

微生物産生ポリエステルの基礎と応用

～生合成、基礎物性、高次構造、成形加工、生分解性、応用展開まで～

Recent Development of Microbial Polyesters

監修：岩田 忠久

- ▶ バイオマスプラスチックと生分解性プラスチック両方の性質を持ち、石油合成プラスチックの課題を克服できるとして最も注目されるポリマー「微生物産生ポリエステル（ポリヒドロキシアルカノエート、PHA）」について詳しく記述！
- ▶ 実用化が難しいとされてきた微生物産生ポリエステルについて、生合成の観点、商業スケールへの増産、構造・物性などの課題克服から実用化に向けてまで様々な研究を詳述！
- ▶ 非常に多くの異なる専門分野研究者が集いPHAの研究を進めている事実を踏まえ、過去から最新のものまでの研究成果を網羅して記述した、これからの更なる研究、実用化開発に必携の一冊！
- ▶ 日々刻々変化する微生物命名法に対しては、第一線の先生方のご協力のもと新旧対照表を作成！

<発行要項>

- 発行：2023年11月20日
- 監修：岩田 忠久
- 定価：本体（冊子版） 99,000円（税込）
本体+CD（PDF版）132,000円（税込）
- 体裁：A4判・並製・本文412頁
- ISBN：978-4-910581-45-3 C3043

刊行にあたって

現在、石油合成プラスチックの抱える地球規模の課題として、石油資源の枯渇、焼却時に発生する二酸化炭素による地球温暖化、環境中で分解されないことによる環境破壊および生態系への影響などが挙げられます。これらを解決する方法として、再生産可能な植物バイオマスを出発原料として生産される「バイオマスプラスチック」と環境中の微生物の働きによって二酸化炭素と水にまで完全に分解される「生分解性プラスチック」の開発が期待されています。

本書で取り上げている微生物産生ポリエステル（ポリヒドロキシアルカノエート、PHA）は、糖や植物油を原料として微生物体内で生合成されるバイオマスプラスチックであるとともに、自然環境中に存在する分解微生物によって山、川、海などの様々な環境下で分解する生分解性プラスチックでもあります。従って、石油合成プラスチックの様々な課題を克服できる持続可能で環境に優しい素材として最も注目されているポリマーの一つです。

PHAは1925年にフランス・パスツール研究所のMaurice Lemoigne博士により発見されましたが、1960年代まで高分子科学者の間ではほとんど知られていないポリマーでした。1982年に、イギリスのICI社が生分解性を有する熱可塑性ポリマーとして本格的な生産に乗り出しましたが、様々な生産上および物性的な困難から真の実用化には至りませんでした。これらの課題克服が、PHA研究の歴史であり、現在でも課題克服に向けて様々な研究開発が行われています。

生合成の観点からは、硬くてもろい物性を克服するために多くの共重合体の生合成に取り組んできました。それは、様々な合成微生物の獲得や遺伝子組み換え技術を用いた新規共重合体の生産です。共重合体第二成分の種類や含率の制御、分子量の増加、生産効率の向上など様々な取り組みがなされています。アカデミアを中心とした実験室レベルでの生産からパイロットスケール、さらには商業スケールへの増産は、菌体内蓄積率の制御が困難であるなど、一筋縄では行きませんでした。一方、物性的な観点では、ガラス転移点が室温以下であることから、二次結晶化が進行し、物性の経時劣化が生じる点が最大の問題でした。また、物性向上には必要不可欠な延伸操作を行うことが難しいこともあり、実用に耐える強度を備えた材料の開発には至りませんでした。

しかし、産官学共同の下、多くのプロジェクトが結成され、また、高分子学会エコマテリアル研究会を始め多くの勉強会が立ち上がり、研究者の人数も増え、また長く研究が続けられることができるようになりました。このような研究の広がりには欧米の研究者とも連携し、1988年にカナダのトロントで第1回International Symposium on Biological Polyesters (ISBP)が開催されました。2010年には、会議名をInternational Symposium on Biopolymers (ISBP)に変え、2022年には第18回の開催をスイスのシオンで迎えました。次回は、2024年にマレーシアのパナンで開催される予定です。PHA研究のすばらしさは、微生物学、発酵学、高分子化学、高分子材料学、酵素学、環境科学など、専門分野の異なる研究者が共に集い、共同研究を遂行しながら進めている点です。

本書は、このような観点から、PHA研究における様々な分野の現在のみならず過去の研究成果についても、敢えて著者の方々に執筆していただきました。PHA研究は、20年ぐらい前に一度大きなピークを迎えています。その時には、非常に多くの貴重な基礎研究や技術開発の報告がなされていますが、最近それらの成果が忘れられ、同じような研究が再度行われている節があります。これまでの研究成果に今一度目を向け、それらを知った上で最新の研究を進めていくことが必要です。PHAを、ポリエチレンやポリプロピレンなどの汎用樹脂を越える、環境に優しい持続可能な社会の構築に必要な不可欠な素材として成長させるために、本書が少しでも貢献できることを祈っています。

最後に、ご多忙にもかかわらずご協力いただいた執筆者の皆様方に深く御礼申し上げます。特に、日々刻々と変化する微生物の命名法に対して貴重なご意見と新旧対照表の作成にご協力いただきました福居俊昭先生、柘植丈治先生、粕谷健一先生にはこの場を借りて厚く御礼申し上げます。
岩田 忠久

注文書		メルマガ登録	登録済み	登録希望	お申込み・お問合せ
品名	微生物産生ポリエステルの基礎と応用	価格	本体 90,000円（税込99,000円） 本体+CD 120,000円（税込132,000円） ★メルマガ会員 本体 81,000円（税込89,100円） 本体+CD 108,000円（税込118,800円）		
会社名		TEL			
部課名		FAX			
お名前		E-mail			
住所	〒				

*書籍はご注文を受けた翌営業日以降順次発送いたします。請求書は別途送付いたします。*お支払いは請求書指定口座に納品日の翌月末日までに振り込みをお願いします。

百武(石井)真奈美 東京工業大学物質理工学院 特任助教	田代孝二 豊田工業大学 名誉教授/あいちシンクロトロン光センター
柘植丈治 東京工業大学物質理工学院 准教授	藤田雅弘 国立研究開発法人理化学研究所 環境資源科学研究センター・
宮原佑宜 東京工業大学物質理工学院 特任助教	バイオプラスチック研究チーム 専任研究員
岩田忠久 東京大学大学院 農学生命科学研究科 生物材料科学専攻 高分子	吉江尚子 東京大学 生産技術研究所 教授
材料学研究室 教授	三宅 仁 アイコンボロジー株式会社 代表取締役
田口精一 神戸大学 科学技術イノベーション研究科/先端バイオ工学研究	石井大輔 東京農業大学 生命科学部 分子生命化学科 生命高分子化学
センター 特命教授	研究室 准教授
高 相晃 神戸大学 科学技術イノベーション研究科/先端バイオ工学研究	Rina Afiani Rebia 信州大学大学院 総合工学系研究科 生命機能・ファイバー
センター 特命助教	工学専攻 博士課程
松本謙一郎 北海道大学大学院 工学研究院 応用化学部門 教授	粕谷健一 群馬大学大学院 理工学府 分子科学部門 教授/群馬大学
山田美和 岩手大学 農学部 応用生物化学科 教授	食健康科学教育研究センター センター長
福居俊昭 東京工業大学 生命理工学院 教授	石井俊一 海洋研究開発機構 超先鋭研究開発部門 副主任研究員
田中賢二 近畿大学 産業理工学部 教授	鈴木美和 群馬大学 食健康科学教育研究センター 助教
中沖隆彦 龍谷大学 先端理工学部 応用化学課程 教授	橘 熊野 群馬大学大学院 理工学府 分子科学部門 准教授/群馬大学
佐藤俊輔 株式会社カネカ アグリバイオ& サプリメント研究所	食健康科学教育研究センター
GreenPlanet 研究グループリーダー	平石知裕 国立研究開発法人理化学研究所 環境資源科学研究センター
前原 晃 三菱ガス化学株式会社 新潟研究所 主任研究員	バイオプラスチック研究チーム 専任研究員
佐藤 俊 国立研究開発法人産業技術総合研究所 機能化学研究部門	久野玉雄 国立研究開発法人理化学研究所 生命機能科学研究センター
主任研究員	専任研究員
水野康平 北九州工業高等専門学校 生産デザイン工学科 教授	中山敦好 国立研究開発法人産業技術総合研究所 バイオメディカル研究部門
阿部英喜 国立研究開発法人理化学研究所 環境資源科学研究センター	主任研究員
バイオプラスチック研究チーム チームリーダー	菊地貴子 一般社団法人化学物質評価研究機構 高分子技術部 主管研究員
山根秀樹 京都工芸繊維大学 名誉教授	佐藤拓己 東京工科大学 応用生物学部 アンチエイジングフード研究室
田中稔久 信州大学 繊維学部 先進繊維・感性工学科 教授	教授
加部泰三 東京大学大学院 農学生命科学研究科 生物材料科学専攻 高分子	
材料学研究室 助教	
大村 拓 東京大学大学院 農学生命科学研究科 生物材料科学専攻 高分子	
材料学研究室	

構成および内容(1)

第 I 編 生合成

第 1 章 微生物産生ポリエステルの分子量に影響する因子と超高分子量化 百武(石井)真奈美, 柘植丈治

- 1 はじめに
- 2 P(3HB)の生合成
- 3 分子量に影響する因子と超高分子量化
- 4 超高分子量 P(3HB)の生産例
- 5 おわりに

第 2 章 中鎖長 PHA ホモポリマーおよび分岐側鎖 PHA 共重合体の生合成 宮原佑宜, 柘植丈治

- 1 はじめに
- 2 天然微生物が生産する PHA と生合成経路
- 3 高性能 PHA の開発
- 4 分岐側鎖を有する新規 PHA 共重合体の開発
- 5 おわりに

第 3 章 超高分子量 P(3HB)の生合成と熱延伸フィルムの作製および物性・構造解析 岩田忠久

- 1 はじめに
- 2 遺伝子組換え大腸菌による超高分子量 P(3HB)の生合成
- 3 熱延伸フィルムの作製と物性および構造解析
- 4 おわりに

第 4 章 微生物ポリマー-PHA 研究の基礎から応用まで 田口精一, 高 相晃

- 1 PHA 事始め
- 2 PHA の生合成
- 3 PHA の合成生物学
- 4 PHA オリゴマー分泌生産の発見と PLA 生産短縮プロセスの開発
- 5 PHA 生産で考慮すべき新しい視点: ストレスマーカーとしての「膜小胞」
- 6 まとめと将来展望

第 5 章 グリコール酸ポリマーおよびブロック共重合体の生合成と材料特性 松本謙一郎

- 1 はじめに
- 2 グリコール酸ポリマー合成条件の発見
- 3 グリコール酸ポリマーの物性
- 4 グリコール酸ポリマーの非酵素的加水分解性
- 5 ブロック共重合体の有用性と合成への試み
- 6 NMR により何が分かるか
- 7 配列制御型 PHA 合成酵素の発見
- 8 ブロック配列の検証
- 9 ブロック共重合体の構造と物性
- 10 ブロック共重合の機構解析
- 11 おわりに

第 6 章 ブルーカーボンの有効活用を目指して ~海藻を原料としたポリヒドロキシアルカン酸の微生物合成~ 山田美和

- 1 はじめに
- 2 微生物生合成の原料という視点から考える海藻の有効性と海藻を原料とした PHA の合成研究
- 3 海藻成分(マンニトールおよびアルギン酸)を利用可能な PHA 合成菌の発見
- 4 Cobetia 属細菌の特徴と本菌による海藻成分を利用した PHA の生合成
- 5 今後の課題について

第 7 章 二酸化炭素からの PHA 生合成 福居俊昭, 田中賢二

- 1 はじめに
- 2 化学合成独立栄養微生物による PHA 生合成
- 3 光合成独立栄養微生物による PHA 生合成
- 4 おわりに

第 8 章 P3HBV-b-P3HB ニブロックおよび P3HBV-b-P3HB-b-P3HBV 三ブロック共重合体の生合成と結晶化挙動 中沖隆彦

- 1 はじめに
- 2 P3HBV-b-P3HB ニブロック共重合体
- 3 P3HB-b-P3HBV ニブロック共重合体
- 4 P3HBV-b-P3HB-b-P3HBV 三ブロック共重合体
- 5 P72G24 ニブロック共重合体と P72G24Px 三ブロック共重合体の結晶化の比較
- 6 まとめ

第 9 章 Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate)生産微生物の育種と実用化 佐藤俊輔

- 1 はじめに
- 2 PHBH の発見
- 3 PHBH の材料化
- 4 まとめ
- 5 おわりに

第 10 章 P(3HB-co-4HB)の生合成 前原 晃

- 1 はじめに
- 2 P(3HB-co-4HB)の生合成の発見
- 3 PHA の研究動向
- 4 4HB 含有 PHA の研究初期の話
- 5 P(3HB-co-4HB)の生合成の代謝経路
- 6 野生株での P(3HB-co-4HB)の生合成
- 7 遺伝子組換え株での P(3HB-co-4HB)の生合成
- 8 高 4HB 比率 P(3HB-co-4HB)や P(4HB)の生合成
- 9 4HB 含有 PHA の物性
- 10 P(3HB-co-4HB)の酵素分解

- 11 超高分子量 P(3HB-co-4HB)の合成
- 12 MGC が開発を進めている P(3HB-co-4HB)共重合体, Elasdia®

第 11 章 高度好塩性古細菌によるポリエステル生産 佐藤 俊

- 1 はじめに
- 2 高度好塩菌と PHA
- 3 Haloferax mediterranei による PHA 生合成と PHA の特徴
- 4 おわりに

第 12 章 ポリヒドロキシアルカン酸(PHA)合成細菌の探索 水野康平, 柘植丈治

- 1 はじめに
- 2 PHA 合成菌, 分解菌の環境分布
- 3 Haloferax 合成細菌のスクリーニングの方法と実際
- 4 R 体特異的 enoyl-CoA ヒドラーターゼの発見
- 5 PHA ポリマーゼ酵素 PhaC の新規サブクラスの発見
- 6 PHA ポリマーゼ酵素の活性中心配列
- 7 環境分離 PHA 合成菌探索の今後の展開

第 II 編 構造, 物性

第 1 章 ポリヒドロキシアルカン酸のフィルム物性およびポリマーブレンド 阿部英喜

- 1 はじめに
- 2 PHA の結晶化挙動
- 3 PHA の熱物性
- 4 PHA の力学物性
- 5 新規な PHA 素材の可能性
- 6 PHA ベースポリマーブレンドの特性
- 7 まとめと今後の展望

第 2 章 ポリヒドロキシアルカン酸の熱分解 阿部英喜

- 1 はじめに
- 2 P(3HB)の熱分解挙動とその分解メカニズム
- 3 P(3HB)をベースとする共重合体の熱分解挙動
- 4 P(4HB)の熱分解挙動とその分解メカニズム
- 5 その他の分子構造からなる PHA の熱分解挙動
- 6 PHA の熱分解に及ぼす不純物の影響
- 7 まとめと今後の展望

第 3 章 PHB 延伸フィルムの作製と物性評価 山根秀樹

- 1 はじめに
- 2 PHA 一軸延伸フィルム
- 3 PHA 二軸延伸フィルム
- 4 おわりに

構成および内容(2)

第4章 冷延伸フィルムの作製と物性および生分解性評価 岩田忠久

- 1 はじめに
- 2 冷延伸による P(3HB)高強度フィルムの作製と物性および構造
- 3 冷延伸による PHA 高強度フィルムの作製と物性および構造
- 4 フィルムの長期安定性評価
- 5 フィルムの生分解性
- 6 おわりに

第5章 微結晶核延伸法による PHA 高強度繊維の作製とトモグラフィー解析 田中稔久, 岩田忠久

- 1 PHA の物性改善と繊維化
- 2 微結晶核延伸法
- 3 微結晶核延伸法により作製した繊維の高次構造
- 4 X 線トモグラフィー解析と酵素分解による微結晶核延伸法で作製した繊維の内部構造の解析
- 5 微結晶核延伸法により作製した PHA 繊維の応用研究と今後の展望

第6章 冷延伸・二段階延伸法および中間熱処理延伸法を用いた高強度繊維の開発 加部泰三, 岩田忠久

- 1 はじめに
- 2 P(3HB)の基礎物性
- 3 P(3HB)の熔融紡糸過程で生じる熱分解
- 4 PHA における繊維化の歴史
- 5 超高分子量 P(3HB)の生合成と冷延伸二段階延伸による高強度繊維の開発
- 6 超高分子量 P(3HB)/通常分子量 P(3HB)ブレンド繊維
- 7 P(3HB-co-3HH)に対する中間熱処理延伸法の開発
- 8 P(3HB)の β 構造と力学物性の関係および熱物性
- 9 PHA 繊維の酵素分解性と経時安定性
- 10 おわりに

第7章 部分熔融紡糸法による伸縮性繊維の開発と海洋分解 大村 拓, 岩田忠久

- 1 はじめに
- 2 P(3HB-co-16 mol%-4HB)の熱的性質
- 3 フラクシオン分離による P(3HB-co-4HB)の分離
- 4 DSC・広角 X 線リアルタイム同時測定
- 5 熔融紡糸中の熱分解による分子量低下
- 6 P(3HB-co-16 mol%-4HB)伸縮性繊維の機械的物性
- 7 海洋分解性
- 8 おわりに

第8章 PHA の結晶構造 —PHB を中心として— 田代孝二

- 1 はじめに
- 2 PHB の結晶構造
- 3 PHB の高次構造と α - β 結晶相転移機構
- 4 分子鎖形態から眺めた PHB と他の PHA との関わり

第9章 放射光を用いた PHA 結晶の動的構造解析 藤田雅弘

- 1 高分子結晶の階層性
- 2 放射光を用いた X 線散乱・回折法
- 3 温度制御下での動的構造解析
- 4 応力下での動的構造解析

第10章 PHA の化学組成分布と組成分別

吉江尚子

- 1 はじめに
- 2 ¹³C NMR 法による PHA 共重合体の微細構造解析
- 3 良溶媒/貧溶媒混合系による PHA 共重合体の組成分別
- 4 PHA 共重合体の組成分布が物性に与える影響
- 5 おわりに

第11章 海洋生分解性バイオマス複合プラスチック材料「Biofade(ビオフェイド)」の可能性 三宅 仁

- 1 はじめに —海洋プラスチックごみ問題—
- 2 生分解性プラスチックについて
- 3 海洋生分解性バイオマス複合プラスチック「BiofadeTM, ビオフェイド」
- 4 BiofadeTM の応用
- 5 おわりに

第三編 生分解性・生体吸収

第1章 微生物産生ポリエステルナノファイバーの作製と生体吸収性評価 石井大輔

- 1 はじめに
- 2 微生物産生ポリエステルの医用材料としての利用
- 3 微生物産生ポリエステルのナノファイバー化
- 4 おわりに

第2章 PHBH ブレンドナノファイバーの作製と医療材料への応用 田中稔久, Rina Afiani Rebia

- 1 ナノファイバーについて
- 2 PHBH/PVA ブレンドナノファイバーの開発
- 3 天然抗菌剤を添加した PHBH ブレンドナノファイバーの開発
- 4 PHBH ブレンドナノファイバーの研究開発と今後の展望

第3章 ポリ(3-ヒドロキシブタン酸)加水分解酵素 粕谷健一, 石井俊一, 鈴木美和, 橋 熊野

- 1 はじめに
- 2 P(3HB)分解酵素
- 3 P(3HB)分解酵素の構造と各ドメインの機能
- 4 P(3HB)分解酵素の作用機構
- 5 プラスティスフィアと生分解性プラスチックの海洋生分解
- 6 おわりに

第4章 PHA 酵素分解機構の解明 平石知裕

- 1 はじめに
- 2 PHA の構造とその分解酵素
- 3 細胞外 dPHAscl(dPHB)分解酵素による PHB 分解
- 4 PhaZRpiT1 基質吸着部位(SBD)の進化分子工学的解析
- 5 dPHB 分解酵素—PHB 間に生じる相互作用力の測定
- 6 PhaZRpiT1 触媒部位(CD)の進化分子工学的解析
- 7 おわりに

第5章 単結晶を用いた分解酵素の吸着および分解機構の解明 岩田忠久

- 1 はじめに
- 2 単結晶と酵素の構造
- 3 TEM を用いた酵素吸着と酵素分解の可視化
- 4 AFM を用いた酵素分解のリアルタイム観察
- 5 分解活性を失活させた変異型 PHB 分解酵素と単結晶との相互作用
- 6 おわりに

第6章 ポリヒドロキシアルカン酸フィルムの酵素分解 阿部英喜

- 1 はじめに
- 2 PHA フィルムの酵素分解性に及ぼす分子構造効果
- 3 PHA フィルムの酵素分解性に及ぼす固体構造効果
- 4 まとめと今後の展望

第7章 PHA 分解酵素の3次元結晶構造

久野玉雄

- 1 はじめに
- 2 PHA 分解酵素の種類
- 3 PHAscl(PHB)分解酵素の結晶構造
- 4 基質結合領域の構造と基質認識様式
- 5 リンカードメインおよび PHA 結合ドメインの構造について
- 6 おわりに

第8章 PHA の海洋生分解性評価

中山敦好

- 1 はじめに
- 2 PHA の土壌生分解
- 3 PHA の海洋浸漬での生分解
- 4 PHA の海水ラボ生分解
- 5 まとめ

第9章 プラスチックの生分解性評価

菊地貴子

- 1 生分解性評価法の開発の歴史
- 2 プラスチックの生分解性評価
- 3 まとめ

第10章 生分解性プラスチックで酪酸菌優位な腸内環境を 佐藤拓己

- 1 PHB の加水分解
- 2 ケトバイオティクスの提案
- 3 ケトン供与体
- 4 ケトバイオティクスの検証
- 5 マイクロバイオーム
- 6 ロゼブリア優位な腸内環境
- 7 大腸がんの抑制
- 8 潰瘍性大腸炎の抑制
- 9 離乳期下痢症の抑制
- 10 ケトバイオティクスの本質

お問い合わせ シーエムシー・リサーチ URL: <https://cmcre.com>
TEL: 03-3293-7053 FAX: 03-3291-5789 E-mail: order_7053@cmcre.com