

特集2

# CO<sub>2</sub>を資源活用せよ!

## 植物の新たな可能性を引き出す

「温暖化は疑う余地がない」「人間活動が20世紀半ば以降の温暖化の確率が高い」——。国連の「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」が今年9月に公表した第5次報告書はこう断定した。温暖化緩和は人類の喫緊の課題にもなってきた。主な温暖化ガスのCO<sub>2</sub>を吸収し、化石燃料を節約し、新しい資源を生み出すための技術として、植物や微生物の働きに学ぶ動きが急速に高まっている。そこで、JSTで植物を利用したCO<sub>2</sub>資源化を掲げる研究領域での、「バイオ燃料」の原料を目指すイネ科の作物ソルガムの品種改良と、穏やかな環境で植物からバイオプラスチックをつくる「微生物工場」の研究の今を紹介する。

## ● 遺伝子情報を活用して品種改良を高速化

### より大きく育つ植物を

産業革命以降、人類は石炭や石油などの化石燃料を大量に消費してきた結果、地球温暖化を招いてしまった。その影響を緩和するため、化石燃料の消費を抑えるのはもちろんのこと、大気中のCO<sub>2</sub>を有効に利用して、少しでもその濃度を下げることが求められている。

そこで、CO<sub>2</sub>を吸収して育つ植物を原料にしたエネルギーや材料への関心が高まっている。植物原料から生産されるエタノールなどのバイオ燃料なら、生産と利用を繰り返しても、大気中のCO<sub>2</sub>濃度を高めることはないと期待されているのだ。

こうした考えは、「カーボン・ニュートラル」と呼ばれ、地球温暖化対策の1つに数えられている。その効果を発揮するには、バイオ燃料を今以上に普及させな

ければならない。しかし、化石燃料と比べると、石油などの価格が高騰している今もなお、バイオ燃料は安価とはいいがたく、「環境にやさしい」だけではシェアは増えない。市場が求める手ごろな燃料を生産するには、同じ農地面積でも大きく育ち、かつ、燃料に加工しやすい糖類を大量に含む植物が必要となる。

### 経験とカンに頼らず 有用な新品種を生み出す

東京大学大学院農学生命科学研究科の堤伸浩教授を中心に、明治大学、名古屋大学などの研究者らが参加する研究グループは、イネ科の作物のソルガム（和名モロコシ）を使い、バイオ燃料の低価格化を目指した品種改良を進めている。大規模な遺伝情報駆使して、その土地や環境に最適な品種を育てていこうという

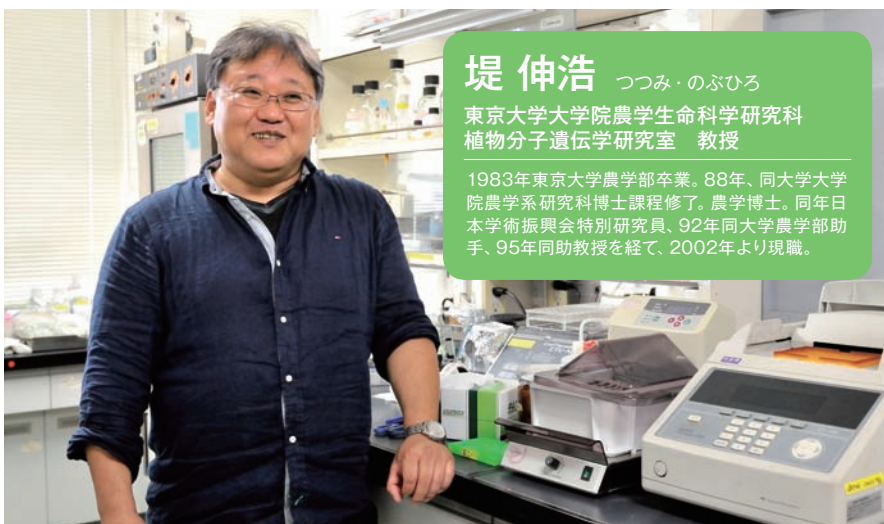


コーリヤンやタカキビなどの名称で雑穀としても知られているソルガム。

「テラーメード育種」だ。より高い生産性を目指すなら、地域の風土に合わせて、それぞれで大きくなる品種を開発する方が有効と考えている。

伝統的な品種改良は、実際に交配を行い、より望ましい特長を持つ株を選び出すことを繰り返して進められる。「これでは新品種を生み出すのに長い年月がかかり、より良い親株を選び出すのに育種家の経験とカンが求められます。私たちは、熟練の力に頼るのではなく、遺伝情報を効果的に活用して、バイオ燃料の原料に適したソルガムを、数理統計的につくろうとしているのです」と堤さんは力説する。

ソルガムは品種により多彩な姿をしており、世界五大穀物の1つとしての食用はもちろんのこと、サトウキビのように糖蜜を絞る原料や牧草といった用途で古くから栽培されている。その一方で、品種改良はあまり進んでなく、さまざまな環境に適応できる遺伝的多様性に富んでいる。つまり、今ある品種をもっと有用に改良できる遺伝子が潜んでいる可能性があるのだ。大型化や糖液の充実など、バイオ燃料の原料として求められる特徴をもたらず遺伝子をうまく組み合わせることができれば、低価格化に大きく貢献できる。



### 堤 伸浩 つつみ・のぶひろ

東京大学大学院農学生命科学研究科  
植物分子遺伝学研究室 教授

1983年東京大学農学部卒業。88年、同大学大学院農学系研究科博士課程修了。農学博士。同年日本学術振興会特別研究員、92年同大学農学部助手、95年同助教授を経て、2002年より現職。



同じ品種のソルガムをベトナムのハノイと中国の蘭州で栽培した結果。ハノイでは人の背丈の倍以上に成長するが、蘭州では株元で枝分かれして背が低くなる。



形質評価では、電子ノギス(右上)やバーコード付き巻き尺(上)で読み取りを自動化し、計測データを瞬時に反映できるようIT化を進めている。IDタグ(右)で過去の履歴もすぐに確認できる。



## 気候風土に合うソルガムを遠隔地でつくり出す

堤さんらのテラーメード育種は、特定の遺伝子に注目することはないという。高糖度や高収量といった性質には、多数の遺伝子がかかわっていて、一筋縄ではいかないためだ。そこで、ソルガムの全ゲノムの中から遺伝情報の局所的な差違(一塩基多型)約4万か所について、それぞれを変数とする数理モデルをつくろうと考えた。交配によって得られた苗の遺伝情報をこのモデルに入力して、育てる前からどんな大きさになるかなどをコンピューターで予測する。その結果から、より大きく、糖度が高くなる可能性を秘めた組み合わせを予測して交配を繰り返していくことができ、品種改良を何段階も効率化できるのだ。

そのために、温暖地のモデルとして福島県、塩害地の代表としてメキシコのシノ

ロワ州ロスモチスを選び、性質が異なる750系統のソルガムを栽培し、成長したところで大きさや糖度などの形質を詳細に調査した。これらの形質情報と遺伝情報、気候などの環境情報を用い、福島とメキシコそれぞれについて数理モデルを構築すれば、交配して得られた株を現地で栽培しなくとも、遺伝型を調べるだけで有望かどうかを評価できるというわけだ。

「亜熱帯気候の沖縄などではソルガムを年3回、栽培することができます。3倍の速さで交配を繰り返せる上、望ましい遺伝子の組み合わせから育てる苗を絞り込めるので、伝統的な品種改良に比べて短期間で欲しい特長を持った品種をつくり出せます」と堤さん。

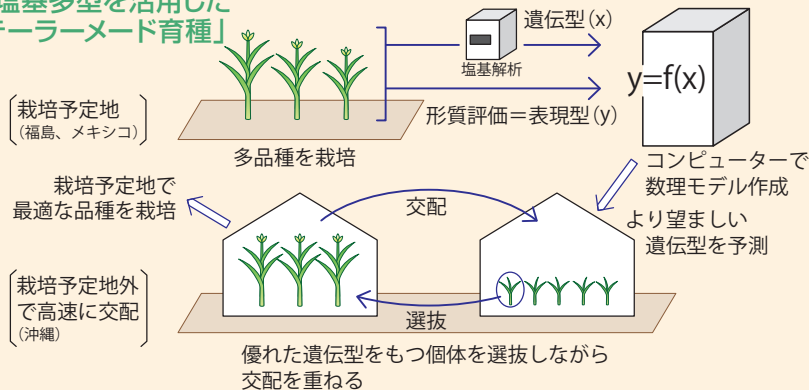
品種改良のための交配は沖縄で実施しているが、遺伝的に同じソルガムであっても、気候風土が変われば育ち方は大きく違ってくる(上図)。そのため、福島とメキシコでも改良された品種を実際に栽培

して、得られた結果から数理モデルの妥当性を確認する。

「福島は日本の平均的な気候風土ですから、ここで大きく成長するソルガムができれば、日本の他の地域でも大きく育つ可能性があります。また、メキシコでの研究から、塩害に強い品種ができれば、今まで作物が育たなかった場所を農地にできます。耕作が可能な土地を広げるだけでなく、バイオ燃料が普及しても、そのための農地確保で食糧生産が脅かされるのを避けたいのです」と将来の戦略も見せている。

全ゲノム解析をしなくても、解析しやすい一部の遺伝情報だけから生産量アップに有用な数理モデルをつくり、その土地に一番適した作物をテラーメードであつらえたい。さらに、日本やメキシコともまったく異なる気候風土へ適応できる品種や、ソルガム以外の作物への応用も広げようと、堤さんの挑戦は果てしなく続く。

### 一塩基多型を活用した「テラーメード育種」



遺伝子型解析は堤さん、数理モデルの作成は東京大学の岩田洋佳准教授と明治大学の矢野健太郎准教授、福島とメキシコ、沖縄での栽培および形質評価は農業ベンチャーの株式会社アースノート。プロジェクトメンバーのどれが欠けても成果は得られない。



沖縄の温室で交配を重ね、優れた品種を高速に育て(上)、メキシコの環境に最適な品種を現地で栽培し評価する(下)。



# ●「微生物工場」でつくる高付加価値バイオプラスチック

## 微生物を改変して 優れた反応の場をつくる

植物原料から生産できるのは、バイオ燃料だけではない。化学合成や微生物の働きで、生物由来のプラスチック（バイオプラスチック）を生産することも可能だ。すでに生分解性のポリ乳酸などが実用化されているが、硬い、柔らかいなどの種類が少なく、用途が限定的だ。今後、普及させるには、さまざまな特性を持つものを開発していかなければならない。

北海道大学大学院工学研究院の田口精一教授は、植物を原料に、高性能バイオプラスチックをつくる微生物工場の研究に取り組んでいる。

これまでポリ乳酸は、微生物に糖類を与えて生産した乳酸を、いったん抽出して、化学合成プロセスにより重合させ、製造してきた。「この時、有害な金属触媒が使われ、高温高压条件が必要なことから、よりマイルドな合成方法が求められていました。微生物体内で重合反応までできれば、それらが解決されるのです」と、微生物の改良を進めている田口さんは説明

する。

例えば乳酸菌のような微生物は、もともと乳酸のモノマー（重合の材料になる単位分子）をつくることができる。しかし、乳酸を重合できる微生物は見つかっていなかった。田口さんは、重合反応でポリヒドロキシアルカン酸（PHA）をつくる微生物をそれまで研究していて、その応用で微生物の体内で乳酸を重合させることに成功し、微生物工場の可能性を示した。そして、用途拡大のため、乳酸だけでなくさまざまな種類のモノマーを含む多様な「多元ポリ乳酸」をつくり、これまでにない物性を持たせようとしている。

## 酵素を進化させ 代謝を最適化する

新奇な反応を起こすには、微生物の体内で化学反応を担う酵素の働きを改変していく必要がある。酵素は、生体内で働く複雑な形の触媒で、その形に応じてさまざまな分子をとらえて化学反応させる。違う分子を反応させるには、その分子に合わせた酵素が必要となるのだ。

田口さんは、昨年CRESTに応募する



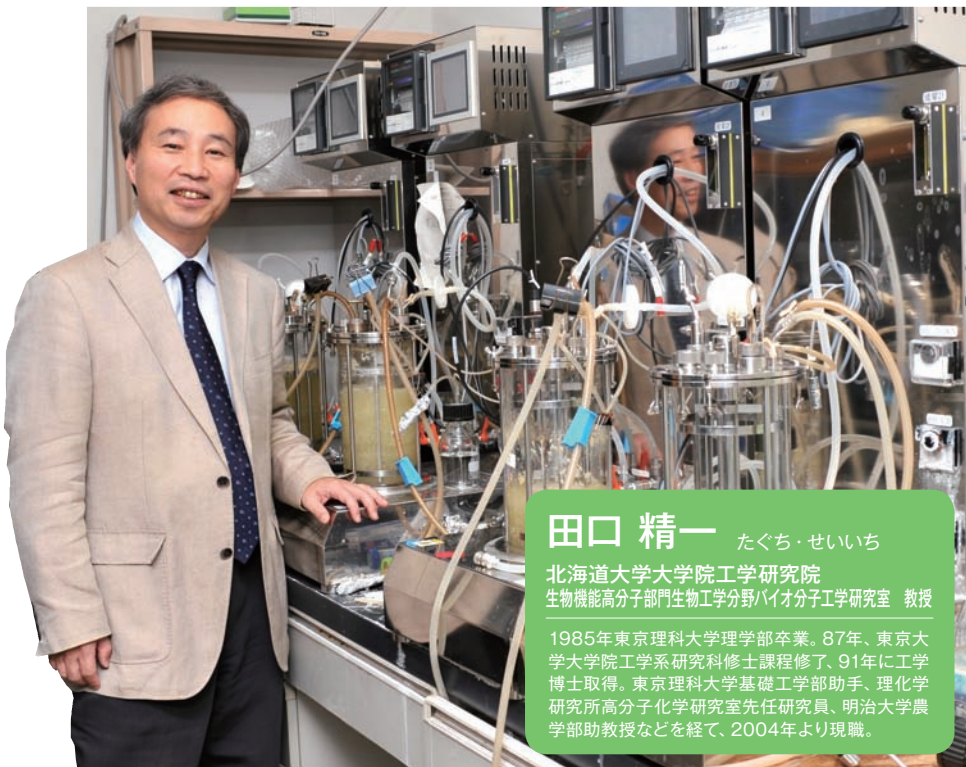
温度や栄養、pH、通気量などを一定に保ちながら微生物を大量に培養する装置を使い、バイオプラスチックをつくり出す微生物の改良を進めている。

ときに、3つのグループで構成された研究体制を構築した。田口さんのグループでは、バイオプラスチック合成の担い手である酵素を改良するため、人為的に微生物の遺伝子にランダムな変異を起こし、得られた多種多様な酵素の中から有用なものを選んでいく「酵素進化学」という手法を用いている。遺伝子に変異が起こって環境に適したものが生き残る進化のメカニズムに似ていることから名付けられた手法だ。

これに対して、東京工業大学大学院総合理工学研究科の柘植丈治准教授のグループは、複数の酵素による連鎖的な化学反応である代謝について、その経路を最適化する「代謝工学」を用いる。

この2つの手法について、田口さんはこう説明する。「野球にたとえると、微生物の体内で化学合成を担う酵素は1人1人の選手で、代謝はチームプレイです。酵素進化学ではエース級のピッチャーを生み出すことを目指していますが、ピッチャー1人が優れていても、野手がエラーばかりしていたら、試合には勝てません。優れた酵素の力を存分に発揮させるには連係プレーの洗練が必要であり、それを実現するのが代謝工学です」。

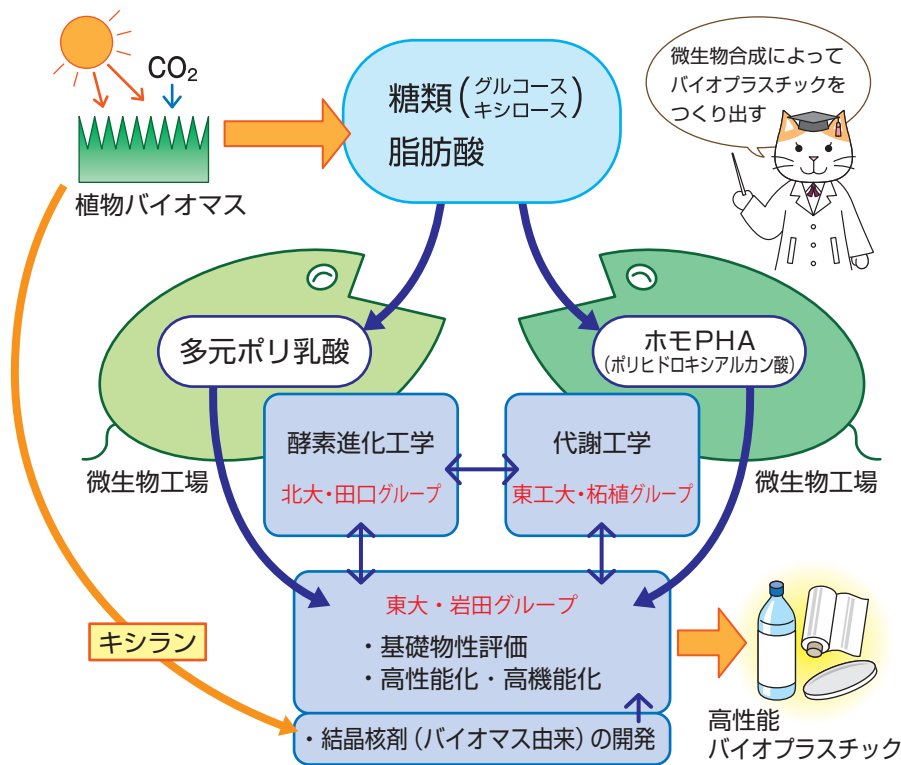
田口グループと柘植グループが開発したバイオプラスチックは、東京大学大学院農学生命科学研究科の岩田忠久教授のグループで、物性を評価するほか、実



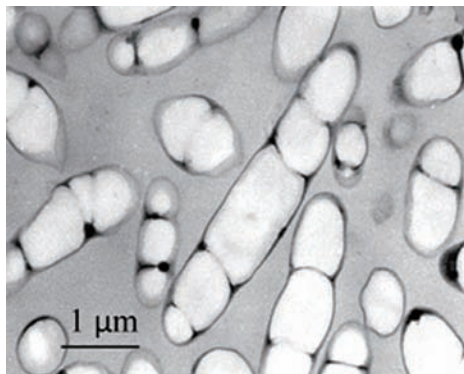
### 田口 精一 たぐち・せいいち

北海道大学大学院工学研究院  
生物機能高分子部門生物工学分野バイオ分子工学研究室 教授

1985年東京理科大学理学部卒業。87年、東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。91年に工学博士取得。東京理科大学基礎工学部助手、理化学研究所高分子化学研究室前任研究員、明治大学農学部助教授などを経て、2004年より現職。



バイオプラスチックの原料となるアブラヤシ (左)、ジャムボススキ (右)。



大量のバイオプラスチックを体内に蓄積した遺伝子組み換え微生物。

用化を見据えて成形加工技術も開発している。成形加工に使う原材料 (結晶核剤など) も植物由来のものを追求している。

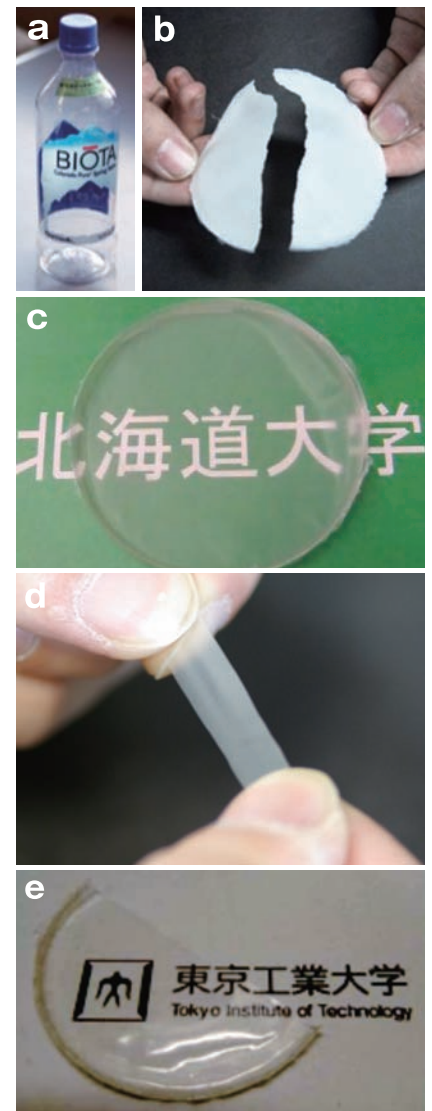
## 医療応用など 新たな価値を求めて

具体的には、どのような物性を持ったバイオプラスチックの開発を目指しているのだろうか。「ポリ乳酸に限れば、耐熱性や耐衝撃性が求められています。今は飲料ボトルなどに使われていて、PETと見た目は変わりませんが、やや硬いため、持つと違和感があります。先に普及しているものがあると、少しの違いで受け入れられにくくなるのです。そこで、既存材料と競合しない新たな領域で用途拡大がで

きないか考えています。高付加価値という点では、医療応用できる材料の開発が望めます」と話す。

バイオプラスチックには生分解性という強みがあり、これは医療応用の可能性を開く重要な特徴といえる。例えば、多孔質の生分解性バイオプラスチックなら、薬物を染み込ませて、患者の体内に埋め込むことにより、生分解とともに、徐々に薬剤を放出する徐放製剤としての応用が見込まれる。分解速度が自在に制御できるようになれば、医療での用途はさらに広がっていくだろう。

また、酵素による反応は、分子の対称性を容易に揃えることができる点でも優れている。田口さんらの方法では、化学



実用生産されているポリ乳酸は硬い (a)。従来のPHAは半透明で硬くてもろい (b)。田口さんらによるPHAを含む多元ポリ乳酸は透明度が高く、やわらかくのび (c,d)、柘植さんらのホモPHAは透明でしなやかだ (e)。さらなる高機能化を目指して、生合成・成形加工技術の開発が進められている。

合成では難しいD体 (右手に相当する光学異性体) 100%の多元ポリ乳酸ができるが、光学的な純度の高さは、安全性と性能の高さにつながる。

地球温暖化対策が求められるようになって、バイオプラスチックは注目を集めているが、「石油代替」や「生分解性」などの環境性能だけで普及させることは難しい。田口さんらは実用化と普及を見越した研究を進めており、すでに柔らかく伸びる材料など有望なものできつつあるという。近い将来、当たり前のように植物由来のバイオプラスチックが使われる時代が来るかもしれない。