

2026 年 7 月 15 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

劣化したプラスチックの強度を回復する新手法を開発 —分子量から強度回復を予測する 新たなリサイクル設計指針を提案—

【発表のポイント】

- 高温多湿環境で劣化したエンジニアリングプラスチック PBT^(注 1) の強度を回復するリサイクル技術を開発しました。
- 鎖延長剤^(注 2) PPDI^(注 3) を添加することで、切断された高分子鎖を再結合し、元の材料に近い強度まで回復できることを実証しました。
- 分子量と引張強さの間に Fox-Flory 型の定量関係^(注 4) が成立することを発見しました。

【概要】

プラスチックの大量生産と廃棄は世界的な環境問題となっており、資源循環型社会の実現に向けて高性能プラスチックのリサイクル技術が求められています。しかし、使用中に劣化したプラスチックは、分子鎖が切断されるため、再利用しても十分な強度を得ることが困難でした。

東北大学大学院環境科学研究科の大塚光陽大学院生、王真金助教、栗田大樹准教授、成田史生教授らの研究グループは、Astemo 株式会社と共同で、自動車部品や電子機器に広く使用されるポリブチレンテレフタレート（PBT）に着目し、鎖延長剤である PPDI を用いて劣化した分子鎖を再結合させることで、力学特性を回復する手法を開発しました。最適条件では、劣化によって初期比 38%低下した引張強さを 94%まで回復させることに成功し、未劣化材料に近い性能を実現しました。さらに、分子量と引張強さの関係が Fox-Flory 型の理論式で表現できることを見出しました。

本成果は、リサイクル材料の性能回復を経験則ではなく理論的に予測する新たな設計指針を提供するものであり、今後の循環型材料設計への応用が期待されます。

本研究成果は 2026 年 6 月 23 日、複合材料分野の専門誌 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

近年、世界のプラスチック生産量は急速に増加している一方で、リサイクル率は依然として低く、多くが焼却や埋立処分されているのが現状です。中でも PBT は、優れた耐熱性や機械特性を持つことから、自動車や電子機器分野で広く利用されていますが、高温多湿環境では、加水分解によって分子鎖が切断され、強度が低下することが課題でした。

今回の取り組み

研究グループは、自動車部品や電子機器などに広く使用されているエンジニアリングプラスチックである PBT に着目しました。PBT は、優れた機械特性や耐熱性を有する一方、高温多湿環境では、加水分解によって分子鎖が切断され、強度が大きく低下することが知られています。本研究では、このように劣化した PBT を再び高性能材料として利用するため、鎖延長剤 PPDl を用いた分子鎖再結合技術を開発しました。

まず、未劣化 PBT を高温多湿環境で意図的に劣化させ、その後 PPDl を添加して熔融混練を行いました。PPDI 添加量を段階的に変化させながら力学特性、分子量、化学構造を詳細に評価した結果、最適な PPDl 配合条件を明らかにしました。この条件では、劣化によって初期比 38% 低下した引張強さが 94% まで回復し、未劣化材に近い性能を実現しました（図 1）。さらに、破断伸びも大幅に回復し、元の材料と同様の延性挙動を示しました。

FT-IR 分析およびカルボキシル基の定量評価から、PPDI が劣化によって生じた高分子末端と反応し、新たなウレタン結合およびアミド結合を形成することで、切断された分子鎖を再結合していることを確認しました。また、分子量測定により、強度回復と分子量回復が対応して進行することが明らかとなりました。

さらに研究グループは、引張強さと分子量の間に Fox-Flory 型の理論式が成立することを発見しました。この関係はもともと高分子のガラス転移温度の説明に用いられてきた理論ですが、本研究では強度回復過程にも適用できることを初めて実証しました。これにより、分子量の変化から材料強度を予測できる可能性が示され、経験や試行錯誤に依存しない新しいリサイクル材料設計指針を提案しました。

今後の展開

本研究で示した設計指針は、PBT に限らず、分子鎖切断によって劣化する多くの熱可塑性樹脂へ展開できる可能性があります。今後、研究グループは、リサイクル材料の性能を理論的に予測・最適化する「力学情報に基づく循環型材料設計」の実現を目指します。

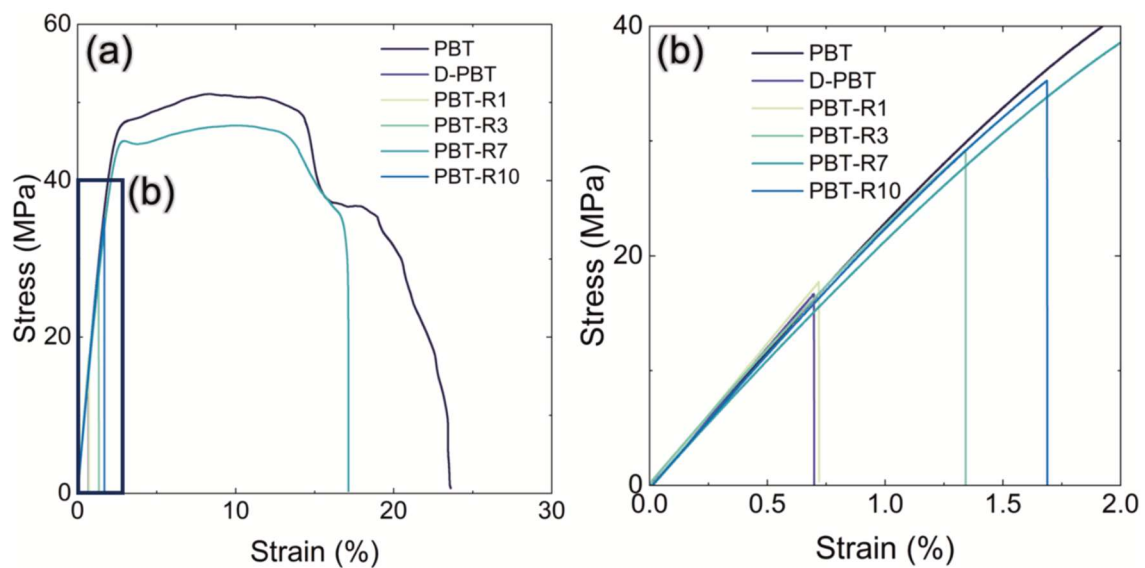


図 1. 分子鎖再結合によるプラスチック強度回復を示す応力-ひずみ曲線。PBT は高温多湿環境下で引張特性が低下するが、劣化した PBT (D-PBT) に鎖延長剤 PPDl を添加することで、力学特性が回復する。R1~R10 は PPDl の添加量 (mol%) を示す。(b) は (a) の一部を拡大した図である。

【謝辞】

本研究は、Astemo 株式会社との共同研究の一環として実施されました。Astemo 株式会社には、試料提供、研究計画の策定、実験の実施および結果の解析において多大な貢献をいただきました。

【用語説明】

- 注1. PBT (ポリブチレンテレフタレート) : 自動車部品や電子機器のコネクタなどに広く用いられるエンジニアリングプラスチック。耐熱性や機械特性に優れる一方、高温高湿環境では加水分解によって劣化する。
- 注2. 鎖延長剤 (Chain Extender) : 切断された高分子鎖同士を再結合させ、分子量や力学特性を回復させるための添加剤。
- 注3. PPDl (1,4-フェニレンジイソシアネート) : イソシアネート基を持つ化合物で、高分子末端と反応して分子鎖を延長する。
- 注4. Fox-Flory 型の定量関係 : 高分子材料の特性と分子量の関係を表す理論式。本研究では、引張強さと分子量の関係が Fox-Flory 型の定量関係で表現できることを見出した。

【論文情報】

タイトル : Molecular-Weight-Driven Recovery of Mechanical Strength via Chain Extension: A Fox-Flory-Type Approach to Polymer Recycling

著者：Koya Otsuka, Zhenjin Wang, Hiroki Kurita*, Fuminori Kondo, Masato Ikeda, Fumio Narita

*責任著者：東北大学大学院環境科学研究科 准教授 栗田大樹

掲載誌：Composites Part A: Applied Science and Manufacturing

DOI：10.1016/j.compositesa.2026.110017

URL：https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2026.110017

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

東北大学大学院環境科学研究科

准教授 栗田大樹

TEL: 022-795-7341

Email: kurita@tohoku.ac.jp

（報道に関すること）

東北大学大学院環境科学研究科

情報広報室

TEL: 022-752-2241

Email: kankyo.koho@grp.tohoku.ac.jp