生分解性プラスチック†

宮 田 喜 明

(電気化学工業総合研究所)

1. 生分解性プラスチックの開発状況

近年、環境問題に対する関心が高まり、たとえばプラスチックなどの合成高分子材料の廃棄処理に関する技術の開発に対する要求が増している。その1つとして生分解性プラスチックに注目が集まっている。

生分解性プラスチックの開発は、1985年ごろから、とくに廃棄物の埋立処理比率の高い米国で盛んになった。当初は、光分解性プラスチックやポリエチレンに澱粉を少量ブレンドした製品も、プラスチックの形状が崩壊した後、生分解するとアピールされていた。現在では、生分解性に対する議論が進み、「生分解性プラスチックとは、微生物によって完全に炭酸ガス、メタン、水、バイオマスなどに分解される材料」と考えられている(定義)⁽¹⁾。

代表的な生分解性プラスチックを表1にまとめた。生分解性のはっきりしている各種脂肪酸ポリエステルやデンプン等の天然多糖類を利用したタイプで開発が進んでいる。米国、欧州では、トウモロコシ等の余剰農産物の用途開発という背景から、バイオマスを原料とするPHB、PLA、デンプン系アロイが盛んに研究されている。

PHB(広義にはポリヒドロキシアルカノエート、PHA)は微生物が菌体内に蓄積する栄養貯蔵物質で、一種の脂肪酸ポリエステルである。数多くの微生物がさまざまな炭素源から、広範な構造のPHAを合成することが知られている²⁾。PHAの構造や共重合組成を変えることで、結晶性の硬いプラスチックから軟らかいゴムまで、多様な物性の素材が得られる。低コスト化のための研究が、生合成遺伝子から発酵プロセスまで幅広い分野で進められている。植物を利用したPHBの合成例も報告されている⁽³⁾。

PLA、PCL、バイオノーレは化学的な重合方法で合成される脂肪酸ポリエステルである。PLAは従来から医用材料分野で生体内吸収性材料として研究されていた。農業廃棄物から発酵で安価に乳酸を製造し、生分解性プラスチックに展開しようと開発が進められている。乳酸の環状ダイマーの開環重合により高分子量のポリマーが得られる。PCLはカプロラク톤の開環重合で得られる高分子量のポリマーである。融点が約60℃と低いため、単独でのプラスチックとしての利用には困難がある。バイオノーレはジオールとジカルボン酸の重縮合で合成される。一般に脂肪酸ポリエステルの重縮合による高分子量化は困難とされていたが、重合方法を工夫することで高分子量化している。融点も100℃程度である。

マタビー、ノボンは、少量の水や可塑剤を使ってデンプンを糊化し、熱溶融加工を可能にしている。両者ともデンプンの割合が60~90%とされている。安価なデンプンの利用はコスト面で有利であるが、糊化デンプンを使ったアロイは、脂肪酸ポリエステルと比較して耐水性に乏しい。

生分解性プラスチックを使った各種の用途開発も、たとえば紙コート、フィルム、ボトル等の包装資材や農業・園芸用各種資材等で進められている。耐水性に優れた各種脂肪酸ポリエステルは、野生動物の保護に効果が期待されることから、釣り糸や漁網への応用、商品化が始まっている⁽⁴⁾。

2. 高分子の生分解性とその評価方法

一般に難分解性と考えられているポリエチレンでも、数10年間生物活性の高い土壤中に埋設された場合、酸化劣化と微生物分解が複合して緩慢に進行している兆候が確認されている⁽⁵⁾。これに対して、積極的に生分解性をアピールする素材では、その用途や使用目的にもよるが、ある程度急速に微生物によって分解することが必要と考えられる。少なくとも観測期間中(たとえば1年間)に、分解や無機化が確認できることが必要だろう。

† Biodegradable Plastics.

Yoshiaki MIYATA (Research Center, Denki Kagaku Kogyo Co., Ltd., Machida, Tokyo 194)

表 1 分解性プラスチックの分類, 代表的な生分解性プラスチック

分解性プラスチック	—光分解性 (崩壊型): エチレン/一酸化炭素共重合体等
	—生分解性 (崩壊型): デンプン/ポリエチレンのブレンド等
	—生分解性 (完全分解)

生分解性プラスチック

製 品 名	開 発 企 業	組 成
バイオポール	ゼネカ (旧 ICI)	ポリヒドロキシブチレート共重合体 (PHB)
ポリ乳酸	デュポン, カーギル, 三井東圧, 協和発酵	ポリ乳酸, ポリ乳酸共重合体 (PLA)
プラクセル, トーン	ダイセル化学, ユニオンカーバイド	ポリカプロラクトン (PCL)
ビオノーレ	昭和高分子	脂肪族ポリエステル
バイネックス	エアプロダクツ	ポリビニルアルコール共重合体
バクテリアセルロース	味の素	セルロース
キトサン/セルロース	アイセロ化学, 金井重要工業, 西川ゴム	キトサンとセルロースの混合物
マタビー	ノバモント	デンプンとポリビニルアルコール共重合体のアロイ
ノボン	ワーナー・ランバート	デンプン系のアロイ

表 2 高分子の生分解性試験方法の特徴

	分 解 の 特 徴	試 験 方 法	試験期間 定性性
基質特有の分解酵素による分解性	高分子の主鎖切断	可溶化試験 末端基の定量	数時間～数日 定性性大
基質特有の分解菌による分解性	高分子の分解菌による資化 高分子の劣化・崩壊	寒天平板試験 液体培養試験 BOD 試験	1 週間～1 カ月 定性性中
環境微生物による分解性	高分子の資化 高分子の劣化・崩壊	BOD 試験 土壌ポット試験	数週間～数カ月 定性性中
自然環境下での分解性	高分子の劣化・崩壊	コンポスト化試験 野外土壌埋設試験 海水浸漬試験	数カ月～数年 定性性小

一般に高分子材料の急速な生分解には, 微生物が菌体外に分泌する分解酵素が関与している. まず菌体外分解酵素が高分子表面に吸着し, 高分子鎖のグリコシド結合, エステル結合などを加水分解反応によって切断する. 生成した低分子量の分解物は, 菌体内に取込まれ代謝, 無機化される. デンプンやセルロースがアミラーゼ, セルラーゼにより分解されることはよく知られている. 脂肪族ポリエステルの生分解機構や関係する分解酵素の研究も数多く行われている. PHB の分解に関しては, PHB 分解菌, *Alcaligenes faecalis* T1 の PHB 分解酵素が単離され, その作用機構が詳細に解明されている⁽⁶⁾. PCL 等の合成脂肪族ポリエステルについては, 各種のリパーゼを用いた酵素分解が研究されている⁽⁷⁾. 疎水性の脂肪族ポリエステルでは, 高分子表面からエッチングするように酵素分解が進行する⁽⁸⁾.

実際の高分子材料の生分解性は, 分解酵素の基質特異

性と直接関係している高分子自体の基本的な化学構造もさることながら, 共重合組成, 重合度, 結晶化度, モルフォロジー, 水分含有量などさまざまな構造因子に大きく左右されることが知られている⁽⁹⁾. 材料自体の特性だけでなく, 製品の形状等にも分解速度は左右される.

生分解性の試験・評価方法は, 生分解性プラスチックを開発, 実用化するうえできわめて重要になる. 表 2 に高分子の生分解試験方法について, その特徴を簡単にまとめた. 開発の初期段階では, 特定の分解酵素や分解菌を用いる評価が有効だが, 自然環境下の分解を直接反映しないため, より自然環境下の条件に近い評価方法が必要になる.

生分解性プラスチックは, 通常の使用条件下ではまったく分解せず, 生物活性の高い環境下で急速に分解する. 生分解性は分解環境自体の性質, たとえば分解酵素の量やそれを分泌する微生物の普遍性, さらに土壌の状

態等さまざまな環境因子によっても大きく左右される。自然環境下、好気条件の土壌中に同一の生分解性プラスチックを埋設したテストでは、その分解速度が埋設場所により異なることが示されている⁽¹⁰⁾。好気条件下では急速な生分解性を示すが、嫌気条件下では生分解性が確認されない場合もある。

生分解性の定義の検討とともに、標準的な試験・評価方法の開発も各国で進められている。ASTM（米国試験材料協会）の標準規格の一例を以下に示す。

ASTM D 5209 都市下水汚泥を用いた好氣的な生分解性の標準試験法

ASTM D 5210 都市下水汚泥を用いた嫌氣的な生分解性の標準試験法

ASTM D 5247 特定微生物を用いた好氣的な生分解性の標準試験法

日本でも JIS 化の検討が進んでいる。完全分解、無機化が生分解性の定義となってきたことから、分解による二酸化炭素発生量や酸素消費量の測定が中心となっている。生分解性の有無の評価だけでなく、分解過程で生じる中間生成物の安全性等についても議論されている。

3. 包装資材用途

生分解性プラスチック自体が開発途上の素材であり、また価格も高いため、日本では包装資材への利用は本格化していない。生分解性プラスチックを包装資材に利用する場合、生分解性という機能を生かした廃棄物処理方法と組み合わせることが重要になると考えられる。生分解性プラスチックの実用化の面で先行している米国でも、当初埋立て地の減容化につながるとアピールされたが、実際の埋立て地での生分解の進行が緩慢なことが明らかになり、コンポスト化処理することが重視されている。米国で実際に採用が進んでいる製品はデンプン系アロイから調製された loose fill（発泡緩衝材）である。この製品は水溶性のため下水に流して処理することができる。このため、ポリスチレン製の loose fill に比べ価格が2倍であるにもかかわらず、通信販売業での採用が進んで

いる⁽¹¹⁾。

最近日本でも、家庭用や業務用の生ゴミ処理機器が盛んに開発されている⁽¹²⁾。コンポスト化装置は、土壌をそのまま使用するコンポスト容器、多種類のバクテリアを配合した処理剤を添加するタイプ、攪拌機や加熱機構を用いて短時間で効率的に処理するタイプまで幅広い。堆肥を発生させずに、水と二酸化炭素に分解消滅させるタイプもある。このような小型コンポスト化装置の普及は、それ自体の目的である生ゴミの易処理性、悪臭防止、分散処理による生ゴミの焼却負荷の低減とともに、生分解性プラスチック製の包装資材の用途開発の下地になるものと期待される。今後、生分解性プラスチックの商品化が本格的になるに従い、それを使った包装資材も処理システムと適合する製品から普及していくものと考えられる。

- (1) 高分子, 海外ニュース, **42**, 764 (1993).
- (2) 国岡正雄:「生分解性高分子材料」, 工業調査会, 東京, 1990, pp. 19—35.
- (3) Y. Poirier, E. Dennis, K. Klomparens, and C. Somerville: *Science*, **256**, 520—523 (1992).
- (4) 日本経済新聞, 平成5年3月17日.
- (5) 大武義人, 小林智子, 伊藤茂樹, 浅部仁志, 矢吹増男, 小野勝道: 日本ゴム協会誌, **66**, 504—512 (1993).
- (6) T. Tanio, T. Fukui, Y. Shirakura, T. Saito, K. Tomita, T. Kaiho, and S. Masamune: *Eur. J. Biochem.*, **124**, 71—77 (1982).
- (7) 常盤 豊:「生分解性高分子材料」, 工業調査会, 東京, 1990, pp. 263—276.
- (8) H. Nishida and Y. Tokiwa: *J. Appl. Polym. Sci.*, **46**, 1467—1476 (1992).
- (9) Y. Doi, Y. Kanesawa, M. Kunioka, and T. Saito: *Macromolecules*, **23**, 26—31 (1990).
- (10) 生分解性プラスチックのフィールドテスト, 生分解性プラスチック研究会技術委員会, 1992年9月.
- (11) G. L. Loomis: “澱粉を基にした生分解性プラスチックの進歩,” 日米生分解性プラスチックシンポジウム (1992).
- (12) 月刊廃棄物, 1993年12月号, 4—36.