

フジシール財団 研究助成事業
成果報告書

公益財団法人フジシール財団
理事長 岡 崎 裕 夫 殿

報告日 2026 年 5 月 30 日

研究課題	微生物触媒を用いた PET 含有プラスチックのカーボンリサイクル	助成金額
		300 万円
助成名	特別長期研究助成・研究助成・若手研究助成	
ふりがな	まつもと たくや	研究助成申請年度
研究者氏名	松本 拓也	2024 年度（追加募集）
所属機関	大阪公立大学 大学院工学研究科	研究期間
		2024 年度 11 月～2026 年 3 月
役 職	准教授	

下記の通り、研究成果を報告いたします。

記

1. 研究成果の概要

本研究では、微生物に廃棄プラスチック成分を食べさせて、別のものに変換するプロセスの開発を目指した。本研究により、化学反応ではなし得ないアップサイクルを実証し、廃棄プラスチックを高付加価値化合物に変換する技術の開発を目的とした。申請者はその手段として、表層提示技術を駆使することで酵素を調製・精製することなく利用でき、かつ再利用が可能な大腸菌を用いた菌体触媒の開発に成功した（図 1）。本研究ではまず、当該菌体触媒を、raw

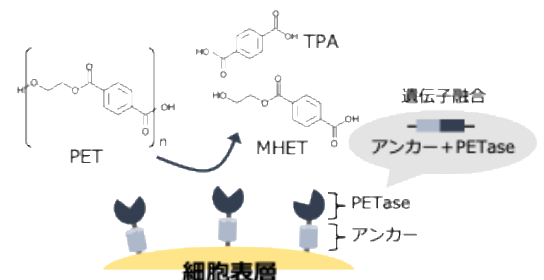


図1. PET分解酵素の表層提示

PET（各種 PET 素材や PET 含有廃プラスチックなど）を分解可能な菌体触媒へと拡張することを目指した。

本菌体触媒における PET 分解は、「1.基質への吸着」、「2.ポリマーの分解」、「3.オリゴマーの分解」の3つのフェーズに分けて考えることができる（図 2）。先行研究においては、特に「2.ポリマーの分解」について重点的に検討を行い、PET シートを分解可能な株の開発に成功した（PETase、mPETase（高活性変異体の導入））。ここで、未分解の MHET が系に多く残存していたことから、本微生物株にさらに MHETase をペリプラズムで過剰発現させることで 3.オリゴマーの分解を促進し、PET をモノマーのテレフタル酸（TPA）まで分解することに成功した。このことで、基質となるアモルファス PET フィルムを質量比で 3%程度、72 h で完全に TPA まで分解することに成功した（論文発表(1), Kurauchi et al., 2026）。

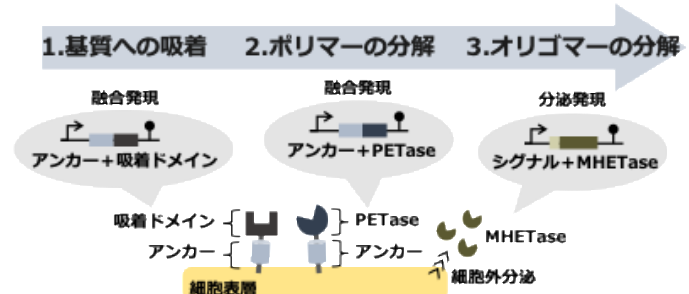


図2. PET分解に適した大腸菌の細胞表層デザイン

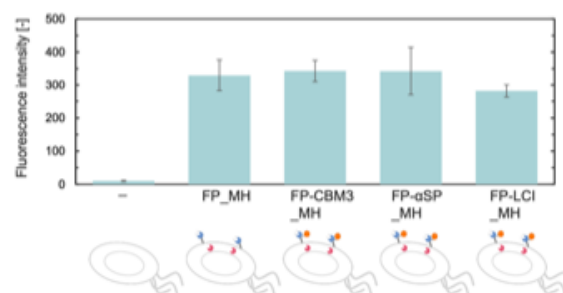
本研究では、更に PET 分解効率を劇的に向上させるために「1.基質への吸着」の改善を図った。具体的には疎水性基質に吸着するタンパク質を本微生物株に、同時に表層提示することで微生物株自体の PET 吸着性を

改善し、PET をシームレスかつ高効率で分解可能な菌体触媒の開発を目的とした。具体的には、既往研究を参考に 3 種類の吸着タグ (CBM3、 α SP、LCI) を PET 分解酵素の C 末端に融合させた。図 3. a)に免疫蛍光染色の結果を示す。PET 分解酵素のみを提示した場合 (FP_MH) と比較して、LCI を除き、いずれの場合も提示タンパク質量が変化していないことが分かる。このことから、吸着タグが PET 分解酵素の表層提示へ与える影響は小さいことが示唆された。一方で、図 3. b)より PET 分解量に関しては CBM3 を融合した場合でのみ、やや TPA 生成量が増加したが大幅な改善は見られなかった。更なる改善のためには、吸着タグを融合する際のリンカー等を検討することで、PET への吸着性能をより詳細に検討していくことが必要であると考えられる。

続いて、図 4 に示すように TPA 代謝経路の導入による PET の微生物リサイクルの実証を試みた。申請者はこれまでの研究において大腸菌や酵母などの微生物を宿主として利用し、多様な有用化合物を生産する代謝改変微生物の開発を行ってきた。本研究では、その知見を活かして、本来は TPA を資化できない大腸菌に対して、TPA 資化経路を導入した。具体的には、TPA 分解細菌 *Comamonas* sp.に由来する遺伝子 *tphAabc*、*tphB* を大腸菌に導入し、TPA からプロトカテク酸 (PCA) を合成する経路を構築した。まず、大腸菌 BL21(DE3)株に対して、Lac プロモータ下に *tphAabc*、*tphB* 遺伝子を挿入したプラスミドを形質転換し、乾燥酵母エキスを含む M9 最小培地を用いて実験を行った。OD₆₀₀ が 0.4~0.6 になった時、誘導剤を添加し、その際、基質となる TPA を終濃度 3 mM となるように加えた。図 5 に 72 h までの培養実験の結果を示す。図 5 a)に示すように、TPA はおよそ 48 h で全て消費され、PCA はおよそ 0.4 mM 生産された。このことから、導入した代謝経路が機能していることが示唆された。一方で、TPA 消費量に対して PCA の収率が低いことは、導入した TPA 代謝経路の不均衡による中間体の蓄積などが原因として考えられる。プロモーターや RBS 等を変更することで発現調整を行うことや、補酵素バランス等の改善が今後必要になると考えられる。

本研究では、大腸菌を宿主として、細胞外における「高効率な PET 分解」と、細胞内における「モノマー (TPA) の有用物質 (PCA) への変換」を実証した。本成果を組み合わせることで、PET 廃棄物を直接有用化合物に変換可能になると期待できる。また、PCA は更なる代謝改変によりバニリンや没食子酸等の他の有用化合物にも変換可能である。本研究による実証を通じて、プラスチック廃棄物をさまざまな有用化合物へとアップサイクルできる可能性が示唆された。一方で、本技術を実装するために生産量や変換速度に関しては改善が求められる。今後、更なる代謝工学改変を加えることで微生物株を改善していくことが必要不可欠である。

a) 免疫蛍光染色による表層提示タンパク質の評価



b) PET分解実験の結果 (TPA生成量の測定)

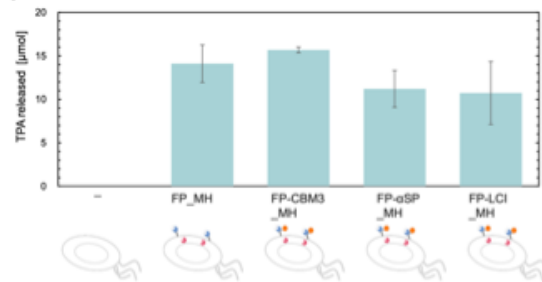


図3. PET分解酵素と吸着タグの同時提示系の評価

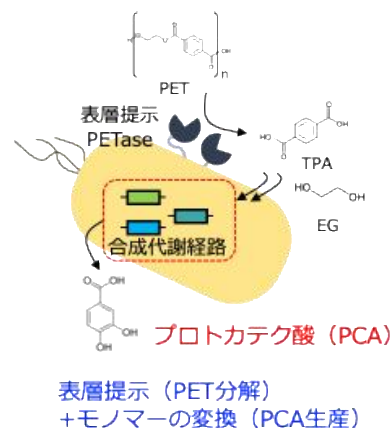
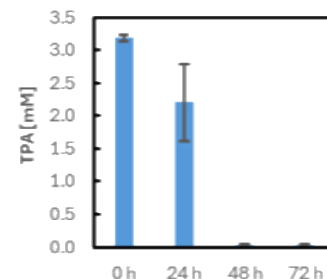


図4. PET分解酵素表層提示大腸菌を用いたプロトカテク酸の直接生産

a) 基質 (テレフタル酸) 消費量



b) 生成物 (プロトカテク酸) 生産量

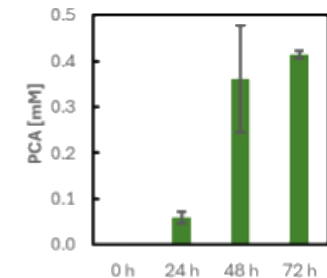


図5. TPAを原料としたPCA生産

2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性

昨今、廃棄プラスチックの海洋汚染や生態系への悪影響が世界中で問題視されており、プラスチック利用量の削減や適切なリサイクルシステムの開発が求められている。我が国では容器包装リサイクル法によってプラスチック容器の分別や回収などが細かく定められ、およそ6割がガス化や熱分解などによる燃料利用に、残りの4割が再生プラスチックとして利用されており、比較的リサイクルシステムは進んでいる。一方で、燃料利用が中心のケミカルリサイクルでは脱炭素効果が薄いことから、原料・モノマー化や別の化合物へのアップサイクルが期待されている。しかしながら、多量の有機溶媒での処理や複雑な化学反応プロセスを必要とし、実用には至っていない。それらの問題を同時に解決する手段として、微生物に廃棄プラスチック成分を食べさせて、別のものに変換するプロセスの開発を目指した。本研究により、化学反応ではなし得ないアップサイクルを実証し、廃棄プラスチックを高付加価値化合物に変換する技術の開発を目指した。

廃棄プラスチックは環境への悪影響という面で着目されているが、ポリエチレン (PE)、ポリプロピレン (PP)、ポリ塩化ビニル (PVC)、ポリエチレンテレフタレート (PET) など炭素骨格を有するポリマーを主成分とする。つまり、適切なリサイクル・アップサイクル技術が確立できれば、ものづくりにおける炭素源の一つとしてなりうるポテンシャルがあると考えられる。本研究では特に PET の分解に着目し、PET のみをモノマーまで特異的に微生物分解する技術の開発を試みた。本研究において PET 分解をモデルに、「廃プラスチックから特定成分のモノマーのみを抽出する技術」と「モノマーを経て有用物質に変換する技術」とを確立することができれば、分解対象を変更した微生物 (PP、PE をターゲットにする) を同様に開発することで、他の成分のモノマーを抽出、変換する技術の開発にも繋がると期待できる。本研究では PET を TPA まで分解する技術と、TPA を PCA 変換する技術の実証に成功したが、当該関連技術が開発されていくことで将来的にプラスチック混合物を成分モノマー毎に細かく分離できるプロセスの構築が可能になれば、リサイクルだけではなく別のものづくりへと容易に展開することができ、アップサイクルの観点で大きな波及効果が期待できる。

3. 学会発表、学会誌等への論文掲載、産業財産権出願などの実績（現時点で未発表・未掲載・未出願のため、上記「1. 研究成果の概要」、「2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性」の当財団ホームページ上の公開の延期を希望される場合、その旨 記載してください。）

● 論文発表

- (1) *Escherichia coli* with surface display of PETase and periplasmic localization of mhetase for enhanced terephthalic acid production from PET., Y. Kurauchi, T. Yamashita, T. Matsumoto*, R. Yamada, H. Ogino, Systems Microbiology and Biomanufacturing, 6, 7 (2026)

● 学会発表

- (1) Cell surface engineering of *Escherichia coli* for enhanced PET degradation, H. Todo, T. Matsumoto, R. Yamada, H. Ogino, Young Asian Biological Engineers' Community 2025 (2025.11. Matsue)
- (2) Engineering *E. coli* for PET degradation using surface-displayed enzyme systems, Y. Kurauchi, T. Matsumoto, R. Yamada, H. Ogino, International Conference on Bottom-up Biotechnology for Understanding and Engineering Living Systems 2025 (2025.11. Okinawa)