生分解性プラスチック*

西山昌史**

Biodegradable Plastics / Masashi NISHIYAMA

Key words : biodegradable plastics, photodegradable plastics, plastic wastes, polysaccharides, biopolyester, environment pollution

1. はじめに

最近、プラスチック廃棄物による海洋汚染や都市ごみなどが、地球環境保全のうえから世界的な問題となっている。

海洋に投棄されたプラスチックは自然界で分解されないために、そのまま海上に浮遊したり、海底に堆積して様々な海洋汚染を起こしている¹⁾²⁾。海岸に打ち上げられた海洋生物の死体から多数のプラスチック袋が発見されており、なかでも魚網やプラスチックリングに絡まったオットセイに高い関心が持たれている。船舶のエンジン冷却口にプラスチックが挟まり、エンジンが停止するなどの事故も発生している。

廃プラスチックを含む都市ごみを焼却すると、高熱を出して焼却炉を傷めたり、塩化水素やダイオキシンの発生のおそれもある。焼却に伴って発生する大量の二酸化炭素や灰の処理にも大きな問題がある。

廃プラスチックを埋立て処分しても、プラスチックは半永久的に腐らず、地盤も締まらないために跡地利用はできない。最適な埋立て地もだんだん少なくなっており、ごみ処理の約90%を埋立てで処理しているアメリカでは1000 kmも離れた場所に埋め立てるような例もあり、埋立て地不足が世界的な社会問題となっている。

2. プラスチック公害に対する取組み

このようなプラスチック廃棄物問題を解決するために、欧米では種々の方法が検討されている。

その一つは、分解しないプラスチックの使用を禁止するなどの法規制である。1984年末イタリアで、1991年以降のショッピングバッグ等の包装用プラスチックは分解性でなければならないと規定した法律が公布された。この法律はイタリア国内ばかりでなく欧州諸国に大きな反響を呼び起こしている³⁾。また、非分解性プラスチックバッグ1枚当たり100リラ(約10円)の課税が1989年7月から実施されている。他の欧州諸国やアメリカの各州においても同様な動きがあり、分解しないプラスチックの使用禁止や分解性プラスチックへの転換に関する法案が多くの自治体で検討されており、一部ではすでに可決されている⁴⁾。

一方、欧州やアメリカのプラスチック製造メーカーは、本来廃プラスチックは回収して再使用すべきものであるとして、プラスチック廃棄物のリサイクリングのための技術開発や工業化に向けて活発な動きをしている⁵⁾⁶⁾。

プラスチック廃棄物問題を解決するための法規制やリサイクリングとともに、分解性プラスチックの開発も各国の大学、研究機関、民間企業で積極的に検討されている⁷⁾。アメリカ化学会においても分解性プラスチックに関するシンポジウムが3年計画で開催されており、1989年春のダラスの化学会では約70件の研究発表が報告された。

我が国においては、通商産業省は生分解性プラスチックを金属材料、無機材料、高分子材料に次ぐ第4の新材料と位置づけ、1989年度から「生分解性プラスチック開発可能性調査」を実施している。また、水産庁においても、漁場保全の観点から海水中の微生物で分解する漁網や釣糸などの開発プロジェクトを進め

* 原稿受付 平成2年1月31日

** 四国工業技術試験所(高松市花ノ宮町2-3-3)

表1 光分解性プラスチック

ケトン系	Eco Plastics 社 (Ecolyte)
	Eastman Kodak 社 etc.
エチレン/一酸化炭素系	Dow Chemical 社
	Du Pont 社
	Union Carbide 社 (ECO)
添加剤	Ampacet 社 (Poly-Grade)
	Princeton Polymer 研究所
	Ideamaster 社 (Plastigone)

ている。更に、民間企業においても、五十数社の企業が参加して共同開発を行う「生分解性プラスチック研究会」が1989年10月に発足している。

3. 分解性プラスチックの開発の現状

分解性プラスチックには太陽光線で分解する光分解性プラスチックと土壌中の微生物で分解する生分解性プラスチックがある。最近では、両者の性能を備えた分解性プラスチックの開発もなされている。

3.1 光分解性プラスチック

光分解性プラスチックの開発研究は1970年以前から盛んに行われたが、プラスチックの物性や経済性、分解物による二次的環境汚染に対する不安から実用化されたものは少ない⁸⁾。現在市販または開発中の光分解性プラスチックの例を表1に示す。なお、括弧内は商品名である。

カルボニル基をもつケトン系をポリエチレンなどのポリマーに導入すると、紫外線でカルボニル分子が破壊されて、ポリマーは砕けやすくなる。濃縮したマスタパッチの形で供給されており、通常のポリエチレンと混合して使用されている。欧州で販売されているゴミ袋やショッピングバッグに使用されており、コストは通常のプラスチックに比べて約10%程上昇するといわれている⁹⁾。

カルボニル基を導入するもう一つの方法はエチレンと一酸化炭素を共重合させる方法であり、数社のプラスチックメーカーで製造されている。この樹脂からなるゴミ容器用ポリ袋が大手スーパーのダイエーで昨年末から試験販売されている。この袋は太陽光線で約3か月でもろくなり、1~3年で水と炭酸ガスになるという。

光分解性を促進するために、光増感剤や酸化剤などの添加剤をプラスチックに加える方法がある。1種類以上の添加剤を加え、相乗効果や光がなくても分解を推進させることをねらっている。

光分解性プラスチックの分解速度は紫外線の強さで決定されるから、地球上の緯度や季節が重要な因子となる。真夏には秋や冬の5倍の速さでもろくなるとい

表2 生分解性プラスチック

微生物による生産	ICI 社 (Biopole)
	東京工業大学
	MIT etc.
でんぷん添加	米国農務省 etc.
	St. Lawrence Starch 社 (Ecostar)
	ADM 社 (Polyclean)
	Iowa 州立大
多糖類	四国工業技術試験所
	米国陸軍省 Natick 研究所
	西独 Battelle 研究所
	Ferruzzi 社
合成高分子	
ポリカプロラクトン	UCC 社 (Tone)
ポリ酪酸	Purdue 大
脂肪族ポリエステル	微生物工業研究所
グラフト重合	Purdue 大
ポリグリコリッド	化学技術研究所
炭酸ガス+酸化エチン	三井石油化学 etc.
ポリビニルアルコール	Air Products 社 (Vinex)

われている。保管中に日光にさらして思わぬ損害を被ったり、捨てても土中で分解しなかったり、中途半端に分解したプラスチックの破片が河川等を汚染するなどの解決すべき問題もある。

3.2 生分解性プラスチック

理想的な生分解性プラスチックとは使用時には石油系プラスチックと同様な機能や特性をもち、土壌中の微生物や酵素によって容易に分解され、環境に負荷を与えないプラスチックであり、そのような生分解性プラスチックの開発が望まれている¹⁰⁾。生分解性プラスチックの素材としては微生物が生産する高分子、植物や動物由来の天然高分子および合成高分子に大別することができる。表2に、現在市販または開発中の生分解性プラスチックの例を示す。

3.2.1 微生物による生産

ある種の微生物は自然界で3-ヒドロキシブチレート (3HB) のポリマーを生合成し、菌体内にエネルギーとして貯蔵している。微生物がつくるポリマーは微生物によって分解されるため、環境を保全する無公害プラスチックとして注目された。しかし、このバイオポリマーは高い結晶性のため加工が困難で、衝撃に弱いなどのために実用化されなかった。

1980年イギリスのICI社は水素細菌の *Alcaligenes eutrophus* にグルコースとプロピオン酸を炭素源として、3HBと3-ヒドロキシバチレート (3HV) との共重合体が醗酵生産することを見出した¹¹⁾。3HVのモル比の増大とともに、結晶性や融点が低下し、加工範囲の拡大や物性の改善がなされた。現在ICI社はBiopoleという商品名で年間数tの規模で生産してい

る。

土肥らは水素細菌に4-ヒドロキシ酪酸と酪酸を炭素源として用いることによって、3HBと4-ヒドロキシブチレート(4HB)からなる新しいバイオポリエステル共重合体の合成に成功している¹²⁾。この共重合体のモル比を変化させることによって、フィルムや糸、ゴムなどの製品に加工でき、また優れた生分解性を示し、春では6週間程で分解されたという。

3.2.2 でんぷん添加

微生物で分解するでんぷんを既存のプラスチックに練り込んで崩壊性プラスチックを製造する方法がある。この方法は余剰農産物であるでんぷんの利用、ごみ問題の解決及び石油製品への依存度の軽減という三重の効果が期待されており、アメリカやカナダで実用化されている。しかし、でんぷんは分解するものの、プラスチックの部分は困難であり、完全な生分解性を有するものではないとされている。

アメリカ農務省の方法は、エチレンアクリル酸共重合体とポリエチレンの混合物にゼラチン状のでんぷんを加える方法であり、でんぷんを40~50%混入することもできる¹³⁾。Illinois大学やAgri-Tech社と共同開発を行っている。

カナダのSt. Lawrence Starch社はポリエチレン内でのでんぷんの分散性を改良するために、シランカップリング剤で処理したでんぷんを使用している。更に少量のコーン油のように不飽和脂肪酸が添加されており、自動酸化剤として作用する。この方法で作られたバッグを土中に埋めると、でんぷんは土壤中の菌類に消費されてバッグはポーラスな構造となり、コーン油が土壤中の金属塩と反応して過酸化物を形成する。この過酸化物がポリマー鎖を破壊するとされている¹⁴⁾。土壤中で3~5年で分解し、環境に汚染をもたらさないとされており、コストアップは5~15%である。

そのほか、でんぷん粒子の疎水化や微粉化によるポリエチレンなどとの相溶性の改良について各所で検討されている。

3.2.3 天然多糖類

天然多糖類を分解する微生物は土壤中に広く存在しており、その分解生成物も生態系に悪影響を及ぼさないと考えられる。

著者らの方法は微細に叩解したセルロース繊維とキトサン塩を主成分とする方法であり、これらの混合溶液を平板上に流延して乾燥すると半透明なシートが得られる。このシートの引張強度は汎用プラスチックシートと同等以上の強度を示し、湿潤強度も高い¹⁵⁾。キトサンあるいは微細化セルロース単独では、成形性

や湿潤強度に問題があるが、両者を組み合わせた場合は良好なシートが得られることが判明した。このシートは日本各地の土壤中に普遍的に存在する菌によって生分解される。畑から採取した土壤中に2か月埋めておくと、シートは腐食して完全に消滅していた。分解初期のシートを観察すると、シートの上層部、すなわち土壤に接触している部分から分解されており、シート中のキトサン部分が優先的に分解されていた。分解時期の制御はキトサンや可塑剤の添加量、シートの熱処理温度によって制御できた¹⁶⁾。この素材はシート以外の種々の成形体への利用も考えられ、民間企業との間で共同開発が進められている。

アメリカ陸軍省のNatick研究所の方法はキトサンとプルランとの組合せであるが、得られたシートの強度は十分でなく、エピクロロヒドリン等の橋架剤等の検討を行っている¹⁷⁾。

西独のBattelle研究所では、変性でんぷん90%、残りの10%もバイオ物質からなる分解性プラスチックを開発した¹⁸⁾。グリンピースの品種改良により、高含量のアミロースを含むでんぷんを化学修飾したものである。イタリアのFerruzzi社も分解性の熱可塑性でんぷんプラスチックを開発している。主成分の変性でんぷん70%に石油製品を混合したものであるという¹⁸⁾。

3.2.4 合成高分子

生分解を受けやすい合成高分子として、脂肪族ポリエステル、ポリビニルアルコール、ポリエステルウレタン、低分子量のポリエチレンなどが知られている。

生分解性である脂肪族ポリエステルと非生分解性のナイロンやテトロンを不活性ガス中で加熱熔融させると、ある種のブロック共重合体となる。脂肪族ポリエステル以外の部分も低分子のブロック共重合体となっているため、微生物によって分解されるという(微生物工業研究所)。セルロースなどへのグラフト重合やC1化学の技術で生産できる一酸化炭素とホルムアルデヒドからのグリコール酸のポリマー、炭酸ガスを利用したもの、ポリカプロラクトンなど多数の生分解性合成高分子が提案されている。その中には一部商品化されているものもあり、今後の発展が期待されている。

4. 生分解性プラスチックの課題と展望

現在、生分解性プラスチックの定義やその試験方法は定められていない。分解性が高いと想定されていたものも、実際の廃棄場所で長期間安定で分解されなかったなどの問題もある。

アメリカのASTMの小委員会では、生分解性プラスチックの定義、評価試験方法の開発、環境やリサイクルリングへの影響等について検討中である。1989年11月カナダのトロントにおいて第1回のASTMの国際会議が開催されたが、議論百出でコンセンサスを得て結論を出すまでには至っていない。

我が国においても、通産省や生分解性プラスチック研究会で同様な検討を行っており、これらの結果を国際会議の場で生かしたいものである。

生分解性プラスチックの製造コストの低減も今後の課題の一つである。ICIのBiopoleは年産1万tの規模では1000円/kgになるだろうと予想しており、MITのSinskey教授は大腸菌を利用して大量生産すれば500円/kgとなると考えている。

世界的に地球環境保全問題がクローズアップされてきており、プラスチック製品の使用後の処分まで含めた対応が欠かせなくなっている。優れた生分解性プラスチックが開発され、地球環境保護に貢献できることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 八木信行：海洋汚染とバイオプラスチックの技術開発，JETI, 37, 6 (1989) 33.
- 2) 諸貫秀樹：プラスチック類による海洋汚染とバイオプラスチック，工業材料, 38, 1 (1990) 26.
- 3) 欧州樹脂連合 (APME) の分解性プラスチックに関する意見書，PLASPIA, 55 (1986) 36.
- 4) 松本満男：プラスチックの使用に関する欧米諸国の規制動向，生分解性プラスチック要旨集，バイオインダストリー協会 (1989) 24.
- 5) J. F. Dunphy & E. Britton: Plastics Recycling Sets for Takeoff, Chem Week, 143, 14, (1988) 16.
- 6) Recycling Grows Up: Where It's Headed, Plast Technol., 34, 13, (1988) 50.
- 7) バイオインダストリー協会編：生分解性プラスチック—海外動向調査報告書，バイオインダストリー協会 (1989).
- 8) 加藤政雄：光分解型プラスチックの開発の現状，工業技術, 17, 10 (1976) 10.
- 9) R. Johnson: An Overview of Degradable Plastics, J. Plast. Film Sheeting, 4, 2, (1988) 155.
- 10) 山中唯義：欧米と日本の分解性プラスチックの現状と展望，工業材料, 38, 1 (1990) 18.
- 11) N.アットリー：バイオポリマーとしてのBIOPOLの機能と応用，フレグランスジャーナル, 78 (1986) 83.
- 12) 土肥義治，岡岡正雄，川口 靖：バクテリアポリエステル，紙バ技協誌, 43, 10 (1989) 23.
- 13) 土肥義治：生物が分解するプラスチック，サイエンス, 12 (1989) 80 ほか.
- 14) F. H. Otey, R. P. Westhoff & W. M. Doane: Starch-based Blown Films, Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev., 19, 4, (1980) 592.
- 15) W. J. Maddever & G. M. Chapman: Modified Starch Based Biodegradable Plastics, Soc. Plast. Eng. Ann. Tech. Conf., 47th, (1989) 1351.
- 16) 無公害プラスチックの開発，四工試ニュース, 59 (1989).
- 17) 細川 純，西山昌史，吉原一年，久保隆昌：セルロース・キトサン複合素材の性質及び微生物分解性，繊維学会秋季研究発表会予稿集 (1989) 1F10.
- 18) D. L. Kaplan et al.: Biodegradable Polymers for Material Applications - Chitosan and Pullulan, ACS Polym. Preprints, 30, 1, (1989) 509.
- 19) In the Race for the 'Greenest' Plastics, Here Are Biopolymers, Mod. Plast. Int., Sep. (1989) 7.

(p. 638 より続く)

大要は次のとおり。

- (1) ボールガイドの剛性は工作機械構造要素の剛性に比べてかなり高い。
- (2) 工作機械のテーブル等には、あらゆる方向から外部荷重やモーメント荷重が作用するためLMBGシステム内最大分布負荷を最小にする最適予圧近傍のオーバサイズ球を取り組む必要がある。
- (3) 垂直変位，水平変位，ローリング，ヨーイング，ピッチングの変位5成分はすきまがあるほど大きく，軽予圧領域から最適予圧領域へかけて著しく低減し，過剰余圧領域になってもさほど低減しない。
- (4) 最適予圧近傍のLMBGシステム内負荷分布状

態は，最大分布負荷をうけるブロック内の最小分布負荷玉列の予圧がまさに抜ける状態である。

- (5) 軌道面両端部の逃げ幅および逃げ量は，LMBGシステム内最大分布負荷や負荷分布状態および案内精度に著しく影響する。
- (6) 外部荷重の条件にもよるが，本システムでは最適端部形状として，それぞれ逃げ幅は玉径の3倍，逃げ量は玉径の1/250～1/500倍を目安にしたクラウニングを施すようにすると最大分布負荷をある程度の増大で押さえ案内精度を著しく向上できることがわかった。

(服部 敏夫)