

課題番号：S-19-1

研究科題名：プラスチック資源循環の展開とバイオ素材導入のための技術開発・政策研究

研究代表者名：吉岡敏明（国立大学法人東北大学）

体系的番号：JPMEERF21S11910

研究実施期間：2021年度～2026年度

【研究体制】

サブテーマ1

吉岡敏明（東北大学）

田村正純（大阪公立大学）

熊谷将吾（東北大学）

サブテーマ2

五十嵐 圭日子（東京大学）

宇山 浩（大阪大学）

金子 哲（琉球大学）

サブテーマ3

中谷隼（東京大学）

小原聡（東京大学）

村上進亮（東京大学）

齋藤優子（東北大学）

大野肇（東北大学）

1. 研究背景、研究開発目的及び研究目標

研究背景

3R + Renewableを基本原則とした「プラスチック資源循環戦略」の下、適正なプラスチック資源循環体制およびバイオ素材の導入が求められている。そのためには、バイオ素材及びプラスチック再生材から化学原料を供給するケミカルリサイクル技術の開発が必要不可欠であり、かつプラスチックのケミカルリサイクルの観点から3R + Renewableの実現を加速化するプラスチックリサイクル政策の方向性を示す必要がある。

研究開発目的

3R + Renewable を基本原則とした「プラスチック資源循環戦略」の下、適正なプラスチック資源循環体制の構築を図り、また、海洋プラスチックごみ汚染の防止を実効的に進めるための科学的情報と政策パッケージを提示することを全体目的とする。

その中で、テーマ1は、プラスチック資源循環の展開とバイオ素材導入のための技術開発・政策研究を進めることを目的に掲げており、サブテーマ(1)は、テーマ1の総括研究として、バイオ素材及びプラスチック再生材からプラスチック原料を供給するケミカルリサイクル技術の開発を行うとともに、プラスチックのケミカルリサイクルの観点から3R + Renewableの実現を加速化するプラスチックリサイクル政策の方向性を示すことを目的としている。

加えて、2050年カーボンニュートラル宣言を受け、本研究においても、プラスチックの処理に伴う温室効果ガス排出の「2050年実質ゼロ化」に資する技術開発・政策提案を目指すこととする。

1. 研究背景、研究開発目的及び研究目標

研究目標（全体目標）

- バイオマス資源（国内で手に入る木質系バイオマス及びサトウキビバガスなどのセルロース系バイオマス、非可食バイオマス、古紙等）をバイオプラスチックの原料とするための資源化・原料化技術とプロセス化技術を開発する。
- 石油精製や石油化学プロセスに組み込める共熱分解や触媒分解等にかかる技術の開発、石油プラスチックとバイオマスプラスチック・生分解性プラスチックの熱分解による基礎化学製品への転換技術を開発するとともに社会実装性を評価する。
- プラスチックの3Rを支える技術としてのマテリアルリサイクルとケミカルリサイクルの強みの明確化及びケミカルリサイクルとして3R+を推し進めるための技術政策を提案する。
- リサイクルプロセスにおいて不純物扱いとなるプラスチックや添加剤のリサイクル事例の解析と循環シナリオへの影響の明確化及び動脈産業における廃プラスチックの利用ポテンシャル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にした、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。

2. 研究目標の進捗状況

(1) 進捗状況に対する自己評価（サブテーマ1）

研究テーマ	バイオ素材と再生材の利用技術開発にかかる技術的政策研究	
研究目標	バイオマスプラスチックの化学原料化技術およびバイオマスプラスチック・石油由来プラスチック・石油製品共処理技術の開発、バイオマスを原料としたバイオマスプラスチック原料合成、3R+Renewableの実現を加速化する適正なプラスチックリサイクル政策の考え方の提案	
研究計画	令和3年度	各種バイオマスプラスチックの熱分解特性の評価、バイオマスプラスチックと石油由来プラスチックの共熱分解特性の評価、糖類モデル化合物であるグリセリンやエリスリトールを用いた触媒スクリーニングによる高機能触媒探索、プラスチックリサイクル政策に係る国内外の基礎情報収集
	令和4年度	化学原料回収率および品位に及ぼす熱分解条件の影響評価、バイオマスプラスチックと石油製品共処理特性の評価（相溶性、共熱分解特性等）、開発触媒の活性点構造の解析及びそのデータを活かした改良触媒の開発、Renewableに関する国内外のプラスチックリサイクル政策・施策の情報収集
	令和5年度	化学原料回収率および品位向上に向けた熱分解条件の探索、バイオマスプラスチック混合組成および熱分解条件の影響評価、開発した最適触媒を用いた反応条件の最適化と速度論的解析による反応メカニズムの解明、3R+Renewableの実現を加速化するプラスチックリサイクル政策の考え方の提案
	令和6年度	バイオマスプラスチックからの化学原料回収に向けた触媒探索、共熱分解生成物の収率および品位を向上する触媒の探索、開発した最適触媒の様々な糖類、還元糖類への適用性の検討と各種条件最適化検討、バイオプラスチック導入ロードマップの改訂を見据えたバイオプラスチック関連政策の考え方の提案
	令和7年度	化学原料回収に最適な熱分解および触媒分解条件の確立、化学原料回収に最適な共熱分解および触媒分解条件の確立、開発した最適化触媒のプロセスイメージの構築、3R+Renewableの実現を加速化する適正なプラスチックリサイクル政策の考え方の提案
自己評価	〔計画通り進展している〕前期2年の目標である熱分解挙動の評価や触媒スクリーニングを達成、後期3年の目標達成に向けて検討を開始している。	

2. 研究目標の進捗状況

(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し（サブテーマ1）

具体的な理由・根拠

各種バイオマスプラスチックの熱分解特性の評価および化学原料回収率および品位に及ぼす熱分解条件の影響評価を完了した。共熱分解においては、共熱分解条件によって共熱分解効果の有無や大小が変化することを確認。バイオマスを原料としたバイオマスプラスチック原料合成については、本反応に有効な単一金属触媒であるRh/SiO₂を見出した。

3年目以降の目標である、化学原料回収率および品位向上に向けた検討や、最適触媒での反応条件の最適化、反応メカニズム解明に向けた検討を開始しており、計画通りと言える。

目標達成の見通し

後期3年間において、種々バイオマスプラスチックの熱分解による化学原料化の適・不適を確認し、熱分解法が適するバイオマスプラスチックはより原料回収率や回収物の品位を向上するための分解方法を探索。熱分解法が適さないバイオマスプラスチックは触媒分解により付加価値の高い化学原料に転換可能か探索。共熱分解に関しても化学原料回収に適するバイオマスプラスチック、石油由来プラスチック、およびVRの混合条件や共熱分解条件・触媒分解条件を探索する。

また、「バイオマスを原料としたバイオマスプラスチック原料合成」に関しては、反応メカニズムの解明を行うと共に、他のバイオマス関連化合物への適用性を検討し、バイオマスからのポリマー原料合成に有効な触媒プロセスのイメージを構築を図る。

2. 研究目標の進捗状況

(1) 進捗状況に対する自己評価（サブテーマ2）

研究テーマ	バイオプラスチック社会普及性を支えるバイオマスの変換技術開発	
研究目標	<ol style="list-style-type: none"> 1) 廃棄紙・余剰パルプの分画技術開発 2) サトウキビバガス・木質バイオマスの分画技術開発 3) オリゴ糖、多糖、繊維残渣からのバイオプラスチックまたは代替素材生産 	
研究計画	令和3年度	<ol style="list-style-type: none"> 1) オリゴ糖を廃棄紙・パルプから多く生産する酵素のスクリーニング 2) サトウキビバガスの前処理条件検討 3) モデル繊維残渣を用いるPVA、多糖類との複合／ブレンド技術の開発
	令和4年度	<ol style="list-style-type: none"> 1) 繊維残渣がCNF化できる酵素のスクリーニング 2) サトウキビバガスからオリゴ糖を高効率で生産できる酵素群の選抜 3) モデルオリゴ糖、多糖類を用いるPVA、多糖類との複合／ブレンド技術の開発
	令和5年度	<ol style="list-style-type: none"> 1) セルロース分解酵素による廃棄紙・パルプの分画 2) サトウキビバガスの前処理-酵素分画の最適化 3) 実バイオマスからの繊維残渣を用いるPVA、多糖類との複合／ブレンド技術の開発
	令和6年度	<ol style="list-style-type: none"> 1) オリゴ糖を直接発酵できる酵母の開発 2) 木質バイオマスの前処理条件検討 3) 実バイオマスからのオリゴ糖、多糖類を用いるPVA、多糖類との複合／ブレンド技術の開発
	令和7年度	<ol style="list-style-type: none"> 1) トータルシステムフロー最適化アルゴリズム構築 2) 木質バイオマスの前処理-酵素分画の最適化 3) 実バイオマスの変換物を用いて作製するバイオプラスチックの高性能化
自己評価	<p>〔計画以上の進展がある〕令和3～5年度は、コロナ禍ではあったが1) 2) 3) それぞれで計画した研究は予定通り進められているだけでなく、想定していなかった特許性のある結果も出ており、「計画以上の進展がある」と評価した。その成果の一つは、Science Advances誌(IF14.98)にも掲載され、海外でも高く評価されたことから、想定以上の進捗であった。</p>	

2. 研究目標の進捗状況

(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し（サブテーマ2）

具体的な理由・根拠

- 1) 当初の予定通り廃棄紙や余剰パルプを原料として単糖、オリゴ糖、多糖、繊維残渣を自在の比率で作分けられる技術開発に成功した（図1）。
- 2) サトウキビバガスや木質バイオマスに対して酸やアルカリ等様々な前処理を行い、構成成分であるセルロース、ヘミセルロースの酵素による糖化性にバリエーションを与えることに成功した。
- 3) PVA/化学薬品処理バガスの複合材料はPVA単独よりヤング率が著しく向上し、プラスチック並みの物性を獲得（図2）

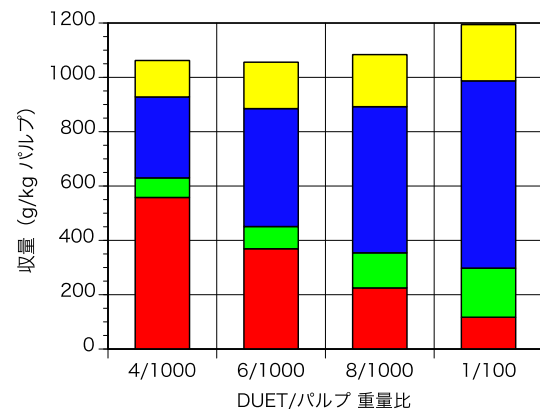


図1 酵素糖化条件を変えて行ったパルプのフラクショネーション
黄:キシロース、青:グルコース、緑:セロオリゴ糖、赤:残渣

目標達成の見通し

令和3～5年度の研究で、パルプから単糖、オリゴ糖、CNF、残渣を作り分ける酵素反応条件は明らかにした。また、サトウキビバガスに二段の化学前処理を行うことで、均一なゲルの作成にも成功し、PVAとの複合材料がプラスチック並みの物性を示したことから、バイオマス変換技術開発に着々と近づいていると言える。現在、酵素反応条件の異なる系において、生産コストと生産される素材の価格等に関してもバランスを明らかにし始めており、フラクショネーションを行うことの経済性に関しても、政策提言ができると考えている。

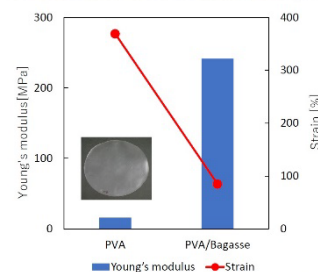


図2 化学処理によるバガスのゲル化（上）とPVAとの複合素材強度（下）

2. 研究目標の進捗状況

(1) 進捗状況に対する自己評価（サブテーマ3）

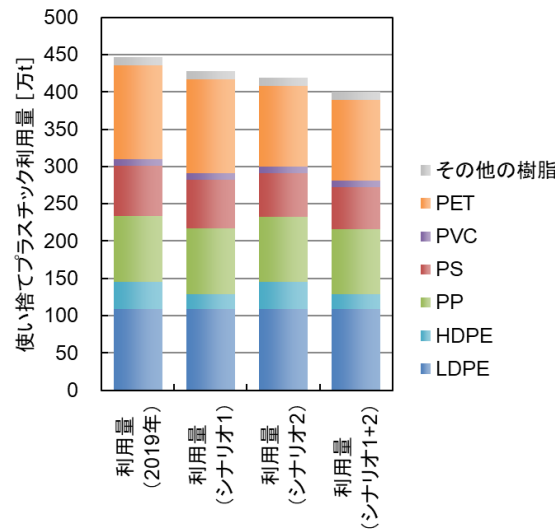
研究テーマ	産業間融合によるプラスチック循環システムの政策的研究	
研究目標	前期3年は、循環シナリオを構成する評価基盤を拡張することを目標とする。 後期2年は、2030～2040年を見据えた循環シナリオを設計する。	
研究計画	令和3年度	産業部門における廃プラスチックの組成調査、バイオマス原料と各種プラスチック生産の現状調査、動脈産業の廃プラスチック受入の動向調査、樹脂添加剤のスクリーニング調査
	令和4年度	エッセンシャルユースのプラスチック需要の特定、国外からの持続可能なバイオマスプラスチックの調達可能量の推計、廃プラスチック受入・処理の目的別シナリオ作成法の検討、機器系プラスチックの市中賦存量の推計
	令和5年度	プラスチック需要と排出のトレンド推計、バイオマスプラスチックの国内原料調達量と生産能力の分析とLCA、廃プラスチックの処理技術選択の最適化問題の構築、機器系プラスチックの地域循環シナリオの設計、製品プラスチックの市中賦存量の推計
	令和6年度	2020年産業連関表によるプラスチック需要と排出のトレンド推計の更新、バイオマス原料と再生樹脂によるプラスチック需要の充足可能量の推計、フィードストックリサイクルに求められる樹脂原料供給量の分析、製品プラスチックの添加剤のフロー分析
	令和7年度	構造変化を考慮した動脈産業の炭素循環フローの推計、プラスチック資源循環のグランドデザインの提示、サーカムスタンス適応型の循環シナリオの設計
自己評価	〔計画通り進展している〕 前期3年の目標とした循環シナリオを構成する評価基盤の拡張について、いずれの研究項目についても順調な進展があった。	

2. 研究目標の進捗状況

(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し（サブテーマ3）

具体的な理由・根拠

- ① 物質フローや市場調査をもとに推計した生活系プラスチックの排出量を基準に、レジ袋の有料化など現状の政策、容器包装の軽量化など企業の取組の延長での削減可能量を推計した（左上図）。
- ② バイオマスプラスチックに関する国内企業へのヒアリング調査をもとに、当初の計画を前倒して2030年における国内のバイオマス原料の調達可能量とポリエチレン（PE）またはポリ乳酸（PLA）に変換した場合の供給可能量を推計した。
- ③ 化学産業におけるケミカルリサイクルを中心に、国内での廃プラスチック受入可能性を調査した。
- ④ 動的物質フローの解析手法を構築し、過去から将来のプラスチック由来の炭素のストックおよび散逸量を推計した。
- ⑤ 仙台市において一括回収された製品プラスチックから採取したサンプルの組成分析などを行った。
- ⑥ 機器系プラスチックの排出量を予測するツールを開発し、使用年数情報の精緻化の必要/不要な財を区分した。



目標達成の見通し

令和5年度までの研究計画については達成済み、または具体的に達成の見込みが立っており、一部については令和6年度に計画していた研究項目にも着手しているなど、最終的な目標である循環シナリオの設計およびグランドデザインの提示に向けて順調に進展している。

3. 研究成果のアウトカム（環境政策等への貢献）

行政等が活用することが見込まれる成果

- バイオマスプラスチックの熱分解法による化学原料回収、バイオマスプラスチックと石油由来プラスチックの共処理、および石油精製設備を活用したバイオマスプラスチックの化学原料化は、プラスチック資源循環戦略のマイルストーン達成に重要なトピックと認識。PLAやPHBHなど、共処理の必要性は確実に生じることから、バイオマスプラの様々な排出ケースを想定した技術開発が、バイオマスプラの導入量増大と効果的なリサイクルを共存させるための提案につながると見込んでいる。
- サブテーマ2「バイオプラスチック社会普及性を支えるバイオマスの変換技術開発」に関して「脱炭素社会に向けたセルロース系バイオマスフラクショネーション産業の構築」として2023年6月20日に東京大学で開催された紙パルプ研究発表会で特別講演を行った。本会を主催する紙パルプ技術協会は、主要な紙パルプ生産国に設けられている紙パルプに関する技術団体の日本を代表する団体であり、日本学術会議協力学術研究団体でもある。
- 本研究をとおして、「プラスチック資源循環戦略」におけるマイルストーン達成可否の目安や達成のために求められる要素を、具体的に示すことができた。使い捨てプラスチックの累積25%削減に向けては、現状の延長での見込みの削減率は10%であり、さらに66万tの削減が必要であることや、削減可能量の61%が家庭由来の廃プラスチックであり、産業部門の排出量削減策が求められることを示した。バイオマスプラスチックの最大200万t導入に向けては、海外からの原料調達の必要性や、変換率を踏まえPLAへの代替可能性・需給分析の検討が必要であることを示した。

行政等が既に活用した成果

特に記載すべき事項はない

4. 研究成果の発表状況

誌上発表（査読あり）：7件

- Zhuze Shao, Shogo Kumagai, Tomohito Kameda, Yuko Saito, Toshiaki Yoshioka, Effects of heating rate and temperature on product distribution of poly-lactic acid and poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate, Journal of Material Cycles and Waste Management, 25(2), 650–661 (2022), <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01573-9>
- Tsukida, R., Yoshida, M., and Kaneko, S., Characterization of an α -L-arabinofuranosidase GH51 from the brown-rot fungus *Gloeophyllum trabeum*, Journal of Applied Glycoscience 70(1): 9-14 (2023)
- M. Kawai, J. Nakatani, K. Kurisu, Y. Moriguchi: Resour. Conserv. Recycl. 180, 106162 (2022), Quantity- and quality-oriented scenario optimizations for the material recycling of plastic packaging in Japan (IF: 13.716)

口頭発表（学会等）：75件

- Toshiaki Yoshioka, OECD Workshop on Flexible Food Grade Packing-Economic, Regulatory or Technical Barriers to Sustainable Design from Chemicals Perspective- 「Ideas and strategies for making plastic a sustainable material」 (2022.5.12)
- 五十嵐圭日子, 第45回日本分子生物学会&日本生物物理学会 未来を奏でる「栄養学×デジタル技術」の最前線「酵素の分子レベルの情報をサーキュラーバイオエコノミーの実現に活かす」(幕張メッセ、千葉) (2022.12.1) [招待講演]
- M. Kawai, J. Nakatani, K. Kurisu, Y. Moriguchi, 3RINCs 2023, Quantity- and quality-oriented strategies for the material recycling of plastic packaging in Japan focusing on source separation and sorting processes (2023)

国民との科学・技術対話：18件

- 五十嵐圭日子、第90回紙パルプ研究発表会「脱炭素社会に向けたセルロース系バイオマスフラクショネーション産業の構築」(東京大学) (2023.6.20)
- 中谷隼、令和5年度 環境研究総合推進費公開シンポジウム「マイクロプラスチック問題の現状と研究紹介」(主催：環境再生保全機構) (あわぎんホール、会場参加95名、オンライン視聴263名) (2023.5.29)

知的財産権等：0件

- 特に記載すべき事項はない。

5. 研究の効率性

- サブテーマ3においては、最終的目標に変更がない中で、一部の項目において、A) 当初の研究計画からアプローチを変更、B) 当初の研究計画から着手する順番を変更、C) 議論する中で新たな分析を追加、等の進め方の工夫を行った。
 - A) アプローチの変更は、プラスチック需要について、エッセンシャルユースの積み上げよりもより現実的な推計を行うために、現状の制約や取組の延長による削減可能量を推計するアプローチに変更した。
 - B) 着手の順番変更については、当初はバイオマスプラスチック供給について国外からの調達可能量を分析した後に、国内での調達可能量を検討する予定であったが、国内での調達可能量の推計が当初の予定よりも進捗したため、順番を前後させた。
 - C) 分析の追加は、解析手法の構築について、目的別シナリオ作成法や最適化問題に幅を持たせることを考慮し、その目的となり得るプラスチック由来の炭素のストックと散逸を分析するモデル構築を実施した。
- 目標達成に向けた今後の進め方として、サブテーマ1で実施する、共熱分解に向けた化学原料回収に適するバイオマスプラスチック、石油由来プラスチック、およびVRの混合条件や共熱分解条件・触媒分解条件の探索において、特に触媒分解については挑戦的な目標設定であるが、同サブテーマで並行して実施する「バイオマスを原料としたバイオマスプラスチック原料合成」と連携し、化学原料回収に適した触媒の選定・開発を進めることで計画通りに研究を進める工夫を行う。