%以上を占めているため、それぞれの普及率が利益の大きさに影響を与えている。単価がより大きい LPG の普及率が高い自治体（県の西部）ほど、LPG 消費削減による節約額が大きくなり、利益も大きくなる傾向がある。

また、熱需要の大きい大人数世帯の割合が多い基礎自治体ほど、エネルギー消費削減による節約額が大きくなり、利益も大きくなる傾向がある。都市ガス及び LPG の普及率がほぼ同等である三浦市と開成町の 4 人以上世帯の割合は、それぞれ 29.3%と 36.1%だが、投資回収期間は、それぞれ 9.7 年と 9.0 年であり、開成町の方が 0.7 年短いという結果になった。

したがって、全体的な傾向としては、都市ガス普及率が低く、大人数世帯の割合が高い、町村部（県の西部）では利益が大きくなり、逆に横浜市や川崎市などの都市部（県の東部）では利益が小さくなる傾向があることが明らかとなった。

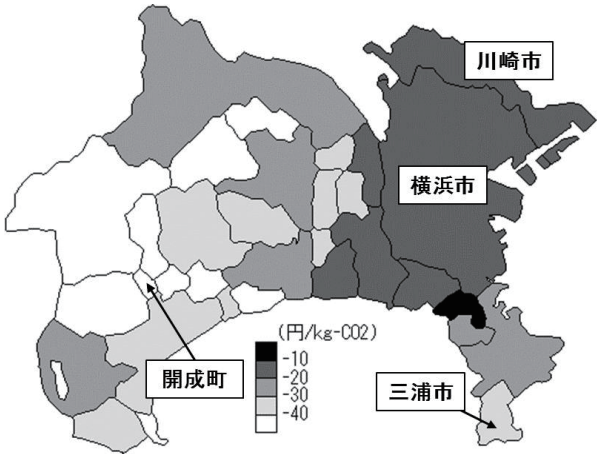


図 1　神奈川県の基礎自治体別 CO_2 削減コスト（試算値）

4. おわりに

本稿では、神奈川県内の平均的な戸建住宅 1 戸あたりの基礎自治体別 CO_2 削減コストを推計したが、今後は集合住宅なども対象とし、全国の基礎自治体について CO_2 削減コストを推計する予定である。

謝辞

データ提供にご協力いただいた事業者の皆様、（一社）ソーラーシステム振興協会の皆様に謝意を表する。なお、本研究は環境省「平成 28 年度再生可能エネルギー導入効果情報に関する基礎検討」より支援を受けた。

引用文献

1)門倉宏子, 本藤祐樹 : 日本 LCA 学会誌, 12(2), (2016), pp.97-105
2)建築環境・省エネルギー機構 : “住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説”, 建築環境・省エネルギー機構, (オンライン), 入手先< http://ees.ibec.or.jp/ >, (参照 2017-1-4)
3)経済産業省 : “統計表一覧(経済産業省生産動態統計)”, 経済産業省, (オンライン), 入手先 < http://www.meti.go.jp/ >, (参照 2017-1-4)
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”, 環境省, (オンライン), 入手先 <http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/ >, (参照 2017-1-4)
5)資源エネルギー庁 : “都道府県別エネルギー消費統計”, 資源エネルギー庁, (オンライン), 入手先 <http://www.enecho.meti.go.jp/ >, (参照 2017-1-4)
6)環境省 : “家庭からの二酸化炭素排出量の推計に係る実態調査 全国試験調査”, e-Stat, (オンライン), 入手先<https://www.e-stat.go.jp/>, (参照 2017-1-4)
7)総務省 : “平成 22 年国勢調査”, e-Stat, (オンライン), 入手先<https://www.e-stat.go.jp/>, (参照 2017-1-4)

消費者の環境配慮製品選択を促す情報表示の設計

Design of consumer information for promoting pro-environmental product selection

○石川奈那*[1)]、文多美 [1)]、中谷隼 [1)]、杉山弘和 [1)]、平尾雅彦 [1)]

Nana Ishikawa, Dami Moon, Jun Nakatani, Hirokazu Sugiyama, Masahiko Hirao

1) 東京大学

* n-ishikawa@pse.t.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

持続可能な社会の構築のためには、構成員としての消費者の環境配慮行動が大きな役割を担っている。消費者行動の中でも、特に環境配慮が求められる製品選択における情報提供に着目した。

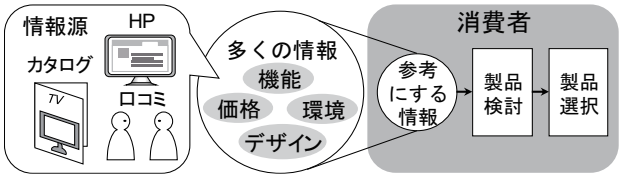


図 1　製品選択時の情報の流れ

図 1 に情報の流れを示した。消費者が環境に配慮した製品選択を行うためには、多くの情報の中から、環境情報が参考にされる必要がある。既往研究では、環境情報自体の効果的な表示方法が研究されている[1)]。そこで、特に製品選択時のような環境情報以外の情報も多く提示される状況においては、効果的な環境情報の表示方法を明らかにする必要がある。本研究は、消費者に環境に配慮した製品選択を促す情報表示の設計を目的とする。家庭のエネルギー消費への寄与が大きい家電製品に着目し、対象を消費者が環境配慮する傾向にあると考えられる冷蔵庫と、しない傾向にあると考えられるテレビとした。対象の情報提供手段はメーカーの製品カタログと設定した。

2. 方法

図 2 に研究の方針を示した。アンケート調査による消費者分類の結果と、環境情報表示に関する指標に基づいた様々な情報表示を用いて、インタビュー調査を行い、製品選択時に効果的な環境情報表示の設計につなげる。

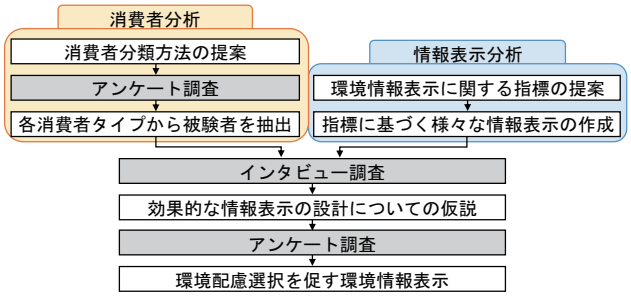


図 2　本研究の方針

2.1 消費者分類方法の提案

環境情報に対する認知は、環境への意識や行動の実行度によると考え、既往研究の行動実行度による消費者分類 [2)]と環境配慮行動までの意思決定プロセス [3)]を基に、**図 3** に示す消費者分類方法を作成した。環境配慮選択の実行までに 3 つの段階があり、それぞれの段階が障壁になっている消費者を、環境無関心、行動不実行、他の要素重視の 3 タイプに分類した。また、すでに環境配慮選択を行っている消費者は環境配慮タイプとした。

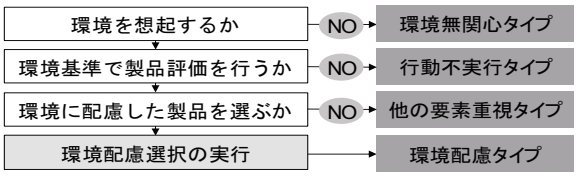


図 3　消費者分類フローチャート

2.2 アンケート調査

消費者の製品選択時の意識を知り、作成した方法に基づいて消費者を分類するために、WEB アンケート調査を行った。実際に近い選択時の意識を知るために、対象者を 3 ヶ月以内に対象製品の購入予定者とした。

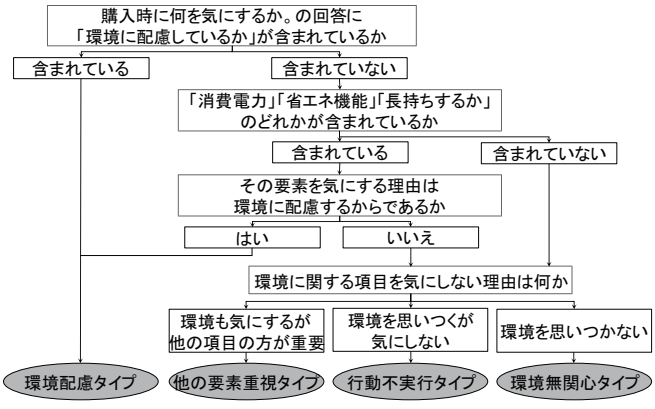


図 4　消費者分類の手順

図 4 に示したように、製品を購入する際に重視する点や環境を気にしない理由に基づいて消費者を分類した。一部の環境に関係する項目に対しては、気にする理由が環境配慮なのか経済性配慮なのかを区別する質問を設定した。

2.3 環境情報表示に関する指標の提案

環境情報表示を定量的に評価する指標として、あるカタログページ(k)の全情報のうち環境情報表示が占める割合を「環境情報濃度(E_k)」と定義した。この指標は、製品カタログに機能やデザインといった様々な情報が表示されている中で、環境情報の視覚的な表示割合を表し、式(1)のように定義した。

$$E_k \equiv \frac{\sum_i (\text{環境情報表示}i\text{の面積} A_{k,i})}{(\text{対象とするカタログページの面積} S_k)} \qquad (1)$$

環境情報には、消費電力量といったテキストや数値、環境ラベルのような図が含まる。A_kは、当該情報を囲う最小長方形の面積とした。

2.4 インタビュー調査

製品選択時に提供される環境情報に関する消費者の意識や意見を詳細に知るために対面でのインタビュー調査を行った。アンケート調査の回答者の中から、各消費者タイプ 2 名ずつを抽出した。

まず、環境情報が消費者意識に及ぼす影響を明らかにする。**図 5** に使用する情報表示の例を示す。メーカー各社のカタログを参考にし、機能や環境の情報を含む仮想的なカタログを作成して使用した。赤い枠で示した部分が環境情報であり、左右で環境情報濃度が異なる。様々な表示パターンのカタログを提示した時の消費者の意識を質疑によって調査する。

その後、環境情報が最も効果的に伝わるような表示方法を明らかにするために、被験者と共に環境配慮意識の向上が期待できるカタログをデザインする作業を行い、環境情報を効果的に表示するための要素を明らかにする。

図 5　提示するカタログの例
(左:現状に近い例(E_k=0.0051)
右:環境情報濃度を増やした例(E_k=0.12))

3. 調査結果

テレビに関する質問で 343 人、冷蔵庫で 336 人の有効回答数を得た。**図 6** に消費者分類の結果を示す。両製品で、他の要素重視タイプが最も多く、環境配慮タイプは両製品とも 10%となった。このことから環境問題について認識はしているが、環境以外の要素を重視した結果、環境配慮選択に至らない消費者が多いことが明らかになった。

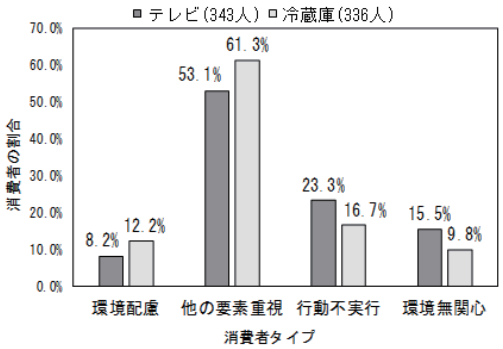


図 6　消費者分類結果

また消費者タイプの分布には両製品で差が見られた。環境配慮選択タイプと他の要素重視タイプの割合は冷蔵庫の方が多く、他の 2 タイプはテレビの方が多く分類された。このことから冷蔵庫購入時の方が環境に配慮するまでの段階の中で、環境配慮に近い段階になりやすいということが明らかになった。実際のカタログについて環境情報濃度を分析した結果では冷蔵庫の方が環境情報の表示が多く、環境情報の表示と消費者の意識には関係がある可能性があると考えられた。

4. 結言

消費者を、環境配慮に至るまでの段階毎に分類する方法を提案した。その後、提案した消費者分類を基に、アンケート調査を行い、現状の製品選択時における消費者の意識を明らかにした。また、環境情報に関する指標である環境情報濃度を提案した。この指標を基にして、環境情報表示が消費者に与える影響を明らかにすることや、消費者の意見に基づいた効果的な表示方法を明らかにするために、今後インタビュー調査を行う予定である。インタビュー被験者はアンケート調査で分類された消費者の中から抽出した。最後にアンケート調査を行い、インタビュー調査で得られた結果を基に立てた仮説を実証することで、消費者が環境に配慮して製品を選択するために効果的な環境情報の設計につなげる。

謝辞　本研究は、環境省の環境研究総合推進費(S-16)により実施された。

引用文献

1) Kikuchi-Uehara E., Nakatani J., Hirao M.: J. Clean. Prod., 117, (2016), pp10-18
2) Prochaska J. O., Velicer W. F., Am. J. Health Promot. , 12(1), (1997), pp 38-48
3) 広瀬幸雄, “環境と消費の社会心理学”, 名古屋大学出版会, 名古屋, (1995), p.83

表 S1 製品購入時に気にする項目の選択肢
(赤字で示した項目については、別の質問で気にする理由を尋ねる)

	環境	機能	デザイン	コスト	その他
テレビ	環境に配慮しているか	操作のしやすさ	色やスタンドなどのデザイン	価格	メーカー
	消費電力量	画質・音質	画面サイズ	消費電力量	人気
	自動で省エネする機能	録画機能		長持ちするか	アフターサポート
	長持ちするか	4K対応			最新モデルか
		起動にかかる時間			その他
		自動で省エネする機能			
		インターネット接続可能か			
		動画サービス対応か			
		対応機器とのネットワーク接続			
		いろんな角度からの見やすさ			
		その他の機能			
冷蔵庫	環境に配慮しているか	使いやすさ	色、形などのデザイン	価格	メーカー
	消費電力量	庫内の脱臭・除菌機能	サイズ・容量	消費電力量	人気
	自動で省エネする機能	保存した食品の鮮度・味を保つ機能		長持ちするか	アフターサポート
	長持ちするか	自動で省エネする機能			最新モデルか
		冷却機能			製造国
		製氷機能			その他
		運転音の静けさ			
		その他の機能			

食料品の購買による CO_2 排出量の傾向と削減策に関する一考察

A Study on the Trend of CO_2 Discharge with Buying Groceries and its Cutback Measures

○中島寛則*[1)]、大野隆史 [1)]
Hironori Nakashima，Takashi Ohno
1）名古屋市環境科学調査センター
* nakashima@nagoyakankaken.net

1. はじめに

名古屋市ではこれまで、青果物や水産物など、生鮮食料品の生産･輸送などに伴う CO_2 などの GHG 排出量の算出を、LCA 手法を用いて行い、シナリオを仮定して削減効果を求める研究を行ってきた [1),2)]。

その結果、再生エネルギー利用の拡大などの生産者の努力による低炭素化および、買い物時の交通手段の改善など消費者の努力による低炭素化を推進することにより、大幅な GHG 排出量の削減効果が見込まれることがわかった。

しかし、いまだに食料品の購買行動を行う際に、GHG 排出量の削減について意識している消費者は少なく、今後カーボンフットプリント等の普及により、購買行動時の GHG 削減に対する意識が向上することが期待されている。

そのためには一般消費者が食品からの GHG 排出量について、広く見識を持つことが重要であり、幅広い年代の消費者に環境教育を行うことが求められる。

環境教育については、電池など身近な製品を利用した教材を作成し学校での授業などが行われてきた例が報告されており [3)]、グループワーク等を通してみずから考えることが環境意識の向上に役立つと考えられている。

そこで今回、消費者に対し食料品の購買行動時における環境意識の向上を目的として、高校生以上の市民約 20 名を募集し、買い物時のレシートの内容から食料品の CO_2 排出量計算を自ら行う講座を実施した。

その結果から、食料品の購買行動の傾向と CO_2 排出量および CO_2 排出削減策について考察を行ったので、その結果について報告する。また講座実施時にアンケートを行ったので、その結果についても合わせて報告する。

2. 方法

2.1 講座の実施方法

環境教育の講座は平成 28 年 11 月 12 日(土)に実施した。受講者は 16 名であった。

講座の流れは図 1 で示したように実施し、使用したレシートは受講者自身が持参したものおよびこちらが用意したもの合計 24 枚分のレシートについて、食料品の CO_2 排出量を算出した。

レシートによる計算の前に LCA について教材を用いて 30 分の講義を行った。
講座の受講前後に、環境意識の変化等についてアンケートを行った。

CO_2 排出量の計算方法は、こちらが用意した CO_2 排出係数一覧表の品目にレシートの品目をあてはめ、その品目の排出係数に、レシートに記載されている金額を乗じるだけの単純なものである。

2.2 CO_2 排出係数の算出方法

CO_2 排出係数は生産段階での係数を用い、3EID[4)]のデータを基に算出した 1 円当たりの CO_2 排出量を CO_2 排出係数とした。

ただし、これまでの研究で名古屋市の市場データに基づいて算出した生鮮食品については、それぞれ個別の CO_2 排出係数を算出した。

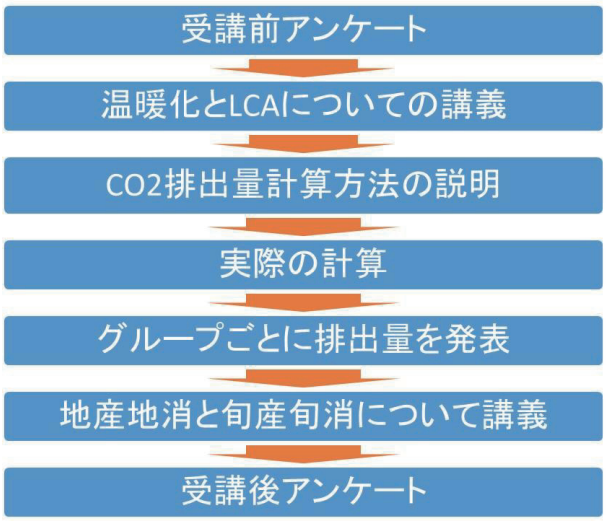


図 1　環境教育講座の流れ

3. 結果と考察

3.1 CO_2 排出量算出結果に基づく考察

表 1 にレシートからの CO_2 排出量算出の一例を示す。このレシートでは購入品目数が 9 品目であり、ばれいしょ、たまねぎ及びだいこんの 3 品目は独自に算出した係数を用いた。このレシートから算出した CO_2 排出量は合計 4.0kgCO_2 となった。

表１　レシートからの CO_2 排出量算出例

購入品目名	購入価格	3EID品目名	CO2排出係数（gCO2/円）	CO2排出量（gCO2）
カクテル	100	その他の酒類	1.916	192
野菜ジュース	178	農産びん･かん詰	3.520	627
野菜ジュース	178	農産びん･かん詰	3.520	627
豚肉	384	豚肉	2.470	948
ばれいしょ	198	ばれいしょ	1.101	218
たまねぎ	198	たまねぎ	1.758	348
大根	98	だいこん	1.975	194
ぶなシメジ	95	特用林産物	5.731	544
食パン	148	パン類	2.062	305
合計	1,577			4002

次に、今回の講座で CO_2 排出量を算出した結果について表 2 及び図 2 に示す。

1 レシートあたりの品目数は 2~23 品目であった。3EID の分類で分けると、最も多く購入した品目は酪農品の 22 であり、2 番目に多く購入した品目はパン類の 20 であった。レシートあたりの CO_2 排出量は 0.64～18.1kgCO_2 であり、平均では 4.58kgCO_2 であった。

また、購入品目数が多いほど CO_2 排出量も大きくなる傾向にあったが、レシー20 とレシート 23 のように、合計金額の差に対して CO_2 排出量の差に大きな開きがある場合も認められた。レシート 23 では金額あたりの CO_2 排出量の多い、遠洋漁業で生産された水産物を多く購入したため、CO_2 排出量が大きくなったと考えられる。

表２　CO_2 排出量算出結果

レシート枚数		24
レシート入手期間		9月～11月
1レシートあたり購入品目数	最大	23
	平均	7.6
	最小	2
最も購入数の多い品目	品目名	酪農品
	購入数	22
2番目に購入数の多い品目	品目名	パン類
	購入数	20
レシートあたりCO2排出量（kgCO2）	最大	18.1
	平均	4.58
	最小	0.64

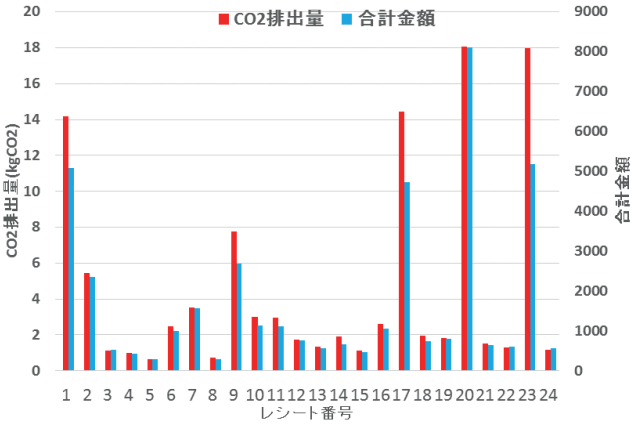


図２　CO_2 排出量算出結果

3.2　アンケート結果に基づく考察

受講者の受講前アンケート結果について表 3 に示す。

回答数が少ないため、参考程度ではあるが、このアンケート結果から、普段の買い物時にさまざまな交通手段を用いていること、お店までの距離が近いほど徒歩や自転車の利用が増えること、食料品購入時にはやはり価格を最も重視していることがわかった。

また、地産地消については広く知られているが、旬産旬消は半数ほどが初めて聞いた言葉であったこと、LCA や CFP については大部分が聞いたことがなかったことがわかった。発表時はより細かな解析結果について報告する。

表３　受講時アンケート結果

性別	男性	12名	地産地消について聞いたこと	ある	16名
	女性	4名		ない	0名
年代	10～20代	9名	旬産旬消について聞いたこと	ある	7名
	30～40代	1名		ない	9名
	50～60代	2名	LCAについて聞いたこと	ある	3名
	70代～	4名		ない	13名
買い物時交通手段（複数あり）	徒歩	8名	CFPについて聞いたこと	ある	2名
	自転車	10名		ない	14名
	自動車	9名	普段の買い物時に環境について意識	している	2名
	鉄道	7名		ややしている	6名
お店までの距離	～1km	3名		あまりしていない	5名
	1～3km	9名		していない	3名
	3～5km	2名			
	5km～	2名			
食料品購入時に重視すること	生産地	3名			
	価格	11名			
	賞味期限	2名			

4.　まとめと今後の課題

消費者の買い物時のレシートから食料品の CO_2 排出量計算を自ら行う講座を実施し、食料品の購買行動の傾向と CO_2 排出量の算出を行った。また同時に受講者の購買行動等についてアンケートを行った。

その結果、水産品を購買することで CO_2 排出量が大きくなる傾向があった。またアンケート結果からは、LCA や CFP の知名度がほとんどないことがわかった。

以上より、食料品購買時の CO_2 排出量を削減するためには、今回のような講座を数多く開き消費者に対し、意識の向上を促すことや、CFP 商品の普及により消費者が普段から CO_2 排出量の情報を目にする機会が増えることが重要だと考えられる。

5.　引用文献

1)　中島寛則, 大野隆史: 日本 LCA 学会誌, 11(3), (2015), pp.292-299

2)　中島寛則，大野隆史：第 11 回日本 LCA 学会研究発表会，千葉県，(2016)，pp.62-63

3)　中原康敬，成田明沙美，松本真哉，中村栄子：日本 LCA 学会誌，11(4)，(2015)，pp.359-365

4)　南斉規介，森口祐一，東野達：産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID), (オンライン), 入手先 <http://www-cger.nies.go.jp/publications/report/d031/>（参照 2016-12-27）

新たな食品表示制度下における環境コミュニケーションの提案

A suggestion about the environmental communication under the new food labeling system

○藤原なつみ*1)、吉川直樹 1)
Natsumi Fujiwara, Naoki Yoshikawa
1）立命館大学
fuji-n@fc.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

1.1 背景

消費者が日常の様々な場面で環境に配慮した消費行動を選択することによって、大幅な温室効果ガス削減効果が期待できる[1)]。例えば、生鮮食品の購買においては、「地産地消」や「旬産旬消」といった消費行動が温室効果ガス削減に有効な選択肢の一つとして挙げられる[2,3)]。

一方で、こうした消費行動を選択している消費者は、必ずしも環境負荷の削減を目的として行動しているわけではない。一般に、消費者がこれらの選択をする背景には、環境配慮より、むしろ安全性や栄養価などに対する期待の高さがあると予想される。同様に、「有機栽培」や「無農薬」の農産物、「天然」や「生」の鮮魚を選択するといった消費行動も、環境影響への配慮より、安全性やおいしさに主眼が置かれていると考えられる。

また、食品表示に関する最近の動向として、平成 27 年に「食品表示法」が施行された。これにより「栄養機能食品」の対象が生鮮食品に拡大され、「機能性表示食品」制度が始まっている。既往研究では、栽培方法が農産物の成分等に影響している可能性が示唆されており[4)5)6)]、仮に有機栽培が食品の栄養成分を高めるとすれば、上記制度の活用によっても、環境影響に配慮した有機農法やそれを選択する消費行動を促進できる可能性がある。

環境に配慮した消費行動の意識啓発に向けて、従来は、主に環境ラベルや売り場の POP による情報提供などの情報的手法が用いられてきた。しかし、上述したとおり、消費者は「環境配慮」を目的としていなくても、結果的に環境負荷の低減となるような消費行動を選択していることがある。そのため、「環境配慮」以外の理由で消費者に環境配慮型消費行動の選択を促すような環境コミュニケーションを試みることにも、一定の効果が期待できる。

1.2 本研究の目的

環境負荷の低減につながる消費行動を促進するために有効なコミュニケーションを検討するにあたり、本研究では、そもそも消費者は、生鮮食品（青果・精肉・鮮魚）を購入する際にどのような要素を考慮しているのか、それらの要素を考慮する際にどんな情報表示や知識（以下、表示等）を元に判断しているのか、アンケート調査によって明らかにすることとした。

さらに、新たな食品表示制度下で、これまで栄養機能の表示が限定的であった生鮮食品において消費者がどのように表示を読み取り解釈しているのか、機能性表示食品を例に調査を行い、今後の環境コミュニケーションの可能性について考察することとした。

なお、本研究においては、生鮮食品における機能性表示食品の既往研究が限られていることから、まず事前調査として小規模調査を実施し、その結果を踏まえて、より大規模な調査に向け今後の展望を示すこととした。

2. 方法

2.1 アンケート調査の概要

本調査は比較的「食」への関心が高いと考えられる保育園の保護者と職員を対象として以下のとおり実施した。

調査方法：質問紙調査法
調査実施期間：2016/12/13~2016/12/28
調査対象者：H 保育園の保護者と職員 20 名
（年齢 30～60 代／性別 男性 1 名・女性 19 名）

2.2 アンケート調査の内容

第一に、生鮮食品（青果・精肉・鮮魚）を購入する際、①安全性、②栄養価、③おいしさ、④価格適正、⑤鮮度、⑥環境負荷の 6 項目を考慮しているかを尋ねた。

第二に、「考慮している」と回答した場合、どんな表示等を判断材料としているのか、青果、精肉、鮮魚のそれぞれについて、商品名、商品価格、産地などの表示などのうち、あてはまるものを選択してもらった（表 1）。

表 1　生鮮食品購入時に判断材料とする表示等

青果	精肉	鮮魚
商品名の表示／商品価格の表示 産地表示（国産／外国産）／産地表示（都道府県） 商品そのものの見た目（触感を含む）／店舗が作成した POP		
旬 肥料に関する表示 農薬に関する表示	消費期限 生育環境に関する表示（放牧・餌など） 商品管理に関する表示（生/解凍）	消費期限 旬 生育環境に関する表示（天然・養殖） 商品管理に関する表示（生/解凍）

そして、これらの表示等のうち、特に環境負荷削減につながりうるであろう項目（青果では産地、旬、農薬、肥料、精肉では産地、生育環境、商品管理、鮮魚では産地、旬、生育環境、商品管理）に着目して結果を整理した。

第三に、機能性表示食品については、「機能性表示食品」という用語の認知度を確認したうえで、実際に生鮮食品の機能性表示に用いられているパッケージを示し、商品を購入したいと思うかどうかと、その理由を尋ねた。

3. 結果と考察

第一に、生鮮食品購入時に①安全性、②栄養価、③おいしさ、④価格適正、⑤鮮度、⑥環境負荷の各要素について考慮するかどうかを質問した結果、青果、精肉、鮮魚に共通して、「考慮しない」という回答が最も多かったのは、⑥環境負荷であった。逆に「考慮する」という回答が多かったのは、青果では①安全性（20 名）、⑤鮮度（20 名）、精肉では①安全性（20 名）、⑤鮮度（19 名）、鮮魚では③おいしさ（19 名）、⑤鮮度（19 名）であった。

第二に、消費者が生鮮食品の購入時に判断材料としている表示等について質問した結果、青果においては、①安全性で「産地（国産・外国産）」や「農薬」、③おいしさで「旬」、⑤鮮度では「外観」に次いで「旬」が多く挙げられており、環境負荷削減につながりうる項目を元に購入を判断しているという回答が多くみられた（図 1）。精肉や鮮魚においても同様の傾向が見られ、購入を判断する際には、環境負荷削減につながりうる表示等が参照されていることがわかった。

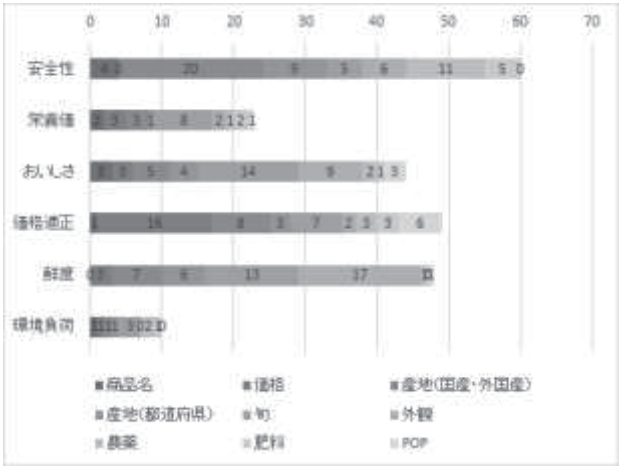


図 1　購入時の判断材料とする情報表示や知識（青果）（複数回答）

これらの結果より、「環境負荷」を考慮して購入する消費者は少ない一方、「安全性」「おいしさ」「鮮度」といった要素を考慮する消費者は多く、それらを判断する際には、「産地」や「旬」など環境負荷削減にも貢献しうる情報や知識を用いていることが明らかとなった。「安全性」「おいしさ」「鮮度」といった観点から、環境影響を意識しながら消費者とのコミュニケーションを図ることが、環境負荷削減に有効となる可能性があるといえる。

第三に、機能性表示食品の認知度について質問したところ、「聞いたことはあるがあまり知らない（7 名）」、「まったく知らない（7 名）」という回答が大半であった。さらに、生鮮食品で実際の商品に用いられている表示を示して購入意思を尋ねたところ、「類似商品に比べて価格が安くても購入したくない」として、その理由としては、「添加物が含まれている」など誤った解釈をしている回答が複数見られた。この理由として、これまで食品の機能性についての表示は加工品が中心であったため、生鮮食品と「機能性」という言葉が結びつきにくいことなどが考えられる。

4. 今後の課題と展望

本研究では、消費者にとって関心の高い「安全性」や「鮮度」を訴えながら、「国産」や「旬」などの情報表示を行っていくことで、消費行動を環境配慮型にシフトする環境コミュニケーションを実現できる可能性があることが明らかになった。また、新たな食品表示制度である機能性表示食品は、消費者に十分に認知されているとは言えず、特に生鮮食品においては本来の意図とは異なり、誤った解釈をされる恐れもあることが明らかになった。

本研究では調査対象者が小規模かつ限定的であったことから、今後、より多くの調査対象者に向けた調査を行い、これらの結果について検証したい。そして、新たな食品制度である機能性表示食品制度等の動向を見守りつつ、当該制度が環境配慮型の消費行動を促進する環境コミュニケーションにもたらす影響とその可能性について、さらに考察を深めていきたい。

5. 参考文献

1) Naoki Yoshikawa, Natsumi Fujiwara, Junko Nagata, Koji Amano: Applied Energy, 1162,(2016), pp. 1564-1570
2) 中島寛則・大野隆史・池盛文数・高木恭子・久恒邦裕：第 6 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集，(2010)，pp. 195-195
3) 吉川直樹・天野耕二・島田幸司：環境システム研究論文集，Vol. 35，(2007)，pp. 499-509
4) 田中福代・村山徹・杉川陽一・川上美智子・岡崎圭毅・建部雅子：日本土壌肥料學雑誌，83(3)，(2012)，pp. 351-357
5) 藤原孝之：園芸学研究，5(1)，(2006)，pp. 1-5
6) 堀田博：日本食品科学工学会誌，46(6)，(1999)，pp. 428-435

食意識・環境意識が消費者のライフサイクル環境情報に対する評価に与える影響

Effect of Pro-environmental Intention and Consciousness Regarding Diet on Consumers' Evaluation of Life Cycle Environmental Information

○吉川直樹*[1)]、天野耕二 [1)]
Naoki Yoshikawa, Koji Amano
1) 立命館大学
* n-yoshik@fc.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

製品環境情報の提供は、環境配慮的な消費者にとって商品選択の指針になるとともに、製品の販売側にとっては製品の付加価値の向上につながる。ライフサイクル環境負荷の情報およびそのラベリングは客観的な環境情報として今後のさらなる普及が望まれる。一方で、現状において消費者のライフサイクル環境負荷情報に関する認知度および理解度は高いとはいえず、今後消費者の受容性を高め、情報を商品・行動の選択に活用できるよう、環境コミュニケーションを展開していく必要がある。

そのような状況の中、タイプⅢ環境ラベルの消費者受容性に関する研究がなされている[1-3)]が、ラベルに対する消費者の評価を規定する社会心理学的な要因については、十分研究されているとはいえない。特に、消費者にとって日常購買される商品である食品に目を向けると、ラベルに対する消費者の評価はその環境への意識に加え、食生活に関わる意識とも関連することが考えられるが、それらについては定量的に明らかになっていない。

そこで、本研究では生鮮野菜を対象に、定量的環境ラベルへの消費者の支払意思額を規定する要因について、質問紙調査をもとにした分析を行った。

2. 方法

2.1 概要

本研究では消費者ラベルへの評価（ここではラベルへの支払い意思額とする）を定量化するため、質問紙調査を用いてコンジョイント分析を行ったうえで、環境意識および食意識との関連を分析した。

対象品目は、比較的消費者の購買頻度の高い野菜であるトマトおよびタマネギ（いずれもMサイズ 3 個入り）とした。コンジョイント分析ではそれぞれ商品の属性（価格・産地・鮮度・カーボンフットプリント(以下 CF)ラベル・その他の環境ラベル）の組み合わせを複数提示し、それらを購入意欲の高い順に並べ替えてもらう方法をとった。この結果をもとに、商品属性ごとの支払い意思額を回答者ごとに推計した。加えて、消費者の食と環境に関わる知識、食習慣への意識、環境意識、ラベルへのイメージに関する設問を設け、それらと支払い意思額の関係を IBM SPSS Amos 22.0 を用いてパス解析により分析した。分析に用いるモデルでは、食と環境に関わる知識およびは環境意識とラベルへのイメージに影響を与えるものとし、環境意識とラベルイメージが支払い意思額に影響すると仮定した。環境意識については広瀬[4)]のモデルを参考に設定した。

2.2 質問紙調査

質問紙調査はウェブ調査により表 1 の通り実施した。実際の商品選択行動を再現できるよう、調査対象者は「普段自身の食べる食材を自身で購入している人」を条件としてスクリーニングを行った。

コンジョイント分析に関わる設問の選択肢を表 2 に示す。他の設問項目として、回答者の基本属性のほか、食と環境に関わる知識水準を問う設問として、「有機栽

表 1　質問紙調査の概要

方法	ウェブ調査（株式会社マクロミル）
対象	普段食材を自分で購入している人
サンプル数	512
調査時期	2015 年 3 月

表 2　コンジョイント分析の商品属性（トマト）

属性	選択肢
価格	250 円、300 円、350 円、400 円
産地	近隣の市町村、国産、海外産（中国・韓国）
鮮度	とても新鮮、新鮮、少ししなびている
CF	表示なし、0.7kg-CO_2、1kg-CO_2、1.3kg-CO_2
他の環境ラベル	表示なし、有機 JAS、特別栽培、カーボンオフセット

図 1　調査に使用したラベルのデザイン

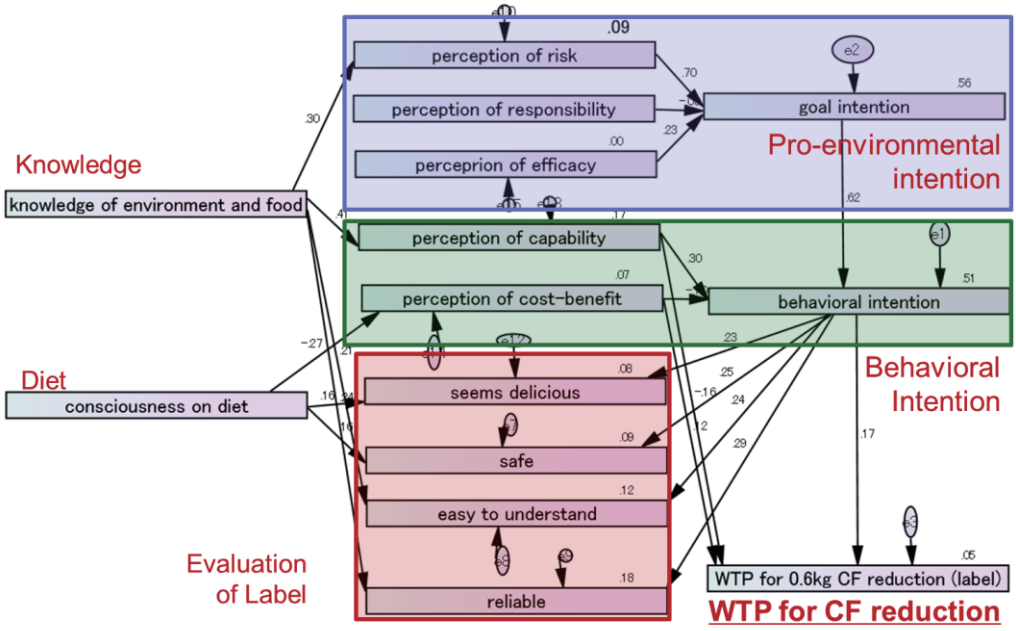


図 2 パス解析結果

培」「カーボンオフセット」等関連用語の認知度を尋ねた。さらに、食習慣への意識に関する設問として、「野菜を意識して摂るようにしている」など食生活において気を付けていることを尋ねた。環境意識に関わる設問では広瀬[4]を参考に設定した。加えて、ラベルへのイメージを定量化するため、本下ら[2]を参考にラベルの「わかりやすさ」「信頼性」「科学的か否か」「品質」「安全性」に関して尋ねた。

なお、質問紙では既存ラベルへのイメージの影響を避けるため、CF ラベルは架空のものを提示した（図 1）。

3. 結果

回答者属性については、年齢別では 20 代 21.9%、30 代 18.4%、40 代 20.1%、50 代 20.1%、60 代 13.9%、70 代以上 5.7%と各年代ともにおおよそバランスよく回答がなされている。CF を「知っている」「聞いたことがある」と答えた割合はそれぞれ 5.5%、22.1%で、その内容まで知っている回答者は比較的少数であった。

コンジョイントの結果から算出した属性別の部分効用を表 3 に示す。部分効用の絶対値の大きさから、産地による影響が最も強く、次いで鮮度、ラベルの順に影響が強いことがわかった。CF の部分効用値は若干のマイナスとなっているが個人間のばらつきは大きく、1.0 kg-CO_2 のケースでは標準偏差は 1.20 であった。

トマトにおけるパス解析の結果を図 2 に示した。本稿では、LC-CO_2 が 1.3 kg-CO_2 のケースと 0.7kg-CO_2 のケースの支払い意思額の差分を取り分析に供したものを示している。推計の結果 5%優位であったパスを矢印で表した。その結果、食環境知識は環境意識およびラベルへのイメージに広く影響を与えると推計された。また、食習慣への意識は商品の品質や安全性に関わるラベルイメージと関連があることがわかった。また、CF の削減に対する評価は環境意識との関連は有意となったが、ラベルイメージとの関連は有意でなかった。

なお、CF の削減量ではなく CF ラベルそのものへの支払意思額(1kg-CO_2 のラベルへの支払意思額)を目的変数とした場合、環境意識のうちの行動意図(Behavioral Intention)との関係は有意でなく、ラベルイメージからの影響が有意となった。すなわち「ラベルが貼付されること」自体への評価については、環境意識の向上はラベルのイメージ向上を通じてラベルの評価に影響を与えると考えられた。

表 3 部分効用の主な推計結果

産地	近隣の市町村	4.09	中国	-2.12
	国産	1.88	韓国	-3.82
鮮度	とても新鮮	0.71	少ししなびている	-0.24
	新鮮	-0.47		
CF	0.7kg-CO_2	0.22	1.3kg CO_2	-0.10
	1kg CO_2	-0.10	表示なし	-0.02

4. まとめ

消費者の環境意識や食習慣への意識が食品の定量的環境ラベルに対する評価に与える影響についてコンジョイント分析を用いて検討した。今後は購買の場での商品選択実験を含めて消費者の環境ラベルの活用を促進する環境コミュニケーションについて検討したい。

5. 引用文献

1) Meyerding S.: Appertite, 103, (2016), 105-112
2) 本下晶晴，本田智則，稲葉敦：環境情報科学論文集, 23, (2009) ， 215-220
3) 小城崇，山本祐吾，東海 明宏：環境情報科学論文集, 23, (2009) ， 209-214
4) 広瀬幸雄：社会心理学研究, 10(1), (1994), 44-55

森林保全を考慮したピアノの環境影響評価

Environmental impact assessment of piano considering forest conservation

○渡邊杜人*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Morito Watanabe, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学
* g1362145@tcu.ac.jp

1. はじめに

FAO によると、世界の陸地面積の約 3 割が森林である。2000-2010 年、世界全体の森林純消失量は年間 1300 万 ha で、約 1600 万 ha であった 1990-2000 年期と比べると、大規模な植林事業によって減少傾向にあるものの、未だ大規模に森林が失われている。近年、世界で最も森林減少が著しいのは、ブラジル、インドネシア、アフリカ等の熱帯諸国である。森林減少の原因は様々だが、プランテーションといった農地等への土地利用の転換、自然回復力に配慮しない非伝統的な焼畑農業、燃料用木材の過剰な採取、森林火災のほか、違法伐採等によって持続可能な森林経営がなされていないことも大きな原因となっていることが挙げられる。
木材を使用する楽器メーカーにおいても原材料のトレーサビリティを考慮した製品づくりが求められている。

2. 研究目的

本研究では、木材が主原料であるグランドピアノに注目し、そのライフサイクルにおける環境影響について、以下の 2 つを目的とする。

① LCA 評価手法を用い、グランドピアノの環境負荷（GHG 排出量等）を算定し、その環境影響を分析する。
② ライフサイクルにおける環境影響について、木材の持続可能性や生物多様性を考慮し、評価を行う。

3. 評価対象及び研究方法

3.1 評価対象

評価対象は、株式会社河合楽器製作所の製品であるカワイグランドピアノ GX-3（表 1）とする。
機能単位は「グランドピアノ 1 台」とし、耐用年数は 5 年とする。

表 1　評価対象

製品名	GX-3
高さ	102cm
間口	152cm
奥行	188cm
重量	334kg

3.2 評価範囲

本研究におけるシステム境界を図 1 に示す。
なお、ピアノは人力で作動するため、使用段階ではエネルギー負荷がないものと判断した。

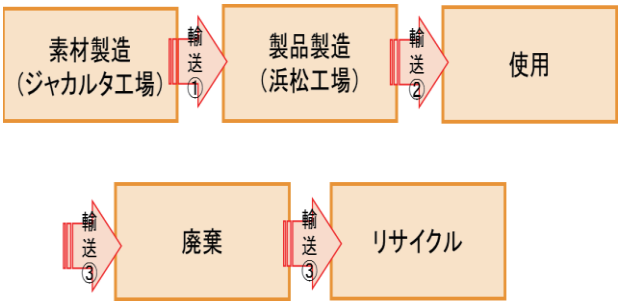


図 1　システム境界

輸送におけるシナリオにおいて、輸送①はヒアリングのもと設定をした。輸送②、輸送③においては、2001 年に JEMAI（一般社団法人産業環境管理協会）が報告している製品環境宣言「カワイグランドピアノ RX-2A」を参考にした。以下に示す。

表 2　輸送シナリオ

輸送①	コンテナ船でジャカルタ～浜松と設定
輸送②	10t トラックを積載率を積載率 80%で 10km と設定
輸送③	2t トラックを積載率 15%で 20km と設定

3.3 データ収集

本研究では、「株式会社河合楽器製作所」からグランドピアノ 1 台を生産するにあたる各種の一次データを入手した。
入手した一次データは、素材製造、製品製造、リサイクル、廃棄の活動量である。
GHG の原単位は主に二次データである IDEA を使用した。

3.4 算定方法

GHG 排出量の算定には、原単位法（式①）を使用した。投入量には、ヒアリングで入手したデータを使用した。

原単位法＝Σ（投入量×原単位）・・・・・・・式①
GHG の原単位には CFP 基本データベース ver1.01、CFP 利用可能データ ver1.03 および実測データを使用した。

4. 結果

4.1 GHG 排出量

グランドピアノ 1 台における GHG 排出量は、全体でおよそ 1 トン（図 2）となった。なかでも、素材製造段階と製品製造の負荷が大きく、両者の差は 100kg ほどしか見られなかった。輸送においては、素材をジャカルタから日本へ輸送する工程が大きかった。図 2 は素材製造段階の内訳であるが、合板と鉄の負荷が大きいことが分かった。
図 4 は製品製造段階の内訳であるが、電力と都市ガス 13A の負荷が大きいことが分かった。

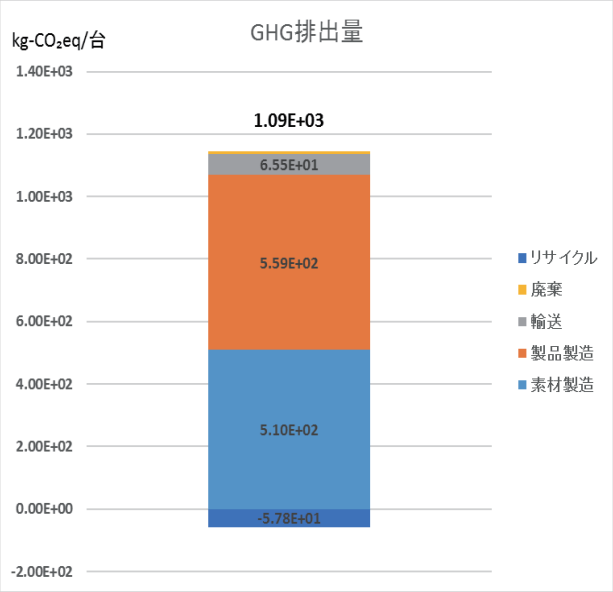


図 2　グランドピアノのライフサイクル GHG 排出量算定結果

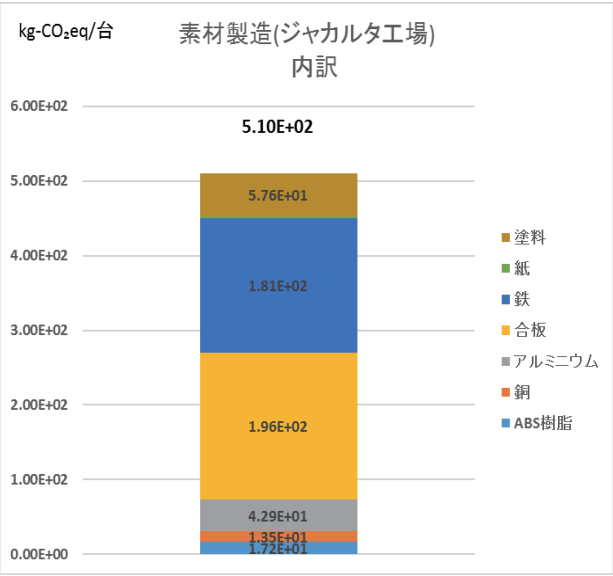


図 3　素材製造に注目した GHG 排出量算定結果

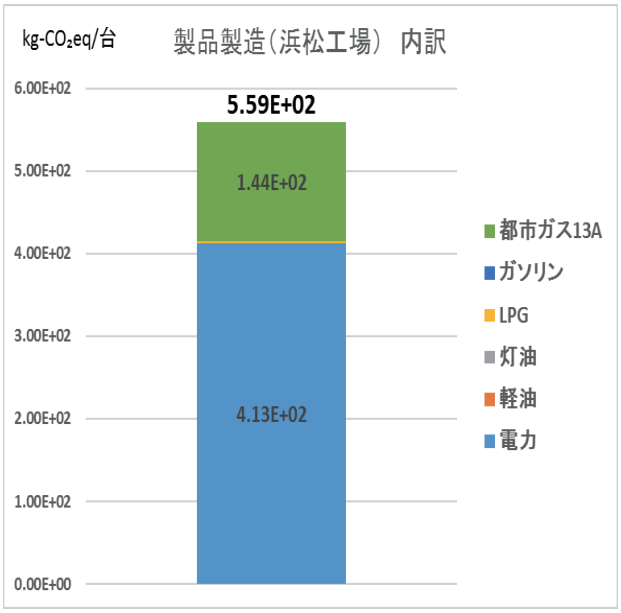


図 4　製品製造に注目した GHG 排出量算定結果

4.2 木材に関する結果

木材における環境影響評価は学会にて公開予定である。

5. おわりに

グランドピアノ 1 台における環境負荷は、およそ 1 トンで、素材製造段階と製品製造段階の負荷がほぼ同等であった。
今回の結果は以前実施された製品環境宣言「カワイグランドピアノ RX-2A」と GHG 排出量はほぼ同等であった。ただし、木材の調達方法によって生物多様性に対する影響は大きく変化し得るため、トレーサビリティの確保が極めて重要である。

6. 参考文献

1） FAO「世界森林資源評価 2010」
2） 製品環境宣言「カワイグランドピアノ RX-2A」
3） 株式会社河合楽器製作所 HP
https://www.kawai.co.jp/

電子書籍端末による読書習慣と満足度の変化を考慮した読書における環境影響評価

Environmental impact assessment of book reading based on changing reading consumption and satisfaction with e-book reader

天沢逸里*[1)]、○井原智彦[1)]、花木啓祐[1)]
Eri Amasawa, Tomohiko Ihara, and Keisuke Hanaki
1) 東京大学
* aamasawa@s.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

本 1 冊あたりを機能単位とし、電子書籍端末で読む電子書籍と紙の本の温室効果ガス排出量(GWP)を比べると、電子書籍は紙の本の 3 分の 2[1)]または半分[2)]という報告がある。通常のライフサイクル評価は製品同士の比較が可能だが、実際に環境負荷の削減が見込めるかを検討するためには、消費者 1 人あたりの消費量を機能単位として評価することが望まれる。現実に、電子書籍を読む人の約 9 割が紙の本も同時に読んでおり[3)]、電子書籍が紙の本を完全に代替すると仮定することは実状との乖離を招く。そのため、読書時間や本の購入数といった読書習慣が、電子書籍によってどのように変化するかを把握することは、環境負荷の明細な評価につながる。

また、電子書籍端末で読む電子書籍が紙より環境負荷が小さくとも、消費者が技術を受け入れなくては負荷削減は夢となる。紙の本と電子書籍における読書体験の違いは、長らく様々な分野で議論されてきた。ヒアリングにより質的な解析を行った研究は「紙の方が良い」という結果を示した一方[4)]、認知科学での数値的な解析は、人間は紙の本も電子書籍も同じように読むとの結果を示している[5)]。これらの結果を踏まえ、読書における読書習慣の変化とともに読書体験の変化を評価することは、技術の普及による環境負荷の削減ポテンシャルをさらに明確に評価できると考える。

本発表では、紙の本しか読んだことのない消費者に電子書籍端末の貸出を 3 ヶ月間行った社会実験を通して、読書量の変化とそれに伴う環境負荷、そして読書における満足度の変化を包括的に議論する。

2. これまでの研究

著者らは、インターネット調査（米国で実施）より、電子書籍端末の所有者は紙の本しか読まない人に比べて、年間書籍購入冊数と 1 日あたりの読書時間が 2-3 倍である、という結果を得た。それゆえ、電子書籍は紙の本を代替せず追加消費となっており、電子書籍端末で本を読むことは絶対的に環境負荷を増大させていると考えられた[6)]。しかし、この調査では、両者で母集団が異なり、電子書籍端末の所有と読書習慣の差違の因果関係が把握できないことから、社会実験の実施に至った。

3. 方法

3.1. 用語の定義

本研究で使う「書籍」は一般書籍を指し、娯楽における読書を対象にする。「読書体験」には、読みたい本を探し、本の入手、読む場所まで本を運ぶ行動、読書、そして本の保管または廃棄を含む。

3.2. 社会実験の概要

本実験では、内的妥当性が高い研究手法であるとされる True experimental design[7)]を適用した。この手法では、どのグループが介入を受けるかを研究者がランダムに振り分ける、ランダム化比較試験を用いる。今まで紙の本しか読んだことがない読書家を集め、ランダムに 2 つのグループに分けた。一グループには Amazon の Kindle を無償で貸出（以降 Kindle Tester、計 18 名）、もう一つのグループは対照群として実験期間中は紙の本での読書を継続した（以降 Paper Only、計 11 名）。さらに、他の電子機器で電子書籍を読む人も参加者(以降 Other Device、計 5 名)に含めた。実験期間の 3 ヶ月に渡って毎週読書量に関するアンケートを行い、実験終了時にヒアリングを行った。実験は 2016 年 7 月から 10 月にかけて米国シアトルで実施された。

3.3. データ収集とその内容

実験では①読書量・読書習慣、②製品の満足度、③読書体験における質的データ、の 3 種類のデータを収集した。①では、入手した書籍の数、読書にかけた時間とその場所を 1 週間ごとに問い合わせた。「入手した書籍」には、購入した本に加え、図書館で借りた本や知人友人から寄贈された本など、一定期間個人が自由に読める本を含む。②では、読書体験の構成要素 11 項目について重要度を、電子書籍端末と紙の本に対する各項目の満足度を、それぞれ 9 段階で回答を得た。重要度は実験開始時と終了時に全員に質問し、Kindle Tester には 1 ヶ月単位で質問した。満足度は電子書籍端末を経験せずに答えることができないため、Kindle Tester のみ、実験開始 1.5 ヶ月後と終了時に質問した。最後に③では、電子書籍端末に慣れるにつれて変化すると考えられる、電子書籍端末へのニーズや不満、そして読書そのものに対する考え方の変化を汲み取るため、自由回答方式で質的データを回収した。

3.4. 満足度の定量化

読書における満足度は、書籍入手数と製品満足度に依存する指標とし、式 1 により算出した。製品満足度は、回答者別に製品の構成要素別満足度を重要度によって加重平均した値[8)]とした。

3.5. 書籍と端末の環境負荷の推算方法

紙の本と電子書籍のライフサイクルにおける環境

負荷は Moberg et al (2011)[1]を、電子端末のライフサイクルにおける環境負荷は Teehan and Kandlikar (2013)[9]の Amazon Kindle と iPad の値を参照した。紙の本の LCA は 14%の古紙リサイクル率を考慮しているのに対し、電子端末はリサイクル率と方法が不確かなため、考慮していない。電子書籍端末の使用年数は 3 年と仮定した。

$$\text{読書における満足度} = (R_{\text{電子書籍}} \times P_{\text{電子書籍}}) + (R_{\text{紙の本}} \times P_{\text{紙の本}})$$

R = 書籍入手数

P = 製品満足度

式 1 読書における満足度の算定方法

4. 結果と考察

4.1. 読書習慣と満足度の変化

実験期間中に被験者一人あたりが入手した書籍の平均数は、Kindle Tester は紙 8 (標準偏差: 2)冊：電 5 (1)冊、Paper Only は紙 30 (9)冊、Other Device は紙 21 (9)冊：電 7 (3)冊となり、必ずしも電子書籍は紙の追加消費とはならない結果となった。

電子書籍端末に対する満足度においては、3 ヶ月時が 1.5 ヶ月時よりもやや高い結果になった。特に増加した項目は「持ち運びやすさ」など、電子書籍端末の強みとされる特性であり、使用することによって得る満足度の変化を確認したと考える。

4.2. 読書における環境影響評価

読書における GWP で大きく占める項目は紙の本の消費である。電子端末の負荷は、紙の本を電子書籍で代替することによって全体的な影響は減る。Kindle Tester の GWP 絶対値が他のグループに比べて一番低い結果が出た(図 1a)。電子書籍が紙の本を代替する事によって GWP も減少した。本一冊あたりの GWP (図 1b)はどの全てのグループが似たような値であるが、Paper Only の一人あたりの GWP の値は大きい。環境負荷削減ポテンシャルを把握するためには、一人あたりの消費量の把握が重要であることがわかる。

4.3. 読書における環境影響の包括的議論

電子書籍を読み始めることによって変化する環境負荷と満足度の傾向をつかむため、実験開始 1.5 ヶ月後と 3 ヶ月後の、Kindle Tester 被験者個々の読書における GWP と満足度を散布図として表した(図 2)。1.5 ヶ月後に比べて 3 ヶ月後の方が傾斜が大きいことから、時間が経つにつれて GWP あたりの満足度が増加したと見受けられる。この傾向が続くとすれば、電子書籍端末で電子書籍を読むことによって、読書における GWP は減少し、なおかつ読書における満足度の増加が見込めると考えられる。

5. まとめ

本稿では、読書における環境負荷と満足度の、電子書籍を読むことによる変化について議論した。社会実験の結果から、消費者 1 人を機能単位とせずには技術の有用性は議論できないことを示した。環境影響と満足度の傾向は電子書籍端末の負荷削減ポテンシャルが高いことを表すが、長期的な変動を把握することは今後の課題である。

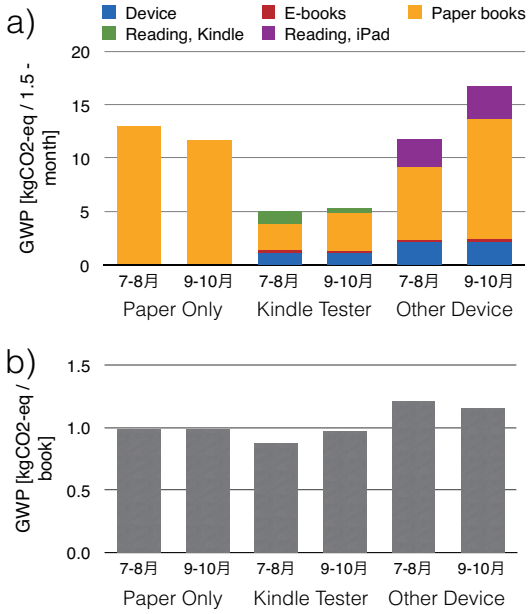


図 1 読書における環境影響評価の結果 a)一人あたり、b) 入手書籍数あたり

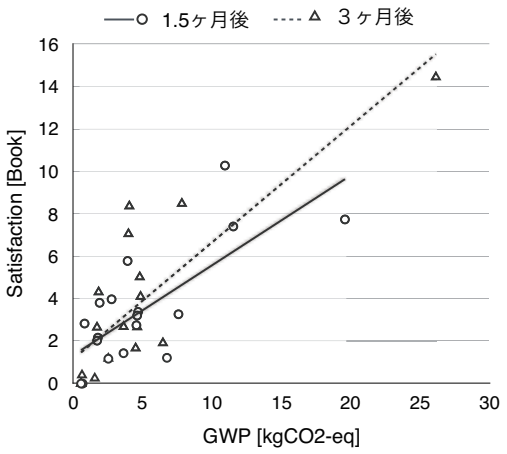


図 2 読書における環境影響 VS 満足度

6. 引用文献

1) Moberg A, Borggren, C, Finnveden G: Int J Life Cycle Assess, 16 (2011) 238–246
2) 中村洋之: “LCA 日本フォーラム・日本 LCA 学会共催セミナー”, (2015)
3) Perrin A: “Book Reading 2016” (2016)
4) Clark D. T, Goodwin S.P, Samuelson T, Coker C: Performance measurement and metrics, 9(2), (2008), pp. 118–129
5) Inoue S, Omodani M: J Imaging Sci Techn, 56(6), (2012), pp. 60504-1 – 60504-6
6) Amasawa E., Ihara T., Hanaki K: “12th Int. Conf. Ecobalance”, Kyoto, (2016)
7) Malhotra K, “Marketing Research (5th ed)”, Pearson Prentice Hall, New Jersey, (2007), pp. 229–237
8) 天沢逸里, 井原智彦, 花木啓祐: “第 11 回日本 LCA 学会研究発表会”, 70-71, (2016)
9) Teehan P, Kandlikar M: Environ Sci Technol, 47 (9), (2013), pp 3997–4003

UV 印刷を対象とした環境影響評価

Environmental impact assessment for UV printing

○川島雄介*[1)]　内田弘美 [2)]　富川恵子 [2)]　伊坪徳宏 [1)]
Yusuke Kawashima, Hiromi Uchida, Keiko Tomikawa, Norihiro Itubo
1)　東京都市大学伊坪研究室　2)東洋インキ SC ホールディングス
* g 1362039@tcu.ac.jp

1. はじめに

パリ協定発効など気候変動緩和策のさらなる強化が求められるなか、インキ業界では環境配慮型インキとして植物油由来のインキの開発と利用に対する注目度が高い。なかでも再生大豆油インキは揮発性有機化合物（VOC）が発生せず、使用済みの大豆油を再使用しているなど、環境負荷削減効果の高い製品として普及しつつある。

また近年では UV 印刷が普及しており、これはインキに紫外線を照射し、瞬時にインキを硬化し印刷媒体に付着させる。これにより生産時間の削減による納期短縮などが可能となった。また環境面においても UV インキは VOC が発生しない為、その関連設備が不要となり省エネルギー化が可能となった。このような現状下、印刷業界では新たに LED-UV 印刷システムという新たな印刷システムが考案された。これはインキ乾燥時に使用するランプを UV 印刷のメタルハライドランプから LED に代えたものである。これにより印刷時の照明に関わる電力を大幅に削減することが可能となった。

2. 研究目的

研究背景として、インキを対象とした環境評価はこれまでに、吉田陽紀らのバイオエタノールを利用した印刷用インキの LCA などが挙げられる。これは LC-CO_2・WF・VOC の評価を実施しており、バイオエタノールの有用性を示している。
しかし LED-UV 印刷システムや、UV インキに着目した研究はまだ実施されていない。またインキの色別に着目し、評価を実施した研究も行われていない。
このため、研究目的は以下の 2 点とする。

①4 種類の印刷モデルを比較し、各種モデルの環境負荷の定量的な把握を行い、LED-UV 印刷物モデルの環境優位性を示す。
②各モデルの中で、4 色（ブラック・シアン・マゼンタ・イエロー）+4 色混合の算定を行い、色別に環境負荷を比較する。

3. 評価対象及び研究方法

本研究の研究対象は印刷物とし、４種類の印刷物モデルを設定した。１種類のモデルにつき、カラー印刷に用いられるブラック（墨）・マゼンタ（紅）・シアン（藍）・イエロー（黄）の 4 色と 4 色混合の評価を実施した。
4 種類の印刷モデルを以下に示す。
①油性枚葉印刷モデル　　（油性枚葉）
②再生大豆油印刷モデル　（再生枚葉）
③UV 印刷モデル　　（UV 印刷）
④LED-UV 印刷モデル　　（LEDUV）
機能単位は、両面印刷 A4 サイズの印刷物 6400 ページとする。6400 ページという数は（株）サンエー印刷の年間印刷部数を年間印刷回数で除して求めた。
また、印刷影響領域は LC-CO_2・WF・VOC の３つとする。印刷インキは東洋インキ（株）が製造したインキを使用し、印刷機は株式会社サンエー印刷の所有する印刷機を使用する。
また、使用データについても、印刷機データは（株）サンエー印刷提供データ、それ以外のデータに関しては東洋インキ SC ホールディングス（株）提供データを使用した。輸送段階は PCR を参考とした。計算ソフトは一般社団法人産業環境管理協会　LCA ソフトウェア MiLCA を使用し、原単位は国立研究開発法人産業技術総合研究所と一般社団法人産業環境管理協会のインベントリデータベース IDEA を使用した。
図 1 にシステム境界を示す。

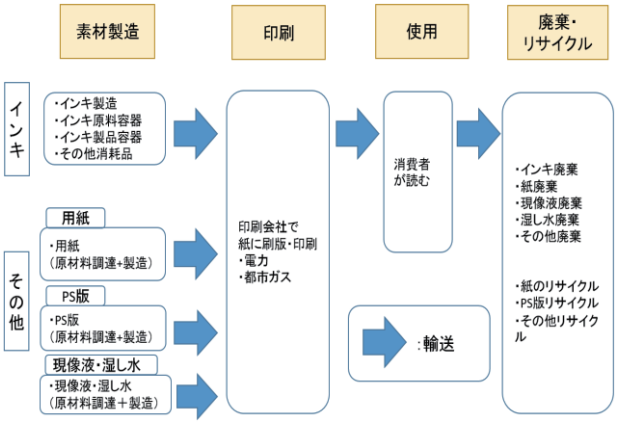


図１　システム境界

4. 算定式

算定式は以下の３つである。

LC-CO_2算定式

LC-CO_2＝Σ(原単位×活動量)

WF 算定式

水消費量(m^3)＝Σ(水消費量×活動量×特性化係数)

VOC 算定式

VOC＝Σ(原単位×活動量×特性化係数)

5. 結果

結果グラフに関して、これらのグラフはインキに着目した評価結果であり使用段階(印刷段階)は含まれていない。よって使用段階はグラフの凡例には入れていない。尚、論文には印刷を含めた評価結果を載せている。

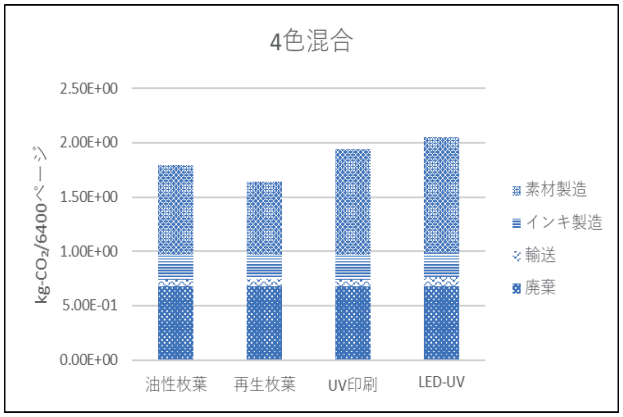


図 2 インキの LC-CO_2(4 色混合)

各モデルの全体排出量は油性枚葉モデルから右にそれぞれ、1.80E+00[kg-CO_2]、1.64E+00[kg-CO_2]、1.80E+00[kg-CO_2]、1.80E+00[kg-CO_2]であった。

どのモデルにおいても素材製造段階が最も大きくなっており、LED-UV モデルと UV モデルはインキ原料である溶剤、顔料、樹脂がそれぞれ大きく占めていた。

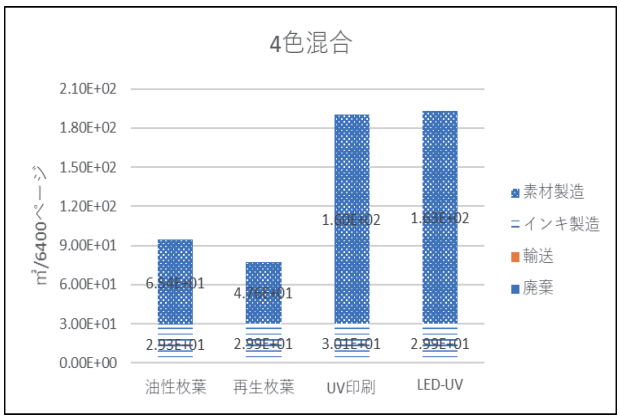


図 3 インキの WF(4 色混合)

各モデルの全体値は、油性枚葉モデルから右にそれぞれ、9.47E+01[m^3]、7.75E+01[m^3]、1.90E+02[m^3]、1.93E+02[m^3]であった。

結果が大きい UV モデルと LED-UV モデルを比較すると僅かに LED-UV モデルの方が大きい。これは素材製造段階において LED-UV モデルはインキ原料であるシクロヘキサノンや有機顔料が大きいことに起因していると考えられる。

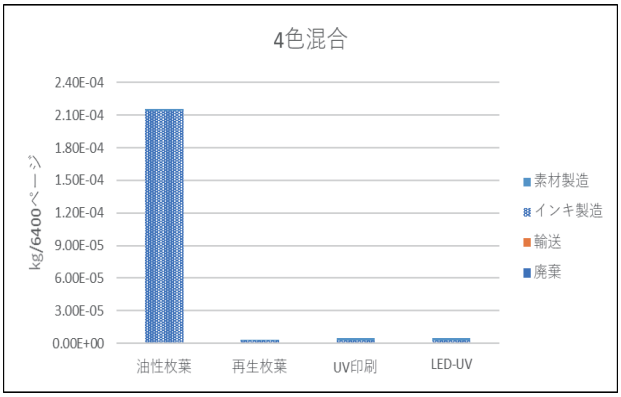


図 4 インキの VOC(4 色混合)

各モデルの全体値は、油性枚葉モデルから右にそれぞれ、2.16E-04[kg]、3.52E-06[kg]、5.99E-06[kg]、4.91E-06[kg]であった。

VOC の結果は極端な結果となり、VOC 対策が施されていなかった油性枚葉モデル以外は、ほぼ変わらない結果となった。

6. まとめ

本研究では、UV 印刷と LED を使用した UV 印刷を対象に、従来の枚葉印刷と比較しつつ環境影響の評価を行った。印刷物の重量の大半を占める紙を除いた分析結果によれば、インキ間の環境側面の違いを定量的に表すことができた。結果では LC-CO_2において LED-UV モデルが最も大きい結果となった。WF に関しては UV モデル LED-UV モデルが大きくなったが、これはどちらもインキ原料である 2-エチルヘキシルアクリレートが起因している。VOC 結果では、インキのノン VOC 化が進められた再生大豆油モデル以降は僅かな差はあるものの、ほぼ見られなかった。これにより、インキからはほとんど VOC 排出されていないことが伺える。

7. 参考文献

1) “UV 硬化型インキ”東洋インキ株式会社
http://www.toyoink.jp/ja/products/uvcure/index.html

2) “LED-UV システムの概要”パナソニック
http://www.jfpi.or.jp/JBFA/seminar/0901_16_01/Panasonic.pdf

東京染小紋ネクタイのライフサイクルアセスメント調査

Life cycle assessment investigation of　Tokyo somekomon necktie.

○田村賢祐*1)、佐々木重邦 2)、十村勝 1)、北原康雄 1)、
Kensuke TAMURA, Shigekuni SASAKI, Masaru TOMURA and Yasuo KITAHARA
1) エヌ・ティ・ティ・アドバンステクノロジ株式会社,2) 武蔵野大学
*kensuke.tamura@ntt-at.co.jp

１．はじめに

伝統的工芸品産業の市場は、生活様式の変化、国内外の安価な製品の増大等により、需要が低迷し、生産額、企業数、従事者数ともに減少傾向にある。しかし、近年では、伝統工芸品の手作りの味わい、優れた機能性等が国内外でも高い評価を受けている。

このような伝統工芸品の魅力に加え、これまでほとんど実施されていない環境面における伝統工芸品ならではの特徴を調査することで、伝統工芸品を社会に広め、後世へ伝えるための一助となることを目的とする。

本研究では、日本の伝統工芸品である東京染小紋ネクタイを対象にライフサイクルに亘る CO_2 排出量と伝統工芸品ならではの特徴の両面について調査・研究を行った。

２．調査対象

調査した東京染小紋ネクタイの製造工場は、株式会社冨田染工芸 1)を選定した。評価対象は、同社の製品である「東京染小紋ネクタイ」とした。

図１　東京染小紋ネクタイ

３．機能単位、システム境界

機能単位は、本製品 1 本とした。CO_2 排出量の算定方法は、「機能単位あたりの CO_2 排出量＝Σ（活動量×CO_2 排出原単位（以下、原単位））」より求めた。
本製品のシステム境界は、図 2 のとおりである。

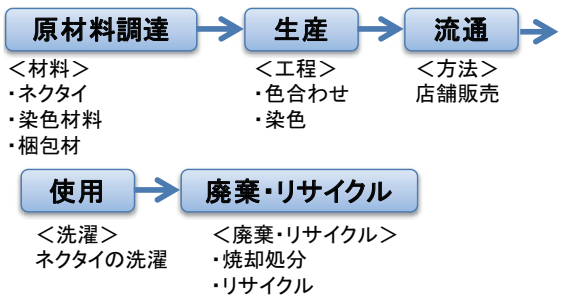


図２　本製品のシステム境界

原材料調達段階では、ネクタイ（絹）や梱包材である貼箱、染色するための型紙（和紙）や色糊（主原料はもち米、米ぬか、染液）等の調達に係るプロセスを評価した。

生産段階では、専用の機械を使い、色糊を塗布していく「地色染め」、色を定着させるための「蒸し」等の工程ごとに評価した。生産段階において、染色に使用する色糊は、余分に作られる。そのため、余った色糊の廃棄についても評価を行った。さらに、工程間における輸送も評価した。また、工場内で使用する機械、資材等資本財の製造および廃棄については評価対象外とした。

製品の検品や梱包については、人の手で行われているため、CO_2 排出量はゼロとして評価した。

流通段階では、店舗までの移動プロセスをパーソントリップ調査結果 2)　を用いて評価した。

使用段階では、東京染小紋ネクタイを洗濯する際に利用する水や洗剤、ガスの利用に係るプロセスを評価した。

東京染小紋ネクタイの洗濯頻度や使用年数、洗濯方法については、無作為に抽出した約 100 人を対象としたアンケート結果を用いた。洗濯頻度は 1.3 回/年、使用年数は約 9.2 年であった。洗濯方法は、「家庭の洗濯機」、「クリーニング店」と回答が得られた。「洗濯はしない」と回答した人の割合については、使用段階の CO_2 排出量をゼロとして評価した。

廃棄・リサイクル段階では、処理場までの輸送と焼却処分に係るプロセスを評価した。

４．評価（データ算出）方法

本評価では、製品 1 本製造するのに必要な材料、電力使用量等をヒアリングし、製品 1 本あたりの評価を実施した。

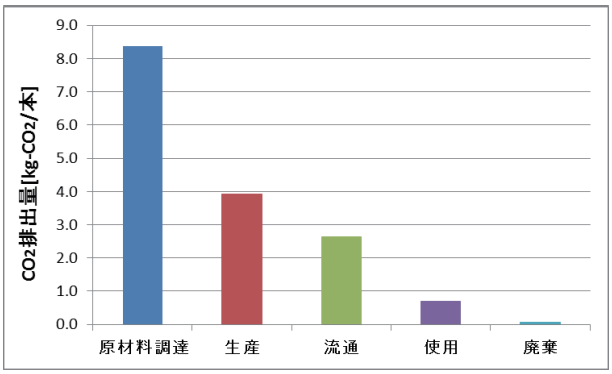
工場内で使用される電力量については、全てヒアリングにより取得した。

バックグラウンドデータは主に、一般社団法人産業環境管理協会の LCA 支援ソフト MiLCA に搭載されているデータベース「IDEA1.1.6.0」3) を利用した。また、原材料調達における輸送は、宅配便が主であるとのヒアリング結果から、ヤマトグループ CSR 報告書 2014 に掲載されている「ヤマト運輸の車両からの原単位 CO_2 排出量」4) を利用した。工程間における輸送の負荷算出に利用した積載

率や距離等は、データが得られなかったため、公開文献[5]を利用した。

5．結果と考察

本評価での製品 1 本あたりに係る CO_2 排出量は 15.7kg であった。



	原材料調達	生産	流通	使用	廃棄	合計
CO_2排出量	8.4	3.9	2.6	0.7	0.1	15.7

kg-CO2/本

図 3　評価結果

ライフサイクル別で見ると、原材料調達段階の CO_2 排出量が最も大きく、全体の 54%を占めていた。和紙を利用している型紙や貼箱が大きく影響している。次いで、生産段階が全体の 25%となっている。こちらは、工程間の輸送に伴う負荷が影響している。

6．感度分析

本評価では、アンケートの結果より、東京染小紋ネクタイの使用年数を9.2年とした。同アンケートにおいて、一般的なネクタイの使用年数についても調査し、6 年との結果を得た。そのため、感度分析では、この使用年数の違いによる結果への影響について検討を行い、その結果をグラフにまとめた。

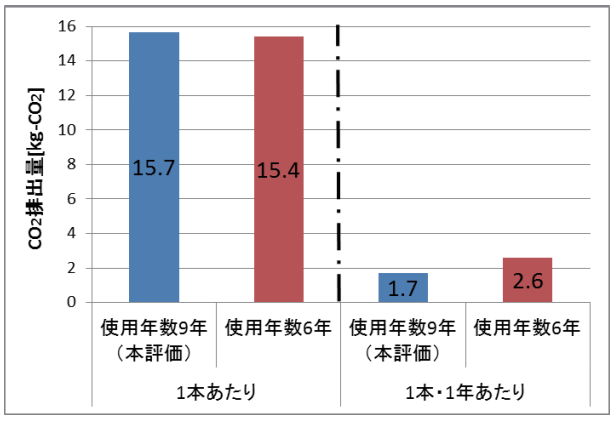


図 4　感度分析評価結果

使用年数の違いが結果に与える影響を検討した結果、製品 1 本あたりで比較した場合（図 4 左側）では、使用年数が長いほど CO_2 排出量は増加するが、ネクタイの使用段階の負荷が占める割合が小さいため、結果に与える影響は小さかった。しかし、機能単位を製品 1 本 1 年あたりとして比較した場合（図 4 右側）では、使用年数 6 年とした場合の CO_2 排出量が 2.6kg となり、本評価（使用年数約 9.2 年）の CO_2 排出量（1.7kg）の 1.5 倍以上にもなるという結果となった。

この結果から、東京染小紋ネクタイは、一般的なネクタイと比べて長期間使用されることにより、1 年あたりの CO_2 排出量が小さくなるということがわかった。

7．まとめ

本評価での製品 1 本あたりの CO_2 排出量は 15.7kg であった。これは、東京染小紋ネクタイが伝統工芸品であるが故に「満足感」が高いことで、「大切に扱う」ことにより長く使用されていることが影響している。これは実施したアンケートにて「東京染小紋のネクタイを使用することで満足感を得られるか」という質問に対して、約 90%の人が満足すると回答していることからも判断できる。

また、機能単位を 1 年あたりとした場合においては、CO_2 排出量が小さくなることが分かった。つまり、一般的に長く使用される東京染小紋ネクタイを使うことは、CO_2 排出量の低減に寄与すると言える。

8．謝辞

本評価の実施にあたり、株式会社冨田染工芸様より、製造工場内の調査にご協力をいただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

1）株式会社冨田染工芸
＜http://www.tokyo-senshoku.com/partner/member/tomita/tomitasomekougei.html＞
2）全国都市交通特性調査(全国 PT)
＜http://www.mlit.go.jp/crd/tosiko/zpt/＞
3）一般社団法人産業環境管理協会、LCA 支援ソフト MiLCA「IDEA1.1.6.0」
4）ヤマトグループ CSR 報告書 2014
5）カーボンフットプリント製品種別基準(CFP-PCR)対象製品：ユニフォーム(PA-AO-04)
6）減価償却資産の耐用年数等に関する省令
＜http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S40/S40F03401000015.html＞

建築分野における LCA の活用実態と課題

Discussion of issues on LCA for building designer

○小林謙介*[1)]、阿保ことり [1)]、新家佑城 [1)]、佐藤整央 [1)]、磯部孝行 [2)]
Kensuke Kobayashi, Kotori Abo, Yuki Shinya, Yoshihisa Sato, Takayuki Isobe
1) 県立広島大学,　2) 武蔵野大学
* kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. はじめに

LCA は、以前にも増して様々な活用がなされているが、建築分野においては、その活用は決して十分とは言い切れない。あくまで一例ではあるが、建築物を取り扱ったカーボンフットプリントは、現状では 2 社にとどまっており、一層の普及が期待される。一方、LCA の実務での活用のためには、世の中の評価の動きや、実務者が求める評価が可能になることも、重要と考えられる。こうした背景を踏まえ、建築分野の LCA の一層の活用のための課題を明らかにすることを目的として、検討を行った。本検討は、①国内外の建築および LCA 関連論文等の調査、②国内の建築実務者へのアンケート調査の 2 つのアプローチで実施した。

2. 国内外の文献調査による課題整理

2.1 調査概要

国内外の LCA および建築関係の論文等（論文だけではなく、学会の大会要旨等も含む：以下、論文等と称する）を対象とした。本調査は、原則として 2010 年から 2016 年 10 月までを対象とした。国外は Int. J. of LCA を、国内は、建築学会（環境系論文集・技術報告集・大会梗概）と、LCA 学会研究発表会要旨集とした。対象は、建築物・建材・都市などを対象とした文献で、業界の分析などは対象から外した。いずれも該当機関に出版された論文をタイトルで判断して一次抽出し、一次抽出されたものについて、概要を捉えて必要事項を記録した。分析対象となった文献は、231 件である。

2.2 調査結果

図 1 には、論文等の種類ごとの推移を示す。そもそもの総数が少ないため、数件の増減によって大きく変化しているように見えるが、全体としては少ないながらも一定数は論文等が投稿されていることが伺える。

図 2 には、建築物・建材などの評価対象の結果を示す。いずれの論文等においても、建築材料を対象とした論文等が最も多く、次いで、建築物が多かった。都市を対象とした文献も少なくなかった。建材は、特に木材が多かった。また、セメント・コンクリートに関連するものも少なくなかった。これはいずれの論文等にも共通していた。このほか、タイル、窓枠、断熱材などもあった。これらの建材は、建築分野での評価における“こだわりどころ”とも考えられる。

図 3 には、評価されている環境負荷物質あるいは環境影響の結果を示す。特に海外の LCA を母体とする論文等では、マルチクライテリアで評価されることが多かった。一方で、国内外の建築を母体とする論文等ではCO_2排出量のみにとどまるケースが非常に多かった。今後は、マルチクライテリアでの評価が重要になることも想像される。

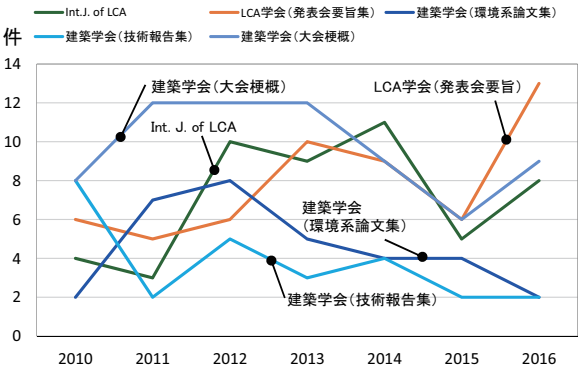


図1 抽出した建築関連の文献数の推移

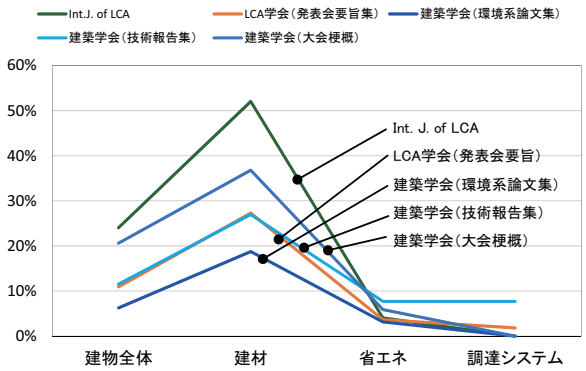


図2 評価の視点ごとに見た文献数

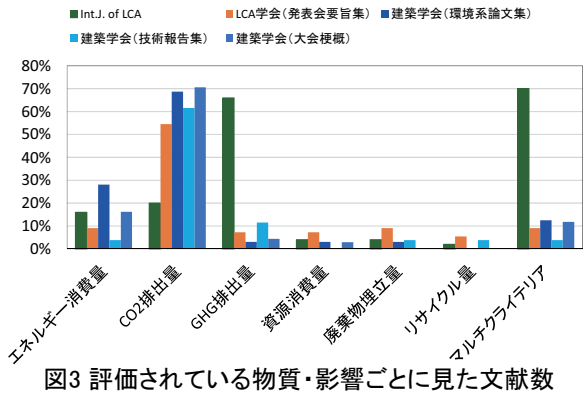


図3 評価されている物質・影響ごとに見た文献数

このほか、機能単位の取り方は、建築物を対象では、殆どが建物あたり・延床面積あたりであった。一方、建築材料は、多くが重量あたり・体積あたりであった。海外の論文等では、評価対象によっては、1 柱あたり、窓枠 1 か所あたりなどのように最も機能が適切に評価されるような機能単位の取り方も見られた。

3. 建築実務者へのアンケート調査

本調査は、日本建築学会 地球環境委員会 LCA 評価手法検討小委員会が主体となって、2015 年 10~11 月に実施した。調査対象は建築分野で LCA を利用している者（事業者・研究者など）とし、地球環境委員会傘下の委員会などの委員（約 200 名）や、過去に評価経験がある人物に依頼した。回答数は 25 であった。

3.1 評価の視点

「これまでどのような視点で環境負荷削減策を検討しましたか」と質問をした結果、使用する建材を変更した場合の評価、省エネルギーのための材料・機器・システム等の導入効果、木材利用システムにおける負荷削減効果、廃棄物のリサイクルに伴う負荷削減効果、長寿命化など、様々な視点で LCA が実施されていることが分かった（表 1）。

3.2 評価領域のニーズ

より詳細なデータを整備する上で具体的にどの領域についてニーズがあるか調査を行った。これまで評価したことがある・今後重要だと感じる環境影響領域についての結果を図 4 に示す。どちらも地球温暖化が最も多かったが、全影響（LIME などによる統合化）、廃棄物排出量、森林資源消費量、化石燃料消費量、土地利用などは評価したことはなくとも、今後重要だと感じている者が多く、これらに対応した評価が行いやすくできるようにすることも重要と考えられる。

3.3 今後の課題

建築分野における、一層の LCA の活用に向け、自由回答で課題を調査した。調査した。建築分野での LCA に関するガイドラインとしては、建物の LCA 指針があり、本調査では、この指針に対する改善点を質問する形で回答を得た。

(1) LCA 指針に関する課題

建物の LCA 指針に求められる課題には、LCA の実施方法についての解説、LCA の動向解説など、またツールに関してはツール説明や機能追加など、データベースに関する課題などが指摘された。

特に、LCA 実施方法は、評価方法（例：システムバウンダリの考え方）、評価結果の活用の仕方（例：アピール方法）などについて、一層詳しい解説を求める声が多かった。また、動向解説は、世界的な動き、他産業の動きや建築分野における活用事例などが求められていた。

(2) LCA ツールに関する課題

LCA ツールに求められる課題については、評価機能の追加、CFP・PEF などの評価対応、他のツールとの連動など、様々な視点で課題が指摘された。評価機能の追加については、部位別やプロセス別などの解析の充実、CFP・PEF などの評価対応では、これらが自動計算できるツールなどを望む声が聞かれた。また、他のツールとの連動では、LIME を用いた影響評価、BIM 等との連動などの意見があった。

(3) 原単位データベース

現行の建物の LCA 指針・DB・ツールに望むことを調査し、「原単位データベースにどのようなデータがある事を望みますか」と質問した。その結果、原単位追加・他の影響物質・海外データ・単位換算データ・耐用年数データ・分類解説など多様な視点で指摘があった。以上のことから、今後は、エネルギー・CO_2 等だけではなく、多様な環境負荷物質が評価できるよう、原単位 DB の拡充を行うことが重要と考えられる。さらには、海外の DB の構築や、詳細な項目での原単位データの整備、単位換算データなどの充実も大きな課題といえる。

4. まとめ

本研究では、建築分野における LCA の一層の活用に向け、内外の研究論文等で取り扱われている内容を調査した。また、建築実務者にアンケート調査を行い、実務者の LCA に対する関心や、活用の支障となる課題を明らかにした。

表1 過去の検討内容（自由回答を整理）

分類	内容
建　　材	・仕上げ簡素化　・地産部材使用　・低炭素型コンクリート適用効果 ・材料別、部位別の評価　・リサイクル建材の採用 ・外装など部位の評価　・再生材利用による土地改変への影響の回避
省エネルギー	・断熱性の向上による省エネ　・省エネライフスタイルの採用 ・構造形式による省エネ　　・創エネ設備の採用
木材/建材利用システム	・木材利用システムの改善　・木材利用による環境負荷低減
廃棄物排出量/処理	・廃棄物処理に伴う環境負荷低減　　・最終処分量低減 ・建物のリユースによる環境負荷低減　・資源循環
そ の 他	・住宅のライフサイクルを含めた環境負荷削減 ・建替えと大規模改修での環境負荷比較

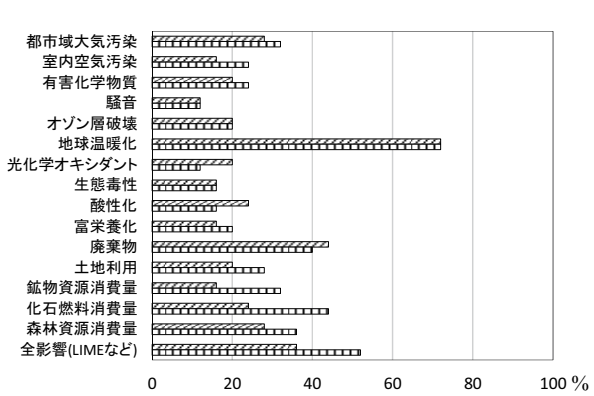


図4 評価経験がある・今後重要と感じる環境影響領域

2011 年版産業連関表を用いた建築実務者向け原単位データベースの構築

CO_2 排出量およびエネルギー消費原単位の開発状況

Development of emissions and energy consumption intensity database
for building designer using Input/Output Table in 2011
CO_2 emissions and unit energy consumption intensities

○外岡豊*[1)]、小林謙介 [2)]、前田拓生 [3)]
Yutaka Tonooka, Kensuke Kobayashi, Takuo Maeda
1) 外岡豊, 2) 県立広島大学, 3) 高崎商科大学
* ytonooka@gmail.com

1. はじめに

筆者らは、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、大気汚染物質の排出量推計とその誘発量分析を 1985 年表から行って来た。最新版として 2011 年表が公開されたので、基本表を用いた推計を行っている。昨年度報告した開発コンセプト[1)2)]に基づき、エネルギー・CO_2 原単位の構築を行っている。本報告では、CO_2 排出量の推計状況について報告する。なお、その中間過程として（2 次）エネルギー消費量についても推計している。

2. 基本的な方針

CO_2 排出量の推計の基礎として、産業連関表の物量表から各種エネルギー消費(投入)量が得られるが、物量表はいったん金額化された投入額(生産者価格)から各部門共通の単価を与えて逆算した二次加工値であるため、独特のゆがみがある。そこで、物量表によらずエネルギー消費構造統計と石油等消費動態統計を用いた推計手法を確立したが、2002 年以降、エネルギー消費構造統計が廃止され、代わりにエネルギー・バランス表が整備されたため、今回の 2011 年表での推計では、エネルギー・バランス表の数値を取り込むことを検討したが、産業連関表基本表よりエネルギー需要部門区分が粗いため推計精度上の制約も多く、部門とエネルギー種類別に見ると物量表と異なるエネルギー消費量値も多く、物量表を使わずにエネルギー・バランス表を用いた CO2 排出量推計を行うことは最良ではないと判断し、基本的に物量表の燃料、電力投入量をもとに CO2 排出量を推計することを基本とし、エネルギー・バランス表だけでなく、エネルギー販売量の一次統計値や業界団体データ等とも比較しつつ、それらを参考にして必要に応じて物量表値を補正し推計する方針とした。なお、推計手順を図 SI-1 に示した。

3. 排出量計算の手法

2011 年産業連関表の基本表は 521 行 398 列の内生部門マトリクスと最終需要 43 部門、租付加価値 13 部門から成る。産業連関表基本表の産出表から、燃料、電力のエネルギー品目がどの部門に産出されているか金額が得られる。行部門・燃料 A が列部門・製品 B の生産に投入されることを、産出表上では「産出される」と記述されるべきであるが、投入と言う方が、誤解がないので以下、投入と表記する。また物量表から各種固有単位で燃料製品 t、kl、kNm^3/年等の産出量（燃料 A の投入先別投入量）が得られる。しかしその他の石油製品、その他の石炭製品等、金額しか得られない品目も存在する。2011 年表ではコークスについては需給量が大きな燃料製品であるのに物量表に掲載されていなかったので物量をエネルギー・バランス表から補足した。燃料投入量がエネルギー・バランス表と一致しない部分についてはその他の一次統計値や業界団体推計等と比較し物量表値を不採用として最も信頼できる値に置き換えた。火力発電用 C 重油投入量等が該当する。投入量のうち排出を伴わない原料用投入を特定し、一部の部門と燃料種類においてはエネルギー・バランス表から原料用投入割合を与えて CO2 排出量を求めた。燃料以外の CO2 排出についてはセメント原料用石灰石からの排出を加算した。

4. 業種別の CO_2 排出量推計結果

基本表部門別 CO_2 排出量推計結果は、電力、自家発、熱供給分を間接排出として需要部門に加算した値とした。本報告での推計と、エネルギー・バランス表の値の比較は、標準産業分類に準拠した業種別に統合し、その合計値を比較した（その結果を一覧にした表は表 SI-2 に示した）。±10%程度の範囲に収まっている業種もあるが、大幅に異なる業種においてはその理由はそれぞれであると考えられる。エネルギー・バランス表と比較して、I/O 表では鉄鋼業排出が大き目、窯業土石は一致、機械とサービス産業、家計は過大、化学、紙パルプは過小であった（図１）。

農林水産業においてはエネルギー・バランス表が過小であると判断する。この部門のエネルギー消費実態

を捉えた 1 次統計調査が不十分であることが原因と考える。繊維衣服においてはエネルギー・バランス表が過大と判断する。化学繊維と化学の境界領域の事業者において化学に計上すべきエネルギー消費が繊維産業として計上されている可能性を仮説として疑っている。紙パルプにおいてエネルギー・バランス表が過大である可能性を考えにくいので I/O 表が過小であると判断する。その理由は紙パでは燃料、電力の購入単価が実際には安いのに物量表では統一単価で逆算した燃料消費量になっていることが原因と考えられる。石炭製品で I/O 表値が小さいのは鉄鋼関連のコークスと副生ガスをどちらの部門の消費とするかで違いが生じている可能性が考えられる。鉄鋼業では I/O 表値が大きいが、その分に相当すると考えると矛盾しない。窯業土石においてはよく一致していた。セメント製造に関してセメント協会推計を取り込んでいるため差が小さくて当然といえるが、その他の窯業土石においてもよく一致していた。機械産業で CO_2 排出量が大きいのは電力消費が大きいからであり、業種の内訳区分が異なり細かな比較はしにくいが機械合計では I/O 表が 20%大きかった。概して I/O 表が大きい業種が多いが製造業合計では一致した。これは実際には電力単価が業種により差があるが I/O表では統一価格になっているため電力単価が高めの業種では推計結果が大き目になり、電力単価が低い業種では I/O 表推計結果が低めに出る傾向があると考えられる。また自家発電の電力量が I/O 表では大きく、その影響もあり得るが詳細の確認はできていない。各業種を集計すると産業全体でも、全部門純計でもほぼ一致しており I/O 表がわずかに小さかった。自動車の差異については I/O 表は一次統計とかなり異なるが、自家用乗用車、自家用貨物車の燃料消費が各内生部門や家計消費に紛れ込んで計上されていると考えると補正すべきではないと判断し、物量表値をそのまま採用した。サービス業では電力間接排出が大きいが I/O 表は 38%大きく、この理由は機械同様、電気事業排出が 13%大きいことも背景にある。家計の差は自家用車分の差が大きく寄与している。差が大きい部門に関してはエネルギー種類別に比較分析して、原因検討を行っているが、作業途中であり、今回の発表時点では、どのような補正を行うべきか、方針は確定していない。

5. 生産額あたりの CO_2 排出量

表 1 に生産額当 CO_2 排出量上位 10 部門を示す。セメント、発電、銑鉄、塩、等が上位となった。卸小売、飲食、公務等サービス業系部門は電力間接を含む排出量は多いが生産額当では低位に位置した。

６．まとめ

2011 年産業連関表を用いた CO_2 排出原単位データベースの構築状況について報告した。本検討では、エネルギー・バランス表などを用いて、データを補完することで、精度の向上を図っている。
本報告では、部門別の値の比較などを行って、今後一層の精度向上のための改善点を検討した。

参考文献 1) 小林、外岡、前田：2011 年版産業連関表を用いた建築実務者向け原単位データベースの構築 開発の方針とデータベース構築状況、第 11 回日本 LCA 学会研究発表会、pp.258-259、2016.3　2) 外岡、小林、前田：2011 年版産業連関表を用いた建築実務者向け原単位データベースの構築　CO2 排出量およびエネルギー消費原単位の開発状況、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2017.2

表１　生産額 100 万円 CO_2 排出量　上位 10 部門　比較　kg-CO_2/100 万円

順位	部門	直接排出電力等除	部門	直接＋間接排出電力等含	部門	誘発排出
1	セメント	103,195	セメント	111,206	セメント	119,770
2	自家発電	40,143	事業用火力発電	40,815	事業用火力発電	62,696
3	事業用火力発電	36,681	自家発電	40,143	事業用原子力発電	62,696
4	銑鉄	35,822	銑鉄	36,226	水力・その他の事業用発電	62,696
5	塩	21,474	塩	22,352	自家発電	40,236
6	フェロアロイ	16,443	フェロアロイ	21,611	銑鉄	36,673
7	自家輸送（貨物自動車）	8,240	圧縮ガス・液化ガス	11,846	圧縮ガス・液化ガス	36,485
8	石油化学基礎製品	7,995	熱供給業	10,803	フェロアロイ	30,673
9	熱供給業	7,092	水力・その他の事業用発電	8,512	生コンクリート	29,450
10	石炭製品	6,551	ソーダ工業製品	8,431	粗鋼（転炉）	26,648

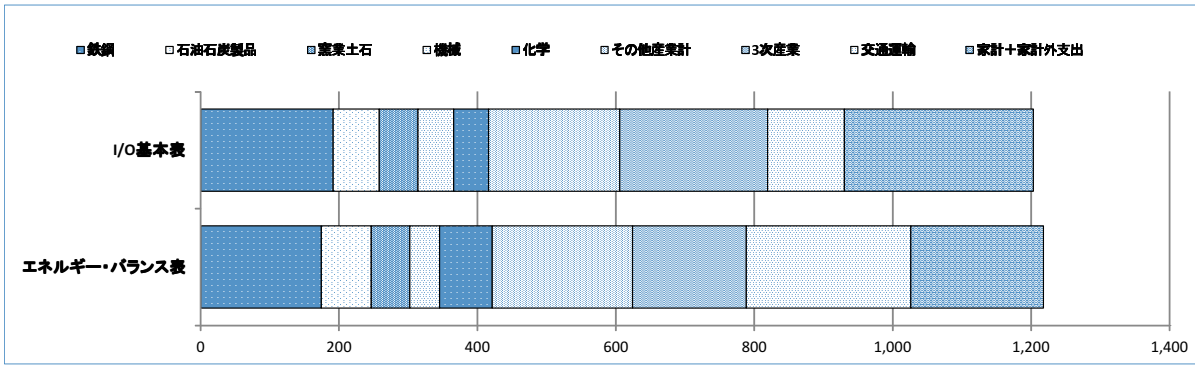


図１　電力等含直接 CO_2 排出量　推計結果　概要　2011 年　産業連関表　基本表より推計

Supporting Information

◆SI-1

推計の手順、全体概要を図 SI-1 に示す。

◆SI-2

IO の物量表におけるエネルギー（燃料・電力）消費量を確認するために、エネルギー・バランス表の値と比較した。その比較結果を表 SI-1 に示す。

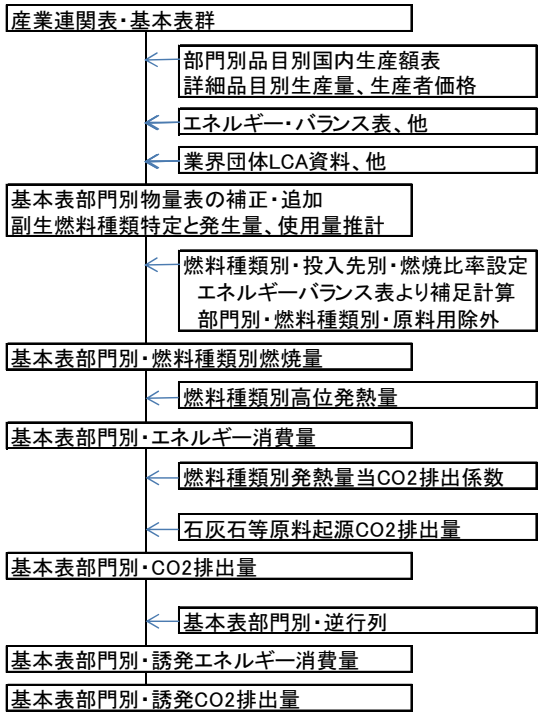


図 SI-1　計算手順概要

表 SI-1　エネルギー消費量　比較

CODE	燃料種類	単位	国内供給計Σ 物量	エネルギーバランス表	単位	I/O /エネバラ	注
621011	石炭(コークス等原料用含)	t	177,260,117	181,369,378	t	98%	
621012	原油	kl	209,771,703	208,766,534	kl	100%	
621013	天然ガス	Nm3	113,282,341	121,829,420	Nm3	93%	*d
		t換算	83,996,635	90,334,127	t	93%	*d
		熱量換算	4,590,981	4,937,368	TJ	93%	*d
2111011	ガソリン	kl	55,125,796	57,215,444	kl	96%	
2111012	ジェット燃料油	kl	7,954,788	4,198,824	kl	189%	バンカー油含*e
2111013	灯油	kl	17,849,969	19,695,566	kl	91%	
2111014	軽油	kl	32,156,508	32,847,172	kl	98%	
2111015	A重油	kl	17,580,444	15,030,760	kl	117%	バンカー油含*f
2111016	B重油・C重油	kl	30,339,461	26,201,678	kl	116%	バンカー油含*f
2111017	ナフサ	kl	45,035,070	32,879,090	kl	137%	*g
2111018	液化石油ガス	t	16,166,294	16,002,314	t	101%	
2111019	その他の石油製品*a	kl	22,617,060	28,073,366	kl	81%	*h
2121011	コークス*b	t	39,459,591	39,259,868	t	101%	
2121019	その他の石炭製品*c	t	15,831,080	34,336,168	t	46%	高炉ガス,転炉ガス含*i
2121019	その他の石炭製品(純量)*c	t	15,831,080	16,608,400	t	95%	コークス除石炭製品純計*i
4611001	事業用電力	kWh	882,351,354	966,161,583	kWh	91%	*j
4611041	自家発電	kWh	223,048,000	100,249,193	kWh	222%	*k
	発電　計	kWh	1,105,399,354	1,066,410,775	kWh	104%	*l
4621011	都市ガス	1000m3	36,432,849	39,388,943	1000m3	92%	*m
4622011	熱供給業	GJ	21,770,841	23,010,952	GJ	95%	
	国内供給・エネルギー利用	GJ		19,610,155,095	GJ		

*a: 国内生産表による製品内訳を精製・混合用原料油・換算。内訳は熱量換算で42%が精製混合用原料油、33%が潤滑油.
*b: 国内生産表にもコークス生産量の記載はない.エネルギー・バランス表生産量と国内生産額より換算.
*c: 国内生産表による製品内訳を石炭・換算、熱量換算の80%はコークス炉ガス.
*d: 天然ガス、40.47MJ/m3、54.58MJ/kgで高発熱量換算.
*e: I/O表のジェット燃料は内生部門に国内航空会社の国際線消費（バンカー油の国内給油＝輸出、国外給油＝輸入）を含む.
*f: I/O表のA重油、C重油は外洋輸送、海面漁業の消費が大きいが、そこにバンカー油が含まれているため大きい.
*g: 物量が多いのはI/O表が暦年でエネバラ表が年度で震災影響で石油化学基礎品生産量が激減しているためか
*h: 内訳は熱量換算で42%が精製混合用原料油、33%が潤滑油、11%がアスファルト、6%が石油（オフ）ガス
*i: エネバラ表のエネルギー単位表から熱量（石炭製品計－コークス）をその他石炭製品とし、石炭t換算　　2016.12.10改訂
*j: エネバラ表から、この表では発電所内損失、揚水発電損失を含む供給量ゆえ大きい
*k: I/O表の自家発電はエネバラ表の二倍以上と大きいが、自家発電単価が事業用発電の57%が過小と考えられる.
*l: 発電計では事業用と自家発電の差が相殺されるが、産業連関表で事業用の一部が自家発に計上されているとする根拠もないので、自家発電の222%という不一致を解消することにはならない.
*m: エネバラ表から、この表ではガス業の自家消費、送管損失を含む供給量.熱供給用も含まれる.

◆SI-2：「4. 業種別の CO_2 排出量推計結果」

表 SI-1 には、CO_2 排出量の部門別の結果と、エネルギー・バランス表に記載されている該当部門の CO_2 排出量の結果を比較したものを示す。

これらに関するコメントは、本文の「5. CO_2 排出量推計結果」に記述している。

表 SI-2　産業部門別 CO_2 排出量　比較　1000t-CO_2/年

部門	I/O表 CO2排出量	エネバラ表 CO2排出量	I/O/エネバラ 比%
農林水産	11,348	3,810	298%
鉱業	1,360	1,964	69%
食品飲料たばこ	17,109	21,296	80%
繊維衣服	3,202	12,040	27%
木材家具	1,686	2,229	76%
紙パルプ	17,674	24,310	73%
印刷	2,216	2,758	80%
化学	50,634	76,174	66%
石油製品	55,023	45,091	122%
石炭製品	11,684	26,962	43%
石油石炭製品計	66,707	72,053	93%
プラスチック,ゴム,皮革	10,694	11,005	97%
ガラス	4,151	3,568	116%
セメント同製品	42,367	43,038	98%
その他窯業土石	9,372	9,224	102%
窯業土石計	55,889	55,830	100%
高炉製鉄	145,780	119,322	122%
電炉	7,973	8,453	94%
鉄鋼圧延	37,670	46,639	81%
鉄鋼計	191,423	174,415	110%
非鉄	10,538	7,218	146%
金属製品	7,720	7,157	108%
機械	51,300	42,908	120%
その他製造業	2,493	－	－
製造業計	489,284	509,394	96%
建築	6,151	－	－
土木	6,826	－	－
建設計	12,977	10,170	128%
鉱工建設計	503,621	521,528	97%
電気事業	485,018	427,860	113%
自家発電	87,185	68,726	127%
電気計	572,203	496,586	115%
都市ガス,熱供給	4,929	3,298	149%
上下水道	8,785	9,563	92%
廃棄物処理	5,745	14,817	39%
ガス熱水廃棄物計	19,459	27,678	70%
農林鉱工業建設エネ等	534,427	553,015	97%
鉄道	6,835	8,660	79%
旅客自動車	37,948	116,181	33%
貨物自動車	27,141	79,999	34%
船舶	19,263	10,151	190%
航空輸送	14,336	9,001	159%
その他輸送	5,415	13,537	40%
交通運輸計	110,937	237,529	47%
卸小売	52,456	47,546	110%
金融保険不動産	12,294	13,963	88%
通信放送	11,134	11,727	95%
宿泊・飲食	30,769	33,272	92%
教育・研究	20,888	7,412	282%
医療・保健	13,213	14,319	92%
福祉・介護	9,271	9,546	97%
洗濯理容美容浴場	6,598	9,670	68%
娯楽その他	16,770	13,650	123%
その他サービス	16,801	－	－
公務	23,326	3,223	724%
サービス業+公務計	161,064	116,783	138%
3次産業−交通運輸計	213,519	164,330	248%
分類不明	24,343	－	－
家計＋家計外支出	273,143	191,795	142%
個別部門未計上分	－	76,322	－
電力等二重集計総計	1.728.574	1.643.256	105%

住宅の高性能化による建設廃棄物への影響に関する研究

Study on the effect of growth of high performance residential building on construction waste

○磯部孝行*[1)]、小林謙介 [2)]
Takayuki Isobe, Kensuke Kobayashi
1) 武蔵野大学, 2) 県立広島大学
* t_isobe@musashino-u.ac.jp

1. はじめに

近年、建設分野では低炭素社会実現に向け、太陽光発電パネルを設置した Zero Energy House などの普及など住宅の低炭素化に向けた施策が運用されている。

これら住宅は、太陽光発電パネルや省エネルギー化に資する高性能建材などを用いており、橋本ら [1)]により明らかにされている旧来の木造住宅の原単位とは異なることが想定される。また、国土交通省が集計している建設副産物実態調査 [2)]の現段階で排出されている建設廃棄物は、旧来の住宅が中心に排出されていると考えられ、住宅の高性能化が建設廃棄物へ与える影響は明らかにされていない。

そこで、本研究では住宅の高性能化に伴い普及した太陽光発電パネル及び複層ガラスに着目して、建設廃棄物排出量への影響を明らかにすることを目的とする。

2. 研究の方法

2.1 対象資材

本研究では低炭素住宅実現に向け普及した太陽光発電パネル、複層ガラスの建設廃棄物への影響を捉えた。

2.2 排出量の推計方法

（住宅用太陽光発電パネル）

住宅用太陽光発電パネルの資源投入量の暦年データを太陽光発電協会の統計データ [3)]に基づき整理した。入手データは重量データではないため、既往文献 [4)]を参考とし、式(1)により資源投入量を推計した。2016 年以降の資源投入量は直近のデータと同等とした。

$$Ppvi = \sum_k (Epvi,k \times Mk) \quad (1)$$

ここで Ppvi は、i 年における太陽光発電パネルの資源投入量、Epvi,k は i 年における太陽光発電パネル k の導入量、Mk は太陽光発電パネル k の kwh あたりの資源投入量

次に排出量推計は、耐用年数を 20 年と設定し既往研究 [5)]を参考に式(2)により推計した。

$$Wpv(t) = \sum_i (Ppvi \times fi(t)) \quad (2)$$

ここで Wpv(t)は t 年における太陽光発電パネルの排出量、Ppvi は i 年における太陽光発電パネルの導入量、fi(t)は t 年における i 年に導入された太陽光発電パネルの故障率、また、故障率に用いているロジステック曲線の形状が推計結果に影響を与えるため、家電製品の平均的な排出と使用しはじめてから 15 年から 25 年の 10 年間で大部分が排出されることを想定した 2 つのロジステック曲線により排出量を推計し影響を捉えた。

（複層ガラス）

複層ガラスの 1980 年から 2015 年までの暦年データを窯業建材統計 [6)]より得た。これら複層ガラスは、一部ホテル等に利用されているが、一般的に住宅に利用されるため、このデータを用いた。また、ガラスの複層化を単板ガラスの高性能化と考え、増加した 1 枚のガラスを資源投入量増加分とした。重量データは日本建築学会が提供している LCA ツール [7)]を参考に 15.2kg/㎡とし資源投入量増加分を推計した。2016 年以降の資源投入量は直近のデータと同等とした。

排出量は、はじめに、複層ガラスの耐用年数及び残存曲線を推計した。耐用年数及び残存曲線は、川本らによる既往研究 [8)]を参考に、平成 5 年から平成 25 年の住宅土地統計調査 [9)]を用い、カプラン・マイヤー法により住宅の耐用年数と残存曲線を推計し、これを複層ガラスのものとした。次に、資源投入量及び上記、残存曲線を用いた式(3)により排出量を推計した。

$$Wmg(t) = \sum_i (Pmgi \times [Si(t) - Si(t-1)]) \quad (3)$$

ここで Wmg(t)は t 年における複層化による廃板ガラスの増加分、Pmgi は i 年の複層ガラスによるガラス増加分、Si(t)は t 年における i 年に投入された複層ガラスの残存率

3. 各資材の資源投入量

3.1 住宅用太陽光発電パネルの資源投入量

暦年の資源投入量を図 1 に示す。2000 年以前の資源投入量は少ないが、2000 年以降 2 万 ton 前後投入され、2009 年以降急激に増加し、2013 年がピークで約 20 万 ton の資源が投入されている。

3.2 複層化によるガラスの資源投入量増分

複層化によるガラスの資源投入量増分の結果を図 2 に示す。資源投入量増加分は 1980 年から 1995 年まで緩やかに増加し、2000 年頃には 10 万 ton を超え、2005 年に 20 万 ton を超える。2013 年がピークで 26 万 ton の資源投入量増加分があった。

4. 各資材の排出量

4.1 住宅用太陽光発電パネルの排出量

太陽光発電パネルの排出量を図 3 に示す。住宅用太陽光発電パネルは 2017 年現在、約 1 万 ton とであり排出は本格化していない。今後、増加傾向にあり 2050 年まで単調に増加し、その排出量は全体で約 12 万 ton となる。材料をみるとガラスが最も大きく約 8 万 ton となり、EVA・プラスチックが約 2 万 ton、アルミが約 2 万 ton となる。太陽光発電パネルの排出形状から捉えると、使用しはじめてから 15 年から 25 年の 10 年間で大部分が排出される場合、2020 年頃までは排出は本格化しないが 2030 年頃に最大で約 14 万 ton の排出量となることが分かった。

4.2 複層化による廃ガラスの増加分

複層化によるガラスの増加分を図 4 に示す。2017 年現在、約 4 万 ton となり排出され始めている。今後も単調に増加すると考えられ、現状の投入量が維持された場合、2050 年には約 16 万 ton となる。

5. まとめ

本研究では、高性能化に係る資材として住宅用太陽光発電パネル及び複層ガラスの排出量を推計し、排出傾向及び排出量を定量化した。現在、建設副産物実態調査 [2]によるとその他建設資材の発生量は 151 万 ton であるため、これらが廃棄物の性状に一定程度の影響を与える可能性があることが示された。特に、廃ガラスは、現状の投入量が維持された場合、将来的に、約 20 万 ton 増加すると想定され、一層の板ガラスの再資源化システム構築が望まれると考えられる。今後は、断熱材など他の建材の検証もしていく予定である。

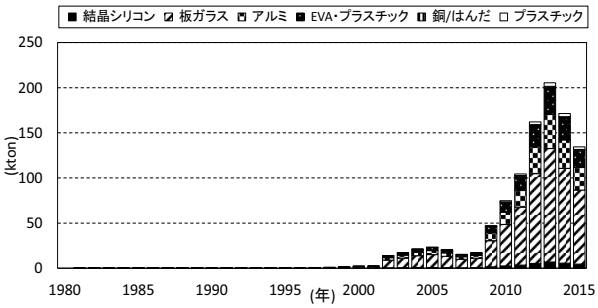


図 1 太陽光発電パネルの資源投入量

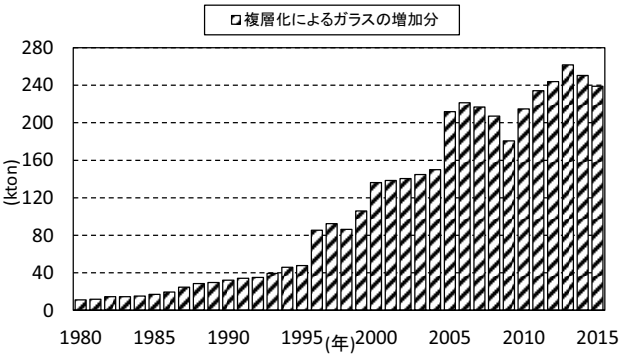


図 2 複層ガラスの資源投入量増加分

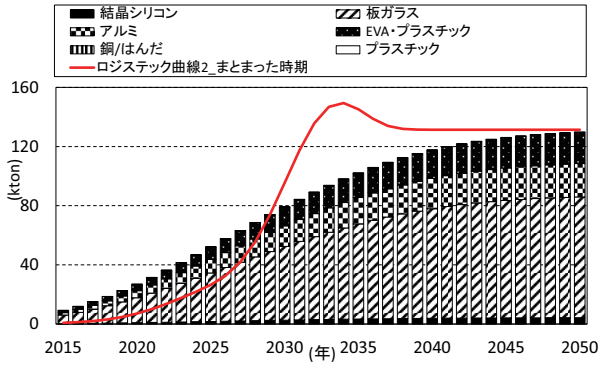


図 3 廃太陽光発電パネルの排出量

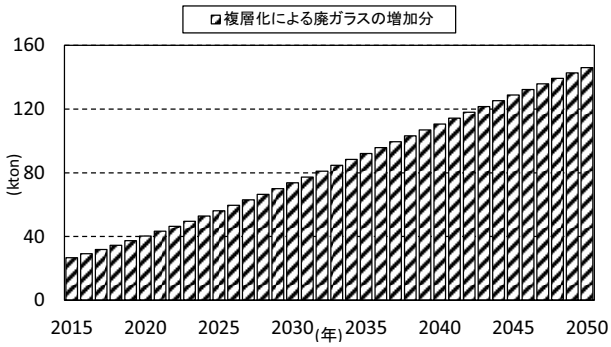


図 4 複層化による廃板ガラスの増加量

引用文献

1) 橋本征二, 寺島泰:廃棄物学会論文誌, 10 (1), (1999), pp.35-44　2) 国土交通省,建設副産物実態調査,(オンライン) 入手先< http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/fukusanbutsu/jittaichousa/>,(参照 2017.1.3)　3) 太陽光発電協会,(オンライン)入手先<http://www.jpea.gr.jp/document/figure/index.html>,(参照 2017.1.3)　4) みずほ情報総研:太陽光発電システムのライフサイクル評価に関する調査研究,p.16,2009.3　5) 佐藤太平,松本亨,藤山淳史:太陽電池パネル廃棄量の将来推計と再資源化のための輸送計画,2 土木学会論文集 G(環境),69(6),pp. II -293-299,2013　6) 経済産業省:経済産業省生産動態統計調査 長期時系列データ(年報掲載情報),(オンライン)入手先<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/archives/>(参照 2017.1.3)　7) 日本建築学会:戸建住宅用 LCA ツール,(オンライン)入手先<http://news-sv.aij.or.jp/tkankyo/s0/site/arc08.html>, (参照 2017.1.3)　8) 川本聖一,安藤正雄:住宅・土地統計調査から算出した日本の住宅寿命に関する考察,日本建築学会計画系論文集,74(635),pp.209-216,2009.1　9) 総務省統計局,平成 5・10・15・20・25 年住宅土地統計調査,(オンライン)入手先<http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2013/tyousake.htm#1>, (参照 2017.1.3)

Supporting Information

〈太陽光発電パネルの排出量推計の補足〉

太陽光発電パネルの推計において $fi(t)$ の詳細な説明を省略しているため、以下、補足する。

$$fi(t) = Ri(t) - Ri(t-1) \qquad \text{(pv-1)}$$

$$Ri(t) = 1 - e^{-\alpha t^{\beta}} \qquad \text{(pv-2)}$$

ここで Ri(t)は i 年に投入された製品の t 年における累積故障確率

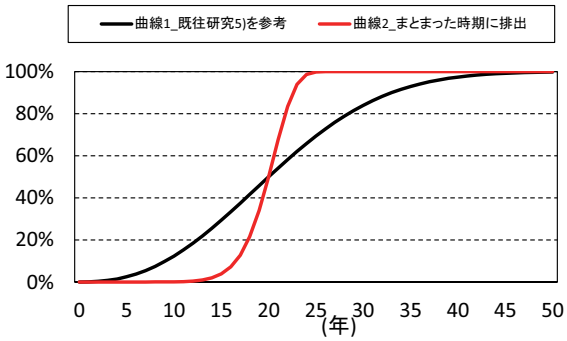


図 SI-1 太陽光発電パネルの排出量推計に用いた故障率のロジステック曲線: $fi(t)$
(曲線 1（家電製品の平均的な排出を想定）: $\alpha = 5.23 \times 10^{-4}$, $\beta = 2.4$
曲線 2（使用しはじめ 15 年から 25 年の 10 年間に大部分が排出されることを想定）: $\alpha = 6.77 \times 10^{-14}$, $\beta = 10$)

〈複層ガラスの排出量推計の補足〉

複層ガラスの推計において $Si(t)$ の詳細な説明を省略しているため、以下、補足する。

$$Si(t) = \mathrm{S}i(t-1) \times \left(1 - \frac{r}{n}\right) \qquad \text{(mg-1)}$$

ここで、n はある測定期間の残存数、r はある測定期間の滅失数

表 SI-1 住宅土地統計調査より引用した各種パラメータ

年次	t = 住宅の残存期間（年）	n = 測定期間の残存数(戸)	r = 測定期間の減失数(戸)	n−r = ある期間終了時の残存数(戸)	(n−r)/n = ある期間終了時の残存率 α^t	残存率 $\alpha \fallingdotseq (1 - \frac{r}{n})$
1956	20	2,373,100	1,448,100	925,000	39%	95%
1966	20	6,489,000	3,194,800	3,294,200	51%	97%
1976	20	12,530,500	4,198,900	8,331,600	66%	98%
1986	15	11,973,000	2,310,300	9,662,700	81%	99%
1993	10	6,092,100	700,400	5,391,700	89%	99%
1997	5	6,296,800	635,000	5,661,800	90%	98%

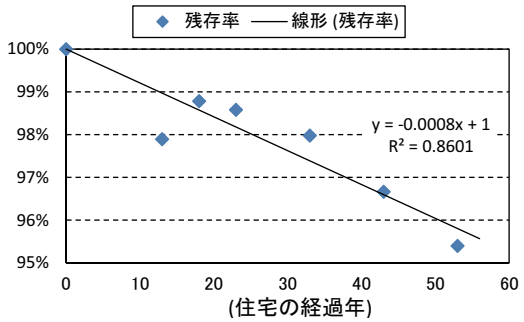


図 SI-2 住宅の経過年と 1 年あたりの残存率

図 SI-2 より $(1-\frac{r}{n})$ に相当する近似線(y=-0.0008x+1)が得られ、$(1-\frac{r}{n})$ =(1-0.0008t)とすることができる。これを上記式(mg-1)に代入すると 図 SI-3 に示す $Si(t)$ の残存曲線を描くことができる。これを複層ガラスの残存曲線として、排出量推計に用いた。

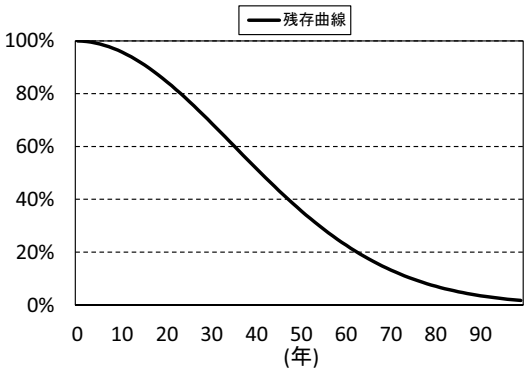


図 SI-3 複層ガラスの残存曲線： $Si(t)$

高断熱住宅の普及に影響する地域特性を考慮した自治体の評価手法の提案

Proposal for Evaluation Method of Dissemination of Well-Insulated Housing Considering Regional Characteristics

○石戸拓朗*[1)]、伊香賀俊治[1)]、川久保俊[2)]、鈴木健太郎[1)]、山崎潤也[1)]、大束開智[1)]
Takuro Ishito, Toshiharu Ikaga, Shun Kawakubo, Kentaro Suzuki, Junya Yamasaki, Kaichi Otsuka
1）慶應義塾大学, 2）法政大学
* ishito@z3.keio.jp

1. はじめに

二酸化炭素などの温室効果ガス排出量の増大に伴い、世界各国で地球温暖化の対策に迫られている。我が国では、家庭部門の二酸化炭素排出量が増加傾向にあり[文 1)]、住宅分野では冷暖房の省エネに寄与する高断熱住宅の普及が求められている[文 2)]。平成 18 年に定められた住生活基本計画では高断熱住宅普及率[注 1)]の目標を掲げ、政府や地方自治体が普及に向けて施策を講じている。しかし、公開統計情報[文 3)]より収集した高断熱住宅普及率の全国分布は図 1 のように、気候に沿った地域格差が存在している。そのため、普及率の指標では気候などの地域特性が類似している自治体の中で、高断熱住宅の普及が比較的進んでいる自治体を評価することは難しい。本研究では普及率による評価ではなく、気候などの地域特性を考慮した評価方法を提案することで、自治体が元来抱える地域特性からは独立した施策による普及効果を示すことを目的とする。有効な施策が講じられている自治体を示すことで、全国の高断熱住宅普及率の向上に資することを目指す。

2. 研究方法・結果

2.1 地域特性を考慮した評価方法

本研究では、公開統計情報より市区町村ごとの高断熱住宅普及率と地域特性についての指標値を収集する。地域特性は、住環境全般に影響する気候・人口・行政・面積に関する 15 指標を選定した（表 SI.1）。これらの地域特性を説明変数、高断熱住宅普及率を目的変数とした重回帰分析を実施し、普及率の予測式を求める。そして、予測式から各自治体の地域特性を考慮した際に考えられる普及率の予測値を求める。

指標値（実際の普及率）と予測値の残差に着目すると、自治体が元来抱える地域特性からは独立した施策による普及への効果が現れてくる。本研究では、各自治体が同様の地域特性を抱える自治体よりも普及が先んじている度合いが残差であると考え、高断熱住宅普及の「先進性」と呼称する。

2.2 高断熱住宅普及率の重回帰分析結果

重回帰分析に基づき、高断熱住宅普及率の予測式を求める。説明変数には地域特性に関する 15 指標を投入したが、目的変数と有意な標準化偏回帰係数が確認された指標は暖房デグリーデーのみであった（表 1）。よって、表 1 の分析結果から求められる高断熱住宅普及率の予測式は 式 1 になる。

$Y_{予測値}=0.0249X_1-23.8$ …（1）

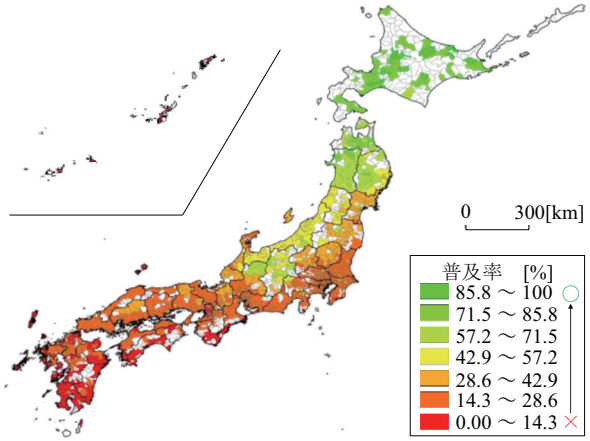


図 1　高断熱住宅普及率の全国分布

表 1 重回帰分析[注 2)]の結果（n=498,　*:p<0.01, 定数項:-23.8）

Y　目的変数：高断熱住宅普及率 [%]（R^2=0.861）		
X_n 説明変数	偏回帰係数	標準化偏回帰係数
X_1 暖房デグリーデー [℃・日]	0.0249	0.928*

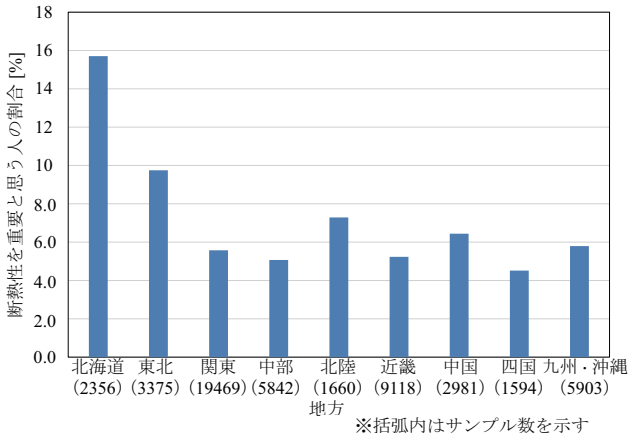


図 2　断熱性を重要と思う人の割合（地方別）[注 3)]

政府が定める住宅の省エネルギー基準が自治体の暖房デグリーデーによって異なり、寒冷地域ほど厳しい基準が設けられていることが普及率に影響を及ぼしている。また、公開統計情報[文4)]より収集した住民の断熱性に対する意識に関する結果を図 2 に示す。省エネルギー基準はこれまで遵守する義務がなく、断熱性を重要と思う人の割合が温暖地域では少ない傾向（図 2）も普及率に影響を及ぼしている可能性がある。

2.3 重回帰分析の残差に基づく自治体の先進性評価

本節では、指標値（実際の普及率）と予測値の残差に基づき先進性を求めることで自治体の施策による普及への効果を示す。図 3 のように指標値が予測値を上回る自治体は普及が先進的であり、一方で指標値が予測値を下回る自治体は後進的と評価される。先進性の全国分布を図 4 に示し、その中の上位 5 自治体を表 2 に示す。図 4 の傾向として、北海道・東北地方の日本海側・北陸地方が先進的な自治体と評価されている。一方で、東北地方の太平洋側や本州の内陸・山間部などの寒冷地域は前述した先進的な自治体と似た気候条件でありながら、後進的な自治体と評価されている。

北海道・東北地方の日本海側・北陸地方において先進性が高い要因として、北方型住宅の普及が考えられる。北海道内で開発された北方型住宅は、冬の寒さが厳しい気候に適応した住宅形態である。「長寿命」「安心・健康」「環境との共生」「地域らしさ」を特徴に掲げ、高い断熱性などによって実現している[文5)]。1988 年から北方型住宅の開発・普及は始まり、現在は北海道だけでなく普及の流れが他県に及んでいる。例えば、NPO 法人などを介して、本州の工務店に北方型住宅の施工法が伝わっている[文6)]。また、日本海側の地域は積雪量が多いため住民が住宅内環境を重視することも影響していると推察される。

3. まとめ

本研究では、高断熱住宅の普及と自治体の地域特性間の関係を明らかにした。また、地域特性から予測される普及率と比べて、実際には普及が上回っている度合いを先進性と定義し、各自治体の評価を実施した。先進性による基準を設け、先進・後進の群分けを行った。特に先進的であると判定された自治体について各自治体の施策や企業の取り組みの関係を考察した。今後の展望として、公開統計情報を用いた行政の施策や企業の取り組みの調査に留まらず、行政や企業からのヒアリングなどを通じた調査が考えられる。

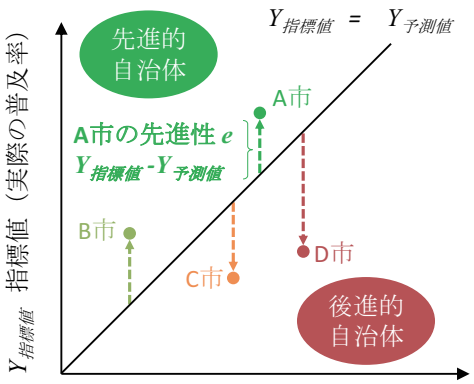
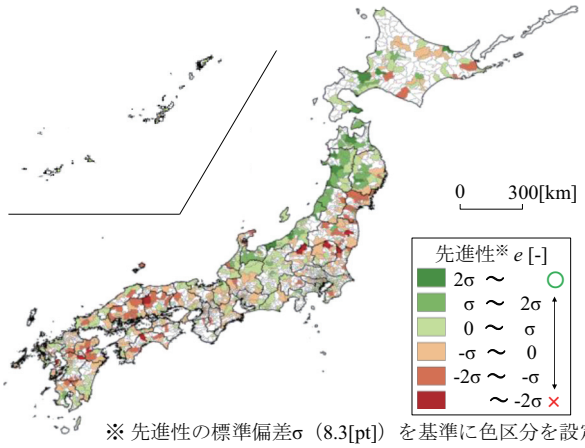


図 3　先進性導出の模式図



※ 先進性の標準偏差σ（8.3[pt]）を基準に色区分を設定

図 4　高断熱住宅普及の先進性全国分布[注4)]

表 2　先進性の上位 5 自治体　（n=496）

自治体	先進性　[pt]
秋田県　にかほ市	34.6
秋田県　秋田市	23.9
秋田県　能代市	23.1
北海道　函館市	23.1
新潟県　胎内市	21.3

注釈

1) 全住宅のなかで複層ガラスまたは二重ガラスがある住宅の割合を、高断熱住宅普及率と定義する。

2) 変数選択法は、有意水準 p>0.1 を削除するステップワイズ法を採用した。

3) 住宅の各要素の中で住宅の断熱性や気密性が「最も重要」もしくは「次は重要」と答えた人を、断熱性を重要と思う人の割合と定義する。

4) 説明変数の指標が収集不可能な地域では先進性の導出を行わなかったため、白色によって区分した。

参考文献

1）全国地球温暖化防止活動推進センター： 家庭部門における二酸化炭素（CO2）排出の動向,（2016）

2）日本サステナブル建築協会： よくわかる住宅の省エネルギー基準（幸せなエコライフ）,（2015）

3）総務省統計局： 住宅・土地統計調査,（2013）

4）国土交通省住宅局： 住生活総合調査,（2013）

5）北海道建設部建築指導課： 北方型住宅,（2016）

6) 新木造住宅技術研究協議会: 1.新住協とは？,(2016)

表 SI.1　重回帰分析に投入した説明変数

部門	項目	年次	収集方法
気候	暖房デグリーデー [℃・日]	2013 年	気象庁アメダスデータ
	冷房デグリーデー [℃・日]		
	年間平均気温 [℃]		
行政	財政力指数 [－]		総務省自治財政局公開データ
	歳入決算総額 [百万円]		
人口・世帯	人口総数 [人]	2010 年	総務省統計局公開データ
	一般世帯数 [世帯]		
	人口集中地区人口 [人]		
	人口密度 [人/km^2]		
	高齢化率 [%]		
	2005 年比人口増減率 [%]		
	1 世帯あたり人員 [人/世帯]		
	昼夜間人口構成比 [%]		
面積	総面積 [km^2]	2013 年	国土交通省公開データ
	可住地面積 [km^2]		

表 SI.2　温暖地域（暖房デグリーデー：2000[℃・日]以下）の先進的自治体

自治体	先進性　[pt]	自治体	先進性　[pt]
千葉県　木更津市	9.1	福井県　敦賀市	9.6
東京都　千代田区	10.7	静岡県　御前崎市	10.9
東京都　港区	8.4	長崎県　大村市	8.6
神奈川県　藤沢市	8.6		

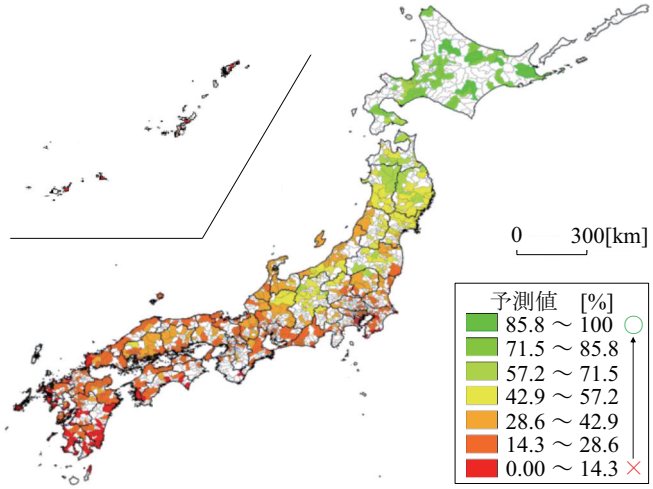


図 SI.3　重回帰分析に基づく高断熱住宅普及率の予測値の全国分布

資源消費・大気汚染を考慮した鉄道車両の環境フットプリント

Environmental footprint of rolling stocks considering
resource consumption and atmospheric pollutions

○岩倉湧也(*1)　伊坪徳宏(*1)
1)　東京都市大学伊坪研究室
*g1231024@tcu.ac.jp

1.　はじめに

地球環境問題と鉄道

現在、世界では二酸化炭素の排出が主な原因とされている地球温暖化の問題をはじめ、資源消費問題、PM2.5 等に代表される大気汚染問題が発生している。また、最近は東日本大震災以降の火力発電の増加で、発電時における負荷が増大している。日本の電力消費における全体の 2 パーセントが鉄道である。政府は 2030 年までに、鉄道の電力使用量を 2010 年比で 2 割使用電力を削減することを目標に掲げ、各鉄道事業者に対し協力を要請した。

鉄道の電力消費

鉄道には様々な場所に電力が使用されている。鉄道の消費エネルギーは、車両エネルギーが全体の約 8 割、その他の駅、信号等の付帯エネルギーが全体の約 2 割を占める。さらに、車両エネルギーは走行に直接使用する駆動用エネルギーと補佐的役割を果たす補機用エネルギーに大別され、前者は車両エネルギーの 8 割を占める。[1]つまり、鉄道全体の消費エネルギーのうち、6 割強は車両の走行によって消費されているのである。

研究目的

近年、鉄道全体を対象とした研究は多く行われている。その一方で、鉄道全体の環境負荷の中で、6 割強を占める車両の駆動エネルギーを考慮した鉄道車両の研究は多く行われていない。そこで本研究は、車体の材質の違いや、最新技術による車両性能の変化によって発生する環境負荷について、地球温暖化、資源消費、都市域大気汚染の領域において検証し、考察することを目的とする。

2.　評価対象及び研究方法

研究対象は、従来型ステンレス車両、従来型アルミ車両、新型ステンレス車両とする。

従来車両の材料やメンテナンス時投入データは、車両技術 213 号（日本鉄道車両工業会）内に記載されているデータを使用した。新型車両に関しては、実測調査に基づいたデータをもとに算定している。

本研究の評価範囲を下記に示す。

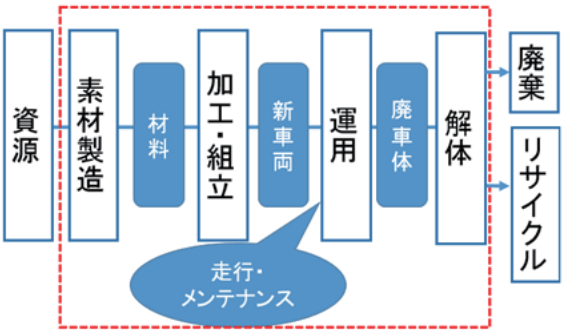


図 1 システム境界

機能単位は以下の通りである。

・生涯走行距離　120,000 キロ
・機能単位　中間電動車 1 両
・耐用年数　13 年

下記に算定式を示す。

$$GHG排出量 = \sum(活動量 \times 原単位)$$

$$資源消費 = \sum(活動量 \times 原単位)$$

$$都市域大気汚染 = \sum(活動量 \times 原単位)$$

本研究の算定は、すべて産業環境管理協会の LCA 算定ソフトウェア「MiLCA」を用いて行った。

また、鉄道車両メーカーは国内で数が限られているのに対し鉄道事業者は全国に存在するため、輸送による負荷を考慮すると純粋な車両自体の負荷の把握が困難になる恐れがある。そのため、本研究では輸送段階における負荷は考慮せず、算定の対象外とした。なお、今回の算定で新型車両は、従来型ステンレス車両を製造する際制御機器を最新の車両に搭載されている機器に置き換えて製造されたものと仮定して算定を行った。

3. 結果

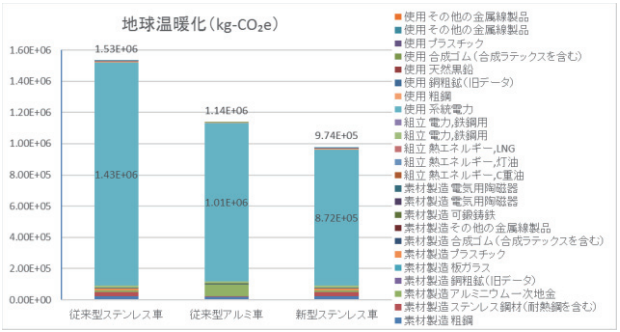


図２　地球温暖化結果

すべての車両において、使用段階の電力による影響が大きな割合を占めた。従来型アルミ車は軽量のため消費電力が少なくなっているが、新型ステンレス車は駆動用装置の改善により、さらなる消費電力の削減を行った結果、全体の負荷でももっとも小さな値を示す結果となった。

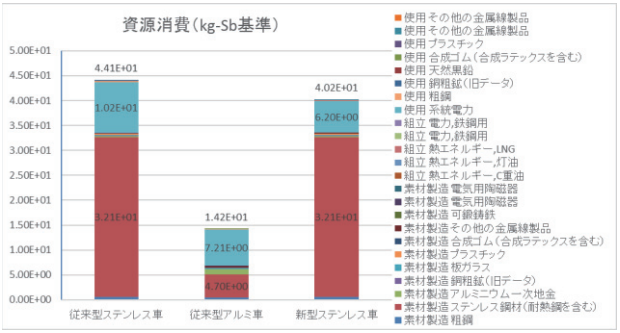


図３　資源消費

ステンレス車が従来型、新型を問わず大きな値を示している。これは、使用電力以上に車体の主原料であるステンレス鋼材の製造時、ニッケル、クロム等の金属を多く使用していることが原因である。一方でアルミ車は、車体の主原料に資源消費負荷の低いアルミを使用しており、結果的に数値を大きく押し下げている。

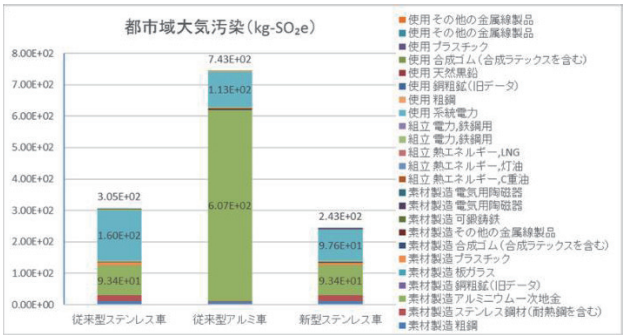


図４　都市域大気汚染

ステンレス車が使用段階と素材製造で同じような値を示しているのに対し、アルミ車は素材製造時のアルミの負荷が非常に大きな値を示している。

これは、車体製造におけるアルミの投入量の差に起因している。アルミはボーキサイトから製造する際に、多くの電力を必要とするほか、精錬時に工場から排出される煤塵の問題もあり、アルミの負荷が大きくなるのである。

4. まとめ

本研究では、鉄道車両の違いを考慮した上で、3 つのモデルにおいて 3 つの影響領域にて算定を行った。

影響領域において、使用段階の電力消費は必ず上位に入っており、この部分を改善した新型ステンレス車両は、結果的に従来型ステンレス車と比較して全体の負荷を大きく減らす結果となった。しかし、車体の主原料が異なると、資源消費、都市域大気汚染においては大きな負荷の差が出ることが分かった。以上のことから、新技術の駆動装置の搭載は地球温暖化には非常に効果的であるが、資源消費、都市域大気汚染については車体に起因している部分が多いため、今後車体の素材の変更等により、負荷をより削減することができると考察する。

5. 参考文献

1）鉄道車両の省エネルギー化（鉄道総研）

Effective speed 指標を用いた交通機関の環境性能評価手法の提案

Evaluating environmental performance of various transport mode utilizing an effective speed index

○河合一輝*[1)]，加藤博和 [1)]
Kazuki Kawai, Hirokazu Kato
1) 名古屋大学
* kkawai@urban.env.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

モータリゼーションとは，自家用自動車の普及と都市域拡大の相乗効果により，自動車が生活に必要不可欠なものになっていく過程である．その結果，渋滞や交通事故の増加といった交通に関わる諸問題が生じるとともに，二酸化炭素（CO_2）も増加する．そのため，過度の自動車依存からの脱却を意図した交通システムの転換を目指す政策がとられている．

その大きな柱として，環境負荷の小さい乗合型大量交通機関への転換が位置付けられることが多い．これは，自動車の使用抑制と渋滞緩和によって CO_2 削減が期待されるからである．しかし，乗合交通機関の利用者が少ないと，自動車の方が 1 人当たりの環境負荷量が少なくなることも考えられる．加えて，交通機関の性能は何人運べるかという輸送量だけでなく，速達性や快適性等の主観に左右される移動性能も求められることに注意が必要である．乗合交通機関は，駅やターミナルまでのアクセスに時間がかかることや，発着時刻が固定され応時性に欠けていることなど，自家用車に比べ利用者から見た移動性能に劣っている点がある．このような交通機関の様々な性能を総合的に評価する方法が，交通体系を検討するために必要である．

そこで本研究では，交通機関の持つ様々な性能を統一的に評価する方法として，移動にかかる時間と移動費用を速度の次元で評価する「effective speed 指標」を基に，交通機関の性能を合わせて評価できるよう再定義し，実際の交通機関に適用することを目的とする．

2. Effective speed 指標

2.1 Effective speed 指標の定式化

Tranter[1)]によると，effective speed 指標とは利用者が感じる交通機関の性能として，移動時間だけでなく，利用にかかる費用を獲得するのに必要な時間を加え，速度に換算して表した指標である．また，Crozet[2)]は effective speed 指標を式(1)で定義している．

$$V_g = \frac{1}{\frac{1}{V}+\frac{k}{w}} \tag{1}$$

V_g：effective speed[km/h]，V：旅行速度[km/h]，k：1km あたり費用（運賃） [円/km]，w：1 時間あたり賃金[円/h]

式(1)では，運賃を 1 時間あたりの賃金で除することで時間価値を算出している．本研究では，移動性能及び環境負荷を時間価値に変換・算入した値を式(1)に組み入れ，effective speed を式(2)として再定義する．

$$V_{es} = \frac{1}{\frac{1}{V}+\frac{k_{per}+k_{env}}{w}} \tag{2}$$

V_{es}：移動性能と環境性能を考慮した effective speed[km/h]，k_{per}：移動性能の 1km あたり費用[円/km]，k_{env}：環境性能の 1km あたりの費用[円/km],

2.2 移動性能の 1km あたり費用の算定方法

2.2.1 移動費用の算定

1km あたり移動費用を式(3)として算出する．また，移動性能値は式(4)に示すように，交通機関の各移動性能項目の水準に項目間の重みを乗ずることで算出する．

$$k_{per} = \frac{m_{per}}{l} \tag{3}$$

$$m_{per} = \sum\left(w_{per} \times s_{tra}\right) \tag{4}$$

m_{per}：移動性能値[円]，l：移動距離[km]，w_{per}：性能項目間の重み，s_{tra}：交通機関の性能項目の水準

2.2.2 移動性能の項目

移動性能の評価項目は，益田ら[3)]が定めた速達性や定時性などの 10 項目とする．各項目間の重みは，益田らが 2012 年に行った移動性能に関するアンケートを基にコンジョイント分析によって算出された値を用いる．このアンケートは移動目的，移動距離，移動人数が異なるいくつかのケースについて質問している．重みの値はどの項目の次元にも変換可能であるが，本研究では費用の単位（円）を用いる．

2.3 環境性能の 1km あたり費用の算定方法

1km あたり環境費用は， LCA の考え方に基づき，

運行時の CO_2 排出のみだけでなく，車両や交通機関の駅や軌道といったインフラ施設の製造から廃棄までのライフサイクルにわたる CO_2 排出で評価を行う．この結果を，日本版被害算定型影響評価手法（LIME2）を用いて貨幣価値に換算して統合し，式(5)によって費用を算出する．

$$k_{env} = \frac{LC_CO_2 \times I_{CO_2} \times n_{people}}{N \times l \times LT} \quad (5)$$

LC_CO_2：ライフタイムにわたる総 CO_2 排出量 [kg-CO_2・60 年]，I_{CO2}：CO_2 の統合化係数[円/ kg-CO_2]，n_{people}：移動人数[人]，N：需要量[人]，l：移動距離[km]，LT：ライフタイム[60 年]

3. 環境性能と移動性能を考慮した effective speed 指標の評価結果

3.1 ケーススタディ

評価対象区間として，もともと路線バスと自家用車があるところに， LRT または BRT が新設されることを想定する．

本研究では栃木県宇都宮市と芳賀町を運行予定である LRT 路線の区間に適用する．この路線は，JR 宇都宮駅を中心に東西方向への基幹路線を整備することにより，公共交通網改善と自家用車依存脱却を図るために計画された．そのうち現在整備が行われようとしている区間は，JR 宇都宮駅から東側の区間で，ショッピングセンターであるベルモール，芳賀工業団地を通り本田技研北門までの約 15km である．

本研究では LRT でなく BRT で運行した場合について想定した計算も行う．LRT と同じ経路を走行すると仮定し，1 日あたりの輸送量も同じとする．

3.2 Effective speed 指標の算定

Effective speed 指標による評価を行うにあたり，交通機関の費用として a) なし（旅行速度），b) 運賃のみ（式(1)），c) 移動費用並びに環境費用（式(2)）のそれぞれを想定し算出する．

1 時間当たりの賃金は，厚生労働省の賃金構造基本統計調査における，栃木県の従業員 10 人以上の企業についての平均年収を年間実労働時間で除した値（2389 円）を使用する．

通勤および買物の場合について算定した結果を図 1 に示す．通勤時では LRT がどの場合においても最大となっている．各交通機関の移動費用の差が買い物時に比べ小さいため，移動速度の差が大きく影響している．一方，買い物時は自家用車がどの場合においても最大となっている．この理由として，自家用車は旅行速度が大きいだけでなく移動費用が最も小さいことが挙げられる．

どちらの移動場面においても，移動性能を考慮した場合，自家用車の effective speed が大きくなっている．これは，自家用車は応時性や着席可能性が寄与し，移動費用が運賃よりも低額となっているために速度が逆転することによるものである．

また，通勤について賃金水準の変化に伴う effective speed 指標の変化を図 2 に示す．1 時間あたり賃金が 900 円よりも低い場合は自家用車が最大となっており，900 円よりも高い場合は LRT が最大となっている．賃金が低い場合は交通機関の利用にかかる費用の影響が強く出るため，旅行速度が小さくても effective speed が大きくなることによるものである．

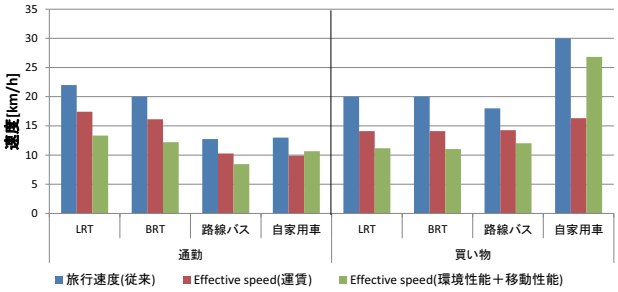


図 1　Effective speed 指標算定結果

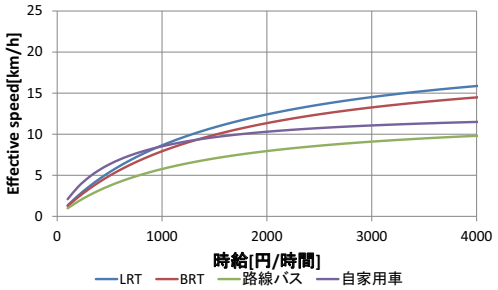


図 2　賃金水準による effective speed の変化

4. 最後に

本研究では，交通機関の性能として費用や所要時間のみならず移動性能や環境性能を考慮に入れた effective speed 指標を定義し，乗合交通機関(LRT, BRT, 路線バス)と自家用車について算出を行うことで，その有効性を確認できた．

引用文献

1) Paul J. Tranter：“Effective Speeds：Car Costs Are Slowing Us Down”，(2004)，pp.1-18
2) Yves Crozet：“Performance in France：From Appraisal Methodologies to Ex-post Evaluation”, (2013), pp.1-34
3) 益田悠貴，加藤博和，柴原尚希，伊藤圭：土木学会論文集 G（環境），68(5)，(2012) ，pp.I_67-I_76

ライフサイクル思考に基づく
海外再エネ起源水素の自動車用燃料としての位置づけの検討

Role of Imported Renewable Hydrogen as an Automotive Fuel Based upon Life Cycle Thinking

○工藤祐揮*[1)]、北川直美[1)]、村松良二[1)]、井上麻衣[1)]、小澤暁人[1)]、玄地裕[1)]
Yuki Kudoh, Naomi Kitagawa, Ryoji Muramatsu, Mai Inoue, Akito Ozawa, Yutaka Genchi
1) 産業技術総合研究所
* kudoh.yuki@aist.go.jp

1. はじめに

化石や再生可能など様々なエネルギー資源から製造することができ、様々な省エネルギー技術で使用できる水素は、エネルギー源の多様化や省エネ、低炭素社会の実現に資する近未来の二次エネルギーとして中心的な役割を担うことが期待されている。わが国では平成 26 年 4 月に策定されたエネルギー基本計画で水素社会実現に向けた記載が盛り込まれ、また平成 28 年 3 月に取りまとめられた水素・燃料電池戦略ロードマップ改訂版に、2030 年までに燃料電池車（FCV）を累計で 80 万台程度普及させる等の目標や取り組みの具体化を盛り込むなど、水素エネルギーを本格的に利活用する水素社会実現に向けた機運も高まっている。

水素の環境的優位性として、水素からエネルギーを取り出す際に水以外の排出物がないことが挙げられる。しかし、LCA の視点から見ると、一次エネルギーや再生可能エネルギーから水素を製造し、エネルギー変換や貯蔵・輸送を経て最終的に利用されるまでの水素サプライチェーン（SC）全体ではエネルギーやその他の資源の投入があるため、水素 SC からは必ず環境排出物が排出される。そのため、水素利用による低炭素社会実現を視野に入れる場合、既存技術に対する水素利用技術の温室効果ガス（GHG）削減効果はエネルギー SC 全体で評価する必要があると私たちは考えている。

筆者らはこれまでに、GHG 削減に資する水素サプライチェーンの構築に向けた研究開発上のホットスポットを把握するために、各種文献から得られたプロセスデータと LCA データベース IDEA（Inventory Database for Environmental Analysis）を用いて、海外再エネ起源水素サプライチェーンの大陸間輸送に伴う GHG 排出量を算出してきた[1),2)]。その後の研究で、新たに得られた知見に基づくデータの更新・追加と条件設定の見直しを行うとともに、海外再エネ起源水素以外の水素 SC との比較、これまでの分析で対象外としていた水素利用技術を含めた SC 全体での評価などを行っている。本稿では水素利用技術として自動車を想定し、海外再エネ起源の自動車用燃料としての位置づけを検討するために Well to Wheel 分析を行った結果を報告する。

2. 分析の前提条件

- 一次・再生可能エネルギーの採取、転換、輸送等を経て、燃料補給スタンドに配送された自動車用燃料を自動車に充填するまで（Well to Tank）と、充填された燃料使って走行するまで（Tank to Wheel）の自動車用燃料の SC 全体（Well to Wheel）での GHG 排出量（6 ガス排出量を IPCC 第 4 次評価報告書の GWP100 年値で CO2 換算した値）を算出した。
- 想定した自動車用燃料とパワートレインは水素（海外再エネ起源、天然ガス改質）と燃料電池車（FCV、充填圧 70MPa）であり、比較対象としてガソリン乗用車（GV）およびガソリンハイブリッド車（HV）を選択した。
- 水素 SC への入力インベントリは、文献調査により収集した。ガソリンについては、IDEA 収録値とローリー国内輸送分の排出量の和を SC からの GHG 排出量とした。
- 海外再エネ起源水素は、オーストラリア（日本までの片道海上輸送距離 10,000km、風力・太陽光）およびノルウェー（片道海上輸送距離 20,000km、風力）で、水電解（固体高分子膜、アルカリ水電解）によって得るものとした。想定した再エネ発電の規模は、40MW ウィンドファーム（陸上・洋上着床式）と 10MW メガソーラーである。
- 再エネ発電施設を海外で建設する場合の環境負荷は、IDEA マトリックス[3)]に対して一定の仮定をおくことによって近似した。紙面の関係上、近似方法の詳細は文献[2)]を参照されたい。
- オーストラリアについては、ベースケース（水素製造以外の現地プロセスでは系統電力を用いる場合）と低炭素ケース（すべての現地プロセスで再エネ電力を用いて低炭素化を図った場合）の 2 ケースについて分析を行った.
- 海外再エネ起源水素は、液化水素（LH）およびメチルシクロヘキサン（MCH）によって国内水素ステーションまで輸送するものとした。
- TtW における各パワートレインの走行距離当たり

のエネルギー消費量は、文献 [4]で想定されている JC08 モードの値を使用した。

3. 分析結果

図 1 に水素の WtT GHG 排出量を、図 2 に各パワートレインの WtW GHT 排出量を示す（紙面の都合上、洋上風力起源の FCV WtW 排出量は割愛した）。WtT の結果では、水素製造、水素液化（LH）、脱水素（MCH）、ステーションでの昇圧に起因する排出量の影響が大きい。オーストラリアでの低炭素電力利用による GHG 削減効果（ベースケースに対する低炭素ケースの削減効果）は、LH ではベースケースと比べて 55%以上の削減が見込めるのに対し、MCH では高々4~5%程度しか削減されない。また WtW の結果から、FCV は想定する水素 SC を問わず、GV・HV に対して GHG 排出量の優位性があることが確認できた。

謝辞

本研究は、NEDO「水素利用等先導研究開発事業／トータルシステム導入シナリオ調査研究」の支援により実施している。

引用文献

1) 井上ほか: 第 11 回日本 LCA 学会研究発表会, 柏, （2016）, pp32-33
2) 工藤ほか : 第 35 回エネルギー・資源学会研究発表会, 大阪, （2016）, pp.205-208
3) 田原ほか : 第 8 回日本 LCA 学会研究発表会, 草津, （2013）, pp.278-279
4) トヨタ自動車株式会社 : The MIRAI LCA レポート for communication

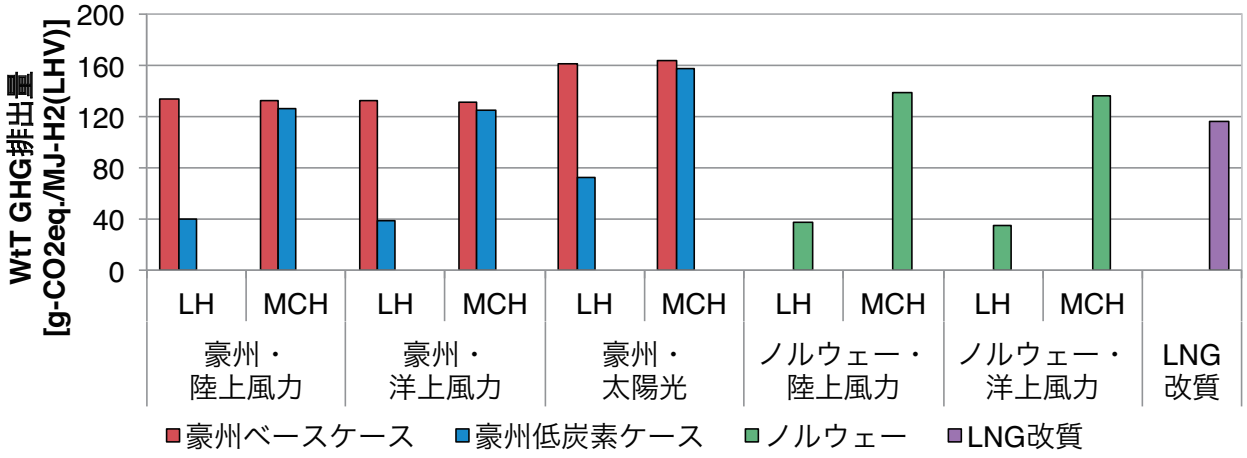


図 1　水素の Well to Tank GHG 排出量

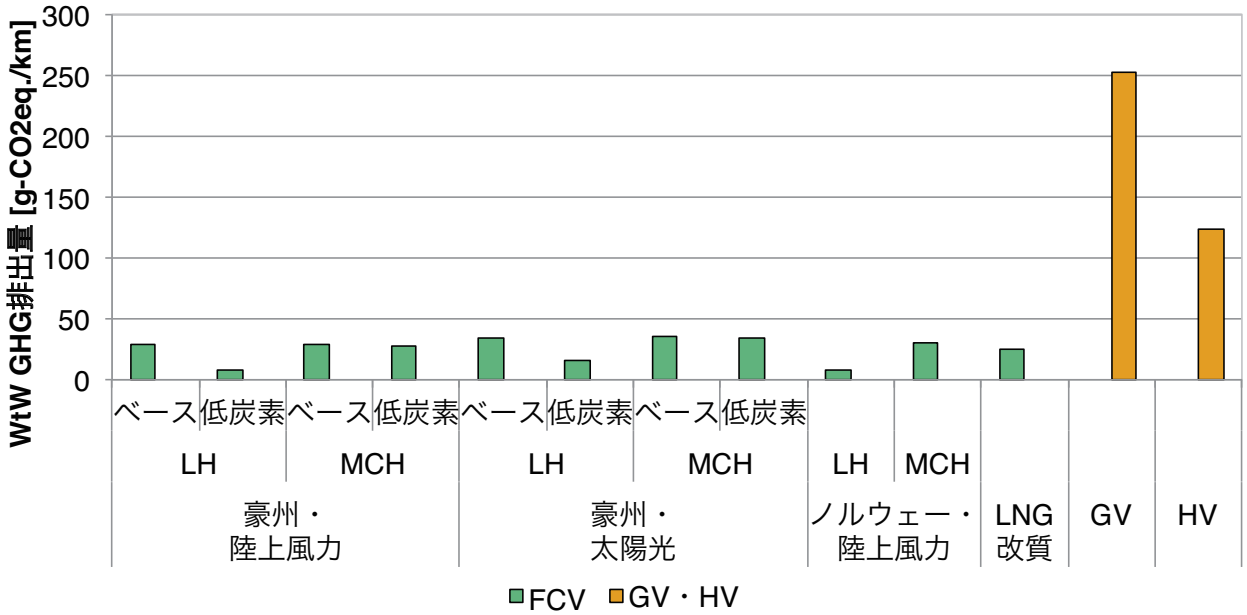


図 2　FCV・GV・HV の Well to Wheel GHG 排出量

産業連関表を用いた水素エネルギーシステムのライフサイクル雇用分析

Life-Cycle Employment Analysis Using an Input-Output Table for Hydrogen Energy System

○稗貫峻一*[1)]、野口和彦[1)]
Shunichi Hienuki, Kazuhiko Noguchi
1) 横浜国立大学
* hienuki-shunichi-sh@ynu.jp

1. 背景と目的

日本政府は、最新のエネルギー基本計画[1)]で、水素の製造、輸送、利用までサプライチェーン全体の、安全性、利便性、経済性、環境性の面から包括的な検討が必要であることを示すとともに、2020 年の東京オリンピック・パラリンピックでは、会場への輸送や選手村等で水素エネルギーを活用する計画をしている[2)]。実際に、国内では 2015 年から燃料電池自動車が市場に投入されており、オリンピックの会場となる東京都は 2020 年までに 35 ヵ所の水素ステーションを建設することを目標としている[3)]。

これまでに国内の水素エネルギーシステムのライフサイクル全体を対象とした分析は行われてきたが、それらの多くは、環境面を対象としたものが多く、社会経済面の分析はほとんどない。

そこで本研究の目的は、産業連関表を用いて、水素エネルギーシステムの導入がライフサイクル全体でもたらす雇用影響を分析することである。

2. 方法

2.1 雇用量の推計

直接間接に生じる雇用量$\boldsymbol{L}$は式(1)に従い求められる。ここでの$\hat{\boldsymbol{l}}$は雇用係数の対角行列、$\boldsymbol{I}$は単位行列、$\boldsymbol{A}$は投入係数行列、$\boldsymbol{f}$は最終需要ベクトルを示す。

$$\boldsymbol{L}=\hat{\boldsymbol{l}}\ (\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{f} \qquad (1)$$

また、関連する生産活動は全て国内で生じると仮定し、分析には 2005 年の産業連関表、雇用表[4)]を用いた。

2.2 システム境界

本研究は社会経済分析の第一歩として、2020 年を想定した公表されている情報に留意した分析を行った。

図 1 はシステム境界を示している。水素は実用化と経済性の観点からナフサの水蒸気改質から製造し[5)]、高圧ガスにより 8 ヵ所の水素ステーションに輸送され、燃料電池車に充填されると想定した。また、全ての耐用年数は 10 年、水素ステーションにおけるライフサイクル全体の水素充填量は 9,450t-H_2、必要なコストは報告書[6)7)]から 9,475 百万円とした。燃料電池自動車の製造に関わる雇用量は、現在の販売価格を考えると、既存のガソリン自動車やハイブリッド車と比べて大きい可能性がある。しかし、適切な情報が得られなかったため本研究では対象外とした。

2.3 前提条件

水素製造設備は、製油所に併設することを前提とし、その生産能力は 1,500Nm^3/h、1 日の稼働時間は 24 時間、年間稼働率は 0.8、年間雇用量は 1 人・年とした。製造、建設段階のコストとして、PSA(Pressure Swing Adsorption)設備、水素圧縮機、サクションドラム、オフガス圧縮機、その他配管、据付、電気設備、土木建設、エンジニアリングを考慮した。運用・維持管理段階のコストとして、原料ナフサ、燃料費、電力、上水、人件費、修繕費、保険料、固定資産税、諸経費を考慮した。なお、原料ナフサと燃料費は 45,900 円/kl、電力 12 円/kWh、上水 300 円/t を前提とした。

水素輸送は、水素製造した場所から 8 ヵ所の水素ステーションへの輸送を想定した。輸送距離は、往復 100km を想定し、各ステーションに 1 日に 1 往復（合計 8 往復）する。トレーラーの仕様は、1 台あたり 45MPa の CFRP 容器 68 本を搭載したトレーラー12 台で、その内訳は留置 8 台、運搬 2 台、充填 2 台である。また、トレーラーを牽引するトラクターは 2 台を想定した。ただし、トラクターの耐用年数は 5 年であるため、ライフサイクル全体では 4 台の製造を考慮した。輸送に必要な軽油は、2km/l、120 円/l とし、年間稼働率は 0.8、年間雇用者は 4 人・年とした。

水素ステーションはオフサイト型 300 Nm^3/h の供給能力を想定した。1 日の営業時間は 15 時間、耐用年数 10 年、年間稼働率は 0.8、年間雇用量は 2.0 人・年とした。製造・建設段階のコストとして、蓄圧器（高圧）、コンプレッサ（充填）、水素ディスペンサ、プレクール装置、水素バルブ、水素センサー、土木建設、エンジニアリングを考慮した。また、運用・維持管理段階は、定期的なメンテナンス費に加えて、機器制御・照明等の電源、プレクール起動電力/維持電力/H2 流通等に必要な電力 2.98kWh/kg-H_2 を考慮し、充填圧力は 70MPa とした。

なお、より詳細な前提条件、金額情報は Supporting Information 表 SI-1、表 SI-2 にそれぞれ記載する。

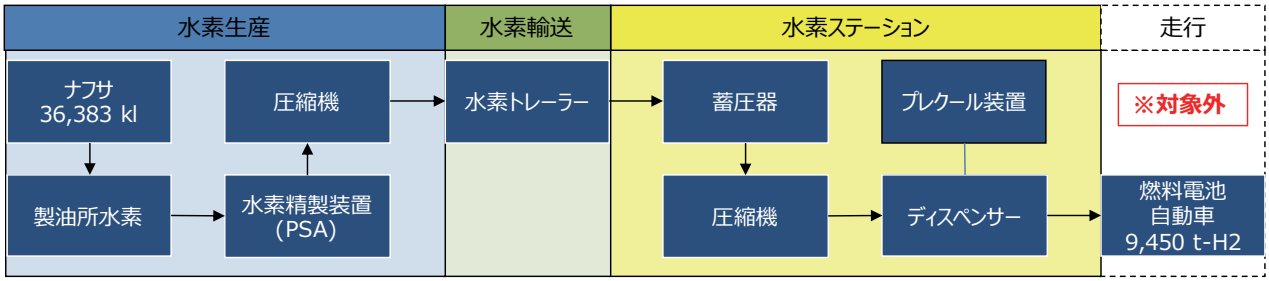


図 1　システム境界

2.4 水素部門の新設・拡張

水素の技術特性を反映するために、運用・維持管理段階における水素製造、水素輸送、水素ステーション 3 部門を既存の産業連関表に新設した。前述した 2.3 の前提条件に従い、3 部門の投入係数行列（$\boldsymbol{A}$）、雇用係数（$\hat{\boldsymbol{l}}$）を作成した。その一方で、製造、建設段階の推計は、既存産業連関表に適切な部門が存在する点、詳細なコストデータに限りがある点から最終需要ベクトル（$\boldsymbol{f}$）を詳細に設定することで推計した。

3. 結果と考察

本研究の分析結果は、製造・建設（システム境界内の全て）、水素生産、水素輸送、水素ステーションの 4 段階で示す（図 2）。

水素ステーションでの水素充填 1t あたりの雇用量は 0.09 人・年と推計された。そのうち、製造・建設段階の比率は 43%であり、運用・維持管理段階の 57%と比べて大きい値となった。つまり、水素エネルギーシステムを導入した場合、約 60%の雇用量は運用・維持管理段階で生じる継続的な影響である。これら運用・維持管理段階の雇用量は、2020 年を想定した直接的な部門で生じる雇用量が約 45%を占めており、将来の価格変化の影響は小さいと考えられる。その一方で、これら製造・建設段階の雇用量は、2020 年以降も技術の普及や進歩、大規模化によってさらに下がる可能性が示唆されており [6)7)]、今後さらに運用・維持管理段階の比率が大きくなる可能性がある。

部門別の雇用量に着目すると、土木建設やそこに投入される労働派遣サービスなどの土木・建設業、化学機械やポンプ圧縮機等の製造業よりも、維持管理に必要な対事業所サービス、機械修理などのエンジニアリング業、卸売、小売、金融などの商業への影響が比較的大きい。

最後に、本研究の結果は、現在入手可能な公開情報を基本として分析したものであり、結果が変わりうる点に留意されたい。今後追加的な事業者へのヒアリング調査やアンケート調査により精査し、生産額や温室効果ガス排出量についても分析していく予定である。

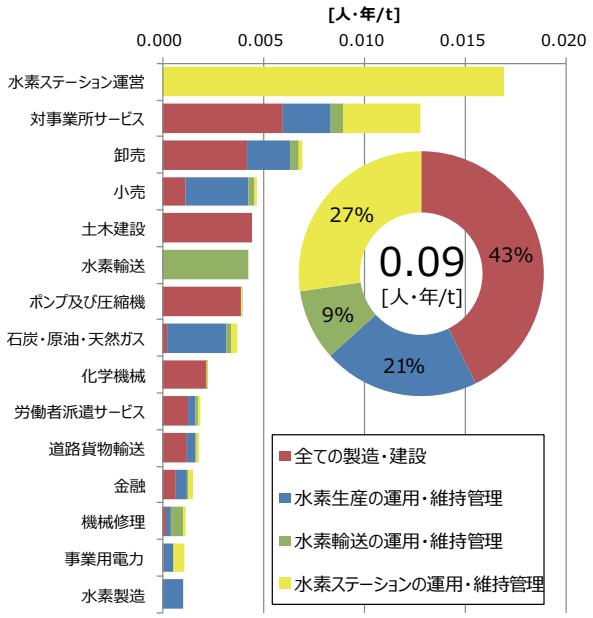


図 2　各部門で生じる水素 1t あたりの雇用効果

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「エネルギーキャリアの安全性評価」（管理法人：JST）によって実施された。

参考文献

1) 経済産業省，2014，エネルギー基本計画
2) 内閣府，2014，2020 年オリンピック・パラリンピック東京大会に向けた科学技術イノベーションの取組に関するタスクフォース
3) 東京都，2015，水素社会の実現に向けた東京戦略会議（平成 26 年度）とりまとめ
4) 総務省，2009，平成 17 年（2005 年）産業連関表
5) NEDO，2014，NEDO 水素エネルギー白書
6) 水素・燃料電池実証プロジェクト，2011，燃料電池システム等実証研究（第 2 期 JHFC Project）
7) 富士経済，2014，2014 年版　水素燃料関連市場の将来展望

Supporting Information

表 SI-1　前提条件

段階	項目		-	単位
水素生産	供給能力		1500	Nm^3/h
	1 日の稼働時間		24	時間
	稼働率		0.8	-
	耐用年数		10	年
水素輸送	トレーラー	留置用台数	8	台
		運搬用台数	2	台
		充填用台数	2	台
		耐用年数	10	年
	トラクター	台数	2	台
		耐用年数	5	年
	燃料代（軽油）		50	L/回/台
	輸送回数		4	回/台
	稼働台数		2	台/日
	輸送距離（往復）		100	km/回
	稼働率		0.8	-
水素ステーション	方式		オフサイト	-
	供給能力		300	Nm^3/h
	営業時間		15	時間/日
	ステーション数		8	ヵ所
	耐用年数		10	年
	稼働率		0.8	-

表 SI-2　10 年間の金額情報

段階		項目	-	単位
水素生産	製造・建設	PSA 装置	70	百万円
		水素圧縮機	100	百万円
		サクションドラム	4	百万円
		オフガス圧縮機	10	百万円
		配管、据付、計装、電気設備	170	百万円
		土木、建設	54	百万円
		諸経費（監督、エンジニアリング、試運転）	90	百万円
	運用・維持管理	原料ナフサ	1,620	百万円
		燃料費	54	百万円
		電力	360	百万円
		上水	20	百万円
		人件費	70	百万円
		修繕費	110	百万円
		保険料	20	百万円
		固定資産税	53	百万円
		諸経費	40	百万円
水素輸送	製造・建設	水素トレーラー（45MPa）	340	百万円
		車台	96	百万円
		トラクター	40	百万円
	運用・維持管理	修繕費	190	百万円
		保険料	29	百万円
		固定資産税	70	百万円
		諸経費	50	百万円
		燃料費	140	百万円
		人件費	280	百万円
水素ステーション	製造・建設	蓄圧器（高圧）	170	百万円
		コンプレッサ（充填）	680	百万円
		水素ディスペンサ	280	百万円
		プレクール装置	270	百万円
		水素バルブ	83	百万円
		水素センサー	10	百万円
		エンジニアリング	380	百万円
		土木	503	百万円
	運用・維持管理	メンテナンス費	320	百万円
		電力料金	480	百万円
		人件費(2 名×8 ヵ所)	800	百万円

2 段 PSA と酸化金属を用いた複数段での バイオ水素の低温脱硫システムの環境評価

Environmental evaluation of the low temperature bio-hydrogen desulfurization system of two steps of PSA and metal oxide

○黒田祥平 [1)]、堂脇清志*[1)]
Shohei Kuroda, Kiyoshi Dowaki
1) 東京理科大学
* dowaki@rs.noda.tus.ac.jp

1. はじめに

バイオ水素(Bio-H_2)は高効率な熱電併給が可能である燃料電池の燃料であることから低環境負荷の水素社会へ向けて利用が期待されている。しかしながら、バイオ水素を製造するためのバイオマスガス化において 50～230 ppmv の H_2S が生成し、この H_2S は高純度の水素によって駆動する燃料電池の触媒を被毒して電圧低下を招くため、このような不純物除去の対策が重要となってくる。Bio-H_2 製造は、一般的には規模の経済性のメリットを得られにくいため、そのコスト低減のためには、このような不純物除去については、低圧や低温下で高効率なガス精製プロセスが必要となろう。

これまで、筆者らは低温での酸化金属による H_2S 除去の研究を行っているが、吸着後の再生が容易でないため多くの吸着剤が必要であり、また頻繁に吸着剤を交換しなければならない。また、環境問題の観点から、金属資源をガス精製に用いることは金属資源の枯渇や廃棄といった指標に関して負の影響を与えることとなる。そこで、吸着剤の再生が可能な多孔質吸着剤への物理吸着と酸化金属での化学吸着を組み合わせることで酸化金属の使用量の低減と同時に低温及び低圧化での運転条件を把握する研究を行ってきた。

以上の背景から、本研究の目的は、バイオ水素製造における原料の収集、輸送からプラントでの所内動力、さらに触媒、吸着剤等の影響を含めた環境評価することであり、バイオ水素製造プラントのプロセス設計をし、LCA 手法による評価を行った。

2. 研究手法:ケーススタディの定義

2.1 システム境界の定義

今回のバイオ水素製造プラントは、スギ材を原料とした小規模分散型の間接ガス化プロセス (原料 12 t-dry/d)を想定した。バイオマスの収集に関しては橋本らの研究より、この規模のプラントであれば、50km 圏内でバイオマスが確保できる [1)]。バイオ水素製造プラントでは、バイオ水素製造における触媒、吸着剤等の影響を評価するため、「Case1： 従来の脱硫プロセスを当てはめたバイオ水素製造プロセス」「Case2： 2 段 PSA と酸化金属を用いた複数段での脱硫システムを当てはめたプロセス」、の 2 つの比較を行う。機能単位はバイオ水素 1 Nm^3 (純度 99.99 vol%)とし、機能単位はバイオマス 1 kg-dry とする。評価範囲は WtT アプローチとし、バイオマスの収集後、チップ化、輸送、バイオ水素製造までとした（図 1 参照)。但し、資本財については評価から除外した。

2.2 原料、チップ化、輸送 (SS1)

今回、原料のスギについては、Ecoinvent 3 のデータベースの針葉樹廃材をバックグラウンドデータとして使用した。チップ化については渡辺らの研究より、エネルギー消費量は軽油 1.033 g/kg-feed、電力 0.0136 kWh/kg-feed とし [2)]、輸送については 50km 圏内でバイオマスを賄えることから、5-50km の平均をとり、27.5km とした。

2.3 バイオ水素製造システム (SS2, SS3)

バイオ水素製造システムについては、プロセス計算ソフト Aspen Plus® V8.8 を用いてプロセスの設計を行った。本研究では、脱硫プロセス別に 2 ケースを評価し、シフト反応器の前段に置かれた従来ケース (図 1 (a)参照)、2 段 PSA と酸化金属を用いた複数段でのケース (図 1 (b)参照)の評価を行った。

また、バイオ水素製造プラントではバイオ水素を製造するだけでなく、PSA1 段目でガスを精製した際に CO_2 が副生産物として生成される。こちらについては、植物工場での炭酸ガス施肥等に利用が可能なため、大気への排出物としてはカウントを行うことはせず、一方で副生産物としての環境負荷の分配も行わないこととする。なお、インベントリーデータについては Aspen Plus®の結果を用いたほか、触媒や吸着剤の充填量に関しては著者がこれまで行った実験値 [3,4)]、及び文献 [5-7)]をもとに式 S1、S2 を用いて計算を行った。

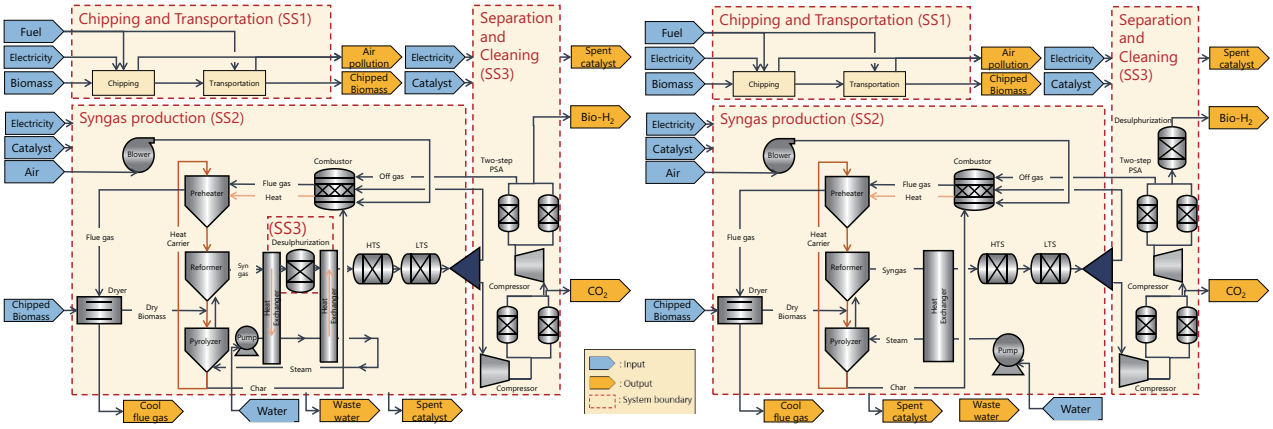


図 1 (a) Case1 (左図) (b) Case2 (右図)の評価ケース

3. 結果と考察

3.1 プロセス設計の結果

バイオ水素製造のプロセス設計結果から、水素 1Nm^3 あたりのインベントリーデータを表 1 に示す。この結果から、脱硫剤を削減する事ができ、また脱硫塔まわりの熱収支の改善により、水素生成量がわずかながら改善されたことにより、電力消費量などについても影響が出ている。

表 1 プラントのインベントリーデータ

	Case1	Case2
Input from nature		
Air (SS2) [kg]	58.35	57.65
Input from technosphere		
Water (SS2) [kg]	1.74	1.72
HTS-Catalyst (SS2) [kg]	3.3.E-06	3.2.E-06
LTS-Catalyst (SS2) [kg]	1.6.E-04	1.6.E-04
Electricity (SS2) [kWh]	0.87	0.86
Adsorbents(SS3)		
Case1 Desulfurization [kg]	2.7.E-03	
Case2 Desulfurization [kg]		5.6.E-05
Electricity (SS3) [kWh]	0.87	0.87
Emission to the water,air		
SO_2 (SS2) [kg]	8.0.E-07	7.9.E-04
CO_2 (SS2) [kg]	2.36	2.33
Waste water (SS2) [kg]	0.24	0.23

3.2 環境影響評価

環境影響評価については、CML 手法を用いてミッドポイントまでの分析を 11 カテゴリーに対して行い、SimaPro 8.2 ソフトウェアを用いて計算した。またバックグラウンドデータに関しては Ecoinvent 3 のデータベースを利用した。

各カテゴリーに対して Case1 の値を基準とした場合のインパクト評価結果を図 2 (全カテゴリー結果は図 S1 参照)に示した。非生物系資源枯渇 (Abiotic depletion)については、脱硫に用いる金属が減ったことから、68.8%改善が見られた。しかしながら、PSA で回収された硫黄がオフガスと一緒に燃焼器へ送られるため、SO_2 の排出量が増えた結果、酸性化 (Acidification)が 7.4%悪化したことがわかる。

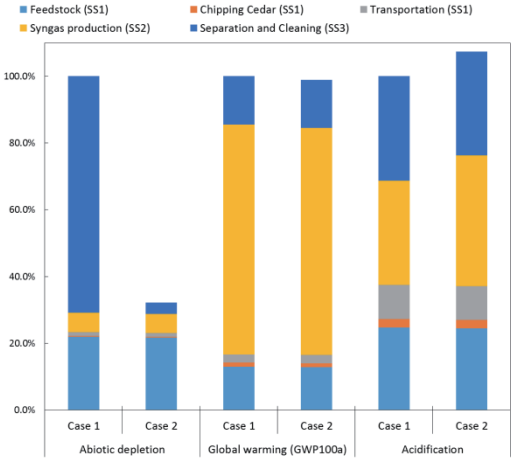


図 2 インパクト評価結果 (抜粋)

4. まとめ

本研究では、プロセス設計を行い、触媒、吸着剤の利用も含めた環境評価を行った。その結果、2 段 PSA と酸化金属を用いた複数段での脱硫システムを導入することで、非生物系資源枯渇が大幅に改善し、水素生成量もわずかながら改善する事がわかった。

引用文献

1) 橋本征二, 小原卓巳, 寺島泰:土木学会論文集, 643(Ⅶ-14), (2000), pp.37-48
2) Watanabe Y., Sato Y., Kawano D., Koido K., Dowaki K.: Int. J. LCA, 9 (1), (2013), pp 20-36
3) Kuroda, S., Koido, K., Dowaki K.: Proc. 25th. Int. JIE, Tokyo, (2016), pp 220-221
4) 黒田祥平, 永石平, 亀山光男, 堂脇清志: 12 回バイオマス科学会議要旨集, つくば, (2017), P-26
5) Novochinskii, I. I., Song, C., Ma, X., Liu, X., Shore, L., Lampert, J., Farrauto, R. J., Micheal Betz, Manfred: Energy & Fuels, 18(2), (2004), pp576-583
6) Maroño, M., Sánchez, J. M., Ruiz, E.: hydrogen energy, *35*(1), (2010), pp37-45
7) Mendes, D., Chibante, V., Mendes, A.: Ind. Eng. Chem. Res. 49(22), (2010), pp11269-11279

Supporting Information

Ecoinvent 3 について

Ecoinvent 3 は 2013 年 5 月にリリースされ、エネルギーや農業、輸送、バイオ燃料、化学製品、建築資材、木材、廃棄処理などの多くの分野において、12800 以上のデータセットを持った国際的な LCI データベースである [S1]。

触媒、吸着剤の使用量の計算

$$W_{catalyst} = \frac{\dot{V} \times 10^{-6}}{GHSV} \times \rho_{catalyst} \qquad \text{(S1)}$$

$$W_{\text{adsorbent}} = \frac{\dot{V} \times C_{H_2S} \times 32.07 \times (6 \times 10^{-4})}{V_m \times S_{cap}} \qquad \text{(S2)}$$

[Nomenclature]

$W_{catalyst}$ [kg] : 触媒量

$W_{\text{adsorbent}}$ [kg] : 吸着剤量

$\dot{V}$ [ml/hr] : ガス流量

$\rho_{catalyst}$ [kg/m^3] : 触媒かさ密度

$GHSV$ [h^{-1}] : 空間速度

C_{H_2S} [ppmv] : H_2S 濃度

V_m [L/mol] : モル体積 (標準状態)

S_{cap} [g-S/100 g-adsorbent]

: 吸着剤 100g に対する硫黄吸着量

SI 引用文献

S1) ecoinvent : “Why ecoinvent”, ecoinvent, (オンライン), 入手先 <http://www.ecoinvent.org/home.html>, (2017-1-4)

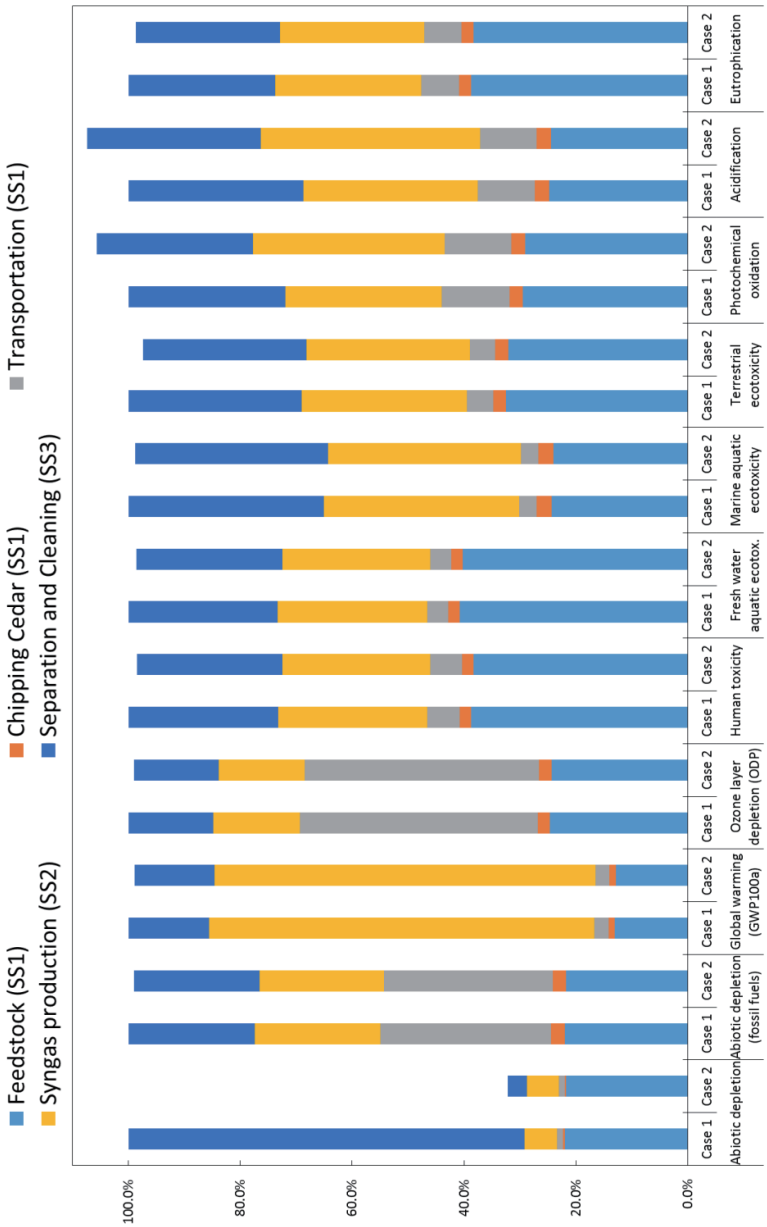


図 S1 インパクト評価結果 (全カテゴリー)

LCA 分析を考慮した家庭用 SOFC-CGS における環境的統合化指標の提案

Proposal of the environmental integrated indicator of household SOFC-CGS considering LCA analysis

○佐藤聖史*1)、堂脇清志 1)

Kiyofumi Sato , Kiyoshi Dowaki

1)東京理科大学

*7413047@ed.tus.ac.jp

1.　はじめに

近年、家庭部門での地球温暖化対策が行われており、また、東日本大震災の経験から分散型電源の必要性が高まってきている。これらの背景により、家庭用燃料電池システムの普及が促進されており、また、我が国だけでなく、温暖化対策の一環として欧州において注目を浴びている。

このような普及状況に応じて、国際電気標準会議（IEC）において、燃料電池の国際標準を作成することを目指し、同会議の IEC/TC105 にて製品・技術面と環境面を考慮した審議が行われている。特に、TC105 の燃料電池 LCA 分科会において、燃料電池の LCA による指標づくりの検討を行っている。

以上のような背景から、本研究では、ライフサイクルアセスメント（LCA）及び包絡分析法（DEA）を用いた環境的統合化指標を開発してきており、現在家庭用の燃料電池システムとして販売されている PEFC-CGS と SOFC-CGS について検討することとした。

2.　条件設定

2.1 対象とするシステム

定格出力 700W の PEFC-CGS と SOFC-CGS（10 年耐久）を分析対象とした。また、各燃料電池システムの仕様ついては平成19年度みずほ情報総研による報告書をベースにして、現在のメーカーの仕様に合うようにヒアリング等によりデータを一部変更して分析を行った。

2.2 対象とする家庭の需要データ

本研究で行う分析対象は家庭用の電力及び給湯需要に対して、10kW 以下の小形燃料電池システムのエネルギー効率測定法（JISC8851）で使用されている標準家庭の年間の電力負荷パターン及び標準家庭の年間の給湯保温負荷パターンを用いた。なお、これらの負荷パターンは夏期 92 日（7 月、8 月及び 9 月）、中間期 152 日（4 月～6 月、10 月及び 11 月）及び冬期 121 日（12 月～3 月）の季節ごとを考慮している。

3.　分析手法について

3.1 LCA について

本研究での LCA は、図 1 に示すシステム境界に従う。機能単位は家庭用燃料電池 1 台分とする。

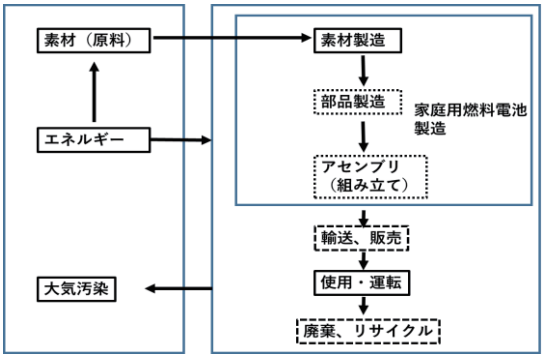


図 1　本研究におけるシステム境界

最初に、家庭用燃料電池の製造段階までのインベントリ分析を行い、続いて、シナリオを基づいた製造段階での妥当性を含めた分析を行い、ReCiPe を影響評価手法として影響分析を行った。ここでの分析に関しては、LCA ソフトウェアは SimaPro ver8.2.0.0 を使用した。

使用段階でのインベントリ分析では、燃料電池の I-V 特性を考慮したプロセスシミュレーター(EXCEL-VBA2013)に基づき、想定されているエネルギー需要に対して、従来ケースと比較して CO_2 排出削減量が最大化となるように、運転条件の最適化を行った。ここでの分析では、最適化計算は(1) 式に従い、GAMSVer.23.0.2 を用いた。

$$\max.\left(\mathrm{Total_Conv}_{CO_2} - \mathrm{Total_PEFC}_{CO_2}\right) \qquad (1)$$

ここでは、従来ケースを、電力供給はすべて電力会社が（CO_2 排出原単位は、東京電力の 2015 年度の CO_2 排出量 0.500 g-CO_2/kWh）とし、給湯は都市ガス 13A によるガス給湯器（CO_2 排出原単位は 0.0509kg-CO_2/MJ）を用いた。なお、燃料電池の燃料及びバックアップ給湯器の燃料も都市ガスで供給されるものとした。

3.2 シナリオ設定

以下のシナリオを設定した。

シナリオ 1 : PEFC[1]の白金使用量が従来ケースに比べて 1/10 まで低減した場合を用いた。

シナリオ 2 : SOFC のスタックの違い（平板型スタック及びアノードサポート型スタックを用いた場合）

SOFC の構成材料については文献と企業のヒアリングをもとに定めた。[2)3)]

3.3 データ包絡分析（Data Envelope Analysis, DEA）について

次に、DEA を用いて統合化指標を作成した。入力項目は製造段階での温暖化効果を表す Climate change [kg-CO_2 eq]と金属資源枯渇を表す Metal depletion[kg-Fe eq]を、出力項目として家庭用燃料電池を導入することによる従来ケースと比較しての CO_2排出削減量[kg-CO_2eq]とする。以上、2 入力 1 出力を設定し、以下の式を解く。

<LP_o>　目的関数

$$\max\theta = u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \cdots + u_s y_{so} \quad (2)$$

制約式

$$v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \cdots + v_m x_{mo} = 1 \quad (3)$$

$$u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \cdots + u_s y_{so} \leq v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \cdots + v_m x_{mo} \quad (j = 1, \cdots n) \quad (4)$$

$$v_1, v_2, \cdots, v_m \geq 0 \quad (5)$$

$$u_1, u_2, \cdots, u_s \geq 0 \quad (6)$$

なお、記号 o は 1,2,...,n のいずれかを指し、また入力ウェイトを v_i(i=1,2,…,m)、出力ウェイトを u_r(r=1,2,…,s)とする。この方程式の最適解(v*,u*)、目的関数値を θ*とすれば、θ*=1 ならば DMUo は効率的であるといい、θ*の最適解として得られた(v*,u*)の値は、DMUo に対する最適ウェイトを意味する。また、比率尺度の値は、

$$\theta^* = \sum_{r=1}^{s} u_r^* y_{rj} \quad (7)$$

となる。[4)]

4. 結果と考察

4.1 製造部分

製造部分に関しては、3.2 にて設定したシナリオに基づいて算出した。今回着目する影響値の値は図 2 に示した通りになる。

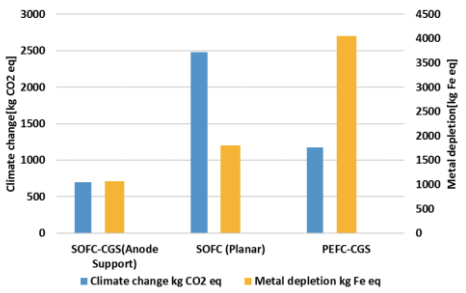


図 2　環境影響値

4.2 使用段階

使用段階での CO_2排出削減量を算出した。家庭用燃料電池 10 年間 1 台相当での CO_2排出削減量は、アノード指示型は 13858.63kg-CO_2、平板型は 14066.57kg-CO_2であった。また、PEFC-CGS は 5910.00kg-CO_2であった。

4.3 DEA による統合化指標

以上、4.1 と 4.2 の結果を用いて統合化指標を作成した。シナリオ別の効率値は、以下の図 3 に示す。アノードサポート型の SOFC-CGS が最も優れているということを示している。

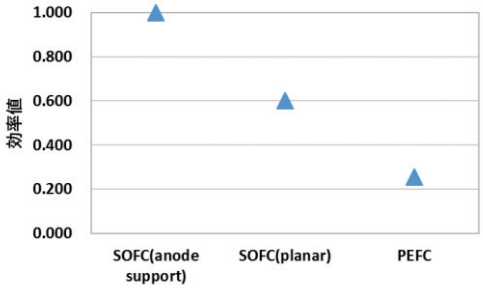


図 3　DEA の効率値

5. まとめ

本研究では家庭用燃料電池に関して LCA を行い、製造段階での CO_2排出量及び資源枯渇のインベトリ分析を行い、また日本における一般的な需要 データをもとに使用段階での CO_2排出量を評価した。その後、DEA によって環境影響と性能を考慮した統合化指標を作成した。

この統合化指標を用いることで、各メーカーは性能向上を図る際に活用することができ、製品の優位性を示すことができる。

今後は、調査範囲に含めることができなかった詳細なデータを入れることによって精度を高めることを目指す。また、家庭用燃料電池にて付加価値を反映するために指標の改良を目指す。

6. 引用文献

1) 神野裕亮, 小井戸賢二, 堂脇清志:”第11回日本LCA学会研究発表会”, 東京大学柏キャンパス, (2016), pp.350-351

2) Young Duk Lee, Kook Young ahn , Tatiana Morosuk , Georgr Tsatsatonis : Energy , 79 ,(2015) ,pp.455-466

3)V.Karakoussis , N.P.Brandon , M.Leach ,R.van der Vorst : Journal of Power Sources , 101 ,(2001) , pp.10-26

4)刀根薫, 経営効率性の測定と改善―包絡分析法 DEA による-, 日科技連出版社, 1993

食品廃棄物のリサイクルによる環境便益評価

Evaluation of Environmental Benefit of Recycling Food Waste

○岡橋拓哉*[1)]、加河茂美 [2)]
Takuya Okahashi, Shigemi Kagawa
1),2) 九州大学
* 1ec14027w@gmail.com

1. はじめに

わが国のバイオディーゼルの生産量は、2006 年には 5000 トンであったのが、2010 年には 14000 トンと、実に 2.8 倍に増加している [1)]。しかしながら、同時期の諸外国、例えば EU の 970 万トン、アメリカの 114 万トンと比べると日本は遅れを取っている。

バイオディーゼルの普及に向けて日本政府は、2002 年にバイオマス・ニッポン総合戦略を閣議決定し、生産技術の開発支援等を通じてバイオマス輸送用燃料の利用を促進した [2)]。2009 年には、バイオマス活用推進基本法が閣議決定され、バイオディーゼルの税制等による低濃度利用の普及や高効率・低コスト生産システムの開発を個別重点戦略の一つに加えることによって、バイオディーゼルの普及を計画している [3)]。

本研究では、廃食油由来のバイオディーゼルの普及が、CO_2 排出削減にどの程度寄与するか分析することを目的とする。

2. 方法

2.1 計算手法

本研究では、バイオディーゼルの生産時に発生する CO_2 量を推計するために、株式会社フチガミの生産活動データを利用した（Eguchi *et al*., 2015）。

具体的に、2011 年におけるフチガミのバイオディーゼルの生産活動における投入物（廃食油、水酸化カリウム、メタノール、電力、トラックディーゼル、B5 バイオディーゼル、B100 バイオディーゼル）の投入量とそれらの 2011 年単価（2011 年生産者価格）よりそれらの投入額（単位：百万円）を計算し、それらの金額ベース投入量に産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)の 2005 年内包型 CO_2 排出原単位 (t-CO_2/百万円)を乗じて、ライフサイクル CO_2 排出量を求めた [4)]。

フチガミの生産活動データから得られたバイオディーゼルの排出原単位と全国バイオディーゼル燃料利用推進協議会及び農林水産省調査の日本全体のバイオディーゼルの 2010 年生産量 14000 kℓのデータから、日本全体のバイオディーゼルの精製の際に発生する CO_2 量を求めた。

これにより得られたデータからバイオディーゼルの将来普及による CO_2 排出削減量を計算した。

2.2 データ

Eguchi *et al*. (2015)の 2011 年におけるフチガミの生産データを用い、2011 年の全体のバイオディーゼルの生産量、原材料の投入量を計算した [5)]。結果を表 1 に記載する。表 1 の投入データと単価データを用い、バイオディーゼルの全体の金額を計算した。結果を表 2 に記載する。

これらのデータを用いて、バイオディーゼルの生産における CO_2 排出量を計算した。結果を表 3 に示す。

表 1. フチガミ及び日本全体のバイオディーゼル生産に対する投入産出量

投入項目	2011 年の数量（フチガミ）	2011 年の数量（日本全体）
廃食油 (kg)	389,002	16,046,333
水酸化カリウム (kg)	6235	257190
メタノール (kg)	70,038	2,889,070
電力 (kW)	2299	94,834
トラックディーゼル (kl)	17.677	729.180
B5 バイオディーゼル (kl)	0	0
B100 バイオディーゼル (kl)	17.677	729.180
産出項目		
バイオディーゼル (kl)	339.360	14,000
グリセリン (t)	88.320	13,999

表 2. バイオディーゼル生産に関する投入額

投入項目	2011 年単価（円）	投入額（日本全体）（百万円）
水酸化カリウム	179,722	46.22
メタノール	331,701	958.31
電力	15	1.47
トラックディーゼル	101,290	73.86
B5 バイオディーゼル		
B100 バイオディーゼル	69,190	50.45

表 3.　日本全体のバイオディーゼル生産の CO_2 排出量

投入項目	金額（日本全体）（百万円）	CO_2 排出量（日本全体）(t)
水酸化カリウム	46.22	492
メタノール	958.31	8107
電力	1.47	40
トラックディーゼル	73.86	407

3.　結果と考察

図 1 は、現状の軽油とバイオディーゼルの双方を生産した場合の CO_2 排出量（現状）、現状のバイオディーゼル生産量を全て軽油に代替した時の CO_2 排出量（シナリオⅠ）、軽油 50 万 kℓをバイオディーゼルで代替すると仮定した時の CO_2 排出量（シナリオⅡ）を示す。シナリオⅡの代替量の仮定は、平成 18 年の環境省の輸送用エコ燃料の普及拡大についての報告書での目標値を用いている [6]。なお、軽油の生産は、中間投入と家計消費を合計したものとしている。軽油に対する中間投入及び家計消費支出のデータは、平成 23 年(2011 年)産業連関表 取引基本表(生産者価格評価)(基本分類)を用いている [7]。

現状の場合、軽油を 3315 万 6 千 kℓ、バイオディーゼルを 1 万 4 千 kℓ、合計で 3317 万 kℓ消費している。この場合の CO_2 排出量は 1 億 436 万トンである。シナリオⅠのバイオディーゼル 1 万 4 千 kℓを軽油に代替した場合、軽油だけを 3317 万 kℓ消費している。この場合の CO_2 排出量は 1 億 439 万トンである。シナリオⅡの場合、軽油を 3267 万 kℓ、バイオディーゼルを 1 万 4 千 kℓ消費している。この場合の CO_2 排出量は 1 億 314 万トンである。3 つのシナリオを比較すると、シナリオⅡを実行することによって現状よりも CO_2 排出量を 122 万トン、シナリオⅠより 125 万トン、削減率にしてそれぞれ 1.16%、1.20%減らすことができる。

本研究により、バイオディーゼルの普及がもたらす CO_2 削減効果が分かった。バイオディーゼルの使用量を 50 万ｷﾛℓから増加させることで、さらなる CO_2 排出量削減を期待することができる。

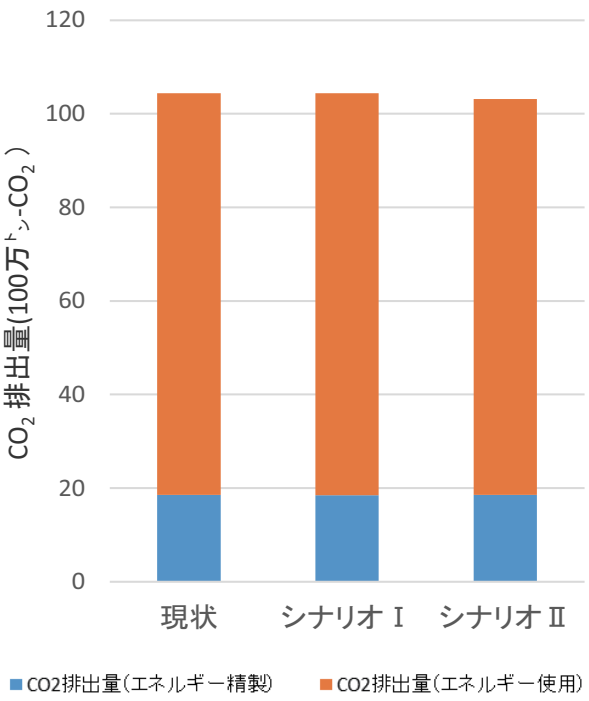


図 1.　バイオディーゼル普及に伴う CO_2 排出量

引用文献

1) 農林水産省(2017) http://www.maff.go.jp/j/biomass/b_kenntou/04/pdf/siryo6_1.pdf
2) 農林水産省(2017) http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_gaiyou.pdf
3) 農林水産省(2017) http://www.maff.go.jp/j/biomass/suisinkaigi/07/pdf/01_meguru_jyoukyou.pdf
4) 国立環境研究所(2016)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/datafile/embodied/2005/403.htm
5) Eguchi *et al*. (2015) *Journal of Cleaner Production*, vol.101, p.245-250.
6) 環境省(2006) http://www.env.go.jp/earth/ondanka/biofuel/materials/rep_h1805/02.pdf
7) 総務省(2017) 平成 23 年(2011 年)産業連関表 取引基本表(生産者価格評価)(基本分類) http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001060671&cycode=0

外食産業を対象にした食品ロスと廃棄物の環境影響評価

Environmental impact assessment of food loss and waste in a Japanese restaurant

○小川俊治(*1)伊坪徳宏(*1)
1)　東京都市大学
*g1262028@tcu.ac.jp

1.　はじめに

食品ロスに関しての研究事例はとても盛んに行われており、特に調理方法や食材の包装における研究が多く見られる。しかし、外食産業に関する評価事例がなく、一次データを基に外食産業を評価事例としている研究がほとんど見受けられなかった。

2.　研究目的

本研究では､外食産業における一次データを駆使した食品ロスの環境影響について評価する。その結果を一般家庭における食品ロスの環境影響と比較するとともに、意識啓発のポスターを作成し、消費者に向けた開示を通じてコミュニケーション手段としての LCA の有効性について検証することを最終目的とする。

3.　評価対象及び研究方法

外食産業及び一般家庭の一人一食を機能単位とした。外食産業に関しては直接ヒヤリングに基づく一次データを使用し、一般家庭に関しては、農林水産省の二次データを使用した。

本研究の評価範囲を図 1 に示す。

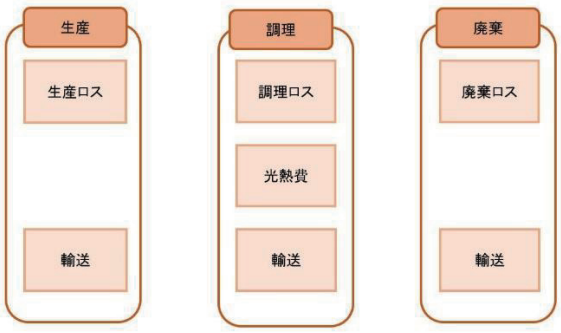


図 1　システム境界

本研究では食材およびユーテリティ、再生、処理のライフサイクルを網羅した CO_2 排出量を算定し、それぞれのプロセスにおけるロスに関して、算定を行う。

$$環境影響領域=\sum\left(活動量(百万円)\times環境負荷原単位(X/百万円)\right)$$

影響領域に関しては気候変動、水、土地利用を対象とした。気候変動は CO2 等価排出量、水は水消費量、土地は土地利用面積で評価指標として採用した。

原単位は一般社団法人産業環境環境管理協会が公開している 2005 年度産業連関表を使用している。
また、外食産業における廃棄データに関しては、食材ごとの廃棄量は二週間分得た後、これを総量データに適用して、通年の廃棄物量を食品ごとに求めた。その結果を図 2 に示す。

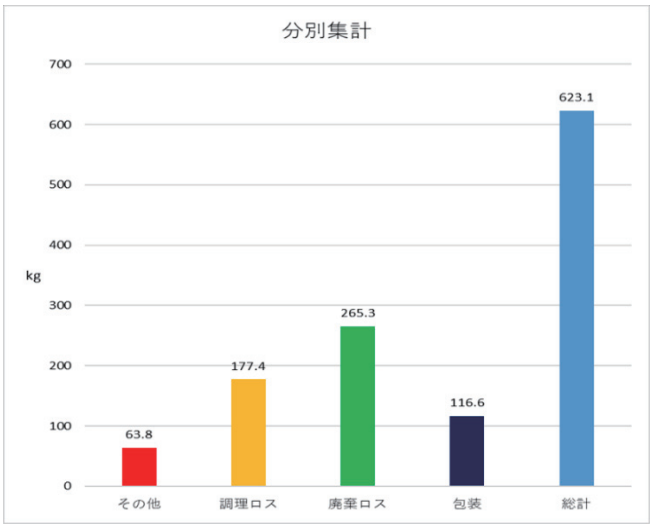


図 2　外食産業における廃棄物量集計結果

顧客の廃棄ロスが全体のゴミの総量の約 4 割と大きな割合を占めた。その一方で、調理時のロスや包装を合わせると廃棄ロスよりも多くの量を占め、これらの項目を考慮することも重要であることが確認された。

また一般家庭においては、農林水産省の食品ロス統計調査 H26 年度の値を使用しており、機能単位が一人一日当たりのデータな為、一食にするにあたり 3 で割った値を使用している。

4.

結果

食材全体の CO_2 排出量を図 3 に示す。

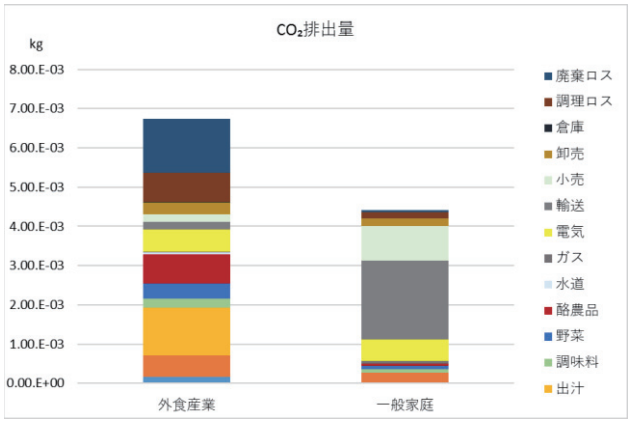


図 3 外食産業および一般家庭における食品ロスに関わるライフサイクル CO_2 排出量（縦軸の単位は kg）

食材の物量は外食産業 1313g/1 食、一般家庭 367g/1 食）だったが、CO2 排出量としては 1.5 倍程度の差となった。一次データに関しては廃棄ロスと輸送の値が大きく出た。二次データに関しては小売と輸送の値が大きく出た。輸送に関しては、輸送における金額の付加価値の違いからこのような結果となった。

食品ロスに関する水使用量算定結果を図 4 に示す。

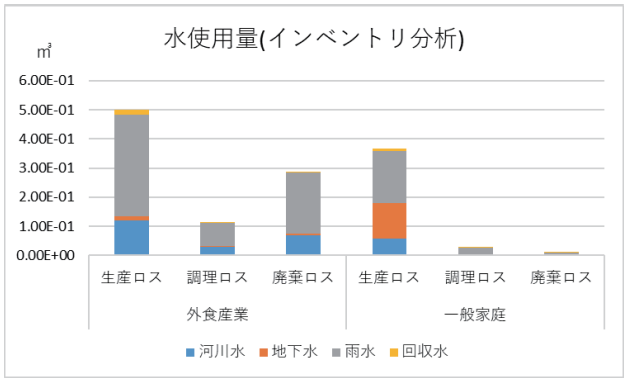


図 4 水使用量算定結果(縦軸は m^3)

外食産業の水使用量は合計で 9.00E-01 で一般家庭の 2.2 倍であった。生産ロスの値が大きく出ており、雨水と河川水の割合が大きく出ていることが分かる。また、一般家庭の生産ロスと、外食産業の廃棄ロスの値が近しいことから、廃棄ロスの水使用量における無駄が大きいことが分かる。

図 5 に食品ロスに関わる土地利用算定結果を示す。

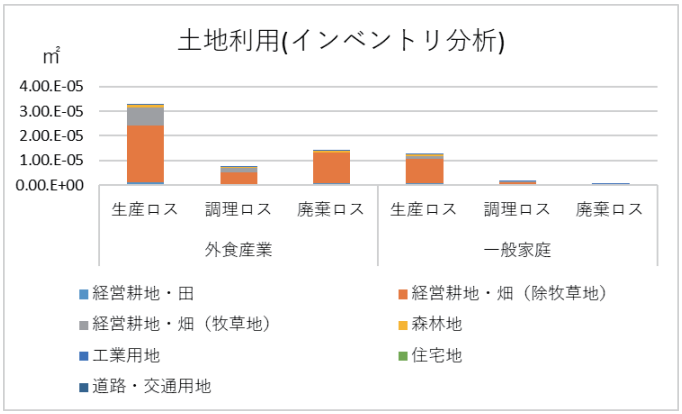


図 5 土地利用面積の算定結果（縦軸は m^2）

外食産業の土地利用面積は合計で 5.42E-05 ㎡で、一般家庭の約 3.7 倍であった。いずれも食品生産に関わる寄与が大きく、全体の 6 割以上を占めた。土地利用形態では、いずれも耕地・畑としての利用が大半を占めた。

5. まとめ

本研究では外食産業と一般家庭における食品ロスに着目し、ライフサイクルを通じて発生する環境影響について算定した。

食材のライフサイクル全体の CO_2 排出量では外食産業の値が少し大きくなったが、物量の差にも関わらず、輸送段階の金額の違いから、差が縮まったと考えられる。

水使用量、土地利用に関しては、生産段階での値が大きかったことから、食品ロスの削減はサプライチェーンの上流部分での負荷軽減に寄与するものといえる。また、外食産業と一般産業いずれも廃棄された食品製品時の環境負荷が大きく、特に外食産業は廃棄ロスの環境負荷が相対的に大きい為、廃棄ロスの削減を行っていく必要がある。。

参考文献

・農林水産省
http://www.maff.go.jp/
・国連 WFP
http://ja.wfp.org/news/news-release/131001
・外務省:国連食糧農業機関(FAO)
http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/fao/
・環境省
http://www.env.go.jp/nature/

大学キャンパスを中心としたバイオマス有効利用シナリオの検討

Study on scenario design for effective utilization of biomass generated in university campus

○細川裕[*1)]・吉川直樹[1)]・天野耕二[1)]
Yutaka Hosokawa,Naoki Yoshikawa,Koji Amano
1) 立命館大学
*rv0022he@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

近年、食品廃棄・食品ロスの問題が世界各国で顕在化している。日本においては農林水産省[1)]によると、食品廃棄のうち可食部分と考えられる量のうち肥料化やメタン化が行われているのは 1/6 に留まっており、ほとんどが焼却･埋め立て処分されている。これより、厨芥類をはじめとしたバイオマス資源を有効活用することで環境負荷低減が見込まれる。

食品廃棄・食品ロスの削減を推進するために、学内店舗利用者が多く、日本全国に数多く存在し構成員も多いため安定した食品廃棄物を得ることができる大学キャンパスでの対策が必要である。大学キャンパスにおけるバイオマス資源化に関する既往の研究は山田らのケーススタディ[2)]があるが、学内で家畜を育成している、バイオマス資源の活用の主目的が暖房器具への燃料中心という点からやや特殊な事例であるといえ、農学部を有しない大学における研究事例の蓄積が必要である。

そこで、大学キャンパス内から発生するバイオマスの有効利用を検討するため環境負荷・コストを考慮したシナリオ分析を行う。

2. 研究概要

本研究では、排出主体を立命館大学びわこ・くさつキャンパスとし、対象とする学内由来バイオマスを大学食堂由来厨芥類及び学内由来剪定枝とする。厨芥類と剪定枝は、現在近隣処理施設に運搬され焼却処分されている。対象物質を堆肥化及び飼料化によって処理する。システム境界として現在の状況を「現行シナリオ」、資源化を実施した状況を「堆肥化シナリオ」「飼料化シナリオ」とする。

システム境界は図 1 のように設定した。

現行シナリオでは、学内由来バイオマス厨芥類と剪定枝は草津市クリーンセンターに輸送された後焼却処理され、焼却灰が発生する。さらに堆肥化及び飼料化相当の化学肥料を購入したと仮定してライフサイクル環境負荷を算定する。

堆肥化シナリオでは、学内由来厨芥類を高温発酵型バイオ式処理機で処理することで堆肥を製造し、近隣農家に輸送する。堆肥製造段階において分解できないプラスチックごみ等が処理機から排出される。このごみ(以下残渣とする)を焼却施設に輸送する。また剪定枝は学内で木質チップ化される。

飼料化シナリオでも同様の工程が発生するが、学内由来厨芥類を乾燥式生ごみ処理機で処理することで飼料を製造し、畜産農家に輸送する点が異なる。

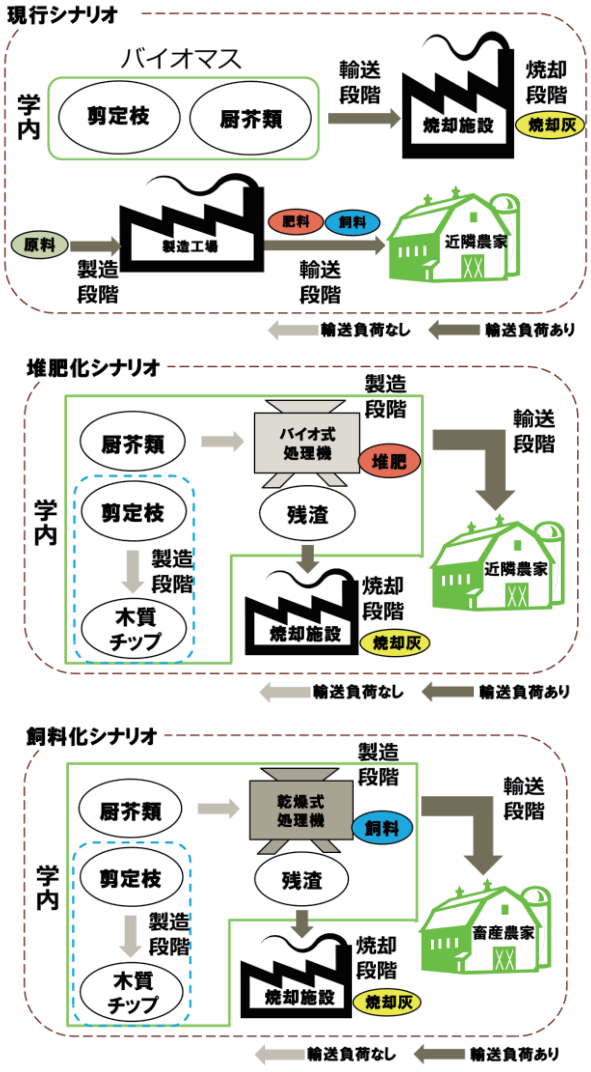


図１　システム境界

表1 排出実態調査概要

	A:廃棄物組成調査	B:厨芥類排出量調査	C:厨芥類組成調査
対象店舗	食堂2か所、コンビニ1か所		
調査期間	2015年10月23日～11月21日（計5回）	2015年5月27日～6月26日（計13回）	2014年2月11日～3月8日（計16回）
区分	容器包装プラスチック	バイオマス残渣	炭水化物
	容器包装以外プラスチック		肉、魚
	紙		
	低品質バイオマス残渣※		野菜
	その他		その他
回収基準	厨芥庫内バイオマス残渣全量	厨芥庫内バイオマス残渣全量	－
	厨芥庫内バイオマス残渣以外中1割		

※夾雑物を多く含み分別困難なものを指す

3. 評価手法

学内に処理機を設置し連続運転を行い、消費電力とともに資源化物量を求める。この結果から処理時のライフサイクル GHG 排出量と処理コストを算出し、製造段階における環境負荷削減効果を推計する。化学肥料・畜産飼料の製造に関しては MiLCA を利用する。焼却処理工程には草津市のケーススタディ [3)]の値を用いた。輸送に関しては改良トンキロ法を使用して算出する。

学内由来厨芥類の排出実態を把握するために調査を行った。調査内容を表 1 に示す。それぞれ厨芥庫内の廃棄物内訳(A)、排出される学内由来厨芥類の全量(B)、排出厨芥類の組成の調査(C)について計 34 回調査した。A は厨芥庫内に廃棄されているごみ袋のうち 1 割をサンプルとして選出して廃棄物質の内訳を調査した。B は全量を計量調査した。C は厨芥類の中からサンプルを採取して調査した。

4. 研究結果

排出実態調査から得られた知見を述べる。

焼却ごみのうち厨芥類は約 50%であった。そのうち、更に半数は夾雑物を多量に含んでいる厨芥だったため、資源化には適さないと考えられた。厨芥類の全量は 10.0[t/年]であり、その内訳として炭水化物・肉・野菜・その他が、44%・22%・31%・3%となった。

次に堆肥及び飼料の製造時の処理機運用から得られた知見を述べる。結果は表 2 のようになった。

表 2 実験結果

	堆肥化	飼料化
投入量あたり消費電力 [kWh/t]	0.97	1.13
資源化量あたり消費電力 [kWh/t]	3.78	3.78
投入量あたり資源化量[t/t]	0.26	0.30
投入量あたり残渣量[t/t]	0.18	

5. おわりに

本研究では、学内に処理機を設置し連続運転を行い、消費電力とともに資源化物量を求めた。この結果から処理時のライフサイクル GHG 排出量と処理コストを算出し、製造段階における環境負荷削減効果を推計した。

学会当日では、シナリオ毎の評価結果について報告する。

6. 謝辞

本研究にあたって立命館生活協同組合からの協力を得た。ここに記して謝意を表する。

7. 参考文献

1) 農林水産省：食品廃棄物等の利用状況等(平成 25 年度推計)〈概念図〉, 平成 25 年度推計値

2) 山田健太・藤井賢彦・荒木肇：日本 LCA 学会誌, 8 (1), (2012), pp. 45−54

3) 天野耕二・曽和朋弘：土木学会論文集G, 63 (4), (2007), pp. 391−402

下水処理-藻類培養統合プロセスにおける導入技術選択に資するライフサイクルアセスメント

Life cycle assessment towards the choice of technologies in the integration of wastewater treatment and algae cultivation

○鈴木征史*[1)]、大野肇[1)]、福島康裕[1)]
Tadashi Suzuki, Hajime Ohno, Yasuhiro Fukushima
1) 東北大学
* suzuki@sis.che.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年、微細藻類由来のバイオ燃料製造に関する研究が活発に行われている。微細藻類からバイオ燃料が製造されるまでには、培養、収穫、濃縮、脱水、抽出、改質といった何段階ものプロセスが必要となり、各プロセスにおいて現在も様々な技術が開発されている。例えば、抽出プロセスに関してだけでも大きく分けて乾式抽出と湿式抽出が存在し、湿式抽出には液液抽出法や水熱可溶化法など様々な技術開発がなされている。このように、プロセスごとの技術選択に対しさまざまな組み合わせが考えられる中で最も効率的にバイオ燃料を製造するためには、導入する技術を適切に選択する必要がある。この技術選択の手段の一つとして、スーパーストラクチャを用いた最適化[1)]が挙げられる。スーパーストラクチャとは、プロセス合成において検討すべきすべての構造をその部分構造として含んだ構造のことを言い、近年、これを微細藻類からの燃料製造プロセスにも適用する試みがなされている[2)]。

また、現在、2011 年の東北大震災によって被災した南蒲生浄化センターにおいて、下水から微細藻類を培養しバイオ燃料を製造するためのプロセス構築のための、要素技術の開発と概念実証研究が行われている[3)]。従来の下水処理プロセスでは、流入する汚水に対し曝気を行い生成した汚泥は脱水焼却している。この曝気や脱水焼却工程における消費エネルギーが大きく、それに伴い多量の温室効果ガス（GHG）が排出されている。しかし、この高環境負荷工程に微細藻類での藻類培養を加えることにより、環境負荷回避および燃料製造を同時に達成することをめざして分野横断型の研究が行われてきた。

我々はこの研究チームの中でデータを集約し、システム化のための研究指針を提案する役割をはたしてきた。本報告では、その一部を報告する。まず、技術の選択について議論するために、基本モデルを設定し LCA を行った。その後、スーパーストラクチャを用いた最適化を行い、様々な要素技術がある中での技術選択の可能性について検討した。

2. 藻類プロセス

2.1 微細藻類の特徴

本報告で想定した微細藻類は *Botryococcus braunii*（B 藻）及び *Aurantiochytrium*（A 藻）の 2 つである。これらの藻類には様々な特徴がある。B 藻は独立栄養藻類であるため光合成を行い二酸化炭素を固定するが、A 藻は従属栄養藻類と呼ばれ光合成を行わない代わりにグルコースなどの単糖を摂取することで成長する。また、B 藻、A 藻どちらも炭化水素を製造する。B 藻から得られる油はボトリオコッセンと呼ばれ、微細藻類の中でも炭化水素含有率が非常に高い(75%)と報告されている[4)]。しかしながら、この B 藻には成長率が遅いという欠点がある。また、B 藻は細胞同士が集合してコロニーを作り、この中に油を溜め込む性質がある。この B 藻の特徴を活かして、ミルキングというプロセスを考える。ミルキングとは微細藻類を生かしたまま、コロニーのみを破砕することで、内部に蓄えられていた油を抽出することで、抽出後の藻類を再培養することができる[5)]。

2.2 基本モデル

本プロジェクト[3)]における基本モデルでは図 1 に示すプロセスでバイオ燃料を製造する。一次処理水を用いて B 藻を培養し、汚泥の可溶化液を用いて A 藻を培養する。これにより外部から培地を投入する必要がないだけでなく、従来下水処理場から排出されていた GHG を回避することができる。B 藻の培養は 2.5 t レースウェイポンドで行い、A 藻の培養は 30 L ジャーファメンタ 2 台で行う。2 種類の藻類から得られた炭化水素を改質することでガソリン代替燃料を得る。また、熱の利用に関しては焼却炉からの廃熱でまかなえるとし、熱源は無尽蔵にあるとした。このプロセスをもとに、機能単位をガソリン 1 MJ 当量とし GHG 排出を計算した。各プロセスのインベントリデータは、プロセスごとの実験データを用いた。また、投入物質の GHG 排出原単位は主に ecoinvent から取得した。

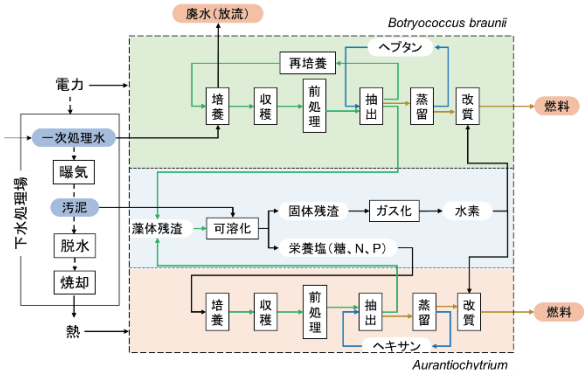


図 1 基本モデルのシステム境界

2.3 スーパーストラクチャを用いた最適化

実際には基本モデルの他にも多くの技術開発が行われている。そこで、基本モデルをベースにスーパーストラクチャを作成し、どのプロセスが最適であるかを検討する。一般的な微細藻類からの燃料製造に関するスーパーストラクチャは図 2 のようになる。このような、考えられるすべての技術とプロセスをスーパーストラクチャとして構築することで、総合的な評価における、プロセス案を提案することができる。最適化は(1)式で示す、混合整数非線形計画法(MINLP)を用いた。

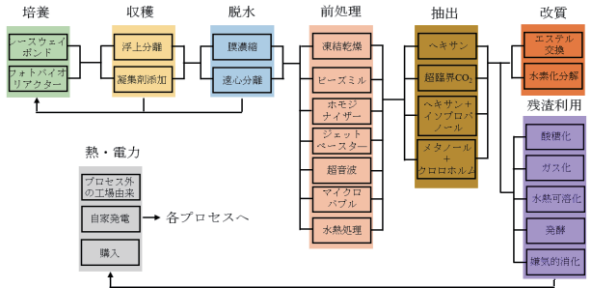


図 2 燃料製造のスーパーストラクチャの例

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & f(x,y) \\ \text{s.t.} \quad & g(x,y) \le 0 \\ & x \in X \ \text{ non-integer} \\ & y \in Y \ \text{ integer} \end{aligned} \qquad (1)$$

3. 結果

基本モデルに関してのLCAの結果、GHG排出は3.47 kg-CO_2eq/MJ-gasoline であることがわかった（図 3 左）。その内訳をみると、A 藻の培地として必要な糖を得るための汚泥の酸糖化プロセスにおいて GHG 排出の寄与が高いことが分かる。この酸糖化プロセスにおける GHG 排出が大きいのは、濃硫酸を用いた酸糖化を行っており、糖化後の糖液は培養に用いるため、中和の必要があるためである。現状は中和剤に炭酸カルシウムを使用しており、その製造に由来する GHG 排出が大きくなっている。そこで、糖化液からの硫酸回収を研究している文献を調査し Heinonenn (2012)[6]のプロセスが導入されることを仮定した。糖化後の含硫酸糖化液はイオン交換樹脂を用いたクロマト分離により、糖化液と回収硫酸に分けられ、この回収硫酸は酸糖化に再利用される。文献値では硫酸回収率は 95 %を達成している。硫酸回収プロセスを導入した場合、GHG 排出は 0.54 kg-CO_2eq/MJ-gasoline まで減少した（図 3 右）。また、石油由来のガソリンとの GHG 排出を比較することで、ブレークイーブン線を作成することができ、これによりどの技術がどれだけ改善可能かの指標とすることができる。

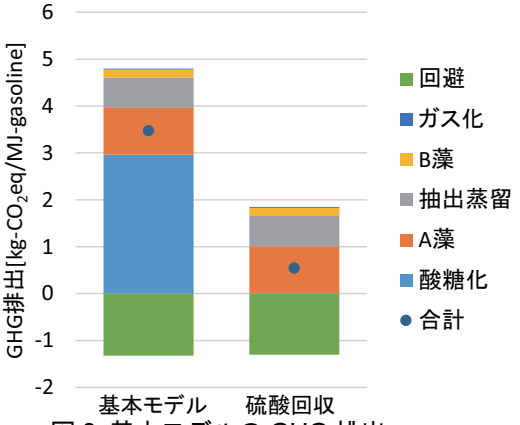


図 3 基本モデルの GHG 排出

4. おわりに

本報告では、LCA を用いて、技術選択や技術の改善目標を提示できることを示した。また、新たに開発された技術について、スーパーストラクチャに追加することで、その技術の導入可能性を検討するための支援ツールとすることを目指す。

謝辞

本研究は文部科学省「東北復興のためのクリーンエネルギー研究開発推進事業」の支援を受けている。筑波大、東北大の各グループメンバー並びに仙台市、南蒲生浄化センターの職員の方々にデータや知見の提供をしていただいた。

引用文献

1) Grossmann I.: Computers and Chemical engineering, 9, (1985), pp 463-482
2) Martin M., Grossmann I.: AICHE J, 59, (2013), pp 2872-2883
3) 東北復興次世代エネルギー研究開発機構：“東北復興次世代エネルギー研究開発プロジェクト“,（オンライン），入手先< http://net-tohoku.sakura.ne.jp/wp/task2 >,（参照 2016-12-26）
4) Chisti Y.: Biotechnology Advances, 25, (2007), pp 294-306
5) Navid R.: J Apply Phycol, 26, (2014), pp 1453-1463
6) Heinonen J.: J Chem Technol Biotechnol, 87, (2012), pp 689-696

セメント直接原料化の見直しに向けた脱水汚泥資源化オプションの比較評価

Comparative assessment of recycling options of sewage sludge collaborating with cement industry

○中久保豊彦*[1)]、小池夏帆[2)]
Toyohiko Nakakubo, Kaho Koike
1) お茶の水女子大学
* nakakubo.toyohiko@ocha.ac.jp

1. はじめに

下水汚泥のリサイクルは脱水汚泥の固形物量ベースに基づき評価されており、リサイクル率は約 78%（2011 年度値）に到達している。一方、近年では下水汚泥中の有機分の利活用が重視されており、有機物量ベースに基づく下水道バイオマス利用率での評価が開始している。2012 年度における下水道バイオマス利用率は 23.9 %に留まっており、温室効果ガス排出削減の観点から下水汚泥をバイオマスエネルギーとして活用する循環システムへと転換することが求められている。

関東圏においてはセメント産業が有する資源化インフラ（廃棄物の受入能力）を積極的に活用してきた経緯があり、首都圏では汚泥焼却灰のセメント原料化を、地方都市では脱水汚泥のセメント原料化（以下、直接セメント原料化）を採用している下水処理場が多数を占める。ここで、直接セメント原料化に着目すると、汚泥中の有機物の活用は図れないため、下水道バイオマス利用率の向上には貢献できていない。そのため、直接セメント原料化に対する見直しが求められる。一方、脱水汚泥の焼却や固形燃料化には、設備投資や維持管理を含め多額の予算を必要とするため、財政力の観点から地方都市では導入が容易でない。そこで本研究では、脱水汚泥の直接セメント原料化の実態把握を行った上で、環境性・経済性を評価し、その継続の可否に関する助言生産を行うことを目的とした。

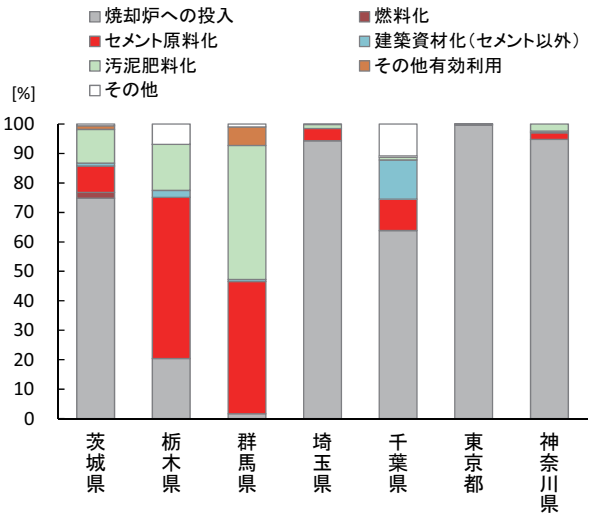


図1　脱水汚泥の焼却・資源化の割合

2. 関東圏における直接セメント原料化の現状

下水道統計[1)]を用い、関東 7 都県を対象とした脱水汚泥の焼却・資源化の割合を分析した結果を**図 1** に示す。割合でみると、脱水汚泥の直接セメント原料化は栃木県で 55%、群馬県で 45%と高く、これら 2 県が脱水汚泥の資源化経路として、直接セメント原料化に依存している県であると言える。

また、下水処理場における下水汚泥の処理プロセスの特徴として、群馬県では消化槽の導入率が低く、栃木県では高いことが挙げられ、直接脱水汚泥（群馬県）、消化脱水汚泥（栃木県）、双方での環境性・経済性の検証を行うことができる。そこで本稿では、群馬県、栃木県の 2 県を対象とすることとした。

3. LCI 分析の枠組み

比較対象とする資源循環ケースとして、群馬県を**図 2** に、栃木県を**図 3** に示す。下水道統計（2013 年度実績）[1)]より、群馬県については直接脱水汚泥のセメント原料化を、栃木県については消化脱水汚泥のセメント

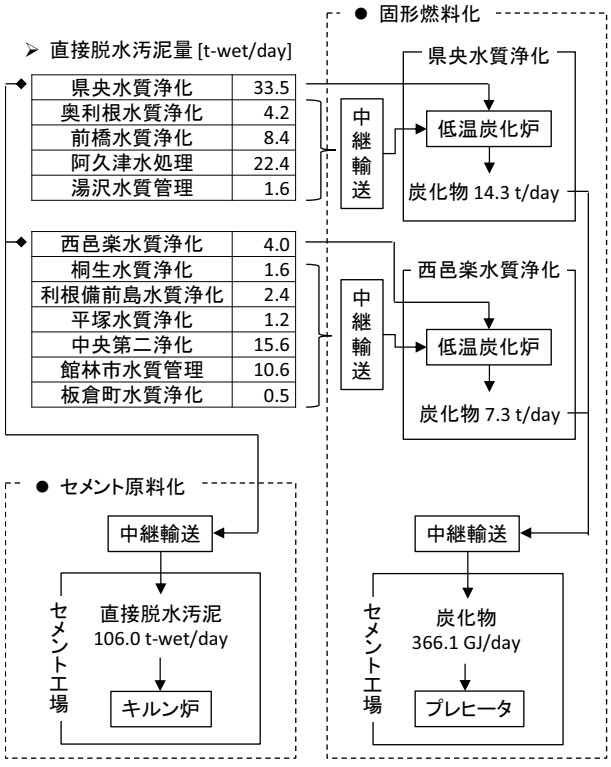


図2　群馬県におけるケース（受入先：熊谷工場）

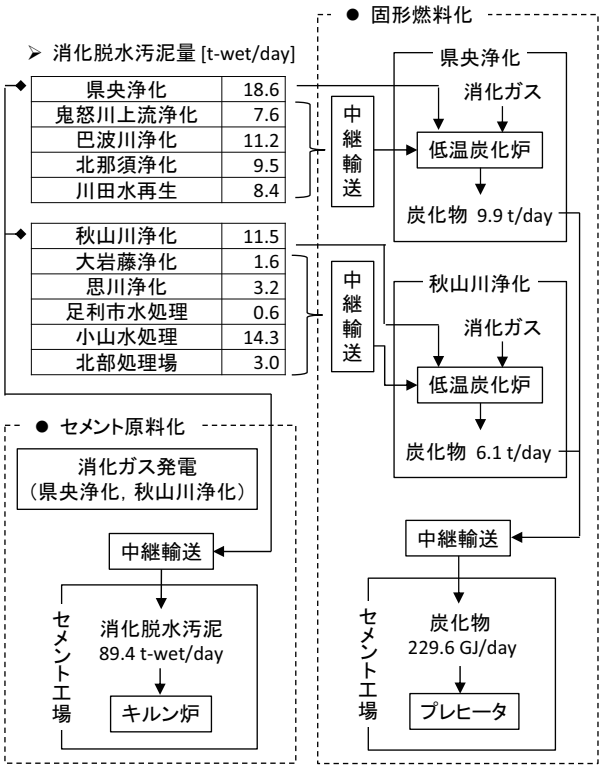


図3　栃木県におけるケース（受入先：栃木工場）

原料化を採用している下水処理場を対象とした。

両県ともに、セメント原料化ケースにおいては、脱水汚泥をセメント工場にトラック輸送し、乾燥させずにキルンに投入する方式をとる。一方で、固形燃料化ケースにおいては、脱水汚泥は集約拠点となる 2 箇所の下水処理場に集められ、低温炭化炉で固形燃料へと変換されるとした。栃木県においては、集約拠点の消化ガスを活用し、汚泥乾燥用の熱の一部が消化ガスによる賄われる。栃木県のセメント原料化ケースでは、固形燃料化ケースで集約拠点となる下水処理場の消化ガスは発電に利用されるとした。

4. 評価結果

温室効果ガス排出量の評価結果を**図 4** に示す。セメント原料化ケースでは、セメント工場において汚泥中の水分を飛ばすための石炭消費が増加するため、その分の CO_2 排出量が計上される。一方で、固形燃料化ケースでは汚泥の乾燥に要する燃料消費が発生するが、汚泥中有機分を廃プラ代替（燃料代替）として活用できるため、CO_2 排出削減の寄与も大きい。群馬県で 135%、栃木県で 44%の CO_2 排出削減効果が得られた。

一方、**図 5** に示す事業コストによる評価では、固形燃料化に転換することで群馬県では 1.3 倍、栃木県では 1.6 倍に増加する結果となった。固形燃料化ケースでは、汚泥の乾燥に要する A 重油の燃料代、低温炭化設備の導入に係る諸経費（人件費、建設費、補修費）が発生する。一方、現状の市場価格では炭化物を 100 円/t で販売することとなるため、炭化物の販売による収益が小さく、そのことがコストの増加を招いている。

炭化物の価格を一般炭と同じ 410 円/GJ（発熱量ベースでの概算）に変更して再推計すると、固形燃料化ケースの事業コストは群馬県で 740 [百万円]、栃木県で 686 [百万円] となり、事業コストが改善する。しかしながら、炭化物は廃プラと競合し、石炭消費産業（セメント産業、製紙産業など）は廃プラを逆有償で入手できるため、炭化物の価格を上げることは困難となる。このことが、直接セメント原料化から固形燃料化への転換を阻害する一要因であることが指摘される。

5. 参考文献

1) 日本下水道協会，下水道統計　平成 25 年度版，(2015).

謝辞：本研究は環境省・環境研究総合推進費（課題番号：3K143006）の支援を受けて実施されました。

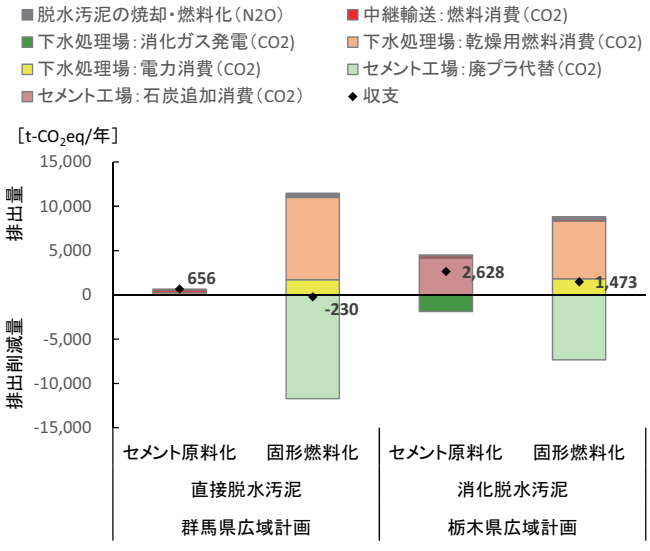


図4　温室効果ガス排出量の評価結果

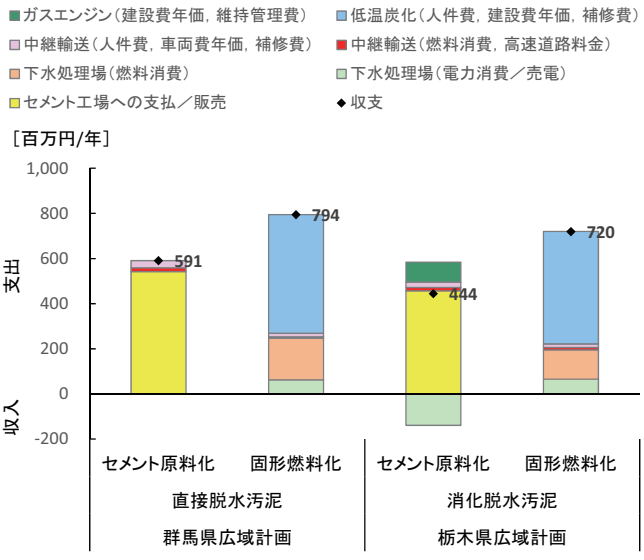


図5　事業コストの評価結果

廃棄物焼却熱の産業利用システムでの主体間 GHG アカウンティング配分手法の検討

GHG accounting and allocation method of heat exchange system between incineration and energy intensive industry

○大西 悟*[1)]、Dou Yi[2)3)]、藤井 実[2)3)]、稲葉陸太[2)]
Satoshi Ohnishi、 Dou Yi、 Minoru Fujii、Rokuta Inaba
1) 東京理科大学、 2) 国立環境研究所、3) 名古屋大学
*ohnishi-s@rs.tus.ac.jp

1. はじめに

温室効果ガスの大幅削減を達成するには、異業種間および複数部門間での資源・エネルギー連携が一つの鍵となる。本報告では、廃棄物焼却熱の産業利用システムを取り上げ、実装の障壁となりうる各主体の費用便益の配分方法を議論する。特に、環境的な便益の観点から、システム全体の便益の主体間への配分を考慮しうる GHG アカウンティング手法を検討する。

2. 廃棄物からの高効率エネルギー回収

異業種間および複数部門間での資源・エネルギー連携の実装に向けては、ある産業・民生部門から出力される副産物・廃棄物や熱・電力を他の主体の資源・エネルギーへと変換する社会システムが必要不可欠である。なかでも、日本では廃棄物処理部門がその中核的な役割を担ってきた。例えば、民生部門から排出された廃プラスチック・紙を分別・回収し、産業部門において原燃料として利活用する社会システムはすでに確立されており、その効果が報告されている。だが、その総量は一般廃棄物処理量の 1.3% 程度（以下、2014 年度）である。

一方、処理量の 80%を占める清掃工場での直接焼却からのエネルギー回収は、発電が主であり、間接的に他部門へのエネルギー供給を実現してきた。しかし、発電施設をもつ清掃工場数は 28.0%にとどまり、設備を有していても発電効率は平均 12.8%にすぎない。さらに、現状での発電効率は最大でも 25.5%にとどまる。そのため、これまで以上に高効率な発電を促進することに加えて、清掃工場からの回収熱利用の重要性が指摘されてきた。

焼却熱の利用は、特に欧州においては熱電併給の拠点として位置づけられ、再生可能なエネルギーシステムの一翼を担っている。日本でもいくつかの自治体が地域熱供給事業を実施している。しかし、民生利用を想定した場合、エクセルギーの観点から、焼却炉から回収した 300～400℃の蒸気を民生の 20 数℃の暖房や、40℃の給湯に利用するのは非効率であり、競合するヒートポンプ等の代替技術と比べて、経済面でも劣るという課題が明らかになっている。

以上を踏まえ、実現可能性を考慮すると、焼却熱からの高効率なエネルギー回収を実装する社会システムとして、

- 100～300℃程度の熱を需要する、産業への熱供給
- 発電を犠牲にしない 50～60℃の低温熱の民生部門への供給

が有望である[1)]。本報告では、前システムを対象とする。

3. 適切な主体間の費用便益配分に向けた基礎的検討

焼却熱はボイラー蒸気を代替するが、技術的にはすでに確立しており、化石燃料価格次第で運用費の直接的な削減が期待できる。だが、事業化を検討する場合、民生・廃棄物処理・産業部門の利害が直接的に関係するため、調整の煩雑さが障壁となってきた。特に、ビジネスモデルの観点から、パイプラインなどの初期費用の負担・補助の有無、蒸気価格と償還期間の設定、安定供給の保証が重要だが、それを定める社会制度の整備が不十分で、不確実性が大きいために、実装しづらい状況が続いてきた。

加えて、気候変動対策が本格化したことをうけ、環境的な便益の配分もビジネスモデルに大きな影響を与えるようになってきた。つまり、GHG 排出に経済的価値が付与された場合には、法規制、炭素への価格付与、補助金、FIT などの公共の制度の設計により主体間の経済的な費用便益が大きく変動するため、意思決定を左右する可能性がある。こうした不確実性を取り除くには、GHG アカウンティングに基づいた公平性と透明性の高い算定・配分手法の確立が必要不可欠である。

4. GHG アカウンティング配分手法の検討

焼却熱の産業利用システムを**図 1** に定義する。熱供給を行う廃棄物処理部門は、民生部門から排出、回収された一般廃棄物を焼却炉で処理し、焼却による熱エネルギーをボイラー蒸気として回収する。蒸気は、高圧蒸気ヘッダーからの直接熱供給、蒸気タービンでの発電、蒸気タービンからの抽気熱供給などの選択肢がある。熱管理事業者は、パイプラインを介して蒸気を搬送したのち、製造プロセスに投入する。搬送システムは、1 対 1 の熱管理事業では供給側が管理することが一般的だが、複数主体による

熱利用ネットワークを想定し、独立した主体として定義する。熱管理事業者は、熱搬送に伴う減損の管理やバックアップボイラーによる安定供給の実現を志向する。搬送された蒸気は、製造プロセスにおいてベースラインで使用していた化石燃料を代替する。システムに求める機能は、一般廃棄物発生量WST^i_{inc}の適正処理、製品の生産に必要な熱量ST^i_{rpp} 、質の確保である。

システム全体の環境的な便益は、他の産業部門での発電削減量$\Delta ELE^i_{inc_out}$と化石燃料供給削減量$\Delta Fuel^i_{gas}$に起因する。なお、この算定値は、発電、蒸気回収、蒸気搬送、製造プロセスの各技術変数に依存する。

ただし、各主体に着目した場合、システム全体の GHG 排出削減量のすべてが正当に配分されるわけではない。

清掃工場に着目すると、温対法の枠組みでは、一般廃棄物処理で発電した電力や回収した熱を外部に販売したとしてもエネルギー起源 CO_2 から控除することができない。そのため、GHG 排出削減という環境的な便益は、回収熱の高効率利用を進めるインセンティブになりえない。しかし、実際には、清掃工場は、FIT を通じて環境的な便益を経済的な便益に変換することができることに加え、建設・更新時の補助金支給の要件として焼却からのエネルギー回収効率を規定しており、GHG 排出削減による環境的な便益は極めて重要な意思決定要因となっている。だが、熱利用を検討する場合には課題がある。電気のエクセルギー率が常に 1 であることから発電効率が投入熱量と売電量（＝発電量－施設内使用量）で定義できるのに対し、熱利用は利用する温度によってエクセルギー効率が異なる。よって、発電と熱利用を比較する場合、熱量に基づく比較評価はそぐわず、比較手法を検討する必要がある。

熱を利用する産業では、これまで化石燃料用ボイラーによって得ていた蒸気を外部からの供給蒸気に置き換える。よって、製造プロセスからの GHG 削減量は、供給する産業用蒸気の GHG 換算係数（=0.060t-CO_2/GJ）と蒸気 1GJ を発生するために必要な都市ガスの GHG 換算係数（=0.063t-CO_2/GJ）との差から算定する（ボイラー効率は 79%としている）。しかし、産業用蒸気の GHG 換算係数は温対法で定めた一般値であり、本システムの環境便益を正当に評価してない。清掃工場の回収熱は、廃棄物の適正処理を行う際には必ず発生するものであり、エネルギー回収による他部門での削減効果を適正に評価する方法を検討する必要がある。

熱管理事業者は、熱減損とバックアップボイラーの使用により環境的な費用をもたらすが、システム全体の環境的な便益をもたらすために必要なサブシステムととらえると正当な配分量を主張することも考えうる。

5. まとめ

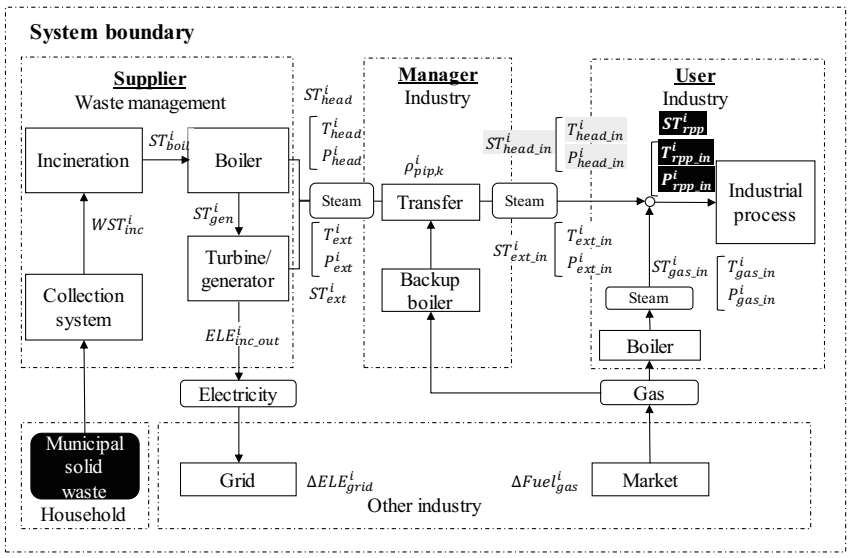
各主体にとっての環境的な費用便益は、法規制、炭素への価格付与、補助金、FIT などの公共の制度を介して経済的な費用便益に転嫁される。焼却熱の産業利用システムの実装を考える場合、GHG アカウンティングを用いた費用便益の配分手法を検討することでビジネスモデルの不確実性を緩和することができ、障壁を減じることができる。今後は、実態を十分に反映させたうえで、経済的な費用便益とライフサイクルでの環境的な便益を統合させたミクロ経済分析手法を構築していく。

謝辞

本研究は、環境省の環境研究総合推進費（2-1404、3K143016）により実施された。関係者に謝意を表する。

引用文献

1） Fujii, M.,Ohnishi S., Inaba, R.,Tasaki,, T.,: ISIE 5th Asian-Pacific conference (2016)



Notation	Description	Unit
WST^i_{inc}	一般廃棄物処理量	ton/day
ST^i_t	蒸気量	kg/h
T^i_t	蒸気の温度	℃
P^i_t	蒸気の圧力	MPa
$ELE^i_{inc_out}$	焼却発電売電量	kW
$\rho^i_{pip,k}$	パイプラインに関する技術変数	-
ΔELE^i_{grid}	系統電力削減量	kW
$\Delta Fuel^i_{gas}$	化石燃削減量	GJ/day

t=boil :蒸気ボイラーによる回収熱
t=head :高圧ヘッダーからの回収熱
t=gen :蒸気タービンへの投入熱
t=ext :蒸気タービンからの抽気熱
t=head_in :搬送後の高圧ヘッダーからの回収熱（＝製造プロセス投入熱）
t=ext_in :搬送後の抽気熱（＝製造プロセス投入熱）
t=rpp :製造プロセスで必要な熱

図 1：焼却熱の産業利用のシステム図

責任あるニッケル資源利用に向けたサプライチェーンリスク要因解析

Analysis of Supply Chain Risk Factors for Responsible Nickel Use

○佐々木翔*[1)]、松八重一代 [1)]、中島謙一 [2)]、村上進亮 [3)]、長坂徹也 [1)]
Sho Sasaki, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, Shinsuke Murakami, Tetsuya Nagasaka
1）東北大学, 2）国立環境研究所, 3）東京大学
* sho.sasaki.r4@dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

国際社会において、資源利用に伴う諸問題への関心が高まっており、経済活動に伴う環境問題だけでなく、社会的側面の影響の管理が重要視されている [1), 2), 3)]。特に、鉱物資源は偏在しており、その資源産出国あるいは生産国においては、鉱石輸出禁止政策や、自然災害・ストライキ・事故等による鉱山・製錬所の操業への影響などの問題が発生している [4), 5), 6)]。しかしながら、グローバル化された経済システムにおいては、影響の原因者と影響を被る主体との空間的乖離が生じており、それが責任の所在を不明確にしている [7)]。そのため、多様なリスク要因の管理と物質フロー・サプライチェーン情報に基づいたリスク要因の解析が求められる。

そこで本研究では、①リスク要因を捉える枠組み設計及びニッケルの採掘・製錬部分を事例として、②ニッケル資源の供給障害に関する事例の要因解析、③ニッケル一次資源の採掘に伴う土地改変量の推計を行うことで、ニッケル資源の持続可能な調達・利用のための指針を提言することを目的とする。ここでニッケルは、新興国の経済成長や低炭素社会の実現のための素材として必要不可欠であるため、今後も更なる需要の拡大が予想されている [8)]鉱物資源の１つである。また、ニッケル資源の採掘・製錬部分においても、土地改変に伴う生物多様性への影響や、環境汚染等の問題が顕著になっており [9)]、持続可能な資源管理が緊要となっている。

①、②については、第 11 回日本 LCA 学会において発表済みであるため、本要旨では、③の推計結果についてのみ述べる。

2. 方法

本研究では、採掘に伴う土地改変量の一つ目の指標として土地改変面積を、また二つ目の指標として、物質集約度(Material intensity)を表す指標である TMR(Total material requirement)を採用した。

土地改変面積の推計については、世界のニッケル鉱山のニッケル鉱石採掘量（t-Ni in ore）に、各ニッケル鉱山の土地利用強度（Land use intensity, m2 / t-Ni in ore）を乗じることで推計を行った。ここで、ニッケル鉱石の採掘に伴う土地利用強度とは、単位ニッケル量を含むニッケル鉱石の採掘に伴う土地改変面積とする。鉱山ごとの土地利用強度の設定については、Tang らの推計手法・結果に基づき設定した。Tang らの推計手法では、鉱山毎に様々なパラメータを必要とするため、推計可能な鉱山は、操業状況などが公表されている鉱山に限定される。このため剝土比などの必要なパラメータが得られない鉱山については、Tang ら [10)]の推計結果に基づいて作成した相関式により土地利用強度を設定した。

TMR については、鉱床種類（Laterite or Sulfide）と採掘方法（Open Pit or Underground）の組み合わせ及び、剝土比を用いて推計モデルを構築し、推計を行った。式（1）に推計式を示す。

$$TMR_o = (M_o + M_s)/M_o = 1 + S \qquad \text{式(1)}$$

ここで、TMR_oは単位ニッケル量を含むニッケル鉱石の採掘に伴う TMR（t / t-Ni in ore）、M_oは単位ニッケル量を含むニッケル鉱石採掘量(t/t-Ni)、Ms は単位ニッケル量を含むニッケル鉱石採掘に伴う剝土量(t/t-Ni)、Sは剝土比を示している。剝土比については、各種文献 [11),12),13),14)]から数値を引用した。剝土比が得られない鉱山については、面積推計の場合と同様に比較的多くの鉱山においてパラメータの得やすい鉱石品位と式（1）による推計結果との相関式を作成し、単位ニッケル量を含むニッケル鉱石の採掘に伴う TMR を設定した。

また、土地改変面積、TMR のいずれの推計においても、副産物による影響を考慮するために、鉱石品位と価格でアロケーションを行った。しかしながら、ニッケル以外の鉱種が主な生産を占めている鉱山や、白金族等の副産物の鉱石品位が不明である鉱山については、その鉱山が属する国・地域の平均値を用いた。また、剝土比などのパラメーが得られず、相関式を適用した鉱山の品位の範囲は、それぞれの推計において剝土比が得られた鉱山の品位の範囲に合わせた。剝土比が得られず、相関式も適用できない鉱山については、その国・地域の平均値を用いた。尚、世界の各鉱山の採掘方法、鉱種、鉱石品位、ニッケル鉱石生産量については、RMD [11)]のものを用いた。

3. 結果と考察

Figure 1 に 2005 年及び 2011 年における世界のニッケル鉱山におけるニッケル鉱石採掘に伴う土地改変量の推計結果を示す。

Figure 1 より、土地改変面積及び TMR のいずれにおいても、露天掘り（OP）による土地改変が支配的であることがわかる。これは、OP ではズリと呼ばれる鉱石採掘の際に発生する岩石・土砂等の鉱業廃棄物が大量に発生することに起因する。

また、国別に見ると、2005 年ではオーストラリア、インドネシア、ロシア、ブラジル等の国・地域が、2011 年には、特にフィリピン、オーストラリア、インドネシア、ブラジルといった国・地域が大規模な土地改変を行っていることがわかる。さらに、年代別に見ると、2005 年から 2011 年にかけて土地改変面積及び TMR が大きく増大していることが分かる。これは、フィリピンにおいて新規鉱山の開発が進められたことにより、鉱石採掘量が増大したことに起因していると考えられる。

土地改変面積と TMR の結果を比較すると、改変が大きい国・地域の順位に差異が見られる。これは、面積推計と TMR 推計では、剥土比などのパラメータが得られず、相関式を適用した品位の範囲が異なることに起因していると考えられる。

4. 終わりに

土地改変量の推計結果より、大規模な土地改変を行っている国・地域があることが明らかになった。これらの中には、ニッケル資源の採掘に伴う生物多様性への影響や地域コミュニティとの地権をめぐる紛争など様々な問題が実際に確認されている [4), 5), 6), 9)]国・地域もある。これによって、資源採掘が規制され、供給の制約へと発展する可能性がある。そのため、責任あるニッケル資源の調達・利用のためには、供給側としては、環境や人権、地域コミュニティとの関係等に配慮した操業を行うことが求められる。また調達側としては、それらに配慮した操業を行う企業または国・地域と取引を行うことが求められる。さらに、技術側としては、二次資源利用の高度化・高効率化を進めることで、一次資源の採掘による環境負荷や供給障害へと発展するリスクを低減できると考えられる。

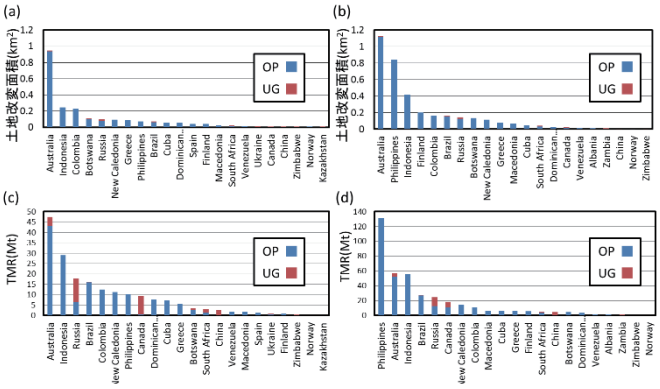


Figure 1 世界のニッケル鉱石採掘に伴う土地改変量

(a)土地改変面積：2005 年、(b)土地改変面積：2011 年

(c)TMR：2005 年、(d)TMR：2011 年

5. 引用文献

1) United Nations: Sustainable “Development Goals(SDGs)”,入手先 <http://www.un.org/sustainabledevelopment/>, （参照 2016-12-20）

2) 国連グローバル・コンパクト：“国連グローバル・コンパクトの 10 原則” 入手先 <https://www.unglobalcompact.org/what-is-gc/mission/principles>,（参照 2016-12-20）

3) Tülin Aktin, Zeynep Gergin：Journal of Cleaner Production 113 , (2016), 767-780

4) JOGMEC 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, “ニュース・フラッシュ”, 入手先 <http://mric.jogmec.go.jp/>,（参照 2016-01-04）

5) USGS：“Mineral Year Book” 入手先 <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/myb.html>, （参照 2017-01-03）

6) 掘琢磨:地質ニュース 623 号, (2006), 21-41 頁

7) Kanemoto, K.; Lenzen, M.; Peters, G. P.; Moran, D. D.; Geschke, A. Environ. Sci. Technol. 2011, 46, 172−179.

8) 尾崎佳智、岡部徹、香川豊: MMIJ, Vol.130, (2014), p93-103

9) Gavin M.Mudd: Ore Geology Reviews, 38, (2010), 9–26

10) L.Tang, K.Nakajima, S.Murakami, N.Itsubo, T.Matsuda: Int J Life Cycle Assess, 21, (2016), 51–59

11) SNL Metals & Mining, Raw Materials Data, 入手先 <http://www.intierrarmg.com/Products/Raw-Materials-Data.aspx>, （参照 2015-2-2)

12) InfoMine Inc., World Mine Cost Data Exchange

13) Berger, V.I., Singer, D.A., Bliss, J.D., and Moring, B.C. (2011), Ni-Co laterite deposits of the world; database and grade and tonnage models: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1058, 入手先 <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1058/> ,（参照 2016-03）

14) Crundwell, F.K., et al: Elsevier, (2011), 610p

包括的なリスク要因抽出に基づいた銅のサプライチェーンリスク解析

Supply chain risk analysis of copper based on a comprehensive risk factor

○山﨑裕貴*[1)]、松八重一代[1)]、中島謙一[2)]、村上進亮[3)]、長坂徹也[1)]

Yuki Yamazaki, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, Shinsuke Murakami, Tetsuya Nagasaka

1) 東北大学，2)（国研）国立環境研究所，3) 東京大学

* yamazaki.yuuki.t6@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

銅は、電線や伸銅品として優れた性能を有する現代生活で重要な金属である。そのため、世界の銅消費量は年々増加を続けており、今後も途上国における経済発展を支えるインフラ整備や次世代自動車の普及などを一因として、世界的な銅の需要拡大が見込まれる[1)]。一方で、銅資源のサプライチェーンにおいては多様なリスクが潜在している。鉱山活動に伴う事故や災害等の直接的なリスクに加え、環境負荷排出や、過剰な資源ナショナリズム等の間接的に供給障害を及ぼす環境・社会的リスクも懸念される。特に、昨今では米金融規制改革法に代表されるように、ものつくりのサプライチェーンの川下に位置する企業であっても、最上流の資源開発まで遡って責任を問われる時代となっている[2)]。ゆえに、戦略的な銅資源の利用にはこれらの直接的及び間接的なリスクをより広範かつ包括的に捉えることが重要であるといえる。

これらのサプライチェーンリスクに関する様々な先行研究や議論は、各々で対象とする主体や扱うリスク要因が異なることから、リスクを広範に捉えることが困難であったが、佐々木らの研究により、それらの既存の議論が把握・整理され、鉱物資源供給に内在するリスク要因をより広範に捉える新たな枠組みを提案された[3)]。

本研究では、①佐々木らの枠組みによる銅のサプライチェーン全体のリスク要因の抽出・整理及び、②産業連関分析マテリアルフロー解析モデル（WIO-MFA モデル）[4)]と財務省貿易統計[5)]を使用し、日本の製品、素材、鉱石由来の各国別銅輸入量の算出による日本の銅供給構造の把握を行い、銅のサプライチェーン全体の広範なリスクを考慮した戦略的な銅資源利用に向けた課題の抽出を目的とする。

2. 手法

2.1 銅を対象とした供給障害に関する事例収集

2000 年～2015 年の銅の供給障害に関わる事例を、銅のサプライチェーン全体（採掘、加工・精錬、輸送・保管、製造、再資源化）を対象に、報告書や Web ニュース[6)7)]から収集を行った。また、本研究で用いたリスク要因の分類表を表 1 に示す。直接・間接的両方のリスク要因を捉えた網羅的な分類表であり、この表を基に収集事例の分類分けを行った。

表 1 ：サプライチェーンリスク要因分類表

大分類	中分類	キーワード
経済	ストライキ	ストライキ、従業員解雇、雇用条件
	市況の変動	需要の変動・低迷、コモディティ価格の変動・低迷、為替レートの変動、減産
	エネルギー/インフラ不足	エネルギー不足、電力不足、水不足、インフラ寸断
	事業所の経営状況の混乱	経営状況の混乱、株主間紛争、企業の買収
	原料調達の障害	原料不足、主要サプライヤーの閉鎖、二次サプライヤーの不足
	参入障壁	参入障壁
	事業所の生産管理	需要予測の失敗、生産能力、労働力の不足、商品価値、陳腐化、在庫管理（在庫保管費）
	知的財産権	知的財産権の違反、模造品
環境	パンデミック	パンデミック、伝染病の拡大
	自然災害	地震、火山活動、津波、土砂災害、地盤沈下
	異常気象	豪雨、サイクロン、ハリケーン
	環境汚染	生物多様性への影響、土地改変、土壌汚染、水質汚染、大気汚染
	資源の枯渇	資源の枯渇、鉱山の枯渇
地政	輸送障害	輸送ルート寸断、国境での遅れ、貿易港の停止
	大量破壊兵器の所持	核/化学/生物兵器
	テロ	テロ
	政情不安	紛争・内乱・暴動、汚職、財政難
	貿易障害	資源ナショナリズム、貿易規制、関税
	二国間の関係	経済制裁、資産凍結
	法的な操業停止	環境規制、鉱業ライセンスの停止、政府と会社との契約期限終了
社会	社会的操業認可	子供の強制労働、地域コミュニティとの関係、環境保護団体からの抗議、違法鉱業
	食料不足	食料不足、貧困
	統制されない移住	統制されない移住
	都市計画の失敗	都市計画の失敗
	ジェンダー差別	男女差別、女性参政権
	不十分な教育	非識字率
	外部のストライキに巻き込まれる	外部のストライキに巻き込まれる
技術	テクノロジーの悪用	3Dプリンター、人工知能、ジオエンジニアリングの悪用
	データ・セキュリティ/ITに関わるインシデント	ITインフラ崩壊、サイバー攻撃、データの流出・盗難
	設備の事故/故障/修理	設備の事故/故障/修理
	輸送リスク	供給不安を煽る報道

2.2 貿易統計と WIO-MFA の接続

WIO-MFA モデルは、2005 年の国内での産業活動を網羅した産業連関表を基に、約 400 部門の製品に対して組成分析が可能である。このモデルによって、伸銅品や電線に限らず、製品中の銅量を網羅的に組成分析することが可能となる。

なお、モデル中では、分析対象のマテリアル M を設定し、式(1)を用いて製品 P 百万円あたりに含まれる M の重量(t)である組成 C_{MP} を算出する。

$$C_{MP} = \tilde{A}_{MP}\left(I - \tilde{A}_{PP}\right)^{-1} \cdots (1)$$

ここで、(1)式の$\tilde{A}_{MP}$及び$\tilde{A}_{PP}$は歩留まり落ちや非物質投入を排除する投入係数行列であり、それぞれ P の単位生産あたりの M の物量投入、P の単位生産あたりの中間製品の投入を表す。

しかし、WIO-MFA モデルの部門は、2005 年の産業連関表を基に設けられており、直接貿易統計と対応することは困難である。ゆえに、本研究では WIO-MFA モデル→産業連関表→貿易統計の順に部門を対応させ、WIO-MFA モデルと貿易統計の接続を行い、その後、2005 年（暦年）の貿易額とC_{MP}から製品中の銅量を推算した。また、WIO-MFA モデルでは組成を算出でき

ない素材部門の銅製品や鉱石は、文献値 [6]の組成を用いて、貿易統計の 2005 年累計重量（1 月～12 月）から銅量に換算した。

3. 結果

3.1 銅供給障害に関わるリスク要因

収集事例をキーワードの抽出・整理により分類分けを行い、日本の銅輸入国順に並べた各国別の収集件数を図 1 に示す。現在までに 1139 件の事例が収集されており、銅の輸入先の上位 10 国では、経済に属するリスク要因が、175 件、環境が 95 件、地政が 71 件、社会が 47 件、技術が 70 件抽出された。また、チリに属する要因としては、165 件が抽出され、他の国に比べ顕著に多くの事例が収集された。

しかし、実際に収集事例の分類分けを行うにあたり、収集に使用した報告書や Web ニュースの発行機関によって、報告される情報に偏りや不備が存在するために定量的に取り扱うことが困難であることなどが課題として挙げられる。

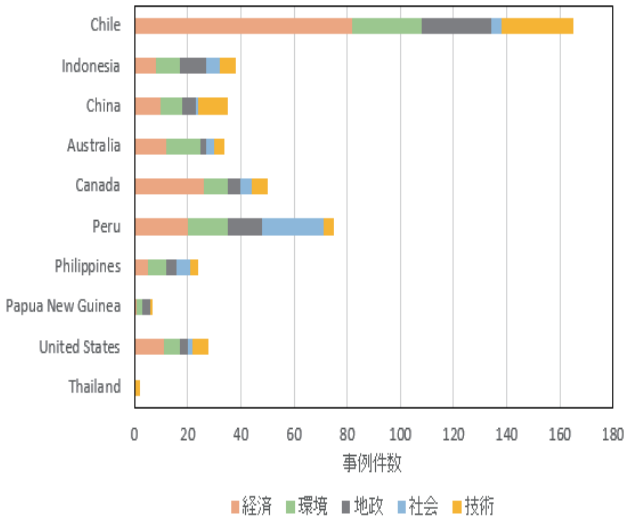


図 1 ：銅の供給障害に関わる事例件数

3.2 日本の銅輸入量

日本に輸入される製品中の銅を含めた 2005 年の日本の銅輸入量を国別に推算した結果を図 2 に示した。鉱石は貿易統計コード 2603：銅鉱（精鉱を含む。）、素材は、7401～7406：銅のマット及びセメントカッパー（沈殿銅）～銅の粉及びフレーク、製品は、鉱石、素材、食料品を除いたその他の製品中のそれぞれの銅量の総計を示している。製品中の銅を含めた日本の銅輸入量は、鉱石由来が 1205 千 t、素材由来が 176 千 t、製品由来が 522 千 t であり、また、日本に輸入される銅の形態には輸入国ごとにそれぞれ顕著な傾向が見られることがわかった。

しかし、WIO-MFA モデルには、『非鉄金属屑』の部門があり、一部銅くずが含まれていると思われる。また、使用した文献の組成値も粗い部分が存在するため、より詳細な分析には、WIO-MFA モデルの同部門の細分化などが検討課題として挙げられる。

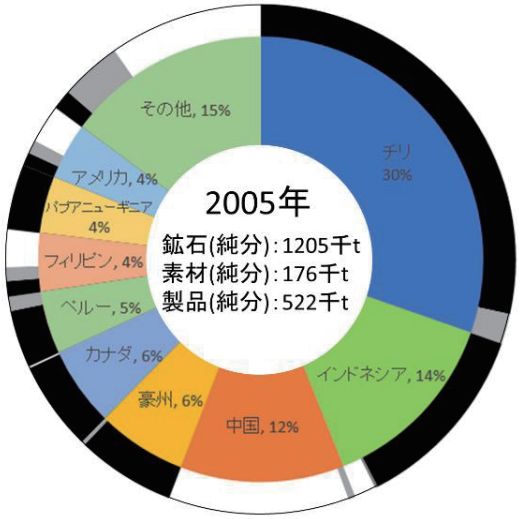


図 2：日本の国及び形態別銅輸入量（外円は黒：鉱石、灰：素材、白：製品由来の各国からの輸入銅量を示す。）

4. おわりに

WIO-MFA モデルを使用し、製品を加味した日本への銅供給の定量的な把握と共に、事例解析によって、銅のサプライチェーンに潜む広範なリスク要因の包括的な定性解析を行うことが出来た。広範かつ包括的な銅のサプライチェーンリスク解析に向けて、今後より多くの情報源からの情報収集と各リスク要因の定量化、また WIO-MFA モデルの銅資源における細分化に取り組む予定である。

5. 引用文献

1) 伊藤俊秀,陳友晴,伊藤正一: Journal of MMIJ Vol 124, (2008), pp.856-863

2) 谷口正次: Journal of MMIJ Vol 131, (2015), pp.588-591

3) 佐々木翔,松八重一代,中島謙一,長坂徹也: ”第 11 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集”,Tokyo,(2016),pp.236-237

4) S.NAKAMURA and K.NAKAJIMA, Materials Transactions, 46 (12), (2005), pp.2550-2553

5) 財務省：”財務省貿易統計”,政府統計の総合窓口-品別国別表-輸入,(オンライン),< http://www.e-stat.go.jp/>, (参照 2016-12-27)

6) JOGMEC : “JOGMEC 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源情報”, JOGMEC 金属資源情報,(オンライン), <http://mric.jogmec.go.jp/>,(参照 2016-01-04)

7) USGS Minerals Information, Publication and Data Products,(オンライン),<http://minerals.usgs.gov>, (参照 2016-7-17)

生産資源の安定的供給に向けたクリティカリティ評価手法の構築

Development of a criticality assessment method toward a stable supply of resources for production

○中駄将人*[1)]、醍醐市朗 [1)]、後藤芳一 [1)]、畑山博樹 [2)]
Masato Nakada, Ichiro Daigo, Yoshikazu Goto, Hiroki Hatayama
1) 東京大学, 2) 産業技術総合研究所
* nakada@mfa.t.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

経済発展や製品機能向上、新技術の開発に伴って、様々な種類の金属において需要が拡大している。その結果、金属の供給制約のリスクと、それによって引き起こされる生産への影響が懸念されている。そうしたリスクと影響を評価するため、米国学術研究会議は、2008 年に米国における金属元素のクリティカリティを評価した [1)]。クリティカリティは、Supply Risk (SR)、Impact of Supply Restriction (ISR)の２つの尺度で評価されると定義した。それらの尺度を２軸とした平面上に、各元素のクリティカリティをプロットし、視覚化した。この評価を受けて、他国でもこれら２つの尺度によるクリティカリティ評価が行われるようになった。

これまでのクリティカリティ評価は、元素を対象として行われてきた。しかし、同一元素でも多様な用途があり、用途ごとに使用される物質の化学組成、形状、素材構成比等が異なっている。そのため、代替性が異なり、サプライチェーンも異なる。したがって、上述の２つの尺度において、物質ごとに評価結果が異なると考えられる。米国学術研究会議 [1)] は、Cu に関して５つの用途（建築、発電、輸送、機械、通信）に分けて ISR を評価した。しかし、用途に関わらず鉱物より加工度の高い材料や部品を評価対象とはせず、SR は同じとしたことから、あくまでも元素としての評価にとどまっている。欧州委員会 [2)] は、Si に限って、精錬された金属 Si も評価した。しかし、金属元素全体の評価方法と加工度の高い物質の評価方法の違いが不明瞭である。Graedel et al. (2012) [3)] や、日本を評価対象国とした新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) [4)] は、元素の評価のみである。

特定の用途に用いられる物質に注目した評価では、それぞれに鉱物より加工度の高い材料や部品を評価することが求められる点において、従来の評価手法の適用が困難であることが考えられる。そこで本研究では、加工度の高い材料や部品も評価できるクリティカリティ評価手法を構築することを目的とした。

2. クリティカリティ評価手法の構築

クリティカリティ評価手法の構築は、１．評価対象規模の設定、２．評価物質の設定、３．評価尺度の設定、の３つのステップで行った。

2.1 評価対象規模の設定

既存のクリティカリティ評価における評価対象規模は、世界、連合、国家、産業、企業と、多岐にわたっている。これまで、評価対象と、評価結果の使用者の関係はあいまいで、ほとんど議論されてこなかった。Graedel and Reck は [5)]、すべての人が結果の使用者として想定される傾向があるが、EU を対象とした評価や、企業を対象とした評価では、使用者が限定的であると指摘した。本研究では、クリティカリティ評価の使用者を、「評価を用いて、自らに関わるクリティカリティを低減する方策をとることができる主体」と定義した。すると、結果の使用者は、図１に示すように、「評価する対象に属する主体」と考えられた。これは、既存研究 [5)] の指摘と整合している。

本研究では、評価の対象規模を国家とした評価手法を構築することとし、結果の使用者としては、国とその内部に含まれる産業、企業を想定した。ケーススタディとして、日本を対象国とした評価を行った。

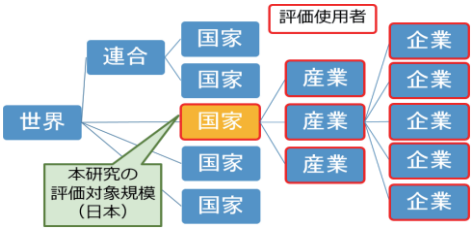


図１　評価対象規模と評価使用者の関係

2.2 評価物質の設定

本研究では、評価物質を、鉱物に限らず加工度の高い材料や部品とした。本稿では、それらを「生産資源」と呼ぶこととする。用途と評価物質の関係について、Si を例として図２に示した。半導体用途を評価する場合、SEG-Si を対象物質とし、板ガラス用途に対しては珪石・珪砂とすることとなる。

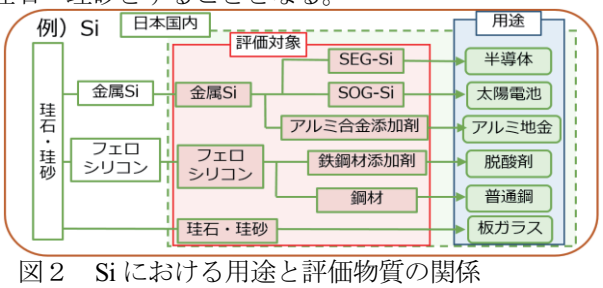


図２　Si における用途と評価物質の関係

2.3 評価尺度の設定

評価尺度は、Graedel ら[3] の提案したものを基とした。この提案は、特定の産業分野などに特化した評価尺度ではない点、評価の対象規模として、世界、国家、企業の３つの異なる対象規模に適応可能としている点、既存研究[5] において評価項目として含まれることが望ましいとされている代替性、共産される金属、リサイクルの影響を含んでいる点の 3 つの理由から、他の尺度より本研究に適していると考えた。Graedel ら[3]は、クリティカリティの評価尺度として、Supply Risk (SR)、Vulnerability to Supply Restriction (VSR)、Environmental Implications (EI)の３つを採用している。VSR は、米国学術研究会議の ISR と対応する尺度である。一方で、Graedel ら[3] が、SR、VSR の 2 つに EI を加えている理由は、金属を使用する製品設計者、政府機関、非政府機関への啓発的な意味合いが強いとしている。本研究では、3 つ目の尺度を含める意図はないため、他の多くの評価と同様に、先述の２つの尺度を採用した。本研究の評価における 2 つの尺度それぞれに含めた項目を図 3 に示した。基にした評価項目との違いについて、以下に記す。

2.3.1 Supply Risk (SR)

S1-1、S1-2、S2-1 は、元素や鉱石の採掘段階を対象にした評価である。これらの項目は、サプライチェーンの最上流の寸断リスクとして、それに由来する全ての生産資源が負っている潜在的なリスクと考えられる。したがって、生産資源を評価する場合でも、これらの評価項目を考慮する必要があると考えた。基とした評価では、リサイクルの影響などを考慮した、動的な可採年数が評価されていた。しかし、特定の用途に用いられる生産資源は、鉱物資源の需要の一部でしかなく、動的な可採年数は評価できない。そこで、サプライチェーンの最上流の寸断リスクとしての（経済的）枯渇性は、静的な可採年数（S1-1）として、それを緩和できる可能性のあるリサイクルについては、評価対象物質を製造する際に消費される天然資源の回避割合としての再生資源利用率 (S1-3) の項目で新たに評価した。S1-2、S2-1 は、基にした評価と同様に評価した。評価物質が複数の元素で構成されている場合、どの１つの元素の供給が停止しても、生産が停止してしまうため、S1 の３項目と S2-1 では、生産資源を構成する複数の元素の評価値うち、最も高い値を採用した。

S2-2、S3-1、S3-2 は採掘、製錬、精錬、加工のプロセスを考慮した、生産資源を対象とする評価である。基にした評価では、採掘、製錬、精練の３つのプロセスを考慮していたが、特定の用途に用いられる生産資源を評価する場合、その後の加工プロセスも特定されるため、そのプロセスも含めて考える必要がある。本研究では、加工プロセスも含めたプロセスのうち、最もリスクが高いプロセスにおける値を評価項目の評価値とした。生産資源では、複数の金属元素から構成されることも多い。そのため、構成する全て元素の上流にある全てのプロセスを対象として評価した。

2.3.2 Vulnerability to Supply Restriction (VSR)

基にした評価では、元素の各用途に対して代替性能などの項目を評価し、用途ごとの評価値を統合することで元素の評価値としている。本研究においては、評価対象物質の用途に限定して、同様に評価した。

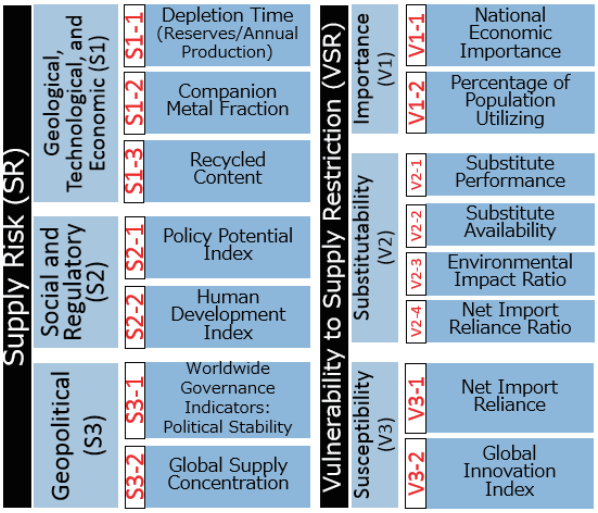


図３　クリティカリティ評価項目

3. 結言

国を対象として用途別に生産資源のクリティカリティを評価する方法を提案した。元素全体の評価では分からなかった、用途ごとの生産資源の供給リスクと重要性を定量できる可能性を見出した。評価にあたっては、従来の元素ごとの評価に加え、その製造プロセスとプロセスごとの生産国の特定が必要であることが分かった。

4. 引用文献

1) National Research Council, “Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy”, The National Academies Press, Wasington, D.C., (2008).

2) European Commission, “ Report on Critical Raw Materials for the EU, Report of the Ad-hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials”, Brussels, (2014).

3) T.E. Graedel et al.: *Environ. Sci. Technol.* **46** (2012) 1063.

4) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）”希少金属代替材料開発等の最新動向に関する検討報告書”, (2015).

5) T.E. Graedel and B.K. Reck: *J. Ind. Ecol.* **20** (2016) 692.

供給障害事象に基づく鉱物資源の供給リスク指標開発

Development of risk indicators for mineral resource supply based on supply failure events

○高橋裕也*[1)]、村上進亮 [1)]
Yuya Takahashi, Shinsuke Murakami
1) 東京大学
* 1001865628@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. 序論

鉱物資源は、産業活動並びに国民生活のために必要不可欠なものである。しかし鉱物資源の中でも特に非鉄金属資源は、希少性や偏在性が他の資源に比べて非常に高く、さらに代替が困難である。これらの需給は常に世界全体の社会的､また経済的な変動に左右され、不安的な状態にある。そして様々な要因によって供給障害が発生すると、社会的混乱を引き起こす。

供給途絶の規模が大きいことは、その混乱をより深刻なものにする一因となり得る。例えば 2013 年には、世界最大の露天掘り鉱山であるビンガムキャニオン銅鉱山で地滑り事故が起き、その年間予定生産量は約 50%縮小した。また南アフリカ共和国の白金鉱山であるマリカナ鉱山では、2012 年に大規模なストライキが発生し、約 5 か月にも渡って操業が停止した。しかし当然ながらこうした供給障害を事前に予測することは難しく、リスク評価そのものの研究はあまり進展していない。これは供給障害を引き起こす要因が個々の金属により異なり、まとめて論ずることは難しいためでもある。よって鉱物資源の安定供給を図るためには、資源開発や政治・経済に関わる障害を金属ごとに検討し、資源戦略にいかす必要がある。

2. 目的

本研究では、供給障害を当該資源の供給が一時的にでも計画から減少した状態と定義し、その発生確率と減少の規模を定量的に評価、リスク指標としていくことで、日本及び世界の鉱物資源政策への提言に結び付けることを目的とする。これまでなされてきた鉱物資源のリスク指標に関する研究、特に昨今多くみられる Criticality 研究におけるリスク評価については、直接の現象を捉えることなく背景となる要因のみを整理してきたものがほとんどである。例えば Graedel et al. (2011) [1)]では、供給リスクを特に資源に特化していない既存の指標を中心に表していた。一方で本研究では、過去の供給障害事象を要因別に分類し、各要因がどれだけ実際に起きた供給障害に寄与しているのか求めることで、過去の実在の事象のみからリスク指標を構築した指標である。

なお、ケーススタディとしては、ステンレスや、耐熱合金等の合金材料として不可欠であり、2014 年に世界最大の生産国であったインドネシアが鉱石の輸出停止を発表した、ニッケルと、自動車触媒や宝飾品として高い価値を持ちながら、政情が不安定なロシアや南アフリカ共和国が主要な生産国である、パラジウムの供給リスク指標を作成した。複数の元素で指標を作成することで、鉱種毎の違いが明確になり個々の金属資源の特徴が把握しやすくなる。

3. 手法

本研究では鉱山と製錬所における事故やストライキ、環境規制の変更等の要因による、供給側が原因となって発生した供給障害のデータを調査する。これまで余り検討されてこなかった製錬段階のリスクをあわせて考慮している理由は、本研究が金属資源を直接消費する素材産業だけではなく、その製品である素材ユーザー（製造業など）にとっての原料供給リスク評価を目指しているためである。

本研究では過去の供給障害事象を精査し、各年について、事故やストライキなどの個別の要因による、(供給障害量) / (生産量) で定義される供給障害率をまず求める。そして現時点（2016 年）の各要因の供給障害率を、過去のサンプルデータから統計的推定を行い、95%信頼区間を求めることで決定する。つまり、求めるリスクμは、収集したデータに基づいて計算される各年の供給障害率の標本平均を$\bar{x}$、信頼度 α の z 値を$z_{\alpha/2}$、標本標準偏差をs、サンプル数をnとして数式で示すと、

$$\bar{x} - z_{\alpha/2}\frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + z_{\alpha/2}\frac{s}{\sqrt{n}} \qquad (1)$$

となる。このようにリスクに幅を持たせたのは、元来リスクというものは一意に定まるものではないためである。また供給障害「率」を考えているため、各要因のリスク指標を最終的に一つに統合することが可能である。

ここで供給障害量は、各鉱山の年間生産量に供給障害により生産が停止した期間を掛け合わせることで求めた。なお供給障害が発生した年の生産量が分からない鉱山については直近の生産量を、供給停止期間が分

からないものは上野(2013)[2]に従って 1 か月とした。調査対象とした供給障害のデータについて、表 1 と表 2 に示す。

表 1 調査対象としたニッケルの供給障害の情報

調査対象とした期間	1984 年～2015 年
情報源	Web 上のニュースや各種文献等
得られた情報の件数	88 件

表 2 調査対象としたパラジウムの供給障害の情報

調査対象とした期間	1999 年～2014 年
情報源	Web 上のニュースや各種文献等
得られた情報の件数	21 件

4. 結果

4.1 鉱山・製錬所でのリスク

ニッケルの鉱山・製錬所での供給リスク μ を 95%信頼区間を用いて表すと、表 3 のようになる。

表 3 ニッケルの各要因に対する世界全体での供給リスクの値

要因	供給リスク
ストライキ	$3.69 \times 10^{-3} < \mu < 3.71 \times 10^{-3}$
洪水	$6.18 \times 10^{-5} < \mu < 6.19 \times 10^{-5}$
電力不足	$4.35 \times 10^{-4} < \mu < 4.37 \times 10^{-4}$
事故	$3.12 \times 10^{-3} < \mu < 3.14 \times 10^{-3}$
自然災害	$8.75 \times 10^{-5} < \mu < 8.77 \times 10^{-5}$
政治的混乱・紛争	$5.25 \times 10^{-4} < \mu < 5.27 \times 10^{-4}$
環境対応コストの増加	$1.11 \times 10^{-5} < \mu < 1.11 \times 10^{-5}$

これらを合計すると、輸送リスクを除いたニッケルの供給リスクの 95%信頼区間は、

$$8.08 \times 10^{-3} < \mu < 8.12 \times 10^{-3}$$

と求めることができた。

同様にパラジウムの供給リスクの 95%信頼区間は、

$$4.11 \times 10^{-3} < \mu < 4.18 \times 10^{-3}$$

と求めることができた。

また日本の輸入国に対して、輸入量に応じて各国の供給リスクを加重平均することで、日本がニッケルを調達する際の鉱山・製錬所におけるリスクの 95%信頼区間を求めると、

$$3.00 \times 10^{-3} < \mu < 1.37 \times 10^{-2}$$

という結果が得られた。

ここで日本におけるニッケル素材の供給リスクは、95%信頼区間をみると最小値は 0.300%だが、最大値は 1.37%と、世界全体の 0.812%と比べ拡大している。これは地金を輸入している国の鉱山・製錬所でのリスクに起因する。

4.2 輸送段階でのリスク

輸送段階におけるリスクは、チョークポイントを通る際のリスクと、航海中に海難事故に遭遇するリスクを足し合わせることで求めた。前者については、各チョークポイントでの年間の海賊発生件数を航行した船数で割ることで、後者については、港湾距離に単位距離の平均海難事故件数を乗じることで求めた。以上の方法で輸送段階のリスクを日本のニッケルの輸入国に対して適用すると、3.20×10^{-3}という結果が得られた。つまり、日本のニッケルの供給リスクの 95%信頼区間を求めると、

$$6.20 \times 10^{-3} < \mu < 1.69 \times 10^{-2}$$

と分かった。

4.3 供給リスク指標の資源調達戦略への適用

各国が経済合理性に対して供給リスクをどの程度評価した上で原料の調達先を定めているのか知るために、ニッケルについてケーススタディを実施した。ここで一次ニッケル生産国iが世界に占める生産シェアをs_i、ニッケル鉱石産出国jが世界に占める生産シェアをs_j、国iと国jの港湾間の距離をd_{ij}とした時に、国iが国jから調達する際の合理性を図る指標として、$\frac{d_{ij}}{s_i \times s_j}$と定めた。この指標の意味するところは、一次ニッケル生産国は輸送距離の短い国を、また生産量が多い国ほど、ニッケル鉱石の生産量が多い国を好むということである。そして経済合理性の指標と、供給リスクの指標の世界全体の合計がそれぞれ 1 となるよう正規化し、両者のみで一次ニッケル生産国側がニッケル鉱石の調達先を定めると仮定した際に、現実のニッケル原料調達割合と最も近くなるような、リスク指標の重みづけの割合を求めた。すると、原料調達先の生産国に占めるシェアの二乗の合計値（HHI）が 0.8 以下となるような国のみに対して、つまり調達国に大きな偏りがある一次ニッケル生産国を除いて、リスク指標の経済合理性に対する重みづけの割合をもとに各国を評価すると、リスクの値が大きな国からの輸入割合が多いフランスのリスク許容度が、各国と異なっていることが明らかになった。

引用文献

1) Graedel et al, “Methodology of Metal Criticality Determination”, Environmental Science & Technology, （2011）, Vol. 46, pp.1063-1070
2) 上野直樹, “金属資源の供給障害とその経済影響の定量分析”, 修士論文, （2013）, pp.38

事例分析に基づいた資源リスク評価手法の検討

Developing the Criticality Assessment with Case-Based Approach

○畑山博樹*[1)]、田原聖隆 [1)]
Hiroki Hatayama, Kiyotaka Tahara
1) 産業技術総合研究所
* h-hatayama@aist.go.jp

1. 緒言

近年数多く顕在化した資源リスクへの対応の重要性から、政府機関等によるクリティカリティ評価手法の開発と適用が盛んにおこなわれている [1,2]。これらの評価では、様々な資源リスク要因を点数化し、１つあるいは少数の指標に統合することで、異なる金属間のリスク比較を可能としている。一方で、点数化および統合化の基準は評価者の主観に依る部分が大きく、幅広く受け入れられる共通の評価枠組みの構築を阻んでいる。意思決定に活用しやすい評価手法と発展させるためには、客観性を有したクリティカリティ評価手法の検討が有用であると考えられる。そこで本研究では、資源リスク評価において注視すべき要因を、過去の供給障害事例を分析することにより抽出することを目的とする。

2. 供給障害事例の調査

過去の供給障害事例を調査するにあたっては、以下の項目が可能な限り把握されるよう情報収集を行った。

(a) 鉱種
(b) 障害発生時期及び継続期間
(c) 障害発生国・地域
(d) 障害の原因
(e) 障害の影響

リスク評価において注視すべき要因の抽出という観点で、(d)の把握は不可欠である。また、(a)から(c)までの項目で整理することで、鉱種ごとや資源国ごとに固有のリスク傾向を抽出することができる。また、特に深刻な障害を引き起こす原因を抽出したいような場合には、(e)を考慮したスクリーニングが有効となる。

供給障害事例の収集は、石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）の各種文献等 [3,4]や、過去の新聞記事データベース（日経テレコン）を活用して実施した。その結果、ここ 50 年間で発生した障害事例を、22 鉱種にわたって約 450 件収集することができた。

収集された事例から、(d)障害の原因を 19 のカテゴリ（表 1）に分類し、事例ごとに原因の整理をおこなった。ここでは、複数の原因が紐づけされる事例も存在している。

表 1 障害の原因リスト

自然災害	経営悪化
事故	市況低迷
ストライキ	ビジネストラブル
環境汚染	メンテナンス
輸送障害	需要増加
治安悪化	電力不足
資源枯渇	主金属減産
外交対立	生産コスト
鉱業規制	その他
資源価格下落	

3. 収集した事例の分析

収集した事例の鉱種別内訳としては、銅（104 件）が最も多く、次いでニッケル（82 件）、鉛・亜鉛（47 件）に関する事例が多く収集された。また、年代別にみると、2000 年以前、2000-2004 年、2005-2009 年、2010 年以降それぞれについて 57 件、40 件、144 件、220 件収集された。2005 年以前の事例が少ないことについては、障害の発生が少なかったというわけではなく、過去の出来事に関する情報へのアクセス性が低いことに因るものと考えられる。

収集事例の原因内訳としては、自然災害、事故、ストライキ、資源価格下落、鉱業規制が比較的大きな割合を占めていた（図 1）。自然災害に関しては、地震等による直接的な鉱山施設への損害だけでなく、電力供給網の寸断によって操業停止を招いた事例が多く存在した。

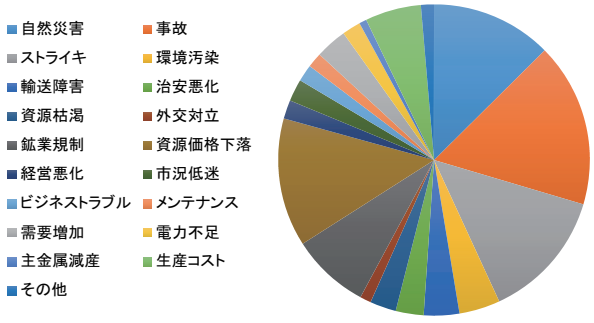


図 1 供給障害の原因別内訳

表 2 供給障害の原因と発生国のクロス集計

	CHN	AUS	CAN	CHL	ZAF	IDN	ZMB	MEX	PHL	USA
自然災害	17	15	3	10	2	2	0	2	4	2
事故	6	12	10	9	7	7	5	3	0	6
ストライキ	0	1	14	14	11	2	3	9	1	3
環境汚染	12	0	0	0	1	0	0	1	5	0
輸送障害	3	6	0	3	0	0	2	0	0	0
治安悪化	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0
資源枯渇	2	2	3	1	0	0	1	2	1	0
外交対立	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
鉱業規制	16	1	0	0	1	5	1	0	0	0
資源価格下落	6	17	12	1	1	3	3	1	5	4
経営悪化	0	2	2	0	0	0	1	0	0	1
市況低迷	4	3	1	1	0	0	0	0	0	1
ビジネストラブル	1	0	2	0	0	1	2	0	0	0
メンテナンス	1	0	1	0	0	0	2	0	1	1
需要増加	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
電力不足	4	0	1	0	4	0	1	0	0	0
主金属減産	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
生産コスト	2	7	9	2	0	0	0	0	0	0
その他	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0

表 3 供給障害の原因と鉱種のクロス集計

	Cu	Ni	Pb/Zn	Au	Al	Fe	Co	PGMs	Mo	REEs
自然災害	20	7	11	6	2	6	0	0	1	1
事故	31	23	6	12	5	3	0	4	3	0
ストライキ	25	10	4	7	2	3	6	10	1	0
環境汚染	4	0	9	3	2	0	0	1	0	2
輸送障害	8	0	1	0	1	3	1	0	0	0
治安悪化	1	4	1	3	0	0	4	0	0	0
資源枯渇	4	2	1	3	0	0	0	0	0	0
外交対立	1	0	0	2	0	0	1	0	0	0
鉱業規制	4	6	0	1	2	3	3	1	2	6
資源価格下落	8	20	13	3	6	4	0	1	3	4
経営悪化	2	0	3	0	3	0	2	0	0	0
市況低迷	1	0	0	0	1	0	0	0	1	3
ビジネストラブル	3	3	0	0	0	0	1	0	0	0
メンテナンス	4	1	0	0	0	0	0	0	1	0
需要増加	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0
電力不足	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1
主金属減産	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
生産コスト	3	5	5	1	8	5	0	0	0	0
その他	1	1	0	0	1	0	2	0	0	0

収集した事例をクロス集計して分析することで、鉱種別､時代別等の様々な特徴を把握することができる。表 2、3 は、障害発生国及び鉱種ごとの原因を集計し、それぞれ上位 10 国（種）を示したものである。中国や豪州では、自然災害や事故が主要な原因となっている一方で、ストライキによる供給障害はほとんど発生していないかった。中国の特徴として環境汚染や鉱業規制が原因の供給障害が多いことが挙げられる。また、資源価格の下落による障害（操業停止、閉山）は、中国やチリといった途上国よりも、豪州、カナダ、米国などの先進国で多く見られた。表 3 は表 2 の結果と関係しており、例えばチリが主要な産出国である銅の供給障害原因としては、自然災害、事故、ストライキが多い一方で、資源価格下落は少なかった。

資源価格下落による供給障害事例が一番多かったニッケルについて、障害発生のタイミングを資源価格の推移上にプロットしたところ、図 2 のようになった。ニッケル価格は 2008 年末の金融危機に急速に下落しており、その周辺時期に多くの鉱山が供給の停止に追い込まれたことがわかる。一方で、2009 年以降は障害の発生と資源価格の上昇、下落に明らかな関係性は見られなかった。

4. 結言

約 450 件の供給障害事例に基づいた分析により、鉱種や発生国ごとにその原因に偏りがあることが示唆された。本研究で示される傾向とクリティカリティ評価で用いられている各指標の傾向を比較することで、各原因を当該指標であらわすことの妥当性を検証できると期待できる。

引用文献

1) European Commission: “Report on critical raw materials for the EU”, (2014)

2) Graedel, T. E., et al.: PNAS, 112(14), (2015), pp.4257-4262.

3) JOGMEC, “メタルマイニング･データブック 2013”, JOGMEC, 東京, (2014).

4) 堀琢磨: 地質ニュース 623 号, (2006), pp.21-41.

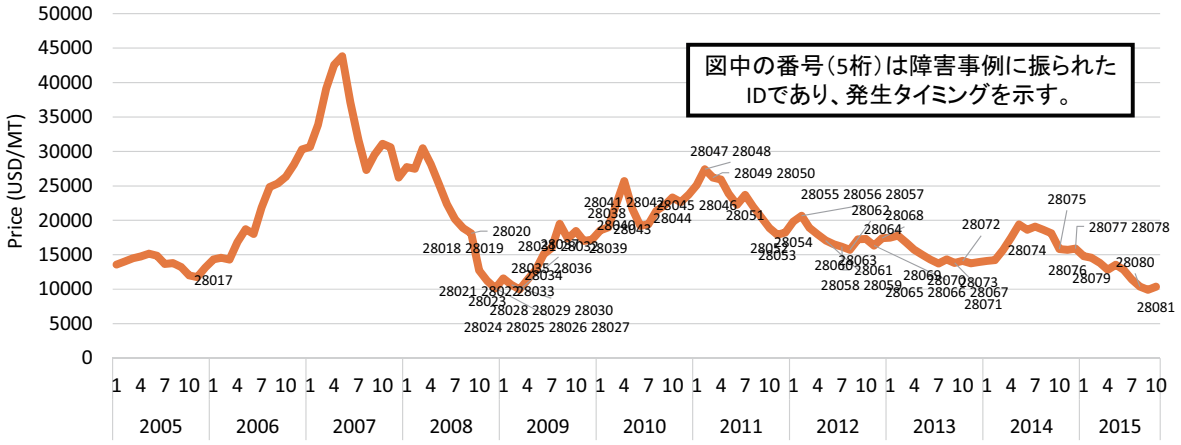


図2 ニッケルの価格推移と障害発生状況

気候変動の緩和策と適応策を対象としたライフサイクル影響評価

Life Cycle Assessment for Mitigations and Adaptations of Climate Change

伊坪徳宏 1)、湯龍龍 2)、小野雄也 3)、小関康雄 1)、正畠宏一 4)、沖大幹 3)

Norihiro Itsubo[1)], Tang Longlong[2)], Yuya Ono[2)], Yasuo Koseki[3)], Koichi Shobatake[4)], Taikan Oki[5)]

東京都市大学 1)、農業環境技術研究所 2)、東京大学 3)、TCO_2 4)

Itsubo-n@tcu.ac.jp

keywords: climate change, mitigation, adaptation, meta-analysis, cost benefit analysis

1. はじめに

製品ライフサイクルの環境影響を定量的に評価する LCA はすでに多くの温暖化対策に適用されている。国連環境計画がバイオ燃料に関する複数の LCA 研究論文を整理した報告 1)によれば、概ねバイオ燃料は石油燃料より CO_2 排出量は低いものの、水消費や土地利用、富栄養化など他の環境影響に対する影響は石油よりも高く、包括的な観点からみた環境配慮が必要であることを警告した。欧州委員会が 2013 年に発行した LCA 実施に基づくグリーン調達の推奨文書 2)は、温暖化のほか、資源消費、生態毒性などを含む 14 種類の影響領域を評価範囲に含むことを要求している。

一方で、多岐に渡る影響領域について評価しても、これらの間でトレードオフが発生した際の対応に課題が残る。近年の LCA 研究は影響領域間で比較できるエンドポイントタイプの手法が注目されている。しかし、エンドポイントタイプの手法はまだ発展途上の段階で国際的な合意がない。特に気候変動については、生物多様性に対する影響評価に関する具体的な提案は限定的で、農作物・水資源・森林資源・水産資源などの社会資本に関する影響を網羅した手法は提案されていない。このような状況下で実施された LCA は気候変動の影響を過小評価するとともに、緩和策や適応策に対する効果も過小評価することになる。

これまでに複数の緩和策と適応策について LCA が適用されているが、実施者が異なるため、評価範囲や手法が異なり、対策間で比較することができない。そこで、本研究では①気候変動に関するエンドポイントタイプの影響評価手法を新規に開発するとともに、②日本発で最新のエンドポイントタイプの影響評価手法である LIME3 に適用して共通の評価基盤の下で複数の気候変動対策に対する LCA を実施する。

2. 研究目的

緩和策と適応策は気候変動対策における車の両輪として位置づけられるものの、両者の統合的な実施を想定した計画立案は少ない。戦略的研究開発領域課題(S-14)「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究(研究代表者：沖大幹)」では、緩和策と適応策の双方を網羅的、かつ、統合的に評価し、気候変動対策の適切な計画立案に貢献するための定量的基礎資料を整備するための研究を行う。

本研究ではその一環として、複数のエンドポイントを網羅した気候変動の影響評価手法を開発し、複数の緩和策と適応策を対象に影響領域間のトレードオフやコベネフィットを考慮した LCA を実施する。

3. 研究内容

【課題 1】気候変動を対象としたエンドポイントタイプのライフサイクル影響評価手法の開発

IPCCAR5WG2 の記載内容と S-14 の他テーマの研究成果を反映しつつ、影響評価手法 LIME が対象とするエンドポイント「人間健康」「社会資産」「生物多様性」「一次生産」を網羅した評価手法の開発を行う。運命分析、影響分析、被害分析に分け、これらを開発・統合することで被害係数、すなわち単位量の環境負荷に対するエンドポイントの潜在的な被害量を求める。運命分析では複数の気候モデルを活用して CO_2 排出による気温変化などを算定する。影響分析では気温変化による生物種の分布変化や農作物の収量変化などを求める。被害分析ではこれらの影響を「生物種の絶滅リスク変化」などの被害指標に集約する。被害係数は、適応策のある場合(例えば SSP1)とない場合(例えば SSP3)のそれぞれを算定する。これらの結果に LIME の重みづけ係数を乗じて統合化係数を算定する。

【課題 2】影響領域間のトレードオフ、コベネフィットを考慮した気候変動対策の LCA

緩和策(自動車、再生可能エネルギー、CCS など)と適応策(インフラ整備、農業、水など)を対象にした LCA を行う。インベントリ分析では、関係者ヒヤリングに基づく一次データの利用を優先しつつ、ecoinvent などの二次データも活用する。影響評価は【課題 1】の成果と LIME3 を用いて、被害評価と統合化を行う。複数の緩和策と適応策を網羅した統合化結果は横断的に費用便益分析に活用され、統合的多面評価に活用される。

4. 現在の進捗

プロジェクト開始二年度に当たる本年度は以下の事項について検討した。

【課題 1】＜気候変動を対象としたエンドポイントタイプのライフサイクル影響評価手法の開発＞

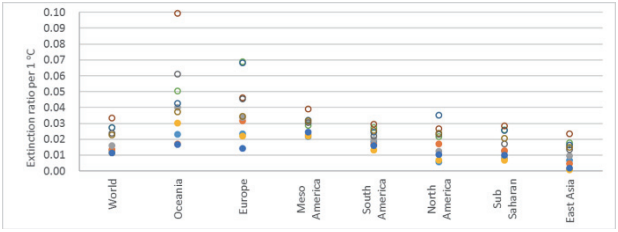
陸域生態系を対象に、気候変動による生態系の絶滅リスクを指標とした被害評価手法を開発した。被害係数算定までのフローを以下に示した。

(1)CO2 排出量から気温変化を予測(運命分析)
(2)気温変化前後における種の分布を予測(影響分析)
(3)種の分布変化から絶滅リスクを予測(被害分析)
(4)被害係数を算定

運命分析は、RCP シナリオに対応する MAGICC6.0 を採用した。種の分布予測には、MaxEnt モデルを採用した。環境変数（気温と降水量関連五項目）と土地利用変数（都市、農地、牧草地、その他の四項目)、種分布データをグリッドごとに入力した。これらのデータを基に現況計算を行い、再現性を確認した後、気候および土地利用データについて将来予測結果を反映させた時の種分布変化について算定した。種分布の変化速度は一定であると仮定したときの種の余命を算定するとともに、その期間の逆数を絶滅リスク（一年における絶滅確率）とした。

一連の計算を生物種ごとに実施した後、それらの和を取ることで被害係数を得た。本研究では生物種ごとの分布データに GBIF(Global Biodiversity Information Facility)を採用した。同データベースは多岐に渡る生物種の分布情報を網羅しているが、本研究では LIME3 の比較検証を優先するため、維管束植物種(2,140 種)を対象に分析を行った。一連の計算を 5 種類の GCM、RCP2 種(2.6, 8.5)、種の適応（移動）を可能とした場合としない場合についてそれぞれ実施し、感度分析を行った。

図 2 に平均気温 1℃上昇に対する生物種絶滅リスクの変化に関する算定結果を示した。移動による適応を考慮した場合(塗りつぶし)と適応行動に制約をかけた場合(白抜き)の双方について、GCM ごと、地域ごとに区別して結果を示した。移動の適応有無によって、絶滅リスクは大きく変化する。さらに、全球平均に比べて、オセアニア、欧州、中南米の影響が大きいなど、地位差がみられた。オセアニア、中南米は島嶼国が多く適応範囲に制限があること、ロシアを含む欧州は高緯度で平均気温上昇が他の地域よりも大きいことが要因と考えられた。また、欧州が相対的に大きいのは、土地利用による影響が他地域よりも相対的に大きいことが影響した可能性がある。



n	228	104	169	312	154	351	84
危惧種率	0.12	0.13	0.32	0.26	0.13	0.28	0.26
面積減少率_NM	25-70%	38-62%	24-63%	27-58%	21-51%	19-51%	16-44%

図 2　平均気温 1℃上昇時における生物種絶滅リスクの変化

【課題 2】＜影響領域間のトレードオフ、コベネフィットを考慮した気候変動対策の LCA＞

気候変動の緩和策を対象とした評価では、電力を取り上げてメタ分析を実施し、再生エネルギー導入による環境負荷削減効果について考察した。

適応策に対する評価では、海洋淡水化を取り上げて LCA を行った。一次データは日本国内の海洋淡水化施設のヒヤリングデータを、二次データは Global Desalination Market より二次データを得て、これらを MiLCA に入力し環境負荷量を算定した。ここでは、以下の事項について評価した。

(1) 施設建設・運用を含むライフサイクルを通じて発生する環境影響
(2) 造水による健康影響削減貢献量
(3) (1)と(2)の比較に基づく正味の環境影響削減量

世界各国の海洋淡水化施設の環境影響と施設運用による便益額を分析し、これらの総計をとったところ、水ストレス被害効果は世界全体で年間 3,180 億円と見込まれた。

5. 今後の予定

気候変動の影響評価では、一次生産を含む生態系サービスへの影響評価、社会インフラや農業など社会資本を対象とした影響評価手法の開発を進める。緩和策と適応策に関する評価では、複数の対策について評価を進め、コベネフィットやトレードオフを含めた包括的な視点から比較しつつ、最適な気候変動対策について考察する。

参考文献

1) UNEP (2009) Towards sustainable production and use of resources: Assessing Biofuels,
2) European Union (2013) Commission recommendation of 9 April 2011 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations

メタ分析を駆使した電力のライフサイクル評価

Life cycle assessment for electricity using meta analysis

○八坂慶仁[*1)] 、正畠宏一 [1)]、伊坪徳宏 [2)]
Yoshihito Yasaka, Koichi Shobatake, Norihiro Itsubo
1) TCO2 株式会社, 2)東京都市大学
* yasaka@tco2.com

1. 緒言

気候変動枠組み条約第 21 回締約国会議を通じて長期目標が採択された。1.5℃目標まで言及したことで、今後世界はさらなる緩和策を推進することが求められる。また、LCA 研究は様々な分野で実施されており、現在その数は年間 3000 件に上る。それらの一部はデータベースに搭載されることがあるが、他の研究等に有効に活用されていないことが多い。LCA の実施では、データ収集等に多大な時間と労力がかかることが課題であるが、これまでの研究論文を有効に活用することで、短期間で代表性のある結果を得ることが期待される。本研究では、既に幅広く行われている電力分野における LCA の研究成果に対してメタ分析（メタ分析は複数の研究結果を統計処理する等、統合して分析結果を得る手法で、特に医療分野で多く用いられている）を実施して、定量的な分析の実施可能性について検討する。

2. 評価対象

本調査では発電所のライフサイクルで発電される電力 1kWh あたりの GHG 排出量を評価対象とした。対象とした電力は、石炭、石油、天然ガス、地熱、風力、原子力、水力、太陽熱、太陽光、バイオマスとした。石炭、天然ガスは CCS の有無でさらに細分化を行った。

3. 調査方法

3.1 対象の収集

調査対象となる論文の収集には Google 検索、Google Scholar を用い、関連すると考えられる検索キーワードを作成し、完全一致検索を行い、電力を対象とした LCA 研究が行われている論文を収集した。加えて NREL[1-6]が電力のメタ分析を行った論文の参照文献のうち論文のみを対象として収集した。また、SimaPro8 に搭載されている ecoinvent データベース 3.1 に IPCC 2013 GWP 100a を適用して GHG 排出量を計算した結果も対象として収集した。

3.2 標本の整理

論文から抽出した GHG 排出量は標本として整理したが、論文によって対象とする段階が異なっていた。そこで標本をライフサイクル段階別に燃料製造、建造、発電、廃棄の 4 つに分類して、標本の整理を行った。

3.3 データクリーニング

単位は論文の中で多く見られた $kgCO_2e/kWh$ とした。標本によっては gCO_2e/kWh や $kgCO_2e/MJ$ と異なる単位が用いられており、これらを全て $kgCO_2e/kWh$ に単位を変更した。単位を修正することができない標本、もしくは極端に小さい標本、大きい標本は対象外として扱った。

3.4 補正と集計

標本によっては、発電のみ、燃料製造と発電のみを対象とするといった場合があり、それぞれの標本で不足している段階について、電力別の平均値を当てはめる補正を行った。

4. 結果

収集した論文数と標本数を表 1 に示す。

表 1　電力別収集標本数及び論文数

	石炭	石炭+CCS	石油	天然ガス	天然ガス+CCS	地熱
標本数	449	13	28	238	2	12
論文数	29	5	10	26	2	9
	風力	原子力	水力	太陽熱	太陽光	バイオマス
標本数	226	193	60	52	251	67
論文数	25	17	14	15	20	12

標本数が最も多かったのは石炭、その次が太陽光という結果となった。論文数が最も多かったのは石炭であり、その次に続くのは天然ガス、風力、太陽光となった。CCS を含む発電について記載されている論文は少数であった。

電力別の GHG 排出量を箱ヒゲ図として図 1 に示す。

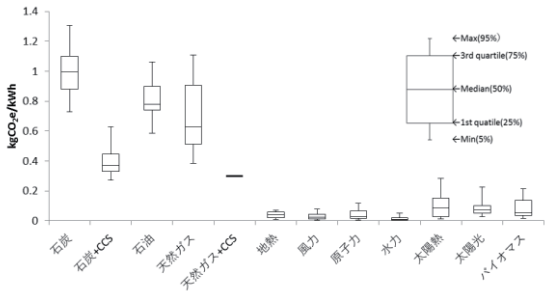


図 1　電力別 GHG 排出量　箱ヒゲ図

中央値では、石炭が最も大きく、約 1 $kgCO_2e/kWh$ となった。石炭の発電に CCS を導入した場合、中央

値が約 0.4 $kgCO_2e/kWh$ となり、約 60%の GHG 排出量を削減できることが明らかとなった。次に GHG 排出量が大きいのは石油であり、中央値で約 0.8 $kgCO_2e/kWh$、天然ガスはそれに次いで約 0.6 $kgCO_2e/kWh$ となった。天然ガスに CCS を導入した場合、中央値で約 0.3 $kgCO_2e/kWh$ となり約 50%の GHG 排出量を削減できることが明らかとなった。地熱、風力、原子力、水力は中央値が 0.1 $kgCO_2e/kWh$ 未満、太陽熱、太陽光、バイオマスの中央値は同程度の約 0.1 $kgCO_2e/kWh$ と石炭や天然ガスを用いた発電に CCS を導入した場合よりも GHG 排出量を大幅に抑えられることが明らかとなった。次に段階別の標本数と補正に用いた平均値を表 2 に示す。

表 2　段階別標本数及び平均 GHG 排出量

	標本数				平均値			
	燃料製造	建造	発電	廃棄	燃料製造	建造	発電	廃棄
石炭	15	13	271	7	9.88.E-02	7.68.E-03	9.27.E-01	1.04.E-04
石炭+CCS			0				3.02.E-01	
石油	5	4	24	0	2.31.E-03	–	7.42.E-01	–
天然ガス	54	40	225	27	9.94.E-02	1.23.E-02	5.08.E-01	2.00.E-05
天然ガス+CCS			0					
地熱	0	0	3	0	–	–	4.53.E-02	–
風力	0	18	67	3	–	2.41.E-02	2.05.E-02	2.13.E-03
原子力	41	43	62	43	2.03.E-02	8.57.E-03	3.04.E-02	1.69.E-02
水力	0	2	35	1	–	–	2.11.E-02	–
太陽熱	0	5	19	3	–	8.59.E-02	9.57.E-02	1.01.E-05
太陽光	0	112	151	0	–	3.70.E-02	5.64.E-02	–
バイオマス	0	0	48	0	–	–	1.12.E-01	–

段階別の平均値を見ると原子力、風力を除いた電力は発電から排出される GHG 排出量が多く、ライフサイクル全体の約 50%以上を占めていることが明らかとなった。一方で原子力は燃料製造が約 30%、廃棄が約 20%と発電段階以外からの GHG 排出量が多くなった。また風力は建造が約 50%、発電が約 40%と設備の建設段階から排出される GHG 排出量が多いことが明らかとなった。

5. 課題

今回のメタ分析を実施した際の課題の一部を以下に示す。

(1)　補正値の妥当性

単位の統一、及び、不足しているライフサイクルに平均値を当てはめる補正を行ったが、各論文で前提条件や発電所のサイズ、二次データ等の前提条件が異なっており、これらの補正が妥当であるかに関しては検討が必要である。

(2)　標本の分類

同じ電力でも発電方法等で、更なる詳細な分類分けを行った検討が必要である。

(3)　標本の不足

石油、地熱、水力、バイオマスの建造、石油、地熱、水力、太陽光、バイオマスの廃棄については標本が収集できず、ライフサイクルでの評価が行えていない。また CCS については、CCS 設備の有無による違いは明らかにできていない。なにかしら標本を収集し、不足している段階を補正する必要がある。

(4)　各標本の GHG 排出量の取り扱い

各標本における GHG 排出量に含まれる温室効果ガスの種類や温暖化係数は統一されておらず、それらの補正は行えていない。

(5)　GHG 排出量以外の影響領域の調査

今回、メタ分析を行う対象は GHG 排出量のみとしたが、取得した論文の中には、大気汚染やエネルギー消費について記載がある論文もあった。電力によっては GHG 排出量を抑制できる一方、他の影響領域が大きくなることも考えられる。このようなトレードオフ関係を明らかにするには、当該影響領域について GHG 排出量と同様な分析が必要となるが十分な数の標本を抽出することができなかった。大気汚染は電力の環境影響評価において重要な影響領域であるため、この影響領域を GHG 排出量と同様の水準で評価するにはさらに多くの論文を調査収集し、標本を抽出する必要がある。

6. まとめ

電力分野において既に行われた GHG 排出量の調査を分類・整理し、ライフサイクルで評価を行うことで GHG 排出量に明確な違いが見られた。一方で、元データとなる LCA 論文においては、その前提条件や結果の表記方法は統一されておらず、その補正過程に課題があることがわかった。今後は、標本数を更に増やすとともに、他の影響領域についても同様の解析を行い、検討を進めたい。

7. 謝辞

本研究は、環境省の環境研究総合推進費（S-14）により実施された。

8. 参考文献

1) David D. Hsu, Patrick O'Donoughue, Vasilis Fthenakis, Garvin A. Heath, Hyung Chul Kim, Pamala Sawyer, Jun-Ki Choi, Damon E. Turney, Journal of Industrial Ecology, 16(s1), (2012), pp S122–S135

2) Ethan S. Warner, Garvin A. Heath, Journal of Industrial Ecology, 16(s1), (2012), pp S73–S92

3) Garvin A. Heath, Patrick O'Donoughue, Douglas J. Arent, Morgan Bazilian, PNAS, 111(31), (2014), pp E3167–E3176

4) Garvin Heath, Journal of Industrial Ecology, 16(s1), (2012), pp S136-S154

5) Hyung Chul Kim, Vasilis Fthenakis, Jun-Ki Choi, Damon E. Turney, Journal of Industrial Ecology, 16(s1), (2012), pp S110–S121

6) Michael Whitaker, Garvin A. Heath, Patrick O'Donoughue, Martin Vorum, Journal of Industrial Ecology, 16(s1), (2012), pp S53–S72

植物を対象とした CO_2 の生物種絶滅リスク係数の開発

Development of extinction risk factors related to CO_2 emissions focusing on plant species

○湯龍龍*[1)]、大橋春香[2)]、松井哲哉[2)]、田中信行[3)]、伊坪徳宏[4)]
Longlong TANG, Haruka OHASHI, Tetsuya MATSUI, Nobuyuki TANAKA, Norihiro ITSUBO
1) 農業・食品産業技術総合研究機構、2) 森林総合研究所、3) 東京農業大学、4) 東京都市大学
*tanglonglong@affrc.go.jp

1. はじめに

地球温暖化は生物多様性損失の主因の一つとして、ミレニアム生態系評価で挙げられている。種レベルの多様性においては、温暖化による種の絶滅リスクの定量化研究が進んでいる。Urban[1)]が近年の温暖化による生物種絶滅リスクの評価研究を対象としたメタ分析によれば、世界平均気温 1～4℃上昇に伴い、平均で 7.8%絶滅割合が上昇すると推計し、十年前の Thomas ら[2)]の研究結果より小さく見積もられている。また、絶滅リスクの算定方法（種数面積関係と種分布面積変化）、種の移動能力の設定などが結果に与える影響が大きいと示している。

被害算定型 LCIA 手法における温暖化の被害評価について、人間健康と社会資産の損失は考慮されるが、生物多様性への影響は、定量的被害係数の開発が遅れている。唯一被害係数を算定した de Schryver ら[3)]の研究は、種数面積関係を採用し、種消失割合を指標としている。種数面積関係は比較的古い Thomas らの知見を使用しており、かつ、用いられる指標はある地域における種の消失であり、その種の絶滅に与える影響は不明である。一方、湯ら[4)]は温暖化による種の絶滅リスク評価を LCA の係数算定に反映できるように、潜在的絶滅種数を指標とした算定方法を開発している。なお、この研究は方法の提案にとどまり、係数の算定に至っていない。

本研究は潜在的絶滅種数を指標とし、世界の植物を対象とした CO_2 の種絶滅リスク係数の算定を目的とする。

2. CO_2 の生物種絶滅リスク係数の算定方法

2.1 既往研究

LCA における CO_2 の生物多様性被害係数を算定した de Schryver ら[3)]について、気温上昇から種の消失割合までの評価方法を示す。まず、種分布モデルから種ごとの分布面積の減少率を算出する。次に、面積減少率の平均値を種数面積関係(SAR: $[S(A) = (A/A_o)^z \cdot S_o]$, S(A): 改変したエリアに生息する種数, S_o: 従来エリアに生息する種数, z: 係数)に適用して、種の絶滅割合を算出する。その種の絶滅割合は種の消失割合と仮定する。この評価方法は以下の課題を有する。

種分布面積の予測は、評価対象種の世界範囲での分布が考慮されていない。種の絶滅割合の算出は、種数面積関係を用いるが、z が 0.25 を使用している。近年は、種の全分布面積を考慮して、改変面積と種の絶滅割合を推計したところ、z をより小さい 0.09 と推計している[5)]。

一方、湯ら[4)]が提案する種ごとの評価方法も種の絶滅割合の算定が可能である。その方法は種分布モデルによる種の分布減少率の予測までは同じであるが、種ごとの現在分布に分布面積の減少率を適用することで、種ごとの絶滅までの余命を推計し、その余命の逆数を潜在的絶滅種数と算定している[4)]。評価対象種の結果である潜在的絶滅種数を評価した合計種数で除して絶滅割合が得られる。

2.2 本研究の評価方法とデータ

上記議論を踏まえて、本研究は温暖化による種ごとの分布面積予測をベースとしたうえで、種数面積関係（式 1~3）と種ごと評価（式 4~10）の二通りの方法を用いて、CO_2 の種絶滅リスク係数を算出する。

種数面積関係を用いた係数は、気温増分(ΔT)、気温 1℃あたりの種絶滅割合(EP)と世界の植物種数(N)を掛け合わせて算出される。ΔT は簡易型気候モデル MAGICC/SCENGEN v5.3 を用いて算出した。世界の植物種数は 30 万種と仮定した。気温上昇と種絶滅割合の関係(EP)は、RCP 別の種絶滅割合の差を気温上昇量の差で除して算出した。絶滅割合(E)は、まず、GBIF[6)]より収集した世界の植物 2,507 種を対象に、将来 100 年間における種ごとの分布面積変化を予測する。MaxEnt (Maximum Entropy)モデルを用いた。種移動能力の設定は困難のため、種が新たな気候的適域へ完全に移動可能（FM）と不能（NM）の双方で算定した。次に、種の分布面積減少率の平均値を種数面積関係(z: 0.09)に適用した。なお、将来の種分布予測は 5 つの気候モデル(GCM)別に行った。

$$DF_{SAR,M} = \Delta T \times EP_M \times N \quad (1)$$

$$EP_M = (E_{M,RCP8.5} - E_{M,RCP2.6}) / (TEMP_{RCP8.5} - TEMP_{RCP2.6}) \quad (2)$$

$$E_{M,RCP} = 1 - (\sum_s a_{s,M,RCP} / \sum_s A_s)^z \quad (3)$$

DF_{SAR}:種数面積関係を用いた絶滅リスク係数 (Extinction species/ton-CO_2)
ΔT: 1t-CO_2 の排出による 100 年間での世界平均気温の最大増加量 (℃/ton)
EP: 1℃あたりの種絶滅割合(%/℃); N: 世界の植物種数 (species)
E: 100 年間(1970-2070)の種絶滅割合 (%); RCP: 8.5, 2.6
$TEMP$: 100 年間(1970-2070)の世界平均気温の上昇量 (℃)
a: 2070 年時の種分布面積 (km^2); A: 1970 年時の種分布面積 (km^2)
z: 係数 (dimensionless); M: 移動能力(可能、不能); s: 評価対象種

種ごと評価を用いた係数の場合は、危惧種と非危惧種別に EP を算出した。IUCN データを参考に植物種の半分

は危惧種と仮定した。植物の絶滅割合(E)は、まず、種ごとの分布面積減少率と現在の分布面積を基に、種ごとの絶滅まで所要年数を算出する(式 7, 10)。次に、種ごとに 100 年あたりの潜在的絶滅種数を算出したうえで、評価対象種の結果を合計し、評価対象総種数を除することで絶滅割合を推計した(式 6, 9)。

なお、評価した 2,507 種中、366 種(m)は危惧種である。また、現在分布面積について、非危惧種は評価対象種より得た(中央値: 200 万 km^2) (A_n)が、危惧種は評価対象種が比較的分布面積が大きい種であることを考え、対象種中危惧種の分布面積と IUCN のレッドリストカテゴリ基準に記載される分布面積を考慮して6万km^2($\hat{A}$)と設定した。

$$DF_{Indi,M} = \Delta T \times (EP_{NT,M} \times N/2 + EP_{T,M} \times N/2) \quad (4)$$

$$EP_{NT,M} = (E_{NT,M,RCP8.5} - E_{NT,M,RCP2.6})/(TEMP_{RCP8.5} - TEMP_{RCP2.6}) \quad (5)$$

$$E_{NT,M,RCP} = \sum_n (100 \times (1/Y_{n,M,RCP}))/n \quad (6)$$

$$1 = A_n \times (a_{n,M,RCP}/A_n)^{Y_{n,M,RCP}/100} \quad (7)$$

$$EP_{T,M} = (E_{T,M,RCP8.5} - E_{T,M,RCP2.6})/(TEMP_{RCP8.5} - TEMP_{RCP2.6}) \quad (8)$$

$$E_{T,M,RCP} = \sum_m (100 \times (1/Y_{m,M,RCP}))/m \quad (9)$$

$$1 = \hat{A} \times (a_{m,M,RCP}/A_m)^{Y_{m,M,RCP}/100} \quad (10)$$

DF_{Indi}:種ごと評価を用いた絶滅リスク係数 (Extinction species/ton-CO_2)

NT: 非危惧種;　T: 危惧種

Y_n: 非危惧種 n の絶滅までの所要年数 (year)

Y_m: 危惧種 m の絶滅までの所要年数 (year)

$\hat{A}$: 補正された危惧種の 1970 年時の種分布面積 (km^2)

3.　結果と考察

3.1　気温の最大増加量

2000 年に CO_2 の追加排出に伴う世界平均気温の追加的上昇量の推移を図 S1 に示す。気温上昇は 2025 年前後にピークを達してから徐々に低下する。そのピーク時の値を気温の最大増加量とした。

3.2　種の分布面積減少率

図 S2 に植物 2,507 種の 100 年間における分布面積減少率を GCM 別、RCP 別に示す。移動可能と不能の場合は、それぞれ約 0~30%、20~60%の分布面積減少率が算定され、Thomas らの結果と同程度である。また、移動能力によらず、RCP8.5 は RCP2.6 に比べて面積減少率が増加した。

3.3　1℃あたりの種絶滅割合

1℃あたりの種絶滅割合は（図 1a）、5 つの GCM、移動可能（網掛け）と移動不能（網掛けせず）を考慮に入れて、1%未満から 3%であった。Urban らの結果に近い。

図 1b は、両評価方法で得られる絶滅割合と、その評価で使用される分布面積減少率との関係をそれぞれ図示している。種ごと評価は現在分布面積の違い（危惧種、非危惧種）でカーブが変わる。両方法のカーブの形状が類似するため、種ごと評価の結果が大きい（図 1a）理由は、面積減少率が大きい種ほど、高い絶滅リスクが得られることが考えられる。

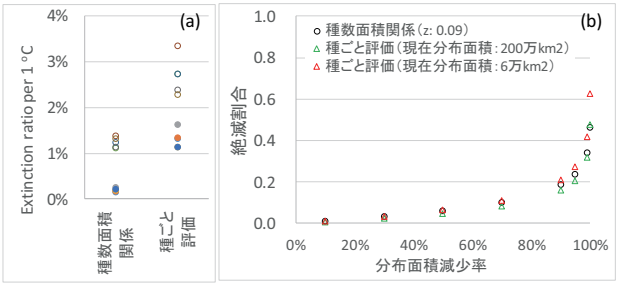


図 1　1℃あたりの種絶滅割合（a）、分布減少率と絶滅割合の関係（b）

3.4　CO_2 の種絶滅リスク係数

図2に評価方法別、GCM別の種絶滅リスク係数を示す。評価方法間の関係は図 1a と同様であった。係数に影響する要因は、評価方法の違いと種移動能力の設定が大きかった。また、種ごと評価の結果では GCM 間の差も大きかった。これは GCM 間で将来の気温と降雨量の予測に差が大きいことが種ごとの分布減少率に影響している。

本係数を日本の年間 CO_2 排出量(2.9E+9 ton)に乗じて得られる世界植物の絶滅種数は 0.4～7.7 種である。この値は LIME2 が示す温暖化要因が含まれない日本植物の絶滅種数規格値(0.9 種絶滅/年)と同等か、より大きいことが初めて示唆された。

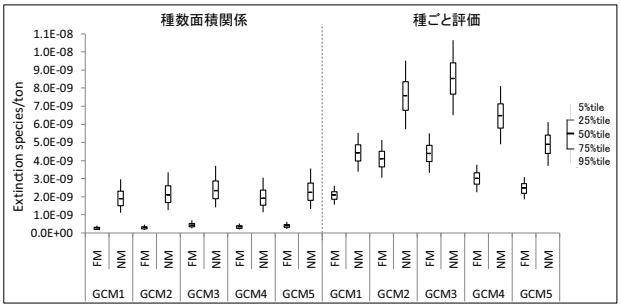


図 2　CO_2 の種絶滅リスク係数

4.　まとめ

本研究は世界の植物2507種を対象に潜在的絶滅種数を指標とした CO_2 の種絶滅リスク係数を初めて算定した。既存研究に比べて、①種分布予測では生物種の世界における分布変化を捉えている点、②絶滅割合の推計では改善された種数面積関係と種ごとの絶滅リスク評価の双方を用いた評価によって、評価方法間の違いが係数に与える影響を明示している点である。今後は、プロセスごとの結果の考察を深めると共に、本評価手法による動物種を含めた係数算定を行う予定である。

参考文献

1) Urban (2015) Science 348 (6234): 571- 573

2) Thomas et al., (2004): Nature 427 (6970): 145-148

3) de Schryver (2009) Environ Sci Technol 43 (6): 1689–1695

4) 湯ら(2012) 第 7 回日本 LCA 学会研究発表会要旨集

5) He et al. (2011) Nature 473: 368-371

6) GBIF (2014) GBIF Science Committee HP

Supporting Information

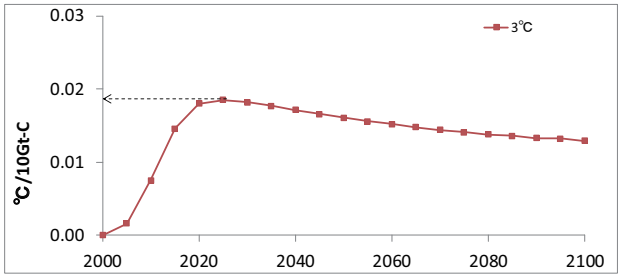


図 S1 CO_2 の追加排出による気温の増分(気候感度 3℃)

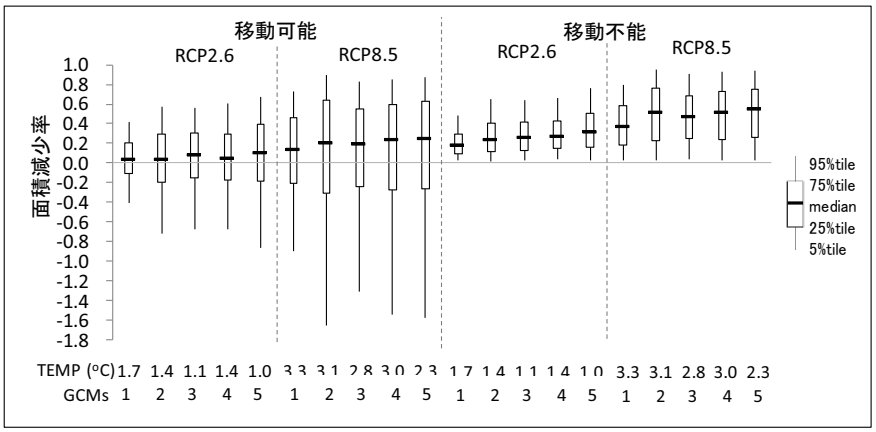


図 S2 温暖化による植物 2507 種の分布面積減少率

共通社会経済シナリオ SSP を用いた CO_2 の健康被害係数の開発

Development of human health damage factors related to CO_2 emissions by using shared socioeconomic pathways

○湯龍龍*[1)]、古島康[2)]、伊坪徳宏[3)]
Longlong Tang, Yasushi Furushima, Norihiro Itsubo
1) 農業・食品産業技術総合研究機構, 2) みずほ情報総研株式会社, 3) 東京都市大学
* tanglonglong@affrc.go.jp

1. はじめに

気候変動による影響を予測するには、人間社会・経済活動が将来どのくらいの規模になり、どのくらいの温室効果ガスを排出するのか、適応能力も含めるシナリオを想定する必要がある。IPCC は気候変動を予測するために、将来社会像に応じた GHG 排出シナリオ SRES (Special Report on Emissions Scenarios) [1)]を開発している。近年は緩和策と適応策の効果を推計する際に、共通の将来シナリオをあらかじめ想定しておくことが望ましいため、整合性のある社会経済シナリオと気候シナリオを前提とした影響評価や適応策評価を支援するための SSP (Shared Socio-economic Pathways) [2)] と RCP (Representative Concentration Pathways)[3)]シナリオが新たに開発された。特に SSP は将来社会の緩和能力と適応の困難さを考慮しており、今後これら新しいシナリオに沿って、適応策の評価研究も増えることが予想される。

一方、LCA においては、Tang ら[4)]が将来社会像を考慮して、SRES シナリオ別の係数を算定している。しかし、SSP シナリオ別では算定しておらず、かつ、気温と疾病リスクの関係は WHO (2004)報告書[5)]の知見をベースにしている。なお、WHO (2014)[6)]は温暖化による健康リスク評価を更新している。本研究は Tang らの方法を基に、SSP 別に CO_2 の健康被害係数を算定することを目的とする。本報告は、温暖化による下痢と低栄養のダメージ関数(SSP1, 2, 3)を試算し、既存研究と比較する。

2. 方法

2.1 CO_2 健康被害係数の算定方法

Tang らが提案する方法を基に、SSP 別の健康被害係数を以下のように算定する。

CO_2 単位量排出による追加的世界平均気温上昇量の推計は、従来の MAGICC5.3 簡易型気候モデルを用いる。

世界平均気温 1℃あたりの地域別疾病別の相対リスク(RR: relative risk)は WHO (2014)の結果を基に、将来社会シナリオ別に算出した(詳細は 2.2 節に参照されたい)。相対リスクは温暖化なし場合の死亡率（ベース死亡率）に対する温暖化あり場合の死亡率の増加率と定義する。

温暖化なし場合のベース死亡率は Tang らの方法を採用する。Tang らは WHO (2004)が推計した 2030 年までの疾病別の死亡率と、その死亡率の推計に用いられる GDP/cap データを基に、GDP/cap と死亡率の関係を抽出してから、SRES 別の GDP/cap に応じた死亡率を 2100 年までに推計している。本研究は同じ方法を用いて、SSP 別に死亡率を推計する。

人口データと死亡一件あたりの損失余命(DALY)は Tang らを参照した。

以上の方法を踏まえて、計算式を以下に示す。

$$DF_{SSP} = \left(AD_{SSP} - D_{SSP}\right) / \Delta CO_2 \quad (1)$$

$$AD_{SSP} = \sum_i \sum_r \sum_t \left(AT_{t,r} \times R_{t,r,i,SSP} \times M_{t,r,i,SSP} \times P_{t,r,SSP} \times S_{r,i}\right) \quad (2)$$

$$D_{SSP} = \sum_i \sum_r \sum_t \left(T_{t,r} \times R_{t,r,i,SSP} \times M_{t,r,i,SSP} \times P_{t,r,SSP} \times S_{r,i}\right) \quad (3)$$

DF_{SSP}: SSP 別の CO_2 健康被害係数 (DALY/kg)
AD：CO_2 が追加排出された場合の健康被害 (DALY)
D：CO_2 が追加排出されない場合の健康被害 (DALY)
AT: CO_2 が追加排出された場合の気温増分 (ºC)
T: CO_2 が追加排出されない場合の気温増分 (ºC)
R: 気温上昇 1℃あたりのベース死亡率の増加率 (%/ºC)
M: ベース死亡率 (%)
P: 人口 (person)
S: 死亡一件あたりの損失余命 (DALY/case)
SSP: SSP1, SSP2, SSP3, SSP4, SSP5
t: 2000-2100; r: 21 地域;
i: 熱中症, 低栄養, デング, マラリア, 下痢, 海岸洪水

2.2 RR/℃の更新

Tang らは、WHO (2004)において、一つの将来社会像（中成長）の基に、3 つの気温上昇シナリオ別に算定される RR を基に、線形で疾病ごとの RR/℃を抽出している。

WHO (2014)は、全疾病項目を対象に一つの気温上昇シナリオ（A1B）の場合、3 つの将来社会像（低、中、高成長）別の温暖化由来の死亡者数を 2030 年と 2050 年別に推計している。なお、相対リスクとしては整理されていない。そこで、本研究は上記結果と温暖化なしの場合の死亡者数（同報告書より）を用いて、2030 年と 2050 年の RR を算出したうえで、2030 年と 2050 年時の気温上昇量をそれぞれ除して、2 つの年次別、地域別、疾病別、社会シナリオ別の RR/℃を求めた。なお、低中高 3 つの成長

シナリオはそれぞれ SSP3、SSP2 と SSP1 に該当させた。

2.3 WHO (2014) における適応の設定

気候変動による低栄養由来の死亡者数の算定について、WHO (2004)は将来の穀物生産量が増加し、食料貿易の自由度が高まると仮定している。WHO (2014)は穀物生産モデルのみに適応を考慮している。

気候変動による下痢由来の死亡者数の算定は、経済成長に伴う安全な水と衛生設備へのアクセス率の向上が考えられる。WHO (2004)は経済成長の効果を考慮している（例：US$6000/year 以上の地域は RR が 1 とする）。WHO(2014)は適応を考慮していない。

3. 結果と考察

3.1 RR/℃の更新

図 1 に、下痢と低栄養について、アフリカ地域における RR/℃の比較を行う。WHO (2004)は Africa_D と Africa_F を対象とし、中成長社会像の 2030 年の値のみである。

WHO(2014)は下痢の RR/℃がやや高かった。また、RR/℃を既存文献より直接設定して線形で評価するため、将来社会像別の値はほぼ同じであった。

低栄養について、WHO(2014)の結果が地域間の平均の場合で約２～５倍大きかった。これは、両報告書の穀物生産モデルと食料貿易モデルの双方が更新されており、かつ、適応の設定の違いによる総合的な影響と考えられる。また、社会像別の値に差が大きく、低成長の社会像ほど、RR/℃が小さい結果となった。この結果から、Tang らが単一の RR/℃を異なる社会像のベース死亡率に適用することは、低成長の社会像の被害係数を過大評価している可能性があることが示唆された。

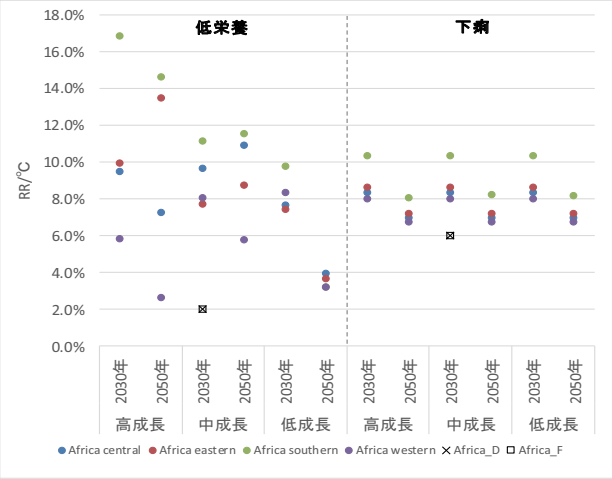


図１　低栄養と下痢の RR/℃の比較

3.2 下痢と低栄養のダメージ関数

図 2 と図 3 に下痢と低栄養のダメージ関数をそれぞれ示している。本研究の結果は、下痢が約 2 倍、低栄養が約３～６倍大きかった。下痢について、ベース死亡率の計算方法が Tang らと同じと考えれば、RR/℃による影響が大きいと言えよう。栄養失調は、RR/℃が影響するほか、ベース死亡率の対象が 5 歳以下の全要因死亡(WHO (2014)に従う)となっているため、一部ダブルカウントの可能性が考えられる。この点については今後詳細を確認する予定である。

被害の地域性は、既存研究と同様に下痢と低栄養の双方でアジアとアフリカの影響が大きかった。また、低成長のシナリオが大きい影響を示す点も共通であった。なお、本研究は RR/℃が低成長の社会像に小さい値を適用したため、シナリオ間の差が小さかった。

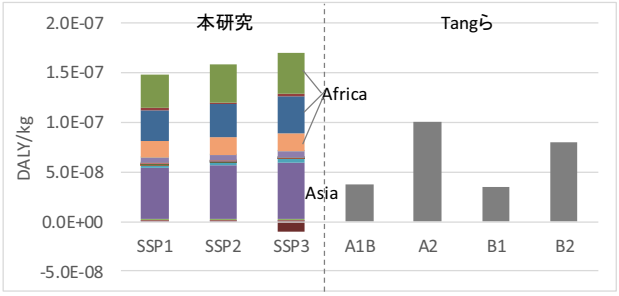


図２　下痢のダメージ関数（DALY/kg-CO2）

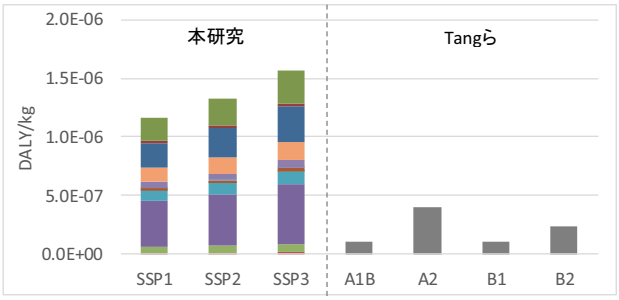


図３　低栄養のダメージ関数（DALY/kg-CO2）

4. おわりに

本研究は、SSP 別の CO_2 健康被害係数の算定方法を開発し、下痢と低栄養を対象に試算を行った。RR/℃を既存研究と比較した結果、下痢は同程度であったが、低栄養は本研究の値が大きいことと、将来社会像で異なることが分かった。下痢と低栄養のダメージ関数では、既存研究より大きい値となり、RR/℃の違いによる影響が大きいことが確認された。今後は、他の疾病の算定とともに、被害係数全体の検証を行う予定である。

参考文献

1) Nakicenovic et al. (2000) Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the IPCC. Cambridge University Press

2) Van Vuuren et al. (2014) Climatic Change 122 (3): 373–386

3) Moss et al. (2010) Nature 463:747–756

4) Tang et al. (2015) Int J Life Cycle Assess DOI 10.1007/s11367-015-0965-9

5) WHO (2004) Comparative quantification of health risks. Global and regional burden of diseases attributable to selected major risk factors, Geneva

6) WHO (2014) Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s, Geneva

気候変動適応策としての浄水器を対象とした費用便益分析

A preliminary study of life cycle based cost benefit analysis for water purifier as an adaptation of climate change

○小関康雄*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Yasuo Koseki, Norihiro Itsubo
1）東京都市大学
＊ ykoseki@ tcu.ac.jp

1. はじめに

気候変動問題について、「防止策」としての「緩和策」と、「事後対応策」としての「適応策」の両面からの検討が、世界レベルで議論されている。

その緩和策や適応策の実現には多くの費用と時間が必要で、その優先順位の決定が非常に重要である。

筆者らは、前報で[1)]、緩和策の選択評価手法として、LCA と LCC の両面から「限界削減費用分析（MAC)」で評価する手法を提案し、電気製品の省エネに着目した検証結果を報告した[1)]。

本研究では、「適応策」の適切な選択評価手法を開発する目的で、公知の「費用便益分析（CBA)」に LCA と LCC を考慮した評価法を提案し、途上国へ浄水器を普及させて健康被害を低減する事例[2)]を用いて、提案手法を検証した結果を、報告する。

本研究は、環境省の環境研究総合推進費（S-14）の研究の一環で実施している。

2. 研究方法

2.1 LCA と LCC を考慮した「費用便益分析」

図 1 に、筆者らが提案した評価手法を示す。

「費用」として、浄水器導入によるライフサイクル全体（製造・使用・廃棄）でのコスト（内部コスト：LCC 値）と、ライフサイクル全体での環境影響コスト（外部コスト：ＬＣＡの統合評価 LIME 値）の合計（円/m3）を用いた。

「便益」として、飲水を浄化して病原体を削減したことによる健康被害の低減量（DALY）とした。後者の健康被害は、更に 230 万円/DALY で円/m3 に換算した。

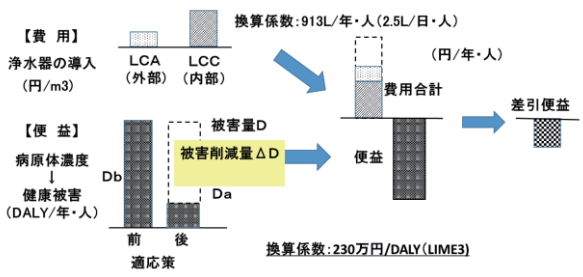


図１ LCA/LCC を考慮した「費用・便益分析」

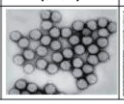
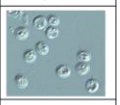
2.2 評価対象

対象とする浄水器は、手軽に使えるピッチャー型の精密ろ過膜（MF）式と、大量に処理できる電動型の逆浸透膜（RO）式の 2 種類を選んだ。

対象国は、水不足が予想される国の中で、水質データの公開があるガーナ地区を選んだ。

ガーナ地区の飲水の水質を表 1 に示す[2) 3)]。4 種類の病原体の寸法及び損失余命（DALY/case）値を示す。0.1μｍまで除去可能な MF 浄水器ではロタウイルス以外は除去可能で、RO 式は全ての病原体を除去可能である。

表１ 浄水器の原水の水質（病原体）

病原体	カンピロバクター	ロタウイルス	大腸菌O157	クリプトスポリジウム
大きさ	幅0.2～0.8μm, 長さ0.5～5μm	70~100 nm (直径)	幅1.1~1.5, 長さ2~6 μm	3μm~8μm (直径)
参考画				
用量反応モデル	β-ポアソン			指数
DALY/Case	0.0046	0.394	0.400	0.093

2.3 評価方法

（１）ガーナ共和国への適応シナリオ概要

本研究では、ＭＦ浄水器とＲＯ浄水器を、それぞれ単独に導入した場合と、都市部にＲＯ浄水器を田舎部にＭＦ浄水器を導入したＭｉｘの場合の、３つの浄水器導入シナリオで評価した。

具体的には、以下を考慮して、国内仕様から海外仕様へ変更した。

【地理的違い】

① 浄水器の輸送を考慮

日本よりガーナへ本体及び交換カートリッジの船便輸送（廃品はガーナで焼却・埋立、排水は放流）

【国の環境の違い】（日本と比較）

② 原水の水質が良くないため、カートリッジの交換頻度を国内仕様の 2 倍に想定（寿命半分）

③ 電気普及率の考慮

ガーナの田舎は 50%程度（都市部は 92%）

RO 浄水器の設置は 50～75%と想定 。

④電気単価は、ガーナ(2007 年)の単価（５円/kWh）
⑤電力原単位は、ガーナの電源構成で修正。

（２）LCA／LCC の算定方法

本研究では、前報[1)]と同様に、以下の３つのステップで評価した。

【ライフサイクルアセスメント（LCA)】

LCA ソフト「MiLCA」を用いて、対象製品１台当たりのライフサイクル全体での統合化の「LIME2」値を算出し、ライフサイクルでの総浄水量（m3）より機能単位を浄水量 1m3 当たりにそろえた。

計算に用いた一次データ（活動量）は、MF 浄水器は秋山氏ら[2)]の数値を、RO 浄水器は浄水器メーカーより入手した。

【ライフサイクルコスト（LCC)】

「製造コスト」は製品価格を、「使用コスト」は消費する電気代と交換部品の単価を、本体と交換部品の「廃棄コスト」は家電リサイクルの回収および処理費用等を参考に仮定した。

【LCA/ＬＣＣを考慮した費用便益分析（CBA)】

図１で記載のように、「費用」としては、LCC 値と LCA の LIME 値（円/m3）を算出し、更に１人当たりの飲料水の年間使用量から、１人当たりの年間費用（円/人・年）を算出した。

「便益」は、健康被害の損失余命（DALY）は前報と同じ手法で１人当たりの年間 DALY 値を算出し、それに浄水器の病原体ごとの除去率から浄化後の水質を算出して、浄化前後の DALY 値の差を、230 万円/DALY で換算した（円/人・年)。

3. 研究結果と検討

3.1 健康被害の低減効果

図３に、3 つのシナリオでの健康被害の低減結果を示す。

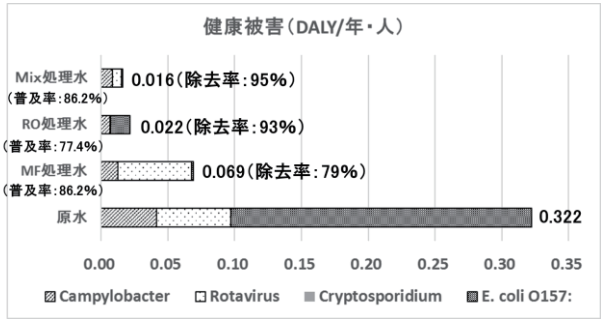


図２　浄水器による健康被害の削減結果

健康被害量（DALY/人・年）は、原水は 0.322 と大きいが、MF 又は RO 浄水器単独では、0.068,0.022 へ大幅に低減できる。Mix では、さらに 0.016 へ低減でき、効果が最も大きい。

3.2 浄水器の「費用・便益分析」評価

図３に、3 つの浄水器導入シナリオでの費用便益分析結果を示す。

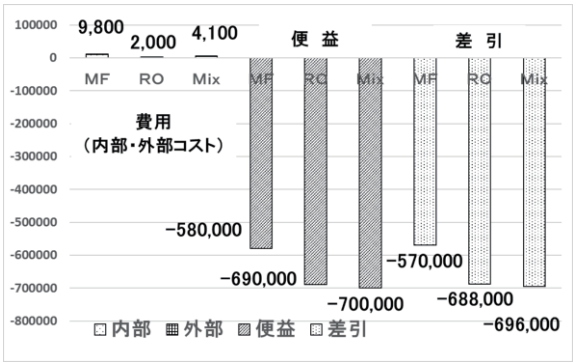


図３　浄水器導入による費用便益分析

全てのシナリオで、健康被害削減の「便益」が 60～70 万円と非常に大きく、「費用」は 2000～10000 円と少ない。「費用」は、MF＞Mix＞RO 順に小さく、理由は、RO が大量処理・長寿命型製品で、浄化量当たりのコストや環境コストは小さくなると推測される。費用内訳では「内部コスト（LCC）/外部コスト（LIME)」比は、MF：216、RO：59, Mix：127 と、いづれも内部コスト（LCC）が支配的である。

「便益」は MF＜RO＜Mix の順に大きく、差引でも Mix シナリオが大きい。これは病原体の除去性能と浄水器の普及率の影響と推測される。

4. まとめ

気候変動適応策の評価方法として、LCA／LCC を考慮した「費用便益分析」（CBA）による評価法を提案し、ガーナ地区への浄水器（MF/RO）普及を例に適応策の効果を試算・検証した結果、LCA/LCC を考慮した費用より便益の効果が大きく、MF/RO 浄水器の併用シナリオが最も効果が大きいことが確認できた。

今後は、対象国を拡大していくとともに、感度分析を基に、一次データやシナリオの代表性や妥当性を検討する予定である。

5. 引用文献

1)小関ら：第 11 回日本 LCA 学会研究発表会（B3-06）2016,3
2)秋山ら：第 10 回日本 LCA 学会研究発表会（A1-20）2015,3
3)E.Machdar ら：Science of the Total Environment 449(2013) 134-142

LCA に基づく新バイオディーゼル製造プロセスの イノベーション支援モデル

Development of an LCA based innovation support model for novel biodiesel production technology

○陳 怡靜*[1)]、彭 劭琳 [1)]、北川 尚美 [1)]、大野 肇 [1)]、福島 康裕 [1)]
I-Ching CHEN, Shao-Lin Peng, Naomi Shibasaki-Kitakawa, Hajime Ohno, Yasuhiro Fukushima
1）東北大学
* chen@tohoku.ac.jp

1. はじめに

地域で他の用途と競合しない資源である廃食用油を原料として用いるバイオディーゼル燃料（BDF）製造は、新産業創出や、廃棄物対策や循環型社会の形成、温室効果ガス排出の削減において重要な役割を期待されてきた [1)]。しかし、現行の均相アルカリ触媒法では以下の問題点がある：(1) 廃食用油中に含まれる遊離脂肪酸（FFA）がアルカリ触媒と反応して石鹸を生成 (2) 石鹸の界面活性作用によりグリセリンが燃料相に混入し、これを除去するために 4、5 回の温水洗浄が必要で多量の廃水が発生する (3) アルカリ触媒が混入した副生グリセリンが発生、処理が困難 (4) 転化率は 90%程度で、未反応油が残存しやすく品質不安定。さらに、燃費の良さが駆動力となり近年主流となってきているコモンレール式のディーゼル車輌では、燃料への品質要求がより厳しいため、現行法によって製造された BDF は燃料として供給できず、BDF 製造事業の継続が困難になってきている。

一方、我々が 2016 年より鹿児島県西之表市で実証試験を進めているイオン交換樹脂触媒法 [2-4)] では、(1) 石鹸生成の原因となる FFA をもエステル化で BDF に変換可能 (2) 石鹸生成がなく、副生したグリセリンも樹脂に吸着除去されるため不純物除去操作なしに高品質燃料を製造可能 (3) 固体触媒のため分離が容易で、アルカリ混入のないグリセリンが副産物になる (4) 転化率はほぼ 100%で、未反応油の残存はなく品質安定。このため、高品質の BDF を得ることができ、コモンレール車両への給油でも今のところ問題は起きておらず、上述の現行法の課題をすべて解決できる可能性が高い。

廃食用油から製造される BDF は収集やその利用を考慮すると集中大量生産には向かず、地産地消が望まれる。このため、経済性確保のためには設備稼働率の向上、地域の未利用資源の利活用、既存の廃棄物やその他の輸送システムとの相乗りなど、地域の事情に密着した様々な工夫が必要となる。

2. 研究方法

本研究では、イオン交換樹脂触媒法を用いた BDF 製造プロセスの LCA や経済性評価を実施し、プロセス導入の有効性を定量的に示し社会実装を支援することを目指している。原料である廃食用油の特性 [5)] や収集コスト、必要となる用役・薬品などの価格、廃熱の利用可能性など地域条件等を踏まえシステム全体の経済および環境側面をライフサイクル思考で検討できるような支援システムが望まれている。本発表では、そのようなシステムを構成するモデルを種子島に於けるケーススタディを用いて論じる。

2.1 目的と評価範囲

投入原料油の特性や利用可能な廃熱の有無等を考慮し、廃食用油回収量からイオン交換樹脂の必要量、反

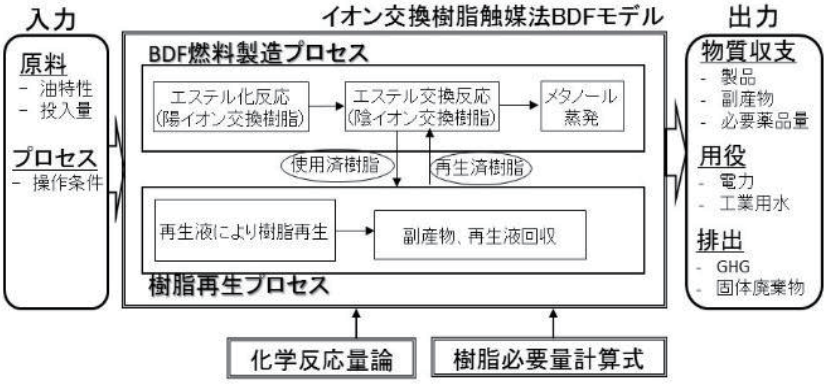


図 1　イオン交換樹脂触媒法を用いた BDF モデル

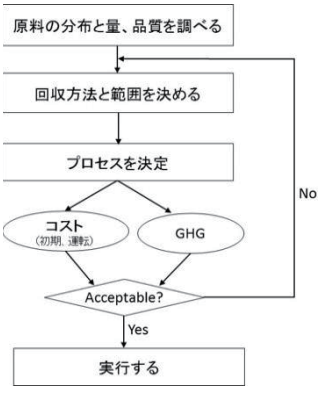


図 2　バイオ燃料製造プロセスのイノベーション支援モデル

応カラムサイズや反応時間、反応や触媒再生にかかるエネルギー使用量などを計算し、プロセス原単位を決定する。これを用いて生産量やライフサイクル GHG 排出量、コストを求め、回収範囲･方法と併せて製造システムのあり方を検討する。

2.2 インベントリ分析：イオン交換樹脂触媒法による BDF 製造プロセスの原単位の導出モデル

イオン交換樹脂触媒法を用いた BDF 製造は主に BDF 燃料製造と樹脂再生プロセスで構成される。本研究で構築した BDF 製造プロセスのモデル（図 1）では入力データとして、原料油の FFA 含有量と投入量から、樹脂の再生までに製造できる燃料量を決定し、出力では物質収支がとれているプロセス原単位（e.g. 製品あたりの副産物量、薬品消費量、用役、排出量など）を得る。

燃料製造プロセスにおいては陽イオン交換樹脂で触媒されるエステル化反応(1)と陰イオン交換樹脂で触媒されるエステル交換反応(2)により BDF が生成される。

$$FFA + MeOH \rightleftarrows FAME + H_2O \quad (1)$$

廃食用油に含まれる FFA とメタノール（MeOH）が、BDF となる脂肪酸メチルエステル（FAME）と水(H_2O)を生成する。

$$G(FA)_3 + 3MeOH \rightarrow 3FAME + G(OH)_3 \quad (2)$$

廃食用油中のトリグリセリド（$G(FA)_3$）と MeOH が、FAME と副産物のグリセリン（$G(OH)_3$）を生成する。

2.3 バイオディーゼル燃料導入支援モデル

図 2 はバイオ燃料製造プロセスの導入支援モデルの概念図である。原料（e.g. 廃食用油）の分布、賦存量や品質を調べ、回収方法と範囲を決めて回収ルートを決定する。前節で述べた BDF 製造のプロセスモデルを使って物質収支のとれたプロセス原単位を出力し、原料回収範囲や回収ルートと併せてライフサイクル GHG 排出とコストを求める。これを用いてバイオ燃料製造システムの経済・環境合理性を検討する。合理性が不十分である場合は原料の回収方法と範囲の決定段階へ戻り再検討し、このように評価を繰り返し製造システム導入のあり方を提示する。

3. 鹿児島県西之表市での BDF 製造システムの導入

鹿児島県西之表市（種子島）でのイオン交換樹脂触媒法を用いた廃食用油からの BDF (FAME)製造を例として、その導入支援モデルを提示する。BDF 製造プロセスでは、樹脂再生部分が比較的複雑であり、かつ導入コストが高い。このような場合には分散型 BDF 燃料製造と集中型樹脂再生[6,7]を組み合わせる方法をとることができる。廃食用油の回収におけるルートと頻度、樹脂再生のための樹脂カラムの輸送や BDF 燃料製品の配布を考慮して、システム全体の GHG 排出とコストの評価を行い、可視化した評価結果を用いて関係者との協議を行うことで地域に密着したバイオ燃料生産プロセスを設計することができる。

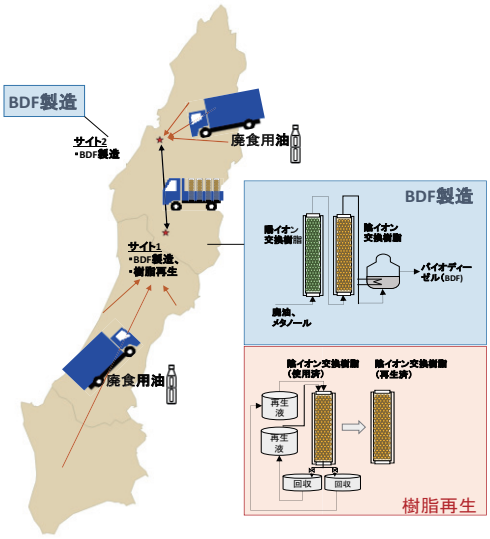


図 3　種子島で廃食用油由来 BDF の導入支援例

4. 結果と考察

本研究で提案した手法による種子島事例の計算結果は口頭発表にて報告する。地産地消に適したバイオ燃料製造プロセスの地域展開方式についての検討により、他の離島へのバイオ燃料システム導入を支援するツールの構築を目指す。

謝辞

本研究は、環境省環境研究総合推進費（課題番号 3K153014）により実施された。

引用文献

1) Atbani, A.E., Silitonga, A.S., Badruddin, I. A., Mahlia, T.M.I., Masjuki, H.H., Mekhilef, S.: Renew Sust Energ Rev., 16, (2012), pp.2070–2093.

2) Shibasaki-kitakawa, N., Tsuji, T., Kubo, M., Yonemoto, T.: Bioenerg. Res., 4, (2011), pp.287–293.

3) Shibasaki-kitakawa, N., Hiromori, K., Ihara, T., Nakashima, K., Yonemoto, T.: Fuel, 139, (2015), pp.11–17.

4) 北川尚美、大柳友克、博吉汗斯琴高娃、中島一紀、丹羽忠夫、南一郎、米本年邦：化学工学論文集, 42, (2016), pp.30–36.

5) 彭劭琳、北川尚美、大野肇、福島康裕：第 11 回日本 LCA 学会研究発表会, 柏, (2016), pp.136–137

6) 廣森浩祐、松岡拓郎、南一郎、北川尚美：化学工学会第 48 回秋季大会, 徳島, (2016), H209

7) 陳怡靜、彭劭琳、北川尚美、大野肇、福島康裕：化学工学会第 48 回秋季大会, 徳島, (2016), V119

藻類バイオマスを用いた航空機の環境影響評価

Environmental impact assessment of aircraft using algae biomass

○根本知亜記*[1)]、伊坪徳宏 [1)]
Chiaki Nemoto, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学
* g1362104@tcu.ac.jp

1. はじめに

世界の航空旅客数は年々増加傾向にあり、今後も航空需要は増加するとされる。アジア太平洋地域、中東、中南米地域の航空需要の伸びが特に顕著であるとICAO（国際民間航空機関）で予測されている。航空旅客数、需要の増加に伴って航空機数の増加が必要になるとされ、航空分野における環境問題に注目が集まっている。従来、空港周辺の騒音問題及び大気汚染問題に焦点が当てられてきたが、近年の気候変動の深刻化に伴い航空機からの CO_2 排出量にも注目が集まるようになってきた。国際航空分野の気候変動対策は、ICAO で検討されており、2013 年 ICAO 総会で ICAO 及び加盟国に対して代替航空機燃料の導入促進に向けた取り組みを要請した。日本も ICAO の加盟国であることから代替航空機燃料の導入等に取り組んでいく必要がある。

LCA 手法を用いた藻類バイオマスの評価では、藻類バイオディーゼル生成における問題点などは検討されているが、藻類バイオ燃料を航空機燃料として用いた場合の評価はなされていない。

2. 研究目的

本研究では、藻類バイオ燃料を使用した航空機の環境影響評価を行い、藻類バイオ燃料の技術改善などによる環境削減の変化を捉えることを目的とする。

3. 評価対象および評価方法

3.1 評価対象

評価対象は航空機燃料（藻類バイオ燃料、従来航空機燃料）、航空機（A330-200）とする。

3.2 機能単位

機能単位は航空機 1 機が 1 便運航したときとする。運航距離は羽田－新千歳間とし、耐用年数は 10 年、年間 2000 便運航することとする。発熱量、燃料使用量、燃費は運航距離などを用いて按分して求めた。また、藻類バイオ燃料、従来燃料ともに 50%の割合で使用していることとする。

3.3 調査範囲

本研究で対象とするシステム境界を図 1 に示す。

図 1 本研究のシステム境界

3.4 算定方法

本研究の算定結果は以下、式［1］～［2］に示す。

GHG 排出量＝Σ（活動量×GHG 排出量原単位）［1］
都市域大気汚染評価
＝Σ（活動量×都市域大気汚染評価係数）　［2］

燃料の投入量には「Life-Cycle Energy Use and Greenhouse Gas Emissions Analysis for Bio-Liquid Jet Fuel from Open Pond-Based Micro-Algae under China Conditions」(2013)、「Lifecycle assessment of microalgae to biofuel: Comparison of thermochemical processing pathways」(2015)、航空機の投入量には「Life cycle assessment of the Airbus A330-200 Aircraft」(2010)のインベントリデータによって得られたデータを用いた。GHG 排出原単位にはソフトウェア MiLCA の原単位 IDEA を使用した。

藻類バイオ燃料の生産プロセスを①～③に示す。

①遠心分離

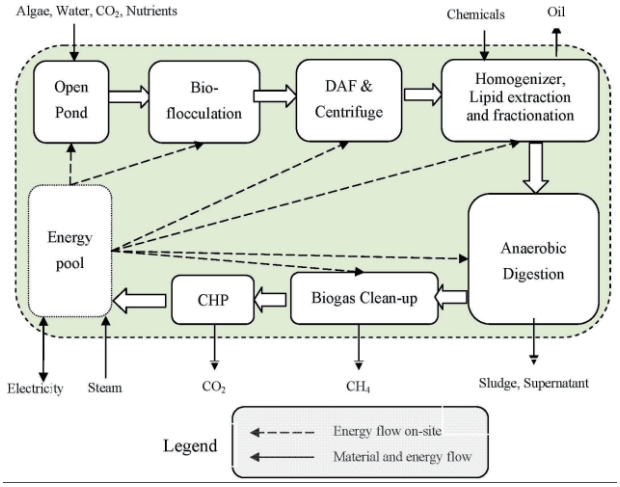


図 2 遠心分離プロセス

②熱分解

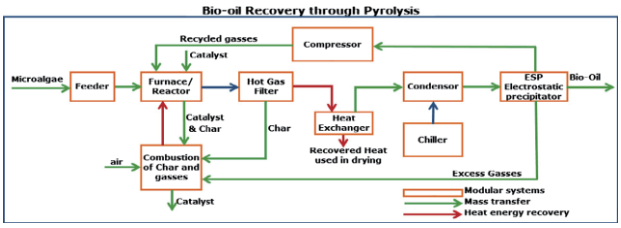


図 3 熱分解プロセス

③HTL

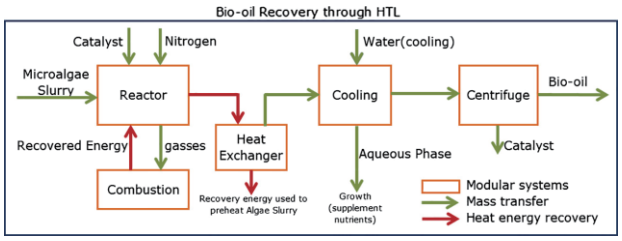


図 4 HTL プロセス

4. 結果

4.1 航空機 1 機 1 便の GHG 排出量比較

航空機 1 機 1 便の運航における GHG 排出量の算定結果を図 5 に示す。①～③は藻類バイオ燃料の生産プロセスである。総量は①4.76E+04（kg-CO_2eq/機・便）、②2.60E+04（kg-CO_2eq/機・便）、③2.16E+04（kg-CO_2eq/機・便）、従来燃料 3.10E+04（kg-CO_2eq/機・便）という結果となった。藻類バイオ燃料は燃料製造の負荷が大きく寄与しており、従来燃料は運航の燃料燃焼の負荷が大きく寄与していることが分かる。藻類バイオ燃料ではカーボンニュートラルの考えにより、燃料燃焼の GHG 排出量は計上しない。

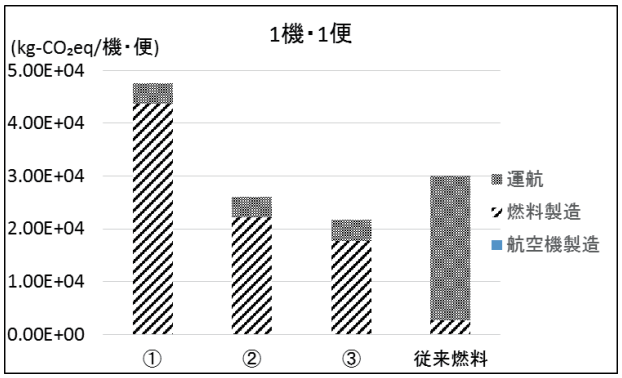


図 5 航空機 1 機 1 便の GHG 排出量比較

4.2 燃料製造における GHG 排出量

燃料製造 1L における GHG 排出量の比較を図 6 に示す。藻類バイオ燃料の①～③は技術改善によって削減されている。総量は①7.92E+00（kg-CO_2eq/L）、②3.87E+00（kg-CO_2eq/L）、③3.05E+00（kg-CO_2eq/L）という結果になった。①では収穫段階の負荷が大きく、次いで栽培段階の負荷が大きい結果となった。収穫段階では使用電力が大きく寄与しているとされ、栽培段階では藻類を栽培する時に肥料や水などの投入量があるとされる。②では抽出段階の負荷が大きく、③では栽培段階の負荷が大きくなった。②の熱分解は回転ドラム乾燥で脱水を行ったあと燃料変換を行い、炭と発生したガスを熱としてリカバリーしている。③の HTL は脱水工程を行わず燃料変換を行い、その際発生するガスを熱としてリカバリーしている。そのため燃料製造の負荷が小さくなっていることがわかる。現在は技術革新によって生産性が向上しており、藻類バイオ燃料の環境負荷は今後さらに削減されるものと期待される。

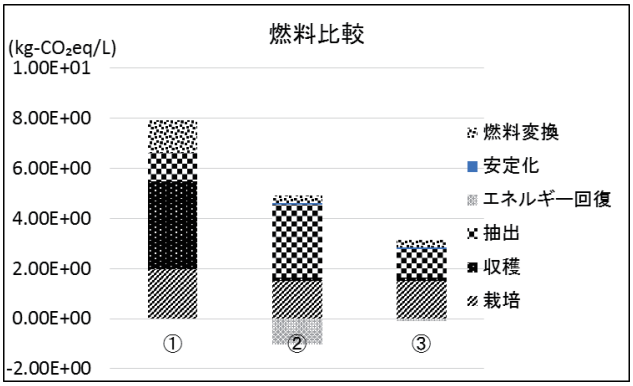


図 6 燃料製造 1L における GHG 排出量の比較

5. 結論と課題

本研究では航空機燃料（藻類バイオ燃料、従来燃料）と航空機（A330-200）に対して GHG 排出量の評価を行った。燃料製造工程では、HTL プロセスが最も環境負荷が低かった。HTL では脱水工程を行わずに燃料変換を行うこと、また発生したガスを熱として再利用していることから環境負荷削減に繋がっていると考えられる。藻類バイオ燃料は技術改善により運航を含めた環境負荷を従来燃料より低減することができてきており、さらなる技術革新を通じて環境負荷の削減が期待される。

今後は、航空機の運航をより実用性のある評価にするため藻類バイオ燃料を用いた時の環境影響削減効果、環境面とコスト面を考慮した費用対効果分析を行う必要がある。

6. 参考文献

1) “民間航空機に関する市場予測”一般社団法人日本航空開発協会
http://www.jadc.jp/files/topics/109_ext_01_0.pdf
2) “世界の航空旅客需要予測”国土交通省
http://www.mlit.go.jp/common/001116059.pdf

バイオ燃料の持続可能性評価に関する研究

～地方自治体の廃食用油 BDF 化事業の環境面および経済面の評価～

A study of the sustainability assessment of biofuel : An assessment of BDF program in Japanese local government in aspects of environment and economy

○[1)] 王 任卓　[2)] 納富 信

Renzhuo WANG, Makoto NOHTOMI

[1)2)] 早稲田大学

[*1)] wrz19901012@fuji.waseda.jp [2)] nohtomi@waseda.jp

1. はじめに

現代社会は化石燃料に大きく依存しており、気候変動や燃料資源枯渇などへの対応が持続的な社会を営むためには必要不可欠となっている。

本研究は、京都市での家庭からの廃食用油 BDF 化事業を取り上げ、環境・経済・社会それぞれの側面での事業継続性に与える影響を明らかにすることを目的としている。本報では、廃食用油の回収を含めたライフサイクルでの環境負荷評価ならびにコスト変動を加味した経済性評価の報告をおこなう。

2. 研究方法

2.1 評価範囲と比較対象

一般的に、廃食用油を原料とした BDF の環境負荷評価では、廃食用油の回収から BDF の利用までを範囲としている。それは、廃食用油は廃棄物＝無価値なものであり、それ以前の工程での負荷は考慮しないという考え方に基づく。しかし本研究では、廃食用油にも価値を配分することで、原材料栽培と食用油の利用段階も含めて、環境負荷を計算した。

2.2 評価指標の設定

先ず、多くのバイオエネルギーに関する持続可能性指標の中から、主に GBEP 指標を参考としてバイオ燃料の持続可能性を評価しうる候補指標を選定した。そして京都市 BDF 化事業の実施状況等を確認しながら、表 1、2 に示す“環境”“経済”の側面で持続性を評価する指標を設定した。

表 1　環境的側面の評価指標

二酸化炭素排出量
窒素酸化物（NOx）排出量
硫黄酸化物（SOx）排出量
煤塵排出量
水使用量
未処理固体廃棄物排出量

表 2　経済的側面の評価指標

BDF化施設の建屋建築費用
使用済み天ぷら回収費用
廃食用油燃料化事業

2.3 データ収集と計算方法

環境的側面の評価については、京都市 BDF 化事業の各段階でのインベントリデータを公開情報やヒアリング（主に京都市環境政策局、廃食用油燃料化施設）を通じて収集し、必要に応じて各種原単位を設定して計算をおこなった。

経済的側面の評価については、京都市 BDF 化施設の建屋建築費用[1]、使用済み天ぷら回収事業評価票[2]と廃食用油燃料化事業評価票[3]の情報を基にしておこなった。

3. 結果

3.1　環境的側面

表 3 に、BDF のライフサイクルにおける環境的側面の評価結果を示す。これより、BDF は二酸化炭素換算の温室効果ガスと SOx の排出量は軽油を利用する時と比べて大きな優位性があると言える。一方、NOx、煤塵、未処理ゴミは、BDF を利用する場合は軽油の場合よりも多く排出され、水も大量に使用されることがわかる。

3.2　経済的側面

京都市の年間での BDF 生産にかかるコストと、仮に使用している BDF を軽油で代替した場合のコスト（軽油コスト）との比較結果を図 1 に示す[1][2][3]。なお軽油のコストは、京都市における軽油相当燃料全体の需要量を週毎に分けて、それぞれの需要量に各週の軽油平均価格を乗じて算出した。

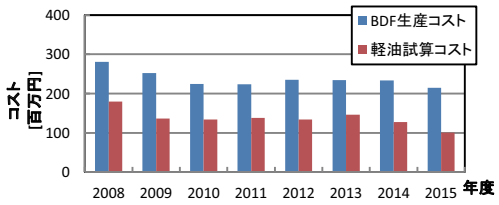


図 1　BDF 生産と軽油試算コストの比較

2008 年以降は、軽油の価格にも変化はあったもの、2015 年までは BDF の利用に係るコストのほうが高いことが分かる。

4. まとめ

環境的側面の評価結果より、温室効果ガスの排出面では BDF 化事業は軽油利用と比較して優位性があると考えられる。また、NOx、煤塵、未処理ゴミ排出量と水利用の比較結果より、BDF を利用する場合は、より環境負荷が高いことが分かった。しかし、煤塵の排出量、未処理ゴミ排出量と水使用量の多くは、原料の栽培段階で使用・発生していることから、原料栽培地や栽培方法の違いなども考慮する必要がある。

経済的側面の評価結果より、軽油と比べて BDF の利用コストが高いことが分かったが、BDF 化施設建築時の市債の償還後(2019 年度以降)はコスト差が減少すると考える。また、今後軽油の価格が上昇した場合には、BDF の利用がコスト面でも優位になり、事業の持続可能性が高くなるかもしれない。以後も、エネルギー価格等の変動を考慮した持続可能性の評価手法について引き続き検討をおこなってゆく予定である。

参考文献：

[1] 京都市南部クリーンセンター燃料化施設係「京都市における廃食用油燃料化事業の概要と施設紹介」

[2] 京都市環境政策局　まち美化推進課「京都市使用済み天ぷら回収事業評価票」

[3] 京都市環境政策局　まち美化推進課「廃食用油燃料化事業評価票」

表 3　環境負荷の比較

環境負荷比較	二酸化炭素排出量（CO2-トン/年）	NOx排出量（NOx-トン/年）	SOx排出量（SOx-トン/年）	煤塵排出量（煤塵-トン/年）	水使用量（水-トン/年）	未処理ゴミ（未処理ゴミ-トン/年）
BDF（栽培除く）	351	1.29	0.0265	77	1950	7.36
BDF（栽培含む）	805	1.49	0.0557	446	31600	16.9
軽油	2760	0.981	0.138	0.0877	835	0.002

バイオ燃料の持続可能性評価に関する研究

～地方自治体の廃食用油 BDF 化事業の社会的側面の評価～

A study of the sustainability assessment of biofuel : An assessment of BDF program in Japanese local government in societal aspect

○[1)] 王 任卓　[2)] 納富 信

Renzhuo WANG, Makoto NOHTOMI

[1)2)] 早稲田大学

[*1)] wrz19901012@fuji.waseda.jp [2)] nohtomi@waseda.jp

1. はじめに

現代社会は化石燃料に大きく依存しており、気候変動や燃料資源枯渇などへの対応が持続的な社会を営むためには必要不可欠である。

本研究は、京都市での家庭からの廃食用油の BDF 化事業を取り上げ、環境・経済・社会それぞれの側面での事業継続性に与える影響を明らかにすることを目的としている。本報では、BDF 化事業が社会的側面に影響を与える項目を検討し、それらを用いて京都市での取り組みについて評価した結果を報告する。

2. 研究方法

2.1 評価範囲

社会的側面の評価を考えるにあたって、それに関わるステークホルダーの立場から、評価範囲を使用済み天ぷら油の回収から BDF を市バスやゴミ収集車で利用するところまでとした。それに関わるステークホルダーと関係する段階は、市民（回収）、行政（回収・製造・利用）、事業者（回収・利用）である。

2.2 評価指標の設定

本研究では多くのバイオエネルギーの持続可能性指標を参考としながら、日本や京都市の現状を勘案して、表 1 に示す指標を設定した。なお、これらの指標は、持続性との関連性の強さ、データ入手の容易性を優先して選定したものであり、最終的にこれらに限定されるものではないことを付記する。

表 1　社会的側面の評価指標

BDF利用意欲
供給安定性
住民意識
環境事業に対するやる気

「BDF 利用意欲」「供給安定性」「環境事業に対するやる気」は自治体行政の立場から、「住民意欲」は事業に関わる住民の立場からの評価指標とし、京都市と他自治体との比較によって評価する。

2.3 評価指標の数量化方法

2.3.1 BDF 利用意欲

現在、いくつかの地方自治体では、保有しているバスとゴミ収集車に BDF を燃料として利用している。そこで、BDF の利用意欲を、行政が管理・保有するバス・ゴミ収集車の全体数に対する BDF 利用車両の台数として見積もることとした。

2.3.2 供給安定性

供給安定性は、現存する BDF 生産施設での生産量が、各自治体での最大 BDF 需要量（自治体が管理・保有するバスとゴミ収集車の燃料利用量）に対してどの程度充足しているのか、という観点で評価した。

2.3.3　住民意識

京都市では、BDF 原料の一部（約 20%弱）を住民からの使用済み天ぷら油回収で賄っている。廃棄物・資源循環の観点から、住民の理解と参加の程度を把握することは、事業の継続性に大きな影響があると予想されるが、使用済み天ぷら油の回収に限った意識調査は例が少ないことから、本研究ではゴミの分別と収集に対する意識、省エネルギーに対する取り組み意識で代替できるものと仮定して住民意識の把握を試みた。

2.3.4　環境事業に対するやる気

近年、自治体においては「地球温暖化対策実行計画」が策定され、そして、自治体が環境事業に対して、一般的に“環境費”も出している。このため、各自治体の温暖化政策の推進状況と自治体の歳出全体の中での環境費の割合を導く事で、自治体の環境事業に対するやる気について把握を試みた。

3. 結果

3.1　BDF 利用意欲の比較結果

BDF を市バス・ゴミ収集車の燃料として継続的に利用している自治体はあまり多くないが、本研究では京都市と佐賀市の比較をおこなった。結果、現時点では、京都市の市バスでの BDF 利用意欲が高いことがわかった。しかし、佐賀市における利用割合も上昇する傾向にあることから、今後は継続的な BDF 利用が見込まれる。（図 SI1、図 SI2）

3.2　供給安定性の比較結果

京都市では、現時点で保有する市バスとゴミ収集車全てに対して不足無く BDF を供給することは困難であることがわかる。（表 SI1）

3.3　住民意識

京都市市民は環境に関する活動面で他自治体住民と比較して高い意識だとわかった。[1-5]（図 SI3、図 SI4、図 SI5）

3.4　環境事業に対するやる気

京都市は 2010 年までの温室効果ガス排出削減率が高く、将来も高い減少率が見込めることから、温暖化対策を中心とした環境事業のやる気と継続性は高いと考える。[6,7]

表 2　各自治体 GHG の減少率[6,7]

自治体	1990年GHG 排出量[万トン]	2010年GHG 排出量[万トン]	削減率
京都市	779	661	0.15
さいたま市	439	512	-0.17
神戸市	1,107	1,036	0.06
横浜市	1,686	1,930	-0.14

4. 結論

社会的側面に関する自治体間の比較から、現時点では全体的に京都市の評価がやや高いことがわかった。今後は、社会的側面の持続可能性を適切に評価できる項目の選定と比較評価を継続しておこなってゆく。

参考文献：

[1] 神戸市　2010、2012、2013、2014 年　「家庭系ごみに関する市民アンケート調査」

[2] 福岡市　2013、2014、2015 年　「市政アンケート調査報告書」

[3] 川崎市　2012 年　「ごみの減量化・リサイクルに関する市民アンケート」

[4] 名古屋市　2012 年　「環境対策についてアンケート」

[5] 京都市　2010、2012、2013、2014、2015 年　「京都市のごみ収集業務に関するアンケート調査」

[6] 京都市、神戸市、横浜市　2011 年　「京都市地球温暖化対策計画」

[7] さいたま市　2009 年　「さいたま市地球温暖化対策実行計画（区域施策編）」

Supporting Information

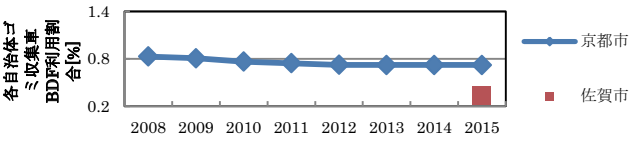


図 SI1　ゴミ収集車BDF利用割合

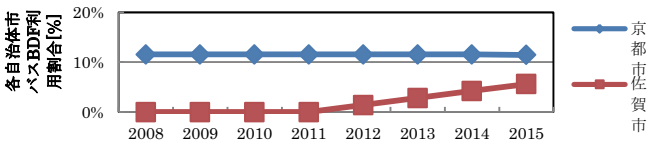


図 SI2　市バスBDF利用割合

表 SI1　BDF 供給安定性試算結果

自治体	年間生産能力[L]	BDF利用先最大利用可能量[L]	供給可能割合
京都市	1,500,000	1,934,187	0.78
佐賀市	400,000	528,200	0.76

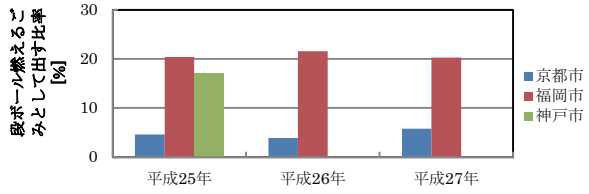


図 SI3　段ボール回収状況[1-5]

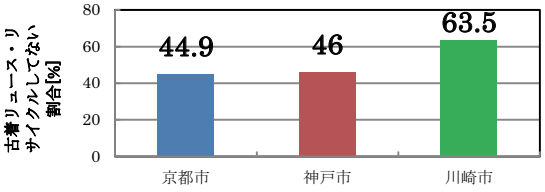


図 SI4　古着回収状況（平成 24 年）[1-5]

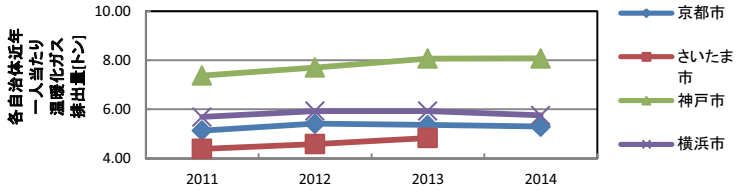


図 SI5　自治体市民一人当たりの GHG 排出[6,7]

Development of Municipal Solid Waste Collection System in Jalalabad City, Afghanistan

○Mohammad Jamal Bawar*[1)], Seiji Hashimoto[1)]
1) Ritsumeikan University
*gr0258xr@ed.ritsumei.ac.jp

1. INTRODUCTION

Jalalabad city, the capital of Nangarhar province, Afghanistan, is the second largest city in the eastern part of the country, with more than 500,000 residents [1]. Since 2001, the city has accommodated a continuous stream of migrants from neighboring Pakistan. This migration led to increase the generation of municipal solid wastes in the city, which has become the city's worst problem. The absence of a proper municipal solid waste management (MSWM) has brought about human health threats, surface and underground water contamination, air and soil pollution, and other difficulties. Moreover, the city aesthetics have been adversely affected because waste is apparently dumped everywhere. The municipality, which is responsible for MSWM, seems to have failed in tackling the problem because of technical, financial, and resource constraints. The root cause of the problems is improper waste storage and collection. Therefore, it is crucially important to model a proper solid waste storage and collection system that can be expected to benefit the people's social, environmental, and economic circumstances. Principally, this research is aimed at developing a suitable storage and collection system for Jalalabad city, Afghanistan.

2. METHODOLOGY

2.1 Evaluation of the Current System

The questionnaire survey was administered in September, 2016 to 25 residences in each of the city's 6 districts (150 households in total). Target respondents were mainly women because they are responsible for managing residential wastes. The questionnaire was designed to acquire information related to waste management practices of households, perceptions and satisfaction levels of the city's MSWM system, and people's difficulties and needs.

The interviews with the government officials and Wakeel Guzar (a community representative and intermediary between local people and government) were conducted in September, 2016. The officer in charge of sanitation in the municipality were asked regarding city's current MSWM cycle, service coverage, inventory of collection bins and vehicles, current landfill location and capacity, operation and maintenance cost, and their problems and recent achievements. Likewise, information such as city's population and land availability for landfill disposal was retrieved from Ministry of Urban Development Affairs (MUDA). Wakeel Guzar provided unbiased information and opinions regarding the MSWM problems in the community, the fault of residents, and mismanagement of the government. By and large, the Wakeel Guzar's information verified the information provided by the people and the government.

Residential waste composition analysis was also conducted in September, 2016. From 60 households from all the districts of the city, a total of 210 kg of waste was collected. Plastic waste bags were distributed to these households, which used them to collect one day's waste (24 hr). After the waste was mixed and compacted thoroughly, a 9 kg sample was taken from the total waste. The sample was then separated into six categories: organic, plastic, paper, metal, glass, and other. Waste of each category was then weighed.

2.2 Planning and Evaluation of a New Collection System

Based on the evaluation above, suitable storage and collection was proposed. For storage, the size of each container was calculated based on the people's attitudes, government capabilities, climatic conditions, locations, and collection frequency. Then, the total number of communal containers required by the city and each district was estimated. District 4, the most densely populated area, was selected as a sample area for detailed analysis. Road network data were digitized in GIS. Then roads were categorized as major, minor, or other. The communal containers were then placed properly at road intersections. Then, assisted by GIS optimal routing model, the minimum cost/ distance efficient collection paths were found for transporting waste to the landfill site. Vehicle types were selected based on the types of proposed containers.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Evaluation of the Current System

(1) Questionnaire Survey Results

Regarding collection, people recognized that the municipality did not have a specific schedule to collect waste from the collection points. Figure 1 presents the perceived frequency of solid waste collection from the collection points. Waste at 32% of collection points is collected once a week, followed by frequency of less than once a week at 22%. However, less than 1% of the waste is collected on a daily basis. Overall, city waste collection practices could be called very poor.

Figure 2 presents people's satisfaction levels of MSWM service of the city. People in the lower income category are

poorly served, which explains their high dissatisfaction. People reporting higher incomes are somewhat satisfied because of their residential location at the city center, where the MSWM service is good. Overall, most people are unsatisfied with the service. Furthermore, although the government claims to have provided community waste containers to people, the survey revealed that 29% of the people did not have, leaving them no alternative but to dump waste openly in streets.

(2) Interview Results

As per municipality, the current MSWM cycle involves storage, collection and disposal, which is being managed by a total of 321 labors using a total of 26 cleaning vehicles, 2 loaders, 2 water tanker and 1 ambulance. The waste is stored in communal containers and a total of 100 of these are distributed in the city. There is no sanitary landfill, instead, the waste is dumped in an agricultural land, resulting in the pollution of the river water. Operation and maintenance cost are 66.5 million Afghanis/year. According to MUDA, the city has a total population of 540,000 which have been disseminated in 6 urban districts. Due to land availability limitations and less attention to MSWM service, the government has failed to provide permanent land for dumping. The Wakeel Guzars confessed that the communal containers are of poor material, insufficient capacity, and less in numbers. The vehicles used for collection are mostly old and are less in numbers. They claimed that the municipality does not have a 100% service coverage.

(3) Waste Composition Analysis Results

Figure 3 shows that organic waste had the highest share of 62% in the total waste sample, followed by plastics and paper. This composition agrees with those found for cities in other economically low-income countries worldwide [2]. A waste generation rate was estimated about 0.37 kg/capita/day, which produces 950 m³ of waste per day in the city.

3.2 Planning and Evaluation of a New Collection System

Considering problems found in above, a set of recommendations can be provided for waste storage and collection. To curb scattering of wastes and pollution from collection points, exchanged community containers were recommended. Containers of these types can accommodate up to 5 m³ of waste, which can accommodate the waste of four streets (22 houses/street) for three days. Numbers of containers required for the city were estimated as shown in Table 1. The collection activities and related information will be discussed in detail at the time of the presentation.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by Project for the Promotion and Enhancement of the Afghan Capacity for Effective Development (PEACE) program of Japan International Cooperation Agency (JICA).

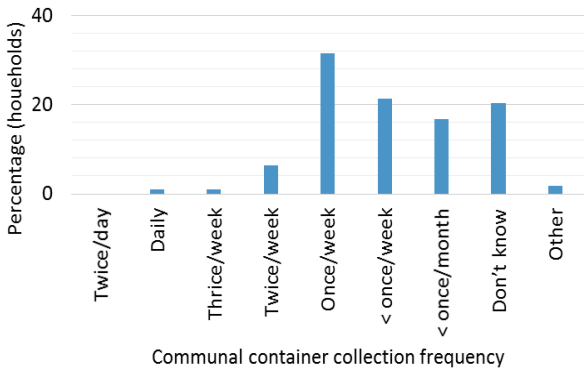


Figure 1: Communal container collection frequency

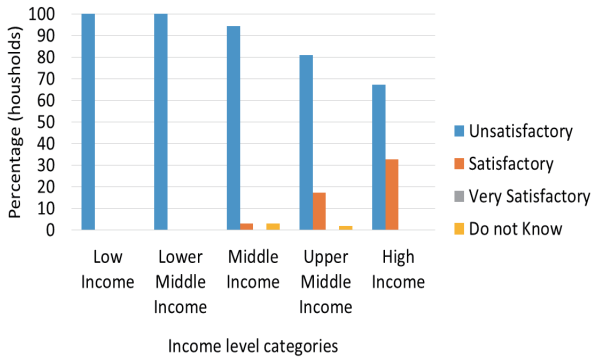


Figure 2: MSWM service satisfaction level.

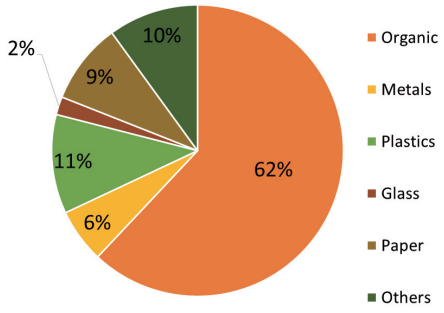


Figure 3: Waste composition.

Table 1: Number of communal containers required.

District	Total population of the city (person)	Population share (%)	Population (person)	Waste generation (m³/day)	Container capacity (m³/unit)	Containers required (unit)
District 1	540000	21	115000	203	5	41
District 2		20	110000	194		39
District 3		15	80000	141		28
District 4		22	120000	212		43
District 5		14	75000	132		26
District 6		7	40000	71		14

REFERENCES

[1] United States Agency for International Development (USAID): Land Reform in Afghanistan (LARA) Jalalabad City Profile, 2013.

[2] Hoornweg, D., Bhada-Tata, P.: What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management, Urban Development Series; Knowledge Papers no. 15, World Bank, 2012.

ライフサイクル処理単価による廃棄物処理施設の最適寿命の推定

An estimation of optimum lifetime by lifecycle unit cost of treatment for waste management facilities

○稲葉陸太*[1)]、田崎智宏 [1)]
Rokuta Inaba, Tomohiro Tasaki
1) 国立環境研究所
*inaba.rokuta@nies.go.jp

1. はじめに

日本では将来、人口減少による地方自治体の財政逼迫が懸念されており、一般廃棄物の処理においても、関連費用の低減が求められている。自治体の中には費用低減策として焼却施設の延命化が検討されている。一方、一般廃棄物処理施設等の関連費用の情報整備については、施設運営への活用方策が明確化されなければ単に作業負担の増加になる恐れも指摘されている [1)]。

本研究では、累積の処理費用を累積の処理量で除した値を「ライフサイクル処理単価（LCUCT: Life Cycle Unit Cost of Treatment）」と捉え（詳細は後述）、それが最小となる時点までの稼働年数が経済的に最適な施設寿命であると考えた。また、6 つの一般廃棄物焼却施設を対象として、関連費用に関する詳細なデータを収集・整理し、経年および累積の関連費用および処理量を分析し、それらをふまえて LCUCT も分析した。

2. 分析対象

一般廃棄物処理施設に係る経費は、施設の建設費とその運営・維持管理費に大別される。前者はさらに機械設備工事費および土木・建設工事費に、後者はさらに運転管理に係る業務費、それ以外の業務費、および資金調達・返済に係る費用に区別される。本研究ではこれらを可能な限り詳細に把握することを目指した。これらの全体像を図 1 に示す。

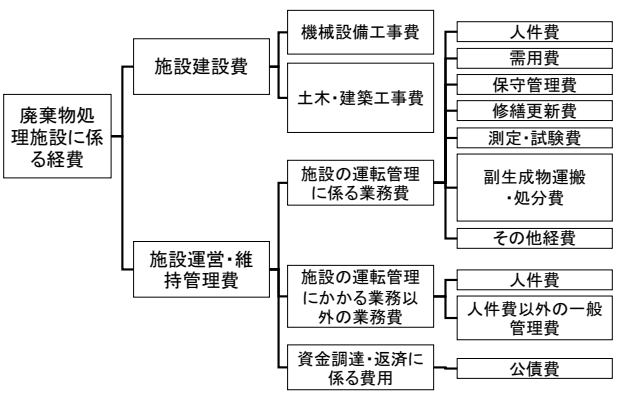


図 1　一般廃棄物処理施設の関連コスト

本研究では、上記の一般廃棄物処理施設の関連費用トを把握するために、6 つの焼却施設を対象としてヒアリング・訪問調査を行い、当該施設を管理する自治体等から入手した廃棄物処理施設整備国庫補助金事業実績報告書等により施設建設費データを、決算書・償還台帳等により施設運営・維持管理費データをそれぞれ集計した。6 施設の概要を表 1 に示す。

表 1　分析対象の 6 施設の概要

	方式	施設能力	稼働年数	運営	発電規模
A	全連続式ストーカ炉	220t/日（2炉）	27年	委託	800 kW
B	全連続式ストーカ炉	351t/日（3炉）	23年（終了）	委託	3,000 kW
C	全連続式ストーカ炉	600t/日（3炉）	20年	直営	7,000 kW
D	全連続式ストーカ炉	240t/日（3炉）	25年	委託	-
E	全連続式ストーカ炉	140t/日（2炉）	26年	委託	-
F	准連続式ストーカ炉	98t/日（2炉）	19年	委託	-

6 施設の各種期間を図 2 に示す。同図では建設期間を紫、運転期間を濃緑、修繕工事期間を橙、および解体工事期間を赤で表示している。

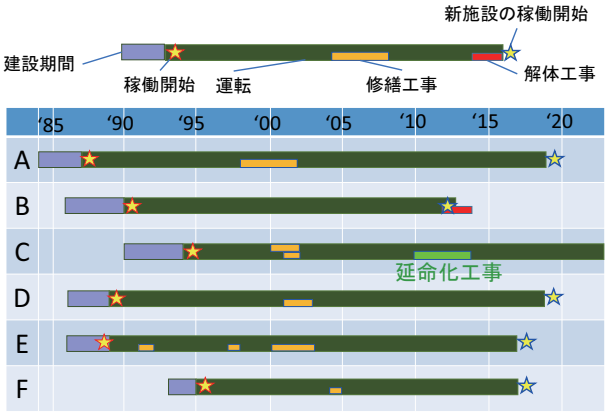


図 2　各施設の経緯

3. 分析方法

本研究では、廃棄物処理施設に関して、ある年数までの累積の関連費用を処理量で割った値を「LCUCT（前述）」、これを最小とする稼働年数を「経済的最適

寿命（EOL: Economically Optimum Lifetimes)」と考える。廃棄物処理施設の関連費用データにデフレーター調整を行い、過去における関連費用の経年変化を解析する。また、それらの結果を用いて今後の運営・維持管理費について 3 種類のトレンド推計を行い、各々の EOL を算出する。推計の種類は、全運営期間（但し 1、2 年目を除く）の一次式トレンド（パターン 1)、過去 5 年間の一次式トレンド（パターン 2）及び指数式トレンド（パターン 3）である。また、計画年数と EOL における LCUCT を推定し、EOL を採用した場合の LCUCT の削減率を求め、その効果を求める。

4. 分析結果

分析結果のうち、施設 A を例として図 3 に示す。同図に示すように、いずれの推計パターンでも EOL は 23 年となった。これに対し、現在の稼働年数および計画年数は各々27 年および 32 年と EOL を過ぎており、計画年数に近づくほど施設運用は経済的ではなくなっていくことになる。

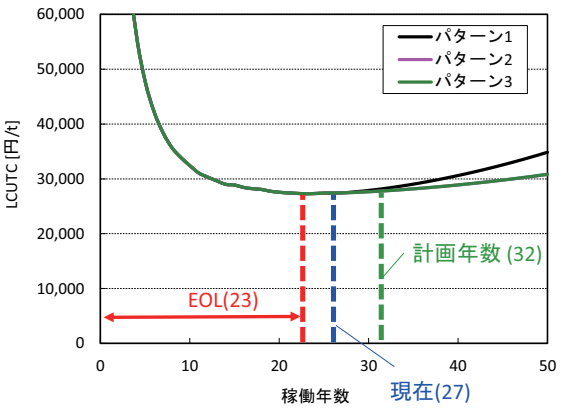


図 3　LCUC と EOL（施設 A の場合）

施設 A と同様に、他の 5 施設についても LCUCT と EOL を推計した。その結果を図 4 にまとめて示す。同図において、現在の運用年数は「現在」（濃茶)、計画の運用年数は「計画」（薄茶)、延命化による運用年数は「計画（延命化)」（薄茶から透明の階調）で示している。また、各施設ともに推計パターンによって EOL には幅があるため、「EOL（最小)」（緑）および「EOL（最大)」（黄緑）を表示している。3 施設で EOL は計画年数を超えたが、残る 2 施設ではその逆であった。前者の施設では EOL までの運用を採用すれば計画よりも経済的となり、後者の施設では最も経済的な年数となる前に施設運用が終了することになる。施設 F は計画年数が EOL の最大値と最小値の間に位置し、経済的に適切な計画ということになる。

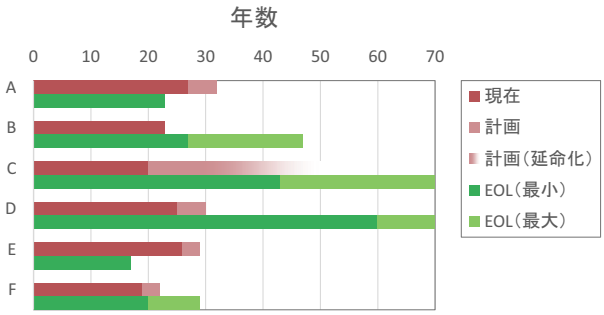


図 4　各施設の計画年数と EOL

つぎに、EOL と計画年数における各々の LCUCT の差から、EOL の採用による LCUCT の削減率を求めた（図 5)。同図に示すように、施設 D および E においては LCUCT の削減率が大きく、EOL の採用が効果的となる可能性がある。一方、残る 4 施設においては LCUCT の削減率が小さく、計画年数で施設を終了しても経済的な問題は小さいといえる。なお、この推計では施設 D の EOL を現実的な 50 年と想定した。

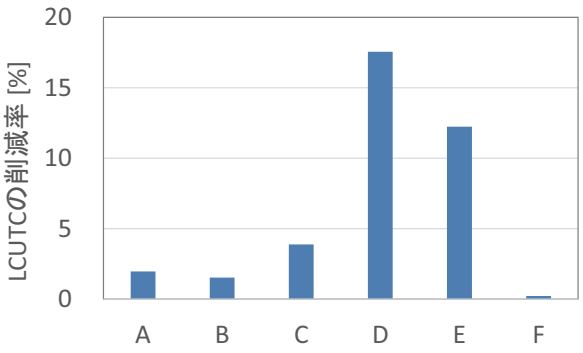


図 5　EOL 採用による LCUC の削減率

5. おわりに

本研究では、6 つの一般廃棄物焼却施設を対象として関連費用の傾向を分析し、前述の LCUCT や EOL を求めた。分析の結果、施設によって計画年数と EOL との大小関係や差分は異なること、EOL の採用による LCUCT の削減率も異なることが示された。LCUCT の削減率は 15%を超える例も示された。本研究の推計では、EOL が現実的な年数を超える値を示す場合もあり、LCUCT の推計におけるパターンやそのパラメータに関してはさらなる精査が必要である。

引用文献

1)　田崎智宏ら(2006) 廃棄物処理施設のライフサイクルコストの調査・研究　第 17 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.84-86

人口減少社会における一般廃棄物処理施設のマネジメント

Management of municipal solid waste treatment facilities in a society with decreasing population

○渡辺梓*[1)]、橋本征二 [1)]
Azusa Watanabe, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* rv0041xp@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

近年、3R 意識の向上やごみ有料化などにより、一般廃棄物の一人あたり排出量は減少傾向にある。今後の人口減少を考慮すれば、一般廃棄物の排出量はさらに減少していくことになるだろう。そのため、必要となる廃棄物処理の施設規模もこれに応じて縮小していくことになると考えられる。ここで、現在使用されている一般廃棄物焼却施設の約半数は、稼働年数が 16 年以上経過しており[1)]、多くの施設が更新あるいは延命化を必要とする段階に来ている。一方、政府財政的には社会保障費や国債費が増加する中で、公共事業費の割合は縮小してきている[2)]。したがって、今後は限られた予算の中で、こうした施設を維持・活用することが必要となってくる。

このようなことから、本研究では、2040 年までの一般廃棄物の排出量とそれまでに寿命を迎える処理施設能力について検討するとともに、更新が必要となる処理施設能力と処理施設整備に必要な費用を推計し、今後の処理施設整備の方向性について検討した。本要旨では、一般廃棄物焼却施設を対象に検討した結果の一部を報告する。

2. 方法

2.1 一般廃棄物の一人あたり排出量と処理方法のシナリオ作成

一般廃棄物の一人一日あたり排出量、焼却処理率の変化の傾向を都道府県別に把握し、2040 年までのシナリオを作成した。2000～2014 年の一般廃棄物の排出量、焼却処理率の傾向について、環境省の「一般廃棄物処理実態調査結果」[3)]のデータを用いて把握した。

2.2 廃棄物処理施設の寿命のシナリオ作成

焼却施設の平均供用年数を推計し、今後の長寿命化の可能性[1)]を考慮して、2040 年までのシナリオを作成した。1998～2014 年の間に廃止された焼却施設の供用年数について、環境省の「一般廃棄物処理実態調査結果」[3)]のデータ用いて把握した。

2.3 今後の廃棄物処理量の推計

以上をもとに、今後の都道府県別の一般廃棄物排出量 Q_k[t]、焼却処理量 Qi_k[t]を下式により推計した。

$$Q_k = w_k \times p_k \times 365 \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$Qi_k = Q_k \times i_k \times 10^{-2} \quad (2)$$

ここで、w_k は k 年における一人一日あたりの一般廃棄物排出量[g/人/日]、p_k は k 年における人口[人]、i_k は k 年における焼却処理率[%]である。人口については、国立社会保障・人口問題研究所の「日本の地域別将来推計人口」[4)]の中位シナリオを用いた。

2.4 今後寿命を迎える処理施設能力と更新が必要となる処理施設能力の推計

2040 年までに寿命を迎える焼却施設の処理能力 Cd[t/日]を下式により推計した。

$$Cd = \sum_{k=2015}^{2040} Cd_k \quad (3)$$

ここで、Cd_k は k 年に寿命を迎える焼却施設の処理能力[t/日][3)]である。また、2040 年までに更新が必要となる焼却施設の処理能力 Cn[t/日]を下式により推計した。

$$Cn = \left\{ \sum_{k=2015}^{2040} (Qi_k - Cs_k * \alpha * \beta) \right\} / (\alpha * \beta) \quad (4)$$

ここで、Cs_k は k 年に維持されている焼却施設の処理能力[t/日][3)]、α は年間実稼働日数で 280[日]、β は稼働日調整分稼働率で 0.96[–]である[5)]。

2.5 今後の処理施設整備費用の推計

廃棄物研究財団の「ごみ焼却施設台帳」[6)]を用いて焼却施設の建設費の単位処理能力あたりの原単位を算出した。延命化工事費については、環境省の「廃棄物処理施設長寿命化総合計画作成の手引き（ごみ焼却施設編）」[1)]を、ランニングコストに関しては松藤[7)]ならびに伊川ら[8)]を参考に推計した。

以上をもとに、今後の処理施設整備の方向性について検討した。

3. 結果と考察

3.1 一般廃棄物の一人あたり排出量と処理方法のシナリオ

2000～2014 年における各都道府県の一人一日あたり一般廃棄物排出量の変化率は、–31%～+8%（全国では–16%）で、41 の都道府県において減少していた。また、この傾向が続くとすると、2040 年の排出量は 2014 年と比較して –86%～+6%（全国では-42%）になると推計された。本研究では、今後の経済状況によっては排出量が増加に転ずる可能性や見込まれる排出抑制の程度を考慮して、

2040 年の一人一日あたり排出量が、2014 年比で+10%、–20%となる 2 つのシナリオ（それぞれ A、B）を設定した（表 1）。一方、2000～2014 年における各都道府県の焼却処理率の変化は–8%～+14%（全国平均は+2%）で、多くの都道府県において微増傾向にあった。今後リサイクルが進展して焼却処理率が減少する可能性はあるものの、ここでは今後も大きな変化はないと仮定し、2014 年と同様の焼却処理率が今後も維持されるとした（表 1）。

3.2　廃棄物処理施設の寿命のシナリオ

1998～2014 年の間に廃止された全焼却施設（429 施設）のうち 10 年以上供用された施設の平均供用年数は約 24 年であった。また、全焼却施設の約 3 分の 2（283 施設）を占めるストーカ式焼却炉の平均供用年数は 25 年であった。2014 年時点における全 1162 施設のうち 826 施設がストーカ式焼却炉であることから[9]、本研究では、焼却施設の平均供用年数を 25 年と設定し、さらに、近年注目されているストックマネジメント[1]により、適切な維持管理が推進されることで供用年数が増加していくことも想定して、今後の平均供用年数が 25 年、40 年となる 2 つのシナリオ（それぞれ 1、2）を設定した（表 1）。

3.3　今後の廃棄物処理量

以上のシナリオをもとに、人口の変化も考慮しながら 2040 年までの一般廃棄物の焼却処理量を推計した結果、A シナリオ（排出量+10%）では 2014 年と比較して–21%～+12%（全国では–2%）、B シナリオ（排出量–20%）では–42%～–19%（全国では–29%）の変化率となった。

3.4　今後寿命を迎える処理施設能力と更新が必要となる処理施設能力

2015 年から 2040 年の間に更新が必要となる処理施設能力を、寿命を迎える処理施設能力で除した値を更新率として、各シナリオの更新率を推計した結果を図 1 に示す。A シナリオでは、宮崎県のみ現在以上の焼却能力が必要になるとの結果になったが、人口減少の影響もあり概ね 80%を下回る更新率となった。B シナリオでは、焼却処理量のさらなる減少に伴って更新率も概ね 60%を下回る結果となった。このうち、施設寿命が伸びる B2 シナリオにおいては、7 県で更新率が 0%となり、これらの県においては、施設の適切な維持管理により新たな施設の建設は 2040 年まで不要であるという結果となった。施設寿命が現状程度の B1 シナリオと比較すると、多くの都道府県で更新率が大幅に減少しており、施設の長寿命化が経費節減において効果的と考えられるが、具体的な削減効果の推計結果については学会当日報告する。

表 1　設定したシナリオ

シナリオ	A1	A2	B1	B2
一人一日あたり排出量(g)	2014 年比 +10%		2014 年比 −20%	
焼却処理率(%)	2014 年と同率			
焼却施設寿命(年)	25	40	25	40

謝辞：本研究は、環境研究総合推進費（1-1402、3K163001）及び科学研究費補助金（26281056）による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

1) 環境省：廃棄物処理施設長寿命化総合計画作成の手引き（ごみ焼却施設編）、2015
2) 財務省：日本の財政関係資料、2016
3) 環境省：一般廃棄物処理実態調査結果、1998～2014
4) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の地域別将来推計人口（平成 25（2013）年 3 月推計）、2013
5) 全国都市清掃会議：ごみ処理施設整備の計画・設計要領 2006 改訂版、2006
6) 廃棄物研究財団：ごみ焼却施設台帳、2011
7) 松藤俊彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価、技報堂出版、2005
8) 伊川純慶、中窪豊彦、東海明宏：レジリエンス特性を踏まえた災害廃棄物（可燃系廃棄物）処理の対策効果分析—近畿圏における広域連携を対象として—、土木学会論文集 G、71(6)、pp.253–262、2015
9) 環境省：日本の廃棄物処理、2016

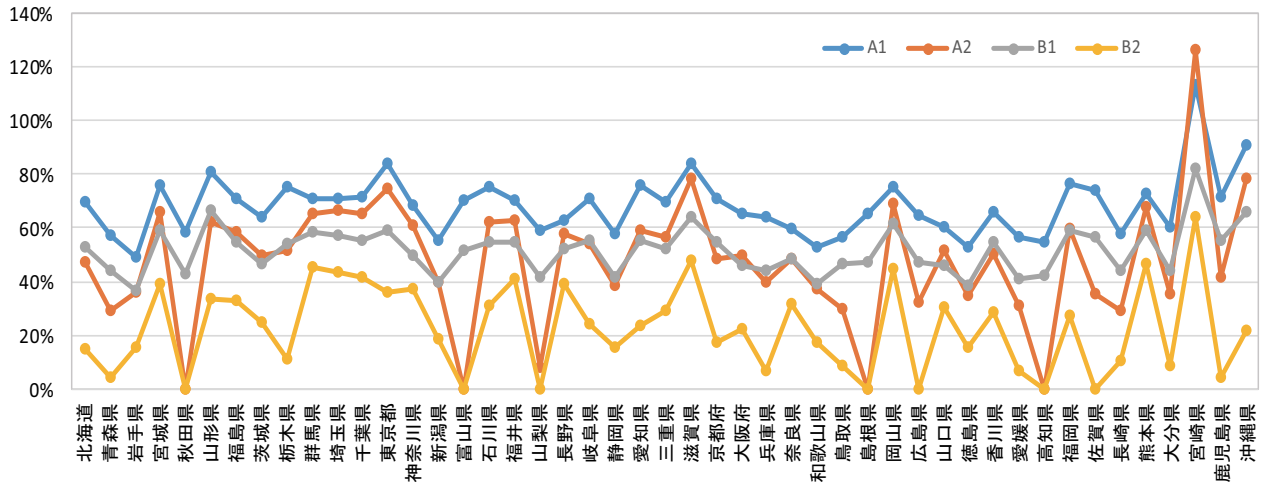


図 1　各都道府県における 2015 年から 2040 年までの更新率

中国広東省における建築廃棄物の持続可能な管理に着目した廃棄物産業連関表の構築

Development of WIO table focused on Sustainable management of Construction waste in Guangdong province, China

○トウガン*[1)]、松八重一代[1)]
Dong Yang, Kazuyo Matsubae
1)東北大学
* dong.yan.r8@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

1990 年代から、中国の経済発展は著しく、同時に、環境汚染がますます深刻化してきた。近年、環境保護の重要性と持続可能な経済発展の必要性が経済発展と同時に求められるようになり、廃棄物の安定処理と再資源化が重要視されるようになってきた。しかしながら、中国の廃棄物処理はまだ発展段階にあり、有効な監督システムと科学的な管理システムの更なる改善が求められている。特に、近年に急激な発展をした都市において大量の建築廃棄物排出は不適切な管理・廃棄が問題視されている。広東省は中国において最も経済発展した地方の一つであり、経済活動増加率が 2012 年に一位になった地域である[1)]。今後、広東省においてさらに増大する建築需要を背景として、建築廃棄物の排出と管理に関する分析を行うために、広東省の廃棄物産業連関表（Waste Input-output Table:以下 WIO 表）を作成し、広東省における建築廃棄物を含む都市廃棄物の発生と処理・再資源化のシナリオ分析を行う。

2. 研究方法

2.1 廃棄物産業連関表の概要

産業連関表(Input-output を Table; 以下 IO 表)を基盤とし、廃棄物の排出、処理と再資源化を詳細に表した表であり、産業活動と廃棄物の排出と処理の関係を定量的に解析可能にしたものである。

2.2 広東省廃棄物産業連関表の構築

本研究は、広東省 2012 年の IO 表と日本の 2005 年版 WIO 表[2)] を基にして広東省 2012 年版 WIO 表を作成する。ここでは以下のステップで作業を行う。

1) 日本の WIO 表の産業分類と広東省 IO 表の産業分類の整合

2) 日本の 2005 年版 WIO 表を参照し、中国元換算の産業活動、廃棄物排出の関係表を作成

3) 2)と広東省 2012 年 IO 表、広東省の廃棄物統計を用いて広東省 2012 年版 WIO 表を作成

まず 1)では日中産業連関表部門分類コンバータ[3)]を参考に、日本の 2005 年版 WIO 表の部門分類と広東省 IO 表の部門対応を行う。

次に 2)では、広東省の廃棄物統計が十分に整備されていないため、中国の廃棄物に関する法律規定と中国統計年鑑と、日本の 2005 年版 WIO 表を参考し、中国元換算の経済活動の単位あたり廃棄物排出係数を推計する。ここで、広東省の各廃棄物の排出、投入データは日本の 2005 年版 WIO 表の排出、投入係数で計算するが、日本円と人民元の為替レート、各通貨の購買力平価の違いを考慮して、人民元換算の経済活動あたりの廃棄物排出表を作成する。ここでは日本の 2005 年版 WIO 表を、為替レートと日中の購買力平価の違いを考慮して 2012 年の人民元価値に換算を行い、さらに廃棄物の排出、投入係数を計算した。最後に、3)では廃棄物処理部門のデータ計算は、北海道大学が開発した総合廃棄物処理評価モデル（H-IWM）[4)] で得た廃棄物データを代入し、廃棄物処理部門のデータを得る。

3. 日中産業部門と廃棄物部門対応表の作成

中国 IO 表産業部門は 143 部門、日本の 2005 年版 WIO 表は 103 部門である。また、広東省 IO 表産業部門は 42 部門がある。日中産業連関表部門分類コンバータを参考して分類し、付表 1 のように部門の対応を行ったうえで、日中産業部門と廃棄物部門対応表を作成した。

4. 広東省の経済構造と廃棄物排出状況

広東省統計局の統計[5)]により、広東省 2012 年の人口は 8635. 89 万人であり。2012 年の経済総量は省別全国一であり、57147. 75 億元、中国全体の 10%を占めている。産業内訳は、第二産業と第三産業は全省総生産の 95%（図 1）、全国総生産（図 2）と比べると、産業構造は近いことがわかる。

一方、廃棄物排出に目を向けると、2010 年中国国家統計局による公布された“全国第一回汚染源調査報告書”[6)] のデータにより、全国の工業固体廃棄物排出量

は 38.52 億トン、工業危険廃棄物排出量は 4573.69 万トンである。一方、広東省環境保護庁[7]によれば、2010 年広東省の固体廃棄物排出量は 1.3 億トンを超え、その内、一般工業固体廃棄物は約 1.16 億トン、工業危険廃棄物は 218.18 万トン、医療廃棄物 6.86 万トン、生活ごみの焼却灰 12 万トン、汚泥 262 万トン、主要廃棄家電製品（テレビ、冷蔵庫、洗濯機、エアコン、パソコン）排出数は 1600 万台である、生活ごみは日割り 5.99 万トンである。2012 年の廃棄物排出状況は表 1 で示すように一般工業個体廃棄物の排出、生活ごみの排出量は中国全土の排出量のそれぞれ 2%、13%を占める。

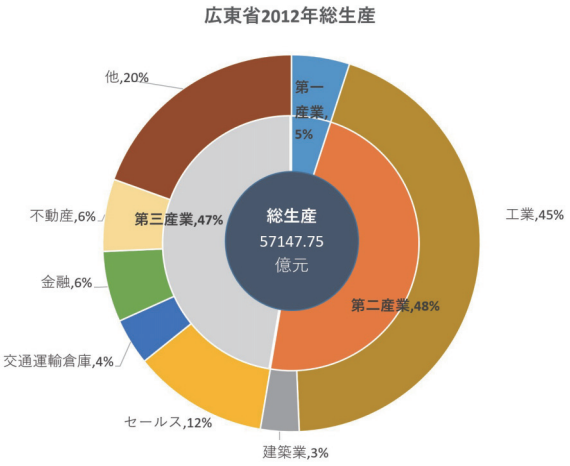


図 1　広東省における 2012 年の産業構造

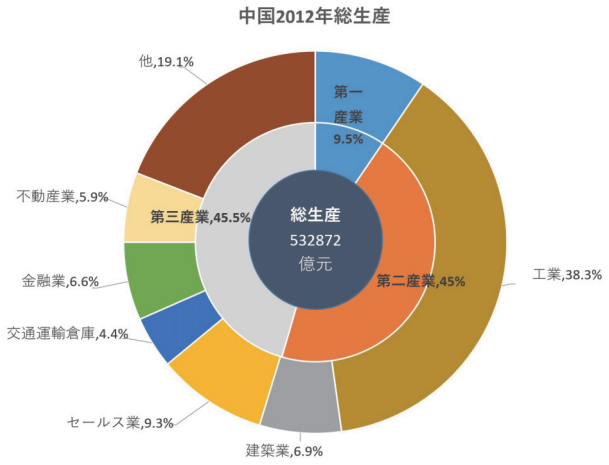


図 2　中国における 2012 年の産業構造

表 1　2012 年の中国と広東省の廃棄物排出状況

単位：万トン	中国	広東省	シェア	出典
一般工業個体廃棄物	329,044	5,965	2%	1)
工業危険廃棄物	3,465	130	4%	1)
医療廃棄物	45	7	15%	6)7)
生活ごみ	17,080	2,137	13%	1)

5.　おわりに

本研究では、広東省を対象にした WIO 表を構築し、特に建築廃棄物に着目してシナリオ分析を行う。

中国では各地方省の経済的格差ならびに統計データの整備において差が非常に大きい。とりわけ廃棄物に関する統計分析は大きな困難がある。ここでは、中国の中でも経済発展が著しい沿岸省である広東省を対象にした WIO 表を構築することで、中国における廃棄物政策において有効な知見を与えられる。

課題としては、データ精度の向上は最も重要な改善を要する点である、特に、廃棄物別種別排出量の統計についての更なる検討を要する。

引用文献

1)　中国統計年鑑 2012（中国国家統計局）(http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/)（参照 2016-12-10）

2)　中村愼一郎「WIO2000 version 0.04b」（2006 年 5 月 28 日）(http://www.f.waseda.jp/nakashin/wio_j.htm)（参照 2016-12-10）

3)　株式会社　日本アプライドリサーチ:平成 26 年度日中国際産業連関表の課題及び次回表のあり方についての調査研究（平成 27 年 3 月）

4)　北海道大学大学院廃棄物資源工学講座廃棄物処分工学分野"都市ごみの総合管理を支援する評価計算システムの開発に関する研究"（１９９８）

5)　広東統計年鑑２０１３(広東省統計局)(http://www.gdstats.gov.cn/tjnj/2013/index.html)（参照 2016-12-15）

6)　全国第一回汚染源調査報告書（中国国家統計局）(http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qttjgb/qgqttjgb/201002/t20100211_30641.html)　（参照 2016-12-15）

7)　広東省固体廃棄物汚染予防“十二·五”計画（2011-2015）（広東省環境局）(http://www.gdep.gov.cn/zcfg/hbwj/201207/t20120717_125879.html)（参照 2016-12-15）

付表 1

广东省	日本
农林牧渔产品和服务	耕種農業
	畜産
	農業サービス
	林業
	漁業
煤　　炭采选产品	石炭
石 油 和天 然 气开采产品	原油・天然ガス
金 属 矿采选产品	金属鉱物
非金属矿和其他矿采选产品	非金属鉱物
食品和烟草	食料品
	飲料
	飼料
	たばこ
纺织品	繊維工業製品
纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	衣服・その他の繊維既製品
	なめし革・毛皮・同製品
	プラスチック製品(靴)
	ゴム製品(靴)
木材加工品和　家　具	製材・木製品
	家具・装備品
造纸印刷和文教体育用品	パルプ・紙・板紙・加工紙
	紙加工品
	出版・印刷
	その他の製造工業製品(文教体育用品)
石油、炼焦产　品　和核燃料加工品	石油製品
	石炭製品
	非鉄金属加工製品(核燃料)
化学产品	無機化学基礎製品
	有機化学基礎製品
	有機化学製品
	有機質肥料
	化学肥料
	合成樹脂
	化学繊維
	医薬品
	化学最終製品(除医薬品)
	プラスチック製品(除靴)
	ゴム製品(除靴)
非 金 属矿物制品	ガラス・ガラス製品
	セメント・セメント製品
	陶磁器
	その他の窯業・土石製品
金属冶炼和压延加工品	銑鉄・粗鋼
	鋼材
	鋳鍛造品
	非鉄金属製錬・精製
	非鉄金属加工製品(除核燃料)
	その他の鉄鋼製品
金属制品	建設・建築用金属製品
	その他の金属製品
通用设备	一般産業機械(除電子製品)
	事務用・サービス用機器
	その他の一般機器(一般)
专用设备	特殊産業機械
	その他の一般機器(特殊)
交通运输设备	乗用車
	その他の自動車
	船舶・同修理
	その他の輸送機械・同修理
电气机械和 器 材	重電機器
	民生用電子・電気機器
	その他の電気機器
通信设备、计算机和其他电子设备	電子計算機・同付属装置
	通信機械
	民生用電子・電気機器
	一般産業機械(電子製品)
	その他の電気機器
	電子部品
仪器仪表	精密機械
其他制造产品	その他の製造工業製品(无文教体育用品)
金属制品、机械和设备修理服务	自動車・機械修理
电力、热力的生产和供应	電力
	熱供給
燃气生产和 供 应	ガス
水的生产和 供 应	水道
建筑	建築
	建設補修
	公共事業
	その他の土木建設
批发和零售	商業
交通运输、仓储和邮政	鉄道輸送
	道路輸送
	水運
	航空輸送
	貨物運送取扱
	運輸付帯サービス
	倉庫
	公務(郵政)
住宿和餐饮	飲食店
	旅館・その他の宿泊所
信息传输、软件和信息技术服务	通信
	放送
	広告・調査・情報サービス(信息技术服务)
金融	金融・保険
房地产	不動産仲介及び賃貸
	住宅賃貸料
租 赁 和商务服务	物品賃貸サービス
	広告・調査・情報サービス(广告，咨询等商务服务)
科学研究和技术服务	研究
	広告・調査・情報サービス(技术服务)
水利、环境和公共设施管理	公務(除郵政と公共管理)
居民服务、修 理 和其他服务	その他の対個人サービス
教育	教育
卫 生 和社会工作	医療・保健
	介護
文化、体育和　娱　乐	娯楽サービス
公共管理、社会保障和社会组织	社会保障
	公務(公共管理)

日本における CAFE 基準と CO_2 排出量の関係分析

Evaluation of the Corporate CAFE standards and CO_2 emission in Japan

○金子満來*[1)]、加河茂美 [1)]
Mitsuki Kaneko, Shigemi Kagawa
1) 九州大学
* 1EC14032K@s.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

地球温暖化の深刻化により、昨年 2015 年のパリ協定では二酸化炭素排出削減目標が決定され、環境に対する認識はより高まっている。環境省（2016）によれば、日本の CO_2 排出量のうち、運輸部門は総排出量の 20%であり、そのうち自動車部門は 90%を占めている。

この運輸部門の CO_2 排出量削減と、競争の激化する自動車産業における企業のより柔軟な自動車販売の促進という二つの目的によって、2020 年度の燃費基準は現行の重量区分制に加え、アメリカで現行の企業別平均燃費基準（Corporate Average Fuel Economy Standard: CAFE 基準）が採用される計画である。この基準では、企業ごとに目標となる燃費基準値を販売台数によって決定し、その基準値を下回らないように自動車製造会社に燃費の向上を目指させるものとなっている。

実際に CAFE 基準の導入されているアメリカの自動車産業では、車両重量の増加という問題が指摘されている。さらに、走行距離の増加に伴い走行時の CO_2 排出量の増加という問題も挙げられ、基準の策定に疑問が残る。また、アメリカと日本の需要構造にも違いがあるため、新基準の導入による日本の環境負荷はいまだ不詳である。

よって、本研究では、この基準のもとでの日本国内の自動車の燃費基準達成を企業別に分析し、各企業の自動車製造と走行による CO_2 排出削減ポテンシャルとその関係分析を行う。

2. 研究手法

本研究では、主要メーカーの販売台数、燃費値をもとに CAFE 値は新車販売台数の加重調和平均値として下式に表される。

$$CAFE = \frac{W}{\sum_i \frac{W_i}{x_i}} \quad (1)$$

ここで、Wはあるメーカーの販売台数、X_iはある自動車メーカーのモデルiの販売台数、W_iはある自動車メーカーのモデルiの燃費値である。

次に、CAFE 基準値は以下のように計算する。

$$CAFETARGET = \frac{W}{\sum_i \frac{W_i}{XTARGET_i}} \quad (2)$$

ここで、$XTARGET_i$は乗用車の重量区分iに定められた目標燃費値である。

また、2020 年度の 15 の重量区分ごとに製造時と走行時と 1 台あたりの CO_2 排出量を推計する。

$$f = f_m \times \theta + f_g \quad (3)$$

ここで、f_mは乗用車の製造起源の CO_2 排出量、f_gは走行時の CO_2 排出量を表す。ガソリン乗用車を θ=1.00 とすると、ガソリン乗用車とハイブリッド乗用車は素材や製造過程が異なるため、ハイブリッド乗用車では θ=1.20 として分析を行う。

3. データ

本研究における自動車の新車登録販売台数は自動車販売連合のデータを用いる。また、各車種の 2015 年の実績燃費値は国土交通省の自動車燃費一覧より JC08 モードの値を用いる。本要旨では、トヨタ自動車の 35 種の販売実績をもとに、トヨタの CAFE 基準値と CAFE 値を分析した。

4. 分析結果

企業を代表して CAFE 基準値、CAFE 値を出すと以下のようになる。

表 1. トヨタの CAFE 基準値と CAFE 値

CAFE 値	19.05
CAFE 基準値	18.14

表 1 から、CAFE 値が CAFE 基準値を上回り、トヨタは基準をクリアしているという結果が得られた。この基準達成に何が原因しているかを重量区分ごとの燃費値（重量区分ごとに販売台数で加重平均した値）でみると

以下のようになる。

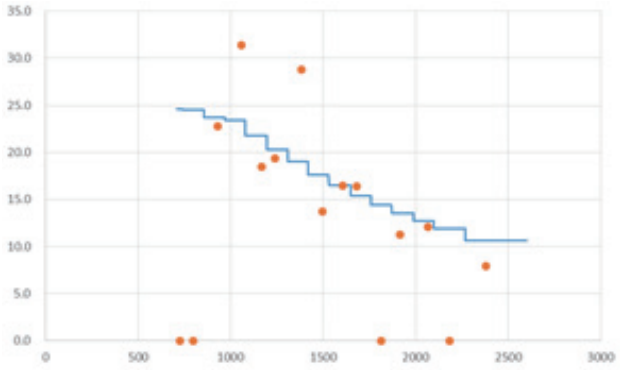


図 1.　重量区分ごとの車両燃費

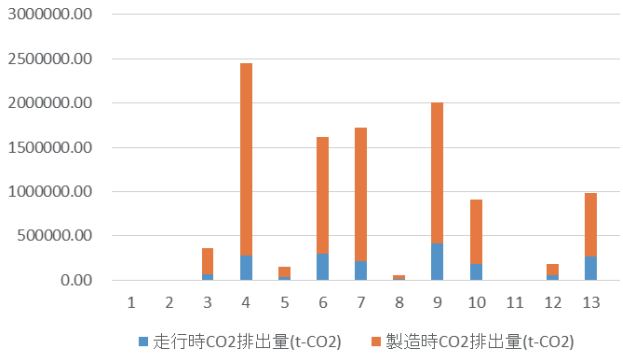


図 2.　区分ごとの走行時・製造時の CO_2 排出量

図 1 から、燃費値を実際に重量区分ごとに見ると重量区分で定められた目標燃費値を達成できていない区分は、達成できている区分で燃費値を補っていると考えることができる。

この 15 の重量区分ごとに製造時、走行時の合計の CO_2 排出量を算出すると、区分 4 の排出量が最も多くなっているという結果が得られた（図 2)。排出量の目立つ区分 4 と区分 9 を比較すると、区分 9 は走行時の排出量が区分 4 より多いが、製造時の排出量は少なくなっている（図 2)。この区分 4 内のハイブリッド率は 70%超であり、ハイブリッド乗用車の製造時における排出係数の高さが関係していると考えられる。

5.　まとめ

得られた結果より、企業が基準を達成するためにハイブリッド乗用車を製造し販売すると、ハイブリッド乗用車の製造に伴い CO_2 排出量が増加すると判明した。また、現行の重量区分制の批判として、車両重量を増加させると目標燃費値を上回ることができるという点も各メーカーの車両重量の変化を考慮し、今後は日本国内における企業の CAFE 基準達成の方法についてシナリオを設定し詳しく分析していく。

6.　参考文献

(1) 小宮山涼一:米国 CAFE 基準（自動車燃費基準）の概要－米国での日本車による省エネ、CO_2 削減ポテンシャルの推計－ <http://eneken.ieej.or.jp/data/pdf/1640.pdf>(2008)

(2) 環境省:国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会(COP21)及び京都議定書第 11 回締約国会合(COP/MOP11) の結果について <http://www.env.go.jp/earth/cop/cop21/>(2016)

自動車の技術変化と素材に着目した資源需要分析

Resource demand caused by automotive technological change.

○松井健裕*[1)]、小柳津顕[2)]、山末英嗣[2)]、松八重一代[1)]、長坂徹也[1)]

Kenyu Matsui, Akira oyaizu, Eiji Yamasue, Kazuyo Matsubae, Tetsuya Nagasaka

1) 東北大学, 2) 立命館大学

* kenyu.matsui.r3@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

自動車産業は大きな完成車メーカーが多数存在し、数多くのサプライヤーを抱える大きな影響力を持つ産業である。[1)]2015 年では世界全体で約 9000 万台[2)]の自動車が生産され、今後さらに多く生産されると予測されている。[3)]また日本では 2015 年度に 900 万台が生産され、自動車輸出額は 12 兆 561 億円であり、日本の総輸出額の 16.3%[4)]を占める重要な基幹産業である。

近年、ハイブリット車や燃料電池自動車、電気自動車といった次世代型自動車が製造されはじめ、販売台数は増加していくと考えられる。また、このような次世代型自動車では従来のガソリン車では搭載されなかった、動力を生むためのモーターや動力制御装置、バッテリー、燃料電池等といった様々な部品が必要となる。[3)]

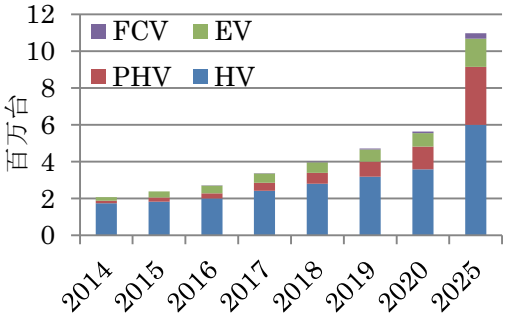


図 1　次世代型自動車の販売台数予測 [3)]

2. 目的

自動車のライフサイクルにおける環境負荷排出を評価する際に最も用いられ、注目されるのは二酸化炭素の排出量である。次世代型自動車は一般的に走行時の二酸化炭素排出量において、ガソリン車よりも小さい。[5)]しかしながら、次世代型自動車には生産段階において多くの銅やリチウム、プラチナ等の希少資源が使用されている。これらの物質は鉱石中にごく微量しか含まれていないことに起因する土地改変量の大きさなどの採掘・精錬段階における環境負荷が大きい。[6)]製造段階における自動車の環境負荷を環境に対する改変量の観点から検討する為に本研究では各種自動車の TMR(Total Materials Requirement)を評価する。TMR は工業製品を製造する際に必要物質の採取・採掘に関与した物質の総量を重量単位で示す指標である。また、工業製品に対して直接的に投入される物質だけでなく、プロセスに必要な燃料などの間接的に投入される物質や採掘の際に発生する脈石といった隠れた物質フローも含んでいる。

3. 手法

3.1 分析手順及び留意点

本研究では乗用車一台当たりの TMR の計算をするにあたり次の手順で行った。まず、ガソリン車、電気自動車、ハイブリット車、燃料電池自動車の構成材料を各金属元素、樹脂、ガラスに分類する[5,6,7,8)]。次に資料[6)]を用いて TMR を算出した。留意すべき点

としては、金属に関して、加工・組み立ての際に用いられる資源エネルギー投入は考慮していない事が挙げられる。また、ガソリン車のアルミニウム製エンジンブロックはリサイクル材の使用を考慮しているが、他の材料はリサイクル材の使用を考慮していない。エンジンブロックにおけるアルミニウム以外の合金元素は考慮していないが、ボディやサスペンション等の鉄中のクロムやモリブデン等の合金元素は考慮している。

3.2 技術変化における注目点

代表的な必要資源の変化としては銅の使用量の増加が挙げられる。銅は次世代型自動車では必須のモーターにおいて大量に使用され、電力化に伴う電線としても使用される。この他に、ハイブリット車や電気自動車ではバッテリーに使用されるリチウムやニッケルの使用量が増大する。また、燃料電池自動車では燃料電池の触媒として使用される触媒の使用量が増大する。一方でガソリン車の触媒として使用されている白金やパラジウム、ロジウムの使用量は減少する。[6)]

4. 結果

本研究における結果を右に図２及び図３として示す。第一に注目すべき物質としては銅が挙げられる。重量ベースで考えるとガソリン車では 1.8%、電気自動車では 9.5%であるが、TMR ベースでみるとそれぞれ 28.8%、48.8%と非常に大きい。一方、電気自動車では銅の他にリチウムイオンバッテリーに使用されるニッケルやリチウムが大きな割合を占める。

従来型自動車のガソリン車一台当たりの TMR は 23112kg であり、次世代型自動車の 1 つである電気自動車の TMR は 71116kg となった。この主な要因としては銅やニッケル、リチウムといった元素の使用量が増大する事が挙げられる。これら三つの元素は TMR が非常に大きい。銅は 360kg-TMR/kg でありニッケルは 260kg-TMR/kg 、リチウムは 1500kg-TMR/kg であり、鉱石中含有量が非常に低いことに起因すると考えられる。

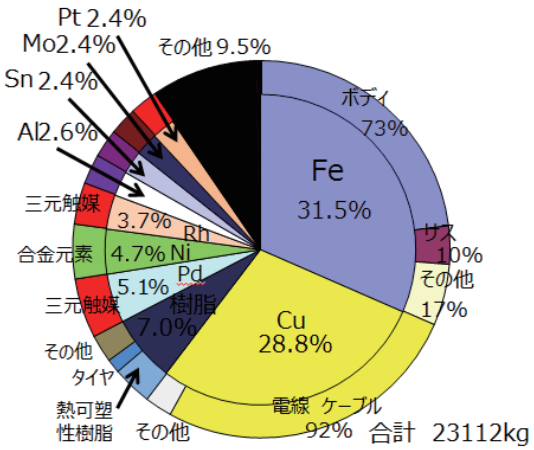


図２　ガソリン車の TMR

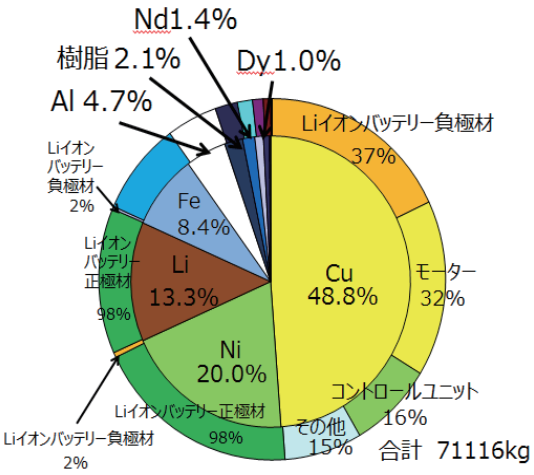


図３　電気自動車の TMR

5. 参考文献

1) “我が国自動車産業の取引構造に関する調査”, 帝国データバンク, (オンライン), 入手先 <http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2014fy/E003915.pdf>, (参照 2017-1-4)
2) “世界各国/地域の四輪車生産台数”, 日本自動車工業会, (オンライン), 入手先 <http://www.jama.or.jp/world/world/world_t2.html>, (参照 2016-12-16)
3) 富士キメラ総研: “2016 次世代自動車関連マテリアル総調査”, (2016)
4) “対世界主要輸出品の推移(年間ベース)”, 財務省, (オンライン), 入手先 <http://www.customs.go.jp/toukei/suii/html/data/fy6_1.pdf>, (参照 2016-12-16)
5) 財団法人　日本自動車研究所: “総合効率と GHG 排出の分析”, (2011)
6) 独立行政法人　物質･材料研究機構: “概説　資源端重量”, (2009)
7) Kudoh Y., Nansai K., Kondo Y., Tahara K: The 23rd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exposition, (2007)
8) 山末英嗣, 松八重一代, 中島謙一, 醍醐市朗, 石原慶一: 鉄と鋼, (2014), pp.778-787
9) 馬場洋三: 2010.9 金属資源レポート, (2010), pp.261-270
10) 独立行政法人　物質・材料研究機構: “我国における自動車用白金族金属触媒のリサイクル動向”, (2004)
11) 独立行政法人　物質･材料研究機構: “概説　資源端重量”, (2009)

電気自動車用リチウムイオン電池のリユース及びリサイクルにおける技術選択支援

Support for technology selection in reusing and recycling lithium ion batteries of electric vehicles

○阿部将宜*[1)]、杉山弘和 [1)]、平尾雅彦 [1)]
Masanori Abe, Hirokazu Sugiyama, Masahiko Hirao
1) 東京大学
* m-abe@pse.t.u-tokyo.ac.jp

1. 諸言

電気自動車（EV）のバッテリーとしてリチウムイオン電池（LIB）が用いられている。これは LIB が高いエネルギー密度を持ち、高電圧であり、小型かつ軽量という特徴を持つからである。また、EV の販売も年々増加しており、需要、普及が増える中で 2030 年以降には廃車となる EV は国内で年間約 40 万台と予想されている [1)]。そのため、EV から回収される LIB の処理方法を議論する必要がある。

処理技術としては、電極材料のリサイクル、および再生可能エネルギー発電の蓄電池としてのリユースが提案されている。リサイクル、リユース導入時の環境影響を評価した事例は存在するが [2,3)]、技術選択を行う際には、環境性のみならず安全性、経済性といった側面からの評価も必要となると考えられる。

本研究は、環境性、安全性の 2 つの側面から新規に導入するリサイクル、リユースを評価し、技術選択支援手法を構築することを目的とする。

2. 選択支援手法

図 1 に本研究で提示する選択支援手法の流れを示す。

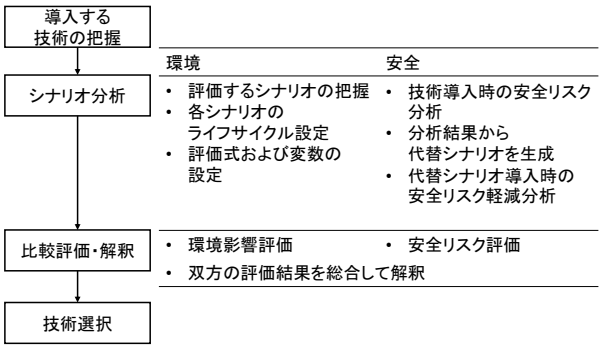


図 1　選択支援手法の流れと内容

まず、導入する技術を把握し、環境影響評価および安全リスク評価に用いるためのシナリオ分析を行う。シナリオ分析により得られたシナリオに対し環境影響、安全リスクの評価を行い、評価結果を元に解釈を行う。このとき、双方の結果を個別に扱うのではなく、総合して解釈が出来るよう評価結果を提示する。

3. 評価手法

3.1 環境影響評価

環境影響評価ではまずライフサイクルを設定し、その後、各工程に対し環境影響を算出するための評価式を設定し、必要と考えられる変数の設定を行う。リユースおよびリサイクルの評価に用いる LIB ライフサイクルを図 2 に示す。

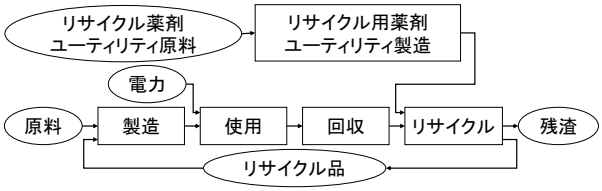


図 2-1　LIB リサイクルのライフサイクル

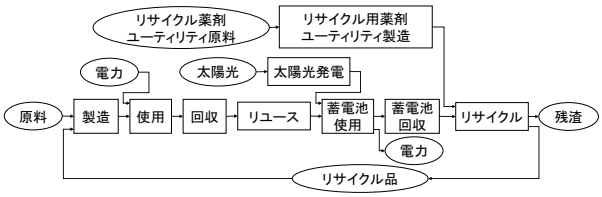


図 2-2　LIB リユースのライフサイクル

これらの評価式を基に LCA を実施し、比較評価を行う。

3.2 安全性評価 [4)]

安全性評価では、まず、評価する技術導入時に考えられる事故を探索する。得られた事故についてフォルトツリー解析（FTA）により分析する。具体的には実際の事故事例などを元に考えられる事故要因を FT に展開していき、これ以上展開できない事故要因を基本事象として抽出する。次に、感度解析により基本事象の重要度を求める。これは対象となる基本事象が発生する時の事故発生確率と発生しない時の事故発生確率の差であり、基本事象が事故発生確率に与える影響の目安として用いられる。得られた重要度を基に対策案を導入し、代替シナリオを生成する。得られた代替シナリオに対し、安全リスクがどれだけ軽減されたかを分析する。評価結果は安全リスクとして表される。

4. ケーススタディ

ケーススタディとして金属溶出によるリサイクルシナリオを設定し、技術選択を行った。

まず、環境影響評価を行った。今回はリサイクルのライフサイクルを使用し評価を行うとした。次に、環境影響の算出方法を設定した。評価に当たり、機能単位は LIB1 セルとした。評価指標としては GWP を使用し、LIB 使用期間は 10 年と設定した。それぞれの工程における環境影響を評価するために作成した式と、使用した変数の意味および単位は S1 に示す。

同時に、安全リスク評価を行った。リサイクル導入時の事故としては LIB の爆発、電解液の溶出、感電が考えられるが、今回は最もハザードが大きいと考えられる電池の爆発に注目し、FTA により基本事象の抽出を行った。電池の爆発について作成した FT 図の一部を図 3 に示す。LIB 爆発の FT 図全体像は図 S2 に示す。

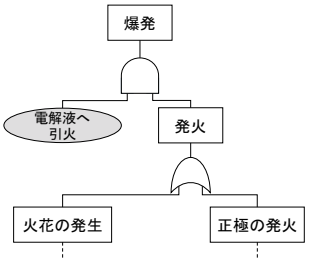


図 3　リサイクル時の LIB 爆発における FT 図

次に、得られた基本事象に対し重要度の算出を行った。今回は基本事象の発生確率が不明であったため、FTA の構造から重要度が決定される構造重要度を使用した。構造重要度は、すべての基本事象が発生するかしないか 2 つの状態をとるとして、対象の基本事象のみ発生した場合の事故発生確率と発生しなかった場合の事故発生確率の差である。基本事象 p の構造重要度の大きさ Δ_p は式(1)により計算される。

$$\Delta_p = F_{accident}(F_p = 1) - F_{accident}(F_p = 0) \quad (1)$$

$F_{accident}(F_p = F_p)$は、基本事象 p の発生確率が F_p かつ他の基本事象の発生確率が 50%であった場合の事故発生確率である。電池の爆発について各基本事象の取りうる発生確率の分布を記述したものを図 4 に示す。発生確率の取りうる変化分の幅が構造重要度となる。

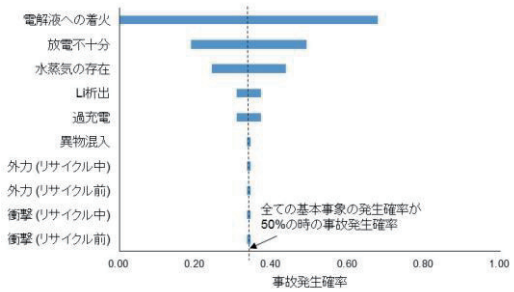


図 4　電池の爆発に対する発生確率の分布

図 4 から、構造重要度が最大である電解液への着火が電池の爆発へ与える影響が最も大きいことがわかり、電解液への着火を防ぐ対策案の導入が安全リスクの軽減に有効であることが示される。電解液への着火を防ぐ対策案として、文献調査の結果、電解液へ難燃材を添加する技術 [5]が提案された。難燃材添加シナリオとして、リン酸トリメチル（TMP）、リン酸トリエチル（TEP）の使用を生成した。これらを電解液に対し 10mass%の割合で添付することで電解液の着火確率が 100%から 20%まで減少すると報告されている [5]。また、添加する難燃剤の製造ライフサイクルをシステムに取り入れ、代替シナリオの環境影響評価を実施した。

図 5 に難燃材添加シナリオをベースケースと比較した結果を示す。安全リスクとして電解液の着火確率を評価した。図 5 から、GWP が 3.2~3.6%増大している一方で、電解液の発火確率が 80%減少していることから、総合的に判断し、難燃材を添加するシナリオが選択できる。

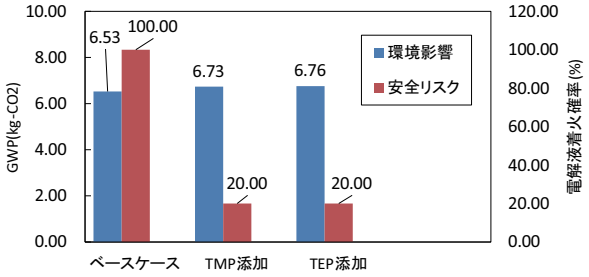


図 5　ベースケースと難燃剤添加時の比較

5. 結言

EV 用 LIB 処理技術導入の選択を支援するために、LCA による環境影響評価手法と FTA による安全性分析手法を構築し、環境面、安全面から選択を支援できる手法を構築した。また、構築した手法を溶出による電極材料のリサイクルについて適用しケーススタディを行った。今後は現在の評価に加え経済性を評価に加えることが必要と考えられる。

引用文献

1)経済産業省： “次世代自動車の状況について”, 産業構造審議会資料, (オンライン), 入手先 <http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/sangyougijutsu/haiki_recycle/car_wg/pdf/038_s06_00.pdf> , (参照 2016-12-31)

2)Dunn J., Gaines L., Sullivan J., Wang M.: Environ. Sci. Technol., 46, (2012), pp.12704-12710

3)Ahmadi L., Yip A., Fowler M., Young S., Fraser R.: Sustainable Energy Technologies and Assessments, 6, (2014), pp.64-74

4) 信頼性技術叢書編集委員会, ”新 FTA 技法”, 日科技連出版社, 東京, (2013)

5)小園卓, 中川裕江, 稲益徳雄, 片山禎弘, 温田敏之：GS Yuasa Technical Report, 2(1), (2005), pp26-31

S1　使用した評価式および使用した変数の意味と単位

$$E_1 = \sum_i \left(m_{parts,i} - m_{recycled\ parts,i}\right) E_{parts,i} \quad (1)$$

$$E_2 = \sum_i m_{reactant,i} E_{reactant,i} \quad (2)$$

$$E_3 = 0.365 N_{EV} C V E_{electricity} \left(\frac{L_{daily}}{L_{max}}\right) \quad (3)$$

変数	意味	単位
E_1	製造時の環境影響	kg-CO_2/cell
E_2	リサイクル時の環境影響	kg- CO_2/cell
E_3	EV 使用時の環境影響	kg- CO_2/cell
$m_{parts,i}$	製造で使用した部品 *i* の質量	kg/cell
$m_{recycled\ parts,i}$	リサイクルされた部品 *i* の質量	kg/cell
$E_{parts,i}$	部品 *i* 製造時の環境影響	kg- CO_2/kg
$m_{reactant,i}$	リサイクルで使用した薬剤 *i* の質量	kg/cell
$E_{reactant,i}$	薬剤 *i* 製造時の環境影響	kg- CO_2/kg
N_{EV}	EV の使用年数	year
C	電池の容量	Ah/cell
V	電池にかかる電圧	V/cell
$E_{electricity}$	電力 1kWh 発電時の環境影響	kg- CO_2/kWh
L_{daily}	EV の 1 日当たりの 平均走行距離	km/day
L_{max}	1 回の充電での電気自動車の 最大走行距離	km
$N_{storage}$	蓄電池の使用年数	year

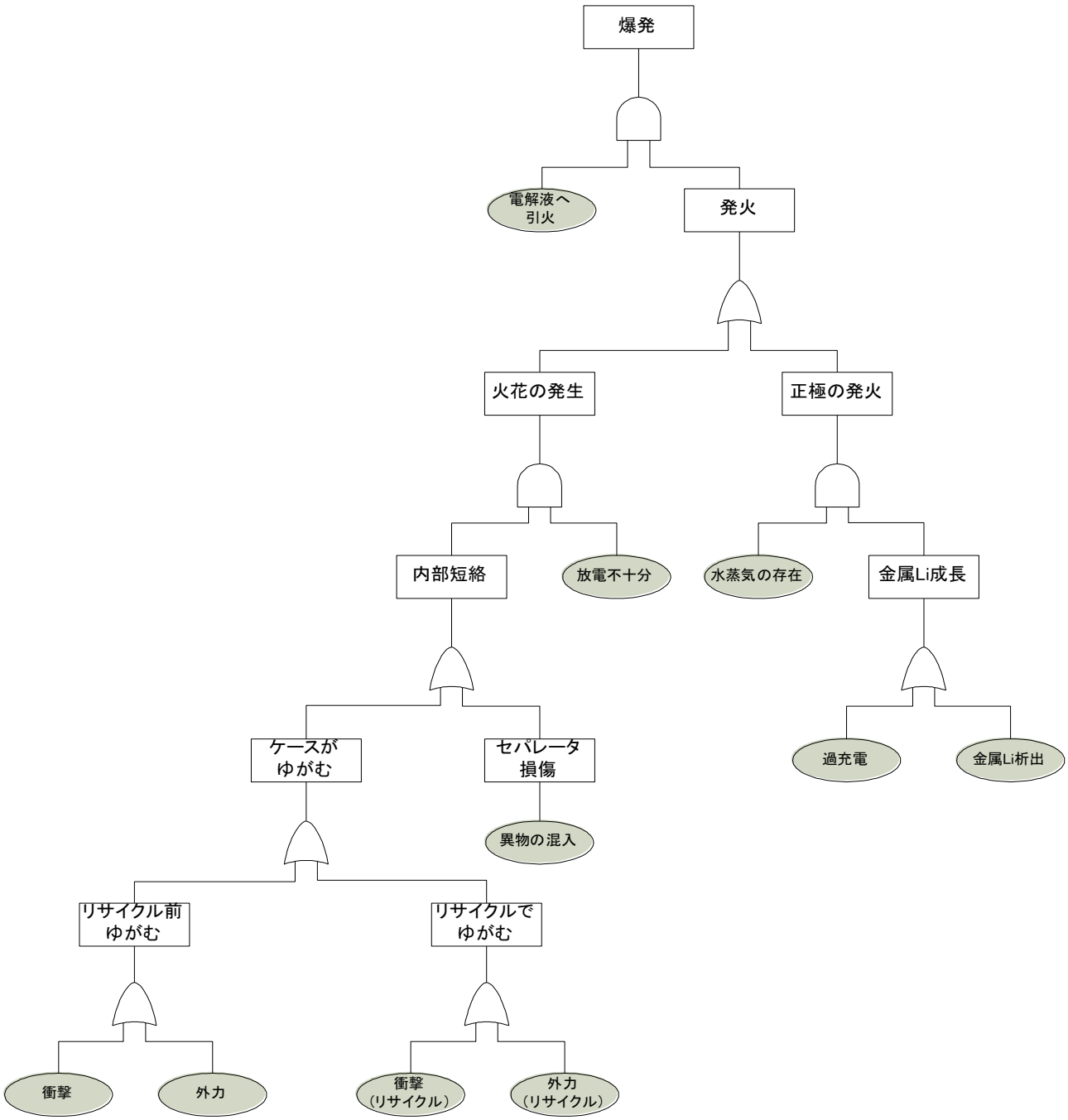


図 S2　リサイクルにおける LIB 爆発の FT 全体図

HV と EV の優位性を分ける経済・環境・技術条件の可視化

Comprehensive techno-economic comparison of hybrid vehicles and electric vehicles using multi-dimensional technology assessment diagram

○原卓也*[1)]
Takuya Hara
1) 株式会社豊田中央研究所
* thara@mosk.tytlabs.co.jp

1. はじめに

LCA の考え方に基づき，環境負荷低減に寄与する新技術の評価が広く行われている．筆者らはこれまで，次世代自動車の技術評価として経済性と CO_2 削減効果を試算してきた [1)]．そのような技術評価は，前提となる様々な条件を定め，それを計算式（あるいはモデル）に入力し，結果（出力）を得，得られた結果の比較・考察から結論を導く，という手順で行われる．しかしそのようにして得られた結果は，あくまでも定めた前提条件における結果である．当然のことながら前提条件が変われば結果も変わる．より一般性をもつ知見が得られるような手法の開発が LCA の課題であった．

そのような課題への対応として，多くの LCA で感度解析が行われている．感度解析とは，LCA に限らずモデルを用いた分析全般に広く用いられる手法であり，注目する前提条件の変数の値を変えたときの結果の変化をみる（入力の変化に対する出力の変化）ための手法である．感度解析は主として一つの変数の変化に対する出力の変化をみるための簡易的手法である（いうなればモデルとなる関数の偏微分係数の値を求めるもの）が，複数の入力変数の変化に対する出力の変化（あるいは前提条件と結果の対応関係）を包括的に分析することはあまり行われてこなかった．

Fukushima ら [2)]は，インベントリ分析をライフサイクルモデルとシナリオモデルの二つのモデルからなる分析体系ととらえ，前者は変数間の関係を表すモデル，後者は変数の数値を指定するモデルとして扱うことを提案した．これにより，分析過程が透明になり，分析手法・モデルの再利用が容易となると述べている．この考え方は，LCA をより体系的な分析が可能な手法とすることをねらったものといえる．本研究における LCA も，Fukushima らと同じく，変数間の関係を表すモデルととらえる考え方に立つ．

LCA の結果をわかりやすく，また前提条件と結果の対応関係をできるだけ包括的に可視化する方法についても，さまざまな工夫が試みられてきた．Barter ら [3)]は，自動車部門の将来シナリオを計算するモデルを構築し，出力（例えば将来の EV シェアや燃費低減のスピード）と入力（消費者の要求ペイバックタイム，炭素価格，バッテリ価格など）との関係を 2 次元の等高線図で表している．Chen ら [4)]は LCA の可視化手法を開発し，その適用例として複数の再生可能エネルギー由来水素を自動車部門で利用した場合の CO_2 削減可能領域を可視化している． Braff ら [5)]は，最適化モデルを用いて異なる条件下における風力・太陽光発電に対する蓄電技術の価値を評価し，その結果を 2 次元×2 次元（2 次元等高線グラフを，別の 2 変数の異なる組合せ（3×3）それぞれについて 9 つ示す）で表している．ただし，いずれの方法も，扱っている対象が持つ変数の多さにくらべればごく限られた変数を抽出してそれらと出力結果の関係を可視化しているという点で，対象を包括的に可視化できたとはいえない．

そこで本研究では，LCA の考え方に基づく技術評価における前提条件と結果の対応関係を包括的に可視化する手法（本研究では技術評価マップと呼ぶものとする）の開発を目的とする．

2. 方法

2.1 従来型の方法

LCA による評価は，①評価のモデルを定式化（関数を決定）し，②モデルを構成する変数について，評価対象の技術に対応する値（入力条件）を設定し，③出力の変数（評価値）の結果を得，その大小から技術の比較をするというものである（図 S1）．従来型の LCA では，この入力の値を各種文献調査・測定等により定め，モデルに入力し，出力を得るという操作をしていた．当然ながら出力結果は入力に依存する．入力に不確実性がある場合には，欲しい出力を得るために恣意的に入力条件を定めたのではないか，というような批判を受けることも少なくなかった．

2.2 本研究の方法

本研究は前提条件と結果の対応関係（入力変数と出力変数の対応関係）を包括的に可視化することを目的とする．変数と変数の対応関係を包括的に可視化するという考え方は一般的なものであり，身近な例としては水の状態図があげられる（図 S2）．温度と圧力に対応した水の状態（気体，液体，固体）を表したもので

ある．このような図ができれば，任意の値の組合せに対する結果を俯瞰することができる．

技術評価についても同様に，前提条件（入力変数の値の範囲）と評価結果の対応関係を俯瞰できると，評価結果の意味をより深く理解することの助けになると考えられる．問題は，水の状態図と違い，技術評価における変数の数は多いため，高次元技術評価マップの可視化が必要となるということである．

3. 問題設定

本研究では，HV と EV の 2 車種のライフサイクルコスト（LCC）・CO_2（$LCCO_2$）の比較をする問題を考えることとする．要旨では $LCCO_2$ について記す．

3.1 定式化

$LCCO_2$ は以下の式で表現されるとする．

$$y_{HV} = D_{HV} + \frac{F_{gas}}{E_{HV}} L \quad (1)$$

$$y_{EV} = D_{EV} + \frac{F_{elec}}{E_{EV}} L \quad (2)$$

ここで，y_i は車種 i（= HV or EV．添え字 i について以下同様）の $LCCO_2$ を表す．D_i は車両製造由来の CO_2，E_i は燃費あるいは電費，F_j はエネルギー j（= gas or elec．ガソリンあるいは電力）の CO_2 原単位，L は生涯走行距離を表す．式(1)，(2)をグラフで表すと図 S3 のようになる．式(1)，(2)より式(3)が得られる．

$$\Delta y = \Delta D + \left(\frac{F_{gas}}{E_{HV}} - \frac{F_{elec}}{E_{EV}} \right) L \quad (3)$$

ただし $\Delta y = y_{HV} - y_{EV}$，$\Delta D = D_{HV} - D_{EV}$．式(3)は 7 つの変数（入力変数 6 つ，出力変数 1 つ）からなる．この関数の入力と出力の対応関係を包括的に可視化するのが目的である．LCC も $LCCO_2$ と同様の形式で定式化できるため説明は略す．

3.2 変数の値の範囲

各変数の値の範囲を表 S1 のように定める．なお走行距離の下限を 3 万 km としているのは，経済性の評価における 3 年間の総コストという指標に対応させることを意図したためである（1 万 km/年×3 年）．走行距離の上限を今回は 10 万 km としているがもっと長い場合もあり，その設定は必要に応じて変えることができる．

4. 結果

HV と EV の優位性を比較評価した技術評価マップの可視化を行った結果を示す．同じ次元数でも異なる表現の仕方がある．$LCCO_2$ の結果を示す．グラフ作成には Matlab を用いた．

HV と EV の $LCCO_2$ の大小比較を計 7 つの変数で表現し，それを可視化した結果を図 S4，S5 に示す．ただし車両 CO_2 差（ΔD）は定数扱いとして，2 つの値（下限値および上限値）をとるケースそれぞれについて示すかたちとした．これは結果の見やすさを優先させてのことである．

中央の 3 次元の図は，HV 燃費，EV 電費，走行距離の組合せを表す．それぞれ値の範囲を設定しているので，考慮すべき範囲は直方体の形状となる．その直方体から 8 つの点（組合せ）を選び，それぞれについて電力 CO_2 とガソリン CO_2 の 2 軸で表した等高線図を表している．等高線は，HV と EV の $LCCO_2$ の差（Δy）を表す．$\Delta y = y_{HV} - y_{EV}$ としているので，正の値（赤色系）は EV 優位（HV の $LCCO_2$ が大きいことになるから），負の値（青色系）は HV 優位を表す．値の大きさで色を段階的に変えており，ゼロに近い値は薄いマゼンタ色としている．車両 CO_2 の差について 2 つのケースで表現している．8 つのグラフの 2 軸を成すガソリン・電力 CO_2 原単位の値の範囲はすべて同一としている．8 つのグラフの色合いは，HV 燃費，EV 電費，走行距離（および車両 CO_2 差）の組合せにより大きく異なるのがわかる．軸を入れ替えた結果を図 S6，S7 に示す．

図 S4～S7 から読み取れる内容の例を以下に箇条書きで記す．

- 考慮するガソリン・電力 CO_2 原単位の値の範囲でほぼすべての領域において EV が優位となるのは，図 S4 の 1，2，5，6，図 S5 の 1 である
  - EV 電費の値が大きく，走行距離が長いならば HV 燃費によらず EV 優位
  - EV 電費の値が大きく，HV 燃費の値も大きいならば，走行距離が長いと EV 優位
  - ガソリン CO_2 原単位が大きいほど，あるいは電力 CO_2 原単位が小さいほど EV 優位の程度は増す
- 現状の HV 燃費，EV 電費に近く，走行距離が長い（10 万 km）の条件（図 S4・S5 の 4）では，電力 CO_2 原単位大きいと HV 優位となる

5. まとめ

対象とする問題を変数の数が少ない簡単なモデルで表し，このような手法を支援ツールとして利用することにより，問題に対する包括的な理解が深まることが期待できる．

引用文献

Supporting Information を参照．

Supporting Information

引用文献リスト

1) Hara T., Shiga T., Kimura K. Satoh A.: SAE Technical Paper 2016-01-1286, (2016)
2) Fukushima Y., Hirao M.: Int. J. LCA, 7 (2), (2002), pp 318-329
3) Barter G., Reichmuth D., Westbrook J., Malczynsk L., West T., Manley D., Guzman K., Edwards D.: Energy Policy. 46, (2012), pp 473-488
4) Chen I., Kikuchi Y., Fukushima Y., Sugiyama M, Hirao M.: Int. J. LCA, 17 (3), (2012)., pp 270-276
5) Braff W., Mueller J., Trancik J.: Nature Climate Change, (2016)　(Advance Online Publication)

Supporting Information

図表

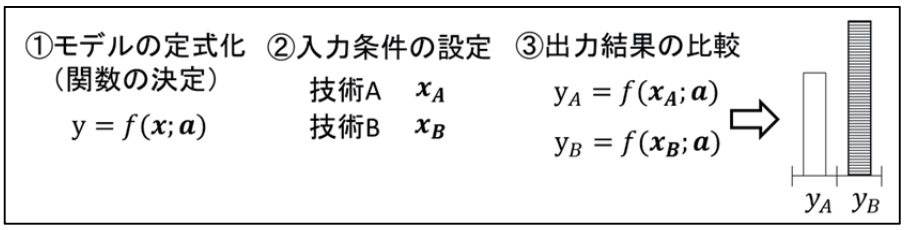


図 S1. 従来型の LCA の方法

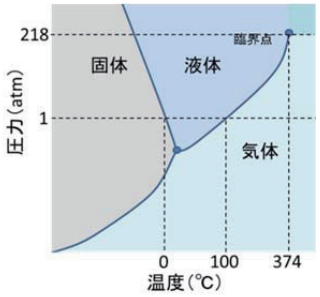


図 S2. 水の状態図

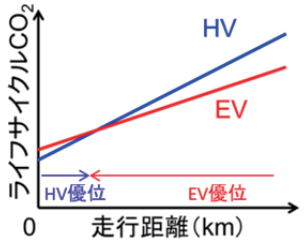


図 S3. 2 車種の $LCCO_2$ のグラフ表現

表 S1. 変数一覧・範囲

変数名	単位	下限値	上限値
車両CO_2差	$kgCO_2$	500	4,000
HV燃費	km/L	20	40
EV電費	Km/kWh	5	15
生涯走行距離	km	30,000	100,000
ガソリンCO_2原単位	$kgCO_2$/L	2.5	3.2
電力CO_2原単位	$kgCO_2$/kWh	0.2	0.8
車両価格差	$	1,000	10,000
ガソリン価格	$/L	0.5	2.0
電力価格	$/kWh	0.1	0.25
バッテリ価格	$/kWh	200	400

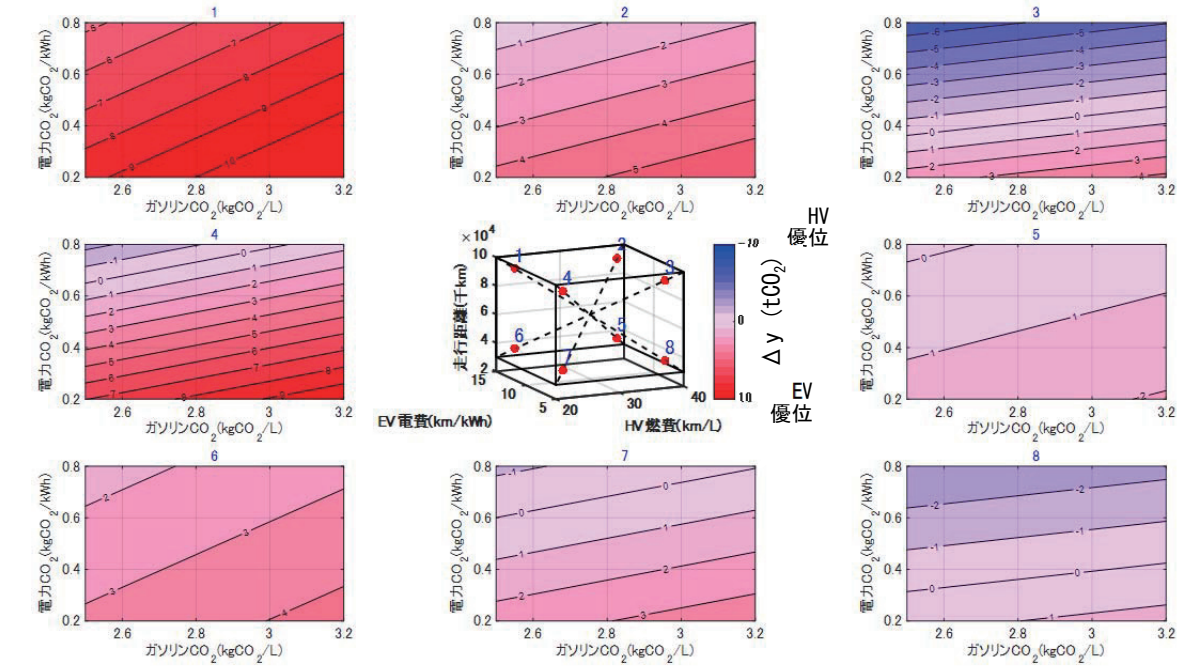


図 S4. $LCCO_2$ 評価マップ（車両 CO_2 差 500 kg CO_2）

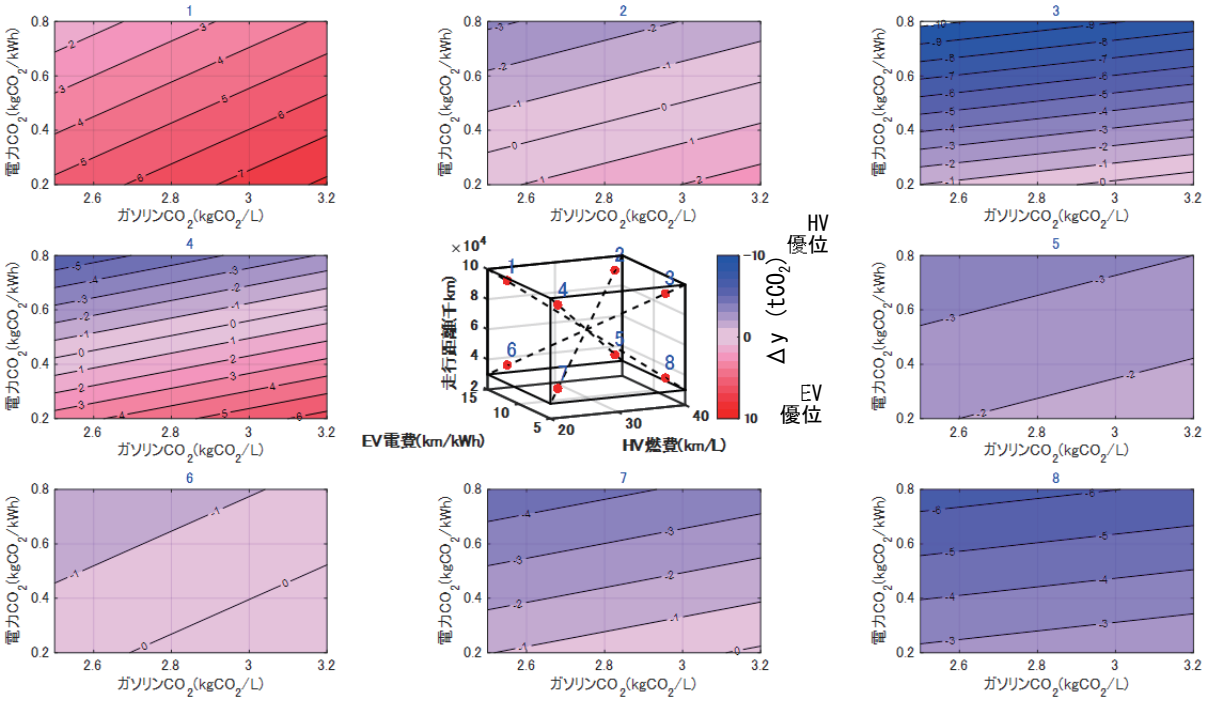


図 S5. $LCCO_2$ 評価マップ（車両 CO_2 差 4000 kg CO_2）

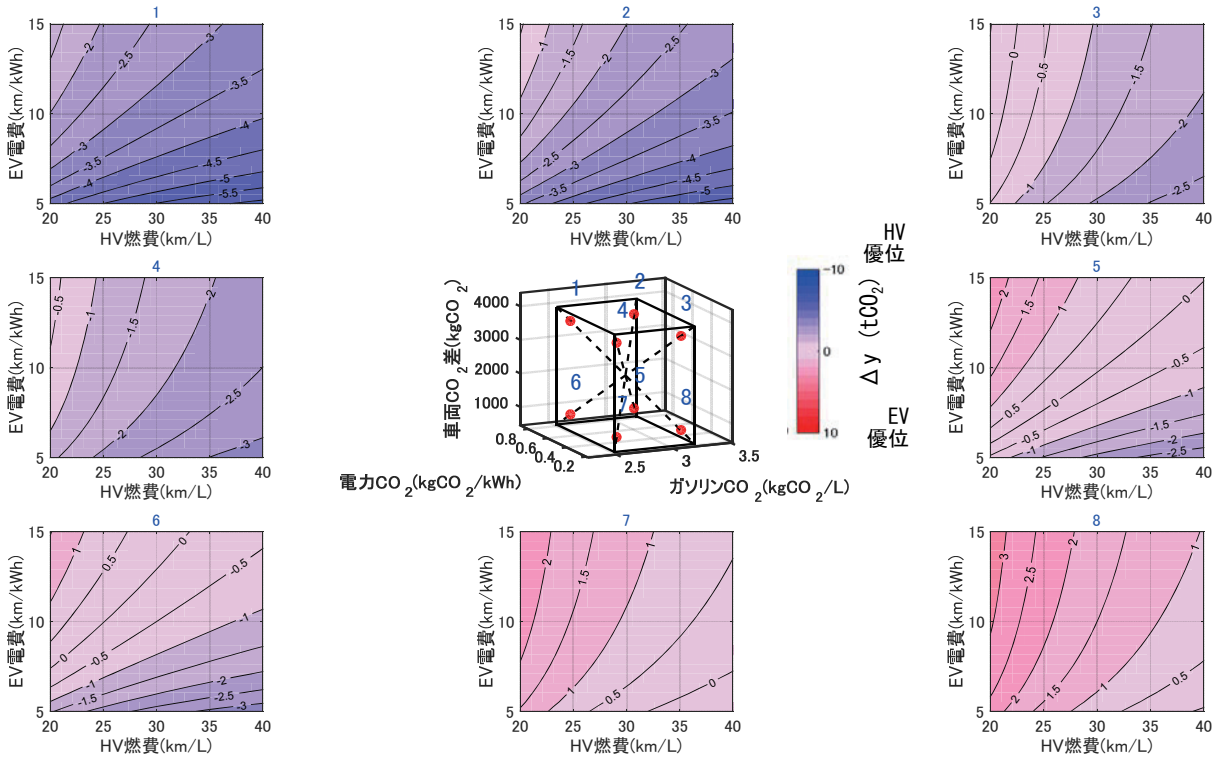


図 S6. $LCCO_2$ 評価マップ（別軸，走行距離 3 万 km）

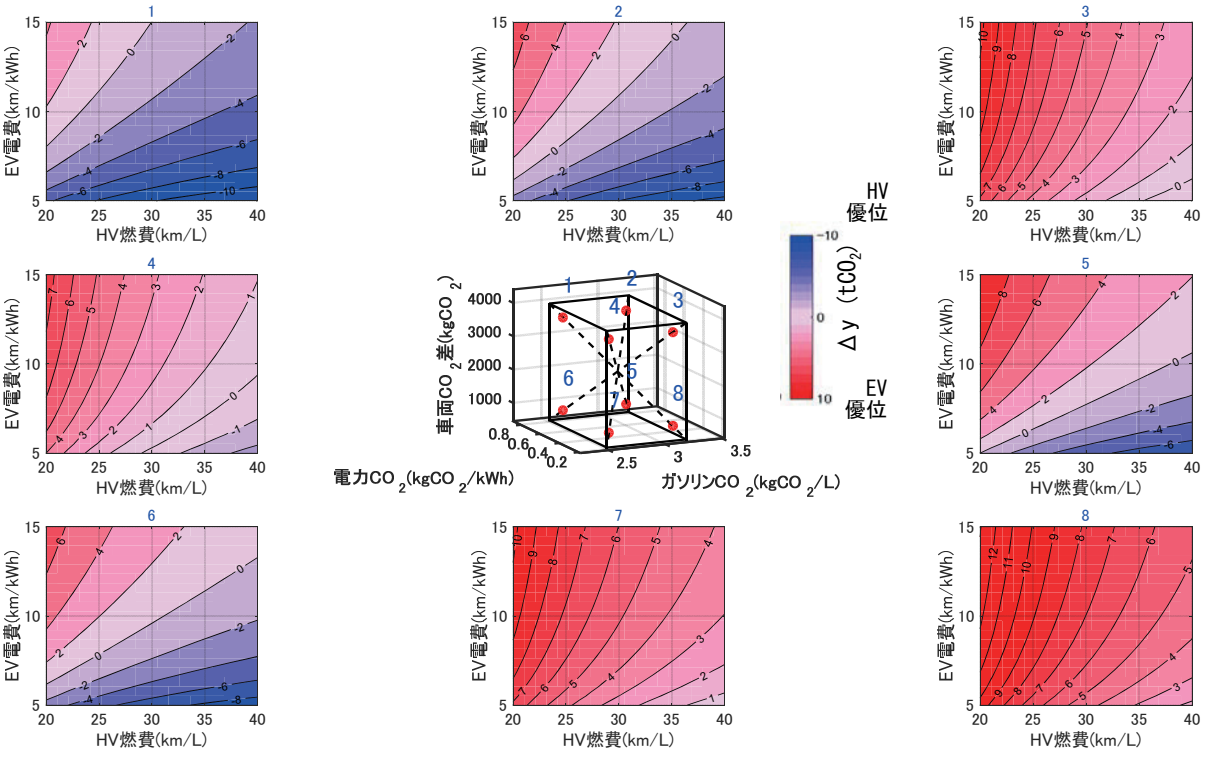


図 S7. $LCCO_2$ 評価マップ（別軸，走行距離 10 万 km）

本稿では示していないが，変数の値の下限・上限を入力したり，3 次元の HV 燃費や EV 電費，走行距離の値の組合せを変えたりすることができ，かつそのときの LCC 評価および $LCCO_2$ 評価において HV と EV が優位となる領域（電力価格やガソリン価格，電力 CO_2 原単位の値の条件）をインタラクティブに可視化するユーザインタフェイスを Matlab GUI を用いて開発している．

全日本学生フォーミュラ大会参加車両の環境影響評価

Environmental Impact Assessment for the vehicle participated in the Student Formula Japan

越田悠揮 1)、伊坪徳宏 1)
1) 東京都市大学
*g1362050@tcu.ac.jp

1. 背景

近年の環境問題の深刻化を受けて、自動車業界では気候変動、大気汚染、資源枯渇に対する対策としてエンジンの燃焼効率の向上、精密な制動技術、車両の軽量化による燃費の改善が行われている。自動車の製品開発は様々な実験、テストを重ねて商品化されるが、そのノウハウを支えてきたのがモータースポーツである。レースで勝ち抜くための開発競争が自動車の技術発展を支え、商品の新技術をテストする場としての機能も果たしてきた。しかし、一回のレースで多量の燃料や騒音を発するため、環境面で問題視されていた。

自動車レース業界において、学生がモータースポーツを通じて、自動車の製作を行い技術の理解を深め、実践的な能力を養える場として全日本学生フォーミュラ大会[1]がある。本大会では、主役である学生が自ら設計・作製した車両の走行を通じて、モノづくりの総合力を競い、自動車技術ならびに産業の開発・振興に資する人材を育成することを目的としている。しかし、最高速度や加速度など、より速く走行することに重点をおかれると、環境面が軽視されることが懸念された。

2. 目的

本研究では、本大会において学生が製作した競技車両を評価することにより、ものづくり教育の一環として環境面にも配慮した競技車両づくりや、将来自動車業界で活躍する学生に今後の車づくりの在り方を提案する。

3. 評価対象および調査範囲

3.1 評価対象

本研究では、東京都市大学所属 Mi-Tech Racing が製作した競技車両(以下、競技車両とする)を対象とした環境影響評価を行う。この結果を一般の乗用車の環境影響と比較することで、競技車両の環境側面の特徴について考察した。

3.2 機能単位

競技車両と 4 ドアセダン 1 台(走行距離 140km)を評価対象とする。

3.3 評価範囲

4 ドアセダンの評価範囲は部品調達、製造、使用段階とし、輸送段階は評価範囲外とする。使用段階ではガソリンの製造、燃焼を含めることとする。一方、競技車両においては、工房でチームの自作品も車両に装着しているため一部部品の材料・部品調達、製造段階を追加し、車両の製造段階では、自作品の製造と、既製品の組立の 2 通りに分けて評価を行う。

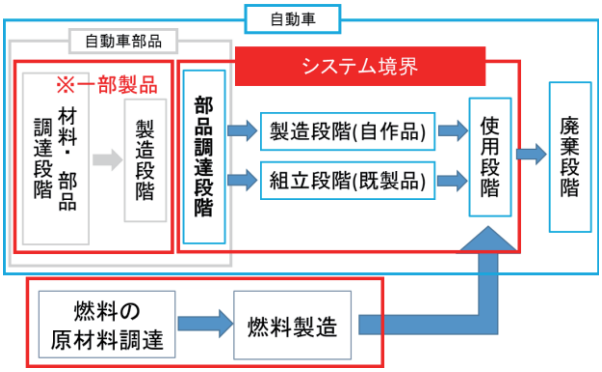


図 1 本研究のシステム境界(競技車両)

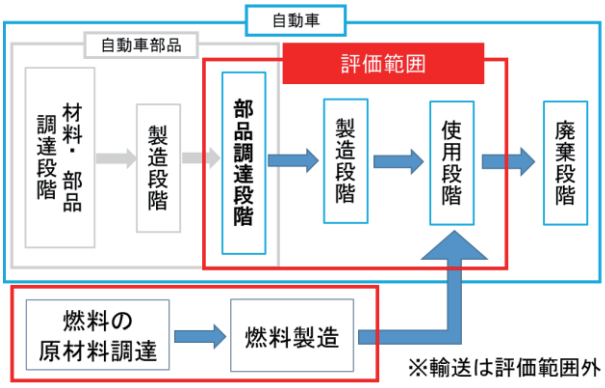


図 2 本研究のシステム境界(4 ドアセダン)

影響領域は、乗用車の関係が強いと認識される気候変動、資源消費、都市域大気汚染を対象領域として取り上げた。

4. 算定方法

競技車両の基礎データは東京都市大学に所属する Mi-Tech Racing から得た部材等のコストデータを活用した。(評価に含めた部材点数は 65 点)。一般の乗用車に関する入出力データは、LCA 日本フォーラムに記載されている日本自動車工業会が作成した自動車の LCI データの概要[2](以下、4 ドアセダンとする)を用いた。

GHG 排出量、資源消費、都市域大気汚染に関わるインベントリ分析には原単位法を使用した。得られたインベントリ分析結果は特性化係数との積和を通じて影響評価を行った。

GHG 排出量＝Σ（活動量×GHG 排出量原単位）(式 1)

資源消費＝Σ（インベントリ結果×資源消費評価係数）(式 2)

都市域大気汚染＝Σ（インベントリ結果×都市域大気汚染評価係数）(式 3)

原単位には、一般社団法人産業環境管理協会が公開している IDEA(Inventory Database for Lifecycle Analysis)を使用した。また特性化係数には、LIME2 (LIME:Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)掲載のものを用いた。

5. 結果

競技車両と 4 ドアセダンの環境影響について、本稿では GHG 排出量のみを示した。競技車両のライフサイクル CO_2 は 89.7 トンであった。いずれの影響領域においても、使用段階の影響が大きかった。これは、自動車の走行に使われるガソリンの燃焼の寄与が大きいことを示す。また、競技車両の環境影響の方が 4 ドアセダンよりも 3 倍ほど大きかった。競技車両は生涯走行距離が短い一方で燃費が 4km/L であるのに対して、4 ドアセダンは生涯走行距離が長いが燃費が競技車両の 4 倍程度(15.7km/L)であることが、競技車両の負荷より小さく示された要因となっている。

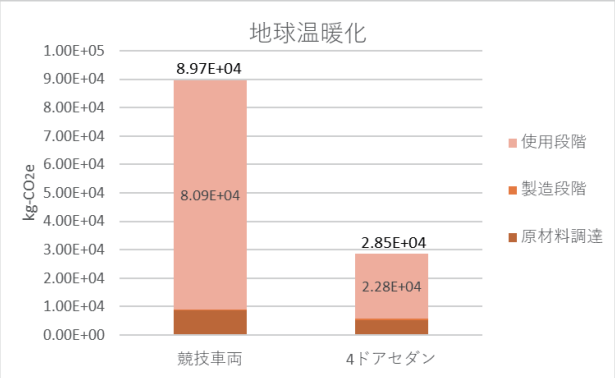


図 3 二車種における影響評価比較

競技車両の環境負荷を評価する際、部品の 8 つにカテゴリに分けた。その中で、負荷の大きかったエンジン系のパーツを取り上げると、エンジン、ドライブドレイン、燃料が主に負荷を与えていることがわかった。ドライブドレインにはデフ、ベアリング、スプロケットの 3 種類で構成されている。この 3 つの部品にはアルミニウム、鋼が同等の割合で構成されており、この 2 種類の物質が大きく寄与していることが分かった。3 つの部品はどれもチームのスポンサーから提供されている既製品であった。

カテゴリ	部品数	部品名
ブレーキ	8	ブレーキキャリパー、ブレーキライン、等
電装系	5	ワイヤーハーネス、ECU、等
エンジン	18	エンジン、インテーク、等
フレーム&ボディ	11	フレーム、アンダーパネル、等
シート	5	シート、ダッシュパネル、等
ステアリング	5	ハンドル、ギアボックス
サスペンション&ショック	8	サスペンション、アーム、等
タイヤ&ホイール	7	タイヤ、ホイール、ナット、等

表 1 競技車両におけるカテゴリ内容

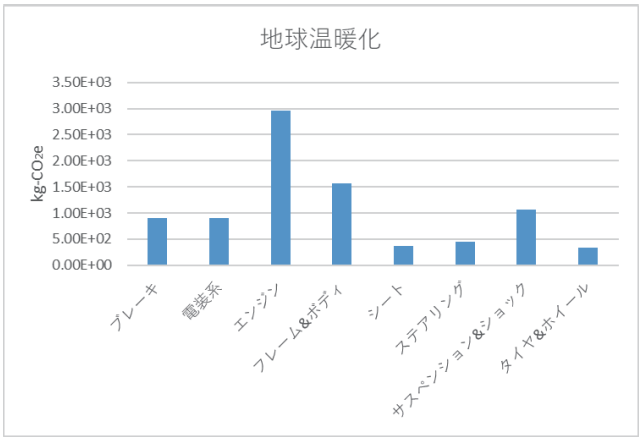


図 4 競技車両におけるカテゴリごとの影響評価比較

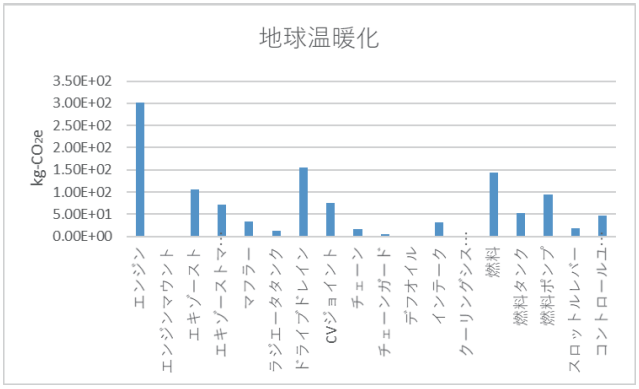


図 5 エンジンパーツにおける環境負荷の比較

4. まとめ

競技車両を対象としたライフサイクル影響評価を実施した。算定した競技車両は 4 ドアセダンと同様、使用段階の環境負荷が相対的に大きかった。これは、生涯走行距離が短いものの、燃費が 4 ドアセダンの 1/4 程度であることによる。製造組立の環境負荷では、スポンサーから提供される大型部品の生産が相対的に大きかった。今回は料金法を採用したため、一部製作物の製作にかかわるコストが相対的に高くなり、環境負荷が過大評価になっている可能性があることに留意されたい。

5. 参考文献

1) 全日本学生フォーミュラ：自動車技術会
2) 自動車の LCI データの概要：日本自動車工業会

日本における鉄鋼材中の不純物元素濃度の決定要因の解明

Identifying factors influencing the content of impurity elements in steel in Japan

○太田暁[*1)]、醍醐市朗 [1)]、後藤芳一 [1)]
Satoshi Ohta, Ichiro Daigo, Yoshikazu Goto
1) 東京大学大学院
*ota@mfa.t.u-tokyo.ac.jp

１．　諸言

非再生可能資源は循環利用することが望ましい。鉄鋼材の循環利用にあたっては、繰り返しリサイクルすることで、トランプエレメントと呼ばれる不純物元素の濃化が懸念されている [1)]。トランプエレメントは、熱力学的な制約によって製鋼時に除去されにくく、その中でも Cu や Sn は、鉄鋼材の熱間圧延時に表面赤熱脆性を生じさせるなど、加工性に悪影響を与えることが知られている [2)]。これらの元素は、各製品の廃棄後の解体工程において、使用済み製品から普通鋼のスクラップを回収する際、特殊鋼や非鉄金属素材などの他素材が意図せずに巻き込まれることによって混入すると考えられている [2)]。しかし、現状において、これらの不純物元素の混入量ならびにその混入源は明らかになっていない。そのため、トランプエレメントのリサイクルによる濃化を回避するための有効な対策を立てることは困難である。したがって本研究では、普通鋼中の不純物元素の混入源の推定を目的とする。

２．　研究手法

普通鋼中の不純物元素として比較的濃度の高い、Cu、Cr、Ni、Sn、Mo の５元素を分析対象とした。

電炉棒鋼中の不純物元素について過去に様々な研究が行われているが、鉄鋼材中の不純物元素濃度は、その品種ごとに異なることが知られている [3)]。棒鋼以外の品種の不純物元素濃度や、生産された普通鋼全体での不純物元素量およびその混入源は明らかになっていない。したがって、本研究では、棒鋼以外の品種での不純物元素濃度を測定し、測定結果を用いて生産された普通鋼全体での不純物元素量を同定した。しかし、これだけでは、不純物元素の起源となる使用済み製品が明らかにならない。そのため、測定に基づいた同定手法とは別に、使用済み製品別の分解が可能な方法として、MFA（Material Flow Analysis）による推計を行った。本研究の手法の概略図を Figure1 に示した。測定結果によって同定された不純物元素量を計測値とし、それに対し、MFA による推計量を推計値とし、それらを比較した。MFA による推計では、製品の素材構成を WIO（Waste Input Output）-MFA 手法 [4)] により、製品の廃棄量を動的 MFA 手法 [5)]により算出し、各製品中の他素材から鉄スクラップに混入する不純物元素量を推計した。計測値と推計値を比較することで、普通鋼中の不純物元素量及びその混入源を推定した。2 つの手法の詳細は、それぞれ 3 章と 4 章に記した。

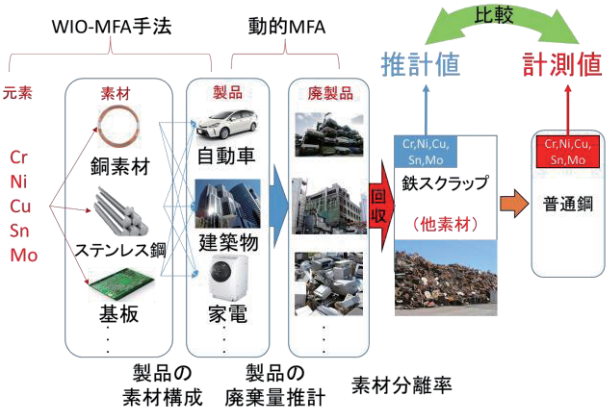


Figure1. 本研究手法の概略図

３．計測に基づく鉄鋼材中の不純物元素混入量の同定

普通鋼中の不純物元素濃度を、X 線蛍光分析器を用いて計測した。計測の結果から、1 年間に生産された普通鋼全体での各不純物元素量を同定した。

鉄鋼材中の不純物元素の由来には、4 種類あると考えられる。意図した添加元素 f_1、意図した合金成分 f_2、鉄スクラップを構成する普通鋼中の意図しない合金成分 f_3、他素材由来の元素 f_4 である。本研究では、不純物元素の混入源の推定が目的であるため、これらの由来を区別して不純物元素量を同定する必要がある。

計測によって得られた不純物元素濃度に普通鋼生産量を乗じたものは、f_3+f_4 と表せる。これは、生産された普通鋼中に意図せず混入した不純物元素量である。これについて、f_3 と f_4 に区別して同定を行う。これを Figure2 に示した。鉄スクラップを構成する普通鋼中の合金成分 f_3 は、鉄スクラップにおける普通鋼中の合金として存在する不純物元素濃度に鉄スクラップの消費量を乗じることで得られる。しかし、各地の電炉に投入された鉄スクラップを構成する普通鋼中の合金濃度を測定することは困難である。そこで、鉄スクラップ中の普通鋼の平均的な合金濃度は、国内で消費された普通鋼の平均的な合金濃度に等しいと仮定した。国内で消費された普通鋼は、生産された普通鋼のうち、輸出量と間接輸出量を差し引いたものである。これにより、f_3、f_4 を区別して同定した。

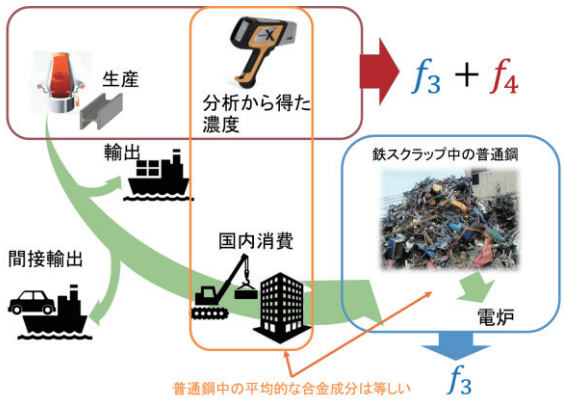


Figure2. 不純物元素量を由来ごとに区別する手法の概略図

2011 年において生産された普通鋼について分析を行った。鉄スクラップを構成する普通鋼中の合金成分 f_3 と他素材由来の元素 f_4 を同定した結果が Table1 である。

Table1. 普通鋼中の由来別不純物元素量

	Cu	Cr	Ni	Sn	Mo
普通鋼中の意図しない合金成分 f_3［千 t］	16	11	6	2.2	1.2
他素材として混入した元素量 f_4［千 t］	33	24	10	1.7	2.6

４．MFA を用いた鉄鋼材中の不純物元素混入量の推計

他素材は、使用済み製品を解体した後、鉄スクラップを回収する際に混入する。したがって、製品全体からだけでなく部品からの鉄スクラップの回収を考慮できるよう、製品を構成する部品や素材の質量及び元素組成情報が必要である。そこで、ある製品に対して、それを構成する全ての部品や素材と、その元素組成情報を一括して分析することが可能な WIO-MFA 手法を用いて、普通鋼中の他素材由来の不純物元素量を推計した。生産年により異なる部品・素材構成及び各元素組成を適用することが望まれたが、それに十分な情報が入手できなかったため、2000 年の産業連関表に基づいた WIO-MFA 手法により得られた部品または素材構成及び各元素組成を他の年にも適用した。

上述の WIO-MFA 手法から得た製品 1 単位あたりの部品構成及び各元素組成に、国内における製品の廃棄量を乗じ、解体プロセスにおける他素材の鉄スクラップへの混入率を考慮することで、使用済み製品から鉄スクラップに混入する他素材由来の各元素量を推計した。国内における廃棄量は、動的 MFA を用いて推計した。中古製品や中古部品としての輸出量や、解体プロセスにおける混入率は、統計や文献、実地調査などから得た。

WIO-MFA 手法の対象製品には、国内最終需要のうち、Fe 需要量の多い産業部門を選択した。分析対象とした 23 製品部門で、国内の総 Fe 最終需要における約 75%を占めた。23 製品部門それぞれについて、2011 年において鉄スクラップに他素材として混入する不純物元素の量を同定した。

WIO-MFA から得られた不純物元素量の総量と、計測値を比較した。計測に基づく鉄鋼材中の他素材由来の不純物元素混入量 f_4 に対する、MFA に基づく由来別混入量の割合を Figure3 に示した。簡便のため、結果には 23 製品部門を自動車、家電、建築、産業機械、その他に分類して示した。Cu を除く 4 元素では自動車からの割合が比較的高く、Cu では建築由来による割合が高かった。Cr、Ni、Mo では、自動車中の構造用合金や耐熱鋼などの素材が主な混入源となっていた。Sn ははんだ、Cu は導線・ケーブルなどが主な混入源であった。Cr では、ステンレス鋼の分離を考慮したものの、推計値が計測値より多かった。これは、ステンレス鋼以外の Cr を含む特殊鋼の分離や、製鋼時のスラグへの分配の可能性が考えられた。Sn についても同様の結果が見られたが、産業機械や自動車中のはんだを用いる部品の分離の可能性が考えられた。

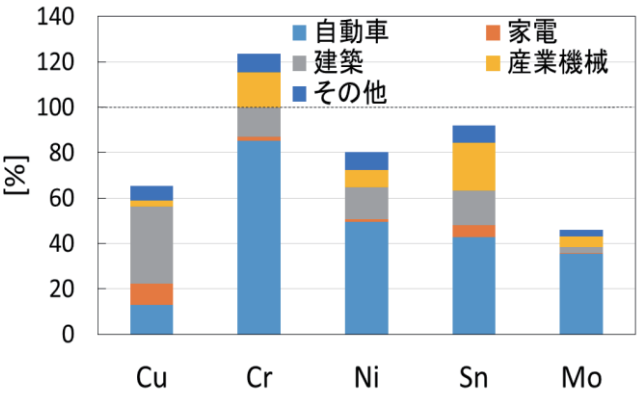


Figure3. 計測に基づく普通鋼中の他素材由来の不純物元素量に対する、MFA に基づく由来別不純物元素量の割合

５．結言

日本の 2011 年において、普通鋼中に存在する不純物元素を由来別に同定した。また、他素材由来のトランプエレメントのうち、Mo を除く元素で 8 割以上の混入源を特定した。

参考文献

1) 秦野ら: 鉄と鋼, 88(2002), 142
2) 片山ら: まてりあ, 35(1996), 12
3) I. Daigo and Y. Goto: ISIJ Int,. 55(2015), 9, 2027
4) S. Nakamura and K. Nakajima: Materials Transactions, 46, (2005), 2550
5) 足立ら: 環境システム工学, 東京大学出版会, 東京, 2004

日本とオランダにおける鉄スクラップへの不純物元素混入源の特定

Comparison of the origin of steel-contamination elements in Japan and Netherlands

○纐纈将太*1)、醍醐市朗 1)、後藤芳一 1)
Shota Koketsu, Ichiro Daigo, Yoshikazu Goto
1）東京大学
* koketsu@ mfa.t.u-tokyo.ac.jp

1.はじめに

鉄鋼材は、繰り返しリサイクルすることにより鉄鋼材中に不純物が蓄積することが危惧されている。そのような元素はトランプエレメントと呼ばれ、精錬時に分離が困難であるとともに、鉄鋼材の加工性に悪影響を与える。不純物元素の混入は、製品の解体時に分離されなかった鉄鋼材以外の金属素材が鉄スクラップに混入することと、同様に合金鋼が普通鋼のスクラップとして回収されることの 2 つの要因により起こると考えられている [1)]。既存研究で、先進国と新興国での使用済み製品の解体手法の違いが、それらの国で生産された鉄鋼材中の不純物元素濃度の違いに影響すると指摘された [1)]。一方で、使用済み製品の解体手法が同じであると予想される日本とオランダの間でも鉄鋼材中の不純物元素濃度に違いがあることがわかってきた [2)]。しかしながら、その差異の要因は解明されていない。この要因は、鉄鋼材の持続可能な循環利用を行っていく上で重要な知見となると考えられる。そこで、本研究では、日本とオランダにおける鉄スクラップへの不純物元素の混入源を特定することを目的とする。

2.研究手法

2.1 分析対象とした鉄鋼材

日本とオランダそれぞれのスクラップヤードから採取された棒鋼のうちスクラップを原料として生産されていた 89 点と 65 点の分析結果 [2)]を用いた。棒鋼は他の品種に比べ不純物元素の許容濃度が高いため、普通鋼以外の素材が混在するスクラップを最も多く使用していると考えられた。分析の結果を図 1 に示す。Cr について日本とオランダの分析値に有意水準 1%で有意な差が見られた。

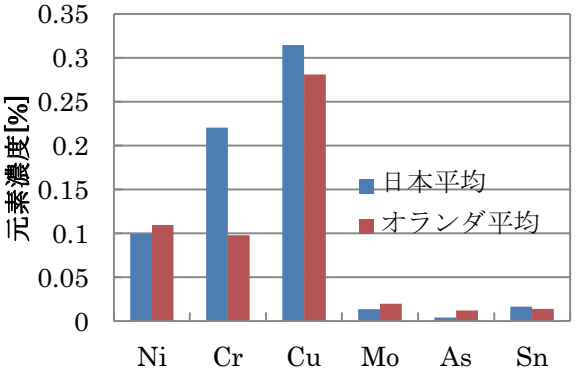


図 1. 日本とオランダで採取されたスクラップを原料とした棒鋼中の平均不純物元素濃度

2.2 分析対象国について

棒鋼を採取したオランダは、自国で使用する鉄スクラップと棒鋼の総量のうち、鉄スクラップについては約 40%、棒鋼については多くを他国から輸入している [3)]。このことは、分析した棒鋼がオランダで生じた鉄スクラップから生産した棒鋼ではない可能性が高く、意図した結果が得られないこととなる。しかしながら、オランダの鉄スクラップと棒鋼の輸入元は、ベルギー、フランス、ドイツの 3 カ国からの輸入がほとんどであった。さらに、オランダを含めた 4 カ国を 1 つの系として考えると、4 カ国以外からの鉄スクラップと棒鋼の輸入量は、それらの総量に対して約 1 割程度であった。したがって、本研究では、オランダで採取された試料ではあるものの、先に述べた 4 カ国を 1 つの評価対象国（西欧）として扱った。他方、日本は、自国で使用する鉄スクラップと棒鋼の総量のうち、鉄スクラップについては約 0.4%、棒鋼については約 1.4%を他国から輸入しており、ほぼ閉じた系として考えられた。

2.3 分析手法概要

棒鋼中の Cr 濃度の差が、鉄スクラップの由来である回収される使用済み製品の排出の違いによるものと考えた。そこで、WIO-MFA 手法と動的 MFA 手法により、日本と西欧において使用済みとなる製品の排出に伴って、鉄鋼材とともに排出される元素のフロー量を推計した。結果を比較し、Cr 濃度の違いを説明できる混入源となると考えられる製品種を検討した。

3. WIO-MFA 手法

3.1 WIO-MFA 手法概要

鉄鋼材とともに排出される元素のフロー量を推計するために、産業連関表を用いた手法である、WIO-MFA(Waste Input Output Material Flow Analysis)手法 [3)]を用いた。WIO-MFA では、元素フローを明らかにすることが目的であるため、産業連関表の部門のうち、異なる元素組成を持つ財が混在する一部の素材に関する部門を拡張した投入産出表を用いている。WIO-MFA を実施することにより、日本の最終製品 551 部門についての素材構成比 Cmp が推計される。Cmp は、各製品に直接投入される素材を記述した投入係数行列 Amp と、各製品に直接投入される中間財としての製品を記述した投入係数行列 App、単位行列 I を用いて式 1 により導出される。本手法の特徴として、多くの金属元素のフローを同時に分析することができる。

$$C_{MP} = \bar{A}_{MP}\,(I - \bar{A}_{PP})^{-1} \qquad \text{(式 1)}$$

3.2　鉄鋼材に対する Cr 使用割合の推計

日本の WIO-MFA の結果を用い、製品ごとに炭素鋼とともに使用される Cr 量を推計した。Fe を含む素材の中では炭素鋼が支配的なため、製品中に含まれる Fe に対する Cr の比を、鉄鋼材の主要な用途に統合し、加重平均した比率で図 2 に示した。自動車が最も高く、機械類は、その半分程度であった。

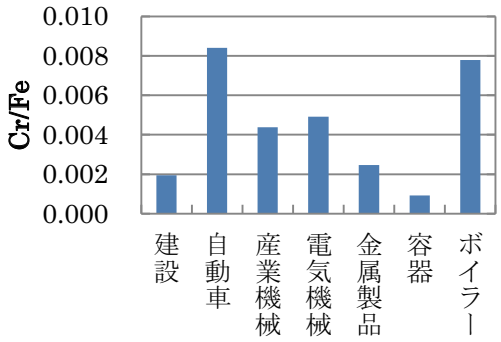


図 2. 鉄鋼材用途部門別 Cr/Fe 比

3.3 西欧 4 カ国における製品の素材構成

WIO-MFA には、先述のように部門拡張した投入産出表の作成が必要であり、そのための元データとして多くの資料を要する。また、西欧各国における産業連関表の製品部門数は 59 であり、日本の産業連関表の部門数に比べ少ない。部門数の少なさと部門拡張のための資料の入手可能性の低さから、西欧の産業連関表を基に拡張した投入産出表の作成は困難であるため、西欧の製品について日本製品の素材構成比を適用することを検討した。

約 4600 に分類された製品の、西欧各国における生産額を記した統計[5]に対し、それらの製品を日本の産業連関表の区分に統合し、それぞれの製品の生産額に対して日本の素材構成比を適用し、生産された製品に使用される Fe の量を推計した。これを最終需要となる製品について積算した。

西欧各国の代表として、データの入手が容易であったドイツについて推計を行った。ただし、製品の生産統計ではカバーできなかった、建築物や土木構造物の建設部門については、2000 年のドイツの鉄鋼材消費量のうち建設部門に投入された割合（36%[6]）を用いた。2003 年のドイツにおける仕上げ鋼の投入量が 3370 万トンである一方、2003 年のドイツで生産された製品に使用された Fe 量の推計値を、鉄鋼用途別の歩留まりで割り戻した値は 3240 万トンとなり、統計値とほぼ一致した（図 3）。日本と西欧の地域性の違いにより、製品の素材構成比に違いがあることが予想されたが、鉄鋼材については、西欧各国の製品について日本の素材構成比を適用することの妥当性が確認された。

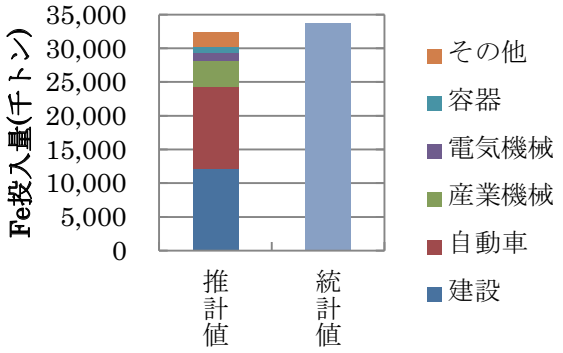


図 3. ドイツにおける WIO-MFA により推計された Fe 投入量（推計値）と統計から得られた仕上げ鋼の生産量（統計値）の比較

4.動的 MFA 手法

鉄鋼材の部門別発生ポテンシャル量を推計するために動的 MFA 手法を用いた。日本については、既存研究[7]の鉄鋼材の動的 MFA の結果を 2015 年までアップデートした。中古品輸出は、自動車、産業機械、電気機械、家庭用事務用機械器具について考慮し、発生ポテンシャルから減じた[7]。西欧 4 カ国については、簡便のため各製品の平均寿命の期間分前に国内で消費された製品が、当年に廃棄されるとして推計した。用途部門別鉄鋼材投入量の時系列データを既存研究[6]より得て、2015 年における用途部門別の鉄鋼材発生ポテンシャルを推計した。なお、中古自動車輸出は、結果に大きく影響を与えると考えられたため考慮した。日本と西欧 4 カ国における、鉄鋼材の発生ポテンシャルの部門別シェアを図 4 に示す。

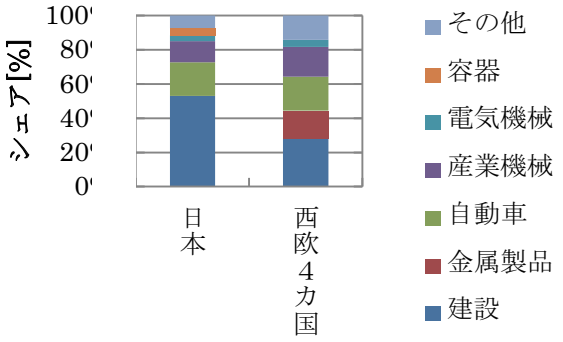


図 4. 日本と西欧 4 カ国の鉄鋼材発生ポテンシャルの部門別シェア

5.おわりに

Cr/Fe 比が他の部門に比べ低い建設、金属製品、容器に関して、欧州 4 カ国よりも日本の方が、全体の鉄鋼材の発生ポテンシャルに占める割合が高いことがわかった。これは、日本の方が棒鋼中の Cr 濃度が高かったことと反する結果となった。このことから、棒鋼中の Cr 濃度の差異は、使用済み製品の発生量の違いではなく、使用済み製品の解体分離プロセスや、鉄鋼材の精錬条件の違いによるものである可能性が考えられた。それぞれの国や地域において、これらの違いを調査することが望まれた。

参考文献

1) 醍醐市朗, 後藤芳一. 鉄鋼材における不純物元素濃度の日中間比較. 鉄と鋼, **100**, (2014), pp.756-760
2) 藤村怜央, 林英男, 醍醐市朗, 後藤芳一 : 第 11 回日本 LCA 学会研究発表会要旨集, 柏, (2016), pp.228-229
3) S. Nakamura and K. Nakajima: Materials Transactions, **46**, (2005), pp.2550
4) J.Davis, R.Geyer, J.Ley, J.He, R.Clift, A.Kwan, M. Sansom, T.Jackson: Resources, Conservation and Recycling, **51**, (2007), pp.118-140
5) Eurostat: Prodcom – statistics by produducts 入手先 ,<http://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/data/excel-files-nace-rev.1.1>, (参照 2016-12-31)
6) D.Panasiuk, B.Laratte, S.Remy: Eco Balance 2016, Kyoto, (2016), pp.111
7) I.Daigo, K.Iwata,I. Okata, Y. Goto: Environ. Sci. Technol. , **49** , (2015), pp.6740-6750.

動的 MFA を用いた鉄鋼循環に伴う Ni および Cr の散逸削減可能性の推算

Estimation of the possibility to reduce the dissipation of Ni and Cr associated with steel recycling using dynamic MFA

○武山 健太郎 [1)*]、大野 肇 [1)]、松八重 一代 [1)]、中島 謙一 [2)]、近藤 康之 [3)]、長坂 徹也 [1)]

Kentaro Takeyama, Hajime Ohno, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, Yasushi Kondo, Tetsuya Nagasaka

1) 東北大学, 2) 国立環境研究所, 3) 早稲田大学

*kentaro.takeyama.t2@dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

鉄鋼材は世界で最大の消費量を誇る金属材料である。鉄は添加した元素によって様々な特性を発現する為、様々な元素が添加されている。そのため、鉄鋼業は様々な金属資源を大量に消費している。金属資源は有限資源であり、その採掘は様々な環境負荷や社会的影響を生じる可能性がある。 一方で、人間の経済活動に伴う資源循環を通じて多くの金属素材が散逸している事が指摘されている。本研究では特殊鋼のうち生産量の多いステンレス鋼に用いられている Ni と Cr に着目する。

鉄鋼資源の循環においては、MFA(Material Flow Analysis)により、鉄鋼材のリサイクルに伴って Ni と Cr の散逸が生じている可能性が指摘されている。[1, 2)] 現在、鉄鋼材のリサイクルは製造工程の端材や廃製品から回収された鉄スクラップを冷鉄源とした製鋼プロセスによって行われている。使用済み製品に由来するスクラップは鋼種の把握が難しく合金元素の管理が不十分なため、合金元素の散逸の原因となっている。[3)]

先行研究では、静的 MFA によって特定の時点においての需要構造が明らかにされているが、将来における存在形態やスクラップの発生量が見積もられていないため、潜在的な二次資源としてのスクラップ発生量やその発生形態が論じられていなかった。[1, 2, 3)]また、単一の素材・元素を対象とした MFA では、随伴する元素の散逸について把握できなかったため、対象とする物質の回収や散逸による他の物質への影響を分析する事ができなかった。[1,2,3)]よって、本研究では、動的 MFA モデルである MaTrace モデル [4)]を多元系へ拡張し、鉄鋼資源循環に伴う Ni と Cr の動的フローを解析する事で、Ni と Cr の散逸量と技術革新による散逸の削減可能量を論じる。

2. 手法

MaTrace モデル [4)]は WIO-MFA(Waste Input-Output MFA)モデル [5)]を製品寿命やリサイクル工程での歩留まりを考慮することで動的に拡張したモデルである。このモデルを用いる事で社会に投入された素材がどのような形態で蓄積されるかを可視化する事が出来る。先行研究 [4)]においては単一の素材について分析が行われていたため、その素材に随伴する元素の散逸については把握できておらず、対象とする素材の回収ら散逸による他の物質、鉄鋼材の場合は合金元素等の散逸への影響を論じる事が出来なかった。そのため、本研究においては多元系に拡張を行い、鉄鋼材に随伴する Ni と Cr のフロー分析を行う。

2.1 モデルの拡張

鉄鋼材に随伴する合金元素について分析を行う際には、WIO Table における粗鋼・鋼材・スクラップの部門を鋼種毎に分割する必要がある。粗鋼・鋼材については先行研究 [3)]によってそれぞれ 58, 27 部門に分割が行われているため、本研究ではスクラップ部門の分割を行った。統計データ [6)]を用いて 10 部門(銑屑、自家発生屑、加工屑(普通鋼系、特殊鋼系、Cr 系ステンレス鋼、Ni 系ステンレス鋼)、老廃屑(普通鋼、特殊鋼、Cr 系ステンレス鋼、Ni 系ステンレス鋼))に分割を行う。製品部門については先行研究 [4)]に準ずる。

また、精錬時の歩留まりについては、それぞれの元素、鋼種毎に文献 [7,8)]に基づいて設定する。

2.2 モデル構造

図 1 にスクラップ部門拡張版 MaTrace モデルの概略図を示す。先行研究においてはスクラップとして統合されていた老廃屑と老廃屑を分割し、それぞれについてフローを個別に計算している。

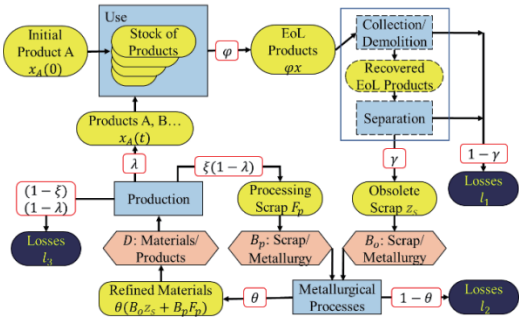


図 1 スクラップ部門拡張版 MaTrace モデル概略図

t年目に発生する老廃屑中に含まれる初年度に生産された製品由来の元素量$z(t)$は以下の式で表せる。

$$z_j(t) = \Sigma_{r=1}^{t-1}\Sigma_i^{N_p}\mu_{ji}(r)\Gamma_i(t)\varphi_i(t-r)x_i(r)$$

ここで$x(t)$は製品中に含まれる元素量、$\varphi(t)$は製品の廃棄率、$\Gamma(t)$は廃製品からの老廃屑回収率、$\mu(t)$は製品の元素含有率を表す。
また、t年目に発生する加工屑中に含まれる元素量$F(t)$は以下の式で表せる。

$$F_j(t) = \Sigma_i \Sigma_l f_{ij}(t,\ l)$$

$$f(t,1) = \hat{\Xi}\left(I - \hat{\lambda}\right) D(t)\hat{\theta}(t) B_o(t)\hat{z}(t)$$

$$f(t,l) = \hat{\Xi}\left(I - \hat{\lambda}\right) D(t)\hat{\theta}(t) B_p(t) v(t,l-1) f(t,\ l-1)$$

ここで$f(t,l)$はl回目のループの加工屑に含まれる元素量、$B_o(t)$は老廃屑の精錬炉への分配率、$\theta(t)$は精錬工程の歩留まり率、Dは再生素材の製品への分配率、λは製造時の歩留まり率、Ξは製造歩留まりの回収率、$B_p(t)$は加工屑の精錬炉への分配率、$v(t,l)$はl回目のループの加工屑の元素含有率を表す。
以上より、t年に生産された最終製品に含まれる元素量$x(t)$は以下の式で表せる。

$$x(t) = \hat{\lambda} D(t)\hat{\theta}(t)\left(B_o z_s(t) + B_p F(t)\right)$$

3. 結果

自動車産業に投入された鉄鋼材とそれに随伴する Ni と Cr について発生するスクラップ中に含まれる元素量とそのリサイクル先の遷移を図 2 に、蓄積先の遷移を鋼材で分類したものを図 3 に、蓄積先の遷移を製品で分類したものを図 4 に示す。鋼材での分類は、製品量をその由来となる粗鋼量に換算し、それを普通鋼、特殊鋼に大別する事で分類を行う。それぞれの図は経過年を横軸に、初年度の投入量に対する割合を縦軸に作図する。

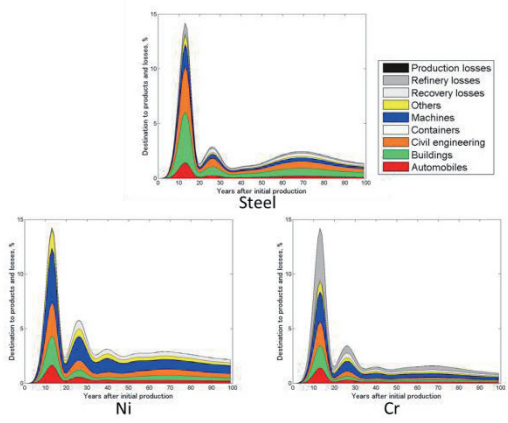


図 2 存在形態の遷移 (年次表示)

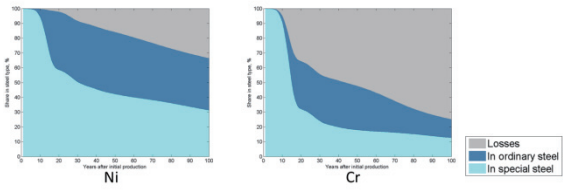


図 3 存在形態の遷移 (蓄積表示, 製品分類)

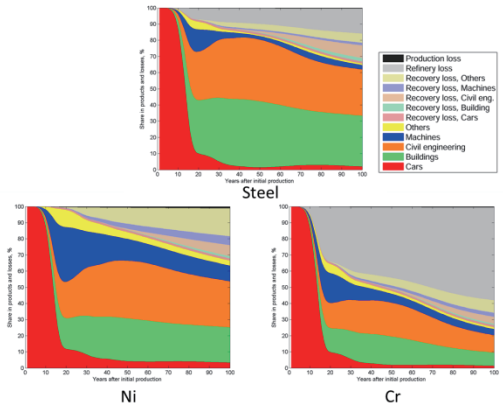


図 4 存在形態の遷移 (蓄積表示, 製品分類)

図より初年度に自動車産業に投入された鉄鋼材に随伴する Ni と Cr の散逸量を推計した結果、100 年後時点での散逸量は Ni 68.8% (物理的: 33.5%, 質的: 35.3%)、Cr 87.4% (物理的: 87.4%, 質的: 12.7%)であると得られた。また、その主な要因は「Ni, Cr について質的な散逸」「Ni についてスクラップ回収時の歩留まり」「Cr について精錬時の散逸」であると得られた。

また、スクラップソーティングの導入を想定して$B_o(t)$を変化させたシナリオを導入した場合の動的フローを解析、比較する事で散逸の削減可能量を明らかにした。推計により、スクラップソーティングの導入によって一回のリサイクル工程で発生する質的な散逸を大幅に削減する事可能である事が明らかになった。シナリオ分析の詳細については口頭およびポスター発表にて述べる。

4. 参考文献

1) B.K. Reck, D.B. Müller, K. Rostkowski, T.E. Graedel: Environ. Sci. Technol., 42, (2008), pp.3394-3400
2) J. Johnson, L. Schewel, T.E. Greadel: Environ. Sci. Technol., 40, (2006), pp.7060-7069
3) H. Ohno, K. Matsubae, K. Nakajima, S. Nakamura, T. Nagasaka: J. Ind. Ecol., 18(2), 2014, 242-253
4) S. Nakamura, Y. Kondo, S. Kagawa, K. Matsubae, K. Nakajima, T. Nagasaka: Environmental Science and Technology, 48, (2014), pp.7207-7214
5) S. Nakamura, K. Nakajima: Mater. Trans., 46, (2005), pp.2550-2553
6) 日本鉄源協会: “鉄源年報”, 日本鉄源協会, 東京, (2005)
7) I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Adachi: Resour. Conserv. Recy., 54, (2010), pp.851–863
8) T. Oda, I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Adachi: ISIJ Int., 50(2), (2010), pp.314-323

関与物質総量を用いた日本の鋼材生産に関わる採掘活動量の定量化

Assessment Mining Activity of Steel Making of Japan using Total Material Requirement

○小栁津顕*[1)], 中島謙一 [2)], 松八重一代 [3)], 村上進亮 [4)], Cravioto Jordi [1)], 山末英嗣 [1)]
Akira Oyaizu, Cravioto Jordi, Kenichi Nakajima, Kazuyo Matsubae, Shinsuke Murakami, Eiji Yamasue
1)立命館大学 , 2) 国立環境研究所, 3)東北大学, 4)東京大学
* rm0060iv@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

鉄鋼材料は工業製品には欠かすことのできない素材の１つであり, 様々な製品に利用されている. 鉄鋼材料は機械設計で要求された仕様や性能を満足させるために, 種々の合金元素や複雑な熱処理を行うことでその条件を満たしている. たとえば粗鋼１つをとっても多くの工程と材料を用いて製造されており, 多くの資源, エネルギーが必要である. 現在の鉄鋼材料にはクロムやニッケル, マンガンなどの希少元素が多く添加されているものも少なくない.

その一方で, 材料の環境影響の評価例に注目した時, Life Cycle Assessment (LCA) 的な視点からはそのほとんどがエネルギー, あるいは二酸化炭素排出量評価に偏っている. 例えば二酸化炭素に関しては鉄鋼 CO2 排出量・原単位計算方法を ISO 化することで世界共通の規格までが構築されている. そのため, 資源消費という観点からも鉄鋼材料の環境影響を議論する必要がある. しかし, 資源消費についてマテリアルフロー分析のように直接・間接の物質投入を考慮した分析はデータベースが少しずつ構築されつつあるが, その他の指標については評価例が少ないのが現状である.

そこで, 本研究では, 関与物質総量という指標に着目する. 関与物質総量は直接, 間接の物質・エネルギー投入だけでなく, 隠れた物質フロー を評価できる指標である. 隠れたフローは採掘に伴う岩石や土砂の移動が代表である. たとえば山末の定義した自然鉱石 TMR や都市鉱石 TMR を用いると、対象とする材料を単位量生産するための全物質投入量を評価できる[1]. しかし, これまでに求められてきた鉄鋼材料に関する関与物質総量は, 原田が周期表上での”Fe”に対して” 8 kg/kg” という値を報告しているのみで, 他の鋼材については, 中島らがクロムメッキ鋼板について求めたものを除き, 報告例がない[2].

本研究では, はじめに, 粗鋼の関与物質総量を製造フローから推計する. 次に, 得られた粗鋼の関与物質総量を基に, 種々の鉄鋼材料の関与物質総量について推計することを目的とする.

2. 研究手法

本研究ではまず, 製造フローを基にした場合と IDEA のデータベースを基にした場合の２通りで粗鋼の関与物質総量を推計する. 製造フローとは製造の流れを図に示し, そこに投入物, 副生物, 生産物を明記し, その流量を表記したものである. 製造フローを用いることにより, 複雑かつ多様な工程を持つ製品製造において、正確に製造状況を把握できる. また, 製造フローでは副産物などの細かな資源やエネルギーの把握が可能である. その結果, アロケーションも可能であり, 正確に関与物質総量推計が行える.

次に, 各種鉄鋼材料の関与物質総量を推計するにあたり, IDEA のデータベースを用いる. このデータベースを使用する理由として多種多様なデータを含んでおり, 様々な鋼種についての投入物, 副産物, 生産物と流量について表記されている. そのため簡略的にではあるが関与物質総量を推計するために有用であると考えたからである. しかし, IDEA のインベントリデータでは, どの経路でどのタイミングで, どの投入物が用いられ, 副産物が生成されるかなどの記載があまりない. その為, 各種鉄鋼材料の正確な製品の関与物質総量を推計するにあたり, まず粗鋼の IDEA のインベントリデータから推計した関与物質総量と製造フローから推計した関与物質総量に近いかの検証を行う. また, 粗鋼の関与物質総量を基に, IDEA のインベントリデータを用いることにより, 普通鋼 8 種と特殊鋼 8 種の関与物質総量を推計した. また, ここでの関与物質総量については, 自然鉱石 TMR(NO-TMR, Natural ore TMR)の概念に基づき推計した.

3. 結果および考察

本研究の結果, 粗鋼の関与物質総量は製造フローを用いて精査した場合と, IDEA のインベントリデータを用いて推計した場合では大きく変わらないことが分かった. そして, そのどちらもまた, 普通鋼, 特殊鋼合わせて16種の関与物質総量推計結果を得られた. その結果を図 1 に示す.

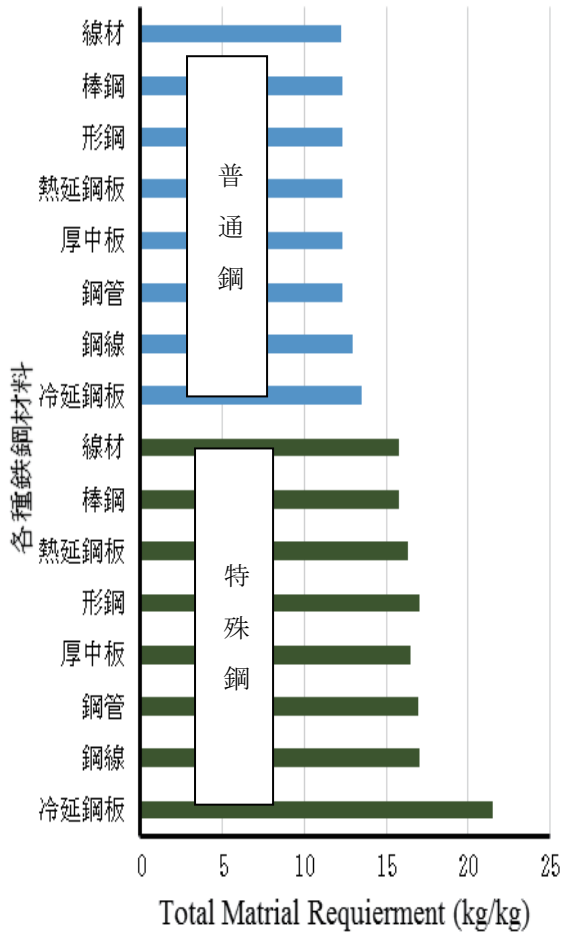


図 1 鉄鋼材料の関与物質総量

図 1 の結果より，同じ鉄鋼材料の中でも鋼種によって関与物質総量の違いがあることが分かった．その中でも普通鋼か特殊鋼かの違いは大きいのは，図 1 から見ても明らかである．

よって，従来のように代表値として 1 つの値を用いて製品の関与物質総量を推計するのではなく，評価対象とする鋼種ごとに関与物質総量を推定するべきであることが分かった．

また，本研究の考察として 1 年間に日本国内で生産された鉄鋼材料の総関与物質総量も推計する．その一部について図 2 に示す．ただし，ここで用いた鉄鋼の関与物質総量については NO-TMR なので，実際の値より過剰に評価している．また，スクラップの関与物質総量を考慮した日本の鉄鋼に関する総関与物質総量については発表にて報告する．

このように国内で 1 年間に生産された鉄鋼材料の関与物質総量を推計することによりその年に，鉄鋼製造関係で消費された資源やエネルギーの数値化が可能となる．これによりどの鋼材が多くの資源を消費しているかが分かる．

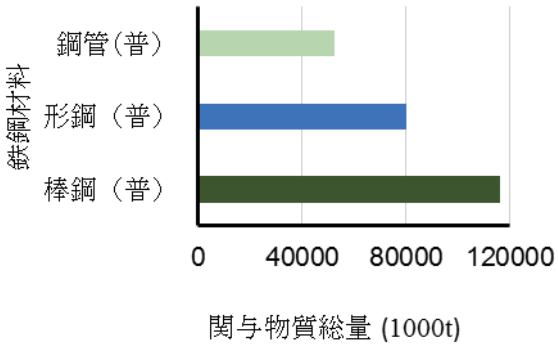


図 2　2015 年度，日本国内で製造された鉄鋼ごとの総関与物質総量

4. まとめ

本研究では，鉄鋼材料の製造時に使用される資源，エネルギーの消費に着目し，関与物質総量を用いた鉄鋼材料の評価が目的である．粗鋼の関与物質総量推計には製造フローとインベントリデータを用い評価した．その結果，粗鋼の関与物質総量は製造フロー，インベントリデータどちらも，10kg/kg 前後の値を取ることが分かった．

また，製造フローにおける粗鋼の関与物質総量を基に，インベントリデータから各種鉄鋼材料の関与物質総量を比較した．その結果，鋼種ごとに関与物質総量は違い，特に，普通鋼と特殊鋼の間では，明らかに差が出ることが分かった．また考察として各種鉄鋼材料の関与物質総量と，年間の日本国内で生産される鉄鋼材料の重量を用いる事により，一年間に消費される鉄鋼材料における資源量を推計した．

5. 参考文献

[1] E. Yamasue, R. Minamino, T. Numata, K. Nakajima, S. Murakami, I. Daigo, S. Hashimoto, H. Okumura and K. N. Ishihara：” Novel Evaluation Method of Elemental Recyclability from Urban Mine, ~Concept of Urban-ore TMR ~”, Materials Transactions, Vol.50, No.6, pp.1536-1540
(2009)

[2] K. Nakazima and K. Halada and K. Ijima “Estimation of Total Material Requirement –Energy Resources and Industrial materials -“, Journal of Life Cycle Assessment, Japan Vol.2 No.2, pp.152-158 (2006)

気候変動の適応策を思考した節水トイレの環境影響評価

Environmental impact assessment of Toilet for saving the amount of water for the adaptation of climate change

○岡崎真優子*[1)]、佐々木秀樹 [2)]、伊坪徳宏 [1)]
Mayuko Okazaki, Hideki Sasaki, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学, 2) パナソニック株式会社
* g1361026@tcu.ac.jp

1. はじめに

IPCC 第 5 次報告書によれば、世界の平均気温は 1800 年から 2012 年の期間にかけて 0.85℃の上昇を示し、2100 年には世界の平均気温が最大 4.8℃上昇すると予測されている。この現状を背景に、気候変動対策は従来の緩和策に加え、適応策に対する取り組みが注目されている。

気候変動による環境問題は気温の上昇にとどまらず、水不足にも強い影響を与える。水不足の主な原因のひとつに、人口増加に伴う総需要量の増大が挙げられる。水資源量に対して水需給が十分でない状態の程度（水ストレス）を表す指標として、「人口一人当たりの最大利用可能水資源量」が用いられる。世界人口と生産活動量の増加、生活様式の変化等が、水の需要量を増加させ、供給量がこれに追いつかない地域がさらに増加するものと予想されている。この水不足の適応策として、節水製品の早期普及が求められる。

2. 研究目的

本研究では、節水トイレを気候変動適応策の一つとして注目し、これを海外に導入した際の環境影響の削減効果について LCA を用いて定量的に評価することを目的とする。気候変動による被害は地域により異なることから、環境影響と節水による被害削減量については国ごとに異なる係数を用いた。

3. 評価対象および研究方法

3.1 評価対象

評価対象は陶器素材の従来型便器 2 台（以下、平均値を従来型）と有機ガラス系樹脂の新型アラウーノ（以下、節水型）とする。機能単位は「便器 1 台（使用年数 20 年）」とし、影響評価は特性化と統合化を行うこととした。特性化では GHG と水を、統合化では地球温暖化・水・資源消費・都市域大気汚染を含めた。

3.2 評価範囲

本研究では、土石や樹脂といった原材料の調達段階から製造、輸送、使用、廃棄までのライフサイクル全体をシステム境界とした。ただし、海外に設置する際の輸送は考慮できなかったため、システム境界外とする。また国内の物流における積載率は各便器の重量が異なるため、容積換算をして設定した。

3.3 データ収集

本研究では、「パナソニック株式会社」から節水型便器の一次データを取得した。従来型便器は JEMAI（産業環境管理協会）が報告している製品環境宣言から二次データを取得した。

3.4 算定方法

本研究での CFP、WF、統合化の算定には原単位法を使用した。（算定式は以下の式 1,2,3 に示す）

CFP＝Σ（活動量×原単位×GWP）（式 1）
WF＝Σ（活動量×原単位×特性化係数）（式 2）
統合化＝Σ（活動量×原単位×統合化係数）（式 3）

活動量にはヒアリングより得た一次データを使用した。（式 1,2,3）の原単位には、IDEA（産業技術総合研究所）を使用した。（式 2）の特性化係数には、矢野らが開発した水消費量特性化係数を使用した。統合化には LIME3 の国別の重みづけ係数を用いた。

4. 結果

4.1 各便器の GHG 排出量比較

各便器（従来型、節水型）の上流別 GHG 排出量の算定結果を図 1 に示す。いずれも使用における下水道処理と上水道の和が全体の約 7 割以上を占めた。節水型にすることでこれらの GHG 排出量を抑制でき、全体で 2 割程度削減できることが分かった。一方、節水型は原材料調達の負荷が相対的に大きかった。これは有機系ガラス樹脂の使用に伴うものである。

今回の計算では、従来型はブラシ掃除を 2 回/週行い、節水型は使用時の流す際に自動洗浄されるというシナリオを採用した。その結果、従来型の洗剤と節水型の洗剤+電力における負荷はほぼ同程度であった。

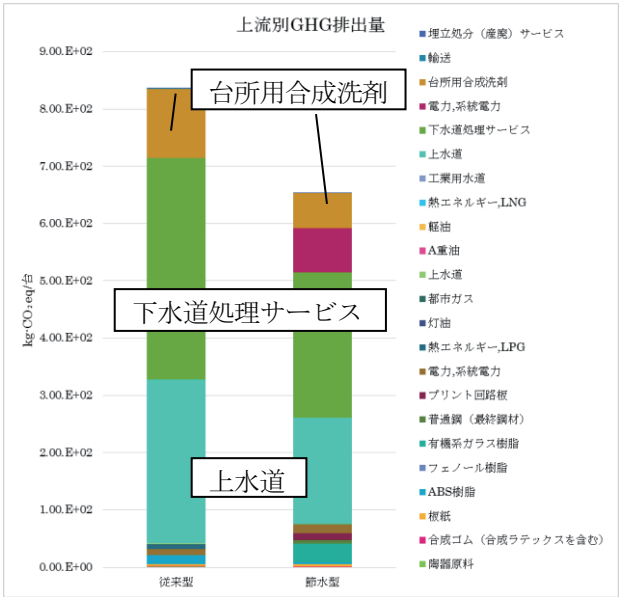


図 1 各便器の上流別 GHG 排出量

4.2 WF

従来型と節水型の WF 算定結果を図 2 に示す。節水型は特に節水効果が使用の結果に大きく、全体で 3 割程度の影響低減に寄与していることが分かる。また、取水源である表層水が大きい。

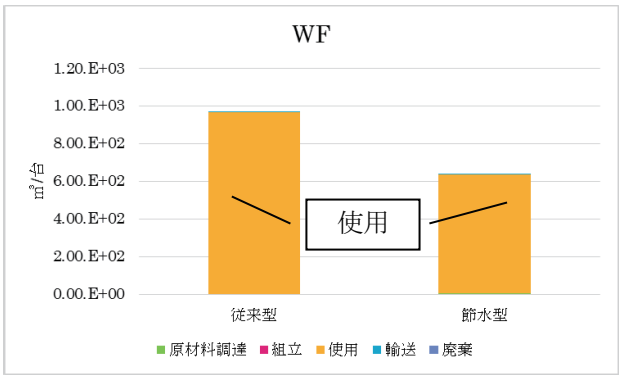


図 2 各便器の WF

4.3 統合化

従来型と節水型の統合化結果を図 3 に示す。網羅性を重視し、地球温暖化と水に加え、資源消費と都市域大気汚染を考慮した。原材料調達と組立は日本で行い、使用と廃棄は輸出相手国で環境負荷が発生するというシナリオで算定した。

表 1 各国における年間販売台数

日本	25,000 台
中国	100 台（違うモデル）
カナダ	1000 台（見込み値）

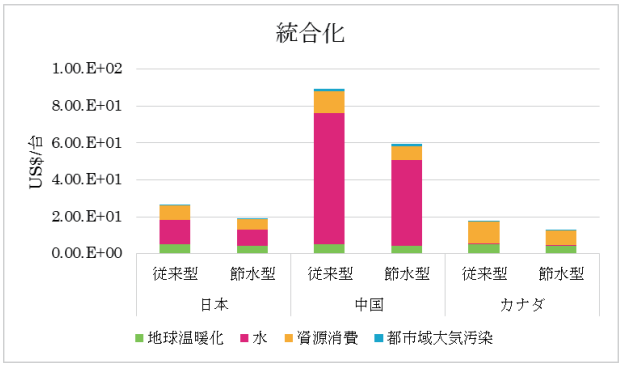


図 3 日本における各便器の統合化

4.4 便益

前述した統合化結果を踏まえ、節水型を各国に適応した際の便益を算出した。本研究では「便益＝Σ（従来型の統合化結果―節水型の統合化結果）×年間台数（表 1）」とした。各国の年間販売台数を乗じた便益の総和を図 4 に示す。各国に導入した際、年間で約 2,000 万円の環境影響削減効果が見込まれた。中国での販売台数は少ない一方で、一台当たりの便益が大きい。

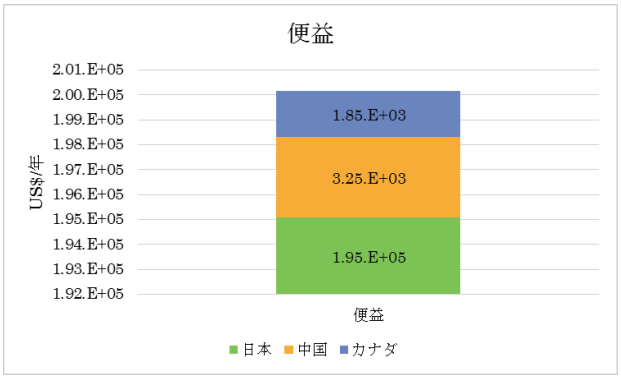


図 4 節水型便器を各国に導入した際の便益

5. 結論・課題

本研究では、従来型と節水型における、CFP と WF、統合化の評価を行うとともに、節水型を海外に導入した際の便益を求めた。

いずれの結果も節水型の環境影響が従来よりも小さく、使用における節水効果が大きく寄与していることが分かった。節水型を日本・中国・カナダに販売することで、2,000 万円に相当する環境影響の削減に貢献するものと推定された。特に中国では一台当たりの便益額が大きく、気候変動の適応策として高い効果があるものと考えられた。

6. 参考文献

1) IPCC 第 5 次報告書
2) 国土交通省　平成 22 年版日本の水資源

逆浸透法を用いた海水淡水化施設の環境影響評価

Environmental impact assessment of seawater desalination plants using reverse osmosis

○黒川賢治*[1)]、杉本和明 [2)]、大熊那夫紀 [2)]、小関康雄 [1)]、伊坪徳宏 [1)]
Kenji Kurokawa, Kazuaki Sugimoto, Naoki Ohkuma, Yasuo Koseki, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学, 2) 一般財団法人造水促進センター
* g1362047@tcu.ac.jp

1. はじめに

将来、新興国や発展途上国では人口増加の進行、及び生活様式の変化によって水需要が増えると予測される。増加する水需要を満たす策として海水淡水化による淡水生成が注目されており、近年では特に逆浸透法(RO)を用いた海水淡水化が需要を伸ばすとともに、逆浸透膜の開発が世界中で進められている。

海水淡水化施設の環境影響評価については、海外では検討事例があるものの、国内で評価した事例は現時点で存在しない。浄水施設を対象とした LCA 研究は既に数多くなされているので、海水淡水化施設の環境影響評価を通じて、浄水施設との比較が可能となる。

2. 目的

本研究では逆浸透法を用いた海水淡水化施設を対象にライフサイクルにおける環境負荷量とコストを国内施設の一次データを用いて算出する。算出結果を従来の海水淡水化方法として代表的な多段フラッシュ(MSF)、多重効用法(MED)、と比較することで逆浸透法の環境優位性について考察する。さらに、評価対象の海水淡水化施設を海外に導入したと仮定した場合の費用便益分析を水ストレスの国別被害係数を用いて行い、施設導入による効果を定量的に示す。

3. 評価対象及び研究方法

本研究では機能単位を淡水 1m^3 の生成とし、施設の稼動データに基づく実測値モデルと最大生産水量の 90%の水量を生産すると仮定した場合の計画値モデルの 2 つを設定し算定を行った。機械設備や建設資材の環境負荷については、当該施設の利用年数を 40 年と仮定して各年の環境負荷量に配分した。評価項目は地球温暖化（GHG 排出量：CO_2, CH_4, HFCs, PFCs, SF_6）、水消費量（WF：Water Footprint）、環境影響（統合化）の 3 種類とした。

3.1 評価対象

本研究の評価対象は「福岡地区水道企業団海水淡水化センター（以後福岡施設）」及び、「沖縄県企業局北谷浄水管理事務所海水淡水化センター（以後沖縄施設）」の 2 箇所の海水淡水化施設とする。評価対象の概要を表 1 に示した。

表 1　評価対象の概要

名称	福岡施設	沖縄施設
最大取水量	103000m^3/日	100000m^3/日
最大生産水量	50000m^3/日	40000m^3/日
所在地	福岡県福岡市東区	沖縄県北谷町
淡水回収率	60%	40%
取水方式	浸透取水方式	直接取水方式
前処理方法	UF 膜処理	砂ろ過
供給開始年月	2005 年 6 月	1995 年 6 月

3.2 評価範囲

環境影響評価の評価範囲を図 1 に示す。算定では赤枠で囲われた各段階における輸送及び施設の建設工事については評価の範囲外とした。廃棄については運用における膜交換によって発生した使用済みの膜のみ全量廃棄することとする。

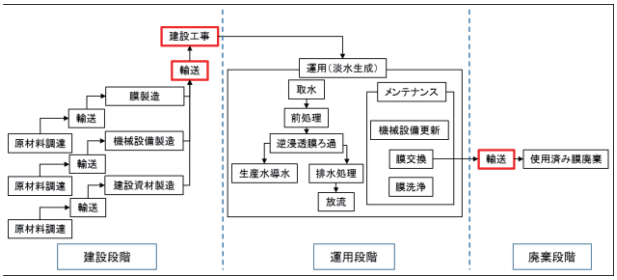


図 1　本研究の評価範囲

3.3 算定方法

本研究では、一般財団法人造水促進センターへヒアリングに行き、海水淡水化施設への投入資材量や事業費等のデータを入手した。また、評価対象である福岡施設、沖縄施設へとヒアリングに行き、運用段階における消費電力量、薬品使用量等が記載された稼動実績を入手した。算定式は以下の式 1.2.3.4 に示す。

GHG 排出量＝Σ（活動量×GHG 排出量原単位）（式 1）
水消費量＝Σ（活動量×水消費原単位）（式 2）
WF＝Σ（水消費量×特性化係数）（式 3）
環境影響＝Σ（インベントリ結果×統合化係数）（式 4）

GHG 排出量原単位には、MiLCA(IDEA)を使用した。水消費量については MiLCA によって算出したインベンリ分析結果に矢野らが開発した特性化係数（Water Availablity Factor[1]）を乗じて算出した。統合化係数には LIME3 を用いた。

4. 結果

4.1 GHG 排出量

実測値モデルと計画値モデルにおける沖縄施設と福岡施設の GHG 排出量を図 2 に示した。いずれも運用段階が大きな割合を占めており、総 GHG 排出量の 90%以上を占めた。沖縄は実測と計画で異なる結果となった。沖縄は計画生産量よりも少ない生産量であり、造水時の負荷のほか、施設等の負荷の割合が相対的に大きくなったことによる。

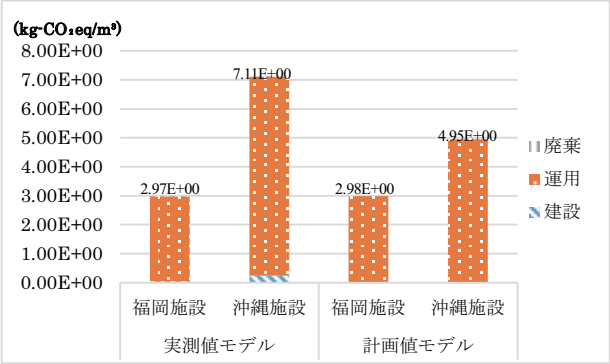


図 2　モデル別･段階別ライフサイクル GHG 排出量算定結果

表 2　運用段階における消費電力量

実測値モデル		計画値モデル	
福岡	沖縄	福岡	沖縄
5.39kWh/m³	6.86kWh/m³	5.49kWh/m³	4.88kWh/m³

今回の結果を既存文献[2]（スペインにおける海水淡水化施設（表 3）を対象とした評価）と比較した結果を図 3 に示す。MED や MSF に比べて、福岡・沖縄の RO 施設の CO2 排出量は、約 1/6～1/8 程度であった。一方、スペインの RO に比べて 1.5～4 倍程度であった。RO 施設の稼働率と電力の環境負荷原単位の違いが強く影響したものと考えられる。

表 3　比較対象施設概要

	生産水量	電力消費	熱量
RO	46000m³/日	4.00kWh/m3	-
MED	45500m³/日	2.00kWh/m3	263MJ/
MSF	45500m³/日	4.00kWh/m3	333MJ/

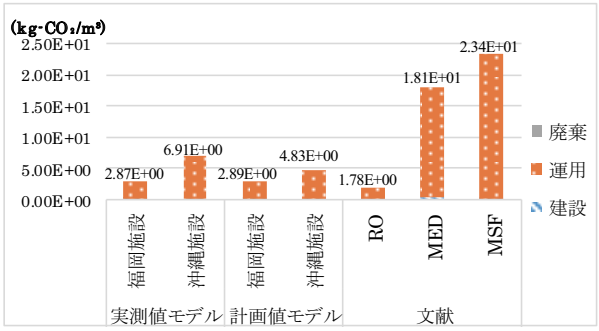


図 3　海水淡水化手法別 CO_2 排出量

4.2 水ストレス被害削減効果

計画値モデル福岡施設の統合化を行ったうえで、G7 加盟国を対象に年間の運用実績に基づく費用対便益分析を行った。削減が認められた国（便益額＞環境影響）のみを図 4 に示す。便益から環境影響を差し引いた値を各国の水ストレス被害削減効果とした。G7 加盟国の中で淡水化施設導入による水ストレス被害削減効果が最も高い国は日本であり、年間で約 14 億円の削減効果が認められた。

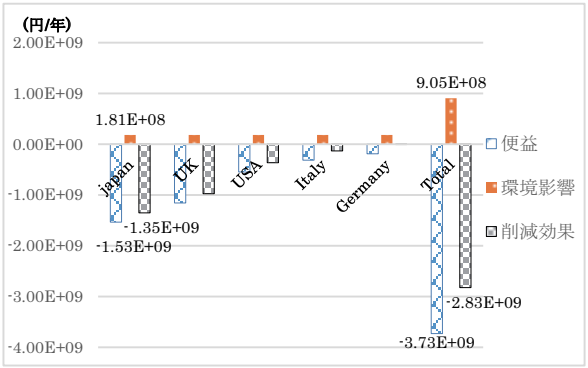


図 4　G7 を対象とした費用便益分析

4.3 まとめ

本研究によって海水淡水化施設のライフサイクルにおける環境負荷量を明らかにするとともに、他の海水淡水化手法と比較することで逆浸透法の優位性を定量的に示した。海水淡水化施設は淡水の生産により水リスクの軽減に貢献する。その影響は先進国の多くの国で、淡水化に伴って発生する環境影響よりも大きいことが示された。

引用文献

1) 矢野伸二郎ほか：日本 LCA 学会誌 10 (3), (2014), pp.327-339
2) R. Gemma Raluy ほか：Int. J. LCA, 10 (4), (2005), pp.285-293
3) 水道技術研究センター, “浄水施設を対象とした LCA 実施マニュアル”,

合意形成に基づいた水利用による影響評価モデルの開発

- UNEP/SETAC ライフサイクルイニシアチブと WULCA からの推奨 -

Consensual model development for impact assessment of water use – Recommendations from UNEP/SETAC Life Cycle Initiative and WULCA –

Boulay Anne-Marie[1)]、Pfister Stephan[2)]、○本下晶晴*[3)]
Anne-Marie Boulay, Stephan Pfister, Masaharu Motoshita
1) CIRAIG, 2) ETH Zurich, 3)産業技術総合研究所
*m-motoshita@aist.go.jp

1.　はじめに

LCA における水利用に関する影響評価への関心の高まりとともに、これまで様々な水不足に関する影響評価手法が開発されてきた。こうした試みは科学の進展に貢献してきた一方、実務においては多数のモデルが存在することが混乱や障害となり得る。そこで、UNEP/SETAC ライフサイクルイニシアチブと WULCA では国際的な専門家やステークホルダーが集まり合意に基づいた影響評価モデル開発に取り組んでおり、ようやくミッドポイント指標と健康被害を対象としたエンドポイント指標についての推奨事項に合意するに至った。本発表では、こうした合意形成プロセスの概要と水不足による影響評価モデルの推奨事項について紹介する。

2.　ライフサイクル影響評価手法の合意形成プロジェクトにおける水資源消費の影響評価手法開発

これまでライフサイクルアセスメント（以降、LCA）において潜在的な環境影響を評価するためのツールとして様々なライフサイクル影響評価手法（LCIA 手法）が開発されてきた。一方で、同じ環境問題（例えば気候変動や鉱物資源消費など）を対象とした評価手法であっても、そのモデル化には様々なアプローチが採用されており、多数の異なるモデルから適切なものを実務者が選択するのは容易ではない。そこで、LCIA 手法の開発者、LCA の専門家、ならびに LCA の実務者やコンサルタントなど様々なステークホルダーが集まり、合意形成に基づいた LCIA 手法の開発を目的として、UNEP-SETAC Life Cycle Initiative によるプロジェクト（Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators）が 2012 年に立ち上げられ、2017 年までにいくつかの環境影響領域を対象として合意形成を進めている。

水資源消費については、新たに注目されようになった環境影響領域でもあり、2007 年から世界中の専門家を含むステークホルダーが協働して議論するグループ（Water Use in LCA：WULCA）で合意形成を進めており、上記の UNEP-SETAC Life Cycle Initiative のプロジェクトの中でも水資源消費に関する合意形成に基づくモデル開発を WULCA のメンバーが担っている。

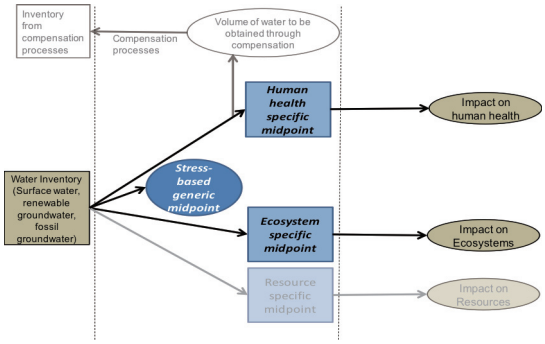


図１　合意形成の対象とする水利用による影響

3.　合意形成の対象とする水利用に伴う影響

3.1　対象とする影響経路

水利用に関わる環境影響としては様々なものが考えられ、WULCA においても水利用に関する影響経路が整理されている[1)]。その中でも合意形成プロジェクトにおいては、水資源の物理的な不足に焦点を置き、図 1 に示すように水資源の希少性そのものを評価するミッドポイント評価、更に水資源不足による人間健康・生態系・資源への影響を評価するエンドポイント評価を対象としている。

ウォーターフットプリントの国際規格 ISO14046（2014）では水利用に関わる影響として物理的な不足だけでなく水質への影響も含めて水の利用可能性に関わる影響を評価することとなっている。しかしながら、合意形成プロジェクトにおいては水質への影響や土地利用の影響などは LCA で取り扱う他の影響領域（例えば、富栄養化、酸性化、化学物質毒性など）との重複が起こりうるため、物理的な水資源不足の影響のみを対象として取り扱うこととした。ただし、WULCA そのものにおいては水質の影響も含めた議論は別に行われている。

3.2　ミッドポイントモデル

ミッドポイントレベルの評価として、物理的な水資源の不足の程度を指標とする評価モデルを開発することとした。これには、特定の保護対象の被害に繋がる影響経路だけでなく、水利用に関わる影響を受ける潜在的な対象への影響も含む広範な評価が可能になるという利点と、ユーザーにとっても水利用に関わる影響を一つの指標で

評価できるメリットが合意のポイントとなった。

3.3　エンドポイントモデル

エンドポイントレベルの評価としては、WULCA ではこれまでにも複数のモデルが開発されており、影響経路が比較的明確な人間健康と生態系を対象として議論を行うサブグループを立ち上げている。合意形成プロジェクトにおいては、これまでの影響経路や評価モデルに関する議論が比較的成熟している人間健康を対象として合意形成を進めることとなった。生態系については WULCA 内で継続して議論すると共に、資源についても議論を開始することとなっている。

4.　合意形成に基づくモデル開発の論点と推奨モデル

4.1　合意形成プロセス

ミッドポイント、エンドポイントモデルのいずれについても同様のプロセスで合意形成に基づいたモデル開発を進めた。まず、WULCA メンバー内でこれまでの既存モデルのレビューと各モデルの類似点・相違点に関する分析を行い[2),3)]、キーポイントとなる要因についていくつかのオプションを設定した。その上で、水文学など LCA 以外の分野の専門家も含めたエキスパートワークショップをチューリッヒ、サンフランシスコ、つくばで開催し、各オプションについて議論を行い、最終的に 2016 年 1 月にバレンシアで開催した Pellston ワークショップでの議論により推奨するモデルを選定した。

4.2　推奨されたミッドポイント評価モデル

ミッドポイントの評価モデルとして、各流域での利用可能水量から環境用水を含む需要量を差し引いた正味の利用可能水量（Availability Minus Demand: AMD）を絶対的な水資源量不足の程度を表す指標とした AWARE モデル[4)]が推奨されることとなった。相対的な水資源不足を表す利用可能水量と需要との比を指標とした DTA（Demand-To-Availability）や、更に DTA に面積当たりの利用可能水量の逆数を乗じることで絶対的な水資源量不足も考慮することができる DTAx なども候補として検討されたが、指標の物理的な意味のわかり易さやステークホルダーの受容性などの観点から AWARE モデルを推奨することで合意された。水需要は季節変動と地域差が大きいことから、影響評価係数は月別、流域別に用意されている。推奨される影響評価係数は、月別、流域別のものであるがインベントリとして水消費の時期や地域を特定できない場合には年平均、国別に集約したものも利用できるよう準備されている。図 2 には一例として農業用に水が消費される場合の流域別影響評価係数を示す。

4.3　推奨されたエンドポイント（人間健康）評価モデル

人間健康を対象としたエンドポイントの評価モデルとして、農業用水不足による食糧生産減少による栄養失調被害を評価するモデルが推奨されることとなった。その特徴としては、水消費に伴う灌漑用水の不足による影響を評価する上で、当該地域の物理的な水資源ストレスの程度を表すパラメータとしては AWARE と整合したストレス指標が採用され、更に食糧生産減少による影響として貿易を通じた他地域への波及影響を考慮している点が挙げられる。貿易による波及影響については様々な議論があったが、現実に起こる社会での変化を反映するためには重要なポイントであるため採用されることとなった。エンドポイント評価モデルも同様に、月別、流域別の影響評価係数が推奨されると共に、年平均、国別に集約した影響評価係数も提供されている。図 3 に一例として農業用に水が消費される場合の流域別影響評価係数を示す。

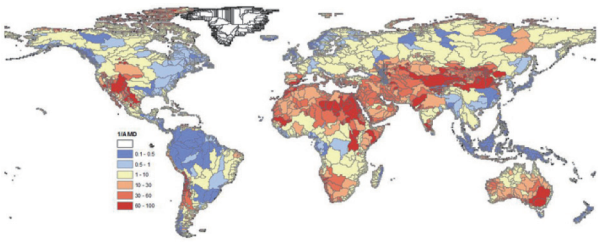


図 2　ミッドポイント評価モデルの流域ごとの影響評価係数

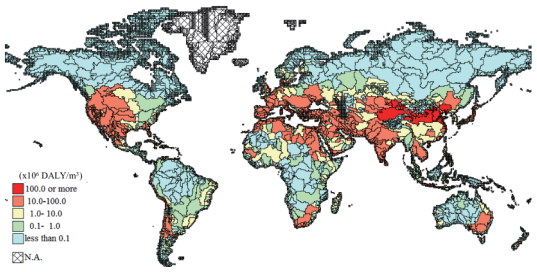


図 3　エンドポイント評価モデルの流域ごとの影響評価係数

5.　まとめ

図 2、3 から分かるようにミッドポイント評価モデルとエンドポイント評価モデルでは同じ地域であっても水消費に対する影響の感度が必ずしも一致するとは限らない。これはそれぞれのモデルが評価の対象として捉えている影響が異なるため当然の結果であり、これらのモデルを利用する際には評価の目的に合わせた選択や感度分析が必要である。また、ケーススタディーを通じてインベントリとの関係から見えてくる課題もあることが考えられる。今後はケーススタディーでの検証を進めると共に、生態系への影響など残されている他の影響経路の評価に関する合意形成を進めていく。

参考文献

1）Kounina et al. (2013): Int. J. LCA, 18(3), 707-721
2）Boulay et al. (2015a): Int. J. LCA, 20(1), 139-160
3）Boulay et al. (2015b): Int. J. LCA, 20(6), 865-879
4）WULCA: Consensual method development, http://www.wulca-waterlca.org/project.html

Employing environmentally extended input-output framework for structural analysis of economic-environmental impact in Vietnam in the period from 2000 and 2011

○Nguyen Thi Hoa*,1) and Akihiro Tokai1)
1) Osaka University, Japan
* hoa@em.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. Introduction

In Vietnam, rapid industrialization and urbanization accompany with a poor management result in the drastic degradation of living environment. Water pollution is considered as the most urgent concern for Vietnamese people. The Vietnamese government has implemented various strategies to mitigate the pollution situation, but it has not been effective. The reason is that the inter-relationship between economy and environment has not been understood well.

This paper is going to apply the methodology of Le et al (2013)[1] to develop water pollution input output (EEIO) table from IO tables for analyzing the relationship between economic sectors and water pollution emissions. The vertical integrated method is then utilized to indicate the characteristics of economic sectors in Vietnam in relation to water pollution and help in identifying the prioritization of sectors for focusing on the proper policies to mitigate the emissions.

2. Methodology

The study's overall framework is shown in Fig. 1.

Pollution load is the total of emission emitted from certain sector to satisfy its intermediate demand and final demand. According to Millar and Blair (2009)[2], pollution load of a sector = Activity x Pollution intensity (PI) of a unit of activity. In which, PI of manufacturing sectors are estimated from IPPS data[3], while PI of remaining sectors are obtained from Trinh's study[3].

The vertical integration coefficient proposed by Sanchez-Choliz and Duarte (2003)[4] is used to disaggregate the emission of pollutants of each sector into five components of pollution related to the flows of goods (Fig. 2). The indices of components are then computed to indicate sectoral characterization in relation to pollution emission. It can be seen that sectors can be classified as key sectors or polluted pullers or polluted pushers. These sectors are considered generating much higher pollution and having more important linkages to other sectors. Thus, the pollution mitigation methods need focusing on these sectors first

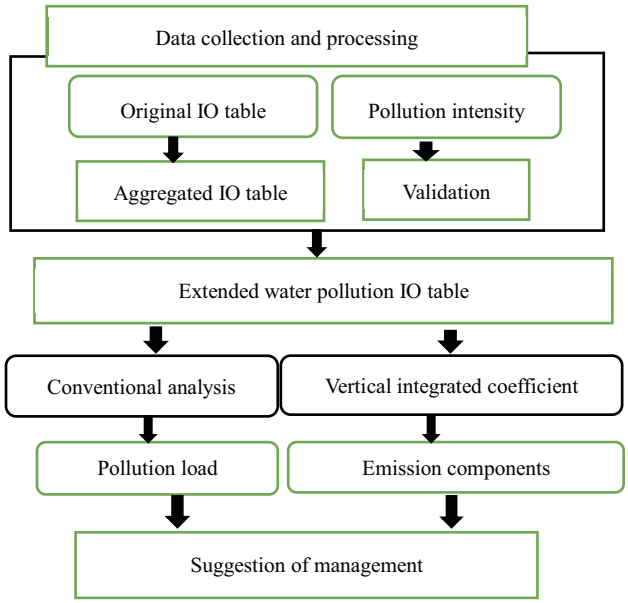


Fig. 1. Overall framework of study

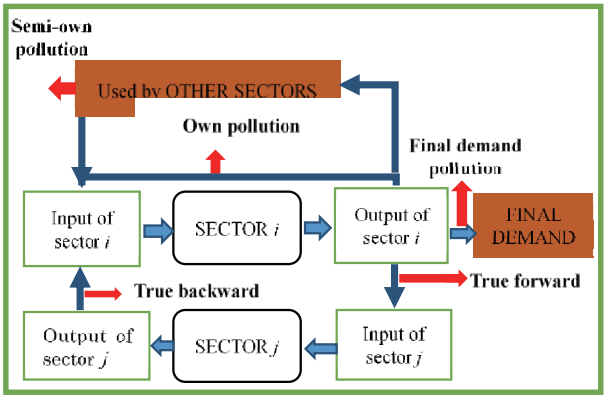


Fig. 2. Emission components regarding product flows

3. Results

The trends of TSS and BOD pollution load of main sectors in the period 2000-2011 are shown in Fig.3. and Fig.4. The classification of sectors follows the classification of International Standard Industrial Classification version 2 (ISIC 2) The results show that TSS and BOD emission increase sharply from 2000 to 2011, in which TSS accounts for 83% total amount of water pollution. For TSS, Basic metal industry emits hightest amount, accounting for 75% total TSS emission. Meanwhile, Food, beverage and tobacco and Agriculture, fishery and forestry are main dischargers of BOD emissions.

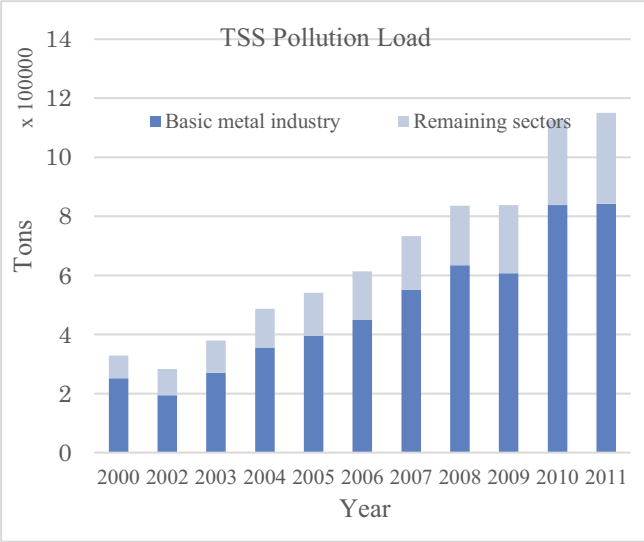


Fig. 3. TSS pollution load

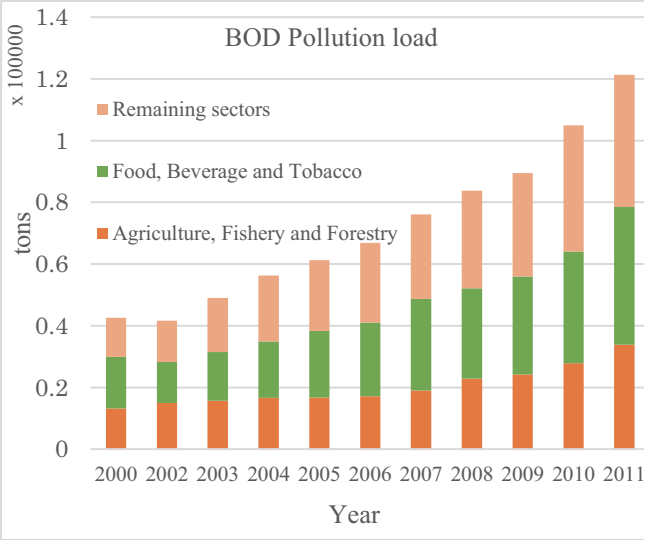


Fig. 4. BOD pollution load

The results for assessing sectoral characteristics using vertical integration method give that for TSS, Agriculture, fishery and forestry; Manufacture of Industrial Chemicals and Other Manufacturing Industries are key sectors which has high backward pollution and forward pollution linkages. In addition, Basic metal industry is true forward pollution linkage which sells 88% its pollution to other sectors. Fabricated metal products, machinery and equipment and Construction sectors are the extreme cases of TSS purchasing sectors. For BOD, Agriculture, fishery and forestry; Food, beverage and tobacco and Other manufacturing sectors are key sectors. Furthermore, high purchasing sectors of BOD are Fabricated metal products, machinery and equipment and Construction, purchasing 27% and 24%, respectively, BOD emissions from other sectors. Meanwhile, Industrial chemicals and Basic metal industry sells high BOD amount to other sectors.

4. Conclusion

The approach of environmentally extended input output model are used to account for TSS and BOD components in water waste emissions. This helps to indicate the trend of water pollution load during the period from 2000 to 2011. In addition, the approach of the vertical integrated coefficient methods to give the characteristics of sectors aids to analyze the relationship between water pollution and economic activities. The method also assists in identifying the prioritization of sectors which generates high water pollution and/or high purchasing and/or sales emissions.

Reference

1) Le A.H., Tokai A. and Yamamoto Y: Structural analysis of relationship between economic activities and water pollution in Vietnam. 25 (3), (2013), pp. 139-151
2) Miller R.E., Blair P.D: Input-Output Analysis: Foundations and Extensions. Pretice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1985)
3) Trinh B., Nguyen P.V: Economic-environmental impact analysis based on the changes of economic structures of Hochiminh city and the rest of Vietnam. 2 (3), (2013)
4) Sanchez-Choliz J., Duarte R: Analyzing pollution by way of vertically integrated coefficients, with an application to the water sector in Aragon. Cambridge Journal of Economics. 27 (3). (2003), pp. 433-448

IDEA データとの連結による JLCA データベースの有用性向上：電線業界を例として

Improvement in JLCA Database Usability by Upstream Aggregation Using IDEA Datasets: A Case Study in the Electric Cable Industry

○柴原尚希*[1)]，仲井俊文[1)]，神崎昌之[1)]，中野勝行[1)]，田原聖隆[2)]，村松良二[2)]，橋本大[3)]，小坂裕[3)]
Naoki SHIBAHARA, Toshifumi NAKAI, Masayuki KANZAKI, Katsuyuki NAKANO,
Kiyotaka TAHARA, Ryoji MURAMATSU, Dai HASHIMOTO, Hiroshi KOSAKA
1)産業環境管理協会，2)産業技術総合研究所，3)電線総合技術センター
* shibahara@jemai.or.jp

1. はじめに

LCA 日本フォーラム(JLCA)では、各工業界から提供されたインベントリデータ等を平成 15 年度から公開している[1)]。以後 10 年以上が経過し、JLCA では今後の産業界に必要な LCA データベースのあり方を検討してきたところ、使い勝手の良さの向上に対して高いニーズがあり、その対応のためには、データ整備、更新･管理､利用活性化が重要であることが確認された。そこで、JLCA データベースの有用性向上を図るために、JLCA データの上流側プロセスを IDEA(Inventory Database for Lifecycle Analysis)データと連結した取り組みについて、電線業界を例に報告する。

2. 既存データベースの特徴

2.1 JLCA データベース

経済産業省及び NEDO によって平成 10～14 年度に実施された LCA プロジェクトの成果をベースに構築され、JLCA 会員に対して公開している。インベントリ分析用データ、インパクト評価用データ、文献データによって構成されており､日本国内の 54 工業会が作成した工業会提供データが主である。それらは、各業界を代表する値として位置づけられている。ほとんどが個々のプロセスを対象範囲とした単位プロセス型(Gate-to-Gate)のデータであり、データベースの利用者は川上のプロセスに係わる環境負荷を自ら計上してプロセス合算型(Cradle-to-Gate)のデータにする必要がある。なお､JLCA データベースでは､14 基本フロー（CO_2、CH_4、HFC、PFC、N_2O、SF_6、NO_X、SO_X、煤塵、BOD、COD、全リン、全窒素、懸濁物質）を対象としている。

2.2 IDEA

産業技術総合研究所(AIST)と産業環境管理協会(JEMAI)によって共同開発されたデータベースであり、LCA 実施支援ソフトウェア MiLCA に初期搭載されている。統計情報を元に作成したデータで産業分類上での網羅性を確保し、使用頻度の高い製品について詳細なデータが用意され、LCA を実施する上で“少なくとも何らかのデータがある”をコンセプトとしている。平成 28 年に IDEA ver.2 がリリースされ、データ数は約 3,800 である。単位プロセス型データとして整備されているが、MiLCA の機能を用いることにより、プロセス合算型データでの抽出が可能である。なお、IDEA では、環境影響領域として地球温暖化、酸性化、化石資源、金属資源、水資源、土地利用、固形廃棄物の評価が可能であり、富栄養化、大気汚染、人間健康についても評価可能とすべくデータ収集に努めている。

3. JLCA データと IDEA データの連結方針

2 章で整理した特徴を踏まえると､網羅性､項目数､データの業界代表性に関する JLCA データと IDEA データの長所・短所は、相互に補完的であることが分かる。そこで、以下の方針で連結を行った（図 1）。

A) JLCA データと IDEA データともに存在する項目（原材料、部品、製品）については、原則として JLCA データを採用｡JLCA データがカバーしない上流部分は IDEA データで補完。

B) JLCA データが存在しない項目（原材料、部品、製品）については、IDEA データを採用。

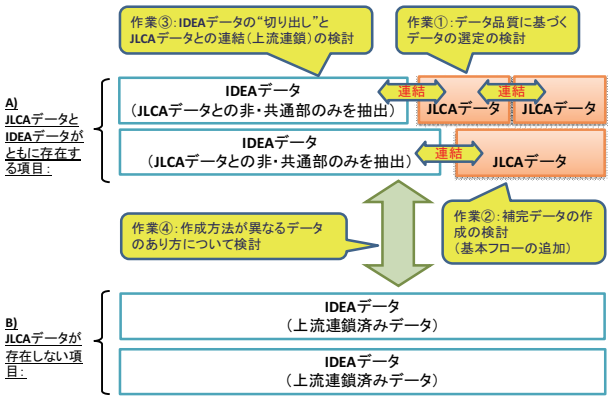


図 1　データの連結方針

4. 電線業界における取り組み

4.1 現状の JLCA データ

電線業界では電線総合技術センター(JECTEC)が中心となり、前述の LCA プロジェクトの一環としてデータベース整備の委託研究やマルチクライアント研究 [2] を実施してきた。各種電線 14 製品（表 1）の製造段階におけるインベントリデータの収集を行い、その成果が JLCA データベースに掲載されている。

表 1　JLCA データベース掲載品種

製品	仕様
高圧電力ケーブル	66k CV1×325mm^2
高圧電力ケーブル	22k CV1×150mm^2
低圧電力ケーブル	600V CVT3×14mm^2
低圧電力ケーブル	600V CET3×14mm^2
機器用電線	UL1007 80℃耐熱 PVC 電線(20AWG)
機器用電線	UL1430 105℃耐熱架橋 PVC 電線(20AWG)
自動車用電線	AESSX0.5f
自動車用電線	AVSS0.5
制御用ケーブル	EM-CEE4×2mm^2
制御用ケーブル	CVV4×2mm^2
1 種ポリエステル銅線	1-PEW 0.8mm
1 種ポリウレタン銅線	1-UEW 0.8mm
光ファイバケーブル	難燃 PE
光ファイバケーブル	PE

今回のデータ連結作業に当たり、改めて現状のデータを確認したところ、それらのインベントリデータは個社のデータであり、業界全体を代表した値ではなかった。さらに、昨今個社データの取り扱いが厳しくなっており、データを連結した結果はおろか、現状のインベントリ情報の公開も見直す必要に迫られている。

4.2 データ連結による業界代表値の算定方法

業界代表値検討の一方で、JECTEC では企業が把握している情報を活用して効率的に算定可能な方法の構築を進めてきた [3]。商品種別算定基準(Product Category Rule: PCR)に則って詳細な積み上げ計算を行う既存算定法と、製品仕様書の設計値や月次の電力消費量といった既に存在しているデータを活用する改良算定法を用いて算定した結果を比較したところ、同一工場での生産の場合、大差ないことが明らかとなっている。なお、算定の際には、バックグランドデータとして IDEA ver.1.1 を使用している。

そこで、本取り組みでは、改良算定法を応用して、JLCA データを業界代表値として再構築するとともに、IDEA データとの連結を図る方法を以下のとおり提案する（図 2）。

A) 投入原材料については、JIS 等で定められている当該製品の規格値から算出した値を用いる。
B) 投入エネルギーについては、日本電線工業会(JCMA)において、銅電線、光ファイバケーブルごとに集計されている電力消費量、生産量等のデータから、生産銅量、光ファイバ心数あたりに換算したエネルギー消費量を用いる。
C) 溶剤等、影響が微少である項目はカットオフする。

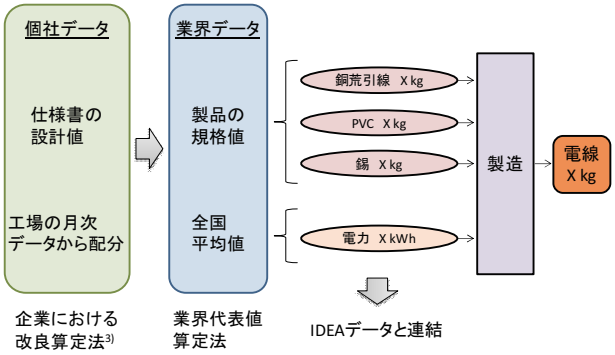


図 2　改良算定法の業界代表値算定への応用

4.3 業界代表値の算定結果

4.2 節の算定方法が妥当であるか確認するため、業界代表値の算定結果と従来の JLCA データに IDEA データを連結した結果を比較したところ、投入エネルギーが大きく異なる光ファイバケーブルを除いて、概ね同程度の値となった。なお、算定結果の具体的な数値は投稿時点で未公開であるため、本稿への記載は避けた。

5. まとめ

本稿では、データベースの有用性向上を目指した JLCA データと IDEA データの連結を通じて、電線業界における業界代表値を算定する取り組みを紹介した。本算定方法では、生産銅量あたりのエネルギー消費量について、全銅電線に対して同一の値を適用しているが、可能であれば製品の種類、サイズ別に個社データを収集し平均化するなどの方法が望ましい。今後さらに算定方法の検討を進め、データ連結結果を JLCA データベースで公開していく予定である。

引用文献

1) LCA 日本フォーラム : “JLCA データベース”, (オンライン), <入手先>http://lca-forum.org/database/, (参照 2016-12-28)
2) マルチクライアント研究『LCA データベースの整理』委員会 : 商品種別算定基準（対象製品 : 建設電販用電線 IV, CV, VVF）, (2010)
3) 柴原尚希, 橋本大, 小坂裕, 齋藤学, 田原聖隆 : “第 11 回日本 LCA 学会研究発表会”, 柏, (2016), pp.250-251

IDEA マトリックスを利用した社会経済用データベースの開発

Development of socio-economic database using IDEA matrix

○塚原建一郎*1)、田原聖隆 1)
Kenichiro Tsukahara, Kiyotaka Tahara
1) 産業技術総合研究所
* k-tsukahara@ aist.go.jp

1. はじめに

新規技術（システム）の導入においては、持続可能であることが求められている。持続可能性の評価にあたっては、環境面・経済面・社会面の 3 つの側面「トリプルボトムライン」を考慮する必要があるとされている。環境面・経済面への影響評価においては、製造プロセスデータの積み重ねであるインベントリデータを利用した、環境負荷（環境影響）及びコスト分析が行われているが、波及的に生じる間接効果は含まれていないケースが多い。また、社会面での影響評価においては、一般的に定性的な分析に留まっている。新規バイオマス利活用システムの導入シナリオを評価する際には、導入による直接的な影響のみならず、普及した場合に、社会はどのように変化するのか（産業構造の変化）といった、社会全体に波及的に生じる間接的な影響まで評価することが求められている。

生産活動や取引の実態を把握するためには、数量による推計と、金額による推計の 2 通りの方法が考えられる。数量による推計により、純粋に生産技術を介した物量的な分析が可能となるが、サービスの多くは固有の数量単位を持たず、投入される原材料などの種類により計測単位も異なることから、同一の数量単位で評価することは困難である。そのため、金額を共通の尺度として、生産活動の大きさを評価することが有利であると考えられる。

我々は、1 次産業、2 次産業及び 3 次産業の一部を対象として、積み上げ法により作成された、インベントリデータベース IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis) を用い、物量連関表となる IDEA マトリックスを作成している。IDEA マトリックスにより､直接的･間接的な各産業の需要量の変化と、それに伴って生じる環境負荷が算出できるようになっている。一方、物量連関表では、異なる生産物について集計できないので、部門を統合することや地域内生産の総量を求めることができないが、貨幣換算することでこれらの推計ができ、IDEA マトリックスとあわせて評価ツールとして利用することで、金額フローと物量フローの両方を分析することが可能になる。

経済波及効果については、従来から産業連関表を利用した分析が行われているが、IDEA マトリックスを利用して経済波及効果を算出することができれば、産業連関表を用いた分析よりも精緻な検討が可能になる。部門を細かく分類して推計することにより、各部門における投入係数もより技術を反映したものになると考えられる。

現在、新規のバイオマス利活用システムの導入が与えうる社会経済影響を評価するために、IDEA マトリックス（物量連関表）を活用し、社会経済用データベース （IDEA E-MAT）を作成することを試みている。そこで本発表では、データベース構築に関する現状を報告する。

2. IDEA マトリックスを用いた社会経済用データベース構築

2.1 データベース整備の概要

IDEA データベースのうち、生産量の情報が入手可能でかつ網羅性が担保できる 1857 のデータを用い、ユニットプロセスデータを行列に入力して作成した投入係数表にそれぞれの製品の生産量を乗じることで、IDEA マトリックスは作成されている 1)。IDEA マトリックスに、各製品・サービスごとの単価を乗じることにより、生産額の推計を行った。また、IDEA マトリックスにおける輸出入量のデータに、貿易統計 2)を参考にそれぞれの単価を乗じることで、輸出入額の推計を行っている（図 1)。

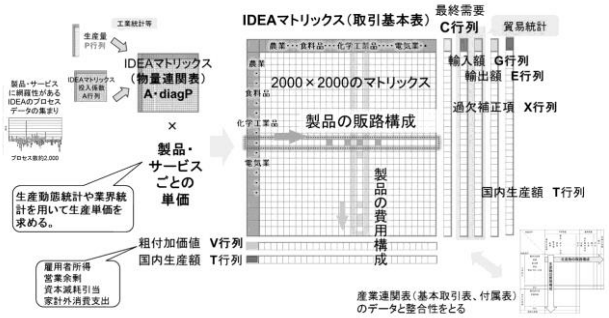


図 1　IDEA マトリックスを利用した
社会経済用 DB の概要

2.2 データベースの品質

IDEA E-MAT のデータ品質を評価するために、産業連関表との比較を行った。IDEA E-MAT の全製品（1857 品目）の総生産額は、産業連関表の約 48%であるが、3 次産業など、IDEA E-MAT に含まれない部門を除くと、IDEA E-MAT の生産額の方が多かった。日本標準産業分類の「16 化学工業」に対応する産業に関し、生産額を IDEA E-MAT と産業連関表で比較したところ、一部を除き、産業連関表の基本分類（列 30 部門）レベルでほぼバランスがとれていた（図 2）。産業連関表の細品目の生産量[3]を参考に、IDEA E-MAT の各製品の生産量の品質を評価しているところである。

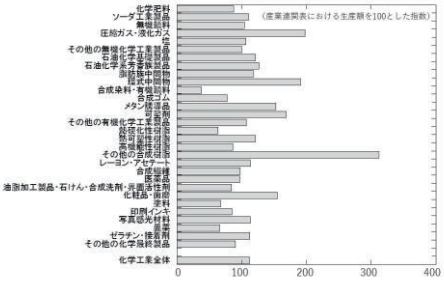


図 2　IDEA E-MAT と IO における生産額比較の例

また、IDEA E-MAT の影響力係数と感応度係数を計算し、日本標準産業分類の「16 化学工業」に対応する産業における、影響力係数と感応度係数を分類した（図 3）。化学工業は、産業全体に対する影響力が強く、かつ、影響も受けやすい分野と考えられるが、IDEA E-MAT の各製品（296 製品）ごとの係数にはかなりバラツキがあった。細分化されていることにより、プロセスをより正確に把握できる可能性があると考えられる。

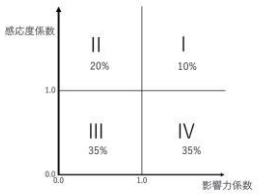


図 3　影響力係数と感応度係数
（IDEA E-MAT, 化学工業）

2.3 データベースの特徴

IDEA E-MAT はプロセスデータに基づくため、詳細な分析が可能であり、容易に他プロセスとの関係を分析できる。産業連関表で積み上げ式の LCA で用いられるインベントリデータと産業連関表を接続することで相互に情報を補い分析を行うハイブリッド LCA を行う場合、部門分割や拡張が必要となるが、IDEA E-MAT では、評価で重要と思われる分類の調整が比較的簡単にできる利点がある。

3. 課題

・積み上げ式のため、インベントリデータに複数の単価が入っていることから、そのまま計算してもバランスが取れない。
・在庫、家計外消費支出、付加価値についての検討がされていない。
・輸入が内生化されていないため、需要の増加による生産量の増加が過大に推計されている。

今後、分析の精度に耐え得るデータ構築を実施していくことにより、社会経済面での波及効果を分析できるように進めていく予定である（図 4）。

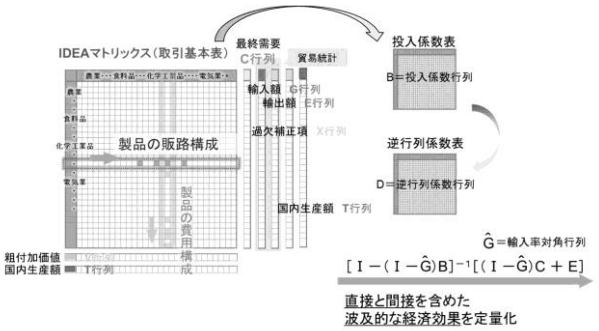


図 4　IDEA E-MAT を利用した分析イメージ

4. おわりに

IDEA マトリックスを利用した社会経済用データベースを作成している。上記に挙げた問題点から、各データのバランスがとれていないため、データの利用は限定的なものに留まっている。今後、データ品質の向上を図っていく必要がある。さらにデータ整備を進めていくことにより、分析に耐えうるデータベースの構築を実施していく予定である。

ケーススタディとして、新規バイオマス利用技術の実用化による産業影響について、本データベースを利用した解析を研究発表会にて報告する予定である。

5. 参考文献

1) 田原聖隆、工藤祐揮、畑山博樹、本下晶晴、河尻耕太郎、本田智則、野村昇、匂坂正幸: 第 10 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, (2015), pp 132-133
2) 財務省、“貿易統計” http://www.customs.go.jp/toukei/info/tsdl.htm
3) 総務省、“平成 23 年(2011 年)産業連関表”、(2015). http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001060671&cycode=0

産業連関分析を用いた日本における
マテリアルフットプリントの評価基盤の構築と活用

永野 健太*[1)] 、伊坪徳宏 [1)]
Kenta Nagano,　Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学 環境マネジメント学科
* g1362100@tcu.ac.jp

1. 背景

2016 年 5 月に開催された伊勢志摩サミットにおける環境大臣会合の中で、UNEP 国際資源パネル(IRP)より資源効率性に関する統合報告書が公表された。本報告書によると、人口増加や経済成長に伴い、世界の物質採掘量は 2050 年に現在の 2 倍以上の 1830 億トンに達する見込みであり、世界的な資源効率性の向上が、現在及び将来にわたり持続可能な開発を可能にするための最優先事項の一つであるとされている。また、国における資源消費量を示す指標としてマテリアルフットプリントが用いられている。

現在、日本の物質フローは環境白書内において把握されているが、輸入製品の製造にかかわる資源消費量がフローに含まれていない。国内で消費される財・サービスを調達し、使用するまでの総資源投入量を求めるマテリアルフットプリントを用いることで、輸入製品の生産等に関わる資源消費も算定でき、実質の消費ベースでの資源消費量を推計することが可能である。

2. 目的

本研究では産業連関分析を用いて日本におけるマテリアルフットプリントのインベントリデータベースを開発することで日本のマテリアルフットプリント評価基盤を構築し、推計した原単位を基にケーススタディを実施し、日本の資源効率性について検討を行うことを目的とする。

3. 研究方法

本研究では CSIRO Asia-Pacific Material Flow Database を中心として各統計値より、10 項目に分けられた日本の資源生産量を 2011 年産業連関表の該当する各部門の国内生産額で除すことで直接投入係数(d)を求め、これにレオンチェフ逆行列を乗じてマテリアルフットプリント原単位を推計した。算定式を以下に示す。

$$e = d \times (I-A)^{-1}$$

e：マテリアルフットプリント原単位　d：直接投入係数
I：単位行列　A：投入係数行列である。

また、原単位を推計するにあたり産業連関表を拡張した。公開されている産業連関表では鉄鉱石と非鉄鉱石が「金属鉱物」部門にまとめられており、波及する影響が鉄・非鉄で区別されていない。これらの影響を考慮するために「金属鉱物」部門を「鉄鉱石」・「非鉄金属鉱物」部門に拡張し、原単位の推計を行った。

今回はケーススタディとして日本人 1 人あたりのマテリアルフットプリント・乗用車 1 台あたりのライフサイクルマテリアルフットプリント(LC-MF)を行った。

1 人あたりマテリアルフットプリントは推計した原単位に国内最終需要を乗じ、日本の人口(2011 年)で除すことにより算出した。こちらは比較対象として UNEP が 2016 年に公開した報告書「GLOBAL MATERIAL FLOWS AND RESOURCE PRODUCTIVITY」における日本の 1 人あたりマテリアルフットプリントの値を用いた。

乗用車 1 台あたりの LC-MF は製造・使用・廃棄におけるシナリオを設定し、活動量の値に用いた。

4. 結果

まず、図 1 に推計したマテリアルフットプリント原単位を示す。総量としては、石灰石や砂利を含む非金属鉱物が他の資源に比べて大きかった。続いて石炭や石油などの化石燃料が大きく、その後に鉄鉱石や非鉄金属鉱物などで構成される鉱物資源が続いた。作物や木材などの生物資源は他の資源に比べると比較的小さい値となった。最も大きい原単位は「砂利・採石」部門であり、内訳は非金属鉱物の影響が大きい。非金属鉱物は直接資源消費量が大きいため原単位も大きくなったと考えられる。

4.1　1 人あたりのマテリアルフットプリント

1 人あたりのマテリアルフットプリントの算定結果を図 2 に示す。こちらは既存文献と比較を行うためにカテゴリを 4 つに統合した。本研究における 1 人あたりマテリアルフットプリントは 13.0t となり、UNEP による結果とカテゴリの割合は比較的近いものとなったが、全体として小さい値となった。値が小さくなった要因としては、本研究が国産仮定型を採用したため、輸入品を国内で製造したものと同等して計上したことが挙げられる。また、生物資源の消費量が小さい要因として、UNEP の結果と

算定範囲が異なることが挙げられる。

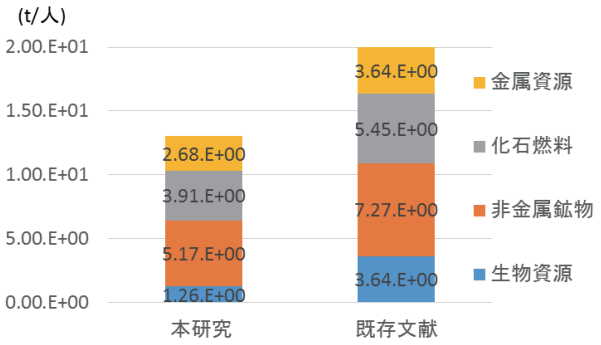


図２　1 人あたりマテリアルフットプリントの比較

4.2　乗用車 1 台あたりの LC-MF

乗用車 1 台あたりの LC-MF 結果を図 2 に示す。乗用車 1 台あたりの LC-MF は 19.9t となった。乗用車の総重量は約 1.5t であり、約 14 倍の資源をライフサイクルで消費していることになる。最も消費量が大きい資源は使用段階における石油であるが、生産までに投入される資源量の和も全体のおよそ半分を占めており、生産段階も使用と同様重要であることが示された。

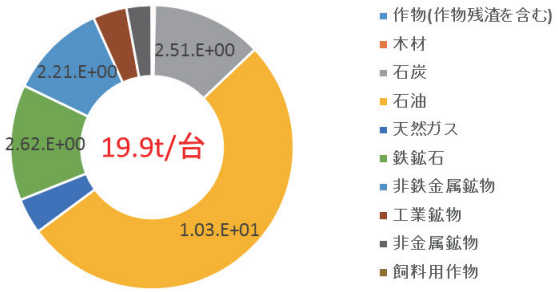


図３　乗用車 1 台あたりの LC-MF

5.　結論と課題

本研究では産業連関分析を用いて日本のマテリアルフットプリント用インベントリデータベースを開発し、日本における資源評価の基盤を構築した。またデータベースを用いてケーススタディを実施し、本データベースの利用可能性について検証した。

本研究では国産仮定型の日本産業連関表を用いたため、輸入における資源消費量は実態が反映されていない。今後は多地域間産業連関表などを用いて貿易を考慮した実態反映型の各国のマテリアルフットプリントを算出し、全球レベルでの資源依存関係を明示する必要がある。

また資源消費量を単なる重量で足し合わせるだけでなく、各資源の潜在的な環境影響を考慮した評価も検討すべきであり、影響評価への適用が求められる。

さらに、今回直接投入係数の推計に用いた CSIRO Asia-Pacific Material Flow Database は最新年度が 2008 年であり、カテゴリも 10 種類にまとめられているため、より最新かつ詳細なデータでの検討が必要である。また、産業連関表の部門への対応に関しても引き続き慎重に検討する必要がある。

6.　参考文献

1）　UNEP Resource Efficiency: Potential and Economic Implications (2016)
2）　CSIRO and UNEP Asia-Pacific Material Flows online database
3）　The material footprint of nations (2015)
4）　GLOBAL MATERIAL FLOWS AND RESOURCE PRODUCTIVITY (2016)

(t/百万円)

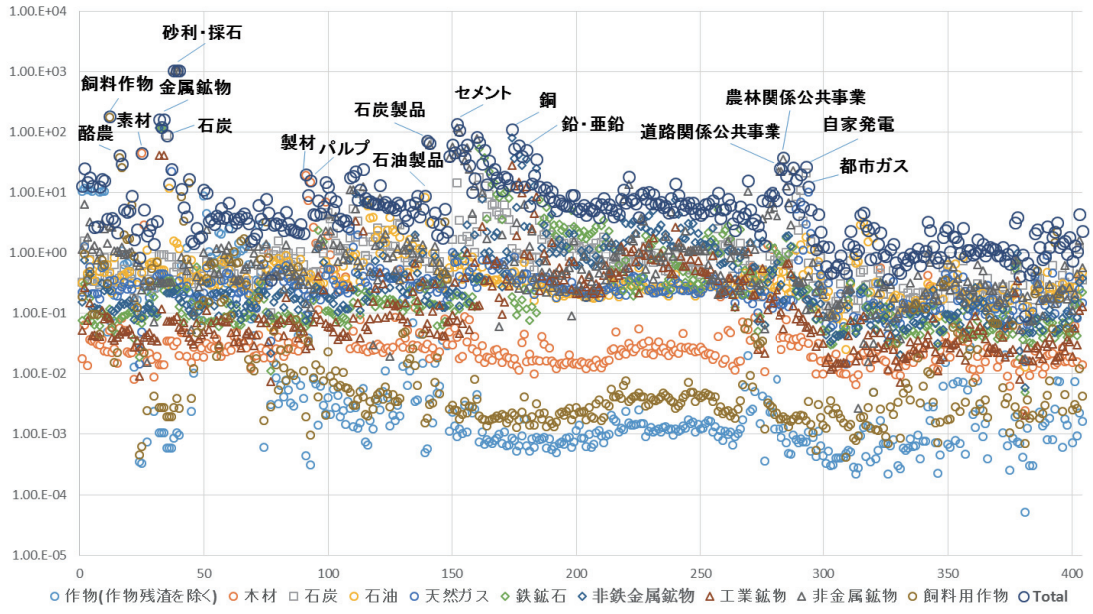


図1　マテリアルフットプリント原単位一覧

PRTR 対象物質に着目したケミカルフットプリントデータベースの開発

Development of chemical footprint database for PRTR chemical substances

○小藤直*[1)]、伊坪徳宏 [1)]
Nao Kofuji , Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学
* g1362054@tcu.ac.jp

1. 研究背景と目的

有害化学物質管理は1992年に発表されたアジェンダ 21 の 19 章に管理方針が示されて以降、国際的に化学物質管理の取り組みが盛んに行われている。2006 年 EU では REACH が開始され、製品サプライチェーンにおける化学物質管理が行われている。日本では PRTR 制度において有害化学物質排出量の把握が行われているが、各事業所の直接排出量と移動量の把握が目的であり、サプライチェーンに着目したものとなっていない。その一方で、企業の社会的責任の範囲は拡張する傾向にあり、サプライチェーンを考慮した環境リスクの把握に対するニーズが益々高まっている。これまでの LCA 研究はカーボン、水、大気汚染、資源消費などを対象としたものが多く、化学物質について注目した評価が少なかった。今後は化学物質についてライフサイクル思考ものとで汎用的な解析が供される評価基盤が求められる。

そこで本研究では以下2項目を研究目的とした。
①サプライチェーンを考慮した有害化学物質インベントリデータベースの開発
②日本人一人当たりのケミカルフットプリント（年間の消費活動によって排出される化学物質による環境リスク）の算出

2. 研究方法

2.1 研究対象及びその範囲

本研究では、PRTR 制度における第一種指定化学物質 462 物質を対象物質とし、届出対象業種による集計データと届出対象外排出量推計値を日本の1年間の化学物質排出総量として使用した。インベントリデータベースの作成には、2011 年版産業連関表 [3)] を用いて、サプライチェーン全体の影響を考慮した化学物質排出量原単位を求めた。

2.2 インベントリデータベースの作成方法

前節で述べた年間化学物質排出総量を産業連関表基本部門に配分し、国内生産額で除すことにより直接化学物質排出係数（*d*）を算出した。ここで、PRTR 公開情報としては、届出による排出量集計値、すそ切り以下排出量推計値、非対象業種による排出量推計値、家庭による排出量推計値、移動体による排出量推計値を直接量の値として用いた。作成した直接化学物質排出係数のうち、産業活動によるもの（届出、すそ切り、非対象業種）に対しては、直接化学物質排出係数にレオンチェフ逆行列（$(I-A)^{-1}$）を乗じ、経済波及を考慮した化学物質排出量原単位（*e*）を算出した（式 1）。産業活動外のもの（家庭、移動体）に対しては波及効果を考慮せず、直接化学物質排出係数を化学物質排出量原単位とした。

$$e=d(I-A)^{-1} \quad （式 1）$$

2.3 影響評価

本研究では、伊坪ら [4)] が開発した LIME2 を用いた。対象化学物質の CAS 番号を参照し、各影響評価係数の対応付けを行う。影響領域は、オゾン層破壊、地球温暖化、光化学オキシダント、有害化学物質（発癌毒性、慢性毒性）、生態毒性（水域生態系、陸域生態系）を対象とし、特性化、被害評価、統合化のそれぞれの段階について影響評価を行った。

2.4 ケミカルフットプリント算定

1 年間の消費活動による化学物質排出に伴う環境影響（*LCIA*）を日本の総人口（*population*）で除すことにより、日本人一人当たりの消費に伴う環境影響をケミカルフットプリント（*ChF*）として算定した（式 2）。1 年間の日本国民による消費活動を起因とした評価を行うため、産業連関表最終需要部門に示される国内最終需要計、家計消費支出を活動量として使用した。家庭由来の化学物質排出量原単位を家計消費支出に乗じ、それ以外の原単位を国内最終需要計に乗じることによりインベントリ結果を得た。

$$ChF=LCIA/population \quad （式 2）$$

3. 結果と考察

3.1 化学物質排出量原単位

大気・公共用水域・土壌・埋立の 4 つの排出先について 462 物質の化学物質排出量原単位を作成した。ここでは一例としてトルエン、キシレン、エチルベンゼンの大気への化学物質排出量原単位を図 1 に示した。縦軸は単位活動量（百万円）当たりの化学物質排出量を、横軸には産業連関表基本部門を示した。

原単位が最も大きかったのは輸送機器関連部門であった。輸送機器生産時の化学物質排出に加え、移動体として使用する際に排出される排ガスの影響が大きかった。

キシレンの原単位は漁業関連部門において使用される防汚剤による影響が大きく、その波及が影響した水産食料品関連部門が大きかった。トルエ

ンの原単位は二次産業の「印刷・製版・製本」「乗用車」「プラスチック製品」による波及が大きく影響した「新聞」「出版」「自動車整備」「事務用品」が大きかった。

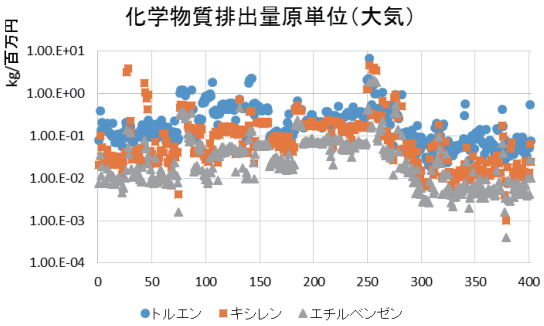


図 1　化学物質排出量原単位（大気）
（トルエン、キシレン、エチルベンゼン）

3.2 LIME2 係数対応

対象化学物質 462 物質に対して LIME2 の影響評価係数の対応付けを行った。ここでは特性化、被害評価、統合化の 3 つの影響評価段階のうち特性化の係数対応結果を表 1 に示す。

表 1　LIME2 係数対応付け結果（特性化）

影響領域	係数対応数	備考
オゾン層破壊	10	
光化学オキシダント	35	
有害化学物質	50	発癌毒性
	65	慢性毒性
生態毒性	61	水域
	59	陸域

これらの影響評価係数を化学物質排出量原単位に乗じることで単位活動量（百万円）当たりの環境影響の値を得ることができ、影響評価係数との積和から影響評価結果を得ることができる。

3.3 ケミカルフットプリント

ケミカルフットプリントの結果として、人間健康の結果を図 2 に、生物多様性の結果を図 3 に示す。縦軸は日本人一人当たりの年間消費活動によって発生する化学物質由来の損失余命、生物種の絶滅リスクを示している。

人間健康の結果では、全体でおよそ 5.0×10^{-5} 年という結果が得られた。これは、およそ 30 分程度の余命の損失に相当する。LIME2 の規格値によれば、一人当たりの経済活動を通じて発生する健康影響は 1.7×10^{-3} 年であり、化学物質による影響はその約 3%となった。大きく影響した化学物質としては、HCFC-22 が全体の約 50%を占めており、HCFC-22 を冷媒に使用する「小売」「飲食サービス」が全体の約 30%を占めた。

生物多様性の結果では、全体でおよそ 6.0×10^{-8} 種が絶滅リスクにさらされる結果が得られた。大きく影響している化学物質としては、有機スズ化合物による影響が全体のおよそ 80%を占め、建材の防腐加工や殺菌において有機スズ化合物を使用する建築関連部門による影響が大きかった。

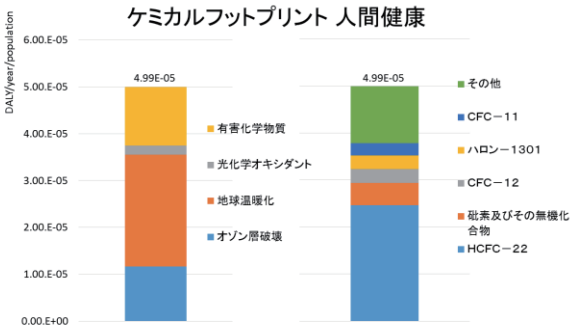


図 2　ケミカルフットプリント　人間健康

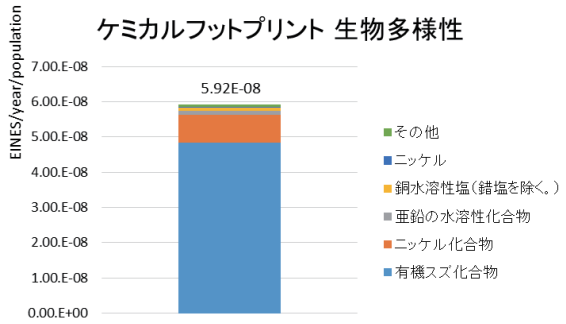


図 3　ケミカルフットプリント　生物多様性

4. まとめ

本研究では、ケミカルフットプリントデータベースとして、PRTR 制度における公開情報と産業連関表を用いて開発した。

影響評価手法においては、LIME2 の影響評価係数の対応付けをしたが、全ての化学物質の対応関係が取れたわけではないため、全体の影響は過小評価となっていることに留意されたい。

データベース作成に当たっては 2011 年の PRTR データ及び産業連関表を使用しており、インベントリデータベースは金額あたりの化学物質排出量を示した。化学物質の排出量は PRTR 制度が始まって以来速い速度で削減されている。正確な評価を行うには、より新しいデータを用いることが求められる。

5. 参考文献

1）環境省　SAICM（国際的な化学物質管理のための戦略的アプローチ）について,（オンライン）
http://www.env.go.jp/chemi/communication/seisakutaiwa/dialogue/01/mat03.pdf
2）環境省　PRTR インフォメーション広場（オンライン）
http://www.env.go.jp/chemi/prtr/result/gaiyo.html
3）総務省　産業連関表（オンライン）
http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/
4）伊坪徳宏,・稲葉敦,“LIME2 意思決定を支援する環境影響評価手法”,付属 CD-ROM

災害廃棄物処理のインベントリデータの作成

Development of Inventory Data for Pre-disaster Waste Management

○田畑 智博*[1)]、佐伯 孝[2)]
Tomohiro Tabata, Takashi Saeki
1) 神戸大学、2) 富山県立大学
* tabata@people.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

自治体が災害廃棄物処理マネジメントを検討する際に、運搬や処理に伴い生じる環境負荷やコストを事前に知ることができれば、対策の環境的・経済的な妥当性の評価、代替案との比較検討が可能となる。これまでに筆者らの研究グループでは、LCA、LCC の各方法を利用して、災害廃棄物処理対策の評価検討を行うための方法論及びインベントリデータの作成を進めてきた。その一環として、特定廃家電のリサイクル、可燃物の処理に関するケーススタディを実施している[1),2)]。

本稿では、これまでに筆者らが実施してきた、災害廃棄物処理に係るインベントリデータの作成結果について報告する。また、2016 年 4 月に発生した熊本地震の災害廃棄物処理の事例に、作成したインベントリデータを適用した結果を報告する。

2. 研究の方法

2.1 インベントリデータの作成

一般に、被災地で発生した災害廃棄物は、一次仮置場に搬入され、保管される。その後、二次仮置場に搬入され、木くず、コンクリートがら(コンがら)、瓦、金属類、特定廃家電のように種類別に分別される。粗大な廃棄物は、破砕処理される。有価物はリサイクルされ、残渣は焼却処理や埋立処分される。

インベントリデータの作成対象とするプロセスは、運搬、一次・二次仮置場での保管・分別、ごみ処理施設(焼却処理、埋立)、産業廃棄物(産廃)処理施設(焼却距離、破砕処理)、特定廃家電のリサイクル、仮設焼却施設とする。以下に示す方法により、プロセス別での災害廃棄物 1t あたりの環境負荷(CO_2、SO_x、NO_x、PM)とコストを算出した。但し、運搬に関しては(1)に示すように他プロセスと単位が異なる。

(1) 運搬

環境負荷は、MiLCA[3)]のトラック輸送の原単位(トンキロ)を採用した。なお、1 次仮置場から 2 次仮置場への輸送は 4t トラックを、2 次仮置場から他施設への輸送は 10t トラックを用いることを想定した。コストは、レンタル業者からのリースを想定し、Web 上の情報より検索した 1 台･1 月当たりの使用料を採用した。

(2) 一次・二次仮置場での保管・分別

東日本大震災の被災自治体への調査を通じて、仮置場の運用データを頂いた。このうち、コスト等のデータに不備があり十分な計算に耐えない事例を除外し、7 自治体の事例を用いて、災害廃棄物 1t 当たりの軽油消費量とコストを算出するための回帰式(式(1)、式(2))を作成した。軽油消費量に軽油の製造・燃焼に係る環境負荷原単位を乗じることで、環境負荷を算出した。

軽油使用量[L/t]=0.0270 仮置場面積[ha] (1)

コスト[百万円/t]=0.0007 仮置場面積[ha]
-0.0051 津波堆積物ダミー (2)

但し、今回の調査で得られたデータは仮置場全体での軽油使用量やコストのみであり、場内での油圧ショベルや破砕機等の軽油使用量、人件費等を知ることはできない。また、事例が 7 自治体のみであるため、事例を増やすことで推計精度の精緻化が必要である。

(3) ごみ処理施設(焼却処理、埋立)

田畑ら[4)]、Tabata et al[5)]が作成した、焼却処理方式別、埋立処分のインベントリデータを利用した。ごみ処理施設で災害廃棄物を処理する場合は通常ごみと合わせて処理する。本稿では、処理される災害廃棄物は通常ごみと比べて少なく、災害廃棄物の処理が上述したインベントリデータに与える影響は無いと仮定した。

(4) 産廃処理施設(焼却処理、破砕処理)

全国の産廃処理事業者に調査を行い、焼却距離、破砕処理(木くず、がれき)のユーティリティ使用量に関するデータを頂いた。これに MiLCA[3)]のユーティリティ別の環境負荷原単位、ユーティリティ別の使用料金を乗じて、環境負荷、コストを算出した。

(5) 特定廃家電

Tabata et al[1)]が特定廃家電リサイクル工場で調査を行って作成した、環境負荷、コストを用いた。

(6) 仮設焼却施設

東日本大震災の被災自治体への調査を通じて、ユーティリティ使用量に関するデータを頂いた。これに田畑ら[4)]のユーティリティ別の環境負荷原単位を乗じることで、環境負荷を算出した。

2.2 熊本地震の災害廃棄物処理

作成したインベントリデータを用いて、熊本地震の災害廃棄物処理の環境負荷、コストを試算した。ここ

では、熊本県 [6]、環境省等のウェブサイト、熊本県庁への調査をもとに、発生した災害廃棄物 3,160 千 t(2016 年 12 月 14 日時点)を図 1 の 8 種類に分類し、全て県内で処理することを想定した。対象とするプロセスは、運搬、1 次・2 次仮置場、破砕、焼却(ごみ焼却施設のみ)、埋立である(図 1)。1 次仮置場は県内 66 ヶ所、2 次仮置場は同1ヶ所、ごみ焼却施設は同21ヶ所である。2016 年 12 月末時点では、各処理施設での災害廃棄物種類別の処理量は不明なため、ごみ焼却施設は処理余力 [7]を考慮して県内の全施設で処理すると仮定した。破砕処理施設、最終処分場は、2 次仮置場や焼却施設と県内の各処理施設間との平均距離を算出した。

3. 結果と考察

3.1 災害廃棄物処理のインベントリデータ

紙面の都合上、結果の一部のみ掲載する。産廃処理施設での災害廃棄物 1t あたりの CO_2 排出量は、焼却が 488[t-CO_2]、破砕(木くず)が 51[t-CO_2] 、破砕(がれき)が 5[t-CO_2]となった。仮設焼却施設では、ストーカ炉が 169~393[t-CO_2]、ロータリーキルンが 631~840[t-CO_2]となった。なお、田畑ら [4]によるごみ焼却施設の結果は、ストーカ炉(ごみ発電なし、全連続)が 54.8[t-CO_2]、ロータリーキルン(ごみ発電あり、全連続)が 24.2[t-CO_2]であり、仮設焼却施設の負荷の大きさが際立っている。

仮設焼却施設の事例は少ないため、事例を増やすことで結果の再確認が必要である。とはいえ、津波を浴びた可燃物は通常のごみに比べて発熱量が低くて灰分が多く、これが結果として CO_2 排出量の増加に繋がった可能性がある。

3.2 熊本地震の災害廃棄物処理

結果の一部として、CO_2 排出量を算出した結果(図 1 ケース 1)、焼却が全体の約 68%を占めていた。次いで、埋立、2 次仮置場の順となった。2 次仮置場には災害廃棄物全量を運搬すると仮定しているが、規模の経済性を考慮すると、実際の負荷は少なくなる可能性がある。

但し、県内のごみ焼却施設のみで可燃物全量を処理する場合は 2.4 年程度かかる計算となり、発災から 2 次仮置場共用開始までの期間も考慮すると、熊本県の目標である 2 年以内の処理は難しい。目標達成には産廃焼却施設の利用が必須であるが、ごみ焼却施設に比べて災害廃棄物 1t あたりの CO_2 排出量が大きいため、1.8 倍程度排出量が増加することになる(図 1 ケース 2)。

4. おわりに

本稿で作成したインベントリデータは、結果の再検討によるデータ品質の向上やデータ有効期間の検証等が必要である。しかし、このようなデータを利用することで、自治体が災害廃棄物処理マネジメントの環境的・経済的評価を簡潔に実施できると考える。発表当日は、本稿に掲載した以外の結果についても報告する。

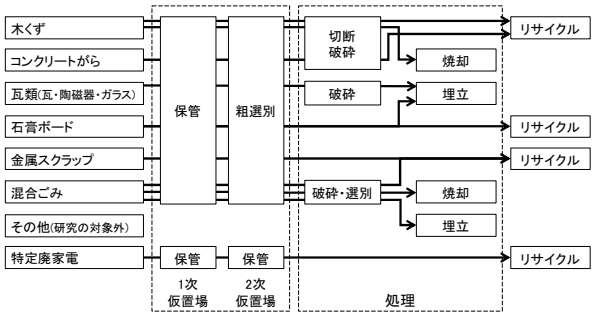


図 1　災害廃棄物処理のフローとシステム境界
(熊本県 [6]より筆者が作成。点線の枠内が評価対象)

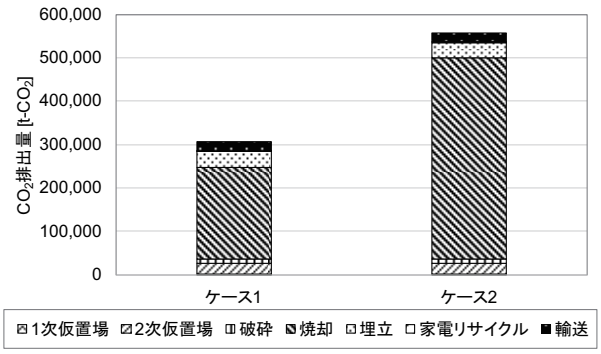


図 2　災害廃棄物処理に伴う CO_2 排出量
(ケース 1:可燃物を県内のごみ焼却施設のみで処理した場合、ケース 2:可燃物をごみ焼却施設と県内の産業廃棄物焼却施設で処理した場合)

謝辞

調査にご協力頂きました、東日本大震災の被災自治体、産業廃棄物処理事業者、家電リサイクル事業者、熊本県庁の皆様に厚く御礼申し上げます。本研究は、環境研究総合推進費(3K143015)の助成のもと実施した。

引用文献

1) Tabata, T., Wakabayashi, Y., Tsai, P., Saeki, T.: Waste Manag, (2016), in press
2) 若林陽平, 田畑智博, 蔡 佩宜 : 第 12 回日本 LCA 学会研究発表会, (2017)
3) 産業環境管理協会 : MiLCA(Ver.1.1.6.0), http://www.milca-milca.net (accessed 2017-1-3)
4) 田畑智博, 李 一石, 菱沼竜男, 楊 翠芬 : 都市清掃, (2011), 64(303), pp.509-519
5) Tabata, T., Hishinuma, T., Ihara, T., Genchi, Y.: Waste Manag Res, (2011), 29(4), pp.423-432
6) 熊本県 : 熊本県災害廃棄物処理実行計画～第 1 版～, http://www.pref.kumamoto.jp/kiji_16209.html (accessed 2017-1-3)
7) Tsai, P., Saeki, T., Tabata, T. : Proc 10th conf SDEWES, (2015), SDEWES2015.0947, 1-7

災害廃棄物の広域処理に対する住民の受容意識と方略

Public Acceptance and Strategy to Wide-Area Disposal Measures for Disaster Waste

○蔡 佩宜*[1)]、田畑 智博[1)]
Peii Tsai, Tomohiro Tabata
1) 神戸大学
* peii.tsai@people.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

災害廃棄物への対応について、東日本大震災を経て、今後起こり得る南海トラフ巨大地震や頻発する災害も念頭に、様々な制度整備が進められたが、災害廃棄物を迅速に処理するため、自治体が災害廃棄物を受け入れる際に、住民の理解や信頼、協力を得る必要があることは避けて通れない課題である。

そこで本研究では、災害廃棄物の広域処理に対する住民の理解に関する基礎的な知見を得るため、東日本大震災によって発生した災害廃棄物を受け入れた地域の住民を対象としてインターネット調査を行うとともに、因子分析やテキストマイニングを用いて災害廃棄物の受け入れ賛否に関わる意思、また合意形成プロセスにどのような要因が影響しているのかを明らかにする。

2. 研究の方法

2.1 アンケート調査の実施

アンケート調査は、ネットリサーチ会社が保有・連携するリサーチ専用パネルを用いて、2016 年 11 月に実施した。対象地域は大阪市、北九州市と東京都 23 区の三地域であり、対象モニター数は 20 歳～69 歳の計 315 名である。調査項目は、回答者属性と本質問である。本質問は、先ず、東日本大震災で発生した災害廃棄物の受け入れに対する合意形成プロセスや廃棄物処理への評価について、5 段階のリッカード尺度（とてもそう思う…全くそう思わない）で尋ねた。また、賛否の理由についても自由記述してもらった。続いて、将来の「災害廃棄物の受け入れ意思」として、「分別された災害廃棄物」、「分別されていない廃棄物」、「有害物質が付着した災害廃棄物」について、それぞれ「受け入れたい」から「絶対受け入れたくない」の 5 段階のリッカード尺度で尋ねた。また、それぞれの災害廃棄物の「受け入れの判断基準」について自由記述してもらった。また、住民の受け入れ意思に関わると考える災害廃棄物の処理に関する知識、行政に対する信頼度合や居住地から処理施設との距離などにも尋ねた。

2.2 アンケート結果の分析

まず、因子分析によって「災害廃棄物の受け入れ」に相関する要因を考察し、重回帰分析による「災害廃棄物の受け入れ」を規定する要因を明らかにした。また、自由回答欄の「受け入れの賛否理由」（東日本大震災）、「受け入れの判断基準」（将来の災害）に対して、フリーウェアの KHCoder [1)]を利用してテキストマイニングを用いた分析を行った。

3. 結果と考察

3.1 「災害廃棄物の受け入れ」の規定構造の分析

災害廃棄物の広域処理の受け入れに係る質問項目のうち、目標変数として設定した項目のいずれとも有意な相関を示さなかった項目を除外し、残りの項目についてプロマックス回転を伴う最尤法による因子分析を行った。その結果、第 1 因子は「東日本大震災で発生した災害廃棄物の受入れに対する評価」、第2因子は「行政への信頼」、第 3 因子は「廃棄物処理に対する知識と行政の主導による災害廃棄物の処理」、第 4 因子は「災害への協力と地域防災活動の参加」、第 5 因子は「災害廃棄物の受け入れ」、第 6 因子は「住民やボランティアの主導による災害廃棄物の分別と搬入」、第 7 因子は「災害廃棄物の安全性と情報の提示」、第 8 因子は「放射線の知識」と命名した。また、信頼性と妥当性を検証する Cronbach のα係数を検討したところ、概ね良い結果が得られた（第 1 因子から順にα＝0. 92、0. 89、0. 79、0. 84、0. 82、0. 75、0. 81、0. 81）。

因子間相関についてみると、「災害廃棄物の受け入れ」と相関が相対的に高い因子は「災害廃棄物の安全性と情報の提示」と「行政への信頼」であった（表 1 参照）。また、因子分析で得られた 7 因子を独立変数、「災害廃棄物の受け入れ」、種類別の災害廃棄物の受け入れ意思をそれぞれ従属変数として重回帰分析を行った（表 2 参照）。

「災害廃棄物の受け入れ」の分析結果では、「災害への協力と地域防災活動の参加」、「住民やボランティアの主導による災害廃棄物の分別と搬入」と「放射線の知識」以外の変数が「災害廃棄物の受け入れ」を有意に規定している。つまり、重回帰分析の結果、「災害廃棄物の受け入れ」は行政への信頼、安全性と情報の提示や過去震災の処理といった行政に関する側面に規定されることが明確になった。さらに、種類別の災害廃棄物の受け入れの分析結果をみると、「有害物質が付着した災害廃棄物」の受け入れでは、「東日本大震災で発生した災害廃棄物の受入れに対する評価」と「災害廃棄物の安全性と情報の提示」といった変数のみが有意に規定している。また、「分別されていない廃棄物」でも、「行政への信頼」、「東日本大震災で発

生した災害廃棄物の受入れに対する評価」と「災害廃棄物の安全性と情報の提示」といった変数が有意に規定している

この結果から、災害廃棄物の広域処理について住民の理解を深めるには、行政による災害廃棄物の安全性の保証や情報開示、また災害廃棄物の分別や搬入において行政が主導的に指示と行動することが有効であることが示唆された。

3.2 自由記述欄のテキストマイニングによる解析結果

東日本大震災で発生した災害廃棄物の受け入れに対して賛成、もしく反対したと考える理由について、自由記述欄に対して形態素分析を行い、抽出したキーワードの共起関係を示した結果の一例を図 1、図 2 に示す。図 1 からは、地域別の受け入れに対する賛成した回答の中に、大阪市の回答では「神戸」「経験」「助け」「我が身」などの過去に災害を経験したことから受け入れに対する協力的な姿勢がみられた。その一方で、北九州市の回答では「焼却」、「能力」、「施設」といった地域における焼却施設と能力があることで協力したいといった意向が伺えた。

図 2 からは、東日本大震災で発生した災害廃棄物の受け入れに「どちらともいえない」（N=158、約 50%）と回答した分析結果では、「放射線」「物質」「汚染」等のネガティブなキーワードがみられ、また「判断」「関与」「情報」「民意」「意見」等の受け入れの意思決定に関わる情報関与といった側面の要素が見られた。今回の調査結果では、災害廃棄物の受け入れに対して反対と答えた割合が低く（約 10%）、「どちらともいえない」といった回答が半数に占めた。それは、図 2 に示したように、災害廃棄物の受け入れに対する説明や情報開示の不十分、また受け入れの意思決定を行う際に自己関与度が低いことから判断することが難しいと考えられる。この結果から、災害廃棄物の受け入れの意思決定を行う際に、自治体による処理方法や場所、負担の度合などの条件が明確的に検討・提示することや、住民説明会といった意見を反映・交流できる場の作りが重要であることが示唆される。

4. おわりに

本研究では、災害廃棄物の広域処理については、住民からの理解や信頼、協力を得るために、どのような取り組みが必要かについてアンケート調査によって考察を行った。その結果、災害廃棄物に対する住民の受け入れには、過去災害の処理状況や災害廃棄物の安全性提示と情報開示といった行政に関わる側面が大きく影響することを示した。

謝辞

本研究の一部は、環境研究総合推進費（3K143015）の助成を受けて実施しているものである。記して謝意を表す。

表１　因子相関行列

因子	2	3	4	5	6	7	8
1. 災害廃棄物の受け入れ	.43**	.56**	.44**	.39**	.01	.59**	.01
2. 東日本大震災で発生した災害廃棄物の受入れに対する評価	—	.51**	.11	.10	-.03**	.42**	.08
3. 行政への信頼		—	.36**	.36**	.06	.72**	.02
4. 廃棄物処理に対する知識と行政の主導による災害廃棄物の処理			—	.61**	.03	.41**	-.17**
5. 災害への協力と地域防災活動の参加				—	.11**	.40**	-.11
6. 住民やボランティアの主導による災害廃棄物の分別と搬入					—	.05	-.15**
7. 廃棄物の安全性と情報の提示						—	.004
8. 放射線の知識							—

**$p<.01$

表２　「災害廃棄物の受入れ」に対する重回帰分析結果

	災害廃棄物の受け入れ	分別された廃棄物	分別されていない廃棄物	有害物質が付着した廃棄物
東日本大震災で発生した災害廃棄物の受入れに対する評価	.196**	.169**	.162**	.174**
行政への信頼	.161**	.041	.205**	.110
廃棄物処理に対する知識と行政の主導による災害廃棄物の処理	.190**	.237**	.050	-.035
災害への協力と地域防災活動の参加	.090	.072	.043	.015
住民やボランティアの主導による災害廃棄物の分別と搬入	-.020	-.094*	0.45	.044
廃棄物の安全性と情報の提示	.283**	.269**	.153*	.158*
放射線の知識	.029	.001	-.003	0.93
R^2	.448	.322	.213	.125

*$p<.05$, **$p<.01$

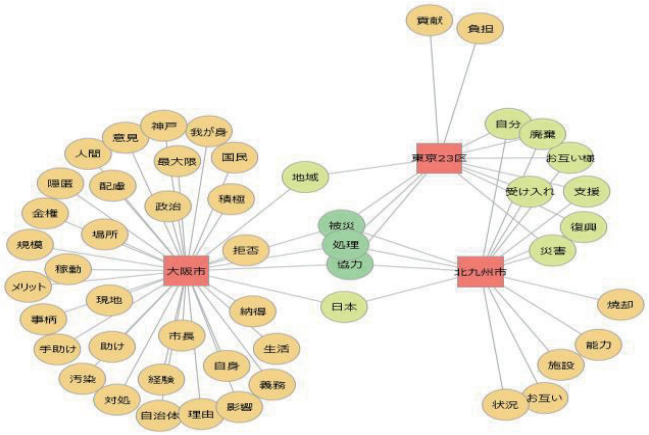


図１　共起ネットワーク図(災害廃棄物の受け入れに賛成した意見)

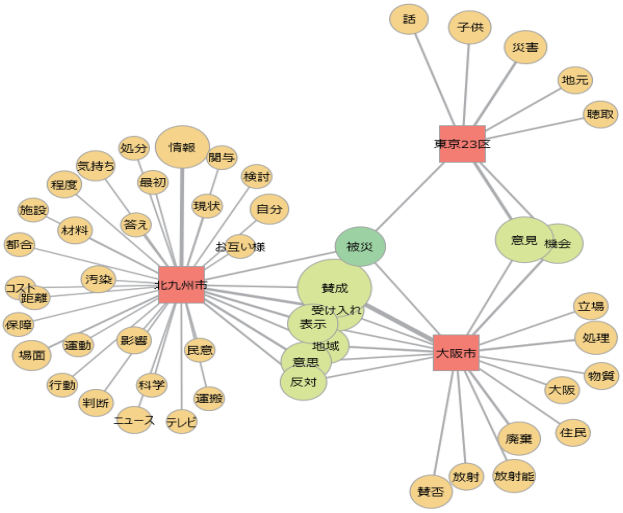


図２　共起ネットワーク図(廃棄物の受け入れ・どちらともいえない)

引用文献

1）樋口耕一：KHCorder，http://khc.sourceforge.net/

災害廃棄物処理システムの環境的、経済的評価方法の開発

Development of Environmental and Economic Evaluation Method for Pre-disaster Waste Management

○若林陽平 [1)]、田畑智博*[1)]、蔡　佩宜 [1)]
Yohei Wakabayashi,Tomohiro Tabata, Peii Tsai
1) 神戸大学
* tabata@people.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

災害廃棄物の処理対策を事前に検討する際、環境面や経済面を評価することで、環境的・経済的に望ましい処理対策の検討が可能となる。しかしながら、現状では、事前の災害廃棄物処理対策を検討するための方法論やインベントリデータの整備が十分ではないこと等から、このような検討ができていない。Tabata et al[1)]は、三重県南伊勢町を対象として、災害廃棄物由来の特定廃家電のリサイクルを事例とした LCA・LCC の実施方法を提案した。本研究では、対象地域を三重県に拡大し、主要な災害廃棄物である可燃物の処理を対象とした環境的・経済的評価方法の開発を目的とする。

2. 研究の方法

三重県 [2)]は南海トラフ巨大地震等を想定した災害廃棄物処理計画を作成している。本稿では、三重県が想定している災害廃棄物処理対策に準じる形で、3 年間に処理を実施した場合での環境負荷とコストの試算、および検討すべき課題等の抽出を行った。

先ず、南海トラフ巨大地震の発災に伴う災害廃棄物および津波堆積物の推計を行った。災害廃棄物の推計フローを図 1 に示す。地震、地すべり、津波の被害を対象として、建物倒壊数に建物材料別の原単位を乗じることで住宅建物の災害廃棄物発生量を推計した [3),4)]。災害廃棄物の内訳は、参考文献 [5)]より可燃物 18%、不燃物 18%、コンクリート 53%、木くず 7%、金属くず 3%と設定した。発災時期は、2015 年と 2035 年の 2 時点とする。本稿では、2015 年の結果のみ示す。また、三重県 [6)]は「防潮施設が機能する場合(防潮堤、防波堤等の防潮施設が地震によって被害を受けず、本来の役目を果たすと仮定)」と「防潮施設が機能しない場合(地震によって防潮堤が崩壊し本来の機能が発揮されないと仮定)」の 2 ケースについて津波ハザードマップを作成している。これを踏まえ、本稿では、防潮施設が機能する／しない場合の 2 ケースについて評価を行う。

図 1 にシステム境界を示す。本稿では、可燃物の処理に伴う環境負荷(CO_2、SO_x、NO_x、PM)とコストを算出する。このうち、1 次仮置場については、災害廃棄物の積み上げ高さは 5m[5)]と仮定し、仮置場の必要面積を算定した。また、学校や都市公園の半分の面積を仮置きできると仮定して、地理情報システムを用いて県内の仮置場の供給可能面積を算出した。2 次仮置場は、1 次仮置きを除いた、15ha[7)]以上の余剰面積がある場所に設置すると仮定し、分別と仮設焼却を行うと想定した。焼却施設および最終処分場は、県内の一般廃棄物および産業廃棄物処理施設を利用すると想定した。

プロセス間での輸送ネットワークの計算(図 2 の①、②、③、④)は、Supporting information に掲載した数理モデルを用いて解を導出した。①～④についてそれぞれ最適化計算を実施した理由は、一括で実施するよりも計算負荷が軽減できるためである。目的関数は環境負荷、コストの最小化である。制約条件は、処理施設の処理規模と処理余力、仮設焼却施設の設置の有無である。コストの最適化では、環境省 [8)]のデータを用いてトラック台数及び費用を算定した。各プロセスのインベントリデータは、三重県 [2)]、田畑&佐伯 [9)]を用いた。

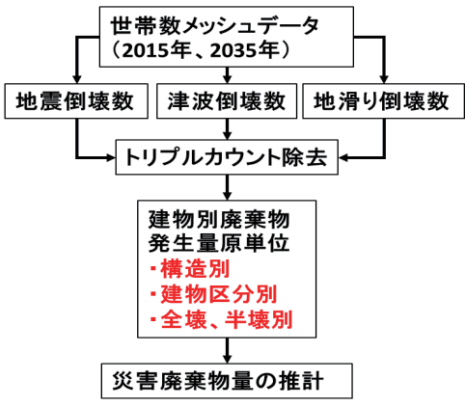


図 1　災害廃棄物の推計フロー

図 2 システム境界

3. 結果と考察

災害廃棄物発生量の推計結果(図 3(a))より、防潮施設が機能しない場合は約 1,260 万 t(うち、可燃物は約 130 万 t)、津波堆積物は約 1,603 万 t となった。一方、防潮施設が機能した場合、災害廃棄物は約 718 万 t、津波堆積物は約 501 万 t となり、大幅に減る結果となった。続いて、仮置場の必要面積と供給面積を比較した結果(図 3(b))、北部沿岸部や内陸部は供給面積に余裕がある一方で、伊勢志摩などのリアス式海岸沿いでは、約 35ha(防潮施設が機能する場合)、約 60ha(防潮機能施設が機能しない場合)それぞれ不足することがわかった。

防潮施設が機能しない場合、2 次仮置場は県内で 17 カ所確保できる。これを踏まえて廃棄物の広域輸送の最適化を行った結果(図 4)、最適化①・④は輸送範囲が小さくなった。また、最適化②・③では、輸送範囲が大きかった。理由について、2 次仮置場の候補地や焼却施設が少ないためであると考えられる。防潮施設が機能する場合は、仮設焼却量は減少したものの、広域処理量は殆ど変わらなかった。

LCA・LCC の結果の一部として、可燃物処理に伴う CO_2、コストを算出した結果(図 5)、CO_2 の場合は焼却が、コストの場合は仮置場での保管・分別が、それぞれ支配的であった。防潮堤施設が機能しない場合は、伊勢志摩、中南勢などの沿岸地域の 2 次仮置場に仮設焼却施設を設置しなければ処理ができないため、余計に CO_2 やコストが発生することが示された。

4. おわりに

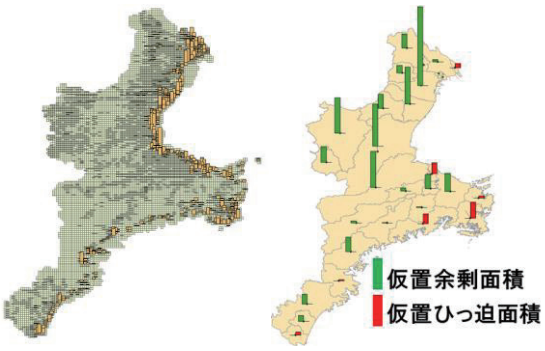
以上の結果から、仮置場や焼却のプロセスで多くのコストや環境負荷が発生することが示された。また、防潮施設を改修することで、仮設焼却施設に由来するコストや環境負荷を軽減できる可能性も示唆された。

謝辞

本研究の一部は、環境研究総合推進費(3K143015)の助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

引用文献

1) Tabata, T., Wakabayashi, Y., Tsai, P., Saeki, T.: Waste Manag, (2016), in press
2) 三重県：三重県災害廃棄物処理計画, (2015)
3) 長岡耕平, 谷川寛樹, 橋本征二：環境システム研究論文発表会講演集, 36, (2008), pp.303-308
4) 兵庫県：防災会議地震災害対策計画, (2013)
5) 荒井康裕, 池田有斗, 稲員とよの, 小泉明ほか 3 名：土木学会論文集, 71, (2015), pp.II_263-II_270
6) 三重県：M-GIS, http://www.pref.mie.lg.jp/m-gis/index.shtm (参照 2016-1-2)
7) 高知県：高知県災害廃棄物処理計画, (2015)
8) 環境省：東日本大震災に係る災害廃棄物処理事業の取り扱いについて, (2012)
9) 田畑智博, 佐伯孝：第 12 回日本 LCA 学会研究発表会, (2017)



(a) 家庭由来の災害廃棄物発生量　(b) 仮置場の面積

図 3　空間分布を考慮した推計結果
(防潮施設が機能しない場合の結果)

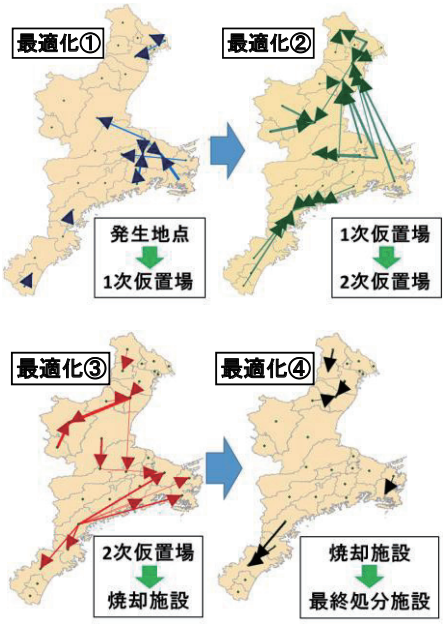
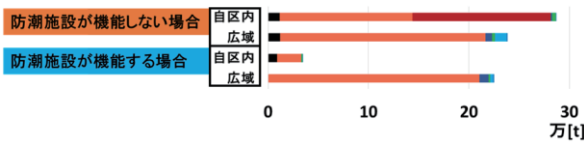
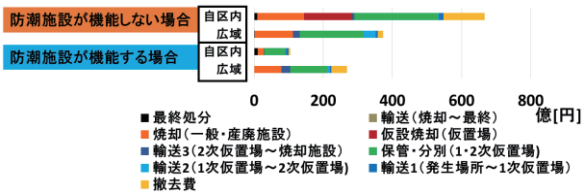


図 4　広域輸送の可視化
(防潮施設が機能しない場合の結果)



(a) CO_2 排出量



(b) コスト

図 5　可燃物処理に伴う LCA・LCC の結果

Supporting Information

数理モデル（廃棄物輸送モデル）

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(w_{ij}\times l_{ij}\right) \tag{1}$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{i=1}^{n} w_i = W_I \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^{n} w_j = W_J \tag{3}$$

$$\text{Minimize} \quad \text{cost} \quad \sum_{i}^{n}\sum_{j}^{n}\left(\frac{w_{ij}}{A_{ij}}\cdot H_\alpha \cdot M_\beta\right)+\sum_{i}^{n}\sum_{j}^{n}\sum_{k}^{n}\left(w_{ij}^{k}\cdot \boldsymbol{g_j^k}\right)+\sum_{j}^{n}\sum_{k}^{n}\left(m_j\cdot \boldsymbol{g_j^k}\right) \tag{4}$$

$$\text{Minimize environmental load} \quad \sum_{i}^{n}\sum_{j}^{n}\left(w_{ij}\cdot l_{ij}\cdot T_\gamma\right)+\sum_{i}^{n}\sum_{j}^{n}\sum_{k}^{n}\left(w_{ij}^{k}\cdot \boldsymbol{g_j^k}\right)+\sum_{j}^{n}\sum_{k}^{n}\left(m_j\cdot \boldsymbol{g_j^k}\right) \tag{5}$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_i^n m_i + \sum_j^n \sum_k^n w_{ij}^k = \sum_i^n w_i \tag{6}$$

$$\sum_j^n \sum_k^n w_{ij}^k \le \sum_j^n w_j^k \quad m_i \le M \cdot y_i \quad w_{ij}^k \ge 0 \tag{7}$$

$$A_{ij} = D_{ij} \times S \times R \tag{8}$$

$$D_{ij} = \frac{H}{2\times\left(\frac{l_{ij}}{V}+U\right)} \tag{9}$$

但し、A_{ij}：トラック輸送能力[t・日/台]，D_{ij}：i~j における 1 日当たり往復回数[回/日]，S：トラックの積載容量 [t] (4 t トラック(発生場所~1 次仮置場)= 4t／10t トラック(2 次仮置場~家電リサイクル工場)= 10)，R：トラックの積載率[-] (= 0.7)，H_α：1 日当たり稼働時間 [h/d] (= 8 h or 24 h)，V：輸送速度 [km/h] (一般道路= 37.1)，U：トラック積み下ろし時間 [時] (= 0.155)，M_β：1 時間当たりトラック稼働単価 [円/時] (4 t トラック= 4,775 ／ 10 t トラック= 6,950), T_γ:トラック輸送 1t1km 当たりの環境負荷(CO_2, SO_x, NO_x, PM)[kg/km・t]

南海トラフ巨大地震が与える地域経済網と炭素排出管理への影響解析

Impact analysis of Nankai megathrust earthquakes on regional economic chains and carbon management

○畑奨*[1)]、南齋規介[2)]、加河茂美[3)]、東野達[1)]
Sho Hata, Keisuke Nansai, Shigemi Kagawa, Susumu Tohno
1) 京都大学, 2) 国立環境研究所, 3) 九州大学
* hata.sho.52z@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

2011 年3月に発生した東日本大震災は日本に対して未曾有の被害をもたらしたが、近年、この地震の規模を超える南海トラフ巨大地震が発生することが予想されている[1)]。このような大規模災害はわが国に対して経済的に大きな被害を与えるだけでなく、復旧工事などにより温室効果ガスの排出増大を招く懸念もある。南海トラフ巨大地震の地震・津波などによる被害の規模、またその被害額についてはすでに内閣府が推計結果を報告しているが[1)]、その被害推計は主に被災地で発生する直接被害のみを対象としており、被災地からサプライチェーンを通じて日本全国へと波及していく影響について分析する手法は確立されていない。そこで本研究では、この巨大地震の被害想定をもとに、この地震が及ぼす経済と環境に関する波及的影響を分析する方法を構築する。

2. 方法

本研究では、部門解像度 80 の日本国 47 都道府県間産業連関表[2)]を基本に、南海トラフ巨大地震がわが国の経済・環境に及ぼす影響についての分析を行う。

2.1 巨大地震発生後の産業連関表の作表

南海トラフ巨大地震発生後の産業連関表は、2005 年の 47 都道府県間産業連関表[2)]に対して、震災が被災地に対して直接与える以下 2 つの影響を反映させて作成する。ただし、本研究で被災地として扱うのは、地域内の合計建物倒壊棟数が 3 万棟以上である 9 府県[1)](静岡県、高知県、愛知県、三重県、和歌山県、大阪府、徳島県、宮崎県、愛媛県）とする。

1) 震災による県内人口の変動や収入の変化に伴う県内最終需要の変化
2) 地震及び津波による生産施設の被害に伴う各産業の生産可能額の減少

これらの直接被害については、過去の震災のデータや市町村ごとの建物倒壊数の予測データなどの統計データから推計を行い[3)]、被災県の最終需要、各産業の生産許容額を求め、産業連関表に反映させる。

また、被災地の生産能力停止や低下によりサプライチェーン上流が寸断され、被災地以外の地域の生産への影響を含む震災による中間投入の構造変化を推計する必要がある。そこで、震災後の中間投入額は、震災前後のサプライチェーン構造の差異である式(1)で定義された目的関数を、需給バランス・最終需要のバランス・投入バランス・被災地の生産許容制約といった制約条件下で最小化する 2 次計画法により決定する。

$$\min \sum \Delta z^2 + \sum \Delta f^2 \qquad (1)$$

ここで Δz 、Δf はそれぞれ震災前後の中間投入額の変化、最終需要額の変化を表す。また、日本全体としての技術係数は震災前の値を維持するものとする。さらに本モデルでは被災地の産業のみに生産許容制約を設けており、被災地の復興需要を満たすための被災地域以外での代替生産への制約は課していない。

2.2 巨大地震後の環境負荷量の分析

南海トラフ巨大地震発生後、復旧による建設事業の増加や電力使用量の変化により、環境負荷排出量にも変化がみられることが予想される。そこで、本研究では環境負荷量の中でも温室効果ガス（GHG）排出量の変化に着目して分析を行う。各産業（部門）からの直接排出原単位 d は基本的には産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)[4)]を用いる。ただし、3EID の排出原単位は 2005 年のものが最新であるが、特に電力部門に関して、2011 年に発生した東日本大震災の影響で原子力発電所が稼働停止し火力発電への依存度が増加したため、原単位が大きく変わっている。そこで今回は国内のすべての原子力発電所が停止し、火力発電で代替しているとして電力部門の直接排出原単位を、各地域の電力会社ごとに調整した。そのほかの産業について、排出原単位は 2005 年と変わらないと仮定して直接排出原単位を設定した。この d を各産業の生産額に乗ずることで各産業の GHG 直接排出量を求めることができる。

また、d と作成した表から得られるレオンチェフ逆行列 $(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}$ を用いることで、産業からの直接排出量に加え、サプライチェーンを通じての間接排出量を含めた内包排出量を求めることが可能になる。以下にこ

の内包排出原単位 e を求める式を示す。

$$\mathbf{e} = \mathbf{d} \bullet (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \qquad (2)$$

式(2)で計算した内包排出原単位を各地域の最終需要に乗じることで、その地域の各部門の最終需要が誘発する GHG 排出量を求めることができる。

3. 結果と考察

以下の図 1 の結果では巨大地震発生後と 2005 年の GHG 直接排出量の変化を折れ線グラフで示し、震災前後の各地域の最終需要額合計の変化率を、2005 年の額を 1 として棒グラフで示している。GHG 排出量については二酸化炭素排出量に換算しており、南海トラフ巨大地震発生年については 20XX 年として示している。

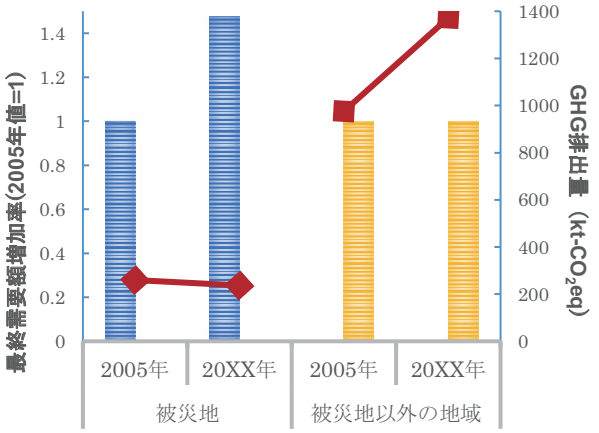


図 1　震災前後最終需要額と GHG 直接排出量の比較

本モデルでは被災地の最終需要は震災後に復興需要のため特に、建設や医療にかかわる部門で増加すると仮定している。そのため、被災地の最終需要額の合計は震災後増加している。しかしながら、被災地では震災の影響により経済活動が停滞し、その需要を満たすだけの生産が行うことができない。その結果、図 S1 に示すように震災前から総生産額は減少し、排出量も震災以前よりも小さい値となっている。一方、被災地以外の地域では排出量が大幅に増加している。これは図 S1 に示すように、生産能力が低下した被災地の代替生産を被災地以外の地域で行っているためであると考えられる。

次に、内包排出原単位 e を使用して、被災地の最終需要が誘発する GHG 排出量を求めると、二酸化炭素換算で約 327kt となった。これは上記の直接排出量の全地域の総量の約 20%を占める量である。以下の図 2 では被災地の最終需要が誘発する GHG 排出量を部門別に示す。図 2 から、部門別では「建築・建設補修」、「公共工事」、「電力」、「医療・保健・社会保障・介護」の順に排出量が多かった。これらの部門は 2.1 の仮定で、復旧工事や治療などの復興需要により、震災後に増加するとした部門である。特に、「建築・建設補修」、「公共工事」、「その他の土木建設」の建設に関する 3 部門からの排出量の合計は被災地の最終需要が誘発する排出量の合計の約 40%を占めていた。この建設に関する 3 部門からの GHG 排出を地域ごとに分解すると、被災地以外の各地域がこの排出量全体に占める割合は 2.0%～2.8%となり、どの地域もほぼ均一な値となっていた。

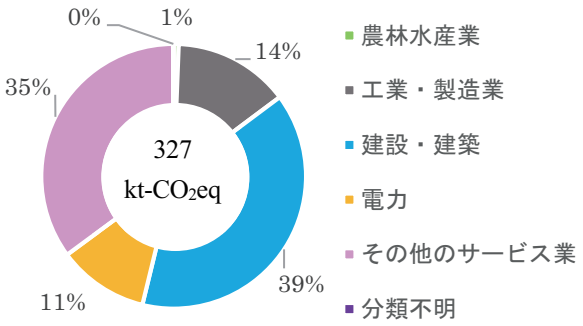


図 2　震災後に被災地の最終需要が誘発する GHG 内包排出量の部門別割合

4. まとめと今後の展望

今回新たに南海トラフ巨大地震後の産業連関表の作成方法を提示した。本方法により特に、都道府県ごとに被害額を算出することが可能となり、直接被災した地域だけでなく、被災していない都道府県に対して巨大地震が与える波及的経済・環境影響についての分析も可能になる。ただし、本方法で得られた結果はあくまでも震災前の技術構造を維持することを制約条件としているおり、被災地とその他の地域との間の地理的な制約は設けられていない。このような地理的な制約を加えるなどのモデルの改良を行うことでより妥当性の高い結果を得ることが可能になる。

5. 引用文献

1) 内閣府政策統括官（防災担当）:“南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ”, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/ , (2016-8-15)
2) R. Hasegawa, S. Kagawa, M. Tsukui: *Economic Structures*, **4**(5), (2015), pp1-20
3) 畑奨,南齋規介,加河茂美,東野達 :“第 11 回日本 LCA 学会”,柏,(2016),pp180-181
4) 南齋規介, 森口祐一, 東野達 :“産業連関表による環境負荷排出原単位データブック(3EID)”, http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/index_j.htm, (2016-8-15)

Supporting Information

図 S1 震災後の域内総生産額の変化率

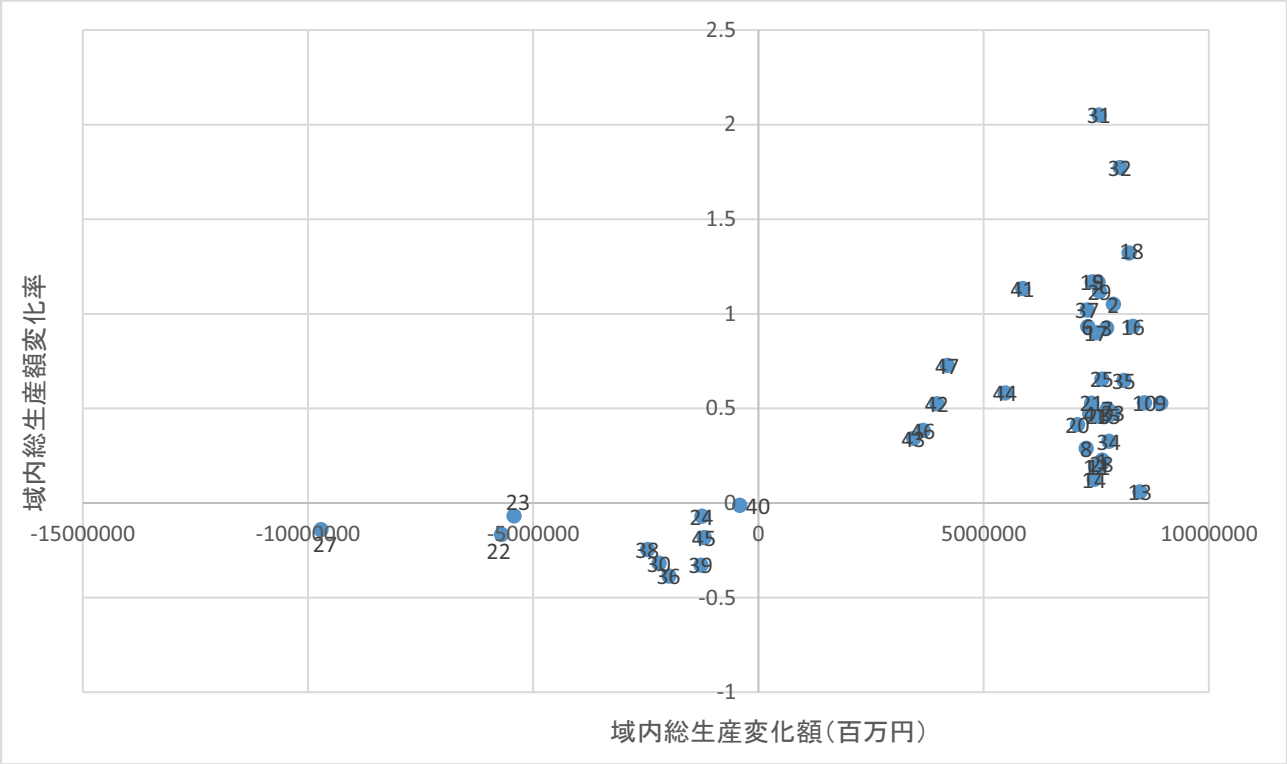


表 S1 都道府県番号

1	北海道	17	石川県	33	岡山県
2	青森県	18	福井県	34	広島県
3	岩手県	19	山梨県	35	山口県
4	宮城県	20	長野県	36	徳島県
5	秋田県	21	岐阜県	37	香川県
6	山形県	22	静岡県	38	愛媛県
7	福島県	23	愛知県	39	高知県
8	茨城県	24	三重県	40	福岡県
9	栃木県	25	滋賀県	41	佐賀県
10	群馬県	26	京都府	42	長崎県
11	埼玉県	27	大阪府	43	熊本県
12	千葉県	28	兵庫県	44	大分県
13	東京都	29	奈良県	45	宮崎県
14	神奈川県	30	和歌山県	46	鹿児島県
15	新潟県	31	鳥取県	47	沖縄県
16	富山県	32	島根県		

食品残渣堆肥を活用した農作物栽培のライフサイクル評価

Life cycle assessment of cultivation activities utilizing composted food residue

○松田朋也*[1)]、吉川直樹 [1)]、天野耕二 [1)]
Tomoya Matsuda, Naoki Yoshikawa, Koji Amano
1) 立命館大学
* rv0022rf@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

近年、化学肥料価格の高騰や栄養塩の流失による環境負荷の問題から、有機質肥料を使用した有機栽培等の環境保全型農業が注目されている。有機質肥料は化学肥料と比較して施肥設計が複雑で制御が困難であり、過剰投入による環境負荷の増大や投入不足による単収の低下が生じる恐れがある。そのため、施肥設計による環境負荷とコストの変化を比較することは重要である。

一方、食品残渣は食品リサイクル法を背景に再生利用等が進められているが、外食産業や一般家庭からのリサイクル率は食品製造業等と比較して低く、焼却・埋立等の処理が多くなされており、それに伴う環境負荷が発生している。そのため再資源化の推進が必要である。

本研究では農作物生産において、環境負荷量および生産コストの算定結果に基づき、現行の有機農作物栽培と施肥設計として立命館大学で開発された土壌肥沃度指標(SOFIX) [1)]を考慮し、 食品残渣堆肥を活用した有機農作物栽培との比較評価を試みる。

2. 研究概要

本研究では、滋賀県草津市の有機ホウレンソウ栽培を対象とする。圃場では SOFIX を指標として施肥条件を決定し、肥料の種類は現地で使用されている市販の有機質肥料(有機アグレット 8-4-4)と食品残渣堆肥の 2 種類とする。食品残渣堆肥は、立命館大学の大学生協食堂から排出される売れ残り・食べ残しといった食品残渣を微生物の高温発酵式堆肥化処理機に投入した処理物を用いた。

SOFIX を用いるにあたって今回の栽培では土壌中の全窒素量が SOFIX の推奨値になるように施肥設計を行った。比較対象として SOFIX を用いずに現行の施肥設計を加えた 3 種類の栽培体系で 2 回栽培し、評価を行う。栽培条件を表 1 に記す。

実験圃場としているビニールハウスの面積は一棟あたり 1.94a(アール)である。

これら 3 つの栽培体系においてホウレンソウ栽培に必要な資材の製造、調達から作物の栽培、納品までのフローについて、ヒアリング調査によって得られたデータから収穫量あたりの温室効果ガス(GHG)排出量、栄養塩負荷量、生産コストを算定し、比較する(図 1)。

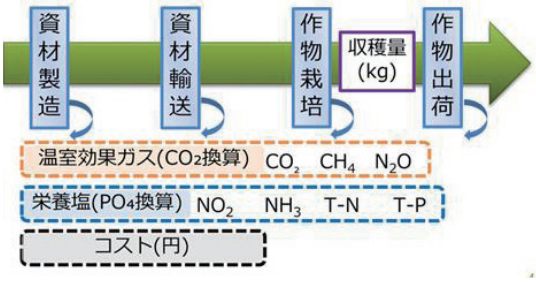


図 1　農作物栽培のライフサイクルフロー

3. 研究手法

GHG 排出量については、栽培に使用した肥料、農薬、燃料等の栽培活動に必要な資材の製造に伴う排出量に加え、栽培期間中において土壌中から発生する CH_4 と N_2O を考慮する。資材の調達や輸送に伴い排出される CO_2 排出等も算定する。栄養塩負荷量については、栽培活動に必要な資材の製

表 1　有機ホウレンソウの栽培条件

		SOFIX食品残渣堆肥		SOFIX現行肥料		現行有機栽培	
		1作目	2作目	1作目	2作目	1作目	2作目
栽培期間	播種	2015/11/28	2016/3/12	2015/12/1	2016/4/28	2015/11/28	2016/4/22
	収穫	2016/2/16	2016/4/23	2016/2/24	2016/6/7	2016/2/19	2016/6/3
施肥	肥料名	食品残渣堆肥(2.5-0.2-0.6)		有機アグレット8-4-4		有機アグレット8-4-4	
	投入量(kgN/10a)	45.1	23.5	45.4	12.4	12.4	12.4
収穫量(kg/10a)		950	860	1092	510	1111	645

造や栽培活動中に土壌から環境へ排出される環境負荷量をリン酸当量(PO_4^{3-})に換算して算定する。

栽培活動に必要な資材の製造に関しては、LCA ソフトウェア MiLCA[2]から環境負荷原単位を入手し、GHG 排出量と栄養塩負荷量を算定する。食品残渣堆肥の製造は消費電力や投入量などの実測値を基に文献値などを用いて環境負荷量を算定する。

土壌由来の CH_4 および N_2O の排出量および栄養塩負荷量の算定には DNDC[3] (The Denitrification-ecomposition)モデルを使用する。

DNDC モデルは、土壌中の温室効果ガスの発生量や硝酸態窒素溶脱量をその土地の気温や降水量といった気候条件、粘土含有率や pH といった土壌状態、品種や肥料の選択といった栽培方法などのパラメーターから予測するモデルである。気象条件のデータは気象庁のサイトから入手する。必要なデータが欠損している場合は他の栽培事例や研究結果などからパラメーターを推定する。

栽培に必要な資材や栽培した農作物を出荷する際の輸送における環境負荷量に関しては、車種や輸送重量、輸送距離等から燃料消費量を算出する改良トンキロ法を用いて算定を行う。

生産コストについては、使用した資材から、購入した資材コストを算出し、労働投入時間から人件費についても算出する。

堆肥化による食品残渣焼却処理工程の削減効果は、処理業者の回収・処理コストとそれに伴う輸送・焼却・埋め立て時の CO_2 排出量を算出し、焼却処理を回避するとして食品残渣堆肥を使用した栽培体系に負の数値として計上する。

これらのデータから、項目ごとに排出される環境負荷物質と生産コストを算定し、LIME2[4]を使用することにより地球温暖化・富栄養化の影響領域で発生した環境負荷量を貨幣価値(円)に換算し、収穫量(kg)で除することでホウレンソウ 1kg の生産における総合評価(フルコストアセスメント)を行い、栽培体系ごとに比較する。

4. 研究結果

1kg ホウレンソウ栽培における各栽培体系における環境負荷・生産コストの総合評価結果を図 2 に示す。

SOFIX を用い食品残渣堆肥を活用した栽培体系で 236 円、市販の有機質肥料を活用した栽培体系で 119 円、現行の有機栽培体系で 85 円となった。食品残渣の堆肥化に伴う有機性廃棄物処理回避による削減効果は 127 円となった。

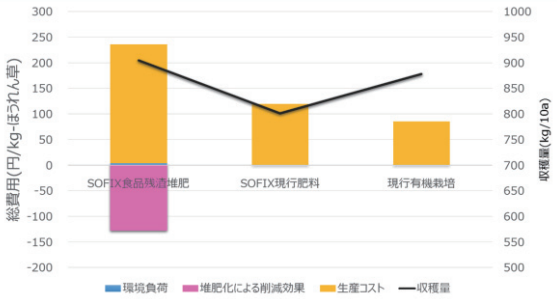


図２　ほうれん草 1kg 栽培あたりの総合評価

全栽培体系において生産コストが 90%以上を占める結果となった。特に食品残渣堆肥の製造時において堆肥化処理機の運転由来の電力消費が環境負荷・生産コスト両面で増加要因となったが、処理機の大規模化や他の堆肥化方式により削減できる可能性がある。

5. まとめ

食品残渣堆肥を活用した有機農作物栽培では、食品残渣の堆肥化に伴う有機性廃棄物処理回避効果が大きく、焼却処理に伴う環境負荷と処理コストといった社会全体で評価する必要がある。

発表当日は栽培回数を増やした上で収穫量あたりの環境負荷量と生産コストの算出結果について報告する予定である。

6. 引用文献

1)立命館大学：”SOFIX-食と農のスロー＆ローカル・イノベーション地域拠点モデルの構築”立命館大学,入手先 <http://www.ritsumei.ac.jp/acd/re/b-liaison/COI-T_SLI/sofix.html>,（参照 2016-12-20）

2)産業環境管理協会:”新 LCA ソフトウェア MiLCA”, 産業環境管理協会, 入手先, <http://www.milca-milca.net/ >,(参照 2016-12-25)

3)国立環境研究所地球環境研究センター:”DNDC”, 国際研究 DB,入手先 <http://www.cger.nies.go.jp/db/gwdb/res/res02/res0205.htm>,(参照 2016-11-13)

4) 伊坪徳宏・稲葉敦編,”LIME2 意思決定を支援する環境影響評価手法”, 丸善, 東京,（2010）,p.52

リンの施肥による増収効果に着目したリン資源の環境効率評価

Evaluation of eco-efficiency of phosphorus resource use focusing on yield increase effect of phosphorus fertilization

○野木茜*[1)]、村上進亮[2)]、栗生木千佳[1)3)]、橋本征二[1)]
Akane Nogi, Shinsuke Murakami, Chika Aoki-Suzuki, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学、2) 東京大学、3) 地球環境戦略研究機関
* rv0031re@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

持続可能な社会を目指すためには、ライフサイクルの視点に基づいて、資源やエネルギーの使用を効率化するとともに、資源やエネルギーの消費に伴う環境負荷を低減することが求められる。このような背景から、社会活動における財・サービスの付加価値と環境負荷の間の効率性を測る、「環境効率」指標を用いた評価が行われている。これは、企業等が提供する製品・サービスをそのための環境影響と対比させて評価する指標であるが、資源の枯渇が叫ばれる中、様々な資源がそのライフサイクルを通じてどのような効率で利用されているか、すなわち、資源に着目した環境効率の評価も合わせて重要になると考えられる。

本研究は、資源(物質)が提供するサービスがそのライフサイクルを通じてどの程度環境に影響を与えるかについて検討し、その資源の環境効率を評価することを試みたものである。具体的には、リン資源を対象として、①それが提供するサービス(付加価値)の定量化を行うとともに、②そのライフサイクルでの環境影響を算定し、③リン資源利用の環境効率を評価した。前報[1)]では①について、肥料価格及び肥料中のリン価格をリンが提供するサービス(付加価値)と捉えて定量化を試みたが、サービスの能力に関わらず、資源の価格変動によってサービスが決定されてしまうという問題があった。本稿では、リンの施肥による増収効果に着目し、サービスの定量化を試みた。

2. 方法

2.1 環境効率指標の設定

作物に利用されるリンがそのライフサイクルで提供するサービス(付加価値)(円/kg-P)を分子に、その環境影響(円/kg-P)を分母にとり、本研究の環境効率指標とした。

$$\text{環境効率} = \frac{\text{リン資源が提供するサービス}}{\text{リン資源の環境影響}} \quad (1)$$

2.2 対象作目と対象肥料の設定

対象とする作目は、わが国の耕種農業部門にて生産される、米・麦類・いも類・豆類・野菜類・果実類・飼料用作物類・工芸作物類・花き類の計 9 作目とした。

また、対象とする化学肥料は、対象作目への施肥量が入手可能な過りん酸石灰、熔性りん肥、普通化成肥料、高度化成肥料の 4 種とした。

2.3 分子のサービス(付加価値)の定量化

リン資源が提供するサービス(付加価値)は、直接的には、リンの施肥によって得られた作物の増収がもたらす経済的な価値と考えられる。そこで、本研究では以下の式 2~4 を用いて化学肥料中のリンが提供するサービスを定量化した。

$$TMV = \sum MV_i \times P_i \quad (2)$$

$$MV_i = \Delta Q_i \times V_i \quad (3)$$

$$\Delta Q_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} \Delta Q_j}{n} \quad (4)$$

ここで、

i：各作目
j：各作物種
TMV：作物全体の付加価値(円)
MV：リン 1 単位が増加させる各作目の付加価値(円/kg-P)
P：各作目へのリンの施肥量[2)](kg-P)
ΔQ：リン 1 単位が増加させる各作目または作物種の収量((kg-作目または作物種)/ha)/(kg-P/ha))
V：各作目 1 単位当たりの付加価値[2)3)4)](円/kg-作目)

ΔQ_j を算出するためには、①三要素(窒素・リン・カリ)の肥料成分を施用して栽培した時の作物収量($Y_{j\ with\ NPK}$：kg-作物種/ha)、②リン成分を除いて栽培した時の作物収量($Y_{j\ without\ P}$：kg-作物種/ha)、③三要素区でのリンの施肥量(PF_j：kg-P/ha)、の 3 つの情報が必要である。これらが記載されている文献をもとに、以下の式 5 を用いて ΔQ_j を算出した。

$$\Delta Qj = \frac{Y_{j\ by\ P}}{PF_j} = \frac{Y_{j\ with\ NPK} - Y_{j\ without\ P}}{PF_j} \quad (5)$$

2.4 分母の環境影響の算定

(1) 生産段階まで

肥料の生産段階までの環境影響は、MiLCA[5)]を用いて算定した。

(2) 使用後の段階

土壌からのリン流出に関するデータベース[6)]より入手可能な文献の中から、肥料由来の土壌からのリン流出量(表面流出＋浸透流出)の 2 点が記載されている文献を対

象に、水田の灌漑期において、「慣行施肥量 - 無施肥量(または減肥量)」より得られる値をリン施肥量(kg-P/ha)、「慣行施肥区の排出量 - 無施肥区(または減肥区)の排出量」から得られる値を、リン流出量(kg-P/ha)として、施肥量に対する流出量の比率の平均値を算定した。また、そうして得られる流出量を MiLCA に与え、その環境影響を算出した。

3. 結果と考察

以下では、米の生産に利用される化学肥料に含まれるリンを対象とした推計結果を示す。

3.1 サービス(付加価値)の定量化の結果

各肥料に含まれるリンが提供するサービス(付加価値)を定量化した結果が図 1 である。

リン 1 単位が増加させる米収量が対象年度内で一定とすると、20011 年度においてリンの提供するサービスが最も高く評価された。これは、対象年度において 2011 年度の米産業における米 1 単位当たりの粗付加価値額が最も高かったためである。

3.2 環境影響の算定の結果

各肥料の環境影響を算定した結果が図 2 である。図からも分かるように、肥料のライフサイクルにおける主な環境影響は富栄養化であり、富栄養化への影響をライフサイクルの段階別にみると、肥料散布後のリン成分の流出段階の影響がほとんどであった。

3.3 リン資源の環境効率の算定の結果

リン資源利用の環境効率算定した結果が図 3 である。リン資源利用の環境影響が対象年度で変わらない条件のもとでは、米産業における米 1 単位当たりの粗付加価値額及び各化学肥料の消費量の変動が結果に影響することとなる。各化学肥料における消費量が年々減少していること[2)]に加え、図 1 からも分かるとおり、2011 年度の米産業における米 1 単位当たりの粗付加価値額が大きく上昇したことにより、環境効率においても 2011 年度が最も高い評価となった。

なお、米以外の作物を対象としたリン資源利用の環境効率評価の結果については学会当日に報告する。

謝辞：本研究は、第Ⅲ期環境経済の政策研究による成果である。ここに記して深謝する。

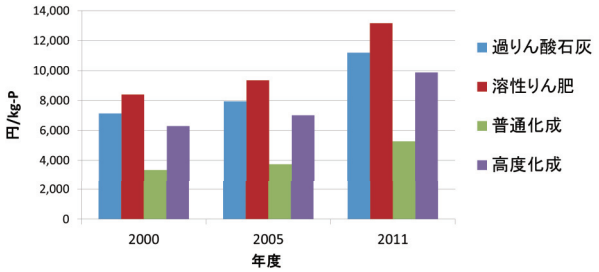


図 1　水稲の生産に利用された対象化学肥料中のリンが提供するサービス(円/kg-P)

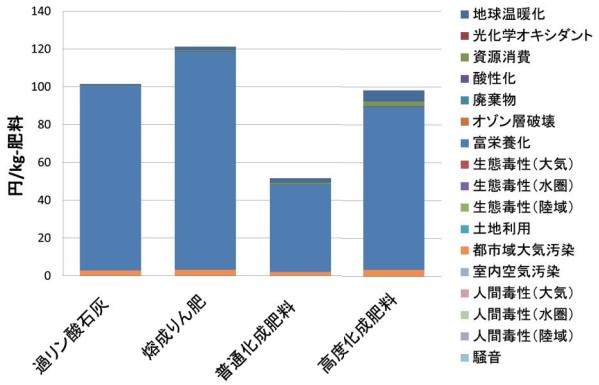


図 2　水稲の生産に利用された対象化学肥料の環境影響(円/kg-肥料)

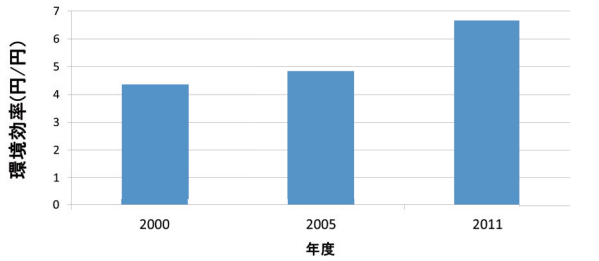


図 3　水稲の生産に利用されたリン資源の環境効率(円/円)

参考文献

1) 野木茜、村上進亮、栗生木千佳、橋本征二：提供するサービスに着目したリン資源利用の環境効率、第 11 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、pp.10-11、2016

2) 農林統計協会編著：ポケット肥料要覧 2011/2012、農林統計協会、2013

3) 総務省：平成 12、17、23 年産業連関表、http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/ichiran.htm、2016 年 9 月アクセス

4) 総務省：平成 12-17-23 年接続産業連関表、http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/ichiran.htm、2016 年 9 月アクセス

5) 産業環境管理協会：MiLCA ガイドブック(2014 年 10 月 9 日版)、2014

6) 日本水環境学会：非特定汚染源からの流出負荷量の推計手法に関する研究、http://jswe-nonpoint.com/h23suishin/link.html、2015 年 11 月アクセス

低炭素農法を目的としたカーボンフリーCO_2を用いた野菜の生産性向上及び LCA 解析

Productivity improvement of vegetables and LCA analysis using carbon-free CO_2 for the purpose of low carbon farming

○井手啓介*1)、北畑信隆 1) 、堂脇清志 1)

Keisuke Ide, Nobutaka Kitahata, Kiyoshi Dowaki

1）東京理科大学

*7415603@ed.tus.ac.jp

1. 背景

近年、人々のライフスタイルの変化やグローバル化の進展に伴い、日本人の食生活が変化している。また、昔と比較して食事の栄養バランスが悪化し、畜産物・油脂類に偏った食事による肥満などが引き起こす生活習慣病等の健康上の問題が増加してきている。そのため、野菜に豊富に含まれるビタミンなどの食による医食同源といった考え方が見直されている。

一方で、世界規模での温暖化が深刻化しており、農業分野においても環境対応が求められており、欧州をはじめとして製品のライフサイクル全般で排出された温室効果ガスを表示する制度が促進されており、「見える化」によって低炭素社会を目指している。また、国内の農業政策においても農林水産省において「攻めの農業実施緊急対策事業」を設立し、化石燃料依存型農業から脱却し、新しい農業生産を構築させ、農産物や生産システムを海外に輸出することを目標として掲げている[1)]。

2. 研究概要及び目的

こうした背景を受けて、古在は、農業分野において各種資源・エネルギー利用効率など LCA を含めて検討することが今後の課題であると述べている[2)]。また、植物の成長に影響を及ぼす主な要因は、光強度、CO_2濃度、呼吸速度、気温、湿度、水分、養分濃度などが挙げられるが[3)]、本研究では、さらに環境面に配慮し、主要な温室効果ガスでもあるCO_2濃度に注目した。これまでの研究では、Christine らは CO_2施肥することによって品質を向上させた上でレタスの収量を増加させることができると報告しているが、LCA の算定は行われていない[4)]。また、大井らはカーボンフリーCO_2施用を用いた施設園芸の LCA を行っているが対象はシロイヌナズナというモデル植物に留まっており、具体的な野菜の検討は行っていない[5)]。

以上から、本研究ではカーボンフリーCO_2を施肥として用いた場合のモデル野菜による実験を通して、その野菜の成長量及び栄養素等の測定を行い、低炭素な野菜の生産性の向上と品質を考慮した LCA 分析を行い、多機能性を考慮した農業生産システムを提案することを目的とする。

3. 研究手法

3.1 生長実験

本研究ではモデル野菜としてほうれんそうを題材とし、生長実験の手順としては、室内で栽培ポットを用いて播種し、発芽したものを順次、栽培用インキュベータ内に移動させて栽培したものをサンプルとした。インキュベータの設定条件はCO_2濃度を大気設定の 400ppm と 1000ppm、日照時間は 16h と 10h、温度 22℃、湿度 50%、照明 60%の 3 種類で行い、重量測定及びに栄養素の測定を行った。栄養素の測定においてはほうれんそうに豊富に含まれるビタミン C に注目し、コスモバイオ社製の定量キットを用いて分析を行った（実験条件の詳細は S1 を参照）。

3.2 LCA

次に、本研究における機能単位は、収穫したほうれんそう 1kg あたりとし、システム境界は播種から、生育、収穫、貯蔵、出荷センターへの輸送までとした。LCA を算定する際のモデル農家は実際にほうれんそうを栽培し、出荷している福岡県朝倉市の藤原農園のものとした。

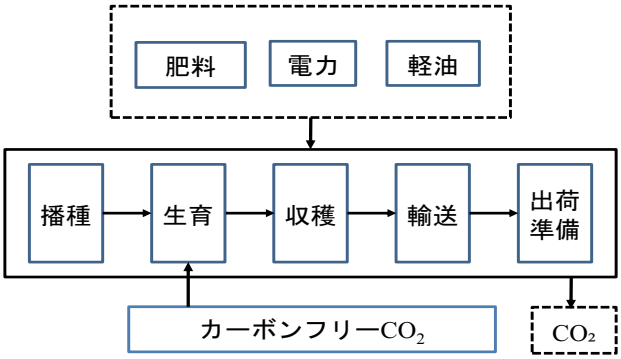


図１　システム境界

実際の農家へのヒアリングの結果や文献等により得られたインベントリデータは表 S3 のようになった。

なお、施肥用のCO_2はバイオマス原料による熱分解ガス化技術を活用した水素精製プロセス由来のものであると仮定し、実際の供給方法等については今後の研究課題としたい。

4. 結果

従来ケースと CO_2 施肥ケースにおいて 20 日経過後重量測定を行ったところ 1.69 倍の重量となり、1.103g の重量差が出た。一方で、一部のサンプルにおいて抽苔が見られたため、表 S1 における短日ケースにおいても比較実験を行ったところ前者 2 つのケースでは 18 日から 28 日にかけて抽苔が起こり、短日ケースでは抽苔は見られなかった。2 つのケースにおける結果は図 2 に示す通りである。施肥することの効果は 5,10,15 日では見られなかったが、28 日経過後では 1.40 倍の重量となり、2.087g の重量差が見られた(詳細な結果は S4 参照)。

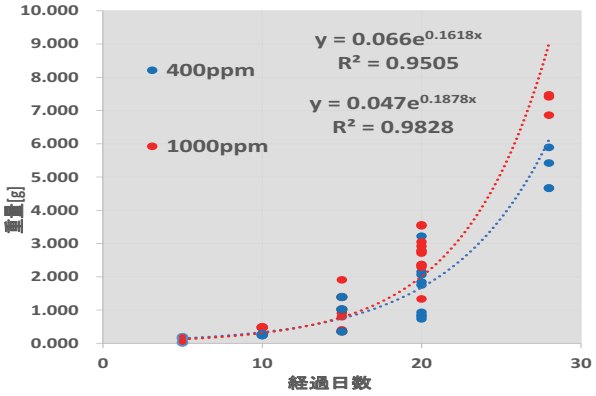


図 2　経過日数ごとのほうれんそう重量

次に、20-30 日経過後のほうれんそうのビタミン C 濃度を図 3 に示す。可食部 100g あたり、従来ケースでは 13.2mg、CO_2 施肥ケースでは 15.1mg となり施肥した方が高い値となった。なお、星らも表 1 に示すように本研究と同様に CO_2 施肥することによってビタミン C 含量の増加を報告している [6]。

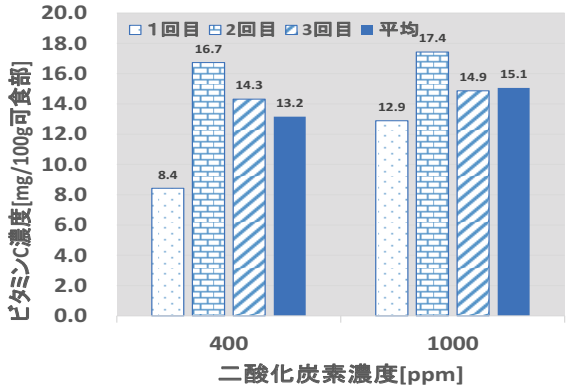


図 3　ほうれんそうのビタミン C 濃度

表 1　明期の炭酸ガス濃度の違いによるほうれんそうの品質及び生育 [6]

試験区 CO_2 濃度	新鮮重[g/株]	ビタミンC[mg%]
900 ppm	35.3	62.48
350 ppm	21.4	57.95

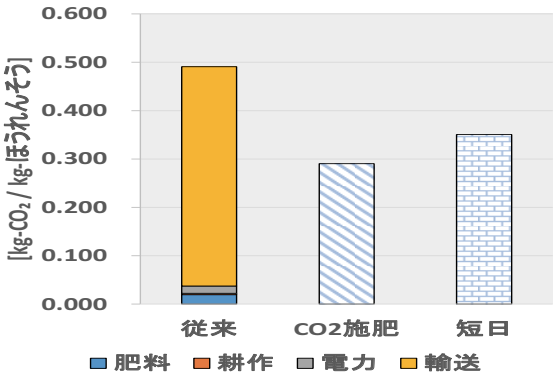


図 4　LCA 算定結果

以上のような検証から、LCA 算定結果は図 4 のようになり、従来ケースでは機能単位あたり 0.490kg-CO_2、これに CO_2 施肥ケースでは 0.290kg-CO_2、短日ケースでは 0.351kg-CO_2 といった結果となった。

このことから、バイオマス由来の CO_2 をゼロエミッションとしてカウントし、野菜の生産に施肥として用いることで環境負荷を低減しつつ、高品質であり、収量の増加が見込めることが分かった。

5. 謝辞

本研究では、LCA の算出を行うにあたり、実際の農家への見学やインベントリデータの提供等、白羽熊鷲の里・藤原農園様に多大なるご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

引用文献

1) 農林水産省：”「攻めの農林水産業」の実現に向けた新たな政策の概要(第 2 版)”, 平成 26 年 8 月

2) Kozai T.:” Closed systems for high quality transplants using minimum resources” Plant Tissue Engineering, vol6, pp. 275-312

3) 古在豊樹, ” 人工光型植物工場”, オーム社, 東京, (平成 24 年), pp. 11-20

4) Christine B., Hans-Peter K:” CO2 enrichment can produce high red leaf lettuce yield while increasing most flavonoid glycoside and some caffeic acid dericative concentrations” Food Chemisitry, 199 (2016), pp. 736-745

5) 大井隆史：“第 11 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集”, 東京大学, pp. 4-5

6) 星岳彦：” 高能率野菜生産技術の開発(3)”, (昭和 63 年), 電力中央研究所, pp. 1-42

Supporting Information(SI)

表 S1　インキュベータの設定条件

ケース名	従来	CO_2施肥	短日
温度［℃］	22	22	22
湿度［%］	50	50	50
照明［%］	60	60	60
CO_2濃度[ppm]	400	1000	400
日照時間［h］	16	16	10

表 S2　藤原農園におけるほうれんそうの栽培概要

項目	無農薬栽培	単位
栽培野菜	ほうれんそう	
栽培面積	3	a
対象単収	2,400	kg/10a
全収量	720	kg

表 S3　インベントリデータ

使用肥料	10a 当たり使用量		成分量(kg/10a)		
			N	P	K
有機肥料	1000	kg	24.0	19.8	16.9
牛糞堆肥	2000	kg			
油粕	100	kg			
卵のから	100	kg			
輸送	1 時間輸送		文献		
燃費	10.3	km/L	S1)		
平均速度	30.2	km/h	S2)		
耕作	1ha 当たり使用量		文献		
軽油	25	L	S3)		
貯蔵	1 日当たり消費量		文献		
消費電力	0.93	kWh	S4)		

表 S4　成長実験結果

		400ppm	1000ppm
5 日経過後	平均値[g]	0.096	0.119
	標準偏差	0.069	0.084
	範囲[g]	0.162	0.162
10 日経過後	平均値[g]	0.477	0.255
	標準偏差	0.003	0.022
	範囲[g]	0.004	0.032
15 日経過後	平均値[g]	1.004	0.919
	標準偏差	0.641	0.525
	範囲[g]	1.506	1.036
20 日経過後	平均値[g]	1.592	2.695
	標準偏差	0.839	0.624
	範囲[g]	1.592	2.695
28 日経過後	平均値[g]	5.160	7.247
	標準偏差	0.603	0.336
	範囲[g]	1.230	0.610

表 S5　本研究と星ら[6]における
ほうれんそうに対する CO_2 施肥効果の比較

試験区 CO_2濃度	重量[g/株]	ビタミンC[mg%]
本研究	1.40 倍	1.14 倍
星ら[12]	1.65 倍	1.08 倍

引用文献

S1)経済産業省・国土交通省：”物流分野の CO2 排出量に関する算定方法ガイドライン”

S2)国土交通省：”平成 22 年度道路交通センサス 一般交通量集計結果整理表

S3)西薗大実：”野菜の生産・流通における環境負荷の LCA 的考察”, 群馬大学教育学部紀要 第 42 巻 pp.145-157

S4)HOSHIZAKI HR-64ZT
<http://www.hoshizaki.co.jp/p/f-refrigerator/z-series/lineup.html>, (参照 2016-12-20)

農産物の新たな複合的環境指標の提案

Proposal of advanced multi-environmental indicators for agricultural product

○渡辺泰子*[1)]、堂脇清志 [1)]

Yasuko Watanabe、 Kiyoshi Dowaki

1)　東京理科大学

*7413111@ed.tus.ac.jp

1.　はじめに

近年の世界人口は増加傾向にあり、2050 年には 95 億人、2100 年には 100 億人を超えると言われている。一方で日本の人口は年々減少しているものの飢餓人口の増加が懸念されている [1)]。また、世界でのフードロスを見た場合、約 13 億トンが毎年廃棄され、これに相当する温室効果ガスの排出量は焼く 30 億トンとされている。

一方で、食に関する様々な情報が錯綜している中、農林水産省や農研機構などで農産物の機能性情報の見える化が注目されている。その背景には、消費者の食に関する環境意識向上と食に関する健康意識の増加があり [2)3)]、また、フードロス削減の効果も期待できる。

そのような背景から、本研究では、環境に対する意識の向上と消費者の健康志向の増加に合わせた食品の低環境商品の普及拡大、食品ニーズの多様化に対応していく必要性に着目し、農産物の新たな複合的環境指標の提案を行う。なお、まずは 1 つの事例として、栽培方法の異なるリーフレタスに着目したおける環境評価、健康成分評価、呈味成分評価の複合的環境指標の提案を行った。

2.　研究方法

本研究における研究概要図を図 1 に示す。

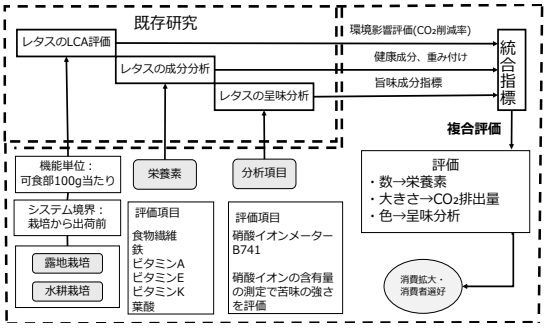


図 1　研究概要図

2.1 環境影響評価

環境影響評価では、自然光併用の植物工場における水耕栽培を行っている農家と露地栽培を行っている農家において収穫されたリーフレタスを評価対象とした。算定方法は、ヒアリングデータに基づく積み上げ法による CO_2 等価量の環境負荷を算定した。評価範囲は、栽培段階から出荷手前までとし、機能単位を出荷直前のリーフレタスの可食部 100g 当りとした(図 2 参照)。なお、別添の SI に CO_2 排出原単位、各農家の詳細情報及びインベントリデータを示す。

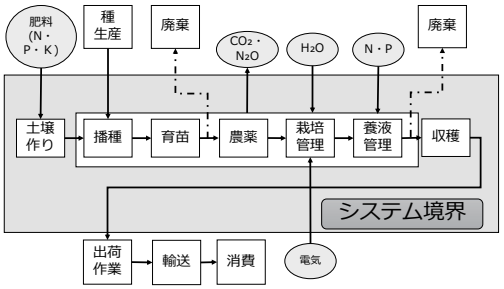


図 2　システム境界

2.2 健康成分分析

次に、健康成分分析では、レタス類の中では差別化が図れる栄養素 6 種(食物繊維、鉄、ビタミン A、ビタミン E、ビタミン K、葉酸)を株式会社デザイナーズ・フーズにて分析し数値化した(SI 参照)。

2.3 消費者選好調査

次に、消費者選好調査では、オンライン上でアンケートを実施し、健康成分分析で用いた 6 種類の栄養素の中でレタスを食べるときに最も気にする栄養素に関する消費者選好調査を行った。この結果を健康成分分析での重みづけ評価に使用した(算出式は SI 参照)。また本研究では、より明確な消費者選好の

ため、20-39 歳、40-59 歳、60 歳以上の 3 区分別での健康成分値を比較した。

2.4 呈味成分分析

呈味分析では、「苦味」や「渋味」に相関がある農産物内の硝酸イオンを測定することで評価した。呈味分析値は、各農家で生産されたリーフレタスを、堀場製作所の硝酸イオンメータにより測定し、算出した(SI 参照)。

3. 結果

3.1 CO_2等価量

図 3 に CO_2等価量の結果を示す。水耕栽培では、栽培段階ごとの肥料や水の投入が多かったことから、露地栽培よりも環境負荷が大きくなっている。露地栽培による栽培管理・追肥の CO_2等価量が大きくなるのは葉面散布による養液製造による環境負荷が大きいためである。

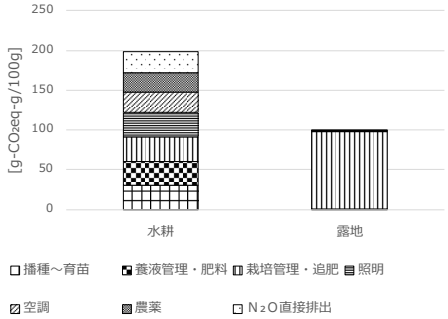


図 3　レタス栽培における CO_2等価量

3.2 健康成分結果

次に、図 4 に健康成分の分析結果を示す。年代別で差が生じるのは、消費者選好の結果から年配の方ほど食物繊維だけでなく、鉄分やビタミン A、E などのも気にしていることが影響している。また、栽培方法別では、水耕栽培のほうが露地栽培に比べ、健康成分値が大きく、特に、食物繊維とビタミン E に大きく差が出た。

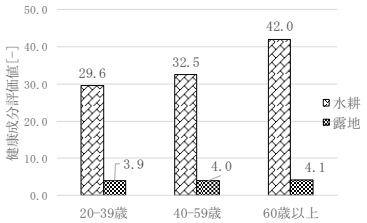


図 4　健康成分結果

3.3 呈味分析結果

最後に、図 5 に呈味成分値の結果を示す。水耕栽培は、露地栽培の約 2.5 倍の硝酸イオンが検出された。これは、水耕栽培の養液濃度のコントロールがうまくいかず養液の硝酸イオンの濃度が濃いまま栽培されており、そのままリーフレタスに蓄積されたと考えられる。

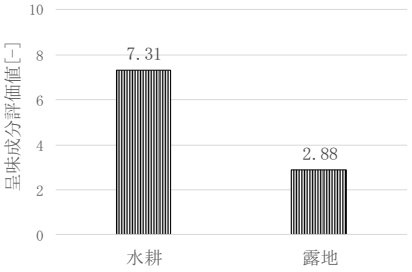


図 5　呈味成分結果

4. まとめ

今回は環境評価、内容成分分析、呈味分析をそれぞれに評価した。露地栽培では、環境負荷が少なく呈味成分においても数値が低いが、健康成分値に関しては水耕栽培の方が数値大きくなった。この結果から、栽培方法別のリーフレタスは差別化が図れると推測される。今後の検討課題として、この差別化を視覚化し、再度消費者選好調査を行い、消費者の反応を調査することとしたい。また、本研究はリーフレタスにおける複合的環境指標の提案を行ったが、今後は他の農産物にも適用できる指標化について、検証を行うこととしたい。

5. 参考文献

1) United Nations:’Department of Economic and Social Affairs Population Division’、入手先＜https://esa.un.org/unpd/wpp/Download/Standard/Population/＞(参照 2016-07-15)

2) 日本政策金融公庫：‘食の志向等に関する調査結果’(2014)、pp.1-6

3) 環境省：’地球環境・国際環境協力　意識調査 2008 年度国民生活モニター調査‘、pp.6-11

Supporting Information

2.1 環境影響評価

表 S1 に各農家の詳細情報、表 S2 に各農家のインベントリデータ、表 S3 に CO_2排出原単位を示す。

表 S1 各農家の詳細情報

	水耕	露地
栽培地	北海道長万部町	佐賀県上峰町
栽培面積	3.192	10
栽培条件	水耕栽培	露地栽培
対象品目	グリーンリーフ	

表 S2 各農家のインベントリデータ

項目	投入物	水耕	露地	単位
播種～育苗	化学肥料(N成分)	1.563	ー	kg/10a
	化学肥料(P成分)	0.334	ー	kg/10a
	化学肥料(K成分)	1.898	ー	kg/10a
	水	626.566	ー	m^3/10a
養液管理・肥料	化学肥料(N成分)	3.125	2.800	kg/10a
	化学肥料(P成分)	0.669	2.800	kg/10a
	化学肥料(K成分)	3.796	2.800	kg/10a
	水	501.253	ー	m^3/10a
	石灰	ー	6.000	kg/10a
栽培管理・追肥	化学肥料(N成分)	7.813	3.000	kg/10a
	化学肥料(P成分)	1.672	1.601	kg/10a
	化学肥料(K成分)	9.489	3.401	kg/10a
	水	1879.699	5572.800	m^3/10a
	有機肥料(N成分)	ー	0.022	kg/10a
	有機肥料(P成分)	ー	ー	kg/10a
	有機肥料(K成分)	ー	ー	kg/10a
	石灰	ー	1.925	kg/10a
空調	灯油	1253.133	ー	L/10a
N_2O直接排出	化学肥料	0.121	0.015	kgN/10a
	作物残渣	0.600	0.002	kgN/10a

表 S3 CO_2排出原単位

項目	投入物	排出量	単位
エネルギー	灯油	2.8	kg-CO_2eq/L
	電力(北海道)	0.683	kg-CO_2eq/kWh
	電力(九州)	0.584	kg-CO_2eq/kWh
肥料製造	化学肥料(N成分)	3.27	kg-CO_2eq/kg
	化学肥料(P成分)	2.44	kg-CO_2eq/kg
	化学肥料(K成分)	0.44	kg-CO_2eq/kg
	有機肥料(N成分)	1.15	kg-$CO_{2eq/kg}$
	有機肥料(P成分)	0.86	kg-$CO_{2eq/kg}$
	有機肥料(K成分)	0.15	kg-$CO_{2eq/kg}$
	石灰石	0.440	kg-CO_2eq/kg
	ドロマイト	0.477	kg-CO_2eq/kg
水道	水	0.36	kg-CO_2eq/m^3
窒素	N_2O直接排出	298	kg-CO_2eq/kg

2.2 健康成分分析

健康成分値の評価は以下の算出式を用いて行った。

2.2.1 価値係数の作り方

$$V_i = \frac{(\frac{R_i}{S_i})}{\sum_i^6(\frac{R_i}{S_i})} \dots (1)$$

V_i…栄養素ごとの価値割合

R_i…栄養素ごとの日本人食事摂取基準

S_i…栄養素ごとの食品標準値

i…栄養素　(1…食物繊維、2…鉄、3…VA、4…VE、5…VK、6…葉酸)

2.2.2 重み付け係数の置き方

$$W_{ij} = \frac{C_{ij}}{V_i} \dots (2)$$

W_{ij}…重み付け係数

C_{ij}…消費者選好調査結果(レタスを食べるとき最も気にする栄養素の消費者選好割合)

j…年代別　(1…20-39 歳、2…40-59 歳、3…60 歳以上)

2.2.3 日本人の食事摂取基準値を考慮した健康成分値

$$LR_{jk} = \sum_i^6 (L_{ik} \times W_{1ij} \div R_i) \dots (3)$$

LR_{jk}…各レタスの年代別健康成分値

L_{ik}…各レタスの栄養素(実測値)

k…栽培方法別のレタス　(1…水耕、2…露地)

式(1)で日本人の食事摂取基準値を用いてレタスの栄養素の価値分析を行い、価値係数を算出した。また、式(2)で消費者選好調査結果を用いて価値係数の算出を行う。ここでは、20–39 歳、40–59 歳、60 歳以上の 3 区分別での健康成分値を算出した。最終的に、式(3)で年齢区分別の健康成分値の算出を行った。

2.3 呈味成分分析

レタス内に含有している硝酸イオン(NO_3^-)の平均値[S1]を使用した。呈味成分値の評価は、平均値で割って評価区分ごとに色で表現した。

0~2	1
2~4	2
4~6	3
6~8	4
8~10	5

図 S1 呈味成分値評価一覧

引用文献

S1) 東京都健康安全研究センター研究年報　第 58 号:’野菜類等の硝酸根、亜硝酸根含有量調査’ pp. 4

2日目
(3/2)

タイムテーブル

2日目　3月2日(木)

<table>
<tr><th></th><th>A会場</th><th>B会場</th><th>C会場</th><th>D会場</th><th>E会場</th></tr>
<tr><td>9:40-10:00</td><td rowspan="4">SDGs</td><td rowspan="4">素材の利用効率</td><td rowspan="4">特別セッション：
ホットスポット分析
(1)</td><td rowspan="4">消費者(1)</td><td rowspan="4">木材</td></tr>
<tr><td>10:00-10:20</td></tr>
<tr><td>10:20-10:40</td></tr>
<tr><td>10:40-11:00</td></tr>
<tr><td>11:00-11:20</td><td colspan="5">休憩</td></tr>
<tr><td>11:20-11:40</td><td rowspan="4">特別セッション：
環境教育(1)
環境配慮行動</td><td rowspan="4">食と一次産業(2)</td><td rowspan="4">特別セッション：
ホットスポット分析
(2)</td><td rowspan="4">消費者(2)</td><td rowspan="4">エネルギーシステム</td></tr>
<tr><td>11:40-12:00</td></tr>
<tr><td>12:00-12:20</td></tr>
<tr><td>12:20-12:40</td></tr>
<tr><td>12:40-13:40</td><td colspan="5">昼休み</td></tr>
<tr><td>13:40-14:00</td><td rowspan="5">特別セッション：
環境教育(2)
学校</td><td rowspan="5">食と一次産業(3)</td><td rowspan="5">LCTの地域への実装</td><td rowspan="5">人間健康</td><td rowspan="5">国際貿易</td></tr>
<tr><td>14:00-14:20</td></tr>
<tr><td>14:20-14:40</td></tr>
<tr><td>14:40-15:00</td></tr>
<tr><td>15:00-15:20</td></tr>
<tr><td>15:20-15:40</td><td colspan="5">休憩</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="5">P会場</td></tr>
<tr><td>15:40-16:40</td><td colspan="5">ポスターセッション1　*コアタイムA:奇数番号</td></tr>
<tr><td>16:40-17:40</td><td colspan="5">ポスターセッション2　*コアタイムB:偶数番号</td></tr>
<tr><td>17:40-18:00</td><td colspan="5">移動</td></tr>
<tr><td>18:00-</td><td colspan="5">交流会(厚生棟1F　厚生センター食堂)</td></tr>
</table>

労働に着目した社会評価データベースの開発

Development of Social Life Cycle Assessment Database Focusing on Labor

○唐戸将大*[1)]、伊坪徳宏 [1)]
Masahiro karato,Norihiro itsubo
1) 東京都市大学
* g1362036@tcu.ac.jp

1. はじめに

2015 年に「持続可能な開発目標（SDGs）」が策定され、17 の目標案と 169 のターゲット案が発表された。SDGs は環境と社会の両側面を対象とするが、LCA は一般に環境側面に注目しており、社会側面についてはソーシャル LCA に関する検討が UNEP/SETAC ライフサイクルイニシアティブにおいてガイドが出されるなどの動きがみられるものの、十分でない。

2. 研究目的

Social Hotspot Database (Norris ら)はソーシャル LCA のなかでインベントリデータとして労働時間を採用している。しかし、労働に関わるインベントリデータは労働時間以外にも非雇用者数や賃金など、他の重要項目もあるものと考えられた。

本研究では、産業連関分析を用いて労働に関する社会評価データベースを開発する。

2011 年の産業連関表 [2)]を用いて、雇用表から雇用者数を、粗付加価値に該当する賃金・俸給部門の投入係数を用いて賃金を、厚生労働省の労働統計要覧を用いて労働時間をそれぞれインベントリデータとし得ることとした。

算出した原単位を用いて最終需要合計、家計消費支出、一般政府消費支出、国内総資本形成を見ることで傾向を考察する。またケーススタディを実施することで本研究成果の妥当性について検証する。

3. 研究方法

3.1 雇用・賃金・労働時間原単位の作成方法

産業連関分析法を用いることで各産業の雇用・賃金・労働時間量だけでなく、サプライチェーンの上流工程における間接の雇用・賃金・労働時間量の推計を行うことが可能となる。

式（1）は産業連関分析に基づくソーシャル LCA 用の原単位 e の算出式である。

$$e=d\times(I-A)^{-1} \quad (1)$$

ただし、d は直接投入係数、I は単位行列、A は投入係数表である。本研究では 2011 年の産業連関表 [2)]の雇用表、産業連関表の粗付加価値部門に該当する賃金・俸給部門、厚生労働省労働統計要覧の産業別月間実労働時間数を使用し推計した。これらを年間生産額で除することで、直接分の雇用者数（人/100 万円）・賃金（円/100 万円）・労働時間（時間/100 万円）を求めた。さらに産業連関表のレオンチェフ逆行列を用いることで間接分の雇用・賃金・労働時間量が求まり、原単位の作成が可能になる。(図 1)

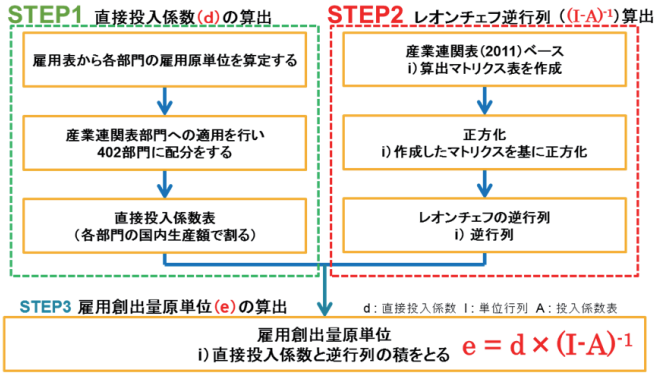


図 1　原単位の作成方法

3.2 乗用車のケーススタディ

産業連関表(2011 年度)を使用して乗用車 1 台のケーススタディを実施した。プロセス、シナリオ、対応部門は以下の表に示す。

表 1 乗用車評価のためのシナリオ一覧

プロセス	シナリオ	対応部門
製造	140万円(IO生産者価格)	乗用車
使用(ガソリン)	走行距離10万km・燃費10km	石油製品
使用(タイヤ)	10万円分使用	タイヤ・チューブ
廃棄	処分費用2万円	廃棄物処理(産業)

4. 結果

本研究の評価結果の中から雇用原単位を図 2 に示す。また乗用車のケーススタディを図 3 に示す。

全体の傾向としては一次産業と三次産業が大きな値となる。三次産業においては、正社員・正職員以外、臨時雇用者が多く働いていることから、数値が大きくなったと考える。一次産業が大きくなる理由としては家族従業者が多いことによって有給役員・雇用者数が少なくなるため 国内生産額が少ないことが理由である。

また原単位を直接と間接に分けて、間接部分が相対的に大きい部門を抽出した。「製粉」（0.22 人/百万円）、「でん粉」（0.20 人/百万円）、「動植物油脂」（0.21 人/百万円）、「飼料」（0.21 人/百万円）など、一次産業の産品を主原料として利用する部門が相対的に大きかっ

た。全体をみると 1 次・2 次産業の数値が高くなっており、3 次産業は間接部分の数値は相対的に低かった。次に乗用車の評価結果について示す。プロセスの割合は雇用、賃金、労働時間ともほぼ同様の形なっており、製造の割合が大きく約 7 割程度を占めた。内訳としては「自動車組立」、「自動車部品」の数値が大きくなっている。自動車の $LCCO_2$ は使用段階が大きいのと対照的である。

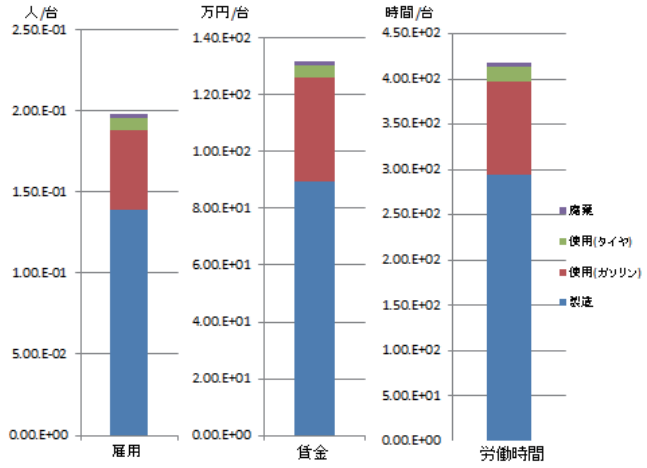


図 3 自動車を対象とした社会影響評価結果

表 2　自動車を対象とした社会インベントリ分析結果

カテゴリ	創出量	単位
雇用	1.98.E-01	人/台
賃金	1.32.E+02	万/台
労働時間	4.18.E+02	時間/台

6. まとめ

本研究では 2011 年産業連関表 [2)]を用いて、雇用、賃金、労働時間の社会評価用原単位データベースを開発した。またこのデータベースを使用した事例研究を通じて、おおよそ妥当な結果を得ることを確認することができた

引用文献

1)　サステナビリティ CSO フォーラム
http://sus-cso.com/aboutsdgs

2)　総務省　産業連関表
http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/index.html

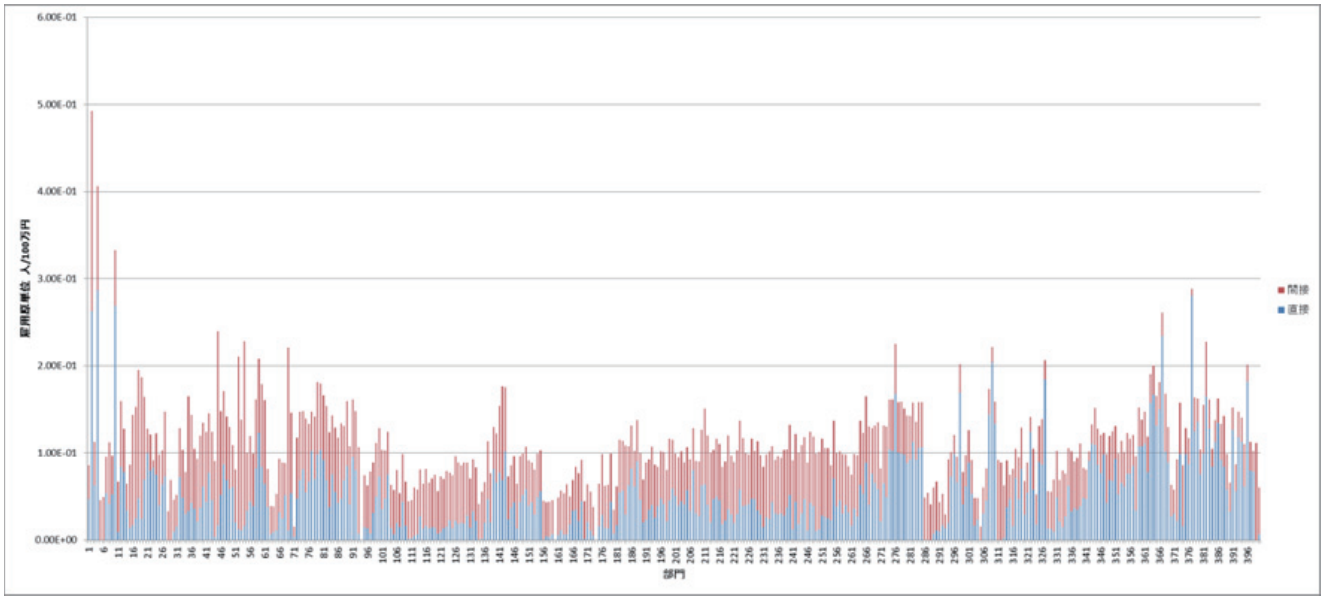


図 2 雇用原単位

SLCA を用いた綿製衣料品の製造過程における労働問題のホットスポット分析

Application of social life cycle assessment to the labor issue of the manufacturing process of cotton clothes

○土屋潔浩*[1)]、井原智彦 [1)]
Kiyohiro Tsuchiya, Tomohiko Ihara
1) 東京大学
* 2044461499tk@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. 研究背景と目的

ソーシャルライフサイクルアセスメント（SLCA）は、国連環境計画（UNEP）が 2009 年にガイドラインを発表した社会的な分野におけるライフサイクル評価手法である。既往研究では複数の社会問題について統合的に評価することを目的とすることが多く、定性的な評価も含まれるため、指標化によって最終的な定量化を行うことが多い [1)]。また、多数の問題を扱うため、専門家による社会問題の順位付けなどを行うことで、社会問題ごとの重み付けを行う提案もされている [2)]。このように指標化と様々な手法を用いた重み付けなどが現在の SLCA 研究の主流であり、SLCA 研究のために作成されたデータベース、Social Hotspots Database（SHDB）も国別・産業分野別の社会問題のリスクの指標化と各問題の重みが等しくなるような重み付けを行っている [3)]。

一方、近年企業の経済活動に社会的な配慮を求める動きが広がっている。企業に対して社会的責任を求める CSR の概念だけでなく、企業の社会的意義を選考基準にして投資を行う社会的インパクト投資や、製品が社会的な配慮のもと生産されたことを示すフェアトレード認証などが徐々に広まりつつある。SLCA のように、製品の社会的なインパクトをライフサイクル的に考えていく手法も、今後より普及していくことが考えられる。

本研究では、コンジョイント分析によって消費者のライフサイクルの各段階における社会問題解決に対する支払い意思額を得た後、それを社会的な重要性をあらわしているものと考え、製品の原料調達・製造段階における社会問題の影響の大きさを表すために用いる。また、一般に出回っているフェアトレード商品の価格と比較することで、手法の妥当性について議論する。

2. 手法

2.1調査目的と調査対象

この研究の目的は、社会問題の解決に対する消費者の支払い意思額を社会問題の重要性を示す数値として捉え、製品の原料調達段階から製造段階にかけて社会に対して及ぼされる影響の大きさを定量的に調査することである。

この研究では、社会問題として製品の原料調達、製造に直接関わるステークホルダーとしての労働者に注目し、社会問題として労働問題のみを扱うことにした。また、調査対象の製品としては、1. 原料生産、製品製造が行われている国が把握しやすく、2. 社会問題解決の試みがされ始めている綿製衣料品（T シャツ、本体綿 100%）とした。

2.2 算出方法

製品の社会的負担の算定は、表 1 のように 3 手順に区分できる。まず、労働問題の解決に対する消費者の支払い意思額の算出を行った。これはアンケート調査をもとに、コンジョイント分析を行うことで、支払い意思額を算出した。この支払い意思額は、消費者が考える労働問題の重要性を示していると考えられる。次に、各国別のリスクを基にした金額の調整を行う。最初のアンケート調査で導かれた問題解決のために支払われる金額を、世界全体における平均的なリスクのもとで考えられているものとし、国ごとのリスクの大きさによって金額を変動させていく。これは綿の生産段階と衣料品の製造段階それぞれの国ごとに行った。最後に、国別の重み付けである。衣料品の製造段階については日本の衣料品輸入相手国の輸入金額別シェアごとに、綿の生産国については各輸入相手国に対する綿の輸出量ごとに重み付けを行った。

表 1　算出方法の手順

手順	目的	方法
1	労働問題の解決のための消費者の支払意思額の算出	アンケート調査 コンジョイント分析
2	各国の労働問題のリスクの大きさごとに消費者の支払意思額を調整	SHDBを用いた各国の労働問題リスクに関するデータ取得
3	原料調達・製造段階の労働問題解決に係る金額の統合	国別の重み付けを行うためのデータ取得

2.3 コンジョイント分析による支払い意思額の調査

消費者が製品の製造段階における労働問題の解決に対していくら支払う意思があるかを調べるため、アンケート調査を行い、コンジョイント分析により支払い意思額を算出した。

アンケート調査においては、表 2 のように 4 水準の属性 1 つと 2 水準の属性 3 つを設定した。アンケートにおいては、労働問題に関わる属性として、「労働問題の有無（製造国）」、「労働問題の有無（綿花生産国）」、「製造国における労働団結権・団体交渉権の保障」の 3 種類を設定した。ここでいう「労働問題」は、強制労働、児童労働、適正賃金、適正な労働時間、安全な労働環境の 5 分野を含んでいる。また、原料調達段階、製品製造段階の二つについても別々のものとして捉えてもらうため、属性も別に設定した。これらの属性によって算出される支払い意思額は、問題ごとに等分される。また、労働団結権・団体交渉権の属性については大規模な工場で労働集約的に生産される製造段階についてのみ設定した。

表 2　アンケート調査の属性・水準

属性	水準			
	水準値1	水準値2	水準値3	水準値4
価格	750	1000	1500	2000
ブランド	大手ファストファッションブランド	気にしない		
労働問題の有無（製造国）	なし	あり		
労働問題の有無（綿花生産国）	なし	あり		
製造国における労働団結権・団体交渉権の保障	なし	あり		

表 1 の 4 属性についてのプロファイルを 20 種類作成し、2017 年 1 月にアンケート調査を実施した。

2.4 リスクを基にした金額調整

各国のリスクについてのデータを得るため、Catherine B.らによって開発された SHDB を用いた [3]。SHDB は国別・産業分野別に様々な課題についてのリスクをまとめている。今回の調査では綿の生産国の産業分野として Plant based fibers、衣料品の製造国の産業分野としては Wearing apparel を採用した。

各リスクについて、具体的な数値が手に入るものについてはその数値を採用し、手に入らないものは最も近いと思われる値を用いながら、労働問題の解決のために支払われる金額を調整していった。

2.5 国別の重み付け

国別に調整された問題解決のために支払われる金額については、最終的に綿生産段階、衣料品製造段階と段階ごとに重み付けが行われる。衣料品の製造段階については日本の衣料品輸入相手国の輸入金額別シェアごとに、綿の生産国については各輸入相手国に対する綿の輸出量ごとに重み付けを行った。各段階での算出イメージは図 1 のようになる。

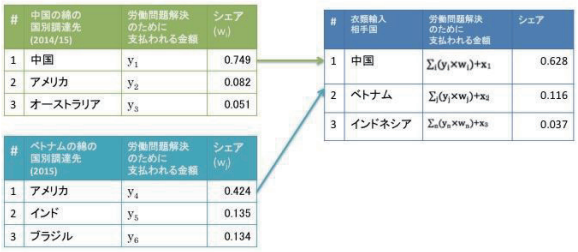


図 1　国別重み付けにおける算出イメージ

3. 結果・まとめ

現在、アンケート調査を実施中であるため、結果は現時点で入手できていない。この調査においては、綿製衣料品の製造段階のみを調査対象としたが、今後は消費・廃棄段階などの対象範囲の拡大や、他の製品に対する適用など、発展する余地があると考えられる。

4. 謝辞

本研究は環境省・環境研究総合推進費・戦略的研究開発領域（課題番号 : S-14-4(3)）、及び科学研究費補助金（課題番号 : 25740052）の支援によって実施された。

引用文献

1) Carlos B., Durval J., Jefferson de O.G.: Procedia CIRP, 29, (2015), pp150-155
2) Yosef M., Jessica L., Anthony H.: Int J Life Cycle Assess, 18 , (2013) , pp 1386-1392
3) Catherine B.N., Deana A.C., Gregory N. : Sustainability, 4, (2012), pp1946-1965
4) Catherine B.N.: “social hotspots database”, The Social Hotspots Database, （オンライン）, 入手先 < http://socialhotspot.org/>, （参照 2017-1-1）

OECD 加盟国内における都市品質と住民の生活満足度の関係

Relationship between the Urban Quality Level and Inhabitants' Life Satisfaction in OECD member countries

○藤田省一郎*[1)]、伊香賀俊治[1)]、村上周三[2)]、川久保俊[3)]、山崎潤也[1)]、鈴木健太郎[1)]
Shoichiro Fujita, Toshiharu Ikaga, Shuzo Murakami, Shun Kawakubo, Junya Yamasaki, Kentaro Suzuki
1) 慶應義塾大学, 2) 建築環境・省エネルギー機構, 3) 法政大学
* shoichiro@ z6.keio.jp

1. はじめに

国際的に都市化が進行し様々な都市開発が実施されているが、OECD では都市施策立案のために「Well-being（住民の暮らしやすさ）」を掲げ、それを測る 11 の大項目と 14 の指標群を「Better Life Index」と定義している。「Better Life Index」では客観指標に加えて、「Life Satisfaction（住民の生活満足度）」という主観指標も選定されている[文1)]。人間の生活満足度を向上させるにはそれを規定する要因を探る必要があるが、人間が住む都市の経済、社会、環境の様々な品質[注1)]は、住民の生活満足度に好影響を与えている可能性がある。そこで、本研究では OECD 加盟国内の TL2 と呼ばれる地域統計分類単位の 391 地域[注2)]を対象に、都市の品質を評価するための統計情報と大規模アンケートによって得られた住民の生活満足度の関係について分析した。分析結果より、住民の生活満足度を向上させる客観指標を把握することを目的とする。

2. 研究方法・結果

2.1 指標データの収集

指標データの収集において、OECD.Stat[文2)]から公開統計情報を参照し OECD 加盟国内 391 地域の各指標データを収集した（図 1）。都市の品質を測る指標群は、国際連合の提唱する Sustainable Development Goals[文3)]や国際標準化機構の定めた ISO371210[文4)]といった国際的な潮流を踏まえ指標を選定している CASBEE-都市（世界版）の都市の品質 Q（Quality）の評価指標群を参照した。本報ではその中から、OECD 加盟国内の地域において比較的広範囲のデータの収集容易性が高く、代表性のある指標を選定した[文5)]。また、住民の生活満足度については Gallup 社[文6)]がアンケート調査として実施し、OECD.Stat において Life Satisfaction として公開されているデータを用いた（表 1）。単純集計の結果、住民の生活満足度の点数分布は概ね正規分布となった（図 2）。

2.2 相関分析結果

収集した都市の品質を測る指標データと住民の生活満足度について相関分析を実施した（表 2, 図 S.1）。表 2 の相関係数の大きさに着目すると、「失業率」「GDP に対する研究開発費の割合」といった雇用や仕事に関わる経済指標と一定の相関があることがわかる。一方、「微粒子状物質（PM2.5）の年間平均濃度」という空気質に関する環境指標とは負の相関があり、絶対値は全指標中最も大きい。また、弱い有意な相関も含めると[注3)]、「人口 1 人当たりの家計所得」や「平均所得の 50%以下の人口の割合」、「総エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの割合」に関する経済面だけでなく、「後期中等教育を修了した人口の割合」、「インタ

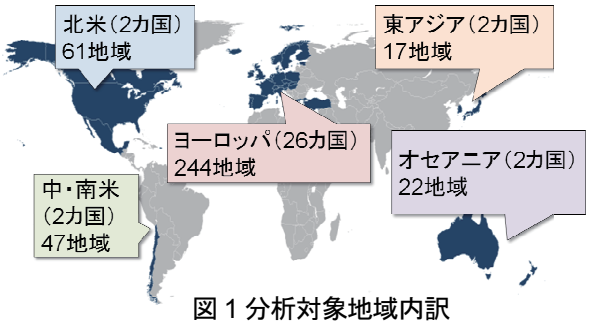


図 1 分析対象地域内訳

表 1 生活満足度アンケート調査概要[文7)]

調査方法	11 件法 インタビュー、電話調査
対象人数	各国約 1,000 人～4,000 人
質問項目（和文）	自分の考えうる最悪な生活を 0、最高な生活を 10 とすると現在自分の生活はどのぐらいであるか
質問項目（英文）	Imagine an eleven-rung ladder where the bottom (0) represents the worst possible life for you and the top (10) represents the best possible life for you. On which step of the ladder do you feel you personally stand at the present time?

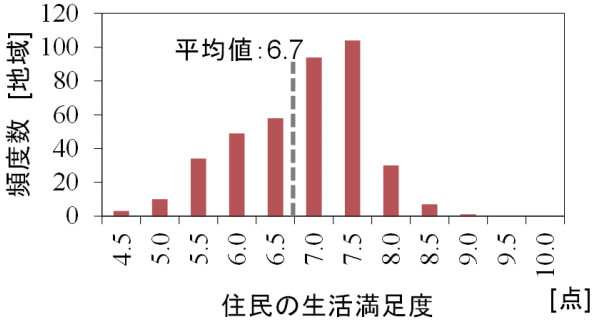


図 2 生活満足度の点数分布

表 2 都市の品質と住民の生活満足度の相関分析結果 **:p<0.01, *:p<0.05

分類	都市の品質を測る指標名	相関係数 R
環境	Q1.1 微粒子状物質（PM2.5）の年間平均濃度[μg/m3]	-0.496**
	Q1.2 緑地エリアの割合[%]	0.304**
社会	Q2.10 人口 10 万人当たりの殺人事件者数[人]	-0.047
	Q2.27 5 歳未満児死亡率[‰]	-0.003
	Q2.40 平均寿命[年]	0.021
	Q2.42 人口 10 万人当たりの医師数[人]	0.166**
	Q2.53 後期中等教育を修了した人口の割合[%]	0.201**
	Q2.100 インターネットを利用する人口の割合[%]	0.381**
経済	Q3.18 総エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの割合[%]	0.237**
	Q3.20 人口 1 人当たりの GDP（PPP）[$/人]	0.083
	Q3.24 失業率[%]	-0.431**
	Q3.28 人口一人当たりの家計所得	0.315**
	Q3.29 平均所得の 50%以下の人口の割合[%]	-0.313**
	Q3.30 GDP に対する研究開発費の割合[%]	0.447**

ーネットを利用する人口の割合」といった社会面や「緑地エリアの割合」といった環境面の品質についても生活満足度と関わりを持つ。このことから、経済先進国である OECD 加盟国内においては、住民の生活満足度が経済・社会・環境の様々な都市の品質を測る指標と有意な相関関係にあることが確認でき、これらの指標値を包括的に向上させる必要があると考えられる。表 S.1 を見ると都市の品質を図る指標同士においても互いに相関関係を多く持つことがわかる。このことから、どれか 1 つの指標値の向上により副次的に他の指標値が向上して生活満足度を相乗効果的に向上させる可能性がある。そのため、今後回帰分析等を実施することで、その相乗効果の連鎖の要因となる都市の品質を解明することが当面の課題である。

3. まとめ

OECD 加盟国内の TL2 という地域区分の 391 地域を対象として都市の品質と住民の生活満足度との関係を相関分析の結果から把握した。その結果、経済だけでなく社会や環境の様々な指標と相関があり、特に空気質について最も相関があることがわかった。

謝辞

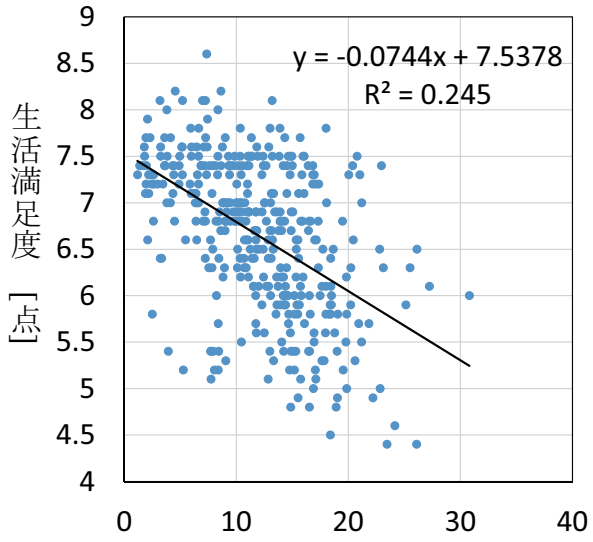
本研究は一般社団法人日本サステナブル建築協会の下に設置された「CASBEE 都市（世界版）検討小委員会」（委員長：村上周三）並びに同委員会作業部会のメンバーの皆さまの多大なるご助言によって実現した。ここに記して深甚の謝意を表す。

注釈

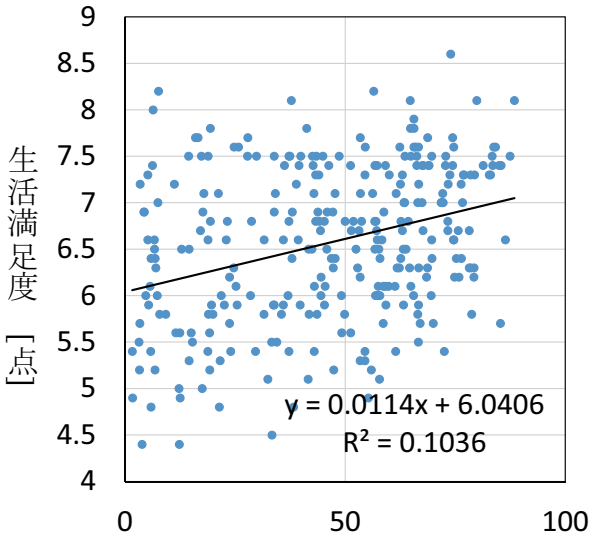
1) 「都市品質」並びに「都市の品質」とは都市環境性能を評価する際の、「都市の質的側面」や「都市内部の活動度」を表す。2) 都市の各指標値を参照する際、TL（Territorial Level）という地域統計分類単位における TL2 というスケールの地域区分を「地域」として用いた。3) 相関係数の大きさから、0.2 以上 0.4 未満を「弱い相関がある」、0.4 以上を「相関がある」とした。表 2 の相関係数の欄を、「弱い相関関係」の係数の場合は薄い橙色で、「相関がある」係数の場合は濃い橙色で色付けした。

引用文献

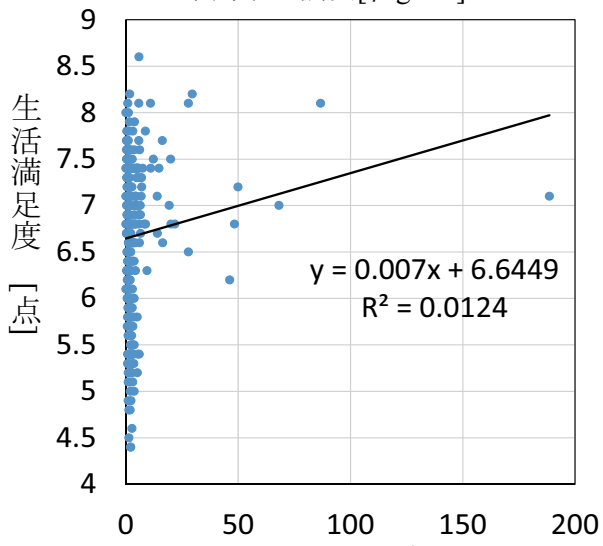
1)OECD:“How’s Life in Your Region? Measuring Regional and Local Well-being for Policy Making”, (2014),入手先<http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Manage-ment/oecd/urban-rural-and-regional-development/how-s-life-in-your-region_9789264217416-en#.WE8K6LKLRpg>,（2015-10-26）2)OECD. Stat : “Regions and Cities”, 入手先<http://stats.oecd.org/>（2016-10-24）3)国際連合広報センター : “2030 アジェンダ”(2016), 入手先< http://www.unic.or.jp/activities/economic_social_developmdev/sustainable_development/2030agenda/>(2016-12-25) 4)ISO : ” Sustainable development of communities – Indicators for city services and quality of life”,<http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=62436＞,（参照 2016-12-15）5)一般財団法人建築環境・省エネルギー機構: “CASBEE for Cities - Pilot version for worldwide use (2015)”, p.p.12-15 6) Gallup World Poll: “What the Whole World Is Thinking”, 入手先<http://www.gallup.com/services/170945/world-poll.aspx>（2015-10-26）7) OECD : “Society at a Glance 2016 OECD Social Indicators”, 入手先< http://www.keepeek.com/Digital -Asset-Management/oecd/social-issues-migration-health/society-at-a-glance-2016_9789264261488-en#.WE8OB7KLRpg#page128>（2016-10-24）



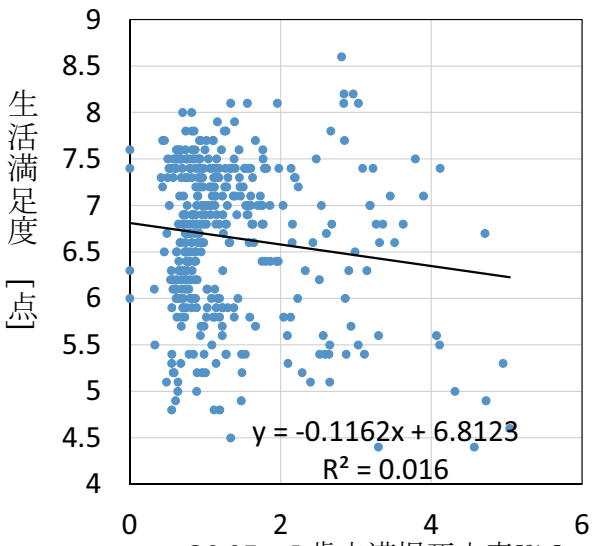
Q1.1 微粒子状物質（PM2.5）の年間平均濃度[μg/m3]



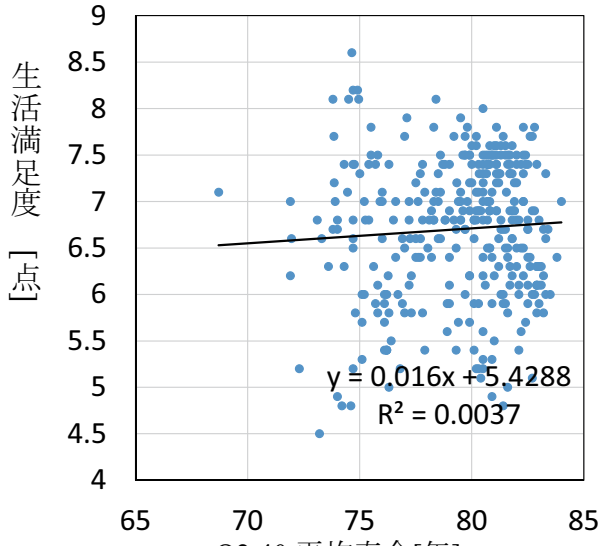
Q1.2 緑地エリアの割合[%]



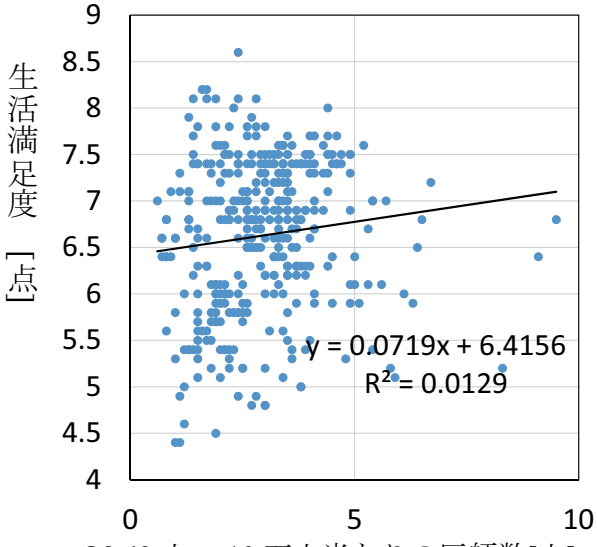
Q2.10 人口 10 万人当たりの殺人事件者数[人]



Q2.27 5 歳未満児死亡率[‰]

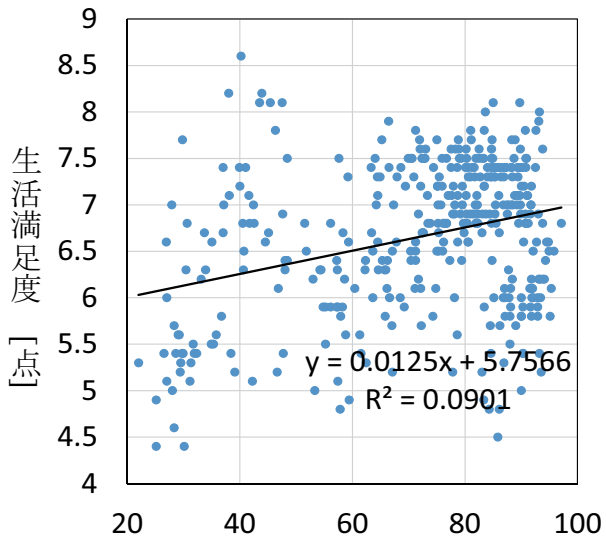


Q2.40 平均寿命[年]

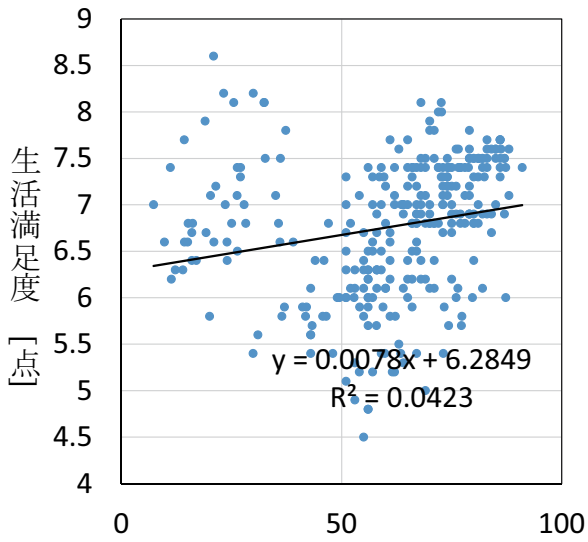


Q2.42 人口 10 万人当たりの医師数[人]

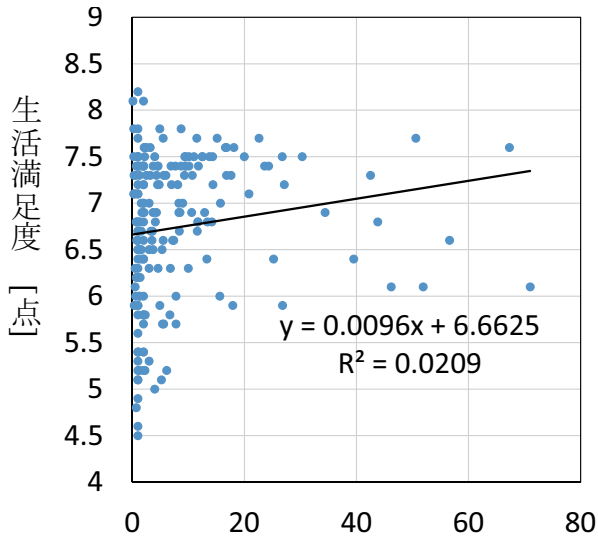
図 S.1 生活満足度と各指標の相関分布一覧



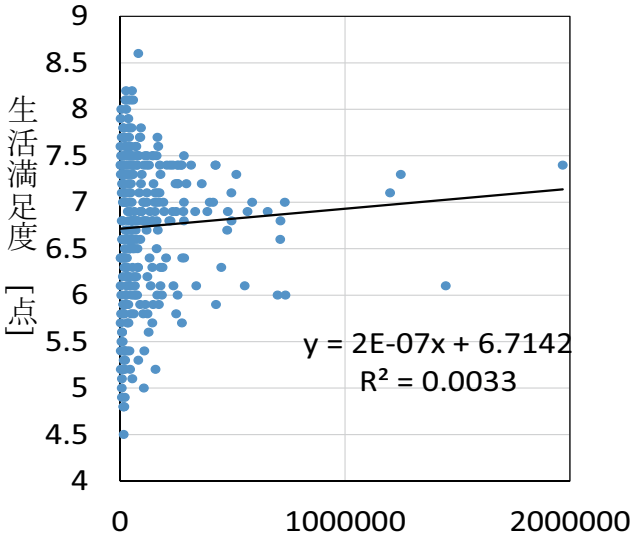
Q2.53 後期中等教育を修了した人口の割合[%]



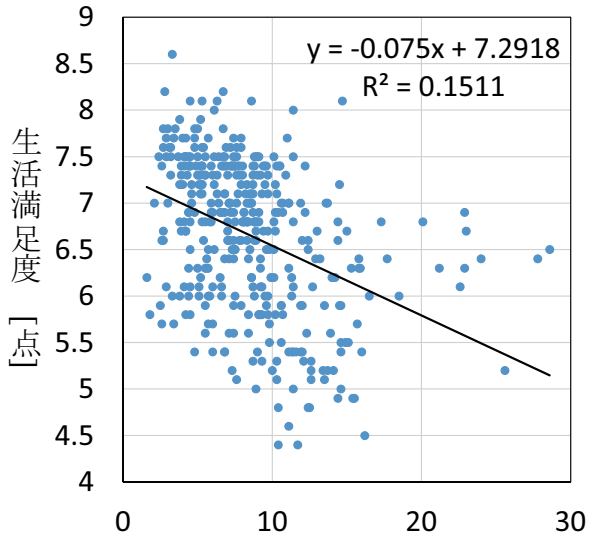
Q2.100 インターネットを利用する人口の割合[%]



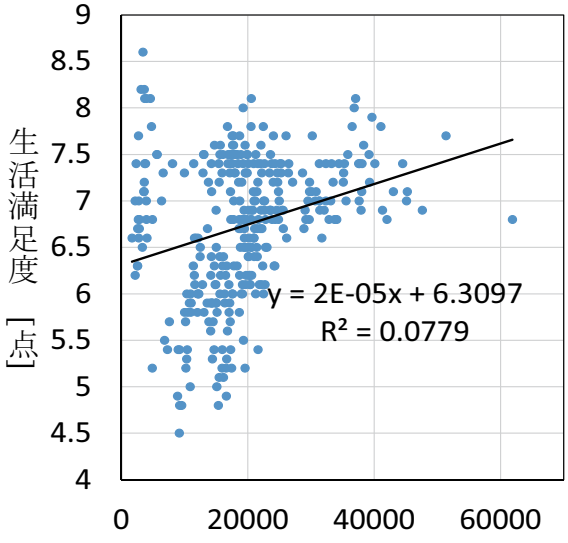
Q3.10 総エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの割合[%]



Q3.20 人口 1 人当たりの GDP（PPP）[$/人]

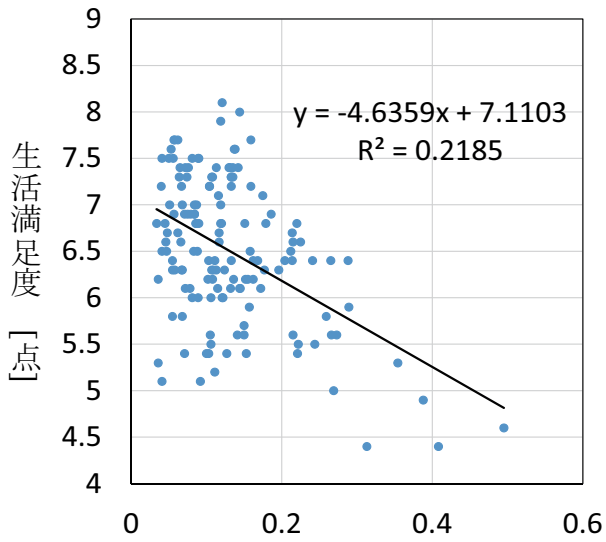


Q3.24 失業率[%]

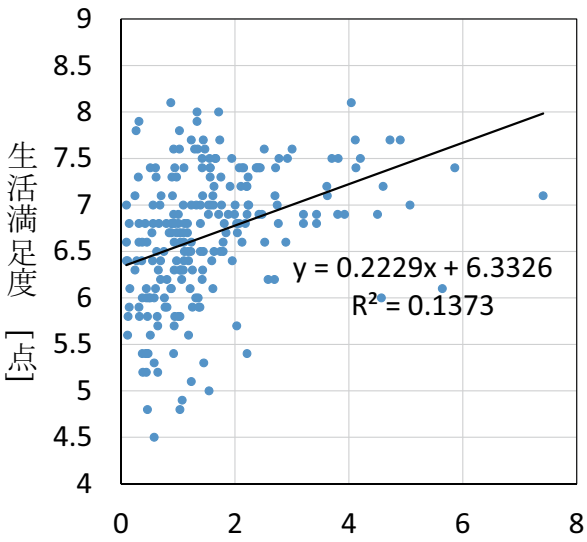


Q3.28 人口 1 人当たりの家計所得(PPP)[$/人]

図 S.1　生活満足度と各指標の相関分布一覧



Q3.29 平均所得の 50%以下の人口の割合[%]



Q3.30 GDP に対する研究開発費の割合[%]

図 S.1　生活満足度と各指標の相関分布一覧

表 S.1　各指標間の相関分析結果一覧

	Q1.1	Q1.2	Q2.10	Q2.27	Q2.40	Q2.42	Q2.53	Q2.100	Q3.18	Q3.20	Q3.24	Q3.28	Q3.29	Q3.30
Q1.1	1.00	-0.30**	0.00	-0.03	0.09	-0.04	-0.00	-0.04	-0.07	0.16**	0.05	-0.22**	-0.13	-0.11
Q1.2		1.00	-0.12*	-0.26**	0.14*	0.19**	0.13*	0.05	0.23**	-0.02	-0.18**	0.14*	-0.17	0.25**
Q2.10			1.00	0.71**	-0.72**	-0.52**	-0.04	-0.36**	-0.31**	0.06	0.06	-0.15**	0.27**	-0.02
Q2.27				1.00	-0.70**	-0.59**	-0.19**	-0.45**	-0.32**	-0.03	0.02	-0.12*	0.40**	-0.21**
Q2.40					1.00	0.53**	-0.09	0.47**	0.46**	0.22**	-0.06	0.37**	-0.03	0.32**
Q2.42						1.00	0.24**	0.42**	0.32**	0.13*	0.12*	0.40**	-0.31**	0.41**
Q2.53							1.00	0.34**	0.18*	0.32**	0.03	0.40**	-0.37**	0.16*
Q2.100								1.00	0.47**	0.31**	-0.13*	0.51**	-0.40**	0.65**
Q3.18									1.00	0.58**	-0.18**	0.42**	-0.06	0.60**
Q3.20										1.00	0.00	0.51**	-0.13	0.58**
Q3.24											1.00	-0.03	0.45**	-0.19**
Q3.28												1.00	-0.26**	0.52**
Q3.29													1.00	-0.41**
Q3.30														1.000

持続可能な開発目標の理念に基づく新興国を対象とした都市品質格差の時系列評価

A Time-Series Assessment of Regional Disparity on Urban Quality in Developing Country based on SDGs

○邉見隼人*[1)]、伊香賀俊治[1)]、村上周三[2)]、川久保俊[3)]、山崎潤也[1)]、藤田省一郎[1)]

Hayato Hemmi, Toshiharu Ikaga, Shuzo Murakami, Shun Kawakubo, Junya Yamasaki, Shoichiro Fujita

1）慶應義塾大学, 2）建築環境・省エネルギー機構, 3）法政大学

* h-hemmi.e2mi48@keio.jp

1. 背景・目的

新興国を中心として急速な国家発展と都市化が進行している[文 1)]。それに伴い人口と資本が都市へ集中することで、同一国内の諸地域において医療施設や所得[文 2)]の地域格差が生じている。資本の一極集中による重点開発が一時的な地域格差を生じさせることは国家戦略上起こり得る現象であるが、しかし国家の成熟と共に諸地域の格差は解消されることが理想的な発展である。このような国家の発展推移を考察した事例は数多く報告されているが、環境・社会・経済の総合的な都市品質の格差に着目した評価事例は少ない。

そこで、本研究では環境性能評価ツール CASBEE-都市（世界版 Pilot ver）[文 3)]を用いて、新興国を対象に都市品質格差の時系列推移を把握した[注 1]。これより、世界の新興国が今後発展を辿る上で適切な計画を考案する際の基礎資料となることを目的とする。

2. 研究方法

2.1 対象国家

本研究では新興国の一例としてマレーシアを分析対象とした。マレーシアは急速な人口増加と都市発展を遂げている一方で所得格差が減少傾向にあり[文 2)]、国家全体として発展に伴う地域格差に適切に対処している可能性がある。これより新興国が発展する上でのモデルケースと成り得ることが期待できる。

2.2 評価手法の概要

CASBEE-都市（世界版 Pilot ver）とは公開統計情報を用いて都市の品質 Q（以下 Q）と環境負荷 L の両面から都市の持続可能性を評価する手法である（本研究で分析に使用した評価指標の一覧は表 S1 を参照）。Q の評価はトリプルボトムラインの観点に立脚し、環境・社会・経済（以下 Q1、Q2、Q3）の項目から構成される。また Q の評価指標は、国際連合にて加盟国が採択した持続可能な開発目標（SDGs: Sustainable Development Goals）[文 4)]の指標群を主に参照して決定している。SDGs は「誰一人取り残されない」包摂性を理念としているため、同ツールを利用することは本研究の趣旨に合致するものと捉え、Q の評価に着目した結果を報告する。

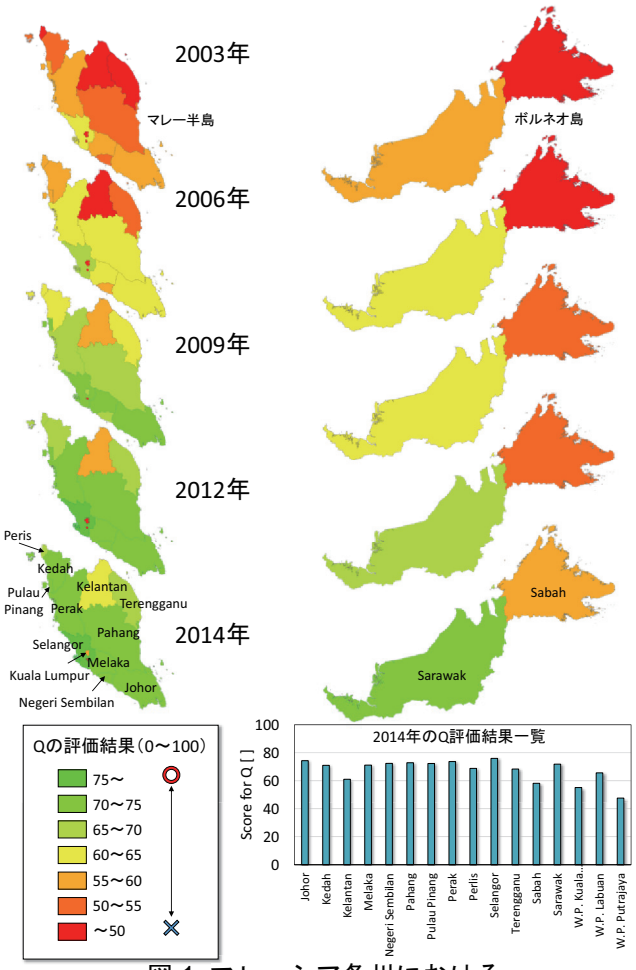


図 1 マレーシア各州における都市の品質 Q の時系列評価

3. 時系列評価の結果

マレーシア統計局[文 5)]より指標データを収集し、データ収集の容易性に基づいて 2003 年から 2014 年の間（5 時点）でマレーシア各州（13 州と 2 直轄領）を対象とした Q の評価を実施した[注 2,3]。Q は 2003 年から 2014 年にかけて評価結果が大きく向上し、マレー半島がボルネオ島に先んじて評価結果が向上している点は、マレー半島の開発が先行しているという既往の知見[文 6)]と合致する（図 1）。

4. 都市品質格差の評価

マレーシア各州の間にある Q の格差を把握するため、前節の評価結果から年次別に箱ひげ図を作成した

（図 2～図 5）。本研究では第 1 四分位数（25%）から第 3 四分位数（75%）の範囲が小さいほど格差が小さいと仮定し解釈を実施した。

Q は 2003 年と 2012 年を比較すると格差が縮小傾向にあることが示唆される。都市の総合的な品質の観点においてマレーシアは地域格差に対して適切に対処を進めていることが示唆された。

Q1（環境）では格差の縮小、拡大は見られなかった。Q2.71、Q2.72 の指標値が 2003 年時点で高いことから水道インフラは既に整備が進んでいたこと、また Q1.2 の値が変化しないことから森林を切り出す都市開発を進めていないことが関連していると考えられる。

Q2（社会）では評価結果の向上傾向は確認できるものの、格差についてはばらつきがある結果となった[注4]。医療・教育施設の整備は推進されている[文7)]一方、州間でその進度に差が生じている可能性がある。

Q3（経済）の評価結果も向上傾向にある。2003 年と比較して 2012 年、2014 年は格差の縮小が確認できた。マレーシア政府は貧困率の削減や家計所得の増加など政策的な目標[文7)]を明確化しており、取り組みの成果が示された可能性がある。

5. まとめ

本報では持続可能な開発目標（SDGs）に対応する評価指標を用いてマレーシアを対象に都市品質格差の時系列評価を実施した。その結果、Q（全体）、Q2、Q3 において評価の向上傾向にあることと Q、Q3 において格差が縮小傾向にあることが示された。

6. 謝辞

本研究は一般社団法人日本サステナブル建築協会の下に設置された「CASBEE 都市（世界版）検討小委員会」（委員長：村上周三）並びに同委員会作業部会のメンバーの皆さまの多大なるご助言によって実現した。ここに記して深甚の謝意を表す。

注釈

注 1　「都市品質」並びに「都市の品質」とは都市環境性能を評価する際の、「都市の質的側面」や「都市内部の活動度」を表す。注 2　一部の年次において前後 1 年のデータを使用。一部の人口データは線形近似によってデータを補間。注 3　都市環境評価手法を用いてマレーシア各州の評価を実施した。注 4　2006 年のみデータ不足により正当な評価が実施できなかった。

引用文献

1）国際連合：” World Urbanization Prospects”,入手先< http://esa.un.org/unpd/wup/DataQuery/.＞,(参照 2016-12-13)　2）酒巻哲朗：”東アジア諸国における地域格差と国土政策”, (2006), pp.84-122　3)”CASBEE for Cities - Pilot version for worldwide use (2015)” 一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構,入手先<http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/index.htm>,(参照 2016-12-21)　4）国際連合：”Sustainable Development Goals”, 入手先< http://www.un.org/sustainabledevelopment/>　5)マレーシア統計局：”Department of Statistics Malaysia”, 入手先<https://www.statistics.gov.my/ >, （参照 2016-12-15）6) 小長谷一之：”マレーシアの地域格差構造と地域開発”, 大阪市大『季刊経済研究』,Vol.19, No.4, March1997, pp1-8　7) EPU：”Ninth Malaysia Plan”, 入手先<http://www.epu.gov.my/en>, （参照 2016-12-21）

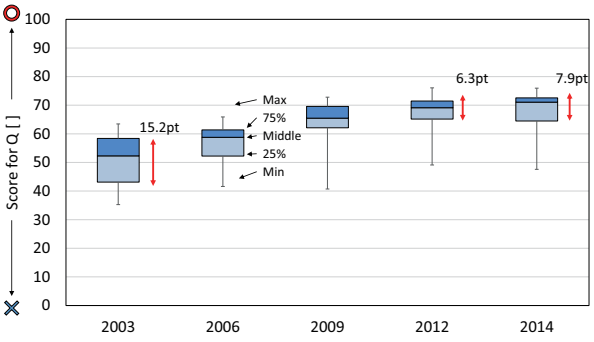


図 2 Q（全体）の格差

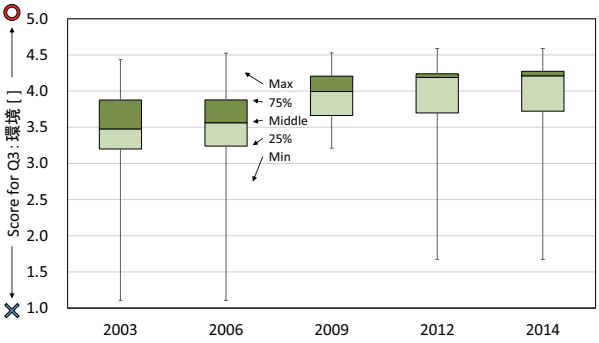


図 3 Q1（環境）の格差

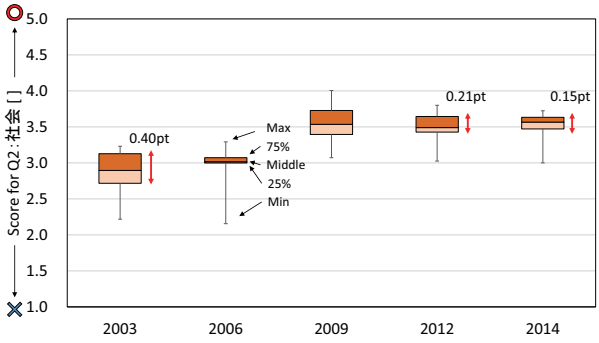


図 4 Q2（社会）の格差

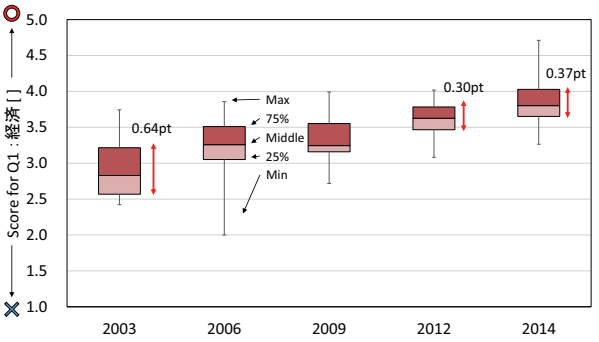


図 5 Q3（経済）の格差

Supporting Information

表 S1　評価指標の一覧

都市の品質 Q	Q1：環境	
	Q1.2	緑地エリアの割合
	Q2.71	安全に管理された飲料水サービスを利用できる人口の割合
	Q2.72	安全に管理された衛生サービスを利用できる人口の割合
	Q2：社会	
	Q2.27	5 歳未満児死亡率
	Q2.40	平均寿命
	Q2.48	初等教育前に組織学習を 1 年間受ける児童の割合
	Q2.56	後期中等教育を修了した人口の割合
	Q2.94	電気を利用できる人口の割合※1
	Q2.100	インターネットを利用する人口の割合
	Q3.34	収集可能な指標の数
	Q3：経済	
	Q3.3	国際貧困ライン以下の人口の割合
	Q3.20	1 人当たりの GDP（購買力平価）※2
	Q3.24	都市の失業率
	Q3.29	1 人あたりの家計所得（購買力平価）※3

マレーシア統計局：Department of Statistics Malaysia，入手先<https://www.statistics.gov.my/ >,（参照 2016-12-15）
MysIDC：Malaysia Informative Data Center，入手先<http://mysidc.statistics.gov.my/index.php?lang=en >,（参照 2016-12-15）より指標参照。

※1　「1 年間のうち電力切断を受けた消費者の割合」をデータの都合上「電気を利用できる人口割合」へ読み替えた。
※2　「1 人当たり GNP」を国際的に比較が容易である「1 人当たり GDP」へ読み替えた。
※3　「平均所得 50%以下で生活する人口割合」をデータ収集の都合上「1 人当たりの家計所得」へ読み替えた。

素材のための新しい LCA の枠組み構築

Development of a new LCA framework for materials

○醍醐市朗*[1)]、中島謙一 [2)] 、山末英嗣 [3)] 、松八重一代 [4)] 、畑山博樹 [5)] 、小林能直 [6)]
Ichiro Daigo, Kenichi Nakajima, Eiji Yamasue, Kazuyo Matsubae, Hiroki Hatayama, Yoshinao Kobayashi
1) 東京大学, 2) 国立環境研究所, 3) 立命館大学, 4) 東北大学, 5) 産業技術総合研究所, 6) 東京工業大学
* daigo@material.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

国際標準となっている LCA（Life Cycle Assessment）は、*製品に伴った環境側面と潜在的な環境影響を評価する 1 つの技法* [1)]と定義されているように、製品評価の手法である。序文 [1)]で、*LCA は，幾つかある環境マネジメントの技法のうちの一つであり，あらゆる状況下で最適の技法として利用できるものではない* [2)] とも明記されているように、素材間比較のために、従来の LCA 手法を適用するには、いくつかの問題点があると考えられる。問題点の 1 つは、比較主張に関する課題である。ISO[2)]において最終製品の比較主張に対し慎重さを求めているのと同様に、異なる素材を比較する際には、調査範囲ならびにシステム境界を慎重に設定し、詳細に評価しなければならないと考えられる。本研究では、その課題を明確にし、素材間比較が可能となる新しい LCA の枠組みの可能性を検討した。

2. 素材を比較する際の課題

LCA 実施者が、製品のライフサイクル（LC, life cycle）を通じた全てのプロセスを主体的に管理している場合は、それらのプロセスにおけるフォアグラウンドデータを用いて評価できる。しかし、このようなケースは稀であり [2)]、最近、日本において報告されている LCA 研究 [3)]では、構成素材量、調達原材料量や搬入資材量に対して IDEA や建物の LCA 指針に登載のインベントリデータなどをバックグラウンドデータとして用いている（図 1）。素材のインベントリデータは、製品 LCA における利便性のために整備されており、異なる素材で構成される製品間での比較を目的としていない LCA であれば、特に問題になることはない。しかしながら、素材構成が異なる同じ機能単位の製品を比較し、その構成素材による環境負荷誘発量等の違いを評価することを目的とする場合、インベントリデータは比較のために準備されたものではなく、素材の使途としての最終製品が同じであっても、その目的に合致した使い方とは言えない。Santero& Hendry[4)]は、金属の高いリサイクル可能性から、リサイクル時の配分問題について考慮すべきとした。同論文 [4)]では、先述の ISO による比較主張の原則に基づき、素材の比較主張において以下の 2 点が重要な考慮事項であるとしている。

- 機能的に等価なシステム間で比較すること
- 関与する全ての LC 段階からの影響（の特性評価）を比較すること

このように、素材の違いによる環境負荷誘発量等の差異を評価することを目的とするのに適した LCA には、従来の LCA とは異なる枠組みが必要である。

3. リサイクルの扱い方に関する課題

アルミニウムを例にとると、天然資源として存在している酸化物を還元プロセスにより金属状態（一次地金）とすることで、アルミニウム素材として使用できる。一方で、二次地金は、スクラップを溶解することで製造される。多くの金属素材において還元プロセスを伴う一次資源からの製造プロセスによって誘発される環境負荷が、溶解からなる二次資源からのそれに比べ大きい。使用する素材の違いだけに着目して製品 LCA の結果を比較する場合、特に使用済み製品からの素材回収の可能性が高い製品であればあるほど、その素材のインベントリデータとして、リサイクル効果を考慮しないものを用いた評価では、評価結果と、社会全体としての環境負荷量の大小が必ずしも一致しないことが考えられる。金属素材のような開ループリサイクルでは、製品の LC からすれば、スクラップ市場はシステム境界の外にあるブラックボックスのように見え、回収されるスクラップと原料とするスクラップは別のものとして扱われる（図 1）。評価では、スクラップ市場で素材のフローが断絶するが、実際には、回収されたスクラップが、市場を通して二次地金の原料になっている。ブラックボックスとされているのは、開ループリサイクルを明確に表現するデータや手法が不足しているからであると考えられる。

対象とする素材の機能が、スクラップであっても二次素材であっても同等であると言える場合、開ループリサイクルを閉ループリサイクルとして扱うことで、

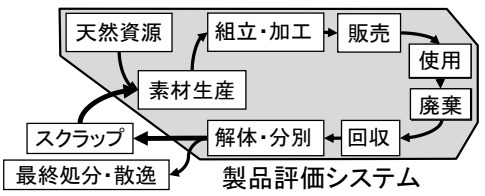


図 1　製品 LCA の評価システムにおける開ループリサイクルされるスクラップの位置づけ

問題は回避できる [5]。異なる素材を用いたエンジンブロックの製品システムの LC における温室効果ガス誘発量を比較した既存研究 [6]においても、再生原料の利用率は外生的に設定し、閉ループリサイクルとして扱った。また、最近の鉄鋼材を対象に、開ループリサイクルを考慮したインベントリデータを提供する手法も、鉄リサイクル全体を閉ループリサイクルとして取扱う方法である [7]。

一方で、アルミニウム二次地金が合金元素濃度を理由に主にダイキャストの原料となり展伸材の原料になることが困難であるように、素材の機能が同等と言えない場合もある。このような閉ループとして扱えないリサイクルに対して、システム境界一致の原則に則ったシステム拡張により、リサイクル効果を配分問題に帰着できるとした研究 [8] が示すように、開ループリサイクルの多機能配分として、物理量基準 [9] や貨幣価値基準 [10] により配分する方法が考えられる。

しかしながら、開ループか閉ループかを議論する際に必要な機能の同等性について、今まで素材の機能を明確に決定し、その同等性を論じうる方法は提案されていない。例えば、構造用金属素材では、その内部組織により機能（強度）は大きく異なり、化学組成だけで機能が表現されるものではない。

開／閉ループの違いの他にも、リサイクルに関連して、LC の製造時の再生資源利用率と LC の廃棄物処理時の使用済み回収率の扱い方も LC を通した環境負荷に大きく影響を与える項目 [11] である。EN 15804[12] では、使用済みからの回収分を回避される負荷に基づいたクレジットとして評価に含める方法を採用している。しかし、実際の使用済み回収率の定量が困難であること [13] から、定量化手法において課題が大きい。

4. 素材 LC を評価システムとした枠組み

ここまでは、素材の比較を、従来の製品 LCA の枠組みにおいて実施することが主に議論されてきた。本来、素材を評価対象とするならば、製品 LC ではなく、複数回の製品 LC を含む素材の LC を通した評価とすべきであろう。ただし、素材によってはその LC は数十年以上になり [14]、その時間的広がりの扱いは課題であろう。また、多くの金属素材は、純金属でなく合金であるため、母金属が同じ素材は同一システムに含めるべきか（炭素鋼とステンレス鋼と鋳鉄や、純銅と黄銅と青銅）、各種素材に共通の考え方が必要であろう。

Santero& Hendry[4]が指摘する 2 つの事項に関して、「機能的に等価なシステム」について、一部は先のリサイクルに関する議論でも論じたが、その他に素材の生産プロセスにおける併産物の扱いならびに配分の問題が課題として挙げられる。もう 1 つの「関与する全ての LC 段階からの影響の特性化」については、製品の要求ではなく、素材の供給に基づいた機能を設定すると、それらが複数回利用される製品において、異なる効用を発揮することになる。そのため、それら素材の製品部材としての使用時の環境負荷を、バックグラウンドデータとして整備する必要があろう。これは、製品 LCA における素材のインベントリと反対で、素材 LCA における製品のインベントリと言えよう。これにより、素材の評価のための LCA として、図 2 に示すような評価の枠組みが構築されると考えている。

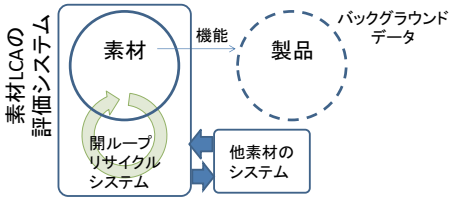


図２　素材を評価対象とした LCA の枠組み

5. おわりに

素材間での比較を目的とする LCA の枠組みを構築するためには、以下のような課題が抽出された。

a. 素材の機能を示す機能単位の設定
b. 開ループリサイクルを含めたマテリアルライフサイクル全体の評価システム（同一素材の定義）
c. 素材生産時の併産物等の扱い方
d. 製品としての使用時のバックグラウンドデータ

引用文献

1) JIS Q 14044: 2010 (ISO 14044: 2006)
2) 中野勝行, 杉本琢磨, 田原聖隆: *日本 LCA 学会誌*, **10** (2014) 165.
3) 例えば、高村秀紀, 浅野良晴, 生駒翔也: *日本 LCA 学会誌*, **10** (2014) 287.
4) N. Santero, J. Hendry: *Int. J. LCA* **21** (2016) 1543.
5) G. Liu, D.B. Mueller: *J. Clean. Prod.* **35** (2012) 108.
6) A.Tharumarajah, P.Koltun:*J.Clean.Prod.* **15** (2007) 1007.
7) ISO/TC17: ISO/WD 20915 Life cycle inventory calculation methodology for steel products, under development.
8) 中島謙一, 井野博満, 原田幸明: *日本金属学会誌* **66** (2002) 701.
9) T. Ekvall, G. Finnveden: *J. Clean. Prod.* **9** (2001) 197.
10) F. Werner, K Richter: *Int. J. LCA*. **5** (2000) 79.
11) A. Dubeuil, S.B. Young, J. Atherton, T.P. Gloria: *Int. J. LCA*. **15** (2010) 621.
12) CEN: European Standard EN 15804:2012+A1:2013: sustainability of construction works - environmental product declarations - core rules for the product category of construction products (2013)
13) I. Daigo, K. Iwata, I. Ohkata, Y. Goto: *Environ. Sci. Technol.* **49** (2015) 8691.
14) 醍醐市朗, 松野泰也, 石原慶一, 足立芳寛: 鉄と鋼 **91** (2005) 159.

金属材料の耐腐食性機能の定量評価手法の構築

Quantitative evaluation method for corrosion resistance functions of metals

○吾妻優美*[1)]、醍醐市朗[1)]、後藤芳一[1)]
Yumi Azuma, Ichiro Daigo, Yoshikazu Goto
1) 東京大学
*aduma@mfa.t.u-tokyo.ac.jp

1.　はじめに

持続可能な開発を目指すためには、より効率的に資源を利用することで、資源生産性を高める必要がある。しかし、従来の貨幣価値による資源生産性の評価は、資源生産性を総合的に表す一方で、評価の時期や地域、需給状況により異なる結果となる。さらに、資源生産性の向上には、様々な技術開発の革新的な進歩が欠かせないと考えられるが、総合的な指標では、それらの要素と資源生産性の関係は把握できない。要素の一つとして、マテリアル工学における材料機能の向上が挙げられる。そこで、材料を評価対象とし、材料機能の向上が資源生産性指標に反映される指標として、材料の各機能を定量的に評価したものを資源投入量で除した指標が必要と考えられる。とりわけ金属材料の腐食は、1997 年に行われた腐食コスト調査によると、日本における年間腐食コストが GNP 比にして 1.9%にあたると推計されており[1]、日本社会の生産活動に大きな影響を与えていることが知られている。そのため、より高い耐腐食性機能を有する材料による資源生産性の向上への貢献が期待される。だが、従来の腐食に関する評価指標である腐食コストと腐食速度は、それぞれ、貨幣価値が基準である点、示強性変数であるため加算性がない点において、資源生産性指標とすることができない。そこで、本研究では、材料機能の中でも金属材料の耐腐食性機能に着目して、その機能を定量的に評価する新たな評価手法を構築することを目的とした。

2.　耐腐食性機能評価手法の構築

2.1.　モデルの構築

耐腐食性機能の定量評価モデルを、Figure 1 の概念図に示すように構築した。金属材料の防食方法には、主にステンレス鋼などのような不働態金属としての耐食材料、亜鉛メッキなどの防食被膜、電気防食の 3 つが挙げられる。これらの異なるメカニズムが存在するため、耐腐食性機能をメカニズムに依らず横断的に評価するための機能を定義する必要がある。また、耐腐食性機能は、評価の対象材料やその材料が組み込まれた製品の使用環境の組合せによって異なって発現されると考えられる。機能の定義と評価対象に基づき、評価尺度を設定した。

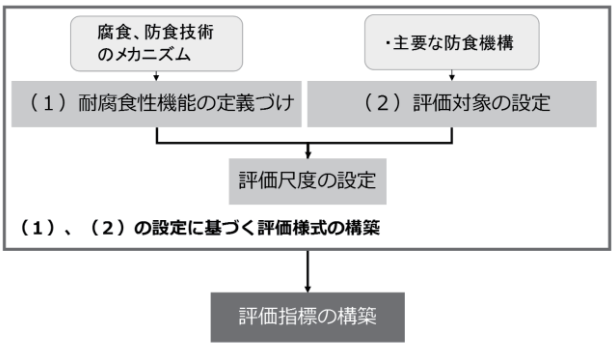


Figure 1　モデルの構築手法の概念図

2.2.　腐食、防食技術のメカニズム

金属の腐食は、化学平衡論的因子と反応速度論的因子に支配され進行する電気化学反応であり[2]、防食は、それぞれの因子に基づいて行われている。よって、耐腐食性機能を評価する際には、これらの両側面を考慮する必要がある。化学平衡論に基づいた防食は、腐食反応の駆動力を小さくすることで行われ、例として電気防食が挙げられる。また、速度論に基づいた防食は、腐食速度を小さくすることで行われ、例として耐食金属や亜鉛メッキが挙げられる。

2.3.　耐腐食性機能の定義づけ

防食は、金属材料が腐食するのを防止するために、母材である金属材料に追加的に与えられているものである。よって、本研究では、金属材料の耐腐食性機能を、母材の腐食反応を防ぐための機能と定義した。

2.4.　評価の対象

腐食現象は、その形態によって、全面がほぼ均一に腐食する全面腐食と、孔食や隙間腐食に代表される局部腐食に大別される[3]。本研究では、このうち、全面腐食に対する耐腐食性機能を評価の対象とする。

さらに、2.3 の定義づけにより、本研究では、防食を母材と防食機構の両方を含んだ系を評価対象とした。すなわち、母材と母材に施された防食機構それぞれを評価する必要がある。

2.5.　ギブズの自由エネルギーに着目した評価尺度

平衡論的見地から、腐食反応が自然に進行する条件は、温度と圧力が一定とすると、その腐食反応のギブズエネルギー変化(ΔG)が負のときである[3]。すなわ

ち、母材において腐食反応が進行するとき、ギブズエネルギー変化として、｜ΔG｜だけのギブズエネルギーを損失していると言い換えることができる。したがって、防食は、腐食反応による｜ΔG｜のギブズエネルギー損失を防ぐことであると表現することができる。また、速度論的見地から、母材の腐食反応の反応速度が大きいほど、防食の果たす機能は大きくなると考えられる。よって、防いだエネルギー損失は、母材の反応速度に比例すると考えることができる。

ある期間 t (time)に腐食から守られた母材のギブズエネルギーを Sene (J)とすると、以下の式で表される。

$$\mathrm{Sene} = |\Delta G_B| \cdot v_B \cdot \frac{1}{M_B} \cdot S_B \cdot \mathrm{t} \quad \cdots (1)$$

ここで、ΔG_B は母材の腐食反応のギブズエネルギー変化(J/mol)、v_B は母材の腐食反応の反応速度(mm/time または g/m^2/time)、M_B は腐食する母材中の金属元素のモル質量(g/mol)、S_B は母材の表面積(m^2)である。Sene が大きいほど、より程度が大きい母材の腐食反応を、防食によって防いだことを意味する。

一方で、母材を守るために導入された、亜鉛メッキなどの防食機構は、耐腐食性機能の発揮により、減耗・劣化する。その際に進行した化学反応のΔG は、耐腐食性機能の発揮に伴い、散逸したエネルギーと言い換えることができる。ある期間 t (time)に防食機構によって散逸したエネルギーを Cene (J)とすると、Sene と同様に、以下の式で表される。

$$\mathrm{Cene} = |\Delta G_P| \cdot v_P \cdot \frac{1}{M_P} \cdot S_P \cdot \mathrm{t} \quad \cdots (2)$$

$$\mathrm{Cene} = E_E \quad \cdots (3)$$

ここで、ΔG_P は防食層の腐食反応のギブズエネルギー変化(J/mol)、v_P は防食層の腐食反応の反応速度(mm/time または g/m^2/time)、M_P は防食層の反応する金属元素のモル質量(g/mol)、S_P は防食層の表面積(m^2)である。一方、電気防食の場合、Cene は、電気防食によって消費された電気エネルギーE_E(J)で表される。Cene が大きいほど、より多くのエネルギー消費により防食を行っていることを意味する。

2.6.　新たな指標の提案：LCE

2.5 で提案した評価尺度を用いて、製品の製造から廃棄に至るまでのライフサイクルにおける、防食に関わるライフサイクルエネルギー(LCE: Life Cycle Energy)を考えることができる。

製品の製造において、防食機構を導入するために消費されたエネルギーを Pene(J)とすると、防食機構が施された金属材料の防食 LCE は、(1)、(2)または(3)を用いて、次の式で表される。

$$\mathrm{LCE} = \mathrm{Pene} - \mathrm{Sene} + \mathrm{Cene} \quad \cdots (4)$$

ここで、Pene は、防食機構を導入するプロセスにおける温度を考慮した、有効に仕事に変換できるエネルギー(エクセルギー)であることに留意する必要がある。これは、ギブズエネルギーの変化量は、等温等圧条件下におけるエクセルギーの変化量を意味するためである。

温度 T の物体が外界(温度 T_0)へ放出する熱流 Q のエクセルギーE は、

$$\mathrm{E} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\mathrm{Q} \quad \cdots (5)$$

で表される。よって、Pene は、次の式で表される。

$$\mathrm{Pene} = \sum_k \left(\left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k\right) \quad \cdots (6)$$

ここで、T_k は防食機構を導入するプロセス k における温度(K)、Q_k は同プロセスで消費する熱量(J)である。

防食 LCE は、どの程度のエネルギーを消費して防食を行っているかを表す指標になる。腐食環境であるほど Sene は大きくなり、防食層の劣化速度が遅いほど Cene は小さくなる。したがって、評価対象である金属材料の防食 LCE がより小さいほど、より高い耐腐食性機能を発揮していることを意味する。

2.7.　考察

従来の評価指標である腐食コストや腐食速度と異なり、防食 LCE は、時期や場所によらない性質と加算性を持つという点で、生産性評価のための指標として優れている。また、防食 LCE は、従来指標では評価しない母材を評価することができる。

3.　おわりに

本研究では、ギブズエネルギーに着目した、金属材料の耐腐食性機能の定量評価手法を構築した。今後、LCE を用いた機能の定量評価が行われることが期待される。

4.　引用文献

[1]腐食コスト調査委員会『材料と環境』第 50 巻、2001 年、pp.490-512.

[2] 藤井哲雄.『空気調和・衛生工学』第 79 巻、2005 年、pp.725-731

[3] 水流徹,藤田栄,木村光男,水野大輔,“腐食読本”,公益財団法人 JFE21 世紀財団,（2015）, pp.59-61

[4]Peter Atkins, Julio de Paula,“アトキンス物理化学 上”、東京化学同人,（2009）, pp.96-101

日本の各都道府県の資源蓄積量を考慮した環境効率性指標の構築とその応用

Construction and Application of Environmental Efficiency Indicator Accounting for the Accumulated Resources in the Prefectures of Japan

○江口昌伍*[1、2)]
Shogo Eguchi
1) 九州大学, 2) 日本学術振興会特別研究員
* shogoeguchi43@gmail.com

1. 研究背景

現代社会では、建築物や道路などの蓄積された社会基盤の上に生活を営み、生産活動を行っている。2013 年に環境省によって公表された「第三次循環型社会形成推進基本計画」では、3R 型社会の構築、資源利用における環境負荷の低減などの物質のフロー的な側面に加えて、物質のストック的な側面にも初めて焦点が当てられ、我が国に蓄積されている資源ストックに関する指標を整備し、ストックの利用価値を高める必要性が記されている。

日本に蓄積された資源のマテリアルストックの利用効率を分析した既存研究には Eguchi (2016)がある。当該研究は、日本の都道府県を分析対象として、蓄積された社会基盤から生み出される生産額の効率性を Data Envelopment Analysis（DEA）を用いて分析し、1970 年から 1990 年にかけて、多くの都道府県で生産性が上昇している一方で、1990 年以降は生産性の向上が頭打ちになっていることを明らかにした。しかしながら、当該研究は生産活動に伴う環境負荷を考慮しておらず、持続可能な経済成長を目指す上で重要となる環境効率性は分析されていない。

一方で、都市における環境効率性を分析した先行研究としては、例えば、Browne *et al.* (2009)はアイルランドのリメリックにおける廃棄物排出量と製品消費量の比（廃棄物排出量÷製品消費量）によって、Zhang *et al.* (2013)は中国の北京における、分析対象エリア内での廃棄物と資源の移動量の比（廃棄物移動量÷資源移動量）によって、それぞれ都市における環境効率性を分析した。しかしながら、これらの既存研究では、都市における生産活動によって生み出された生産額を考慮しておらず、経済的な効率性は分析されていない。また、生産額を考慮した環境効率性指標として、Huppes and Ishikawa (2007)は Environmental Productivity（経済的価値÷環境負荷量）を提案したが、この環境効率性指標には投入要素による影響が一切考慮されていない。

これらの研究背景から、本研究では、日本の都道府県を分析対象として、経済的価値と環境負荷量の比で定義される従来の環境効率性指標と DEA による資源蓄積量を考慮した環境効率性指標を比較し、両指標にどれだけの差異が見られるのかを分析する。また、環境効率性が向上、あるいは低下している都道府県を特定し、日本の資源蓄積の関する持続可能な発展について議論する。

2. 手法

2.1 従来の環境効率性指標

Huppes and Ishikawa (2007)の指標を用いて、都道府県 z における従来の環境効率性指標（‘Conventional’ Environmental Efficiency Indicator: *CEEI*）は以下の式のように計算される。

$$CEEI_z = \frac{y_z}{b_z} \quad (1)$$

ここで、y_z は都道府県 z における地域内総生産を、b_z は都道府県 z における CO_2 排出量をそれぞれ示している。従って、$CEEI_z$ は都道府県 z における CO_2 排出量 1 単位あたりの地域内総生産を表す環境効率性指標であり、$CEEI_z$ が高い値を取るほど、優れた環境パフォーマンスを示す。

2.2 DEA による環境効率性指標

DEA に基づく環境効率性指標（‘DEA-based’ Environmental Efficiency Indicator: *DEEI*）は Mandal and Madheswaran (2010)の DEA モデルを用いて以下の式のように表される。

$$\begin{aligned}
&\vec{D}_o\left(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k, \mathbf{b}_k, \mathbf{y}_k, -\mathbf{b}_k\right) = \text{Max } \beta \\
&s.t. \sum_{k=1}^{K} \lambda_k y_{km} \geq (1+\beta) y_{zm} \quad m = 1,...,M \\
&\sum_{k=1}^{K} \lambda_k b_{ki} \leq (1-\beta) b_{zi} \quad i = 1,...,I \\
&\sum_{k=1}^{K} \lambda_k x_{kn} \leq x_{zn} \quad n = 1,...,N \\
&\sum_{k=1}^{K} \lambda_k = 1, \lambda_k \geq 0, \ k = 1,...,K \quad (2)
\end{aligned}$$

ここで、y_{zm} は都道府県 z における正の産出項目 y に関する産出ベクトルであり、b_{zi} は都道府県 z における負の産出項目 b に関する産出ベクトル、x_{zn} は都道府県 z における投入項目 x に関する投入ベクトルである。y_{km}、

b_{ki}、x_{kn} はそれぞれ、都道府県 k における正の産出項目 m の産出量を表す産出行列、都道府県 k における負の産出項目 i の産出量を表す産出行列、都道府県 k における投入項目 n の投入量を表す投入行列である。λ_k は（2）式を解くことで内生的に求められる都道府県 k におけるウェイトベクトルである。本研究では正の産出項目を 1 項目（地域内総生産）、負の産出項目を 1 項目（CO_2 排出量）投入項目を 4 項目（建築物、道路、民間資本ストック、就業者数）、分析対象都道府県数を 46 としており、M=1、I=1、N=4、K=46 となる。

（2）式は投入水準を増加させることなく、正の産出の増加と負の産出の縮小を同時に最大限達成可能な効率性スコア を見つける線形計画問題である。従って、β は必ず 0 から 1 の値を取り、$\beta=0$ の時に効率的となり、1 に近づくほど非効率的となる。また、$\beta=0$ である都道府県を結んだ線によって生産可能性フロンティアが構成される。また、本 DEA フレームワークでは収穫可変モデルを用いており、環境効率性は各都道府県の規模を考慮して計算される（Banker *et al.*, 1984）。

2.3 Malmquist-Luenberger 指数

本研究では、Malmquist-Luenberger（ML）指数を用いて、環境効率性の経年的な変化を分析した。t 年から t+1 年にかけての環境効率性の変化は ML 指数を用いて以下のように定義される（Färe *et al.*, 2001）。

$$ML_t^{t+1}=\left\{\frac{\left[1+\vec{D}_o^t\left((\mathbf{x}_z,\mathbf{y}_z,\mathbf{b}_z)^t\right)\right]}{\left[1+\vec{D}_o^t\left((\mathbf{x}_z,\mathbf{y}_z,\mathbf{b}_z)^{t+1}\right)\right]}\cdot\frac{\left[1+\vec{D}_o^{t+1}\left((\mathbf{x}_z,\mathbf{y}_z,\mathbf{b}_z)^t\right)\right]}{\left[1+\vec{D}_o^{t+1}\left((\mathbf{x}_z,\mathbf{y}_z,\mathbf{b}_z)^{t+1}\right)\right]}\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

（3）式において、$ML_t^{t+1}>1$ であれば、t 年から t+1 年にかけて都道府県 z の環境効率性は向上しており、$ML_t^{t+1}<1$ の時には環境効率性の低下を示す。また、（3）式の $\vec{D}_o^t\left((\mathbf{x}_z,\mathbf{y}_z,\mathbf{b}_z)^{t+1}\right)$ は t 年の技術水準で評価した t+1 年の都道府県 z の環境効率性を表している。

3. データ

本研究では、Tanikawa *et al.* (2015)で推計された 46 都道府県（沖縄県を除く）の 1992 年から 2008 年にかけての建築物と道路に関する資源蓄積量の物量データと各都道府県における民間資本ストックの金額データ、就業者数（ともに経済産業研究所）を投入要素として用いた。また、正の産出には、各都道府県の地域内総生産額（経済産業研究所）を、負の産出には各都道府県における CO_2 排出量（資源エネルギー庁）をそれぞれ用いた。

4. 結果と考察

図 1 は 1992 年における *CEEI* の結果を、図 2 は 1992 年における *DEEI* の結果をそれぞれ示している。両結果から、東京、大阪、京都のように両指標ともに高い環境効率性の値を示した都道府県があった一方で、関東地方や四国地方を中心として、多くの都道府県において両指標の環境効率性の結果に大きな差異が見られた。また、各都道府県における両指標の相関を、スピアマンの順位相関係数（ρ）を用いて分析したところ、$\rho=0.198$ となり、ほとんど相関は見られなかった。

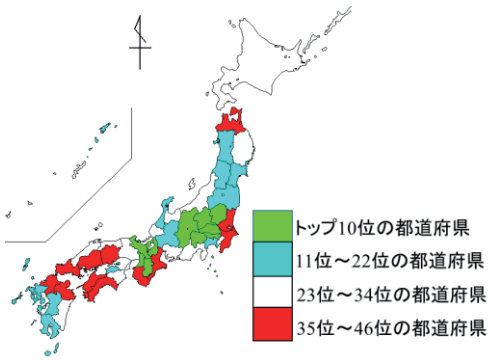


図 1　1992 年における *CEEI* の結果

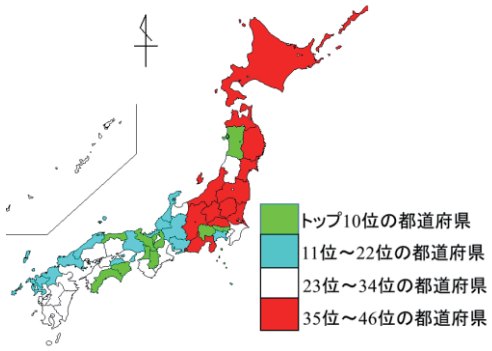


図 2　1992 年における *DEEI* の結果

また、ML 指数を用いて 1992 年から 2008 年にかけての環境効率性の変化を分析したところ、全都道府県平均では 1992 年から 1999 年にかけて環境効率性が一貫して低下していたものの、2000 年以降は環境効率性が大きく向上し、2008 年時点では 1992 年時点と比較して 10.8%の向上が見られた。特に環境効率性の著しい向上が見られた都道府県は三重、福島、静岡であり、1992 年から 2008 年にかけてそれぞれ 40%以上環境効率性が向上した。一方で、大阪と京都における環境効率性は大きく低下しており、1992 年から 2008 年にかけて両都道府県で約 14%の低下が見られた。

研究発表会では、これらの結果を詳細に発表し、環境効率性の変化の要因についても分析することで、日本の資源蓄積の関する持続可能な発展について議論を行う。

Comparative efficiency of mechanical properties and material intensity in steel production: A DEA perspective.

○Jordi Cravioto*[1)]、Eiji Yamasue[1)] 、Ichiro Daigo[2)]
1)立命館大学 2) 東京大学
* jordi-c@gst.ritsumei.ac.jp

1. Introduction

Efficient production of high quality steel is essential for the development of other industries, but as a major energy and material consumer it is also a source of environmental damage[1)]. Ore-mining activities for steel production are highly intensive in terms of overburden and waste rock[2)], while the direct, indirect and hidden energy-material flows to obtain the metal during manufacturing is equally damaging, given its pollution and greenhouse gases[2)].

Yet, steel production is crucial for the economy and the Japanese industry is among the most efficient ones. Research has corroborated this fact[3)], but recent studies have assessed through a rather unexplored method: Total Material Requirement (TMR). This literature has found that certain types of steel have higher material intensity when mining and manufacturing inputs are aggregated together[4)], but more comprehensive analyses are yet to be done in the light of the actual achievements in the quality of products by the industry.

Provided an objective method for such an analysis, the assessment could further clarify which type of steel might need more efficiency improvements, and how could policy initiatives target its more sustainable performance without compromising quality. Lined in that direction, this study presents a comparative performance analysis of 40 steels in terms of environmental burden and the quality of its products expressed by mechanical properties obtained.

2. Methods

In order to determine which steels have higher efficiency under the state-of-the-art production, a reliable database is needed. A trustworthy database of TMR of different types of steel of the Japanese industry is available[5)]. Based on the information available, the following stainless steel types were considered for evaluation: corrosion-resistant, heat-resistant, non-magnetic and spring stainless steels. Full details on the 40 types under analysis are provided in the supporting information section.

2.1 TMR values and mechanical properties

The TMR value of the selected steels is the environmental damage proxy, which includes the phases of mining and smelting. Quality of the product is measured by four mechanical properties: stress, tensile strength, elongation and hardness (Vickers). All information is taken from the same database, surveyed and updated through tests and product specification sheets.

2.2 Data Envelopment Analysis

The comparative evaluation is carried out using Data Envelopment Analysis (DEA), an operations research method for comparative evaluation of processes using several indicators aggregated as inputs and outputs[6,7)].

The preferred model is a CCR assuming that any production of the selected steel types can achieve the same level of efficiency[8)]. TMR is used as the input in the model and the four mechanical properties as the outputs.

2.3 Statistical analyses

Once the DEA results are obtained, statistical analyses on the efficiency scores are applied for generalisations. These comprise ANOVA of the 40 types of steels grouped into 5 categories: Spring, Heat-resistant and three types of Corrosion-resistant (Stainless, Duplex and Nickel-based).

3. Results and discussion

3.1 Most efficient types of Steel

Considering all the mechanical properties and TMR, four types of steel are the most efficient: Corrosion-resistant duplex NSSMC-NAR-DP12 and SUS316L, corrosion-resistant SN-3 and Non-magnetic stainless steel 305 (Std.). Interestingly, when hardness and elongation are taken away from the DEA model, only Corrosion-resistant duplex NSSMC-NAR-DP12 and Non-magnetic 305 (Std) remained being the most efficient types. This suggests that Corrosion-resistant duplex SUS316L and Corrosion-resistant SN-3 have a high score given their properties achieved in terms of elongation and hardness. Hence, considering all the four dimensions would yield a slight different outcome in the most efficient types under comparison. It is noteworthy that table 1 also shows that outcomes of a DEA model composed of TMR with stress and tensile strength (column 1) highly correlated with models comprising more mechanical properties (column 2

and 3), but the most complex model (row 3) seemed the least similar. Yet, the high correlations with simpler models in this row also suggests that good approximation of the efficiency could be obtained by using a smaller amount of mechanical properties. Thus, when lack of data is an issue, a simpler model might yield rather accurate outcomes.

Table 1 Correlations between DEA models

	DEA model	1	2	3
1.	TMR – Stress, Strenght	1		
2.	TMR – Stress, Strenght, Elongation	0.92**	1	
3.	TMR – Stress, Strenght, Elongation, Hardness	0.86**	0.94**	1

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

3.2 Least efficient types

Contrastingly to the highest efficiency, mostly nickel-based alloys scored the lowest in the comparison. Considering all the mechanical properties and TMR, two corrosion-resistant nickel based alloys (20-25MTi and 66NEL), the heat resistant nickel based alloy 600 and the pure nickel N201 were the worst performers. These results did not change much in downscaled versions of the DEA model (considering three and two mechanical properties).

3.3 Efficiency by groups

As previously mentioned in section 2.5, a grouping of steels based on their composition into 5 categories yielded the results shown in figure 1.

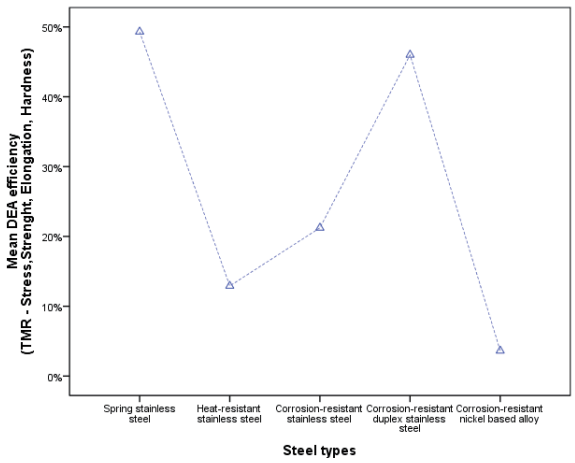


Fig 1 ANOVA plots of DEA efficiency of TMR

It can be observed that the mean score was higher for two groups: Spring and Corrosion resistant duplex steels. Contrastingly, Heat resistant steels and Corrosion-resistant nickel based alloys showed the lowest outcomes. Furthermore, according to the ANOVA results, there is a significant difference in some efficiency ranks from the DEA, supporting the information displayed in the figure. Post-Hoc testing should provide precise information of which type of steel is significantly different in the efficiency rank. Provided this, the graphs show that Spring Stainless Steel and the Corrosion Resistant Duplex Stainless Steel series seem the most efficient ones, and probably significantly different to others.

Table 2 Robust measures of ANOVA

Measure	Statistic[a]	df1	df2	Sig.
Welch	12.948	4	10.212	.001
Brown-Forsythe	4.009	4	10.117	.034

a. Asymptotically F distributed.

4. Conclusions

A comparative efficiency assessment in terms of mechanical properties achieved by steel making in Japan with respect to the environmental burden in terms of TMR could be assessed using a DEA model. It was found that Spring and Corrosion-resistant stainless steels were the most efficient, whereas Corrosion-resistant nickel based alloys the least. Detailed by type, corrosion-resistant duplex NSSMC-NAR-DP12 and SUS316L, corrosion-resistant SN-3 and Non-magnetic stainless steel 305 (Std.) showed the highest efficiency. In contrast, nickel based alloys (20-25MTi and 66NEL), heat resistant nickel based alloy 600 and the pure nickel N201 were the worst performers.

5. Acknowledgements

This research was partly supported by the Environment Research and Technology Development Fund (S-16) of the Ministry of the Environment, Japan.

6. References

1) Cobb, H.M.: The history of stainless steel (2010) ASM Int.
2) Yamasue, E., Minamino, R., Numata, T., Nakajima, K., Murakami, S., Daigo, I., Ishihara, K.N. Mat. Trans., 50(6) (2009) pp 1536-1540.
3) Hasegawa, H. The Steel Industry in Japan: A Comparison with Britain (2003) Routledge.
4) K. Halada: Materia Japan 46 (2007) 543–548.
5) “TMR database”, 循環資源・材料プロセス研究室, (2016-12-15) <http://www.ritsumei.ac.jp/~yamasue/tmr/database.html>
6) Charnes, A., Cooper, W., Rhodes, E. European J Op Res, 2(6), (1978). pp 429-444.
7) Cravioto, J., Yamasue, E., Okumura, H., Ishihara, K.N. Zero-Carbon Energy Kyoto 2010 (pp. 49-55). Springer Japan
8) Cooper, W., Seiford, L., Zhu, J. Handbook on data envelopment analysis (2011) Springer.

7. Supporting Information

Table S1 - Types of stainless steel, TMR, stress, tensile strength, elongation and hardness values.

Name	TMR	Stress	Strenght	Elongation	Hardness
Corrosion-resistant 20-25LMCu	113.3884	298	559	50	150
Corrosion-resistant 20-25MTi	114.66	315	589	50	173
Corrosion-resistant 20-3	143.0644	327	625	44	166
Corrosion-resistant 303	41.424	215	540	45	196
Corrosion-resistant 304	32.085	278	626	58	164
Corrosion-resistant 305B SUS304	32.085	278	626	58	164
Corrosion-resistant 305B SUS310S	61.3768	224	563	52	130
Corrosion-resistant 305B SUS890L	45.108	305	665	61	161
Corrosion-resistant 315N - SUS310S	61.3768	224	563	52	130
Corrosion-resistant 315SN - SUS315J1	47.3372	319	676	58	167
Corrosion-resistant AC-3	124.2024	325	673	58	166
Corrosion-resistant duplex DP-3 NSSMC-NAR-DP-3	54.424	608	813	31	260
Corrosion-resistant duplex DP-3 NSSMC-NAR-F	39.064	571	769	32	250
Corrosion-resistant duplex DP-3W	58.5844	669	894	36	270
Corrosion-resistant duplex NSSMC-NAR-DP12	8	610	822	42	251
Corrosion-resistant duplex NSSMC-NAR-DP-28	33.2	647	937	42	281
Corrosion-resistant duplex SUS316L	8	234	518	52	144
Corrosion-resistant HCR-18	91.0416	295	539	44	160
Corrosion-resistant nickel based alloy 20-25MTi	186.8976	326	688	55	95
Corrosion-resistant nickel based alloy 66NEL	287.19	282	549	43	95
Corrosion-resistant SN-1	47.518	328	718	57	200
Corrosion-resistant SN-3	53.162	329	738	57	200
Corrosion-resistant SN-5	34.244	560	751	33	230
Heat resistant 310S	68.618	245	570	40	160
Heat resistant 310S	68.618	245	570	40	160
Heat resistant AH-1	76.7916	279	583	48	139
Heat resistant AH-4	41.7452	440	767	42	201
Heat resistant nickel based alloy 600	199.54	364	666	35	180
Pure Nickel N201	258.81	177	401	54	140
Spring 301 SP 1/2H	27.71728	759	1138	29	330
Spring 301 SP 3/4H	27.71728	986	1269	22	386
Spring 301 SP EH	27.71728	1872	1918	2	536
Spring 301 SP H	27.71728	1281	1430	15	451
Spring 301L HS1	28.0432	1280	1350	15	450
Spring 301L SE1 3/4H	28.0612	1144	1183	13	397
Spring 304-CSP 1/2H	31.82064	703	863	32	274
Spring 304-CSP 3/4H	31.82064	941	1011	20	340
Spring 304-CSP H	31.82064	1152	1185	6	383
Spring 403 2D-Q	10.32428	972	1113	10	378

グリーン購入推進に向けたホットスポット分析の評価手法の構築と社会実装

Development of hotspot analysis based on life cycle perspectives and application to green procurement

伊坪徳宏 [1)]、田原聖隆 [2)]、近藤康之 [3)]、佐野裕隆 [4)]、神崎昌之 [5)]

Norihiro ITSUBO[1)], Kiyotaka Tahara[2)], Yasushi Kondo[3)], Hirotaka Sano[4)], Masayuki Kanzaki[5)]

東京都市大学 [1)]、産業技術総合研究所 [2)]、早稲田大学 [3)]、日本環境協会 [4)]、産業環境管理協会 [5)]

Itsubo-n@tcu.ac.jp

keywords: hotspot analysis, IDEA, WIO, LIME, social impact assessment

1. 背景

UNEP(国連環境計画) /SETAC(環境毒物化学会)ライフサイクルイニシアティブは、ライフサイクルの中から重要な要素を抽出するホットスポット分析に注目し、分析方法の開発を開始した。欧米が開発するホットスポット分析手法は、欧米のデータベースと影響評価手法が活用されるため、日本の技術や環境条件が反映されにくい。環境影響の誤解と評価手法の誤用が生じると、得られた結果に対する信憑性が低下し、却ってグリーン購入促進の障害になりかねない。

「製品ライフサイクルに立脚した環境影響評価基盤の構築と社会実装によるグリーン購入の推進」(科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業：平成 26 年 10 月～平成 29 年 9 月)では、日本の最新の影響評価手法やデータベースを統合したホットスポット分析手法を開発している。これを 100 種類の製品を対象に解析し、その評価報告書を国、産業界、消費者へ公開する。その研究成果はグリーン調達、購入のための共通基盤として活用されることが期待される。

2. 研究目的

本プロジェクトでは、最新のインベントリデータベースと環境影響評価手法に基づく環境ホットスポット分析手法の開発を行う。科学的な方法を駆使した 100 品目を対象とした分析結果は、専門家による「グリーンイノベーションのための羅針盤」として国、自治体、企業、消費者に広く報告される。国は政府特定調達品目の評価基準を、企業はエコイノベーションの効果的な推進を、消費者は真のエコプロダクツを購入するための判断基準を得ることができる。ホットスポット分析手法と結果は環境ラベル(タイプ 1 と 3)の信頼性を高めるべく社会実装されるとともに、合理的な審査基準の下で調達品目の選択を促進する改正グリーン購入法施行の基盤として活用されることが期待される。

3. プロジェクトの概要

上に示した本研究の目的を達成するための実施課題として、以下の二つを挙げた。

【課題１　17 影響領域を網羅したインベントリデータベースと影響評価手法の開発】

LCA の実施方法に倣い、実施項目を以下の三つに分類し、それぞれの課題について作業部会を設置してインベントリデータベースと影響評価手法を開発する。

インベントリ分析(上流)は産業技術総合研究所が開発した IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis)を、インベントリ分析(下流)では早稲田大学が開発した WIO (Waste Input Output)を、影響評価手法は産業技術総合研究所と東京都市大学が開発した LIME (Life cycle Impact assessment based on Endpoint modeling)を基礎として、これらの更新と新規追加のための開発研究を行う。

本研究の実施を通じて、インベントリ(上流)では産業連関表の基本分類約 400 部門を対象として 17 種の影響領域を網羅した環境負荷原単位が、インベントリ(下流)は約 400 部門を対象としたリサイクルおよび廃棄を通じた環境負荷原単位が得られる。影響評価の研究成果として、17 影響領域を対象とした特性化係数が得られる。

【課題２　100 品目を対象とした環境ホットスポット分析と社会実装】

実施項目を以下の二つに分類し、それぞれの課題について二つのグループ (エコマークグループ、エコリーフグループ)を設置して評価インフラを開発するとともにそれを活用する。

上に示した課題とプロジェクト成果、社会実装までの関係を以下の図 1 に示した。

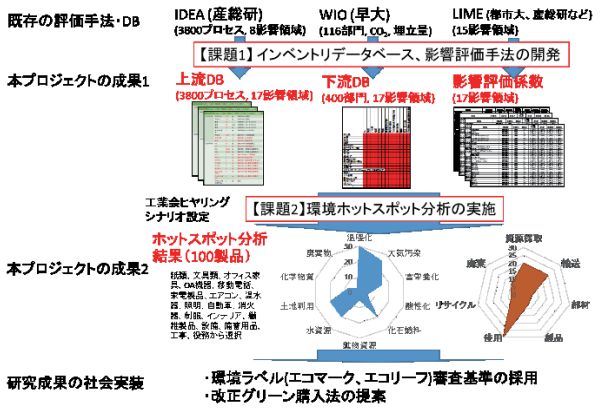


図１　本プロジェクトの研究課題と成果、社会実装

までの関係

4. 平成 27 年度までの進捗

昨年度までの主な結果を課題ごとに示した。

【課題 1】　環境ホットスポット分析のための手法およびデータベースの開発

（1）上流インベントリデータベースの開発

IDEA（Inventory Database for Environmental Analysis）の各単位プロセスに、光化学オキシダント、大気汚染、ヒト毒性、生態毒性、陸域酸性化及び水域酸性化の各影響領域に関係する基本フローを追加した。化学物質排出移動量届出制度（Pollutant Release and Transfer Register：PRTR）、ダイオキシン類の排出量の目録、工業統計等の各種生産統計を利用した。算出できた排出源ごとの化学物質排出量を、該当する排出源で生産される製品の金額で除することによって、生産額当たりの化学物質排出量を求め、IDEA に格納されている各プロセスに基準単位当たりの化学物質排出量を導入した。また、上流データベースは平成 23 年（2011 年）産業連関表の部門ごとに生産額当たりの環境影響を用意しておく必要がある。そのため IDEA に格納されている製品の基準単位が数量の場合は金額に変換した上で、産業連関表の約 400 部門と対応させた。複数の IDEA 製品が産業連関表の 1 部門に対応する場合は、IDEA 製品の各供給額で環境負荷量を加重平均することによって、産業連関表の部門に統合し、日本に流通している製品流量を反映させた部門別の直接環境負荷量を算出した。算定結果は PRTR マニュアル等から得られた排出実態と乖離がないかを確認する等の見直しを実施した。

（2）下流インベントリデータベースの開発

平成 23 年（2011 年）産業連関表を基礎とする廃棄物産業連関表（WIO 表、暫定版）を開発した。まず、各都道府県・政令市により実施・公表されている産業廃棄物多量排出事業者報告データの電算化を完了した。このデータベースを活用することにより、とくに多量排出事業者の占める割合の大きい産業部門については、例えば種類別、業種別の産業廃棄物排出に関する政府統計を利用する方法よりも精度の高い廃棄物排出量の推計が可能となった。一般廃棄物については、自治体・一部事務組合別、収集区分別、処理施設別の処理量と組成調査結果に関する資料を整理した。開発した廃棄物データベースを利用して、平成 23 年（2011 年）産業連関表を基礎とする WIO 表（暫定版）を開発した。さらに、多量排出事業者の占める割合の大きくない産業部門による産業廃棄物排出量、事業系一般廃棄物の産業部門別排出量、産業廃棄物と一般廃棄物の処理フローの推計に関して、さらなる精度向上のための課題を抽出した。

（3）影響評価手法の開発

光化学オキシダント、ヒト毒性、生態毒性、土地利用について特性化係数開発のための検討を行った。光化学オキシダントは全球大気化学輸送モデルを用いて、越境移動を考慮した地域別、物質別の健康被害係数の算定枠組みを構築した。NMVOC および NOx を対象にして、単位量を追加排出したときの健康影響の増分について試算した。排出地域によって発生する健康被害の増分は約 10 倍の差が見られた。暴露地域の人口分布と越境移動による寄与の影響が大きいことがわかった。

ヒト毒性・生態毒性の 2 影響領域については、UNEP/SETAC ライフサイクルイニシアティブがコンセンサスモデルとして指定する USEtox を用いて化学物質の運命曝露分析を用いた。化学物質の単位量排出から得られた環境媒体中の濃度増分を用いて、生態毒性の特性化係数を求めた。さらに、環境媒体中の濃度変化量から吸入及び経口の摂取量を求め、ヒトの慢性影響及び発がんに対する特性化係数を試算した。

土地利用については、生物多様性の影響評価に向け、複数の先行研究について調査するとともに、LCA における特性化係数開発研究への利用可能性について考察した。さらに、全球規模の関連データ情報を収集・整理し、絶滅リスク算定に用いるデータ整備を進めた。

【課題 2】　100 製品を対象とした環境ホットスポット分析の実施と評価報告書の公開

課題 1 の開発成果を利用したホットスポット分析を試行した。2011 年産業連関表を基礎としつつ、上流インベントリに IDEA、下流インベントリに廃棄物産業連関表(WIO)、影響評価係数には LIME2 を統合した評価システムを開発した。エコマークグループを通じて得られた一次データを導入したハイブリッド型の分析を行って、より詳細な分析への利用可能性についてもあわせて検証した。紙、液晶テレビを取り上げてライフサイクル全体を網羅した分析を行った。CO_2、水、土地、資源について注目した分析では、液晶テレビの場合使用段階で CO_2 が多い一方で、水・資源・土地においては生産段階が大きいなど、物質によって主要なライフサイクルステージが異なることが確認された。さらに、統合化を通じてこれらのトレードオフを解消することが可能であることが確認された。今後は【課題 1】の研究成果を搭載したホットスポット分析ツールを開発し、100 品目の分析へと展開する。

IDEA における環境負荷項目の拡充 ～電離放射線および PRTR 対象物質～

Improvement and expansion of elementary flow to IDEA
Ionizing radiation substances and chemical substances

○田原聖隆*[1)] 、藤井千陽 [1)] 、高田亜佐子 [2)]、紀平茂雄 [3)]
Kiyotaka Tahara, Chiharu Fujii, Asako Takada, Shigeo Kihira
1) 産業技術総合研究所, 2) 無所属, 3)S&R
* k.tahara@aist.go.jp

1. はじめに

影響評価では、多様な影響領域の評価が要求されるようになってきている。European Commission で議論されている環境フットプリントは 14 の影響領域に関するマルチクライテリアによる評価を目指している。また、環境ホットスポット分析（EHSA）の重要性が指摘されている。このような状況下で、マルチクライテリアに対応したインベントリデータベースの開発は必要不可欠である。そこで、著者らが開発しているインベントリデータベース IDEA(Invetory Database for Environmental Analysis)[1)] で算定することのできる環境負荷項目を拡充することを試みた。IDEA には日本の産業(サービス業の一部を除く)で製造された製品を網羅すべく階層構造を有する日本標準産業分類をベースに 3847 プロセスのデータセットが格納されている。格納されたデータセットの単位プロセスには環境負荷物質の種類(基本フロー)と入出力量が明記されている。また、IDEA は影響領域のうち地球温暖化や化石燃料消費等に関して全プロセスで分析を終えているため、残りの影響領域に関連する環境負荷項目を拡充すればマルチクライテリアに対応させることができる。著者らのグループは 17 の影響領域(地球温暖化、オゾン層破壊、水資源消費、土地利用、大気汚染、光化学オキシダント、陸域酸性化、富栄養化、水域酸性化、森林資源、化石燃料消費、鉱物資源、廃棄物、ヒト毒性、生態毒性、電離放射線、室内空気質汚染)を評価できる EHSA を日本で実施するための環境を整え、グリーン購入等の施策への展開を目指した研究開発(RISTEX, JST)を実施している。その一環として本発表は、電離放射線、ヒト毒性および生態毒性に関連する基本フローを追加し、インベントリデータの作成を試みた。

2. 方法

2.1 電離放射線

電離放射線の発生源と排出量に関しては UNSCEAR 2008 報告書[2)]に被爆の分類と被爆量の見積もりが網羅されている。このうち公衆被曝の中から、石炭採掘・利用、リン鉱石採掘・利用、金属採掘・利用、および核燃料サイクルを対象とした。

2.1.1 石炭採掘・利用

石炭エネルギーセンター(JCOAL) [3)]より日本における石炭使用量と石炭灰発生量、および石炭灰有効利用の情報を得る。NORM データベース [4)]より、各炭鉱における石炭中の NORM 含有量の代表値を得る。NORM からの被爆の影響度合いの中で最も考慮すべきは気体として人に吸入され内部被爆の元となる 222Rn であり、222Rn 発生量は 238U の濃度に比例する。その比例係数は EPA の資料 [5)]より 0.2 に単位変換ファクター(3.03E-7 (Ci/ST ppm))を乗じた値となる。

2.1.2 リン鉱石採掘・利用

リン鉱石はリン酸を経て肥料、飼料、金属表面処理、食品添加物、防錆、蛍光体、コンデンサー、半導体、めっき、研磨、医薬、染色等に使われている。UNSCEAR 2008 報告書 [2)] および NORM データベース [4)]よりリン鉱石中の 238U 濃度を算出した。リン酸とリン酸石膏から派生する製品の NORM 濃度については、原料中の NORM 濃度を合算し、それを製品の出力量の比に応じて割り振る。さらに、NORM の中の 238U から継続して発生する 222Rn の発生量を石炭灰の場合と同様の方式で求める。

2.1.3 金属採掘・利用

金属鉱石中の NORM の濃度は通常高くはないが、熱処理工程では大部分の NORM は金属鉱滓に濃縮する [2)]。したがって石炭やリン鉱石の場合と異なり、製錬された金属の利用からの被爆は対象としない。EPA モデル [5)]にある金属鉱石採掘・粉砕・尾鉱による 222Rn の発生量の見積もり表を用いて銅の採掘で発生する 222Rn の量を見積もる。銅鉱石中の 238U の含有量は、NORM データベース [4)]より得られ、222Rn の発生量は石炭灰の場合と同様の方式で求める。

2.1.4 核燃料サイクル

日本の核燃料サイクルからの放射性物質の排出量については、原子力施設運転管理年報 [6)]を基に求める。放射性物質は水圏排出と大気圏排出合わせて 37 種類であり、出力値を個別の原子炉の発電量(kWh)で除することによって算出した。それを 9 電力会社の各々で集計した。

2.2　ヒト毒性および生態毒性(PRTR 対象物質)

影響領域のうちヒト毒性および生態毒性においては、IDEA には一部の単位プロセスに一部の基本フローが導入されているにとどまるため、対象となるすべてのプロセスに出力基本フローを追加する必要がある。そこで化学物質排出移動量届出制度（Pollutant Release and Transfer Register : PRTR）[7]を利用した。PRTR とは、人の健康や生態系に有害な恐れのある化学物質を製造・使用している事業所の環境中への排出量及び事業所外への移動量を調査し公表する仕組みのことである。PRTR の対象である 462 物質のうち、LIME2[8]で設定されているヒト毒性対象物質は 104 物質、生態毒性対象物質は 70 物質含まれ、LIME2 の対象物質の多くが PRTR の対象物質にも該当したため、PRTR の利用は有効だと考えた。PRTR では 46 業種から排出量が報告され、上記業種と対応している IDEA 分類は約 2,000 あり PRTR 分類より細かい。PRTR 分類に対応する IDEA 分類のすべてに同一の排出量を導入するのは妥当ではない。そこで、製造業のうち PRTR データを IDEA 分類へ配分する必要がある場合は、工業統計[9]対象事業所と PRTR 対象事業所を対応させることにより、PRTR 対象事業所の排出量と、工業統計対象事業所の出荷品目とその出荷額の情報を紐付け、品目別に PRTR 対象物質排出量を推算する。ただし当該事業所が出荷する品目のうち特定の品目が化学物質の排出に関与していると判断できる場合は当該品目のみに負わせる。

製造業以外の農業、鉱業、電気業、ガス業、サービス業等は PRTR の業種と IDEA 分類で大きな差はないと仮定し、IDEA の基準単位当たりの排出量を求める。

3. 結果及び考察

3.1 電離放射線

IDEA に追加した基本フローの種類及び取扱いプロセスを表 1 に示す。IDEA の基本フロー数は 38 種であり、ecoinvent の 77 種よりも少ないが、その多くを占める人工起源放射線の核種が日本の実態を反映しているためこの差は妥当であると判断した。IDEA の取扱いプロセス数は 178 プロセスであり、ecoinvent の 211 プロセスと近いが、ecoinvent ではひとつのプロセスから国や地域を拡張させ複数のプロセスを作成しているためプロセス数が増え、IDEA では 222Rn の排出を取扱うプロセスとして、石炭やリン鉱石の採掘の他に、それらが投入される石炭灰や肥料等の製造プロセスまで 222Rn の排出を拡充したことによって差が生じたと判断した。

3.2 ヒト毒性および生態毒性(PRTR 対象物質)

PRTR 対象物質のうち IDEAv2 の基本フローの種類として整備されている 204 物質、コンパートメント別に計上した 235 基本フローに加え、PRTR で報告されているコンパートメント別（大気、水域、土壌）の 312 基本フローを IDEA に追加した。IDEA に追加した基本フローの種類と取扱いプロセス数を表 2 に示す。

表 1 IDEA に追加した基本フローと取扱いプロセス (電離放射線)

被場の領域	IDEA に追加した基本フロー	基本フローを組み込んだプロセス
石炭採掘・利用	**大気圏放出 1 種類**: 222Rn	**48 プロセス**: 「一般炭の燃焼,焼炉」,「一般炭の燃焼,溶解炉」,「一般炭の燃焼, 乾燥炉」,「一般炭の燃 焼,ボイラー」,「発電用エネルギー, 亜炭火力の生産」等の石炭燃焼に係るプロセス計 32 プロセスと,石炭灰の利用に係るプロセス(「フライアッシュセメント,B 種の製造」や「人工骨材の製造」等) 計 16 プロセス,合わせて 48 プロセス
リン鉱石採掘・利用	**大気圏放出 2 種類**:222Rn,全 α 線放射能(大部分は 210Po)	**31 プロセス**:リン鉱石(精鉱前),リン鉱石(精鉱後),リン酸,過リン酸石灰, リン酸質肥料,重過リン酸石灰, リン酸ナトリウム,第三リン酸ソーダ,石膏リン酸,化成肥料,その他無機質顔料,等
金属採掘・利用	**大気圏排出 1 種類**:222Rn	**17 プロセス**:「銅鉱石,精鉱の生産」,「銅鉱石の生産」,「銅粗鉱の生産」,「銅精鉱,32%Cu」,「粗銅の製 造」,等
核燃料サイクル	**大気圏排出 16 種類**:放射性希ガス(原子炉由来),放射性希ガス(クリプトン,Kr85),放射性希ガス(アルゴン,Ar),ヨウ素 129,ヨウ素 131,トリチウム(H3),ウラン,炭素 14,放射性セシウム,放射性ルテニウム,プルトニウム 239,コバルト 60,全 α 放射能,全 βγ,その他核種(α 線放出),その他核種(α 線放出無し) **水圏排出 21 種類**:全核種(トリチウム以外)(原子炉分),トリチウム(H3),ウラン,全 α 放射能,全 β 放射能(H3 を除く),ストロンチウム(Sr89),ストロンチウム(Sr90),セシウム(Cs134),セシウム(Cs137),セリウム(Ce141),セリウム-プラセオジム(Ce144-Pr144),ジルコニウム-ニオブ(Zr95-Nb95),ルテニウム(Ru103),ルテニウム-ロジウム(Ru106-Rh106),ヨウ素 129,ヨウ素 131,プルトニウム(Pu(α)),その他核種(α 線放出),その他核種(α 線放出なし),コバルト(Co60),その他放射性物質	**81 プロセス**:9 電力会社,9 年度分

表 2 IDEA に追加した基本フローと取扱いプロセス (PRTR 対象物質)

業種	対象基本フロー数	プロセス数
農林業	129	89
漁業	3	38
鉱業	39	4
土木建築業	22	38
製造業	167	1241
電気業	39	1
ガス業	11	1
熱供給業	10	1
水道業	3	1
サービス業	102	18
廃棄物処理業	73	20

4. まとめ

EHSA で 17 の影響領域を評価できるように、従来の IDEA に電離放射線、ヒト毒性および生態毒性に関連するインベントリデータを追加した。今後、上記以外の影響領域に関連するインベントリデータを拡充する予定である。

謝辞
本研究は、(国)科学技術振興機構　社会技術研究開発センター 科学技術イノベーション政策のための科学研究開発プログラムの「製品ライフサイクルに立脚した環境影響評価基盤の構築と社会実装によるグリーン購入の推進」の一環として実施された。ここに記して謝意を表する。

引用文献

Supporting Information に記載

Supporting Information

1) (国)産業技術総合研究所 (一社)産業環境管理協会：”IDEA”， <http://www.idea-lca.jp/> ，(2016-01-04)
2) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation：“Sources and effects of ionizing radiation”，UNSCEAR 2008 report - Vol. I: Sources, <http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_Annex_B.pdf >，(2016-12-28)
3) (一財)石炭エネルギーセンター：“石炭灰全国実態調査報告書(平成 26 年度実績) (平成 28 年 3 月)” <http://www.jcoal.or.jp/ashdb/ashstatistics/H27_ashstatistics_r1.pdf>，(2016-12-28)
4) (国)放射線医学総合研究所 “自然起源放射性物質(NORM)データベース”, <http://www.nirs.qst.go.jp/db/anzendb/NORMDB/index.php>，(2016-12-28)
5) United States Environmental Protection Agency, “radiological impact caused by emissions of Radionuclides into Air in the United States Preliminary Report”, Apendix C-2, (1980)
6) (独)原子力安全基盤機構, “原子力施設運転管理年報 平成 25 年版”, PATECH 企画, 東京, (2013), p.516
(独)原子力安全基盤機構, “原子力施設運転管理年報 平成 24 年版”, 大應, 東京, (2012), p.722
(独)原子力安全基盤機構, “原子力施設運転管理年報 平成 23 年版”, 大應, 東京, (2011), p.703
(独)原子力安全基盤機構, “原子力施設運転管理年報 平成 22 年版”, PATECH 企画, 東京, (2010), p.750
(独)原子力安全基盤機構, “原子力施設運転管理年報 平成 21 年版”, 大應, 東京, (2009), p.798
(独)原子力安全基盤機構, “原子力施設運転管理年報 平成 20 年版”, PATECH 企画, 東京, (2008), p.855
(独)原子力安全基盤機構, “原子力施設運転管理年報 平成 19 年版”, 勝美印刷, 東京, (2007), p.893
(独)原子力安全基盤機構, “原子力施設運転管理年報 平成 18 年版”, 湊複写, 東京, (2006), p.888
(独)原子力安全基盤機構, “原子力施設運転管理年報 平成 17 年版”, 勝美印刷, 東京, (2005), p.884
(独)原子力安全基盤機構, “原子力施設運転管理年報 平成 16 年版”, 勝美印刷, 東京, (2004), p.725
(独)原子力安全基盤機構, “原子力施設運転管理年報 平成 15 年版”, 勝美印刷, 東京, (2005), p.884
7) 環境省 経済産業省：“個別事業所のデータ”，環境省，< http://www.env.go.jp/chemi/prtr/kaiji/index.html>, (2016-1-6)
8) 伊坪徳宏 稲葉敦, “LIME2 意思決定を支援する環境影響評価手法”, (社)産業環境管理協会, 東京, (2010)
9) 経済産業省，“平成 22 年工業統計調査 工業調査票甲・工業調査票乙”，経済産業省， 東京， (2010)

廃棄物産業連関表の推計とホットスポット分析への応用

Estimation of a New Waste Input-Output Database and Its Application to Hotspots Analysis

○近藤康之*[1]、立尾浩一[2]、溝田健一[2]、池本久利[2]、中村愼一郎[1]
Yasushi Kondo, Koichi Tachio, Kenichi Mizota, Hisatoshi Ikemoto, Shinichiro Nakamura
1) 早稲田大学、2) 日本環境衛生センター
* ykondo@waseda.jp

1. はじめに

欧州の環境フットプリントのように、様々な環境影響を評価するマルチクライテリア評価へのニーズが高まっている[1,2]。また、詳細なLCAの実施が困難な場合であっても、利害関係者の参画を通して、簡易なLCAの実施、既存研究、専門家の判断などを総合して評価を実施するとともに、経済活動の改善等を実践するホットスポット分析の進展が期待されている[3,4]。例えば現在のグリーン購入法に基づく特定調達品目の判断において、多岐に渡る環境問題（マルチクライテリア）が考慮されているが、LCA等によるマルチクライテリアの定量的評価は必ずしも実施されていない[5]。

このような背景のもと、日本におけるホットスポット分析のデータベースと手法を開発し、それを実践する研究開発プロジェクト「製品ライフサイクルに立脚した環境影響評価基盤の構築と社会実装によるグリーン購入の推進」（研究代表者　伊坪徳宏　東京都市大学教授）を科学技術振興機構（JST）社会技術研究開発センター（RISTEX）「科学技術イノベーション政策のための科学」の助成を受けて遂行している。本稿は、同プロジェクトで開発したデータベースを紹介する。

2. データベースの勘定体系

プロジェクトで開発したデータベースの雛型は、廃棄物産業連関（waste input-output, WIO）[6-8]の勘定体系である廃棄物産業連関表（WIO表）である。WIOに基づくLCAは、他のハイブリッドLCAと同様に、産業連関表であらわされる地域の経済活動すべてがシステム境界に含まれるため、その定義が明確であり、管理部門を含むサービス投入もシステム境界に含まれる[9]。

WIOは環境拡張産業連関（environmentally extended input-output, EEIO）のひとつであり、(1)廃棄物等のフローを明示していること、(2)そのフローを質量で測定していること、(3)廃棄物等のフローが環境拡張部分ではなく内生部門に配置されていることに主たる特徴がある。そのため、廃棄物の排出は廃棄物処理サービスに対する需要（サービスの投入）と見なされ、廃棄物の再資源化は廃棄物処理サービスの副産物としての供給と見なされる。このWIOに特徴的な廃棄物の排出、処理、再資源化の取扱は、Ecoinventにおいても第3版から採用されるに至っている[10]。

プロジェクトで開発したデータベースのうち、財・サービス部門（廃棄物処理および再資源化を行う部門を除く産業部門）のあいだの取引は、総務省により公表されている日本の産業連関表（2011年表）により把握される[11]。財・サービス部門による環境負荷（廃棄物フローを除く）はIDEAによる[12]。特性化と統合化はLIMEによる[13]。廃棄物のフローに係る部分については次節で詳述する。

3. WIO 表における廃棄物フローの推計

WIO表における廃棄物フロー（排出量、再資源化量、処理量）を部門別に推計するためには、基礎資料として環境省の統計を利用できる[14,15]。ただし、環境省統計だけでは不足している情報を補う必要がある。

3.1　産業廃棄物のフロー

環境省の統計「産業廃棄物排出・処理状況調査」[14]から69業種別19種類別の排出量が得られる。いわゆる13号廃棄物や混合廃棄物について排出量を実態に即して把握することが難しいという課題はあるが、重要な基礎資料として利用できる。産業連関表[11]の内生部門数が約400であることから、69業種のそれぞれに対して複数の部門が対応する。同一業種に属する部門について、種類別の排出原単位（生産額あたりの排出量）が共通であると仮定して部門別種類別排出量を推計することが一案として考えられる。他に追加情報がない場合は、この仮定に基づいて推計を行うが、追加情報がある場合はそれを優先する。

環境省統計を補う追加情報として、多量排出事業者による処理計画および実施状況報告から得られるデータを用いる。多量排出事業者は、廃掃法により、産業廃棄物の発生量が1000トン以上または特別管理産業廃棄物の発生量が50トン以上の事業場を設置している事業者と定められている。多量排出事業者は年間の処理計画と実施状況の提出が義務付けられており、提出された計画と実施状況報告書は、都道府県と政令市によりインターネットで公表されている。処理計画からは経済活動水準のデータ（従業員数、生産量、出荷額など）が得られ、実施状況報告からは種類別排出量等が

得られる。したがって、分母が生産額でない場合もあるが、事業場レベルでの排出原単位を推計できる。

プロジェクトに参画する産業技術総合研究所の協力を得て、多量排出事業者データの得られる製造業の事業場と工業統計表の個票データをマッチングして、事業場別に商品別の出荷額あたりの排出原単位を推計した。その際、同一事業場で生産される各商品については、種類別の排出原単位が共通であると仮定した。この仮定が妥当でない事例や、出荷額が必ずしも生産量の指標として適当でない事例もあるため、この点の改善は今後の課題である。得られた商品別の原単位を産業部門ごとに集計して部門別の排出原単位を推計した。この方法で排出原単位を推計できない部門については、上述の環境省統計から算定できる原単位を用いた。

3.2　一般廃棄物のフロー

環境省の統計「一般廃棄物処理実態調査結果」[15]から自治体により処理された一般廃棄物について詳細な情報が得られる。生活系・事業系の別、および収集区分別（可燃ごみ、不燃ごみ、混合ごみ、粗大ごみなど。集団回収も収集区分の1つと見なしてデータベースを整備する）に収集量、および施設別の処理量が得られる。また、処理施設ごとに処理されたごみの組成（ちゅう芥類、紙・布類、金属類、ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革類などの種類別の処理量。生活系・事業系の区別はない）が得られる。処理量と収集量にはわずかな乖離しかないため、処理量を排出量と見なす。事業系・生活系の別にごみ組成データが得られないため、一部の自治体により実施されている組成調査を利用する。事業系の種類別排出量は、言わば産業連関表の「内生部門計」列に計上されるものであり、部門別の排出量は環境省の統計からは得られない。そのため、従業員1人あたりの排出量が（後述する一部の部門と種類を除いて）種類ごとに各部門に共通と仮定して部門別排出量を推計した。

上述の環境省統計からは、自治体により処理された一般廃棄物の排出量は把握できるが、事業者が自ら処理した量、および処理業者に委託して処理された量は把握できない。とくに大規模な事業者により排出される一般廃棄物は、これに該当する可能性が高い。これを網羅的に把握することは非常に困難であるが、飲食サービスおよび飲食料品流通に係る部門により排出される食品系一般廃棄物については、食品リサイクル法関連の資料が利用できるため、これを用いて自治体等により処理されない排出量を推計する。

部門別種類別の再資源化量等の推計方法、推計に関して留意すべきその他の事項、および詳細な推計結果は、研究発表会において報告する。

4. 引用文献

1) Manfredi, S., K. Allacker, N. Pelletier, E. Schau, K. Chomkhamsri, R. Pant, D. Pennington (2015) Intl J Life Cycle Assess 20(3), 389–404
2) 日本LCA学会（2015）「環境マネジメントにおけるマルチクライテリア評価と意思決定」日本LCA学会・LCA日本フォーラム共催第20回講演会
3) UNEP (2014) Hotspots Analysis: Mapping of Existing Methodologies, Tools and Guidance and Initial Recommendations for the Development of Global Guidance. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative Flagship Project 3a
4) Fava, J.A., M. Barthe (2016) Hotspots analysis—What do we know and how can it be used to improve sustainability of product systems. Abstract Book, EcoBalance 2016, October 2016, Kyoto, Japan
5) 環境省（2016）「環境物品等の調達の推進に関する基本方針」（平成28年2月2日変更閣議決定）
6) Nakamura, S. (1999) Input-output analysis of waste cycles. Proceedings of the First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. IEEE Computer Society, Los Alamitos, pp. 475–480
7) Nakamura, S., Y. Kondo (2002) J Ind Ecol 6(1), 39–63
8) Nakamura, S., Y. Kondo (2009) Waste Input-Output Analysis: Concepts and Application to Industrial Ecology, Springer Science & Business Media
9) Suh, S., M. Lenzen, G.J. Treloar, H. Hondo, A. Horvath, G. Huppes, O. Jolliet, U. Klann, W. Krewitt, Y. Moriguchi, J. Munksgaard, G. Norris (2004) Environ Sci Technol 38(3), 657–664
10) Weidema, B.P., C. Bauer, R. Hischier, C. Mutel, T. Nemecek, J. Reinhard, C.O. Vadenbo, G. Wernet (2013) Overview and Methodology: Data Quality Guideline for the Ecoinvent Database Version 3. Ecoinvent Report 1(v3). St. Gallen: The Ecoinvent Centre
11) 総務省（2015）『平成23年（2011年）産業連関表：総合解説編』東京、経済産業調査会
12) Tahara, K., K. Kobayashi, T. Onoue, M. Kanzaki, K. Nakano (2008) Development of Inventory Database (IDEA) based on Process Analysis. Proceedings, EcoBalance 2008, December 2008, Tokyo, Japan.
13) Itsubo, N., Sakagami, M., Kuriyama, K., Inaba, A. (2012) Intl J Life Cycle Assess 17(4), 488–498
14) 環境省（2013）「産業廃棄物排出・処理状況調査報告書　平成23年度実績」
15) 環境省（2013）「一般廃棄物処理実態調査結果　平成23年度調査結果」

日本の LCA 評価基盤に基づくホットスポット分析手法の開発とケーススタディ

Development of Hotspot Analysis Method using the Japanese LCA infrastructure and Case Studies

○鈴木春生*1)、一杉佑貴 1)、村主さとみ 1)、近藤康之 2)、田原聖隆 3)、藤井千陽 3)、有間俊彦 1)、伊坪徳宏 1)、
Haruo Suzuki, Yuki Ichisugi, Satomi Suguri, Yasushi Kondo, Kiyotaka Tahara, Chiharu Fujii, Toshihiko Arima, Norihiro Itsubo
1）東京都市大学, 2）早稲田大学, 3）産業技術総合研究所
* h3suzuki@tcu.ac.jp

1. はじめに

ホットスポット分析とは製品やサービスのライフサイクルを通じて環境影響の大きい活動領域を特定する手法である。ホットスポットを特定することで、問題点を抽出して改善に向けた取り組みを促し、環境に配慮した商品を選択するグリーン購入を促進することが可能となる。しかしながら、科学的な知見、根拠に基づいたホットスポット分析の事例は少ない。

本研究では、最新のインベントリデータベースと環境影響評価手法に基づくホットスポット分析手法の開発を行い、科学的な方法を駆使して 100 品目を対象としたホットスポット分析に向けた検討を行った。

2. 研究目的

ホットスポット分析の基となる情報は、研究、市場、専門的な知見や事業者による科学的な調査を基にしたもので、その範囲は経済、環境、倫理、社会の多岐にわたるものである。様々なシステムで懸念される問題をホットスポット分析は、検討段階で先行して問題を抽出、精査することが可能であり、国、産業、組織、製品、サービスといった広い分野で活用することができる。

ホットスポット分析の結果は、専門家によるグリーンイノベーションのための羅針盤として、国・自治体・企業・消費者に広く報告され、環境ラベルの信頼性を高めるべく社会実装されるとともに、合理的な審査基準の下で、調達品目の選択を促進する改正グリーン購入法施行の基盤として活用されることを目指す。

3. 研究方法

3.1 評価対象と評価範囲の設定

本研究は、2011 年の IDEA (Inventory Database for Lifecycle Analysis)、WIO 2011(Waste Input-Output table)を基に、レトルト食品とカラー複写機のホットスポット分析を行った。

表 1 に機能単位とシナリオ設定、図 1 にシステム境界を示す。

表 1 機能単位とシナリオ設定

評価対象	レトルト食品	複写機
機能単位	レトルト食品1[kg] 製造から廃棄まで	カラー複写機1[台] 製造・使用・廃棄まで
評価シナリオ	国内で製造、家庭で使用した後、一般ごみとして焼却され、残渣を埋め立て処理	国内で製造、5 年使用した後、リサイクル施設に運ばれ再生、埋め立て処理

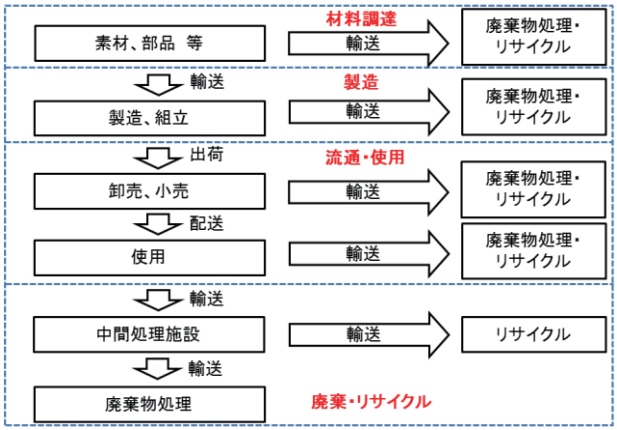


図 1 システム境界

3.2 計算方法

本研究では、2011 年産業連関表の部門分類に基づき統計データによる二次データ、工業会等から提供される一次データの収集を行った。

算定には、IDEA2、WIO 2011 のインベントリデータベースを使用し、統合化は環境影響評価手法である LIME(Life-cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling)2 を用いて評価を行った。

(1)材料調達、製造段階の推定

産業連関表の約 400 部門に分類された一部門である「レトルト食品」および「複写機」部門に投入(供給)される原材料、燃料、サービスのデータを抽出した。抽出したデータの内、再生資源回収・加工処理　部門までを「材料調達段階」に分類し、それ以降の部門を「製造段階」とした。

(2)輸送、使用段階の推定

輸送に関しては、生産した「レトルト食品」部門、「複写機」部門から使用する消費者(最終需要部門)に渡るまでの販売者(卸売・小売)および輸送手段(貨物輸送ほか)に関わるデータを産業連関表から推定した。

レトルト食品では流通・輸送のみ考慮して使用段階の加熱エネルギーは考慮していない。

カラー複写機ではトナー、印刷用紙の消費は考慮せず、消費電力のみを考慮した。

消費電力は、使用実績に基づいて 5 年間の総電力量を推定した。

(3)廃棄、リサイクル段階の推定

レトルト食品は包装材(レトルトパウチ)のみが一般廃棄物として収集、運搬されて焼却され、焼却残渣が埋め立てられるものとした。

カラー複写機は使用後に回収され、選別、破砕されてリサイクル材と廃棄物に分別され、各々再生、埋め立てされるものとした。

(4)LIME2 を活用した環境影響評価

上記(1)～(3)で推定したデータに基づき、インベントリ分析を行った後に LIME2 を活用して被害評価、統合化を行い、ライフサイクル別、影響領域別の環境影響評価結果を算出した。

4. 結果

4.1 レトルト食品

図 2 に示す様に、使用段階でエネルギーを消費しないとしたレトルト食品は、材料調達段階の土地利用の影響が大きく、食材である農林産物を作る際の田畑、森林の土地占有がホットスポットである。

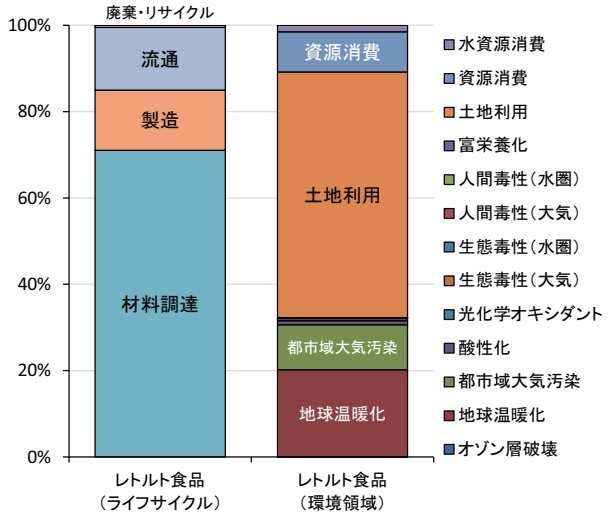


図 2 レトルト食品の統合化結果

4.2 カラー複写機

エネルギー消費型製品であるカラー複写機では図 3 に示す様に材料調達段階の温室効果ガス排出、土地利用、資源消費の影響が大きく、製品で多用されている集積回路ほかの電子部品を作る際のエネルギー、土地占有、金属資源がホットスポットである。

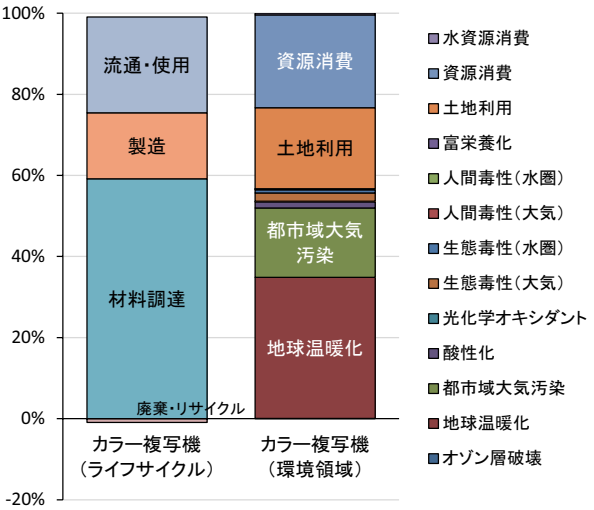


図 3 カラー複写機の統合化結果

5. 結論

本研究では、使用段階でエネルギーを使わない製品とエネルギー消費型製品のホットスポット分析を行い、各製品の特徴が分析結果に表れていることを確認した。

今後は、分析結果の精緻化を目指して製品の一次データ収集を行い、100 品目のケーススタディを行う予定である。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人　科学技術振興機構　戦略的創造研究推進事業（社会技術研究開発）「科学技術イノベーション政策のための科学研究開発プログラム」題名：製品ライフサイクルに立脚した環境影響評価基盤の構築と社会実装によるグリーン購入の推進において実施されました。

引用文献

1) 総務省：平成 23 年（2011 年）産業連関表（確報）
http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/
2) 伊坪研究室：環境フットプリントデータファイル
http://www.yc.tcu.ac.jp/~itsubo-lab/research/EFPitiran.html
3) 平成 23 年度　廃棄物収集運搬車両の低公害化に係る調査結果報告書
https://www.kankyo.metro.tokyo.jp/resource/recycle/attachement/le_packer2011_01.pdf
4) LCA 日本フォーラム：LIME2 係数リスト
http://lca-forum.org/database/impact/

産業連関表と家計支出統計の接続表を用いた カーボンフットプリントの GHG 排出削減効果の推計

Estimation of GHG reduction effect by carbon footprint based on connection table between Input-Output Table and household expenditure statistics

○環野真紀*[1)]、浅野泰仁[2)]、井原智彦[1)]
Maki Kanno, Yasuhito Asano, Tomohiko Ihara
1) 東京大学, 2) 京都大学
* kanno-m@envsys.k.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

消費者は日常生活を通じて、多くの直接・間接 GHG を排出する[1)]。消費者の低炭素製品選択を促進し、家計由来の GHG 排出量を削減するための取り組みのひとつとして、カーボンフットプリントが存在する。しかし、カーボンフットプリントが付与された製品の GHG 排出量削減効果は明らかではなく、製品数の少なさとあいまって消費者の低炭素製品選択のための指標とはなっていない。製品の GHG 排出量を網羅的に算出する方法として、産業連関分析が存在する。しかし、産業連関表の項目分類は製品の原材料に基づくため、家計支出統計の項目分類とは大きく異なる。

本研究では、産業連関表と家計支出統計の項目を対応させた接続表を開発する。接続表に基づいて、一般的な製品の GHG 排出量を算出することによって、カーボンフットプリントが付与された製品の GHG 排出削減効果を評価する。さらに、各世帯の消費行動に適用して、カーボンフットプリントの GHG 排出削減効果を明らかにする。

2. 産業連関表と家計支出統計の接続表の開発

図 1 に接続表の概念図を示す。

2.1. 産業連関表

製品の GHG 排出原単位として、国立環境研究所による「産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）」が利用されている。産業連関表の「総合解説編」に部門ごとに対応する日本標準産業分類と項目の例示が記載されている。本研究では、3EID（2005 年）[2)]と、2005 年の産業連関表（IO）[3)]、2002 年改訂日本標準産業分類（JSIC）[4)]を用いる。

2.2. 家計支出統計

家計支出の統計として、家計調査（家調）と全国消費実態調査（全消）が利用されている。家調の付録「収支項目分類及びその内容例示」に具体的な製品例が記載されている。本研究では、2004 年の家調[5)]および全消[6)]を用いる。

2.3. 産業連関表と家計支出統計の例示の対応

JSIC と家調の例示を対応させることで、各統計を連結し、支出額あたりの直接・間接 GHG 排出量(t-CO_2eq/百万円)の算出を可能にする。JISC の小分類の例示（5551 項目）と家調の小分類の例示（2609 項目）すべての項目が、それぞれ 1 項目以上の対応があるようにする。項目数が膨大であるため、客観的な指標を用いて自動的に対応する項目を判定する必要がある。そこで、自然言語処理における手法 Word2Vec[7)]を用いる。Word2Vec は、テキストデータに含まれる単語を 200 次元程度の空間内におけるベクトルとして表現する手法で、単語間の近さ（コサイン類似度）を算出することができる。テキストデータには、検索エンジンを用いて各項目の例示を検索し、上位 100 件のタイトルとスニペットを結合し、1 つのコーパス（自然言語の文章のデータベース）としたものを用いる。例示間のコサイン類似度を算出し、高いものを対応させる。

統計データ	3EID	産業連関表		家計支出統計	
				家計調査	全国消費実態調査
内容	国内外GHG排出原単位	産業別生産額経済波及効果		世帯ごとの支出額	世帯ごとの支出額
分類	産業連関表に基づく	日本標準産業分類	連結	収支項目分類	家計調査に基づく
	例示		⇔	例示	
	例示		⇔	例示	
	例示		⇔	例示	

図 1　接続表の概念図

3.　ケーススタディ：食料品の対応

3.1.　手法

CFP コミュニケーションプログラム [8]で認定されている CFP 宣言認定製品は 1280 件あり、そのうちの 17%が食品関連である。CFP の算定・宣言となる CFP 製品種別基準（CFP－PCR）が登録されている「うるち米（ジャポニカ米）」について、上記の手法で類似度を算出する。

初めに、対応可能な領域に含まれる項目とその例示を抽出する。表 1 に示した家調の細分類：米の例示はすべて IO の細分類：精米業に対応可能である。抽出した家調の例示を検索エンジンで 100 件ずつ検索し、タイトルとスニペットを結合して、コーパスを作成する。次に、単語を検出可能にするため、辞書に基づき文章を分割する形態素解析エンジン「Mecab」[9]を用いて、コーパス内の文章を単語に区切る。作成したコーパスに Word2Vec を適用し、コーパスに含まれる単語と IO の例示「精米（業）」との類似度を算出する。記号・英数字など、関連のない単語が複数の例示に共通して頻出する場合、それらを削除したコーパスを用いて再び類似度を算出する。

表 1　IO の細分類：精米業と家調の細分類：米の例示

大分類	中分類	小分類	細分類	例示
産業連関表（日本標準産業分類）				
製造業	食料品製造業	精穀・製粉業	精米業	精米業
家計調査				
食　料	穀　類	米	米	こしひかり
食　料	穀　類	米	米	ササニシキ
食　料	穀　類	米	米	あきたこまち
食　料	穀　類	米	米	無洗米
食　料	穀　類	米	米	玄米
食　料	穀　類	米	米	はい芽米

3.2.　結果

家調の細分類：米の例示から得られたコーパス内の単語を、IO の細分類の例示「精米（業）」と類似度の高いものから並べた結果を表 2 に示す。

表 1 に示した 6 つの例示から得たすべてのコーパスに「精米」が含まれていた。例示（米の種類）、産地、栽培方法や炊き方に関わる単語が「精米」と類似度が高い結果となった。処理を行いながら、助詞や小売・卸売に関わる頻出語（「通販」、「送料」、「無料」など）を削除した。コーパス内での単語の区切り方や、これらの単語の扱いを、より多くの品目で試算し、検討する必要がある。

このようにして、類似度が高い単語を検出可能なコーパスの例示を、対応可能なものとして連結する。例示が検出不可能であった場合は、細分類、小分類と項目を大きくして類似度を算出し、対応させる。

表 2「精米」との類似度

コーパス	こしひかり		ササニシキ		あきたこまち	
「精米」との類似度（降順）	米	0.978	県	0.910	あきたこまち	0.938
	コシヒカリ	0.976	産	0.909	秋田	0.936
	新潟	0.976	ササニシキ	0.909	栽培	0.935
	産	0.975	有機	0.907	米	0.934
	魚沼	0.972	東北	0.907	県	0.934

コーパス	無洗米		玄米		はい芽米	
「精米」との類似度（降順）	洗米	0.992	玄米	0.962	米	0.991
	無	0.992	米	0.961	玄米	0.991
	米	0.991	発芽	0.956	金	0.989
	方	0.989	白米	0.953	芽	0.988
	人気	0.988	炊き	0.951	胚芽	0.988

4.　結言

産業連関表と家計支出統計の項目を自然言語処理手法によって連結させる手法を考案した。本発表では、開発した接続表に基づいて、カーボンフットプリントによる一般的な製品の GHG 排出削減効果を算出し、カーボンフットプリントカーボンフットプリントが付与された製品の GHG 排出削減効果を評価する。各世帯の消費行動に適用して、カーボンフットプリントの GHG 排出削減効果を示す。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（若手研究（B）25740052）の支援により実施された。

引用文献

1) 井原智彦, 本瀬良子, 工藤祐揮: 環境システム研究論文発表会講演集, 37 (2009), pp.267-273
2) 南齋規介, 森口祐一：“産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)”, 国立環境研究所, (2012)
3) 総務省: “2005 年産業連関表”, (2009)
4) 総務省: “日本標準産業分類”(2002 年改訂)
5) 総務省: “2004 年家計調査統計報告”, (2005)
6) 総務省: “2004 年全国消費実態調査報告”, (2005)
7) Tomas Mikolov et al. “word2vec”, Google Code（オンライン）<https://code.google.com/archive/p/word2vec/>,（参照 2016-12-22）
8) “CFP プログラム”, 産業環境管理協会（オンライン）, <https://www.cfp-japan.jp/>（参照 2016-12-22）
9) 工藤拓：“Mecab”, GitHub（オンライン）, <http://taku910.github.io/mecab/>（参照 2017-1-4）

家庭における時間帯別省エネポテンシャルの推計

－社会生活基本調査を用いて－

Evaluation of hourly energy-saving potential in the home:
Analysis using the Survey on Time Use and Leisure Activities

○平湯直子*[1)]、鷲津明由 [2)]
Naoko Hirayu, Ayu Washizu
1) 武蔵野大学, 2) 早稲田大学
* n_hirayu@musashino-u.ac.jp

1. はじめに

電力市場自由化の背景の下で，ネガワット市場（節電の取引市場）の創設が検討されている。そのような中で，家庭におけるデマンドレスポンス（DR:電力需要のピーク時に，電力価格を引き上げる，または，消費者が節電に応じた場合に対価を支払う，という方法によって消費者に節電してもらうという仕組み）の効果がどの程度得られるかについて関心が高まっている。DR の効果について検討した先行研究は，実証フィールドでの限られた家庭を対象とした社会実験結果に基づくものが中心である。しかしこのような実証実験結果が一般性や持続性を持つかどうかについては疑問が持たれている [1,2)]。

電力は必需品であるので，家庭はたとえその時間に電力価格が高いとわかっていても，どうしても必要な電力を高い価格を支払って消費する可能性がある。そもそも節電の余地が全くない時間に節電要請を行っても，確実な DR の効果は望めない。そこで，家庭の時間帯別節電ポテンシャルを把握して，DR の効果の確実性を検証することが本研究の目的である。これにより家庭がピーク時の電力使用量を無理なく減らすには，どのような方法があるかを検証したい。

2. 研究の方法

2.1 用いるデータ

社会生活基本調査によれば，個人の 15 分ごとの行動パターンが把握できる。特に調査票 B では行動小分類別にそれを把握できる。一方，省エネルギーセンター／資源エネルギー庁「家庭の省エネ百科」によれば，家電機器の使い方を工夫するという省エネ行動によって可能となる省エネ（節電）ポテンシャルの大きさが推計されている。本研究では，個人の行動を，この省エネポテンシャルに対応付けることによって，15 分ごとの省エネポテンシャルロードカーブを推計する。

2.2 推計の手順

推計の手順は図 1 と 2 に示す。まず，4 つの季節ケース別，全国・地域別，社会生活基本調査・調査票 B による小分類の行動別に，15 分当たり省エネポテンシャル原単位（以下，省エネポテンシャル原単位）を図 1 の手順で計算する。ここで，省エネポテンシャル原単位とは，ある行動のために必要な機器の使い方を工夫することによって達成できる，CO_2 削減量と，エネルギー（原油換算 L），電力，都市ガス，ガソリンの各削減量を，その行動 15 分当たりの大きさにした値のことである。社会生活基本調査の行動分類と，使用する機器との関係を表 1 に示す。

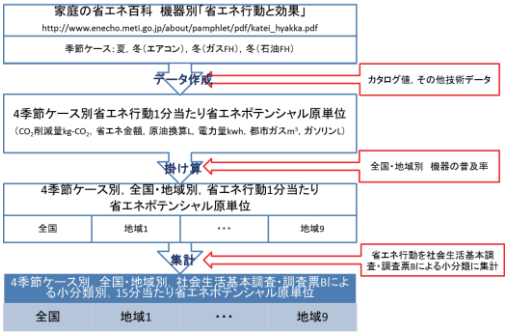


図 1　省エネポテンシャル係数導出手順

次に，各個人の 15 分ごとの行動パターンを個人およびその属する世帯の属性ごとにまとめて，ポテンシャル原単位を乗ずることにより，平均的な省エネロードカーブを作成する（図 2）。

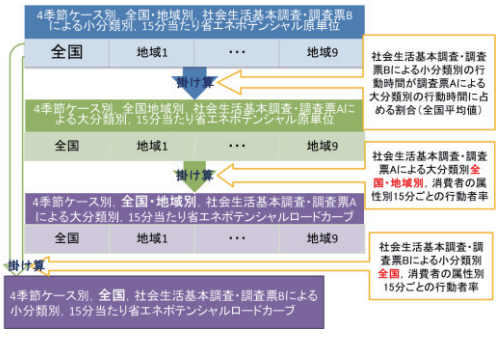


図 2　省エネロードカーブ導出手順

表 1　社会生活基本調査の行動分類と使用機器との対応

調査票 A による分類	調査票 B による分類	省エネ行動を行う機器
5　仕事	112　主な仕事中の移動	自動車(1/9)
5　仕事	122　副業中の移動	自動車(2/9)
4　通勤・通学	131　通勤	自動車(3/9)
7　家事	211　食事の管理	ガス給湯器
		電子レンジ
		ガスコンロ
		食器洗い乾燥機
		炊飯器
	214　住まいの手入れ・整理	掃除機
	215　衣類等の整理	洗濯機
		乾燥機
	219　世帯管理	ノート PC
11　移動(1/3)	226　子供の送迎移動	自動車(4/9)
10　買物	231　買い物	ノート PC
11　移動(2/3)	241　家事関連に伴う移動	自動車(5/9)
	252　ボランティア活動に伴う移動	自動車(6/9)
2　身の回りの用事	422　入浴	風呂給湯器
15　趣味娯楽	53B　ドライブ	自動車(7/9)
	53D　コンピュータの使用	ノート PC
12　テレビ・ラジオ・新聞	552　新聞・雑誌	ノート PC
	553　テレビ	テレビ
11　移動(3/3)	611　家事的趣味に伴う異動	自動車(8/9)
	612　その他の移動	自動車(9/9)
冬の在宅時間		エアコン
		ガス FH
		石油 FH
		電気こたつ
		電気カーペット
		照明(LED)
		電気ポット
夏の在宅時間		エアコン
		照明(LED)
		電気ポット
全時間		電気冷蔵庫
		温水洗浄便座

3. 省エネポテンシャル原単位の推計結果

電力の省エネポテンシャル原単位を図 3 と 4 に示す。

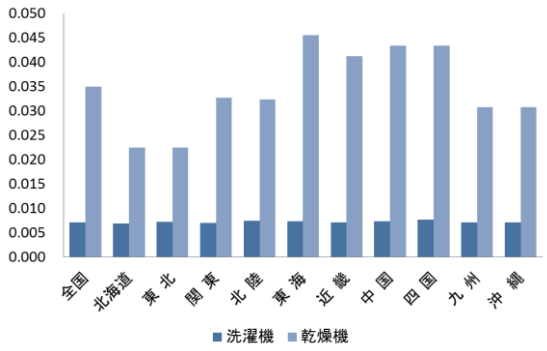


図 3　省エネポテンシャル係数(電力 kwh/15 分)

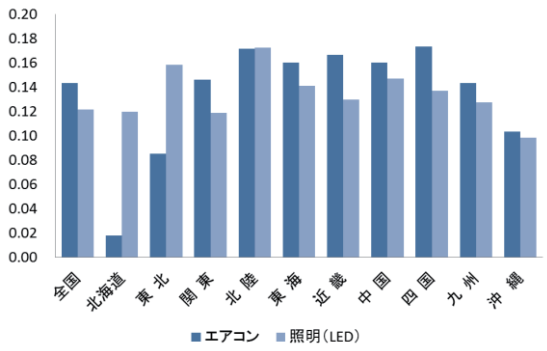


図 4　省エネポテンシャル係数(電力 kwh/15 分)

図 3 は洗濯機と乾燥機の稼働時間 15 分あたりの省エネポテンシャル原単位である。原単位の地域別の大きさの違いは機器の普及率の違いに基づく。機器の平均的な省エネ量は標準的なスペックの仮定の下で計測されている[3]が，各地域の普及率の違いに応じて，実際には各地域の特性の違い（家族数など）に応じて，機器のスペック（洗濯機の大きさなど）が異なるだろう。そうしたスペックの違いを示す代理変数としてここでは普及率を用いている。図 4 はエアコン（冷房）と照明（LED）稼働時間 15 分あたりの原単位である。

4. 省エネポテンシャルロードカーブ

省エネポテンシャル係数と社会生活基本調査・調査票 A による集計結果を用いて計算した省エネポテンシャルロードカーブを図 5 と 6 に示す。図 6 は図 5 のうち，家事用家電の利用に係わる省エネポテンシャル部分を示す。

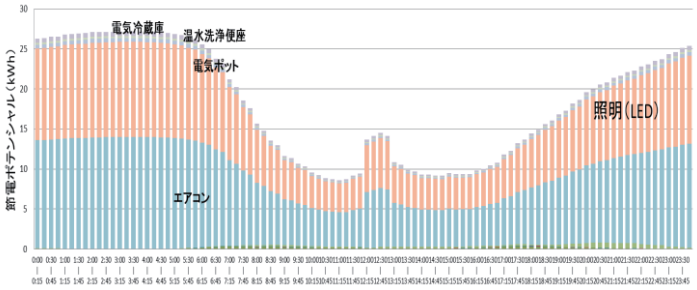


図 5　省エネポテンシャルロードカーブ（全国総数）

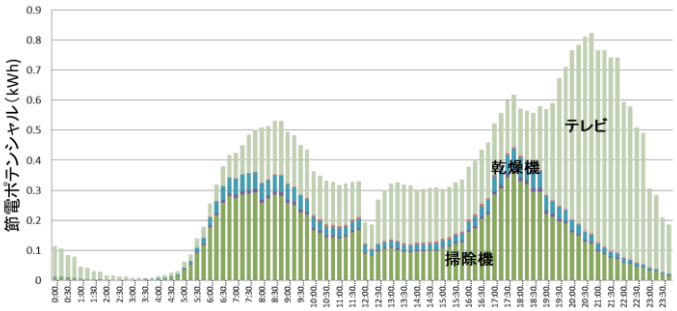


図 6　家事の省エネポテンシャルロードカーブ(全国総数)

5. 謝辞

本研究は，一般財団法人住総研平成 28 年度の助成（助成 No.1615），データの収集については平成 27～30 年度科学研究費補助金（挑戦的萌芽研究）（課題番号 16K12663 代表：鷲津明由）の下で実施した。

6. 引用文献

1)　トヨタ自動車株式会社 I-1-2 ― エネルギー情報マネジメントシステム(EDMS)サービスの実証検証，及び調査・研究 http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/150330/150330_126.pdf

2)　向井登志広，西尾健一郎，小松秀徳，内田鉄平，石田恭子，エネルギー・資源，36(4) (2014)

3)　家庭の省エネ百科 http://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/pdf/katei_hyakka.pdf

家計消費とプラネタリー・バウンダリー：淡水利用について

Household consumption and planetary boundaries: a case study of freshwater use

○佐々木貴央*[1)]、本下晶晴[2)]、南斉規介[3)]、橋本征二[1)]
Takahiro Sasaki, Masaharu Motoshita, Keisuke Nansai, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学,　2) 産業技術総合研究所,　3) 国立環境研究所
* rv0037ie@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

近年、地球システムの重要なプロセスについて、人類が安全に活動できる境界を示した「プラネタリー・バウンダリー」[1)]とうい概念が注目されている。プラネタリー・バウンダリーは、気候変動、海洋の酸性化、成層圏オゾンの減少、窒素・リン循環の変化、淡水の利用、土地利用の変化、生物多様性の減少、エアロゾルの負荷、化学物質による汚染という 9 つの項目からなるが、いくつかの項目は既に限界値を超えており[2)]、持続可能な社会の実現のためにも我々の活動をプラネタリー・バウンダリーの範囲内に抑えることが求められている。このためには、我々のどういった消費活動がどのプラネタリー・バウンダリーにどれだけ影響を与えているのかを知る必要がある。

本研究では、9 つのプラネタリー・バウンダリーの中でも淡水の利用を対象として、我々の家計消費が淡水の利用に与える影響を評価した。本要旨では、日本の家計消費が直接・間接に利用する淡水量を推計する方法について述べ、結果については学会当日に報告する。なお、プラネタリー・バウンダリーにおける淡水の利用は consumptive blue water use のため、以下では淡水消費量という言葉を用いる。

2. 方法

2.1 家計消費の影響の推計方法

本研究では、世界連結産業連関モデル(Global Link Input-Output model)(以下、GLIO モデル)[3,4)]を用いてグローバルな直接・間接の淡水消費量を推計した。GLIO モデルでは、わが国の生産消費システムと諸外国との国際貿易を通じた関係性を表 1 に示す勘定体系に基づき表現し、国内外における財やサービスのフローを記述している。表1の$\sum_{k=1}^{l} Y^{(k)}$, $\sum_{k=1}^{l} Z^{(k)}$, $\sum_{k=1}^{l} W^{(k)}$, f^Gに各国の各部門における淡水消費のフットプリントを推計したものを記述することで、日本の家計消費がグローバルな淡水消費に及ぼす影響を推計するモデルである。なお、GLIO モデルは 2005 年を対象としていることから、本研究でも 2005 年を対象年とした。

具体的には、国外部門の輸出量$Y^{(k)}, Z^{(k)}, W^{(k)}$を国外商品 k が内包する淡水消費のフットプリントで表現した行列$Y^{(k)}, Z^{(k)}, W^{(k)}$に変換する。同様に国外部門の最終需要$f^G$を自国の国産品への需要に関して内包する淡水消費のフットプリントf^Gで表現する。

表 1 世界連結産業連関(GLIO)モデルの勘定体系
表頭表側は以下の通り。sc1,部門分類(第一階層); sc2,部門分類(第二階層); sn,部門番号; **JP**,国内部門; **OS**,国外部門; **FD**,最終需要部門; **TO**, 総生産量部門; DC,国産品部門; IC,最終需要部門が直接需要する輸入品部門; FC,国外地域部門。添え字の k は国外商品の種類を示す。

		sc1	JP		OS	FD	TO
		sc2	DC	IC	FC		
sc1	sc2	sn	n^{JP}	n^{JP}	n^{GL}		
JP	DC	n^{JP}	X^D	0	E	f^{JD}	x^{JD}
	IC	n^{JP}	0	0	0	f^{JI}	x^{JI}
OS	FC	n^{GL}	$\sum_{k=1}^{l} Y^{(k)}$	$\sum_{k=1}^{l} Z^{(k)}$	$\sum_{k=1}^{l} W^{(k)}$	f^G	x^G

$$\tilde{Y}^{(k)} = \sum_{k=1}^{l} (\hat{\omega}^{(k)} Y^{(k)}) \quad (1)$$

$$\tilde{Z}^{(k)} = \sum_{k=1}^{l} (\hat{\omega}^{(k)} Z^{(k)}) \quad (2)$$

$$W^{(k)} = \sum_{k=1}^{l} (\hat{\omega}^{(k)} (U - I) \otimes W^{(k)}) \quad (3)$$

$$\tilde{f}^G = \hat{\lambda}^G (I - \hat{m}^{Gf}) f^G \quad (4)$$

$\omega^{(k)}$は国外地域pの輸入商品kの単位あたりに発生する自国内での直接間接の淡水消費量を示す内包型淡水消費量原単位である。U は全ての要素を 1 とする行列であり、I は n^{GL} 次元の単位行列を示す。また、λ^Gは国外地域pの国産品への 1 単位の国内最終需要あたりに発生する直接間接の淡水消費量である。m^{Gf}は国外地域pの最終需要に占める輸入率を示す。演算子⊗は行列の成分ごとの積を表すアダマール積である。式(3)は、(U-I)を$w^{(k)}$に乗じることで、国外地域内の国産品の中間投入量を示す$w^{(k)}$の対角成分の淡水消費の内包量を 0 としている。中間投入量と総生産量は、両者またはどちらかを淡水消費の内包量に換算しても比例関係にあると仮定し、以下のように投入係数行列を作成する。

$$A_{11} = X^D (\hat{X}^{JD})^{-1} \quad (5)$$

$$\tilde{A}_{13} = E (\hat{\tilde{X}}^G)^{-1} \quad (6)$$

$$\tilde{A}^{(k)}{}_{31} = \tilde{Y}^{(k)} (\hat{X}^{JD})^{-1} \quad (7)$$

$$\tilde{A}^{(k)}{}_{32} = \tilde{Z}^{(k)}(\hat{X}^{JI})^{-1} \quad (8)$$

$$\tilde{A}^{(k)}{}_{33} = \tilde{W}^{(k)}(\hat{X}^{G})^{-1} \quad (9)$$

$\tilde{X}^{G}$は各国の総淡水消費量を要素とするベクトルである。また、わが国の単位あたりの直接淡水消費量を示すベクトルをd^{JD}とすると、各部門の内包型淡水消費量を要素とする行列成分$E^{JD,JD} = [e_{i_1 j_1}^{JD,JD}]$、$E^{JD,JI} = [e_{i_1 j_2}^{JD,JI}]$、$E^{G,JD} = [e_{pj_1}^{G,JD}]$、$E^{G,JI} = [e_{pj_2}^{G,JI}]$を得ることができる。$e_{i_1 j_1}^{JD,JD}$は、商品$j_1$への国内の最終需要$f_{i_1=j_1}^{JD}$によってもたらされる、商品$i_1$の製造に伴う国内での淡水消費量を示す。$e_{i_1 j_2}^{JD,JI}$は、輸入商品$j_2$への国内の最終需要$f_{i_2=j_2}^{JI}$によってもたらされる、商品$i_1$の製造に伴う国内での淡水消費量を示す。一方で、$e_{pj_1}^{G,JD}$、$e_{pj_2}^{G,JI}$はそれぞれ$f_{i_1=j_1}^{JD}$、$f_{i_2=j_2}^{JI}$によってもたらされる国外地域 p での淡水消費量を示す。以下に、その式を示す。横付きの diag は対角行列である。

$$\begin{pmatrix} E^{JD,JD} & E^{DJ,DI} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ E^{G,JD} & E^{G,JI} & 0 \end{pmatrix}$$

$$= \mathrm{diag}\begin{pmatrix} d^{JD} \\ 0 \\ i^{G} \end{pmatrix}\left\{ I - \begin{pmatrix} A_{11} & 0 & \tilde{A}_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ \sum_{k=1}^{l} \tilde{A}_{31}{}^{(k)} & \sum_{k=1}^{l} \tilde{A}_{32}{}^{(k)} & \sum_{k=1}^{l} \tilde{A}_{33}{}^{(k)} \end{pmatrix} \right\}^{-1}$$

$$\mathrm{diag}\begin{pmatrix} f^{JD} \\ f^{JI} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

2.2 各国各部門における直接的な淡水消費量の推計方法

本研究では、国内部門を 812 部門(n^{JP}=406、n^{JI}=406)、国外部門を 230 部門(n^{GL}=230)、国外商品を 111 種類(l=111)として、淡水消費量の推計を行った。

国内の各産業部門の直接淡水消費量については、Ono et al.[5]の supplementary material のデータを用いた。国外部門の直接淡水消費量は、以下のような推計方法を用いた。

農業部門は Pfister and Bayer[6]によるグリッドスケールの 160 種の作物別淡水消費量データを基に GTAP(Global Trade Analysis Project)の産業分類に対応して国別に各農業部門に集約することで直接淡水消費量を推計した。電力部門は Pfister et al.[7]による各国の電源構成を考慮した淡水消費量の推計値を利用した。畜産部門は、Water GAP 2 による流域別畜産用淡水消費総量の推計値を国別に集計し、各国の水道部門から各畜産部門(4 部門)への投入金額の割合で淡水消費総量を配分した。上記以外の部門については、Water GAP 2 の製造業部門の総淡水消費量(工業用水)と生活用水の総淡水消費量[7]を国別に集計した上で、各部門への配分を行った。配分率の設定のため、日本の 2005 年産業連関表の上水道・簡易水道部門と工業用水部門から各産業部門(406 部門)への投入金額を GTAP の 57 部門へ集約し、上水道・簡易水道部門と工業用水部門から各産業部門への投入比率を設定した。次に、GTAP における水道部門から各産業部門への投入金額を、上記の投入比率を用いて上水道・簡易水道部門と工業用水部門に振り分けた。最後に、各国の工業用水及び生活用水の総淡水消費量を、推計された各部門の工業用水と上水の投入金額の割合に応じて、各産業部門と家計消費部門へ割り振ることで推計した。ここでは、各国各産業の上水道・簡易水道部門と工業用水部門の投入比率が、日本と同じという仮定を置いている。

GTAP の非対象国では、国別に集計した灌漑用水、生活用水、工業用水、畜産用水、電力用水の合計を直接淡水消費量とし、これを各国の国内生産額の合計で除すことで、単位生産額あたりの直接淡水消費量とした。GTAP の非象外国では部門の違いを考慮せず、製造された商品は全て同じ淡水消費原単位となる。

2.3 基準化の方法

淡水利用のプラネタリー・バウンダリーは、年間 4000km^{3}以下と設定されており、家計消費に関わる各産業部門の淡水消費量をこの値で除すことで基準化を行った。基準化された数値は、家計消費が他のプラネタリー・バウンダリーに与える影響との比較を行う際に用いるものである。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金（15H02863、15H05342）による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

1) Rockström J. et al.: A safe operating space for humanity, Nature, 461(24), pp.472-475, 2009
2) Steffen, W. et al.: Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet, Science, 347(6223), 1259855, 2015
3) 南斉規介、加河茂美、近藤康之、稲葉陸太、中島謙一：世界連結産業連関モデルの開発、第 4 回日本 LCA 学会発表研究会講演要旨集、ｐp.130-131、2009
4) Nansai, K. et al.: Characterization of economic requirements for a “carbon-debt-free country”, Environmental Science & Technology, 46, pp.155–163, 2012
5) Ono、Y. et al.: Development of water footprint inventory database on Japanese goods and services distinguishing the types of water resources and the forms of water uses based on input-output analysis, International Journal of Life Cycle Assessment, 20, pp.1456–1467, 2015
6) Pfister, S. and Bayer, P.: Monthly water stress: spatially and temporally explicit consumptive water footprint of global crop production, Journal of Cleaner Production, 73(15), pp.52-62, 2014
7) Pfister, S. et al.: The environmental relevance of freshwater consumption in global power production, The International Jounrnal of Life Cycle Assessment, 16(6), pp.580-591, 2011
8) Alcamo, J. et al.: Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability, Hydrological Sciences Journal, 48(3), pp.317-337, 2003

消費者の生活価値観と環境配慮行動の関係

How consumers value standard of affects their pro-environmental behavior

○木村大*[1)]、柴田清 [1)]
Dai Kimura, Kiyoshi Shibata
1) 千葉工業大学
* s1291005gv@s.chibakoudai.jp

1. 研究背景と目的

平成 28 年度版の環境白書 [1)]では、2014 年度の二酸化炭素総排出量は 2005 年度と比較して 3.1%減少しており、部門別では産業部門が同年比で 6.8%減少している。しかし、家庭部門では同年比で 6.6%増加している。家庭部門の排出量は他部門への間接的な影響も大きく、家庭部門の排出量削減が重要となる。

家庭部門からの排出削減にあたっては、消費者の環境配慮行動が重要である。広瀬 [2)]は消費者にとって環境配慮行動が、手間がかかる場合や個人の快適さが損なわれるため、環境に配慮したいという意識が高くても行動に結びつかないという点を指摘した要因関連モデル提案した。その後、広瀬のモデルは消費者の環境配慮行動を解析する多くの研究の基礎になっている。しかし、その多くは消費者のデモグラフィックな要因や生活様式が、どのようにして環境配慮への態度を形成し、配慮行動に結びつくか検討したものである。態度の形成に際しより根本的な価値観について検討していない。ところで、真鍋 [3)]によれば「価値観」は「態度」を方向づけ、そしてそれらが「意見」や「行動・行為」につながるとされている。そこで本研究では、環境配慮への態度はどのような価値観に規定されるのかを明らかにすれば消費者の環境配慮行動をより促すことができると考え、消費者のもつ価値観がどのようにむすびつき環境配慮行動に現れるか Web アンケートを実施し解析した。

2. 研究方法

消費者がもつ価値観、環境配慮行動を Web アンケートによって調査した。価値観については、設問作成時に様々な価値観の項目を設定し、その内容を問う設問を 32 問作成した。環境配慮行動については、買い物時のマイバッグ持参や環境配慮製品の選択や節電行動などについての設問を 15 問作成した。回答方法は「非常にあてはまる」から「全くあてはまらない」の 5 件法とした。

3. 結果と考察

調査は 2016 年 7 月に、㈱ネオ・マーケテイング登録モニターの成人男性および成人女性計 1000 人を対象に実施した。

調査に当たって、「経済」や「社会公正」などの重視する価値観を予め想定した設問を作成していたが、設問の意図通りに回答者の認識が得られているか、クロンバックのα係数による信頼性分析によって確認した。

今回の調査サンプルにおいて、回答者のもつ価値観を抽出するため、因子分析を実施した。因子抽出方法は、アルファ因子法とした。その結果、9 個の因子を抽出した。グルーピングされた設問とα係数と因子名を表 1 に示す。抽出した因子の中にはα係数が 0.5 を下回る因子がいくつか検出された。しかし、解析を進めるにあたりα係数の 0.45 以上の 7 因子を採用し各因子の下位尺度得点を算出し分析を行った。

表 1　設問文とα係数および因子名

設問	α係数	項目名
ボランティア活動などの良い話を聞くと、自分もそうしなければと思う	0.665	弱者保護
アフリカで飢えに苦しむ子供たちへの募金に応じる		
中東の難民を日本も受け入れるべきだ		
伝統芸能は社会としてお金をかけてでも受け継いでいくべきだ		
議員選挙の投票によって社会を変えることができる		
政治や経済に関する出来事について、常に情報収集している	0.494	共同体意識
将来に希望を持っている		
TPP（環太平洋パートナーシップ協定）に賛成である		
日本人に生まれて幸運だ		
ハロウィンで仮装して渋谷で騒ぐ人達のニュースを見るとあきれる	0.572	合理思考
アイドルやアニメに金をかけるのは、馬鹿げている		
「不特定の誰かのため」なんて綺麗ごとだ		
メタボリックシンドロームの人は医療費を高くすべきだ		
他人の評価が気になる	0.518	比較選好
日常生活で物事を決める際、まずは他者の意見を仰ぐ		
日用品や食料品は安い時にまとめ買いする		
雑貨・日用品を購入する場合、実店舗と通販で価格を比較する		
自宅の近所に葬儀式場ができるのは絶対嫌だ		
日本の食料自給率を高めるべきだ	0.533	厚生経済
累進課税を強化すべき（高所得者の税率を上げるべき）だ		
日本は直近の景気対策より財政赤字削減にもっと真剣に取り組むべきだ		
高校の制服は廃止すべきだ	0.46	未来志向
家事などが全て自動化したら暮らしは豊かになる		
人工知能を搭載したロボットと暮らしてみたい		
同性同士の結婚を認めるべきだ		
日本の福祉政策は、子育てよりも高齢者介護に力を入れるべき		
横断歩道以外のところで車道を渡らない	0.661	規則遵守
電車の優先座席付近では携帯電話やスマートフォンの電源を切る		

検出された因子と環境配慮行動に関するパスモデルを作成し共分散構造分析を行った。環境配慮行動については、回答結果をダミー変数・点数化したものを「環境配慮行動値」とした。価値観と環境配慮行動値との関連について、採用されたモデルを図 1 に示す。モデルの適合度は、GFI=0.957、AGFI=0.914、RMSEA=0.093 であった。環境配慮行動に直接影響を及ぼす価値観は「弱者保護」、「規則遵守」、「厚生経済」であった。「共同体意識」から影響を受ける「弱者保護」の考え方が環境配慮行動に繋がるということは、将来において環境問題が進行した場合、困る立場の人々のことを想定し、配慮行動をと

る可能性が示唆された。

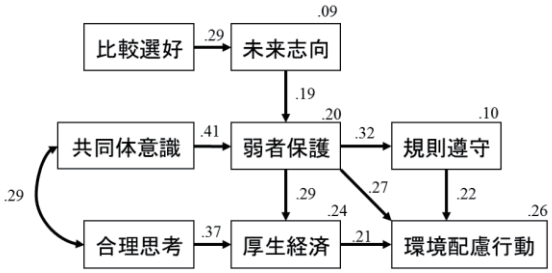


図 1　価値観と配慮行動に関するパス図

価値観の因子分析によって得られた因子得点を用いて、Word 法によるクラスタ分析を行った。その結果、4 つのクラスタに分類することができ、各クラスタの人数は、クラスタ 1 が 165 人、クラスタ 2 が 92 人、クラスタ 3 が 310 人、クラスタ 4 が 433 人であった。4 つのクラスタを独立変数、7 つの因子を従属変数とし各因子の平均値を比較した。各クラスタの平均値を図 2 に示す。

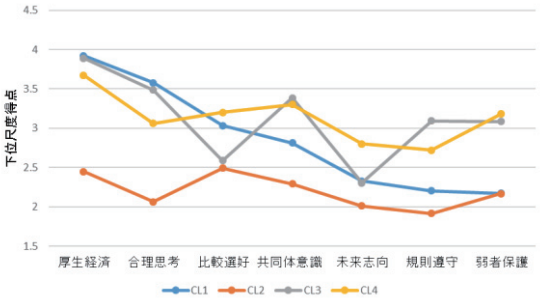


図 2　各クラスタの下位尺度得点の平均値

各クラスタの特徴として、クラスタ 1 の人々は、「合理思考」や「厚生経済」の下位尺度得点の平均値が高く、反面「弱者保護」や「規則遵守」といった価値観は低いため、「合理主義群」とした。クラスタ 2 の人々は他のクラスタと比較してどの項目も平均値が低いため、「無関心群」とした。クラスタ 3 の人々は「比較選好」や「未来志向」の平均値は低く、「規則遵守」の平均値がどのクラスタよりも高いため「共同体重視群」とした。クラスタ 4 の人々は「弱者保護」や「未来志向」、「比較専攻」といった価値観を重視しつつ、「合理思考」や「厚生経済」といった価値観はクラスタ 1 やクラスタ 2 と比較して低いため「周囲調和群」とした。

配慮行動においてクラスタ毎の特徴を見出すため、環境配慮行動に関する設問 15 問についてアルファ因子法による因子分析を実施した。その結果 2 因子を抽出し、配慮行動をとるにあたり手間やコストがかかり、環境配慮に対し比較的強く意識しなければならない「意識型」と、それほどかからずに済む「節約型」の配慮行動に分けることができた。各クラスタの「意識型」と「節約型」の配慮行動値の平均値を図 3 に示す。

共同体重視群と周囲調和群に属する人々は配慮行動値の平均値に大きな差は見られないが、他のクラスタと比較して配慮行動をとっている傾向がある。合理主義群については、「意識型」の配慮行動値の平均値が他のクラスタと比較して最も低いが、「節約型」の配慮行動の平均値は共同体重視群と同様の水準にある。合理主義群の人々に対し、「意識型」の配慮行動を促進するには、環境配慮行動がとることが合理的であり、経済性に合致することを認識させることで、行動促進につながる可能性がある。例えば、環境税等の経済的誘導策の導入や、環境問題の進行による経済損失の大きさを認識させることなどが挙げられる。

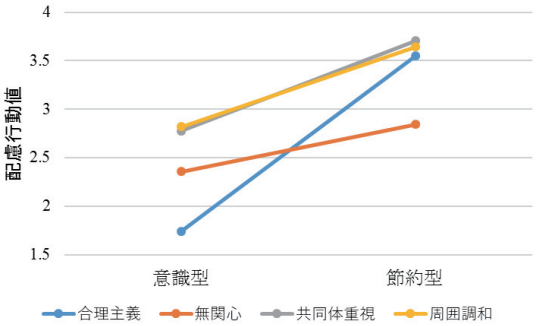


図 3　意識型と節約型の平均値

4. まとめ

本研究では、消費者の価値観がどのように環境配慮行動に結びつくか検討した。弱者保護、規則遵守や厚生経済などの価値観が環境配慮行動に直接影響する結果となった。また、合理的思考をとるがゆえに、環境配慮行動に至らない人が一定数存在し、彼らを環境配慮行動に導くための制度的な工夫の余地があることが示唆される。今後、価値観の項目設定に見直しを加えたうえで解析を進め、一般消費者の環境配慮行動に結びける要因や手段を検討する必要があると考える。

引用文献

1)　環境白書:平成 28 年版「環境白書」
2)　広瀬幸雄:社会心理学研究,10 (1994)P44-55
3)　真鍋一史:法学研究 86 巻 7 号(2013)

将来の国産木材需給と木質バイオマス発電所の立地適性

Domestic future wood supply-demand and location suitability of woody-biomass power plants in Japan

○大澤一岳*[1,2]、徐夢荷[1]、兼松祐一郎[1]、大久保達也[1]、菊池康紀[1]
Kazutake Oosawa, Menghe Xu, Yuichiro Kanematsu, Tatsuya Okubo, Yasunori Kikuchi
1) 東京大学, 2) 和歌山県
*oosawa_k0002@platinum.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

日本は、国土面積の 67%である約 25 百万 ha を森林が占める世界でも有数の森林国である。化石資源の代替や新たな機能を持つ製品素材として、森林は国内で得られる有用な再生可能資源といえる。日本の森林は育成単層林、育成複層林および天然生林に大別されるが、とりわけ林業活動の主たるフィールドである育成単層林（所謂、人工林）は、森林の持つ公益的機能のみならず持続可能な木材供給源として、将来目指すべき森林構成と齢級分布を見据えた計画的な伐採・更新による適切な資源管理が求められている。

また、森林資源の分布状況を都道府県別に見ると、森林率が 31%から 84%まで存在し、資源分布が一様ではない。一方で再生可能エネルギー固定価格買取制度（以下、FIT）が 2012 年に施行されると、燃料の年間必要量が数万 m^3 を越える木質バイオマス発電所が全国に 87 箇所（2016 年 4 月現在）計画、建設[1,2]され、木材需給に大きなインパクトを与えている。また、これらの発電所は発電のみを対象とし廃熱利用が積極的に行われていないため、総合エネルギー効率が低位であるという課題も併せ持っている。

そこで本研究では、木材供給のシミュレーションと地域毎の木材需要シナリオを組合せ、将来における木材需給のバランスを木質バイオマス発電所の立地を考慮して分析した。併せて、それぞれの地域の熱需要に応じた発電廃熱利用を検討し、CO_2 排出量の削減可能性を検証した。

2. 推計手法

2.1 需給バランスの推計フロー

今回の推計は地域毎の木材需要の推移計算、木材需給分析、および発電廃熱利用検証の３ステップで構成されている。推計フローを図 1 に示す。想定される木材のマテリアル需要に対し、木質バイオマス発電所による需要増が地域毎にどの程度のインパクトを与えるのかをこのフローにより検証する。

木材供給のシミュレーションは既存のモデル[3]によるシミュレーション結果を用いた。なお、間伐材の供給については各都道府県の地域森林計画に基づいて行われるようモデルを拡張し、再計算を行った。

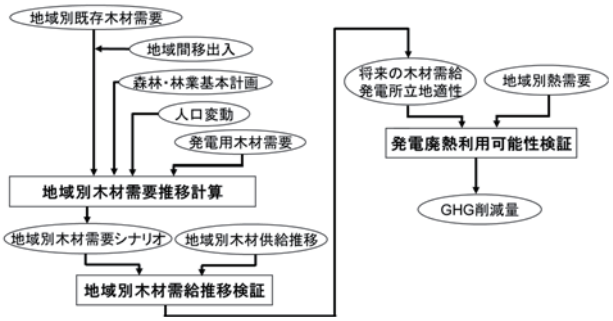


図１　木材需給の推計フロー

2.2 現状の木材需要

木材需要の推計は、マテリアル需要として用途別に製材用、合板用、製紙用チップ、およびエネルギー需要としての発電用チップとした。基礎データについては、マテリアル需要は林野庁公表統計である木材需給報告書(2012)主要部門別、自県・他県・外材別素材入荷量[4]を、エネルギー需要についてはバイオマス白書2016[1]やプレスリリース[2]を参考に発電用の需要を集計し、それぞれ針葉樹利用率、民有林材の利用率を考慮している。また、都道府県間の木材の移出入を加味した需要量とするため、木材需給報告書(2012)主要部門別素材交流表[5]を逆行列に加工し、各都道府県の需要量から供給に対する需要を計算して、各用途の需要量を求めた。発電用チップについてはプレスリリース[2]や各発電所の Web ページを参考に、未利用材および一般木材の利用量を推算している。

2.3 需要シナリオの設定

今回の推計では表 1 に示す３とおりの需要シナリオを都道府県毎に設定して供給シナリオとし、需給バランスを検証した。シナリオ１は、マテリアル需要においては森林・林業基本計画に準じた積極的な需要拡大(高)が見込まれ、FIT による木質バイオマス発電所も全て順調に稼働するもの(高)、シナリオ２は、マテリアル利用は人口変動に木材需要が連動し(中)、FIT による木質バイオマス発電所が順調に稼働するもの、シナリオ

３は、マテリアル利用は人口変動に木材需要が連動し、FIT による木質バイオマス発電所は失敗に終わるもの(低)、としている。人口変動については公表の推計データ[6]を使用した。

表１各需要シナリオの設定

需要種別	製材用	合板用	製紙用チップ	発電用チップ
シナリオ１	高	高	高	高
シナリオ２	中	中	中	高
シナリオ３	中	中	中	低

2.4 発電廃熱の利用ポテンシャルと効果

それぞれの木質バイオマス発電所から発生する廃熱量を発電効率から推算し、各発電所の立地市区町村で地域温冷熱として供給するシミュレーションを実施し、CO_2 排出削減効果を検証した。廃熱利用は住宅、業務の順に給湯と空調に対して熱供給を行うこととし、月・時間別需要をもとに長期的な熱需要予測に基づいたシミュレーションとした。指標として、年間 CO_2 排出削減量を用いた。

3. 結果と考察

推計は 2012 年から 2112 年の 100 年間で行った。2012 年の供給と需要の指数を１とした場合の需給バランスの推移は以下のとおりである。シナリオ１では 2062 年で 1.01、2112 年で 1.08 と日本全体では概ねバランスするが、地域別に見るとそのばらつきは 0.21 から 9.74 と大きく、現状の林業活動の規模が資源量に対して小さい地域では供給が需要を大きく上回る。また、木質バイオマス発電所の稼働期間中は発電需要が負担となり、北日本と九州南部を中心に大きく供給が不足し、2030 年には全国の指数が 0.65 と供給が需要を大きく下回る。マテリアル需要が人口変動と連動するシナリオ２およびシナリオ３では、将来的に日本全体で大きく供給過剰となり、シナリオ２においての初期の発電需要が北日本の一部の地域で供給不足を引き起こすものの、現在の発電所の売電期間が終了すると急激に供給過剰へと転じる。つまり、マテリアル需要の拡大が順調に進めば、さらなる木質バイオマス発電所の導入および運転継続は人工林の資源面から困難であるが、木材需要が人口変動に一定程度連動すれば木質バイオマス発電のさらなる導入が可能な地域が発生することとなる。

一方、発電廃熱の利用ポテンシャルについては、利用端において全国で約 29.6 PJ/year の熱供給が可能であり、約 37.5 10^3 ton-CO_2-eq/year の CO_2 排出量の削減が可能となった。

4. おわりに

今後は木材需要の指標である住宅着工戸数の推移や新たな機能性素材の材料としての需要予測、熱供給事業の展開の検証、また、各地域の路網整備の進捗や林業機械の導入予測などを新たに加えた供給シナリオの最適化、それに連動した育成複層林および天然生林へのモデル拡張による森林全体モデルによるシナリオ分析が必要である。

謝辞

本研究は、若手研究 A(16H06126)、基盤研究 A(15H01750)、基盤研究 A(26240032)、環境研究総合推進費(1RF-1503)および NEDO プロジェクト「非可食性植物由来化学品製造プロセス技術開発／電子・材料・ナノテクノロジー部実施事業の周辺技術開発実施／非可食性バイオマスを活用するスマート化学生産システムに関する調査（平成 27 年度）」における研究成果を含んでいる。

東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は（株）地球快適化インスティテュート、日本電信電話（株）、富士フイルムホールディングス（株）、三井不動産（株）、（株）LIXIL、信越化学工業（株）からの寄付で活動している。

引用文献

1) 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 2016, pp.5
2) 日刊木材新聞社：日刊木材新聞, 2016.1.8, pp.2-18
3) 大澤一岳、兼松祐一郎、大久保達也、菊池康紀：第 11 回日本 LCA 学会講演要旨集, 柏, (2016), pp.90-91
4) 林野庁："木材需給報告書主要部門別、自県・他県・外材別素材入荷量（2012）", e-Stat 政府統計の総合窓口，(オンライン)，入手先 <http://www.estat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001118013>,（参照 2016-10-15）
5) 林野庁："木材需給報告書主要部素材交流表", e-Stat 政府統計の総合窓口，(オンライン)，入手先 <http://www.estat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001118013>,（参照 2016-10-15）
6) 国立社会保障・人口問題研究所："日本の地域別将来推計人口"，国立社会保障・人口問題研究所ホームページ，（オンライン），入手先 <http://www.ipss.go.jp/ppshicyoson/j/shicyoson13/2gaiyo_hyo/gaiyo.asp>,（参照 2016-10-1）

樹種別を考慮した木材のインベントリデータベースの開発

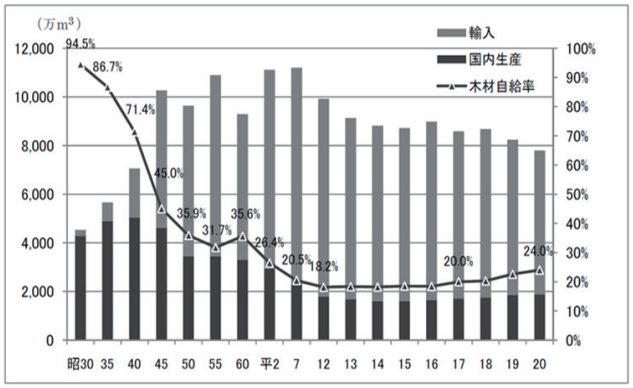
Development of a database of wood materials considering the type of tree

○土屋　成*1)、伊坪 徳宏*1)
1) 東京都市大学 環境学部
g1362088@tcu.ac.jp

1.　はじめに

世界の森林は農地化・牧地化、薪炭材利用の増加、非伝統的な焼畑農業を背景に、平成 12 年から平成 22 年までの平均で毎年、約 520 万 ha が減少し続けている。その中で日本は木材輸入自由化や拡大造林政策の影響により、海外から多くの森林資源を輸入し、国産材の需要は低下していた。近年は、国産材の自給は高まる傾向にあり、政府が「森林・林業基本計画」を通じて平成 37 年までに木材自給率 50%を達成することを目標にするなど、今後は民間や政府を通して持続可能な林業への移行が図られることが予想される。

日本の森林を構成する主要樹種を分類した場合、針葉樹と広葉樹に分けられる。樹種によって成長速度や強度など木材の機能が異なるため、用途や環境負荷は異なる。樹種これらの違いを考慮した木材のデータベースがあれば、樹種の特徴と用途を考慮した解析が可能になる。先行研究の中で日本国内の木材のインベントリデータベースは存在するが、樹種の違いを考慮した細分化したものは存在していない。



(出所) 林野庁「木材需給表」より作成

図-1　木材用材の供給量の推移

2.　研究目的

本研究では、産業連関表を用いて木材のインベントリデータベースを更新するとともに、主要樹種を考慮した木材のインベントリデータベースの開発を行う。その結果から、「木材消費の見える化」をすることを目的とする。それにより国産材に着目した樹種別の木材利用の在り方を示す。

3.　研究方法

3.1 木材消費原単位の作成

林野庁の平成 23 年の木材需給表と経済産業省の平成 23 年の紙・印刷・プラスチック・ゴム製品統計年報を適宜組み合わせることで木材消費量を推定し、該当する平成 23 年の産業連関表の 402 部門に配分する。次に配分した木材消費量を各産業連関表部門の生産額で除することにより、木材消費係数を作成する。直接木材消費係数については、特用林産物、製材、合板、木材チップ、その他の木製品、パルプの計 6 部門に分けてそれぞれの推計を行った。最後に木材消費係数と産業連関表から作成したレオンチェフの逆行列を乗じることで原単位を推計した。

本研究では、具体的な計算方法は次式によって求められる。

$$e = d(I - A)\hat{} - 1 \qquad (1)$$

d は各部門における木材消費係数、$(I-A)\hat{}-1$ はレオンチェフ逆行列を示す。レオンチェフ逆行列は、ある 1 単位の需要によって誘発される生産波及効果を示す。

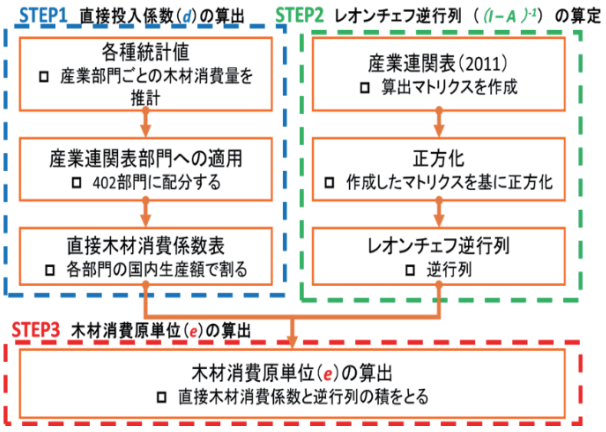


図-2　原単位作成のフロー

3.2 樹種別木材消費原単位の作成

本研究では木材需給表の需要部門別、供給部門別素材需給の値を比に変換し、木材消費原単位を乗じることで主要樹種別直接木材消費係数の推計を行った。産業連関表の製材、合板、木材チップの行拡張を行い、百万円当たりの国内生産額の行に対してのどこに売るかという販売先のデータを変えて推計を行った。針葉樹由来、広葉樹由来と国内生産額を分け、元の国内生産額のデータを削除することで拡張を行った。

4.　結果

結果として木材消費原単位、樹種別木材消費原単位、一人当たりの木材消費量を示す。

4.1 木材消費原単位の作成結果

木材消費原単位を図-3 に示す。図-3 より、パルプ・紙・木製品等の二次産業の一部分で顕著に値が大きくなっていることが分かる。その中でも百万円あたりの値が最も大きくなった部門は「木材チップ」である。国内生産額が他の木材・木製品よりも安価であり、生産量に比して相対的に生産額が低いことが原因と考えられる。「木材チップ」「パルプ」「製材」「合板・集合材」の上位 4 項目が大きくなった理由としては直接的な木材消費量が大きいことが原因と言える。「パルプ」は「洋紙・和紙」「木材チップ」に波及の影響を大きく与えた。「出版」「新聞」の間接の内訳として「洋紙・和紙」が多くの割合を占めている。また、「住宅建築（木造）」や「非住宅建築（木造）」の部門でも波及が大きくなった。これらは原材料に木材を消費していることが原因とみられる。

4.2 樹種別木材消費原単位

樹種別の木材消費原単位を同様に図-3 に示す。針葉樹由来が広葉樹樹由来よりも全体的に大きい傾向となった。原木の用途として針葉樹の「合板」「製材」の需要が大きいため、波及が大きくなったと考えられる。

4.3 一人当たりの木材需要量

一人当たりの木材需要量を図-4 に示す。全体で 4.E-04 千 m³/人となった。その中で「住宅建築（木造）」の消費が最も大きくなったのは国内総固定資本形成（民間）の額が大きく寄与したからである。

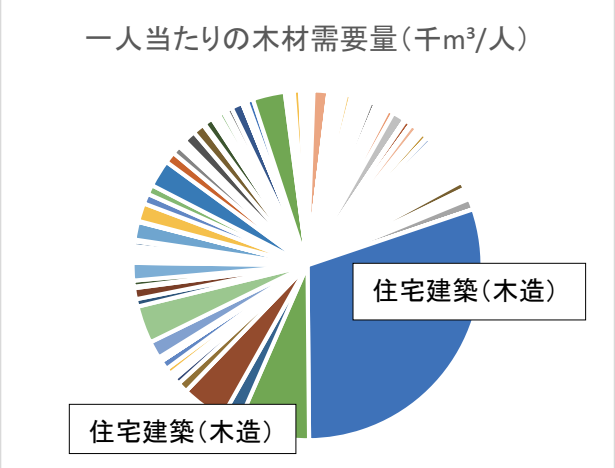


図-4　一人当たりの木材需要量

5.　まとめ

本研究では産業連関表を用いて木材のインベントリデータベースを更新・樹種別木材消費原単位の開発を行った。木材消費原単位に関して産業間の考察を行う事で部門間の傾向を示した。今後は更新・開発したインベントリデータベースを用いてケーススタディを随時行い、蓄積させていくことが必要である。

参考文献

1.　林野庁：“平成 23 年度木材需給表”
2.　経済産業省：“平成 23 年の紙・印刷・プラスチック・ゴム製品統計年報”
3.　辻本真弥、伊坪徳宏：“産業連関分析法に基づいた木材のインベントリデータベースの開発”日本 LCA 学会誌 2011.

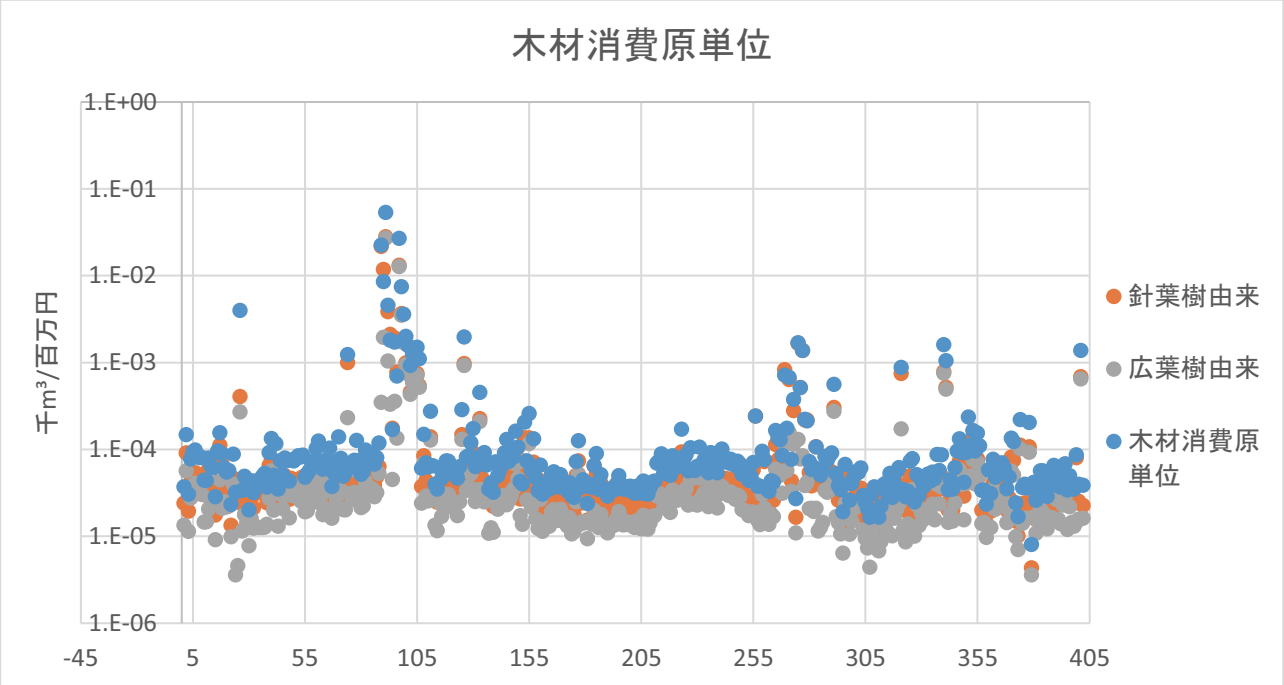


図-3 木材消費原単位

パルプ紙とストーンペーパーの環境影響評価

Environmental impacts assessment of pulp paper and stone paper

○阪西達矢*[1)]、本下晶晴[2)]、田原聖隆[2)]、稲葉敦[1)]
Tatsuya Sakanishi,Masaharu Motoshita,Kiyotaka Tahara,Atsushi Inaba
1)工学院大学,2)産業技術総合研究所
*a-inaba@cc.kogakuin.ac.jp

1.はじめに

著者らはこれまで木材由来のパルプ紙と石灰石を主原料としたストーンペーパーの環境影響評価を行ってきた[1)]。これまでは、パルプ紙のための木材資源を全て国産材と仮定して水消費量を評価してきたが、日本の木材調達は、70%が輸入材である。そこで、本研究では、輸入材を考慮した森林育成のための水消費量を算定し、GHG 排出量を含めたストーンペーパーとパルプ紙の環境影響評価を行った。

また、これまでに算定したパルプ紙のための森林(丸太 1kg)の育成に必要な水消費量(蒸発散量)には、育林期間、国内の立木伐採面積以外の森林特性(樹高、樹冠面積など)が考慮されていなかった。そこで本研究では、パルプ紙のための木材調達国の樹種を対象に森林特性を表す作物係数開発し、森林特性を考慮した森林育成のための水消費量を算定した。

2.システムバウンダリ

パルプ紙とストーンペーパーのシステムバウンダリを図 1 に示す。機能単位を製紙 1m²とし、ストーンペーパーの廃棄方法は焼却処理と埋立処理の 2 つのケースで環境影響評価を行った。

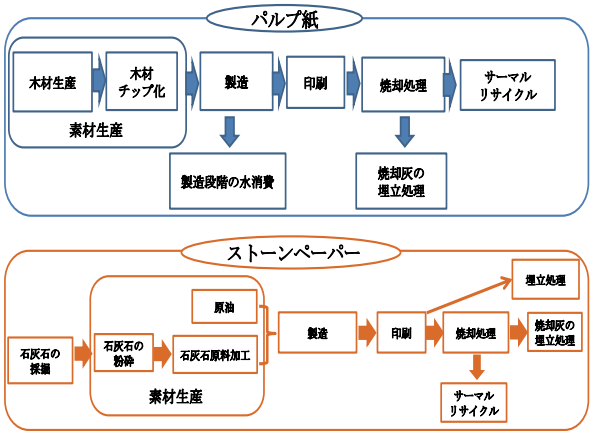


図1.パルプ紙とストーンペーパーのシステムバウンダリ

3.丸太 1kg の育成に必要な蒸発散量の算定

3.1 算定条件

製紙 1m²に必要な木材は 0.246kg と設定し、表 1 に示した。日本の木材調達割合[2)]を用いて各国からの木材調達量を求めた。

3.2.実蒸発散量の文献調査と作物係数の開発

各国の樹種毎の実蒸発散量(Etci)は、文献からデータを収集し、単純平均により実蒸発散量(Etci)の代表値を算出した。作物係数は、対象地域の気候だけで決定される基準蒸発散量(Et_0)に対する対象地域の樹種毎の実蒸発散量の比で求められ、森林特性を表現している。本研究では、各国の樹種毎の森林特性を一般化するために作物係数を開発した。開発した作物係数（Kc）を表 1 に示す。基準蒸発散量(Et_0)は FAO のモデル CROPWAT・CLIMWAT により算定した 。

表 1.パルプ紙 1m²に必要な木材調達量と作物係数

国名	樹種		木材調達割合	木材調達量	基準蒸発散量 (ET_0)	実蒸発散量 (ET_c)	作物係数 (Kc)
			-	kg	mm/年	mm/年	-
合計木材チップ量【(CF)+(BL)】			100%	0.246			
日本	針葉樹(CF)	スギ	30.0%	7.38.E-02	7.90.E+02	8.80.E+02	1.11E+00
アメリカ		ダグラスファー	4.0%	9.90.E-03	1.39.E+03	6.55.E+02	4.73E-01
オーストラリア		ラジアータパイン	4.0%	9.83.E-03	1.75.E+03	7.99.E+02	4.56E-01
カナダ		スプルース	1.0%	2.53.E-03	6.68.E+02	5.26.E+02	7.88E-01
ニュージーランド		ラジアータパイン	0.8%	2.03.E-03	1.67.E+03	8.33.E+02	4.98E-01
フィジー		カリビアマツ	0.6%	1.36.E-03	2.39.E+03	1.78.E+03	7.44E-01
ロシア		モミ	0.2%	4.17.E-04	5.16.E+02	6.59.E+02	1.28E+00
		(CF) 合計	41%				
ベトナム	広葉樹(BL)	アカシア	19%	4.71.E-02	1.30.E+03	8.61.E+02	6.62E-01
オーストラリア		ユーカリ	12%	2.98.E-02	1.75.E+03	8.07.E+02	4.60E-01
チリ		ユーカリ	11%	2.81.E-02	8.80.E+02	1.45.E+03	1.65E+00
南アフリカ		ユーカリ	8%	1.85.E-02	1.46.E+03	1.10.E+03	7.56E-01
タイ		ユーカリ	5%	1.33.E-02	1.53.E+03	9.84.E+02	6.45E-01
ブラジル		ユーカリ	4%	9.35.E-03	1.36.E+03	1.22.E+03	9.00E-01
		(BL)合計	59%				

3.3.パルプ紙 1m²に必要な蒸発散量の算定

3.2 で文献調査した各地域の実蒸発散量を用いて式1より丸太 1kg の育成に必要な蒸発散量を算定した。

$$Li=[(Gi\times Hi\times Etci)/(Ii\times Ni)] \quad (式\ 1)$$

i:樹種, Li:国別の樹種 i の丸太 1kg の育成に必要な蒸発散量[m³/kg-丸太], Gi:樹種 i の育林期間[3)][年],Hi: 樹種 i の国別の立木伐採面積[4)][m²],Etci:樹種 i の実蒸発散量[mm/年],Ii:樹種 i の国別の素材生産量[4)][m³],Ni:樹種 i の全乾比重[5)][kg/ m³]

丸太 1kg の育成に必要な蒸発散量の算定結果を図 2 に示す。図 2 より、ロシアのモミの蒸発散量が大きいことがわかった。これは、ロシアのモミの収量（伐採面積 1m²あたりの丸太生産量）が他国より小さいことが主な要因である。

また、丸太 1kg の育成に必要な蒸発散量の算定結果

(Li)に表 1 の各国からの木材調達割合を踏まえた木材調達量を掛け合わせて算定されたパルプ紙 1m²に必要な蒸発散量の合計値は、1.79[m³/m²]となった。その計算の詳細を Supporting Information の図 SI1 に示す。

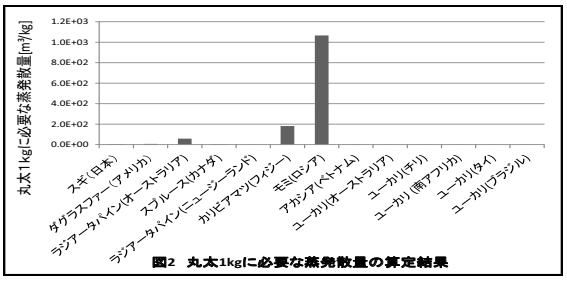


図2　丸太1kgに必要な蒸発散量の算定結果

4.パルプ紙とストーンペーパーの環境影響評価

環境影響評価手法 LIME3 を用いて、パルプ紙とストーンペーパー1m²のライフサイクルで生じる環境負荷を統合化し環境影響評価を行った。表 2 に統合化結果を示す。紙 1m²に必要な環境負荷が 3 つの保護対象（人間健康、生物多様性、一次生産）に与える被害影響を金額（US＄）で表している。また、製紙 1m²に必要な森林資源の消費と蒸発散量に関して、3 つのケースを想定した。各ケースの統合化結果を図 3～5 に示す。

表 2.LIME3 による統合化結果

	ストーンペーパー 焼却処理			ストーンペーパー 埋立処理			パルプ紙		
	人間健康	生物多様性	1次生産	人間健康	生物多様性	1次生産	人間健康	生物多様性	1次生産
単位	US$								
CO_2排出量	1.87.E-03	1.98.E-03		9.50.E-04	1.00.E-03		8.80.E-04	9.30.E-04	
CH_4排出量	4.22.E-05	1.20.E-04		9.57.E-04	2.73.E-03		2.15.E-05	6.13.E-05	
サーマルリサイクル:CO_2排出量	-2.02.E-04	-2.13.E-04					-1.87.E-04	-1.98.E-04	
サーマルリサイクル:CH_4排出量	-1.82.E-06	-5.17.E-06					-1.68.E-06	-4.80.E-06	
森林資源の消費								7.06.E-03	5.63.E-04
石灰石の採掘		9.74.E-07	2.37.E-06		9.74.E-07	2.37.E-06			
水消費:蒸発散							7.60.E-03		
水消費:工業用水	3.89.E-07			3.89.E-07			2.15.E-04		
合計	1.71.E-03	1.88.E-03	2.37.E-06	1.91.E-03	3.73.E-03	2.37.E-06	8.53.E-03	7.85.E-03	5.63.E-04

ケース 1 は森林資源を非認証林と仮定し、森林資源の消費に伴う生物多様性、一次生産への影響（表 2 に示す被害額）を考慮し、さらに、製紙 1m²に必要な蒸発散量が及ぼす人間健康被害を含む。製紙 1m²に必要な蒸発散量が及ぼす人間健康被害の統合化評価の詳細を Supporting Information の図 SI1 に示した。各国において降水量平年値[7]より育林のための蒸発散量(Etci)の数値が大きい時、降水量で補うことができなかった蒸発散量(降水量から蒸発散量を引いた差分)を農業用水で灌漑することを仮定して、育林のための農業用水不足に伴う食物生産の低下による人間健康被害を評価した。

ケース 2 では、森林資源の消費に伴う生物多様性、一次生産への影響に着目するために森林資源が非認証林と仮定して、森林資源の消費がもたらす生物多様性、一次生産への影響を考慮し、製紙 1m²に必要な蒸発散量が及ぼす人間健康被害影響は考慮しなかった。

そして、ケース 3 では、木材調達に関わる環境負荷を考慮しない時の環境影響評価を行うために、森林資源を認証林だと仮定した。

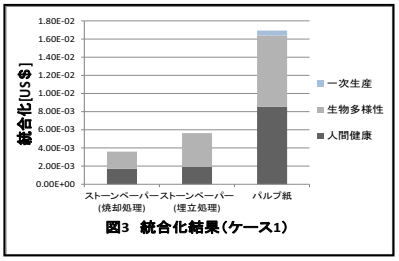


図3　統合化結果（ケース1）

認証林の場合は伐採から植林までの森林管理が行われていると仮定し、生物多様性、一次生産への環境影響は考慮しないこととした。さらに、製紙 1m²に必要な蒸発散量が及ぼす人間健康被害影響も考慮しなかった。

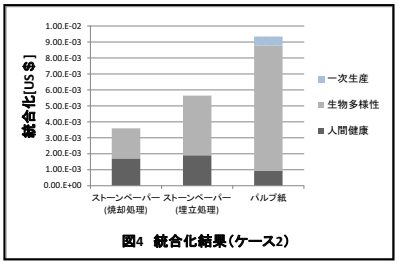


図4　統合化結果（ケース2）

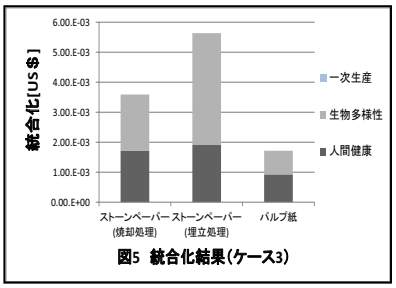


図5　統合化結果（ケース3）

5.まとめ

パルプ紙とストーンペーパーの統合化結果ケース 1 とケース 3 より、森林資源の消費に関する環境影響を考慮するかしないかで、パルプ紙の環境影響に大きな差が生じることがわかった。しかし、非認証林の森林資源消費が及ぼす生物多様性、一次生産について国別の森林管理の実態が考慮されていないため、今後、国別の森林管理の実態を明らかにし、環境影響評価に反映する必要がある。

6.参考文献

1）阪西達矢、本下晶晴、田原聖隆、稲葉敦：“ストーンペーパーの環境影響評価”,第 11 回日本 LCA 学会研究発表会,(2015),122-123
2)日本製紙連合会　パルプ（チップ）の輸入先（2015）https://jpa.gr.jp/states/pulpwood/index.html
3）日本製紙連合会　ヒアリングデータ
4）Country report , Forestry Department, FAO
5）林野庁林業試験場編 木材工業ハンドブック(1973)
6）Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith (1998): FAO Irrigation and drainage paper 56, Rome
7) 気象庁　世界の地点別平年値について http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/normal/about_normal.html

				①	②	①−②	③	④	③×④
			パルプ紙1m²に必要な蒸発散量	実蒸発散量(Etc)	年降水量平年値	年降水量平年値-実蒸発散量	降水量で補うことが出来なかったパルプ紙1m²に必要な蒸発散量	統合化係数	統合化結果【統合化係数×③】
単位			m³/m²	mm/年			m³/m²	US$/m³	US$
日本	針葉樹	スギ	2.89.E-01	8.80.E+02	1.53.E+03	6.49.E+02			
アメリカ		ダグラスファー	6.95.E-02	6.55.E+02	1.25.E+03	5.97.E+02			
オーストラリア		ラジアータパイン	5.74.E-01	7.99.E+02	5.87.E+02	**-2.12.E+02**	**1.53.E-01**	2.43.E-02	3.71.E-03
カナダ		スプルース	8.09.E-03	5.26.E+02	1.20.E+03	6.71.E+02			
NZ(ニュージーランド)		ラジアータパイン	1.47.E-03	8.33.E+02	1.00.E+03	1.67.E+02			
フィジー		カリビアマツ	2.46.E-01	1.78.E+03	2.89.E+03	1.12.E+03			
ロシア		モミ	4.45.E-01	6.59.E+02	7.07.E+02	4.79.E+01			
ベトナム	広葉樹	アカシア	9.17.E-02	8.61.E+02	1.64.E+03	7.84.E+02			
オーストラリア		ユーカリ	2.53.E-02	8.07.E+02	5.87.E+02	**-2.20.E+02**	**6.88.E-03**	2.43.E-02	1.67.E-04
チリ		ユーカリ	2.26.E-02	1.45.E+03	2.66.E+02	**-1.18.E+03**	**1.84.E-02**	1.51.E-01	2.79.E-03
南アフリカ		ユーカリ	1.41.E-02	1.10.E+03	6.66.E+02	**-4.35.E+02**	**5.57.E-03**	1.67.E-01	9.30.E-04
タイ		ユーカリ	2.59.E-03	9.84.E+02	1.65.E+03	6.69.E+02			
ブラジル		ユーカリ	3.51.E-03	1.22.E+03	1.49.E+03	2.68.E+02			
合計			1.79.E+00				**1.84.E-01**		7.60.E-03

図 SI1.パルプ紙 1m²のための蒸発散量が及ぼす人間健康被害の統合化評価の詳細

バックグラウンドデータベースの違いによる LCA 結果への影響：パーティクルボードのケーススタディ

Impact of background database selection on LCA result: case study of particle board

○中野勝行*[1)]、瀧川充朗 [2)]、田原聖隆 [3)]、安藤恵介 [4)]、服部順昭 [4)]
Katsuyuki Nakano, Mitsuo Takigawa, Kiyotaka Tahara, Keisuke Ando, Nobuaki Hattori
1) 産業環境管理協会, 2) 日本繊維板工業会, 3) 産業技術総合研究所, 4) 東京農工大
* nakano@jeami.or.jp

1. はじめに

国内外では様々なインベントリデータベースが開発・利用されているが、それぞれ独自のデータ作成方法があり、数値が異なる。そこで、本研究ではデータベースの選択が LCA 結果に与える影響を分析し、データベースの特徴について考察する。

2. 方法

我が国の代表的な積み上げ法に基づくデータベースである IDEA ver.2[1)]と、国際的に広く利用され、かつ単位プロセスレベルでデータ解析が可能なデータベースである ecoinvent ver.3.3 (cut-off model) [2)]を分析対象データベースとした。ecoinvent 内における基本フロー、上流側プロセスの寄与分析には openLCA 1.5.0 を用いた。

製品システムとして、パーティクルボード(PB)の原料採取から製造段階までを評価対象とした。パーティクルボードは比較的素材構成がシンプルである一方、接着剤等で様々な化学物質を利用していることから、データベース間の特徴が出やすいと考えた。

2.1 影響領域と基本フローのマッピング

評価対象とした環境影響領域は、ILCD ver. 1.08 が示す 15 影響領域とした。特性化モデルは ILCD ver.1.08 に基づいたが、ecoinvent ver.3.3 では当該 ILCD バージョンの水資源枯渇の特性化結果を示していないため、水資源枯渇のみ ecological scarcity 2013 を利用した。

異なるデータベースでは、土地利用形態の区分方法など、基本フローの定義が異なる。そのため、ILCD が示す特性化係数を IDEA に適応する際には、最も近いと思われる土地利用区分を当てはめるなど、基本フロー間の紐付け（マッピング）を行った。

2.2 パーティクルボードのデータ収集

日本繊維板工業会に属する PB 製造企業 6 社よりデータ収集を行った。国内生産量に占めるデータカバー率は 50%以上確保した。原料等の使用量データは 2004 年度に収集したが、当該データが大きく現在も変化していないことを確認し、かつ水消費量等のデータを 2014 年から 2015 年にかけて再収集し、データを補完した。

製造工程において直接大気放出されるホルムアルデヒド等の化学物質排出量は、PRTR 法によって報告・公開されている値を、生産量で除することで得た。

2.3 インベントリ分析

当該 PB は国内工場で生産されるため、バックグラウンドデータも国内のデータを利用することが望ましい。しかし、ecoinvent は主に欧州のデータから構成されているため、電力など日本を想定したデータが利用可能な場合を除き、世界平均を想定して作成したデータを利用した。そのため、後述の結果には地域の違いによる差も含まれることに留意する必要がある。

3. 結果

IDEA による特性化結果を分母とし、ecoinvent による特性化結果を分子として影響領域別に比を示した（図 1）。ただし、ほぼ IDEA 側にデータがなかった影響領域（富栄養化（海域・淡水・陸域）、呼吸器系疾患、電離放射線、オゾン層破壊）は除外した。その結果、気候変動、土地利用は数十%の差異に留まった。一方、酸性化、水資源、人間健康（発癌性）は約十倍、鉱物資源枯渇、光化学オキシダント、人間健康（非発癌性）は数十倍、生態毒性（淡水）は約 1000 倍 ecoinvent が大きな傾向を示した。

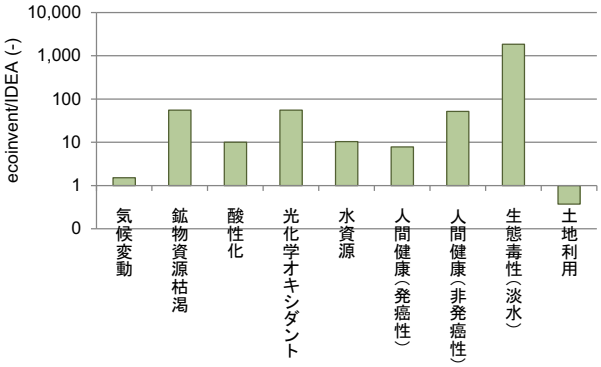


図 1 IDEA に対する ecoinvent の領域指標の比（PB の評価事例）

IDEA と ecoinvent による領域指標の構成を図 2 に示した。その結果、IDEA では木くずボイラの寄与が若干小さいものの、気候変動に関しては類似した結果となった。

鉱物資源枯渇では、特に接着剤の影響に差がみられた。ecoinvent のデータを分析すると、基本フローとしてはインジウム資源の寄与が大部分を占めていることがわかった。当該フローは亜鉛-鉛精鉱採掘時において発生しており、亜鉛、ろう付けはんだ、化学工場建設、ホルムアルデヒド製造・尿素製造という経路で結果に寄与している。そのため、例えば亜鉛めっき薄鋼板（zinc coating, coils）の金属資源枯渇においても、インジウム資源の影響が 85%以上を占めている。一方、ecoinvent におけるインジウム 1kg 製造のインベントリ分析結果では、インジウム資源が 0.016kg のみ入力されるデータとなっている。IDEA では化学工場建設等の資本財の影響を含めておらず、また亜鉛精鉱プロセスではインジウムの併産を想定していないが、可能な限り金属元素含有量に基づいて金属資源関係の基本フローを配分している。そのため、データ収集範囲、配分の考え方等でデータベース間の差異が生じているものと考えられる。

土地利用においては、木くずボイラの影響が最も大きかった点は同様であったが、合計値の差異は大きく、またその他の構成は異なった。これは、土地利用面積の違いだけでなく、基本フローのマッピングの課題もあると考えられる。例えば IDEA における土地改変に関わる基本フロー「その他の用地→鉱物採掘用地」を、ILCD における基本フローの何にマッピングするかによって結果が異なる。

酸性化は 10 倍程度 ecoinvent の合計値が大きかったが、比較的寄与構成そのものは類似した。酸性化は燃料中の硫黄含有量、脱硫率の設定に結果が左右されるが、ecoinvent では世界平均のデータを用いたため、我が国の脱硫や脱硝実態が反映されていないと考えられる。

水資源も同様に 10 倍程度 ecoinvent が大きかったが、寄与構成は類似した。ただし、木材チップ製造に関わる水資源消費量には大きな違いがあることに注意する必要がある。IDEA では雨水の蒸散には特性化係数を乗じなかったが、仮に乗ずると非常に大きな数値となる。

光化学オキシダント、人間健康（非発癌性）、生態毒性（淡水）の構成は大きく異なった。特に、IDEA では人間健康（発癌性）においてフォアグラウンドデータとして入力した PB 製造工場での直接放出の影響が大部分を占めた。IDEA では化学物質等の直接放出データがあまり整備されていないため、これら影響領域ではバックグラウンドデータの寄与が過小評価される。

4. 結論

主要な LCI データベースである IDEA ver.2 と ecoinvent ver.3.3 (cut-off model)の違いを分析した。データベースによって未整備の基本フローがあったり、逆に過大評価されていたりする可能性があることが示された。LCA の実務においては、データベースが網羅している影響領域に注意し、適切な地理的代表性のあるデータを利用する必要がある。また、異なるデータベースを併用する場合には、データ作成方法等の十分な精査が必要である。

引用文献

1) 産業技術総合研究所・産業環境管理協会：“IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis)”（オンライン），入手先 <http://www.idea-lca.jp/>, (2016-12-19)

2) Wernet G., et al.: Int. J. LCA, 21(9), (2016), pp 1218–1230

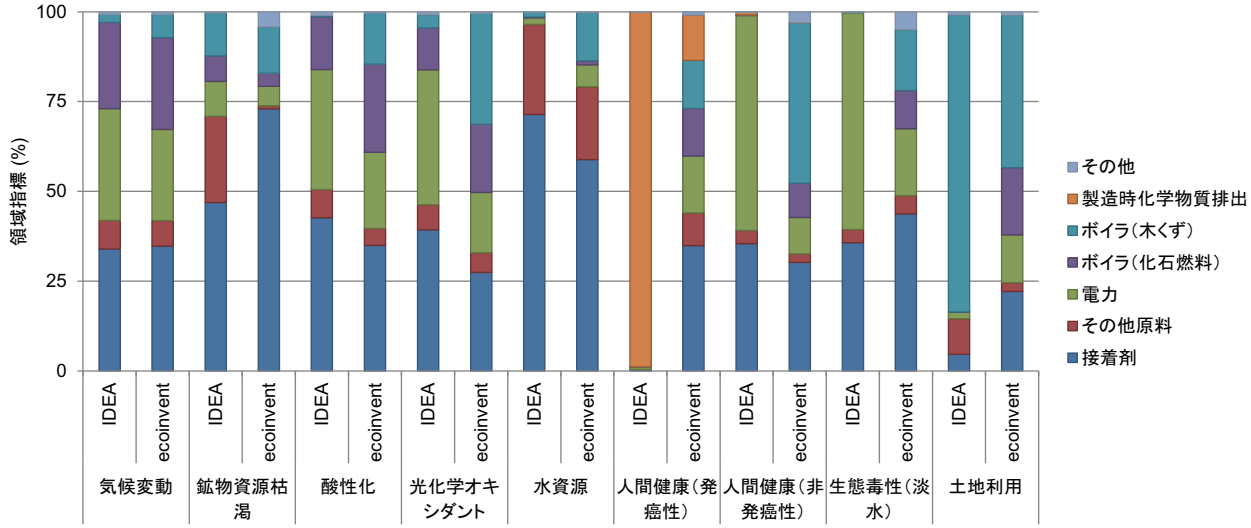


図 2 IDEA と ecoinvent の領域指標構成（PB の評価事例）

ライフサイクル思考の学びが環境配慮行動の意思決定過程に与える影響-2-

Influence of the learning of life-cycle thinking on decision-making process of pro-environmental behavior part2

○田髙初奈*[1)]、平山世志衣[2)]、高岡由紀子[3)]、津田祥子[4)]、水野建樹[2)]、松本安生[5)]、松本真哉[1)]

Hatsuna Tadaka, Yoshii Hirayama, Yukiko Takaoka, Shoko Tsuda, Tateki Mizuno, Yasuo Matsumoto, Shinya Matsumoto

1) 横浜国立大学, 2) 特定非営利活動法人横浜 LCA 環境教育研究所, 3) グリーン購入ネットワーク, 4) 日本 LCA 学会, 5) 神奈川大学

* tadaka-hatsuna-dj@ynu.jp

1. はじめに

地球温暖化や資源の枯渇などの様々な地球規模の環境問題に対処し、持続可能な社会の実現を目指すための一つの有効な手段として、環境教育の重要性が指摘されている。環境教育は、環境問題に対処する上で必要な興味関心、技能、態度及び実行力などを身につけた人材の育成を主な目的とし、国内外において実践されている。しかしこれまでに、環境教育を学んだ受講者の意識と日常生活における実際の行動との間に乖離が存在していることが指摘されており、この点が環境教育の抱える大きな課題と考えられる。

近年、この課題に対する取組みとして、ライフサイクル思考(LCT)の学びを取り入れた環境教育教材の開発と実践が行われている。これらの取組みでは、LCT の学びによる日常生活の消費行動と環境問題のつながりの気付きが意識と行動の乖離を埋め、日常生活における環境配慮行動を促すと想定されている。しかし LCT の学びが受講者に与える影響については、講義直後に意識が向上することは確認されているものの、その後の意識と行動の関係や実態について調査した例は限られている[1)]。そこで我々は LCT の学びが受講者の意識及び行動に与える影響を過去に検討されている環境配慮行動の要因関連モデル[2)]により明らかにすることを試みた。本稿ではこれまで実施してきた一次及び二次調査を踏まえ、環境配慮行動の意思決定過程をより詳細に分析した内容を報告する。

2. 一次及び二次調査の概要

我々は 2014 年に一次調査として、LCT 環境教育受講者について、受講後の環境配慮意識及び行動の変化に関する実態調査を実施した[3)]。調査結果から、講義直後に向上した環境配慮意識が最長で 2 年持続していることや、LCT の学びが環境配慮行動を促す要因の一つである可能性が示唆された。しかし講義直後を含む講義後のみの調査であったため行動変容を正確に把握できなかったことや、質問紙設計の課題もあり行動変容を促す要因の特定には至らなかった。

そこで一次調査の結果を踏まえ 2015 年に実施した二次調査では、松本らのプラスチックの LCT に着目した講義[4)]の受講生を中心に、講義の前後において環境配慮行動の要因連関モデルに倣い設計した質問紙による調査を実施し、講義前後及び 3 ヶ月後の環境配慮行動の実施頻度の比較と、LCT の学びが意識変化から行動変容に至る過程に与える影響の解明を試みた[5)]。調査結果から受講 3 ヶ月後の行動頻度が高まったこと、受講直後に有効感及び実行可能感が高まり行動実施に至った可能性が示唆された。しかし行動変容と心理過程の変化との因果関係は認められなかった。

3. 本研究の内容

3.1 研究目的

そこで本研究では二次調査の調査対象を増やし、LCT 環境教育の学びが環境配慮行動の意思決定過程に与える影響を検討した。調査手法は二次調査と同じく講義前、直後及び 3 ヶ月後の 3 回に渡り環境配慮行動の要因連関モデルに基づいた質問紙調査を実施することで行動の実施頻度を明らかにし、LCT の学びが心理過程の変化に与える影響を検討した。

ところで本研究で実施した LCT 環境教育講義では、身近な工業製品のライフサイクルにおける環境負荷に焦点を当て、自身の消費行動と環境問題の目に見えないつながりを認識することを主目的としている。更に講義中に実施するグループワークでは受講者が様々なステークホルダーに分かれ、各々の立場で実行可能な環境配慮行動を模索する。そのため本研究では LCT 環境教育の学びが「個人の消費行動が環境悪化に寄与している」という責任感、「個人の環境配慮行動が問題解決に効果的だ」という有効感及び「身近に環境配慮行動を実施する機会が多くある」という実行可能感に特に影響を与えると予測し結果を分析・考察した。

3.2 方法

調査対象は 2015 年 4 月～2016 年 8 月に一度 LCT 環境教育を受講した 20 代～70 代の男女 171 人であり、製造業職員、教員向け講習会参加者、通信制大学学生のいずれかに属している。講義内容は同じであるが、講義担当者は各集団により異なる。調査は講義の前後

及び 3 ヶ月後の計 3 回、留置法及び郵送法により実施した。二次調査で設計した質問紙を用い、水の利用及び購買行動に関する 4 種の環境配慮行動に対する考えや実施頻度を 4 段階尺度(大いにそう思う～全く思わない、いつもしている～全くしていない)で尋ねた。

4. 結果と今後の予定

回収率は、講義前後は 99%(170 名)、3 ヶ月後は 73%(125 名)であった。図 1 に講義前及び 3 ヶ月後の環境配慮行動実施状況と講義直後の行動意図について尋ねた結果を示す。講義前の実施状況は、排水処理及び節水ではそれぞれ 50%以上が実施していると回答した。エコ製品購入及び再生製品購入では 40%前後の実施率であった。しかし直後の行動意図を見ると、全ての行動において 90%以上が「行動したい」と回答した。次に、大いにそう思う＝4 点～全く思わない＝1 点として点数化し、各規定因の平均値を算出した。環境問題に対する危機感、LCT の寄与が大きいと予測した責任感、有効感及び実行可能性の 4 つの規定因の平均点が講義後に高まり、前回調査では平均点は高まっていたものの統計的に有意ではなかったが、本調査では全て有意であった(p>.01)。このことから LCT の学びは環境配慮意識を向上させることが明らかになった。更にいつもしている＝4 点～全くしていない＝1 点として点数化し、講義前と 3 ヶ月後の実施状況の平均値を算出した。3 ヶ月後の実施状況をみると、行動意図よりは下がっているものの、全ての行動において実施状況は講義前よりも改善されており、前回調査では節水及びエコ製品購入のみで統計的に有意であったが、本調査では全ての行動で統計的に有意であった(排水: p＞.05、他: p>.01)。このことから LCT の学びにより高められた環境配慮意識が、環境配慮行動の実施につながった可能性が示唆された。

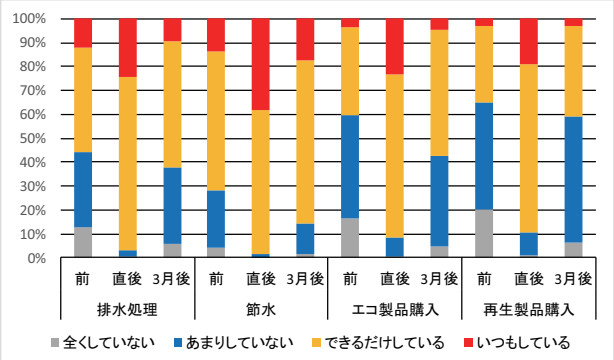


図 1 環境配慮行動の実施状況及び行動意図

次に講義前、直後及び 3 ヶ月後の意思決定モデルの共分散構造分析結果を示す。本稿では紙面の都合により「節水行動」の結果を示す。また、直前及び直後の共分散構造分析結果は図 S1-S2 に示し、本稿には 3 ヶ月後の結果を示す(図 2)。

LCT 環境教育講義受講前の結果は環境配慮行動の要因関連モデルを支持しており、行動意図に最も影響を与えていたのは目標意図(β=.25)で、目標意図に最も影響を与えていたのは責任感(β=.24)であった。次に講義直後では、行動意図に最も影響を与えていたのは目標意図(β=.56)であり、実行可能性と社会規範のパスは有意ではなかった。目標意図に最も影響を与えていたのは有効感(β=.45)であり、次いで危機感(β=.32)、責任感(β=.20)であった。3 ヶ月後では、行動意図に影響していたのは実行可能性(β=.25)、目標意図(β=.24)、費用便益(β=－.38)であり、目標意図に影響していたのは有効感(β=.38)、危機感(β=.23)であり、責任感と社会規範のパスは有意ではなかった。

講義前の結果から、行動意図に最も影響を与えていたのは目標意図であったが、費用便益(β=－.42)も影響を与えており、節水に対し「面倒である」という考えが行動の阻害要因であった可能性が伺えた。講義直後に LCT の学びにより実行可能性が高められるという予測は当てはまらなかったが、行動意図には目標意図が影響し、目標意図には危機感、責任感及び有効感が影響していたことから、これらの規定因が LCT の学びにより高められ、節水の行動意図を高める要因になった可能性がある。3 ヶ月後の結果から、直後にはなかった実行可能性の影響が確認できた。LCT の学びにより高められた危機感、有効感及び実行可能感が目標意図や行動意図を高め、環境配慮行動につながった可能性が考えられる。しかし講義から 3 ヶ月の間に LCT 講義以外の教育的経験をしている可能性も考えられるが、外的要因に関する調査は行っていないためこの結果について今後注意して考察する必要がある。より詳細な結果は発表会において報告する。

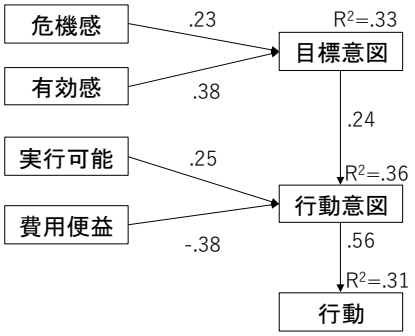


図 2 講義 3 ヶ月後の意思決定モデルの分析結果

5. 参考文献

1) 平山世志衣他: 日本 LCA 学会誌, 5(3), (2009), pp.367-381
2) 広瀬幸雄: 環境と消費の社会心理学, 名古屋大学出版会, (1995)
3) 田高初奈他: 日本 LCA 学会講演要旨集, (2015), pp.46-47
4) 松本真哉: 日本 LCA 学会誌, 5(3), (2009), pp.338-343
5) 田高初奈他: 日本 LCA 学会講演要旨集, (2016), pp.196-197

Supporting Information

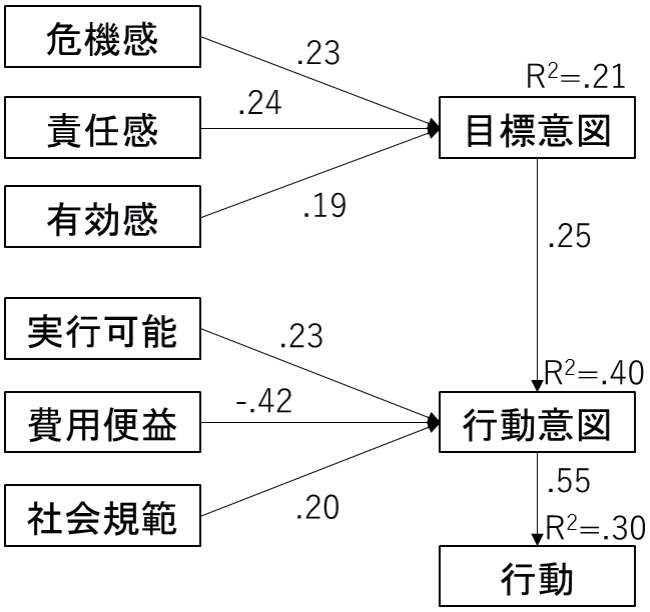


図 S1　講義前の意思決定モデルの分析結果

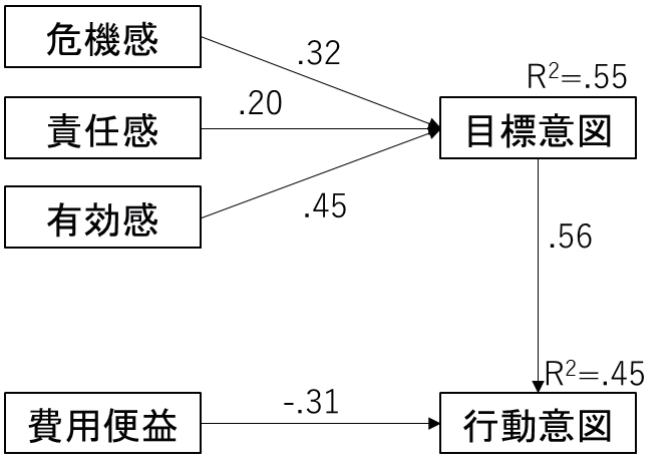


図 S2　講義直後の意思決定モデルの分析結果

ライフサイクル思考と環境配慮行動の関係性を探る

－ライフサイクル思考の測定尺度の開発－

Exploring the relationship of the life cycle thinking and pro-environmental behavior: Development of the Life Cycle Thinking Scale

○森健太朗*[1)]、本藤祐樹[1)]
Kentaro Mori, Hiroki Hondo
1) 横浜国立大学
* mori-kentaro-tb@ynu.jp

1. はじめに

近年、環境教育の新たな手法としてライフサイクル思考(Life-Cycle-Thinking)を学ぶ環境教育(以下、LCT 環境教育)が注目されている。LCT 環境教育の手法は、学習者にとって身近な製品やサービスなどライフサイクルに伴う“見えない”環境負荷に関する気づきを与えることである。そして、学習者は日常生活と環境問題との密接な“つながり”を認識、実感することで環境に配慮する意識が向上し、それに伴い行動が変化するという仮説の基、実施されている。

先行研究[1)2)]では、日常生活と環境問題の「つながり感」が環境配慮行動に与える影響についての有効性を示している。その一方で、LCT 環境教育プログラムの効果を分析する際に用いられる構成概念の測定に関する課題が指摘されている。従って、LCT 環境教育プログラムの効果を明らかにするためには、その実施によって向上が期待される構成概念を的確に測定する尺度の開発が求められる。

本研究の目的は、LCT 環境教育の主眼でもある「つながり感」の向上を測定する尺度を作成し、「つながり感」と環境配慮行動の関係性を明らかにすることである。

2. 測定する構成概念

まず、LCT 環境教育によって高まると期待される「つながり感」について検討する。測定する「つながり感」は、製品を利用する段階での環境負荷は無いものを題材とし、製品ライフサイクルを意識することで実感する日常生活と環境問題の“つながり”と定める。

次に、「つながり感」が環境配慮行動に与える影響を探ることを考慮し、直接的或いは間接的に環境配慮行動を規定する構成概念を検討する。社会心理学の領域において、環境配慮行動を説明する理論モデルが数多く示されている。例えば、先行研究[3)]は、個人の道徳的意識に基づく規範活性化理論(Norm Activation Theory)と、合理的な意思決定に基づく計画的行動理論(Theory of Planed Behavior)を基に、環境配慮行動を説明するモデルを提示している。

本研究では、このような先行研究のモデルを参考に、「つながり感」から「行動意図」までのモデルを想定した。そして、「責任感」「個人規範」「行動コントロール感」という構成概念が「行動意図」を形成するための重要な要因であると予測した。「責任感」とは、環境問題が進行することについて、“自分にも責任がある”という感情を表す。「個人規範」とは、「責任感」に喚起される構成概念であり、ある環境配慮行動に対して“行動をしなければいけない”という義務感や道徳的意識を表す。「行動コントロール感」とは、ある環境配慮行動に向けた具体的な方法の認知や自らの能力などに基づき、“行動ができる”という可能感を表している。

以上より、測定する構成概念は「つながり感」「責任感」「個人規範」「行動コントロール感」「行動意図」の 5 つと定めた。

3. 研究方法

3.1 質問紙の設計

質問紙の作成にあたり、題材とする環境問題は地球温暖化、環境配慮行動は CO_2 削減行動と定めた。そして、関連する既往研究を参考にして、各構成概念の定義に沿った質問項目を作成し、全部で 29 項目から構成される質問紙を設計した。

3.2 予備調査の実施

以上の 29 項目から成る質問紙を用いて、神奈川県の公立高校 1 年生 278 名を対象とした予備調査(1 回目)と、神奈川県の私立高校 2 年生 245 名を対象とした予備調査(2 回目)を実施した。このように、2 段階での質問紙調査と項目分析を行い、質問文を修正するなどして、各構成概念を測定する尺度を洗練した。

最終的に、因子分析などに基づき、「つながり感」(7 項目)、「責任感」(3 項目)、「個人規範」(3 項目)、「行動コントロール感」(3 項目)、「行動意図」(3 項目)、という 5 種類の構成概念を測定するための計 19 項目から構成される質問紙を作成した。

3.3 本調査の実施

続いて、予備調査に基づき作成された質問紙を検証することを目的に、長野県の公立高校 1 年生と山形県の公立高校 3 年生を対象とした本調査を実施した。加えて、神奈川県の公立高校 2 年生も対象としており、この高校での質問紙調査は今後実施する予定である。本調査の調査概要を表 1 に示す。

4. 本調査の分析結果

4.1 回答結果の偏向の検証

本調査から得られた各項目への回答結果に 1 点から 5 点を付与し、得点化を行った。そして、そのデータを変数として項目分析を実施した。記述統計の結果を表 2 に示す。

表 2 より、全項目において、目立った天井効果と床効果は確認されなかった。また、各項目に関する度数分布(回答の散らばり)も確認したところ、回答が二極化するなどの偏向は認められなかった。これらのことから、データの偏りは存在しないとともに、分布の形状も安定しているため、尺度として好ましいと判断できる結果を得た。

表 1：本調査の概要

調査対象	長野県の 公立高校1年生	山形県の 公立高校3年生	神奈川県の 公立高校2年生
実施期間	2016年11月24日 −12月1日	2016年11月24日 −12月2日	2017年1月下旬 実施予定
回答形式	リッカート尺度による5件法 （1:思う−5:思わない）		
回収数	計306名	計117名	
有効回答数	計253名	計89名	

表 2：記述統計

		平均値	標準偏差	天井効果 (平均値+標準偏差)	床効果 (平均値−標準偏差)
つながり感	つながり1	3.04	1.22	4.27	1.82
	つながり2	2.97	1.13	4.11	1.84
	つながり3	2.96	1.11	4.08	1.85
	つながり4	3.52	1.20	4.72	2.32
	つながり5	2.71	1.25	3.95	1.46
	つながり6	3.04	1.15	4.20	1.89
	つながり7	3.05	1.06	4.11	2.00
責任感	責任1	3.75	1.07	4.82	2.67
	責任2	3.67	0.99	4.67	2.68
	責任3	3.94	0.92	4.86	3.01
個人規範	個人規範1	3.67	0.99	4.67	2.68
	個人規範2	3.77	0.91	4.69	2.86
	個人規範3	3.77	0.94	4.71	2.82
行動 コントロール感	コントロール1	4.22	0.86	5.07	3.36
	コントロール2	3.69	1.06	4.75	2.63
	コントロール3	3.78	0.99	4.77	2.80
CO2削減 行動意図	削減意図1	3.31	0.94	4.25	2.36
	削減意図2	3.51	0.93	4.44	2.57
	削減意図3	3.39	0.92	4.31	2.47

表 3：α係数と修正済み項目合計相関係数の算出

		修正済み項目合計相関係数	α 係数
つながり感	つながり1	.536	.791
	つながり2	.526	
	つながり3	.546	
	つながり4	.585	
	つながり5	.354	
	つながり6	.515	
	つながり7	.592	
責任感	責任1	.650	.810
	責任2	.713	
	責任3	.622	
個人規範	個人規範1	.624	.777
	個人規範2	.674	
	個人規範3	.547	
行動 コントロール感	コントロール1	.559	.759
	コントロール2	.638	
	コントロール3	.584	
CO2削減 行動意図	CO2削減意図1	.670	.835
	CO2削減意図2	.760	
	CO2削減意図3	.662	

4.2 信頼性の検証

尺度の内的整合性を検証するため、クロンバックのα係数と修正済み項目合計相関係数を算出した。α係数と相関係数の結果を表 3 に示す。

表 3 より、各項目の相関係数は概ね 0.5〜0.7、各構成概念のα係数は 0.8 程度であり、尺度の内的整合性は十分あると判断される。

5. おわりに

本研究では、3 段階に渡る質問紙調査を実施することで、「つながり感」とそれに関連する構成概念の測定尺度を作成した。これらの尺度はα係数などの値から十分に信頼性があると判断できる。本研究で作成した質問紙は、LCT 環境教育プログラムの効果検証のみならず、人々の「つながり感」を測定する尺度として使用できると考えている。

現在分析中であるが、今後、以下の 2 点を検証していく予定である。第 1 に、LCT 環境教育を過去に受けた生徒を対象に質問紙調査を行うことで、作成した尺度の妥当性を評価することである。

第 2 に、「つながり感」から「行動意図」までの結びつきを想定したモデルが成り立つのか検証することである。具体的には、本調査(表 2)で得られたデータを用いて、構成概念間での相関分析や共分散構造分析を実施することで評価する。

参考文献

1) 平山世志衣,中島光太,本藤祐樹：日本 LCA 学会誌, 5(3), (2009), pp.367-381
2) 中島光太,平山世志衣,本藤祐樹：日本 LCA 学会誌, 7(1), (2011), pp.84-95
3) Sebastian Bamberg, Guido Möser.：Journal of Environmental Psychology, 27, (2007), pp.14-25

日常の中の自然な働きかけによる環境配慮行動の促進

—心理的近接性を高める 2 種の介入実験—

Promoting Pro-Environmental Behavior by A Natural Approach in The Daily Life: Two Intervention Studies to Increase Psychological Proximity

○弘中雄介*[1)]、本藤祐樹 [1)]
Yusuke HIRONAKA, Hiroki HONDO
1) 横浜国立大学
* hironaka-yuusuke-hg@ynu.jp

1. はじめに

近年、地球温暖化対策は優先的な課題の一つとなっており、課題解決のために人々の協力が必要とされている。人々の環境配慮行動を促す方策として代表的なものに環境教育があるが、時間的・人材的な負担が課題となっている。そのため環境教育以外の方策として、負担の少ない日常の中で実施可能な方策を設計することも必要となっている。こうした方策を設計する手掛かりとなるのが、種々の先行研究で指摘されている”再生可能エネルギー利用技術が人々の環境意識を向上させる契機となる可能性”である。特に太陽光発電(PV)システムは生活圏への普及と認知度の高さから人々へ影響を与える下地が最も整っていると考えられる。PV システムが人々に影響を与える可能性に着目した先行研究 [1)]では、”PV システムへの心理的近接性(愛着などの好意的な気持ち)”がその促進要因の一つであることを示唆している。

本研究は PV システムの身近な存在が人々の環境意識を向上させる可能性に着目し、日常の中で実施可能な方策を提案することを目的とする。具体的には PV システムへの心理的近接性を高める介入実験を行い、心理的近接性の向上が環境配慮意識や行動へ与える影響を明らかにする。

2. 仮説

本研究では、環境配慮行動を説明する心理プロセスとして VBN 理論(Value-Belief-Norm Theory)を想定する。VBN 理論では、一般的な価値観、地球や人間に対する価値観(NEP)、環境問題への認識(重要性認知)、環境問題への責任感(責任帰属)、そして自身が行動をするべきという考え(個人規範)によって、環境配慮行動が説明されるとしている(VBN 理論では環境配慮行動は 4 種類に分類されているが、ここでは割愛する)。より具体的には、価値観が NEP へ、NEP が重要性認知へ、という順で影響を与え、最終的に個人規範が環境配慮行動へ影響を与える一連のプロセスを、環境配慮行動が行われるまでの心理プロセスとして捉えている。

本研究の仮説は、PV システムへの心理的近接性が VBN 理論の 7 つの要素(価値観、NEP、重要性認知、責任帰属、個人規範、環境配慮行動(省エネ行動、環境政策の受容性))のいずれかに影響を与えることで、環境配慮行動を促進させているというものである。そして仮説検証の為に、心理的近接性を向上させる介入実験を行い、VBN 要素がどのように変化するのか、心理的近接性の変化がどの要素に影響を与えているのかを明らかにする。

3. 方法

3.1 介入実験

介入実験は PV システムが設置された保育園の保護者を対象として実施している。介入は、日々の中で自然に働きかけることを重視し、以下の 2 つの方法を考案し、それぞれ異なる保育園で実施している。

(1) PV 写真連絡帳カバーの利用

日常的に保育園と保護者の間でやり取りされている連絡帳に、保育園の PV システムの写真が印刷されたカバーを装着して使っていただく。

(2) コンテンツ表示モニターの設置

保護者が子どもの送迎時に通過する場所にモニターを設置し、PV システムへの注意喚起を行うコンテンツを表示する。

なお本稿の執筆時点では連絡帳カバーを利用した保育園の調査のみ完了しているため、以降は連絡帳カバー保育園について記述する。

3.2 質問紙調査

今回分析で用いるデータは対象の介入前のデータ(事前調査)と、12 月に実施した直近調査のデータ（事後調査）である。なお、事前データの調査時期は入園時期で異なっている。なお、以下に示す分析では入園時期によって介入期間の異なる対象者グループ(以下、GP)(介入期間が長い順に A1、A2、A3)のデータを合算している。各 GP と質問紙調査の概要を Table.1 に示す。

3.3 分析

2 回の調査で照合の取れた回答者のデータを対象と

して分析を行う。具体的には、各質問項目の変化量分析(事前・事後データを用いた対応のある t 検定)と、変化量を用いた相関分析である。本稿では心理的近接性を中心に分析結果を記述する。

4. 結果・考察

4.1 各質問項目の変化

事前・事後の回答を得点化し、それら得点の差分を変化量として分析を行った。また全ての質問項目の中で少なくとも 1 項目の変化量の絶対値が最大の 4 だった回答者は何かしらの大きな環境の変化が予想され、介入の影響を観察することが難しいと考え、分析対象から除外した。A1GP の 4 名がこの基準に該当したため除外し、53 名を分析対象とした。

心理的近接性は、3 種の質問項目を用いて、5 段階のリッカート尺度で測定した。各項目の質問文はそれぞれ”シンボル:太陽光発電システムは園のシンボルだと思う”、”愛着:園の太陽光発電システムに愛着を感じる”、”自己所有感:園の太陽光発電システムを自分のもののように思う”である。心理的近接性の質問項目は 2 項目で有意な正の変化があり、心理的近接性 3 項目の合算も有意な正の変化であった(Table.2)。

心理的近接性項目の向上から、介入によって園の PV システムに対する好意的な意識が高まっていると考え

Table.1 対象者 GP・質問

GP	A1	A2	A3
介入開始	2014/12/15	2015/4/28	2016/4/14
事前調査	2014/11/27-2014/12/8	2015/4/17-2015/4/27	2016/4/4-2016/4/13
事後調査	2016/12/2-2016/12/14		
照合数	27	11	19
実施方法	保育園経由での配布/回収		
照合方法	記名式/番号式		
調査項目	PVシステムへの心理的近接性(3項目), PVシステムの視認行動(1項目), 価値観(6項目), NEP(4項目), 重要性認知(2項目), 責任帰属(2項目), 個人規範(2項目), 環境政策の受容性(3項目), 省エネ行動の実践頻度(7項目), 個人属性に関する項目(4項目)		

Table.2 心理的近接性の変化

		シンボル	愛着	自己所有感	心理的近接性(単純加算)
変化量	最大値	2	2	2	5
	最小値	-2	-2	-2	-6
	平均値	0.472	0.321	-0.019	0.774
	中央値	0	0	0	1
	標準偏差	0.890	0.803	0.820	1.928
t 検定	t 値	-3.858	-2.907	0.167	-2.921
	p値(両側)	0.000	0.005	0.868	0.005

Table.3 シンボルの相関分析結果

	相関係数
重要性認知2 (エネルギー資源の大量消費は極めて重要な問題である)	.302*
個人規範1 (エネルギーを無駄遣いしていると、罪悪感を覚える)	.339**
コンセント (使用しない電化製品のコンセントは抜いている)	.325*
情報 (省エネや節電に関する情報を、自ら探している)	.279*
*:5%水準で有意(両側), **:1%水準で有意(両側)	

られる。特にシンボル意識の変化が大きく、PV 写真カバーの日常的な使用によって PV システムが園を象徴するものであるという意識が高まったと考えられる。一方で、価値観など他の 27 項目に関しては、省エネ行動の照明(なるべく照明を点けず、自然の光で生活している)で有意な負の変化が見られたが、それ以外の 26 項目では有意な変化は見られなかった。

4.2 心理的近接性と他項目との相関関係

各項目の変化量を用いて相関分析を行った。ここではシンボルと有意な相関がある項目を示す(Table.3)。

心理的近接性の 3 項目はいずれも複数項目と有意な相関が認められ、シンボルが一番多くの項目と相関が見られた。シンボルは政策受容項目との相関は確認できなかったが、他の心理的近接性 2 項目では政策受容項目と有意な相関が認められた。本研究では心理的近接性を一つの構成概念として捉えているが、他項目との関係性が異なるため、それぞれ異なる構成概念として検討する必要性が示唆される。全体として見ると、心理的近接性の項目は、環境意識と環境配慮行動のどちらの項目とも相関があったことから、人によっては心理的近接性の向上が環境配慮行動を直接間接に促進させる可能性が考えられる。

5. 終わりに

今回の分析では心理的近接性以外に有意な正の変化が見られた項目がなかった。この原因のひとつとして心理的近接性の向上による影響が大きなものではない可能性が挙げられる。しかし、相関分析の結果は、心理的近接性の向上が、環境配慮行動を促進させる可能性を示唆しており、心理的近接性を向上させる方策が環境配慮行動の促進に一定の効果があることが期待される。

最後に調査にご協力いただいた皆様に御礼申し上げます。また、本調査は JSPS 科研費(課題番号:25340120)の支援により実施されました。

参考文献

1) 藤本ひかり,本藤祐樹,弘中雄介:日本エネルギー学会誌 12(1),(2016),pp1-13

環境ラベル認知度から見る消費者特性

Consumer Characteristics to Judge from the Environmental Label Awareness

○藤澤美恵子*
Mieko Fujisawa
金沢大学
*fujisawa@ staff.kanazawa-u.ac.jp

1.　はじめに

環境にやさしい商品を認定する環境ラベルは、消費者の商品選択行動に対し、環境問題を喚起させ、環境保護の消費行動を促す役割が期待されている。しかしながら、環境ラベルの認知度は必ずしも高いとは言えず、その普及に関してはいくつかの課題がある。

本研究は、環境ラベルの認知度の高い消費者の特性を明らかにして、環境ラベルの普及にむけた議論に資することが目的である。そのために、環境ラベルに関するアンケート調査をおこない、個別の環境ラベルの認知度について尋ねた。この認知度の度合いをポイント化（環境ラベル認知度）し、このポイントの高低と消費者の属性、環境意識や環境行動が、どのような関係にあるのかを明らかにする。

2.　調査分析方法

株式会社マクロミルのモニターを利用し、インターネットアンケートを実施した。回答対象者は、東電エリア内の1都6県（東京都・千葉・埼玉・神奈川・群馬・栃木・茨城県）の住民で、世帯主もしくは世帯主の配偶者かつ勤労者もしくは年金受給者（学生は含まれない）で、自ら電気使用量を確認し、既に住宅エネルギー管理システム（HEMS）等を設置していない住宅に居住する、との条件に合致する者とした。

アンケート調査は、二段階でおこなった。まず、回答対象者を抽出するためにスクリーニング（事前）調査を実施し、本調査を実施した。実施概要は、表 1 のとおりである。事前調査の実施期間は 2016 年 3 月 28 日（月）～30 日（水）、本調査は 2016 年 3 月 30 日（水）である。配信数 2,390 に対して、1,036 の回答が得られ、回収率は 43.3%であった。本調査の主な調査項目は、電気料金や環境への関心度合い、世帯属性（住居、子供数、在宅時間等）、電力自由化に伴う行動等である。

また、環境ラベル認知度と環境意識や環境行動との関係性を調査するために、環境問題に対する関心（環境関心度）や日常的なエネルギー削減努力（削減努力度）、電気使用量の見える化サービスである「でんき家計簿」の登録の有無、HEMS 機能の導入の賛否なども質問した。

回収サンプル 1,036 から厳密にデータクリーニングをおこない、851 サンプルを分析の対象とする。具体的な分析方法は、単純集計、クロス集計ならびに重回帰分析で、得られた結果から考察をおこなう。

3.　調査結果

調査対象の環境ラベルは、浅野（2013）[1] やエコマーク事務局（2015）[2] により確認されている一般的な認知度を考慮した上で、11の環境ラベルを選定した。具体的には、図1のような環境ラベルである。それぞれの環境ラベルを画面表示して、既知か否かを認知している度合いから4段階で尋ねた。

表１　調査概要

調査名	環境意識に関するWebアンケート調査
調査方法	インターネットアンケート調査
調査委託先	株式会社マクロミル
調査日	【スクリーニング調査】2016年3月28日（月）16時55分～3月30日（水）
	【本調査】2016年3月30日（水）
調査対象者	東電エリア内（1都6県）居住 世帯主もしくは世帯主の配偶者 勤労者もしくは年金受給者（学生は含まない） 自ら電気使用量を確認する 既に住宅エネルギー管理システム（HEMS）を設置していない住宅に居住
調査項目	【スクリーニング調査】 東電との契約・電気料金（使用量）の確認者 【本調査】 電気料金 環境項目への関心度合い 電気使用量減少のための行動 環境マーク認知度 世帯属性（子供数・住居・延床面積・在宅時間） 電力自由化に伴う行動

エコマーク　　統一省エネラベル

図１　調査した環境ラベルの例

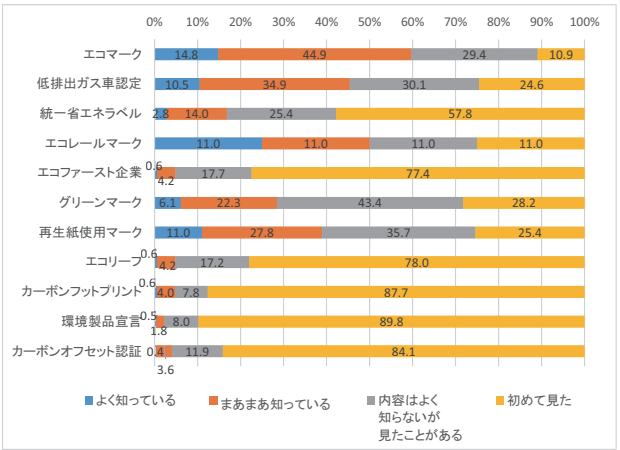


図２　環境ラベルの認識度

図2から、11の環境ラベルの認知について概観すると、「エコマーク」「低排出ガス車」は「まあまあ知っている」が4割前後を占めている。これは、先行研究と同様な結果である。「見たことがある」が、最も高い比率のラベルが、「グリーンマーク」「再生紙使用マーク」である。他の環境ラベルは、「初めて見た」の比率が最も高い。なお、先行研究では、比較的知られている「統一省エネラベル」は、本調査では初めて見た人が過半数を占めており、先行研究と比較して、本回答者はやや認知度の程度が低い状態である。

さらに、選択肢の「よく知っている」を2点、「まあまあ知っている」を1点、他の選択を回答の場合は0点とし、全11項目×2点の最大22点で、全サンプルのポイント化をおこなった結果が図3である。全サンプルの平均は、2.68ポイントであった。1～3ポイントが全体の約44%を占め最も多く、最頻値は0ポイントである。そもそも、環境ラベルを知らない人が多くいることがわかる。

アンケートでは HEMS の機能について説明し、その HEMS を住宅に導入するかを質問した。特に、HEMS の機能の１つである電力ピークシフトでは、社会全体の環境対策となることから、ピークシフト機能の導入と環境ラベル認知度との関係を調べた。図４から、環境ラベル認知度の平均値を上回っている「平均以上」の人は、HEMS 導入に 69.9%が合意しているのに対して、「平均未満」の人では 55.1%である。環境ラベル認知度が高い人は、ピークシフトに合意する傾向にあることが思料される。

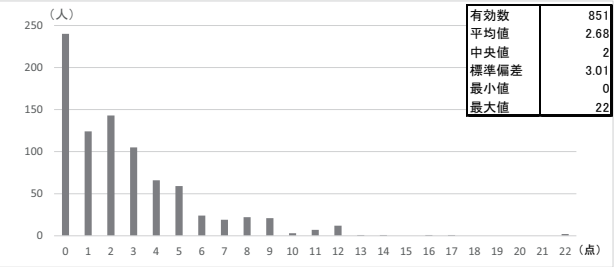


図３　環境ラベル認知度

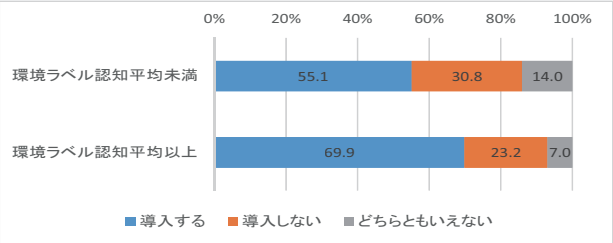


図４　環境ラベルの認知度とピークシフト合意

表２　重回帰分析結果

	係数	標準誤差	t 値
(定数)	0.689	0.703	0.980
男性ダミー	0.342	0.259	1.320
年齢	-0.004	0.012	-0.353
でんき家計簿登録ダミー	0.521 **	0.242	2.154
電気料金	8.184E-06	0.000	0.523
環境関心度	0.114 ***	0.020	5.588
削減努力度	0.174 ***	0.035	5.001
電力会社変更ダミー	0.370	0.263	1.407
住宅延べ床面積	0.003	0.004	0.801
平日在宅時間	-0.059 **	0.025	-2.402
戸建てダミー	-0.093	0.308	-0.301
18歳以下の子ダミー	0.368	0.343	1.074
調整済み決定係数	0.147		
N値	851		

***：1%有意、**：5%有意

4.　分析結果

ポイント化した環境ラベル認知度を被説明変数として重回帰分析をおこない、消費者の属性や環境意識や環境行動などとの因果関係を確認した。なお、分析にあたり環境ラベル認知度と同様に、環境関心度と削減努力度もポイント化した。

表２が、分析結果である。統計的有意な変数は、「でんき家計簿登録ダミー」と「環境関心度」、「削減努力度」、「平日の在宅時間」である。ここから、環境ラベル認知度が高いのは、でんき家計簿の登録をおこない、日常的にエネルギーの削減努力をしている環境行動が取れる人であることがわかる。同様に、環境への関心度が高い人も環境ラベル認知度が高い傾向にある。また、平日の在宅時間が短い方が、環境ラベル認知度が高くなることがわかる。

一方で、年齢や住宅の状況による差は、確認されなかった。統計的有意になっていないが、男性、もしくは 18 歳以下の子供がいる子育て世帯で、環境ラベル認知度が高まる傾向にあるようであるが、これは再度調査により確認する必要がある。

5.　さいごに

分析の結果、環境ラベル認知度が高い消費者は、電力ピークシフトなどの環境に対応した要請に関して合意する傾向が比較的高く、日常的なエネルギー削減努力をおこなっていることを確認することができた。環境ラベルは、そもそも、環境意識が高く環境行動をおこなっている人に認知されているとの結論となった。

また、分析の結果からは属性による因果関係は確認されなかったものの、性別や家族構成などで違いがあるかもしれないことが示唆された。これは、今後の課題である。

引用文献

1)　浅野智恵美：消費生活研究，第 15 巻 1 号（2013）pp33-40

2)　エコマーク事務局：“エコマーク認知度調査報告書”公益財団法人日本環境協会（オンライン）入手先：https://www.ecomark.jp/info/new/20150612.html（参照：2016-3-20）

※本研究は、科研費基盤Ｃ（一般）15K03476 による支援を受けての研究である。

導入シナリオ分析のための植物工場モデリング

Modeling of artificial light plant factory for implementation scenario analyses

○冨永華子 1)、兼松祐一郎 1)、大久保達也 1)、菊池康紀*1)
Hanako Tominaga, Yuichiro Kanematsu, Tatsuya Okubo, Yasunari Kikuchi
1)　東京大学
*kikuchi@platinum.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

植物工場とは、施設園芸のうち水耕栽培や二酸化炭素施用などにより光、温度、湿度、二酸化炭素濃度、養分、水分等の管理を行い、環境条件を制御して反収を増強させる農作物生産システムを指す。半閉鎖空間で主にトマトなどの果菜類を生産する太陽光型と、閉鎖空間で主にリーフレタスなどの葉物を生産する人工光型がある [1]。特に人工光型植物工場については、閉鎖空間で環境条件を制御するため、従来の栽培方法が適さない地域でも一定の価格・品質で 1 年中計画的に食物を生産できることや、営農操作が天候に左右されないこと、肥料や水分といった資源の利用効率を向上させうることなどの利点が考えられており、機能性食品の製造も期待されている。

植物工場に関して、農産物毎にライフサイクルアセスメント(LCA)を行った例 [2,3]や、具体的な工場における LCA・収支バランスの分析等の報告 [4,5]、植物工場に導入される個々の技術及びその生産性の向上との関係性の評価等の報告 [6-8]は過去にもある。また、近年では、特定の地域を対象に遊休施設や観光施設、福祉施設を活かした導入シナリオを検討している研究 [9]や、実際に操業している工場のデータを用いて LCA を行った研究 [10]もある。しかし、所与の地域や条件でエネルギー需要や肥料消費量を分析しており、経済性、環境性、社会性の地域特性との関わりを考慮した導入を検討できるようなモデリングが必要と考える。

本研究では人工光型植物工場における資源や熱の流れを可視化可能なモデルを開発し、技術導入のシナリオを議論する。モデリングの対象として、リーフレタスを栽培する人工光型植物工場を扱う。工場の規模は、既存の植物工場を参考に、ユニットハウス型（1 日当たり 100 株程度)、中規模・大規模一部屋型（1 日当たり 1000-10000 株程度)を想定し、栽培株数に応じて屋内体積等を変化させる。

2. モデリング概要

2.1 植物工場の導入に影響する地域特性

植物工場の規模や構造の設計において大きく関係すると予想される地域の諸条件としては、日照量や気温などの気象条件や、人口構造や大消費地との距離などの需要に関わる要素、農産業の現状や資源価格などの供給に関わる要素等が挙げられる。本研究においては、気象条件を熱負荷モデリングにおける変数として用い、需要・供給に関わる要素に基づいて栽培規模の設定を行う。

2.2 工場内の熱負荷のモデリング

人工光型植物工場における物質や作業の流れを数値化する。まず、植物工場の建設から操業、廃棄に至るまでの作業工程及び操業に関わる作業工程を可視化し、各工程における入出力を明らかにした(図 1)。また、エネルギーバランスに関しては、操業時の建屋内外の熱移動の可視化を行った。壁を介した建屋内外の伝熱による温度変化に加え、建屋内の照明、養液ポンプ等の各種装置、ならびに作業者、植物の生命活動を熱の発生源とし、空調設備による温度・湿度の制御をシミュレーションできる数理モデルを構築した(図 2)。図 2 において、elec、Mat、q はそれぞれ時間当たりの電力、原料、熱を表す。空調設備の消費電力に関しては、空調設備の成績係数(COP)を考慮し、以下の式 [11]を用いて算出する。

$$\mathrm{COP} = \frac{R * T_{\mathrm{evp}}}{T_{\mathrm{cnd}} - T_{\mathrm{evp}}}$$

COP の定義より

$$\mathrm{elec}^{\mathrm{in}}_{\mathrm{Acond}} = \frac{q^{\mathrm{pumpin}}_{\mathrm{ACond}}}{\mathrm{COP}}$$

したがって

$$\mathrm{elec}^{\mathrm{in}}_{\mathrm{Acond}} = \frac{q^{\mathrm{pumpin}}_{\mathrm{ACond}}}{\mathrm{COP}} = \frac{q^{\mathrm{pumpin}}_{\mathrm{ACond}} * \left(T_{\mathrm{cnd}} - T_{\mathrm{evp}}\right)}{R * T_{\mathrm{evp}}}$$

T_{evp}：　冷媒蒸発温度 [K]

T_{cnd}：　冷媒凝縮温度 [K]

R：空調設備の冷凍機部分の理論効率(入力エネルギーに対して得られる出力エネルギーの比)と実際の効率の比

ここで、T_{evp}、T_{cnd}、R、$q^{\mathrm{pumpin}}_{\mathrm{ACond}}$ はそれぞれ、気象条件に影響を受けて変化するため、同じ構造・規模の植物工場を設置した場合でも、設置地域により空調機器の消費電力は変化する。

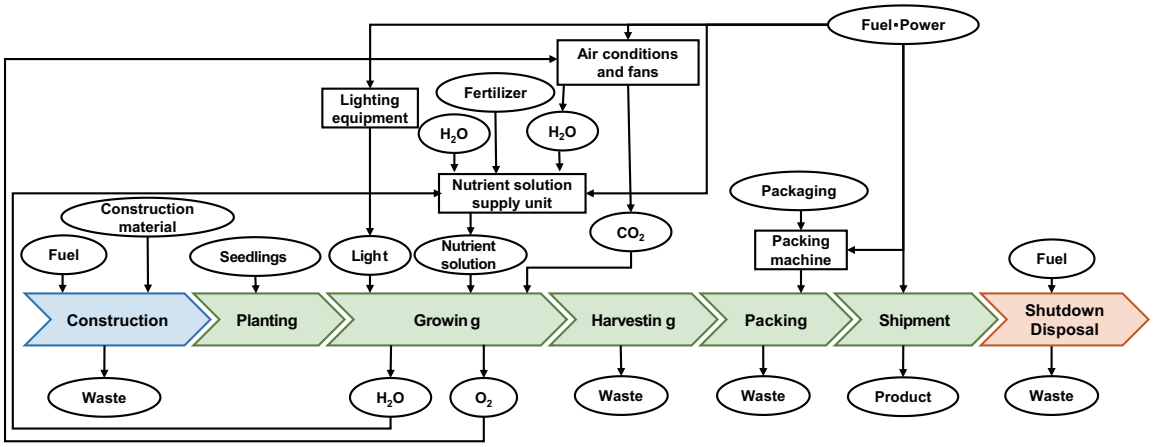
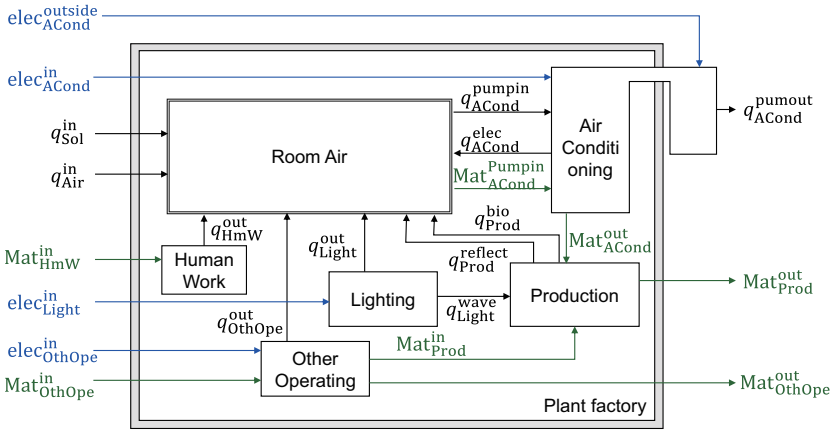


図 1：建設から廃棄までのライフサイクル

作成したモデルにおいては、栽培規模、設置場所の特性（気象条件、人口構造、ライフスタイル等）、施設の条件(設置面積や壁等の厚み、使用照明、建築資材等の物性特性等)を入力することで、電力消費量や生産量当たりの環境影響物質排出量を算出する。また、栽培規模や設置場所の特性を入力することで、地域の条件に応じて導入可能な施設の条件を、生産量当たりの電力消費量や環境影響物質排出量の削減量といった項目とともに出力する。



変数一覧は表 S1 に記す。

図 2：人工光型植物工場におけるエネルギーバランス

3. おわりに

本研究では、特に熱負荷に焦点をあてた解析を行うことにより、植物工場の壁の伝熱や、空調設備の稼働状況、さらには生産量当たりの環境影響物質排出量等の分析を行うモデルを提案した。より具体的な導入シナリオの設計において、建屋の条件や室内の設備の定格に応じたエネルギーバランスの分析が可能となった。

謝辞

本研究は、環境研究総合推進費（1RF-1503）、科学研究費補助金（若手研究（A）16H06126）における成果を含んでいる。東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は（株）地球快適化インスティテュート、日本電信電話（株）、富士フイルムホールディングス（株）、三井不動産（株）、（株）LIXIL、信越化学工業（株）からの寄付で活動している。

引用文献

1) 農林水産省、経済産業省：“植物工場の事例集”, (2009)
2) 山田裕子、伊坪徳宏：“第 3 回日本 LCA 学会研究発表会”, 名古屋, (2008), pp.270-271
3) 椎名武夫　ら：“第 6 回日本 LCA 学会研究発表会”, 仙台, (2011), pp.260-261
4) 大山克己, 古在豊樹, 全昶厚：植物工場学会誌, 15(1), (2003), pp.1-10
5) 高辻正基：植物工場学会誌, 4(2), (1993), pp.111-117.
6) H.Shimizu *et al.*：“Preprints of the 18th IFAC World Congress”, Italy, (2011), pp.605-609
7) 羽藤堅治, 野口多聞, 橋本康：植物工場学会誌, 7(2), (1995), pp.110-115
8) 安保正一、福田弘和、和田光生,：“植物工場の生産性向上、コスト削減技術とビジネス構築”, CMC Books,東京, (2015)
9) 酒井徹, 津田渉, 小林由喜也：秋田県立大学ウェブジャーナル A, 2, (2014), pp.19-29
10) 菊池康紀　ら：“第 11 回日本 LCA 学会研究発表会”, 柏, (2016), pp14-15
11) 電力中央研究所：“研究報告：R09017”, (2010)

Supporting Information

表 S1：変数一覧

変数		単位
$\mathrm{elec}_{\mathrm{ACond}}^{\mathrm{outside}}$	空調機器（室外機）が消費した電力	W
$\mathrm{elec}_{\mathrm{ACond}}^{\mathrm{in}}$	空調機器（室内機）が消費した電力	W
$\mathrm{elec}_{\mathrm{Light}}^{\mathrm{in}}$	照明機器が消費した電力	W
$\mathrm{elec}_{\mathrm{OthOpe}}^{\mathrm{in}}$	養液循環装置等、その他の機器が消費した電力	W
$\mathrm{Mat}_{\mathrm{HmW}}^{\mathrm{in}}$	作業者のエネルギー	W
$\mathrm{Mat}_{\mathrm{OthOpe}}^{\mathrm{in}}$	養液循環装置等、その他の機器が消費した原料	t-carbon / day L-water / min
$\mathrm{Mat}_{\mathrm{OthOpe}}^{\mathrm{out}}$	養液循環装置等、その他の機器の排出物（排水等）	L-water / min
$\mathrm{Mat}_{\mathrm{Prod}}^{\mathrm{in}}$	養液循環装置等、その他の機器から植物体への供給物（水、二酸化炭素、肥料分等）	t-carbon / day L-water / min
$\mathrm{Mat}_{\mathrm{Prod}}^{\mathrm{out}}$	製品、廃棄物（野菜くず等）	t-carbon / day L-water / min
$\mathrm{Mat}_{\mathrm{ACond}}^{\mathrm{Pumpin}}$	空調機器の室内空気からの回収物（水蒸気等）	L-water / min
$\mathrm{Mat}_{\mathrm{ACond}}^{\mathrm{out}}$	空調機器で凝縮された水	L-water / min
$q_{\mathrm{Sol}}^{\mathrm{in}}$	室外からの伝熱による熱（放射伝熱）	W
$q_{\mathrm{Air}}^{\mathrm{in}}$	室外からの伝熱による熱（自然伝熱、対流伝熱）	W
$q_{\mathrm{HmW}}^{\mathrm{out}}$	作業者の生命活動による発熱	W
$q_{\mathrm{OthOpe}}^{\mathrm{out}}$	養液循環装置等、その他の機器からの発熱	W
$q_{\mathrm{Light}}^{\mathrm{out}}$	照明機器からの発熱	W
$q_{\mathrm{Light}}^{\mathrm{wave}}$	照明機器から植物体への光のエネルギー	W
$q_{\mathrm{Prod}}^{\mathrm{reflect}}$	植物体による反射	W
$q_{\mathrm{Prod}}^{\mathrm{bio}}$	植物体の生命活動による発熱	W
$q_{\mathrm{ACond}}^{\mathrm{pumpin}}$	空調機器が室内から除した熱	W
$q_{\mathrm{ACond}}^{\mathrm{elec}}$	空調機器による発熱	W
$q_{\mathrm{ACond}}^{\mathrm{pumout}}$	空調機器が屋外に排出した熱	W

The environmental impact evaluation of tomato food loss reduction scenario using appropriate technology

○Shin Yoshizawa*[1)], Kiyoshi Dowaki[1)]
1) Tokyo University of Science
* 7412133@ed.tus.ac.jp

1. Introduction

Today, the examination of product sustainability by way of renewable energy is being considered in Asia. However, it has not been utilized very well in developing countries. So this shows the reason for the need to construct a system with added value. From another point of view, food losses are known to have impacts on food security, quality, safety, economic development, and also the environment. For this reason, cold storage systems have been recognized as playing an important role in maintaining the quality of agricultural products.

In our previous study , a feasibility study in Indonesia was executed because this country has plenty of geothermal resources. Also, most of the land mass of this country is in a tropical area. Therefore, this implies that it is difficult to maintain the quality of agricultural products in warm atmospheric conditions, leading to the significant promotion of cold storage in the product supply chain. Here, the tomato was selected as the target product due to its high consumption rate in our study. However, in the previous study the potential for food loss reduction using cold storage systems was not accounted for, and there was also a lack of information on the environmental effects. That is, a 22.4% increase in waste occurred in the conventional tomato supply chain, which in turn had a negative impact on the environment. For the protection of food loss and the improvement of environmental conditions, we proposed the use of a eco-friendly, geothermal cold chain in Indonesia. However, the environmental impacts of this system have not yet been estimated by means of LCA methodology. Thus, our goal is to find the hot spot in the entire system and show the countermeasure for the abatement of food loss in consideration of environmental aspects on the basis of the LCA concept.

2. Methodology

2.1 Case study and system boundary

In this study, at the farming and packaging phase, all input data is from Ecoinvent 3 [1)] because access to accurate information for this data is insufficient. Furthermore, it enhances the effectiveness of investing in data collection by performing sensitivity analysis using ecoinvent data to identify the most relevant flows and processes. The data collection of cold storage was from a storage facility, located close to a geothermal power plant [2)] (See Table S1). The functional unit is 1 kg of raw edible tomato cultivated in the West Java region of Indonesia and purchased by consumers in a Jakarta supermarket. In this study, we referred to the dynamic quality change of tomatoes. In the following figure (S1) you can see the transportation distance. The operational speed of the truck is assumed to be 60km/h. The warm atmosphere is the most important factor in the deterioration of the product.

The outline of this research is shown in Figure 1, and the methods are explained below.

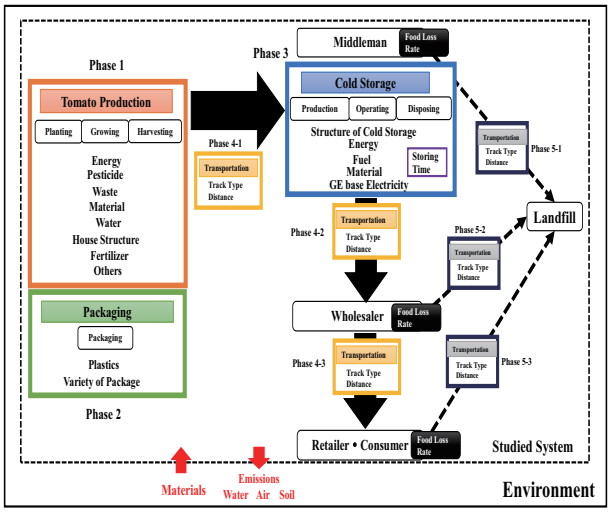


Figure 1 System boundary

2.2 Measurement of food loss rate over time

We set the food loss standards by quantity loss: if the weight loss of tomatoes from shipment to sale is more than 5% , those are discarded to a landfill [3)] . Also, it is possible to estimate the quality retention time of sample through an examination of the time to reach a reduction of 5%. Thus, we observed the deterioration time to measure their loss rates, taking into account all different forseeable scenarios. After cold storage, each sample was stored at room temperature for twenty days. Considering the site conditions, the ambient temperature of 28 °C and the cooling temperature of 10 °C were set, which are corresponding to the annual average temperature in Indonesia and the best temperature for the chilled storage of tomatoes. Based on these conditions, 4 scenarios were discussed (see Table S3).

2.3 Proposal of integrated index

We propose the integrated index, which has the evaluation criteria so that people can know both aspects of quality and eco-friendliness. The details is expressed in SI. In this analysis, we used ReCiPe as the impact analysis method and software used SimaPro ver 8.2.0.0.

3. Result and Discussion

3.1 Dynamic change of food loss ratio

The result is as shown in Figure S2. The necessity for cold chain is proven because storage duration has a profoundly negative impact on the quality loss. However, please note that an extended storage duration (more than a couple days) may occur if you take the site conditions into account.

3.2 LCA results of conventional and cold chains

Figures 2 and 3 show the hot spots of environmental burden in each scenario.

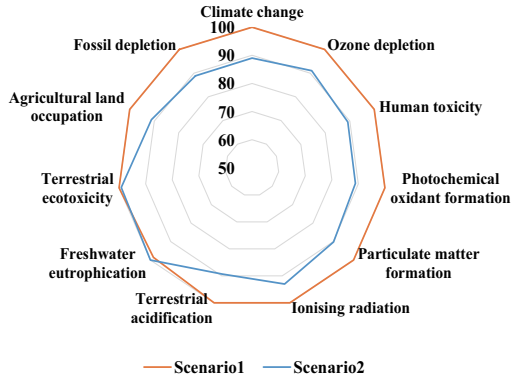


Figure 2 Hot spot in the case of 1 day storage

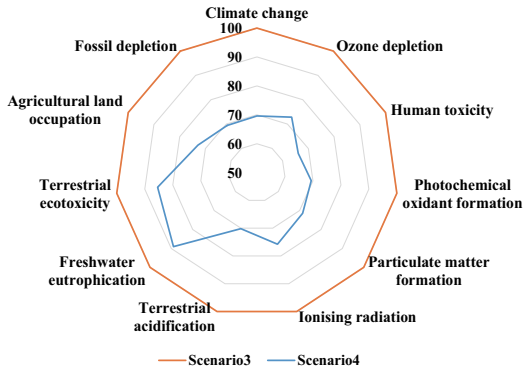


Figure 3 Hot spot in the case of 2days storage

It became clear that the environmental impacts are reduced by 10% in 1day storage, and 30% in 2 days storage, respectively. These results imply that a cold chain storage contributes greatly to the environmental impacts. Longer storage at an atmospheric temperature causes greater loss in comparison to initial conditions. That is, cold chain has an extremely low environmental impact. However, the energy input for cold storage operations which causes bad effects should be optimized.

3.3 Calculation of integrated index

Figure 4 shows the integrated index by scenario. According to this index, it was found that the intensity of scenario4 was 1.5 times greater in comparison to scenario3. However, there is a possibility that the difference in influence widens considerably when the other items are taken into consideration resulting in an underestimation in this integrated index. Thus, in our future study, we think it necessary to include a comprehensive evaluation of the tomato's nutritional value and appearance.

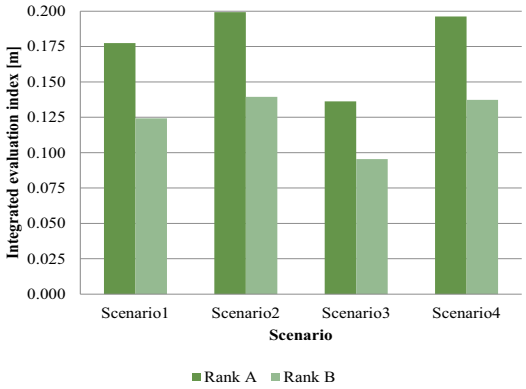


Figure 4 Combined evaluation result

4. Conclusion

In our study, we proposed the integrated index so as to find the hot spot of the tomato supply chain in Indonesia. Especially, in the tropical area in which the quality of agricultural products would easily deteriorate, such as in Indonesia, the abatement of food loss and environmental impact is absolutely necessary. Based on the quality change by altering the storage temperature, we measured dynamic changes and evaluated the impacts. Here, the promotion of cold chain can offer the advantage of maintaining quality, and the effects, including the environmental aspects, which would be measured from our integrated index.

5. References

1) Wernet, G. et al., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. Int. J of LCA, 21(9), pp.1218–1230,
2) Shizuoka Seiki Co.,Ltd. vegetable cooler GB-H series,GB-14H,<http://www.shizuokaseiki.co.jp/agriculture/agriculture_02/20130522gb-h.html> [Accessed 28/12/2016]
3) Takeo Shiina : Vegetable information (2016), pp.44-56

Supporting Information

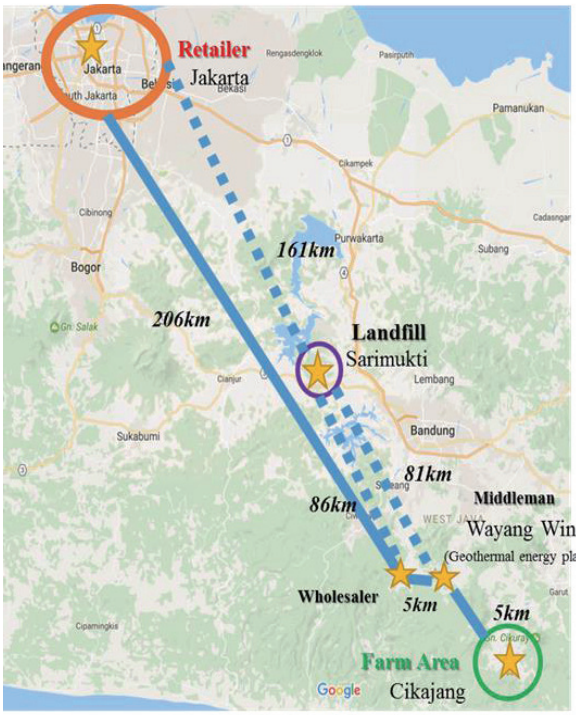


Figure S1 Geographical context

Table S1 Inventory data of cold storage

Cold Storage-Structure	
Effective volume (L)	884
Weight (kg)	99
Temperature -inside (℃)	2-20
Number of container (-)	8
Cold Storage-Energy	
Heat form light fuel oil (Wh)	19
Electricity-Geothermal (Wh-60Hz)	320

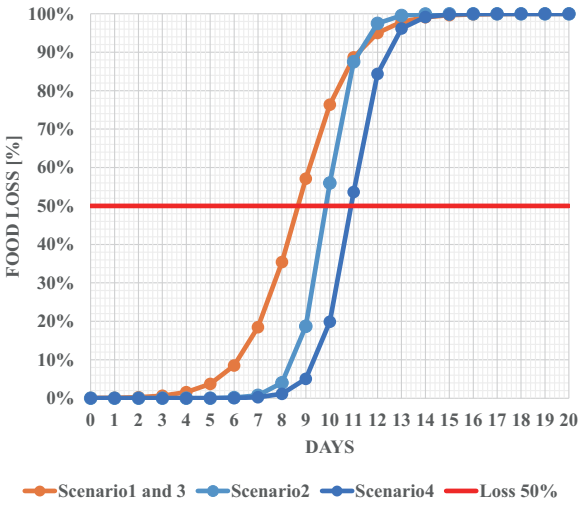


Figure S2 Dynamic change of food loss ratio

LCA was performed taking into consideration the food loos for each Scenario by converting the above graph to the following formula.

$$y = \frac{1}{1 + e^{((-(b_0 + b_1 x))}} = \frac{1}{1 + exp(-(b_0 + b_1 x))} \quad (1)$$

y : Food loss rate

x : time (hour)

For calucurating the integrated index we utilized the method of calculation as follows:

The standards of ranking were split into two types, A and B. If there was a greater than 50% loss of quality 5 days after the purchase, it would ranked as A; others were ranked B.

The evaluation criteria allows people to have an image of both the quality and eco-friendliness in comparison to other scenarios.

$$C_{ij} = \frac{I_j}{S_i} \quad (2)$$

C : Integrated evaluation index

S : Environmental assessment of scenario

I : Equivalent weight

j : rank ($1 \leq i \leq 2$)

i : Each scenario ($1 \leq j \leq 4$)

Table S2 Equivalent mass by rank

j	Rank	Loss 50%	Equivalent mass
1	A	More	100
2	B	Less	70

Table S3 LCA of each scenario

i	Scenario (days in storage)
1	The system without cold storage (1day)
2	The system with cold storage (1day)
3	The system without cold storage (2days)
4	The system with cold storage (2days)

新冷媒を用いた野菜のコールドチェーンにおける品質維持方法の提案

Proposal on maintaining quality of cold chain of vegetables using new refrigerant

○大野彰之*[1)]、堂脇清志 [1)]
Akiyuki Ohno, Kiyoshi Dowaki
1) 東京理科大学
* 7415607@ed.tus.ac.jp

1. 背景・目的

高品質な野菜を消費者に供給する上で、高品質野菜の栽培に加えて、流通過程における品質劣化を抑制することが課題となっている [1)]。野菜の品質は流通過程において様々な原因より劣化する。食品劣化の原因の中でも、微生物による劣化は食品を食用不可能にしてしまうとともに、食中毒発生の主要因ともなるために、コールドチェーンによる冷温管理での微生物の抑制は食品衛生の面から不可欠であると知られている [2)]。野菜を貯蔵する上での大きな特徴として、野菜は収穫後も生命活動を続け、呼吸作用によって熱エネルギーを放出するというものがある。これは野菜が保有するエネルギー源を消費する作用であり、鮮度・品質の低下につながる。

一方で、食料のコールドチェーンのために使われる電力は世界中で使用される電力の 15%を占めるとされており [3)]、コールドチェーンにおける省エネは大きな課題となっている。コールドチェーンにおける冷却は、一般的にヒートポンプによって行われる。ヒートポンプは冷媒が蒸発する際の気化熱で冷却を行う。ヒートポンプにおける冷凍能力は冷媒の気化熱のエンタルピーから決まることから、冷媒はヒートポンプの重要な要素となる。ここで性能の良い冷媒とは、ヒートポンプに導入した際に冷凍サイクルの成績係数(COP: Coefficient Of Performance)が高くなるような冷媒であるが、加えて近年では冷媒の環境親和性が求められている。1920 年代にフロン類が開発されたが、オゾン層を破壊するという特性が明らかになり使用が禁止されるようになった。次に代替フロン HFC が使用されるようになったが、地球温暖化係数(GWP)が大きいことから、これも制限されつつある。

以上のような背景から、本研究では環境負荷が小さい冷媒として、新冷媒 GF-08 に注目した。なお、GF-08 は、炭化水素を用いた自然冷媒であり、環境負荷が極めて小さい(表 S1)[4)]。すなわち、本研究では、新冷媒 GF-08 を、野菜のコールドチェーンに導入した際にエネルギー消費の面では省エネになるかを検証することを目的とした。そのために、冷媒の特性から、冷媒をヒートポンプに導入した際の性能、つまり COP を求められるようなシミュレータの作成し検証した。

2. シミュレーション手法

2.1 モデル概要

図 S1 は本研究で想定するヒートポンプの概略図であり、コンプレッサー、凝縮器、膨張弁、蒸発器とこれらの装置の間を循環する冷媒の状態を表している。例えばコンプレッサーの前後を見てみると圧縮前において温度 T1、圧力 P1、エンタルピーh1 であった冷媒がコンプレッサーにより圧縮されることで温度と圧力、エンタルピーが高くなる。圧縮後の温度、圧力、エンタルピーをそれぞれ T2、P2、h2 と表す。冷媒は圧縮前、圧縮後、凝縮後、膨張後の順で冷媒の状態量(温度、圧力、エンタルピー)が変化する。膨張後に状態量が T4、P4、h4 となる冷媒はその後蒸発器において蒸発し、対象とする空間の空気の熱を、気化熱による熱交換によって吸収した後、T1、P1、h1 の状態となる。

2.2 シミュレーションモデルの作成

次に、シミュレーションモデルによって圧縮前、圧縮後、凝縮後、膨張後の冷媒の状態を想定するために、p-h 線図を用いた(図 S2)。

このシミュレーションでは、消費するエネルギーに対してどれだけ冷凍能力があるかを表す指標である COP を求めることを目的とする。ここでヒートポンプ稼働のために必要な動力とは、つまりコンプレッサーの動力であり、圧縮後のエンタルピーh2 から圧縮前のエンタルピーh1 を引くことによって求めることができる。

冷凍能力とは膨張した冷媒が蒸発する際に発生する気化熱であり、蒸発後、すなわち圧縮前のエンタルピーh1 から蒸発前、すなわち膨張後のエンタルピーh4 を引くことによって求めることができる。このとき、COP を求める式の説明については SI を参照。

また、蒸発後、コンプレッサーに送られる最中の圧力損失はコンプレッサーに吸入される冷媒の体積に係わるため、ヒートポンプの性能に大きく影響を与える。

従って本研究では蒸発器からコンプレッサーの間における圧力損失を管の太さ、長さ、曲がり、冷媒の物性から算出し、圧力損失が COP に与える影響を参考に分析を行うこととした。圧力損失を求める式の説明については SI を参照。

3. 結果･考察

3.1 理論冷凍サイクル

理論冷凍サイクル、すなわち圧力損失を考慮しない場合における COP を評価した。図 1 は同じ条件下(蒸発温度 T1=0℃,凝縮温度 T3=20℃~40℃)における GF-08 と既存冷媒の COP 比を示したものである。

COP 比とは GF-08 の COP を既存冷媒の COP で除したものであり、100%を超えた場合には GF-08 の性能が既存冷媒よりも高いことを意味する。

また、このとき、理論冷凍サイクルにおいては 20℃~40℃のどの凝縮温度下においても R134a の COP が GF-08 を上回った。また、R404A との比較においては凝縮温度が 27℃を超えると GF-08 の COP が R404A を上回った。

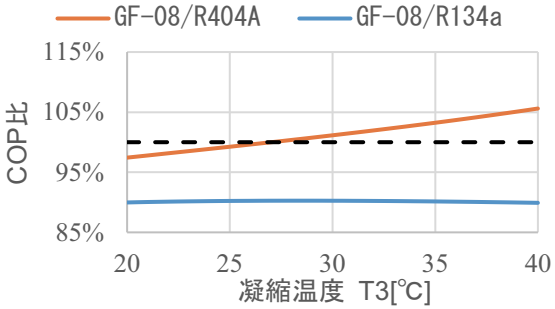


図 1 理論冷凍サイクルにおける COP 比

3.2 圧力損失の影響

蒸発器と圧力損失の影響を分析するために、圧力損失の小さい場合と大きい場合の COP 比を示した。

図 S3 と図 S4 に示すように、圧力損失が大きくなるほど、R134a の COP が小さくなり、圧損が小さいケース(管長さ L=2[m]では、凝縮温度 T3 が 42℃を超え、大きいケース(管長さ L=4[m])では T3 が 29℃を超えると GF-08 の COP が R134a の COP を上回った。

4. GF-08 の導入による省エネ効果の検討

小型の圧力損失が小さい条件下においては、R134a が GF-08 より高い性能を示すことが明らかになった。従って、中型以上の R404A を使用している、冷蔵倉庫に GF-08 を導入した際の省エネ効果を検討する。ここで、想定する冷蔵倉庫の規格は図 S5、表 S2 で示したもので、管長さ L は 3[m]とする。

図 S6 は千葉県の 2015 年における年間の外気温度の推移と、その時の COP 比(GF-08/R404A)の推移を表したものある。4/20~10/30 の間は COP 比が 100%を上回ったが、それ以外の期間では COP 比が 100%を下回る結果になった。

図 2 は月別の熱需要と、それに対する冷媒ごとのエネルギー消費量を表したものである。4 月~10 月の間は GF-08 を導入によりエネルギー消費量が削減され、最大で 8 月に 61.5[MJ/mon]、7.1%の省エネとなった。一方で 11 月~3 月の間は GF-08 の導入によってエネルギー消費量が増加し、2 月には最大で 1.4[MJ/mon]エネルギー消費が増加した。年間のエネルギー消費量を合算して比較すると、GF-08 を導入した場合には、エネルギー消費量が 3.7%削減された。

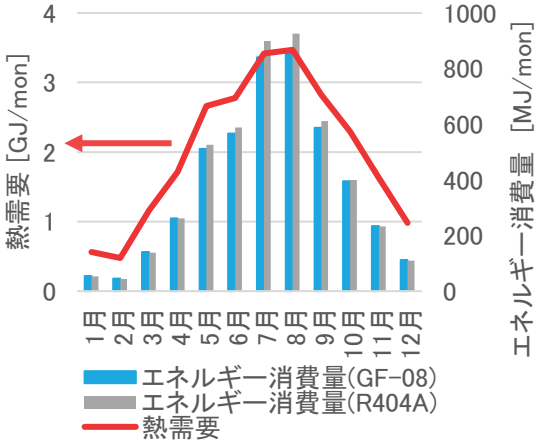


図 2 月別の熱需要とエネルギー消費量(千葉県)

5. まとめ

本研究では冷媒の物性データ(p-h 線図、密度、粘度)からヒートポンプの性能(COP)を求め、新冷媒 GF-08 と既存冷媒 R134a、R404A の比較を行うことを目的としてシミュレーションモデルを作成した。

理論冷凍サイクルでは R134a が GF-08 と比べ約 10%高い性能を示したが、R134a は高い粘性により圧力損失の影響が大きくなった。また、R404A と GF-08 の比較では、高い凝縮温度下で GF-08 が高い性能を示した。

この結果から GF-08 は圧力損失が大きくなる中規模以上の冷凍倉庫等に対して、凝縮温度が高くなる高温な環境においては高い性能を示すと考えられた。

従って R404A を使用している、千葉県の中型冷蔵倉庫を想定し、冷媒を GF-08 に交換した際の影響を検証した。検証の結果、GF-08 導入により 3.7%の省エネ効果があることが明らかになった。また、熱需要が高いほど、省エネ効果が高いことから GF-08 の導入によりピークカットが可能であることが示唆された。

引用文献

1) 相良泰行：日本冷凍空調工業学会誌，78(906),(2003),pp.272-281.
2) 農研機構：“野菜の最適貯蔵条件”，入手先，<https://www.naro.affrc.go.jp/index.html>(参照20016-12-28)
3) S.J.James, C.James : Food Research International,43,(2010),pp.1944-1956
4) 丸八空調工業株式会社：“「GF-08」-自然冷媒-”，入手先，<http://www2.tbb.t-com.ne.jp/maruhati-a-s/>(参照 2016-12-28)

Supporting Information

表 S1 新冷媒 GF-08 と既存冷媒の環境性能比較

	R134a	R404A	**GF-08**
オゾン破壊係数	0	0	**0**
地球温暖化係数	1430	3920	**3**
大気中寿命	14	11	**1**

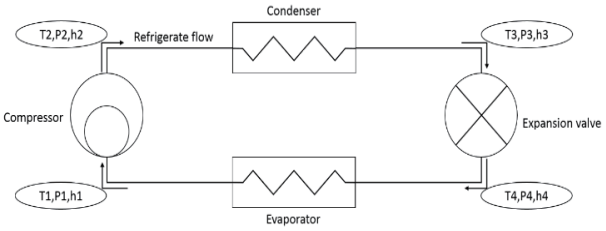


図 S1 ヒートポンプの概要

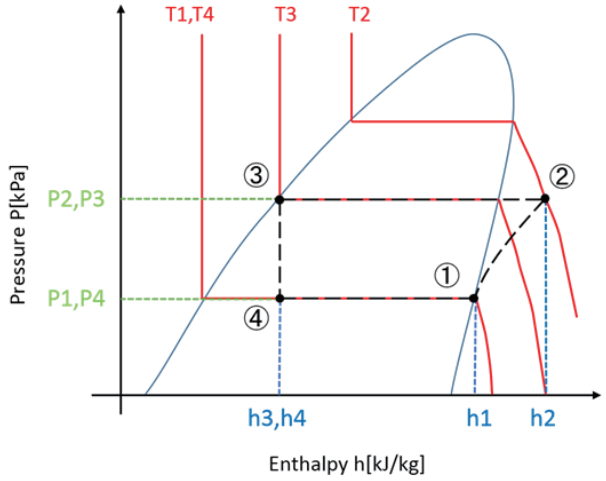


図 S2 p-h 線図上における冷凍サイクル

・COP 算出に使用した式

$$P1 = f(T1) \quad (1)$$

$$h1 = f(T1) \quad (2)$$

$$P3 = f(T3) \quad (3)$$

$$P2 = P3 \quad (4)$$

$$h2 = h1 + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \times P1 \times V \times \left\{ \left(\frac{P2}{P1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right\} \quad (5)$$

$$h3 = f(T3) \quad (6)$$

$$h4 = h3 \quad (7)$$

$$COP = \frac{h1 - h4}{h2 - h1} \quad (8)$$

P1 [kPa] : 蒸発圧力
T1 [℃] : 蒸発温度
h1 [kJ/kg] : 蒸発後のエンタルピー
P3 [kPa] : 凝縮圧力
T3 [℃] : 凝縮温度
P2 [kPa] : 圧縮後の圧力
h2 [kJ/kg] : 圧縮後のエンタルピー
V [m³/kg] : 圧縮前の冷媒体積
κ : 比熱比
h3 [kJ/kg] : 凝縮後のエンタルピー
h4 [kJ/kg] : 膨張後のエンタルピー
COP : ヒートポンプの成績係数

・圧力損失算出に使用した式

$$v = \frac{Q}{\rho \times A \times P_{cool}} = \frac{k \times (Tout - Tin)}{\rho \times A \times (h1 - h4)} \quad (9)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{v \times d}{\mu \times 10^{-6}} \quad (10)$$

$$if\ Re \leq 2300, \lambda = \frac{64}{Re} \quad (11)$$

$$if\ Re > 2300, \lambda = 0.3164 \times Re^{-0.25} \quad (12)$$

$$\Delta P = \lambda \times \frac{L}{d} \times \frac{\rho \times v^2}{2} \quad (13)$$

v [m/s] : 流速
Q[kJ/s] : 熱需要
ρ [m³/kg] : 冷媒密度
A [m²] : 管の断面積
P_{cool} [kJ/kg] : ヒートポンプの冷凍能力
k [kJ/s/℃] : 熱貫流係数
Tat[℃] : 外気温度
Tset [℃] : 設定温度
h1 [kJ/kg] : 蒸発後のエンタルピー
h4 [kJ/kg] : 膨張後のエンタルピー
Re : レイノルズ数
d [m] : 管内径
μ [μPa*s] : 粘度
λ : 管摩擦係数
ΔP [kPa] : 蒸発と圧縮間の圧力損失
L [m] : 管長さ

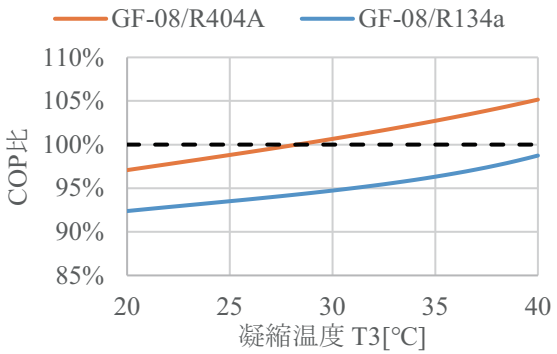


図 S3 圧損が小さい場合における COP 比(L=2[m])

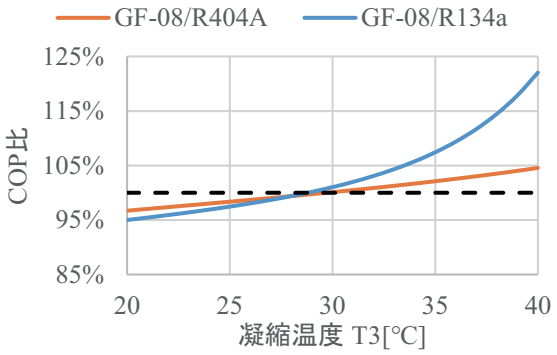


図 S4 圧損が大きい場合における COP 比(L=4[m])

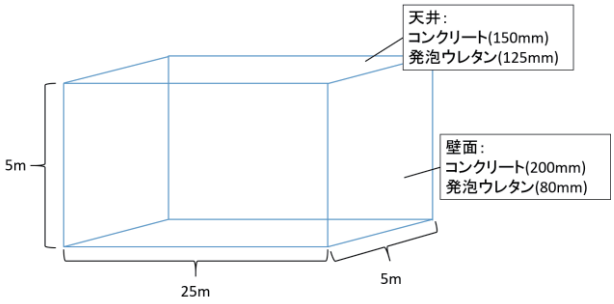


図 S5 冷蔵倉庫の規格

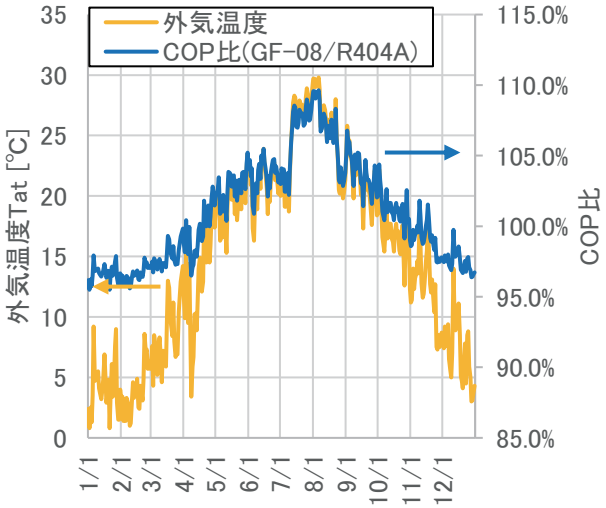


図 S6 外気温度と COP 比の推移(千葉県)

表 S2 想定条件の設定

冷媒	GF-08/ /R404A
コンクリート熱伝導率 λ1 [W/mk]	1.6
発泡ウレタン熱伝導率 λ2 [W/mk]	0.024
外気温度 Tat [℃]	千葉県我孫子市の外気温度 (2015/1/1~2015/12/31)
凝縮温度 T3 [℃]	T3= Tat + 15
設定温度 Tset [℃]	0
蒸発温度 T1 [℃]	T1=Tset=0
管内径 d [mm]	25.4
管長さ L [m]	3

機能の分析による食品容器包装のライフサイクル設計

Life Cycle Design of Food Packaging based on the Analysis of Product Functions

○横川直毅*[1)]、杉山弘和 [1)]、平尾雅彦 [1)]
Naoki Yokokawa, Hirokazu Sugiyama, Masahiko Hirao
1) 東京大学
* n-yokokawa@pse.t.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

容器包装は、ライフサイクルに存在するステークホルダーからの多様な要求に応え、使いやすさといった利便機能に代表される多くの機能を持ち、ライフサイクルへと影響を与える。特に食品容器包装は、内容物の食品を外的要因から守り流通させる保護機能を維持しつつ他の機能によって差別化を行うため、多くの機能が存在している。**図 1** に、本研究が対象とする製品ライフサイクルと発現する機能の例を示す。生産・保管・廃棄のしやすさなど、容器包装の機能は容器包装のライフサイクル全体に存在しているほか、保護機能による食品ロスの削減や利便機能による消費者の製品選択といった食品のライフサイクルへの影響も考慮する必要がある。

容器包装の食品保護機能を考慮した環境影響評価 [1)] は行われてきたが、保護機能以外の機能や機能間の関係を考慮した評価も行う必要がある。本研究では、これまでの食品容器包装に存在する機能の影響と要求の関係の分析 [2)]をもとに、食品と容器包装のライフサイクルへの影響を考慮した環境影響評価を行う。この評価によってライフサイクルに存在するステークホルダーが意思決定を行うことで、ライフサイクル全体で環境配慮となる設計を行えることが本研究の目的である。

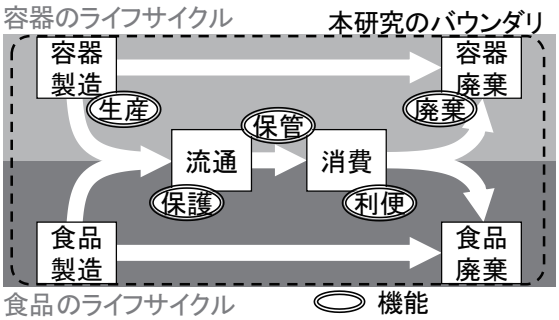


図 1　対象としている製品ライフサイクルと機能の例

2. 機能がライフサイクルに及ぼす影響の分析

2.1 製品機能とそれに関する項目の抽出と分類

容器包装の機能のライフサイクルへの影響を考慮するために、機能に関する変数やプロセスといった項目を抽出し、抽出した項目間の関係が明確になるように 4 つの分類を設定した。**表 1** に項目の 4 分類を示す。この 4 分類ごとの特徴を考慮することで、項目間の関係の記述を行う。

表 1　項目の分類とその内容

分類	内容
製品変数	製品自体に関わる項目（物質や物理量）
プロセス	プロセスに関わる項目（手段や行動）
製品機能	機能として現れる項目（物性など）
評価指標	評価結果とされる項目（環境影響など）

2.2 項目間の影響と要求の分析

2.1 で分類した項目に対し、項目間の影響と要求の関係を分析した。ここで影響とはある項目が決定した際に別の項目が決定することを指し、要求とはある項目を決定するための制約条件を与えることを指す。例えば、容器包装の素材によってバリア性が発現するため、素材はバリア性に影響する。逆に、バリア性を発現するための条件を満たす素材を選択する必要があるため、バリア性から素材に要求する。この項目間の影響と要求の関係を項目が効果を発揮するライフサイクルステージに着目して可視化した。**図 2** に可視化した関係の例を示し、全体の関係は**図 S1** に示した。機能や項目間の関係に関しては、文献 [3)]や容器包装メーカーへのヒアリング調査に基づいて作成した。ライフサイクルステージを越えた関係を記述したことで、生産段階における項目が機能を通してライフサイクル全体に対して影響を与えていることがわかる。逆に、ライフサイクル全体からの容器包装への要求も表している。また、項目間の関係の分析によって、ある項目を変更する際に考慮するべき範囲をみることができる。例えば、バリア性を実現するために高機能な素材を使用するとリサイクル性が悪くなる、といったライフサイクルステージを越えた項目間のトレードオフも表している。

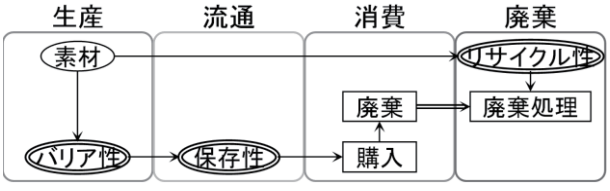


図 2　項目間の影響関係の例

さらに、可視化された影響関係を遡ることで、ライフサイクルに影響を与える始点となる項目を抽出でき

る。この始点の項目をシナリオ変数とすると、製品開発のきっかけごとのシナリオ分析を行うことができる。

3. ケーススタディ

3.1 シナリオ設定

家庭での調理時間の短縮などの効果によって需要が拡大しているカットキャベツを対象にケーススタディを行った。カットキャベツの容器包装は無延伸ポリプロピレンフィルムの単一素材のものが一般的である。

シナリオとして、現状の製品をより環境配慮するように改善することを設定した。対象の容器包装は単一素材であるため、容器包装重量の削減に着目した。2.2 で示した項目間の関係から、形状を小さくすることで重量の削減を行う。また、容器包装の形状と重量の変更により生産適性を経て充填プロセスにまで影響が波及すると考えられる。**図 3** にこの影響関係を示した。つまり、容器包装の形状縮小・重量削減によって余白が減ることで容器包装の接着が困難になるなど生産適性が低下する。その結果、充填プロセスにおいてより丁寧さが必要となり充填速度が低下し、製品の生産に要する時間が長くなる。そのため、1 製品あたりに投入されるエネルギー量が増加し、1 製品あたりの環境影響が増加することが考えられる。

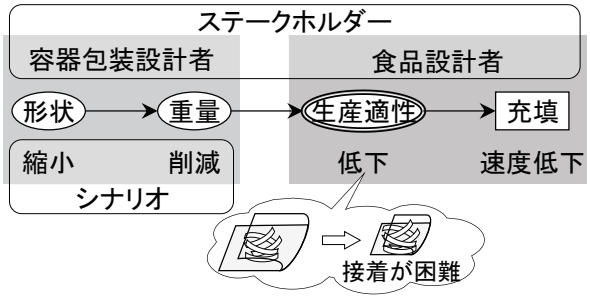


図 3　カットキャベツで設定したシナリオとその関係

3.2 項目間関係を考慮した評価

カットキャベツの環境影響において、図 3 の関係を考慮して式(1)を設定した。形状に関しては表面積(S)で比較を行った。式の導出と詳細は SI に記載した。

$$E_{product} = \frac{S_{product}^{\mathrm{packaging}}}{S_{\mathrm{as_is}}^{\mathrm{packaging}}} E_{\mathrm{as_is}}^{\mathrm{packaging}} + \frac{E_{\mathrm{as_is}}^{\mathrm{filling}}}{r_{product}^{\mathrm{filling}} / r_{\mathrm{as_is}}^{\mathrm{filling}}} + E_{\mathrm{as_is}}^{\mathrm{others}} \quad (1)$$

式(1)から、容器包装の表面積と充填速度に関して環境影響評価を行った。**図 4** に、GWP を評価指標として、現状の製品を基準に容器包装表面積・充填速度・GWP を相対化したときの環境影響評価の結果を示す。

3.3 解釈

図 4 は、容器包装設計者の観点からでは容器包装表面積の削減が製品ライフサイクル全体の環境影響の削減に貢献するとは限らないことを示している。すなわち、容器包装の表面積と充填速度の関係を知ることで、はじめてライフサイクル全体での環境影響を議論することができるということである。

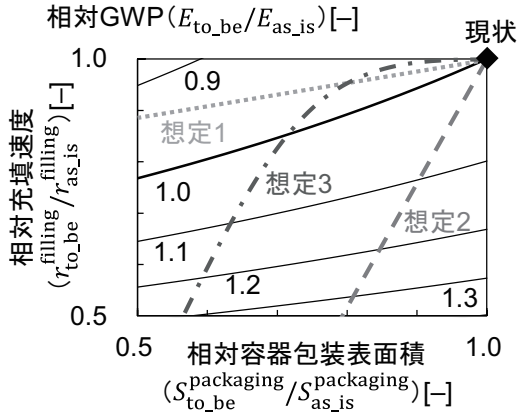


図 4　容器表面積と充填速度による GWP の評価結果

例えば図 4 において、容器包装の表面積によって充填速度が大きく影響を受けない場合（想定 1）は、容器包装の表面積を削減する決定ができる。一方、容器包装の表面積によって大きく充填速度が影響を受ける場合（想定 2）は、容器包装の表面積を増加させるような意思決定も考えられる。また、容器包装の表面積と充填速度の関係が単調でない場合（想定 3）は、環境影響が最小となる点を模索する必要がある。この関係は、食品設計者が充填プロセスを変更する場合にも存在しており、同様に考慮する必要がある。

このように、容器包装の機能がライフサイクルへ及ぼす影響を分析し評価に組み込むことで、ステークホルダーの意思決定のライフサイクルへの影響をみた。

4. 結言

容器包装の機能がライフサイクルへ及ぼす影響を分析し、その関係に基づいて環境影響評価を行い、ステークホルダーが自身の意思決定の及ぼす影響を考慮する必要性を示すことができた。

謝辞

本研究は、環境省の環境研究総合推進費(S-16)により実施された。

引用文献

1) Williams H., Wikström F.: J. Clean Prod., 19 (1), (2011), pp. 43-48
2) 横川直毅, 上原恵美, 杉山弘和, 平尾雅彦: 第 11 回日本 LCA 学会研究発表会, 柏, (2016), pp. 284-285
3) LCA 日本フォーラム: “平成 26・27 年度 「容器包装の環境効率研究会」報告書”, (2016)

Supporting Information

S1. 項目間の影響と要求の可視化

図 S1 に、容器包装の機能がライフサイクルに及ぼす影響を可視化したものを示す。容器包装のみで発現する項目に関しては上段に、食品のみで発現する項目に関しては下段に配置し、容器包装と食品が合わさることで発現する項目は中段に配置している。なお、ここでの機能は LCA 日本フォーラム「容器包装の環境効率」研究会で議論されている容器包装の機能を参考にし [3]、関係は容器包装メーカーへのヒアリング調査など基づいて記述した。

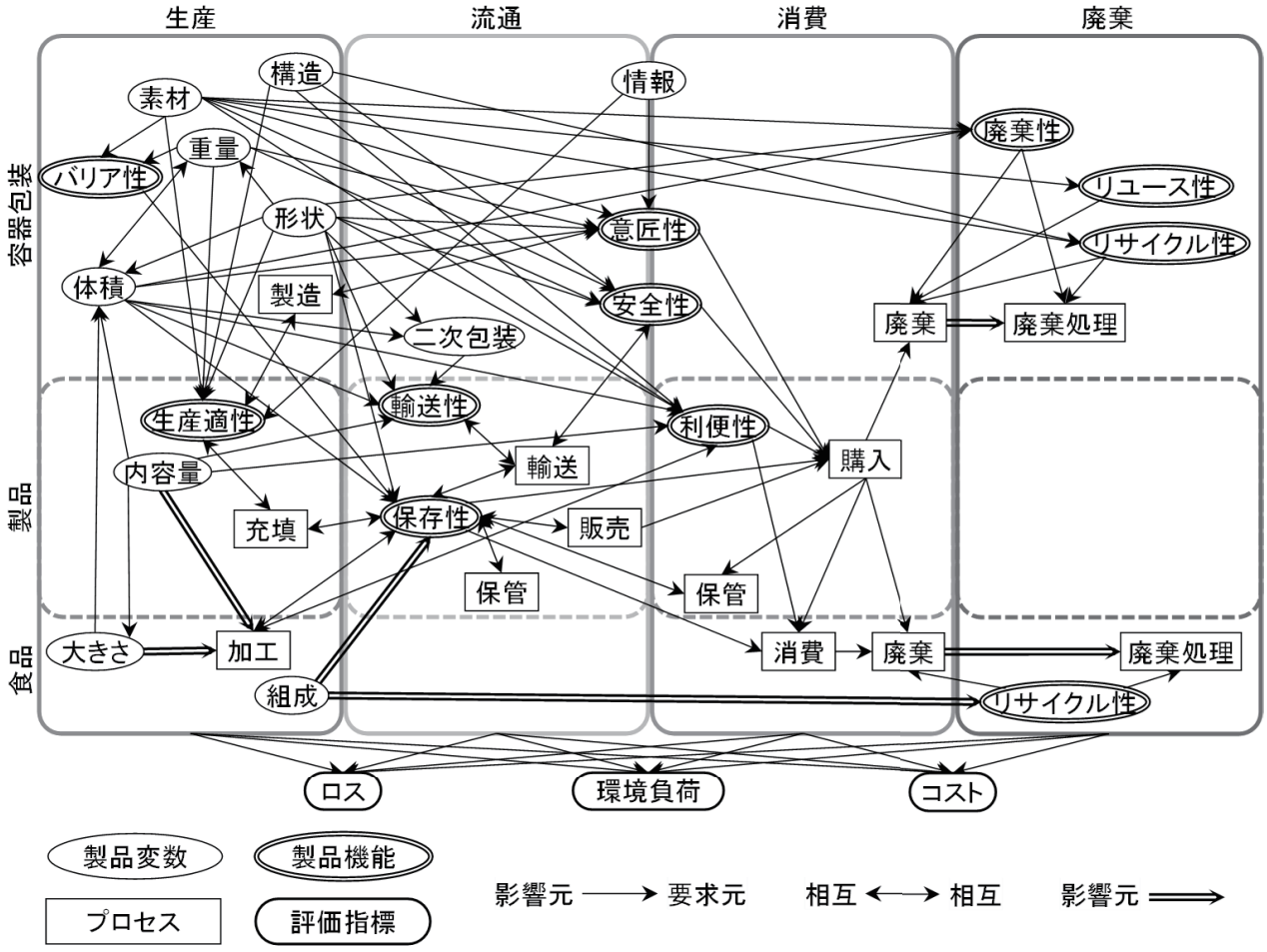


図 S1　機能に関わる項目間影響の可視化図

S2. ケーススタディにおける環境影響の導出

現在の製品の環境影響に対して、式(S1)-(S5)を設定した。式(S4)は容器包装の表面積と重量の比例関係を設定し、式(S5)は充填速度の増減に対し製品あたりの充填プロセスの環境影響が反比例すると設定した。

$$E_{\text{as_is}} = E_{\text{as_is}}^{\text{packaging}} + E_{\text{as_is}}^{\text{filling}} + E_{\text{as_is}}^{\text{others}} \tag{S1}$$

$$E_{\text{as_is}}^{\text{packaging}} = w_{\text{as_is}}^{\text{packaging}} I_{\text{as_is}}^{\text{packaging}} \tag{S2}$$

$$E_{\text{as_is}}^{\text{filling}} = w_{\text{as_is}}^{\text{food}} I_{\text{as_is}}^{\text{filling}} \tag{S3}$$

$$w_{\text{as_is}}^{\text{packaging}} = \rho^{\text{packaging}} S_{\text{as_is}}^{\text{packaging}} \tag{S4}$$

$$I_{\text{as_is}}^{\text{filling}} = \alpha^{\text{filling}} / r_{\text{as_is}}^{\text{filling}} \tag{S5}$$

$E_{product}$: 製品の環境影響 [kg-CO_2eq./product]

$E_{product}^{process}$: プロセスの現状の環境影響 [kg-CO_2eq./product]

$I_{product}^{process}$: プロセスのインベントリデータ [kg-CO_2eq./kg]

$w_{product}^{material}$: 製品のある材料の重量 [kg/product]

$S_{product}^{\text{packaging}}$: 容器包装の表面積 [m^2/product]

$\rho^{\text{packaging}}$: 容器包装の面密度 [kg/m^2]

$r_{product}^{\text{filling}}$: 製品の充填速度 [kg/s]

α^{filling} : 充填時の速度あたりの環境影響 [kg-CO_2eq./s]

式(S1)-(S5)を基準として、充填速度と容器包装の表面積（形状）が変化した製品の環境影響は次のように書くことができる。

$$\begin{aligned} E_{product} &= \rho^{\text{packaging}} S_{product}^{\text{packaging}} I_{\text{as_is}}^{\text{packaging}} + w_{\text{as_is}}^{\text{food}} \frac{\alpha^{\text{filling}}}{r_{product}^{\text{filling}}} + E_{\text{as_is}}^{\text{others}} \\ &= \frac{S_{product}^{\text{packaging}}}{S_{\text{as_is}}^{\text{packaging}}} \rho^{\text{packaging}} S_{\text{as_is}}^{\text{packaging}} I_{\text{as_is}}^{\text{packaging}} + \frac{w_{\text{as_is}}^{\text{food}} \alpha^{\text{filling}}}{r_{\text{as_is}}^{\text{filling}} \left(r_{product}^{\text{filling}} / r_{\text{as_is}}^{\text{filling}} \right)} + E_{\text{as_is}}^{\text{others}} \\ &= \frac{S_{product}^{\text{packaging}}}{S_{\text{as_is}}^{\text{packaging}}} E_{\text{as_is}}^{\text{packaging}} + \frac{E_{\text{as_is}}^{\text{filling}}}{r_{product}^{\text{filling}} / r_{\text{as_is}}^{\text{filling}}} + E_{\text{as_is}}^{\text{others}} \end{aligned}$$

このようにして、式(1)は導出される。

エコマーク認証基準の策定におけるホットスポット分析手法の導入に関する検討

Study on Introduction of hotspot analysis as a screening method in Eco Mark programme

○佐野裕隆*[1)]、鈴木春生[2)]、伊坪徳宏[2)]、田原聖隆[3)]、近藤康之[4)]
Hirotaka Sano, Haruo Suzuki, Norihiro Itsubo, Kiyotaka Tahara, Yasushi Kondo
1) 公益財団法人日本環境協会, 2) 東京都市大学, 3) 産業技術総合研究所, 4) 早稲田大学
* hirotaka.sano@ ecomark.jp

1. はじめに

エコマーク事業は、日本環境協会が ISO14024 タイプⅠ環境ラベル規格に則って実施する環境に配慮した製品・サービスの認証事業である。本ラベルは、(1)第三者認証であること、(2)商品ライフサイクルを考慮した認証基準であること、を特徴としており、認証のための基準の策定にあたっては、表 1 に示す「商品ライフステージ環境負荷項目選定表」を用いて、対象となる商品のライフサイクルを考慮することとしている。

また、海外ではホットスポット分析手法を活用して対象商品の環境負荷を影響領域とライフステージごとに定量的に評価し、負荷低減のための優先度を表して政策等に反映していく研究が UNEP 等で進められており、科学的根拠に基づいたグリーン購入の推進が図られている。

本研究では、商品のライフサイクルから重要な環境負荷項目を抽出するという点で、エコマーク事業とホットスポット分析手法が共通性を有する点に着目し、伊坪らが開発を進めている、日本の最新の影響評価手法とデータベースに基づいたホットスポット分析手法を活用して、エコマーク事業に同手法を導入するための検討を行った。

表１　商品ライフステージ環境評価項目選定表

環境評価項目	商品のライフステージ					
	資源採取	製造	流通	使用消費	ﾘｻｲｸﾙ	廃棄
省資源と資源循環						
地球温暖化の防止						
有害物質の制限とコントロール						
生物多様性の保全						

2. 方法

2.1 対象商品

エコマーク事業が対象としている商品のうち、グリーン購入法等においても対象とする等、社会的にグリーン購入が広く取り組まれている印刷用紙について検討を行った。対象商品の選定にあたっては、ホットスポット分析を行うための統計データの収集の容易性、事業者の協力の得られやすさ等についても考慮した。

2.2 エコマーク事業の認証基準策定

エコマーク事業では、ISO14020 及び ISO14024 に則って「エコマーク事業実施要領」及び「エコマーク商品類型・認定基準の制改定等に関する諸ガイドラインおよび規程」を定めており、これに基づき、認証基準の策定を行っている。

主な手順は以下のとおりである。

(1)商品類型の選定
(2)商品類型に関する基準策定委員会の設置
(3)商品ライフステージ環境負荷項目選定表により対象商品のライフサイクル全体にわたる環境への負荷を考慮した上で、環境負荷が他の同様の商品と比較して相対的に少ない商品等となるよう、商品類型の目的を達成するために優先度の高い項目を絞り込んで基準案を策定
(4)基準審議委員会による審議、パブリックコメント
(5)基準策定委員会及び基準審議委員会の審議結果に基づき、認証基準の制定・公表

本手順の(3)では、一般的にライフサイクルアセスメント報告等を含む既存文献､関係業界資料､調査資料、統計データ、関係規格等をもとに関係者が協議し、認証のための基準について合意形成を図るプロセスを取っている。

2.3 ホットスポット分析

2.2.(3)に示す手順において、ホットスポット分析手法を活用することを想定し、重要な環境負荷項目を抽出する。

分析は、鈴木らによる報告[1)]を用いることとして、機能単位、シナリオ設定及び計算方法を以下のとおり示す。

機能単位：印刷用紙 1 トンの消費
評価シナリオ：国内で製造、家庭で使用した後、一般ごみとして焼却され、残渣を埋立
計算方法：2005 年産業連関表を基に以下の統計データによる二次データを収集。
算定には 3EID2005 年生産者価格基準原単位、環境フットプリントデータファイル、平成 12 年廃棄物産業連関表を使用し、統合化は環境影響評価手法である LIME2 を用いて評価。

3. 結果

ホットスポット分析による重要な環境負荷項目は、表 2 に示すとおり「資源採取」ステージ「土地利用」及び「資源の消費」、並びに「製造」ステージ「地球温暖化」及び「都市域大気汚染」と算出した。

エコマーク事業の「商品ライフステージ環境負荷項目選定表」における基準が設定された項目は表 3 のとおりである。◎印の項目を基準を設定するべき重要な環境負荷項目として選定した。

ホットスポット分析及びエコマーク事業の「商品ライフステージ環境負荷項目選定表」において、共通する項目は「資源採取」ステージ「資源の消費」であり、本項目についてはエコマーク「印刷用紙」認証基準として、持続可能な森林管理に関する基準が設定されている。

4. まとめ

用紙において、ホットスポット分析と「商品ライフステージ環境負荷項目選定表」を比較検討した結果、それぞれの主要な重要環境負荷項目に類似する点があることを確認できた。これにより、エコマーク事業にホットスポット分析手法を導入し、活用することで、エコマーク事業の認証基準における科学的根拠を強化することができると考えられる。今後は、他商品分野においてケーススタディを行って検証を進め、データベースの精度向上を図るとともに、エコマーク事業にホットスポット分析手法を導入するための手順・評価項目等の整備を進める予定である。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構社会技術研究開発センター　戦略的創造研究推進事業（社会技術研究開発）「科学技術イノベーション政策のための科学研究開発プログラム」製品ライフサイクルに立脚した環境影響評価基盤の構築と社会実装によるグリーン購入の推進の一環として実施された。ここに記して深謝する次第である。

表 2　ホットスポット分析結果

上級印刷紙（洋紙・和紙）

影響領域	統合化結果（まとめ）			
	材料調達	製造	流通	廃棄・リサイクル
オゾン層破壊	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
地球温暖化	1.2%	9.6%	1.9%	0.0%
都市域大気汚染	0.9%	9.5%	0.9%	0.0%
酸性化	0.1%	0.7%	0.1%	0.0%
光化学オキシダント	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
生態毒性（大気）	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%
生態毒性（水圏）	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
人間毒性（大気）	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
人間毒性（水圏）	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
富栄養化	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
* 室内空気汚染	–	–	–	–
土地利用	44.4%	1.9%	1.6%	0.0%
資源消費	20.8%	2.2%	1.0%	0.0%
* 廃棄物	–	–	–	–
* 道路交通騒音	–	–	–	–
水資源消費	2.7%	0.0%	0.0%	0.0%

PPC 紙（洋紙・和紙）

影響領域	統合化結果（まとめ）			
	材料調達	製造	流通	廃棄・リサイクル
オゾン層破壊	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
地球温暖化	2.4%	19.4%	3.2%	0.0%
都市域大気汚染	1.8%	18.3%	1.5%	0.0%
酸性化	0.2%	1.4%	0.2%	0.0%
光化学オキシダント	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
生態毒性（大気）	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%
生態毒性（水圏）	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
人間毒性（大気）	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
人間毒性（水圏）	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
富栄養化	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%
* 室内空気汚染	–	–	–	–
土地利用	22.4%	5.7%	2.7%	0.0%
資源消費	11.3%	5.6%	1.7%	0.0%
* 廃棄物	–	–	–	–
* 道路交通騒音	–	–	–	–
水資源消費	1.3%	0.2%	0.1%	0.0%

表 3　印刷用紙の商品ライフステージ環境評価項目選定表

環境評価項目	商品のライフステージ					
	資源採取	製造	流通	使用消費	廃棄	ﾘｻｲｸﾙ
資源の消費	◎	◎	◎			
地球温暖化影響物質の排出						
オゾン層破壊物質の排出						
生態系への影響	◎					
大気汚染物質の排出		◎				
水質汚濁物質の排出		◎				
廃棄物の発生・処理処分		◎	◎			
有害物質などの使用・排出		◎		◎		
その他の環境負荷		◎		◎		◎

引用文献

1) 鈴木春生, 有馬俊彦, 一杉祐貴, 村主さとみ, 近藤康之, 田原聖隆, 高田亜佐子, 伊坪徳宏：第 11 回日本 LCA 学会研究発表会要旨集, 柏市, (2016), pp 308-309

タイプⅢ環境宣言と環境ホットスポット分析の相互活用に関わる考察

Consideration of mutual utilization between Environmental Product Declarations and Environmental Hot Spots Analysis

○神崎 昌之*[1)]　片岡 顯[1)]　根岸 華子[1)]　伊藤 聖子[1)]　石塚 明克[1)]　伊坪 徳宏[2)]　田原 聖隆[3)]
Masayuki Kanzaki, Akira Kataoka, Hanako Negishi, Satoko Itoh,
Akiyoshi Ishizuka, Norihiro Itsubo, Kiyotaka Tahara
1) 産業環境管理協会, 2)東京都市大学, 3) 産業技術総合研究所
* kanzaki@jeami.or.jp

1. はじめに

製品・サービスに関する持続可能性を高めるためにサプライチェーン全体最適化の観点から LCA が活用されている。この LCA を補完するものとしてホットスポット分析の在り方が UNEP の主導するプロジェクトで検討されている。UNEP プロジェクトの一次レポート[1)]では、多様な既存の方法論を踏まえながらホットスポット分析の典型的な実施ステップとして、目的設定・データ収集/解析・ホットスポットの特定/有効性評価に加え、対応課題の抽出が挙げられている。ここで対応課題においては利害関係者間の協働が重要とされている点で、コミュニケーションツールが重要であるものと考えられる。一方、LCA を活用したエコデザインの基本的なコミュニケーションツールとしては欧米においてタイプⅢ環境宣言（Environmental Products Declaration 以下、EPD）が活発に活用されている。

そこで本稿ではホットスポット分析の展開により持続可能性への取組が進展する想定のもと、EPD の取組への貢献の仕方について考察する。検討にあたっては、まず欧米における EPD の活用状況を概観し、次いで既存のホットスポット分析を軸とするイニシアチブと EPD の事例比較を行い両者の連携について考察した。

2. EPD の活用状況

ホットスポット分析により抽出された重要な環境側面についての事業者のコミュニケーションの在り方を検討するため、本項では EPD における環境側面の取り上げ方について検討した。EPD は ISO14025 によりその開示方法が大まかに規定されているが具体的な環境側面の選定は規定されておらず要因解析の余地がある。

2.1 欧米における EPD の公開内容

EPD は企業が自社製品の情報として自主的に開示しており、その LCA データの開示項目は企業の意向を反映しているものと考えられる。欧米の主要な EPD プログラム 6 組織の EPD から新しく公開された 18 点をサンプリングしその開示項目を表 1 にまとめた。共通するのは環境影響評価の結果を開示する環境側面として表 1 の①を挙げていること、資源およびエネルギーのフローに関する定量データを②の方法で開示していることである。

表 1　欧米の EPD の LCA データ開示項目

定量的な開示情報	開示状況
①環境影響評価（温暖化、酸性雨、オゾン層破壊、光化学オキシダント、富栄養化、水資源使用）	製品分野によらず欧米でほぼ全てで、共通項目として開示されている
②資源/エネルギー投入量（再生可能/否で区分）、廃棄物量（有害/非有害で区分）	米国では一部未対応。欧州ではほぼ全てで、共通項目として開示されている

2.2 建築分野を中心とした EPD 開示状況

表 1 に示される開示項目の共通化の要因の一つとして建築製品の EPD に関する動向が考えられる。現在 EPD は欧米において建築製品の分野で登録公開数が増加している（表 2）。

欧州の建築製品の EPD について、その製品分類別算定・表示ルール（PCR）が Construction Product Regulation (EU305/2011) 等を背景として EN15804 として標準化され[2)]、LCA データの開示項目が具体的に規定されている。その開示項目の一部は ISO21930 の中でも規定されている[3)]。表 3 に示すように欧州においては今回サンプリングしたほぼ全ての建築製品 EPD で EN15804 の開示項目の指定に従っている一方、米国では半数強が ISO21930 の開示項目に従うにとどまり標準化の度合いに差異が見られる。

こうした欧州の EPD の開示項目の中で、表 1 の②の物質・エネルギーのフローの記述については、建築製品分野に加えて食品・飲料等、電子機器などの分野でもサンプリングした EPD の半数近くで同じ項目が採用されていた。欧州では建築分野での標準化を中心として、産業分野をまたがり共通して物質・エネルギーのフローの記述が重視されていることが示唆される。

表 2　建築製品 EPD の登録製品数(2016 年 12 月)

国	運営組織	建築製品登録数
スウェーデン	Environdec	339
フランス	PEP	1642
ドイツ	IBU	1698
アメリカ合衆国	IERE	21
	NSF	80
	UL	594

表 3　LCA データ開示要求への EPD の適合割合

評価した建築製品 EPD (注 1)	EN15804 要求項目	
	ISO21930 要求項目(注 2)	ISO21930 非要求項目
欧州(n=5)	約 80%	約 80%
米国(n=8)	約 60%	約 10%

注１：表 2 の各プログラムからサンプリングした
注２：表 1 の①・②が相当する

3. ホットスポット分析と EPD の比較

ホットスポット分析を軸として持続可能な対応を推進するイニシアチブの事例として The Sustainability Consortium (以下 TSC)、WRAP の Product sustainabiltiy forum が挙げられる。これらの活動と EPD の相違を確認するため、ビールを事例として、両イニシアチブの公開文書と Environdec プログラムにおける EPD との内容を比較した（表 4)。TSC、WRAP ともにホットスポット分析を行い対策項目の抽出を行っている。これらの対策項目は、その実施の結果として生産サイトなどの状況を重要業績評価指標(KPI)として指標化するなどの試みがなされている。EPD はさらに、対策の結果としての環境影響の低減を定量評価し開示する役割に期待がもたれる。

4. 考察とまとめ

欧米の動向として事業者が EPD で開示する環境影響項目が、地域の政策、標準化動向、事業者独自の取組、製品分野の特徴など複数の要因で定まる状況を確認した。EPD とホットスポット分析の連携を検討することは、分野によって、今後に向けてより多面的な取り組みを推進してゆくうえで有効と考えられる。

5. 引用文献

1) UNEP/SETAC Life Cycle Initiative :“Hotspots Analysis: mapping of existing methodologies, tools and guidance and initial recommendations for the development of global guidance”(2014)
2) BRE :“BRE Global Category Rules for Type III environmental product declaration of construction products to EN15804:2012+A1:2013”(2013)
3) ISO :“ISO21930:2007 Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products” (2007)
4) TSC :“Beer Sustainability Insights”（ｵﾝﾗｲﾝ）、入手先 < https://www.sustainabilityconsortium.org/ >, (2016-12-31)
5) WRAP :“Hotspots,oppotunities & initiatives Beer Ver.1”（ｵﾝﾗｲﾝ）、入手先 < http://www.wrap.org.uk/ >, (2016-12-31)
6) Environdec :“EPD TUBPRG Beer (S-P-00311 / 2014)” （ｵﾝﾗｲﾝ）、入手先 < http://www.environdec.com/ >, (2016-12-31)

表 4　既存のホットスポット分析イニシアチブと EPD の比較（ビールの事例）

運営組織	主たるコミュニケーション	ホットスポット分析の中で推奨された対策項目		活動の評価指標
TSC [4]	小売業とサプライヤー間の情報共有	農業プロセスの適正管理（施肥、耕うん、エネルギー・水使用等)、製造プロセスの適正管理（エネルギー使用、容器包装設計等）	労働者の安全･健康･権利への取組の明示	社会側面・環境側面の定性的・定量的指標を KPI として用意
WRAP（PSF）[5]	種々のイニシアチブのネットワーク化		消費者の廃棄への配慮促進	-
Environdec-EPD [6]	エコデザイン情報の一般公開	-		5 種の環境影響項目、資源・エネルギー・廃棄物の定量情報を開示、新規開発した容器の環境性能を説明

環境・社会側面を対象とした日本版ホットスポット分析手法の開発と活用

Development and Application of Hotspots Analysis Method
Considering Environmental Aspects and Social Aspects

○一杉佑貴*[1)]、村主さとみ [1)]、鈴木春生 [1)]、藤井千陽 [2)]、田原清隆 [2)]、近藤康之 [3)]、伊坪徳宏 [1)] 、

Yuki Ichisugi, Satomi Suguri, Haruo Suzuki, Chiharu Fuji, Kiyotaka Tahara, Yasushi Kondo, Norihiro Itsubo,
1) 東京都市大学大学院　環境情報学研究科 2)産業技術総合研究所 3) 早稲田大学
* g1583102@ tcu.ac.jp

1. 背景

2015 年 9 月ニューヨーク国連本部において国連持続可能な開発サミットが開催され、2030 年に向けた持続可能な開発目標（SDGs : Sustainable Development Goals）が合意された。SDGs では 17 項目の目標と、それらを達成するための 169 種類のターゲットが設定された。気候変動対策をはじめとした環境側面だけではなく、労働や教育といった社会側面も対象としている。

従来の LCA は環境側面を評価する技法として産業界を中心に定着しつつあるが、近年はデータベースや評価手法の開発を受けて、以下の動きが注目される。

・環境側面の評価はカーボンを含むマルチクライテリアに注目した検討が進んでいる。
・社会側面の評価に対する注目が高まり、ソーシャル LCA のためのガイドやデータベースが公開された。

評価範囲の拡張に伴い、優先して改善設計すべき事項を得るための指針となる方法論が必要となってきた。2014 年に UNEP/SETAC Life Cycle Initiative がホットスポット分析（HSA : Hotspots Analysis）のガイドを公開した。HSA とは、LCA や関係者ヒヤリングなど複数のアプローチを駆使しつつ、製品のライフステージや影響領域のなかからホットスポットを明示する手法である。複数の環境・社会側面に注目しつつ、ステイクホルダー間における迅速なコミュニケーションの促進に貢献するものと期待される。WRAP やサステナビリティコンソーシアムがホットスポット分析を採用し、消費者や会員企業に向けて評価結果を公開している。世界では HSA の評価手法を開発が進んでいくなかで、日本では HSA 手法が確立していないのが現状である。

2. 研究目的

本研究では、日本を対象に HSA 手法の開発とその活用を試みる。また、SDGs が対象とする側面を評価項目として考慮するため、環境側面のみではなく社会側面に対する影響を定量的に分析することも検討する。HSA を行うことで、製品における各ライフステージの重要な影響領域を特定することで、その後の改善案を提案できるようにする。環境側面ではグリーン調達のための意思決定支援に用いることを目指す。社会側面では、健康、雇用、教育といった項目を取り上げ、環境側面と同じ手法体系のもとで解析ができる手法体系の構築を目指す。

3. 方法

3.1 評価対象項目

本研究では、持続可能な開発目標の網羅性を重視して、以下に示す評価枠組の構築を試みた。環境側面では⑥水資源と衛生、⑫持続可能な生産と消費、⑬気候変動と対策、⑭海洋資源、⑮陸上の資源を考慮し、社会側面では、③健康と福祉、④質の高い教育、⑧働きがいと経済成長を評価項目とした。

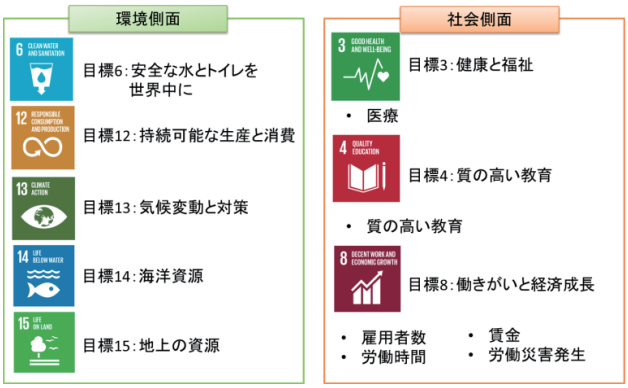


図 1 本研究の評価範囲と SDGs との対応関係

3.2 使用データ

環境負荷のデータとして産業技術総合研究所が開発した IDEA2 の環境負荷データ（144 項目）を用い、社会評価のデータとして、総務省統計局が公開している 2011 年 産業連関表及び付帯表である雇用表、厚生労働省が公開している労働統計、労働災害統計を用いて、雇用者数、雇用者所得、労働時間、労働災害発生件数、を推計した。

3.3 算定方法

近藤らが開発した廃棄物産業連関表を用いてインベントリデータを整備した。算定式を以下に示す。

$$e = d(I - A)^{-1}$$

d は直接係数、$(I - A)^{-1}$はレオンチェフ逆行列、e は原単位である。

産業部門ごとの直接環境負荷データと社会評価データを国内生産額で除すことで、百万円あたりの直接係数を算出した。そこにレオンチェフ逆行列を乗じることで、原単位を作成した。

次に、影響評価手法 LIME2 を用いて 17 影響領域の特性化を推計できるようにした。さらに、人間健康、社会資産、生物多様性、一次生産の 4 つの保護対象ごとに被害評価を行えるようにした。最終的には被害評価結果に重みづけ係数を乗じることで､統合化を行い、各影響を比較できるようにした。最終的にはライフステージごとの統合化から HSA 結果を示すこととした。

4. 研究結果

4.1 評価対象

本研究で作成したデータベースを用いたケーススタディとして、ノートパソコンの評価を行った。金額は 10 万円でシステム境界は材料調達、製造、流通、使用段階とする。耐用年数は 4 年で、使用時の電力シナリオはオフィスで使うことを想定し、1 日 9 時間で年間 240 日使用するとした。これは一般社団法人日本電気工業界のシナリオを参考にした。活動量は廃棄物産業連関表から推計される投入係数行列のパーソナルコンピュータの列を用いて、各産業から投入される金額を用いた。

4.2 環境側面

表 1 にノートパソコンの HSA 結果を示す。使用段階の電力による地球温暖化への影響が最も大きいという結果になった。材料調達に着目すると、資源消費の影響が最も大きいことが読み取れる。これは集積回路を製造するときに投入される金、一般炭、原油の影響によるものである。その他の影響領域においても集積回路の影響が大きく起因することが読み取れたため、上流に遡ると集積回路の影響が最も大きいといえる。

表 1　ノートパソコンの HSA 結果

統合化結果[円]				
影響領域	材料調達	製造	流通	使用
地球温暖化	5.40E+02	1.13E+02	2.30E+02	1.13E+03
水資源消費	8.41E+00	3.16E+00	4.75E+00	2.67E+00
都市域大気汚染	3.74E+02	6.74E+01	9.49E+01	2.01E+02
土地利用	4.34E+02	1.18E+02	1.72E+02	3.95E+02
資源消費	6.95E+02	6.22E+01	1.45E+02	4.03E+02

4.3 社会側面

表 2 にノートパソコンの社会評価結果を示す。雇用者の創出では、集積回路や電子部品の製造による常用雇用者が大きな値を示した。雇用者所得では、集積回路、電子部品の工場内で働く労働者の所得に加え、研究開発を行う労働者の所得にも影響があることがわかった。一方で、労働時間の創出と労働災害発生への影響も集積回路や電子部品の製造、開発に関わる労働者への影響が大きいということが明らかになった。

表 2　ノートパソコンの社会評価結果

大項目	小項目	単位	値
雇用者数	有給役員	[人]	1.58E-03
	常用雇用者	[人]	2.16E-02
	臨時雇用者	[人]	1.07E-03
雇用者所得	賃金	[百万円]	9.46E-02
	社会保険料	[百万円]	1.14E-02
	その他の給与及び手当	[百万円]	5.08E-03
労働時間	総実労働時間　（5人～29人）	[時間]	3.91E+01
	所定外労働時間　（5人～29人）	[時間]	2.92E+00
	総実労働時間　（30人～）	[時間]	3.92E+01
	所定外労働時間C　（30人～）	[時間]	3.23E+00
労働災害発生	死亡	[件]	4.83E-05
	休業	[件]	5.97E-05

※労働時間の括弧内は事業所の規模を表す

5. 結論

産業連関表を用いた評価を行うことで、サプライチェーンを遡った HSA を実施することができた。ノートパソコンの事例では、集積回路の調達段階における環境側面の影響が大きいところが社会に与える影響も大きいということが明らかになった。

参考文献

1） 国際連合広報センター:“2030 アジェンダ”, United Nations Information Centre,(オンライン),入手先＜http://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/＞

2） UNEP/SETAC Life Cycle Initiative：“Guidance for Social Life Cycle Assessment of Products”, (2013),pp33-75

3） 総務省統計局：平成 23 年（2011 年）産業連関表―総合解説編―, 第 3 部　産業連関表で用いる部門分類表及び部門別概念・定義・範囲, pp290-pp292

4） 総務省統計局：平成 23 年（2011 年）産業連関表付帯表　雇用表, e-stat, ホームページ　＜入手先 http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001060671&cycode=0＞

5） 厚生労働省：労働災害統計平成 23 年（2011 年）業種別局別労働災害発生状況, ホームページ＜入取先 http://anzeninfo.mhlw.go.jp/user/anzen/tok/anst00_h23.htm＞

訪日外国人の消費行動が CO_2 排出量に与える影響

The Impact of Consumption Behavior of Foreign Travelers of Japan on CO_2 emissions

○柴田睦美*[1)]、加河茂美 [1)]、白新田佳代子 [1)]

Mutsumi Shibata, Shigemi Kagawa, Kayoko Shironitta

1) 九州大学

* yasuaouw88@gmail.com

1. はじめに

現在日本経済は人口減少に伴う内需減少により外需を必要としている。外需拡大を主に下支えしている要因は訪日外国人客の増加による日本での消費である。日本を訪れた外国人旅行者は 2015 年に 1974 万人と過去最高を更新した（観光庁、2016）。円安効果や対中関係の安定を背景に 2000 万人の政府目標をほぼ前倒し達成した。滞在中の支出総額も初めて 3 兆円台に乗せた（観光庁、2016）。

外国人旅行者の傾向としては世界各国からバランスよく伸びておりアジア地域が 1637 万人と全体の 82.9%を占めた（国土交通省、2016）。中でも東アジアが 1420 万人で 71・9%に達する。国・地域別では、1 位が中国の 499 万人、2 位が韓国の 400 万人、3 位が台湾の 368 万人、4 位が香港の 152 万人、5 位が米国の 103 万人。次いで、タイ、オーストラリア、シンガポール、マレーシア、フィリピン、英国と続く（国土交通省、2016）。

円安進行による訪日旅行の割安感やビザ発給要件の大幅緩和など日本側の政策対応、アジア地域の経済成長に伴う海外旅行需要の拡大などが訪日外国人増加をもたらしたといえる。

訪日外国人旅行客増加による影響は、経済的には正であるが、環境面では果たして良いと言えるのか。本研究では訪日外国人による日本国内での消費動向から、消費行動によって日本国内で誘発される CO_2 排出量を推計しし分析することを目的とする。

2. 研究手法

訪日外国人消費動向調査（観光庁、2016）より外国人旅行客の消費動向から、訪日“中国人”観光客の費目別購入者単価と 2015 年度の訪日“中国人”旅行者 4993689 人を掛け中国人旅行者全体の購入総額を算出し、産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)の内生部門から CO_2 排出量(t-CO_2/百万円)を引用し、訪日中国人旅行客の消費行動によって排出される CO_2 排出量を算出する。

この誘発 CO_2 排出量は以下のように推計することができる。

$$Q^c = \sum_{i=1}^{n} e_i x_i^c P^c \qquad (1)$$

ここで

Q^c : c 国の訪日観光客が日本で消費活動したことに伴う CO_2 総排出量

e_i : 3EID による商品 i の内包型 CO_2 排出係数

x_i^c : c 国の訪日観光客の一人が日本で購入した商品 i の消費額

P^c : c 国の旅行客総数

とする。

3. データ

訪日外国人観光客数の購買データ
(http://www.mlit.go.jp/kankocho/siryou/toukei/syouhityousa.html)

2015 年の訪日中国人観光客数
(http://www.jnto.go.jp/jpn/statistics/visitor_trends/)

100 万円あたりの CO_2 排出量(t-CO_2/100 万円)
(http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/datafile/embodied/2005/403.htm)

一人当たりの費目別購入者単価（円）
(http://www.mlit.go.jp/kankocho/siryou/toukei/syouhityousa.html)

4. 結果

訪日外国人観光客数の購買データより、訪日外国人観光客の支出の内訳を見ると、買い物代が 1 兆 4539 億円超と全体の 41･8%程度を占め、宿泊費（約 25･8%）、

飲食費（18・5%）と続く。2015 年の外国人観光客 1 人当たりの平均支出額は 17 万 6168 円と前年比 16・5%増えた。

結果より、今回の研究対象国である中国人旅行客による費目別支出総額は 4 兆 7819 億円（表 1 参照）その消費支出の内訳は、宿泊費が 8%、飲食費が 3%、交通費が 12%、娯楽サービス費が 9%、買物代が 51%、その他が 17%となっている（図 1 参照）。

一方、排出合計の内訳は、宿泊が 3%、飲食が 3%、交通が 15%、娯楽サービスが 17%、買物が 62%である。（図 2 参照）。なお、費目別購入者単価のその他に該当する CO_2 排出係数が設定できなかったため、その他の項目は排除して作図している。結果より、訪日中国人客の消費行動が日本国内にもたらす CO_2 排出量は 2528 万トンであり、国内の CO_2 排出管理をする上で無視できない量であることが分かった。なお、韓国や台湾など、訪日外国人旅行客の多くを占める東アジアの国々を同様に分析し、各国の結果を比較していく。その詳細な比較結果は発表会で述べる。

表 1. 中国人旅行客による費目別支出額と排出内訳

	購入総額(百万円)	排出合計(t-CO_2)
宿泊料金	365,215	757,521
飲食費	164,989	840,949
交通費	561,331	3,790,399
娯楽サービス費	455,674	4,240,209
買物代	2,426,215	15,652,586
その他	808,519	
合計	4,781,942	25,281,665

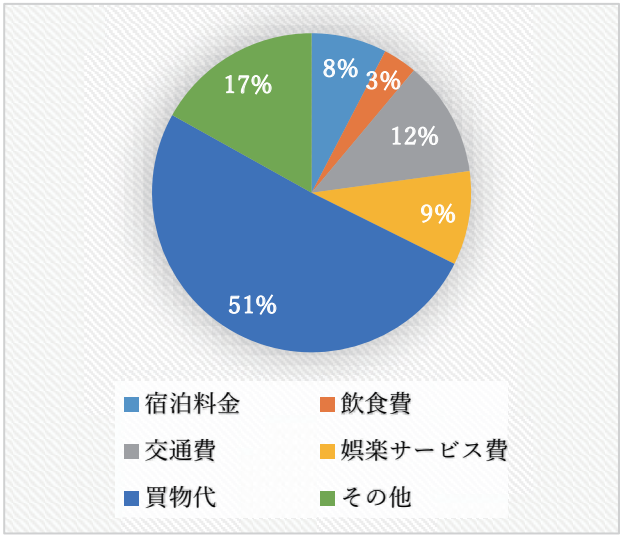


図 1. 中国人旅行客による費目別支出割合

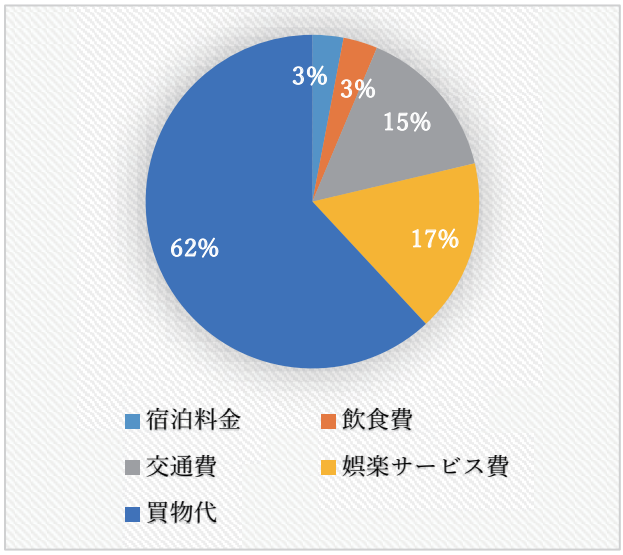


図 2. 中国人旅行客の日本での消費行動による CO_2 排出割合

参考文献

観光庁（2016）訪日外国人観光客数の購買データ、http://www.mlit.go.jp/kankocho/siryou/toukei/syouhityousa.html

観光庁（2016）2015 年の訪日中国人観光客数、http://www.jnto.go.jp/jpn/statistics/visitor_trends/

国立環境研究所（2016）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/datafile/embodied/2005/403.htm

観光庁（2016）訪日外国人観光客数の消費動向調査、http://www.mlit.go.jp/kankocho/siryou/toukei/syouhityousa.html

アパレル産業における消費者嗜好を考慮した環境影響評価

Life cycle assessment considering consumers taste in apparel industry

○酒匂郁輔*1)、堂脇清志 1)
Ikusuke Sako, Kiyoshi Dowaki
1)東京理科大学
*7413046@ed.tus.ac.jp

1. はじめに

世界的な環境問題への関心の高まりより、2016 年にアパレル産業において 2030 年までに原油換算で 15 万 kl 省エネ化することが目標として掲げられた [1]。アパレル製品はその製造、使用工程において多くの資源消費や廃棄物を伴うため、ライフサイクルにおける環境汚染が問題視されている。

しかしながら、日本における衣類の研究では、一つの環境領域についての評価が主であり、複数の環境領域についてホットスポットを分析した研究は少ない。また高田ら [2]は、衣類の環境影響評価において考慮すべき課題として、機能単位における使用期間の設定を挙げている。この理由として、衣類は嗜好性を持つため同製品であっても消費者によって求める機能や製品寿命は異なることを述べている。

他方で、衣類の消費動向を見てみると、一般家庭の被服費が最も高い品目はスーツである。このことを踏まえ、本研究では、スーツについて複数の環境領域に対するホットスポット分析、消費者行動の相違による環境影響を分析することを目的とした。

2. 方法

2.1 評価対象

評価対象は毛 100%のスーツとし、日本国内における製造～廃棄を想定した。なお、スーツのライフサイクルにおいては輸送工程での環境負荷は小さいと考えられるため本研究では評価外とした [2,3]。

次に、スーツは同製品であっても消費者行動によりその耐用年数はばらつきがあると考えられるため、機能単位を 1 着とすると使用工程での環境負荷に不確実性が発生する。従って、ここでは評価期間を 10 年間とし、実態調査から 10 年間で使用するスーツについて妥当なシナリオを作成し環境影響を評価する。

2.2 算定方法

システム境界は図 1 の通りとし、計算は LCA 評価ソフト Milca(ver.1.2.0.0)にて行った。インプット及びアウトプットのデータソースは、製造工程は経済産業省による LCA 調査報告書 [3]、使用工程は山口らのクリーニングの CO_2 排出量の算定 [4]を用いた。

また、環境影響評価では、地球温暖化、資源消費、酸性化、富栄養化、人間毒性(癌性)、生態毒性(水性)、水資源消費を環境領域として評価した。

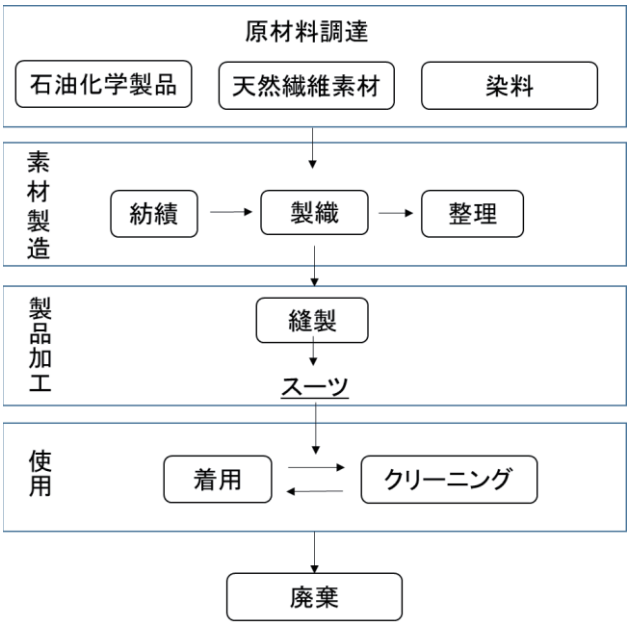


図 1　対象製品システム境界

2.3 使用実態調査

本研究では、アンケートによりスーツの使用実態調査を行い、それに基づくシナリオを設定した。アンケート概要は次の通りである。

<アンケート概要>
対象：仕事着にスーツを着用する、40~59 歳代男性
対象人数(有効回答数)：200 人
方法：調査会社によるインターネット調査
実施期間：2016/12/21～26 日
調査項目：スーツ着回し着数、購入頻度、クリーニング頻度

以上のアンケート結果をもとに、次の(1)及び(2)式から最も平均的なスーツについての消費行動のシナリオを決定した。

総所持枚数[着] = 購入頻度[着 / 年]× 期間[年] + 着回し着数[着]　(1)

総クリーニング着数[着]
＝クリーニング頻度[回/年]×期間[年]　　(2)
×1回のクリーニングに出すスーツ着数[着/回]

3. 結果

3.1 シナリオの決定

アンケート結果より、購入頻度は最頻値を用い、その他の項目は平均値を算出しシナリオを決定した。なお、シナリオの各項目の設定値として、購入頻度（0.5 着/年）、期間（10 年）、着回し回数（6 着）、クリーニング頻度（6 回/年）、1 回のクリーニングに出すスーツ着数（2 着/回）とした。

3.2 環境影響評価

環境影響評価の結果は図 2 の通りである。

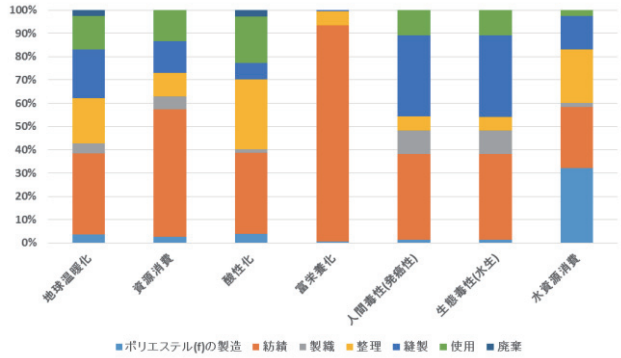


図 2　環境影響評価結果

図 2 より、各環境領域について寄与率が 20%以上の工程をホットスポットとして定義し、その原因を分析した（表 1 参照）。

表 1 ホットスポット分析結果

環境領域	ホットスポット分析
地球温暖化	紡績、縫製工程における電力、熱エネルギーの消費
資源消費	紡績工程での電力消費、整毛品の製造
酸性化	紡績工程での整毛品製造及び紡績、整理工程での電力、熱エネルギーの消費
富栄養化	紡績工程でのリン化合物の排出
人間毒性(発癌性)	紡績、縫製工程での電力消費
生態毒性(水生)	紡績、縫製工程での電力消費
水資源消費	ポリエステルフィラメント製造工程でのポリエチレンテレフタラートの製造、紡績工程での整毛品製造、紡績・整理工程での工業用水の消費

3.3 感度分析

次に、3.1 で決定したシナリオを 1 単位とし、購入頻度、クリーニング頻度をそれぞれ独立に単位量増加させたときの全体の変動率を計算した（図 3 参照）。

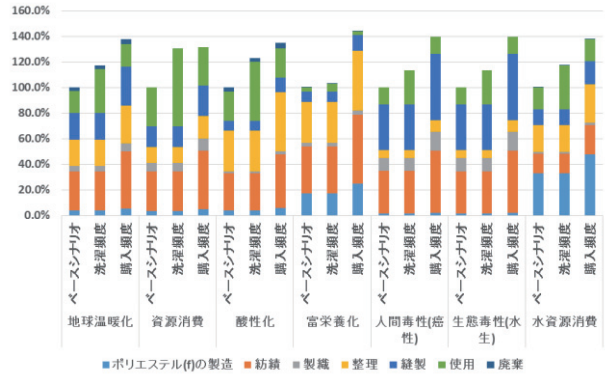


図 3　感度分析結果

図 3 の結果より、いずれの環境領域においても購入頻度が多くなるとベースシナリオと比較して、環境負荷が 30%以上大きくなった。

また、クリーニング頻度を多くすると、富栄養化と水資源消費を除いた環境領域で 10%以上増加した。特に、資源消費の環境負荷は約 20%増加したが、これはクリーニングの際に使用する蒸気の製造で多くの熱エネルギーを消費するためであると示唆される。

4. まとめ

本研究の結果より、スーツの環境負荷は製造工程の影響が大きいため、購入頻度が多くなるとすべての環境領域にたいして負荷が高まることが分かった。

一方で、クリーニング頻度が多い場合は、購入頻度が多い場合よりも影響度は小さいものの、クリーニング時に多くの蒸気を製造するため、資源消費の負荷が大きくなることが分かった。

以上より、スーツのライフサイクルにおける環境負荷は、消費者の行動によって異なる影響をもたらすことが定量的に示された。

引用文献

1) 経済産業省:SAVE THE ENERGY PROJECT, <https://amazonfashionweektokyo.com/jp/the22th/event/savetheenergyproject.html>, (参照 2016-12-20)
2)高田亜佐子, 田原聖隆:衣類におけるライフサイクルアセスメントの現状と課題, 廃棄物資源循環学会誌, vol21, No3, pp148-156, (2010)
3)経済産業省:繊維産業(衣料品)の LCA 調査報告書, (2003)
4)山口庸子ら他 2 名:クリーニングの CO_2排出量の算定, 日本 LCA 学会誌, 6 (3), (2010), pp209-216,

レガシーと持続可能性を考慮したイベント評価手法の開発と活用

Development and Application of Event Assessment Method
Considering Legacy and Sustainability

○池田雄貴*[1)], 越川延明 [2)], 伊坪徳宏*[1)]
Yuki Ikeda, Nobuaki Koshikawa, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学, 2) 株式会社セレスポ
* g1362010@ tcu.ac.jp

1. はじめに

イベントの持続可能性に注目した ISO20121 は，環境・社会・経済を考慮し，レガシーを創出することを大きな特徴して挙げられている．東京オリンピックにおいても ISO20121 が準拠されており，JOC や組織委員会が中心にレガシー創出に向けた様々な取組みが企画されている．オリンピックを始めとした MICE 誘致を国策として進めるなかで，イベントの持続可能性やレガシーに関する評価の重要性は益々高まっている．

2. 研究目的

本研究では，従来のイベント評価 [1)]を参考に，レガシーの概念と範囲を定義した上で，その原動力となる有形レガシーの評価手法を開発し，事例研究を通じて妥当性についての検証を行う．ここでは，岩手国体を対象に，環境・経済・社会の各側面の解析を行う．

3. レガシーの定義

IOC の報告書によれば，レガシーはオリンピック開催に伴う「長期にわたる，ポジティブな影響」として定義されている．本研究では，レガシーを包括的に解釈するためのレガシーキューブの概念 [2)]を参考にした．これは，レガシーの中身がポジティブかネガティブか，有形か無形か，計画的か偶発的なものかといった三軸で表したものである．荒牧 [3)]はここでの有形と無形レガシーに着目し，オリンピックレガシーについての定義や解釈について再整理している．（表 1,2）

表 1 オリンピックにおける有形レガシー

項目	詳細		
スポーツ施設	新設	改修	
都市開発	交通基盤の整備	住宅建設	都市再生計画
経済発展	雇用機会の増加	旅行	投資拡大
環境	改善対策		

表 2　オリンピックにおける無形レガシー

項目	詳細		
スポーツに参加する機会			
都市の成長	活気	ボランティアの増加	サービス精神
国家間交流による平和の創造			
環境への配慮の高まり	環境教育の高まり	行動の変容	
オリンピック・ムーブメントの高まり			

無形レガシーの「スポーツに参加する機会」や「環境への配慮の高まり」は有形レガシーの「スポーツ施設」や「環境改善」があることで初めて成り立つものであり，無形レガシーを生み出し，長期的に持続させるための原動力となる有形レガシーが重要であると考えられる．（図 1）

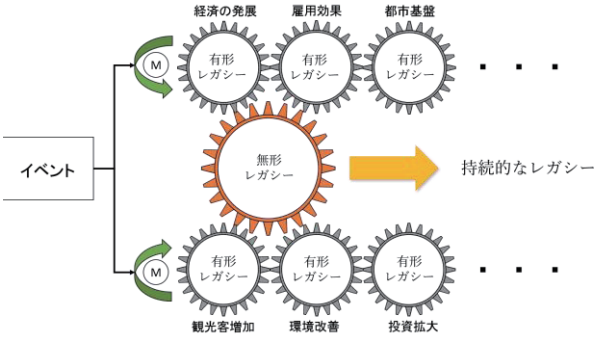


図 1 レガシー概念図

以上を踏まえ，本研究では原動力となる有形レガシーに注目し「経済効果」「雇用効果」「観光効果」「環境改善」の 4 つに注目した．有形レガシーのポジティブな要素として，イベントによって生じた経済および社会効果を，ネガティブな要素として環境負荷量を取り上げた．また，偶発的な有形レガシーに関する要素として，観光によって得られた経済および社会効果，観光による環境負荷量を含めることとした．これらの結果を総合的な観点から考察するために，環境効率を採用して開催期単位，または年単位で解析を行い，イベントとしての有形レガシーの変化を考察することとした．

4. 研究方法

本研究では網羅的な観点からイベント評価を実施するため，ライフサイクルに着目した解析を行う．図 2 にシステム境界について示したが，これは計画的段階，偶発的段階に分けつつ，会場，主催者，選手，来場者の活動に関わる項目すべてを評価範囲に含めた．ただし，スポンサーの企業ブースについてはデータ不足により評価対象外とした．

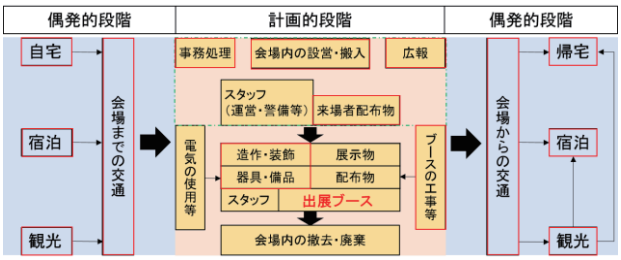


図 4-2 イベントにおけるシステム境界

計画的段階においては，各項目の活動量を「環境」や「経済」,「社会」各側面の原単位に乗じることで，算出することが出来る．式は以下に示す．

$$n = \sum_{n} (Pi \times Ii)$$

n= CO_2 排出量，経済波及効果，雇用効果
P=投入金額（円）, I=原単位

「環境」側面の評価には，3EID を原単位として使用し，CO_2 排出量を算定した．「経済」側面は，需要の発生に伴う誘発効果を考慮した算定を行った．「社会」では，GRI ガイドラインの社会指標項目の中から労働慣行および公正な労働条件の「雇用・労使関係・安全衛生」を選択し，雇用を評価対象とした．

一方で偶発的段階の観光は，購入物品を把握することが困難である．そこで，それらの需要側，供給側の各種統計を統合した観光サテライト勘定を使用することで，観光産業における直接的な経済効果や雇用効果を求めた．環境においても観光サテライト勘定と同じ部門解像度に活動量を分類して評価した．

以上を踏まえて，計画的段階と偶発的段階のそれぞれの環境効率を算出した．本研究における環境効率の式は以下に示す．

$$n = \frac{\left\{ \frac{Er}{F} * 100 + \frac{Ee}{Tee} * 100 \right\} * \frac{1}{2}}{\frac{Ce}{Tce} * 100}$$

n=環境効率（%）
Er=経済波及効果（円）, F=国内最終需要計（円）
Ee=雇用効果（人）, Tee=国内総雇用計（人）
Ce＝CO_2 排出量（ton）, Tce＝国内総 CO_2 排出量（ton）

5. 結果・考察

以上の研究方法を踏まえ，岩手国体における計画的段階と偶発的段階「環境」「経済」「社会」側面の総計結果を表 3 に示した．

表 3 岩手国体評価結果

二酸化炭素（ton）	経済波及効果(百万円)	雇用効果（人）
2100	3500	90

ここから，環境効率を算定し，統合指標として有形レガシーの評価を行う．結果は表 4 に示した．ここでは計画的段階および偶発的段階の環境効率をそれぞれ算定し，そこから岩手国体全体としての有形レガシーを評価した．

表 4 環境効率の結果

計画的段階	偶発的段階
3.4%	15.6%
岩手国体全体	
7.5%	

本研究では，環境効率が 7.5%という結果となった．表 4 の結果から偶発的段階が計画的段階より有形レガシーとして高い結果が残せることが分かった．

偶発的段階において，地域との連携を行うことで，集客を観光へと誘導し，公共交通機関の増便や観光ツアーなどより高い環境効率を目指す必要があると考えられる．また，観光客の増加は地域の魅力向上にもつながり，地方創生やその地域への誇り，新たな特産物や名物の登場など，様々なレガシーに繋がる．

一方で，有形レガシーの結果が直接的に無形レガシーを含む結果の原動力として働くという数学的根拠に裏付けられた仕組みがないことから，今後は有形と無形レガシーの関係性を考察していく必要がある．

6. まとめ

本研究では，イベントの有形レガシーに注目しつつ，岩手国体を対象としたライフサイクル評価を実施した．MICE におけるレガシーの範囲として，本研究では「経済」「雇用」「観光」「環境」4 つの有形財に注目した．一方で「税収効果」などの様々な本研究の対象外の領域の取り扱い，無形レガシーの定量的評価や有形レガシーとの関係に関する考察が今後の課題として挙げられる．

参考文献

1) 松永 典子,伊坪 徳宏 “持続可能性を考慮したイベント評価手法の開発”(2011)
2) 間野 義之 “オリンピックレガシー 2020 年東京をこう変える！”, ポプラ社, 東京(2013),P.54
3) 荒牧 亜衣 “第 30 回オリンピック競技大会招致関連資料からみるオリンピックレガシー”(2013)

ICT サービスの導入がわが国のエネルギー需要と二酸化炭素排出量の削減に及ぼす影響

The Effects of Introducing ICT Services on the Reduction of Energy Demand and CO_2 Emissions in Japan

○棟居洋介*[1)]、上野捷[1)]、鶴見真子[1)]、張暁曦[2)]、折口壮志[2)]、飯橋真輔[2)]
Yosuke Munesue, Sho Ueno, Masako Tsurumi, Xiaoxi Zhang, Takeshi Origuchi, Shinsuke Hannoe
1) 東京工業大学, 2) NTT ネットワーク基盤技術研究所
* munesue.y.aa@m.titech.ac.jp

1. はじめに

パリ協定の発効を受けて、日本においても温室効果ガスの実質的な排出量をゼロにするような取り組みの強化が求められている。こうした中では、エネルギーの供給側の対策のみならず、需要側の取り組みも重要となる。需要側の対策として、これまでに情報通信技術（ICT）導入とその活用の役割についての議論が行われてきた。Nagao (2015)[1)]では、23 の ICT 導入による CO_2 削減効果が、産業連関分析をもとにそれぞれの項目ごとに推計され、その合計として 2013 年には 40.86 Mt-CO_2 の CO_2 が削減されたと推計している。一方で、ICT 導入に伴う様々な財の需給の変化に伴う間接的な影響については、考慮されていないといった課題がある。そこで、本研究では、応用一般均衡モデルを用いて同様の試算を行い、CO_2 排出量の変化について、ICT 導入による直接的な影響と、その誘発的な効果、さらには市場均衡による影響についても含めた分析を行う。

2. 分析方法

2.1 モデル

本研究では、増井他(2014)[2)]や国立環境研究所 AIM プロジェクトチーム(2012)[3)]等でも使用されている日本を対象とした応用一般均衡モデルである AIM/CGE [Japan] をもとにしたモデルを構築している。Nagao(2015)と分析の枠組を合わせるため、2005 年産業連関表[4)]を再現するようにデータの更新を行っている。なお、AIM/CGE [Japan]は、動的なモデルで将来予測を行っているが、本研究においては、2005 年のみを対象に ICT サービスの導入の CO_2 排出量への影響について分析を行っている。また、AIM/CGE [Japan]では、ICT サービス以外の省エネ技術や再生可能エネルギーの導入も可能となっているが、本研究では、ICT サービス以外の技術等については変化しないとしている。

2.2 ICT サービス

表 1 に、本研究で対象としている ICT サービスの一覧を示す。6 つの分野で合計 20 種類のサービスを評価対象としている。これらのサービス量の導入とそれによる行動の変化については、Nagao(2015)に基づいて 2005 年産業連関表の基本表に遡って設定し、応用一般均衡モデルにおける係数を変化させている。

表 1 対象とする ICT サービス

金融	A_1 ネットバンキング
	A_2 電子債権
公務	B_1 電子入札
情報通信業	C_1 テレワーク
	C_2 遠隔会議
	C_3 遠隔管理
製造業	D_1 生産流通管理
	D_2 中古自動車部品
	D_3 産業機械
	D_4 建設機械
	D_5 電算機及び関連機器
流通・サービス業	E_1 BtoC
	E_2 航空券のネット予約
	E_3 コンビニ店におけるネットサービス利用
	E_4 BtoB
	E_5 音楽系コンテンツの電子化
	E_6 映像系コンテンツの電子化
	E_7 PC ソフトの電子化
	E_8 書籍の電子化
医療	F_1 電子カルテ

3. 分析結果

試算結果を以下に示す。今回の試算では、表 1 に示した各 ICT サービスを個別に変化させた場合と、全てを反映させた場合（「すべて反映」と略）について、それぞれ計算を行った。図 1 に CO_2 排出量及び GDP の結果を示す。CO_2 排出量の削減効果が最も大きかったのは C_1（テレワーク）、次いで E_3（コンビニ店におけるネットサービス利用）であった。一方、ICT サービスの導入によって GDP への効果が最も大きかったのは D_1（生産流通管理）であった。特に、C_1（テレワーク）については、CO_2 排出量を削減するだけで

なく GDP を増加させる効果が見られるのに対して、D_1（生産流通管理）については、CO_2 排出量の増大をもたらすことなく GDP を増大させる効果が見られるなど、それぞれのサービスによる効果は異なることが明らかとなった。

すべての ICT サービスを導入した場合の CO_2 排出量の削減効果は約 9.1 Mt-CO_2 であり、2005 年排出量の 0.67%となった。また、すべての ICT サービスを導入すると、GDP は 6.8 兆円（1.4%）増加する結果となった。このほか、ICT サービスの導入により、エネルギー需要量は減少するが、石炭や石油よりは電力、ガスへの影響が大きく、電力需要量は 1.4%削減される結果となった。

個別の ICT サービス導入による効果とすべての ICT サービスを導入した場合の効果の比較から、個別の ICT サービスでは CO_2 排出量の削減や経済活動への効果がわずかであっても、これらを積み上げることで、CO_2 排出削減効果が大きくなることが示された。

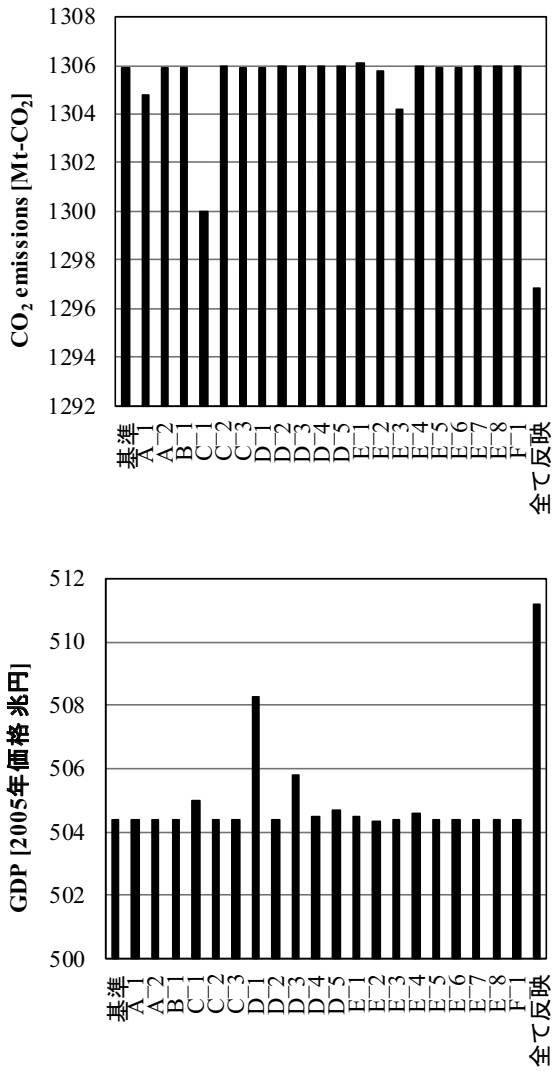


図１　ICT サービスの導入による CO_2 排出量と GDP（横軸の記号は表１を参照のこと）

4. 本研究の結論と今後の課題

本研究では、表 1 に示した 20 種類の ICT サービス導入による CO_2 排出量への変化について、応用一般均衡モデルを用いて定量的な分析を行った。これらの ICT サービスの導入により、GDP は 6.8 兆円増加するのに対して、CO_2 排出量は、約 9.1 Mt-CO_2 削減される結果となり、ICT サービスの導入が経済活動の活性化とエネルギー需要の削減を通じた CO_2 排出量の削減に寄与することを定量的に明らかにした。個別には効果の小さい取り組みであっても、それらを積み上げることで、CO_2 排出量の削減効果や GDP への影響が大きくなることを示した。

今後の課題として、以下の 3 点が挙げられる。1 点目は、分析方法でも示した通り、本研究での分析は静学分析であるが、本研究で用いている応用一般均衡モデルそのものは動的なモデルであることから、将来予測について今後検討したいと考えている。また、2 点目として、ICT サービス導入により余った時間や予算をどのように利用するかという点について、様々な活動が考えられる。本研究では、現状と同じ行動を前提としているが、張他(2016)[5]により示されているリバウンド効果の影響を組み合わせることで、ICT サービスを使用し、さらなる低炭素な社会を提示することも可能である。3 点目は、本分析で示された電力需要量の削減に対して、電力供給のミックスを変えることで更なる CO_2 排出量の削減が可能となる。また、ICT の導入により供給変動が大きい再生可能エネルギーの大幅な導入可能性も指摘されており、本分析以外の ICT サービスの活用とその効果について分析することを通じて、より包括的な評価が可能になると考えている。

引用文献

1) Nagao, T., Hara, M., Hannoe, S., Nakamura, J.: Ecodesign 2015, Tokyo, (2015)
2) 増井利彦, 日比野剛, 大城賢; 土木学会論文集 G(環境), 70 (5), (2014), pp.I_43-I_51
3) 国立環境研究所 AIM プロジェクトチーム; “2013 年以降の対策・施策に関する検討小委員会における議論を踏まえたエネルギー消費量・温室効果ガス排出量等の見通し（中央環境審議会地球環境部会 2013 年以降の対策・施策に関する報告書別冊 1）”, (2012)
4) 総務省編; “平成 17 年（2005 年）産業連関表”, 経済産業調査会, (2009)
5) 張暁曦, 原美永子, 篠塚真智子, 飯橋真輔: 電子情報通信学会2016年ソサイエティ大会, 札幌, (2016)

オールドニュータウンの更新に合わせた エネルギーマネジメント技術導入可能性の検討

Assessing the potential of introducing energy management technologies with a renewal of old new-town areas

○長尾和哉*[1)]、加藤博和 [2)]
Kazuya Nagao, Hirokazu Kato
1) 名古屋大学
* knagao@urban.env.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

日本の都市は，高度経済成長期以降モータリゼーションの進展とともに郊外へ拡大してきた．その結果，環境問題や維持コスト増大などが問題となり，その解決策として持続可能性を考慮した低炭素でコンパクトなまちづくりが求められている．一方，国内外の各地でスマートシティ・コミュニティ事業が進められている．ICT を活用してエネルギーマネジメントなどの環境技術の導入を行うことで環境負荷を低減させるものであり，新規街区や街区の更新の際に導入するケースが多いが，既成街区への展開は進んでいない．

日本において更新が急務な街区としてニュータウンがある．ニュータウンは公共公益施設の整備率の高い良好なストックであるが，入居開始から半世紀が経つところも出てきており，インフラ・住宅の老朽化や，居住者の高齢化といったオールドタウン化による問題が生じている．林 [1)]や猪原ら [2)]は，ニュータウン再生の手法や方向性を提案しているが，これらはオールドタウン化への対応に焦点を当てたもので，街区の低炭素化という観点からは検討されていない．

本研究では，オールドニュータウンの更新を行う際に，周辺の都市計画区域外を含めた集約を行うと同時に，事業所を誘致し住宅との混合土地利用にすることで都市空間のコンパクト化とエネルギー需要の時間変動の平準化を図ることを考える．その上で創・蓄・省エネルギー技術を導入することによる民生部門の CO_2 削減量を評価することを目的とする．

2. ケーススタディ

本研究では，愛知県春日井市の東部に位置する高蔵寺ニュータウンを対象とする（**図 1**）．1968 年から入居開始した中部地区最大のニュータウンで，近年，人口減少に伴い集合住宅を中心に，老朽化や空家率の上昇が問題となっている．また，高蔵寺ニュータウンは区画整理により計画的に開発されたが，周辺は都市計画区域外であるため，インフラが非効率な地区が存在している．

3. シナリオ分析

3.1 シナリオの種類

本研究では，2015 年時点にシナリオ（**表 1**）を導入した場合を仮定して分析を行った. BAU は現状推移のシナリオである．MLU シナリオでは，更新の際に住宅と事業所の混合土地利用に移行するとともに，周辺地域の住宅をニュータウン内へ集約する．

3.2 導入するエネルギー技術

さらに MLU+EMS シナリオでは, 集合住宅を撤去する街区において「エネルギーの面的利用」を行う．MLU+EMS シナリオでは，小規模な特定地域内へ集中的なエネルギープラントから冷水や温水を供給する「地点熱供給型」を導入する．エネルギー技術の一次エネルギー効率は，資源エネルギー庁 [3)]が公表している値を参考にする．

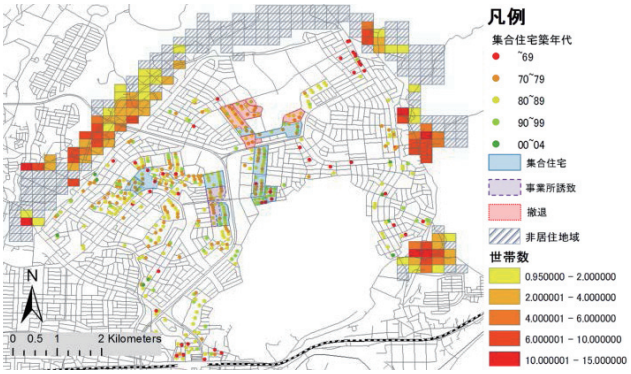


図 1　ニュータウン周辺の地図

表 1　シナリオの種類

シナリオの種類	集合住宅撤去後の土地利用	周辺地域の集約	エネルギーマネジメント技術導入
BAU	撤去しない	なし	なし
MLU	集合住宅+事業所	あり	なし
MLU+EMS			あり

3.3 民生部門エネルギー消費量及び CO_2 排出量の推計

民生部門の CO_2 排出量推計方法の概要（**図 2**）に示す．まず，シナリオごとにコーホート要因法を用いて，2010 年の国勢調査地域メッシュ統計の性別・年齢階級別人口から 5 年おきに 2040 年までの世帯数を算出する．次に，算出された将来世帯数と事業所の床面積からエネルギー消費量原単位を乗じることで，家庭部門と業務部門を合わせた民生部門のエネルギー消費量を算出する．その際にエネルギー技術導入によるエネルギー消費量削減効果も考慮する．

4. シナリオの分析結果

各シナリオの人口・世帯数経年変化（**図 3**），世帯数当たりの家庭由来 CO_2 排出量（**図 4**），民生由来 CO_2 排出量の変化（**図 5**）をそれぞれ示す．

エネルギー技術導入によるニュータウン全体の世帯数当たり家庭由来 CO_2 排出量は 2.07%削減となるが，MLU シナリオでは，事業所を新たに誘致したため, BAU シナリオと比較したときニュータウン全体における民生部門 CO_2 排出量は増加している．MLU シナリオと MLU+EMS シナリオを比較すると，エネルギー技術による CO_2 削減量は 236(t-CO_2/年)で 2.16%の削減となる．

5. まとめ

本研究では，オールドニュータウンを更新する中で，立地集約を進めると同時に省エネルギーな街区にする手法を検討するための CO_2 排出量推計モデルを開発した．それを用いて，街区更新に合わせて事業所を誘致し住宅との混合土地利用にすることで，ニュータウンの人口減少を緩和することが可能になり，さらにエネルギー技術導入も合わせることで CO_2 排出量削減効果が期待できることを明らかにした．

引用文献

1) 林直人：国土技術研究センター報告レポート，入手先<http://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/reports/act/21st/nikkan2010_06.pdf >（参照 2016-12-26）
2) 杉本賢二，猪原暁，加藤博和，林良嗣：“土木計画学研究発表会”，長崎（2016） Vol.54, CD-ROM(135)
3) 経済産業省　資源エネルギー庁：“平成 19 年度未利用ネルギー面的活用熱供給適地促進調査報告書概要版”，(2008)

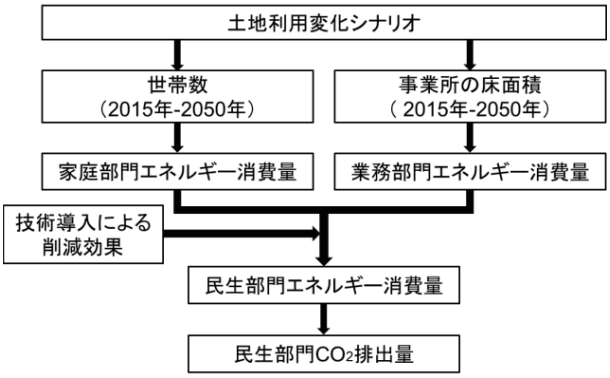


図 2　CO_2 排出量推計方法

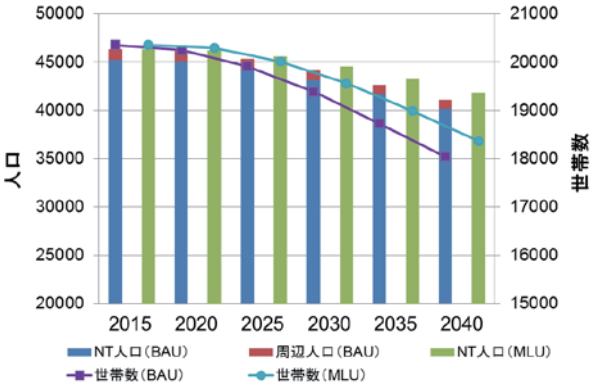


図 3　人口・世帯数経年変化

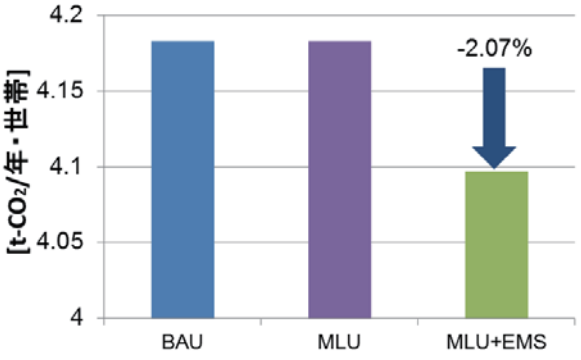


図 4　家庭部門 CO_2 排出量推計結果

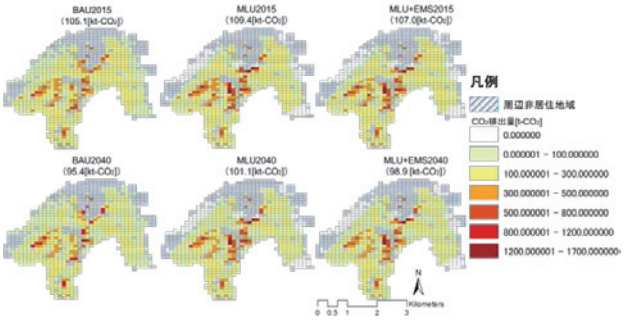


図 5　年代別民生部門 CO_2 排出量推計結果

マイクログリッドによる CO_2 削減効果から見た街区構成と生活スケジュールの評価

Evaluation of daily activity schedules and neighborhood composition from the viewpoint of CO_2 reduction by applying Micro-Grid

○佐藤惇*[1)]、栗栖聖 [1)]、花木啓祐 [1)]

Atsushi Sato, Kiyo Kurisu, Keisuke Hanaki

1) 東京大学

* a_sato@env.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

街区規模のマイクログリッド (以下: MG) 導入により、太陽光発電やエネファームから発生する余剰電力や排熱を建物間で融通することが可能となり、CO_2 排出量の削減が期待できる。その削減効果の大きさは、街区内の建物構成だけでなく、街区内の居住者の生活スケジュールにも左右されると考えられる。本研究では、住宅を中心に構成された街区において、居住者の生活スケジュールに関して多様なパターンを考慮した上で、モンテカルロ法を活用して CO_2 削減効果を検討した。

2. 研究概要

2.1 生活スケジュールとエネルギー負荷の推定

10 軒の戸建住宅 (単身世帯 3 軒、2 人世帯 3 軒、3 人世帯 4 軒) を MG により統合し、電力・熱の融通を可能にする場合を想定した。評価対象日は夏期の晴天日 (2015 年 8 月 5 日, 東京 [1)]) とした。

はじめに、エネルギー負荷の根拠となる、各居住者の生活スケジュールを推定した。居住者の属性は、勤め人 (家事あり/なし) 、高齢者 (家事あり/なし) 、主婦、中学生の 6 属性とし、各属性の生活スケジュールを国民生活時間調査 2010[2)]を基に 4 パターンずつ設定した。具体的には、1 日を 1 時間間隔に 24 分割し、同調査に記載のある「睡眠」「食事」「身のまわりの用事」などの項目から時刻別行為者率の高いものを各時間帯に割り当てることで作成した。設定した生活スケジュールの概要を表 1 に示す。

表 1 設定した生活スケジュールのパターン

居住者属性	パターン 1	パターン 2	パターン 3	パターン 4
勤め人家事あり 勤め人家事なし	典型	帰宅遅め	夜勤	起床早め
高齢者家事あり 高齢者家事なし	典型	外出型	在宅型	帰宅遅め
主婦	典型	昼外出型	夜外出型	終日 外出型
中学生	典型	帰宅遅め	午前 外出型	起床早め

次に、生成したスケジュールを基に、各住宅の電力・熱負荷を求めた。居住者が在宅かつ起床している時間帯には床面積や住居内外の温度差を基に照明負荷と冷暖房負荷を算出した。また、各行為に対応する家電機器や給湯水温・水量を指定することで各時間帯の家電負荷、給湯負荷を算出した。照明、冷暖房、家電の値の和が電力負荷、給湯の値が熱負荷となる。推定したエネルギー負荷の一例として、勤め人 (家事あり) の電力負荷を図 1 に示す。

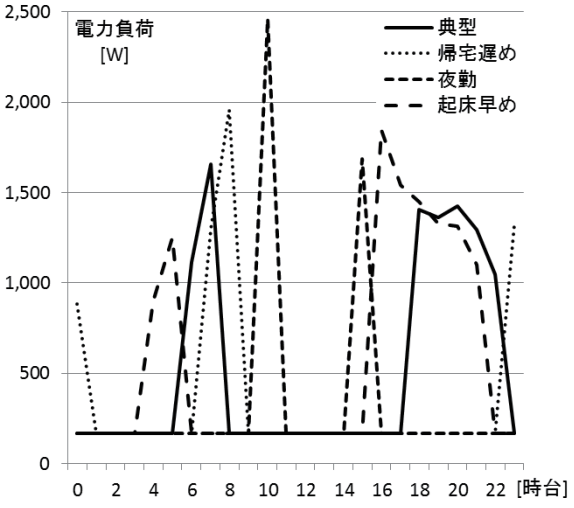


図 1 推定したエネルギー負荷の例

2 人世帯や 3 人世帯のエネルギー負荷は、各居住者のエネルギー負荷を積算することで求められる。ただし、湯張りに係る給湯負荷は 18 時以降最初に入浴する居住者にのみ与え重複を避けた。また複数の居住者が TV を使用する時間帯も負荷の重複を避けた。各世帯の居住者属性については表 S1 に示す。

2.2 導入する環境配慮機器とその運転方法

各住宅に導入する環境配慮機器は次のように設定した。各戸は 3.5kW の太陽電池と 1kWh の蓄電池を導入し、その余剰電力は蓄電、他戸への融通 (MG の場合) 、廃棄の順に処理した。また各戸はエネファームを導入し、その定格出力を電気 750W、熱 1080W、定格発電効率を 39%とし、部分負荷運転時の発電効率や熱回収効率は線形に逓減するものとした。エネファームの運転開始は午前 6 時とし、太陽電池と蓄電池による供給分を減じた電力負荷に合わ

せて稼働し、発電と同時にお湯を生成する。また内蔵の貯湯タンクが満水になるか 1 日に必要な熱を生成した時点で停止する。不足電力は系統より買電し、不足熱は内蔵のガスボイラーより補うものとした。

2.3 マイクログリッドによる CO_2 削減量の推定

各建物に環境配慮機器を導入しない場合、個別に導入する場合、個別に導入した上で余剰電力や排熱を MG により融通する場合について、それぞれ CO_2 排出量を求めた。

各住宅のエネルギー負荷は居住者の生活スケジュールによって多様に変化し、その組み合わせは極めて多数存在するため、MG 全体の CO_2 排出量を一意に求めることはできない。そこでモンテカルロ法を用いて、各居住者の生活スケジュールを 4 パターンの中から無作為に抽出し、当該スケジュールにおける MG 全体のエネルギー負荷および CO_2 排出量を求めることを繰り返した。計算回数は 10,000 回とした。個別導入、MG 両ケースにおける CO_2 排出量について 10,000 サンプルをプロットしたものを図 2 に示す。

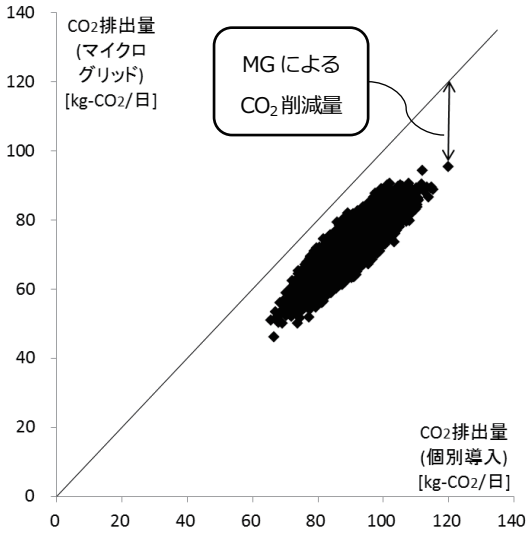


図 2 街区全体における CO_2 排出量

個別導入ケースと比べて、MG ケースでは平均 18.7kg/日 (最大 29.7kg/日、最小 6.6kg/日) の CO_2 が追加的に削減された。これは当該スケジュールの無対策ケースと比べて 4.7%から 18.7%の CO_2 削減効果にあたる。CO_2 削減効果に差が生じた理由としては、各居住者の生活スケジュールの組み合わせによって、MG 全体で負荷が平準化されたケースと特定の時間帯、主に朝晩に負荷が集中したケースが生じ、前者では後者に比べて太陽電池やエネファームが効率的に稼働したことが挙げられる。

2.4 他施設の統合による追加的削減量の推定

住宅のみからなる MG に、昼間に安定した負荷を持つ他施設を統合することで、昼間の在宅者が少ない場合でも太陽電池やエネファームの高効率な稼働が可能になると考えられる。そこで、他施設の導入による追加的な CO_2 削減効果を算定した。

統合する施設は業務施設、商業施設、医療施設とした。業務・商業施設は昼間の電力負荷が顕著である一方、熱負荷や夜間の電力負荷は小さい。医療施設は電力負荷の変動が小さく、また給湯利用に伴う熱負荷が大きい。それぞれの施設の電力・熱負荷は文献 [3]値を参照し、図 S1 に示す。各施設を統合した場合の CO_2 排出量について前節と同様に 10,000 回繰り返し計算し、住宅のみの場合との比較による追加的な CO_2 削減量を求めた。結果を表 2 に示す。

表 2 他施設を統合した場合の CO_2 追加的削減量

施設の種類	追加的削減量 [kg-CO2/日]		
	平均値	最大値	最小値
業務施設	9.7	20.8 (16%)	−1.7 (−1%)
商業施設	10.8	30.8 (25%)	−0.8 (−0%)
医療施設	14.5	19.4 (14%)	6.4 (4%)

(%は当該生活スケジュールにおける
無対策ケース (住宅のみ) の値を 100%としたもの)

いずれの施設においても、追加的削減量の平均値はおよそ 10kg となった。最大値は業務・商業施設において大きい値となった一方、医療施設においてはサンプル間での変動が小さく、結果として最も大きい平均値となった。これは医療施設の持つ安定した熱負荷がエネファームの効率的な稼働に寄与したためと考えられる。医療施設の最大値の場合を例に、太陽電池・エネファームの稼働状況を図 S2 に示す。

3. 結論

本研究では、住宅における多様な生活スケジュールの組み合わせが MG の CO_2 削減効果に影響を与えること、および昼間に安定した需要を持つ施設を MG に含めることで追加的な CO_2 削減効果が得られる場合があることを定量的に示した。

参考文献

1) 気象庁, 過去の気象データ検索,
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php
(2016 年 12 月 1 日閲覧)
2) NHK 放送文化研究所, データブック 国民生活時間調査, NHK 出版, 2011
3) 日本地域冷暖房協会, 地域冷暖房技術手引書 改訂新版, 2002

Supporting Information

表 S1 各世帯の居住者属性

世帯人員	世帯員の構成			
	世帯 1	世帯 2	世帯 3	世帯 4
単身世帯	勤め人家事あり	勤め人家事あり	勤め人家事あり	
二人世帯	勤め人家事あり 勤め人家事なし	高齢者家事あり 高齢者家事なし	高齢者家事あり 高齢者家事なし	
三人世帯	主婦 勤め人家事なし 中学生	主婦 勤め人家事なし 中学生	主婦 勤め人家事なし 高齢者家事なし	勤め人家事あり 勤め人家事なし 中学生

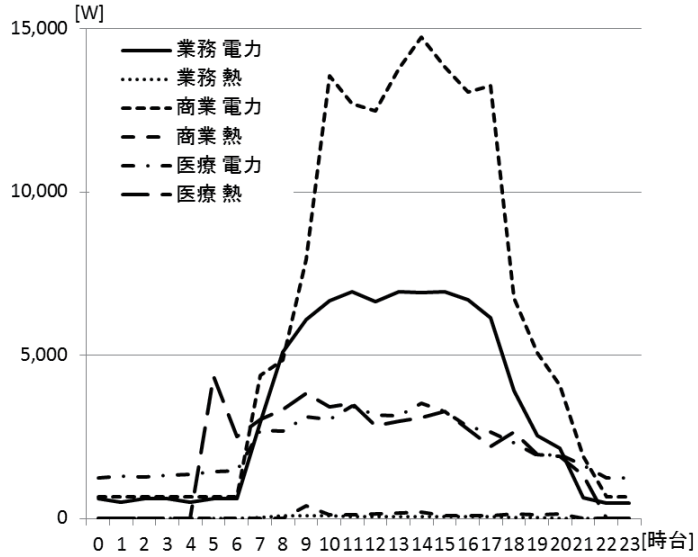


図 S1 他施設のエネルギー負荷

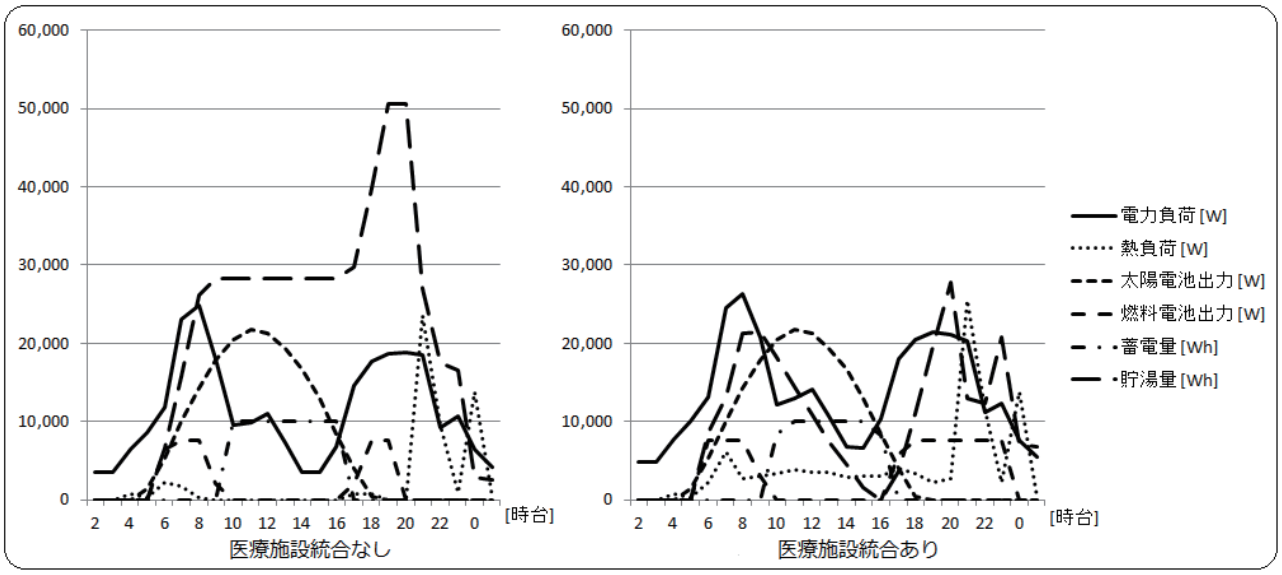


図 S2 医療施設の統合前後での太陽電池・エネファーム稼働状況の一例

使用条件の異なる家庭用エネルギー機器によるコスト・CO_2 排出量

Cost and CO_2 emissions from residential energy system under various usage conditions

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

1. はじめに

わが国の家庭部門のエネルギー消費量はここ 40 年間で倍増しており対策の余地が大きい。「地球温暖化対策計画」（2016 年 5 月閣議決定）では、2030 年までに家庭部門 CO_2 排出量を 2013 年比 40%削減するために、高効率照明を現在の 4 倍、燃料電池を 32 倍導入することなどが記され、これら家庭用エネルギー技術の普及は急務である。この計画達成には、技術をシステムとして捉えて評価し、少ない経済負担で温室効果ガスを削減する技術普及シナリオとそれを実現する技術普及策を示すことが重要で、そのためには技術導入の経済性・環境性を評価するモデルが必要となる。

エネルギー技術には、需要自体を削減する技術（例. 省エネ家電製品）と、需要に対して高効率または低炭素で供給する技術（例. 燃料電池）の２種類がある。需要側の技術評価を目的として、家電・給湯製品の使用状況からエネルギー需要を推計するモデル[1-3)]（以降、需要推計モデル）が開発される一方、供給側の技術評価には、与えられた需要に対して家庭での最適なエネルギー供給をシミュレーションするモデル（以降、最適供給モデル）が必要となる。しかし、需要推計・最適供給モデルは互いに独立して開発され、需給両方の技術を包括的評価することによる技術システムの普及策は検討されていない。

本研究では、需要側・供給側の家庭用エネルギー技術について導入の経済性・環境性を評価する手法を開発する。その一環として実施した、省エネ家電製品への買い替えによる電力需要の変化と、そのときの家庭のコスト・CO_2 排出量の評価結果について、本発表で紹介する。家電製品のなかで年間電力使用量の多い 4 製品（エアコン・テレビ・冷蔵庫・照明）に着目し、使用時間の長さを考慮して、エアコン・照明は居間・食堂に設置された機器の買い替え効果を評価した。

2. 手法

2.1 アンケート調査の実施

2014 年の冬・夏 2 回にわたり男女 1227 名を対象に、家庭における生活行動と家電・給湯の使用状況に関するアンケート調査を実施した。直近の平日または休日 1 日における 15 分ごとの居場所、行動、家電の使用状況を質問した。調査の結果、1 日の大半を居間・食堂や寝室で過ごしていることが分かる（図 1）。

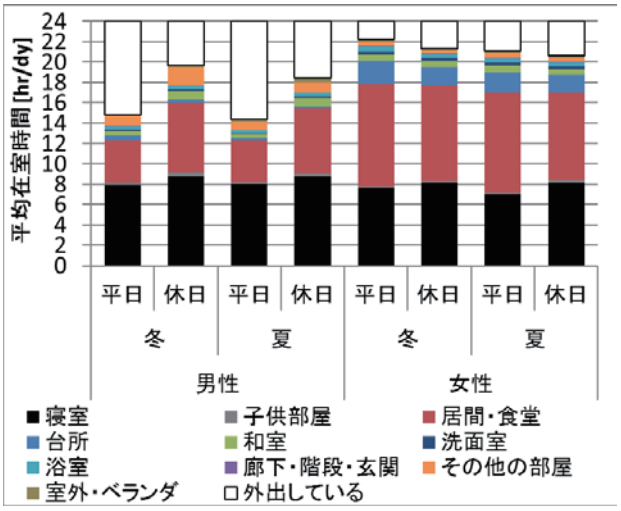


図 1 各部屋における平均在室時間

2.2 需要推計モデル[3)]

つづいてアンケート調査結果を入力値として、家庭における 15 分ごとの電力需要を推計するモデルを開発した。モデルの推計手順を図 2 に示す。まず個人別のデータを統合し、家族の生活行動データを生成した。次に家族での家電の使用状況を家電による電力需要に変換した。例えば 7 時～9 時にテレビを使用したとすると、同時間帯の電力需要にテレビによる消費電力を加算した。同様の手法で、居場所を照明による電力需要に変換した。空調による電力需要は、各時間の居場所と家電・照明の内部発熱を入力値とする住宅熱負荷計算によって求めた。熱負荷計算ソフトは、建築環境・省エネルギー機構の「BEST 専門版」を使用した。

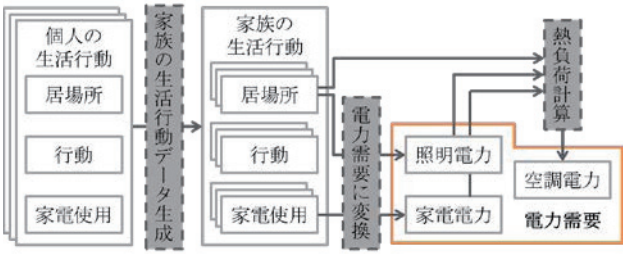


図 2 モデルの推計手順

2.3 家電製品の性能・買い替え費用の設定

評価対象の家電製品 4 種類（エアコン・テレビ・冷蔵庫・ダイニング照明）について、買い替え前後の性

能（エアコンは COP、それ以外は消費電力）と買い替え費用の設定を行う。買い替え前の性能は、需要推計モデル [3]で想定する標準的な家電製品のものとする。この標準的な性能に基づいて家庭の二次エネルギー需要を推計した場合、推計結果は統計値とよく一致することを確認済みである。

省エネラベルで最高評価の 5 つ星を取得している機種への買い替えを想定し、買い替え後の消費電力は『省エネ性能カタログ 2016 年夏版』に掲載されている 5 つ星機種の平均とする。一般に家電製品はオープン価格であり、販売価格は市場で決定される。消費者にとっては複数の販売店の中から最も安価に購入できる店を選ぶことが合理的であるため、5 つ星機種それぞれについて最安販売価格を調査し、全機種の平均を買い替え費用とした。販売価格の調査にはマーケティングサービス「トレンドサーチ」[4]（株式会社カカクコム）を利用し、調査対象期間は 2016 年 12 月 5～11 日とした。買い替え前後の性能と買い替え費用を表 1 に示す。

表 1 買い替え前後の性能と買い替え費用

家電製品	買い替え前（上段）・後（下段）の性能	買い替え費用 [円]
エアコン	COP 4.77(冷房), 5.85(暖房)	166,707
	COP 2.91(冷房), 3.48(暖房)	
テレビ	消費電力 107W	78,886
	消費電力 93W	
冷蔵庫	消費電力 80W	162,667
	消費電力 30.4W	
照明	消費電力 90W（白熱電球）	2,679
	消費電力 14.3W（LED）	

3. 結果・考察

ケーススタディーとして、4 人家族の家庭が家電製品を買い替えたときの効果を評価した。冬の平日における電力需要カーブの変化を図 3 に示す。ベースケース（黒線）は家電製品を買い替える前、省エネケース（赤線）は家電製品 4 種類を買い替えた後のカーブを表し、それぞれの家電製品の効果の内訳を色の塗り分けで表す。居間・食堂のエアコンの買い替えによって、冬の朝方のピーク電力が削減される。また冷蔵庫や居間・食堂の照明の買い替えによって、長時間発生するベース電力が削減される。

それぞれの家電製品を 10 年間使用したときの、買い替え費用・電力料金を合計した総コスト（現在価値換算 割引率 1%）、CO_2 排出量を評価した（図 4）。コストに関して、居間・食堂の照明を買い替えた場合には 10 年間での投資回収が可能であり、その他の家電製品を買い替えた場合にはコストが増加する。CO2 排出量に関して、テレビの買い替え以外の場合に 10 年間で 2.0～2.5t-CO_2 程度の削減が可能である。

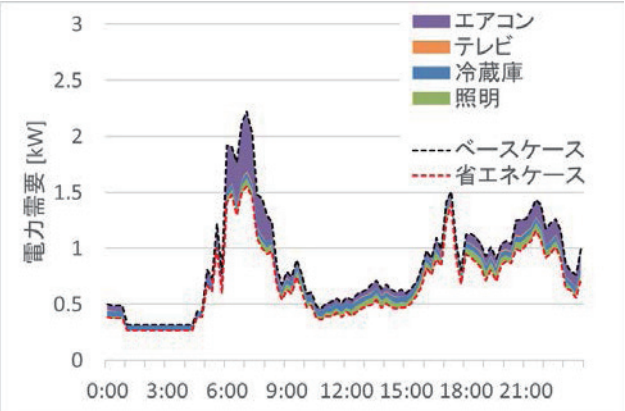


図 3 電力需要カーブ（4 人家族、冬の平日）

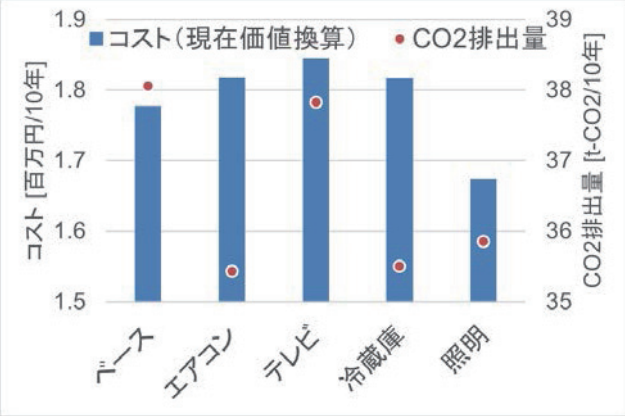


図 4 10 年間のコスト・CO_2 排出量（4 人家族）

4. おわりに

以上、需要側のエネルギー技術導入時の電力需要・コスト・CO2 排出量への影響を評価した。今後は需要推計モデルに対応する最適供給モデルを開発し、需給両方の技術について包括的評価を行なう。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP16H07468 の助成を受けたものです。

引用文献

1) Shimoda Y., Asahi T., Taniguchi A., Mizuno M.: Energy, 32 (9), (2007), pp 1617-1633
2) Tanimoto J., Hagishima A., Sagara H.: J. Building Performance Simulation, 1(1), (2008) pp 31-42
3) 小澤暁人, 吉田好邦: エネルギー・資源学会論文誌, 36 (5), (2015), pp 12-23
4) 株式会社カカクコム: “トレンドサーチ　市場調査を支援するマーケティングサービス”, （オンライン）, 入手先<http://kakaku.com/trendsearch/>, （参照 2017-1-1）

印刷を対象としたライフサイクルすごろくのコンテンツ開発と実践の事例
～ カーボンオフセットの選択肢を加えて ～

Case of development and practice of the life cycle Sugoroku content intended for printing.
～ In addition to the choice of carbon offset ～

○北村祐介*[1)2)3)]、藤永颯人[4)]、小藤直[4)]、海老原誠治[2)5)]、高岡由紀子[2)6)]、西尾チヅル[2)7)]、伊坪徳宏[4)]
Yusuke Kitamura, Hayato Fujinaga , Nao Kofuji , Seiji Ebihara , Yukiko Takaoka , Chizuru Nishio , Norihiro Itsubo
1) プリプレス・センター, 2) 資源と環境の教育を考える会「エコが見える学校」, 3)elsa , 4)東京都市大学 ,
5)三信化工 , 6)グリーン購入ネットワーク（GPN）, 7)筑波大学
* elsa.coremember@gmail.com

1. はじめに

本発表は「ものの一生すごろくコラボ（資源と環境の教育を考える会「エコが見る学校」×プリプレス・センター)」と「インターンシップによる開発（プリプレス・センター×東京都市大学伊坪研究室)」によるコンテンツ開発の経過を報告する。

「ものの一生すごろく」とは、エコが見える学校が開発した参加会員企業の商品・サービスのライフサイクルを示したすごろくのことを指す。これまでに、うつわの一生、制服の一生、油性マーカーの一生、つくえの一生すごろくの開発が行われている。

本発表は、印刷物を対象としたコンテンツ「印刷物の一生すごろく（以下、本コンテンツ)」の開発を行ったものである。

インターンシップは、印刷業のプリプレス・センターが実施する夏期プログラムである。東京都市大学伊坪研究室から 2015 年度に小藤氏、2016 年度に藤永氏が参加し、環境教育コンテンツの開発に関する企画構想、調査、設計、デザイン校正までを行った成果である。

2. 基本設計

すごろくの基本原則（デザイン、ゲームルール）はこれまでに開発された既存コンテンツを踏襲したものとした。

図 1：うつわの一生のすごろくの例

表 1：ゲームの基本ルール

	内容
1	かばボン　＝　二酸化炭素（CO2）である。（どういう時にエネルギーを使う=CO2 が出る=かばボンが溜まるという補足を行う）
2	『足あと』にある『かばボン』ポイントの数の分だけ、ブロックやチップを重ねる。（1 個 =5 かばボン ）『かばボン』ポイントは、出た CO2 として考える。かばぼんは、おおいのと すくないの、 どっちがいいかな？
3	足あとが続くリボンの色に合わせ、ブロックやチップを集める。ブロックやチップが無いときは、グラフ用紙に書く。
4	環境に良いことができたら、最後に『かばボン』を引くことが出来る。
5	環境に良いコースがある。限定色に塗られた『足あとに』止まった時だけ、点線にすすめる。
6	ぴったりの目で止まらなくても、1 度ゴールに着いたら、おしまいだ。 ゴールからは折り返さない。
7	ゴールしたら、『ゴールかばボン』を足すよ。速くゴールしてしまうと、 沢山の『かばボン』が増える。(『 10 かばボン』ずつ)ゴールははやいのとおそいの、 どっちがいいかな?
8	全部の『かばボン』が、1 番 少ない方が、勝ち。
9	『おたすけの札』があると 1 枚で 1 回だけ、いつでも サイコロのふり直しが出来る。

3. コンテンツの開発目的と特徴

コンテンツの共通目的は企業の環境教育コンテンツとして、自社商品・サービスを題材としながら「ライフサイクルってなに？」を知ってもらうこと、「ものを長く大事に使う」ことを考えて欲しい思いを込めている。ゲームをつうじて、ライフサイクルを知ってもらい、ライフサイクル思考（LCT）で考え、日常生活でものを長く大事に使うことを期待している。

本コンテンツでは、従来の「ライフサイクルを知る」「ものを長く大事に使う」に、植樹によるカーボンオフセットを含み「つくる/つかう/すてる」の商品ライフサイクルで CO2 排出を認識しながら、環境貢献活動により埋め合わせすることを加えた内容とした。

既存コンテンツの特徴に加えて「カーボンオフセット」と「3R：リデュース・リユース・リサイクル」を学ぶことができる内容を付加したものとなっている。

4. 開発コンテンツ

今回、開発したコンテンツを図２～図６に示す。

全体像としては、既存コンテンツと同様に３つのゾーン（つくるゾーン、つかうゾーン、すてるゾーン）に分け、本コンテンツの対象である印刷物のライフサイクルを表している。

つくるゾーンではリデュースマス、つかうゾーンではリユースマス、すてるゾーンではリサイクルマスに止まると「R」カードをもらえる。環境貢献ゾーンとしてカーボンオフセット（植樹・下草刈り・間伐）マスで「C」カードを用意した。これらは、最後に点数に組み入れることができるため、入手したいカードにしている。

図２：開発コンテンツの全体像

図３：つくるゾーン

図４：つかうゾーン

図５：すてるゾーン

図６：環境貢献ゾーン

5. まとめと課題

ここまでにおいて、コンテンツ開発とテスト実施までを完了した。この後、実際の期待や効果が得られるかどうかの実証トライアルを行いながら、さらにコンテンツの検証を行い、改良を図る予定にしている。

6. 引用文献

エコが見える学校 URL：http://www.kababon.org 他

ライフサイクル・TMR・生活・文化を通じた環境プログラム、事例と行動変容

学びと遊びの受容性

Case study and behavior change in environment programs about life cycle thinking, TMR, life and culture, Case study and behavior change.

Acceptability about learn and play

○海老原誠治*1)2)、高岡由紀子1)3)、堀川悦夫1)4)、西尾チヅル1)5)
Ebihara Seiji, Yukiko Takaoka, Yusuke Kitamura, Etsuo Horikawa, Chizuru Nishio
1) 資源と環境の教育を考える会「エコが見える学校」, 2) 三信化工株式会社,
3) グリーン購入ネットワーク, 4) 佐賀大学, 5) 筑波大学
＊ s-ebihara@sanshin-kako.co.jp

1. 背景

産学コンソーシアムである「エコが見える学校」では、LCTに取り組むモノづくり企業を中心とし、企業がもつ生活に関わる環境情報の発信と理解とLifeStyleの変容を目的とし2012年発足した。国内2番目となる環境教育等支援団体（環境 教育等促進法）の指定のもと、 関連企業が持つLCA情報等を元に、複数の環境コンテンツの開発・実施・調査・修正・展開を通じて評価した。2014年度には70回以上・延べ10,000人程の方を対象として衣食住を通じた出前授業やワークショップ・セミナーの実績を持ち現在も活動を継続している。

2. 目的

近年のマテリアルフットプリントへの注目や、都市鉱山とリサイクルを導入した２０２０東京オリンピックのメダル採用決定など、LACに対する期待は非常に高まっている。しかし、幅広いステイクホルダーに対し、LACへの理解を促すプログラムはまだ十分と言えない。特に文部科学省学習指導要領を視野に置いた時、義務教育と連携できるプログラムに関し開発の余地は大きいため、高く期待のもてる領域でもある。この様な背景の中、筆者らは伝統遊戯でもある双六上で、 LCおよびプロセスにおけるインパクトをモデル化し、LCAをシミュレーションしながらも楽しみながら学べるコンテンツ「ものの一生のすごろく」(Figure1,2)を確立した。また基本ルールやマニュアルを共通化し、食器・衣服・マーカーペン・机・印刷物と、プログラムのフレームを移植し複数製品のLCで展開している。

本発表ではLCAのシミュレーションコンテンツ「ものの一生のすごろく」(Figure1,2)を学校指導要領と対応させ小学校４年生の社会科に導入したプログラムの事例紹介と、 受容性結果を報告する。

3. プログラムと事例

実際のLCのプロセス・インパクトの体感を目的に開発された「ものの一生のすごろく（食器版）」(Figure1,2)を小学校４年の社会科の授業で展開し調査した。展開は以下となる。

- CO2がどこに存在するのか、児童自身の呼吸動作を交えながら、排出源・吸収源と効果を説明
- 食器の出来るまでを動画で紹介
- 各LC段階でのインパクトの紹介
- 使用段階での洗浄に掛かる水供給負荷を説明
- 使用段階での洗浄に掛かる水排水負荷を説明
- 廃棄段階における、食器と３R事例の紹介
- ルール説明
- ゲーム実施により児童自身において検証
- 製造および使用におけるLCAに関し、振り返りとまとめ

指導要領と対応する項目は、エネルギー・水の供給、下水、廃棄物、３Rとなる。

4. 結果・考察

子どもからは高く受容され理解も得た。受容されるための動機としては、プログラム内の様々な要素に分散された。また記述回答からの抽出では「今までCO2の単語は知っていたが、意味が分からなかった」とい

う声も多く、同じ学年内や個人内での知識の差も多く見られ、複数の知識レベルに合わせたプログラムの必要性が指摘された。

5. 課題

今後の課題として、次が挙げられる。

- 他プログラムと比較した際の、介入の効果
- 追跡調査による意識の経年変化
- 行動変容における介入の効果

6. 参考情報

資源と環境の教育を考える会「エコが見える学校」
HP；http://www.kababon.org

Figure1　ものの一生のすごろく（食器のLCAシミュレーション）

Figure2　シミュレーションされたCO2インパクト

小中学校におけるライフサイクル思考に基づく環境教育プログラム ～ 雨水で育てる緑のカーテンを使った 7 年間の実践記録 ～

Environmental Education Program Based on Life Cycle Thinking in an Elementary and Junior High School - Practice Record for 7 Years with Green Wall Cultivation Using Rainwater -

○笠井利浩*[1)]、荒木史代[1)]
Toshihiro Kasai, Fumiyo Araki
1）福井工業大学
* kasai@fukui-ut.ac.jp

1. はじめに

近年、一般市民の環境保全に対する意識は非常に高くなり、様々なエコ活動が実施されると共に環境に配慮した商品が一般化している。これは、これまでに実施されてきた、自然の素晴らしさや自然を大切にすることを伝える環境教育プログラムの大きな成果である。しかしながら、実際に環境保全を行うためには、環境への負荷を真に削減する“正しい”環境活動を実践しなければならない。これまでに行われてきた環境保全活動の多くは、自然の素晴らしさや環境問題の現状を伝え、自然保護を訴える事に主眼をおいたものであり、これらは環境保全活動への第一ステップとして捉えることができる。今後は、第二のステップとしてライフサイクル思考（以下、LCT）を導入した環境教育を実践し、一般市民に真に環境保全に繋がる環境活動とは何かを伝え、広く“正しい”環境活動が行われる社会にする必要がある。

笠井ら[1,2)]は、2010 年度から初等教育における LCT に基づく環境教育を提案・実践し、比較的長期に渡って取り組んできた。この環境教育プログラムでは、LCT の要となる環境負荷の定量化を導入するための教材として、雨水利用装置を導入した。これは、“水（雨水）”という人間にとって最も身近な物質を教材に使用することで、環境負荷の定量化への話しの流れをスムーズにすることを狙ったものである。また、平成 24 年度からは、新たに巨大な緑のカーテン（幅 18m、高さ 10m）を教材に加え、小学校全学年を対象とした、継続的な環境プログラム（長時間体験型環境教育プログラム）に発展させた。さらに、平成 26 年度からは、この小学校の児童の殆どが進学する中学校において、さらに巨大な緑のカーテン（幅 36m、高さ 15m）を設置し、LCT に基づく環境教育の繰返しによる理解の深まりと定着効果を狙った環境教育プログラムを実践してきた。

本報では、福井市内において小学校および中学校で 7 年間に渡って実践を行ってきた本環境教育プログラムの流れを紹介すると共に、これまでの実践過程や結果から得られた、LCT に基づく環境教育の可能性と今後の課題について述べる。

2. 実践

2.1 小学校における実践（2010～2016 年）

福井市内の A 小学校において実践してきた、LCT に基づく環境教育の実践記録を、図 1 に示す。2010 年 7 月に、最初の LCT に基づく環境教育用教材（雨水活用装置）を設置し、その後の 2012 年 6 月に二つ目の環境教育用教材（緑のカーテン）を設置して環境教育を行ってきた。

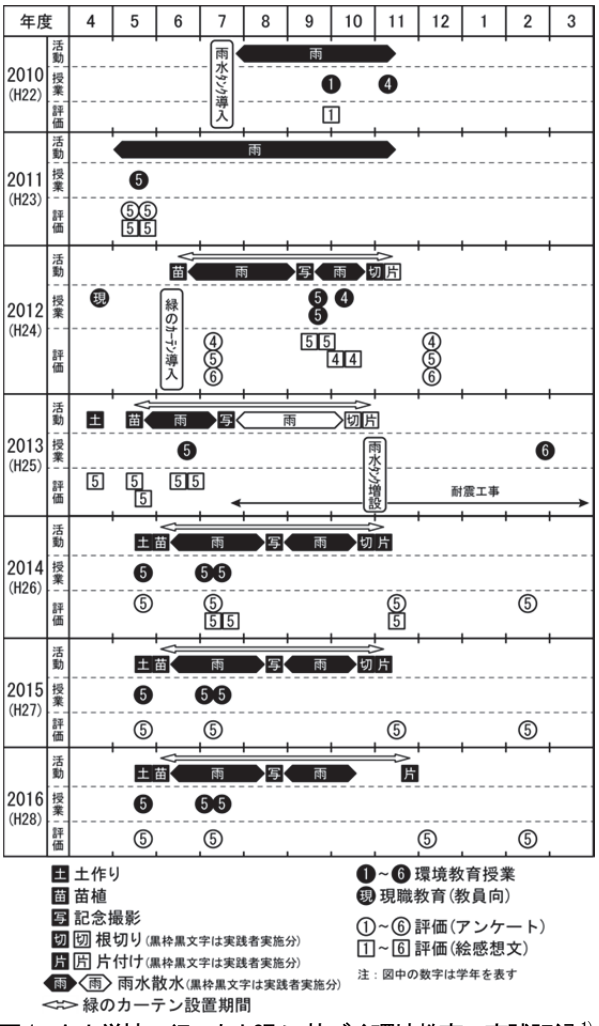


図 1　A 小学校で行った LCT に基づく環境教育の実践記録[1)]

小学校における実践の中で、特に 5 年目となる 2014 年度にはこの環境教育プログラムから派生したイベントや活動が実施できた。この年度を境に、雨水で育てる緑

のカーテンが小学校で毎年行う活動として定着すると同時に本環境教育プログラムの内容もほぼ確定した。その後は、同じプログラムを 3 年間繰返し、児童への質問紙調査や担任の先生方への聞取り調査等を行い、プログラムの評価を行った。

図 2　小学校の緑のカーテン（2016 年度）

2.2　中学校における実践（2014～2016 年）

福井市内の B 小学校において実践してきた、LCT に基づく環境教育の実践記録を、図 2 に示す。2014 年 7 月に環境教育用教材である緑のカーテンを設置後、A 小学校で実践を行ってきた LCT に基づく環境教育をベースとした中学生向けの環境教育プログラムを行ってきた。

中学校における実践では、校舎の配置や環境から緑のカーテンの育成に雨水利用はできなかった。また、学校行事やクラブ活動との時間の兼ね合いの関係から、小学校よりもシンプルなプログラム構成にする必要があった。また、小学生とは異なり活動への参加を促す上で様々な工夫が必要であると感じられる場面が多くあった。しかしながら、活動を始めると小学生とは異なった教育上の意義が感じられる場面も多々あり、プログラム実践上の工夫が今後も求められる。

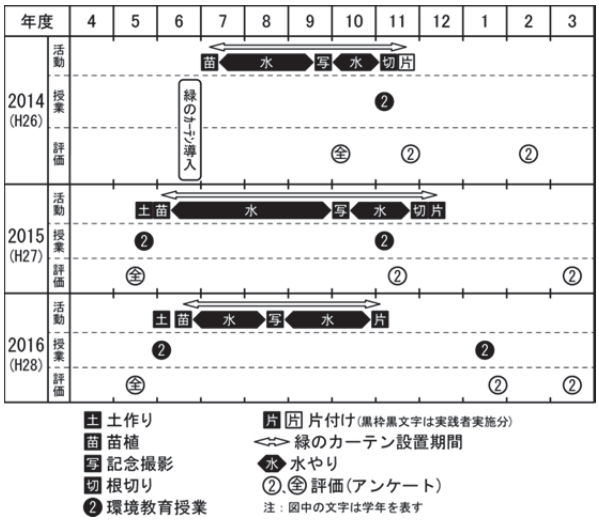


図 3　B 中学校で行った LCT に基づく環境教育の実践記録 [2)]

図 4　中学校の緑のカーテン（2016 年度）

3.　LCT に基づく環境教育の可能性と今後の課題

2010 年に開始以降、LCT に基づく環境教育を緑のカーテンという巨大な教材を使って比較的長期（7 年間）に渡って実施してきた。その過程で見えてきた LCT に基づく環境教育の可能性と今後の課題について、以下に述べる。児童、生徒に LCT の概念やその意義を伝える事については、小学生 5 年生以上であれば十分可能である事が分かった。また、小学校に緑のカーテンを定着させ、1 年次から育成活動への参加を意識させることや、中学校においても繰返し教育を行うことで、教育効果を高めると同時に LCT の考え方を定着させることができる事が分かった。一方、今後の課題として以下の事が挙げられる。これまで取り組んできた環境教育プログラムを広く実施するには、各学校内で実施できる体制を整えねばならない。

4.　おわりに

これまでの実践過程において様々な出来事があり、それらの振り返りから、環境教育の本質について考えてみた。人が環境保全に関する手段や方法を理解し、知識として身に付けてもそれを継続的に実行しなければ環境保全の観点から考えると全く意味の無いことになる。これらの知識を活かした環境保全活動を実行に移すためには、倫理的な考え方が必要になると思う。今後の方向性として、既に言葉としては存在するが、環境倫理学の観点からの考察や取り組みが重要になるのではないだろうか。

参考文献

1）笠井利浩，荒木史代(2015)：日本 LCA 学会誌，11(4)，pp.337-347
2）笠井利浩，荒木史代(2016)：日本 LCA 学会誌，12(4)，pp.273-284

【謝辞】本報告は、学術研究助成基金助成金「定量的要素を取り入れた新しい環境教育プログラムの開発（課題番号：24650542）および「実践分析を取り入れた新しい環境教育プログラム評価手法の開発（課題番号：26350248）」の研究成果報告の一部である。

高校生の主体的学びが地域の持続可能性に及ぼす効果
－愛媛県内子町におけるヒューマンソーシャルライフサイクル分析(その 2)

Effect of active learning of high school students to local sustainability
- The Human social life cycle analysis in Uchiko town (Part 2) -

○中口毅博*[1)]
Takahiro Nakaguchi
1) 芝浦工業大学
* nakaguti@sic.shibaura-it.ac.jp

１．はじめに

筆者は一昨年・昨年の発表において、環境学習の効果を測定するために、人間の一生に着目し長期的に評価する手法、すなわち人間そのものを対象とした HLCA(（ヒューマン・ライフサイクルアセスメント）を提唱した。

本研究では、HLCA の予備的検討の 2 回目として、愛媛県内子町の A 高校の総合学習の効果を検証することを目的とする。

２．研究の対象と方法

HLCA と地域の持続可能性指標の評価フレームを、図 1 と図 2 に示す。今回は愛媛県内子町

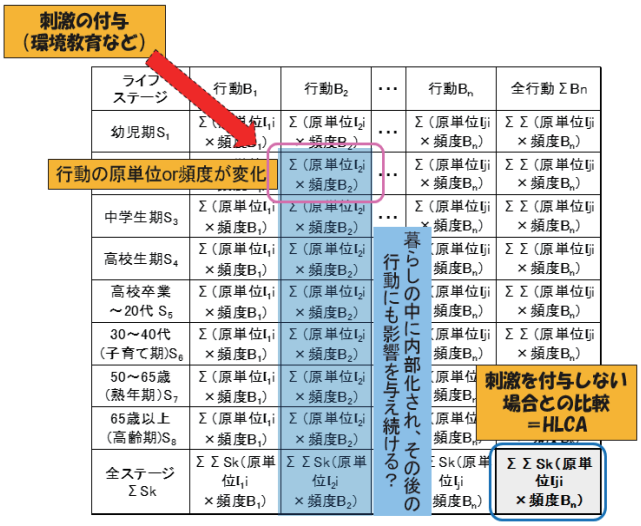


図 1　HLCA の評価フレーム [1)]

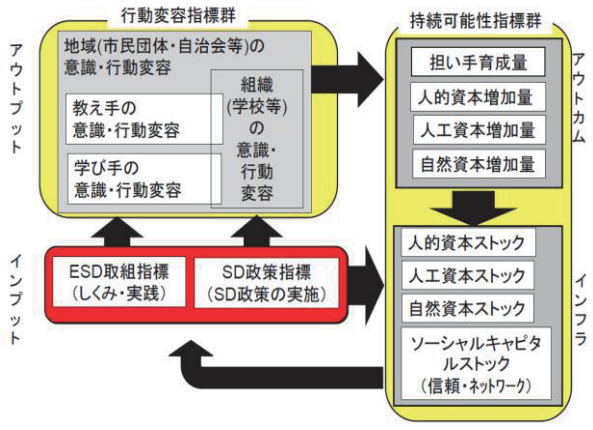


図 2　地域の持続可能性の評価フレーム [2)]

表 1　対象別の意識・行動調査項目と実施時期

指標項目	評価尺度	A高校 2年1・2組（生徒（1年、）	A高校 2年3組（生徒）	A高校 教員	B高校C高校（1年、2年生徒）	B高校C高校 教員	S高校 生徒（13歳）、教員、保護者
ESDの資質・能力	批判的に考える力	○	●○	○	○	○	
	予測して計画を立てる力	○	●○	○	○	○	
	多面的・総合的に考える力	○	●○	○	○	○	
	コミュニケーション力	○	●○	○	○	○	
	他者と協力する態度	○	●○	○	○	○	
	つながりを尊重する態度	○	●○	○	○	○	
	進んで参加する態度	○	●○	○	○	○	
基礎的スキル	他人の話を注意して聞く	○	●○	○	○	○	◇
	グループ作業に参加する	○	●○	○	○	○	◇
	問題を他の視点から判断する	○	●○	○	○	○	◇
	自主的に課題に取り組む	○	●○	○	○	○	◇
	環境・自然をいたわる	○	●○	○	○	○	◇
	メディアで見聞きしたことを考える	○	●○	○	○	○	◇
	他の人と考えを話す	○	●○	○	○	○	◇
	自分で決める	○	●○	○	○	○	◇
	新しいことを試みる	○	●○	○	○	○	◇
	書くことで自分の考えを良く説明できる	○	●○	○	○	○	◇
	口頭で、自分の考えを良く説明できる	○	●○	○	○	○	◇
	社会での経験を積んでいる	○	●○	○	○	○	◇
方針・信条	はっきりした目標をもっている	○	●○		○		◇
	社会のために役立つ生き方をする	○	●○		○		◇
	社会経験を積んでいる	○	●○		○		◇
	他人に負けないよう頑張るほうだ	○	●○		○		◇
	現状を受け入れるほうがよい	○	●○		○		◇
	今住んでいる場所で暮らしたい	○	●○		○		◇

調査時期　◇2013年　●2015年12月　○2016年3～4月

の A 高校を対象とする。本来は高校生の生涯を追うとともに地域の持続可能性への影響を評価すべきだが、今回は高校生期 S_4 に絞り、「学び手の意識・行動変容」の部分のみ評価する。

３．アンケート調査の概要

アンケート調査の対象別の意識・行動調査項目と実施時期を表 1 に示した。A 高校については、総合学習を問題解決型で実施した 2 年 3 組のみ 2 回アンケート調査を実施し、効果を比較できるようにした。また比較対象として、岡山市立 B 高校と、ユネスコスクールに認定され全校で ESD に取り組んでいる岡山県立 C 高校で同様の調査をした。さらにドイツ・フライブルク市の S 学校で中学 2 年生、教員、保護者を対象に 2013 年実施された調査を取りあげた。

質問の選択肢の数は 6 もしくは 4 であるが、ここでは評価の最も高い選択肢を 100 点に換算したうえで属性別に平均点を算出した。

４．結果

ここではESDの資質・能力と基礎的スキルの学校間比較結果とA高校の2時点の比較結果についてのみ紹介する。

4.1　ESDの資質・能力の比較

項目間で比較すると、3 校とも「他者と協力する態度」が最も評価が高い。一方「予測して計画を立てる力」の評価がおおむね低くなった。

3 校を比較すると、全体的に B 高校が高く、矢掛高校が低くなっている。C 高校生徒は自分に厳しいか、もしくはアンケート実施時期が新年度にずれ込んだため、学習の記憶が薄れたことが一因として考えられる。

4.2　基礎的スキルの比較

項目間で比較すると、日本の高校は 3 校とも「他人の話を注意して聞く」が最も評価が高いのに対し、ドイツ S 学校は中学 2 年生に相当するにもかかわらず「社会での経験を積んでいる」が最も高くなっている。また日本の高校は「社会での経験を積んでいる」の評価がおおむね低くなっているのに対し、ドイツ S 学校は「環境・自然をいたわる」が最も低くなった。

日本の 3 校を比較すると、4.1 と同様、後楽館高校が高く、矢掛高校が低くなっている。「環境・自然をいたわる」のみ、矢掛高校が最も高くなっている。ドイツのＳ学校とは「社会での経験を積んでいる」で大きな開きがある。

4.3　A高校総合学習の学習効果

問題解決型学習を実施した 2 年 3 組と、従来の体験型学習を行った 1･2 組についてESDの資質・能力を比較すると、2 学期終了時では 1･2 組と 3 組でほとんど差が無いのに対し、3 学期には 3 組はすべての項目で評価が飛躍的に向上しているのがわかる。3 学期には校外者を招いての発表会や、発表するための準備が行われていることから、問題解決型学習の効果は発表まで実施して初めて顕在化すると言える。

５．まとめと考察

本研究では、HLCA の予備的検討の 2 回目として内子町の A 高校の総合学習の効果をアンケートの結果によって把握したが、ESD に熱心な C 高校の自己評価が低かった。紙面では取り上げていないが、教員の評価のほうがより客観的であった。また、A 高校の 2 時点の比較では、発表まで実施して初めて効果がでていた。今後これらの生徒が大学生や社会人になった際のこれらの尺度の変化を把握し、さらには地域の持続可能性に及ぼす影響を指標により把握したい。

文　献

中口毅博・高杉悠那(2016)第 11 回日本ＬＣＡ学会研究発表会.

中口毅博(2016)第 15 回環境アセスメント学会論文報告集.

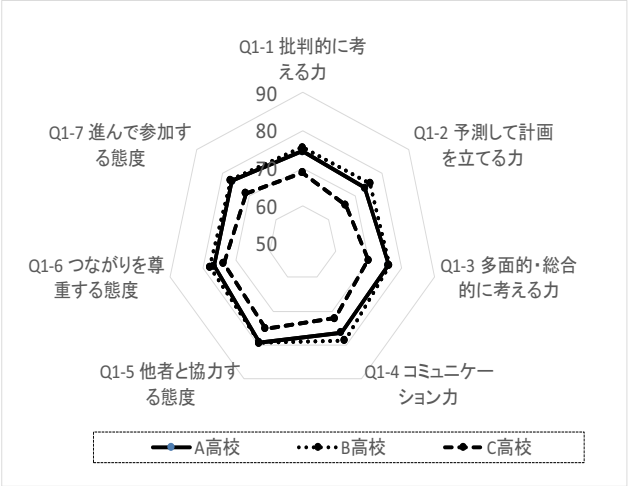


図 2　ESD の資質・能力の自己評価

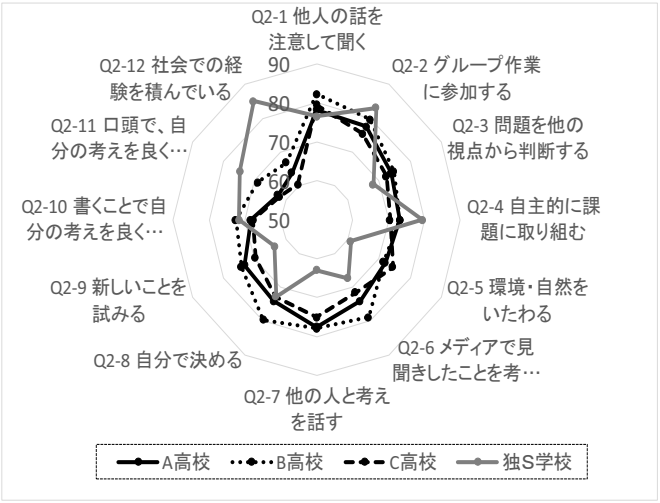


図 3　基礎的スキルの自己評価

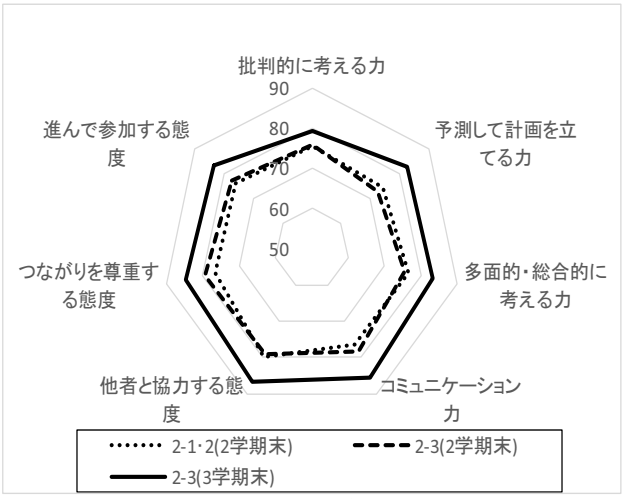


図 4　内子高校の ESD の資質・能力の変容

ライフサイクル思考に基づく環境教育実施による体系的な思考力に対する影響

Impact on systematic thinking caused by Environmental Education Based on Life Cycle Thinking

○森正敬之*[1)]、北村祐介 [2)]、伊坪徳宏 [1)]
Takayuki Morimasa, Yusuke Kitamura, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学, 2) elsa
* g1362127@tcu.ac.jp

1. はじめに

Life Cycle Thinking（以下 : ライフサイクル思考）は、製品等の資源の採掘から、素材や部品の製造、組立、使用、廃棄に至るまでの一生（ライフサイクル）を考えることを指す。物事を一面的にとらえるのではなく、多面的にとらえる能力が鍛えられるとともに製品等にはすべてつながりがあるという認識を高めることができると考えられる。

ESD （Education for Sustainable Development）は、地球に存在する人間を含めた命ある生物が、遠い未来までその営みを続けていくために、これらの課題を自らの問題として捉え、一人ひとりが自分にできることを考え、実践していくこと（think globally, act locally）を身につけ、課題解決につながる価値観や行動を生み出し、持続可能な社会を創造していくことを目指す学習や活動のことを指す。「学校における持続可能な発展のための教育（ESD）に関する研究[最終報告書]」では、ESD の視点に立った学習指導で重視する能力・態度として，7 つの能力・態度を抽出し設定した。ESD の重視する 7 つの能力・態度とは、1.批判する能力， 2.未来像を予測して計画を立てる能力,3.多面的、総合的に考える力,4.コミュニケーションを行う能力,5.他者と協力する態度,6.つながりを尊重する態度,7.進んで参加する能力である。

本研究では、ライフサイクル思考を学ぶことにより、ESD の重視する 7 つの能力・態度をもとにその能力を伸ばすことに寄与するか検証するために、ライフサイクル思考環境教育の実施と授業の前、講義後、グループワーク後のアンケート調査を通じて考察する。

2. 評価対象及び研究方法

研究対象は、東京都世田谷区にある東京都市大学等々力中学校にて 11 月 19 日（土）10:30~12:10 に行われたライフサイクル思考の授業を受ける中学 2 年生 199 名を対象とし、アンケート調査によって算定する。

対象となる授業は、講義とグループワークという構成となっている。調査方法は、授業前、講義が終わった後、グループワークが終わった後の計 3 回行い、属性と ESD の重視する 7 つの能力・態度について問う。

表 1 授業内容

	内容
賽子の例	賽子の面の合計を予想してもらい、多面的に考える方法の紹介。
定義の説明	ライフサイクル思考等の定義の説明。
野菜の例	野菜のライフサイクルの説明と地産地消に触れることで輸送段階の話に触れる。
携帯電話の例	携帯電話のライフサイクルの紹介から都市鉱山や紛争鉱物等紹介を行う。見えない部分も考えるという一環で児童労働の問題にも触れる。
グループワーク	携帯電話をもとにグループの中で「児童労働者」「メーカー」「消費者」の 3 チームに分かれディスカッションを行う。

講義は主に 3.多面的、総合的に考える力、6.つながりを尊重する態度が伸び、グループワークではすべての能力に効果があるという仮説立てた。

それぞれの能力の相関をとるために、2 つの量的変数の間の直接的関係の程度を表す指標であるピアソンの積率相関係数（式①）を扱い算定する。

$$r = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Xi-\overline{X})(Yi-\overline{Y})}{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Xi-\overline{X})^2}\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Yi-\overline{Y})^2}} \quad \cdots ①$$

3. 結果

今回の被験者すべてのアンケート結果を平均化し比較したものを図 1 に示す。全ての項目のスコアが上昇したことを確認した。

講義よりグループワークでの影響がより大きくでたことから、学びの成果をコミュニケーションを通じてアウトプットすることが生徒の充実度を高めることにつながるものと推察される。多面的に考える力、つながりを尊重する態度が事前～最後で約 30%の増加率がみられる。講義では、多面的に考える力とつながりを尊重する態度が上昇すると考えたが、批判する能力

も同様に伸びていた。批判する能力が上昇する理由として挙げられるのは、賽子を使った例で表面だけだは考えずに多面的に見ることが大切という講義の際に、疑って物事をみるということを指導したことが寄与していると考えられる。また、「未来像を予測して計画を立てる能力」が相対的に増加率が低かった。

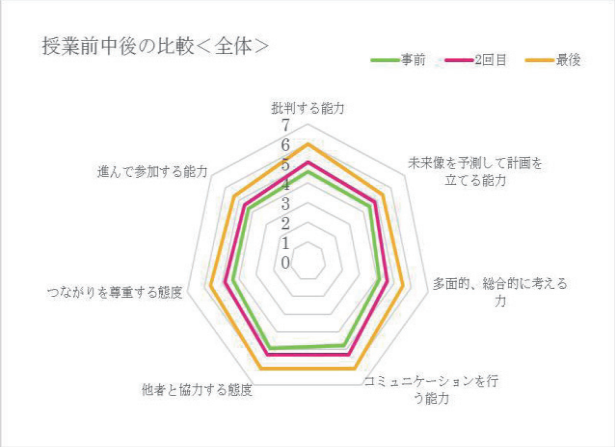


図 1 授業の前中後での比較＜全体＞

男女のアンケート結果を平均化し比較したものを図 2,3 に示す。

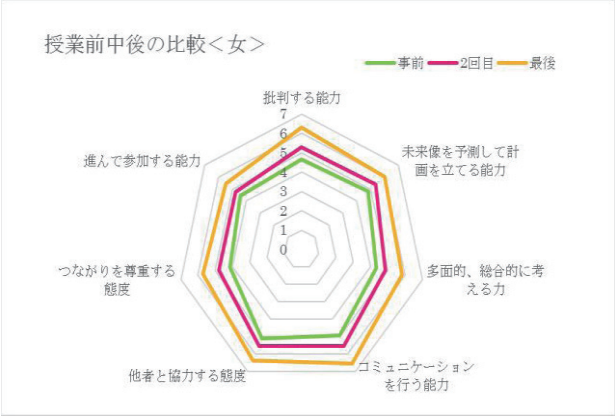


図 2 授業の前中後での比較＜女＞

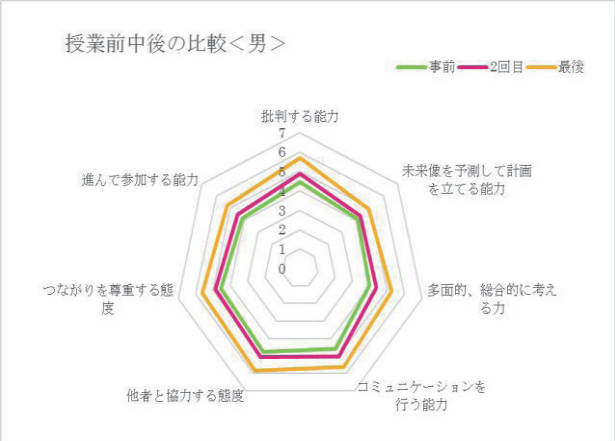


図 3 授業の前中後での比較＜男＞

男女のアンケート結果を平均化し比較したものを図 2,3 に示す。全体的に女子生徒の方がもともとの能力値が高く出ている。また、講義やグループワークに対しての影響も能力の増加率として女子生徒の方が大きく出ている。どちらの性別も講義よりグループワークの影響が大きく出ている。事前～2 回目においてつながりを尊重する態度が男子生徒より女子生徒の方が 15%多く増加している。男子生徒に関して、講義、グループワークともにライフサイクル思考が影響すると考えられる多面的な能力が一番伸びており、次に批判する能力が伸びている。コミュニケーションを行う能力がほかの能力に比べ、増加率が低くなっている。今回、グループワークにおいてコミュニケーションを行う能力で影響が出ると考えられたが、今回の結果から男子生徒に関してはグループワークで大いなる上昇傾向がみられず、今回の授業の課題として挙げられる。

図 4 に関して r≧0.7 にハッチをかけて表示した。全体でみると「多面的、総合的に考える力」と「批判する能力」、「つながりを尊重する態度」の相関が取れていることがわかる。ライフサイクル思考を学ぶことによって生まれる「多面的、総合的に考える力」と「つながりを尊重する態度」と同時に「批判する能力」が伴ってくることが今回の結果から推察される。

表 2　7 つの能力の相関＜全体＞

	＜全体＞						
	批判する能	未来像を予	多面的、総	コミュニケ	他者と協力	つながりを	進んで参加する能力
批判する能力	1	0.66717	0.758141	0.668071	0.484186	0.656671	0.520662101
未来像を予測して計画を立てる能力		1	0.617022	0.606517	0.623947	0.595537	0.625513685
多面的、総合的に考える力			1	0.696769	0.527441	0.719228	0.481546253
コミュニケーションを行う能力				1	0.680944	0.659722	0.569211539
他者と協力する態度					1	0.580411	0.635846416
つながりを尊重する態度						1	0.599938201
進んで参加する能力							1

4. まとめ

本研究では、東京都市大学等々力中学校において elsa によるライフサイクル思考の授業を対象にアンケート調査及び分析を行った。授業前、講義後、グループワーク終了後の計 3 回でアンケートを取った結果、男女ともに ESD で重視する能力・態度である 7 つの能力ですべて上昇傾向にあることが分かった。単純集計や単回帰分析の結果から、ライフサイクル思考の授業は、「批判する能力」「多面的、総合的に考える力」「つながりを尊重する態度」に上昇傾向で影響を与えることが推察される。

5. 参考文献

1) 国立教育政策研究所: “学校における持続可能な発展のための教育（ESD）に関する研究[最終報告書]”, (2012)

2)日本 LCA 学会環境教育研究会: “ライフサイクル思考に基づいた環境教育のすすめ”, (2013)

交雑種および乳用種を用いた肉用牛生産の温室効果ガス排出量

Life cycle greenhouse gas emissions from beef production systems using crossbred or dairy-breed cattle in Japan

○荻野暁史*、山下恭広、長田隆
Akifumi Ogino, Takahiro Yamashita, Takashi Osada
農研機構 畜産研究部門
*aogino@affrc.go.jp

1. はじめに

農業・食品においても環境調和型の生産が求められるようになり、それは畜産でも例外ではない。肉牛生産は畜産の中でも環境影響が大きいことが知られており [1]、その低減が求められている。肉牛生産においては、肥育だけでなく、母牛を飼養して子牛を生産する繁殖ステージの割合も比較的高いことが報告されている [2]。従って、子牛生産の環境負荷を減らすことは肉牛生産全体の環境影響の削減につながる。

一方、肉用牛生産では、黒毛和種等の肉用種を用いる他、酪農の副産物である余剰子牛を用いた肥育が行われてきた。乳用種の子牛に加え、高い販売価格を見込んで近年では乳用種の雌に肉用種の雄を交配して得られる交雑種の子牛の利用も増加している。乳用種あるいは交雑種の子牛を用いる場合、子牛生産過程の環境負荷を酪農と共有するため、子牛生産における環境影響を削減できると考えられる。しかし、肉用種を用いた肉牛生産の環境影響は調べられているが、交雑種や乳用種を用いた肉牛生産システムの環境影響はまだ調べられていない。品種や子牛生産方法の環境影響に及ぼす効果を明らかにすることは、肉牛生産の環境影響を正確に把握し、環境影響の小さい生産システムを検討する上で重要である。

そこで、本研究では肉用種、交雑種、乳用種を用いた肉牛生産システムの LCA を行い、各システムの温室効果ガス (GHG)を比較した。

2. 方法

2.1 評価対象システム

肉用種、交雑種、乳用種を用いた肉牛生産システムをそれぞれ肉用種システム、交雑種システム、乳用種システムとする。肉用種システムでは日本の代表的な肉用種である黒毛和種、乳用種システムでは代表的な乳用種であるホルスタイン、そして交雑種システムではホルスタイン種の雌に黒毛和種の雄を交配した交雑種を用いた。図 1 に今回解析対象とした肉牛生産システムを示した。肉用種、交雑種、乳用種システムの出荷月齢は、それぞれ 29 ヶ月、26.6 ヶ月、22 ヶ月である。またそれぞれの出荷体重は、735kg、797kg、760kg である。肉用種システムでは、子牛は母牛を飼養して子牛を産ませる繁殖生産から供給される。一方、交雑種および乳用種システムでは、子牛は酪農生産の副産物として生産され、産まれて間もない初生牛として肉牛農家に導入される。肥育プロセスでは、いずれのシステムでも敷料を用いた舎飼いとし、ふん尿は堆積型堆肥化 (堆積発酵)により処理するものとした。機能単位は、出荷生体重 (LW)1kg あたりとした。

2.2 インベントリ分析

交雑種および肉用種システムの環境負荷の算出は、著者らが以前に開発した肉牛 LCA モデルを用いて行った [2,3]。ただし、飼料生産および輸送は改良版のデータを用いた [4]。肉用種に関しては、既報の結果 [2,3]を基に、飼料生産・輸送については前述のデータを用いて再計算した。

交雑種および乳用種システムにおける導入時の子牛の環境負荷は、我が国における酪農 LCA の結果 [5]から、主産物である生乳および他の副産物である廃用牛との間で生物学的アロケーションを行うことで求めた [6]。用いた式は以下のとおりである。

$$AF_{calf} = 6.04 \times (M_{meat} / M_{milk})$$

M_{meat}: 子牛の体重の合計、M_{milk}: 脂肪補正乳量

3. 結果と考察

肉用種、交雑種、乳用種システムの温室効果ガス排出量は、それぞれ 15.4、9.4、8.6kgCO_2e/kg-LW であった (図 2)。子牛生産/繁殖ステージから排出される GHG の全体の GHG 排出量に対する割合をみてみると、肉用種が 45%であるのに対し、交雑種と乳用種はそれぞれ 23%および 27%であった。交雑種および乳用種システムでは、酪農の副産物であるそれぞれの品種の子牛を用いることで、子牛生産からの GHG が大きく低減していたと考えられた。

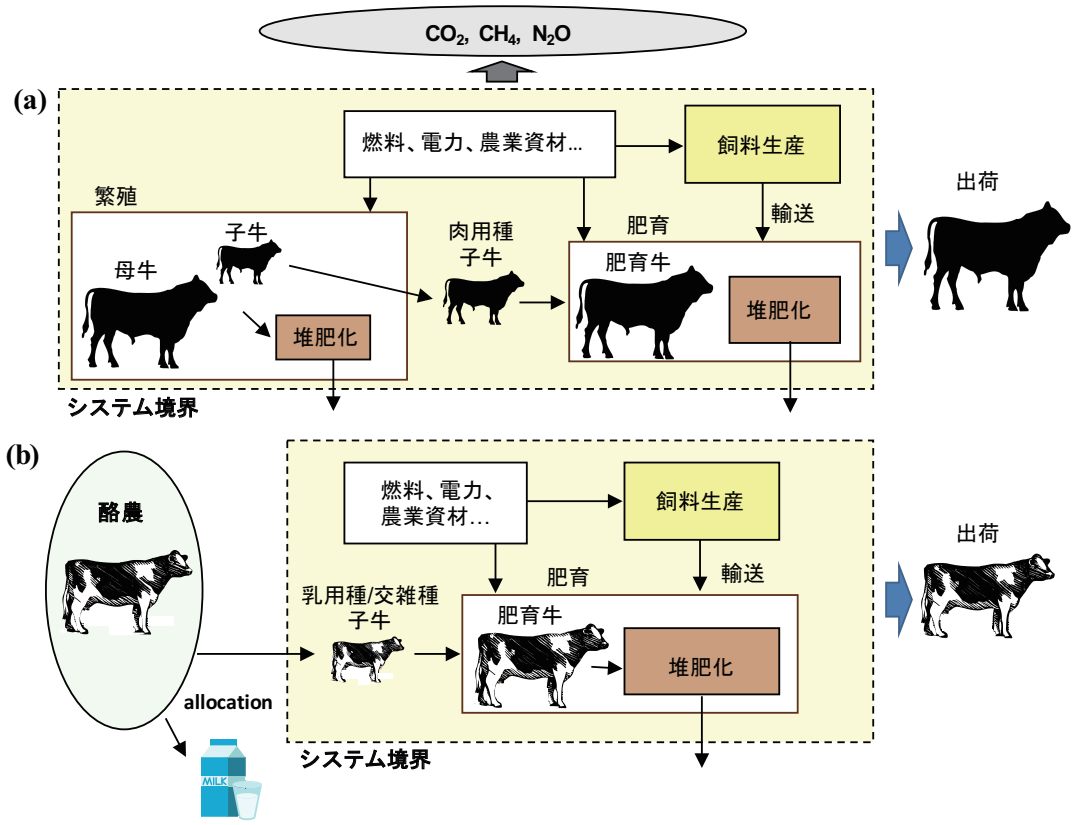


図1. 今回解析した肉用牛生産システム (a)肉用種、(b)交雑種または乳用種

また肥育ステージについても、交雑種および乳用種の GHG 排出量が肉用種と比べて小さかった。交雑種と乳用種では、出荷月齢を早めることで飼養期間が短くなっており、一方出荷体重は逆に大きくなっていることから、出荷生体重あたりの GHG 排出量が小さくなったものと考えられた。GHG 排出量の内訳をみてみると、いずれのシステムでもウシの消化管由来のメタンの寄与が最も大きかった。ただし、生産された牛肉の価格は一般的に肉用種が最も高く、交雑種、乳用種の順になっており、経済価値が同等でないことには注意が必要である。

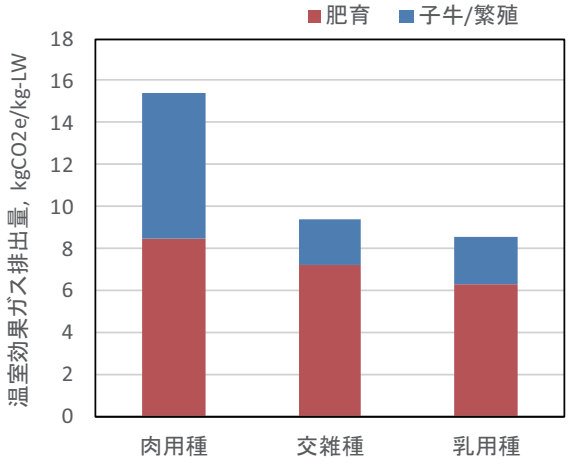


図2. 様々な品種を用いた肉用牛生産システムの温室効果ガス排出量

4. まとめ

我が国の肉用種、交雑種、乳用種を用いた肉牛生産システムの LCA を行い、各システムの GHG 排出量を比較した。その結果、GHG 排出量はそれぞれ 15.4、9.4、8.6kgCO_2e/kg-LW であった。交雑種および乳用種システムでは、酪農の副産物であるそれぞれの品種の子牛を用いることで、子牛生産からの GHG が大きく低減していた。

5. 引用文献

1) de Vries M., de Boer IJM.: Livestock Science, 128 (1-2), (2010), pp.1-11

2) Ogino A., Kaku K., Osada T., Shimada K.: J. Anim. Sci, 82 (7), (2004), pp.2115-2122

3) Ogino A, Orito H, Shimada K, Hirooka H.: Anim. Sci. J. 78(4), (2007), pp.424-432

4) Ogino A, Ishida M, Ishikawa T, Ikeguchi A, Waki M, Yokoyama H, Tanaka Y, Hirooka H.: Anim. Sci. J. 79, (2008), pp.727-736.

5) Ogino A, Osada T, Takada R, Takagi T, Tsujimoto s, Tonoue T, Matsui D, Katsumata M, Yamashita T, Tanaka Y.: Soil Sci. Plant Nutr. 59(1), (2013), pp.107-118.

6) IDF. A common carbon footprint approach for the dairy sector. International Dairy Federation. Brussels, Belgium. (2015)

有機的管理による国産グラスフェッドビーフの環境影響評価

Life Cycle Impact Assessment of Organic Grass-fed Beef Production in Japan

○堤　道生*[1)]、小野　泰[2)]、小笠原英毅[2)]、寶示戸雅之[2)]
Michio Tsutsumi, Yutaka Ono, Hideki Ogasawara, Masayuki Hojito
1) 農研機構, 2) 北里大学
* mcot@affrc.go.jp

1. はじめに

一般に、畜産における環境影響は植物由来の食物生産よりも大きく[1)]、中でも牛肉が最大の環境影響を持つとされている[2)]。一方、わが国を含む各国の肉用牛生産システムの環境影響を比較した例がいくつかある[3-6)]。これらの結果を総括すると、わが国の慣行肉用牛生産システムは、GHG 排出量がやや多いか各国と同水準にあるものの、極めて高い水準のエネルギーを消費している。この要因として、給与される濃厚飼料の多くを輸入に依存していることが挙げられる[4,6)]。

北里大学獣医学部附属フィールドサイエンスセンター八雲牧場では 1994 年から場内産の飼料のみによる肉用牛生産が行われており、北里八雲牛として出荷されている（2004 年に商標登録）。2003 年、2005 年に農薬および化成肥料の施用が順次中止され、その後、有機畜産物 JAS 認証を受けている。

北里八雲牛には牧場内で生産された飼料のみが給与されていることから、輸入飼料が使用される慣行生産と比較して環境影響が低減されていることが期待できる。既報において、Hojito ら[7)]は八雲牧場における有機的管理システムを窒素フローの面から評価し、持続可能であることを示している。一方、de Vries ら[8)]は、グラスフェッドを含む粗飼料多給の肉用牛生産システムは、濃厚飼料多給（わが国の慣行はこれにあたる）システムと比較して、GHG 排出量とエネルギー消費の値が高い傾向にあることを指摘している。また、彼らは有機肉用牛生産システムでは GHG 排出量およびエネルギー消費が非有機システムと比較して低減されるものの、酸性化および富栄養化ポテンシャルが上昇すると論じている。

本研究では、有機的管理導入前後の北里八雲牛生産システムおよび慣行肉用牛生産システムの環境影響評価を行い、これらの結果を比較した。

2. 方法

2.1 評価対象

八雲牧場における去勢雄牛（日本短角種および短角系雑種）生産について、有機的管理導入以前（1997-2004 年；非有機）および以後（2006-2013 年；有機）のそれぞれを評価の対象とした。また、北里八雲牛と出荷体重の近い褐毛和種去勢雄牛の慣行生産を比較の対象とした。

機能単位は枝肉重量 1 kg とした。システム境界は、飼料の生産・加工・輸送、家畜管理、消化管活動、排泄物およびその処理を含むものと定義した。

2.2 インベントリ分析および影響評価

インベントリ分析の対象は、CO_2、CH_4、N_2O、NH_3、NO_2、NO_x、SO_2、SO_x の排出量およびエネルギー消費とした。インベントリ作成には LCA システム MiLCA ver.1.1 を使用し、LCI データベース IDEAver.1.1 を参照した。

飼養管理、体重曲線、飼料生産、飼料成分および繁殖成績などのデータについては、実測値および文献値を用いた（表 S1 と S2）。飼料生産にともなう土壌からの環境負荷物質排出については表 S3 に示す既存の研究を参照した。飼料の輸入先はすべてアメリカ合衆国とした。副産物飼料については、主産物との価格比に基づいて環境影響を按分した。重量あたりの環境影響の比率は、モミ米 25 に対し稲ワラ 2、小麦粉 81 に対しフスマ 19、大豆油 72 に対し大豆粕 28 とした。舎内での家畜管理、消化管活動、排泄物および堆肥化（堆積発酵）過程における環境影響は表 S4 に示す文献に従って計算した。

影響評価項目は GHG 排出量（100 年指数）、酸性化ポテンシャル（AP）、富栄養化ポテンシャル（EP）、エネルギー消費とした。

3. 結果と考察

3.1 GHG 排出量

GHG 排出量は非有機、慣行、有機の順に多かった（図 1a）。3 システムに共通して消化管活動の寄与が最大であったが、それに次ぐプロセスはシステム間で異なっていた。慣行では濃厚飼料生産の寄与が 2 番目に大きく、飼料輸送の寄与もこれと同等であった。非有機の家畜管理、消化管活動、排泄物（堆肥化を含む）の各プロセスにおける GHG 排出量は有機と同等であったが、飼料生産において差が見られ、これが全体の差に反映されていた。また、この差は化学肥料の生産工程における CO_2 の排出から生じていた。

3.2 AP および EP

AP は慣行で最大であり有機および非有機の 3 倍前後の値を示した（図 1b）。慣行では飼料輸送の寄与が大きく、排泄物と濃厚飼料生産がこれに続いた。有機および非有機では排泄物の寄与が最大であった。飼料生産で生じる AP は有機＜非有機であったが、排泄物では有機＞非有機であり、その結果全体では有機＞非有機となっていた。有機的管理導入後の八雲牧場では、それ以前と比較して、肥育期間が長期化されている。これにより排泄物由来の NH_3 が増大していた。したがって、AP が有機＞非有機となった主因は、「有機的管理の導入」ではなく「肥育期間の長期化」であると考えられる。

EP に関する結果は AP と類似していた（図 1c）。慣行の EP は有機および非有機の 2 倍前後の値であった。3 システムにおける各プロセスの寄与は、AP と同様であった。EP についても有機＞非有機となっており、その主因は上述の AP と同一と考えられる。

3.3 エネルギー消費

エネルギー消費は慣行で最大であり、非有機の 2 倍、有機の 8 倍に近かった（図 1d）。慣行では濃厚飼料生産で最大のエネルギーが消費されていたが、飼料輸送もこれに匹敵した。有機および非有機ともに飼料生産の寄与が最大であった。非有機の飼料生産プロセスにおけるエネルギー消費は有機の 3 倍以上であった。このことは、前述の GHG 排出量と同様に、化学肥料使用の有無に起因していた。

4. おわりに

自家産牧草のみの給与で生産したグラスフェッドビーフは、慣行と比較して酸性化および富栄養化ポテンシャル、エネルギー消費が大幅に低減されることが明らかとなった。一方、非有機では GHG 排出量が慣行を上回っていたが、有機では GHG 排出量が慣行をやや下回るとともに、さらにエネルギー消費が低減されていた。このように、八雲牧場における有機的管理を導入したグラスフェッドビーフ生産は、環境影響の面から好ましいことが示された。

5. 引用文献

1) Schmidinger K., Stehfest E.: Int. J. LCA, 17 (8), (2012), pp 962-972
2) de Vries M., de Boer I.J.M.: Livest. Sci., 128 (1-3), (2010), pp 1-11
3) Nguyen T.L.T., Hermansen J.E., Mogensen L.: J. Clean. Prod., 18 (8), (2010), pp 756-766
4) Peters G.M., Rowley H.V., Wiedemann S., Tucker R., Short M.D., Schulz M.: Environ. Sci. Technol., 44 (4), (2010), pp 1327-1332
5) Stackhouse-Lawson K.R., Rotz C.A., Oltjen J.W., Mitloehner F.M.: J. Anim. Sci., 90 (12), (2012), pp 4641-4655
6) Ogino A., Sommart K., Subepang S., Mitsumori M., Hayashi K., Yamashita T., Tanaka Y.: J. Clean. Prod., 112 (1), (2016), pp 22-31
7) Hojito M., Adachi Y., Ono Y., Ogasawara H.: Soil Sci. Plant Nutr., 62 (5-6), (2016), pp 545-552
8) de Vries M., van Middelaar C.E., de Boer I.J.M.: Livest. Sci., 178, (2015), pp 279-288

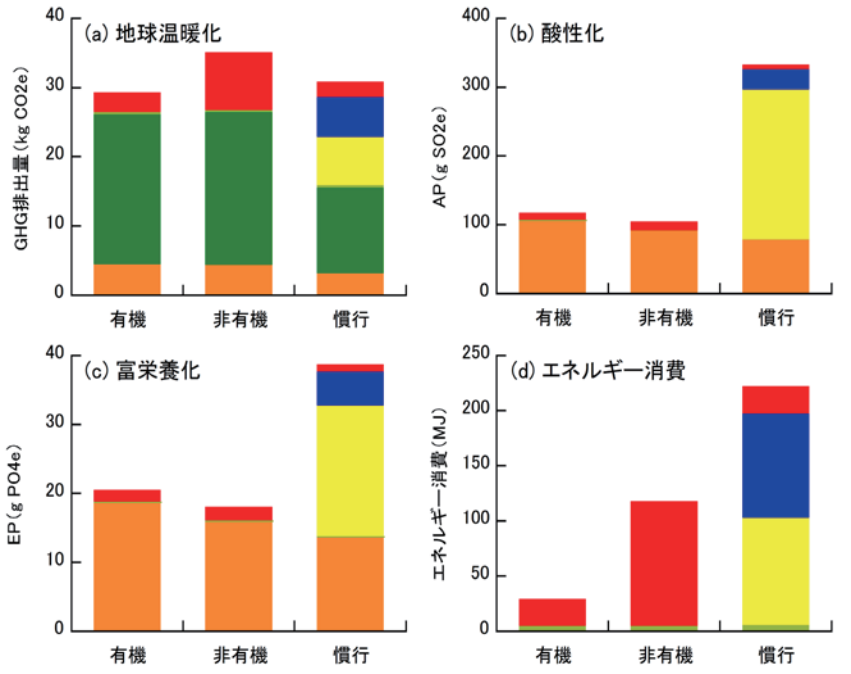


図 1　北里八雲牛（有機・非有機）および慣行肉用牛生産システムにおける枝肉 1 kg あたりの環境影響

- ：粗飼料生産
- ：濃厚飼料生産
- ：飼料輸送
- ：家畜管理
- ：消化管活動,
- ：排泄物および堆肥化処理

Supporting Information

表S1　北里八雲牛（有機・非有機）および慣行肉用牛生産システムに関する基礎データ

	北里八雲牛		慣行生産†
	有機	非有機	
全牛群			
年あたり放牧日数	168	168	0
肥育素牛生産			
初産日齢	779	779	757
分娩間隔（日）	395	395	417
繁殖雌牛1頭あたり分娩回数	7	9	9
授乳期間（月）	6	6	3
肥育牛			
日増体量（kg）	0.63	0.65	0.95
と畜時日齢	1089	885	761
と畜時体重（kg）	724	615	722
枝肉重量（kg）	410	339	465

†S1-3を参照した.

表S2　北里八雲牛（有機・非有機）および慣行肉用牛生産システムにおける飼料構成（肥育素牛生産～肥育を含む合計）とその生産・加工についてのインベントリ作成に際して参照した文献

	北里八雲牛		慣行生産	文献
	有機	非有機		
八雲牧場産飼料†				
牧草（放牧地）	6785	5931		S6
牧草（採草地）	8157	6719		S6
その他国産飼料‡				
イタリアンライグラス乾草			2266	S6
稲ワラ			1437	S6
野乾草			515	S6
輸入飼料‡				
チモシー乾草			569	S7
トウモロコシ			3098	S8
アルファルファ乾草			956	S7
大豆粕			833	S9
フスマ			1330	S7, S10

†kg DM．採食量はS4に従って推定．機械作業に関するデータのみ文献値を使用.
‡kg．飼料の品質についてはS5を参照した.

表S3　飼料生産における土壌からの環境負荷物質の排出係数および参照した文献

	単位	排出係数	文献
国内			
水田			
NH_3	% N-NH_3	8.1	S11
N_2O	% N-N_2O	0.31	S12
CH_4	kg CH_4/ha/yr	439.0	S12
水田以外			
NH_3（化学肥料由来）	% N-NH_3	0.08	S13
NH_3（堆肥由来）	% N-NH_3	0.8	S14
N_2O（化学肥料由来）	% N-N_2O	1.39	S15
N_2O（堆肥由来）	% N-N_2O	0.46	S15
国外			
NH_3	% N-NH_3	8.1	S16
N_2O	% N-N_2O	1	S17

表S4　消化管活動，排泄物および堆肥化処理過程における環境負荷物質の排出係数あるいは推定式および参照した文献

排出源	単位	排出係数あるいは推定式†	文献
舎内での家畜管理			S18
消化管活動†			
CH_4（5ヵ月齢まで）	g/day	$-1.2 + 3.4 \times W$	S19
CH_4（上記以外）	L/day	$-17.766 + 42.793 \times DMI - 0.849 \times DMI^2$	S20
排泄物および堆肥化処理‡			
CH_4（放牧）	kg	$VS \times 0.095\%$	S12
CH_4（舎内）	kg	$VS \times 0.13\%$	S12
NH_3（放牧）	% N-NH_3	3.8	S21
NH_3（舎内）	% N-NH_3	8.77	S22, S23
N_2O（放牧）	% N-N_2O	0.684	S12
N_2O（舎内）	% N-N_2O	1.6	S12

†W：週齢，DMI：日あたり乾物摂取量（kg）．
‡VS：排泄物中有機物（kg）．VSはS17に従って推定．N排泄量はS24に従って推定．

引用文献

S1) 家畜改良センター: “家畜改良センター”, （オンライン）, 入手先 <http://www.nlbc.go.jp/>, （参照 2016-12-27）
S2) 熊本県: 熊本県酪農・肉用牛生産近代化計画書, (2011)
S3) 日本あか牛登録協会: “日本あか牛登録協会”, （オンライン）, 入手先 <http://www.akaushi.or.jp/>, （参照 2016-12-27）
S4) 農業・食品産業技術総合研究機構: “日本飼養標準・肉用牛（2008 年版）”, 中央畜産会, 東京, (2009), pp 55-153
S5) 農業・食品産業技術総合研究機構: “日本標準飼料成分表（2009 年版）”, 中央畜産会, 東京, (2010), pp 74-155
S6) 農業環境技術研究所: 環境影響評価のためのライフサイクルアセスメント手法の開発, (2003)
S7) Pelletier N., Pirog R., Rasmussen R.: Agric. Syst., 103 (6), (2010), pp 380-389
S8) Kim S.D., Dale B.E., Keck P.: BioEnerg. Res., 7 (2), (2014), pp 753-764
S9) Pradhan A., Shrestha D.S., McAloon A., Yee W., Haas M., Duffield J.A.: Trans. ASABE, 54 (3), (2011), pp 1031-1039
S10) 小林久, 柚山義人: 環境情報科学, 35(3), (2006), pp 45-53
S11) Hayashi K., Nishimura S., Yagi K.: Sci. Total Environ., 390 (2-3), (2008), pp 485-494
S12) 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, (2016), pp 5-1-5-58
S13) Hayashi K., Koga N., Fueki N. :Agric. Ecosyst. Environ., 140 (3-4), (2011), pp 534-538
S14) Hayashi K., Koga N., Yanai Y.: Atmos. Environ., 43 (35), (2009), pp 5702-5707
S15) Shimizu M., Hatano R., Arita T., Kouda Y., Mori A., Matsuura S., Niimi M., Jin T., Desyatkin A.R., Kawamura O., Hojito M., Miyata A.: Soil Sci. Plant Nutr., 59 (1), (2013), pp 69-86
S16) European Environment Agency: EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2013, (2013)
S17) Intergovernmental Panel on Climate Change: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, (2006)
S18) 農林水産技術情報協会: 平成 11 年度エネルギー管理型農業生産システム開発調査委託事業報告書, (2000), pp 95-116
S19) 関根純二郎, 近藤誠司, 大久保正彦, 朝日田康司: 日畜会報, 57 (4), (1986), pp 300-304
S20) Shibata M., Terada F., Kurihara M., Nishida T., Iwasaki K.: Anim. Sci. Technol., 64 (8), (1993), pp 790-796
S21) Bouwman A.F., Boumans L.J.M., Batjes N.H.: Glob. Biogeochem. Cycles, 16 (2), (2002), pp 8-1-8-14
S22) Groot Koerkamp P.W.G., Metz J.H.M., Uenk G.H., Phillips V.R., Holden M.R., Sneath R.W., Short J.L., White R.P.P., Hartung J., Seedorf J., Schröder M., Linkert K.H., Pedersen S., Takai H., Johnsen J.O., Wathes C.M.: J. Agric. Eng. Res., 70 (1), (1998), pp 79-95
S23) 白石誠, 長田隆, 滝本英二, 脇本進行, 北村直起, 奥田宏健: 岡山総畜セ研報, 15, (2004), pp 70-75
S24) 寺田文典, 阿部啓之, 西田武弘, 柴田正貴: 日畜会報: 69 (7), (1998), pp 697-701

日本の漁業部門の環境生産性分析

Environmental Efficiency Analysis of Fishery Sector in Japan

○敷田和哉*1)、加河茂美 1)
Kazuya Shikita, Shigemi Kagawa
1) 九州大学　経済学部
* kztgtng@gmail.com

1. はじめに

日本の漁業生産量は 1984 年をピークに減少を続けている（水産庁、2014）。この主な要因としては、遠洋漁業と沖合漁業の衰退が挙げられる（水産庁、2014）。これらの漁業においては、各国が排他的経済水域を設定し自由公海漁場が縮小したことと、石油価格の高騰による採算の悪化が背景にある。

こうした状況の中で、日本の漁業の効率性が先進国の中でも低いことが指摘されている（八木・馬奈木、2010）。この研究では、修正 Johansen モデルを基に、日本における漁業全体の生産性分析を行ったうえで、漁獲枠の適切な配分を通しての産業全体の効率化のポテンシャルを評価している。結果として、日本の漁業生産効率性は非常に低く、生産性向上の大きなポテンシャルを有していることが示唆されている。

本研究では日本の、東日本大震災の影響で試験操業中の福島県と内陸 8 県を除く 38 都道府県（以下、Decision Making Units: DMU）における海面漁業の生産効率性分析を行う。先行研究（八木・馬奈木、2010）では、環境負荷を考慮したものが無かったため、そこに環境負荷を考慮することで、生産効率的かつ環境負荷の少ない漁業を行っている DMU を抽出すると共に、それ以外の都道府県の投入の削減ポテンシャルを評価する。

2. 分析手法

本研究では、複数の投入要素と産出要素を考慮しながら、評価対象の効率性を分析することが可能である、データ包絡分析法（Data Envelopment Analysis: DEA）を用いて分析を行った。投入要素として漁船数、漁業就業者数、エネルギー消費量を、産出要素として 5 分類した漁獲量を考慮し、少ない投入で多くの産出をもたらしている効率的な DMU を識別する。本研究における環境負荷はエネルギー消費量で評価し、これを削減することで CO_2 の排出量を削減し、環境負荷が少なくなるものとした。

いくつか DEA モデル式が存在するが、今回は産出である漁獲量は変化させずに、投入である、漁船数、漁業就業者数、エネルギー消費量をどれだけ抑えることができるかを分析するために CCR（Charnes-Cooper-Rhodes）モデルを用いることにした。(1)式がそのモデルである。

$$\begin{aligned} &\min \quad \theta_J \\ &s.t.\ \theta_J x_{iJ} - \sum_{j=1}^{38} \lambda_j x_{ij} \geq 0 \ (i = 1,2,\dots 3) \\ &y_{rJ} - \sum_{j=1}^{38} \lambda_j y_{rj} \leq 0 \ (r = 1,2,\dots 5) \\ &\lambda_j \geq 0 \ (j = 1,2,\dots 38) \end{aligned} \qquad (1)$$

ここで、θ_J は各 DMU の効率値であり、$\theta_J = 1$ のとき効率的とされ、それ以外（$0 \leq \theta_J < 1$）は非効率的とされる。本研究では DMU の数は 38 であるため、1≦J≦38 である。λ_j は変数ベクトルであり、非効率な DMU を効率的にするための指標である。x_{ij} は j 番目の DMU の投入要素 i の投入データを、y_{rj} は j 番目の DMU の産出要素 r の産出データを表し、投入要素は漁船数、漁業就業者数、エネルギー消費量の 3 投入であるため、1≦i≦3 である。また、産出は魚類、甲殻類、いか・たこ類、海藻類、貝類の 5 産出要素の漁獲量であるため、1≦r≦5 である。また、各 DMU の規模を考慮した効率性分析を行うために収穫可変モデルを用いた。(2)式の制約条件を(1)式に追加したものがそのモデルである。

$$\sum_{j=1}^{38} \lambda = 1 \quad (2)$$

3. データ

本研究では、漁業センサス（2013）より、38 都道府

県の 2013 年における海面漁業の生産効率性を分析する。エネルギー消費量に関しては資源エネルギー庁より、都道府県・業種別エネルギー消費（2013）を用いた。分析に使用するデータは、投入として海面漁業に使用された漁船数、就業者数、エネルギー消費量、産出として評価対象が漁獲及び収穫した魚介類を、魚類、甲殻類、いか・たこ類、海藻類、貝類に 5 分類し、3 投入 5 産出の DEA モデルを適用した。

4. 結果

表 1 は 2013 年における 38 都道府県での海面漁業における生産効率値を表している。表 1 から効率的な都道府県は 13 あることが分かる。北海道、青森県、岩手県、山形県、宮城県と北海道・東北地方の効率が良いことが分かる。秋田県も θ =0.781 と高い値を示した。その一方で、鹿児島県、熊本県、佐賀県、福岡県など九州地方を中心に効率が悪いことが分かる。また、生産効率値の平均値は θ =0.622 であった。

また、図 1 は効率的な漁業を行っている都道府県を赤色で表しているが、研究発表会ではこれら都道府県に共通する漁業の特徴や、特色などを分析していく。

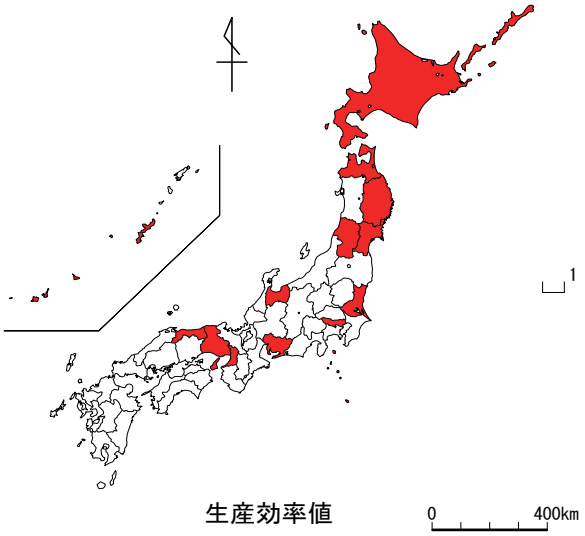


図 1. 生産効率値の分布図

表 1　各 DMU の生産効率値

	DMU	θ		DMU	θ
1	愛知県	1	20	京都府	0.545
1	東京都	1	21	新潟県	0.433
1	青森県	1	22	徳島県	0.428
1	岩手県	1	23	神奈川県	0.414
1	茨城県	1	24	高知県	0.413
1	宮城県	1	25	島根県	0.402
1	富山県	1	26	大分県	0.400
1	山形県	1	27	宮崎県	0.399
1	北海道	1	28	長崎県	0.365
1	鳥取県	1	29	静岡県	0.358
1	沖縄県	1	30	香川県	0.342
1	兵庫県	1	31	愛媛県	0.333
1	大阪府	1	32	和歌山県	0.327
14	石川県	0.929	33	福岡県	0.316
15	秋田県	0.781	34	佐賀県	0.307
16	千葉県	0.729	35	熊本県	0.259
17	三重県	0.613	36	山口県	0.247
18	岡山県	0.593	37	広島県	0.203
19	福井県	0.564	38	鹿児島県	0.164

5. 引用文献

1) 寶多康弘, 馬奈木俊介, “資源経済学への招待―ケーススタディとしての水産業―”, ミネルヴァ書房, 京都, （2010）, pp. 79-94
2) William W. Cooper et al., “DATA ENVELOPMENT ANALYSIS Second Edition”, Springer Science+Business Media, NY, (2007), pp. 21-34
3) 刀根薫, “経営効率性の測定と改善―包絡分析法 DEA による―”, 日科技連出版社, 東京, （1993）, pp. 31-56

大規模料理レシピ解析による「食」に関わる関与物質総量の算定

Total Material Requirement Estimation of Food based on Big Data Analysis of Food Recipes

石井裕剛 [1)]，Benjamin McLellan[1)]，○山末英嗣[*2)]
Hirotake Ishii, Benjamin C. McLellan, Eiji Yamasue
1) 京都大学, 2) 立命館大学
* yamasue@fc.ritsumei.ac.jp

1. 緒言

爆発的な人口増加に対応した食料生産を行うためには，自然に成長する動植物の利用では追いつかず，効率的な生産のための人工物投入が必要となる．たとえば肉の生産には飼料，温室等に必要なエネルギーといった直接投入だけでなく，飼料の生産に必要な農薬，肥料といった間接投入，さらには肥料や農薬の製造に種々の元素が必要であるが，それらは資源採掘活動によって得られる．筆者らの簡単な試算では，牛肉と魚肉では単位重さあたりで 5 倍以上の資源投入量の差があり，日本人の肉食化は間接的に資源消費量の増加誘因となっていることがわかる．畜産だけでなく種々の食材まで視野を広げるとまさに千差万別の資源投入を考慮しなければならない．

日本は食材や調理形態を含め，「食」の多様性とその変化が大きい．したがって，日本における食の嗜好・食事構成を網羅的に調査し，我々が食を通じてどのように資源に依存しているのかを分析することは，将来に渡って効率的で持続可能な食料生産を行っていく上で重要である．著者らは「食」に付随する資源利用量を「関与物質総量（資源端重量）」を通じ定量化している．しかし，これまで，ある料理，食材，調理法に注目した研究は散見されるが，日本の「食」についての全体像を調理された食材（すなわち料理）を含めて俯瞰した例は存在しない．

興味深いことに，クックパッドと呼ばれるウェブサイトがあり，近年，そこに集約されたレシピデータが研究者向けに公開された [1)]．そのデータ量は公称で 172 万品目を超え，その 1 割を活用できただけでも膨大な情報が蓄積される．本研究では，クックパッドを通じて得られたレシピに関するビッグデータを分析することで，日本人の食を通じた資源依存構造とその変容を解明することを目的とする．

2. 研究手法

2.1 ビッグデータの収集と解析

クックパッドのレシピデータは，国立情報学研究所の情報学研究データリポジトリ(IDR)を通じて行われている．本研究では，クックパッドとの契約を通じ，これらのデータを収集した．得られたデータのサイズは 5.5GB で，約 172 万件のレシピデータが含まれていた．

レシピデータには，各レシピのタイトル，材料（材料名と分量），出来上がり人数，調理手順などが含まれているが，各項目はクックパッドの登録ユーザがテキストとして入力しているため，同じ料理や材料・分量を表す場合でも，その表現が異なる場合がある．例えば，「玉ねぎ」を表現する場合でも，「たまねぎ」「玉葱」「玉ネギ」など，多くの表現が存在する．また，「沢山入れるとおいしいよ！！」など，登録ユーザから利用者へのメッセージなども含まれるため，これらの記述の中から有効な記述のみを抜き出す必要がある．

そこで今回は，まず，出来上がり人数の記載があるレシピデータのみを抜き出し，データに含まれる「★」や「🥢」などの特殊な文字を削除したのち，材料名と分量に含まれるアルファベットと漢数字をすべて半角英数字に変換した．その後，一般に形態素解析エンジンとして使用されている KAKASI (kanji kana simple inverter)[2)]を用いて，平仮名とカタカナを平仮漢字混じり文に変換して表現の統一性を向上させた（「たまねぎ」は「玉葱」に，「パプリカ」は「ぱぷりか」などに変換される）．また，食品成分表 [3) 4)]を参考に，標準材料名・材料別名表現・単位分量あたりの標準重量のテーブルを作成し，これらを用いてレシピデータに含まれる材料を，標準材料名とその重量に変換した（本テーブルに含まれない表現は処理対象外として排除した）．単位分量としては，枚・本・個・片・丁・小匙・大匙・つまみ・袋・箱・缶・cc・ml・cm・束・合を処理対象とし，分数や「半」の表現も変換の対象とした．例えば，「こんにゃく・ 1 枚半」は，「蒟蒻・315 グラム」に変換した．分量が範囲として表現されている場合は，その中央値に変換した（例えば，「2 個〜3 個」と表現されている場合は，「2.5 個」に変換した）．以上の変換処理を，MySQL と C++言語を用いて自動的に実行するツールを開発して解析に用いた．

2.2 関与物質総量との接続

得られたレシピに含まれる食材データは，筆者らが推算している関与物質データベースと接続させた．筆者らはこれまでに種々の国産作物，肉類，魚類，飲料の推算結果について関与物質総量を推算してきた．具

体的にはコメ，トマト，キャベツ，小麦，ジャガイモ，サツマイモ，大根，ミカン，なし，甜菜，緑茶，牛肉，豚肉，鶏肉，いか，ニシン，サーモン，マグロ，水，ジュース類，豆乳等であるが，これらはほぼ全てが国産を仮定したものであった．そこで，小麦（粉），大豆，トウモロコシ等，輸入食品についても可能な限り推定を行った．さらに，醤油，味噌，みりん，マヨネーズ，砂糖，塩といった調味料についても MiLCA 等を中心として関与物質総量のデータベースに追加を行った．

ただし，本研究で得られたビッグデータには加熱手法（IH，ガス，電子レンジ）とその時間に関する情報はほとんど含まれていなかった．したがって，加熱に必要な関与物質総量は本報告については含まれていない．

3. 結果および考察

3.1 代表的な料理のレシピ数

図１にビッグデータの解析の結果得られた代表的な料理のレシピ数について示す．

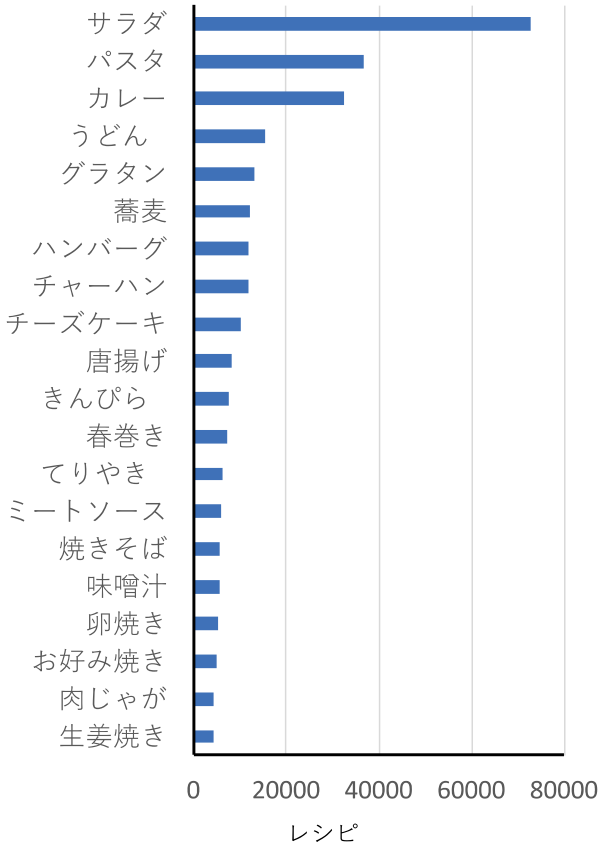


図 1 代表的な料理のレシピ数

3.2 代表的な料理の関与物質総量

次に，いくつかの料理について，そのレシピによってどの程度ばらつきが見られるかを調査するため，代表的な料理（カレー，肉じゃが，みそ汁，生姜焼き）について，ビッグデータから 4 レシピをランダムに抽出し「一人分」の関与物質総量を推算した（図２）．図からわかるように，一つの料理についてもそのレシピによって大きくばらついていることがわかる．特にカレーや肉じゃがでその傾向が高い．これは肉の関与物質総量の値が大きいだけでなく，牛肉（49.3 kg/kg），豚肉(13.3 kg/kg)，鶏肉（7.34 kg/kg）とばらつきが大きいためである．一方，みそ汁は基本的には肉を使用しないため，ばらつきはそこまで大きくない．生姜焼きも，基本的には豚肉を使用するため，カレーや肉じゃがほどのばらつきは見られない．

最後に，みそ汁の 5400 レシピについて分析を行ったところ，暫定値として一人あたりの関与物質総量は 0.4 ± 0.2kg/kg という結果が得られた．

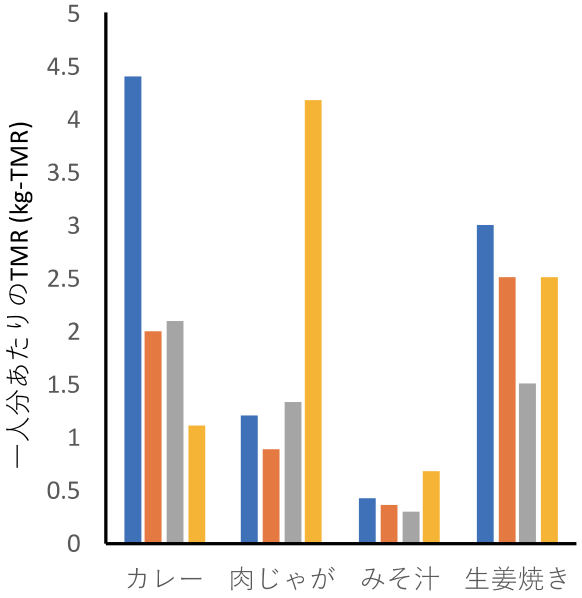


図 2 カレー，肉じゃが，みそ汁，生姜焼きの TMR

4. 謝辞

本研究の一部は，公益財団法人 すかいらーくフードサイエンス研究所による平成 28 年度助成，および科研費基盤研究 B（特設分野）（研究課題番号：16KT0030）によって行われました．ここに謝意を表します．

引用文献

1) クックパッドデータセット（オンライン），入手先 <http://www.nii.ac.jp/dsc/idr/cookpad/cookpad.html>, (参照 2016.11.30) .
2) 山末英嗣，松八重一代，石原慶一「日本における食料生産の TMR とそのエネルギー・物質集約度評価」, 第 10 回日本 LCA 学会講演大会講演要旨集, (2015), C2-09.
3) 新食品成分表編集委員会編，新食品成分表 2017, 東京法令出版株式会社, 2016.
4) 香川昭夫監修，はじめての食品成分表（第 2 版），女子栄養大学出版部, 2016.

ビール醸造副産物由来の肥料を活用したゴルフコース管理における農薬削減効果のライフサイクル評価

Life Cycle Assessment of Reduced Chemical Golf Course Management Using a Fertilizer Derived from Brewing By-products

○林清忠*[1)]、北川隆徳[2)]、御影佳孝[2)]、高崎智子[2)]
Kiyotada Hayashi, Takanori Kitagawa, Yoshitaka Mikage, Satoko Takasaki
1) 農業・食品産業技術総合研究機構, 2) アサヒグループホールディングス株式会社
* hayashi@affrc.go.jp

1. はじめに

環境に配慮したゴルフコース管理に対する関心が高まっている[1)]。それは、コース内での生物多様性の保全、生態系サービスの提供に加え、化学物質の適正管理と使用量削減等を内容とする管理である。本研究では、ゴルフコース管理における農薬使用量の削減可能性に焦点を当てる。プラントアクティベータとしての作用を持つビール酵母細胞壁からの抽出物[2)]を含む液体肥料の散布は、農薬削減効果をもたらすと期待されるため、その程度を、実際のゴルフコースにおける管理作業の実態ならびに圃場試験に基づくデータを用いたLCAによって、明らかにすることを目的とする。

2. 方法

2.1 分析のフレームワーク

本研究では、ビール酵母細胞壁からの抽出物を含む液体肥料を活用したゴルフコース(グリーン)管理を、慣行の管理と比較することにより、期待される農薬削減効果の程度を解明する。その際には、単位面積当たりの比較を行う。面積に焦点を当てた農業生産システムの比較LCA[3,4)]においては、面積当たり環境影響と面積当たり収量を２次元平面上で比較するが、ゴルフコースが提供するサービス（収量に相当する事象）の数量的把握が現時点では未実施であるため、新たな管理法と慣行の管理法には提供するサービス（少なくともゴルフを行う上での芝の質）には違いがないとの想定の下に、面積当たりでの環境影響を比較する。

新たな管理法を実施することによる直接的な効果は殺菌剤使用量の減少であり、それにより作業機械稼働時間の低減も可能となる。本研究では、それら効果の連鎖を考慮するため、ライフサイクルでの環境影響を算出する。

2.2 ビール醸造副産物由来の肥料のインベントリ

ビール酵母細胞壁からの抽出物を含む液体肥料は、清和肥料工業株式会社による製造を想定しており、投入と産出のデータ等に基づき、ユニットプロセスのインベントリを作成し、システムプロセス化（排出係数の作成）を行った。その際、製造用機械・施設に関わる環境影響は除外した。また、肥料原料については、輸入先を特定した上で、輸送距離を求め、環境影響を推定した。

2.3 ゴルフコース管理のインベントリ

グリーン管理（慣行）のインベントリデータは、株式会社アコーディア・ゴルフにおいて、2016 年 6 月から 10 月にかけて実施されたグリーンの管理実態に基づいて作成した。その際には、芝の更新作業、目土散布、施肥、薬剤散布、散水等に関する日別作業記録を用いた。公表されているグリーン管理用作業機械の仕様には、燃料（ガソリン）消費量が含まれないため、乗用管理機については時間当たり 1.5L を、その他については 1L を想定して推計した。

新たな管理法は、アコーディア・ゴルフ試験圃場において 2016 年に実施した効果試験の結果を慣行の管理に組み入れることにより構成した。すなわち、当試験における散布実態をデータとして用いるとともに、芝の質については慣行の場合と差がないことを目視で確認した。新たに用いる液体肥料については、慣行の施肥等と同時に実施することを想定しているが、別々に実施する場合を感度分析として検討した。

2.4 その他のバックグラウンドプロセス

新たに用いる液体肥料以外の肥料については、NPK 成分量に基づいて暫定的に GHG 排出量を推計した。成分ごとの排出係数は、ecoinvent 2 のアダプテーションにより各肥料のインベントリを作成した上で[5)]、国内での肥料使用量による加重和をとることによって求めた。農薬についても同様に、殺菌剤、殺虫剤ごとに求めた排出係数を使用した[6)]。また、ガソリンについては、地球温暖化対策の推進に関する法律施行令における排出係数、電力量については、電気事業者別排出係数（平成 26 年度実績）における排出係数を用いた。一酸化二窒素の直接排出は、日本国温室効果ガスインベントリ報告書（2016 年）に基づいて計算した。

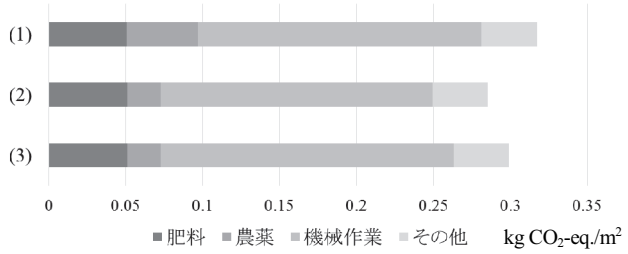
2.5 影響評価手法

本研究で取り上げる影響領域は、地球温暖化（IPCC 2013 GWP 100a）である。これによって、新たな液肥導入が与える様々な影響（①液肥追加による環境影響の増大、②農薬使用量削減に伴う環境影響の減少、③農薬散布に必要な燃料の使用量減少に伴う環境影響の減少等）の連鎖を検討することができる。

3. 分析結果

3.1 ライフサイクル GHG 排出量の比較

ビール酵母細胞壁からの抽出物を含む液体肥料を利用した新たな管理法を導入することにより、農薬に関わるGHG排出量を慣行に対して半減することができ、全体として m^2 当たり 3.2×10^{-2} kg CO_2-eq.を削減できることが示された（図１）。



(1) 慣行のグリーン管理法
(2) 新たなグリーン管理法
(3) 新たなグリーン管理法（別散布）

図 1 慣行と新たなグリーン管理法のライフサイクル GHG 排出量の比較

3.2 施肥回数に関する感度分析

新たに導入する液体肥料の散布は、慣行における施肥等と同時に実施できると考えられるが、追加的な機械散布作業が必要になる場合（図１の(3)）を仮想的に感度分析として検討した。その場合においても、新たな管理法の GHG 排出量の方が小さいが、慣行との差は m^2 当たり 1.8×10^{-2} kg CO_2-eq.に縮小することが示された（図１）。

4. 結論と考察

4.1 削減量の含意

農薬使用量ならびに関連する機械作業時間の減少により低減できる単位面積当たり GHG 排出量は、全体の１割程度である。しかしながら、日本全体のゴルフコース面積を考えた場合、本研究で取り上げた管理法の意義は大きいと考えられる。その際、グリーンは、林帯を含むゴルフコース全体の４％程度を占めるに過ぎないが、ティーグラウンドとともに集約的な管理が実施される場所であり、GHG 排出量を削減する管理法を確立する上で中心的な位置を占めると考えられる。今後、検討した管理法を IPM（総合的病害虫管理）の中に適切に位置づけつつ、ゴルフコース全体の評価を実施する予定である。

4.2 影響領域

農薬使用量削減の効果は、生態毒性、人体毒性等の影響領域においても検討する必要がある。新たな管理法の意義を理解する上でも、これらの影響を評価することが重要であり、マルチメディアモデル等を用いた推計は今後の課題としたい。

4.3 ゴルフコースが提供するサービス

本研究では、ゴルフコースが提供するサービスを未特定の状態で、面積当たりの環境影響の比較を実施した。機能単位をより明確に規定するためには、提供されるサービスを評価する必要があるが、その際には、人間の主観的情報の処理が必要になると予想される。ゴルフコースが提供する生態系サービスの評価とともに、今後の重要な検討課題である。

謝辞

株式会社アコーディア・ゴルフ、コース管理本部の皆様、とりわけ安井芳彦氏には、グリーン管理に関する様々なデータを、また清和肥料工業株式会社の大野勝也氏には、肥料製造に関する詳細なデータをご提供いただいた。ここに記して感謝の意を表する。本報告は、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センターとアサヒグループホールディングス株式会社の共同研究の成果である。

引用文献

1) Witteveen G., Bavier M.: Practical Golf Course Maintenance, 3rd edn, Wiley, (2013)
2) Narusaka M., Minami T., Iwabuchi C. et al.: PLOS ONE, 10(1), (2015), e0115864
3) Hayashi K.: Int. J. LCA, 18, (2013), pp.331–339
4) Hayashi K., Nagumo Y., Domoto A.: Sci. Total Environ., 571, (2016), pp.134–141
5) Hayashi K., Makino N., Shobatake K., Hokazono S.: J. Clean. Prod., 73, (2014), pp.109–115
6) 林清忠, 正畠宏一, 牧野直樹, 内田晋: 第 7 回日本ＬＣＡ学会研究発表会講演要旨集, (2012), pp.156–157

ライフサイクル思考の社会実装：種子島の例

Implementation of Life Cycle Thinking: A Case Study in Tanegashima

○菊池康紀*[1)]、 尾下優子 [2)]、 福島康裕 [3)]
Yasunori KIKUCHI、 Yuko OSHITA、 Yasuhiro FUKUSHIMA
1) 東京大学、 2) 神戸大学、 3) 東北大学
* kikuchi@platinum.u-tokyo.ac.jp

1. 緒言

環境負荷の制御、エネルギーシステムの設計、少子高齢化への対策など、社会課題は山積みであり、課題解決指向の研究成果の導入促進が必要である。「課題先進国」[1)]とされる日本において、離島地域はさらに課題が先進して顕在化している地域といえる [2)]。それぞれの島ではエネルギーシステムの再設計が必要とされているが、人口や産業の将来ビジョンに基づいた技術導入の評価やシステムの設計はなされていない。

本研究では、種子島において展開されている、技術やシステムを社会に実装する取組を例に、ライフサイクル思考(LCT)が社会に定着する過程について議論する。具体的な事例としてサトウキビ産業を中心としたシステムで形づくる地域の物質循環と、エネルギーシステムの設計や新規バイオディーゼル製造技術の導入について取り上げる。

2. 方法

2.1 社会実装と LCT

研究開発には段階があり、実験室等から実際の現場において技術やシステムを試すフェーズがあることが知られている。この段階は実用化や実証化、社会実装といった形で表現されている [3,4)]。この中でも社会実装は、研究開発成果が想定していた地域・組織等で受け入れられているだけでなく、当初予定以外にも水平展開されている状態を含んでいる [4)]。このとき、制度的、経済的社会慣習的及び社会心理的な障害により、社会への導入が困難かあるいは長期間を要するものが多いとされており、定着に向けては技術とシステムの成熟化だけでなく、導入者側の受容性を高める活動が必要といえる。

LCA には、現在のライフサイクルにおける製品の環境属性を可視化させる帰属的 LCA と、現在のライフサイクルに変化を加えた時に起こる変化を可視化することを目的とする帰結的 LCA の 2 種類がある [5)]。地域のエネルギーシステムを設計するためには、地域特性の変化を考慮にいれたシステム評価が不可欠であり、帰結的な思考が必要といえる。ここで、技術やシステムに関する LCT の普及が地域の変革に影響しうる。地域にとって技術やシステムを導入する動機を正しく理解し、合意に基づく意思決定を支援できるようになることが、LCT の社会実装と考えることができる。

2.2 種子島における社会実装プロジェクトと LCT

本研究では種子島で推進されている技術やシステムの導入プロジェクト [2)]において、LCT の社会実装を試みた。特にサトウキビ産業を中心としたシステムで形づくる地域の物質循環と、エネルギーシステムの設計や新規バイオディーゼル製造技術の導入について、考慮すべきライフサイクルの種類と、LCT の実装の手順について、業界団体の検討会 [6)]や地域におけるシンポジウム [7)]、高校における特別講義 [8)]を通して得られた成果を議論する。

3. 技術・システムと LCT の実装

3.1 システムで形づくる：農林工業の横断とライフサイクル

図 1 に例としてサトウキビ製糖工場を中心とした地域エネルギーシステムの設計例を示す。製糖工場では絞りかすであるバガスを用いた熱電併給を行っているが，製糖に必要な量以上にエネルギーが発生している場合があり，再生可能資源由来の未利用エネルギーが存在する [6)]。一方，サトウキビの輪作体系にあるイモを加工する焼酎・でんぷん工場では化石燃料の高騰による影響が出ている。製糖工場の排熱はこれらの工程で必要とする熱需要の一部を満たすことができる。蓄熱輸送などの技術を用いることで，熱の時空間的需給

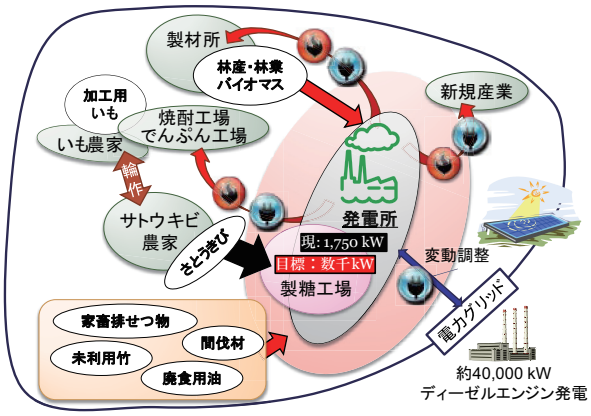


図 1　種子島における物質循環システム

ギャップを乗り越えた地域エネルギーマネジメントが可能となりうる[9,10]。

ここでは、種子島におけるサトウキビ、木材、加工用いも、公共電力といったライフサイクルが関連しており、多業種の合意による推進が必須である。原料糖以外の製品の複合生産によるサトウキビおよび製糖業の高付加価値化は、生産者および糖業において重要な課題であり、受容性が高いことが分かった[6]。サトウキビを基幹産業とする地域においては、伝統・文化としてサトウキビが定着しているためといえる。これはサトウキビに関係する組織だけでなく、地域の高校生や住民にとっても同様であった。伝統文化とは異なる側面として、林業の健全化も重要な課題である。これは国内であれば多かれ少なかれ同様であり[11]、サトウキビバガスと複合的に木質バイオマスを利用することは、地域の社会受容性が高いということが分かった。

3.2 技術で牽引する：新規バイオディーゼル製造技術の実装

地域に賦存する未利用資源には廃棄物も含まれる。例えば廃食用油から製造したバイオディーゼルは既に多くの離島で利用されているが、利用できる廃食用油が、利用回数が少なく高品質なものに限られてしまうこと、メタノールや触媒のアルカリが離島では特に高価であること、製品燃料油の品質が十分でないことなどが課題である。固体触媒を用い、原料廃食用油の品質を選ばずに高い歩留まりで高品質なバイオディーゼルに変換する最新の技術[12]を用いることにより、離島地域に多い特殊用途車の燃料を地産できる可能性があり、実証が進められている。また、同技術を応用しメタノールの代わりに地産されるバイオエタノールを用いてバイオディーゼル燃料を製造する研究も進められている。

廃食用油という廃棄物の利用については地域によって差があり、必ずしも常に受容性が高いとはいえない。ただし、種子島の事例においては、既に廃食用油を回収していた事業者が居たため、受容性は元々高い状態にあった。言い換えると、種子島の社会の中には既にバイオディーゼル用の廃食用油を収集する仕組みが実装されていたといえる。ここに、新しい技術を組み込むことでより高効率化することができることから、新規技術であっても高い受容性を確保できたといえる。

4. 結言

新しい技術やシステムの導入においては既存のインフラと融和しながら進むシナリオが不可欠といえる。技術や資金、制度も必須であるが、風土/文化にあったシステムの提案とそれを支える人材がなければ技術・システムの社会実装は進みえない。対象技術やシステムが関係するライフサイクルについて、環境影響や社会経済性を可視化していくライフサイクル思考を実装することによって、社会課題解決に臨むことができる。

謝辞

本研究は、環境研究総合推進費(1RF-1503; 3K153014)、科学研究費補助金(若手研究(A)16H06126; 若手研究(B)26740056)における成果を含んでいる。東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は、(株)地球快適化インスティテュート、日本電信電話(株)、富士フイルムホールディングス(株)、三井不動産(株)、(株)LIXIL、信越化学工業(株)からの寄付で活動している。

参考文献

1) 小宮山宏、“「課題先進国」日本”、(2007) 中央公論新社
2) 菊池康紀、 尾下優子、 福島康裕 : PETROTECH、36(6)、 (2016)、 461-467.
3) 環境省、TRL 計算ツール、https://www.env.go.jp/earth/ondanka/biz_local/26_15/tool_manual.pdf
4) 茅明子、奥和田久美：社会技術研究論文集、12、(2015)、12-22.
5) Ekval, T., “Attributional and consequential LCI modelling”, (2003) http://www.lcacenter.org/InLCA-LCM03/Ekvall-presentation.pdf
6) 菊池康紀、サトウキビで形作るスマートシステムの在り方：種子島の事例、平成 28 年度 さとうきび・甘蔗糖関係検討会、西之表市、(2016)
7) 西之表市、自然と共生するスマートエコアイランド種子島シンポジウム～動き始めた大学等との連携による新たな可能性～、西之表市, (2016) http://www.city.nishinoomote.lg.jp/admin/soshiki/keizaikankoka/shoukouseisaku/ecoiland/2995.html
8) 鹿児島県立種子島高等高校 HP、http://taneko.edu.pref.kagoshima.jp/category/bunrui/bunrui31/
9) Kikuchi, Y., Kanematsu, Y., Ugo, M., Hamada, H., Okubo, T., J. Ind. Ecol., 20(2) 276-288 (2016)
10) Fujii, S., Kanematsu, Y., Kikuchi, Y., Nakagaki, T., Mechanic. Eng. J., DOI: 10.1299/mej.16-00334
11) Oosawa, K., Kanematsu, Y., Kikuchi, Y., Forestry and Wood Industry, DOI: 10.1007/978-4-431-55951_26, in "Energy Technology Roadmaps of Japan" edited by Kato, Y., Koyama, M., Fukushima, Y., Nakagaki, T., Springer: Tokyo, ISBN13: 9784431559498 (2016)
12) Shibasaki-Kitakawa, N., Kanagawa, K., Nakashima, K., Yonemoto, T., Bioresour. Technol., 142, 732 (2013)

植物資源利活用に向けた農工横断型プロセスモデリング

Integrated Modeling of Agricultural and Industrial Processes
for Utilization of Plant-derived Resources

○大内田弘太朗*[1)]、冨永華子[1)]、牟田侑樹[1)]、兼松祐一郎[1)]、大久保達也[1)]、菊池康紀[1)]
Kotaro Ouchida, Hanako Tominaga, Yuki Muta, Yuichiro Kanematsu, Tatsuya Okubo, Yasunori Kikuchi
1) 東京大学
* ouchida_k@chemsys.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

化石資源依存からの脱却に向けて、植物資源は食料のみならず化成品や燃料などの原料として利活用されることが期待されている。これまでに工業分野では、農業残渣などの植物由来生成物を、化石燃料の代替として利用するのみならず、燃料よりも高い価値を持つ化成品への変換を目指して、原料変換や精製に関する様々な技術開発が取り組まれてきた[1)]。このような技術の実装は、食料生産システムの安定化にも貢献し得る一方で、原料供給源である農業は、依然として作物生産のみを主目的としており、農業と工業の間で設計思想に齟齬が生じているのが現状である。品種選択などの農業側の意思決定は、供給される植物資源の量や成分組成の変化を通して、工業側のプロセスの効率に影響を及ぼし得るため、植物資源の利活用に関わる諸問題を解決するには、農工横断的視点が不可欠である。しかしながら、農業と工業における研究開発や技術導入、意思決定はそれぞれ個別に行われてきており、これらを統合してシステムを設計する方法が存在しない。本研究では、農工を横断したプロセスモデリングにより、植物資源を原料とする食料、化成品、燃料の持続可能な生産システムの設計を支援することを目指す。

2. 持続可能な植物資源利活用の要件

農業と工業という異なる分野にまたがる問題を適切に解釈し、解決策を探索、実行するためには、関連分野における各々の専門知識が必要である。しかし、植物資源の利活用においては、農作物を生産する農家や、それを最終製品に加工する事業者、及び、それぞれの関連技術の研究者といった様々な意思決定者が関与しており、各々が全分野の専門知識を習得することは困難である。そこで、異分野間でのコミュニケーションを可能とするツールが求められる。ツールの概要をFigure 1[2)]に示す。

これまでに、農業と工業を同時に定量的に議論するためのツールは存在しなかった。その理由として、データ、知識、権限などがそれぞれの分野に分散しており、統合的な議論が困難であったためであると考えられる。ここで、モデリングは、対象を良く理解し望ましい姿を探求するために用いられるアプローチであり、これまでに化学プロセスの設計において重要な役割を果たして来たように[3)]、複雑な対象を解釈しやすい形に変えて、定量的な議論を行うことを可能にする。これを本研究においても適用し、農工横断型モデリングを通して、農工間で不明瞭であった相互作用を可視化し、合意形成を支援できると考えられる。

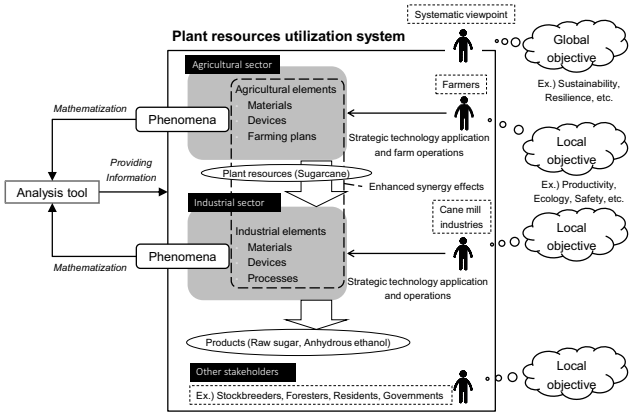


Figure 1 Role of an analysis tool for design of plant resources utilization system based on integrating agricultural and industrial processes[2)]

3. 農工横断型プロセスモデリング

筆者らがこれまでに行ってきた事例を通して、農工横断型プロセスモデリングの役割について検討した。

3.1 サトウキビにおける事例

サトウキビは、原料糖の抽出後に残る糖蜜を発酵させることでエタノールへ変換できる植物資源の一つである。抽出過程で搾り粕として発生するバガスは工程内で必要なエネルギー源としても活用でき、既に熱電併給設備が導入されていることから、原料糖、エタノール、電力、熱のマルチジェネレーションの実現や、それに伴う生産システムの安定化が期待できる[4)]。しかしながら、サトウキビ産業は、人口減や、化石資源依存、病虫害や天候不順による不作のリスクなど、様々な課題に直面している。一方で、近年、従来低品質と見なされてきた品種からでも高い効率で製糖を行うことを可能にする要素技術が工業側で開発され[5)]、農業

側ではその技術の利点を最大限に高め得る改良品種が開発されたことから、これらを組み合わせ、プロセスシステム全体を統合的に解析し設計することで、両製品の同時増産が期待される。

原料糖・エタノールの複合生産システムについて、プロセスシステムとして最適な装置・操作の条件の探索や、温室効果ガス排出量の可視化を目的として、プロセスモデリングを行ってきた [6]。開発したモデルを用いたケーススタディにより、農家と製糖工場が連携して意思決定を行うことで、原料糖とエタノールを同時増産しつつ、温室効果ガスの削減、省プロセス化、関連資源の節約を同時に達成できることを定量的に示した [6),7)]。

3.2 稲作における事例

玄米精穀時の副産物である米糠には、イノシトールやビタミンを始めとする様々な高付加価値成分が含まれており、これらの精製技術の実装は、米糠のみならず、稲そのものの生産価値を高めることにつながる。さらに、米糠には肥料成分も豊富に含まれており、尚且つ、主食由来ゆえの生産規模の大きさから、それらを回収して作物栽培に還元することは、農業全体の資源循環の観点から見ても重要である。しかし、米糠の大部分は廃棄されており、一部の回収プロセスのみが稼働しているのが現状である。米糠精製プロセスの評価、及び稼働中のプロセスに対する代替案の提言のために、データ収集、及びプロセスモデリングを行ってきた。

3.3 植物工場における事例

植物工場は、露地栽培と比較して、天候や病害虫などの外乱に対して安定した植物生産を可能にする技術であり、施肥量や排水の管理も可能であることからその有効性が期待されているにもかかわらず、経済的な側面により実装が妨げられているのが現状である。

植物工場の抱える課題として、農業と工業の両面を有するものでありながら両者の調和がうまくいっていないことが挙げられる。例えば、植物工場では、気温、湿度といった環境条件が人工的に制御可能となったことで、作物の外乱耐性に対する要求レベルが低減し、一方で、出荷サイクルの短さという、露地栽培に無い新たな要求が発生した。このように、作物に求められる要件が変化したにもかかわらず、従来の農業で行われてきたような経験知による改善の延長で議論されることが多い。

植物工場と露地栽培がそれぞれに持つ機能の違いを考慮した比較、及び、工場内の設備能力や空間的設計による経済性、環境性、社会性への影響の可視化のために、植物工場のモデリングを行ってきた。

4. おわりに

農工横断型プロセスモデリングを通して、生産性や環境影響などの懸念すべき項目と農工それぞれの持つオプションの関係の可視化を行い、農業と工業の間の定量的な議論を可能にした。さらに、3.1 ではモデルを用いた分析により、問題解決のための代替案を示した。しかしながら、モデリングにより導き出される代替案を実行するには、産業従事者、研究者、政策決定者らが、問題を認識し、適切な連携を図っていくことが必要である。今後は、開発したモデルを活用するためのフレームワークの開発が必要であり、現在、モデルを実際のユーザーに使ってもらい、手法の妥当性について意見交換を行っている。

このようなアプローチは、農学及び工学に対して、より広い技術領域から解を探索することを可能とし、各要素技術を個別に最適化する従来の形式では見出し得なかった解決策につながると言える。

謝辞

本研究に関して議論をさせていただいた東北大学の福島康裕准教授、アサヒグループホールディングス（株）の小原聡 博士、杉本明 博士、農研機構九州沖縄農業研究センターの樽本祐助 博士、服部太一朗 博士に感謝する。東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は、（株）地球快適化インスティテュート、日本電信電話（株）、富士フィルムホールディングス（株）、三井不動産（株）、（株）LIXIL、信越化学工業（株）からの寄付で活動している。

引用文献

1) Cherubini F.: Energ. Conv. Manag., 51, (2010), pp 1412-1421
2) Ouchida K., Okubo T., Kikuchi Y.: Proc. 7th. PSE Asia, Tokyo, (2016), A111
3) Chen H., Shonnard D. R.: Ind. Eng. Chem. Res., 43 (2), (2004), pp 535-552
4) Kikuchi Y., Kanematsu Y., Ugo M., Hamada Y., Okubo T.: J. Ind. Ecol., 20, (2016), pp 276-288
5) Ohara S, Fukushima Y., Sugimoto A., Terajima Y., Ishida T., Sakoda A.: Biomass Bioenerg., 42, (2012), pp 78-85
6) Ouchida K., Fukushima Y., Ohara S., Sugimoto A., Hirao M., Kikuchi Y.: AIChE J., in press, DOI: 10.1002/aic.15374
7) Ouchida K., Kikuchi Y., Okubo T.: Comput.-aided Chem Eng., 38, (2016), pp 1947-1952

砂糖・バイオエタノール逆転生産プロセスの導入による GHG 排出削減効果

Reduction of GHG emission by introducing Inversion process into existing sugarmill

○福島康裕*[1)]、小原聡[2)]、大内田弘太朗[3)]、菊池康紀[3)]
Yasuhiro Fukushima, Satoshi Ohara, Kotaro Ouchida, Yasunori Kikuchi
1) 東北大学, 2) アサヒグループホールディングス, 3) 東京大学
* fuku@sis.che.tohoku.ac.jp

1. はじめに

世界的な人口増加に伴い，食料・エネルギー不足が予測される中、バイオマス（植物資源）を用いた食料とバイオ燃料の増産が望まれている。サトウキビは単位収量が高く、主に砂糖原料となるショ糖と、エタノール原料となる還元糖（ブドウ糖，果糖）を蓄積するため、小面積で砂糖（食料）とエタノール（バイオ燃料）を多く生産できる作物として注目されてきた。世界的に優良農地が減少するなか、世界の研究機関が多収性サトウキビ品種を開発してきたが、多収性サトウキビには、砂糖の晶析を阻害する還元糖が多いという世界共通の課題があった。土地あたりの糖生産量は増加するものの、還元糖比率の高さから砂糖回収率が低下するため、エタノールのみの増産は可能だが、砂糖を同時に増産できないことから、結果として産業上利用されてこなかった。

近年，還元糖のみを選択的にエタノールに変換する特殊な酵母（ショ糖非資化性酵母）を用いて、第一段階で砂糖製造の阻害因子である還元糖のみを選択的にエタノール変換し、第二段階で砂糖を高効率に生産する画期的な生産プロセスが開発された[1)]。砂糖とエタノールの生産順序が従来と逆転（従来は砂糖製造後の糖蜜をエタノールに変換）したプロセスであるため，「逆転生産プロセス」と呼ばれている[2)]。

逆転生産プロセスは，還元糖の選択的変換・除去により、砂糖製造効率（ショ糖の晶析効率）を飛躍的に向上させる[2)]。最近では，砂糖（食品）工場で利用可能な *Saccharomyces cerevisiae* 属の Non-GMO ショ糖非資化性酵母も開発され[3)]，さらにエタノールも製糖工場の濃縮工程を利用して回収可能であるため，既存の製糖工場への導入が容易である。以上の特徴から，還元糖を多く含む多収性サトウキビとの組み合わせにより，砂糖とエタノールの同時増産が可能となる。

このような技術を用いて生産されるバイオ燃料は、食料との直接競合を起こす第 1 世代バイオ燃料（食料から製造するバイオ燃料）、これを回避する第 2 世代（未利用繊維分や廃棄物など食料以外からのバイオ燃料製造）、第 3 世代（藻類からのバイオ燃料製造）とは一線を画した、新たな世代のバイオ燃料と考えることができる。そのため，従来型のバイオ燃料生産による GHG 排出削減効果とは異なる考え方が必要になる。

本報告では、既存の製糖工場に逆転生産システム（多収性サトウキビ＋逆転生産プロセス）を導入した際の GHG 排出削減効果を算出し，食料とバイオエタノールを併産する場合の LCA の課題を議論する。

2. 評価方法

2.1 評価対象とする地域

バイオマスの生産，バイオエネルギーの利用等は地域によって条件が大きく異なる。今回は，様々なサトウキビ原料生産データを有する九州沖縄農業研究センター・さとうきび試験地が立地し，逆転生産プロセスのプラント実証試験を実施している国内唯一の製糖工場である新光糖業（圧搾能力：1,500 [t-sugarcane/d]）が立地している，種子島（鹿児島県）をモデル対象地域とする。しかしながら，地域特有の事情／影響をできるだけ排除することによって，システムの導入効果に焦点を当てることとする。

2.2 方針

既往の研究[4)]では，多収性サトウキビ品種を導入し，逆転生産プロセスを用いずに従来と同量の砂糖生産をした場合に，余剰バイオマス発電とバイオエタノール生産の増加分によって回避される排出量を，製糖プロセス及びエタノール製造に係る排出量変化に加えることで，単位面積の畑あたりの GHG 排出削減効果を定量化している。すなわち，農地の利用面積と砂糖生産量を一定に揃えた仮定を採用している。

一方，本研究では，以下の 2 ケースを比較することにより，逆転生産システム導入に伴う GHG 排出削減効果を算出する。

Case1: 従来の製糖用サトウキビを原料とし，製糖工場に従来のエタノール生産プロセス（糖蜜からのエタノール生産）のみを導入

Case2: 多収性サトウキビに変更し，製糖工場に逆転生産プロセスを導入（逆転生産システムを導入）

本研究では，食料とエネルギーの同時増産が起こった場合の農地あたりの GHG 排出削減量の変化を算定した後，砂糖，エタノール，電力の機能単位あたりの GHG 排出削減効果の貢献度を算定することとする。シ

ステム拡張の考え方は採用せず，一定のポリシーのもとに，各製品（砂糖，エタノール，電力）へ GHG 排出量を Allocation する。

2.3 評価範囲および機能単位

評価範囲は，サトウキビ生産から砂糖・エタノール・電力の生産までを考える。サトウキビ生産に関しては，品種のみを変更することとし，農地への肥料・水等の投入量は同じ条件とする。バガスボイラーおよび発電設備の更新はしない。地域におけるバガス需要（畜産敷料等）はある程度考慮するが，Case1 と 2 では同じ条件とし，最終的にはバガスはすべて CO_2 になると仮定し，GHG 排出量としてカウントする。

機能単位は，以下の 2 つの観点から算出し議論する。

1) 農地 1 ha あたりから生産される原料およびそこから派生する製品製造に伴う GHG 排出量 [kg-CO_2.eq./ha]
2) 各製品の機能単位（砂糖 1 kg，エタノール 1 L，電力 1 kWh）毎の GHG 排出量

2.4 逆転生産システム

従来システムと逆転生産システムの比較概要を図 1 に示す。原料変更とプロセス変更（製糖工程に熱交換器（発酵前後）と選択的発酵槽を挿入）が従来システムと異なる点である。逆転生産システムでは，砂糖製造効率が向上するが（砂糖回収率向上と晶析エネルギーの減少），一方で新たに熱交換によるエネルギーロスが発生する。熱交換器についてはエネルギーロスが最小になるように設計した[5]。

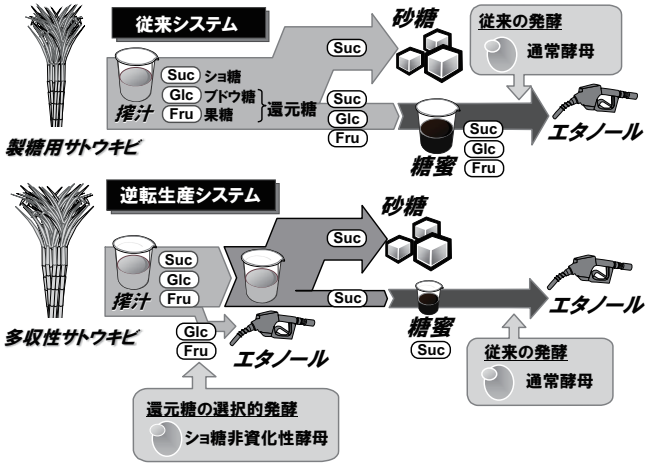


図１．逆転生産システムの概要

2.5 計算方法

システム全体の物質／エネルギー収支，GHG 排出量については，プロセスモデルを作成し算出した[6]。ケーススタディに用いた主なパラメータを表 1 に示す。

表１　計算に用いた主なパラメータ

パラメータ	データ
収穫面積（種子島）	2,500 ha
収穫方法	ハーベスタ
バガス含水率	45 %
砂糖品質（1, 2 番糖純糖率）	98 %
砂糖品質（3 番糖純糖率）	88 %
最終エタノール濃度	99.5 %
発電タービン効率	9.9 %
還元糖除去率 (逆転プロセス)	85 %
発酵温度（従来＆逆転プロセス）	35 ℃

3. おわりに

従来の研究では，食料競合の回避を前提として，食料増産に繋がらないバイオ燃料生産の技術開発，議論が多くなされてきた。この場合の GHG 排出削減効果については，食料生産と切り離して考えられ，さらに原料（食品残渣含む）からは燃料のみが生産されるため，分かり易かった。しかしながら，実際は，経済性や土地競合の観点から食料生産とバイオ燃料生産は切り離して考えられないケースが多い。

今後は，本研究のように，食料とエネルギーの同時増産のために，システム上流の原料生産や食品製造プロセスの変更などを行った場合に，下流のバイオ燃料製造の GHG 排出削減効果をどのように算定するのが良いのかについて更なる研究・議論が必要であろう。

4. 引用文献

1) Ohara S., Fukushima Y., Sugimoto A., Terajima Y., Ishida T., Sakoda A.: Biomass and Bioenergy, 42, (2012), pp 78-85
2) O'Hara I., Rackemann D., Moller D., Zhang Z., Plaza F., Kitai K., Ohara S., Yasuhara T.: Proc. 29th. Int. Soc. Sugar Cane Tech., Chiang Mai, (2016), pp. 1570-1579
3) Kato T., Ohara S., Fukushima Y., Sugimoto A., Masuda T., Yasuhara T., Yamagishi H.: J. Biosc. Bioeng., 122(1), (2016), pp 58-63
4) 小原聡, 福島康裕, 杉本明, 寺島義文, 石田哲也, 迫田章義: 日本 LCA 学会誌, 5(4), (2009), pp 439-445
5) Kikuchi Y., Ouchida K., Kanemtsu Y., Ohara S., Fukushima Y.: J. of Chem. Eng. of Japan, in press
6) Ouchida K., Fukushima Y., Ohara S., Sugimoto A., Hirao M., Kikuchi Y.: AIChE Journal, in press

気象変動を考慮したバイオマス利用システムの製品 LCA のありかた

Life cycle assessment of products from biomass resource utilization system considering interannual weather variability

○中村遼太郎*[1)], 大内田弘太朗[2)], 菊池康紀[2)], 小原聡[3)], 大野肇[1)], 福島康裕[1)]
Ryotaro Nakamura, Kotaro Ouchida, Yasunori Kikuchi, Satoshi Ohara, Hajime Ohno, Yasuhiro Fukushima
1) 東北大学, 2) 東京大学, 3) アサヒグループホールディングス
* naka@sis.che.tohoku.ac.jp

1. 緒言

バイオマス利用システムでは目的製品に合わせて原料の生産に適切な品種の作付けや肥培管理、灌漑方式や作付けパターンなどを選択できる。一方で、原料の収量や成分はこれら設計可能な変数の他に、気象変動による影響も受ける。このため、システム設計の際には、圃場管理と工程調整でどのようにこれらの影響を吸収し、安定した製品生産が行えるのかを織り込む必要がある。バイオマス利用システムでは LCA を用いた検討が重要であるが、未だ現実に運営されず、システムの評価については、農業試験場などの理想的な環境での栽培データを用いるか、平均的な年の作柄が用いられた評価がほとんどで、上記の様な現実的な要因の影響や発生頻度を考慮した例は見当たらない。

サトウキビを例にすると、砂糖の主成分であるショ糖の含有率が高い製糖用品種や、単収が大きく新たな体系でのバイオマス利用が期待される高バイオマス品種がある[1)]。また、品種の特徴は台風・気温・日照不足等の気象変動による単収や構成成分の影響、被害の大きさにも現れる。例えば、収穫期に氷点下の気温が続くと、ショ糖は還元糖へ分解され、可製糖量が減少する。還元糖はショ糖の結晶化を阻害するため、晶析前に選択的に除去する技術を導入することで、歩留まり向上につながり[2)]、低温被害の際の影響も抑えることができると見込まれる。

このように、適切な気象シナリオの設定による、品種や加工工程、製品量の検討が重要である。本報告では､収穫期の気温低下によるサトウキビの品質変動と、経験的な製糖工場の能力を踏まえたモデルの拡張を行い、製品 LCA への影響について議論する。

2. 方法

2.1 考察範囲

大内田ら[3)]は種子島にある圃場・製糖工場を対象に、サトウキビ栽培から製品加工までのプロセスを通して、原料糖やエタノールの生産量や GHG 排出量を試算するモデルを作成している。今回、収穫期（12-4 月）におけるサトウキビの登熟度や収量の推移を各月の上・中・下旬の 15 期間に分け、低温被害による糖度減少の影響を試算するようモデルを拡張した。

サトウキビ品種としては、南西諸島で奨励品種とされる NiF8 と多収で砂糖・エタノール複合生産へのバイオマス利用が期待される KY01-2044 の 2 品種を用いた。低温被害は氷点下が一晩中続くとショ糖含有率が 2%低下し還元糖へ分解する[4)]。この経験的なデータを用いて被害が起きる時期別に、各品種の品質と製糖量への影響を検討した。また、この被害により増加する還元糖はショ糖の結晶化を阻害する。そこで、晶析前に還元糖のみを選択的に発酵する「逆転生産プロセス」の導入[2)]を想定し、加工側の気象変動への対応力も検討した。逆転生産プロセスや晶析残渣の糖分の発酵で得られるエタノールは複製品とし、ガソリン代替による GHG 排出削減を考慮した。これらを総合的に、低温被害が製糖量と環境に与える影響の幅を考察した。

2.2 モデリング

KY01-2044 は新しい品種であり、導入には至っていない。そこで、導入を想定した基準データ作成のために、種子島の成績参考書[5)]をチャンピオンデータとして、低温被害がない場合の第 n 期の KY01-2044 基準データを (1) 式より算出した（表 1)。

$$C_i^{\mathrm{KB},n} = \frac{C_i^{\mathrm{NB},n}}{C_i^{\mathrm{NC},n}} C_i^{\mathrm{KC},n} \quad \text{...(1)}$$

表 1 各品種の基準データ[5,6)]

	品種[%]	
成分[%]	NiF8	KY01-2044
ショ糖	15.49	12.07
還元糖	0.38	0.45
水分	71.83	71.63
繊維分	11.28	14.15
その他	1.02	1.71
純糖率	91.71	84.82
単収[t/a]	0.80	1.05

第 m 期に低温被害を受けて以降、サトウキビのショ糖含有率は 2 %減少し、その分還元糖が増加するものとする。低温被害を考慮した場合の通年のショ糖および還元糖含有率をそれぞれ 表 1 を用いて、(2) 式より算出した。

$$C'^{KB,0}_{i} = \frac{\sum_{j=1}^{m-1} S^{j} \cdot C_{i}^{KB,j} + \sum_{l=m}^{15} S^{l} \cdot \left(C_{i}^{KB,j} + (-1)^{\alpha_i} 2\right)}{\sum_{n} S^{n}} \quad ...(2)$$

記号 $C_i^{X,n}$: 品種条件 X における第 n 期のサトウキビ中の成分 i 含有率 [%]，$C'^{X,n}_i$: 低温被害を考慮した品種条件 X における第 n 期のキビ中の成分 i 含有率 [%], S^n: 第 n 期サトウキビ搬入量 [t], α_i: 成分 i における指数 {α_{suc}=1, α_{red}=2}, X : {NB, NC, KB, KC}, i : {suc, red}, NB: NiF8 基準データ, NC: NiF8 チャンピオンデータ, KB: KY01-2044 基準データ, KC: KY01-2044 チャンピオンデータ, suc: ショ糖, red: 還元糖。ここでは、霜が降りやすい時期である 1 月上旬-2 月下旬（4 ≦ m ≦9）で低温被害が起きる可能性があるとする。

3. 結果と考察

3.1 製品量

4≦ m ≦9 の各期間で低温被害を受けた圃場 1 ha 当たりから、通年で得られるサトウキビによる製糖量を図 1 に示す。被害程度は品種間でほぼ変わらず、被害時期が早いほど、多くのショ糖が還元糖へ分解するため、製糖量が少なく、逆転生産プロセスにより還元糖除去を行うメリットが大きい。被害なしでは KY01-2044 は利用技術によらず、NiF8 より製糖量が少ない一方で、被害時期が早いほど逆転生産プロセスを用いることで、用いない場合の NiF8 と近い製糖量を示している。つまり、製品量に関して逆転生産プロセスの技術と高バイオマスキビの組合せは比較的寒い栽培地域でメリットがある。

3.2 製糖量当たりの GHG 排出量

3.1 と同様に各期間で低温被害を受けた場合の通年の GHG 排出量を製糖量 1 t あたりで算出した（図 2）。逆転生産プロセス導入なしの場合では、被害による製糖量減少に伴い排出量も減少している。一方で、導入ありの場合では、製糖量が少ないほど排出量が大きい。エタノールの生産が製糖工程やガソリン代替による排出削減効果より排出寄与が大きく、被害時は製糖量に対する排出量が増加することがわかる。

4. 結言

今回はサトウキビを例に、収穫時期の気温の変化を考慮した製品量、環境負荷への影響を検討した。一方で、萌芽や分げつ性にも気温の影響は大きく、伸長期には台風による生育不良等の気象変動もある [7]。バイオマス利用システムの評価に際し、適切な変動要因を考慮した上で、製品 LCA の検討を進めたい。

引用文献

1) 小原聡, 福島康裕, 杉本明, 寺島義文, 石田哲也, 迫田章義: 日本 LCA 学会誌, Vol.5 (4), (2010), pp. 439-445
2) Ohara S., Fukushima Y., Sugimoto A., Terajima Y., Ishida T., Sakoda A.: Biomass Bioenerg., 42, (2012), pp. 78-85
3) Ouchida, K., Fukushima Y., Ohara S., Sugimoto A., Hirao M., Kikuchi Y.: AIChE J.. doi:10.1002/aic.15374 (2016).
4) 独自ヒアリング
5) 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構: “新品種候補決定に課する参考成績書さとうきび「KY01-2044」”, (2010), pp. 11-25
6) 独自ヒアリング
7) 日本特産農作物種苗協会, “特産種苗”, (2011), pp149-152

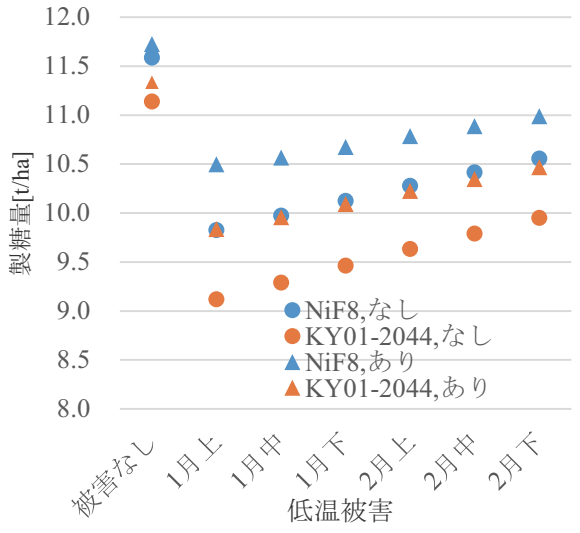


図 1 被害時期別逆転生産プロセスの有無と製糖量の関係

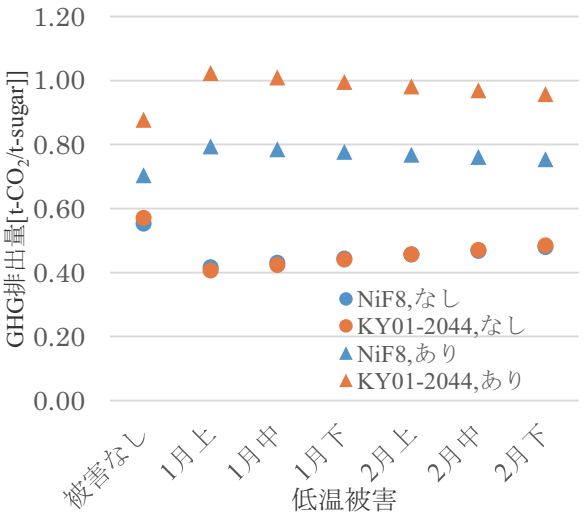


図 2 被害時期別逆転生産プロセスの有無と GHG 排出量の関係

イノベーション支援ツールとしての LCA

Opportunities and challenges in using LCA to accelerate technology innovation

○福島康裕 1)
Yasuhiro FUKUSHIMA
1)東北大学
* fuku@tohoku.ac.jp

1. 緒言

LCA は製品の環境側面の評価ツールとしてのみならず、その製造プロセスの設計に用いることができる事はよく知られている。本発表では LCA はさらに製造プロセス要素技術の開発にも展開できる可能性があり、研究と社会をつなぐイノベーション支援ツールとして役割を果たしていくことができるのではないか、と言うことを、研究事例を引用しながら議論したい。

いまや日本では大規模な石油化学プラントの新設は非常に少ない。しかし、化石資源の枯渇への備えや、地域の資源を活用した産業を興すことを目的としてバイオマスから燃料などの化学製品を製造し、地域で利用していくような新たな形の分散型化学プラントへの期待が高まっている。このようなプラントの社会実装を実現し、持続的に成り立たせるためには、化学プロセス設計の考え方を従来のものとは大きく違う形に変えていく必要がある [1]。

そこで、本発表ではまず、「従来とは異なる考え方」とはどのようなものであるのかについて整理し、そのあらたな考え方の元で LCA がどのようにプロセスの設計・開発を支援しうるのかを述べる。

また、化学プロセスに関する研究では「プロセス強化 [2]」という開発方針が注目を集めている。このアプローチは後に述べるように分散型プロセスの実現に向けて鍵となる方向性の一つである。本発表ではさらに、プロセス強化についても紹介し、その技術開発に於ける LCA の利用の可能性についても述べたい。具体的事例に関しては、別の研究発表 [3]にその詳細を譲る。

2. プロセス設計に求められるパラダイムシフトと LCA の役割

里山・里海地域では、バイオマスなどの自然資源が近隣に豊富に存在するため、これらを適切に利用しつくす統合化プロセスシステムを構築することで、物質やエネルギーの供給や雇用の増加、域外からの富の獲得などの形で地域に貢献をすることができる。一方、都市や工業地域から離れたこのような地域で役割を果たすシステムを経済的に持続可能な形で実装することのハードルは低くはない。プロセス産業では製品の市場規模でプロセスの規模が決まり、通常は規模が大きく稼働率の高い方が効率は高い。しかし、地域で地産地消されるエネルギーや製品の生産であれば市場規模は大きくないので、その規模は限定される。また、原材料や運転のためのエネルギー資源などのコストや、製品の市場までの運搬コストも高くなる。 従って、地域展開を目指す化学プロセスは、従来とは異なる経済合理性の考え方のもとで設計・評価されなければ成立は難しい。また、用いられる技術も、従来の如く安定した原料・エネルギー供給を前提に、大規模プロセスで力を発揮するものばかりではなく、小型でも高効率で、かつ年間を通して高稼働率を確保するために多目的、原料品質の変化に柔軟に生産可能といった要件を満たすシステムとするための技術を選択する必要があ

表１　従来のプロセス設計の姿と今後のプロセス設計の目指す姿

	従来	目指す姿
目的	企業の利益の最大化	企業の利益＋ 地域産業の利益
立地	工業地域，集中型	里山里海里川地域，分散
製品の市場	全世界（全国），大きい	地域内（国内）、規模は限定的
利益向上の方法	「規模の経済」の利用 － *稼働率の向上による設備費の圧縮* － *熱効率の向上*	モジュールの標準化 → 大量生産によるコスト圧縮 必要な製品の域内自給、未利用資源の利用 公共コストの低減
環境の位置付け	排出基準、取水制限など遵守すべき制約	生態系の好状態を維持し、その価値を最大化 保全が公共の利益（＝目的の一部）に合致
社会責任	プロセスシステムの設計に際して影響は限定的	共生可能なプロセスシステムの実現によるコミュニティー全体の活性化

る。以上、従来のプロセス設計の姿と今後目指すべきと筆者が考えている姿を表 1 に対比させて整理した。また、新たなパラダイムの下での化学製品の製品製造プロセスの設計においては、少なくとも次の３つの LCA の用途がありうる。

1. **複数の複雑な変換過程を一貫したシステムとして比較すること**
   例えば微細藻類を用いてバイオマスを獲得し、燃料などの化学製品とする際には、乾燥工程、抽出工程、精製工程など様々なルートが提案されている[4]。これらの中から目的に応じて選ばれた指標で比較することで有望なプロセスを合成する。その指標として LCA で得られる環境影響を用いることで、環境負荷低減が目的であればその合理性の確認に、制約条件となる場合にはプロセス全体での達成目標の設定に対応できる。
2. **開発目標までの道筋を示すこと**
   合成されたプロセスを対象に LCA を用いて注目すべき操作変数やスペックを抽出する。これらをパラメータとして、LCA で算出される様々な目標値に対して現状の研究開発がどの程度の位置にいるのかを、等排出量線（ブレークイーブン線）[5]などを用いて可視化し、研究開発やプロセスの選択候補の探索に活用する[4]。
3. **目的と制約条件に合わせて、プロセスの変数を決める「最適化」を行うこと**
   何を目的とし、何を制約条件として考慮するかという事を決めること自体が最適化というアクティビティの一部分と考える。その上で、2. で得られた情報を駆使して開発ターゲットを達成するための、プロセスの変数と開発ターゲットを各パラメータについて落とし込む[3,4]。

3. プロセス強化と LCA の役割

プロセス強化とは、複数の反応、あるいは反応と分離など、従来は個別のプロセスで行われていた複数の操作を複合化しより少数のプロセスで実現することで、プロセスシステムの劇的な簡略化を実現し、コンパクトで取り扱いしやすくする開発アプローチである[2]。分離操作の設備である蒸留塔や膜モジュールの中で反応を起こす強化プロセスや、触媒と吸着材を兼ねたイオン交換樹脂を用いた反応分離プロセス、などの例がある。地域に分散する小型の製造プロセスはコンパクトで単純な構成の設備が望まれる。このため、プロセス強化は大規模な化学プラントだけでなく、上記の新たなパラダイムの元で成立するような化学プロセスでの応用が期待される。

プロセス強化においては、複数の操作間のバランスはプロセス最適化の変数となり得る。そのような変数を、目的に合わせて決定する際に、バイオマス利用システムのように GHG 排出削減率のような環境負荷低減が制約条件として採用される場合には、LCA を用いる必要性が生じる。

本来プロセス強化の範疇には含まれない事が多いようであるが、反応に必要な原料の製造とそれを用いた製品の製造を同時に行うような複合機能触媒を用いるプロセスも新たな反応ルートを用いているわけではないのでプロセス強化の一手法と考えることもできるだろう。本研究会での別の講演[3]で、植物の繊維から得られるバイオマス原料であるソルビトールと水素から炭化水素を製造するプロセスで、水素の製造を一部行う水相改質反応を水素化分解反応と同時に起こすことのできる触媒を用いることで外部からの化石資源由来の水素の投入量を削減し、狙った GHG 排出削減率を達成するという研究を発表する。詳細はその講演に譲るが、二つの反応の選択率は触媒の構造を調整することで設計が可能である。強化型プロセスを対象とすることで、LCA を触媒の設計に用いることが必要となった興味深い例となっている。

4. 結言

LCA には製品の環境側面を理解し、そのライフサイクルシステムの改善を行うといった一般的な LCA の用途から、その開発を含めた技術イノベーションを支援するツールとして、飛躍的な役割の拡大を起こす可能性があり、LCA 研究者と技術開発者の共同研究の促進が望まれる。

参考文献

1) Fukushima Y. : Roles of Process Systems Engineer in Directing Development of Systems Technologies, Proceedings of PSE Asia 2016 (2016)
2) Andrzej I. Stankiewicz, Jacob A. Moulijn: Process Intensification: Transforming Chemical Engineering, Chemical Engineering Progress, (2000), pp. 22-34
3) 奥山泰世、小池充、田村正純、中川義直、今井章雄、冨重圭一、福島康裕：バイオガソリン製造用触媒の設計への LCA の適用、第 12 回日本 LCA 学会講演要旨集 (2017)
4) 鈴木征史、大野肇、福島康裕：下水処理-藻類培養統合プロセスに於ける導入技術選択に資するライフサイクルアセスメント、第 12 回日本 LCA 学会講演要旨集 (2017)
5) Fukushima Y., Chen S.-P., Int J LCA, A decision support tool for modification in crop cultivation method based on life cycle assessment: A case study on greenhouse gas emission reduction in Taiwanese sugarcane cultivation, 14 (7), 639-655 (2009)

内生型構造経路分析を用いたアジア地域における炭素質エアロゾルの排出分析

Analyzing the Carbonaceous Aerosol Emissions in Asia Using Endogenous Structural Path Analysis

○永島史弥*[1)]、加河茂美 [1)]
Fumiya Nagashima, Shigemi Kagawa
1) 九州大学
* sbhfmb1122@yahoo.co.jp

1. はじめに

今日、アジアの国や地域は、さまざまな財やサービスを生み出す過程で多量の化石燃料を消費し、大気汚染の原因となる物質を排出している（参考文献）。特に中国領内で排出される微小粒子状物質($PM_{2.5}$)は大気汚染物質の越境輸送を通して国内だけにとどまらず、近隣諸国においても環境影響や健康被害をもたらしている（参考文献）。もし新たな政策が導入されなければ、2050 年には大気汚染が早期死亡者をもたらす最大のリスク要因になると OECD は警告しており、温室効果ガスだけでなく大気汚染物質の削減に関しても早急の対策が必要となっている（参考文献）。

アジア地域において大気汚染物質が増加する要因の一つに、他国に対する輸出需要の増加が挙げられる。製品を輸入し消費した国がその財の生産過程で発生した環境負荷に対して責任を負うという「消費者基準」の観点から見た排出量の推計が、これまでにも多くの研究で行われており（Guan *et al*., 2014; Meng *et al*., 2016）、例えば、Guan *et al*. (2014)は、中国の輸出に体化された一次生成の $PM_{2.5}$ 排出量を推計し、これらの排出が主に OECD 加盟国の消費に誘発されていることを明らかにした。近年では、このような「消費」と「生産」のリンケージだけでなく、大気質シミュレーションモデル等を用いることで、排出された大気汚染物質の越境輸送を加味した研究も多くなされており（Takahashi et al., 2014; Li *et al*., 2016; Nagashima *et al*., 2016）、「消費」と大気輸送された汚染物質によって引き起こされる「健康被害」のリンケージについても分析されている。

これらの研究はすべて産業部門における人為起源の大気汚染物質にのみ着目している一方で、Liu *et al*. (2016)でも指摘されているように、アジア最大の排出国である中国では産業部門からの排出よりも家計消費による排出が圧倒的に多い。中国の家計部門からの排出は主に低所得世帯によって形成される農村を中心とした地域における低品質石炭やバイオマスの燃焼に起因している。このような農村部と都市部における大気汚染物質排出の差異は所得や消費スタイルの格差によるものであり、消費→生産→所得→消費→...といったサイクルが波及していく過程で家計部門での排出格差が拡大していくものと考えられる。このような所得―家計消費（ライフスタイル）―大気汚染排出の関係を分析するためには、産業連関システムを社会会計表（Social Accounting Matrix: SAM）に拡張する必要がある。産業間のやり取りだけでなく産業部門と家計部門のやり取りと各家計部門の消費と所得の差異に伴う排出格差の波及を分析することは、大気汚染問題に抜本的に取り組むための重要な示唆を提供するであろう。そこで本研究では、中国国内の家計部門に着目し、中国の大気汚染物質の排出における家計部門の役割について分析する。

2. データ及び研究手法

本研究で使用するデータは、Liu *et al*. (2012)で推計された 2007 年版中国地域間産業連関表である。当産業連関表は中国国内 30 の省や自治区、直轄市と 18 の産業部門から構成されている。本研究では Miyazawa and Masegi (1963)において提唱された家計消費内生化の Miyazawa モデル（タイプⅡ型産業連関モデル）を多地域産業連関表に適応して分析を行った。

		中間需要				最終需要			合計
		産業1	産業2	…	産業n	家計1 … 家計r		その他最終需要	
中間投入	産業1	z_{11}	z_{12}	…	z_{1n}	h_{11} … h_{1r}		f_1	X_1
	産業2	z_{21}	⋱		⋮	h_{21} ⋱ ⋮		⋮	⋮
	⋮	⋮		⋱		⋮		⋮	⋮
	産業n	z_{n1}	……		z_{nn}	h_{n1} … h_{nr}		f_n	X_n
付加価値	家計1	V_{11}	V_{12}	…	V_{1n}				
	⋮	⋮	⋱		⋮				
	家計r	V_{r1}	……		V_{rn}				
合計		X_1	……		X_n				

$(n > r)$

図 1　産業連関表の概念図

図 1 は本研究で用いる産業連関表の概念図である。Lenzen and Schaeffer (2004)では、家計部門を

所得水準ごとに分類しているが、本研究では地域別の大気汚染物質の排出に着目するため、中国国内 30 の各地域の家計部門の分類とする。

ここで、$a_{ij} = \mathrm{z}_{ij}/\mathrm{X}_j$を投入係数、$v_{kj} = \mathrm{V}_{kj}/\mathrm{X}_j$を第$j$産業における第$k$家計部門の付加価値係数、$c_{ik} = h_{ik}/\sum_j \mathrm{V}_{kj}$を第$k$家計部門の第$i$産業への消費係数をとし、各々に対応する行列をそれぞれ$\mathbf{A}, \mathbf{V}, \mathbf{C}$で表す。家計消費および所得を内生化した Miyazawa モデルは次のような行列形式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix}\mathbf{x}\\ \mathbf{y}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\mathbf{A} & \mathbf{C}\\ \mathbf{V} & \mathbf{O}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{x}\\ \mathbf{y}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\mathbf{f}\\ \mathbf{g}\end{bmatrix} \tag{1}$$

ここで、$\mathbf{f} = \{f_i\}$は家計部門以外の最終需要を表すベクトルであり、$\mathbf{g} = \{g_i\}$は外的出処からの所得を表すベクトルである。この方程式を解くと次のようになる。

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}\mathbf{x}\\ \mathbf{y}\end{bmatrix} &= \begin{bmatrix}\mathbf{I}-\mathbf{A} & -\mathbf{C}\\ -\mathbf{V} & \mathbf{I}\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\mathbf{f}\\ \mathbf{g}\end{bmatrix}\\ &= \begin{bmatrix}\mathbf{B}(\mathbf{I}+\mathbf{CKVB}) & \mathbf{BCK}\\ \mathbf{KVB} & \mathbf{K}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{f}\\ \mathbf{g}\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{2}$$

$\mathbf{B} = (\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}$はレオンチェフ逆行列を表し、$\mathbf{K} = (\mathbf{I}-\mathbf{VBC})^{-1}$は所得連関乗数行列を表す。このように家計消費を内生化することで、拡大レオンチェフ逆行列は生産誘発による産業間のリンケージに加え、消費誘発による生産–所得–消費–生産といったリンケージを含む。

この Miyazawa モデルを環境分析に拡張し、所得形成の過程と環境負荷の相互関係についての分析を行う。産業部門と家計部門の単位当り大気汚染物質排出量ベクトルをそれぞれ$\mathbf{q}_s, \mathbf{q}_h$とすると、第$r$地域の最終需要$\mathbf{f}^r$が誘発する産業部門での大気汚染物質排出量$Q_s^r$は、以下のように計算できる。

$$\begin{aligned}Q_s^r &= \mathbf{q}_s\mathbf{B}(\mathbf{I}+\mathbf{CKVB})\mathbf{f}^r = \mathbf{q}_s\mathbf{B}(\mathbf{I}-\mathbf{CVB})^{-1}\mathbf{f}^r\\ &= \mathbf{q}_s\mathbf{B}(\mathbf{I}+\mathbf{CVB}+(\mathbf{CVB})^2+(\mathbf{CVB})^3+\cdots)\mathbf{f}^r\\ &= \mathbf{q}_s\mathbf{B}\mathbf{f}^r+\mathbf{q}_s\mathbf{BCVB}\mathbf{f}^r+\mathbf{q}_s\mathbf{B}(\mathbf{CVB})^2\mathbf{f}^r+\cdots\end{aligned} \tag{3}$$

展開式の各項は、生産→所得→消費というサイクルの波及段階（propagation layer）を示している。例えば、(3)式の第 1 項$\mathbf{q}_s\mathbf{B}\mathbf{f}^r$は第$r$地域の最終需要が誘発する直接・間接の大気汚染物質排出量（従来の消費者基準排出量）を表し、第 2 項$\mathbf{q}_s\mathbf{BCVB}\mathbf{f}^r$は第$r$地域の最終需要が誘発した生産によって生じた家計所得が再び消費に回り、その消費を満たすための生産活動に伴って直接・間接的に排出された大気汚染物質排出量を表している。

同様に第r地域の最終需要が誘発する家計部門での大気汚染物質排出量Q_h^rは以下のように計算することができる。

$$\begin{aligned}Q_h^r &= \mathbf{q}_h\mathbf{KVB}\mathbf{f}^r\\ &= \mathbf{q}_h(\mathbf{I}+\mathbf{VBC}+(\mathbf{VBC})^2+(\mathbf{VBC})^3+\cdots)\mathbf{VB}\mathbf{f}^r\\ &= \mathbf{q}_h\mathbf{VB}\mathbf{f}^r+\mathbf{q}_h\mathbf{VBCVB}\mathbf{f}^r+\mathbf{q}_h(\mathbf{VBC})^2\mathbf{VB}\mathbf{f}^r+\cdots\end{aligned} \tag{4}$$

展開式の各項は、それぞれ消費→生産→所得というサイクルの波及段階を示している。

3. 結果と考察

結果および議論については LCA 学会発表会にて詳細を述べる。

4. 引用文献

1) Guan, D., Su, X., Zhang, Q., Peter, G.P., Liu, Z., Lei, Y., He, K. (2014) *Environmental Research Letters*, 9(2), 024010.
2) Meng, J., Liu, J., Xu, Y., Guan, D., Liu, Z., Huang, Y., Tao, S. (2016) *Proceedings of the Royal Society A*. 472: 20160380.
3) Takahashi, K., Nansai, K., Tohno, S., Nishizawa, M., Kurokawa, J., Ohara, T. (2014) *Atmospheric Environment*, 97, 406–415.
4) Li, Y., Meng, J., Liu, J., Xu, Y., Guan, D., Tao, W., Huang, Ye., Tao, S. (2016) *Environmental Science & Technology*, 50, 4118–4126.
5) Nagashima, F., Kagawa, S., Suh, S., Nansai, K., Moran, D. (2016) *Economic Systems Research*, Forthcoming.
6) Liu, J., Mauzerall, D.L., Chen, Q., Zhang, Q., Song, Y., Peng, W., Klimont, Z., Qiu, X., Zhang, S., Hu, M., Lin, W., Smith, K.R., Zhu, T. (2016) *PNAS*, 113(28), 7756–7761.
7) Liu, W.D., Chen, J., Tang, Z., Liu, H.G., Han, D., Li, F.Y. (2012) *China Statistics Press*, Beijing, P.R. China.
8) Miyazawa, K., Masegi, S. (1963) *Metroeconomica*, 15(2), 89–103.
9) Lenzen, M., Schaeffer, R. (2004) *The Developing Economics*, 42(3), 371–391.

室内空気質汚染と一般大気汚染を対象としたライフサイクル健康影響評価手法の開発

The development of Life-cycle Health Impact Assessment methods for Indoor Air Quality Pollution and Urban Air Pollution

○枝廣あかり*1) 湯龍龍 2) 伊坪徳宏 1)

1)　東京都市大学伊坪研究室 2) 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構

*g1683103@tcu.ac.jp

1.　はじめに

世界保健機関が 2014 年に発行した報告書では、室内空気質汚染は最も重要な健康リスクであると提言している。主に調理機器や暖房器具から発生する室内空気質汚染は、換気設備が十分備わっていない発展途上国が全体の 9 割の被害者数を占める。

一方、一般大気汚染の健康影響も Global Burden of Disease project が 2015 年に発行した報告書(GBD 2013)から、死者数が毎年 550 万にのぼると報告されている。一般大気汚染の排出源としては火力発電に用いる石炭燃料の寄与が大きく、特に中国・インドで被害者数が多いと推定されている。

これまで LCA における健康影響評価手法の開発研究では一般大気汚染に関する検討が多く、近年はLIME3 をはじめ世界における影響を考慮した研究が行われている。本研究では、以下の点を当該分野の研究課題として捉えた。

・疫学研究の進展により、脳卒中や肺がん、慢性虚血性心疾患といった疾患別の評価が可能となっている。従来の全要因を束ねた慢性死亡ではなく、要因別の評価が可能となる。

・運命分析は地球規模の大気循環モデルを利用する研究が増えたが、計算負荷から排出地域の細分化が十分でなかった。

・室内空気質汚染を対象とした評価も UNEP/SETAC Lifecycle Initiative において検討がなされるなど一定の進捗がみられるが、大気汚染による影響と統合するための検討は十分行われていない。

2.　研究目的

本研究では、地域細分化および評価対象疾患別に評価する一般大気汚染の影響評価モデルを構築するとともに、室内空気質汚染の健康影響評価モデルを新規開発して両者の健康影響を融合する総合的な影響評価手法を構築することを目的とした。

なお、今回の発表では一般大気汚染の評価手法開発について報告する。

3.　評価対象及び研究方法

3.1 評価対象

評価対象物質は SO_2、NOx、NH_3、PM2.5 とする。対象国は、EDGAR が対象としている 192 ヶ国の排出量を 32 地域に統合した。LIME3 が 10 地域を対象としたことに比べると地域細分数を大幅に増やしたこととなる。室内空気質汚染に関しては、産業総合研究所が開発した暴露濃度算出ソフトウェア「iAir」を用いて、各地域に対応させて評価を行う予定である。健康影響の評価においては、4 種の疾病(肺がん・脳卒中・慢性閉塞性肺疾患・虚血性心疾患)を対象に損失余命を求めた後、これらの総計を取ることで被害係数を算定する。

3.2 算定方法及び使用データ

被害係数の算定フローを図 1 に示す。

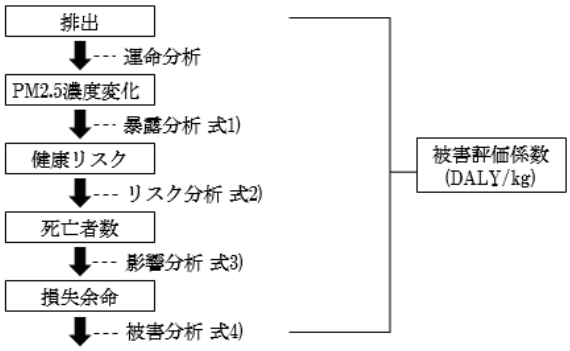


図 1 被害係数の算定フロー

上記のフロー図は「LIME2 -意思決定を支援する環境影響評価手法（伊坪ら 2010）」を参考にして作成した。図の中に記されている式 1~4 までを以下で説明する。

式 1)　$RR = 1+\alpha*(1-EXP(-\gamma*(C - zcf)^{\delta}))$

式 2)　Death = RR * 死亡率 * 人口

式 3)　DALY = Death * DALY/Death

式 4)　$DALY/kg = (DALY_0 - DALY_+)/ SO_2$ 排出量

上記式 1~3 で使用するデータを下記表 1 にまとめた。

表 1 使用データ

		室内空気質汚染	一般大気汚染
式1	$\alpha \cdot \gamma \cdot zcf \cdot \delta$ (相対リスクを算出するためのパラメーター)	Global Burden of Disease	
	C	EDGAR	産業技術総合研究所 iAirソフト
式2	死亡率$_{a,d}$	WHO,209	
	人口$_e$	United Nations,2015	
式3	DALY, Death	WHO,2005	

最後の式 4 では $DALY_+$ から $DALY_0$ の差分を取った数値を SO_2 排出増分で除している。本研究では 2 つのシナリオ「ベースシナリオ」（全球）及び「20%増加シナリオ」（地域別）について計算した。
ベースシナリオは、192 カ国における現状排出量を基礎データとして大気汚染モデルを用いて全球の PM2.5 濃度を評価した結果である。20%増加シナリオは、ベースシナリオの排出量に加えて、いずれかの地域のみを排出量を 20%増加させた場合を基礎データとして計算した結果となる。本研究では 32 地域を対象としているため、32 地域分の増加シナリオが存在する。
得られた地域ごとの被害係数に地域の年間排出量を乗じると当該地域で排出された大気汚染物質による全球の健康影響増分が得られる。（式 5）。

式 5) DALY = 大気汚染物質排出量 reg ＊ 被害係数 reg

SO2 排出量は EDGAR に記載されている各国の数値を使用した。

4. 結果

一般大気汚染の評価結果について以下に示す。
まず初めに、4 つの疾病を合計した被害係数値を全球で算出した（図 2）。

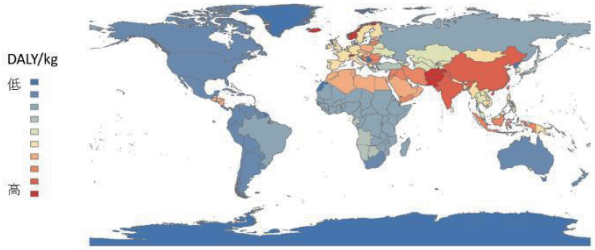


図 2 被害係数結果(SO_2)

4 つの疾病の合計で最も被害係数が高かった地域は東アジア及び南アジアであった。いずれも人口密度が高く、かつ、西風の風下になる地域に人口密度が高い地域があることも影響している。東南アジアや日本は比較的人口は高いが、排出された大気汚染物質の多くは海洋側へと移送されるため他地域への影響が小さく被害係数も中国やパキスタン、インドに比べて小さかった。人口密度の低い北米やロシア、オーストラリアの被害係数は相対的に小さかった。

次に、被害係数に排出国別の年間排出量を乗じた結果を図 3 に示した。

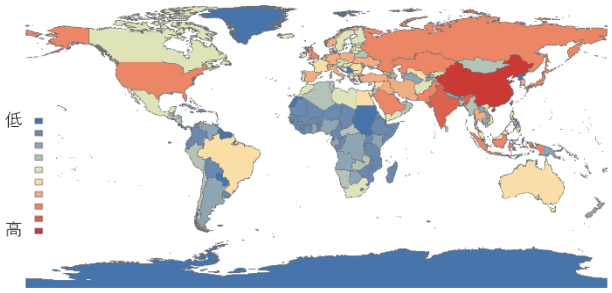


図 3 国ごとの DALY 結果

中国での排出由来の被害量が最大（1207295DALYs）で、これに次いで、インド（454262DALYs）、イギリス（319002DALYs）、アメリカ（287915DALYs）という順で大きかった。中国とインドは自国での影響が大きい。アメリカは被害係数に対し、年間排出量が大きいため健康被害量は大きくなった。これらを合計すると 11043592DALYs となった。これは WHO による算定とほぼ整合する結果となった。

5. まとめ

本研究では一般大気汚染を対象に、既存の算定手法を修正し、本研究の目的に適用させる形で健康影響評価結果及び被害係数を算定した。
結果としては、被害係数及び大気汚染物質の年間排出に伴う健康被害の双方とも東アジア・南アジアが高い値となった。これは人口密度が高く、かつ、石炭や薪などの燃料を熱源として利用することが主要因と考えられる。

6. 参考文献

1) World Health Organization- indoor air pollution-
2) Global Burden of Disease project (2013)
3) LIME2―意思決定を支援する環境影響評価手法 p.99
4) PREVENTING DISEASE THROUGH HEALTHY ENVIRONMENTS p.57-59
5) An Integrated Risk Function for Estimating the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Fine Particulate Matter Exposure p.397-404
6) Indoor Air Pollutant Exposure for Life Cycle Assessment: Regional Health Impact Factors for Households p.12823-12831
7) Regionalized life cycle impact assessment of air pollution on the global scale: Damage to human health and vegetation p.129-137

地域性を考慮した航空機騒音による健康影響評価

The health impact assessment by air plane noise considering special differences

○山本　遼*[1)]、伊坪徳宏 [1)]
Ryo Yamamoto, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学
*g1362137@tcu.ac.jp

1. はじめに

経済成長に伴う都市化や人口増加によって交通機関の発達したことで、航空機や自動車などの交通手段を原因とする騒音被害が問題視されている。疫学研究によると、騒音は高血圧や心疾患、睡眠妨害などとの関連性が認められており、深刻な健康問題を及ぼすリスクがある。なかでも航空機騒音は、騒音レベルが他の交通機関と比べて高く、広範囲に騒音が及ぶため、被害人口が多いと考えられる。

欧州 WHO 事務局が 2011 年に「Burden of disease from environmental noise」という報告書を公開しており、騒音による健康影響を DALY という指標で表している。西欧州では年間約 160 万 DALY の健康被害が出ている。世界的に騒音問題が重大な問題として認識されているとともに、欧州の各空港は、騒音に規制をかけてられている。日本国内においても、騒音に関する環境基準（表 1 参照）を定めている。国内で空港騒音を DALYs として評価した事例は少なく、新環境基準等の施策・規制の妥当性を人間健康の側面から測る必要がある。

表 1　騒音に関する新環境基準 [1)]

環境基準は、地域の類型ごとに次表の基準値の欄に掲げるとおりとし、各類型をあてはめる地域は、都道府県知事が指定する。

地域の類型	基準値	
	現行	改正後
Ⅰ	W値７０以下	Lden５７デシベル以下
Ⅱ	W値７５以下	Lden６２デシベル以下

（注）Ⅰをあてはめる地域は専ら住居の用に供される地域とし、Ⅱをあてはめる地域はⅠ以外の地域であって通常の生活を保全する必要がある地域とする。

環境基準の改正（概要）

2. 研究目的

本研究では、欧州 WHO 事務局が報告した「Burden of disease from environmental noise 2011」に記載されている算定方法に基づいて、国内 5 つの空港付近における健康影響を DALYs 値として算定する。その結果から新環境基準によって空港間にどれほどの差異が生じるのか調べることを研究目的とする。

3.　方法

3.1 評価対象

本研究の評価対象は、東京国際空港、中部国際空港、大阪国際空港、福岡空港、那覇空港の 5 空港とする。

上記の空港を算定した理由は、以下の二点である。

1. 空港による健康影響の違い（地域性）をみる。
2. 会社管理空港や国管理空港は発着回数が多いため、騒音被害が出やすい。（図 1）

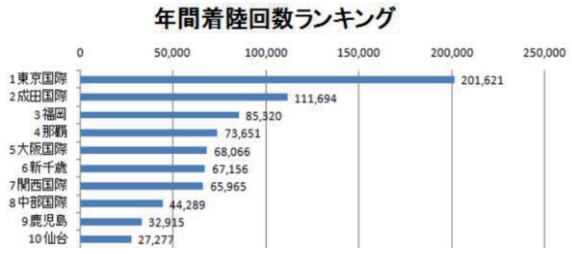


図 1　各空港の発着回数（平成 25 年度）[2)]

3.2 算定項目

WHO が制定した騒音による健康影響 5 項目アノイアンス、心疾患系、睡眠妨害、認知障害、耳鳴りを算定項目とする。

3.3 算定方法

騒音による被害量の算定式を以下に示す。

$$DALYs=EF*P*DW \quad (1)$$

DALY:騒音による健康影響(損失余命：年)
EF:影響分析(%)
P:曝露人口（人）
DW:Disability weight (障害重み付け係数)

式 2）影響分析 EF・被害分析 DW [4) 5)] を疾患の種類ごとに示した。

・アノイアンス

$$EF=-9.199・10\text{-}5\ (Lden\text{-}42)3+3.932・10\text{-}2(Lden\text{-}42)2+0.2939(Lden\text{-}42) \quad (2)$$

DW=0.02

・睡眠妨害

$$\%HSD=18.147-0.956(L_{night})+0.01482(L_{night})^2 \quad (3)$$

DW=0.045

・心疾患系

$$OR=1.63-6.13・10^{-4}・L_{day,16h}+7.36・10^{-6}・L_{day,16h} \quad (4)$$

急性心筋梗塞　DW=0.405　狭心症　DW= 0.108
鬱血性心不全　DW=0.186　高血圧症　DW=0.201
虚血性心疾患　DW=0.3502

・認知障害

こどもの認知障害の影響分析は騒音レベルごとに設定されており、55dB 未満は 0%、55～65dB は 20%、65～75dn は 50%、75dn 以上は 75%とする。DW=0.006

・耳鳴り

耳鳴りの障害重み付け係数は騒音レベルごとに設定されており、50～64dB の DW 値は 0.01、65dB 以上の DW 値は 0.11 とする。

3.4 暴露人口

空港を点音源と見なして、距離減衰式を用いることで、騒音の拡散範囲を求める。（図 2）点音源の騒音レベルは、140dB とする。

減衰式）L2=L1-20log(r2/r1)

r1：基準距離

r2：予測距離

L1：基準距離での騒音レベル

L2：予測距離での騒音レベル

＊音源源が距離に対して十分小さい（点音源）と仮定した場合の式である。

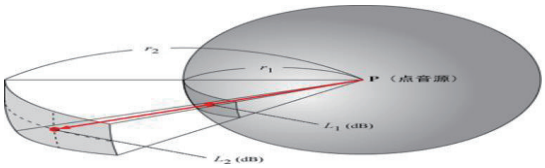


図 2　点音源の拡散 [3)]

求めた半径に応じて GIS（地理情報システム）で網掛けすることで、暴露人口のデータを得た。以下表 2 は、空港から半径 12000m 以内の騒音レベル及び曝露人口を示す。

表 2　各空港周辺地域の曝露人口及び騒音レベル

減衰距離(m) ＼ 空港名		東京国際空港	中部国際空港	大阪国際空港	福岡空港	那覇空港
12000	57.5	2.1E+06	2.3E+05	3.4E+06	1.8E+06	7.1E+05
7500	62.3	6.3E+05	6.7E+04	1.7E+06	1.1E+06	4.5E+05
4500	67.3	7.7E+04	2.8E+04	6.5E+05	4.9E+05	2.0E+05
2500	72.3	9.5E+02	5.0E+00	1.6E+05	1.2E+05	5.4E+04
1400	77.3	1.0E+00	1.0E+00	3.6E+04	2.7E+04	1.9E+04
800	82.3	0.0E+00	0.0E+00	5.1E+03	5.7E+03	1.5E+03
450	87.3	0.0E+00	0.0E+00	2.1E+02	0.0E+00	6.9E+02
250	92.3	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
	騒音レベル(dB)					

4. 結果

4.1 結果グラフ

航空機騒音による損失余命算定結果を図に示す。

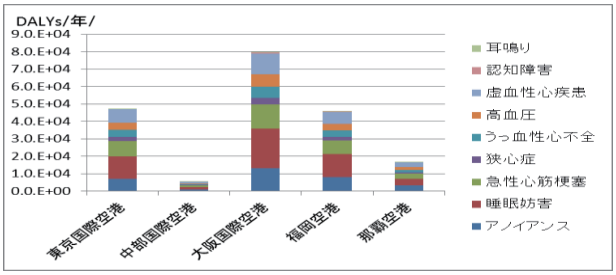


図 3 各空港(DALYs/年)

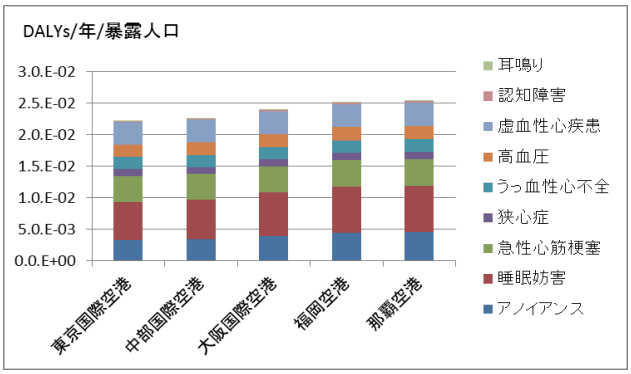


図 4　各空港 DALYs 値(DALYs/年/曝露人口)

4.2 考察

図 3 は、各空港から半径 12000m 以内の曝露人口あたりの総 DALYs 値を示したものであり、図 4 は、曝露人口で除し、一人当たりの DALYs を示したものである。半径 12000m を暴露範囲として定めた理由は、新環境基準 [1)]に 57dB を超えると人体の健康に影響を与えうると明記されているためである。空港間で大きな差が見受けられないものの、那覇空港は、相対的に大きかった。各空港ともに日数に換算すると、7~9 日失われたことになる。どの空港においても、睡眠妨害が大きな値となっている。健康への影響度を示す影響分析値が他の項目と比べて高いことが理由として挙げられる。

5. まとめ

本研究では、各空港の航空機騒音による健康影響を算定した。航空機騒音による健康被害は曝露人口が大きく関わっていることがわかった。大阪国際空港や福岡空港は、他の空港と比べて DALYs 値が高いが、これは、空港周辺が住宅地や商業地になっており、人口密度が高いためである。いずれも睡眠妨害による健康被害が大きかった。よって夜間飛行回数の制限なども健康削減効果が高いものと考えられる。

参考文献

1) 環境省騒音に係る環境基準の評価マニュアル
2) 国土交通省_空港管理状況【参考資料】平成 25 年（暦年）空港別順位表
3) 株式会社小野測器　HP
4) WHO EU: Burden of disease from environmental noise-Quantification of health life years Lost in Europe- (2011)
5) WHO methods and data sources　for global burden of disease estimates 2000-2011

ジャカルタにおける睡眠困難の実態把握とエアコン導入効果の定量化

Survey on sleep disturbance and quantification of introduction effect of air conditioners in Jakarta

○ 草間蓮*1)、井原智彦 1)
Ren Kusama　Tomohiko Ihara
1) 東京大学
*5057130409 @ edu.k.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

近年、地球温暖化に伴う気温上昇に加え、ヒートアイランド現象によって都市域の高温化が加速している。さらに、国連（2014）によれば、2014 年時点で、世界人口の 54%が都市域で生活していると報告されており、特にアジア新興国などを中心として今後も都市人口は増加していくことが予測されている[1)]。

このような傾向は、都市人工被覆の拡大によるエネルギー需要の増加など、社会的な問題を数多く引き起こすと考えられる。特に、都市域を中心とした直接の暑熱による健康影響が増大し、住民の健康上重要なリスクとなることが懸念される。さらに、睡眠中に熱中症の発症に至る危険性も明らかになっており[2)]，夜間の外気温の上昇に伴う暑熱健康被害は大きな社会問題であるといえる。しかし、睡眠困難などの軽度の暑熱影響の解析は社会統計には記載されないため、疫学調査を行っている高緯度の先進国のみで実施されており[3) 6)]、低緯度の発展途上国ではほぼ実施されていない。

そこで本研究は、低緯度に位置し、都市圏人口が東京に次ぐ世界第 2 位であるインドネシアのジャカルタを対象に、統計に記載されない軽度の暑熱健康影響として睡眠困難の実態を把握した。また、適応策評価としてエアコン導入効果を定量化した。定量化には、影響間比較が可能でかつ、伊坪ら[4)]が開発した LIME による統合化も可能な障害調整生存年数(disability adjusted life year, DALY)を用いる。

2. 研究手法

2.1. 睡眠困難の推計

ジャカルタにおいて睡眠に関する疫学調査を実施し、その結果を用いて外気温と睡眠困難罹患率との関係を解析した。エアコンの使用有無による被害関数の変化の解析を実施し、導入効果を定量化した。

2.1.1 疫学調査概要

表 1　過去 1 か月の睡眠の質に関する調査

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
	睡眠の質	入眠時間	睡眠時間	睡眠効率	睡眠困難	眠剤の使用	日中覚醒	睡眠困難
ジャカルタ 2016, 訪問留め置き	0.80	0.70	0.80	0.00	1.03	0.02	0.44	6.1%
東京 2007, インターネット	1.28	1.08	1.40	0.19	0.83	0.26	0.90	46.6%

ジャカルタにおいて 2016 年 10 月、11 月の連続 3 週間のうち火・水・木曜日に睡眠に関する疫学調査を実施した。その結果を基に睡眠困難罹患率を算出し、外気温との関係を解析した。サンプル数は N=264、調査は訪問留め置き調査にて行い、対象者はジャカルタに居住する 20 歳以上の男女から年齢構成、社会階級（SEC）を考慮して抽出した。

2.1.2 気温データ

OGIMET[5)]から日最高気温、3 時間ごとの気温が入手可能である。利用可能な外気温データは 3 つの観測地点が存在するため、ジャカルタ市内をそれぞれの観測点に対応する 3 地域に分類した。

2.1.3 睡眠困難の評価

睡眠研究で広く用いられている Kupfer らによって開発された過去 1 か月の睡眠に関する 18 項目の質問票（ピッツバーグ睡眠質問票, PSQI）を参考に，井原ら[6)]が作成した毎日の睡眠に関する質問票（SQIDS）を用いて評価した。PSQI 及び SQIDS は以下のような 7 つの構成要素に分類される。
①睡眠の質②入眠時間③睡眠時間④睡眠効率⑤睡眠困難⑥眠剤の使用⑦日中覚醒困難

これらを各 0–3 点の 4 段階で評価し，総合得点（0–21 点）を算出し、総合得点が高いほど睡眠の質が悪いと評価される。土井らは PSQI の結果が睡眠障害(sleep disorder)と相関することを示し，特に PSQI の総合得点 5.5 点（5 点と 6 点の間）と睡眠障害の診断基準が高い割合で一致することを示した[7)]。そこで、本研究では SQIDS の得点 5.5 点を睡眠困難のカットオフポイントとして定め、毎日の罹患者数を推計した。本調査における PSQI の得点分布と睡眠困難罹患率を表 1 に示す。

2.2　健康影響の定量化

健康影響の定量評価のために DALY（障害調整生存年）を用いた。以下の式[8]で計算される。

DALY ＝ YLL＋YLD

YLL ＝ N × L

YLD ＝ I × DW × L

（N：死亡数、L：余命、I：障害発生数、DW：重篤度、L：罹患期間）睡眠困難の DALY は YLD＝睡眠困難発生数×重篤度×罹患期間で算出した。重篤度は 0.1（Fukuda et al 2013）、罹患期間は 1/365[年]とした。睡眠困難発生数はジャカルタの人口（2015 年）×罹患率によって算出した。

3. エアコン導入効果の評価

エアコン導入効果を定量化するため、被験者を就寝時にエアコンを使用（冷房運転）した場合と、使用していない場合（除湿運転、扇風機を使用した場合を含む）に分類し解析を行った。本調査の結果、最も多い就寝時刻は 22 時台であったため、睡眠困難罹患率と 22 時外気温との関係を 3 次の平滑化スプライン回帰（GCV による自由度最適化）によって導出した。結果を図 1 に示す。被害関数を用いて、現状とエアコン使用率を増加させた場合の損 DALY[年]の比較を行った。結果を表 2 に示す。

4. 結果と考察

エアコン使用有無による睡眠困難罹患率の被害関数を導出した。エアコンを使用した場合、線形型の関数となった。また、使用していない場合は気温が 27.7℃よりも低い場合も高い場合も罹患率が上昇する V 字型の関数となった。エアコンを使用しない場合は気温に感応しやすく、気温が高くなるほど罹患率の増加も著しくなる傾向となった。本調査から得られた現状のエアコン使用率を 40%から 80%に増加させた場合、年間約 20%の DALY 損失(13.8[千年])を削減できる試算となった。

5. おわりに

インドネシアのジャカルタにおける睡眠困難の被害関数を開発し、エアコンの導入効果を定量化した。今後は、東京や名古屋の睡眠困難に関する疫学データのメタ解析を進めることで一般化し、被害関数を他都市へ適用する方法も探索する。また、年齢構成や社会階級別の解析を行うことで、将来予測に必要なパラメータの整備も検討していく。

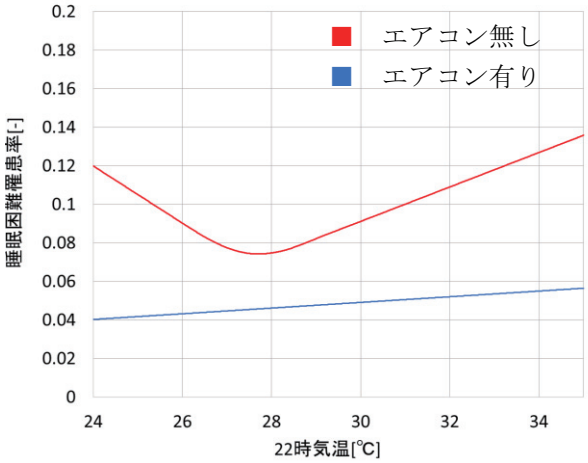


図 1　睡眠困難罹患率と 22 時外気温の関係

表 2　エアコン導入効果

	エアコン使用率		損失 DALY
	無し	有り[-]	
現状（本調査）	0.6	0.4	66.92
使用率増加	0.2	0.8	53.10

▪ 謝辞

本研究は、環境省の環境研究総合推進費（戦略研究プロジェクト,S14）の一環として行ったものである。

▪ 引用文献

1)　United Nations: “World Urbanization Prospects 2014”, (2014)

2)　“平成 27 年夏の熱中症死亡者の状況(東京都 23 区)”，東京都福祉保健局東京都監察医務院(オンライン), 入手先 <http://www.fukushihoken.metro.tokyo.jp/kansatsu/oshirase/nettyusho27.html>, (2016-12-20)

3)　大橋 唯太, 井原 智彦, 玄地 裕 ：環境情報科学学術研究論文集, 28, (2014), pp.367-372

4)　伊坪徳宏・稲葉敦編, “ライフサイクル環境影響評価手法”, (2005), 産業管理協会.

5)　“Country summaries”, OGIMET.com, (オンライン) 入手先 <http://www.ogimet.com/resynops.phtml.en> ,(2016-12-20)

6)　岡野 泰久, 井原 智彦, 玄地 裕: 日本ヒートアイランド学会論文集, 3 , (2008), pp.22-33

7)　Y.Doi, M.Minowa, M.Uchiyama, M.Okawa, K.Kim, K.Shibui, Y.Kamei,: Psychiatry Research, 97, (2000), pp.165-172

8)　“Health statistics and information systems” , World health organization, (オンライン), 入手先 <http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/metrics_daly/en/> , (2016-12-20)

日常生活における低線量被曝を対象とした健康影響評価

Health impact assessment caused by low-dose radiation exposure in daily life

○寺本麻実[*1)]、伊坪徳宏[1)]
1) 東京都市大学
*g1362089@tcu.ac.jp

1. 背景

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災により、福島第一原子力発電所から大量の放射性物質が放出する事故が発生した。この事故は、放射線への関心を高めるきっかけとなった。日本人の自然放射線量による年間線量は平均で約 1.5mSV と報告されている。[1)]自然放射線量はライフスタイルによって変動することが考えられるが、その違いについて着目した研究は行われていない。また、日常的に放射線を浴びているにもかかわらず、自然放射線による低線量被曝についてはあまり注目されておらず、人間に対してどのような影響があるのか明確にはなっていない。

2. 目的

本研究では、ライフスタイルの違いに着目して自然放射線の低線量被曝による観点から健康影響評価を行った。また、日常生活の中でどのような活動を選択するかによって、損失余命の値に変化があるのかを把握することを目的とする。さらに、低線量被曝による影響を明確にし、現状を把握する。

3. 算定方法

本研究では放射線量、年齢別・男女別・部位別の発がん率を用いて健康影響評価を行った。健康影響評価算定式を式 1 に示す。

$$DALY = \Sigma(Ex \times R \times Ds) \quad (式\ 1)$$

Ex：評価対象の被曝線量
R：生涯発がん率(年齢別・男女別・部位別)
Ds：がん 1 件あたりの損失余命(DALY/incidence)

3.1 評価設定

評価対象は 22 歳一般男性 1 名、一般女性 1 名の合計 2 名とする。また、ライフスタイルの違いに着目することから、ライフスタイルを 2 つ用意し、損失余命がどのように変化するのかを調べる。評価対象部位は胃、肺、大腸、肝臓、食道、皮膚、甲状腺、膀胱、前立腺、乳房、子宮の 11 部位を対象とする。評価対象物質はラドンとし、機能単位は 1 年とする。

3.2 プロセス詳細

3.2.1 被曝線量(Ex)

放出された放射性物質は、内部被曝と外部被曝を引き起こす。内部被曝と外部被曝では被曝の経緯が異なるため、算定方法も異なる。内部被曝による被曝評価は、郷原らが被害評価係数を開発するために使用した UNSCEAR の係数を使用し、被曝線量に乗じることで値を算出した。[2)]外部被曝による被曝評価は、「ICRP2007 年度勧告」の組織荷重係数を使用し、部位ごとへ重み付けを行い、年間被曝線量を乗じて値を算出した。[3)]ライフスタイルの項目と年間被曝線量について、表 1 に示す。[4)5)] ①はアクティブに外で活動する場合、②はインドアで過ごす時間が多い場合とする。赤いチェックがある項目は内部被曝、それ以外は外部被曝の項目とする。また、被曝線量にマイナス値があるが、これは鉄や水などで放射線が遮られたと考えられるためである。

表 1 ライフスタイルの項目と年間被曝線量

項目①	年間被曝線量(mSV/年)
ラドンの吸入✓	0.606
大地放射線	0.4035
宇宙放射線	0.308
洞窟観光	0.12
ミネラル水✓	0.008
ラドン温泉(三朝温泉)	0.006
登山(富士山頂)	0.005
たばこ✓	0.0004
満員電車	-0.003

項目②	年間被曝線量(mSV/年)
ラドンの吸入✓	0.6
大地放射線	0.4
宇宙放射線	0.3
ミネラル水✓	0.008
たばこ✓	0.0004
水泳	-0.002

3.2.2 生涯発がん率(R)

がん発症率の年齢別・男女別・被曝年齢別の推定式は、旧独立行政法人原子力安全基盤機構が整理した報告書の推定式を用いた。[6)]この報告書では、被曝年齢×がんの発症年齢のデータを 1 歳単位ごとに得ることができる。対象部位は前節で述べたように、11 部位とする。また、がんの発症リスクが 60 歳を境に急激に上がることから、22 歳での被曝を要因として 60 歳までにがんを発症する場合の生涯発がん率を用いる。

3.2.3 DALY/incidence

DALY/incidence は、日本のがんの種類ごとの年間の損失余命を発症件数で除したものであり、LIME2 の係数を

用いた。[7]甲状腺がんについては、単独での係数が無かったため、掲載されていた全てのがん平均の値を使用する。

4. 結果と考察

4.1 ライフスタイル①と②の結果比較

ライフスタイル①･②の損失余命の結果を図1に示す。①・②ともに、大地放射線の損失余命が 1 番の割合を占めている。また、男性よりも女性の損失余命が高かった。これは、次節の図 2 より、乳がんの損失余命が高いことが起因しているためである。生活様式の違いによる損失余命の差は小さかった。

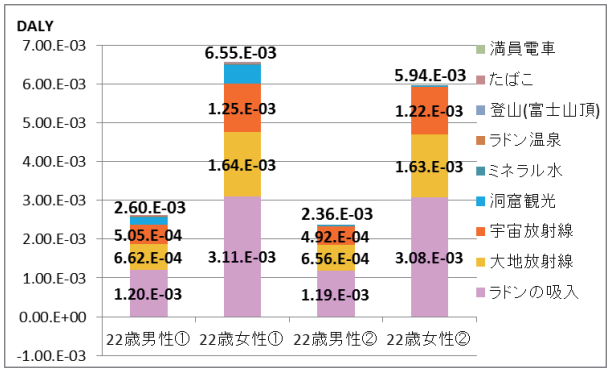


図１　生活様式①・②の違いによる損失余命の比較

4.2 外部被曝の損失余命

次に、外部被曝と内部被曝の部位ごとの損失余命の比較を行う。初めに外部被曝について述べる。生活様式①の大地放射線の部位ごとの損失余命を、図 2 に示す。この中で最も損失余命が高いのは、乳がんであった。これは、乳がんの生涯発がん率が 11 部位の中で最も高いからである。前節で、男性よりも女性の損失余命が高かったが、この乳がんの損失余命が大きいことが影響している。

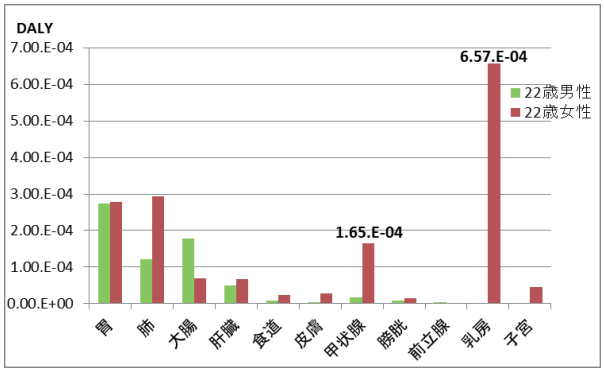


図２ 大地放射線の部位ごとの損失余命

4.3 内部被曝の損失余命

生活様式①のラドンの吸入による、内部被曝の部位ごとの損失余命を図3に示す。先ほどの外部被曝と比べて、最も損失余命が高いのは、女性の肺がんという結果になった。また、男性も肺がんが最も高かった。ラドンは肺に溜まりやすく、付着しやすいという性質があることから、このような結果になったと考えられる。さらに、男性よりも女性の方が肺がんにかかるリスクが高いことが理由に挙げられる。肺と甲状腺以外の部位は、損失余命がほぼゼロに近い値になった。

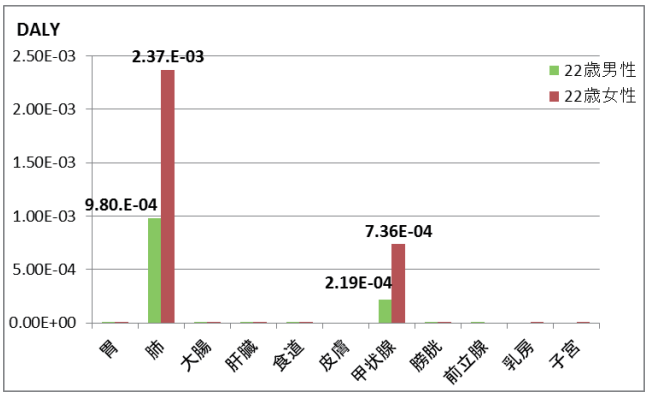


図３ ラドンの吸入の部位ごとの損失余命

5. 結論と課題

本研究では、日常生活における低線量被曝に着目して健康影響評価を行った。結果として、男性よりも女性の方が、損失余命の値が高くなるという傾向が見られた。低線量被曝ではあるものの、放射線量によって損失余命が大きく左右されるということが分かった。また、内部被曝よりも外部被曝が大きいという結果になった。生活様式が変わっても、被曝量の合計と損失余命に大きな変化はなかった。

郷原らの先行研究の課題として線量換算係数の不確実性が挙げられていたが、本研究では考慮することができなかった。また、3.2.1 に示した被曝線量は世界・日本平均の値のため、過大・過小評価の恐れがある。さらに、今回は対象物質をラドンとしているが、食物からラドンが検出されることはほぼないため、食物については算定外としてある。今後は地域性や食物などを考慮することで、より正確な評価が行われることを期待する。

6. 参考文献

1) UNSCEAR2008 年報告
2) 郷原大希 : ^{222}Rn を対象とした自然放射線の室内曝露に関わる被害評価手法の構築と係数の開発(2014)
3) ICRP2007 年度勧告
4) 環境省：自然・人工放射線からの被ばく線量(2015)
5) 藤元憲三：人間活動で変えられた自然放射線被ばく(1995)
6) 独立行政法人原子力安全基盤機構：確率論的環境影響評価のための生涯がんリスク解析に関する報告書(2010)
7) 伊坪徳宏 稲葉敦 : LIME2 - 意思決定を支援する環境影響評価手法(2010)

中国からの輸出に起因する二酸化炭素排出量の多地域産業連関分析

Effect of Chinese Export on Carbon Dioxide Emission: A Multi-regional Input-Output Analysis

○劉倩 [1)]、近藤康之*[1)]
Qian Liu, Yasushi Kondo
1) 早稲田大学
* ykondo@waseda.jp

1. はじめに

経済活動に伴う CO_2 排出の気候変動への影響に関する議論の中で、地域別の生産基準の CO_2 排出量ではなく、消費基準の CO_2 排出量に着目した分析が行われてきた[1-5]。例えば、中国は世界最大の CO_2 排出国であるが、その多くが中国からの輸出に起因することが指摘されている。

消費基準の CO_2 排出量の推計には、産業連関分析の手法が利用されている。分析対象の 1 か国の産業連関表を用いた分析（single-regional input-output analysis, SRIO）や、多地域の産業連関表を用いた分析（multi-regional input-output analysis, MRIO）が行われている。Weber et al.[4] と Lin and Sun[5]は、中国の貿易が CO_2 排出量に与える影響を中国の産業連関表を用いた SRIO により分析した。Peters and Hertwich[1]は国際貿易に内包された CO_2 排出量を GTAP データベースに収録された各国の産業連関表を用いて輸出国ごとの SRIO により分析した。Davis and Caldeira[2]は各国の消費に内包された CO_2 排出量を GTAP データベースに収録された各国の産業連関表を用いて MRIO により分析した。

本稿は、Weber et al.[4]と Lin and Sun[5]と同様に、世界最大の CO_2 排出国である中国について、その貿易が CO_2 排出量に与える影響を分析する。分析には Davis and Caldeira[2]と同様に MRIO を用いる。しかし、彼らが最終需要に内包された CO_2 排出量に着目したのに対して、本稿では Peters and Hertwich[1]と同様に、輸入国における最終需要だけでなく中間需要も含めた輸出全体が CO_2 排出量に与える影響を分析する。分析には、van Burken and Dietzenbacher[6]の提案した global extraction method (GEM)に類似の hypothetical extraction method (HEM)を用いる。

2. 分析手法

地域数 R、各国の部門数 N の MRIO の需給均等式は以下で与えられる。

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{y}$$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}^1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}^R \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^{11} & \cdots & \mathbf{A}^{1R} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}^{R1} & \cdots & \mathbf{A}^{RR} \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{y} = \begin{pmatrix} \mathbf{y}^{1\cdot} \\ \vdots \\ \mathbf{y}^{R\cdot} \end{pmatrix}$$

ここで、$\mathbf{x}$ は $NR \times 1$ の生産額ベクトル、その第 r ブロック $\mathbf{x}^r$ は $N \times 1$ の地域 r における生産額ベクトル、その第 i 要素 x_i^r は地域 r における部門 i の生産額である。また、$\mathbf{y}$ は $NR \times 1$ の最終需要額ベクトル、その第 r ブロック $\mathbf{y}^{r\cdot}$ は $N \times 1$ の地域 r で生産された商品に対する最終需要額ベクトル、その第 i 要素 y_i^r は地域 r で生産された商品 i に対する最終需要額である。これらの最終需要額は、どの地域における最終需要であるかを区別して、

$$\mathbf{y}^{r\cdot} = \sum_{s=1}^{R} \mathbf{y}^{rs}$$

のように分解される。ここで、$\mathbf{y}^{rs}$ は $N \times 1$ の地域 s における地域 r で生産された商品に対する最終需要額ベクトルであり、その第 i 要素 y_i^{rs} は地域 s における地域 r で生産された商品 i に対する最終需要額である。$\mathbf{A}$ は $NR \times NR$ の投入係数行列であり、その (r,s) ブロック $\mathbf{A}^{rs}$ の (i,j) 要素 a_{ij}^{rs} は地域 s における部門 j が 1 単位の生産のために直接必要とする地域 r で生産された商品 i の投入量をあらわす投入係数である。各地域で生産された各商品に対する中間需要の合計 $\mathbf{A}\mathbf{x}$ は、合計せずに需要地域・部門毎に区別した $NR \times NR$ 行列 $\mathbf{Z} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$ であらわすこともできる。ただし、$\hat{\mathbf{x}}$ は $\mathbf{x}$ の要素を対角要素に並べた対角行列をあらわす。

最終需要 $\mathbf{y}$ によって誘発される生産額 $\mathbf{x}$ と CO_2 排出量 c は次のようにあらわされる。

$$\mathbf{x} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{y}, \qquad c = \mathbf{f}\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{y}$$

ここで、$\mathbf{f} = (\mathbf{f}^1 \quad \cdots \quad \mathbf{f}^R)$ は生産 1 単位あたりの各地域各部門の CO_2 排出量をあらわす $1 \times NR$ の係数ベクトルである。

HEM[7]は、その名の示す通り、仮想的な（hypothetical）産業連関表を、観察された産業連関表から分析対象の部門に係る要素を抜き取ること（extraction）によって構築し、観察された表と仮想的な表それぞれに基づく産業連関分析の結果を比較して、分析対象部門の経済への影響を分析する手法である。本稿で用いる HEM は、van Burken and Dietzenbacher[6]の提案した GEM と類似しており、次のようにあらわされる。これまでに定義し

た記号の上にバーを付けて、HEM のために構築された産業連関表をあらわす。国 1 を中国と見なし、中国からの輸出がない場合を分析の対象とする。そのため、中国からの輸出に該当する要素をすべてゼロで置き換える。

$$\bar{z}_{ij}^{1s} = 0,\ \bar{y}_i^{1s} = 0\ \ (i,j = 1,\dots,N;\ s = 2,\dots,R)$$

中国における中間需要と最終需要は、観察された産業連関表と同じ値である。

$$\bar{z}_{ij}^{r1} = z_{ij}^{r1},\ \bar{y}_i^{r1} = y_i^{r1}\ \ (i,j = 1,\dots,N;\ r = 1,\dots,R)$$

中国以外の国における中間需要は、4 ヵ国の数値例を用いて図 1 のようにあらわされる。

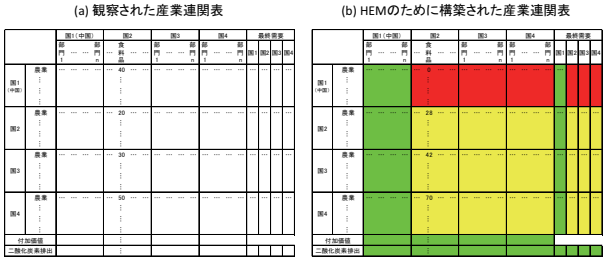


図 1　HEM の数値例

注：塗りつぶした要素毎の HEM における値の設定方法は次の通り。緑色＝観察された値と同じ。赤色＝すべてゼロで置き換え。黄色＝中国からの輸入を代替するため増加。

国 2 の食料品製造部門（部門 j）は、中国（国 1）、自国（国 2）、国 3 および国 4 で生産された農産物（商品 i）を、それぞれ 40 万ドル、20 万ドル、30 万ドル、50 万ドル投入している（$z_{ij}^{12} = 40,\ z_{ij}^{22} = 20,\ z_{ij}^{32} = 30,\ z_{ij}^{42} = 50$）。中国からの輸出がない場合の産業連関表においては、中国からの農産物 40 万ドルの輸入を抜き取る（$\bar{z}_{ij}^{12} = 0$）。伝統的な HEM では、この操作のみで仮想的な産業連関表が構築されるため、van Burken and Dietzenbacher[6]が指摘したように、根拠のない技術進歩を想定した分析になってしまう。そこで、同額の農産物を自国、国 3、国 4 で生産された農産物の投入額を増加して補う（$\bar{z}_{ij}^{22} = 28,\ \bar{z}_{ij}^{32} = 42,\ \bar{z}_{ij}^{42} = 70$）。増加分（8 万ドル、12 万ドル、20 万ドル）の合計は中国からの観察された輸入 40 万ドルに等しい。また、増分の構成比は観察された投入額（20 万ドル、30 万ドル、50 万ドル）の構成比に等しい。一般の場合については、国 1 以外の地域における中間需要と最終需要は、

$$\bar{z}_{ij}^{rs} = z_{ij}^{rs} + z_{ij}^{1s} \times \frac{z_{ij}^{rs}}{D_{ij}},\qquad D_{ij} = \sum_{r=2}^{R} z_{ij}^{rs}$$

$$\bar{y}_i^{rs} = y_i^{rs} + y_i^{1s} \times \frac{y_i^{rs}}{D_i},\qquad D_i = \sum_{r=2}^{R} y_i^{rs}$$

$$(i,j = 1,\dots,N;\ r,s = 2,\dots,R)$$

により与えられる。

3. 分析結果

前節で概説した HEM を WIOD（World Input-Output Database）の 2001 年から 2009 年の国際産業連関表[8]に適用し、中国からの輸出に起因する CO_2 排出量について分析した。WIOD の最新版が 2016 年 11 月に公表されたが、本稿では、研究を開始した 2016 年 7 月に利用可能な最新版であった 2012 年 4 月版データを用いた。

中国の内生部門で排出された CO_2 は 2001 年の 2851 Mt から 2009 年の 6213 Mt へと 2 倍以上に増加した。そのうち、中国からの輸出に起因する排出量の割合は、2001 年の 21%から 2007 年の 33%まで一貫して増加し、その後、減少に転じて 2009 年には 24%であった。2008 年以降は、割合だけでなく量も減少に転じた。

世界全体の内生部門からの CO_2 排出量は 2009 年において 24.9 Gt であり、そのうち中国からの輸出に起因する排出量の割合は 3.8%であった。すなわち、中国の CO_2 強度（生産額あたりの CO_2 排出量）が他国よりも大きいため、中国の輸出を他国の生産で代替すれば、世界全体の CO_2 排出量が削減される状況にある。

より詳細な結果は、研究発表会において報告する。

4. 引用文献

1) Peters G.P., Hertwich E.G.: Environ. Sci. Technol., 42 (5), (2008), 1401–1407
2) Davis S.J., Caldeira K.: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 107 (12), (2010), 5687–5692
3) Peters G.P., Minx J.C., Weber C.L., Edenhofer O.: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 108 (21), (2011), 8903–8908
4) Weber C.L., Peters G.P., Guan D., Hubacek K.: Energy Policy 36, (2008), 3572–3577
5) Lin B., Sun C.: Energy Policy 38, (2009), 613–621
6) van Burken B., Dietzenbacher E.: Hypothetical extractions from a global perspective. 24th International Input Output Conference, July 2016, Seoul, South Korea
7) Miller R.E., Blair P.D.: Input-Output Analysis: Foundation and Extensions, 2nd ed. Cambridge University Press, (2009)
8) Timmer M.P., Dietzenbacher E., Los B., Stehrer R., de Vries G.J.: Rev. Int. Econ. 23, (2015), 575–605

低炭素社会シナリオに応じた国際資源フローの将来推計手法の開発

Prediction of international resource flows considering global low-carbon scenarios

○森岡涼子*[1)]、津田宏治[2)]、中島謙一[2)]、南斉規介[2)]
Ryoko Morioka, Koji Tsuda, Kenichi Nakajima, Keisuke Nansai
1) 国立環境研究所, 2) 東京大学
* morioka.ryoko@nies.go.jp

1. はじめに

金属をはじめとする資源の国際フローを把握することは、将来の各国の資源の需要やストックを知るために重要である。また、低炭素社会を目指していく上で、様々な国際社会の在り方が資源貿易に与える影響を見通しておくことも今後重要となる。本研究では、国際的な資源循環の将来像を描くための基礎データを得るため、159 か国の間での 2050 年の貿易表の推計を行う。1995 年から 2013 年の貿易統計をもとに HS コード上 2 桁に基づく全 97 品目について、将来シナリオごとに 2050 年輸出入表を外挿する。

2. データ

1995 年から 2013 年までの貿易統計および、Shared Socioeconomic Pathways version 1.0[1)] の 5 つの将来シナリオ(GDP,人口、二酸化炭素排出量)に基づいて行う。過去データとシナリオデータで共通に扱われている国のみ(159 か国）を対象とする。

3. 手法概要

3.1 行列の分解・再合成

過去の毎年の貿易統計を構造と流量に分解し、将来データに対しては後述する２つの手法の結果を用いて再合成を行う。ここで用いる行列分解・再合成法は、情報幾何に基づき、行列を構造と流量に分解、またはその２つから行列を再合成するものである。本研究では、各品目の輸出入表の分解、品目×輸出量計の行列の分解、および品目×輸入量計の行列の分解に用いる。

代表して、輸出入表の分解として以下に説明する。他の２つの行列分解・合成も計算プロセスは全く同じである。

流量データの分析において、行列を任意の行和・列和に合致する変換が用いられ、matrix balancing, biproportional fitting と呼ばれているが[2)]、産業連関分析では RAS 法と呼ばれている[3)]。以降、代表して RAS 法と呼ぶ。RAS 法は以下の 2 つのステップを収束するまで交互に繰り返す.

1. 各行に係数を掛けて，与えられた行和に合わせる
2. 各列に係数を掛けて，与えられた列和に合わせる

貿易統計の輸出入表が張る空間を，行和列和（以下，周辺和とする）の規模と、構造の空間に分解するため，双対座標，混合座標を導入し，直交分解を行う．
まず，輸出入量の列を積み上げてベクトルにし，a とする。行と列の国の数を n とする。a の要素数は $N = n^2$ である。基底 $\{b_i\}_{i=1}^{N}$ を一次独立なベクトルの集合として C_i を k 行の要素がすべて 1 で他の要素はすべてゼロの $n \times n$ 行列とし、以下のように定義すると

$$b_1 = \mathbf{1}, \quad b_i = vec(C_{i-1}), i = 2,\ldots,n,$$

$$b_i = vec(C'_{i-n}), i = n+1,\ldots,2n-1,$$

となり、最初の $2n-1$ 個のベクトルについて、$a^{\top} b_i$ は周辺和に対応する。情報幾何では、a を相互に双対な 2 つの座標系、m 座標系と e 座標系で表現する[6)]。m 座標系を $\eta = B'a$ とする。B は $\{b_k\}_{k=1}^{N}$ を列とする行列で、$'$ は転置である。η の最初の $2n-1$ 個の要素を η^A とすると、これは周辺和に対応する。また残りの要素を η^B とする。一方で、e 座標系 θ を $\theta = B^{-1} \log a$ と定義する。θ についても η 同様に、最初の $2n-1$ 個の要素とそれ以外に切断し、θ^A と θ^B を定義する。さらにこれらを用いて混合座標系 $\xi = (\eta^A, \theta^B)$ を導入する。次に，異なる輸出入表の距離を考える．2 つの輸出入表のベクトルがあるとき，その Kullback-Leibler(KL) divergence は

$$D(p,q) = \sum_{i=1}^{N} p_i \log q_i - p_i \log q_i - p_i + q_i$$ である.

1 点 x が与えられて多様体 S への写像を考えるとき、

KL divergence は非対称であるため、以下の 2 種類の射影が存在する [4]。ここで，RAS 法は KL divergence を最小化する e 射影であることが証明されている [5]。RAS 法が e 射影であることから，以下の一般化ピタゴラスの定理が成り立ち，直交分解を考えることができる [4]。

$$D(a_2, a_1) = D(a_2, a_3) + D(a_3, a_1).$$

右辺の項はそれぞれ周辺和と構造に対応する。この直交分解に基づくと RAS 法は周辺和のみを変更する操作であるため、構造と呼ばれる量は RAS 不変量に対応する。RAS 不変量を θ 座標系で考えると，対数空間において輸出入表ベクトル a を次のように分解したとき

$$\log a = B_1\theta^A + B_2\theta^B,$$

右辺第 2 項が RAS 不変量に対応する。ここで、RAS 法により周辺和のみ変更されることにより生成される空間と、それと直交する補空間を考えることにより、RAS 不変量 θ^B の各要素は，列を積みなおして戻した行列の成分で表記しなおすと

$$\mathcal{K}_{ij} := \log a_{ij} - \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\log a_{ik} - \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\log a_{kj} + \frac{1}{n^2}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\log a_{kl}$$

となる。また、輸出入表のような正方行列以外に、長方行列に対しても適用できる。長方行列の場合の $\mathcal{K}'$ も同様に

$$\mathcal{K}'_{ij} := \log a_{ij} - \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\log a_{ik} - \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}\log a_{kj} + \frac{1}{mn}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{m}\log a_{kl}$$

となる。これは国×品目の構造を算出するときに用いる。これらの $\mathcal{K}$ が，a を積み直した元の輸出入表固有の RAS 不変量であり，厳密に定義された構造である．これを”構造行列”と呼ぶことにする．

また、分解と逆の操作である合成は、構造行列（構造）と周辺和(流量)を組み合わせて次のように計算する。$a_{new} = RAS(exp(\mathcal{K}_{any}), \eta^{A}_{any})$ ．ここで、*RAS* は先述の RAS 法による数値計算をさす。

3.2 貿易の流量(輸出入量計)の推定

シナリオのパラメータ(GDP, 人口，二酸化炭素排出量) から、2050 年の流量を予測する際には、リッジ回帰を用いる。ここで求める 2050 年流量とは 2 種類の行列の行和・列和に対応する。１つは、各国の各品目の輸出量合計からなる国×品目ごとの輸出量計の行列の、行和と列和である。もう一つは、各国の各品目の輸入量合計からなる国×品目ごとの輸入量計の行列の行和と列和である。

3.3 構造の時系列予測

構造行列の時系列予測において、過去データは毎年得られるが、将来シナリオは 10 年おきのため、10 年おきの遷移行列 $W_{10\,years}$ を推定する。

$$W_{10years} = \mathrm{argmin}_W \left[||y_a - W_a x_a|| + \lambda ||W_a||_2^2 \right]$$

ここで、y_a は 10 年後のベクトル化した構造行列、x_a は y_a より 10 年前のベクトル化した構造行列、λ は複雑度パラメータである。

4. おわりに

本研究において開発した将来推計法は、構造行列を用いて国と国および国と品目の関係を含めて輸出入量を推定する点が、輸出入量のみに着目して推定する他の研究と異なる。今回用いた過去の貿易統計では、輸出入量における構造の経年変化が小さいため、現状のトレンドを用いて 2050 年まで外挿すると情勢によっては誤差が大きくなる可能性がある。2050 年推計の精度を上げるためには、貿易構造に関わる国際関係のシナリオも構造推定に入れる必要があるだろう。

予測で得られる、シナリオごとの将来の貿易表は様々な応用が可能である。消費傾向・経済成長・人口動態が各資源需要に与える影響や技術革新が資源循環や資源の節約に与える影響を定量化するシミュレーションに本データを活用することで、資源循環の観点からみた低炭素社会の方向性を理解し、リサイクル技術の拠点とすべきストックが増える地域を見積もることにつながると考えられる。

引用文献

1) Shared Socioeconomic Pathways version 1.0 : https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about
2) Ireland, C.T. and Kullback S., Biometrica, Vol.55,(1968), pp.179-188
3) Stone, R.,“Input-Output and National Accounts”, OECD, Paris,(1961)
4) Amari,S. and Nagaoka, H.,“Methods of Information Geometry”, Oxford University Press, (1997)
5) Censor, Y. and Zenios, S.A.,“Parallel Optimization”, Oxford UniversityPress, (1997)

国際貿易を考慮した食料消費に関わる淡水資源需給バランスの将来シナリオ評価

Future scenario assessment of water resource supply-demand balance related to food consumption considering international trade

○山口陽平*[1)]、田村賢人[1)]、吉川直樹[1)]、橋本征二[1)]、天野耕二[1)]
Yohei Yamaguchi, Kento Tamura, Naoki Yoshikawa, Seiji Hashimoto, Koji Amano
1) 立命館大学
* rv0023hs@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

人類の社会活動に不可欠な食料生産には土地資源と淡水資源の双方が必要となるが、両資源は地球上に偏在する。また近年、途上国を中心とした人口増加・経済発展の進行、全球規模での気候変動が顕在化している。そのため、地域ごとの気候・地理的特性と相まって、両資源の需給不均衡による食料逼迫を生じる恐れがあり、持続可能な社会の達成が危ぶまれつつある。

世界全体の淡水資源消費に占める農業用水の割合は70%とされており[1)]、食料生産に対する淡水資源制約は無視できない。また、淡水資源の直接的な国際貿易は困難であるため、淡水資源の不足地域では食料輸入が不可欠である。既往研究[1)]では、SRES シナリオを基にした 6 種類の GCM モデルにより、淡水資源消費量の将来予測が行われた。しかし、食料貿易の影響については考慮されていない。山口ら[2)]においては、国際貿易を考慮した上で、食料消費に関わる淡水資源必要量の将来シナリオ評価を行った。同研究では、Planetary Boundary との比較による需給バランスの評価も試みたが、世界全体での大まかな評価に止まっており、地域別の詳細な分析が必要である。そこで本研究では、山口ら[2)]による食料消費に関わる淡水資源必要量の修正値に基づき、各国の食料消費に関わる淡水資源需給バランスを将来シナリオ別に水ストレスで評価する。

2. 研究方法

2.1 使用データと対象設定

本研究では、評価対象年を 2010-2100 年とし、山口ら[2)]の対象である 170 か国のうち、FAO 貿易収支表[3)]および AQUASTAT[4)]の双方に記載された 120 か国を対象国とした。これは各国間での詳細な貿易収支を評価に反映させるためである。また、山口ら[2)]の方法に修正を加えた上で、将来シナリオ（SSPs）別の食料消費に関わる Blue Water 必要量を集計し、本研究の淡水資源必要量として用いた（詳細は S.1 節参照）。淡水資源供給可能量の推計では、AQUASTAT[4)]に記載された淡水資源賦存量と取水量の統計データを使用した。

2.2 淡水資源供給可能量の推計

本研究では、各対象国に関して、AQUASTAT[4)]に記載された Total Renewable Water Resources の項目を淡水資源賦存量 *TRWR* [km^3]として用いた。しかし、食料消費に関わる淡水資源必要量のみを評価対象としているため、この値を淡水資源供給可能量としてそのまま用いた場合、後述する水ストレスの推計（2.3 節）において過小評価を生じさせる可能性がある。そこで次式(1)により、淡水資源供給可能量 *ARWR* [km^3]を定義した。

$$ARWR_i \equiv TRWR_i \times \frac{AWW_i}{TWW_i} \quad \cdots(1)$$

ここで、添え字 i は対象国、*AWW* は農業用水取水量[km^3]、*TWW* は総取水量[km^3]を表す。両取水量に関しては、AQUASTAT[4)]に記載された各対象国の 2012 年値を基準年値（2010 年）として用いた。両項目は地表水・地下水の取水に加え、再生処理水や海水淡水化の利用も含む。*AWW* の当該年データが欠如する場合は、当該年前後で最も近い年度のものを代用した。

なお本研究では、淡水資源供給可能量は 2100 年までの将来にわたって基準年値で一定と仮定した。したがって、気候変動による淡水資源供給可能量の将来変動、および技術革新により新たに利用可能となり得る淡水資源の潜在賦存量などは考慮していない。

2.3 水ストレスの推計

本研究では、次式(2)で定義した水ストレス *WSI* [-]により、各対象国の淡水資源需給バランスを評価した。

$$WSI_i \equiv \left\{ \sum_j WR_{i,j}(t) \right\} \Big/ ARWR_i(2010) \quad \cdots(2)$$

ここで、添え字 *i* は対象国、*j* は淡水資源必要量の対象品目（96 品目）を表す。また、*t* は対象年[yr]、*WR*(*t*)は SSP 淡水資源必要量[km^3]、*ARWR*(2010)は淡水資源供給可能量[km^3]（t = 2010 は基準年）を示す。

(2)式の水ストレスに対して、表 1 に示した 3 段階の判断基準により、淡水資源需給バランスを評価した。同表の判断基準は、既往文献[5)]を参考に設定した。

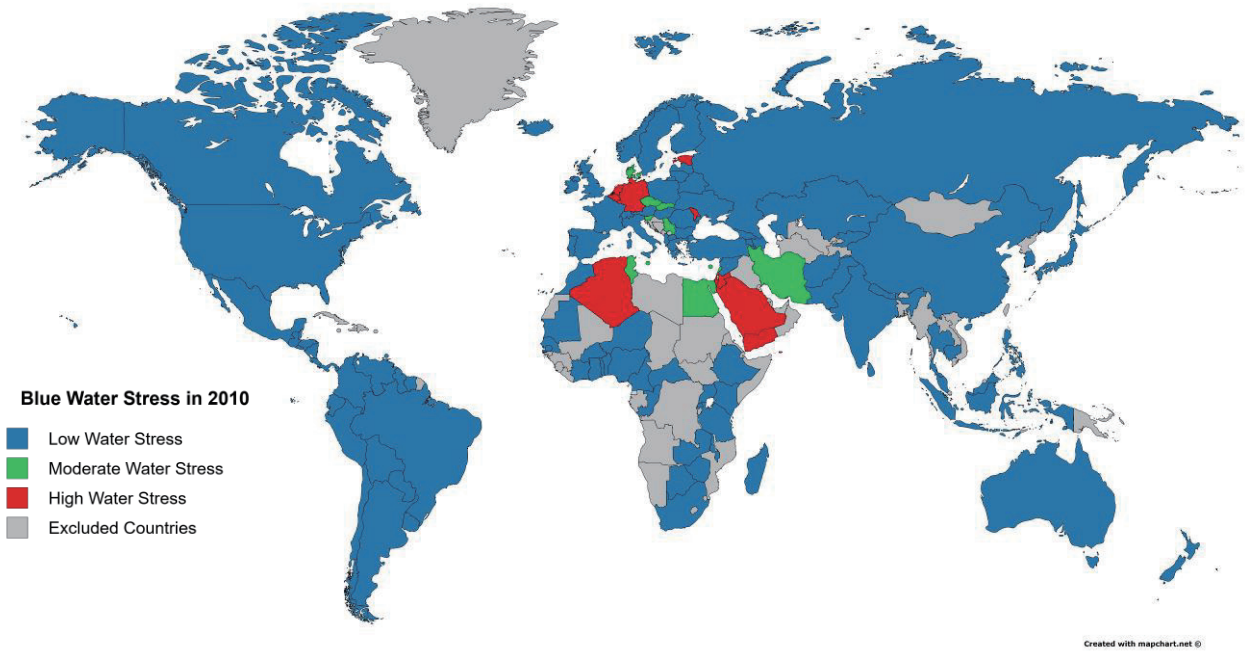


図 1 水ストレスの推計結果（2010 年）

表 1 水ストレスの判断基準

WSI Ranges	Degrees of Water Stress
WSI ＜ 0.2	Low Water Stress
0.2 ≦ WSI ＜ 0.4	Moderate Water Stress
0.4 ≦ WSI	High Water Stress

なお本研究では、水ストレスの判断基準において、環境流量 [5]（流域生態系構造の維持に必要とされる水量）は考慮していない。

3. 結果と考察

2010 年時点の水ストレスの結果を図 1 に示す。同図より、2010 時点で高い水ストレス（High Water Stress）下にある 12 カ国のうち 10 カ国で、国内生産のみで高い水ストレスを示した。一方、他の 2 カ国（Luxembourg, Estonia）では、輸出が加わることにより高い水ストレスを示した。これら 2 カ国を見ると、自国と同じ EU 圏内への食料輸出に伴う淡水資源必要量が各々、99%（16[10^6m^3]）と 97%（14[10^6m^3]）を占めており、これが両国の水ストレスを強めていることが示唆された。

次に、SSP1 における 2050 年時点の水ストレスの結果を図 S1（S.2 節）に示す。図 1 と比較すると、一部の地域で 2050 年の水ストレスが 2100 年に比べて強まっている。例えば Egypt を見ると、2050 年時点の国内生産および輸出由来の淡水資源必要量は 2010 年比で各々、39%（11km^3）と 56%（0.89km^3）増加となることが予測された。これより、同国の水ストレスを強める要因としては、国内食料需要増加に加えて輸出先の食料需要増大が相対的に大きく寄与すると考えられる。

ただし本研究では、食料生産に限定して淡水資源必要量や淡水資源供給可能量を推計した。したがって、生活用水や工業用水を新たな推計対象に加えることにより、両図の水ストレスの結果が大きく変化する可能性があることに留意する必要がある。

4. おわりに

本研究では、将来的に変化する可能性のあるいくつかの要因を一定と仮定して淡水資源需給バランスの将来推計を行った。今後はこの点の改善が必要になると考える。なお、学会当日はシナリオ別の評価結果を報告する予定である。

5. 謝辞

本研究の一部は、環境省環境研究総合推進費(S-11)の支援により実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) Y. Shen, T. Oki, N. Utsumi, S. Kanae and N. Hanasaki: Hydrological Sciences Journal, 53(1), (2008), pp.11-33
2) 山口陽平, 田村賢人, 吉川直樹, 橋本征二, 天野耕二: 第 11 回 LCA 学会研究発表会講演要旨集, (2016), pp.100-101
3) FAO: FAOSTAT – Data, <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
4) FAO: AQUASTAT – Main Database, <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en>
5) V. Smakhtin, C. Revenga and P. Döll: IWMI Reserach Report Series – Report 2, (2004), pp.1-19

Supporting Information

S.1 淡水資源需要量の推計

本研究では、山口ら[2)]の方法に修正を加えた上で、5種類の将来シナリオ（SSPs）別に、2010-2100年までの食料消費に関わる淡水資源必要量（SSP淡水資源必要量）を10年ごとに96品目、170国を対象として推計した。SSPsはIPCCにより定義された社会経済シナリオであり、気候変動に対する緩和策・適応策の困難度から、SSP1（持続可能）、SSP2（過去の延長）、SSP3（分断）、SSP4（格差）、SSP5（在来型発展）の5種類のシナリオ別に人口とGDPのデータが用意されている[6),7)]。SSP淡水資源必要量は、上記5種類の社会経済シナリオに基づいて推計されたものであり、したがって人口とGDPを主たる説明変数とした推計値である。

3種類のWater Footprint（WF、Green：降水由来、Blue：地表水・地下水由来、Grey：汚濁負荷物質に対する希釈水量）により、SSP淡水資源必要量を推計した。WFの評価範囲としては、原料作物の栽培時における淡水消費のみを対象とした。したがって、原料作物の栽培時に使用される肥料・農薬・農業用具の製造などにより上流部で消費される淡水資源量、および原料作物の加工段階から最終消費段階までの各過程の淡水消費量は、すべて評価対象外とした。

SSP淡水資源必要量に各国間の国際貿易による食料生産・消費地の乖離の影響を反映させるために、FAO食料需給表[3)]に基づいて同推計値を国内生産由来と輸入由来の2種類の食料消費内訳に配分した。このうち、輸入由来に関しては、FAO貿易収支表[3)]に基づいて可能な限りで輸入相手国別の配分を試みた。その際、国際貿易の形態としては2国間での食料輸入を想定し、輸入食料はすべて輸入相手国内で生産されるものと仮定した。各々の配分比率は、2100年までの将来にわたって基準年値で一定と仮定した。

なお、山口ら[2)]の推計方法では、食料消費内訳の配分比率の設定において、国内生産・輸入・輸出との間にダブルカウントが生じていた。そのため、本研究ではこの部分を修正した上でSSP淡水資源必要量を集計し、このうちBlue Water必要量を本研究の淡水資源必要量として使用した。

S.2 水ストレスの推計結果（SSP1、2050年）

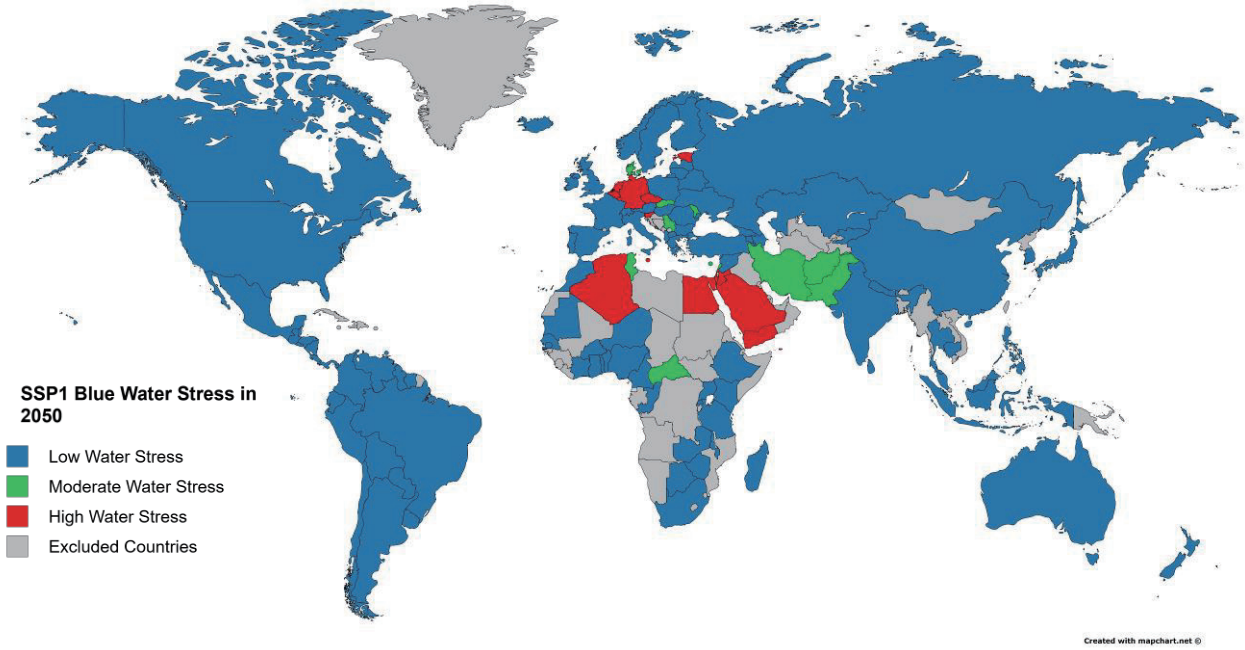


図 S1 水ストレスの推計結果（SSP1、2050年）

S.3 参考文献（Support Information）

6) B. C. O'Neill, E. Kriegler, K. Riahi, K. L. Ebi, S. Hallegatte, T. R. Carter, R. Mathur and D. P. van Vuuren: Climatic Change, 122, (2014), pp.387-400

7) IIASA: SSP Database – Version 1.1, < https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>

世界経済における二酸化炭素排出貿易のネットワーク分析

○時任翔平*、加河茂美
九州大学
*stkyuuni103@gmail.com

1. はじめに

世界全体での二酸化炭素排出削減を目指すに当たり、各国は排出削減努力を行ってきたが、国際分業化が進む現在では、海外に生産拠点を移し、結果的に環境負荷を海外に押し付けてしまっている。その現実を受けて、パリ協定では先進国だけでなく開発途上国も含めて排出規制が行われるため、排出削減をよりグローバルにサプライチェーン全体で考えていくことの重要性が明らかになり、日本のような環境技術先進国が合理的な環境政策を局地的に行う必要性がある。そこで Kagawa et al. (2015) ではサプライチェーンネットワーク内の排出移転のつながりに着目し、産業連関表にクラスター分析を用いて、定量的に排出集約的な炭素クラスターを検出することで、環境政策を行う政策パートナーを見つけることに成功している。しかし Kagawa et al. (2015)では、ヨーロッパ主体の多地域産業連関表を用いているため、成長の著しいアジア地域や、第一次産業部門の誘発が大きいアフリカ地域の解像度が低い。

本研究では、世界 189 カ国を対象とした世界多地域産業連関表に、各国各産業の移転構造を分析するために単位構造モデルを適用して各国各産業の排出移転ネットワークグラフを作成し、スペクトラルクラスター分析、次数中心性分析、ブロックモデリング分析などのネットワーク分析を用いて、排出移転構造を網羅的に理解し、持続可能な発展について提言を行う。

2. データと分析手法

2.1. 単位構造ネットワークグラフの作成

1990 年から 2013 年における 189 カ国を対象とした時系列世界多地域産業連関表(EORA)を単位構造モデルに適用し、各国各商品の最終需要に付随する誘発付加価値と誘発二酸化炭素排出に関する時系列のグローバルサプライチェーンネットワークグラフを作成する。今回はケーススタディとして、輸送機器世界シェアトップ 5 国の輸送機械生産に伴うサプライチェーンのネットワークグラフで分析した。

2.2. クラスター分析

クラスター分析を行うことによって、各国が複雑に絡み合うレアメタルの貿易ネットワークから密な貿易構造を抽出する。本研究では 3.1 で作成したグラフから隣接行列を作成し、その隣接行列に、Kagawa et al. (2016)で用いた、非負行列因子分解を用いたクラスター分析を行う。

2.3. ブロックモデリング分析

ブロックモデリング分析を応用し、クラスター分析によって抽出したクラスター（ブロック）について、ブロック間の移転量を見ることで、クラスター内部、及びクラスター群がどのような構造・配置（核-周辺構造、序列構造など）であるかを分析し、サプライチェーンネットワークについて理解を深める。

2.4. 中心性分析

中心性分析を用いて、グローバルサプライチェーンネットワークにおけるつながりの多いハブとなる国、媒介性の高い加工もしくは輸送の核となる国を抽出し、全体ネットワークの構造を明らかにする。Liang *et al.* (2016) ではサプライチェーンにおける中心性の中でも、影響力、感応度が高い、媒介性の高い産業に注目し、その媒介性指標を(1)式のように定式化した。

$$b_i = \sum_{s=1}^{n}\sum_{t=1}^{n}\sum_{r=1}^{\infty}(q_r \times w) = \mathbf{fTJ}_i\mathbf{Ty} \tag{1}$$

ここで、s,t はそれぞれ始点、終点の産業を示し、r は波及階層数、q_r はそのサプライチェーンパスに i が出てきた回数であり、w はそのパスでの環境負荷を示す。本研究では、最終需要 t を固定した媒介性指標として(2)のように定義した。

$$b_{it} = \sum_{s=1}^{n}\sum_{r=1}^{\infty}(q_r \times w) = \mathbf{fTJ}_i\mathbf{Ty}_t^0 \tag{2}$$

$\mathbf{y}_t^0$ は t 行目に y_t を持ち、ほかの要素が 0 のベクトルである。この指標を用いて、各国の輸送機械生産に付随するサプライチェーンにおいて媒介性の高く、誘発の大きい産業を抽出する。

3. 結果

3.1. クラスター分析

生産額が全体の 62%を占めるトップ 5 カ国にクラスタリング分析を適用した結果、合計で 124 個の貿易クラスターを検出した。日本の輸送機械生産が誘発する二酸化炭素排出移転ネットワークからは20個のクラスターに分

割できた（図 1）。最もクラスター内の排出量が大きかったのは 13 番のクラスターであり、日本の産業とロシアの鉱業が含まれていた。ロシアの工業はドイツ、フランスの上位クラスターにも含まれていた。また、3 番目のクラスターは中国の産業で構成されており、この中国クラスターは他 4 国の上位クラスターとしても出現しており、輸送機械生産において大きな役割を果たしていた。

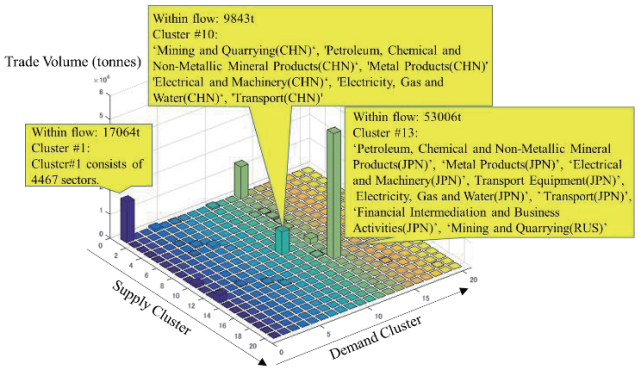


図 1 クラスター間における排出移転量 1 (Mg)

3.2. ブロックモデリング分析

図 2 を見ると、クラスター同士のフローは、Cluster#1 から Cluster#13 に流れており、また、Cluster#10 は比較的独立してクラスター内で排出していることがわかった。他の国の生産ネットワーク結果についても、輸送機械生産においては生産国の産業が含まれるクラスターと、加工度の低い上流の産業が集まるクラスターに極端に分かれており、双方向的なやり取りは見られなかった。

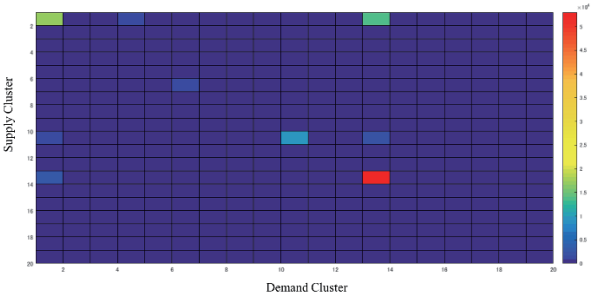


図 2 クラスター間における排出移転量 2 (Mg)

3.2. 中心性分析

次に中心性分析の結果を示す。（表 1）

媒介中心性分析の結果、どの国の生産ネットワークにおいても中国の金属・鉱業およびそれらに誘発される電気が上位に入っていた。このことから、中国の鉱業系産業が、誘発される各国各産業の生産において非常に感応度が高く、またその排出量が大きいことがわかる。レアアースやレアメタルなど自動車製造に必要である物質において中国に依存しており、それが大きな排出を誘発していることがわかる。また、各国の産業構造についても違いを見ることができ、ドイツ、アメリカ、日本は自国の産業と中国の鉱業系産業が上位に来ているのに対し、フランスはドイツやスペインの輸送機械が上位に来ている。

表 1 中心性結果（上位 10 国）

United States	b_{it}
'USA _ Electrical and Machinery'	100120
'USA _ Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products	74839
'USA _ Metal Products'	60855
'USA _ Transport Equipment'	60298
'CHN _ Electrical and Machinery'	48239
'CHN _ Metal Products'	40159
'CHN _ Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products	31478
'USA _ Finacial Intermediation and Business Activities'	27047
'USA _ Wholesale Trade'	17095
'USA _ Transport'	14945
China	
'CHN _ Transport Equipment'	353622
'CHN _ Metal Products'	280904
'CHN _ Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products	196156
'CHN _ Electrical and Machinery'	144731
'CHN _ Electricity, Gas and Water'	108902
'CHN _ Mining and Quarrying'	46089
'CHN _ Transport'	31009
'CHN _ Finacial Intermediation and Business Activities'	20944
'CHN _ Wood and Paper'	15707
'CHN _ Textiles and Wearing Apparel'	12901
Germany	
'DEU _ Transport Equipment'	70417
'DEU _ Metal Products'	20210
'CHN _ Metal Products'	14306
'DEU _ Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products	13764
'CHN _ Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products	9618
'DEU _ Transport'	9415
'CHN _ Electrical and Machinery'	8370
'DEU _ Electricity, Gas and Water'	6393
'NLD _ Re-export & Re-import'	4626
'DEU _ Finacial Intermediation and Business Activities'	4477
Japan	
'JPN _ Transport Equipment'	45996
'JPN _ Metal Products'	35448
'JPN _ Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products'	34979
'JPN _ Electrical and Machinery'	29237
'CHN _ Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products	9088
'JPN _ Finacial Intermediation and Business Activities'	8661
'CHN _ Metal Products'	8226
'CHN _ Electrical and Machinery'	7968
'JPN _ Electricity, Gas and Water'	6094
'JPN _ Transport'	4945
France	
'FRA _ Transport Equipment'	10650
'FRA _ Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products'	5871
'CHN _ Metal Products'	4892
'CHN _ Electrical and Machinery'	4789
'FRA _ Metal Products'	4737
'DEU _ Transport Equipment'	4633
'CHN _ Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products	4314
'DEU _ Re-export & Re-import'	3586
'ESP _ Transport Equipment'	2770
'DEU _ Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products	2521

4. 考察と結論

つくばでの発表会において、これらの結果から複合的に分析し、今後の二酸化炭素排出削減における国際協調について議論を行う。

各国の自動車寿命と自動車市場の変化が世界のライフサイクル CO_2 排出量に与える影響

Effects of Changes in Automobile Lifetime and Market in Nations on World CO_2 Emissions

○中本裕哉*[1)]、加河茂美 [1)]
[1)]九州大学
*y.nakamoto0527@gmail.com

1. はじめに

Kagawa *et al.* (2013)は、日本で 2009 年から 2010 年に導入されたエコカー補助金制度に着目して、補助金制度を利用して一斉に買い替えられた場合の自動車（新車のみ）のライフサイクル CO_2 排出量と補助金制度が導入されず自動車の寿命分布に従って徐々に買い替えられた場合の自動車（新車＋旧型車）のライフサイクル CO_2 排出量とを比較し、補助金制度導入の環境便益を明らかにした。

しかしながら、Kagawa *et al.* (2013)で提案されている分析フレームワークでは、寿命分布に従って抹消登録された現行車は全て廃車扱いされており、中古車の動態が全く考慮されておらず、分析の対象は新車にとどまる。そこで本研究では、“新車”と“中古車”の両方の寿命関数を考慮した新たなライフサイクル分析フレームワークを提案し、寿命変化を通した新車と中古車の台数変化が自動車の累積ライフサイクル CO_2 排出量に与える影響を分析した。

2. 研究手法

本研究における対象は1993 年から2014 年に製造され新規登録された普通車と当該期間にその普通車が抹消登録された後再登録される中古車である。本研究では、寿命分布の一つである Weibull 分布に従い自動車の残存台数が年々減少していく一方で、その減少分を補うように新車と中古車がそれぞれ購入されていく様子をモデル化する。今、0 年に新規登録された車が t 年までに廃棄される確率は下式(1)のような Weibull 分布関数として定式化できる

$$F(t)=1-\exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{m}\right\} \quad (t\geq 0) \tag{1}$$

$$\mu=\eta\Gamma(1+1/m) \tag{2}$$

ここで、m は形状パラメータ、η がスケールパラメータ、μ は平均で、Γ は一般化ガンマ関数を示している。また、(2)式は、平均μ を表している。(1)式によって新車の廃棄動向を分析することが可能である。また、0 年に新規登録された車が t 年までに残存している累積残存確率は $\varphi_n(t)=1-F(t)$ として得ることが出来る。ここで、$\varphi_n(0)=1$ は、0 年に新規登録された車は全て 0 年に残存していることを示す。しかしながら、(1)式では中古車の動向を分析することはできない。

今、0 年に新規登録されて t 年後に抹消登録されその年に中古車として再登録された車について考える。この中古車が再登録された年から y 年後までに残存している割合は下式(3)のように定式化することができる。

$$\varphi_u(t,y)=\frac{\int_{t+y}^{\infty}f(s)ds}{\int_{t}^{\infty}f(s)ds}\approx\frac{1-F(t+y)}{1-F(t)} \tag{3}$$

ここで、t 年における乗用車のストック台数は、下式(4)のように表せる。

$$S(t)=S_n(t)+S_u(t) \quad (4)$$

$S_n(t)$ と $S_u(t)$ は、それぞれ t 年における新車と中古車の台数を表している。新車と中古車の残存確率を用いることによって、新車と中古車のストック台数は下式のように定式化できる。

$$S_n(t)=B_n(t)+\sum_{i=1}^{t-1}\varphi_n(t-i)B_n(i) \quad (5)$$

$$S_u(t)=B_u(t)+\sum_{y=i+1}^{t-1}\sum_{i=1}^{t-1}\varphi_u^{t-i}(y)B_u(i) \quad (6)$$

ここで、$B_n(t)$ と $B_u(t)$ は、それぞれ t 年における新車と中古車の購入台数、$\varphi_n(t-i)$ は i 年に新規登録された新車の t 年における残存確率、$\varphi_u^{t-i}(y)$ は i 年に新規登録されて t 年後に中古車として再登録された車が、再登録された年から y 年後までに残存している確率を表している。

新車の製造・走行・廃棄に付随するライフサイクル CO_2 排出量と現行車ならびに中古車の走行・廃棄に付随する CO_2 排出量を推計する。

t 年に登録された新車と中古車のライフサイクル排出量は以下のように定式化できる。

$$q(t)=f_mB_n(t)+f_wD(t)+f_g(t)B_n(t)+\sum_{s=1}^{t-1}f_g(s)H_n(s,t-s)+\sum_{s=1}^{t-1}f_g(0)H_u(s,t-s) \quad (7)$$

ここで、f_m は自動車一台あたり製造時の CO_2 排出量、f_w は自動車一台あたり廃棄時の CO_2 排出量、$f_g(t)$ は t 年製の自動車一台当たりの走行時の年間 CO_2 排出量を示している。(7)式の右辺第一項は新車製造時のライフサイクル CO_2 排出量、第二項は乗用車廃棄時のライフサイクル CO_2 排出量、第三項は新車走行時のライフサイクル CO_2 排出量、第四項は現行車走行時のライフサイクル CO_2 排出量、第五項は中古車走行時のライフサイクル CO_2 排出量を表している。

3. 分析結果と考察

図-1 は、X 軸が自動車販売台数に占める中古車のマーケットシェア率、Y 軸が新車の平均寿命の増減、Z 軸が 1993 年から 2014 年までの累積ライフサイクル CO_2 排出量を表している。これによると、中古車のマーケットシェア率を上昇させることで累積ライフサイクル CO_2 排出量は大きく減少していることが分かる。例えば、新車のベースラインの平均寿命が 11.50 年(つまり図-1 における平均寿命の変化が 0 年)のとき、中古車のマーケットシェア率を 10%向上させると、約 6000 万トンの削減効果があった。また、中古車のマーケットシェア率が 40%以上の時、新車と中古車の平均寿命を減少させることは累積ライフサイクル CO_2 排出量の削減に効果があるという結果が得られた。既存研究の分析対象である新車やエコカーの購入補助金制度は、買い替えを促進させるという点において自動車の平均寿命を減少させることに他ならない。このことは、エコカー減税・補助金政策は中古車のマーケットシェア率が高いほど効果的であるということを示している。また、図-1 より新車の平均寿命を増減させるよりも中古車のマーケットシェア率を変化させるほうが累積ライフサイクル CO_2 排出量の削減に大きく貢献していることも明らかになった。本結果から、自動車部門の CO_2 排出量の削減に向けてエコカー減税・補助金のような自動車寿命短縮へのアプローチに加えて、中古車のマーケットシェア率を増加させることが重要であるという、これまでにない視座が得られた。このことは今後の自動車部門からの CO_2 排出量の削減策を考える上で非常に重要である。これらの結果を踏まえると、2009 年 4 月から 2010 年 9 月にかけて実施された、エコカー減税・補助金などの買い替えを進ませるような政策に加えて、中古車購入に補助金を与える政策などで、中古車の割合を増やすことができれば、より効果的な削減が期待できる。つまり、中古車を自動車市場に効率よく投入することは、自動車由来の CO_2 排出量の削減に大きく寄与する可能性があるといえる。

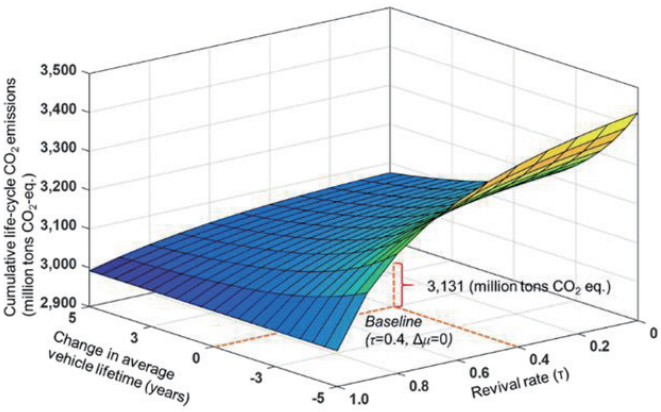


図-1 Cumulative life-cycle CO2 emissions of new and used cars registered during 1993 to 2013 under combined scenarios of average vehicle lifetime and the revival rate

4. 参考文献

Kagawa, S., *et al.* (2013) Global Environmental Change 23: 1807–1818.

一般社団法人自動車販売協会連合会『自動車統計データブック(第 33 集)』、自販連、2015

3日目
(3/3)

タイムテーブル

3日目　3月3日(金)

	A会場	B会場	C会場	D会場	E会場
9:40-10:00	バイオマス(1)	パリ協定	特別セッション：組織のLCAと削減貢献量評価(1) 素材・部品・プロセスの貢献	製品LCA(2)	
10:00-10:20					ストック・フロー(1)
10:20-10:40					
10:40-11:00					
11:00-11:20	休憩				
11:20-11:40	バイオマス(2)	生物多様性	特別セッション：組織のLCAと削減貢献量評価(2) 製品・サービスの貢献	廃棄物(3)	ストック・フロー(2)
11:40-12:00					
12:00-12:20					
12:20-12:40					
12:40-13:40	昼休み				
	A会場				
13:40-15:05	学会各賞受賞記念講演				
15:05-16:00	クロージング				

低圧バイオメタノール合成システムのインパクト評価

Life cycle impact assessment of low pressure bio-methanol production system

○石山智之*1)、布浦鉄兵 2)、堂脇清志 1)
Tomoyuki Ishiyama, Teppei Nunoura, Kiyoshi Dowaki
1）東京理科大学, 2）東京大学
* 7413701@ed.tus.ac.jp

1. はじめに

東日本大震災以降、我が国では新エネルギーの利用及び分散型電源に注目が集まっている。その中でも、新エネルギーの一つであるバイオマス資源を小規模分散型に対応可能なガス化システムに、本研究では着目した。このガス化システムは電力や水素エネルギーなど様々な形で 2 次エネルギーの生産を可能とするが、本研究では今後温暖化対策の一環として、燃料電池用の燃料や化学原料など様々な需要が増加することが見込まれ、さらに常温常圧で液体であり輸送・保管が容易なメタノール(CH_3OH, MeOH)に着目した。他方、このようなエネルギー導入に関しては、温質効果ガス削減効果を見える化が求められており、その 1 つの指標として LCA による指標化が重要となりつつある。特に、バイオマス資源方のエネルギー変換においては、原料の輸送やエネルギー変換時における所内動力の影響が大きいとされていため、LCA 思考による見える化とそれに伴う各プロセスにおけるホットスポットの明示は重要な意味を持つ。

渡辺ら [1]は、ガス化システムから製造されたメタノールの分析はインベントリ分析において CO_2 排出量及びエネルギー収支比(生産エネルギーあたりの投入エネルギーの比)を分析したが、エネルギー収支比が 1 を超え省エネルギー性が欠けるという評価をしている。これはメタノール製造プラント内における所内動力の影響が大きく、特に、合成のための圧縮動力の大きさが原因であると指摘し、この動力を削減するために、合成圧力の低減の効果について検討した [2]。当該研究においても、動力削減のために低圧(1 MPaG 以下)での合成システムについて、ラボベースでの実験結果を基に評価を行い、その改善策を明示することとした。

また、環境影響評価については、これまで温暖化指標が主な指標であったが、それ以外のインパクト指標についても、多様化した環境指標の明示化を行うことは多様化する消費者ニーズからも重要であるため、本研究では他のインパクト指標の明示化を行うこととした。さらに、エネルギーの有効利用の概念を考慮した指標の提案をした。なお、インパクト指標の計算は、SimaPro V8.2 を使用した。

2. 条件設定

2.1 システム境界

本研究における提案指標はエクセルギー効率あたりのインパクト評価値を定義することとした。このエクセルギー効率を分母にする意味は、本研究で扱うエネルギープラントにおいては、オフガスの熱源としての利用割合、あるいは、加圧動力の低減はエクセルギー量として評価することが可能であり、プロセスの変更によるエネルギーの質を評価できることにある。

ここで､本研究のシステム境界は Fig.1 の通りとし、考慮するプロセスは、バイオマスのチップ化・輸送・乾燥及びエネルギー変換プロセス(ガス化＋メタノール合成)とし、渡辺ら [1]と同様とした。

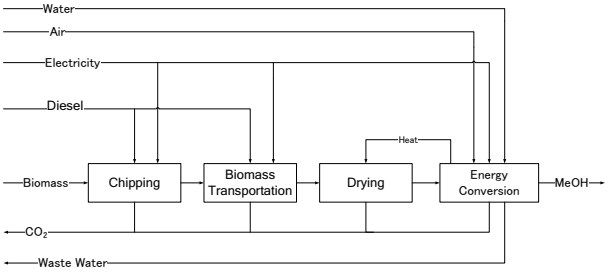


Figure 1 System boundary

2.2 原料・前処理プロセス

本研究では、原料として杉廃材を想定し、針葉樹廃材を選択しバックグラウンドデータとして環境影響評価を行うためのインベントリデータベースである Ecoinvent3 の針葉樹廃材を選択した。

次に、前処理プロセスとしてチップ化・原料輸送及び乾燥プロセスを考慮した。チップ化及び原料輸送は渡辺ら [1]と同様としたが、乾燥プロセスで消費する熱エネルギーはエネルギー変換プロセスから賄えるとしてエネルギー消費は考慮しない。各プロセスにおける投入エネルギーはチップ化が電力及び軽油を使用し、原料輸送が軽油を使用した。

2.3 エネルギー変換プロセス

エネルギー変換プロセスであるバイオマスガス化及びメタノール合成システムはプロセスシミュレータである Aspen Plus V8.8 を使用して設計評価し、各プロセスの評価を可能とした。

本研究ではエネルギー変換プロセスをメタノール合成条件別に 2Case 評価した。Case 1 は渡辺ら [1]と同様

の 170℃、3.0MPaG とし、理論平衡の Case。Case 2 は 200℃、0.7MPaG の条件とし [2]、実験値より平衡反応において平衡温度と反応温度の差を表すアプローチ温度差を求めて評価した。

このエネルギー変換プロセスに対して本研究では、エクセルギー解析を行った。エクセルギーは式(1)のように表され流体の持つ有効仕事を表す。

$$E = \Delta H - T_0 \Delta S \quad (1)$$

ここで、E:エクセルギー, ⊿H:エンタルピー変化, T_0:基準温度(25℃), ⊿S:エントロピー変化とする。

ここで、エネルギー変換プロセス全体におけるエクセルギー効率を式(2)の通りに定義する。

$$E_{eff} = \frac{E_{MeOH}}{E_{MeOH} + E_{loss} + W_{in}} \quad (2)$$

ここで、E_{eff}:エクセルギー効率, E_{MeOH}:製品として取れ出せたメタノールのエクセルギー, E_{loss}:各プロセスにおけるエクセルギーロスの合計, W_{in}:投入した仕事とした。但し、ここで電力 W を投入した仕事と換算するには機器の出口温度 T を考慮して、式(3)のように定義される。

$$W_{in} = W(1 - T / T_0) \quad (3)$$

以上の定義式より、Table 1 に本研究で設計評価したエネルギー変換プロセスにおけるインベントリーデータを示す。

Table 1 Plant specification

	Case 1	Case 2
Plant Scale [dry-t/day]	12	12
Auxiliary Power		
Compressor [kW]	176	75
Others [kW]	112	112
Produced Methanol [MJ/h]	2,640	2,706
Exhaust CO_2 [kg/h]	691	691
Waste Water [kg/h]	267	254
E_{eff} (Exergy efficiency)	36%	39%

Table 1 より、低圧合成システムである Case 2 では、所内動力、特に合成時の加圧動力の削減を可能とし、筆者らが検討してきた熱の有効利用を考慮したプロセス設計により燃料製造量が Case 1 より増加している [2]。

2.4 インパクト評価

次に、本研究では、ReCiPe Midpoint を使用してインパクト評価を行った。前述した 2 つの Case について評価し、各 Case で求めたインパクト指標に対し、プロセス内部の効率性を考慮したエクセルギー効率で割り戻した値を正規化し、最終的な評価指標として表した。

3. 結果及び考察

まず、Table 1 をみるとエクセルギー効率はわずかに Case 2 が Case 1 を 2 ポイントほど上回った。これはメタノール製造量の増加、低圧化による所内動力(主に加圧動力)の削減及びその後のプロセスによる減圧幅の縮小による。また、システムの構成別にみるとガス化炉に熱を供給する燃焼炉システムでのエクセルギー損失が最も多きく、燃焼反応及び大きな温度変化によるものである。

次に Fig.2 に各指標に対して、エクセルギー効率で正規化したインパクト指標について、Case 1 の結果を 1 と基準にした場合の結果 (Climate change, Water depletion 及び Fossil depletion)について示す。

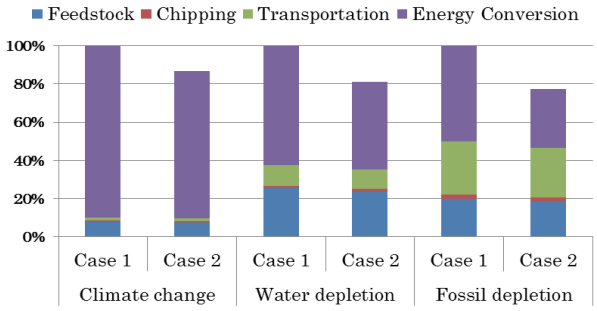


Figure 2 Imapct assessment results

この結果から、全ての指標で所内動力の低減及びエクセルギー効率の向上により結果が改善している。特に、エネルギー変換プロセスが占める割合が大きい。また、Climate change(地球温暖化)はプラントからの直接排出及び電力消費、Water depletion(水資源枯渇)が水使用及び電力消費、Fossil depletion(化石資源枯渇)が電力消費によるものであり、このことから低圧合成による効果はエネルギー消費の削減のみならず、各指標の低減に大きくつながることが示唆された。

4. おわりに

本研究では、従来のインパクト評価に加え、プロセス内部の効率性を評価できるエクセルギー解析を組み合わせ評価した。結果として、プラント内での電力消費が各指標に多きく影響を与えることがわかった。

引用文献

1) 渡辺佑太郎, 佐藤由雄, 川野大輔, 小井土賢二, 堂脇清志: 日本 LCA 学会誌, 9(1), (2013), pp 20-36
2) Ishiyama T, Koido K, Nunoura T, Douwaki K; “4th Asian Conference on Biomass Science”, Penang, (2016), pp 63-66

Supporting Information

用語説明

EcoInvent 3 とは、スイスで開発され環境影響評価を行うためのインベントリデータベースの一つ。欧州を基準としてデータが作成されているが、世界平均を算出評価することも可能。また、LCA に加え、フランスの環境負荷情報表示実験、英国カーボンフットプリントにおいても利用実績がある [SI 1)]。

3 章の全ての指標に対する結果

3 章で一部を示した ReCiPe Middpoint で評価される全 18 のインパクト指標に対して、エクセルギー効率で正規化したインパクト指標について、Case 1 の結果を 1 と基準にした場合の結果について Fig. S1 で示す。

引用文献

SI 1) LCA 日本フォーラム LCA/DB 委員会: “LCA 日本フォーラムインベントリデータベース動向調査報告書” (2013)

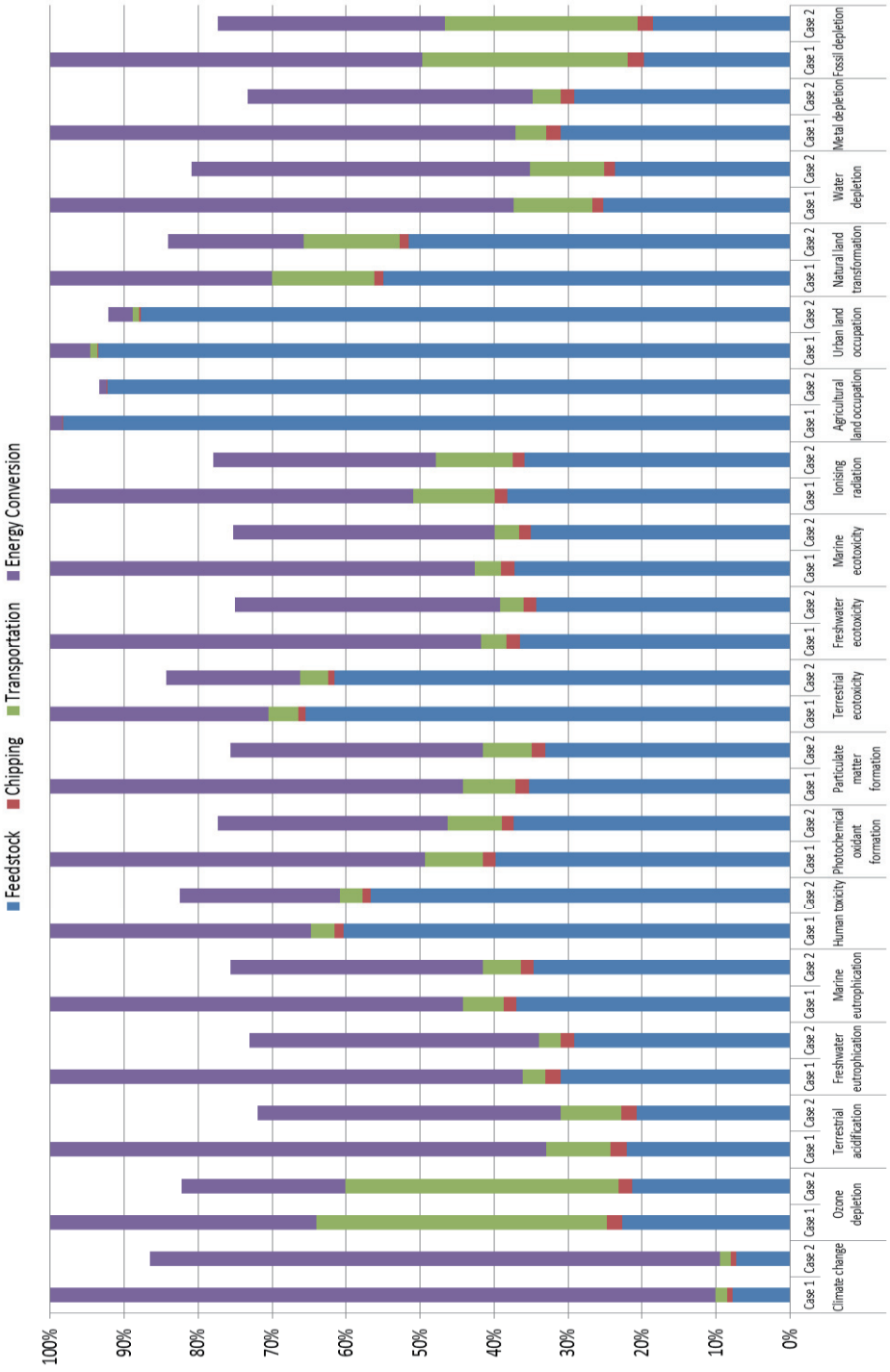


Figure S1　Impact assessment results

バイオガソリン製造用触媒の設計への LCA の適用

Application of LCA to catalyst design for biogasoline production

○奥山泰世*[1)]、小池充 [1)]、田村正純 [2)]、中川善直 [2)]、今井章雄 [1)]、冨重圭一 [2)]、福島康裕 [2)]
Yasuyo Okuyama, Mitsuru Koike, Masazumi Tamura, Yoshinao Nakagawa, Akio Imai, Keiichi Tomishige, Yasuhiro Fukushima
1) 昭和シェル石油株式会社, 2) 東北大学大学院
* Yasuyo.okuyama@showa-shell.co.jp

1. はじめに

低炭素社会に向けたバイオリファイナリーの技術開発の一つとして、我々は、バイオマス由来の糖アルコールから従来のガソリンにも含まれる C5 及び C6 のオレフィン（バイオガソリン）を製造するプロセスを研究している。このプロセスには、糖アルコールからモノオールを製造する“モノオール製造工程”とモノオールを脱水させてオレフィンを製造する“オレフィン製造工程”がある。それぞれの工程中の反応を少ないエネルギーの投入で進行させるためには触媒が用いられるが、その性能が技術開発の核心となっている。

バイオガソリンは、コスト低減に加えて、石油由来ガソリン（GHG 排出量 : 87.1 g-CO_2e/MJ-gasoline）に対して、WTW (Well-to-wheels)で 50%以上の GHG 削減効果が求められている [1)]。そのため、バイオガソリン製造用の触媒開発では、基礎研究でも、開発触媒を用いたバイオガソリン製造プロセスが GHG 排出量を目標まで削減できる見込みがあるか、見極める必要がある。

モノオール製造の固体触媒反応では、糖アルコールが持つ複数の OH 基を水素で切断し、１つの OH 基を残したモノオールを生成する水素化分解反応を行わせる（eq. (1): ソルビトールからヘキサノールを生成する水素化分解反応）。

$$C_6H_{14}O_6 + 5H_2 \rightarrow C_6H_{14}O + 5H_2O \quad (1)$$

バイオガソリンのコスト低減を意識して、安価な化石燃料由来水素（例えば、天然ガスのスチームリフォーミングで生成した水素）（外部水素）を用いると、プロセスの GHG 排出量が多くなる。一方、バイオマス由来の糖アルコールから水素（*in situ* 水素）を生成する反応として、水相改質（Aqueous phase reforming ; APR）反応が知られている（eq. (2):ソルビトールから水素を生成する APR 反応）。

$$C_6H_{14}O_6 + 6H_2O \rightarrow 13H_2 + 6CO_2 \quad (2)$$

この水素を用いれば、バイオガソリン製造プロセスの GHG 排出量を少なくすることができるが、水素を製造するために原料のバイオマスを使うので、バイオガソリン製造のための原料が減ってしまう。それ故、バイオガソリンの収量が減るので、コストが上がってしまう。つまり、コスト低減を考慮して化石燃料由来水素を利用しつつ、バイオガソリンに求められる GHG 削減目標値を満たす分だけのバイオマス由来水素を利用することが必要である。

我々が開発した新規固体触媒（Pt-Ir-ReO_x/SiO_2）は、上記の水素化分解反応と APR 反応に高活性であることが見出されている [2)]。そこで本研究では、Pt-Ir-ReO_x/SiO_2 を用いたバイオガソリン製造プロセスについて、WTW での GHG 削減効果が 50%となるときの APR 反応選択率（触媒反応の原料となるソルビトールが APR 反応に用いられる割合(%-C)）を計算し、触媒設計の指針を立てることを目的とした。

2. GHG 排出量の算出と APR 反応選択率の計算

2.1 バイオリファイナリーの GHG 排出量

米国 National Renewable Energy Laboratory (NREL)では、2,000 dry biomass ton / day 規模で、コーンストーバー等から炭化水素を製造するバイオリファイナリーの GHG 排出量を算出している [3)]。このバイオリファイナリーには、原料受け入れ、前処理、酵素糖化、酵素製造、触媒変換、廃水処理、燃料貯蔵、熱電併給、及びユーティリティーの 9 つの工程（区画）が含まれる。

そこで、今回、我々の開発触媒を含むバイオガソリン製造プロセス（図 1）を NREL のバイオリファイナリーの触媒変換工程と置き換え、化学プロセスシミュレーターである PRO/II によって算出したインベントリデータを用いて GHG 排出量を算出した。

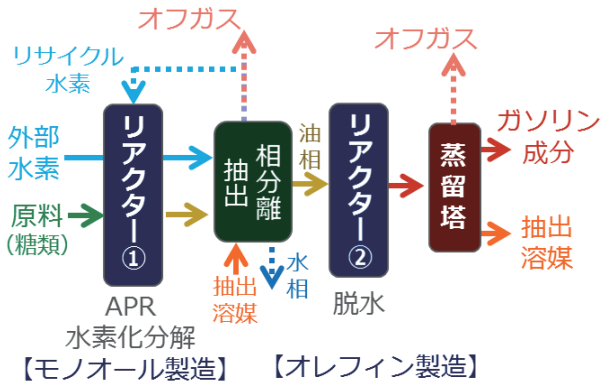


図 1 バイオガソリン製造プロセス

バイオリファイナリーでは、必要とされる熱と電気は全てリファイナリー内の熱電併給で賄われる。それ故、バイオリファイナリーの GHG 排出量は、①前処理等で用いる外部購入薬品、②外部水素、及び③余剰電力の外販のみに関連する。我々は触媒変換工程を NREL のものと置き換えるため、①は NREL と同一である。一方、②は触媒反応での外部水素消費量が影響し、③は発電の原料に触媒変換で生じるオフガスが含まれるので、オフガス量が余剰電力に影響する。

2.2 バイオリファイナリー以外の GHG 排出量

WTW でのバイオリファイナリー以外のプロセス（原料調達と調整、原料輸送、燃料の輸送と調整、及び燃料の消費）の GHG 排出量については、JEC [4]の値を参考にした。これらの値をガソリンの発熱量ベースの排出量に変換して、リファイナリー以外の GHG 排出量を 3.8 g-CO_{2e}/MJ-gasoline とした。

2.3 APR 反応選択率の計算

PRO/II モデルにおいて、触媒変換工程のモノオール製造工程中の水素化分解反応と APR 反応の反応選択率を変化させてシミュレーションを行い、外部水素消費量とオフガス量を求めた。この外部水素消費量とオフガスから生じる電力外販にかかる GHG 排出量は、それぞれ、天然ガスのスチームリフォーミングによる炭素排出強度 11.2 kg-CO_{2e}/kg-H_2 [3]、及び米国の発電による平均炭素排出強度 0.65 kg-CO_{2e}/kWh [3]のクレジットを用いて算出した。これらの GHG 排出量とリファイナリー以外の GHG 排出量を加えた WTW の GHG 排出量が、石油由来ガソリンの GHG 排出量の 50%となる APR 反応選択率をトライアル&エラーで求めた。

3. 結果

まず、モノオール製造工程において、APR 反応をさせずに、必要最低限の外部水素を供給したときの GHG 削減効果を算出した。その結果、触媒変換プロセスに最低限必要となる水素投入量は 3,546 kg/h であり、GHG 削減効果は 41.7%であった。

次に、外部水素と APR 反応による *in situ* 水素の合計を 3,546 kg/h としたときの GHG 排出量を算出した。図 2 に APR 反応選択率を 5、10、及び 15%-C と変化させたときの GHG 排出量及び燃料収量を示す。APR 反応選択率を 5、10、及び 15%-C と増大させると、ガソリン製造の原料が減るため燃料収量はそれぞれ、924、869、及び 814 GJ/h と低下したが、リファイナリーの GHG 排出量は、それぞれ、43.6、39.7、及び 35.3 g-CO_{2e}/MJ-gasoline と改善した。これは、APR 反応によって生成した *in situ* 水素が増えたことで、外部水素の投入量を減らせたためである。さらに、オフガス量が増大したことで、発電量が多くなり、外販できる余剰電力が増えたことも寄与した。これらの値から WTW での GHG 削減効果を算出すると、APR 反応選択率 5、10、及び 15%-C でそれぞれ、45.6、50.1、及び 55.1%となった。さらに、APR 反応選択率の微調整を行い、GHG 削減効果 50%を満たす APR 反応選択率を求めたところ、9.9%-C になることが分かった。

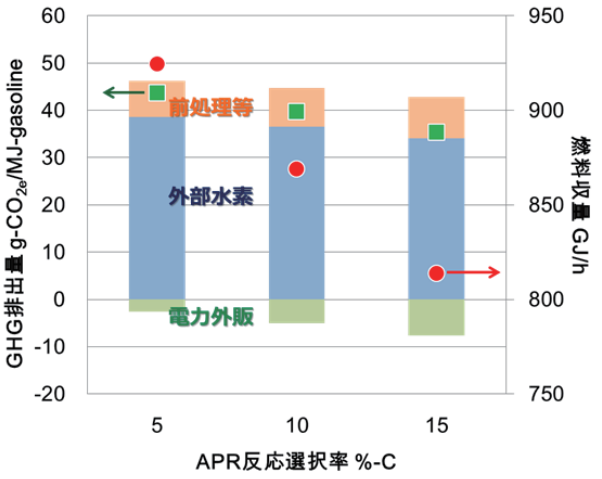


図 2　APR 反応選択率の変化に伴う GHG 排出量と燃料収量
縦積棒グラフ：各要素の GHG 排出量（左軸）、■：リファイナリーの GHG 排出量（左軸）、●：燃料収量（右軸）

4. まとめ

バイオガソリン製造用の新規固体触媒の開発において、PRO/II シミュレーションを用いて、GHG 削減効果 50%を満たすために必要なバイオマス由来水素を生成する APR 反応の反応選択率を求めた。この結果は、開発触媒の性能目標となり、APR 反応の活性金属の担持量等、触媒設計に役立てることができる。また、外部水素の炭素排出強度や電力外販による炭素排出強度クレジットの感度分析を行うことで、事業化する時期や場所に合わせた触媒設計の指針を示すことができる。

引用文献

1) 経済産業省: “非化石エネルギー源利用に関する石油精製業者の判断基準（告示第 242 号）”, (2010).
2) Liu, S., Okuyama, Y., Tamura, M., Nakagawa, Y., Imai, A., Tomishige, K., Catalysis Today, 269, (2016), pp.122-131.
3) National Renewable Energy Laboratory (NREL): “Process Design and Economics for the Conversion of Lignocellulosic Biomass to Hydrocarbons”, (2015).
4) JEC: “Well-to-Tank Report Version 4.a”, (2014).

バイオマス由来 PET 製造における CO_2 排出量の検討

A study of CO_2 emissions in biomass-derived PET manufacturing

○仙波壽朗*[1)]、稲葉敦 [2)]
Toshiro Semba, Atsushi Inaba
1) 飯田女子短期大学, 2) 工学院大学
* senba@iidawjc.ac.jp

1. 緒言

ポリエチレンテレフタレート（Polyethylene Telephtalate, 以下 PET）は、汎用プラスチックとして繊維材料や容器包装材料、電子機器の部材などさまざまな分野で利用されている。従来、PET は化石資源である石油や天然ガスから生産されてきたが、GHG 排出量の削減や化石資源への依存低減の観点からバイオマス資源へ転換することが望ましい。そのため現在、バイオマス資源から PET を製造する試みが世界中で行われている。一般的に PET は石油由来のモノエチレングリコール（Monoethylen Glycol, 以下 MEG）とテレフタル酸（Telephthalic Acid, 以下 TPA）を重合して製造される。これまで八木橋ら [1,2)]により、サトウキビ由来の MEG と石油由来の TPA を用いた部分バイオ由来 PET について報告されているが、バイオマス炭素含有量は 30%程度であり、GHG 削減効果は小さい。

そこで本研究では、100%バイオ由来 PET（バイオ由来 MEG とバイオ由来 TPA の重合）の GHG 排出量を算出し、石油由来 PET および部分バイオ由来 PET との比較を行う。

2. 方法

本研究では PET 樹脂 1kg を評価対象とした。Figure1 にバイオ PET 製造工程、Figure2 に石油系 PET 製造工程を示す。バイオ PET のシステム境界にはサトウキビ栽培から PET 重合、廃棄までを含めた。また石油系 PET のシステム境界には海外での原油採掘から PET 重合、廃棄を含めた。

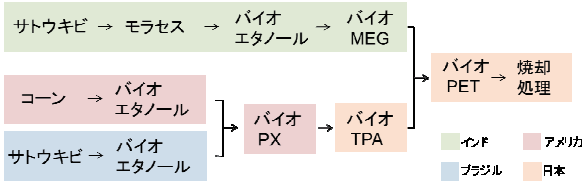


Figure1 バイオ PET 製造工程

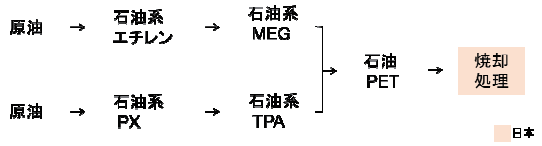


Figure2 石油系 PET 製造工程

3. PET 製造工程と GHG 排出量の算定結果

PET は MEG と TPA の脱水縮合により合成される。

3.1 MEG 製造

MEG は示性式 $C_2H_4(OH)_2$ で表わされる。

3.1.1 バイオ MEG

先行研究 [2)]では、インドでのサトウキビ栽培からバイオ MEG 製造までの GHG 排出量 1.088kg-CO_{2e}/kg-MEG を報告している。本分析ではバイオ MEG 製造の GHG 排出量原単位として前記の値を用いる。

3.1.2 石油系 MEG

石油系 MEG の GHG 排出量原単位は IDEA の 1.502kg-CO_{2e}/kg-MEG [3)]を引用する。

3.2 TPA 製造

TPA は示性式 $C_6H_4(COOH)_2$ で表され、通常、パラキシレン（Paraxylene, 以下 PX）を触媒下で酢酸と混合し、酸素酸化させて合成される。

3.2.1 バイオ TPA 製造

バイオ TPA はサトウキビおよびトウモロコシを原料とし、バイオエタノール、バイオ PX を経て製造される。アメリカ産のトウモロコシとブラジル産のサトウキビを原料としてバイオエタノールを製造する。そしてバイオプロセスによりバイオエタノールからバイオ PX を製造する。その後、日本でバイオ PX からバイオ TPA を製造する。

(1) バイオ PX

原材料のエタノールはサトウキビ由来 20%、コーン由来 80%を想定した。製品のバイオ PX に加えバイオベンゼンが併産され、バイオ PX とバイオベンゼンに GHG 排出量を重量基準で配分した。さらに併産される水素、留出燃料、及び燃料は石油由来の製品を代替するものとして GHG 排出量から控除した。その結果、バイオ PX またはバイオベンゼン 1kg 製造時 GHG 排出量は、入出力の GHG 排出量合計 5.88kg-CO_{2e}/kg から控除対象の GHG 排出量合計 1.85kg-CO_{2e}/kg を引き、4.03kg-CO_{2e}/kg となった。

(2) バイオ TPA

東レ社から入手した入出力データを基に計算した結果、2.79kg-CO_{2e}/kg-TPA となった。

3.2.2 石油系 TPA 製造

通常、石油系 TPA はナフサ、混合キシレンを経て得

られた PX を酸素酸化して製造する。

(1) 石油系 PX

石油系 PX の GHG 排出量原単位として 1.65kg-CO_{2e}/kg-PX [4-6]を用いることとする。また併産されるベンゼンについては、1.69 kg-CO_{2e}/kg-ベンゼン [5,6]を用いる。

(2) 石油系 TPA

バイオ TPA 製造と同じプロセスデータを用い計算した結果、1.22kg-CO_{2e}/kg-TPA となった。

3.3 PET 製造と廃棄

原材料の MEG と TPA にはそれぞれバイオ由来と石油由来があり、計 4 パターンの PET について算出した。PET 製造の入出力データは東レ社から入手した。廃棄時に 1mol の PET [$C_{10}H_8O_4$ (M=192)]を燃焼すると 10mol の CO_2 が排出される。よって PET 1kg の燃焼では 440kg-CO_2÷192kg-PET= 2.292kg-CO_{2e}/kg-PET が排出される。炭素の由来に基づき、バイオ MEG を用いる場合は、このうち 2/10 の 0.4582kg-CO_{2e}/kg-PET を控除する。またバイオ PX を用いる場合は、このうち 8/10 の 1.83kg-CO_{2e}/kg-PET を控除する。

3.3.1 石油系 PET

石油系 PET では原材料である MEG と TPA がともに石油由来のため、バイオ由来炭素は 0 である。したがって石油系 PET の GHG 排出量は、入出力工程の GHG 排出量と、廃棄工程の PET 焼却時に発生する GHG 排出量を足し合わせ 4.51kg-CO_{2e}/kg-PET となった。

3.3.2 部分バイオ PET（バイオ MEG＋石油系 TPA）

(1) 本研究

バイオ MEG と石油系 TPA より PET を製造する場合、バイオ MEG 由来の GHG 排出量を控除できる。その結果、3.91kg-CO_{2e}/kg-PET となった。

(2) 既報 [1,2]

先行研究では 4.85kg-CO_{2e}/kg-PET と報告している。本研究と比較したところ、原材料による GHG 排出量は八木橋らの報告の方が 1.15kg-CO_{2e}/kg-PET 多く、ユーティリティと排出物による GHG 排出量は本研究の方が 0.246 kg-CO_{2e}/kg-PET 多い結果となった。

3.3.3 部分バイオ PET（石油系 MEG＋バイオ MEG）

入出力工程で排出される GHG 排出量からバイオ TPA に起因するバイオ由来炭素を控除した結果、4.03kg-CO_{2e}/kg-PET となった。

3.3.4 100%バイオ PET（バイオ TPA の原材料：サトウキビ 20%，コーン 80%）

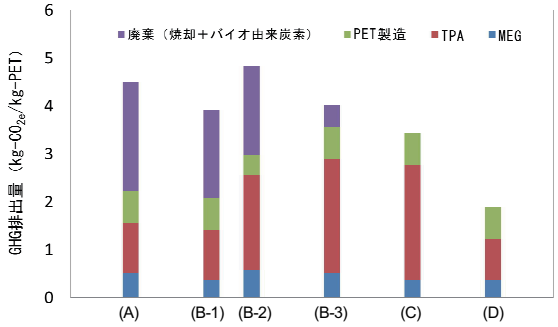
100%バイオ PET はバイオ MEG とバイオ TPA より製造する。バイオ TPA の原材料であるエタノールは商業生産に向けてより現実的なコーン由来 80%、サトウキビ由来 20%の割合で用いた。全体の GHG 排出量は、焼却時の CO_2 とバイオ由来の CO_2 が相殺され、3.43 kg-CO_{2e}/kg-PET となった。

3.3.5 100%バイオ PET （TPA の原材料：サトウキビ 100%）

単位 MJ 当たりの GHG 排出量はコーン 56gCO_{2e}/MJ、サトウキビ 16gCO_{2e}/MJ [7]である。そこでサトウキビ 100%由来のバイオ TPA を用いた 100%バイオ PET について GHG 排出量を算出した。その結果、バイオ TPA に起因する GHG 排出量は、3.3.4 の結果と比べ 49%減少し 1.89kg-CO_{2e}/kg-PET となった。

3.3.6 各 PET の GHG 排出量構成

3.3.1-3.3.5 のデータを Figure3 にまとめた。



PET製造の GHG排出量 (kg-CO_{2e}/kg)	(A) 石油系 PET	(B) 部分バイオPET			(C) 100% バイオPET (PX:サトウキビ 20%,コーン80%)	(D) 100% バイオPET (PX:サトウキビ 100%)
		バイオMEG＋石油系TPA		(B-3) 石油系MEG ＋バイオTPA		
		(B-1) 本研究	(B-2) 既報			
MEG	0.50	0.37	0.57	0.50	0.37	0.37
TPA	1.05	1.05	1.99	2.40	2.40	0.86
PET製造	0.67	0.67	0.42	0.67	0.67	0.67
廃棄工程	2.29	1.83	1.86	0.46	0.00	0.00
合計	4.51	3.91	4.84	4.03	3.43	1.89

Figure3 各 PET の GHG 排出量と構成

4. まとめ

石油系 PET において焼却時に発生する CO_2 量は全体の 5 割以上を占めている。そのためバイオマス由来の原材料を用い CO_2 を植物生体内に固定することは、CO_2 排出量の削減において効果的である。またバイオ TPA 製造時における GHG 排出量は、バイオマス原材料に大きく影響を受けることが分かった。100%バイオ PET（TPA の原材料:サトウキビ 100%）の GHG 排出量は 1.89kg-CO_{2e}/kg-PET であり、石油系 PET と比べ 58%少ない。

引用文献

1) 八木橋聡美, 柴田あゆみ, 大島寛, 伊坪徳宏 : 第7回LCA学会研究発表会講演要旨集, 野田市, (2012), pp44-45

2) 八木橋里美 : バイオマス由来ポリエチレンテレフタレートの LCA, 学士論文, (2012)

3) IDEA, (2015)

4) Suding P. : Inter-American Development Bank, (2013)

5) PlasticsEurope : Benzene, Toluene, and Xylenes, (2013)

6) U.S. Life Cycle Inventory Database, (2012)

7) GREET 2013 Data

Towards measurement of eco-efficiency of Japan: Assessment of the environmental impacts of biomass products

○Sébastien M.R. Dente [*1)], Chihiro Kayo [2)], Chika Aoki-Suzuki [1)3)], Kiyotaka Tahara[4)], Seiji Hashimoto[1)]
1) Ritsumeikan University, 2) Tokyo University of Agriculture and Technology, 3) Institute for Global Environmental strategies, 4) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
*15v01062@gst.ritsumei.ac.jp

1. Introduction

Eco-efficiency is an indicator used in environmental management policy and defined, in case of national level, as the ratio between the value of Gross Domestic Production (GDP) and the total environmental impact. Disaggregation of this indicator at the level of materials leads to several issues. First, as underlined in van der Voet et.al [1)], a proper management of double counting is necessary, because resources/materials supply chain in the upstream side are intertwined. Second, as selected resources/materials being not necessarily final products, allocation of value added and environmental impact in the downstream side must be managed carefully. In this study, we determine the eco-efficiencies of biomass resources/materials as reported in the Japanese 2011 Input-Output (IO) table[2)], using greenhouse gas emissions as a proxy for environmental impacts.

2. Methodology

2.1 Estimation of upstream unitary environmental impacts and value added of targeted resources/materials

We adjusted the 2011 IO table by removing the imports in order to get a domestic IO table. We then calculated the upstream unitary environmental impact (I) and value added (D) of targeted biomass resources/materials by multiplying the process emissions (S) and value added (V) with the Leontief inverse matrix (L). In all following equations, * refers to matrix type multiplication.

$$I = S * L \ ; D = V * L \ \ (eq.1)$$

2.2 Estimation of upstream environmental impacts and value added of targeted resources/materials

The upstream environmental impact (Eup) and value added (Vup) of targeted resources/materials are calculated by multiplying the previous unitary coefficients by the total production of resources/materials (X) adjusted from double counting by a coefficient (k).

$$E_{up} = kIX \ ; V_{up} = kDX \ \ (eq.2)$$

The coefficient k is calculated as shown in eq.3 by decomposing the intermediate matrix (A) of the IO table into four block matrices Att, Ato, Aot and Aoo in which t is the index representing targeted resources/materials and o is the index representing non–targeted resources/materials. Loo is then the Leontief inverse of the matrix Aoo. Id is a vector of which all components are equal to one.

$$(Id - k)X = (A_{tt} + A_{to}L_{oo}A_{ot}) * X \ \ (eq.3)$$

The core idea to manage double counting is to keep intact the integrity of the supply chain of targeted resources/materials. For example, feed and forage crops, a targeted resource/material, is used as input to beef and dairy cattle which are also targeted resource/materials. In this case, the input amount is allocated to beef and dairy cattle and not to feed and forage crops for which it constitutes a double count.

2.3 Estimation of downstream environmental impacts and value added of targeted resources/materials

The calculation of downstream environmental impacts (Ed) and value added (Vd) of targeted resources/materials requires the allocation of process environmental impact (So) and value added (Vo) of non-targeted resources/materials to targeted ones. Our allocation (αto) is based on the intermediate coefficient matrix (A) as shown in eq.4.

$$\alpha_{to} = A_{to} * L_{oo} \ \ (eq.4)$$

For example, the value added and environmental impact of meat, a non-targeted resource/material, is allocated to its inputs following the intermediate matrix coefficients, i.e. 29% to hogs, 29% to beef cattle, 16% to chickens and 5% to wholesale trade. Hogs, beef cattle and chickens are targeted resource/materials which is not the case of wholesale trade. In addition, we considered that the share value added represents in the input coefficients should not be allocated to targeted resources/materials. For the case of meat, this represents for example 10%.

An iterative process is thus used to calculate the final allocation coefficient to targeted resources/materials as shown in eq.5 and eq.6, in which Yoo corresponding to the final demand of non-targeted resources/materials.

$$E_d = \alpha_{to} * diag(L_{oo} * Y_o) * S_o \ \ (eq.5)$$
$$V_d = \alpha_{to} * diag(L_{oo} * Y_o) * V_o \ \ (eq.6)$$

3. Results and Discussion

3.1 Life cycle environmental impacts and value added of targeted materials

Figure 1 shows the estimated results of environmental impact

and value added of target biomass resources/materials. The top highest five environmental impact sectors are rice (17%), marine fishery (14%), dairy cattle farming (14%), vegetables (13%) and beef cattle (10%). The top five highest value added sectors are vegetables (21%), rice (19%), marine fishery (10%), dairy cattle farming (8%) and fruits (8%). Reasons of these results differ between resources/materials. Vegetables, rice, marine fishery, dairy cattle farming and fruits represent respectively 20%, 18%, 9%, 8% and 7% of the 11 billion associated with the production of targeted resources/materials. In terms specific impact, dairy cattle farming and marine fishery are the most impactful resource/material, respectively 9 gCO2e/yen and 9.32 gCO2e/yen, whereas for specific value added, vegetable and rice are the one with high value, respectively added 0.89 yen/yen and 0.86 yen/yen. Except for sugar crops (56%), more than 90% of the environmental impact of targeted resource/materials occurs in the upstream phase. For value-added, though upstream still represents the main share for all sectors except sugar crops (50%), feed and forage crops (49%) and wheat (47%), the downstream covers as much as 20-50% of value added for 16 sectors and 0-20% for 6 sectors.

3.2 Eco-efficiency of target biomass resources/materials

Figure 1 also shows the respective eco-efficiencies of target biomass resources/materials. The average eco-efficiency is 0.18 yen/gCO2e. The top five worst eco-efficiencies are encountered for wheat, beef cattle, crops for beverages, dairy cattle farming, and marine fishery sectors which should therefore be managed carefully.

4. Conclusion

This study estimated carbon efficiencies of biomass resources/materials. Environmental impact and value added showed different patterns leading to consider wheat, beef cattle, crops for beverages, dairy cattle farming and marine fishery as the lowest eco-efficient sectors and therefore priority sectors to manage.

Acknowledgements: This research was supported by the Policy Studies of Environmental Economics (Phase III) of Ministry of the Environment, Japan and Grant-in-Aid for Scientific Research (15H02863) of Japan Society for the Promotion of Science.

References

1) van der Voet, E., van Oers, L., Nikolic, N.: Dematerialisation: not just a matter of weight. Center of Environmental science, report 160, 179pp, Leiden University.
2) Ministry of Internal Affairs and Communications Japan: 2011 Input-Output Tables, 2015

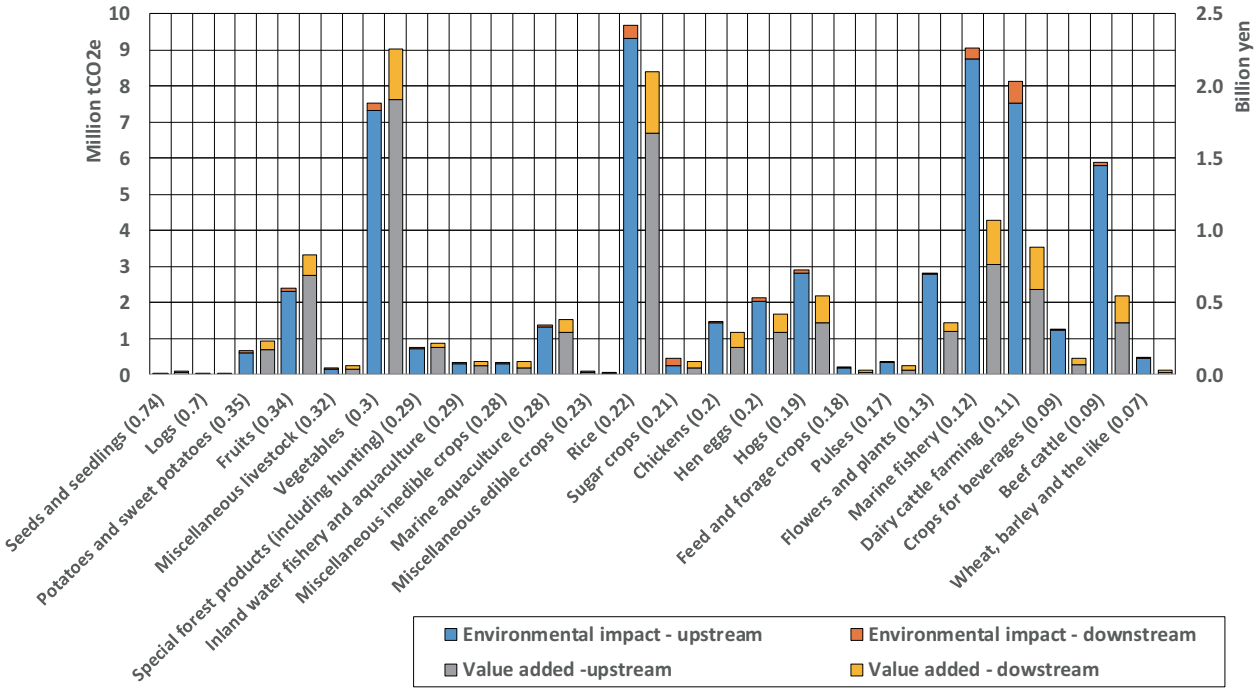


Figure 1 Upstream and downstream environmental impacts, value added of targeted biomass resources/materials. Eco-efficiency is shown in brackets and expressed in yen/gCO2e.

2050 年に向けた日本の産業のシナリオ検討

Scenarios planning and strategic forecasting for Japanese industries toward 2050

○玄地　裕*[1)]、 稲葉　敦 [2)]
Yutaka Genchi, Atsushi Inaba
1) 産業技術総合研究所，2)工学院大学
* y.genchi@aist.go.jp

1. はじめに

パリ協定後、日本の産業界も 2050 年に向け、低炭素社会実行計画からさらなる削減の積み上げが必要となる。一方、温室効果ガス(GHG)排出削減制約は、その大きさからエネルギーインフラ､輸送構造のみならず、産業構造を大きく変える可能性もある。そこで、著者らは「パリ協定後の産業研究会」を立ち上げ、2050 年の産業構造を考え、その産業構造を基に、社会としての温暖化対策について考える検討を開始した。

本発表ではその途中経過について報告する。

2. 産業を対象とした理由

2.1 日本の GHG 排出削減長期目標と現状

パリ協定 [1)]の内容は、産業革命以前からの世界の平均気温上昇を 2℃未満、さらに 1.5℃以下になるよう努力すること、今世紀後半には、人為的な温室効果ガス排出量を吸収量とバランスさせ、実質ゼロにする、などの項目を含む。パリ協定への対応も視野に入れて、日本政府は、2016 年 5 月に地球温暖化対策計画を閣議決定し [2)]、その中で、長期目標として 2050 年までに GHG 排出量 80%削減を目指すことを表明した。

具体的に現状の日本の GHG 排出量（2014 年、約 12 億 6,600 万トン [3)]）を基準としたときの 80%削減量について単純に考えると次のようになる。

2014 年の GHG 総排出量は約 12 億 6,600 万トンであり、その直接排出量としての内訳は、発電所等のエネルギー転換部門 40%、工場等の産業部門 28%、自動車・船舶等の運輸部門 16%、商業・サービス・事務所等の業務その他部門 5%、家庭部門 4%、石灰石消費等の工業プロセスおよび製品の使用 4%、廃プラスチック、廃油の焼却等廃棄物 2%となっている。

この数値は、現状の産業、輸送、業務や家庭の社会構造が保たれた場合、電力の GHG 排出源単位をゼロにして 40%の削減、さらに運輸部門からの排出をゼロにしてトータル 56%の削減、さらに産業部門からの排出をゼロにしてトータル 84%の削減が達成されることを示す。電源構成として仮に再生可能エネルギーや原子力だけで構成し、電力の GHG 排出原単位がゼロに近くなったとしても、最大 40%の削減が限界となる。また仮に、さらにそれらの電力を利用した大量の電気自動車や、再生可能エネルギーを利用して生産された水素を燃料とする燃料電池車の普及が 100%となり、風力と太陽光発電等を利用した船舶航行が導入されたとしても、56%の削減が限界となる。LCA 的には電力、運輸部門、産業部門からの GHG 排出ゼロは困難であるので、ここで示した 56%の削減量も最大の値と考えることができる。ここから明らかなことは、2050 年に 80%の GHG 排出削減を目標とした場合、電源構成や運輸部門のみで、その目標を達成することは困難であり、工場等の産業部門からの GHG 排出削減が非常に重要な意味を持つということである。家庭部門、業務その他部門の GHG 排出量の寄与も 9%程度あるので、こちらからの GHG 排出量を限りなくゼロに近づけることで、目標達成への貢献はあるが、その場合でも、量的には、おおよそ 50%以上の産業部門からの GHG 排出削減が必要となる。

産業部門の GHG 杯移出削減対策は、経団連による「低炭素社会実行計画 [4)]」を中心に行われているが、産業界全体での 2050 年までの目標までは言及されていない。このような目標を議論するためには、何が今後 2050 年までに産業部門からの GHG 排出削減のキーとなるのか、技術的な課題、資源やエネルギー面の課題、制度や政策的な課題、コストや市場的な課題、雇用など社会的な課題、といった各産業を取り巻く 30 年以上の大きな構造的、時間的変化を考慮して産業構造を議論する必要がある。

3. シナリオプランニング

30 年先のような長期的な将来像は不確実性が高く、唯一の将来像のみを前提として対策や戦略を作ることは危険である。一方、ライフサイクル思考に基づく対策検討のためにはシナリオは必須である。そこで、検討に際しては、複数の将来像について未来のタイミングも考慮して「なるほどと思えるようなストーリー」を作成する未来を語るための手法であり、またそれらに備える戦略を練るための戦略プランニング手法であるシナリオプランニングによる検討を行うこととした。

3.1 方針と原則

ここでは､不確実性が高い 30 年以上先の事象を議論

するので、予測ではなくありそうな事象につながる因子を抽出し、最も影響の大きそうな因子を基に大胆なシナリオを構築することを目指す。そのため、あるべき姿、例えば温暖化対策の実施を前提とする規範的手法と、あり得る複数の未来を網羅的に探索する探索的手法とを併用してシナリオプランニングを実施する。

シナリオでは外部環境を客観的に描写することを目指し、因子については、完全な合意が望ましいが、少なくとも「すべてを完全には同意しないが、そのような因子（シナリオ）が想定されることは理解できる」というレベルの因子（シナリオ）抽出を目指す。

また、エネルギー環境イノベーション戦略など政府の作成している 2030 年、あるいは 2050 年への対策やシナリオについては、資料として取り扱い、特にそれらに併せてシナリオを設定することは行わず、自由に議論を行うこととした。

3.2 方法

シナリオプランニングの進め方の概要を図 1 に示す。因子抽出は以下の 2 つの質問の回答を取りまとめ、理想的な未来と悪夢的な未来を取りそろえ、その中から出てきた事象について整理を行った。具体的には、図 1 に示した方法で産業、エネルギー転換、運輸、農林水産業、共通項目の 5 項目にわけて、整理を行い、社会・消費者（Societal）、経済・税制（Economic）、政治・政策・規制（Political）、技術（Techinological）、地球環境（Ecological）のいわゆる SEPTEmber の 5 つの視点を考慮して検討を進めている。

質問項目は以下の通りである。

- あなたは、この研究会に参加するに当たって、予言者に 3 つまで質問することができるとします。2050 年の産業について予言者に質問するとしたら、どのような質問をしますか？3 つお答えください。
- さきほどとは逆にあなたが予言者だとします。先ほどのあなたの 3 つの質問に対して、そうなったらいいと思っていたとおりの、よい未来がやってきたと想像してみてください。あなたは予言者として、自分自身の 3 つの質問にどう答えますか？

シナリオプランニングでは、自由な発想が重要であり、不確実な未来への質問の回答は、同等の確率で実現するとして取り扱う。理想的、悪夢的を分ける因子や、理想的な中でも未来を分ける因子の重要度については、現段階で裏付けとなりそうなデータや事例が存在するか調査を行うとともに、専門家へのインタビューによるエキスパートジャッジを参考に決める。

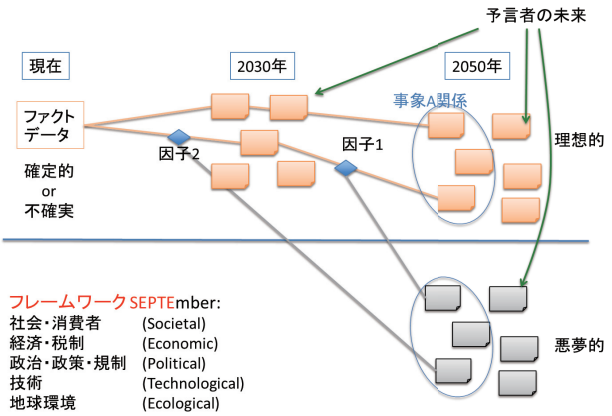


図 1　シナリオプランニングの進め方

4. 今後の予定

産業全体への影響が大きいエネルギー需給構造を中心に因子抽出とシナリオ検討を実施している。研究発表会で、一部の因子の提示を行うことで、幅広く意見をいただき、シナリオは研究会名で幅広く HP や報告書などで公開する予定である。また次のフェーズでは、それらのストーリーに基づき、どのような因子に対する戦略かも含めて考える予定である。

引用文献

1) パリ協定（Paris Agreement）, UNFCCC ホームページ, 入手先 <http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf>, （参照 2016-11-30）
2) 環境省地球温暖化対策計画, 環境省ホームページ, 入手先 <https://www.env.go.jp/press/files/jp/102816.pdf>,（参照 2016-11-30）
3) 環境省地球環境局低炭素社会推進室・温室効果ガスインベントリオフィス編(2015), 温室効果ガスインベントリオフィスホームページ, 入手先 <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/2015/NIR-JPN-2015-v3.0_J_web.pdf>, (参照 2015-12-14)
4) 低炭素社会実行計画 2015 年度フォローアップ結果 総括編 ＜2014 年度実績＞, 日本経済団体連合会ホームページ, 入手先 <http://www.keidanren.or.jp/policy/2015/102_honbun.pdf>, （参照 2016-8-26）

謝辞

本研究は、日本 LCA 学会「パリ協定後の産業研究会」で実施中である。質問への回答、因子抽出、インタビュー等取りまとめへの研究会メンバーのご協力とインタビューを快諾頂いた専門家の方々に感謝いたします。

世界の構造変化が CO_2 排出に果たす役割

Role of World Structural Change in CO_2 Emissions

○白新田佳代子*[1)]、岡本隼輔 [2)]
Kayoko Shironitta, Shunsuke Okamoto
1) 九州大学, 2) 尾道市立大学
* kayoko.s137@gmail.com

1. はじめに

世界の CO_2 排出量は、世界各国の経済成長とともに増加の一途をたどっている。先進国の多くはサービス経済化が進行しており、この変化が CO_2 排出量の削減に貢献していると言われている [1,2]。しかし一方で国内のサービス経済化に伴い第一次・第二次産業の製品の輸入の増加し、その国の輸入構造とその規模の変化が輸入相手国の CO_2 排出の増加に影響を与えていると考えられる [3,4]。

パリ協定を受けて、各国の気候変動に対する役割を評価する必要性が高まっており、世界全体と各国での構造の変化とそれが CO_2 排出に与える影響を比較することは今後の気候変動政策を考えていくうえで重要であると考える。そこで本研究では WIOD の多地域間作業連関表を 1 国産業連関表に統合し、構造分解法を用いて 1 つの単位として世界の構造変化が CO_2 排出量に与える影響を分析し、その結果を世界各国の状況と比較し考察を行う。

2. 研究手法

まず本研究で使用するデータは、世界産業連関表 The World Input-Output Database (WIOD)[5]から、1995 年から 2009 年における多地域間産業連関表を使用する。この多地域間産業連関表は生産価格評価の 40 か国 35 産業部門からなる。この世界産業連関表は GRAS 法 [6,7] を用いて 2009 年価格で実質化されており、さらに 1 国産業連関表に変換している。

この 1 国産業連関表を用いて生産起源 CO_2 排出量を次の(1)式を用いて推計する。

$$Q_d^t = \sum_{i=1}^{N} e_i^t \theta_i^t X_d^t \tag{1}$$

ここで、Q_d^t は t 年における生産起源の総排出量、θ_i^t は i 部門の t 年における排出係数、e_i^t は i 部門の t 年における産業構造比率、X_d^t は t 年における全産業部門を総計した総生産額である。

この式の時間的変化を t 年から t+1 年と考えると、以下の(2)式が得られる。

$$\begin{aligned}\Delta Q_d &= Q_d^{t+1} - Q_d^t \\ &= \sum_{i=1}^{N} e_i^{t+1}\theta_i^{t+1}X_d^{t+1} - \sum_{i=1}^{N} e_i^t\theta_i^t X_d^t \\ &= \mathbf{E}^{t+1}\boldsymbol{\theta}^{t+1}X_d^{t+1} - \mathbf{E}^t\boldsymbol{\theta}^t X_d^t\end{aligned} \tag{2}$$

$\mathbf{E} = (e_i)$ は産業部門の(35×1)排出係数ベクトル、$\boldsymbol{\theta} = (\theta_i)$ は(1×35)産業構成比率ベクトルである。この式に排出係数、産業構造比率、総産出額の変化を考えると、以下の(3)式が得られる。

$$\begin{aligned}\Delta Q_d &= \mathbf{E}^{t+1}\cdot\boldsymbol{\theta}^{t+1}\cdot X_d^{t+1} - \mathbf{E}^t\cdot\boldsymbol{\theta}^t\cdot X_d^t \\ &= (\mathbf{E}^t + \Delta\mathbf{E})\cdot(\boldsymbol{\theta}^t + \Delta\boldsymbol{\theta})\cdot(X_d^t + \Delta X_d) - \mathbf{E}^t\cdot\boldsymbol{\theta}^t\cdot X_d^t \\ &= \Delta\mathbf{E}\,\boldsymbol{\theta}^t X_d^t + \mathbf{E}^t\Delta\boldsymbol{\theta}\,X_d^t + \mathbf{E}^t\boldsymbol{\theta}^t\Delta X_d \\ &\quad + \Delta\mathbf{E}\,\Delta\boldsymbol{\theta}\,X_d^t + \mathbf{E}^t\Delta\boldsymbol{\theta}\,\Delta X_d + \Delta\mathbf{E}\,\boldsymbol{\theta}^t\Delta X_d + \Delta\mathbf{E}\,\Delta\boldsymbol{\theta}\,\Delta X_d\end{aligned} \tag{3}$$

Shapley-Sun 分解法を用いて技術効果、産業構成効果、経済規模効果の 3 つに分解すると

$$\begin{aligned}\Delta Q_d &= \Delta\mathbf{E}\,\boldsymbol{\theta}^t X_d^t + \mathbf{E}^t\Delta\boldsymbol{\theta}\,X_d^t + \mathbf{E}^t\boldsymbol{\theta}^t\Delta X_d \\ &\quad + \Delta\mathbf{E}\,\Delta\boldsymbol{\theta}\,X_d^t + \mathbf{E}^t\Delta\boldsymbol{\theta}\,\Delta X_d + \Delta\mathbf{E}\,\boldsymbol{\theta}^t\Delta X_d + \Delta\mathbf{E}\,\Delta\boldsymbol{\theta}\,\Delta X_d \\ &= \underbrace{\Delta\mathbf{E}\,\boldsymbol{\theta}^t X_d^t + \tfrac{1}{2}(\Delta\mathbf{E}\,\Delta\boldsymbol{\theta}\,X_d^t + \Delta\mathbf{E}\,\boldsymbol{\theta}^t\Delta X_d) + \tfrac{1}{3}\Delta\mathbf{E}\,\Delta\boldsymbol{\theta}\,\Delta X_d}_{\text{Technique effect}} \\ &\quad \underbrace{+\mathbf{E}^t\Delta\boldsymbol{\theta}\,X_d^t + \tfrac{1}{2}(\Delta\mathbf{E}\,\Delta\boldsymbol{\theta}\,X_d^t + \mathbf{E}^t\Delta\boldsymbol{\theta}\,\Delta X_d) + \tfrac{1}{3}\Delta\mathbf{E}\,\Delta\boldsymbol{\theta}\,\Delta X_d}_{\text{Industrial composition effect}} \\ &\quad \underbrace{+\mathbf{E}^t\boldsymbol{\theta}^t\Delta X_d + \tfrac{1}{2}(\Delta\mathbf{E}\,\boldsymbol{\theta}^t\Delta X_d + \mathbf{E}^t\Delta\boldsymbol{\theta}\,\Delta X_d) + \tfrac{1}{3}\Delta\mathbf{E}\,\Delta\boldsymbol{\theta}\,\Delta X_d}_{\text{Economic scale effect}}\end{aligned} \tag{4}$$

これにより、CO_2 排出の変化量は 3 つの効果に分解され、CO_2 排出に影響を与えている要因を定量的に評価することが可能となる。本研究では産業構造の変化を見るために、各効果を第一次、第二次、第三次産業の 3 部門にまとめ考察を行う。

3. 結果と考察

世界全体の CO_2 排出量の変化について、設定した 4 期の研究期間において、最も排出増加に貢献している要因は経済規模（すなわち総生産額の大きさ）であることが明らかとなった（図 1 参照）。とりわけ第二次産業由来の経済規模効果が全体の経済規模効果の約 75%を占めている（表 1 参照）。先進国を中心にサービス指向型経済へと移行が進んでいるが、一方で第二次産業製品の生産活動そのものは縮小の方向にありながらも世界全体でみると CO_2 排出の要因として依然として大きな役割を持っている。詳細な分析結果と考察については研究発表会で述べる。

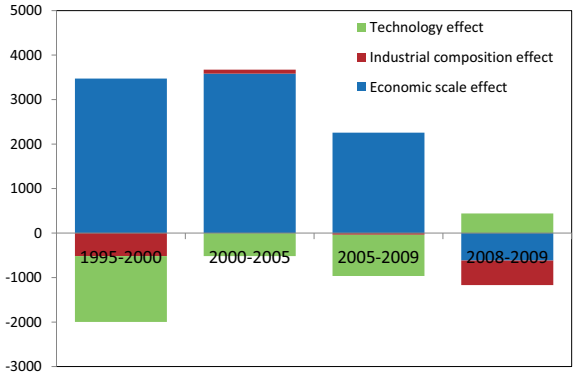


図 1.　CO_2 排出量の変化の構造分解結果（Mt CO_2）

4. 引用文献

1) Okamoto S., Journal of Economic Structures, 2, (2013), pp 1-21
2) Henriques S. T. , Kander A., Ecological Economics, 70(2), (2010), pp271-282
3) Nansai K., Kagawa S., Suh S., Fujii M., Inaba R., Hashimoto S., Environmental Science & Technology, 43, (2009), pp 4241-4246
4) Suh S., Environmental Science & Technology, 40, (2006), pp 6555-6560.
5) Timmer M. P., Dietzenbacher E., Los B., Stehrer, R. and de Vries, G. J., Review of International Economics, 23, (2015), pp575-605
6) Lenzen M., Wood R., Gallego B. Economic Systems Research, 19, (2007), pp461-465
7) Temurshoev U., Miller E. R., Bouwmeester C. M., Economic Systems Research, 25 (3), (2013), pp361-367

表 1.　産業別 CO_2 排出量の変化の構造分解結果（Mt CO_2）

	Primary industry	Secondary industry	Tertiary industry	Total
Economic scale effect				
1995-2000	99.8	2604.8	767.2	3471.9
2000-2005	93.4	2742.0	747.7	3583.0
2005-2009	56.4	1756.0	444.2	2256.6
2008-2009	-14.6	-481.9	-120.5	-617.0
Industrial composition effect				
1995-2000	-56.7	-499.9	40.0	-516.6
2000-2005	-39.2	193.1	-64.8	89.1
2005-2009	-13.7	65.2	-90.3	-38.8
2008-2009	21.0	-563.1	-10.2	-552.3
Technology effect				
1995-2000	-69.8	-879.1	-531.6	-1480.5
2000-2005	8.3	-180.7	-344.2	-516.6
2005-2009	-55.7	-642.2	-226.6	-924.5
2008-2009	-11.8	426.9	26.2	441.4

一億総活躍社会におけるパリ協定達成への課題

Agenda for achievement of the Paris Agreement on “A Society in Which All Citizens are Dynamically Engaged”

○重富陽介*[1)]，南齋規介 [2)]，加河茂美 [3)]，東野達 [4)]
Yosuke Shigetomi, Keisuke Nansai, Susumu Tohno
1) 長崎大学, 2) 国立環境研究所, 3) 九州大学, 4) 京都大学
* y-shigetomi@nagasaki-u.ac.jp

1. はじめに

2015 年に全世界で 2100 年までに気温上昇を 2 度以内に抑制することを目的とするパリ協定が採択され、我が国は 2030 年に 2013 年比で温室効果ガス (GHG) を 26%削減することを目標に批准した。一方で少子高齢化に伴う経済成長の隘路の脱却を図るべく、日本政府は同年に「一億総活躍社会」と銘打った経済政策を執り行っている [1)]。本政策の中には合計特殊出生率の回復と女性の社会進出に主眼を置いたものもあり、またそれらの効果による所得増が見込まれている。しかしながら気候変動の観点からは、人口や世帯、所得の増加は支出を促し、家計消費由来のライフサイクル GHG 排出量 (カーボンフットプリント: CF) の悪化に寄与することが既存研究から明らかにされている [2)]。

本研究では、上記の経済政策が狙いとする人口、労働形態、支出額の変容が、将来における日本の家計 CF にどれだけ寄与するか推計する。さらに、その結果に基づいてパリ目標の達成に向けて必要な GHG 削減量を定量し、経済政策と気候変動目標とのトレードオフ関係について検証することを目的とする。

2. 方法

2.1 世帯別 CF の同定

本研究では、家計消費由来の CF を定量するのに必要とした世帯属性別支出額$f_{\alpha,\beta}$を式(1)のように推計した。

$$f_{\alpha,\beta} = \bar{f}_{\alpha,\beta} \times H_{\alpha,\beta} \quad (1)$$

ここで$\bar{f}_{\alpha,\beta}$は一世帯あたり世帯別支出額、$H_{\alpha,\beta}$は世帯別世帯数をそれぞれ表す。また、αは 6 つの世帯主年齢 (-29: 20s, 30-39: 30s, 40-49: 40s, 50-59: 50s , 60-69: 60s, 70-: 70s)、βは世帯人数や勤労者の数等で区別された 10 の世帯構成に対応する。例えば、$f_{1,6}$は世帯主年齢が 20s で子供を 1 人持つ夫婦共働き世帯を指す。αとβの詳細を表 1 に記載する。本研究では、2009 年の全国消費実態調査 (全消調査) に基づく各世帯間の支出シェアを算出し、対応する国内産業連関表 (JIOT) の商品部門における支出額 (2005 年値) に乗じて$\bar{f}_{\alpha,\beta}$を得た。$H_{\alpha,\beta}$は全消調査における対象とする各世帯数の分布と、国立社会保障・人口問題研究所 (人口研) による世帯データを基に計算した。

解析対象とした CF は、3EID [3)] に記載される競争輸入型の内包型 GHG 排出量原単位 (t-CO_2eq/百万円) を$f_{\alpha,\beta}$に乗じて同定した。すなわち、ここで同定した間接 GHG 排出量は、国産品のみの生産に伴うライフサイクルを対象とし、輸入品は含まれない。また、家庭内のエネルギー利用 (電力含む) や自家用車の利用に伴う直接 GHG 排出量については、今回の CF に含めた。

2.2 将来シナリオ

合計特殊出生率と 15-49 歳女性人口およびその年齢構成の違いによって、その年の全出生数を予想できる。これにより、出生率の違いによる出生数の差を反映することが可能となる。本研究では、経済政策によって出生率が 2016 年から 2030 年にかけて 1.38 から 1.80 まで線形的に回復する (+0.03/年) と仮定し、人口研による中位人口推計シナリオ (中位推計) による出生率の場合の出生数と比較して、各年で新たに出産される子供の数を予測した。これらの総和は、2016 年から実施した政策に伴う出生率回復がもたらした 2030 年時点の子持ち世帯の増加と言い換えることができる。

ここで、経済政策に伴う「若年世帯における出生率回復に伴う子持ち世帯の増加」と「夫婦共働き世帯の増加」、「所得増に伴う支出額の上昇」を反映した将来

表 1.　世帯属性の区分

Age of the householder	Household size	Nuclear or non-nuclear	Number of child	Number of labors
20s: 29 and younger (α = 1)	Single-person household (β = 1)			
30s: 30-39 (α = 2)	Multi-person household	Non-nuclear family and one parent (β = 2)		
40s: 40-49 (α = 3)		Nuclear family	0	1 (β = 3) 2 (β = 4)
50s: 50-59 (α = 4)			1	1 (β = 5) 2 (β = 6)
60s: 60-69 (α = 5)			2	1 (β = 7) 2 (β = 8)
70s: 70 and older (α = 6)			3 and more	1 (β = 9) 2 (β = 10)

シナリオ (*Policy scenario*) について、以下に要点を記述する。

- 上記の各年の子持ち世帯の増加は、その年の 20s と 30s の世帯による出産の促進による結果と仮定する。また、各年の人口研から参照した 20 代と 30 代の女性における第 1 子、第 2 子、第 3 子以降の出生確率を出生数に乗じて、それぞれ 20s と 30s で中位推計から増加する第 (k+1) 子世帯 (k=0,1,2) を推計する。
- 各年の中位推計における第 k 子世帯が第 (k+1) 子世帯に移行する (新たに子を産む) と仮定する。このとき、第 k 子の夫婦共働き世帯から優先的に移行し、増加する子持ち世帯の数がそれを上回る場合は第 k 子の非共働き世帯からも移行する。一度移行した世帯は、以降の年で第 (k+2) 子の世帯に移行しない (新たに子を産まない)。
- 政府によると、2025 年時点で政策効果による所得増に伴い 20.4 兆円の支出増が見込まれている。この支出増が若中年の 20-50s 世帯全体を中心に 2030 年で起こるとし、各世帯の支出額が子供の数に応じて変化すると仮定する。ここでは、子供のいない世帯ないし非核家族世帯における一定の支出増に加え、OECD equivalent scale [4] に基づいて世帯内の子供が 1 人増えるごとにその支出増を 30%ずつ上昇させる。
- 支出額は増加しても消費シェア (例: 全支出に対するパンへの支出割合) は$\bar{f}_{\alpha,\beta}$から変化しない。また、子供の増えない世帯や 60s・70s の世帯の世帯数と消費支出については、中位推計における世帯数および$\bar{f}_{\alpha,\beta}$と等しい。

上記の過程で推計した 2030 年時点の世帯別世帯数と世帯別支出額を式(1)に代入し、前述した 3EID の排出原単位を乗じて得た世帯別 CF の総和を将来家計 CF として推計した。また、将来世帯別世帯数が中位推計に、一世帯あたり世帯別支出額が$\bar{f}_{\alpha,\beta}$にそれぞれ等しいシナリオを *BaU* とし、このシナリオ下の CF と先の CF の差異を比較して、経済政策の影響を考察した。図 1 に両シナリオにおける世帯構成の違いを例示する。

3. 結果と考察

図 2 に 2009 年の CF、*BaU* と *Policy scenario* における CF、およびパリ目標の削減率を達成した場合の CF (2005 年の家計 CF [5] を 25.4%削減した値) をそれぞれ示す。2009 年と *BaU* を比較すると、CF は 1%ほど微減すると推計された。すなわち少子高齢化による人口動態の自然変化による影響は非常に小さいものの、GHG は減少傾向に転じる。しかしながら、*Policy scenario* における CF は、*BaU* と比較して 68 Mt-CO_2eq/y (M: 10^6) 大きい。パリ目標に準ずる CF は 533 Mt-CO_2eq/y と見積もられ、*BaU* においては 28.5%、*Policy scenario* においては 34.5%の削減が求められる。換言すれば、一億総活躍社会による人口動態と所得増によって、パリ目標を達成するために付加的に 6.0%の CF 削減を行なう必要があると考えられる。

環境省は、パリ目標の達成に向けて、2030 年で家庭からの直接 CO_2 排出量を 2005 年比で 34%削減 (-59 Mt-CO_2eq/y) することを目指している [6]。仮にこの目標を達成した場合の *Policy scenario* における CF の必要削減率は 29.3%となり、依然として上記の *BaU* の必要削減率を僅かに上回る。したがって、間接排出量も含めた大胆な排出管理の方策との両立が急務である。

4. 引用文献

1) 首相官邸, 2016. ニッポン一億総活躍プラン.
2) Shigetomi et al., 2016. *J. Econ. Str.* 5, 1-19.
3) 南斉, 森口, 2012. 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID): 2005 年表.
4) Chitnis et al., 2014. *Ecol. Econ.* 106, 12-32.
5) Shigetomi et al., 2014. *Environ. Sci. Technol.* 48(11), 6069-6080.
6) 地球温暖化対策推進本部決定, 2015. 日本の約束草案.

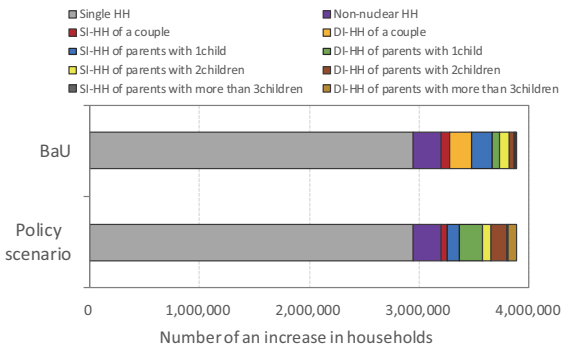


図 1. *BaU* と *Policy scenario* における 20s の世帯別世帯数 (HH: 世帯, SI: 非共働き, DI: 共働き)

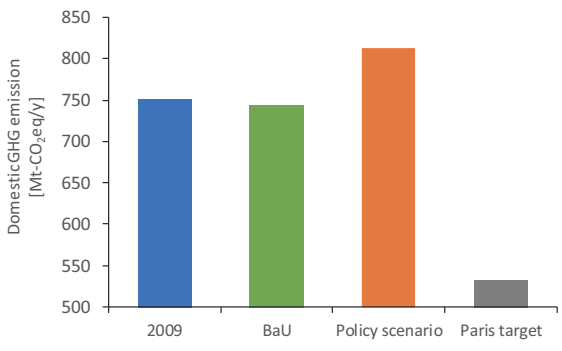


図 2. 2009 年と 2030 年 (*BaU* と *Policy scenario*)、およびパリ目標に準じる家計 CF の推計結果

世界各国の生産性向上が二酸化炭素排出量に与える影響

The Effect of Productivity Improvement on Carbon Footprint in the World

○高藪 広隆*1)、加河 茂美 1)
Hirotaka Takayabu, Shigemi Kagawa
1）九州大学
* yavugne6318@gmail.com

1. 研究背景

近年、二酸化炭素排出量の増加に伴う地球温暖化が問題となっており、世界全体での二酸化炭素排出量の削減が大きな課題となっており、各国は生産技術を向上させることで二酸化炭素排出量を削減していくことが求められている。生産活動を行う上で、生産技術の高い国、つまり生産性の高い国では 1 単位の生産を行うために必要な投入物の量は少なく、生産性の低い国では 1 単位の生産を行うために必要な投入物の量は多くなる。したがって、各国は生産技術を向上させることで、より少ない投入量で生産活動を行うことができるようになり、また、生産活動に伴って排出される二酸化炭素量を削減することができる。このような関係性が生産性の向上と二酸化炭素排出量の削減との間にはある。

そこで本研究では、40 カ国 14 産業部門を対象とした EXIOBASE データをデータ包絡分析法に適用することによって生産性分析を行った。また、生産性の向上によって削減される二酸化炭素排出量（CO_2 削減ポテンシャル）を環境産業連関分析を用いることで推計した。

2. 分析手法

2.1 生産性分析：データ包絡分析法

データ包絡分析法は複数の事業体の相対的な効率性を分析する手法の一つであり、生産活動を行う事業体の生産性を評価するために多く用いられてきた。

本研究では、40 カ国の 14 鉄鋼産業の生産性をそれぞれ評価するために、投入指向型・収穫一定モデルのデータ包絡分析フレームワークを用いた。このモデルでは、s 国の産業 i の生産性スコア θ^{is} は以下の式(1)によって求めることができる(1-1)。

$$Min.\ \theta^{is} \qquad (1)$$

$$s.t.$$

$$\sum_{n=1}^{s} z^{in} y_l^{in} \le \theta^{is} y_l^{is} \ (l = 1,2,3,4,5)$$

$$\sum_{n=1}^{s} z^{in} x_m^{in} \le x_m^{is} \ (m = 1)$$

$$z^{is} \ge 0 \ (s = 1,2,...,40)$$

ここで、x_m^{is} は s 国の産業 i が生産に用いた投入物 m の投入量を、y_l^{is} は s 国の産業の産出物 l の産出量を、z^{is} は s 国の産業 i にかかる強度ウエイトを表している。また、目的関数 θ^{is} は評価対象である s 国の産業 i が産出量 y_l^{is} を担保しながらどれだけ投入量 x_m^{is} を削減する余地があるのかを表しており、制約式の 1 つ目は投入物に関する制約、制約式の 2 つ目は産出物に関する制約、制約式の 3 つ目は強度ウエイトに関する非負制約を表している。この問題を解くことによって、評価対象である s 国の産業 i が他の効率的な国と比べて、どれだけ投入要素を削減する余地があるのかという生産性スコア θ^{is} を求めることができる。例えば、$\theta^{is} = 0.8$ の場合、s 国の産業 i は他の効率的な事業体と比べて、投入要素を 0.8 倍に削減する余地があるということを示している。

本研究では、 (1)式の問題によって内生的に求められた生産性スコア θ^{is} に基づいて、各国が生産性を向上させた場合の二酸化炭素排出量の削減効果を以下の手法を用いて推計する。

2.2 CO_2 削減ポテンシャル：産業連関分析

生産性の向上によって削減される二酸化炭素排出量（CO_2 削減ポテンシャル）に関して、直接的な CO_2 削減ポテンシャルと間接的な CO_2 削減ポテンシャルの 2 種類の観点から推計を行った。

(1) 直接的な CO_2 削減ポテンシャル

生産性の向上による直接的な CO_2 削減ポテンシャルとは、生産性の向上によって削減される投入量に二酸化炭素排出係数 d^{is} を乗じることで推計できる二酸化炭素排出量である。s 国の産業 i の直接的な CO_2 削減ポテンシャル DRP^{is} は(2)式に表される。

$$DRP^{is} = \theta^{is} \times d^{is} \times x^{is} \qquad (2)$$

(2) 間接的な CO_2 削減ポテンシャル

生産性の向上による間接的な CO_2 削減ポテンシャル

とは、生産性の向上によって生産性分析で対象にした s 国の産業 j の投入係数 a_{ij}^{rs} が $\tilde{a}_{ij}^{rs}$ に下がったことによって同じ量の最終需要 $\mathbf{F}$ を満たすために誘発される二酸化炭素排出量が削減される分である。s 国の産業 i の間接的な CO_2 削減ポテンシャル IRP_j^s は(3)式に表される。

$$IRP_j^s = \mathbf{e}(\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{F} - \mathbf{e}(\mathbf{I}-\tilde{\mathbf{A}}_j^s)^{-1}\mathbf{F} \qquad (3)$$

ここで、$\mathbf{e}$ は排出係数行列、$\mathbf{I}$ は単位行列、$\mathbf{A}$ は実際の投入係数行列、$\tilde{\mathbf{A}}_j^s$ は s 国の産業 j が生産性を向上させた場合の投入係数行列、$\mathbf{F}$ は実際の最終需要行列を表している。

3. データ

本研究では、データ包絡分析法と産業連関分析を適用する際に、EXIOBASE (http://www.exiobase.eu/) [(2-1, 2)], International Energy Agency (http://www.iea.org/), World Input-Output Database (http://www.wiod.org/home) [(3-1)] より 2007 年のデータを入手して分析を行った。データ包絡分析法を行う際は、5 投入 1 産出のモデルを用いており、投入要素として中間財投入額・資本ストック額・労働者数・電力使用量・燃料使用量を、産出要素として部門総生産額を変数とした。また、EXIOBASE データにおける鉄鋼製品製造業に該当する 14 部門を分析対象とし、データが利用可能な 40 カ国を分析対象とした。

4. 結果

2007 年における 40 か国の鉄鋼製造業に関する直接・間接 CO_2 排出量の削減ポテンシャルの合計は 13.8 億トンであった。これは世界全体の 2007 年の CO_2 総排出量である 252.6 億トンに対して、約 5.5%を占めている。このことから、世界の鉄鋼製造業の生産性向上による CO_2 排出量の削減ポテンシャルは非常に大きいということが明らかになった。

本発表会では、生産性分析と直接・間接 CO_2 排出量の削減ポテンシャルの国・部門ごとの結果を詳述し、本研究で明らかになった直接・間接 CO_2 排出量の削減ポテンシャルをどのように実現していくのか、という議論を行う予定である。

5. 引用文献

(1-1) Charnes A., Cooper W. W., Rhodes E.: European Journal of Operational Research, 2, (1978), pp429-444

(2-1) Tukker, A., de Koning, A., Wood, R., Hawkins, T., Lutter, S., Acosta, J., Rueda Cantuche, J.M., Bouwmeester, M., Oosterhaven, J., Drosdowski, T., Kuenen, J.: Economic Systems Research, 25 (1), (2013), pp50-70

(2-2) Wood, R., Stadler, K., Bulavskaya, T., Lutter, S., Giljum, S., de Koning, A., Kuenen, J., Schütz, H., Acosta-Fernández, J., Usubiaga, A., Simas, M., Ivanova, O., Weinzettel, J., Schmidt, J.H., Merciai, S., Tukker, A.: Sustainability (Switzerland), 7 (1), (2015), pp138-163

(3-1) Timmer, M. P., Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R. and de Vries, G. J.: Review of International Economics, 23, (2015), pp 575–605

産業連関分析を活用した組織の環境フットプリント評価手法の開発

Development of Organization Environmental Footprint methodology using Input-Output analysis

○村主 さとみ*[1)] 、一杉 佑貴[1)]、田原 聖隆[2)]、近藤 康之[3)]、伊坪 徳宏[1)]

Satomi Suguri, Yuki Ichisugi, Kiyotaka Tahara, Yasushi Kondo, 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 3)早稲田大学

*g1583107@tcu.ac.jp

1. はじめに

製品を対象とした環境評価が中心であった LCA は、近年 SCOPE3 ガイドの発行や CDP の結果開示を受けて組織を対象とした分析の活用へと進化しつつある。欧州環境フットプリントにおいても、製品を対象とした PEF と合わせて、組織を対象とした OEF[1)]のガイドも発行された。組織を対象としたとき、複数の製品・サービスに関する情報を包括的に得る必要があり、かつ、資本財や出張、一般管理なども含めた分析が求められるため、製品評価よりも広い範囲のデータが要求される。基礎データの収集範囲は担当者の力量により異なる可能性があるが、その違いを極力調整しつつ汎用的に組織間を比較できるような評価体系が必要であると考えられた。

2. 目的

本研究では、上記のような観点から企業の費用データを有効に活用するため、産業連関表を活用した組織の環境フットプリント評価手法開発に向けた検討を行った。

以下、本研究の特徴について示した。

① 組織を対象とした評価において、経済産業省の統計調査である「産業連関構造調査（鉱工業投入調査）」[2)]を用いて、産業としての平均と組織別の環境影響について分析する。これにより、組織間の結果の違いを基に、産業部門ごとに環境影響の幅を把握することができる。これを利用することで、評価対象機関が当該産業の中で環境効率が優れているかどうかについて検証することができる。

② 金額データを用いることで入力項目は一次データを入力外の項目については二次データ（産業連関表の部門平均データ）を代用することで、評価範囲を統一して組織の環境評価を行うことができる。そのため組織間の比較評価の妥当性も向上するものと考えられる。

3. 方法

3.1 評価対象

本研究では、経済産業省「平成 23 年産業連関構造調査（鉱工業投入調査）」[2)]を用いた評価を行う。対象事業は、産業連関表における 187 部門に該当し、大半が二次産業である。機能単位は、鉱工業投入調査が対象とする暦年もしくは決算に合わせた 1 年間の事業活動とする。

3.2 システム境界

システム境界を図 1 に示す。

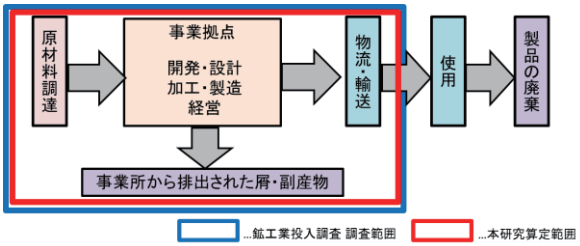


図 1　システム境界

青枠が、鉱工業投入調査で提供される情報の範囲であり、提供された経費情報を用いて評価を行う。また、事業所から排出された屑・副産物を購入、または自社利用して生産活動を行っていた場合、本来であれば処分されるものを利用しているため環境負荷の削減に貢献した、と仮定して本研究では、屑・副産物分の環境影響をマイナス計上して評価を行う。

3.3 算定方法

本研究は、国立研究開発法人 科学技術振興機構におけるプロジェクト「製品ライフサイクルに立脚した環境影響評価基盤の構築と社会実装によるグリーン購入の推進」[3)]の一環として組織評価を行っており、その成果物となる産業連関分析手法を用いて算定を行った。算定式は式①のとおりである。

$$Environmental\ load_x = d_x \cdot (I-A)^{-1} \cdot Input\ data \quad \cdots式①$$

x…インベントリ項目数

d…国立研究開発法人　産業技術総合研究所によって開発された「IDEA2」を基にした直接環境負荷係数

$(I-A)^{-1}$…平成 23 年産業連関表を用いたレオンチェフ逆行列

$Input\ data$…鉱工業投入調査から得られた事業所ごとの経費情報

x は、144 種類あり、主に OEF で取り上げられている

影響領域を中心に係数が開発されている。*Input data* はすべて金額の情報であり、経費の項目が産業連関表のどの部門に該当するかを調査し割り当てることで評価をした。その際、事業所の規模に左右されずに比較を行うため、売上で除した 100 万円当たりの結果で比較を行う。また、情報量が少ない事業所については、先に述べたように産業連関表の部門平均データの情報を補てんし評価を行った。

4. 結果

本稿では、「乗用車」部門における化石資源由来の CO_2 排出量の結果について示す。「乗用車」部門における売上 100 万円あたりの結果のうち、活動量の項目別に積み上げた結果を図 2、CO_2 排出の由来となる部門の内訳別に積み上げ 100%表記にした結果を図 3 に示す。図にある 1~9 は、「乗用車」部門に該当した事業所の通し番号である。

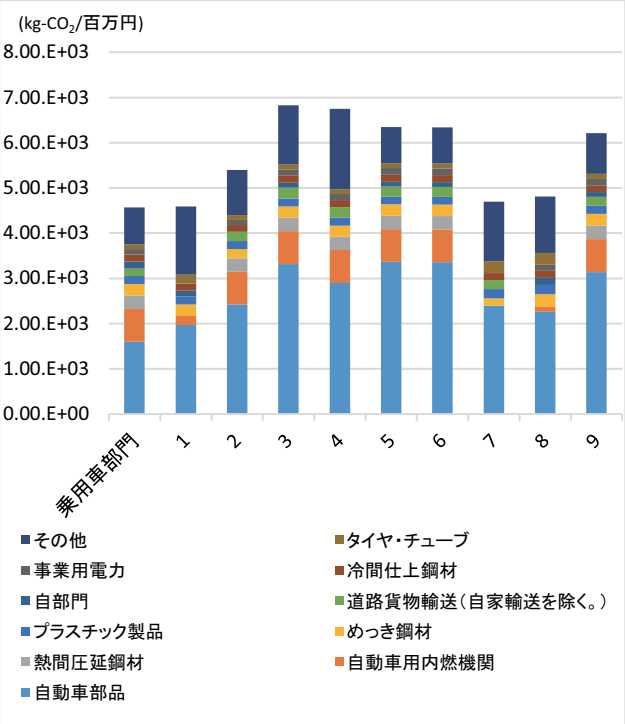


図２　乗用車部門結果（項目積み上げ）

妥当性を検証するため、乗用車部門の投入係数行列から得られる情報を元にした結果と比較を行う。

この結果から、主要な原材料となる部品やエンジン等が環境影響の大半を占めることが分かった。図 2 の結果を CO_2 の排出由来別に見た結果が図 3 となる。

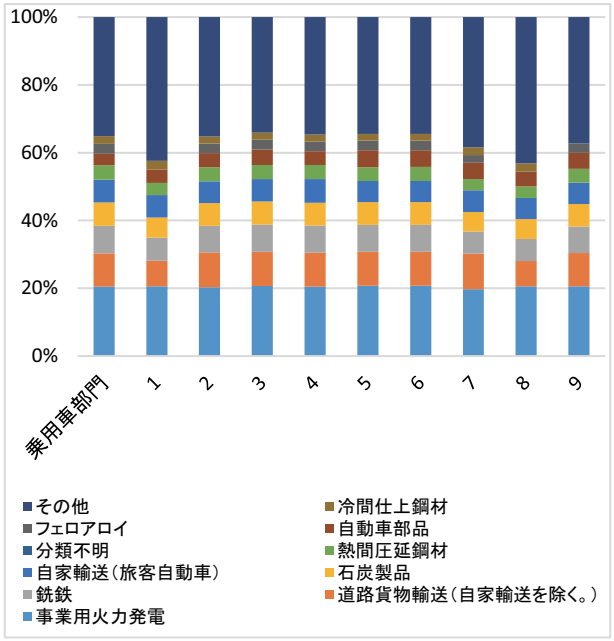


図３　乗用車結果（CO_2 排出由来別）

この結果から、乗用車の生産において、火力発電、道路貨物輸送、銑鉄、石炭製品における寄与が大きいことが分かった。事業所ごとの結果を見ても同様な傾向がみられたことから、「乗用車」部門における CO_2 発生量を削減するためのホットスポットは自動車部品や内燃機関等を作る際に利用される電力や鉄鋼材料生産時の負荷であるものと考えられた。金額情報を用いて部門を代表する結果とおおよそ似た数字を得ることができたことから、鉱工業投入調査の情報を用いた組織評価は有用であることが分かった。

5. まとめ

本研究では、平成 23 年産業連関構造調査（鉱工業投入調査）を用いた組織評価を実施した。産業連関表の部門と事業所ごとの結果を比較した結果、事業所ごとに違いはあるものの、対応関係は良好であった。

参考文献

1) Europe Commission, “Organization Environmental Footprint Guide”, (2012)

2) 経済産業省, 産業連関構造調査（鉱工業投入調査）, 経済産業省ホームページ, 入手先 http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/exam.htm>, （参照 2016-12-26）

3) 国立研究開発法人 科学技術振興機構, 製品ライフサイクルに立脚した環境影響評価基盤の構築と社会実装によるグリーン購入の推進, 国立研究開発法人 科学技術振興機構ホームページ, 入手先 <http://ristex.jst.go.jp/stipolicy/project/project18.html>, （参照 2016-12-26）

組織のウォーターフットプリント分析を目的とした新規ツールの開発

Novel Evaluation Tools for Organizational Water Footprint Analysis

○大橋 憲司*[1)]、ムルン テムールン [1)]、高橋 透 [2)]、木下 順次 [3)]、能勢 泰祐 [4)]、高橋 拓 [5)]、水谷 敦司 [6)]、吉村 祐美 [7)]、田村 光範 [8)]、伊坪 徳宏 [9)]

Kenji Ohashi, Temuulen, Toru Takahashi, Junji Kinoshita, Taisuke Nose, Taku Takahashi, Atsushi Mizutani, Yumi Yoshimura, Mitsunori Tamura, Norihiro Itsubo

1) 株式会社資生堂、2) アサヒグループホールディングス株式会社、3) イオン株式会社、4) 積水化学工業株式会社、5) 大日本印刷株式会社、6) 株式会社竹中工務、7) 東洋製罐株式会社、8) 株式会社日立製作所、9) 東京都市大学

*kenji.oohashi@to.shiseido.co.jp

1. はじめに

世界経済フォーラムは World Risk Report 2016 において、世界経済に負の影響を与えるリスク要因として、「気候変動問題の緩和と適応の失敗」「大規模な移民、難民」に次いで「水危機」を挙げている。欧州を中心とした ESG 投資増大の影響を受け、持続可能性、その中でも特に水リスクをどのように捉えているか、また水リスク管理の方針に関する情報開示圧力が強まりつつある。水リスクの高い地域で水資源を過剰に消費することは、事業リスク（操業リスク、評判リスク）を高めるだけではなく、自然環境に対しても大きなインパクトを与えることから、事業のバリューチェーンを通じて、どの地域で、どの程度の量の水資源を利用しているのかを把握することは極めて重要である。

2014 年に Water Footprint についての国際規格 ISO 14046 が発行されたものの、まだまだ一般的に活用されているとは言いがたい。企業活動と生物多様性保全の両立を目指す JBIB（一般社団法人 企業と生物多様性イニシアチブ）・水と生態系 WG では、企業活動と水資源の関わりの可視化を目的として、より簡便にバリューチェーンを通じた水資源の間接利用について分析を実施できるツール”SWAT (Supply chain Water Assessment Tool)”の開発を試みた。

2. ツールの概要

本ツールは FileMaker Pro 14 で開発を行った。本ツールでは、企業の経理データ（金額データ）をベースに、①東京都市大学環境学部の伊坪徳宏教授の開発した水原単位データベース [1)]に基づいて、企業のバリューチェーンを通じた GHG 排出量（Scope 3 GHG 排出量）から国立研究開発法人国立環境研究所の公開する産業連関表による環境負荷データブック（3EID; Embodied Energy and Emission Intensity Data for Japan Using Input-Output Tables）[2)]と上記の水原単位データベースによって間接的な水消費量を推計する方法と、②企業の経理データ（金額データ）をベースに、購入した原材料やサービスによる間接的な水消費量を計算する方法の 2 種類を用意した。購入した原材料の生産国（方法①）や GHG を排出した国（方法②）がわかる場合には、国ごとでの年間水消費量の集計が可能であることから、それぞれの国における応じた水資源利用可能性の希少さに応じた影響評価を行うことができる。

計算のベースとなる水原単位データベースは、日本における水使用量統計と産業連関分析に基づいて作成されていることから、海外から調達した原材料の評価については、「もしもその原材料製品・サービスを日本で生産した場合には、どの程度の量の水資源が消費されるか？」というバーチャルウォーターとして計算される。

3. 使用方法

1. 以下の 2 種類から、計算方法を選択する。

(1) CDP アンケートで回答している Scope3 CO2 排出量に基づいて、バリューチェーンを通じた水資源の間接的消費量を計算する。

(2) 購入した原料やサービスの支払金額に基づいて、調達段階の水資源の間接的消費量を計算する。

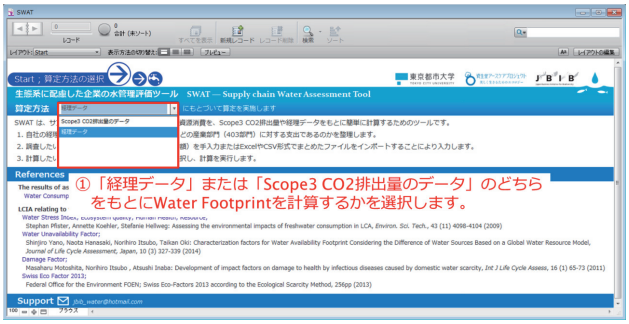


図 1　計算方法の選択

2. Scope3 CO2 排出量に基づいて計算を実施する場合

2-1 評価年の Scope3 CO2 排出量データ（「年」「項目」「CO2 排出量 (t-CO2e)」）を入力する。ライフサイクルステージ（Scope3 のカテゴリー）、CO2 排出を行った部署、サイト、国が特定できる場合には入力する。

図２　CO_2 排出量の入力画面

3. 年間の経理データ（支払金額データ）に基づいて計算を実施する場合

3-1 経理コードが、水原単位データベースのどの産業分類への支払いに該当するかを整理する。経理コードによって、支払先の国が特定できる場合には、支払先の国を入力する。国を入力しない場合は、画面下部に表示された国が自動的に支払先国として設定される。

図３　経理コードの整理

3-2 経理コードごとの支払金額を入力する。支払先の国が特定できる場合には、支払先の国を入力する。国を入力しない場合は、画面下部に表示された国が自動的に支払先国として設定される。

図４　支出金額の入力

4. 影響評価（特性化）

「評価年」「影響評価手法」を選択し、画面上部の をクリックして、水消費量の集計と影響評価を実行する。データの項目をクリックすると、クリックした項目でソートできる。先頭行（ピンク色の行）の「年」「ライフサイクルステージ」「部門」「国」を選択すると、表示するデータを絞り込むことができる。

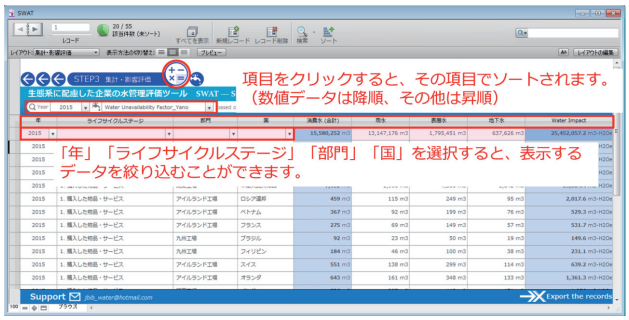


図５　影響評価

5. 水現単位データベース

画面上部の をクリックすると、データベースを確認することができる。

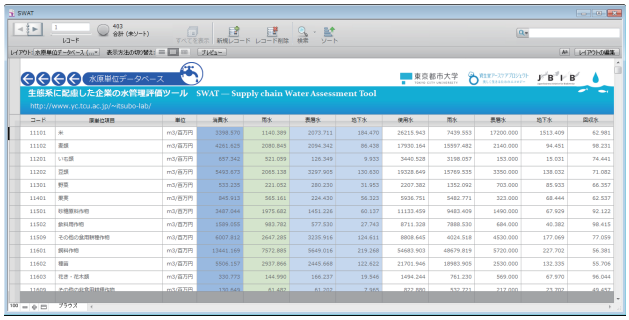


図６　水現単位データベース

4. さいごに

企業活動による生態系影響を考える上でも、また水に関わる事業リスクを評価する上でも、自社の事業がどの地域の水に、どの程度依存しているかを把握することは極めて重要です。本ツールが有効に活用され、効率的な水資源利用が進むことで、より良い形で人間社会と生態系との共存が図られることを期待します。

5. 参考文献

1) http://www.yc.tcu.ac.jp/~itsubo-lab/
2) http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/index_j.htm

組織単位の環境パフォーマンス評価による環境側面の抽出事例報告

A Case Study in Extraction of Environmental Aspect by Evaluation Environmental Performance in Organization unit.

○山﨑啓之*1)
Hiroyuki Yamazaki
1) TOTO 株式会社

1. はじめに

2015 年に国連サミットで採択された 17 の持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals, SDGs）の１つに「責任ある消費と生産の確保」という目標が設定された。この目標達成に向け、企業は自然資本の効率的な利用を推進するなど持続可能な取り組みを導入することが求められている。このような社会からの要求に対し、企業は事業活動において環境影響リスクが高い環境側面を抽出し環境マネジメントシステム（Environmental Management System, EMS）に落としこみ、管理していく必要がある。
本調査では、組織の LCA に着目し組織単位の環境パフォーマンス評価により、リスクが高い環境側面の抽出を行った事例を報告する。

2. 調査概要

2.1 調査対象

TOTO 株式会社及び国内外の連結子会社 52 社の 2015 年 4 月 1 日から 2016 年 3 月 31 日までの事業活動を調査対象とする。活動量が微小である一部の海外営業所及び国内厚生施設は調査対象外とした。

2.2 調査範囲

本調査のシステム境界を図 1 に示す。

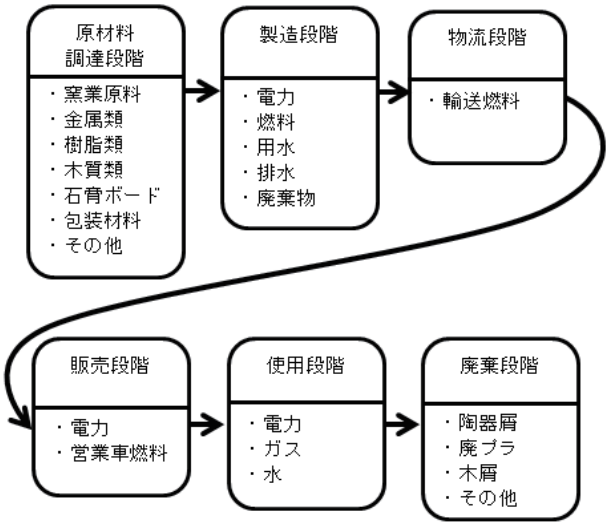


図 1　本調査のシステム境界

原材料調達段階では窯業原料、金属類、樹脂類、木質類、石膏ボード、包装材料、その他における購入重量をインベントリデータとした。一部の原材料は購入重量データが入手困難であったため、代表商品の材料構成から生産個数を乗じることで調達原材料重量を推計している。

製造段階では製造拠点における購入電力量、燃料別使用量、上水及び工業用水道使用量、排水量、製造時に発生する廃棄物量をインベントリデータとした。

物流段階では TOTO の事業活動に伴って貨物輸送を委託することにより消費された燃料容量をインベントリデータとした。

販売段階では営業拠点における購入電力量、営業車両のガソリン給油量をインベントリデータとした。

使用段階では販売した商品の使用期間における電力使用量及び都市ガス使用量、水使用量を推計しインベントリデータとした。推計にあたり、各代表商品 1 台あたりの使用期間における電力使用量及び都市ガス使用量、水使用量モデルを設定し、それぞれに販売個数を乗じて推計を行った。

廃棄段階では商品使用後に廃棄される陶器屑及び、廃プラ、木屑、その他における重量を推計しインベントリデータとした。代表商品の材料構成に販売個数を乗じることで材質別の廃棄物重量を推計している。金属屑、ダンボール屑はリサイクル率が高いため、廃棄段階のインベントリデータから除外した。

2.3 評価方法

LIME2（Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling）を活用し、環境領域毎の統合化指標を算定し評価を実施した。環境領域毎の統合化指標の算定は、主に LCA ソフトフェア MiLCA[1)]を利用した。環境領域「水資源消費」は MiLCA で統合化指標の算定ができないため、IDEA Ver.2[2)]の水消費原単位データを用い、活動量あたりの水消費量を算出し日本の水消費による健康被害評価係数 [3)] に LIME2 の人間健康に対する重み付け係数 [4)] を乗じた統合評価係数 5.97×10^{2}　（円/m3）を用いて影響評価を行った。

3. 結果

環境領域毎の統合化結果を各段階別に算出した結果を表 1 に示す。使用段階の水資源消費の統合化指標が最も大きく、全体の 57%を占めていた。これは水を使用する商品である便器で平均 19.6 年 [5]、水栓金具で 16.1 年 [5] と使用期間が長いことが影響している。使用段階の地球温暖化についても統合化指標が全体の 11.7%を占めることがわかった。これはお湯を使用する商品である浴槽で 15.8 年 [5]、シャワーヘッドで 13.4[5] 年と使用期間が長く、使用期間中に多くのガスを使用することが影響しているためである。以上の結果より使用段階の水資源消費、地球温暖化を事業活動においてリスクの高い環境側面とし、EMS や環境目標に落とし込み管理を実施していく必要があることがわかった。

TOTO では「商品使用時の水使用量削減」及び「商品使用時の CO_2 排出量削減」という環境目標を設定している。環境目標があった場合と無かった場合の違いによる統合化指標の結果への影響を検討した。環境目標が無かった場合の統合化指標は 2005 年を基準に設定したモデルに 2015 年の出荷実績を乗じることで算出した。結果を図 2 に示す。環境目標推進による削減量は地球温暖化より水資源消費が大きいことが確認できた。削減量を環境目標無しの総量で除した削減率を確認すると水資源消費で 17.2%、地球温暖化で 17.5%となりほぼ同じ削減率であることがわかった。

表 1　段階別及び環境領域別の統合化結果

段階 / 環境領域	原材料調達	製造	物流	販売	使用	廃棄	計
水資源消費	14.9	0.2	0.0	0.0	965.7	0.0	980.9
地球温暖化	15.0	4.4	1.4	0.2	197.5	0.0	218.6
資源消費	11.7	2.0	0.5	0.1	119.3	0.0	133.6
酸性化	1.1	0.1	0.4	0.0	6.3	0.0	7.9
廃棄物	2.6	3.8	0.0	0.0	80.0	121.5	207.9
富栄養化	0.0	0.0	0.0	0.0	76.5	0.0	76.5
生態毒性	4.8	0.4	0.0	0.0	9.1	0.0	14.2
都市域大気汚染	11.9	0.8	4.6	0.0	36.4	0.0	53.7
人間毒性	0.1	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.8

（単位：億円）

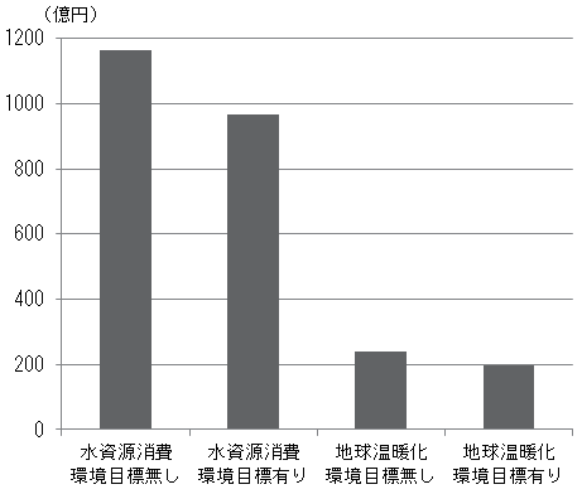


図 2　環境目標の有無による統合化指標の比較

4. まとめと今後の課題

LIME2 を活用して組織単位の LCA を実施し、事業活動においてリスクの高い環境影響を抽出した。水資源消費と地球温暖化については、EMS 及び環境目標などの取り組みにより統合化指標が削減されていることを確認した。

本評価は海外のインベントリデータに対しても日本の原単位データベースを使用しているため、海外の活動量が過小評価されている可能性がある。海外の原単位データベースを使用し、評価の精度を向上させることが今後の課題と言える。

5. 謝辞

本評価の実施にあたり、工学院大学稲葉敦教授及び産業技術総合研究所本下晶晴様に水資源消費に関わる評価にご協力いただきました。ここに感謝いたします。

6. 引用文献

1) 一般社団法人産業環境管理協会、LCA 実施を支援するためのソフトウェア「MiLCA」
2) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 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 IDEA version 2.1
3) Motoshita et al.: Consistent characterisation factors at midpoint and endpointrelevant to agricultural water scarcity arising from freshwater consumption, The International Journal of Life Cycle Assessment, in press, 2014
4) 伊坪徳宏・稲葉敦編著: LIME2　意思決定を支援する環境影響評価手法, 社団法人産業環境管理協会, 2010
5) 豊貞佳奈子, 出嶋聡, 小代禎彦, 清水康利：空気調和・衛生工学会論文集 No. 172, 2011 年 7 月, pp1～7

アズビルグループの環境施策におけるマテリアリティ抽出に向けた組織の LCA の活用

Application of Organizational Life Cycle Assessment to define materiality in environmental initiatives of azbil Group

○秦野　弘*[1)]、永山　綾子 [1)] 、木村　重夫 [1)]
Hiromu Hatano, Ayako Nagayama, Shigeo Kimura
1) アズビル株式会社
* h.hatano.bh@azbil.com

1. はじめに

azbil グループでは社会と企業の持続的な発展に向けた取組みを経営の最重要課題の一つと捉え、中期環境経営目標を策定し、環境保全活動を推進している。中期環境経営目標の策定にあたってマテリアリティを抽出する目的で、JBIB の「生物多様性関連性マップ」に基づき、azbil グループと環境の関連性マップの作成を試みた。しかし、あくまで定性的な情報に基づく分析ため、経営層との対話ツールとしては一歩及ばなかった。そこで、組織の LCA を算定し、その結果を従来の関連性マップと紐づけて分析し、さらに LIME 2 を用いて、我々の環境施策の土台となる「低炭素社会の実現」「資源循環社会の実現」「自然共生社会の実現」という軸においての整理を行い、マテリアリティの抽出と環境施策への落とし込みについて考察した。

2. 取組みの背景、及び概要

2.1 環境取組み重点施策

地球環境に関わる「地球温暖化の危機」「資源の浪費による危機」「生態系の危機」の３つの危機を克服するための「低炭素社会の実現」「循環型社会の実現」「自然共生社会の実現」の３つの社会の実現を通じて、“持続可能な社会の実現に貢献する”ことが社会からの要請として私たちが取り組むべき課題であると考え、環境取組みの土台と位置づけている。中期環境経営目標では、社会からの要請である 3 つの社会の実現を考慮に入れて、取り組むべき重要な項目を整理し、施策へと反映している。

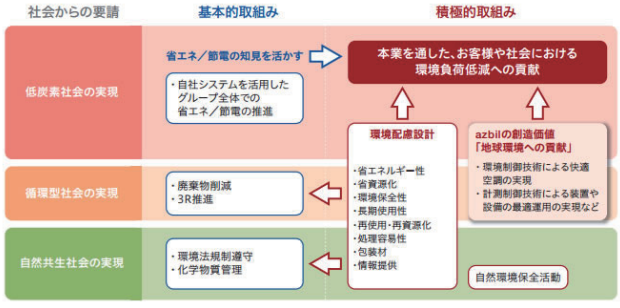


図 1　環境取組み重点施策

2.2 システム境界

算定のシステム境界を図 2 に示す。お客さまへ提供する製品・サービスを基準フローとし、それに関わるすべての活動を算定範囲とした。国内外の生産子会社は別会社となるため調達先の一つとして位置づけるが、グループとしての環境管理活動における範囲（エネルギー、紙、水など）は SCOPE1,2 の範囲として扱う。

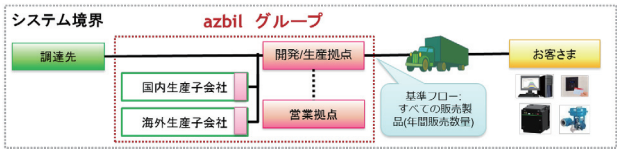


図 2　システム境界

2.3 データ収集方法

システム境界に基づくデータ収集方法を、図 3 に示す。上流は財務データより実際の金額データを活動量とした。SCOPE1,2 は、環境パフォーマンスデータの活動量を用いた。下流は、輸送については輸送業者より提供された燃料データ、使用段階は生産数量及び各製品スペック、廃棄については「廃プラごみ」「金属ごみ」の 2 種類に分類し概算とした。なお、SCOPE1,2 及び　SCOPE3 (Cat 1,2,3,5,6,7,11) については第三者検証済（2015 年度）である。継続的な算定に向けて、検証されたデータであることの意義は大きいと考える。

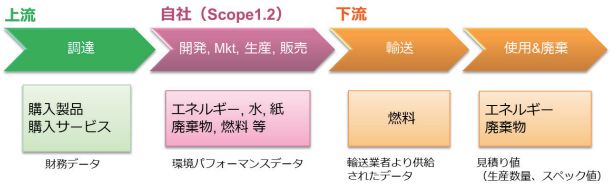


図 3　データ収集方法評価手法

2.4 評価手法

LIME2 を用いてインパクト評価を実施した。得られた結果を影響領域で整理し、図 4 のように「低炭素社会」「循環型社会」「自然共生社会」の 3 つの視点から分類し分析を進めた。

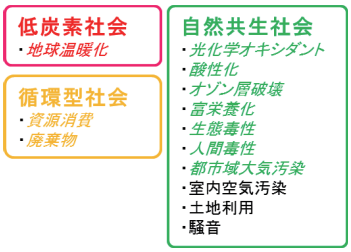


図 4　LIME2 影響領域の分類

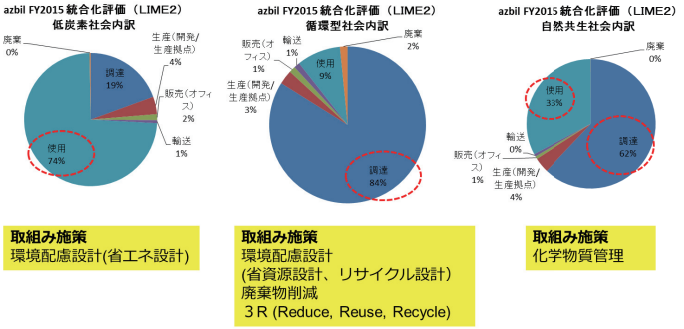


図 7 各社会での内訳、及び具体的な施策検討

3. 結果

3.1 総合結果

統合評価の結果を図 5、6 に示す。全体の傾向としては、資源循環社会への影響が 56%と大きく、その次が低炭素社会、自然共生社会となった。この結果は、低炭素社会のみをターゲットとした SCOPE3 の結果とは異なる結果となった。また、ライフサイクルの段階で比較すると、調達段階、使用段階が大きく、各々資源循環社会、低炭素社会への影響が大きいことが分かった。

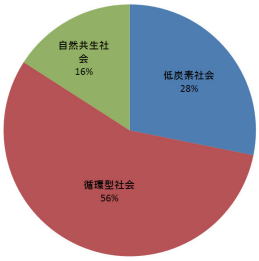


図 5　統合評価結果（2015 年度）

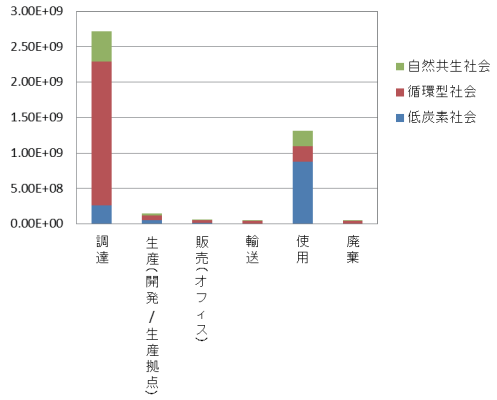


図 6 ライフサイクルでの統合評価結果（2015 年度）

3.2 社会別の内訳、及び具体的施策への落とし込み

社会別の内訳を。図 7 に示す。より具体的な施策についての検討を進めた結果、「環境配慮設計」がマテリアリティの一つとして抽出され、低炭素社会では省エネ設計、資源循環社会では省資源設計の重要性について各々位置づけることができた。

4. データ品質の評価

結果の信頼性評価の目的で、データ品質の評価を行った。評価項目、及びスコア一覧を表 1 に、評価結果を表 2 に示す。これらにより、より具体的に結果の信頼性や、データ品質向上について議論をすることができた。

表 1　データ品質評価項目、及びスコア一覧

スコア	1	2	3	4	5
算定期間における代表性[1)]	すべて算定期間の実データである	すべて算定期間のデータだが、一部推計値あり（過去の実データ含む）	すべて過去の実データ	過去の実データと、一般的なデータからの推計値を含む。	すべて一般的なデータなどから推計値
地理的な代表性（バウンダリの評価）[1)]	組織全体を含む	組織全体を含むが、一部は補完されている	バウンダリが限定的である	バウンダリが限定的であり、一部補完されている	データによりバウンダリが異なる
信頼性[1)]	検証された実データ（財務データ、環境パフォーマンスデータ）である	一部検証された適切な方法による推計データを含む	一部検証されていない実データ（財務データ、環境パフォーマンスデータ）を含む	一部検証されていない推計データを含む	すべてが検証されていない推計データである
バックグランドデータの代表性	可能な限りのデータにおいて、1次データ（サプライヤーから提供される入手可能なデータ）を用いている。（例：購入品毎のLCAデータなど）	可能な限りのデータにおいて、インベントリに紐づいた一般的なデータを用いている。	適切なカテゴリー毎にまとめられた一般的なデータを用いている。	適切なカテゴリー毎にまとめられた一般的なデータを用いているが、一部のカテゴリーの区分けが曖昧である	カテゴリーの区分け、及び一般的なデータ選択の両方に課題がある

表 2　データ品質評価結果

データ品質評価結果					結果(%)			
ライフサイクル	算定期間	バウンダリ	信頼性	バックグラウンドデータ	合計	低炭素	循環	自然共生
調達	1	1	1	3	63%	19%	84%	62%
	1	1	1	3				
生産＆販売	1	1	1	2	5%	6%	4%	5%
輸送	1	1	1	2	1%	1%	1%	1%
使用	1	1	1	2	31%	74%	9%	33%
廃棄	1	1	4	4	1%	0%	2%	0%

5. まとめ

3 つの社会の実現を背景に、組織の LCA の算定結果に基づくマテリアリティについての定量的な議論を進め、一つの成果として「環境配慮設計」の施策を位置づけることができ、中期環境経営計画へ落としこんだ。また、データの品質評価を通じて、その結果の信頼性についての見解を議論することができた。

6. 参考文献

1)　UNEP, Guidance On Organizational Life Cycle Assessment, 2015, P75

HDD と SSD を対象とした環境影響評価

Environmental impact assessment intended for the HDD and SSD

○山崎有平*1)、伊坪徳宏
Yuhei Yamazaki, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学
* g1362133@tcu.ac.jp

1. 社会背景

総務省の平成 26 年度版情報通信白書によると、情報通信産業の市場規模は 81.8 兆円となっており、全体の 8.9%を占めている。これは全産業の中でも最大の市場規模である。今日、携帯電話及びパソコンの普及率はそれぞれ 94.8%、81.7%と高い水準となっており、PC や携帯電話、等の端末が普及したことでより多くの情報が身近なものとなった。こうしたインターネット上に公開された電子情報を保存するためには、ハードディスク（以下 HDD）やソリッドステートドライブ（以下 SSD）といった情報を記録する媒体を使用することが一般的であり、パソコンやスマートフォンなどといった身近な電子機器にも多く使用されており、今では日常生活には欠かせない重要なデバイスとなっている。

HDD は磁気を帯びた円盤に情報を記憶させるストレージとして扱うデバイスで、ストレージでは主流のものとなっている。一方 SSD は半導体を使用した記憶媒体で、HDD に代わる次世代のストレージとして開発された。重量も HDD は約 90 グラム、SSD は約 50 グラムとなっており、軽量化もされている。HDD の年間出荷台数(世界市場)は平成 22 年にピークを迎えてから、減少傾向が続いてきた一方で、SSD の出荷台数(世界市場)は平成 27 年に前年比で 14.3%増と 2 桁成長であり、平成 28 年の出荷台数も増加が予想されている。SSD は価格の下落も進んでおり、徐々に HDD から SSD への世代交代が進みつつあるといえる。

2. 研究背景

既存研究では、パソコンをベースに LCA を行っている事例は数多く存在する。しかし、今回研究を行う HDD や SSD に焦点を当てた研究はまだ少ない。また、存在する事例としても 10 年以上前の研究で現在と規格の異なる部品を算定している事例であったりするため、近年の製品をベースに行われている研究は数少ない。

3. 研究目的

従来より電子情報等の保存に用いられてきた HDD に対して、近年は処理速度の早く消費電力の少ない SSD への移行が進んでいる。部品点数が少なく、性能も向上した SSD は、本体や、使用面でその特徴について詳細に考察された研究例は少ない。こうした背景より、本研究では HDD、SSD を対象に資源及びエネルギーの観点から評価を行う。エネルギーは特定の使用条件のもとで消費電力を実測し、資源は素性分析より金属含有量を得て環境影響評価を行う。

4. 研究方法

本研究では、HDD・SSD それぞれ製品を用意し、データの採取を行う。本体は分解をして、部品ごとに重量の測定を行うことでデータの採取を行った。分解した部品は、“詳細解体による廃パソコン中の金属含有量の推定”に記載されている使用金属の一覧に素材の対応をさせることで使用素材の推定を行った。基板上の抵抗等の部品は目視で数を数え評価の詳細化を図っている。

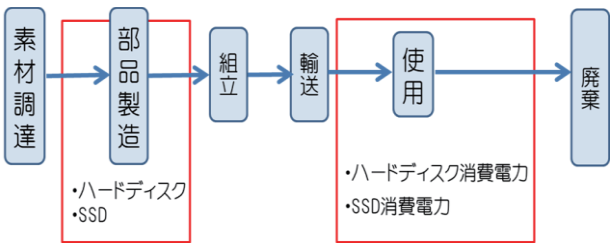
集積回路部分は、基板に接続するピン数を調査し 3EID ベースの集積回路算定ツールを使用して結果を出した後、MiLCA に算定ツールの投入量の部門対応をさせることで算定を行った。

使用部分は USB 型の電力テスターを使用してアイドル時の消費電力と、10GB のデータを転送する際の消費電力及び、転送にかかる時間を測定した。そこに国税庁が公開している耐用年数表のパソコンの項目の 4 年を使用シナリオとして想定し算定を行う。

5. 調査対象

2.5 インチ HDD（約 90g）と SSD（約 50g）1 台あたり

6. 調査範囲



システム境界は HDD・SSD それぞれの本体部分と、使用部分を対象とする。素材調達、組み立て、輸送、廃棄に関しては対象の範囲外とする。

7. 算定式

GHG 排出量、資源枯渇評価の算定には原単位法を使用した。(式 1,2)　算定には MiLCA を使用した。

GHG 排出量＝Σ(活動量×GHG 排出量原単位)（式 1)
資源消費＝Σ（活動量×資源枯渇評価係数）　(式 2)

算定に際しては、本体の集積回路以外の部品は重量ベースで算定を行い、集積回路はピン数を調査した上で BGA 方式と QFP 方式で区別をし、3EID ベースの算定ツールで結果を出してからその結果を MilCA に入力することでピン数別の集積度別に評価を行っている。

8. 結果

8.1 地球温暖化

HDD と SSD の地球温暖化の結果を以下に示す。

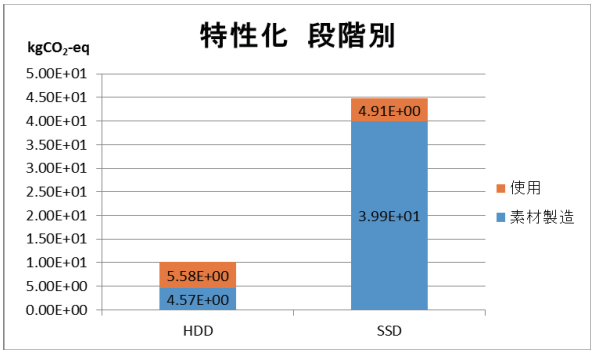


図 1　本体と使用の地球温暖化結果

HDD、SSD 共に本体部分の地球温暖化への寄与が支配的な結果となった。SSD は素材製造の段階が温暖化の全体の大半を占める一方で、HDD は使用部分が温暖化により寄与している結果となった。
本体部分の比較では、HDD が本体重量の約 52 倍、SSD が約 693 倍の CO2 が排出される結果となった。

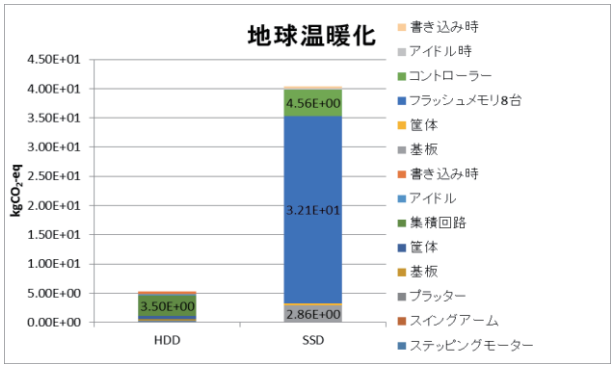


図 2　各部品ごとの地球温暖化寄与

どちらも本体部分の負荷が大きく、特に各基板に搭載されている半導体集積回路の負荷が大半を占めている。そのため半導体集積回路を多く搭載する SSD の方が本体部分の負荷が大きい結果となった。使用部分は SSD に優位性が現れたものの、全体の結果として負荷はかなり大きいものとなった。

8.2 資源消費

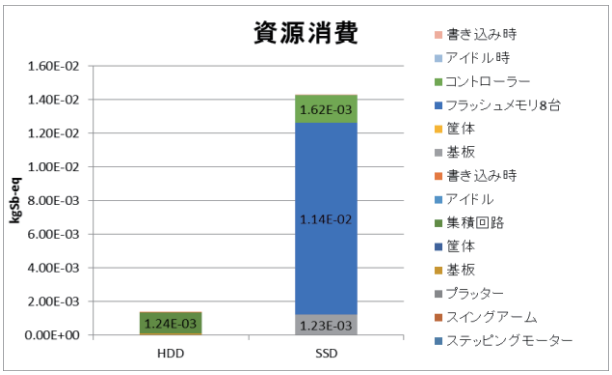


図 3　資源消費結果

HDD は基板上の集積回路、が最も大きく、次いで基板、筐体の順で大きい。白金、鉛、銀、モリブデン、金　が上位の資源である。
SSD は記憶部分に当たるフラッシュメモリが最も大きい結果となった。次いでコントローラー、基板の順に大きい結果となった。白金、鉛、銀、モリブデン、金　が上位の資源である。

9. 考察

SSD は使用時の電力の測定結果でアイドル時、書き込み時の消費電力や、書き込み時間に HDD よりも優位性を見いだせたものの、本体部分の環境負荷では HDD よりも大きな結果となった。これは、集積度の上がった半導体部分が大きく寄与していると考えられ、今後環境負荷を削減する際に焦点を当てるべきポイントであると考えられる。

10. 参考文献

・詳細解体による廃パソコン中の金属含有量の推定　白波瀬朋子ら　2009 年
・総務省
　・情報通信産業の動向
　・平成 26 年度版情報通信白書
・PC　Watch
　・HDD の世界市場、2016 年は 1.3%減の 4 億 6,500 万台と予測　(2016/2/16 日付)
　・SSD の世界市場、2016 年は 16.5%増の 9,500 万台と予測　(2016/2/17 日付)

パナソニックにおける製品・サービスによる CO_2 削減貢献量算定・開示の取組み

Panasonic's Initiatives for Calculation and Disclosure of the Size of Contribution in Reducing CO_2 Emissions

○佐々木秀樹*[1)]、東山信幸 [1)]
Hideki Sasaki, Nobuyuki Higashiyama
1) パナソニック株式会社
* sasaki.hideki001@jp.panasonic.com

1. はじめに

パナソニックグループのサプライチェーン（SC）全体における年間温室効果ガス排出量は約 1 億トンであり、その約 8 割を販売した製品の使用時における排出（スコープ 3　カテゴリ 11）が占める（表 1）[1)]。そのため CO_2 削減には製品の省エネ性能改善と省エネ製品の普及が重要と考え、CO_2 排出削減の継続的努力を反映できる指標として 2010 年度から CO_2 削減貢献量を算定・開示している [1)]。

表 1　SC 全体における 2015 年度 GHG 排出量（ｽｺｰﾌﾟ別）

カテゴリ		排出量（万トン）
スコープ1		43
スコープ2		200
スコープ3	1. 購入した製品・サービス	1,299
	2. 資本財	71
	3. スコープ1,2に含まれない燃料およびエネルギー関連活動	13
	4. 輸送、配送（上流）	86
	5. 事業から出る廃棄物	1.6
	6. 出張	2.3
	7. 雇用者の通勤	3.4
	8. リース資産（上流）	0.9
	9. 輸送、配送（下流）	2.1
	10. 販売した製品の加工	-
	11. 販売した製品の使用	7,973
	12. 販売した製品の廃棄	123
	13. リース資産（下流）	-
	14. フランチャイズ	-
	15. 投資	-
合計		9,818

2. 当社における CO_2 削減貢献量の算定方法

現在、省エネ製品、創エネ製品、デバイスの分野で算定・開示している。算定方法の検討においては、既存のガイドライン [2-4)] を参考にした。それぞれの分野における算定方法の概要を以下に示す。

2.1 省エネ製品

対象は、最終製品として販売している製品で販売量を加味した製品使用時の総エネルギー消費量が大きい主要製品、すなわち、エアコン、照明、テレビ等の約 30 製品である。

削減貢献量は製品仕様に基づく年間消費電力量を用いて算出した。考え方は、「基準年度（2005 年度）から省エネ性能の改善がないと仮定した場合に使用する総電力量に応じて平均的な発電により発生すると想定した CO_2 排出量から、当該年度の製品仕様（消費電力量）から試算される CO_2 排出量を差し引いた量」とした（図 1）。年間消費電力量の算定式が国や業界によって定められている場合はそれに準じ、定められていない場合は当社にて設定した。なお、製品寿命には補修用性能部品の保有期間を用いた。

算定式は、以下の通りである。

201X 年度削減貢献量　＝　｛(2005 年度製品の年間消費電力量) − (201X 年度製品の年間消費電力量)｝ × 201X 年度販売台数 × CO_2 排出係数 × 製品寿命

2.2 創エネ製品

対象は、太陽光発電システムや燃料電池である。

削減貢献量算定の考え方は、「創エネ製品からの総発電量を平均的な発電で発生を想定して試算した CO_2 排出量に等しい」とした（図 1）。

算定式は、太陽光発電の場合、以下の通りである [5)]。

201X 年度削減貢献量　＝　201X 年度年間発電容量 × 発電量係数 × CO_2 排出抑制係数 × 製品寿命

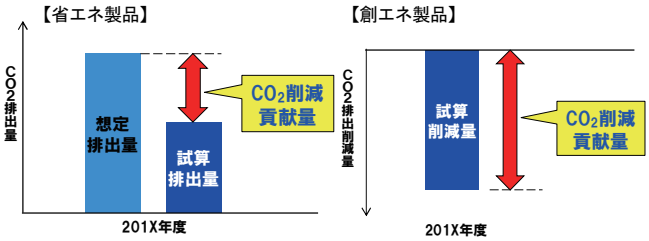


図 1　省ｴﾈ・創ｴﾈ製品における削減貢献量の考え方

2.3 デバイス

デバイスによる CO_2 排出削減貢献量についても 2014 年度から算定・開示している。対象は、他社で販

売される最終製品に組み込まれる当社製デバイスであり、エアコン・冷蔵庫向けコンプレッサやモータ、エコカー（EV、HEV 等）用車載電池、冷蔵庫・自動販売機等向け真空断熱材などである。当該デバイスが搭載される自社省エネ製品による削減貢献量とのダブルカウントを排除するため、他社への販売分のみを対象とした。

削減貢献量算定の考え方は、例えばコンプレッサの場合は、「基準年度（2005 年度）から省エネ性能の改善がないと仮定した場合にコンプレッサが使用する総電力量により発生すると想定した CO_2 排出量から、当該年度の当該他社最終製品でコンプレッサが使用する総電力量に応じて試算される CO_2 排出量を差し引いた量」とした。但し、当社においてコンプレッサが搭載される他社最終製品の仕様（消費電力量）を把握することが困難なため、以下のように推定した。

同等レベルのコンプレッサを搭載している当社最終製品の年間消費電力量を他社最終製品の年間消費電力量と仮定した。さらに、最終製品の消費電力量に占めるコンプレッサの消費電力量の比率は、社内関連事業部へのヒアリングから決定した。また、これまでの算定においては、その最終製品の年間消費電力量に占めるデバイスの比率については一定とみなした（図 2）。

以下にコンプレッサについての算定式を示す。

201X 年度削減貢献量 ＝ {（2005 年度 当社コンプレッサが搭載される他社製品の推定年間消費電力量）－（201X 年度 当社コンプレッサが搭載される他社製品の推定年間消費電力量）} ×（搭載される最終製品消費電力量に占めるコンプレッサ消費電力量の比率）× 201X 年度販売台数 × CO_2 排出係数 × 製品寿命

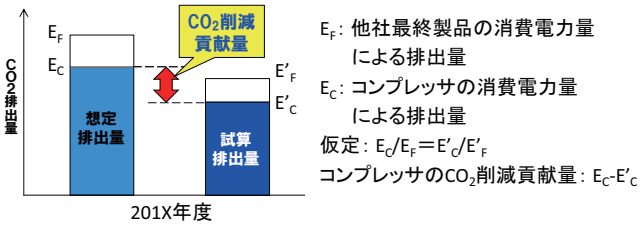


図 2　コンプレッサにおける削減貢献量の考え方

3. 直接貢献と間接貢献の設定

最終製品の省エネによる削減貢献量と排出量は同時に開示してきた。しかし、デバイスの省エネ性能が最終製品の仕様に反映されている可能性は高いと想定されるものの、最終製品の設計にどの程度反映して CO_2 排出量の削減に貢献できているかを明確にできない。そこで、省エネ製品、創エネ製品のように最終製品の仕様を当社が決めている製品・サービスによる削減貢献を “直接貢献”、デバイスなど他社最終製品による削減貢献を “間接貢献” と区別し、直接貢献では貢献量とともに排出量を開示、間接貢献では貢献量のみを開示している。

また、削減貢献量の開示においても、間接貢献量は直接貢献量に単純に加算せずに、当社の CO_2 削減に対する努力を区別している。

2014 年度の実績は直接貢献量が 4,314 万トン、間接貢献量が 1,101 万トン、2015 年度は直接貢献量が 4,312 万トン、間接貢献量が 1,407 万トンであった（図 3）。

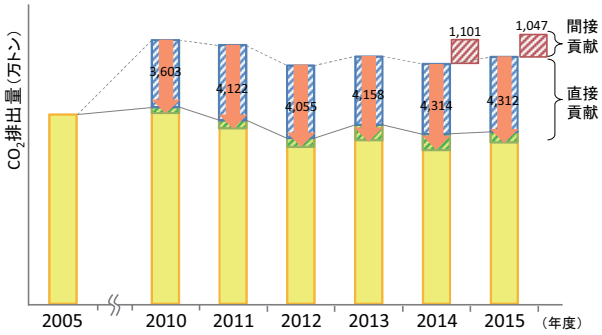


図 3　排出量および直接・間接貢献量の推移

4. まとめ

当社では、最終製品の仕様を自社で把握できるか否かによって直接貢献と間接貢献を設定し、両者を区分して開示することにより、電力を消費する最終製品における省エネ性能向上取組みの努力分を明確化するとともに、他社最終製品に組み込まれるデバイスによる削減貢献量も試算できる可能性がある。特に、コンプレッサを一例として、他社最終製品を当社でも製造している場合は有効な試算方法と考える。

引続き、製品・サービスの省エネ性能改善および省エネ製品の普及、並びに、新たな製品・サービスの算定手法確立を進め、削減貢献量を算定・開示していく。

5. 引用文献

1) パナソニック株式会社: “Sustainability Data Book 2016”, (2016)

2) 一般社団法人　日本化学工業協会: “CO_2 排出削減貢献量算定のガイドライン”, (2012)

3) IEC: “TR62726 Guidance on quantifying greenhouse gas emission reductions from the baseline for electrical and electronic products and systems”, (2014)

4) 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)

5) 太陽光発電協会: “表示に関する業界自主ルール（平成 22 年度）”, (2010)

カイコによる検査薬を対象とした環境影響評価

Environmental impact assessment of Reagent using silkworm

○立原航揮*[1)]、宇佐美昭宏 [2)]、伊坪徳宏
Koki Tachihara, Akihiro Usami, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学, 2)　シスメックス株式会社
* g1362083@tcu.ac.jp

1. はじめに

高齢化人口の増加は、血液凝固検査や遺伝子検査の件数増加と試薬・検査薬の需要増加に繋がることが予想される。

試薬とは「化学的方法による物質の検出もしくは定量、物質の合成の実験または物理的特性の測定のために使用される化学物質」と定義される。検査薬とは、健康状態を把握するために行う健康診断や病院の診察などで主に使われる薬のことである。主にウシやウサギなどの動物のタンパク質が原料に使われていたが、近年では遺伝子組み換え技術とカイコによるタンパク質の量産技術を組み合わせること [1)] で、試薬の供給に必要な量の原料の効率的かつ安定的な生産を実現している。動物愛護の観点だけでなく、生産性の面からも大きな改善が期待されているが、これは同時に環境影響の削減にもつながるものと考えられた。

2. 研究目的

本研究では、シスメックス株式会社が製造しているカイコを原料とした医療分野に用いられる試薬の環境影響を算定する。その結果は従来法と対比することでその環境優位性についても合わせて考察する。

3. 評価対象および研究方法

3.1 評価対象

評価対象は表 1 に示したカイコにより製造された検査薬とする。
機能単位は「検査薬 1 年分」とし、評価項目は GHG とする。

表 1 本研究評価対象

検査対象	検査内容	従来原料
複合因子 TTO[2)]	血液凝固検査	ウシ大脳
肺サーファクタントアポ蛋白 SP-A[3)]	突発性間質性肺炎	ヒト細胞
プロトロンビン時間 PT[4)]	血液凝固因子欠乏	ウサギ大脳

2)　TTO:トロンボテスト
3)　SP-A:コレクチンファミリーに属するタンパク質
4)　PT:プロントビンタイム

3.2 評価範囲

本研究では、カイコの餌の原材料調達段階から、カイコの飼育、試薬生産、輸送、使用（検査）、廃棄までの図 1 に示された範囲をシステム境界とする。製薬会社では生産以外にも研究開発に関わる人材等の投入も多いものと考えられたことから、研究開発に関する環境負荷について算定対象とした。

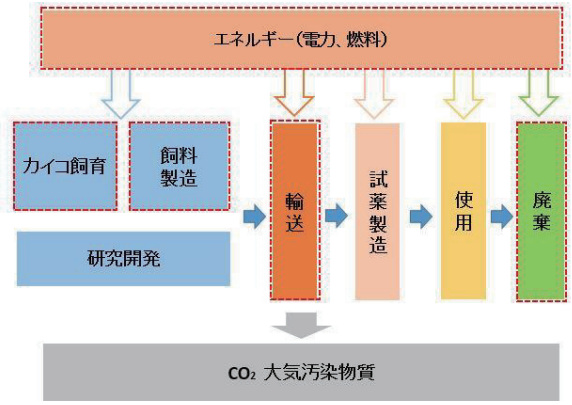


図 1 本研究のシステム境界

3.3 データ収集

本研究では、「シスメックス株式会社」から一次データを取得した。一次データには、主要検査薬品における原材料（飼育含む）、研究、生産、廃棄に関わるデータが含まれる。原単位は主に IDEA の原単位を使用した。

3.4 算定方法

本研究での GHG 排出量には原単位法を使用した。（算定式は以下の式 1 に示す）

GHG 排出量＝Σ（投入量×原単位）（式 1）

輸送の負荷の算定にあたっては、料金法を使用した。（算定式は以下の式 2 に示す）

GHG 排出量＝Σ（輸送料金×排出量原単位）（式 2）

投入量にはヒアリングで入手したデータを使用した。

4. 結果

4.1 シスメックス株式会社全体の算定結果

まず、シスメックス株式会社が公開している CSR 報告書[5] による結果以下に示す。こちらに関しては、シスメックス株式会社の事業全体の負荷となるので試薬製造のみでなく、他事業も含まれている。そこで、事業全体に対する試薬製造の割合（45.5%）[6] に換算し算出している。

事業全体としての負荷は約 2 万トンとなった。なかでもエネルギー消費量が主な割合を占めていて割合としては約半数を占めている。尚且つ、原材料については含まれていない。

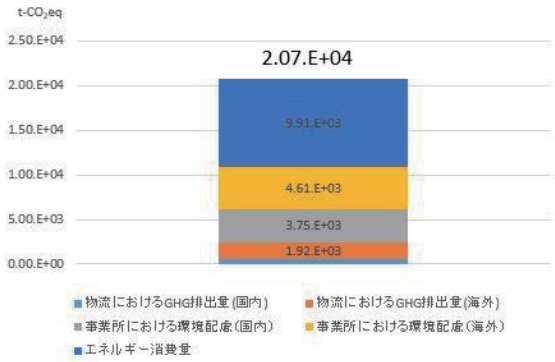


図 2　シスメックス株式会社全体の負荷

4.2 検査薬全体としての LCA 算定結果

検査薬全体としての負荷は約 1.5 万トンとなった。結果をみると飼料製造と廃棄が寄与していることがわかる。一方で輸送に関しては全体に比べてかなり小さい負荷となっている。

飼料製造に関しては、投入量が多く一つ一つの値が大きいこと、そして電力使用量も大きいことが結果に寄与したと考えられる。

廃棄に関しては、飼育中に死んでしまうカイコを燃焼し廃棄とするため負荷が大きくなったと考えられる。

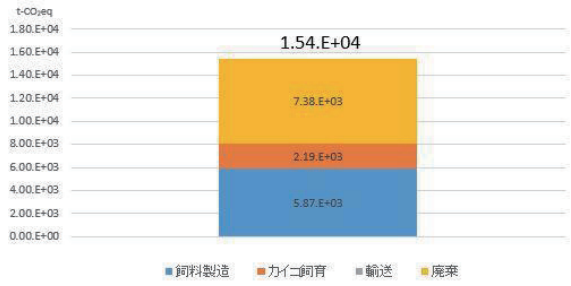


図 3　検査薬全体の負荷

4.3 シスメックス株式会社 CSR 報告書[5] との比較

CSR 報告書と検査薬に着目した結果の比較を行うと以下の通りとなった。事業全体の負荷に比べて検査薬に着目した結果が小さく出ていることが見て分かる。今回算定を行った検査薬に関して、全体を網羅できていないため過小評価になっていることが考えられる。

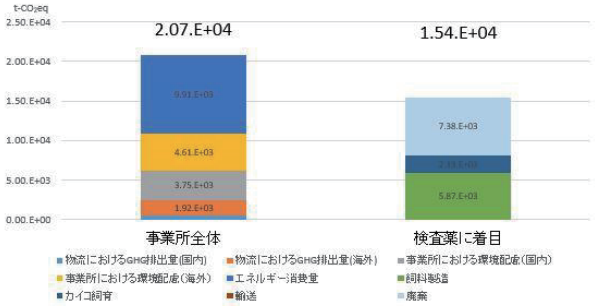


図 4　CSR 報告書と検査薬の比較

5. まとめ・課題

本研究では、検査薬の環境負荷について算定した。算定結果を見て今回の算定に関して、研究開発・試薬製造・使用（検査）の段階の負荷は算定外となっている。なので、今後はこれらを考慮した結果を出し考察したいと考える。

そして、今回の結果は全体を見る段階なので本来の目的は果たせていない。まだ各検査薬に注目して結果が出せていないことから従来との比較ができていなく、動物からカイコに変えたことによる負荷の違いを示せていないことを課題と考える。よって従来の試薬製造との比較結果も口頭発表では示していきたいと考える。

6. 参考文献

1)　シスメックス株式会社研究開発
5)　シスメックス株式会社 CSR 報告書
6)　シスメックス株式会社 IR 情報

未来技術の環境影響評価手法の開発：革新的な炭素繊維の製造手法のケース

Development of LCA on Future Technology Considering Scale Effect:
A Case Study on the Novel Process Manufacturing Carbon Fibers

○河尻耕太郎
Kotaro Kawajiri
産業技術総合研究所
* kotaro-kawajiri@aist.go.jp

1. はじめに

ライフサイクルアセスメント（LCA）は、製品やプロセスの環境負荷を評価するための手法として、確立されつつある。近年、研究開発段階において、新規技術の優位性を環境負荷の側面で定量的に評価し、研究開発を効率化することが求められつつある[1)]。早い段階で将来技術のポテンシャルを定量的に評価出来れば、早期に有望な技術を選択することが可能となり、研究開発の効率を向上させることが出来る。

しかしながら、研究開発段階では、個々のプロセスのスケールが小さく、またプロセスの効率が低い。一般的に、プロセスのスケールが大きくなることによって、効率が向上することが、スケール効果として知られている。逆に、革新的な技術であったとしても、小規模スケールで製造された場合、大規模スケールで製造された既存技術よりも、単位生産物あたりの環境負荷が大きく評価され、その技術の将来的なポテンシャルを過小評価する可能性がある。したがって、小規模スケールで研究開発されている将来技術の環境負荷と、大規模スケールで製造される既存技術の環境負荷を、直接比較することは難しい。新規技術と既存技術の環境負荷を比較するためには、各プロセスのスケールを合わせた上で、比較する必要がある。

過去の研究において、我々は、燃料電池の革新的な製造プロセスの、研究スケール、パイロットプラントスケールでのインベントリ情報と、装置情報を元に、研究開発段階の技術が商業化スケールで生産されたときの CO2 排出量を推計した[1)]。本研究では、前述の過去の研究の枠組みを用いて、革新的な炭素繊維の製造手法をケース・スタディとして取り上げ、研究開発段階の将来技術が商業化スケールで用いられたときの CO2 排出量を推計する。なお、本要旨では、現在進行中の研究の暫定的な成果を紹介するものであり、結果等については、分析精度の向上に伴って将来的に変化し得るものである。

2. 革新的な炭素繊維の製造手法

炭素繊維は、高強度、高引張強度、低重量、化学的安定性、成形性などの特徴を有する材料である。一方で、スチール高張力鋼などと比較して、コストが高く、さらなる生産性の向上が求められている。現在では、炭素繊維は、飛行機など、高付加価値な最終製品から導入が進められつつある。

環境側面では、炭素繊維によって製品が軽量化される一方で、炭素繊維の製造に必要なエネルギー消費量が大きいことが問題として指摘されている[2)]。図 1 に、炭素繊維の合成プロセスを示す。一般的に炭素繊維は、ポリアクリロニトリル（PAN）繊維を合成し、紡糸、耐炎化、炭素化、表面処理という工程を経て製造される。中でも、耐炎化、炭素化は、PAN の繊維を熱処理するプロセスであり、エネルギー消費量が大きい。

そこで、本研究で取り上げる製造手法では、耐炎化処理後の生成物とほぼ同等の機能を有する前駆体を化学的に合成する。これにより、既存プロセスにおけるエネルギー消費量の大きな耐炎化のプロセスを代替することが可能となり、炭素繊維の製造に必要なエネルギー消費量を大幅に削減できると期待されている。

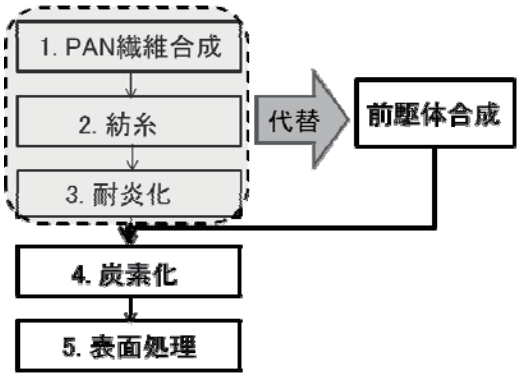


図 1. 炭素繊維の合成プロセス

3. 手法

本研究では、特許情報[3)]を元に、将来技術を構成するシステム境界を明らかにし、各ステージにおける材料投入量等のインベントリデータを収集する。

ただし、特許情報では、材料投入量や、所定条件下でのプロセス時間などの情報は得られるものの、具体的なエネルギー消費量の数値が得られないことが多い。そこで本研究では、各プロセスの装置情報を収集し、所定スケールでの電力消費量を推計する式を導出し、

エネルギー消費量のインベントリデータを補完する。

以上により、所定スケールで将来技術を用いたときの、機能単位あたりの環境負荷を推計する。

本研究では、機能単位を炭素繊維前駆体 1kg とする。

各プロセスで投入される原材料や電力、排出物の環境負荷については、産業技術総合研究所で開発中の IDEA データベースを用いて推計する[4]。環境負荷として、CO2 排出量を用いる。

図 2 に、前駆体合成のシステム境界を示す[3]。本要旨における分析では、装置情報が少ないことや、エネルギー消費量が小さいことなどから、紡糸プロセスのエネルギー消費を考慮しない。また、各ステージにおける装置や建物などの環境負荷は考慮しない。

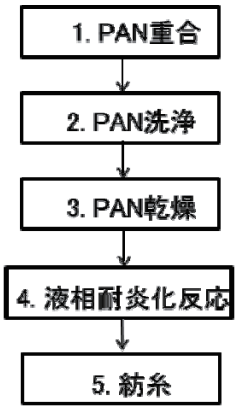


図 2. 前駆体合成のシステム境界

4. 結果

図 3 に、炭素繊維前駆体を機能単位製造するための CO2 排出量と、そのステージごとの内訳を示す。なお、本図においては、図 2 の各工程に 1 台の製造装置を割当て、全行程で計 5 台の製造装置を 1 ラインとして、ライン 1 サイクルで製造できる最終生成物である前駆体の製造量を、0.01kg から 1000kg まで変化させたときの前駆体 1kg 製造するための CO2 排出量を示す。

図より、本ケースにおいては、前駆体の製造量が大きくなるに連れて、各ステージにおける CO2 排出量が減少する。これは、各ステージにおける電力消費量が、製造スケールの増加とともに減少するためである。製造量が 0.01kg のときに、電力による CO2 排出量が全体の約 96%を占めるのに対して、製造量が 1000kg の時に、その割合は約 3%まで減少する。特に、ステージ 3 の CO2 排出量の減少が大きい。これは、他の工程が加熱機能付き攪拌装置を用いるのに対して、ステージ 3 は減圧乾燥機を用いており、減圧乾燥機のスケール効果が、攪拌装置のスケール効果よりも大きいためである。

製造スケールが大きくなると、材料由来の CO2 排出量の割合が大きくなる。中でもステージ 1 とステージ 4 で溶媒として使用されるジメチルスルホキシドの CO2 排出量がその大部分を占める。

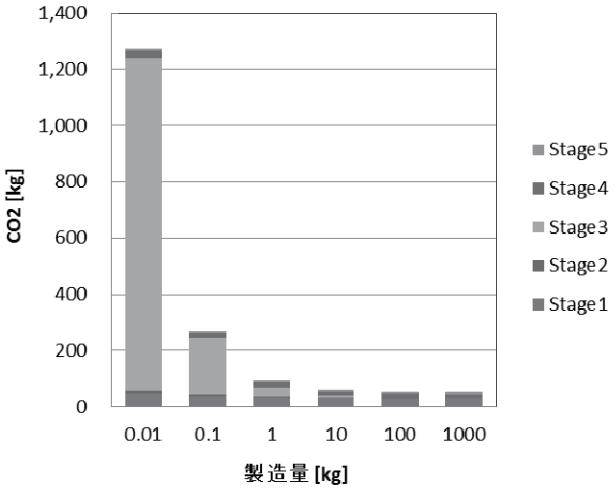


図 3. 炭素繊維製造時の CO2 排出量

5. 結論

本研究では、炭素繊維前駆体を、異なる製造スケールで製造した時の環境負荷を推計した。

製造スケールが小さいときは、電力由来の CO2 排出量が全体の約 96%を占めるが、製造スケールが大きくなるに連れて、その割合は小さくなり、最終的に約 3%まで減少する。特に、減圧乾燥機のスケール効果が大きく、ステージ 3 における CO2 排出量の減少が大きい。材料由来の CO2 排出量については、溶媒のジメチルスルホキシドによる CO2 排出量が大きい。

最後に、本要旨の内容は、現在進行中のプロジェクトの途中経過を示したものである。今後は、より分析の精度を高めるとともに、本技術による既存技術の代替による環境負荷削減量を評価したい。

6. 謝辞

本研究は、つくば市科学技術振興部スマートシティ推進課の支援を得てすすめられた。特に甲斐氏、加藤氏の両名にはデータの収集、分析等で大きく貢献頂いた。ここに謝意を表したい。

7. 引用文献

1) K. Kawajiri, T. Inoue, J. Cleaner Production, (2015), pp.4065-4070.
2) T. Suzuki, J. Takahashi, Proc. 9th Japan Int. SAMPE symp. , (2005), pp.14-19.
3) 特開 2015-17204.
4) 田原聖隆, 村松良二, 松林芳輝, 紀平茂雄, 高田亜佐子, 藤井千陽, 横田真輝, 玄地裕, 第 9 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, (2013), pp. 174-175.

耐久財の製品寿命分析に関する研究動向

A Review of Product Lifetime Analysis of Durable Goods

○西嶋大輔*[1) 2)]、加河茂美 [1)]、小口正弘 [2)]
Daisuke Nishijima, Shigemi Kagawa, Masahiro Oguchi
1)九州大学, 2) 国立環境研究所
* nishijindaiko@gmail.com

1. はじめに

製品寿命は、製品が私たちの社会で“生きる”期間を示すものであり、需要予測、廃棄物の発生量、マテリアルフロー、耐久財由来の環境負荷を推計するうえで不可欠な要素である。それと同時に製品寿命のモデル化や推計方法、製品寿命の構成要素の特定などの研究も発展してきた。他方で、“大量生産大量消費社会”から“循環型社会”への転換に対する注目が高まってきている。特に欧米では、“Circular Economy”と呼ばれる経済の実現が叫ばれており、Nature 誌でもこの Circular Economy に関する論文が掲載されるなど、その重要性がますます高まってきている(Stahel, 2016) [1)]。その転換を実現するうえで、製品寿命は注目すべきテーマの一つであり、学術分野だけでなく世界でも製品寿命が重要になってきているといえる。こうした背景から、製品寿命に関する先行研究をレビューし、今後の製品寿命についての研究の方向性を議論することは有益であると考えられる。本研究は製品寿命に関わる先行研究のレビューをし、それらの研究がもたらした貢献を踏まえたうえで、将来の製品寿命にまつわる研究の展開について議論することを目的とする。

2. これまでの製品寿命に関わる研究分野

2.1 製品寿命を用いた実証研究

製品寿命は、ストックやマテリアルフローを推計するうえで重要な要素であり、多くの先行研究では製品寿命モデルが用いられている [2)]。また、環境システム分析でも製品寿命モデルを用いた研究が多く行われてきている [3)]。製品寿命に関する先行研究としては、当該製品を買い替えるべきか否かについて実証的な LCA 研究が行われている [4)]。さらに、循環型社会や Circular Economy といったテーマが注目されるなか、製品の長期使用や長寿命化が大きなトピックの 1 つとなっており、製品の長寿命化に焦点を当てて、その環境や経済への影響に関する分析もなされている [5)]。

このように、多くの分野で製品寿命モデルは用いられており、製品寿命あるいは製品寿命モデルが多くの研究分野と密接に関わっているといえる。そのため、製品寿命モデルの設定方法が研究結果に与える影響は大きいと考えられ、その影響の大きさについて指摘する研究も存在する [6)]。そこで、具体的な製品寿命モデルの推計に関する研究について見ていく。

2.2 製品寿命の推計に関する研究

これまでの先行研究では、製品寿命モデルとして寿命分布関数が多く用いられてきた。寿命分布関数は、製品の使用期間の長さとその製品の寿命（あるいは、製品の生存割合）の関係を分布関数で定量的に表したものである。寿命分布の研究分野では、その定義や推計方法、寿命分布の推計方法の発展や簡便化などが研究として進んでいる [7)]。

一方で、経済学やマーケティングの分野でも、寿命分布とは異なる製品寿命モデルが展開されている。それは、経済学の効用最大化理論に基づく買い替えモデルの推計である。これは、製品の保持と買い替えそれぞれの便益を比べ、便益が最大となるように消費者が行動を選択するということをモデル化した製品寿命モデルである。この製品寿命モデルについても、多くのモデルが提案されている [8)]。

2.3 製品買替・寿命の決定プロセスに関する研究

どういった要因が製品寿命や買い替え行動に大きな影響を及ぼしているかという点も、製品寿命を考えるうえで不可欠である。その要因として、生産者側の要因と消費者側の要因が考えられる。

生産者側の視点での製品寿命への影響は、しばしば Planned Obsolescence という形で述べられている。Planned Obsolescence は、消費者が買い替えを頻繁に行うように、寿命を短くするよう意図的に製品を設計することであり(Fishman et al., 1993) [9)]、結果として生産量や廃棄量が増やされ、環境負荷が増大されることとなる。この Planned Obsolescence については、その必要性や引き起こされる要因についての研究が存在する [10)]。消費者側の製品寿命を決める要因の特定については、消費者に対するアンケート調査を中心に、製品寿命と消費者心理や消費者行動の関係性についての研究が盛んに行われてきている [11)]。

計量経済学の手法を用いた研究もあり、買い替え行動と複数の要因の関係について定量的な分析が為されている [12)]。経済学の分野では、どのようにして製品寿

命が決まるのかについて理論モデルを構築し説明するものもある。こういった理論モデルは、製品寿命がどのように決まるのかについてのダイナミクスを直感的に理解するうえで大きな役割を果たし得る [13]。

2.4 その他の製品寿命に関わる研究分野

その他では、ある期間の環境負荷を最小にする買い替えサイクルを計算する手法の研究分野もあり、Life Cycle Optimization (LCO)モデルなどがその分野の研究として挙げられる [14]。

製品設計という観点から、環境負荷を減らすための製品寿命に関する研究を行っているものもあり、どういった製品設計を行えば消費者の買い替え行動に影響を与えられるかという議論も行われている [15]。

3. これからの製品寿命に関する研究

これまでの製品寿命にまつわる先行研究について述べてきた。その概略図を図 1 に示す。これらの研究分野の貢献を踏まえ、将来の製品寿命研究の方向性として､以下のことが重要になるのではないかと考える。

1 つ目は、製品寿命の決定プロセスや構造の詳細な解明である。これまでの先行研究でも製品寿命の決定プロセスについて研究が進んできたが、多種多様で複雑であり、未だ製品寿命のメカニズムは明らかになっていない。そのため、製品寿命を決める要因の関係性や影響の度合いを明らかにすることは、今後の様々な研究分野において極めて重要であると考えられる。

2 つ目は、寿命に関するデータの整備と推計方法の発展である。寿命データやその推計は発展してきているものの、まだ不十分である。特に、経済成長著しく今後重要な位置を占めると考えられる東南アジアの寿命データが乏しい。また、寿命分布は販売台数や残存台数、廃棄台数などを用いて推計されるが、製品の性能別や機能別のデータも乏しい。同じカテゴリーの製品でも、その性能の大きさや特定の機能の有無によって製品寿命の特長は異なると考えられるが、現状ではその考慮が十分に為されていない。そうした問題を解決するための寿命に関するデータの蓄積が急務である。また、限られたデータの中で寿命を推計しなければならない場合もあり、その点で寿命分布の推計手法の発展も今後の重要な研究分野である。

3 つ目は､研究分野同士のコラボレーションである。今回紹介した研究分野のなかには、分野同士で関わっている場合もあるが、それぞれの分野で独自に発展を遂げてきたものが多い。これらの分野がよりコラボレーションすることで、研究の更なる発展が期待できると考えられる。

本研究が製品寿命に携わる研究者にとって何らかの役に立つことができれば非常に幸いである。

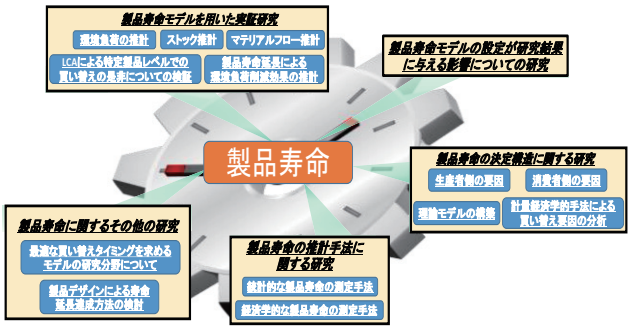


図 1 製品寿命に関する研究分野

引用文献

1) Stahel W. R.: Nature, 531, (2016), 435–438.
2) Yoshida A., Tasaki T., Terazono A.: Waste Manag., 29, (2009), 1602–1614.
3) Pauliuk S., Dhaniati N. M. A., Müller D. B.: Environ. Sci. Technol., 46, (2012), 140-147.
4) Tasaki T., Motoshita M., Uchida H., Suzuki Y.: J. Ind. Ecol., 17 (2), (2012), 290–298.
5) Kagawa S., Kudoh Y., Nansai K., Tasaki T.: Econ. Sys. Res., 20 (1), (2008), 3-28.
6) Aktas C.B. Bilec M. M.: Int. J. LCA, 17, (2012), 337–349.
7) Oguchi M., Murakami S., Tasaki T., Daigo I., Hashimoto S.: J. Ind. Ecol., 14 (4), (2010), 613-626.
8) Rust J.: Econometrica, 55(5), (1987), 999-1033.
9) Fishman A., Gandal N., Shy O., J. Ind. Econ., 41 (4), (1993), 361–370.
10) Guiltinan J.: J. Business Ethics, 89, (2009), 19-28.
11) Cooper T.: J. Consumer Policy, 27, (2004), 421–449..
12) Bayus B. L. and Gupta S.: Int. J. Res. in Mark., 9, (1992), 257–267.
13) Brouillat E.: J. Evol. Econ., 25, (2015), 447–473.
14) Kim H. C., Keoleian G. A., Grande D. E., Bean J. C.: Environ. Sci. Technol., 37, (2003), 5407–5413.
15) Nes N. V., Cramer J.: Business Strategy and the Environ., 14, (2005), 286–299.

部品の段階まで考慮したプラスチックのマテリアルフローの分析と寿命関数の推定

Analysis of Material Flow of Plastic Considering Parts and Estimation of Life Function

○丸山多聞*[1)]、中谷隼 [1)]、森口祐一 [1)]

Tamon Maruyama, Jun Nakatani, Yuichi Moriguchi

1) 東京大学

* maruyama@env.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

プラスチックの廃棄に伴う環境負荷を削減する手段として 3R が推進されている。プラスチックは 6 つの個別リサイクル法の対象製品の内 5 つに含まれており、個別製品の枠組みを超えた素材としてのプラスチックのリサイクルのあり方も検討されている [1)]。

一方で、使用済み製品の回収方法やリサイクル技術を含めたリサイクルシステムの設計には、製品を構成する樹脂種類や部品形態と、製品の最終需要先の把握が欠かせない。

本稿では、日本国内で使用されるプラスチックを含むあらゆる製品を対象として、それらの製品別および樹脂別のマテリアルフローを産業連関表 [2)]を用いて分析した。このとき、樹脂と最終製品間の投入関係だけでなく、その経路上の中間的な製品についても分析した。また、各製品の寿命関数を推定し、各製品に対する樹脂の投入量とあわせることで、各年における廃プラスチックの排出量を分析した。

産業連関表を利用したマテリアルフロー分析の既往研究としては中村 [3)]らや中島ら [4)]があり、中村ら [3)]は廃棄物産業連関表を用いた分析手法の開発と金属への応用、中島ら [4)]は PVC への応用を行っている。しかし、全国レベルでのプラスチック廃棄物の排出量推計を目的とした、樹脂別製品別最終需要先別のプラスチックフローの分析事例は存在しない。

2. 分析手法

2.1 誘発樹脂投入量の分析

SI1 で作成した産業連関表から、樹脂p→樹脂投入先i→最終製品j→最終需要先kの樹脂のフローを分析した。このとき、樹脂が直接最終製品や最終需要先に投入される場合（p→j→kやp→k）も考慮した。

各段階での樹脂誘発量$q_{p,i,j,k}$ $q_{p,j,k}$, $q_{p,k}$（単位は物量）は以下の(10)~(12)式によって求められる。

$$q_{p,i,j,k} = f_{j,k} \times \left(b_{i,j} - \delta_{i,j}\right) \times a_{p,j}/u_p \quad (10)$$

$$q_{p,j,k} = f_{j,k} \times a_{p,j}/u_p \quad (11)$$

$$q_{p,k} = f_{p,k}/u_p \quad (12)$$

（$f_{j,k}$：kに投入されるjの金額、$b_{i,j}$：jに究極的に投入されるiの金額、$a_{p,i}$：iに直接投入されるpの金額、u_p：pの単価、$\delta_{i,j}$：単位行列Iの要素（$i = j$のとき 1, $i \neq j$のとき 0 をとる））

2.2 寿命関数の推定

田崎ら [5)]は乗用車と家電 4 品目、小口ら [6)]は小型家電の使用済み台数を推計しており、出荷台数と使用済みとなる割合から使用済み台数を求めている。

t年度末において使用年数y年までに使用済みとなった割合$W_t(y)$がワイブル分布の累積確率密度関数で表されるとし、以下の式により求めている。

$$W_t(y) = 1 - exp[-\{y/\bar{y_t}\}^b \times \{\Gamma(1 + 1/b)\}^b] \quad (13)$$

（$\bar{y_t}$：平均使用年数、Γ：ガンマ関数、b：使用年数分布の幅）

(13)式より、$\bar{y_t}$とbにより使用済み割合が決まるので、製品ごとの平均使用年数および分布の幅の根拠となる調査データを収集し、寿命関数を求めた。

3. 分析結果

3.1 誘発樹脂投入量の分析結果

SI1 で作成したプラスチック製品部門を分割した産業連関表、および 2.1 で述べた分析方法によって、どのような最終需要先kからの最終製品jへの需要が樹脂投入先iを経て樹脂pをどれだけ誘発するかを示したフロー（誘発生産フロー）の図を作成した。

図の左側からp→i→j→kとなり、それぞれの箱の大きさ、線の太さが誘発量の多さを示している。

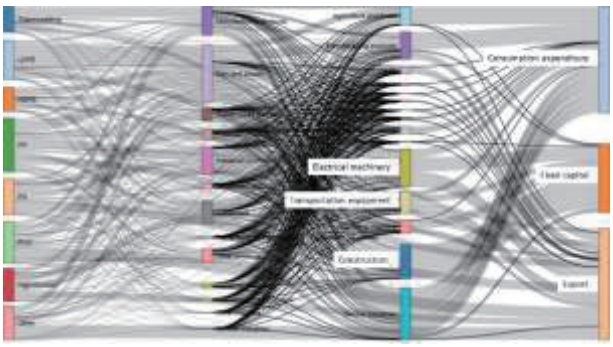


図 1 日本全国でのプラスチックの誘発生産フロー

樹脂投入先ではプラスチック製品への誘発量が多く、最終製品では電気機械、輸送機械、建設への誘発量が多い。また、樹脂の直接輸出も多く、製品と

して輸出される樹脂と同等の量である。

プラスチック製品部門の分割により各jに各種類のpがどのような部品の形で投入されるか分析できる。

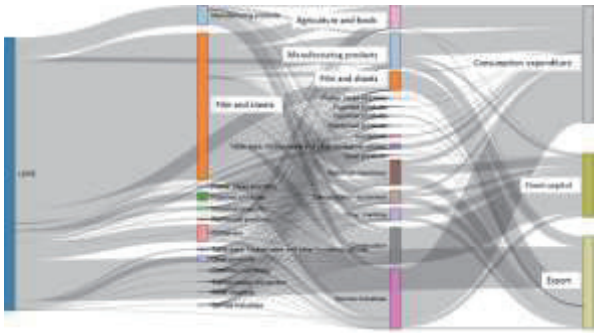


図 2 低密度ポリエチレンの誘発生産フロー

消費支出から飲食料品（食品容器等）や工業製品、輸出からフィルム・シートが最終製品として需要され、樹脂投入先としてフィルム・シートを経て低密度ポリエチレンが誘発されるフローが大きい。

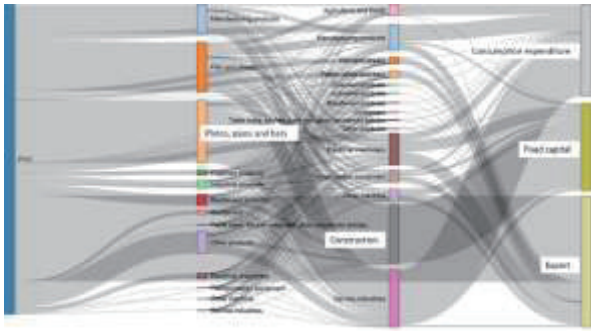


図 3 塩化ビニル樹脂の誘発生産フロー

固定資本から最終製品として建設が需要され、樹脂投入先として板・管・棒を経て塩化ビニル樹脂が誘発されるフローが大きい。樹脂の輸出も多い。

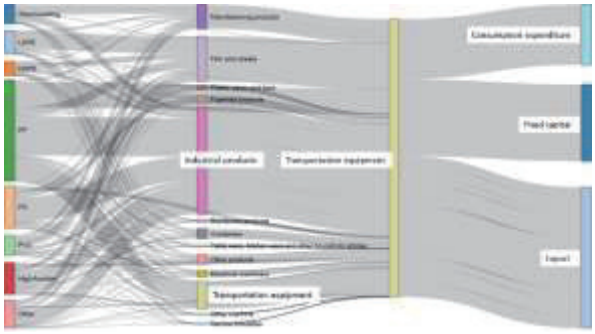


図 4 輸送機械への需要に伴う樹脂の誘発生産フロー

輸送機械によって誘発される樹脂はポリプロピレンが最も多く、輸送機械から直接誘発されることもある。また、輸送機械が誘発する部品は工業用プラスチック製品と輸送機械が多い。最後に輸送機械は輸出から誘発されることが多くなっている。

3.2 樹脂排出量の推定結果

最終製品jにより誘発される樹脂pの量を$q_{p,j}$と定義すると$q_{p,j}$は以下の式によって求められる・

$$q_{p,j} = \sum_i \sum_k \left(q_{p,i,j,k} + q_{p,j,k}\right) \tag{14}$$

各最終製品jについて(13)式の$\overline{y_t}$とbを推定し、輸出を除いた最終需要先の$q_{p,j}$の和に乗じることで、2000 年に出荷された各樹脂の排出量を求めた。ただしサービス業については寿命関数を設定していない。

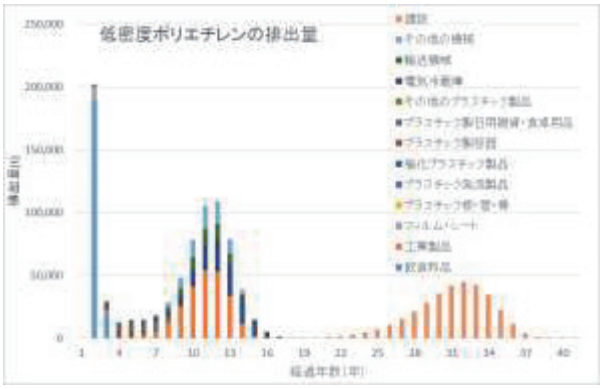


図 5 2000 年出荷の低密度ポリエチレンの排出量

1 年以内に飲食料品に伴うプラスチック（食品に伴う容器包装など）、5 年程度で日用雑貨や食卓用品、10 年程度で工業製品や機械、30 年程度で建設に伴うプラスチックが排出される。同じ樹脂でも用途により排出される時期が異なることが分析できた。

4. おわりに

本稿では、産業連関表のプラスチック製品部門の分割を行い、プラスチックを含むあらゆる製品について、樹脂→部品→製品のフローを分析した。さらに、各最終製品について寿命関数をワイブル分布により推定することで、2000 年に出荷された樹脂の排出量を分析した。

ただし、本稿での結果は最終需要に伴い誘発される樹脂の投入量を示したものであり、加工段階での樹脂のロスや、サービス業において利用されるプラスチック製品など、最終需要先に投入されない樹脂を区別できていない。それらの製品に対しても最終製品の寿命関数を適用しているため、樹脂の排出時期の推計が不正確である可能性がある。今後は、樹脂投入先での加工ロスや最終製品に付属する容器包装のような最終製品でない製品の寿命関数を考慮することで分析の精度を向上させる。

謝辞

本稿は、環境研究総合推進費 1-1601 の一環としてまとめられた。

引用文献は SI に示した。

Supporting Information

SI1. プラスチック製品部門の分割

産業連関表の取引基本表の列部門では、「プラスチック製品」という 1 部門にフィルム・シート、機械部品、建材などの用途も単価も異なる製品がひとまとめにされているので、「プラスチック製品」部門を行方向、列方向ともに 51 部門（産業連関表の 10 桁コードに対応）に分割する。

産業連関表を分割した後の各内生部門を樹脂部門、プラスチック製品部門、樹脂投入先部門、最終製品部門に分類した。

表 1　各内生部門、最終需要部門の文字による定義

樹脂	p
プラスチック製品（分割後）	h
プラスチック製品分野（プラスチック製品統計の定義）	h'
樹脂投入先	i
最終製品	j
最終需要先	k

（ただし、iとjはp以外のすべての部門を含む）

分割後のプラスチック製品部門hは、樹脂pの投入比率がそれぞれ異なるので、プラスチック製品hに投入される樹脂pの量を求める。

$$\sum_{h=1}^{51} q_{p,h} = Q_p \tag{1}$$

（$q_{p,h}$：分割後のhに投入されるpの量、Q_p：分割前のプラスチック製品部門に投入されるpの量）

Q_pは物量表から既知である。

$q_{p,h}$は以下のように求められる。

$$q_{p,h} = q_h^{resin} \times \varepsilon_{p,h'} \times c_{h',h} \tag{2}$$

（q_h^{resin}：hに投入される樹脂の総量、$\varepsilon_{p,h'}$：h'に投入されるpの比率、$c_{h',h}$：h'とhの対応行列の要素）

$\varepsilon_{p,h'}$は以下のように求められる。

$$\varepsilon_{p,h'} = \varepsilon_{p,h'}^{st} \times \lambda_{p,h'} \tag{3}$$

（$\varepsilon_{p,i'}^{st}$：プラスチック製品統計から求められるh'に投入されるpの比率、$\lambda_{p,h'}$：樹脂投入比率補正係数）

また、$\varepsilon_{p,h'}$は以下の(4)式を満たす。

$$\sum_{p=1}^{8} \varepsilon_{p,h'} = 1 \tag{4}$$

$c_{h',h}$は製品の定義から求められるが、1 つのhは 1 つまたは複数のh'に対応し、(5)式を満たす。

$$\sum_{h'=1}^{11} c_{h',h} = 1 \tag{5}$$

q_h^{resin}は以下のように求められる。

$$q_h^{resin} = q_h^{prod} \times \alpha_h \tag{6}$$

（q_h^{prod}：hの数量、α_h：hの中の新規樹脂の割合）

α_hは以下のよう求められる。

$$\alpha_h = \alpha_{h'} \times c_{h',h} \tag{7}$$

（$\alpha_{h'}$：h'に投入される新規樹脂の割合）

$\alpha_{h'}$はプラスチック製品統計から求められる。

q_h^{prod}は以下のように求められる。

$$q_h^{prod} = \frac{X_h}{u_h} \tag{8}$$

（X_h：hの国内生産額、u_h：hの単価）

X_hは産業連関表から既知である。

u_hは以下のように求められる。

$$u_h = u_{h'}^{st} \times c_{h',h} \times \beta_h \tag{9}$$

（$u_{i'}^{st}$：プラスチック製品統計から求められるh'の単価、β_h：hの単価補正係数）

(4)式、(5)式の条件の下で、(1)式を満たすように$\beta_h, \lambda_{p,h}, c_{h',h}$を求めることで、プラスチック製品$h$に投入される樹脂$p$の量$q_{p,h}$が求まる。この$q_{p,h}$を樹脂の単価で割り戻すことで、プラスチック製品部門が分割された金額単位の産業連関表を作成した。

SI2. 樹脂誘発量の分析結果における文字と部門の対応関係

産業連関表の内生部門を統合して飲食料品、工業製品、プラスチックフィルム・シート、プラスチック板・管・棒、プラスチック発泡製品、工業用プラスチック製品、強化プラスチック製品、プラスチック製容器、プラスチック製日用雑貨・食卓用品、その他のプラスチック製品、電気機械、輸送機械、その他の機械、建設、サービス業部門を作成しiとjとした。また、最終需要部門を統合して消費支出、固定資本、輸出等部門を作成しkとした。

SI3 引用文献

1) 環境省：”素材別リサイクル戦略マップ策定に向けた調査・検討の中間報告について”,　環境省 HP, http://www.env.go.jp/press/102551.html（参照 2016-12-31）

2) 総務省統計局：“平成 12 年度産業連関表”, (2000), http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/（参照 2016-12-31）

3) 中村愼一郎, 中島謙一, *日本金属学会誌*, 70(6), (2006), pp505-510

4) 中島謙一, 中村愼一郎, 松八重（横山）一代, 近藤康之, 長坂徹也, *廃棄物資源循環学会誌*, 20(5), (2009), pp206-211

5) 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), pp49-58

6) 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), pp50-60

水銀排出による世界各国の健康影響評価

Health impact assessment by mercury emissions in the world

○佐藤祐也*[1)]、小野雄也 [2)] 、伊坪徳宏 [1)]
Yuya Sato, Yuya Ono,Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学, 2) 東京大学生産技術研究所
* g1362062@tcu.ac.jp

1. はじめに

2013 年に水銀の扱いを規制する水俣条約が採択された。UNEP の「Global mercury assessment 2013」によると、世界における水銀の人為的による排出は年間で 1960 トンであり、中でも小規模金採掘と石炭火力発電によるものが大きいと報告されている。特に、小規模金採掘での排出は LCA の最上流に位置し、採掘国に深刻な影響を与える恐れがある一方で、金は様々な電気製品を通じて世界で広く利用されるため、両者の定量的な関係づけは難しい。国際産業連関分析を用いて水銀の排出量とその要因を最終製品の環境評価において関連付けられれば、最終製品の使用者である消費者の意識高揚を通じて水銀の排出量を抑えるための手段として活用することが期待される。

2. 研究目的

本研究では世界各国を対象として、国ごとに水銀排出量や排出要因について産業連関分析を用いて評価することで、消費と水銀排出の全量的関係付けを行った。また排出に関しては消費ベースでの評価を行うことで、消費国における責任や生産国に対する被害を定量的に算出して評価を行う。

3. 研究方法

3.1 各国における水銀排出量の算定方法

UNEP の「Global Mercury Assessment 2013」[1)]のデータから、アジア、欧州、アフリカ、中南米、オーストラリア・オセアニア、北米、その他地域の 7 つの地域に分類した。排出要因の部門については、石炭燃焼、石油・ガス燃焼、石油精製、銑鉄・銑鋼、非鉄金属、水銀、大規模金採掘、セメント、小規模金採掘、塩素アルカリ、廃棄物、火葬の 12 部門に分類した。この 7 地域 12 部門からの水銀の排出量を基に、評価を行った。水銀排出量の地域別・部門別のデータを表 1 に示す。

表 1:世界各地域の年間水銀排出量[1)]

t/年	アジア	欧州	アフリカ	その他	中南米	大洋州	北米
石炭燃焼	2.79E+02	6.62E+01	6.02E+01	0.00E+00	6.79E+00	3.59E+00	4.25E+01
石油・ガス燃焼	5.90E+00	1.69E+00	6.65E-01	0.00E+00	1.26E+00	6.19E-02	8.43E-01
石油精製	1.09E+01	2.89E+00	1.89E-01	0.00E+00	3.11E-01	6.19E-02	1.85E+00
銑鉄・銑鋼	2.74E+01	8.58E+00	3.63E-01	0.00E+00	4.74E+00	6.19E-02	1.18E+00
非鉄金属	1.01E+02	3.27E+01	1.25E+01	0.00E+00	4.20E+01	4.34E+00	1.66E+00
水銀	1.00E+01	1.89E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
大規模金採掘	2.09E+01	1.37E+01	3.36E+01	0.00E+00	2.65E+01	1.26E+01	1.66E+00
セメント	1.20E+02	1.69E+01	1.28E+01	0.00E+00	1.09E+01	6.81E-01	3.04E+00
小規模金採掘	3.39E+02	2.99E+01	1.99E+02	0.00E+00	1.80E+02	0.00E+00	0.00E+00
塩素アルカリ	3.73E+00	1.58E+01	1.61E+00	0.00E+00	4.33E+00	0.00E+00	1.01E+00
廃棄物	4.87E+01	1.17E+01	8.19E+00	0.00E+00	1.45E+01	7.43E-01	6.24E+00
火葬	2.14E+00	4.86E-01	3.63E-01	0.00E+00	4.90E-01	1.24E-01	6.74E-01

地域単位で算出されている各部門の排出量(表 1)を生産額で按分して国単位の排出量を得た。国際産業連関表の各部門における水銀排出の直接係数を d とした。また、国際産業連関表における正方行列の逆行列を、プログラミング計算ソフトである MATRAB を用いることで算出した。直接係数 d にこの逆行列を乗じることにより、間接的排出を考慮した国際産業連関表の各部門の生産額あたりの水銀排出量 e を算出した。また、生産額あたりの水銀排出量 e に国際産業連関表の各部門の最終需要 f を乗じることにより、国際産業連関表の各部門の水銀排出量を算出した。これらの値を国ごとに統合することにより、各国の水銀量フットプリント(消費ベースの水銀排出量)を算出した。国際産業連関表の各部門の生産額あたりの水銀排出量 e までの算出方法を図 1 に示す。

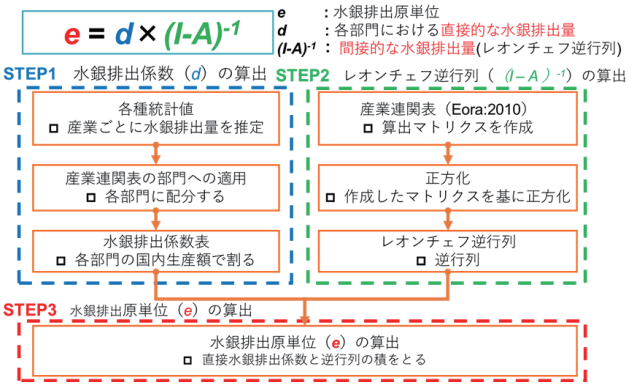


図 1:原単位算出までの流れ

3.2 評価範囲

全世界 193 ヶ国を対象に、各国からの水銀排出量を

消費ベースで算出した。消費ベースは、対象国内で消費される財やサービスを対象に生産から消費するまでに発生する水銀消費量の合計(輸入材も含む)で表す。

4. 算定結果

4.1 世界各国の水銀排出量

世界各国の水銀量フットプリントの結果を図 2 に示す。世界の総排出量 1960 トンに対して、中国における排出量が約 500 トンで、南アフリカの 200 トンが次いで大きく、日本はアメリカと同じく 120 トンと推定された。中国、南アフリカ、ブラジルといった新興国のほか、日本、アメリカ、ドイツなどの先進国のフットプリントは金等を消費する電気電子機器の生産・輸入等によるものと考えられる。

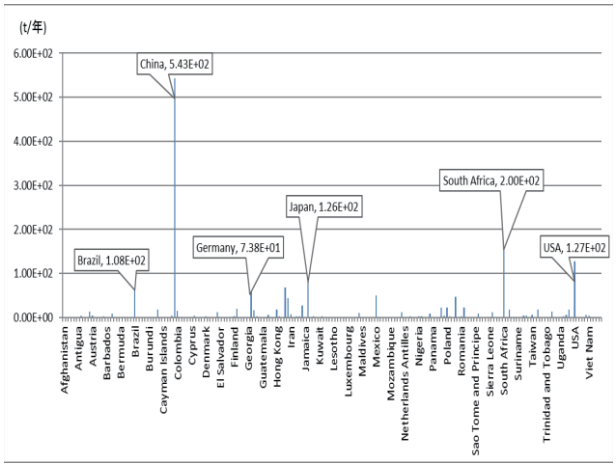


図 2:世界各国の水銀フットプリント

4.2 水銀排出量上位 10 ヶ国における影響国内訳

水銀排出量上位 10 ヶ国における影響国内訳の結果を図 3 に示す。結果として、自国での排出量が大きく占める国(中国、南アフリカ、ブラジル、インドネシア等)と他国での排出量が半分、もしくはそれ以上の国(アメリカ、日本、韓国等)に分かれた。自国の排出量が大半を占める国は共通して、金の採掘を行っている。これらの国は、自国で採掘した金を自国で消費する傾向が強い。一方、他国での排出量が半分を占める国は、製造業、特に電子電気機器産業が盛んであることが挙げられる。金などの希少金属を他国から輸入し、それらを原材料として製品製造すること、火力発電に石炭を主に利用していることが、共通している。

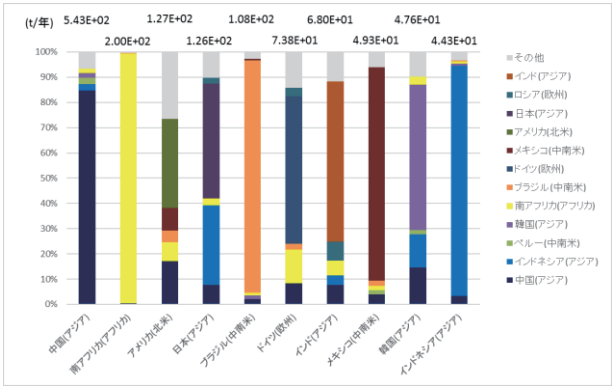


図 3:水銀排出量上位 10 ヶ国における影響国内訳

4.3 世界各国の一人当たりの水銀排出量

図 2 に示した値を、世界各国の人口[2]で除して算出した、世界各国における一人当たりの水銀量フットプリントを図 3 に示す。図 2 における結果では、中国での排出量が大きくなっていたが、図 3 における結果では各国に比べて小さくなった。また、図 2 における結果では小さかったガイアナ共和国が、図 3 の結果では大きくなった。中国の人口は多く、ガイアナの人口は小さいため、一人当たりのフットプリントが変動した。

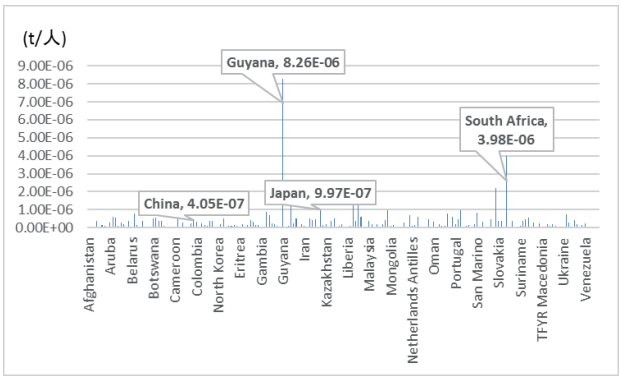


図 3:世界各国の一人当たりの水銀フットプリント

まとめ・課題

本研究では、国際産業連関分析を用いて世界各国の水銀量フットプリントについて評価した。課題として、国際産業連関表の部門が粗く、本来水銀の排出されない部門から水銀が排出されてしまうと扱われる部分があることを解消することが求められる。特に、火力発電や鉱物資源採掘における細分化は結果の精度を高めるうえで重要な検討課題と考えられる。

参考文献

1) UNEP：Global Mercury Assessment 2013
2) 国際連合経済社会局人口部：世界の人口推計 2011 年版〈https://esa.un.org/unpd/wpp/〉

CO_2 施用を考慮した 2 段式 PSA による水素精製の LCA 評価

Life Cycle Assessment of hydrogen purification by pressure swing adsorption in consideration of CO_2 fertilization

○永石平*[1)]、井手啓介 [1)]、亀山光男 [2)]、堂脇清志 [1)]
Taira Nagaishi, Keisuke Ide、Mistuo Kameyama、Kiyoshi Dowaki
1) 東京理科大学, 2)株式会社ジャパンブルーエナジー
* 74115614@ ed.tus.ac.jp

1. 背景

水素製造方法は化石燃料に含まれる炭化水素の水蒸気改質法、部分酸化法が挙げられるが、ライフサイクルアセスメント(以下 LCA)の観点から考えると、温室効果ガス排出に大きく寄与していると考えられる。従って、本研究ではカーボンニュートラルの性質を有するバイオマスを原料とした水素製造を考え、特に、高濃度の H_2 の生成が期待できる還元雰囲気下のガス化方式であるブルータワープロセス(以下 BT プロセス)に着目した。

自動車用等の燃料電池用の水素精製では、通常圧力変動スイング法(Pressure Swing Adsorption 以下 PSA)により精製されるが、昇圧のためのコンプレッサー動力が、効率的な水素の回収を実施している。一方、このコンプレッサーの圧縮動力に必要なエネルギーは化石燃料由来の外部電力より供給しているため、環境貢献度が低下すると指摘されてきた [1)]。そこで、著者らは PSA プロセスにおいて、作動流体の減少に伴う加圧動力の削減に着目し、水素精製前段に CO_2 吸着を取り入れた二段式の水素精製実験装置(以下 2-step PSA)を提案し実証した。

この 2-step PSA では、CO_2 の吸着剤にはハスクレイと呼ばれる非晶質アルミニウムケイ酸塩を使用し、CO_2 の吸着除去行った後、ZeoliteA-5 にて水素精製を行うシステム、これまでの検討結果からエネルギー効率及び CO_2 削減効果が示唆されている [2)]。

一方、分離した CO_2 は地中貯留といった方法で、地中内に封入するという提案がなされているが、コスト面での多くの課題が指摘されている [3)]。そこで、本研究では、分離、回収した CO_2 を野菜に施用するシステムを考案した。この場合、野菜などの植物は CO_2 施用による光合成の促進から、収量が増加するという特徴があり、冬季で日射の少ない北米地域では日射量不足を補う CO_2 施用の実用化が進められており [4)]、同時に、後に植物にバイオマス由来の CO_2 を吸収させることによりネガティブエミッションが期待される。

以上のような背景の下、本研究ではバイオマス由来水素の精製プラントと施設園芸の複合化システムを想定し、ほうれんそうの光合成による CO_2 吸着試験の結果を考慮するとともに、2 段式 PSA による水素精製の CO_2 削減効果について検証した。

2. 条件設定

本研究にて実施する CO_2 施用を考慮した、2-step PSA による水素精製の LCA の評価範囲を Fig.1 に示す。なお、ここでの評価範囲は、プロセス変更の影響を検討することを目的としているため、Gate to Gate による分析であり、プラント内での評価に留めていることに注意されたい。

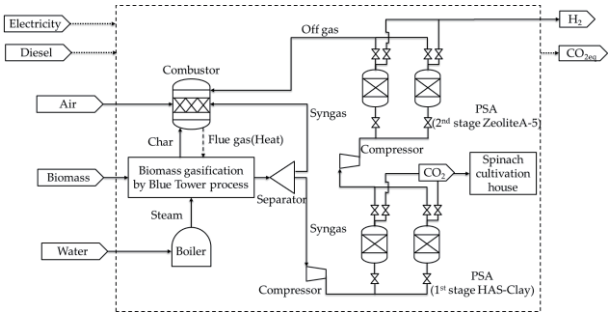


Figure1 LCA system boundary

このとき、水素製造原料となるバイオマスは鉛筆製造時にて排出されたおが屑(株式会社北星鉛筆提供)とし、BT プロセスに基づいて製作したラボスケールの実験装置を用いてガス化試験を実施した。以下に実験結果を水素製造のインベントリとして利用した(Tab.1)。

Table1 Result of gasification experiment

Pressure[MPa]	0.1013
PyrolysisTemperature[K]	550
Reforming temperature[K]	950
gasifying agent(steam)[ml/min]	0.04
Gas component[%]	
H2	55.7
CO	18.9
CH_4	17.0
CO_2	8.4
C_2H_4	0.0
C_2H_6	0.0
Char[g/g-biomass]	0.214
Tar[g/g-biomass]	0.036
Cold gas efficiency[%]	68.2
Syngas volume[NL/g-biomass]	1.098
Hydrogen yield[Nm^3/g-biomass]	10.9×10^{-5}

また、本研究における BT プロセスのプラント規模はおが屑の発生量を考慮した結果、12 ton-dry/day とした。

次に、Tab.1 より得られた合成ガスのガス組成から標準ガスを作成し、2-step PSA による CO_2 吸着及び水素精製実験を行った。ガス化試験同様、この時の実験結果を 2-step PSA のインベントリデータとした。このとき、前述したように CO_2 吸着塔にはハスクレイ(株式会社戸田工業提供)、水素精製プロセスには ZeoliteA-5(株式会社和光純薬)を用いた。Tab.2、Tab.3 にそれぞれ吸着剤の物性と 2-step PSA 試験結果を示す[4]。

Table2 Physical property of adsorbents

	HAS-Clay	Zeolite A-5
Surface area [m^2/g]	399	327
Pore size [nm]	1.64	0.5
Particle size [mm]	3.4	3.35
Bulk density[kg/m3]	290	750

Table3 2-step PSA performance

Adsorbent volume[ml]	200
Temperature[K]	303.15
Adsorption pressure [MPa]	0.5
Purge pressure [MPa]	0.1
H_2 recovery efficient [%.LHV]	55
CO_2 recovery efficient [%.LHV]	62.6

本研究では、CO_2 施用を施したほうれんそうの CO_2 吸収量を測定し、その吸収量を加味した水素燃料の CO_2 排出量を次式のように評価した((1)式参照)。

$$FCO_2 = \frac{C_1 + C_2 + C_{aux} - \alpha C_{fs}}{Q_{H_2}} \qquad (1)$$

ここで、Q_{H2} は水素の低位発熱量[MJ]、C_1[g-CO_2]は第一吸着塔におけるコンプレッサーの動力消費量に対する CO_2 排出量、C_2[g-CO_2]は第一吸着塔におけるコンプレッサーの動力消費量に対する CO_2 排出量であり、第一吸着塔にて生じた圧力損失分をコンプレッサーにて昇圧している。なお、C_{aux}[g-CO_2]は BT プロセスにおけるバイオマスガス化の際、補助動力として消費した電力に対する CO_2 排出量、C_{fs}[g-CO_2]は合成ガス中に存在 CO_2、α はほうれんそうの CO_2 施用による CO_2 吸収割合を示している。また、CO_2 施用の濃度は、文献値から 1000ppm 設定した[6]。従って、大気中に含まれる CO_2 濃度は 390ppm であるため、610ppm 分、ハスクレイより分離、回収した CO_2 を富化させた。このときの、ほうれんそうの栽培はフェンロー型の温室栽培(植物工場)を想定した。植物工場のサイズは引用文献より高さ 4m、幅 9.6m、奥行き 100ｍとし、総床面積が 1ha となるように、施設を併設することを仮定した。

3. 結果

まず、2-step PSA を導入した場合と従来型 PSA6)による動力の比較を行った(Fig.2)。

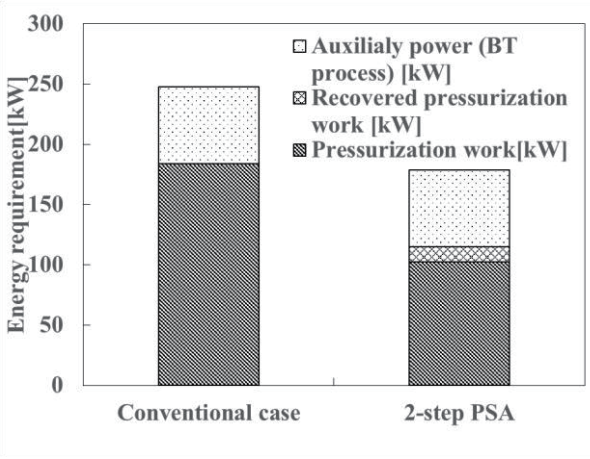


Figure2 Conventional case[7] vs 2-step PSA

上記の結果より、二段目では一段目より CO_2 吸着によって圧力が減少するため、再び所定圧力まで昇圧する必要があるが、トータルのエネルギー消費量を比較すると加圧動力によるエネルギー消費量を大幅に改善されたことが確認された。

一方、日照時間を 16 時間とし、α=1 とした時の FCO_2 の値は-36.37g-CO_2/MJ となった。この結果から、ハスクレイにより分離、回収した CO_2 を植物の施用に用いると、仮に日照時間外では CO_2 を大気放出したとしても、CO_2 排出量低減に繋がることが示唆された。
また、ほうれんそうの CO_2 吸収量の測定結果を反映した評価指標の結果を報告する予定である。

4. 引用文献

1) 大久保塁ほか: エネルギー・資源学会, 34 (6), (2013), pp.1-9
2) 堂脇清志ほか: 日本エネルギー学会, 95 (8), (2016), pp.615-620
3) 田中浩二: 石油技術協会, 76 (6), (2011), pp.517-521
4) 谷川孝弘ほか: 園芸学会, 61 (4), (1993), pp.873-878
5) Kiyoshi Dowaki et al.: “4th Asian conference on biomass science”, Penang, pp.158-165
6) Christine, B, Hans-Peter, K: Food Chemistry, 199, (2016), pp.736-745
7) 渡辺 佑太朗ほか: 日本 LCA 学会, 9 (1), (2013), pp.20-36

福井県あわら・坂井地域における
木質バイオマス熱供給事業の温室効果ガス削減効果

GHG Emission Reduction Effect Created by the Heat Supply Project Utilizing Woody Biomass in the Awara-Sakai Region of Fukui Prefecture

○柴原尚希*[1)]，高城玲奈[2)]，大城謙治[3)]，酒井洋美[4)]，小林靖尚[2)]，西川浩一[4)]，壁谷武久[1)]
Naoki SHIBAHARA, Reina TAKI, Kenji OSHIRO, Hiromi SAKAI, Yasuhisa KOBAYASHI, Koichi NISHIKAWA, Takehisa KABEYA
1)産業環境管理協会，2)アルファフォーラム，3)マルツ電波，4)坂井森林組合
* shibahara@jemai.or.jp

1. はじめに

近年、地域内で生産される木質バイオマスをエネルギー源とする熱供給システムの温室効果ガス(GHG)削減効果が期待されている。本研究では、福井県あわら・坂井地域の観光施設に木質バイオマスボイラを設置し、地元産未利用木材を熱源利用する事業[1)]のサプライチェーン全体を通じた GHG 排出量を把握する。さらに、化石燃料ボイラにより熱供給する場合と比べて GHG 排出量がどれだけ削減されるか評価する。

2. 調査範囲の設定

図 1 に木質バイオマス熱供給事業のシステム境界を示す。本研究では、伐採された木材がバイオマスセンターで切削チップ化され、それを燃料として用いるボイラで熱供給されるまでを評価対象範囲とする。育林、林道整備、林業機械・輸送車両・ボイラの製造は除外している。

また、バイオマスボイラは温泉旅館に設置され、空調・給湯に利用されるため、1MJ の熱供給を機能単位とする。

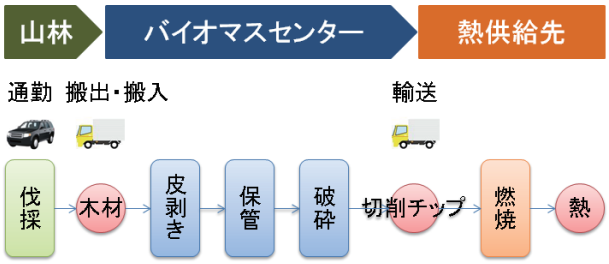


図 1　木質バイオマス熱供給事業のシステム境界

3. インベントリデータ

インベントリデータの収集方法を以下に示す。バックグラウンドデータには、LCA ソフトウェア「MiLCA」搭載のインベントリデータベースである IDEA ver.1.1 を用いる。

3.1 山林

実際に伐採・集材作業を行った際に把握した、出材積、出材重量、作業機械及び通勤車の燃料消費量を用いる。また、比重から出材積を出材重量に換算する。

3.2 搬出・搬入

各山林現場から用材とチップ材が搬出される。その際用いる搬出機械（ハーベスタ、グラップル、フォワーダ、スイング、プロセッサ）と運搬のためのトラックの軽油使用量を把握し、全搬出量に対するバイオマスの割合を乗じる。なお、現場ごとのトラックの燃料は把握不可能であるため、運搬距離・回数、平均燃費から推計する。

3.3 バイオマスセンター

(1) 生産量

バイオマスセンターでは、木粉、ペレット、切削チップが同一工場内で製造されている。本研究が対象とするバイオマスボイラで用いられる燃料は切削チップであるため、バイオマスセンター内の電力・燃料消費量を各製品に配分する必要がある。そのため、それぞれの生産量と売却単価を把握する。

(2) 重機

バイオマスセンター内で使用される重機 5 種類のうち、切削チップの製造に関係する 4 種類について軽油使用量を把握する。それらを(1)で把握した製品の生産量に応じて切削チップに配分する。

(3) 電力

電力使用量はバイオマスセンターと隣接会社を合算した数値しか把握できないため、電気料金の按分比率を用いて按分する。さらに、バイオマスセンター分の電力使用量を、(1)で把握した製品の売却単価に応じて切削チップに配分する。

表 1　熱供給 1MJ あたりのインベントリデータ

段階	項目			IDEA項目	[☆/t]	[☆/MJ]	☆	データ期間・換算方法
山林	タワーヤーダ		軽油	熱エネルギー, 軽油	8.30.E-03	2.53.E-03	L	＜データ期間＞ 2015年9月12日～10月10日 ＜換算方法＞ 出材積177.48 m^3＝出材重量136.08 t
	ハーベスタ		軽油	熱エネルギー, 軽油	7.35.E-04	2.24.E-04	L	
	グラップル		軽油	熱エネルギー, 軽油	7.35.E-04	2.24.E-04	L	
	チェーンソー		ガソリン	熱エネルギー, ガソリン	1.32.E-04	4.04.E-05	L	
			オイル	潤滑油(石油精製によらないもの)	4.41.E-05	1.35.E-05	L	
	通勤車①		軽油	熱エネルギー, 軽油	1.04.E-03	3.19.E-04	L	
	通勤車②		ガソリン	熱エネルギー, ガソリン	2.96.E-04	9.04.E-05	L	
	通勤車③		ガソリン	熱エネルギー, ガソリン	2.13.E-04	6.51.E-05	L	
搬出・搬入	トラック・搬出機械		軽油	熱エネルギー, 軽油	2.47	7.53.E-04	L	＜データ期間＞ 2015年1月～12月 ＜換算方法＞　生産量配分
バイオマスセンター	重機	PC120	軽油	熱エネルギー, 軽油	1.92.E-02	5.88.E-03	L	＜データ期間＞ 2015年5月～12月 ＜換算方法＞　生産量配分
		フォークリフト	軽油	熱エネルギー, 軽油	1.13.E-03	3.45.E-04	L	
		WA100	軽油	熱エネルギー, 軽油	5.68.E-04	1.73.E-04	L	
		WA200	軽油	熱エネルギー, 軽油	1.96.E-03	5.99.E-04	L	
	電力			電力, 系統電力	0.129	3.93.E-02	kWh	＜データ期間＞ 2015年5月～2016年1月 ＜換算方法＞　生産額配分
輸送	トラック		軽油	トラック輸送, 4トン車(tkm)	運搬距離 7.7 平均積載率 40.2		km %	＜データ期間＞ 2015年6月～2016年1月
熱供給先	電力			電力, 系統電力		4.47.E-03	kWh	＜データ期間＞ 2015年6月～2016年1月

3.4　輸送（バイオマスセンター～バイオマスボイラ）

(1)　運搬距離

バイオマスセンターから熱供給先である温泉旅館への切削チップの運搬には 4t トラックを使用しており、運搬距離は片道 7.7km である。

(2)　運搬回数・運搬量

チップボイラ運転計画表では、切削チップの運搬回数と運搬量が管理されている。これらから、1 回あたりのチップ運搬量と平均積載率を算出する。

3.5　熱供給先

バイオマスボイラ熱管理月報では、切削チップにより得られた熱量や消費電力量が日々管理されている。これらの情報とチップ消費量の関係から、熱供給 1MJ あたりのチップ消費量を算出する。

3.1～3.5 節で収集したデータを、機能単位である熱供給 1MJ あたりに換算した結果を表 1 に示す。バックグラウンドデータとして用いた IDEA の項目名も合わせて示す。

4.　GHG 排出量算出結果

4.1　木質バイオマス熱供給に伴う GHG 排出量

3 章で整理したインベントリデータを用いて、木質バイオマス熱供給に伴う GHG 排出量を算出した結果を図 2（切削チップ）に示す。木質バイオマスボイラを用いて 1MJ 熱供給することで、0.0592 kg-CO_2/MJ 排出されることが分かる。段階別にみると、バイオマスセンターが全体の 72%を占める。中でも電力起因が最も大きく全体の 38%を占めている。次いで、重機（油圧ショベル）起因であり全体の 29%を占めている。

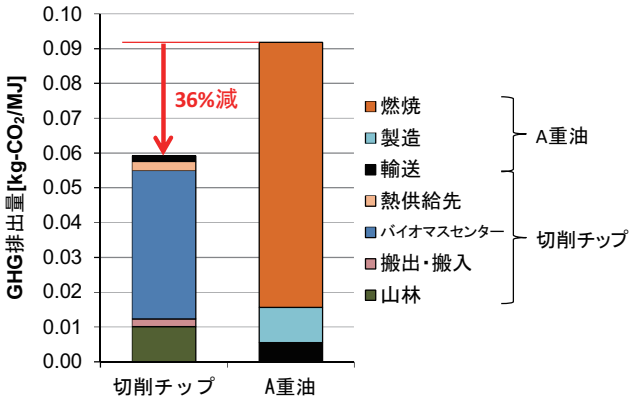


図 2　熱供給に伴う GHG 排出量の燃料による比較

4.2　重油による熱供給との比較

本事業のボイラシステムでは、必要に応じて重油を用いて追い炊きを行っているため、重油により得られた熱量や油流量も管理されている。そこで、原油がサウジアラビアから東京都へタンカーで運ばれ、その後福井県にタンクローリーで輸送されたと仮定し、重油を用いて熱供給した場合の GHG 排出量算出結果を図 2（A 重油）に示す。重油により 1MJ 熱供給することで、0.0919 kg-CO_2/MJ 排出されることが分かる。燃焼起因が全体の 83%を占めている。

4.1 節で得られた結果と比較すると、切削チップを用いた熱供給の方が、A 重油と比べて GHG 排出量が 36%削減されることが分かる。

引用文献

1)　あわら三国木質バイオマスエネルギー事業協議会：平成 26・27 年度 木質バイオマスエネルギーを活用したモデル地域づくり推進事業（福井県あわら・坂井・南越前地域）事業報告書

バイオガス発電事業の温室効果ガス削減効果の事前評価に向けた簡易ツールの作成

Development of a Simplified Tool for Prospective Evaluation of Greenhouse Gas Reduction of Biogas Power Generation Projects

○兵法彩*[1),2)], 本藤祐樹[1)], 森泉由恵[1)]
Aya HEIHO, Hiroki HONDO, Yue MORIIZUMI
1) 横浜国立大学, 2) 東京大学
* heiho-aya-gm@ynu.jp

1. はじめに

循環型社会の形成や地球温暖化対策のひとつとして、地域資源である家庭系・事業系生ごみ（以下、厨芥類）などの廃棄物系バイオマスのエネルギー利用（以下、バイオマス事業）が進められてきている。バイオマス事業の構想・計画を進めるにあたっては、事業導入に伴う温室効果ガス（Greenhouse gas、以下 GHG）削減量などの導入効果をライフサイクル思考に基づき定量的に評価することが重要となる。しかしながら、構想・計画段階では、事業に関する詳細な情報が整っていない場合が多いため、公表されているガイドライン[1)]などに従ったインベントリ分析を実施することが難しい。

そこで本研究では、事業の構想・計画段階における事前評価を支援することを目的として、廃棄物量などの限られた情報で、バイオマス事業の導入効果を簡易に推計できるツール（以下、環境特性評価ツール）の作成を行った。

2. 環境特性評価ツールの作成

本稿では、厨芥類を用いたメタン発酵ガス化発電事業（以下、バイオガス発電事業）の GHG 削減効果の推計が可能な環境特性評価ツールを作成する。事前評価では、バイオガス発電事業の導入前後の 2 つのシステムを設定し、両システムの GHG 排出量の差分で事業導入に伴う GHG 削減効果を明らかにする。

2.1 評価範囲の設定

図 1 はバイオガス発電事業導入前後のシステムを示している。機能単位は、投入物である地域内の一般廃棄物[t]と、生産物である電力（送電量）[kWh]となる。既存システムは、事業導入前の状況を示しており、地域内の一般廃棄物は全て焼却・埋立処分されている。なお、既存システムにおける電力は、系統電力で生産される。新規システムでは、厨芥類をメタン発酵処理し、得られるバイオガスを用いて電力の生産を行う事業を新たに導入する。このとき、厨芥類を除く一般廃棄物は既存システムと同様に、焼却・埋立処分される。

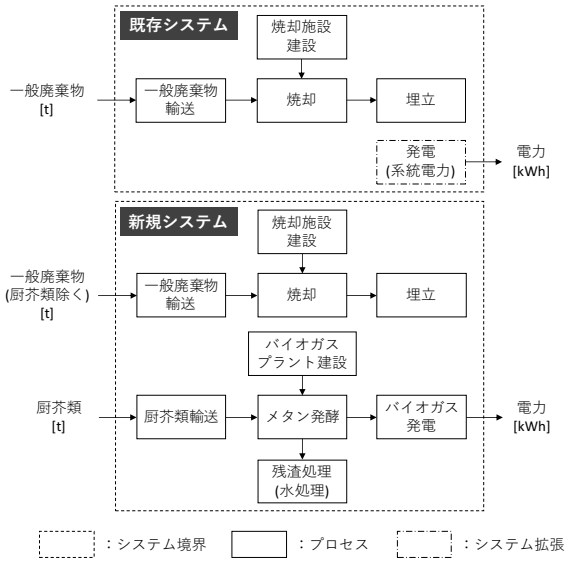


図 1　既存システム（上）と新規システム（下）

2.2 環境特性評価ツールの推計フロー

環境特性評価ツールは、分析者が廃棄物処理量を Excel に入力することで、各システムのパラメータが決定し、パラメータに基づいて推計される建設費・運用費ベクトルから、導入実施前後の GHG 排出量および GHG 削減量を推計する（**図 2**）。

2.2.1 パラメータの入力または推計

建設費・運用費の推計に必要な複数のパラメータ p_i[unit]$(i = 1, 2, \dots, \mathrm{n})$のうち、廃棄物処理量$p_1$[t]（一般廃棄物処理量または厨芥類処理量）と厨芥類の割合p_2[%]は、入力必須項目となっている。この 2 つの情報は、環境省が毎年公表している一般廃棄物処理実態調査結果[2)]から地域の値を得ることができる。分析者が廃棄物処理量および厨芥類の割合を入力すると、国内実績に基づいて予め設定しておいた設計条件から、焼却施設およびバイオガス発電プラントの基本仕様 p_i[unit] $(i = 3, 4, \dots, \mathrm{n})$（日処理量や発生ガス量、定格出力、発電・送電量など）が自動的に推計される。なお、分析者が基本仕様等に関する具体的な情報を有している場合には、その値を直接入力することが可能である。

Step 1 パラメータp_i[unit]の入力または推計

入力必須項目	
p_1：廃棄物処理量[t]	p_2：厨芥類の割合[%]

任意項目（必須項目から自動推計、任意入力可）	
p_3：日処理量[t/日]	p_6：定格出力[kW]
p_4：発生ガス量[Nm3]	p_7：発電量[kWh]
p_5：残渣発生量[t]	p_8：送電量[kWh]

Step 2 建設費・運用費ベクトル$F_{x,k}$[百万円]の推計

$$\boldsymbol{F}_{x,k} = g\left(p_i, \boldsymbol{U}_{x,k}\right)$$

$\boldsymbol{U}_{x,k}$：単位コストベクトル[円/unit]
x：既存システムまたは新規システム　k：プロセス

Step 3 ライフサイクルGHG排出量E_x[t-CO₂eq.]の推計

$$E_x = \sum_{k=1}^{m}\left(E_{x,k}^{FC} + E_{x,k}^{EG} + E_{x,k}^{IO}\right)$$

$E_{x,k}^{FC}$：燃料消費に伴うGHG排出量　$E_{x,k}^{EG}$：発電に伴うGHG排出量
$E_{x,k}^{IO}$：財・サービスの生産に伴うのGHG排出量

Step 4 GHG削減効果[t-CO₂eq.]の推計

$$GHG\ reduction = E_{after} - E_{before}$$

E_{before}, E_{after}：既存システム、新規システムのGHG排出量

図２　環境特性評価ツールの推計フロー

2.2.2 建設費・運用費ベクトルの推計

p_iとプロセス別の単位コストベクトル$\boldsymbol{U}_{x,k}$[円/unit]により、システム内の建設費・運用費の内訳（最終需要ベクトル）$\boldsymbol{F}_{x,k}$[百万円]を推計する（式 1）。

$$\boldsymbol{F}_{x,k} = g\left(p_i, \boldsymbol{U}_{x,k}\right) \qquad (式\ 1)$$

ここで、xは既存システムまたは新規システム、kはプロセス（$k = 1, 2, \ldots, \mathrm{m}$）である。また、$\boldsymbol{U}_{x,k}$は産業連関表の部門分類に合わせて作成した$k$における$p_i$あたりの詳細な金額情報である。焼却施設建設には、建設部門分析用産業連関表 [3]の「環境衛生」の値を使用し、一般廃棄物輸送・焼却・埋立には、サービス産業・非営利団体等投入調査 [4]の「一般廃棄物処理業」の値を使用した。バイオガス発電事業に関連する各プロセスには、国内の実績を参考にモデル化した詳細な金額情報を用いた。

2.2.3 ライフサイクル GHG 排出量の推計

各システムの GHG 排出量E_x[t-CO₂eq.]は、積み上げ法で推計した燃料消費に伴う GHG 排出量$E_{x,k}^{FC}$[t-CO₂eq.]と系統電力の発電に伴う GHG 排出量$E_{x,k}^{EG}$[t-CO₂eq.]と、産業連関法で推計した財・サービスの生産に伴う GHG 排出量$E_{x,k}^{IO}$[t-CO₂eq.]の合計となる（式 2）。

$$E_x = \sum_{k=1}^{m}\left(E_{x,k}^{FC} + E_{x,k}^{EG} + E_{x,k}^{IO}\right) \qquad (式\ 2)$$

$E_{x,k}^{FC}$は$\boldsymbol{F}_{x,k}$のうち石油製品と都市ガスの最終需要額と各種燃料単価から燃料消費量を算出し、排出係数 [5]を乗じて推計する。$E_{x,k}^{EG}$は電力（送電）量に電力会社の電源構成と電源別の排出係数 [6]を乗じて推計する。$E_{x,k}^{IO}$は産業連関分析用の原単位 [7]と$\boldsymbol{F}_{x,k}$から推計する。

2.2.4 GHG 削減効果の推計

GHG 削減効果は、既存システムの GHG 排出量E_{before}[t-CO₂eq.]と新規システムの GHG 排出量E_{after}[t-CO₂eq.]の差分によって求める（式 3）。

$$GHG\ reduction = E_{after} - E_{before} \qquad (式\ 3)$$

3. 今後の展開

環境特性評価ツールを用いることで、廃棄物量から簡易にバイオガス発電事業の削減ポテンシャルの推計が可能となる。今後は、市区町村レベルのバイオガス発電事業実施による削減ポテンシャルの分析を行う。

謝辞

ヒアリング調査、資料提供にご協力いただいた関係者の方々に謝意を表する。なお、本研究は環境省の環境研究総合推進費（課題番号 2-1302）および JSPS 科研費（課題番号 15J11714）の支援により実施された。

参考文献

1) 環境省：“バイオガス関連事業の LCA に関する補足ガイドライン ver.1.0”, (2012), 21pp.
2) 環境省：“一般廃棄物処理実態調査結果”, 環境省, (オンライン), 入手先<http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/stats.html>, (参照 2016-12-29)
3) 総務省統計局：“建設部門分析用産業連関表”, e-Stat, (オンライン), 入手先<https://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020101.do?_toGL08020101_&tstatCode=000001077955>, (参照 2016-12-29)
4) 総務省統計局：“平成 23 年サービス産業・非営利団体等投入調査 調査対象産業分類別、調査項目別金額及び構成比（全国）”, e-Stat, (オンライン), 入手先<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001049167&cycode=0>, (参照 2016-12-29)
5) 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”, (2015), 655pp.
6) 今村栄一, 井内正直, 坂東茂：“日本における発電技術のライフサイクルCO_2排出量総合評価”, (2016), 84pp.
7) 南斉規介, 森口祐一：“産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)”, 国立環境研究所, (オンライン), 入手先<http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/index_j.htm>, (参照 2016-12-29)

土地利用の変化と生物多様性の減少
：森林植生による生物多様性の違いを考慮した影響評価

Land-use change and biodiversity loss: Impact assessment considering difference in biodiversity by forest vegetation type

○植屋純平*[1)]、橋本征二 [1)]
Junpei Ueya, Seiji Hashimoto
* rv0034if@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

Rockstrom et al.[1)]は、人類の活動が許容される地球の閾値として Planetary Boundaries を提示した。Planetary Boundaries は、気候変動、海洋酸性化、成層圏オゾンの減少、窒素・リン循環の変化、淡水の利用、土地利用の変化、生物多様性の減少、エアロゾルの負荷、化学物質による汚染といった 9 つのプロセスを対象としているが、設定されたそれぞれの閾値の整合性は必ずしも明らかではない。これについて、田村 [2)]は、土地利用の変化と生物多様性の減少の 2 つのプロセスの関係について検討している。具体的には、今後の農地面積の増加による林地面積の減少が生物多様性の減少に与える影響について、各国への農地配分をシナリオとして設定し、これら 2 つの閾値の整合性を検討しているが、減少する森林の植生の違いは考慮されていない。

そこで本研究では、国際自然保護連合(IUCN)が指定する絶滅危惧種の生息範囲をより詳細に考慮することで、森林植生による生物多様性の違いを考慮した。その上で、生物多様性の減少を抑制するシナリオを新たに検討した。

2. 方法

2.1 生物多様性の減少の推計方法

Planetary Boundaries の生物多様性の減少の閾値は、絶滅種数で設定されており、本研究では、農地面積の拡大(林地面積の減少)による生物多様性の減少への影響を生物種の絶滅数の期待値で推計した。具体的には、古川 [3)]らの研究を参考にした田村 [2)]と同様に以下の式を用いた。

$$SEEV = \sum_i \left(EAAL \cdot \frac{HALR_i}{EAAL} \cdot \frac{SEP_i}{HALR_i} \right) \quad (1)$$

ここで、SEEV は生物種の絶滅数の期待値(Species Extinction Expected Value)(種数)、EAAL は農地拡大面積(Expanded Area of Agricultural Land)(ha)、$HALR_i$ は EAAL の条件下での生物種 i の生息地減少率(Habitat Area Loss Ratio)(-)、SEP_i は $HALR_i$ の条件下での生物種 i の絶滅確率(Species Extinction Probability)(種数)である。

EAAL については、田村 [2)]において推計された 2010～2050 年のシナリオのうち、最大となるもの(シナリオⅢ)を用いた。

$HALR_i$ については、以下の式で推定した。

$$HALR_i = \frac{\sum_k HAL_{k,i}}{\sum_k HA_{k,i}} \quad (2)$$

ここで、$HAL_{k,i}$ は国 k における生物種 i の生息地減少面積(Habitat Area Loss)(ha)、$HA_{k,i}$ は国 k における生物種 i の生息地面積(Habitat Area)(ha)である。

HALRi と SEPi の関係については、Maclean&Wilson[4)]の式より、生息地減少と個体群減少が比例関係にあると仮定し以下の式を用いた。

$$\mathrm{logit}(SEP_i^{55.628}) = 13.284 \cdot PLR_i^{10} - 6.793 \quad (3)$$

ここで、$SEP_i^{55.628}$ は 55.628 年間の生物種 i の絶滅確率(-)であり、PLR_i^{10} は 2010 年から 2050 年までの 40 年間の $HALR_i$ を用いて下式より推定した。

$$PLR_i^{10} = 1 - (1 - HALR_i)^{10/40} \quad (4)$$

次に、以下の式を用いて 40 年間の絶滅確率 SEP_i^{40} に換算した。

$$SEP_i^{40} = 1 - (1 - SEP_i^{55.628})^{40/55.628} \quad (5)$$

以上により、生物種ごとの絶滅確率を推計し、それらを合計して絶滅数の期待値を推計した。

2.2 生物多様性の減少を抑制するシナリオの検討

本研究では、生物多様性の減少を抑制するシナリオとして、必要な農地拡大面積を次の考え方で配分することとした。

① 森林の生息地面積が大きい生物種が生息する森林から配分する。
② 生息する生物種数が少ない森林から配分する。

ここでは、森林の生息地面積が大きい生物種は小さい生物種に比べ、森林の生息地面積が減少しても絶滅する確率が小さいと考えている。具体的には、ある国において、森林の生息地面積が大きい順に ABCD の生物種が存在する場合、まず、種 A のみが生息する森林に必要な農地拡大面積を配分し、続いて、種 B のみ、種 AB のみ、種 C のみ、種 AC のみ、種 BC のみ、種 ABC のみ、種 D のみ、といった順で必要な農地拡大面積の全てを配分していく方法である。

各生物種の森林生息地面積は、各生物種の生息分布図(Red List Spatial Data[5)])と世界の土地利用図(Land Use Systems of the World[6)])を重ね合わせることで算出した。

3. 結果と考察

本要旨では、田村 [2]において必要な農地拡大面積がアフリカで最大であったコンゴ民主共和国を対象とし、IUCN の指定する絶滅危惧種のうち絶滅確率が最大であった両生類について検討した結果について報告する。

3.1 生物多様性の減少を抑制するシナリオにおける生息地減少面積の推計結果

コンゴ民主共和国における両生類の絶滅危惧種 221 種のうち、41 種のみで森林の生息地面積の減少が見られ、他の種は全く生息地の減少がないという結果となった(表 1)。森林の生息地面積が大きい種のみで必要な農地拡大面積(＝森林減少面積)を賄うことができ、森林の生息地面積が小さい種の生息地面積の減少を抑えることができたと考えられる。田村 [2]のシナリオⅢにおける結果と比較して、逆に生息地減少面積が増加した種は 13 種であり、80%以上増加した種が 2 種見られたが、いずれも森林生息地面積の大きい種であった。種全体の生息地減少面積は、田村 [2]のシナリオⅢにおける結果と比較して 55%少なくなった(図 1)。

3.2 生物多様性の減少を抑制するシナリオにおける生物種の絶滅数の期待値の推計結果

コンゴ民主共和国における両生類の絶滅数の期待値の推計結果は、田村 [2]のシナリオⅢにおける結果と比較して、20%小さくなった。森林の生息地面積の減少が全くみられない種が田村 [2]より多くあったことが大きな要因として挙げられる。絶滅確率が最も減少した種については、田村 [2]と比較して 30%の減少が見られ、約半分の 105 種で 25%以上絶滅確率が下がる結果となった。一方、上述のように、生息地減少面積が増加した 13 種で絶滅確率が増加した。生息地減少面積の増加が大きかった 2 種の絶滅確率は、いずれも 28%程度増加したが、その値は 0.00106 から 0.00136 に増加したのみであった。

2.2 で示した農地拡大面積の配分シナリオを現実に採用できれば、生物多様性の減少を一定程度抑制する効果があるといえる。田村 [2]で考慮されていなかった森林植生、すなわち生息種数による森林の区分を考慮して農地配分を行うことで絶滅数の期待値を下げることができる可能性が示唆された。

なお、本要旨では、コンゴ民主共和国の例を示したが、対象国、対象種数を拡張した結果、また、その結果を Planetary Boundaries の閾値と比較し、土地利用の変化による生物多様性の減少の抑制可能性について検討した結果については、学会当日に報告する。

表 1 コンゴ民主共和国における両生類の生息状況と絶滅数の期待値

絶滅危惧種数	区分[注]ごとの生息種数	生息地面積減少種数	絶滅数の期待値
221	19～49 種	41 種	0.185

注：ここでいう区分とは、生息している種の組み合わせによって森林を区分したものである。

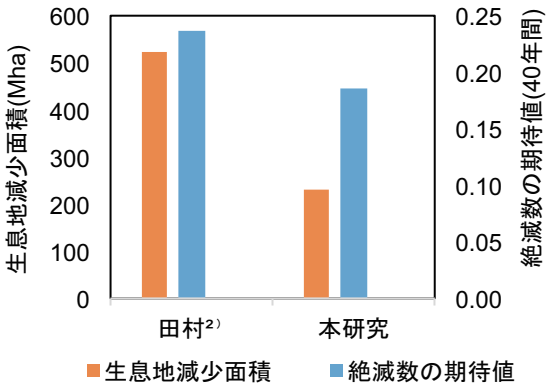


図 1 生息地減少面積と絶滅数の期待値の比較

謝辞：本研究は、科学研究費補助金(15H02863)による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

1) Rockstorom J. et al.: A safe operating space for humanity, Nature, 461(24), pp.472-475, 2009
2) 田村賢人：将来の生物資源需要がもたらす土地利用の変化とその生物多様性への影響、修士論文、2015
3) 古川拓哉ら：生物多様性フットプリント～木材材消費国が引き起こす海を越えた森林破壊の影響～、日本生態学会第 60 回全国大会、2013
4) Maclean M.D. and Wilson R.J.: Recent ecological responses to climate change support predictions of high extinction risk, PNAS, 108(30), pp.12337-12342, 201
5) IUCN: Red List Spatial Data, http://www.iucnredlist.org/technical-documents/spatial-date, 2016 年 10 月アクセス
6) FAO: Land Use Systems of the World, GeoNetwork, http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=37139&currTab=simple, 2016 年 10 月アクセス

空間的環境フットプリント分析

Spatial Environmental Footprint Analysis

○金本圭一朗*[1)]、Daniel Moran[2)]
Keiichiro Kanemoto, Daniel Moran
1) 信州大学, 2) NTNU
* keiichiro.kanemoto@gmail.com

1. はじめに

経済のグローバル化によって、私たちの消費はその消費している場所とは全く異なった場所において環境への影響を引き起こしている。近年、世界多地域間産業連関 (MRIO) 分析の発展によって、各国の消費と環境負荷物質の発生をつなげることに成功した。

筆者は、日本 LCA 学会誌において、MRIO 分析に関する論文をレビューすることで、170 本以上の論文を紹介し、これからの課題を示してきた [1]。その中で、MRIO 表の発展、産業連関分析の応用 (構造分析、ネットワーク分析、可視化)、結果の利用 (仮説の検証とインパクト評価)、産業連関分析の理論的発展、将来予測、指標や推計方法の統合、不確実性とモデルの差異、法・政治・経済的アプローチを紹介してきた。

このレビューの中であえて触れていなかったいくつかの問題の一つが、近年の GIS の成果を活かした空間的な分析である。本論文では、フットプリント分析を空間的に拡張し、二酸化炭素 [2]、大気汚染物質 [3]、生物多様性 [4] への応用研究を行う。

2. 方法

多地域間産業連関分析は、ある国の消費がどの国で環境負荷を排出させているのかを辿ることができるが、その国のどの場所で排出をさせているかは明らかにできない。近年、衛星等によって地球全体での観測が可能となり、GIS 情報が提供されてきている。本研究では、EU の EDGAR データベース、IUCN のレッドリストの位置情報を Eora 多地域間産業連関表と統合することで、ある国の消費がどの国のどの場所で二酸化炭素、大気汚染物質、そして、生物を絶滅の危機に引き起こしているのかを明らかにする。

EDGAR データベースでは、温室効果ガスおよび大気汚染物質が発生源別 (部門別) GIS データで提供されている。また、IUCN レッドリストでは、各生物種別に、その生息範囲、絶滅の危機の原因が提供されている。

3. 結果

図 1 に、1970 年および 2008 年の日本のカーボンフットプリントを地図化した図を示す。1970 年は、貿易の割合が低いことから、日本国内での排出が大きい。また、米国、化石燃料を輸入している中東、欧州各国で二酸化炭素を排出させていることが分かる。しかし、2008 年になると、各国からの輸入が急激に増加し、中国や東南アジアでの二酸化炭素排出が急激に増加していることが分かる。

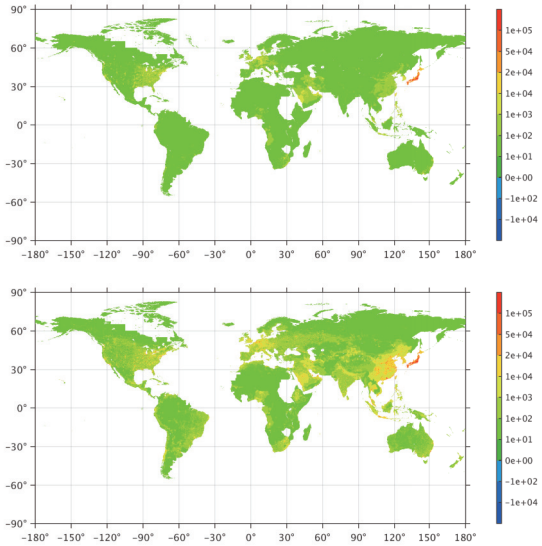
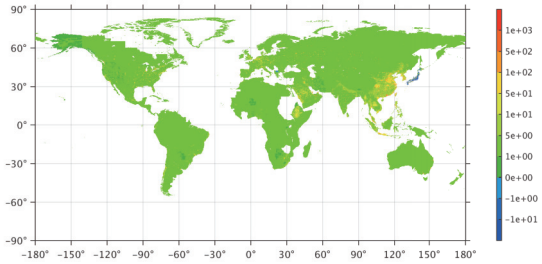


図 1 地図化した日本のカーボンフットプリント 1970 年 (上)、2008 年 (下)

図 2 に、地図化した日本の消費によって排出された NO_x および SO^2 の 1970 年から 2008 年までの変化を示す。日本は、国内では大気汚染物質を減らしてきたが、輸入によって、中国および各国で大気汚染物質を排出させてきたことが分かる。



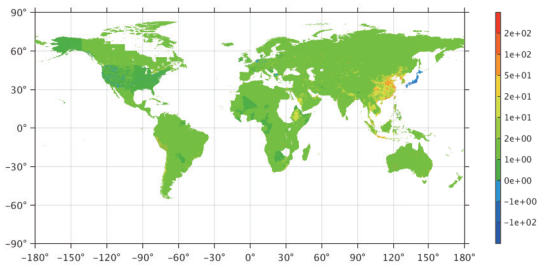


図 2 地図化した日本の消費によって排出された NO_x (上) および SO_2 (下) 1970 年から 2008 年までの変化

図 3 に、日本の消費によって各国で危機に晒されている種の地図化を行った図を示す。日本の消費は、東南アジアで主に種を絶滅の危機に晒しており、また、陸上だけでなく、海洋で種を絶滅の危機に晒されていることが明らかになった。

4. 最後に

本研究によって、ある国の消費がどの国のどの場所で二酸化炭素、大気汚染物質、そして、生物を絶滅の危機に引き起こしているのかを明らかになった。

企業は、ある消費・調達が、どの国のどの場所で環境負荷を排出しているのかが明らかになり、環境負荷削減を行うことが可能となる。また、例えば、CDM 等のプロジェクトベースの環境負荷削減を行う際に、自身の調達に関連してどの場所で削減プロジェクトを行ったら良いかが明らかになる。

今後、他の GIS データの資源を利用することで、これら以外の環境負荷物質についても同様の研究を行うことが可能となると考える。

引用文献

1. 金本圭一朗. 産業連関分析の環境分析への応用. *日本LCA学会誌* **10,** 340–350 (2014).
2. Kanemoto, K., Moran, D. & Hertwich, E. G. Mapping the Carbon Footprint of Nations. *Environ. Sci. Technol.* **50,** 10512–10517 (2016).
3. Moran, D. & Kanemoto, K. Tracing global supply chains to air pollution hotspots. *Environ. Res. Lett.* **11,** 94017 (2016).
4. Moran, D. D. & Kanemoto, K. Identifying Species Threat Hotspots from Global Supply Chains. *Nat. Ecol. Evol.* In Press (2017).

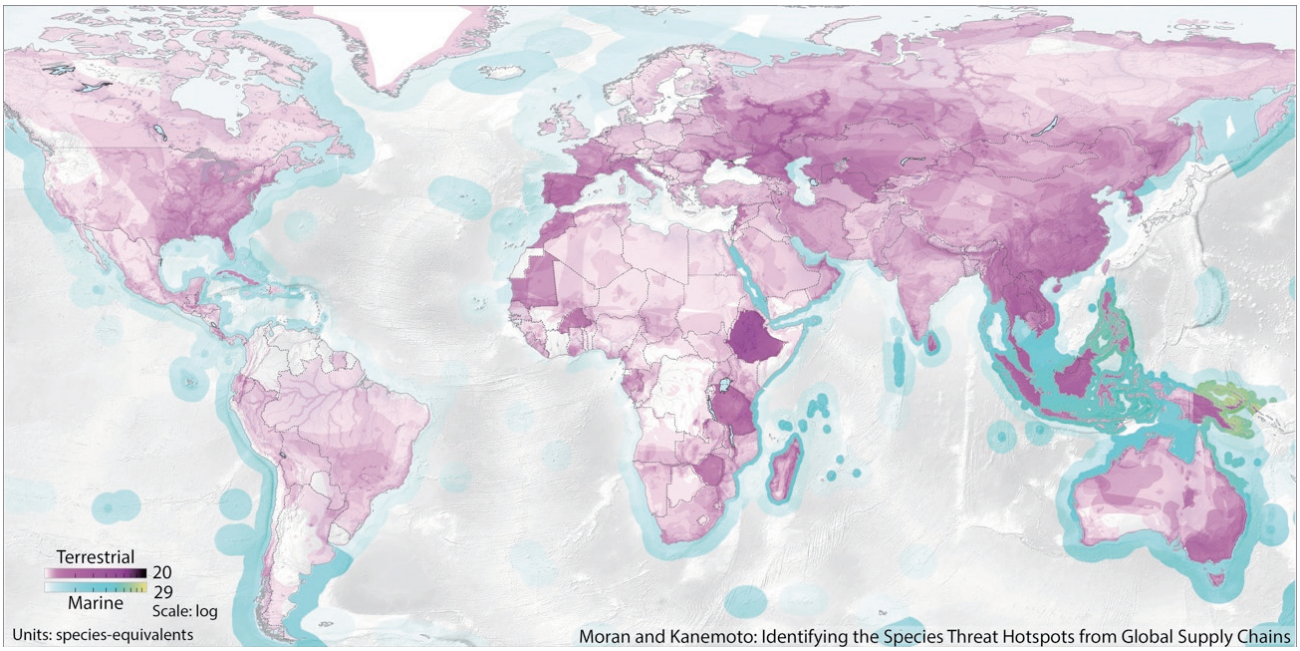


図 3 日本の消費によって各国で危機に晒されている種の地図化

生態系サービスの LCA への導入可能性：
農業生産システムの総合的評価枠組みの構築を意図した批判的再検討

Possibility of introducing ecosystem services into life cycle assessment: toward integrated framework for evaluating agricultural production systems

○湯龍龍*、神山和則、林清忠
Longlong Tang, Kazunori Kohyama, 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

農業は土地利用に通じて、ローカルの生態系に影響を与える点が特徴であるため、農業の環境影響評価において、土地利用に伴う生態系影響の評価が重要である。一方、生態系サービスの評価はミレニアム生態系評価[1)]とTEEB報告書[2)]によって注目されるようになった。持続可能な農業を考えるうえで、農業が生態系サービスに与える影響が重要と認識されており、農業と生態系サービスの関係の解明や農業の生態系サービスの定量評価が増えている[3)]。

一方、持続可能な農業のために、環境影響の少ない管理方法の実践が進められている。環境負荷の削減（例：減化学肥料、減農薬）のほかに、最近は生態系サービスの向上を意図する管理方法も実践されている（例：冬期湛水、畦畔雑草維持）。現場の生産者にとっては、適用される管理方法による生態系サービスの保全効果を詳細に確認したいニーズがある。一方、水田における冬期湛水の例では、生息地保全に効果的であるが、メタンの排出増加をもたらし、いわゆるトレードオフ関係が生じる場合も見られる。現場の生産者や農産物の消費者にとって、評価が粗くても様々な環境影響を総合的に示せることは、管理方法の選択や管理方法別の食品の選択に必要不可欠である。ニーズによって、必要な情報の詳細度が異なるが、管理方法別の評価（管理方法レベルの評価）が求められる。

LCA では農業の管理方法間の比較評価が増えている。Meier らは管理方法間の違いについて、LCA の課題を整理している[4)]。しかし、影響評価手法の開発が遅れているため、土地利用における管理方法間の違いに関する課題は明らかでない。近年、LCA においても生態系サービスの考慮が検討され始めている[5)]。現段階では主に、土地利用の生態系サービス影響係数の開発が進められている。なお、これら係数は、農業に適用した場合、管理方法の違いを表現できるかは不明である。

本研究の目的：①農業の管理方法別に評価する観点で、LCA の土地利用評価の課題抽出を行い、②農業の LCA において土地利用の影響評価における今後のチャレンジを展望する。

2. 農業と生態系サービス

Power[6)]と Huang ら[7)]を基に、農業に関わる主な生態系サービスを整理した（表 1）。農業から提供される生態系サービスは主に供給と文化的サービスである。逆に、農業は周辺生態系から受粉や有害生物防除などの恩恵を受けている。また、炭素貯留や侵食防止など調整サービスは農業と周辺生態系の双方によって提供されている。

供給と文化的サービスを除いて、殆どのサービスは LCA で扱う土地利用影響カテゴリーに関連している。それら項目の多くは用いられる農業の管理方法によって、影響が異なる。

表 1 農業の生態系サービス項目と関連する管理法の例

	主な項目	スケール	関連する管理法の例
Ecosystem services flowing to agriculture	受粉	農場、集水域	ランドスケープの管理
	有害生物防除	農場、集水域	防除方法、農薬の施用
	水の供給	農場、集水域	灌漑方法
	土壌形成	農場、集水域	土地利用の集約度
Ecosystem services to and from agriculture	土壌炭素貯留	圃場、農場	有機質肥料の管理、作付け体系
	土壌侵食防止	農場、集水域	斜面の栽培方法、作付け体系
	水質浄化	農場、集水域	肥料施用、作付け体系
	生息地保全、生物多様性保全	農場、集水域	肥料、農薬の施用、ランドスケープの管理
	栄養塩循環	農場、集水域	肥料施用、作付け体系
Ecosystem services from agriculture	食料、繊維、バイオ燃料	圃場、農場	肥料、農薬の施用
	廃棄物分解	圃場、農場	肥料施用、作付け体系
	リクリエーション、景観	農場、集水域	ランドスケープの管理

表２に３つの生態系サービスを例に、評価モデルと考慮する主なパラメーターを示す。土壌炭素貯留と侵食防止のいずれも、評価結果の地域性が大きい。これは生態系サービス評価の特徴とも言える。また、受粉や有害生物防除など定量化が困難な項目もある一方、表 2 に例示したような項目は定量化が可能、かつ、管理方法の違いを示すことが可能である。

表 2 生態系サービスの評価モデル（例示）

	主な評価モデル	考慮するパラメーター	評価スケール	管理方法間の違いの評価
土壌炭素貯留	RothC (Dungait et al. 2012)	土壌、気候、有機物の投入、作物種類	農場、集水域	可能
土壌侵食防止	USLE (Wischmeier et al. 1978), WEPP (Savabi et al. 1995)	栽培期間、作物種類、傾斜、等高線、輪作、土壌、気候	圃場、農場、集水域	可能
生息地保全	代表生物種の現地調査	－	圃場、農場	可能

3. LCA における土地利用評価と農業管理法の関係

LCA における土地利用の影響評価の現状を概観するために、LCA 事例評価と土地利用の影響係数開発の文献をそれぞれ調査した。前者の調査方法について、Scopus より、peer reviewed article、2000~2015 年、Life cycle assessment + organic + conventional + land use をキーワードで検索した結果、15 件がヒットした。また、農法間の比較はしなくても、農業の土地利用の影響評価を行う最近の文献 4 件を加えて、合計 19 件の文献を調査した。後者の調査方法については、国際誌 IJLCA、ES&T、Clean Products を対象に調査した。影響評価手法の指標、評価方法を示したうえで、農法の違いの表現の観点で手法間の違いを整理した。以下に、調査した結果を要約し、詳細は湯ら 8)を参照されたい。

3.1 事例評価における土地利用の評価

土地利用の影響項目について、管理方法間の比較を行う 15 件中 12 件がインベントリー分析結果である土地面積で示している。いずれも有機農法が慣行農法に比べてより多くの農地を必要とする。なお、その 12 件中 4 件が土地利用の影響を評価すべきと言及している。

また、全 19 件中 4 件が土地利用の影響評価結果を示している。4 文献のうち 1 件のみが管理方法別に評価しており、2 件は管理方法の相違について評価することを今後の課題としている。よって、土地利用影響カテゴリーは、農業管理方法別に評価できることが重要と示唆された。

3.2 土地利用の影響係数の開発

土地利用の影響項目は主に生物多様性と生態系サービスに分かれており、いずれもまだ開発途上であり、指標や、評価方法などに合意が得られていない。土地利用タイプについて、農業は考慮されるが、管理方法の違いまで定量化した文献は 3 件に留まった。考慮する生態系サービス項目は表 1 の項目のほんの一部に留まる。

影響係数の多くはバイオームレベルで算出されており、国レベルで算出されている生態系サービス係数は少ない。また、いずれのレベルで算出されている影響係数も不確実性が大きく、地域間の違いよりも地域内の違いが大きい。管理方法の違いを表現するには、より詳細な区分が求められる。

4. 総合的評価手法の提案

背景で述べたように、評価結果の活用方法に応じて、ローカルの生態系サービスを重視する総合的評価方法と、LCA の拡張による総合的評価方法の両側面からアプローチする方法を提案する。

4.1 生態系サービスを重視した統合評価

生態系サービス評価の特徴とされる影響項目が多様であること、地域性が大きいこと、管理方法による影響の違いを有することを損なわないように、独立した生態系サービス評価を行い、LCA の評価結果と統合する方法である。この方法は、生態系サービスの評価項目の網羅性と評価の詳細度を考慮できるが、両結果の統合を工夫する必要がある。

具体的には、生態系サービス評価は農業用地の現状の評価であり、LCA のような農業生産による追加的な影響を示す方法ではないため、両評価結果を直接統合できない。ここでは、例えば、複数管理技術を評価し、技術間の生態系サービスの差分と LCA 結果の差分が得られれば、両者を統合することが可能である。

4.2 LCA の拡張による統合評価

LCA 枠組みの中に、様々な環境影響カテゴリーによる生態系サービス影響を定量化し、農業管理方法の違いを考慮できる生態系サービス係数を開発する方法である。この方法は、統一した枠組みの中で生態系サービスを含む様々な環境影響を網羅的に示すことができるが、考慮できる生態系サービスの項目、影響係数の詳細度が相対的に低下する（3.2 節）。

特に農業管理方法レベルの影響係数の開発が課題である。例えば、農法レベルの定量化が可能、かつ、農業管理方法の違いによる影響が大きい項目は優先して係数開発を行う。また、影響係数の区分について、管理方法の違いを示す主なパラメーターの違いを考慮できる区分における影響係数の算定が求められる。

5. おわりに

生態系サービスの維持・向上を志向した農業管理方法が実践されている。管理方法レベルでの環境影響評価に生態系サービスを考慮に入れることが求められている。本研究は評価のニーズに応じて、生態系サービスを重視する場合と LCA の拡張による総合的評価方法の両側面からアプローチする方法を提案した。両者の関係はそれぞれ独立して行うのではなく、前者の成果を後者の LCA 用係数算定に取り入れることも期待できる。

参考文献

1) MEA (2005) Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC: Island Press

2) TEEB (2010) The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A Synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB

3) TEEB (2015) TEEB for Agriculture & Food: an interim report, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland

4) Meier et al. (2015) Journal of Environmental Management 149: 193‑208

5) Koellner et al. (2013) Int J Life Cycle Assess 18: 1188‑1202

6) Power (2010) Philos Trans R Soc B: Biol Sci, 365 (1554): 2959-2971

7) Huang et al. (2015) Journal of Environmental Management 149: 138-147

8) 湯ら(2015) 日本 LCA 学会研究発表会要旨集

企業の意思決定のための
自然資本プロトコルとライフサイクルアセスメントの活用

Applying the Natural Capital Protocol and lifecycle assessment in corporate decision making

○山岸健*[1)]
Ken Yamagishi
1) 産業環境管理協会
* yamagishi@jemai.or.jp

1. はじめに

近年、企業における環境経営をより効率的で効果的に進めていくため、様々な枠組みや指針が提案されている。そのひとつとして、2016 年 7 月、自然資本連合が自然資本プロトコルを発行した [1)]。自然資本プロトコルは自然資本とビジネスの関係について企業の意思決定支援を目的とした枠組みである。自然資本プロトコルの目的のひとつには自然資本への影響評価があり、これはライフサイクルアセスメント（LCA）の目的と共通する。

そこで、LCA 手法を適用して進めてきた企業の既存の取組みに対して自然資本プロトコルの枠組みを適用することにより、企業における環境経営をより効率的で効果的に進めることができるのか、検討することを目的として事例調査を行うこととした。

2. 調査方法

2.1 概要

事例調査に際しては、積水化学グループにおける LCA 手法を適用した既存の取組みである「事業活動による環境影響および環境貢献に関する統合化評価 [2)]」を採用した。この取組みに対して自然資本プロトコルを適用することで取組みの改善可能な点を検討した。

2.2 LCA 手法を適用した既存事例の概要

事例調査で採用した積水化学グループの LCA 手法を適用した既存事例 [2)]について簡単に記す。積水化学グループは 2013 年度に環境長期ビジョン「SEKISUI 環境サステナブルビジョン 2030」を策定した。この長期ビジョンでは「生物多様性が保全された地球」の実現に向けて、地球上の自然資本の利用に対し、「環境貢献製品の市場拡大と創出」「（省資源や省エネルギーなどの）環境負荷低減」「自然環境の保全」の 3 つの活動により事業活動で利用した自然資本を還していくことを提唱している（図 1）。

この長期ビジョンの達成度、進捗を計るため、事業活動での自然資本の利用と製品等での環境貢献を統合評価する指標「SEKISUI 環境サステナブルインデックス」を設定している。このインデックスは LIME2 [3)]をカスタマイズした手法が用いられている。

事業活動での自然資本の利用、および製品等での環境貢献の評価範囲は、直接影響だけでなく販売した製品のライフサイクルに係る間接影響も含む。事業活動での自然資本の利用の評価方法は ISO 14040:2006、ISO 14044:2006 および ISO/TS 14072:2014 を参考にしている。製品等での環境貢献の評価方法は、日本 LCA 学会の温室効果ガス排出削減貢献量算定ガイドライン [4)]および日本化学工業協会の CO2 排出削減貢献量算定のガイドライン

図 1 積水化学グループのビジョン「SEKISUI 環境サステナブルビジョン 2030」[2)]
～ 生物多様性が保全された地球を目指して ～

[5]を参考としている。

現段階では 2014 年度および 2015 年度実績（図 2）に基づくインデックスの算出がなされている。

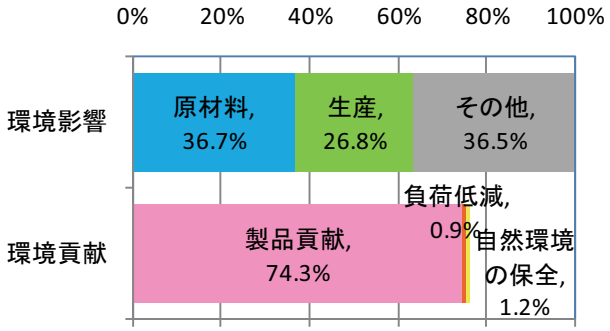


図 2　2015 年度の SEKISUI 環境サステナブルインデックス算出結果 [2]

2.3　自然資本プロトコルの適用方法

自然資本プロトコルの枠組みは 4 個の「段階(Stage)」からなり、「段階」はさらに 9 個の「手順(Step)」に分解され、各「手順」ではさらに数個の「活動(Action)」が示されている [1]。今回の事例調査では、「活動」のレベルに注目した。前述の既存事例ではその報告書や発表資料等で取組みの詳細が記されている。それらの記述が「活動」の各項目で検討するべき内容を満たしているか否かを取組みの関係者と共に議論し確認した。

3.　結果

自然資本プロトコルの枠組みで示されている合計 38 項目の「活動」の内、前述の既存事例において検討済みであり報告書等で明文化されていた項目は 26 項目であった。

検討済みではあるが報告書等で明文化されていない項目は 8 項目であった。例えば「協力者とその適切な関与度合いの特定」や「重要な計画上の課題への対処」である。

現段階で未検討な項目は 4 項目であった。具体的には「外部要因による自然資本の変化の特定」、「自然資本の状態に影響を与える動向の評価」、「関連する費用および/または利益の相対的な重要性の判断」、「重要な仮定のテスト」であった。

4.　考察とまとめ

前述の既存事例において検討済みであり報告書等で明文化されていた 26 項目については、自然資本プロトコルの枠組みを適用しなくても、LCA 手法に基づく枠組みや指針を適用することで十分に満たすことができた項目であると考えられる。

前述の既存事例において検討済みではあるが報告書等で明文化されていない 8 項目については、LCA 手法に基づく枠組みや指針で示唆を得ることができるが、自然資本プロトコルの枠組みを適用することにより、明文化した形で計画を立てることに役立つ項目と考えられる。

前述の既存事例において現段階で未検討な 4 項目については、取組みの関係者と共に議論を重ね、次段階の強化項目として検討中である。例えば、環境経営の長期計画検討の際に、長期目標設の定や重点を置く実施項目の設定、複数の将来シナリオでの評価等に役立つことが期待される。

前述の既存事例への自然資本プロトコルの枠組みの適用は、環境経営をより効率的で効果的に進めていく上で、見落としがちな視点を補強し包括的な検討を支援する意味で有用であった。今後はこの事例調査およびその他の事例に関しても、LCA 手法に基づく枠組みや指針と自然資本プロトコルの枠組みを組み合わせて用いること、さらなる環境経営の推進が期待される。

5.　謝辞

本検討にあたり、積水化学工業の三浦仁美様、岩井清行様、澤田聡様には多大なるご支援、ご指導をいただきましたことお礼申し上げます。

引用文献

1) NATURAL CAPITAL COALITION：“NATURAL CAPITAL PROTOCOL”，（オンライン），入手先 < http://naturalcapitalcoalition.org/>，（参照 2016-7-28）
2) 三浦仁美ら：“エコデザイン・プロダクツ＆サービス 2016 シンポジウム”，東京，（2016），OS2-1
3) N. Itsubo, A. Inaba： “Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling”，（オンライン），入手先 < http://lca-forum.org//>，（参照 2016-7-28）
4) 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”，日本 LCA 学会，（2015）
5) 日本化学工業協会，“CO_2 排出削減貢献量算定ガイドライン”，日本化学工業協会，（2012）

用紙数量を活動量とする印刷物及び印刷会社の LCA 手法の開発

Development of LCA methodology for print media products and printing company with activity of paper usage

中村洋之
Hiroyuki Nakamura
大日本印刷株式会社
Nakamura-H2@mail.dnp.co.jp

1.はじめに

近年、印刷物のカーボンフットプリント（CFP）の普及のために、データ収集の労力を低減した CFP 算定の商品種別算定基準（CFP-PCR）を開発した。

今回は、本 CFP-PCR を利用し、用紙数量である用紙枚数を活動量として、地球温暖化以外の環境影響も評価する印刷物の LCA 手法を開発した。併せて、印刷会社の Scope3 から、同様に用紙枚数を活動量とする印刷物納入先への Scope3 の切り出しを検討した。

2.印刷物の LCA 手法を開発

2.1 簡易化 CFP-PCR

従来は、印刷機をはじめとする生産設備や空調・照明設備の消費電力（もしくは、稼働時間）やインキ・製本材料・梱包材料等の使用量の詳細なデータを収集する必要があった。しかし、本 CFP-PCR でシナリオや PCR 原単位を設定したため、一次データとして用紙の使用枚数を把握することで、CFP の算定を可能にした。表 1 にデータ収集項目、表 2 に本 CFP-PCR である「出版・商業および一般証券印刷物（中間財）CFP-PCR」（PA-AD-06、2016 年 1 月改訂）[1)]で設定した PCR 原単位を示す。

表 1 データ収集項目

分類	データ項目
製品仕様	製品部数
	製品寸法
	頁数
	色数
	綴じ方
用紙	用紙寸法
	用紙重量
	本紙枚数
	印刷予備枚数
	製本予備枚数

分類	データ項目
印刷版	印刷版寸法
	枚数
	厚さ
印刷機	印刷方式
	定格電力
	最大印刷速度

表 2　印刷物 CFP-PCR で設定した PCR 原単位

段階	分類	プロセス	原単位		
			原単位名	原単位	単位
原材料調達	プリプレス	DTP 材料製造	DTP 材料	4.05E-01	kg-$CO2_e$/頁
	印刷	印刷材料製造	その他印刷材料	3.62E-03	kg-$CO2_e$/㎡×色数
	断裁・製本	製本・仕上げ材料製造	中綴じ用針金	3.47E-04	kg-$CO2_e$/部
	梱包	梱包材量製造	梱包材量	1.61E-03	kg-$CO2_e$/枚
生産	プリプレス	DTP	DTP 生産・空調照明	1.74E+00	kg-$CO2_e$/頁
	印刷	印刷	印刷空調照明	6.90E-03	kg-$CO2_e$/枚
	断裁・製本	断裁	断裁生産・空調照明	2.33E-03	kg-$CO2_e$/枚
	断裁・製本梱包	製本・仕上げ	折り生産・空調照明	2.60E-03	kg-$CO2_e$/枚
		製本・仕上げ	中綴じ生産・空調照明	3.64E-03	kg-$CO2_e$/部
		梱包	梱包生産・空調照明	1.36E-05	kg-$CO2_e$/枚
	廃棄・リサイクル	輸送・適正処理	廃棄・リサイクル（生産段階）	1.51E-02	kg-$CO2_e$/枚

2.2 開発した印刷物の LCA 手法の概要

この PCR 原単位を材料やエネルギー等に分解して、各環境負荷に対応した原単位を設定し、PCR 原単位と同様に、用紙枚数を活動として印刷物の LCA を簡易に算定できた。LCA の評価対象として、印刷物の主要項目と考える、①地球温暖化、②光化学オキシダントに関わる VOC、③木材資源、④水利用とした。フランス印刷産業連合会（UNIC）がグレネル 2（グルネル環境会議実施計画法の枠組みを規定）に対応するために、評価対象とした地球温暖化・光化学オキシダントに関わる VOC・資源枯渇を参考にした。

具体的には、原材料調達段階の PCR 原単位名「その他印刷材料」を例として以下の手順で実施した（単位の kg-CO2e/m2・色の m2 は、用紙枚数から換算）。

(1)PCR 原単位に算入されている項目に分解

「その他印刷材料」を構成する「オフセットインキ投入量」、「ダンプニング液（IPA 液）投入量」、「エッチ液投入量」、「用水投入量」、「オフセットインキの調達に係る輸送量」、「ダンプニング液の調達に係る輸送量」、「エッチ液の調達に係る輸送量」に分解した。

(2)インベントリー分析

IDEA2 を利用して、上記の分解した項目ごとに、LCA の評価対象に対して、地球温暖化と光化学オキシダントに関わる VOC は各物質の排出量、木材資源は木材の再生可能材料、水利用は消費量からインベントリー分析を行った。

(3)環境影響評価

地球温暖化と光化学オキシダントに関わる VOC は LIME の特性化係数を利用して、各物質のそれぞれに寄与度を考慮し、合算して、原材料調達段階の PCR 原単位名「その他印刷材料」に対応する本稿 LCA 原単位を設定した結果を表 3 に示す。

表 3　「その他印刷材料」に関する LCA 原単位

LCA 原単位名	LCA 原単位
その他印刷材料の地球温暖化	3.40E-03kg-CO2e/m2・色
その他印刷材料の光化学ｵｷｼﾀﾞﾝﾄ	1.95E-08 kg-C2H4e/m2・色
その他印刷材料の木材資源	5.28E-06kg/m2・色
その他印刷材料の水利用	1.29E-05kg/m2・色

2.3 活動量等のデータの収集

本 CFP-PCR と同様に表 1 のデータを収集する。

2.4LCA の計算と考察

例として、表 4 に光化学オキシダントの本稿 LCA 原単位をまとめる。

この収集データと本稿 LCA 原単位から、今回の

表 4 光化学オキシダントの本稿 LCA 原単位

段階	分類	プロセス	原単位		
			原単位名	原単位	単位
原材料調達	プリプレス	DTP 材料製造	DTP 材料	1.60E-06	Kg-C2H4e／頁
	印刷	印刷材料製造	その他印刷材料	1.95E-08	kg-C2H4e／㎡×色数
	断裁・製本	製本・仕上げ材料製造	中綴じ用針金	1.48E-09	kg-C2H4e／部
	梱包	梱包材量製造	梱包材量	6.54E-09	kg-C2H4e／枚
生産	プリプレス	DTP	DTP 生産・空調照明	5.34E-05	kg-C2H4e／頁
	印刷	印刷	印刷空調照明	8.46E-08	kg-C2H4e／枚
	断裁・製本	断裁	断裁生産・空調照明	5.14E-08	kg-C2H4e／枚
	断裁・製本梱包	製本・仕上げ	折り生産・空調照明	3.98E-08	kg-C2H4e／枚
		製本・仕上げ	中綴じ生産・空調照明	9.38E-08	kg-C2H4e／部
		梱包	梱包生産・空調照明	4.16E-10	kg-C2H4e／枚
	廃棄・リサイクル	輸送・適正処理	廃棄・リサイクル（生産段階）	4.61E-07	kg-C2H4e／枚

印刷物（A4 サイズ、50,000 部、24 ページ、中綴）の 1 冊あたりのインパクト分析の結果を以下に示す。

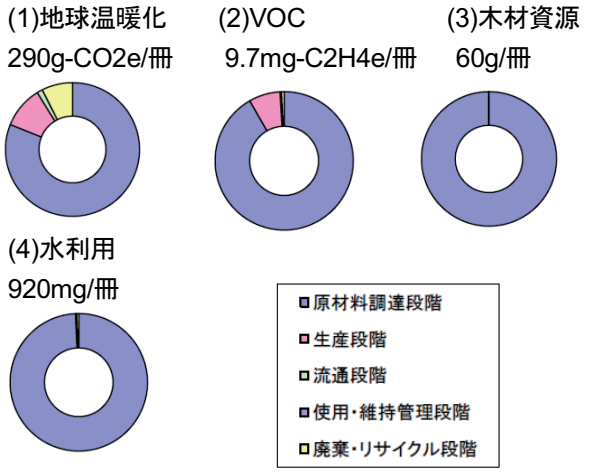


図 1　印刷物のインパクト分析結果

全て原材料調達段階の用紙の負荷が大きいことが共通している。その次に大きいものは、地球温暖化では生産段階と廃棄・リサイクル段階、光化学オキダントに関わる VOC では生産段階だった。

3.印刷会社の LCA の開発

3.1 簡易化した CFP-PCR を活用した Scope3 原単位

印刷会社の Scope3 から客先の Scope3 を切り出す方法（配分方法）として、売上高、印刷物の出荷数量、用紙の購入コスト、印刷用紙の重量を基準にする方法が提案されている [2]。この論文のデータ及び用紙枚数の情報を入手し、本報告では、CFP-PCR と同様に、用紙の使用枚数を基準とする配分方法を検討した。Scope1,2 を含めた Scope3 のカテゴリー別の GHG 排出量と用紙 1 枚当たりの GHG 排出量（Scope3 原単位）を算定した結果を表 5 に示す。

3.2 Scope3 の切り出しと考察

上記 Scope3 原単位を利用して、表 6 印刷物を納入

表 5 カテゴリー別の GHG 排出と Scope3 原単位

			GHG排出量（t-CO2e）	用紙1枚当たりのGHG排出量（kg-CO2e/枚）
Scope 1,2			9.60E+03	3.00E-01
Scope 3	カテゴリー1	購入製品・サービス	5.99E+04	1.88E-03
	カテゴリー2	資本財	2.00E+03	6.25E-02
	カテゴリー3	エネルギー関連	9.39E+02	2.94E-02
	カテゴリー4	調達物流	1.58E+04	4.95E-01
	カテゴリー5	事業から出る廃棄物	1.41E+02	4.42E-03
	カテゴリー6	出張	1.49E+02	4.65E-03
	カテゴリー7	雇用者の通勤	6.57E+02	2.06E-02
	カテゴリー12	販売した製品の廃棄	6.97E+02	2.18E-02
全GHG排出量			8.98E+04	9.37E-01

している客先への Scope3 を切り出した結果を表 7 に示す。用紙枚数には、製品にならない損紙も算入している。用紙枚数は GHG 排出量の多くを占める原材料調達段階と生産段階で用紙の 1 枚毎に利用・加工処理されるため、用紙枚数基準は実態を反映すると考える。

表 6 客先に納入した印刷物の例

印刷物名	部数	製品サイズ	ページ	綴じ
定期刊行物1	4951	A4	16	中綴じ
定期刊行物2	1729	A4	32	中綴じ

表 7 客先への Scope3 の切り出しを行った結果

			GHG排出量（kg-CO2e）
Scope 1,2			2.83E+03
Scope 3	カテゴリー1	購入製品・サービス	1.77E+01
	カテゴリー2	資本財	5.88E+02
	カテゴリー3	エネルギー関連	2.77E+02
	カテゴリー4	調達物流	4.67E+03
	カテゴリー5	事業から出る廃棄物	4.16E+01
	カテゴリー6	出張	4.38E+01
	カテゴリー7	雇用者の通勤	1.94E+02
	カテゴリー12	販売した製品の廃棄	2.05E+02
全GHG排出量			8.86E+03

但し、表 7 は印刷会社の Scope1,2,3 分類だが、客先では多くが Scope3 のカテゴリー1 に分類される。

今回は Scope3 であり GHG のみを対象とするため、多項目の LCA は今後の課題であるが、本報告の CFP から LCA に拡張した方法を利用できると考える。

4.まとめ

用紙枚数を活動量として印刷物の LCA を簡易に算定し、ホットスポット分析を実施した。また、Scope3 においても用紙枚数を活動量に設定できた。以上より、製品品質として「印刷物の LCA」に着目する従業員と、企業価値につながる「印刷会社の LCA」に関心を持つ経営層がともに、用紙 1 枚当たりの環境負荷を指標に、一体となる環境負荷の削減活動を可能にする。

5.引用文献

[1]一般社団法人 産業環境管理協会, カーボンフットプリント製品種別基準, (認定 CFP-PCR 番号：PA-AD-06), “出版・商業および一般証券印刷物(中間財) “, 入手先 ＜https://www.cfp-japan.jp/common/pdf_authorize/000228/PA-AD-06.pdf>, （参照 2016 -1-26）

[2]佐々木弘道, 田中信康：日本 LCA 学会誌. 11(2), (2015), pp.121-128

持続可能な森林から作られる認証紙と非認証紙の違いによる社会的なインパクト評価

Social impact assessment by the difference between certification paper made from the sustainable forest and non-certification paper

○佐々木 弘道*[1)]、田中 信康[1)]
Hiromichi Sasaki, Nobuyasu Tanaka
1) サンメッセ株式会社
* h-sasaki@sunmesse.co.jp

1. 背景

昨年、国連で持続可能な開発目標（SDGs）が採択され、その 17 の目標が示された。その中の目標 12 には、「つくる責任 つかう責任」として、持続可能な生産と消費について明記されている。また、2020 年に開催される東京オリンピックにおいても持続可能性に配慮した調達コード 基本原則が発表されるなど持続可能な製品の使用について、注目をされるようになってきている。

当社は印刷会社として日々、多くの紙を使用している。自社の Scope3 の算定においては、カテゴリ 1 の原材料である用紙に占める割合がサプライチェーン全体の中でもっとも多く、7 割を超えることがわかっている。

このような社会的背景と製品の製造に不可欠な用紙について持続可能な森林から産まれる認証紙と認証を受けていない非認証紙の差を比較し、社会的なインパクト評価を行うこととした。

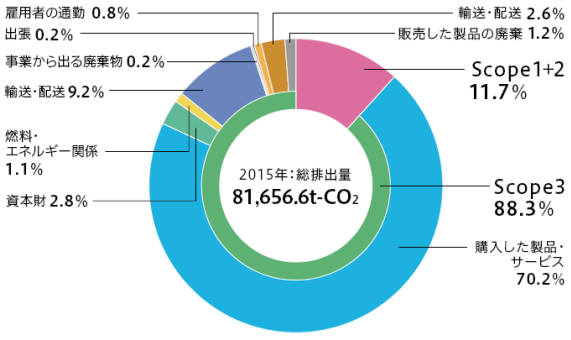


図 1：サンメッセの Scope1-3

2. 調査

調査にあたっては自社サプライチェーンの環境負荷の算出に使用した Scope 3 の一次データ 23 項目を使用し、ステージごと LIME 2 の環境影響評価原単位表から、用紙の環境負荷に最も関連性の高いと思われる「木材、CO_2、NO_x、SO_x」のインベントリー分析を行い、その後、統合化係数（被害化係数）を掛けて、「人間健康、社会資産、生物多様性、一次生産」の 4 分野への被害について算定を行った。今回の算定では、認証紙は持続可能な森林から生産され、持続可能な森に再生されるということを前提に生物多様性の被害はゼロと想定し、差がどの程度あるかについて評価を行った。

3. 結果

当社の Scope1-3 算定に活用した 23 項目。

原料…1:情報用紙、2:その他の紙製品、3:下版（刷版に相当）、4:PP フィルム、5:印刷インキ、6:ストレッチフィルム

加工…7:プロパン、8:A 重油、9:電力、10:都市ガス

廃棄…11:汚泥、12:廃油、13:廃酸、14:廃アルカリ、15:廃プラ、16:紙くず産廃処理、17:木くず、18:繊維くず、19:金属くず、20:紙くず埋立処理

その他…21:通勤（自動車）、22:通勤（公共交通）、23:出張

以上の項目に対して、ライフサイクルインベントリ分析用データベース IDEA（Inventory Database for Environmental Analysis）の原単位表を活用し、「木材、CO_2、NO_x、SO_x」の各環境負荷を算定した。

表 1 ：インベントリー分析結果

		項目	資源, 木材, 日本, 陸域, 再生可能材料_kg	排出, CO2（発生源不特定）, 大気, 不特定_kg	排出, NOx, 大気, 不特定_kg	排出, SOx, 大気, 不特定_kg
原料	1	情報用紙	1.93.E+07	1.22.E+05	9.34.E+04	3.28.E+03
	2	その他の紙製品, 4桁	6.31.E+04	4.69.E+02	4.75.E+02	2.06.E+01
	3	下版(製版, 4桁	1.02.E+02	2.43.E+01	3.86.E+01	3.94.E+00
	4	ポリメチレンポリフェニルポリイソシアネート(PMPPI)	8.77.E+00	1.46.E-01	2.74.E+01	1.51.E+00
	5	印刷インキ, 4桁	3.99.E+03	2.23.E+03	3.09.E+03	1.64.E+02
	6	包装用軟質プラスチックフィルム, 厚さ0.2mm未満で軟質のもの	1.97.E+02	6.16.E+00	1.64.E+02	9.98.E+00
		小計	1.94.E+07	1.25.E+05	9.72.E+04	3.48.E+03
加工	7	プロパン, クメン副生	4.64.E-02	1.72.E-02	9.05.E+01	5.24.E+00
	8	A重油	4.05.E-04	2.09.E-05	3.39.E+02	4.41.E+01
	9	電力, 一般電気事業者10社平均, 2012年度	8.67.E-03	3.12.E-04	9.43.E+03	9.72.E+02
	10	都市ガス	5.85.E-04	2.19.E-05	5.81.E+02	1.45.E+01
		小計	5.60.E-02	1.75.E-02	1.04.E+04	1.04.E+03
廃棄	11	産廃処理, 汚泥サービス	4.69.E-04	6.64.E-06	2.25.E-01	2.14.E-02
	12	産廃処理, 廃油サービス	6.39.E-04	9.58.E-06	8.69.E-02	8.74.E-03
	13	産廃処理, 廃酸サービス	1.62.E-03	2.09.E-05	5.25.E-03	4.29.E-04
	14	産廃処理, 廃アルカリサービス	6.34.E-02	6.35.E-03	1.77.E-01	1.13.E-02
	15	産廃処理, 廃プラスチック類サービス	8.02.E-03	1.06.E-04	9.48.E+00	9.24.E-01
	16	産廃処理, 紙くずサービス	1.38.E-01	1.96.E-03	1.23.E+01	1.21.E+00
	17	産廃処理, 木くずサービス	1.83.E-03	2.58.E-05	6.99.E-02	6.55.E-03
	18	産廃処理, 繊維くずサービス	1.10.E-03	1.48.E-05	3.45.E-02	3.15.E-03
	19	産廃処理, 金属くずサービス	5.55.E-04	8.04.E-06	2.60.E-01	1.56.E-02
	20	埋立処理, 産業廃棄物, 紙くず類サービス	4.61.E+00	5.96.E-02	1.40.E+02	1.27.E+01
		小計	4.82.E+00	6.81.E-02	1.63.E+02	1.49.E+01
その他	21	他に分類されない輸送用機械器具, 4桁	8.84.E+01	2.79.E+03	3.89.E+02	1.22.E+02
	22	他に分類されない輸送用機械器具, 4桁	2.50.E+01	7.89.E+02	1.10.E+02	3.46.E+01
	23	他に分類されない輸送用機械器具, 4桁	7.37.E+01	2.32.E+03	3.24.E+02	1.02.E+02
		小計	1.87.E+02	5.90.E+03	8.22.E+02	2.59.E+02
			1.94.E+07	1.31.E+05	1.09.E+05	4.79.E+03

表１の工程ごとの結果を後記の表２にまとめた。

表２：工程ごとのインベントリー分析

項目	原料	加工	廃棄	その他	合計
資源, 木材, 日本, 陸域, 再生可能材料 kg	1.94.E+07	9.66.E−03	4.82.E+00	1.87.E+02	1.94.E+07
排出, CO2(発生源不特定), 大気, 不特定 kg	1.25.E+05	3.55.E−04	6.81.E−02	5.90.E+03	1.31.E+05
排出, NOx, 大気, 不特定 kg	9.73.E+04	1.04.E+04	1.63.E+02	8.22.E+02	1.09.E+05
排出, SOx, 大気, 不特定 kg	3.48.E+03	1.03.E+03	1.49.E+01	2.59.E+02	4.79.E+03

この結果は単位がそれぞれ異なるため、算定結果を基に、さらに統合化係数（被害係数）を乗じ、算定を行ったものを次頁、表３と図２に表記をした。

表３：統合化評価表

	木材	CO2	NOx	SOx	合計
人間健康		2.52E+05	1.91E+07	1.05E+07	2.98E+07
社会資産		4.22E+04	9.32E+06	5.19E+05	9.88E+06
生物多様性	2.39E+09				2.39E+09
一次生産	1.53E+09		1.19E+06	6.67E+04	1.53E+09
合計	3.92E+09	2.94E+05	2.96E+07	1.10E+07	3.96E+09

図２：統合化評価（項目別）

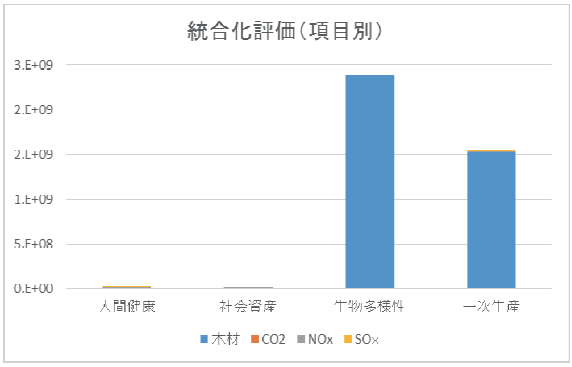
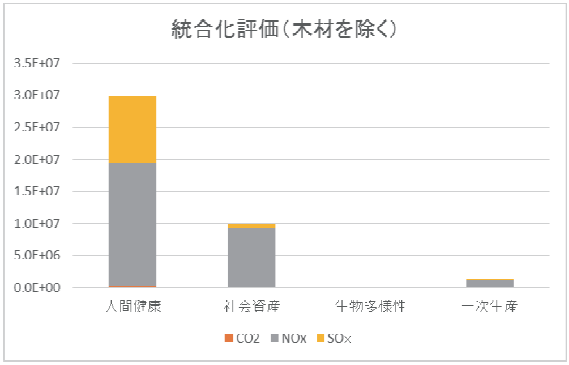


図３：統合化評価（木材を除く）



算定結果から、「生物多様性」に与える影響は木材から約 24 億円の被害が想定され、「一次生産」には木材、NO_x、SO_xから約 15 億円の被害が出ることが算定された。「人間健康」は NO_x、SO_x、CO_2、から 3,000 万円、「社会資産」は NO_x、SO_x、CO_2 から 1,000 万円の被害が出ることがわかった。

4. 考察

まず、日本製紙連合会は、森林伐採の問題から各国が独自で原材料調達のガイドラインを定め、認証の有無に関わらず、環境に配慮した調達方法が取られていると説明している。

一方、認証紙は、持続可能な森林資源から調達されたことを第三者が認証し可視化され、土地改変が行われていないことを保証している。そのため、今回算定した被害は最低限に抑えられていると考えることができる。

5. まとめ（当社の対応）

持続可能な調達が約束されている認証紙の利用推進は、当社の Scope1-3 の中でもっとも負荷が大きいカテゴリ 1 の原材料（用紙）への環境配慮、ならびに生物多様性への配慮につながると考える。そこで当社は、認証紙の利用を推進し、用紙の認知度を高めることで、冒頭記した社会の脱炭素化の動き、世界の動きに呼応する形で、持続可能な社会に貢献する経営を実践していきたいと思う。

6. 謝辞

本研究は、日本 LCA フォーラム「組織の LCA」研究会ワーキンググループにおいてご助言をいただきながら研究を進めたものをまとめたものです。委員の先生、メンバーの方々には深く感謝申し上げます。

7. 引用文献

1) (国)産業技術総合研究所/ (一般)産業環境管理協会: “IDEA”，入手先<http://www.idea-lca.jp/ >（参照 2016-12-25）

2) 持続可能な開発目標（SDGs）- 国連広報センター，入手先 <http://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/ >（参照 2016-12-25）

3) 東京 2020 オリンピック・パラリンピック競技大会持続可能性に配慮した調達コード，入手先 <https://tokyo2020.jp/jp/games/sustainability/data/sus-principles-JP.pdf>（参照 2016-12-25）

Supporting Information

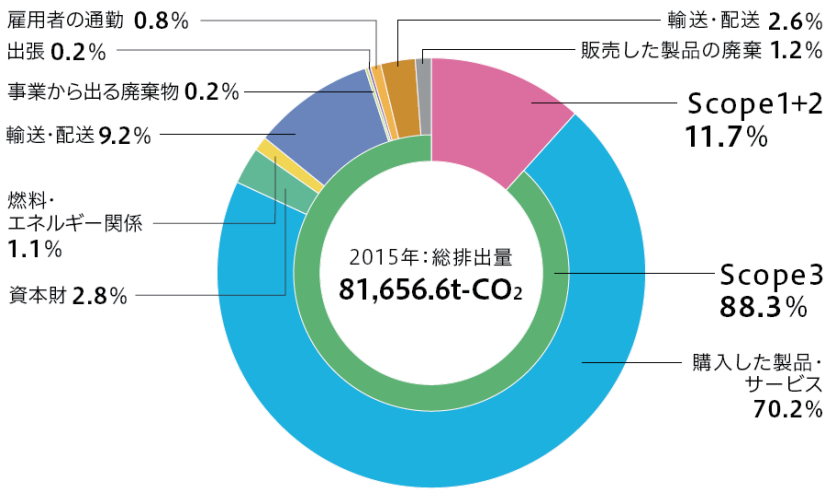


図 1：サンメッセの Scope1-3

		項目	資源, 木材, 日本, 陸域, 再生可能材料_kg	排出, CO2（発生源不特定）, 大気, 不特定_kg	排出, NOx, 大気, 不特定_kg	排出, SOx, 大気, 不特定_kg
原料	1	情報用紙	1.93.E+07	1.22.E+05	9.34.E+04	3.28.E+03
	2	その他の紙製品, 4桁	6.31.E+04	4.69.E+02	4.75.E+02	2.06.E+01
	3	下版(製版, 4桁	1.02.E+02	2.43.E+01	3.86.E+01	3.94.E+00
	4	ポリメチレンポリフェニルポリイソシアネート(PMPPI)	8.77.E+00	1.46.E−01	2.74.E+01	1.51.E+00
	5	印刷インキ, 4桁	3.99.E+03	2.23.E+03	3.09.E+03	1.64.E+02
	6	包装用軟質プラスチックフィルム, 厚さ0.2mm未満で軟質のもの	1.97.E+02	6.16.E+00	1.64.E+02	9.98.E+00
		小計	1.94.E+07	1.25.E+05	9.72.E+04	3.48.E+03
加工	7	プロパン, クメン副生	4.64.E−02	1.72.E−02	9.05.E+01	5.24.E+00
	8	A重油	4.05.E−04	2.09.E−05	3.39.E+02	4.41.E+01
	9	電力, 一般電気事業者10社平均, 2012年度	8.67.E−03	3.12.E−04	9.43.E+03	9.72.E+02
	10	都市ガス	5.85.E−04	2.19.E−05	5.81.E+02	1.45.E+01
		小計	5.60.E−02	1.75.E−02	1.04.E+04	1.04.E+03
廃棄	11	産廃処理, 汚泥サービス	4.69.E−04	6.64.E−06	2.25.E−01	2.14.E−02
	12	産廃処理, 廃油サービス	6.39.E−04	9.58.E−06	8.69.E−02	8.74.E−03
	13	産廃処理, 廃酸サービス	1.62.E−03	2.09.E−05	5.25.E−03	4.29.E−04
	14	産廃処理, 廃アルカリサービス	6.34.E−02	6.35.E−03	1.77.E−01	1.13.E−02
	15	産廃処理, 廃プラスチック類サービス	8.02.E−03	1.06.E−04	9.48.E+00	9.24.E−01
	16	産廃処理, 紙くずサービス	1.38.E−01	1.96.E−03	1.23.E+01	1.21.E+00
	17	産廃処理, 木くずサービス	1.83.E−03	2.58.E−05	6.99.E−02	6.55.E−03
	18	産廃処理, 繊維くずサービス	1.10.E−03	1.48.E−05	3.45.E−02	3.15.E−03
	19	産廃処理, 金属くずサービス	5.55.E−04	8.04.E−06	2.60.E−01	1.56.E−02
	20	埋立処理, 産業廃棄物, 紙くず類サービス	4.61.E+00	5.96.E−02	1.40.E+02	1.27.E+01
		小計	4.82.E+00	6.81.E−02	1.63.E+02	1.49.E+01
その他	21	他に分類されない輸送用機械器具, 4桁	8.84.E+01	2.79.E+03	3.89.E+02	1.22.E+02
	22	他に分類されない輸送用機械器具, 4桁	2.50.E+01	7.89.E+02	1.10.E+02	3.46.E+01
	23	他に分類されない輸送用機械器具, 4桁	7.37.E+01	2.32.E+03	3.24.E+02	1.02.E+02
		小計	1.87.E+02	5.90.E+03	8.22.E+02	2.59.E+02
			1.94.E+07	1.31.E+05	1.09.E+05	4.79.E+03

表 1：インベントリー分析結果

項目	原料	加工	廃棄	その他	合計
資源, 木材, 日本, 陸域, 再生可能材料_kg	1.94.E+07	9.66.E-03	4.82.E+00	1.87.E+02	1.94.E+07
排出, CO2(発生源不特定), 大気, 不特定_kg	1.25.E+05	3.55.E-04	6.81.E-02	5.90.E+03	1.31.E+05
排出, NOx, 大気, 不特定_kg	9.73.E+04	1.04.E+04	1.63.E+02	8.22.E+02	1.09.E+05
排出, SOx, 大気, 不特定_kg	3.48.E+03	1.03.E+03	1.49.E+01	2.59.E+02	4.79.E+03

表２：工程ごとのインベントリー分析

	木材	CO2	NOx	SOx	合計
人間健康		2.52E+05	1.91E+07	1.05E+07	2.98E+07
社会資産		4.22E+04	9.32E+06	5.19E+05	9.88E+06
生物多様性	2.39E+09				2.39E+09
一次生産	1.53E+09		1.19E+06	6.67E+04	1.53E+09
合計	3.92E+09	2.94E+05	2.96E+07	1.10E+07	3.96E+09

表３：統合化評価表

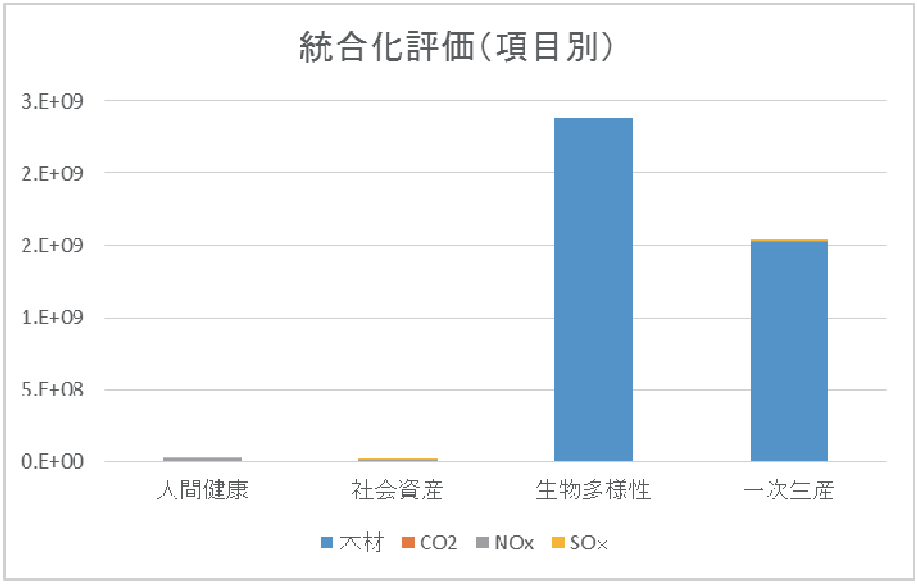


図２：統合化評価（項目別）

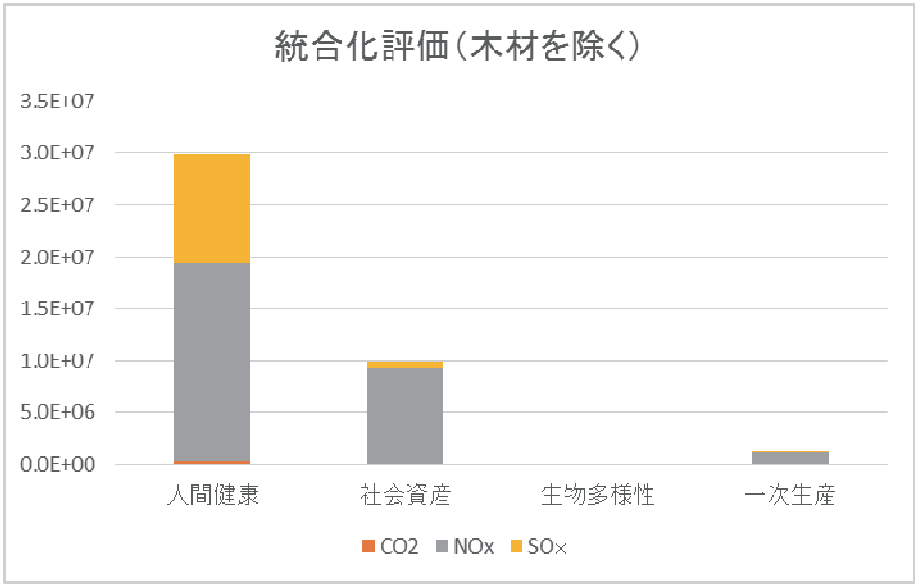


図３：統合化評価（木材を除く）

ビジネスにおける LCA 情報の意思決定への適用

Application of LCA Information on Business Decision Making

○大橋 憲司
Kenji Ohashi
株式会社資生堂
kenji.oohashi@to.shiseido.co.jp

1. はじめに

世界経済フォーラムは World Risk Report 2016 において、世界経済に負の影響を与えるリスク要因として、「気候変動問題の緩和と適応の失敗」「大規模な移民、難民」に次いで「水危機」を挙げている。欧州を中心とした ESG 投資増大の影響を受け、持続可能性、その中でも特に水リスクをどのように捉えているか、また水リスク管理の方針に関する情報開示圧力が強まりつつある。

こうした背景を受け、我々は当社の国内化粧品事業を対象とした Water Unavailability Footprint 分析に取り組み、第 11 回研究発表会で報告した。バリューチェーンを通じた間接的水資源消費の中でも特に大きな寄与を占める原料調達に注目し、国別の水資源消費量を集水可能性により重み付けしてマップ化したが、それだけでは事業リスク分析としても、またビジネスの意思決定材料としても不十分であった。

本研究では、こうした組織の Water Footprint 分析の結果について、ビジネスの意思決定材料として活用することを念頭に、水資源に関連する事業リスク分析への応用を試みた。

2. 調査概要

2.1 調査対象

2015 年度の当社国内化粧品事業に関連する、生産事業所における水資源の直接利用および原材料調達による間接利用を対象として水の供給に関わる事業リスクの評価を実施した。

2.2 水リスクの定義

ESG の文脈でしばしば「水に関わる事業リスク」あるいは「水リスク」と表現されるものの、学術的に明確な定義があるわけではない。そもそも、「水リスク」とは何であろうか？現時点で水資源を大量に消費している地域やプロセスは「水リスクが高い」と言われることが多いが、しかしながら、水資源が豊富に存在する地域や水系で、その地域の健全な水循環を阻害しない範囲で水を使用している限り、水リスクが高いと評価することは妥当ではない。

そこで本研究では、現在の気象環境あるいは地政環境で使用可能な水資源の量や質が、何らかの環境変化で使用できなくなることにより、事業活動に負の影響を及ぼすことを「水リスクが高まる」とした。2010 年現在の事業環境におけるリスクの大きさを「1」として、リスクファクター x が変化した時の関数 $f(x)$ として水リスクを定義した。リスクファクターとしては、利用可能な水資源量の変化率として Hanasaki *et al.*による気候変動シナリオ（RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0、RCP 8.0）条件下での 2011～2040 年、2041～2070 年、2071～2100 年における降雨量の相対変化量 [1]を、水資源の利用に関する競合を示す指標として各国の人口動態予測 [2]を用いた。雨量変化および人口動態によるリスクへの寄与の割合は、産業セクターや水の利用実態により異なることが考えられることから、評価者が任意に重み付けを行えるように設定した。

2.3 生産事業所における水リスクの定義

水リスク関数 $f(x)$ を次式のように定義した。

$x < 1$ の場合　$f(x) = 1 - (1 - x) / 2$

$1 \leq x < \mathrm{T}min$ の場合　$f(x) = 1$

$\mathrm{T}min \leq x < \mathrm{T}max$ の場合

$$f(x) = \left(\sin\left(\frac{(x - \mathrm{T}min) * \pi}{(\mathrm{T}max - \mathrm{T}min)} - \frac{\pi}{2} \right) + 1 \right) * 0.5 * (\mathrm{R}max - 1) + 1$$

$\mathrm{T}max \leq x$ の場合　$f(x) = \mathrm{R}max$

T*min*: リスクが変化し始める x の閾値
T*max*: リスクが最大値となる x の閾値
R*max*: リスクの最大値

生産事業所の操業が停止となる降雨変化量を T*max*、その時のリスクの最大値を R*max* として、上記の関数により算出される総合リスク（相対値）に出荷金額に乗じることにより、生産事業所ごとの推定損害額を評価した。

2.4 原料素材作物の栽培に関する水リスクの定義

保湿剤や油分、界面活性剤といった化粧品原料には、その成分の一部ないし全てが植物由来素材（グリセロール、脂肪酸、糖など）により構成されるものも多い。こうした原料素材を生産するために必要となる素材作

物栽培に利用される水量は、自社の生産工場における直接的な水の利用量に比べて著しく大きく、素材作物の栽培に必要な水資源利用に関するリスクを評価することは極めて重要である。このため、素材作物種および生産国ごとに、雨量変化による水資源減少リスク、雨量増加に伴う日照不足リスク、人口増加に伴う水資源への競合リスクをそれぞれ 2.3 項の関数 $f(x)$と同様に定義し、評価を行った。

雨量が減少する場合には、雨量変化による資源量低下のリスクと人口動態による競合リスクの双方が任意に重み付けられた割合で総合リスクが評価されるものとし、雨量が増加する場合には、日照不足に伴うリスクのみが総合リスク（相対値）として評価されるものとした。算出した相対リスクに、栽培に投入される水資源量および栽培国における Water Unavailability Factor[3]を乗じることで作物リスクとした。

3. 結果

3.1 生産事業所における水リスク評価

生産事業所 A と B における雨量変化による水資源量低下のリスク（旱魃リスク）と人口動態による競合リスクについて、4 : 1 で重み付けをして総合的な水リスクを評価した結果を表 1 に示す。

	年代	旱魃リスク	競合リスク	総合リスク
事業所 A	2011-2040	0.915	0.982	0.928
	2041-2070	0.896	0.910	0.899
	2071-2100	0.903	0.845	0.891
事業所 B	2011-2040	1.004	1.038	1.011
	2041-2070	1.087	1.183	1.107
	2071-2100	1.043	1.338	1.102

表 1 事業所 A・B の水リスク比較

その結果をもとに、各生産事業所の操業リスクを、損失金額で評価した結果を図 1 に示した。

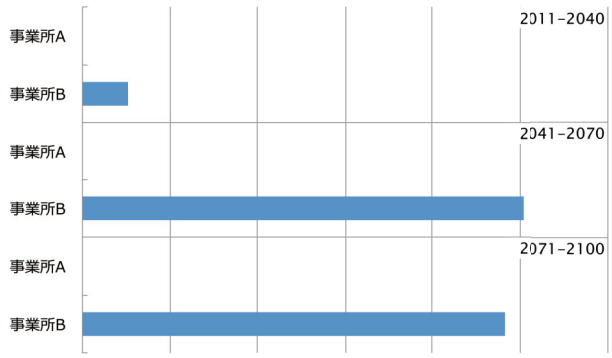


図 1 事業所 A・B の機会損失による損害額

事業所 A では、今世紀後半にかけて降雨量が増え、人口も減少傾向にあることから旱魃リスクおよび競合リスクが発生しないが、事業所 B においては雨量が減る一方で人口が増加することから、水リスクおよびそれによる機会損失が発生することが予想される。このようにリスクの可視化あるいは金額化を行うことで、「給水あるいは節水に関して投資を行うとすれば、事業所 B に集中して行うべきである」という意思決定の判断材料として活用できると考えられる。

3.2 原料素材作物の栽培に関する水リスク評価

サトウキビの水リスクについて、評価した結果を表 2 に示す。同一種の作物であっても栽培国によってリスクの値には大きな違いが認められ、作物種だけでなく栽培地ごとに異なったリスクへの対処が必要となることを示唆している。

作物と水消費量		年代	総合リスク	作物リスク
サトウキビ（ブラジル）		2011-2040	1.73	138
雨水	122 m^3/t	2041-2070	1.50	120
表層水	5.41 m^3/t	2071-2100	1.01	80.5
サトウキビ（インド）		2011-2040	1.24	366
雨水	122 m^3/t	2041-2070	1.90	561
表層水	141 m^3/t	2071-2100	1.48	437

表 2 サトウキビの水リスク比較

4. 今後の課題

本研究では、評価地点における雨量変化による資源量減少と日照の減少、人口の変化による競合についてのみ、水リスクの要因として考慮した。しかしながら本来は、流域上流地域における雨量変化と水の移動、産業構造の変化、GDP、水インフラの整備状況、同一水系に立地するステークホルダーの水利用の状況など、様々な要因が深く関わっている。特に、素材作物栽培に投入される間接的な水消費については、素材の代替性、栽培地の代替性、作物種の代替性も、リスク要因として大きく影響することから、これら考慮した、より精緻な分析が求められる。

加えて、リスクが上昇し始める閾値、リスクが最大値となる閾値についても、過去の気象データなどから合理的な設定方法について、検討が加えられるべきであろう。

5. 引用文献

1) N. Hanasaki *et al.* : *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, (2013), pp. 2393–2413
2) World Population Prospects: United Nations (2015)
3) Shinjiro Yano *et al.* : *Sustainability*, 7, (2015), pp. 9753-9772

Assessment of cost-benefit and CO_2 reduction potentials of an integrated municipal solid waste management and urban symbiosis system

○Lu Sun[*1,2)], Minoru Fujii[2)], Tomohiro Tasaki[1,2)], Satoshi Ohnishi[3)]
1) The University of Tokyo, Japan, 2) National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan,
3) Tokyo University of Science, Japan
Sun.lu@nies.go.jp

Abstract:

Resources efficient utilization is an important way to promote the decoupling of economic growth and environmental impact A cyclic economy will be achieved by coupling maximum waste to energy with material recycling. As a waste to energy way, the overall energy recovery efficiency improvement of waste incineration became hot issue in the past ten years. Since 73% of municipal solid waste (MSW) in Japan is treated by incineration, however, the average power generation efficiency is 12%, which has big room for improvement. Recycling is among the highest preferences of waste treatment options. Currently, the MSW recycling rate of Japan is 20%, which indicates a potential and need to improve.

This study tried to propose an efficient regional MSW management system for higher waste recycling rate and waste-to-energy rate through an integrated MSW management and urban symbiosis network. Then quantitative analysis the cost-benefit, the CO_2 reduction effect and waste to energy rate of the integrated system.

The Tokyo city was selected as case area. After forecast the amount of MSW from 2013 to 2030, the cost benefit of different MSW treatment scenarios has been analyzed. Three scenarios are set, with BAU scenario being that the MSW treatment system are the same as current situation. Scenario 2 assumes that MSW is treated by source separation treatment policy, which means plastic & paper, food waste is separated collection from combustible waste and being used as inputs to substitute fossil fuels, sent to fermentation treatment respectively. Scenario 3 assumes that MSW is treated by the large scale and intensive treatment policy.

The results showed that, the new MSW treatment policy will not only contribute to waste management, but also to the development of a sound material-cycle society that actively recycles and uses waste. Compared with BAU scenarios, in 2030, MSW source separation treatment will increase the total cost, while MSW intensive treatment will save the MSW management funding. For waste to energy rate, both source separation and intensive treatment scenario will obviously increase the waste to energy rate. Lastly, source separation treatment scenario showed great potential of the CO_2 emission reduction in 2030. It is expected that the research can not only contribute to the establishment of more efficient regional recycling system, but also can contribute to the low carbon society development.

1. Municipal solid waste treatment design

Three scenarios are set, with BAU scenario, scenario 2 and scenario 3. The detail of different scenarios are showed in Fig 1.

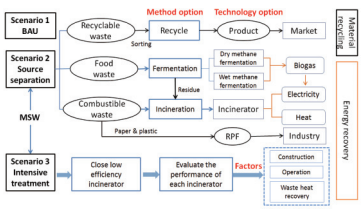


Fig 1. MSW treatment scenario design

2. Cost benefit analysis

The results showed that the collection and RPF production is the main cost of source separation. In 2030, the RPF production and waste collection cost will account for 47% and 44% of the total cost. As for the benefit, incineration reduction contribute the most of the benefit. Because waste incineration maintenance is much higher than waste fermentation.

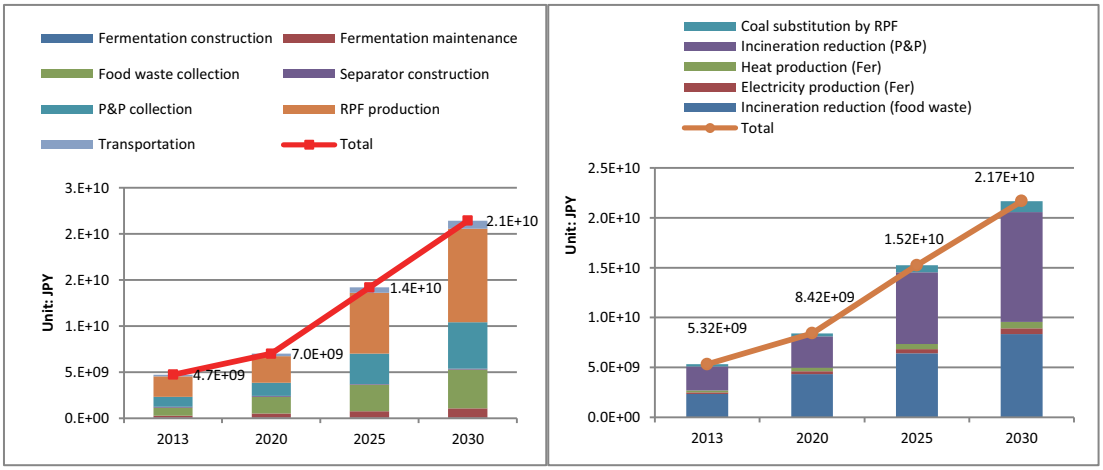


Fig.2 Total cost and benefit of MSW source separation (2013-2030)
(Left: source separation; Right: intensive treatment)

3. Energy recovery rate

For MSW source separation treatment, the energy recovery efficiency will increase. The ERE increase from 9.52% in 2013 to 13.50% in 2030 (4.49 billion MJ).While the ERE of intensive treatment in 2030 is 15.4% (4.97 billion MJ). It indicate that the energy recovery efficiency will be improved since the transform of treatment method. While for the energy recovery, incineration and electricity production still dominate the total energy recovery.

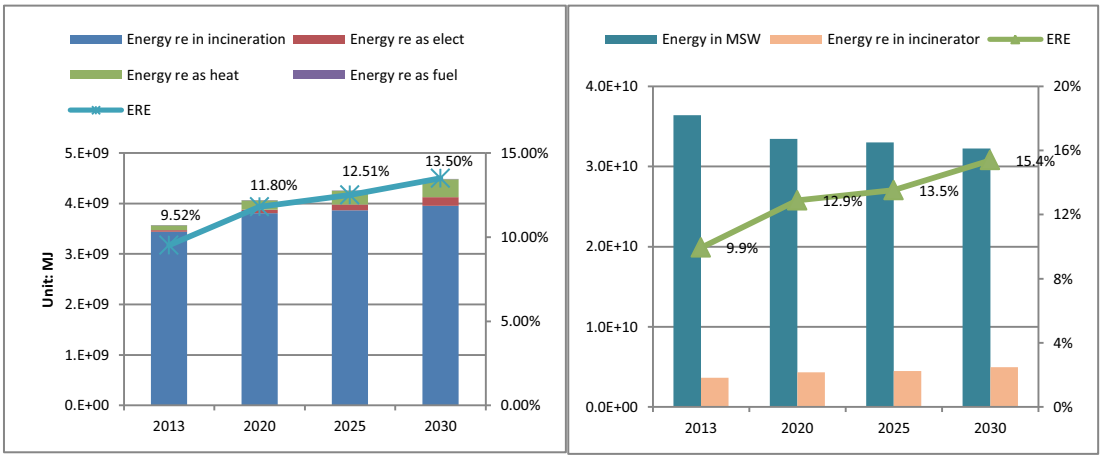


Fig.3 Energy recovery efficiency (ERE) of source separation and intensive treatment
(Left: source separation; Right: intensive treatment)

Acknowledgments

This work was supported by the NSFC (71461137008, 71325006, 71311140172).and This research was supported by the Environment Research and Technology Development Fund (3K143016 and 2-1404).

Supporting Information

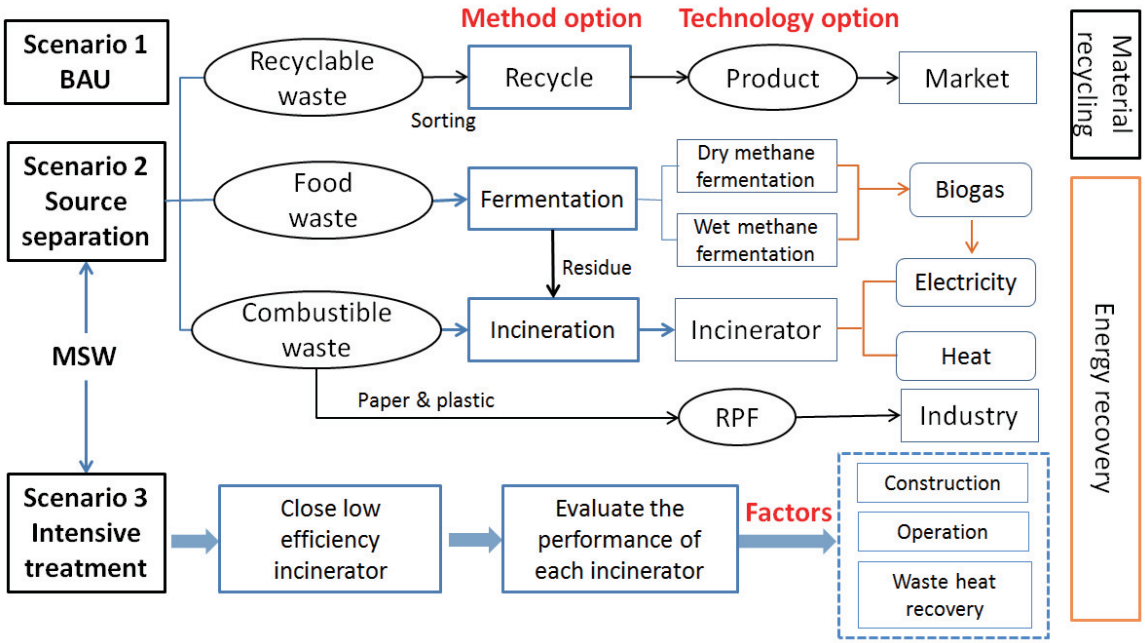


Fig 1. MSW treatment scenario design

東南アジアにおける家電製品の素材リサイクルによる TMR 削減ポテンシャル評価

Potential Evaluation of Total Materials Requirement Reduction by Materials Recycling of Home Appliances in Southeast Asia

○山末英嗣*[1)]、安永玲華[2)]、Jordi Cravioto[1)]
Eiji Yamasue, Reika Yasunaga, Jordi Cravioto
1)立命館大学, 2) 京都大学
* yamasue@fc.ritsumei.ac.jp

1. 背景

東南アジア諸国において使用済み家電製品の発生量はその普及拡大や使用期間の短縮化によって急増している．例えば，タイでは 2000 年に約 70%だった冷蔵庫の普及率が 2013 年には約 95%まで上昇している[1)]．また，国民の購買能力の上昇や国の高効率製品への買い替え政策が促進された結果，使用済み家電製品の推算年間廃棄量は, テレビは 2010 年の 130 万台から 2018 年には 200 万台, 冷蔵庫は 99 万台から 120 万台, エアコンは 37 万台から 59 万台まで増大すると予想されている[2)]．

大量に廃棄されている使用済み家電製品の集まりは一つの大きな鉱山と考え「都市鉱山」と呼ばれており，筆者らはそれらに含まれる個々の使用済み製品を「都市鉱石」と呼んでいる[3)]．今後さらに家電製品の消費・廃棄量の増大が予想される東南アジアにおいて，これらの都市鉱石から資源を回収することは，東南アジア諸国の持続可能な発展を考える上で重要な要素となる．都市鉱石の有効性を資源の観点から評価する指標として筆者は TMR(関与物質総量：Total Materials Requirement)に注目している．筆者らは TMR の観点から，日本における携帯電話やノートパソコン，家電製品を対象に都市鉱石と自然鉱石を比較し，都市鉱石の有用性について論じてきた[3,4)]．

本研究では，ベトナム，タイにおいて家電製品の素材リサイクルによる TMR 削減量のポテンシャル値を推算し，その潜在的効果について評価する．

2. 手法

2.1.対象製品

本研究では，冷蔵庫，洗濯機，液晶テレビ，エアコン耐久消費財家電 4 品目を対象とした．

2.2.シナリオ設定

本研究では，使用済み家電製品から資源を回収し，再び家電製品の素材として利用される，自己循環型マテリアルリサイクルを仮定とした削減ポテンシャル量を推算する. そのため, 以下の 3 シナリオを設定した．

(1)シナリオ 1（中国での素材リサイクル）

現行のタイ, ベトナムの家電リサイクルシステムは，その廃棄方法が制度化されていない．使用済み家電の多くは回収業者によって回収・手解体が行われた後，リサイクル工場[5)]で，素材ごとに分別され，海外へ輸出されている．シナリオ 1 では，主な輸出先である中国で，鉄・銅・アルミニウムは破砕・選別・溶解・鋳造の工程を経てリサイクルされ, 混合プラスチックは，破砕・比重選別を経て，再生ペレットにリサイクルされることを想定した．

(2)シナリオ 2（タイ国内での素材リサイクル）

シナリオ 2 では，技術向上，法制化が進み，国内で素材リサイクルの工程が行えるようになった場合の可能性を，タイにおいて検討する．家電製品が回収業者によって手解体された後，リサイクル工場でシナリオ 1 と同様のリサイクル工程を経ることを想定した．

(3)シナリオ 3（タイ国内での素材リサイクル）

シナリオ 3 では，タイにおいて，冷媒回収装置によって冷媒が回収され，その後，機械による解体が行われ，シナリオ 1 と同様のリサイクル工程を経ることを想定した．ただし，ここでは全て同工場内でおこなわれる一貫処理リサイクルシステムを想定した．

2.3.使用データ

自然鉱石 TMR は原田・中島らが算定したデータ[6)]から，都市鉱石 TMR の算出で使用した各工程に必要な投入物質量は JAMAI-LCA のデータから入手した[7)]．都市鉱石 TMR における全輸送距離は，著者らの既存論文と同様のやり方で行った[3)]. ただし, シナリオ 1 における中国への輸送は，タイにおいては船舶で，レムチャバン港から広東港までのとし，ベトナムにおいては，ハイフォン港から広東港までとし，距離は SEA-DISTANCES から求めた[8)]．

2.4.システム境界と TMR 削減量の定義

ある素材を自然鉱山から得る際の TMR を自然鉱石 TMR(NO-TMR)，都市鉱山からリサイクルして得る際の TMR を都市鉱石 TMR(UO-TMR)と定義する．都市鉱石 TMR のシステム境界は，使用済み製品が発生し

た段階から開始し，素材としてリサイクルされるまでとする．シナリオ 1 においては，中国から再びタイ，ベトナムに戻されるまでとし，使用中の物質投入については考慮しない．リサイクルされない部分は「都市鉱石ずり」と定義し，都市鉱石ずりの処理はシステムバウンダリー外とする．鉄・銅・アルミニウムのリサイクル工程で必要な不純物除去や成分調整は考慮しない．また，混合プラスチックの素材別回収は，比重選別の後，X 線分析選別や静電選別を経て高純度な素材別再生ペレットにリサイクルされるが [9]，本分析では比重選別までを考慮した．

対象製品を全て 1 次資源から生産した場合(NO-TMR)と，全て 2 次資源(UO-TMR)のみで生産した場合の TMR の差分を「TMR 削減量」として定義した．これを推算することで，同量の資源を自然鉱石から得る場合の TMR と比べ，TMR がどれだけ削減出来るのかということを定量的に示すことができ，環境影響削減効果を評価する新たな一指標になると考える．

3. 推算結果および考察

初めに，三ヶ国の TMR 削減量を比較したものを図 1 に示す．日本においては，4 品目の合計 TMR 削減値である．ここから日本が 3 ヵ国の中で，最も TMR 削減量が大きいという結果になった．また，ベトナムはテレビ，タイはエアコンにおいて家電リサイクルによる TMR 削減効果が大きいといえる．

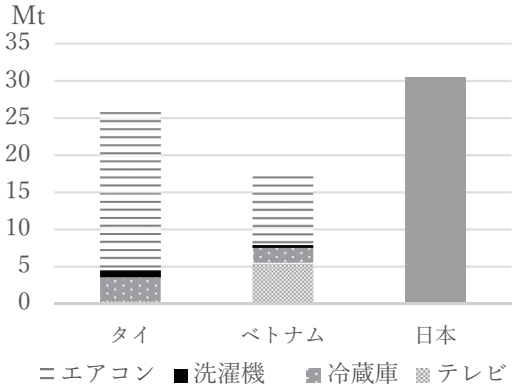


図 1　3 ヵ国の製品別 TMR 削減量

タイのシナリオ別の分析結果では，シナリオ 2 の TMR 削減量が 26.6Mt と最も大きく，またその中でもエアコン, テレビの削減率は他の家電製品と比べて 2.5 倍もの差があった．これは，テレビとエアコンが都市鉱石 TMR と自然鉱石 TMR の差が大きい銅を多く含んでいるためである．素材別にみると，全ての家電製品で銅，アルミニウム，プラスチックは自然鉱石より都市鉱石から資源を得た方が TMR は少ないことが示されたが, 鉄は家電中の組成が大きいにも関わらず，自然鉱石から資源を得た方が TMR は少ないという結果になった. なおシナリオ 3 の削減量は 25.9Mt と 3 つのシナリオの中で最も小さかったが，このシナリオでは，エアコン，冷蔵庫の冷媒フロンの回収，機械による解体・分解を想定しているため，環境・健康被害を削減することができる. この評価は今後の課題である.

シナリオ間の都市鉱石 TMR をプロセス別に比較したものを図 2 に示す．ここから溶解・鋳造などリサイクル工程にかかる TMR の比率が高く，輸送にかかる TMR は全体の数%と低くなった. 輸送距離が最も長いシナリオ 1 においても，中国までの輸送に一度に多く運べる船舶を用いたため，他のシナリオと比べ，大きな差はみられなかった.

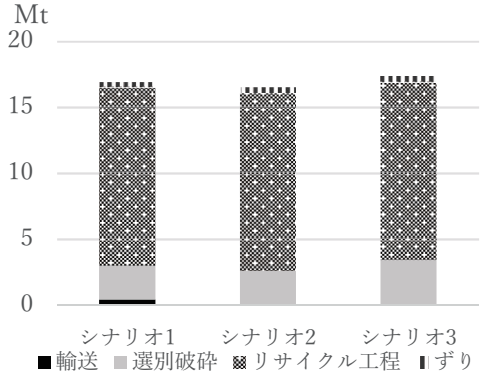


図 2　タイのシナリオ別都市鉱石 TMR の比較

4. 参考文献

1)株式会社大和総研 : “新興国における主要物品の需要拡大予測を踏まえた国際展開モデルの構築に関する調査”, (2015)

2)Japan International Cooperation Agency: “Data Collection Survey on E-waste Management in Malaysia and Surrounding Countries”, (2014), pp.55-101

3)山末英嗣，南埜良太，醍醐市朗，奥村英之，石原慶一 : 日本金属学会誌，74(12)，(2010)，pp.811-819

4)南埜良太，山末英嗣，中島謙一，村上進亮，奥村英之, 石原慶一 : 日本 LCA 学会誌, 6(3), (2010), pp.251-258

5)株式会社エックス都市研究所 : “マレーシア及び近隣国 E-waste 管理に関する情報収集・確認調査”, (2014), pp.65-108

6)中島謙一，井原清，原田幸明 : “資源端重量”，(2009)

7)Japan Environmental Management Association For Industry: JEMAI-LCA Pro Ver. 2 Option Data Pack, (2007)

8)SEA-DISTANCES.ORG.http://www.sea-distances.org/

9)廣瀬悦子，藤崎克己 : 日本 LCA 学会論集，3(67)，(2011)，pp.422-433

紙おむつのクローズドリサイクルの LCA と業界内カーボンオフセット方法論の考察

Lifecycle Cycle Assessment on Closed-loop Recycling System of Disposable Diapers and Discussion on Methodology of Carbon Offset in the Industry

○田口 直*[1)]、本田雄暉 [1)]、松本 亨 [1)]、長 武志 [2)]
Sunao Taguchi, Yuki Honda, Toru Matsumoto, Takeshi Cyo
1) 北九州市立大学, 2) トータルケア・システム株式会社
* x6mac007@eng.kitakyu-u.ac.jp

1. はじめに

高齢化の進展により使用済み紙おむつの排出量は年々増加傾向にある。現在、使用済み紙おむつの多くは焼却処理されている。紙おむつのリサイクルについては、汚物の付着による感情的・衛生的問題、複合素材であるため分離選別の困難性等の問題から、自治体の清掃工場におけるごみ発電を除くと、固形燃料（RPF）化が一部で実施されている程度である。

紙おむつは、パルプ、プラスチック、高分子吸収剤の複合素材で主に構成されている。マテリアルリサイクルにはまだ課題があるものの、使用済み紙おむつから再生パルプを抽出し、建築資材の材料として再利用することや、再び紙おむつの材料として循環利用するための技術開発が進められている。また、一部メーカーでは、いわゆる「紙おむつ to 紙おむつ」のクローズドリサイクルの検討もされており、これが実現すれば、紙おむつの再資源化量増大に伴う再生資源の安定的な循環利用に貢献するものと考えられる。

そこで、本研究では、ライフサイクルアセスメントにより紙おむつリサイクルの温室効果ガスの削減量を算定した。建設資材への利用については、著者らがすでに LCA を実施し、温室効果ガスの削減効果を確認しているが [1)]、ここでは、プラスチックの擬木への再利用を評価対象に加える。また、現状ではマテリアルリサイクルによる資源代替による効果がカーボンオフセット等のカーボンの経済価値創出制度において認められるケースはほぼないが、既存のオフセット・クレジット制度の方法論やデータの信頼性を紙おむつのリサイクルのケースと比較することで課題を明らかにし、業界によるデフォルト値の準備とモニタリングの効果的実施による信頼性向上策を検討した。

2. 紙おむつのリサイクルの LCA

2.1 評価対象

紙おむつによる環境負荷削減効果として、LCA を用いて CO2 排出量の算出を行う。本研究で対象とした再資源化システムは水溶化処理によりプラスチックとパルプ等を分離し、建築資材と RPF に再利用するケースである。評価のシステム境界は、使用済み紙おむつがリサイクルプラントに搬入されてから、各素材へ分解され、二次利用可能な状態に再生されるまでである。つまり、再生パルプが防火板製造工場へ搬入されるまで、廃プラスチックが RPF に加工され燃料として使用されるまで、低質パルプおよび脱水汚泥が発酵肥料へと再商品化されるまでとした。比較対照としては、従来の使用済み紙おむつ処理を想定し、一般廃棄物として焼却処理、埋立処分されるものとした。再生パルプの比較対照はやはり防火板製造に用いられるバージンパルプとした。

2 つ目の再資源化システムは、やはり水溶化処理によりプラスチックとパルプ等を分離し、建築資材と擬木に再利用するケースである。評価のシステム範囲は、擬木が生産されるまでを評価範囲とした。この比較対照としては、1 つ目と同様に従来の使用済み紙おむつ処理を想定したが、擬木の比較対照は工業用プラスチックの製造とした。機能単位は評価対象リサイクルプラントに搬入される使用済み紙おむつ 1 年間分の処理とした。

2.2 評価結果

評価結果を図 1 に示す。この結果より、紙おむつのリサイクルによる CO_2 削減効果は、水溶化処理システ

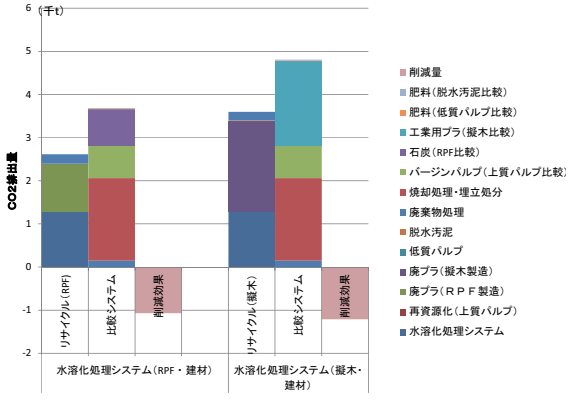


図 1 紙おむつのリサイクルによる CO_2 削減効果

ム（RPF・建材）、水溶化処理システム（擬木・建材）ともに約 1,000t- CO_2 の削減になることがわかった。

2.3 クローズドリサイクルの検討状況

ここでは、ユニ・チャームにおいて検討されている事例を紹介する [2]。新たな技術としてオゾン処理を行うことで使用済み紙おむつのパルプをバージンパルプと同等の品質にする方法が開発されている。使用済み紙おむつからバージンパルプと同等品質のパルプを再生し資源化する技術は、焼却処理より環境負荷が低く、さらに改善を加えることで 30%以上の温室効果ガス削減効果があるとされている。また再生パルプであっても感染性の危険性のないバージンパルプと同等の素材になることが確認されている。

3. カーボンオフセット方法論の考察

3.1 未利用資源の活用による GHG 排出削減対策

GHG 排出削減・吸収に資する技術ごとに、適用範囲、排出削減・吸収量の算定方法及びモニタリング方法等を規定するものとして J-クレジット制度がある [3]。未利用資源（廃熱、バイオマスを含む）の活用による GHG 排出削減対策に関しては、複数の登録例があるので、ここではそれらと使用済み紙おむつのリサイクルを比較することでカーボンオフセットの可能性を考察する。

3.2 考察の視点

考察の視点としては、現在登録されている方法論の削減対策による資源・エネルギーの代替関係の把握と、その GHG 削減量への換算に用いる係数がデフォルト値（あるいはプロジェクト固有値）かモニタリングなのか、さらにその信頼性を比較することとする。特にデフォルト値の場合の信頼性については、どのように正当化された値かに着目し比較・検討する。

3.3 比較結果

カーボンオフセット方法論の比較結果を表 1 に示す。ここで抽出したカーボンオフセット方法論については、削減対策による資源・エネルギーの代替関係は全てモニタリングであり、GHG 削減量の換算はデフォルト値であることがわかる。ここで抽出した方法論のうち、「ポルトランドセメント配合量の少ないコンクリートの打設」を見ると、ポルトランドセメントを高炉スラグで代替することによる CO2 削減量を算定しており、紙おむつのマテリアルリサイクルに近い。CO2 削減量を算定には、ポルトランドセメントと高炉スラグ製造時の排出係数の差を用いており、セメント協会『セメントの LCI データの概要』の値が推奨されている [3]。使用済み紙おむつのリサイクルの場合は、様々な素材を同時に対象とすると信頼性の担保が困難であろうが、例えばプラスチックに絞ることで単純化することはありえる。資源の分離・抽出過程（水溶化処理）を行うリサイクル事業者におけるエネルギー消費量と再生資源の利用サイトにおける代替率をモニタリングすることで信頼性は担保できると考えられる。さらに、クローズドリサイクルならば、資源代替率を自社内でモニタリング可能となる。

4. まとめ

本研究では、使用済み紙おむつのマテリアルリサイクルを対象に、水溶化処理によるプラスチック、パルプ等の分離・抽出と、建築資材と RPF あるいは擬木への再利用を多少に LCA を実施し、GHG 削減量を評価した。さらに、既存のカーボンオフセット方法論と比較することにより、使用済み紙おむつのマテリアルリサイクルのカーボンオフセット方法論認証の可能性について考察した。

5. 引用文献

1) 藤山淳史, 竇 応瑛, 松本 亨, 日本 LCA 学会誌 8(1), （2012）, pp37-44
2) ユニ・チャーム : “使用済み紙おむつ資源化技術を開発”, 入手先 <http://www.unicharm.co.jp/company/news/2015/1201622_3936.html>, （2017-01-04）
3) J-クレジット制度事務局 : , 入手先 <https://japancredit.go.jp/about/methodology/>, （2017-01-04）

表 1　カーボンオフセット方法論の比較

方法論	削減対策による資源の代替関係		モニタリングorデフォルト	GHG削減量の換算	モニタリングorデフォルト
	資源	代替物質			
廃棄物由来燃料による化石燃料又は系統電力の代替	化石燃料	廃棄物由来燃料	廃棄物由来燃料使用量・単位発熱量をモニタリング	廃棄物由来燃料使用時のGHG排出係数	デフォルト
ポルトランドセメント配合量の少ないコンクリートの打設	ポルトランドセメント	高炉スラグ	ポルトランドセメント・高炉スラグ使用量をモニタリング	ポルトランドセメント・高炉スラグ製造時のGHG排出係数	デフォルト
バイオ液体燃料(BDF・バイオエタノール・バイオオイル)による化石燃料又は系統電力の代替	化石燃料又は系統電力	バイオ液体燃料	バイオ液体燃料使用量・単位発熱量をモニタリング	バイオマス液体燃料使用時のGHG排出係数	デフォルト
バイオマス固形燃料(下水汚泥由来バイオマス)による化石燃料又は系統電力の代替	化石燃料又は系統電力	バイオ固形燃料	バイオ固体燃料使用量・単位発熱量をモニタリング	バイオマス固体燃料使用時のGHG排出係数	デフォルト
バイオガス(嫌気性発酵によるメタンガス)による化石燃料又は系統電力の代替	化石燃料又は系統電力	バイオガス	バイオガス使用量・単位発熱量をモニタリング	バイオガス使用時のGHG排出係数	デフォルト
食品廃棄物等の埋立から堆肥化への処分方法の変更	堆肥	食品廃棄物等	廃棄物重量・CH4回収量をモニタリング	廃棄物の堆肥化によるGHG排出係数	デフォルト
紙おむつのクローズドリサイク	バージンパルプ	再生パルプ	再生パルプ使用量をモニタリ	再生パルプ製造時のGHG排出係数	デフォルト

人為的炭素滞留・循環構造の体系的検討

Systematic Consideration on Anthropogenic Carbon Retention and Circular Structure

○大野 肇*[1)]、佐藤博一 [1)]、福島康裕 [1)]
Hajime Ohno, Hirokazu Sato, Yasuhiro Fukushima
1) 東北大学
* ohno@sis.che.tohoku.ac.jp

1. 緒言

化石燃料の消費に伴い温室効果ガスが発生する一方で、一部の炭素は製品中へ固定化される。固定化され社会に滞留する炭素は、各製品の寿命に従って環境中へ放出されるか、マテリアルリサイクルを経て再び滞留する。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は炭素を吸収する媒体として大気、海洋、土壌及び森林を定義した [1)]。加えて、既報 [2)]では石油化学製品由来の炭素固定量を産業連関マテリアルフロー解析(IO-MFA)により算出し、2005 年一年間で社会における炭素滞留に加わった炭素の増加量を産業部門毎に定量化した。IPCC による定義のうち、森林に関しては素材として利用可能な状態で炭素を固定していると言え、IO-MFA により求められた人為的な炭素固定も同様に炭素含有製品のリサイクル方法によっては再び素材となることが可能であると言える。このことから、森林における炭素固定を比較対象として、人為的な炭素固定の量的スケールと循環構造を理解することは、社会に滞留する炭素の CO_2 として放出を低減しマテリアルとして循環させる構造の構築に有用であると考えられる。

本報告では、産業連関分析マテリアルフロー解析モデル(WIO-MFA モデル)[3)]を用い、石油化学基礎製品由来の炭素フロー及び最終製品中の炭素量を定量し、リサイクル量の統計値と照らし合わせることで、人為的炭素滞留の純増量及び循環構造についての検討を行う。

2. 手法

2.1 WIO-MFA モデル

WIO-MFA モデルは、国内での産業活動を網羅した産業連関表を基本とし、約 400 部門の製品に対して複数の分析対象マテリアルの含有組成分析、並びにそれらの流入経路の遡及分析が可能である。本報告にて固定炭素源として着目する石油化学基礎製品及び石油化学系芳香族製品の多様な利用形態の把握において、当モデルの網羅的な解析は非常に有効である。

WIO-MFA モデルでは分析対象の素材 M を設定し、式(1)を用いて製品 P 中の M の組成C_{MP}を分析する。

$$C_{\mathrm{MP}} = \tilde{A}_{\mathrm{MP}}\left(I - \tilde{A}_{\mathrm{PP}}\right)^{-1} \qquad (1)$$

ここで、$\tilde{A}_{\mathrm{MP}}$及び$\tilde{A}_{\mathrm{PP}}$は歩留まり落ちや非物質投入を排除した投入係数行列であり、それぞれ P の単位生産あたりの M の物量投入、P の単位生産あたりの中間製品の投入を表している。モデルの詳細に関しては既報(文献 3 他)に譲る。

2.2 分析対象

本報告では 2005 年版国内産業連関表を基準とし、素材 M すなわち固定炭素源として石油化学基礎製品及び石油化学系芳香族製品に着目する。基準となる IO 表における当該部門の製品分類とそれらの分子量及び炭素量は既報 [2)]に準じる。「その他の～製品」に関しては IO 表付帯の品目別生産額表記載の細分類に対して分子量及び炭素量を求め、それぞれの生産量との加重平均によって各数値を求めた。$\tilde{A}_{\mathrm{MP}}$の算出に用いる各 M の物質投入は、基準の IO 表の付帯表である物量表から得、さらに各 M の炭素含有率によって炭素投入量として求め、規格化した。単純に物質投入量を用いて収支計算をしないのは、石油化学製品の合成においては縮合重合等に伴い投入物と生産物の間で重量が大きく変化するためであり、分子式から求めた炭素量を基準として「炭素歩留まり」を設定することによって物質収支を合わせることを試みた。

2.3 データ

2005 年版産業連関表を基準とした WIO-MFA により、一次資源から新たに生産された炭素含有製品中の炭素量を推計する。一方で、2005 年に発生したプラスチック廃棄物の量は一般及び産業廃棄物合わせて約 1 千万 t と報告されている [4)]。このうちの樹脂別内訳を基に、各樹脂の炭素含有率を用いて樹脂由来の炭素排出量とし、それぞれのリサイクル形態を考慮して再滞留または放出の切り分けを行う。

人為的炭素滞留の比較対象とする森林における炭素吸収については、日本国温室効果ガスインベントリ報告書から引用した [5)]。

3. 結果

3.1 石油化学製品由来炭素フロー

図 1 に石油化学基礎製品由来の炭素フローの概略

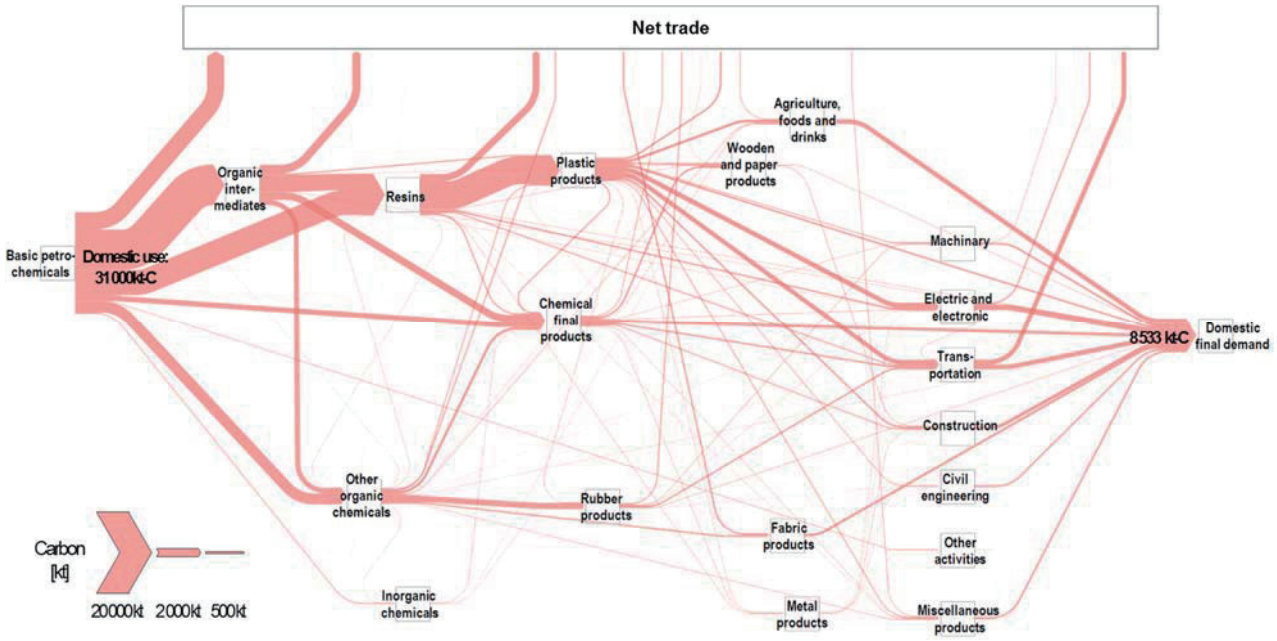


図 1　化学製品由来炭素フロー概略図

を示す。2005 年に石油化学基礎製品として国内産業に投入された炭素は約 3 千万 t であり、そのうちの多くが有機系中間物、樹脂を介してプラスチック製品となり、各最終製品に組み込まれる。一方でゴム製品やその他の化学最終製品として消費される炭素も存在する。最終的に製品として国内における滞留に加わる炭素量は 850 万 t と算出され、一次資源投入に対して最終製品として残る炭素量は 3 割にも満たないことが明らかとなった。さらに、最終製品に含まれる炭素のうち、塗料や接着剤などに含まれるものは、使用中に揮発し大気中に解放される可能性も考えられることから、実際に社会における滞留に加わる石油化学製品由来の炭素量はさらに小さくなることが予想される。

3.2 人為的炭素循環

2005 年に発生したプラスチック廃棄物の内訳 [4]を基に推計されたプラスチック由来炭素廃棄量は 774 万 t であった。そのうち 185 万 t (134 万 t-C)がマテリアルリサイクルされており、その約 43%が国内で利用されていること、他のリサイクル方法では含有炭素は CO_2 として放出される可能性が高いことも考慮すると、単純計算ではあるものの、2005 年の石油化学製品由来の炭素の滞留量純増はおよそ 136 万 t となる。一方で、2005 年における森林の炭素ストックの変化に伴う CO_2 の吸収量は 9270 万 t と報告されており [5]、炭素換算で 2530 万 t となる。このことから、化学製品由来の人為的な炭素の固定は、森林の炭素固定に比べて 20 分の 1 程度の少ない量であるといえる。さらに、木材としての炭素蓄積量変化も報告されており、2005 年では 44 万 t の炭素が廃棄物として排出されている [5]。従って、木材としての炭素滞留も考慮すると、人為的な炭素固定量は 92 万 t となる。

4. おわりに

本報告では、石油化学製品由来の炭素フローについて WIO-MFA を用いて解析することで各段階での炭素の利用形態及び最終製品に含まれる炭素量を定量化すると共に、他の統計から得られた炭素放出量および木材としての炭素蓄積変化量から人為的な炭素固定量についても検討を行った。今後は、炭素含有廃棄物のリサイクルや木材の利用等も含めて同じ IO 上で表記し、同時に WIO-MFA により解析するためのデータ整理が求められる。また、森林との炭素固定量の比較では、人為的な炭素固定量が森林に比べて非常に小さな値であることが明らかとなったものの、まだ単年での評価に過ぎないため、現状で社会に滞留している炭素量の定量を進めることでより包括的な検討を目指す。

5. 引用文献

1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): “*Climate Change 2013: The Physical Science Basis*”, (2013)
2) 大野肇, 菊池康紀, 福島康裕: “第 11 回日本 LCA 学会研究発表会” 柏, (2016), pp. 238-239
3) S.Nakamura and K.Nakajima, Materials Transactions, 46 (12), (2005), pp.2550-2553
4) プラスチック処理促進協会:”プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況”, (2006)
5) 国立環境研究所: “日本国温室効果ガスインベントリ報告書”, (2016)

Classification of Secondary Zinc Resources in Major Countries

○Kyaw Nyunt Maung*[1)], Cherry Myo Lwin[1)], Seiji Hashimoto[1)]

1) Ritsumeikan University

*kyawnyunt.maung@gmail.com, gr220vf@ed.ritsumei.ac.jp

1. INTRODUCTION

For the sustainable use of metals, one must consider as resources not only primary metals in the natural environment but also secondary metals in society. For that purpose, it is important to understand the availability of secondary metals, i.e. secondary metal reserves. Using a framework for classifying secondary resources [1], which is based on a classification framework of natural resources, Maung et al. [2][3] assessed secondary copper reserves and secondary aluminum reserves in major countries. For this study, we applied the classification framework to secondary zinc resources in major countries, including zinc products in use, dissipated zinc during the use phase, disposed EoL zinc products in landfill sites, and lost zinc in mixed metals. This abstract presents results for Japan.

2. METHODOLOGY

In the classification framework of secondary resources (Table 1)[1], the horizontal arrow indicates the level of knowledge such as the form of existence and time of emergence as recyclable or non-recyclable materials. The vertical arrow indicates the possibility of reutilization of secondary materials based on different degrees of profitability. Zinc products in use under economic condition are classifiable as secondary reserves, which are considered economically and technologically producible for reutilization at the time of estimation. Conversely, zinc products in use in sub-economic conditions are regarded as sub-economic secondary resources. Furthermore, zinc products in use under the lowest profitability are assumed as unrecoverable materials. Wastes in managed landfill sites and dissipated materials are classified either as sub-economic secondary resources or unrecoverable materials

The zinc stock in use was estimated using the following equation.

$$ZS_{(t,c,i)} = \Sigma ZC_{(t',c,i)} \times SR_{(t-t',c,i)} \qquad \text{Eq. (1)}$$

Therein, $ZS_{(t,c,i)}$ denotes the stocks of product i in country c in year t, $ZC_{(t',c,i)}$ denotes zinc consumption for finished

Table 1. Framework for classifying secondary resources

Profitability \ Knowledge	Products in Use: Emerging in a year	Products in Use: Not emerging in a year	Wastes in managed landfill sites	Dissipated materials
Economic	Secondary reserves in a year	Secondary reserves in future		
Marginally economic	Marginal secondary reserves in a year	Marginal secondary reserves in future		
Sub-economic	Sub-economic secondary resources in a year	Sub-economic secondary resources in future	Sub-economic secondary resources	Sub-economic secondary resources
Others	Unrecoverable materials (others)	Unrecoverable materials (others)	Unrecoverable materials (others)	Unrecoverable materials (others)
	Unrecoverable materials (mixed metal losses)			

product i in country c in year t', and $SR_{(t-t',c,i)}$ is the pro duct i survival ratio in country c after t-t' years. Product i has six categories: construction, transportation, industrial machinery, electrical and electronic goods, agriculture, and miscellaneous. $ZC_{(t',c,i)}$ was inferred from the allocation model from semi-finished products to finished products in the respective countries and the fabrication efficiency during the manufacturing stage [4].

The secondary reserve ratio (i.e., the end-of-life (EoL) recycling rate) was estimated using the following equation.

$$SRR_{(t,c)} = RS_{(t,c)} / GS_{(t,c)}\,, \qquad \text{Eq. (2)}$$

where $SRR_{(t,c)}$ stands for the secondary reserve ratio in country c in year t (–), $RS_{(t,c)}$ signifies the amount of recovered EoL scrap in country c in year t, and $GS_{(t,c)}$ denotes the generated EoL scrap in country c in year t.

The sub-economic secondary resources in the column of the dissipated materials were estimated as

$$DM_{(t,c,i)} = \Sigma ZS_{(t,c,i)} \times DR_{(t,c,i)} \qquad \text{Eq. (3)}$$

where $DM(t,c,i)$ are dissipated materials of finished product i in country c in year t; $DR(t,c,i)$ is the dissipation ratio of finished product i in use.

After completion of their useful life, recyclable zinc in the EoL products will be returned to production processes through recycling but non-recyclable zinc passes to final destinations such as managed or unmanaged landfill sites and loss in mixed metals. Sub-economic secondary materials in the column of managed landfill sites were estimated as

$$WLF_{(t,c)} = \Sigma NRZ_{(t,c)} \times LFR_{(t,c)}\,, \qquad \text{Eq. (4)}$$

where $WLF(t,c)$ is the amount of waste in managed landfill sites in country c in year t; $NRZ(t,c)$ stands for non-recyclable zinc in country c in year t; and $LFR(t,c)$ denotes the landfill ratio in country c in year t [5].

The amount of mixed metal loss in the row of others, i.e., materials that are unrecoverable because the zinc has passed into other metal cycles, can be estimated as

$$MML_{(t,c)} = \Sigma NRZ_{(t,c)} \times MLR_{(t,c)} \qquad \text{Eq. (5)}$$

where $ML(t,c)$ is the amount of mixed metal loss in country c in year t; $MMLR(t,c)$ is the mixed metal loss ratio in country c in year t.

In this analysis, we used refined zinc production data [6], principal end-uses data [7] and trade data [8].

3. RESULTS AND DISCUSSION

Table 2 presents results of the classification of secondary zinc resources in Japan. We have 215 and 9,585 thousand tons of secondary zinc reserves that will be emerged during the year and in the future, respectively, for 2010. Based on the highest reserve ratio in the recent five year period, we have 157 and 6,980 thousand tons of marginally economic secondary reserves that will emerge in a year and in the future. During 1960–2010, 2,152 thousand tons of zinc have accumulated in waste in managed landfill sites, 5,802 thousand tons have been dissipated, and 606 thousand tons have been lost in mixed metals.

In Japan, zinc consumption has been about 800 thousand tons: the availability of secondary zinc reserves (215+157) can meet about half of domestic demand. We also have a large amount of secondary zinc reserves (9,585+6,980), representing domestic zinc demand for more than 20 years. Moreover, Japan has a certain amount of secondary zinc in the landfill sites (2,152) that are considered as potential targets for the future extraction of secondary zinc through landfill mining. For increasing the fraction of secondary zinc in the domestic demand, it is important to consider how to recover from these deposits. Moreover, it favors Japanese domestic economic condition.

As discussed above, classification framework can provide information about potential short-term and long-term availability of secondary zinc resources and can be used for developing waste management and urban mining strategy.

Other countries' results will be discussed at the conference.

Table 2. Details of secondary zinc resources in Japan

	Products in use		Waste in managed landfill sites	Dissipated materials	
	Emerging in a year	Not emerging in a year			
Economic	215 kt 1%	9,585 kt 31%			
Marginally economic	157 kt 0%	6,980 kt 22%			
Subeconomic & others	128 kt 19%	5,726 kt 18%	2,152 kt 7%	5,802 kt 19%	Total
Mixed metal losses	606 kt 2%				31,349 kt 100%

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Environmental Research and Technology Development Fund (1-1402) of the Ministry of Environment, Japan.

REFERENCES

[1] Hashimoto, S.: Material stock accounting for secondary resource management. Proceedings of the 9th International Conference on EcoMaterials, D8, 2009.

[2] Maung, K.N., Mizukami, M., Wang, T., Lwin, C.M., Hashimoto, S.: Assessment of secondary copper reserves in the anthroposphere. The Eighth Biennial Conference of the International Society for Industrial Ecology, University of Surrey, Guildford, 7–10 July 2015.

[3] Maung, K.N., Lwin, C.M., Liu, G., Muller, D.B, Hashimoto, S.: Classification of secondary aluminum resources of nations. The ISIE Joint 12th Socio-Economic Metabolism Section Conference and Fifth Asia-Pacific Conference, Nagoya University, Nagoya, 28–30 September 2016.

[4] Meylan, G., Reck, B.K.: The anthropogenic cycle of zinc: Status quo and perspectives. Resource, Conservation and Recycling, in press.

[5] Gordon, R.B., Lifset, R.J., Bertram, M., Reck, B., Spatari, S., Graedel, T.E.: Where is all the zinc going: The stocks and flows project, part 2. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 56(1), 24–29, 2004.

[6] International Lead and Zinc Study Group: Statistical database,. http://www.ilzsg.org/static/home/ [accessed 3.9.2016]

[7] World Bureau of Metal Statistics: Metals database. http://www.world-bureau.com/ [accessed 6.10.2016]

[8] United Nations: United Nations Commodity trade statistics database. http://comtrade.un.org/data/ [accessed 15.10.2016]

提供サービスに基づいた物質ストック変遷の分析

A new model to explore time-series changes in demand for material based on services

○河村洋佑*[1)]、醍醐市朗 [1)]、後藤芳一 [1)]

Yosuke Kawamura, Ichiro Daigo, Yoshikazu Goto

1)　東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻

* kawamura@mfa.t.u-tokyo.ac.jp

1.　はじめに

物質は、そのストックが機能を発現している。物質ストックは、サービスを提供するため社会中に蓄積される。さまざまな資源が、この提供サービスの維持及び増大のための物質ストックの充足に向けて消費されている。持続可能な開発に向けてはこの物質ストックの管理が重要となる。

経済発展に伴って一人あたりの物質ストック量が増加し、やがて飽和するという経験則に基づいて、物質ストック量の将来推計が行われている [1)]。一方で、飽和するメカニズムは解明されておらず、今後発展する国々が、同様の成長過程となるかは不明である。物質ストックの目的を鑑みると、物質ストック量の質量ではなく、物質ストックの提供するサービスを基準とした定量・分析を行うことで飽和メカニズムを説明できる可能性がある。サービスと物質ストックに着目した既往研究として、船舶についてサービスの提供量をもとに船舶用鉄鋼材ストック量変遷の説明、将来推計を行う試み [2)]や、建築物についてサービス提供量当たりに必要な物質ストック量を分析し、ストック価値を評価する試み [3)]などが行われてきた。しかし、これらは物質ストックが資するサービスを解析的に評価することはできていない。そこで本研究では、物質ストックが機能を発現しサービスを提供しているプロセスをモデル化し、サービスと物質ストックについての定量的な関係を明らかにすることを目的とした。

2.　研究手法

2.1. ストックサービスモデルの構築

本研究では、サービス工学における定義 [4)]を採用し、サービスとは「サービスの供給者であるプロバイダが対価を伴って受給者であるレシーバが望む状態変化を引き起こす行為」とした。本研究では物質ストックが機能を発現しサービスを提供するプロセスに対してこの定義をあてはめ、「物質ストックはその有する機能によりプロバイダとしてレシーバへ作用し、レシーバの状態変化をもたらす」というストックサービスモデルを構築した(図 1)。

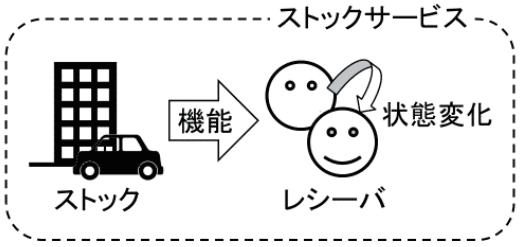


図 1 ストックサービスモデルの概念図.

2.2. モデルの定量化

プロバイダ側の定量的表現として、物質ストックの有する機能をある物理量として表し、ストック機能量とした。レシーバ側では、レシーバの状態変化を直接定量的に表現することが望まれたが、レシーバの主観性を伴うため、定量的な表現は困難であると考えられた。そこで、レシーバの状態変化を駆動すると考えられる観測変数や物理量を状態変化駆動量とし、間接的にレシーバの状態変化を説明するモデルを構築した。ストック機能量は多様な状態変化のニーズを反映していると考えられるため、状態変化駆動量は、物質ストックの機能を要因分解することで列挙できると考えた。複数の状態変化駆動量の時系列変化を説明変数とし、ストック機能量の時系列変化を被説明変数として重回帰分析を行い、ストックサービスの変遷を説明した。

2.3. 住宅としての物質ストックにおけるケーススタディ

住宅ストックの有する機能は居住空間の提供であるため、ストック機能量は総住宅床面積と考えられた。総住宅床面積は、総人口・住宅当たり床面積及び平均世帯人数・非空家率(1 – 空家率)の逆数の積へと要因分解できた。このうち総人口と非空家率はレシーバ個人単位での居住状態の変化と無関係であると考え、この 2 変数をストック機能量へと組み込み「一人当たり利用住宅床面積」をストック機能量として新たに定義した。レシーバの状態変化駆動量としては、住宅当たり床面積に対応するものとして、平均世帯収入及び不動産価格、平均世帯人数に対応するものとして高齢者率及び未婚率が考えられたが、多重共線性を考慮しそれぞれ前者で説明変数を代表させた。これらの説明変数に対して、ストック機能量を被説明変数とした重回帰分析を行った。

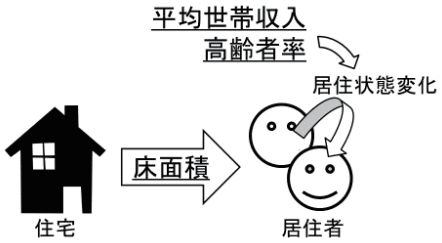


図 2 住宅ストックサービスモデル概念図.

重回帰モデル

$$A_h = P \times a_h \times p_f^{-1} \times r_o^{-1}$$

$$\ln\left(\frac{r_o A_h}{P}\right) = \ln a_h - \ln p_f$$

一人当たり利用住宅床面積

$$= \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$$

A_h：総住宅床面積, P：総人口, a_h：住宅当たり床面積, p_f：平均世帯人数, r_o：非空家率, α：定数, β_1, β_2：偏回帰係数, x_1：平均世帯収入, x_2：高齢者率

3. 結果と考察

3.1. ケーススタディ

重回帰分析における結果を表 1 及び図 3 に示す。すべての回帰係数において 1%水準で有意となり、修正決定係数 0.998 と回帰式にてよく説明できた。平均世帯収入の増加に伴うゆとりを持った居住空間を得るニーズや、高齢化に伴う世帯の単身化のニーズが増加してきた中で、一人当たり利用住宅床面積を増加させることで居住状態を変化させ、これらのニーズを満たしてきたことが説明できた。個々人の居住の状態変化を駆動するものとして、平均世帯収入のような経済的要因と、高齢者率のような社会的要因を用いて表現することができ、これらの要因の変化に伴って居住状態に対するニーズが変化し、住宅ストックの有する機能が変遷してきた様子を定量的に表すことができたと考えられた。

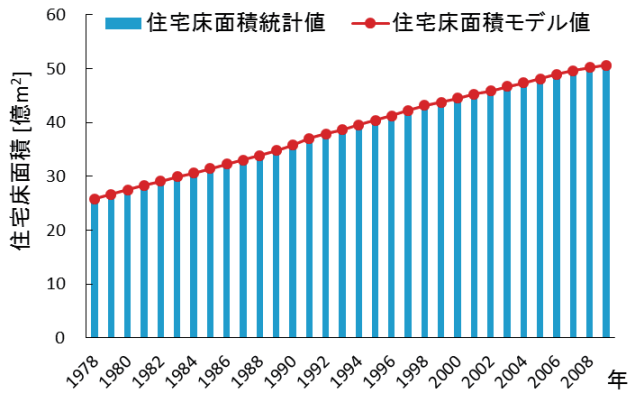


図 3 床面積推移における統計値とモデル値の比較.

表 1 重回帰分析結果.

説明変数	偏回帰係数	標準化偏回帰係数	t 値
平均世帯収入	0.126	0.139	15.3
高齢者率	0.471	0.914	101
(定数)	3.733	-	94.9
修正決定係数		0.998	

3.2. ストックサービスモデルの一般化における課題

本モデルを用いて他製品における物質ストックの機能および状態変化の関係を定量化していく上で、プロバイダ側の定量的表現において、ストックの持つ機能を網羅的に列挙していく手法やそれらの機能の定量化を行う手法を構築する必要がある。本ケーススタディにおいても、住宅の有する機能は床面積だけではなく、耐震性、耐火性、断熱性などが考えられる。アンケート等を用いて機能を特定・統合評価する試み [5]や、ある製品が複数の機能を有している場合、機能の位置づけに応じて基本機能・補助機能といったように機能を階層化する概念 [6]などを参考に、機能の集約、定量化を行っていくことが考えられる。レシーバ側の定量的表現においても、レシーバが人である場合の状態変化は主観性を伴うため、状態変化を表現する変数の選定は重要であり、同様にアンケート等を用いていく可能性が考えられる。

4. おわりに

物質ストック量と提供サービスの関係をモデル化し、物質ストックの有する機能とそれに伴う状態変化の関係性を定量的に表現した。ケーススタディとして、住宅ストックについて住宅の有する機能と、提供されたサービスとの関係を定量的に明らかにした。さらに今後は、資源利用の観点からストック量を考えると材料質量とストック機能量の関係も評価する必要がある。この場合、材料機能とストック機能量の関係性を定量化するため、材料機能の定量化も同様の枠組みで行っていく必要がある。

引用文献

1) H. Hatayama *et al.*, *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 6457-6463 (2010).
2) 川原他, 鉄と鋼, **98**, 135-142 (2012).
3) S. Ota *et al.*, *EcoBalance 2016 Abstract Book*, 83 (2016).
4) 原他, 日本機械学会論文集, **74**, 2321-2330 (2008).
5) P. Park *et al.*, *J. Environ. Manage.*, **83**, 158-170 (2007).
6) 社団法人 日本バリュー・エンジニアリング協会, VE 基本テキスト, 13-21 (1997).

ポスター

タイムテーブル

2日目　3月2日(木)

15:40-16:40	ポスターセッション1　*コアタイムA:奇数番号
16:40-17:40	ポスターセッション2　*コアタイムB:偶数番号

農業系バイオマスの物質フローと循環利用率

Material flows of agricultural biomass and cyclical use rate

○谷畑佑典*[1)]、橋本征二[1)]
Yusuke Tanihata, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* rv0038fk@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

地球温暖化と資源の枯渇は、現代が抱える問題の一つである。このような中、カーボンニュートラルで再生可能な資源として、近年バイオマスが注目されている。日本においては、2002 年にバイオマス・ニッポン総合戦略が定められて以降、研究機関・民間企業・行政により、利用技術の開発およびシステムの構築が進められている。各地で未利用バイオマスや廃棄物バイオマスの利用が進められているが[1)]、バイオマス全体の体系的なフローの把握や、バイオマス全体としての循環利用率の評価は必ずしも進んでいない。

バイオマスは農業系・林業系・漁業系に大別され、このうち林業系については、そのフローの把握や効率の評価が行われているが[2)]、農業系や漁業系については、いくつかの報告はあるものの[3)]十分には行われていない。

このようなことから、本研究では、農業系バイオマスを対象として、そのライフサイクルにわたる物質フローを推計するとともに、未利用バイオマスや廃棄物バイオマスの利用ポテンシャルおよび循環利用率について検討した。本要旨では、畜産物に関わる物質フローの推計結果について報告するが、その他の農産物に関わる物質フロー及び循環利用率の推計結果については学会当日に報告する。

2. 方法

2.1 農業系バイオマスの物質フローの推計

2013 年を対象として、農業系バイオマスの物質フローを推計し、投入産出表の形で整備した。以下では、畜産物に関わるプロセスの推計方法について述べる。

(1) 肉用牛の投入と産出

投入には「飼料」「敷料」がある。「飼料」は、配合飼料の統計値[4)]と一頭に必要なその他の飼料量[5)]に飼育頭数をかけて算出した値を合計した値とした。「敷料」は、1頭当たりに必要な稲わらとおがくず等の量[6)]に飼育頭数をかけて全体量を推計した。産出には「肉用牛」「糞尿」「廃棄物」「糞尿以外の代謝物」がある。「肉用牛」は、部分肉生産量[7)]から歩留まり率[8)]を用いて生体量を推計した。「糞尿」は産業廃棄物の統計値[9)]を用い、「廃棄物」は「敷料」と同値とした。ここで、「飼料」「敷料」に含まれる水分量と「肉用牛」「糞尿」「廃棄物」に含まれる水分量を算出し、その差分を「水分調整」として投入に加えた。また、以上の投入の合計から産出の合計を差し引くことで「糞尿以外の代謝物」を算出した。このうち CH_4 については、文献に記載の式[10)]を用いて別途算出した。

(2) 生乳の投入と産出

投入には「飼料」「敷料」があり肉用牛と同様に算出した。産出には「生乳」「肉用牛」「糞尿」「廃棄物」「糞尿以外の代謝物」がある。「生乳」は、生産量の統計値[7)]を用いた。「肉用牛」は、肉用牛と同様に、部分肉生産量[7)]から歩留まり率[8)]を用いて生体量を推計した。「糞尿」「廃棄物」は、肉用牛と同様に算出した。ここで、肉用牛と同様に水分調整を行った上で、「糞尿以外の代謝物」を算出した（CH_4 を含む）。

(3) 豚の投入と産出

投入には「飼料」「敷料」があり肉用牛と同様に算出した。産出には「豚」「糞尿」「廃棄物」「糞尿以外の代謝物」がある。「豚」は、肉用牛と同様に部分肉生産量[7)]から歩留まり率[8)]を用いて生体量を推計した。「糞尿」「廃棄物」は、肉用牛と同様に算出した。ここで、肉用牛と同様に水分調整を行った上で、「糞尿以外の代謝物」を算出した（CH_4 を含む）。

(4) 肉鶏（ブロイラー）の投入と産出

投入には「飼料」「敷料」がある。「飼料」は、配合飼料の統計値[4)]を用いた。「敷料」は、ブロイラー1kg に木くず等 0.00024kg[11)]が必要になるとして算出した。産出には「肉鶏」「糞尿」「廃棄物」「糞尿以外の代謝物」がある。「肉鶏」は、生体出荷量[7)]を用いた。「糞尿」「廃棄物」は、肉用牛と同様に算出した。ここで、肉用牛と同様に水分調整を行った上で、「糞尿以外の代謝物」を算出した（CH_4 は含まない）。

(5) 鶏卵の投入と産出

投入には「飼料」「敷料」があり肉鶏と同様に算出した。産出には「鶏卵」「採卵鶏（廃鶏）」「糞尿」「廃棄物」「糞尿以外の代謝物」がある。「鶏卵」と「採卵鶏」は、生産量の統計値[7)]を用いた。「糞尿」「廃棄物」は、肉用牛と同様に算出した。ここで、肉用牛と同様に水分調整を行った上で、「糞尿以外の代謝物」を算出した（CH_4 は含まない）。

(6) と畜の投入と産出

投入には「肉用牛」「豚」「肉鶏」「採卵鶏（廃鶏）」「その他」がある。「肉用牛」「豚」は上述のように部分肉生

産量から生体量を推計した。「肉鶏」「採卵鶏（廃鶏）」は統計値 [7]を用いた。「その他」は検討中である。産出には「牛肉」「豚肉」「鶏肉」「その他の肉」「副産物」「廃棄物」がある。「牛肉」「豚肉」は、部分肉生産量の統計値 [7]を用い、「鶏肉」は、生体出荷量 [7]から歩留まり率 [8]を用いて正肉量を推計した。「その他の肉」については検討中である。「廃棄物」は、産業廃棄物の「動物系固形不要物」排出量 [9]を用い、「副産物」については生体量から部分肉量と廃棄物量を差し引いて算出した。

2.2　未利用バイオマスや廃棄物バイオマスの利用ポテンシャルと循環利用率の推計

2.1 で作成した農業系バイオマスの物質フローをもとに、現状の物質利用量／エネルギー利用量、副産物の利用量、使用済み品の再生利用量や利用の効率性を検討するとともに、未利用バイオマス、廃棄物バイオマスの利用ポテンシャルを推計した。また、農業系バイオマスとしての循環利用率を推計した。

3.　結果と考察

肉用牛、生乳、豚、肉鶏、鶏卵、と畜の各プロセスにおける投入産出の推計結果を図 1 に示す。豚については、「糞尿以外の代謝物」の項目がマイナス値となったが、これは、飼料全体に占める配合飼料の割合が非常に高く、その他の飼料の投入が過小評価されている可能性が原因の一つとして考えらえる。また、いずれも「水分調整」が大きな比率を占めているが、水分率の設定次第で結果が大きく左右されることから、現在詳細な検証を進めている。なお、これらの物質収支を投入産出表の形にした整理も行っている。畜産物の推計について検証を進めた結果、並びにその他の農産物に関わる物質フロー及び循環利用率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(3K163001)による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

1)　中村一夫：自治体における廃棄物系バイオマス利活用の現状と地域技術実証事例について、廃棄物資源循環学会誌、21(1)、pp.29-40、2001
2)　橋本征二、森口祐一：日本における伐採木材のマテリアルフロー・炭素フローデータブック、国立環境研究所、2004
3)　松岡誠、寺島義文：サトウキビ産業の未来、熱帯農業研究、2(1)、pp.23-26、2009
4)　農林水産省:飼料をめぐる情勢(平成 28 年 8 月)、2016
5)　農林水産省：流通飼料及び牧草の使用数量の価額、http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001130986　2016 年 12 月アクセス
6)　農林水産省:敷料の使用数量と価格、http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001130986　2016 年 11 月アクセス
7)　独立行政法人農畜産業振興機構：国内統計資料、https://www.alic.go.jp/joho-c/joho05_000073.html　2016 年 12 月アクセス
8)　畜産物統計協会：http://www.jlba.or.jp/con05_2.html#　2016 年 10 月アクセス
9)　環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：産業廃棄物排出物・処理状況調査報告書平成 25 年度実績、2016
10)　農林水産省生産局畜産部：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル(畜産編)、2011
11)　産業環境管理協会:MiLCA ガイドブック(2014 年 10 月 9 日版)、2014

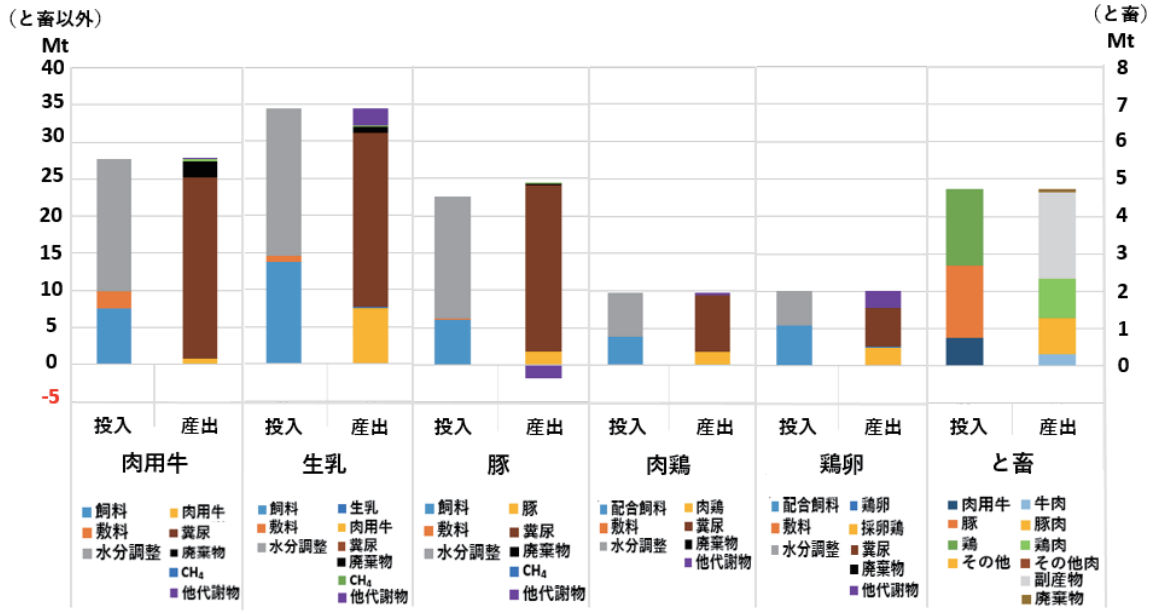


図 1　畜産物に関わるプロセスの投入産出

タイにおける食品残渣を原料としたバイオガスプラントのライフサイクルコスト分析

Life cycle cost analysis of food-waste biogas plant in Thailand

○小井土賢二*[1)]、竹内一佐枝 [2)]、長谷川達也 [2)]

Kenji Koido, Hisae Takeuchi, Tatsuya Hasegawa

1) 福島大学, 2) 名古屋大学

* koido@sss.fukushima-u.ac.jp

1. はじめに

タイでは、これまで国内のエネルギー需要の不足分を輸入により賄ってきた背景がある [1)]。代替エネルギー利用とバイオエネルギー開発の促進のために、タイ政府が「新・代替エネルギー開発計画 2012-2021（new Alternative Energy Development Plan 2012-2021, (AEDP)）」を 2011 年に立案し、2021 年までに最終国内消費の代替エネルギー分を 25%まで引き上げる計画を打ち出した [1,2)]。この AEDP の一環として、食品残渣を原料とする小規模バイオメタン製造が可能な、処理能力 600 kg-wet/day のバイオガスプラントが、タイ・ナコーンナーヨック県で稼働している [3)]。

本研究では、プラントのライフサイクルコスト分析を行うことにより、事業性を高める運転条件を明らかにし、タイにおけるバイオガスプラント導入のための提案を行う。

2. 目的と範囲

前述のタイで稼働するバイオガスプラントのライフサイクルコスト分析を行うことにより、事業収支を明らかにしたのち、感度分析を行う。これによって事業性の高い条件を明らかにする。このため、原料である食品残渣の生産段階はシステムの範囲外とした（図 1）。また、実施時間は 15 年とした。

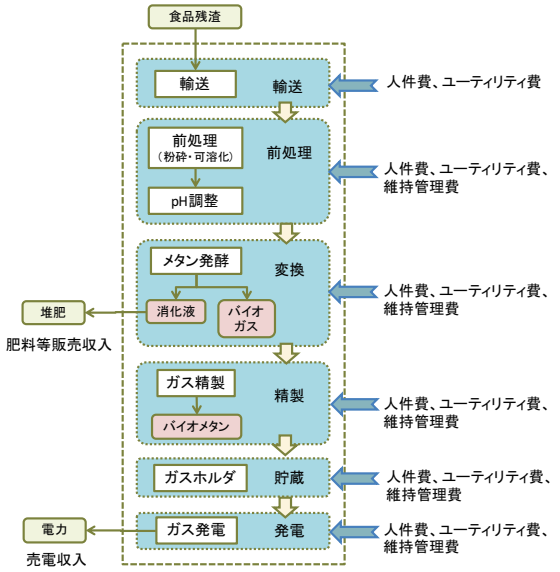


図 1　システム境界.

3. インベントリ分析

3.1 建設費

100 t/d のバイオガスプラントの建設費が 40 億円であること、および 0.7 乗則を用いて、3.278 ¥/THB の為替レートから、以下の推算式を用いた。

$$CI = (40\times10^{8} \div 3.278) \times (PS \div 100)^{0.7} \quad (1)$$

規模 PS [t/d], そのときの費用 CI [THB]とする [4)]。

3.2 年間経費（収入）

① 売電

売電収入については下式によって算出した。

$$C_{elec} = EP \times P \times D \times \mathrm{Opt} \quad (2)$$

ただし、売電収入 C_{elec} [THB/yr], 売電単価 EP [THB/kWh], 出力 P [kW], 稼働日数 D [day/yr], 1 日あたり稼働時間 Opt [hr/d]ただし、プラント内で消費する自家消費量を発電量全体の 25%として、残りを 5 THB/kWh で売電すると仮定する。

② 消化液の液肥利用

現在、ナコーンナーヨック県内の圃場では、化学肥料による液肥（価格 30~50 THB, 200 倍に希釈）の散布によって施肥が行なわれている [3)]。通常、液肥中にはリン、窒素、カリウムが含まれている。使用に際して消化液中に充分な濃度でこれらの成分が含まれている事が確認されれば代替が可能となる。仮に利用できるとすると、0.97 kg/kg-投入原料の消化液が得られる。液肥販売価格を 40 THB/L とした。

3.3 年間経費（支出）

① ユーティリティ費

原料のディーゼルトラックによる輸送を想定し、燃費はヒアリングに基づいて 16.5 km/L-diesel を用いる。原料輸送距離は 1.75 km とし、1 回/day だけの往復とした。軽油の燃料費の計算には以下の式を用いた。

$$C_{fuel} = d \div FC_{diesel} \times 26.69 \times 2 \quad (3)$$

ただし距離 d [km]、燃費 FC_{diesel} [km/L]とし、タイでの軽油(Blue Diesel)価格として 26.69 THB/L を用いる [5)]。

薬品類の費用もユーティリティ費として計上した。原料とする食品残渣 1 t あたり 213.5 THB（¥700[4)] を 3.278 ¥/THB の為替レートで計算）と想定した。

表 1　メタン発酵のコスト計算における計算条件.

項目			
運転条件	稼働日数	330	day/yr
	稼働時間	24	hr/day
	バイオメタン収率	240	Nm^3/t
	ガス単位発熱量	40	MJ/Nm^3
	耐用年数	15	yr
支払い金利		3	%
売電価格		5	THB/kWh
天然ガス価格		12.47	THB/kg
液肥価格		40	THB/L
ガスエンジン		50	kW
発電効率		30	%
排熱回収効率		40	%
所内電力利用率		25	%
人件費	タイのエンジニア	411,335	THB/yr

②　維持管理費

メンテナンスやオーバーホールの費用。毎年建設費の 2~3%で数年に一度 5~7%のオーバーホール費用を仮定し、ここでは平均して年間 5%と想定

③　人件費

プラント規模が約 2～30 t/day の範囲にある場合 3～6 名の人員が必要であるとされる [4]。今回は 2 名の雇用とし、タイのエンジニアの平均年収 [6]を用いた。

④　減価償却費

定額法により算出を行なった。なお、耐用年数は 15 年 [7]とした。

⑤　租税公課

固定資産税や事業税を含む費用であり、建設費から減価償却費を除いた額の 1.4%を想定した。

⑥　法人税

2016 年 1 月 1 日以降、タイの法人税は 20%である。本研究でもこの値を用いた。

4. コスト分析結果と考察

4.1 収支

図 2 は食品廃棄物のメタン発酵（0.6 t/d）事業収支を示す。収入において売電は全体の 7.1%、液肥販売収入は 92.9%を占め、液肥による収入の高さが明らかになった。また、支出において、維持管理費が最もインパクトが高いことがわかった。

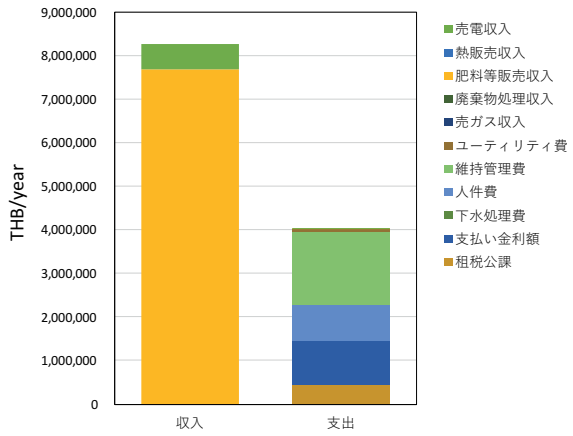


図 2　食品廃棄物のメタン発酵（0.6 t/d）事業収支.

4.2 経済性に関する比較

3 節で示した前提条件を用いて、キャッシュフローを整理し、回収期間法により、ペイバックタイム(PT)を求め評価を行った [7]。その結果、売電とともに売肥を行った場合、0.6 t/d であっても PT は 9 年であるが、売電のみまたは売ガスのみの場合、回収率および事業性収支が負となるため回収できない（図 3）。

感度分析の結果が図 3 に示される。規模を 3 割だけ増やした場合、売電と売肥を行うケースでは PT が 9 年から 8 年に短縮された。また維持管理費を 3 割削減した場合も同様の結果が得られた。また、液肥の価格が 3 割減少するような場合、PT は 14 年まで伸びるため、液肥の価格が収益には最も重要であろう。

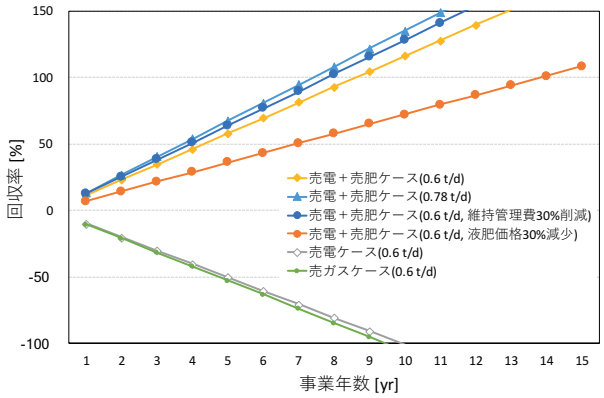


図 3　感度分析結果.

5. まとめ

タイでのバイオガスプラント導入のために、内部コストを用いたライフサイクルコスト分析を行った。同プラントの事業性には液肥の販売が重要であり、その価格管理によって PT が大きく左右される。

引用文献

1) Wattana S.: Energy Procedia, 52, (2014), pp. 506–515.
2) Sutabutr, T.: Int J. Renew. Energ., 7, (2012), pp. 1–10.
3) 関根産業: “タイ・ナコンナヨク県スマートシティ構想実現のためのバイオメタンエネルギーシステム”, 平成 25 年度貿易投資促進事業報告書.
4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: “バイオマスエネルギー導入ガイドブック　第 4 版”.
5) Oil price in Bangkok and Vincinity (on 5 Jan 2017), <http://www.pttplc.com/EN/Media-Center/Oil-Price/pages/Bangkok-Oil-Price.aspx> (2017/01/05).
6) 日本貿易振興機構, 投資コスト比較, <https://www.jetro.go.jp/world/search/cost_result?countryId%5B%5D=1100 > (2017/01/12).
7) 新エネルギー財団編: “バイオマス技術ハンドブック　導入と事業化のノウハウ”, オーム社.

温州ミカン栽培の環境影響評価

－慣行法と周年マルチ点滴灌水同時施肥法の比較－

Environmental impact assessment of a Satsuma mandarin cultivation system
Comparison between conventional method and drip irrigation and liquid fertigation system with year-round plastic mulching

○志村もと子*、高橋英博、渡邊修一、松森堅治、笠原賢明、清水裕太
Motoko Shimura, Hidehiro Takahashi, Shuichi Watanabe, Kenji Matsumori, Yoshiaki Kasahara, Yuta Shimizu
農研機構西日本農業研究センター
* shimura@affrc.go.jp

1. はじめに

近年、農業では国内外の産地間競争により農産物のブランド化が必要になっている。また、異常気象もたびたび生じているが、その状況下でも高品質な農産物を安定生産するため、さまざまな持続的農業技術が開発され、現地へ導入されている。導入する技術を選択する際に必要となる判断基準の一つとして、農業者や消費者に導入した際の環境負荷削減効果や便益をわかりやすく示す評価指標が必要になっている。

温州みかんでは、品質を上げるために夏場の約３か月間（普通温州で８月中下旬～11 月中下旬）、樹体の水分吸収の抑制を行うことが推奨されている。その方法の一つとして、周年マルチ点滴灌水同時施肥法（以下、マルドリ方式）の導入が進められている。

マルドリ方式は、マルチを敷いたままにし、マルチ下に点滴チューブを敷設して灌水（ドリップ）する栽培方法である。いつでも灌水ができるため、長雨や干ばつなどの影響を受けにくい。マルチの敷設・撤去作業を毎年行う必要がなく、液肥を灌水するため施肥作業を省力化できる。根域に肥料成分を効率的に供給できるため肥料の利用効率が高く、全体の施肥量を削減することができる[1)]。

マルドリ方式の環境影響評価としては、富栄養化インパクトの評価が行われ、地下水への窒素排出量の低減効果が大きいことが報告されている[2)]。施肥量の削減によって地表から発生する一酸化二窒素の排出量も減ると予想されるが、地球温暖化に与える影響についての評価は、まだなされていない。

本研究では、マルドリ方式の導入が地球温暖化に与える影響をライフサイクル全体で明らかにすることを目的として環境影響評価（LCA）を行い、慣行栽培との比較を行った。

2. 研究の方法

2.1 研究対象作目・技術

本研究の対象は、広島県島しょ部のミカン園である。慣行の栽培方法とマルドリ方式との比較を行った（表１）。マルドリ方式は、マルチ資材や点滴灌水設備、ポンプを稼働する電力が必要となるが、マルチ被覆のため除草剤と除草作業が不要になる。

2.2 システム境界

システム境界は生産から収穫・選果までとし、栽培に使用する機械や資材の製造を含めた。それ以降の流通・消費は対象外とした。有機肥料（堆肥）は、原材料や製造方法によって GHG 排出量が大きく異なるため、今回の評価からは除外した。また、施設・建物の製造や圃場整備も対象外とした。

2.3 解析方法

解析には、LCA ソフトウェア SimaPro (Ver.8.2.3)を使用した。評価手法には、IPCC 2013 GWP 100a V1.00 を使用した。

インパクト評価は、６過程（資材製造・耕地からの排出・燃料使用・機械製造・化学肥料製造・農薬製造）に分けて評価した。

GHG 排出量は慣行栽培、マルドリ方式について、収穫物の単位重量あたりで算出した。

2.4 インベントリデータ

栽培に関する農業機械、燃料、肥料、農薬、資材等のデータは、広島県農業経営指標（平成 26 年度）【果樹】[3)]の「かんきつ（温州みかん、レモン等）2.5 ha（南部）」の情報を用いた。温州ミカンの収量は、県標準値 3.2 kg/m^2 とした。

マルドリ方式に関しては、技術マニュアル[1)]の導入園の資材費例のデータに、ポンプと貯水タンクのデータを追加して用いた。電力は、現地試験でのポンプの稼働時間から消費電力量を計算した。施肥窒素量は、技術マニュアル[1)]の灌水施肥基準 15.5 kg/10a を使用した。

大気中への窒素ガス排出量の実測値がないため、既往の研究から排出係数を求めた。施肥窒素量に対する一酸化二窒素排出量の排出係数(kgN_2O-N/kgN)が慣行茶園で 0.076、樹幹下点滴施肥茶園で 0.042 [4)]であっ

たという報告、露地ナス栽培において慣行灌水 0.0032、点滴灌水 0.0012 であった[5]という報告があるが、今回は同じ樹木である茶園の排出係数を用いた。

機械や農薬、肥料などについては、種類別のインベントリデータがまだ不十分なため、機械は重量[6]、農薬は有効成分量、肥料は成分量を用いた。

耐用年数は農業経営指標[3]の記載を用い、点滴灌水設備は 10 年とした。ただし、マルチシートは 3 年、ポンプは 2 年とした。

3. 結果

収穫物 1 kg あたり GHG 排出量を図 1 に示す。

慣行栽培では地表からの排出量が約半分を占めた。マルドリ方式では、使用する設備・資材が慣行より増えるため、資材製造過程の排出量が多くなった。ポンプの電力利用のため、燃料使用過程も多くなった。逆に、施肥量が慣行より少ないため、地表からの排出量は慣行の約半分に抑えられ、肥料製造過程の排出量も少なかった。農薬も除草剤の分が少なくなった。

総合的にみると、慣行栽培での排出量は 0.27 kgCO_2eq/kg、マルドリ方式は 0.23 kgCO_2eq/kg となり、資材製造・燃料使用過程の増加分より地表排出・肥料製造過程の減少分が大きいため、マルドリ方式での排出量は慣行栽培の 87 %と少なかった。

4. 結論

温州ミカン園において、慣行とマルドリ方式での GHG 排出量を評価、比較した。マルドリ方式では、点滴灌水設備導入により資材製造過程と燃料使用過程の GHG 排出量が増加するが、施肥量の減少により肥料製造過程と地表からの排出量がそれ以上に減少する。そのため、総排出量はマルドリ方式の方が少なくなり地球温暖化への影響が小さいことが示された。

ただし、今回用いた地表からの排出量は推定値であり、今後、ミカン園での実測値を用いて検討することが望ましい。データがまだ整備されていない他の項目についても、引き続きデータの収集が必要である。

5. 引用文献

1) 近畿中国四国農業研究センター: “周年マルチ点滴灌水同時施肥法（マルドリ方式）技術マニュアル”, (2003)
2) 高橋英博ほか: 日本水文科学会, 46(3), (2016), pp.235-247.
3) 農業技術課：“経営指標【果樹】”, 広島県, (オンライン), 入手先 <https://www.pref.hiroshima.lg.jp/soshiki/84/1268022523165.html>, (2016-12-14)
4) 糟谷真宏ほか: 愛知県農総試研報, 42, (2010), pp.147-152.
5) 渡邊修一ほか: 第 8 回日本 LCA 学会研究発表会公園要旨集, (2013), pp.360-361
6) 日本農業機械化協会: 農業機械・施設便覧 2013/2014

表 1　慣行栽培とマルドリ方式の比較

	慣行	マルドリ方式
マルチ	無	有
灌水方法	天水、灌水	点滴灌水
施肥方法	固形肥料	液体肥料
除草剤	必要	不要
電力	不要	必要（ポンプ）
設備・資材	―	点滴灌水設備

表 2　主なインベントリデータ

		単位/10a	慣行	マルドリ方式	出典
収量	出荷分	t	3.2	3.2	農業経営指標
燃料	ガソリン 混合油 潤滑油	L	23.3 9.1 3.6	21.7 9.1 3.6	農業経営指標
	電力	kWh	0.0	**57.6**	稼働時間から算出
機械	トラック等 農業機械	kg	19.1 8.4	19.1 8.4	農業経営指標 農業機械･施設便覧
肥料	窒素N	kg	22.2	**15.5**	農業経営指標 技術マニュアル
農薬	殺虫剤 殺菌剤 除草剤	kg	8.23 2.93 0.76	8.23 2.93 **0.0**	農業経営指標
資材	めっき鋼材 熱可塑性樹脂 その他金属	kg	0.4 7.9 0.5	**32.1** **173.4** 0.5	農業経営指標 技術マニュアル

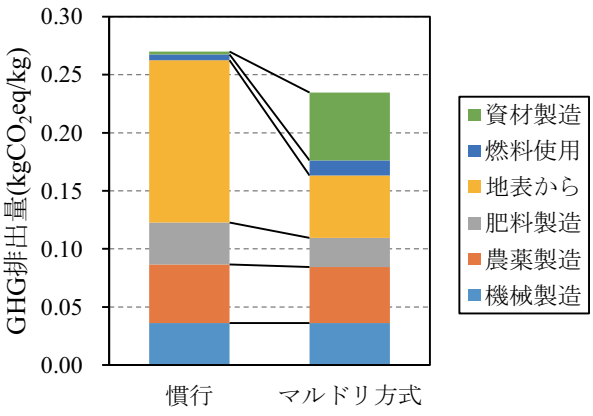


図 1 排出過程別温室効果ガス排出量

環境保全型農業による水稲栽培のインパクト評価

Impact Assessment of Rice Cultivation by Conservation Oriented Agriculture

○青芳樹*1)、内田晋 1)
Tatsuki Aoyoshi, Susumu Uchida
1) 茨城大学
＊ 15am301y@vc.ibaraki.ac.jp

1. はじめに

現在、地球規模での温室効果ガスの主要な発生源の一つとして水田や農耕地土壌が挙げられている。そのため環境に配慮した持続的農業が今後、温室効果ガス排出量の削減のために重要な栽培体系となる。
しかし、今日までに環境保全型農業の導入が、どの程度の環境負荷の低減につながり、単収や収益性等の経済性などにどのように影響するかについての研究例が少ない。そこで本研究では、水稲栽培を対象として慣行栽培、特別栽培、有機栽培の栽培体系について LCA を用いて環境影響評価を行いその結果を比較し、環境負荷の削減効果と経済性について評価を行う。

2. 手法

2.1 評価方法

ライフサイクルインパクト評価
使用ソフト:MiLCA(1.2.0.0)
評価項目：地球温暖化（100 年指数、IPCC、2007）

2.2 データの作成

栽培を行う対象地として茨城県を選定した。栽培体系について表 1 に示す。慣行栽培と有機栽培については中央農研研究報告 1)を基に各栽培の収量を設定した。有機栽培の収量については、5 年間栽培され収穫した収量の平均 497g/10a、最低収量 416kg/10a、最高収量 537kg/10a、農林水産省調査の収量 2)386kg/10a に設定した。特別栽培については、農林水産省 2)の調査を参考に栽培体系を設定した。そして各栽培体系について、MiLCA のデータをベースに投入量を振り分けした。慣行栽培は茨城県栽培基準 3)を参考に肥料の投入量を設定し、特別栽培 4)については、慣行栽培における化学肥料、農薬の使用量を半分とし投入量を決定した。

そして機械使用による燃料使用量については農業機械学会の報告書 5)を使用し投入量を振り分けた。

表 1：各栽培の収量

水稲の栽培体系	収量
慣行栽培	518kg/10a
特別栽培	500kg/10a
有機（平均）	497kg/10a
有機（min）	416kg/10a
有機（max）	537kg/10a
有機（15 年）	386kg/10a

2.3 システム境界

システム境界として作物の生産から卸売市場までを設定した。また圃場からの直接排出 6) や肥料起因の排出についても投入に含めた。

2.4 生産費と労働時間

水稲の生産費及び労働時間は、茨城県における水稲の生産費(平成 25~27 年)を基に農林水産省のデータ 2)から特別栽培と有機栽培のデータを平均値で作成した。

3. 結果

3.1 環境影響評価

分析した結果について図 1 に示す。慣行栽培の収量分（518kg）栽培した際の CO_2 排出量を各栽培で試算した。CO_2 排出量を比較すると、有機栽培については、収量が低い場合、慣行栽培より排出量が多くなることが示唆された。この事から慣行栽培よりも排出が多くなった原因として考えられるのは、有機栽培の収量の低さから慣行栽培よりも土地を多く使用する必要があるためであることや、有機物の投入量が慣行栽培よりも多くなっているためであると推察される。

3.2 経済性

生産費と労働時間について表 2、表 3 に示す。表 2 の各栽培の物財費を見ると、慣行栽培と特別栽培の物財費の差は 4 千円程だが、有機栽培においては慣行栽培よりも 2 万円もの差がある。これは有機栽培で使用する農機具費やそれに伴う光熱動力費が慣行より多くなっている事が原因である。一方で雇用費について見ると、有機栽培の問題として挙げられている労働時間が機械除草により大幅な削減をすることができたので、結果的に慣行栽培並の労働時間と雇用費に抑えられた。しかし、機械除草を行うにはある程度の広さを持った水田でなければ使用できないことや、慣行収量分の収量を得るためには農地を拡大する必要があり、その分労働時間が増加するので

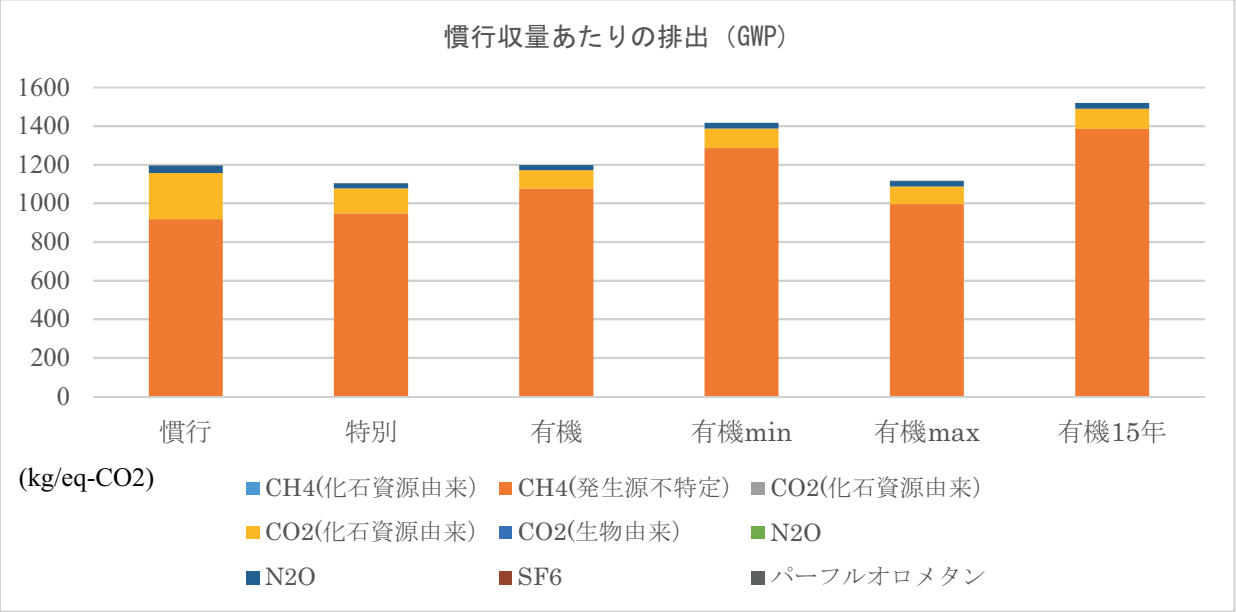


図１：慣行収量分（518kg）の栽培における CO_2 排出量

その点を留意する必要がある。

表２：生産費（平均）

生産費(円/10a)	慣行	有機	特別
物財費	83,449	102,211	79,891
雇用費	36,069	35,509	37,321
合計	119,518	172,039	132,335

表３：労働時間（平均）

労働時間 (h/10a)	慣行栽培	特別栽培	有機栽培
	25.18	26.39	27.18

4. まとめ

4.1 考察

水稲栽培の各栽培体系を比較してみると、必ずしも有機栽培が環境負荷を低減させているとは限らない事が示された。しかし、有機栽培での課題として挙げられている除草作業を大幅に短縮したことによって雇用費を削減できたことが、有機栽培の普及に繋がると考えられる。一方で特別栽培については、雇用費は慣行よりも上回るが収量の多い面や環境負荷の低減する割合が安定している事から、経済的にも環境負荷の低減にも貢献する事の出来る栽培体系であることが示唆された。

4.2 今後の展望

本研究の分析を通して、環境保全型農業として特別栽培と有機栽培は環境負荷の低減につながる事が明らかになった。しかし、有機栽培については安定した収量の確立が必要であり、最低収量の 386 kg/10a の場合環境負荷が大きくなるだけでなく収益も大幅に減る。そのため慣行栽培の収量に近づけば、利益が増えるだけでなく環境負荷の低減につながり、特別栽培よりも環境負荷を減らし収益も多く見込める。また機械除草の導入による労働時間の削減が、有機栽培の低コスト化だけでなく農家の負担を減らしため有機栽培の普及に繋がるだろう。現状では特別栽培による栽培が取り組みやすく慣行栽培より有用であるが、今後有機栽培の作業の効率化や低コスト化が可能になれば、更に環境保全型農業は普及していくだろう。

5. 引用文献

1) 中央農研研究報告 24：機械除草と米ぬか散布等を組み合わせた水稲有機栽培体系の抑草効果と収量性 (2015) pp55-69
2) 農林水産省：環境保全型農業推進農家の経営分析調査（オンライン）入手先 < http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kankyo_hozen/>（参照 2016-06-10）
3) 農林水産省：茨城県栽培基準（普通作物、飼料作物、野菜、果樹、花き）（オンライン）入手先 <http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/iba02.html >(参照 2016-05-16)
4) 茨城県：特別栽培農産物　（オンライン）入手先 <https://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/sansin/eco/contents04.html> (参照 2016-05-17)
5) 農業機械学会：農業機械による環境保全機能向上のための調査研究-調査報告-（1991）pp128 頁-131 頁
6) 温室効果ガスインベントリオフィス（GIO）：日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2015 年（オンライン）入手先<http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/2015/NIR-JPN-2015-v3.0_J_web.pdf>　(参照 2016-09-15)

寿司チェーン店におけるサプライチェーンを通じた環境配慮

Environmental management of sushi chains through supply chains

○有見亜佐土*
Asado Arimi
横浜国立大学
* arimi-asado-pn@ynu.jp

1. はじめに

近年、ニホンウナギやクロマグロなどレッドリストに注目が集まっているように、人為的負荷の増大による水産資源の減少が顕著になっている。一方、水産物に対する消費者の需要は増加しているため、国際的にエコラベルやサステナブルシーフードのニーズの高まりがみられる。MSC「海のエコラベル」付き製品の数はここ 5 年で倍以上になり、現在では 20000 を超す。[1)]

環境に配慮した水産物の需要の高まりの一つの要因として、オリンピックを契機とした波及がある。2012 年ロンドンと 2016 年リオデジャネイロのオリンピックでは、ホスト国が提供する水産物にサステナブルシーフード（MSC・ASC 認証品）を導入し、市場の拡大に貢献した。例えば、イギリスの大手スーパーマーケットチェーンであるテスコは 2012 年から持続可能な漁業の強化に取り組んでおり、2016 年には持続可能な漁法で獲られたマグロの販売を強化すると発表した。[2)] 次いで、同じくイギリスの大手スーパーマーケットチェーンのウェイトローズは、2017 年末までに店頭のツナ缶全てについてサステナビリティ認証（MSC 認証または一本釣り漁法で獲られたもの）を取得させると発表した。[3)] 東京オリンピックでのサステナブルシーフードの取り扱いについても注目が集まっている。しかし現在出ている調達基準案では、環境配慮に関する基準はロンドンおよびリオオリンピックの基準より低く設定されている。

日本でも、いくつかの大手スーパーマーケットでは、環境配慮の取り組みが進められている。中には、持続可能な調達原則および水産物調達方針を制定し、MSC・ASC 認証品の積極的な販売などに取り組んでいる企業もある。[4)] 消費者は環境に配慮してスーパーマーケット等で MSC 認証品や ASC 認証品を購入することができる。しかし、飲食店を利用する際は店舗が情報開示しない限り、環境に配慮した店を選ぶことは難しいと考えられる。

中でも寿司店は、外国人にも人気の日本食であり、魚介類の取扱量が多い。有路（2011）による調査では、マグロの消費形態として、刺身と並び寿司が一番であるなど、日本の水産物の消費形態において寿司は重要な位置を占める。また、ロンドンで展開している「YO! Sushi」という回転寿司チェーン店をはじめとして国際的にも寿司は人気が高く、訪日外国人には注文のしやすさや値段のわかりやすさなどの面から、回転寿司店のニーズが高い。しかしながら、回転寿司チェーン店は安価を追及するために環境配慮はなおざりにされ、サプライチェーン全体でより高い環境負荷がかかっている可能性がある。

以上の背景から、回転寿司チェーン店は今後の持続可能な水産物市場の拡大に大きな影響があると考えられる。そこで、本研究では、回転寿司チェーン店によるサプライチェーン全体での取り組みに着目した。回転寿司チェーン店は主にサプライチェーンにおいてどのような環境配慮に努めているのか、認証品に対してどのような認識をもっているのか、また企業間でどの程度の差があるかについて、アンケート調査により明らかしていく。また、その結果から水産物の持続可能な生産と消費に関する今後の展望を探り、持続可能な調達に向けた提案を検討する。

2. 方法

本研究では、専門家や環境 NGO に対して聞き取り調査を行い、水産資源に関する情報を収集するとともに、回転寿司チェーン店に対して直接アンケートを行う際の手法を検討する。また、回転寿司チェーン店を対象に環境配慮に関するアンケート調査を行う。

2.1 聞き取り調査

一般社団法人（国際環境 NGO）グリーンピース・ジャパン（以下 GPJ）へ聞き取り調査を行った。GPJ は既にお魚スーパーマーケットランキング [5)] を行っており、主にアンケート手法について調査した。

2.2 アンケート調査

GPJ のスーパーマーケットに対するアンケートを参考に、回転寿司サプライチェーンにおける環境配慮を調査するためのアンケートを作成した。

野田（2000）によると、環境マーケティングとは①Product: LCA の考え方からエコデザイン、②Packaging: 包装の簡易化、③Price: 環境コストを価格に上乗せすることで内部化、④Place: 小売業者の協力、⑤Physical

Distribution: サプライチェーンマネジメントの活用（輸送方法の低公害化）、⑥Promotion: 環境広告など、の 6 つとしている。本研究に関する項目は③～⑥であり、③と④は「問題意識について」，「持続可能性について」、⑤は「魚介類の調達方針について」，「トレーサビリティについて」、⑥は「情報公開・環境配慮の促進について」にて明らかにする。

以下がアンケートの大項目である。（表 1）

表 1 アンケート大項目

No	大項目
1	問題意識について
2	魚介類の調達方針について
3	持続可能性について
4	トレーサビリティについて
5	情報公開・透明性・持続可能な魚介類の促進について

また対象企業については、100 円寿司を主とした回転寿司チェーン店 5 社を予定している。加えて、価格帯の異なる 5 社への調査についても検討している。

「4. トレーサビリティについて」において魚種は、マグロ・ウナギ・サーモン・タコ・アサリを対象とする予定である。

3. 結果

3.1 聞き取り調査

GPJ が行ったアンケートにおいては、回答の有無だけでなく、企業ごとの回答内容まで全て公開・発表していた。アンケート結果の公表に当たり、企業名の非公開を条件にした上で回答を依頼すれば、回答率を高められる可能性がある。

回転寿司チェーン店は CSR 部門のある企業が少ないため、主な窓口は広報部または経営企画部となり、回答の依頼を行っていた。

またクロマグロについては、回転寿司チェーン店では供給の難しさから太平洋クロマグロは取り扱いが少なく、ほとんどが大西洋クロマグロと考えられた。

3.2 アンケート調査

結果は学会当日に報告する予定である。

4. おわりに

2020 年開催の東京オリンピック・パラリンピックでは、イスラム教やペスコベジタリアン（魚菜食主義者）を始めとして、多くの出場選手・観光客も寿司を食すことになるだろう。回転寿司チェーン店にも多くの人が足を運ぶはずだ。そのような中、公益財団法人東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会が示している持続可能性に配慮した水産物の調達基準（案）は 2012 年ロンドンオリンピックと 2016 年リオオリンピックの基準より緩く、過去 2 回の開催国が築いてきた持続可能な水産物の提供が 2020 年東京オリンピックではできないかもしれない。

その調達基準の問題点は [6]

・国際的なイベントであるのに FAO の「責任ある漁業の行動規範」や「天然水産物のエコラベリングに関するガイドライン」等の基準と整合していない

・トレーサビリティの確保について触れていない

・MEL と AEL という緩い認証制度が MSC や ASC と同列に並べられ、それらの認証品も持続可能性に配慮した調達であるとされている

・行政と漁協が認めれば、どのような水産物でも良い

・曖昧な記述が多く基準としての役割を果たせない

以上 5 点が指摘されている。オリンピック（持続可能な調達基準）を契機として日本も、国や企業、生産者・消費者が一体となり、少しずつサステナブルシーフードへ転換していくことを願っている。本研究は企業への提案が、その促進につながることも狙っている。

参考文献

1) 海洋管理協議会（MSC）：“MSCAnnualReport2015-2016WEB”, (2016), pp.37
2) TESCO PLC “News releases, Tesco – leading on sustainable seafood”, （オンライン）, 入手先 <https://www.tescoplc.com/news/news-releases/2016/tesco-leading-on-sustainable-seafood/>, （2017-1-4）
3) Waitrose Media Centre “Waitrose makes major sustainability commitment for canned tuna products”, （オンライン）, 入手先 < http://waitrose.pressarea.com/pressrelease/details/78/NEWS_13/6256>, （2017-1-4）
4) イオン株式会社“環境・社会貢献活動, イオン持続可能な調達原則”, （オンライン）, 入手先 <https://www.aeon.info/environment/procurement/general.html>, （2017-1-4）
5) 一般社団法人グリーンピース“お魚スーパーマーケットランキング 6”, （オンライン）, 入手先 <http://act-greenpeace.jp/ocean/ranking6/>, （2016-11-29）
6) 勝川俊雄“持続性を無視する東京五輪の水産物調達方針”, （オンライン）, 入手先 <http://katukawa.com/?p=6136>, （2017-1-4）

宇都宮市内の小中学校を対象とした食育の取り組みの実態調査

Questionnaire survey on the food and nutrient education programs of compulsory education stage at Utsunomiya city

○菱沼竜男[*1)]、大森玲子[1)]
Tatsuo Hishinuma, Reiko Ohmori
1) 宇都宮大学
* thishinuma@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

現在、私たちを取り巻く環境や環境問題に関する正しい理解を深めるとともに、責任を持って環境を守るための行動がとれることを大きなねらいとして、学校教育において「環境教育」が進められている。環境教育を通して、地球規模の環境問題の原因が生産活動だけでなく消費者を含んだ一連の経済活動にあることを理解し、これからの社会システムが持続可能なものとなるように主体的に関わる能力や態度の育成が求められている。また、環境負荷低減に向けた消費行動の必要性が注目される中で「作る」、「使う」、「捨てる」の一連の流れを通して環境負荷を包括的に考えるライフサイクル思考（LC 思考）の理解を促すライフサイクルリテラシーの重要性が認識されている。これまでに、LC 思考を取り込んで、生活に身近な製品や活動を取り上げた環境教育プログラム(P)が開発されてきた[1-5)]。

また、私たちの身近な生活場面である「食」や「食生活」を取り上げた教育として「食育」がある。特に、学校教育の中で行われる食育において、環境問題の視点を取り入れた教育 P の実施事例もいくつか報告されている。中学校家庭科での事例では、教材としてフードマイレージを取り上げることで、食生活と世界とのつながり、環境を考えさせている[6)]。また、小学校家庭科に関連させたエコクッキングを通して、食材生産から食卓にあがるまでの消費エネルギーや調理に伴うエネルギーの節約、調理くずを減らす方法などを体験的に学習する取り組みがある[7)]。このように、食育の中に環境教育を取り込んだ教育 P が開発され、具体的に実施されている。

2. LC 思考を取り入れた教育プログラムの開発

2.1 食育と LC 思考

食や食生活は主に消費者を中心とした活動であり、食育には消費者という立場から食材や調理、食事に関連して栄養や健康、社会、環境の知識を習得するという視点が含まれている。一方で、消費の上流には生産や加工（作る）、流通があり、下流には廃棄（捨てる）がある。すなわち、食や食生活を取り上げる食育の中に環境負荷を包括的に捉える LC 思考の理解を促す内容を取り組むことは、身近な生活と環境問題の理解をつなげる点で重要であると考える。

2.2 LC 思考を取り入れた食育プログラム開発

菱沼らは、LC 思考を取り入れた食育 P の開発に取り組んでいる。これまでに、小学校高学年を対象にして、フードマイレージの概念に基づく食材の生産地や輸送に伴う消費エネルギーの違いを把握するための調理体験型食育 P を作成した[8)]。また、豚肉の生産から消費に至るまでのプロセスの理解と温室効果ガス排出を取り上げて、小学校高学年向けの紙芝居形式の教育 P を作成し、第 11 回うつのみや食育フェア（2016.10）にて実施した（未発表）。

これまでに作成した LC 思考を取り込んだ食育 P では、生産から消費までが主な学習対象であり、生産から廃棄に至るライフサイクルを取り込むには至らなかったこと、学習内容が対象として想定した児童には難解であったことなどが課題として挙げられた。

今後、より平易で児童・生徒の発達段階に沿った教育 P を作成するためには、教育現場での取り組み状況を反映して学習内容や方法を検討する必要がある。そこで本研究では、LC 思考への気づきや理解のための教育 P 開発に資する情報収集を目的として、宇都宮市内の小学校、中学校における家庭科での環境教育や食育の取り組み状況、教職員の LC 思考の認識の実態を把握するアンケート調査を実施した。

3. 宇都宮市内の小・中学校へのアンケート調査

アンケート調査は、宇都宮市内にある公立小学校（69 校）、公立中学校（27 校）、（宇都宮大学教育学部附属小学校および中学校を含む）を対象に実施した。調査票は郵送で配布し、FAX で回答する形式とした。アンケート調査の回答対象者は、各校において食育に取り組んでいると考えられた家庭科主任の担当教諭と栄養士として配置された職員と定めた。また、調査票は、家庭科担当教諭と栄養士の回答対象者ごとに質問内容が異なるよう作成した。本アンケート調査は平成 28 年 2 月 19 日から 3 月 4 日の 2 週間で実施した。回収率は、小学校家庭科の主任担当教諭で 55.1%、小学校栄養士で 59.4%、中学校家庭科の主任担当教諭および中

学校栄養士はともに 48.1%であった。また、回答された調査票には、未回答欄や記載の誤りなどがあり、これらの回答内容は分析対象から外した。

4. 結果と考察

本稿では、小学校を対象とした分析結果を報告する。

4.1 小学校における環境教育の取り組み状況

家庭科における環境教育について、回答者の 89.2% (n=37)が「必要」と回答しており、具体的な内容としては、家庭科にある「身近な消費生活と環境」の単元が挙げられたほか、調理実習や洗濯学習、住まい方など、ほとんどの題材で環境教育に取り組めるという回答があった。家庭科の中で環境教育に取り組んでいる時間数は、5 年生で 1-3 時間(51.4%)、4 時間以上(45.9%)、6 年生で 1-3 時間(42.9%)、4 時間以上(51.4%)であり、両学年で 0 時間という回答(1 校)もあった。

特別活動および総合的な時間（特活や総学）の時間数は、回答のあった各校で比較的幅のある時間数を取っていた。特活や総学の中で、家庭科に関する環境教育の取り組んでいるのは 1･2 年生では 30%の学校が、3・4 年生では 50%の学校、5・6 年生では 55-70%の学校であった。その時間数は、1･2 年生で 1-3 時間程度、3 年生以上の学年では 1-3 時間程度の学校や 10 時間以上と回答した学校があった。また、取り組み事例から、1-2 年生ではコメ作り、公園の観察、家族についてなどが挙げられ、環境問題やリサイクルなどに関する内容はおよそ 4 年生以上の学年で取り組まれていた。

家庭科に関した環境教育を実施する際の課題として、資料や教材が少ない点や実践まで考えたときに家庭（保護者）との連携が難しいことが挙げられた。

4.2 授業への LC 思考の適用について

家庭科教諭に対する LC 思考に関する設問で、LC 思考を、「何となく知っている」、「よく知っている」という回答は 21.0%であった(n=38)。また、家庭科に LC 思考を取り込むことについて回答者(n=38)の 68.4%が「必要」と回答していた。家庭科授業に LC 思考を取り込む可能性について、「取り込めるが容易でない」、「難なく取り込める」との回答が 63.2%を占めた(n=38)。家庭科に LC 思考を取り込む際の課題として、「指導例・教材、ノウハウがない」、「時間が足りない」ことを理由に挙げた回答者が多かった。また、授業の中への LC 思考を適用する方法として、「視覚教材の利用」を選択した回答者が多かった。回答内容より教員らは LC 思考の必要性、授業への適用の可能性を感じながら、知識修得が追いついていない状況にあると考えられた。

今後の取り組みとして、家庭科単元と密接に関連しながら、LC 思考につながる具体的な指導案や教材例、資料集などを幅広く整理していくことが求められる。

4.3 小学校栄養士による食育の取り組み状況

小学校における食育について、回答者の 97.6% (n=41)で「必要」と回答しており、栄養士からみた食育内容として栄養や健康、食事のマナー、食を通した自己管理能力の育成などが挙げられた。1 ヵ月あたりの食育指導回数は、1-5 回（週 1 回）が 60%を占め、毎日実施している学校（16 回以上）も 16.2%あった(n=37)。また、食育は学年に関係なく実施されており、その場面として給食の時間と授業時間が回答された。

一方で、栄養士が食育の実施に当たって感じる問題点として、時間的に教員との連携が困難であることや家庭との連携の難しさが挙げられていた。特に、朝食の欠食、食事のマナーなど家庭の協力が不可欠な食育内容に取り組む難しさを挙げた回答者が多かった。

4.4 小学校での食育への LC 思考の適用について

栄養士では、LC 思考に関して、「聞いたことがある」、「何となく知っている」との回答が 72.5%を占めた(n=40)。食育に LC 思考を取り込むことについて、77.5%の回答者が「必要」と回答していた(n=40)。一方で、食育に LC 思考を取り込む可能性について、「困難である」、「取り込めるが容易でない」との回答が 94.9%を占め(n=39)、その理由は家庭科教員が挙げた内容と同様であったことから、具体的な教材や指導例などを整理する重要性を示していると考えた。現状で栄養士は、食育への LC 思考を適用すること重要性を感じながらも、知識修得の機会不足や時間不足などで対応が難しい状況にあると考えられた。

今後、具体的な教育 P の作成だけでなく、家庭科教員や栄養士の LC 思考に関する理解を深めるための研修会や勉強会などに取り組むことが必要と考える。

謝辞

アンケート調査にご協力いただきました宇都宮市内の公立小学校、中学校の皆様に感謝申し上げます。また、アンケート調査票の作成にご指導いただいた宇都宮市教育委員会学校健康課の皆様にお礼申し上げます。

引用文献

1) 平山世志衣, 天野雄太, 大内康弘, 本藤祐樹：日本LCA学会, 5(3), (2009), pp367-381. 2) 安藤生大：日本LCA学会誌, 5(3), (2009), pp382-392. 3) 成田明沙美, 井上弘毅, 松本真哉, 中村栄子：日本LCA学会, 5(3), (2009), pp393-402. 4) 天野雄太, 平山世志衣, 本藤祐樹：日本LCA学会, 8(1), (2012), pp55-65. 5) 笠井利浩, 荒木史代：日本LCA学会誌, 11(4), (2015), pp337-347. 6) 中山節子, 堀尾真理子:千葉大学教育学部研究紀要, 58, (2010), pp89-94. 7) 三神彩子, 長尾慶子, 今井悦子：日本家庭科教育学会誌, 53(4), (2011), pp279-289. 8) 菱沼竜男, 大森玲子：第11回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, (2016), pp190-191.

食品ロス削減策としてのフードバンクの有用性の検証

Evaluation of the effectiveness of food bank as a reduction of the amount of food loss

○塚原直樹*[1)]、伊坪徳宏[1)]
Naoki Tsukahara, Norihiro Itsubo
1) 東京都市大学
* g 1131132@tcu.ac.jp

1. 1 はじめに

まだ食べられる状態にもかかわらず廃棄されてしまう食品をフードロスと称するが、小売店での売れ残り・期限切れ、製造段階で発生する規格外品、飲食店や家庭での食べ残し・調理中のロスなどが含まれる。日本の平成 23 年度の推計では、食用 仕向量は 8,460 万トン、食品廃棄物等排出量は 1,760 万トンである。食品ロスの年間発生量は、事業系食品廃棄物 715 万トンのうち可食部分と考えられる量は約 300～400 万トン、家庭系食品廃棄物 1,014 万トンのうち可食部分と考えられる量は約 200～400 万トンで、合計約 500～800 万トンと推計されている 。つまり、食用仕向量のうち 6～9%、食品廃棄物等排出量のうちの 28～45%が食品ロスとして発生していることとなる。フードロスを削減するために国は様々な取り組みを行っているが、フードバンク活動支援もその一つに位置づけられている。フードバンク活動は廃棄される予定の食品を食品として有効活用していく活動であり、フードロス量の削減とともに、我が国で広がっている格差是正につながることが期待される。

環境側面に注目したフードバンク活動の環境影響に関する評価研究はいくつかある。しかし、これらの研究では輸送過程を含まれていないことや、廃棄過程の削減効果が含まれていない点、外食産業からの廃棄物をフードバンク活動量として算定するなど、フードバンク活動の現状に則していないものが多い。

1.2.研究目的

我が国のフードロス量は先進国の中でも上位であり、率先してフードロスの削減に取り組むことが求められる。その中でも注目されるフードバンク活動が現状に則した評価研究がなされていない現状を踏まえ、本研究では食品ロス対策としてのフードバンク活動に注目し、一次データの下で環境評価を行うとともに、その有用性を検証する。

2. 評価対象及び評価方法

2.1 評価対象

フードバンク活用シナリオ、現状シナリオの２ケースを評価対象とし、フードバンク利用率を変化させるときの環境影響削減効果を算定する。

2.2 機能単位

神奈川県内の食品ロス量を処理することを機能単位とした。また現状で行われている食品ロスの有効策（焼却発電、飼料化、堆肥化）による電力、肥料、飼料の各生産量についても機能単位として設定した。

2.3 評価範囲

フードバンクを活用しない場合のシステム境界を図１、食品ロス廃棄物をフードバンクを活用し再利用した場合のシステム境界を図 2 に示す。

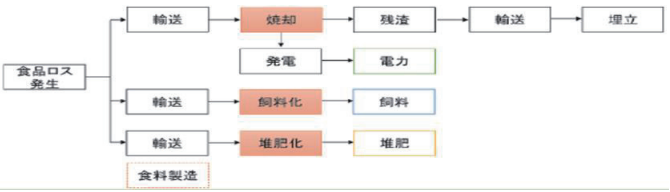


図１フードバンクを活用しない現行フロー図

図２フードバンクを活用した場合のフロー図

なお、中間処理、最終処理施設の建設段階は対象外とし運用段階のみの評価としている。

2.4 算定方法

本研究では神奈川県内事業者からの食品ロス量の推計値と農林水産省による食品製造、卸、小売業ごとの食品ロス寄与率を用いて、食品類ごとに食品ロス量と CO_2 排出量を求めた。排出原単位は、味の素グループ版 CO_2 排出係数データベースを用いた。

3. 結果

3.1　神奈川県内事業者からの食品ロス量推計

日本の食品ロス量 650 万トンから神奈川県の事業系食品ロス量を以下に示す形で按分し推計した。

食品製造業は製造品出荷額を、外食産業は飲食店の従業員数を、食品卸業および食品小売業は年間商品販売額を用いた。その結果、神奈川県における内事業系食品ロス量は約 14.49 万トンと推計された。内訳はそれ

ぞれ食品製造業 7.3 万トン、外食産業 5.4 万トン、食品卸業 0.2 万トン、食品小売業 1.4 万トンとなっている。なお、外食産業からの食品ロスのはその多くが食べ残しに起因するものなのでフードバンクでの再利用はできないと判断し、今後の算定には加えないこととした。

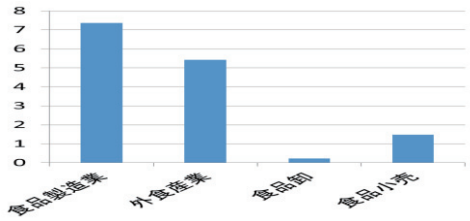


図 3 事業別食品ロス量（縦軸は万ｔ）

3.2 産業別製造時 CO_2 排出量

各産業ごとにみた食品ロスの製造時 CO_2 排出量を図 4 に示す。

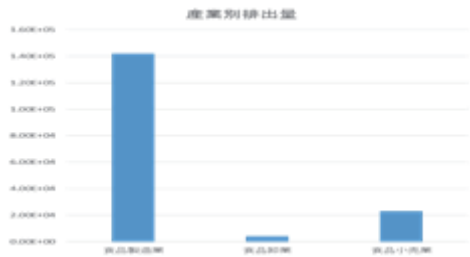


図 4 産業別製造時 CO_2 排出量（縦軸はトン）

3.3 ライフサイクル評価結果

現状で行われている食品ロスへの食品ロスの有効策（焼却発電、飼料化、堆肥化）とフードバンク活用シナリオのライフサイクル CO_2 を表 1 に示す。

	FB率0%（t-co2）	FB率100%（t-co2）
飼料化	943	0
飼料製造	0	943
肥料化	7837	0
肥料製造	0	7837
焼却	1792	0
埋立	240	0
電力製造	0	1109
輸送	2211	3095
食料生産	138790	0
合計（t-co2）	151813	12984

表 1　現行シナリオとフードバンク活用シナリオの CO_2 排出量

現行シナリオとフードバンク活用シナリオの輸送に関しては既存研究を参考にシナリオ設定し算定した。輸送手段は４t トラック積載率 50%で共通している。輸送距離に関しては現行シナリオが 75km、フードバンク活用シナリオはそこにフードバンクかわさき～神奈川県内人口重心地の距離を加算し算定を行った。また、飼料、肥料、ゴミ発電に関する環境負荷量の算定は CO_2 排出原単位を用いて算定した。

この結果、フードバンク食品ロス量を 1%低減することで約 1400t - CO_2 の排出を抑制できることがわかった。これは食品ロス 1t 削減が約 1.5t-CO_2 削減に相当する。この結果は既存研究の結果 1.5~1.7tCO_2 /t-food とほぼ整合するものとなった。

4. 結論と課題

本研究では神奈川県内の事業者を対象に食品ロス廃棄物をフードバンク活動で有効活用した場合の環境負荷削減効果を推計した。LCA による評価結果では、食品 1t をフードバンクで有効活用した際に約 1.5t の CO_2 を削減することができるとの結果が得られた。現在、食品ロスに応じて発生する食品製品包装材などの正確な集計ができていない、食品ロスの品目別のデータが得られていないなどの課題が残されている。また、食品の配給先における QOL 変化についてみることでフードバンク活動の総合評価を行うことも重要な課題であると考える。

5. 参考文献

1）NPO　ネットワーク地球
2）セカンドハーベストジャパン
3）農林水産省　統計部
4）農林水産省　統計部
5）　味の素グループ版 CO_2 排出係数データベース
6) 厨芥類の発生抑制と再資源化のトレードオフを考慮した家庭系廃棄物処理のライフサイクル分析

途上国における食生活変化に伴う温室効果ガス・フットプリント変化量の定量評価―パラオ共和国を対象として―

Quantitative evaluation for the changing GHG emission and Footprints with dietary life change at developing country –focusing on Republic of Palau-

○清水喬文*[1)]、中村晋一郎[1)]、飯田晶子[2)]、中谷隼[2)]、小野雄也[2)]、加藤博和[1)]
Takafumi Shimizu, Shinichiro Nakamura, Akiko Iida, Jun Nakatani, Yuya Ono, Hirokazu Kato
1) 名古屋大学, 2) 東京大学
* tshimizu@urban.env.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

食物は人間が生命を維持するために不可欠であるが，現代ではその生産から流通を経て調理・廃棄に至るまでのライフサイクルにわたり，直接的・間接的に多くのエネルギー・資源が消費され，環境負荷を排出している．[1)]近年発展途上国では，先進国を追う形で食生活が大きく変化しており，温室効果ガス排出量や資源消費量の変化につながっていると考えられる．

そこで本研究では，食生活に関わる環境負荷・フットプリントの変化量を評価するフレームワークを構築する．また，生活水準向上に伴う食生活の変化について，設定したいくつかの食生活シナリオに沿った温室効果ガス・フットプリント量の推計を行う．結果に対して，社会･自然環境の状況を踏まえた考察を加える．

2. 食生活を評価する手法の構築

2.1 食生活の変化の評価手法

対象とする地域の食生活について，使用されている食材がどこから，またどのように得られたかを分析する手法として，住民へのアンケート調査を行う．食材ごとの使用重量のデータを整備するために，アンケート調査では食材の入手先・入手方法・提供人数を質問する．得られたデータを用いて食材の入手先を推定する．

2.2 環境負荷量とフットプリント変化量の評価手法

本研究では，食のライフサイクル CO_2 の 8 割を占める生産と輸送段階に特に着目して推計を行う．温室効果ガスについて，生産段階では主に，食材生産や一次加工・包装加工などの際に排出される．[2)]以下に，生産者ベースの原単位を使用することを想定した推計式(1)を示す．輸入されている食材に関しては，食材の輸入金額に応じた加重平均をとり，多地域間産業連関表によって算出された排出量原単位を調節する．

$$GHG_P = \sum M_i \times U_{p1i} \quad (1)$$

ここで，U_{p1i}：食材 i を生産する際に排出される温室効果ガス排出量原単位（g-GHG/US$），$M_i$：使用されている食材 i の生産に必要なコスト（US$）である．

一方，フットプリントは，消費する全ての資源を生産するために必要な生態学的資本のことで，実用的には地球上に存在する生産性を有する土地と水域の平均生産性を有する仮想的な 1 ヘクタールの土地を示すグローバルヘクタール（Gha）で表現する．[3)] 本研究では，生産段階におけるフットプリント量を，多地域間産業連関表から得られる原単位を用いて推計する．以下に，生産者ベースの原単位を使用することを想定した推計式(2)を示す．

$$FT_P = \sum M_i \times U_{p2i} \quad (2)$$

ここで FT_P：生産段階におけるフットプリント量（Gha），M_i：使用されている食材 i を生産するのに必要なコスト（US$），$U_{p2i}$：食材 i を生産する際に発生するフットプリント原単位（Gha/US$）である．

3. パラオ共和国を対象とした食生活の評価

3.1. 対象地域の概要と食生活の実態評価

本研究では，パラオ共和国アルコロン州オレイ（Ollei）集落を対象とする．対象地域の位置を図 1 に示す．対象地域は，中心市街地コロールから 60km 以上あり，国内では最も離れた集落である．

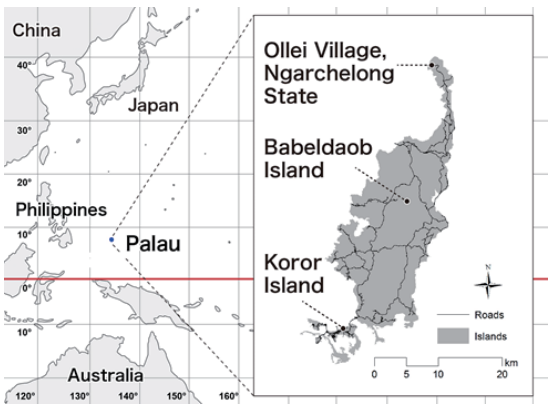


図 1 対象地域の概要

現在の食生活を把握するために，居住者全員を対象に，食生活に関するアンケート調査を調査票記入形式で実施した．調査により得られた食材の入手方法の割合を図 2 に示す．オレイ集落では穀物や肉・卵・乳製品はほぼ全てが購入によって入手されている一方，野菜・果物や魚介類，芋類などは地域内で生産されている傾向にある．つまり，パラオで唯一豊富に得られる食材である漁業資源や，比較的少ない投資・資源で生産可能な耕作農業に関わる食材は自給されている傾向があるが，畜産農業や米作食材は生産に多くの投資や資源が必要で，パラオでは購入，つまりは海外からの輸入に依存している．

3.2　環境負荷・フットプリントの変化量の評価

前節で得られた結果をもとに，オレイ集落全体での食物による温室効果ガス排出量の推計を行う．本研究では，原単位として EORA（2012）が提供する多地域間産業連関表によって算出された原単位データを用いて推計を行った．

また，パラオ国内に輸入される食品関連品目の輸入先の割合を把握するために，ITC（2012）によるトレードマップのデータを用いて HS 品目ごとの輸入先・輸入額・輸入量のデータを整備した．

次に，食生活の変化を分析するために，今後予想される食生活変化のシナリオを 4 通り設定し，各シナリオにおける食生活に関わる温室効果ガス・フットプリント量の評価を行った．設定したシナリオを表 1 に整理する．また推計された温室効果ガス・フットプリント量の変化を図 3 に示す．例えば，輸入食品の一部を対象地域で生産するシナリオ 4 では，プットプリント量が減少した一方，温室効果ガス排出量が増加した．これは主に，対象地域では使用される土地資源量が少ないものの，食材の生産効率が低いため，全体的に温室効果ガスの排出原単位が大きいことによる．特に，生産時に使用される肥料に含まれる窒素に起因する N_2O が大きくなり，この温室効果能力の高さによって環境負荷量の変化が大きく左右されている．

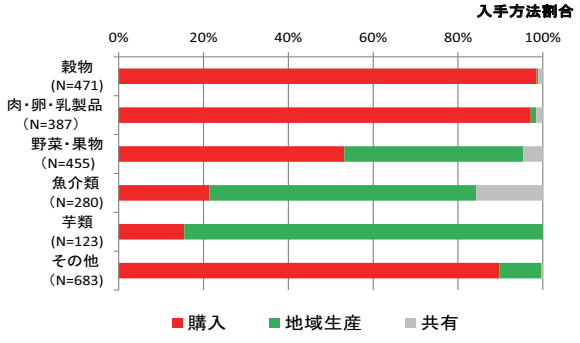


図 2　オレイ集落の食材入手方法割合

表 1　食生活変化に対応した分析シナリオ

	予想される自然・社会環境の変化	シナリオ内容
シナリオ 1	乱獲による周辺漁業資源の減少	魚介類部門の地域内生産が喪失
シナリオ 2	海面上昇に伴う田畑の塩害化	タロイモの地域内生産が喪失
シナリオ 3	観光化に伴う経済効果	GDP 増加に伴い摂取カロリーが増加
シナリオ 4	ローカルな食への回帰	主食が全てタロイモに変化

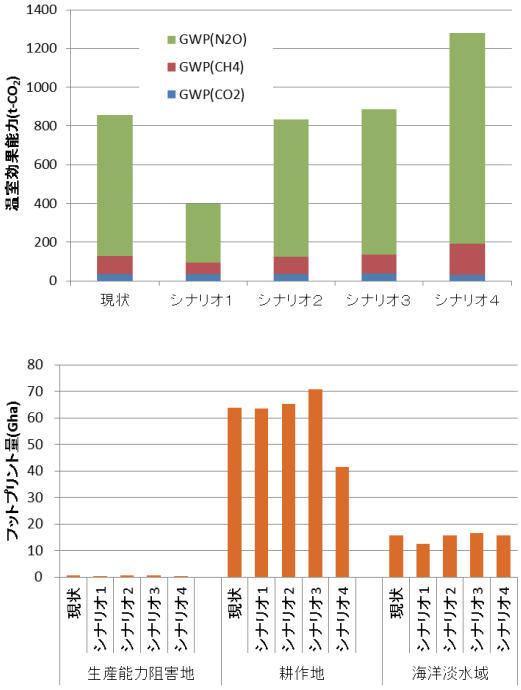


図3　各シナリオの環境負荷・フットプリント量の変化

4.　まとめ

パラオ共和国の農村集落を対象としてシナリオ分析による食生活変化に伴う温室効果ガス・フットプリントの変化量を推計し評価した．結果，ローカルな食への回帰であるシナリオ 4 ではフットプリントは減少したが，温室効果ガス排出量は増加した．温室効果ガス排出量は，窒素に代えてリン酸やカリなどの含有量を増やした肥料を用いることで改善されると考えられる．

謝辞

本研究は，環境省の自然共生型社会部会4RF-1401「島嶼部におけるRAKUEN指標の開発：沖縄県石垣島・パラオ共和国を事例として 」の一環として実施したものである．ここに記して謝意を表する．

引用文献

1)　松本亨・井村秀文：環境科学会誌，13.4，（2000） pp.455-468.
2)　松本ら：環境システム研究，27，(1999) pp.89-96
3)　氏原ら：.環境システム研究論文集, 36，(2008)，pp 207-215

有機薄膜太陽電池による日本のトマト施設栽培からの LC-CO_2 排出量の削減

Mitigating LC-CO_2 emissions by organic photovoltaic in Japanese greenhouse tomato production

○レオン愛*[1)]、フーマンファルザネ [1)]、山末永嗣 [2)]、石原慶一 [1)]
Ai Leon, Farzaneh Hooman, Eiji Yamasue, Keiichi Ishihara
1) 京都大学, 2) 立命館大学
*leon.ai.3s@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

近年、発電用光透過型有機薄膜太陽電池（OPV）が開発されている。OPV は半透明なので農業生産と併用することが可能であり、今後普及が期待される。これまで、従来型の太陽光発電と水稲 [1)]、小麦 [2)]、及びトマト [3)]等の栽培とを並行させるソーラーシェアリングが収量や経済性に与える影響が評価されてきた。しかし、OPV を利用した研究はほとんどなく、様々な条件（設置方法や地域等）を考慮し有効性を評価する必要がある。京都大学附属農場（京都府木津川市）に OPV を導入した温室を設置し、農業生産との併用及び CO_2 削減の可能性を実証することを目的とし、昨秋よりトマト栽培を行い、データ収集を始めた。本研究では、トマト施設園芸に OPV を導入することによる CO_2 削減の可能性を実証することを目的として、ライフサイクルアセスメント（LCA）手法を用い、まずこれまでに報告例のほとんどない全国のトマト栽培施設からの LC-CO_2 排出量をボトムアップ手法で算出し、OPV 導入による削減量の可能性について調査推定した。

2. トマト施設栽培面積と収量

本研究では、市町村ごとに求めた排出量・削減量の合計を全国値とした。しかし、市町村別施設栽培面積と収量は未公開であるため、関連する統計データ（平成 26 年度市町村別栽培面積、平成 27 年度県別栽培面積 [4)]、平成 20 年度施設栽培延べ面積 [5)]）を用いて集計した結果、平成 27 年度施設栽培面積と収量は、それぞれ 5236 ha、40.4 万トン（内、加温有 32.7、加温無 7.7 万トン）となった（ミニトマトと加工用トマトは含まない）。

3. トマト栽培による LC-CO_2 排出量推定

トマト栽培にかかわる資材投入量については経営指標を用いた。暖房エネルギー消費量はデグリアワーに基づき推定することとし、経営指標に示された燃料消費量は控除した。システム境界は農業資材・機械の製造及び育苗から収穫までの栽培管理を設定した。機能単位は 1 kg のトマト生産とした。機械の耐用年数は、国税庁の減価償却に基づいた。ハウスの骨材については、30 年とした。インベントリ分析は MiLCA の LCI データベース ver1.1 を用いた。

暖房消費量は基礎データとして気象データ（平成 26 年 10 月～27 年 9 月）および各市町村の栽培面積を用い、デグリアワー[6)]、放熱係数、地中伝熱負荷、床面積及び被覆面積から計算した。トマト栽培の加温期間は、野菜の種類別作型 [7)]に従った。各市町村の加温設備施設に関するデータがないため、すべて A-重油またはすべてヒートポンプ（Coefficient of performance: COP 5）により 10 ℃に保たれると仮定した。ヒートポンプ使用による電力の CO_2 排出係数は、平成 26 年度実績代替値 0.579 kg/kWh[8)]を用いた。全国のトマト施設栽培からの暖房エネルギー消費量は 12.4 PJ となった。

以上から 1 kg トマト生産の LC-CO_2 排出量は加温設備有（A−重油）の場合 5.0 kg、加温設備有（ヒートポンプ）の場合 2.3 kg、加温設備無の場合 1.4 kg となった。また、日本のトマト施設栽培（加温有と加温無の合計）からの LC-CO_2 排出量は暖房に全て A−重油を用いた場合 174 万トン、全てヒートポンプとした場合 85 万トンとなった。農林業分野の GHG 排出量は、558 万トンと報告されており [9)]、この値は想定される範囲内にあると考えられる。

4. OPV による LC-CO_2 削減量推定

実験施設（屋根面東西設置、屋根勾配 26.6°、床面積 162 ㎡：OPV　屋根面 50 枚、東西側面 24 枚、南北妻面 12 枚、被覆率 24 %、マイクロインバータ最大出力 250W、10 台）と同じ仕様を全国のトマト施設栽培に導入した場合を推定した。尚、本被覆率を用いた試験では、現在まで収穫に差は見られていないことから OPV による収量低下はないものと仮定した。

4.1 OPV による発電量

東西屋根の発電量は、各市町村に近接する観測地点の日射量 [10)]、OPV 公称最大出力（18 W、光電変換効率 2.7 %）及び温度補正係数等を用いて計算した。一方で、シミュレーションツール、TRNSYS（University of Wisconsin-Madison）、を用い、試験圃場における 1 年間の発電量を推定し、妻面と側面の発電量が全発電

量に占める割合を求めた。この割合を上述の屋根面の発電量推定値に掛け、全国のトマト加温栽培施設に OPV を被覆した場合の発電量を推定した結果、年間 3.5 億 kWh となった。

4.2 OPV 製造に伴う LC-CO_2 排出量

OPV の製造は Roll-to-Roll とし、製造に伴う CO_2 排出量は文献値[11]を用いた。耐用年数は、OPV とインバータともに 10 年とした。その結果、OPV 製造 1 枚あたり LC-CO_2 排出量 11.9 kg、インバータ製造 1 台あたり 10.8 kg とした。

削減量は、OPV による発電量（排出係数 0.579 kg/kwh を用い LC-CO_2 換算）から、OPV 製造に伴う LC-CO_2 排出量/year を差し引いて得た。

4.3 全国のトマト施設栽培における LC-CO_2 削減量試算

表 1 に OPV 発電導入した場合の LC-CO_2 排出削減量を示す。OPV の光電変換効率はまだ発展途上にあり、今後効率の改善が期待される。光電変換効率が向上した場合の OPV 導入による LC-CO_2 削減量は、ヒートポンプが導入され、光電変換効率が 15 %以上になった場合、現状のトマト栽培からの LC-CO_2 排出量を上回った。

表 1 全国のトマト温室に OPV を設置した場合の LC-CO_2 削減量（万トン）

OPV 光電変換効率	LC-CO_2 排出削減量
2.7 %	17
5 %	31
10 %	62
15 %	94
20 %	125

5. まとめ

本研究では、OPV による CO_2 削減の可能性を実証することを目的として、LCA 手法を用い、全国のトマト栽培施設からの LC-CO_2 排出量をボトムアップ手法で算出し、OPV 導入による削減量を推定した。

本研究では、暖房消費量及び発電量の試算に推定値を用い、資材や排出量の配分を行わなかったが、今後は、実測値を用いて LC-CO_2 排出量、削減量をより高い精度で推定し、OPV 導入の効果を明らかにする予定である。

6. 参考文献

1）本間優, 土肥哲哉, 吉田好邦:エネルギー資源学会論文誌, 37(6), (2016), pp.23-31

2) Dupraz C., Marrou H., Talbot G., Dufour L., Nogier A., Ferard Y. :Renew. Energ, 36, (2011), pp.2725-2732

3) Ureña-Sánchez R., Callejón-Ferre Á. J., Pérez-Alonso J., Carreño-Ortega Á. :Scientia Agricola, 69, (2012), pp.233-239

4) 農林省農林経済局統計調査部: 作物統計, (2016)

5）農林省農林経済局統計調査部:園芸用施設及び農業用廃プラスチックに関する調査, (2010)

6）三原義秋：農業気象, 34(2), (1978), pp.83-85

7）農研機構：“研究資料第 5 号 野菜の種類別作型一覧”, (2010), pp.56-70

8) 環境省：“グリーン契約”, 環境省, http://www.env.go.jp/policy/ga/faq/1.denki.html , (2016-12-21)

9) 農林水産省：“農林水産業・食品製造業における温室効果ガス排出量の状況”, http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kikaku/bukai/H26/pdf/140529_02_03part2.pdf, (2016-12-26)

10)（独）新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）：“日射量データベース” http://app0.infoc.nedo.go.jp/metpv/metpv.html , (2016-12-26)

11）Espinosa N., Garcia-Valverde R., Urbina A., Krebs F.: Sol. Energ. Mat. Sol. C., 95, (2011), pp.1293-1302

【謝辞】本発表は、環境省「平成 28 年度 CO_2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」にて実施し得られた成果であり、関係者各位に感謝いたします。

家庭洗濯における超濃縮液体洗剤の環境負荷低減効果の評価

Evaluation of the super liquid detergent at the home laundry for the reducing environmental load

○山口庸子*、中村弥生
Yoko Yamaguchi*, Yayoi Nakamura
共立女子短期大学
* yamaguchi@kyoritsu-wu.ac.jp

1. はじめに

近年、女性の社会進出によるライフスタイルの変化や環境意識の高まりに伴い、わが国の家庭洗濯は大きく変化してきた。家庭用洗剤の変化は著しく、1987 年の粉末洗剤のコンパクト化に始まり、2009 年には節水や時短を謳った濯ぎ 1 回の超濃縮液体洗剤、2014 年には濯ぎ 1 回計量不要のユニットドーズ洗剤が登場した。これに伴い「濯ぎ 1 回液体洗剤コース」が設けられた洗濯機が販売されている。また、従来のパルセーター式洗濯機（縦型洗濯機）に加えてドラム式洗濯機を利用する家庭が増えたことで、使用水量や機械力、洗濯時間など家庭洗濯の洗い方が多様化している。

一方、これまでの報告[1,2]から、家庭洗濯において使用段階（洗濯）の環境負荷が大きいことから、効果的な環境負荷の削減には使用段階の見直しが必要不可欠である。本報告では、新型洗剤（超濃縮液体洗剤、ユニットドーズ洗剤）と従来製品のコンパクト粉末洗剤を比較して、洗い方の違いによる環境負荷の低減効果を検討した。

2. 方法

2.1 評価対象および洗濯モデルの設定

一般家庭の衣類洗濯を想定した洗濯モデルは、2014 年の国勢調査の平均世帯人数より 2.5 人とした。衣類の洗濯物量は、実態調査の結果[2]より、1 世帯あたり 2.9 人の 1 週間の総洗濯物重量 18.8kg をもとに 2.5 人世帯の 1 回あたりの洗濯物量を 2.5kg とした。また、洗濯物量 5.0kg をまとめ洗いの洗濯モデルとした。

2.2 洗浄性能の評価

洗剤は、濯ぎ 1 回で洗濯できる超濃縮液体洗剤とユニットドーズ洗剤、比較にコンパクト粉末洗剤を指示使用量で用いた（表 1）。洗濯機は、濯ぎ 1 回コースのある縦型洗濯機と斜めドラム式洗濯機（ドラム式）を用いた（表 2）。洗濯条件は、洗浄温度：25±2℃、洗濯物量 : 2.5kg（毎日洗濯）、5.0kg（まとめ洗い）、浴比の調整には、綿 100%の肌シャツを使用した。

洗浄力は、湿式人工汚染布（JIS C 9606）15 枚を用いて、洗浄前後の反射率から洗浄率 D(%)を求めた。

$D(\%) = \{(K/S)s - (K/S)w\} / \{(K/S)s - (K/S)o\} \times 100$

$K/S = (1-R)^2 / 2R$、ここで、R：反射率、K：吸光係数、S：光散乱係数、(K/S)s：洗浄前汚染布の K/S 値、(K/S)w：洗浄後汚染布の K/S 値、(K/S)o：白布の K/S 値である。

表 1 洗剤の詳細

タイプ	液性	使用量（g）		
		洗濯物量	2.5kg	5kg
ｺﾝﾊﾟｸﾄ粉末洗剤	弱ｱﾙｶﾘ性	縦型	30.8	51.1
		ﾄﾞﾗﾑ式	25.0	39.2
超濃縮液体洗剤*	中性	縦型	15.0	21.1
		ﾄﾞﾗﾑ式	12.5	20.0
ﾕﾆｯﾄﾄﾞｰｽﾞ洗剤*	中性	縦型	1個（25g）	
		ﾄﾞﾗﾑ式	洗濯物量2.0kg～6.0kg	

*：濯ぎ1回の洗濯が可能

表 2 洗濯機の詳細

タイプ	製造年	本体寸法（mm）	本体質量（kg）	標準洗濯時 容量（kg）	水量（L）	時間（min）
パルセーター式（縦型）	2013	599×638×1014	46	9	102	43
ドラム式	2013	639×716×1021	80	9	72	30

2.3 インベントリデータ

洗剤の原材料と配合割合は文献値を基に想定、容器および詰替用容器の質量は実測を用いた（表 3）。GHG 排出量の算定は、IPCC 第 5 次報告書に基づく地球温暖化係数から、CH_4 は 25、N_2O は 298 を特性化係数として換算した。LCI データベースは、MiLCA 搭載の IDEA を使用した。この他、蛍光増白剤は産業連関表のデータ、脂肪酸ナトリウムは文献値[3]を用いた。

表 3 洗剤の GHG 排出量

項目		詳細	内訳	配合量（kg/piece）	GHG（kg/piece）
ｺﾝﾊﾟｸﾄ粉末洗剤	洗剤（1kg）	活性剤（22%）	陰ｲｵﾝ、非ｲｵﾝ	0.220	0.851
		ｱﾙｶﾘ剤	炭酸塩、硫酸塩	0.498	0.335
		ｷﾚｰﾄ剤	ｱﾙﾐﾉけい酸塩	0.280	0.578
		蛍光増白剤		0.002	0.051
	容器	容器、ｽﾌﾟｰﾝ	紙、PP	0.083	0.201
	詰替[1]	ﾊﾟｯｸ	PE	0.008	0.019
超濃縮液体洗剤	洗剤（400g）	活性剤（60%）	陰ｲｵﾝ、非ｲｵﾝ、脂肪酸ﾅﾄﾘｳﾑ	0.240	1.023
		ｱﾙｶﾘ剤、水	炭酸塩、水	0.152	0.153
		ｷﾚｰﾄ剤	ｱﾙﾐﾉけい酸塩	0.008	0.034
	容器[2]	ﾎﾞﾄﾙ、ｷｬｯﾌﾟ、ﾗﾍﾞﾙ	PET,PP	0.066	0.292
	詰替	ﾊﾟｯｸ	PE	0.013	0.031
ユニットドーズ洗剤	洗剤（500g・20個）	活性剤（66%）	陰ｲｵﾝ、非ｲｵﾝ、脂肪酸ﾅﾄﾘｳﾑ	0.330	1.407
		ｱﾙｶﾘ剤、水	炭酸塩、水	0.159	0.191
		ｷﾚｰﾄ剤	ｱﾙﾐﾉけい酸塩	0.010	0.043
		蛍光増白剤		0.001	0.026
	容器	容器、ﾌﾀ	PS,PP	0.054	0.240
	詰替[3]	ﾊﾟｯｸ	PE	0.011	0.027

1)：詰替容量900g、2)：詰替容量360g、3)：詰替容量360g・18個

3. 結果および考察

3.1 洗浄性能の比較

濯ぎ 1 回の新型洗剤（超濃縮液体、ユニットドーズ）とコンパクト粉末洗剤を比較して、1 回あたりの使用水量と消費電力量を図 1 と図 2 に示す。使用水量は、ドラム式＜縦型、新型洗剤＜従来製品の関係を示し、ドラム式洗濯機で新型洗剤の洗濯が使用水量を最も削減できた。消費電力量は、縦型＜ドラム式、従来洗剤＜新型洗剤の傾向を示した。縦型洗濯機で新型洗剤の洗濯が消費電力量を最も削減できる洗濯であった。

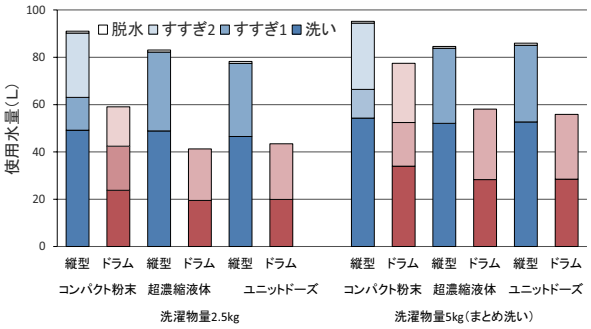


図 1 洗濯 1 回あたりの使用水量

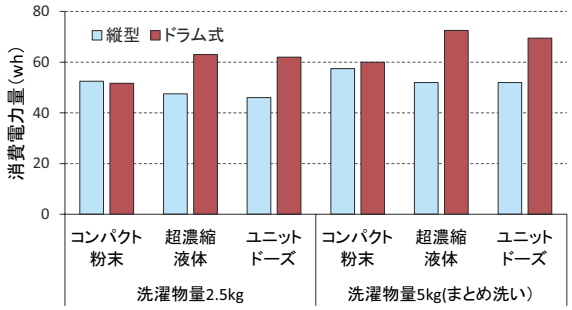


図 2 洗濯 1 回あたりの消費電力量

縦型洗濯機とドラム式洗濯機を用いて超濃縮液体洗剤とユニットドーズ洗剤、コンパクト粉末洗剤の洗浄力を比較した（図 3）。洗浄力は、ドラム式＞縦型、洗濯物量 2.5kg＞5kg、コンパクト粉末＞超濃縮液体＞ユニットドーズ洗剤の傾向を示した。まとめ洗いを想定した洗濯物量 5kg のユニットドーズ洗剤の洗浄力が最も低い値を示し洗濯条件の見直しを必要とした。

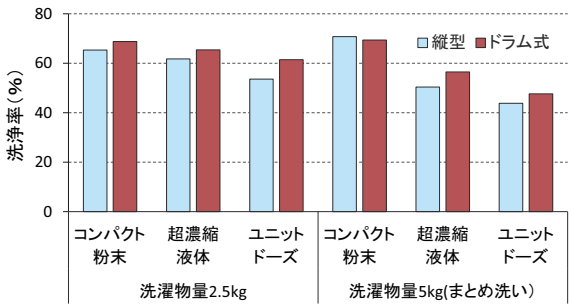


図 3 各種洗剤の洗浄率

3.2 使用段階（洗濯）の GHG 排出量

毎日の洗濯を想定した洗濯物量 2.5kg とまとめ洗いを想定した洗濯物量 5kg の 1 年間あたりの GHG 排出量を図 4 と図 5 に示す。洗剤の GHG 排出量はいずれの場合も超濃縮液体＜コンパクト粉末＜ユニットドーズ洗剤の関係を示した。特に、ユニットドーズ洗剤は使用範囲が広いため、GHG 排出量が高い値となった。また、縦型洗濯機で毎日洗濯の場合、上下水道の GHG 排出量の占める割合が高く、ドラム式洗濯機の使用で改善できた。まとめ洗いによりいずれの場合も、1 年間あたりの GHG 排出量をほぼ半減することができた。

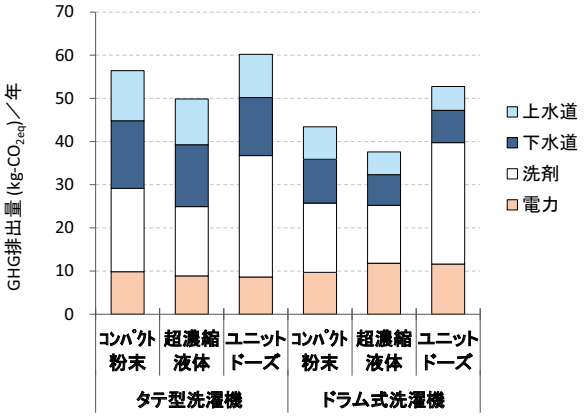


図 4　1 年間の GHG 排出量（洗濯物量 2.5kg/回）

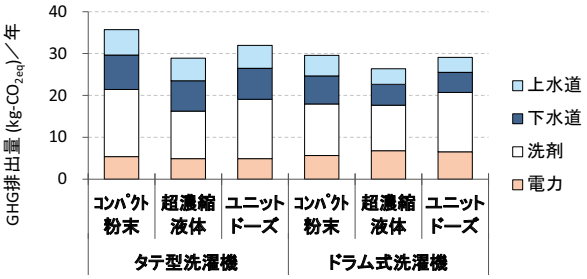


図 5　1 年間の GHG 排出量（洗濯物量 5kg/回）

4. まとめ

新型洗剤（超濃縮液体、ユニットドーズ）と従来製品のコンパクト粉末洗剤を比較して環境負荷低減効果を検討した結果、ドラム式洗濯機を用いた超濃縮液体洗剤の洗濯は、洗浄力の維持と同時に GHG 排出量を最も低減できた。縦型洗濯機を使用した日本独自の洗濯は、使用段階の GHG 排出量が高く洗い方に注意を要するなど、適宜消費者への情報提供が重要である。

5. 引用文献

1) P. A. Gilbert, 4th CESIO World Surfactants Congress, Barcelona, Proceeding, 1, (1996), pp57-66
2) 山口庸子，土屋みさと，桑村典子，永山升三：日本エネルギー学会誌，83，(2004)，pp 1021-1029
3) Stalmans M., Berenbold H., Berna L. J., Cavalli L.: Tenside Surf. Det., 32(2), (1995),pp84-107

謝辞　本研究は科研費 26242005 によるものである。

印刷物のカーボンフットプリント

Carbon Footprint of Printed Products

○牛久深雪、稲葉敦*
Miyuki Ushiku, Atsushi Inaba
工学院大学
* a-inaba@cc.kogakuin.ac.jp

1. 諸言

印刷物のカーボンフットプリント（CFP）登録件数は年々増加している[1]が、算定手法が難しく、認知度はまだ低い。本研究では、カーボンフットプリントコミュニケーションプログラムの PA-AD-06[2]（PCR：Product Category Rule）を用いて光写真印刷株式会社の印刷物および大学広報誌の CFP 算定を行い、CO_2 排出の要因を把握するとともに、削減方法を検討した。また、印刷物の CF`P の理解度と認知度を上げるために、印刷物に CFP をつけることにより、消費者の購買行動がどのように変化するかアンケート調査を行った。

2. 研究方法

2.1 CFP 算定方法

本研究は下記の手順によって進めた。

(1)インターネット、PCR ブック（PA-AD-06）を入手し、計算方法を調べた。

(2)CFP 算定に必要なデータについての質問票を作成した。本研究でご協力を頂いている光写真印刷株式会社と工学院大学の広報誌「窓」を製作している会社に質問票を送り、収集したデータから CFP の算定を行った。この算定では、カーボンフットプリントコミュニケーションプログラムの CO_2 換算量共通原単位とデータベース[3]と PA-AD-06[2]の付属書に記載されている原単位を用いた。

2.2 消費者の意識調査

エコプロダクツ 2016 で予備調査を行った。その結果をもとに、消費者向けのアンケートを作成し、調査を行う。

3. 結果

3.1 CFP 算定

3.1.1 CFP の算定結果

質問表にて収集した広報誌「窓」と光写真印刷株式会社の印刷物 3 種のデータを用いて、CFP の算定を行った。それぞれ 1 部当たりの CO_2 排出量を表 1 に、グラフにしたものを図 1 に示した。その結果、原材料調達段階の CO_2 排出量が 7 割以上を占めることが分かった。

原材料調達の内訳をみると、大部分が紙によるもので、次に PS 版が占めていることが分かった。広報誌「窓」に関しては、紙の輸送距離が長く、印刷部数に比べ PS 版の枚数が少ないため、1 部あたりにすると、その他の占める割合が高くなった。

また、生産段階では、印刷機の割合が高くなった。表 1 の環境説明と会社案内の結果を見て分かるように、用紙枚数や、最大印刷速度の値は同じだが、光写真印刷(株)の「環境説明」の定格電力が大きく、印刷機の排出量が 0.031kg-CO_2 大きくなった。

表 1　製品のデータと 1 部当たりの CO_2 排出量

	光写真印刷株式会社			工学院大学
	会社案内	環境説明	会社経歴書	広報誌「窓」
製品部数[部]	500	500	500	13000
本紙枚数[枚]	250	250	250	14000
印刷予備枚数[枚]	500	500	250	500
製本予備枚数[枚]	250	250	250	500
PS版[枚]	8	8	2	8
連量[kg]	76.5	76.5	62.5	68.5
印刷機	片面印刷	片面印刷	両面印刷	片面印刷
定格電力[kW]	120.1	88.78	72.45	181.65
最大印刷速度[枚/h]	8000	8000	8000	13000
原材料調達[kg-CO_2]	0.436	0.43836	0.22478	0.1848
生産[kg-CO_2]	0.18	0.161	0.0747	0.0347
合計[kg-CO_2]	0.616	0.59936	0.29948	0.2195

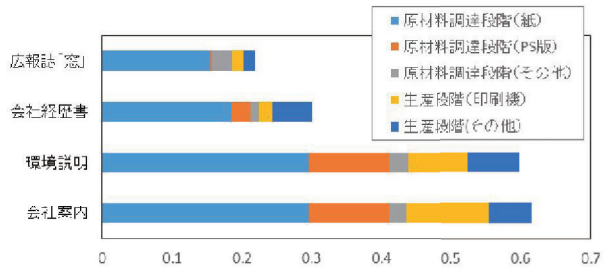


図 1　製品 1 部当たりの CO_2 排出量

3.1.2 CFP の削減方法

3.1.1 で述べたように、印刷物の CO_2 排出量の大部分を占めているのが「紙」であった。そのため、印刷するときに使用する紙の無駄を少なくすること、つまり印刷予備紙と製本予備紙をできる限り少なくすることが最も削減に効果的であると考える。ほかにも、紙の輸送距離を短くすることができるように、調達方法を検討することも削減につながる。また、光写真印刷(株)の「会社案内」を両面印刷機で印刷したとすると、一冊当たりの印刷機の排出量を 50%削減することが可能になる。

3.2 消費者の意識調査

3.2.1 エコプロダクツ 2016 での調査

エコプロダクツ 2016 で 29 人に予備調査を行ったところ、関心のある環境問題（複数回答可）は地球温暖化が 22 人で最も多かった。しかし、CO_2 排出量の少ない製品を買うという人については 5 人と少ないことが分かった。また、カーボンフットプリントを知っている人は 18 人で 62%の認知度であった。認知度を上げる手段として、印刷物専用の CFP マークを作ることも提案したが、専用マークの浸透力の難しさなどから必要ないという意見が多かったため、現在の CFP マークの普及を図ることが重要であると考えられる。

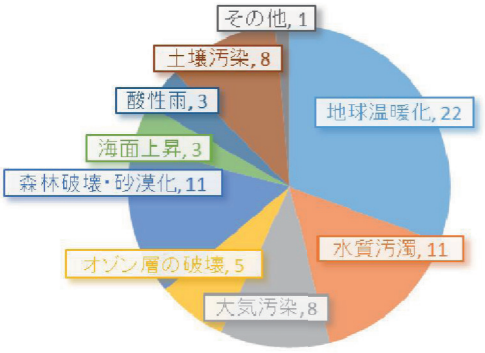


図 2　関心のある環境問題

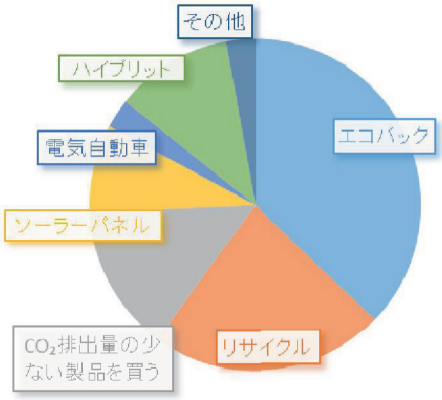


図 3　環境のためにやっていること

3.2.2 インターネット調査

インターネット調査は現在 44 名の回答を得た。

(1) CFP の認知度

CFP の説明をしたうえで、「CFP マークを知っていましたか？」という質問で、知っていたと回答した人は、31.8%であった。この回答からも分かるように CFP の認知度はエコプロ 2016 展での調査よりも低い。エコプロ 2016 展には、環境に関心のある人が集まるため、CFP の認知度が高くなったと考えられる。

(2) 購入するときに使う環境情報の入手先

店頭、パンフレット、インターネットが同じくらい情報源として使われている。中でも多かったインターネットの情報を充実させることが必要である。

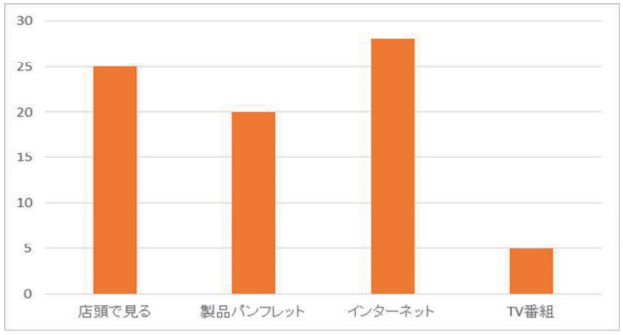


図 4　環境情報の入手先

(3) 購入する動機になる環境情報

LCA 情報そのものの必要性は少ないが、省エネ、地球温暖化が LCA と連携していないことが問題である。

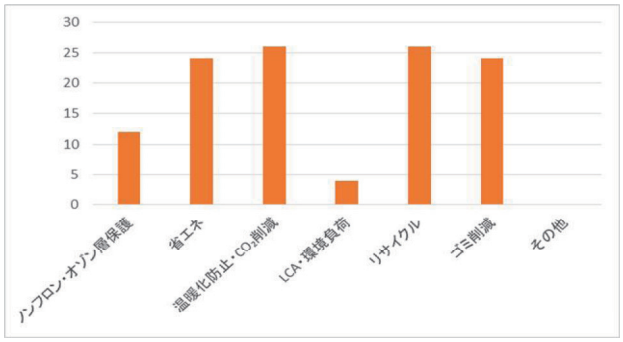


図 5　購入する動機になる環境情報

3.3 まとめ

最後に「CFP マークを表示している企業の商品を購入したいか」という質問をしたところ、「したい」と回答した人は 95.5%であったため、パンフレットなどの印刷物に CFP をつけることは効果的であると考えられる。商品の CFP が購入を促進することはもちろんであるが、CFP を表示したパンフレットに掲載されていることが、その商品の購入を促進する可能性もある。パンフレット自体の CFP の普及も必要になると思われる。

4. 参考文献

1) 一般社団法人産業環境管理協会，JEMAI 環境ラベル累計登録数

2) CFP コミュニケーションプログラム：製品カテゴリールール(PCR)，入手先 <https://www.cfp-japan.jp/common/pdf_authorize/000228/PA-AD-06.pdf>（参照 2016-12-16）

3) CFP コミュニケーションプログラム：CO_2 換算量共通原単位データベース，入手先 < https://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/data.html >（参照 2016-12-

旅行商品のタイプⅠラベル認証基準の作成

Development of type 1 label standards and its application tool for tours

○末吉普*[1)]、稲葉敦 [2)]
Sue Yosihiro, Inabaken Atusi
1)工学院大学
* b513063@ns.kogakuin.ac.jp

1. 研究背景

2015 年度における国内旅行者数は約 5 億 4 百万人であり、2008 年度比で 1.6 倍に増加している [1)]。 2020 年の東京オリンピックにより国内旅行者数の増加が予想され、より環境影響の低い国内旅行を推奨していくことが求められている。

本研究では旅行商品にタイプⅠラベルを表示するための基準書を作成した。またこの基準書に適合する項目をチェックすることで、自動的に取得ポイントが算定されるエクセルを用いたツールを開発した。このツールを実際のツアーに適用した結果を報告する。

2. 研究手順

2.1 タイプ 1 ラベルの認定基準の作成

2015 年度既往研究 [2)]でまとめられた旅行の移動・宿泊・食事・観光の 4 要素を基にして、ホテルの廃棄物の削減方法などツアーにおける環境配慮の定性的評価項目と CO2 排出量の定量的算定項目からなる。

2.2 ケーススタディ

宿泊施設を利用しない日帰りツアーや、遊園地や水族館などの観光施設を利用しない登山・トレッキングツアーなど様々なツアーが存在している。これらを宿泊と観光の有る無しで 4 パターンに分けて評価した。その結果からタイプⅠラベルとして認定するための点数や、ツアーによる傾向を検討した。

3. 結果

3.1 認定基準作成

認定基準は 79 項目あり、そのうち 8 項目を必須項目とし配点を 2 点とした。内訳は移動・食事・宿泊・観光の CO_2 排出量の定量的評価が 4 項目と定性的評価が 4 項目である。表 1 に定性的評価の必須項目を示す。

表 1 定性的評価の必須項目

各要素	内容
申請者の取り組み	ツアー内容が大項目の分類に該当するものであること
食事の項目	宿泊先、あるいは外食先の食材の在庫管理によるデッドストックの防止、宿泊予約数に合わせての調理量の調整、調理時の残り物の有効活用などにより、厨芥・残飯の発生抑制に取り組んでいる
宿泊の項目	宿泊先が利用客の持ち込んだごみを分別・リサイクルしている
	宿泊先が環境法規の順守

表 2 各項目の概要

各ツアーの算定	
各要素	小項目
申請者の取り組み（合計8点）	申請者の取り組み［6項目］×1
	地域の環境活動等[1項目]×2
移動の項目（合計10点）	レンタカー［3項目］×1
	運転方法［2項目］×1
食事の項目（合計19点）	廃棄物処理［4項目］×1
	食材・調理［3項目］×1
	エネルギー［2項目］×2
	環境美化活動［2項目］×2
	リサイクル［4項目］×1
宿泊の項目（合計38点）	アメニティ［9項目］×1
	リサイクル［4項目］×1
	エネルギー［12項目］×1
	客室ごとの空調管理[1項目]×1
	環境美化活動［6項目］×1
	その他［3項目］×1
観光の項目（合計11点）	観光活動［2項目］×1
	エネルギー［6項目］×1
	リサイクル［1項目］×1

必須項目以外は 71 項目あり、内訳は「申請者の取り組み」が 7 項目、「移動の項目」が 5 項目、「食事の項目」が 15 項目、「宿泊の項目」が 35 項目、「観光の項目」が 9 項目となっている。各項目の概要を表 2 に示す。配点は原則として各項目を 1 点とし、次の考え方に当てはまる項目を 2 点とする。

1) 環境への影響が大きく、取り組みによる改善効果が大きいと考えられる項目
2) 取り組みが組織や他の取り組みに与える波及効果・影響度が大きいと考えられる項目
3) 創意工夫や積極的な設備投資など先進的な取り組みと考えられる項目
4) 本研究における調査結果から排出削減が必要されるべき箇所

また、移動・食事・宿泊・観光の項目の中で最も CO_2 排出量の割合が多いと考えられる移動の項目は配点をすべて 2 点としている。

3.2 国内ツアーの定量評価

移動・食事・宿泊・観光の CO_2 排出量の定量的評価の計算方法を下記に示す。

移動：移動距離[km]×交通機関の原単位[kg-CO_2/km] [2)]

食事：食材の重量[g]×食材の原単位[kg-CO_2/g][7)]
宿泊：y:一人当たりの CO_2 排出量[kg-CO_2]x:客室数[8)]
　　算定式：y=0.0534x
観光：y:年間 CO_2 排出量[kg-CO_2/ m^2]x:延床面積[m^2][9)]
　　算定式①：y=0.2621x
　　y:年間 CO_2 排出量[t-CO_2]x:入場料金[円][9)]
　　算定式②：y=0.5173x

3.3 ケーススタディ

作成したツールを用いて現在行われているツアーを評価した。評価したツアーを表 3 に示す。今回のケーススタディでは必須項目がすべて合格である前提で評価を行った。

表 3 評価するツアー[3.4.5.6)]

番号	各ツアーの場合	各ツアー名
①	宿泊× 観光○	富士サファリパークといちご狩り食べ放題！[5)]
②	宿泊○ 観光×	プライベート富士登山一泊二日コース[3)]
③	宿泊× 観光×	日本版グランドキャニオンと小富士火山Dコース[4)]
④	宿泊○ 観光○	JRタワーホテル日航札幌に泊まる札幌のプレミアムな休日[6)]

今回の評価では該当する項目の合計点数の半分以上の点数を獲得できるツアーをタイプⅠラベルの認定ツアーとすることにする。例えば③のように宿泊施設、観光施設を利用しないツアーの場合は「宿泊」または「観光」を除いた合計点は 37 点であるため、19 点を超えればタイプⅠラベルを認定できるものとする。評価にあたっては、ツアーの説明書を入手し使用するホテルやレストラン等の情報をインターネットで入手するとともに、移動方法など推定できる部分は推定して使用した。表 3 に示したツアーの評価結果を表 4 に示す。2

表 4 各ツアーの定性的評価の結果

各ツアーの場合	①	②	③	④
申請者の取り組み	7/8	4/8	4/8	7/8
移動の項目	6/10	0/10	0/10	6/10
食事の項目	3/19	13/19	12/19	13/19
宿泊の項目	無し	17/38	無し	13/38
観光の項目	4/11	無し	無し	5/11
合計得点	20/48	34/75	16/37	40/86

①のツアーでは食事に関する項目の得点が低い。これは、食事をとる店舗が個人経営であるため、廃棄物処理などの情報が不透明で評価できない項目があるためである。食事をとる店舗についても付属証明書を求める必要がある

②と③のツアーは移動に関する項目の得点が低い。これは、このツアーは登山がメインのツアーであるため、移動手段に乗り物を利用しないにもかかわらず、レンタカーや運転方法に関する項目を評価に加えたためである。乗り物を利用しないツアーの場合には乗り物に関する項目を除外して評価することが必要である。

また、宿泊と観光がある④のツアーの場合は宿泊に関する点数の獲得割合が最も低くなった。④のツアーで宿泊するホテルにはエネルギーに関する情報しか公開しておらず、リサイクルなど他の小項目の評価ができなかったためである。実際には、各宿泊施設ごとに行われている環境保全活動について付属証明書で具体的な記載を求めることで評価が可能になると思われる。

また、3.2 で紹介した定量的評価をツアー②に当てはめたところ、移動は電車等の手段が明らかなので計算できるが、食事はツアー内容から食事のメニューを知ることができても、その材料を調べることが困難であった。また宿泊は山小屋なので 3.2 に示した式の使用が困難であることがわかった。

4. まとめ

タイプ 1 ラベルを認定するための基準項目を作成し、実際に行われているツアーに適用した結果、基準項目並びに定量的評価の方法の改善が必要であることがわかった。今後ケーススタディの数を増やし、定性的評価項目の付属証明書の記述方法並びに定量的評価項目である GHG の算定方法をさらに詳細にして行きたい。

5. 引用文献

1) 日本政府観光局「訪日外客統計の集計・発表」 (オンライン)入手先
<http://www.jnto.go.jp/jpn/index.html> 2016-4-15
2)吉田知史　工学院大学卒業論文（2011）P.3-77
3)エコツアー総覧「プライベート富士登山一泊二日コース」(オンライン)入手先
<http://ecotourism.jp/tour/detail.php?id=2041> 2016-12-22
4) エコツアー総覧「日本版グランドキャニオンと小富士火山 D コース」(オンライン)入手先
<http://ecotourism.jp/tour/detail.php?id=1084> 2016-12-22
5) 株式会社 HIS「【新宿発】富士サファリパークといちご狩り食べ放題！静岡ご当地グルメ「富士宮やきそば」を味わって♪」(オンライン)入手先
<http://bus.his-j.com/T8.php?jcd=11&tour_cd=TK-FTH0004-624&dept_area_cd=KT> 2016-12-22
6) 株式会社 HIS「JR タワーホテル日航札幌に泊まる札幌のプレミアムな休日」(オンライン)入手先
< http://nippon.his-j.com/tour_detail/TK-FSN2017-JRT2I> 2016-12-22
7)風間理応　工学院大学卒業論文（2011）P.10-32
8)玉利有香　工学院大学卒業論文（2011）P.97-100
9)桜庭愛美　工学院大学卒業論文（2014）P.38-52

イベントにおける CO_2 排出量の算定方法の検討

Calculation of CO_2 emission join the event for participating in events

○阿部由夏子、稲葉敦*
Yukako Abe, Atsushi Inaba
工学院大学
* a-inaba@cc.kogakuin.ac.jp

1. 緒言

近年、スポーツ、フェスティバル等のイベントの市場規模が年々増加しており、イベント来場者の消費額も増加している [1]。また、2020 年に開催される東京オリンピックに向けて、訪日外国人旅行者数が更に増加すると予想され、イベントにおいても環境との調和が求められると考えられる。著者らは既にツーリズムの CO_2 排出量を算定する為の一部として、東京ディズニーランド等のテーマパークや動物園、博物館等の観光に関する CO_2 排出量の算定方法を提案した [2]。しかし、イベントに関する具体的な CO_2 排出量の算定方法はまだ提案されていない。

本研究では、劇場と野球場を対象とし、温室効果ガス算定公表制度 [3](以降温対法)のデータを基に、公演数、来場者数等のデータを収集、分析する事で観劇並びに、野球観戦とコンサートの参加者 1 人当たりの CO_2 排出量の算定方法を提案する事を目的とする。

2. 研究手法

本研究は下記の手順によって進めた

①主な劇場や野球場の CO_2 排出量は、温対法における平成 25 年度から平成 21 年度のデータを用いて収集した。②インターネットを用いて劇場の公演数、来場者数、並びに野球場のスポーツ等の試合日数、コンサート開催件数、イベント開催件数を収集した。過去の開催件数等が不明な会場については、直近の開催数の年間平均を算出し、過去も同様であると仮定した。観劇並びに野球観戦、コンサートの参加人数は、会場の最大収容人数を使用した。③必要に応じて野球場に質問表を送り、消費電力量等のデータを収集した。④収集したデータを基に、CO_2 排出量と公演数並びに来場者数についての関係を分析した。1 公演およびイベントに参加する 1 人当たりの CO_2 排出量を算定した。

3. 結果

3.1 劇場の算定結果

温対法のデータが入手可能であった、明治座・Bunkamura・宝塚大劇場・新国立劇場・帝国劇場を対象とした。また、各劇場のホームページより公演数、来場者数についてのデータを収集した。

劇場における CO_2 排出量と公演数の関係を図 1 に、CO_2 排出量と来場者数の関係を図 2 に示す。

図 2 より、明治座・Bunkamura・宝塚大劇場・帝国劇場における 1 人当たりの CO_2 排出量は約 4.6kg/人となった。

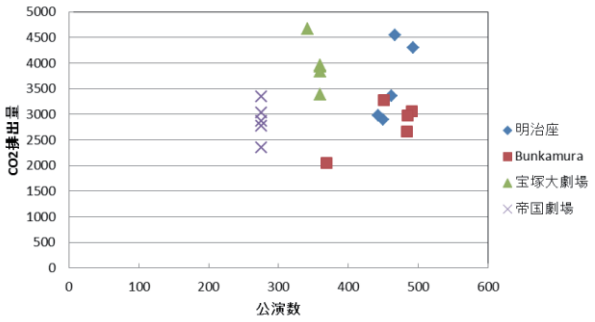


図 1　劇場における CO_2 排出量と公演数の関係

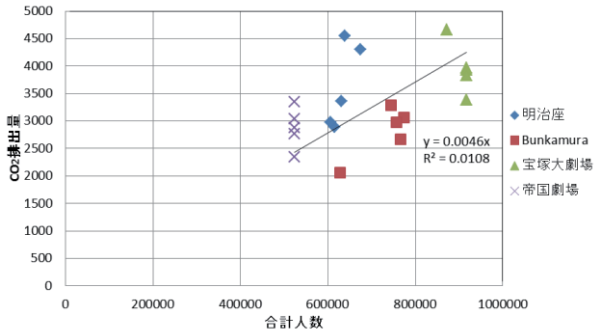


図 2　劇場における 1 人当たりの CO_2 排出量

新国立劇場における CO_2 排出量と来場者数の関係を図 3 に示す。新国立劇場の 1 人当たりの CO_2 排出量は明治座等の劇場よりも 1 桁大きく、18.8kg/人となった。

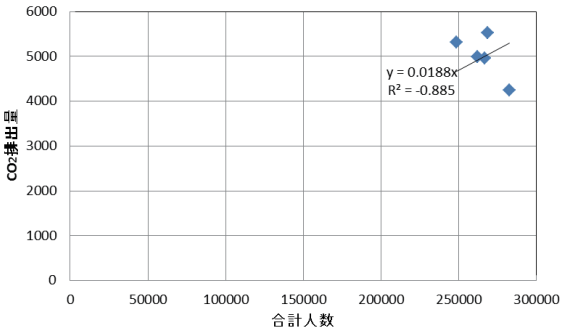


図 3　新国立劇場の CO_2 排出量と来場者数の関係

3.2 野球場の算定結果

温対法のデータが入手可能であった、東京ドーム・ナゴヤドーム・札幌ドーム・京セラドーム大阪・福岡ヤフオク！ドーム・さいたまスーパーアリーナを対象

とした。また、各野球場のホームページより 1 年間のプロ野球試合数と来場者数についてのデータを収集した。さらに、過去に開催されたイベントやコンサートについてのデータを収集した。野球場には 1 年間のスポーツ、コンサートの開催日数、来場者数についての質問表を送り、札幌ドーム・ナゴヤドーム・東京ドームから回答を得た。

温対法から得た野球場の CO_2 排出量を野球(その他のスポーツも含む)とコンサート等のイベントの開催日数で配分した。これをそれぞれの来場者数で除して 1 人当たりの CO_2 排出量を求めた。

図 4 にスポーツ等の CO_2 排出量を示す。

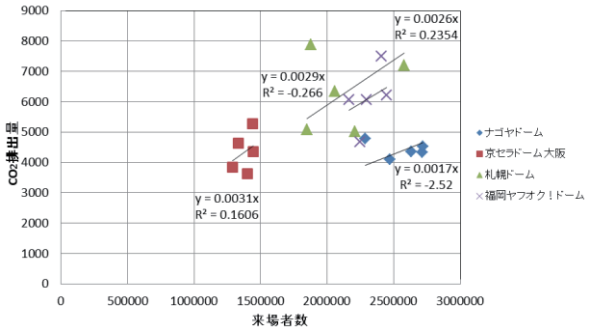


図 4　野球場におけるスポーツ等の CO_2 排出量と来場者数の関係

図 4 より、ナゴヤドームは 1.7kg/人、京セラドーム大阪は 3.1 kg/人、札幌ドームは 2.9kg/人、福岡ヤフオク！ドームは 2.6kg/人となった。

札幌ドームから入手した 1 試合当たりの電力消費量を用いて CO_2 排出量を算出すると 29t/1 試合となる。これは図 4 の計算で使用した 1 試合当たりの CO_2 排出量(57t～100t/1 試合)の 1/3 程度である。従って、図 4 の結果はその 1/3 程度であると考えられる。

コンサート等の CO_2 排出量を図 5 に示す。

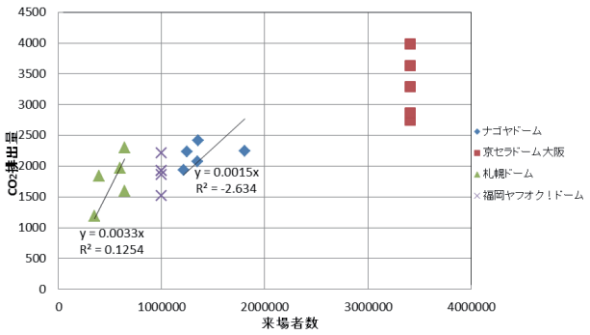


図 5　野球場におけるコンサート等の CO_2 排出量と人数の関係

図 4 と同様にして各野球場の 1 人当たりの CO_2 排出量を求めた。ナゴヤドームは 1.5kg/人、京セラドーム大阪は 1.0kg/人、札幌ドームは 3.3kg/人、福岡ヤフオク！ドームは 1.9 kg/人となった。

札幌ドームから入手したコンサート 1 回当たりでの電力消費量を用いて CO_2 排出量を算出すると 33t/1 回となる。これは図 5 の計算で使用したコンサート 1 回当たりの CO_2 排出量(57t～100t/1 回)の 1/3 程度である。従って、図 5 の結果はその 1/3 程度であると考えられる。

東京ドームシティにおける CO_2 排出量と来場者数の関係を図 6 に示す。東京ドームシティは大小様々な施設が融合しており、温対法で得られるデータは全体の CO_2 排出量となっている。東京ドームのみの CO_2 排出量が不明な為、東京ドームシティ全体としての 1 人当たりの CO_2 排出量を算出した。

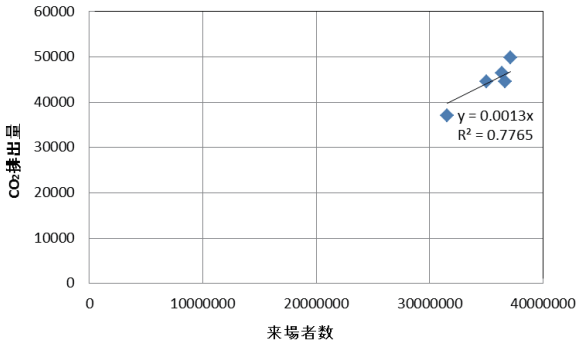


図 6　東京ドームシティにおける CO_2 排出量と来場者数の関係

図 6 より 1 人当たりの CO_2 排出量は 1.3kg/人となった。

さいたまスーパーアリーナについても同様に 1 人当たりの CO_2 排出量を求めたところ、1.2kg/人となった。

4. まとめ

本研究では温対法を用いて、観劇やコンサート、スポーツの試合等における 1 人当たりの CO2 排出量を算定した。

劇場での 1 人当たりの CO_2 排出量は約 5kg になる事がわかった。新国立劇場はその他の劇場より 1 桁大きくなった。新国立劇場は 1 年間の公演数が少ない為、その他の劇場より来場者数が少なくなり、1 人当たりの CO_2 排出量が大きくなったと考えられる。

球場におけるスポーツ等の CO_2 排出量は約 2kg から 3kg となり、コンサート等では 1kg から 3kg となった。コンサート等では多くの来場者があり、開催日数が多い球場は CO_2 排出量が少なくなる事がわかった。

5. 参考文献

1)一般社団法人　日本イベント産業振興協会：平成 27 年　イベント市場規模推計報告書，(2016)，p11

2)桜庭愛美：観光施設から排出される CO_2 排出量の算定，(2015)

3)環境省地球環境局地球温暖化対策課：温室効果ガス算定公表制度，(2016)

国際基準による内子町のグリーンツーリズムの評価

Evaluation of the green tourism of Uchiko town by the international standard

西口光 1)　中口毅博 1)

Hikaru Nishiguchi,Takahiro Nakaguchi

1)芝浦工業大学

1. 研究の背景と目的

グリーンツーリズムとは「農山漁村地域において自然、文化、人々との交流を楽しむ滞在型の余暇活動」のことである。しかし日本ではまだ認知度が低く、意義や効用について十分検証されていないことがその理由のひとつと思われる。そこで本研究では、愛媛県内子町のグリーンツーリズムを対象に、グローバル・サスティナブル・ツーリズム協議会（GSTC）の国際基準で定められた視点から評価することで、その有用性を示すことを目的とする。

2. 研究対象地域

本研究では愛媛県内子町を研究対象地域とする。内子町のグリーンツーリズム協会は 2004 年に発足した内子町役場が事務局を担う任意団体である。グリーンツーリズムを「地域資源を活用した都市とのパートナーシップによる地域づくり」と定義し、交流・定住促進のため体験や農家民宿の PR・情報発信を行い、内子の歴史、文化、自然を生かした「内子ツーリズム」の推進に取り組んでいる。また、協会に参加している宿泊施設向け研修を実施したり、宿泊客にアンケートを実施し、その結果を施設にフィードバックしている。

3. GSTC 及び国際基準の概要

GSTC(グローバル・サスティナブル・ツーリズム協議会)は UNEP(国連環境計画)、UNWTO(国連世界観光機関)をはじめとする 32 の団体による連合として 2007 年に設立された。GSTC の国際基準は自然や文化資源を保護し、維持するために観光事業や観光地が目指すべき最低限の条件を示したもので、「A.経営管理」「B.地域社会」「C.文化遺産」「D.環境保全」の 4 分類、41 の指標からなっている。

4. 評価の方法

評価の手順を図 1 に示す。グリーンツーリズム協会に参加している宿泊施設および、体験プログラムの実施主体に対してヒアリング調査を行い、各施設の活動を GSTC 国際基準に照らし合わせ、評価する。また、町並保存地区を訪れる観光客にアンケート調査を行い観光客の意識と行動を分析する。

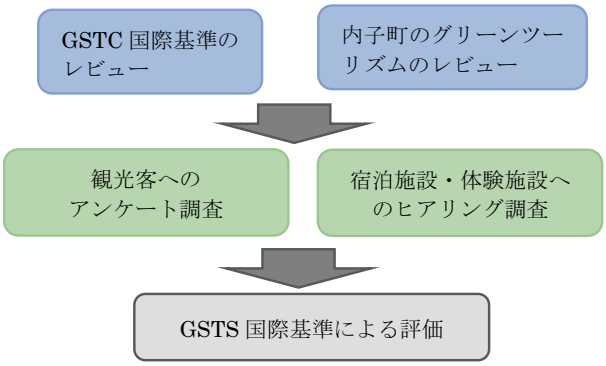


図 1　評価の手順

5. 観光客の意識と行動

そこでまず、国際基準における「A8.利用客に対する情報提供と行動規範の提示」、「C4.地域独自の要素」の 2 項目を評価するために町並保存地区を訪れている観光客にアンケート調査を行った。調査は 8 月、10 月、12 月の日曜日及び平日に実施し、104 票のアンケートを回収した。

図 2 は観光をする際に気を付けていること(Q8)を尋ねた結果である。「文化財の保全」という回答は最も多く全体の約 65%の回答が得られたが、それ以外の項目は半数以下の 3 割～4 割程度と十分に意識が浸透しているとは言えない。

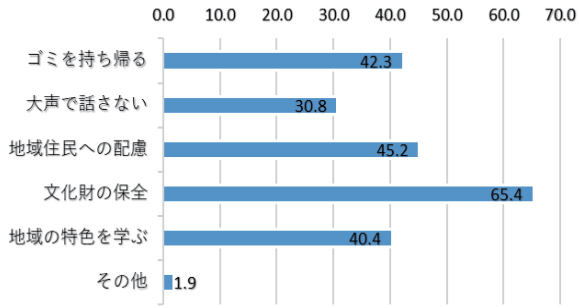


図 2 Q8. 観光する際気を付けていること

図 3 は Q8 で「地域の特色を学ぶ」と回答した人が来訪先の情報をどのように入手しているのかを分析

した結果である。「知人や友人」、「TV」、「インターネット」の 3 項目で全体の約 6 割を占めており、これらの手段は来訪先を訪れる前に利用されることが予想される。このことから、現地での情報提供は十分であるとは言えないことが分かる。

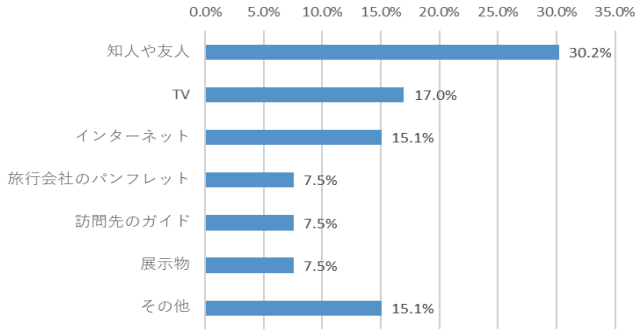


図 3 地域の特色の情報入手手段

6. 国際基準による評価

次に、グリーンツーリズム協会に参加している 8 つの宿泊施設および、1 つの体験プログラム実施主体に対してヒアリングを行った。その結果を表 1 に示す。

従業員研修（A3）や満足度調査（A4）はグリーンツーリズム協会の働きによってほとんどの施設で実施できている。また、地域独自の資源（C4）や地元食材の提供（D1.1）といった地域資源を生かす取り組みはすべての施設で実施できている。これらの項目は基準を十分満たしているといえる。

一方でバリアフリー（A5）や外国語対応（E1）の項目、すなわち、外国人や身体障がい者などの特殊な旅行客については、はほとんどの施設で対応できておらず、国際基準の達成が不十分であることが分かる。

参考文献

1)グローバル・サスティナブル・ツーリズム協議会（2013）国際基準および推奨評価指標
2)内子グリーンツーリズム協会
http://uchiko-gt.sakura.ne.jp/memberlist.html
3)グローバル・サスティナブル・ツーリズム協議会
http://www.gstcouncil.org/

表１　ヒアリング結果（抜粋）　※評価項目 E：国際基準にはないが評価が必要と考えられる項目

	A.石畳の宿	B.ログ立山	C.お山の学校ながた	D.ファームインRAUM 古久里来	E.こころ	F.手仕事の会	G.グリーンツーリズム里山	対応する評価項目
立地	山間部	山間部	山間部	国道沿い	市街地	町並み保存地区内	国道沿い、山の上	
特徴	・地元農家の女性が担う「さくらの会」が運営している ・古民家を移築して民宿にリノベーションした建物 ・屋根裏を改修して作られた独特の客室 ・周辺観光地への送迎	・宿の主人の手作りログハウス ・提供する食事はほぼすべて自身の畑から採れたもの ・季節に応じて山菜採りやピザ焼き体験も可能 野菜の収穫、季節ごとの遊び	・閉校となった内子町立長田小学校を改築した宿泊施設 ・餅つき、豆腐・こんにゃくづくり等も可能 ・五右衛門風呂あり ・地元食材 ・地域の紹介	・平成7年に内子町の「美しい景観建造物デザイン賞」に輝いた建物 ・五右衛門風呂,非日常を提供 ・地元食材 ・陶器や地元の人が書いた絵画を展示するギャラリー ・インフォメーションセンター、コミュニティホールとしての役割	・明治生まれの蔵を宿としてリニューアル ・夕飯においしいお店を紹介 ・階段箪笥をモチーフにした階段 ・温かみのある木製の檜風呂 ・壁紙に内子特産の和紙を使用	・内子町の様々な伝統技術を持つ職人さんたちが集まって運営している ・行灯や和紙製品など多くのものづくり体験が可能 ・ワークショップを通して文化を伝ええる ・ほかの宿で作品の展示	・ブドウ園も経営しており、宿の主人がワインの醸造も行っている ・ブドウ狩り ・自分の畑の食材を提供	D1.1 C4
周辺の観光資源・イベント	・水車祭り ・ソフトバレーなど	・立川の行事 ・敬老会の文化祭	・GT協会への参加 ・食の文化祭	・観桜会・朗読会・観月会などのイベント企画	・笹まつり ・100円商店街	内子座でのイベント	・文化祭、魚釣り体験、 ・星空、野花などの自然 ・ワイン祭り	
現状と今後の心がけ	・身の丈に合うサービス	・できるだけ宿泊客の要望に応える	・リピーターの確保	・観光客と宿の相互満足 ・宿泊客との濃い交流	空き家を利用した新たな宿泊施設の提案	・外部で積極的に伝統産業を発信している ・ほかの施設と協力して内子の伝統産業をアピール	・内子の景観を守り、文化、歴史を伝えていく ・リピーター	
外国語対応	英語の接客表現	身振り手振りで対応	外国語は未対応	英語対応のパンフレット	身振り手振りで対応	片言の英語で対応	・英語は話せない 話せなくても何とかなる	※E1
従業員の研修	GT協会の料理講習	ヨーロッパでのグリーンツーリズム体験	・南予博の料理講習 ・民泊向けの講習	GT協会の料理講習	GT協会の料理講習	講師を呼んで店の運営に関する指導を受ける	・GT協会の料理講習 ・観光協会の接客講習	A3
満足度調査	・GT協会のアンケート ・思い出ノート	・GT協会のアンケート ・思い出ノート	アンケート調査 （結果の反映もあり）	・思い出ノート ・毎回写真を撮り、送る	直接話して感想を聞く	旅行会社経由のアンケート	表情や感想を直接聞く	A4
広告の更新	雑誌などで紹介されている内容と差異がないように心がけている	近所の人に広告の更新をしてもらっている	・facebookを利用して発信	・ネット上の広告の更新はできていない	・SNSでは積極的に更新しているが、ネットのホームページ等は対応できていない部分もある	・SNSを利用して頻繁に発信	・宿のホームページはあまり更新していない	A5
建物へのこだわり	・古い民家を移築して建てられた宿 ・古民家をできるかぎりそのまま利用	・内子町の森林組合から資材を購入	・防火対策、防炎対策 ・町内の業者、資材を利用	・内子町の植生調査を行い、原風景を再現 ・丸い建物は異質ではないか、地域住民に相談	・周囲の景観への配慮 ・現地の資材,地域の工務店 ・暮らすような快適さと内子らしさ	・明治10年の建物を修理してそのまま利用 ・内子町の資材を利用して修復	・自分の山から資材を調達	A6.2 A6.3
バリアフリー	対応できない 建物が古く、改修できない	対応していない	手作りのもので一時的な対応が可能	・建物内の段差を低くする ・室内で使える車いす	・対応していない	伝統建築のため 対応できない	・対応できない ・観光農園は完全バリアフリー	A6.4
従業員雇用と男女差	男女で役割分担	家族経営	男女で役割分担	家族経営	・男女で役割分担	男女で役割分担	家族経営	B7
資源の保全	・生ごみは畑の肥料に ・広間にゴミ箱は置かない	・廃棄物はほぼ出ない ・生ごみは畑の肥料に ・環境浄化微生物（えひめai-1）の利用	・生ごみの再利用 ・資材の再利用を心がける	・歯ブラシ、浴衣などはお客さんに用意してもらう	古民具、古家具のリノベーション	・端材を利用したワークショップ ・余ったものはペレット燃料に	・生ごみは畑の肥料 ・宿で使えなくなったものを再利用できる人に提供	D1.2
省エネ努力	努力はしているが、お客さんが第一	・省エネタップ使用	使いすぎないよう心掛ける	・太陽光パネル ・LED電球 ・樹木による日射遮蔽効果	・LED電球	水・電気はそもそもあまり使わない	・宿泊客におまかせ ・省エネ電灯は使っていない	D1.3 D1.4
環境負荷の低減	特になし	・薪ストーブ ・環境浄化微生物（えひめai-1）の利用 ・合併浄化槽の設置	合併浄化槽の設置	・自分の山から木を切って薪にする ・合併浄化槽の設置	特になし	特になし	特になし	D2.3 D2.4
後継者	・会員の中には比較的若い人もいる	息子夫婦に継いでもらう	未定	娘に継いでもらう予定	未定	各団体でそれぞれ育成している	未定	※E2

7. 参考資料

表 2 GSTC による国際基準　※調査方法 A：ヒアリング B：アンケート C：評価対象外

基準	項目	調査方法
A.効果的な持続可能な経営管理の明示		
A1.長期的かつ持続的な経営管理制度の実施	A1.a持続可能な経営管理制度を実施している。 A1.bこの制度は社会、文化、経済、品質管理、衛生管理、安全問題に配慮している。	C
A2.国際法、国内法及び条例を順守	A2.a国際法、国内法及び条例を順守する。 A2.法的必要条件のリストを備えている。	C
A3.従業員研修	A3.aすべての従業員がそれぞれの役割に関して高い意識を持っている。 A3.b従業員は職務に応じた資格を持っている。	A
A4.利用客の満足度調査	A4.a苦情対応の仕組みがある。	A
A5.正確な広告宣伝	A5.a販売促進資料の内容は、実際に提供できる範囲に留める。	A
A6.建築物及びインフラ整備の計画、設計デザイン、修復建設、修理、運営、取り壊し について		
A6.1土地利用に関する法令順守	A6.1.a土地利用は、その土地の法律や規則、利用計画を順守している	C
A6.2周囲の環境に配慮した建設計画	1.立地や設計デザインは周囲の文化遺産保護や保全に貢献している。 2.考古学的遺産、文化遺産、聖域を荒らしていない。 3.保護が必要な生物の生活を脅かしていない。 4.施設が景観を損なっていない。 5.水路、集水路、湿地に手を加えていない。	A
A6.3持続可能な建設方法及び資材	1.現地に適した方法で建材や資材を使用する。	A
A6.4バリアフリー化	1.施設及びサービスが特別に補助が必要な人に対応している。	A
A7地域住民の権利保護	1,土地の利用や活動は合法である。 2.地域住民に移住を強要していない。	C
A8利用客に対する情報提供と行動規範の提示	1.顧客は適切な行動を心得ており、周囲の自然環境や地域文化について理解している。事業者は解説プログラムを設けている。	B
B.地域コミュニティーの社会的・経済的な利益の最大化、悪影響の 最小化		
B1地域社会開発分野への積極的な支援	1.地域コミュニティに対して奉仕活動などを行い、交易に貢献している。	C
B2地域住民の均等雇用	1.地域住民を雇用し、研修や昇進の機会を与える。	C
B3フェア・トレード	1.購入は主に地域の供給者かフェアトレードを選んでいる。	C
B4持続可能な商品開発及び販売	1.地元の中小事業者が商品を顧客に直接販売できるようにする。	C
B5伝統的な地域コミュニティにおける行動規範	1.行動規範には、事業者の方針、マーケティング、社員研修の内容や研修資料、パンフレットなどが含まれている。また、地域コミュニティの同意を得ている。	C
B6商業的、性的等搾取及びハラスメントの防止	文書化された方針があり、経営陣を含む全従業員に周知されている。	C
B7女性、少数民族等に対する雇用機会の均等	1.女性や地域の少数派の人々の雇用割合が人口の割合に比例している。 児童労働はしない。	A
B8被雇用者保護に関する法令順守	1.賃金や保証が、地域・国・世界の基準に見合うかそれを上回っている。 2.賃金は国の社会保障制度に沿ってなされている。 3.時間外労働は適切に対応されている。 4.従業員は有給休暇を取る権利をもっている。 5.健康保険かそれに相当する対応がなされている。	C
B9.組織活動の近隣コミュニティへの影響	1.地域コミュニティに対するサービスの品質低下が事業体に起因していない。 2.地域コミュニティ収入に占めるエネルギー、水、ごみ処理のコスト割合の変動を測定。 3.事業体の活動が地域コミュニティに対する資源の提供を脅かさない。	C
B10地域住民への配慮	1.公共の場へのアクセスが保証されている 2.生活が障害されていない	C

C.文化遺産への魅力の最大化、悪影響の最小化		
C1.行動規範の順守	1.事業者は自主ガイドラインや、行動規範を採択し、年に1度見直しを行い、順守する。	C
C2.展示物の法令順守	1.すべての展示品が法律で許可されている。	C
C3.文化財の保護および維持	1.ツアーオペレーターは観光スポットや宿泊施設の地域において保全活動に貢献している。 2.地域住民はその地域内に公平かつ無理のない料金で立ち入ることができる。	C
C4.地域独自の要素	1.顧客は滞在中に地域独自の建築、芸術、文化遺産を観賞または見学するか体験している。 2.地域独自の文化遺産であるデザイン、モチーフ、芸術を取り入れる場合は知的所有権を尊重している。	A,B
D.環境メリットの最大化、環境負荷の最小化		
4-1、資源の保全		
D1.1地産地消とグリ ーン購入	1.文書化された購買方針を持っている。	A
D1.2消耗品の管理と削減努力	2.リサイクル商品をできるだけ購入し、包装は避けまとめ買いする。	A
D1.3省エネルギー	1.エネルギー消費量を測定し、再生可能エネルギーの割合を測定している。	A
D1.4水消費量の測定と削減	1.活動ごとの水源別消費量を測定している。 2.持続可能な水源を使用する。	A
4-2、汚染の削減		
D2.1温室効果ガスの測定と削減	1.一人当たりのカーボンフットプリントはモニタリングされ、前年から増加していない。 2.可能な限りカーボンオフセット制度を利用している。	C
D2.2温室効果ガス排出に繋がる交通の削減	1.顧客、 職員、商品供給者は輸送に関する温室効果ガスの排出を削減する方法を知っている。	C
D2.3廃水の適切な処理	1.自治体や国が認可した処理システムを利用する。 2.地域住民や環境に悪影響を及ぼしていない。	A
D2.4廃棄物の測定と削減	1.廃棄物の種類と排出量、リサイクルの種類と量を策定している。 2.公的に認可された廃棄場で処分している。	A
D2.5有害な化学物質の削減	1.使用・保管しているすべての化学物質に安全性データシートがある。 2.使用している化学物質を無害なものに切り替えられるか検討している。 3.化学薬品は適切な基準に沿って扱う。	C
D2.6公害の最小化	1.騒音 2.照明 3.流出水 4.地表浸食 5.オゾン層破壊混合物 6.大気汚染物質 7.水質汚染物質 8.土壌汚染物質	C
4-3、生物多様性、生態系、景観の保全		
D3.1野生生物に関する法令順守	1.野生生物種の採取、展示、販売は国内法および国際法を順守している。	C
D3.2野生生物の捕獲に関する法令順守	1.野生生物の管理は国内法および国際法を順守している	C
D3.3外来種生物の侵入防止	1.侵略的外来生物を拡散させない、あるいは管理・根絶の措置を講じている。 2.自然を利用するツアーオペレーターは外来生物の拡散防止プログラムを持っている。 3.在来種の利用を検討する。	C

D3.4生物多様性の保全	1.以下の活動に対する支援金または支援の年間予算に占める割合を指標とする。 ・自然保護地域や生物多様性の保全 ・地力回復 ・生息環境の保護、修復 2.生物多様性の保全に関する教育を行っている。	C
D3.5野生生物との関わり	1.政府の認可もしくは専門家の承認を得て、悪影響を与えないようにしている。 2.自然生態系へ影響が生じた場合、影響を最小限に抑え、再生する取り組みを行っている。 3.補償に対する貢献度合いは年間売り上げまたは土地利用料に対する割合で評価する。	C

出典：グローバル・サスティナブル・ツーリズム協議会（2013）国際基準および推奨評価指標をもとに作成

消費と水銀排出量との関係

Relationship between consumption and mercury emissions

○市川拓也*[1)]、橋本征二 [1)]
Takuya Ichikawa, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* rv0034pv@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

2013 年 10 月、水俣において「水銀に関する水俣条約」が採択され、水銀の環境中への排出と管理に注目が集まっている。セメントの製造や金属の製錬、廃棄物の燃焼等によって環境中へ排出された水銀は、全世界に拡散し、食物連鎖によって様々な生物に濃縮する恐れがあることから、世界的な取り組みによって排出量を削減することが求められる。

水銀排出量の削減には、消費者の行動も重要である。直接的には蛍光管やボタン電池、水銀体温計等を適切に廃棄することが重要であるが、我々の消費や投資も間接的に水銀の排出と結びついており、そうした状況を理解することで、意識の向上を図ることも必要である。

このようなことから本研究では、家計や企業、政府の消費や投資に関わる直接・間接の水銀排出量を推計することにより、どのような消費や投資が水銀の排出に関与しているのか検討した。

2. 方法

2.1 水銀排出原単位の推計方法

本研究では、次式により直接・間接の水銀排出原単位を推計した。

$$EHg = DHg(I - (I - M)A)^{-1}$$

ここで、

EHg：各産業部門における生産額あたりの直接・間接水銀排出原単位ベクトル(g-Hg/百万円)

DHg：各産業部門における生産額あたりの直接水銀排出原単位ベクトル(g-Hg/百万円)

M：輸入係数の対角行列

A：投入係数行列

I：単位行列

なお、投入係数行列(A)には、2011 年の産業連関表取引基本表 [1)]を 393×393 部門に統合したものを用いた。このとき、屑、副産物がマイナス投入されている場合はこれを削除した。

2.2 各産業部門における生産額あたりの直接水銀排出原単位の推計方法

直接水銀排出原単位は、各産業部門における直接水銀排出量をその部門における国内生産額で除すことにより算出した。各産業部門における直接水銀排出量は、環境省が作成した「水銀に関するマテリアルフロー(2010 年度ベース)」[2)]及び「水銀大気排出インベントリー(平成 22 年度ベース)」[3)]を基に求めた。具体的には、表 1 の第 1 列に示す水銀排出源からの排出量(2〜4 列)を第 5 列に示す産業部門に割り当てた。2〜4 列にそれぞれ大気、水域、土壌への排出量を示している。このうち、石炭灰の有効利用に伴う土壌への排出量は、石炭の使用割合 [4)]に応じて「石炭火力発電所」と「石炭焚き産業ボイラ」に配分した。また、「石炭焚き産業ボイラ」に関しては、総合エネルギー統計における自家用蒸気発生用の石炭使用割合 [4)]に応じて各産業に配分した。「産業用ボイラ（石油系）」「産業用ボイラ（ガス系）」に関しても同様に、自家用蒸気発生用の石油及びガスの使用割合 [4)]に応じて各産業に配分した。「運輸」に関しては、5 つの産業部門(タクシー、バス、道路貨物輸送、自家輸送(旅客自動車)、自家輸送(貨物自動車))と最終需要部門が想定されることから、それぞ

表 1　水銀の各排出源における排出量 [2)3)]と産業連関表における部門 [1)]との対応関係

排出源	排出量(t/年)			産業部門
	大気	水域	土壌	
石炭火力発電所	0.915	0.0044	0.2824	事業用電力
石炭焚き産業ボイラ	0.21		0.0276	蒸気発生用石炭使用量で配分
非鉄金属製造施設	0.94	0.097		銅、鉛、亜鉛
一般廃棄物焼却施設・最終処分場	1.6	0.01555	0.0056	廃棄物処理(公営)
産業廃棄物焼却施設・最終処分場	2.415	0.00245	0.0019	廃棄物処理(産業)
下水汚泥焼却施設・下水処理施設	0.51	0.12	0.13	下水道
セメント製造施設	6.9			セメント
鉄鋼製造施設	4.72			銑鉄
石油精製施設	0.1			石油製品
石油・ガス生産施設	0.001			石油製品
石油火力発電施設	0.01			事業用電力
LNG 火力発電所	0.001			事業用電力
産業用ボイラ(石油系)	0.003			蒸気発生用石油使用量で配分
産業用ボイラ(ガス系)	0.02			蒸気発生用ガス使用量で配分
ランプ類製造施設	0.01			電球類
歯科用水銀アマルガム製造施設	0.0004			医療用機械器具
石灰製品製造	1			その他窯業・土石製品
紙パルプ製造	0.23	0.002		パルプ
カーボンブラック製造	0.1 1			無機顔料
蛍光灯回収・破砕	5.5E -06			再生資源回収・加工処理
火葬	0.07			冠婚葬祭業
運輸	0.07			運輸の燃料使用量で配分
魚アラ		0.061		生産額で配分

れ、総合エネルギー統計におけるタクシー、バス、貨物自動車/トラック(営業用)、乗用車(企業利用寄与)、貨物自動車/トラック(自家用)、乗用車(家計利用寄与)の燃料使用割合[4]に応じて配分した。「魚アラ」に関しては3つの産業部門(水産びん・かん詰、ねり製品、その他の水産食品)が想定されることから、国内生産額の比率により各部門に配分した。

2.3 消費および投資に関わる水銀排出量

産業連関表に記載されている消費額および投資額と上記の水銀排出原単位を乗ずることにより、消費および投資に関わる水銀排出量を算出した。

3. 結果と考察

3.1 水銀排出原単位の推計結果

推計された各産業の水銀排出原単位の上位10部門を図1に示す。セメントが大きいのは水銀を含む石灰石を大量に使用するためであり、セメントを使用する生コンクリートやその他の窯業・土石製品、セメント製品も同様である。廃棄物処理(公営)については、雑多な一般廃棄物を処理するため、その原因となる廃棄物を特定することは難しいが、廃棄物処理(産業)については、汚泥に起因する水銀排出量が多いと考えられる[2]。粗鋼(転炉)、鉛・亜鉛(再生を含む)、銅については、鉱石に含まれる水銀が寄与している。

3.2 消費および投資に関わる水銀排出量の推計結果

消費および投資に関わる水銀排出量の推計結果を図 2 に示す。家計消費からの水銀排出量のほか、固定資本形成や輸出に関わる水銀排出量も大きい結果となった。固定資本形成はセメントや鉄鋼製品の利用、輸出についても鉄鋼製品や自動車の輸出が起因しているものと考えられる。

家計消費に関わる水銀排出量のうち、上位10部門を表図 3 に示す。事業用電力に関わる排出量が最も大きく、次いで住宅賃貸料、下水道、飲食サービス等となった。事業用電力については石炭火力発電、下水道については下水汚泥焼却が寄与していると考えられる。住宅賃貸料の内訳を見てみると、事業用電力による寄与が大きく、また、住宅の維持に関わるセメントや鉄鋼製品による排出も一定寄与していた。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金(15H02863)による成果である。ここに記して深謝する。

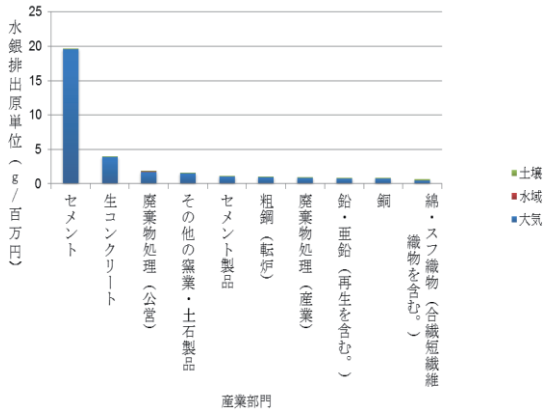


図 1　水銀排出原単位(上位 10 部門)

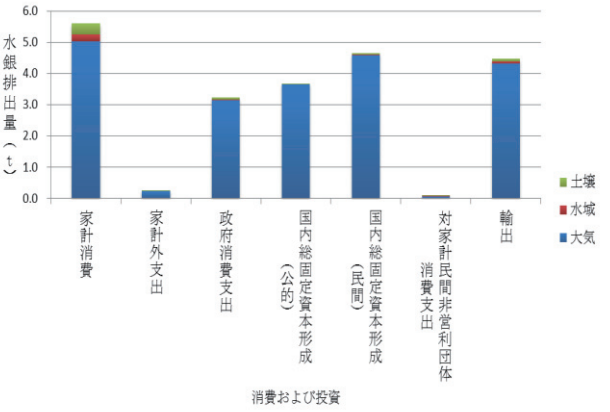


図 2 消費及び投資に関わる水銀排出量

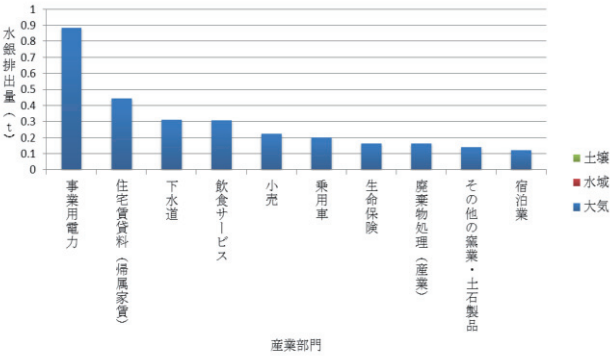


図 3 家計消費からの水銀排出量

参考文献

1) 総務省：平成 23 年(2011 年)産業連関表、2015
2) 環境省：水銀に関するマテリアルフロー(2010 年度ベース)の検討結果、2013
3) 環境省：水銀大気排出インベントリー(平成 22 年度ベース)、2013
4) 経済産業省：総合エネルギー統計、2011

クラウドシステムの CO_2 削減効果の研究

Carbon reduction effect by using cloud computing

○近藤 優貴 [1)]、稲葉 敦*[1)]、並河 治 [2)]、前川 均 [2)]、諸星 勝 [2)]
Yuki Kondo, Atsushi Inaba, Osamu Namikawa, Hitoshi Maekawa, Masaru Morohoshi
1) 工学院大学, 2) 日立製作所
* a-inaba@cc.kogakuin.ac.jp

1 緒言

情報化社会に伴い、IT 機器並びにそのシステムの全体としての消費電力は増加すると予測されている [1)]。一方で個々の IT 機器の消費電力の削減が進んでおり、また波及効果により社会全体の CO_2 排出量の削減にも貢献することができる [2)]。本研究では、最近利用が進んでいるデータセンタに着目し、サービスとして提供されているクラウドシステムを工学院大学が利用した場合とサービスを利用せず、大学内で管理し運用するシステムの両者を CO_2 排出量、経済性、安全性・安心度の 3 軸から評価した。

2 クラウドシステムの機器構成

本研究でモデルとした、工学院大学のシステムとクラウドデータセンタ(クラウド DC)を利用したシステムを図 1 と図 2 に示す。

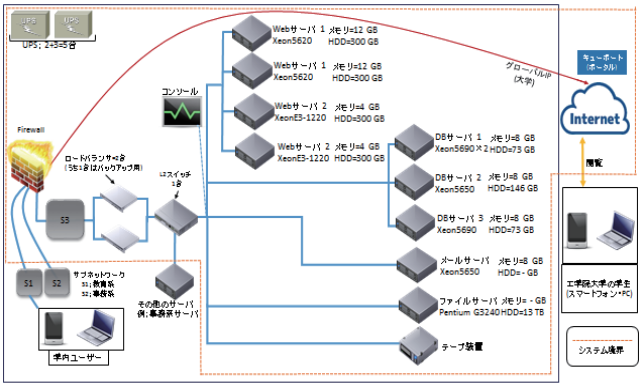


図 1　工学院大学のシステム(2016 年 9 月時点)の機器構成図

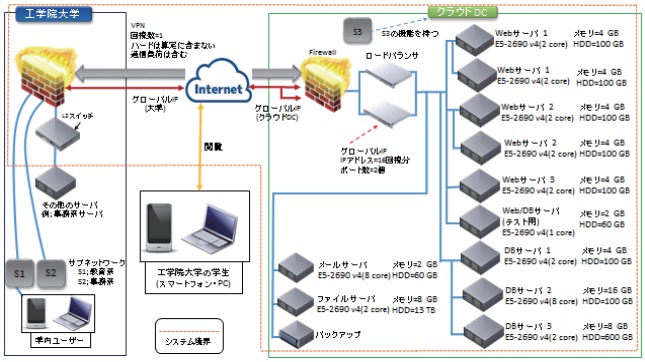


図 2　クラウド DC を利用したシステムの機器構成図

3 クラウドシステムの評価方法

①CO_2 排出量

両システムにおいて、構成する機器の CO_2 排出量と、学生が大学のシステムを使うときのデータ通信時に生じる CO_2 排出量の合計より求めた。データ通信量はデータ通信量測定のフリーソフト NetWorx を用いた。

②経済性

初期投資額と維持管理費用(1 年間)の 2 種に設定した。工学院大学のシステムでは、初期投資額をサーバルームの建築費用、維持管理費用を電気代とした。クラウド DC を利用したクラウドシステムでは、初期投資額をクラウドシステムの契約時に発生する一時費用とし、維持管理費用をクラウドシステムの月額利用料金とした。

③安全性・安心度

個人情報の値段の推定には、情報インシデントによる報告書の 2003 年度版 [3)]と 2014 年度版 [4)]を用いた。2003 年度版の個人情報漏洩事件の損害賠償額一覧表と 2014 年度版のインシデント一覧表より、漏洩した情報の内容と推定損害賠償額のデータを入手した。そのデータと工学院大学が所有している個人情報の内容を照らし合わせることで、大学が所有している個人情報の値段を推定した。また、情報漏洩にあう確率を「情報漏洩　大学　2016 年」と「情報漏洩　個人情報　大学　2016 年」をキーワードにし、大学の HP もしくは文書で公表している事例を AND 検索より調査した。確率を全国の大学数と被害にあった大学の所属人数より算出した。

4 結果

4.1 システムの CO_2 排出量の算出

CO_2 排出量の算出に使用する、工学院大学のシステムとクラウド DC を利用したシステムの機器構成と消費電力についてのデータを表 1 と表 2 に示す。

表 1　工学院大学のシステムの機器構成と消費電力

構成機器名	台数[台]	定格消費電力[kw]
Web サーバ 1	2	0.49
Web サーバ 2	2	0.20
DB サーバ 1	1	0.68
DB サーバ 2	1	0.68
DB サーバ 3	1	0.68
メールサーバ	1	0.58
※ファイルサーバ	※1	2.85
Firewall	1	0.22
テープ装置	1	0.28
ロードバランサ	2	0.318
L2 スイッチ	1	0.097
コンソール	1	0.004
UPS	2	0.11
UPS	3	0.045

表 2　クラウド DC を利用したシステムの機器構成と消費電力

	構成機器名	台数[台] ※ファイルサーバ[式]	定格消費電力[kw]
工学院大学	Firewall	1	0.22
	L2 スイッチ	1	0.097
+			
	構成機器名	台数[台]	消費電力[kw]
クラウド DC	サーバ	8(ブレード数)	0.6215
	ストレージ	480	0.1226
	Firewall	1	0.0304
	ロードバランサ	2	0.0318
	ネットワーク	-	0.0039
	ファシリティ	-	0.4861

システムは 1 年間の間 1 日も停止することなく運用するものとした、以下の式より算出した。

(運用時の機器の消費電力[kw]×365[日]×24[h])[kwh/年]×0.559[kg-CO_2/kwh]・・・(1)

運用時の機器の消費電力は、定格電力の 60[%]とした。天吊空調機と床下吹出空調機は常に定格電力で運用している。クラウド DC における消費電力は運用時の値である。

データ通信による CO_2 排出量を算出する為のデータは Supporting Information に示した。表 S1 が工学院大学のシステム利用によるデータ通信量、表 S2 が利用人数と回数と通信の原単位 0.0014[kg-CO_2/年][5]より算出した CO_2 排出量である。表 S2 の CO_2 排出量の合計より 1.78×10^3[kg-CO_2/年]より、システム全体の CO_2 排出量はクラウド DC の利用前が 2.87×10^4[kg-CO_2/年]、利用後が 9.06×10^3[kg-CO_2/年]となった。

4.2 システムの経済性の算出

①クラウド DC 利用前のシステム

①-1 初期投資額：工学院大学(新宿キャンパス)全体の建築費用 1.42×10^4[百万円]より算出したサーバルームの面積 93.93[m^2]あたりの費用 26.8[百万円]と空調設備の費用 6.90[百万円]を加え、耐用年数 20[年]を考慮し 1.69[百万円]となった。

①-2 維持管理費用：運用時の機器の消費電力を 1 年間にした値 7.95×10^4[kwh]に東京電力の電気料金 16[円/kwh]をかけ 1.27[百万円]となった。

②クラウド DC 利用後のシステム

②-1 初期投資額：クラウド DC の一時費用を調査中である。

②-2 維持管理費用：同様にクラウド DC の月額利用料金を調査中である。機能の移転後も工学院大学に残る機器の 1 年間の電気料金は 2.67×10^{-2}[百万円]となった。

4.3 安全性・安心度の推定

2 種の報告書より推定した工学院大学の所有する個人情報の値段を表 3 に示す。

情報漏洩にあう確率では、設定したキーワードより 9 件の事例が集まり、被害人数は 693[人]であった。全国の大学数 1,118[校][6]と被害にあった大学の所属人数 693[人]より確率を算出し 1.98×10^{-4}[-]となった。工学院大学内で 1 年間に 6,505 人の内被害にあう人数は 1 人となった。

表 3　工学院大学の所有する個人情報の値段

情報の種類		該当者	情報の値段[円/人] 最低値	最高値
個人情報(氏名、住所、生年月日)		学生 (6,505 人)	6,000	12,000
成績			11,000	66,000
健康診断書			16,500	33,000
メール	アドレス(アカウントも含む)		1,000	2,000
	パスワード		2,000	6,000
	内容		33,000	
		合計	69,500	152,000

5 クラウドシステムの 3 軸による評価

表 4 に 3 軸による評価のまとめを示す。

表 4　3 軸による評価のまとめ

		クラウド DC 利用前のシステム	クラウド DC 利用後のシステム
CO_2 排出量[kg-CO_2/年]		2.87×10^4	9.06×10^3
経済性	初期投資額[百万円]	1.69	??
	維持管理費用[百万円]	1.27	2.67×10^{-2}+??
安全性・安心度	最低値[円]	69,500	-
個人情報の値段	最高値[円]	152,000	-

6 まとめ

表 4 より CO_2 排出量はクラウド DC 利用後のシステムの方が少ない。初期投資額と維持管理費用は調査中である。安全性・安心度は同じ個人情報の種類と量でも、最低値と最高値に倍以上の差がでることが分かった。

7 参考文献

1, 2) 経済産業省：グリーン IT イニシアティブ <http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g80520c03j.pdf>, (参照 2016-12-20)

3) 日本ネットワークセキュリティ協会：2003 年度 情報セキュリティインシデントに関する報告書 <http://www.jnsa.org/houkoku2003/incident_survey2.pdf>, (参照 2016-12-20)

4) 日本ネットワークセキュリティ協会：2014 年度 情報セキュリティインシデントに関する報告書 <http://www.jnsa.org/result/incident/data/2014_apx.pdf>,(参照 2016-12-20)

5) 日立製作所：テレワークモデルシステムの環境負荷低減に関する調査研究 <www.soumu.go.jp/main_content/000066231.pdf>,(参照 2016-12-20)

6) 文部科学省：学校基本調査 http://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/chousa01/kihon/1267995.htm ,(参照 2016-12-20)

Supporting Information

表 S1　大学のシステム利用におけるデータ通信量

内容	データ通信量[MB]
キューポートの(Top 画面)お知らせの閲覧	0.309
授業時間割	0.320
授業変更一覧の確認	0.371
試験時間割のダウンロード	0.359
シャトルバスの予約	0.333
active mail でのメール受信確認	0.457
active mail でのメール作成	0.586

表 S2　システム利用における学生の人数と利用回数

該当者	人数[人]	内容	回数[回]	CO_2 排出量 [kg-CO_2/年]
学部 1 年～学部 3 年 2 部の学部 1 年～4 年	先進工学部(1 年及び 2 年)=784 その他の学部生(1 年～3 年)=3475 2 部(1 年～4 年)=91 合計=4350	大学からのお知らせの確認	275	517
		授業時間割の確認	八王子キャンパスの学生(2863)=166	213
			新宿キャンパス学生(1487)=165	110
		授業変更一覧の確認	八王子キャンパスの学生(2863)=166	247
			新宿キャンパス学生(1487)=165	127
		試験時間割の確認	2	4.37
		シャトルバスの予約	学部 1 年及び 2 年(13 人)=172	1.04
学部 4 年	1637	active mail の受信の確認	672	337
		大学からのお知らせの確認	52	36.8
		シャトルバスの予約	217	1.33×10^{1}
修士	1 年=254 2 年=243 合計=497	active mail の受信の確認	1 年=1095	85.3
			2 年=1028	76.6
		メールの作成	1 年=58	8.17
			2 年=47	6.33
博士	1 年=8 2 年=7 3 年=6 合計=21	active mail の受信の確認	1 年=1095	2.69
			2 年=1028	2.35
			3 年=1028	1.89
		メールの作成	1 年=58	2.57×10^{-1}
			2 年=58	2.57×10^{-1}
			3 年=47	1.56×10^{-1}
			合計	1.78×10^{3}

ICT の社会的価値の評価方法の開発

Development of Evaluation Method of Social Value for ICT

○武田 明日花 [1)]、稲葉 敦*[1)]、並河 治 [2)]、前川 均 [2)]
Asuka Takeda, Atsushi Inaba, Osamu Namikawa, Hitoshi Maekawa
1) 工学院大学, 2) (株)日立製作所 ICT 事業統括本部 環境推進本部
* a-inaba@cc.kogakuin.ac.jp

1. 諸言

ICT 機器は近年急速に普及しており、ICT による CO_2 排出削減効果は 2020 年には 1.25 億トンにも及ぶとされている [1)]。ICT 機器の普及は CO_2 排出削減効果だけでなく、導入による費用の低減や使用者が感じる幸福度(社会的価値)の増加にも効果があると考えられる。本研究では、ICT 機器による効果を CO_2 排出量、費用及び社会的価値(幸福度)の 3 軸にて評価を試みる。

2. 評価方法

本研究では、既に報告した [2)]フィーチャーフォンからスマートフォンに買い替えた事例について再度整理し、CO_2 排出量、費用及び社会的価値の 3 軸を「1 kg あたりの CO_2 削減費用」として総合的に評価した。また、ウェアラブル端末について調査した。

2.1 CO_2 排出量の評価方法

ライフサイクル段階別での CO_2 排出量を調査した。また、電力消費や紙の使用量などが直接削減される直接効果や、削減効果を発揮するために時間的遅れがあるみなし効果 [3)]について調査した。

2.2 費用の評価方法

ICT 機器の購入金額、使用料金、電力料金、および導入により削減された費用を調査した。

2.3 社会的価値(幸福度)の評価方法

ICT 機器の使用により「楽しい時間や空き時間の増加」[2)]といった、ICT 機器の機能によって得られる幸福度を調査した。

スマートフォンやフィーチャーフォンの使用による社会的価値は、楽しさ(Fun)や便利さ(Time Saving)による機能の使用時間を調査し、労働時間あたりの平均給与を乗じて金銭に換算した。また、ウェアラブル端末については、その使用によって得られる便利さをアンケートによって調査した。

3. 算定結果

3.1 フィーチャーフォンからスマートフォンに買い替えた事例

スマートフォンは CFP 情報が公開されている [4)]GALAXY S5、フィーチャーフォンはドコモ 2102i シリーズ [5)6)]1 台が 2 年間使用されるものとした。

(1) CO_2 排出量の評価

スマートフォンはライフサイクル段階別での CO_2 排出量 [4)]、フィーチャーフォンは生産段階と使用段階における CO_2 排出量 [5)6)]を調査した。さらに削減効果について、インターネットで文献検索したときの環境負荷削減、ネットショッピングによるスーパーへ行く時に必要となる自動車燃料の削減や LINE による郵便物の環境負荷削減を直接効果、スマートフォンの場合、音楽配信によって CD の製造枚数が減少したときの環境負荷削減や電子書籍による紙書籍の製造数が減少したときの環境負荷削減をみなし効果として考慮した。

(2) 費用の評価

購入金額、使用期間における使用料金、電力料金およびネットショッピングによる燃料代の削減費用を算定した。

(3) 社会的価値の評価

楽しさ(Fun)について、スマートフォンは、SNS、音楽再生、動画再生及び電子メールなど、フィーチャーフォンは、音声通話、電子メール、ゲームアプリなどの機能の使用時間を調査した [7)]。便利さ(Time Saving)は、自宅から図書館に行き文献調査したときの所要時間を 1.5 時間と仮定し、この所要時間からインターネットで文献調査したときの使用時間の差を取りインターネット検索による時間の削減とした。これらを労働時間あたりの平均給与によって乗じ、金銭に換算した。

3.1.1 算定結果

3.1 項(1)、(2)、(3)で調査した算定結果を表 1 に示す。

表 1　スマートフォン･フィーチャーフォンの算定結果

				スマートフォン	フィーチャーフォン
CO_2排出量	直接効果	原材料調達段階	kg-CO_2	20	20.2
		生産段階	kg-CO_2	0.53	
		流通段階	kg-CO_2	0.34	
		使用・維持管理段階	kg-CO_2	2.2	0.99
		廃棄・リサイクル段階	kg-CO_2	0.03	
		合計	kg-CO_2	23	21.2
	みなし効果	インターネット検索	kg-CO_2	−63.9	−117
		ネットショッピング	kg-CO_2	57	57
		LINE,電子メール	kg-CO_2	7.20.E+05	7.20.E+05
		音楽配信	kg-CO_2	3.8	
		電子書籍	kg-CO_2	43.8	
費用		購入金額	円	39466	19000
		使用料金	円	1.89.E+05	1.26.E+05
		電力料金	円	127	18
		ネットショッピングによる燃料代削減	円	1345	1345
社会的価値	Fun	使用時間	hour/日	3.19	0.841
		(平均給与)/(労働時間)	円/hour	2400	
		想定使用年数	年	2	
		楽しさ(Fun)の金額	円	5.59.E+06	1.47.E+06
	Time Saving	自宅から図書館で文献調査したときの時間	hour/日	1.5	1.5
		インターネット検索の使用時間	hour/日	0.852	0.502
		インターネット検索による時間の削減	hour/日	0.648	0.998
		(平均給与)/(労働時間)	円/hour	2400	
		想定使用年数	年	2	
		便利さ(Time Saving)の金額	円	2.63.E+06	2.63.E+06

3.1.2 削減費用

フィーチャーフォンからスマートフォンに買い替えた時の削減費用(円/kg-CO_2)を算出した。

初期費用は、新たに購入するスマートフォンのみの購入費用とした。また維持管理費用は、使用料金やネットショッピングによる燃料代の削減などの直接費用のみ考慮した場合と、これに社会的価値を加算した場合の費用を各 ICT 機器で算出し、これらの差額とした。さらにエネルギー費用は、使用時の電力料金の差額とした。

CO_2 排出削減量について、各 ICT 機器の直接効果のみ考慮した場合と、これにみなし効果を加算した場合の CO_2 排出削減量を算出した。

これらの費用の合計を CO_2 排出削減量で除し算出した。社会的価値とみなし効果をそれぞれ考慮した組み合わせと算出した削減費用を表 2 に示す。

表 2　組み合わせと削減費用

		(1)	(2)	(3)	(4)
社会的価値		×	×	○	○
みなし効果		×	○	×	○
初期費用	円/年	1.97.E+04	1.97.E+04	1.97.E+04	1.97.E+04
維持管理費用	円/年	3.11.E+04	3.11.E+04	−1.72.E+06	−1.72.E+06
エネルギー費用	円/年	54.5	54.5	54.5	54.5
合計	円/年	5.09E+04	5.09.E+04	−1.70.E+06	−1.70.E+06
CO_2排出削減量	kg-CO_2/年	25.7	49.5	25.7	49.5
削減費用	円/kg-CO_2	1.98.E+03	1.03.E+03	−6.64.E+04	−3.44.E+04

表 2 より、(1)、(2)は、削減費用が正の値で算出された。これは、スマートフォンに買い替えにより CO_2 排出量が削減されるが費用が増加するためである。また(3)、(4)は、削減費用が負の値で算出された。これは、スマートフォンの使用により社会的価値が直接費用を上回るためである。CO_2 排出削減量が正の値であり、社会的価値を得ながらかつ CO_2 排出量を削減できるということがいえる。

3.2 ウェアラブル端末の事例

ウェアラブル端末は Apple Watch を 1 台 3 年間使用されるものとした。

(1)　CO_2 排出量の評価

Apple Watch 1 台のライフサイクル段階別における CO_2 排出量[8]を調査した。

(2)　費用の評価

Apple Watch の購入費用は Apple 社のホームページ[9]に掲載されている価格の平均値とし、使用期間における電力料金を調査した。

(3)　社会的価値の評価

ウェアラブル端末の社会的価値について、製品自体が小さく、ICT 機器がウェアラブルになることへの支払意志額とウェアラブル端末の機能に対する支払意志額を調査し、結果を整理中である。

3.2.1 算定結果

ウェアラブル端末の調査結果を表 3 に示す。

表 3　ウェアラブル端末の算定結果

CO_2排出量	直接効果	製造	kg-CO_2	34.5
		輸送	kg-CO_2	8.0
		ユーザーによる使用	kg-CO_2	5.0
		リサイクル	kg-CO_2	2.5
		合計	kg-CO_2	50
費用		購入金額	円	68830
		電力料金	円	22
社会的価値			円	−

CO_2 排出量について、製造段階では原材料の調達、製品および製品パッケージの製造を含む[8]ため、最も CO_2 排出量が大きいと考えられる。また、みなし効果などの CO_2 排出削減量、削減される費用や社会的価値について今後調査し、ウェアラブル端末全体の価値について検討したい。

4. まとめ

本研究では、ICT 機器による効果を CO_2 排出量、費用及び社会的価値(幸福度)の 3 軸で評価することを試みた。

フィーチャーフォンからスマートフォンに買い替えたときの削減費用について、正の値の場合、CO_2 排出量が削減される一方で費用が増加するということがいえる。また負の値の場合、スマートフォンの使用によって社会的価値が直接費用を上回るため、社会的価値を得ながらかつ CO_2 排出量が削減できるということがいえる。

ウェアラブル端末について、みなし効果などの CO_2 排出削減量、削減される費用および社会的価値を今後調査することによって、ICT 機器全体の価値を評価したい。

参考文献

1) 総務省：“平成 22 年 情報通信白書”,pp91-92.
2) 矢澤通拓,稲葉敦,渕上智子,小泉享,前川均,並河治：“工学院大学卒業論文”,(2014),p499.
3) 山田要,稲葉敦:“工学院大学卒業論文”,(2016),p354.
4) サムスン電子株式会社:“カーボンフットプリント登録情報”,(2014)
5) 澤田ほか:“ブロードバンド・ユビキタスサービスの環境効果”,NTT 技術ジャーナル,18,(2006),p2.
6) 折口ら：“Eco-Efficiency Evaluation of 3G Service “FOMA”” ,(2006),p3.
7) 池田圭甫, 稲葉敦, 並河治, 前川均, 細渕良之:“工学院大学卒業論文”,(2016),p418.
8) Apple：“Apple Watch 環境報告書”,p1-4.
9) Apple：“Apple Watch を購入”,Apple(日本),<http://www.apple.com/jp/shop/buy-watch/apple-watch>,(参照 2016-12-11)

三重県南伊勢町のバイオマス利活用について

Resrech for biomass in Minamiise town, Mie prefecture

○甲斐穂高*[1)]、中道隆広 [2)]、石橋康弘 [3)]
Hotaka Kai, Takahiro akamichi, Yasuhiro Ishibashi
1) 鈴鹿工業高等専門学校, 2) 長崎総合科学大学, 3)熊本県立大学
* kai@chem.suzuka-ct.ac.jp

1. はじめに

三重県南伊勢町は、三重県の東南部に位置した人口 13,000 人、面積 241 ㎢の町であり、漁業を中心とした農林水産業が盛ん（遠洋漁業の基地となる港が多数存在、アコヤガイやハマチの養殖、山間部でのブロイラーやみかんの栽培）である。南伊勢町では、バイオマス利用を中心とした産業創出と農林漁業の活性化を目指し、バイオマス賦存量と利用可能量調査および事業性評価を進めてきた。調査の結果、鶏糞を代表とする家畜糞尿や水産加工場残さなどの廃棄物バイオマスが多数排出されている（表１）。

表１　三重県南伊勢町バイオマス賦存量と利用可能量可能量調査結果の概要

種別	発生量（日）	活用可能量（日）最大値	活用可能量（日）最少（現状）値
下水汚泥（脱水ケーキ）	868	2,604	2,604
水産加工物残渣	224	208	0
食品加工残渣	108	82	0
鶏糞	20,411	10,247	8,247
豚糞	2,750	2,338	2,338
牛糞	1,000	800	800

（単位：kg ）

筆者らは、80℃の高温条件下でバイオマス資源を可溶化処理してメタン発酵処理する技術を有している。この技術は、メタン発酵槽の前段にある可溶化槽でバイオマス中の高分子有機物をある程度低分子化（可溶化）し、その可溶化液をメタン発酵槽へ送り込んでメタン発酵を行う技術である。この技術の特徴は、可溶化処理に温泉土壌から採取した微生物 Anoxybacillus sp. MU3（以下　MU3 株）を使用していることである。MU3 株は、産生する酵素が優れた熱耐性を示し、pH5～10（至適 pH は 6 付近）の広い pH 範囲で高いタンパク質分解能を示す。そのため、高温可溶化に対する耐性を持ち、十分な有機物の可溶化効果がある。下水汚泥を対象とした実証試験では、従来の一槽式メタン発酵よりも効率的にメタン発酵処理を行うことができ、また、環境に与える負荷についても一槽式メタン発酵と同等であることを明らかにした。なお、80℃で可溶化処理することにより、投入される原料に含まれる病原体や雑草の種子の不活性化が可能であり、消化液を肥料として用いた場合の安全性も高めることができる。さらに、80℃の好気性状態で可溶化していることで、アンモニアをストリッピングにより除去することが可能である。

文献によると、鶏糞は 66～110 m^3/t のメタンガスが発生する。これは、他の利用可能なバイオマス（豚糞（32～48 m^3/t)、牛糞（10～30 m^3/t））に比べ 2 倍以上の値であり、本研究グループの高温可溶化処理技術を用いることで、さらなるメタンガスの収率向上が期待できる。しかしながら、鶏糞は、豚糞や牛糞と比較して窒素を多く含んでいるため、アンモニアが発生しやすい性質があり、発酵処理の過程でアンモニアによるメタン発酵処理阻害が発生するため、鶏糞はメタン発酵には不向きとされ、あまり利用されてこなかった。MU3 株を用いた高温可溶化-メタン発酵処理技術は、既述したとおりに有機物の高効率可溶化や時間短縮などのメリットが増え、メタン発酵施設・施設規模の大幅縮小が可能となり、鶏糞等のアンモニアを高濃度に含む原料も利用可能と考えられる。これらの背景から、本研究では南伊勢町で発生するバイオマス資源の化学的組成分析を行ったので、以下のとおりに報告する。

２．バイオマス資源の化学的組成分析

本研究において化学的組成分析の対象とした試料は、南伊勢町で最も賦存量が多かった鶏糞の他に、下水汚泥、生ごみ、豚糞および水産加工残差とした。これらの試料について、含水率測定、熱量測定、示差熱分析、COD_{Cr} 分析を行い、化学的組成を明らかにした。

３．化学的組成分析結果

表２は、含水率測定結果である。含水率測定時の乾燥試料は、乾燥前と比較して全体的に体積が縮小していた。全ての試料の中で最も含水率が高かった下水汚泥（84.4%）は、1/10 程度の体積となっていた。水産加工場残さは、サンプル中の油分により、乾燥後もまだ粘り気が生じていた。鶏糞、生ごみ、豚糞は、十分に乾燥されていた。鶏糞の含水率は 55.6%と全ての試料の中で最も低い含水率を示した。鶏糞が採卵鶏由来

の場合、その含水率は 30%を示す場合があり、これについては燃焼発電用の材料として利用できる場合もあるが、今回の結果では含水率 50%を超えているので燃焼には不適と思われる。全体的に、試料の含水率がやや高いことから、含水率を下げて燃料として利用を行う場合、乾燥のためにエネルギーやコストがかかる。

表２　バイオマス試料の含水率測定結果

試料名	含水率（%）
生ごみ	76. 6
水産加工場残さ	72. 0
鶏糞	55. 6
豚糞	73. 1
下水汚泥	83. 9

図１は、熱量測定結果である。測定結果より、水産加工場残さの熱量（3.5×10^{-2} MJ/g）が最も高かった。これは、水産加工残さには油分が含まれているためである。図１中には、比較対象として木質系のバイオマス資源で燃焼処理によってバイオマスエネルギーを生産できるスギペレットの熱量を示している。水産加工場残さと生ごみは、杉ペレットよりも高い熱量を得ることができ、また、豚糞もスギペレットとほぼ同等の熱量を得ることができる。しかし、これら３試料の含水率は表２のとおりに高いため、杉ペレットと同等の熱量を得ることは困難である。鶏糞は、全ての試料の中でもっとも熱量が小さかった（1.39×10^{-2} MJ/g）。

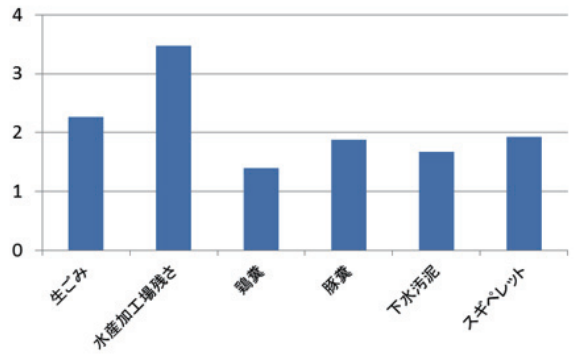


図１　試料の熱量測定結果（単位：$\times10^{-2}$ MJ/g）

図２は TG 分析結果であり、全ての試料で 200℃付近から重量が減少し、鶏糞を除く試料については 500℃から 600℃の間で重量減少が終息した。鶏糞は、500 から 700℃の間で重量の変化なく推移していたが、700℃以上で２度目の重量減少が確認された。これは、鶏糞は他の試料よりも難燃成分が多く含まれ、これら難燃成分が他の試料よりも高い温度で燃焼する性質があるためと考えられる。直接燃焼させてエネルギーを得られる杉ペレットは、燃焼後の灰はほとんど発生しない。しかし、今回の試料については燃焼後に灰が残り、特に、鶏糞については燃焼前と比較して約半分量が燃え残り（灰分）として残っていた。バイオマス資源の燃料利用を考えた場合、試料の燃え残りは、燃焼室の損傷を引き起こしたり、燃え残り成分の除去を含めた細かなメンテナンスが必要だったりする。

図３は DTA 分析結果である。生ごみと鶏糞はいくつかの温度帯に分けて発熱反応があるため、ガス化と燃焼が行われていると考えられる。下水汚泥は 450℃あたりから発熱反応を示しているので、この温度帯で難燃成分が燃焼していると考えられる。全ての試料の発熱ピークは、杉ペレット発熱ピーク（460℃付近）よりも高い温度域に認められた。これは、燃焼にって熱エネルギーを生産する場合、杉ペレットより高い温度が必要となり、熱エネルギーを得るためには杉ペレットよりも効率が悪くなることを意味している。

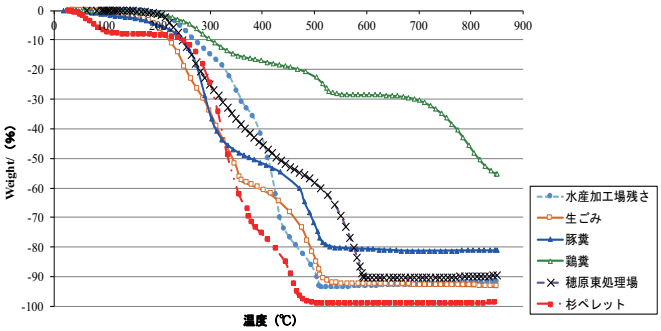


図２　試料の TG 分析結果

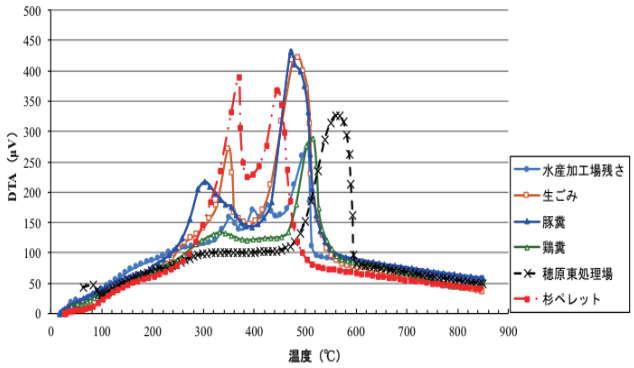


図３　試料の DTA 分析結果

COD_{Cr} 値から、メタン発酵処理した際のメタンガス量を推定することができる。COD_{Cr} 値が最も高かった試料は水産加工場残さ（412 mg/g）であり、最も低かった試料は下水汚泥（59 mg/g）であった。鶏糞（296 mg/g）と生ごみ（275 mg/g）は比較的有機物量は多かった。豚糞（146 mg/g）は、鶏糞よりも高い熱量を示していたが（図１）、COD_{Cr} 値は鶏糞より低かった。

これらの分析結果より、南伊勢町に賦存しているバイオマスをメタン発酵利用する場合、利用可能量が一番多いとされる鶏糞は COD_{Cr} が高いことから、メタン発酵に用いた場合、高いガス発生量が見込める。

水素利用システムの CO_2 排出削減量の検討

CO_2 Emissions Of Hydrogen Utilization System

○樋口　尚輝、稲葉 敦[1*]
Naoki Higuchi, Atushi Inaba
工学院大学
*a-inaba@cc.kogakuin.ac.jp

1.　はじめに

水素は使用段階で CO_2 を排出しない。しかし、化石燃料から水素を製造する場合、製造段階で CO_2 が排出される。水素の製造段階における CO_2 の排出削減方法には、再生可能エネルギーによる水の電気分解や、副生物としての水素を利用する方法などがある。本研究では、風力発電や小水力発電等の再生可能エネルギーによる水の電気分解で得られた水素並びに苛性ソーダ工場で副生物として得られた水素を使用することを想定し、ライフサイクルでの CO_2 排出量を算出した。

2.　対象とするシステム

①風力発電または小水力発電で得た電力で水を電気分解し水素を製造する方法と②苛性ソーダ生産時に副生物としての水素を利用する 2 つのケースを想定した。製造された水素は FCV で使用することとし、③製造された水素は 35Mpa まで圧縮し、カードルで水素ステーションに輸送し、さらに 70MPa に昇圧するものとした。

3.　算定

本研究のモデルケースを以下のようにした。

3.1　水素の製造

①　風力発電または小水力発電による水素製造のケース

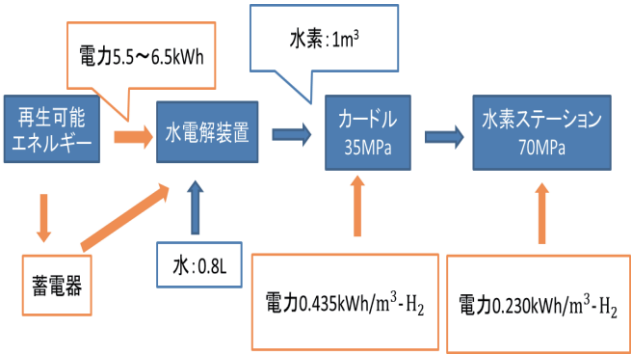


図 1.モデルケース①のフロー図

固体高分子型水電解装置は 1m³ の水素製造に 0.8L の水と 5.5~6.5kWh[3]の電気が必要であると仮定した。

②　苛性ソーダ工場の副生物としての水素

苛性ソーダを 1t 製造するために、2500kWh[2]の電力が必要で、副生物としての水素が 280Nm³ 生産されるものとした。

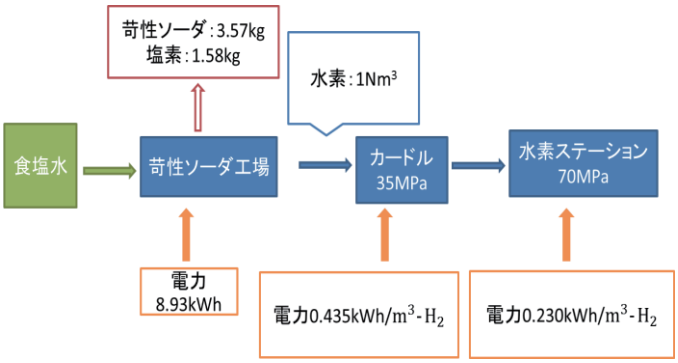


図 2. モデルケース③のフロー図

3.2　水素の輸送

昇圧の際にかかる消費電力を　JHFC　燃料電池システム等実証研究（第 2 期 JHFC プロジェクト）報告書 2011[7]から求めた。

表 1.水素 1[Nm³]の圧縮時にかかる消費電力[7]

水素ステーション（方式）	30MPa[kWh]	70MPa[kWh]
旭（ナフサ）	0.4351	0.2673
千住（都市ガス改質）	0.434	0.2301
平均値	0.4346	0.2301

3.3　FCV での水素利用と比較対象のガソリン自動車の燃費

総合効率と GHG 排出の分析　報告書　2011 より FCV の燃費を 138[MJ/100km]とし、ガソリン自動車の燃費も 223[MJ/100km]とした。水素とガソリンの発熱量をそれぞれ 128[MJ/Nm³]、34.6[MJ/L]とすると、各車両 100km 走行に必要な燃料の消費量を以下のようなった。

FCV100km 走行時の水素消費量は

138[MJ/100km]　/　12.8[MJ/Nm3]
＝10.78[Nm3-H2/100km]、

ガソリン自動車 100km 走行時のガソリン消費量

223[MJ/100km]　/　34.6[MJ/L]
＝6.445[L-ガソリン/100km]となる。

3.4　CO_2 排出量の計算

IDEA　Ver2[10]、経済産業省　資源エネルギー庁　発電別二酸化炭素排出量[11]から表 2 を作成し、以下の CO_2 排出係数を用い、各ケースの CO_2 排出量を算定した。

表 2.各燃料の CO_2 排出係数

	CO_2 排出係数
ガソリン	2.88[kg-CO2/L][10]
電力	0.559[kg-CO2/kWh[10]
電力（水力発電）	1.12×10^{-2}[kg-CO2/kWh][11]
電力（風力発電）	29.5×10^{-2}[kg-CO2/kWh] [11]

(1)ガソリン自動車 100km 走行時の CO_2 排出量は

2.88[kg-CO2/L]×6.445[L/100km]

＝18.56[kg-CO_2]となる。

(2)水素 10.78[Nm^3]の圧縮かかる消費電力の CO_2 排出量

(0.4346+0.2301)[kWh/Nm^3]×10.78[Nm^3]×0.559[kg-CO_2/kWh]=4.00[kg-CO_2]

(3)再生可能エネルギーによる水電解の CO_2 排出量

(a)風力発電における水電解の CO_2 排出量

6.0[kWh/Nm^3]×10.78[Nm^3]×29.5×10^{-2}[kg-CO2/kWh]

＝1.91[kg-CO_2]

(b)水力発電における水電解の CO_2 排出量

6.0[kWh/Nm^3]×10.78[Nm^3]×1.12×10^{-2}[kg-CO2/kWh]

＝0.7762[kg-CO_2]

(4)苛性ソーダ工場での副生成される際の消費電力の CO_2 排出量

今まで利用されず、廃棄されていた水素を利用するものとし、CO_2 排出量は 0 と考えた。

(5)算定結果

算定結果は風力発電由来の FCV は 5.913[kg-CO_2]となり、水力由来の FCV は 4.781[kg-CO_2]、苛性ソーダ工場の副生水素由来の FCV では 4.005[kg-CO_2]、ガソリン自動車は 18.56[kg-CO_2]となった。これらを図 3 に示す。

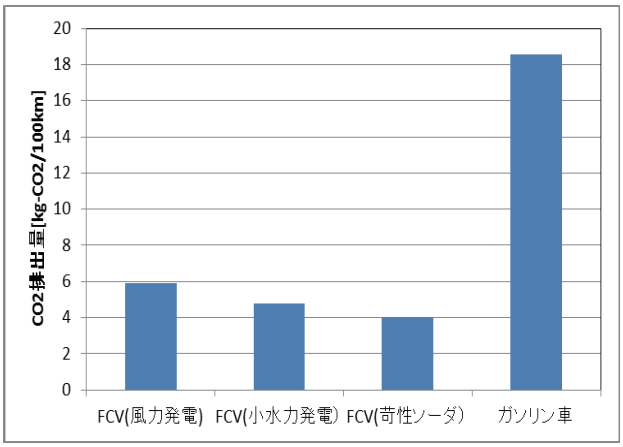


図 3　各車両 100km 走行時の CO_2 排出量

4.　まとめ

苛性ソーダ工場の副生水素を利用したケースは、副生水素の CO_2 排出量を 0 としたので、FCV で使用するための圧縮かかる CO_2 排出量だけが計算されている。再生可能エネルギーを使う場合も、今まで使われていなかった再生可能エネルギーを使用すると考えれば、再生エネルギー製造に係わる CO_2 排出量を 0 と見ることができる。水素利用の CO_2 排出量の評価では、システムバウンダリの設定が結果に与える影響が大きいことがわかった。

5.　参考文献

1)資源エネルギー庁燃料電池推進室　水素の製造、輸送・貯槽について
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/pdf/005_02_00.pdf　2016 年 12 月 18 日確認
2)化学工業日報社　13901 の化学商品　p29
3) 水電式高純度水素発生解装置-株式会社神鋼環境ソリューション
http://www.kobelco-eco.co.jp/product/suisohassei/hhog_qa.html　2016 年 12 月 18 日確認
4) Iwatani 水素供給システム
http://gas-plant.iwatani.co.jp/h2s/pdf/h2s.pdf
2016 年 12 月 18 日確認
5) Abdin, Z.; Webb, C. J.; Gray, E. M., Solar Hydrogen Hybrid Energy Systems for Off-grid Electricity Supply: A Critical Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52, 1791-1808
7)　JHFC　燃料電池システム等実証研究（第 2 期 JHFC プロジェクト）報告書、平成 23 年 3 月　石油産業活性化センター、日本自動車研究所、エンジニアリング振興協会、日本ガス協会
8）総合効率と GHG 排出の分析　報告書　2011 総合効率検討作業部会日本自動車研究所
9) 才木義夫　中沢誠,　ガソリン自動車の走行時における二酸化炭素排出量の推定
10)　IDEA　Ver2
11）経済産業省　資源エネルギー庁　発電別二酸化炭素排出量
http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/hydroelectric/support_living/merit002/
2017 年 1 月 4 日確認
12）水素エネルギー利活用のあり方に関する調査　報告書　平成 27 年 2 月　日本エネルギー経済研究所 エネルギー総合研究所

色素増感太陽電池の導入ポテンシャル及び環境・経済性評価

Potential evaluation of dye-sensitized solar cell considering environmental and economic performance

○関谷知治*[1)]、吉川直樹 [1)]、天野耕二 [1)]

Tomoharu Sekiya, Naoki Yoshikawa, Koji Amano

1)立命館大学

*rv0029hv@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

近年、日本では再生可能エネルギー固定価格買取制度(FIT)等の政策効果により、特に、メガソーラーなど非住宅分野において太陽光発電の導入量が急増した。しかし、買取価格の引き下げやメガソーラー適地の減少により導入量は減少傾向にある。NEDO 報告書 [1)]などではメガソーラーの適地は減少しているものの太陽光発電の導入ポテンシャルは豊富に存在するとされる。ただし、この報告書ではどの種類の太陽電池を用いるか指定されておらず、日本全体の推計が主にされ、日本各地における天候や日射量を考慮した発電量の推計は行われていない。

主流のシリコン型太陽電池は導入コストが年々低下しているが依然として高価であり、使用環境下では低日射条件で実発電効率が低下する特性がある [2)]。そこで、低日射条件で実発電効率が低下せず、導入コストや製造時のエネルギー消費量が低いとされる色素増感太陽電池 [2)](DSC)に注目した。

本研究では各都道府県の県庁所在地における集合住宅を対象とし、階数や集合住宅の方角ごとにカテゴリを分類、DSC およびシリコン型太陽電池を導入することを想定し、環境面・経済面の優位性とポテンシャルを比較評価する。

2. 方法

2.1 設置可能面積の推計

長屋建て住宅と共同住宅を「集合住宅」とし、太陽光発電の設置場所として壁面を想定する。導入対象となる集合住宅の階数、棟数、住宅数、延床面積のデータは「平成 25 年住宅・土地統計調査報告」[3)]より用いた。１棟あたりの延床面積を「各階数の総住宅数/各階数の総棟数×１住宅あたり延床面積」にて算出した。この値に既存調査 [4)](NEDO)の「延床面積に対する側壁面積比率（=80%）」を乗ずることで１棟あたりの壁面面積を算出した。ただし、共同住宅の 1 階建における棟数がデータ上では 0 であるが、算出不可能になってしまうため、２階建の１棟あたり住宅数を 1/2 にし逆算することで総棟数とした。代表として大阪市のデータを表 1 に示す。

太陽光発電の設置可能面積の制約として壁面における窓・出入り口などの面積(全体の 50%を想定 [4)])を考慮した。この値を 4 等分したものを各方面の壁面に設置可能な最大面積とする。

対象の集合住宅を階数ごと、方角を 2 種類(東西南北、南西南東北西北東)に分類、斜線制限などにより建物や道路が隣接し、設置不可能である場合も考慮する。

2.2 発電量推計

本研究では DSC(基準効率 6.0%)と多結晶シリコン太陽電池(基準効率 14.7%)の比較を行う。NEDO[5)]の推定式を参考に、既往研究 [2)]より日射量の違いによる発電効率の変化を考慮し、集合住宅１棟の建て方・階数・設置方角ごとに太陽光発電の発電量を式(1)を用いて推計する。式(2)より、この値をすべて足し合わせたものが建て方・各階数別１棟の最大発電量となり、式(3)により、建て方・各階数別の総棟数を乗じることで対象とする県庁所在地の総計とする。

$$PV_{rd} = \alpha \times \beta \times \gamma \times A_r \times \delta(m) \times PV_{op} \times PV_e \times SR(m)_d \quad \cdots(1)$$

$$PV_r = \sum PV_{rd} \quad \cdots(2)$$

$$PV_p = \sum PV_r \times T_r \quad \cdots(3)$$

表１ 大阪市のデータ

	長屋建て住宅		共同住宅								
	１階建	２階建以上	１階建	2階建	３階建	４階建	５階建	６,７階建	８～10階建	11～14階建	15階建以上
棟数	2,900	14,800	46	8,300	7,100	8,900	7,300	5,600	5,400	3,300	900
住宅数	6,200	37,600	100	36,100	45,100	85,600	116,400	133,000	198,400	234,400	112,800
1住宅あたり延床面積(m^2)	66		47								
延床面積に対する壁面面積比率	0.8		0.8								
１棟あたり住宅数	2	3	2	4	6	10	16	24	37	71	125
１棟あたり延床面積(m^2)	140	167	101	203	296	448	743	1,107	1,712	3,310	5,841
１棟あたり壁面面積(m^2)	112	133	81	162	237	359	594	885	1,370	2,648	4,672
１棟あたり設置可能面積(m^2)	56	67	41	81	118	179	297	443	685	1,324	2,336
１方角ごとの設置可能面積(m^2)	14	17	10	20	30	45	74	111	171	331	584

ここで、PV_{rd}: 建て方・階数・設置方角ごとの発電電力量(kWh/h)、α: 設置方式による温度上昇への影響係数(=1.0)、β: その他損失(=0.95)、γ: パワーコンディショナー変換効率(=0.95)、A_r: １方角ごとの設置可能面積(m^2)、$\delta(m)$: 季節別素子温度上昇による損失係数、PV_{op}: 発電出力(kW)、PV_e:太陽電池モジュール基準効率に対する実発電効率、$SR(m)_d$: 設置方角ごとの１時間日射量{(kWh)/m^2・h}、PV_r:建て方・各階数別１棟の総発電量(kWh/h)、PV_p :県庁所在地ごとの総発電量(kWh/h)、T_r: 建て方・各階数別の総棟数とする。

2.3　環境面・経済面の評価

環境面においては CO_2 排出削減量について式(4)を用いて比較評価を行う。

$$ERCO_{2i}=G_i\times(Fe-Fpv_i) \quad \cdots(4)$$

ここで、$ERCO_2$:CO_2 排出削減量(g-CO_2)、G:発電量(kWh)、i:太陽電池の種類、Fe:電力会社の排出係数(g-CO_2/kwh) 、Fpv:太陽光発電の排出係数(g-CO_2/kwh)とする。

経済面については以下の式(5)を用いてコストペイバックタイム（CPT）を算出し比較評価を行う。年間節約金額としては、集合住宅にて全量消費する場合と FIT を利用して売電する場合を考える。

$$CPT_i=(Ci_i+Cr)/Cas_i \quad \cdots(5)$$

ここで、CPT:コストペイバックタイム(年) 、Ci:イニシャルコスト(円)、Cr:ランニングコスト(円)、Cas:年間節約金額(円/年)とする。

3. 結果と考察

大阪市における建て方・各階数・各方角 1 棟の DSC とシリコン太陽電池の年間発電量推計結果を表２、表３に示す。また、表 4 に大阪市における建て方・各階数・各方角 1 棟の DSC に対するシリコン太陽電池の年間発電量比率(DSC=1)、表 5 に南面を 1 とした際の他方角の年間発電量比率を示す。

表 2　DSC の１棟あたり年間発電量

DSC発電量	長屋建て住宅		共同住宅								
(kWh/y*棟)	1階建	2階建以上	1階建	2階建	3階建	4階建	5階建	6，7階建	8～10階建	11～14階建	15階建以上
東面	734	873	531	1,062	1,551	2,348	3,892	5,798	8,969	17,339	30,595
西面	721	857	521	1,043	1,523	2,306	3,822	5,693	8,807	17,027	30,044
南面	874	1,039	632	1,263	1,845	2,794	4,632	6,899	10,672	20,632	36,405
北面	483	574	349	698	1,020	1,544	2,560	3,813	5,898	11,403	20,121
南東面	840	998	607	1,214	1,774	2,685	4,452	6,631	10,259	19,833	34,995
南西面	828	983	598	1,196	1,747	2,646	4,386	6,533	10,106	19,537	34,474
北東面	575	684	416	832	1,215	1,839	3,049	4,541	7,026	13,582	23,966
北西面	572	679	413	826	1,207	1,827	3,029	4,512	6,980	13,494	23,810

表 3 シリコン太陽電池の１棟あたり年間発電量

シリコン発電量	長屋建て住宅		共同住宅								
(kWh/y*棟)	1階建	2階建以上	1階建	2階建	3階建	4階建	5階建	6，7階建	8～10階建	11～14階建	15階建以上
東面	1,205	1,432	871	1,742	2,544	3,852	6,385	9,511	14,713	28,444	50,190
西面	1,173	1,393	848	1,695	2,475	3,748	6,214	9,256	14,318	27,681	48,844
南面	1,522	1,808	1,100	2,200	3,213	4,864	8,065	12,012	18,582	35,925	63,390
北面	666	792	482	963	1,407	2,130	3,532	5,261	8,138	15,734	27,763
南東面	1,463	1,739	1,058	2,115	3,089	4,678	7,755	11,551	17,870	34,547	60,958
南西面	1,426	1,695	1,031	2,061	3,011	4,558	7,557	11,256	17,413	33,665	59,402
北東面	844	1,003	610	1,220	1,782	2,698	4,473	6,663	10,308	19,928	35,163
北西面	835	993	604	1,208	1,764	2,670	4,427	6,594	10,201	19,721	34,798

表 4 DSC に対するシリコン太陽電池の年間発電量比率

東面	西面	南面	北面	南東面	南西面	北東面	北西面
1.64	1.63	1.74	1.38	1.74	1.72	1.47	1.46

表 5 南面を１とした際の他方角の年間発電量比率

	東面	西面	南面	北面	南東面	南西面	北東面	北西面
DSC	0.84	0.83	1.00	0.55	0.96	0.95	0.66	0.65
シリコン	0.79	0.77	1.00	0.44	0.96	0.94	0.55	0.55

表 2 より DSC が低日射条件下で比較的高効率とはいえ、日射量の多い南向きの方が発電量は多いことがわかる。また、表 3 よりシリコン太陽電池は元々の発電効率が高いため DSC と比較し、共同住宅の１５階建以上で１棟年間 26,000kWh も多く発電することが可能である。しかし、表 4 より DSC に対するシリコン太陽電池の年間発電量比率を比較してみると 1.38～1.74 であり元の基準効率比(=2.45)を考慮するとかなり発電量の差が縮まっているのではないかと考えられる。また、表 5 より南面を 1 とした際の他方角の年間発電量を比較すると、DSC はシリコン太陽電池と比べ日射量の低い北方向において発電量の低下が抑えられている。

4. おわりに

詳細な結果については、学会当日に報告する。

建物統計データを用いて集合住宅を個別に評価し、集合住宅以外の建築物にも範囲を広げていきたい。

太陽電池の壁面設置は屋上や屋根よりも目立つため、太陽電池に意匠性を持たせることで景観を向上し、また、環境配慮型住宅としてのアピールに繋がる。集合住宅経営者に対しイメージ向上に活用されるニーズや意識調査を行い、評価に加えたいと考えている。

参考文献

1）独立行政法人新エネルギー･産業技術総合開発機構：”太陽エネルギー技術研究開発（太陽光発電システム次世代高性能技術の開発）太陽光発電における新市場拡大等に関する検討”,(2013)
2)岡田顕一,松井浩司,田辺信夫:フジクラ技報,120,(2011),pp.42-48
3)総務省:”平成 25 年住宅・土地統計調査報告”,入手先〈https://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020101.do?_toGL08020101_&tstatCode=000001063455&requestSender=search〉, （参照 2016-12-21）
4）みずほ情報総研：“非住宅分野における太陽光発電システム技術に関する調査研究”,（2003）
5）NEDO（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）：“大規模太陽光発電システム導入の手引書”,(2011)

産業連関表を用いた技術導入の社会経済性分析

—種子島を例に—

Socio-economic Analysis on Technology Introduction using Input-Output Tables: A Case Study of Tanegashima

○兵法彩*[1)], 尾下優子 [2)], 大野肇 [3)], 中井美和 [1)], 福島康裕 [3)], 菊池康紀 [1)]
Aya HEIHO, Yuko OSHITA, Hajime OHNO, Miwa NAKAI, Yasuhiro FUKUSHIMA, Yasunori KIKUCHI
1) 東京大学, 2) 神戸大学, 3) 東北大学
* heiho-aya@platinum.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

近年、バイオマスや太陽光などの地域資源を有効利用した分散型エネルギーシステム（以下、地域エネルギーシステム）に注目が集まっている。新たな地域エネルギーシステムを地域に受容される形で構築する際には、技術導入に伴う域内経済循環や雇用創出効果などの社会経済性をライフサイクル思考に基づいて分析することが重要となる。国や都道府県が公表している産業連関表は、社会経済性分析のツールとしてこれまでも広く用いられてきている [1)]が、例えば、課題先進地域でもある離島地域においては、国や都道府県レベルの産業連関表では、その地域の特徴を反映した分析結果を得ることが難しい。特に、域内経済循環や雇用創出効果などは、地域の意思決定における重要な要素のひとつであるため、実態を反映した分析に基づいて、合理的な議論が展開されることが望まれる。

そこで本研究は、効果的な地域エネルギーシステムの構築に向けた意思決定支援を目的として、鹿児島県の離島のひとつである種子島を対象に、より適切な産業構造を反映した地域産業連関表を作成し、社会経済性分析を行う。

2. 種子島の概要

種子島は鹿児島県の大隅諸島を構成する島のひとつで、人口が約 30,000 人（2016 年 11 月現在）であり、総面積が 445km^2 である。他の南西諸島に比べて、気候的に植物生産能力が高いという特色があり、サトウキビ、野菜・花卉、サツマイモ、水稲などの生産が行われている。特に、サトウキビは島内の基幹産業である製糖業の原料として重要な役割を担っているが、作付け面積の減少などの課題が生じ始めている。また、島内の電力は、2 か所のディーゼル発電所で生産しているため、島外からの化石燃料資源に依存する構造となっている。このような課題解決のために、種子島ではサトウキビなどの島内資源の有効利用を軸としたエネルギー生産業の新たな展開および経済基盤の再構築や強化が検討されている。

3. 地域産業連関表の作成

鹿児島県産業連関表 [2)]（以下、鹿児島県表）をベースに、国の産業連関表 [3)]（以下、全国表）や沖縄県の産業連関表 [4)]（以下、沖縄県表）、地域の統計や企業などの報告書を用いて種子島産業連関表（以下、種子島表）を作成した（**図 1**）。

3.1 種子島表の作成

まず、新たな地域エネルギーシステムを導入する前の現状の種子島の産業構造を表章した 197 部門の種子島表を作成した。鹿児島県表（小分類 190 部門）をベースに、他の統計を組み合わせて実態の反映を試みた。このとき、種子島における重要な生産活動および、後述する新しい技術導入に関連する部門（いも類、でんぷん、砂糖原料作物、原料糖、黒糖・その他の糖、ガソリン、発電、送配変電販売）は、鹿児島県表では、他の生産活動との統合部門であるため、分割して 197 部門とした。

種子島表の各部門の島内生産額は、地域の統計情報（例えば、熊毛地域の概況 [5)]など）を用いて推計し、原則として鹿児島県表の投入係数および粗付加価値係数（以下、係数）で按分することで部門ごとの投入額を算出した。ただし、鹿児島県表から分割して作成した部門については、以下の方法で作成した。いも類、でんぷん、ガソリンの作成には、細分化された情報が

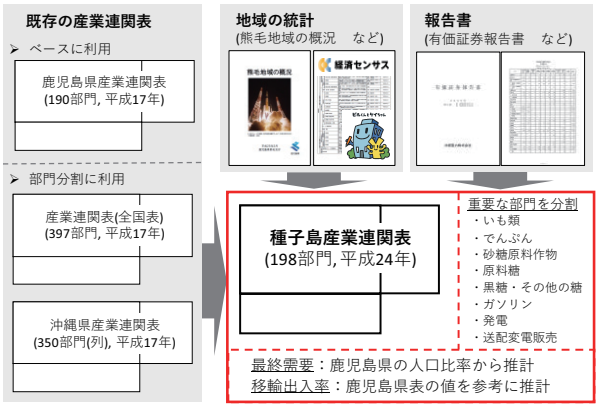


図 1　地域産業連関表（種子島表）の作成

得られる全国表の係数を用いた。砂糖類関連部門（砂糖原料作物、原料糖、黒糖・その他の糖）の作成には、種子島と同じくサトウキビから砂糖生産を行っている沖縄県表の係数を用いた。電力関連部門（発電、送配変電販売）は、ディーゼル発電の費用構成を反映するために、沖縄電力の有価証券報告書 [6]の電気事業営業費用明細に記載されている情報から、ディーゼル発電の費用構成と送配変電販売の費用構成を作成し、沖縄県表の火力発電部門の係数を用いて細分化した。

最終需要部門は、鹿児島県表から人口比（鹿児島県内人口に占める種子島人口の割合）から推計した。移輸出入率は、鹿児島県表の値を参考に推計した。ただし、島内需要に対して生産量の小さい財・サービスなどの移輸出入率は適宜調整を加えた。

3.2 社会経済性分析に向けた部門の新設

次に作成した種子島表を、製糖工場への新しい技術導入に伴う社会経済性分析に応用する。**図２**は、本研究で分析対象とする新しい地域エネルギーシステムの全体像を示している。導入する（更新含む）技術は、サトウキビの圧搾時に生じる残渣であるバガスを用いたバイオマス熱供給およびバイオマス発電と、原料糖の精製時に生じる副産物であるモラセスを用いたバイオエタノール製造である [7]。

これら 3 つの導入技術にあたる部門（バイオマス熱供給部門、バイオマス発電部門、バイオエタノール製造部門）を種子島表に新設した。3 つの部門の島内生産額は、生産量（熱供給量、発電量、エタノール生産量）と技術導入後に想定される単価から推計した。各部門の費用構成については、現地調査で得られている物量情報（電力消費量や燃料消費量など）を用いて推計した。ただし、情報が得られていないメンテナンス等に係る費用は、既存の産業連関表の類似部門の係数を用いて推計した。このとき、バイオマス熱供給部門は鹿児島県表の熱供給部門、バイオマス発電部門は再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（REFIO）[8]の木質バイオマス発電部門、バイオエタノール製造部門は全国表のウイスキー部門の係数を用いた。新たに作成した 3 部門を 197 部門の種子島表に反映することで、地域エネルギーシステムの分析が可能な 200 部門の種子島表とした。

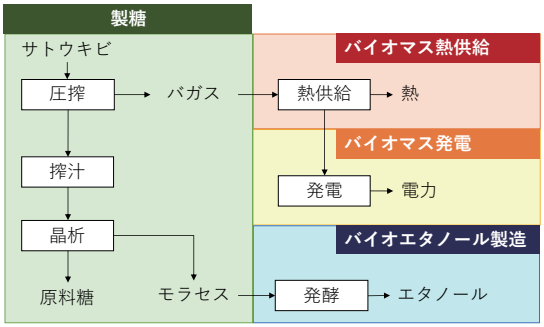


図２　地域エネルギーシステムの全体像

4. 今後の展開

地域エネルギーシステムに関する複数のシナリオ（発電優先シナリオ、エタノール生産優先シナリオなど）を設定し、作成した 200 部門の種子島表を用いてシナリオごとの社会経済性を定量的に明らかにしていく。また、得られた結果を地域のステークホルダーに提示することで、地域産業連関表が果たす役割に関する議論を展開していく予定である。

謝辞

本研究は、環境研究総合推進費（1RF-1503）、日本学術振興会科学研究費補助金（若手研究（A）16H06126、若手研究（B）26740056、特別研究員奨励費 15J11714）における成果を含んでいる。東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座は、(株)地球快適化インスティテュート、日本電信電話（株）、富士フイルムホールディングス（株）、三井不動産（株）、（株）LIXIL、信越化学工業（株）からの寄付で活動している。

参考文献

1) 総務省, “平成 17 年産業連関表 総合解説編”, (財)全国統計協会連合会, 東京, (2009), pp.143-146
2) 鹿児島県：“鹿児島県産業連関”, 鹿児島県庁(オンライン), 入手先< http://www.pref.kagoshima.jp/toukei/bunya/keizai/renkan/index.html>, (参照 2016-12-09)
3) 総務省：“平成 17 年(2005 年)産業連関表(確報)”, e-Stat(オンライン), 入手先< http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001019588&cycode=0>, (参照 2016-12-9)
4) 沖縄県：“平成 17 年産業連関表”, 沖縄県庁(オンライン), 入手先<http://www.pref.okinawa.jp/toukeika/io/2005/sanren_top.html>, (参照 2016-12-9)
5) 鹿児島県：“平成 24 年度熊毛地域の概況”, 鹿児島県庁(オンライン), 入手先<https://www.pref.kagoshima.jp/ap01/chiiki/kumage/chiiki/h24kumagegaikyou.html>, (参照 2016-12-9)
6) 沖縄電力（株）：“平成 18 年度有価証券報告書”, 沖縄電力(オンライン), 入手先<https://www.okiden.co.jp/shared/pdf/ir/zaimu/2007/070727_1.pdf>, (参照 2016-12-9)
7) 菊池康紀, 尾下優子, 福島康裕：PETROTECH, 36(6), (2016), pp.461-467
8) 森泉由恵, 本藤祐樹, 中野諭：日本エネルギー学会誌, 94(12), (2015), pp.1397-1413

触媒開発・設計のためのライフサイクルアセスメント

Life Cycle Assessment for the Development and Design of Catalysts

○川音侑輝*[1)]、大野肇[1)]、福島康裕[1)]
Yuki Kawaoto, Ohno Hajime, Yasuhiro Fukushima
1) 東北大学
* kawaoto@dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

プラスチックや薬品、燃料など多くの化学製品の製造プロセスにおいて触媒が用いられている。これまで種々の化学製品について LCA を用いて環境影響の評価が行われてきたが、既報文献の多くにおいては製造プロセスで用いられている触媒の活性は不変と仮定、触媒の製造・再生などを含むライフサイクルについては算定範囲外、あるいはカットオフされ、考慮されていないものが多い。しかし実際のプロセスでは触媒は劣化するため、その寿命に応じて交換・再生が行われており、これらの段階において生じている環境負荷をカットオフすることの是非について確認の必要がある。

また触媒開発の立場をとると、実験室規模でのデータを用い LCA の観点から触媒の特定の性能向上による効果を評価する報告[1)]はあるが、複数の性能の向上や触媒利用プロセスの側の効果と触媒製造プロセス側の効果を一貫して評価するような LCA 研究は僅少であり、そのための手法は体系化されていない。一方で触媒の研究開発は盛んであり、新たなものが多く報告されている。例えば、マイクロリアクターを用いて、これを使わなければできないような特殊な構造を持つ触媒を製造し、その性能（耐久性、触媒量、寿命、選択率など）の向上を目指した研究がある[2)]。マイクロリアクターはその流路の小ささから圧力損失の大幅な増大が予想されるため、触媒製造プロセスは多量のエネルギーを要し環境影響が大きくなることが懸念される。しかし、利用プロセス側で消費エネルギーの削減が実現できるならば上記の負荷増大を打ち消す事ができる可能性は充分にある。

本研究では、このような議論をある程度の定量性をもって行い、触媒開発の研究において LCA を用いて指針を与えることができるようにすることを目的としている。本稿ではそれに向けた、触媒の製造から使用までを含めた開発・設計方法のモデリングについての進捗を報告する。

2. 触媒のライフサイクルを包括した LCA

2.1. 評価対象

マイクロリアクターを用いた触媒開発として報告されている例の中からポリイミドナノ粒子に金ナノ粒子を担持させた触媒（Au NPs/PI NPs）[2)]に着目した。この触媒が得意とする反応の一つにニトロベンゼンを接触還元することによりアニリンを製造する反応がある。そこで本報告ではアニリン製造プロセスを対象とし、触媒のライフサイクルを含めたアニリン製造プロセスの環境影響を考えた。ここで議論する環境影響は CO_2 排出量とし、システム境界は原料の調達からアニリンの製造までとした。Au NPs/PI NPs と比較する従来触媒はカーボンにパラジウムを担持したもの（Pd/C）[3)]とし、この二つの触媒を同プロセス内で用いた際の環境影響について議論する。どちらの触媒もプロセス内では懸濁床触媒として用いられる[2, 3)]。Au NPs/PI NPs はマイクロリアクターを用いて製造するため触媒製造にかかる環境影響が従来触媒と比べ大きくなるが、触媒の活性、寿命が改善されると仮定した。また Au NPs/PI NPs を使用した際のアニリン製造プロセスにおける反応温度は Pd/C を使用した時と比べ低いと報告されている[2, 3)]ため、アニリン製造に係る CO_2 排出量は Au NPs/PI NPs を使用した際のほうが抑えられると仮定した。そのほかの反応条件は両触媒で同じものとした。

2.2. CO_2 排出量の計算

触媒のライフサイクルを含めた環境影響の算出は以下の(1)式によって行った。

$$G_a = C \cdot G_c + \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor \cdot C \cdot G_r + G_p \cdot X \cdot T \quad (1)$$

(1)式の第 1 項は触媒の製造にかかる CO_2 排出量、第 2 項は触媒の再生にかかる CO_2 排出量、第 3 項はアニリンの製造にかかる CO_2 排出量をそれぞれ示している。アニリン製造量を機能単位としたときの CO_2 排出量 G を時間 t に対してプロットすると図 1 となる。時間 0 ではアニリン製造量が 0 であるが触媒製造に係る CO_2 が排出されているため無限大に発散している。グラフがステップ上になる部分は触媒の再生が行われていることを示している。図 1 より時間に対してアニリン製造量当たりの CO_2 排出量を追うことができ、アニリン製造を続けるにしたがって触媒製造および触媒再生の影響が小さくなることが分かる。

さらに触媒が再生をn回繰り返しアニリン製造がおこなわれ、最終的に再生が不可能になったときの G を(2)式に示す。

$$G = \frac{C \cdot G_c}{(1+n) \cdot X \cdot T} + n \cdot \frac{C \cdot G_r}{T \cdot X} + G_p \quad (2)$$

(2)式の第 1 項、第 2 項および第 3 項は(1)式と同じくそれぞれ触媒製造、触媒再生およびアニリン製造の環境影響の寄与を示している。このように CO_2 排出量を算出すれば触媒の製造から再生までを包括した LCA を行うことができる。

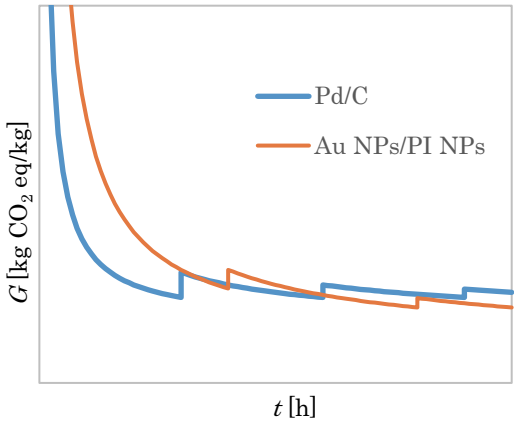


図 1 時間と CO_2 排出量の関係

3. LCA を用いた触媒の開発・選択手法のモデル化

マイクロリアクターを用いた触媒開発では前述のとおり触媒の活性の向上は期待できるが触媒の製造に係る CO_2 排出量が従来法と比較して大きくなることが予想される。このような複数のパラメータの変化を包括し触媒の性能を評価する方法として表 1 に示したパラメータを仮定して図 2 を考えた。

表 1 図 2 で用いた各パラメータ

変数	Pd/C
C [kg]	1
G_c[kg-CO_2/kg]	1
T[h]	8760
G_r[kg-CO_2/kg]	1
G_p[kg-CO_2/kg]	4.88
X[kg/h]	100
n[-]	0

図 2 はG_cとG_pのみがが変化したときの等 CO_2 排出量線を示したものである。この図からG_pが仮定した 4.88 から 0.01 小さくなると Gc が約 9,000 倍となっても触媒製造を含めたプロセス全体の CO_2 排出量は変わらないことがわかる。よって本稿の仮定においては、マイクロリアクターによる触媒製造に係る CO_2 排出量の増大という懸念は、触媒の改善によりアニリンの製造に係る CO_2 排出量を小さくすることができれば十分に解決されると考えられる。

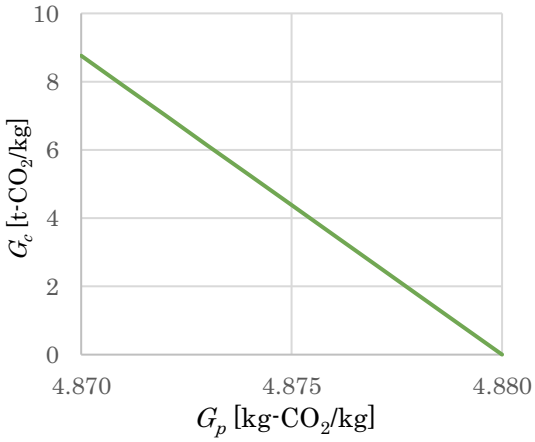


図 2 Cと G_c で示す等 CO_2 排出量線

4. 結言

触媒のライフサイクルを考慮した LCA ではプロセス全体の CO_2 排出を触媒製造、触媒再生およびアニリン製造の 3 つの項にわけて算出し、それらの和の時間変化を見ることで、触媒のライフサイクルがプロセス全体にどのような影響を与えるのかを議論した。さらに LCA の結果から、マイクロリアクターによる触媒製造に係る CO_2 排出量の増大という懸念を、プロセス全体のほかのパラメータの改善により解決できることが示された。

本報告では様々な仮定を用いて簡潔にモデリングを行ったが、実際の系ではそれぞれのパラメータが複雑に変化することが予想される。今後は触媒製造をしている企業へのヒアリング等を通してモデルをより詳細化していきたい。

記号

G_a：全 CO_2 排出量[kg-CO_2 eq]、C：触媒量[kg]、G_c：触媒製造に係る CO_2 排出量[kg-CO_2 eq]、t：アニリンの製造時間[h]、T：触媒の寿命（次の触媒再生を迎えるまで）[h]、G_r：触媒再生に係る CO_2 排出量[kg-CO_2 eq]、G_p：アニリン製造に係る CO_2 排出量[kg-CO_2 eq]、X：アニリン製造能力[kg/h]、G：機能単位で規格化した全 CO_2 排出量[kg-CO_2 eq/kg]、n：触媒再生回数[-]

引用文献

1) Griffiths O. G, Owen R E., O'Byrne J P., Jones M D., McManus M C.:RSC ADV., 3, (2013), pp12244-12254
2) Ishizaka T, Ishigaki A, Chatterjee M, Suzuki A, Suzuki T M., Kawanami H:Chem. Lett., 41, (2012), pp.447-449
3) 室井高城, "工業触媒の劣化対策と再生、活用ノウハウ", サイエンス＆テクノロジー, 東京, (2008), p.12

産業連関マテリアルフロー解析を用いた製品由来炭素固定量の時系列定量分析

Time Series Quantification of Embodied Carbon in Products with Input-Output based Material Flow Analysis

○佐藤博一*[1)]、大野肇[1)]、福島康裕[1)]
Hirokazu Sato, Hajime Ohno, Yasuhiro Fukushima
1) 東北大学
* hirokazu.satou.r4@dc.tohoku.ac.jp

1. 緒言

これまで、気候変動の一因である二酸化炭素(CO_2)については排出量に関する議論が多くなされてきた。その一例として、CO_2 排出量削減の為の化石燃料に依存しないクリーンエネルギーの開発等が挙げられる[1)]。

人間活動による CO_2 排出量や削減方法に注目が集まる一方で、将来の CO_2 発生源となる可能性のある製品中に固定されている炭素量については今まで着目されてこなかった。しかし、CO_2 排出の主な要因となっている化石燃料のうち、石油の使用用途の約 20%は繊維や塗料といった原料に使われていることから[2)]、無視できない量の炭素が製品中に固定されていると予想される。また、これらの製品はリサイクル方法によって大気中に解放される炭素量が異なる。特に、容器等の短寿命製品は使用開始後すぐに廃棄されるためリサイクル方法によって炭素放出量が大きく変化すると考えられる。

既往の研究により産業連関表に基づくマテリアルフロー解析(WIO-MFA モデル)が開発され[3)]、鋼鉄をはじめとする金属の MFA 等が可能となった。しかし、これまでの手法では各最終製品中の炭素量については正確に定量化することができない。これは産業連関表に記載のない炭素源からの投入が考慮されていないからであると考えられる。そこで本報告では、炭素フロー解析の整合性を高めるために、マテリアルリサイクルされた樹脂の投入量を考慮した新 WIO-MFA 手法の評価と、製品中の固定炭素量を年代別に得、短寿命製品に着目した炭素放出量の分析を行う。

2. 手法

2.1 WIO-MFA モデル

WIO-MFA モデルとは、産業取引を行列化した産業連関表を用いることで、約 400 部門の製品に対して分析対象マテリアルの含有組成、並びに流入経路の分析が可能な手法である。

WIO-MFA モデルでは以下の式を用いて製品 P 中の分析対象マテリアル M の組成 C_{MP} を計算する。

$$C_{\mathrm{MP}} = \tilde{A}_{\mathrm{MP}}\left(I - \tilde{A}_{\mathrm{PP}}\right)^{-1}$$

$\tilde{A}_{\mathrm{MP}}$及び$\tilde{A}_{\mathrm{PP}}$は歩留まり落ちとサービス部門などの非物質投入を排除した投入係数行列である。$\tilde{A}_{\mathrm{MP}}$は製品 P の 1 単位生産当たりの M の投入、$\tilde{A}_{\mathrm{PP}}$は製品 P の 1 単位当たりの中間製品 P の投入を表している。既往の研究では、石油化学基礎製品と石油化学芳香族製品部門を分析対象マテリアル M として計算を行った。このモデルの詳細については既報[3)]に譲る。

しかし、熱可塑性樹脂と高機能性樹脂部門のC_{MP}を算出すると、各樹脂中の炭素 1kg における M 由来の総炭素量が 1kg に達しない。これは、生産された樹脂中の炭素量が樹脂生産への炭素投入量よりも大きくなっていることが原因と考えられ、産業連関表に記載のない樹脂部門への炭素源投入が存在することが示唆される。例として、各年のプロピレンから熱可塑性樹脂の一種であるポリプロピレン(PP)への投入量と PP 生産量の比較[4)]を表 1 に示す。そこで、今回はマテリアルリサイクルされた樹脂の熱可塑性樹脂部門、高機能性樹脂部門への投入を考慮して計算を行った。

表 1　炭素投入量と製品中炭素量の比較 [kt]

年代	PP への炭素投入量	PP 中の炭素量
2000	2568	2723
2005	2516	3063
2011	2284	2448

2.2 分析対象

本報告では 2000 年、2005 年、そして 2011 年版の国内産業連関表を利用して各年毎に計算を行った。産業連関表は金額ベースであり、$\tilde{A}_{\mathrm{MP}}$の算出に用いる M の物質投入量は単価によって物量に変換し、さらに各 M 部門の炭素含有率で炭素投入量に変換する必要がある。ここで、「その他の石油化学基礎製品」と「その他の石油化学芳香族製品」は複数の部門が統合されて

いるため、産業連関表に付属の品目別価格表から細分類に対する分子量、炭素量及び生産量を求め、加重平均をとることで炭素含有率を算出した。なお、リサイクル投入量に関しては物量の文献データ [5]を参照した。

3　結果

3.1 樹脂中の炭素量と投入物中の炭素量の比較

2011 年における熱可塑性樹脂部門の樹脂中の炭素計とリサイクル投入量を考慮した場合の各投入物由来の炭素計の比較を図 1 に示す。リサイクルの投入を考慮した場合、投入量中の炭素計が樹脂中の炭素計よりも大きいことが確認できる。なお、高機能性樹脂部門についても同様の傾向が確認できた。しかし、今回リサイクルされた樹脂の投入量として使用したデータはマテリアルリサイクルに向かった廃樹脂量であり、樹脂としてリサイクル処理がされた場所(国内または国外)は不明である。後者の場合、産業連関表に組み込むことができないため今後その真偽について詳しく追及する必要があるが、本報告では、リサイクルが国内で行われた仮定で計算を行った。

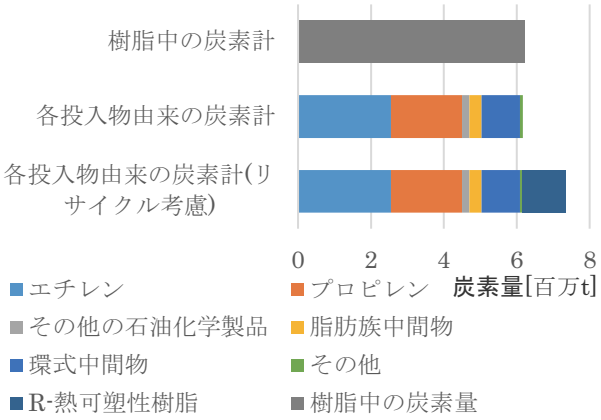


図 1 熱可塑性樹脂の生産量と投入量の比較

3.2 各年の製品中固定炭素量

2000 年、2005 年、そして 2011 年の製品中の総固定炭素量を図 2 に示す。

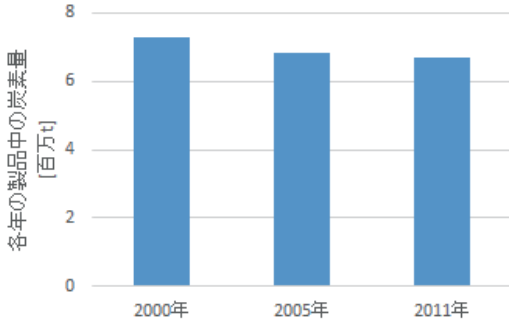


図 2 各年の製品中固定炭素量の推移

図より、最終製品中の総炭素量はさほど変化しないことが確認できる。この要因として、最終需要額と各製品 1 単位当たりの炭素含有量に大きな変化が見られないことが考えられる。

各年の製品中固定炭素量における清涼飲料水等の食品部門、化粧品・歯磨部門の割合を図 3 に示す。1 年以内に寿命が尽きる部門を短寿命製品とすると、対象部門は短寿命と定義できる。今回着目した短寿命製品だけでも各年で全体の 15~20%を占めるので毎年一定量の炭素量が短寿命製品に固定されていると考えられる。これらの製品は使用後すぐに廃棄されるのでリサイクル方法によって炭素放出量が大きく変化する特性を持つことから、全量マテリアルリサイクルできると仮定すると、現状のリサイクル量も併せて最大約 4 百万 t 以上もの CO_2 排出量を削減できると予想できる。

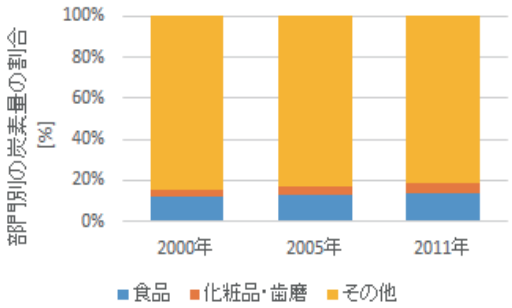


図 3　各年の部門別製品中固定炭素量の割合

4　おわりに

本報告では、WIO-MFA モデルの整合性の向上と製品中の固定炭素量の時系列定量分析を行った。今回は短寿命製品の CO_2 排出量について議論したが、長寿命製品由来の炭素に関しては長期に渡って社会に固定される。ゆえに、社会の滞留時間について確率密度関数を適用することで固定炭素蓄積量の推移の評価 [6]を行い、より包括的な製品由来炭素量の定量化を目指す。

5　引用文献

1) 一般社団法人 産業環境管理協: “CFP プログラム”. http://www.cfp-japan.jp/ (2016.01.06)
2) 石油連盟: “石油製品の用途別国内需要”, (2012)
3) Nakamura S. and Nakajima K., Materials Transactions, 46 (12), (2005), pp.2550-2553
4) 総務省: “産業連関表　統計表一覧”. http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/ichiran.htm (2017.01.04)
5) 一般社団法人プラスチック循環協会: “「プラスチックのマテリアルフローの LCA 分析の精度向上」に関する調査研究事業報告書”,(2014)
6) Yucheng Zhou, Resources, Conservation and Recycling, **73**, (2013),pp33-40

非金属鉱物を対象とした日本の環境効率の評価

Evaluation of Japan's eco-efficiency for non-metallic minerals in Japan

○田中大介*[1)]、栗生木千佳 [1)2)]、Sebastien M.R. Dente[1)]、橋本征二 [1)]
Daisuke Tanaka, Chika Aoki-Suzuki, Sebastien M.R. Dente, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学、2) 地球環境戦略研究機関
* rv0029kx@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

第四次環境基本計画では、「環境と社会経済の関係を端的に表す指標」として「環境効率性を示す指標」や「資源生産性を示す指標」が挙げられている。前者については、当面「二酸化炭素排出量÷GDP」を用いることとしているが、生産量ベースでの指標や他の環境負荷（大気環境、化学物質など）の環境効率性についての検討が課題となっている。また、後者についても、少量だが有害な物質の影響や希少金属の価値が過小評価されるなどの課題が指摘されている。一方、「資源生産性」を重要な指標の 1 つとして採用している第三次循環型社会形成推進基本計画では、今後の検討課題の一つとして、環境負荷と財・サービスの付加価値の間の効率性を測る環境効率指標の検討が挙げられている。

これに関して欧州では、「資源生産性（resource productivity: €/kg）」と「環境効率（eco-efficiency: €/impact）」の両者を「資源 1 単位あたりの環境影響（resource specific impact: impact/kg）」で関連づけて検討する方向にある。しかしながら、そうした手法の開発は未だ諸に着いたばかりである。数少ない既存研究においても、資源のライフサイクルのどの段階で物質を定義するか、各物質へ環境影響をどのように配分するか、製品使用時の環境影響をどう考えるか等の課題があり [1)]、さらなる検討が必要な状況にある。

本研究では、建設用非金属鉱物を対象とした前報 [2)]の対象範囲を拡大し、建設用以外も含めた非金属鉱物を対象としてその環境影響・付加価値を推計し、対象資源・物質の環境効率の評価を行った。具体的には、対象資源・物質の選定方法を改めるとともに、選定した対象資源・物質の上流側及び下流側を含めた環境影響・付加価値を試算した。また、これらを用いて、非金属鉱物利用の環境効率の評価を行った。本要旨では、その試算方法を記述し、評価結果については学会当日に報告する。

2. 方法

2.1 対象資源・物質の選定

前報[2)]では、既存研究[1)]が対象としている資源・物質と、MiLCA[3)]で試算が行える物質を照合するとともに、生産量・消費量等のデータの入手可能性を調査し、対象資源・物質を選定した。本稿では、より網羅性を高めるため、以下の手順で対象資源・物質を選定し直した。まず、産業連関表[4)]において非金属鉱物に関わる資源・物質を生産する部門を同定し、次に、同定した生産部門に含まれるMiLCA[3)]の資源・物質（データベースとしてIDEAv2を使用）を同定した。さらに、部門内において生産額のシェアが80%以上となるように主要な資源・物質を選定し、これらの資源・物質のうち、ある資源・物質が他の資源・物質の原材料であって、その比率が極めて高いものを除外した。最後に、生産量・消費量等のデータの入手可能性を調査し、同定した資源・物質の包含関係に留意しながら、対象資源・物質を選定した。

2.2 対象資源・物質の環境影響と付加価値の試算

(1) 対象資源・物質1単位あたりの上流側の環境影響と付加価値

対象資源・物質1単位あたりの上流側の環境影響ベクトル（E_{unit}）は、IDEAv2の投入係数行列（A）とその環境負荷行列をLIME[5)]を用いて統合した環境影響ベクトル（S）を用いて以下の通り算出した。Iは単位行列、*は行列の乗算を表す。

$$E_{unit} = \mathrm{S} * (\mathrm{I} - \mathrm{A})^{-1}$$

対象資源・物質1単位あたりの上流側の付加価値ベクトル（V_{unit}）は、産業連関表の投入係数行列（B）と付加価値ベクトル（T）により算出した。

$$V_{unit} = \mathrm{T} * (\mathrm{I} - \mathrm{B})^{-1}$$

上述の通り、本研究の対象資源・物質はIDEAv2の項目となるが、対象資源・物質として選定したIDEAv2の項目と産業連関表の部門を対応させながら分析を行っていく。

(2) 対象資源・物質の上流側の環境影響と付加価値

対象資源・物質の上流側の環境影響と付加価値を算出するにあたっては、ダブルカウントを考慮する必要がある。選定した対象資源・物質が他の対象資源・物質の原材料となっている場合があるからである。そこで、他の対象資源・物質の原材料となっている対象資源・物質の環境影響及び付加価値は当該資源・物質のそれから控除することとした。例えば、セメントには石灰石が原材料として投入されている。この場合、セメントに使用される石灰石の環境影響と付加価値はセメントに帰属するものとした。

以上の考え方に基づき、(1)で算出したE_{unit}、V_{unit}にそれぞれIDEAv2の生産量ベクトル（X）、産業連関表の生産

額ベクトル（Y）を乗じ、さらにダブルカウントを控除する係数ベクトル（h、k）を乗じて、対象資源・物質の上流側の環境影響（E_{up}）と付加価値（V_{up}）を算出した。

$$E_{up} = hE_{unit}X$$
$$V_{up} = kV_{unit}Y$$

係数h、kを算出するにあたり、投入係数行列A、Bを図1のように4つのブロックに分割した（図1はAの場合）。ここで、tは対象資源・物質、oは対象外の財・サービスであり、A_{tt}は対象資源・物質の投入のみで構成される行列を、A_{oo}は対象外の財・サービスの投入のみで構成される行列を、Idは単位ベクトルをそれぞれ表している。このとき、係数h、kは以下で算出される。

$$(\mathrm{Id} - \mathrm{h})\mathrm{X} = (A_{tt} + A_{to} * (I - A_{oo})^{-1} * A_{ot}) * \mathrm{X}$$
$$(\mathrm{Id} - \mathrm{k})\mathrm{Y} = (B_{tt} + B_{to} * (I - B_{oo})^{-1} * B_{ot}) * \mathrm{Y}$$

A_{tt}	A_{to}
A_{ot}	A_{oo}

図1　投入係数行列Aの分割

(3) 対象資源・物質の下流側の環境影響と付加価値

対象資源・物質の下流側の環境影響と付加価値を算出するにあたっては、下流側で発生する環境影響や付加価値の一部を対象資源・物質に割り当てる考え方が必要となる。本稿では、下流側のプロセスの投入係数の比によって、そのプロセスで発生する環境影響や付加価値を上流側の対象資源・物質に割り当てた。例えば、生コンクリートの生産には、セメント、骨材、水、労働等が必要となるが、それらの投入費用に応じて生コンクリート生産プロセスで発生する環境影響や付加価値をセメントや骨材に割り当てる考え方である。この係数（α_{to}、β_{to}）は、以下で表される。

$$a_{to} = A_{to} * (I - A_{oo})^{-1}$$
$$\beta_{to} = B_{to} * (I - B_{oo})^{-1}$$

この割り当てを繰り返し、対象外の財・サービスの生産プロセスで発生する環境影響（S_o）と付加価値（T_o）を下式により対象資源・物質に割り当て、下流側の環境影響（E_d）と付加価値（V_d）を算出した。ここで、対象外の財・サービスの需要量（P_o）または需要額（Q_o）を用いる。

$$E_d = \alpha_{to} * diag((I - A_{oo})^{-1} * P_o) * S_o$$
$$V_d = \beta_{to} * diag((I - B_{oo})^{-1} * Q_o) * T_o$$

2.3　対象資源・物質の環境効率の試算

以上をもとに、対象資源・物質の環境効率（EE）を算出した。これは、算出した付加価値ベクトルの成分（V_{upj}、V_{dj}）の合計を、算出した環境影響ベクトルの成分（E_{upi}、E_{di}）の合計で除したものである。

$$\mathrm{EE} = \frac{\sum_i V_{upi} + \sum_i V_{di}}{\sum_j E_{upj} + \sum_j E_{dj}}$$

謝辞：本研究は、第Ⅲ期環境経済の政策研究及び科学研究費補助金(15H02863)による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

1) van der Voet, E., et al.: Dematerialization: Not just a matter of weight, CML report 160, 2003
2) 田中大介、粟生木千佳、S.M.R. Dente、橋本征二：資源・物質利用の環境影響：建設用非金属鉱物を対象として、第 11 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、pp.244-245、2016
3) 産業環境管理協会：MiLCA ガイドブック(2014 年 10 月 9 日版)、2014
4) 総務省：産業連関表、http://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/、2016 年 12 月アクセス
5) 伊坪徳宏、稲葉敦編著：LIME2(Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)、産業環境管理協会、2010

日本における白金族金属類二次埋蔵量の評価

Assessment of secondary PGMs reserves in Japan

○福谷大樹*[1)]、橋本征二 [1)]
Daiki Fukutani, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* rv0040pv@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

白金族金属類(Platinum Group Metals : PGMs)は化学的に安定で、高融点、高触媒性という性質から、燃料電池の電極、るつぼ、自動車排ガス処理の触媒といった工業用品の他、宝飾品など多くの用途で利用されている。しかし、PGMs の年間産出量(約 400 トン)は、金銀等の他の貴金属と比較しても少なく(それぞれ約3,000 トン、約27,000 トン)、埋蔵量が南アフリカとロシアに偏在していることから供給リスクの高い物質である。また、鉱石中の濃度が低いために、生産段階でのエネルギー消費や TMR (Total Material Requirement)も大きく [1)]、リサイクルの推進が望まれる物質でもある。

日本では、栗木ら [2)]が自動車排ガス処理の触媒用 PGMs を対象としてそのリサイクルポテンシャルを検討しているが、PGMs の需要分野全てを対象とした研究やその二次埋蔵量の推計はなされていないのが現状である。

そこで、本研究では社会中に蓄積している PGMs の量を推計するとともに、このうち循環利用が可能な量、すなわち二次埋蔵量の評価を行った。

2. 方法

2.1 対象物質と対象製品

本研究では、PGMs(Pt、Pd、Rh、Ru、Ir、Os)のうち最終製品のデータが存在する Pt、Pd、Rh(PPR)を対象として検討を行った。最終製品は自動車用触媒、電子材、化学、ガラス、宝飾、その他の 6 つの分野に分類した。

2.2 Pt、Pd、Rh の蓄積量および二次埋蔵量の推計方法

PPR の蓄積量および二次埋蔵量は、吉田ら [3)]の推計方法を参考に、以下の式で算出した。

$$S(t)=\Sigma a\Sigma i\{Ua(i)\cdot Ra(t-i)\}$$

$$SR(t)=S(t)\cdot r(t)$$

$$Ra(y)=\exp[-(y/Ya)^b\cdot\{\Gamma(1*1/b)^b\}]$$

ここで、S(t)は t 年における PPR の蓄積量(t)、Ua(i)は i 年における最終製品 a としての PPR 利用量(t/y)、Ra(y)は製品 a の y 年後の残存率(-)でワイブル関数、SR(t)は t 年における PPR の二次埋蔵量(t)、r(t)は t 年における PPR の二次埋蔵率(-)、Ya:は製品 a の平均使用年数(年)、Γはガンマ関数、b は分布の幅を表すパラメータである。

2.3 二次埋蔵率の推計方法

PPR の二次埋蔵率r(t)は経済社会に蓄積されたPPRのうち、経済的に回収可能な PPR の比率であり、PPR の二次埋蔵量を推計するための係数である。二次埋蔵率は、二次資源として回収される老廃スクラップの量を推計される老廃スクラップの発生量で除することで算出した。

$$r(t)=RS_{EOL}(t)/GS_{EOL}(t)$$

ここで、$RS_{EOL}(t)$は t 年における老廃スクラップの回収量(t/y)、$GS_{EOL}(t)$は t 年における老廃スクラップの発生量(t/y)である。$RS_{EOL}(t)$は以下のように算出した。

$$RS_{EOL}(t)=US(t)+S_{EX}(t)-S_{IM}(t)$$

ここで、US(t)は t 年におけるスクラップ利用量(t/y)、$S_{EX}(t)$は t 年におけるスクラップの輸出量(t/y)、$S_{IM}(t)$は t 年におけるスクラップ輸入量(t/y)である。また、$GS_{EOL}(t)$は以下の式で算出した。

$$GS_{EOL}(t)=\Sigma i\{Ua(i)\cdot fa(t-i)\}$$

$$fa(y)=Ra(y-1)-Ra(y)$$

ここで、fa(y)は製品 a の y 年後の廃棄率(-)である。

2.4 用いたデータ

(1)基本データ：日本における最終製品向けの需要量については、統計データ [4)]を用いた。また、PPR の回収量については、JOGMEC[5)]の値を用いた。最終製品の自動車、触媒、電子材、宝飾品の輸出入量については、貿易統計 [6)]のデータを用いた。

(2)最終製品の PPR 含有量 : 貿易統計の数値は製品の重量であるため、これを PPR の輸出入量に換算する必要がある。自動車用触媒については、自動車用触媒の需要量を自動車の生産量で除したものを含有量として用いた。また、電子材については、JOGMEC[5)]の PPR 含有量の数値を用いた。なお、本推計では最終製品の製造時の PPR の歩留まりを 100%と仮定している。

(3)最終製品の PPR 利用量 : 最終製品 a としての PPR 利用量 Ua(i)については、国内で販売された最終製品のみ考慮する必要がある。本研究では、自動車用触媒についてこれを考慮し、文献 [3)]と同様に自動車用触媒 PPR の需要量に日本の自動車生産量に占める日本の自動車新規登録台数の割合を乗じたものと(2)で推計した輸入自動車に含まれる PPR の和を Ua(i)とした。

(4)最終製品の平均使用年数 : 平均使用年数 Ya については、電子材、化学、ガラス、その他の分野については JOGMEC[5)]の数値を参考に、宝飾については文献 [7)]の数値を参考に設定した。また、自動車用触媒については自動車の平均使用年数 [8)]を設定した。なお、ワイブル関数のパラメータは

文献[10]を参考に設定した。

(5)老廃スクラップ発生量：自動車用触媒については、その一部が中古自動車や部品として輸出されることから、上記で推計される自動車用触媒の老廃スクラップ発生量から輸出される中古自動車及び中古部品に含まれる PPR の量を差し引いたものを回収対象となる老廃スクラップ量とする必要がある。中古自動車及び中古部品の輸出量は文献[10]と統計[11]の数値を用いた。また、輸出される中古自動車及び中古部品に含まれる PPR 含有量は上記(1)と同様のものを用いた。

3. 結果と考察

3.1 蓄積量の推計結果

PPR 蓄積量の推計結果を図 1 に示す。2014 年における PPR 蓄積量は Pt で 656 トン、Pd で 337 トン、Rh で 40 トンと推計され、一人当たりの PPR 蓄積量は 8.1g となった。最終製品の分野別蓄積量では、使用年数の最も長い宝飾品(平均 20 年)が最も多く、約 5 割を占める結果となった。

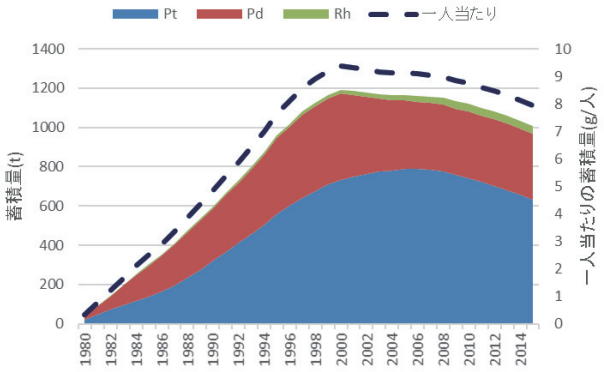


図 1　PPR の蓄積量

3.2 二次埋蔵率の推計結果

二次埋蔵率の推計結果を図 2 に示す。2014 年から過去 10 年間の二次埋蔵率の平均は Pt で 30%、Pd で 67%、Rh で 31%となった。また、PPR 全体の二次埋蔵率は 30%から 60%の間を推移する結果となった。なお、近年 Pd の二次埋蔵率が上昇しているが、これは 90 年代中頃に自動車用触媒の需要が Pt から安価な Pd にシフトし、その自動車が 2000 年代に寿命を迎えたことにより、自動車用触媒の高いリサイクル率が影響した面もあると考えられる。ただし、本研究で推計した二次埋蔵率(＝使用済み製品リサイクル率)には多くの不確定要素があり、現在その検証を進めている。

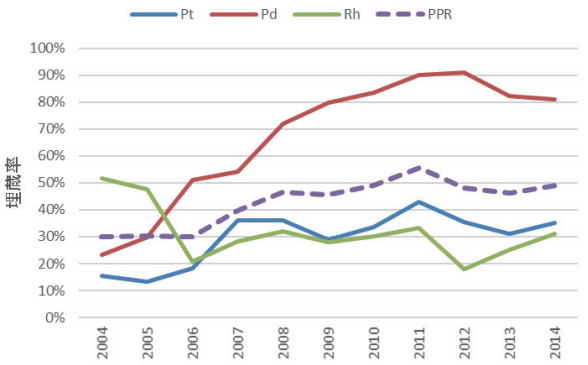


図 2　PPR の二次埋蔵率

3.3 二次埋蔵量の推計結果

図 3 に PPR の二次埋蔵量及び一人当たりの二次埋蔵量の推計結果を示す。過去 10 年間の平均的な二次埋蔵率を用いて推計した 2014 年の二次埋蔵量は Pt で 194 トン、Pd で 227 トン、Rh で 11 トン、PPR 合計で 432 トンとなった。また、一人当たりの二次埋蔵量は 3.4g と推計された。この二次埋蔵量は、2014 年における PPR の国内総需要量 85 トンを約 5 年分賄える程度の量である。

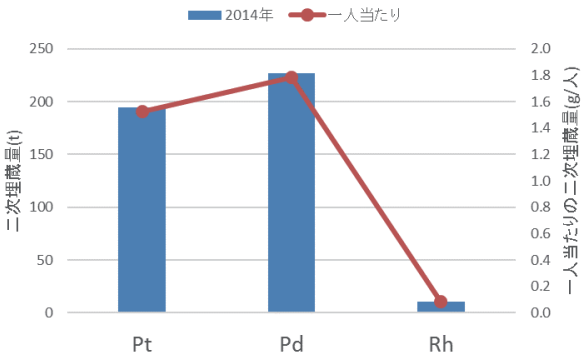


図 3　2014 年の PPR の二次埋蔵量

謝辞：本研究は、環境研究総合推進費(1-1402 及び 3K163001)による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

1) Saurat, M. and S. Bringezu: Platinum group metal flows of Europe Part 1, Journal of Industrial Ecology, 12, pp.754-767, 2008
2) 栗木辰悟、醍醐市朗、松野泰也、足立芳寛：日本における白金族金属のリサイクルポテンシャル評価、日本金属学会誌、74(12)、pp.801-805、2010
3) 吉田友晴、K.N. Maung、橋本征二：世界における二次アルミニウム埋蔵の量推計、第 11 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、pp.358-359、2016
4) Johnson Matthey: Platinum 2013, 2013
5) JOGMEC：金属資源情報、http://www.jogmec.go.jp/、2016 年 7 月アクセス
6) 財務省：貿易統計、http://www.customs.go.jp/ toukei/info/、2016 年 10 月アクセス
7) UNEP International Resource Panel: Metal Stocks in Society – Scientific Synthesis, 2010
8) 自動車検査登録情報協会：自動車検査登録情報協会ホームページ、https://www.airia.or.jp/、2016 年 10 月アクセス
9) 田崎智宏、小口正弘、亀山隆志、浦野紘平：使用済み耐久消費財の発生台数の予測方法、廃棄物学会誌、12(2)、pp.49-58、2001
10) 布施正暁、鹿島茂：日本からの使用済み自動車輸出量の推計、廃棄物学会誌、18(5)、pp.305-313、2007
11) 日本自動車工業協会：日本自動車工業協会ホームページ、http://www.jama.or.jp/、2016 年 11 月アクセス

低炭素発電技術に使用される金属のクリティカリティ評価

Criticality assessment of metals used for low-carbon power generation technologies

○宮本渉*[1)]、橋本征二[1)]
Wataru Miyamoto, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* rv0040if@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

地球温暖化が国際的な課題となって以降、低炭素社会の実現に向けて、再生可能エネルギーの普及や火力発電の高効率化が求められている。日本においては、2012 年に再生可能エネルギーの固定価格買取制度が導入されて以降その普及が加速し、2015 年度に策定された長期エネルギー需給見通し[1)]においても、2030 年における電源のうち、22～24%を再生可能エネルギーにするとしている。

一方、これらの低炭素発電技術には様々な希少金属が使われており、技術の普及とともにそうした金属の需要も増加することが予想される。鉱物資源に乏しい日本において、希少金属資源の確保は重要な課題であり、低炭素技術の普及においても、どのような金属が制約条件となりうるかを理解しておくことが有益である。既存研究[2)]では、世界を対象として太陽光発電や風力発電、燃料電池に使用される金属の重要度(クリティカリティ)が評価されているが、本研究では文献[3)]の手法を参考に、日本を対象として高効率な火力発電を含む幅広い低炭素発電技術に使用される金属のクリティカリティ評価を行った。

2. 方法

2.1 対象技術及び金属

今後導入が増加すると予想される低炭素発電技術として太陽光発電、風力発電、水力発電、地熱発電、バイオマス発電、ガスタービンコンバインドサイクル(GTCC)、石炭ガス化複合発電(IGCC)を対象とした。また、対象金属については文献[4),5)]を参考に図 1 の金属を選定した。

2.2 クリティカリティ評価の方法

金属のクリティカリティ評価の方法論[3)]を参考に評価を行った。評価軸は供給リスクと脆弱性で構成され、以下の各評価項目の値を 0 から 100 の値に置き換え、総合的に評価した。

(1)供給リスク

地質学、社会・規制、地政学の観点から評価した。

① 地質学：可採年数(RPt)及び CMF(Companion Metal Fraction)で評価した。RPt は、RP(2014 年における各鉱物の埋蔵量[6)]を 2014 年の生産量[6)]で除したもの)を下式[3)]に当てはめることで推計した。

$$RPt = 100 - 0.2\times RP - 0.008\times RP^2$$

また、CMF は副産物として生産される金属の割合を示しており文献[7)]を参考にした。

② 社会・規制：ポリシーポテンシャル指数(PPI)[8)]及び人間開発指数(HDI)[9)]で評価した。PPI は企業の採掘や探鉱に影響を及ぼす政策を潜在的に評価したものである。また HDI は対象国の健康・教育・生活の質を評価したものである。これらの指標を金属ごとの生産国の割合で加重平均し推計した。

③ 地政学：世界ガバナンス指数(WGI)[10)]と生産国の寡占度(GSC)で評価した。WGI は各国の政治安定性を評価しており、この指標を用いて生産国のカントリーリスクを推計した。また GSC はハーフィンダルハーシュマン指数(HHI)と下式[3)]を用いて推計した。

$$GSC = 17.5\times \ln(HHI) - 61.18$$

(2)脆弱性

重要性、代替可能性、感受性の観点から評価した。

① 重要性：国家経済上の重要性(NE)として評価した。NE は対象金属の市場規模(2014 年需要量[11)]×2014 年の原料価格[11)])を 2014 年の GDP との比較で推計した。

② 代替可能性：代替金属の能力(SP)、入手可能性(SA)で価した。SP については文献[12)]を参考に、SA は代替金属の供給リスクで評価した。各代替金属で評価された値を、2014 年における需要量の割合で加重平均をとり、各金属の SP、SA として推計した。

③ 感受性：世界イノベーション指数(GII)[13)]と輸入依存度(IR)で評価した。GII は各国の革新度を評価したものであり、供給制限を受けた際の日本の対応の柔軟性をこれにより評価した。IR は輸入に依存している度合いであり、見掛消費量[11)]と輸出入量等[11)]を用いて推計した。

3. 結果と考察

供給リスク(SR)、脆弱性(VSR)の各評価項目を推計した結果が図 1 である。

3.1 供給リスクの評価結果

SR では太陽光発電に用いられる In や Cd といった金属がクリティカルな金属と評価された。評価項目別に見ると、地質学的な観点では点数に大きな差が出たが、その他の項目では大きな差は生じなかった。社会・規制及び地政学の観点で大きな差がなかったのは、どの金属も生産国が似通っているためと考えられる。In や Cd は、太陽光発電に用いられる金属であり、これらの金属により太陽光パネルの供給が制限される可能性が他の発電技術より高いと言える。

3.2　脆弱性の評価結果

VSR では、NE の項目で大きな値をとった Fe がクリティカルな金属であると評価された。また代替可能性の項目で大きな値をとった Mn も比較的クリティカルな金属といえる。日本のインフラを支える常用金属、とりわけ Fe が、NE の項目において他の金属と大きく異なっており、これが VSR 全体の評価に影響を与えているため、他の金属の VSR がやや過小評価されている可能性があると考えられる。Fe や Mn は、特殊鋼として多くの発電技術に使用されている金属である。

4.　今後の課題

本研究では、評価した各項目を等しく重みづけしているが、日本独自のクリティカリティ評価を行う上では、重みづけを変えることや独自の項目を設けることも検討する必要がある。また、個々の評価項目についても精査を行っており、図 1 は暫定的な結果である。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金(15H02863)による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

1) 経済産業省：平成 27 年長期エネルギー需給見通し、http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf、2016 年 7 月アクセス
2) 橋本征二ら：地球温暖化対策技術の普及と関連金属の重要度、第 38 回環境システム研究論文発表会講演集、pp.291-296、2010
3) T.E. Graedel et al: Methodology of metal criticality determination, Environmental Science & Technology, 46, pp.1063-1070, 2012
4) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構、次世代火力発電システムに必須のレアメタル、http://mric.jogmec.go.jp/public/kouenkai/2015-08/20150828_03.pdf、2016 年 7 月アクセス
5) 電力中央研究所：日本における発電技術のライフサイクル CO_2排出量総合評価(別冊付録：ライフサイクル CO_2排出量評価表)、電力中央研究所報告書、2016
6) U.S. Geological Survey: Minerals Yearbook Volume1, http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/myb.html, accessed November 2016
7) N. T. Nassar, et al: By-product metals are technologically essential but have problematic supply, Science Advance, 1 (3), e1400180, 2015
8) Fraser Institute: Annual Survey of Mining Companies 2015, https://www.fraserinstitute.org/studies/annual-survey-of-mining-companies-2015, accessed November 2016
9) United Nations Development Programme: Human Development Data (1980-2015), http://www.hdr.undp.org/en/data, accessed November 2016
10) The World Bank Group: The Worldwide Governance Indicator, http://info.worldbank.org/governance/wgi/index.aspx#home, accessed November 2016
11) アルム出版社：工業レアメタル、130、2014
12) T. E. Graedel et al: The criticality of metals and metalloids, PNAS, 112 (14), pp.4257-4262, 2015
13) INSEAD: The Global Innovation Index 2014. The Human Factor in Innovation, pp.xxiv-xxv, 2014

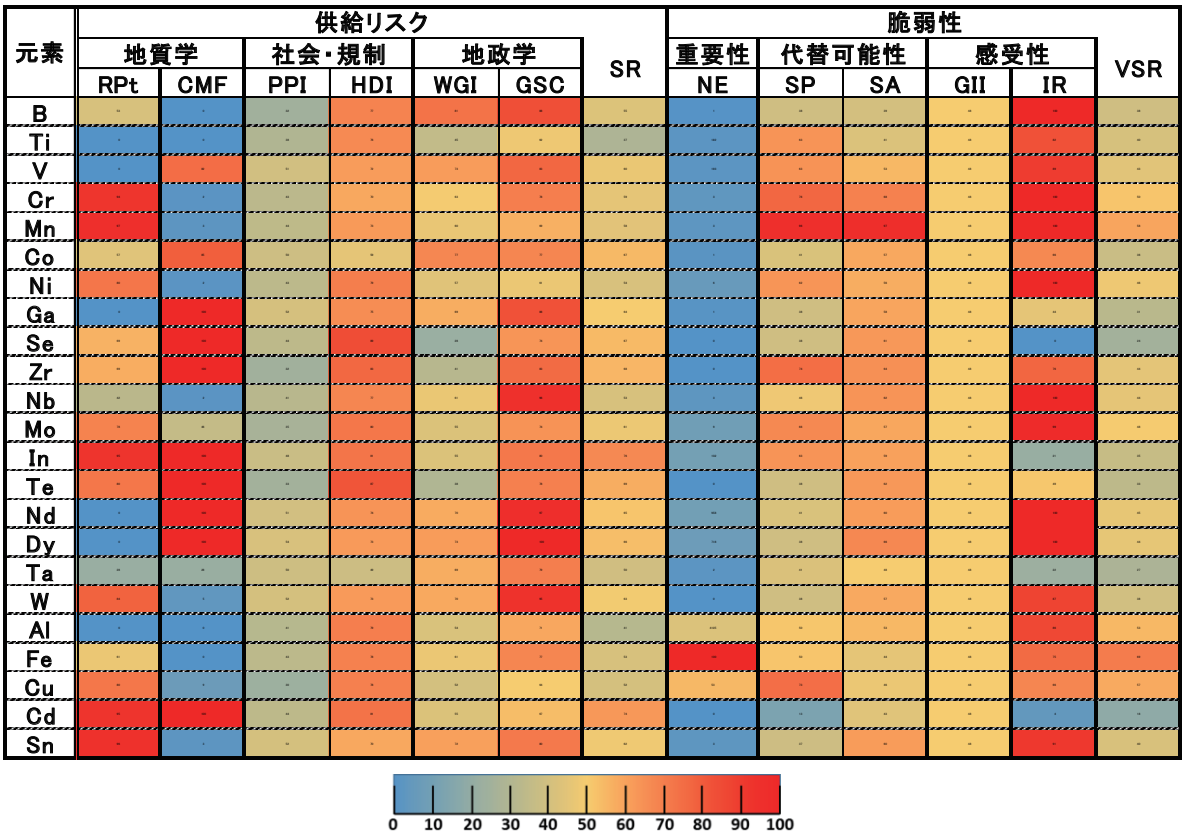


図１　対象金属のクリティカリティ評価

社会における物質の滞留時間を考慮した蓄積物質使用効率指標の提案

Proposal of stocked material-use efficiency indicator considering stocking time of materials in a society

○八柳有紗*[1)]、谷川寛樹[2)]、橋本征二[1)]
Arisa Yatsuyanagi, Hiroki Tanikawa, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* rv0023xk@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

近年、大量生産・大量消費・大量廃棄のフロー型社会から、社会に蓄積された資源の活用に重きを置くストック型社会への転換が求められている。こうした社会へ向かうためには、社会に蓄積している物質量(蓄積物質量)の定量化や蓄積物質量の有用性を計測する指標が必要となる。そこで、筆者らは住宅を始めとする建設物を対象として、蓄積物質使用効率指標(Stocked Material Use Efficiency: SMUE)を提案するとともに[1)]、国際比較の例として SMUE の日諾比較を行ってきた[2)]。結果として、日諾の住宅における SMUE は近年ほぼ同値であることが示された。しかし、上記の SMUE は、ある時点における蓄積物質量の使用効率に着目したものであり、その物質がどれだけ長く使用されているかという滞留時間の概念を考慮できていなかった。滞留時間が異なると、SMUE が同値だとしても、物質 1 トンあたりのライフサイクルでのサービス量が異なることになる。

そこで、本研究では、物質の滞留時間を考慮した新しい SMUE の提案を行なうとともに、ケーススタディとして日諾の住宅に適応した。さらに、滞留時間を考慮した SMUE の差の要因も検討することで、日本がストック型社会に向かうための方策を検討した。

2. 方法

2.1 蓄積物質使用効率(Normal SMUE)の定義

従来の SMUE(Normal SMUE)は、サービス量を蓄積物質量(Normal SM)で除すことで定義される[1)]。すなわち、SMUE が高いと、ある時点での蓄積物質が効率よく使用されている状態を意味する。本研究で対象とする住宅は、主に人が居住するために存在すると考え、サービス量を居住人口とした。

2.2 蓄積物質量の推計方法

蓄積物質量は Hashimoto et al.[3)] を参考に、日諾において以下のように推計した。

$$SM_{ai}(t)=\sum_{c}\left(S_a(t-1,c)\times\alpha_{ai}(c)\times\frac{R_a(t-c)}{R_a(t-c-1)}\right)\cdots(1)$$

ここで、$SM_{ai}(t)$は t 年度に構造 a の住宅に蓄積されている資材 i の量(ton)、$S_a(t,c)$は c 年に着工された構造 a の住宅のうち、t 年に残存している床面積(m^2)、$\alpha_{ai}(c)$は c 年に着工された構造 a の住宅における着工床面積あたりの資材 i の投入原単位[4)](ton/m^2)、$R_a(t\text{-}c)$は c 年(＜t 年)に着工された構造 a の住宅の t-c 年後における残存確率である。本推計では、資材 i は木材とコンクリートを対象とした。構造 a は日本においては表 1 に示す 4 種、ノルウェーについては構造を考慮しないとした。残存率に関しては、既存研究[5)6)7)]を参考に、一部の構造物を除いて残存率の時系列変化を考慮し、表 1 のように設定した。推計の起点に関しては、日本においては基準年(1987 年または 1990 年)以降は着工床面積[8)]を積み上げていき、それ以前は基準年の総床面積を Hashimoto et al.[3)]の手法を用いて、築年別に振り分けることで推計した。ノルウェーの場合は、1800 年から 1983 年までは Bergsdal et al.[9)]の方法を参考に、人口とライフスタイルに関するパラメータから推計した床面積需要を積み上げていき、その後は新築着工量[10)]を計上することで蓄積物質量を推計した。

表 1　設定した残存率関数と平均寿命

	構造	関数形	平均寿命
日	木造	対数正規分布	46～63 年
	SRC 造	ワイブル分布	39 年
	RC 造	ワイブル分布	51～45 年
	S 造	ワイブル分布	32～52 年
諾	なし	標準正規分布	150 年

2.3 滞留時間を考慮した蓄積物質使用効率(adjusted SMUE)の定義

滞留時間の考慮の方法としては、①蓄積物質がライフサイクルで提供した延べサービス量を、対象年の蓄積物質量で除す方法、②対象年のサービス量を、予想される滞留時間で重み付けした蓄積物質量で除す方法があると考えられる。しかし、①の延べサービス量の定量化は事実上難しいことから、本推計では②の方法により滞留時間を考慮した SMUE(Adjusted SMUE)を定義した。具体的には、滞留時間を考慮した蓄積物質量(Adjusted SM)を以下のように推計した。

$$AdjustedSM(t)=\sum_{d}^{\infty}\sum_{c}^{t-1}\frac{SM(d,c)-SM(d-1,c)}{d-c}\cdots(2)$$

ここで、Adjusted SM(t)は滞留時間で重み付けした t 年の蓄積物質量(ton/年)、SM(d,c)は c 年に着工された蓄積物質量のうち d 年(>c 年)に残存している蓄積物質量である。つまり、毎年廃棄される蓄積物質をそれまでに経済社会で活躍したものと捉え、滞留した年数で除して各年に割り振る方法である。このようにすることで、Adjusted SM は経済社会に投入された物質の毎年の「割り当て分」となり、この割り当て分を毎年どのように使用するかで使用効率が決まる。例えば、長寿命化などで滞留時間が長くなると、Adjusted SM は小さくなり、Adjusted SMUE は大きくなる。また、Adjusted SM は毎年の廃棄量を割り振っているとも考えられるため、滞留した年数で徐々に廃棄していた場合の仮想的な廃棄量とも捉えることができる。すなわち、Adjusted SM を Normal SM で除すと、毎年の Normal SM のうちどのくらいの物質が入れ替わっているかという入れ替え率を示すことになる。

3. 結果と考察

3.1 Normal SM、Adjusted SM の推計結果

図 1 に日諾における Normal SM と Adjusted SM の推計結果を示す。Normal SM については、1990 年は日諾それぞれ 25 億トンと 1 億トン、2012 年は 42 億トンと 2 億トンと推計された。一方、Adjusted SM については、1990 年は日諾それぞれ5400万トンと94万トン、2012年は8400万トンと 130 万トンと推計された。蓄積物質の入れ替え率は、1990 年においては日諾それぞれ 2.1%、0.8%であり、2012 年においては 2.0%、0.8%となった。日諾間で約 2.5 倍の差があり、ノルウェーの方が約 2.5 倍長く物質を使用している可能性が示唆される結果となった。また、日本の入れ替え率が改善傾向にあるのは、日本の住宅が概ね長寿命化している傾向を反映したものと考えられる。

3.2 Normal SMUE、Adjusted SMUE の推計結果

図 2 に日諾における Normal SMUE と Adjusted SMUE の推計結果を示す。Normal SMUE に関しては 1990 年においては日本がノルウェーを上回っていたが、近年はほぼ同値であると推計された。一方、Adjusted SMUE はいずれの年でも日本がノルウェーの約 1/2～1/2.5 という結果となった。すなわち、滞留時間を考慮すると、ノルウェーの方が日本よりも蓄積物質を効率よく使用できていることが示唆される。しかしながら、日諾ともに Adjusted SMUE は減少傾向であり、物質の利用効率は徐々に下がってきていると考えらえる。

Adjusted SMUE の日諾差と時系列推移の要因およびストック型社会へ向かうための方策の検討は学会当日に報告する。

謝辞：本研究は、環境省環境研究総合推進費（1-1402）及び文部科学省科学研究費補助金（26281056）による成果である。ここに記して深謝する。

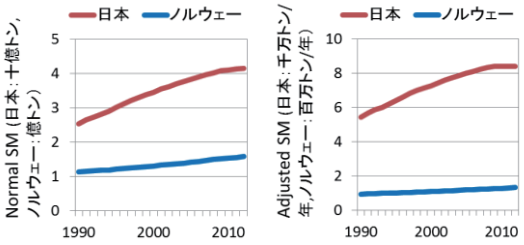


図 1　住宅における Normal SM（左）と Adjusted SM（右）の推計結果

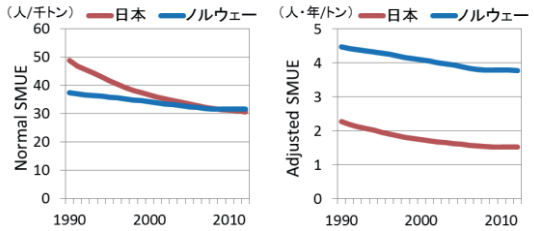


図 2　住宅における Normal SMUE（左）と Adjusted SMUE（右）の推計結果

参考文献

1) 八柳有紗, 橋本征二：ストック型社会形成に向けたストック使用効率の評価、第 10 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集、88-89、2015
2) Yatsuyanagi, A. et al.: Stocked material use efficiency of housing: Comparison of Japan and Norway, The International Society for Industrial Ecology Joint 12th Socio-Economic Metabolism Section Conference and 5th Asia-Pacific Conference, 2016
3) Hashimoto, S. et al.: Where will large amounts of materials accumulated within the economy go? – A material flow analysis of construction minerals for Japan, Waste Management, 27(12), 1725-1738, 2007
4) 建設省/国土交通省：建設資材・労働力需要実態調査報告書、1982-2012
5) 小松幸夫ら：わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告～1987 年固定資産台帳に基づく推計、日本建築学会計画系論文報告集、439、101-110、1992
6) 小松幸夫ら：東京 4 区における事務所建築のストック調査と寿命推計、日本建築学会計画系論文報告集、465、123-132、1994
7) 小松幸夫：1997 年と 2005 年における家屋の寿命推計、日本建築学会計画系論文集、73(632)、2197-2205、2008
8) 建設省/国土交通省：建築統計年報、1956-2012
9) Bergsdal, H. et al.: Dynamic material flow analysis for Norway's dwelling stock, Building Research and Information, 35(5), 557-570, 2007
10) Statistics Norway: Building statistics, 1983-2012

地区別の人口動向を考慮した新築および既存住宅数と自治体による二酸化炭素排出量の違いの将来推計

Future prospect of the number of houses and the difference of CO2 emission from rebuilding houses and inslation retrofit houses in each municipality

○堀 星至*[1)]、田崎 智宏[2)]、松橋 啓介[2)]、石河 正寛[2)]
Seiji Hori, Tomohiro Tasaki, Keisuke Matsuhashi, Masahiro Ishikawa
1) 東京大学, 2) 国立環境研究所
* horiseiji@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

国内の温室効果ガスの排出量削減が求められるなかで、家庭部門の二酸化炭素排出量の削減が進んでいないことが課題となっている。国は地球温暖化対策計画において家庭部門の二酸化炭素排出量を 2030 年までに 4 割削減することを提示し、高効率機器の普及と住宅の省エネ化に対策の重点を置いている。このうち、高効率機器の普及については各機器の導入台数が実数で見積られているのに対して、住宅の省エネ化については新築住宅数と既存住宅数のそれぞれの量に対する省エネ基準への適合割合が示される程度に留まり、実数としてどれだけの住宅が新築および改修されるのかははっきりと示されていない。

翻って国内の住宅事情を鑑みると、現時点で既に「家余り」の状態にあることや、今後長期にわたって人口減少が続くと予想されていることから、従来と同じペースで新築住宅が市場へ供給され続けるとは考えにくい。新築住宅の供給量が削減目標に対して不足する場合は代替案として既存住宅の改修量を増やして補うことが考えられる。このとき、どれだけの既存住宅を改修の対象とする必要があるかに応じて政策支援のあり方やその妥当性の評価が変わってくる。

これまでにも、住宅の断熱改修による二酸化炭素排出削減量を推定する研究はなされてきた。国レベルの推定は伊香賀[1)]によって、単一の自治体レベルでは安田ら[2)]によって福岡市、西川ら[3)]によって秋田県の推定が行われている。しかしながら、全国一律の計算では膨大に存在する既存住宅のなかから改修を進めるべき対象住宅を絞り込むには情報が十分でなく、気候条件や将来世帯数といった地域差を無視した推計では各地の二酸化炭素排出削減ポテンシャルを正確に推計することが困難となってしまう。他方、単一の自治体の推計結果では、地域によって異なる人口動態などの地域ごとの特徴をふまえて、全国あるいは地方ごとにどのような施策を講じるべきかの情報は得られないという問題がある。また、全国の自治体単位での推計の基礎となる既存ストック量の算定方法は発表されていない。政策効果の推計・評価という点でいえば、国土交通省による住宅省エネ改修補助に加えて各地の市町村で独自の住宅省エネ改修補助が行われているが、政策の評価に必要な市町村レベルでのストック量算定が十分に行われていないという問題がある。

そこで本研究では断熱改修による自治体別の二酸化炭素排出量の削減効果を推定することを最終目的とし、本稿では、市町村別の既存住宅ストック量と今後発生する新築住宅数を全国レベルで推定する方法、ならびに、地域ごとに異なる断熱性能を仮定したうえで市町村別の冷暖房由来の二酸化炭素排出量を推定する手法を提案する。

2. 方法とデータ

基本的に、公開されている統計データを利用して計算を行なうこととした。

まず、市町村別の住宅着工統計[4)]から各年度の建築種（集合/戸建）別の新築戸数を求め、設定した住宅の平均寿命（集合 60 年、戸建 30 年）から毎年一定割合で除却が行われると仮定して現在および将来の築年数別住宅戸数を(1),(2)式で推計する。将来の新築戸数は、社人研による将来世帯数[5)]と推計した既存ストックの住宅戸数の差分とした。

次に、住宅の断熱性能については、建築物省エネ法にもとづく断熱性能基準および建築物省エネルギー性能表示制度[6)]を利用し、各市町村内の新築時の断熱性能基準を満たす住宅の割合は、都道府県別の基準適合率[7)]をそのまま用いる。基準を満たさない新築住宅は無断熱であると仮定した。将来の断熱性能については、3.で述べるように複数の政策シナリオを設定した。住宅の改修は建物平均寿命の 1/2 の時点で行うものとし、改修によって性能が現在の省エネ基準と同程度まで改善する仮定を基本とした。

住宅一戸あたりの冷暖房由来二酸化炭素排出量については、今回は旧省エネルギー基準 IV 地域における

代表値[8] を用いて、(3)式より算出する

$$a_{d\ n} = p_{d\ n} - \left\{\sum_i^n a_{d\ i} - \sum_{k=1}^{i}\left(a_{d\ i-k} \cdot f_{d(k)}\right)\right\} \quad (1)$$

$$a_{m\ n} = p_{m\ n} - \left\{\sum_i^n a_{m\ i} - \sum_{k=1}^{i}\left(a_{d\ i-k} \cdot f_{d(k)}\right)\right\} \quad (2)$$

ここで、

$a_{d\ n}$：n年度における一戸建て新築住宅戸数

$a_{m\ n}$：n年度における集合住宅新築戸数

$p_{d\ n}$：n年度における一戸建て居住世帯数

$p_{m\ n}$：n年度における集合住宅居住世帯数

$f_{d\ (k)}$：一戸建てが新築からk年後に取り壊される確率

$f_{m\ (k)}$: 集合住宅が新築からk年後に取り壊される確率

$$b_{d\ n} = \sum\ \ a_{d\ n} \cdot \left\{s_n r_n + s'_{\ n}(1 - r_n)\right\} \quad (3)$$

ここで、

$b_{d\ n}$: n年度での一戸建ての冷暖房由来二酸化炭素排出量

s_n: n年度での基準を満たした住宅の排出量

$s'_{\ n}$: n年度での基準を満たさない住宅の排出量

r_n ：n年度での新築住宅の基準適合率

3. シナリオ

省エネ改修の内容により削減効果は様々であるため、回収による省エネ効果の値を複数設定する。また、将来の新築住宅について、現行の省エネ基準程度から建築物省エネルギー性能表示制度における等級を参考に現状よりも省エネルギー化が進んだ場合のシナリオを複数設定する。

4. 結果とまとめ

本稿では、多数の自治体を対象とした計算方法を示した。推計結果については、当日の発表にて報告する。

現時点ではいくつかの仮定を置いたが、今後統計データ等からより現実的と考えられる値を用いて計算することで、削減ポテンシャルの地域差を明らかにする予定である。将来の住宅需要が大きいにも関わらず断熱性が低い住宅が多い地域に対して断熱改修への補助金を重点的に投入することができれば、住宅由来冷暖房エネルギー消費量のより高い削減効果を得ることができる可能性が示されると考えている。

今後の課題として、ストック量推定に用いた市町村別住宅着工量に補足漏れがあることに加えて、断熱基準適合率は県レベルの分解能しか無いため、とくに人口の少ない自治体では実際と計算で乖離が生じる可能性がある点が挙げられる。住宅着工統計の誤差については、補正を行なって精度を高める予定である。

5. 引用文献

1) 伊香賀俊治: “住宅および事務所ビルにおける温暖化対策の 2050 年までの予測”, 地球環境 12(2), (2007), pp 191-199

2) 安田哲郎, 細木翼, 高口洋人, 渡辺敏行:”住宅の省エネルギー改修に関する研究その 4 省エネ改修による CO2 排出量削減効果”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 2006, D-2 分冊 pp.1270 -1273

3) 西川竜二, 佐々木優花: ”統計調査の公表データによる県別の建築年別の住宅ストックの将来推計およびその利用方法に関する研究 –秋田県における 2020 年までの住宅の省エネルギー化の推進に関する試算を例にして-”, 秋田大学教育文化学部研究紀要 自然科学 67, <http://hdl.handle.net/10295/1877, (2012), pp.11-16>

4) 総務省統計局: 住宅着工統計など

5) 国立社会保障・人口問題研究所: 市町村別将来推計人口、日本の世帯数の将来推計（都道府県別）,2013

6) 既存建築物省エネ化推進制度, 既存建築物省エネ化推進事業評価事務所, <http://hyoka-jimu.jp/kaishu/>

7) 小坂信二, 坂口敦子, 砂川雅彦, 小浦孝次, 鈴木大隆: “既存住宅の建築年次別ストックと断熱水準に関する推定”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 2011, D-2 分冊, pp.323-324

8) 国土交通省「低炭素社会に向けた住まいと住まい方推進会議」資料, < http://www.mlit.go.jp/common/000115968.pdf>

超高齢社会の進展が自治体のごみ処理システムにおよぼす環境的影響の評価-神戸市でのケーススタディ-

Environmental Evaluation of Municipal Solid Waste Management System Considering a Super-Aging Society: Case Study in Kobe City

○小田実紀*[1)]、蔡佩宜[1)]、田畑智博[1)]、片桐恵子[1)]
Minori Oda, Peii Tsai, Tomohiro Tabata, Keiko Katagiri
1) 神戸大学
* m.o.trommel@ gmail.com

1. はじめに

日本の高齢化率(全人口に占める 65 歳以上人口の割合)は、2015 年に 26.7%に達した[1)]。高齢化率が 21%を超えた社会を超高齢社会と呼ぶ。この定義に照らし合わせると、日本は 2007 年に、世界に先駆けて超高齢社会に入っている。

今後も高齢化率は上昇すると予想されるが、超高齢社会の進展は行政サービスなどに影響を及ぼすと予想される。その 1 つが、ごみ処理施策である[2)]。認知機能や体力が衰えることで、高齢者が煩雑なごみ分別などの日常行動が十分に行えないケースが指摘されている。例えば、神戸大学大学院人間発達環境学研究科[3)]が実施した調査では、50 歳以上の住民に対してごみ分別ができるかどうかを質問している。調査結果によると、75 歳以上の住民で分別ができないと回答している割合が急激に増加している。

本研究では、容器包装プラスチックごみ(以下、容リプラ)を対象として、高齢者がどれだけ資源ごみとして分別できているか(以下、分別率)を、年齢階級・生活様式(単身世帯・複数世帯等)を考慮して調査することを目的とする。また、将来の人口推計結果を用いて、将来のごみ分別率の推計を行うとともに、ごみ分別率の変化がごみ処理時の CO_2 排出に及ぼす影響を試算する。これにより、超高齢社会にふさわしい自治体のごみ処理施策のあり方を考察する。

2. 研究の方法

2.1 高齢者の分別に関するアンケート調査

田畑ら[4)]は、神戸市の 69 歳以下の住民(1,242 人)を対象として、容リプラの分別に関する Web アンケート調査を実施している。本稿では、高齢者と高齢者以外での分別率の違いを考察するため、同市に居住する 70 歳以上の住民を対象として調査を行った。

アンケート調査は 2016 年 6 月 14 日~同月 17 日の期間で実施した。調査方法は、個人情報保護の観点から個別郵送調査が困難であったため、Web アンケートで実施した。対象は神戸市および大阪市に居住する(1)70 歳以上の住民、(2)70 歳以上の同居者がいる 69 歳以下の住民である。回収サンプル数は 413((1)161 人、(2)252 人)である。(2)については、70 歳以上の同居者に依頼して、回答を入力してもらった。

アンケートの主な質問項目は、基本属性(年齢、性別、同居人数など)と本質問である。本質問は、①容リプラ 6 種類別に、可燃ごみ袋ではなく資源ごみ袋に入れているかどうか(「いつも入れる」から「全く入れない（可燃ごみに入れている）」までの 5 段階)、②容リプラ 6 種類別に、資源ごみ袋に入れる前に洗浄しているかどうか(「全ての汚れを洗い流す」から「洗浄しない」までの 3 段階)、③ごみ処理に関する情報認識(容リプラだと認識しているごみの種類)等である。調査では環境省[4)]に基づき、表 1 に示す 6 種類の容リプラに関して質問を行った。

2.2 分別率の算出

上記の調査結果をもとに、5 歳年齢階級別および生活様式別での容リプラ種類別の分別頻度を算出した。ここでは、本質問①に関する 5 段階の回答結果について、「いつも入れている」場合は 100%、「全く入れない」の場合は 0%というように、25%刻みの尺度に変換し、5 歳年齢階級別での平均値を算出した。また、容リプラ種類別の分別頻度に容リプラ種類別の組成割合を乗じ、分別率を算出した。また、5 歳年齢階級別での分別率の平均値を生活様式別（単身世帯・複数世帯）に算出した。

2.3 分別率の将来推計およびごみ処理への影響

国立社会保障・人口問題研究所(社人研)[6)]による 2020 年~2060 年の日本の将来推計人口(出生高位・死亡中位のデータを使用)と、2015 年の神戸市の世帯数から、2020 年~2060 年の神戸市の 5 歳年齢階級別の世帯数を推計した。その推計値に年齢階級別の分別率を乗じ、2020 年~2060 年の分別率を推計した。

表 1　対象とした容リプラの種類と組成割合[5)]

(1)パック・カップ・弁当容器	34%
(2)商品の袋・包装(アルミなし)	27%
(3)PET 以外のプラスチックボトル	17%
(4)販売店のレジ袋	9%
(5)複合アルミ箔	8%
(6)販売店の袋・包装	5%

続いて、将来の分別率の変化が、ごみ処理時の CO_2 排出量に与える影響を試算した。ここでは、分別率が高くなると可燃ごみに含まれている容リプラが分別収集されて、ごみ焼却量が減少すると考えた。分別率が低くなる場合は逆である。これを踏まえて、焼却量と資源選別量の変化に伴う CO_2 排出量を算出した。これを実施するため、2020 年~2060 年の容リプラの発生量を推計した。先ず、神戸市における 2014 年の容リプラ収集量と人口から、1 人 1 日当たりの容リプラ排出量を算出した。続いて、容リプラの排出量は将来変化しないと仮定し、社人研 [6]の人口推計データを用いて推計した 2020 年~2060 年の神戸市の人口と、1 人 1 日当たりの容リプラ排出量を乗じて推計した。

3. 結果および考察

3.1 年齢階級および生活様式と分別率との関係

図 1 に、回答者年齢階級別の容リプラ分別度合を示す。分別度合には 55～59 歳までは上昇傾向が、60～64 歳以上には下降傾向が見られた。また生活様式別では、70 歳以上の単身で住む回答者について、年齢階級の上昇とともに分別度合は低下した。この理由として、加齢にともなう身体の衰えや、同居者の目がないことで分別行動がおろそかになることが考えられる。

さらに、容リプラの洗浄度合いを年齢階級別にみると、洗浄しないと回答した住民の割合は年齢階級の上昇とともに増加した。これは洗浄が高齢者にとって身体的負担となり、加齢とともに実施されにくくなるためであると考えられる。

以上の結果からから、容リプラのリサイクルに必要とされる分別や洗浄は、高齢者にとっては困難を要することが見て取れる。

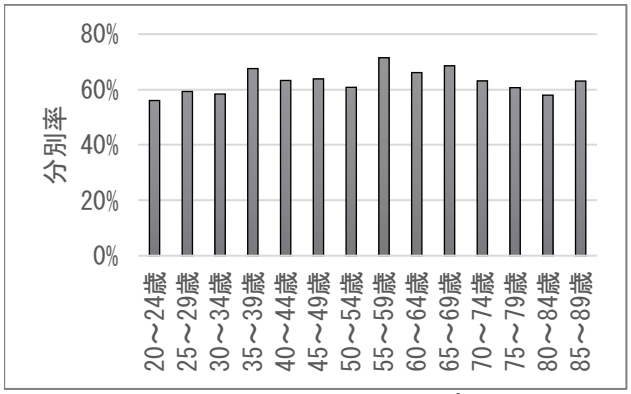


図 1　回答者年齢階級別でみた容リプラ分別度合

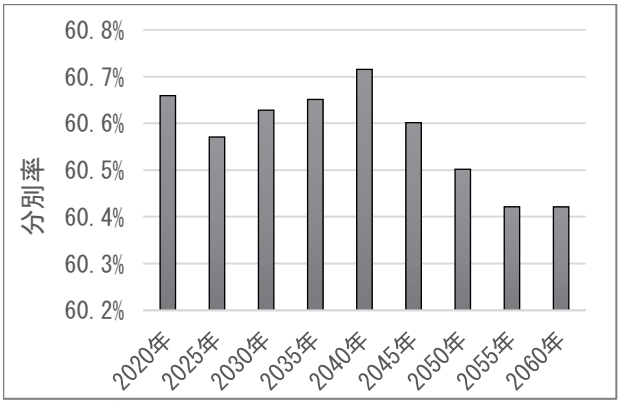


図 2　ごみ分別率の将来推計（2020 年～2060 年）

3.2 ごみ分別率の将来推計、ごみ処理への影響

図 2 に人口変化や世帯数変化を考慮した、将来のごみ分別率の試算結果を示す。分別率は 2040 年まではやや上昇する傾向が、2040 年以降はやや低下する傾向がみられた。これは 2035 年~40 年に、最も分別率の低い 80~84 歳の人口が一時的に減少するためであると考えられる。

2020 年~2060 年の容リプラの発生量は、2020 年の 8,757t が最大で、以降 5 年ごとに約 250t ずつ減少すると推計された。この理由として、神戸市の人口が 2020 年以降減少し続けると推計されたことが挙げられる。なお、紙面の都合上、容リプラの分別率の変化がごみ処理の CO_2 排出量に与える影響の分析結果は、研究発表会当日に報告する。

4. おわりに

本研究で得られた結果は、自治体が今後のごみ処理施策を定めるうえで参考になりうると考えられる。高齢化の進展がごみ処理に及ぼす影響を考慮し、高齢者への支援の人員を増やすなど、自治体が廃棄物管理と高齢者福祉の両方の視点を持ち、超高齢社会におけるごみ処理施策を行うことが望まれる。

謝辞

本研究の一部は環境研究総合推進費(3K143016)、三井住友海上福祉財団、JSPS 科研費(16K12687)の助成を受けて実施した。

引用文献

1) 内閣府 :“平成 28 年版高齢社会白書”, (2016), http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2016/zenbun/28pdf_index.html
2) 田畑智博, 小田実紀, 宮本一毅, 蔡 佩宜, 片桐恵子：超高齢社会に対応した廃棄物処理システムのあり方に関する考察, 日本 LCA 学会誌, (2016), Vol.12, No.4, pp.243-251
3) 神戸大学大学院人間発達環境学研究科 :“アクティブ・エイジング・プロジェクト縦断調査報告書～大学による介入プログラムの効果～”, (2015), pp.1-64
4) 田畑智博, 宮本一毅, 蔡 佩宜：年齢階級・生活様式を考慮した住民のごみ分別実施状況に関する考察, 第 11 回日本 LCA 学会研究発表会論文集,(2016), pp.364-365
5) 環境省：平成 25 年度容器包装廃棄物の使用・排出実態調査, (2015), http://www.env.go.jp/recycle/yoki/c_2_research/research_09.html
6) 社人研 :“日本の将来推計人口”, (2011), http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/newest04/sh2401top.html

低炭素型家庭ごみ処理システムの研究

Study of the low-carbon model household waste processing system

○出口 明日香[1)]、田中 浩二[2)]、稲葉 敦*[1)]
Asuka Deguchi, Koji Tanaka, Atsushi Inaba
1)工学院大学、2)e.s.feed 株式会社
* a-inaba@cc.kogakuin.ac.jp

1. 諸言

年々高齢者の人口は上昇し、現在の高齢化率は 25.1%[1)]に達している。近年、高齢化社会におけるごみ出し労働の軽減ができることからディスポーザーへの関心が高まっている。ディスポーザーとは、生ごみを粉砕し、水と一緒に排水管に投入する装置である。生ごみを含んだ排水が直接､下水管に排出されるものは、直投型ディスポーザーと呼ばれるが、これが普及すると、家庭からの可燃ごみの量が減少するだけでなく、下水処理場での生ごみ由来のエネルギー回収量の増加が期待できる。本研究では、直投型ディスポーザーとエネルギー回収を組み込んだ家庭ごみ処理システムについて、CO_2 排出量とコストの算定及び分析を目的とした。

2. 研究方法

本研究は下記の手順によって進めた。

①直投型ディスポーザーの設置を許可している自治体にヒアリング調査を行い、導入実態を把握する。

②既往の研究を参考にして、新たにデータ等を収集して、ディスポーザー普及率 0%と 100%のときの CO_2 排出量を算定する。

③ディスポーザー普及率 0%と 100%のときのコストを算定する。

④調査及び算定結果を基に、今後の低炭素家庭ごみ処理システムの在り方についての検討を行う。

3. 結果

3.1 ヒアリング調査

3.1.1 秦野市（人口：17 万人）

○許可目的：直投型ディスポーザーの普及が広まった場合、生ごみの収集運搬・処分費用を軽減できる。

○導入実績：公共施設 4 基、一般住宅 14 基

※（平成 27 年～平成 28 年の実績）

下水処理場の現状としては、一人当たりの下水量はピーク時に比べて 2/3 程度に減少しており、処理効率も高いため、処理能力に余裕がある。しかし、直投型ディスポーザーが普及すると､ごみ処理費用は減るが､下水処理費用は増えるということが課題である。

直投型ディスポーザーの取り付けには、55,000 円の補助金を出しているが、年間維持費用として 300 円を徴収している。設置者、使用者からは便利であると好意見が得られている。

3.1.2 伊勢崎市（人口：21 万人）

○許可目的：可燃ごみの減量を図るため

○導入実績：公共施設 68 基、一般住宅 184 基

※（平成 19 年～平成 28 年の実績）

直投型ディスポーザーについて本体+取り付け費用の 1/2（最大 24,000 円）の補助金があり、秦野市と違い、維持費用の徴収は行っていない。導入した住民からは好評であるが、一気に流れない、夏場は臭いが気になるという意見もある。

伊勢崎市の下水処理場ではバイオマス発電を行っており、余剰ガスを有効利用してマイクロガスタービンによるバイオマス発電設備を運用している。しかしメンテナンスコストが高いことが課題である。

3.2 CO_2 排出量算定

本研究では、家庭（150 戸の集合住宅）から出る可燃ごみ（紙類、プラスチック類、生ごみ）と排水を処理する方法について 2 つのシナリオを設定し、それぞれ CO_2 排出量を算定した。ケース①（図 1）を直投型ディスポーザー普及率 0%、ケース②（図 2）を普及率 100%のときとし､CO_2 排出量の算定項目とコストの算定項目を表 1 のように設定した。

図 1　ケース①のフロー

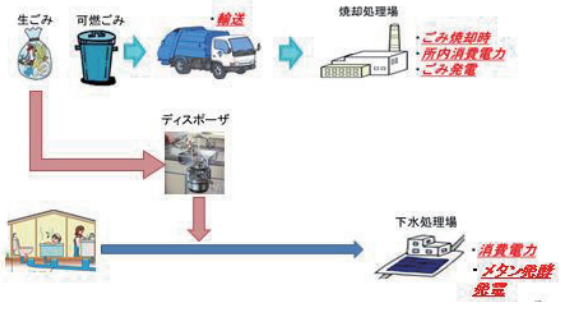


図 2　ケース②のフロー

表 1　CO_2 およびコストにおける算定項目

算定項目	CO2	コスト
(ⅰ)可燃ごみ輸送	○	○
(ⅱ)ごみ（プラスチックごみ）燃焼	○	
(ⅲ)焼却処理場	○	○
(ⅳ)助燃剤利用	○	
(ⅴ)ごみ発電による削減量	○	○
(ⅵ)ディスポーザー（水及び電力消費由来）	○	
(ⅶ)下水処理場	○	○
(ⅷ)下水処理場の汚泥処理	○	○
(ⅸ)下水処理場のメタン発酵発電による削減量	○	○

ごみ焼却においては、可燃ごみ中の生ごみ、紙ごみの燃焼による CO_2 排出量は、カーボンニュートラルの概念に基づきゼロとし、プラスチックごみの燃焼による CO_2 排出量のみを対象とした。また、ごみ発電における CO2 排出削減量は、可燃ごみの熱量をごみ種別毎に算定し、ごみ全体の熱量に発電効率（12.84%[2]）を乗じて求めた発電量と CO_2 排出量原単位 [3]より算定した。直投型ディスポーザーの CO2 排出量は、直投型ディスポーザーの消費電力量、水使用量（平均使用水量 5[L/（人・日）][4] とした）と CO_2 排出量原単位 [3]より算定した算定した。ケース①とケース②の算定結果を表 2 に示す。

表 2　家庭ごみ処理における CO_2 排出量

算定項目	CO2排出量 [t-CO2/（年・150戸）]	
	ケース①	ケース②
(ⅰ)可燃ごみ輸送のCO2排出量	0.90	0.55
(ⅱ)ごみ（プラスチックごみ）燃焼のCO2排出量	19.88	19.88
(ⅲ)焼却処理場の電力消費によるCO2排出量	7.13	4.33
(ⅳ)助燃剤利用のCO2排出量	0.18	0
(ⅴ)ごみ発電によるCO2排出削減量	−14.38	−13.32
(ⅵ)ディスポーザのCO2排出量（水及び電力消費由来）	0	1.21
(ⅶ)下水処理場の電力消費によるCO2排出量	20.33	20.58
(ⅷ)下水処理場の汚泥処理におけるCO2排出量	32.80	33.49
(ⅸ)下水処理場のメタン発酵発電におけるCO2排出削減量	−5.11	−5.82
合計	61.73	60.90

算定の結果、ケース①では 61.73[t-CO_2/（年・150 戸）]、ケース②では 60.90[t-CO_2/（年・150 戸）]となった。

3.3 コスト算定

ケース①とケース②についてランニングコストを算定した。コストの算定項目は表 1 に示した通りであり、ディスポーザーの購入費と維持費用は、一時的な支出のため算定外とした。

ケース①とケース②の算定結果を表 3 に示す。

算定の結果、ケース①では 8.89×10^6 [円/（年・150 戸）]、ケース②では 8.38×10^6 [円/（年・150 戸）]となった。

表 3　家庭ごみ処理におけるコスト

算定項目	コスト [円/（年・150戸）]	
	ケース①	ケース②
(ⅰ)可燃ごみ輸送のコスト	1.23×10^6	0.73×10^6
(ⅱ)可燃ごみ処理のコスト	0.60×10^6	0.36×10^6
(ⅲ)ごみ発電によるコスト削減量	-0.91×10^6	-0.84×10^6
(ⅳ)ディスポーザーのコスト（水及び電力消費由来）	0	0.17×10^6
(ⅴ)下水処理場の電力消費によるコスト	6.71×10^6	6.74×10^6
(ⅵ)下水処理場の汚泥処理におけるコスト	1.58×10^6	1.59×10^6
(ⅶ)下水処理場のメタン発酵発電におけるコスト削減量	-0.32×10^6	-0.37×10^6
合計	8.89×10^6	8.38×10^6

算定の結果、ケース①では 8.89×10^6 [円/（年・150 戸）]、ケース②では 8.38×10^6 [円/（年・150 戸）]となった。

4. まとめ

ヒアリング調査では、直投型ディスポーザーの導入によって、可燃ごみの量が減りごみ出しの回数が減るという意見も多いが、直投型ディスポーザーを使うと河川の水が汚染されるという認識を持った住民が多く、このことが普及の妨げになることが分かった。

家庭ごみ処理における CO_2 排出量及びコスト算定では、いずれもケース②（直投型ディスポーザーの普及率 100%）の方が低い結果となった。CO_2 排出量で普及の影響が大きかったのは、焼却処理場の電力消費分 2.8[t-CO_2/（年・150 戸）]で、生ごみが減ることで焼却処理場の負担が少なくなることが分かった。一方、直投型ディスポーザーの電力消費と水使用による増加分は 1.21[t-CO_2/（年・150 戸）]であった。コストについて削減効果が大きかったのは、輸送費の 0.5[円/（年・150 戸）]であり、次に処理費用の 0.24[円/（年・150 戸）]であった。

直投型ディスポーザーの普及によって得られるメタン発酵発電による電力回収の効果（CO_2 排出量及びコスト面）は、あまり大きくはなかった。平成 23 年度 B-DASH プロジェクトでメタウォーター株式会社が実証事業を行った超高効率固液分離 [5] のような高効率の回収を行える技術を用いればメタン発酵発電による効果がさらに期待できると考える。

5. 参考文献

1) 内閣府 平成 26 年版高齢社会白書
http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2014/zenbun/s1_1_1.html
2)環境省 日本の廃棄物処理（平成 26 年度版）p19
3) IDEA 原単位計算結果
4)国土交通省 ディスポーザー普及時の影響判定の考え方 p31
5) B-DASH プロジェクト - 下水処理研究室/国総研
www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/bdash.htm

都市規模やインフラ条件に応じて選択可能なエネルギー回収型廃棄物処理システムの評価フレームの構築

Development of evaluation framework for applicable energy recovery technology to waste treatment system in accordance with urban scale and infrastructure conditions

○田代颯馬*[1)]、松田雄太郎[1)]、中尾彰文[1)]、山本祐吾[1)]、吉田登[1)]、鶴巻峰夫[2)]
Soma Tashiro，Yutaro Matsuda，Akifumi Nakao，Yugo Yamamoto，Noboru Yoshida，Mineo Tsurumaki
1)和歌山大学、 2)和歌山工業高等専門学校
* s164021@center.wakayama-u.ac.jp

1. はじめに

2013 年度から 2017 年度を計画期間とした廃棄物処理施設整備計画[1)]では、地域の自主性および創意工夫を活かすことが基本理念のひとつとして掲げられている。例えば広域的な視野に立った廃棄物処理システムへと改善することや、施設整備の際には廃棄物系バイオマスの利活用により高効率な発電を実施することなどが示されており、低炭素社会に向けた省エネルギー化・創エネルギー化の取組に配慮した廃棄物処理システムへの転換が求められている。

一方、さまざまな廃棄物削減の取組みや今後の人口減少によって、市町村での一般廃棄物の発生量は将来的に減少すると見込まれている。エネルギー回収技術を導入するには、その運転に必要な廃棄物量を確保することが求められる。そのため、今後の施設整備においては、将来の廃棄物発生動向などを踏まえた廃棄物処理の広域化や、人口低密度地域ではし尿処理施設などとの連携も視野に入れた施設整備計画を検討する必要があるといえる。

そこで本研究では、都市規模や保有インフラの条件などを判断基準として、一般廃棄物処理システムに適用可能なエネルギー回収技術を診断・評価するフレームのプロトタイプを設計する。その上で、和歌山県を対象としたケーススタディを実施し、将来の人口減少下における技術選択や広域化計画の基本的な方向性を明らかにする。

2. 評価フレームの設計

先進事例や施設整備ガイドライン[2)、3)]をもとに、エネルギー回収型廃棄物処理の技術オプションとして蒸気タービン発電、バイオガス化技術を設定した。バイオガス化技術としては、防府市で導入されている厨芥類など（搬入される可燃ごみから選別された厨芥類と紙類）と下水・し尿汚泥の乾式メタン発酵、およびそこで回収したメタンガスで過熱した蒸気を用いた高効率廃棄物発電（以下、防府モデル）、南但広域行政事務組合で導入されている厨芥類などの乾式メタン発酵、およびそこで回収したメタンガスを用いたガス発電（以下、南但モデル）の 2 つを選択肢とした。

蒸気タービン発電を用いたエネルギー回収技術は、従来から可燃ごみの処理量が 100 [t/日]以上の処理場で導入されてきた。バイオガス化技術は、厨芥類などの処理量が 20 [t/日]以上の処理場で導入が進んでいる。さらに、乾式メタン発酵技術はバイオガス生成後に発生する消化液を処理する必要があるが、下水道への接続が可能な場合は処理水を下水道へ放流する防府モデル、そうでない場合はごみ焼却施設で処理水を混焼する南但モデルが適用可能であると判断できる。

以上の都市規模（ごみ処理量）、インフラ条件以外にも、補助金交付の成立要件を満たせるか否かを示す政策誘導への対応を診断の基準に選定し（表 1）、診断・評価フレームを構築した（図 1）。第 1 フェーズでは、廃棄物処理の事業主体（2013 年度時点）ごとに適用可能なエネルギー回収技術を診断する。ここで判断基準を満たして導入可能となる技術が選定されなかった事業主体に関しては、和歌山県の広域化計画によって区切られた 7 ブロックを参考に、広域化によって新たに構成可能な事業主体を想定して、第 2 フェーズで再び診断する枠組みとしている。

表 1　各処理システムの概要

項目	蒸気タービン発電	バイオガス化技術	
		防府モデル	南但モデル
ごみ処理量[t/日]	100 以上	150	43
メタン発酵槽投入量*[t/日]	-	43	30
下水道の必要性	無	有	無
未利用汚泥からのエネルギー回収	市町村の意思	有	無

*投入物は可燃ごみから選別された厨芥類と紙類

3. 評価フレームの和歌山県への適用

まず将来の人口変化を考慮し、和歌山県の市町村を対象に 2016 年度から 2030 年度までのごみ処理量[t/日]を推計した。次に、南但モデルの選別率を参考に、メタン発酵槽への厨芥類などの投入量[t/日]は、搬入される

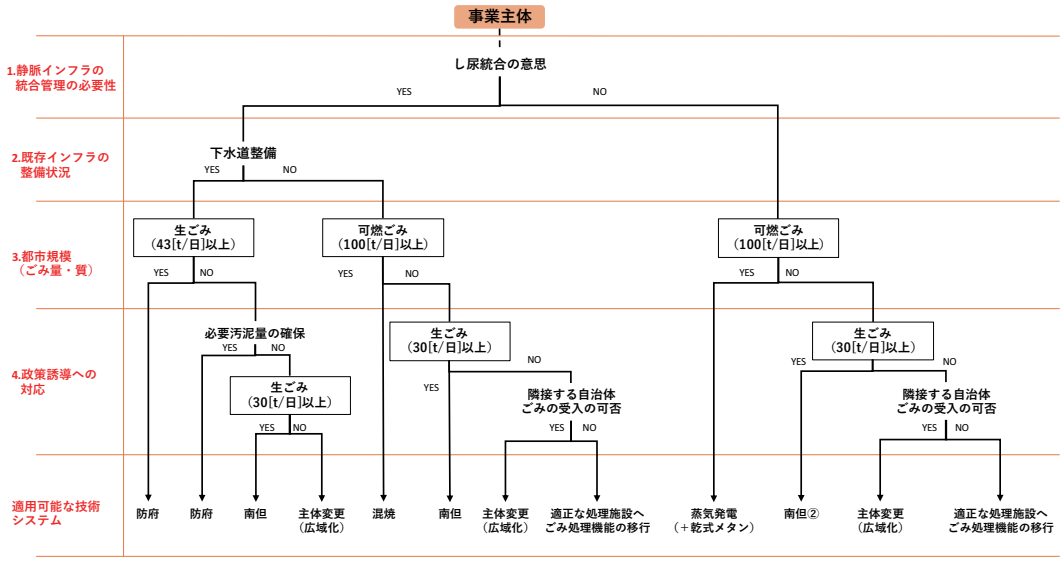


図１　エネルギー回収型廃棄物処理システムへの更新オプション

ごみ処理量[t/日]の 45.4%とした。その上で、構築した評価フレームを用いて、2030 年度時点で和歌山県の事業主体に適用可能な技術を診断した。第 1 フェーズと第 2 フェーズの各推計結果を表 2、表 3 に示す。

人口減少に伴い、すべての市町村でごみ処理量が減少する結果となった。第 1 フェーズでは、ごみ処理量 100[t/日]以上の規模は和歌山市のみである。そのほかの市町村はメタン発酵槽投入量 30[t/日]以下であり、これらの事業主体ではエネルギー回収技術適用が困難となる。

第 2 フェーズでは、和歌山市以外の市町村は広域化を実施する計画となっている。それぞれの値は、各ブロックを構成している市町村の、第 1 フェーズで推計した結果の総和である。推計結果から、和歌山市、海南・海草・那賀、田辺市では、蒸気タービン発電、またはし尿処理と統合を検討するのであれば防府モデルが適用可能である。新宮市周辺、橋本市周辺のブロックでは第 1 フェーズと同じく南但モデルが検討可能であるが、今後の人口減少を考慮した施設整備計画が重要となる。

表２　第１フェーズにおけるごみ処理量の推計結果

ごみ処理主体名	2030 年度 ごみ処理量 [t/日]	メタン発酵槽 投入量[t/日]
和歌山市	423	192
海南市	43	20
田辺市	59	27
新宮市	29	13
紀の川市	35	16
岩出市	57	26
みなべ町	8	4
白浜町	30	14
すさみ町	5	2
那智勝浦町	16	7
串本町古座川町衛生施設事務組合	15	7
御坊広域行政事務組合	54	25
上大中清掃施設組合	13	6
有田周辺広域圏事務組合	41	19
橋本周辺広域市町村圏組合	64	29
太地町	3	1

4. まとめ

先行事例の廃棄物処理システムから、エネルギー回収型廃棄物処理システムへの更新選択肢を診断するフレームワークを構築した。評価フレームを用いることで適当な処理システムの選択が可能となるため、広域化や汚泥の統合処理など、各市町村の戦略的な施設整備計画を支援できる。

参考文献

1) 環境省：“廃棄物処理施設整備計画　2013 年”，(オンライン)，< http://www.env.go.jp/press/files/jp/22341.pdf >，(参照 2016_12_14)
2) 株式会社東洋建設、株式会社日水コン：“平成 27 年度廃棄物系バイオマス利活用導入促進事業委託業務報告書”，(オンライン)，< http://www.env.go.jp/recycle/waste/biomass/introductionpromotion.html >，(参照 2016_12_15)
3) 環境省：“エネルギー回収型廃棄物処理施設整備マニュアル　2016 年改訂”，(オンライン)，<http://www.env.go.jp/recycle/misc/energy/hyoshi_h2803.pdf >，(参照 2016_12_15)

表３　第２フェーズにおけるごみ処理量の推計結果

ごみ処理主体名	2030 年度 ごみ処理量 [t/日]	メタン発酵槽 投入量[t/日]
海南・海草・那賀	135	61
田辺市周辺	115	52
新宮市周辺	62	28
御坊市周辺	54	25
有田市周辺	41	19
橋本周辺	64	29

Scenarios of Phosphorus Flow from Agriculture and Domestic Wastewater in Myanmar

○Cherry Myo Lwin [1)]*, Mari Murakami[1)], Kyaw Nyunt Maung[1)], Seiji Hashimoto[1)]

Ritsumeikan University
*cml-11@fc.ritsumei.ac.jp

1. INTRODUCTION

Phosphorus (P) fertilizer use for agricultural activities has increased to meet growing demands for feeding the world's growing population, which has also increased inflows of water containing phosphorous into the hydrosphere. Researchers around the world have conducted material or substance flow analyses of P on a global scale and individual country level for the past and current target timing [1][2][3]. Lwin et al.[4] also approached global P flow but Myanmar was not in their research scope. For this study target, agriculture and domestic wastewater from Myanmar during 2010–2100 was chosen for P flow analyses. The study has two objectives.

A. To estimate amount of P flow from agriculture and domestic wastewater

B. To estimate effects of efficient or less-efficient fertilizer use and sewage systems on the flow of P to the hydrosphere

2. METHODOLOGY

Figure 1 presents our P flow research scope. Flows and systems shown in dotted lines were excluded from our research: our system boundary includes P flow from agriculture (fertilizer and livestock manure) and domestic wastewater (excrement and gray water) for 2010–2100. Although the research is intended to be done for both parts, this abstract presents results only of P flows from livestock manure and domestic wastewater because of the lack of reliable data related to total amount of fertilizer usage by crops in Myanmar.

The P flows from livestock manure (PF_m) (tonnes/year) were calculated using equations (1)–(2).

$$PF_m = P_{ls} \times (1 - R_{ls}) \times R \quad \text{Eq. (1)}$$

$$P_{ls} = \sum_i (N_i \times P_{ANIMALi}) \quad \text{Eq. (2)}$$

In those equations, P_{ls} signifies the P flow from livestock manure (tonnes/year), R_{ls} denotes a ratio of P return to farm from livestock manure (–), R represents the ratio of outflow to water from farm (–), N_i stands for the number of livestock i (beef cattle, dairy cattle, pig, layer chicken, and broiler chicken unit in heads), and $P_{ANIMALi}$ represents the P content in manure of animal i per head(tonnes/head/year). The P

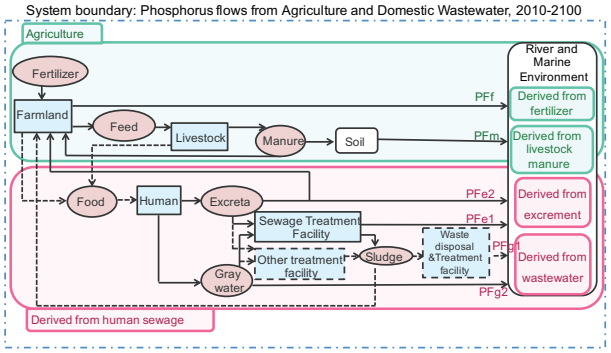


Figure 1. Simplified P flows from agriculture and domestic wastewater

flow from human excrement (PF_e) (tonnes/year) was estimated using equations (3)–(6).

$$P_e = Pop \times P_{person,e} \quad \text{Eq. (3)}$$

Therein, P_e is the P amount in excrement (tonnes/year), Pop denotes population (persons), $P_{person,e}$ signifies per-capita P contained in excrement (tonnes/person/year).

$$PF_{e1} = P_e \times SC \times (1 - PR) \quad \text{Eq. (4)}$$

In that equation, PF_{e1} represents P flow from excrement passing through sewer treatment facilities (STF) (tonnes/year), SC is the ratio of urban population with access to STF (–), and PR denotes the average P removal ratio in STF (–).

$$PF_{e2} = P_e \times (1 - R_e) \times (1 - SC) \quad \text{Eq. (5)}$$

In that equation, PF_{e2} stands for the P flow from excrement without passing through STF (tonnes/year), R_e is the ratio of P in excrement returned to farmland (–).

$$PF_e = PF_{e1} + PF_{e2} \quad \text{Eq. (6)}$$

The P flow from gray water (PF_g) (tonnes/year) was calculated using the following equations (7)–(10).

$$P_g = Pop \times P_{person,g} \quad \text{Eq. (7)}$$

Therein, $P_{person,g}$ denotes the per-capita P contained in domestic gray water (tonnes/person/year).

$$PF_{g1} = P_g \times SC \times (1 - PR) \quad \text{Eq. (8)}$$

In that equation, PF_{g1} represents the P flow from gray water passing through STF (tonnes/year).

$$PF_{g2} = P_g \times (1 - SC) \quad \text{Eq. (9)}$$

Therein, PF_{g2} is the P flow from gray water without passing through STF (tonnes/year).

$$PF_g = PF_{g1} + PF_{g2} \quad \text{Eq. (10)}$$

As one of the ultimate scenarios, how much P could be recovered from domestic wastewater system and reused as fertilizer was calculated using the following equation:

$$P_{rec} = (Pe + Pg) \times SC \times PR \qquad \text{Eq. (11)}$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

As shown in Figure 2, increasing trends are generally observed. A markedly increasing trend is especially apparent for P flow from livestock during 2010–2020. P flows from livestock in 2010 were 12 thousand tones, but it becomes a twofold increase by 2100. No great change was found in the P flow amount during 2040–2090; it is about 25 thousand tonnes. However, in overall study period (2010-2100), one might infer that, due to economic growth, livestock demand increased and consequently it results in gradual enlarged P flow from livestock manure to hydrosphere.

The P flows from domestic wastewater during the study period are almost 15–19 thousand tonnes. The result is overwhelmed by the P flow of direct discharge from human excreta. That is true because in Myanmar, only a small share of the urban population has access to STF and that the *SC* is expected to be 41% by 2100. Moreover, under our assumption related to per-capita GDP and *PR* in STF, the *PR* will be between 30% and 50% by 2100. As an overall trend, a gradual increase in P flow into the hydrosphere is observed in correlation with increased urban population.

If proper P recovery equipment was introduced in STFs, total 3,600 tones of P would be potentially recovered in 2010 as shown in Figure 3. That amount could be reached over 7,400 tonnes by 2100 according to the improved SC. The potential amount of P recovery is not too high because the major P flows to hydrosphere are from agriculture.

Still today, no hard data are available for fertilizer usage by crops in Myanmar. However, P flow from fertilizers is expected to be presented at the conference while configuring a comprehensive image of P flow from agriculture and domestic wastewater in Myanmar. The effects of efficient or less-efficient fertilizer use and sewage systems on the flow of P to the hydrosphere will be also discussed at the conference. Ultimately, this national research is expected to provide a core for the appraisal of P utilization and to facilitate determination of important objectives for sustainable P management for Myanmar.

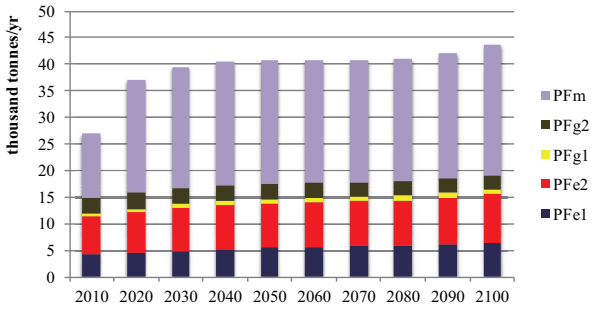


Figure 2. P flows from livestock and domestic wastewater in Myanmar.

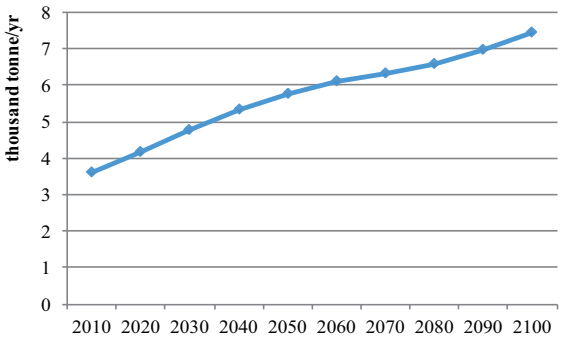


Figure 3. Amount of P recovery potential to be used as fertilizer

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Environment Research and Technology Development Fund (S-11-2) of the Ministry of the Environment, Japan, and the Ritsumeikan Global Innovation Research Organization (R-GIRO) Program.

REFERENCES

[1] Chen, M., Graedel, T.E.: A half-century of global phosphorus flows, stocks, production, consumption, recycling, and environmental impacts, Journal of Global Environmental Change, 36, pp.139-152, 2016.

[2] Cordell, D., Drangert, J.-O., White, S.: The story of phosphorus: Global food security and food for thought, Global Environmental Change, 19(2), pp.292-305, 2009.

[3] Ma, D., Hu, S., Chen, D., Li, Y.: The temporal evolution of anthropogenic phosphorus consumption in China and its environmental implications, Journal of Industrial Ecology, 17(4), pp.566-577, 2013.

[4] Lwin, C.M., Murakami, M., Tamura, K., Hashimoto, S.: Scenarios of global phosphorus flows from agriculture and domestic wastewater, International Conference of Eco Balance 2016: Responsible value chains for sustainability, Kyoto, Japan, 3-6 October, 2016.

南海トラフ巨大地震における災害廃棄物仮置場の検討

Examination of temporary storage space for disaster waste of Nankai Megathrust Earthquake

○水谷一平*[1)]、立尾浩一[2)]、橋本征二[3)]
Ippei Mizutani, Koichi Tachio, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学大学院、2) 日本環境衛生センター、3)立命館大学
*rv0032xx@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

東日本大震災は、主に東北地方に甚大な被害をもたらし、その災害廃棄物の処理に 3 年という時間を要した。しかし、近々発生するとされる南海トラフ巨大地震においては、最大で東日本大震災の約 11 倍に相当する量の災害廃棄物が発生すると推計されている[1)]。震災からの復旧・復興のためには、災害廃棄物の迅速な処理が求められるが、その第一歩が災害廃棄物を一時的に保管する仮置場の確保である。

仮置場については、水谷ら[2)]が、上町断層帯地震を対象として、大阪市において必要となる仮置場面積と、仮置場としての利用が考えられる公園面積を明らかにしている。また、荒井ら[3)]が、首都直下型地震を対象として、東京 23 区において必要となる仮置場面積と、公園や運動場を仮置場とした場合の受入可能量を検討している。しかしながら、南海トラフ巨大地震において必要となる仮置場面積及び、仮置場選定にあたっての留意事項[4)]を踏まえた仮置場として利用可能な面積についての検討は行われていない。

このようなことから、本研究では、①南海トラフ巨大地震が発生した際に必要となる仮置場面積、②仮置場選定にあたっての留意事項を踏まえた、仮置場として利用可能な面積を推計することで、処理計画の立案に貢献することを目的とする。本要旨では、大阪府と滋賀県の結果を報告する。

2. 方法

2.1 必要となる仮置場面積の推計

都道府県別の災害廃棄物発生量は、環境省[1)]による最大の推計値（津波堆積物を除く）に、中央防災会議[5)]が推計した都道府県別の災害廃棄物発生量の割合を乗じて推計した。また、東日本大震災における災害廃棄物の種類ごとの排出割合[6)]を用いて、種類別の発生量を推計した。本研究では、災害廃棄物の大半を占める、コンクリートがら、木くず、混合ごみ、可燃ごみを対象として仮置場の検討を行った。仮置場の必要面積は、以下の式[7)]を用いて推計した。なお、見かけ比重[8)]はコンクリートがら 1.1(t/m^3)、木くず、混合ごみ、可燃ごみ 0.4(t/m^3)、積上高さ[4)]は 5m、作業スペース割合[4)]は 1 とした。

必要面積(m^2)
＝集積量(t)÷見かけ比重(t/m^3)÷積上高さ(m)
×(1＋作業スペース割合)

集積量(t)＝災害廃棄物発生量(t)－1 年目処理量(t)

処理期間については、水谷ら[9)]が検討した 3 つのシナリオ（都道府県内処理、地方ブロック内広域処理、全国広域処理）の処理年数と、東日本大震災時の目標処理年数である 3 年を用いた。

2.2 仮置場として利用可能な面積の推計

仮置場選定の際の留意事項としては、

① 二次災害のある場所を避ける
② 自然保護区域を避ける
③ 十分な面積を有している
④ 住居等に隣接しない
⑤ ダンプトラックの往来が可能である

ことが挙げられるが[4)10)]、本研究ではデータの関係上、上記の①～④の条件を満たす仮置場を検討した。①②の条件に関しては、利用可能な仮置場として、都市公園、グラウンド（球場含む）、最終処分場跡地を取り上げ、これらの位置データと、土砂災害警戒区域、浸水想定区域、自然保護区域のデータを、GIS を使用し重ね合わせることで、利用に適している仮置場を抽出し、その合計面積を推計した。③の条件に関しては、2ha 以上の敷地とし[9)]、都市公園については敷地面積に 0.5 を乗じたものを用いた。④の条件に関しては、町丁目ごとの人口密度から判断した。人口密度(人/km^2)が、1000 以下、2000 以下、3000 以下、4000 以下の町丁目に該当する仮置場対象地を使用可能、また、全て使用可能とする場合の 5 つに区分し、それぞれの結果を推計した。

3. 結果と考察

本要旨では、近畿地方において災害廃棄物発生量が最も多い大阪府と最も少ない滋賀県を対象に推計を行った結果について報告する。

3.1 必要となる仮置場面積の推計

大阪府と滋賀県において、シナリオごとに必要となる仮置場面積を推計した結果を図 1、2 に示す。大阪府では最大で約 2300 万 m^2、滋賀県では最大で約 25 万㎡の仮置場が必要になると推計された。両府県における災害廃棄物量の発生量（それぞれ 5700 万 t、130 万 t）の差が如実

に表れた結果となっている。また、処理年数が短いシナリオになるほど、必要となる仮置場面積が減少する結果となった。これは、処理年数が短いほど 1 年目に処理される廃棄物量が多く、その分仮置場が不要となるためである。

3.2 仮置場として利用可能な面積の推計

大阪府と滋賀県において、人口密度区分ごとに利用可能な仮置場面積を推計した結果を図 3、4 に示す。大阪府では、全ての人口密度で利用可能とした場合でも約 1000 万 m^2 しか確保できず、全てのシナリオ（最小で約 1500 万 m^2 必要）で仮置場が不足する結果となった。一方、滋賀県では、人口密度を 1000 人/km^2 以下とした場合でも約 250 万 m^2 確保でき、全てのシナリオ（最大で 25 万 m^2 必要）で十分な面積の仮置場が供給できる結果となった。利用可能な面積は、大阪府の方が滋賀県より大きいが、災害廃棄物発生量に大きな差があるため、大阪府では仮置場が不足する結果となった。大阪府については、本研究で対象とした敷地以外の公有地の選定（大阪湾フェニックスや港湾等）や、私有地の事前確保も検討していく必要がある。広域処理を考えれば、港湾周辺の用地確保は非常に重要である。

参考文献

1) 環境省：巨大災害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) 水谷聡、阿部能也、貫上佳則：大阪市における建物ストックと災害廃棄物発生量の推定、第 23 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集、pp.189-190、2012
3) 荒井康裕、池田有斗、稲員とよの、小泉明、茂木敏、吉田慎太朗、飯野成憲：震災廃棄物の輸送計画に関するモデル分析―１次仮置場の制約条件に着目した検討―、土木学会論文集 G（環境）、71(6)、pp.263-271、2015
4) 廃棄物資源循環学会：災害廃棄物分別・処理実務マニュアル―東日本大震災を踏まえて、ぎょうせい、2012
5) 中央防災会議：南海トラフ巨大地震の被害想定について（第二次報告）、2012
6) 環境省：一般廃棄物処理実態調査結果、2011～2013
7) 和歌山県：震災時における市町村用廃棄物処理マニュアル、2005
8) 環境省：東日本大震災の経験を踏まえた災害廃棄物処理の技術的事項に関する概要報告書、2016
9) 水谷一平、梁田雄太、加用千裕、立尾浩一、橋本征二：南海トラフ巨大地震における災害廃棄物の広域処理と仮設処理施設の検討、環境システム計測制御学会誌、21(2/3)、pp.137-144、2016
10) 国立環境研究所：仮置場の設置と留意事項（第一報）、2011

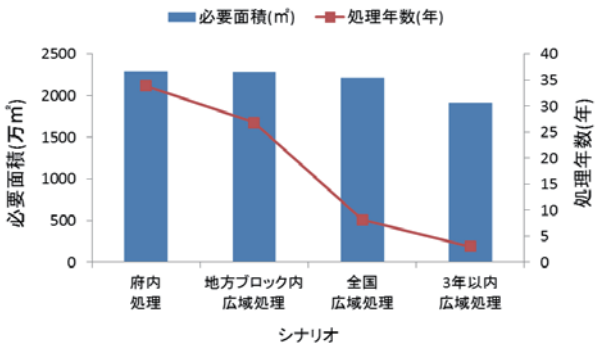


図 1　シナリオごとの処理年数と必要となる仮置場面積（大阪府）

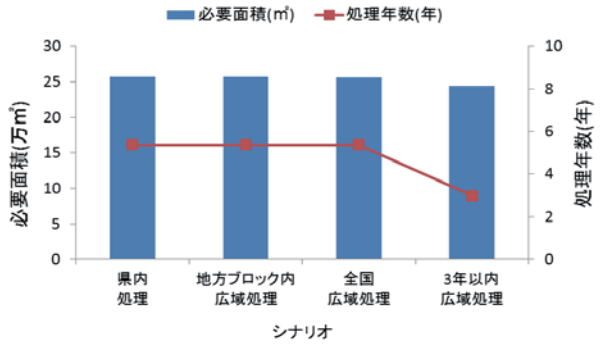


図 2　シナリオごとの処理年数と必要となる仮置場面積（滋賀県）

注）地方ブロック内広域処理シナリオ、全国広域処理シナリオにおいては、他府県の災害廃棄物を受け入れるため滋賀県の処理年数は長くなるが、これらの災害廃棄物は直接処理施設で受け入れるとして、県内処理シナリオと同じ処理年数がかかると仮定した。

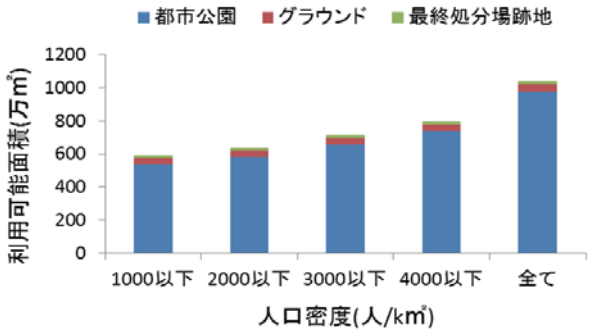


図 3　人口密度区分ごとに利用可能な仮置場面積（大阪府）

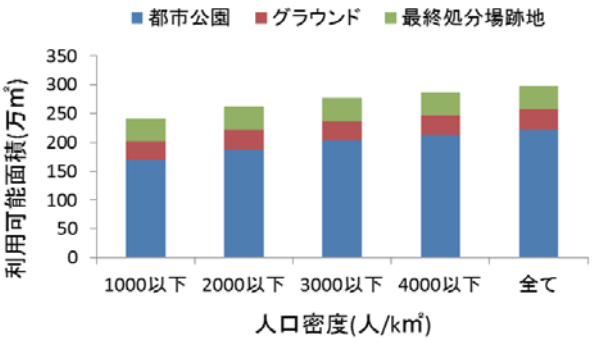


図 4　人口密度区分ごとに利用可能な仮置場面積（滋賀県）

トラックの車両重量別の LCA 研究

LCA study of difference in vehicle weight of truck

大井康寛 [1)]、冨岡佳祐 [1)]、○佐野慶一郎*[1)]、八木田浩史 [2)]、小杉信明 [3)]
Yasuhiro Ooi, Keisuke Tomioka, Keiichiro Sano, Hiroshi Yagita, Nobuaki Kosugi
1) 関東学院大学, 2) 日本工業大学、3) いすゞ自動車
* keisano@kanto-gakuin.ac.jp

1. はじめに

トラック（バスも含む）は、2014 年度に日本で約 1,497 千台／年が、世界で約 21,994 千台／年が生産され、そして、日本で 16,520 千台が、世界で 325,292 千台が保有されていた（2014 年末時点）と試算されている [1)]。

トラックは、乗用車と比較し、下記の特徴がある。

① 車体重量は重く、小型車から大型車まで幅広い。
② 小型車は短距離での、大型車は長距離での輸送に多く用いられる。両者の走行パターンは、異なり燃費に影響する。
③ 貨物や乗客の積載により、走行燃費が低下する。
④ 廃車に至るまでの走行距離が長く、メンテナンス部品の交換回数が多い。

世界で使用されている全自動車において、4 台のうち、3 台が乗用車で、1 台がトラック、バスと見積もられているが [1)]、上記のトラックの特徴を鑑みると、トラックは地球環境に与える負荷は予想以上に高い可能性がある。

本研究では、車両重量の異なる代表的なトラックのインベントリー分析を行い、車両製造と走行、メンテナンスの段階での CO2（二酸化炭素）の排出量を概算し、比較した。トラックの車両重量の違いによる環境負荷の変化、ならびに、小型車と大型車の適した使用条件について、結果と考察を報告する。

2. トラックの LCA 方法

表 1 に、トラックの小型車と大型車の比較を示す。小型車に比べ、大型車は車体が重く、燃費は悪いが、最大積載量が大きい。

表 1　トラックの小型車と大型車の比較

項　目	小型車	大型車	大型/小型
燃料　(ｴﾝｼﾞﾝ)	ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ	ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ	
車体重量 (相対比)	1.0	3.5	3.5 倍
最大積載量 (ton)	2.0	13.5	6.8 倍
重量モード車燃費(km/L)	10.7	4.2	1/2.5 倍

図 1 にトラック LCA の評価領域を示す。CO2 発生量の計算は、thinkstep(株)製の LCA ソフトウェア GaBi を用いた [2)]。表 2 に各材料の製造時における CO2 発生量原単位を示す。これら原単位は、GaBi データベースを引用した [2)]。なお、白金とセラミックス、窓ガラス用ウォッシャー液、バッテリー液については、含有成分を調べ、試算した。トラック 1 台の全部品（アルミカーゴなどの荷台は含まない）を 17 種の材料（表 2）に分類して、各材料の総重量から CO2 を求め、合算した。なお、ねじや樹脂クリップ、シール材等、小重量の部品は、車両重量の 3.5wt%未満となり、本 LCA 結果に含まれていない。環境影響が高いフロンガスと白金は、評価に含めた。

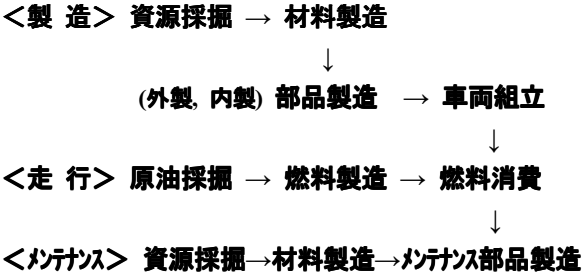


図 1　トラック LCA の評価領域

＜製造＞ トラック 1 台を製造するために必要となる資源採掘から材料製造、および部品製造（内製と外製での材料の加工や組立）まで、そして、全部品を用いた車両組立で生じる CO2 量を概算した。

＜走行＞ トラックは 48 万 km 走行して、廃車にすると仮定した。貨物の積載は、往路 (24 万 km) に最大積載量、復路（24 万 km）にゼロと仮定した。また、貨物を積載した往路の重量車モード燃費は、短距離輸送が多い小型車の場合、50%と大きく低減し、長距離輸送の多い大型車の場合、25%低減すると仮定した。なお、貨物積載ゼロとした復路の重量車モード燃費は、両トラックともに変動無しと仮定した。前記の条件にて、両トラックが 48 万 km 走行するために消費するディーゼル燃料量を計算した。両トラックが消費する燃料量について、原油採掘から日本への輸送、燃料製造、そして燃料消費（燃焼）までの CO2 発生量を概算した。

＜メンテナンス＞ 図 2 に 48 万 km 走行に対するメンテナンスの条件を示す。走行の中で、各メンテナンス部品（ﾀｲﾔ, ｴﾝｼﾞﾝｵｲﾙ, ﾊﾞｯﾃﾘｰ液）の交換回数を想定して、各材料の総重量から CO2 発生量を求め、合算した。

表 2　各材料の製造時における CO2 発生量原単位 [2)]

材 料	kg-CO2/kg	材 料	kg-CO2/kg
ﾌﾛﾝｶﾞｽ	13.1	鉛	1.70
ｱﾙﾐ合金	9.72	ガラス	1.12
白金	9.20 *	潤滑油	1.09
ｾﾗﾐｯｸｽ	5.41 *	不凍液	1.09
ｽﾃﾝﾚｽ鋼	4.48	ﾌﾟﾗｽﾁｯｸｽ	0.86
銅	3.60	ｳｫｯｼｬｰ液	0.63 *
鉄鋼	2.25	ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ燃料	0.44
鋳鉄	2.21	ﾊﾞｯﾃﾘｰ液	0.18 *
ゴム	1.85		

（資源採掘から部品製造までの CO2 発生量）* 試算値

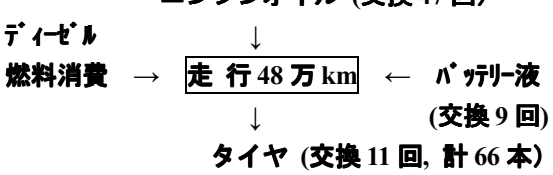


図 2　走行とメンテナンスの条件

3. トラックの LCA 結果

表 3 にトラックの LCA 結果を示す。各項目での環境負荷の大きさは、小型トラック製造時の総 CO2 排出量を 1.0 とした相対値で表わした。

＜製造＞ 大型車の製造時における環境負荷は、車体重量比と同じく、小型車の約 3.5 倍となった。

＜走行＞ 大型車の走行（燃料消費）による環境負荷は、車両重量比の 3.5 倍より小さく、小型車の約 2 倍程度と概算された。

＜メンテナンス＞ 大型車のメンテナンス 3 部品による総環境負荷は、走行（燃料消費量）と同じく小型車の約 2 倍程度と概算された。メンテナンスの環境負荷は、重量物のタイヤ交換が最も大きな割合（約 95%）を占めている。大型車のタイヤ（金属ホイールは含まない）は約 60kg/本と重い。また、走行の多いトラックにおいて、メンテナンスの総環境負荷は、トラック製造時よりも大きく、小型車では約 2 倍、大型車では約 1.2 倍と概算された。本結果より、リサイクルタイヤを用いるなど、メンテナンスの環境負荷を低減させることは、重要と考えられる。

大型車の総環境負荷（製造から走行、メンテナンスまで）は 86.2（相対値）で、小型車 41.0（相対値）の約 2 倍と概算された。また、両者の総環境負荷値を最大積載量で除して、貨物 1ton 毎の環境負荷を求めた。大型車の環境負荷は小型車の 1/3 と概算された。大量な貨物を長距離輸送する場合、小型よりも大型のトラックを使用する方が、環境負荷の抑制に有効であることが再確認された。なお、トラックの環境負荷は、小型車・大型車ともに、走行（燃料消費）で 91～92%を占め、次いで、メンテナンスで約 5%、製造で約 3%前後と試算された。化石燃料に起因する環境負荷の大きさが再確認された。

表 3　トラックの LCA 結果

評価項目		小型トラック（相対値）	大型トラック（相対値）	大型/小型（倍）
製造	トラック車両製造	1.0 (基準値)	3.5	3.5
走行	燃料消費 (48万km) *	33.2	69.1	2.1
	ディーゼル燃料製造	4.5	9.3	2.1
メンテナンス	タイヤ (交換11回/48万km, 計66本)	2.2	4.1	1.9
	バッテリー液 (交換9回/48万km)	0.006	0.009	1.5
	エンジンオイル (交換47回/48万km)	0.09	0.24	2.7
合 計		41.0	86.2	2.0
最大積載量		2.0 (ton)	13.5 (ton)	6.8
貨物1ton 毎のCO2排出量(相対値/ton/48万km)		20.5	6.4	1/3

*貨物の積載は、往路 (24万km) に最大積載量、復路にゼロと仮定、重量車モード燃費は、往路に50%に低減し、復路は100%と仮定した。

4. まとめ

本研究では、小型と大型のトラックについて、製造から走行、メンテナンスまでの LCA 比較結果を紹介した。今後、トラックの LCA に追加すべく、他のメンテナンス部品、廃車のリサイクル工程を精査する予定である。

5. 引用文献

1)　日本自動車工業会, 公開資料
http://www.jama.or.jp/world/world/index.html
2)　thinkstep(株), 公開資料
http://www.thinkstep.co.jp/gabi

地方自治体の森林管理方法の評価

Evaluation of forest management method by local government

○鶴田将貴、稲葉 敦*
Masaki Tsuruta, Atsushi Inaba
工学院大学
* a-inaba@cc.kogakuin.ac.jp

1. 諸言と研究目的

森林管理とは、森林の間伐などの作業を継続的に行うことである。木材生産や土砂災害等に強い森林を作るために、森林管理が必要とされている。しかし、森林を管理するためには、育林費用や人件費などの多額の費用が掛かる。そこで、本研究では、地方自治体の例として稲城市を取り上げ、森林管理の実態を調査し、今後の森林管理の方法を検討する事を目的とした。

2. 本研究方法

以下の手順によって進めた。

① 稲城市の森林の現地調査。
② 森林の管理のために、稲城市が取り組んでいる制度の調査。
③ 稲城市の森林の管理方法の調査。
④ 稲城市の森林管理の費用と収益の評価。
⑤ 森林の適正管理の提案。

3. 結果

3.1 稲城市の現地調査

図 1 に、稲城市の森林の現地調査の例を示した。2016 年 8 月 13 日に稲城市の若葉台公園で撮影したものである。

図 1　森林の現地調査

樹冠の影響で、根に日が当たらず根が出ていることが分かる。管理が行き届かないと、木々が上層部で縄張り争いを始め，それにより、地表に日が差込まなくなり、下層植生が衰退していき、枯れ木が増えてしまう結果になる。

3.2. 森林管理のために、稲城市が取り組んでいる制度の調査 [1)]

森林の適正管理のために、稲城市が取り組んでいる計画には 1999 年に策定された「緑の基本計画」がある。この中で、稲城市は森林の適正管理のために、次の制度を実施している。

(1) 公園など市民の屋外レクリエーションの需要に応えるための施設である公園や緑地を計画的に整備する施設緑地制度。
(2) 樹木や樹林の保全を図るために、法律や市の制度に基づき土地利用を一定に規制することによって保全を図る地域制緑地制度。
(3) 水と緑によるまちづくりを目指す都市緑化制度。

3.3 稲城市の森林の管理方法の調査

稲城市の森林の伐採方法として、単層林施業を採用して行われている。単層林施業の概念を図 2 に示した。

図 2　稲城市が行っている単層林施業

一斉に苗を植えて、成長したら一斉に伐る事である。

単層林施業の利点は、長期的な樹冠の維持による林地の裸地化の頻度の低下による水源涵養や土砂の流出防止等に係る公益的機能の向上がある。単層林施業の欠点は、主林木の投資資本回収が長く、その間の台風被害等のリスクが高まる可能性がある。

3.4. 稲城市の森林管理の費用と収益の評価

森林管理の費用と収益について、稲城市役所と多摩市役所で 2016 年 10 月~11 月にヒアリング調査を行った。森林の維持管理費用と整備費用を図 3 に示した。

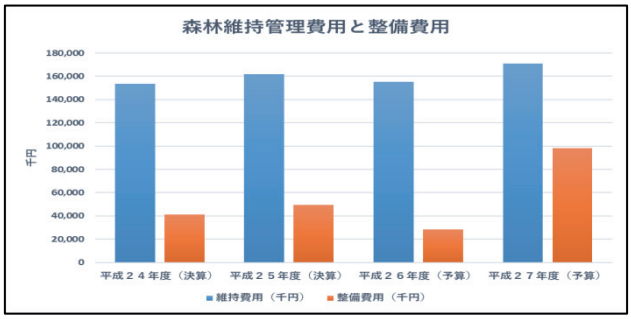


図 3　稲城市の森林維持管理費用と整備費用 [2)]

稲城市の森林の最適伐採周期を求める為に、式[1]のファウストマンの式を用いた。ファウストマンの式とは、植林から木材利用までのライフサイクルで得られる総利潤の現在価値を最大にする伐採周期を求めるも

のである。ただし、植林した森林は、雨や風などの影響によって破損されたり、流されたりする事は無いと仮定する。

$$\mathrm{Max(T)} = \frac{f(T)\times e^{-rT}-C}{1-e^{-rT}} \cdots [1]$$

ここで、T は伐採周期、f(T)は経常収入、e^{-rT}は割引率(r=0.05)を考慮した係数、C は植栽費用を示す。

稲城市の植栽費用を表 1 に示した。

表 1　稲城市の植栽費用 [3)]

	森林の植栽費用（千円）
平成24年度（決算）	62,922
平成25年度（決算）	62,196
平成26年度（予算）	62,000
平成27年度（予算）	62,000

稲城市の人工林は、約 6000 本あり、森林 1 本の平均の価格は 10.3 円である。その内訳を表 2 に示した。

表 2　稲城市の森林 1ha と 1 本の値段の内訳 [3)]

年数	1haあたりの値段	1本当たりの値段
15年生の人工林	約12万0000円	20.0円≒20円
20年生の人工林	約11万1000円	18.3円≒18円
30年生の人工林	約10万0000円	16.6円≒17円

式[1]の経常収入 f(T)を求めるために、表 2 を用いて、経常収入のグラフを作成した。経常収入は、図 4 のようになった。

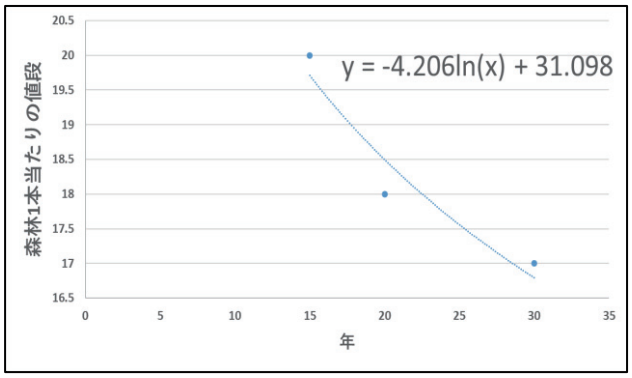


図 4　経常収入のグラフ

稲城市の植栽費用 C は 62000 円(今回は表 1 の平成 27 年度の値を用いる)、経常収入 f(T)は森林 1 本の平均の値段(円)×稲城市の人工林(本)×図 4 の対数近似で求められる。計算を行うと以下のようになった。

$$T = \frac{10(円)\times 6000(本)\times[-4.206\times \ln(x)+31.098]\times e^{-0.05T}-62000}{1-e^{-0.05T}}$$

T＝52.7≒53

ここでは、樹齢 53 年で、稲城市の人工林を伐採し、売る事が、木材から得られる利潤が最大になる事が算出された。

3.5. 森林の適正管理の提案

森林の適正管理の提案をするために、稲城市の緑の基本計画に記載されている緑被率を見直す事にする。

稲城市の緑被率を表 3 に示した。

表 3 稲城市の緑被率

	目標値	達成値
平成10年度	40．9%	53．2%
平成22年度	56．7%	50．0%
平成32年度	50．0%	—

稲城市の緑被率が減少した理由は、宅地化が進んでしまっている事と、稲城市の駅周辺の区画整理や南山東部地区の都市開発が原因である。これは、稲城市が行っている第 3 次稲城市長期計画 [4)]よるものである。これらの改善策として、2 つ述べる。

1 つ目は、稲城市全体として、今後も最低限「緑被率 50%を維持・確保」するべきである。この理由は、緑被率が 50%を下回ると稲城市民の「やすらぎ感」が低くなるからである [5)6)]。その為には、斜面緑地や谷戸地域にある景観を保全しながら自然の緑を確保する必要がある。

2 つ目は、現在行われている宅地開発等を止め、森林や河川の保全や管理、公園の創造や保全、街路樹や屋上など市街地のみどり化、農地の維持や育成などを実行することである。

平成 22 年度の緑被率の目標値は 56.7%と設定されたが、平成 10 年以降実態調査や計画の進捗状況が、きちんと把握されていないのが現状である。それは、第 3 次稲城市長期総合計画に記載されている駅周辺の土地区画整理事業や大幅な都市開発によって、駅周辺の約 40ha の森林が全て伐採されてしまい、稲城市のみどりが大幅に減少してしまったことが原因である。また、第 3 次稲城市長期計画は、平成 13 年度から平成 22 年度までの 10 年間の計画である。この問題を解決するためには、 5 年ごとに現況を調査し、進捗状況を含めて目標の達成に努める必要がある。

4. 本研究のまとめ

森林の適正管理について、稲城市が取り組んでいる制度に対する改善策の提案は、稲城市の緑の基本計画に記載されている緑被率の見直しを行うことである。そのためには、1 つ目は、緑被率 50%を「維持・確保」することと、2 つ目は、現在行われている宅地開発等を今すぐ止め、市街地のみどり化に意識を高めることが、今後の課題である。

5. 参考文献

1) 稲城市の緑の基本計画(2016 年 11 月 15 日参照)
2) 平成 27 年度版　東京都緑化白書 PART34
発行：東京都造園緑化業協会　委員長：松村　一
3) 多摩市役所と稲城市役所にヒアリング調査
4) 第 3 次稲城市長期総合計画(2016 年 12 月 19 日参照)
5) 自然とみどり分科会(2016 年 12 月 19 日確認)
https://www.city.inagi.tokyo.jp/shisei/keikaku_hokoku/keikaku/chokisogo/yonchou/kaigi/teigensyo.files/dai3.pdf
6) 品田 穣「都市の自然史」中央公論社（1974）

海外インベントリデータの簡易推計手法の構築

Development of simplified inventory-data estimation method

IDEA Ver.3 への反映

Implementation for IDEA Ver.3

○小林謙介*[1)2)]、中野裕貴[1)]、中井健士郎[1)]、藤井千陽[2)]、横田真輝[2)]、田原聖隆[2)]
Kensuke Kobayashi, Yuki Nakano, Kenshiro Nakai, Chiharu Hujii, Maki Yokota, Kiyotaka Tahara
1) 県立広島大学,　2) 産業技術総合研究所
* kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. はじめに

LCA の実施では、すべてのデータを自ら収集することが理想であるが、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は欠かすことができない。

わが国のインベントリデータベースは、IDEA Ver.2[1)]などが開発されている。これらは、主として国内の製品・サービスを対象としたものである。一方、我が国は輸出入が非常に多い国であり、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すことができない。海外のインベントリデータベースは先進国・新興国などで構築されてきているが、網羅的に整備されているものは無い。また、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、整備までには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、簡易的かつ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、世界平均データなどよりは地域事情が反映できる評価が可能になると考えられる。

これまで筆者らは、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)]。本報では、既報の手法を改善し、世界各国共通で推計可能な手法を提案するとともに、国別により精度高く推計するため、特に中国とタイを例として、手法の構築を行った。また、その結果をもとに、IDEA Ver.2 から、中国・タイの推計データベースを構築した。

2. 推計手法

2.1 基本的な考え方

本推計手法は、世界各国のデータを簡易的に推計することを目的としている。本検討では、①電力原単位、②発電効率・熱効率、③エネルギー構成比のデータ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（参考：図 1）。

2.2 推計のためのデータ

前節で示したデータの変換を行うにあって課題となるのが、①~③のためのデータの入手・整備の可能性である。これらのデータは、主として統計データを用いることを想定しており、(1)各国で共通して得られるデータを利用するケースと、(2)国によってはより詳細な分類で統計データが整備されており、それを利用するケースが考えられる。

(1) 各国で共通して得られるデータを利用した推計

①電力原単位は、IDEA Ver.2 の日本の電力原単位を各国の電力原単位に置き換えるため、各国の電力原単位を整備する必要がある。これは、IEA の Energy Statistics of OECD/non-OECD Countries[3)]の Part II にあるエネルギーバランス表から整備した。②発電効率・熱効率は、IEA の Energy Balances of OECD/non-OECD Countries[4)]の Part II から算出した。③のエネルギー構成比（総エネルギー消費量に占める石炭・石油・ガス等の割合）は、IDEA Ver.2 の各プロセスで消費されるエネルギー消費量の燃料種の構成比を対象国の構成比に置き換えた。このとき、IDEA Ver.2 の部門分類数は約 1700 であり、それぞれの部門に対して対象国のそれぞれの燃料構成比に置き換えることが望ましい。しかし、そこまで詳細な燃料構成データを有した統計はない。各国共通で入手できるデータには、IEA の Energy Statisitics of OECD/non-OECD Countries があるが、全体で 26 部門しかない。ここでは IDEA の 1700 部門を 26 部門のいずれかと対応させて、燃料構成比を置換えた。

(2) 各国で公表している統計データを利用した推計

前述の(1)③で示した通り、エネルギー構成比のデー

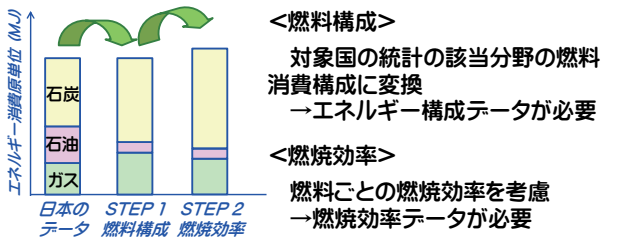


図1　推計手法の考え方

タは、部門数が非常に少ない。一方、各国の統計でより詳しい情報が得られることが少なくない。より詳しいデータが入手できれば、推計精度を高くできると予想される。そこで、本研究では、中国・タイを対象として、両国で公開されている統計データとそれに合わせた推計手法の構築を試みた。

(a) 中国の推計

中国のエネルギー統計には、国家統計局が公表する中国能源統計年鑑 [5]があるが、掲載されているデータの部門数は約 40 程度で、(1)で示した IEA の統計とそれほど大きく変わらない。一方、中国投入産出表 [6]は、日本の産業連関表に該当するもので、約 150 部門のマトリクスで構成されている。そこで、中国投入産出表の各部門へのエネルギー投入量を物量換算し、その部門のエネルギー構成比率を算出することとした。この際、石炭や石油等の燃料種ごとのエネルギー消費量は IEA の Energy Statisitics of non-OECD Countries の中国のデータを用い、それを各部門への投入金額で配分し、部門別のエネルギー構成比を算出した。

(b) タイの推計

タイは、エネルギー省が公表している Thailand Energy Situation[7]があるが、中国と同様に部門数が少ないのが実態である。一方、タイにも Input Output Table[8]があり、部門数は約 180 である。そこで、タイについても、Input Output Table を用いてエネルギー構成比を算出することとした。ただし、タイの場合は石油とガスが同じ部門で計上されており、石油とガスの構成比を算出することができない。本検討では、石油とガスの消費量が、石油が 67%、ガスが 33%であったため、各部門一律でこの比率を用いて配分した。これについては、今後、改善の余地がある。

3. 推計の限界

本検討は、簡易的な推計方法の構築を想定しており、電力原単位・燃料種ごとの構成比・エネルギー効率を変更することで対象国のインベントリデータを推計した。そのため、推計には限界がある。

日本と海外のデータを比較した際に、差異を生じさせると考えられる要因には、以下のようなものがあると考えられる。

・エネルギー構成
・エネルギー効率（機器効率）
・製造技術（○○法、△△法）
・機械化の状況
・要求機能・品質
　・水道（飲用可能・不可能など）
　・建築物（求められる機能が違う）
・地域環境（地域の気候・風土等）
　・農業・林業・水産業
・製造歩留り（製造時残さ発生率）
・法的整備の状況

エネルギー構成や効率以外の要素が大きく影響する製品やサービスについては、推計の質が著しく劣る可能性もある。例えば、農産品は、地域環境に大きく影響されるため、実態に合わないことも予想される。また、そもそも推計対象国では生産されていない作物があることも考えられる。その一方、日本では生産されておらず、対象国で生産が盛んなケースもある。このほか、建築物も気候・風土によって要求される機能が異なるほか、用いる材料も大きく異なるため、現段階での推計方法には限界がある。そのため、本推計データ利用には推計手法の限界を十分理解したうえで利用することが重要である。

4. まとめ

本検討では、IDEA Ver.2 を用いて、簡易かつ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。特に、中国とタイを対象として、その国で公開されている統計を用いた詳細な推計手法を検討した。また、本手法の限界についても考察を行った。これらを踏まえ、中国・タイの推計インベントリデータを構築した。

謝辞

本研究の成果の一部は、JSPS 科研費 16K06615 の助成を受けたものです。

参考文献

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/ >、（参照 2017-01-05）
2) 小林、田原ら : 海外インベントリデータの簡易推計手法の構築　-アジア数か国の推計データベースの構築と妥当性検証-、第 8 回日本 LCA 学会研究発表会、pp.90-91、2013.3
3) Energy Statistics of OECD/non-OECD Countries、International Energy Agency
4) Energy Balances of OECD/non-OECD Countries、International Energy Agency
5) 中国能源統計年鑑、中国国家統計局
6) 中国投入産出表、中国国家統計局国民経済核算司
7) Thailand Energy Situation、Ministry o Energy
8) Input-Output Table of Thailand、Office of the National Economic and Social Development Board

広島県内市町村における森林資源の利用状況と将来資源量の検討

県北部自治体におけるケーススタディー

Estimation on actual and future accumulation-amount of forest resources in Hiroshima Pref.
Case studies in northern-area municipality

○若林國久*[1)]、山本綾香[1)]、坂神慎一[1)]、小林謙介[1)]
Kunihisa Wakabayashi, Ayaka Yamamoto, Shinichi Sakagami, Kensuke Kobayashi
1) 県立広島大学
*k-wakaba@pu-hiroshima.ac.jp

1.はじめに

戦後植林したスギやヒノキが伐期を迎え、利用拡大が叫ばれる一方で、利用後の再造林は低迷している。資源の利用状況は国・県・市町村で異なる可能性がある。この場合、個々の自治体に則した資源管理が必要となるが、市町村レベルでの利用状況と将来資源量の検討例は殆どない。このため、本研究の目的を木材の持続的な利活用策の提案とし、人工林比率が4割強と低い(全国6割弱)広島県を例に、県内すべての市町村を対象に木材生産量や伐採後の造林量に基づく資源量の将来予測、生産業者への実態調査を行った。本報告では、広島県の林務関係行政資料[1)]やヒアリング[2)]などをもとに市町村(14市・9町)ごとに現状の木材伐採量と伐採後の造林量を明らかにした。さらに現状の伐採と造林を続けた場合の2100年(伐採2サイクル80年＋α)までの資源量(蓄積量)推計を行った。この推計結果と生産業者への実態調査をもとに木材資源の持続的利用のあり方を検討した。

2.木材資源の現状分析

分析対象は広島県全体の蓄積量の 9 割強を占める民有林とし、森林資源量(蓄積量)の将来推計に必要な現状の資源量と伐採量及び造林面積を調査した。資源量と伐採量(2014 年)は広島県林業課へのヒアリングで得た。齢級ごとの蓄積量を樹種ごとに合計し、資源量とした(図 1)。伐採事業所の所在地内の木材を伐採していると し、民間事業所と森林組合の合計を伐採量(図 2)とした。北部地区個人分のように複数の自治体がまとめられている場合や複数の自治体内を管轄する森林組合の場合は自治体ごとの民間事業所や森林組合の伐採量の比率で按分してそれぞれの自治体の伐採量に加算した。造林面積は広島県の林務関係行政資料の 5 年間(2011～2016 年)の平均値とした。伐採は県北部を中心に県全体の蓄積量の約 97%を占める 10 自治体(6 市 4 町)で行われている。造林(図 2)は、12 自治体(7 市 5 町)で行われているが、2 自治体は伐採後の造林が行われていない。

3.資源量の将来推計

現状の伐採量と造林量を続けた場合の 2100 年までの 8 齢級(造林後 40 年)以上の森林資源量推計 [3)]を行った。推計は人工林(人工林スギとヒノキの合計)と天然林(天然林針葉樹と天然林広葉樹の合計)について行った。蓄積量から伐採量を差し引いた値に成長量と造林量を加えた値を将来資源量(立木換算値)とした。なお、天然林伐採後は天然更新(伐採面積＝造林面積)とした。伐採有の 10 自治体(人工林)と伐採無の 13 自治体(人工林)の 2100 年までの資源量推計結果を図 3 および図 4 に、23 自治体の将来資源量を表した地図を図 5 に示す。伐採有の 10 自治体の資源量を見ると、3 自治体(図 5 の緑色)は 2045 年頃まで増加後、単調に減少し、2100 年の資源量は現状より 20～50%弱増加する。2 自治体(図 5 の灰色) は 2035～2040 年頃まで増加後、単調に減少し、

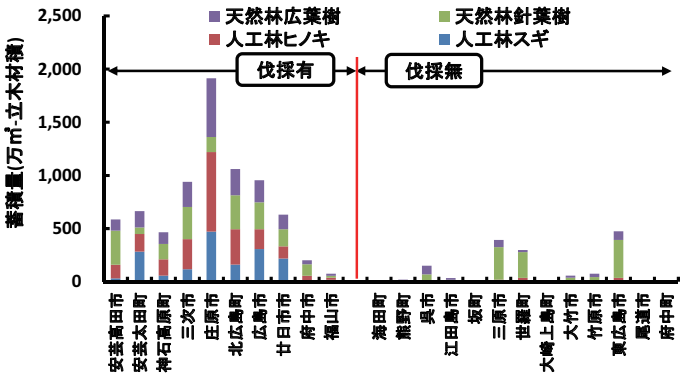


図1 広島県内自治体の資源量

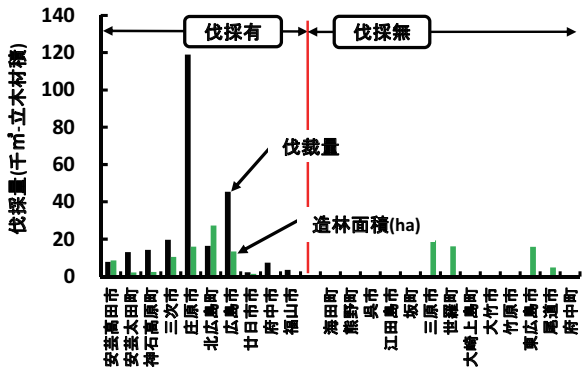


図2 広島県内自治体の伐採量と造林面積(人工林)

2100 年の資源量は概ね現状を維持(現状の±1 割以内)した。5 自治体(図 5 の黄色)は 2025～2035 年頃まで増加後、急激に減少し、2100 年の資源量は現状の 3 割～7 割弱になる結果となった。一方、伐採無の 13 自治体の資源量は今後緩やかに増加し続けた。天然林は概ね現状の資源量を維持し続ける結果(図 6)となった。現状に比べて資源量が急激に減少する 5 自治体は資源の枯渇を防ぐ施策を、また、2100 年の資源量が現状より増加、あるいは、現状維持の自治体でも 2100 年以後は単調に減少するのでこれを防ぐ施策(必要な資源量を決めて再造林や天然林の活用などにより維持する)が必要である。

4.実態調査

木材資源の持続的利用の視点での課題を捉えるため、県内の生産事業者(北部 3,西部 3,東部 1 施設)をヒアリングした(表 1)。地域固有の課題もあるが、価値向上と言った前向きな意見を備えており、これらの課題を踏まえて今後の皆伐の増加に対処する施策が重要である。

表 1 木材生産 7 施設ヒアリング結果

	植林促進上の意見
1. 植林適期	①今は間伐が主体(今後皆伐が増：各施設) ②植林は皆伐後(間伐 20～30 年後)
2. 作業性	①不在地主、所有者不明の解消(北・西部) ②飛び地、急傾斜地対策(北・西部)
3. 人材確保	①山の価値の認識向上(各施設) ②造林技術伝承(研修後の実践場：西部)
4. 価値向上施策	①所有者への還元アップ(各施設) ②付加価値を高める業者誘致(北・西部) ③スギ伐採後、ヒノキを植林(西部)

5.まとめ

本報告では、広島県を例に県内 23 自治体の伐採量と伐採後の造林量の現状を明らかにした。また、現状の伐採と造林を継続した場合の 2100 年までの資源量を試算し、伐採量が造林量を上回る 10 自治体では、いずれも、資源量が将来減少することを定量的に示した。また、自治体によっては急速に森林資源が減少する事態があり得ることを定量的に示した。さらに、木材生産施設への実態調査を通して持続的利用の課題を捉えることができた。持続的利用には使った量に見合う造林が必要であり、自治体の資源量の減少の程度や今後の皆伐の増加などの諸課題を踏まえ、伐採と造林を組合せるなどの林業施策が重要である。また、資源量が豊富な天然林 (天然更新するので造林負荷軽減、人工林の伐採量抑制) の活用も有効な施策と考えられる。

6.参考文献

1) 広島県農林水産局：林務関係行政資料(2014.7)
2) 広島県農林水産局：木材生産取り纏め表 (2015.8)
3) 若林ら：第 11 回日本 LCA 学会研究発表会 P2-77、2016.3

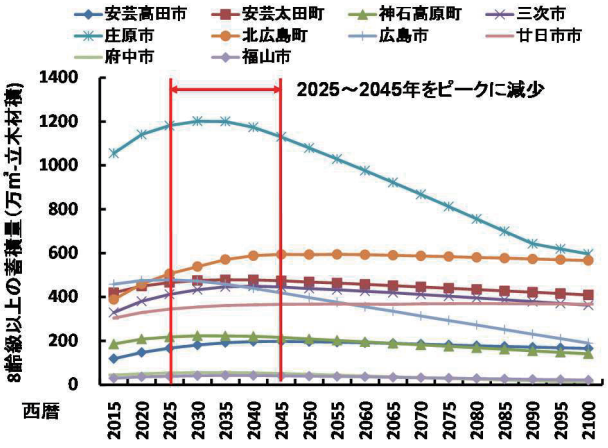


図3 広島県内自治体の人工林の将来資源量(伐採有)

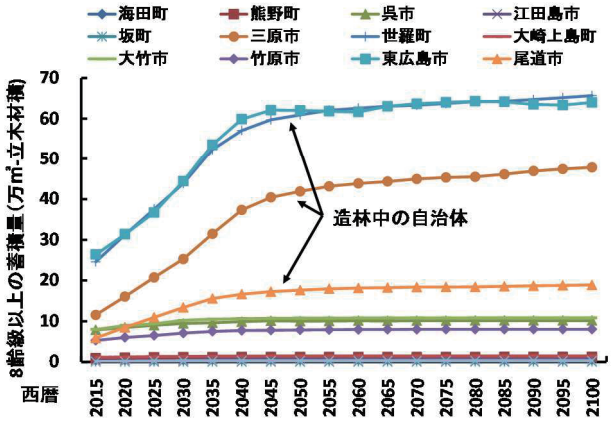


図4 広島県内自治体の人工林の将来資源量(伐採無)

図5 広島県内自治体の2100年の資源量(人工林)

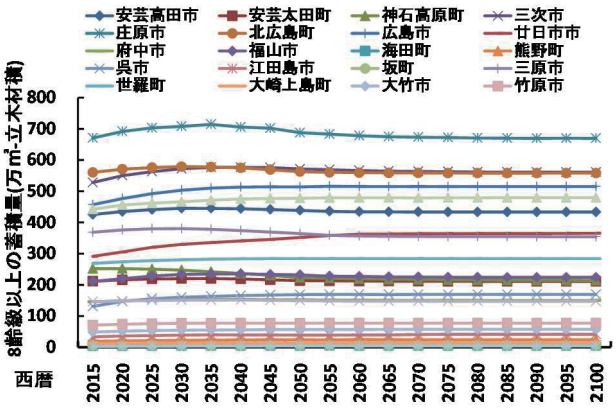


図6 広島県内自治体の将来資源量(天然林)

将来の木材需要を考慮した森林資源量の試算

Trial examination on accumulation-amount of forest resources based on future consumption

○山本綾香*[1)]、坂神槙一[1)]、若林國久[1)]、小林謙介[1)]
Ayaka Yamamoto, Shinichi Sakagami, Kunihisa Wakabayashi, Kensuke Kobayashi
1) 県立広島大学
* q306052jo@ed.pu-hiroshima.ac.jp, kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. はじめに

大量の森林資源が伐期を迎える中、木材の有効利活用が叫ばれている。利用しなければ、管理しきれなくなった森林が荒廃し、自然災害を起こす危険性がある。しかし、利用しすぎると木材資源が枯渇することも懸念される。このため、木材の生長期間（数十年）以上の長期的な視点での適切な管理が必要となる。

これまで森林資源のマテリアルフロー分析や LCA の研究[1)]は行われてきたが、伐採量に造林率を加味した 2100 年（伐採 2 サイクル 80 年+α）までの森林資源量（蓄積量）の推計は殆どない。そのような背景から、本研究では、国・県などのスケールで、長期的な視点での森林資源の持続可能性を評価する手法を構築した。具体的には造林率をパラメータとし、全国及び広島県で評価を行い、長期的な視点を踏まえた木材利活用策を提案した。また、自給率（総需要量に対する国内生産量・県内生産量の割合）も考慮した推計を行った。

2. 推計概要

2.1　伐採条件

本推計では、標準伐期齢を参考に、8 齢級以上を伐採可能とした。伐採量は、8～20 齢級以上の齢級ごとの蓄積量に比例配分し、8 齢級以上の蓄積量の合計が伐採量に満たない場合は伐採しないとした。

2.2　推計方法

森林資源の供給可能量の推計のため、既報の森林資源の将来予測の方法[2)]をもとに、造林率をパラメータとして検討を行った。対象樹種は人工林（スギ・ヒノキ・マツ類）とし、対象期間は 2015 年から 2100 年の今後 85 年間（標準伐期の 2 サイクル分）とした。

推計には 1～3 式を用いた。まず、初期値（2015 年）をベースとして、齢級ごと、樹種区分ごとに、蓄積量から伐採量を差し引き、造林量と成長量を加えて蓄積量の変化を算出した。短齢級の蓄積量のデータがないため、森林面積をベースに齢級別の面積あたりの材積を乗算して割り戻して蓄積量を算出した。

$$S_{n+1} = \sum_{m=8}^{20*} (A_{mn} \cdot k_{mn} - x_{mn} + y_{mn} \cdot k_{mn}) \cdots 1\text{ 式}$$

$$x_{mn} = Z_{mn} \cdot k_2 \cdots 2\text{ 式}$$

$$y_{mn} = B_{mn} \cdot k_4 \cdots 3\text{ 式}$$

S_{n+1}: n + 1 年の供給可能量（㎥）

A_{mn}: n 年の齢級 m の森林面積（ha）

k_{mn}: n 年の齢級 m の森林面積を材積量に換算する係数（㎥/ha）

x_{mn}: n 年に伐採した齢級 m の材積量（㎥）

y_{mn}: n 年に造林した齢級 m の材積量（ha）

Z_{mn}: n 年に齢級 m の森林から伐採した材積量（㎥-丸太材積）

k_2: 丸太材積を立木材積に換算する係数（1/0.9）

B_{mn}: n 年に伐採した齢級 m の森林面積（ha）

k_4: 造林率（造林面積と伐採面積の比）

*伐採対象を 8 齢級（造林後 40 年経過）以上としたためである。

2.3　想定したケース

本推計では、対象スケールは全国と広島県とした。造林率をパラメータとし、0%・現状（全国は 23%、広島県は 18%）・50%・100%に設定した。それに加えて現状の自給率が続くとした場合と国の目標値である自給率 50%が続くとした場合の 2 ケースで推計を行った。現状の自給率は、全国は森林林業白書より 28.6%、広島県は木材需給表より 15%とした。

3. 推計結果

3.1　全国

（1）自給率が現状の場合

図 1 に推計結果を示す。造林率が④100%の蓄積量は 2040 年まで増加し、その後減少して現状の 2 割強増で一定となった。一方、造林率が 100%以下の蓄積量は 2040 年まで増加するがその後は単調に減少した。2015 年から 2100 年にかけて造林率が①0%の場合は 1 割弱減少し、②現状の場合は微減、③50%の場合は 1 割弱増加する結果になった。

（2）自給率が 50%の場合

図 2 の様に、造林率が⑧100%の蓄積量は 2030 年まで増加し、その後減少して、現状と同値で一定となった。一方、造林率が 100%以下の蓄積量は 2030 年まで

表 1　ケーススタディ

条件		造林率							
		全国				広島県			
		0%	現状	50%	100%	0%	現状	50%	100%
自給率	現状	①	②	③	④	⑨	⑩	⑪	⑫
	50%	⑤	⑥	⑦	⑧	⑬	⑭	⑮	⑯

増加するがその後は単調に減少した。2015 年から 2100 年にかけて造林率が⑤0%の場合は 6 割弱、⑥現状の場合は 4 割強、⑦50%の場合は 3 割弱減少した。

3.2 広島県

（1）自給率が現状の場合

図 3 に結果を示す。造林率が⑫100%の蓄積量は 2035 年まで増加し、その後減少して 2100 年には現状の約 2 割弱増加した。一方、造林率が 100%以下の蓄積量は 2035 年まで増加するがその後は単調に減少した。2015 年から 2100 年にかけて造林率が⑨0%の場合は 2 割弱減少し、⑩現状の場合は 1 割弱、⑪50%の場合は微減する結果になった。

（2）自給率が 50%の場合

図 4 に結果を示す。全ての造林率で 2020 年まで増加するが、その後急減した。本条件では、森林資源が枯渇する可能性がある。造林率が⑬0%の場合は 2075 年に、⑭現状の場合 2080 年に、⑮50%の場合は 2090 年に蓄積量が伐採量を下回った。⑯100%の場合は 2015 年から 2100 年にかけて 5 割弱減少した。

4. まとめ

造林率をパラメータとした 2100 年までの森林資源蓄積量の推計を行った結果、2020～2040 年頃までは増加し、その後は減少する結果になった。2100 年にかけて造林率 100%の場合は横ばいになった。一方、造林率が下がるほど、自給率が上がるほど減少スピードは速くなることがわかった。短期的に見れば年間伐採量は十分確保できるが、長期的視点で捉えると現状の造林率のままでは森林資源の枯渇を招く事が危惧される。

また、全国平均と広島県では減少の度合いが異なることも定量的に明らかになった。今回の推計で全国と広島県の結果に差が生じた原因として、1ha 当たりの蓄積量のデータの違いや造林率の違いなどが影響していると考えられる。具体的には、全国に比べて広島県の方が 1ha 当たりの蓄積量が少ない。このように地域によって大きな差があるため、地域の特徴を考慮した上で、木材を有効に循環利用できるようなシステム作りをしていく必要がある。また、自給率を上げると蓄積量の減少が激しくなるため、造林を積極的に行う必要がある。今後は、木材資源の有効活用のために森林資源蓄積量をどの水準で維持するかを検討し、長期的な視点でマネジメントをしていくことが重要である。

5. 参考文献

1）小林謙介：建築における木質資源の利活用にかかわるマテリアルフローと LCA、木材学会誌 61 巻 3 号（60 周年記念号）、pp.111-116、2015.5

2）小林、若林：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、2016.02

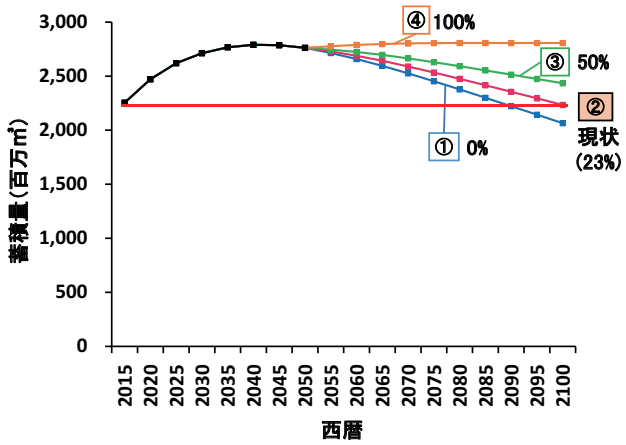


図 1　森林資源量（全国：自給率現状）

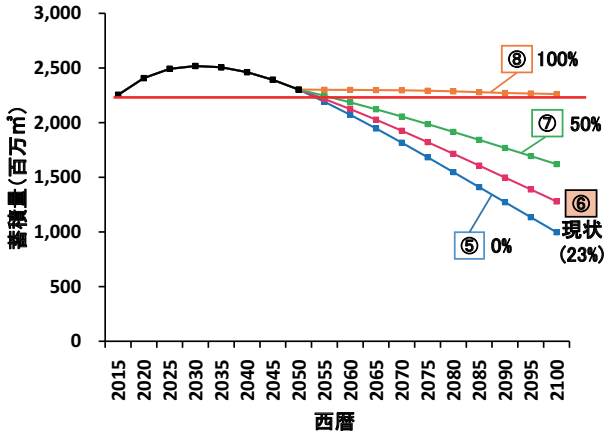


図 2　森林資源量（全国：自給率 50%）

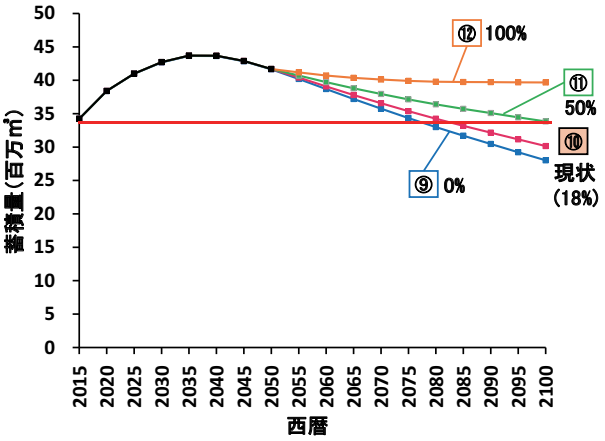


図 3　森林資源量（広島県：自給率現状）

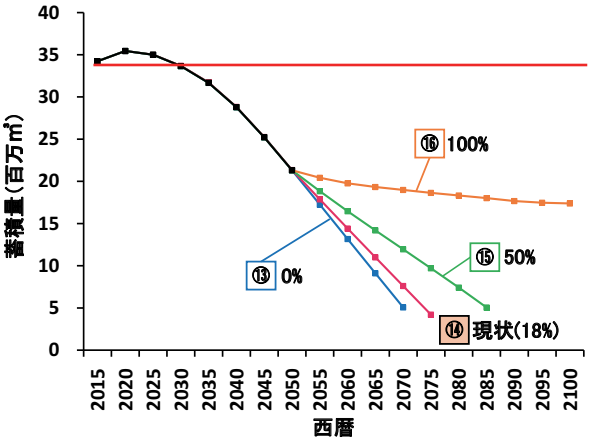


図 4　森林資源量（広島県：自給率 50%）

インベントリ分析における評価精度向上に関する検討

IDEA Ver.2 を用いた住宅における多様な環境負荷物質の誤差分析試算

Study on Improvement of Estimation Accuracy on Inventory Analysis
Trial calculation of an evaluation error on various environmental loads in housing

○恒川智美*1)、小林謙介 1)2)、田原聖隆 2)
Tomomi Tsunekawa, Kensuke Kobayashi, Kiyotaka Tahara
1) 県立広島大学, 2) 産業技術総合研究所
*1 q306035mw@ed.pu-hiroshima.ac.jp、kensuke@pu-hiroshima.ac.jp

1. はじめに

LCA 実施におけるインベントリ分析では、あらかじめ整備されたバックグラウンドデータの利用が一般的である。しかし、バックグラウンドデータの品質が十分に考慮されないまま、LCA が実施されると誤った結果解釈を招く恐れがある。

筆者らは、評価対象の投入資材データと連鎖するバックグラウンドデータの対象範囲の適合状況を判断する指標である「適合性」を提案し、不適合なバックグラウンドデータを用いることによって生じることによる誤差の評価手法を検討してきた [1)]。これまでの研究では、住宅 9 件の資材製造時と改修時を対象とした事例分析を行った。しかし、これまでの誤差分析は CO_2 排出量のみを対象としたものであり、多様な環境負荷物質を幅広く評価してはいなかった。

本研究では CO_2 排出量だけでなく、様々な環境負荷物質の誤差データベースを構築し、住宅の建築・改修時に使用される資材製造時の環境負荷の誤差分析を実施した。これらの結果から、特に影響が大きいバックグラウンドデータの項目を明らかにすることを目的とした。

2. 検討概要

2.1 概要

本検討では、はじめに、IDEA Ver.2[2)]を用いて、CO_2 排出量以外の環境負荷物質の誤差データベースの構築を行った。特に温室効果ガスなど、建築分野で関心の高い項目を中心に構築した。次に、構築した誤差データベースをもとに、事例住宅 9 件（木造戸建 6 件、S 造戸建 1 件、RC 造集合 1 件、木造集合 1 件）の建築・改修時に使用される資材の製造に伴う環境負荷排出量、バックグラウンドデータ利用時の誤差を分析した。

2.2 分析に使用したデータ

本検討で、評価に用いたバックグラウンドデータベースは IDEA Ver.2 である。また、誤差データベースの構築も、IDEA Ver.2 を用いた。

表1 事例住宅の概要

項目		住宅①	住宅②	住宅③	住宅④	住宅⑤	住宅⑥	住宅⑦	住宅⑧	住宅⑨
主要構造		木造戸建						S造戸建	RC造集合	木造集合
延床面積		164㎡	141.6㎡	184.4㎡	165.4㎡	175.6㎡	143㎡	119㎡	25622㎡	331.1㎡
資材データ数		121	112	112	103	112	212	156	260	333
主要投入資材	基礎	砕石・生コンクリート							生コンクリート 鉄筋	砕石 生コンク
	躯体	製材・合板						鉄骨 鋼板		製材 合板
	内外装	窯業系 サイディング 石こうボード	モルタル 石こうボード	合板 石こうボード			ガラス 石こうボード	石こう ボード	合板 造作材	合板 石こうボード
	設備	ユニットバス システムキッチン			システム キッチン ケーブル	ユニット バス システム キッチン	太陽光電池 パネル	ユニット バス システム キッチン	ケーブル 開閉器	ユニット バス システム キッチン

対象とした事例住宅は、表 1 に示す詳細な資材が把握できる実施設計段階を想定した資材データを用いた。なお資材データは使用箇所ごとに分類されていて、項目数が膨大なため、分析に影響のない範囲で部位ごとに集約した。なお、住宅寿命は 35 年と設定し、各資材の耐用年数は建築・設備維持保全推進協会の「建築躯体・部材・設備等の耐用年数調査」報告書 [3)] のデータを参考にした。

3. 誤差データベースの構築方法

既存の CO_2 誤差データベースに加えて、新たに CH_4、フロンなどをはじめとする、様々な環境負荷物質の誤差データベースを構築した。IDEA Ver.2 は細分類、詳細分類、個別データとより細かい分類になる階層構造を有している。適合性の判断をするデータは詳細分類であるため、誤差データベースは詳細分類に付属する個別データの分散をとることを基本とした。また誤差の算出においては、分類ごとに、生産額で重みづけして分散を算出した。

4. 事例住宅の誤差分析

4.1 適合性・誤差評価結果

事例住宅 9 軒を対象として、適合性評価で不適合と判断された項目に、構築した誤差データベースを用いて、誤差を算出した。ここでは各建築物・各温室効果ガスによる環境負荷の違いを検討した。一例として住宅別の CO_2 排出量、PFCs 排出量の結果を示す（図 1、2）。2 つの結果のみの例示ではあるが、環境負荷物質によって結果が大きく異なっているこ

とが見てとれる。

4.2 大きな誤差を生じさせる項目の特定

不適合となる資材の中で、特に環境負荷物質排出量・誤差共に大きいものの特定を試みた。図 3 に住宅①における CO_2 排出量の誤差の分析結果を例示すように、各建築物・環境負荷物質ごとに排出量または誤差の大きいものから順に並べ、各住宅で上位 20 項目に入ったものを抽出した。これらのうち、建築物 9 件中、5 件以上で抽出された項目を、特に大きな誤差をもたらし、優先的に改善すべきデータとして整理した。

温室効果ガス（6 ガス）の結果を表 3 に示す。特に設備であるシステムキッチン(木製流し台)・ユニットバス(強化プラスチック・浴槽)・ケーブル(通信ケーブル)・洋風便器(衛星陶器)等はいずれの環境負荷物質においても影響が大きいことが分かった。また N_2O ではアスファルトルーフィング(アスファルト塗工紙)、PFCs では天井扇(換気扇)や電灯類(白熱電灯器具等)、代替フロンでは塩ビ管(プラスチック硬質管)など、環境負荷物質によっても影響の大きくなる項目が異なることが分かった。

この様に、環境負荷物質を超えて大きな影響与える項目や特定の環境負荷物質で影響が大きくなる項目を優先的に改善することで、住宅分野での評価の精度向上が期待できる。

5.まとめ

バックグラウンドデータを利用して評価を実施した場合の、評価対象の投入資材データと連鎖するバックグラウンドデータの対象範囲が合致しないことによって生じる誤差の検討を行った。本報告では、CO_2 排出量以外の温暖化影響物質等について誤差データベースを構築した。また、構築したデータベースを用いて、住宅 9 件について、誤差を分析した。その結果をもとに、住宅の評価を想定した場合に優先的に改善すべきバックグラウンドデータの項目を明らかにすることができた。

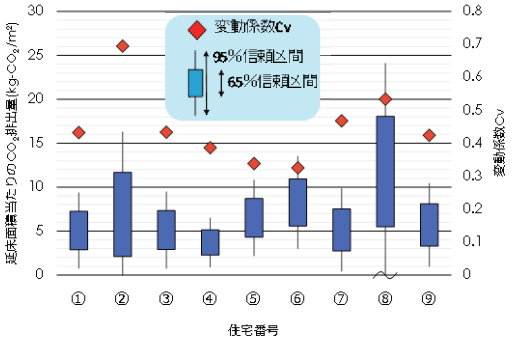


図1 住宅別PFCsの排出量と誤差

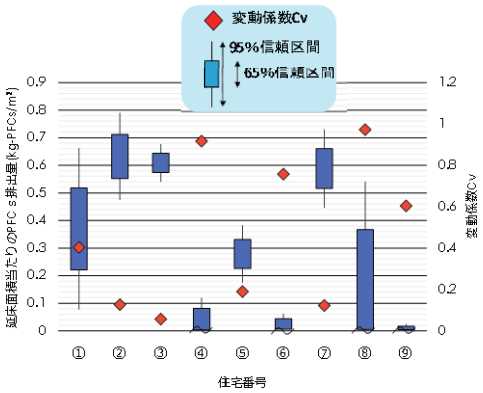


図2 住宅別CO_2の排出量と誤差

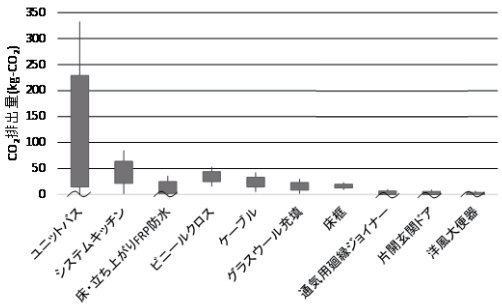


図3 影響の大きい項目の特定(例:住宅①)

表2 各環境負荷物質で特に影響が大きい項目

環境負荷物質	特に影響の大きい項目
CO_2・CH_4・SF_6	・ユニットバス(強化プラスチック製容器・浴槽・浄化槽) ・システムキッチン(木製流し台・調理台・ガス台) ・FRP防水(そのほかの強化プラスチック製品) ・ケーブル(通信ケーブル) ・洋風大便器(衛生陶器) ・ビニールクロス(プラスチックシート) ・タイル(その他タイル) ・床框・鴨居・長押・廻縁(造作材(建具を除く)) ・皇室塩化ビニル管(プラスチック硬質管)
N_2O	＜CO_2・CH_4・SF_6に記載の内容に加えて以下＞ ・アスファルトルーフィング等(アスファルト塗工紙)
PFCs	＜CO_2・CH_4・SF_6に記載の内容に加えて以下＞ ・天井扇、その他ファン(換気扇) ・住宅版(分電盤) ・サッシ(アルミニウム製サッシ、住宅用) ・勝手口灯・台所灯等(白熱電灯器具・直管蛍光灯器具) ・アルミ圧延製品(アルミニウム圧延品)
HFCs	＜CO_2・CH_4・SF_6に記載の内容に加えて以下＞ ・耐衝撃性塩ビ管(プラスチック硬質管) ・脱酸銅管(銅伸銅品)

参考文献

1)小林謙介ら：住宅建築時における投入資材の CO_2 排出量の評価においてバックグラウンドデータの利用によって生じる誤差　建築物の LCA における評価精度の検討、日本建築学会環境系論文集 No.718 pp.1163-1170、2015.12

2)田原聖隆ら：網羅性を考慮したインベントリデータベース（IDEA: Inventory Database for Environmental Analysis）の開発状況、第 5 回日本 LCA 学会研究発表会、2010.3

3)社団法人：「建築・設備維持保全推進協会：建築躯体・部材・設備等の耐用年数調査」報告書、1998 年 3 月、pp.55-63

近年の木材パルプの平均使用回数の推計

Estimation of average number of times of use of wood pulp in recent years

○肖瀚*[1)]、橋本征二[2)]

Xiao Han, Seiji Hashimoto

1) 立命館大学大学院、2) 立命館大学

* gr0236sv@ed.ritsumei.ac.jp

1. はじめに

紙の主原料である木材パルプは、植物繊維から製造する代表的な再生可能資源で、資源の循環利用という点でも大変優れた素材といえる。日本においては、近年古紙回収率が 80%程度となっており、古紙利用率も 60%を越える水準に達している。しかし、近年中国を中心とした紙需要の増加に伴う原材料の逼迫等の問題から、パルプの使用効率をさらに向上させることや、リサイクルの促進が求められている。

本研究では、日本における木材パルプの使用状態を定量的に評価するため、木材パルプが社会に投入されてから廃棄あるいは輸出されるまでの平均使用回数を推計した。これについては、山田ら[1)]が、マルコフ連鎖モデルを適用して、1988 年から 2003 年において平均使用回数が約 1 回増加したことを示している。ここでいう平均使用回数とは、パルプがある使用状態（新聞用紙、衛生用紙等）で存在した確率の和である。本研究では、山田ら[1)]の手法に基づき、近年（2003 年以降）の平均使用回数の変化について検討を行った。本要旨ではその推計方法のみ記載する。

2. 方法

2.1 木材パルプの状態分類

木材パルプからは各種の紙・板紙製品が生産され、それらが使用済みとなった後は、一部が古紙として回収され、一部が廃棄される。古紙は、その紙の種類や状態によって分類され、一部は海外に輸出されるが、多くは国内の製紙会社に製紙原料として購入され、一部は製紙以外の目的で利用される。

このようなフローを踏まえ、木材パルプの状態としては、山田ら[1)]の分類と同じく、木材パルプ、洋紙製品 5 種（新聞用紙、衛生用紙、工業用雑種紙、その他の晒系洋紙（印刷・情報用紙等）、その他の未晒系洋紙（未晒包装紙））、板紙製品 2 種（段ボール原紙、その他の板紙）、古紙 5 種（古新聞、晒系古紙（雑誌、模造・色上等）、未晒系古紙（茶模造）、古段ボール、古板紙）、製紙外利用（パルプモールド、建材等）、廃棄、輸出の 16 の状態を想定した（表 1）。

2.2 木材パルプの状態推移表の作成

上記の状態分類に基づき、パルプの状態推移表を作成した。この表は、各行に示す状態から各列に示す状態へ推移した木材パルプの量を示したものである。各行の推計方法[1)]は以下の通りである。

表 1　木材パルプの状態[1)]

1	木材パルプ	9	古新聞
2	新聞用紙	10	晒系古紙
3	衛生用紙	11	未晒系古紙
4	工業用雑種紙	12	古段ボール
5	その他の晒系洋紙	13	古板紙
6	その他の未晒系洋紙	14	製紙外利用
7	段ボール原紙	15	廃棄
8	その他の板紙	16	輸出

第 1 行（木材パルプ）は、木材パルプの各紙・板紙製品（2〜8）の原材料としての推移量を示すものとなる。各製品における木材パルプの消費量[2)]のデータを用いた。

第 2〜8 行（新聞用紙〜その他の板紙）は、各紙・板紙製品が各古紙（9〜13）として回収される量、廃棄（15）される量、及び輸出（16）される量を示すものとなる。古紙の回収量と輸出量は統計値[3)4)]、廃棄量は生産量[2)]と輸出量[4)]の差から 求めた。ここで、回収古紙の分類である古新聞（9）には新聞紙（2）とチラシ等の洋紙が混在していることから、チラシ等は晒系洋紙（5）であるとして、古新聞（9）への推移量を考慮している。山田ら[1)]と同様に、チラシ等の古新聞への混入率は 35%とした。また、衛生用紙と工業 用紙は、全量が廃棄されるものとしている。

第 9〜13 行（古新聞〜古板紙）は、回収された古紙の使途を示すものとなる。各古紙（9〜13）の各紙・板紙製品（2〜8）への推移量は、紙・板紙品種別古紙消費原単位[3)]に紙・板紙製品の生産量[2)]を乗じることで求めたが、こうして求めた古紙の推移量の合計は、統計上の古紙消費量[2)]と合致しないことから、統計値と合致するよう補正した。

第 14〜16 行（製紙外利用〜輸出）は、それぞれ最終状態であり、古紙としての回収もないと仮定して、全要素を 0 とした。

2.3 状態推移確率行列の作成と平均使用回数の推計

上記により作成した状態推移表の各成分を x_{ij}、その行和を X_i として、式 1 に示す a_{ij} を各要素に持つ状態推移確率行列 $\boldsymbol{A}$ を求めた。

a_{ij}=x_{ij}/X_i $(X_i \neq 0)$

$a_{ij} = 0$ $(X_i = 0)$ (式1)

ここで、状態推移確率は時間に依らず一定とすると、k 回の状態推移により状態 i から j に推移する確率は式2で計算される。右辺は行列 $\boldsymbol{A}$ を k 回乗じた $\boldsymbol{A}^k$ の ij 成分を表している。

$P_{ij}(k) = [A^k]_{ij}(j \notin W)$ (式2)

また、木材パルプが、ある初期状態 s から無限回の状態推移により、最終状態に推移するまでの間に、状態 u に存在した平均回数をN_{su}とすると、N_{su}は式3により計算される [1)]。

$$N_{su} = \lim_{n\to\infty} \sum_{k=0}^{n} P_{su}(k)$$
$$=[\lim_{n\to\infty} \sum_{k=0}^{n} A^k]_{su}$$
$$=[(I - A)^{-1}]_{su} \quad (式3)$$

ここで、$\boldsymbol{I}$ は単位行列、$(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})^{-1}$は、$(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})$行列の逆行列である。

木材パルプの平均使用回数を、製品中のパルプとして使用された回数すなわち洋紙製品 5 種、板紙製品 2 種および最終状態である製紙外利用の状態に存在する回数とし、これら計 8 つの状態の集合を U と定義すると、初期状態 s から無限回の推移により最終的に廃棄または輸出されるまでの国内での平均使用回数は式 4 により算出できる [1)]。

$t_s = \sum_{u\in U} N_{su}$ (式4)

なお、山田ら [1)]と同様に、輸出先の状態推移も日本と同じと仮定して、輸出先での使用も含めた平均使用回数の推計も行った。

3. おわりに

現在、2003 年以降の状態推移表の推計を進めており、近年の木材パルプの平均使用回数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、第 III 期環境経済の政策研究による成果である。ここに記して深謝する。

参考文献

1) 山田宏之、松野泰也、醍醐市朗、足立芳寛：マルコフ連鎖モデルを適用した木材パルプの平均使用回数解析、廃棄棄物学会論文誌、17(5)、pp.313-321、2006
2) 経済産業省：紙・パルプ・プラスチック・ゴム製品統計年報、2003～2013
3) 古紙再生促進センター：古紙ハンドブック、2003～2013
4) 財務省：貿易統計年報、2003～2013

京都産材を用いた木製治山ダムによる環境保全・地域活性化の効果検証

Effectiveness of promotion of erosion-control dam made of wood produced in Kyoto from the viewpoint of environmental conservation and community activation

○長井翔太朗*[1)]、橋本征二[1)]
Shotaro Nagai, Seiji Hashimoto
1) 立命館大学
* rv0021hr@ed.ritsumei.ac.jp

1　はじめに

地球温暖化防止、循環型社会形成、戦略的産業育成、農村漁村活性化等の観点から、2002 年に「バイオマス・ニッポン総合戦略」[1)]が閣議決定され、日本各地でバイオマスの利活用が進められてきた。しかしながら、バイオマス利活用に関する事業評価､政策評価は進んでおらず、バイオマス利活用が地域の産業育成や活性化に与えた影響については、必ずしも十分な検証がなされていない。これを受けて稲葉ら[2)]は、持続可能な社会を達成するためには「環境」「経済」「社会」のバランスを取ることが必要との考えに基づき、バイオマス利活用と環境保全・地域活性化の関係性を明らかにすることを目的とした研究を行っている。しかしながら、バイオマス利活用と環境保全・地域活性化の関係性に関する評価事例は未だ少なく、更なる事例の蓄積が求められている。

本研究では、京都における公共建築物を対象とした取り組みの一つとして木製治山ダムに着目し、京都産材を用いた木製治山ダム利活用による効果を環境・経済・社会の側面から検証した。

2　方法

2.1　評価対象ダムとシナリオ設定

平成 25 年に京都府綾部市に建設された木製治山ダムを対象とした。本ダムは、京都府下で生産・加工された間伐材を使用しており、ダムの体積は 86m^3、土砂抑止量は 185m^3 である。また、木材の地産地消による効果とコンクリートダムとの代替効果を検討するため、本研究では、以下の 4 つのシナリオを設定した。①地産材シナリオ：評価対象ダムと同様に、京都府下で生産・加工された間伐材を使用するシナリオ。②U ターン材シナリオ：京都府下で生産された間伐材を京都府外で加工したのち、京都府下で使用するシナリオ。③他産材シナリオ：京都府外で生産・加工された間伐材を使用するシナリオ。④コンクリートシナリオ：対象とした建設箇所に木製治山ダムではなくコンクリート製治山ダムを建設するシナリオ。なお、コンクリート製治山ダムについては、対象木製治山ダムと同じ機能を持ったものを設計し、比較対象とした。また、コンクリート製治山ダムの型枠に使用される木材には地産材を用いることとした。

2.2　環境面の評価手法

長井ら[3)]は木材製品のライフサイクル炭素収支評価の枠組みとして、森林の炭素ストック変化、木材製品の炭素ストック変化および化石燃料の使用等に伴う炭素排出を考慮した枠組みを提示している。本研究ではその枠組みを適用したライフサイクル炭素収支をシナリオごとに算定し、環境面の評価とした。

2.3　経済面の評価手法

地域産材利用による地域経済への影響に関する既存研究[4),5)]を参考に、対象ダムに使用した資材を調達することで府内に発生した生産誘発額を経済面の効果として評価した。算定に用いた産業連関表は、平成 17 年京都府産業連関表[6)]の 199 部門表である。使用資材量にそれぞれの製品単価をかけることで算出した購入者価格から、商業・運輸マージンを差し引いた生産者価格を需要額とした。なお、資材の販売・運搬は府内の企業によって行われ、商業・運輸マージンは府内でのみ発生する状況を想定した。ここで、商業・運輸マージンは日本の平成 17 年産業連関表の投入表（基本分類表）[7)]より求めた各マージン率を用いた。また、本研究における経済面の効果の算定範囲は、各資材需要額と商業・運輸マージン額の合計となる直接効果と、それにより府内で誘発する第一次間接効果、および第一次間接効果のうち消費に転換される額により府内で誘発する第二次間接効果とした。消費転換率は平成26年度家計調査年報[8)]の近畿地方を参考に 0.62 とした。また、算定に使用した投入係数表は、それぞれのシナリオにおける木材の自給状況に合うよう、素材および製材・チップ・合板部門に変更を加えたものである。

2.4　社会面の評価手法

地域活性化におけるひとつの重要項目である雇用者数を社会面の効果として評価した。経済面の評価で算定した各部門の生産誘発額に対して、各部門の雇用誘発原単位をかけ合わせることで雇用誘発数を算定した。雇用表は京都府のものでは部門数が合わなかったため、日本の平成17年産業連関表の雇用表[7)]を 199 部門に部門統合をしたものを用いた。

3　結果と考察

以下では、経済面と社会面の評価結果を報告する。

3.1　経済面の評価結果

直接効果、第一次間接効果および第二次間接効果をシナリオ別に比較したものを**図 1** に示す。木製治山ダムの総需要額は 291 万円、コンクリート製治山ダムの総需要額は 192 万円となった。同規模のダムであるにも関わらず総需要額に差が生じたのは、木材とコンクリートの製品単価の差によるものが大きい。地産材シナリオとコンクリートシナリオは、総需要額がそのまま直接効果となったが、U ターン材シナリオと他産材シナリオは、商業・運輸マージンのみが直接効果となった。そのため、U ターン材および他産材シナリオでは、発生した総需要額のうち、大部分が京都府外へ流出する結果となった。

また、林業部門で得られる第一次間接効果の額は、地産材シナリオ 59 万円、U ターン材シナリオ 58 万円、コンクリートシナリオ 10 万円、他産材シナリオ 0 万円の順となった。U ターン材シナリオにおいては、素材部門に発生した需要とその波及効果が含まれるため、地産材シナリオとの差は小さい。他産材シナリオにおいては、直接効果が商業・運輸マージンのみのため、林業部門への波及効果は一切得られない。また、すべてのシナリオにおいて、第二次間接効果に関しては、家計消費支出を需要額としているため、家計消費に関係の深い住宅賃貸料や小売、保険などが多くを占める結果となった。

また、直接間接効果の合計である総生産誘発額を、総需要額で除した生産誘発倍率は、地産材シナリオ 1.66、U ターン材シナリオ 0.90、他産材シナリオ 0.59、コンクリートシナリオ 1.58 となった。さらに、地産材シナリオとその他のシナリオの差分を京都産材の地産地消による府内への経済効果の増価額と考えると、直接間接を合わせた地産地消による効果は、他産材シナリオと比較して 313 万円、U ターン材シナリオと比較して 221 万円、コンクリートシナリオと比較して 180 万円の増加となることがわかった。

以上から、木製治山ダムの方がコスト高となるが、生産誘発倍率に着目した場合、地産材シナリオが最も高い値であり、得られる経済面の効果はコンクリート製治山ダムよりも高いことが示された。しかしながら、コンクリート製治山ダム以上の効果をもたらしているのは、地産材シナリオのみであり、地域への経済効果を目的として木製治山ダムを導入する場合には、使用する材を京都産材に特定することの重要性が示された。

3.2　社会面の評価結果

総雇用誘発数は、地産材シナリオ 0.29 人、U ターン材シナリオ 0.18 人、他産材シナリオ 0.11 人、コンクリートシナリオ 0.17 人と推計された。また、林業と木材生産に関係する 3 部門（育林部門、素材部門、製材・合板・チップ部門）における総雇用誘発数では、地産材シナリオ 0.14 人、U ターン材シナリオ 0.05 人、他産材シナリオ 0 人、コンクリートシナリオ 0.02 人となった。上記の 3 部門で一人分の雇用を誘発するには、対象ダムと同規模のダムが地産材シナリオであれば 1 年間に 7.2 基、U ターン材シナリオであれば 21.8 基、コンクリートダムであれば 42.1 基必要となる。雇用面では、地産材シナリオが他のシナリオより大きな効果をもつことが示された。

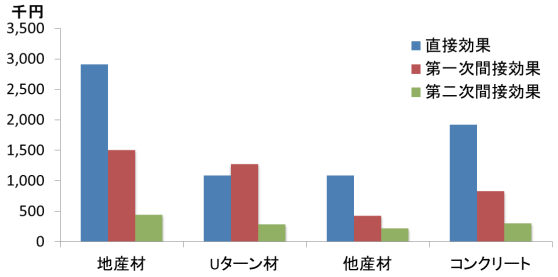


図 1　経済効果のシナリオ比較

4　おわりに

本研究では、京都産材を用いた木製治山ダムによる環境保全・地域活性化への効果を環境・経済・社会の三側面から評価した。経済・社会面の評価結果から、京都府内における生産誘発倍率および総雇用誘発数は京都産材を地産地消するシナリオが最大となり、特に林業と木材生産に関係する産業に対する経済効果および雇用創出効果が高いことが示された。環境面を合わせた評価結果については、学会当日に報告する。

謝辞：本研究は、立命館グローバル・イノベーション研究機構（R-GIRO）及び私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（S1411032）による成果である。

参考文献

1) 農林水産省：バイオマス・ニッポン総合戦略、2006
2) 稲葉陸太ほか：地域活性化をめざしたバイオマス利用技術戦略の立案手法の構築、平成 24 年度 環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書、2013
3) 長井翔太朗、金澤瑛、明石浩和、橋本征二：木材製品のライフサイクル炭素収支評価の枠組み：木製治山ダムへの適用、木材利用研究論文報告書、14、69-73、2015
4) 古俣寛隆、加藤幸浩、大橋寛隆、石川佳生、石河周平、山本伸幸：北海道における枠組壁工法住宅への地域材利用による経済波及効果、木材学会誌、58(4)、209-214、2012
5) 渕上佑樹、木村友紀、古俣寛隆、佐々木ふみ、古田裕三：公共建築物への地域材の使用による同一地域への経済波及効果 京都府を事例として、木材学会誌、61(5)、326-334、2015
6) 京都府：平成 17 年京都府産業連関表、2010
7) 総務省：平成 17 年産業連関表、2009
8) 総務省：平成 26 年度家計調査年報、2014

工学院大学生協の SCOPE3

Scope3 of co-op of Kogakuin University

○松本 奈々、高野須 悠人、稲葉 敦*、田中 浩二
Nana Matsumoto, Yuuto Kounosu, Atsushi Inaba, Kouzi Tanaka
工学院大学
* a-inaba@cc.kogakuin.ac.jp

1. 諸言

近年、バリューチェーン全体での CO_2 排出量の削減を目指す SCOPE3 の実施が進んでいる。本研究では、2015 年度のデータを用いて、工学院大学の生協購買部・食堂部の SCOPE3 を新宿キャンパス、八王子キャンパスに分けて算定し、昨年度の結果と比較して、CO_2 排出量の変化を整理した。また、新宿キャンパスの生協購買部・食堂部が 2015 年の 9 月に閉鎖し、代わりにコンビニエンスストア(以下、コンビニ)が開店し、デリバリー弁当店(以下、弁当訪問販売店)が訪問販売を行うようになった。その影響も分析する。

2. 研究手法

本研究は下記の手段によって進めた。

①生協食堂部の食料購入品データ、生協購買部の購入品データを生協より入手した。また、生協食堂部・購買部の光熱費・水道代データを工学院大学の施設課より入手した。

②生協食堂部の食料購入品・重量データを食材・調味料・調理済み食品に仕分けた。調味料・調理済み食品に関しては、cookpad[1]等のインターネットサイトで食材の構成割合を算出し、原材料ごとにカーボンフットプリントのデータベース[2]より CO_2 排出量の原単位を得て、新宿キャンパス、八王子キャンパスに分けて以下の式により CO_2 排出量を算定した。また、弁当訪問販売店も同様に算定した。

> ○生協食堂部の食料購入品データ
> CO_2 排出量[t-CO_2]
> ＝食材の重量[t]×CO_2 排出量係数[t-CO_2/t]

③生協購買部の購入品データを新宿キャンパス、八王子キャンパスに分け、各購入品の金額合計に 3EID[3]、MiLCA[4]により得た CO_2 排出量係数を用いて、以下の式により CO_2 排出量を算定した。また、コンビニも同様に算定した。

> ○生協購買部の購入品データ
> CO2 排出量[t-CO_2]
> ＝購入金額[円]×CO_2 排出量係数[t-CO_2/円]

④生協食堂部・購買部の光熱費・水道代データ 3EID により得た CO_2 排出量係数を用いて、新宿キャンパス、八王子キャンパスに分けて以下の式により CO_2 排出量を算定した。

> ○生協食堂部・購買部の光熱費・水道代データ
> CO_2 排出量[t-CO_2]
> ＝光熱費・水道代[円]×CO_2 排出量係数[t-CO_2/円]

3. 結果

3.1 生協食堂部の SCOPE3

2015 年度の生協食堂部の SCOPE3 排出量の結果を図 1 に示す。

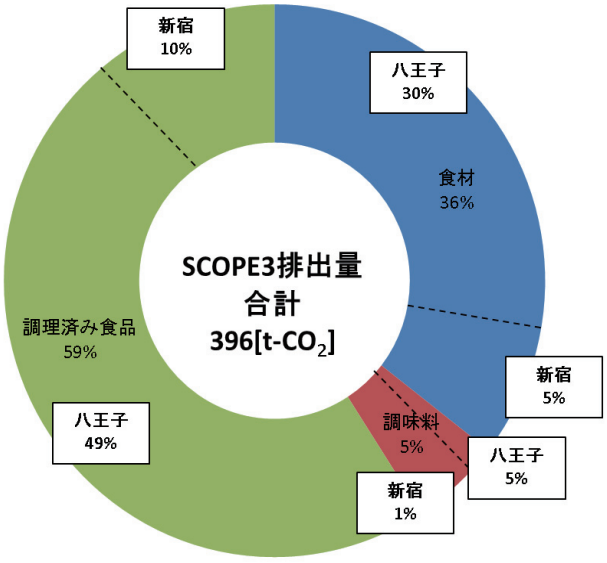


図1. 2015年度生協食堂部のSCOPE3排出量

2015 年度生協食堂部の SCOPE3 排出量は 396.3[t-CO_2]であり、その内訳は、新宿キャンパスが 62.8[t-CO_2]、八王子キャンパスが 333.7[t-CO_2]であった。新宿キャンパスの生協食堂部が 2015 年度の 9 月に閉鎖した影響で、八王子キャンパスの CO_2 排出量が全体の 84%を占める。

3.2 生協購買部の SCOPE3

2015 年度の生協購買部の SCOPE3 排出量の結果を図 2 に示す。

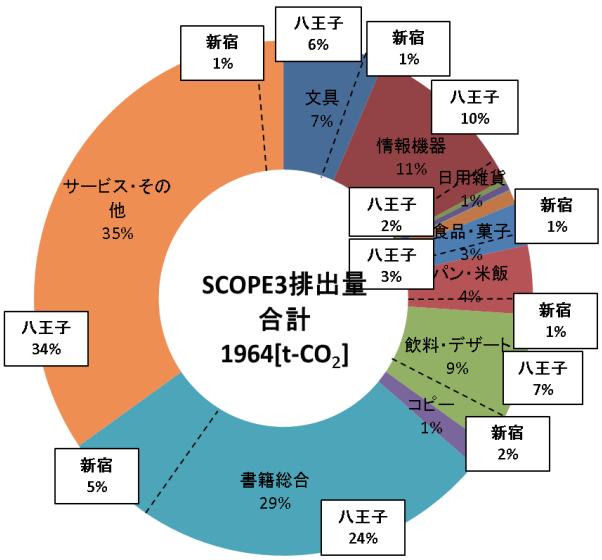


図2. 2015年度生協購買部のSCOPE3排出量

2015 年度生協購買部の SCOPE3 排出量は 1964[t-CO_2]であり、その内訳は、新宿キャンパスが 358.7[t-CO_2]、八王子キャンパスが 1730[t-CO_2]であった。図 2 に、文具や情報機器等項目ごとの割合を示す。今回の算定結果で割合の大きいサービス・その他の項目には、バスの定期券が多くの割合を占める。

3.3 弁当訪問販売店の SCOPE3

2015 年度 9 月以降の弁当訪問販売店の SCOPE3 排出量は 4.337[t-CO_2]となった。

3.4 コンビニの SCOPE3

2015 年度 9 月以降の SCOPE3 排出量を図 3 に示す。

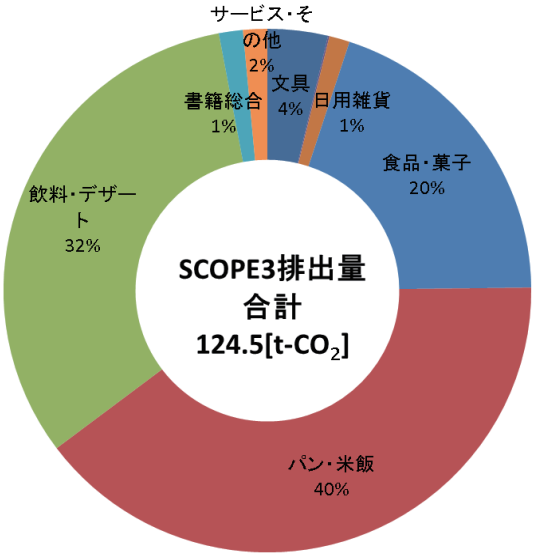


図3. 2015年度(9～3月)コンビニのSCOPE3排出量

2015 年度 9～3 月のコンビニの SCOPE3 排出量は 124.5[t-CO_2]であった。図 3 に文具や日用雑貨等項目ごとの割合を示す。食品関係が全体の 92%を占めている。

3.5 生協及び学内販売企業の SCOPE1,2,3

2015 年度生協全体の SCOPE3 排出量を図 4 に示す。

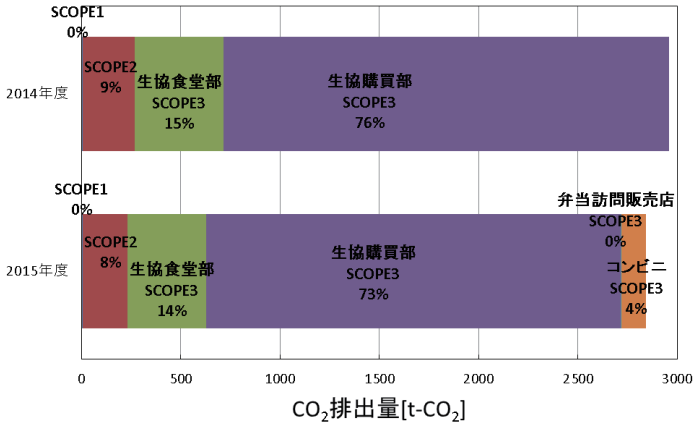


図4. 2015年度と2014年度の生協全体のCO2排出量の比較

2015 年度生協全体の SCOPE3 排出量は 2847[t-CO_2]であった。新宿キャンパスは 607.0[t-CO_2]で 21%、八王子キャンパスは 2238[t-CO_2]で 79%であった。SCOPE1,2 は全体の 8%、生協食堂部の SCOPE3 は 14%、生協購買部の SCOPE3 は 73%を占めることがわかった。

4. まとめ

本研究では、生協や学内販売店舗や工学院大学施設課から入手したデータを新宿キャンパス、八王子キャンパスに分け、算定を行った。生協食堂部では、2015 年度は 2014 年度に比べ CO_2 排出量が 50.2[t-CO_2]減少した。一方、生協購買部では、2015 年度は 2014 年度に比べ 152[t-CO_2]減少した。また、SCOPE1,2 では 39.3[t-CO_2]の減少があり、新宿キャンパスの生協食堂部の閉鎖の影響で厨房を使わなくなったことや節電対策等の効果があったと考えられる。

5. 参考文献

1)cookpad : http://cookpad.com/ (2016 年 12 月 17 日確認)
2)産業環境管理協会：カーボンフットプリントコミュニケーションプログラム：https://www.cfp-japan.jp/ (2016 年 12 月 17 日確認)
3)独立行政法人国立環境研究所：産業関連表による環境負荷原単位データブック(3EID)（2015）
4)一般社団法人産業管理協会：LCA 支援ソフトウェア (MiLCA), http://www.milca-milca.net/ (2016 年 12 月 17 日確認)

Scope3 から組織の LCA への展開ツールの開発

Development of a tool to conduct organizational LCA (O-LCA) based on Scope3

○山田 要[1)]、稲葉 敦*[1)]、本下 晶晴[2)]、田原 聖隆[2)]
Kaname Yamada, Atsushi Inaba,Kiyotaka Tahara,masaharu Motoshita
1)　工学院大学　2)　産業技術総合研究所
* a-inaba@cc.kogakuin.ac.jp

1. 諸言

組織を対象とした温室効果ガス（以下、GHG）の算定手法として、Scope1（直接排出量）、Scope2（他者から供給された電気、熱・蒸気の使用に伴う間接排出）、Scope3（事業活動に関連する他者の排出）の算定を実施する企業が増加している。

しかし、Scope1,2,3 は GHG のみの評価なので、複数の環境影響（酸性化、都市大気汚染、水や資源の消費など）を対象する『組織の LCA』が注目され、UNEP/SETAC により組織の LCA ガイダンスが発行された[1)]。このガイダンスには、既に Scope3 を算定している組織が GHG 以外の影響領域を考慮する概念が示されている。しかし、具体的な方法はまだ明確ではない。

現在、Scope3 を算定している企業は、購入品に関するデータは物量ではなく支出金額による把握が中心となっており、購入品の支出金額に GHG のみを対象とした 3EID[2)]や MiLCA[3)]に搭載された IDEA Ver.1 などの金額ベースの原単位を乗じる事で GHG を求めている。Scope3 からガイダンスの内容に基づいて組織の LCA を実際に行うためには、複数の環境負荷を算出できるデータベースを用いる必要がある。現在の日本では環境フットプリント用データベース[4)]や IDEA Ver2[5)]（以下、IDEAv2）がこれにあたる。本研究では欧州委員会環境総局（EC）が推奨している 14 の影響領域を算定対象とする為、影響領域の評価項目が多い IDEAv2 を用いて、複数の環境負荷を算定する。

IDEAv2 を用いて複数の環境負荷項目についての評価を行うためには、購入品の物量データ（kg）が必要となる。従って、Scope3 から組織の LCA へ展開するためには、GHG のみに対応している 3EID（400 項目）から複数の環境負荷を算定できる IDEAv2（3,800 項目）に変換させるための対応表、金額を物量に変換する単価表、IDEAv2 では対応していないサービス業の原単位を作成する必要がある。そこで本研究では、Scope3 から組織の LCA へ展開するためのツールとして①3EID と IDEAv2 の対応表の作成、②単価表作成、③IDEAv2（サービス業）の作成をする。さらに工学院大学を例にこれらのツールを用いて、Scope3 から組織の LCA への展開をする場合の課題を抽出する。

2. 研究手法及び結果

2.1 3EID と IDEAv2 の照合

3EID（400 項目）と IDEAv2（3,800 項目）を対応させるためには、3EID の細項目と IDEA を照らし合わせる必要がある。そこで、産業連関表部門別品目別国内生産額表[6)]と商品分類表[7)]に記載されている製品名に対して、IDEAv2 の原単位を 1 つ 1 つ照らし合わせ、3EID と IDEAv2 の項目の対応関係を整理した。また、支出金額を物量に換算する IDEAv2 の単価表も同時に対応関係を整理した。その結果、一部の製品名に対して IDEAv2 の原単位と単価が存在しないことが分かった。そこで、産業連関表と商品分類表を基に、IDEAv2 の原単位と単価が存在しない製品に対して、IDEAv2 の 4 桁コードまたは 6 桁コードを代わりの原単位と単価として当てはめた。その結果、3EID の細項目と IDEAv2 の 3800 項目を照合する事が出来た。3EID と IDEAv2 の対応表を図 1 に示す。図 1 の色が付いている部分は製品名に対して IDEAv2 の原単位と単価が存在しない為、産業連関表と商品分類表を用いて、代わりの IDEAv2 の原単位と単価を当てはめた部分である。

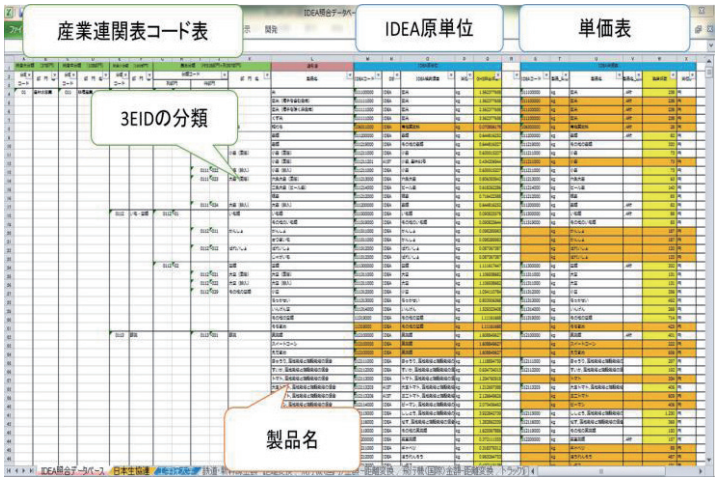


図 1　3EID と IDEAv2 の対応表

2.2 単価表の作成

IDEAv2 の単価表は約 1600 項目あるが、3EID の細項目と対応関係を整理した結果、3EID の細項目に対して、IDEAv2 の単価表が対応しきれていないことが分かった。そこで、インターネットを用いて IDEAv2 の単価

表に存在しない製品の単価をひとつの製品項目について 10 件から 20 件程度調査し、その平均単価を製品の単価とした。この方法で 101 品目の単価を作成した。

また、鉄道輸送や飛行機輸送、トラック輸送の支払金額から距離へ変換するためのツールを同時に作成した。使用データは大手輸送会社より運賃や輸送料金のデータを引用し、金額－距離のグラフを作成した。このグラフに近似直線を引き、金額から距離に変換するための式を得た。ツール作成例として、在来線と新幹線の鉄道旅客輸送による金額-距離変換した例を図 2 に示す。

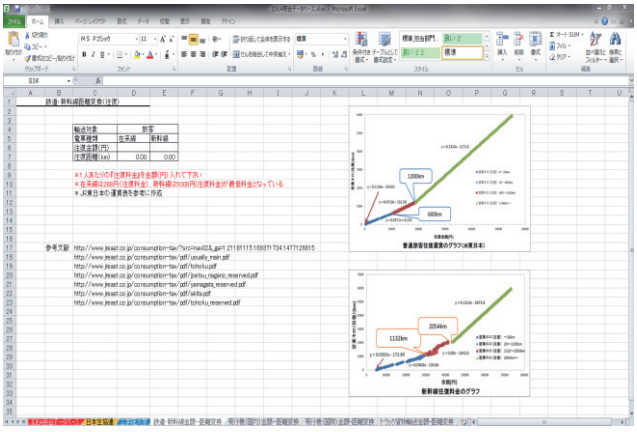


図 2　鉄道旅客輸送の金額-距離変換

2.3 サービス業の環境負荷原単位の作成

サービス業の環境負荷原単位は、波及効果を考慮する為に、IDEAv2 を用いて求めた各産業の国内生産額当たりの直接環境負荷原単位に逆行列係数に乗じることで、サービス業の環境負荷原単位を作成する。

本研究では、産業連関表の基本分類に含まれるサービス業 100 部門の原単位を作成する。

2.4 工学院大学の組織の LCA

Scope3 から組織の LCA への展開ツールを用いて、工学院大学の Scope3 から組織の LCA を実施する。システム境界は工学院大学本体（教職員の通勤、物品購入を含む）と付属施設である工学院大学生協及びセブンイレブン、WAO（弁当訪問販売店）に、大学生の行動として通学及び物品購入、昼食、軽食を含めた複数の環境負荷を算定・評価する。教職員の食事に関する環境負荷は、学生数に対して教職員の人数が圧倒的に少ないことから、今回の算定には含まないものとした。

3. まとめと今後

本研究では、Scope3 から組織の LCA へ展開するためのツールの開発として、3EID と IDEAv2 の対応表、単価表の作成を行った。3EID と IDEAv2 の対応表では、産業連関表部門別品目別国内総生産額表と商品分類表に記載されている製品名 1 つ 1 つに IDEAv2 の原単位と単価を当てはめた。製品名に対応する IDEAv2 原単位と単価が存在しない場合は、産業連関表及び商品分類表を基に代りの IDEAv2 を当てはめることで対応した。この結果、3EID の 400 項目と IDEAv2 の 3,800 項目を照合する事が出来た。

単価表の作成では、インターネット調査よりひとつの製品の単価を 10 から 20 件程度調査し、平均値を算出、その値を製品の単価とした。また、同時に鉄道旅客輸送など輸送にかかる支払金額から距離へ変換するツールも作成した。

今後は IDEAv2 が対応していないサービス業の原単位を産業連関表の取引データに基づき 100 項目作成する。

発表では、上述のツールを紹介するとともに、工学院大学を例にツールを使用して Scope3 から複数の環境負荷を定量・評価する組織の LCA を実施した際の算定結果とツールを使用して Scope3 から組織の LCA へ展開した際の課題を紹介する。

4. 参考文献

1) UNEP/SETAC：“Guidance on Organizational Life Cycle Assessment”,（2015）
2) 独立行政法人国立環境研究所：“産業連関連表環境負荷単位(3EID)”
3) 一般社団法人,産業環境管理協会：“LCA　支援ソフトウェア（MiLCA）”
4) 東京都市大学伊坪研究室：“環境フットプリントデータファイル一覧”,（2016 年 12 月 25 日確認）http://www.yc.tcu.ac.jp/~itsubo-lab/research/EFPitiran.html
5) 産業技術総合研究所,：“ライフサイクルインベントリ分析データベース　IDEA Ver2”
6) 総務省：“産業連関表部門別品目別国内総生産額表（2011 年確報）”http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001060671&cycode=0
7) 経済産業省：“商品分類表”,（平成 25 年）http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/gaiyo/sonota/bunrui/pdf/h25-reiji.pdf

工学院大学の SCOPE3

SCOPE3 for Kogakuin University

○高野須　悠人[1)]、松本　奈々[1)]、田中 浩二[2)]、稲葉 敦*[1)]
Yuto Kounosu ,Nana Matsumoto Koji Tanaka, Atsushi Inaba
1)工学院大学、2)e.s.feed 株式会社*a-inaba@cc.kogakuin.ac.jp

1. はじめに

温室効果ガス排出量削減の取り組みとして世界的に SCOPE3 の実施が進んでいる。著者らも大学での SCOPE3 実施方法を確立するために工学院大学の SCOPE3 の算定を行った。今年度は、2015 年度のデータを用いて算定した結果と前年度までの算定結果を比較し、大学の活動と CO_2 排出量の対応関係を考察する。

2. 分析方法

本研究の手順を以下に示す。

①金額と支払い内容等で構成されている 2015 年度の工学院大学一般会計支出データ及び、キャンパスの建築・解体費用等で構成されている特別会計データを経理課より入手した。また、電気・ガス等のエネルギーと上水の実績使用量を ISO14001 推進委員会より入手した。

②一般会計支出データを 450 の物品及びサービスの項目別に分類して集計し、MiLCA[2)]及び 3EID[3)]を用いて該当する項目の CO_2 排出原単位を調べた。

③以下の計算方法に基づき各項目の CO_2 排出量を算出した。

○一般会計支出データ
CO_2 排出量＝金額×CO_2 排出係数（金額当たり）
○エネルギー使用量データ
CO_2 排出量＝使用量×CO_2 排出係数（使用量当たり）

④上式で算出した結果から、各 SCOPE の CO_2 排出量を求め、2015 年度の計算結果と比較した。

⑤工学院大学の学生行動（通学手段と購入物品）を知るために Google フォームを用いてアンケート活動を２日間行った。集計人数は 241 人であり、新宿キャンパスは 98 人で八王子キャンパスは 143 人であった。

通学方法の算定は以下の式を用いて算出した。

○学生の通学算定方法
①電車のみの通学
②シャトルバスのみの通学
③電車・シャトルバス両方利用する方
④電車・シャトルバス両方利用しない方
※電車の場合：「Yahoo!Japan 路線情報」より自宅最寄り駅から新宿駅・八王子駅・京王八王子駅までの距離を調査し移動距離（a）[km][7)]とする。
※シャトルバスの場合：新宿校舎−八王子校舎間の移動距離(a)を 40.5［km]とした。

○通学の CO_2 排出量（一人辺りの平均）＝
移動距離（a）[km]×CO_2 排出係数[6)]/データ件数
○通学の CO_2 排出量（全学生一年分）＝Σ（一人辺りの通学の CO_2 排出量）×学生数×授業日数
※学生数は 6502 人であり、授業日数は 1〜3 年生が 205 日で 4 年生・大学院生以上は 280 日とした。

3. 結果

3.1 2015 年度 SCOPE の CO_2 排出量と経年変化

2013〜2015 年度の SCOPE の内訳を図 1 に示した。

また、図 2 に建物費を除いた場合の SCOPE3 の減少要因を示した。

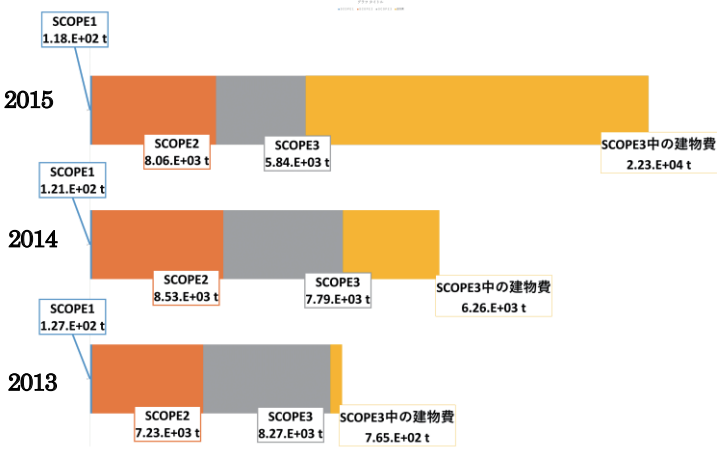


図 1 SCOPE の経年変化（2013〜2015 年度）

2015 年度の SCOPE1,SCOPE2,SCOPE3 全体の CO_2 排出量は 3.63E+04 t であった。SCOPE1 に関しては毎年ほとんど変化が見られなかった。

SCOPE3 の割合は前年までと比較して 2 倍近く増加した。これはカテゴリ 1(購入した製品・サービス), カテゴリ 2（資本財）,カテゴリ 5（事業から出る廃棄物）,に含まれる各建物費による増加が主な原因である。各建物費のカテゴリ 2 の内訳では新設工事が全体の 94%をしめていることが分かった。新設工事の内容としては新宿校舎の学外店舗・地下ラウンジの工事によるものであり学生の休憩スペースの工事がほとんどであった。八王子校舎は実験棟やモノづくり支援センターなどの学生が実験をする新築工事が目立った要因であった。各建物費を除いて考えた場合 SCOPE 全体として経年的に減少しており、SCOPE3 も経年的に減少している。

3.2 各建物費を除いたカテゴリ別の割合

2013～2015 年度の各建物費を除いたカテゴリ別の割合を図 2 に示す。

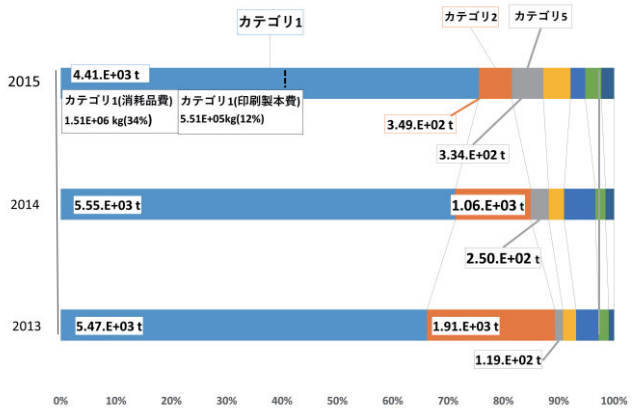


図 2　各建物費を除いたカテゴリごとの割合

図 2 から各建物費を除くとカテゴリ 1 がおよそ 7 割であった。カテゴリ 1 の内訳では特に印刷に関係する項目だけで全体の約 46%を占めていた。次に多い項目としては委託保守費に関する内容であった。またカテゴリ 2 が昨年度よりも 7.11E+02 t　減少した。これは、カテゴリ 2 に含まれる各備品の購入量が減少したことが一番大きい要因であった。

3.3 工学院大学の学生の通学に伴う CO_2 排出量

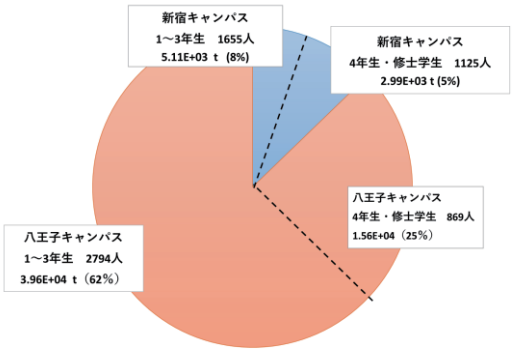


図 3　学生の通学に伴うキャンパス別 CO_2 排出量

工学院大学の学生に対してアンケート調査を行い 241 名分の通学に伴う CO_2 排出量を算定した。

新宿校舎は 2483 名で CO_2 排出量は 8.07E+03 t となり、八王子校舎は 3504 名で CO_2 排出量は 5.43E+04 t となった。八王子校舎の割合が多いのは通学距離が新宿校舎よりも遠いことやバスの利用などの経路が新宿校舎よりも多いことが起因している。また学生数が 1021 人新宿よりも多いことも起因している。一方、新宿校舎の通学手段のほとんどが電車のみの通学であるため CO_2 排出量としては八王子校舎よりも小さい結果となった。

3.6 工学院大学全体の CO_2 排出量割合

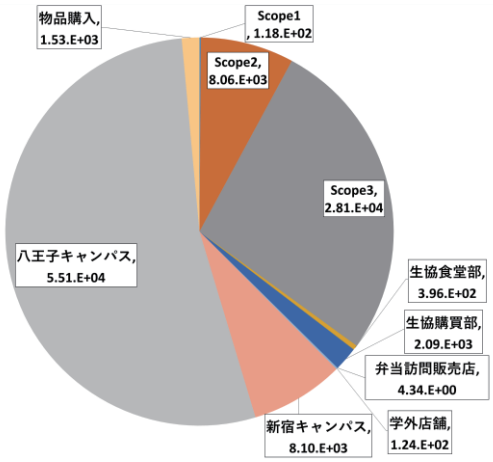


図 4 学生の行動を加味した工学院大学の SCOPE1,2,3

全体の中では年間の学生行動における CO_2 排出量が全体の 6 割を占めていた。中でも通学に関する CO_2 排出量が通学の CO_2 排出量割合の中では八王子キャンパスの通学算定が大部分を占めていた。また今年から新しく新宿校舎内の弁当訪問販売店と学外店舗を算出した。

4.　まとめ

昨年度に引き続き、工学院大学の SCOPE3 の算出を行った。工学院大学全体としては SCOPE3 が昨年の 2 倍近く増加した。これは、八王子校舎や新宿校舎内の新築工事や建て直しによる各建物費の増加が起因しているからである。特に八王子キャンパスでは学生が実験で使用する新築工事が主な原因であった。各建物費を除いた場合は SCOPE 全体としては経年的に減少していた。

また、工学院大学全体としてみると全学生の通学に伴う CO_2 が一番多い結果となった。八王子キャンパスと新宿キャンパスで学生人数が 1000 人弱しか差がないのに八王子キャンパスの CO_2 排出量が多いのは通学距離が新宿よりも多いことや電車だけの通学だけでなく路線バスの利用者やシャトルバスの利用者が多くなるためである。

5.　参考文献

1) 一宮　敦史　工学院大学の SCOPE3(2013)
2) 中野　龍司　工学院大学の SCOPE3(2014)
2) 井上　夏美　工学院大学の SCOPE3(2015)
3)一般社団法人産業管理協会：LCA 支援ソフトウェア（MiLCA）
4)独立行政法人国立環境研究所:産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）　(2005)
5)環境省・経済産業省：サプライチェーンを通じた温室効果ガス排出量算定に関する基本ガイドライン　Ver1.0 (2015)
6) CO_2 排出係数は※日本 LCA 学会「ニューツーリズム研究会中間報告書を用いた。
7)Yahoo!Japan 路線情報（2016）
8)工学院大学学生便覧（2016）および学修便覧（2016）

日本 LCA 学会学生交流ネットワーク 2016 年度活動報告

ILCAJ-Student Communication Network Activity Report 2016

○江口昌伍*[1)]、横井崚佑[2)]、田髙初奈[3)]、伊藤亮太[3)]、一杉佑貴[4)]、高柳達[5)]
Shogo Eguchi, Ryosuke Yokoi, Hatsuna Tadaka, Ryota Itoh, Yuki Ichisugi, Satoru Takayanagi
1）九州大学、2）東京大学、3）横浜国立大学、4）東京都市大学、5）立命館大学
* shogoeguchi43@gmail.com

1. はじめに

環境問題が現代社会における一つの大きな問題となった中で、ライフサイクルアセスメント（LCA: Life Cycle Assessment）を基盤とし、持続可能性のための科学的かつ定量的な評価方法とそれに基づく意思決定方法を検討する日本 LCA 学会が果たすべき役割は拡大してきた。本会に所属する学生会員は、研究発表会をはじめとする各種活動に参加し、様々な知識や経験を得ている。同学会に所属し、広い意味での環境問題という同じ問題を考える学生同士で、文理の垣根を越えて意見や考えを交換することは、各学生にとって非常に有意義である。学生会員の間で研究活動をはじめとする様々な問題に対処するための知識や人脈のネットワークを形成することを目指し、日本 LCA 学会の研究会の一つとして学生交流ネットワーク（SCN: Student Communication Network）が設立された。SCN では、学生会員の LCA への理解を深める契機として、様々なイベントを企画、開催している。SCN 設立から現在までの流れを図 1 に示す。

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） 2009年度の活動を第5回日本LCA学会研究発表会にてポスター発表 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） 2010年度の活動を第6回日本LCA学会研究発表会にてポスター発表 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） 2011年度の活動を第7回日本LCA学会研究発表会にてポスター発表 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） 2012年度の活動を第8回日本LCA学会研究発表会にてポスター発表 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） 2013年度の活動を第9回日本LCA学会研究発表会にてポスター発表 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	ワークショップ2014開催
2014年　10月	1st Young Researchers Meetingを開催（EcoBalance 2014会期中）
2015年　1月	ワークショップ2014の様子を学会誌で報告
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） 2014年度の活動を第10回日本LCA学会研究発表会にてポスター発表 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6回工場・研究所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） 2015年度の活動を第11回日本LCA学会研究発表会にてポスター発表
2016年　8月	第7回現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（EcoBalance 2016会期中）

図 1 SCN 設立から現在までの流れ

2. 主な活動内容

・現場見学会　（年 1 回開催）

実際に工場施設や研究所を見学することで、プロセスの仕組みや現場での LCA の利用法を理解し、議論を行う。例年の工場・研究所見学に代わり、本年度は沖縄県糸満市の大度浜海岸にて生態系の調査を行った。

・ワークショップ　（年 1 回開催）

研究成果を発表形式で報告する。本年度は 8 月 29 日から 31 日にかけて、沖縄県那覇市にある沖縄青年会館で開催した。

・セミナー　（年 1～2 回開催）

環境に関する研究に取り組む学生会員の現在の研究活動を将来にどう活かしていくのか、企業やアカデミアに所属する正会員による講演などを通して意見交換を行う。本年度は EcoBalance 2016 会期中に、*International Journal of LCA* の Editor-in-chief である Mary Ann Curren 氏による講演が行われ、第 12 回日本 LCA 学会発表会の会期中にも、招待講演者による講演を予定している。

・学生総会　（年 1 回開催）

毎年開催される日本 LCA 学会研究発表会の会期中に開催する。活動報告や、翌年度の活動内容の検討、役員の決定などを行う。

・Young Researchers Meeting（EcoBalance 会期中に開催）

EcoBalance 2014 にて SCN の主催により初めて開催され、会期中に招待講演や世界各国から参加する若手研究者による研究発表会等を行う。

・懇親会　（随時開催）

研究活動や進路選択、普段の生活まで様々なことについて学生同士で話し合い、情報交換を行う。

3. 2016 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（2016 年 8 月 29～31 日）

本年度の第 7 回現場見学会およびワークショップ 2016 は、8 月 29 日から 31 日にかけて沖縄県那覇市で開催され、7 大学 11 研究室から過去最多となる総勢 37 名の参加者が集まった。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 7 回現場見学会の様子

今年度は、「自然からの学び」をテーマとして、環境の移り変わりを最も近くで体感してきた現地の方々との交流を通して、個々人が研究に対する問題意識を強く持つことを目的とし、沖縄県糸満市の大度浜海岸において生態系の調査を行った。

大度浜海岸では、琉球大学の学生の方々が中心となって運営する団体であるエコツーリズムデザイン研究所の魚住亮輔さん、堺恭介さん（ともに琉球大学大学院修士課程 海洋環境学専攻）の協力の下、イノー（サンゴ礁に囲まれた浅い海）の調査を行い、そこに生息する生物を実際に手に取って観察しながら、生態系の現状についての説明を受けた。

また、生態系調査終了後には、大度浜会館そばの公民館において、堺さんの修士課程での研究内容の報告があり、現場見学会に参加した学生との間で意見交換会が行われた。

図 2 大度浜海岸での生態系調査の様子

3.2.　ワークショップ 2016

2 泊 3 日で行われたワークショップでは、11 の研究室からの参加者による研究発表会が行われ、過去最多となる 29 件の口頭発表が行われ、各自 10 分の発表時間と 5 分の質疑応答の時間が設けられた。研究対象は、マテリアルフロー分析（レアメタル、化学物質、鉱物資源等）、東日本大震災の環境影響分析、耐久財の寿命の変化に着目した LCA 分析、生物多様性に関する研究、ライフサイクル思考による環境教育の実施結果など非常に多岐に渡った。

また、昨年度からの新しい取り組みとして、全参加学生の投票による優秀発表者の表彰（修士課程及び学部生が表彰対象）が今年度も引き続き行われ、最優秀発表賞を一杉佑貴さん（東京都市大学・伊坪研究室）、優秀発表賞を高藪広隆さん（九州大学・加河研究室）がそれぞれ受賞した。

3.3.　参加学生からの反応について

研究所見学・ワークショップ終了後、メールにて参加者全員を対象にアンケート調査を実施した。ほとんどの回答では、現場見学と研究発表会の内容を肯定的に捉えており、一定の成果があったと言える。また、現場見学の内容に関しては、ほとんどの回答で「概ね満足」という結果が得られた一方で、「生態系調査を通じて自らの研究との繋がりを実感できたか」という設問に対しては、「あまり実感できなかった」という回答も少なからず見受けられた。

また、今回の現場見学会・ワークショップは初の関東圏以外での開催となったが、来年度以降の開催場所に関して、「毎年開催場所を変えるべき」との回答が多く、来年度以降も開催場所及び現場見学会の内容を十分考慮した運営が求められる。

4.　Young Researchers Meeting at EcoBalance 2016

10 月に京都で開催された EcoBalance 2016 の会期中に SCN の主催による Young Researchers Meeting（YRM）が開催された。YRM では、*International Journal of LCA* の Editor-in-chief である Mary Ann Curren 氏による「Publishing in the *International Journal of LCA*」と題した講演が行われた。また、講演後には Flash Presentations Competition（発表時間各自 2 分）が行われ、世界中から参加した 26 名の若手研究者が研究発表を行い、天沢逸里氏（東京大学）が Best Presentation Award を受賞した。図 3 は YRM 参加者の集合写真である。

図 3 YRM 参加者の集合写真

5.　今後の活動に向けて

SCN では、これまでの経験と反省を活かしながら、今後も学生会員同士のみならず、学生と企業あるいは大学の間のネットワークを広げる活動を続けていく予定である。正会員や賛助会員の皆様には、SCN の活動にご理解いただくとともに、工場・現場見学会や招待講演などで今後もご協力をいただければ幸いである。また、学生会員の皆様には、是非 SCN の活動に積極的に参加していただきたい。

学会賞受賞者講演

3日目　3月３日（金）　A 会場

13:40 － 13:55　**【奨励賞】意思決定支援を指向したライフサイクルアセスメントと多様な手法の統合手法の研究**

◎中谷隼（東京大学）

13:55 － 14:10　**【論文賞】* 家庭用太陽熱給湯器のエネルギー収支とライフサイクル CO_2 排出量**

◎門倉宏子（横浜国立大学）、本藤祐樹（横浜国立大学）

14:10 － 14:25　**【論文賞】* 太陽光発電システムへの心理的近接性が省エネルギー意識・行動に及ぼす影響**

◎藤本ひかり（横浜国立大学）、本藤祐樹（横浜国立大学）、弘中雄介（横浜国立大学）

14:25 － 14:45　**【功績賞】交通分野へのライフサイクル思考の適用**

◎加藤博和（名古屋大学）

14:45 － 15:05　**【功労賞】** LCA の国内基盤構築と国際的地位確立への貢献**

◎稲葉敦（工学院大学）

* 要旨ではなく受賞論文を掲載させていただいております。

** 要旨の掲載はございません。

意思決定支援を指向したライフサイクルアセスメントと多様な手法の統合手法の研究

Decision-Making oriented Integration of Various Methods including Life Cycle Assessment

○中谷隼*[1)]
Jun NAKATANI
1) 東京大学
*nakatani@env.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

今回、「日本 LCA 学会 奨励賞」という大変栄誉ある賞をいただいた。受賞に当たって、表題にあるような業績題目をいただいた。これを筆者は、「ある行為がもたらす直接的・間接的な影響を、幅広い選択肢（代替案）について、様々な側面から客観的かつ網羅的に評価し、意思決定に資する情報として提示するための研究」と解釈した。ここには、決定的な単一解を与えるような評価に限らず、何らかの形で意思決定に貢献しうる様々な評価や設計の形態が包含されていると考えている。

表題にもあるように、これまで筆者は、LCA を中心とした多様な評価・設計手法を応用し、リサイクルや水利用など様々な都市・社会システムを対象として、環境問題に関わる意思決定支援を指向した研究を実践してきた。これらは、①資源の流れを明らかにする、②環境負荷や資源消費を定量的に測る、③環境負荷や資源消費の影響を評価する、④意思決定者の判断と行動に活かすという段階に分けることができる（**図 1**）。

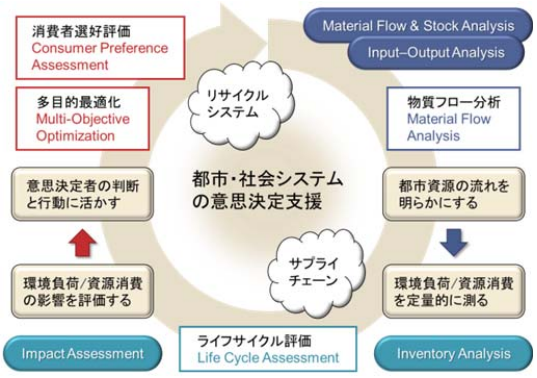


図 1　意思決定支援を指向した研究の枠組み

本稿では、紙幅の制約もあるため、以前から継続して取り組んできたプラスチックリサイクルと現在の中心的な研究課題としているサプライチェーンリスクに対象を絞って、いくつかの事例を紹介する。ここでは、意思決定支援の文脈から、どのような問題意識で筆者が研究を進めてきたか述べるとともに、今後の研究の発展性について展望する。それぞれの詳細な方法や結果については、**引用文献**に示した個々の論文を参照されたい。

2. リサイクルシステムの評価と設計

筆者がプラスチックリサイクルの研究に深く携わるようになった当時（2006～2008 年ごろ）は、リサイクルの意義に対する懐疑論が提起されていた時期であった。そうした社会的背景から、リサイクルによる環境負荷の削減効果を定量的に評価し、その正当性を科学的に示す役割が LCA に期待されていた。

2.1. リサイクルによって何が代替されるのか

それまでにも、リサイクルの LCA の方法論としては、負荷回避法や製品バスケット法といったシステム拡張による評価方法が確立していた。しかし、それらの方法にも課題はあり、特にリサイクルによって何が代替されるかは評価結果を決定付ける重要な要因であるものの、その特定には曖昧さが残されている [1)]。

この問題に筆者が直面したのは、使用済ペットボトルの国内リサイクルと国際（日中間）リサイクルの比較評価においてであった [2,3)]。それらの評価結果を決定付けたのは、国内と国外（中国）におけるリサイクルプロセスの負荷よりも、それらによって代替・控除されると仮定された日本および中国における新規樹脂生産の負荷であったが、現実の市場においては、国内リサイクルからの再生樹脂が国外から輸入される新規樹脂を代替する場合や、国外から再生樹脂が再輸出されて国内の新規樹脂生産を代替する場合も考えられる。この問題に対して筆者らは、再生製品と新規製品の生産による負荷を行方向と列方向に示し、それらの代替関係に応じて負荷を算定できるようにすることで（**図 S1**）、LCA の方法論に残された曖昧さを逆に明示的に表すというアプローチをとった。

さらに筆者は、このリサイクルにおける代替の問題を、市場代替性という概念によって解決することを試みた [4)]。マテリアルリサイクルは新規原料の生産を代替するとは限らず、そもそも需要が存在しなかった機能が産出される可能性もあると考え（**図 S2**）、それらの構成比を原料の需要および供給の価格弾力性を用いて定式化した。

同様のアプローチで、レジ袋の削減について環境負荷の削減効果を評価した事例がある [5)]。この研究は、ごみ排出袋として再使用されたりリサイクルされたりしていたレジ袋を削減しても、その効果は大きくないのではな

いかという疑問に着想を得ている。自治体（市区町村）ごとの廃棄物施策の実施状況によって、レジ袋の機能を代替するために他製品（ごみ袋やマイバッグ）の製造量が増加することがあり、削減効果が異なることを示した。

2.2. 正当化のための評価から改善のための設計へ

以上のような評価方法の確立と実践は、リサイクルの意義を科学的に示すという社会的要請を受けたものであるが、それは視点を変えれば、既存の社会システムを正当化しているだけという消極的な見方もできる。こうした問題意識から筆者は、最適化手法などを応用して、より積極的にリサイクルシステムの改善を指向した設計手法の開発に取り組むようになった。

まず、ペットボトルリサイクルにおいて、再生樹脂の用途が品質によって制約を受け、その品質は回収される使用済ボトルの品質とリサイクルプロセスの特性に依存することに着目した [6]。各用途について、再生樹脂への要求特性を満たすために求められる使用済ボトルの品質やプロセスを混合整数線形計画によって導出し、この品質情報と環境影響に基づいて改善の方向性を提示する、多基準設計の枠組み（**図 S3**）を開発した。

また、リサイクルを規定する条件（廃棄物の排出量や再生原料の需要など）の変動性が、リサイクル施設の処理能力の不足など様々なリスクの要因となるという問題意識から、変動リスクに対する頑健性・柔軟性を考慮したリサイクルシステム設計の枠組みを構築した [7]。他にも、リサイクルの設計に関する直近の研究として、プラスチック選別施設を対象とした事例（**図 S4**）がある [8]。

3. サプライチェーンリスクの分析と評価

もっぱらリサイクルに関わる研究に従事していた筆者が、サプライチェーンリスクを研究課題としようと考えたのは、2011 年の東日本大震災およびタイ洪水によって様々な製品の供給寸断の事例が立て続けに発生したことが契機であった。これまでに LCA 研究が蓄積してきた分析手法やデータベース、さらには根底にあるライフサイクル思考は、サプライチェーンの分析に必要なノウハウや情報を内包しているはずであるという着想から、この研究に取り組むようになった。

それ以降、筆者が実践してきた研究には、環境産業連関分析を応用したサプライチェーンの潜在的な環境ホットスポットの分析（**図 S5**）のように、従来の LCA の延長上にある事例もある [9]。以下では、より先駆的な研究としてサプライチェーンの脆弱性評価について紹介する。

3.1. インベントリデータベースを用いた脆弱性評価

近年、生産管理などの分野でも、サプライチェーンの寸断リスクの分析にグラフ理論を適用した事例が見られるようになっていた。筆者らは、サプライチェーン構造を有向グラフおよび同義の隣接行列によって表し、代替性を考慮して脆弱性を評価する枠組みを提案した [10]。

この段階での着想は、上記の隣接行列がインベントリデータや産業連関表の投入係数行列に類似していることにあった。そこで、インベントリデータベースをバイナリ行列に変換してデータソースとして活用するとともに、環境産業連関分析における適用事例が多い構造経路分析の手法を援用して、サプライチェーンの脆弱性評価の方法論を確立した [11]。ここでは、国内生産地域および輸入相手国の寡占度（市場集中度）を原料供給の寸断リスクの指標として、脆弱性要因（ボトルネック）となる原料までの経路を図示することで（**図 S6**）、原料の供給源の分散や備蓄の戦略に寄与することを目指した。

3.2. 地震リスクを考慮した脆弱性評価への展開

上記の寸断リスクの指標では、国・地域ごとにリスク要因の頻度や規模が異なることは考慮されていない。現在、特定のリスク要因を想定した脆弱性評価への展開が進行中である。具体的には、国内における地震リスクを対象として、震度ごとの発生確率や南海トラフ巨大地震の予測震度の地理情報をもとに、それらによって重み付けされた寸断リスクの指標を算定している。

4. おわりに

これまでに筆者は、結果的に LCA に関連する多くの手法を経験する機会に恵まれてきた。しかし、現時点までの研究成果は、横の広がりに比べて縦の蓄積に乏しく（ともすれば散逸しかねないと自身でも危惧している）、現実の意思決定への活用までにはギャップがあると認識している。今後は、これまでに実践してきた多様な評価・設計手法を、都市・社会システムの意思決定支援の文脈から体系化することを目指して研究に取り組む。

謝辞　東京大学の花木啓祐教授・平尾雅彦教授・森口祐一教授をはじめ、これまでご指導ご鞭撻いただいた多くの方々に謝意を表する。

引用文献

1) Nakatani: *Sustainability* 6 (9), pp. 6158–6169 (2014)
2) 中谷・藤井・森口・平尾：日本 LCA 学会誌 4 (4), pp. 324–333 (2008)
3) Nakatani *et al.*: *Int. J. Life Cycle Assess.* 15 (6), pp. 590–597 (2010)
4) 中谷・奥野・藤井・平尾：日本 LCA 学会誌 7 (1), pp. 96–107 (2011)
5) 西島・中谷：廃棄物資源循環学会論文誌 27, pp. 44–53 (2016)
6) Nakatani, Hirao: *J. Ind. Ecol.* 15 (2), pp. 228–244 (2011)
7) 石川・中谷 他：廃棄物資源循環学会論文誌 26, pp. 1–15 (2015)
8) Nakatani *et al.*: *Resour. Conserv. Recycl.* 116, pp. 53–60 (2017)
9) Nakatani *et al.*: *Sustainability* 7 (9), pp. 11878–11892 (2015)
10) 中谷・醍醐・松八重・中島 他：開発技術 19, pp. 23–35 (2013)
11) Nakatani, Tahara, Nakajima, Daigo, *et al.*: *Omega* (under review)

事 例 論 文(Case Study Research Article)

家庭用太陽熱給湯器のエネルギー収支とライフサイクル CO_2 排出量

門倉　宏子[1]・本藤　祐樹[1,*]

Energy Ratios and Life Cycle CO_2 Emissions for Domestic Solar Thermal Systems

Hiroko KADOKURA[1] and Hiroki HONDO[1,*]

Synopsis:

Objective. The objective of the present study is to evaluate the environmental performance of solar thermal systems for domestic hot-water supply from life cycle perspective. Energy ratios and life cycle CO_2 emissions of two different types of solar thermal system are analyzed, namely, the integrated solar thermal system and the separated solar thermal system that supply 40% of the total hot-water demand of a four people household. This analysis uses the material and energy data collected from eight manufacturers of solar thermal systems to reflect the present reality.

Results and Discussion. The analysis shows that the life cycle CO_2 emissions of solar thermal systems are 25-37% less than those of domestic gas boilers. Energy ratios of solar thermal systems are more than one, while that of a gas boiler system is 0.9. This is because solar thermal systems require less gas consumption compared to a domestic gas boiler. Moreover, comparison between the two different types of solar thermal systems reveals that the life cycle CO_2 emissions and energy consumption of the separated solar thermal system are more than those of the integrated solar thermal system mainly because the separated type consumes electricity for pumps to circulate the heat medium. Furthermore, The effects on CO_2 emission of the change in heat supply rate by the solar thermal systems are analyzed. The analysis finds that the more the heat supply rate increases, the less the CO_2 emissions of the solar systems are. When the solar thermal systems supply 60% of the total hot-water demand, the life cycle CO_2 emissions of solar thermal systems are 25-37% less than in the case of 40% supply.

Conclusions. The present study reveals that both the integrated and separated solar thermal system are superior to gas boiler from viewpoints of energy ratios and life cycle CO_2 emissions. Furthermore, comparison between the integrated and separated solar thermal system finds the former has better environmental performance than the latter.

Keywords: Hot water supply; life cycle assessment (LCA); renewable energy, renewable heat; solar thermal systems

1. 背景と目的

近年、地球温暖化の防止や化石燃料の削減などの観点から再生可能エネルギーの導入が推進されると共に、その熱利用技術が着目されてきている。太陽熱給湯器は再生可能エネルギー熱利用技術の一つであり、日射を得ることができれば場所を問わず導入が可能なことを特徴とし、日本でも過去から住宅などでの給湯に利用されてきた。太陽熱給湯器は、給湯や暖房など特に低温熱の需要に対し、熱を供給することでエネルギー消費量の削減および二酸化炭素（以下、CO_2）排出量を削減する効果が期待されている[1)]。

太陽熱給湯器の導入によるエネルギー消費量や温室効果ガス（以下、GHG）排出量の削減効果をライフサイクルの観点から評価した研究が海外を中心に実施されてきた。特に、太陽熱給湯器の導入が盛んなアメリカ[2)]、キプロス[3)]、ギリシャ[4)]などにおいて多くの研究事例が認められる。例えば、Hangら[2)]は、気候・電源構成の異なるアメリカ

1　横浜国立大学／〒240-8501 神奈川県横浜市保土ケ谷区常盤台 79-7
1　Yokohama National University / 79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, Kanagawa 240-8501
＊連絡先(Corresponding author), hondo@ynu.ac.jp

の3都市において、補助熱源にガスまたは電気を使用した場合の分離型太陽熱給湯器のライフサイクルエネルギー消費量とGHGを比較している。また、Kologirouら[3]は、キプロスにおける分離型太陽熱温水器を対象に補助熱源を3パターン（ガスと電気、電気のみ、ガスのみ）に分け、それぞれ従来の電気やガスを使った温水器に比べ、どれほどGHG排出量が削減されているかについて検討している。Koroneousら[4]は、ギリシャにおける分離型太陽熱給湯器を対象として、GHG排出量とエネルギーペイバックタイムを推計している。これらの先行研究は、導入地域の日射量や気温、太陽熱が不足した際に用いる補助熱源などの違いが、評価に影響を与えることを示している。それ故に、日本における太陽熱給湯器の導入効果を評価するためには、気候や利用技術など日本の現状を反映することが必要である。

過去、日本においても少ないながら太陽熱給湯器に関するLCA研究が行われている。例えば、鴨志田ら[5]は市販されている一体型太陽熱給湯器を対象として、そのライフサイクルCO_2排出量を推計している。この研究では、対象製品の構成素材量を聞き取り調査と文献調査により求めたと記されているが、その具体的なデータは記述されていない。また、水野ら[6]の研究では、一体型太陽熱給湯器に加え分離型太陽熱給湯器のライフサイクルCO_2排出量を推計し、既存のガス給湯器などと比較することで太陽熱給湯器のCO_2削減効果を明らかにしている。この研究でも、構成素材の種類は大まかに記載されているものの重量は明記されておらず、データの出所も明確には提示されていない。

このように日本における太陽熱給湯器を対象とした研究は存在するが、第一に、上記の二件の研究は1997年[5]と1998年[6]に報告されたものであり、20年近く以前のものである。現在では太陽熱給湯器の性能（集熱効率など）や構成素材が変化している可能性があり、また、比較対象とするガス給湯器のガス燃焼効率や素材や電力のCO_2排出原単位も当時の値を用いており、最近の状況が反映された評価ではない。第二に、既往研究では、用いられている構成素材量データが明示されておらず、それらの出所も不明確であり、推計結果の妥当性や代表性を評価することが困難である。

そこで本研究では、太陽熱給湯器の製造業者8社の協力を得て、現在市販されている家庭給湯用の太陽熱給湯器2種（一体型、分離型）を対象として、それらのライフサイクルCO_2排出量とエネルギー収支を推計し、太陽熱給湯器の環境性能を明らかにすることを目的とする。

2. 前提条件

2.1 太陽熱給湯器

太陽熱給湯器とは、日射から得られる熱を、集熱媒体を介して集め、蓄熱し供給するシステムを指す。その構造は、太陽熱を集める集熱部とその熱を温水として蓄える貯湯部に大きく分かれる。

太陽熱給湯器は、集熱部と貯湯部が一体であるか、分離しているかによりその呼称が異なる。一般的には、それぞれ太陽熱温水器、ソーラーシステムと呼称されていることが多いが、本研究では、以後、一体であるものを一体型太陽熱給湯器、分離しているものを分離型太陽熱給湯器と呼ぶ。それぞれの機器概要[7]を図1に示す。一体型太陽熱給湯器は、水温差で生じる比重差により自然に水が循環する。それに対し、分離型太陽熱給湯器は集熱器と貯留槽が分離しているため、それらの間で集熱媒体を強制的に循環させる必要がある。それ故に、動力として集熱ポンプを必要とするため、分離型太陽熱給湯器は運用時において電力消費が発生する。

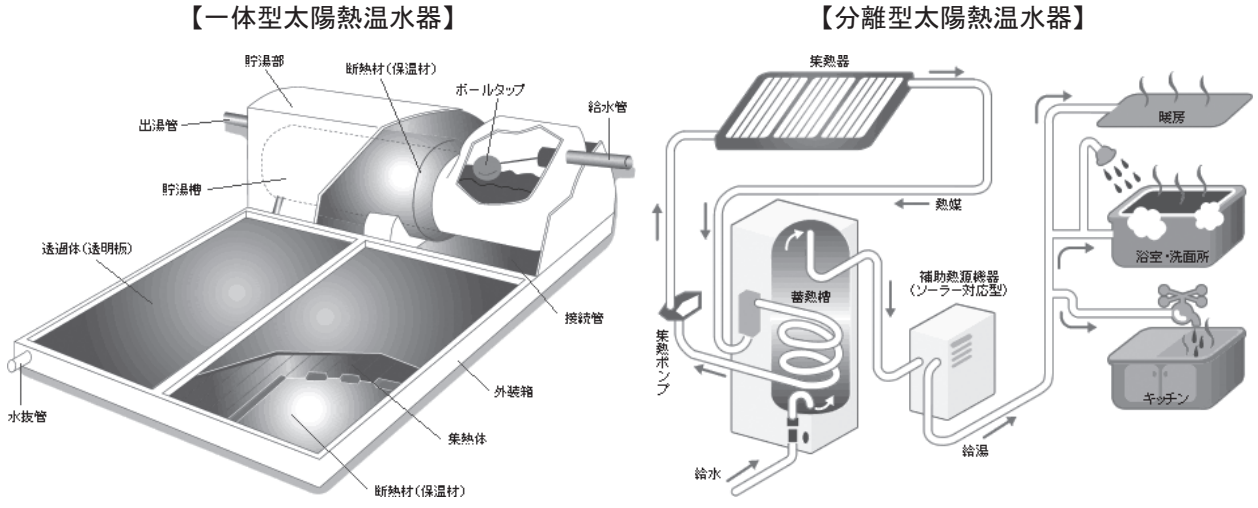


図1　一体型および分離型太陽熱給湯器の概要[7]

2.2 評価対象とする家庭用給湯システム

本研究では、2種の太陽熱給湯器（一体型太陽熱給湯器と分離型太陽熱給湯器）および従来のガス給湯器の、計3種の家庭用給湯システムを対象とし、それぞれのライフサイクルCO_2排出量とエネルギー収支を推計した。

図2に、評価対象としている3種の給湯システムを示す。太陽熱給湯システムは集熱量が不足した際に補助熱源を必要としており、本研究では補助熱源としてガス給湯器を想定した。各給湯システムの評価範囲は、資源採取から、素材製造、組立加工、運用までとした。電力や都市ガスにおいては、それぞれの原料採掘・輸送・製造・供給も評価範囲に含んでいる。また、太陽熱給湯器とガス給湯器の耐用年数は、それぞれ15年と10年とした。

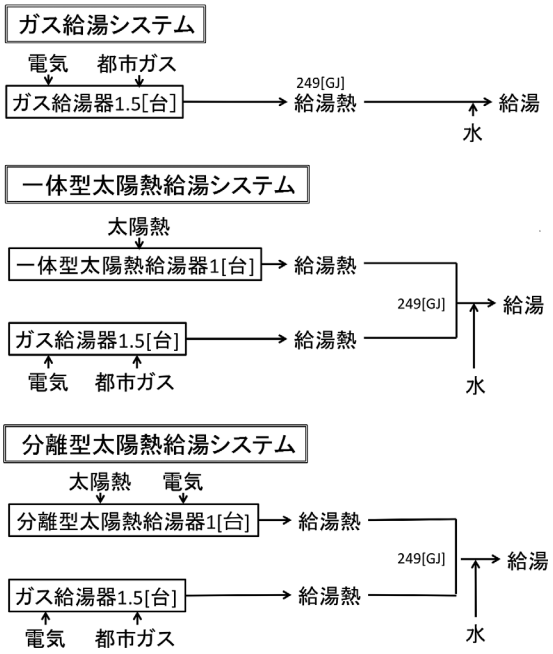


図2　対象とした3種の家庭用給湯システム

本研究では、これら3種の給湯システムの機能単位を、平均的な4人世帯家庭の15年間分の給湯熱需要に対する供給熱量である249［GJ］[8]とした。太陽熱給湯システムに関しては事業者からのヒアリングに基づき、249［GJ］のうち40%を太陽熱給湯器による熱供給とし、残り60%を補助熱源による熱供給とした。なお、ガス給湯器はガス給湯システムとして用いる場合も、太陽熱給湯システムの補助熱源として用いる場合も、同等の性能のガス給湯器を導入することを想定し、4人世帯において一般的な製品サイズである24号で燃焼効率90%のガス給湯器とした。ガス給湯器の燃焼効率値に関しては、近年の高効率ガス給湯器が概ね90%以上であることを参考に、決定した[9, 10]。

2.3 太陽熱給湯器の集熱面積と蓄熱容量

評価対象とする太陽熱給湯器の集熱面積と蓄熱容量（以下、両者をあわせて規模と呼ぶ）は、図3の算出フローに従い算出した。この算出フローは4ステップから成る。Step1で評価対象とする太陽熱給湯システムにおいて、全供給熱量に対し太陽熱給湯器が供給する熱量の割合（以後、太陽熱給湯率）を決定する。本研究では前節の通り、太陽熱給湯率を40%と想定した。一方で、Step2において市販の118機の太陽熱給湯器の太陽熱給湯率を推計する。Step2の結果からStep1で設定した太陽熱給湯率を±1%水準で満たすシステムをStep3で選び、Step4にて、それら選択されたシステムの規模の平均値でもって、評価対象とする太陽熱給湯器の規模とした。また、分離型の場合には集熱ポンプの年間消費電力も同様にして求めた。

実際に計算したところ、太陽熱給湯率が39% ～ 41%となる市販の太陽熱給湯器は一体型太陽熱給湯器が3機、分離型太陽熱給湯器が8機であった。図3の算出フローにより、規模を算出した結果を表1に示す。

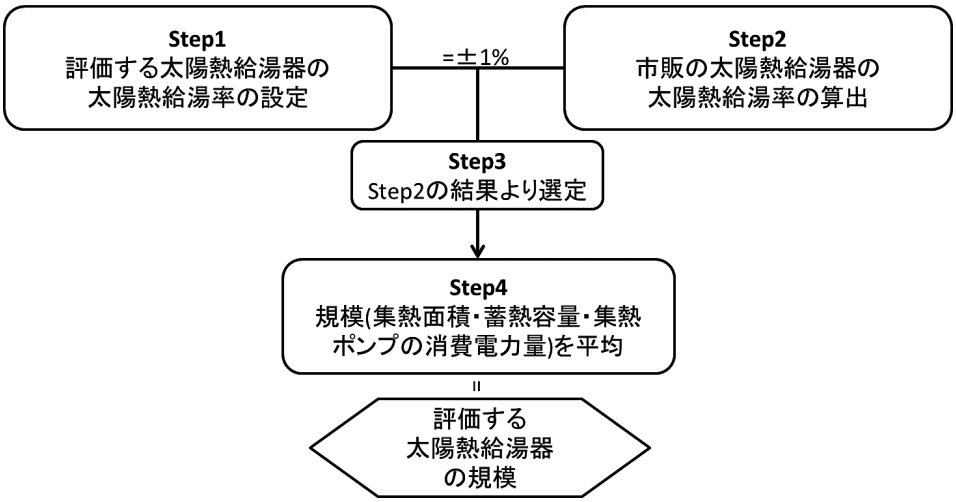


図3　評価対象とする太陽熱給湯器の規模の算出フロー

表1　評価対象とする太陽熱給湯器の規模

	一体型	分離型
集熱面積［m^2］	3.3	4.0
蓄熱容量［L］	200	160
集熱ポンプの年間電力消費量［kWh/年］	—	169

なお、図3の算出フローにおける、市販の太陽熱給湯器の太陽熱給湯率の算出（Step2）には、一般社団法人ソーラーシステム振興協会が保有する計算ソフトウェア「CO_2削減効果計算証書発行制度プログラム」を用いた。このソフトウェアは、EESLISM[11]をベースに開発されたものであり、太陽熱給湯器による給湯熱量とエネルギー（ガス、電気）消費量を計算できる。

このソフトウェアでは、図4に示されるように、日射から集熱した熱量（集熱量）と世帯の給湯熱需要とのバランスから、実際に太陽熱給湯器が給湯できる熱量（給湯熱量）が推計される。

集熱量は、太陽熱給湯器の設置条件に基づいた斜面日射量と、規模（集熱器面積と蓄熱槽容量）そして機器性能値（集熱性能および蓄熱槽の熱損失係数）から求められる。本研究では設置条件を東京、南向き、斜面角度30°とした。斜面日射量には日本建築学会「拡張アメダス気象データ」を用いており、365日別の変動を考慮している。機器性能値に関しては、ソーラーシステム振興協会の会員メーカーから市販されている太陽熱給湯器を対象に、JIS A 4112およびJIS A 4113による実験方法に従い、実測された値が用いられている。

他方、給湯熱需要は、標準的な4人世帯の年間を通した給湯パターン（修正M1モード[8]）および、東京の月別平均水温と給湯温度（40℃）の水温差から求められる。

分離型太陽熱給湯器の場合には、集熱ポンプの年間消費電力量も当該ソフトウェアで計算できる。集熱ポンプの稼働時間に定格出力をかけることで集熱ポンプの電力消費量が算出される。なお、集熱ポンプは過熱を防ぐため、蓄熱槽内の温度が80℃以上になると止まる仕組となっており、このソフトウェアでもそのような実態を反映して、集熱ポンプの稼働時間を算出する。

3. 推計方法とデータ

3.1 計算方法

図2において示した各給湯システムのライフサイクルCO_2排出量および一次エネルギー消費量は（1）式より推計した。

$$E_x = \sum_i (M_i \times E_i) \quad (1)$$

ここで、E_xは給湯システムxのライフサイクルCO_2排出量［kg-CO_2］あるいは一次エネルギー消費量［MJ］を示す。M_iは、素材・エネルギー種iの使用量［Unit］であり、機器の構成素材量、組立加工エネルギー、運用エネルギーを指す。E_iは素材・エネルギー種iの各種係数［kg-CO_2 or MJ/Unit］である。各種係数とは、CO_2排出原単位と一次エネルギー原単位を示しており、これらについてはLCAソフトウェアMiLCA[12]の値を用いた。なお、太陽光エネルギーは消費してもまた再生が可能であるという理由から、一次エネルギー消費量には含まれていない。

エネルギー収支（EPR）は（2）式より推計した。

$$EPR = E_p / (E_m + E_c + E_{op}) \quad (2)$$

ここで、E_p：システムの生産エネルギー［MJ］、E_m：素材製造エネルギー、E_c：組立加工エネルギー、E_{op}：運用エネルギーを意味する。生産エネルギーを除き、各段階の一

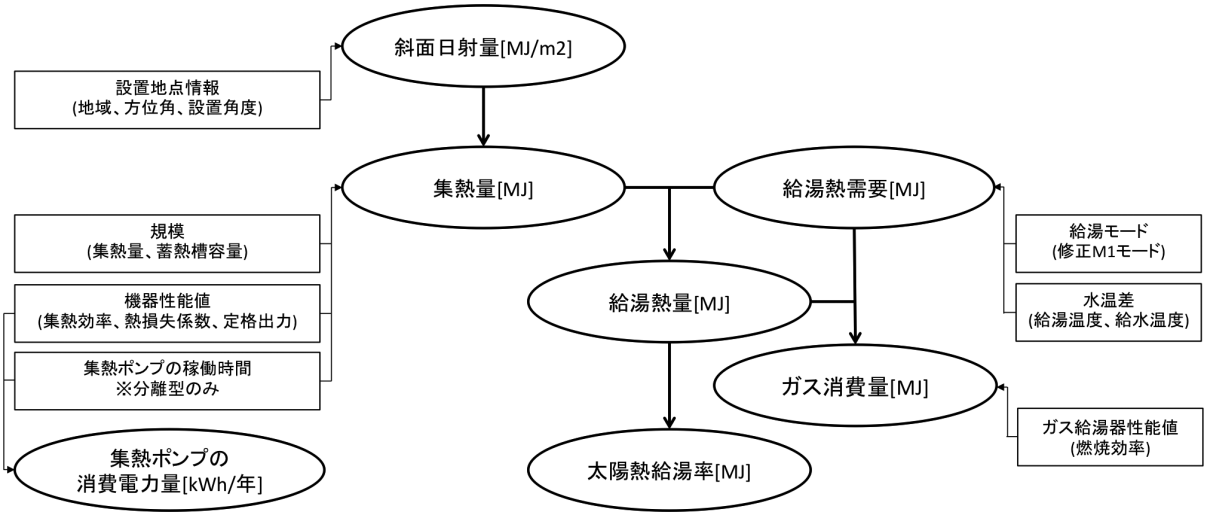


図4　「CO_2削減効果計算証書発行制度プログラム」の計算体系

次エネルギー消費量は（1）式より推計を行った。なお、4人の給湯熱需要を満たす給湯システムを評価対象としているため、生産エネルギーと給湯熱需要は一致する。

3.2 給湯システムの物量データ

3.2.1 ガス給湯器の物量データ

ガス給湯器の構成素材量および組立加工エネルギーに関するデータは、MiLCAの値を参照した。給湯に必要なガスの消費量は、給湯熱需要249［GJ/15年］を、燃焼効率90%で除すことにより求めた。また、ガス給湯器の電力消費に関しては、文献値[13]を参考に87［Wh/day］として計算を行った。

3.2.2 太陽熱給湯器の物量データ

ソーラーシステム振興協会の技術委員会に属する製造業者8社の協力のもと、家庭向けとして市販されている一般的な太陽熱給湯器の構成素材量と組立加工エネルギーに関し、データを収集した。一体型は、集熱面積2～4［m^2］、蓄熱容量200～220［L］、分離型は集熱面積2～6［m^2］、蓄熱容量100～300［L］の範囲でデータを得ており、表1に示す評価対象の規模と近いものである。一体型および分離型太陽熱給湯器の構成素材量と組立加工エネルギーの推定については、それぞれ（a）、（b）項に譲る。

補助熱源として用いるガス給湯器の構成素材量および組立加工エネルギー、運用時の電力消費は3.2.1と同様である。また、ガス消費量は、太陽熱給湯器が供給した残りの60%の給湯熱需要149.4［GJ］を燃焼効率90%で除すことにより求めた。

（a）一体型太陽熱給湯器の構成素材量、組立加工エネルギーの推定

一体型太陽熱給湯器は、集熱部、蓄熱部、接続管、架台から成り、それぞれの機器ごとに構成素材量を推定した結果を表2に示す。

一体型太陽熱給湯器の核となる集熱部と蓄熱部の構成素材量は､3社のデータを用いて推計した。集熱部に関しては、まず、各社の集熱面積1［m^2］あたりの構成素材量の平均値を算出した。この1［m^2］あたりの構成素材量の平均値に対して、表1に示した一体型太陽熱給湯器の集熱面積を乗じることにより、集熱部の構成素材量を算出した。また、蓄熱部に関しても集熱部と同様に、蓄熱容量100［L］あたりの構成素材量の3社平均値を算出し、蓄熱容量（表1）をかけることで、蓄熱部の構成素材量を算出した。

接続管および架台は、家庭用の範囲内では、規模によってその素材量が大幅に変わらないものとみなし、規模の異なるデータであっても全て平均を取ることにした。接続管については、2社から得られた素材量を平均したものを、構成素材量として用いた。また、架台については、3社からデータを得たが、脚付きか否か、角度調整機能があるか否かで、重量に大きな差異が生じる。したがって、本研究においては脚および角度調整機能の無い屋根に直接取り付けるタイプの1社の架台の構成素材量を用いた。

組立加工エネルギーに関しては、1社からのみデータを得られたが、集熱部と蓄熱部に分けてデータを得ることができなかったため、家庭向けに製造された一体型太陽熱給湯器の範囲内では、規模によらず組立加工エネルギーは一定のものと仮定した。よって、1社から得られた組立加工エネルギーを、評価対象とする一体型太陽熱給湯器の組立加工エネルギーとしてそのまま用いた。

表2　一体型太陽熱給湯器の構成素材および組立加工エネルギー

集熱部	ガラス	19.23 kg
	ステンレス鋼材	20.49 kg
	亜鉛メッキ鋼板	8.83 kg
	鉄	0.98 kg
	発泡スチロール	0.41 kg
	グラスウール	0.71 kg
	合成ゴム	0.10 kg
	プラスチック	0.04 kg
蓄熱部	ステンレス鋼材	10.66 kg
	鉄	0.32 kg
	黄銅	0.11 kg
	銅	2.86 kg
	亜鉛メッキ鋼板	1.84 kg
	青銅	0.28 kg
	発泡スチロール	1.14 kg
	グラスウール	0.67 kg
	合成ゴム	1.01 kg
	ポリエチレン	9.20 kg
	プラスチック	0.06 kg
接続管	ポリエチレン	0.09 kg
	塩化ビニル	0.25 kg
架台	ステンレス	0.08 kg
	熱感圧延鋼材	1.98 kg
	鋼材	0.57 kg
組立加工	電気	28.58 kWh
エネルギー	LPG	4.88 kg

（b）分離型太陽熱給湯器の構成素材量、組立加工エネルギーの推定

分離型太陽熱給湯器は、集熱器、蓄熱槽、接続管、架台、リモコン、電装、コントローラーから成り、それぞれの機器ごとに構成素材量を推定した結果を表3に示す。

表3　分離型太陽熱給湯器の構成素材量および組立加工エネルギー

集熱器	ガラス	25.38 kg
	アルミ	9.75 kg
	鋼材	6.65 kg
	銅	3.07 kg
	亜鉛メッキ鋼板	5.29 kg
	ステンレス鋼材	9.32 kg
	グラスウール	1.42 kg
	発泡スチロール	0.53 kg
	シリコン	0.04 kg
	合成ゴム	0.58 kg
	プラスチック	0.19 kg
接続管	アルミニウム	4.10 kg
架台	鉄	3.80 kg
	鋼材	6.98 kg
	ステンレス鋼	0.10 kg
リモコン	ABS樹脂	0.32 kg
	アクリル樹脂	0.03 kg
	ポリプロピレン	0.02 kg
蓄熱槽	ステンレス鋼材	22.2 kg
	鉄	5.01 kg
	黄銅	1.29 kg
	銅	1.75 kg
	鋼材	21.53 kg
	グラスウール	1.50 kg
	発泡ポリエチレン	0.01 kg
	プロピレングリコール水溶液	17.37 kg
	プラスチック	1.28 kg
	シリコン	0.66 kg
	合成ゴム	0.22 kg
	ポリエチレン	1.08 kg
電装	銅	0.10 kg
	亜鉛メッキ鋼鈑	0.80 kg
コントローラー	ポリスチレン	0.18 kg
	ポリウレタン	0.42 kg
	はんだ	0.02 kg
組立加工エネルギー	電気	223.06 MJ
	LPG	144.29 MJ

分離型太陽熱給湯器の核となる集熱器と蓄熱槽の構成素材量に関しては、4社からデータを入手した。集熱器はまず、4社のデータを用いて集熱面積1［m^2］あたりの構成素材量の平均値を算出した。この平均値に、表1に示した分離型太陽熱給湯器の集熱面積を乗じることによって、構成素材量を算出した。蓄熱槽に関しても、集熱器と同様100［L］あたりの4社の平均値を算出した。ただし、蓄熱槽の一部である集熱媒体は、4社のうち2社が利用しているプロピレングリコール水溶液とし、2社の使用量の平均値を採用した。この平均値に蓄熱容量を乗じることによって評価対象とする分離型太陽熱給湯器の蓄熱槽の構成素材量を算出した。

接続管、架台、リモコン、電装、コントローラーに関しては、集熱面積や蓄熱容量が変化しても、その規模は一定であるとし、構成素材量も変わらないものとした。接続管および架台は2社の平均を取り、それ以外は1社のみから得た構成素材量を、そのまま用いた。

組立加工エネルギーは、2社から得たデータをもとに、集熱面積1［m^2］あたり、蓄熱容量100［L］あたりの組立加工エネルギーを別々に求めた。そして評価対象とする分離型太陽熱給湯器の規模（表1）を乗じることで、組立加工エネルギーを算出した。

さらに、分離型太陽熱給湯器の場合には、2.3節で述べたように計算ソフトウェアを用いて集熱ポンプの稼働時間を計算し、それに定格出力をかけることで電力消費量を算出した。

表4　ライフサイクルCO_2排出量およびエネルギー収支

	ガス給湯器	一体型	分離型
CO_2排出量［g-CO_2/MJ］	56.7	35.5	42.0
エネルギー収支［-］	0.9	1.4	1.2

4. 結果と考察

4.1 CO_2排出量とエネルギー収支

表4に、ガス給湯システム、一体型太陽熱給湯システム、分離型太陽熱給湯システムの給湯熱需要1［MJ］あたりのライフサイクルCO_2排出量とエネルギー収支の結果を示す。

一体型・分離型太陽熱給湯システムのライフサイクルCO_2排出量は、ガス給湯システムのそれに比べて、それぞれ37%、26%小さい。エネルギー収支に関しては、ガス給湯システムが0.9であるのに対し、太陽熱給湯システムは一体型で1.4、分離型で1.2である。つまり、ライフサイクル全体にわたり投入した一次エネルギーを考慮しても、太陽熱給湯システムは投入エネルギーよりも生産エネルギーの方が大きい。ただし、太陽光エネルギーは投入エネルギーとしては計上されていない。

図5にそれぞれの給湯システムのCO_2排出量の内訳を示す。概して、どの給湯システムも使用段階での影響が大きく、製造と組立加工の影響は小さい。ただし、組立加工分は完成品メーカーにおけるCO_2排出量のみを対象としており、外注部品の製造や輸送などに伴うCO_2排出量は考慮していない。ガス給湯システムと比較すると、太陽熱給湯シ

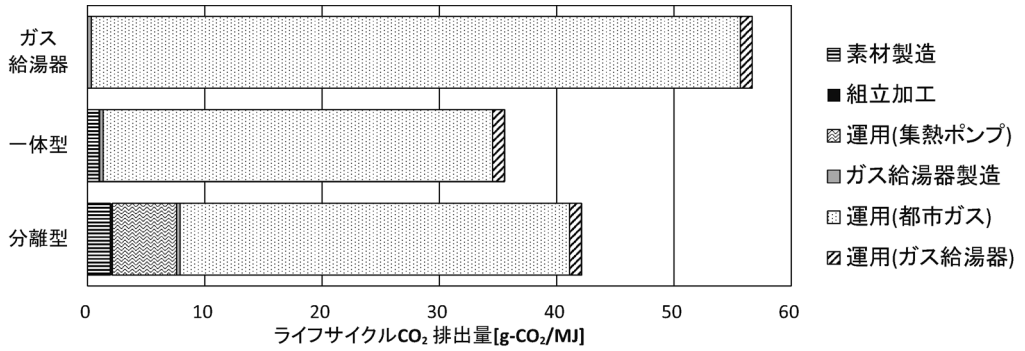


図5　3種の給湯システムのライフサイクルCO_2排出量

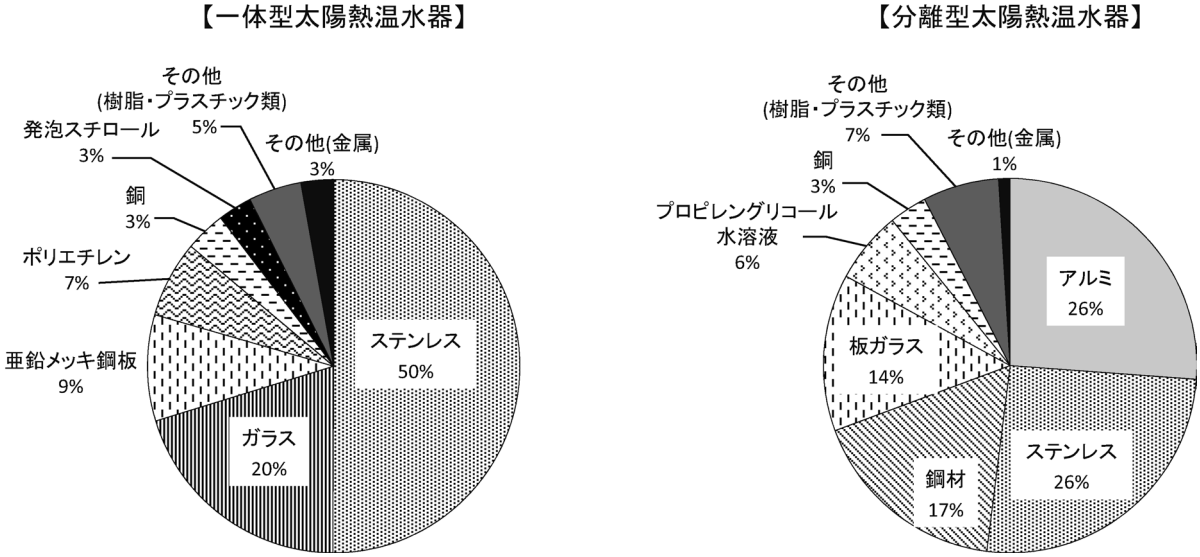


図6　素材製造時の素材別CO_2排出量の百分率

ステムは都市ガスの消費量が少ないことがCO_2排出量の値が小さくなる主な原因である。また、太陽熱給湯システム同士を比較した場合、分離型太陽熱給湯システムのCO_2排出量が多い主な理由は、集熱ポンプでの電力消費である。集熱ポンプに起因するCO_2排出量は、分離型太陽熱給湯システムの全CO_2排出量の内の12%を占めており、分離型太陽熱給湯システムのCO_2排出量を低減させるためには集熱ポンプの電力消費量の削減が重要となる。

図6は、図5における素材製造時のCO_2排出量の素材別内訳を示す。一体型太陽熱給湯器に関しては、ステンレスとガラスの製造からのCO_2排出量で全体の70%を占めている。これら2種の素材製造に伴うCO_2排出量が大きい主な理由は、用いられている素材の重量自体が大きいことにある。表2を見ると、ステンレスは集熱部の重量のうち60%、蓄熱部の重量のうち38%を占めている。また、ガラスも集熱部の38%を占めており、ステンレスに次いで素材重量が多い。一方、分離型太陽熱給湯器の場合は、アルミニウムとステンレスからのCO_2排出量が過半を占めている。一体型と同様、分離型においても使用されている重量の多い素材ほどCO_2排出量も多い。アルミニウムとステンレスの重量が全体に占める比率は、それぞれ9%、21%であることが、表3よりわかる。ただし、アルミニウムのCO_2排出原単位は8.98［t-CO_2/t］と、ステンレスのそれの約2倍であるため、全体に占めるCO_2排出量はほぼ同じとなる。

4.2 太陽熱給湯率の増加による比較

前節で示した結果は、太陽熱給湯器によって、家庭の給湯熱需要のうち40%の熱量を供給する想定に基づいている。しかし、前節の結果が示すように、太陽熱給湯システムのCO_2排出のうち8割から9割が都市ガスの消費によるものであることから、太陽熱給湯率の増加が都市ガスの更なる消費抑制に寄与し、太陽熱給湯システムの環境性能が向上することが期待される。

そこで本節では、夏季に過剰集熱にならない範囲内で、太陽熱給湯率を増加させた場合の検討を行う。太陽熱給湯率を高くするためには集熱器の面積を広くする必要があるが、あまり広くすると、給湯熱需要が下がる夏季において過剰に集熱され、太陽熱温水器に負荷がかかる。そこで本

表5　太陽熱給湯率と太陽熱給湯器の規模

太陽熱給湯率		40%	50%	60%
一体型	蓄熱容量［L］	200	245	270
	集熱面積［m^2］	3.3	4.5	6.0
分離型	蓄熱容量［L］	160	200	300
	集熱面積［m^2］	4.0	6.0	6.0
	集熱ポンプの年間電力消費量［kWh/年］	169	245	270

研究では、製造業者からのヒアリング調査に基づき、夏季に過剰集熱にならない最大の太陽熱給湯率を60%と想定した。表5には太陽熱給湯率が40%、50%、60%の場合の太陽熱給湯器の規模を示す。太陽熱給湯率が50%と60%である場合の太陽熱給湯器の規模は、2.3節にて説明した方法に基づいて、40%の場合と同様に推計した。つまり、「CO_2削減効果証明書発行制度プログラム」にて市販の太陽熱給湯器を対象に太陽熱給湯率を計算し、太陽熱給湯率が50%の場合49% ～ 51%、60%の場合59% ～ 61%となる太陽熱給湯器を選定し、それらの規模を平均した。太陽熱給湯率が高くなるに従い、集熱面積と蓄熱容量、また、分離型の場合は集熱ポンプの電力消費量が大きくなる。ただし、50%と60%の分離型太陽熱給湯器の集熱器の面積が同じであるが、これは実際に販売されている機器の情報に基づき、面積を計算しているためである。分離型太陽熱給湯器の集熱器のユニットは2［m^2］刻みで販売されているため、例えば、計算上は5［m^2］で十分な集熱が可能であっても、4［m^2］で集熱量が不足する場合には6［m^2］を導入するしかない。

図7と8に、太陽熱給湯率を40%、50%、60%とした場合の太陽熱給湯システムのCO_2排出量とエネルギー収支の推計結果をそれぞれ示す。太陽熱給湯率が増加するごとにCO_2排出量とエネルギー収支が改善していることが分かる。太陽熱給湯率を40%から60%に増加すると、CO_2排出量は一体型太陽熱給湯システムで33%、分離型太陽熱給湯システムで21%減少する。これは、太陽熱給湯器の規模の増大による素材製造や組立加工のCO_2排出量やエネルギー消費の増加効果よりも、都市ガス消費量の減少によるCO_2排出量やエネルギー消費の低減効果が大きいことを表している。特に一体型太陽熱給湯システムではその傾向が顕著に見られる。一方、分離型太陽熱給湯システムのエネルギー収支およびCO_2排出量改善効果が一体型に比べて小さい理由は、規模の増大に伴い集熱ポンプもより大きな定格出力を必要とするため、電力消費量も増加することにある。

以上から、家庭向けに製造されている太陽熱給湯器は、集熱器面積、蓄熱容量の規模を可能な限り拡大し太陽熱による給湯を行う方が、CO_2排出量とエネルギー収支の面からは有効であると言える。

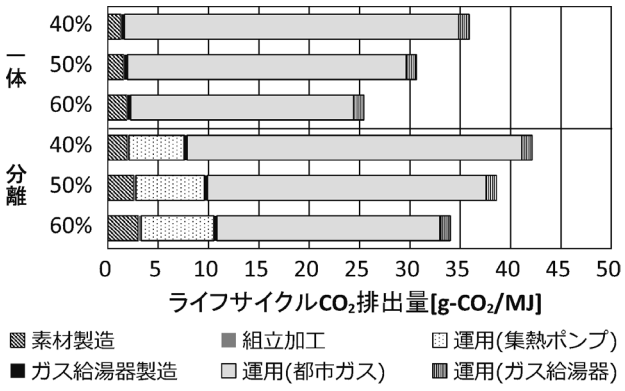


図7　太陽熱給湯率の変化によるライフサイクルCO_2排出量の変化

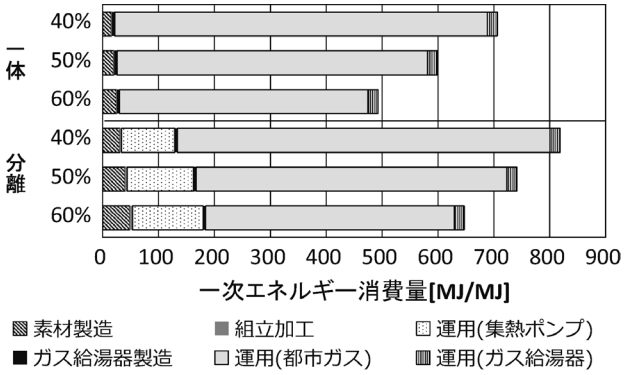


図8　太陽熱給湯率の変化によるエネルギー収支の変化

本稿では、前述したように、家庭向け太陽熱給湯器による給湯可能な範囲として、太陽熱給湯率60%までを考慮した。しかし、太陽熱給湯器の規模をより拡大することで、これ以上の太陽熱給湯率を可能とする太陽熱給湯器を導入することもできる。ただし、給湯率を高めるためには給湯需要が多い冬期に規模を合わせる必要があり、夏期に過剰な集熱がなされる状態が続くと、太陽熱給湯器自体に高熱の物理的負荷がかかることで耐用年数が短くなる恐れがある。よって、規模を拡大する場合には、夏期の余剰熱量を冷房として利用するなど高熱負荷を回避する対応が求められる。

5. 結論

本研究は、エネルギー収支およびライフサイクルCO_2排出量を指標として従来のガス給湯器による給湯と、一体型と分離型という2種の太陽熱給湯器による家庭用給湯システムを比較分析した。この分析に用いたデータは、実際に販売されている太陽熱給湯器を対象として複数社から得ており、現在の日本における太陽熱給湯器の実態を反映したものである。

太陽熱給湯システムは、従来型のガス給湯システムに比べて、運用時の都市ガス消費量を削減できることから、太陽熱給湯システムのCO_2排出量はガス給湯システムのそれに比べて26% ～ 37%小さいことが示された。また、太陽熱給湯システムのエネルギー収支は1.2 ～ 1.4であり、投入エネルギー以上のエネルギーを生産できることが明らかにされた。本研究では、素材製造、組立加工、運用のライフサイクルにわたりCO_2排出量を推計したが、ライフサイクル全体に占める素材製造時の影響は5 ～ 7%程、組立加工は1%に満たない程度とその影響は小さかった。また、一体型太陽熱給湯システムは分離型と比べ、運用時にエネルギーを消費しないため、ライフサイクルCO_2排出量とエネルギー収支の点で優れていることを明らかにした。

さらに、太陽熱給湯率を過剰集熱の起こらない範囲で変化させて分析したところ、導入する太陽熱給湯器の規模を拡大し太陽熱給湯率が増加するほど、太陽熱給湯システムのライフサイクルCO_2排出量の削減効果とエネルギー収支は改善されることが認められた。ただし、太陽熱給湯率を更に高くするためには、夏期の過剰集熱分を冷房などに有効利用することが求められる。

なお、一体型太陽熱給湯システムは分離型と比較してライフサイクルCO_2排出量とエネルギー収支の両面で優れていたが、美観や屋根への荷重など実際の導入において伴う問題を考慮すると、一体型太陽熱給湯システムと分離型の比較は本稿の指標のみで結論付けるのではなく、より多くの観点から議論されるべきである。

謝辞

ヒアリング調査およびデータ提供にご協力頂いた、一般社団法人ソーラーシステム振興協会および会員各社の皆様に謝意を表する。なお本研究の一部は環境省環境研究総合推進費（課題番号2-1302）の支援により実施された。

（平成27年10月13日受付、平成27年12月25日採択）

参照文献

1) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2009): 業務用太陽熱利用システムの導入検討ガイドライン, 1-4
2) Yin Hang et al. (2012): Energy and Building, 45, 181-188
3) Soteris Kalogirou. (2004): Energy Conversion and Management, 45(18-19), 3075-3092
4) Christopher J. Koroneos et al. (2012): Journal of Clear Production, 37, 154-161
5) 鴨志田準司, 浅井俊二 (1997): 太陽/風力エネルギー講演論文集, 361-364
6) 水野朝弘, 浅井俊二 (1998): 太陽/風力エネルギー講演論文集, 269-272
7) 一般社団法人 ソーラーシステム振興協会, 太陽エネルギー利用, 一般社団法人 ソーラーシステム振興協会ホームページ, 入手先 <http://www.ssda.or.jp/energy/index.html>, (参照 2015-9-6)
8) 一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構 (2009): 住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説, 205-288
9) 株式会社 ノーリツ, ニュースリリース, 株式会社 ノーリツホームページ, 入手先 <http://www.noritz.co.jp/library/news/2009files/20091225_01.pdf>, (参照 2015-9-6)
10) リンナイ株式会社, エコジョーズって何？教えて給湯器, リンナイ株式会社ホームページ, 入手先 <http://rinnai.jp/products/waterheater/gas/what/ecoj/>, (参照 2015-9-6)
11) 工学院大学 宇田川研究室, EESLISM, 入手先 <http://ees.arch.kogakuin.ac.jp/>, (参照 2015-9-6)
12) 一般社団法人 産業環境管理協会, LCAソフトウェア MiLCA, MiLCA（みるか） でみえる化をホームページ, 入手先 <http://www.milca-milca.net/>, (参照 2015-9-6)
13) 経済産業省資源エネルギー庁 (2007): 平成20年度待機時消費電力報告書, 6

Journal of Life Cycle Assessment, Japan

特集「第10回日本LCA学会研究発表会からの投稿」

研 究 論 文(Research Article)

太陽光発電システムへの心理的近接性が省エネルギー意識・行動に及ぼす影響

藤本　ひかり[1]・本藤　祐樹[1,*]・弘中　雄介[1]

Effect of Psychological Proximity to PV Systems on Energy-Saving Behavior

Hikari FUJIMOTO[1], Hiroki HONDO[1,*] and Yusuke HIRONAKA[1]

Synopsis:

Objective. Changes in thinking and behavior of consumers are required to solve global environmental problems. Solar photovoltaic (PV) systems may play a significant role for increasing attention to energy issues and behavioral change. The present study focuses on a concept of "psychological proximity to PV systems," that is, a feeling that regards PV systems as a symbol and attachment object, and aims to reveal whether and how it affects energy-saving behavior based on the Value-Belief-Norm (VBN) theory in the social-psychological field. Questionnaire surveys were conducted with 281 households which send their children to three nursery schools (two with and one without PV systems) in Iida city, Nagano prefecture. The questionnaire comprises about 20 questions such as the psychological proximity to PV systems, awareness of energy issues, energy-saving behavior. The collected data was statistically analyzed to find causal relationships between the psychological proximity of PV systems and variables in the VBN theory. In addition, an intervention study to increase the psychological proximity to PV systems at a nursery school was carried out to observe changes in VBN variables associated with the proximity increase.

Results and Discussion. The results of covariance structure analysis show that the psychological proximity to PV systems positively affects some VBN variables, suggesting that it encourages energy-saving behavior through activating the altruistic and biospheric value, and might directly promote two types of energy-saving behavior (i.e. domestic energy-saving behavior, support of energy saving policies). Furthermore, statistical analysis of the intervention study data finds that there is an almost significant relationship between two increases in the psychological proximity to PV systems and the altruistic and biospheric value. Consequently, the psychological proximity to PV systems may directly and indirectly facilitate to engage people in more energy-saving behavior.

Conclusions and Perspectives. The present study revealed a possible mechanism to generate energy-saving behavior when PV systems exist in our daily living area and we have a positive feeling for them. An important conclusion is that the mechanism seems to be different from those to explain behavioral change by conventional energy and environmental education. In the future, authors will collect data by using more long-term follow up survey to thoroughly analyze the mechanism. In addition, we plan to improve the intervention study, and provide effective measures to increase the psychological proximity of PV systems.

Keywords: Energy-saving behavior; intervention study; psychological proximity; solar photovoltaic system; value-belief-norm theory

1　横浜国立大学／〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-7

1　Yokohama National University / 79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, Kanagawa 240-8501

＊連絡先(Corresponding author), hondo@ynu.ac.jp

1. はじめに

地球温暖化などのグローバルな環境問題の解決に向けて、消費者1人ひとりが関与していくことが求められている。地球温暖化問題は、個人の日々の消費行動と密接に結びついているものの、その影響が時間的にも空間的にも遠く離れていることから、消費者がそれを自分自身の問題であると捉える意識が希薄化しやすい。例えば、今日の一般消費者の生活では、プラグにコンセントを差すだけで、簡単に電力を使うことができる。しかしながら、電力がどのように作られ、その過程でどれだけの資源を使ったり二酸化炭素を排出したりしているかということは、考える機会がほとんどない。このような見えない電力システムの状態を本藤[1)]は「ブラックボックス化」と呼び、このことが、エネルギー・環境問題に対する意識の希薄さ、ひいては地球温暖化問題を助長する原因の1つとなり得ると指摘している。つまり、省エネルギー行動を推進するためには、消費者が日頃からエネルギーや環境問題を身近に感じ、それを自分自身の問題であると常に認識できるような状況を作ることが必要である。

このような課題に示唆を与える知見として、太陽光発電（以下、PV）システムに着目したいくつかの研究事例[2-9)]が挙げられる。PVシステムは、従来の大規模集中型の発電技術とは異なり、日常生活の目に見える場に常に存在するという特性を有する。さらに近年では、住宅用のみならず公共施設や企業への設置が急速に普及しており、人々を取り巻く環境は、PVシステムなどの発電技術が生活の一部として身近に存在し得る状況に変化していると捉えることができる。ギフォード[10)]は、我々の行動や態度を規定する感情成分や信念成分は、日常生活の中で影響を受けて形成してくと述べており、この考えに基づいた高山ら[11, 12)]の研究では、生活域の環境が人々の考え方や行動に影響を与えていることが明らかにされている。つまり、我々の意識・行動は、身の回りに存在するものから常に影響を受けていると言える。それ故、近年のPVシステムをとりまく身の回りの環境の変化は、これまで何の疑いもなく使えていた電気やエネルギー、そしてそれらに関係する地球温暖化問題に対して、目を向けるきっかけとなるかもしれない。実際に、既往研究[2-9)]では、家庭や学校に設置されたPVシステムが、そこで生活する人々の環境意識や行動を向上させる可能性が明らかにされている。Hassら[2)]は、PVシステムが設置された世帯の実際の電力消費量を調査し、PVシステム購入が電力消費量を減少させる場合があることを述べている。また、Keirstead[5)]は、質問紙調査とインタビュー調査によって、住宅用PVシステムを導入した後に、その世帯の環境意識や行動が変化する可能性を指摘している。国内では、野田ら[7)]やHondo[8)]が、中学校や保育園などの住宅以外に設置されたPVシステム、つまり自分の所有物でないPVシステムに関しても、その存在が人々の省エネ意識や行動に影響を及ぼす可能性を明らかにしている。

さらに、PVシステムの存在が人々の省エネ行動などを向上させるメカニズムについて、PVシステムに対する感情に着目した研究[8, 9)]がなされてきた。Hondo[8)]は、PVシステムが設置されている保育園に子供を通わせている家庭の省エネ行動に着眼し、保育園のPVシステムに対する「愛着」が、家庭における省エネ行動を促進するのに重要な規定因となっていることを示唆している。また、小学校に設置されたPVシステムを取り扱った溝口ら[9)]の研究では、児童がPVシステムの掃除や発電量の記録などを行い、学校生活においてPVシステムの存在を意識する機会を増やすことで、児童の節電行動がどのように変化するかについて分析している。分析の結果、PVシステムと日常的に関わることで、「PVを好きだ」という気持ちや「PVは学校のシンボルだ」という気持ちが高まることが明らかにされている。さらに、このような気持ちを持った児童ほど、環境問題に対する関心や、節電規範・行動が高まる可能性を示唆している。

以上のように、既往研究では、PVシステムというエネルギー技術との間に感情的なつながりが存在し、それが省エネルギー行動を促進する心理プロセスにおいて重要な役割を果たす可能性があることが示されてきた。本研究では、PVシステムに対して愛着やシンボルに思う気持ちのような感情成分をまとめ、「PVシステムへの心理的近接性（＝PVシステムに対して心理的な距離を近しく感じていること）」と呼ぶ。もし、PVシステムへの心理的近接性が人々の省エネ意識・行動を促進するのであれば、心理的近接性を持たせるような仕組みを作ることで、時間を要せず且つ自然に、環境教育と同様の役割を果たすことが期待できる。しかしながら、PVシステムなどの発電技術に対する感情成分に着眼し、それが省エネ意識・行動にどのように働きかけるのかを検討した研究事例は少ない。また、そのような働きかけのメカニズムを検討した既存研究[8, 9)]においては、PVシステムの心理的近接性に着目しつつも、社会心理学分野における行動理論に基づいた検討はなされていない。

本研究では、PVシステムへの心理的近接性が省エネ行動に与える影響のメカニズムを、社会心理学の分野で知見が蓄積されている行動モデルに基づいて、体系的に明らかにすることを目的とする。PVシステムが設置されている保育園に子どもを通わせる保護者を対象とした質問紙調査によってデータを収集し、PVシステムへの心理的近接性が、省エネ行動を説明するモデルの構成要素のいずれに影響しているのかを分析した。さらに、その影響を確認するため、

PVシステムへの心理的近接性を意図的に高めることを狙った介入実験を行い、心理的近接性の高まりに伴って当該構成要素に向上がみられるのかを検討した。

2. 理論的枠組みと仮説

2.1 VBN理論

環境行動を説明する理論モデルは、心理学や社会心理学の分野を通して数多く構築されてきた。Bamberg[13]によると、環境行動を説明するモデルは大きく、私利的な要因モデルと向社会的な要因モデルの2種に分かれる。私利的な要因モデルは、Ajzenの計画的行動理論[14]に代表され、個人の合理的な意思決定に基づいて環境行動が行わる過程を説明したものである。一方、向社会的な要因モデルでは、Schwartzの規範活性化理論[15]が主流とされ、認知や感情、その他社会的要因による道徳意識の活性化が環境行動に影響する過程が示されている。さらに、Sternは、規範活性化理論に価値理論と自然観・環境観といった人々の信念成分の要素を組み込み、VBN理論（Value-Belief-Norm Theory）[16]として展開させている。

地球温暖化問題などのグローバルな環境問題は、個人の利益の追求のみでは解決に結びつかず、「環境問題の解決のために、個々人が省エネルギーに努めるべき」といった全体の利益を尊重した規範意識の活性化が特に重要である。そこで本研究では、PVシステムへの心理的近接性が与える省エネ行動への影響を分析するにあたり、価値観や規範に基づいて環境行動の心理プロセスを記述する「VBN理論[16]」を理論的枠組みとする。この枠組みを用いて環境行動を説明した研究には、自動車利用の低減意思を対象としたもの[17]のほか、エネルギー政策の受容性[18]、公園の利用[19]を対象としたものなどがある。さらに、省エネルギー行動の説明にもVBN理論を用いることが可能であることをIbtissem[20]、Sahin[21]は示している。

VBN理論では、例えば省エネ行動を行うのには、自分が省エネ行動をすべきだという「個人規範」が活性化されるからであると考える。この個人規範には、地球温暖化やエネルギーの大量消費の責任が自分にあると感じる「責任帰属」が、責任帰属にはこれらの問題が重大であるとの認識「重要性認知」が影響しているとされる。さらに、重要性認知には自然も人間も人間以外の種も平等だと捉える考え方「New Environmental Paradigm；NEP」が影響を与え、NEPには人々の信念や価値観が影響していると説明される。ここで、自分の利益を重視する「利己的価値」はNEPに負の影響を与え、自分以外の人や、全体にとって利益となる事柄を重んじる「利他的価値」、及び自然界のある地域に住むすべての生物群集や環境を大切にする考え方である「生態系価値」はNEPに正の影響を与えるものとされる。

2.2 仮説

図1に、本研究の仮説を示す。既往研究[19, 22]の知見を参考に、「価値観」については概念を2カテゴリーとし、自分の利益を重視する価値観を「利己的価値」、自分以外の人や人間以外の種などの全体の利益を重視する価値観を「利他的・生態系価値」とした。また、VBN理論で説明される環境行動は、環境主義行動（デモへの自主的参加等）、社会レベルの環境行動（環境政策の支持や受容等）、個人レベルの環境行動（家庭内の省エネなど）、組織レベルの環境行動（製品の環境配慮設計など）、の4種であるが、本研究においては、社会レベルの環境行動の指標として「省エネ政策の受容性」を、個人レベルの環境行動の指標として「家庭内省エネ行動」を取り上げた。

本研究では、PVシステムへの心理的近接性は、VBN理論が提唱する行動モデルの構成要素（価値観、NEP、重要性認知、責任帰属、個人規範、省エネ政策の受容性、家庭

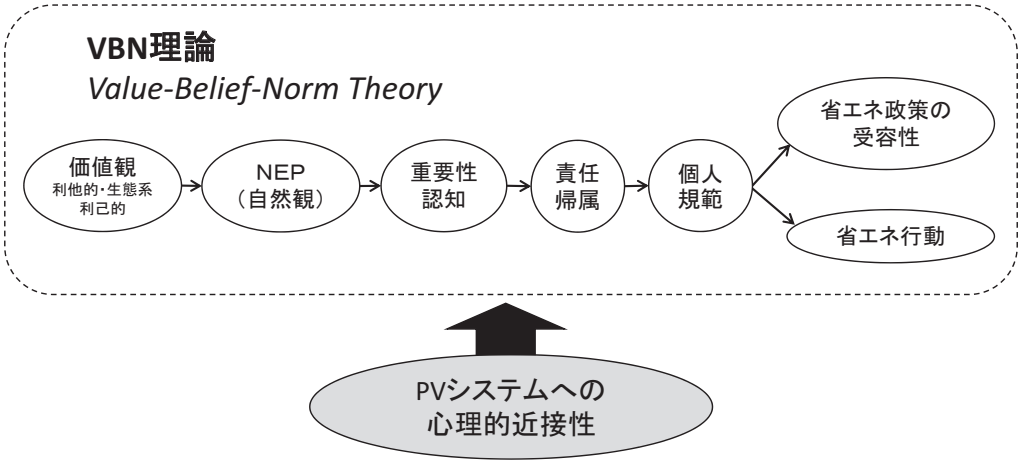


図1　理論的枠組みと研究仮説

内省エネ行動）のいずれかに影響を与え、省エネ政策の受容性や家庭内省エネ行動を向上させるという仮説のもと、分析を行う（図1）。地球環境志向のイメージを持ちやすいPVシステムに心理的近接性を抱くことで、環境問題は自分にも関係があるという認識を持ち、重要性認知、責任帰属、個人規範など認知的な要素が活性化されるかもしれない。一方で、PVシステムは物体（装置）としてそこに存在しているだけであり、省エネ意識・行動を啓発するような文字・数値情報を発信しているわけではない。それ故、環境教育や情報提供等でも活性化される上記のような認知的要素の他、さらに異なった要素にも影響する可能性がある。例えば、日頃の生活環境から形成される価値観やNEPといったプロセスのより上位側、さらには省エネ政策の受容性や家庭内省エネ行動に直接的に働きかけることも考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、保育園に設置された「公共のPVシステム」、そして、現在いわゆる環境教育を受ける立場にない「保護者」を研究対象として取り上げる。個人が所有しているPVシステムでは、節電や省エネ行動を行うことで余剰電力の売電量が増加するといった経済的な便益が発生する。そのため、自己の経済的便益に基づく合理的な選択の結果として省エネ行動が実施される可能性が高い。一方で、公共のPVシステムの場合には、そのような私的な経済的便益には直接関係しない。つまり、公共のPVシステムを対象とすることで、経済的な要因をある程度排除し、よりVBN理論を構成する要素に着眼した解析が可能になると考えられる。また、前述のように、認知的と非認知的の両方の影響プロセスが有り得るPVシステムへの心理的近接性の働きをより明確化するためにも、エネルギー・環境教育の影響を可能な限り取り除くことが求められる。この理由から、現在、教育を受ける立場にない、当該保育園に子どもを通わせる保護者を対象とする。

3. 方法

長野県飯田市の保育園に子どもを通わせる保護者を対象に、PVシステムの心理的近接性や省エネ意識・行動などに関する質問紙調査を実施し、得られたデータを用いて2章で示した仮説を検証した。さらに、PVシステムへの心理的近接性を意図的に高めることを狙った介入実験を行い、介入前後における質問紙調査から、心理的近接性の向上がもたらす影響について検討した。

3.1 対象とするPVシステム

本研究では、PVシステムが設置された長野県飯田市の保育園を調査対象とした。PVシステムは平成16～17年より園舎の屋根の上に設置されており、保護者は日常的に目にすることができる（図2）。

図2　調査対象園のPVシステム

表1　質問紙調査の概要

実施期間	介入前	平成26年11月27日～12月8日
	介入一カ月後	平成27年2月6日～2月16日
対象者	長野県飯田市の保育園3園に子どもを通わせる保護者	
人数	A園	（PVあり，介入あり）92名
	B園	（PVあり，介入なし）100名
	C園	（PVなし，介入なし）89名
	合計	281名
実施方法	保育園経由での配布/回収	
回答方式	リーカット尺度による選択法、記名式	
回収率	介入前	245/281(87.2％)
	介入一カ月後	228/281(79.2％)

3.2 質問紙調査

表1に示されるように、平成26年11月27日～12月8日の期間で、長野県飯田市の保育園に子どもを通わせる保護者（3園、281名）を対象に質問紙調査を行った。対象の3園には、PVシステムが設置されている園（A園、B園）に加えて、設置されていない園（C園）が含まれる。調査は、各保育園へ質問紙を一括して送付し、園の職員によって保護者に配布・回収をしてもらい、回答済みの質問紙を一括して返送してもらう形で実施された。質問紙は、図1の仮説のメカニズムに沿って、家庭内省エネ行動、省エネ政策の受容性、その他VBN理論の構成要素、PVシステムへの心理的近接性などの設問項目から成り、リッカート尺度を用いた5段階評定による20問程度の設問で構成される（表2）。質問紙の設計にあたっては、大学生を対象にプレ調査（2回、計228名）を実施し、質問文の信頼性を確認し適宜修正を加えた。PVシステムへの心理的近接性は、先行研究[8, 9]等を参考に、PVシステムに愛着を感じること（＝「PV愛着」）、PVシステムをシンボルに思う気持ち（＝「PVシンボル」）、PVを自分のもののように思う気持ち（＝「PV自

表2　質問紙調査の設問一覧

測定項目	設問	
心理的近接性	PVシンボル	太陽光発電システムは園のシンボルだと思う
	PV愛着	園の太陽光発電システムに愛着を感じる
	PV自己所有感	園の太陽光発電システムを自分のもののように思う
利己的価値	富	財産やお金を手に入れること
	社会的権力	他者よりも優位に立つこと
利他的・生態系価値	平等	すべての人に均等な機会が与えられること
	社会正義	不正を正し、弱いものに配慮すること
	環境保護	自然環境を守っていくこと
	地球の尊重	地球を尊重し、動植物と共存して生活を送ること
NEP	1	人間活動が現在のまま続けば、きっと近いうちに取り返しのつかない自然破壊がもたらされるだろう
	2	人間と動植物の生きる 権利は同等である
	3	人間の活動は、地球が支えることができる能力の限界に近づいている
	4	人間が自然に手を加えると、しばしば悲惨な結果をもたらす
重要性認知	1	地球温暖化は社会として取り組むべき深刻な問題である
	2	エネルギー資源の大量消費はきわめて重大な社会問題である
責任帰属	1	地球温暖化に関して、私にも責任がある
	2	大量のエネルギー消費は政府や工場だけでなく私にも責任がある
個人規範	1	エネルギーを無駄遣いしていると、罪悪感を覚える
	2	他の人がどうするか関係なく、私は省エネルギーに努めなければならないと思う
省エネ政策受容性	製品開発	省エネルギー製品開発を支援するために、新たな税金を導入する政策
	ガソリン	ガソリン車に対して追加的な税金をかける政策
	再エネ税	あなたの住んでいる地域に再生可能エネルギーを導入するため、市民税を高くする政策
家庭内省エネ行動	コンセント	使用しない電化製品のコンセントは抜いている
	テレビ	部屋を離れるのが5 分くらいでもテレビを消している
	情報	省エネや節電に関する情報を、自ら探している
	暖房	寒い日も暖房はなるべく使わず、衣服で調節している
	呼びかけ	家族に省エネをしようと呼びかけている
	冷蔵庫	冷蔵庫を開け閉めする回数・時間は最小限にしている
	照明	なるべく照明をつけず、自然の光で生活している

※各設問は、5段階で回答を求め、点数を付与した。
「とてもそう思う/とても重要/賛成/毎日している」＝5点
「そう思う/やや重要/どちらかと言えば賛成/ほぼ毎日している」＝4点
「ややそう思う/どちらとも言えない/時々している」＝3点
「あまりそう思わない/あまり重要でない/どちらかと言えば反対/まれにしている」＝2点
「そう思わない/重要でない/反対/していない」＝1点
「機会がない」＝除外

己所有感」）の3点を測定変数とした。省エネ政策の受容性は、省エネ社会へ向けた仮想の3政策に対する受容性を測定した。家庭内省エネ行動は、7種の行動の実践度を測定しており、「毎日している」～「していない」の5段階に「機会がない」を加え、回答を求めた。

なお分析にあたっては、各園あたり全学年の保護者、計245名から得られた回答のうち、有効回答である224名分のデータを対象とした（表1）。

3.3 介入実験

3.2の質問紙調査の後、PVシステムが設置されたA保育園を対象に、平成26年12月25日より介入実験を実施した。介入実験の狙いは、保護者が日常生活の中でA園のPVシステムを意識する機会や、身近に感じられる状態を作ることを通して、園のPVシステムへの心理的近接性を高めることにある。介入の内容は、市役所職員及び園職員への聞き取り調査をもとに手間や実現可能性、介入の継続性等の観点から検討し、「PV連絡帳の利用」と「ソーラーライトキーホルダーの所有」の2種で構成した。

「PV連絡帳の利用」は、普段使用している連絡帳に、園のPVシステムの写真が表紙となったカバー（図3）を取りつけ、使っていただくものである。保育園と保護者の間

図3　介入実験で用いた連絡帳カバー

では毎日、連絡帳を使って情報の交換が行われている。もともとA園の全世帯が使用していた一般的なB6ノートに、PVパネルと園舎の外観が表紙となったカバーをとりつけ、A園の全世帯において利用を試みた。連絡帳の表紙となるため、PVシステムを園のシンボルだと思う気持ちが高まること、また、連絡帳は保護者が毎日目を通すものであることから、見る機会が増えることでPVシステムに対する愛着が湧いてくることを狙っている。

「ソーラーライトキーホルダーの所有」は、太陽電池がついたLEDライトキーホルダー（図4）を配布し、かばんや車のキーなどに付けて使っていただくものである。ボタンを押すとライトが光るキーホルダーを防犯用・防災用として保護者に1つ、園児に1つ配布した。保護者用は車のキーや家のカギにつけるよう依頼した（介入後調査によると84％の保護者がそれに従って何らかの利用をしていたことが確認できている）。園児用は通園カバンに装着した（図5）。PVシステムと同じように太陽の光で機能するものであることから、似た機能のものを自分で所有することで、園のPVシステムを身近に感じ、自分のもののように思う気持ちが高まること、そして、改めてPVシステムの機能を理解することにつながり、愛着がわいてくることを期待している。

介入開始から約1カ月後にあたる平成27年2月6日～2月16日の期間で、3.2と同様の質問紙による追跡調査を実施し、介入効果を測定した（表2）。なお、介入実験実施園（A園）に加えて、PVシステムが設置されているが介入実験は行わない園（B園）、PVシステムが設置されておらず介入実験も行わない園（C園）においても、同時期に質問紙調査を実施した。分析にあたっては、記名をもとに前後の照合がとれた128名分のデータを対象とした。

図4　介入実験で用いたソーラーライトキーホルダー

図5　ソーラーライトキーホルダーが園児の通園カバンに装着された様子

4. 結果と考察

4.1 介入前調査に基づく仮説の検証

本節では、介入実験前の質問紙調査で得られた有効データ（N=224）を用いて、仮説に示したVBN理論とPVシステムへの心理的近接性の関係を体系的に明らかにする。尺度の信頼性を検討した後、共分散構造分析によるパス解析を行い、VBN理論が提唱する行動モデルを検証する。その上で、PVシステムへの心理的近接性がVBN理論の行動モデルの構成要素のいずれに影響しているのかを分析する。

4.1.1 尺度

VBN理論尺度、及び心理的近接性尺度の信頼性を検証する。質問紙調査から得られたデータに対し因子分析（最尤法・プロマックス回転）を行って因子を抽出した後、クロンバックのαを用いて抽出した因子の信頼性を確認した。表3に各尺度のα係数を示す。信頼度の判定については、項目数を考慮し、その値が0.6以上であれば信頼性を認め、尺度として定めた。表3に示されるように、多くの尺度で概ね良好な信頼性が得られた。但し、利己的価値については、2項目間のクロンバックの信頼性係数αは低く（α=.481）、質問文の表現及び相関分析の結果を考え合わせた

結果、一つの要素を測っていると認めるのは困難と判断した。よって、相関分析や因子分析を参考に、2項目のうち、利己的価値をより正確に測定できていると考えられる「社会的権力：他者よりも優位に立つこと」を尺度として用いることとした。

表3　各尺度の信頼性係数（α）

設問	尺度	α
PVシンボル PV愛着 PV自己所有感	心理的近接性	0.830
富 社会的権力	利己的価値※	0.481
平等 社会正義 環境保護 地球の尊重	利他的・生態系価値	0.808
NEP1 NEP2 NEP3 NEP4	NEP	0.785
重要性認知1 重要性認知2	重要性認知	0.649
責任帰属1 責任帰属2	責任帰属	0.729
個人規範1 個人規範2	個人規範	0.658
製品開発 ガソリン 再エネ税	省エネ政策の受容性	0.799
コンセント テレビ 情報 暖房 呼びかけ 冷蔵庫 照明	家庭内省エネ行動	0.767

※利己的価値は信頼性係数が低いため、「社会的権力：他者よりも優位に立つこと」を尺度として用いる。

4.1.2 VBN理論の検証

はじめに、3園の有効データ（N=224）を用い、省エネ行動に関して、VBN理論が提唱するモデルの検証を行った。共分散構造分析については、IBM社のSPSS-Amosを用いた。

因果の強さを示すパス係数とその有意確率、及び各種適合度指標[23]の度合いを参考に、構成要素の概念についても再検討した結果、NEP及び利己的価値を除外したモデルが妥当であると判断した（図6）。図中の値は標準化パス係数と決定係数であり、パス係数の**印は1％水準で有意であることを示している（図中の楕円は潜在変数を示しており、観測変数と誤差変数は省略している）。図6に示されるように、利他的・生態系価値から家庭内省エネ行動及び省エネ政策の受容性に至る一連の心理プロセスは統計的に支持された。特に、重要性認知→責任帰属→個人規範間のパスは強固な値であった。また、省エネ政策の受容性の説明力は低く（R^2=.07）、個人規範による説明には限界があることが示唆された。これは、オランダ北部で行った調査において、個人規範がエネルギー政策の受容性の大きな規定因となると示したStegら[18]とは異なる結果である。日本における省エネ政策の受容性は、「自分が省エネをすべきだ」という個人の規範よりも、他の要因（例えば、政策によるコスト負担の懸念、便益の有無など）が強く影響していると考えられる。また、Stegらが用いたエネルギー政策の受容性の質問文に比べて、本調査で設けた政策受容性に関する質問文は、消費者の負担をより強く連想させるものであった可能性が高い。それ故、個人規範による説明力が低くなっていたとも考えられる。

以上の結果より、NEP及び利己的価値を除外しているものの、一連の心理プロセスは統計的に支持されており、省エネ政策の受容性及び家庭内省エネ行動がVBN理論によって説明できることが示された。

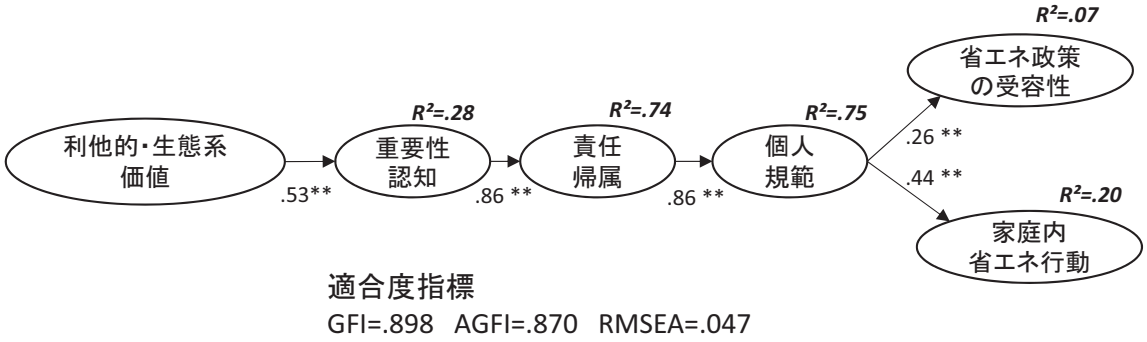


図6　VBN 理論の検証

4.1.3 心理的近接性が与える影響

続いて、PV設置園（A園とB園）の有効データ（N=156）を用いてPVシステムへの心理的近接性を外生変数として加えた共分散構造分析を行い、行動モデルの構成要素のいずれに影響を与えているのかを検討した（図7）。図7に示されるモデルの適合度はやや不良であるが、モデルが棄却されるほどではない。ここでは、このようなモデルの状態に留意しつつ、心理的近接性からのびるパスに焦点を当て考察を行う。

共分散構造分析の結果、「PVシステムの心理的近接性」は、「利他的・生態系価値」に1％水準で有意に正の影響を与えていることが分かった。検出された心理的近接性から利他的・生態系価値へのパスは、公共のもの（PVシステム）に心理的近接性を抱くことで、人の考え方を構成する根本的な価値観に刺激を与え、社会や他人のために自然環境を大切にしようという、利他的な考え方を促す傾向があることを示していると考えられる。表4は、心理的近接性と利他的・生態系価値の設問毎の得点について、スピアマンの順位相関分析を行った結果を示している。例えば、心理的近接性-PVシンボルと利他的・生態系価値-地球の尊重との相関係数は.193であり、5％水準で相関があることが読み取れる。表4に示されるように、PVシンボル、PV愛着、PV自己所有感のすべてにおいて利他的・生態系価値の「地球の尊重」との有意な相関が検出された。PVシステムは環境志向のイメージを抱きやすい発電技術であることから、PVシステムに対して高い心理的近接性を持つ保護者ほど、地球環境への配慮の意識を持ちやすくなると解釈できる。

また、図7のモデルに「心理的近接性」から「利他的・生態系価値」以外へのパスを付加したモデルを検討したところ、「心理的近接性」から「省エネ政策の受容性」と「家庭内省エネ行動」への2本のパスが引ける可能性が確認された。それぞれのパスは有意に近い値（それぞれ、p=.065、p=.059）で正の影響を与えていることが分かった。これは、PVシステムに心理的近接性を抱くことで、地球温暖化問題やエネルギーの消費増大に関する特別な知識や危機感、責任感等を有していなくても、省エネ行動が誘発される過程が存在すると解釈できる。つまり、これらの結果は、PVシステムへの心理的近接性が、環境教育や情報提供で

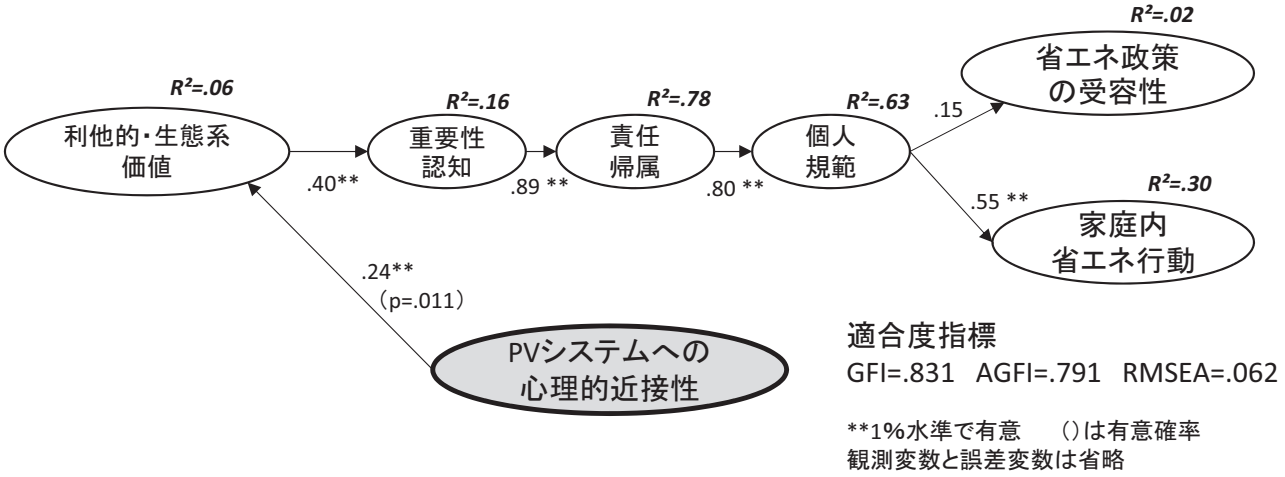


図7 PVシステムへの心理的近接性が省エネ行動へ影響するメカニズム

表4 心理的近接性と利他的・生態系価値の相関分析

			利他的・生態系価値			
			平等	社会正義	環境保護	地球の尊重
心理的近接性	PVシンボル	相関係数	0.180*	0.094	0.078	0.193*
		有意確率（両側）	0.025	0.241	0.332	0.016
	PV愛着	相関係数	0.156	0.137	0.173*	0.221**
		有意確率（両側）	0.051	0.089	0.031	0.006
	PV自己所有感	相関係数	0.039	0.046	0.071	0.189*
		有意確率（両側）	0.631	0.569	0.379	0.018

**. 相関係数は 1% 水準で有意（両側）
*. 相関係数は 5% 水準で有意（両側）

活性化される認知的なプロセスとは特徴を異にするメカニズムで省エネ行動を後押ししていることを示唆している。

4.2 介入実験に基づく仮説の検証

本節では、PVシステムへの心理的近接性を高めるための介入実験による変化を、介入実験の前と介入一カ月後における2回の質問紙調査のデータを用いて明らかにする。介入前後の2時点の変化量に着目することで、4.1項の分析結果に表されるように、PVシステムへの心理的近接性の向上が、利他的・生態系価値や省エネ政策の受容性、家庭内省エネ行動に影響しているのかを検証する。

なお、介入前調査の段階では、PV設置園（A・B園）と非設置園（C園）を含む3園間の省エネ意識・行動には特徴的な差異がないことが認められている（詳細は付録を参照）。また、統制群として質問紙調査を実施したC園については、介入実験の前後で省エネ意識・行動に変化がみられていないことを確認しており、以降の分析では言及しない。

4.2.1 心理的近接性の変化

PVシステムへの心理的近接性は「太陽光発電システムは園のシンボルだと思う」「園の太陽光発電システムに愛着を感じる」「園の太陽光発電システムを自分のもののように思う」の3つの設問を設けている。表2に示す方法で保護者の各回答に点数を付与し、介入前後の平均値を算出した。各設問のA園とB園の平均値、及び*t*検定による有意確率を表5に示す。A園（介入実験有り）では、3つの設問のすべてで介入後の値が介入前の値を上回る傾向にあったが、特にPVシンボルの高まりが大きかった。*t*検定（対応あり）の結果、PVシンボルは有意に近い向上が確認された。また、介入実験を行っていないB園と比較しても、PVシンボル、PV愛着、PV自己所有感、合計値すべてにおいてA園の平均値の高まりが大きいことが読み取れる。以上より、今回実施した介入実験を通して、人によってはPVシステムへの心理的近接性が高まる効果が示唆された。

連絡帳カバーは毎日目にするものであったことから、シンボルと思う気持ちは高まりやすかったことが推察される。他方、PV愛着とPV自己所有感の向上はあまり見られなかった。特に、PV自己所有感についてはもともと平均値が低く、園のPVシステムを「自分のもの」と思うことは難易度が高い様子がうかがえる。そのため、連絡帳カバーやソーラーライトキーホルダーの所有ではこの変化を促すのには十分でなかった可能性が考えられる。また、介入後一カ月という短期間の時点の結果であるという点も留意すべきである。愛着意識や自己所有意識のような比較的強い感情の形成には、一カ月程度の期間では十分でなく、さらに長い時間を要する可能性がある。

4.2.2 心理的近接性の変化と省エネ意識・行動の関係性

ここでは、介入実験による心理的近接性の向上が、省エネ意識・行動にもたらした影響について検討を行う。前節の共分散構造分析の結果に基づき、有意なパスが検出された利他的・生態系価値、及び、有意に近いパスが検出された省エネ政策の受容性、家庭内省エネ行動に着目し、介入前後におけるこれらの要素の変化について分析した。

表5　介入前後における心理的近接性の平均値

測定項目	園	人数	介入前後	平均値	標準偏差	*t*値	有意確率（両側）
PVシンボル	A園（介入あり）	50	前	2.68	1.186	–1.853	0.070
			一カ月後	2.92	0.966		
	B園（介入なし）	45	前	2.89	1.133	–0.321	0.750
			一カ月後	2.93	1.074		
PV愛着	A園	50	前	2.58	1.108	–0.191	0.850
			一カ月後	2.60	0.808		
	B園	45	前	2.56	1.099	0.973	0.336
			一カ月後	2.42	0.988		
PV自己所有感	A園	50	前	1.64	0.693	–0.781	0.438
			一カ月後	1.72	0.701		
	B園	45	前	1.64	0.802	1.138	0.261
			一カ月後	1.51	0.589		
心理的近接性（合計）	A園	50	前	6.90	2.589	–1.342	0.186
			一カ月後	7.24	2.066		
	B園	45	前	7.09	2.704	0.763	0.449
			一カ月後	6.87	2.232		

表6は、心理的近接性の変化と上記3種の尺度との関係を分析した結果である。介入実験を行ったA園の保護者のデータ（N=50）を用い、「一カ月後の単純加算値（例えば、利他的・生態系価値の場合、4設問の合計値）」から「介入前の単純加算値」を差し引いた値が1以上であった保護者を「向上グループ」、そうでない場合を「非向上グループ」と区別した。その上で各尺度に関して、介入前と介入一カ月後のPVシステムへの心理的近接性（PVシンボル、PV愛着、PV自己所有感の単純加算得点）の平均値を算出し、ウィルコクソンの符号順位検定によってその有意確率を確認した。表6によると、3種の尺度すべてにおいて、介入前に比べて一カ月後の心理的近接性の平均値が上回っていた。ただし、その程度に関しては向上グループ・非向上グループで異なる。利他的・生態系価値が向上したグループの心理的近接性の平均値は、介入一カ月後に向上していることが一定の有意確率（p=.054）で認められる。他方、非向上グループの心理的近接性の平均値の有意な向上は認められない。つまりこの結果は、介入実験を経て高まった心理的近接性が、利他的・生態系価値を高めたと解釈できる。しかし、省エネ政策の受容性と家庭内省エネ行動については、向上グループの心理的近接性の平均値が、非向上グループのそれに比べて、有意に向上しているとは言えない。前節の共分散構造分析においても、省エネ政策の受容性と家庭内省エネ行動に関してはともに5％水準では有意なパスは検出されておらず、その関係性は必ずしも強くないことがうかがえる。状態量による共分散構造分析ではその関係性が微小ではあるものの観察されたが、変化量に焦点を当てた場合には、変化量が小さいことからその関係性が検出され難いと考えられる。また、前項と同様に、短期間の調査であったこともその関係性が見られなかった理由の1つとして留意すべきである。つまり、今回の介入実験による心理的近接性の高まりは、利他的・生態系価値の向上に影響した可能性が考えられるものの、省エネ政策受容性や家庭内省エネ行動への目に見える影響の観察までは至らなかった。

5. おわりに

本稿では、PVシステムへの心理的近接性が人々の省エネ意識・行動に与える影響を明らかにするため、VBN理論に基づき、質問紙調査で得られたデータを用いて分析を試みた。共分散構造分析の結果、PVシステムへの心理的近接性は、VBN理論の行動モデルを構成する要素の中でも、自分よりも他の人や人間以外の種などの全体の利益を尊重する利他的・生態系価値に正の影響を与えていることが明らかとなった。また、家庭内省エネ行動や政策受容性に対しても影響を与えている可能性があるとの知見を得た。そして、その影響を確認するため、さらには省エネ行動の促進に向けた1つの方策とすることを想定し、PVシステムへの心理的近接性を高める介入実験を試みたところ、心理的近接性の高まりが利他的・生態系価値を向上させている可能性が認められた。

本研究の主眼は、最初に述べたように、身近なエネルギー技術の存在とそれに心理的な近接性を覚えることが、日々の行動とグローバルな環境問題とをつなぐ役割を果たすことにある。分散型電源であるPVシステムは、電気を作るという過程を身近にし、電気の消費と生産の結びつきを実感させることによって、このような役割を果たす可能

表6　A園の保護者の心理的近接性と省エネ意識・行動の関係性

向上グループ						
尺度	人数	介入前後	心理的近接性平均値	標準偏差	*z*値	有意確率
利他的・生態系価値	17	前	6.24	2.137	–1.926	0.054
		一カ月後	7.06	2.461		
省エネ政策の受容性	17	前	6.76	2.948	–1.699	0.089
		一カ月後	7.65	2.523		
家庭内省エネ行動	22	前	7.14	2.606	–0.111	0.911
		一カ月後	7.18	2.196		
非向上グループ						
尺度	人数	介入前後	心理的近接性平均値	標準偏差	*z*値	有意確率
利他的・生態系価値	33	前	7.24	2.762	–0.414	0.679
		一カ月後	7.33	1.865		
省エネ政策の受容性	33	前	6.97	2.430	–0.399	0.690
		一カ月後	7.03	1.794		
家庭内省エネ行動	27	前	6.85	2.553	–1.613	0.107
		一カ月後	7.30	2.035		

性を持つ[6)]。つまり、PVシステムの存在は、人々に対して認知的にではなく感覚的にライフサイクル思考を刷り込む可能性を持つ。本研究では、PVシステムが物理的だけではなく心理的にも身近になることで、自らの行動とエネルギー・環境問題との結びつきがより強く実感される点に着目した。結果として、PVシステムの心理的近接性の向上は、日常における省エネ行動を間接的に促進する可能性が示された。

現在、PVシステムは家庭のみならず、企業や学校など公共の場など多様な場所に導入が拡大している。導入の際に心理的近接性を抱きやすいような少しの「工夫」をすることで、人々の省エネ行動を誘発するきっかけとなって、環境教育や情報的手法とは異なった影響プロセスからそれらの後押しをする役割を果たすかもしれない。

効果検証や分析に関する今後の課題としては、追跡調査による長期的な検討が第一に挙げられる。今回試みた介入実験は、保護者の身の回りの状況に少し工夫をし、刷り込みのような影響でPVシステムへの意識や省エネ意識・行動が誘発されることを想定しているため、短期間で大きな変化を見込めるものではない。したがって、介入後一カ月の時点の知見として本稿の分析結果を踏まえ、より長期的な調査・検証が必要である。また、介入実験の内容をより効果的なものに洗練し、調査対象の幅を広げたさらなる検討も必要である。

謝辞

本研究の実施にあたり、飯田市役所環境モデル都市推進課、同子育て支援課、おひさま進歩エネルギー株式会社の皆様には、多大なご協力いただきました。心より御礼申し上げます。また、調査の場を提供していただきました各保育園の園長先生と職員の方々、調査にご協力頂きました保護者の皆様に深く感謝いたします。なお、本研究はJSPS科研費（課題番号：25340120）の支援により実施されました。

（平成27年5月18日受付、平成27年11月13日採択）

参照文献

1) 本藤祐樹 (2011): 日本エネルギー学会誌, 90, 670-672
2) Haas R., Ornetzeder M., Hametner K., Wroblewski A., Hübner M.(1999): Solar Energy, 66(3), 183-191
3) Bahaj A.S., James P.A.B.(2007): Renewable and sustainable Energy Reviews, 11, 2121-2136
4) Dobbyn J., Thomas G.(2005): Sustainable Development Commission, Technical Report, London, 73pp.
5) Keirstead J.(2007): Energy Policy 35, 4128-4141
6) 本藤祐樹, 馬場健司 (2008): エネルギー・資源, 29 (1), 15-21
7) 野田肇, 本藤祐樹(2011): エネルギー・資源学会論文誌, 32(1), 1-7
8) Hondo H.(2012): International Workshop on Energy Efficiency for a more sustainable world, São Miguel, Portugal, 14-16
9) 溝口由華, 本藤祐樹 (2014): 日本エネルギー学会誌, 93, 1257-1266
10) ロバート・ギフォード (2005): 環境心理学〈上〉原理と実践, 北大路書房, 京都, 365pp.
11) 高山範理, 喜多明, 香川隆英 (2007): ランドスケープ研究 : 日本造園学会誌, 70(5), 585-590
12) 高山範理, 綛谷珠美, 朴範鎭 (2008): 環境情報科学論文集, 22, 393-398
13) Bamberg S., Möser G.(2007): Journal of Environmental Psychology, 27,14-25
14) Ajzen I. (1991): Organization Behavior and Human Decision Processes, 50, 179-211
15) Schwarz H. (1977): Advances in experimental psychology, 10, New York: Academic Press, 222-280
16) Stern P.C.(2000): Journal of Social Issues, 56(3), 407-424
17) Nordlund A. M., Garvill J.(2003): Journal of Environmental Psychology, 23, 339-347
18) Steg L., Dreijerink L., Abrahamse W.(2005): Journal of Environmental Psychology, 25(4), 415-425
19) van Riper C.J., Kyle G.T.(2014): Journal of Environmental Psychology, 38, 288-297
20) Ibtissem M.H.(2010): Journal of Sustainable Development , 3(2), 129
21) Sahin E.(2013): International Journal of Environmental & Science Education, 8(2), 269-283
22) Nordlund A. M., Garvill J. (2002): Environment and Behavior, 34, 740-756
23) 豊田秀樹 (2007): 共分散構造分析 Amos編―構造方程式モデリング, 東京図書, 東京, 261pp.

付録

表A1に介入前質問紙調査の単純集計結果を示す。各設問に対する保護者の回答に点数を付与し（表2参照）、各設問の平均値と標準偏差を園別に算出した。また、表A1の単純集計結果に基づき求めた、PVシステムの設置園（A・B園）と非設置園（C園）の各尺度（図6の心理モデルを構成する6種）の平均値などを、表A2に示す。表A2に示す平均値は、主成分分析により求めた主成分得点の平均値である。また、設置園と非設置の平均値に差異があるか否かを確認するために実施した*t*検定の結果もあわせて示す。

表A2で示されるように、各尺度に関して、設置園と非設置園の間に特徴的な差異は検出されなかった。このことは、PVシステムがただ単に設置されているだけでは、省エネ意識・行動を促進するために十分な効果を発揮しないことを示唆している。また、この結果は、PV システムが存在するだけでは省エネ行動を高めず、PV システムへの愛着が鍵となると述べている既往研究[8] と整合的である。

表A1　介入前質問紙調査の単純集計結果

測定項目	設問	A園（PV設置） n = 72		B園（PV設置） n = 84		C園 n = 68	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
心理的近接性	PVシンボル	2.71	1.144	2.74	1.031	−	−
	PV愛着	2.58	1.097	2.43	1.009	−	−
	PV自己所有感	1.69	0.744	1.68	0.779	−	−
利己的価値	富※	3.75	0.900	3.69	0.821	3.79	0.907
	社会的権力※	2.26	0.787	2.20	0.861	2.15	0.778
利他的・生態系価値	平等	4.07	0.811	4.25	0.863	4.22	0.826
	社会正義	4.21	0.691	4.21	0.851	4.18	0.752
	環境保護	4.49	0.731	4.26	0.746	4.44	0.632
	地球の尊重	4.31	0.816	4.11	0.836	4.10	0.736
NEP	1	4.25	0.818	4.12	0.856	4.13	0.845
	2	3.86	0.844	3.87	0.847	3.66	0.874
	3	3.32	0.962	3.24	0.952	3.25	0.983
	4	3.99	0.971	3.55	0.856	3.65	0.927
重要性認知	1	4.49	0.650	4.25	0.656	4.34	0.704
	2	4.00	0.934	3.81	0.828	3.97	0.753
責任帰属	1	3.88	0.804	3.76	0.801	3.63	0.976
	2	3.39	0.848	3.15	0.799	3.31	0.797
個人規範	1	3.32	0.976	3.31	0.760	3.24	0.932
	2	3.92	0.666	3.51	0.784	3.72	0.770
省エネ政策受容性	製品開発	2.96	1.013	2.92	0.908	2.75	1.013
	ガソリン	2.17	0.769	2.25	0.943	2.24	0.900
	再エネ税	2.44	0.886	2.38	0.917	2.34	0.940
家庭内省エネ行動	コンセント	3.10	1.355	3.06	1.206	3.53	1.215
	テレビ	3.07	1.514	2.99	1.427	3.37	1.424
	情報	2.24	1.068	1.99	1.035	2.22	0.975
	暖房	2.74	1.138	2.43	1.122	2.41	1.109
	呼びかけ	2.97	1.267	2.54	1.113	3.04	1.365
	冷蔵庫	3.25	1.219	3.26	1.291	3.44	1.226
	照明	3.22	1.189	2.81	1.256	3.10	1.306

※逆転項目

表A2　PVシステム設置園と非設置園の各尺度の平均値の比較

尺度	PV設置	N	平均値	標準偏差	*t*値	有意確率
利他的・生態系価値	PV設置園	156	0.0005	1.061	0.01	0.990
	非設置園	68	–0.0013	0.851		
重要性認知	PV設置園	156	–0.0098	1.019	–0.22	0.824
	非設置園	68	0.0226	0.963		
責任帰属	PV設置園	156	0.0265	0.989	0.60	0.549
	非設置園	68	–0.0608	1.029		
個人規範	PV設置園	156	0.0106	0.989	0.24	0.811
	非設置園	68	–0.0243	1.032		
政策受容性	PV設置園	156	0.0287	0.982	0.65	0.516
	非設置園	68	–0.0659	1.045		
省エネ行動	PV設置園	156	–0.0639	0.988	–1.45	0.150
	非設置園	68	0.1467	1.019		

交通分野へのライフサイクル思考の適用

Applying life cycle thinking to the field of transport

加藤博和*[1)]
Hirokazu Kato
1) 名古屋大学
* kato@genv.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

LCA と運命の出会いを果たしたのは博士前期課程在学中，今（2017 年）から四半世紀近く前である．もともと都市・交通計画の仕事をしたいと思って土木工学を志し，国家公務員 I 種試験にも合格し，大学に残ることなど全く考えていなかったにもかかわらず，いまだに大学でくすぶっているのは LCA のせいであると言っても過言ではない．まさに腐れ縁である．しかし，華々しい成果にはほど遠く，研究で世の中にインパクトを与えることもできず，人生の選択を誤ったと悔やんでいる．結婚式のスピーチで研究室の先輩（現：某国立大学教授）より「研究よりまず人生のライフサイクルアセスメントをきちんとやれ」というご忠告をいただいたにもかかわらず実践してこなかった報いかもしれない．その意味で，交通分野への LCA 適用についてしつこく考え続けてきたことに対し，このたび日本 LCA 学会功績賞をいただくことになったのは，過分ではあるがありがたい限りでもある．そこで，本稿では著者が LCA に関わってきた経緯を振り返るとともに，今後の方向性についても論じてみたい．

2. LCA との出会い

著者が学生・教員として所属した研究室は土木工学の中の計画系分野で，入った時は，交通・都市計画が環境に及ぼす影響を定量評価し，それをもって環境に配慮した計画を策定する手法の開発に取り組んでいた．その関係で，環境省地球環境研究総合推進費の重点領域「人間－地球系」の研究会に指導教員の代理で出席する機会が頻繁にあり，そこで LCA が主要課題として取り上げられていた．そのリーダーが安井至先生であった．研究会で「布おむつより紙おむつの方が環境負荷が少ない」「ビンよりカンの方が環境負荷が少ない」といった，一般常識を覆すアウトプットを見て，生来のあまのじゃくである著者は LCA のとりこになってしまった．土木構造物もライフサイクルで環境負荷を大量に排出するが，その配置や仕様をうまく工夫して計画すれば，構造物を基盤として成り立つ人間社会が排出する環境負荷も長期にわたり大きく削減でき，「土木＝環境破壊」という世間の固定観念を覆すことができるのではないかと考えたのである．

当時は土木分野でも LCA 適用が集中的に研究されており，土木学会地球環境委員会に小委員会が設けられ，原単位の整備や各種社会基盤施設のケーススタディを経て方法論のマニュアル化を目指していた．そちらでは井村秀文先生が研究を引っ張っておられ，一連の LCA 研究[1)]で土木学会論文賞も受賞されている．まさか後に上司になるとは思っていなかったが，安井先生とともに，著者のライフサイクルに影響を与えた方である．

3. 拡張ライフサイクル環境負荷の考え方

土木分野の LCA 研究は 20 世紀中にほぼ終息し，日本 LCA 学会設立の頃には低調になってしまった．理由は，1)土木事業で特に問題になる局地環境問題は環境アセスメントで扱っており，LCA の対象がほぼ CO_2 に限られていた（LCA は CO_2 排出量を計算するツールという認識），2)多くのケーススタディから，運用時に多くのエネルギーを消費する一部の施設を除けば，CO_2 の大半が建設時の資材製造から排出され，それはほぼ鋼とコンクリートの使用量で決まり，建設費との相関も高い（つまりコスト削減≒CO_2 削減）ことが示された，3)様々な構造物への適用例が出そろい，原単位も整備され「研究のネタ」が尽きた，ことである．しかし，著者の問題意識である「交通・都市計画が人間活動の変化を通じて環境負荷を規定することの評価」には至っていなかった．この問題意識に立った研究は国内外で散発的に出たものの，ずっと取り組んできたのは著者だけであった．

発想は極めて単純である．社会基盤を対象とした従来の LCA は，製品 LCA を援用したものであったため，評価対象範囲（システム境界<boundary>）を施設自体に限定していた．これを拡大し，それが影響を与える人間活動全般も扱うことにしようという主張である（**図 1**）．交通施設なら，その上を走る自動車や鉄道車両も含めることになる．後から振り返れば scope3 に近い発想であるが，当時 LCA の世界では歓迎されるも

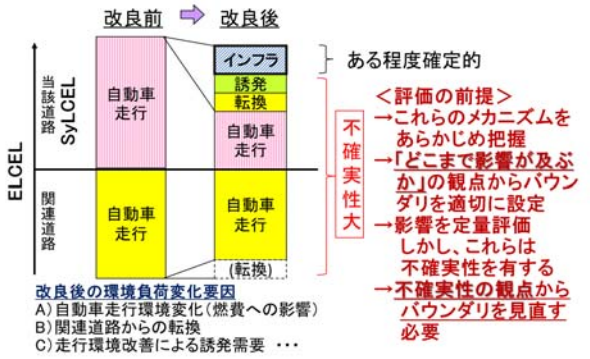


図 1　ELCEL(Extended Life Cycle Environmental Load)適用の考え方（既存道路改良の例）

のではなく，「お前がやっているのは LCA ではない」と言われることもけっこうあった．

しかし交通・都市計画の分野では，この拡大したシステム境界が当たり前である．そもそも土木施設の多くは社会基盤として人間活動を支えるために造られるのだから，評価も人間活動の部分をむしろ主として行わなければならない．すなわち，社会基盤整備が人間活動に与える影響を，そのデザインが影響を及ぼすメカニズムに基づいて把握する方法論こそ必要である．具体的に適用されているのが費用便益分析(Cost Benefit Analysis: CBA)であり，そこでは施設の建設などライフサイクル費用と，施設を使用する各種主体が被るライフサイクル便益・被害が同時に扱われ，施設の配置・仕様による費用便益比（B/C）の違いが計算できる．ところが，CO_2 排出量を推計する場合，その上での人間活動は詳細にモデル化され適用される一方，施設はシステム境界外とされることが多かった．これを CBA と同様とするために，従来のインフラ LCA 研究で確立された手法を導入したのである．そして，「施設自体」＋「それが影響を与える活動」に拡大したシステム境界で LCA を実施した結果得られる環境負荷を「拡張ライフサイクル環境負荷(Extended Life Cycle Environmental Load: ELCEL)」と呼ぶこととし，交通・都市計画による環境負荷変化の評価指標として用いるべきと提案した [2]．

初めての ELCEL での評価対象は道路改良，具体的には，交通量の多い交差点の立体化（オーバーパス／アンダーパス），および山間部での線形改良（トンネル・橋梁等）であった [3]．当然ながらこれらの例では，道路上を走る自動車の環境負荷を道路のライフサイクルにわたり削減する効果が，交通量が多いほど大きくなる．しかし，そのために新設する土木構造物はライフサイクルにわたり環境負荷を排出する．この両者のどちらが大きいかで，道路改良によって環境負荷が削減できるかが決まるので，その分岐点となる交通量を求めることが有用である．ただし，道路改良すると利便性が向上するため，交通量が増加することが一般的であり，それは便益を高める一方で環境負荷も増加させる．合わせて生じる走行状況改善やそれによる燃費向上，1 台当たり走行距離減少と時間短縮等も，便益や環境負荷の多寡を左右する．そこで，これら各種変数による便益や ELCEL 値の感度分析を行うことも合わせて提案した．これによって，精度が高いとは言えない交通需要予測の外れに対する LCA 結果の頑健性も確認することができるようになった．

4. 様々な社会資本への適用

このような流れで，手当たり次第に様々な対象施設を ELCEL で評価し，感度分析を行った．道路改良に始まり，高速道路の横断面構成（車線数・幅員）[4]，都市部における鉄軌道等の乗合大量輸送機関整備 [5]，都市間高速交通手段（新幹線／航空路／高速道路／磁気浮上式超高速鉄道＜リニア新幹線＞）[6]，都市交通ネットワーク全体（道路＋鉄軌道）の整備 [7]，都市域内の各種インフラ・建築物全体のメタボリズム [8]，IT と交通活動との比較 [9]，ツアー商品の評価 [10]，商品の流通方式の違い（コンビニ／スーパー／家庭配達）[11] など，ありとあらゆる活動を評価してきた．都市交通ネットワーク評価の部分は自分の博士学位論文となり，2003 年には環境科学会奨励賞もいただいた．

研究の結果，「新幹線は航空路に比べ人キロあたり CO_2 が少ないという主張はインフラ建設分を考慮していない推計結果に基づくもので公平を欠く」という某著名学者の著書での意見に対し，それを考慮しても整備新幹線レベルの需要があれば航空路に比べずっと CO_2 が少ないという結果を示したり，逆に利用の少ないローカル鉄軌道線はインフラ分を入れなくてもバスや乗用車より人キロあたり CO_2 が多いところもあると示して鉄道存続運動団体に嫌がられたりと，常識に修正を迫るアウトプットを得る機会もあった．

一方で，鉄道や道路の LCA を行うための原単位整備やマニュアル作成を鉄道・運輸機構 [12]や国土技術政策総合研究所 [13]とともに実施した．また，ELCEL 値のシナリオ分析や感度分析の結果を誤解ないように皆さんに見ていただき意思決定の参考になるような見せ方として「交通エコレポート」を提案し，日本環境効率フォーラムより「環境効率アワード 2009」奨励賞をいただいた [14]．このように実務への活用にも取り組み，土木計画学分野でも普及啓発に努めたが，著者一人の非力では不十分なレベルにあり，今後も粘り強く活動を続けないといけないと考えている．

また，理論的にも詰めるべき点が少なからずある．

ELCEL 評価では，評価対象施設が影響を与える範囲をシステム境界とする．そのため，例えば鉄道整備によって並行道路から交通量が転換するケースを扱う場合，鉄道施設は評価する一方，並行道路施設は変化しないので評価に含めない．この点は繰り返し疑問として投げかけられてきたところで，やはり LCA ではないのではないかという批判もよくいただいた．しかし著者は，純粋な？LCA を追求するつもりはなく，社会基盤整備によって長期的に環境負荷が減らせるかどうかを知りたくて LCA を適用しているので，このような批判が出てもあまり気にはならなかった．

5. Social/Dynamic LCA への展開

要するに，著者はライフサイクル思考に基づく環境負荷・インパクト評価を社会基盤に対して行うことが重要であると考え，その具体的な作業プロセスとして ISO 等に基づく LCA 方法論をとらえていた．端的に言うと，ツール指向でなく目的指向である．

目的指向をとったことで，土木分野では全く別個に研究されていた，土木構造物の LCA と，施設整備による人間活動の変化分析とを合わせたハイブリッド型の評価枠組である ELCEL を提案するに至った（**図 2**）．これを振り返って解釈すると，ライフサイクル思考は「縦割りの打破」でもあると思える．そもそも環境とは「環」（まわり）と「境」（さかい）からなる言葉であることを考えると，システム境界をどう定義するかは環境問題を考える本質であることがうかがわれる．ISO-LCA でもシステム境界設定を，それに依存する評価の不確実性の検討や，システム境界の外にある部分を考えないことによる評価の限界を検討した上で行うべきと主張している．著者は社会基盤施設という，ISO-LCA が想定する対象から幾分外れた対象を相手にしてきたが故に，ライフサイクル思考を貫徹しようとしてシステム境界を拡張するという無手勝流を展開してしまったわけである．

しかし，それがあながち的外れでもなかったと気付かせてくれたのが，「Social/Dynamic LCA」という言葉を稲葉敦先生から教えていただいたことであった．人間活動による環境負荷を客観かつ包括的にとらえ改善に活かす方法論として LCA を成長させるためには，システム境界を製品・サービスや建築物・インフラ単体にとどめるのでなく，それらがどのような波及効果を社会に対して時間的・空間的広がりをもって与えるのかを含めて評価しなければならないという，ELCEL 概念に通じる枠組の提示である．これに勇気づけられ，日本 LCA 学会誌第 5 巻第 1 号（2009 年 3 月）にて特集「社会システムの LCA: Social/Dynamic LCA の確立を目指して」の担当編集委員となり，関連成果をまとめ公表する機会をいただくこともできた．なお，日本 LCA 学会誌については，2004 年の編集開始時から昨年 2016 年末まで編集委員（2011～14 年は編集委員長）としてかかわり，LCA に関する知見を深めることができた．

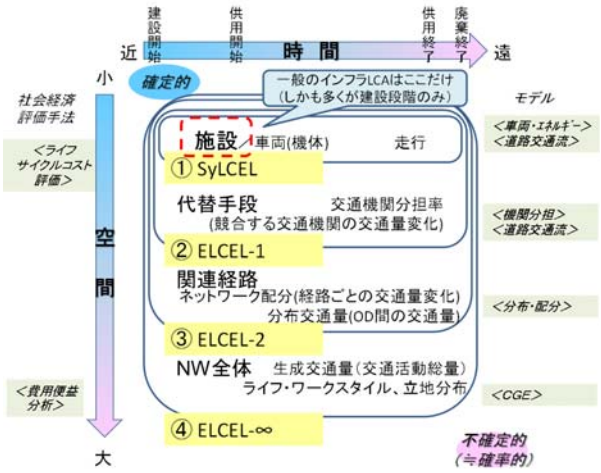


図 2　分析範囲（システム境界）の拡大
：交通システムの例）

システム境界拡張については，広げるほど波及効果の不確実性が高まり，評価の信頼性が低下する（シナリオ設定に結果が大きく左右される）との指摘が多かったので，原単位や各種パラメータに幅を持った値を与えて ELCEL 値を推計し，それによる判断の信頼性を確率値として与えることも試みた．そして，システム境界設定を時間・空間それぞれについてどのように行えばよいか集中的に検討し，前者は柴原尚希氏（現：産業環境管理協会），後者は森本(山本)涼子氏が博士学位論文として成果をまとめるに至った [15), 16)].

また，都市街区群の単位で社会基盤・建築物群がもたらすライフサイクル環境負荷を，維持コストや QOL(Quality Of Life)とともに将来にわたり推計することで，環境側面に限定せず持続可能な都市形成の検討に資するシステムの開発は，戸川卓哉氏（現：国立環境研究所）や森田紘圭氏（現：大日本コンサルタント）の博士学位論文となった [17), 18)]．その他，たくさんの学生・スタッフや外部の共同研究者の方々にご協力をいただいてきたことに，この場をお借りして感謝申し上げる次第である．

6. おわりに –ライフサイクル思考の普及と社会貢献に向けて-

著者らが行ってきた検討は，交通・都市施設(群)というライフタイムが極めて長く，波及効果も大きい対象を扱うために考えざるを得なくなったことである．考えなければ限られた適用しかできず，著者も他の土木分野の方々と同様，LCA 研究を続けることができな

かった．その結果，著者はよく言えばニッチ，悪く言えば交通・都市計画分野でも LCA 分野でもアウェイの立場になってしまったことは否めない．しかし，社会基盤にとどまらずあらゆる対象も含めて，LCA が持続可能社会の達成に資する方法論へ昇華していくために参考となる議論をしてきたと個人的には考えている．それも踏まえ，LCA の方法論には，分野・世代の縦割りを破り，「環」「境」を客観的・包括的に把握することで，現在世代が将来世代に迷惑を掛けない道を明らかにするアプローチとして成長していくことが期待されていると信じている．

ここまで書いてきて，四半世紀にわたりライフサイクル思考に基づく社会基盤施設の環境負荷評価に関わり続けてきたにもかかわらず，きちんとしたまとめをしていないことに改めて気付いたので，本としてまとめたいという誘惑に駆られている．もちろん，残されている課題はまだ多いし，再生可能エネルギー，自動運転技術，シェアリングエコノミーといった都市・交通を取り巻く新たな流れを評価する取組にも踏み込みたい．LCA との腐れ縁はまだまだ続きそうである．

引用文献

1) 井村秀文編著：建設の LCA，オーム社，2001.6
2) 加藤博和，柴原尚希：ELCEL 概念による Social/Dynamic LCA への挑戦, 日本LCA学会誌, Vol.5，No.1，pp.12-19，2009.1
3) 加藤博和，林良嗣，登秀樹：道路構造代替案の地球環境負荷に関するライフサイクル的評価手法，土木学会環境システム研究論文集，Vol.24，pp.282-293，1996.10
4) 中村英樹，加藤博和，丸田浩史，二村達：都市間高速道路の横断面構成の相違による CO_2 排出量のライフサイクル評価，土木学会環境システム研究論文集，No.26，pp.261-270，1998.10
5) 例えば，森本涼子，伊藤圭，山本充洋，加藤博和，柴原尚希：都市内旅客交通手段のライフサイクル CO_2 排出量比較，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.68, No.5, pp.I_285-I_290, 2012.12
6) 加藤博和，柴原尚希：公共交通整備計画評価への LCA 適用－超伝導磁気浮上式鉄道を例として－, 日本 LCA 学会誌, Vol.2, No.2, pp.166-175, 2006.4
7) 例えば，伊藤圭，加藤博和，柴原尚希：日本における地域内旅客交通 CO_2 大幅削減のための乗合輸送機関導入必要量の算定，土木学会論文集 D3，Vol.67，No.5，pp.I_145-I_153，2011.12
8) 例えば，林良嗣，加藤博和，北野恭央，喜代永さち子：都市空間構造改変施策に伴う各種環境負荷のライフサイクル評価システム，土木学会環境システム研究論文集，Vol.28，pp.55-62，2000.10
9) 森本涼子，柴原尚希，後藤直紀，加藤博和：環境効率指標を用いたテレビ会議と出張会議の LCA による比較，土木計画学研究・論文集，Vol.26，no.1，pp.181-188，2009.9
10) 伊藤友佳，森本涼子，柴原尚希，加藤博和：パッケージツアーへのカーボンフットプリント付与の方法論，土木学会論文集 G，Vol.67，No.5，pp.I_281-I_290，2011.9
11) 森本涼子，加藤博和，柴原尚希，金原宏：製品の流通・販売形態のライフサイクルアセスメント：容器入り清涼飲料水を例として，日本 LCA 学会誌，Vol.5，No.1，pp.47-53，2009.1
12) 森田泰智，山崎敏弘，加藤博和，柴原尚希：鉄道整備の CO_2 排出量のライフサイクル評価手法, 日本LCA学会誌, Vol.7, No.4, pp.360-367, 2011.10
13) 国土技術政策総合研究所環境研究部道路環境研究室 : 社会資本のライフサイクルをとおした 環境評価技術の開発に関する報告 －社会資本 LCA の実践方策－，2012.2
14) 柴原尚希，渡辺由紀子，森本涼子，加藤博和：交通システム LCA における評価の不確実性を考慮した情報提示の方法論：「交通エコレポート」の提案，日本 LCA 学会誌，Vol.5，No.2，pp.231-236，2009.4
15) 柴原尚希，加藤博和：交通社会資本評価における環境アセットマネジメント手法の提案:LRT 整備プロジェクトへの適用，日本 LCA 学会誌，Vol.6，No.4，pp.303-309，2010.10
16) 森本涼子，加藤博和：交通社会資本プロジェクトの LCA における評価範囲設定が結果の不確実性に及ぼす影響の分析枠組, 日本 LCA 学会誌, Vol.7，No.4，pp.329-338，2011.10
17) 鈴木祐大，加知範康，戸川卓哉，柴原尚希，加藤博和，林良嗣：環境・経済・社会のトリプル・ボトムラインに基づく都市域の持続可能性評価システムの構築，地球環境研究論文集，Vol.17，pp.93-102，2009.9
18) 森田紘圭，杉本賢二，加藤博和，村山顕人，飯塚悟，柴原尚希，林良嗣 : 4D-GIS を用いた地区統合環境性能評価モデルの構築，土木学会論文集 D3，Vol.69，No.5，pp.I_297-308，2013.12

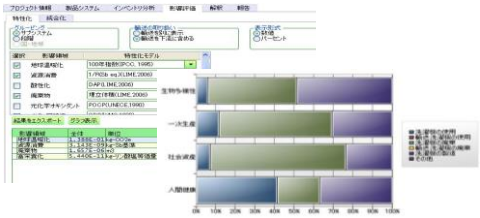
新バージョンのご案内

最新の国内LCAデータを豊富に搭載した高機能なLCAソフト

MiLCA（みるか）がバージョンアップします（2017年3月リリース予定）

✓ MiLCAは、ライフサイクルアセスメント（LCA）実施を支援するソフトです。産業技術総合研究所とJEMAIが共同開発した新LCAデータベース（IDEAv2）と日本版被害算定型影響評価手法（LIME2）などを搭載することで、国内の実態に即したLCAをより簡便に実施できます。

MiLCA v2 の改良点



✓インストール・操作の安定性向上！
✓算定スピードの向上！
✓将来の特性化係数拡充などへの対応体制が充実！
✓国内最大規模の*LCA*データベース、*IDEA v2*を初期搭載！

ソフトウェア名	MiLCAv1	MiLCAv2
搭載LCAデータベース	IDEAv1	IDEAv2（2016年リリース）
搭載影響評価手法	LIME2、T-E2A、TMR、海外主要特性化モデルを搭載。	

MiLCAの特徴

- マウスによる直感的な操作で製品システムをモデル化し、ケーススタディの実施が可能
- 環境影響評価手法として1,000を超える環境負荷物質を対象としたLIME2を搭載し、様々な視点からの評価が可能
- これらの手法にて算定した結果を棒グラフや円グラフ等で分かりやすく表示

MiLCA v2（IDEA v2 搭載）
価格（標準ライセンス）：60万円（税別）

- MiLCAv2の価格は初期費用のみになります。（更新利用料はありません）
- 現行版（MiLCAv1）のユーザーを含め、MiLCA v2は新規購入が必要です。

◆MiLCA v2の詳細情報
www.milca-milca.net

IDEA v2 ：LCAデータベース
価格（標準ライセンス）：26万円（税別）

- IDEAデータベース部分のみの先行販売を開始しました。
- IDEA v2ライセンスをご購入済の方は、MiLCAv2購入時に当該料金を割引します。

◆IDEA v2の詳細情報
http://www.jemai.or.jp/lca/idea/

（現行）**MiLCA v1**

- MiLCA v1の取扱いは下記の予定になります。

2017年3月末：新規販売終了
2019年3月末：使用終了

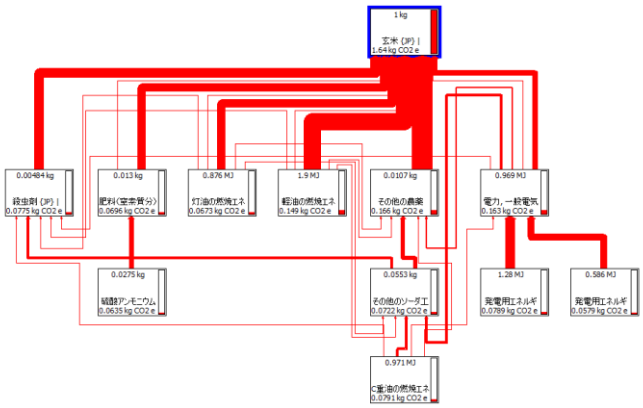
◆お問合せ先
一般社団法人産業環境管理協会　LCA事業室
E-mail：jemai-lca@jemai.or.jp
TEL：03-5209-7708
HP：　http://www.jemai.or.jp/

IDEA v2

Excel 版、SimaPro 版 好評販売中

高い網羅性と解像度

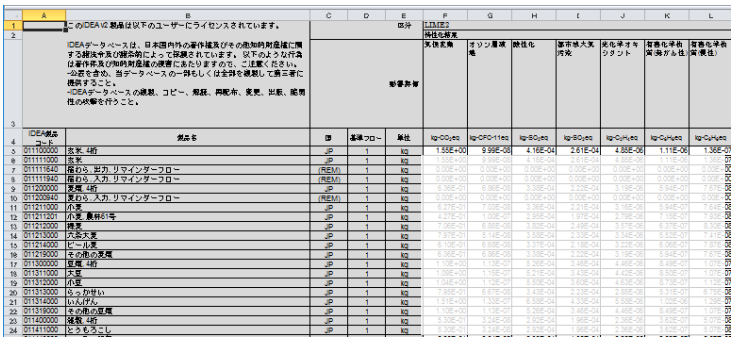
IDEA V2 は日本国内のほぼ全ての事業の経済活動を網羅的にカバーし、日本標準商品分類を元にした 3800 以上のプロセスからなる、高い解像度を誇ります。つまり、IDEA をバックグラウンドデータベースとして用いた場合、特定の二次データを探索して、該当する製品がなにかしら存在する（国内の一部サービスや、国内で生産されない製品は除く）ことになります。



SimaPro でのネットワーク表示例

幅広い影響領域

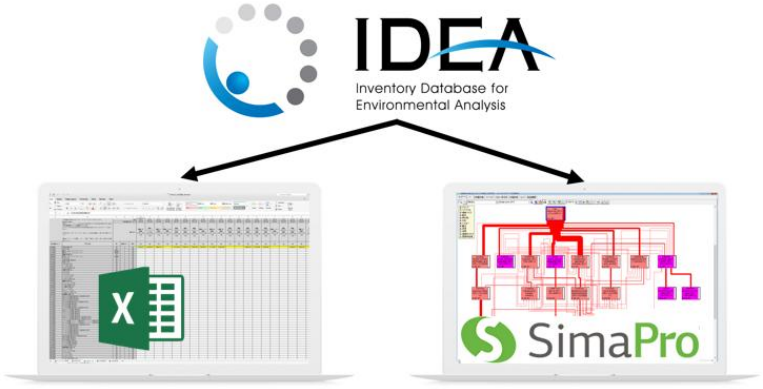
従来から IDEA が対象としていた環境影響領域の地球温暖化、酸性化、鉱物・化石資源消費等に加え、バージョン 2 からは、水資源、土地利用等に関する基本フローが加わり、LCA で対象とする主要影響領域を広くカバーしています。



Excel での表示例

提供形式

IDEA v2 は、現在、上流遡及を行い原単位化した Excel 版と、LCA ソフトウエア SimaPro 上でお互いにリンクした単位プロセス型のデータベースの両方の形てご利用いただけます。他のソフトウエアやフォーマットについても順次対応を進めています。



TCO2 株式会社
URL: http:// IDEA-LCA .com/
Email: IDEA@tco2.com
TEL: 03-6272-6814（受付時間 平日 10:00～17:00）

ご注意
本書の内容の一部または全部を、個人で使用するほかは、著作権上、日本 LCA 学会、および
著作権者の承諾を得ずに無断で、転写、複製することは禁じられております。

第 12 回日本 LCA 学会研究発表講演要旨集
2017 年 3 月 1 日発行 【定価：1,000 円（CD-ROM 版）、8,000 円（印刷版）】
発行者 ：第 12 回日本 LCA 学会研究発表会実行委員会
発行所 ：日本 LCA 学会事務局
〒 231-0002
神奈川県横浜市中区海岸通 3-9 横濱ビル 210 号室
株式会社シーエーティ 内
印刷・製本：（有）創文社