



ポリエステル材料の ケミカルリサイクル法の最前線

あらゆるポリエステルの循環利用に向けた分子触媒設計

田中真司 Shinji TANAKA

プラスチック資源循環への関心が高まる中、ポリエステルのケミカルリサイクルは、サーキュラーエコノミー実現に向けた重要技術として注目を集めている。近年は金属錯体触媒の精密な分子設計により、従来の高効率な解重合に加え、混合プラスチックの選択的解重合やアップサイクルを可能とする革新的な触媒系が次々と報告されている。本稿では、2025～2026年の最新研究を中心に、触媒の設計戦略とその将来展望について概説する。

はじめに

近年、プラスチック資源循環の重要性が世界的に高まる中、ポリエチレンテレフタレート（PET）のリサイクルはサーキュラーエコノミー実現の中核的課題として位置づけられている。欧州や日本でも容器包装のリユース・リサイクル率が具体的数値として掲げられる中、多くの企業が再生PET利用目標を公表しており、高品質な再生PETの需要は急速に高まりつつある。

従来のPETリサイクルの主流はマテリアル（メカニカル）リサイクルである。しかしこの手法では再加工を繰り返す過程で分子量の低下や着色、不純物の蓄積が生じるほか、異種材料が混在する複合製品では適用が困難である。そのため、製品品質を維持しながら資源循環を実現できるケミカルリサイクルへの期待が高まっている。ケミカルリサイクルは、PETを分子レベルまで分解してモノマーとして回収し、再び新品同等のPETへ再生する技術である。特にPETは、ガス化や油化に比べてエネルギー効率に優れるモノマー化プロセスが適用できる。そのため、モノマー化を基軸とするケミカルリサイクルが産業界、学术界の双方で活発に研究されている。特に学术界では、ケミカルリサ

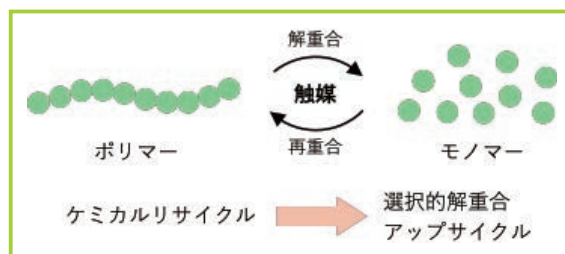


図1 ポリマーのケミカルリサイクルの概念図

イクルの研究は単なる分解反応の高速化から、ほかのポリエステルとの混在系における「選択的解重合」や「アップサイクル」へと研究の重点が移りつつある（図1）。その中核的なアプローチとして注目されているのが金属錯体を利用した精密触媒設計である。本稿では、特に2025～2026年に報告された金属錯体触媒に関する最新の研究動向を概説する。

単核錯体触媒の精密設計

M. D. Jones らはイミノピロール配位子を有するZn錯体を開発し、選択的なポリエステルの解重合反応に適用した¹⁾。特に2つの配位子を有する錯体**1**（図2）は80℃、溶媒フリー条件でポリ乳酸（PLA）を乳酸メチルへ変換し、PETのグリコリシスやポリカーボネート（PC）のメタノリシスにも適用可能であった。さらにPET/PLA/PCのうち二成分を混合した系における選択的解重合を達成し、混合プラスチックへの対応可能性を示した。また、S. Herres-Pawlis らはグアニジン配位子を有するZn錯体**2**（図2）を触媒として、ポリカプロラクトン（PCL）とPLAの混在系におけるPLA選択的な解重合を報告している²⁾。これらの報告はいずれ

たなか・しんじ

産業技術総合研究所サーキュラーテクノロジー実装研究センター 上級主任研究員

〔経歴〕2013年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了、博士（理学）。同年産業技術総合研究所触媒化学融合研究センター特別研究員、14年同研究員、17年同主任研究員、25年現所属への異動を経て、26年より現職。〔専門〕触媒化学・核磁気共鳴。〔趣味〕料理。

E-mail: shinji-tanaka@aist.go.jp



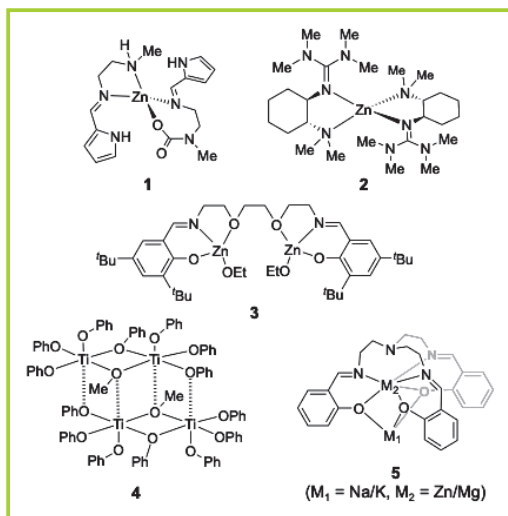


図2 ポリエステル解重合のための金属錯体触媒の構造

も、Zn 触媒系におけるエステル基の反応性の差を巧みに利用した点に特徴がある。PLA, PCL 等の生分解性ポリエステルは、今後 PET と併用される可能性があることから、これらの研究は将来の資源循環システムを支える基盤技術として注目すべき研究成果である。

多核錯体触媒の精密設計

最近 X. B. Lu らは、フェノキシイミン型の多座配位子を有する二核 Zn 錯体 **3** (図2) によるポリエステルの解重合を報告した³⁾。DFT 計算と速度論解析により、一方の Zn がエステル基を活性化し、もう一方の Zn がアルコールを活性化する協働機構を提案した。このような二核金属中心による協働活性化は低分子エステルの変換反応では広く知られているが^{4,5)}、その設計原理をポリエステルへと展開した点は注目に値する。また、H. Wang らは多核 Ti 錯体 **4** (図2) を用いた協働活性化を鍵とするポリエステルの変換反応を報告した⁶⁾。この触媒反応では2つの Ti 中心がアルコールとエステル基を同時に活性化し、エステル交換の活性化障壁を大幅に低減する。PET のメタノリシスでは 200 °C で $1.9 \times 10^7 \text{ g}_{\text{PET}} \text{ mol}_{\text{Ti}}^{-1} \text{ h}^{-1}$ という高活性を達成した。さらに回収モノマーから種々の芳香族ポリエステルを再合成できるだけでなく、PET 自体を原料とした直接アップサイクルも実証している。

一方、A. P. Dove らは、3つのフェノキシイミンを有

する多座配位子上に Zn/Mg と Na/K を結合させたヘテロ二核錯体 **5** (図2) を報告した⁷⁾。この系では Zn や Mg が直接エステル基質と反応するのではなく、Na あるいは K の電子状態を制御することで活性を向上させる機構が提案されている。興味深いことに、PET のグリコリシスでは Zn-K 系が最も高活性である一方、PLA の解重合では Zn-Na 系が優れた活性を示し、エステルの種類によって最適な金属の組み合わせが異なることが示された。180 °C の反応条件下でも数週間にわたり触媒活性を保持する極めて高い耐久性は、工業的に大きな利点である。

おわりに

金属錯体触媒の分子設計を鍵とするポリエステルのケミカルリサイクルに関する最新の研究動向を紹介した。従来からエステルへの触媒活性が知られていた Zn や Ti に加え、アルカリ金属を含むヘテロ二核錯体へと発展している点が注目される。また、解重合に留まらず再重合やアップサイクルまで視野に入れた触媒設計が進展している。今後は、低温プロセス化や、ライフサイクルアセスメントやグリーンメトリクス指標を統合した研究が重要になると考えられる。一方で、産業界での研究開発では、実社会で流通するポリエステル材料への適用に関わる別の観点での課題が存在し、国内外の企業が事業化に向けた研究を進めている⁸⁾。筆者の所属する産総研グループにおいても、低温解重合を鍵とするケミカルリサイクルの社会実装に取り組んでおり、これらの動向については文献を参照されたい⁹⁾。

- 1) J. A. Stewart, L. T. W. Powell, M. J. Cullen, G. Kociok-Köhn, M. G. Davidson, M. D. Jones, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2025**, 64, e202502845.
- 2) T. Becker, K. Takeuchi, C. Süßmuth, F. Boekhoff, M. A. Schäfer, S. Kato, A. Hoffmann, T. Hayashi, S. Herres-Pawlis, *Adv. Sci.* **2025**, 13, e11260.
- 3) G. T. Ma, B. H. Ren, T. J. Yue, W. X. Peng, W. M. Ren, Y. Liu, X. B. Lu, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2026**, e7775492.
- 4) T. Ohshima, *Chem. Pharm. Bull.* **2016**, 64, 523.
- 5) X. Zhao, M. Ratanasak, K. Kon, J.-y. Hasegawa, K. Ishihara, *Chem. Sci.* **2023**, 14, 566.
- 6) Z. Shi, H. Jiang, C. Xue, Y. Yang, Z. Hou, H. Wang, *Angew. Chem., Int. Ed.* **2025**, 64, e202505024.
- 7) N. V. Reis, Y. Zhou, B. Bati, Y. Wang, G. S. Nichol, J. A. Garden, A. P. Dove, *J. Am. Chem. Soc.* **2025**, 147, 36697.
- 8) 府川伊三郎, ARC リポート (RS-1076), 2025 年 5 月.
- 9) 田中真司, 大石佑子, *環境管理* **2026**, 62, 10.

© 2026 The Chemical Society of Japan