

## ポリエステルを化学原料に完全変換可能な高性能鉄触媒の開発 ～安価で製造も容易、資源循環型社会の基盤技術に～

### ポイント

- ペットボトルや衣料廃棄物などのプラスチックごみ問題を解決する革新的な科学技術が切望されている。
- アルコールと混合・加熱するだけで、ポリエステルを高純度の化学原料にほぼ100パーセント変換可能で、かつ、安価で入手容易な高性能鉄触媒を開発した。
- プラスチックごみから化学原料・高付加価値品への化学変換など、資源循環型社会の実現に向けた科学技術の発展に寄与する有用な基盤技術となる。

JST 戦略的創造研究推進事業 CREST において、東京都立大学 大学院理学研究科の野村 琴広 教授らの研究グループは、PET（ポリエチレンテレフタレート）<sup>注1</sup>などのポリエステル<sup>注2</sup>とアルコールを混合・加熱するだけで、効率良く（ほぼ100パーセント；99.7～99.9パーセント）化学原料（モノマー）に変換可能な高性能触媒の開発に成功しました。

ペットボトルや衣料廃棄物などのプラスチックごみ問題は、早期に解決すべき重要課題ですが、現状はほとんどが燃料としての再利用で、原料として再利用される割合は低いのが現状です。特にペットボトルの回収・リサイクルでは品質低下が懸念で、いったんエステル結合を切断して効率良く化学原料に戻す「ケミカルリサイクル<sup>注3</sup>」手法の開発が重要です。しかし、従来法では環境負荷の高い、高温かつ過剰の無機塩基や酸などが必要とされるために、シンプルで安価、環境負荷の低い手法開発が切望されていました。

本研究グループは、多量の無機塩基などを必要とせず、ポリエステルとアルコールを混合するだけで原料に変換する触媒開発に注目して研究に取り組みました。その結果、従来法より温和な条件下でも触媒が高い性能で機能し、かつ、もとのポリエステルに含まれる成分をほぼ100パーセント、高純度のテレフタルジエステルなどに変換する高性能鉄触媒の開発に成功しました。入手容易で安価な鉄触媒を用いるケミカルリサイクルにより、単純な精製操作のみで高純度の化学原料が得られることを明らかにしました。

本研究成果は、実際のリサイクル工場で使用されるペットボトル廃棄物や衣料廃棄物でも高い触媒性能を発揮します。今回開発した鉄触媒で、今までより温和な条件下で、実社会のサンプルでもほぼ100パーセントに近い回収率を実現する技術を開発した意義は大きく、資源循環型社会の実現に向けた重要・有用な基盤技術となることが大いに期待されます。この触媒技術により、今後は高付加価値品の製造へも展開可能です。

本研究成果は、2025年11月12日（現地時間）に米国化学会の学術誌「ACS Sustainable Resource Management」のオンライン版で公開されました。

本成果は、以下の支援によって得られました。

戦略的創造研究推進事業 チーム型研究 (CREST)

研究領域：「分解・劣化・安定化の精密材料科学」

研究総括：高原 淳

(九州大学 ネガティブエミッションテクノロジー研究センター 特任教授)

研究課題：「機能集積型バイオベースポリマーの創製・分解・ケミカルリサイクル」

(課題番号：JPMJCR21L5)

研究代表者：野村 琴広 (東京都立大学 大学院理学研究科 教授)

研究期間：2021年10月～2027年3月

上記研究課題では、豊富な非可食植物資源からのバイオベースポリエステル・アミドの精密合成と高機能材料の開発、ポリマー分解によるモノマーや機能化学品の合成を可能とする高性能触媒の開発を目的としています。

## <研究の背景と経緯>

使用済みのプラスチックを原料に戻すケミカルリサイクルは、プラスチックごみ問題を解決する重要な課題と認識されていますが、国内でのリサイクル率はわずか 3 パーセント程度にとどまり、欧州などではこの割合はさらに低いのが実情です。現状、ペットボトルのケミカルリサイクルには高温で過剰の酸・塩基や添加剤が必要で、反応後の目的物と副生物やアルカリ金属などとの分離・精製が難しいなど、リサイクル原料による品質低下が懸案であり、リサイクル後の物質を原料に用いると新規材料に比べて経済的にも不利（原料費が高くなる）になるのが問題です。また、使用可能なアルコールが反応性の高いメタノールに限定されてしまうという例も多く見られます。

また、近年は衣料廃棄物のリサイクル問題も重要視されています。市場に出回る衣料よりもその前に廃棄となる量の割合が高く、ポリエステルや木綿、ナイロン、ポリウレタンなどの混合繊維も多いため、ポリエステルのみを化学分解・分別する手法開発が求められています。

本研究グループでは、酸や塩基を使わず、ポリエステルとアルコールを混合・加熱するだけで化学原料に変換する触媒開発に取り組んできました。今回の研究では、入手容易で安価な鉄触媒で、プラスチックごみ問題を解決する高性能触媒の開発を目指しました。

## <研究の内容>

本研究グループは、ポリエステルとアルコールを混合するだけで、ほぼ 100 パーセント、テレフタル酸ジエステル、エチレングリコールなどの化学原料に変換する鉄触媒の開発に成功しました。テレフタル酸ジエステルは他の生成物から容易に分離することができ、ポリエステルの原料などに広く再利用されます。開発した技術は、温和な条件下でも、高い触媒効率、かつ単純な後処理で高純度の原料をほぼ 100 パーセント回収する触媒技術です。また、各種アルコールが使用可能で、さらにアミンと組み合わせることで触媒効率が向上することも見いだしました。

ポリエステルや、ポリエステルと木綿との混合繊維でできた衣料廃棄物とアルコールを混合・加熱することで、ポリエステルのみを定量的に分解するだけでなく、木綿も定量的に回収する技術開発にも成功し、混合繊維からの選択分別・分解を可能にしました。

実験室のサイズから工場での利用が見据えられるサイズへとスケールアップしたところ、実際の PET 廃棄物や衣料廃棄物とアルコールとの反応でも触媒性能の低下が見られずに、定量的な収率（99.7～99.9 パーセント）で原料回収を達成しました（図 1 および図 2）。得られた化学品は高純度であり、触媒残渣（さ）などが混在しないことも確認しました。

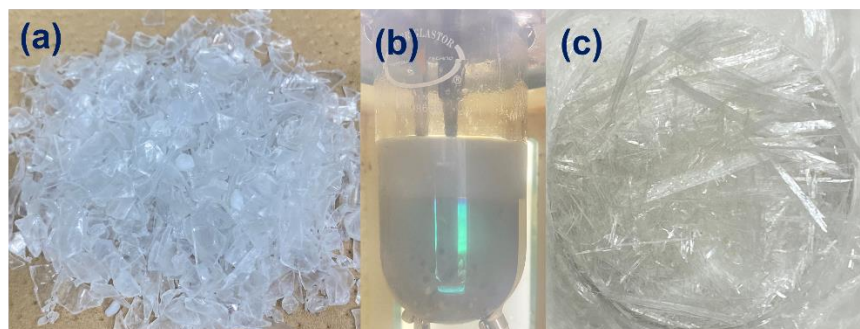


図 1 ペットボトルのケミカルリサイクル

- (a) 回収したペットボトルをチップ状に砕いた物（リサイクル工場での使用品）。
- (b) 反応前の様子（145 度、メタノール、鉄触媒）。

(c) 145 度で加熱・反応後に回収した原料。テレフタル酸ジメチル (DMT) をほぼ 100 パーセント回収。

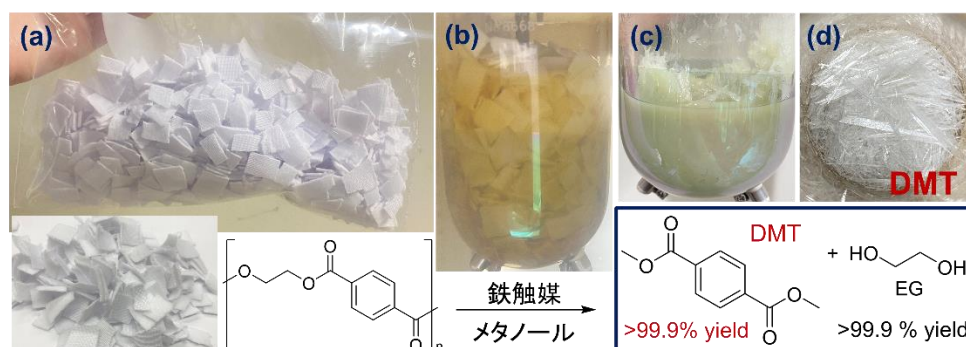


図2 ポリエステル繊維のケミカルリサイクル

- (a) ポリエステル繊維・廃棄物。
- (b) メタノールと鉄触媒を加えた反応前の様子。
- (c) 145 度で加熱し、18 時間経過後に空冷した後の様子。原料・テレフタル酸ジメチル (DMT) の結晶が析出。
- (d) 回収後のサンプル (高純度の DMT をほぼ 100 パーセント回収)。

### <今後の展開>

今回開発した触媒技術では、実際のリサイクル工場で使用されるペットボトル廃棄物や衣料廃棄物でも高い触媒性能を発揮し、ほぼ 100 パーセントの回収率 (収率 99.7~99.9 パーセント) で高純度の化学原料が得られることを確認しました。

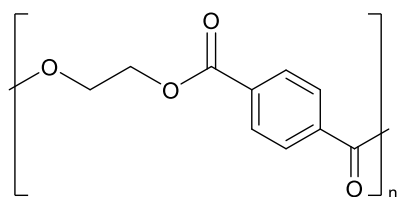
入手容易で安価な鉄触媒で、従来法より温和な条件下、実社会のサンプルでもほぼ 100 パーセントの回収率を実現する技術を開発した意義は大きく、資源循環型社会の実現に向けた重要・有用な基盤技術となることが大いに期待されます。

また、関連触媒 (※関連情報参照) では高付加価値品への展開 (アップサイクル) も実現していることから、本触媒でも有用化学品の合成への展開も十分期待できます。

### <用語解説>

注1) PET (ポリエチレンテレフタレート)

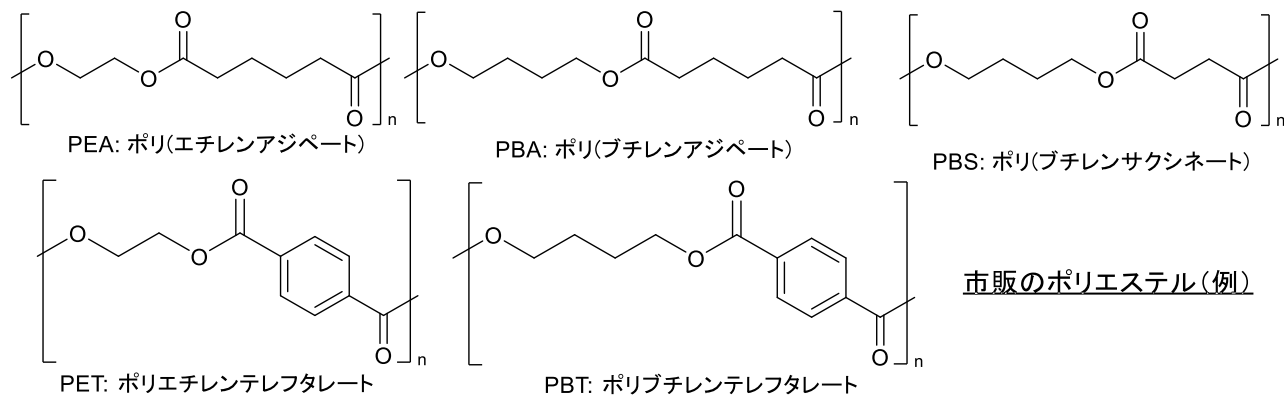
飲料用などのペットボトルやポリエステル繊維などで広く使用されている汎 (はん) 用プラスチックで、テレフタル酸とエチレングリコールとのエステル結合を基本単位とする。以下の化学構造から成る。



PET: ポリエチレンテレフタレート

## 注2) ポリエステル

アルコールの水酸基 (ROH) とカルボン酸のカルボキシ基 (R' COOH) とが脱水することで生成する化学結合 (R' COOR) をエステル結合といい、エステル結合を繰り返し単位とする重合体 (ポリマー) をポリエステルという。以下に代表的な化学構造を示す。



## 注3) ケミカルリサイクル

使用済み資源を化学的に処理し、他の化学物質に転換して再利用するリサイクル手法。ここでは、使用済のプラスチックを製造 (合成) 前の原料に変換することを意味する。

### <関連情報>

2022年9月16日 JST プレスリリース

「ポリエステルの分解・ケミカルリサイクルを実現する高性能触媒を開発」

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220916/index.html>

### <論文タイトル>

“Quantitative Chemical Conversion of PET Waste Bottles, Textile Wastes by Exclusive Transesterification with Alcohols by FeCl<sub>3</sub>-Amine Catalyst Systems”

(塩化鉄-アミン触媒による高選択的トランスエステル化によるペットボトルや衣料廃棄物の定量的な化学変換)

DOI : 10.1021/acssusresmgt.5c00447

<お問い合わせ>

<JST 事業に関すること>

安藤 裕輔 (アンドウ ユウスケ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町

Tel : 03-3512-3531 Fax : 03-3222-2066

E-mail : crest@jst. go. jp

<報道に関すること>

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町 5 番地 3

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-mail : jstkocho@jst. go. jp

東京都公立大学法人 東京都立大学 管理部 企画広報課 広報係

〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1

Tel : 042-677-1806

E-mail : info@jmj. tmu. ac. jp

**<科学を支え、未来へつなぐ>**

例えば、世界的な気候変動、エネルギーや資源、感染症や食料の問題。私たちの行く手にはあまたの困難が立ちはだかり、乗り越えるための解が求められています。JST は、これらの困難に「科学技術」で挑みます。新たな価値を生み出すための基礎研究やスタートアップの支援、研究戦略の立案、研究の基盤となる人材の育成や情報の発信、国際卓越研究大学を支援する大学ファンドの運用など。JST は荒波を渡る船の羅針盤となって進むべき道を示し、多角的に科学技術を支えながら、安全で豊かな暮らしを未来へとつなぎます。

JST は、科学技術・イノベーション政策推進の中核的な役割を担う国立研究開発法人です。