

環境にやさしいプラスチックとは

～生分解性プラスチックとバイオマスプラスチック～

東京大学大学院農学生命科学研究科 教授 岩田 忠久

1. はじめに

プラスチックは石油から得られるナフサ（炭素と水素の化合物）を原料として、全世界では年間約4億3,000万トン、日本では約1,100万トンが生産されています。プラスチックは、軽くて・丈夫で・長持ちする性質から、食品包装フィルム、食器・文具・おもちゃ、衣料繊維、電気製品、パソコン・スマートフォン、スポーツ用品、住宅・家具、医療器具、自動車・航空機など様々な分野で使われ、我々の生活には欠かせない素材となっています。しかし現在、海洋マイクロプラスチック問題に代表されるように、環境中で分解されない非生分解性石油合成プラスチックの廃棄物による環境汚染が地球規模の解決すべき重要な課題となっています。その解決策の一つとして、環境中の微生物によって水と二酸化炭素にまで完全に分解される「生分解性プラスチック」の開発が望まれています。さらに、エネルギー使用量の増大に伴う化石資源の枯渇、プラスチック焼却に伴う地球温暖化、二酸化炭素排出削減などの社会的要請から、再生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」の重要性も高まっています。^{注1～注4}

しかし、一般消費者の方々は、従来の「石油合成プラスチック」と「生分解性プラスチック」あるいは「バイオマスプラスチック」の違いを、どの程度理解しておられるのでしょうか。本稿では、「生分解性プラスチック」と「バイオマスプラスチック」の正確な理解と、今後求められる性能について、生分

解性プラスチックを中心に解説します。

2. 生分解性プラスチックとバイオマスプラスチック

環境にやさしいプラスチックの概念のもと、最初に研究開発が進められたのは、土壌、河川水、海水などの環境中で分解する「生分解性プラスチック」です。理想的な生分解性プラスチックとは、「使用中は通常のプラスチックと同様に使用でき、使用後は自然界において微生物が分泌する分解酵素によって水に可溶性低分子化合物にまで分解された後、微生物体内に取り込まれ、代謝により最終的に水と二酸化炭素にまで完全に分解されるプラスチック」と定義されています（次頁図1）。したがって、生分解性プラスチックは、環境保全に貢献するという観点で環境にやさしいプラスチックであり、生分解するという機能に大きな意味があることから、原料が石油であるのか、再生産可能な植物バイオマスであるのかは関係ありません。

一方、「バイオマスプラスチック」とは、再生産可能な資源である植物バイオマスを原料として製造されるプラスチックのことです。植物バイオマスを出発原料としていることから、たとえ廃棄後に焼却されても、発生した二酸化炭素は光合成により再び植物体内に固定化され、地球上の二酸化炭素の総量を変えないというカーボンニュートラルの概念のもと、環境にやさしいプラスチックとして考えられています。したがって、バイオマスプラスチックが、生分解性を有しているか否かは問題ではありません。

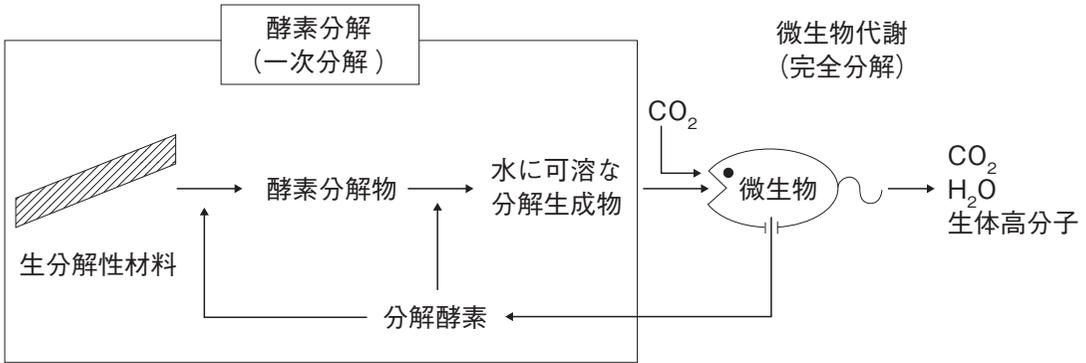
注1 イチからつくるプラスチック、岩田忠久編、農山漁村文化協会

注2 岩田忠久、高性能な生分解性バイオマスプラスチックの開発と今後の課題、日本エネルギー学会100周年記念企画シンポジウム、講演要旨（2023）ダウンロード可

注3 岩田忠久、【生物工学会創立100周年記念特別企画】生物がつくるバイオマスプラスチックの高性能化を目指して、生物工学会誌、100, 9, 506（2022）ダウンロード可

注4 岩田忠久、【総説賞】生分解性プラスチックの現状と展望、マテリアルライフ学会誌、32, 25（2020）ダウンロード可

図 1 生分解性プラスチックの分解機構（酵素分解と微生物代謝）



酵素分解（一次分解）：水不溶性のプラスチックを、酵素により水に可溶性な物質にまで分解

微生物代謝（完全分解）：微生物体内で、二酸化炭素、水、生体高分子にまで完全代謝

表 1 環境にやさしいプラスチック（生分解性プラスチックとバイオマスプラスチック）

← 原料転換 →

	バイオマス資源 バイオマスプラスチック	化石資源 石油合成プラスチック
↑ 機能付与	・ポリ乳酸 (PLLA) ・微生物産生ポリエステル (PHA) ・ポリブチレンサクシネート / アジペート (PBS/PBSA) ・多糖エステル誘導体 (DS<2.5)	・ポリカプロラクトン (PCL) ・ポリブチレンアジペートテレフタレート (PBAT)
↓	・バイオポリエチレン ・バイオポリプロピレン ・バイオ PET ・バイオポリアミド ・多糖エステル誘導体 (DS> 2.5)	・ポリエチレン (PE) ・ポリプロピレン (PP) ・ポリエチレンテレフタレート (PET) ・ポリスチレン (PS)

つまり、生分解性プラスチックとバイオマスプラスチックは、環境にやさしいプラスチックとしてひとくくりにされることが多いですが、決して同じではなく、生分解性という機能に着目しているか、石油からバイオマスへの原料転換に着目しているかで、本来は全く異なるコンセプトのプラスチックです。

特に注意しなければならないことは、バイオマスプラスチックは「植物からつくられたプラスチック」と宣伝されることが多いことから、全て環境中で分解されると誤解されがちです。決してそのようなことはないことを理解しておく必要があります。また、バイオマスプラスチックと生分解性プラスチックを総称して、「バイオプラスチック」と呼ぶこともあります。これが誤解を生む原因でもあるので、今後はこの呼び方を検討する必要があります。

3. 現在開発されているプラスチックの分類

現在研究開発がなされているプラスチックを、出発原料と生分解性の有無の観点で分類すると、表 1 に示すように 4 つのカテゴリーに分類されます。

ポリエチレン (PE)、ポリプロピレン (PP)、ポリエチレンテレフタレート (PET) を始めとする石油合成プラスチックは、軽くて丈夫で長持ちし、決して環境中で分解しない非生分解性石油合成プラスチックです。しかし、石油合成プラスチックの中には、環境中で分解するものも存在します。石油を原料として合成される生分解性プラスチックの代表的なものには、ポリカプロラクトン、芳香環の含まれたポリブチレンアジペートテレフタレートなどが挙げられます。これらは、PE や PP などに匹敵する物性や熱的性質を有すると共に、環境中で分解する生分解性石油合成プラスチックでもあります。

一方で、バイオマスプラスチックは、原料としてデンプンやセルロースなどの多糖類を用いているため、いずれも生分解すると誤解されています。古くからフィルムやたばこのフィルターなど様々な分野で利用されているセルロースのエステル誘導体は、熱可塑性を有する高置換度体 (置換度 =3) では決して生分解性を示しません。また、最近開発が進んでいるバイオマスから作られるエタノールを用いて生産されるバイオ PE やバイオ PET などは、バイオマスから生産されますが、決して環境中で分解しない非生分解性バイオマスプラスチックです。

現在最も研究開発が進んでいる生分解性プラスチック

チックであるポリ乳酸は、トウモロコシやサトウキビから抽出される糖を原料として、乳酸発酵により生合成された乳酸を縮重合により合成したバイオマスプラスチックでもあります。また、糖や植物油を原料として微生物体内で生合成される微生物産生ポリエステル（PHA）も同様に、生分解性プラスチックであると共に、バイオマスプラスチックでもあります。最近、ジオールとジカルボン酸の共重合体であるポリブチレンサクシネートアジペート（PBSA）なども、バイオマスから生産される技術が確立されました。

このように現在のプラスチックは4つのカテゴリーに分類されますが、ポリ乳酸と微生物産生ポリエステルが両方のカテゴリーに属していることから、バイオマスプラスチックと生分解性プラスチックは同じであると誤解されることが多く、それによる弊害も生じており、真の実用化に向けての教育・啓蒙活動が必要です。

4. 生分解性プラスチックの期待される用途と試験法

生分解性プラスチックは「生分解」することに意義があります。生分解性プラスチックの利用用途としては、農林水産用資材、野外レジャー用品など環境中で使用され、全てを回収することが困難な自然環境中で利用される分野と、食品包装用資材や日用品・雑貨類などの分別回収は難しいが、きちんと回収してコンポスト分解させることが望ましい分野の2つが考えられます（表2）。

生分解性試験には、コンポスト分解、土壌分解、水系分解などがあり、現在、国際標準化機構（ISO）により分解環境に応じた生分解性試験法が発行されています。最初に発行されたのは1999年の日本提案による水系における好氣的分解試験法（酸素が存在する環境）であり、2004年には嫌氣的分解試験法についても発行されています。一方、海水分解や深海分解に関しては、海洋マイクロプラスチック問題が取り上げられるようになったこの数年で急速に審議されてきています。その結果、2つの海水・海底土による好氣的生分解試験法（ISO188-30, ISO19679）が発行されました。現在、日本提

案の海洋生分解性試験法を目指して、国のプロジェクトが進められています。

5. 生分解性プラスチックは、深海でも分解することを実証

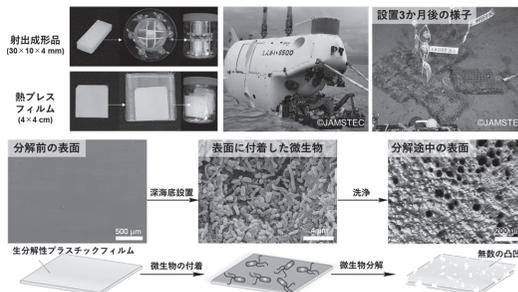
筆者らは、様々な生分解性プラスチック（ポリ乳酸を除く）が、神奈川県三崎沖（水深757 m）、静岡県初島沖（水深855 m）、伊豆小笠原島弧海底火山付近の明神海丘（水深1,292 m）、黒潮続流域の深海平原（水深5,503 m）、日本最東端の南島島沖（水深5,552 m）の全ての深海で、微生物により分解されることを世界で初めて明らかにしました。^{注5}

生分解性プラスチック表面には無数の微生物がびっしりと付着し、時間と共にサンプル表面に粗い凹凸ができて生分解が進行する様子が観察されました（図2）。深海における生分解速度は、水深が深くなるにつれて遅くなるものの、全ての深海底で生分解されることも確認されました。水深約1,000 mの深海底では、生分解性プラスチックで作製したレジ袋は、3週間から2ヶ月間で生分解されることも計算により推定されました。

表2 生分解性プラスチックの期待される用途

分野	用途	
自然環境中で利用される分野	農林水産用資材	多目的フィルム、農業・肥料用の徐放性被覆材、移植用ポット、釣り糸、漁網、ノリ網など
	土木・建設用資材	荒地・砂漠の緑化用保水素材、工事用の保水シート、土のう袋、植生ネットなど
	野外レジャー用品 水処理用資材	ゴルフ、釣り、マリンスポーツなどの使い捨て製品、洗剤、分散剤、洗剤
コンポスト化に有用な分野	食品容器包装資材	生鮮食品用のトレイ、ファーストフードの容器、弁当箱など
	衛生用品	紙おむつ、生理用品など
	日用品、雑貨類	ごみ袋、使い捨てのコップなど

図2 深海における生分解性プラスチックの微生物分解



注5 東京大学・高分子材料科学研究室 HP, 2024.1.26, 生分解性プラスチックが深海でも分解することを実証, 日本語プレスリリース, ダウンロード可

今回、深海から生分解性プラスチックを分解できる新たな分解微生物を多数発見することにも成功しました。さらに、発見した分解微生物は、世界中のさまざまな海底堆積物にも生息していることが明らかになり、分解が実証された生分解性プラスチックは、世界中のいずれの深海でも分解されると考えられました。

本研究成果により、将来の海洋プラスチック汚染の抑制に貢献する優れた素材として、生分解性プラスチックの研究開発の進展が期待されます。

6. 生分解性プラスチックの課題と今後求められること！

ここからは、今後、生分解性プラスチックの普及のために求められることを紹介したいと思います。

①環境分解性の正確な認識

一口に生分解性プラスチックといっても、どのような環境で分解するのかを明確にし、それを一般消費者にわかるようにしなければなりません。現在、日本バイオプラスチック協会（JBPA）^{注6}が生分解性プラスチックの認証ロゴマークを運用しています（図3）。今後は、開発した生分解性プラスチックが実際にどの環境下（コンポスト、活性汚泥、土中、河川水・湖水・海水、深海）で分解するかを正確に把握し、明確に表示することも必要です。なお、バイオマスプラスチックに関しては2種類のロゴマークがありますが、詳細はJBPAと日本有機資源協会^{注7}のHPを参照してください。

図3 「生分解性プラ」マークと「海洋生分解性プラ」マーク（日本バイオプラスチック協会）

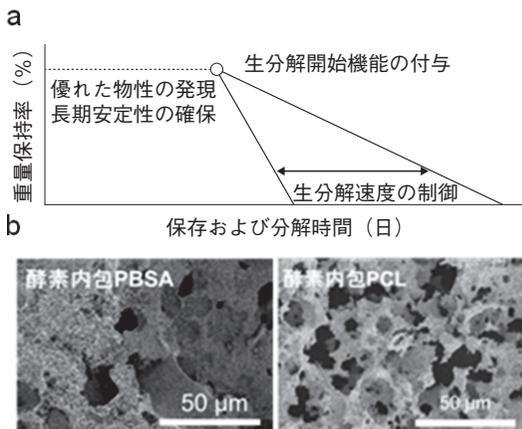


②生分解性開始機能の付与と生分解性速度の制御

生分解性バイオマスプラスチックの真の実用化のためには、使っているときは決して分解が起こらず、使い終わって不要となったとき、あるいは環境中に流出した時に、生分解が始まる機能を付与しなければなりません。さらに、使用目的に応じて自在にその生分解速度がコントロールできることも重要です。

最近筆者らは、生分解性開始機能の付与に成功しました^{注8,9}。生分解性プラスチックは、自らを分解する能力を持った分解酵素と接触しなければ決して分解されることはありません。しかし、分解酵素がどの環境にでも存在するわけではありません。そこで筆者らは、目的とする生分解性プラスチックを分解する酵素を、生分解性プラスチック内に埋め込むことを着想しました。その結果、使っているときは分解せず、環境中に流失し、物理的に崩壊すると、つまりはマイクロプラスチック化すると、分解酵素が水と接触し、スイッチが入ったように分解が開始する「酵素内包生分解性プラスチック」の開発に成功しました（図4）。

図4 生分解性開始機能と酵素内包生分解性プラスチックの分解例



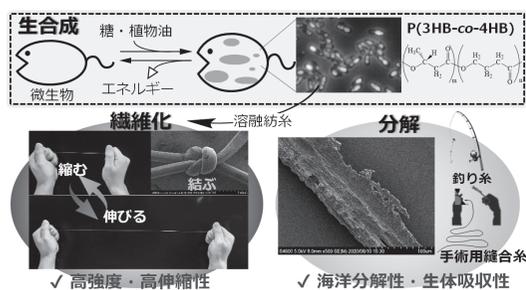
注6 日本バイオプラスチック協会 HP 参照

注7 日本有機資源協会 HP 参照

注8 東京大学農学部 HP：「分解開始スイッチ機能を有する酵素内包生分解性プラスチックの開発」2020.7.30 プレスリリース

注9 岩田忠久, 生分解開始スイッチ・オン! 高分子, 72,508 (2023)

図5 強度と伸縮性を兼ね備えた生分解性繊維と海洋分解性



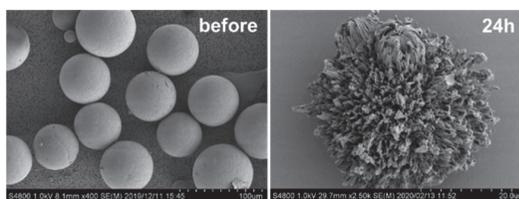
③本当の意味でのマイクロプラスチック問題の解決

現在問題となっているマイクロプラスチックは、数ミリ角のプラスチックです。今後さらに問題となるのは、衣料の洗濯により排出されるミクロンオーダーの繊維くず、化粧品や歯磨き粉などに入っているナノ粒子など、目に見えない本当の意味でのマイクロプラスチックやナノプラスチックです。

プラスチックの主な用途は、フィルム、射出成型品および繊維です。繊維は衣料のみならず、様々な分野で利用されています。生分解性繊維としては、不織布、釣り糸、漁網、衣服への利用が有力です。そのためには目的に応じた強度が求められ、筆者らは微生物産生ポリエステルから新規な溶融紡糸法を開発することにより、世界最高強度や伸び縮みする性質を持つ生分解性繊維の作製に成功しています(図5)。

さらに最近筆者らは、微生物産生ポリエステルから微粒子の開発にも成功するとともに、開発した微粒子が海水中で速やかに分解されることも確認しています(図6)。

図6 生分解性プラスチック微粒子の生分解挙動



今後は、小さくて目に見えない繊維や微粒子を始め、どのようなプラスチックが、どのような形状で使われ、それらが環境中にどのように流出しているかを正確に理解する必要があります。さらに、微粒子化に伴い比表面積は劇的に増加するため、プラスチック表面へ吸着した様々な化学物質、添加剤や分解途中の中間生成物の生体への影響なども含めて、そこから生じる課題を未然に予測し、対策を図ることが必要です。

7. おわりに

地球温暖化や海洋マイクロプラスチック問題がクローズアップされ、石油合成プラスチックがまるで悪者のように扱われ、「バイオマスプラスチック」と「生分解性プラスチック」への期待が高まっています。しかし、プラスチックは我々の生活に必要不可欠な素材であり、今後もうまく利用していかなければなりません。今後は、非可食系バイオマスから生産され、使っているときは優れた機能を発現し、使用后、仮に環境中に流出した場合、速やかに分解が始まる分解開始機能を持ち、分解速度が自在にコントロールされた高性能な生分解性プラスチックの開発がますます求められると考えられます。

令和8年度用 実教出版発行 準教科書

★文部科学省検定済教科書が発行されていない科目につきまして、弊社が独自に編修・発行しました。

生活産業基礎

B5判 / 176ページ / 定価 1,000円 (税込)

栄養

B5判 / 160ページ / 定価 1,450円 (税込)

リビングデザイン

B5判 / 144ページ / 定価 1,540円 (税込)
※「住生活デザイン」でもご利用いただけます。

ファッション造形

B5判 / 192ページ / 定価 1,650円 (税込)

生活と福祉

B5判 / 192ページ / 定価 1,500円 (税込)

●生活と福祉学習ノート

B5判 / 64ページ / 定価 680円 (税込)

調理 1

B5判 / 176ページ / 定価 1,430円 (税込)

調理 2

B5判 / 160ページ / 定価 1,320円 (税込)

福祉情報活用

B5判 / 144ページ / 定価 1,650円 (税込)