

環境調和型ポリマー材料の分解制御と再構築技術

理学研究科 高分子科学専攻

教授 高島 義徳

Researchmap https://researchmap.jp/ytakashima_0068747

研究の概要

本研究では、可動架橋構造を有するポリエステルに対して、酵素反応を利用することにより、分解・機械的強化・再生・アップサイクルを統合的に実現した。シクロデキストリン (CD) を基盤とする可動架橋を導入することで、ポリマー鎖間の応力分散と自由体積を同時に制御し、柔軟かつ高強度な高分子材料を構築した。得られたポリエステルは、リパーゼ (Novozym 435) による酵素分解に対して高い反応性を示し、架橋点の CD 含有量を増やすことで分解効率が最適化された。また、反応時間を制御することで、酵素による分子量増大と機械的特性向上を両立する“酵素反応を利用した材料強化”を実現した。さらに、分解生成物を反応条件の切り替えにより再重合してクロズドループ型リサイクルを達成し、選択的基質を用いることでアップサイクルによる高機能材料化にも成功した。

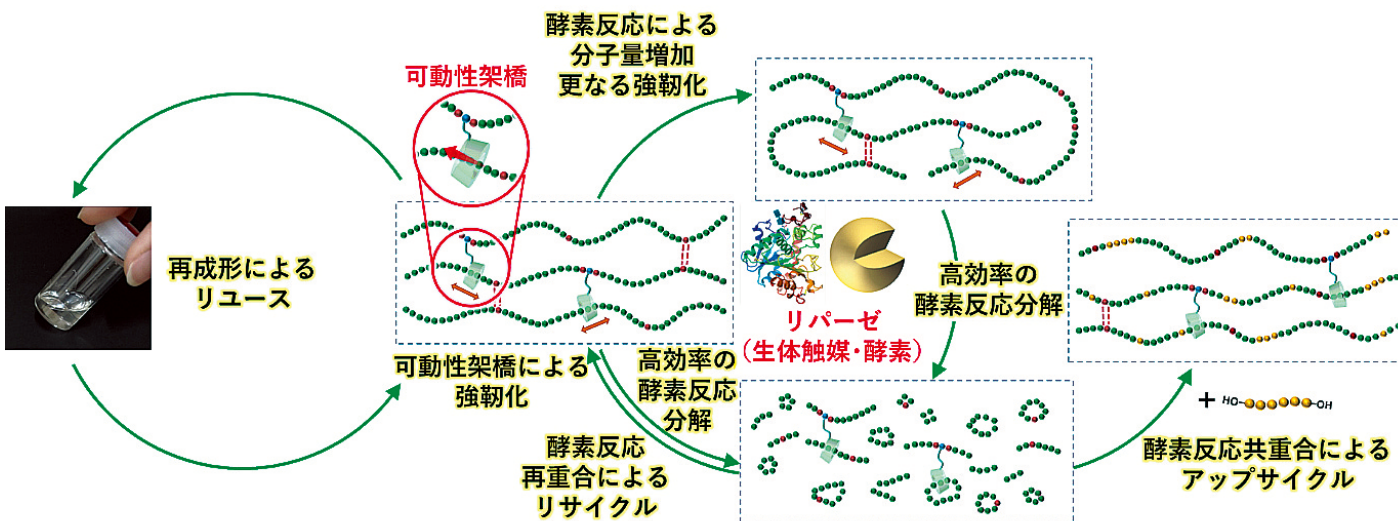
内部に自由体積を生じさせることで、酵素のアクセス性を大幅に改善した。その結果、シクロデキストリン含有量の増加に伴い分解速度が著しく向上した。さらに、酵素濃度を変化させることで反応経路を制御し、高濃度条件下では分子量と強度が増大する“酵素反応を利用した材料強化”を実証した。生成した低分子体は、同一酵素を用いて再重合することでクロズドループリサイクルが可能であり、さらに選択的モノマーやポリオールと組み合わせることで、ポリ乳酸系やシリコン系を組み込んだ高付加価値ポリマーへのアップサイクルにも成功した。これらの結果は、可動架橋と酵素反応の相乗設計により、分解性と耐久性を両立する持続可能高分子を創出できることを示している。

研究の意義と将来展望

本研究は、ポリマー構造設計と酵素触媒反応を融合した新たな循環型高分子創製概念を提示するものである。可動架橋の導入により、酵素アクセス性と機械強度を同時に向上させ、単一酵素による分解・再生・強化を自在に制御できる点が特筆される。今後は、ポリウレタンのみならずポリエステル、エラストマーなど多様な高分子系への展開が期待され、持続可能なプラスチック循環社会の実現に寄与する基盤技術となる。さらに、バイオ触媒を活用したエネルギー低消費プロセスとして、グリーンケミストリーおよび環境材料分野への波及が見込まれる。

研究の背景と結果

近年、耐久性高分子の廃棄は重大な環境課題となっている。化学的リサイクル法は高温・高エネルギーを要し、環境負荷が大きい。一方、酵素は高選択的かつ環境低負荷な触媒として注目されているが、結晶化や鎖凝集により反応効率が制限される。本研究では、体積の大きいシクロデキストリン基を架橋点とする可動架橋構造を導入し、ポリマー



酵素反応を利用したポリマー分解・再重合プロセスの概念図

特許 特願2024-571194、特許第7769347号

論文 Liu, Jiaxiong; Uyama, Hiroshi; Takashima, Yoshinori et al. Exploring enzymatic degradation, reinforcement, recycling and upcycling of poly(ester)s-poly(urethane) with movable crosslinks. Chem. 2025, 11(2), 102327. doi: 10.1016/j.chempr.2024.09.026

参考URL <https://www.chem.sci.osaka-u.ac.jp/lab/takashima/>

キーワード 可動架橋高分子・酵素分解・持続可能高分子材料・アップサイクル・クロズドループリサイクル