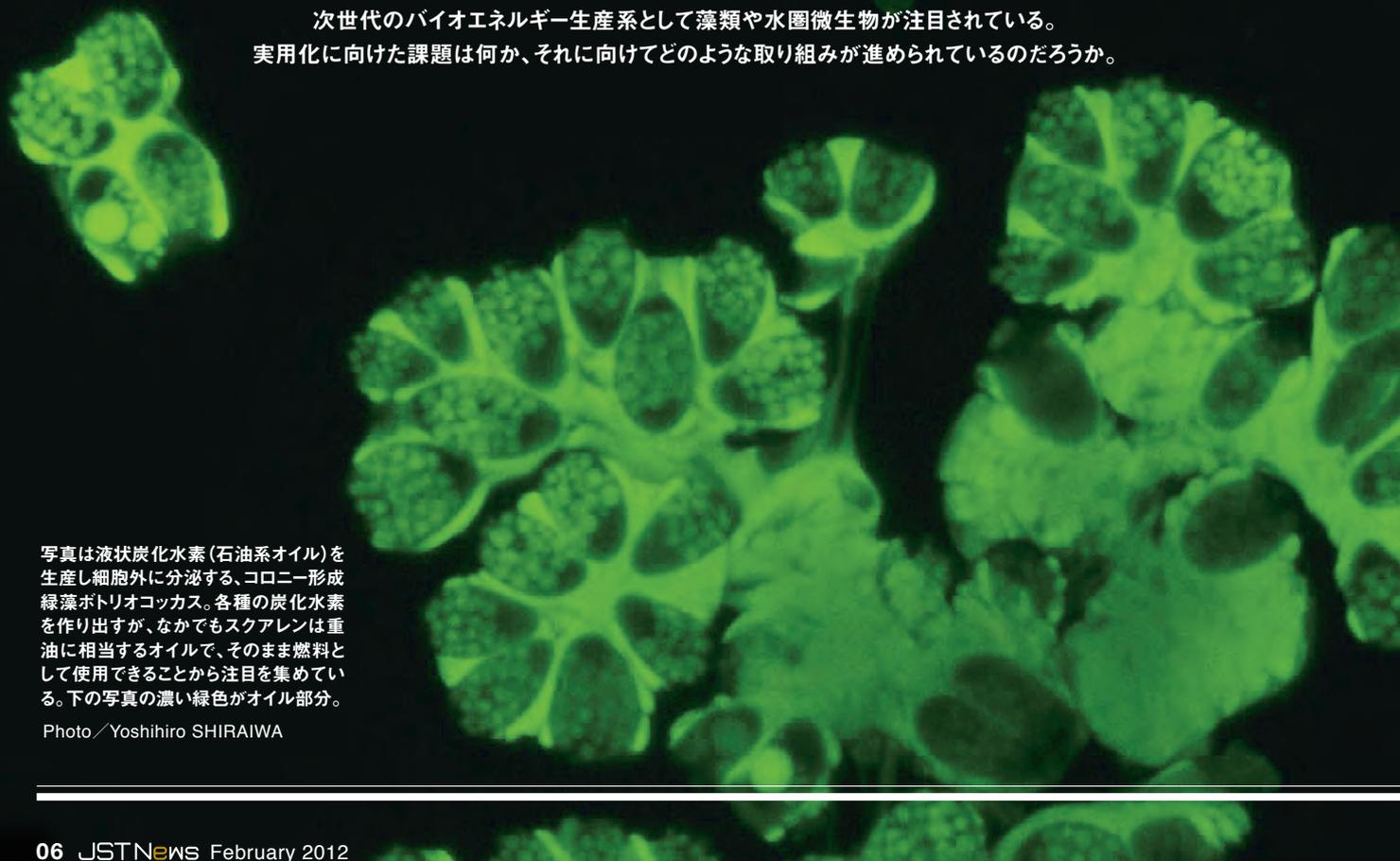




藻類などを利用したエネルギー生産の可能性

バイオエネルギーの！ 明日の礎を構築する！

次世代のバイオエネルギー生産系として藻類や水圏微生物が注目されている。
実用化に向けた課題は何か、それに向けてどのような取り組みが進められているのだろうか。



写真は液状炭化水素（石油系オイル）を生産し細胞外に分泌する、コロニー形成緑藻ポトリオコッカス。各種の炭化水素を作り出すが、なかでもスクアレンは重油に相当するオイルで、そのまま燃料として使用できることから注目を集めている。下の写真の濃い緑色がオイル部分。

Photo / Yoshihiro SHIRAIWA

“CREST”と“さきがけ”のハイブリッドで藻類からバイオエネルギーを

太陽からの光エネルギーを利用して、生物が生産するエネルギー、それがバイオエネルギーだ。現在、太陽光発電、風力発電、地熱発電などとともに、再生可能なエネルギーとして大きな期待を集めている。

最初に研究が盛んになったのは1970年代のことだった。当時「石油は近い将来枯渇する」と予測されたことを受け、アメリカを中心に、国を挙げての研究開発が世界中で行われた。なかでもバイオエネルギーは環境に負荷を与えないクリーンなエネルギーとして注目され、エタノールやメタン、水素などを生産する研究が進められた。

やがて1990年代に入ると、温室効果ガスなどによる地球温暖化問題がにわかにクローズアップされ、藻類による二酸化炭素固定の研究などが日本やヨーロッパで行われはじめた。その一方、陸生の植物から生成されるバイオエタノールやバイオディーゼルが、アメリカを中心に実用化されるが、これらのバイオ燃料は新たな問題を抱えるようになった。

というのも現在実用化されているバイオ燃料は、トウモロコシ、サウキビ、食用油といった可食材料を原料としているからである。そうした材料が食料利用と競合するため、価格が高騰する事態を招いた。

そうしたなか、藻類・水圏微生物によるバイオ燃料生産の可能性に新たな注目が集まるようになった。これらの生物のなかには高い脂質・糖類の蓄積能力や多様な炭水素生産能力、および高い増殖能力をもつものが存在する。そして海での生産を視野に入れることもできる。いうまでもないことだが、食料利用との競合もない。

「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイオエネルギー創成のための基盤技術の創出」は、これらのポテンシャルに着目して2010年にスタートした、JSTの戦略的創造研究推進事業“CREST”と“さきがけ”を一体的に推進する「ハイブリッド研究領域」である。

その概要を、研究総括の松永是さん（東京農工大学学長）は次のように語る。

「研究領域では、近年急速に発展したゲノム、たんぱく質、代謝、細胞の解析技術を中心とした先端科学を活用して、藻類・水圏微生物のもつバイオエネルギーの生産等に有効な生理機能や代謝機構の解明を進めています。また、それらを制御することで、エネルギーの生産効率を向上させることも研究対象としています」

つまり、生物系、化学系、工学系など、多彩で幅広い分野から新たな発想での挑戦的な研究が進められているのだ。先述した、CRESTとさきがけのハイブリッドとなっていることも、この研究領域の大きな特徴だ。

「チームを組んで研究するCRESTと、新進気鋭の個人が研究するさきがけとが密に交流することによって、新たな研究が生まれる可能性が高まります。また、さきがけの研究者がのちに研究室を構える際に、CREST研究者との交流は非常に有益なものとなるでしょう」

石油やバイオエタノールに対抗できるエネルギー生産の実現を目指す

現在、緑藻や珪藻、紅藻、ハプト藻、シアノバクテリア、アーキア（真核生物や真正細菌とは異なる第3の生物界、古細菌）などの藻類・水圏微生物を利用したバイオエネルギー生産の研究が、スタートしている。目標とする生成物はバイオディーゼルの原料となる脂質、炭水化物を中心に、バイオエタノールへの変換を見すえた糖類、水素と多岐に及ぶ。

こうした研究が本格化する一方で、今後、研究成果の実用化に向けてクリアすべき課題は何か、松永さんは次のように考えている。

「まずは高速、高収量でバイオ燃料を生産する必要がありますが、このためには藻類・水圏微生物の光合成効率や代謝速度を上げなければなりません。つまり、二酸化炭素の固定経路やバイオ燃料の合成経路を明らか

にし、その制御因子を解明する必要があるということです。一方、大量培養技術や実海域での増殖も視野に入れた研究も必要です。さらに、高効率なバイオ燃料回収技術の確立が望まれます。これらの取り組みと並行させてコスト計算を行い、現在の石油や植物由来のバイオエタノールに対抗できるエネルギー生産を実現しなければならないのです」

そうした課題のもとで、「海洋性アーキアの代謝特性の強化と融合によるエネルギー生産」「微細緑藻ボトリオコッカス・ブラウニーの炭水素生産・分泌機能の解明と制御」（以上CREST）、「暗所で光合成を行う藻類の創生」「糖代謝ダイナミクス改変によるラン藻バイオプラスチックの増産」（以上さきがけ）など、合わせて20以上におよぶ研究が進められている。

いずれも「基盤技術の創出」をテーマとした研究であり、ただちに実用化されるものではない。しかし、松永さんは壮大な未来図を描いている。

「将来は、大量培養や燃料抽出の技術を開発し、湖沼や海域などの自然を利用したバイオ燃料生産を目指したいと思っています。一方で、石油の起源に微細藻類がどのように関わってきたかを、明らかにすることも必要です。それは、さまざまな藻類の生成物が形成されるメカニズムを究明することによって、おのずと解き明かされるのではないかと期待しています」

そのメカニズムをコントロールできるようになれば、太古の昔、地球で起こっていたこと、つまり、石油の生成を再現することも決して不可能ではなくなるはずだ。

夢の先の夢として、松永さんは語った。「日本海に油田が作れるんですよ」

将来は湖沼や海域を利用した生産を目指したい。



研究総括

松永 是

まつなが いたし

東京工業大学大学院総合理工学研究科、博士課程修了。工学博士。米マイアミ大学研究員、東京農工大学工学部助教授などを経て、1989年から同大学教授。共同研究開発センター長、工学部長などを歴任し、2011年から同大学学長を務める。

● 研究事例

“円石藻”のポテンシャルを引き出せ!



＊ 円石藻

ハプト藻類に属する植物プランクトンで、細胞の表面に炭酸カルシウムの鱗片(円石)をもつ。石灰岩や原油・天然ガスの起源生物の1つと考えられているが、現在の海洋でもしばしば大量に増殖し、そのブルーム(大量発生して水の色が変わって見える現象)は、人工衛星からも確認できるほど(上写真)。なかでもエミリアニア属の「エミリアニア・ハクスレイ」は最大のバイオマスを誇っている。

有機物と無機物の両方を生み出すメカニズムをもつ細胞

研究領域の取り組みのなかから、筑波大学教授の白岩善博さんを研究代表者とする「海洋ハプト藻類のアルケノン合成経路の解明と基盤技術の開発」(CREST)を紹介したい。

円石藻は「アルケノン」という脂質を合成する能力をもっている。白岩さんはこの研究テーマで、アルケノンの合成能を強化するため、遺伝子や代謝経路の解析・改変技術を駆使して、その合成経路を解明することに取り組んでいる。最終的な目標は、海水や海洋を利用するバイオ燃料生産や、原油の代替となる工業原料の生産強化につながる基盤技術を確立することだ。

もともと白岩さんは、クロレラや緑藻のようなモデル生物を使って、光合成のメカニズム、とりわけ二酸化炭素固定のプロセスを研究していた。円石藻に興味をもったきっかけは、二酸化炭素を固定する有機物しか作らないそれまでのモデル生物と異なり、この円石

藻が、同時に無機物である炭酸カルシウム(石灰)の殻も作り出すことを知ったことだった。つまり、1つの細胞が、2つの二酸化炭素固定のメカニズムをもっているということだ。

この代謝のメカニズムに強い興味を抱いた白岩さんは、まず円石藻の培養に着手。試行錯誤の結果、培養にはセレンという元素が必須であることを突き止めた。と同時に円石藻が作り出す炭酸カルシウムの量をコントロールする研究も進め、低温やリン酸欠乏状態で殻の生成が促進されることも発見した。

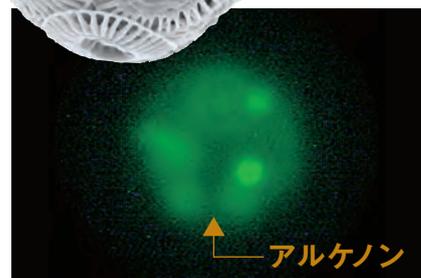
植物学の分野ではなく有機地球化学で注目された円石藻

白岩さんは「1990年代ごろは、円石藻を植物学の分野で研究している人はほとんどいませんでした。しかし、有機地球化学の分野では大きな注目を集めていたのです」と話す。というのも、円石藻が作るアルケノンは非常に長い炭素鎖(炭素数は37~39)を形成するため、細菌による分解を受けにくく、海洋堆積物の中に、ほぼそのままの形で保存される。しかも、アルケノンの不飽和数は合成時の温度によって規定されるため、その不飽和数を測定すれば、堆積物が作られた時代の海洋温度(古海洋温度)も推定できる。

「あるとき、有機地球化学の研究者がデータを取るために円石藻の培養をしたいが、できなくて悩んでいる、という話を聞きました。化学の専門家は藻類の培養経験がないでしょう。当然、セレンが円石藻の培養に欠かせないことも知らない。そこで協力することになった



エミリアニア



のが、現在CRESTでの共同研究者である沢田健さん(現北海道大学講師)です」

筑波大学で同僚となった2人は、円石藻のアルケノン代謝の研究を共同で開始した。白岩さんの持ちこむ生理学的なデータを、沢田さんがガスクロマトグラフィーなどの手法で分析し、メカニズムの解明に取り組んだ。

「代謝の全体像はまだ分かっていません。ただ、有機地球化学の文献を調べてみると、円石藻は中近東の原油のもとになったと書かれていました。中近東の原油は、円石藻の先祖が大量に増殖して石灰岩を作り、同時に原油を作っていたのです。原油が作られるためには、微細藻類の有機物が無酸素状態で熱分解される必要があります。私の研究室で培養した円石藻を使って試すと、300℃で液体炭化水素、400℃で天然ガスができて、それが原油の成分と非常によく似ていました。そこで、この石油の起源生物、円石藻を大量培養することによって、人工的に原油を生産することができるのではないか、という発想をもったわけです」

応用につながる基盤技術の確立を目指します。



白岩善博

しらいわ・よしひろ

東京大学大学院理学系研究科修了。理学博士。新潟大学理学部助手、助教授を経て、1997年から筑波大学大学院生命環境科学研究科教授。現在は研究科長を務める。

微細藻類生成物と熱が作ったものを バイオテクノロジーで生産する

そのとき白岩さんが考えたのは、現状では天然ガスを作り出すのに300℃、400℃の熱分解が必要だが、その方法ではむしろエネルギーのロスになってしまう。「これまで研究してきた藻類の代謝制御技術をもっと磨けば、熱分解処理をしなくても、同じ産物を遺伝子工学的に作っていただけるのではないかと考えた」ということだった。

「バイオテクノロジーを使って、微細藻類の代謝のある部分を止めたり、代謝経路を少し変化させることができれば、原油生成プロセスの一部を微細藻類の体内で再現できるのではないかと考えました。このアイデアが現在のCRESTでの研究につながっています」

自然界では、円石藻の大量発生は決して珍しいことではない。もっとも繁茂したのは約7000万年前の白亜紀だ。その際に円石藻が生成するアルケノンが石油の原料になり、殻が石灰岩になったと考えられている（現に石灰岩の分布と原油の分布はかなり一致する）。円石藻が現在でもブルームが生じた海域では、1日に数百万トン単位で大気中の二酸化炭素を吸収し、固定している。つまり、現状でも二酸化炭素の削減に貢献しながら、石油の原料になるアルケノン

を海底に堆積させているわけだ。「ですから単純に大量培養するだけで、自然に二酸化炭素の削減にはつながるのです。ただ大量培養というのは、生物屋ひとりの力が及ぶものではありません。エンジニアリングが必要不可欠です。ですからCRESTでは、世間に大量培養を促せるような材料（基盤技術）を提供したいと考えています」

一案として構想されているのが、円石藻から「直接ジェット燃料を抽出する」という技術だ。アルケノンは、非常に長い炭素鎖をもつので、そのままではクリーム状になってしまうが、これを半分に短縮するとジェット燃料として使えるオイル原料が出来る、白岩さん

は見立てている。「そういうものが採れば、おのずと大量培養しようとするプロジェクトが起ってくるでしょう」

ほんの一群しかもっていない物質が 石油のもとになっている不思議さ

バイオテクノロジーを使ってアルケノンの炭素鎖を円石藻の体内で短くする方法は、まだ見つかっていない。それどころか、円石



白岩さんの研究室では、世界各地（北極からグレート・バリア・リーフまで）で採取された円石藻が培養され、生育条件の調査も行われている。「よりポテンシャルの高い株を見つけたいのと、将来的には、いろいろな気候に対応できる円石藻を作る基盤技術を確立することも必要だと考えています」

藻への遺伝子導入のシステムすら確立されていないのが現状だ。

「それが可能になれば、代謝を簡単に変化させることもできるのです。代謝をコントロールできるようにすれば、いろいろな代謝産物ができるように、それを正確に定量、測定し、物質を同定しなければならない。そこで、沢田さんに分析を依頼するだけではなく、私たちのところでも分析できるよう、技術的な指導をもらっています」

解決すべき課題は尽きない。石油の原料と目される重要な物質の研究は、まだようやく端緒に着いたばかりだ。発見されて20年ほどのアルケノンは、同じ藻類の珪藻が生成する「トリグリセリド」という物質と同じものだと誤解した人も多く、ほとんど生物学者の注目を浴びてこなかった。

「珪藻とハプト藻類は遺伝子の系統的には比較的近いのですが、それでもその距離は相当離れています。アルケノンという分子は、これまでに知られている限り、この世で4種類のハプト藻類しかもっていない物質です。非常に多様な生物の中のほんの一群しかもっていない、でもそれが石油のもとになっているという、なんとも不思議なこと

が起こっているんですね」

円石藻のもつポテンシャルは エネルギー生産だけに留まらない

単に石油を生み出すだけではない。白亜紀後期に、地球の二酸化炭素濃度は激減した。むろん、100%因果関係を立証するのは難しいが、円石藻の繁茂期と相当オーバーラップしているのは確かだ。これはこの生物が、地球の環境を一変させるほどの力をもつ可能性を示唆する。

また、より直接的な部分では、ヨウ素の濃縮に関わっているのではないかともいわれている。白岩さんが期待をかけるのも、つまるところ、そうした円石藻のポテンシャルの高さだ。

「私たちが研究を進めていくなかで、この生物のポテンシャルが非常に大きいことに驚かされます。将来、私たちがまた別の問題に直面したとき、その解決のためのシーズになるようなデータがたくさん得られるのではないかと考えています。私たちの役目はまず、応用研究にもって行ける基盤技術を開発することですが、その次に、別の観点から、この生物のポテンシャルを生かすことに寄与することだと思っています」■