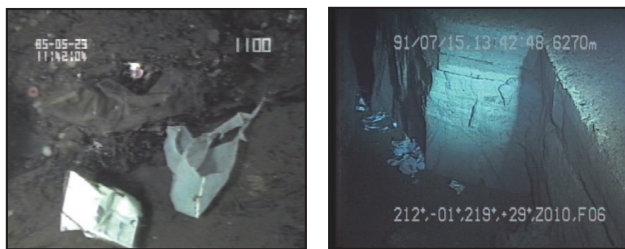




生分解性プラスチックの 素材・技術開発

—— 海洋プラスチック汚染問題を見据えて

監修 望月 政嗣



左：相模湾 1100 m, 右：日本海溝 6270 m

提供：JAMSTEC

図1 深海の海底に堆積するプラスチックごみ (p.47)

PLA



PLA



PLA

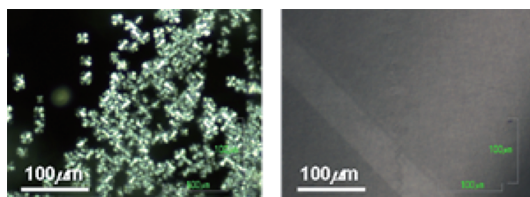


図3 試験用 透明カップ, トレー (p.58)



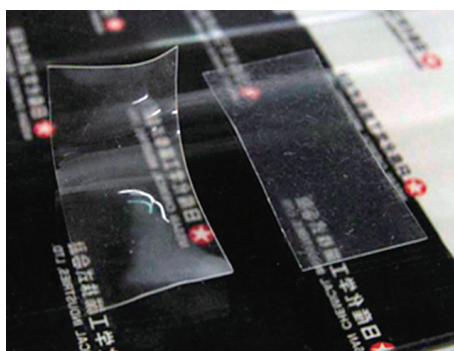
左：無添加，右：エコプロモート®-TF 添加

図 3 結晶化後の PLA フィルムの外観 (p.158)



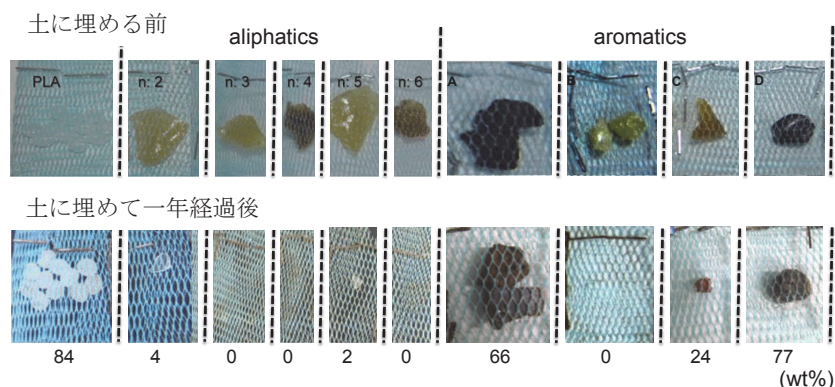
左：無添加，右：エコプロモート®-TF 添加；白い輝点が
ポリ乳酸の結晶

図 5 偏光顕微鏡による PLA 結晶の観察 (p.158)



左：エコプロモート®-TF 添加（結晶性），右：無
添加（非晶性）

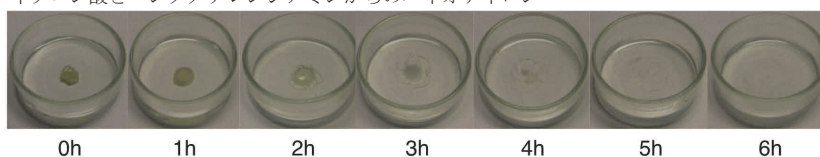
図 8 熱湯に曝した後の PLA フィルム外観
(p.159)



n は脂肪族アミン成分の炭素数を示し、A は 4,4'-diaminodiphenylether, B は *m*-xylenediamine, C は *p*-xylenediamine, D は *p*-phenylenediamine より合成した芳香族ポリアミドである。下に残った樹脂の重さの割合を示す

図3 土に一年間埋入した際の各種バイオナイロン樹脂の形状変化 (p.171)

イタコン酸とペンタメチレンジアミンからのバイオナイロン



イタコン酸とメタキシリレンジアミンからのバイオナイロン

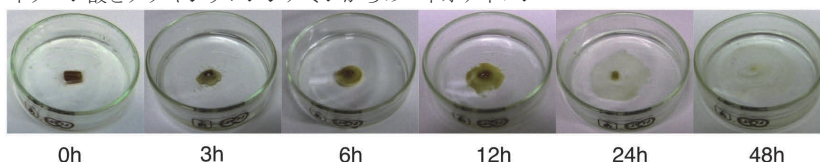
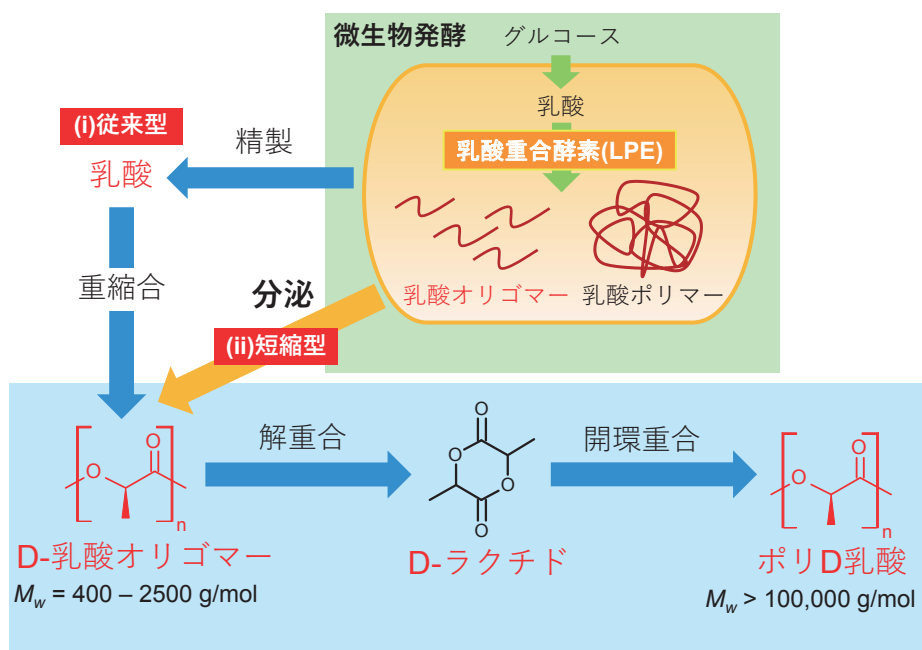


図4 高圧水銀灯 (波長 250~450 nm) 照射によるバイオナイロンの水への可溶化挙動 (p.172)



乳酸ベースオリゴマーが、大腸菌の菌体外へ分泌していることが初めて見出された。さらに、アルコール性水酸基を有する化合物が連鎖移動反応することから、オリゴマーの合成量が向上し、膜透過効率も促進することが明らかとなった。末端がジオール化されたオリゴマーは、ポリウレタンなどのモノマー基材として利用価値が高い

図5 乳酸オリゴマー分泌の発見によるポリ乳酸プロセスの短縮 (p.183)



画像提供：(株)クナプラス

図5 PLA 繊維製エコバッグ “クナプラス (kna plus)” (p.227)

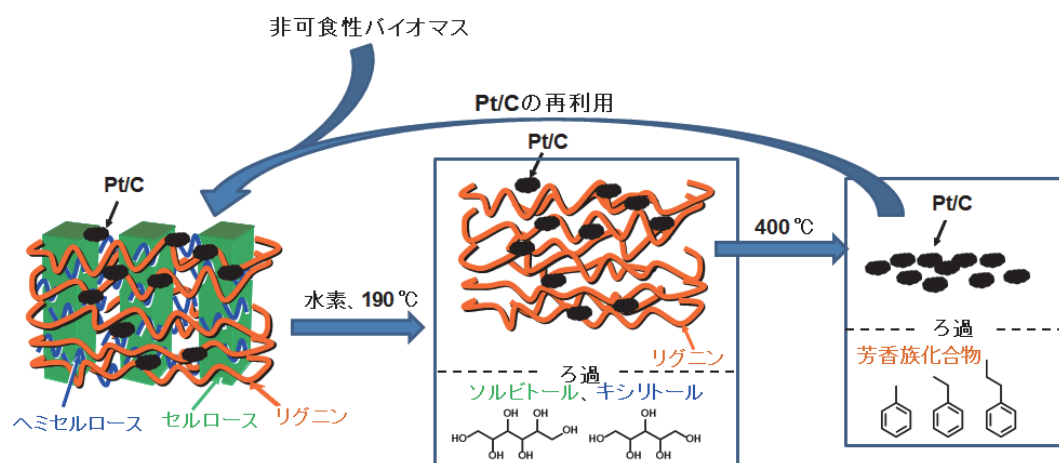


図1 バイオマス全成分の有用化学物質への変換 (p.308)

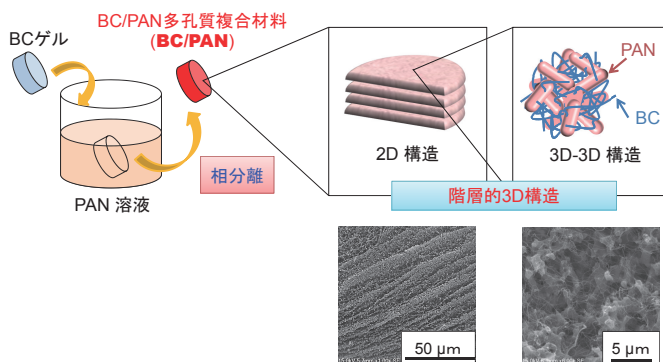


図5 BC/PAN 多孔質複合材料の階層的 3D 構造 (p.317)

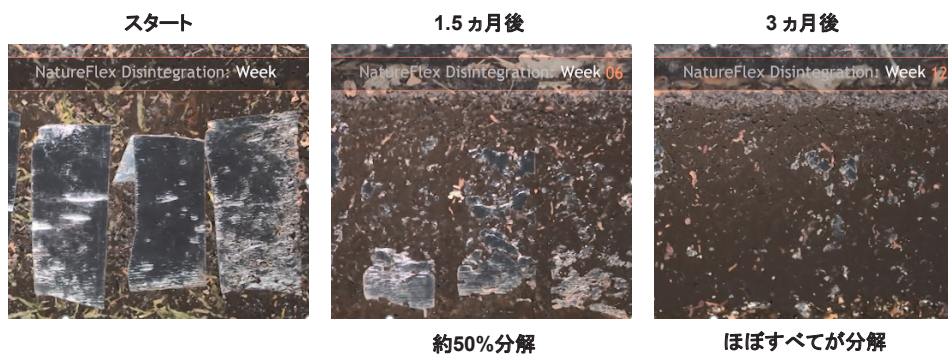


図10 家庭用コンポスト条件における NatureFlex の分解の様子 (p.327)

▶ 監修者・執筆者一覧 ◀

(掲載順・敬称略)

【監修】

望月 政嗣 元京都工芸繊維大学繊維科学センター 特任教授

【執筆者】

望月 政嗣 元京都工芸繊維大学繊維科学センター 特任教授

田中 周平 京都大学大学院地球環境学堂 准教授

兼廣 春之 東京海洋大学名誉教授

寺田 道弘 BASF ジャパン株式会社パフォーマンスマテリアルズ事業部スペシャリティ
プラスチック マネージャー/生分解性ポリマー開発営業

国岡 正雄 国立研究開発法人産業技術総合研究所イノベーション推進本部 審議役

植松 正吾 植松技術事務所 代表

糸賀 公人 八幡物産株式会社

金高 武志 トタルコーピオン PLA b. v. 日本連絡事務所 代表

鈴木 義紀 株式会社クレハ中央研究所高分子研究室 室長

小林 史典 株式会社クレハ中央研究所高分子研究室 主任研究員

岡本 昌司 ユニチカ株式会社技術開発本部技術開発企画室サステナブル推進グループ
グループ長/テラマック推進グループ グループ長

土井 幹雄 太陽化学株式会社インターフェイスソリューション事業部研究開発グループ
乳化剤チーム チームリーダー

長濱 宅磨 日産化学株式会社材料科学研究所次世代材料研究部 主事

金子 達雄 北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 教授/領域長

Mohammad Asif Ali 北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科/
グリーンサイエンスマテリアル株式会社 R&D 事業部 研究員

岡島麻衣子 北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科/
グリーンサイエンスマテリアル株式会社 R&D 事業部 執行役員

田口 精一 東京農業大学生命科学部 教授/北海道大学名誉教授

山田 美和 岩手大学農学部 准教授

粕谷 健一 群馬大学大学院理工学府分子科学部門 教授

鈴木 美和	群馬大学理工学部 技術職員
橘 熊野	群馬大学大学院理工学府分子科学部門 准教授
柘植 丈治	東京工業大学物質理工学院 准教授
百武(石井)真奈美	東京工業大学物質理工学院 特別研究員
田中 孝明	新潟大学工学部 教授
後藤 武士	リスパック株式会社技術開発本部素材開発部素材第1チーム 係長
畠山 治昌	株式会社平和化学工業所 常務取締役
正木 辰典	ユニチカ株式会社中央研究所研究開発グループ
中井 誠	ユニチカ株式会社中央研究所研究開発グループ グループ長
山崎 聡	三井化学株式会社フード&パッケージング事業本部コーティング・機能材事業部ウレタン開発グループ グループリーダー/九州大学客員教授
都甲 梓	東京大学大学院農学生命科学研究科
岩田 忠久	東京大学大学院農学生命科学研究科 教授
山本 敦	国立研究開発法人産業技術総合研究所触媒化学融合研究センター 特別研究員
根本 耕司	国立研究開発法人産業技術総合研究所触媒化学融合研究センター 主任研究員
山口 有朋	国立研究開発法人産業技術総合研究所化学プロセス研究部門 研究グループ長
宇山 浩	大阪大学大学院工学研究科 教授
花市 岳	フタムラ化学株式会社中部統括開発グループ グループリーダー
内村 元一	日本製紙株式会社新素材営業本部パッケージング・コミュニケーションセンター 技術調査役
城崎 智洋	熊本県産業技術センター材料・地域資源室 研究主任
永岡 昭二	熊本県産業技術センター材料・地域資源室 研究主幹/室長

序 論 海洋プラスチック汚染問題と その解決策としての生分解性プラスチック (望月 政嗣)

1. はじめに	3
2. 地球環境問題におけるグリーン・ウォッシングとミスリーディング	4
3. 海洋に流入するプラスチック濃度の経年変化模式図	5
4. 自然の叡智に学ぶ	6
5. 生分解性プラスチックの理想の化学構造とは	8
6. 生分解性プラスチックの分解挙動	11
7. 「世界ラーメンサミット」大阪宣言	15
8. おわりに	15

第1編 マイクロプラスチック汚染の現状と 国内外の規制動向 (田中 周平)

1. 私たちの生活とマイクロプラスチック	19
2. マイクロプラスチックに関する研究	19
3. マイクロプラスチックに関する国内外の規制動向	21

第2編 生分解性プラスチックの分類、基本特性と生分解機構

第1章 生分解性プラスチックの生分解機構と分解挙動

第1節 生分解機構：酵素分解型と非酵素分解型 (望月 政嗣)

1. はじめに	31
2. 生分解機構：酵素分解型と非酵素分解型	31
3. 酵素分解型	32
4. 非酵素分解型（加水分解型）	33

第2節 土中などの自然環境下または再資源化（堆肥化またはバイオガス化） 過程での分解挙動 (望月 政嗣)

1. はじめに	39
2. 土中分解挙動	39
3. 海水中分解挙動	40
4. 再資源化（堆肥化またはバイオガス化）過程での分解挙動	42

目 次

第3節 生分解性プラスチックの海水中での分解挙動 (兼廣 春之)

1. プラスチックによる海洋汚染	47
2. 環境にやさしい生分解性プラスチックの開発	47
3. 生分解性プラスチックの種類	48
4. 海水中における生分解性プラスチックの分解	48
5. 海水中の微生物の変動とプラスチック分解微生物	49
6. 深海漁場に浸漬したプラスチックの分解	50
7. 深海からのプラスチック分解微生物の単離	51
8. 深海（日本海溝および千島海溝）からのプラスチック分解微生物のスクリーニング	52
9. 深海から単離した PCL 分解微生物の性状	53
10. 生分解性プラスチックの利用と今後の展望	54

第4節 生分解プラスチック製使い捨て食器具などの堆肥化施設での分解試験 (寺田 道弘)

1. はじめに	57
2. 試験の概要	57
3. 試験用サンプル	57
4. サンプルの投入方法	59
5. 試験結果	60
6. まとめ	63
7. 今後の展開	64

第5節 生分解度とバイオベース度の国際標準規格 (国岡 正雄)

1. 生分解度の国際標準化	65
2. バイオベース度の国際標準化	79

第6節 海水中における生分解度測定方法 (植松 正吾, 糸賀 公人)

1. 生分解度測定法	87
2. ASTM D6691	88
3. ISO 19679	88
4. ラウンドロビン試験	89
5. まとめ	97

第2章 生分解性プラスチックの分類と基本特性

第1節 第二世代ポリ乳酸：高L組成ポリ乳酸（High % L PLA） (望月 政嗣)

1. はじめに	99
2. ポリ乳酸の基本特性と技術的課題	99
3. ポリ乳酸の D-乳酸共重合比が結晶化挙動に及ぼす影響	101

4. 第二世代ポリ乳酸の登場	107
第2節 ポリ乳酸 (PLA) Luminy®	(金高 武志)
1. はじめに	109
2. ポリ乳酸概略	109
3. 現在のポリ乳酸市場	110
4. 光学純度と物性	111
5. 圧電高分子	112
6. ステレオコンプレックスポリ乳酸	113
7. 抗菌性	113
8. 耐衝撃性	113
9. 加工適正	114
10. 結晶化	114
11. バイオマスプラスチックとしてのポリ乳酸	114
12. バイオマスプラスチックを使用する意義	115
13. Luminy® の原材料	116
14. 生分解性プラスチックとしてのポリ乳酸	117
15. 生分解性樹脂を使用する意義	118
16. 他のプラスチックからの乗り換え	119
17. まとめ	120
第3節 BASF の生分解性プラスチック「エコフレックス」	(寺田 道弘)
1. エコフレックス開発の経緯と歴史	121
2. エコフレックスの化学構造式	121
3. エコフレックスの物性	122
4. エコフレックスの特徴	122
5. エコフレックスの生分解性認証	123
6. エコフレックスの分解特性	123
7. エコフレックスの主要用途	124
8. 今後の用途展開	126
9. 海水中での分解特性	126
第4節 ポリグリコール酸「クレダックス (Kuredux®)」	(鈴木 義紀, 小林 史典)
1. はじめに	129
2. Kuredux® の原料と製法	129
3. Kuredux® の特性	130
4. Kuredux® の用途例	133
5. Kuredux® の環境適性	135

第3章 生分解性プラスチックの高性能化・高機能化・複合化技術

第1節 ポリ乳酸の高性能・高機能化技術の進展“テラマック (TERRAMAC)®”： 耐熱性，耐衝撃性，耐久性，寸法安定性，成形加工性の向上

(望月 政嗣，岡本 昌司)

1. ポリ乳酸の基本特性	137
2. 耐熱性	138
3. 耐衝撃性	140
4. 耐久性 (耐湿熱性)	142
5. 寸法安定性	143

第2節 ポリ乳酸用マルチ機能改質剤“チラバゾール®”

(望月 政嗣，土井 幹雄)

1. ポリ乳酸の基本特性と技術的課題	145
2. チラバゾール® の化学構造と基本特性	146
3. マルチ機能改質剤としてのチラバゾール®	151

第3節 ポリ乳酸用透明核剤“エコプロモート®-TF”

(長濱 宅磨)

1. はじめに	155
2. 結晶核剤とは	155
3. 透明結晶化を達成するために	156
4. エコプロモート®-TF の性質	156
5. エコプロモート®-TF 使用時の PLA の結晶化プロセス	157
6. エコプロモート®-TF を添加したポリ乳酸の物性	157
7. 総 括	160

第4節 ポリ乳酸と PBAT のコンパウンド樹脂「エコバイオ」

(寺田 道弘)

1. エコフレックスとエコバイオ	161
2. エコバイオの特徴と優位性	161
3. エコバイオの基本グレード	162
4. エコバイオ特殊グレード	163
5. ヨーロッパの法規制とエコバイオのバイオマス度	164
6. 今後の展開	165

第5節 高耐熱性分解性プラスチック材料の開発

(金子 達雄，Mohammad Asif Ali，岡島 麻衣子)

1. はじめに—ホワイト・バイオテクノロジーによるバイオプラスチック—	167
2. イタコン酸を用いた分子設計	169
3. イタコン酸重合体の性能と分解性	170
4. 桂皮酸を用いたバイオポリイミド	172

5. おわりに	175
 第6節 「オリゴマー」が鍵：バイオプラスチックの生合成と生分解	
(田口 精一, 山田 美和)	
1. はじめに	177
2. PHA の生合成システム	178
3. 多元ポリ乳酸の創製	180
4. オリゴマーが鍵：乳酸重合の超えるべきライン	181
5. 多元ポリ乳酸の物性	182
6. 「オリゴマー」が鍵：PHA や多元ポリ乳酸の生分解性	184
7. 今後の展望	186
 第7節 海洋時限生分解性プラスチックの開発	
(粕谷 健一, 鈴木 美和, 橘 熊野)	
1. 海洋時限生分解性プラスチックとは	189
2. 海洋時限生分解性プラスチックの開発戦略	190
3. 海洋時限生分解性プラスチックの創製	195
 第8節 高性能なバイオポリエステルを合成する微生物の開発	
(柘植 丈治, 百武 (石井) 真奈美)	
1. はじめに	201
2. モノマー組成制御による PHA の高性能化	202
3. 分子量制御による高性能化	205
4. バチルス属細菌由来の重合酵素を利用した PHA の合成	207
5. おわりに	209
 第9節 生分解性プラスチックの多孔質化による機能性材料の開発	
(田中 孝明)	
1. はじめに	211
2. 多孔質化の目的と手法	211
3. 発泡法	212
4. ポロジェン溶出法	213
5. 熱誘起相分離法	213
6. 非溶媒誘起相分離法	214
7. 生分解性プラスチックの多孔質化の例	215
8. おわりに	217
 第4章 プラスチック廃棄物処理問題を踏まえた 生分解性プラスチックの用途分野別材料・ 製品設計と市場開発動向	
(望月 政嗣)	
1. プラスチック廃棄物処理問題	219

目 次

2. 生分解性プラスチックの製品設計と使用後の廃棄・再資源化方法	221
3. 生分解性プラスチック製品の開発動向	223

第5章 生分解性プラスチックの成形加工技術

第1節 押出成形 (望月 政嗣, 岡本 昌司)

1. はじめに	233
2. 繊維・不織布	233
3. フィルム・シート, その他	242

第2節 射出成形 (望月 政嗣)

1. はじめに	245
2. ポリ乳酸射出成形用樹脂に求められる基本特性	245
3. ポリ乳酸用射出成形機の最適設計	247
4. ポリ乳酸射出成形製品の事業化成功事例	248

第3節 発泡成形 (望月 政嗣)

1. 発泡成形法の分類と溶融押出發泡の原理	253
2. ポリ乳酸発泡成形用樹脂に求められる基本特性	254
3. ポリ乳酸発泡成形品の開発事例	256

第4節 真空・圧空成形 (後藤 武士)

1. 真空・圧空成形とは	259
2. 成形機の仕組み	259
3. シートの加熱温度	260
4. 真空成形と圧空成形	261
5. 金型の形状	262
6. プラグの役割	262
7. リスパックの取り組み	263

第5節 ブロー成形 (畠山 治昌)

1. はじめに	265
2. ブロー成形品に求められる要求性能	265
3. 結果および考察	267
4. おわりに	269

第3編 新規バイオプラスチックの創製とセルロース系材料 その他の最新動向

第1章 新規バイオプラスチックの事業化最前線

第1節 次世代スーパーエンブラとしての超高耐熱性バイオポリアミド“ゼコット (XecoT®)” (正木 辰典, 中井 誠)

1. XecoT®の開発経緯	273
2. XecoT®の特長	273
3. XecoT®の特性	275
4. 応用展開	276
5. 今後の展望	278

第2節 バイオポリウレタン (山崎 聡)

1. はじめに	279
2. バイオポリオールを用いた軟質ポリウレタンフォームの開発	279
3. バイオイソシアネートを用いたポリウレタンコーティング・成形材料の開発	285
4. 今後の技術課題	289
5. おわりに	290

第2章 新規バイオプラスチックに関する研究開発動向

第1節 高分子多糖類エステル誘導体の接着剤への応用 (都甲 梓, 岩田 忠久)

1. バイオマス資源としての多糖類とその誘導体	291
2. デキストランとは	291
3. デキストランエステル誘導体の合成と基礎物性	292
4. デキストランエステル接着剤	294
5. おわりに	297

第2節 非可食バイオマス原料を用いたレブリン酸エステルの製造研究と実用化への橋渡し (山本 敦, 根本 耕司)

1. はじめに	299
2. バイオマスリファイナリーとレブリン酸	299
3. 効率的なセルロースの変換を可能にする触媒反応の開発	300
4. まとめ	304

第3節 バイオマスを構成する全成分の有用化学物質への変換技術 (山口 有朋)

1. はじめに	307
2. セルロース・ヘミセルロースの変換技術	308

目次

3. リグニンの変換技術	310
4. おわりに	311

第3章 セルロース系材料やその他複合材料の最新開発動向

第1節 セルロース多孔質体・ゲルを基盤とする機能材料 (宇山 浩)

1. はじめに	313
2. セルロースモノリス	313
3. バクテリアセルロースを基盤とする機能材料	315
4. BC/モノリス複合材料	317
5. おわりに	318

第2節 セルロース由来次世代生分解性フィルムの開発と包装材への応用 (花市 岳)

1. はじめに	321
2. セルロースフィルム「セロハン」の歴史	322
3. セルロースフィルムの製造方法	322
4. セルロースフィルムの特徴	324
5. 新たなセルロースフィルムの設計	325
6. おわりに	329

第3節 紙製バリア素材の特徴とその包装材料への応用—環境に優しい紙製バリア素材『シールドプラス』の開発 (内村 元一)

1. はじめに	331
2. 「紙」素材の役割	331
3. バリア性を有する食品包装材料	332
4. 紙製バリア素材の開発	333

第4節 高吸水性セルロースマイクロビーズの開発 (城崎 智洋, 永岡 昭二)

1. はじめに	339
2. 吸水性セルロースマイクロビーズの調製	340
3. 吸水性セルロースマイクロビーズの特性	342
4. まとめ	343

※本書に記載されている会社名、製品名、サービス名は各社の登録商標または商標です。なお、本書に記載されている製品名、サービス名等には、必ずしも商標表示 (®、TM) を付記していません。

序 論

海洋プラスチック汚染問題と
その解決策としての生分解性プラスチック

元京都工芸繊維大学 望月 政嗣

1. はじめに

無数に浮遊するプラスチックごみから成る太平洋ゴミベルトの存在を世界に知らしめたアルガリタ海洋研究財団のチャールズ・ムーア (C. Moore) 船長が、取り返しのつかない海中のプラスチックごみ問題を投げかけている。地球上のごみの終着駅は海洋であり、海底には数多くの PET ボトルが堆積し、PE レジ袋がクラゲのように漂っている。タイではクジラが弱って漂流しているのが発見され、獣医師が懸命の介抱を施したが虚しく、ポリ袋 5 枚を吐き出し息途絶えた。解剖の結果、胃から 80 枚以上のポリ袋が発見された。プラ製品を食べて死んだ海鳥やカメが浜に打ち上げられる光景は、今や見慣れたものとなりつつある。

国際連合のコフィー・アナン第 7 代事務総長が発表した声明によると、プラスチックをはじめとする海に投棄されたごみが、毎年 100 万羽以上の海鳥と 10 万頭にのぼる哺乳動物やウミガメの命を奪っているという。死んだアシカ、イルカ、ウミガメなどの胃の中から、ビニール袋、プラスチック製のボトルキャップ、発泡スチロール製コーヒーカップがよく見つかる。

世界自然保護基金 (WWF) は、地中海が“プラスチックの海”になる可能性があると警告する報告書を公表した。ベトナムのマングローブはポリ袋をまとい、タイの海ではプラスチック製の袋をのみ込んだクジラが死に、インドネシアの「楽園」の島々の海中はごみで溢れている。また、ドイツなどの研究チームが北極の海水の中にマイクロプラスチックが大量に蓄積していることを突き止めた。

これらプラスチックごみの多くは河川を経由して海洋中に流入すると考えられるが、独ヘルムホルツ環境研究センターはこれらプラごみの 88%~95% の汚染源を約 20 億人が住む新興・開発途上国を流れる大河 (長江、インダス川、黄河、海河、ナイル川、ガンジス川ほか) が汚染源であると推定し、早急な廃棄物処理・管理システムの構築を提言している。

毎年、世界の海洋には 1,000 万~2,000 万トンのプラスチックごみが流れ込んでいる。これらの内、大きさが 5 mm 以下の小さなものをマイクロプラスチックといい、発生源により以下の 2 種類に分けられる。

まず、一次マイクロプラスチックとして洗い流し製品である化粧品、洗剤、シャンプー、整髪料、歯磨き粉、洗顔料などの製品中には、研磨剤 (スクラブ剤) としてポリエチレンなどの極小プラスチック粒子、マイクロビーズが含まれている。もう一つは海洋環境に流出したプラスチックが紫外線や熱、波浪などにより 5 mm 以下に微粉碎化された二次マイクロプラスチックである。

海洋に流出したマイクロプラスチックには海水中から殺虫剤 (DDE) や難燃剤 (PBDE) などの有害化学物質 (POPs) を高濃度に吸着する (数万倍~百万倍に濃縮) する性質がある。実際、樹脂ペレット 1 g 当たり PCB で最大 890 ng、DDE で 1,600 ng 吸着していた。

これらは分解されずにどんどん微細化していくため、67% は粒径が 0.05 ミリ以下と極めて小さく、生物の体内に取り込まれやすいものである。すでに東京湾や沖縄県・座間味島の海岸の二枚貝の中に大量に蓄積していることが確認され、さらには海洋の食物連鎖の要となるプランクトンからも検出されている。その結果として、食物連鎖の頂点に位置する私達人間の体内からも既に

検出されている。ウィーン医科大学のチームが日本を含む8か国(8人)の33~66歳の便を調べた結果、全員から便10g当たり平均20個のマイクロプラスチックが見つかった。

2. 地球環境問題におけるグリーン・ウォッシングとミスリーディング

環境先進地の欧米諸国では、素材や製品の環境負荷低減の表示に関して、明確な根拠を示さずに誇大宣伝(虚偽やミスリード)をする、いわゆるグリーン・ウォッシング(Greenwashing)が問題となっている。その素材や製品が環境に優しいことを主張するためには、ライフサイクルアセスメント(LCA)の手法を用い、原料の採取から樹脂ペレットの製造、さらには成形加工から製品製造を経て使用後の廃棄処理過程に至るトータル(揺りかごから墓場まで)の二酸化炭素発生量などから客観的・定量的に表示しなければならない。

生分解性プラスチックの世界における各界からのミスリーディング(Miss-leading)も枚挙に暇がない。海洋プラスチック汚染問題が深刻化する中で、国連環境計画(UNEP)は、いち早く「生分解性プラスチックは海を漂うプラスチックごみの減量や海の環境への悪影響低減の効果は小さい」とする報告書を公表した(2015年)。「プラスチックの生分解には工業的な堆肥化装置や長時間の50℃以上保温などの条件が必要で、海の環境では達成されにくい」という。このような軽薄にして短小な論理に留まらず、学術的・技術的な誤謬を平然と世界に向かって発信する国連環境計画とは一体何者なのであろうか?

一方、世界に冠たる飲食大手は先を争うようにしてプラスチック製ストローから紙製ストローへの変換を喧伝し、巷では「脱プラスチック論」や「プラスチック悪者論」のすり替え論理が流布されている(後述するごとく、紙製ストローもマイクロチップのかたまりである)。その一方で、生分解性プラスチック世界の一部では、いまだ生分解性プラスチックは生分解速度が速いものほど望ましいと漠然と考える大いなる誤解が存在し、巷では海水中における生分解性プラスチックの分解速度競争が繰り広げられている。

さて、「生分解性」という概念はしばしば誤解され、廃棄物問題の解決ではなくむしろ原因にもなっている。実際にアンケートを取ってみると、消費者の21%が屋外にポイ捨てをしても自然と消えてなくなるだろうと考えている。そうした中で欧米諸国はグリーンガイド指針において、米国連邦取引委員会(FTC)は1年以内に分解消滅するもの(実質的には存在しない)以外に“degradable”なる表示を行ってはならないと規定している。また、欧州バイオプラスチック協会も“biodegradable”なる表示ではなく、生ごみなどの有機性廃棄物と共に再資源化(堆肥化)が可能な“compostable”なる表示をするように特定の認証制度(ラベル)の下に運用している。ベルギーでは包装材料に対して“biodegradable”の表示を禁止しているほどである。

そうした中で、昨今の深刻化する海洋プラスチック汚染問題に便乗・迎合した某欧州企業が、通常は存在しないような30℃の海水中で半年以内に90%以上分解するものに対して海水中で分解することの証明として“OK biodegradable marine”なる認証を発行するという、“biodegradable”なる表示を禁止する世界の趨勢に逆行し、正に海洋へのポイ捨てを助長するような愚行を繰り広げている。

そして、その試験に合格した某企業が海水中での分解速度が速いことを根拠に、漁具・釣具や浮き、藻場再生などの海洋資材への用途拡大に注力すると大々的にプレスリリースを発している。はたして、この認識は正しいのだろうか？

具体例として、瀬戸内海の海上漂流物として最も多い養殖いかだのフロート（発泡スチロール製）を生分解性プラスチックに転換する構想に関して考察してみよう。一つは海水中での分解速度の速い素材（半年以内に強度半減）、もう一つは分解速度の遅い素材（3年後に強度半減）で、これらを3年間実用に供したとしよう。前者は半年で強度が半減して使用不可となるために、半年毎に6回新たに取り換え設置する必要がある。その結果として、分解速度の速い生分解性プラスチックに係る必要経費（経済的負担）は後者の6倍、そして発生するプラスチックごみの量も後者の6倍である。このようなものが採用される可能性は未来永劫的に絶対的にあり得ない。すなわち、実際の使用環境下あるいは自然環境下で生分解速度が速いことは長所ではなく、致命的欠点なのである。

3. 海洋に流入するプラスチック濃度の経年変化模式図

筆者は1980年代の後半より今日までの30年間有余、生分解性プラスチックの理想の化学構造を求めて、その基礎・応用研究から技術・事業開発までを産学両分野に渡り先進的に取り組んできた。ここでは人類が自然界の神様から絶滅危惧種に指定されないためにも、海洋プラスチック汚染問題の正しい理解を出発点に、生分解性プラスチックの存在意義と役割を以下に論証する。

毎年、海洋中には1,000万～2,000万トンのプラスチックごみが流れ込むが、図1に海洋中に流入するプラスチック濃度の経年変化模式図を示す。非生分解性プラスチックはほぼ永遠に分解消滅しないがために未来永劫的に増え続ける。しかも、自然生態系に甚大な悪影響を及ぼす細分、微粉化が進行する（いつまで経っても完全に二酸化炭素と水にならない）形で海洋中の濃度がどんどん上昇し、将来的には自然生態系の破壊に繋がる極めて深刻な事態を招来することが危惧される。

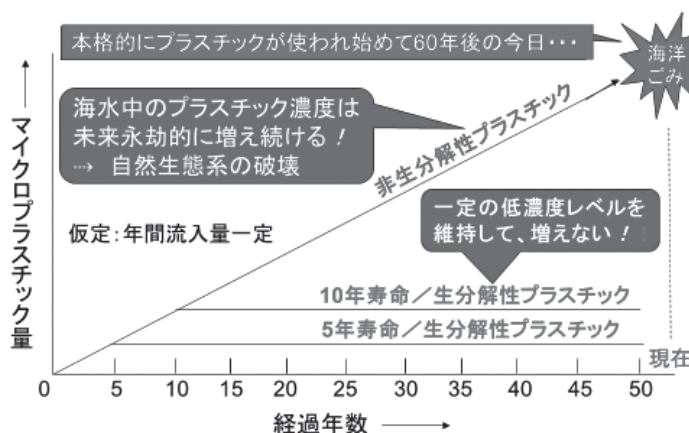


図1 海洋中に流入するプラスチック濃度の経年変化模式図
(非生分解性プラスチックと生分解性プラスチックの比較)

一方、生分解性プラスチックは海洋中で完全に分解消滅するのに仮に5～10年を要するとしよう。その場合の海洋中のプラスチック濃度の経年変化は図1に模式的に示す通り、流入した生分解性プラスチックは5～10年後には完全に分解消滅するがゆえにそれ以上には増えず、一定の低濃度レベルを維持する。ここに、生分解性プラスチックが海洋プラスチック汚染問題を解決する上で決定的に重要な役割を果たすことを、抽象的な観念論ではなく具体的な現実世界として視認することが可能となる。

4. 自然の叡智に学ぶ

4.1 地球上に生命が誕生して38億年、地球はなぜ廃棄物で埋もれなかったのか？

地球上に生命が誕生したのは、今からおよそ38億年前の原始海洋であったと推測されている。そして、地球上の生命体は進化の過程で普遍的な物質循環システムとしての炭素循環システムを構築することにより、今日まで健全な自然生態系を維持してきた。地球上の生命体が生み出す全ての高分子化合物は生分解性であり、そこには自然界の真のリサイクルシステムとしての物質循環（炭素循環）が成立し、これまで地球は決して廃棄物で埋もれることはなかった。しかるに、石油を原料とする非生分解性プラスチックが出現してわずか60年後の今日、私達は今や深刻な海洋プラスチック汚染問題に直面している。

有機化合物を構成する基本元素である炭素原子を含む大気中の二酸化炭素から、直接的に有機化合物を合成し得るのは独立栄養生物（生産者）としての植物である。私達動物は従属栄養生物（消費者）として植物を食することにより、あるいは動物を食することにより、これらを体内で分解・再合成して生命活動を維持している。そして、これら生命活動を終えた植物や動物を分解して菌体内に取り込み、資化・代謝することにより再び無機化（二酸化炭素）して大気中に還元しているのが分解者としての微生物（細菌、カビ）である。私達は分解者としての微生物の存在なくして生きて行くことはできない。図2に自然界の真のリサイクルシステムとしての物質循環（炭素循環）模式図を示す。

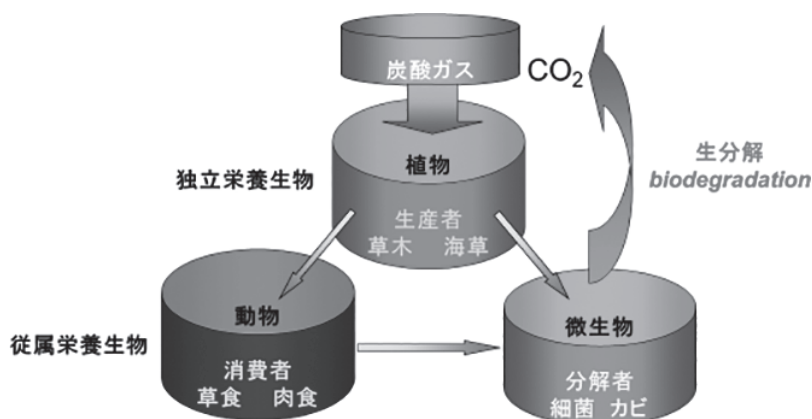


図2 自然界の真のリサイクルシステムとしての物質循環（炭素循環）

4.2 海洋中のマイクロチップは太古の昔より存在した！？

近年、大きな問題となっている海水中のマイクロプラスチックに相当する微粒子（マイクロチップ）は、生分解性プラスチックを含むいかなる素材も避けることはできない。素材間で異なるのはマイクロチップ化するまでに要する時間と、それが分解消滅するまでの時間に過ぎない。海洋環境下でマイクロチップ化することなく、即座に分解消滅するような素材は天然の生分解性素材を含めてあり得ない。私達がマイクロチップを抑制するためになすべきことは、海洋環境下に流入するプラスチックその他を極力少なくするための社会システムの構築と社会規範の確立である。

ところで、海水中のマイクロプラスチックに相当する微粒子は、地球上に生命が誕生以来太古の昔より存在したと考えられる。筆者は滋賀県下最大の河川である野洲川源流域の農山村（甲賀流忍者の里）に隠れ棲むが、毎年河川には大量の流木や草本類が流れ込み、これらはやがて海洋へと流入し、最終的には相当長い時間をかけてマイクロチップ化を経て完全に分解されると考えられる。これまで流木など見たことのない都会人は、大雨の後に新幹線で木曽川鉄橋を渡る時に川下（海側）の中之島には大量の流木が山積みになっている様子を目にすることができる。また、海洋環境に流入するプラスチック以外の紙、段ボールや天然・合成繊維なども同様にマイクロチップの素原因となっているはずである。既述の紙製ストローもマイクロチップのかたまりである。したがって、現在マイクロプラスチックで問題となっている有害物質の吸着と濃縮も同様に生じていたはずである。

しかし、これらが大きな問題とならなかったのは、すでに図1に模式的に図示したように、生分解性天然高分子化合物から構成されるものは海水中に長く（永遠に）留まらず、やがて（5～10年後には？）完全に分解消滅するがゆえに、有害物質の吸着と濃縮も自然生態系が許容し得る低濃度レベルに留まり、大きな影響を及ぼさなかったためと考えられる。

4.3 天然の生分解性構造材料としてのリグノセルロース

自然界における天然の生分解性構造材料として圧倒的存在感を誇る植物の細胞壁成分を構成するリグノセルロース（Lignocellulose）を鉄筋コンクリートに仮定すると、鉄筋はセルロース（約50%）、鉄筋を束ねるワイヤはヘミセルロース（20～30%）、これらの間隙を埋めるコンクリート（20～30%）はリグニン（Lignin）から構成されると例えられる。しかるに、地球上に生命が誕生しておよそ38億年になるが、植物細胞壁成分としてのリグニンが誕生したのは、今から約10億年前であるといわれている。周知の通り、リグニンは生分解性であるが難分解性である（リグニンが白色腐朽菌による分解能を獲得したのは2億9千万年前）。しかるに、自然界は進化の過程で、なぜ分解速度だけから見れば環境負荷が増大する難分解性のリグニンを生み出したのだろうか？

リグニンの役割はセルロース繊維を被覆することにより頑健性や傷病耐性（微生物や昆虫などによる腐朽・食害への抵抗性）をもたらし、また導管における水輸送を可能にしている。その結果として、植物は長寿を全うすることが可能となり、自然界で発生するごみの量は減少し、環境負荷は従前と同等以下に維持された可能性が高い。すなわち、環境負荷とは式(1)で表される分

解速度の逆数と発生するごみの量との積である。

$$\text{環境負荷} = (\text{分解速度})^{-1} \times (\text{ごみの量}) \quad (1)$$

ここに、地球上に出現してまだ数百万年にしか過ぎない私達人類が見落としがちな廃棄物問題における最も大切な原点が隠されている。プラスチックを含む廃棄物問題で最も大切なことはリユースやリサイクルの前に、ごみの発生源抑制 (Source Reduction) である。一般的に、素材の分解速度と発生するごみの量は比例関係にあり、分解速度の速いものほど製品寿命・奉仕期間が短く、ごみが拡大再生産される。これを逆説的にいえば、私達が木造建築を 100 年以上もの長期間維持・活用できるのは難分解性物質リグニンの賜物である。

自然界の神様が分子設計された天然の生分解性構造材料はリグノセルロースであることを、今一度思い起こそう。私達人間は神の手になるリグノセルロースを合成することは到底不可能としても、その意図は理解することができる。そして、リグノセルロースの自然界での生分解速度を律速しているのはセルロースを被覆しているリグニンであり、海洋を含む自然界で許容される生分解速度の指標 (ポジティブ・コントロール) はセルロースではなくリグニンと考えられる。

5. 生分解性プラスチックの理想の化学構造とは

5.1 カローザスが果たせなかった夢を追い求めて

今日、生分解性プラスチックといえば脂肪族ポリエステルを基本骨格とするものが大半を占める中で、最初に脂肪族ポリエステルを系統的に研究したのは高分子化学黎明期の 1930 年代にナイロンの発明により高分子化学に不滅の金字塔を打ち立てたカローザス (C. W. Carothers) であることは意外と知られていない。彼の死後発刊された論文集にはポリエステルに関しては数十編の論文が記載されているのに対し、ポリアミドはわずか 4 編にすぎない。彼はさまざまな化学構造の脂肪族ポリエステルを重合し繊維化を試みたが、脂肪族ポリエステルは熱的・機械的特性のみならず成形加工性にも劣るため実用化には至らず、やむなくポリアミドへの転向によりナイロン 66 繊維を発明するに至った。

筆者は 1980 年代の後半より今日までの 30 年間有余、生分解性プラスチックの基礎・応用研究から技術・事業開発に取り組む中で、当初の最大の関心事は生分解性プラスチックの理想の化学構造 (一次構造) に辿り着くことであった。筆者はカローザスとは対極をなす自らの凡庸さを顧みず、カローザスが果たせなかった夢を追い求めて 10 年間にも及ぶ当てのない流浪の旅に出た。

最初に遭遇したのは、1986 年頃に米国から光分解性樹脂が輸入販売されるとの新聞記事を通してコンタクトした米国のユニオンカーバイド社のポリカプロラクトン (PCL) であった。早速に繊維化を試み成功した結果、当時の生分解性プラスチック黎明期の物珍しさも手伝い、期せずして「溶ける釣り糸」として NHK テレビをはじめとするメディアの寵児となった。融点がわずかに 60℃ の PCL を実用化するなどとは夢にも思わなかったが、研究材料としては好適で、自然環境下の土中分解やラボでの分解酵素リパーゼによる酵素分解実験などにより、生分解機構を含む生分解性プラスチックとしてのあるべき姿を考察する上で絶好の機会を得ることができた¹⁾⁻³⁾。

次に取り上げたのは、当時の生分解性プラスチックといえば、英国を代表する ICI 社の一世を風靡した Biopol[®]に代表される微生物産生ポリエステル (PHBV) であった。筆者は 1990 年頃に英国に渡り、その繊維化に関して ICI 社と数年に及ぶ共同開発に取り組んだ。ところが、微生物産生ポリエステルはバルキーな側鎖を有する β -オキシ酸の重合体で、加熱溶融時の熱分解を避けるために低融点の共重合体とせざるを得ないために、ガラス転移点は室温以下である上に結晶化速度が極めて遅く (PP の 100 分の 1 以下)、溶融紡糸過程でほとんど結晶化せず (ゴム状態のまま) に粘着感が残り、糸条同士が粘着して正常な巻取りすら困難であった。

また、微生物産生ポリエステルは天然高分子化合物であるがゆえに生分解性に優れる反面、自然界や使用環境下で分解し易く、素材としての奉仕期間は短期間に限られる。さらには、微生物菌体内から分離・精製するがゆえに不純物の混入による着色や異臭は避けられず、カビが生え易く、透明性を欠き、耐熱性が低く、成形後の室温下で経時劣化 (二次結晶化) が起こり易く、およそ構造材料としては最悪の部類に属する。そもそも、これは自然界の神様がエネルギー貯蔵物質として分子設計されたものであり、菌体内では非晶状態で機能している。これをわざわざ菌体内から取り出し、結晶性構造材料として利用しようとする人間の見識自体が問われている。

次に取り上げたのはジオールとジカルボン酸からの重縮合ポリマーであるポリブチレンサクシネート (PBS)、ポリエチレンサクシネート (PES)、ポリエチレンサクシネート・テレフタレート (PEST)、ポリブチレンアジペート・テレフタレート (PBAT)、その他諸々の脂肪族または脂肪族/芳香族共重合ポリエステルであった。欧米を含む数多くの国内外大手企業とコンタクトしながら検討を進めたが、本稿では紙数の関係から詳細は割愛させて頂く⁴⁾⁻⁷⁾。

5.2 ポリ乳酸との再会

筆者は生分解性プラスチックの研究に取り組む以前は、バイオメディカル関係の医療用具 (抗菌剤徐放性導尿カテーテル) の研究開発に約 5 年間従事していたことから、生体内分解吸収性医用材料 (骨折固定用ボルトなど) としてはすでに実績のあるポリ乳酸 (PLA) についての基礎知識は有していた。しかしながら、PLA は高分子化学黎明期の 1930 年代にカローザスも合成を試みているほど古典的なポリマーであるが、今日まで汎用的プラスチック材料として使用されることはなかった。それには確固とした下記理由があった。

1980 年代から生分解性プラスチックが脚光を浴びる中で、1990 年前後から PLA の商業生産を志向する企業が世界で数社現われたが、1995 年以前の PLA は通常の室温環境 (20℃, 65% RH) 下に放置するだけで、約 3 カ月で強度が半減する代物であった。PLA は乳酸からの重縮合では高分子量体を得ることは難しく、乳酸の環状ダイマーであるラクチド (Lactide) の開環重合により生産するが、重合終了後のポリマー中には未反応ラクチドが化学平衡量として数%残留する。その結果として、ラクチドは室温環境下でも大気中の湿気を吸湿することにより開環して線状ダイマーとなるためにフリーのカルボキシル末端基を生成し、これが PLA の加水分解反応を促進する触媒として作用することになる。

筆者は、当時の PLA の開発では世界的にも先行していたかに見えた国内某企業に、そのデータを示し改善を求めた。しかし、その企業の理解を得ることは難しく、やむなく 1995 年の秋も深

まる頃米国ミネアポリスにカーギル（現在、ポリ乳酸世界最大手ネイチャーワークス（NatureWorks LLC、以降、NW社）を訪ねた。こうして始まった共同研究により、カーギル社はポリ乳酸重合後の残留ラクチドを効率的に除去する技術を確立し、これまで通常の室温環境下ではわずか数カ月の製品寿命を3年以上に延ばすことに成功し、ここに初めてPLAの汎用プラスチックとしての道が拓かれた。

一方、筆者の所属したユニチカ(株)はPLAを汎用プラスチックとして展開するために越えなければならない数々の高性能・高機能化技術（耐熱性、耐衝撃性、耐久性、寸法安定性、成形加工性）開発に注力し、2002年には世界初の130℃の耐熱性を実現するなど、PLAの高性能化技術の確立に大きく貢献した。こうして両社は世界で最初に商業契約を締結する企業となり、ユニチカ(株)は1998年に「地球の子」「テラマック（TERRAMAC）[®]」のブランドを掲げPLAの一次加工製品事業に進出した。

5.3 ポリ乳酸が内包する分解制御機構：2段階2様式の特異的な生分解機構

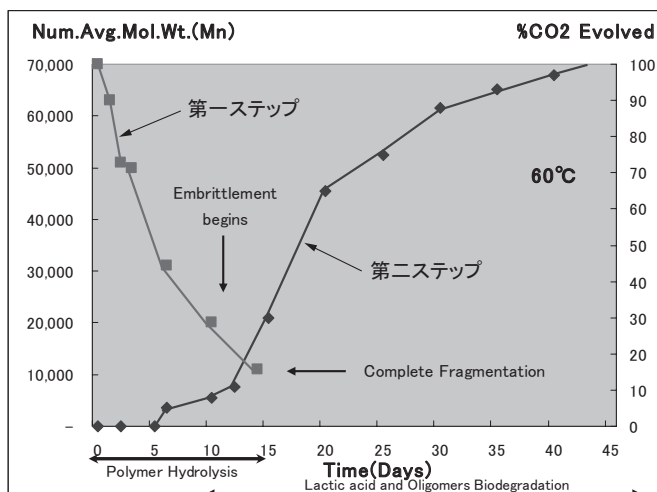
PLAは側鎖にメチル基を有する α -オキシ酸である乳酸が重合しただけの何の変哲もない極めて単純な化学構造をしている。しかし、基本骨格が比較的剛直であるために脂肪族ポリエステルの中では最も高いガラス転移温度（約58℃）を有することが特徴的である。ところが、この58℃という温度は、生ごみなどの有機性廃棄物を堆肥化する工程で通常観察される発酵熱の温度と偶然にも一致する。これは世界各国の生分解性プラスチックの堆肥化可能（compostable）認証基準における試験温度が $58 \pm 2^\circ\text{C}$ に設定されていることから明らかである（詳細は[6.3]参照）。これより、PLAは通常の室温環境下での使用過程ではほとんど加水分解を起こすことなく安定であるが、使用後に58℃以上の堆肥化工程に投入されると顕著に加水分解が進行し、生分解が促進されることを意味する。

ここで、PLAの60℃堆肥中での特異的な2段階2様式の生分解様式を図3に示す⁸⁾。PLAは60℃のコンポスト条件下に置かれるとまず加水分解が進行し、数平均分子量が1～3万まで低下すると形状崩壊を起こし水溶性の乳酸モノマーやオリゴマーを生成し始め、微生物の細胞膜を通過して菌体内に取り込まれて資化・代謝され生分解（CO₂の発生）が始まることを示唆している。

では、この図から一体何が読み取れるのだろうか？ その後、自らが思い描く生分解性プラスチックの理想像を思索する過程である日突然、そこにはあたかも自然界の神様が分子設計したかのようなPLAの分解制御機構としての、生分解開始の自動スイッチ・オン機能が内蔵されていることを見出し、自らが思い描く生分解性プラスチックの理想像そのものであることを発見した。

合成高分子化合物であるPLAを分解する微生物や分解酵素は自然界には実質的には存在しない。それは、ポリ乳酸は初期の律速反応である加水分解を起こさない限り微生物による生分解は始まらず、長い製品寿命を確保することができ、長期耐久性構造材料としても使用が可能であることを意味する。筆者（のみならず多くの人々）が思い描く生分解性プラスチックの理想像とは、これまでの石油系非生分解性プラスチックと同じように使え、使用後は生ごみと同等の速度で速やかに再資源化（堆肥化またはバイオガス化）される、あるいは自然に還る素材であると考えられる⁹⁾¹⁰⁾。

- ▶ 第一ステップ：化学的加水分解反応（律速）
数平均分子量：7万 \ 3万～1万（形状崩壊）
水溶性オリゴマー（乳酸の1～5量体）の生成開始



- ▶ 第二ステップ：生分解反応
水溶性モノマー、オリゴマーの微生物細胞膜通過
微生物菌体内での資化・代謝による CO₂ の発生

図3 PLAの60℃コンポスト中での生分解挙動³⁾

生分解性プラスチックの世界では、これまで40年以上の最も古い歴史を有しながら、その表向きの公式生産能力とは裏腹に生産・販売実績に乏しい微生物産生ポリエステル系とは対照的に、本格的商業生産開始からいまだ17年しか経たないPLAが今日では生分解性プラスチックの世界で圧倒的な存在感（年間数十万トンの生産・販売実績）を誇るのには、それなりの確固とした科学技術的背景と論拠が存在する。

6. 生分解性プラスチックの分解挙動

6.1 生分解機構

生分解性プラスチックの生分解機構には決定的に異なる2つの分解機構、酵素分解型と非酵素分解（加水分解）型が存在することを多くの人は知っているようで、その核心を理解する人は極めて少ないように思われる。その証拠に、異なる素材間の分解速度の比較をする際に、いまだ重量減少速度を指標として用いる人が圧倒的に多いことから伺い知ることができる。

表1に、生分解性プラスチックの

表1 生分解性プラスチックの生分解機構（分解初期～中期）

	酵素分解型	非酵素分解型 (加水分解型)
素 材	PHA (PHBV 他)	PLA
表面形状	凹凸	平滑
重量減少	あり	なし
分子量低下	ほとんどなし	あり
分解サイト	表面	表面～内部
分解様式	表面分解 (surface erosion)	塊状分解 (bulk degradation)

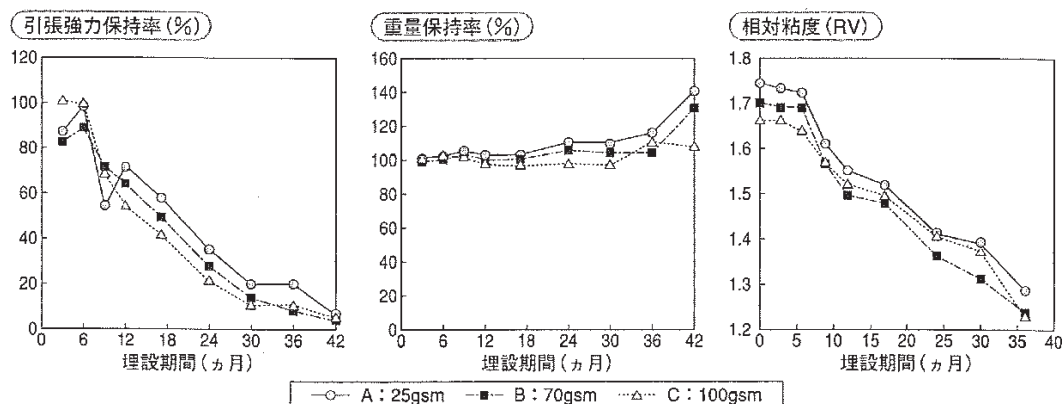


図4 非酵素分解型 PLA 不織布の土中分解試験 (3年半)¹¹⁾

分解初期から中期過程において観察される分解挙動の特徴を、決定的に異なる2つの生分解機構について示す⁵⁾。これより、これら両者の分解挙動には共通の指標は一つもないことが判る。したがって、分解過程における重量減少速度は酵素分解型の指標とはなり得ても、非酵素分解（加水分解）型の指標とはなり得ない。酵素分解型は材料表面にとりついた微生物が分泌する分解酵素により材料表面から分解され溶解除去されるところから、材料表面には凹凸が形成されると共に重量が減少する（surface erosion）。

これに対し、非酵素分解（加水分解）型のポリ乳酸（PLA）不織布の3年半にわたる土中分解試験結果を図4に示す¹¹⁾。これより、分解の初期～中期過程において重量減少は全く観察されず（後半の重量増は試料間隙に残存する細砂の完全除去が困難なために生ずる実験誤差）、見掛け上は全く分解していないかのような外観を呈している。しかし、この間の分解の直接指標としての分子量に相当する相対粘度の低下は顕著であり、分解の間接指標としての強度低下も顕著に観察される。

すなわち、PLAは土中埋設約3年半で実質の強度がほぼゼロとなるまでに加水分解が進行して形状崩壊（bulk degradation）を起こし、それ以降は生成した低分子の水溶性乳酸モノマーあるいはオリゴマーが土中微生物の菌体内に取り込まれて資化・代謝され、おおよそ5年前後で完全に分解消滅する。

6.2 海水中での分解挙動

さて、海洋環境には水温が10～25℃で微生物相が比較的多い表層海水域と、水温が1～10℃の低水温、高水压下の微生物相が比較的小さい深層海水域がある。微生物ポリエステル（PHBV、PHBH）やポリカプロラクトン（PCL）、ポリブチレンサクシネート（PBS）などの主たる分解機構が酵素分解型の生分解性プラスチックについては海水中分解挙動が比較的良好に検討され、表層海水中のみならず深層海水中でも分解することが確認され、分解微生物の同定まで行われているケースもある¹²⁾。

しかし、今日主要な生分解性プラスチックとして君臨している非酵素分解型である硬質のPLAや軟質のポリブチレンアジペート・テレフタレート（PBAT）についての実験例は極めて少

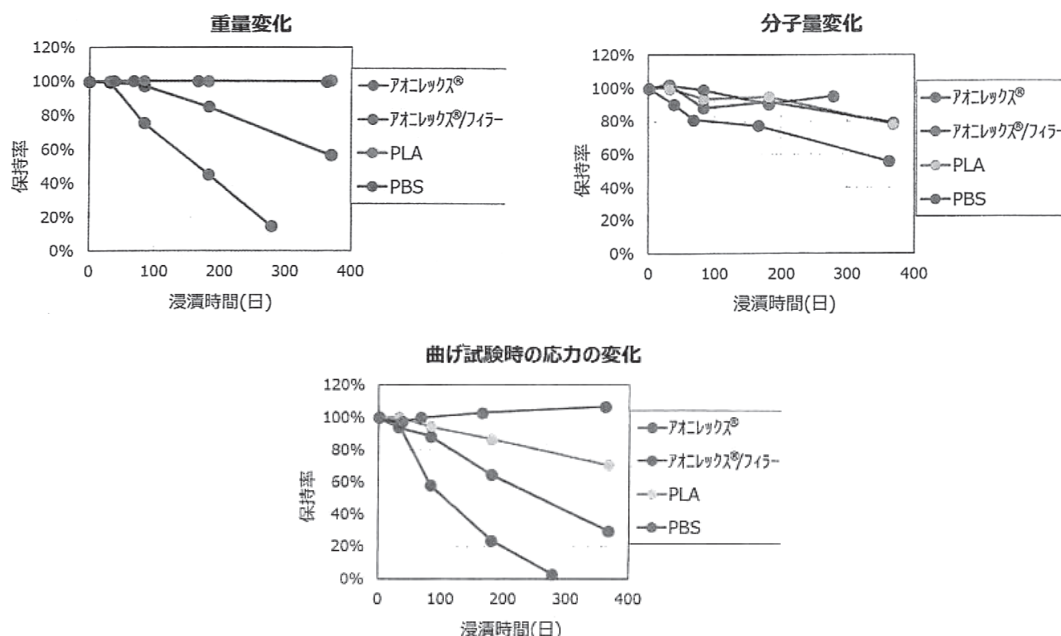


図5 各種生分解性プラスチックの海水中での分解挙動（1年間）¹³⁾

ない。ここでは、PLAの海水中での分解挙動に関して、これまでに報告されている1年後の土中分解試験¹¹⁾（図4）と海水中分解試験¹³⁾（図5）を基に考察する。

ここで表2の数値は、図4（土中分解試験）と図5（海水中分解試験）から読み取った数値であるが、PLAは海水中で1年後には土壌中とほぼ同程度の速度で分解していることから、3～5年後には（図4に示す土中分解試験データと同様に）形状崩壊を起こすまでに加水分解（低分子化）が進行し、水溶性の乳酸モノマーないしオリゴマーを生成して海水中の微生物菌体内に取り込まれて資化・代謝され、最終的には自然（土、海洋）に還る素材と考えられる。自然界で用いられる農林・園芸・土木・水産資材の大半は、少なくとも3～5年の製品寿命と奉仕期間を求められる用途（第2編第4章）が大半であるところからPLAは最適の素材であり、すでに数多くの実績がある。

PLAは自然環境下に留まらず、私達人間の体内においても完全に分解消滅する生体内分解吸収性医用材料として、骨折固定用ボルトなどで古くから実用に供されていることは周知の通りである。PLAは微生物や分解酵素の力を借りることなく、水分が存在する環境下（大気中、土中、水中、生体内）であれば、いかなる環境下でも最終的には完全に分解消滅する素材である。PLAの加水分解を止めることは、自然界の神様をもってしても不可能である。

表2 PLAの土中と海水中での分解試験結果（試験期間：1年間）

分解試験	重量減少率 [%]	分子量保持率 [%]	強度保持率 [%]
土中	0	89	64
海水中	0	80	70

〔備考〕土中分解試験¹¹⁾：愛知県，海水中分解試験¹³⁾：瀬戸内海（23℃）

6.3 再資源化（堆肥化またはバイオガス化）過程での分解挙動

今日、海洋プラスチック汚染を含むプラスチック廃棄物問題における最大の課題は、使い捨て食器具や食品容器・包装材、レジ袋、ごみ袋などのワンウェイ・ユース製品群の使用後の廃棄物処理に係る問題である。環境先進地の欧米では、これら製品には生分解性プラスチックを用いて使用後に生ごみなどの有機性廃棄物と共に再資源化（堆肥化またはバイオガス化）する方法が主流であり、表3に示す堆肥化認証基準が設けられている。

筆者は生分解性プラスチックの理想像とは、使用時は通常のプラスチックと同じように使え、使用後はその他の有機性廃棄物と共に速やかに再資源化（堆肥化またはバイオガス化）が可能な

表3 生分解性プラスチックの堆肥化（compostable）認証基準

国	認証	規格	温度	期間	測定項目	認証基準
ベルギー 独 米	OK Compost	EN 13432	58℃	6ヶ月	CO ₂ 発生量	90% ≤
	Din Certco	EN 13432	58℃	6ヶ月	CO ₂ 発生量	90% ≤
	BPI Compostable	ASTM 6400	58℃	6ヶ月	CO ₂ 発生量	60% ≤



使用済ティバッグフィルターのコンポスト中での生分解挙動

画像提供：山中産業(株)

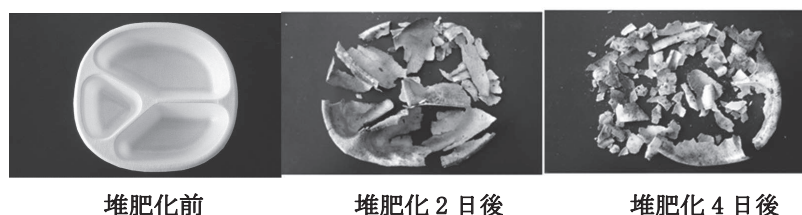
図6 PLA 繊維製ティバッグフィルター「ソイロン®」と取得済の世界の堆肥化認証基準とコンポスト過程での分解挙動

プラスチックであると定義し、その代表例として PLA を挙げた。ここでは、代表例として今や欧米を中心に世界市場を席巻しつつある PLA 繊維製ティバッグフィルター “ソイロン (Soilon)®” (山中産業(株)) について紹介する^{14)~17)}。ソイロン®は、すでに前述世界の堆肥化可能 (compostable) 認証基準を取得しており、使用後には生ごみと共に堆肥化・再資源化されている (図 6)。

7. 「世界ラーメンサミット」大阪宣言

今から丁度 60 年前に、日清食品(株)から世界で初めてのインスタントラーメンが発売されて以降、これまでは発泡スチロール製のプラスチック容器が大量に使われてきた。しかしながら、海洋プラスチック汚染問題が顕在化する中で、2018 年の「世界ラーメンサミット」大阪大会において世界ラーメン協会の安藤宏基会長 (日清食品社長) から、「環境負荷削減のため、業界全体でプラスチック素材を生分解性素材に置き換えてゆく努力を始めなければならない」との歴史的な「大阪宣言」が世界に向かって高らかに発せられた。

これまで使い捨てプラスチック食品容器の元祖であり、象徴的存在でもあったラーメン容器が、生分解性プラスチックに切り替えられる意義は計り知れない。最後に、今から 10 年以上も前にユニチカ(株)により世界で初めて開発されたラーメン容器にも使用が可能な、ポリ乳酸 (PLA) の発泡成形用樹脂から成形された食品衛生法 370 号適合の耐熱性発泡食品トレイ (熱湯注入や電子レンジ 130℃加熱可能) の堆肥化写真を図 7 に示す¹⁰⁾。



画像提供：ユニチカ(株)

図 7 耐熱性 PLA 発泡食品トレイの堆肥化試験 (60±1℃)

8. おわりに

従来の既成概念・価値観を根底から覆す真に革新的な全ての新素材・技術が辿る社会的認知度曲線からすれば、生分解性プラスチックは 1980 年代の「黎明期」から新規性が喧伝される過度な期待ピークの「流行期」(2000 年代)を経て、その後技術改良やコスト低減、さらにはインフラや法的整備に時間を要する「幻滅期」に入ったが、私達の棲む地球の自然生態系の存続を危うくする海洋プラスチック汚染問題が顕在化した今日、再びその存在意義と役割が正しく見直され、今後本格的な実用化時代を迎えようとしている。

文 献

- 1) M. Mochizuki et al.: *J. Appl. Polym. Sci.*, **55**, 289–296 (1995).
- 2) M. Mochizuki et al.: *Pure and Appl. Chem.*, **69**(9), 2567–2575 (1997).
- 3) M. Mochizuki et al.: *Pure and Appl. Chem.*, **71**(11), 2177–2188 (1999).
- 4) M. Mochizuki et al.: *Macromolecules*, **30**, 7403–7407 (1997).
- 5) M. Mochizuki et al.: *Polymers for Advanced Technologies*, **8**, 203–209 (1997).
- 6) M. Mochizuki: *Sen'i Gakkaishi*, **52**(5), 200–208 (1996).
- 7) M. Mochizuki and M. Hiram: *Polymers and Other Advanced Materials*, P. N. Prasad and E. Mark, and T. J. Fai eds., Plenum Press, New York, 589–596 (1997).
- 8) J. Lunt: *Polymer Degradation and Stability*, **59**, 145 (1998).
- 9) M. Mochizuki: *Biopolymers, Polyesters III*, A. Steinbuchel, Y. Doi, eds., WILEY-VCH Verlag, GmbH, Germany, **4**, 1–22 (2002).
- 10) M. Mochizuki and K. Ueda: *Bio-based Polymers*, Kyoritsu Pub. Tokyo, 119–137 (2006).
- 11) M. Mochizuki: *Web Journal*, (43), 1–5 (2002).
- 12) H. Keneshiro, T. Sekiguchi and C. Kato: *BioPla Journal*, (61), 5–9 (2016).
- 13) T. Ohkura: *BioPla Journal*, (62), 5–9 (2016).
- 14) M. Mochizuki and K. Ohshima: *Advanced Materials and Technologies of Bioplastics*, CMC Books, Tokyo (2009).
- 15) M. Mochizuki: *Handbook of Textile Fibre Structure*, J. Hearle, S. Eichhorn, M. Jaffe, and T. Kikutani Eds., Woodhead Publishing, Cambridge, 257–275 (2009).
- 16) M. Mochizuki: Poly (lactic acid): *Synthesis, Structure, Properties, Processing and Applications*, R. Auras; L-T, Lim; S.E.M. Selke, and H. Tsuji eds., John Wiley and Sons, 469–476 (2010).
- 17) E. Masuno: *BioPla Journal*, (72), 17–20 (2019).

この先をご覧くださいいただくには、パスワードが必要です。

制限つきPDFで全ページをご覧くださいいただけます。
(制限内容：閲覧期間の設定、コピーやプリントの禁止など)

- ・ PDFの閲覧

「パスワード」と「専用のビューア」（無料）が必要です。
費用は一切かかりません。

※WindowsのPCでのみご覧いただけます。予めご了承ください。

- ・ パスワード ※電子試読ページよりお申込みください

<https://www.nts-book.com/ntsの電子試読>

ページ下部にお申込みフォームがあります。

右のQRコードからも
電子試読ページにアクセス
いただけます。



- ・ ビューアのダウンロード

PDFは、株式会社スカイコムの SkyPDF Viewer（無償のPDFビューア）をダウンロードしてご覧いただけます。

※Adobe Acrobat Readerなど他のPDF閲覧アプリケーションではご覧になれません。

SkyPDF Viewer 無償ダウンロード：

<https://www.skycom.jp/free/>