

生分解性プラスチックの現状と食品産業への展開

岩田 忠久

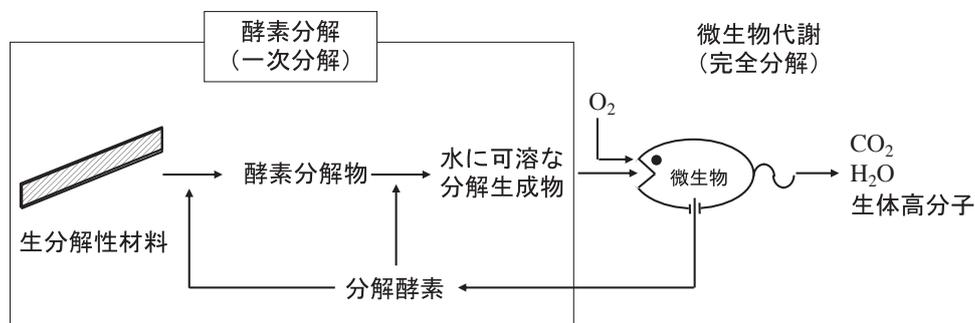
1. はじめに

プラスチックごみの焼却に伴い発生する二酸化炭素による地球温暖化、マイクロプラスチック化による海洋汚染と生態系への影響など、人類の生活を豊かにしてきたプラスチックが引き起こす世界規模の課題に対して、いかに我々が取り組むか、その対応が真剣に迫られている。我が国では、今年の7月に始まったレジ袋の有料化に伴い、プラスチック使用削減に対する国民の意識が急激に高まってきている。環境中で分解しない石油合成プラスチックのレジ袋は有料化されたが、バイオマスプラスチックが25%含まれたレジ袋や100%海洋で分解する海洋生分解性プラスチックはその対象から外されている。しかし、一般消費者は、従来の「石油合成プラスチック」と今回の対象から外されている「バイ

オマスプラスチック」あるいは「生分解性プラスチック」をどの程度正確に理解しているであろうか。本稿では、主に生分解性プラスチックに焦点を当て、その開発現状と食品産業への利用展開を含めた今後の展望について概説する。

2. 生分解性プラスチックとバイオマスプラスチックを正確に理解する

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」であった¹⁾。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関与して低分子化合物、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」と定義されている(図1)。



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

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）

いわた ただひさ：東京大学 大学院農学生命科学研究科
生物材料科学専攻 高分子材料学研究室 教授

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、再生産可能なバイオマスであるのかは問題ではない。

一方、「バイオマスプラスチック」とは、再生産可能資源である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ある。植物バイオマスを出発原料していることから、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バイオマス中に再固定化され、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る。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ない。

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ある。

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ある。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る。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」と呼ぶが、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る。

3. 4つに分けられる現在のプラスチック

現在、研究開発がなされているプラステッ

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る。

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ある。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する。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る。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ある。

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る。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さない。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るが、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ある。今回のバイオマスプラスチックを25%混ぜたレジ袋は、バイオPEなどを混ぜたものであり、地球温暖化防止対策には貢献するが、海洋汚染問題の解決には貢献しないことを理解しておくことが重要である。

現在最も研究開発が進んでいる生分解性プラス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合

により合成したバイオマスプラスチックでもある。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る。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るが、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することから、先に述べたように、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・啓蒙活動が必要である。

4. 生分解性プラスチックに期待される用途と開発状況

生分解性プラスチックは「生分解」することに意義がある。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つが考えられる(表2)。

現在生産がおこなわれている生分解性プ

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

← 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)

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、農薬・肥料用の徐放性被覆材 移植用苗ポット、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 ゴルフ、釣り、マリンスポーツなどの使い捨て製品 水処理用資材 沈殿材、分散材、洗剤
コンポスト化に有用な分野	食品容器包装資材 生鮮食品用のトレー、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

プラスチックは、ポリ乳酸、PHA、PBSAなど、基本的にエステル結合を有する生分解性ポリエステルのみであるといっても過言ではない。PE、PP、ポリ塩化ビニル、PS、PETの5大プラスチックは、様々な強度、熱的性質、透明性などを有し、適材適所で利用されている。しかるに、生分解性プラスチックは、ポリ乳酸 (NatureWorks、Ingeo™、約14万トン)、微生物産生ポリエステル (カネカ、PHBH™、約5,000トン)、ポリブチレンアジペートテレフタレート (BASF、ecoflex®、約5万トン)、ポリブチレンサクシネート/アジペート (三菱ケミカル、BioPBS™、約1万トン) など、数種がわずかに生産されているに過ぎない。生分解性ポリエステル以外では、デンプンを化学的に変性させた修飾デンプンを基本成分としたNovamont社のMater-Biが15万トン生産されているのみであり、様々な物性を有する多種多様な生分解性プラスチックの創製が必要である。

筆者らは、セルロース (β -1,4-グルカン) やミドリムシが合成するパラミロン (β -1,3-グルカン) など、様々な結合様式を有する高分子多糖類をエステル誘導体化することにより、これまでの石油合成プラスチックにはない、優れた熱的性質や物性を有する生分解性バイオマスプラスチックの開発に成功している²⁾。例えば、パラミロントリアセテートは、融点=320℃、ガラス転移点=180℃と、PETよりも高い融点と優れた耐熱性を有する。また、これらの多糖類エステル誘導体は、置換度をコントロール (置換度2.1以下) することにより、生分解性を発現させることも可能である。

このように、ポリエステルのみならず、様々な構造と優れた性能を有する生分解性プラスチックを開発し、多様な使用用途に応じた要求性能を満たさなければならない。

5. 食品産業における利用と意義

生分解性プラスチックは、これまでも既に様々な食品産業で使用されている。その中心となっているのはポリ乳酸である。食品包装フィルム、使い捨てのカップや容器、コンポストのゴミ袋などである (図2)。どこの家庭にでもあるようなものでは、ラップを切るプラスチックの歯、紅茶のティーバッグ、ペットボトルのシュリンクフィルムなどにも使われている。2005年の愛・地球博においては、経済産業省の主導でポリ乳酸を用いた実証試験も行い、会場内で使用した使い捨て食器やリターナブル食器のコンポスト分解とマテリアルリサイクルも行われた。ポリ乳酸以外の生分解性プラスチックでも少しずつ商品開発はされているが、樹脂のそもそもの生産量が少ないため、その利用用途は限られている。

食品産業への生分解性プラスチックの利用については、いろいろな考え方がある。わが国では、ゴミの回収システムが整っているため、一般家庭から出るごみが環境中に流出することは少ない。また、仮に生分解性プラスチックを食品容器包装資材として利用した場合では、わが国にはコンポストの施設が整っていないため、ゴミとしてきちんと回収した場合でも、コンポストによるたい肥化、あるいは、微生物分解により発生するメタンガスなどの利用も行えない。結局は、焼却による熱エネルギー回収に回されることとなる。従って、我が国だけを考えた場合は、回収できずに環境中に流出したときのことを想定して製品開発を行うこととなる。

しかし、世界に目を向けると、全く異なってくる。スウェーデンを始めとする欧州の多くの国にはコンポスト施設が整っており、生分解性プラスチックは集められた生ごみなど

と一緒にたい肥化されるとともに、発生したメタンガスを用いて、公共のバスや自家用車なども走らせており、生分解性プラスチックの本来の機能を活かした物質・エネルギー循環を行っている。一方、世界の多くの国ではゴミの回収システム自体が整備されておらず、プラスチックごみが野積みされている。それが川を經由して海に流れ、毎年800万トンずつのプラスチックゴミが流出していると考えられている。これらの国での生活を考えると、分別回収すること自体が難しく、また、そこにサーマルリサイクルやマテリアルリサイクルなどの再利用も行われにくいことから、その場の環境下で確実に分解する生分解性プラスチックを用いた食品容器包装資材は大きな意味を持つてくる。

環境ゴミ問題は、食品容器包装資材へ生分解性プラスチックを導入しただけでは決して解決しないが、各国における様々な事情を考慮し、多面的かつ多角的に対処法を検討し、少しずつでも導入に向けた努力を行うべきであると考えられる。



図2：ポリ乳酸を用いた食品包装資材の例

6. 環境分解性の正確な理解

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らない。そのためには、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、理解しておくことが必要である。

図3は、ポリ乳酸を始めとする生分解性プラスチックの土中埋設試験の結果である。微

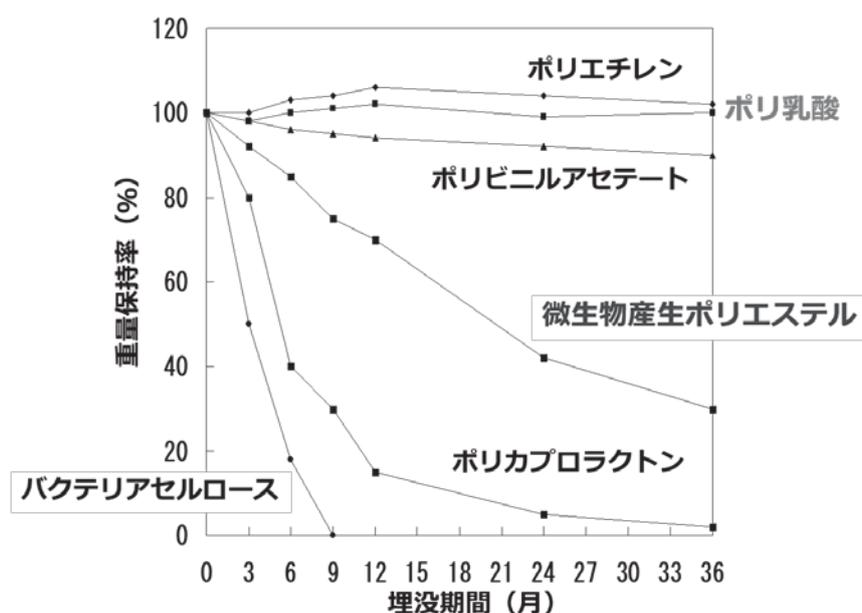


図3：様々なプラスチックの土中埋設試験

生物産生ポリエステルやポリカプロラクトンなどは、セルロースと同様、土中で一定期間後に分解する。一方、食品産業で最も使用されているポリ乳酸は、残念ながら3年たっても全く分解しない。それはポリ乳酸を分解する分解酵素が自然環境中に存在しないからである。ポリ乳酸は、生分解性プラスチックとして位置づけられているが、通常の土壌、川や海では決して分解されることはない。コンポストという温度60度以上、湿度60%以上の高温・多湿の条件下でのみ低分子化合物の乳酸にまで加水分解され、さらに分解生成物の乳酸が微生物により完全に二酸化炭素と水にまで分解されるため、コンポスト型生分解性プラスチックとされている。従って、ポリ乳酸を生分解性プラスチックとして商品化する場合は、きちんと回収してコンポストにより処理することが必要である。決して環境中に流出するような状況下では使用してはならない。

図4は、農業用マルチフィルムなどへの利用が行われている微生物産生ポリエステルの環境水を用いたBOD分解試験の結果である。全ての環境水で完全に分解されることは分かったが、興味深いことに、人間の生活の場に近い荒川河川水と山中湖水の方が、東京湾や大洗から採取した海水より2倍以上の速度

で分解していることである。このように、同一サンプルでも環境により分解の速度が異なり、これは存在する分解微生物の数に依存すると考えられる。

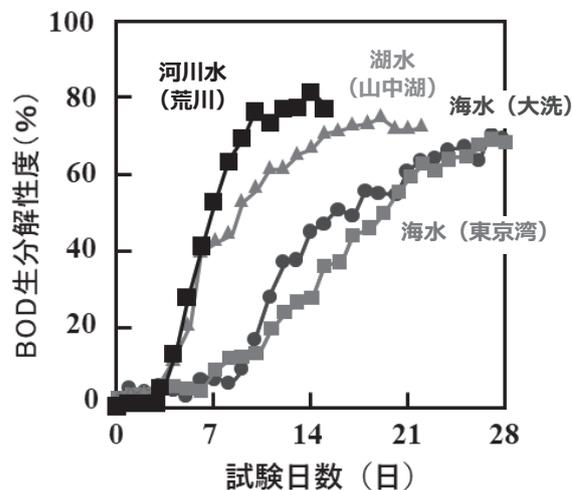


図4：微生物産生ポリエステルの環境水を用いたBOD試験

7. 理想的な生分解性プラスチックを目指して

生分解性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、生分解が始まる機能を付与しなければならない(図5)。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ある。

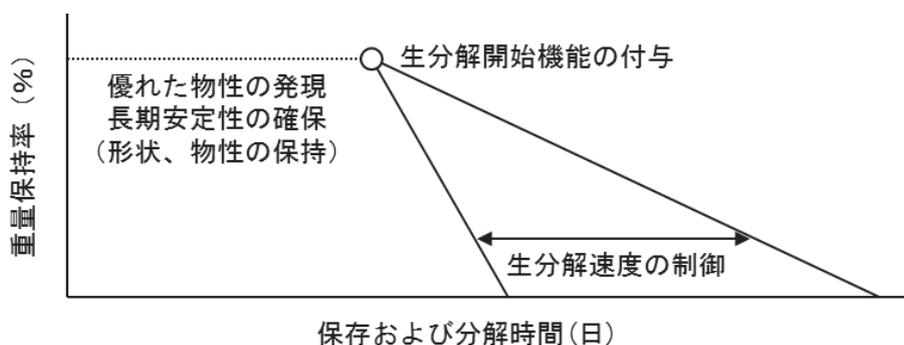


図5：生分解性プラスチックにおける分解開始スイッチ機能と分解速度制御の概念図

筆者はこれまで生分解速度をコントロールする因子の解明を行い、材料中の結晶の量や大きさ、分子鎖の構造が生分解速度に重要な寄与を及ぼすことを解明している^{3,4)}。

さらに最近、生分解性開始機能の付与にも成功した。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ない。しかし、分解酵素がどの環境にでも存在するわけではない。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た。

先の述べたように、ポリ乳酸は通常の土壌、川や海では決して分解されることはない。それはポリ乳酸を分解する分解酵素が自然環境中に存在しないからである。そこで筆者らは、本来はたんぱく質のアラニン分解する酵素であるが、ポリ乳酸を分解することもできるProteinase-Kを用いて研究を行った^{5,6)}。しかし酵素は一般に熱に弱いことから、このままの形ではポリ乳酸と熔融混練は不可能である。そこで、Proteinase-Kを多孔質ゲルに固定化し、200℃での熔融混練にも耐えられる耐熱性固定化酵素とした後、ポリ乳酸と熱混

練し、酵素内包ポリ乳酸の作製を行った(図6)。この高耐熱性固体化酵素内包ポリ乳酸フィルムは、使用中は分解を生じないが、環境中に流出し、物理的に崩壊によりマイクロプラスチック化すると、プラスチック内部に埋め込まれていた酵素がまわりの水と接触し、酵素が活性を復活させ、ポリ乳酸を分解するというメカニズムである。

今回開発した分解酵素の耐熱化と酵素内包生分解性プラスチックの作製は、全ての生分解性プラスチックとそれを分解する分解酵素に応用可能であり、生分解性プラスチックの真の実用化に大きく貢献するものと期待される。

8. おわりに

生分解性プラスチックは生分解することに大きな意味があることから、長期安定性が必要とされる家電や車の部材などに利用展開することは想定できない。本稿でも述べた通り、生分解性の特徴を最大限に利用できる、農林水産資材、レジャー用品、食品容器包装資材、日用雑貨品などに利用されることが望まれる。筆者は生産量や用途を考えると、現在の石油

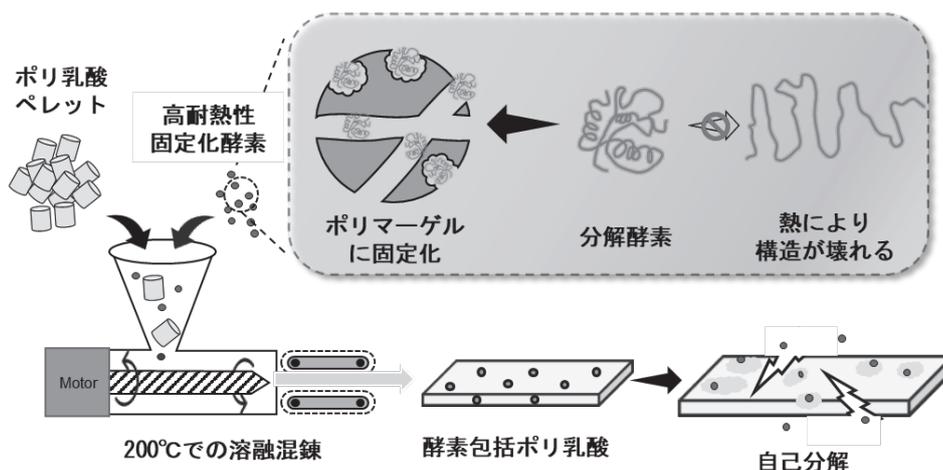


図6：高耐熱性固定化酵素および酵素内包生分解性プラスチックの作製模式図

合成プラスチックの20～30%ぐらいが生分解性プラスチックに置き換わると、現在の海洋プラスチックごみ問題をはじめ、多くの課題が解決する一助となると考えている。プラスチックは使っている間に分解が始まっては困る。生分解性プラスチックの真の実用化には、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ものであることが必要である。さらに、可能であれば、再生産可能なバイオマスから生産されていることが望ましく、高性能な生分解性バイオマスプラスチックの開発が期待される。

参考文献

- 1) 岩田忠久, 繊維学会誌, 10, 532 (2019) .
- 2) 岩田忠久, 応用糖質科学, 8, 110 (2018) .
- 3) 岩田忠久, 日本結晶学会, 55, 188, (2013) .
- 4) 岩田忠久, プラスチックエージ, 12, 45 (2018) .
- 5) Q. Huang, M. Hiyama, T. Kabe, S. Kimura, and T. Iwata, Biomacromolecules, 21, 3301 (2020) .
- 6) 東京大学大学院農学生命科学研究科HP, 研究成果, 2020.7.30

参考図書

持続可能社会をつくるバイオプラスチック、日本化学会編 (岩田忠久代表編集)、化学同人、2020年5月発刊