

生分解プラの大量生産 「微生物工場」で成功

土肥理事長とカネカ、24年の苦闘の成果

プラスチックは製品として米国で約100年前に誕生した。日本で日用品として出回ってから半世紀になる。軽くて強く、加工が簡単で使い易いなど、メリットが多い。しかし原料として石油資源を大量に消費することや、自然界に廃棄物として長期間残存し、たくさんの生物に害を及ぼしてしまうことが大きな問題になってきた。これらを解決すると期待されるのが「微生物工場」による生分解性プラスチックの大量生産技術。その裏では微生物を相手に実用化への苦闘の日々が続いた。生分解性プラスチックが、地球生命圏の救世主になる日は来るのだろうか。



カネカ高砂工業所にあるPHBHの実証設備

生分解プラ 年間1,000トン生産に成功

生分解性プラスチックは土や水中の微生物によって分解できる。その製法には、化学合成によるもの、微生物を利用するもの、植物など天然物に由来するものがある。なかでも早くから研究されてきたのが、糖や植物油を微生物に食べさせてつくる方法である。微生物の中には、エネルギー源として体内にプラスチック（ポリエステル）をため込む性質がある

ものが知られていた。

微生物を利用した生分解性プラスチックの研究を、世界に先駆けて推し進めてきたのが、高輝度光科学研究センター（兵庫県佐用郡）の土肥義治理事長だ。土肥さんとともに、植物油脂から微生物がつくる生分解性プラスチックの実用化に取り組んできた化学メーカーのカネカ（大阪市）が大きな成果をあげた。軟らかくて熱にも強い生分解性プラスチック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重合体）を年間1,000トン生産することに世界で初めて成功したのだ。

生分解性プラスチックとしては、トウモロコシやサトウキビなどのデンプンからつくるポリ乳酸がよく知られている。しかし、ポリ乳酸は硬くて熱にも弱いため扱いが難しく、応用範囲も限られていた。PHBHのような柔軟性のある生分

解性プラスチックの大量生産技術が開発されたのは世界でも例がない。

海のプラごみ汚染に 心を痛める

土肥さんが生分解性プラスチックの研究を始めたのは、ちょうど30年前のこと。

「私はもともと化学合成が専門ですが、大学で助教授になったときに、化学産業と地球環境の調和を目指す部門に所属しました。新しい研究テーマを探していて、合成繊維のポリエステルをつくる微生物がいることを知り、とても新鮮に感じました。そこで微生物を使ってプラスチックをつくる研究を始めたのです」ときっかけを話した。

実はもっと個人的な思いもあった。「私の趣味は海釣りで、分解されないプラスチック製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のです。何とかしたいと思いました」。

土肥 義治 どい・よしはる

公益財団法人高輝度光科学研究センター理事長・
東京工業大学名誉教授

1969年、東京工業大学理工学部応用化学科卒業。71年、同大学院理工学研究科修士課程修了。72年、同博士課程中退、同工学部化学工学科助手。84年、同大学資源化学研究所助教授。このころより生分解性ポリエステルの微生物合成の基礎研究を始める。92年、理化学研究所高分子化学研究室主任研究員。2001年東京工業大学大学院総合理工学研究所教授。理化学研究所理事、同社会知創成事業本部長などを経て、2013年6月より現職。



広がるプラスチックの海洋汚染

ペットボトルから食器、おもちゃ、自動車、コンピューター、ボールペンにいたるまでプラスチック製品は年々増加しており、世界全体の生産量は年間2億トンに上る。このうち数百万トンが海に流出していると見られ、海は化学物質の最終到着地になっている。

国連環境計画 (UNEP) によると、プラスチックなど海に投棄されたり流出したりするごみが、毎年100万羽以上の海鳥と10万頭に上る哺乳動物たちの命を奪っている。実際に死んだウミガメやイルカなどの胃から、ビニール袋やプラスチック製のボトルキャップ、発泡スチロールなどが多数発見されている。海中ではこうしたプラスチックが、餌になるクラゲやイカのように見えるために、魚や哺乳動物が飲み込んでしまうと考えられている。

プラスチックは何十年も分解されないが、陸上で風化して微粉末化し海に飛散したり、海中で小さく砕けたりした微細な破片はプランクトンに取り込まれ、その体内からも見つかったり。

またペレット状のプラスチックには、農薬のDDTやPCB (ポリ塩化ビフェニール) などの毒性の強い物質を引き寄せる性質があり、北太平洋などのごみの集積場を中心にプラスチックごみによる複合汚染が進んでいると、世界の海洋環境の研究者が警鐘を鳴らしている。

「研究を進めるに従って人工のプラスチックは合成法によって性質が異なるのに、微生物は100%立体的に規則性のあるものをつくると気づいたのです。これには感動しました」。

微生物を使ってプラスチックをつくらうとしても、有用なものはほとんどできなかった。土肥さんのグループは、1987年に硬いプラスチックから軟らかいゴムまで幅広い樹脂をつくれる微生物を発見した。先進的な研究に多くの企業から声がかかり、共同研究が実現した。その中の1社がカネカで、1990年から共同研究に着手することになった。

その2年後、カネカの植物油工場の敷地の土壌からPHBHをつくる微生物を発見した。これまでの微生物とは違う新種で、生分解性プラスチックの持つ可能性が広がると期待された。

だが、そう簡単な話ではなかった。「微

カネカ高砂工業所にて。写真左から

松本 健 まつもと・けん

カネカGP事業開発部 生産技術グループリーダー

山田 和彦 やまだ・かずひこ

執行役員 同開発部長

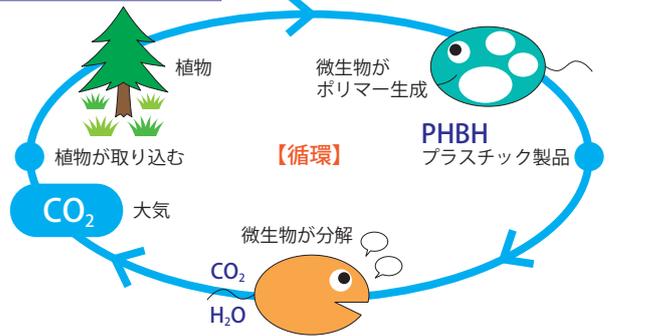
三木 康弘 みき・やすひろ

同総括グループリーダー

藤木 哲也 ふじぎ・てつや

同将来技術グループリーダー

生分解プラスチック



従来のプラスチック



PHBHと従来のプラスチックのライフサイクルの比較

PHBHは植物油脂を原料として微生物が産するプラスチックであるため、使用後は微生物により二酸化炭素と水に分解され、自然へ還る。分解されたときに生じる二酸化炭素は植物体の炭素に由来する。化石燃料の燃焼等によって排出される二酸化炭素とは意味合いが異なり、環境中で循環していると考えられる。一方、従来のプラスチックは化石燃料を原料とし、環境中で分解されない。焼却や埋め立てで廃棄されるため、環境への負荷が大きい。

生物が体の中にプラスチックをため込むのは、人間でいえば脂肪をためるようなものです。肥満であるほど理想的なのです。野生の微生物には制御機構が働くため、体重の30%くらいまでしかプラスチックを蓄えられません。これでは効率が悪く、コストが高くなってしまふ難点がありました」。

土肥さんは理化学研究所に移り、分子生物学の手法も取り入れて研究を進め、1997年に遺伝子組み換えによってPHBHを体重の90%近くまで蓄えることのできる微生物づくりに成功した。

微生物の改良・培養や用途開発で難産

科学の研究ならこれで一件落着となるが、実用化となるとまだまだ越えなければいけない問題がたくさんあった。

カネカで微生物の改良や培養技術を研究している藤木哲也さんがこの研究に参加したのは2000年以降のこと。

「その頃は、微生物からつくったプラスチックは硬質のものが多く、ほかの生分解性プラスチックとの差別化ができないという問題がありました」。



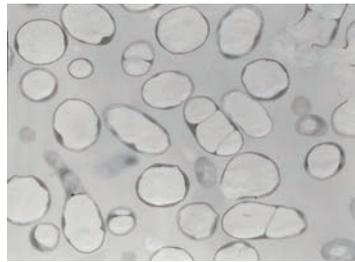
PHBHは炭素数4のヒドロキシブチレートと炭素数6のヒドロキシヘキサノエートという2つの物質の組み合わせでできている。このうちヒドロキシヘキサノエートの割合が高くなると軟らかいPHBHができるため、微生物の遺伝子の改良や、適切な培養条件を懸命に探した。

この間、日用品の製造メーカーと共同で開発を進めるなど、PHBHは着々と事業化への道を進んでいるように見えた。だが、2006年にその日用品メーカーがPHBHの開発から手を引くと、一気に苦境に立たされてしまった。用途開発を担当し、メーカーとやりとりをしていたのが三木康弘さん。

「シンガポールの医薬品の工場で、なるべく安価な生分解性プラスチックをつくらうと研究していて、多額の費用をかけていたこともあり、とても残念でした。役割分担としてはそのメーカーが用途開発を担当していたので、撤退された後は、製造から用途開発までカネカで一手に引き受けました。本来ならば用途開発は、ほかのメーカーからの提案を受けて動き出します。これまで市場になかった製品を投入して使ってもらわなければいけないので、とても大変でした」と苦しい時代を振り返った。

巨大な培養槽で初めてわかったこと

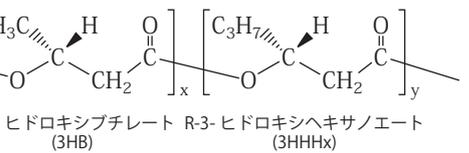
このような危機に見舞われながらも、カネカは粘り強くPHBHの生産研究を続けた。2006年に軟らかいPHBHを体内のほぼすべての場所にため込む微



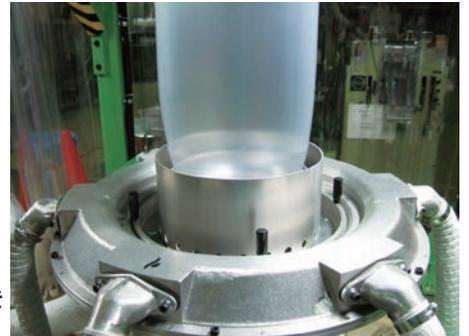
PHBHを産生する微生物

カネカが土壌細菌の一種から育種した、PHBHを高効率で生産する微生物の電子顕微鏡写真。丸い形をしているのが微生物で、白っぽい部分が体内にためこまれたPHBH。この微生物はPHBHを生産する原料として食用ではない植物油脂も使用できるため、将来的に食料用油脂と競合する恐れがない。

PHBHを原料とするシートを製造する様子



PHBHの化学構造式



生物をつくり出すことに成功した。これで弾みがつき、2009年にJSTの委託開発を利用して、PHBHの生産実証実験に着手した。この制度は大学や公的研究機関の研究成果の中で、特に開発リスクの高いものについてJSTが開発費を支援し、実用化を後押しする仕組みだ。

カネカの山田和彦執行役員は、実用化ならではの決断の難しさを語る。「実験室で開発できても、それだけでは実用化にはつながりません。実用化にはある程度大型の試験プラントを建設し、実験するために企業も大きな投資が必要になります。大型化で初めて見えてくる重要なポイントもあるので、それを乗り越えないと実用化はできません」。

この研究は、実験室では金魚鉢ほどの容器ですむ。しかし、実用段階では実験室の規模の10万倍にあたる、100立方メートル以上の巨大な培養槽を使う必要

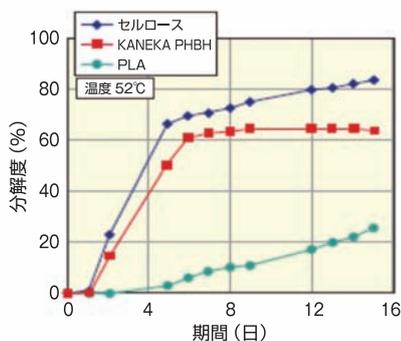
がある。容器が大きくなると当然、温度や濃度などにむらができやすくなるので、生産量や品質にも大きな影響を与える。通気、攪拌、原料の投入方法を工夫して、培養槽の温度や濃度を均一になるように調整する。

「微生物がプラスチックをため込む理由は、飢餓状態に備える栄養源にするためです。私たちが最終的に欲しい品質のPHBHをつくるには、大きな培養槽で微生物を培養しても、実験室と変わらないようにしないとけません。そのコントロールがとても難しいのです」。

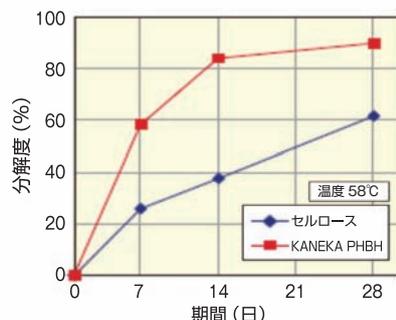
殻はがし、分離、目詰まりの難問と格闘

大型の培養槽でうまくいっても、さらに「精製」という壁がある。培養によって微生物が十分に成長し、体内にたくさんのPHBHをため込んだことが確認されると、熱処理で微生物の動きを止め、精製工程へと移る。微生物の体内はほとんどプラスチックになっていて、外側にたんぱく質や脂肪でできた殻がついている。精製工程はこの殻をはがすことから始まる。

大きく成長しても、微生物の体長は1～2マイクロメートルほどだからとても小さい。物理的にははがせないため、アルカリ性の溶剤で溶かす。精製工程の開発を担当した松本健さんは、「溶かすために、溶液の条件をきつくしすぎると、肝心のPHBHも分解してしまうので、条件の調



嫌気性条件



好気性条件

PHBHの生分解性評価

PHBHは嫌気的条件下、好気的条件下いずれにおいても優れた生分解性を持つ。



開発された農業用マルチフィルム

①マルチフィルムで覆った畑で野菜を栽培。フィルムはトラクターの後ろにつけた作業機で敷設するが、機械作業に十分に耐える強度がある。フィルムには、土中水分の蒸散防止、天候による土壌の環境の急激な変化の緩和、病害や雑草の抑制などの効果がある。②作物収穫後は土にすきこみ、分解させることができるため、フィルムをはがして回収し、廃棄する労力やコストが軽減される。

整は慎重に行いました」と語る。

しかし、それ以上に頭を悩ませたのがPHBHの固まりやすい性質だったという。「培養が終了し、微生物の殻に包まれた状態では軟らかいのですが、精製して純化していくと、次第にくっついてしまうのです。実験室のような小さな装置では問題にならないことも、工業生産レベルの大きな装置では命取りになります。これは実際に装置をつくって運転してみないと見えてこない問題なのです。委託開発で大型装置をつくって、問題点を洗い出せたメリットはとても大きかったのです」。

委託開発の中では、精製中のPHBHが固まったり、配管が目詰まりすることが度々起こっていた。松本さんは長年、同社の新製品の開発や試作などにかかわってきたが、PHBHの精製を軌道に乗せる開発研究は、これまでの中で一番困難だったと話す。

「この精製は、決まった期間に必要な品質の製品を必要量だけつくることを目標に取り組みました。これほど深刻に悩む日々が続いたのは初めてのことで」と苦笑した。

農業フィルム、ボトル、ごみ袋の商業生産に目途

幾度もの苦難を乗り越え、カネカは2014年にPHBHを年間1,000トンまで生産能力を高めることができた。日本では年間約1,000万～1,400万トンのプラスチックが生産されているので、プラスチック全体からすればまだ微々たる

ものだが、微生物利用の生分解性プラスチックの商業生産に目途が付いたのは、世界でも稀なことだ。

委託開発の結果がJSTに成功と認定されたことについて、土肥さんは「ぜひとも成功してほしいと願っていた。嬉しい。カネカという優秀なパートナーにめぐり会えたことが良かった。その時々を経営陣の理解と決断も大きかったです」と目を細める。

カネカは今後、PHBHを使用した製品を提案しながら、普及にも力を入れていく。委託開発では、モデルケースとして畑の畝を覆う農業用マルチフィルムを開発した。PHBHは軟らかい素材のため、トラクターを使ってフィルムを引きながら畑に敷くことができる。収穫後に土の中にすき込む作業も簡単のため、大都市近郊の農家に急速に広がっている。土中の微生物などの分解条件にもよるが、3～6カ月ほどで分解される。最終的には二酸化炭素と水に分解され、ほかの物質は残ら

ないという (p.10左下図)。

また、天然ゴムを混ぜ合わせることで、天然由来の原料を100%使った消しごむをつくることができる。その他、ボトルやトレイ、コンポスト用の生ごみ処理袋など、さまざまな製品を開発している。

「PHBHはパンやお菓子の袋などに利用されているポリオレフィンというプラスチックとよく似ているので、この代替ができます。ヨーロッパでは石油系のポリオレフィンを使用できなくなっているため、生分解性プラスチックへの関心が急速に高まっています。これらの代役としてPHBHを広めていけたらと思っています」。山田さんは新たなビジネスの展開を期待している。

地球の生命環境にも配慮しつつ、人間の生活も便利にする技術が求められる。PHBHは、先駆的な存在として、多くの人々のもとに届けられようとしている。



PHBHを原料とする製品の数々。右下は消しごむ。