

ERATO「橋本光エネルギー変換システムプロジェクト」の取り組み

自然に近づいていく 新たなサイエンスの礎

自然から離れる方向で発展してきた20世紀のサイエンスは、人類に多くの恩恵とともに負の遺産ももたらした。21世紀を迎えた今、1人の研究者がその反省を胸に、“自然に近づいていく”新たなサイエンスの礎を築くべく、大きな1歩を踏み出そうとしている。

ハスの葉が教えてくれたこと

地球の循環という観点から 研究を見直して得た着想

東京・駒場の東京大学駒場キャンパスの一角にある橋本和仁教授の研究室。そのベランダでは、鉢植えのハスが緑の葉を風に揺らしている。現在の研究テーマと関係が深いわけではない。それなのに身近なところに置いているのには理由がある。

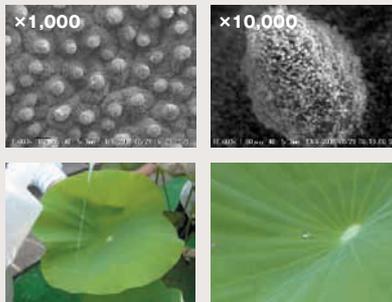
「ハスの葉はね、私に、とっても大切なことを教えてくれたんですよ」

話は数年前にさかのぼる。当時から橋本教授は、光機能材料分野において数多くの先駆的な研究を行ってきた。特に、有機物、汚染物質を分解する光触媒の研究により、新規の環境保全・改善のための材料開発などにすぐれた成果を上げていた。しかし、そのうちに橋本教授の心の中では、ある思いが生じてきた。

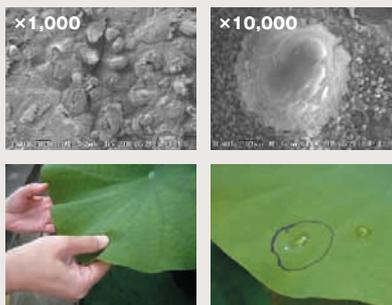
「光触媒による汚染物質の分解では、有機物と酸素が反応して二酸化炭素と水が発生します。ちょうど光合成のプロセスと逆だといえます。私はこれを地球上の循環という大きな視点から見て、光触媒は汚染物質を自然に戻す役割をしているのだと考えていました。しかし、考えを深めていくうちに、問題意識が膨らんでいったのです。すなわち、物質循環という観点からは化石燃料の大量消費のほうがもっともっと重大な問題であり、それこそ我々が取り組むべきだと」

二酸化炭素などの温室効果ガスの過剰な排出を原因とする地球温暖化は、現在の地球が抱える重大な課題だ。その解決に向けてさまざまな試みがなされているが、これらは原子力発電に象徴されるように、自然から離れる方向で発展してきた20世紀のサイエンスによっているのではないだ

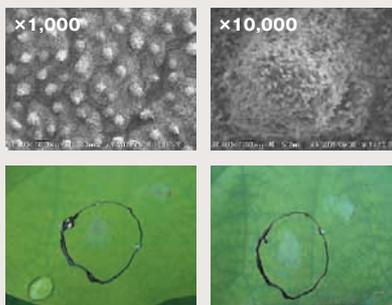
ハスの葉の表面の撥水構造



葉の表面を指で押した状態



7日後



ろうか。「21世紀のサイエンスは、自然に近づいていくものであるべきだ」——橋本教授の心の中でそうした考えが日増しに確固たるものになっていった。そして、考えから行動へと1歩を踏み出す大きなきっかけくれたのが、ハスの葉の教えだった。

ハスの葉の自己治癒能力が 大きなヒントに

酸化チタン光触媒の性質の1つに材料表面の親水性の向上がある。橋本教授は親水性とは逆の撥水性にも興味を持ち、ハスの葉に注目していた。ハスの葉の上に水滴をたらすと、水滴はまったく葉になじまず玉のようになって転がる。そんな超撥水性の秘密は、葉の表面の、細かい凹凸にさらに細かい凹凸が重なったフラクタル構造にある。それを真似たコーティング膜も作り出されているが、問題があった。微細なフラクタル構造は、指で押して壊れてしまうと、元に戻らないのだ。解決の道を探っていた橋本教授は、ハスの葉の観察からあることに気づいた。

「ハスの葉も、指で強く押すとその部分だけ水を弾かなくなります。しかし、1週間後に調べてみると、同じ部分がまた水を弾くようになっていたのです。こうした自己治癒能力は人工物ではなかなか再現できません。だとしたら、生き物をそのまま利用する発想を持つべきだと思いました」

とはいえ、ハスの葉を使った撥水素材を考えたわけではない。頭の中にあったのは、自然の力を“太陽電池”に活用することだった。

自然が持っている、人工システムが持っていないものは何なのか？

新たなサイエンスに 分子生物学は不可欠

21世紀のサイエンスは自然に近づいていくべきだ――。

橋本教授がそんな考えを深め、形にする絶好の機会となったのが、2006年にJSTの戦略的創造研究推進事業ERATOへの応募の機会を得たことだった。研究分野として最適だと考えたのは、太陽の光エネルギーを電力に変換し出力できる太陽電池だ。

「たとえば、携帯電話に使われている電池にはガリウムヒ素が使われています。これにはヒ素という毒性のある元素物質が含まれています。一つひとつに含まれるのは微量とはいえ、そんな物質をすべての人が持ち歩いているという事実は、自然から離れていった20世紀のサイエンスを象徴しています。

一方、シリコン、太陽電池は違います。地球上にありふれて存在する無害な物質からできており、また、使い終わって廃棄されても酸化され自然に還っていくのです」

そんな太陽電池の研究において、今、自然から学ぶべきことは何なのか。一般的に太陽電池の課題であるとされているエネルギー変換効率について橋本教授は、大きな問題ではないという。

「植物の行っている光合成の太陽エネルギー変換効率は、最大でも数%、通常は0.5%程度です。一方、市販の太陽電池は10%を超え、研究段階ではすでに40%以上のものも実現できています。エネルギー変換効率という点からいえば、現在の太陽電池は自然を

超えているのです」

自然に回帰するシステムの開発を目指す橋本教授がぜひとも取り入れたいと考えていたのが、近年のサイエンスに革命的ともいえる変化を起こし続けている分子生物学の活用だ。

「クローン羊ドリーの誕生やiPS細胞の作製成功など、近年の常識を覆すような大発見はいずれも分子生物学の急速な発展によってもたらされました。そこで得られた知見は、ライフサイエンス分野だけではなく、エネルギー分野でも活かせるのではないかと考えたのです。しかし、たとえば遺伝子組み換え生物などでは、自然に近づいていくという発想からは遠いところにある。それとは違う方向性で分子生物学から自然に学ぶ観点はないかと頭を悩ませていました」

橋本教授がハスの葉から教を受けたのは、ちょうどそんな時でもあった。

「植物は、自らが生み出したエネルギーを、自らの傷を癒したり、自らが大きく成長していくために使っている。そこから人工システムを作り出すのではなく、生き物そのものを活用することで、21世紀のサイエンスにふさわしい、まったく新しい太陽電池が生まれるのではないかと考えました」

有機物をエネルギーに 電気を発生する微生物

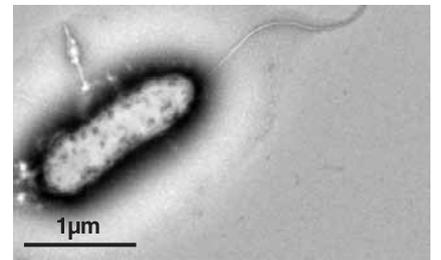
新しい太陽電池のベースとして、橋本教授は微生物燃料電池(*)に着目した。

*微生物燃料電池

有機物を分解してエネルギーを獲得する際に電気を発生させる「電流発生菌」を利用した燃料電池。一般の燃料電池は水素と酸素が反応して発電するが、微生物燃料電池は電流発生菌に有機物をエサとして与えると発電する。代表的な電流発生菌にシュワネラ菌(*Shewanella loihica*)がある。

「私たちは、有機物の持っている電子エネルギーを代謝過程のなかで取り込むことによって生きています。エネルギーを失った電子は、呼吸によって取り込んだ酸素に渡し、体外に捨てています。一方、ある種の微生物は、まだエネルギーが残っている電子を体外に捨てています。たとえば、二酸化炭素に電子を渡しているメタン発生菌です。また、電極に電子を渡し電流を発生させる微生物もあり、電流発生菌と呼ばれているのです」

●電流発生菌シュワネラ・ロイヒカ



代表的な電流発生菌。有機物をエサとして与えると発電する。ゲノム解析も完了しているため、微生物燃料電池の研究には欠かせない存在だ。

微生物による電流発生が発見されたのは約100年前のこと。しかし、一般的な燃料電池と比べて得られる電気エネルギー密度が小さいため、あまり注目されてこなかった。そんな現状が、分子生物学の急速な進展によって大きく変わりつつあるのだ。

物理化学が専門の橋本教授は、分子生物学も微生物もまったくの門外漢だ。しかし、一般向けの解説書や教養課程の学生向けの教科書などを読んで勉強を続け、微生物燃料電池をベースの1つとした研究計画を練り上げた。応募したERATO「橋本光エネルギー変換システムプロジェクト」は見事に採用。橋本教授の構想はついに実現に向けて動き出した。

サイエンスは
自然に
近づくべきです。

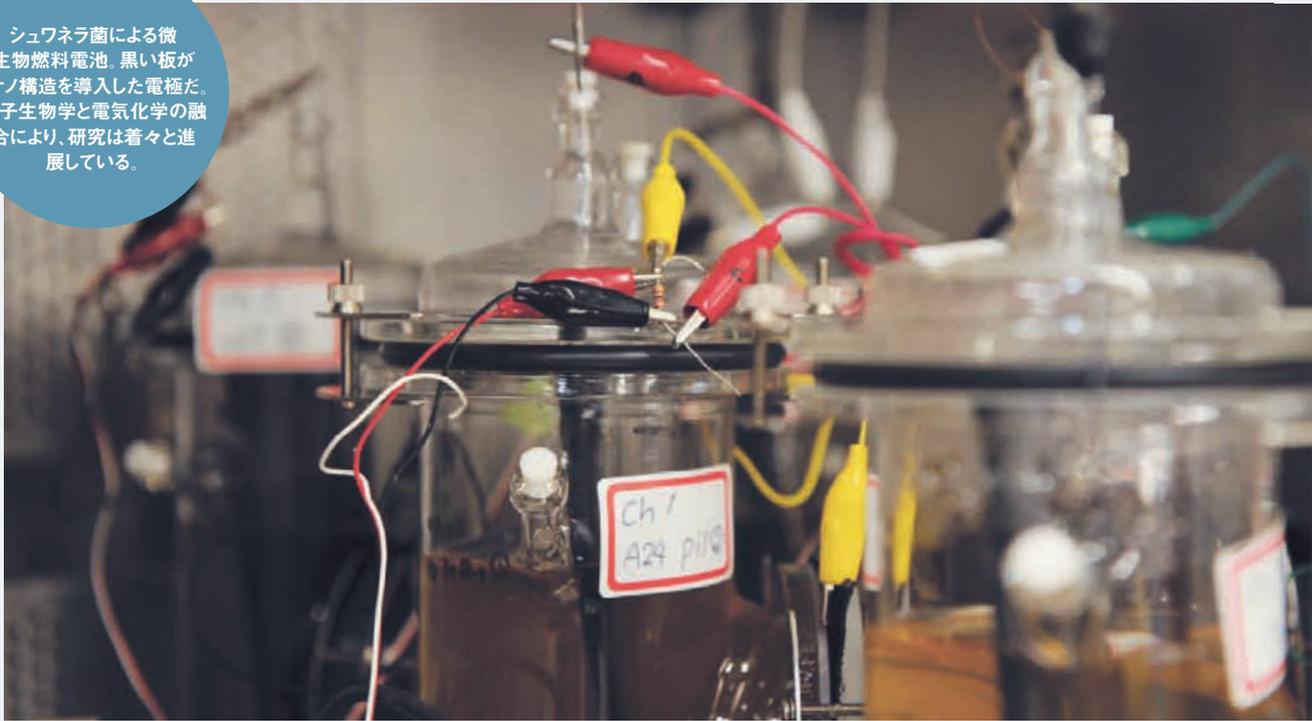
研究総括

橋本和仁 はしもと・かずひと

1980年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。国立分子科学研究所助手、東京大学工学部助教授などを経て、現在は東京大学大学院工学系研究科教授、同大学先端科学技術センター教授。現在の専門は光触媒、有機太陽電池微生物エネルギー変換など。

自然に近づいていく新たなサイエンスの礎

シュワネラ菌による微生物燃料電池。黒い板がナノ構造を導入した電極だ。分子生物学と電気化学の融合により、研究は着々と進展している。



微生物燃料電池、そして微生物太陽電池の開発へ

いよいよ動き出した橋本教授による新しい太陽電池プロジェクトでは、微生物燃料電池の研究を進めるとともに、それをベースとした微生物太陽電池の開発にも着手している。その先に見据えているのは、人間と自然とが共存する「田んぼ発電」という斬新な発想だ。

自然に近い環境を与えることで生まれた予期せぬ効果

プロジェクトを成功に導くためには、太陽電池開発に取り組んできた光化学や電気化学の専門家と、微生物燃料電池に取り組んできた微生物学や分子生物学の専門家との融合が欠かせないと橋本教授は考えた。

そして、後者のメンバーとして白羽の矢を立てたのが、当時、海洋バイオテクノロジー研究所に主幹研究員として勤務していた渡邊一哉特任准教授だ。まったく面識はなかったが、東京大学で開催された微生物燃料電池研究のシンポジウムに橋本教授が訪れたのを機に知り合い、メンバーに加わってもらった。それは、渡邊特任准教授にとっても大いに興味をそそられる誘いだったという。

「私自身、微生物燃料電池の研究に取り組むなかで、効率を上げるために電気化学的な知識も必要だと感じていました。だから、ぜひとも一緒にやってみたく思ったのです」（渡邊特任准教授）

分野が異なれば研究に挑む方法もベースとなる常識も異なるが、互いに戸惑いを感じ

ながらも共同研究を進め、画期的な成果も着々と上がっている。

その1つが電極の改善だ。電気化学の専門チームのアイデアから、電極にナノ構造を導入したグラファイトを用いたところ、得られる電流が一気に数十倍になった。



異分野融合で大きな成果が生まれました。

微生物グループ/グループリーダー

渡邊一哉

わたなべ・かずや

1987年東京工業大学大学院理工学研究科卒業。海洋バイオテクノロジー研究所などを経て、現在は東京大学先端科学技術研究センター特任准教授。専門は微生物を用いた環境浄化などの応用微生物学。

「こうしたアイデアは、微生物が専門の私からはなかなか出てこないものです。電気化学の知恵が加わったからこそ得られた成果だと思います」（渡邊特任准教授）

もう1つの成果は、自然に近づくとというコンセプトから生まれた。

「電流発生菌であるシュワネラ菌は、もともと深海の海底火山近くに住んでいます。そんなシュワネラ菌にとって、研究室内の環境は、シロクマにとつての動物園のようなもの。動物園の環境がどんなに快適に整えられているように見えても、シロクマにとっては本来の生息地である北極の氷のほうが最適はずです。シュワネラ菌のいる深海には、酸化鉄や硫化鉄が豊富に含まれています。そこで、研究室のシュワネラ菌に酸化鉄のナノコロイドを与えたところ、発電量が数十倍アップしたのです」

シュワネラ菌は有機物を食べてエネルギーを出す。故郷の海に豊富な酸化鉄は、シュワネラ菌にとって活発に活動できる居心地のよい環境だったのだ。

「興味深いのは、電流発生菌だけだと電極にとりついた菌しか電極に電子を渡せないの

に、酸化鉄を与えた場合、その酸化鉄がネットワークの役割を果たして、電極から離れたところにいる菌も電子を渡せるようになったことです。自然に近い環境を与えることで、集団で助け合うという予想もしなかった効果が生まりました。私たちの考えは間違っていないと強く思いました」

三四郎池も田んぼも 天然の太陽電池になる

こうして微生物燃料電池の研究が進む

サになり、電流を発生させたのです」

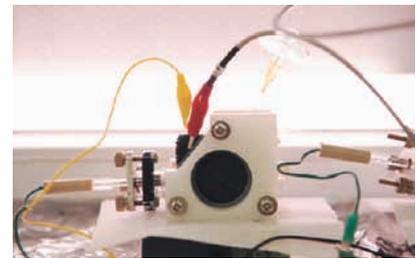
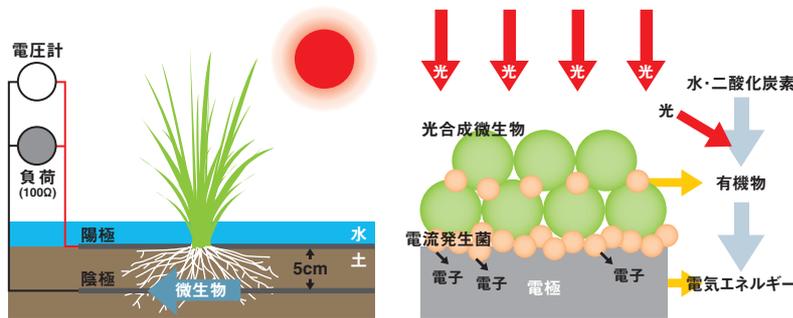
三四郎池だけでなく、田んぼの水からも同様に電流を取り出すことができた。実験では人工的に光を当てているが、自然環境では、太陽光、光合成微生物と電流発生菌の組み合わせによって、同じように電子が発生していると考えられる。その電子を電流として取り出すことに成功したこの実験は、それ自体が微生物太陽電池ともよぶべき大きな成果といえる。そして、橋本教授がこの仕組みを柔軟な発想によって広げたのが「田んぼ発電」といえる。

の10%に比べてはるかに低い。しかし、橋本教授は田んぼの場合、これを1%にできれば実用化への道が開けてくると考えている。主に屋根の上に設けられる現在の太陽電池に比べて、田んぼの場合にははるかに広い面積を使うことができるからだ。

「田んぼ発電は、実際にはまだ実用化を考える段階にはきていません。しかし、自然の共生関係を生かして、太陽光エネルギーから電気を取り出すことができると証明したこと、大きな意味があると考えています」

「田んぼ発電」と微生物太陽電池

田んぼの泥に電極を差し込み、対極を水面に設置すると、日中に電流の発生が確かめられる。これは、イネが光合成によって作り出した有機物を根から分泌し、泥の中に住む電流発生菌がそれをエサとして取り入れた結果、発生したと考えられる。光合成微生物と電流発生菌の組み合わせによっても光電流が得られる。太陽光によって光合成微生物が作り出す有機物が電流発生菌のエサとなっていると考えられる。これが微生物太陽電池で、条件を整えると電池が自ら成長するという特徴があるといえる。



開発中の微生物太陽電池。発電効率は低いが、まったく新しい太陽電池の可能性を秘めている。

一方で、プロジェクトではその先に見据えるゴールとして、微生物太陽電池(**)の開発にも着手している。

**微生物太陽電池

生きた微生物を利用して光エネルギーを電気エネルギーに変換する装置。電流発生菌と、そのエサとなる有機物を作り出す光合成微生物を組み合わせることにより、自立的で持続的な装置を作ることができる。

開発は、東京大学本郷キャンパス内の三四郎池の水を採取することから始まった。電流発生菌は、こうした身近な池の中にも住んでいる。一方、光エネルギーを直接電流に変えることのできる微生物は、これまでまったく知られていない。しかし、採取した水を光の照射下で培養したところ、光電流の発生が確かめられたのだ。橋本教授は、この現象は光合成微生物の存在によって説明できるという。「光を当てることで光合成微生物が有機物を生産した。その有機物が電流発生菌のエ



「田んぼ発電でのイネは、太陽の光から有機物を出すアンテナのようなものです」(橋本教授)

「電流発生菌は田んぼの泥の中にも住んでいます。そこで、田んぼに電極を差し対極を水面に置くと、燃料電池として作用し電流を発生すると考えられます。しかし、実際は日中、光の当たっているときだけ光電流が得られるのです。これは、イネ自身が光合成を行って根から有機物を出し、それが電流発生菌のエサになっているからです」

三四郎池の発電効率は0.02%、田んぼは0.01%と、現在製品化されている太陽電池

自然に近づくことへの こだわりを忘れずに

世界を見渡せば、微生物燃料電池研究の最先端では、電流発生菌に遺伝子改変を加え、より大きな電流を発生させる試みに力を入れているところもある。橋本教授のプロジェクトでも同様の試みを行っているが、そこをゴールにするつもりはない。

「微生物燃料電池は、すでに実用化の一手手前までできています。遺伝子改変はメカニズムの解明などに役立つことはあるし、実用化への時間を短くしてはくれるでしょう。しかし、私としては、自然に近づくということにこだわりたい。20世紀のサイエンスは結果的に、地球が長い時間をかけて生み出した化石燃料を食いつぶしていくことにつながりました。だとしたら、21世紀のサイエンスは逆に化石燃料を作り出すべきではないか。そんなこだわりを忘れずに、開発に取り組んでいきたいと考えています」

力を込めてそう語る橋本教授の後ろで、ペランダのハスの葉が風を受けて揺れていた。