

技術コラム 技術編

生分解性プラスチック

2024年3月20日

パナソニックグループ 知的財産部門

本資料における情報等の内容の正確性、有用性、および確実性に関して、保証または確約する（明示・黙示を問わず）ものではありません。また、本資料における情報等のご利用等により、万が一直接または間接的に損失および損害が発生したとしても、パナソニックグループ、およびその関係会社は一切の責任を負いません。

調査サマリ

生分解性プラスチックに係る技術の概要や開発動向等を調査しました。

【技術の概要】

- ✓ プラスチックは生分解性の可否及び原材料（バイオ由来/化石由来）によって分類
- ✓ 生分解性プラスチックは、PLA、PHA、デンプンブレンドポリマー、PBS などの種類が存在
- ✓ ナノ複合材料や 3D プリント用フィラメント、包装技術などの用途へ応用が期待

生分解性プラスチックの技術概要 (1, 2, 3, 4)

【生分解性プラスチックの位置づけ】

- プラスチック全体における、生分解性プラスチックの位置づけは、生分解性・非生分解性ならびに原材料により、以下の通り整理しました。
- 生分解性プラスチックは化石由来の製品も含まれていますが、生分解性プラスチックとバイオ由来プラスチックが混同される場合が多いため、まずバイオ由来プラスチックの種類の概要から言及します。

《表 1 プラスチックの全体像から見る生分解性プラスチックの位置づけ》

		原材料による整理		
		バイオ由来	バイオ由来+化石由来	化石由来
生分解性の可否	生分解性	PLA PHA 他	バイオ PBS デンプンブレンドポリマー 酢酸セルロース (ジアセテート)他	PBS PBAT 他
	非生分解性	バイオ PE バイオ PA 系の一部 他	バイオ PET バイオ PA 系の一部 他	PE PET 他

《バイオ由来プラスチック（バイオマスプラスチック）》

- バイオ由来プラスチックは、植物油脂、コーンスターチ、ワラ、ウッドチップ、おがくず、再生食品廃棄物などの再生可能なバイオマス源から生産されるプラスチック材料です。
- バイオ由来プラスチックは、最終的な処理方法に基づいて、異なるカテゴリに分類されます。
 - 分解可能性
 - ✓ プラスチックは技術的に分解可能で、適切な時間と環境条件があれば、プラスチックは小さな断片に分解される
 - ✓ しかし、従来のプラスチック材料は、完全に「自然」に戻ることはなく、環境負荷が存在

- 生分解性
 - ✓ 「生分解性」を持つバイオ由来プラスチックは、細菌、真菌、藻類などの微生物によって、水、二酸化炭素、メタン、バイオマス、無機化合物に分解
 - ✓ 実用的には、数ヶ月以内に完全に分解できるバイオプラスチックは生分解性とみなされ、分解に数年要す生分解速度が遅いバイオプラスチックは、「耐久性」があるとされる
- 堆肥化可能性
 - ✓ 堆肥化可能なバイオ由来プラスチックは、微生物によってわずか 3 ヶ月で栄養豊富なバイオマスに分解され、毒素や残留物を残さない

【生分解性プラスチックの概要と製造過程】

- 生分解性プラスチックは、生物（主に微生物）の作用により分解するプラスチックを指します。
 - 生分解性プラスチックは再生可能な原料、微生物、石油化学物質を使用して製造され、特定の指定された条件下で分解（例：土壌中、廃水処理施設内など）
 - 生分解性プラスチックは自然でも生分解する可能性はありますが、分解速度は一定ではなく基本的には産業用堆肥化施設が必要
 - また、堆肥化可能プラスチックは、破碎後のサイズ、生態毒性の欠如、重金属などの潜在的な汚染物質のしきい値濃度など、一連の規制要件により適合させる必要が存在
- 生分解性プラスチックの製造工程は、種別により異なるものの、一定の共通工程が存在します。
 - 原材料の取扱い
 - ✓ プラスチックの製造に使用される原材料の輸送・保管では、空気圧搬送システム等を利用し、原料を貯蔵所から加工設備へ輸送
 - 混合
 - ✓ 次工程にむけて混合技術によりプラスチックの配合に異なる成分を混ぜ合わせて均一化
 - 押出成形
 - ✓ 均一に混合された原料を押出成形し、ペレット化器等を用いて所望の形状にし、冷却
 - ✓ ペレタイズされた製品は次工程に向けて輸送
 - 梱包・保管
 - ✓ 最終製品は、梱包前に大容量の保管用サイロに保管され、機械梱包され出荷

対象技術の特徴

【生分解のメカニズム】^(5, 6)

- 生分解性プラスチックの分解は微生物（細菌や真菌の酵素）によって行われ、生分解の速度は、湿度、温度、その他の条件によって異なります。プラスチックは理想的には、好気性および嫌気性生物によって、CO₂、メタン、水、および食用バイオマス/堆肥に至るまで分解されます。
- 多くの生分解性プラスチックは、ガス状態まで至らずに堆肥状態での分解に留まりますが、プラスチックが堆肥化可能であるためには、生成物が動植物にとって無害である必要があります。
 - 堆肥は、食品廃棄物と一緒に室温で生成されるか、より一般的には、温度管理が徹底された（典型的には 58°C）工業施設で生成される。
 - 工業用堆肥として知られており、製造に際してプラスチック廃棄物の適切な収集と分別が必要

《環境別の分解方法や堆肥化》

- 土壌中での分解
 - 土壌には多様な微生物が存在し、他の環境よりもプラスチックの生分解がより容易で、土壌培地から分離された多くの微生物がバイオプラスチックを炭素源として利用
 - *Nonomuraea*, *Amycolatopsis*, *Streptomyces*, *Laceyella*, *Actinomadura*, *Thermomactimycetes* などのアクチノバクテリア属が土壌から得られる
 - バクテリア群のうち *Streptomyces* と *Amycolatopsis* は、土壌環境での生分解性プラスチックの分解に重要な役割を果たす最も一般的な種と認知
- 水中での分解
 - 海水および淡水での生分解性プラスチックの分解は、一般的に堆肥化、好気性消化および土壌環境での生分解よりも遅い傾向
 - 上記は、水中環境の特性に由来しており、生分解性プラスチックの特性に加えて、栄養素含有量、温度、pH、微生物多様性、および微生物集団密度などの環境パラメータが、水中環境での生分解性プラスチックの分解に重要な影響を与えるため
- 生分解性プラスチックの堆肥化
 - 生分解性プラスチックの再生や堆肥化は、一般的に固体廃棄物からプラスチックを回収するよりも適した方法として認知
 - 堆肥化は、微生物が有機物を消費し、有機物を CO₂ と腐植に変えることで発生
 - 再生施設では食品で汚染されたプラスチックを処理できないため、堆肥化プロセスは特に食品で汚染された包装材料を処理するのに適合していると認知され、この際に生成される堆肥は土壌改良にも利用可能

【生分解性プラスチックの種類】⁽²⁾

■ ポリ乳酸 (PLA)

- 乳酸に由来する直鎖の熱可塑性脂肪族ポリエステルであり、糖類原料、でんぷん、トウモロコシなどの再生可能で生分解性の植物原料の 100%発酵によって得られる
 - ◇ まず、炭水化物源はデキストロースに化学変換され、デキストロースは乳酸に発酵され、続いて乳酸モノマーが重縮合によって得られる
- PLA の最も一般的な製造方法は、乳酸から形成されるラクチド単量体の開環重合による合成
 - ◇ 石油系ポリマーと比較し、PLA 樹脂の生産は化石エネルギー消費量が 25%から 55%少ないことで注目
- PLA は、生分解特性により、主に組織工学などの生物医学用途に利用、また、従来のプラスチックに比べて機械的・光学的特性が高いため、包装用途においても利用
- また、PLA は低融点であり、低温環境に適すとされる

■ ポリヒドロキシアルカノエート (PHA)

- 天然に存在するポリマー類に属し、PHA は、細胞内に存在する化合物を合成する *Cupriavidus necator* や *Pseudomonas putida* のような微生物によって生産
 - ◇ PHA は加水分解に強く、水に溶けないとされ、また生体適合性のために医療分野でも利用
 - ◇ 耐紫外線性に優れるが、酸・塩基には弱く、クロロホルム及び他の塩素化炭化水素にも溶解
- PHA は製造が容易で、製造、成形、吹込み、処理、紡糸に使用でき、食品包装材料に利用

■ デンプンブレンドポリマー

- 酵素や微生物によって分解されるセルロース系生体材料で構成される生分解性ポリマー材料
- デンプンとポリオレフィンの組み合わせは、デンプンの生分解特性とポリオレフィンの熱的、機械的、およびバリア特性を持つ単一の材料を提供
 - ◇ 一般的に使用されるデンプンは米のでんぷん、サゴ、タピオカで、使用されるポリオレフィンにはポリプロピレンとポリエチレンが含まれる
- デンプン膜の低い透過性により、食品包装用途に適すと認知

■ ポリブチレンサクシネート (PBS)

- 1-4-ブタンジオールとコハク酸から合成される半結晶性生分解性熱可塑性樹脂
- PBS は水と二酸化炭素中で自然に分解することが知られており、非常に汎用性が高く、幅広い用途を持つプラットフォーム化学物質に発展すると期待

- PBS は比較的高い融点と良好な機械的性質を有するが、高い結晶性・結晶化速度により、生分解速度に難点
- PBS は、包装フィルムや箱の製造、化粧品の包装にも利用
 - ◇ PBS の高い結晶性は、今後数年間で包装業界に導入されることが予測

■ ポリ酪酸アジピン酸テレフタレート (PBAT)

- 生分解性のランダム共重合体で、1,4-ブタンジオール、ジメチルテレフタレートおよびアジピン酸の共重合体は、樹脂として、及びデンプンや PLA との化合物として市販化
- PBAT は、低密度ポリエチレンと特性が類似しており、多くの用途で代替品として利用
- PBAT の高い耐久性と柔軟性は、ボトル製造に理想的な他の生分解性ポリマーとの混合に適しており、農業や園芸用の堆肥化可能なポリ袋としても使用

■ ポリビニルアルコール (PVOH)

- 包装フィルムの製造に主に使用される樹脂で、高密度ポリエチレン (HDPE) や低密度ポリエチレン (LDPE) の代替可能性を秘めるとされ、生分解性プラスチックを生成するデンプンと混合して製造
- PVOH は、高引張強度や高温多湿に対する耐性などの特性から、包装用としての用途が急増

■ 酢酸セルロース

- 植物に含まれるセルロースを原料とした生分解性プラスチックで、約 53%～56%のアセチル基を有する酢酸セルロースは、熱可塑性加工に適合
- 酢酸セルロースで得られたプラスチックは、可塑剤を適度な割合で使用することにより、透明度が高く、肌触りの良い質感を持つとされ、櫛、眼鏡フレーム、工具ハンドルなどの日用品の製造に利用

■ ポリカプロラクトン (PCL)

- 生分解性の半結晶性ポリマーであり、高い結晶性と疎水性により PCL はゆっくりと分解し、薬物送達用のマイクロ粒子として利用
- 同製品の包装・医療用途での利用増により、北米地域の同市場拡大が予測

技術トレンド

- バイオプラスチックの分野では、広範にわたる技術開発が行われています。以下、技術開発例です。

【生分解性プラスチックの最近の技術開発動向】

- 生分解性ナノ複合材料
 - ナノ粒子やナノクレイなどのナノスケール材料を生分解性プラスチックに組み込み、機械的・バリア性の改善を課題として取り組んでおり、生分解性材料の性能・汎用性向上が期待⁽⁷⁾
- 生分解性 3D プリント用フィラメント
 - 3D プリント用の生分解性フィラメントの開発は注目されており、プロトタイプ、医療機器、消費者製品など、持続可能な 3D プリントオブジェクト作成に利用⁽⁸⁾
- 生分解性包装技術
 - 食品・飲料業界では、生分解性包装技術が大きく進歩しており、食べられる包装材料、堆肥化可能なフィルム、より長い保存期間のための改良されたバリア特性などの材料が開発⁽⁹⁾
- 酵素リサイクル
 - 酵素を使って生分解性プラスチックを元の構成要素に分解する技術も開発
 - 同技術プロセスにより、生分解性プラスチックのより効果的なリサイクルが可能とされる⁽¹⁰⁾
- 農業用生分解性プラスチック
 - 生分解性プラスチックは、マルチフィルムや作物保護などの用途で農業において使用が増加
 - 農業におけるプラスチック廃棄物の削減に貢献⁽¹¹⁾
- 生分解性エレクトロニクス
 - 医療機器や環境モニタリングなどの多用途で利用可能な回路などの生分解性電子部品を開発⁽¹²⁾
- 生分解性医療用インプラント
 - 体内で安全に吸収される医療インプラントやデバイスのための生分解性材料も開発
 - 外科手術による医療用具の回収・除去の手間削減などが期待⁽¹³⁾
- 生分解性プラスチックリサイクル技術
 - 生分解性プラスチックの効果的な回収・リサイクル技術も開発の対象で、一例として廃棄物を堆肥化し、エネルギーに変換するプロセスが包含⁽¹⁴⁾
- 生分解性海洋プラスチック
 - 海洋環境で安全に分解できる生分解性プラスチックは、海洋におけるプラスチック汚染への対処上、非常に重要と認知⁽¹⁵⁾
- 生分解性プラスチックの規格及び試験方法

- 生分解性プラスチックの有効性及び信頼性を確保するための、標準化された試験方法及び認証基準の開発も重要と認知⁽¹⁶⁾

【近年脚光を浴びている企業・技術例】^(17,18)

- 一例として、Polymateria 社（英）のバイオトランスフォーメーション技術をご紹介します。
 - 同技術は、ポリオレフィンベースの包装材料を水、CO₂、およびバイオマスに完全に生分解させ、生態毒性の問題は一切発生しないと謳う
 - ◇ 既存の製造プロセスを変更せずに導入でき、また既存のリサイクルストリームと互換性があり、非常に拡張性があるとされる
 - ◇ 最近の主要顧客には、トゥイッケナム・ラグビースタジアム、シカゴマラソン、7-ELEVEN 台湾等
 - 同社は、同技術を強化するために 2,000 万ポンド相当の資金調達を実施

パナソニック関連技術

当社関連技術として、Kinari®を紹介します。下記 URL より、紹介ページをご参考ください。

<https://www.panasonic.com/jp/company/ppe/molddie/kinari.html>

【出典】

1. Let's Do It Foundation, "What are biodegradable plastics? The need for a clarified terminology", 記事公開日 2020/9/4, 閲覧日 2023/10/23, <https://letsdoitfoundation.org/2020/09/04/what-are-biodegradable-plastics-the-need-for-a-clarified-terminology/>
2. Insight Partners Report, "Biodegradable Plastics Market", 記事公開日 2020/3/2, 閲覧日 2023/10/16
3. UrthPact, "The Basics of Bioplastics", 記事公開日 2018/3/29, 閲覧日 2023/10/23, <https://www.urthpact.com/bioplastics-basics/>
4. 日本プラスチック協会, "生分解性プラスチック入門", 閲覧日 2023/10/23, <http://www.jbpaweb.net/gp/>
5. Dr. Layla Filiciotto, Prof. Dr. Gadi Rothenberg, "Biodegradable Plastics: Standards, Policies, and Impacts", Chemistry Europe, 2021, Volume14, 56
6. Wazir Aitizaz Ahsan, Adnan Hussain, Chitsan Lin, Minh Ky Nguyen, "Biodegradation of Different Types of Bioplastics through Composting—A Recent Trend in Green Recycling", Catalyst, 2023, 13, 294
7. Ilaria Armentano, Debora Puglia, Francesca Luzi, Carla Renata Arciola, Francesco Morena, Sabata Martino, Luigi Torre, "Nanocomposites Based on Biodegradable Polymers" Materials, 2018, 11, 795
8. Yu Ying Clarrisa Choong, Hong Wei Tan, Deven C. Patel, Wan Ting Natalie Choong, Chun-Hsien Chen, Hong Yee Low, Ming Jen Tan, Chandrakant D. Patel, Chee Kai Chua "The global rise of 3D printing during the COVID-19 pandemic" Nature News, 2020, 5, 637
9. Andreas Panou, Ioannis Konstantinos Karabagias, "Biodegradable Packaging Materials for Foods Preservation: Sources, Advantages, Limitations, and Future Perspectives" International Journal of Food Science & Technology, 2023, 13, 1176
10. Cleantech Group, "Enzymatic Depolymerization and Recycling: Using Enzymes to Convert Linear Waste Streams into Circular Supply Chains" Progress in Polymer Science", 閲覧日 2023/10/23, <https://www.cleantech.com/enzymatic-depolymerization-and-recycling-using-enzymes-to-convert-linear-waste-streams-into-circular-supply-chains/>

11. Farming Connect, "Biodegradable Plastics for Agriculture", 閱覽日 2023/10/23, <https://businesswales.gov.wales/farmingconnect/news-and-events/technical-articles/biodegradable-plastics-agriculture>
12. Jianxiong Zhu, Haiying Wen, Hui Zhang, Peng Huang, Lei Liu, Haibing Hu, "Recent advances in biodegradable electronics- from fundament to the next-generation multi-functional, medical and environmental device", Sustainable Materials and Technologies, 2023, 35, 530
13. Science Direct, "Biodegradable Implant", 閱覽日 2023/10/23, <https://www.sciencedirect.com/topics/nursing-and-health-professions/biodegradable-implant>
14. Karen Howard, "Science & Tech Spotlight: Biorecycling of Plastics" GAO, 2022, 23, 106261
15. Spring Wise, "7 INNOVATIONS PROTECTING THE OCEANS FROM PLASTIC WASTE", 閱覽日 2023/10/23, <https://www.springwise.com/innovation-snapshot/plastic-waste-oceans/>
16. ASTM International, ISO, and other relevant standards organizations
17. Plastribution, "Polymateria Biotransformation – A next-gen biodegradable solution", 閱覽日 2023/10/23, <https://www.plastribution.co.uk/polymateria-next-gen/#:~:text=Polymateria's%20Biotransformation%20technology%20is%20the,biomass%20without%20any%20ecotoxicity%20issues.>
18. Polymateria, "Investors back Polymateria's Biotransformation Technology Which Tackles Plastic Pollution With £20 Million In Series B Funding Led By Singapore-Based Impact Private Equity Fund ABC Impact", 記事公開日 2023/4/28, 閱覽日 2023/10/23, <https://www.polymateria.com/pfp-invests-2-2-2/>