

フジシール財団 研究助成事業
成果報告書

公益財団法人フジシール財団
理事長 岡 崎 裕 夫 殿

報告日 2026 年 5 月 25 日

研究課題	靱性と分解性を制御し得る高分子改質剤による環境低負荷型パッケージ素材の開発	助成金額
		300 万円
助成名	特別長期研究助成・研究助成・若手研究助成	
ふりがな	あそう たかあき	研究助成申請年度
研究者氏名	麻生 隆彬	2024 年度
所属機関	東京理科大学 先進工学部マテリアル創成工学科	研究期間
		2024 年 11 月 1 日～2026 年 3 月 31 日
役 職	教授	

下記の通り、研究成果を報告いたします。

記

1. 研究成果の概要

はじめに

ポリ乳酸（PLA）は、原料となる植物の成長段階において CO₂ を吸収しているため、焼却処分に伴う CO₂ 量
が変化しないカーボンニュートラルなバイオマス材料である。環境にやさしい PLA であるが、実用化に際して
3 つの問題点がある（図 1a）。1 つ目は硬くて脆い点である。破断時の伸びがほとんどなく衝撃に弱いことから、
実用レベルのパッケージ素材とならない。2 つ目は、PLA は環境中で加水分解しない点である。したがって、
PLA はカーボンニュートラルな材料ではあるが、環境分解性プラスチックには位置付けられていない。3 つめに
結晶化の問題がある。高温での結晶化が必要であり、成形時のエネルギー問題に直結するため、様々な結晶核剤が開発されている。PLA の
靱性を向上させ、環境分解性を付与し、低エネルギーで成形することができれば、環境低負荷
型のパッケージ素材として用いることができる。このような背景のもと本研究では、代表的
な低分子可塑剤（図 1b）の化学構造を模した PLA の物性を向上させる分解性高分子改質剤
としてのポリエステルを 5,6-ベンゾ-2-メチレン-1,4-ジオキセパン（BMDO）とモノマーで
あるアルキル（メタ）アクリレートとの共重合により合成した（図 1c）。モノマーの選択に
よって PLA の機能を向上させる分解性高分子改質剤の開発に成功した。

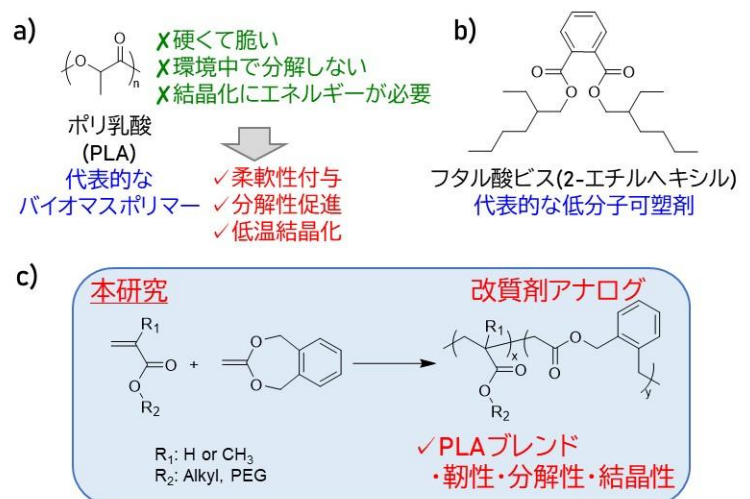


図1 a) ポリ乳酸 (PLA)の改善すべき物性. b) 代表的な低分子可塑剤であるフタル酸ビス(2-エチルヘキシル). c) 本研究で合成する改質剤アナログ. PLAとのブレンドにより、靱性、分解性、結晶性を向上させる。

結果

PLA の靱性を向上させる設計

2-エチルヘキシルアクリレート (2-EHA) と 2-エチルヘキシルメタクリレート (2-EHM) をそれぞれ 5,6-ベンゾ-2-メチレン-1,3-ジオキセパン (BMDO) と共重合し, poly(2-EHR-co-BMDO) ($R=A, M$) を合成した。2-EHR:BMDO の組成比を $x:y$ とし, EHR_xBMDO_y と表記した。所定量の PLA と EHR_xBMDO_y でキャストフィルム (PLA/EHR_xBMDO_y) を作製し、力学物性を評価した。

共重合比に近い $PLA/EHA_{66}BMDO_{34}$ と $PLA/EHM_{60}BMDO_{40}(M)$ の引張試験から、ヤング率・靱性値を評価した。いずれも PLA 単体と比較して、ヤング率の大幅な低下はなく、靱性の向上が見られた (図 2)。通常、PLA と改質剤が相分離している場合、界面に応力が集中し破断に至る。本研究では両者が相溶しており、界面での応力伝達が円滑に行われたと考えられる。また、降伏応力は EHM の方が高い値を示し、破断伸びは EHA の方が高い値を示した (図 2a)。主鎖に α -メチル基を有するメタクリレート誘導体は回転を抑制され、アクリレート誘導体と比較して剛直な高分子が得られる。その結果、主鎖が剛直な EHM は硬さに寄与し、EHA は破断伸びを改善させたと考えられる。いずれの場合も靱性値は PLA 単独と比較して 3 倍以上向上した (図 2b)。

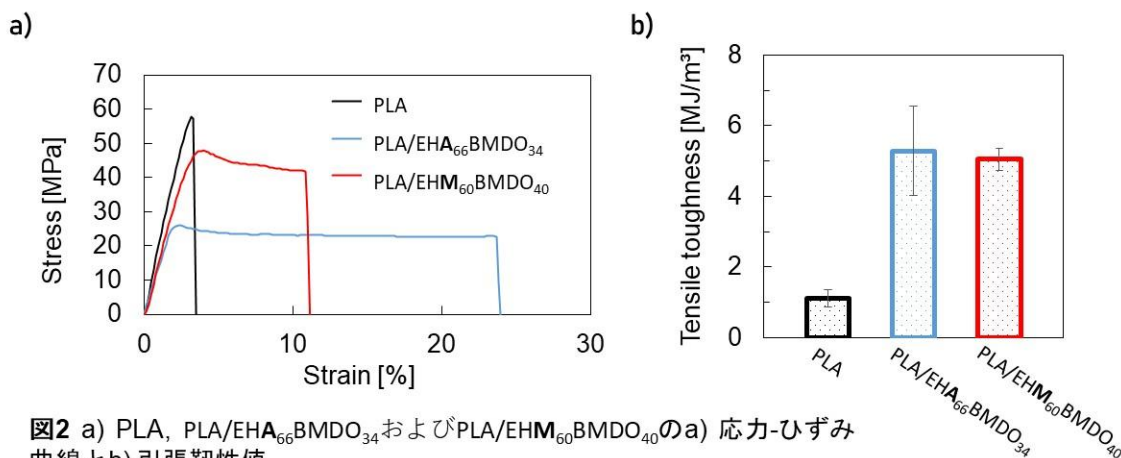


図2 a) PLA, PLA/EHA₆₆BMDO₃₄およびPLA/EHM₆₀BMDO₄₀のa) 応力-ひずみ曲線とb) 引張靱性値。

PLA の分解を向上させる設計

ポリ(エチレングリコール)メチルエーテルメタクリレート (PEGMA) (M_n 500) と BMDO を共重合して poly(PEGMA-co-BMDO) を合成した (PEG_xBMDO_y)。PLA に対して 10 wt% の poly(PEGMA-co-BMDO) を添加し、キャストフィルムを作製した。1 mL の重水に DSS- d_6 標準液 (500 mg/L) を 10 μ L 添加し、フィルムを 40 °C で 14 日間浸漬させて加水分解性を評価した。

分解試験後の外液に 1H NMR 測定を実施して溶出物を同定したところ、PLA/PEG_xBMDO_y の溶出物には PLA の分解物である乳酸と乳酸二量体が含まれていることが認められた (図 3)。標準物質のシグナルとの積分値をもとに PLA の分解率を算出した結果、PEG 含有量に応じて増加する傾向が確認された。親水性側鎖を有する改質剤により、水分が材料中を拡散しやすくなった結果、PLA の加水分解が促進されたと考えられる。

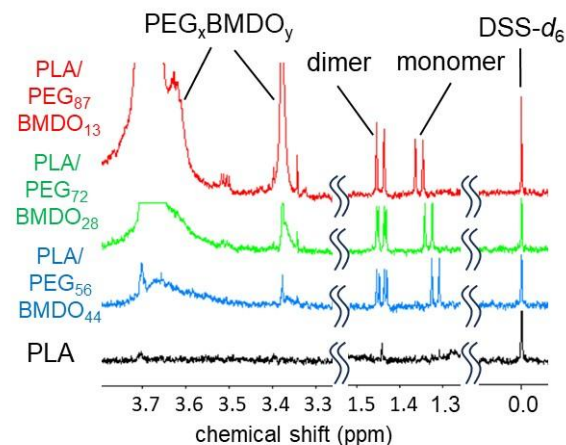


図3 PLAおよびPLA/PEG_xBMDO_yの分解試験に伴う外液の 1H NMR。

PLA を低温アニーリングで高強度化する設計

ステアリルメタクリレート (SMA)と BMDO を共重合して、poly(SMA-co-BMDO)を合成した (SMA_xBMDO_y)。PLA に対して 5 wt%の poly(SMA-co-BMDO)を添加し、キャストフィルムを作製した。30℃ の温度条件下で作製した PLA/SMA₉₂BMDO₈ フィルムと PLA フィルムの引張試験を比較した。

PLA フィルムは 30℃ のアニーリング温度では結晶化がほとんど進行しておらず、アモルファス相が支配的な構造を有していた。このため、分子鎖の配向や塑性変形が生じやすく、大きな破断伸びを示した。一方、PLA/SMA₉₂BMDO₈ フィルムでは結晶化が進行しており、結晶相が物理的拘束点として機能することで分子鎖運動が制限され、最大応力やヤング率が増加した。30℃ という低温条件下においても、PLA と部分相溶した SMA₉₂BMDO₈ が結晶化することに誘起されて、PLA の結晶化が促進されたメカニズムが考えられる。

2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性

プラスチックはパッケージ材料として欠かせない材料の一つであるが、プラスチックの多くが自然環境中で生分解しないことが、昨今の海洋プラスチックごみの社会問題としてクローズアップされ、その対策が社会的課題であった。ポリ乳酸 (PLA) は植物を原料とする環境にやさしいバイオマスプラスチックであるが、パッケージ素材として実用化の際には上述したような問題を抱えていた。本研究では、これを解決し得る生分解性の高分子改質剤を開発した。靱性や分解性の向上、低温での結晶化に寄与する生分解性の高分子改質剤の開発は、環境低負荷型のパッケージ素材として PLA の用途を広げることに貢献し、二酸化炭素排出抑制やプラスチックごみの削減に基づく環境保全や海洋ごみ問題などの社会問題解決への一助となる。また、成形性や物性の改善は、バイオマスプラスチックがパッケージ産業で利用される機運を高めることにつながる。

3. 学会発表、学会誌等への論文掲載、産業財産権出願などの実績（現時点で未発表・未掲載・未出願のため、上記「1. 研究成果の概要」、「2. 研究成果のパッケージ産業への貢献の可能性」の当財団ホームページ上の公開の延期を希望される場合、その旨 記載してください。）

学会発表

1. 知念 優・小林 吉彰・麻生 隆彬「イオン性芳香族ポリエステルから成るポリイオンコンプレックスの安定性・分解性」第 75 回高分子学会年次大会
2. 陶山 尚哉・鶴川 将多・小林 吉彰・麻生 隆彬「高分子改質剤の添加によるポリ乳酸の結晶化」第 75 回高分子学会年次大会
3. 高橋 虎太郎・小林 吉彰・麻生 隆彬「ポリ乳酸の靱性発現に寄与する生分解性高分子改質剤の分子設計」第 75 回高分子学会年次大会
4. 鶴川 将多・小林 吉彰・麻生 隆彬「親水性と分解性を併せ持つ高分子改質剤によるポリ乳酸の加水分解促進」第 75 回高分子学会年次大会
5. 高橋虎太郎・小林吉彰・麻生隆彬「ラジカル開環共重合により合成した高分子改質剤とポリ乳酸のブレンド」第 47 回日本バイオマテリアル学会大会
6. 鶴川 将多・小林 吉彰・麻生 隆彬「ポリ乳酸に親水性を付与する分解性高分子改質剤の合成」第 47 回日本バイオマテリアル学会大会

特許

1. 特願 2025-157353, 生分解性高分子改質剤及び生分解性高分子組成物, 麻生 隆彬, 学校法人東京理科大学