Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費　終了研究成果報告書

循環型社会政策の効果評価と導入支援のための資源利用・廃棄物処理モデルの構築
(1-1601)

平成28年度～平成30年度

Development of Models for Resource Use and Waste Management and Evaluation of Effectiveness of Policies towards a Sound Material-cycle Society

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

みずほ情報総研株式会社

東京大学

令和元年5月

目次

Ⅰ．成果の概要　・・・・・・・・　1
１．はじめに（研究背景等）
２．研究開発目的
３．研究開発の方法
４．結果及び考察
５．本研究により得られた主な成果
６．研究成果の主な発表状況
７．研究者略歴

Ⅱ．成果の詳細
Ⅱ－１　資源・2R・地域循環に係る政策立案のためのモデル開発　・・・・・・・・　13
（国立研究開発法人国立環境研究所）
要旨
１．はじめに
２．研究開発目的
３．研究開発方法
４．結果及び考察
５．本研究により得られた成果
６．国際共同研究等の状況
７．研究成果の発表状況
８．引用文献

Ⅱ－２　既存政策の分析とモデル分析に基づく政策パッケージの提示　・・・・・・・・　34
（みずほ情報総研株式会社）
要旨
１．はじめに
２．研究開発目的
３．研究開発方法
４．結果及び考察
５．本研究により得られた成果
６．国際共同研究等の状況
７．研究成果の発表状況
８．引用文献

Ⅱ－３　横断型プラスチック・リサイクルの政策評価モデルの開発　・・・・・・・・　51
（東京大学）
要旨
１．はじめに
２．研究開発目的
３．研究開発方法

４．結果及び考察
５．本研究により得られた成果
６．国際共同研究等の状況
７．研究成果の発表状況
８．引用文献

Ⅲ．英文Abstract ・・・・・・・・ 64

Ⅰ. 成果の概要

課題名　　1-1601循環型社会政策の効果評価と導入支援のための資源利用・廃棄物処理モデルの構築

課題代表者名　大迫　政浩　（国立研究開発法人国立環境研究所　資源循環・廃棄物研究センター　センター長）

研究実施期間　平成28～30年度

累計予算額　　71,862千円
（うち平成28年度：24,360千円、平成29年度：24,360千円、平成30年度：23,142千円）
累計予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード　物質フロー・ストックモデル、循環型社会形成推進基本計画、政策評価、一般廃棄物、耐久財、プラスチック、国際資源供給

研究体制
（1）資源・2R・地域循環に係る政策立案のためのモデル開発（国立研究開発法人国立環境研究所）
（2）既存政策の分析とモデル分析に基づく政策パッケージの提示（みずほ情報総研株式会社）
（3）横断型プラスチック・リサイクルの政策評価モデルの開発（東京大学）

1. はじめに（研究背景等）

日本では、3R（リデュース・リユース・リサイクル）政策が循環型社会形成推進基本法（以下、「循環基本法」という。）やそれに基づく循環型社会形成推進基本計画（以下、「循環基本計画」という。）、個別リサイクル法などによって進展・展開されてきた。これまでの循環基本計画の数値目標の主眼は日本全体の物量を捉えた3つの物質フロー指標（資源生産性、循環利用量、最終処分量）にあったが、土石系資源以外の資源生産性の改善は停滞していること、産業廃棄物の最終処分量の削減は概ね限界に来ていることなどをふまえると、資源効率や廃棄物処理をさらに向上・進化させるには資源種ごとの対策を検討するなど、きめ細かい政策が求められている。

このため、循環基本計画における目標と実施策の設定を支援するため、3R政策や今後の社会変化が我が国の資源利用や廃棄物管理に与える影響を定量的に算出できる物質フローモデルを構築することが必要となっている。これにより、政策パッケージでの政策導入量もしくは政策実施による効果を定量的に示すことができるようになる。

2. 研究開発目的

本研究は、3R政策や今後の社会変化が我が国の資源利用や廃棄物管理に与える影響を定量的に算出できる物質フローモデルを構築した上で、将来ビジョンとその達成に向けた政策・取組を設定し、それらの政策導入量を定量的に示すものである。本研究では、第一に、国立環境研究所で開発してきた物質フロー・ストックモデルとプロセスモデルからなる国レベルのモデルをベースに、新たな施策導入をきめ細かく表現できるモデルへの改良・拡張を行う。モデルの改良・拡張は後述する6つの視点（資源・2R（リデュース・リユース）・地域循環などの政策展開）に着目して行い、これらの施策の進捗状況を計測する新たな指標群を併せて提示する。第二に、これまでの3R政策が物質フローに与えた影響について定量的な調査・評価を行い、そのうえで将来ビジョンを達成するための政策パッケージを設定し、開発したモデルを用いた分析により政策の導入量や効果の算出を行う。

3. 研究開発の方法

（1）資源・2R・地域循環に係る政策立案のためのモデル開発

a）資源モデルの開発

資源モデルの開発では、1)日本国内の資源利用が海外で引き起こす環境負荷の把握を可能とする分析モデ

ル開発、2)将来の国際フロー構造の推定モデルの開発を実施した。1)については、多地域産業連関分析モデルの1つであるGLIO(Global Link Input-Output)モデルを応用する事で、面積と関与物質総量(TMR)を計測指標として、日本の経済活動（国内最終需要および輸出）が誘発する土地改変量の推計手法を開発した。事例解析では、鉄・銅およびニッケルを事例として、世界全体および日本の経済活動が誘発する採掘活動に伴う改変面積（ニッケル）およびTMR（鉄・銅・ニッケル）の推計を実施した。2)の資源利用に伴う資源採掘国への環境影響の定量化について将来予測を行うには、国際貿易の将来構造の推計が必要となる。国際貿易データは国×国×貿易商品の3次元構造をしており、最も詳細なデータの場合、国数は200以上、貿易商品数は5000以上に上る膨大なデータであるため、その3次元のデータを全て変数とする推計は極めて高度な計算機を有する。そこで、計算負荷を大幅に低減し、汎用の計算機でも実行可能な国際貿易モデルの手法論を開発した。

b）2Rモデルの開発（耐久消費財）

第四次循環基本計画に記載されている2R型ビジネスモデルの普及が天然資源消費量等にもたらす影響を定量的に評価するためには、モデルの中で製品の長期使用ならびにリユースの進展を明示的に扱えるようにすることが必要である。そこで、通常期間使用者の使用製品群（通常期間使用者群）と長期使用推進者の使用製品群（長期使用者群）の寿命分布を分離し、各群の平均使用年数および製品保有者に占める長期使用者の割合をパラメータとする製品寿命モデルの開発を行った。また、主要な耐久消費財を対象とし、開発したモデルを用いて長期使用行動が促進された場合の2Rシナリオ分析を行い、新製品需要と使用済み製品の削減効果を定量化した。また、開発したモデルを国立環境研究所で開発してきた物質フロー・ストック分析モデルに組み込み、耐久消費財の長期使用行動の進展による天然資源消費量、温室効果ガス排出量、廃棄物最終処分量削減の効果を評価できるようにした。なお、消費財の2Rについては、過去に国立環境研究所で開発してきたモデルで分析可能なことからモデル開発の対象外とした。

c）地域循環モデルの開発

地域循環モデルの開発目標は二つある。一つは、サブテーマ2で開発される一般廃棄物処理モデルとの接合がされているモデルを開発すること、もう一つは、地域特性を考慮できるモデルを開発することである。そのために、モデルの基本構造を検討し、市区町村において廃棄物のリサイクルが進展した場合に再生品が確実に利用されて持続的な地域循環を形成することを促すように、再生品の需給バランスを分析できるようにした。地域循環の検討対象として事例が多い生ごみ由来の堆肥・液肥の需給バランスを取り上げ、一般廃棄物処理モデルで推定された生ごみ由来の堆肥・液肥の供給可能量と市区町村別の田畑面積および都道府県別の施肥基準に基づき農地での施肥可能量を潜在的需要量として算出して市区町村毎の生ごみ資源化による肥料の窒素換算での需給バランスを分析できるようにした。併せて、競合の可能性がある家畜ふん尿についても家畜種別のふん尿発生量および堆肥・液肥の供給可能量を算出し、同様に需給バランスを分析した。

また、過剰な焼却施設容量が存在する地域においては、生ごみリサイクルなどの地域循環圏システムの構築を阻害してしまう可能性がある。そこで、将来の人口減少を想定して、広域化ブロック別に焼却処理必要量と必要施設容量を算出し、同一広域化ブロックにおいて施設統合が進展する4つの施設統合シナリオを設定してモデル分析を行った。4つの施設統合シナリオは、2つの施設更新期間のケース（施設年齢が25～30年と20～35年（延命化あり））と2つの広域化ケース（施設規模が300t/日以上の場合には統合しない「通常統合」と、施設規模が600t/日を超える場合には統合しない「超統合」）の組み合わせとして作成した（離島では統合しない）。施設の更新はできるだけ先延ばしする、できるだけ統合する施設数を多くするという基準を設定し、一定確率で統合が行われる（施設統合による効果のポテンシャルをみるため、今回は1/2と設定）ものとした。

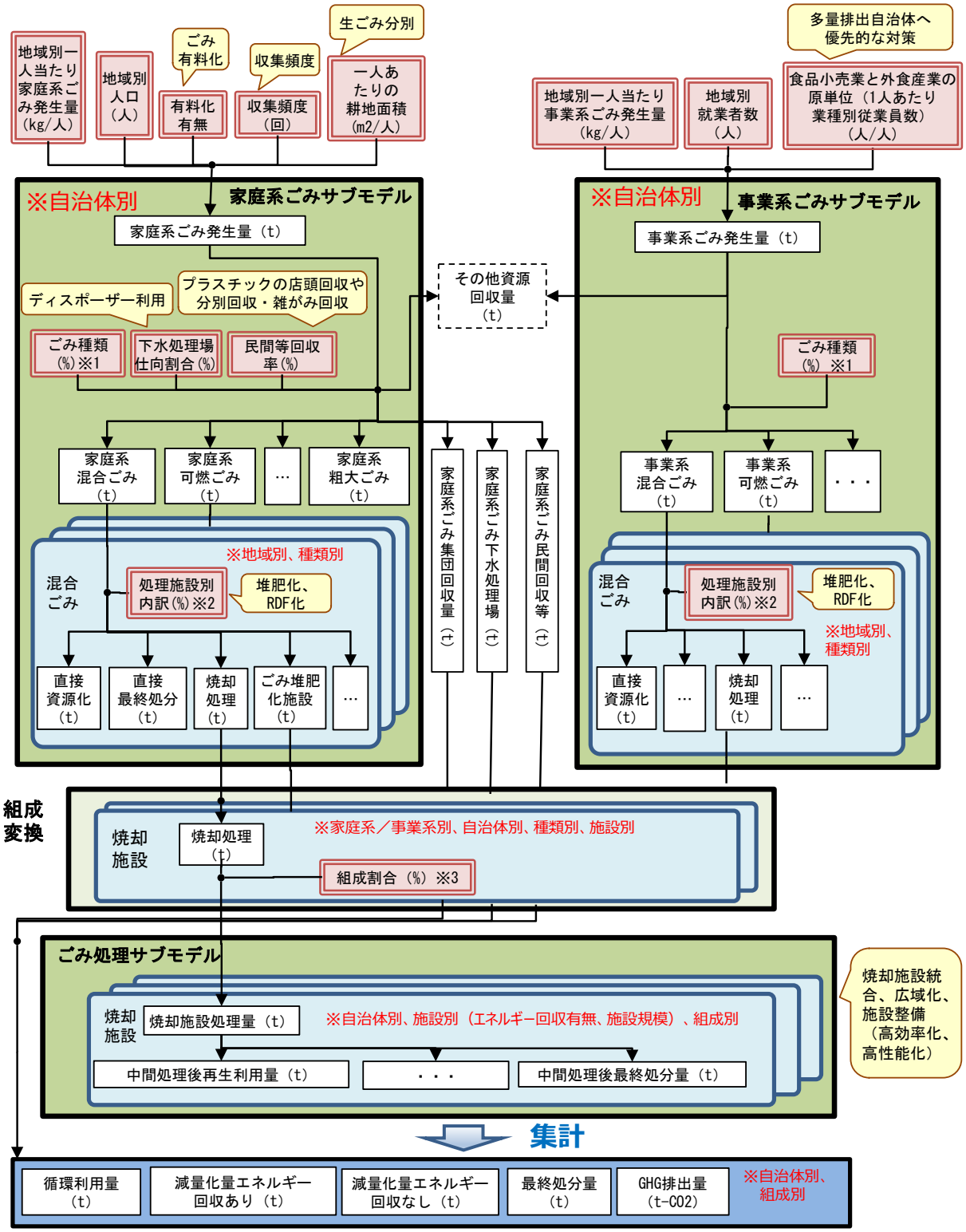
d）3R政策の指標と将来ビジョンの検討

3R政策の効果を評価するためには、評価軸の設定とその評価軸に合致した評価指標を設定する必要がある。そこで、各地域で選択されるリサイクル・処理のシステム（以下、「処理オプション」という。）を整理し、それらの処理オプションが選択される理由を考察・整理して、システムの評価軸ならびに評価指標を特定した。また、各モデルの開発検討のなかで把握できた今後求められる指標とデータ整備を整理した。3R政策の将来ビジョンについては、サブテーマ2の政策ロジックモデルと各サブテーマからのモデル計算結果を環境省が循環基本計画の3つの物質フロー指標の設定に用いているモデル（以下、「環境省循環計画モデル」という。）に投入し政策シナリオ分析の結果を得て、今後の3R政策の展望を考察した。

(2)既存政策の分析とモデル分析に基づく政策パッケージの提示

a)一般廃棄物モデルの開発

既存のモデルや循環基本計画の点検作業では自治体廃棄物政策に係る将来目標の設定がきめ細やかに提示されてこなかった点に着目し、様々な地域施策を踏まえつつ、一般廃棄物に係る全国レベルの目標と自治体レベルの施策導入量を提示できるモデルの開発を行った。モデルの基本構造を図1に示す。一般廃棄物処理事



※1:混合ごみ、可燃ごみ、不燃ごみ、資源ごみ、その他ごみ、粗大ごみ
※2:直接資源化、直接最終処分、焼却施設(直接焼却)、粗大ごみ処理施設、資源化等を行う施設、ごみ堆肥化施設、ごみ飼料化施設、メタン化施設、ごみ燃料化施設、その他施設
※3:紙、金属、ガラス、ペットボトル、プラスチック、厨芥、繊維、その他可燃、その他不燃

図 1 一般廃棄物モデルの基本構造

業実態調査データを可能な限り活用し、地域区分毎の推計結果を積み上げて日本全国値を推計することができるボトムアップ型の全国モデルである。家庭系ごみ発生サブモデル、事業系ごみ発生サブモデル、ごみ処理サブモデルの3つのサブモデルから構成され、発生したごみを地域別・取組別・組成別に推計を行うことができるようになっている。

b）耐久財モデルの改良

国立環境研究所で開発してきた耐久財モデルは、住宅、工場・倉庫、事務所、土木構造物を対象とし、それぞれに対応した4つのサブモデルから構成されている。しかし、スラグや石炭灰など系外から供給される土石系資源の循環利用については考慮できていない。今後、建設工事の減少に伴い土石系資源の需要の減少が見込まれることから、これまでは系外としてきた分野から供給される土石系の循環資源の割合が増加すること等が予想される。つまり、土石系循環資源全体の需給バランスを確保することが困難になるという問題が懸念される。そこで、これまで系外とされてきた高炉スラグ、石炭灰、下水汚泥の各発生源を耐久財モデルに加え、これらを含めた土石系の循環資源の全体の需給バランスを把握できるよう、高炉スラグ再生材サブモデル、石炭灰再生材サブモデル、下水汚泥再生材サブモデルを追加開発した。また、土石系の循環資源には高炉スラグや石炭灰のようにその発生源に地域的な偏りがあることから、需給バランスを考えるうえでは日本全国だけでなく、地域別にみることが重要であることから、耐久財モデルの分解能を地域別に改良した。

c）3R政策パッケージの政策導入効果の検討

循環型社会白書の循環型社会形成に関する施策の取組状況や第三次循環基本計画の点検結果（国の取組の評価部分）を踏まえ、既存の3R施策のリストアップを行い、循環型社会形成に関する政策ロジックモデルについて検討を行った。また、サブテーマごとに実施したモデル開発及び政策パッケージ検討の成果を統合し、今回検討した政策が全体として我が国の物質フローに係る指標に与える影響を推計した。サブテーマの統合は環境省「平成29年度第四次循環基本計画策定に向けたモデル・指標・政策検討及び平成30年版循環白書作成支援等業務」にて開発された第四次循環基本計画の物質フロー指標の目標検討に用いたモデルの外生変数の将来値をサブテーマの成果から推計することで実施した。

（3）横断型プラスチック・リサイクルの政策評価モデルの開発

a）物質フロー分析モデルの開発

様々な製品の素材として利用されるプラスチックの廃棄量を国・地域レベルで網羅的に推計するためには、廃棄物の回収量や組成など廃棄側の調査データをもとにしたボトムアップ的なアプローチでは限界があり、プラスチックの生産側の統計データなどを起点としたトップダウン的なアプローチが求められる。また、廃棄量を排出源ごとに推計するためには、プラスチックを構成要素とする製品の需要先を特定する必要がある。さらに、他の素材と比べてもプラスチックの物質フローにおいては、他製品に付随する容器包装が支配的な位置を占めることが考えられる。こうした背景から、横断型プラスチックリサイクルの分析・評価モデルを構築するため、産業連関（input-output：IO）分析に基づく物質フロー分析の既往モデルを発展させて「産業連関プラスチック物質フロー分析（IO-based Material Flow Analysis for Plastics：IOMFA-P）モデル」を開発した。また、IOMFA-Pモデルの特長を活かした精緻な分析のために、我が国の産業連関表の基本分類（列部門）の約400部門のうち熱可塑性樹脂およびプラスチック製品の部門について、プラスチック製品統計や樹脂種類および加工形態別の利用実態に基づくフィッティング計算によって分割し、「拡張プラスチック分析用産業連関（Extended IO for Plastics：EIO-P）表」を作成した。IOMFA-PモデルおよびEIO-P表を用いて、現時点で最新の産業連関表が公表されている2011年を対象に、我が国における国内需要および輸出に伴うプラスチックの物質フローを樹脂種類（10種類）・容器包装（6種類）・利用製品（139部門）・需要先（113部門）別に分析し、プラスチック消費量と利用製品や需要先の内訳を推計した。

b）リサイクル効果評価モデルの開発

廃プラスチックの回収範囲を変化させた横断型のリサイクルシナリオの資源消費および環境負荷の削減効果を評価するためには、既往の評価事例で提示されてきたプラスチックの単位重量（1kg）当たりの原単位では、樹脂組成の変化を反映することができない。そこで、プラスチックのマテリアル（材料）リサイクル、フィードストックリサイクル（油化、合成ガス化、高炉還元剤化、コークス炉化学原料化）およびエネルギー回収（固形燃料化、セメ

ント焼成、焼却発電）について、樹脂種類別の化石資源消費量と二酸化炭素（CO_2）排出量の原単位を推計し、その上で、現行の個別リサイクル法の枠組みを越えたリサイクル施策のオプションとして、生活系のプラスチックに着目した容器包装プラスチックと製品プラスチックの横断型リサイクル、家庭系と事業系の容器包装プラスチックの横断型リサイクルのシナリオを設定した。それぞれについて、a)における2011年の物質フローの分析結果を活用して、樹脂種類および排出源（需要先に一致すると考えた）別にリサイクル目的の回収可能量を算定し、上記の原単位を用いてシナリオごとの化石資源消費量およびCO_2排出量の削減効果（全量を単純焼却した場合との比較）を評価した。

4．結果及び考察

（1）資源・2R・地域循環に係る政策立案のためのモデル開発

a）資源モデルの開発

日本国内の資源利用が海外で引き起こす環境負荷の把握については、世界全体と日本の経済活動が誘発するニッケルの国際フローの比較より、日本の経済活動が誘発するフローは、インドネシア、ニューカレドニア、オーストラリアを起点とするネットワークが主要であることがわかった。世界全体でのニッケル鉱石の採掘に伴う土地改変面積の推移（1990年－2010年）の推計結果からは、ニッケルの鉱石採掘に伴う土地改変面積は約20年間で増加の一途を辿っていること、世界全体および日本の経済活動が誘発するニッケル鉱石の採掘活動に伴う土地改変面積の推計結果（2005年）からは、日本の経済活動は世界全体で誘発されるニッケル鉱石の採掘に伴う改変面積の約20%（国内最終需要:11%、輸出:9%)に寄与していることなどが明らかとなった。

国際貿易の将来構造の推計については、①3次元国際貿易のデータのベクトルと行列への分解方法、②品目別貿易量、国別輸入総量、国別輸出総量の2次計画法による推計、③カーネル行列の自己回帰モデル、④再構成による3次元貿易データの推計を行ったところ、①の貿易データの構造分解を可能にしたことで大幅な計算負荷の低減が可能となったことを確認した。また、得られた資源モデルによる過去の貿易量の再現性を検証し、良好な結果を得たことから、実用性の高いモデルであることを確認した。

b）2Rモデルの開発（耐久消費財）

製品の残存率を単一の分布で推定した場合と通常期間使用者群および長期使用者群の2つの分布の合成分布として推定した場合の結果を比較した。貨物車の結果では、単一分布による推定では使用年数が13年以上の部分において観測値と推定値に乖離が見られるが、2つの分布の合成分布による推定では使用年数13年以上の部分を含め、全体の残存率の観測値をよく推定できた。なお、長期使用者群の割合はメンテナンス・修理の実施率や中古製品の利用率、長期使用者群の平均使用年数は2Rによる長寿命化、通常期間使用者群の平均使用年数は製品の耐久性を反映するものと解釈される。

開発したモデルを用い、2015年から2030年にかけて長期使用者群の割合が20%まで線形的に増加した場合の国内新製品需要台数と使用済み台数の削減効果を分析した結果を述べる。長期使用者群の割合が20%まで増加した場合、2015年から変化しない場合と比較して国内新製品需要台数および使用済み台数が5～10%程度削減されると推計された。このように、開発したモデルでは、製品使用年数の長期化と長期使用者の割合増加という2つの長期使用行動のパラメータを分離して扱い、それらによる国内新製品需要台数や使用済み台数の変化への影響を定量的に算出できる。この2Rモデルを組み込んだ物質フロー・ストックモデルを用いることで、耐久消費財の長期使用の進展による天然資源消費量、廃棄物最終処分量削減量等の計算が可能となった。

c）地域循環モデルの開発

市区町村別の生ごみや家畜ふん尿由来の堆肥・液肥の需給比（＝供給量/需要量）をモデル分析した結果を述べる。需給比が1を超えると供給過剰であり、廃棄物処理の観点からは再生品の受入に余裕がある1以下の状態が望ましいといえる。推定結果として、全ての都道府県で需給比が1以下となっており、物量的な観点から生ごみや家畜ふん尿の堆肥や液肥としての地域循環が成立する可能性が高いことが示された。ただし、本推計において、供給可能量は生ごみの資源化施設への搬入量（実績）から推定しており、生ごみの発生量が大きくても資源化施設が存在しない地域ではゼロとなるというように、将来の施設建設による可能性などは考慮されておらず、かなり厳しい設定条件となっている。一方、潜在的需要量については、生ごみや家畜ふん尿由来肥料を施肥基準の最大限で農家が受入れるというかなり緩い設定条件となっている。これらの結果として需給比は小さい

値を示しているが、供給側と需要側ともにより現状を考慮した設定条件のさらなる検討が必要と考えられる。

次に、焼却施設の統合シナリオを設定した結果を述べる。現在の焼却割合が変わらず、施設統合が行われずに施設数も変化しないとした場合、2030年には、人口減少がもたらす焼却必要量の減少によって現存施設の平均施設容量が73%まで減少した。このような状況では、施設の小規模化により高効率発電が導入できなくなったり、コストが増大することが想定される。一方、施設統合を行った場合、延命化なしの通常統合ケースであっても、施設の小規模化は回避できることが分かり、また、さらに延命化を行うと、施設統合が可能となる施設の組み合わせが増え、施設統合がより可能となることが示された。さらに、600トン/日以上の施設への超統合を目指すと、2016年よりも施設数が減少し、それに伴い平均施設容量も減少した。

施設統合による焼却施設からの温室効果ガス（GHG）排出量の削減効果を推計した結果を述べる。「超統合＋延命あり」のケースにおいては、施設統合による大規模化によって焼却施設のGHG排出原単位が減少し、さらなる削減ができると計算された。なお、今回の試算は、施設統合効果のポテンシャルを把握するために、施設統合の機会がある施設の組み合わせのうち1/2の確率で統合が行われるとして計算したものである。統合確率を高めに設定したことから、適宜、統合確率を補正して、期待される削減効果量を判断する必要がある。

d）3R政策の指標と将来ビジョンの検討

焼却、生ごみの堆肥化、生ごみのメタン発酵（液肥利用あり／なし）、コンバインド方式、容器包装ごみの資源化、RDF化（生ごみリサイクルあり/なし）の8つの処理プロセス情報を整理して、それらの選定基準の考察から3Rシステムの評価軸とその評価指標を得た。正味費用の削減、自治体の費用の削減、埋立回避量の増加、資源・エネルギーの回収量の増加、資源消費の削減、環境負荷量（GHG）の削減、環境散逸量の削減、自区域内資源循環利用量の増加、自区域内経済効果（事業者活用）の増加、コントローラビリティの確保、作業の質と安定性の確保と人材育成、市民の分別等の負担削減、衛生処理の確保、新システム構築の行政負担軽減という14の評価軸が抽出された。また、他のサブテーマも含め、各モデル開発から得られた開発すべき指標と整備すべきデータを表１のとおりにまとめた。今後の指標開発ならびにデータ整備の検討が期待される。

表１　各モデル開発の検討のなかから得られた今後整備すべきデータ

モデル	今後、整備すべきデータとそれによって利用が可能となる指標（方法論は概ね存在、「→」以降が指標を示す）
一廃＆地域循環	・ 自治体以外の主体がリサイクルしている量（例、新聞店での資源回収量など）　→正確な総リサイクル率 ・ 自区域内資源循環利用量　→自区域内資源循環割合＝自区域内資源循環利用量／総資源循環利用量 ・ 下水汚泥処理などの既存インフラ（動脈含む）での処理可能量　→連携処理可能量、連携による需給比
横断型プラ	・ プラスチック含有製品の使用年数または寿命の分布 →使い捨て以外の製品の総排出量（推計精度向上） ・ 個別リサイクル法の対象外のプラスチック製品のリサイクル量または循環利用量　→プラスチック全体を網羅したリサイクル率および循環利用割合（入口側）
2R	・ 保有製品の製品年齢分布データ（データの乏しい電気電子機器について）　→長期使用推進者群の割合 →通常使用／長期使用推進者群の製品平均使用年数
耐久財	・ リフォームの実施割合及びリフォーム実施による使用年数変化　→ライフサイクル資材需要量（推計精度向上） →リフォーム時代における正確な建築寿命 ・ 使用済みの建設物のうち解体されないものや残置される材の割合　→廃棄物等発生量（推計精度向上）
資源	・ 他資源（木材など）の一次資源利用に起因する改変量等地球温暖化の各 SSP シナリオにおける将来の日本の金属以外の資源の利用・貿易量　→それらが引き起こす海外での環境影響量

最後に、3R政策の将来ビジョンを得るため、サブテーマ2と協働して、各モデルの結果を環境省循環計画モデルに投入し政策シナリオ分析を実施し、日本全体の3つの物質フロー指標を推計した結果を述べる。資源生産性は向上、最終処分量は同程度となったが、循環利用率が低下した。循環利用率の目標設定においては、これまでよりも実施可能性を考慮しなければならないことが示され、循環政策の取組効果が漸近する時代においては、複数の対策がトレードオフをもたらすことに注意がより必要であることが確認できた。

（2）既存政策の分析とモデル分析に基づく政策パッケージの提示

a）一般廃棄物モデルの開発

一般廃棄物モデルを用いて2030年のBaUシナリオと対策シナリオを試算した。BaUシナリオにおける2030年度の一般廃棄物の発生量は約40.6百万トン、各種発生抑制対策を導入した対策シナリオでは約38.8百万トンであり、削減効果が約1.8百万トン程度という推計結果となった。なお、2015年度から2030年度のBaUシナリオにおける発生量は約3.5百万トン減少しており、人口減少による自然減の効果のほうが大きいと推計された。出口側の循環利用率（エネルギー回収を含まず）については3R対策のみで約1.8ポイントの増加、焼却施設統合化を含めれば約2.1ポイントの増加、最終処分量は3R対策のみの場合と焼却施設統合化を含めた場合について約0.3百万トンの減少という結果となった。ただし、2015年度比で見ると、3R対策と焼却施設統合化により、出口側の循環利用率は約3.1ポイントの増加、最終処分量は約0.6百万トン程度の減少となった。

この推計結果を循環基本計画の目標値と比較すると、一般廃棄物の出口側の循環利用率の目標値が2013年度比で約8ポイント増加（2025年度）となっているため、目標達成に向けては今後更なる対策を検討する必要があることが分かった。なお、発生量についても2025年度目標に向けては対策シナリオから更に百万トン以上の削減が必要という結果となった。一方で、最終処分量に係る目標についてはBaUシナリオと対策シナリオの両方で達成する結果になった。

本研究で開発した一般廃棄物モデルは全都道府県、全市町村を対象に個別の自治体ごとの推計が可能となっている。市町村レベルの分析から、環境先進都市の高い循環利用が見込まれる廃棄物量が発生抑制対策によって減少することで、相対的に循環利用率が低い廃棄物等の割合が大きくなり、結果的に日本全体の出口側の循環利用率を押し下げることが明らかになった。こうした状況を踏まえると、日本全国の循環利用率の向上に向けては、低い循環利用率に留まる自治体の底上げが重要になると考えられる。

b）耐久財モデルの改良

建設解体に係る寿命関数や廃棄物発生強度が現在値で一定と仮定したうえで耐久財モデルを用いて将来の土石計循環資源の発生量と需要量を推計した。推計においては追加的な対策を実施しないBaUケースと、解体時の発生抑制対策、建設物の長期使用対策といった各施策の実施について、現在と比べて大幅に導入されることを想定した対策ケース（高強度シナリオ）を設定した。推計結果によると、「土石系資源の需要量に対する土石系循環資源供給量の比（以下、需給率と呼ぶ。）について、2015年度の日本全国の実績値で48%のところ、2030年度の日本全国では88%となり、40ポイント上昇することが推計された。また、対策ケースにおける日本全国の需給率は62%であり、BaUケースと比較して、需給率26ポイント押し下げる効果があることがわかった。

地域別の推計結果については、2015年度実績の需給率について、最も小さい地域は東北と四国で30%、最も大きい地域は中国地方で67%であり、地域によって最大37ポイントの差があることが推計された。また、2030年のBaUケースでは関東、北陸、近畿、中国、四国の各地域において需給率が100%以上となり、需要に対する循環資源の供給過多が推計された一方、東北、九州・沖縄ではそれぞれ56%、71%となり、将来における需給率の地域差があることが推計された。今後の建設リサイクル法の見直しなどにおいて発生抑制対策や土石系循環資源の広域的な需給調整が重要になることが示唆された。

c）3R政策パッケージの政策導入効果の検討

3R既存施策の整理結果を踏まえた政策ロジックモデルの整理イメージとしてインプットーアウトプットーアウトカムーゴールの構造で整理を行い、本研究の成果を踏まえた政策ロジックモデルを作成した。なお、アウトプットとアウトカムはそれぞれの項目が相互に複雑に関連するため、今後関連性の整理を更に進める必要がある。

サブテーマごとに今回検討した政策が全体として我が国の物質フローに係る指標に与える影響については、資源生産性は向上し、最終処分量はほぼ横ばいになり、入口側の循環利用率は減少するという結果となった。今回検討した政策によって循環利用率が上昇しなかったのは、主に耐久財モデルなどで想定した発生抑制対策によって、相対的に高いリサイクル率で処理される種類の廃棄物の発生量が減少し、発生量全体に対する循環利用量が減少したことが原因と考えられた。

（3）横断型プラスチック・リサイクルの政策評価モデルの開発

a）物質フロー分析モデルの開発

物質フローの分析結果から、国内需要および輸出に伴うプラスチック消費量ならびに国内の家庭や産業への流入量、容器包装の利用量が推計できた。加えて、プラスチック消費量の需要先の内訳も推計でき、全体として

は産業や輸出が家庭よりも多いことや家庭に流入する製品のうちプラスチックが多いものを示すことができた。また、原料となる樹脂種類の内訳も推計ができた。

b)リサイクル効果評価モデルの開発

各リサイクル手法の化石資源消費量およびCO_2排出量の原単位では、樹脂種類によって資源消費や環境負荷の削減効果に差があり、いずれのリサイクル手法でもポリ塩化ビニル(PVC)は残渣とされることからリサイクル効果が期待できず、ポリエチレン(PE)やポリプロピレン(PP)については、いずれのリサイクル手法でも資源消費や環境負荷の削減効果があることが分かった。材料リサイクルについては、残渣がエネルギー回収されていることから、特にCO_2排出量については樹脂種類によって原単位に大きな差は見られなかった。

リサイクルシナリオとしては、現行の容器包装リサイクル法の対象となっている家庭系のプラスチック製容器包装(ペットボトルを除く)の全量回収に加えて、回収範囲を家庭系の製品プラスチックまで広げた横断型リサイクル、回収範囲を事業系の容器包装プラスチックまで広げた横断型リサイクルを設定した。これらのシナリオについて、a)で推計した国内の需要先へのプラスチックの流入量(2011年)の推計結果をもとに、回収可能量を以下のように算定した。ここで、製品プラスチックには容器包装の直接需要および工業製品が含まれるものとした。

・プラスチック製容器包装(現行法)全量回収シナリオ:回収可能量122万t/年
・容器包装・製品プラスチック横断型(家庭系)シナリオ:回収可能量154万t/年
・家庭系・事業系 横断型(容器包装プラスチック)シナリオ: 回収可能量332万t/年

リサイクルシナリオの評価結果からは、回収可能量がリサイクル効果の決定的な要因であり、回収可能量が332万tと最大である家庭系および事業系の容器包装プラスチックの横断型リサイクルが、最も資源消費や環境負荷の削減効果が見込めると評価された。ただし、樹脂種類別に最も削減効果の見込めるリサイクル手法に配分するような回収や選別が可能であれば、いずれのシナリオでもリサイクル効果は大幅に向上する潜在性があることも示された。

5. 本研究により得られた主な成果

(1)科学的意義

・資源モデルで開発した、シナリオごとの将来の資源貿易表を推計する手法は様々な応用が可能である。例えば、消費トレンド・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できる。
・2Rモデルにおける使用年数を合成分布とみなして分解して物質フロー分析に用いるというアプローチは国際的にも例がなく、物質フロー分析の領域を広げる研究といえる。耐久消費財の長期使用行動の進展による天然資源消費量、温室効果ガス排出量等の削減効果を評価できるという実用性もある。
・開発した一般廃棄物モデルならびに地域循環モデルを用いることで自治体レベルの施策導入量を踏まえた全国レベルの計算値を示すことが可能となった。例えば、循環基本計画では廃棄物処理に関連する指標として循環利用率等を掲げているが、これらの目標設定にあたっての根拠を示すことが可能となる。また、これらのモデルでは自治体毎に収集システムー廃棄物組成ー処理施設という3要素をリンクさせており、着目する廃棄物フローだけでなく、分別収集されない廃棄物の処理を考慮できる統合的な廃棄物モデルである。日本の詳細な一般廃棄物実態調査をフル活用した本モデルを確立できれば、世界に類をみないモデルとなると考えられる。

(2)環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

・環境省の循環基本計画分析・新指標検討ワーキンググループにおける次期循環基本計画の目標値の検討において、本研究成果である一般廃棄物モデルおよび耐久財モデルの試算結果や本モデル研究にもとづく政策案を提示し、次期循環基本計画策定の検討に貢献した。
・改良した耐久財モデルを用いることでBaUケースにおける地域別の土石系循環資源の需給バランスを示すことができた。この結果は、今後の次期循環基本計画の議論のために環境省の担当者から要請されたものであり、タイムリーに情報をインプットできた。その結果、第4次循環基本計画では、将来的な社会課題として、老朽化した土木建築の解体に伴う廃棄物発生量の増加と新規建築需要の低下に伴う循環資源需要の低下によっ

て循環資源の需給バランスが崩れる可能性が指摘されるに至った。

・横断的なリサイクル施策を検討するうえでは、複数のプラスチックのフローが存在することを的確に認識したうえで、それら全てへの施策影響を予想することが必要となる。開発している横断型プラスチック・リサイクルモデルにより、日本で用いられる各種プラスチックについて、どの産業部門における、どの製品・部品に、どのくらいの量が投入されているかを包括的に明らかにすることができた。2018年6月のG7海洋プラスチック憲章を受けて策定が進められているプラスチック資源循環戦略などの動向に先んじたことで、プラスチックの全体フロー把握に貢献でき、政策実施の基礎情報として重要な知見を提示できた。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

第4次循環基本計画のフォローアップはこれからであり、加えて、第5次計画に向けた科学的知見の集積も求められると考えられる。本研究課題のモデル開発の大きな成果は、そのための検討内容の選択肢を拡げるものであり、開発したモデルで循環型社会政策パッケージの導入効果の推計などをさらに行っていくことでさらなる政策貢献が期待できる。

６．研究成果の主な発表状況

（１）主な誌上発表

＜査読付き論文＞

1) Nakajima K., Nansai K., Matsubae K., Tomita M., Takayanagi W., Nagasaka T. (2017) Science of the Total Environment, 586, 730-737
"Global land-use change hidden behind nickel consumption"

2) Nakajima K., Daigo I., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M., Matsuno Y. (2017) Matériaux & Techniques, 105, 511
"Global distribution of material stocks: iron, copper, and nickel"

3) Nansai K., Nakajima K., Suh S., Kagawa S., Kondo Y., Takayanagi W., Shigetomi Y. (2017) Economic Systems Research, 29 (3), 335-356
"The role of primary processing in the supply risks of critical metals"

4) Nakajima K., Daigo I., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M., Matsuno Y. (2018) Resources, Conservation and Recycling, 133, 369-374
"Global distribution of material consumption: Nickel, copper, and iron"

5) Morioka R., Nansai K., Tsuda K. (2018) Economic Structures, 7:7, 21p.
"Role of linkage structures in supply chain for managing greenhouse gas emissions"

6) Nakajima K., Noda S., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M. (2019) Environmental Science & Technology, 53, 1555-1563
"Global Distribution of Used and Unused Extracted Materials Induced by Consumption of Iron, Copper, and Nickel"

7) 河合萌子、中谷隼、栗栖聖、森口　祐一（2019）廃棄物資源循環学会論文誌、（受理済）
「再生処理能力と再生樹脂利用の制約に基づくペットボトル循環利用シナリオの提案」

（２）主な口頭発表（学会等）

1) R. Inaba, T. Tasaki:. The joint 12th International Society for Industrial Ecology (ISIE) Socio-Economic Metabolism section conference and the 5th ISIE Asia-Pacific conference, Nagoya, Japan (2016)
"Estimation of cost reduction by the lifetime extension of waste incineration facilities"

2) R. Morioka, K. Tsuda, K. Nakajima, K. Nansai: Ecobalance 2016, Kyoto, Japan (2016)
"Prediction of international trade statistics based on GDP scenarios."

3) R. Inaba, T. Tasaki, M. Fujii, N. Yamaguchi: The 12th Biennial International Conference on EcoBalance, Kyoto, Japan (2016)
"Benefits from Integration of Municipal Solid Waste Incinerators as a Measure for Decreasing Combustible Waste in the Future"

4) 森岡涼子、津田宏治、中島謙一、南齋規介: 第12回日本LCA学会研究発表会 (2017)
「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」
5) 稲葉陸太、田崎智宏:第12回日本LCA学会研究発表会 (2017)
「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」
6) 丸山多聞、中谷隼、森口祐一:第12回 日本LCA学会研究発表会(2017)
「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」
7) 高木重定、不破敦、田崎智宏、稲葉陸太、河井紘輔:第28回廃棄物資源循環学会研究発表会(2017)
「一般廃棄物に係る全国レベルのボトムアップ型ごみ発生・処理モデルの開発」
8) 稲葉陸太、田崎智宏、河井紘輔、松橋啓介、西村 想、山口直久:第28回廃棄物資源循環学会研究発表会(2017)
「広域処理を考慮した廃棄物処理施設の稼働率と容量削減率の推計」
9) 河井紘輔:第28回廃棄物資源循環学会研究発表会(2017)
「生ごみ堆肥化促進シナリオによる全国レベルでの一般廃棄物処理に係る再生利用率推計モデル」
10) Inaba R., Tasaki T., Fujii M., Yamaguchi N. (2017) Program of The 9th biennial conference of the International Society for Industrial Ecology (ISIE) and the 25th annual conference of the International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST), 1174
"Estimation of environmental and economic effects of integrating municipal solid waste incinerators in a Japanese region"
11) Maruyama T., Nakatani J., Moriguchi Y. (2017) EcoDesign 2017, 10th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tainan, Taiwan
"Estimation of lifetime functions of plastic products"
12) Nakajima K., Daigo I., Nansai K. Matsubae K. Takayanagi W. Tomita M. Matsuno Y. (2017) 11th International Conference on Society & Materials (SAM11), 15-16 May 2017, Trondheim
"Global distribution of material stocks: iron, copper, and nickel"
13) Nakajima K., Nansai K. Matsubae K. Tomita M. Takayanagi W. (2017) World Resources Forum 2017, Centre International de Conferences (CICG), Geneva, Switzerland・24-25 October 2017
"Global Distribution of Hidden Flows Induced by Consumption of Metals"
14) Nansai K., Tsukamoto N., Tohno S., Kondo Y. Kagawa S. and Takayanagi W.(2017) World Resources Forum 2017, Centre International de Conferences (CICG), Geneva, Switzerland・24-25 October 2017
"Screening of the criticality level for precious metals on social sustainability issues"
15) Morioka R., Nakajima K., Nansai K. (2017) 4th International Conference on Final Sinks conference, Oct 2017, Kyoto, 43-44
"Global resource flows in trade by future socio-economic scenarios"
16) 稲葉陸太、田崎智宏、河井紘輔、西村想、山口直久 (2018) 第13回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 174-175
「生ごみと下水汚泥の集約処理による環境面および経済面での効果」
17) 丸山多聞、中谷隼、森口祐一(2018)第13回 日本LCA学会研究発表会、東京
「容器包装と産業への蓄積に着目したMFAによるプラスチック廃棄物の発生量推計」
18) 高木重定, 不破敦, 田崎智宏, 稲葉陸太, 河井紘輔 (2018) 第29回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, 17-18
「一般廃棄物に係る全自治体レベルのボトムアップ型ごみ発生・処理モデルを用いた対策シナリオ導入効果について」
19) 中西翔太郎, 高木重定, 田崎智宏 (2018) 第29回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, 15-16
「土木建築由来の循環資源に係る地域需給バランスの将来推計」
20) 森岡涼子、津田宏治、中島謙一、南斉規介 (2018) 第13回日本LCA学会研究発表会要旨集, 58-59
「温室効果ガス削減目標に準じた金属資源の国際貿易推計」

21） Nakajima K., Noda S., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M. (2018) The 13th Biennial International Conference on EcoBalance, Ecobalance 2018
″Global Distribution of Hidden Flows Induced by Consumption of Metals: Iron, Copper, and Nickel. ″
22） Oashi A., Yamazaki Y., Matsubae K., Nakajima K., Nagasaka T. (2018) The 13th Biennial International Conference on EcoBalance, Ecobalance 2018
″Analyzing international supply chain risk in copper mining: focus on water resources″
23） Maruyama, T., Nakatani, J., Moriguchi, Y. (2018) EcoBalance 2018, 13th Biennial International Conference on EcoBalance, Tokyo, Japan
“Material flow modeling of plastics for tracking containers and packaging flows and accumulation in intermediate sectors”
24） 森岡涼子，津田宏治，中島謙一，南斉規介（2019）第14回日本LCA学会研究発表会，第14回日本LCA学会研究発表会 講演要旨集, 268-269.
「代表濃度経路シナリオを考慮した資源投入量および移動量の地域別推計」
25） 丸山多聞、中谷隼、森口祐一（2019）第14回 日本LCA学会研究発表会、福岡
「プラスチックの製品種類および蓄積先に着目した物質フロー分析」
26） 東野航平、中谷隼、栗栖聖、森口祐一（2019）第14回 日本LCA学会研究発表会、福岡
「横断型プラスチックリサイクルのシナリオ分析」
27） Oguchi M., Tasaki T., Terazono A., Nishijima D. (2019) The 3rd International Product Lifetimes and the Environment Confeerence, PLATE 2019 Conference （アブストラクト受理済）
″A product lifetime model for assessing the effect of product lifetime extension behavior by different consumer segments″

7. 研究者略歴

研究代表者

大迫政浩

工学博士、国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター・センター長

主な研究分担者

1） 田崎智宏

博士(学術)、国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター・循環型社会システム研究室長

2） 高木重定

修士、みずほ情報総研株式会社 環境エネルギー第1部 持続型社会チーム・課長

3） 森口祐一

博士(工学)、東京大学工学部都市工学科・教授

4） 中谷隼

博士(工学)、東京大学工学部都市工学科・講師

II．成果の詳細

Ⅱ－１　資源・2R・地域循環に係る政策立案のためのモデル開発

国立研究開発法人国立環境研究所

資源循環・廃棄物研究センター	大迫　政浩
資源循環・廃棄物研究センター　循環型社会システム研究室	田崎　智宏
資源循環・廃棄物研究センター	寺園　淳
資源循環・廃棄物研究センター　国際資源循環研究室	南齋　規介
資源循環・廃棄物研究センター　国際資源循環研究室	中島　謙一
資源循環・廃棄物研究センター　循環型社会システム研究室	稲葉　陸太
資源循環・廃棄物研究センター　循環型社会システム研究室	河井 紘輔
資源循環・廃棄物研究センター　基盤技術・物質管理研究室	小口 正弘
資源循環・廃棄物研究センター　国際資源循環研究室	森岡　涼子＜研究協力者＞
資源循環・廃棄物研究センター　国際資源循環研究室	西嶋　大輔＜研究協力者＞

平成28～30年度累計予算額：29,621千円
（うち平成28年度：10,041千円、平成29年度：10,041千円、平成30年度：9,539千円）
累計予算額は、間接経費を含む。

［要旨］
3R政策が進展するなか、循環基本計画の数値目標等に示されている物質フロー指標の改善率が鈍化・漸近して段階に入っており、今後は、上記計画におけるよりきめ細かい目標設定とフォローアップによる政策のさらなる効果発現が求められている。本サブテーマでは、そのような検討に資する3つの物質フローモデルを開発した。資源モデルでは、温暖化シナリオのパラメータを用いて貿易量を推計するモデルを構築した。過去の貿易量を再現することができたことを確認したうえで、温暖化シナリオでの貿易量を将来予測した。耐久消費財の2R（リデュース・リユース）モデルにおいては、長期使用群と短期（通常）使用群に分けた製品フローモデルを構築し、耐久消費財の長期使用促進による新製品・廃製品の台数変化を算出した。地域循環モデルにおいては、サブテーマ２と協働して一般廃棄物モデルと連結したモデルを開発し、食品廃棄物のリサイクル品である堆肥利用の需給バランスの地域特徴を分析するとともに、人口減少下における焼却施設の統合シナリオを作成し、施設統合効果を推計した。最後に、他のサブテーマで開発したモデルの結果も含めて、その政策シナリオ分析結果を環境省循環計画モデルに入力し、3つの物質フロー指標を算出した。循環政策の取組効果が漸近する時代においては、複数の対策がトレードオフをもたらすことに注意がより必要であることを確認した。

［キーワード］
物質フロー・ストックモデル、政策シナリオ分析、国際資源供給、２Ｒ（リデュース・リユース）、地域循環

１．はじめに

日本では、3R（リデュース・リユース・リサイクル）政策が循環型社会形成推進基本法（以下、「循環基本法」という。）やそれに基づく循環型社会形成推進基本計画（以下、「循環基本計画」という。）、個別リサイクル法などによって進展・展開されてきた。これまでの循環基本計画の数値目標の主眼は日本全体の物量を捉えた3つの物質フロー指標（資源生産性、循環利用量、最終処分量）にあっ

たが、土石系資源以外の資源生産性の改善は停滞していること、産業廃棄物の最終処分量の削減は概ね限界に来ていることなどをふまえると、資源効率や廃棄物処理をさらに向上・進化させるには資源種ごとの対策を検討するなど、きめ細かい政策が求められている。

このため、循環基本計画における目標と実施策の設定を支援するため、3R政策や今後の社会変化が我が国の資源利用や廃棄物管理に与える影響を定量的に算出できる物質フローモデルを構築することが必要となっている。これにより、政策パッケージでの政策導入量もしくは政策実施による効果を定量的に示すことができるようになる。

２．研究開発目的

本研究は、3R政策や今後の社会変化が我が国の資源利用や廃棄物管理に与える影響を定量的に算出できる物質フローモデルを構築した上で、将来ビジョンとその達成に向けた政策・取組を設定し、それらの政策導入量を定量的に示すものである。本研究では、第一に、国立環境研究所で開発してきた物質フロー・ストックモデルとプロセスモデルからなる国レベルのモデルをベースに、新たな施策導入をきめ細かく表現できるモデルへの改良・拡張を行う。サブテーマ１では、本研究プロジェクトが対象とする6つのモデルの改良・拡張の視点のうち、資源、2R（リデュース・リユース）、地域循環の3つに着目してモデル開発を行い、これらの施策の進捗状況を計測する新たな指標群を併せて提示する。第二に、これまでの3R政策が物質フローに与えた影響について定量的な調査・評価を行い、そのうえで将来ビジョンを達成するための政策パッケージを設定し、開発したモデルを用いた分析により政策の導入量や効果の算出を行う。

３．研究開発方法

ａ）資源モデルの開発

資源モデルの開発では、1)日本国内の資源利用が海外で引き起こす環境負荷の把握を可能とする誘発影響量の分析モデル開発、および、2)将来の国際資源フロー構造の推定モデルの開発に取り組んだ。誘発影響量の分析モデル開発については、多地域産業連関分析モデルの1つであるGLIO(Global Link Input-Output)モデルを応用することで、改変面積(Nakajima et al. 2017[1])と関与物質総量(Total material requirement(TMR), Nakajima et al. 2019[2])を指標として、日本の経済活動（国内最終需要および輸出）が国際サプライチェーンを通じて誘発する土地改変量の推計手法を開発した。事例解析では、鉄・銅およびニッケルを事例として、世界全体および日本の経済活動が誘発する採掘活動に伴う改変面積（ニッケル）およびTMR（鉄・銅・ニッケル）の推計を実施した。

改変面積の推計においては、式(1)- 1および式(1)- 2を用いて国・地域ごとの採掘方法割合を推定した。ここで$\boldsymbol{m_q^{OP}}$は、国・地域 q における露天掘り鉱山の比率であり、$\boldsymbol{m_q^{UG}}$は国・地域 q における坑内掘りの比率である。また、$\boldsymbol{g_q^{OP,i}}$は、国・地域 q における鉱山 i での露天掘りによる生産量を$\boldsymbol{g_q^{UG,i}}$は同鉱山での坑内掘りによる生産量である。

$$m_q^{OP} = \frac{\sum_i g_q^{OP,i}}{\sum_i g_q^{OP,i} + \sum_i g_q^{UG,i}} \qquad (1)-1$$

$$m_q^{UG} = 1 - m_q^{OP} \qquad (1)-2$$

これらの情報をもとに、国・地域qにおける鉱石採掘に伴う土地改変面積(L_q)および日本の経済活動が誘発する国・地域qにおける鉱石採掘に伴う土地改変面積(L_q^{JPD})を、式(1)- 3および式(1)- 4により推計した。ここで、l は土地利用強度であり、l^{OP}は露天掘りによる生産量(成分純分量)あたりの土地利用面積であり、l^{UG}は坑内掘りによる土地利用強度を意味する。また、g_q^{JPD}は、日本の経済活動が国・地域qに誘発する鉱石生産量であり、GLIOモデルを用いて推計した。推計方法の詳細とデータの出典等については、発表成果(Nakajima et al. 2017[1])を参照されたい。

$$L_q = g_q\,(m_q^{OP}\,l^{OP} + m_q^{UG}\,l^{UG}) \qquad (1)-3$$
$$L_q^{JPD} = g_q^{JPD}\,(m_q^{OP}\,l^{OP} + m_q^{UG}\,l^{UG}) \qquad (1)-4$$

上記のGLIOモデルは、日本の産業連関構造と世界各国の生産活動との接続において国際貿易データ[3)]を利用している。本研究が目的としている国内の資源利用に伴う資源採掘国への環境影響の定量化について将来予測を行うには、国際貿易の将来構造の推計が必要となる。国際貿易データは国×国×貿易商品の3次元構造をしており、最も詳細なデータの場合、国数は200以上、貿易商品数は5000以上に上る非常に膨大なデータであり、その3次元のデータを全て変数とする推計は極めて高度な計算機を有する。そこで、本研究では計算負荷を大幅に低減し、汎用の計算機でも実行可能な国際貿易モデルの手法論を開発した。以下に、方法を四つの段階に区分し、個々の概要を記述する。

一つ目は、「①３次元国際貿易のデータのベクトルと行列への分解方法」である。1995年から2013年までの各年物量ベース（重量（トン））国際貿易表を各年の貿易量ベクトルと貿易構造行列へ分解した。国際貿易表は輸出国148か国×輸入国148か国×5041品目の3次元データである。この3次元データに対して3種類定義される行列について、行列分解を行った。3種類の行列とは、輸出国×輸入国からなる各品目表（A）、各国の品目別輸出合計ベクトル×品目の行列（B）、各国の品目別輸入合計ベクトル×品目の行列（C）である。（A）は5041個の行列、（B）と（C）は１つずつの行列が対応する。

ここで、任意の行列Zをオリジナルカーネル行列とその行和、列和に分解することを考える。このオリジナルカーネル行列は、対数空間においてZの要素からZの行平均、列平均を減じ、Z要素全体の平均を加えた行列である。オリジナルカーネル行列に、すべての行和・列和が１になるようにRAS法をかけて得られる行列をカーネル行列Kと定義する。カーネル行列Kはすべての行と列を確率値とみなせる2重確率行列である。例えば品目hの輸出入表（A）のカーネル行列のi行は国iから他の国へ品目hを輸出する確率を並べたベクトル、j列は国jが他の国から品目hを輸入する確率を並べたベクトルに対応する。

二つ目は、「②品目別貿易量、国別輸入総量、国別輸出総量の2次計画法による推計」である。148か国のそれぞれのGDP（購買力平価ベース）,人口，二酸化炭素排出量からなる444次元ベクトルを説明変数として、品目別貿易量、国別輸入総量、国別輸出総量をリッジ回帰により推定した。ただし、将来の推定年も含めて推定貿易量が負の値になる場合は、リッジ回帰モデルに非負制約を加え、リッジ回帰の結果を初期値として2次計画法を用いた。リッジ回帰・2次計画法におけるリッジパラメータは交差検定によって決定した。

三つ目は、「③カーネル行列の自己回帰モデル」である。カーネル行列の列要素を積んで作ったベクトルに対し、正則化項付きの1次の自己回帰モデルを適用し、遷移行列を推定した。正則化パラメータは交差検定によって決定した。カーネル行列の要素数は最大で148×5041となり、要素を積んで作ったベクトルに対してそのまま自己回帰モデルを適用すると遷移行列の計算が汎用計算機のメモリには乗らない大きなサイズになる。現在普及している計算機のスペックで現実的な時間で計算を可能とするため、正規化項付き自己回帰モデルをクリロフ部分空間法における共役勾配法を用いて定式化しなおし、高い近似精度で高速に遷移行列を推定することを可能にした。

四つ目は「④再構成による３次元貿易データの推計」である。ここで①で述べた行列の分解の逆変換である再構成について説明する。任意のカーネル行列Kに、行和列和ベクトルを指定してRAS法を適用することで、カーネル行列Kによって規定される2重確率構造をもち、行和列和条件を満たす新しい行列を作ることができる。③で得られた将来のカーネル行列と②で得られた（A），（B），（C）の行和列和を用いて、将来の3次元貿易データを再構成した。（B）に関する将来の推定カーネル行列と推定各国輸出量合計ベクトルを使って再構成した行列は、将来当該年の（A）における輸出量合計ベクトルが並んだ行列（D）となる。（C）に関する将来の推定カーネル行列と推定各国輸入量合計ベクトルを使って再構成した行列は、将来当該年の（A）における輸入量合計ベクトルが並んだ行列（E）となる。（D），（E）によって得られた将来当該年の輸出量合計ベクトル、輸入量合計ベクトルと推定した（A）のカーネル行列を用いてRAS法によって品目表を1枚ずつ再構成することにより、将来の3次元貿易データを完成させた。

ｂ）２Ｒモデルの開発（耐久消費財）

過去に国立環境研究所で開発してきた国レベルの分析モデルには、製品の販売や保有量と製品寿命分布に基づいて使用済み製品の発生量や新たな製品の需要量を計算する耐久消費財フロー・ストックモデルが組み込まれている（藤井ら、2013[4)]）。このモデルでは、製品寿命分布を単一の分布として扱っている。本研究がねらいとしている第四次循環基本計画に記載されている2R型ビジネスモデルの普及が天然資源消費量、温室効果ガス排出量、廃棄物最終処分量等にもたらす影響を定量的に評価するためには、モデルの中で製品の長期使用ならびにリユースの進展を明示的に扱えるようにすることが必要である。そこで、通常期間使用者の使用製品群（通常期間使用者群）と長期使用推進者の使用製品群（長期使用者群）の寿命分布を分離した製品寿命モデルの開発を行った。また、主要な耐久消費財を対象とし、開発したモデルを用いて長期使用行動が促進された場合のシナリオ分析を行い、新製品需要と使用済み製品の削減効果を定量化した。また、開発したモデルを国立環境研究所で開発してきた物質フロー・ストック分析モデルに組み込み、耐久消費財の長期使用行動の進展による天然資源消費量、温室効果ガス排出量、廃棄物最終処分量削減の効果を評価できるようにした。

統計データに基づく自動車の残存率分布の観測値を単一の分布関数で近似した場合、高車齢部分において観測値と近似値に乖離が見られ、統計値が分布関数近似値を上回っている事象が確認できた。この乖離をメンテナンスやリユースによる長期使用行動の影響であると考え、製品の残存率分布は便宜的に通常期間使用者群と長期使用者群それぞれの残存率分布の合成分布で表現できるとの仮説に基づき、自動車を事例としてその分布の推定を行った。具体的には、自動車全体の残存率分布（t年末における使用年数i年の製品の残存率）$s_t(i)$は式(1)－ 5で表現されるとし、通常期間使用者群および長期使用者群の各年度末における製品の残存率分布の観測値を式(1)－ 6および式(1)－ 7のワイブル分布関数で近似した場合の形状パラメータと尺度パラメータを推定した。

$$s_t(i) = (1-Y)\cdot s_{t,N}(i) + Y\cdot s_{t,L}(i) \qquad (1)-5$$

$$s_{t,N}(i) = \exp\left\{-\left(\frac{i}{a_N}\right)^{b_N}\right\},\quad s_{t,L}(i) = \exp\left\{-\left(\frac{i}{a_L}\right)^{b_L}\right\} \qquad (1)-6$$

$$y_{av,N} = a_N \times \Gamma\left(1+\frac{1}{b_N}\right),\quad y_{av,L} = a_L \times \Gamma\left(1+\frac{1}{b_L}\right) \qquad (1)-7$$

ここで、$s_t(i)$はt年末における使用年数i年の製品の残存率、Yは製品保有者に占める長期使用者の割合、aはワイブル分布関数の尺度パラメータ、bはワイブル分布関数の形状パラメータ、添字のNは通常期間使用者群、Lは長期使用者群の値であることを示す。

これらのパラメータを推定するにあたり、通常期間使用者群の故障確率$\lambda_N(i)$は長期使用者群の故障確率$\lambda_L(i)$よりも大きくなるべきことに留意し、これを制約条件としてパラメータの最適化を行った。また当初は、最小二乗法により観測値と式(1)－ 5による計算値の残差二乗和の最小化により3つのパラメータを推計対象年度ごとに推定したが、現実的には極端に変動するとは考えられない尺度パラメータaや長期使用者の割合Yの年変動が非常に大きくなった。そこで、その際に推定された値を基準に形状パラメータbを年度によらず通常期間使用者群と長期使用者群それぞれについて固定し、各年度の当てはめの精度を保ちつつ、尺度パラメータaと長期使用者の割合Yの年変動を抑制し、当初の推定で年度ごとに最適化したパラメータとの乖離が小さくなるように、複数年度にわたる各年度のパラメータを一括して推定した。具体的には式(1)－ 8で示すerrを最小化するように各年度のaとYを同時推定した。

$$err = \frac{\Delta e}{\Delta e_{\mathrm{ref}}} + \frac{\Delta a_{\mathrm{N}} + \Delta a'_{\mathrm{N}}}{\Delta a_{\mathrm{N,ref}} + \Delta a'_{\mathrm{N,ref}}} + \frac{\Delta a_{\mathrm{L}} + \Delta a'_{\mathrm{L}}}{\Delta a_{\mathrm{L,ref}} + \Delta a'_{\mathrm{L,ref}}} + \frac{\Delta Y + \Delta Y'}{\Delta Y_{\mathrm{ref}} + \Delta Y'_{\mathrm{ref}}} \qquad (1)-8$$

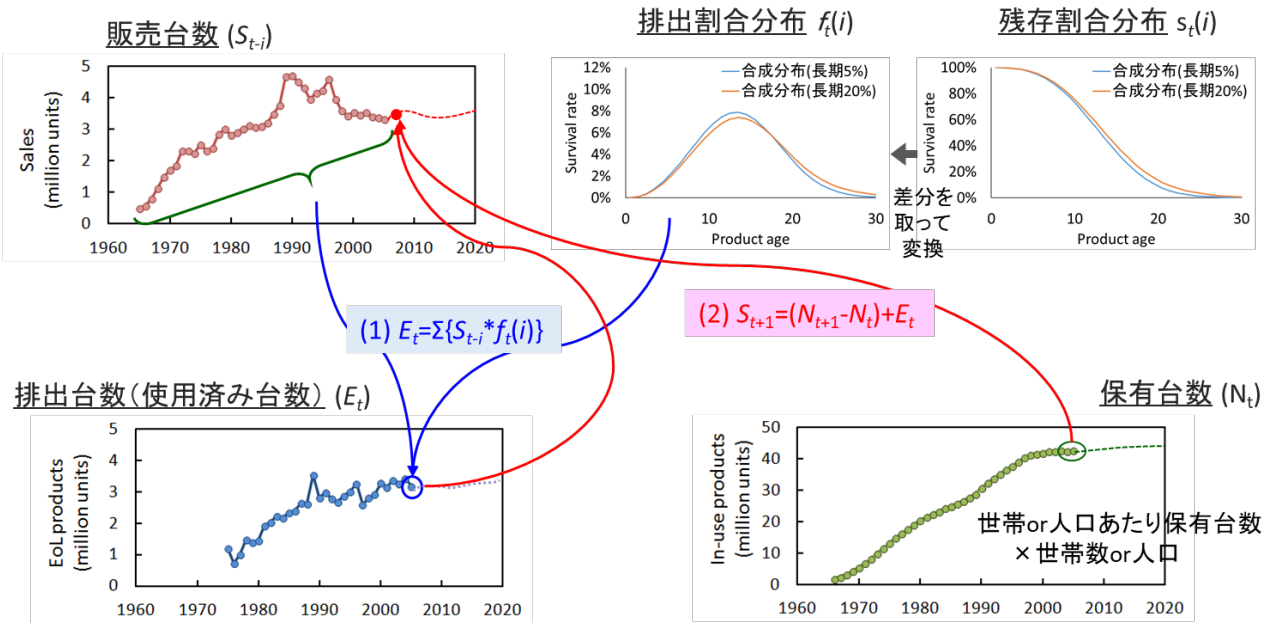
ここで、Δeは各年度における観測値と計算値の差の二乗和、Δa_N、Δa_Lは通常期間使用者群および長期使用者群の残存率分布の尺度パラメータの前年度との差の二乗和、ΔYは長期使用者の割合の前年度

との差の二乗和、$\Delta a'_N$および$\Delta a'_L$は通常期間使用者群および長期使用者群の尺度パラメータの年度別推定値（前後2年間の平均）との差の二乗和、$\Delta Y'$は長期使用者の割合の年度別推定値（前後2年間の平均）との差の二乗和である。また、右辺各項の分母にある添字refは年別の推定値から求めた値であることを示しており、右辺第1項から第4項の重みを均等にするために各項を規格化したものである。残存率分布の観測値は、一般財団法人自動車検査登録情報協会による各年度末の残存台数を対応する年度の新車登録台数で除して作成した。推定は乗用車（軽乗用車を除く）と貨物車について、1988年度から2009年度の期間を対象とした。

次に、乗用車、エアコン、冷蔵庫、洗濯機、テレビ、携帯電話の6品目を対象とし、長期使用行動が促進された場合のシナリオ分析を行った。具体的には、長期使用者群の割合が2015年から2030年の間に20%まで線形的に増加した場合の国内需要台数の削減効果を分析した。分析方法の概要を図(1)－ 1に、詳細を以下に示す。

①長期使用者群の割合Y、通常期間使用者群および長期使用者群の平均使用年数$y_{av,N}$、$y_{av,L}$を設定
②①で設定した値からから求めた寿命分布（残存率分布$s_t(i)$の差分から排出率分布$f_t(i)$へ変換）と過去の販売台数S_{t-i}からt年における使用済み台数E_tを計算（図中の(1)式）
③計算したE_tと保有台数の変化分（$N_{t+1}-N_t$）から次の期間（1年間）の販売台数を計算（図の(2)式）
④②と③を繰り返し、2015年から2030年までを計算

なお、保有台数の水準は長期使用行動の有無とは関係しないと考えられるので、統計値（自動車検査登録情報協会、内閣府消費動向調査）のトレンドで固定した。2Rシナリオは、長期使用者群の割合は2015年から2030年にかけて20%まで線形的に増加するとし、2015年の値は乗用車は前述の実データによる推定結果をふまえて5%、電気電子機器は0%と設定した。通常期間使用者群および長期使用者群の平均使用年数は、乗用車は前述の実データで推定した値をふまえて設定した。電気電子機器については、通常期間使用者群の平均使用年数は2015年の残存率分布を単一の分布で近似したときの平均使用年数とし、長期使用者群の平均使用年数は通常期間使用者群の1.4倍とした。長期使用者群の平均使用年数を通常期間使用者群の1.4倍としたのは、前述の実データで推定した乗用車全体の残存率分布（通常期間使用者群と長期使用者群の合成分布）における長期使用推進者群の平均使用年数に相当する使用年数の残存率が約15%であり、電気電子機器の残存率分布（単一分布での近似）における残存率15%の使用年数が平均値（通常期間使用者群の平均使用年数）の1.35～1.45倍であったことを根拠としている。



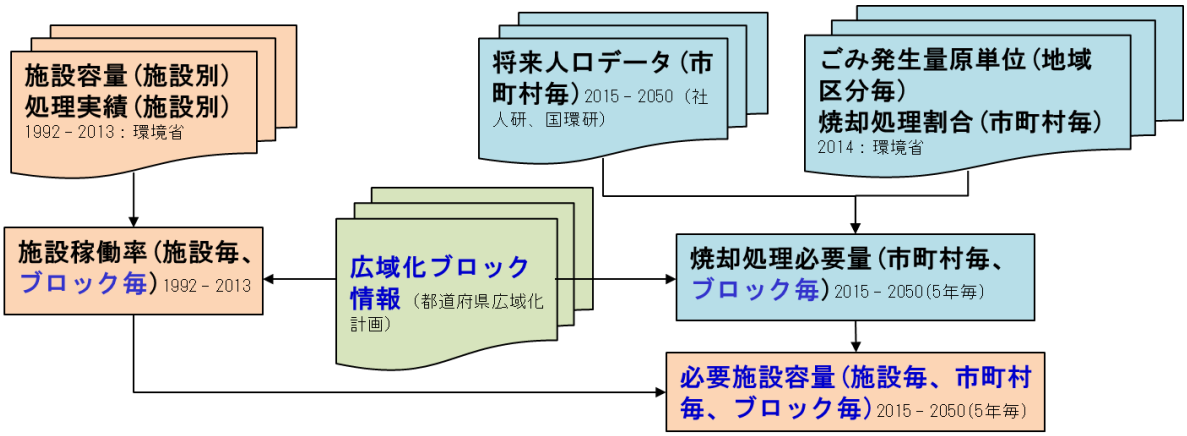
図(1)－ 1　長期使用行動が促進された場合のシナリオ分析方法の概要

また、開発したモデルを国立環境研究所で開発してきた物質フロー・ストック分析モデルに組み込み、耐久消費財の長期使用行動の進展による天然資源消費量、温室効果ガス排出量、廃棄物最終処分量削減の効果を評価できるようにした。具体的には、同モデルにおける耐久消費財フロー・ストックモデルの中で単一分布として扱われている製品寿命分布の部分を開発した製品寿命モデルで置き換えたものを作成した。

ｃ）地域循環モデルの開発

地域循環モデルの開発目標は二つある。一つは、サブテーマ２で開発される一般廃棄物処理モデルとの接合がされているモデルを開発すること、もう一つは、市区町村レベルの解像度で地域特性を考慮できるモデルを開発することである。そのために、モデルの基本構造を検討し、市区町村において廃棄物のリサイクルが進展した場合に再生品が確実に利用されて持続的な地域循環を形成することを促すように、再生品の潜在的な需給バランスを分析できるようにした。地域循環の検討対象として事例が多い生ごみ由来の堆肥・液肥に着目して、一般廃棄物処理モデルで推定された生ごみ由来の堆肥・液肥の供給可能量（窒素換算）Srを算出した。また、農林水産省の公表データにおける市区町村別の田畑面積[5]、および都道府県別の施肥基準[6]に基づき農地での施肥可能量（窒素換算）を潜在的需要量Dとして算出した。このようにして得られたSrをDで除して需給比Rrを算出し、市区町村毎の生ごみ資源化による肥料の窒素換算での需給バランスを分析できるようにした。併せて、競合の可能性がある家畜ふん尿についても農林統計[7]などに基づいて家畜種別のふん尿発生量および堆肥・液肥の供給可能量（窒素換算）Scを算出し、ScをDで除した需給比Rcから窒素換算での需給バランスを分析した。

また、過剰な焼却施設容量が存在する地域においては、生ごみリサイクルなどの地域循環圏システムの構築を阻害してしまう可能性があるため、将来の人口減少[8]を想定して、広域化ブロック別に焼却処理必要量と必要施設容量を図(1)－２に示す手順で算出し、そのうえで、後述するとおり、一般廃棄物実態調査の焼却施設データ[9]を用いて同一広域化ブロック[10]において施設統合が進展する4つの施設統合シナリオを設定して、統合なしシナリオとともにモデル分析を行った。また、その設定したシナリオを一般廃棄物処理モデルに接続させるためには、広域処理を行う組合と市町村、ならびに施設の市町村の対応状況を表現した行列表によるインターフェースが必要となる。そこで、市町村・組合・施設間のリンクの有無を表したバイナリ表と市区町村分担金を用いた金額表及び廃棄物量を用いた物量表を作成した。最後にこれらの検討で得られたデータを一般廃棄物モデルに投入し、自治体の3R施策とともに広域化を実施した場合の温室効果ガスの排出削減などの効果推計を行った。



図(1)－２　施設稼働率と焼却必要量の推計手順

4つの施設統合シナリオは、2つの施設更新期間のケースと2つの広域化ケースの組み合わせとして作成した。施設の更新期間については、施設年齢が25～30年とする「通常更新」と施設年齢が20～35年とする「延命化・早期廃止あり」（以下、「延命化あり」という。）の2つのケースを設定した。広域化

については、広域化通知をふまえ、施設規模が300t/日以上の場合には施設統合を行わず、それ以外が施設統合を行う「通常統合」と、施設規模が600t/日を超える場合には施設統合を行わない「超統合」の2つのケースを設定した。いずれのケースにおいても、北海道、本州、四国、九州、沖縄本島と道路で繋がっていない島に位置する施設は施設統合を行わず、単独更新を行うものとした。また、施設統合の年を探索するにあたっては、図(1)- 3に示すとおり、施設統合が可能となる年次や施設の組み合わせは多数に存在する。そこで、施設の更新はできるだけ先延ばしする、できるだけ統合する施設数を多くするという基準を設定した。さらに、上記条件を満たす施設であっても社会的な要因等から必ずしも施設統合が行われるわけではない。そこで、一定確率で統合が行われることと、今回のシナリオ分析においては、施設統合による効果のポテンシャルをみるため、その確率を1/2と大きめと考えられる値を設定した。将来的には、過去の施設統合の実績をふまえてこの確率を算出することが望ましい。

図(1)- 3　施設稼働率と焼却必要量の推計手順

d）3R政策の指標と将来ビジョンの検討

開発されたモデルを用いて3R政策の効果を評価するためには、評価軸の設定とその評価軸に合致した評価指標を設定する必要がある。そこで、これまでの3R・廃棄物政策において各地域で選択されるリサイクル・処理のシステム（以下、「処理オプション」という。）を整理し、それらの各処理オプションが選択される理由を考察・整理して、システムの評価軸ならびに評価指標を特定した。また、各モデルの開発検討のなかで把握できた今後求められる指標とそのためのデータ整備についても、まとめを行った。

3R政策の将来ビジョンについては、本研究で開発中のモデルに関してどのような政策提言が可能か、関係するかを研究メンバーで検討し、アドバイザリー会合の機会で外部の意見を聴取した。その上で、モデル開発、ならびに、サブテーマ2の政策ロジックモデルの検討と政策シナリオの設定を行い、最後に、各モデルの計算結果を環境省が循環基本計画の3つの物質フロー指標の設定に用いているモデル（以下、「環境省循環計画モデル」という。）に投入し政策シナリオ分析の結果を得ることで、今後の3R政策の展望を考察した。

4．結果及び考察

a）資源モデルの開発

ここでは、ニッケルを事例とした世界全体および日本の経済活動が誘発する採掘活動に伴う改変面積に関する結果を紹介する。世界全体の経済活動に伴うニッケルの国際マテリアルフローと国際マテリアルフローデータにGLIOモデルを適用する事で得られた日本の経済活動が誘発するニッケルの国際マテリアルフローが得られている。日本の経済活動が誘発する国際フローは、GLIOモデルを適用する事で同定した。解析の結果、世界全体のフローでは、北米・ロシア・南アを起点とした西欧・北米向けのネットワークが主要な構成要素であるのに対して、日本の経済活動が誘発するフローは、インドネシア、ニューカレドニア、オーストラリアを起点とするネットワークが主要であることが分かった。

また、表(1)- 1には、日本の経済活動が誘発するニッケルの鉱石生産量を示した。United States Geological Survey(USGS)[11]によると世界全体でのニッケル鉱石の採掘量は、純分換算で、1.5×10^{6} t-Niであった。一方、GLIOモデルを適用する事で、日本の経済活動が誘発するニッケル鉱石の採掘量は

0.25×10^6 t-Ni(国内最終需要：0.14×10^6 t-Ni、輸出：0.11×10^6 t-Ni)であり、世界全体の約16.5%を占めると得られた。需要部門の内訳をみると、固定資本形成(民間)および家計消費支出、次いで、固定資本形成(公的)であった。国別の内訳をみると、インドネシア(40%)、ニューカレドニア(13.6%)、オーストラリア(8.3%)、カナダ(8.3%)、ロシア(7.4%)であった。上位3か国は、主要なニッケル酸化鉱の生産国であり、日本における原料の調達国でもある。

表(1)- 1　日本の経済活動が誘発するニッケルの鉱石生産量：a. 最終需要部門別内訳、b. 国別内訳

(a) Final demand category

Num.	Final demand category for Japan	Material footprint [t-Ni/year]
[1]	Household consumption	32,229
[2]	Governmental expenditure	5,617
[3]	Public fixed-capital investment	18,761
[4]	Private fixed-capital investment	69,371
[5]	Other	9,750
[6]	Export	111,297
	Total domestic final demand (sum of [1] to [5])	135,728
	Total final demand (sum of [1] to [6])	247,025

(b) Countries and regions

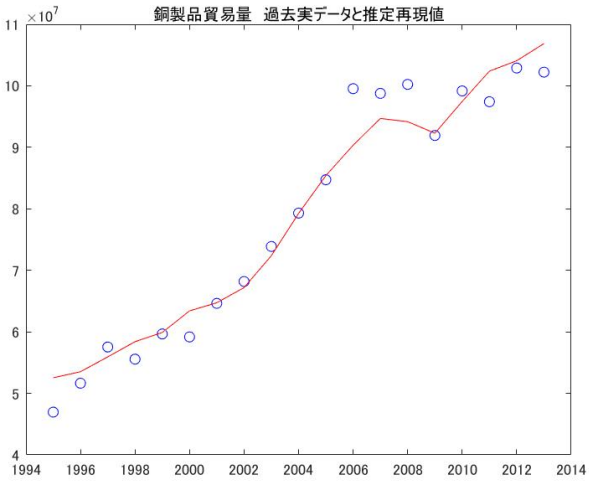
Countries and regions	Material footprint [t-Ni/year]
Republic of Indonesia	98,780
New Caledonia (France)	33,571
Australia	20,608
Canada	20,547
Russia	18,254
Others	55,265
Total	247,025

図(1)- 4には、世界全体および日本の経済活動が誘発するニッケル鉱石の採掘活動に伴う土地改変面積の推計結果(2005年)を示した。本研究により、ニッケルの鉱石採掘に伴う土地改変面積は約20年間で増加の一途を辿っていることが示された。GLIOモデルを適用する事で日本の寄与を見てみると、日本の経済活動は、世界全体で誘発されるニッケル鉱石の採掘に伴う改変面積の約20%(国内最終需要:11%, 輸出:9%)に寄与している事などが明らかとなった。また影響を与える国・地域は、インドネシア(47.0%)、ニューカレドニア(16.0%)、オーストラリア(7.7%)に対する寄与が大きいことが明らかになった。

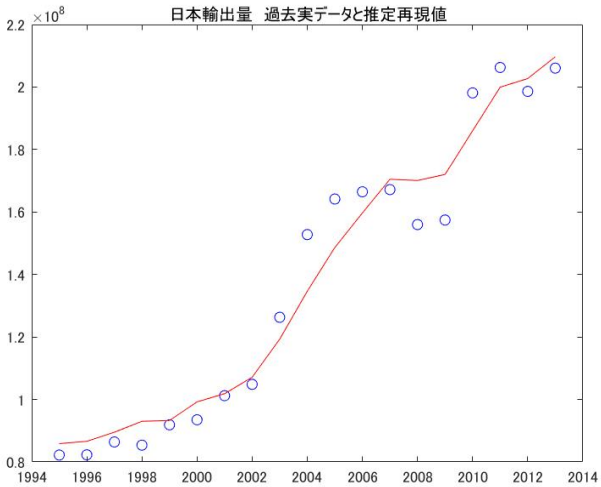
図(1)- 4　世界および日本の経済活動が誘発するニッケル鉱石の採掘に伴う土地改変面積(2005年)

次に、開発した国際貿易モデルによる過去の貿易量の再現性を検証した結果の例を図(1)- 5に示す。

この図は過去1995-2013年の貿易データ（○青丸）と推定モデルによる過去データの再現値を折れ線（赤）で結んだもの（赤線）を示したものである。Aは貿易商品の例として銅含有品目の貿易量、Bは国別輸出入量の例として日本の総輸出量をそれぞれ示した。2050年や2100年という将来を推計するとき、過去データに過剰に適合することは過学習となり、推計精度を下げる。図(1)- 5は、過去19年のGDP,人口，二酸化炭素排出量からそれぞれの年で回帰をした結果であるが、正則化により汎化誤差最小化を行った結果、時間方向に繋げてみた時に貿易量の傾向は取り出しつつ過学習を避けることができている。時間方向に変化をモデリングするカーブフィッティングなどによるアプローチと比較して、シナリオによって与えられるGDP，人口，二酸化炭素排出量を媒介して将来貿易量を推計するアプローチは、推計結果が描く将来像の設定を限定し、シナリオが仮定する社会変化を反映する利点がある。また、貿易商品、輸入量、輸出量のそれぞれで時系列変化の再現性が高いことを確認し、計算負荷が少ない実用性のあるモデルであると考えられる。



A:銅関連貿易量の時系列変化再現性



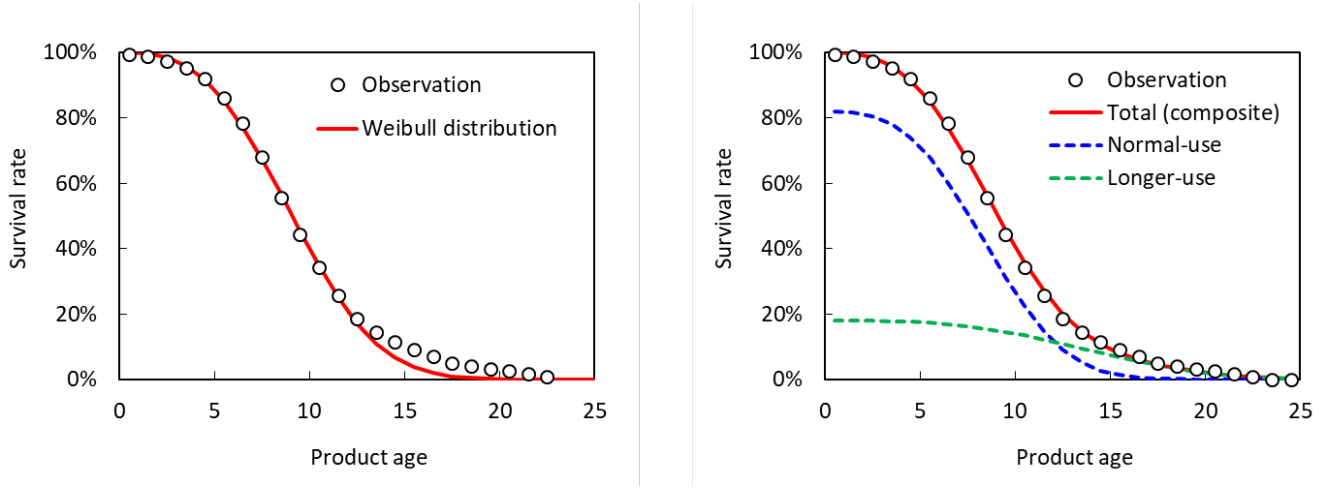
B:日本の総輸出量の時系列変化再現性

図(1)- 5　国際貿易モデルの過去データの再現性（1994～2013年、横軸：年，縦軸：貿易量（トン））

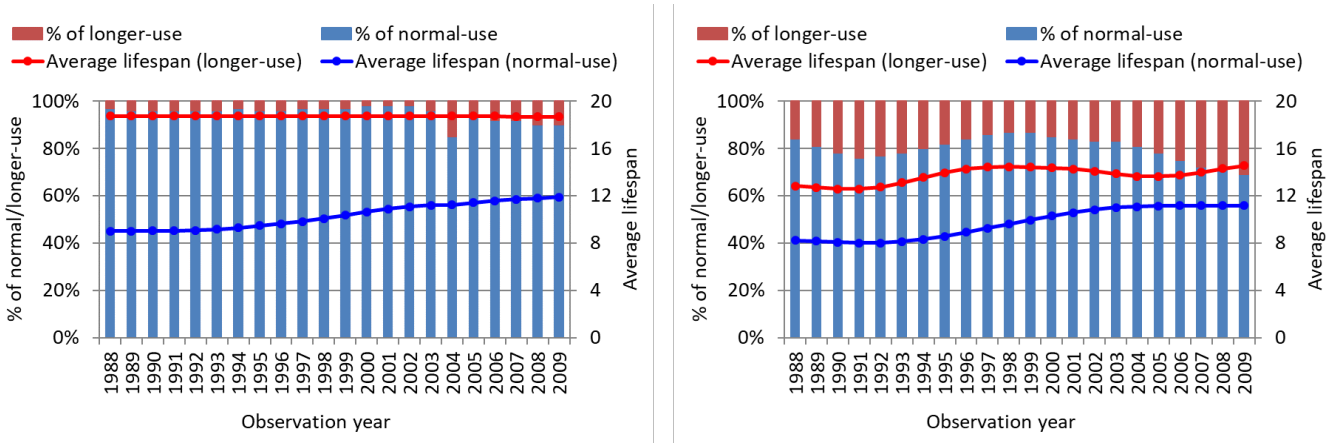
ｂ）２Ｒモデルの開発（耐久消費財）

乗用車ならびに貨物車を対象に通常期間使用者群と長期使用者群に分離した製品寿命モデルを検討した結果を述べる。図(1)- 6に、残存率を単一の分布で近似した場合と通常期間使用者群および長期使用者群の2つの分布の合成分布で近似した場合の結果の例を示す。単一分布による近似では、使用年数が13年以上の部分において観測値と近似値にかい離が見られるが、2つの分布の合成分布による近似では使用年数13年以上の部分を含め、全体の残存率の観測値をよく近似できた。このように、本研究で提案した方法により、通常期間使用者群と長期使用者群を分離した寿命モデルの適用可能性が示された。

製品の残存率を2つの分布の合成分布で近似したときに得られた各年末における通常期間使用者と長期使用者の割合とそれぞれの平均使用年数（残存率分布をワイブル分布関数で近似したときの平均値）を図(1)- 7に示す。長期使用者群の割合はメンテナンス・修理の実施率や中古製品の利用率、長期使用者群の平均使用年数は2Rによる長寿命化、通常期間使用者群の平均使用年数は製品の耐久性を反映するものと解釈される。



図(1)－６　ワイブル分布関数による残存率の近似結果（貨物車1995年度末データの例、左：単一分布による近似、右：通常期間使用者群と長期使用者群の分布を分離した近似）



図(1)－７　通常期間使用者と長期使用者の割合およびそれぞれの平均使用年数の推定結果（左：乗用車、右：貨物車）

長期使用者の割合は乗用車では平均で5%と小さいのに対し、貨物車では13%～31%（平均20%）と相対的に大きく、メンテナンス等による長期使用行動がより実施されている可能性が示唆された。この結果は、貨物車は業務に使用されるものであり、古くても動けばよいという機能性・経済的合理性がより重視されているためと推察される。乗用車については長期使用行動を取る消費者の割合がまだ少ないことが示唆され、長期使用者の割合（長期使用行動を推進している保有者の割合）についてはまだ政策介入の余地があるのではないかと考えられた。平均使用年数については、通常期間使用者群、長期使用者群ともに長期化しており、製品の耐久性・メンテナンス性自体は向上していることが示唆された。

次に、長期使用行動が促進された場合の2Rシナリオ分析結果を述べる。2015年から2030年にかけて長期使用者群の割合が20%まで線形的に増加した場合に加え、長期使用者群の割合が2015年から変化しなかった場合の国内新製品需要台数が推計できた。当然ながら、長期使用者群の割合が増加することで国内新製品需要台数が減少することが示されている。長期使用者群の割合が20%まで増加した場合の2015年から2030年における累積の国内新製品需要台数および使用済み台数の減少率については、設定した2Rシナリオのもとでは、国内新製品需要台数および使用済み台数が5%～10%程度削減されることが計算された。この結果は、製品を通常の使用期間の1.4倍長く使用する（長期使用行動を推進する）消費者が20%まで増えることで、国内新製品需要台数および使用済み台数は5%～10%程度削減されることを示している。

このように、開発した2Rモデルでは、製品使用年数の長期化と長期使用者の割合増加という2つの長期使用行動のパラメータを分離して扱い、それらによる国内新製品需要台数や使用済み台数の変化への影響を定量的に算出できることが示された。また、このモデルを組み込んだ国レベルの物質フロー・ストック分析モデルを用いることで、耐久消費財の長期使用行動の進展による天然資源消費量、温室効果ガス排出量、廃棄物最終処分量削減量の計算が可能となった。任意のパラメータを設定した分析を行うことで、長期使用行動の程度に応じた効果の分析が可能であり、2R政策の目標設定に活用できる。

なお、本研究の開発モデルで扱う「長期使用」の概念の範囲は表(1)- 2に整理したとおりである。部品レベルのモデル開発は別途の研究による検討が求められる。また、シェアリングやリースなどによる効果の分析も考えられるが、これらは保有台数の水準を変化させる政策・対策でもあるため、保有台数の設定を変化させつつ、開発モデルで分離した消費者群を製品を保有して使用する消費者群とシェアリング等の利用者群に読み換えることで、開発モデルを応用した分析が可能であると考えられる。

表(1)- 2　長期使用の概念整理と本研究の開発モデルで扱っている範囲

実施レベル		手段	本研究の開発モデルで扱うもの
ユーザーレベルでの使用期間延長		ここの製品の単純な使用期間延長（買い替えせずできるだけ長く使用）	○
		修理による個々の製品の使用期間延長	○
社会レベルでの使用期間延長	製品レベル	リユースによる社会での使用期間延長	○
		リファービッシュ、リコンディショニングによる社会での使用期間延長	(○)
	部品・材料レベル	リマニュファクチャリングによる使用期間延長	×

ｃ）地域循環モデルの開発

市区町村別の生ごみや家畜ふん尿由来の堆肥・液肥の需給比をモデル分析した結果需給比が1を超えると供給過剰であり、廃棄物処理の観点からは再生品の受入に余裕がある1以下の状態が望ましいといえる。推定結果として、全ての都道府県で需給比RrとRcがいずれも1以下となっており（最大で神奈川県の0.036）、物量的な観点から生ごみや家畜ふん尿の堆肥や液肥としての地域循環が成立する可能性が高いことが示された。ただし、本推計において、供給可能量Scは生ごみの資源化施設への搬入量（実績）から推定しており、実現可能性を反映した前提条件とはいえるが、生ごみの発生量が大きくても資源化施設が存在しない地域ではゼロとなるため、将来の施設建設による可能性などは考慮されておらず、かなり厳しい設定条件となっている。一方、潜在的需要量Dについては、生ごみや家畜ふん尿由来肥料を施肥基準の最大限で農家が受入れるというかなり緩い設定条件となっている。これらの結果として需給比は小さい値を示しているが、実際の受入割合はもっと小さくなると考えられるため、妥当な受入割合の設定と、それに基づく実現性を反映した需給比の推定が必要である。また、家畜ふん尿由来肥料がある程度施用され、その次に残った受入可能量に対して生ごみ由来肥料が施用される、などといったシナリオの検討も必要である。

次に、焼却施設の統合について検討を行った結果を述べる。この検討は、過剰な廃棄物処理施設が存在すると地域循環システムの構築が困難になるという問題意識で実施したものである。まず、2050年度を想定すると、必要焼却量から算出される施設容量の削減率が40～60％及び60～80％となる広域化ブロックが増加すると予想された。2050年に向けて施設の統合を進めていくことの効果を検討する意味があることを示唆している。また、2030年において施設更新期間が重複する、すなわち施設統合可能性がある広域化ブロックを調べると、全国436広域化ブロックのうち106の広域化ブロックが該当した。特に、東海、九州、近畿の高域化ブロックが比較的多いことが分かった。

次に、焼却施設の統合シナリオを設定した結果を述べる。現在の焼却割合が変わらず、施設統合が行われずに施設数も変化しないとした場合、2030年には、人口減少がもたらす焼却必要量の減少によって

現存する1,012の平均施設容量が減少した。このような状況では、施設の小規模化により高効率発電が導入できなくなったり、コストが増大することが想定される。一方、施設統合を行った場合、延命化なしの通常統合ケースであっても、施設の小規模化は回避できることが分かり、また、さらに延命化を行うと、施設統合が可能となる施設の組み合わせが増え、施設統合がより可能となることが示された。さらに、600トン/日以上の施設への超統合を目指す場合の結果も得た。

施設統合による焼却施設からの温室効果ガス（GHG）排出量の削減効果を推計した結果を述べる。「超統合＋延命あり」のケースにおいては、施設統合による大規模化によって焼却施設のGHG排出原単位が減少し、さらなる削減ができると計算された。

なお、今回の試算は、施設統合効果のポテンシャルを把握するために、施設統合の機会がある施設の組み合わせのうち1/2の確率で統合が行われるとして計算したものである。統合確率を高めに設定したことから、適宜、統合確率を補正して、期待される削減効果量を判断する必要がある。

ｄ）3R政策の指標と将来ビジョンの検討

まず、従来型の処理オプションから求められる指標を検討した結果を述べる。平成19年にとりまとめられた「市町村における循環型社会づくりに向けた一般廃棄物処理システムの指針」では、一般廃棄物処理基本計画の見直しに当たっては分別収集区分を類型I→類型II→類型IIIといった水準に引き上げることが提案されている。類型Iから類型IIに移行する場合にはプラスチック製容器包装（白色トレイ等）、紙製容器包装（紙パック等）、小型家電を分別収集及び循環利用することとし、類型IIから類型IIIに移行する場合にはさらに生ごみや廃食用油等のバイオマスを分別収集及び循環利用することとしている。これに異なる処理技術を考慮して、焼却、生ごみの堆肥化、生ごみのメタン発酵（液肥利用あり／なし）、コンバインド方式、容器包装ごみの資源化、RDF化（生ごみリサイクルあり/なし）の8つの処理オプションのプロセス情報を整理した。それらの処理オプションの選定基準の考察から抽出された3Rシステムの評価軸とその評価指標を表(1)- 3に示す。評価軸の1と2が費用関連、評価軸3～7が物質

表(1)- 3　一般廃棄物処理プロセスの選定基準の考察から抽出された 3R システム評価指標群

評価軸	評価指標
１．正味費用の削減	正味費用＝年あたり初期費用（大規模修繕含む）＋運用費用－資源売却益
２．自治体の費用の削減	自治体費用＝Σ（自治体の各費用）
３．埋立回避量の増加	埋立回避量＝発生量－最終処分量
４．資源・エネルギーの回収量の増加	回収量＝リサイクル施設仕向け量or正味リサイクル量
５．資源消費の削減	天然資源消費量、非再生可能資源の消費量
６．環境負荷量（GHG）の削減	GHG排出削減量＝従来システムの排出量－新システムの排出量
７．環境散逸量の削減	環境散逸量＝面積あたりの散逸量or清掃活動での回収量 不法投棄量＝発見量or現状回復量
８．自区域内資源循環利用量の増加	自区域内資源循環利用量＝Σ（各資源の自区域内利用量）
９．自区域内経済効果（事業者活用）の増加	経済効果自区域割合＝（自区域内委託費用＋自区域内資源売却額）／（総費用＋総資源売却額）
10．コントローラビリティの確保	コントローラビリティ指標＝自区域内処理割合（委託処理を除く）
11．作業の質と安定性の確保と人材育成	従事者の数
12．市民の分別等の負担削減	市民の負担＝Σ（分別・家庭内保管・ごみだしの私的費用）
13．衛生処理の確保	ごみ収集のカバー率や頻度、衛生処理適合施設の数(or割合)
14．新システム構築の行政負担軽減	行政負担＝関わった自治体職員の作業人日

フローと環境負荷量に関係するもの、評価軸8と9が地域循環共生圏の視点を含むもの、評価軸10～14が上記以外のもので、マネジメント上のクオリティや関係主体の負担などが含まれている。評価軸10以降を計測する指標は代理指標的なものばかりであり、これらの評価軸を重視するのであれば指標開発が望まれるものである。

また、他のサブテーマでの成果を含め、各モデル開発から得られた開発すべき指標と整備すべきデータをまとめると、表(1)- 4のとおりとなった。左列のデータ制約によるものについては環境省等との議論、右列の方法論制約によるものについては学会等での議論が期待される。

表(1)- 4　各モデル開発の検討のなかから得られた今後整備すべきデータ

モデル	今後、整備すべきデータとそれによって利用が可能となる指標（方法論は概ね存在、「→」以降が指標を示す）
一廃＆地域循環	・自治体以外の主体がリサイクルしている量（例、新聞店での資源回収量など）　→正確な総リサイクル率 ・自区域内資源循環利用量　→自区域内資源循環割合＝自区域内資源循環利用量／総資源循環利用量 ・下水汚泥処理などの既存インフラ（動脈含む）での処理可能量　→連携処理可能量、連携による需給比
横断型プラ	・プラスチック含有製品の使用年数または寿命の分布 →使い捨て以外の製品の総排出量（推計精度向上） ・個別リサイクル法の対象外のプラスチック製品のリサイクル量または循環利用量　→プラスチック全体を網羅したリサイクル率および循環利用割合（入口側）
2R	・保有製品の製品年齢分布データ（データの乏しい電気電子機器について）　→長期使用推進者群の割合 →通常使用／長期使用推進者群の製品平均使用年数
耐久財	・リフォームの実施割合及びリフォーム実施による使用年数変化　→ライフサイクル資材需要量（推計精度向上） →リフォーム時代における正確な建築寿命 ・使用済みの建設物のうち解体されないものや残置される材の割合　→廃棄物等発生量（推計精度向上）
資源	・他資源（木材など）の一次資源利用に起因する改変量等地球温暖化の各 SSP シナリオにおける将来の日本の金属以外の資源の利用・貿易量　→それらが引き起こす海外での環境影響量

最後に、3R政策の将来ビジョンを得るため、サブテーマ2と協働して、各モデルの結果を環境省循環計画モデルに投入し政策シナリオ分析を実施し、日本全体の3つの物質フロー指標を推計した結果を述べる。資源生産性は向上、最終処分量は同程度となったが、循環利用率が低下した。循環利用率が低下した原因は耐久財モデルにおける発生抑制対策に伴う（循環利用されていた）土石系循環量の減少によるものと考えられた。循環政策の取組効果が漸近する時代においては、複数の対策がトレードオフをもたらすことに注意がより必要であることが確認できた。また、循環利用率の目標設定においては、これまでよりも実施可能性を考慮しなければならないことが示された。

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

・資源モデルで開発した、シナリオごとの将来の資源貿易表を推計する手法は様々な応用が可能である。例えば、消費トレンド・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できる。

・2Rモデルにおける使用年数を合成分布とみなして分解して物質フロー分析に用いるというアプローチは国際的にも例がなく、物質フロー分析の領域を広げる研究といえる。耐久消費財の長期使用行動の進展による天然資源消費量、温室効果ガス排出量等の削減効果を評価できるという実用性もある。

・開発した一般廃棄物モデルならびに地域循環モデルを用いることで自治体レベルの施策導入量を踏まえた全国レベルの計算値を示すことが可能となった。日本の詳細な一般廃棄物実態調査をフル活用した本モデルを確立できれば、世界に類をみないモデルとなると考えられる。

・3R政策のニーズをふまえたモデル開発を行うことにより、今後開発が求められる3R政策指標を提示することができた。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

環境省の循環基本計画分析・新指標検討ワーキンググループにおける次期循環基本計画の目標値の検討において、本研究成果である一般廃棄物モデルおよび地域循環モデルの試算結果や本モデル研究にもとづく政策案を提示し、次期循環基本計画策定の検討に貢献した。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

第4次循環基本計画のフォローアップはこれからであり、加えて、第5次計画に向けた科学的知見の集積も求められると考えられる。本研究課題のモデル開発の大きな成果は、そのための検討内容の選択肢を拡げるものであり、開発したモデルで循環型社会政策パッケージの導入効果の推計などをさらに行っていくことでさらなる政策貢献が期待できる。循環基本計画や廃棄物処理基本指針では廃棄物処理に関連する指標として出口側の循環利用率や再生利用等を掲げているが、これらの目標設定にあたっての根拠を示すことが可能となる。

また、モデル開発を通じて今後の3R政策のために整備すべき指標とデータを明らかにした。今後、環境省が情報体制の整備を検討するうえでの参考になると考えられる。

６．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

７．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

＜論文（査読あり）＞

1) Nakajima K., Nansai K., Matsubae K., Tomita M., Takayanagi W., Nagasaka T. (2017) Science of the Total Environment, 586, 730-737
"Global land-use change hidden behind nickel consumption"

2) Nakajima K., Daigo I., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M., Matsuno Y. (2017) Matériaux & Techniques, 105, 511
"Global distribution of material stocks: iron, copper, and nickel"

3) Nansai K., Nakajima K., Suh S., Kagawa S., Kondo Y., Takayanagi W., Shigetomi Y. (2017) Economic Systems Research, 29 (3), 335-356
"The role of primary processing in the supply risks of critical metals"

4) Nakajima K., Daigo I., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M., Matsuno Y. (2018) Resources, Conservation and Recycling, 133, 369-374
"Global distribution of material consumption: Nickel, copper, and iron"

5) Morioka R., Nansai K., Tsuda K. (2018) Economic Structures, 7:7, 21p.
"Role of linkage structures in supply chain for managing greenhouse gas emissions"

6) Nakajima K., Noda S., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M. (2019) Environmental Science & Technology, 53, 1555-1563
"Global Distribution of Used and Unused Extracted Materials Induced by Consumption of Iron, Copper, and Nickel"

＜その他誌上発表（査読なし）＞

1) 稲葉陸太、田崎智宏、河井紘輔（2018）都市清掃，71（342），137-143
ごみ処理の広域化と集約化～将来の社会変化に対応して

2) 田崎智宏、稲葉陸太、河井紘輔（2018）環境技術，47（4），181-186

「人口オーナス時代の廃棄物管理～人・ごみ・施設・財政の観点から」

（２）口頭発表（学会等）

1) R. Inaba, T. Tasaki :. The joint 12th International Society for Industrial Ecology (ISIE) Socio-Economic Metabolism section conference and the 5th ISIE Asia-Pacific conference, Nagoya, Japan (2016)
"Estimation of cost reduction by the lifetime extension of waste incineration facilities"
2) R. Morioka, K. Tsuda, K. Nakajima, K. Nansai: Ecobalance 2016, Kyoto, Japan (2016)
"Prediction of international trade statistics based on GDP scenarios."
3) R. Inaba, T. Tasaki, M. Fujii, N. Yamaguchi : The 12th Biennial International Conference on EcoBalance, Kyoto, Japan (2016)
"Benefits from Integration of Municipal Solid Waste Incinerators as a Measure for Decreasing Combustible Waste in the Future"
4) 森岡涼子、津田宏治、中島謙一、南齋規介: 第12回日本LCA学会研究発表会 (2017)
「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」
5) 稲葉陸太、田崎智宏：第12回日本LCA学会研究発表会 (2017)
「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」
6) 高木重定、不破敦、田崎智宏、稲葉陸太、河井紘輔：第28回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2017)
「一般廃棄物に係る全国レベルのボトムアップ型ごみ発生・処理モデルの開発」
7) 稲葉陸太、田崎智宏、河井紘輔、松橋啓介、西村 想、山口直久：第28回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2017)
「広域処理を考慮した廃棄物処理施設の稼働率と容量削減率の推計」
8) 河井紘輔：第28回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2017)
「生ごみ堆肥化促進シナリオによる全国レベルでの一般廃棄物処理に係る再生利用率推計モデル」
9) Inaba R., Tasaki T., Fujii M., Yamaguchi N. (2017) Program of The 9th biennial conference of the International Society for Industrial Ecology (ISIE) and the 25th annual conference of the International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST), 1174
"Estimation of environmental and economic effects of integrating municipal solid waste incinerators in a Japanese region"
10) Nakajima K., Daigo I., Nansai K. Matsubae K. Takayanagi W. Tomita M. Matsuno Y. (2017) 11th International Conference on Society & Materials (SAM11), 15-16 May 2017, Trondheim
"Global distribution of material stocks: iron, copper, and nickel"
11) Nakajima K., Nansai K. Matsubae K. Tomita M. Takayanagi W. (2017) World Resources Forum 2017, Centre International de Conferences (CICG), Geneva, Switzerland・24-25 October 2017
"Global Distribution of Hidden Flows Induced by Consumption of Metals"
12) Nansai K., Tsukamoto N., Tohno S., Kondo Y. Kagawa S. and Takayanagi W.(2017) World Resources Forum 2017, Centre International de Conferences (CICG), Geneva, Switzerland・24-25 October 2017
"Screening of the criticality level for precious metals on social sustainability issues"
13) Morioka R., Nakajima K., Nansai K. (2017) 4th International Conference on Final Sinks

conference, Oct 2017, Kyoto, 43-44
"Global resource flows in trade by future socio-economic scenarios"

14) 稲葉陸太、田崎智宏、河井紘輔、西村想、山口直久（2018）第13回日本LCA学会研究発表会講演要旨集，174-175
「生ごみと下水汚泥の集約処理による環境面および経済面での効果」

15) 高木重定，不破敦，田崎智宏，稲葉陸太，河井紘輔（2018）第29回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，17-18
「一般廃棄物に係る全自治体レベルのボトムアップ型ごみ発生・処理モデルを用いた対策シナリオ導入効果について」

16) 森岡涼子、津田宏治、中島謙一、南斉規介（2018）第13回日本LCA学会研究発表会要旨集，58-59
「温室効果ガス削減目標に準じた金属資源の国際貿易推計」

17) Nakajima K., Noda S., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M. (2018) The 13th Biennial International Conference on EcoBalance, Ecobalance 2018
"Global Distribution of Hidden Flows Induced by Consumption of Metals: Iron, Copper, and Nickel. "

18) Oashi A., Yamazaki Y., Matsubae K., Nakajima K., Nagasaka T. (2018) The 13th Biennial International Conference on EcoBalance, Ecobalance 2018
"Analyzing international supply chain risk in copper mining: focus on water resources"

19) 森岡涼子，津田宏治，中島謙一，南斉規介（2019），代表濃度経路シナリオを考慮した資源投入量および移動量の地域別推計，第14回日本LCA学会研究発表会，第14回日本LCA学会研究発表会 講演要旨集，268-269.

20) Oguchi M., Tasaki T., Terazono A., Nishijima D. (2019) The 3rd International Product Lifetimes and the Environment Confeerence, PLATE 2019 Conference　（アブストラクト受理済）
"A product lifetime model for assessing the effect of product lifetime extension behavior by different consumer segments"

（３）知的財産権
特に記載すべき事項はない。

（４）「国民との科学・技術対話」の実施
特に記載すべき事項はない。

（５）マスコミ等への公表・報道等
特に記載すべき事項はない。

（６）その他
特に記載すべき事項はない。

８．引用文献

1) Nakajima K., Nansai K., Matsubae K., Tomita M., Takayanagi W., Nagasaka T. (2017) "Global land-use change hidden behind nickel consumption" Science of the Total Environment, 586, 730-737

2) Nakajima K., Noda S., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M. (2019) Global Distribution of Used and Unused Extracted Materials Induced by Consumption of Iron,

Copper, and Nickel. Environmental Science & Technology, 53, 1555-1563
3) CEPII(Le Centre d'études prospectives et d'informations internationales) Base pour l'Analyse du Commerce International, http://www.cepii.fr/anglaisgraph/bdd/baci.htm
4) 藤井崇、吉川実、田崎智宏、小口正弘、中島謙一、大迫政浩、橋本征二（2012）物質フロー・ストックモデルによる近未来における耐久消費財の資源循環の推計. 第40回環境システム研究論文発表会講演集, 291-296
5) 農林水産省（2016年）作物統計調査　平成27年耕地及び作付面積統計
6) 農林水産省（2016年）都道府県施肥基準等
7) 農林水産省（平成28年調査：2017年）平成28年畜産統計
8) 国立社会保障人口問題研究所, 日本の将来推計人口（都道府県・市区町村）(2018)
9) 環境省「一般廃棄物処理実態調査結果」（各年度版）
10) 各都道府県「ごみ処理広域化基本計画」
11) United States Geological Survey (USGS) Nickel Statistics and Information http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/nickel/index.html#mcs

Ⅱ－２　既存政策の分析とモデル分析に基づく政策パッケージの提示

みずほ情報総研株式会社　　高木　重定・小林　元・不破　敦・中西　翔太郎

平成28～30年度累計予算額：32,947千円
（うち平成28年度：11,168千円、平成29年度：11,168千円、平成30年度：10,610千円）
累計予算額は、間接経費を含む。

［要旨］
一般廃棄物および耐久財（建築、土木構造物など）に関わる廃棄物等を対象として、3R政策等の影響を定量的に算出できるモデルを開発した（一般廃棄物モデルおよび耐久財モデル）。一般廃棄物モデルについては、ごみ発生抑制、リサイクルの進展などの対策が異なる市町村で導入される政策の組合せ（政策パッケージ）を設定し、開発したモデルを用いて、政策の導入効果を表す指標となるごみ発生量、循環利用率、最終処分量などを算出した。耐久財モデルにおいては、昨年度までに開発した全国10地方に分割したモデルを用いて、推計精度の向上及び対策シナリオを検討した。その結果、BaU（Business as Usual）シナリオにおいて、2030年に土木系資源の再生材供給量が土木系資源の需要量を超過する地方が存在することを示すとともに、対策による供給/需要比の改善効果を推計した。そのうえで他のサブテーマと協働して、将来ビジョンを達成するための政策パッケージを提示し、開発したモデルによる政策の導入量もしくは効果の算出を行った。具体的には、各開発モデルで得られた政策効果等のパラメータを環境省循環計画モデルに投入することによって政策パッケージによる効果として資源生産性、循環利用率、最終処分量を推計した。

［キーワード］
一般廃棄物、耐久財、物質フロー分析、政策評価モデル、政策効果分析

１．はじめに

日本の3R（リデュース・リユース・リサイクル）政策は循環基本法、循環基本計画および個別リサイクル法などのもとで進展してきた。このうち循環基本計画の数値目標としては日本全体の物量を捉えた3つの物質フロー指標（資源生産性、循環利用量、最終処分量）に主眼がおかれてきた。これらの指標については、土石系資源以外の資源生産性向上の停滞や産業廃棄物の最終処分量のこれ以上の削減が困難な水準に達していることなどが指摘されており、こうした状況のなかで資源効率や廃棄物処理をさらに向上させるには資源種の対策検討などのきめ細かい政策が求められていると言えるだろう。また、2018年6月に第四次循環基本計画が策定されたことを受けて、この計画における中長期な目標・ビジョンを裏付ける、より具体的な政策パッケージに係る行政ニーズは高いと考えられる。

以上から、第四次循環基本計画における目標と実施策の策定支援のため、3R政策や今後の社会変化が我が国の資源利用や廃棄物管理に与える影響を定量的に算出できる物質フローモデルの構築や、そのモデルによってパッケージとしての政策の導入による効果を定量的に示すことの重要性は高いと言える。

２．研究開発目的

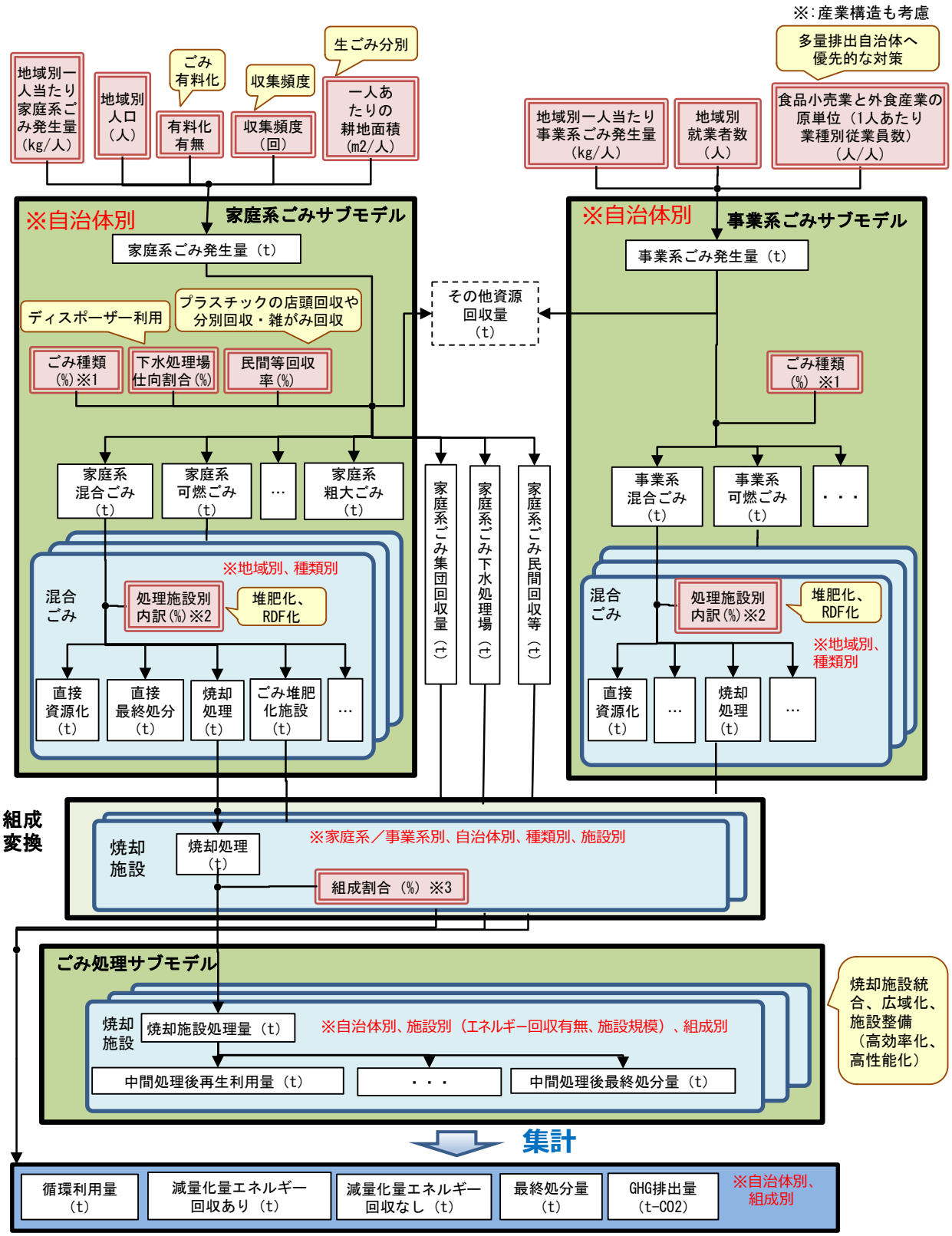
一般廃棄物および耐久財（建築、土木構造物など）に関わる廃棄物等を対象として、3R政策等の影響を定量的に算出できるモデルの開発と、将来ビジョンとその達成に向けた政策・取組を設定し、それらの政策導入量を定量的に示すことを目的とする。

３．研究開発方法

ａ）一般廃棄物モデルの開発

過去の循環基本計画の目標策定や既往研究においては自治体の廃棄物政策に係る将来像はきめ細や

かに提示されてこなかった。そこで本研究では、サブテーマ1と連携し、自治体別、施設種類別の分解能を有し、各自治体における3R対策や廃棄物処理施設の統合等の施策の効果を評価することができる一般廃棄物モデルを構築した（図(2)－１）。この際、モデルの情報源としては、自治体の政策判断の現場で



※1:混合ごみ、可燃ごみ、不燃ごみ、資源ごみ、その他ごみ、粗大ごみ
※2:直接資源化、直接最終処分、焼却施設（直接焼却）、粗大ごみ処理施設、資源化等を行う施設、ごみ堆肥化施設、ごみ飼料化施設、メタン化施設、ごみ燃料化施設、その他施設
※3:紙、金属、ガラス、ペットボトル、プラスチック、厨芥、繊維、その他可燃、その他不燃

図(2)－１　一般廃棄物モデルの基本構造と 3R 政策の導入効果推計の概要

活用しやすいように、各自治体の廃棄物行政の基礎資料として用いられている環境省「一般廃棄物処理事業実態調査結果」を可能な限り活用した。ただし、同調査は収集区分（可燃ごみ、不燃ごみ、粗大ごみ等）ごとに情報が整備されており、廃棄物組成（紙類、プラスチック類、厨芥等）に係る情報は不十分という課題がある。そこで、本研究では環境省「廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用量実態調査報告書」に示されている収集区分から廃棄物組成を推計する手法を活用することで、廃棄物の組成別に施策の導入効果を反映できるようにした。さらに、サブテーマ1において開発された自治体と施設の対応などを考慮した焼却施設統合モデルの結果を本モデルに反映した。

一般廃棄物モデルを用いたシナリオ分析における各パラメータの設定方法についての説明を表(2)-1に示す。対策シナリオの設定にあたっては、想定した3R対策のうち、今後強化が必要だと考えられる「ごみ有料化」、「プラスチック店頭回収・分別回収」、「焼却施設統合化」に関しては導入可能な最大値を想定し、それ以外の対策については現在の取組の延長上に想定できる範囲の対策量を想定した。

表(2)-1　一般廃棄物モデルのパラメータの設定

対策			パラメータ	BaU シナリオ	対策シナリオ
発生抑制	家庭系ごみ	ごみ有料化	ごみ有料化実施割合	現状維持	現状で有料化が未実施の自治体全てが今後有料化するものとした。
		ごみ収集頻度	収集頻度	現状維持	現状で収集頻度が3回以上の地域における収集頻度を2回とした。ただし、財政力指数（基準財政収入額を基準財政需要額で除した値）が1.0を上回っている自治体は3回以上のままとした。
		生ごみ分別	生ごみ分別の実施割合	現状維持	現状で生ごみ分別が未実施の自治体のうち、一定以上の耕地面積を有すれば生ごみ分別・堆肥化を新たに導入するものとした[a)]。
	事業系ごみ	多量排出自治体への優先的な発生抑制対策導入（食品小売業、外食産業）	食品小売業と外食産業での発生抑制	現状維持	各自治体の人口あたりの従業員数で全自治体を4つに区分し、従業員1人あたりごみ発生量が最大値をとる区分での発生抑制の取組が進展し、2番目に大きい区分の値まで削減されるとした。ただし、削減率が20%以上と非常に大きくなる場合には実行可能性を加味し、削減率はその半分とした。
回収	家庭系ごみ	ディスポーザー導入	下水処理場への仕向け割合[b)]	現状維持[c)]	今後の新築共同住宅の5割にディスポーザーが導入されるものとした。削減効果としては家庭から発生するごみのうち、生ごみ分（約37.6％： H27循環利用量実態調査）は下水処理場において処理されると想定。
		雑がみ回収	雑がみ回収の実施割合	現状維持	人口が上位20％の自治体において新たに雑がみ回収を実施するものとした。削減効果は経済産業省（H28.3）「我が国の古紙リサイクルシステムの課題とその対応に関する調査報告書」を踏まえ、一人あたり年間約1.0kg削減と想定。
	事業系ごみ	プラスチック店頭回収・分別回収	プラスチックの店頭回収や分別回収量	現状維持	導入先は全国の小売業の事業所を想定（約86万箇所）。環境省で実施している「BRING PLA-PLUSプロジェクト」の2017年度の実証結果を踏まえ、1拠点あたり年間約9.2kgの回収量と想定した。
処理	堆肥化施設	堆肥化促進	リサイクル施設への仕向け割合	現状維持	生ごみの堆肥化が可能な自治体に関しては、生ごみの堆肥化が促進すると想定し、堆肥化への仕向け割合を増加（約2.1％）[a)]。増加した分は焼却施設等への仕向け割合を減少。
	焼却施設	焼却施設統合化	各処理施設への仕向け割合	現状維持	サブテーマ1の検討結果を反映。 焼却施設の更新・統合についての「施設統合シナリオ」の「延命化ケース　×　超統合ケース」を用いた。

a)河井紘輔、生ごみ堆肥化促進シナリオによる全国レベルでの一般廃棄物処理に係る再生利用率推計モデル、第28回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集，pp.23-24（2017）

b)廃棄物のうち、下水処理場へ向かった割合のこと。ディスポーザー導入割合に同じ。

c)既に現状でも毎年新築マンションの3割には導入されている。

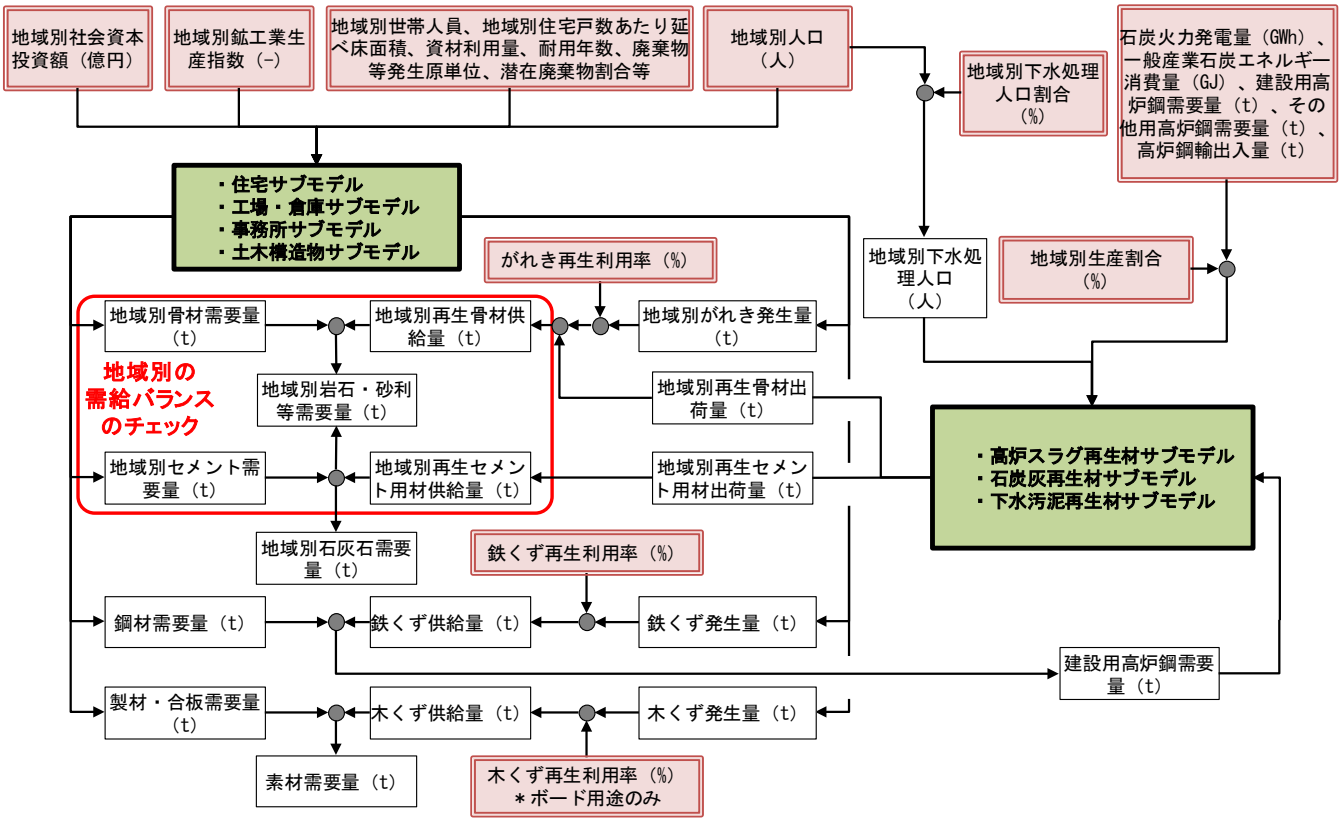
b）耐久財モデルの開発

耐久財モデルは我が国の土石系の再生資源の需要量、供給量の将来推計を地域別に行うことを目的としており、土石系資源の需要と供給に係る主要な活動として、建築物の建築・解体、土木構造物の建築・解体にくわえて、鉄鋼業からの高炉スラグ発生、石炭火力発電からの石炭灰発生、下水処理場からの下水汚泥発生を対象として、それぞれの活動による土石系資源の需要量と土石系の再生資源の供給量を推計するサブモデルを開発した。建築に関しては用途別に住宅、事務所、工場・倉庫の3区分についてサブモデルを構築した。また、土木構造物に関しては公共土木14、民間土木10、合計で24の用途別に推計した。また、地域区分については表(2)-2の通り、全国を10地域に区分して推計を行った。

表(2)-2　地域区分の想定

地域	都道府県
北海道	北海道
東北	青森, 岩手, 宮城, 秋田, 山形, 福島
関東	茨城, 栃木, 群馬, 埼玉, 千葉, 東京, 神奈川, 山梨, 長野
北陸	新潟, 富山, 石川
中部	岐阜, 静岡, 愛知, 三重
近畿	福井, 滋賀, 京都, 大阪, 兵庫, 奈良, 和歌山
中国	鳥取, 島根, 岡山, 広島, 山口
四国	徳島, 香川, 愛媛, 高知
九州	福岡, 佐賀, 長崎, 熊本, 大分, 宮崎, 鹿児島
沖縄	沖縄

耐久財モデルの構造を図(2)-2に示す。サブモデルは７種類のサブモデルで構成されている。このうち、建築・土木構造物については図(2)-2に示す各パラメータから対象とする建築・土木構造物の地域全体の需要量を推計し、この需要を満たすように新規投入が行われると仮定することで推計を行う。その他の、高炉スラグ、石炭灰、下水汚泥の各モデルについては表(2)-3に示す各パラメータからそれぞれ鉄鋼業、石炭火力発電、下水処理の活動規模に関して将来の動向を推計し、それらの活動当り決まった値の土石系の廃棄物等が排出されると仮定することにより推計を行う。なお、建築・土木構造物の寿命関数は各種出典より建設の種類、構造別に設定した。また、資源需要及び廃棄物等発生に係る原単位



図(2)-2　耐久財モデルの構造

については国土交通省「建設資材・労働力需要実態調査」を参照して設定した。

土石系循環資源の需給バランスを維持する対策として、「品質向上」、「発生抑制」、「需要先割当」の3種類を表(2)-4のとおり設定し、それらの対策導入効果について試算した。

表(2)-3　各サブモデルの外生変数の想定

サブモデル		外生変数（将来推計）
建築	住宅	世帯数：国立社会保障人口問題研究所「将来推計人口・世帯数」
	事務所	全産業の国産品の国内最終需要：環境省（2017）
	工場・倉庫	製造業の国産品の国内最終需要：環境省（2017）
土木構造物	公共土木	公共事業の国産品の国内最終需要:環境省(2017)※ただし、全国規模の推計においては別途3パターンの成長率を仮定
	民間土木	その他建設業の国産品の国内最終需要：環境省（2017）※ただし、全国規模の推計においては別途3パターンの成長率を仮定
高炉スラグ		金属業の国産品の国内最終需要：環境省（2017）
石炭灰		電力・ガス・水道業の国産品の国内最終需要：環境省（2017）
下水汚泥		世帯数：国立社会保障人口問題研究所「将来推計人口・世帯数」

環境省（2017）「平成28 年度第四次環境基本計画（循環型社会部分）、第三次循環型社会形成推進基本計画に係るフォローアップ及び次期基本計画策定に向けたモデル・指標・政策検討並びに平成29 年版「環境・循環型社会・生物多様性白書（循環部分）」作成支援等業務」

表(2)-4　耐久財モデルの対策シナリオの想定

対策	対象 サブモデル	対策	対象の外生変数	高強度対策シナリオ (2030時点)
品質向上	建築・土木構造物全て	現場における分別の高度化や建材の再使用による発生抑制	がれき類の発生強度	5%減
発生抑制	建築全て	CLT、超高層木造建築等の普及による木造化比率の上昇	構造比率	＜住宅＞　木造比+20ポイント ＜非住宅＞50%まで増加
	住宅	リフォーム市場･既存住宅流通市場の活性化による平均使用年数の延長	寿命関数（平均使用年数）	＜新築・既築住宅＞　現状の2倍
	土木構造物	維持管理体制の充実による耐用年数の増加	耐用年数	＜全土木構造物＞　現状の2倍
需要先割当	広域輸送の拡大	再生品の地域外使用	―	無制限に移動

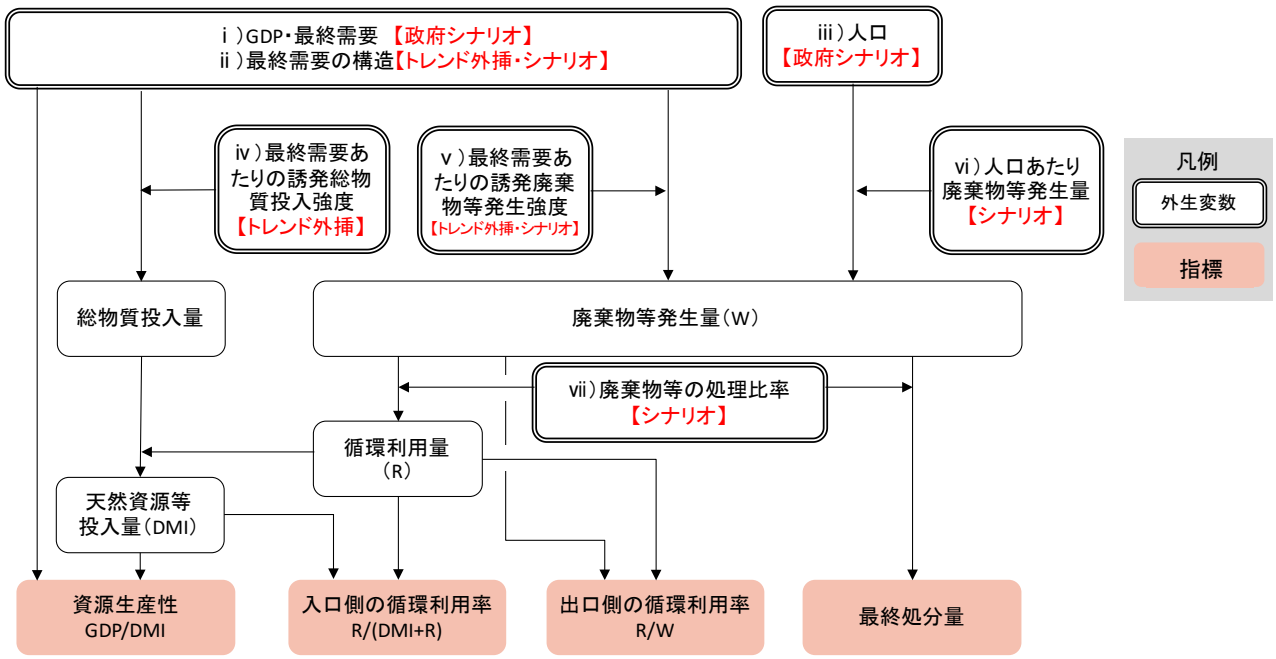
ｃ）3R政策パッケージの政策導入効果の検討

循環型社会白書の循環型社会形成に関する施策の取組状況や第三次循環基本計画の点検結果（国の取組の評価部分）を踏まえ、既存の3R施策のリストアップを行い、循環型社会形成に関する政策ロジックモデルについて検討を行った。

また、サブテーマごとに実施したモデル開発及び政策パッケージ検討の成果を統合し、今回検討した政策が全体として我が国の物質フローに係る指標に与える影響を推計した。サブテーマの統合は環境省「平成29年度第四次循環基本計画策定に向けたモデル・指標・政策検討及び平成30年版循環白書作成支援等業務」にて開発された第四次循環基本計画の物質フロー指標の目標検討に用いたモデルの外生変数

の将来値をサブテーマの成果から推計することで実施した。図(2)-3に当該モデルの構造を示す。このモデルは、ⅰ）GDP・最終需要、ⅱ）最終需要の構造、ⅲ）人口、ⅳ）最終需要あたりの誘発総物質投入強度、ⅴ）最終需要あたりの誘発廃棄物等発生強度、ⅵ）人口あたり廃棄物等発生量、ⅶ）廃棄物等の処理比率を外生変数として入力することで、総物質投入量、廃棄物等発生量、循環利用量、天然資源投入量等の物質フロー量を推計し、これらから循環基本計画の主要な指標である資源生産性、入口側の循環利用率、出口側の循環利用率、最終処分量の将来の増減を評価するモデルとなっている。各サブテーマの成果を反映した外生変数の設定を表(2)-5に示す。

最後に、上記a)～c)の研究成果を踏まえ、今後の循環型社会形成政策で求められる指標と整備すべきデータについて整理を行った。



図(2)-3　第四次循環基本計画の目標検討に使用したモデルの構造

表(2)-5　各サブテーマで開発したモデルによる外生変数の設定

モデル名	対象パラメータ	対象物
一般廃棄物・地域循環モデル （サブ１、２）	ⅵ）人口あたり廃棄物等発生量 ⅶ）廃棄物等の処理比率	一般廃棄物等
横断型ﾌﾟﾗｽﾁｯｸﾘｻｲｸﾙﾓﾃﾞﾙ （サブ３）	ⅴ）最終需要あたりの誘発廃棄物等発生強度 ⅵ）人口あたり廃棄物等発生量	化石系資源
2R モデル（耐久消費財） （サブ１）	ⅳ）最終需要あたりの誘発総物質投入強度 ⅴ）最終需要あたりの誘発廃棄物等発生強度	金属系資源
耐久財モデル （サブ２）	ⅳ）最終需要あたりの誘発総物質投入強度 ⅴ）最終需要あたりの誘発廃棄物等発生強度	非金属系 鉱物資源
※資源モデル （サブ１）	ⅰ）GDP・最終需要（輸出入額） ⅱ）最終需要の構造	金属系資源

４．結果及び考察

ａ）一般廃棄物モデルの開発

一般廃棄物モデルを用いて推計した 2030 年の BaU シナリオと対策シナリオの試算結果を述べる。BaU シナリオにおける 2030 年度の一般廃棄物の発生量、各種発生抑制対策を導入した対策シナリオの削減効果が得られた。なお、2015 年度から 2030 年度の BaU シナリオにおける発生量は減少しており、人口減少による自然減の効果のほうが大きいと推計された。

出口側の循環利用率については、3R 対策のみでは増加、焼却施設統合化を含めればさらに増加という推計結果となった。また、最終処分量は 3R 対策のみの場合と焼却施設統合化を含めた場合について

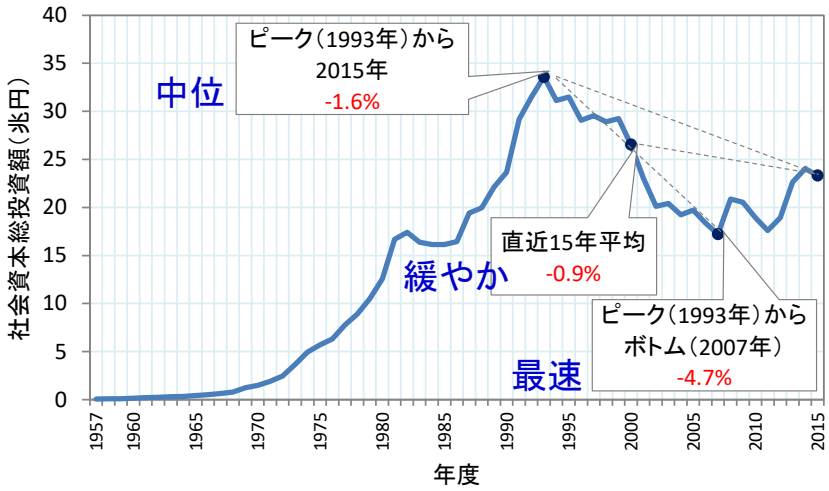
減少という結果となった。ただし、2015 年度比で見ると、3R 対策と焼却施設統合化により、出口側の循環利用率は増加、最終処分量は減少となった。

この推計結果を循環基本計画の目標値と比較すると、一般廃棄物の出口側の循環利用率の目標値が2013年度比で約8ポイント増加(2025年度)となっているため、目標達成に向けては今後更なる対策を検討する必要があることが分かった。なお、発生量についても2025年度目標に向けては対策シナリオから更に百万トン以上の削減が必要という結果となった。一方で、最終処分量に係る目標についてはBaUシナリオと対策シナリオの両方で達成する結果になった。

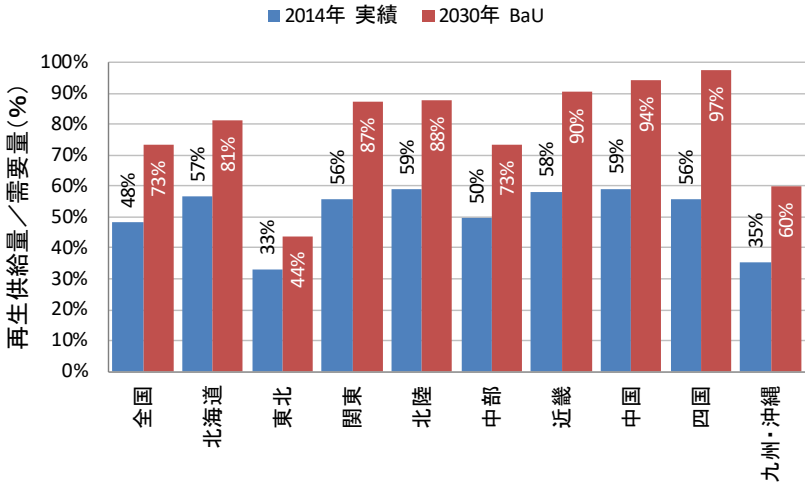
本研究で開発した一般廃棄物モデルは全都道府県、全市町村を対象に個別の自治体ごとの推計が可能となっている。また、モデルは任意の市町村について、グループ化して一つの地域として試算することが可能な構造となっており、焼却施設の統合シナリオの検討に利用することができる。

市町村レベルの分析から明らかになったこととして、いわゆる環境先進都市と呼ばれるような市町村では廃棄物の循環利用対策と発生抑制対策が両方とも高いレベルで進むことで、結果的に日本全体の出口側の循環利用率を押し下げる要因となっていることが挙げられる。これは、環境先進都市の高い循環利用が見込まれる廃棄物量が発生抑制対策によって減少することで、相対的に循環利用率が低い廃棄物等の割合が大きくなることで生じるものであり、先進的な自治体において発生抑制対策が進めば進むほど、日本全国の出口側の循環利用率を押し下げることになる。こうした状況を踏まえると、日本全国の循環利用率の向上に向けては、低い循環利用率に留まる自治体の底上げが重要になると考えられる。

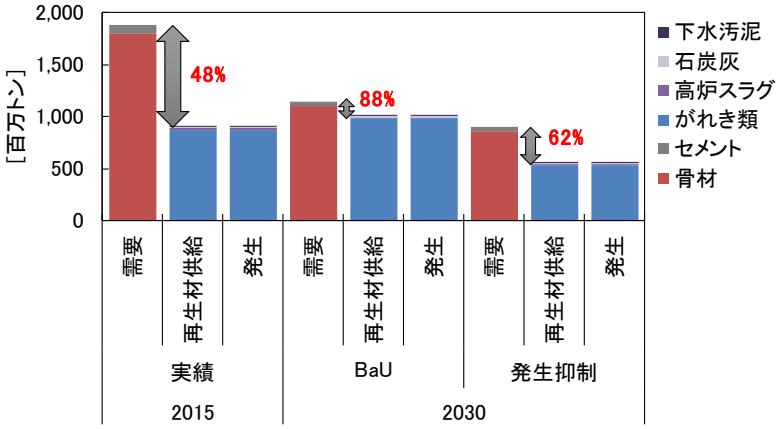
本研究では全国レベルの組成情報を元に試算を行っているが、今後、自治体毎の詳細な組成情報をモデルに反映することができれば自治体レベルでの政策検討にも役立てることが期待できる。



図(2)-4　社会資本総投資額の将来推計における成長率の想定



図(2)-5　地域別の土石系資源の需要量に対する再生材の供給量



図(2)-6　土石系循環資源の需給バランスに係る対策の効果（全国）

ｂ）耐久財モデルの開発

耐久財モデルの推計結果として、①全国レベルの土木構造物の需要の成長別シナリオ別の推計結果、②地域別の推計結果、③地域別の土石系循環資源の需給バランスを維持する対策の推計結果にわけてそれぞれ述べる。

① 全国レベルの土木構造物の需要の成長別シナリオ別の推計結果

土木構造物の需要（社会資本総投資額）の将来推計について、社会資本総投資額の減少のスピードについて最速、中位、緩やかの3つのシナリオを設定し、それぞれの場合の全国の土石系資源の需要量に対する再生材の供給量を推計した。土石系資源の需要量に対する再生材の供給量は2014年度に48%のところ、2030年の推計結果では、全てのケースにおいて現状よりも需要量に対する再生材の供給量の比率が高まるという結果を得た。

② 地域別の推計結果

① の想定のうち、緩やかシナリオ（年率0.9%減少、2000～2015年度の実績のトレンド延長）について、地域別に土石系資源の需要量に対する再生材の供給量を推計した。各地域の2030年度の土石系資源の需要量に対する再生材の供給量の比率にはばらつきがあり、東北、九州・沖縄地方ではそれぞれ現状の全国平均に近い水準となるという推計結果になった。

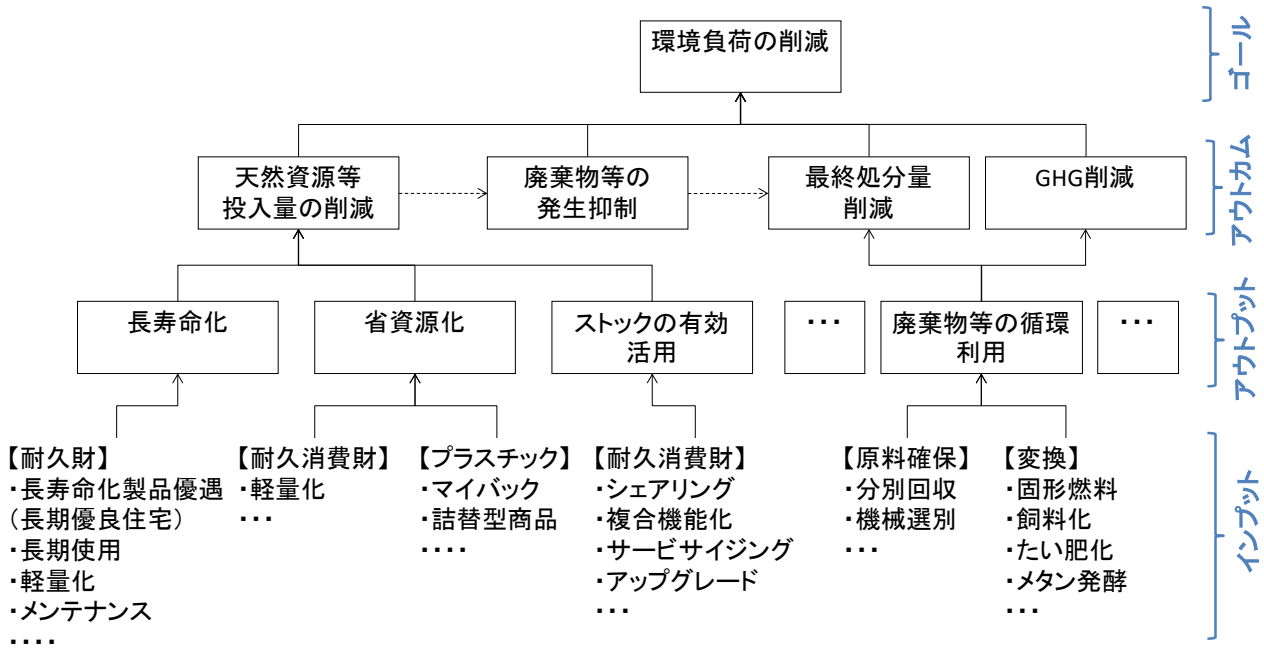
③地域別の土石系循環資源の需給バランスを維持する対策の推計結果

地域別の土石系循環資源の需給バランスに対し、表(2)-4に示す各対策の効果について推計した。ただし、推計にあたっては「ｃ）3R政策パッケージの政策導入効果の検討」において実施する各サブモデルの対策シナリオの統合を念頭に置いて、社会資本総投資額の想定については、①、②の推計結果とは異なり、第四次循環基本計画の目標検討に使用したモデルにおける各産業の最終需要の将来値を使用して推計した。

全国の推計結果からは、今回評価した対策によって、2030年度の土石系資源の需要量に対する再生材の供給量の比率は各地域で減少することがわかっている。

ｃ）3R政策パッケージの政策導入効果の検討

3R既存施策の整理結果を踏まえた政策ロジックモデルの整理結果を図(2)-4と表(2)-6に示す。図(2)-4のようなロジックの構造のもと、表(2)-6に示す構造が想定されていると考えられた。なお、表(2)-6のアウトプットの部分にはアウトプットの評価指標も併せて整理している。また、アウトプットとアウトカムはそれぞれの項目が相互に複雑に関連するため、今後関連性の整理を更に進める必要がある。



図(2)-4　政策ロジックモデルのイメージ図

表(2)-6　3R施策のリストアップから作成した政策ロジックモデルにおける
インプットーアウトプットーアウトカムの構造

対象	インプット	アウトプット（個別評価指標）
耐久財	・長寿命化製品および技術開発 ・長寿命化製品の優遇（長期優良住宅） ・長期使用（ライススタイルの変革） ・メンテナンス促進	長寿命化（使用年数）
	・軽量化	省資源化（資材原単位）
	・木造化 ・バイオマスプラスチックの建材利用	再生可能資源の利用（再生可能資源利用割合）
	・空き家の有効活用 ・インフラ活用	ストックの有効活用（未利用割合）
	・住宅等の解体性の向上（困難物の排除） ・分別解体 ・リサイクル ・リサイクル材の需要拡大	廃棄物等の循環利用（循環利用量、資源削減量）
耐久消費財	・軽量化（高張力鋼板の導入等）	省資源化（資材原単位）
	・シェアリング ・複合機能化 ・サービサイジング ・アップグレード	ストックの有効活用（一人あたり保有台数）
	・製品のリサイクル性・解体性の向上 ・回収率の向上 ・リサイクル率の向上（プラなど）	使用済み製品の回収（製品回収率） 廃棄物等の循環利用（循環利用量、資源削減量）
	・バイオマスプラスチックの利用	再生可能資源の利用（再生可能資源利用割合）
プラスチック	・軽量化 ・簡易包装商品 ・マイバック ・詰替型商品	省資源化（資材原単位）

アウトカム	ゴール
天然資源等投入量の削減	資源利用持続可能性の確保
再生可能資源の利用	
廃棄物等の発生抑制	
最終処分量削減	
GHG削減	環境負荷の削減
環境中への散逸防止	
（中間アウトカム）	
省資源化が組み込まれた経済システムの構築	
所有によらない社会システムの構築	

対象	インプット	アウトプット （個別評価指標）	アウトカム	ゴール
	・単一素材化・複合素材の回避	廃棄物等の循環利用（循環利用量）		
	・バイオプラスチックの利用 ・紙製容器包装の利用	再生可能資源の利用（再生可能資源利用割合、追加代替割合）		
	・固形燃料（RPF、RDF） ・熱回収 ・ケミカルリサイクル利用 ・マテリアルリサイクル利用	廃棄物等の循環利用（循環利用量、資源削減量）		
	・分別回収 ・店頭回収 ・型回収	循環資源の回収（回収量）		
	・リユース品利用	ストックの有効活用 （一人あたり保有台数）		
	・清掃活動	散乱防止（面積あたりの散乱ごみ量）		
紙	・電子化 ・チケットレス化 ・オフィスでの紙利用量削減 ・簡易包装 ・ネット販売における段ボール削減	省資源化（資源削減量）		
一般廃棄物・食品系廃棄物	・ごみ有料化 ・食べ残し対策（フードバンク、エコクッキング） ・住民による分別促進（普及啓発） ※特に生ごみ ・食の適正消費 ・売れ残り・余剰食品の削減 ・日々の需要予測（外食） ・ディスポーザー導入 ・機械選別（技術開発、製品普及）	ごみの発生抑制（ごみ収集量）	前ページを参照	
	・飼料化 ・たい肥化 ・メタン発酵 ・液肥利用 ・MBT ・溶融処理	廃棄物等の循環利用（循環利用量、資源削減量）		
	・住民による分別促進（普及啓発） ・機械選別（技術開発、製品普及） ・集団回収促進	循環資源の回収 （循環資源の回収量）		
	・一定の効率以上でエネルギー回収がなされている焼却施設の普及 ・施設統合	焼却施設からのエネルギー回収（エネルギー回収量）		
資源	・持続可能な調達のグリーン購入法への組み入れ ・持続可能な調達に関する認証制度 ・企業および行政における海外からの資源調達のチェックリスト	持続可能な調達促進 （持続可能な調達と認定される公共の資源調達量）		

循環型社会の全体像に関する指標である資源生産性、入口側の循環利用率、出口側の循環利用率、最終処分量について、第四次循環基本計画における目標値と本研究プロジェクトにおける政策パッケージの推計結果を比較した。各サブテーマの成果を統合した政策パッケージの推計では、資源生産性は向上し、最終処分量はほぼ横ばいになるという結果を得た。また、入口側の循環利用率については減少する

という結果となった。これは耐久財モデルにおける発生抑制対策によって、従来から高い割合で循環利用されている土石系資源の減少が生じたことが原因と考えられた。

最後に、上記の研究成果を踏まえ、今後の循環型社会形成政策で求められる指標と整備すべきデータを考察した結果を述べる。本研究で開発した一般廃棄物モデルおよび耐久財モデルを用いることで政策モニタリングに利用できる指標を「Tier1」、今後整備すべきデータとそれによって利用することが可能となる指標を「Tier2」、現在は方法論が確定しておらず今後開発すべき指標を「Tier3」とすると、表(2)-7のとおりの指標開発とデータ整備が求められると考えられた。

表(2)-7　一般廃棄物モデルおよび耐久財モデルを活用した政策モニタリング指標およびデータ整備等

モデル	サブモデルの入出力データ等を用いて政策モニタリングに利用できる指標（Tier1）	今後、整備すべきデータとそれによって利用が可能となる指標（方法論は概ね存在するもの）（※「→」以降が指標を示す）（Tier2）	今後、開発すべき指標（方法論が確定していない指標）（Tier3）
一般廃棄物	一人あたり廃棄物発生量 一人あたり廃棄物等発生量 リサイクル率（＝出口側の循環利用率） 最終処分量 埋立残余容量／最終処分量 GHG排出量	自治体以外の主体がリサイクルしている量（例、新聞店での資源回収量など） →正確な総リサイクル率 自区域内資源循環利用量 →自区域内資源循環割合＝自区域内資源循環利用量／総資源循環利用量	リサイクルの質（グレードや代替資源の違い）を考慮したリサイクル率 リデュース・リユース・リサイクルのトレードオフの関係を総合的に評価する指標
耐久財	非金属鉱物資源の総需要あたり土石系の再生資源の割合	リフォームの実施割合及びリフォーム実施による使用年数のへの影響 →ライフサイクル資材需要量（建物利用中の資材需要量の推計精度向上） →リフォーム時代における正確な建築寿命 使用済みの建設物のうち解体されないものや残置される材の割合 →廃棄物等発生量（推計精度向上）	都道府県、市区町村単位の土石系再生資源の需給に関する指標 再生資源の需要飽和の状態について段階的な警告を示す指標（early warning指標）

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

サブテーマ1で開発した地域循環モデルと本研究で開発した一般廃棄物モデルを用いることで自治体レベルの施策導入量を踏まえた全国レベルの計算値を示すことが可能となった。例えば、循環基本計画では廃棄物処理に関連する指標として循環利用率等を掲げているが、これらの目標設定にあたっての根拠を示すことが可能となる。また、これらのモデルでは自治体毎に廃棄物の収集システムー廃棄物組成ー処理施設という3要素をリンクさせており、着目する廃棄物フローだけでなく、分別収集されない廃棄物の処理を考慮できる統合的な廃棄物モデルになっている。日本の詳細な一般廃棄物実態調査を限界まで活用した本モデルを確立できれば、世界に類をみないモデルとなると考えられる。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

環境省の循環基本計画分析・新指標検討ワーキンググループにおける次期循環基本計画の目標値の検討において、本研究成果である一般廃棄物モデルおよび耐久財モデルの試算結果や本モデル研究にもとづく政策案を提示し、次期循環基本計画策定の検討に貢献した。

改良した耐久財モデルを用いることでBaUケースにおける地域別の土石系循環資源の需給バラン

スを示すことができた。この結果は、今後の次期循環基本計画の議論のために環境省の担当者から要請されたものであり、タイムリーに情報をインプットできた。その結果、第四次循環基本計画では、将来的な社会課題として、老朽化した土木建築の解体に伴う廃棄物発生量の増加と新規建築需要の低下に伴う循環資源需要の低下によって循環資源の需給バランスが崩れる可能性が指摘されるに至った。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

循環基本計画の指標（特に循環利用率および最終処分量）の目標値の設定にあたってはこれまで国レベルで各種リサイクル法等の政策効果を想定しながら目標設定を行ってきたところだが、近年、循環利用率が横ばいになってきており、この改善に向けては一般廃棄物の3R対策が重要になっている。このため、今後の循環基本計画の目標設定にあたっては地域特性を踏まえた自治体毎の一般廃棄物の3R対策の導入可能性を考慮する必要がある。本研究で開発した一般廃棄物モデルでは自治体レベルでの施策導入量を踏まえ全国レベルの目標値を検討することができるものであり、この検討に活用することが期待できる。また、第五次環境基本計画および第四次循環基本計画では地域循環共生圏の重要性が指摘されており、この検討を進めていくためには地域レベルで政策検討を行うことができるモデルが必要になるが、本研究で開発したモデルはこうした検討にも活用することが期待できる。

耐久財モデルは建設リサイクル法の見直しの検討における基礎材料として活用できることが期待される。3R政策パッケージの政策導入効果の検討で用いた方法論は第五次循環計画の目標値の検討においても有用な方法論であり活用できることが期待される。

６．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

７．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

＜論文（査読あり）＞

なし

＜その他誌上発表（査読なし）＞

なし

（２）口頭発表（学会等）

1) 高木重定、不破敦、田崎智宏、稲葉陸太、河井紘輔：第28回廃棄物資源循環学会研究発表会（2017）
「一般廃棄物に係る全国レベルのボトムアップ型ごみ発生・処理モデルの開発」

2) 高木重定, 不破敦, 田崎智宏, 稲葉陸太, 河井紘輔（2018）第29回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, 17-18
「一般廃棄物に係る全自治体レベルのボトムアップ型ごみ発生・処理モデルを用いた対策シナリオ導入効果について」

3) 中西翔太郎, 高木重定, 田崎智宏（2018）第29回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, 15-16
「土木建築由来の循環資源に係る地域需給バランスの将来推計」

（３）知的財産権

特に記載すべき事項はない。

（４）「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

８．引用文献

1) 環境省「一般廃棄物処理実態調査結果」（平成27年度実績）
2) 環境省「廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用量実態調査報告書（平成２８年度）」（平成27年度実績）
3) 河井紘輔、生ごみ堆肥化促進シナリオによる全国レベルでの一般廃棄物処理に係る再生利用率推計モデル、第28回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集，pp. 23-24（2017）
4) 総務省，国勢調査（大正9 年～平成27 年実績）
5) 経済産業省，鉱工業指数年報（平成20～ 27 年実績）
6) 総務省，労働力調査（平成19～27 年度実績）
7) 国土交通省，建設総合統計（昭和43 年度～平成27 年度実績）
8) 日本鉄鋼連盟，鉄鋼統計要覧（平成22～ 27 年度）
9) 資源エネルギー庁，エネルギー白書（平成22～27 年）
10) 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22 年度～27 年度）
11) 国土交通省，建設資材・労働力需要実態調査（昭和57 年～平成25 年）
12) 国立社会保障人口問題研究所，日本の将来推計人口（都道府県・市区町村）(2018)
13) 経済産業省，長期エネルギー需給見通し(2015)

Ⅱ－３　横断型プラスチック・リサイクルの政策評価モデルの開発

東京大学大学院工学系研究科 都市工学専攻 都市資源管理研究室　森口 祐一
中谷 隼
丸山 多聞 ＜研究協力者＞
東野 航平 ＜研究協力者＞

平成28～30年度 累計予算額：9,293千円
（うち平成28年度：3,150千円、平成29年度：3,150千円、平成30年度：2,993千円）
累計予算額は、間接経費を含む。

［要旨］
サブテーマ(3)では、産業連関分析に基づく物質フロー分析の既往モデルを発展させて「産業連関プラスチック物質フロー分析モデル」を開発した。また、我が国の産業連関表の基本分類のうち熱可塑性樹脂およびプラスチック製品の部門を分割し、「拡張プラスチック分析用産業連関表」を作成した。これらを用いて、現時点で最新の産業連関表が公表されている2011年を対象に、我が国における国内需要および輸出に伴うプラスチックの物質フローを樹脂種類（10種類）・容器包装（6種類）・利用製品（145部門）・需要先（115部門）別に分析し、プラスチック消費量と利用製品や需要先の内訳を推計した。また、現行の個別リサイクル法の枠組みを越えたリサイクル施策のオプションとして、容器包装プラスチックと製品プラスチックの横断型リサイクル、家庭系と事業系の容器包装プラスチックの横断型リサイクルのシナリオを設定し、2011年の物質フローの分析結果を活用して樹脂種類および排出源別にリサイクル目的の回収可能量を算定した。さらに、プラスチックのマテリアルリサイクル、フィードストックリサイクルおよびエネルギー回収について、樹脂種類別の資源消費と環境負荷の原単位を推計し、シナリオごとの化石資源消費量および二酸化炭素（CO_2）排出量の削減効果（全量を単純焼却した場合との比較）を算定した。
物質フローの分析結果から、国内需要および輸出に伴うプラスチック消費量は1,396万tであり、国内の家庭や産業への流入量は759万tと推計された。容器包装の利用量は年間420万t（加工ロスと直接需要を除く）であり、そのうち40%を食品の容器包装が占めると推計された。プラスチック消費量の需要先の内訳では、全体では産業や輸出が家庭よりも多いが、容器包装に限ると家庭が174万tで産業が219万tとなる。家庭に流入するプラスチックのうち110万tが食品の容器包装であり、商業に利用される容器包装（レジ袋など）の流入量は20万tと推計された。リサイクルシナリオの評価結果からは、回収可能量がリサイクル効果の決定的な要因であり、回収可能量が332万tと最大である家庭系および事業系の容器包装プラスチックの横断型リサイクルが、最も資源消費や環境負荷の削減効果が見込めると評価された。

［キーワード］
プラスチック、容器包装、リサイクルシナリオ、物質フロー分析、ライフサイクル評価

１．はじめに

近年、世界的にプラスチックの消費が引き起こす様々な問題が注目を集めており[1)]、特に容器包装など使い捨て（シングルユース）のプラスチック製品が問題視され、リサイクルを含む資源循環の必要性が指摘されている。2018年1月に公表された「循環経済（サーキュラーエコノミー）における欧州プラスチック戦略」では、欧州の新たなプラスチック経済のビジョンとして、2030年までに欧州で発生する半分以上の廃プラスチックがリサイクルされるといった目標が掲げられている[2)]。近年の我が国では、年間1,000万t程度のプラスチック製品が国内で消費され、そのうち400万t程度が容器包装（同協会の用語では「包装・容器等／コンテナ類」）とされている[3)]。また、近年は年間150万t前後の廃プラスチッ

クが国外に輸出されてきたが[3]、主な輸出先であった中国の輸入規制によって、生活由来（2017年末）および工業由来（2018年末）の廃プラスチックの輸入が禁止された。こうした背景から、我が国のプラスチックの資源循環は再検討が求められる現状にあり、2018年6月に閣議決定された第四次 循環型社会形成推進基本計画において、「プラスチック資源循環戦略」 を策定し、環境負荷の低減に資する プラスチック使用の削減（使い捨て容器包装など）、使用済プラスチック資源の徹底的かつ効果的・効率的な回収・再生利用、バイオプラスチック（バイオマス由来および生分解性のプラスチック）の実用性向上と化石燃料由来プラスチックとの代替促進といった施策を進めることとされた。中央環境審議会・プラスチック資源循環戦略小委員会での審議内容を踏まえた「プラスチック資源循環戦略（案）」の中間整理が2018年11月に公表され、パブリックコメントの実施（2018年11月～12月）を経て、2019年3月に中央環境審議会から環境大臣に答申された。2019年6月に大阪で開催されるG20首脳会合までには、政府によって正式決定される見込である。この戦略（案）では、使用後は徹底的に分別回収し循環利用を図るという基本原則のもと、2030年までにプラスチック製容器包装の6割をリユースまたはリサイクルする、2035年までに全ての使用済プラスチックを有効利用（リユースまたはリサイクル、それが技術的・経済的観点などから難しい場合には熱回収を含む）するといった、欧州の目標を超える野心的な戦略が述べられている[4]。

このような目標の達成に向けた具体的な方向性として、家庭系の容器包装プラスチックを対象とした容器包装リサイクル法の範囲を越えた、他の排出源や製品に由来する廃プラスチックとの横断的なリサイクルがある。その効果を評価するためには、まず国内における排出源や利用製品ごとのプラスチックの廃棄量を網羅的に推計し、様々な横断的リサイクルのシナリオにおけるリサイクル目的の回収可能量を算定する必要がある。さらに、回収対象とする排出源や製品の拡大により、廃プラスチックの樹脂組成も変化することが考えられるため、排出源や利用製品ごとの樹脂組成に加えて、様々なプラスチックのリサイクル手法による資源消費や環境負荷の原単位が樹脂種類別に必要になる。前者の廃棄量については、前述のプラスチック循環利用協会による推計[3]をもとに、環境省の検討会が2013年における用途ごとの廃プラスチックの排出見込量を推計し、個別リサイクル法のもとでの回収量と比較している[5]。ここでは、ペットボトルの58万tを除くと容器包装プラスチックの排出見込量は368万tと見込まれているが、容器包装リサイクル法のもとでの回収量はペットボトルを除くと66万tに過ぎず、差分の約300万tの廃棄および回収の実態は明らかにされていない。

製品や素材の廃棄量の推計には物質フロー分析（material flow analysis：MFA）が有効であり、その推計方法は、廃棄物の回収量や素材の組成などの廃棄側の調査データを積み上げて廃棄量や組成を推計するボトムアップ的なアプローチと、製品の生産量や素材の使用量など生産側の統計データと製品寿命を用いるトップダウン的なアプローチに分けることができる。前者による国・地域レベルでの分析事例として、2013年のオーストリアにおける特定の容器包装（7種類）について、廃棄からリサイクルまたは処理処分までの物質フローと樹脂組成（8種類）が推計されている[6]。ただし、現実的にボトムアップ的アプローチは特定の種類の製品や廃棄物を対象とした推計への適用に限られ、国・地域レベルでの網羅的かつ精確な推計は困難であると考えられる。一方、トップダウン的アプローチによる国・地域レベルのプラスチックのMFAには多くの先行研究が存在し、特定の樹脂種類を対象にした分析事例としては、中国における2050年までのポリ塩化ビニル（PVC）樹脂の廃棄量を推計した事例[7]、欧州における2012年までのPVC樹脂の利用量と廃棄量を5種類の加工形態および6種類の用途別（うち1種類が容器包装）に推計した事例[8]などがある。また、様々な樹脂種類を包括的に分析した事例には、ドイツにおける生産統計を用いて6種類の樹脂について6種類の加工形態（うち1種類が容器包装）および9種類の用途別の生産・消費・廃棄量を推計した事例[9]や、インドにおける生産統計を用いて7種類の樹脂および7種類の用途別（うち1種類が容器包装）に2030年までの消費・廃棄量を推計した事例[10]、オーストリアにおける9種類の用途別（うち1種類が容器包装）の物質フロー（樹脂種類は区別されていない）を推計した事例[11]、欧州およびスイスにおける7種類の樹脂および35種類の用途別（うち7種類が容器包装）の生産・廃棄量を推計した事例[12]がある。

２．研究開発目的

以上のように、様々な製品の素材として利用されるプラスチックの廃棄量を国・地域レベルで網羅的に推計するためには、廃棄物の回収量や組成など廃棄側の調査データをもとにしたボトムアップ的アプローチのMFAでは限界があり、プラスチックの生産側の統計データなどを起点としたトップダウン的アプローチが求められる。また、廃プラスチックの発生量を排出源ごとに推計するためには、プラスチックを構成要素とする製品の需要先を特定する必要がある。さらに、他の素材と比べてもプラスチックの物質フローにおいては、他製品に付随する容器包装が支配的な位置を占めることが考えられる。前述したトップダウン的アプローチによるMFAの先行研究では、プラスチックの樹脂種類や容器包装を含む用途別の消費量や廃棄量は推計されているものの、製品の需要先まで特定した事例は確認されていない。

それに対して、産業連関（input-output：IO）表には合成樹脂を含む素材の生産から製品の製造、それらの最終需要までが記述されており、それを用いた産業連関分析は需要先の特定も含むプラスチックのMFAにも活用できる可能性がある。これまでに、産業連関分析に基づくトップダウン的アプローチによるMFAのモデルが開発および実践されており、廃棄物産業連関表（waste input-output：WIO）を用いたWIO-MFAモデル[13, 14]や、それをもとに異なる製品間のオープンループリサイクルによる物質の運命を動的に追跡するMaTraceモデル[15]が代表的である。これらの分析モデルでは、産業連関表の内生部門（物的な製品が産出される部門）を資源→素材→製品に階層化することで、製品の素材構成を推計する手法である。その適用事例は、自動車の部品および金属素材の構成の推計[16]や、PVC樹脂が中間製品を経て最終製品の構成要素となり各部門に蓄積されるまでの物質フローの推計[17]、使用済の自動車（end-of-life vehicle：ELV）に由来する鉄スクラップのリサイクルに関する分析[14, 18]、MaTraceモデルを拡張して世界のスクラップ貿易を考慮した鉄の物質フロー・ストックの分析[19]、さらに炭素の循環フローおよび製品としての蓄積量の推計[20]など、様々な素材や元素に広がっている。また、供給・使用表（supply and use table：SUT）を用いたSTREAMSという分析モデルも存在し、オランダにおける1990年の産業部門別のプラスチックの消費量と、包装/部品/最終製品の内訳（樹脂種類は区別されていない）が推計されている[21]。

ここで、容器包装は製品の輸送や販売に供した後、梱包した製品に付随して需要先に流入し、多くの場合、その需要先で直ちに廃棄されるという運命にある。WIO-MFAにおいて物的な製品が産出される部門への物的な投入は、原料として製品の構成要素になるか、それ以外（その部門でロスとして廃棄されると見なされる）に分けられるが、現実の容器包装の物質フローは、いずれにも該当しないことになる。前述のように、プラスチック消費量に占める容器包装の割合は他の素材と比べても高く、特に排出源ごとの廃プラスチック発生量を精確に推計するためには、容器包装の物質フローを特定できる分析モデルが求められる。また、物的な製品の産出がないとされる部門の中には、例えば商業（卸売および小売）や医療、飲食サービス、洗濯業のように、サービスの提供のために容器包装を利用する業態も存在する。

こうした背景から、横断型プラスチックリサイクルの分析・評価モデルを担当するサブテーマ(3)では、上記の産業連関分析に基づくMFAの既往モデルを発展させて「産業連関プラスチック物質フロー分析（IO-based MFA for Plastics：IOMFA-P）モデル」を開発した。また、IOMFA-Pモデルの特長を活かした精緻な分析のために、我が国の産業連関表の基本分類（列部門）の約400部門のうち熱可塑性樹脂およびプラスチック製品の部門について、プラスチック製品統計[22]や樹脂種類および加工形態別の利用実態に基づくフィッティング計算によって分割し、「拡張プラスチック分析用産業連関（Extended IO for Plastics：EIO-P）表」を作成した。IOMFA-PモデルおよびEIO-P表を用いて、現時点（2019年5月）で最新の産業連関表[23]が公表されている2011年を対象に、我が国における国内需要および輸出に伴うプラスチックの物質フローを樹脂種類（10種類）・容器包装（6種類）・利用製品（139部門）・需要先（113部門）別に分析し、プラスチック消費量と利用製品や需要先の内訳を推計した。

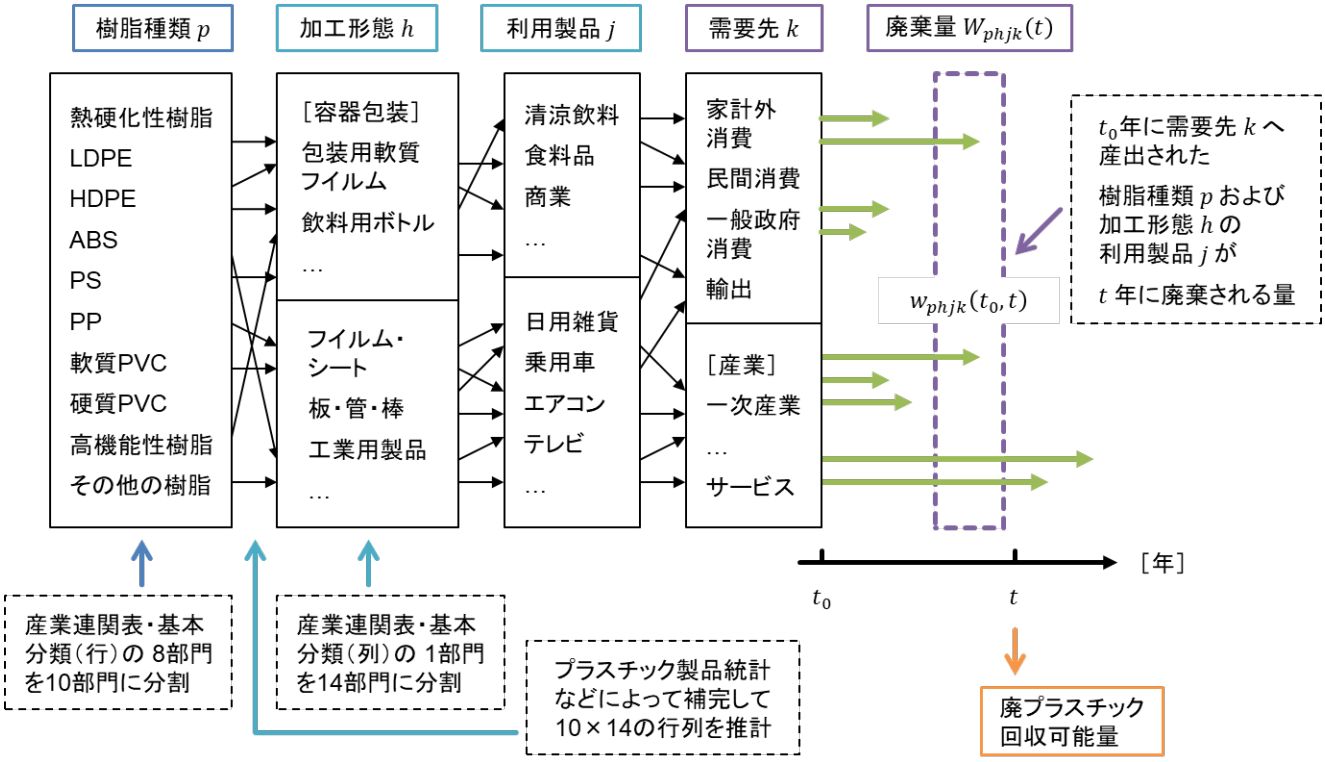
さらに、現行の個別リサイクル法の枠組みを越えたリサイクル施策のオプションとして、廃プラス

チックの回収範囲を変化させた横断型のリサイクルシナリオにおける資源消費および環境負荷の削減効果（リサイクル効果）を評価した。ただし、自動車・家電・小型家電リサイクル法などで対象とされる機器系のプラスチックや、建設リサイクル法で対象とされる建設系のプラスチックは範囲外として、生活系のプラスチックを対象とした容器包装プラスチックと製品プラスチックの横断型リサイクル、家庭系と事業系の容器包装プラスチックの横断型リサイクルのシナリオを設定した。それぞれについて、上記の四次元を持つ2011年の物質フローの分析結果を活用して、国内の需要先へのプラスチックの流入量をもとに樹脂種類および排出源（需要先に一致すると考えた）別にリサイクル目的の回収可能量を算定した。一方で、シナリオごとのリサイクル効果を評価するためには、既往の評価事例で提示されてきたプラスチックの単位重量（1 kg）当たりの原単位では、樹脂組成の変化を反映することができない。そのためサブテーマ(3)では、プラスチックのマテリアル（材料）リサイクル、フィードストックリサイクル（油化、合成ガス化、高炉還元剤化、コークス炉化学原料化）およびエネルギー回収（固形燃料化、セメント焼成、焼却発電）について、樹脂種類別の化石資源消費量と二酸化炭素（CO_2）排出量の原単位を推計した。その原単位を用いて、各シナリオにおける樹脂種類別の回収可能量から、化石資源消費量およびCO_2排出量の削減効果（全量を単純焼却した場合との比較）を評価した。

３．研究開発方法

ａ）物質フローの分析モデルの開発

まず、IOMFA-Pモデルの構造について概要を述べる。図(3)-1に示したように、国内需要および輸出に伴うプラスチックの物質フローについて、樹脂種類 p、加工形態 h、利用製品 j および需要先 k の四次元を持つ分析結果が得られる。容器包装プラスチックは、特定の加工形態のプラスチック製品が容器包装のみに利用されると見なすことで特定される。需要先としては、通常の産業連関分析では中間需要と見なされる内生部門への投入のうち、その部門から産出される製品の構成要素（原料）にはならないと考えられる製品の蓄積も考慮することから、産業連関表における最終需要部門に加えて産業（内生）部門も含むものとする。利用製品は、上記の需要先に産出される製品と定義され、プラスチックを構成要素として利用する製品と、容器包装プラスチックを利用する製品の両者を含む。



図(3)-1　　産業連関プラスチック物質フロー分析（IOMFA-P）モデルの構造

以上の物質フローのうち国内の需要先への流入量は、樹脂種類や利用製品、排出源ごとのプラスチックの廃棄量の網羅的な推計の基礎となる。ここで、図(3)-1における $W_{phjk}(t)$ のように廃棄年 t ごとの推計には、物質フローの経年的な分析に加えて、物質ストックが直接的に計測されない限り、利用製品ごとの寿命分布が必要とされる。ただし、多くの場合は需要先で直ちに廃棄される容器包装は、各年について需要先別の流入量は排出源別の廃棄量に等しいと見なすことができる。また、短寿命の製品についても、その寿命分布の範囲で物質ストックが一定と見なすことができれば、同様に各年の需要先別の流入量と排出源別の廃棄量は等しいと考えることができる。前述のように、b)においてリサイクル効果を評価するシナリオは生活系の廃プラスチックを対象としており、長寿命の製品を含む機器系や建設系のプラスチックは範囲外とすることから、2011年の需要先へのプラスチックの流入量を同年の廃プラスチックの発生量と見なすこととする。

このIOMFA-Pモデルにおいて、物質フローは以下の5パターンで算定される。①②は製品の構成要素となるプラスチックの物質フロー、③～⑤は容器包装プラスチックの物質フローである。

① 最終需要部門に流入する製品（その部門で使用および廃棄されると見なされる）
② 内生部門に流入し、その部門から産出される製品の原料や容器包装として利用されない製品（同上）
③ 製品に付随せずに、最終需要部門に流入する容器包装（同上）
④ 内生部門に流入し、その部門から産出される製品に付随しない容器包装（同上）
⑤ 内生部門から産出される製品に付随して、需要先の部門に流入する容器包装（製品の需要先の部門で廃棄されると見なされる）

これらのうち②は、各内生部門の生産活動に利用される消耗品や耐久消費財（例えば、生産機械やオフィスで使用されるパソコンなどのプラスチック部品）が該当する。③および④は、製品の販売に供するためではなく、最終需要部門の消費活動および内生部門の生産活動に直接的に需要される容器包装（それと同じ加工形態のプラスチック製品を含む）である。例えば、ごみ袋や家庭やオフィスで使用されるケースなどが該当する。①および⑤は、それぞれ通常の製品および容器包装が該当する。

いずれの物質フローも、WIO-MFAと同様に、単位金額（百万円）当たりの製品 j（容器包装として利用される製品を含む）の素材含有量、ここでは樹脂種類 p ごとのプラスチック含有量 $\boldsymbol{C}$（p 行 j 列の行列）を基礎とする。

上記の物質フロー①～⑤の算定には、$\boldsymbol{C}$ および $\boldsymbol{A}$ などが必要とされる。EIO-P表では、2011年の産業連関表の基本分類（列部門）を基礎として、内生部門は420部門に拡張し、最終需要部門は消費支出および輸出の14部門とした。最終需要部門のうち国内総固定資本形成については、物質フロー②に該当するものとして、需要先としての各内生部門に分配した。また、物質フローの分析結果を可視化する際には、樹脂を7種類、利用製品を7部門、需要先を3部門（家庭、産業、輸出）に統合し、容器包装は加工形態によらず1部門とした。原料フィルタ行列の要素は、部門間の原料－製品の関係（矢印の根が原料、先が製品）に従って設定した。商業ベクトルは、農水産業および飲食料品部門から産出される製品のみ卸売・小売業での食品廃棄をもとに設定し、他の部門については全て1とした。

ｂ）リサイクル効果評価モデルの開発

プラスチックの様々なリサイクル手法として、マテリアル（材料）リサイクル、フィードストックリサイクル（油化、合成ガス化、高炉還元剤化、コークス炉化学原料化）およびエネルギー回収（固形燃料化、セメント焼成、焼却発電）について、樹脂種類別の化石資源消費量とCO_2排出量の原単位を推計した。システム境界は、回収された廃プラスチックがベール化およびリサイクルされて再生原燃料または製品が消費されるまでとし、それらによって代替される新規原燃料または新規製品（代替物）の化石資源消費量とCO_2排出量を控除した。まず、プラスチック製容器包装のリサイクルに関する評価事例[24-26]から、廃プラスチックのベールから再商品化製品（再生原燃料または再生製品）までのリサイクルプロセスにおける樹脂種類ごとの収率と原燃料の使用量を引用した。代替物の重量については、材料リサイクルは重量および代替率[24]、合成ガス化は炭素含有量[24]、高炉還元剤化およびコークス炉化学原料

化は原燃料によって重量または発熱量[25]、油化も原燃料によって重量または発熱量[26]、エネルギー回収は発熱量[24]に基づいて、それぞれ樹脂種類ごとに算定した。原燃料の化石資源消費量およびCO_2排出量のバックグラウンドデータは、我が国のライフサイクルインベントリ（LCI）データベース[27]から引用した。

さらに、廃プラスチックの回収範囲を変化させた横断型のリサイクルシナリオにおける資源消費および環境負荷の削減効果（リサイクル効果）を評価した。ここでは、生活系のプラスチックを対象とした容器包装プラスチックと製品プラスチックの横断型リサイクル、家庭系と事業系の容器包装プラスチックの横断型リサイクルのシナリオを設定した。それぞれについて、a)における国内の需要先へのプラスチックの流入量（2011年）の推計結果をもとに、樹脂種類および排出源（需要先に一致すると考えた）別にリサイクル目的の回収可能量を算定し、上記の樹脂種類別の原単位を用いて、シナリオごとの化石資源消費量およびCO_2排出量の削減効果（全量を単純焼却した場合との比較）を評価した。

４．結果及び考察

ａ）物質フロー分析モデルの開発

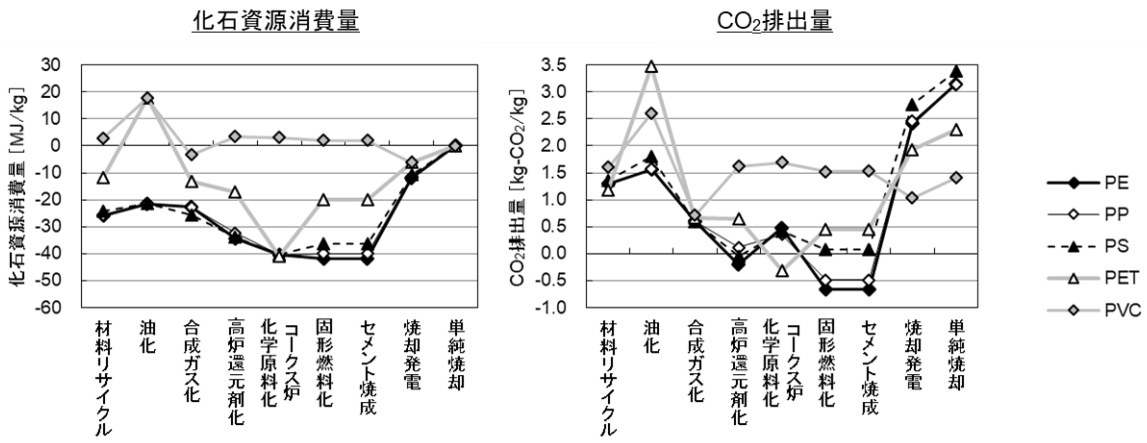
我が国における2011年の国内需要および輸出に伴うプラスチックの物質フローについて、サンキー図の結果を得た。輸出を除くと、国内の家庭や産業に流入する（すなわち、国内で使用および廃棄されると考えられる）プラスチックを推計できた。この結果は、プラスチック循環利用協会による国内樹脂製品消費量の内訳[3]で「包装・容器等／コンテナ類」が434万tとされていることと大きな乖離はない。容器包装を利用した製品の部門は一次産業・飲食料品が多かった。需要先への流入量は、プラスチック全体では産業や輸出が家庭よりも多い。

次に、国内需要および輸出に伴うプラスチック消費量について述べる。容器包装プラスチックを利用した製品およびプラスチックを構成要素として利用する製品の内訳、用途分類（容器包装か製品か）の内訳、利用製品の需要先の内訳が得られている。家庭に流入するプラスチックのうち食品（一次産業・飲食料品）の容器包装が多く、商業に利用される容器包装（レジ袋など）の流入量を推計できた。一方で、家庭に流入する製品は機械（家電や乗用車など）、産業に流入する製品は工業製品（水道および下水道に使用される硬質管など）が多い。

また、原料となる樹脂種類の内訳も算出できた。ここでは、低密度および高密度ポリエチレン（LDPEおよびHDPE）とポリプロピレン（PP）を含むオレフィン系の樹脂の割合は半分程度である。これを容器包装（加工ロスと直接需要を除く）に限ると、オレフィン系の樹脂（LDPE、HDPE、PP）のおよそ半分程度を占めると推計された。

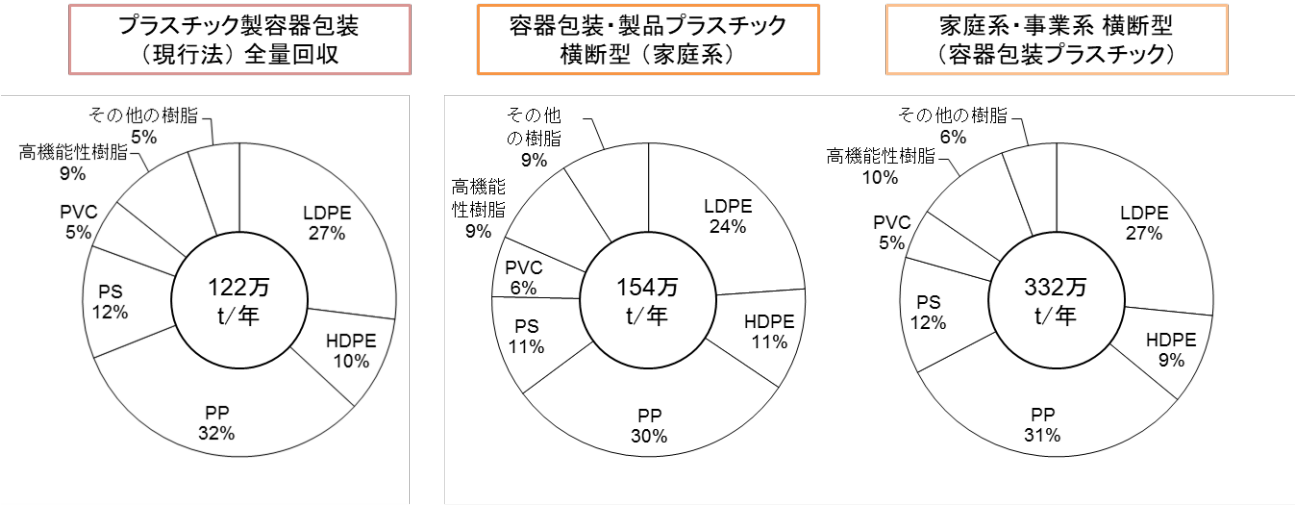
ｂ）リサイクル効果評価モデルの開発

樹脂種類別の各リサイクル手法の化石資源消費量およびCO_2排出量の原単位は、それぞれ図(3)-2のように推計された。ここでは、材料リサイクルの再生樹脂と新規樹脂の代替率は0.5、高炉還元剤化はコークス代替、固形燃料化およびセメント焼成は収率75%、焼却発電は発電効率10%の場合を示している。樹脂種類によって資源消費や環境負荷の削減効果に差があり、いずれのリサイクル手法でもPVCは残渣とされることからリサイクル効果が期待できず（単純焼却と原単位が同程度か、それよりも大きい）、ポリエチレン（PE）やPP、PSについては、いずれのリサイクル手法でも資源消費や環境負荷の削減効果があることが分かる。材料リサイクルについては、再商品化製品（再生樹脂）となるのはPEとPPであるが、残渣がエネルギー回収されていることから、特にCO_2排出量については樹脂種類によって原単位に大きな差は見られない。



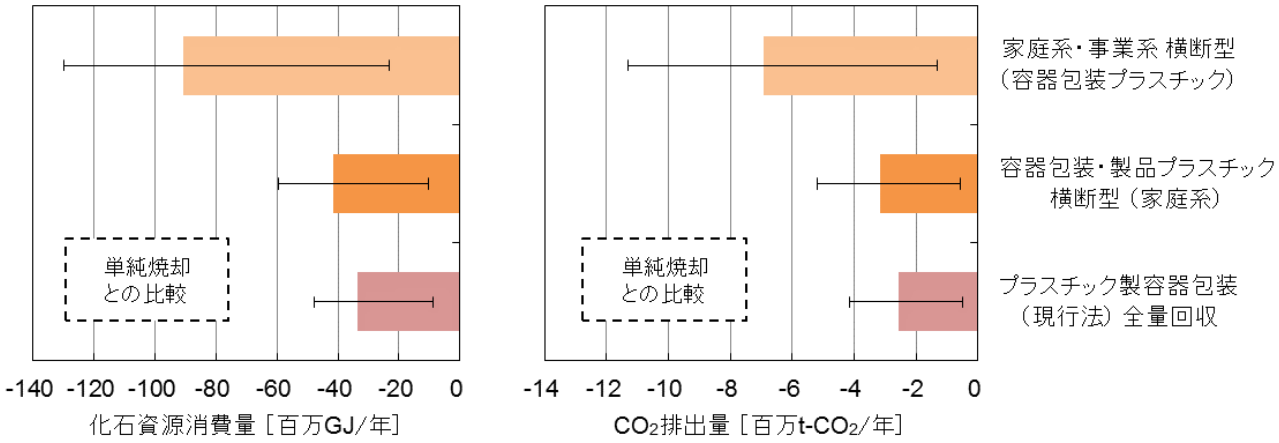
図(3)-2　　各リサイクル手法の樹脂種類別の資源消費・環境負荷原単位の推計結果

リサイクルシナリオとしては、現行の容器包装リサイクル法の対象となっている家庭系のプラスチック製容器包装（ペットボトルを除く）の全量回収に加えて、回収範囲を家庭系の製品プラスチックまで広げた横断型リサイクル、回収範囲を事業系の容器包装プラスチックまで広げた横断型リサイクルを設定した。これらのシナリオについて、a)で推計した国内の需要先へのプラスチックの流入量（2011年）の推計結果をもとに、回収可能量と樹脂組成を図(3)-3のように算定した。ここで、製品プラスチックには容器包装の直接需要および工業製品が含まれるものとした。また、リサイクル効果の評価に当たっては、金属類および水分の混入（それぞれベール重量に対して2.6%および7.3%）を考慮した。



図(3)-3　　各リサイクルシナリオにおける廃プラスチックの回収可能量と樹脂組成の算定結果

これらのリサイクルシナリオについて、化石資源消費量およびCO_2排出量の削減効果は図(3)-4のように評価された。棒グラフは、2011年度のプラスチック製容器包装の落札量における再商品化手法別の構成比[28]に従って、それぞれのシナリオにおける回収可能量を同じ樹脂組成で各リサイクル手法に配分した場合であり、誤差範囲（エラーバー）は樹脂種類ごとに削減効果が最大または最小のリサイクル手法に配分した場合を示している。棒グラフの削減効果を1 kg当たりに換算すると、化石資源消費量が-27.0～-27.5 MJ、CO_2排出量が-2.05～-2.09 kg-CO_2とシナリオによって大きな差はなく、回収範囲を広げるだけであれば、回収可能量がリサイクル効果の決定的な要因であることが明らかとなった。そのため、回収可能量が332万tと最大である家庭系および事業系の容器包装プラスチックの横断型リサイクルが、最も資源消費や環境負荷の削減効果が見込めると評価された。ただし、誤差範囲の最小値を見ると、樹脂種類別に最も削減効果の見込めるリサイクル手法に配分するような回収や選別が可能であれば、いずれのシナリオでもリサイクル効果は大幅に向上する潜在性があることも示された。



図(3)-4　　各リサイクルシナリオにおける資源消費・環境負荷削減効果の評価結果

５．本研究により得られた成果

（１）科学的意義

サブテーマ(3)の研究成果のうち物質フローに関しては、産業連関分析に基づくMFAの既往モデルを発展させた「産業連関プラスチック物質フロー分析（IOMFA-P）モデル」を開発した。また、我が国の産業連関表の基本分類（列部門）の約400部門のうち熱可塑性樹脂およびプラスチック製品の部門について、プラスチック製品統計や樹脂種類および加工形態別の利用実態に基づいて分割した「拡張プラスチック分析用産業連関（EIO-P）表」を作成した。これらを用いることで、国内需要および輸出に伴うプラスチックの物質フローを樹脂種類（10種類）・容器包装（6種類）・利用製品（139部門）・需要先（113部門）別に分析することが可能になった。特に、プラスチック消費量に占める容器包装の割合が他の素材と比べても高いことを背景に、IOMFA-Pモデルによって容器包装の物質フローが特定できるようになったことは、MFAの研究分野においても科学的に大きな意義を持つものと言える。

また、プラスチックの様々なリサイクル手法について、資源消費と環境負荷の原単位を樹脂種類別に推計したことにも意義がある。その結果、上記の物質フローの分析結果と合わせることで、樹脂組成を考慮して回収範囲を変化させたリサイクルシナリオの資源消費と環境負荷の削減効果を評価することが可能になった。

（２）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

特に記載すべき事項はない。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

容器包装や日用雑貨など使い捨てや短寿命のプラスチック製品について、その潜在的な廃棄量をプラスチック消費量の推計結果から導くことができる。それを分母とし、シナリオごとの回収可能量を分子とすることで、「入口側」のリサイクル率の上限が算定される。また、需要先（排出源）別の廃棄量の推計結果からは、例えば家庭と産業に分けたリサイクル率の算定も可能である。また、リサイクル効果の評価の中で用いられている各リサイクル手法の収率を用いることで、上記の入口側のリサイクル率を「出口側」のリサイクル率に換算することもできる。

さらに、廃プラスチックの回収範囲を変化させた横断型のリサイクルシナリオを設定し、物質フローの分析結果を活用して各シナリオにおける回収可能量を算定するとともに、資源消費および環境負荷の削減効果を評価した。これらの結果は、現行の個別リサイクル法の枠組みを越えたリサイクル施策のオプションを検討する際に、ベンチマークとして活用できるものである。

６．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

７．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

1) 河合萌子、中谷隼、栗栖聖、森口 祐一（2019）廃棄物資源循環学会論文誌、採択済
「再生処理能力と再生樹脂利用の制約に基づくペットボトル循環利用シナリオの提案」

（２）口頭発表（学会等）

1) 丸山多聞、中谷隼、森口祐一（2017）第12回 日本LCA学会研究発表会、つくば
「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」
2) Maruyama, T., Nakatani, J., Moriguchi, Y. (2018) EcoDesign 2017, 10th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tainan, Taiwan
“Estimation of lifetime functions of plastic products”
3) 丸山多聞、中谷隼、森口祐一（2018）第13回 日本LCA学会研究発表会、東京
「容器包装と産業への蓄積に着目したMFAによるプラスチック廃棄物の発生量推計」
4) Maruyama, T., Nakatani, J., Moriguchi, Y. (2018) EcoBalance 2018, 13th Biennial International Conference on EcoBalance, Tokyo, Japan
“Material flow modeling of plastics for tracking containers and packaging flows and accumulation in intermediate sectors”
5) 丸山多聞、中谷隼、森口祐一（2019）第14回 日本LCA学会研究発表会、福岡
「プラスチックの製品種類および蓄積先に着目した物質フロー分析」
6) 東野航平、中谷隼、栗栖聖、森口祐一（2019）第14回 日本LCA学会研究発表会、福岡
「横断型プラスチックリサイクルのシナリオ分析」

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

８．引用文献

12) Editorial (2018) Nature Sustainability 1(5), p.205 “Closing the plastics loop”
13) European Commission (2018) “European Strategy for Plastics in a Circular Economy”
14) プラスチック循環利用協会（2012-2018）「2011-2017年 プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況 マテリアルフロー図」
15) 中央環境審議会（2019）「プラスチック資源循環戦略の在り方について ～プラスチック資源循環戦略（案）～（答申）」
16) 素材別リサイクル戦略マップ検討会（2016）「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」

17) Eygen, E.V., Laner, D., Fellner, J. (2018) Waste Management 72, pp.55-64 “Circular economy of plastic packaging: Current practice and perspectives in Austria”
18) Zhou, Y., Yang, N., Hu, S. (2013) Resources, Conservation and Recycling 73, pp.33-40 “Industrial metabolism of PVC in China: A dynamic material flow analysis”
19) Ciacci, L., Passarini, F., Vassura, I. (2017) Resources, Conservation and Recycling 123, pp.108-116 “The European PVC cycle: In-use stock and flows”
20) Patel, M.K., Jochem, E., Radgen, P., Worrell, E. (1998) Resources, Conservation and Recycling 24, pp.191-215 “Plastics streams in Germany-an analysis of production, consumption and waste generation”
21) Mutha, N.H., Patel, M., Premnath, V. (2006) Resources, Conservation and Recycling 47, pp.222-244 “Plastics materials flow analysis for India”
22) Laner, D., Feketitsch, J., Rechberger, H., Fellner, J. (2016) Journal of Industrial Ecology 20(5), pp.1050-1063A novel approach to characterize data uncertainty in material flow analysis and its application to plastics flow in Austria”
23) Kawecki, D., Scheeder, P.R.W., Nowack, B. (2018) Environmental Science & Technology 52(17), pp.9874-9888 “Probabilistic material flow analysis of seven commodity plastics in Europe”
24) Nakamura, S., Nakajima, K., Kondo, Y., Nagasaka, T. (2007) Journal of Industrial Ecology 11(4), pp.50-63 “The waste input-output approach to material flow analysis”
25) 中島謙一、中村慎一郎、松八重（横山）一代、近藤康之、長坂徹也（2009）廃棄物資源循環学会誌20(3)、pp.206-211「産業連関分析を応用したトップダウン型MFAモデルの開発」
26) Nakamura, S., Kondo, Y., Kagawa, S., Matsubae, K., Nakajima, K., Nagasaka, T. (2014) Environmental Science & Technology 48(13), pp.7207-7214 “MaTrace: Tracing the fate of materials over time and across products in open-loop recycling”
27) 中村慎一郎、中島謙一（2006）日本金属学会誌70(6)、pp.505-510「廃棄物産業連関マテリアルフロー分析手法と量産金属への応用」
28) Nakamura, S., Nakajima, K., Yoshizawa, Y., Matsubae-Yokoyama, K., Nagasaka, T. (2009) Journal of Industrial Ecology 13(5), pp.706-717 “Analyzing polyvinyl chloride in Japan with the waste input-output material flow analysis model”
29) Ohno, H., Matsubae, K., Nakajima, K., Kondo, Y., Nakamura, S., Nagasaka, T. (2015) Resources, Conservation and Recycling 100, pp.11-20 “Toward the efficient recycling of alloying elements from end of life vehicle steel scrap”
30) Pauliuk, S., Kondo, Y., Nakajima, K., Nakamura, S. (2017) Resources, Conservation and Recycling 116, pp.84-93 “Regional distribution and losses of end-of-life steel throughout multiple product life cycles-Insights from the global multiregional MaTrace model”
31) Ohno, H., Sato, H., Fukushima, Y. (2018) Environmental Science & Technology 52(7), pp.3899-3907 “Configuration of materially retained carbon in our society: A WIO-MFA-based approach for Japan”
32) Joosten, L.A.J., Hekkert, M.P., Worrell, E. (2000) Resources, Conservation and Recycling 30(2), pp.135-161 “Assessment of the plastic flows in The Netherlands using STREAMS”
33) 経済産業省（2012）「平成23年 紙･印刷･プラスチック・ ゴム製品統計年報」
34) 総務省（2015）「平成23年（2011年）産業連関表（確報）」
35) 日本容器包装リサイクル協会（2007）「プラスチック製容器包装再商品化手法に関する環境負荷等の検討」

36) Nishijima, A., Nakatani, J., Yamamoto, K., Nakajima, F. (2012) Journal of Material Cycles and Waste Management 14(2), pp.52-64 “Life cycle assessment of integrated recycling schemes for plastic containers and packaging with consideration of resin composition”
37) 中谷隼、鈴木香菜、平尾雅彦（2011）廃棄物資源循環学会論文誌22(3)、pp.210-224「ライフサイクル評価に基づくプラスチック製容器包装リサイクルの利害関係者間の問題解決支援」
38) 産業技術総合研究所（HP）http://www.idea-lca.jp/ja/「IDEA LCA Database」
39) 日本容器包装リサイクル協会（HP）
https://www.jcpra.or.jp/recycle/related_data/tabid/477/index.php「平成23年度 落札結果」

III. 英文Abstract

Development of Models for Resource Use and Waste Management and Evaluation of Effectiveness of Policies towards a Sound Material-cycle Society

Principal Investigator: Masahiro OSAKO
Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)
16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN
Cooperated by: Mizuho Information & Research Institute, Inc.; The University of Tokyo

[Abstract]

Key Words: Material flow/stock model, Circular economy, Policy evaluation, Municipal waste, Durables, Plastics, International resource supply

As policies for establishing a sound material-cycle society in Japan have progressed significantly since 2000, their outcomes have approached saturation. To advance policies for a sound material-cycle society in such a context, detailed and evidence-based policy target setting and monitoring of policy progress play important roles. Material flow modeling is a tool that can support this.

We developed six focused material flow models with this in mind and then used these to estimate outcomes of policy packages. The main results of each model were as follows:

The municipal waste/regional circular model enables to simulate different policies of all municipalities considering regional characteristics and calculate national-level policy outcomes. We set a policy package that included waste prevention and recycling and estimated its outcomes: a reduction in municipal waste generated and disposed of and an increase in the recycling rate. A stronger policy is necessary if the goal is more than 4% waste reduction, an increase in the recycling rate greater than 2%, and a final reduction in disposal greater than 8%, all by 2030. The outcomes of integrating waste incinerators that are not working at full capacity due to depopulation were also estimated.

The inter-sectoral plastic recycling model depicts each supply-demand relationship pertaining to plastics in Japan. Using this model, CO_2 emissions of recycling beyond single sector can be estimated.

The durable model separates Japan into nine regions and enables analysis of future imbalances in nonmetallic minerals caused by decreased public construction. According to the analysis, the supply of recycled materials will exceed demand in five regions in 2030.

The 2R (reduce and reuse) model enables the discrimination of two groups of products: those used for an extended period of time and those that are not. We set a policy scenario for extending the lifetime of consumer durables and estimated changes in new product sales and waste product generation.

The resource model considers changes in future trade given global warming scenarios. Our analysis confirmed that the model could simulate changes in trade flows for metal resources/products in the past. Therefore, we used this to estimate future trade in metal resources/products.

Finally, the results of each model were input into the Ministry of Environment's model

to calculate the three material-flow indicators used in the Fundamental Plan for a Sound Material-Cycle Society. In the era of saturating policy outcomes, the results suggest that more attention should be paid to the interlinkages between policies.