

バイオものづくりを基盤としたリサイクル技術 —スマートセルによる酵素を活用したプラスチックリサイクル—

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部
執筆：インダストリーイノベーション室 佐藤 佳寿子
知財分析：知的財産室 松浦 由依

Biz Tech フォーカス 2025

なぜこの技術を取り上げるのか

2020年に宣言された「2050年カーボンニュートラル」を目指して、2021年に経済産業省によるグリーンイノベーション基金（2030年までに官民合わせて年間の投資規模を3兆円に拡大）が設立された。さらにバイオものづくり革命推進基金（予算規模3,000億円）が推進されるなど研究開発を官民あげて推進する機運が高まっている。また欧米で脱炭素やサーキュラーエコノミーの推進を背景として積極的に政策が制定されている。特にバイオものづくりを基盤としたプラスチックリサイクル技術については、企業が事業化に向けた活動を活発化しており、注目が高まっている。

Summary

- バイオものづくりを基盤とする遺伝子改変微生物（スマートセル）によって生産された酵素を用いることで環境負荷が低く、品質が一定程度担保されたプラスチックリサイクルが可能となってきた。
- 酵素の大量生産という課題はあるもののAIを活用することで、本課題を解決するための技術が確立しつつある。

1. 「バイオものづくり」とは

1-1. バイオものづくり

バイオものづくりは、遺伝子技術を使って微生物が生成する物質の量や性質を変えることで、地球温暖化などの社会的課題を解決することを目指す注目の分野となっている。この考え方は、日本政府の「新しい資本主義のグランドデザイン」にも取り上げられているほか¹、海外では、欧州においてEU域内におけるバイオ技術およびバイオものづくりの強化に向けた政策文書が2024年3月に発表されている²。また、米国では2022年9月に米国内バイオ産業振興の大統領令が出されており、国をあげて競争力強化を目指している³。

バイオものづくりとは、有用な物質を効率的な生産や従来の化学反応を環境への負荷が少ない条件で行えるようにする遺伝子改変微生物（スマートセル）を作り出し、それらを物質の生産に活用することを指す。

スマートセルを作り出すためには、以下のようなプロセスが繰り返し行われる。

設計（Design）： 遺伝子改変や代謝経路の変更を行うための設計図を作成。

構築（Build）： 設計に基づいて遺伝子改変を行い、スマートセルを作製。

評価（Test）： 作製したスマートセルの機能を評価。

学習（Learn）： 評価データを基に改善点を見つけ、より最適化されたスマートセルを設計。

¹ 新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画 2024年改訂版

² 欧州委、域内のバイオ産業強化策をまとめた政策文書を発表(EU) | ビジネス短信 —ジェトロの海外ニュース— ジェトロ

³ バイデン米大統領、国内バイオ産業振興の大統領令に署名(米国) | ビジネス短信 —ジェトロの海外ニュース— ジェトロ

この一連のプロセスはDBTLサイクル (Design, Build, Test, Learn) と呼ばれ、このサイクルを繰り返すことで、高効率に有価物生産できる微生物を開発することが可能となる (図表1)。

図表1：バイオものづくりの概念図



出所：バイオものづくり革命の実現 経済産業省 2023年4月19日
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shin_kijiku/pdf/014_05_00.pdf
 から三井物産戦略研究所作成

1-2. バイオものづくりのリサイクル分野への活用

一般的なバイオものづくりではバイオマスを用いて物質生産を行うが、本技術を活用して開発されたスマートセルが生産する酵素を用いた、プラスチックリサイクル技術に関する研究成果報告が近年増加している。酵素は特定の分子構造や化学結合のみと反応するという生体由来の特徴から、メカニカルリサイクルやケミカルリサイクルと比較して高い選択性を保有している。そのため不純物にはほとんど反応せず、高効率なリサイクルを実現する。また高温・高圧や化学品を用いる従来のケミカルリサイクルと異なり、酵素を用いる場合は、常温・常圧で反応を進められるため、エネルギー消費を抑えることができる。さらに物理的な手法であるメカニカルリサイクルでは素材の性能が低下しやすいが、酵素を用いた場合には元の品質に近いリサイクル素材が得られる。

1-3. リサイクル分野への活用時の課題

一方で酵素が生体由来であるため従来技術よりも反応が遅くなる、精緻な温度やpHの管理が必要になる、酵素の大量生産方法が確立していないため生産コストが高いという課題がある。そのため前述したDBTLサイクルを用いることによって、より高性能な酵素が開発されつつあるものの、技術開発によるさらなる改善が期待されている。

2. 注目すべき動向

2-1. プラスチックリサイクル事例

代表的な例として（仏）Carbiosがあげられる。同社はPETを分解する酵素を用いてエチレングリコールとテレフタル酸（TPA）を回収する技術を開発中であり、2026年に商業プラントを稼働させる予定となっている。また（日）キリンHDも高効率でリサイクルが可能となるPET分解酵素を静岡大学、自然科学研究機構、大阪大学と共同で開発したことを発表している⁴。

PET以外のプラスチックリサイクル事例としては（豪）Samsara Ecoがナイロンのリサイクル技術を構築しており、スポーツウェア企業である（米）lululemonと提携することによって、リサイクルナイロン6,6生産に成功し、スポーツウェアを試作している。また（日）兼松は（豪）Samsara Ecoへの出資を行っておりリサイクルサプライチェーンの構築を目指している⁵。

図表2：プラスチックリサイクル研究・開発状況

企業名、研究機関名	リサイクル素材	概要
（仏）Carbios	PET	酵素を用いたPET解重合の先駆者として多くの企業との連携を進めている。Carbiosは、Indorama Venturesとの合併会社（JV）として工場を2025年稼働を目指す
（豪）Samsara Eco	ナイロン、PET	オーストラリア国立大学（ANU）の技術を活用した酵素開発を実施 PET分解に注力する企業が多い中でナイロンの酵素リサイクルのスケールアップを検討中
（ラトビア）Enzymity	PET、ポリエステル、ポリウレタン、ポリスチレン	機械学習機能を活用し最適化されたプラットフォームを保有 PET分解時間100hから15h。ポリエチレン分解時間50日から20日にまでの短時間化に成功
（英）Epoch BioDesing	ナイロン、ポリエステル	公開データセットと独自のデータセットの両方で生成AIを活用することにより、プラスチック解重合の可能性が高い酵素候補を設計します。同社は、温和な条件下でポリマーを分解する酵素の能力を評価するために、物理モデリングを実装
（日）キリンHD、静岡大学、自然科学研究機構、大阪大学	PET	耐熱性の高い酵素の開発に成功。PETとポリウレタン、PETとコットンの2種類の混紡繊維中のPETを選択的に分解することが可能であることも検証されており、PETとコットンの混紡繊維では、PET分解率が世界最高値の90%を達成

出所：三井物産戦略研究所作成

2-2. スマートセル創出におけるAIの台頭

AIの台頭によりこれまで以上に高効率な酵素を得るためのスマートセル設計のための時間は短縮されつつある。AIの活用には企業独自および公開されたデータセットの両方を活用することが重要となる。これまでは企業独自のデータセットを大量保有する企業が競争優位を持っていたが、最近では生成AIプラットフォームを提供する企業が出てきている。これによりデータセットを保有していない企業でもスマートセルの設計が可能となる。例えば（米）Ginkgo Bioworksはこれまでフレーバー等の物質生産を行ってきたが、2023年9月にGoogle Cloudとの提携を発表した。これはGinkgo Bioworksが保有するデータセットとGoogle Cloudが保有するAI技術を用いて、第三者に対するスマートセル設計のための生成AIプラットフォームを開発するためであり、2024年9月より本プラットフォームを第三者に提供している^{6, 7}。このような新たなサー

⁴ キリンHD、PET高効率分解 酵素使用のCR技術：化学工業日報 電子版

⁵ 兼松、環境技術スタートアップ、豪 Samsara Eco 社へ出資 ～独自の酵素リサイクル技術によりプラスチックをモノマー化。CO₂排出を抑え、何度もリサイクル可能～

⁶ Google and Ginkgo: Foundry-Scale Data Meets AI - Ginkgo Bioworks

⁷ Introducing Ginkgo's Model API: A Programmable Interface for Ginkgo's AI Research - Ginkgo Bioworks

ビスにより、スマートセルを用いた酵素開発に取り組む企業の広がりや研究開発の活発化、製品の市場投入の加速化が予測される。

2-3. 量産技術の推進

スマートセルの大量生産技術は発展途上であるが、（日）ちとせ研究所ではAI技術を活用して安定した大量生産を目指している。従来の培養技術では温度やpH、溶存酸素濃度など測定しやすいデータに加え、色・においといった職人の経験や感覚に依存している部分が多くあった。しかし、ちとせ研究所では従来のデータに加えて、AIが学習しやすい多次元データ（電位データ、においデータ、画像データ等）を継続的・連続的に安価に収集し、最適な培養条件を導き出す「コンボリューショナルデータ」の活用を進めている。これらの技術は、今後新しい微生物が設計される際に幅広く利用され、スマートセルの安定生産を支える重要な基盤となっていくと期待される。

3. 今後の展望

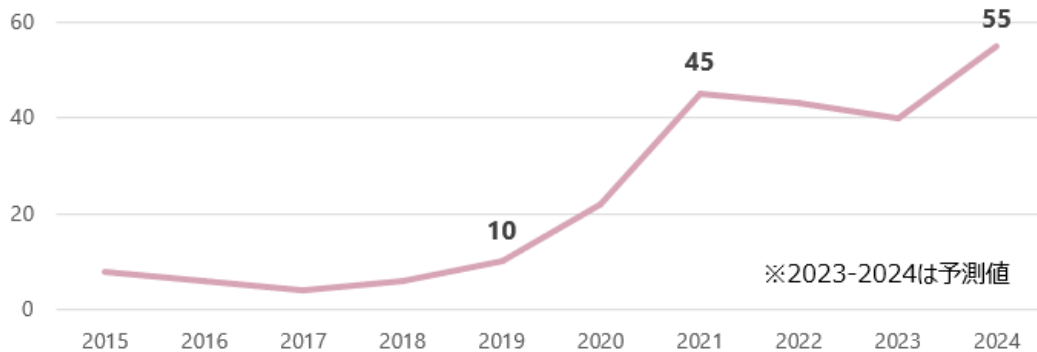
酵素を用いたリサイクル技術はエネルギー削減やGHG排出削減が期待できる。例えばPETのリサイクルでは、サプライチェーン全体においてPETの原料であるTPA1kgあたり化石燃料ベースの従来プロセスと比較して69%~83%のエネルギー削減、17%~43%のGHG排出削減が可能であると報告されている⁸。PETは、エステル結合を含んでいるため酵素による加水分解が比較的容易であること、一定のリサイクル手法が確立している背景から、多くの企業や研究機関において、より高効率なリサイクルを可能とする酵素開発が進められている。しかし今後は前述したようにAI技術を活用することでナイロンやポリエステルといったPET以外の汎用プラスチックに関しても酵素を用いた高効率なリサイクル技術が推進されると考えられる。

⁸ [Techno-economic, life-cycle, and socioeconomic impact analysis of enzymatic recycling of poly\(ethylene terephthalate\)](#): Joule

バイオものづくりに関する知財分析

バイオものづくりに関する知財分析として、酵素を用いたリサイクル技術に関する特許データを抽出し、技術をめぐる状況を分析した。分析対象は、グローバル特許検索ツールPatSnapを用いて検索した、2015年から2024年出願の311件（ファミリー件数）である。

図表3：酵素リサイクル技術に関する特許出願件数/年



出所：三井物産戦略研究所作成

図表4：出願人別件数上位ランキング（2015年-2024年）



出所：三井物産戦略研究所作成

図表3に示すように、2019年から2021年の期間に出願件数が大きく増加しており、技術の成熟や市場の需要拡大が反映されている。2024年の予測値では、出願件数はさらに伸びる見込みであり、酵素リサイクル技術の重要性の高まりや市場の拡大を示している。図表4に示すように、主要出願人としては、研究機関（例：江南大学）や企業（例：Carbios）が確認できる。

特許データより現状の技術状況を確認すると、特にPETの分解に特化した酵素技術が多く、実用化を目指した研究開発が進んでいる。CarbiosはPETの分解技術に注力し、工業規模での実用化に向けた設計に独自性がある。江南大学はポリエステルやポリスチレンを含む複数のプラスチック素材の分解技術を研究し、酵素の遺伝子工学的改良を通じた性能向上に独自性がある。

現状の特許群は酵素リサイクルが「技術的に可能」であることを示す実験室レベルの成果が中心であり、

実際の導入には商業化の壁が残っている。Carbiosの特許は、短中期的に実用化可能なプロセスとして優位性が高い一方、江南大学をはじめとする研究機関の基礎研究は新規材料への挑戦に価値があり、長期的には新規市場を切り開く可能性があるといえる。

佐藤 佳寿子 Sato Kazuko / シニアプロジェクトマネージャー
専門分野：先進マテリアル

松浦 由依 Yui Matsuura / シニアアナリスト
専門分野：知的財産権、知財コンサルティング

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できるとされる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社および三井物産グループの統一した見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社および三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。