Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費　終了研究成果報告書

3-1801　先端的な再生技術の導入と動脈産業との融合に向けたプラスチック循環の評価基盤の構築
（ＪＰＭＥＥＲＦ２０１８３００１）

平成３０年度～令和２年度

Assessment Foundation for Plastics Cycles towards Introduction of Advanced Recycling Technologies and Integration with the Arterial Industries

〈研究代表機関〉
国立大学法人 東京大学

〈研究分担機関〉
国立大学法人 東北大学
国立研究開発法人 国立環境研究所
国立大学法人 富山大学

〈研究協力機関〉
立教大学

○図表番号の付番方法について
「Ⅰ．成果の概要」の図表番号は「０．通し番号」としております。なお、「Ⅱ．成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。
「Ⅱ．成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号．通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和３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．研究目標
４．研究開発内容
５．研究成果
５－１．成果の概要
５－２．環境政策等への貢献
５－３．研究目標の達成状況
６．研究成果の発表状況
６－１．査読付き論文
６－２．知的財産権
６－３．その他発表件数
７．国際共同研究等の状況
８．研究者略歴

Ⅱ．成果の詳細
Ⅱ－１　先端的な再生技術の導入と動脈産業との融合を志向した循環シナリオ ・・・・・・・・ 17
（国立大学法人 東京大学）
要旨
１．研究開発目的
２．研究目標
３．研究開発内容
３－１．物質フロー分析による生活系プラスチックの利用量および排出量と樹脂組成の推計
３－２．光学自動選別機による容器包装プラスチックの選別実証試験
３－３．物質フロー分析と選別実証試験に基づく容器包装プラスチックの回収・選別シナリオの設計
３－４．自動車由来プラスチックの循環フローおよび受入可能性の調査と循環シナリオの設計
４．結果及び考察
４－１．物質フロー分析による生活系プラスチックの利用量および排出量と樹脂組成の推計
４－２．光学自動選別機による容器包装プラスチックの選別実証試験
４－３．物質フロー分析と選別実証試験に基づく容器包装プラスチックの回収・選別シナリオの設計
４－４．自動車由来プラスチックの循環フローおよび受入可能性の調査と循環シナリオの設計
５．研究目標の達成状況
６．引用文献

Ⅱ－２　物質の動的バランスとプロセス技術に関するファクトの整備 ・・・・・・・・ 30
（国立大学法人 東北大学）
要旨
１．研究開発目的
２．研究目標

３．研究開発内容
３－１．国内外におけるフィードストックリサイクルの研究開発動向調査
３－２．廃プラスチックの化学組成分析法の確立
３－３．選別実証試験における選別物の組成を再現したサンプルの熱分解試験
３－４．トップダウン法による炭素フローとプラスチックリサイクルの環境負荷削減効果の可視化
３－５．熱分解試験に基づく製油所を介したプラスチック地域循環のシナリオ設計とフィージビリティ評価
４．結果及び考察
４－１．国内外におけるフィードストックリサイクルの研究開発動向調査
４－２．廃プラスチックの化学組成分析法の確立
４－３．選別実証試験における選別物の組成を再現したサンプルの熱分解試験
４－４．トップダウン法による炭素フローとプラスチックリサイクルの環境負荷削減効果の可視化
４－５．熱分解試験に基づく製油所を介したプラスチック地域循環のシナリオ設計とフィージビリティ評価
５．研究目標の達成状況
６．引用文献

Ⅱ－３　プラスチック循環に伴う合成樹脂添加剤のフロー分析　・・・・・・・・　43
（国立研究開発法人 国立環境研究所）
要旨
１．研究開発目的
２．研究目標
３．研究開発内容
３－１．電気電子機器由来プラスチックの添加剤含有データの整理
３－２．電気電子機器由来プラスチックのフロー推計
３－３．電気電子機器由来プラスチックのフローに伴う臭素系難燃剤フローの推計
３－４．電気電子機器由来プラスチックの処理・リサイクルに伴う臭素系難燃剤のフロー推定とシナリオ分析
４．結果及び考察
４－１．電気電子機器由来プラスチックの添加剤含有データの整理
４－２．電気電子機器由来プラスチックのフロー推計
４－３．電気電子機器由来プラスチックのフローに伴う臭素系難燃剤フローの推計
４－４．電気電子機器由来プラスチックの処理・リサイクルに伴う臭素系難燃剤のフロー推定とシナリオ分析
５．研究目標の達成状況
６．引用文献

Ⅱ－４　プラスチック循環の経済的効率性と安定性の理論・実証分析　・・・・・・・・　56
（国立大学法人 富山大学）
要旨
１．研究開発目的
２．研究目標

３．研究開発内容
３－１．経済理論の文献レビューと現状の制度設計における課題の抽出
３－２．制度変更を要因とした生活系プラスチックの回収および排出行動への影響
３－３．経済活動を考慮した産業系プラスチックの排出量変化の要因分解
４．結果及び考察
４－１．経済理論の文献レビューと現状の制度設計における課題の抽出
４－２．制度変更を要因とした生活系プラスチックの回収および排出行動への影響
４－３．経済活動を考慮した産業系プラスチックの排出量変化の要因分解
５．研究目標の達成状況
６．引用文献

Ⅲ．研究成果の発表状況の詳細 ・・・・・・・・ 66

Ⅳ．英文Abstract ・・・・・・・・ 71

Ⅰ．成果の概要

課題名　　3-1801　先端的な再生技術の導入と動脈産業との融合に向けたプラスチック循環の評価基盤の構築

課題代表者名　中谷 隼　　（東京大学大学院工学系研究科 都市工学専攻 講師）

重点課題　　主：【重点課題⑨】３Ｒを推進する技術・社会システムの構築
副：【重点課題②】持続可能な社会の実現に向けた価値観・ライフスタイルの変革

行政要請研究テーマ（行政ニーズ）
（３－５）プラスチックの3R高度化に向けたシステム最適化に関する研究

研究実施期間　平成３０年度～令和２年度

研究経費　　（千円）

	契約額	実績額 （前事業年度繰越分支出額含む）
平成３０年度	29,460 千円	29,460 千円
令和元年度	32,760 千円	32,760 千円
令和２年度	30,000 千円	30,000 千円
合計額	**92,220 千円**	**92,220 千円**

本研究のキーワード　　循環フロー，物質フロー分析，選別技術，化学原料化技術，熱分解法，炭素循環，合成樹脂添加剤，臭素系難燃剤，経済的効率性

研究体制
（サブテーマ１）先端的な再生技術の導入と動脈産業との融合を志向した循環シナリオ
（国立大学法人 東京大学）
（サブテーマ２）物質の動的バランスとプロセス技術に関するファクトの整備
（国立大学法人 東北大学）
（サブテーマ３）プラスチック循環に伴う合成樹脂添加剤のフロー分析
（国立研究開発法人 国立環境研究所）
（サブテーマ４）プラスチック循環の経済的効率性と安定性の理論・実証分析
（国立大学法人 富山大学）

研究協力機関
立教大学

１．はじめに（研究背景等）

一般系と産業系を合わせた廃プラスチックの排出量は，本研究課題の開始前の2015年には年間915万トンと推計されており（出典：プラスチック循環利用協会），その循環利用や適正処理の必要性は言うまでもない。そうした背景から，容器包装，自動車，家電，小型家電といった個別リサイクル法によって，プラスチックの循環利用が進められてきた。一方で，各品目のリサイクルには様々な問題点が指摘されており，各個別リサイクル法の見直しに向けた議論とともに，それらの枠組みを超えた製品横断型リサ

イクルの可能性についても基礎的な検討が始まっていた（環境省・素材別戦略マップ検討会）。そうした議論の中で提起されているプラスチック循環に関わる問題としては，以下の表に示したような論点が代表的であった。

- ✓ プラスチック製容器包装：(1) 回収量や分別収集に参加する市町村数が頭打ちの傾向にあり，近年は分別収集を取り止める市町村まで見られるようになっていた。(2) マテリアル（材料）リサイクルは高コストであるが，必ずしも高付加価値な再生樹脂を生産できておらず，落札において優先的な取扱いを受けるだけの十分な根拠は明確でなかった。(3) 分別基準適合物とするために市町村の選別保管施設で容器包装以外の混入物を除去した後，再商品化事業者においてもリサイクル不適物の選別があり，非効率と指摘されていた。(4) 製品プラスチック（日用品など）の中にはオレフィン系の単一樹脂製品も多く，プラスチック製容器包装との混合収集によって循環利用を促進するべきではないかという意見があった。
- ✓ ペットボトル：(5) 分別回収物は有価で事業者に引き取られるものの，そこに至るまでの市町村による分別収集の費用負担が大きく，経済効率的な回収方法が求められていた。(6) 2017年までは，分別回収量の3分の1から2分の1程度が中国をはじめとした国外に流出していると推計されており，国内資源循環の観点から問題視されていた。
- ✓ 自動車：(7) バンパーの塗膜（熱硬化性樹脂）の混入など，自動車由来の再生樹脂の品質には注意が必要とされていた。(8) ASR（シュレッダーダスト）の削減が課題であり，それを念頭に自動車由来の廃プラスチックのリサイクルと再生樹脂の利用促進が求められていた。
- ✓ 家電・小型家電：(9) 臭素系難燃剤（例えば，POPs条約の附属書Aに追加されることが決定していたDeBDE）などの合成樹脂添加剤は過去から蓄積してきた家電・小型家電の筐体などに存在しており，こうしたプラスチック部品が循環利用された場合，そのリスクは利用先の製品の製造や廃棄段階にも及ぶと指摘されていた。
- ✓ その他：(10) 2017年末からの中国による廃プラスチックの輸入停止など国外の動向によって，国内で処理するべき廃プラスチックの量や質が大きく変動することが予想されていた。

特に容器包装プラスチックについては，リサイクルによる環境負荷や資源消費の削減効果を評価した事例が，国内外における学術研究の段階を経て（Nishijima et al. 2012；Nakatani et al. 2010など），実務的なレベルでも存在していた（日本容器包装リサイクル協会による報告書など）。しかし，それらは現行のシステムを環境負荷や資源消費の面から正当化する段階に留まり，システムの改善やリスクの低減に向けた前向きな政策提言には結び付いていなかった。また，ケミカルリサイクル技術の開発も進められていたが（齋藤ら2017），過去に油化事業者やペットボトルのケミカルリサイクル事業者が撤退したことからも分かるように，技術面から理想的と考えられたリサイクル手法が，異物の混入も含め性状の安定しない廃プラスチックを扱った場合，経済的に事業性を持たないことが懸念されていた。

一方，自動車リサイクル制度においては，中環審・産構審の合同報告書の中で3Rの推進と質の向上の必要性が提言されていた。これを踏まえ，再生資源利用の進んだ自動車に対するインセンティブ制度の導入の検討がなされ，ASR削減と両立させる自動車to自動車のプラスチックリサイクルに限らず，他の使用済製品に由来する再生樹脂の利用も進めることが望ましいことが確認されていた。こうした動脈産業における利用促進は，再生樹脂の素材としての信頼性向上にも寄与しうるが，その信頼性の前提として，上記 (9) のような化学物質リスクについても知見の蓄積が欠かせないと考えられていた。

２．研究開発目的

先端的な再生技術の導入と動脈産業との融合によるプラスチック循環の高度化を志向した，10～20年後を見据えた循環シナリオの設計を目指して，そのための評価基盤の構築（動的な物質フロー分析，再生技術のフィージビリティ分析，合成樹脂添加剤のフロー分析，回収制度の理論・実証分析）を本研究課題の目的とした。実現性の高い再生技術（選別およびリサイクルを含む）と動脈産業における利用ポテンシャルを特定・分析し，一方で循環利用にかかる制約要因として排出量の変化，樹脂製品に含有さ

れる化学物質（添加剤）の再生品への混入などを考慮して，循環シナリオのオプションを提示することまでを本研究課題の達成目標とした。ただし，本研究課題では循環利用を検討するプラスチックの範囲と分類を以下のように定めた。

- ✓ 生活系プラスチック：家庭から一般廃棄物として排出される容器包装・製品プラスチック，およびオフィスなどから事業系一般廃棄物または産業廃棄物として排出される容器包装・製品プラスチック
- ✓ 機器系プラスチック：自動車，家電（パソコンを含む），小型家電をはじめとした，家庭やオフィス，産業において使用された機器の樹脂部品として排出されるプラスチック

３．研究目標

全体目標	動的な物質フロー分析，再生技術のフィージビリティ分析，合成樹脂添加剤のフロー分析，回収制度の理論・実証分析を通した評価基盤の構築と，生活系および機器系プラスチックの循環シナリオのオプションの提示を達成目標とする。

サブテーマ１	先端的な再生技術の導入と動脈産業との融合を志向した循環シナリオ
サブテーマリーダー/所属機関	中谷 隼 / 国立大学法人 東京大学
目標	生活系プラスチックについては収集区分の変更や高度選別施設の導入を想定して，機器系プラスチックについては動脈産業との融合と制約要因としての合成樹脂添加剤のフローを考慮して，それぞれ実現可能性のある循環シナリオを設計する。

サブテーマ２	物質の動的バランスとプロセス技術に関するファクトの整備
サブテーマリーダー/所属機関	福島 康裕 / 国立大学法人 東北大学
目標	動脈産業における廃プラスチックの利用ポテンシャルの推計結果や先端的な化学原料化技術などの技術開発動向の調査結果を基盤として，特定地域における動脈産業と融合したサーカムスタンス適応型の循環シナリオを設計する。

サブテーマ３	プラスチック循環に伴う合成樹脂添加剤のフロー分析
サブテーマリーダー/所属機関	小口 正弘 / 国立環境研究所
目標	機器系プラスチックに含有される添加剤が，どのような製品として社会に戻るかについて難燃剤を事例として分析し，循環シナリオの制約となりうる箇所があればそれを明らかにする。

サブテーマ４	プラスチック循環の経済的効率性と安定性の理論・実証分析
サブテーマリーダー/所属機関	山本 雅資 / 国立大学法人 富山大学
目標	生活系プラスチックを対象として，廃棄物回収の対象が，法制度や経済主体の判断によって区切られていることの経済的影響を定量的に分析する。

４．研究開発内容

生活系および機器系プラスチックについての循環シナリオの設計のための基盤として，製品別・部門別（家庭および産業）の廃プラスチック排出量と，動脈産業における利用ポテンシャル（再生樹脂や固形燃料など）を分析した。また，先端的な選別・リサイクル技術のフィージビリティを分析することで，循環シナリオの幅を広げた。生活系については経済的効率性の高い回収，機器系については循環利用の制約要因となりうる合成樹脂添加剤のフローを分析することで，循環シナリオの質を担保することを試みた。以上の研究内容を，図０．１に示したサブテーマごとの役割分担のもとで実施した。

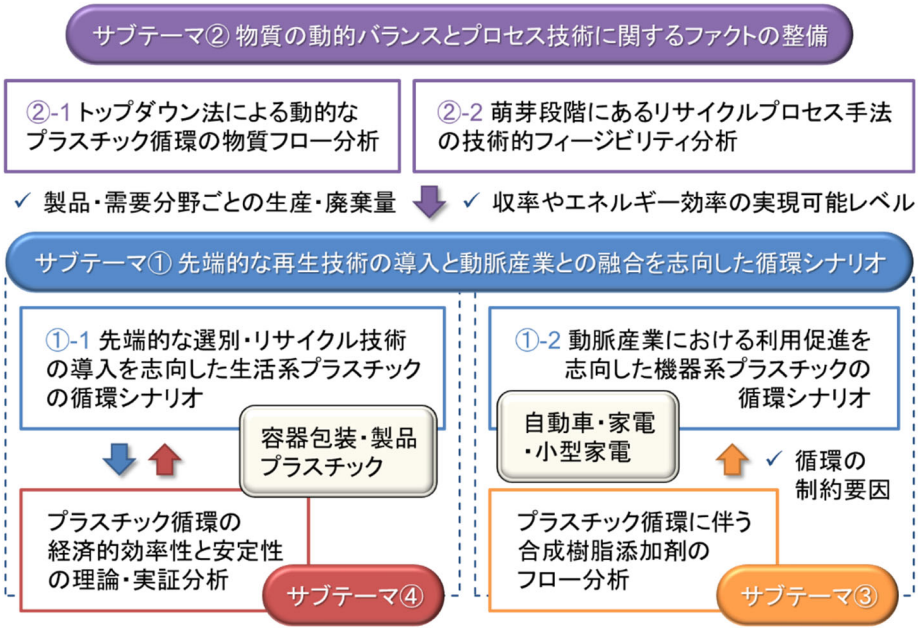


図０．１　　本研究課題におけるサブテーマごとの役割分担

サブテーマ１では，評価基盤の構築に関して，プラスチックの潜在的な排出量および樹脂組成の調査の一環として，産業連関表を用いたトップダウン法による物質フロー分析によって容器包装および製品を含む生活系プラスチックの利用量を経年的に推計し，その結果をもとに浸出モデル法を適用して容器包装および製品プラスチックの樹脂種類別・部門別の排出量を推計した。機器系プラスチックについては，自動車由来の廃プラスチックの循環フローを分析するとともに，それに由来する再生樹脂の利用先としての動脈産業の受入可能性についてボトムアップ的に調査した。さらに，選別技術のフィージビリティ分析として，再商品化事業者の協力を得てプラスチック製容器包装の組成調査を実施した上で，光学自動選別機メーカーの協力も得て，複数の組成パターンと選別パターンの組み合わせについて選別実証試験を実施して選別精度を分析した。

サブテーマ２では，炭素循環を指標としたプラスチック循環の評価の基盤として，産業連関表を用いたトップダウン法により産業全体の製品ごとの炭素フローを分析および可視化した。そのことで，プラスチックの消費量に加えて，動脈産業における廃プラスチックの利用ポテンシャルを推計することができた。また，リサイクル技術のフィージビリティ分析として，先端的な化学原料化技術を中心とした萌芽段階にあるリサイクルプロセスに関する世界的な技術開発動向を調査し，それに基づいて技術的な実現可能性と課題を整理した。さらに，サブテーマ１が実施した選別実証試験における選別物の樹脂組成を再現したサンプルで熱分解試験を実施し，得られた気体・液体・固体生成物の収率や成分分析の結果に基づいて，熱分解法による石油化学原料化のプロセスデータを推計した。

サブテーマ３では，機器系プラスチックに由来する再生樹脂に含有される可能性があり，その循環利用の制約要因となりうる合成樹脂添加剤について基礎情報を収集し，その結果から対象を臭素系難燃剤に絞った。それを含有する廃プラスチックが，どのようなルートで回収され，どのように選別され，どのようなリサイクルによって処理されるか分析することによって，臭素系難燃剤のフローを追跡した。

サブテーマ４では，リサイクル目的の廃棄物回収について，品目や排出源の区分などの制度の変更に伴う市町村や事業者などの経済主体の行動と，その結果として循環システムの経済的な効率性や安定性が受ける影響を，理論と実証の両面から分析した。まず，関連する経済理論の先行研究をレビューするとともに，国内外の実態調査によって現状の法的な枠組みと制度設計における課題を抽出した。その整理を出発点として，現状の制度設計を必ずしも制約とせず，プラスチック循環の高度化に向けた望ましい廃棄物回収の法制度について経済理論の枠組みで検討した。さらに，生活系プラスチックに関する法制度の経済的影響として，容器包装リサイクルの分別収集費用や再商品化費用の決定要因を実証的に分析した。

以上の各サブテーマによる調査・分析結果を基盤として，生活系および機器系プラスチックの循環シナリオのオプションを設計した。サブテーマ１では，物質フロー分析による排出量の推計結果と選別実証試験の分析結果に基づいた，マテリアルリサイクルの高度化と拡大を志向した分別・選別パターンと品質別の回収・選別可能量のシナリオを設計した。サブテーマ２はサブテーマ１と連携して，サーカムスタンス適応型循環シナリオとして，熱分解試験に基づく石油化学原料化のプロセスデータと，本研究課題で推計した生活系プラスチックの市町村別排出量を活用することで，特定地域（仙台製油所の周辺市町村）を対象とした地域循環シナリオを設計した。サブテーマ３はサブテーマ１と連携して，機器系プラスチックの循環シナリオについては，自動車由来の廃プラスチックの水平リサイクルを含むマテリアルリサイクルの可能性についての循環シナリオと，制約要因となる臭素系難燃剤のフローを考慮した家電・小型家電由来の廃プラスチックの循環シナリオについて，それぞれ分析および設計した。

５．研究成果

５－１．成果の概要

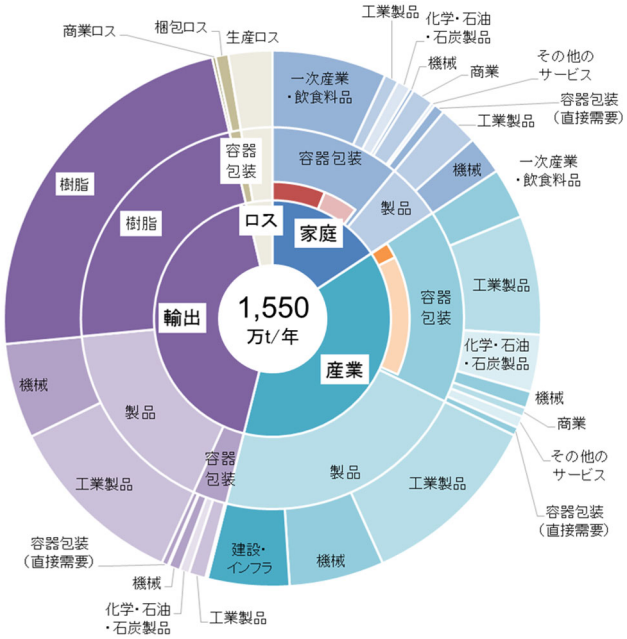
(1) プラスチックの物質フローに関する評価基盤の構築

サブテーマ１では，産業連関表およびプラスチック関連の生産・出荷統計などからサプライチェーンを追跡するトップダウン的な物質フロー分析のアプローチによって，日本国内における容器包装および製品を含む生活系プラスチックの利用量を推計した。容器包装プラスチックに関しては，①どのような樹脂種類および②どのような加工形態の容器包装が，③どういった製品の梱包に利用され，④どういった需要部門で廃棄されるか，⑤2000年から2015年までの経年変化を含めた五次元で物質フロー（利用量および排出量）を分析した。

日本における2015年の国内需要および輸出に伴うプラスチック消費量は，ロスを含めて1,550万tと推計された（図０．２）。ここから輸出を除くと，国内の家庭や産業に流入する（すなわち，国内で利用および排出されると考えられる）プラスチックは835万tと推計された。容器包装プラスチック（ペットボトルを含む）はロスを含めて485万tが利用されており，そのうち容器包装の輸出および輸出製品の梱包に伴う利用量が44万t，家庭および産業部門における直接需要が18万tと推計された。一次産業・飲食料品は，それらの製品に合成樹脂が含まれていないため，製品としてのプラスチックのフローはないが，容器包装としてのフローは無視できない量である。需要部門ごとの利用量は，プラスチック全体では71%を産業が占め，容器包装に限っても家庭は40%であり，産業の方が多いことが明らかとなった。

容器包装の利用者を製品の供給側（販売に伴って利用）と需要側（購入または調達に伴って利用）の両面から見ることで，推計結果はリサイクル目標だけでなく，部門別のリデュース目標の検討にも役立つ。リサイクル目標のためには需要側の視点が中心になり，リデュース目標のためには供給側の視点が中心になる。さらに，過剰包装の拒否などを通して需要側からリデュースに寄与することや，容器包装のリサイクル設計などを通して供給側からリサイクル率の向上に寄与することも検討できる。家庭部門に流入するプラスチックのうち106万tが食品を梱包した容器包装であり，商業（卸売および小売）部門からの流入量は20万tと推計された。また，典型的な持ち帰り食品である「惣菜・寿司・弁当」部門の容器包装のうち家庭への流入量は7万tであり，狭義の食品に利用された容器包装（上

記の106万tから飲料とタバコの容器包装を差し引いた57万t）のうち12%を占める。商業および持ち帰り食品の容器包装については，消費者による使い捨て包装の拒否や小売業者による販売方法の工夫によって削減できる可能性がある。しかし，プラスチック資源循環戦略におけるリデュース目標である25%（輸出を除く国内の需要部門への流入量407万tに対して102万tの削減）と比べると，消費者による努力のみでは目標に遠く及ばないことが分かる。そのため，それ以外の食品については生産者である食品業による容器包装の薄肉化などサプライチェーン全体での努力が欠かせない。食品を梱包した容器包装は，「対個人サービス」部門にも24万tが流入しており，その95%を飲食サービスが占めている。農水産業や飲食料品の部門間のフロー，すなわち食品の生産段階における容器包装の利用量は16万tである。



注）　濃い赤色および濃い橙色の範囲は，それぞれ家庭および産業に流入した容器包装プラスチックのうち，2015年において確認されたリサイクル目的での分別回収量を示す。薄い赤色および薄い橙色の範囲は，それぞれ家庭および産業に製品や原料を梱包して流入した容器包装プラスチックを示しており，潜在的なリサイクル目的での回収可能量と解釈できる。

図０．２　　国内需要および輸出に伴う需要部門別（内円）・用途分類別（中円）・製品別（外円）のプラスチック利用量（2015年）

ここで，2016年2月に実施されたレジ袋の実態調査の結果では，調査期間の1週間における1人当たりのレジ袋の取得枚数は5.8枚であった。この結果にレジ袋1枚当たりの重量を7.2 gとし，これに同月の人口推計（総務省）による全国の成人人口（10,479万人）を乗じると，全国のレジ袋の使用量は年間23万tと推計された。この結果は，物質フロー分析による商業部門から家庭部門への流入量20万tと同程度であり，東京都における1人当たりのレジ袋の使用量が全国平均より多いといった可能性を考えれば，整合的な結果と言うことができる。また，2021年2月に実施したレジ袋の実態調査では，調査期間の1週間における1人当たりのレジ袋の取得枚数（無料配布を含む）は1.7枚であった。同月の成人人口を乗じて全国の使用量を求めると7万tとなり，有料化により全国で年間16万tのレジ袋の使用が削減されたものと推計された。これは，上記のリデュース目標（102万t）の16%に相当する。

産業連関表を用いたトップダウン法による分析としては，サブテーマ２においても，循環シナリオの評価指標として炭素循環に着目し，その基盤として製品ごとの炭素フローと製品中のプラスチック由来の炭素をリサイクルした場合の環境負荷削減効果を可視化した。家計消費された製品別炭素量を横軸，炭素含有量当たりのカーボンフットプリントを縦軸として，製品別にプラスチックリサイクルの最大効果ポテンシャルを直接・間接別に示した（図０．３）。ここでは，製品種別に現行リサイクル法との対応を色分けで示している。この表記方法は，「Iceberg図」と呼称することとした。

直接・間接あわせてIcebergの面積が大きいものがリサイクルの効果が高い製品と言え，リサイクル技術および政策の導入ターゲットと考えることができる。マテリアルリサイクルを主眼に置いた場合，ケミカルリサイクルを主眼に置いた場合に比べてIcebergの面積が大きくなる。これは，プラスチックのカーボンフットプリントが石油化学製品のカーボンフットプリントより大きいためである。それぞれの場合において，Iceberg全体として990万t-CO_2および700万t-CO_2の排出削減が可能である。2011年時点で，マテリアルリサイクルされている廃プラスチックの割合は22%であることから，単純計算で730万t-CO_2の排出削減の可能性が失われ，直接排出分（すなわち炭素含有分）である446万tが排出されることとなる。この結果は，2011年に生産された製品が一度に廃棄された場合という仮定の上での単純計算であるため，実際の廃プラスチックの組成を反映していないが，プラスチックリサイクルの意義を再認識するには十分なものであると考える。また，現行リサイクル法との対応を見ると，約40%のIceberg（灰色の範囲）がリサイクル法によりカバーされていない。従って，これらのIcebergに対応する製品部門へのリサイクル法の整備が求められるとともに，自動車や家電部門のIcebergが比較的大きいことから，容器包装以外に現行リサイクル法でカバーされている製品に関しても，含有されるプラスチックの扱いを明確にするといった対応が必要であることが示唆された。

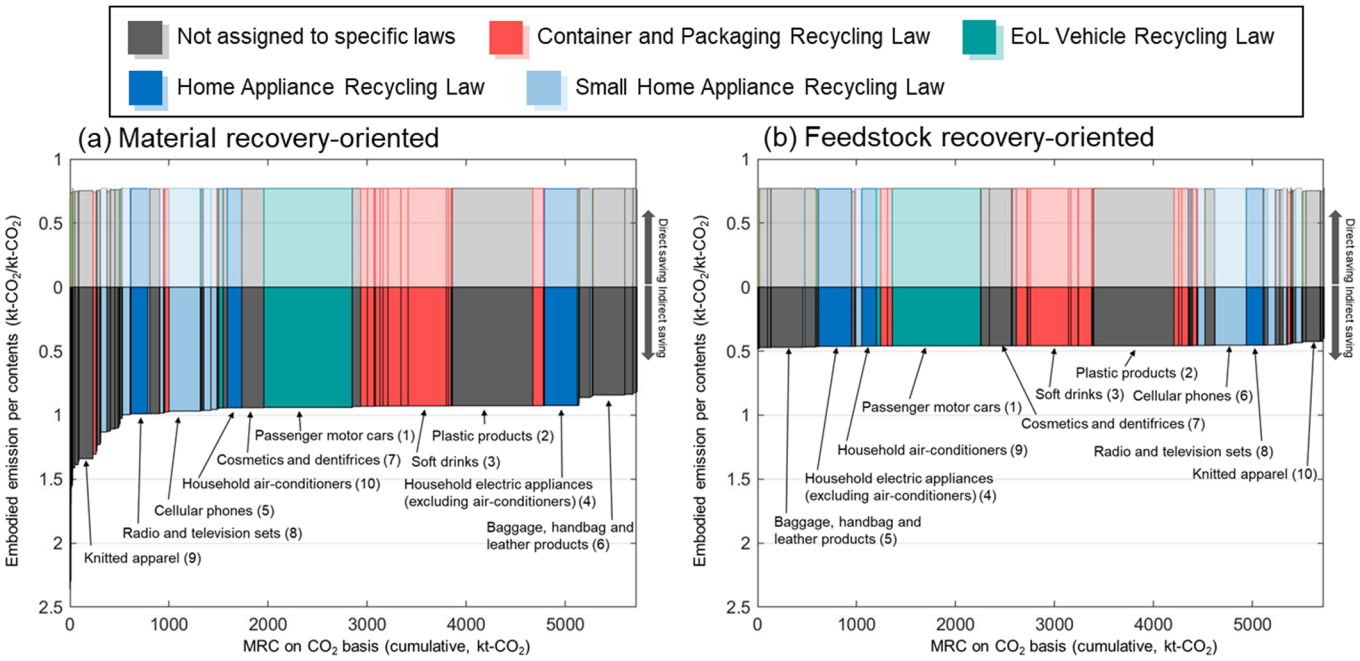


図０．３　　プラスチックリサイクルの直接的（上部）・間接的（下部）効果：(a) マテリアルリサイクル，(b) ケミカルリサイクル

サブテーマ１では，機器系プラスチックの事例として，自動車由来プラスチックのフローのボトムアップ推計も実施した。シンクタンクの報告書やリサイクルに関する実証分析による分析データなどを用いて，その結果を前提にリサイクル目的の回収側のフローを推定した。現状の商業ベースでは，ほぼ行われていないマテリアルリサイクルについて，そのポテンシャルの推計を実施した。

分析結果から，図０．４のようなフローであることが確認された。ヒアリングからの推計が多いこともあり，数値の不確実性は高いものの，現状で安定的にリサイクルへ回るためには部品単位での解体かポストシュレッダーでの分離･選別技術の応用が必要なことが分かるとともに，その量は極めて小さい。部品の取り外しは基本的にはリユース目的であることを思えば，プレシュレッダーでの精緻解体からのリサイクルを進めるためには，部品リユースに近いレベルの経済性が必要になると考えられる。逆に，ポストシュレッダーについても多くのPPがリサイクルされていない（ただし，エネルギー回収はリサイクルに含めていない）ことが見られ，低費用で大規模な分離･選別が可能になるのであれば，こちらも大きなポテンシャルを含んでいると言える。

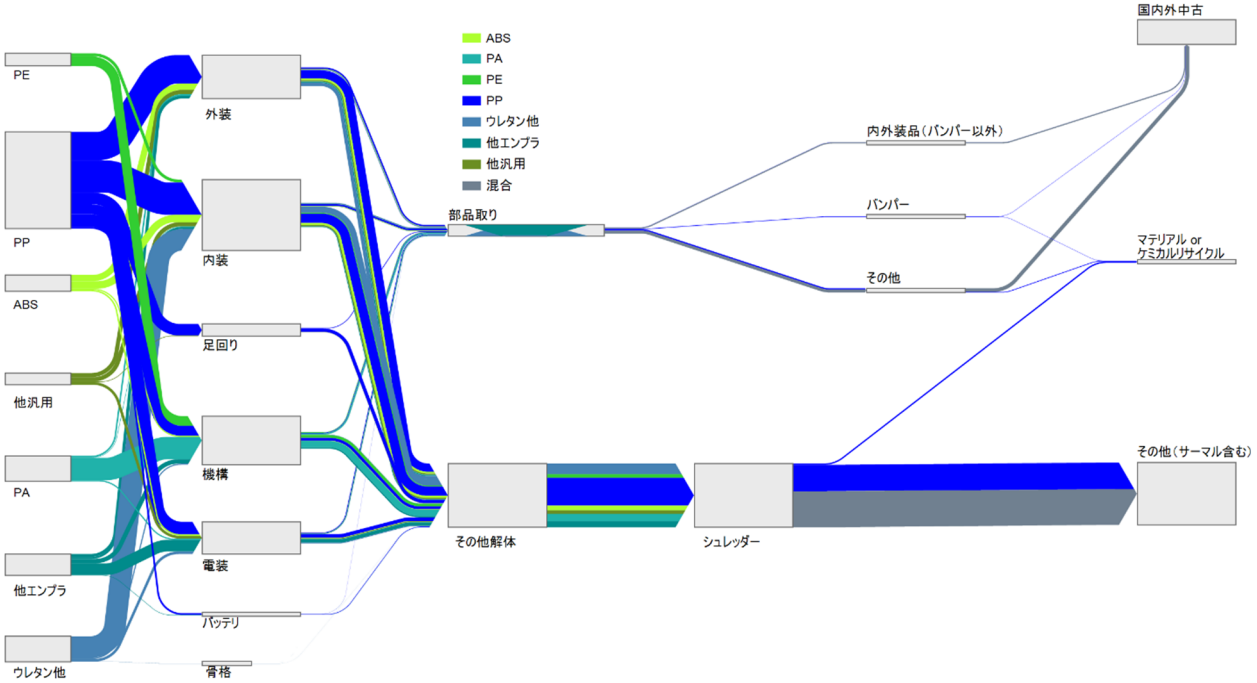


図０．４　　現状の使用済自動車に含有されるプラスチックのマテリアルフロー

ポテンシャルの推計については，現状（段階1），事前の取り外しの促進（段階2），ASRからのPP，ABS，PE回収も実施（段階3），その他の樹脂の回収も実施という4段階を想定して分析を行った。段階4における，その他の樹脂類がすべて回収されるという仮定には無理があることから，段階2までしか実現できないとして9.4万t，さらに段階3の「その他」を除いた3種類のプラスチックのみが回収できたとして22万t程度が上限だと考えられる。つまり，自動車リサイクルからのプラスチック回収を推し進めた際に，かなり野心的なシナリオであるとしても，水平リサイクルによる供給能力は需要側の推計結果81.8万tの27%程度でしかないと言える。これは，自動車業界が水平リサイクル由来のプラスチックだけを重点的に使う上での大きな懸念だと主張している，量的な安定供給の懸念に直結する。

(2) 再生技術のフィージビリティに関する評価基盤の構築

サブテーマ１では，これまでに国内でも導入実績が多くある近赤外線による3種選別の光学自動選別機を用いて，この選別機を導入しているプラスチック製容器包装の材料リサイクル事業者および光学自動選別機メーカーの協力を得て，容器包装プラスチックの選別精度の実証試験を実施した。まず，サンプルとした長野市のプラスチック製容器包装の分別回収物160 kg（ベール半個）の組成を，樹脂種類・形状・色による30分類（プラスチック28分類と小破片および樹脂以外の異物）で調査した。この28分類に従って，一部の市町村による特徴的な収集区分や，消費者が見分けて分別できる可能性，予想される選別機の選別精度（フィルムは他の形状よりも劣る可能性があるなど）を考慮しつつ，複数の組成パターンを設定した。それぞれの組成パターンについて，プラスチック製容器包装のサンプルから対象とする組成分類のみを抽出して，選別機への投入物とした。都度，1台の選別機の設定を変更し，バッチ式に稼働させることで，図０．５に示した選別パターンを再現した。選別機のプログラム設定および選別順序は，上記の事業者の実際のプロセスに従った。図１．２に示した6種類の樹脂の選別物および残渣の組成を上記の28分類で調べることで，樹脂種類や形状・色ごとの選別割合と選別物の純度の両面から，組成パターンごとに選別精度を分析した。

各組成パターンの選別試験の結果から，まず形状・色ごとの回収率（それぞれの投入物のうち意図した樹脂種類に選別された割合）を分析した。特定の形状・色の容器包装は樹脂種類によらず回収率が高めである一方，全体的に低かった形状の容器包装もあった。また，黒色の廃プラスチックが近赤外線による光学自動選別機（少なくとも今回の選別設定）では検知しにくいことや，ラップが付着し

たままの状態で投入された発泡トレイの一部がPVCの選別物に混入する（ラップのPVCやPVDCが検知されたものと考えられる）といった阻害要因が明らかになった。

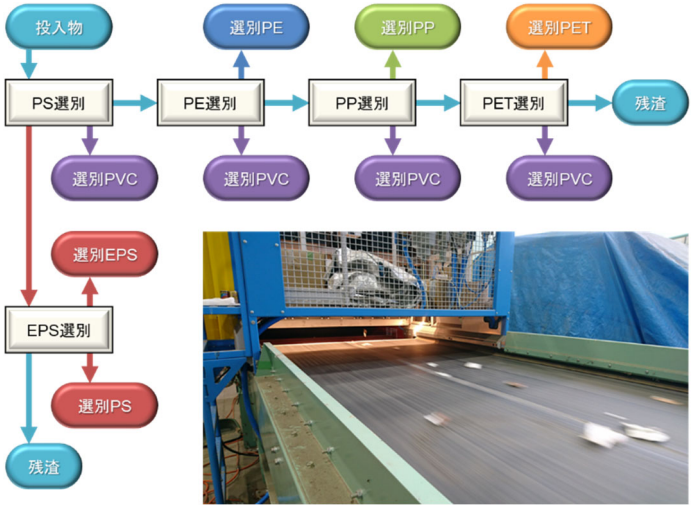


図０．５　　選別実証試験における選別パターンと稼働中の光学自動選別機

サブテーマ２では，先端的な化学原料化技術を中心として，リサイクルプロセスに関する世界的な研究開発動向を調査した。特に，熱分解法および加溶媒分解法（モノマー回収）によるフィードストックリサイクルを対象として，世界の学術論文をベースに調査し，調査結果を整理した。熱分解法によるポリオレフィン（PEやPP）の化学原料化・燃料化に関する研究が多勢を占めたことから，これらの研究開発動向を集中的に検討した。調査結果から，熱分解の収率や生成物は，投入される廃プラスチックの樹脂組成に依存することが裏付けられた。

次に，混合プラスチックの化学組成分析法を確立し，回収した廃プラスチックがどのような性状のものであるか全体像を理解することができ，廃プラスチック性状に応じたシナリオ設計の際に有効であることを確認した。その上で，サブテーマ１で実施した選別実証試験の結果から，熱分解による液体生成物の収率を改善する可能性があり，かつ光学自動選別機によってプラスチック製容器包装から現実的に得られる選別物の樹脂組成（複数パターン）を特定した。次に，選別なしのプラスチック製容器包装の樹脂組成と，それと材料リサイクルのプロセスデータから推計される比重選別の選別物の樹脂組成を特定した。それらの組成パターンをプラスチック試料（粉体または粒状のPE，PP，PS，PETおよびPVC試薬）を用いて再現し，それらの熱分解試験を実施した。気体，液体および固体生成物を回収し，試料の組成パターンごとの収率を求めた。さらに，気体および液体生成物をガスクロマトグラフィーにより評価した。その結果，いずれの組成パターンのサンプルからも，液体生成物を主とする熱分解生成物が得られた。一部のサンプルでは一定量の固体生成物が確認された一方で，他の組成パターンのサンプルにおいては，固体生成物の収率は非常に小さくなった。

(3) <u>プラスチック循環の制約要因に関する評価基盤の構築</u>

サブテーマ３では，国内で発生する使用済電気電子機器に由来するプラスチックの処理・リサイクルフローと，それに伴う含有臭素系難燃剤のフローを推計した。2017年度の推計結果では，国内で発生する電気電子機器由来プラスチックの多くは国内で混合プラスチックや破砕残渣として回収されていることが分かった。ただし，国内でマテリアルリサイクルに向けられるものは総発生量の10%強であり，多くは熱回収・焼却処理や混合プラスチックとしての輸出に向けられていると推計された。

電気電子機器由来プラスチックの選別処理における臭素系難燃剤の分配挙動を実験的データから明らかにし，それに基づいて臭素系難燃剤のフローを推計したところ，2017年度において国内のマテリアルリサイクルへ流入した臭素系難燃剤は総量の1%未満であると考えられた。これは，臭素系難燃剤含有プラスチックの多くが比重選別プロセスにおいて重比重プラスチックとして除去されることによるものであり，現状のプロセスにおいても臭素系難燃剤は結果的に循環のフローから排除され，

適正管理に繋がっていると考えられた。他方，国内で発生する電気電子機器由来プラスチックに含まれる臭素系難燃剤は50%程度が海外輸出されたと推計されたが，近年の中国の廃プラスチック輸入禁止や日本の雑品スクラップ輸出規制強化によって国内での処理・循環に回るようになり，結果的に国内での熱回収・焼却による臭素系難燃剤の無害化が促進されたものと考えられた（図０．６）。

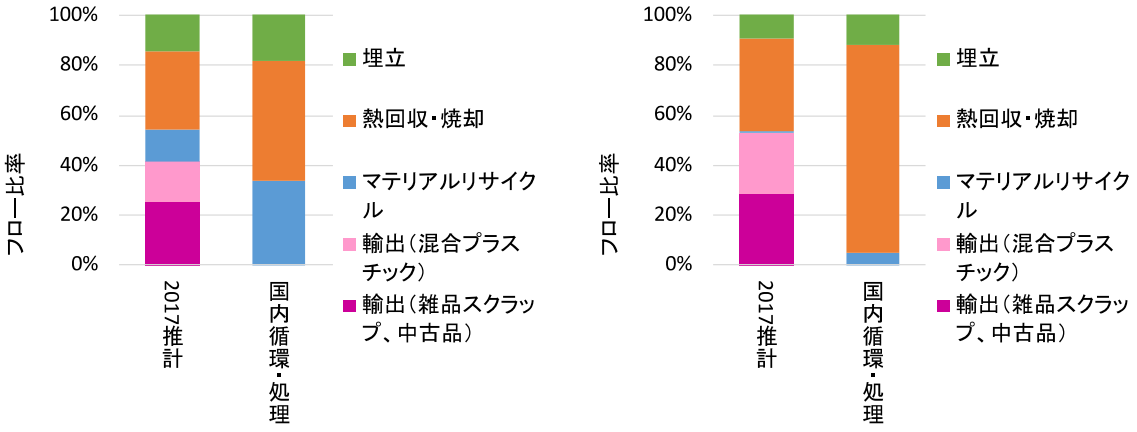
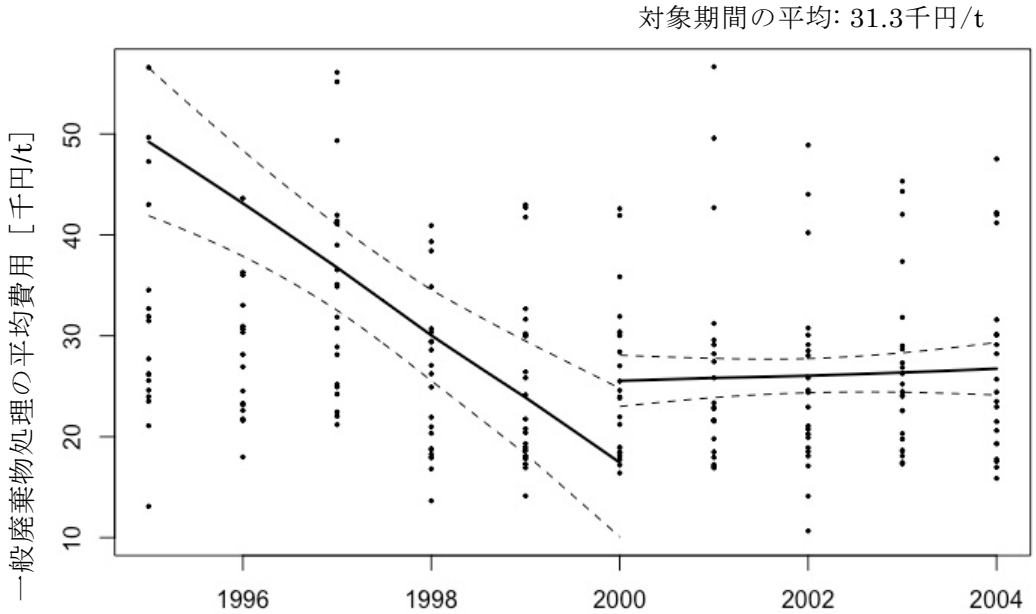


図０．６　電気電子機器由来プラスチックの国内処理・循環の増加を想定した臭素系難燃剤の最終仕向先別フロー比率のシナリオ分析の結果（左：プラスチック，右：臭素系難燃剤）

サブテーマ４では，収集する品目や排出源の区分などリサイクル制度を変更した場合に，市町村や再商品化事業者などの経済主体が受ける影響を，経済理論と実証の両面から分析することを目的とした。はじめに理論的な視点から現状の法制度が製品別となっていることのメリット・デメリットを整理した。結論として，既存制度は確実な回収を進めることに貢献しているものの，マテリアルフローが分断され横断的な意思決定がうまくコーディネートされていない可能性があることを指摘した。既存の制度の良い部分をうまく生かしながら，最終処分量をベンチマークとした意思決定が効率性を高めると考えられる。



Estimates:

	Bandwidth	Observations	Estimate	Std. Error	z value
LATE	6.266	222	8.098	3.130	2.5871
Half-BW	3.133	157	3.456	3.845	0.8988
Double-BW	12.531	222	7.930	3.500	2.2658

図０．７　容器包装リサイクル法の導入による費用増加の分析結果

経済的影響の定量的な分析では，容器包装リサイクル法の2000年改正によって分別が増加したことの効果をEBPMの方法論で分析した。図０．７は，因果推論の一つであるRDD（回帰不連続デザイン）による推定結果を示したものである。対象期間内での平均費用の単純平均値は，31.3千円/tである。図０．７の下方に示した推定結果を示す表でLATEのestimateをみると，約8.1千円/tとなっている。ただし，表に掲載していないが容器包装リサイクル法を実施していない自治体だけを集めて実施したRDDにおいても6.1千円/tの費用増加が有意に観察された。この二つの分析より，少なくとも自治体の平均的な費用を6.4%増加させたと考えることができ，容器包装リサイクル法の導入は自治体の費用に対して，かなりのインパクトをもたらした政策であることが明らかになった。

ここで費用と呼んでいるものは環境省「一般廃棄物処理実態調査」に掲載されている情報であり，自治体の負担である。これは容器包装リサイクルの一次回収部分を示しているに過ぎないが，今後，プラスチックの回収に対して新たな分別基準を設けるとなれば，相応のインセンティブが回収責任を持つ主体に提供される必要があると言えるだろう。また，新たな回収システムのもたらすメリットが，そのインセンティブを提供する負担に見合うものであるかも，きちんと検討する必要がある。

(4) 生活系プラスチックの循環シナリオのオプションの提示

本研究課題の達成目標としていた循環シナリオのオプションの提示について，ここでは生活系プラスチックの循環シナリオについて述べる。機器系プラスチックについては，(1)で自動車由来プラスチックの水平リサイクルの可能性は，(3)で臭素系難燃剤を含有した電子電気機器由来プラスチックの国内循環シナリオについて，それらの評価基盤の構築（フロー推計）とともに述べた。生活系プラスチックについては，特にプラスチック製容器包装を対象とした循環シナリオのオプションとして，マテリアルリサイクルの高度化と拡大を志向した回収・選別シナリオと，熱分解技術によるフィードストックを核とした地域循環シナリオを設計した。前者はサブテーマ１，後者はサブテーマ２が中心となって検討したが，いずれもサブテーマ１が構築した物質フローと選別技術の分析結果に基づいており，サブテーマ横断的に検討したものである。

マテリアルリサイクル志向の回収・選別シナリオについては，まずプラスチック製容器包装の分別パターンおよび選別パターンを設定した。分別パターンは，そのまま選別実証試験における組成パターンを当てはめた。また，比重選別のみ選別パターン1，図０．５のプロセスのうちEPS選別以外の全ての光学選別を実施する選別パターン2，PSおよびPET選別のみの選別パターン3を設定した。選別パターン2および3については，光学選別の残渣から比重選別によってオレフィン系の樹脂を回収することも想定した。プラスチック製容器包装の回収可能量（最大ポテンシャル）および樹脂種類については，物質フロー分析によって推計された家庭からの排出量（113万t）および樹脂組成（図０．２参照）を適用した。ただし，樹脂種類ごとの形状・色については，選別実証試験に当たって実施した分別回収物の組成調査の結果を利用した。その上で，以上の分別パターンと選別パターンの組み合わせ15パターンについて，選別精度の分析結果から品質別の回収・選別可能量を算定した。

この結果から，現行の分別基準適合物と同様に全ての種類の容器包装を分別収集の対象とし，光学選別と比重選別を駆使すれば，選別物の大半は低品質（純度90%未満）であるものの，最大ポテンシャルで100万t程度の選別物が得られることが分かった。現行の分別区分では，仮に家庭から排出される全てのプラスチック製容器包装（113万t）が分別収集されたとしても，比重選別のみで得られるオレフィン系樹脂（PO）の選別物が最大でも60万t程度である。それと比べると，光学選別はマテリアルリサイクルの量的な拡大に貢献する可能性があると言える。一方，特定の種類の容器包装のみを分別収集する組成パターンでは高品質（純度95%以上）の選別物が得られることから，マテリアルリサイクルの質的な向上への貢献の可能性も示された。すなわち，消費者も見分けられるような形状・色による収集区分でも，選別技術との組み合わせによって高品質なマテリアルリサイクルが実現できる可能性が示された。ただし，選別物の質の向上と量の拡大の間にはトレードオフの関係があるため，マテリアルリサイクルの推進に当たっては「量」を志向するか「質」を志向するかの選択が必要であることも示唆された。

熱分解技術を核とした地域循環シナリオについては，製油所での廃プラスチックの油化（熱分解）および石油化学原料化の可能性を念頭に（油化生成物を原油とともに常圧蒸留に投入することを想定する），製油所を中心とするプラスチック地域循環において油化に求められる要件解析ツールを開発した。市町村のプラスチック製容器包装の保管施設をGoogle Map APIを用いてマッピングするとともに，事例研究の対象とする製油所（仙台製油所）から道のり距離50 kmおよび100 km圏内に含まれる保管施設から廃プラスチックを輸送する地域循環のシナリオを設計した。さらに，サブテーマ２で実施した熱分解試験における液体生成物の収率の結果に応じて，熱分解試験で想定した選別物の組成ごとにGHG排出量の観点からシナリオを評価した。

仙台製油所が立地する宮城県内および近隣の岩手県，福島県の市町村には，それぞれ39，33，59か所のプラスチック製容器包装の保管施設が存在する。これらのうち仙台製油所から道のり距離100 km圏内に立地する保管施設は，宮城県および福島県の15か所が該当した。組成パターン別の熱分解試験の結果より，選別パターンによって得られる生成物の収率および成分が異なることから，事前選別を実施する場所（保管施設または製油所）と，その選別パターンによって8シナリオを作成した。

油化生成物を熱源化する割合と，全焼却ケース（回収可能な廃プラスチックを全て各保管施設の最寄りの焼却施設で燃焼し，発電分を控除）と同等のCO_2排出量となるときに許容される外部燃料の投入量について，Break-even解析を適用した。その結果，少なくとも1～3割程度の油化生成物を後段の常圧蒸留に投入しなければ，CO_2排出を全焼却ケースよりも削減できないことが分かる。油化生成物を燃料化しない場合，一部のシナリオを除けば，約30,000 MJ/t程度の外部熱投入が許容されることが示された。札幌で行われていた熱分解式の油化プロセスでは，約7,000 MJ/tの燃料が投入されていたことから，各シナリオにおいて同程度の燃料投入で運転することができれば，十分に排出削減が見込まれることが分かった。各シナリオにおいて生成物の燃料化率0のときのCO_2排出原単位は，それぞれ2.27 kg-CO2/kg-廃プラスチックとなる。燃料化率が大きくなるにつれて，外部熱源の貢献部分が内部熱源，すなわち油化生成物の燃料利用分の貢献に置き換わる。同時に，ナフサ輸入，原油輸入，ガス製造の控除分が減少する。それ以外の要因については，変数の値に関わらず一定となるため，排出削減のためには外部熱源の使用量を削減することと，油化生成物の燃料化率を低く保つことが求められることが示唆された。

５－２．環境政策等への貢献

＜行政等が既に活用した成果＞

特に記載すべき事項はない。

＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

まず，物質フロー分析の推計結果から，プラスチック資源循環戦略のマイルストーン達成に向けた具体的な道筋を示した（政策決定者向けサマリーの1-1参照）。容器包装プラスチックの60%をリユースまたはリサイクルというマイルストーンに対して，どういった排出源から，どういった種類の容器包装を回収しなければいけないか検討した。リサイクル率については，リサイクル目的で回収される容器包装廃棄物のうちプラスチックの純量を分子として，2015年を基準とすれば国内の需要部門への流入量446万tの60%として，約250万tの分別回収を具体的な目標とできる。ペットボトルのリサイクル率を95%（56万t），それ以外の家庭から排出される容器包装プラスチックについては80%（91万t）の回収を見込めば，産業部門から排出されるペットボトル以外の容器包装で約100万tの分別回収が求められることになる。容器包装の流入量が多い産業部門として「飲食サービス」や「飲食料品」があるが，これらの部門は食品リサイクル法の対象とされていることから，リサイクル目的の分別回収の実行可能性は他の部門よりも高いと考えられる。仮に，これらの部門に流入する全ての容器包装プラスチックを回収すると，それぞれ26万tおよび23万tになる。ただし，こうした排出量が多い特定の産業部門のみからの回収だけでは目標達成には至らない。例えば，産業部門間で利用されているLDPE製

の軟質フィルムといった特定品目の部門横断的な回収も含め，あらゆる産業部門を巻き込んだ容器包装プラスチックの回収戦略が欠かせないことが示された。

また，光学選別の利用によって得られる選別物の量および質の両面からのポテンシャルや，質の向上のために，どういった容器包装を分別収集の対象にするべきかを示した。具体的には，現行の分別基準適合物と同様に全ての種類の容器包装を分別収集の対象とし，光学選別と比重選別を駆使すれば，選別物の大半は低品質（純度90%未満）であるものの，最大ポテンシャルで100万t程度の選別物が得られることが分かった。比重選別のみで得られる選別物が最大でも60万t程度であることと比べると，光学選別はマテリアルリサイクルの量的な拡大に貢献する可能性があると言える。一方，分別収集の対象を光学選別の精度が高い透明硬質系の容器包装（全体の20%程度）に絞れば，高品質（純度95%以上）の選別物が得られることから，マテリアルリサイクルの質的な向上への貢献の可能性も示された。このように，消費者も見分けられるような形状・色による収集区分でも，選別技術との組み合わせによって高品質なマテリアルリサイクルが実現できる可能性が示されたことは，政策的にも大きな意味を持つ結果と考えられる。同時に，選別物の質の向上と量の拡大の間にはトレードオフの関係があるため，マテリアルリサイクルの推進に当たっては「量」を志向するか「質」を志向するかの選択が必要であることも明らかになった。

選別実証試験および熱分解試験という技術的な分析を，具体的な地域循環シナリオに落とし込んだことも，政策的に意味を持つ結果であると考えられる。まず，研究開発動向の調査結果からも，オレフィン系の樹脂（PEおよびPP）やPSが液体生成物（炭化水素油）に分解されるのに対して，PETやPVCはプロセスの阻害要因になる可能性が指摘されるなど，熱分解技術にも適した樹脂種類と適していない樹脂種類があることが示唆された。このことから，光学選別によって熱分解技術に適した樹脂種類の割合を高め，それを熱分解プロセスに投入するという技術の組み合わせによって，より効率的なフィードストックリサイクルが実現できるという仮説が着想された。実際に，4パターンの樹脂組成の試料を熱分解試験に供した結果，いずれのサンプルからも液体成分を主とする熱分解生成物が得られたものの，プラスチック製容器包装を選別せずに投入する場合を想定したパターンでは，重量比で約18%の固体生成物も確認された。一方，PETやPVCを選別除去した他のサンプルの液体生成物の収率は，いずれも90%を超え，これらのサンプルから得られた液体生成物は石油原料を代替する炭化水素油となることも確認されたことから，着想された仮説は妥当であったものと考えられる。

一方，自動車由来プラスチックについては，どのくらい野心的なシナリオに基づいたとしても，廃自動車由来の再生樹脂（すなわち水平リサイクル）のみでは自動車産業の樹脂需要を満たせない（27%程度）ことが明らかになった。一方，自動車産業と静脈産業の協力により，リサイクルによる再生樹脂の用途開発が進んでいることなども明らかにした。

プラスチック循環の制約要因となりうる臭素系難燃剤についての研究成果からは，電気電子機器由来の混合プラスチックの湿式比重選別において，臭素系難燃剤の大部分は結果的に除去されており，POPs含有廃棄物の該非判定を選別前と選別後のどちらで行うかによって，循環できるプラスチックやその量が変わることが分かった。さらに，シナリオ分析の結果からは，種々の廃プラスチックや雑品スクラップの輸出入規制強化が，電気電子機器由来プラスチックの国内処理・循環増加を通じ，結果的に国内での臭素系難燃剤の適正管理（熱回収・焼却による無害化）の促進にも寄与することが示されたことは，国内循環の正当性を示す一助にもなる。

さらに，分別回収の範囲の拡大が，回収総量を増加させる一方で，直接的な費用のみでも無視できない増加があることが，過去の事例に基づく実証分析から明らかになった。2021年1月に閣議決定された「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律案」に含まれたプラスチック資源の効率的な回収・リサイクルの促進も含め，分別回収を拡大するために新たな分別基準を設けるのであれば，相応の経済的なインセンティブを設ける必要があることが分かった。分析結果は，例えば容器包装リサイクル法のルートなど，既存の回収システムを活用することの経済的な合理性を示唆しているとも言える。

５－３．研究目標の達成状況

本研究課題では，プラスチック循環の評価基盤の構築という研究目的を達成する過程において，サブテーマ１からは，産業連関表を用いた物質フロー分析によってプラスチックの利用実態を解明した研究がPNAS（米国科学アカデミー紀要）誌［IF：9.412］に掲載され，サブテーマ２からは，トップダウン法によって炭素フローとプラスチックリサイクルの環境負荷削減効果をIceberg図として可視化した研究成果がResources, Conservation and Recycling誌［IF：8.086］に掲載されたるなど，学術的にも質の高い成果をあげた。

研究目標としていた評価基盤の構築のうち物質フロー分析については，上記のサブテーマ１におけるプラスチックの物質フロー分析やサブテーマ２における炭素フローの可視化といったトップダウン法に加え，サブテーマ１における自動車由来プラスチックのボトムアップ推計，サブテーマ３における電気電子機器由来プラスチックのフロー推計によって，当初の研究目標を上回る成果が得られた。

再生技術のフィージビリティ分析についても，サブテーマ１では光学自動選別機の実機を用いて容器包装プラスチックの選別実証試験を実施し，サブテーマ２では先端的な化学原料化技術などの世界的な研究開発動向を調査し，それに基づいて技術的な実現可能性と課題を整理したことで，当初の研究目標は十分に達成された。さらに，混合プラスチックに対して樹脂や添加剤の種類を同定する分析手法を確立した上で，熱分解試験を実施することで生成物の収率および成分を分析することで熱分解法のプロセスデータの推計まで繋げており，研究目標を上回る成果が得られたと言える。

サブテーマ３が担当した合成樹脂添加剤のフロー分析についても，電気電子機器由来プラスチックの処理・リサイクルに伴う臭素系難燃剤のフローを推計する中で，選別プロセスにおいて副次的に臭素系難燃剤が循環のフローから排除されている実態を明らかにした。さらに，近年の中国による廃プラスチック輸入禁止やバーゼル条約による混合プラスチックの輸出規制強化などを受けて，使用済電気電子機器の輸出減少と国内処理・循環増加を考慮したシナリオ分析によって，国内循環において制約・課題となる要素を考察するなど，当初の研究目標を十分に達成した。

サブテーマ４が担当した回収制度の理論・実証分析については，生活系プラスチックが法制度等によって区切られていることの経済的影響を定量的に分析するという研究目標に対して，容器包装リサイクル法の制度変化のタイミングで，その費用変化について回帰不連続デザインを用いて分析した。世界的潮流となっているEBPMの方法論で日本の廃棄物・リサイクル制度を分析した結果は限られており，今後の政策立案に資する一定の根拠を提供できたと考える。

さらに，プラスチックの循環シナリオのオプションを提示することも，本研究課題の研究目標であった。特に，評価基盤として構築した物質フロー分析と選別実証試験の結果は，サブテーマ１におけるマテリアルリサイクルの高度化と拡大を志向した回収・選別シナリオと，サブテーマ２における熱分解技術を核とした地域循環シナリオに反映された。光学選別と熱分解という先端的な技術について，選別実証試験や熱分解試験という裏付けを持って循環シナリオを設計したことは，そのこと自体が大きな研究成果であると同時に，本研究課題で構築した評価基盤の有用性を示すものでもある。サブテーマ間が具体的なデータ共有や共同作業という形で有機的に連携したことも，研究体制のマネジメントという観点で評価されるべきものと考えている。

また，プラスチックの資源循環政策に直接的に活用できるような分析結果が多く得られたことも，本研究課題の大きな成果である。具体的な内容については，＜行政等が活用することが見込まれる成果＞および政策決定者向けサマリーに記載した通りである。

６．研究成果の発表状況

６－１．査読付き論文

＜件数＞

9件

＜主な査読付き論文＞

1) 河合萌子，中谷隼，栗栖聖，森口祐一：廃棄物資源循環学会論文誌30，80-94（2019）
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) Y. Shigetomi, H. Ohno, A. Chapman, H. Fujii, K. Nansai, Y. Fukushima: Environmental Science & Technology 53(24), 14123-14133 (2019) [IF: 7.864]
Clarifying demographic impacts on embodied and materially retained carbon towards climate change mitigation

3) J. Nakatani, T. Maruyama, Y. Moriguchi: PNAS 117(3), 19844-19853 (2020) [IF: 9.412]
Revealing the intersectoral material flow of plastic containers and packaging in Japan

4) J. Lu, S. Borjigin, S. Kumagai, T. Kameda, Y. Saito, Y. Fukushima, T. Yoshioka: Journal of Material Cycles and Waste Management 22, 1620-1629 (2020) [IF: 1.974]
Practical dehalogenation of automobile shredder residue in NaOH/ethylene glycol with an up-scale ball mill reactor

5) S. Kumagai, J. Nakatani, Y. Saito, Y. Fukushima, T. Yoshioka: Journal of the Japan Petroleum Institute 63(6), 345-364 (2020) [IF: 0.890]
Latest trends and challenges in feedstock recycling of polyolefinic plastics

6) H. Ohno, Y. Shigetomi, A. Chapman, Y. Fukushima: Resources, Conservation and Recycling 166, 105263 (2021) [IF: 8.086]
Detailing the economy-wide carbon emission reduction potential of post-consumer recycling

６－２．知的財産権

特に記載すべき事項はない。

６－３．その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	1件
その他誌上発表（査読なし）	6件
口頭発表（学会等）	36件
「国民との科学・技術対話」の実施	2件
マスコミ等への公表・報道等	5件
本研究に関連する受賞	2件

７．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

８．研究者略歴

研究代表者
中谷 隼
東京大学工学部 卒業，博士（工学）、現在 東京大学大学院工学系研究科 講師

研究分担者
1) 村上 進亮
東京大学工学部 卒業，博士（工学）、現在 東京大学大学院工学系研究科 准教授

2) 福島 康裕

東京大学工学部 卒業，博士（工学)、現在 東北大学大学院工学研究科 教授

3) 吉岡 敏明

東北大学工学部 卒業，博士（工学)、現在 東北大学大学院環境科学研究科 教授

4) 小口 正弘

横浜国立大学工学部 卒業，博士（工学)、現在 国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター 主任研究員

5) 山本 雅資

筑波大学第二学群 卒業，博士（経済学)、現在 富山大学研究推進機構 極東地域研究センター 教授

Ⅱ．成果の詳細

Ⅱ－１　先端的な再生技術の導入と動脈産業との融合を志向した循環シナリオ

国立大学法人 東京大学
大学院工学系研究科 都市工学専攻　　中谷 隼、森口 祐一
大学院工学系研究科 システム創成学専攻　　村上 進亮

［要旨］

産業連関表を用いた物質フロー分析によって，日本国内における容器包装および製品を含む生活系プラスチックの利用量を推計した。2015年には，国内の家庭や産業に流入するプラスチックは835万tと推計された。家庭部門に流入するプラスチックのうち106万tが食品を梱包した容器包装であり，商業部門からの流入量は20万tと推計された。容器包装の利用を製品の供給側と需要側の両面から見ることで，リサイクル目標およびリデュース目標の検討に役立つ分析結果が得られた。また，近赤外線による3種選別の光学自動選別機を用いて，容器包装プラスチックの選別精度の実証試験を実施した。ここでは，投入物について複数の組成パターンを設定した。その結果，分別収集の対象とする容器包装プラスチックの種類を形状･色によって絞ることでも,純度と回収率の両面から選別精度を向上できることが示された。以上の物質フロー分析と選別実証試験の結果に基づいて，マテリアルリサイクルの高度化と拡大を志向したプラスチック製容器包装の回収・選別シナリオを設計した。光学選別と比重選別を駆使すれば，最大100万t程度の選別物が得られる一方，分別収集の対象を透明硬質系の容器包装に絞れば，高品質の選別物が得られることも分かった。また，自動車由来プラスチックについては，ボトムアップ推計に基づいて段階別の回収ポテンシャルを推計した。その結果，野心的に自動車リサイクルからのプラスチック回収を推進するシナリオでも，水平リサイクルによる供給能力は需要量の27%程度と推計された。

１．研究開発目的

本サブテーマでは，生活系および機器系プラスチックについての評価基盤として，潜在的な排出量や樹脂組成を含む物質フローの分析，再生樹脂の利用先としての動脈産業の受入可能性の調査，高度選別施設への導入が想定される光学自動選別機の選別精度の実証を目的とした。特に，生活系プラスチックはサブテーマ２および４，機器系プラスチックはサブテーマ３との連携によって分析を進めた。

２．研究目標

本サブテーマおよび他のサブテーマで構築した評価基盤をもとに，生活系プラスチックについては収集区分の変更や高度選別施設の導入を想定して，機器系（自動車由来）プラスチックについては制約要因として再生樹脂の受入可能性を考慮して，それぞれ動脈産業との融合を志向した実現可能性のある循環シナリオのオプションを提示することを達成目標とした。

３．研究開発内容

３－１．物質フロー分析による生活系プラスチックの利用量および排出量と樹脂組成の推計

産業連関表およびプラスチック関連の生産・出荷統計などからサプライチェーンを追跡するトップダウン的な物質フロー分析のアプローチによって，日本国内における容器包装および製品を含む生活系プラスチックの利用量を推計した。容器包装プラスチックに関しては，①どのような樹脂種類および②どのような加工形態の容器包装が，③どういった製品の梱包に利用され，④どういった需要部門で廃棄されるか，⑤2000年から2015年までの経年変化を含めた五次元で物質フロー（利用量および排出量）を分析した[1)]。製品プラスチックに関しては，2015年までに，①どのような樹脂種類および②どのような加

工形態の製品が，③どういった需要部門で利用され，毎年どれだけの割合が廃棄されるか分析することで，2015年における排出量を三次元で推計した。

環境研究総合推進費1-1601から引き継ぐ形で本研究課題において構築した物質フロー分析のモデルでは，各年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について，樹脂 p，用途分類 h（容器包装：1，製品：0），製品 j および需要部門 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，特定の加工形態が容器包装に利用されると見なすことで特定される。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，その部門で製造される製品の構成要素（原料）にはならないプラスチックの蓄積や，それに伴う容器包装プラスチックの流入も考慮することから，需要部門には産業連関表における最終需要部門に加えて内生部門も含まれる。製品 j としては，上記の需要部門に産出されるプラスチックを構成要素とする最終製品に加えて，容器包装プラスチックに梱包された製品については，プラスチックを構成要素としない製品やサービス，内生部門へ投入される原料が考慮される。

データ源は，日本の2000・2005・2011・2015年の産業連関表を基礎として，生産動態統計（経済産業省）やプラスチックおよび包装産業による自主的な生産・出荷統計（日本包装技術協会，日本ポリオレフィンフィルム工業組合など）を活用して，合成樹脂およびプラスチック製品の部門を分割した。また，輸出入量については貿易統計（財務省）も活用した。2011年の産業連関表の基本分類（列部門）に従って，各年の産業連関表を共通の420部門（内生部門）に拡張した。これらのうち10部門から樹脂 p が産出され，プラスチックを加工する13部門からの産出（13種類の加工形態）のうち6種類が容器包装（$h = 1$）と見なされる。また，上記の420部門から産出される製品 j のうち，プラスチックを構成要素とする製品は139部門から産出される。また，需要部門 k は上記の内生部門に最終需要部門（消費支出11部門，固定資本形成2部門，輸出3部門）を合わせた436部門である。

本研究における物質フローのモデルは，WIO-MFA[2-4] と同様に単位生産額（百万円）当たりの製品の素材含有量，製品 j（容器包装を含む）の樹脂種類 p ごとのプラスチック含有量（$p*j$ 行列）を基礎とする。その算定には，産業連関表の取引基本表に基づく内生部門間の投入係数行列（$i*j$）と，それに付帯の物量表に基づく各内生部門（百万円当たり）への合成樹脂の産出量を記述した物量係数行列（$p*j$）が用いられる。また，WIO-MFAの原料フィルタ行列および加工度の考え方を取り入れて，各内生部門 j への投入 i のうち産出される製品の原料となるものを特定する原料フィルタ行列（$i*j$）が適用される。それらの他に，プラスチック以外の製品が産出される部門への合成樹脂の投入を分離するためのプラスチックフィルタ行列（$p*j$）と，原料の投入のうちロスにならずに製品に転換される割合を表す歩留行列（$i*j$）が用いられる。物量係数行列について，産業連関表においてPSの一部とされているABS，高機能性樹脂の一部とされているPETは，それぞれの業界団体の自主統計（PETボトルリサイクル推進協議会，日本ABS樹脂工業会）から用途ごとのABSおよびPETの出荷量を引用して補完した。また，一般的に軟質PVCには可塑剤が添加されていることから，産業連関表においてPVCと可塑剤の両方が投入されている部門については，物量係数行列においてPVCの産出量に可塑剤の添加量を加えた。

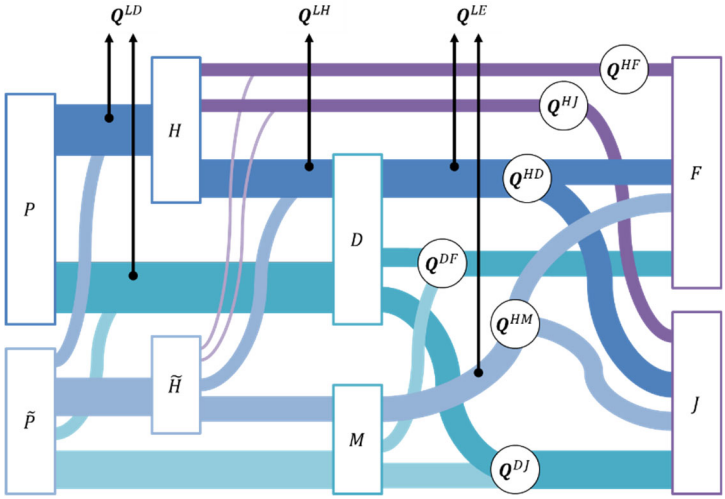
このモデルでは，プラスチックの物質フローは以下の6パターンで算定される。①②は製品の構成要素となるプラスチック，③～⑥は容器包装プラスチックの物質フローである（図１．１）。これらのうち，①～④の製品または容器包装は，それが流入した部門で利用および排出されると見なされる。⑤および⑥の容器包装は，それが梱包していた最終製品や原料を需要した部門から排出されると見なされる。②は，各内生部門で利用される消耗品や耐久消費財（例えば，生産機械やオフィスで利用されるパソコンなどのプラスチック部品）が該当する。③および④は，製品の販売に供するためではなく，最終需要部門の消費活動および内生部門の生産活動に直接的に需要される容器包装である。例えば，ごみ袋や製品保管用の容器などが該当する。

① 最終需要部門（輸出を含む）に流入する製品（輸入製品を含む）：$\boldsymbol{Q}^{DF}$

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（輸入製品を含む）：$\boldsymbol{Q}^{DJ}$

③ 製品に付随せずに，最終需要部門（輸出を含む）に流入する容器包装：$\boldsymbol{Q}^{HF}$

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：$\boldsymbol{Q}^{HJ}$
⑤　国産製品（最終製品および原料を含む）に付随して，需要部門（最終需要部門および内生部門を含む）に流入する容器包装：$\boldsymbol{Q}^{HD}$
⑥　輸入製品（最終製品および原料を含む）に付随して，需要部門（最終需要部門および内生部門を含む）に流入する容器包装：$\boldsymbol{Q}^{HM}$



注）　水色の線は製品のフロー，紫色の線は製品に付随しない容器包装のフロー，青色の線は製品に付随する容器包装のフロー，黒色の矢印は各段階で発生するロスを表す。P は樹脂，H は容器包装を示し，それぞれチルダは国外で生産された樹脂および容器包装を表す。D および M は，それぞれ国産製品および輸入製品，F および J は，それぞれ最終需要部門および内生部門を示す。$\boldsymbol{Q}^{LD}$ は合成樹脂の生産から製品や容器包装の製造までの間に発生する生産ロス，$\boldsymbol{Q}^{LH}$ は製品に容器包装を利用（梱包）する際に発生する梱包ロス，$\boldsymbol{Q}^{LE}$ は商業部門で製品の廃棄に伴って発生する容器包装の商業ロスである。

図１．１　　本研究におけるプラスチックの物質フロー分析のモデル構造

これらの物質フローの算定には，プラスチック含有量および投入係数行列に加えて，以下の各種のフィルタ行列が用いられる。すなわち，内生部門 j のうちプラスチックを容器包装に加工する部門を特定する容器包装フィルタベクトル（$j*1$），内生部門 j のうち容器包装を付随させるような製品を産出しない（すなわち，容器包装を自部門に蓄積させる）部門を特定する蓄積ベクトル（$j*1$），容器包装に梱包された製品 j の需要部門 k への産出割合を表す移行行列（$j*k$），商業部門において廃棄されずに販売される製品 j および付随する容器包装の割合を表す商業ベクトル（$j*1$）である。① $\boldsymbol{Q}^{DF}$ および③ $\boldsymbol{Q}^{HF}$ は，取引基本表のうち最終需要部門を抽出した最終需要行列（$j*f$）から算定される。一方，② $\boldsymbol{Q}^{DJ}$，④ $\boldsymbol{Q}^{HJ}$ および⑤ $\boldsymbol{Q}^{HD}$ は取引基本表に記述された国内生産額（$j*1$ ベクトル），⑥ $\boldsymbol{Q}^{HM}$ は輸入額（$j*1$ ベクトル）から算定される。

以上の容器包装および製品を含むプラスチックの利用量を経年的な推計結果をもとに，容器包装および製品プラスチックの樹脂種類別・部門別の排出量を推計した。多くの場合，製品の提供に利用された容器包装は需要部門で直ちに廃棄される使い捨てプラスチックであることから，各年について需要部門別の流入量は排出量に等しいと見なされる。一方，それ以外のプラスチックには一定期間の蓄積があるため，各年の利用量と排出量が一致するとは限らない。そこで，以下のように浸出モデル法を適用することで，経年的な利用量から2015年における排出量を推計した。

まず，産業連関表を用いて利用量を推計した2000・2005・2011・2015年以外の年について，内挿（2001～2004年，2006～2010年，2012～2014年）および外挿（1988～1999年）によって樹脂種類別・製品別・需要部門別の利用量を推計した。ここでは，短期的なプラスチック利用量の変動（例えば，リーマンショックによる2009年の景気後退の影響など）を考慮するために，内挿においても単純な線形を仮定するのではなく，樹脂種類別の国内生産量（生産動態統計）から輸出入量（貿易統計）を差し引きした各年の国内利用量による補正を適用した。外挿については，2000年の樹脂種類別・製品別・需要部門別の利用量をもとに，樹脂種類ごとに各年の国内利用量に比例させることで推計した。

次に，各内生部門 j から産出される代表的な製品の平均寿命を，国立環境研究所によるデータベース[5]などから検索した。浸出モデル法において毎年の排出率 x が平均寿命 y の逆数となることから，t 年の製品別の利用量に $x(1-x)^{(2015-t)}$ を乗じ，それらを $t=1988$ から累積することで2015年における樹脂種類別・製品別・需要部門別の排出量を求めた。

以上で推計した全国の排出量（2015年）を，部門ごとに47都道府県，さらに1896市区町村（政令指定都市の行政区を含む）に配分した。全国から都道府県への配分は，産業廃棄物排出・処理状況調査（環境省）において欠落データの補完に用いられている業種ごとの活動量指標（例えば，製造業については工業統計の製造品出荷額，サービス業は経済センサスの従業者数）を用いることとして，産業連関表に付属の日本標準産業分類（細分類）との対応表に基づいて需要部門 k に割り当てた。ここから市区町村別の排出量を求める際には，活動量指標に用いられている製造品出荷額などが秘匿処理され利用できない市区町村も多いため，一律に市区町村別・産業分類別の従業者数を用いて各都道府県における需要部門別の排出量を配分した。

最後に，樹脂を7種類（熱硬化性樹脂，ABSおよび高機能性樹脂は，その他の樹脂に統合した），産業連関表の統合中分類に従って内生部門を108部門，最終需要部門を消費支出4部門および輸出の5部門に統合した。最終需要部門のうち国内総固定資本形成については，産業連関表に付帯の固定資本マトリクスを用いて需要部門としての内生部門（108部門）に分配した。分析結果を可視化する際には，内生部門を37部門，最終需要部門を4部門に統合し，さらに内生部門を7分類および需要部門を3分類に集約した。

容器包装プラスチック（ペットボトルを除く）の推計結果は，排出量や組成などボトムアップ的な調査結果が公表されている場合，それらに該当する部分を抜き出して比較することで精度を検証した。さらに，商業部門から家庭部門への容器包装の流入量について，2016年2月に東京都民を対象として実施されたレジ袋の使用および廃棄の実態調査（有効回答：3,015人）の結果を引用して検証するとともに，2021年2月に同様の項目および方法で再調査を実施し（有効回答：4,325人），2020年7月に必須となったレジ袋（プラスチック製買物袋）有料化のリデュース効果について考察した。樹脂組成の推計結果は，３－２で述べる選別実証試験のサンプルとしたプラスチック製容器包装の組成調査の結果とも比較した。

３－２．光学自動選別機による容器包装プラスチックの選別実証試験

これまでに国内でも導入実績が多くある近赤外線による3種選別の光学自動選別機を用いて，この選別機を導入しているプラスチック製容器包装の材料リサイクル事業者および光学自動選別機メーカーの協力を得て，容器包装プラスチックの選別精度の実証試験を実施した。まず，サンプルとした長野市のプラスチック製容器包装の分別回収物160 kg（ベール半個）の組成を，樹脂種類・形状・色による30分類（プラスチック28分類と小破片および樹脂以外の異物）で調査した。この28分類に従って，一部の市町村による特徴的な収集区分や，消費者が見分けて分別できる可能性，予想される選別機の選別精度（フィルムは他の形状よりも劣る可能性があるなど）を考慮しつつ，複数の組成パターンを設定した。

それぞれの組成パターンについて，プラスチック製容器包装のサンプルから対象とする組成分類のみを抽出して，選別機への投入物とした（表１．１）。都度，1台の選別機の設定を変更し，バッチ式に稼働させることで，図１．２に示した選別パターンを再現した。選別機のプログラム設定および選別順序は，上記の事業者の実際のプロセスに従った。図１．２に示した6種類の樹脂の選別物および残渣の組成を上記の28分類で調べることで，樹脂種類や形状・色ごとの選別割合と選別物の純度の両面から，組成パターンごとに選別精度を分析した。

表１．１　選別実証試験における容器包装プラスチックの投入物の組成パターン

組成パターン	対象とした組成分類	投入物重量
① 基本組成	プラスチック製容器包装のサンプル全体	139.5 kg
② トレイのみ	トレイ類（発泡・非発泡）	43.6 kg
③ ボトル・発泡トレイ	ボトル類，トレイ類（発泡）	22.6 kg
④ 軟質系以外	フィルム類，トレイ類（発泡）以外	63.5 kg
⑤ 透明硬質系	ボトル・トレイ・カップ類（透明・半透明）	30.5 kg

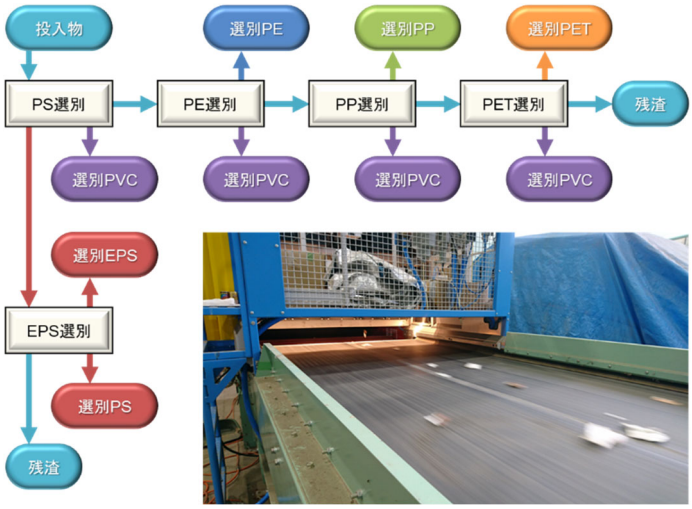


図１．２　　選別実証試験における選別パターンと稼働中の光学自動選別機

３－３．物質フロー分析と選別実証試験に基づく容器包装プラスチックの回収・選別シナリオの設計

容器包装プラスチックの循環シナリオのオプションとして，３－１で述べた物質フロー分析による排出量の推計結果と，３－２で述べた選別実証試験による選別精度の分析結果に基づいて，マテリアルリサイクルの高度化と拡大を志向した，プラスチック製容器包装の回収・選別シナリオを設計した。まず，分別パターンおよび選別パターンを設定した。分別パターンは，そのまま選別実証試験における組成パターン①～⑤を当てはめた。また，比重選別のみ選別パターン1，図１．２のプロセスのうちEPS選別以外の全ての光学選別を実施する選別パターン2，PSおよびPET選別のみの選別パターン3を設定した。選別パターン2および3については，上記の材料リサイクル事業者におけるプロセスを参考に，光学選別の残渣から比重選別によってオレフィン系の樹脂を回収することも想定した。

プラスチック製容器包装の回収可能量（最大ポテンシャル）および樹脂種類については，物質フロー分析によって推計された家庭からの排出量（113万t）および樹脂組成（図１．６参照）を適用した。ただし，樹脂種類ごとの形状・色については，選別実証試験に当たって実施した分別回収物の組成調査の結果（図１．７参照）を利用した。その上で，以上の分別パターンと選別パターンの組み合わせ15パターンについて，選別精度の分析結果から品質別の回収・選別可能量を算定した。

３－４．自動車由来プラスチックの循環フローおよび受入可能性の調査と循環シナリオの設計

機器系プラスチックについては，審議会においてプラスチックリサイクルの進んだ自動車に対するインセンティブ制度の検討が行われたことなどもあり，昨今，実証事業などによる検討が進み情報が増えつつあることを念頭に，自動車を題材に選び分析を進めた。まず，樹脂の投入にかかるフローについては産業連関分析に基づくトップダウン的な推計と，ボトムアップ的な推計の比較を行った。ボトムアップ的な推計については，シンクタンクの報告書やリサイクルに関する実証分析による分析データなどを用いた。

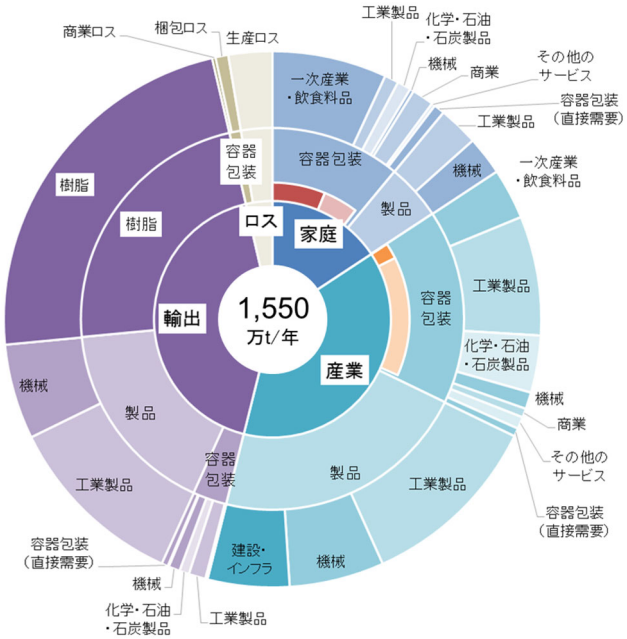
次に，ボトムアップ推計の結果を前提に，回収側のフローの推定へと進んだ。ただし，複数年の投入フローがボトムアップで推定できるほどの情報はそろわないことから，得られた投入データを生産台数に比例させる形で変化させることとした。これらを用いて，現在のマテリアルリサイクルに関するフローを改めて整理した。

現状の商業ベースでは，ほぼ行われていないことが明らかになったマテリアルリサイクルについて，そのポテンシャルの推計を実施した。前提として，新車の国内出荷台数が500万台前後で推移している一方で，自動車リサイクル法の枠内での回収台数は300～350万台程度である。発生台数そのものが新車出荷台数よりは少ないこともあるが，中古車輸出台数がコンスタントに100万台以上の規模あることについて，検討を加える必要がある。

４．結果及び考察

４－１．物質フロー分析による生活系プラスチックの利用量および排出量と樹脂組成の推計

日本における2015年の国内需要および輸出に伴うプラスチック消費量は，ロスを含めて1,550万tと推計された。輸出を除くと，国内の家庭や産業に流入する（すなわち，国内で利用および排出されると考えられる）プラスチックは835万tと推計された。容器包装プラスチック（ペットボトルを含む）はロスを含めて485万tが利用されており,そのうち容器包装の輸出および輸出製品の梱包に伴う利用量が44万t,家庭および産業部門における直接需要（３－１で述べた物質フローのパターン③に該当）が18万tと推計された。一次産業・飲食料品は，それらの製品に合成樹脂が含まれていないため，製品としてのプラスチックのフローはないが,容器包装としてのフローは無視できない量である。需要部門ごとの利用量は,プラスチック全体では71%を産業が占め，容器包装に限っても家庭は40%であり，産業の方が多いことが明らかとなった。



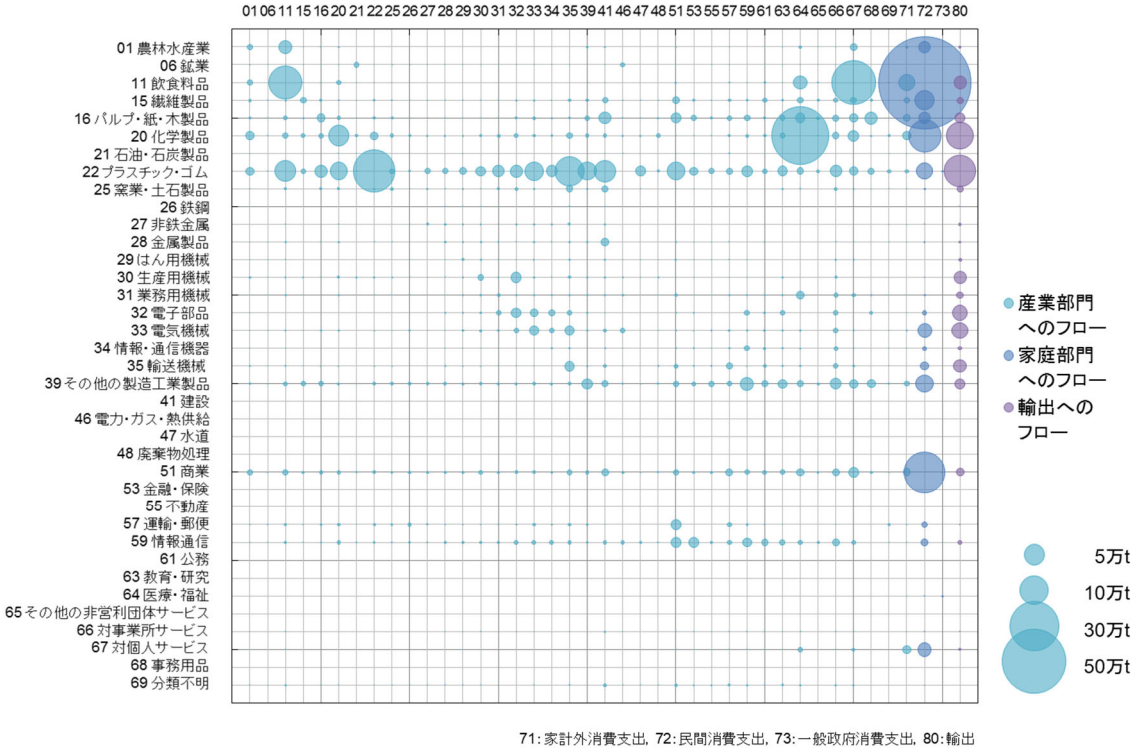
注）　濃い赤色および濃い橙色の範囲は，それぞれ家庭および産業に流入した容器包装プラスチックのうち，2015年において確認されたリサイクル目的での分別回収量を示す。薄い赤色および薄い橙色の範囲は，それぞれ家庭および産業に製品や原料を梱包して流入した容器包装プラスチックを示しており，潜在的なリサイクル目的での回収可能量と解釈できる。

図１．３　　国内需要および輸出に伴う需要部門別（内円）・用途分類別（中円）・製品別（外円）のプラスチック利用量（2015年）

容器包装の利用者を製品の供給側（販売に伴って利用）と需要側（購入または調達に伴って利用）の両面から見ることで，推計結果はリサイクル目標だけでなく，部門別のリデュース目標の検討にも役立つ。リサイクル目標のためには需要側の視点が中心になり，リデュース目標のためには供給側の視点が中心になる。さらに，過剰包装の拒否などを通して需要側からリデュースに寄与することや，容器包装のリサイクル設計などを通して供給側からリサイクル率の向上に寄与することも検討できる。これらの関係を見るために，部門間の容器包装プラスチックのフロー量（2015年）を図１．４のバブルチャートで示した。家庭部門に流入するプラスチックのうち106万tが食品を梱包した容器包装であり，商業（卸売および小売）部門からの流入量は20万tと推計された。また，典型的な持ち帰り食品である「惣菜・寿司・弁当」部門の容器包装のうち家庭への流入量は7万tであり，狭義の食品に利用された容器包装（上記の106万tから飲料とタバコの容器包装を差し引いた57万t）のうち12%を占める。商業および持ち帰り食品の容器包装については，消費者による使い捨て包装の拒否や小売業者による販売方法の工夫によって削減できる可能性がある。しかし，プラスチック資源循環戦略におけるリデュース目標である25%（輸

出を除く国内の需要部門への流入量407万tに対して102万tの削減）と比べると，消費者による努力のみでは目標に遠く及ばないことが分かる。そのため，それ以外の食品については生産者である食品業による容器包装の薄肉化などサプライチェーン全体での努力が欠かせない。食品を梱包した容器包装は，「対個人サービス」部門にも24万tが流入しており，その95%を飲食サービスが占めている。農水産業や飲食料品の部門間のフロー，すなわち食品の生産段階における容器包装の利用量は16万tである。

他に産業部門に流入する容器包装としては，「化学製品」部門から「医療・福祉」部門へのフロー量が41万tと目立つが，その97%は医療部門への医薬品の納入に伴う容器包装である。また，プラスチック・ゴム製品の梱包に利用された容器包装は主に産業部門に流入しているが，この結果には産業連関表の「プラスチック製品」部門の分割の精度が大きく影響することから，慎重に解釈する必要がある。



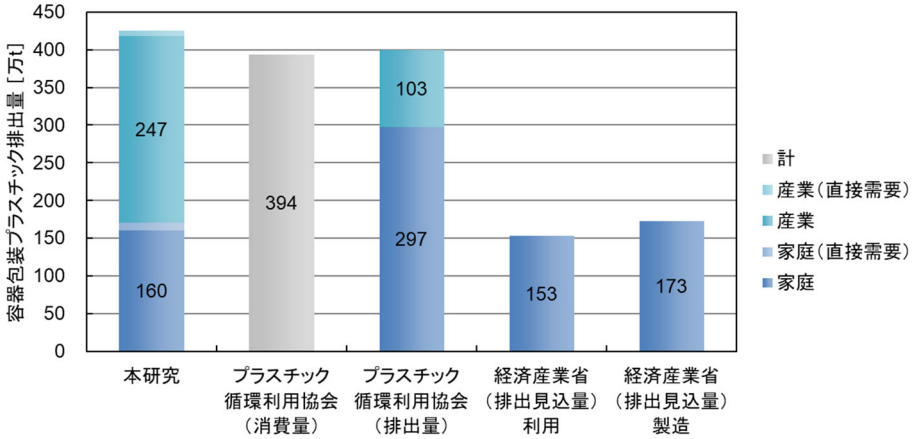
注）　バブルの面積は，縦軸の部門から横軸の部門への製品の産出に付随した容器包装プラスチックのフロー量を表す。

図１．４　　部門間の容器包装プラスチックのフロー量（2015年）

本研究の推計結果では，直接需要を含む国内の需要部門（家庭および産業）からの排出量は425万tである。比較のために，これに容器包装の輸出および輸出製品の梱包に伴う利用量を加え，輸入製品に付随する容器包装を差し引くと407万tとなる。この結果は，プラスチック循環利用協会によるトップダウン的な推計における容器包装プラスチックの国内消費量394万t（ロスを含まず，製品の輸出入に付随する容器包装は考慮されていない）と近く，ペットボトルを含む容器包装プラスチックの消費量および排出量は年間400万t程度と考えて間違いはなさそうである（図１．５）。ただし，輸出入される製品に付随する容器包装によって，国内の排出量が正味20万t程度は増加する可能性がある。

一方，プラスチック循環利用協会による排出量の内訳を見ると，一般系（家庭）および産業系の容器包装の排出量が297万tおよび103万tであり，本研究の推計結果と大きく乖離している（図１．５）。この差異を検証するために，経済産業省の算定方法による家庭からの容器包装廃棄物の排出見込量と比較する。この算定方法は，事業者への容器包装の利用・製造量のアンケート調査と，家庭からの容器包装廃棄物の組成調査に基づいており，ボトムアップ的な推計と言うことができる。利用と製造で若干の乖離があるものの，それぞれ153万tおよび173万tであり，本研究における直接需要を除く家庭からの排出量と近い。実際，プラスチック循環利用協会の推計モデルでは品目ごとに一般系廃棄物および産業系廃

棄物への配分比が設定されているが，その根拠は明確にされていない。以上より，家庭および産業からの容器包装プラスチックの排出量について，本研究の推計結果には妥当性があるものと考えられる。

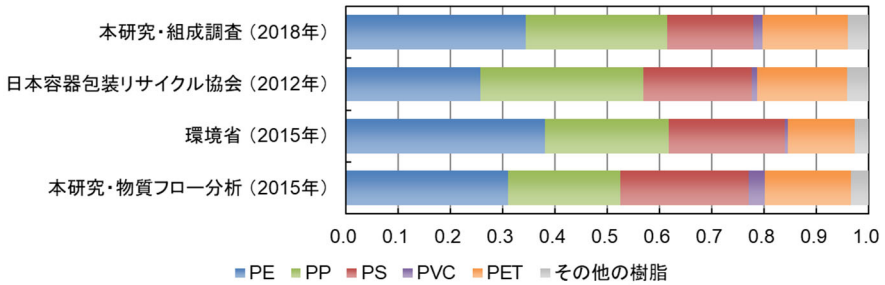


注）　容器包装の直接需要は，プラスチック循環利用協会の推計範囲には含まれ，経済産業省の算定方法には含まれない。

図１．５　　家庭および産業からの容器包装プラスチックの排出量の検証（2015年）

ここで，2016年2月に実施されたレジ袋の実態調査の結果では，調査期間の1週間における1人当たりのレジ袋の取得枚数は5.8枚であった。この結果にレジ袋1枚当たりの重量を7.2 gとし[7]，これに同月の人口推計（総務省）による全国の成人人口（10,479万人）を乗じると，全国のレジ袋の使用量は年間23万tと推計された。この結果は，物質フロー分析による商業部門から家庭部門への流入量20万t（図１．４）と同程度であり，東京都における1人当たりのレジ袋の使用量が全国平均より多いといった可能性を考えれば，整合的な結果と言うことができる。また，2021年2月に実施したレジ袋の実態調査では，調査期間の1週間における1人当たりのレジ袋の取得枚数（無料配布を含む）は1.7枚であった。同月の成人人口を乗じて全国の使用量を求めると7万tとなり，有料化により全国で年間16万tのレジ袋の使用が削減されたものと推計された。これは，上記のリデュース目標（102万t）の16%に相当する。

ペットボトルを除く容器包装プラスチック（直接需要は含まない）について，本研究の物質フロー分析における樹脂組成の推計結果（2015年）を，環境省によって2015年に8市を対象に実施された一般廃棄物に含まれる容器包装プラスチックの組成調査，2012年4～9月に日本容器包装リサイクル協会によって実施された伊勢崎市におけるプラスチック製容器包装の分別回収物（計332 kg）を対象とした組成調査，さらに４－２で述べる選別実証試験の中で2018年12月に実施した長野市における分別回収物（160 kg）を対象とした組成調査の結果（図１．７参照）と比較した（図１．６）。本研究の物質フロー分析による樹脂組成の推計結果は，これらの組成調査の結果と大きな差はないものの，PPが少なくPSが多い傾向が見られた。



注）　組成調査（本研究，日本容器包装リサイクル協会および環境省）の結果からは，容器包装プラスチック以外の異物は除いて示した。また，これらの組成調査ではLDPEとHDPEが区別されていないことから，物質フロー分析の推計結果もLDPEとHDPEを合わせてPEとして示した。

図１．６　　家庭から排出される容器包装プラスチック（ペットボトルを除く）の樹脂組成の検証

４－２．光学自動選別機による容器包装プラスチックの選別実証試験

各組成パターンの選別試験の結果から，まず形状・色ごとの回収率（それぞれの投入物のうち意図した樹脂種類に選別された割合）を分析した。透明のトレイ類は樹脂種類によらず高め（全ての組成パターンの単純平均で73～83%）で，ボトル類はPP以外では高め（同74～85%）であり，複合なしのPEのフィルム類（同85%）やPEのチューブ類（同81%）の回収率も高めであった。一方，複合ありのフィルム類（同45～49%）や有色のトレイ類（18～62%）は全体的に低かった。有色のトレイ類については，図１．７（右）の残渣の写真にも多く見られるような黒色の廃プラスチックが，近赤外線による光学自動選別機（少なくとも今回の選別設定）では検知しにくいことや，ラップが付着したままの状態で投入された発泡トレイの一部がPVCの選別物に混入する（ラップのPVCやPVDCが検知されたものと考えられる）といった阻害要因が明らかになった。

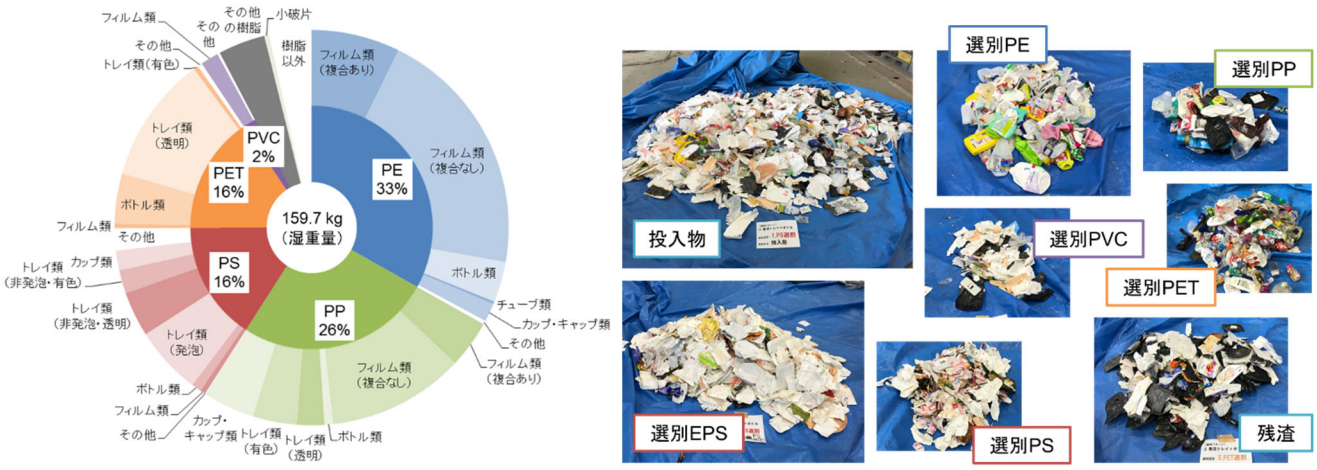


図１．７　　プラスチック製容器包装の分別回収物の組成調査の結果（左）と組成パターン③における投入物および選別物（右）

次に，組成パターンおよび樹脂種類ごとに純度（選別物の樹脂組成において意図した樹脂種類の割合）と選別割合を分析した。図１．８には，サンプル全体を投入した組成パターン①（基本組成）と，透明・半透明のボトル・トレイ・カップ類のみを投入した組成パターン⑤（透明硬質系）の選別割合，図１．９には各組成パターンの投入物および選別物の樹脂組成を示した。いずれの組成パターンでも発泡PSは選別物の純度は高く（88～99%前後），反面で回収率が低い（37～49%）。回収率を下げた要因として，発泡PSの大半を占める発泡トレイが，近赤外線によって検知されたとしても，軽量であることからエアで飛ばし切れずに選別されないといった現象も見られた。PETは，どの組成パターンでも純度（87～96%）も回収率（76～89%）も高かった。組成パターン⑤は，投入物に回収率の高い透明のトレイ類が多いことから，PPを除き全般的に選別物の純度が高く，どの樹脂種類の回収率も高かった。

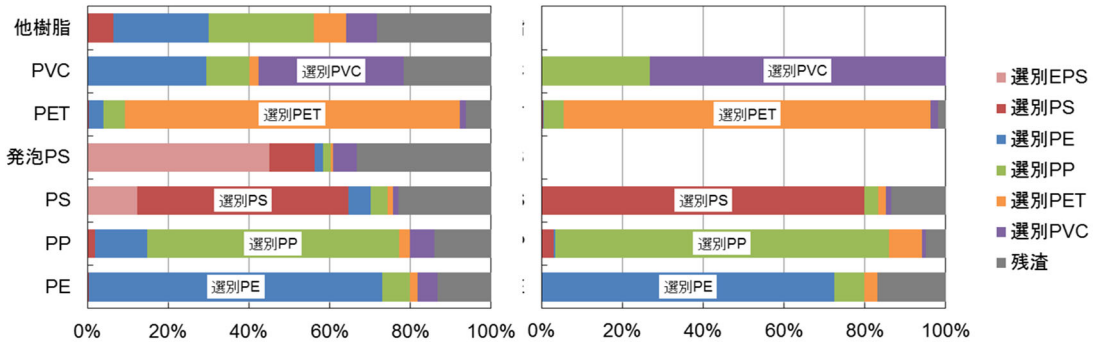


図１．８　　樹脂種類ごとの選別割合（左：組成パターン①，右：組成パターン⑤）

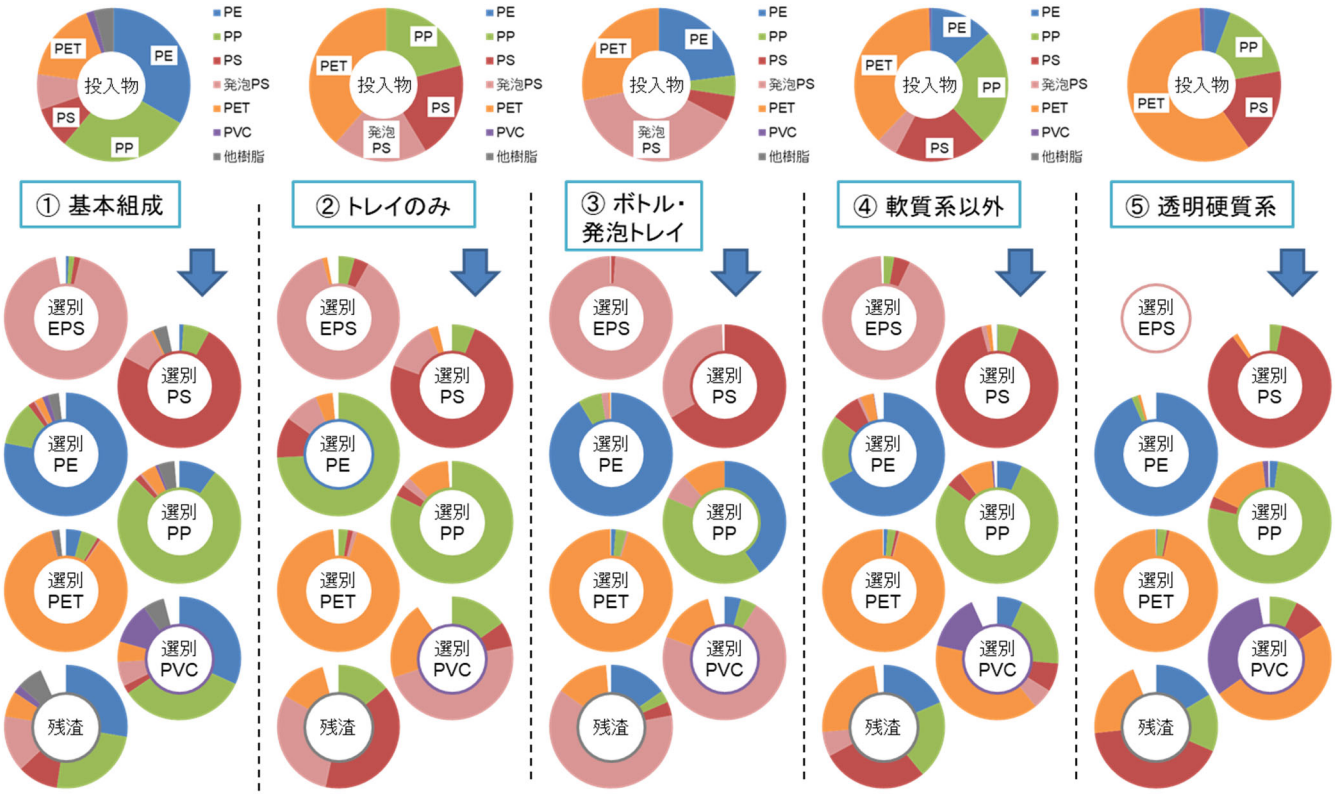


図１．９　　各組成パターンの投入物および選別物の樹脂組成

以上のように，分別収集の対象とする容器包装プラスチックの種類を消費者が見分けられるような形状・色によって絞ることでも，純度と回収率の両面から選別精度を向上できることが示された。一方，この組成パターン⑤で対象とする組成分類は，表１．１に示したようにサンプル全体の重量の3分の1程度であり，質の向上と量の確保の間にトレードオフの関係があることも明らかとなった。

４－３．物質フロー分析と選別実証試験に基づく容器包装プラスチックの回収・選別シナリオの設計

分別・選別パターンごとの選別可能量の算定結果から，現行の分別基準適合物と同様に全ての種類の容器包装を分別収集の対象とし，光学選別と比重選別を駆使すれば，選別物の大半は低品質（純度90%未満）であるものの，最大ポテンシャルで100万t程度の選別物が得られることが分かった（図１．１０）。現行の分別区分では，仮に家庭から排出される全てのプラスチック製容器包装（113万t）が分別収集されたとしても，比重選別のみで得られるオレフィン系樹脂（PO）の選別物が最大でも60万t程度である。それと比べると，光学選別はマテリアルリサイクルの量的な拡大に貢献する可能性があると言える。

一方，組成パターン③や⑤では分別収集の対象が全体の20%程度に過ぎない反面，高品質（純度95%以上）の選別物が得られることから（図１．１０），マテリアルリサイクルの質的な向上への貢献の可能性も示された。消費者も見分けられるような形状・色による収集区分でも，選別技術との組み合わせによって高品質なマテリアルリサイクルが実現できる可能性が示された。ただし，選別物の質の向上と量の拡大の間にはトレードオフの関係があるため，マテリアルリサイクルの推進に当たっては「量」を志向するか「質」を志向するかの選択が必要である。

仮に，経済性などを度外視してリサイクルの量と質を両立させるのであれば，現行のプラスチック製容器包装のうち，組成パターン⑤に相当する透明または半透明のボトル・トレイ・カップ類のみ別の区分で分別収集する（第三の分別区分）シナリオが考えられる。この区分にPSやPETが多く含まれることから，残りのプラスチック製容器包装はオレフィン系の樹脂（PEおよびPP）の割合が高くなる。これらが従来の比重選別によるマテリアル（材料）リサイクルや，本研究課題のサブテーマ２で検討した熱分解技術を含むフィードストック（ケミカル）リサイクルに投入されることを考えれば，比重選別も熱分解技術もオレフィン系の樹脂の適性が高いことから[8)]，分別区分と再生技術の組み合わせという技術的な

面からは望ましいシナリオと言うことができる。ただし，本研究課題のサブテーマ４でも分析したように，新たな分別区分を設けることの費用増加は無視できない大きさになる。また，消費者にとって分別区分が増えることへの負担感にも配慮が必要である。さらに，これまで材料リサイクル事業者はオレフィン系の再生樹脂の需要を開拓してきたことから，現実的な問題として，高品質であっても再生PS樹脂や再生PET樹脂の需要（販路）を確保できるかどうかも不透明である。

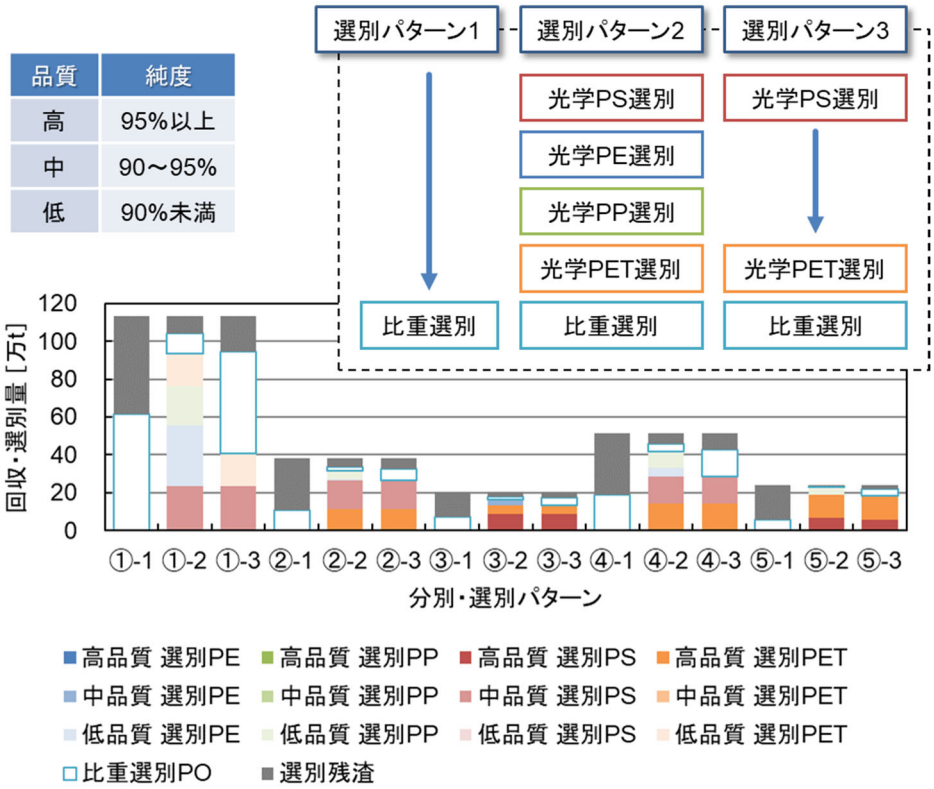


図１．１０　プラスチック製容器包装の分別パターンおよび選別パターンごとの樹脂種類・品質別の選別可能量

４－４．自動車由来プラスチックの循環フローおよび受入可能性の調査と循環シナリオの設計

投入フローの推計について，トップダウン的な推計とボトムアップ的な推計の比較を行った。ボトムアップ推計による樹脂の年間投入量は81.8万t，トップダウン推定では38.7万tと大きな差が見られた。家電リサイクル法対象である家電4品目についても同様の推計をしたものの,やはりボトムアップ推計の方が明らかに大きい値を示した。日本全体の樹脂のフローとしては大きなものではないが無視できる規模ではなく，この理由の検討は必要である。

現状のフローの推計は，投入側の数値にボトムアップ推計の結果を用いて行った。その結果，図１．１１のようなフローであることが確認された。ヒアリングからの推計が多いこともあり，数値の不確実性は高いものの，現状で安定的にリサイクルへ回るためには部品単位での解体かポストシュレッダーでの分離･選別技術の応用が必要なことが分かるとともに，その量は極めて小さい。部品の取り外しは基本的にはリユース目的であることを思えば，プレシュレッダーでの精緻解体からのリサイクルを進めるためには，部品リユースに近いレベルの経済性が必要になると考えられる。逆に，ポストシュレッダーについても多くのPPがリサイクルされていない（ただし，エネルギー回収はリサイクルに含めていない）ことが見られ，低費用で大規模な分離･選別が可能になるのであれば，こちらも大きなポテンシャルを含んでいると言える。

ポテンシャルの推計については，現状（段階1），事前の取り外しの促進（段階2），ASRからのPP，ABS，PE回収も実施（段階3），その他の樹脂の回収も実施という4段階を想定して分析を行った結果，表１．２

のような結果を得た。ただし，段階4におけるその他の樹脂類がすべて回収されるという仮定には無理がある。段階3および段階4は部品単位で整理を行っていないことからも明らかなように，少なくとも部分的にはポストシュレッダーの分離･選別に頼ることを想定している。そこで，段階2までしか実現できないとして9.4万t，さらに段階3の「その他」を除いた3種類のプラスチックのみが回収できたとして22万t程度が上限だと考えられる。つまり自動車リサイクルからのプラスチック回収を推し進めた際に，かなり野心的なシナリオであるとしても，水平リサイクルによる供給能力は需要側の推計結果81.8万tの27%程度でしかないと言える。これは，自動車業界が水平リサイクル由来のプラスチックだけを重点的に使う上での大きな懸念だと主張している，量的な安定供給の懸念に直結する。

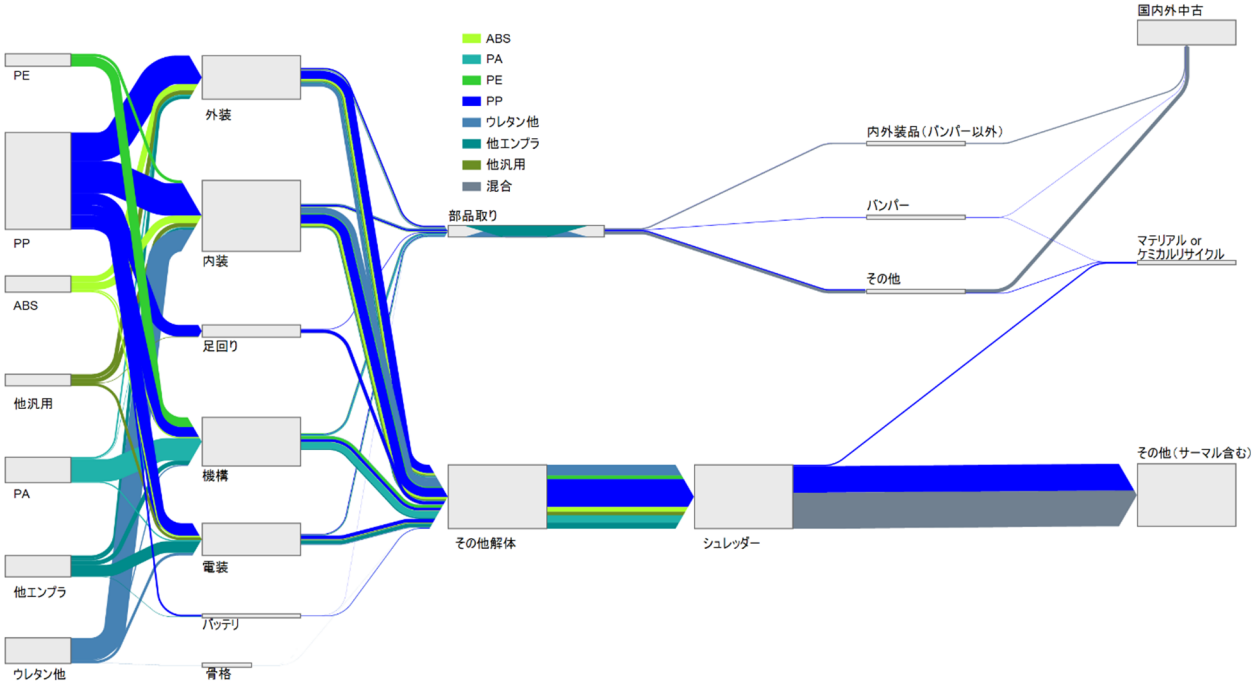


図１．１１　現状の使用済自動車に含有されるプラスチックのマテリアルフロー

表１．２　　段階別の使用済自動車からのプラスチック回収の可能性

樹脂	段階	大分類	部品	１台当たり重量［kg］	回収量［千t］
PP	段階1	一部実施	バンパー	8	26.4
			段階1 小計	8	26.4
PP	段階2	外装	ピラー	1.5	4.95
			サイドシルガーニッシュ	1	3.3
			カウルトップ	1	3.3
		内装	ドアトリム	1	3.3
			インパネ周り	4.5	14.9
ABS		外装	ピラー類	0.5	1.7
		内装	インパネコア	4	13.2
			センタークラスター	2	6.6
PE		機構部品	燃料タンク	5	16.5
			段階2までの合計	28.5	94.1
PP	段階3	その他のすべて		35	115.5
ABS				2	6.6
PE				2	6.6
			段階3までの合計	67.5	222.8
その他	段階4	その他のすべて		52	171.6
			段階4までの合計	119.5	394.4

他方で，PPなどについてはリサイクルによる再生樹脂の物性などについては検証が進みつつあり，用途開発も徐々に行われていることを思えば，これからは回収可能なプラスチックと，その用途のマッチングを詰めることで徐々に進めていくこと，そして自動車産業の我が国の製造業における立ち位置を思えば，水平リサイクルにこだわらず再生樹脂利用を進めることが望ましい。そうした意味では，審議会などで議論が行われつつある，再生樹脂利用率の高い自動車へのインセンティブ付与や，精緻解体に対するインセンティブなどの社会システム的な後押しは重要になると考えられる。

５．研究目標の達成状況

本サブテーマでは，産業連関表を用いた物質フロー分析が，NatureやScienceと並ぶ総合学術誌であるPNAS（米国科学アカデミー紀要）に掲載されるなど，目標を上回る成果をあげた。物質フロー分析によるプラスチックの利用実態の解明や，光学自動選別機を用いた選別精度の実証試験の実施など，研究目標とした評価基盤の構築が達成された。さらに，物質フロー分析と選別実証試験の結果は，本サブテーマにおけるマテリアルリサイクルの高度化と拡大を志向した回収・選別シナリオの設計に反映されるとともに，サブテーマ２における熱分解技術を核とした地域循環シナリオにも活用されるなど，研究課題全体の評価基盤としての有用性も示された。

さらに，プラスチックの資源循環政策に直接的に活用できるような分析結果が多く得られたことも，本サブテーマの大きな成果である。まず，物質フロー分析の推計結果から，プラスチック資源循環戦略のマイルストーン達成に向けた具体的な道筋を示した（政策決定者向けサマリーの1-1参照）。また，光学選別の利用によって得られる選別物の量および質の両面からのポテンシャルや，質の向上のために，どういった容器包装を分別収集の対象にするべきかを示した。一方，機器系プラスチックについては，自動車を題材として検証を進めた結果，どのくらい野心的なシナリオに基づいたとしても，廃自動車由来の再生樹脂（すなわち水平リサイクル）のみでは自動車産業の樹脂需要を満たせないことを明らかにする一方，自動車産業と静脈産業の協力により，リサイクルによる再生樹脂の用途開発が進んでいることなども明らかにした。

６．引用文献

1) J. Nakatani, T. Maruyama, Y. Moriguchi: PNAS 117(3), 19844-19853 (2020)
2) S. Nakamura, K. Nakajima: Materials Transactions 46(12), 2550-2553 (2005)
3) S. Nakamura, K. Nakajima, Y. Kondo, T. Nagasaka: Journal of Industrial Ecology 11(4), 50-63 (2007)
4) S. Nakamura, K. Nakajima, Y. Yoshizawa, K. Matsubae-Yokoyama, T. Nagasaka: Journal of Industrial Ecology 13(5), 706-717 (2009)
5) 国立環境研究所：製品使用年数データベース LiVES, http://www.nies.go.jp/lifespan/index.html
6) 河合萌子，中谷隼，栗栖聖，森口祐一：廃棄物資源循環学会論文誌30, 80-94 (2019)
7) 西島亜佐子，中谷隼：廃棄物資源循環学会論文誌27, 44-53 (2016)
8) S. Kumagai, J. Nakatani, Y. Saito, Y. Fukushima, T. Yoshioka: Journal of the Japan Petroleum Institute 63(6), 345-364 (2020) [IF: 0.890] Latest trends and challenges in feedstock recycling of polyolefinic plastics

Ⅱ－２　物質の動的バランスとプロセス技術に関するファクトの整備

国立大学法人 東北大学
大学院工学研究科 化学工学専攻　福島 康裕，大野 肇
大学院環境科学研究科 先端環境創成学専攻　吉岡 敏明，熊谷 将吾
大学院環境科学研究科 先進社会環境学専攻　齋藤 優子

［要旨］

リサイクル技術のフィージビリティ分析として，先端的な化学原料化技術を中心とした萌芽段階にあるリサイクルプロセスに関する世界的な技術開発動向を調査し，それに基づいて技術的な実現可能性と課題を整理した。その結果と，サブテーマ１で実施したプラスチック製容器包装の選別実証試験の結果から，熱分解による液体生成物の収率を改善する可能性があり，かつ選別技術によって現実的に得られる選別物の樹脂組成を特定した。それらの組成パターンをプラスチック試料によって再現して熱分解試験を実施し，気体，液体および固体生成物の収率と成分を同定した。また，炭素循環を指標としたプラスチック循環の評価の基盤として，産業連関表を用いたトップダウン法により産業全体の製品ごとの炭素フローを分析および可視化した。さらに，上記の熱分解試験の結果から油化のプロセスデータを推計した上で，サーカムスタンス適応型の循環シナリオのオプションとして，熱分解技術を核として選別技術と組み合わせた製油所周辺のプラスチック地域循環のフィージビリティを評価した。

１．研究開発目的

先端的な再生技術の導入と動脈産業との融合によるプラスチック循環の高度化を志向した循環シナリオの設計のための評価基盤のうち，本サブテーマでは熱分解を中心とした再生技術のフィージビリティ分析と，物質フロー分析による炭素フローの分析を目的とした。さらに，実現性の高い再生技術と動脈産業における利用ポテンシャルを特定・分析して循環シナリオのオプションを提示するという課題全体の達成目標を具体化するものとして，熱分解技術を核とした地域循環シナリオについて検討した。

２．研究目標

動脈産業における廃プラスチックの利用ポテンシャルの推計結果や先端的な化学原料化技術などの技術開発動向の調査結果を基盤として，特定地域における動脈産業と融合したサーカムスタンス適応型の循環シナリオを設計する。

３．研究開発内容

３－１．国内外におけるフィードストックリサイクルの研究開発動向調査

先端的な化学原料化技術を中心として，リサイクルプロセスに関する世界的な研究開発動向を調査した。特に，熱分解法および加溶媒分解法（モノマー回収）によるフィードストックリサイクルを対象として，世界の学術論文をベースに調査し，調査結果を整理した。熱分解法によるポリオレフィン（PEやPP）の化学原料化・燃料化に関する研究が多勢を占めたことから，これらの研究開発動向を「Latest Trends and Challenges in Feedstock Recycling of Polyolefinic Plastics」と題して，Journal of Japan Petroleum Instituteに発表した[1)]。

３－２．廃プラスチックの化学組成分析法の確立

廃プラスチックとして，固形燃料（refuse derived paper and plastics densified fuel：RPF）の原料となる混合プラスチックを調達し，プラスチック種や添加剤種を同定する分析手法を確立した。得られた分析結果は，循環シナリオ設計における適合可能なリサイクル技術の検証に活用できる。

３－３．選別実証試験における選別物の組成を再現したサンプルの熱分解試験

本サブテーマの３－１の調査結果によって，熱分解の収率や生成物は，投入される廃プラスチックの樹脂組成に依存することが裏付けられた。フィードストックリサイクルやエネルギー回収に対しては，例えばマテリアルリサイクルの残渣を含め，それに適さない廃プラスチックを処理する役割が期待されることもある。しかし，熱分解の技術をプラスチック資源循環のシステムの中で効果的に活用するためには，そうした階層的な役割への期待に対して受動的にならず，より積極的に熱分解に適した樹脂組成の廃プラスチックを投入することも検討に値する。

ここでは，まずサブテーマ１で実施したプラスチック製容器包装の選別実証試験の結果から，熱分解による液体生成物の収率を改善する可能性があり，かつ光学自動選別機によってプラスチック製容器包装から現実的に得られる選別物の樹脂組成（複数パターン）を特定した。次に，選別なしのプラスチック製容器包装の樹脂組成（選別実証試験における投入物の組成パターン①：基本組成）と，それと材料リサイクルのプロセスデータ[2)]から推計される比重選別の選別物の樹脂組成を特定した。それらの組成パターンをプラスチック試料（粉体または粒状のPE，PP，PS，PETおよびPVC試薬）を用いて再現し，それらの熱分解試験を実施した。気体，液体および固体生成物を回収し，試料の組成パターンごとの収率を求めた。さらに，気体および液体生成物をガスクロマトグラフィーにより評価した。

３－４．トップダウン法による炭素フローとプラスチックリサイクルの環境負荷削減効果の可視化

プラスチック資源循環の構築による低炭素社会実現への効果を検討するため，循環シナリオの評価指標として炭素循環に着目し，その評価の基盤として，産業連関表を用いたトップダウン法により製品ごとの炭素フローと，その製品中のプラスチック由来の炭素をリサイクルした場合の環境負荷削減効果を可視化した。すなわち，各製品中のプラスチックが全てマテリアルリサイクル及びフィードストックリサイクルされた場合に控除される新規原料由来の生産プロセスに起因する温室効果ガス（greenhouse gas：GHG）排出量を推計し，その削減効果（低炭素効果）の最大可能量を示した。ここでの研究成果は，Resources, Conservation and Recycling誌に掲載された[3)]。

３－５．　熱分解試験に基づく製油所を介したプラスチック地域循環のシナリオ設計とフィージビリティ評価

製油所での廃プラスチックの油化（熱分解）および石油化学原料化の可能性を念頭に，製油所を中心とするプラスチック地域循環のシナリオにおいて，油化技術に求められる要件解析ツールを開発した。市町村のプラスチック製容器包装の保管施設をGoogle Map APIを用いてマッピングするとともに，事例研究の対象とする製油所（仙台製油所）から道のり距離50 kmおよび100 km圏内に含まれる保管施設から廃プラスチックを輸送する地域循環のシナリオを設計した。さらに，熱分解試験における液体生成物の収率の結果に応じて，油化で得られる生成油がナフサおよび原油の代替品として扱えると仮定して，熱分解試験で想定した選別物の組成ごとにGHG排出量の観点からシナリオを評価した。

４．結果及び考察

４－１．国内外におけるフィードストックリサイクルの研究開発動向調査

先端的な化学原料化技術を中心としたリサイクルプロセスに関する世界的な研究開発動向として，熱分解法および加溶媒分解法（モノマー回収）によるフィードストックリサイクルを対象として，世界の学術論文を調査・整理した結果，熱分解法によるポリオレフィンの化学原料化・燃料化に関する研究が多勢を占め，熱分解反応器の種類，反応条件（液化またはガス化），触媒利用に至るまで，多岐に渡って検討されていることが明らかとなった。研究開発動向調査の成果を公表した総合論文[1)]の中では，1980～2020年の期間にSCIジャーナルに発表された130以上の論文をベースに，プラスチックへの伝熱効率を改善するための反応器設計，液化のための触媒熱分解法，ガス化および炭素繊維製造のための触媒熱分

解法の研究開発動向を整理した。調査結果の一例として，触媒熱分解によるプラスチックの液化に関する研究について，対象プラスチック，反応装置，触媒種，および反応温度条件を整理した表を論文から抜粋した（表２．１）。

表２．１　　触媒熱分解によるプラスチック液化条件の一覧

(continued from previous page)

Entry	Year	Plastics (values: wt%)	Reactor	React. mode	Catalyst	Temperatures (pyro. and catal. reactors)	References
21	2011	MP (40 PE, 35 PP, 18 PS, 4 PET, 3 PVC)	Semi-batch (plastic was pyrolyzed with catal.)	Semi.	NH_4ZSM-5 (Si/Al = 50, at. ratio), red mud[s] (Fe_2O_3, Al_2O_3, TiO_2, etc.)	Pyro. and catal.: 20 °C/min → 440-500 °C	López *et al.*[79]
22	2012	LDPE, HDPE, PP	FBR	Semi.	Commercial Ziegler-Natta ($TiCl_4/MgCl_2$, $TiCl_4$ = 5-16 wt%)	Pyro. and catal.: 500, 650 °C	Donaj *et al.*[91]
23	2012	LDPE	Autoclave	Batch	Ni/*h*-beta zeolite (Si/Al = 25, at. ratio, Ni = 7 wt%)	Pyro.: 250-350 °C (1.5 barr N_2) Catal.: 310 °C (5-40 bar H_2)	Escola *et al.*[86]
24	2013	LDPE	Two-stage FxBR (1st: plastic pyro., 2nd: catal. bed)	Semi.	H-GaMFI (Si/Ga = 22.5, at. ratio), Ga/HZSM-5 (Si/Al = 15, at. ratio, Ga = 2 wt%)	Pyro.: 455 °C Catal.: 525 °C	Uemichi *et al.*[80]
25	2015	LDPE	Microwave (pyro.) + FxBR (catal.)	Semi.	ZSM-5	Pyro.: 480 °C Catal.: 250-450 °C	Zhang *et al.*[81]
26	2017	HDPE	Semi-batch (plastic was pyrolyzed with catal.)	Semi.	Fe_2O_3, CoO, ZnO, MnO_2 and NiO impregnated waste brick kiln dust (metal = 2 wt%)	Pyro. and catal.: 350 °C	Ahmad *et al.*[93]
27	2017	LDPE	Microwave (pyro.) + FxBR (catal.)	Semi.	MgO	Pyro.: 350-550 °C Catal.: 350-550 °C	Fan *et al.*[95]
28	2017	MP (42 HDPE, 35 PP, 18 PS, 5 PET)	Semi-batch (plastic was pyrolyzed with catal.)	Semi.	Al-, Fe-, Ti-, and Zr-pillared bentonite	Pyro. and catal.: 40 °C/min → 300 °C → 10 °C/min → 500 °C	Li *et al.*[92]
29	2017	HDPE	Two-stage FxBR (1st: plastic pyro., 2nd: catal. bed)	Semi.	ZSM-5 (Si/Al = 20), MCM-41 (Si/Al = 4, at. ratio)	Pyro.: 40 °C/min → 500 °C Catal.: 500 °C	Ratnasari *et al.*[82]
30	2018	*w*PE	Semi-batch (plastic was pyrolyzed with catal.)	Semi.	Fly ash catalyst (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, etc.)	Pyro. and catal.: 500-800 °C	Gaurh and Pramanik[94]
31	2018	*w*PE, *w*PP, *w*PE PP mixtures	Cont. reactor (plastic/catal. simultaneously feed)	Cont.	USY zeolite (Si/Al = 15, at. ratio)	Pyro. and catal.: 500 °C	Kassargy *et al.*[87]
32	2019	LDPE	Microwave (pyro.) + FxBR (catal.)	Semi.	NiO, HY zeolite (Si/Al = 5.1, at. ratio)	Pyro.: 450-600 °C Catal.: 350-500 °C	Ding *et al.*[85]
33	2019	HDPE	Semi.[g] with distil. column (plastic was pyrolyzed with catal.)	Semi.	HZSM-5 (Si/Al = 15, at. ratio)	Pyro. and catal.: 400-500 °C Distil. column.: 20-40 °C	Santos *et al.*[83]
34	2019	LDPE, MP (40 PE, 35 PP, 18 PS, 4 PET, 3 PVC)	Two-stage FxBR (1st: plastic pyro., 2nd: catal. bed)	Semi.	Commercial ACs (PTRODARCO, 8X30, NORIT, GAC1240, MRX, NORIT GCN 1240PLUS, NORIT C GRAN, GAC 830 PLUS)	Pyro.: 430-571 °C Catal.: 430-571 °C	Zhang *et al.*[65]
35	2020	PE	Two-stage FxBR (1st: plastic pyro., 2nd: catal. bed)	Semi.	SiO_2, SA, Si-MFI, Si/Al-MFI	Pyro. and catal.: 450 °C	Klaimy *et al.*[72]

a) waste. b) mixed plastics. c) fixed bed reactor. d) fluidized bed reactor. e) conical spouted bed reactor. f) continuous. g) semi-batch. h) activated carbon. i) silica-alumina. j) molar. k) Kanemite derived folded silica. l) atomic. m) non-precious metals on a silica-alumina support. n) 25 wt% of HY zeolite (SiO_2/Al_2O_3 = 5.2, mol. ratio), 30 wt% bentonite, 45 wt% inert alumina. o) 25 wt% of HZSM-5 zeolite (SiO_2/Al_2O_3 = 30), 30 wt% bentonite, 45 wt% inert alumina. p) 25 wt% of Hβ zeolite (SiO_2/Al_2O_3 = 75), 30 wt% bentonite, 45 wt% inert alumina. q) silica-alumina. r) hierarchical. s) byproduct of Bayer process.

また，上記の総合論文[1]では，日本国内におけるポリオレフィンの発生源や石油精製設備を活用したケミカルリサイクルの可能性についても言及した。この研究開発動向調査を通じて，本サブテーマは製油所周辺の地域循環シナリオに着目するに至っており（３－５，４－５参照），重要な役割を果たした。

４－２．廃プラスチックの化学組成分析法の確立

廃プラスチックの一例として，固形燃料（refuse derived paper and plastics densified fuel：RPF）の原料となる混合プラスチック（図２．１）を調達した。試料は凍結粉砕機により粉砕し，元素組成分析および熱分解分析に供した。

有機元素分析は，元素分析装置により炭素，水素，窒素，フッ素，塩素，臭素，および硫黄含有量を定量した。無機元素分析は，本試料を酸分解処理した後，誘導結合プラズマ質量分析計により測定した。灰分は，熱重量分析装置を用いて900℃で有機物を全て燃焼して残った固体残渣の重量とした。これらの手法を適切に組み合わせることにより，このような雑多な混合プラスチックであっても，高精度にマテリアルバランスを確保し（表２．２），元素組成を明らかにすることに成功した。

図２．１　　混合プラスチック試料

表２．２　　混合プラスチック試料の元素分析結果

Sample	Element																			
	C	H	N	S	Cl	Br	F	B	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Fe	Ni	Zn	O*	Ash
Mixed plastics	66.8	6.3	-	+	1.0	-	-	0.3	0.2	+	0.3	0.9	+	0.1	0.2	+	0.1	0.2	+	23.6	3.5

-: not detected, +: <0.05 wt%, * balance

混合プラスチックに含まれている樹脂種及び添加剤は，熱分解－ガスクロマトグラフ/質量分析計を用いて推定した。試料を50℃ →（10℃/分）→ 300℃の温和な条件で加熱した。本条件では，一部の添加剤は熱分解せずに揮発し，プラスチックの熱分解反応も穏やかであるため，熱分解生成物から本試料に含有されているプラスチック種を予想することが可能であった。得られた熱分解生成物について，クロマトグラムを図２．２に示す。熱分解生成物の詳細な帰属結果については割愛するが，PVC由来，PS由来，PET由来，バイオマス由来の多数の熱分解生成物が確認され，その他にポリウレタン，フッ素系樹脂，ポリメチルメタアクリレート（PMMA），酸化防止剤，PVC可塑剤，滑剤，ゴムなどに由来する生成物も確認された。

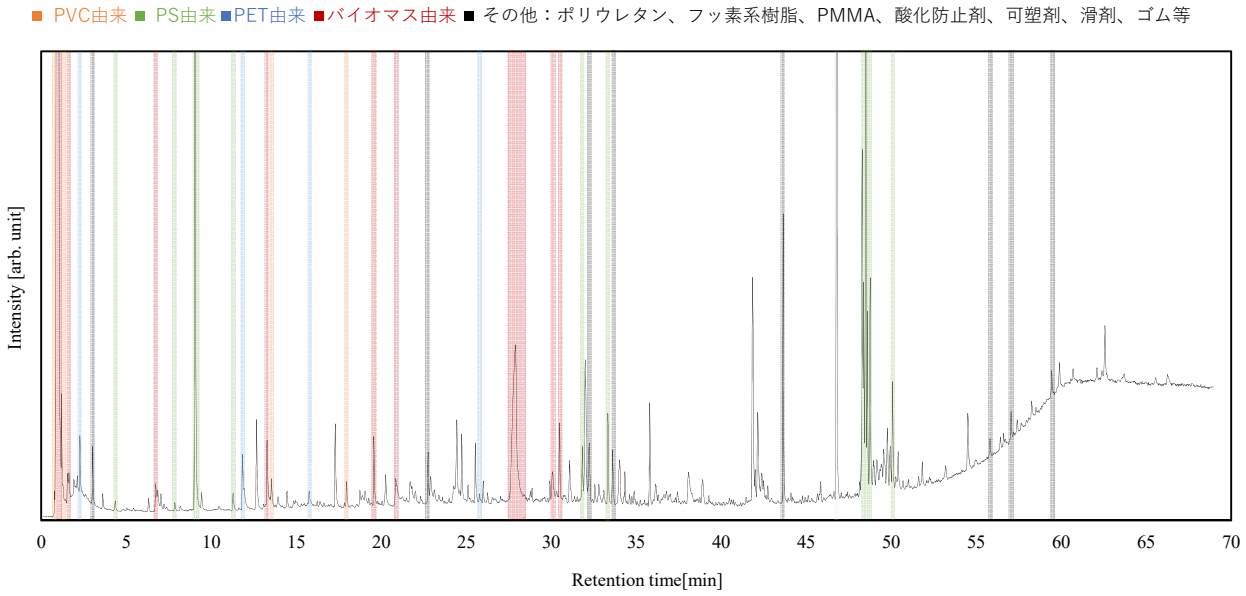


図２．２　　混合プラスチックから得られたクロマトグラム

以上のように，本サブテーマで確立した化学組成分析法を用いれば，回収した廃プラスチックがどのような性状のものであるか全体像を理解することができ，廃プラスチック性状に応じたシナリオ設計の際に有効であることを確認した。

４－３．選別実証試験における選別物の組成を再現したサンプルの熱分解試験

まず，４－１の文献調査などの結果から，熱分解プロセスにおいて液体生成物の収率が高くなる樹脂種類として，オレフィン系樹脂（ポリオレフィン：PEおよびPP）とPSが有力であると考えた。そこで，1．選別なしのプラスチック製容器包装の樹脂組成を比較対象として，2．オレフィン系樹脂の含有率が現実的に最大になる比重選別の選別物，3．PSの含有率が高くなる光学自動選別機によるPS選別の選別物の樹脂組成を特定した（表２．３）。ただし，3．PS選別については，選別前のプラスチック製容器包装のベール（異物および水分を含む）に対して，投入物（樹脂のみ）の重量比が13%と低くなる。そこで，オレフィン系樹脂およびPSの含有率と選別物の重量比を両立できる組成パターンとして，4．光学選別によってPETを選別した残渣の樹脂組成を特定し，熱分解試験の対象に加えた（表２．３）。

[redacted]

次に，表２．３の樹脂組成となるように試薬のPE，PP，PS，PET，およびPVCを混合し，4パターンの試料を調製した。それらの試料を50 gずつ，バッチ式熱分解装置に充填し，室温から450℃まで5℃/分で昇温しながら熱分解した。液体生成物は氷冷トラップで回収し，気体先生物は氷冷トラップの後段に設置したガスバッグによって回収した。固体生成物は，試料充填容器に残った固体残渣とした。

[redacted]

4パターンのサンプルから得られた気体・液体・固体生成物の重量割合は図２．３に示した通りであり，いずれのサンプルからも液体生成物を主とする熱分解生成物が得られた。1．選別なしのサンプルにおいては，約18 wt%の固体生成物が確認されたが，これは主に本試料に含まれているPETおよびPVCに由来する炭化物であると考えられる。一方で，ほとんどPETおよびPVCを含まない他の組成パターンのサンプルにおいては，固体生成物の収率は非常に小さくなった。

[redacted]

PEおよびPPを主とする2．比重選別サンプル，およびPSを主とする3．PS選別サンプルから得られた液体生成物のGC/MS分析結果を，それぞれ図２．４(a)および(b)に示す。[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

４－４．トップダウン法による炭素フローとプラスチックリサイクルの環境負荷削減効果の可視化

プラスチック関連部門（熱硬化性樹脂，熱可塑性樹脂，高機能性樹脂，その他の合成樹脂），およびその他の素材（合成ゴム，化学繊維，木材，紙）を出発点として産業連関分析に基づくトップダウン法で炭素フローを分析し,家計で消費された最終製品について炭素含有量の上位10部門を特定した(図２．５)。上位製品において，プラスチック由来，化学繊維由来，紙由来の炭素が多く含まれることが明らかとなった。プラスチック由来の炭素のみに着目すると,プラスチック製品にはプラスチック製の棒や管，容器など多岐にわたる製品が含まれているが，それらが直接，大量に家計消費へ向かっていることが明らかとなった。また,「乗用車」や「民生用電気機器（除エアコン)」といった加工度の高い最終製品に付随して家計消費に向かうものとともに,「清涼飲料水」や「化粧品・歯磨き」「菓子類」といった容器包装由来と考えられるプラスチックの利用も大きいことが分かった。

炭素量としては，家計消費に向かった総量で156万t，CO_2換算で570万tとなり，すべてが焼却された場合は年間CO_2排出量の0.44%に相当する。無論，乗用車などの耐久財は生産および消費から廃棄されるまでにタイムラグがあるため，この年に家計に向かった炭素が全て同時に放出されることはないが，消費後すぐ廃棄される容器包装以外の耐久財としてのプラスチック利用も将来的な炭素放出源であることには変わりなく，その放出を制御するための技術および仕組みの構築が重要であることが示唆された。

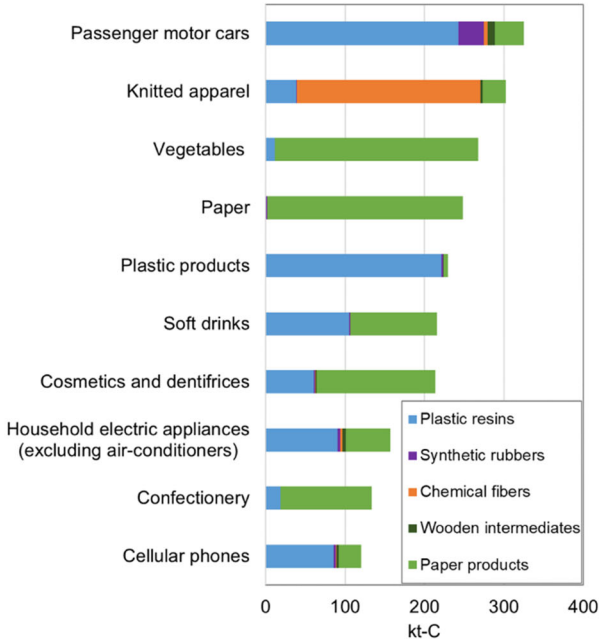


図２．５　家計消費における炭素含有製品上位10部門（2011年）[3)]

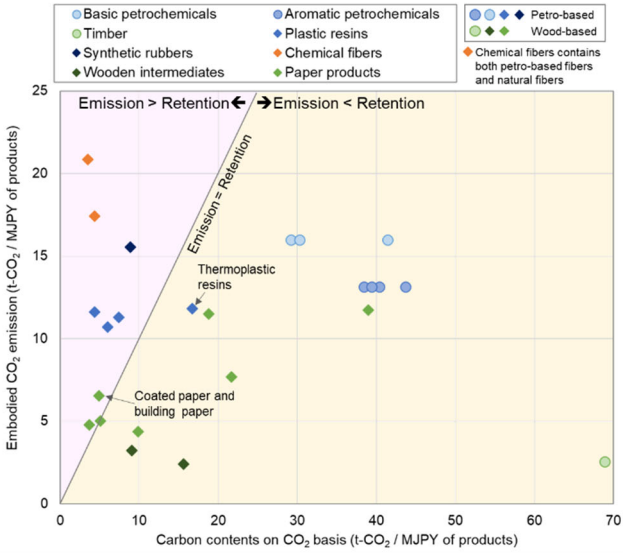


図２．６　素材別炭素含有量（CO_2換算）とカーボンフットプリントの関係[3)]

使用済プラスチックが完全にマテリアルリサイクルされた場合，そのプラスチックをバージン材（化石資源)を用いて生産する工程を回避でき,かつ廃棄物処理プロセスにおける焼却を回避することができる。従って，使用済プラスチックのリサイクルがもたらす炭素循環における利益の最大量は，バージン材由来プロセスにおけるGHG排出量（カーボンフットプリント）と焼却によって放出されるプラスチック中の炭素量（CO_2換算）の和であると考えることができる。図２．６に，バージン材を用いた場合のカーボンフットプリントを縦軸，含有炭素量を横軸として素材別にプロットした。このプロットは，百万円あたりの素材中に炭素を固定するのに排出された炭素量と見なすことができる。図中に引いた直線は，含有炭素量に対してカーボンフットプリントが1対1になる境界線である。従って，この直線よりも下にプロットされる素材は炭素の固定効率が良いと言える。

樹脂について見ると，熱可塑性樹脂は比較的効率よく炭素を固定しているが，それ以外の樹脂は境界線よりも上となっているため，その樹脂の生産は炭素含有量の観点から環境負荷が高いと言える。逆に

言えば，それ以外の樹脂種類はリサイクルによるCO_2排出削減量が熱可塑性樹脂より多いことが示された。また，廃プラスチックをケミカルリサイクルし，エチレンやプロピレンなどの石油化学基礎製品，およびベンゼンなどの石油化学芳香族製品を得ることを想定し，同様の観点で図２．６上にプロットした。これらの石油化学製品は炭素含有量に対してフットプリントが小さい傾向があるため，廃プラスチックをこれらにケミカルリサイクルする場合は，マテリアルリサイクルする場合よりも回避できるフットプリントが小さくなる。しかしながら，ケミカルリサイクルで得られる化学品は基礎的な石油化学製品に限られるわけではない。従って，廃プラスチックを何にリサイクルされるかを念頭に置きながら処理することが重要である。

次に，家計消費された製品別炭素量を横軸，炭素含有量当たりのカーボンフットプリントを縦軸として，製品別にプラスチックリサイクルの最大効果ポテンシャルを直接・間接別に示した（図２．７）。ここでは，製品種別に現行リサイクル法との対応を色分けで示している。Ohno et al.[3]では，本表記方法を「Iceberg図」と呼称した。直接・間接あわせてIcebergの面積が大きいものがリサイクルの効果が高い製品と言え，リサイクル技術および政策の導入ターゲットと考えることができる。マテリアルリサイクルを主眼に置いた場合，ケミカルリサイクルを主眼に置いた場合に比べてIcebergの面積が大きくなる。これは，図２．６で確認できるように，プラスチックのカーボンフットプリントが石油化学製品のカーボンフットプリントより大きいためである。それぞれの場合において，Iceberg全体として990万t-CO_2および700万t-CO_2の排出削減が可能である。2011年時点で，マテリアルリサイクルされている廃プラスチックの割合は22%であることから，単純計算で730万t-CO_2の排出削減の可能性が失われ，直接排出分（すなわち炭素含有分）である446万tが排出されることとなる。この結果は，2011年に生産された製品が一度に廃棄された場合という仮定の上での単純計算であるため，実際の廃プラスチックの組成を反映していないが，プラスチックリサイクルの意義を再認識するには十分なものであると考える。また，現行リサイクル法との対応を見ると，約40%のIceberg（灰色の範囲）がリサイクル法によりカバーされていない。従って，これらのIcebergに対応する製品部門へのリサイクル法の整備が求められるとともに，自動車や家電部門のIcebergが比較的大きいことから，容器包装以外で現行リサイクル法でカバーされている製品に関しても，含有されるプラスチックの扱いを明確にするといった対応が必要であることが示唆された。

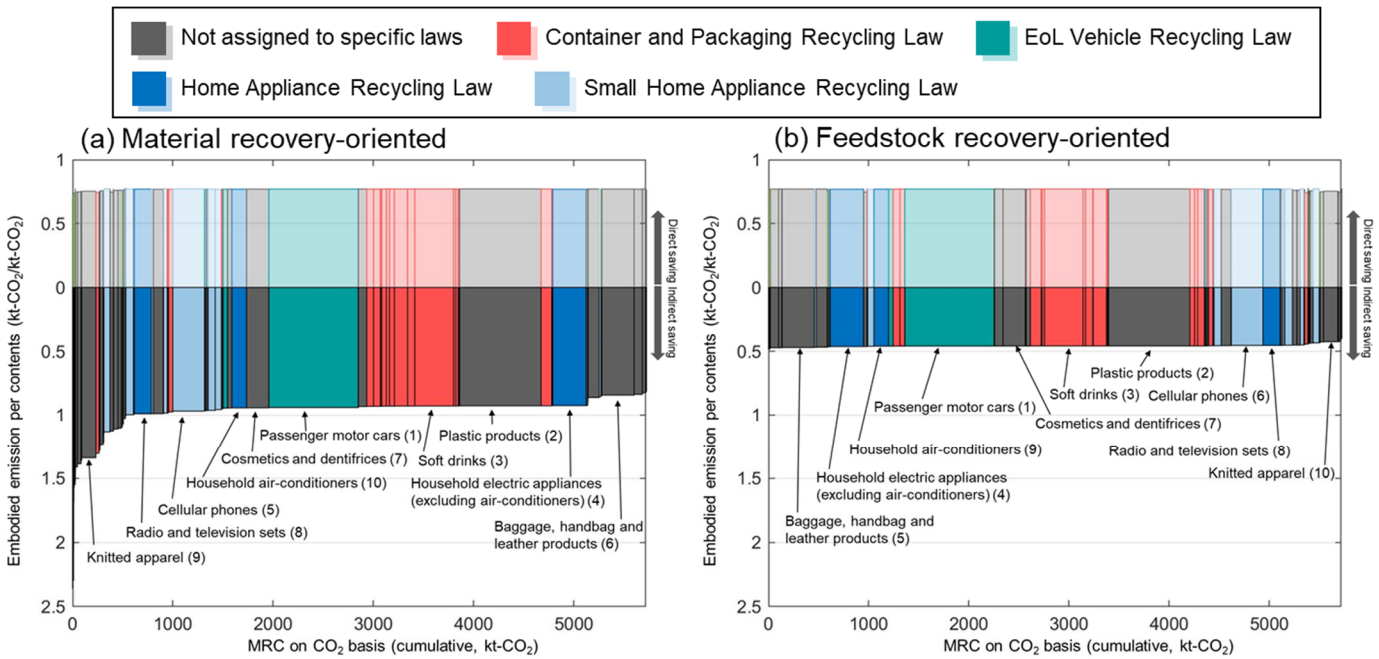


図２．７　プラスチックリサイクルの直接的（上部）・間接的（下部）効果：(a) マテリアルリサイクル，(b) ケミカルリサイクル[3]

４－５．　熱分解試験に基づく製油所を介したプラスチック地域循環のシナリオ設計とフィージビリティ評価

製油所において廃プラスチックを油化し，石油精製プロセスに投入することを検討する。油化の方式には熱分解式，接触分解式，原油蒸留残渣油との共熱分解，触媒反応による潤滑油化などが存在するが，本検討では実際に試験を行った熱分解式に焦点を当て，ケーススタディとして仙台製油所を中心としたプラスチック地域循環シナリオを構築しCO_2排出量の観点から評価する。

熱分解式の油化では，油化生成物を原油とともに常圧蒸留に投入することを想定する（図２．８）。熱分解式の廃プラスチックの油化は，これまで国内においても札幌や新潟において実施されていたが[4-6]，容器包装リサイクル法のもとでの材料リサイクル優先の入札制度，他のケミカルリサイクル技術（コークス炉化学原料化や高炉還元剤化など）との競合により量・質ともに十分な廃プラスチックを得られなかったこと，熱源の確保の問題，生成物の分離工程に追加の設備費用が掛かること，油化工程での発火などの事故のリスクが高いことなどから，2010年までに撤退を余儀なくされている[7]。廃プラスチックの油化を製油所で行うことにより，生成物の分離工程については既存のプロセスを利用できることがメリットである。仙台製油所は1日当たり145,000バレル（23,055 kL）の原油処理能力がある常圧蒸留装置を保有している。一方で，各地で収集された廃プラスチックを回収し，製油所へ輸送することが求められる。仙台製油所が立地する宮城県内および近隣の岩手県，福島県の市町村には，それぞれ39，33，59か所のプラスチック製容器包装の保管施設が存在する。本検討では，これらのうち仙台製油所から道のり距離100 km圏内に立地する保管施設を回収対象とした。また，事前の選別を想定した組成パターン別の熱分解試験の結果（４－３参照）より，選別の有無，選別対象によって得られる生成物の収率および成分が異なることから，プラスチック製容器包装の選別方法についてシナリオを分けて評価を実施した。

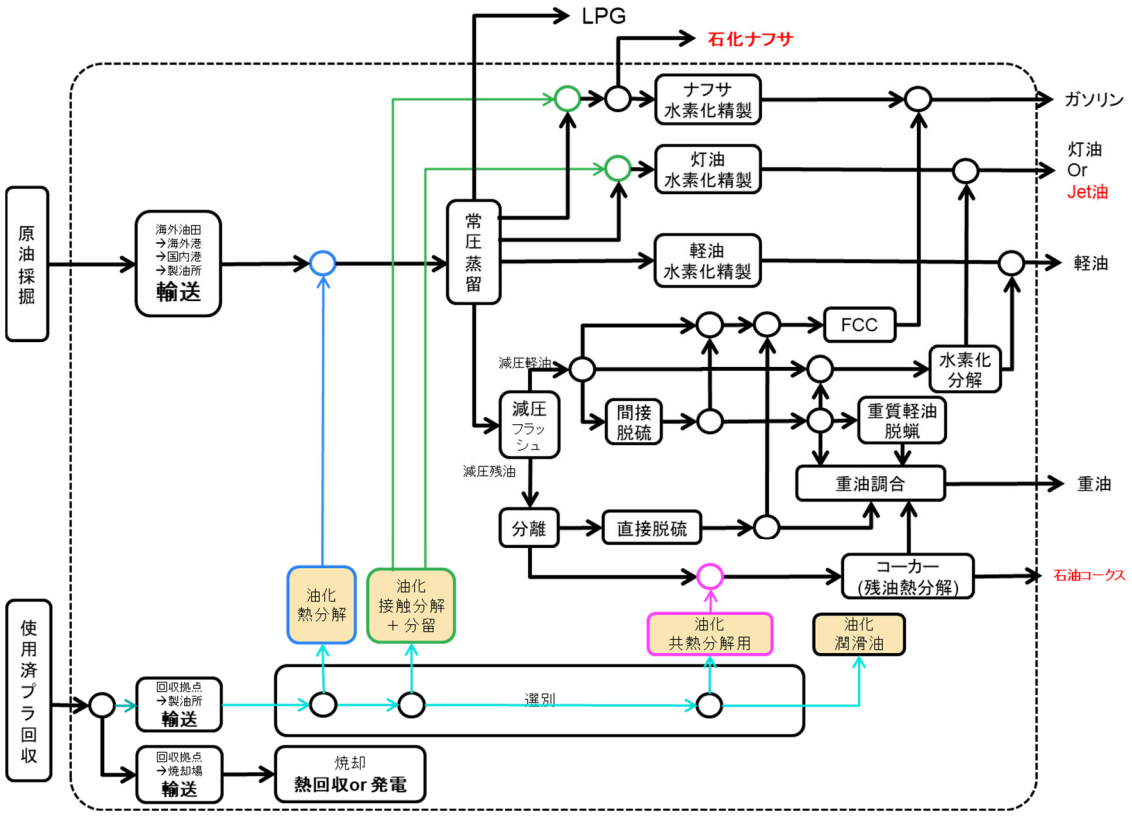


図２．８　　製油所における油化生成物の投入工程の検討

仙台製油所から道のり距離100 km圏内に立地するプラスチック製容器包装の保管施設は，宮城県および福島県の15か所が該当した（表２．４）。単純化のため，これらの15施設と製油所を往復する形での輸送を想定した。図２．９に製油所からの道のり距離100 kmを10 km刻みで回収範囲とした場合の1日当た

りの廃プラスチック回収量と，輸送により発生するCO_2排出量の関係を示す。回収量については，回収対象の施設の規模がそれぞれ異なるため，回収範囲に対して不規則に増加する。100 km範囲で約260 t/日の回収が可能なのに対し，20 km範囲の時点で既に半数を超える140 t/日を回収可能である。CO_2排出量の観点では，当然ながら回収範囲を広げることにより排出量が増加する。輸送は10 tトラックで保管施設と製油所間を往復することを想定しているため，保管施設からの廃プラスチックの回収量が10 tを超える場合は繰り返し同じ道のりを輸送することになる。そのため，回収範囲によって直線の傾きが異なる。この点に関しては，トラックの規模や巡回型で回収ルートをとるなどのシナリオ設定により結果が異なると考えられる。

以上より，廃プラスチックの回収量とCO_2排出量のバランスから，50 kmの範囲で回収する方が100 km範囲で回収するよりも有利であることが示唆されたが，後述する油化プロセスおよび比較対象である廃プラスチックの焼却処理における排出の方が圧倒的に多量であるため，この差はCO_2排出量に限れば結果に大きな影響を及ぼさない。従って，より多くの廃プラスチックを回収できる100 km範囲での回収のケースに絞ってシナリオを設計する。

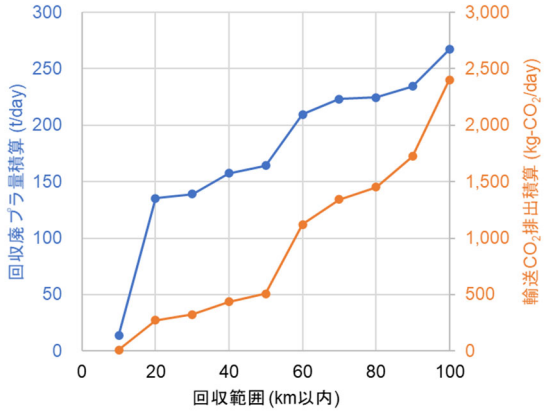


図２．９　製油所からの道のり距離10 km刻みの廃プラスチックの回収可能量と輸送によるCO_2排出量

表２．４　仙台製油所から道のり距離100km圏内のプラスチック製容器包装の保管施設

施設名	市町村	道のり距離［km］	回収量［t/日］
宮城東部衛生処理組合事業所	宮城県宮城郡利府町	9.3	14.0
新浜リサイクルセンター	宮城県塩竈市	9.7	6.1
Ｊ＆Ｔ環境株式会社仙台工場	宮城県宮城郡利府町	10.5	115.0
協業組合富谷環境リサイクルセンター	宮城県富谷市	29.5	3.9
岩沼東部環境センター	宮城県岩沼市	32.0	18.5
黒川地域行政事務組合環境管理センター	宮城県黒川郡大和町	41.1	6.8
仙南リサイクルセンター	宮城県刈田郡蔵王町	51.0	20.7
大崎広域リサイクルセンター	宮城県大崎市	53.0	23.6
女川町クリーンセンター	宮城県牡鹿郡女川町	57.8	1.0
登米リサイクル事業協同組合資源化共同施設	宮城県登米市	64.3	9.2
株式会社相馬リサイクルセンター	福島県相馬市	65.2	4.3
南三陸町ストックヤード	宮城県本吉郡南三陸町	75.8	1.3
有限会社齋藤商店	福島県南相馬市	80.9	1.1
伊達地方衛生処理組合清掃センター	福島県伊達市	86.9	9.0
あぶくまクリーンセンター	福島県福島市	97.5	32.6

廃プラスチックの選別を実施する場所と，その方法によって8シナリオを作成した（表２．５）。選別場所は保管施設または製油所，選別方法は熱分解試験の結果（４－３参照）が良好だった比重選別の選別物（主にPE，PP），PET選別の残渣（主にPE，PP，PS）とした。比重選別については，選別後の廃プラスチックの乾燥の手間などから各保管施設で実施した場合，油化しない選別残渣は焼却施設へ輸送して処理するものとした。その際の輸送に係るCO_2排出については，保管施設の最寄りの焼却施設への道のりと輸送量から前述と同様の手法で算出した。焼却の際は熱を電力として回収することとした（効率10%を想定）。製油所での選別で生じた残渣は，熱源として燃焼されるものとした。このとき，残渣の燃焼は燃料の投入を回避したとみなし，C重油の発熱量換算でC重油製造分の排出を控除した。製油所における熱分解による油化は，投入される廃プラスチックの組成に応じて，熱分解試験における気体・液体・固

体生成物の収率の合計が100%となるように規格化し，それに従ってガス・生成油・コークが産出されるものとした。また，熱分解試験の結果，生成油は幅広い沸点範囲の物質を含むことが示唆されたため，生成油が代替する石油製品を輸入ナフサまたは輸入原油とし，代替される製品の違いによるCO_2排出量の差についても確認した（シナリオ3と4の比較）。生成する気体成分についても構成成分は様々であるが，ここではプロピレンを代替すると仮定した。油化プロセスの運転に係る排出として，熱源の燃焼に伴う排出を計上した。熱源としては，外部から購入する燃料，油化生成物，選別残渣，コーク分を考慮した。以上の油化シナリオに対し，同地域で回収可能な約260 t/日の廃プラスチックを全て各保管施設の最寄りの焼却施設で燃焼し，発電分を控除する全焼却ケースを比較対象として，Break-even解析を行った。

表２．５　　仙台製油所における廃プラスチックの油化シナリオの設定

	選別 （保管施設）	選別 （製油所）	油化の対象とする樹脂種類 → 生成油の分類	油化量 [t/日]
シナリオ1	PET選別	なし	PE，PP，PS → 軽質油（ナフサ代替）	205
シナリオ2	なし	比重選別	PE，PP → 軽質油（ナフサ代替）	152
シナリオ3	なし	PET選別	PE，PP，PS → 軽質油（ナフサ代替）	205
シナリオ4	なし	PET選別	PE，PP，PS → 重質油（原油代替）	205
シナリオ5	なし	なし	PE，PP，PS，PET，PVC → 重質油（原油代替）	267

油化生成物を熱源化する割合を横軸変数とし，全焼却ケースと同等のCO2排出量となるときに許容される外部燃料の投入量を縦軸に取りBreak-even線図を作成した（図２．１０(a)）。[redacted]

[redacted]

[redacted]しかしながら，以上に述べた傾向は，全焼却ケースの排出からの削減を検討する際の出発点を示すものでしかない。

そこで，図２．１１に全焼却ケースに対して10%から50%排出削減を達成する際のBreak-even線図を，複数シナリオで重ねた図を示す [redacted]

[redacted]

次に，同じPET選別の残渣を油化するシナリオ1，3および4を比較する（図２．１１(b)）。シナリオ1と3の差異は，選別を行う場所であり，それに伴って選別残渣の取り扱いが異なる。前述のとおりシナリオ1では焼却発電を，シナリオ3では燃焼による燃料投入の控除を想定することが両者の違いである。[redacted]

[redacted]従って，廃プラスチックの油化によって，よりCO_2排出の削減効果が高くなるような，排出原単位の大きい代替先を選定することが重要である。選別組成別の油化生成物の含有成分を特定することで，より現実的な代替先の決定とそれに基づく線の引き直しが可能である。

[redacted]Iceberg図では，石油化学基礎製品まで戻すことを想定しているため，今回のようにナフサや原油といったより加工度の低い製品の生産を控除する場合よりもリサイクルによる生産控除分の効果が大きい。油化生成物の含有物や製油所における精製技術についてより理解を深め，油化によって実際に何が控除できたのかを明確にすることで,Icebergの高さを最大値に近づけることが可能であると考える。また，今回の検討ではCO_2排出のみをBreak-even解析したが，本シナリオをより実装に近付けるには費用面も評価すべきである。本検討において最もCO_2排出削減が容易とされたシナリオ1では，プラスチック製容器包装の保管施設においてPET選別（光学自動選別機の利用を想定）を行うが，現状で市町村の保管施設に選別機が存在するわけではない。選別機の導入費用や稼働率を考えると，製油所に集約的に設置し選別するシナリオ3の方が有利になる可能性が高い。製油所を介した廃プラスチックの地域循環構造の構築に向けて，CO_2排出量を削減しつつ経済的にも実現可能な範囲を探索すべく，検討を重ねる必要がある。

５．研究目標の達成状況

本サブテーマでは，研究課題全体の評価基盤として，熱分解技術を中心とした化学原料化の研究開発動向を調査し（再生技術のフィージビリティ分析），産業連関表を用いたトップダウン法により産業全体の炭素フローを分析することで動脈産業における廃プラスチックの利用ポテンシャルを示した。さらに，廃プラスチックの化学組成分析法を確立した上で，サブテーマ１における選別実証試験の結果を活用して熱分解試験を実施してプロセスデータを推計した。さらに，この熱分解試験の結果を反映したBreak-even解析により，製油所を介した地域循環構造の実現可能性について現実的な検討を可能にするなど，目標を上回る成果をあげた。

６．引用文献

1) S. Kumagai, J. Nakatani, Y. Saito, Y. Fukushima, T. Yoshioka: Journal of the Japan Petroleum Institute 63(6), 345-364 (2020) [IF: 0.890] Latest trends and challenges in feedstock recycling of polyolefinic plastics
2) 日本容器包装リサイクル協会：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 (2007)
3) H. Ohno, Y. Shigetomi, A. Chapman, Y. Fukushima: Resources, Conservation and Recycling 166, 105263 (2021) [IF: 8.086] Detailing the economy-wide carbon emission reduction potential of post-consumer recycling
4) J. Scheirs, W. Kaminsky: Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels, Wiley (2006)

5) 中谷隼，鈴木香菜，平尾雅彦：廃棄物資源循環学会論文誌22(3)，210-224（2011）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
6) G. Grause, A. Buekens, Y. Sakata, A. Okuwaki, T. Yoshioka: Journal of Material Cycles and Waste Management 13, 265-282 (2011) Feedstock recycling of waste polymeric material
7) プラスチック循環利用協会：プラスチック基礎知識2020（2020）

Ⅱ－３　プラスチック循環に伴う合成樹脂添加剤のフロー分析

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　　小口 正弘

［要旨］

本サブテーマでは，国内で発生する使用済み電気電子機器に由来するプラスチックの処理・リサイクルフローとそれに伴う含有臭素系難燃剤のフローを推計した。2017年度の推計結果では，国内で発生する電気電子機器由来プラスチックの多くは国内で混合プラスチックや破砕残渣として回収されていることがわかった。ただし，国内でマテリアルリサイクルに向けられるものは総発生量の10%強であり，多くは熱回収・焼却処理や混合プラスチックとしての輸出に向けられていると推計された。電気電子機器由来プラスチックの選別処理における臭素系難燃剤の分配挙動を実験的データから明らかにし，それに基づいて臭素系難燃剤のフローを推計したところ，2017年度において国内のマテリアルリサイクルへ流入した臭素系難燃剤は総量の1%未満であると考えられた。これは，臭素系難燃剤含有プラスチックの多くが比重選別プロセスにおいて重比重プラスチックとして除去されることによるものであり，現状のプロセスにおいても臭素系難燃剤は結果的に循環のフローから排除され，適正管理に繋がっていると考えられた。他方，国内で発生する電気電子機器由来プラスチックに含まれる臭素系難燃剤は50%程度が海外輸出されたと推計されたが，近年の中国の廃プラスチック輸入禁止や日本の雑品スクラップ輸出規制強化によって国内での処理・循環に回るようになり，結果的に国内での熱回収・焼却による臭素系難燃剤の無害化が促進されたものと考えられた。

１．研究開発目的

本サブテーマでは，機器系プラスチックのうち電気電子機器に由来するプラスチックの回収，処理，リサイクルフローを明らかにするとともに，電気電子機器由来プラスチックのリサイクルに伴う臭素系難燃剤のフローの現状を明らかにした。また，中国の廃プラスチック輸入禁止や日本の雑品スクラップ輸出規制強化といった社会情勢に伴う電気電子機器由来プラスチックのリサイクルフローの変化について実態を把握し，それをふまえたシナリオ分析を行うことで，リサイクルフローの変化に伴う臭素系難燃剤のフローを把握するとともに，国内循環を促進する上でその制約となりうる要素を考察した。

２．研究目標

機器系プラスチックに含有される添加剤が，どのような製品として社会に戻るかについて難燃剤を事例として分析し，循環シナリオの制約となりうる箇所があればそれを明らかにする。

３．研究開発内容

３－１．電気電子機器由来プラスチックの添加剤含有データの整理

機器系プラスチックに由来する再生樹脂に含有される可能性がある添加剤の情報として，家電・小型家電リサイクルにおいて回収されるプラスチックの添加剤含有データを整理した。具体的には，臭素系難燃剤を対象とし，国立環境研究所で実施した過去の分析調査データの整理，小型家電の分析データの追加等を行った。

まず，梶原らが環境研究総合推進費補助金課題「新規POPsを含有する廃棄物の環境上適正な管理に関する研究」（3K163005）において実施した家電4品目からの回収プラスチックのデカブロモジフェニルエーテル（DeBDE）含有量分析調査結果[1)]を整理した。同調査は，2016年9月に指定家電4品目のリサイクル施設2ヵ所および家電破砕混合プラスチック選別施設1ヵ所で回収プラスチックの採取を行い，DeBDEの含有量を分析したものである。試料の採取，前処理，分析方法は同課題報告書[1)]を参照されたい。また，

同じ採取試料について,梶原が実施したDeBDE以外の22種類の臭素系難燃剤の含有量分析データの提供を受け，その整理を行った。

また，小型家電に含まれるプラスチックの難燃剤含有量データを文献および分析調査から取得，整理した。まず，環境省が2020年11月に実施した国内で小型家電由来混合プラスチックの選別，再生を行っている樹脂再生業者におけるDeBDEの分析調査データ[2)]を整理した。この対象施設では，比重の異なる選別液を用いた3段階の湿式比重選別プロセスを用いており,選別プロセスの原料である小型家電由来混合プラスチックおよび各選別槽の浮遊物および沈殿物の試料採取を行って分析を行なったものである。また,同じ試料の提供を受け,テトラブロモビスフェノールA(TBBPA),デカブロモジフェニルエタン(DBDPE)の分析を行い，含有量データを取得した。加えて，Oguchi et al.[3)]が小型家電リサイクル制度の開始以前である2010年1月にある自治体の不燃・粗大ごみ処理施設において小型家電の破砕選別試験を行い，試料採取，金属類の分析を行なった選別後の回収物や残さの試料について，臭素系難燃剤（DeBDEを含むポリ臭素化ジフェニルエーテル（PBDEs），ヘキサブロモシクロドデカン（HBCDs），TBBPA，DBDPE）の含有量分析を行った結果をもとに，小型家電に含まれるプラスチックの難燃剤含有量データを作成した。このときの試料は，試験を行った自治体である期間（2週間）に排出された小型家電全て（約12.6 t）を破砕選別したものであり，破砕対象であった小型家電は小型家電リサイクル制度における制度対象品目全てである（特定対象品目ではない）。破砕選別後に採取した磁選回収物，可燃残渣（30 mm以上），不燃残渣（30 mm未満），サイクロン・バグフィルターで集塵したダストの各試料のプラスチック重量割合（素材組成）と難燃剤含有量の分析結果から，小型家電に含まれるプラスチック中の平均的な難燃剤含有量を推定した。ただし，難燃剤は全て硬質プラスチックに含まれるものと仮定して計算した。

３－２．電気電子機器由来プラスチックのフロー推計

電気電子機器やプラスチックのリサイクルに関する公表資料データの整理，多数の樹脂再生業者や小型家電認定事業者等へのヒアリングによる実態把握を行い，それらに基づいて電気電子機器由来プラスチックのリサイクルフローを以下の通り推計した。

(1) 電気電子機器由来プラスチックの国内発生量

電気電子機器由来プラスチックの国内発生量は，使用済み電気電子機器の国内発生量に品目ごとのプラスチック含有率を乗じて推計した。使用済み電気電子機器の国内発生量は環境省による推計値[4,5)]を引用した。品目ごとのプラスチック含有率は家電リサイクルおよび小型家電リサイクルの実績データから推定した。具体的には，家電については，家電リサイクル実績[6)]における「その他有価物」再商品化量をプラスチック再資源化量，再商品化等重量と再商品化重量の差分をプラスチック熱回収量とみなし，これらの合計を処理量で除したものをプラスチック含有率とした。小型家電については，小型家電リサイクル法施行規則第15条に基づく報告値[5)]における「プラスチック再資源化量」と「プラスチック熱回収」の合計を処理量で除したものをプラスチック含有率とした。

(2) 電気電子機器由来プラスチックの仕向先別仕向量

処理施設等の仕向先別の電気電子機器由来プラスチック仕向量は，(1)で推計した電気電子機器由来プラスチックの国内発生量に仕向先別の仕向割合を乗じて推計した。仕向先は家電リサイクルプラント，小型家電認定事業者，一般廃棄物処理施設，産業廃棄物処理業者，スクラップ業者・中古品輸出業者（海外輸出）とし，仕向先別の仕向割合は環境省による推計値[4,5)]をもとに設定した。

(3) 各仕向先（処理施設等）における回収物別の回収量

処理施設等の各仕向先において使用済み家電・小型家電の処理が行われたときに電気電子機器由来プラスチックがどのような回収物として回収されるか，その回収物別の回収量（各回収物として回収されるプラスチックの量）を推計した。回収物別の回収量は，(2)で推計した仕向先別の電気電子機器由来プラスチックの仕向量に，各回収物への分配率を乗じて推計した。家電・小型家電リサイクルの実態をふまえ，回収物の種類は単一素材プラスチック（マテリアルリサイクル向け），混合プラスチック（マテリ

アルリサイクル向け)，混合プラスチックまたは破砕残渣（熱回収・焼却処理向け)，破砕残渣（埋立向け）とした。各回収物への分配率は家電・小型家電リサイクル実績[5,6]，文献[3,7]，認定事業者等へのヒアリングに基づいて推定した。

(4) 混合プラスチックの国内樹脂再生業者仕向量と輸出量

(3)での回収物のうち混合プラスチック（マテリアルリサイクル向け）について，推計対象とした2017年度においては回収された混合プラスチックの多くが中国など海外へ輸出されていた。そこで，樹脂再生業者等へのヒアリングに基づいて国内樹脂再生業者と輸出への仕向割合を設定し,(3)で推計した混合プラスチック（マテリアルリサイクル向け）の回収量を国内樹脂再生業者向けと混合プラスチックとしての輸出に配分した。なお，その後の社会情勢等の変化により，現在の混合プラスチックの輸出量は大きく減少していると考えられるが，この影響については後のシナリオ分析において分析する。

(5) 混合プラスチックの選別プロセスにおける樹脂種別回収量

家電リサイクルプラントや小型家電認定事業者において回収された混合プラスチックについて，国内の複数の樹脂再生業者へのヒアリングによれば，業者によって詳細には違いがあるものの概ね湿式比重選別と静電選別または近赤外線選別を組み合わせた選別によって樹脂種類別に選別し，再生プラスチック原料として回収，利用されている。この選別プロセスにおいて，電気電子機器由来の混合プラスチックで回収，再生利用される樹脂は一般的にポリプロピレン（PP)，ポリスチレン（PS)，アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン（ABS）の3種である。選別プロセスにおける技術的パラメータとして回収される各樹脂種への分配率を設定し，樹脂再生業者における混合プラスチックからの樹脂種別回収量を推計した。この各樹脂種への分配率は，文献[8,9]から得られたWEEE由来混合プラスチックの組成データ，電気電子機器由来混合プラスチックを扱っている複数の樹脂再生業者へのヒアリングから得られた情報に基づいて推定した。

また，国内の樹脂再生業者には選別したプラスチックからX線選別を用いて高臭素高有プラスチックを除去している業者がある。再生樹脂業者へのヒアリングや認定事業者へのアンケート調査[10]に基づいてX線選別を行っている樹脂再生業者とそれ以外への仕向け量を推計した。

３－３．電気電子機器由来プラスチックのフローに伴う臭素系難燃剤フローの推計

電気電子機器由来プラスチックのフローに伴う含有臭素系難燃剤のフローは，基本的には３－３のプラスチックのフロー推計と同様の方法で推計した。すなわち，臭素系難燃剤を含むプラスチックがプラスチック全体と異なる分配挙動を示すプロセスを除き，プラスチックそのものと同じ仕向割合や分配率のパラメータを用いて臭素系難燃剤の量を配分した。

複数の樹脂再生業者へのヒアリングから，臭素系難燃剤を意図的添加のレベルで含有するプラスチックは，その比重の大きさから湿式比重選別において一定の割合が除去されていると考えられた。このため，樹脂再生業者における混合プラスチックの選別プロセスについては，臭素系難燃剤含有プラスチックがプラスチックそのものとは異なる分配挙動を示すことから，臭素系難燃剤の分配率は混合プラスチックとは異なる値を設定した。その分配率は，文献[9,11,12]で報告された実験的データ，樹脂再生業者へのヒアリングから得られた情報,国内の樹脂再生業者において環境省が行なったDeBDEや全臭素の分析調査データ[2]および同じ試料について本研究で分析したTBBPA，DBDPEの分析調査データを元に，調査対象施設等へのヒアリングによって得られた混合プラスチックの選別における物質収支の情報を組み合わせて推定した。

３－４．電気電子機器由来プラスチックの処理・リサイクルに伴う臭素系難燃剤のフロー推定とシナリオ分析

前項まで（３－２，３－３）の推計は，推計実施時点で使用済み電気電子機器の処理・リサイクルフローデータが利用可能な最新年度である2017年度について行っており，使用済み電気電子機器から回収されたプラスチックの一定割合は中国をはじめとする海外へ輸出されていた時期を対象とした推計とな

っている。しかし，2018年末の中国による工業系廃プラスチックの輸入禁止およびそれに続く東南アジア諸国における輸入制限，また，バーゼル条約附属書の一部改正に伴って2021年に施行されたバーゼル法省令改正による混合プラスチックの輸出規制強化により，混合プラスチックの輸出量についてはその後大きく減少したと考えられる。また，2017年度においては，使用済み家電・小型家電の一定割合は，混合金属スクラップ（いわゆる「雑品スクラップ」）として輸出されており，推計もこれを想定したものとなっている。しかし，2018年に施行された廃棄物処理法およびバーゼル法改正による雑品スクラップ輸出規制強化によって，雑品スクラップとしての輸出もその後は減少していると考えられる。そこで，それらの社会情勢の影響をふまえ，電気電子機器由来プラスチックの輸出の減少とそれに伴う国内での処理・循環増加を想定したシナリオ分析を行った。

複数の樹脂再生業者や小型家電認定事業者へのヒアリングから，近年，電気電子機器由来混合プラスチック選別施設の建設が日本国内で進んでおり，これまで輸出後に輸出先で行われていた混合プラスチックの選別処理やペレット化が日本国内で行われるように変化しつつあることがわかった。また，ヒアリングによれば，国内における電気電子機器由来混合プラスチックの選別処理は，数ヶ所の大規模な選別施設へ集約されつつあることもわかった。そこで，これらの状況をふまえた電気電子機器由来プラスチックの国内処理・循環増加シナリオとして，国内で発生する使用済み電気電子機器（家電および小型家電），それらから回収される混合プラスチックの全てが国内で選別処理，ペレット化まで行われた場合を仮定したシナリオ分析を行った。具体的には，３－２(2)の仕向先別市向け割合のうちスクラップ業者・中古品輸出業者向けの割合，３－２(4)の混合プラスチックの輸出向け割合をゼロとし，その分を他の仕向先にそれぞれの占める割合で追加配分した。選別プロセスにおける分配率などのその他のパラメータは変わらないものとした。

４．結果及び考察

４－１．電気電子機器由来プラスチックの添加剤含有データの整理

電気電子機器由来プラスチックのDeBDE含有量の分析結果データを整理した結果を図３．１に示す。なお，検出下限（30 mg/kg）未満であった試料はゼロとして扱って表示した。

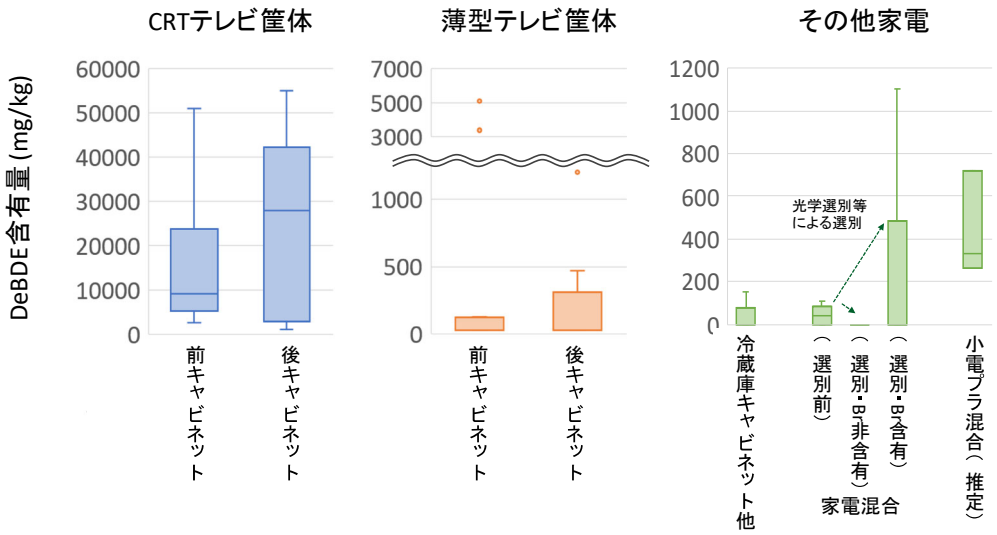


図３．１　　電気電子機器プラスチックのDeBDE含有量分析調査データ

梶原らの調査分析データでは，CRTテレビについては前キャビネット，後キャビネットともに混合破砕物中のDeBDE含有量が%オーダーである試料が多く，非常に高含有量でDeBDEが検出されたことが示されている。ほぼ全ての試料でRoHS指令の規制値（1000 mg/kg）を超えており，CRTテレビのキャビネットは電気電子機器部品への再生利用は困難と考えられ，現在雑貨や建設資材等の別用途へ再生利用されてい

る[13]という状況は難燃剤含有の観点からも妥当であることを示している。また，ストックホルム条約（POPs条約）の規制対象物質への追加に伴い，POPs含有廃棄物としての処理対象基準値（バーゼル条約の低POP含有濃度：Low POP content（LPC））が議論されているが（10 mg/kgまたは1000 mg/kgが提案されている），いずれの値が採られたとしてもその基準値を超過する可能性が高い。ただし，CRTテレビの排出量減少に伴ってキャビネットのプラスチック発生量も縮小すること，関係者へのヒアリングによれば全量焼却処理されるなど再生利用以外の処理へ変更されてきているとのことから，焼却処理等が適切に行われる限りは臭素系難燃剤の管理も適切に行われるものと考えられる。

薄型テレビについては，梶原らの調査分析データでは，ごく一部の試料を除けばDeBDE含有量は最大で500 mg/kg程度であることが示されている。RoHS指令の基準値は多くの試料で超過しておらず，難燃剤含有の観点だけで見れば電気電子機器部品への再生利用も可能性がある。一方，バーゼル条約LPCがより低い値の50 mg/kgに設定された場合には，薄型テレビ筐体由来のプラスチックも再生利用が困難になると考えられる。

テレビ以外の3品目（冷蔵庫，洗濯機，エアコン）由来の混合プラスチックについては，リサイクル施設における回収物としてはDeBDEを最大100 mg/kg程度含有していることが示されている。全く同一の試料ではないが，家電破砕混合プラスチック選別施設において混合プラスチックを比重選別および光学選別によって臭素非含有プラスチックと臭素含有プラスチックに選別した場合には，前者では全試料で不検出，後者ではいくつかの試料で360～1100 mg/kgのDeBDEが検出されている。全ての家電リサイクル施設で回収される混合プラスチックについてこのような選別処理が行われているわけではないが，高度選別によってDeBDEの含有レベルが低いプラスチックを得ることができることが示されている。後の添加剤フロー分析においてはこの選別プロセスにおける臭素系難燃剤の挙動を考慮する。

小型家電に含まれるプラスチックについては，DeBDEの推定含有量は260～700 mg/kgであった。非常に多様な製品が含まれる小型家電総体としての平均的な値ではあるが，CRTテレビを除く家電4品目のデータと比較しても相対的に高濃度である。ただし，小型家電は品目ごとではなく多種の製品が混合されたまま処理されていることから，小型家電由来プラスチックに係る添加剤のフロー分析においてはこの平均的な値を示すデータを出発点とすることは妥当である。なお，図３．１に含めた分析調査データでは，2010年と2020年の採取試料でDeBDE含有量は半分程度の低下しており，時間経過に伴って社会に残存するDeBDE含有製品が減少している影響が現れている可能性が示唆された。

次に，DeBDE以外の臭素系難燃剤のデータについて述べる。梶原による家電4品目の分析調査データでは，分析を行ったDeBDE以外の22種類の臭素系難燃剤のうち，多くの物質において検出されない試料が大部分を占めていた。ただし，DBDPEについては約100試料のうち72%と多くの試料で検出され，その含有量レベルも比較的高かった。また，小型家電に含まれるプラスチックの推定含有量でもDBDPEは比較的高い濃度で検出された。DBDPEはDeBDEの代替として使用されてきていることから，意図的に添加されたものが含まれている可能性が高い。

図３．２に，DBDPEの含有量データを整理したものを示す。なお，検出下限（30 mg/kg）未満であった試料はゼロとして扱って表示した。CRTテレビ，薄型テレビ筐体プラスチックについては，試料によって含有量レベルが大きく異なるものの，最大で1%程度のDBDPEが含有されていた。CRTテレビの筐体についてはDeBDEよりも含有量レベルが低いが，これはCRTテレビではDeBDE使用製品の方が主流であり，DBDPE使用製品は一部のみであるためではないかと考えられる。一方，薄型テレビの筐体についてはDeBDEよりも含有量レベルが高い。これは，薄型テレビ筐体にはDeBDEはほとんど使用されていないこと，DBDPEが薄型テレビ筐体に使用される主要な難燃剤の1つであることを示唆している。なお，臭素系難燃剤の添加量は一般的に10%以上のオーダーであることを考えると，DBDPE含有量が最大でも1%程度であることは，製品によってはDBDPE以外の難燃剤が使用されているものもあり，それらが一定の割合で混在して使用済みとなっていることが推察される。

テレビ以外の3品目（冷蔵庫，洗濯機，エアコン）由来の混合プラスチックについては，リサイクル施設における回収物としてはDBDPEを最大100 mg/kg程度含有しており，これはDeBDEと同レベルである。また，DeBDEと同様に，比重選別および光学選別によってDBDPE低含有量のプラスチックと高含有量のプ

ラスチックに選別されていることが示されている。また，小型家電に含まれるプラスチックについては，DBDPEの推定含有量は300mg/kg前後であり，DeBDEよりもやや低含有量であるが，オーダーは大きく変わらなかった。このデータは，傍証的ではあるが，テレビ以外の家電3品目や小型家電のプラスチックにおいてDBDPEはDeBDEの代替的に使用されてきた可能性を示唆している。ただし，DeBDEのケースと異なり，2010年と2020年の採取試料の間で含有量に大きな差は見られず，DeBDEの使用中止に関わらずDBDPEは過去から使用されていた可能性も示唆される。

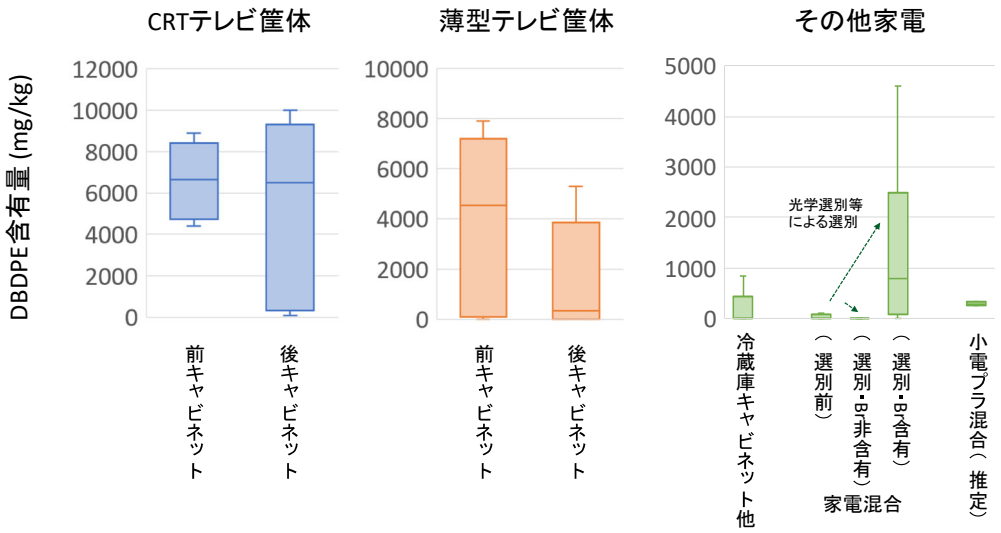


図３．２　　電気電子機器プラスチックのDBDPE含有量分析調査データ

４－２．電気電子機器由来プラスチックのフロー推計

前項（４－１）において，テレビの筐体には臭素系難燃剤が高濃度で含まれることが整理されたが，プラスチックの回収，リサイクル実態として，テレビの筐体プラスチックは他の品目と分別した形で処理，リサイクルがされるケースが多いこと，規制臭素系難燃剤を含むCRTテレビの筐体は焼却処理を行うケースも多くなっているという情報もあることから，以降ではテレビを除く家電3品目（エアコン，冷蔵庫・冷凍庫，洗濯機・衣類乾燥機）および小型家電に由来するプラスチックを対象として行った推計結果について示す。

(1) 電気電子機器由来プラスチックの国内発生量

表３．１に，品目ごとのプラスチック含有率とそれに基づく電気電子機器由来プラスチック国内発生量の推計結果を示す。家電3品目と小型家電の合計で約400千tのプラスチックが発生したと推計された。

表３．１　　品目ごとのプラスチック含有率と国内発生量（2017年度）

		エアコン	冷蔵庫・冷凍庫	洗濯機・衣類乾燥機	小型家電
(A)	プラスチック再資源化量*1（千t/年）	19	49	44	2.3
(B)	プラスチック熱回収・焼却量*2（千t/年）	9	36	13	20.3
(C)	使用済み製品処理量*3（千t/年）	116	185	137	66
(D=(A+B)/C)	製品中平均プラスチック含有率	24%	46%	41%	34%
(E)	国内使用済み発生量(千t/年)	265	238	169	450
(F=E*D)	プラスチック国内発生量(千t/年)	64	109	70	154

*1 家電3品目は「その他有価物」再商品化量をプラスチック再資源化量と見なした。
*2 家電3品目は再商品化等重量と再商品化重量の差をプラスチック熱回収量と見なした。
*3 家電3品目は再商品化重量/再商品化率から推定した。

(2) 電気電子機器由来プラスチックの仕向先別仕向割合

表３．２に，推定した電気電子機器由来プラスチックの仕向先別仕向割合を示す。この仕向割合は，使用済み製品の発生から処理施設等への仕向についてのものであるから，使用済み製品そのものの仕向割合と同じである。2017年度においては，雑品スクラップとしての輸出も多く，家電3品目については家電リサイクルプラントで処理された使用済み製品は発生量の43%から82%と推定された。小型家電については小型家電リサイクル制度の元で処理されたものが全体の16%であり,雑品スクラップとしての輸出も20%あるものの，大部分は一般廃棄物または産業廃棄物としての処理が占めていると推定された。

表３．２　　電気電子機器由来プラスチックの仕向先別仕向割合（2017年度）

	エアコン	冷蔵庫・冷凍庫	洗濯機・衣類乾燥機	小型家電
家電リサイクルプラント	43%	79%	82%	-
小型家電認定事業者	-	-	-	16%
一般廃棄物処理施設	-	-	-	28%
廃棄物処理業者	0.7%	0.8%	0.6%	37%
スクラップ業者・中古品輸出業者（海外輸出）	56%	21%	17%	20%

(3) 各仕向先（処理施設等）における回収物別の分配率

表３．３に，推定された各仕向先での処理における回収物別の分配率を示す。家電リサイクルプラントおよび小型家電認定事業者(a)については家電･小型家電リサイクル実績および認定事業者等へのヒアリング,一般廃棄物処理施設(b)については地方自治体の破砕選別処理施設における小型家電破砕実験で得られた可燃残渣と不燃残渣への分配率データに基づいて推定した値である。また，産業廃棄物処理業者(c)については，家電3品目は家電リサイクルプラントと同等以上の処理が求められていることから家電リサイクルプラントと同じ値とした。一方，小型家電についてはマテリアルリサイクル向けのプラスチック回収は一般的に行われていないことからゼロとし，小型家電認定事業者の値を参考に熱回収・焼却向けと埋立向けの破砕残渣への分配率を設定した値となっている。

表３．３　　各仕向先での処理における回収物別の分配率

(a) 家電リサイクルプラント・小型家電認定事業者

	エアコン	冷蔵庫・冷凍庫	洗濯機・衣類乾燥機	小型家電
単一素材プラ（マテリアルリサイクル向け）	10%	40%	2%	-
混合プラ（マテリアルリサイクル向け）	60%	20%	78%	10%
混合プラ、破砕残渣（熱回収・焼却処理向け）	30%	40%	20%	62%
破砕残渣（埋立向け）	-	-	-	27%

(b) 一般廃棄物処理施設

	エアコン	冷蔵庫・冷凍庫	洗濯機・衣類乾燥機	小型家電
混合プラ、破砕残渣（熱回収・焼却処理向け）	-	-	-	20%
破砕残渣（埋立向け）	-	-	-	80%

(c) 産業廃棄物処理業者

	エアコン	冷蔵庫・冷凍庫	洗濯機・衣類乾燥機	小型家電
単一素材プラ（マテリアルリサイクル向け）	10%	40%	2%	-
混合プラ（マテリアルリサイクル向け）	60%	20%	78%	-
混合プラ、破砕残渣（熱回収・焼却処理向け）	30%	40%	20%	70%
破砕残渣（埋立向け）	-	-	-	30%

(4) 混合プラスチックの国内樹脂再生業者仕向量と輸出量

混合プラスチック（マテリアルリサイクル向け）の国内樹脂再生業者向けと輸出向けの仕向割合につ

いて,家電3品目は主要な国内樹脂再生業者へのヒアリングから電気電子機器由来混合プラスチックの国内受け入れ可能量を概算したところ，国内樹脂再生業者向けが20%，輸出向けが80%程度であった。小型家電については，小型家電認定事業者で回収された二次資源は国内の業者へ引き渡すことが基本とされており，環境省の推計フローにおいてもリユースを除けば海外への輸出フローはほぼないことから，全量が国内樹脂再生業者へ仕向けられたものとした。ただし，前述の通り，国内樹脂再生業者で製造された再生ペレットの輸出は存在するものと考えられる。

(5) 混合プラスチックの選別プロセスにおける樹脂種別回収量

表３．４に，推定した混合プラスチックの選別プロセスにおける各樹脂への分配率を示す。また，家電3品目および小型家電に由来する混合プラスチックから選別，回収されたPP，PS，ABSのうち，それぞれ60％と10％がX線選別で処理されたものと設定した。

表３．４　　混合プラスチック選別プロセスにおける分配率

	混合プラスチックの由来	
	家電3品目（エアコン，冷蔵庫・冷凍庫，洗濯機・衣類乾燥機）	小型家電
PP	50%	13%
PS	15%	25%
ABS	15%	50%
重比重プラ	20%	6%
その他	-	6%

以上のデータをもとに推計した電気電子機器由来プラスチックのフロー（2017年度）を図３．３に示す。家電3品目に由来するプラスチックは，総発生量の約70%に相当する171千トンが家電リサイクルプラントへ仕向けられ，そのほとんど（約80%）は混合プラスチックまたは破砕残渣として回収されたと推計された。一方，小型家電に由来するプラスチックは，大部分が一般廃棄物処理または廃棄物処理業者へ仕向けられ，それらは熱回収・焼却または埋立される破砕残渣として回収されたと推計された。小型家電認定事業者へは総発生量の約15%に相当する約25千tが仕向けられたと推計されたが，マテリアルリサイクル向けにプラスチックを回収している小型家電認定事業者は限られるため，マテリアルリサイクル向けに回収された混合プラスチックは仕向量の約10%に過ぎず,大部分は熱回収向けの混合プラスチックか焼却または埋立向けの破砕残渣として回収されたと推計された。なお，小型家電認定事業者へのヒアリングおよびアンケート調査によれば，この状況は2019年度においても大きく変わっていないと考えられた。

次に，2017年度において，家電リサイクルプラントや小型家電認定事業者で回収された混合プラスチックのうち18千トンが国内樹脂再生業者へ仕向けられたと推計された。この量は電気電子機器由来プラスチックの国内発生量の約5%に相当する。これらは，湿式比重選別と静電選別または近赤外線選別を組み合わせた選別によって選別され，選別処理量18千トンの約80%にあたる15千tが再生プラスチック原料（PP，PS，ABSフレーク）として回収され，残りの約20%にあたる3千tが重比重プラスチックとして分離されていたと推計された。この量は国内総発生量の5%程度であり，家電リサイクルプラントで回収されている単一素材プラスチック（約38千t）と合わせても，マテリアルリサイクル向けの回収量は国内総発生量の13%程度であると推計された。

また，2017年度においては，家電3品目と小型家電に由来するプラスチック総発生量のそれぞれ約30%と20%に相当する71千t，31千tが雑品スクラップに含まれて輸出され，家電リサイクルプラントで回収された混合プラスチックの80%にあたる63千tが混合プラスチックとして輸出されていたと推計された。合わせて165千t,国内総発生量の40%程度が輸出されたことになる。特に後者の混合プラスチックの輸出は，輸出先で選別され，再生材として利用されていたと考えられるが，国内の樹脂再生業者へのヒアリングによれば，それらの再生プラスチックの多くは建築資材に使用されているものの，海外の電気電子機器メーカーでも使用されているという情報があり，一定量の電気電子機器由来プラスチックが新しい電気・電子製品に使用されている可能性が示唆された。なお，これらの輸出量は，前述の通り，中国の廃

プラスチック輸入禁止や東南アジア諸国における輸入制限，バーゼル条約附属書の一部改正に伴う混合プラスチックの輸出規制強化，廃棄物処理法およびバーゼル法改正による雑品スクラップ輸出規制強化によって現在は減少しており，現在はその分国内処理業者等への仕向量が増加していると考えられる。

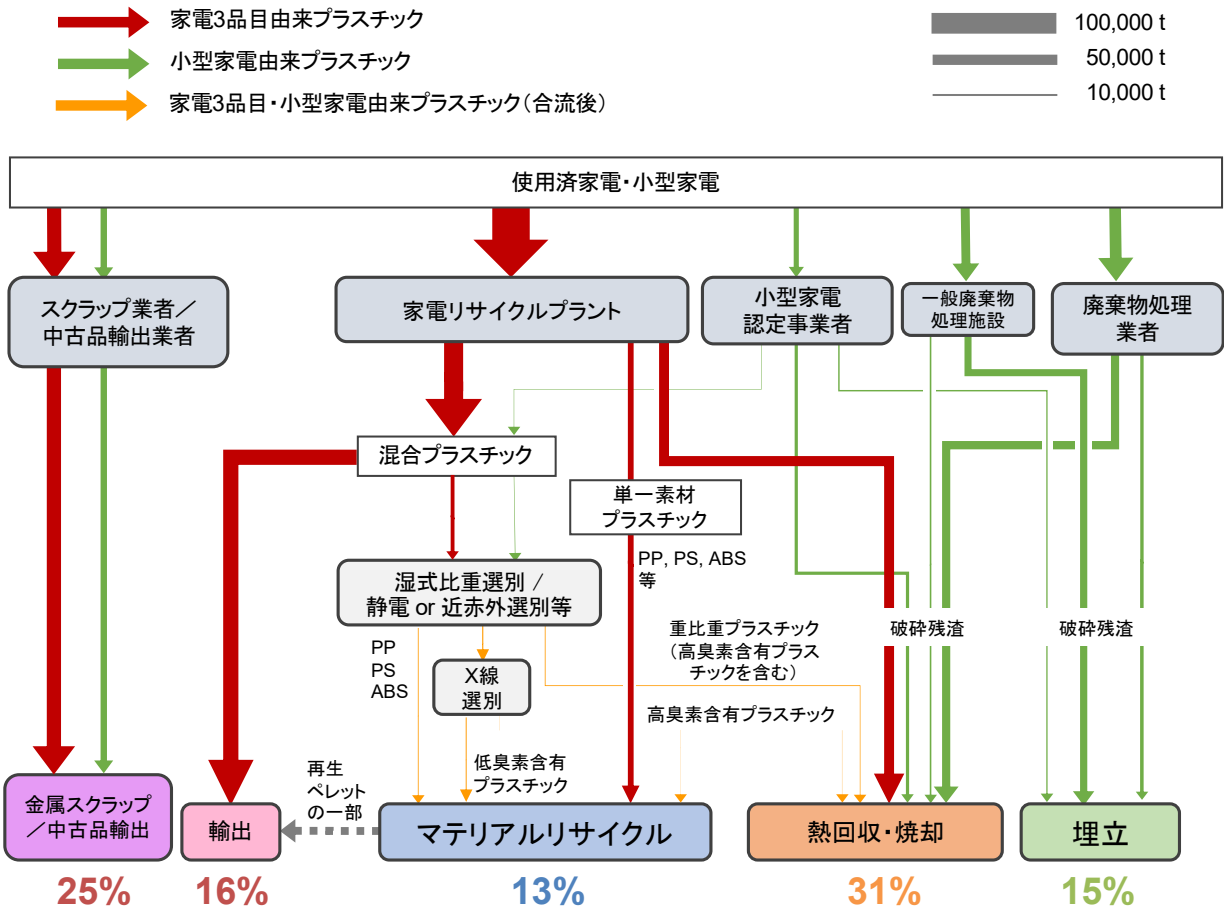


図３．３　　電気電子機器由来プラスチックのフロー推計結果（2017年度）

４－３．電気電子機器由来プラスチックのフローに伴う臭素系難燃剤フローの推計

まず，混合プラスチックの選別工程における臭素系難燃剤の分配率推定結果について述べる。家電3品目由来の混合プラスチックについては，文献で報告されている実験的データと樹脂再生業者へのヒアリングに基づく情報より推定したところ，臭素系難燃剤は家電3品目由来混合プラスチックの湿式比重選別プロセスにおいて総量の75%が重比重プラスチックの画分へ分配し，残りの25%が再生プラスチック原料として回収されるPP，PS，ABSフレークの画分へ分配すると推定された。なお，文献で報告されている個別物質の分析データには検出下限値未満のものも含まれていたため，この分配率は全臭素の分析データに基づいて推定したものである。ただし，後述の通り，比重選別での分配率はプラスチックの比重で決定されることから，全臭素と個別物質は湿式比重選別プロセスにおいてほぼ同様の分配挙動を示すと考えられる。

小型家電由来の混合プラスチックの分配率については，樹脂再生業者の選別施設において採取した試料の分析結果と物質収支情報から推定したところ，図３．４のようになった。[redacted]この分配率は物質によらずほぼ同様であり，個別物質と全臭素もほぼ同様である。これは，臭素系難燃剤を含むプラスチックは難燃剤の種類によらず非難燃プラスチックよりも比重が大きく，その比重の大きさによって湿式比重選別で分離されるためである。

[redacted]このように，湿式比重選別プロセスが結果的に臭素系難燃剤の除去プロセス（もしくは濃縮プロセス）としても機能していることがわかった。なお，家電3品目と小型家電の推定結果は大きく異なっているが，これは施設の違いや混合プラスチックの性状の違いなどに起因している可能性が考えられる。

[redacted]

以上の推定結果を適用して推計した臭素系難燃剤の最終仕向地別（図３．３における最下段）のフロー比率を図３．５に示す。図３．５にはプラスチックのフロー比率推計結果も合わせて示した。

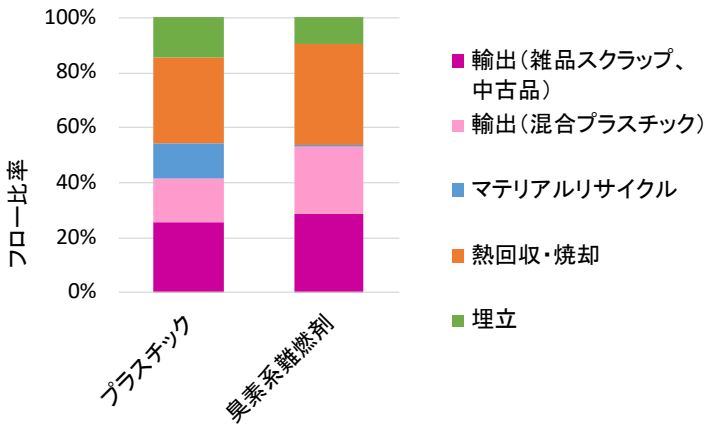


図３．５　　臭素系難燃剤の最終仕向地別のフロー比率推計結果

2017年度の推計結果においては，国内で発生する使用済み電気電子機器に由来するプラスチックの13%が国内での解体や選別処理を経てマテリアルリサイクルへ向かったのに対し，このフローへ流入した臭素系難燃剤は総量の1%未満であった。これは，前述の通り，臭素系難燃剤が湿式比重選別において重比重プラスチックへ多く分配することで，マテリアルリサイクル向けのフローから排除されたことによる。重比重プラスチックは再生プラスチック原料としての利用が容易ではないため主に焼却（熱回収を含む）されていると考えられ，その分熱回収・焼却のフロー比率が大きくなっている。このように，国

内でマテリアルリサイクル向けに回収，処理されたプラスチックへ混入する臭素系難燃剤は小さな割合であり，国内においては2017年の時点においても臭素系難燃剤は結果的に電気電子機器由来プラスチックの循環から適切に排除され，熱回収・焼却によって無害化されていたと考えられる。

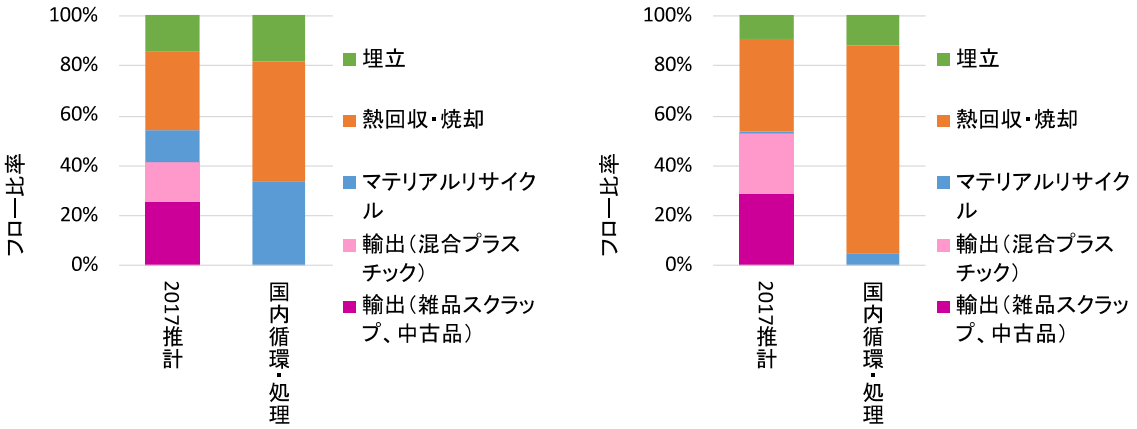
他方，プラスチックの国内総発生量の40%が雑品スクラップ，中古品，混合プラスチックのいずれかの形で輸出されており，臭素系難燃剤は総量の50%以上がこのフローへ流れていたと推計された。一部のプラスチックは輸出先で再生プラスチック原料として利用されていたと考えられるが，臭素系難燃剤の管理が適正に行われていたかは不明である。再生プラスチックを利用したと思われる製品から臭素系難燃剤が意図的添加よりも低いレベルで検出された事例は多数の報告があり，日本から輸出されたものに含まれていた臭素系難燃剤が再生プラスチック利用製品への混入の由来になっていた可能性も否定できないと考えられる。

４－４．電気電子機器由来プラスチックの処理・リサイクルに伴う臭素系難燃剤のフロー推定とシナリオ分析

図３．６に，国内で発生する電気電子機器由来プラスチックおよびそれらに含まれる臭素系難燃剤の最終仕向地別のフロー比率について，2017年度の推計結果と国内処理・循環増加シナリオにおける推計結果を示す。混合プラスチックや雑品スクラップの輸出減少と国内処理・循環増加を想定した国内処理・循環増加シナリオでは，2017年度の推計結果において混合プラスチックや雑品スクラップの形で輸出されていた分が全て国内での処理・循環に移行するため，国内でマテリアルリサイクル向けに回収されるプラスチックの量が国内総発生量の35%程度に増加すると推定された。また，同様に熱回収・焼却，埋立へのフロー比率もその分増加している。

臭素系難燃剤のフローについては，熱回収・焼却されるものが全体の80%程度を占めるという結果となった。中国のプラスチック輸入禁止やバーゼル条約による混合プラスチックの輸出規制強化，日本からの雑品スクラップ輸出規制強化は，結果的に国内での熱回収・焼却による臭素系難燃剤の無害化の促進にも寄与しているものと考えられる。一方，国内処理・循環シナリオでは，マテリアルリサイクル向けの回収に向かうフローが5%程度に増加しているが，これは主に，輸出されていた混合プラスチックの処理が国内へ移行する影響であり，混合プラスチックの選別処理によるマテリアルリサイクル向けプラスチック回収量の増加に比例して増加するものである。フロー比率としては増加しているが，混合プラスチックの選別処理における臭素系難燃剤の除去率は変わらないことから，回収される再生プラスチック原料の臭素系難燃剤含有量は変わらない。2017年度までは電気電子機器由来プラスチックの半分程度が中国等へ輸出され，含有される臭素系難燃剤の管理状況も不明であったのに対し，国内循環が増えることで臭素系難燃剤のフローが見えるようになると言うことができる。

なお，国内処理・循環シナリオにおいて国内で選別処理される混合プラスチックの量は，家電3品目由来と小型家電由来のものを合わせて120千t程度と推計された。国内の主要な樹脂再生業者（選別処理業者）へのヒアリングをもとに，電気電子機器由来混合プラスチックの国内受け入れ能力を概算すると年間100～150千t程度と考えられ,全量が国内循環に移行した場合でも能力としては処理できる可能性が高いと考えられる。しかし,国内で製造される再生ペレットの需要は未だ輸出に依存していることから，電気電子機器由来プラスチックの国内循環促進に向けては再生ペレットの海外での利用状況の把握も必要であるとともに，樹脂再生業者へのヒアリングによれば再生ペレットの主たる利用先である中国の輸入規制がさらに厳しくなっていることから国内での再生ペレットの需要拡大も必須であると考えられる。また，樹脂再生業者へのヒアリングによれば，混合プラスチックの選別における残渣率が高い場合には残渣の処理費用が大きくなるために混合プラスチック受け入れが逆有償となり，廃棄物処理業許可を有しない業者では受け入れが困難になるとのことであった。特に小型家電由来の混合プラスチックはPP，PS，ABS以外の重比重プラスチックの比率が高く，このような状況が実際に生じているようである。この点も電気電子機器由来プラスチックの国内循環促進における制約となる可能性がある。小型家電を含む機器系プラスチックの国内循環の促進のためには，廃棄物処理や再資源化に係るこういった制度上の課題も解決する必要があると考えられる。



(a) プラスチック　　(b) 臭素系難燃剤

図３．６　電気電子機器由来プラスチックの国内処理・循環の増加を想定した臭素系難燃剤の最終仕向先別フロー比率のシナリオ分析の結果

５．研究目標の達成状況

本サブテーマでは，設定した研究目標に対し，電気電子機器に由来するプラスチックの処理・リサイクルに伴う含有臭素系難燃剤のフローを推計するとともに，シナリオ分析を行って，国内循環の促進において制約・課題となりうる要素を考察した。より具体的には，電気電子機器に由来するプラスチックのリサイクルフローを推計し，それに伴って含有される臭素系難燃剤がどのフローへどの程度配分されているのかを推計した。また，その中で，物理選別プロセスにおけるプラスチックと臭素系難燃剤の分配挙動の違いを実験的データから明らかにし，選別プロセスにおいて副次的に臭素系難燃剤が循環のフローから排除されていると言う実態を反映した推計を行った。また，近年の中国による廃プラスチック輸入禁止とそれにともなう東南アジアでの輸入規制強化，バーゼル条約による混合プラスチックの輸出規制強化，また日本の雑品スクラップ輸出規制により，使用済み電気電子機器およびそれに由来するプラスチックの輸出減少と国内処理・循環増加を考慮したシナリオ分析を行って，それによる臭素系難燃剤フローとその管理への影響を分析するとともに，電気電子機器由来プラスチックの国内循環において制約・課題となりうる要素を考察した。

６．引用文献

1) 梶原夏子（国立環境研究所）：環境研究総合推進費補助金（3K163005）研究報告書「新規POPsを含有する廃棄物の環境上適正な管理に関する研究」(2019)
2) 株式会社エックス都市研究所：環境省請負業務令和2年度有害廃棄物の適正処理方策調査検討業務報告書（2021）
3) M. Oguchi, H. Sakanakura, A. Terazono, H. Takigami: Waste Management 32(1), 96-103 (2012) Fate of metals contained in waste electrical and electronic equipment in a municipal waste treatment process
4) 経済産業省・環境省：家電リサイクル法に基づくリサイクルの実施状況等について，https://www.env.go.jp/council/03recycle/y032-36/mat02.pdf（2018）
5) 経済産業省・環境省：小型家電リサイクル制度の施行状況について，https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/haikibutsu_recycle/kogata_wg/pdf/004_02_00.pdf（2019）
6) 一般財団法人 家電製品協会：家電リサイクル年次報告書平成29年度版，

http://www.aeha-kadenrecycle.com/pdf/report/kadennenji29.pdf (2018)
7) 環境省：H30年度 使用済小型電子機器等再資源化促進に向けた調査検討等業務報告書 (2019)
8) 豊田通商：ミックスプラスチックの高度選別，コンパウンドによる工業製品化事業報告書 (2018)
9) 井関康人：廃棄物資源循環学会誌32(2)，140-147 (2021)
10) 寺園淳，小口正弘，長谷川亮，牛シン：第30回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿，183-184 (2019) 小型家電リサイクルにおける中国輸入規制による影響と改善策の検討
11) 環境省：H30年度 使用済小型電子機器等再資源化促進に向けた調査検討等業務報告書 (2019)
12) N. Kajiwara, H. Matsukami: Abstract of 37th International Symposium on Halogenated Persistent Organic Pollutants (POPs) DIOXIN 2017 (2017) Polybrominated diphenyl ethers in end-of-life electric home appliances collected in Japan in 2016
13) 環境省：第3回 POPs廃棄物適正処理推進に関する検討委員会，資料1-2，
https://www.env.go.jp/recycle/pops/conf/pops_com03/mat01_2.pdf (2016)

Ⅱ－４　プラスチック循環の経済的効率性と安定性の理論・実証分析

国立大学法人 富山大学
研究推進機構 極東地域研究センター　山本 雅資
〈研究協力者〉
立教大学経済学部 経済政策学科　一ノ瀬　大輔

［要旨］

はじめに理論的な視点から現状の法制度が製品別となっていることのメリット・デメリットを整理した。結論として，既存制度は確実な回収を進めることに貢献しているものの，マテリアルフローが分断され横断的な意思決定がうまくコーディネートされていない可能性があることを指摘した。既存の制度の良い部分をうまく生かしながら，最終処分量をベンチマークとした意思決定が効率性を高めると考えられる。経済的影響の定量的な分析では，容器包装リサイクル法の2000年改正によって分別が増加したことの効果をEBPMの方法論で分析した。結果として一次物流を担う自治体に大きな費用負担が生じていることが明らかになった。また，二次物流の費用分析では平均的なロットを大きくすることで全体費用を減少できることが明らかになり，さらなる効率化の余地がある。生活系プラスチックを含む家計排出に対する有料化の効果は既存研究よりも実際は低い可能性が明らかになっており，新たなプラスチック資源循環における制度設計では，各主体への影響を慎重に分析した上で進めていく必要がある。

１．研究開発目的

本サブテーマでは，リサイクル目的の資源回収および選別について，収集する品目や排出源の区分などリサイクル制度を変更した場合に，どのように市町村や再商品化事業者などの経済主体が影響を受けるかについて，経済理論と実証の両面から分析することを目的とした。特に，生活系プラスチックの収集についてはサブテーマ１との連携によって分析を進めた。

２．研究目標

生活系プラスチックを対象として，廃棄物回収の対象が，法制度や経済主体の判断によって区切られていることの経済的影響を定量的に分析する。

３．研究開発内容

３－１．経済理論の文献レビューと現状の制度設計における課題の抽出

廃棄物処理を伴う経済活動は情報の非対称などの市場の失敗の可能性があるため，政策立案者が市場に介入することは経済効率性の観点からも正当化される。そのため，日本の廃棄物・リサイクル行政は廃棄物処理法や個別リサイクル法といった強力なレジームが市場メカニズムの外側に存在し，これまでに大きな成果をあげてきたと言える。その一方で，レジームが強固であるがゆえに，個別法の枠組みを超えた協調はほとんどなされていない。そこで，時代や技術の変化を考慮した見直しの時期にあるのではないかという問題意識から，関連する経済理論の先行研究をレビューして，主として回収効率の観点から現状の法的な枠組みおよび制度設計における課題を抽出した。

３－２．制度変更を要因とした生活系プラスチックの回収および排出行動への影響

生活系プラスチックの代表格である容器包装リサイクル法の対象品目について，制度導入による総費用への影響を分析した。容器包装リサイクル法は，1995年に第１段階施行を皮切りに徐々に制度が整備されていくが，本研究では2000年の完全施行をターゲットとして分析を行なった。この改正では，それまでの対象品目であった「ガラスびん（無色，茶色，その他色）及びペットボトル」に加えて，「紙製容

器包装及びプラスチック製容器包装」が追加された。また，リサイクル義務を負う企業もそれまでの大企業のみから，本改正によって中小企業が加わることになった（ただし，小規模企業は対象から除外）。分析方法としては，因果推論の一つであるRegression Discontinuity Design(回帰不連続デザイン：RDD)を用いた。この分析方法は，ある政策要因（トリートメントと呼ぶ）の閾値（この分析では2000年）に極めて近いサンプルでは他の要因はほとんど差がないという仮定に基づいている。評価したい効果は

$$\hat{\tau}_{SRD} = \hat{\mu}_+ - \hat{\mu}_-$$

である。ただし，

$$\hat{\mu}_+ = \lim_{x \to 0_+} = \hat{\alpha}_+(0) \quad \text{and} \quad \hat{\mu}_- = \lim_{x \to 0_-} = \hat{\alpha}_-(0)$$

である。これは閾値の右側のサンプルに基づいて推定した式と左側のサンプルに基づいて推定した式の切片の差を評価する意味している。アウトカム変数(Y)は，自治体によるトンあたり平均費用であるから，この差は容器包装リサイクル法の導入による費用の増分を意味することになる。実際の推定式は以下の通りである。

$$\left(\hat{\alpha}_-(0), \hat{\beta}_-(0)\right) = \arg\min_{\alpha,\beta} \sum_{i=1}^{N} \mathbf{1}(X_i < 0)(Y_i - \alpha - \beta X_i) \cdot K\left(\frac{X_i - 0}{h}\right)$$

$$\left(\hat{\alpha}_+(0), \hat{\beta}_+(0)\right) = \arg\min_{\alpha,\beta} \sum_{i=1}^{N} \mathbf{1}(X_i \geq 0)(Y_i - \alpha - \beta X_i) \cdot K\left(\frac{X_i - 0}{h}\right)$$

ただし，$K(\,)$ はカーネル関数である。また，h はバンド幅で，Imbens and Kalyanaraman [1)]の定義した $MSE\,(h)$ を最小化することで推定した。

次に生活系プラスチックを含む家計の排出抑制について分析するために，家庭ごみ有料化の効果について分析を行なった。日本の家庭系廃棄物は自治体固有の事務となっているため，ごみ有料化の導入時期や制度そのものが多様であるという特徴がある。例として東京都の自治体の有料化導入時期を比較したものが図４．１である。サンプルデータ期間より前に導入済みの自治体や期間内に一度も導入していない自治体など様々である。

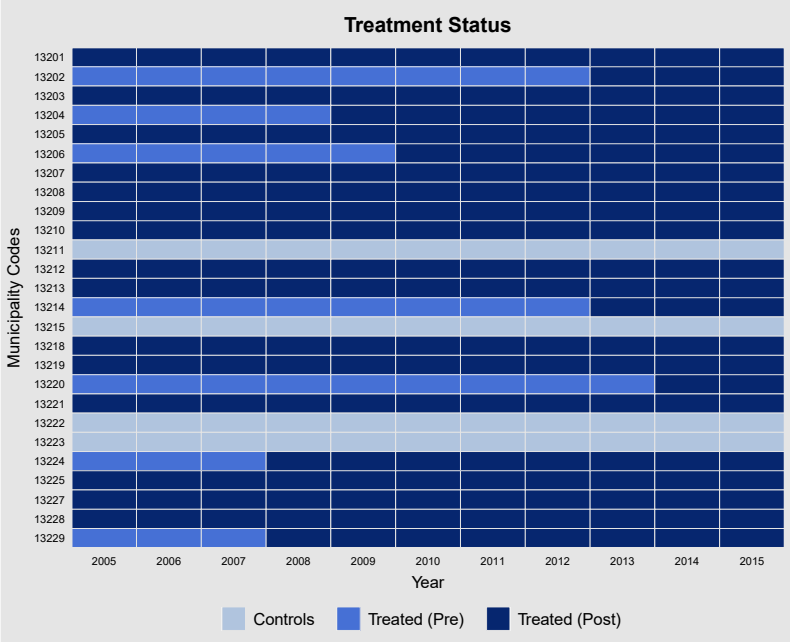


図４．１　　東京都におけるごみ有料化実施のタイミング

これは因果推論の枠組みで言えばトリートメントが同質でないことを意味し，異質なトリートメントの元では，これまでの有料化分析で広く用いられてきたパネルデータ分析や通常のdifference-in-differences（差の差の分析）を適用した場合，推定値にバイアスが出ることが明らかになってきた。そこで本サブテーマでは，異質なトリートメントを分析するために新たに開発されたChaisemartin and D'haultfoeuille [2]による方法論を用いて，有料化が家計に与える効果を分析した。

３－３．経済活動を考慮した産業系プラスチックの排出量変化の要因分解

経済学系の廃プラスチックに関する分析は，家庭系プラスチック廃棄物に関するものがほとんどである。しかし，日本においては，製造業から発生するプラスチック廃棄物の量は，家庭系プラスチック廃棄物とほぼ同量であり，無視できない大きさである。図４．２は日本の製造業の廃プラスチック排出量と，その原単位をプロットしたものである。

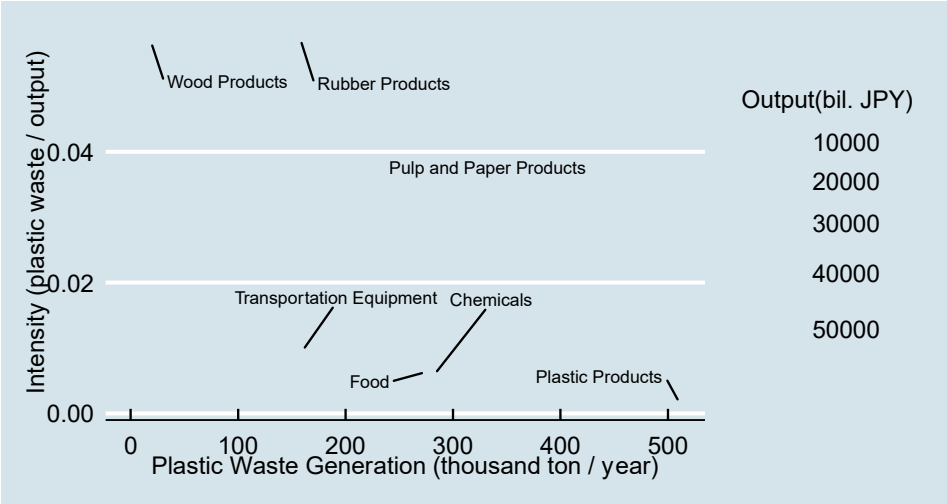


図４．２　　製造業による廃プラスチックの排出量（2018年）

そこで，本研究では2004年から2018年までの製造業からの発生したプラスチック廃棄物の変化要因を分析する。Levinson [3]が示した新しい要因分解の方法論に従って，プラスチック廃棄物の排出要因を規模効果（scale effect），代替効果（composition effect），および（直接）技術効果（technique effect）に分解する。このLevinson [3]の方法は，CO_2排出量に関するものであるが，その応用例であるBrunel [4]およびCole and Zhang [5]もCO_2と大気汚染に関するものであり，本研究は廃棄物分野での初めての適用例となる。

具体的な計算方法は以下の通りである。まず p_{it} は，産業 i から t 年に発生したプラスチック廃棄物の量を意味する。 また，v_{it} を産業 i から t 年に生み出させる付加価値の大きさと定義し，そのシェアを θ_{it} $\left(=\frac{v_{it}}{\sum_i v_{it}} \equiv \frac{v_{it}}{V_t}\right)$ とする。単位あたり発生量を $\frac{p_{it}}{v_{it}} \equiv z_{it}$ とすると，ある t 年の製造業全体からのプラスチック廃棄物の発生量は以下のように書くことができる。

$$P_t = \sum_i p_{it} = \sum_i v_{it} z_{it} = V_t \sum_i \theta_{it} z_{it}$$

ここで，z_{it} が一定であると仮定し $\bar{z}_i$ と書けば，t 年の排出量は

$$\hat{P}_t = V_t \sum_i \theta_{it} \bar{z}_i$$

となる。これは，排出量は，規模効果として知られる経済活動の大きさ$(=V_t)$，産業内でのシェアの変化である代替効果（$=\theta_t$）で決まることを意味している。このとき， 実際の排出である P_t から $\hat{P}_t$ を引い

たものが技術効果となる。規模効果と代替効果で説明できない部分が技術効果となっていることから，Levinson[3)]は，この効果を間接技術効果（indirect technique effect）と呼んだ。その一方で，Levinson[3)]は，以下で示される二つの指数を用いて，より直接的に技術効果を計測する方法を示した。すなわち，この二つとは，ラスパイレス指数（Laspeyres index：IL）およびパーシェ指数（Paasche index：IP）である。排出原単位を一定とするのではなく，対象となる産業の付加価値や売り上げシェアを一定として，原単位の変化をみるものである。基準年を2004年とすれば，ラスパイレス指数，パーシェ指数はそれぞれ，

$$\text{Laspeyres index: } I_t^L = \frac{\sum_i z_{it} \times v_{i,2004}}{\sum_i z_{i,2004} \times v_{i,2004}}$$

$$\text{Paasche index: } I_t^P = \frac{\sum_i z_{it} \times v_{i,t}}{\sum_i z_{i,2004} \times v_{i,t}}$$

と表すことができる。本研究ではこのLevinson[3)]の方法論に倣い，日本の製造業による廃プラスチックの発生要因の変化を分析する。

４．結果及び考察

４－１．経済理論の文献レビューと現状の制度設計における課題の抽出

市場経済において廃プラスチックを含めたバッズが高度に循環されない理由は，経済性がないためである。しかし，純粋な市場経済はバージン資源利用による外部不経済や世代間公平性の問題を考慮することができない（市場の失敗)。資源循環の観点からよく知られた制度は、拡大生産者責任(Extended Producer Responsibility: EPR)であろう。本研究では制度設計の課題を幅広に検討するため、プラスチック資源循環に限らずに既存のEPRに関する論文についてレビューを行なった。その結果をまとめると、EPRといってもその内容にはさまざまな可能性があり、特に複数の制度が経済圏の中に存在する場合(ex. 輸出入や個別法などでマテリアルフローが制度的に分断されている場合など)、一方がEPR制度を強化したからといって社会厚生が必ず改善するわけではない。そのため、循環資源のインセンティブ設計は高度にコーディネートされた上で勧められるべきである。

現状の制度は使用済み製品の種類に応じた個別リサイクル法が中心となっている。このような個別法中心の制度によるメリットとしては、業界団体等を通じて処理責任の所在を明確化しやすい点がある。一方、個別の法的枠組みではなく素材別などの新たな制度を想定した場合は、うまく機能すれば規模の経済性を追及できたり、回収量の拡大につなげることが期待できる。これは、回収量の拡大を目指すスキームと確実な処理を目指すスキームを分けて考える必要性があることを意味している。集めやすい区分と処理しやすい区分は現実には異なる可能性が高い。

それでは現状の制度を一旦考えずに望ましい制度設計を考えるとすれば、どのような視点が重要となるであろうか。一つの考えた方としては経済全体での最終処分量を最大限に回避する制度設計を目指すという方向性がありうる。最終処分量をゼロとすることはほぼ不可能である一方で最終処分場の新規建設は今後も困難である可能性が高く、最終処分場の枯渇が現実味を帯びてくる。

現状の制度設計では、個別リサイクル法の範囲の中でのみリサイクルの経済性を検討し、採算性のないものは最終処分されることを想定している。しかし、特定の制度で制限されたマテリアルフローの中で最終処分すべきとされた使用済み製品も、他のマテリアルフローで最終処分した方が経済合理的という判断されたものと比較すると、リサイクルのコスト競争力がある可能性を否定できない、例えば、使用済み太陽光パネルのガラスは自動車や建築用板ガラスや、ガラスウールなどにリサイクルできれば大きな付加価値を達成する。しかし技術的な観点から路盤材や資材としてリサイクルされることがほとんどであり付加価値も小さい。市況の変化で採算割れする可能性が有るが最終処分してしまうと、自動車のASRなどに比べるとはるかに付加価値を持つものを最終処分することになってしまう。最終処分場の有

効活用という点からは、製品横断的にリサイクルを判断できる制度的枠組みが必要である。

そのような場合の意思決定を単純化したモデルで表現すると以下のようになる。はじめに使用済み製品iはリサイクルされるか最終処分されるかのどちらかだけであると仮定する。単純化のために時間軸を考えないものとするとある年に発生した使用済み製品の処理費用を最小化する問題は(1)式のように表すことができる。

$$\min \quad \underbrace{\sum_i DC_i}_{\text{処理費用}} = \underbrace{\sum_i RC_i(R_i)}_{\text{リサイクル費用}} + \underbrace{\sum_i p_L \times L_i}_{\text{最終処分費用}} \qquad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad W_i = R_i + L_i, \quad \forall\, i \qquad (2)$$

$$\text{F.O.C.} \rightarrow \quad MRC_i = p_L, \quad \forall\, i \qquad (3)$$

ここで、W_iは使用済み製品iの発生量、R_iとL_iはそれぞれリサイクル量と最終処分量である。つまり(2)は全ての使用済み製品はリサイクルされるか最終処分されるということを意味する制約式である。また、リサイクルの費用関数は、$MRC_i \equiv RC_i' > 0$および$RC_i'' > 0$を仮定している。p_Lはトンあたりの最終処分単価で、処分する財の種類によって変わることがないと仮定している。(1)の一階の条件は(3)式のようになる。すなわち、経済全体での使用済み製品の処理費用を最小化するためには、使用済み製品iの限界リサイクル費用が最終処分単価と等しくなるような水準までリサイクル量を増やすことが望ましい。よって、個別の使用済み製品のリサイクル採算性ではなく、経済全体で定額の最終処分単価との比較によって判断することが求められることがわかる。

前述のように、現状のリサイクル法制度では業界団体が果たしている役割が大きく、安定した資源循環を支える大きな力になっている。これは使用済み製品ごとの法体系となっていることが影響していると考えられるが、個別法の枠を超えて、最終処分価格をシグナルとした意思決定を行うことで資源循環の長期的な効率性を高める可能性がある。

実験が困難な社会科学においては，仮にデータが取得されたとしても，回帰分析などに代表される統計的仮説検定において得られる相関関係を因果関係として解釈することが困難である場合が少なくない。図４．３（左）は有名な例であるが，世界の海賊の数と地球の平均気温をプロットしたものであり，これを見ると負の相関関係が観察できる。もちろん，これは偶然であり，海賊の数を増やしたからとって地球の気温が下がることはない。技術的・倫理的な理由でラボ実験が困難な社会経済活動においてデータから得られる相関関係が因果関係を意味しない代表的な例と言える。図４．３（右）は，我が国のCO_2排出の経年比較である。2009年3月に高速道路に1000円で乗り放題となる政策が導入されて，多くの高速道路が混雑したが，図では2009年のCO_2排出量は減少している。交通は日本のCO_2の20%を占め，自家用車はその約９割のシェアを占めることを知っていると，定額化がCO2の排出の削減に貢献したような印象を受けてしまう。しかし，実際にはこの12%の減少は，リーマンショックとして知られる世界金融危機による製造業への大打撃に起因したものである。

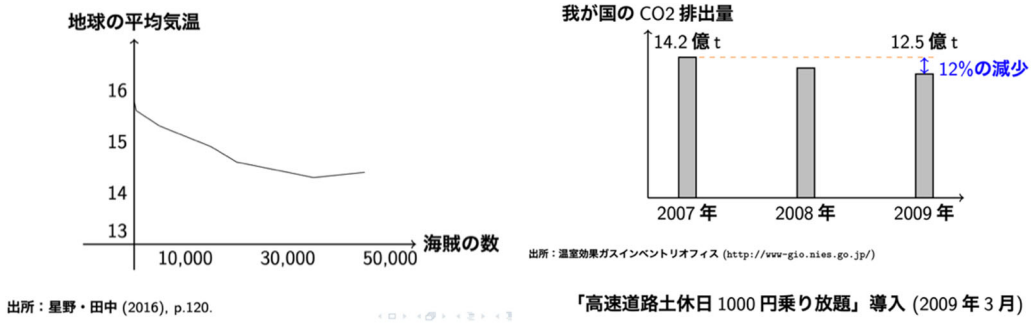


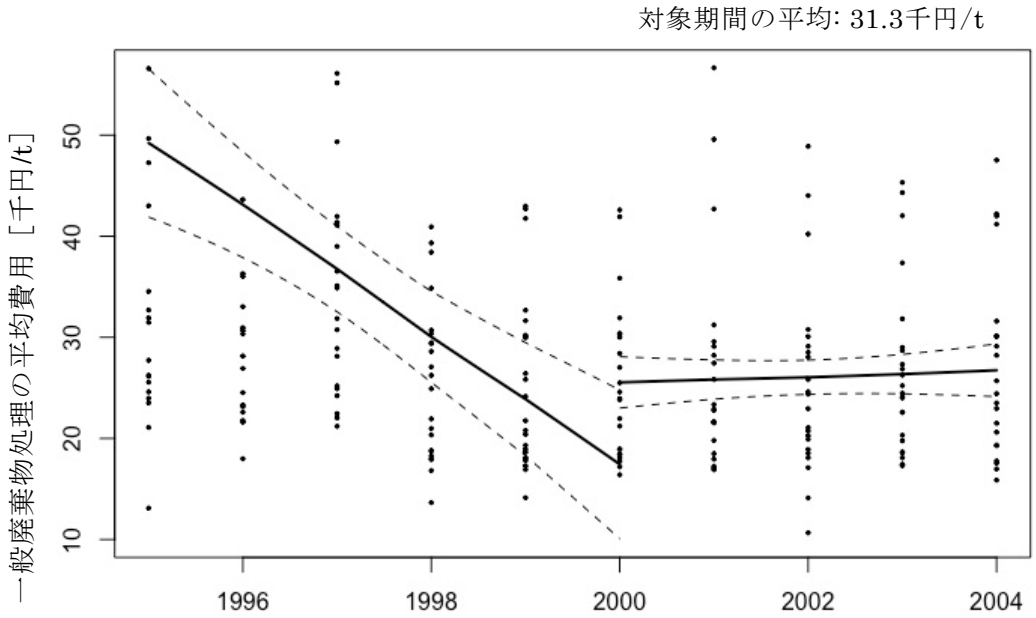
図４．３　　相関関係が因果関係を意味しない例

この二つの例のように真の因果関係が明らかなものであれば，解釈を誤ることはそれほどないかもしれない。しかし，分析が求められる政策課題によっては必ずしもこの二つの例ほど明らかではない要因（交絡変数と呼ばれる）がアウトカムデータに影響に与える可能性がある。従来の経済分析では，経済理論に基づいた定性的な数理最適化問題として経済問題をまず分析し，政策とアウトカムの間に因果関係が想定できることを確認してきた。その上で，理論モデルに沿った形での回帰分析を行い，相関関係が得られたら，それを因果関係として解釈することが一般的であった。

近年，データ蓄積やコンピューターサイエンスの発展に合わせて，因果関係を特定するための計量経済学的な方法論も発展し，相関関係ではなく因果関係をベースとした「エビデンスに基づく政策立案(EBPM)」が先進国政府や開発援助系の国際機関などで進められてきた。これに歩調を合わせるように日本政府も2017年5月の閣議決定においてEBPM推進委員会が設置し，各省庁に担当統括官が配置された。今後の政策立案において因果関係に基づいたエビデンスが重視されるようになったが，本研究においてもそのような流れに沿ったエビデンスの蓄積を目指している。

４－２．制度変更を要因とした生活系プラスチックの回収および排出行動への影響

はじめに，容器包装リサイクル法の導入による費用増加の分析結果を紹介する。以下の図４．４は，RDDによる推定結果を示したものである。対象期間内での平均費用の単純平均値は，31.3千円/tである。図４．４の下方に示した推定結果を示す表でImbens and Kalyanaraman[1)]による最適なバンド幅に基づいた結果であるLATEのestimateをみると，約8.1千円/tとなっている。ただし，表に掲載していないが容器包装リサイクル法を実施していない自治体だけを集めて実施したRDDにおいても6.1千円/tの費用増加が有意に観察された。この二つの分析より，少なくとも自治体の平均的な費用を6.4%増加させたと考えることができ，容器包装リサイクル法の導入は自治体の費用に対して，かなりのインパクトをもたらした政策であることが明らかになった。



Estimates:

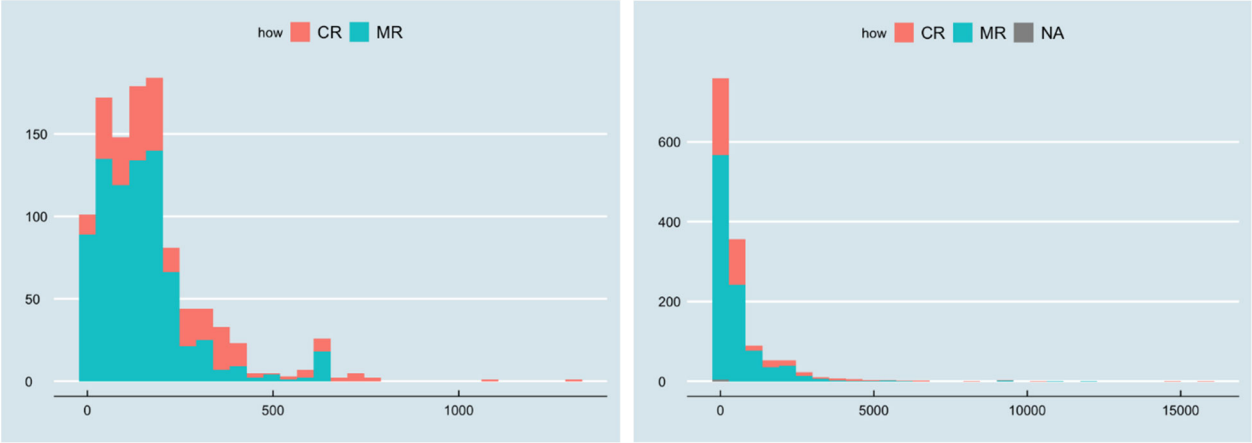
	Bandwidth	Observations	Estimate	Std. Error	z value
LATE	6.266	222	8.098	3.130	2.5871
Half-BW	3.133	157	3.456	3.845	0.8988
Double-BW	12.531	222	7.930	3.500	2.2658

図４．４　　容器包装リサイクル法の導入によるコスト増加分析結果

ここで費用と呼んでいるものは環境省「一般廃棄物処理実態調査」に掲載されている情報であり，自治体の負担である。これは容器包装リサイクルの一次回収部分を示しているに過ぎないが，今後，プラ

スチックの回収に対して新たな分別基準を設けるとなれば，相応のインセンティブが回収責任を持つ主体に提供される必要があると言えるだろう。また，新たな回収システムのもたらすメリットが，そのインセンティブを提供する負担に見合うものであるかも，きちんと検討する必要がある。

また，容器包装リサイクル法の回収対象が自治体から処理事業者に引き渡される際の費用の決定要因についても分析を行なった。これは，市場に十分な競争があり，指定法人への入札価格が事業者の再商品化費用の構造を反映しているとすれば,落札結果から 費用の決定要因を分析できるのではないかという仮説に基づいている。図４．５は，分析に使用した2018年の落札結果のデータの概要である。



注）　縦軸は保管施設数

図４．５　　保管施設から再商品化施設への輸送距離［km］（左）と輸送量［t］（右）の分布

さらに，図４．６は回帰分析の結果から輸送量に関する推定値を用いて，落札単価との関係を示したものである。これをみると落札単価を最小とするような輸送量は約7,500 tであり，現状の実績値と比較するとかなり大規模な輸送ロットである。すなわち，二次物流には物量について規模の経済性があることになり，保管施設か処理施設のいずれかの集約が必要である。その一方で距離については有意な結果が得られなかった。これは特に処理施設について既存の動脈産業との結びつきもあり，立地場所については大きな制約があることを示した結果である。

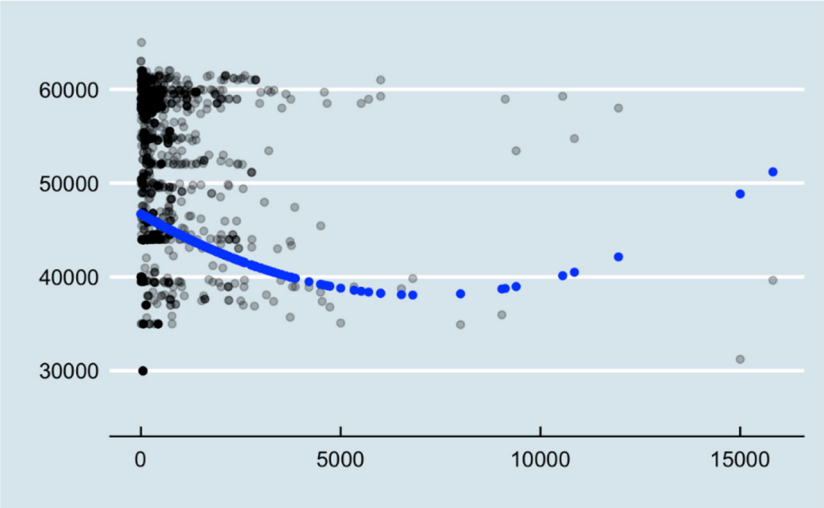


図４．６　　落札単価と輸送量

次に，生活系プラスチックを含む家庭系廃棄物の排出に対するごみ有料化の影響に関する分析結果について述べる。本研究では異質なトリートメントに対応できるChaisemartin and D'haultfoeuille [2)]によるweighted DID(DIDM)を使って,既存研究で用いられてきたパネルデータによる差の差の推定(FE DID)

との比較を行なった。図４．７は，その結果を示したものである。この図において，横軸はごみ有料化によって減少した一人当たり家庭系廃棄物の排出量である。また縦軸は，有料化政策の金額の差異を示している。これを見ると，Chaisemartin and D'haultfoeuille [2)]によって提案されたバイアスのない推定方法を用いると点推定でのトリートメント効果が3種類のトリートメントの全てで既存のFE DIDよりも小さくなっている。これは，既存のパネルデータによる「差の差の推定」が異質なトリートメントの存在により過大に推定されている可能性があることを示している。

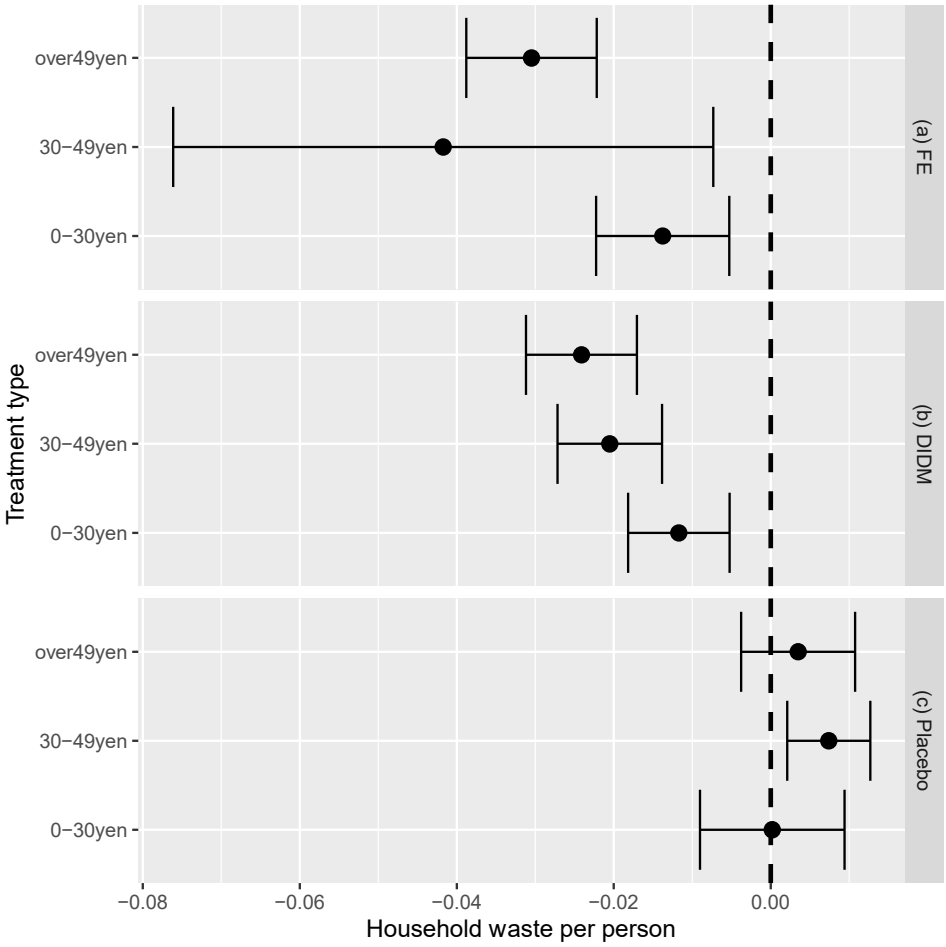


図４．７　　ごみ有料化の効果の比較

もう一つの得られた結果としては，人口密度が高い自治体では有料化の効果が低くなっていることである。この理由としてはゴミ排出の相対価格が上昇したとしても選択できる代替手段がなければ，ごみ排出を減らすことができないことが背景にあると考えられる。例えば，EU諸国等でははるかに高い有料化価格が適用されている国も多くあるが，こうした国では台所からの厨芥ごみを簡単にコンポスト化できるような住宅事情があり，そうした手段が排出抑制につながっている。それに比べると人口密度の高い日本の都市部ではコンポスト化はほとんど不可能であり，高い価格を支払って，ごみを捨てざるを得ない世帯が少なくない。なお，ごみ有料化の導入がプラスチックや他のリサイクル財に与える影響も分析したが有意な結果は得られなかった。

４－３．経済活動を考慮した産業系プラスチックの排出量変化の要因分解

次に，産業用プラスチックの発生要因分析の結果と解釈について述べる。図４．８は，Levinson [3)]の方法論を用いて,2004年を100と基準化して製造業からの廃プラスチックの発生要因を分解したものである。図から明らかなように，上方シフトの大部分はLine 1，すなわち規模効果で説明される。2004年から2018年の間に，日本の製造業は31%ほど成長しているのである。 世界金融危機の影響を受けて，2008

年から2009年にかけて大きく減少しているが，その後は（東日本大震災の前後を含めても）順調に成長していたことが分かる。

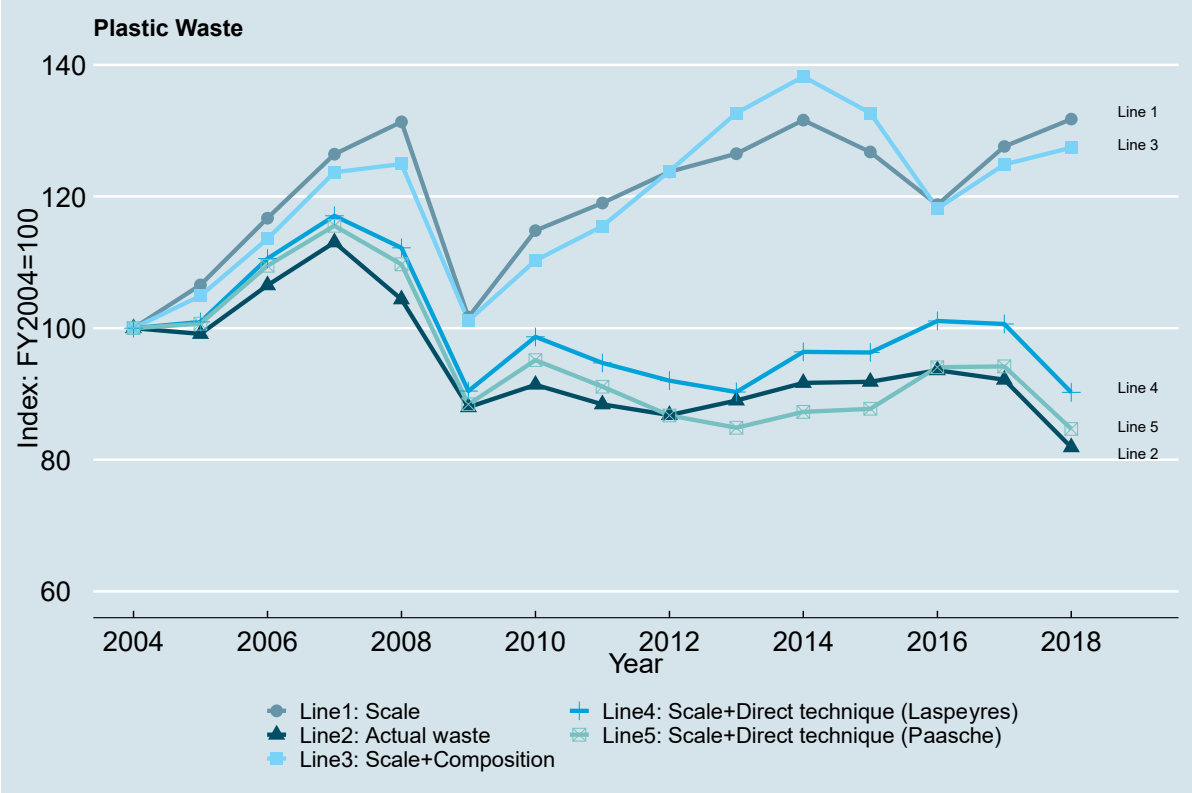


図４．８　　製造業からの廃プラスチックの要因分解

Line 2は，実際に観測された廃プラスチックの排出量を示している。これを見ると，2004年と比較して，2018年には廃プラスチックの排出量が18.1%減少していることがわかる。この減少は代替効果と技術効果の合計によるものである点には注意が必要である。Line 3 は，$\hat{P}_t$ の経年変化をプロットしたものである。これは規模効果と代替効果の合計であるが，2004年から2018年までの間に27%増加している。 よって，Line 1とLine 3の垂直方向の距離は代替効果のみを示すものであるから，

$$\frac{\text{Scale [131.77]-(Scale + Composition [127.42])}}{\text{Scale [131.77] - (Scale + Composition + Technique [81.89])}} = 0.087$$

となり，代替効果は廃プラスチック減少に8.7%だけ貢献したということができる。そして，残りの91.3%は間接技術効果によることになる。8.7%は決して大きな値ではないが，同じ方法論でEUや中国のCO_2と大気汚染を分析したBrunel [4]やCole and Zhang [5]がプラスの代替効果，すなわち，期間中に，より汚染集約的な産業の製造業の生産額が増加したことに比べると大きな差異である。

ここで，Line2とLine4の差が直接技術効果である。本研究の例で言えば，

$$\frac{\text{Scale [131.77]} - \text{(Scale + Technique (Laspeyres)[90.24])}}{\text{Scale [131.77]} - \text{(Scale + Composition + Technique [81.89])}} = 0.833$$

がラスパイレス指数でみた直接技術効果である。同様の計算をLine2とLine5について実行すると，パーシェ指数に基づく直接技術効果として，94.4%を得る。よって，我が国の製造業から発生する廃プラスチックの発生減少は8割から9割程度が技術進歩（排出原単位の改善）に依拠していることが分かる。Yamamoto and Eva [7]では，産業廃棄物全体を対象とした同一の分析を行なっている。その結果と比べると，産業廃棄物全体の方が代替効果の貢献度が大きいことが分かった。

５．研究目標の達成状況

本サブテーマの目標は，生活系プラスチックが法制度等によって区切られていることの経済的影響を定量的に分析することであった。定量的な分析として，容器包装リサイクル法の制度変化のタイミングで，その費用変化を回帰不連続デザインを用いて分析した。その結果,「紙製容器包装およびプラスチック製容器包装」という新しい分別の導入は自治体の総費用を6.4%増加させたことが明らかになった。また，別の因果推論の方法論でプラスチックを含む生活系ゴミの有料化の効果を分析したところ，既存研究の結果を大きく下回る排出抑制効果しかなかったという結果となった。世界的潮流となっているEBPMの方法論で日本の廃棄物・リサイクル制度を分析した結果は限られており，今後の政策立案に資する一定の根拠を提供できたと考える。その一方，現状分析は行なったものの，将来どのような政策デザインを進めていくべきかという望ましい姿については具体的な提案には至っていないため，今後の研究課題としたい。

６．引用文献

1) G. Imbens, and K. Kalyanaraman: Review of Economic Studies 79, 933-959 (2012) Optimal bandwidth choice for the regression discontinuity estimator
2) C. Chaisemartin and X. D'haultfoeuille: American Economic Review forthcoming (2020) Two-way fixed effects estimators with heterogeneous treatment effects
3) A. Levinson: Journal of the Association of Environmental and Resource Economists 2(1), 43-56 (2015) A direct estimate of the technique effect: Changes in the pollution intensity of US manufacturing, 1990-2008
4) C. Brunel: Environmental and Resource Economics 69(3), 621-641 (2017) Pollution offshoring and emission reductions in EU and US manufacturing
5) M. A. Cole and L. Zhang: Economics Letters 180, 11-14 (2019) The clean-up of Chinese manufacturing: Examining the role played by changing techniques of production
6) D. Ichinose and M. Yamamoto: University of Toyama Discussion Paper (2020) Does unit-based pricing really reduce waste? A causal inference approach with panel data
7) M. Yamamoto and N.S. Eva: University of Toyama Working Paper (2021) What activities reduce plastic waste most? The path to a circular economy for Japan's manufacturing industry

Ⅲ．研究成果の発表状況の詳細

（1）誌上発表

＜査読付き論文＞

【サブテーマ１】

1) 河合萌子，中谷隼，栗栖聖，森口祐一：廃棄物資源循環学会論文誌30，80-94（2019）
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) 中谷隼：環境経済・政策研究12(2)，81-84（2019）
プラスチック資源循環と海洋プラスチック問題（環境論壇）

3) J. Nakatani, T. Maruyama, Y. Moriguchi: PNAS 117(3), 19844-19853 (2020) [IF: 9.412]
Revealing the intersectoral material flow of plastic containers and packaging in Japan

【サブテーマ２】

1) Y. Shigetomi, H. Ohno, A. Chapman, H. Fujii, K. Nansai, Y. Fukushima: Environmental Science & Technology 53(24), 14123-14133 (2019) [IF: 7.864]
Clarifying demographic impacts on embodied and materially retained carbon towards climate change mitigation

2) J. Lu, S. Borjigin, S. Kumagai, T. Kameda, Y. Saito, Y. Fukushima, T. Yoshioka: Journal of Material Cycles and Waste Management 22, 1620-1629 (2020) [IF: 1.974]
Practical dehalogenation of automobile shredder residue in NaOH/ethylene glycol with an up-scale ball mill reactor

3) S. Kumagai, J. Nakatani, Y. Saito, Y. Fukushima, T. Yoshioka: Journal of the Japan Petroleum Institute 63(6), 345-364 (2020) [IF: 0.890]
Latest trends and challenges in feedstock recycling of polyolefinic plastics

4) H. Ohno, Y. Shigetomi, A. Chapman, Y. Fukushima: Resources, Conservation and Recycling 166, 105263 (2021) [IF: 8.086]
Detailing the economy-wide carbon emission reduction potential of post-consumer recycling

【サブテーマ３】

1) 寺園淳，小口正弘：環境経済・政策研究12(2)，84-88（2019）
廃プラスチックと雑品スクラップの国内資源循環に向けた課題（環境論壇）

【サブテーマ４】

1) トラン・ディン・トゥン，山本雅資：環境経済・政策研究12(2)，62-65（2019）
中国による使用済みプラスチック輸入禁止後のベトナム における現状と課題（環境論壇）

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

【サブテーマ１】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ２】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ３】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ４】

1) 細田衛士・大沼あゆみ 編著：環境経済学の政策デザイン，慶應義塾大学出版会（2019）

第８章 国際資源循環の経済学（執筆担当：山本雅資）

＜その他誌上発表（査読なし）＞

【サブテーマ１】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ２】

1) 吉岡敏明，齋藤優子，熊谷将吾：環境情報科学48(3)，39-44 (2019)
動脈産業と静脈産業の協働による持続可能なプラスチックリサイクルシステムの構築

2) 吉岡敏明，齋藤優子，熊谷将吾：PETROTECH 43(4)，250-257 (2020)
プラスチックケミカルリサイクルを進める動脈産業の役割と期待

【サブテーマ３】

1) 小口正弘：化学物質と環境167，7-9 (2021)
資源循環における有害物質管理の現状と今後

【サブテーマ４】

1) 山本雅資：三田評論1236，31-34 (2019)
経済学からみたサステナブル消費

2) D. Ichinose, M. Yamamoto: Working Paper, School of Economics, University of Toyama 326 (2020)
Does unit-based pricing really reduce waste? A causal inference approach with panel data

3) M. Yamamoto, S. Eva: University of Toyama Discussion Paper 322 (2021)
What activities reduce plastic waste most? - The path to a circular economy for Japan's manufacturing industry

（２）口頭発表（学会等）

【サブテーマ１】

1) T. Maruyama, J. Nakatani, Y. Moriguchi: EcoBalance 2018 (2018)
Material flow modeling of plastics for tracking containers and packaging flows and accumulation in intermediate sectors

2) 丸山多聞，中谷隼，森口祐一：第14回 日本LCA学会研究発表会 (2019)
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

3) 安田智文，中谷隼，栗栖聖，森口 祐一：第14回 日本LCA学会研究発表会 (2019)
施設配置を考慮した容器包装プラスチックリサイクルの効率化の分析

4) T. Yasuda, J. Nakatani, K. Kurisu, Y. Moriguchi: EcoBalance 2018 (2018)
Optimization of plastic containers and packaging recycling in terms of facility location

5) J. Nakatani, T. Maruyama, Y. Moriguchi: ISIE 2019 Conference (2019)
Input-Output modeling for nationwide material flow analysis of single-use plastics

6) J. Nakatani: 3rd Annual Meeting between MOE and MTES for Cooperation on Low-carbon Environment-friendly Society (2019)
Resource circulation of plastics for low-carbon society

7) 中谷隼：2019年度 循環型社会形成推進研究発表会 (2019)
先端的な再生技術の導入と動脈産業との融合に向けたプラスチック循環の評価基盤の構築

8) J. Nakatani, T. Maruyama, Y. Moriguchi: 3RINCs 2020 (2020)
Nationwide material flow of plastic containers and packaging in Japan

9) 中谷隼，丸山多聞，森口祐一：第15回 日本LCA学会研究発表会 (2020)

容器包装の利用製品と購入部門に着目したプラスチックの物質フロー分析
10) 中西翔太郎，中谷隼，森口祐一：第15回 日本LCA学会研究発表会（2020）
処理技術選択モデルによる多層的な資源循環に着目したシナリオ分析方法の構築
11) 河合萌子，中谷隼，栗栖聖，森口祐一：第15回 日本LCA学会研究発表会（2020）
分別区分と選別技術に着目した容器包装プラスチックの循環利用シナリオ設計
12) 方大樹，中谷隼，栗栖聖，森口祐一：第15回 日本LCA学会研究発表会（2020）
プラスチック製容器包装のリサイクル率目標達成の実行可能性評価
13) 方大樹，中谷隼，栗栖聖，森口祐一：第31 回 廃棄物資源循環学会研究発表会（2020）
原料利用に着目したプラスチックリサイクルの新たな評価指標の提案
14) J. Nakatani, T. Maruyama, Y. Moriguchi: EcoBalance 2020 (2021)
Input-output modeling for the intersectoral material flow of plastic packaging in Japan
15) 中谷隼，丸山多聞，森口祐一：第16回 日本LCA学会研究発表会（2021）
容器包装プラスチックの部門間の物質フローの解明
16) 東野航平，中谷隼，藤田壮，森口祐一：第16回 日本LCA学会研究発表会（2021）
廃プラスチックの排出量推計モデルに基づくリサイクルシナリオの生成
17) 須藤凜太郎，中谷隼，藤田壮：第16回 日本LCA学会研究発表会（2021）
環境負荷の削減に向けた食品廃棄と容器包装プラスチックのトレードオフ分析

【サブテーマ２】
1) 安地幸乃，大野肇，福島康裕：第14回 日本LCA学会研究発表会（2019）
最適化による技術選択　手法を応用した新技術の複数要素間すり合わせに資するライフサイクル視点導入
2) S. Kumagai: 1st International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis in the Asian Region 2019 (2019)
Pyrolysis for feedstock recycling of plastic wastes
3) 吉岡敏明：新化学技術推進協会（2019）
廃プラスチックのフィードストックリサイクルの最新 技術動向と将来展望
4) T. Yoshioka: Saudi Aramco-JCCP Symposium on Refinery of the Future (2019)
Chemical recycle processes of waste plastics base on chemical reaction
5) T. Yoshioka：廃棄物資源循環学会国際セッション（2019）
Plastic recycling through collaboration between arterial and venous industries
6) 吉岡敏明：地球環境技術推進懇談会研究会（2019）
廃棄物の資源価値を高める化学プロセス
7) T. Yoshioka：Chemical Sciences and Society Summit (2019)
Integration of arterial and venous industries & promotion of chemical (feedstock) recycling
8) H. Ohno, Y. Shigetomi, Y. Fukushima: ISFR 2019 (2019)
Comprehensive quantification of potential benefits from plastic recycling
9) Y. Kato, H. Ohno, Y. Fukushima: International Symposium on Chemical-Environmental-Biomedical Technology (2019)
Supporting tool for designing a circular economy of plastics in the presence of unknown condition by system synthesis with a rank order
10) 熊谷将吾：日本LCAフォーラム「プラスチックのリサイクルを考える」研究会（2020）
世界のケミカルリサイクル技術の研究開発動向
11) 加藤由樹，大野肇，福島康裕：第15回 日本LCA学会研究発表会（2020）
序列付きシステム合成による未知な条件の存在下でのプラスチック循環社会の設計支援

12) S. Kumagai: EcoBalance 2020 (2021)
Latest trends and challenges in feedstock recycling technologies for waste plastics [invited]
13) M. Sasaki, H. Ohno, Y. Saito, S. Kumagai, T. Yoshioka, J. Nakatani, Y. Fukushima: EcoBalance 2020 (2021)
Revealing bromine flame retardants flow in Japan with input-output approach

【サブテーマ３】
1) M. Oguchi, A. Terazono, N. Kajiwara, S. Murakami: 3RINCs 2020 (2020)
Flows of plastics and brominated flame retardants in the recycling of waste electrical and electronic equipment
2) M. Oguchi, A. Terazono, N. Kajiwara, S. Murakami: Electronics Goes Green 2020+ (2020)
WEEE plastics flows and the corresponding behavior of brominated flame retardants - A Japanese case before and after China's ban on waste imports
3) A. Terazono, M. Oguchi: Electronics Goes Green 2020+ (2020)
Small WEEE recycling in Japan and challenge after China's import ban
4) 小口正弘，寺園淳，梶原夏子，村上進亮：第31回 廃棄物資源循環学会研究発表会 (2020)
我が国における電気電子機器由来プラスチックおよび含有難燃剤のフロー推計と中国の廃プラスチック輸入規制による影響［ポスター発表］

【サブテーマ４】
1) M. Yamamoto: EAERE 2019 (2019)
Does unit-based pricing really reduce waste? A causal inference approach with panel data
2) M. Yamamoto, S. Eva: Research Seminar for Transdisciplinary Perspectives Toward Environmental Sustainability organized by Waseda Institute for Advanced Study (2021)
What activities reduce plastic waste most? - The path to a circular economy for Japan's manufacturing industry [invited]

（３）「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ１】
1) 一般公開展示会「エコプロ2018」（主催：産業環境管理協会および日本経済新聞社，2018年12月8日，東京ビッグサイト 東ホール）環境再生保全機構ブースにおいて「分別の先を見てみよう～産官民で進めるプラスチック資源循環」と題してサイエンスカフェ形式で講演
2) 村上進亮：環境省チャンネル（2021年1月8日）「ミライアイズ～あなたの不要を暮らしの必要に“ペットボトルリサイクル” ～」，https://www.youtube.com/watch?v=PR27dq801Us

【サブテーマ２】
特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ３】
特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ４】
特に記載すべき事項はない。

（４）マスコミ等への公表・報道等＞

【サブテーマ１】

1) 日経ESG（2020年3月号）「見直し急務の廃プラ戦略「プラスチック資源循環戦略」の問題点」
2) 日本経済新聞（2020年8月4日，電子版）「東大，容器包装プラスチックの家庭および産業における利用実態を解明」
3) 環境ビジネスオンライン（2020年8月6日）「東大，容器包装プラの利用実態を解明 目標達成への道筋示す」
4) 石油化学新聞（2020年9月21日）「東京大学大学院・森口祐一教授，中谷隼講師ら 容器包装プラ，リサイクル率向上を 総合利用実態を解明」
5) 化学工業日報（2020年11月30日）「東大，容器包装プラ 利用実態解明 部門ごとの“出入り”把握産業連関表など統計を駆使」

【サブテーマ２】
特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ３】
特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ４】
特に記載すべき事項はない。

（５）本研究費の研究成果による受賞

【サブテーマ１】
1) 令和元年度 廃棄物資源循環学会 論文賞，2020年4月10日（河合萌子，中谷隼，栗栖聖，森口祐一：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）

【サブテーマ２】
2) 日本LCA学会 第14回研究発表会 学生優秀発表賞（ポスター），2019年3月7日（安地幸乃，大野肇，福島康裕：最適化による技術選択手法を応用した新技術の複数要素間すり合わせに資するライフサイクル視点導入）

【サブテーマ３】
特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ４】
特に記載すべき事項はない。

Ⅳ. 英文Abstract

Assessment Foundation for Plastics Cycles towards Introduction of Advanced Recycling Technologies and Integration with the Arterial Industries

Principal Investigator: Jun NAKATANI
Institution: The University of Tokyo, Tokyo, JAPAN
Tel: +81-3-5841-1279 / Fax: +81-3-5841-1279
E-mail: nakatani@env.t.u-tokyo.ac.jp
Cooperated by: Tohoku University, National Institute of Environmental Studies, University of Toyama

[Abstract]

Key Words: Circulation flow, Material flow analysis, Sorting technology, Chemical recycling technology, Pyrolysis, Carbon circulation, Synthetic resin additive, Bromine flame retardant, economic efficiency

This study aims at developing the assessment foundation for designing the highly sophisticated plastic circulation scenarios oriented to the introduction of advanced recycling technologies and cooperation with the arterial industry. The assessment foundation includes the material flow analysis of plastics, feasibility analysis of recycling technologies, flow analysis of synthetic resin additives, theoretical and empirical analysis of recycling collection regimes. The goal of this study is to present options of circulation scenarios considering feasible sorting and recycling technologies, the utilization potential of recycled plastics in the arterial industry, variation of the generation amounts of waste plastics, and contamination of chemical substances such as additives as constraints.

Regarding the plastic flows, we estimated the amounts of usage of general plastics including plastic packaging and products in Japan based on the top-down approach of material flow analysis which traced supply chains using the input-output table. In addition, we focused on the carbon circulation as an assessment indicator of circulation scenarios and, as a foundation of the assessment, we visualized the carbon flows of products, and the reduction effect of environmental burdens through recycling of the plastic-oriented carbon. Furthermore, we conducted the bottom-up estimation of flows of automobile-oriented waste plastics and their recycling collection, and then analyzed the potential of material recycling and discussed the feasibility of close-loop recycling of automobile plastics.

Regarding the feasibility of recycling technologies, we conducted verification tests for the precision of sorting of plastic packaging using an optical sorting machine. On the other hand, we surveyed global academic studies focusing on feedstock recycling using the pyrolysis technology. Then, we experimented on the pyrosis of plastics with samples which replicated the resin composition of sorted plastics.

Regarding the constraints on plastic recycling, we estimated the waste treatment and recycling flows of electric and electronic equipment-oriented waste plastics and associated brominated flame retardants. Furthermore, we both theoretically and empirically analyzed the economic impacts on the stakeholders including municipalities and recyclers in the case where a recycling regime such as waste collection categories were changed.