

# 生分解性プラスチックの課題と将来展望

2019年4月

経営イノベーション本部

事業戦略グループ 舟橋龍之介

## 1. 廃棄プラスチックによる環境問題

### 1.1 廃棄プラスチックの概況

現在、プラスチックなしに生活している人はほぼいないだろう。1950年時点での世界のプラスチック生産量は200万トン（化学繊維含む）だったが、2015年には3億8000万トンに達した。1950年から2015年までのプラスチック総生産量は78億トン、製造で必要となる添加剤を含めると83億トンになる（図1）。83億トンのプラスチックのうち、現在も製品として使用されているのは25億トンであり、58億トンは使用済みである。使用済プラスチックのうち、埋め立てなどで廃棄されたものが46億トン（79%）、焼却処分されたものが7億トン（12%）、リサイクルされたものは残りの5億トン（9%）である。リサイクル分を加味すると、最終的には49億トンの廃棄プラスチックが生じている。

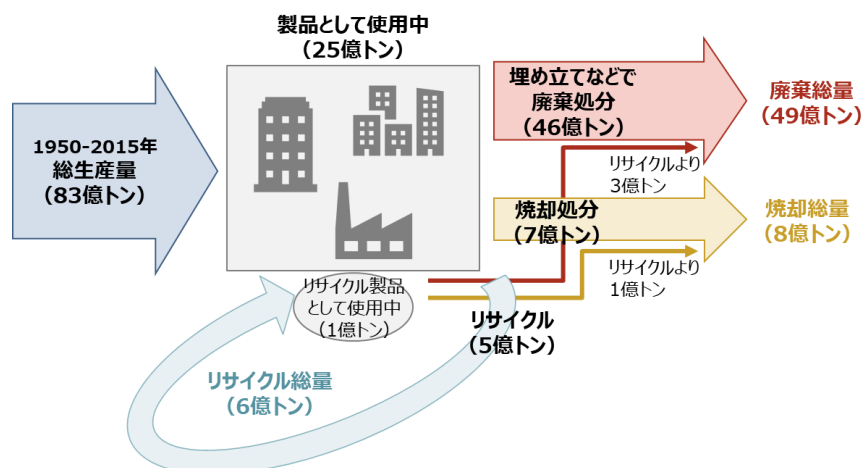
チックが生じている。

日本では行政による廃棄プラスチックの回収が進み、埋め立て地も適切に管理されている。しかし、日本でも河川などからマイクロプラスチック（水の流れや紫外線により細かく粉砕され、粒径5mm以下となったプラスチック）が検出されているのが現状である。ましてや、廃棄プラスチックが野ざらし状態となっており、埋め立て地の管理が不十分である中国や東南アジアなどの国々では、多くのマイクロプラスチックが海洋に流出していると想定される。2010年には、世界で480万～1270万トンのプラスチックが海洋に流出したと推定されている。

### 1.2 マイクロプラスチック問題

現在、一般的に使用されているプラスチックは生分解性（自然界に存在する微生物の働きで最終的

図1 1950年から2015年までに世界で生産されたプラスチックのマテリアルフロー



出所: 参考文献1を基に三菱総合研究所作成

技術レポート

にCO<sub>2</sub>と水に完全に分解される性質)が低いため、人間が焼却処分しない限りは分解されずに自然環境中に残存する。木材などの天然有機材料であれば当該材料を分解できる微生物が自然界に存在するため、最終的にはCO<sub>2</sub>と水に完全に分解される。しかし、プラスチックは人類が生成した化合物であり、分解できる微生物は自然環境中に存在しない。プラスチックは水や紫外線により細かく粉碎されるが、自然環境では分解されずに微細化だけが進行し、回収が困難になってしまうことがマイクロプラスチック問題の本質である。

昨今のニュースでは、目視で認識可能なミリメートルサイズのマイクロプラスチックが取り上げられている。しかし、注視すべきは目視で認識できない数十μm以下のマイクロプラスチックである。こうした微細なマイクロプラスチックが魚や貝類の体内に摂取・蓄積されることにより、生態系や人体に悪影響を及ぼすことが懸念されている。

2. 生分解性プラスチックのポイント

マイクロプラスチック問題を解決すべく、土壌環境や水環境などの自然環境で生分解されるプラスチック

の研究開発に現在注目が集まっているが、そのポイントを3点紹介する。

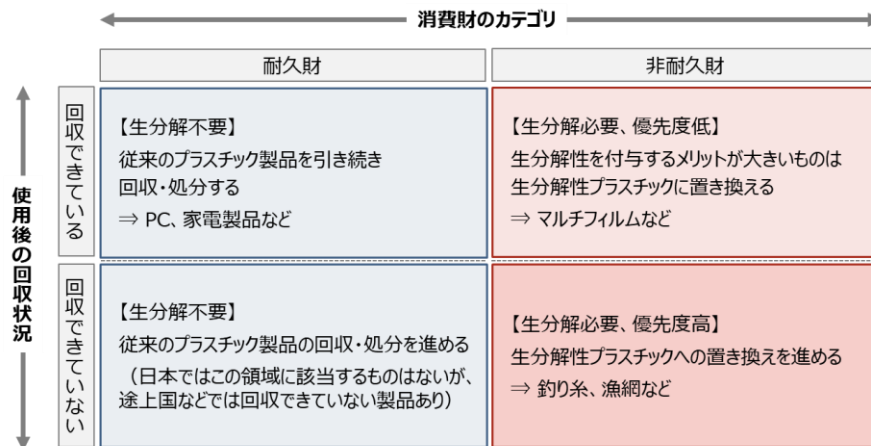
2.1 生分解性を必要としない用途がある

全てのプラスチックを生分解性プラスチックに置き換える必要はない。「消費財のカテゴリ」と「使用後の回収状況」の2軸で、従来のプラスチックと生分解性プラスチックのすみ分けを理解することが肝要である(図2)。

生分解性プラスチックへの置き換えを優先的に進めるべきは、非耐久財で使用後に回収できていない用途である。例えば、釣り糸や漁網などは自然環境への流出が見られるため、生分解性プラスチックへの置き換えを進めることが望ましい。また、非耐久財で現在回収できている用途についても、生分解性を付与するメリットが大きいものは生分解性プラスチックの適用範囲となる。例えば、農業用のマルチフィルムなどが該当する。マルチフィルムに生分解性が付与されれば、畑にすき込むだけで処分可能なため、回収に要する労力を大きく軽減することができる。

一方で耐久財に関しては、プラスチックが分解されることは望ましくないため、従来のプラスチックを

図2 生分解性プラスチックへの置き換えに係る優先度



出所: 三菱総合研究所

技術レポート

引き続き用いることになる。PCや家電製品など現在回収できているものについては、引き続き適切な回収・処分を進めていけばよい。また、日本では基本的に全てのプラスチックが回収されているが、途上国ではプラスチックの回収体制が不十分なことが多い。こうした国に対しては、生分解性を付与したプラスチック製品の開発を支援するのではなく、日本が構築した行政による回収システムを広めていく取り組みが求められるだろう。

2.2 生分解性とバイオマス由来を区別する

現在すでに「生分解性プラスチック」「バイオマスプラスチック」「バイオプラスチック」の研究開発が行われているが、ここであらためて用語を整理しておきたい(図3)。「バイオプラスチック」とは、一般的に「生分解性プラスチック」と「バイオマスプラスチック」の総称で用いられている。「生分解性プラスチック」は、通常のプラスチックと同様の耐久性を持ち、使用後は自然界に存在する微生物の働きで最終的にCO<sub>2</sub>と水にまで完全に分解されるプラスチックと一般的に定義されている。一方の「バイオマスプ

ラスチック」は、再生可能なバイオマス資源を原料として、化学的または生物学的に合成することにより得られるプラスチックと定義されている。

なお、日本国内では複数の協会が「バイオマスプラスチック」をさらに細かく定義しているが、いずれの定義でも、バイオマス由来の炭素と石油由来の炭素が混ざっているプラスチックも「バイオマスプラスチック」に含めている。本コラムでは分かりやすさの観点から、バイオマス由来の炭素を含んでいるプラスチックを「(広義の)バイオマスプラスチック」とし、100%バイオマス由来のプラスチックを「(狭義の)バイオマスプラスチック」と整理した。バイオマス由来の炭素と石油由来の炭素が混ざっているプラスチックは便宜的に「バイオマスベースプラスチック」としている。

ここで注意すべきことが2点ある。1点目は、「生分解性プラスチック」は分解性に係る機能、「バイオマスプラスチック」は原料に着目しているため、「生分解性プラスチック」と「バイオマスプラスチック」は必ずしも一致しないことである。すなわち、バイ

図3 バイオプラスチック、生分解性プラスチック、バイオマスプラスチックの用語の整理



出所: 参考文献5を基に三菱総合研究所作成

## 技術レポート

オマスプラスチックは再生可能資源であるバイオマス为原料としている点に特徴があるため、必ずしも生分解性という機能を有するわけではない。例えば、サトウキビなどの植物から得られたエタノールを基に製造されるバイオPE(ポリエチレン)は、植物由来であるためバイオマスプラスチックに該当するが、生分解性は低い。そのため生分解性プラスチックには該当しない。同様に、生分解性プラスチックは生分解性が高いことに特徴があるため、PVA(ポリビニルアルコール)などの石油由来プラスチックを含んでいる。

2点目は、原則として生分解性プラスチックと従来のプラスチックを混ぜてはいけないことである。バイオマス由来プラスチックと石油由来プラスチックは由来が異なるだけであり、混練しても特段の問題は生じない。しかし、生分解性プラスチックと従来のプラスチックを混練した場合は、生分解性プラスチックが分解される一方で従来のプラスチックは分解されずに残存するため、生分解性の機能が失われることに注意したい。生分解性プラスチック同士の組み合わせでなければ生分解性プラスチックとはならない。




## 2.3 生分解性は環境によって異なる

生分解性を評価する環境は、おおまかにコンポスト(高温多湿)、土壌環境、水環境の3点がある。一口に「生分解性が高い」といっても、どの環境で生分解性を発現するかは生分解性プラスチックの種類によって異なる。

マイクロプラスチック生成で問題となっているのは水環境での生分解性であるが、水環境で分解されるのは生分解性プラスチックの中でもPHBH(ポリヒドロキシブチレート/ヒドロキシヘキサノエート)などのごく一部に限られる。生分解性プラスチックで有名なPLA(ポリ乳酸)はコンポストでの高温多湿な環境では分解されるが、通常の土壌環境や水環境では分解されにくい(図4)。また、バイオPBS(ポリブチレンサクシネート)はコンポストならびに土壌環境では分解されるが、水環境では分解されにくい。

前述したとおり、「プラスチックが生分解される」とは、自然界に存在する微生物の働きでプラスチックがCO<sub>2</sub>と水に完全に分解されることを指す。コンポストと土壌環境と水環境では生息する微生物の種類や密度が異なるため、分解されやすいプラスチックの種類も異なるのである。

図4 各生分解性プラスチックがコンポスト、土壌環境、水環境で発現する生分解性

	PHBH	バイオPBS	PLA
 <b>コンポスト (高温多湿)</b>	分解される	分解される	分解される
 <b>土壌環境</b>	分解される	分解される	分解されにくい
 <b>水環境</b>	分解される	分解されにくい	分解されにくい

出所:参考文献6および7を参考に三菱総合研究所作成

## 技術レポート

### 3. 生分解性プラスチックに求められる機能

生分解性プラスチックの普及に向けて求められる機能を考えるため、まずは従来のプラスチックが普及した背景を考える。プラスチックは加工性と物性の安定性が高いために普及してきた。すなわち、プラスチックは所望の形に加工することが容易で、かつ身の回りで使用する際に求められる強度などの物性を満たしており、さらにはその化学的安定性のために使われるようになった。ここで一段視座を高めて考えてみると、「生分解性を高める」ことは、裏を返せば「物性の安定性を落とす」ことにつながると気づく。プラスチックが普及した一因である「物性の安定性」は「生分解性」とトレードオフの関係にあるのだ。従来のプラスチックは、物性の安定性に優れるが生分解性は低い一方、生分解性プラスチックは物性の安定性が低いことが課題となっている。

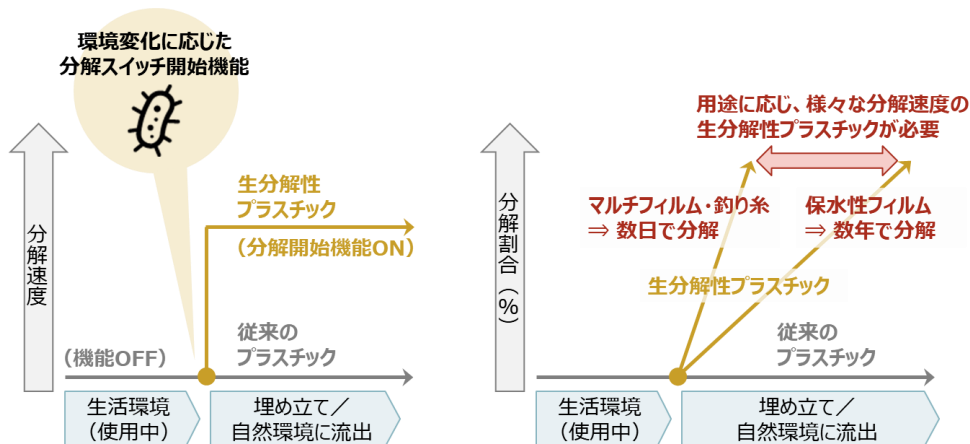
物性の安定性と生分解性を併せ持つプラスチックを開発するには、時間軸を念頭に置く必要がある。すなわち、プラスチックがどのような経路でその一生を終えるのかを想定した上で、プラスチックを

デザインする取り組みが求められる。デザインの方向性としては、分解開始機能を付与、言い換えると、自然環境に流出したタイミングで高い生分解性を発現するための仕掛けづくりをすることが考えられる(図5左)。

例えば、生活環境では分解されず物性が安定的に維持されるが、海洋に流出すると崩壊や分解が促進されるようにプラスチックをあらかじめデザインしておけば、仮に製造者や使用者の意図しないところで海洋にプラスチックが流出したとしても、マイクロプラスチックの生成を抑制できる可能性がある。現に東京大学の高分子材料学研究室では、プラスチック分解酵素をプラスチック内部に埋め込んでおき、海洋でプラスチックが崩壊してプラスチック内部が水分に触れると酵素が働き出す仕掛けづくりを検討しているとのことである。

ただし、分解開始機能がONとなった後は、用途に応じてさまざまな分解速度が求められる(図5右)。農業用のマルチフィルムや釣り糸であれば使用後速やかに分解されることが望ましいが、砂漠の緑化に用いる保水性フィルムは年単位で分解されるようにデザインする必要がある。用途に応じてこれまでにさまざまな種類のプラスチックが開発されて

図5 (左)分解開始機能のイメージ (右)求められる分解速度のイメージ



出所:三菱総合研究所

## 技術レポート

きたが、生分解性プラスチックの種類は現状限られている。では、生分解性プラスチックの種類を増やすためにはどのようなアプローチが考えられるだろうか。

## 4. 生分解性プラスチックの開発に向けて

生分解性プラスチックに限らず、材料開発の効率化に向けては、情報科学の知見が不可欠だ。例えば、東京大学の森林化学研究室では、セルラーゼと呼ばれるセルロース分解酵素の動きのシミュレーションにより、セルロースの分解速度が低下するメカニズムを解明した。これまでに進められてきた、一分子に着目したミクロな視点での研究、また生化学反応的特性に着目したマクロな視点での研究に情報科学の知見を組み合わせることで、プラスチックの構造と生分解速度の関係性を解き明かすことが有効だろう。

プラスチックは、分子鎖の構造、その分子鎖が集積した結晶構造、さらにその結晶が三次元的に集積した高次構造を有する。プラスチックの分子鎖構造、結晶構造、高次構造をどのように変えると分解速度が向上するのかを明らかにすることは、さまざまな種類の生分解性プラスチックを研究開発す

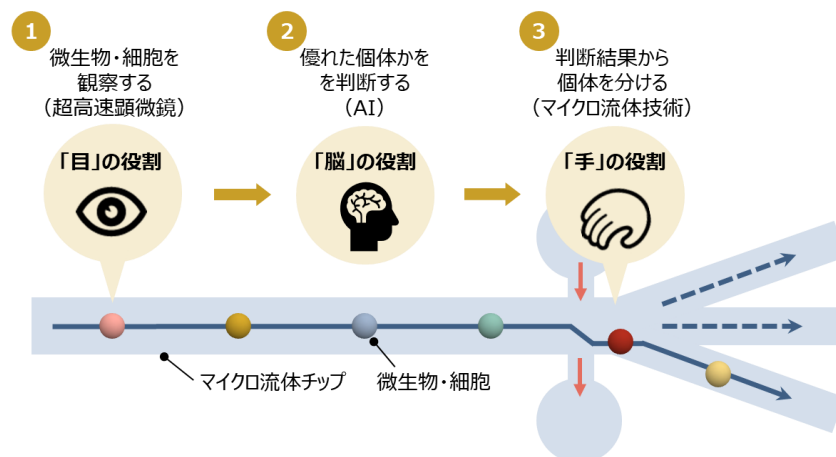
る上で大いに役立つはずだ。従来の材料開発アプローチに情報科学という新たな風を吹き込むことで、生分解性プラスチックの研究開発に弾みがつくことを期待している。

## 5. 持続可能な炭素循環型社会に向けて

生分解性プラスチックは微生物の働きによって最終的にはCO<sub>2</sub>と水に分解される。石油化学により製造された生分解性プラスチックであれば、分解後は石油や天然ガス由来のCO<sub>2</sub>が大気中に放出されることになる。そのため、最終的にはバイオマス(植物、細胞・微生物)由来の生分解性プラスチックを研究開発する取り組みが求められる。最後に、取り組みの方向性の一つの事例として、革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「セレンディピティの計画的創出」(合田PM)で開発された「細胞検索エンジン」を紹介したい。これは、紫外線照射などにより多種多様な変異が生じた細胞・微生物集団から、生分解性の高いプラスチック原料を産生する個体を選び出す際に有効となるデバイスである。

「細胞検索エンジン」は、超高速顕微鏡+AI+マイクロ流体技術の3点の技術から構成されている。

図6 細胞検索エンジンのイメージ



出所: 参考文献10を参考に三菱総合研究所作成

## 技術レポート

超高速な顕微鏡(=目の役割)で微生物・細胞を観察し、あらかじめAIで捉えておいた優れた細胞の特徴からデバイスの動作内容を判断し(=脳の役割)、判断結果に基づいて細胞を分ける(=手の役割)ことができる(図6)。同プロジェクトでは、微細藻類であるヘマトコッカス細胞中に含まれるアスタキサンチンの分子含有量を1細胞レベルで短時間に定量できることを実証している。生分解性の高い構造を特定できれば、「細胞検索エンジン」を用いることで、その構造を有するプラスチック原料などを産生する細胞・微生物を選び出すことができるようになるだろう。

思い返してみると、1980年代には現在と同じようにプラスチックのごみ処理問題が提起され、多くの生分解性プラスチックが開発された。また、2005年の愛・地球博では、生分解性プラスチックを用いて製造されたごみ袋やリサイクル食器などが経済産業省主導で導入された。日本は当該分野において基礎と応用の両面で世界をリードしている。しかし、ここで一歩立ち止まり、研究開発の戦略を振り返ることも必要であるように感じている。生分解性プラスチックの中ではポリ乳酸が最も有名であるが、想定している用途ではポリ乳酸が適切なのか。立地が限られている日本においてコンポストの普及がどこまで進むのか。炭素繊維の例からも分かるように、新規材料の開発は容易ではなく、長期的な取り組みが求められる。さまざまなシナリオを事前に検討しておくことで、将来起こり得るさまざまな変化に対して柔軟に対応する構えを持つことが必要であろう。

## 6. 参考文献

- 1) R. Geyer *et al.* “Production, use, and fate of all plastics ever made” (閲覧日:2019.4.2)  
<http://advances.sciencemag.org/content/3/7/e1700782.full>
- 2) J. R. Jambeck *et al.* “Plastic waste inputs from land into the ocean” (閲覧日:2019.4.2)  
<http://science.sciencemag.org/content/347/6223/768>
- 3) 東京理科大学、愛媛大学 “全国の河川における深刻なマイクロプラスチック汚染の実態を解明” (閲覧日:2019.4.2)  
<https://www.tus.ac.jp/today/201810310005.pdf>
- 4) グリーンジャパン “グリーンプラ” (閲覧日:2019.4.2)  
<http://www.greenjapan.co.jp/seibunkaiplastic.htm>
- 5) 日本バイオプラスチック協会 “バイオプラスチック概況” (閲覧日:2019.4.2)  
<http://www.env.go.jp/council/03recycle/y0312-02/y031202-5r.pdf>
- 6) カネカ “カネカ生分解性ポリマー-PHBHの開発” (閲覧日:2019.4.2)  
<http://www.env.go.jp/council/03recycle/y0312-02/y031202-6r.pdf>
- 7) PTT MCC Biochem “BioPBS” (閲覧日:2019.4.2)  
[http://www.pttmcc.com/new/download/BioPBS\\_FD72PM\\_and\\_FD72PB\\_Technical\\_Data\\_Sheet\\_for\\_Injection\\_Molding.pdf](http://www.pttmcc.com/new/download/BioPBS_FD72PM_and_FD72PB_Technical_Data_Sheet_for_Injection_Molding.pdf)
- 8) SMBCマネジメント+ “生分解性プラスチック 河川や海に流出したら消えてなくなるプラスチック” (閲覧日:2019.4.2)  
<http://www.fp.a.u-tokyo.ac.jp/lab/polymer/common/pdf/2019/20190204SMBC.pdf>
- 9) 東京大学 “分子を大きくして渋滞解消: 3億個の分子を動かしてセルロースの酵素分解メカニズムを解明” (閲覧日:2019.4.2)

## 技術レポート

[https://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/topics\\_20190307-1.html](https://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/topics_20190307-1.html)

- 10) N. Nitta *et al.* “Intelligent Image-Activated Cell Sorting” (閲覧日: 2019.4.2)

[https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674\(18\)31044-4](https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674(18)31044-4)

- 11) K. Hiramatsu *et al.* “High-throughput label-free molecular fingerprinting flow cytometry” (閲覧日: 2019.4.2)

<http://advances.sciencemag.org/content/5/1/eaau0241>