

生分解性プラスチックを実用化 多様な環境下での循環に挑む

プラスチックは高い安定性と耐久性のために、自然界での分解は困難とされてきた。これに対し、微生物を使った「生分解性プラスチック」の実用化に成功したのは、理化学研究所の土肥義治名誉研究員だ。現在年間5000トン生産され、国内だけでなく欧州でも利用が進む。その研究を引き継いだのは、理化学研究所 環境資源科学研究センターの阿部英喜チームリーダーと平石知裕専任研究員だ。実環境での生分解機構を解明し、耐久性を保ちつつ、廃棄された時には自然界の多様な環境下で分解される新素材の開発に挑む。



どい よしはる
土肥 義治

理化学研究所 名誉研究員/
東京工業大学 名誉教授
2017年より未来社会創造事業領域運営会議委員

環境省が新基本計画策定 「入口」も「出口」も変える

日本では年間約1000万トンのプラスチックが製造され、広く使われているが、多くが化石燃料を原料としている。そのため化石燃料の大量消費によって大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度が徐々に増大し、地球環境への影響が懸念されている。また、環境中に出たプラスチックは分解されることなく海や川に残存し、長期間生態系へ影響を及ぼしている。昨今、これらの課題の解決策として「バイオプラスチック」が注目を集めている。

バイオプラスチックは、植物などのバイオマスを原料とする「バイオマスプラスチック」と、微生物により分解される「生分解性プラスチック」の総称である(図1)。バイオマスプラスチックは原料という「入口」に、生分解性プラスチックは生分解性という「出口」に着目した呼び名といえる。バイオマスプラ

クが必ずしも生分解性を持っているわけではなく、同様に生分解性プラスチックであっても、化石燃料由来のプラスチックを含んでいることもある。

このようにプラスチック問題は「入口」も「出口」も変えなければ解決しないことから、国もバイオプラスチック

への転換を後押しする。2019年には環境省が「第4次循環型社会形成推進基本計画」を策定し、30年までに現在のプラスチックの年間生産量の20パーセントに当たる約200万トンのバイオマスプラスチックを日本で生産するとしている。

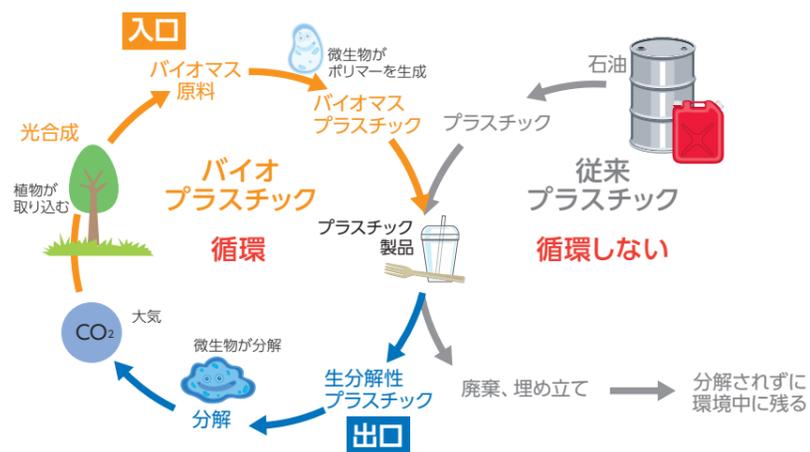
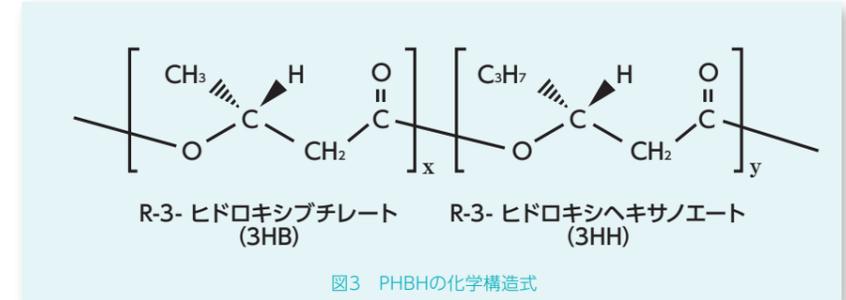


図1 バイオプラスチックの概略
バイオプラスチックにはバイオマスプラスチックと生分解性プラスチックの2種類がある。原料がバイオマスのプラスチックをバイオマスプラスチックといい、使用後に分解することができるプラスチックを生分解性プラスチックという。バイオマスを原料とした生分解性プラスチックを作ることができれば、入口から出口まで循環させることができ、より環境負荷を下げるができる。



きっかけは「忘れられたポリマー」 プラスチックを作る微生物を発見

今後さらに需要が高まると考えられる生分解性プラスチックのパイオニアの一人が、理化学研究所の土肥義治名誉研究員だ。1984年に東京工業大学化学環境工学専攻(当時)の助教授として就任した頃、世間ではすでにプラスチックごみが大きな社会問題となっていた。高分子の研究を環境問題に生かしたいとプラスチックのリサイクルを研究テーマに据えた。海釣りが趣味だったこともあり、日頃から自然界では分解されないプラスチックの釣り糸が海洋生物に害を与えていることに心を痛めていたことも要因の1つだった。

プラスチックのリサイクルを研究し始めた頃、化学繊維として知られるポリエステルを体内で合成する微生物が自然界にいることを知り、土肥さんは衝撃を受けた。「化学合成を専門としてきましたが、バイオマス由来の原料から微生物による生物学的合成ができ、生分解性も有するという入口と出口の両方をカバーするバイオマスプラスチックが実現できるかもしれないと考えました」と振り返る。土肥さんは生分解性プラスチックの研究へと大きくかじを切った。

さらに過去の文献を読み進める中で、土肥さんはPHA(ポリヒドロキシアルカン酸)という立体規則性ポリマーにたどり着いた(図2)。これは1920年代に微生物の中にあることがわかっていた「忘れられたポリマー」だった。これを足掛かりに研究を進め、1987年には硬いプラスチックから軟らかいゴムまで作る微生物を発見した。「新聞でも私たちの研究

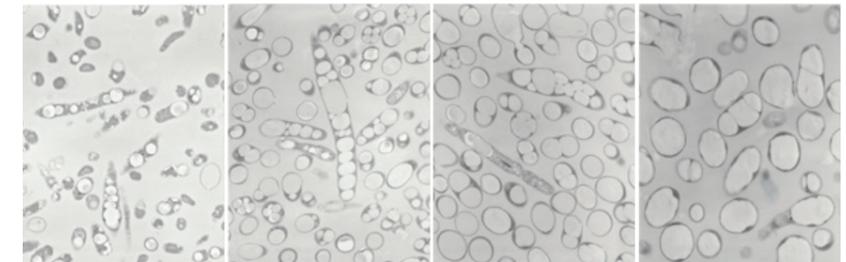


図4 微生物が体内にPHBHを蓄積していく過程を撮影した顕微鏡写真。微生物の細長い体内に、丸い粒のように見えるのがPHBHだ。飢餓状態に備えるために、栄養源としてプラスチックを体内にため込む。(画像提供:カネカ)

が紹介されるようになりました。それまでは学会で発表しても人はまばらで、ほとんど注目されていませんでした」と当時の様子を語る。

25年に及ぶ共同研究 PHBHの量産に成功

土肥さんは化学メーカーのカネカと、糖よりも生産性が高い植物油を原料に、高性能なPHAを作ることを目指して1989年に共同研究を開始した。まずカネカの植物油工場周辺の土壌から、PHAを合成する新規の微生物を探索した。「植物油やマーガリン、魚油などを扱う食品関係の事業部を持つカネカの敷地

なら、植物油を原料とする微生物もいるだろうという読みでした」という土肥さんの予測は的中し、1991年にカネカがPHBH(3-ヒドロキシブチレート-co-3-ヒドロキシヘキサノエート共重合体)を作る新種の微生物を発見した(図3)。

PHBHはBH組成を変えることによって結晶化度が調整でき、成形しやすくなおかつ丈夫というプラスチックに適した性質を持っていることがわかり期待が高まったが、課題もあった。「微生物がポリマーを合成して体内にため込むのは、人間に例えると皮下脂肪をためるようなものです。そのため、菌体重量の30パーセント程度までが限界でした。これでは効率が悪く、実用化は



図5 カネカが開発しているPHBHの製品。今後ますます用途が広がると期待されている。(画像提供:カネカ)

とてもできないと思いました」と土肥さんは語る。理化学研究所に移籍後の1996年には遺伝子組み換え技術を使い、菌体重量の90パーセント近くまでPHBHを蓄積する微生物を作り出すことに成功した(前ページ図4)。

これがブレークスルーとなり、一時中断していたカネカとの共同研究が再開した。09年にはJSTの委託開発事業を利用し、実験室の10万倍の巨大な培養槽で微生物を培養する生産実証実験を行った。高分子技術による化学の力と発酵技術によるバイオテクノロジーの力を結集し、微生物からPHBHのみを分離し精製する工程を確立した。

そして11年にはPHBHの年間生産量1000トンを実現し、14年に実用化を果たした(前ページ図5)。「共同研究を始めてから25年の歳月を要しました。ここに至るまでには多くの困難がありました。カネカの方々最後まで諦めなかったことに心から敬意を表します。現在は年間5000トンまで生産量を拡張しており、数年以内には年間2万トン、最終的には年間10万トンの生産を目指すということです」と今後の展開に期待を寄せる。

土肥さんとカネカが生み出したPHBHは、バイオマス由来の原料から微生物による生物学的合成ができ、生分解性も有するという「入口」と「出口」の両方をカバーするバイオマスプラスチックとして、海外での利用も進んでいる。これらの功績が認められ、19年には一般社団法人バイオインダストリー協会が主催する第3回バイオインダストリー大賞を受賞した。今後は日本でもPHBHで作られた製品を手にする機会が多くなるだろう。

環境により異なる分解性能 新たな循環システム構築へ

現在、土肥さんの研究を引き継いでいるのは、理化学研究所環境資源科学研究センターの阿部英喜チームリーダーが率いるバイオプラスチック研究チームだ。阿部さんらは、植物バイオマスから化学的・生物学的手法を用いて新しい機能性バイオマスポリマーの合成に取り組んでいる。その研究の1つとして、多様な環境に適した生分解性プラスチックの開発に挑んでいるのが、チームメンバーの平石知裕専任研究員だ。個別の環境下で狙った通りに分解できるプラスチックを作ることで、生分解性プラスチックを軸とした新たな循環システムを構築しようというのだ。生分解性プラスチックは、微生物により最終的にはCO₂に完全に分解され、自然に戻る。CO₂は光合成により植物に取り込まれ、その植物を使ってバイオマスプラスチックを作るという循環が生まれる。

そのためにはまず、プラスチックがさまざまな環境でどのように分解されるのかを明らかにする必要がある。一口に「生分解性が高い」と言っても、環境やプラスチックの種類によってその度合いは大きく異なる。特に海水中で高い生分解性を示すプラスチックは、現在のところPHBHなどごく一部しかない(図6)。「生分解性プラスチックは、土壌や河川、海などの自然環境中に存在する微生物が分泌する酵素によって分解されます。どのプラスチックがそれぞれの環境下でどのようなメカニズムで分解されるのかを明らかにで



ひらいし ともひろ
平石 知裕
理化学研究所 環境資源科学研究センター
専任研究員
2019年より未来社会創造事業研究開発代表者

あべ ひでき
阿部 英喜
理化学研究所 環境資源科学研究センター
バイオプラスチック研究チーム
チームリーダー

ければ、環境に適した生分解性を持つプラスチックが設計できます」と平石さんは語る。

酵素との反応に着目 メカニズムを推定

従来は、微生物がプラスチックを分解するときに消費する酸素量(BOD)の測定や核磁気共鳴装置などを使い、残存プラスチックの構造解析を行う。これらの方法では、実際に微生物や酵素が分解する様子を直接観察することはできない。分解酵素が生分解性の鍵を握ると考えた阿部さんや平石さんら

であっても、酵素による分解性能と自然環境での分解性能が必ずしも一致しないこともわかった。

予想されるプラスチックの生分解のプロセスは6段階に分かれている(図7)。はじめにプラスチックの表面に微生物が付着する。微生物が分泌した酵素によってプラスチックが分解される。微生物は分解されてできた生産物を栄養源にして増殖し、コロニーを作る。そこに新たにプラスチックを分解しない菌も付着して、より大きなコロニーができるとともに、コロニーを覆うバイオフィルムを形成するという流れだ。

単にプラスチックと分解酵素の反応メカニズムのみに着目しているだけでは不十分だと、平石さんは強調する。「実際の自然環境において、何が引き金になって生分解性を発現させるのかなどを詳しく分析する必要があります」。

リアルタイム解析の手法確立 漁業用具に適した素材開発も

そこで新たに取り組み始めたのが、生分解のプロセスを従来のように個別に解析するのではなく、自然環境と同じ状態でリアルタイムに観測する手法の開発だ。各プロセスでどのような微生物がどのような酵素で分解反応を行っているのかを網羅的に調べるオミックス解析や、代謝産物が微生物によってどのように利用されているかを

測定する同位体ラベル法などを新たに導入して、全プロセスのリアルタイム計測を進めている。「この測定法で自然環境下での生分解のメカニズムを解明できれば、より適切に生分解性を評価できるようになります。プラスチックの設計にも生かしていきたいです」平石さんは力強く語る。

現在、阿部さんたちは海洋汚染で問題となっている釣り糸や漁網用に、安定性と生分解性を併せ持った生分解性プラスチックの開発も進めている。「使用している間は耐久性が高く、一定時間が経過したり、環境が変化したりした時に一気に生分解が進むという性質が求められます。一方で生分解性を高めることは材料の安定性を下げるトレードオフの関係です」と開発の難しさを説明する。例えば塩分濃度や温度、圧力、酸性度などが変化した時にだけ生分解が始まるといった、何らかのスイッチ機能を持つ生分解性プラスチックを作り出す研究も現在進めている。

生分解性プラスチックの研究がスタートしてから約40年が経とうとしている。土肥さんから始まり、阿部さん、平石さんに受け継がれてきた研究は、世界の潮流も相まって、今大きく花開こうとしている。基礎と応用の両面から進められてきた研究は、今後さまざまな循環型生分解性プラスチックを生み出していこう。低炭素社会の実現に向けて、3人はこれからも着実に歩み続ける。

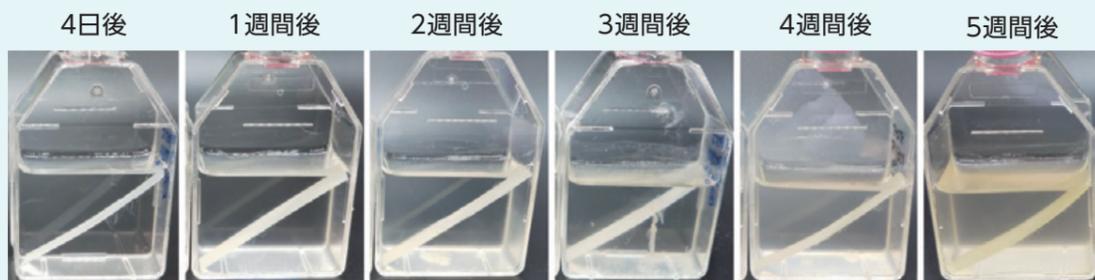


図6 海水環境で高い生分解性を示すPHBH。日を追うごとに微生物によって分解されていく。

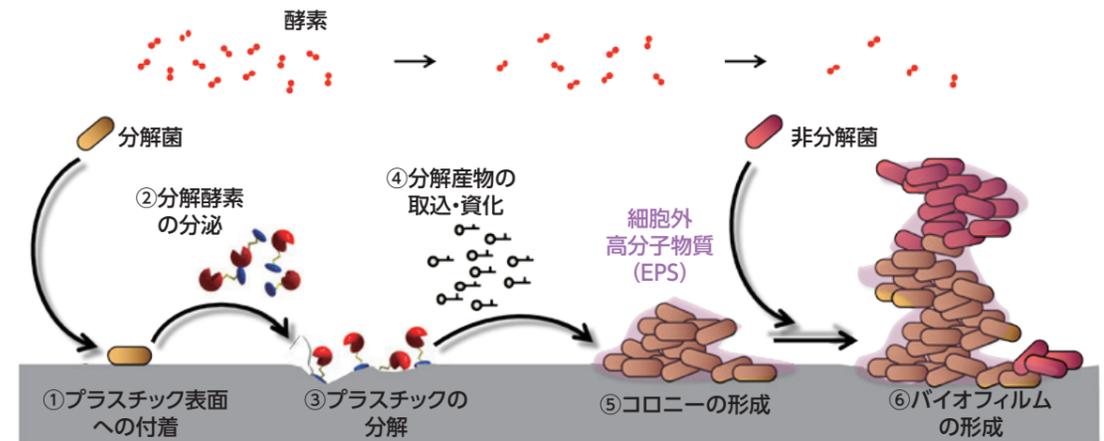


図7 プラスチックの生分解のプロセスは大まかに6つのステップで起こっていると考えられる。①プラスチックの表面に微生物(分解菌)が付着する。②微生物が分解酵素を分泌する。③酵素がプラスチックを分解する。④微生物は分解産物を栄養源として取り込み増殖する。⑤微生物が集めたコロニーを作る。⑥コロニーに他の非分解菌などが付着し、コロニーの表面を覆うバイオフィルムが形成される。