圧力応答性高分子によるプラスチックの低温成形とリサイクル性向上

1．発表者：

谷口　育雄（京都工芸繊維大学　繊維学系　教授）
古賀　毅（京都大学　大学院工学研究科　教授）
出口　茂（海洋研究開発機構　生命理工学センター長）

2．発表のポイント：

◆圧力応答性高分子（バロプラスチック baroplastics）を既存プラスチックに添加することで、成形時の流動温度を大幅に低下させることに成功した。これにより、従来よりも低温で成形加工が可能となる。

◆成形加工温度の低下によって、加熱による分解や劣化が抑えられる。その結果、再成形を繰り返しても物性が保持され、プラスチックのリサイクル性が大幅に向上する。

◆低温での加工が可能になるため、成形時のエネルギー消費を削減できる。これにより、環境負荷の低減と製造コストの削減を同時に実現する持続可能な技術となる。

3．発表概要：

京都工芸繊維大学 繊維学系 谷口教授らの研究グループは、加熱ではなく加圧によって流動し、低温で成形できるバロプラスチック（注 1）を、汎用の生分解性プラスチックであるポリ L 乳酸に添加することで、その成形温度を最大で約 100 ℃低下させることに成功した。さらに、この特異な低温流動のメカニズムが、加圧によってバロプラスチックのミクロ構造が秩序状態から無秩序状態へと相転移することに起因することを明らかにした（図 1）。本研究は、バロプラスチックの添加による汎用プラスチック（非バロプラスチック）の「圧力可塑化（baroplasticization）」という新概念を提案し、汎用プラスチックに低温成形性を付与できる一般的な設計指針を確立したものである。この成果は、プラスチック成形加工（注 2）の省エネルギー化や二酸化炭素排出量の削減に加え、リサイクル性向上にもつながる革新的技術であり、廃プラスチックによる環境汚染の抑制にも貢献することが期待される。

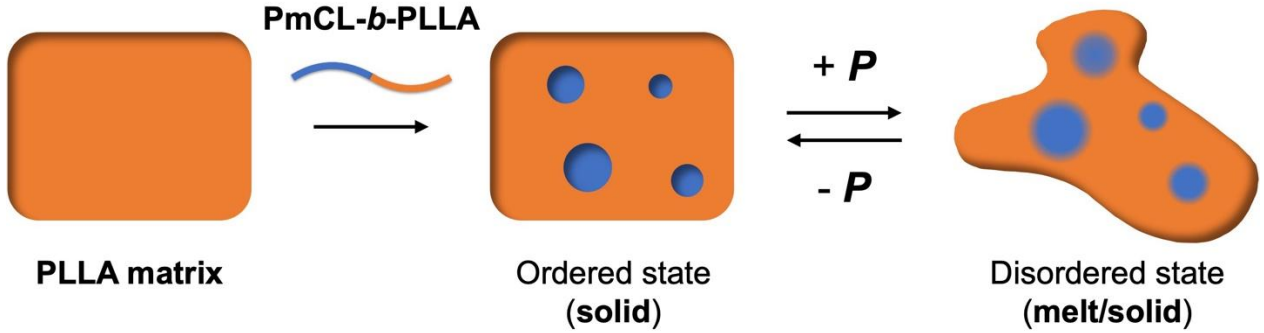

図 1．バロプラスチックをポリ L 乳酸に添加することによる加圧下での低温流動の模式図

４．発表内容：

研究の背景

プラスチック成形加工は、射出成形や押出成形、圧縮成形など、製品の大量生産を可能にする基盤技術であり、私たちの生活に欠かせないプラスチック製品を支えている。しかしその一方で、成形加工には高温・高圧環境が不可欠であり、大きなエネルギー消費と環境負荷を伴うという問題を抱えている。一般的な熱可塑性プラスチックは、加熱によって分子鎖が運動しやすくなり、溶融状態で流動して金型に充填される。この過程では、一般的に 200℃を超える高温が必要となり、加熱および冷却に多大なエネルギーを要する。また、高温下での繰り返し加工は、分子鎖の熱分解や酸化劣化を引き起こし、機械的強度や透明性などの物性を低下させる。特にポリ L 乳酸などの生分解性プラスチックや飲料ボトルなどに利用される PET は熱に脆弱であり、再成形時に分子量が低下してリサイクルが困難となる。このように、現在のプラスチック成形プロセスは、エネルギー多消費型で、材料劣化による循環利用を阻む構造的課題を抱えている。持続可能な社会の実現に向けては、加熱に依存しない新しい低温成形技術の確立が急務である。

研究内容

谷口教授らはこれまで、数百気圧程度の加圧によって秩序（固体）状態から無秩序（流動）状態へと可逆的に相転移する高分子材料「バロプラスチック（baroplastics)」の研究を行ってきた。バロプラスチックは、室温付近でも加圧下で容易に流動する特性をもち、低温での成形加工が可能である。また、加熱による高分子鎖の分解を抑制できるため、高いリサイクル性を有する点が特徴である。本研究では、バロプラスチックの一種であるポリ L 乳酸を含む共重合体を、汎用の非バロプラスチックであるポリ L 乳酸に添加することで、バロプラスチックの圧力応答性を母材であるポリ L 乳酸に付与するという新たな試みを行った。その結果、加圧下での低温流動が確認され、成形温度を従来より大幅に低下させることに成功した。また、低温成形により分子量の低下が抑制され、リサイクル時の劣化が大きく改善された。すなわち、バロプラスチックの添加によって非バロプラスチック材料にも圧力可塑性を付与する「圧力可塑化（baroplasticization)」という新概念を実証した世界初の成果であり、プラスチック成形加工の省エネ化・リサイクル性向上に向けた重要なブレークスルーである。

今後の展開

本研究の成果により、今後は高分子材料の設計、成形プロセス、リサイクル技術の革新へと展開を目指す。まず、ポリ L 乳酸にとどまらず、他の汎用熱可塑性樹脂への応用拡大を検討する。これにより、リサイクル時の加熱工程を大幅に低温化し、エネルギー消費と CO_2排出を削減できるとともに、熱劣化を抑制してプラスチックのリサイクル性を根本的に高めることが可能となる。また、圧力可塑化剤（baroplasticizer）の分子設計を最適化することで、わずかな添加でも顕著な可塑化効果を示す材料開発が進み、産業的な実用化が現実味を帯びる。さらに、低温・低圧での射出成形や圧縮成形などへの実装が進めば、既存設備を活かしつつ省エネ化を実現し、劣化を伴わない多回リサイクルが可能となる。こうした技術展開は、廃プラスチックの再資源化を促進し、廃プラ問題の抜本的解決にも寄与する持続可能なプロセス技術として期待される。最終的には、すべてのプラスチックを「低温・省エネルギーで繰り返し使える」新時代へ導く鍵となる技術を目指す。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST（JPMJCR21L4）の支援を受けて行われた。

５．発表雑誌：

雑誌名：ACS Macro Letters

論文タイトル：Baroplastic Effect of Aliphatic Polyester Block Copolymers for Degradation-Free Multi-Cycle Processing of Poly(L-Lactide)

著者：Neha Sharma, Tsuyoshi Koga, Shigeru Deguchi, Ikuo Taniguchi

DOI 番号：10.1021/acsmacrolett.5c00483

アブストラクト URL：https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsmacrolett.5c00483

６．用語解説：

注 1）バロプラスチック（baroplastics）

主にブロック共重合体（block copolymer）などのように、分子の中に「異なる性質を持つ部分（ハードドメインとソフトドメイン）」をもつ高分子多相系材料である。圧力を加えると、これらのドメイン間の秩序構造が一時的に崩れ（秩序→無秩序）、分子が動きやすくなることで材料が流動化する。圧力を解放すると再び秩序が戻り（無秩序→秩序）、固体状態に戻る――という可逆的な挙動を示す。

注 2）プラスチック成形加工

一般的な熱可塑性プラスチックは、加熱すると分子鎖の運動が活発になって軟化し、金型へ流し込むことで成形される。代表的な方法には、射出成形、押出成形、ブロー成形、圧縮成形などがある。しかし、このプロセスには高温（200℃以上）と高圧（数百気圧）が必要であり、多量のエネルギーを消費するのみならず、高温での成形を繰り返すうちに分子鎖が熱分解や酸化劣化を起こし、機械的強度や透明性などの特性が低下する問題がある。