

生分解性プラスチックの海洋における分解

北口 博隆

プラスチックは我々の生活に欠かせない素材であるが、廃棄されたプラスチックは、環境中に長期間滞留して様々な問題を引き起こす。海洋においては、ゴーストフィッシングやプラスチックからの化学物質の漏出による海洋生物への影響が懸念されている。このような背景から、生分解性プラスチックの開発が進められており、すでに市場に出回るものも増えている。しかし、生分解性プラスチックの分解性能は、決められた条件における分解性を基準にしており、環境中における生分解の速度はばらつきが大きい。海洋からも生分解性プラスチック分解細菌が分離されているが、海洋では生分解性プラスチックの分解性は比較的 low、数ヶ月から数年の比較的長期間かけて分解すると考えられるため、安易な投棄は避けるべきである。

キーワード : プラスチック汚染, 生分解性プラスチック, 脂肪族ポリエステル, フィールドテスト

海洋におけるプラスチック汚染

ギリシャ語の *plastikos* (形を作ることができるもの) を語源とするプラスチックは、日本工業規格 (JIS) では、「高分子物質を主原料として人工的に有用な形状に形作られた個体」と定義されている。プラスチックは、主な原料が石炭から石油に変わった 1950 年代から工業的に生産されるようになり、今では全世界で年間 1 億 4000 万トン程度、日本では年間 1400 万トン程度生産されている。プラスチックは、市場に出回り始めた頃は代用品というイメージが強かったが、現在ではどんな形にも加工でき、軽くて丈夫といった特性を持つ素材として、我々の生活のあらゆる場面で活用される欠かせない素材となっている。一方、生産されるプラスチック量が増えるにしたがって廃棄される量も莫大となり、廃棄物問題、さらには環境問題の原因のひとつともなっている。現在日本では年間 900 万トン以上のプラスチック類が廃棄されているとされ、こ

これらの多くは燃やされたり土に埋められたりして処理される。しかし、一部は不法に投棄され海へと流出し、また、水産業、マリンレジャーで使用される漁具、漁網、発泡スチロール、釣り糸等の流出や放置も問題となっている。さらに、プラスチックを成形して製品化する前の中間材料であるレジンペレット（多くは直径数ミリ程度の小粒子）が輸送中や保管中に漏出し、広く全世界の海岸や海水中で発見



図1 海岸に散乱するプラスチック

されており、環境中へのプラスチック流出の主な要因のひとつとされている。流出したプラスチックは、軽いものは海洋表面を漂流し、重いものは海底に沈降して堆積する。また、一部は潮目に集積し海岸に漂着・埋没するものもある（図1）。平成12年に環境庁が行った調査では、日本全国の海岸に漂着または廃棄されたプラスチックの総量は年間およそ1～2万トンと推定されている。

プラスチックは天然素材ではなく人為的に合成された物質であり、環境中に流出したプラスチックは物理的作用により微小な碎片にまで崩壊することはあっても、微生物によって分解されている可能性は極めて低い。このため、海洋に流出したプラスチックは長期間環境中に存在することになり、これらのプラスチックが海洋生物や環境に影響を与えていることは疑いようがない。海洋生物に対する影響としては、梱包プラスチックや漁網などの絡みつき、プラスチック片やレジンペレットの体内への取り込み（誤食）等の事例が数多く報告されている。また、近年プラスチックからの化学物質の漏出も問題視されている。プラスチックには可塑剤、安定剤、紫外線吸収剤などの添加剤が多数含まれている上に、他の石油化学物質であるPCB、DDT、DDEなどの有機塩素化合物と親和性があるため、これらの化学物質を吸着しているとも考えられる。海鳥・海産哺乳類、ウミガメ、魚類からプランクトンにいたるまで、様々な生物の体内からプラスチックが検出されており、これらの化学物質が原因となって海洋生物に影響を与えることが懸念されている。

生分解性プラスチック

海洋におけるプラスチック汚染の問題に対する抜本的な対策は、プラスチックを環境中に排出させないことである。このために、マスメディアや企業を通じた広報活動、リサイクルの推進、不法投棄に対する取締り、レジンペレットの漏出防止対策などが検討され、すでに実施されている。しかしながら、プラスチックの排出を全くなくすことは不可能であり、対策のひとつとして環境中で微生物の作用により分解され、最終的には水と二酸化炭素になるプラスチック、すなわち「生分解性プラスチック」の開発が進められている。

生分解性プラスチックの海洋における分解

生分解性プラスチックの代表的なものは、すべて「脂肪族ポリエステル」と呼ばれるもので、ポリ乳酸 (PLA)、ヒドロキシアルカン酸を構成単位とするポリ(3-ヒドロキシ酪酸) (PHB) などのポリヒドロキシアルカン酸 (PHA)、ポリブチレンサクシネート (PBS)、またそれらの原料の共重合体などがある。これらの構造を図 2 に示す。生分解性プラスチックはすでに一部の農林水産業用資材、土木・建設資材、食品包装用のフィルムや容器、釣り具等野外レジャー製品などの分野で利用されている。

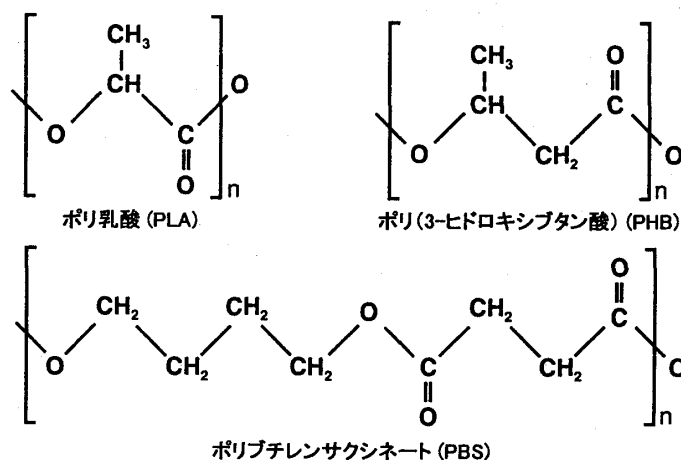


図2 代表的な生分解性プラスチックの構造

生分解性プラスチックは、その原料によって、デンプンなどの再生可能資源を使ったものと石油などの化石資源を使ったものに大別される。特に前者は、循環型社会への移行にマッチした新素材として需要が拡大し、生産量も増大してきた。たとえば、トウモロコシやサトウキビなどの植物由来のデンプンから発酵生産される乳酸を原料とする PLA については、2001 年にアメリカで年産 14 万トン規模の大量生産工場が稼動し、日本でも自動車メーカーが PLA 生産とそれを利用した自動車部品の開発を表明するなど、商業生産の段階に入りつつある。生分解性プラスチックは、現在石油系樹脂の 2-3 倍とされる生産コストの削減や物性の改良が進めばさらに多くの分野で使用される可能性を秘めており、分解物が通常物質循環に組み込まれるため環境への負荷を低減し、石油資源の節約や二酸化炭素の排出抑制にもつながるなど期待の大きい素材である。

生分解性プラスチックの環境中での分解

ところで、生分解性プラスチックで言及される分解性能は、自然環境中ではなく温度・湿度等を管理した条件下でテストされた結果を基にしている。国際標準化機構 (International Organization for Standardization, ISO) によって発効された「プラスチック - 水系培養液中の好気的かつ究極的な生分解度の求め方 (ISO 14851)」では、試験体を非馴化活性汚泥あるいは馴化活性汚泥、土壌懸濁液、コンポスト懸濁液で 20-25°C 最大 6 ヶ月処理した際の酸素消費量で評価することとなっている。しかし、自然環境中では温度・湿度・pH・酸素量等の環境条件や微生物の現存量・微生物相が常に変化していることを考慮すると、環境中での分解性についてはフィールドテストのデータを蓄積することが必要である。

フィールドでの分解性については、主に土壌を対象にした研究が進められてきた。これまでに、各県の試験研究所を中心とした大規模なフィールドテストが実施されており、環境中での生分解性は一般に PHA > PBS > PLA で、環境中での各種ポリエステル分解微生物の分布も同様の傾向であることが示されている。また、農耕地などの肥沃な土壌や高温で処理されるコンポストでは分解性が高く、それ以外の土壌や海水中で

は分解性が低いといわれている。

一方、分解機構に関しては、脂肪族ポリエステルは微生物の持つエステラーゼやリパーゼ、プロテアーゼといった酵素による分解を受けること¹⁾、微生物合成により生産される PHA は、生産菌などが持つ PHA 分解酵素により分解されることが知られている。例えば、PHB 分解菌として *Bacillus* 属、*Pseudomonas* 属、*Streptomyces* 属の菌株が報告されている²⁻³⁾。PLA は、フィールドテストでは難生分解性とされ、中～高分子量の PLA を分解する微生物は環境中に広く存在するとはいえないが、高温・高湿度条件では加水分解されて容易に低分子化し、分子量 10,000 以下の低分子量 PLA は微生物分解を受け、最終的に二酸化炭素と水になる⁴⁾。PLA 分解菌としては、*Amycolatopsis* 属の放線菌が報告されている⁵⁻⁶⁾。高分子量の PBS は、リパーゼによる分解をほとんど受けませんが、好熱性の放線菌⁷⁾などが PBS 分解菌として分離されている。

生分解性プラスチックの海洋環境中での分解

一方、海洋環境中から生分解プラスチックを分解する微生物が分離されたという報告も数例ある。相模湾海底に 5 ヶ月浸漬した PHB の表面から、PHB を分散した寒天平板培地上に分解帯（ハロー）を形成する細菌 *Marinobacter* sp. が分離された⁸⁾。この細菌は、PHB あるいは 3-ヒドロキシ酪酸を唯一の炭素源とする培地で培養すると PHB 分解酵素を分泌し、この酵素は PHB を 3-ヒドロキシ酪酸の単量体に分解する。また、東京湾で採水した表面海水から PCL フィルムを分解する *Pseudomonas* sp. 3 株が分離されている⁹⁾。これらの菌株は、寒天平板培地上に生じたコロニーに PCL フィルムを載せるとそれを分解し、PCL を唯一の炭素源とする液体培地で培養すると、培養液中に PCL 分解酵素を分泌する。

筆者の所属する研究室では、デンプンを主原料に発泡性を持たせたプラスチック、釣具として市販されている「生分解性」を謳ったプラスチック、の沿岸環境での生分解性をフィールドテストによって評価することを試みている。その一例を図 3 に示した。デンプン系発泡プラスチックの小片を因島市重井町の浮き棧橋から水深 1 m に浸漬し、約 2 週間毎に重量を測定して重量保持率によって分解性を評価したところ、3 ヶ月後にもほとんど重量は変化せず、

表面の観察において分解の兆候は見られなかった。他のプラスチックについても、数ヶ月という期間ではほとんど分解されないことが示唆されている。

海洋での生分解性プラスチックの分解については、現時点では「海洋でも分解されうるが、速やかに分解されるわけではない」というのが妥当である。

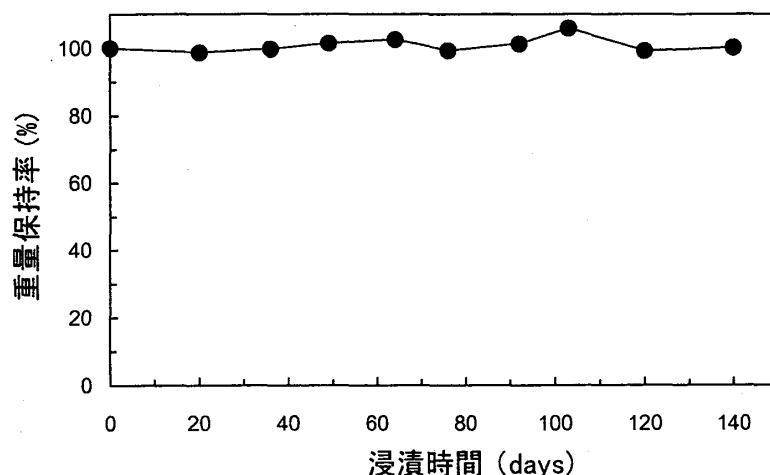


図3 デンプン系発泡プラスチックの海中における重量変化

生分解性プラスチックの海洋における分解

おわりに

一度海洋に流出したプラスチックは長期間環境中に滞留して、潮流や海流などによって世界中に運ばれるため、全世界的な対策が必要とされる問題である。海洋におけるプラスチック汚染に対する抜本的な対策は、プラスチックを環境中に排出させないことである。しかしながら、プラスチックの排出を全くなくすることは不可能であり、生分解性プラスチック、特に植物などの再生可能資源由来のプラスチックを利用することは、環境への負荷を低減させるという意味で重要な対策の1つになるだろう。一方では、分解性が高いといわれるコンポスト処理においても、完全分解にいたるには数ヶ月から数年を要する場合もあることから、たとえ「生分解性」であるといっても安易に投棄することは避けるべきで、適切に処理して環境中への流出は最小限にするべきであろう。生分解性プラスチックについては、ケミカルリサイクル、バイオリサイクル、サーマルリサイクルなど、適切に処理して資源の有効活用を図る方向での研究開発の重要性が増すと考えられる。海洋における生分解性プラスチック分解微生物の分離やその分解機構に関する研究は、バイオリサイクルの分野に貢献するものとして今後の研究の進展が期待される。

文献

- 1) Y. Tokiwa, and T. Suzuki: Hydrolysis of polyesters by lipases. *Nature*, **270**, 76-78 (1977)
- 2) A. Chowdhury: Poly-b-hydroxybuttersaure abbauende bakterien and ezoenzyme. *Arch. Mikrobiol.*, **47**, 167-200 (1963)
- 3) P. Calabia, and Y. Tokiwa: Microbial degradation of poly(D-3-hydroxybutyrate) by a new thermophilic *Streptomyces* isolate. *Biotechnol. Lett.*, **26**, 15-19 (2004)
- 4) J. Lunt: Large-scale production, properties, and commercial applications of polylactic acid polymers. *Polym. Degrad. Stabil.*, **59**, 145-152 (1998)
- 5) H. Pranamuda, and Y. Tokiwa: Polylactide degradation by an *Amycolatopsis* sp. *Appl. Environ. Microbiol.*, **63**, 1637-1640 (1997)
- 6) H. Pranamuda, and Y. Tokiwa: Degradation of poly(L-lactide) by strains belonging to genus *Amycolatopsis*. *Biotechnol. Lett.*, **21**, 901-905 (1999)
- 7) Jarerat, and Y. Tokiwa: Degradation of poly(tetramethylene succinate) by thermophilic actinomycetes. *Biotechnol. Lett.*, **23**, 647-651 (2001)
- 8) K. Kasuya, H. Mitomo, M. Nakahara, A. Akiba, T. Kudo, and Y. Doi: Identification of a marine benthic P(3HB)-degrading bacterium isolate and characterization of its P(3HB) depolymerase. *Biomacromolecules*, **1**, 194-201 (2000)
- 9) Ebisui, K. Tabata, H. Kanehiro, C. Imada, and T. Kobayashi: Degradation of biodegradable Plastics in seawater. *Fish. Eng.*, **40**, 143-149 (2003)

Annu. Rep. Fac. Life Sci. Biotechnol., Fukuyama Univ. (4), 21-26 (2005)

Decomposition of biodegradable plastics in seawater

Hiroataka Kitaguchi

Department of Marine Biotechnology, Faculty of Life Science and Biotechnology,
Fukuyama University, Fukuyama, Hiroshima 729-0292, Japan

Plastics are indispensable to our life. But, if plastics are once left into environment, they remain for a long time and may cause various problems for organisms and environments. It is well known that fish, birds, and marine mammals are strangled by plastic detritus such as packaging and waste fishing gear. Many people are concerned about leakage of harmful chemical substances from plastics. Biodegradable plastics have been expected to be one of the solutions for such problems. Recently, the development of biodegradable plastics has been further advanced and the market of such plastics is increasing. However, the evaluation of their biodegradability in natural environment has not been well established. The degradability of these plastics is now evaluated under the definite condition, but the great diversity of environmental condition alter the biodegradability in nature. In marine environment, decomposition rate of biodegradable plastics probably be lower than cultivated land. Some data suggest that it takes from several months to several years to decompose biodegradable plastics in seawater. So, easy abandonment of plastics, even if indicated as biodegradable ♪, should be avoided

Key words: aliphatic polyester, biodegradable plastics, field test, plastic pollution