

Symposium | Co-Innovation Program (CIP) : Cutting-edge research in polymer science for a sustainable society

📅 Thu. Mar 27, 2025 9:00 AM - 11:40 AM JST | Thu. Mar 27, 2025 12:00 AM - 2:40 AM UTC 🏠

[E]F402(F402, Bldg. 4, Area 2 [4F])

[[E]F402-2am] Cutting-edge research in polymer science for a sustainable society

Chair, Symposium organizer: Yoshihiro Ikari, Kenji Hara, Ryotaro Tsuji, Ken-Ichi Kasuya

石油化学は高分子科学工業を生み出し、社会にわたって我々の生活を豊かにしてきか一方、近年では温室効果ガス排出やプラスチックごみの環境拡散といった新たな問題を生み出しています。高分子科学におけるサーキュラーエコノミーは、これら諸問題に対する革新的解決策創出の重要な切り札と考えられます。CO₂やバイオマスをから合成される新材料や、樹脂を再利用するための技術、生分解される材料等、様々な研究成果が生まれつつあり、高分子科学は大転換期を迎えようとしています。本セッションでは、持続可能社会を創出する高分子科学の研究前線を紹介すると共に、これからの高分子科学の在り方について議論します。

本セッションは午前、午後に実施されます。

聴講後の[アンケート](#)へのご協力をお願いいたします。

9:00 AM - 9:05 AM JST | 12:00 AM - 12:05 AM UTC

Opening Remarks

🇯🇵 Japanese 🇯🇵 Invited Lecture

9:05 AM - 9:35 AM JST | 12:05 AM - 12:35 AM UTC

[[E]F402-2am-01]

Function Control of Degradable Polymers for the development of Sustainable Materials

○Kazuki Fukushima¹ (1. Kyoto Institute of Technology)

🇯🇵 Japanese 🇯🇵 Invited Lecture

9:35 AM - 10:05 AM JST | 12:35 AM - 1:05 AM UTC

[[E]F402-2am-02]

Development of solid catalysts for low-temperature chemical recycling of polyolefins

○Masazumi Tamura¹ (1. Osaka Metropolitan University)

10:05 AM - 10:25 AM JST | 1:05 AM - 1:25 AM UTC

[2E_F40201-03-4add]

Incubation Time

🇯🇵 Japanese 🇯🇵 Keynote Lecture

10:25 AM - 11:25 AM JST | 1:25 AM - 2:25 AM UTC

[[E]F402-2am-03]

Circular Economy of Polymers

○KOHZO ITO^{1,2} (1. The University of Tokyo, 2. National Institute for Materials Science)

11:25 AM - 11:40 AM JST | 2:25 AM - 2:40 AM UTC

[2E_F40201-03-6add]

Incubation Time

サステイナブル材料への展開に向けた分解性ポリマーの機能制御

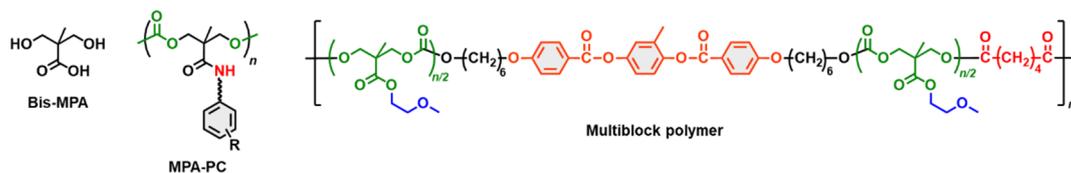
(京工繊大院工芸¹⁾ ○福島 和樹¹

Function Control of Degradable Polymers for the Development of Sustainable Materials
(¹Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology) ○Kazuki Fukushima¹

Degradable polymers are expected to be a solution to the plastic waste problem. However, considering them as alternatives to existing plastics, their physical properties and extensive functionalities are required to be equivalent. To date, many degradable polymers with functional groups attached to their side chains have been developed through sophisticated monomer design and precise polymerization techniques. Recently, aliphatic polycarbonate-based polymers, including rigid aromatic motifs in the main and side chains, have been developed, demonstrating high physical properties and controlled degradability.

Keywords : Sustainable Polymers; Degradation; Functionalization; Organocatalysts; Self-Assembly

分解性ポリマーはプラスチック廃棄物問題に対する解決策の1つとして期待されている。しかし、既存のプラスチックの代替を想定した場合、同等の物性や広範な機能が求められる。これまでに、巧みなモノマー設計と精密重合技術によって、側鎖に機能部位が付与された分解性ポリマーが数多く開発されている。著者らは15年以上にわたり2,2-ビス(ヒドロキシメチル)プロピオン酸 (bisMPA) を原料とした機能性脂肪族ポリカーボネート (MPA-PC) の開発に取り組んできた¹⁾。脂肪族縮合系ポリマーの多くは柔軟な物性を示すため芳香環などの剛直構造を導入することによる物性強化が有効であるが、分解性としばしば相反するためその両立を可能にする分子機構の開発が重要となる。最近、著者らは主鎖に三環芳香族エステルとMPA-PCのマルチブロックポリマーによるエラストマー化とその有機触媒的メタノリシスによる低エネルギー分解プロセスを開発した²⁾。さらに、側鎖に剛直構造を導入したMPA-PCのガラス転移温度の向上とアルカリ条件における予想外に速い分解を見出した³⁾。



- 1) Poly(trimethylene carbonate)-based polymers engineered for biodegradable functional biomaterials. K. Fukushima, *Biomater. Sci.* **2016**, 4 (1), 9–24.
- 2) Degradable and nanosegregated elastomers with multiblock sequences of biobased aromatic mesogens and biofunctional aliphatic oligocarbonates. Y. Watanabe, R. Kato, K. Fukushima, T. Kato, *Macromolecules* **2022**, 55 (23), 10285–10293.
- 3) Hydrolyzable and biocompatible aliphatic polycarbonates with ether-functionalized side chains attached via amide linker. K. Fukushima, S. Hakozaiki, R. Lang, Y. Haga, S. Nakai, A. Narumi, M. Tanaka, T. Kato, *Polym. J.* **2024**, 56, 431–442.

ポリオレフィンの低温ケミカルリサイクル用固体触媒の開発

(阪公大工) ○田村 正純

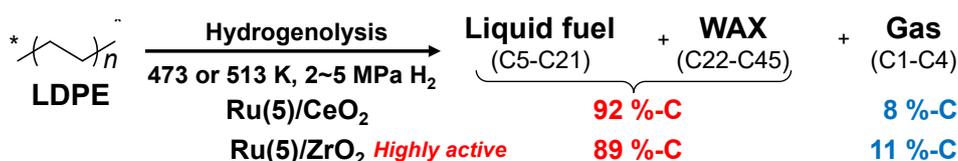
Development of solid catalysts for low-temperature chemical recycling of polyolefins
(Graduate School of Engineering, Osaka Metropolitan University) ○Masazumi Tamura

The development of plastic recycling technologies is urgently required due to issues such as plastic waste and the depletion of fossil resources, and recently, chemical recycling has attracted much attention to the objective. Hydrogenolysis is one of the promising approaches under mild reaction conditions among chemical recycling methods. Our research group has demonstrated that cerium oxide-supported 5 wt% ruthenium (Ru/CeO₂) and zirconium oxide-supported 5 wt% ruthenium (Ru/ZrO₂) acted as effective solid catalysts for the hydrogenolysis of polyolefin-based plastics, providing a high yield of valuable chemicals (liquid chemicals and waxes) in ~90%. Furthermore, we have found that Cu-Ru/CeO₂ was a highly effective solid catalyst for the hydrogenolysis of LDPE by reducing the Ru loading from 5 wt% to 1 wt% and doping copper (Cu) into the Ru particles. This catalyst system suppressed the gas yield to ~4% and achieved a high yield of valuable chemicals (~96%).

Keywords : Polyolefins; Hydrogenolysis; Ruthenium; Solid catalysts; Liquid chemicals

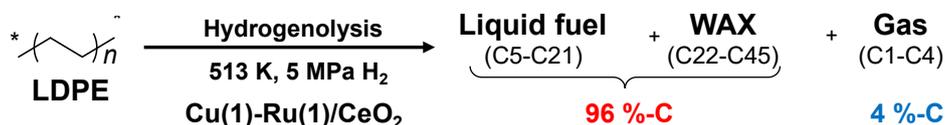
近年、プラスチックごみ問題や化石資源の枯渇などから、プラスチックのリサイクル技術の開発が求められている。日本ではサーマルリサイクルやマテリアルリサイクルがプラスチックリサイクル技術の大部分を占めているが、資源効率や炭素循環の観点から、ケミカルリサイクルは有効な手段の一つと考えられている。現在、プラスチックの中で、ポリエチレン(PE)やポリプロピレン(PP)といったポリオレフィンがプラスチックの大部分を占めるため、そのリサイクル技術の開発はプラスチックのリサイクルへの効果は大きいと期待される。

ポリオレフィンのケミカルリサイクルとして、熱分解が一般的な変換手法として知られているが、通常 673 K 以上の高温を必要とし、また、ガス収率が多く、芳香族化合物など様々な化合物も生成するため混合物となる。そこで、低温条件下で高選択性を実現できる触媒の開発が望まれ、その方法の一つとして水素を用いた C-C 結合切断手法である水素化分解が注目を集めている。我々の研究グループでは、ポリオレフィン系プラスチックの水素化分解に、酸化セリウムにルテニウムを 5 wt%担持した Ru/CeO₂ や酸化ジルコニウムにルテニウムを 5 wt%担持した Ru/ZrO₂ が 200°C といった低温条件下で有効な固体触媒として機能することを見出し、低密度ポリエチレン(LDPE)から有用化学品(液体化学品(C5-C21)+ワックス(≥C22))を 90%程度の収率で得られること明らかにした^{1,2)}。



本触媒系では、これまでに報告されている触媒系に比べ、安価なガス生成物収率を10%程度に抑制することが可能であるため、高い有用化学品収率を実現できている。生成物は主にアルカンであり、異性化した分岐アルカンや芳香族化合物の生成が抑制されているのも本触媒系の特徴である。さらに、これらの Ru 触媒は再利用可能であり、耐久性が高いことも確認している。また、LDPE、HDPE や PP などの様々なポリオレフィン系プラスチックの水素化分解にも適用可能であり、さらに、レジ袋や廃ポリエチレンなどの実廃プラスチックの変換にも適用可能であることを見出し、高収率で目的有用化学品(液体化学品(C5-C21)+ワックス(\geq C22))を得られることを明らかにした¹⁾。

しかし、更なる有用化学品収率の向上のためには、安価なガス化合物 (C1-C4)の生成をさらに抑制することができる固体触媒系の開発が望まれる。これまでの我々のグループの検討から、Ru 粒子サイズが小さいほど、ガス生成率が低下することを見出しており²⁾、Ru 粒子のアンサンブルサイズを小さくすることが有効であると考えた。そこで、Ru 粒子表面のアンサンブルサイズを減少させる方法として、Ru 担持量による Ru 粒子サイズコントロールと Ru への第二金属種の導入により、Ru アンサンブルサイズの低下を戦略とし、有効な固体触媒系の開発を行った。酸化セリウムを担体として用い、Ru 担持量を 5 wt%から 1 wt%に減少させ、さらに、Cu を Ru 粒子にドーブした Cu-Ru/CeO₂ 触媒が LDPE の水素化分解において有効であり、ガス生成物をさらに抑制できることを見出した。反応時間を最適化することで、ガス収率を~4%に抑制し、有用化学品(液体化学品(C5-C21)+ワックス(\geq C22))を 96%の高収率で得られることを見出した。



本講演では、これらの Ru 触媒の開発経緯について紹介し、触媒構造が活性や生成物選択性に与える影響について議論する。

1) Y. Nakaji, M. Tamura, S. Miyaoka, S. Kumagai, M. Tanji, Y. Nakagawa, T. Yoshioka, K. Tomishige, *Appl. Catal. B* **2021**, 285, 119805.

2) M. Tamura, S. Miyaoka, Y. Nakaji, M. Tanji, S. Kumagai, Y. Nakagawa, T. Yoshioka, K. Tomishige, *Appl. Catal. B* **2022**, 318, 121870.

高分子のサーキュラーエコノミー

(東大/NIMS) ○伊藤 耕三

Circular Economy of Polymers (*The University of Tokyo/NIMS*)○Kohzo Ito

In recent years, marine pollution caused by microplastics has been attracting global attention, and there is a growing need for an even higher level of commitment to environmental conservation on a global level. Under these circumstances, there is an urgent need to develop technologies aimed at building a circular economy system that improves industrial competitiveness and minimizes environmental impact. In this lecture, the achievements of a national project on circular economy, which are managed by myself, are introduced.

Keywords : Polymer; Sustainability; Circular Economy; Recycle; Biodegradability

高分子材料は、自動車、航空機、電子・電気、建築、情報、食品、ヘルスケア分野など広範な産業分野で主に金属・無機材料の代替材料として開発され多量に利用されてきた。近年、地球環境保全の見地から、CO₂ 排出量の削減や資源循環型社会構築などに対する配慮が材料開発の段階から求められるようになってきた。一方で、マイクロプラスチックによる海洋汚染が世界的注目を集めるようになり、地球レベルでの環境保全への取り組みが一層高いレベルで求められている。このような状況の中で、サプライチェーン全体として産業競争力の向上や環境負荷を最小化するサーキュラーエコノミーシステムの構築を目指した技術開発が喫緊の課題となっている。また、消費者の行動変容を促す環境整備や特に欧州を意識した国際的な法規制への対応も加速する必要がある。

環境負荷の低減のためには、ポリマーの強靱性・耐久性を向上し、リユースして長く使うことが重要である。演者は 2014 年に始まった内閣府 革新的研究開発プログラム (ImPACT) の中で、PM (プログラムマネージャー) として自動車用タフポリマーの開発に産学連携で取り組んできた。その際に利用された技術の 1 つが、ロタキサン構造を用いた環動高分子である。図 1 に模式的に示す環動高分子は、ネックレス状の超分子であるポリロタキサン中の環状分子を架橋することにより合成され、架橋点が自由に動くことから、滑車効果と呼ばれる応力分散機能を有しており、様々な高分子材料の強靱性を向上することが知られている。そこで本講演では、まず環動高分子とその最近の成果について解説し²⁻⁵⁾、その後で自分自身が PM を務める NEDO ムーンショット型研究開発事業「非可食性バイオマスを原料とした海洋分解可能なマルチロック型バイオポリマーの研究開発」の成果について概要を述べる。

現在、マイクロプラスチック問題を契機として「プラスチック汚染」という言葉まで登場し、プラスチック汚染に関する法的拘束力のある国際文書 (条約) の策定が約 160 か国の国連加盟国によって盛んに議論されている。これが締結されると、少なくとも環境への流出が懸念される用途については、環境中で自然に水と CO₂ に分解しないポリマーの使用が将来は義務付けられる可能性が指摘されている。一方で、高分子

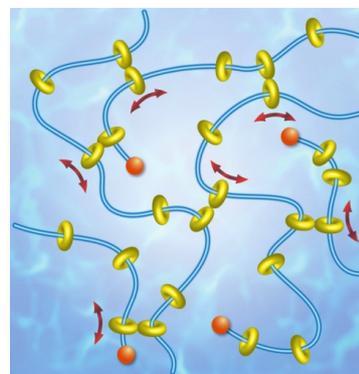


図 1 環動高分子の模式図。

の生分解性と耐久性・強靱性は典型的なトレードオフの関係にある。本プロジェクトでは、このような特性における高分子のトレードオフ関係を打破するために、高分子の分解にマルチロック機構を導入する。すなわち分解の際に、コポリマー、動的架橋、超分子構造、光、熱、酸素、水、酵素、微生物、触媒などの複数の条件を同時に必要とすることで、使用時には分解を抑えて耐久性を保って劣化を防ぎ、環境中に誤って拡散した際には高速なオンデマンド分解が実現可能となる(図2)。本プロジェクトにおいて実用化を目指す製品は、非可食性バイオマスを原料として得られる農業資材(肥料被覆材など)、タイヤ摩耗粉、漁業資材(釣り糸、漁網、フロート、ロープなど)などである。環動高分子はこれらのプロジェクトでもキーマテリアルの1つとして利用されている。



図2 「非可食性バイオマスを原料とした海洋分解可能なマルチロック型バイオポリマーの研究開発」のイメージ図

以上で触れた後で、本講演では、昨年4月から始まった、内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第3期の「サーキュラーエコノミーシステムの構築」の研究成果についても紹介する。2023年7月には、自動車の車両設計から生産、廃車までの過程における循環性の向上に向けた自動車設計・廃車管理における持続可能性要件に関する規則案 (ELV 規則案) が欧州議会及び理事会に対して提案され現在審議が行われている。ELV 規則案の需要を満たすためには、廃車からのリサイクル (Car-to-Car) だけでは足りず、一般の消費財を品質向上して自動車に展開する (X-to-Car) ことが必須となる。しかしながら、自動車のような耐久消費財には高品質のプラスチックが使用されているのに対して、一般消費財の品質は相対的に低い。その中から比較的高品質のプラスチックを大量に抽出し、さらに品質を向上 (アップグレード) して自動車用プラスチックとして利用することが重要である。そこで再生材の要件定義・規格検討 (グレード化) のために必要不可欠となる再生材の物性データを蓄積したデータベース (以下「再生材データバンク」という。) の構築が必要となる。

また、今後増加する再生材需要に対応するためには、再生材の品質に対するメーカーの信頼性向上を図るとともに、メーカーの要求品質を満たす再生材を質と量の両面で安定的に供給することも重要である。これは、再生材のバリューチェーン全体、すなわち消費者、リサイクラー、化学メーカー、製品メーカーなどに広く関わる問題であり、個社での対応困難な課題である。SIPにおいては、この流れを受け、高品質再生プラスチックの開発を計画に組み込んでいる。欧州の規制をピンチではなくチャンスと捉え、イノベーションに結びつけることで、世界一の資源循環大国の実現を目指している。

また、今後増加する再生材需要に対応するためには、再生材の品質に対するメーカーの信頼性向上を図るとともに、メーカーの要求品質を満たす再生材を質と量の両面で安定的に供給することも重要である。これは、再生材のバリューチェーン全体、すなわち消費者、リサイクラー、化学メーカー、製品メーカーなどに広く関わる問題であり、個社での対応困難な課題である。SIPにおいては、この流れを受け、高品質再生プラスチックの開発を計画に組み込んでいる。欧州の規制をピンチではなくチャンスと捉え、イノベーションに結びつけることで、世界一の資源循環大国の実現を目指している。

- 1) Y. Okumura and K. Ito, *Adv. Mater.*, 13, 485 (2001).
- 2) C. Liu, et al., *Science*, 372(6546), 1078(2021).
- 3) K. Hashimoto, et al., *Science Adv.*, 9, 47, eadi8505 (2023).
- 4) S. Ando, et al., *ACS Mater. Lett.*, 5, 3156-3160 (2023).