



## 20 エネルギー学への誘い

東京理科大学工学部工業化学科

荒川 裕則 教授

このコーナーでは、私たちの社会や生活に身近な研究テーマをわかりやすく紹介する。第一線で活躍されている研究者の研究内容を中心に、学問の仕組みや今後の可能性などについて、インタビューする。

現在、人類が利用しているエネルギーのほとんどは石油や石炭、天然ガスなどの化石燃料に依存しています。しかし、埋蔵量には限りがあり、排出される二酸化炭素が地球温暖化をもたらすなど、自然環境にも大きな負荷を与えています。そこで、半永久的に利用でき、二酸化炭素を排出しないエネルギーとして太陽光エネルギーに大きな期待が集まっています。しかし、より一般的に利用できるようにするには、太陽光を利用しやすいエネルギーに効率よく変換して、取り出す技術が不可欠です。そのヒントは植物が行う光合成にありました。光合成の仕組みを活用した色素増感太陽電池の開発に加え、光触媒による水素製造などにも応用できます。究極的には太陽光エネルギーだけですべてのエネルギーをまかなうグリーンアースの実現が期待されています。

### エネルギー問題の解決のために 多様な分野からアプローチする「エネルギー学」

現代生活は大量のエネルギーを消費することで成り立っています。しかし、化石燃料の枯渇や地球温暖化などの危機に直面し、エネルギー利用の考え方や姿勢、システムなどを根本的に見直さなければならない時期に来ています。こうした視点から生まれたのが「エネルギー学」という分野です。

化石燃料の枯渇を防ぐためには、代替燃料の発掘・開発や、廃棄物や排熱からのエネルギー回収が必要です。また二酸化炭素排出を削減するためには、有害物質を出さないエネルギー源の開発や、二酸化炭素の固定・再利用技術の

# 植物の光合成をヒントに 太陽光エネルギーの 多様な変換技術で 環境にやさしい 循環システムをつくる

確立などが有効です。これらの科学技術に加え、技術開発、利用を後押しする経済的な枠組みや、環境負荷が小さい生活へ移行するための意識改革も必須です。こうした現状を鑑みると、自然科学だけでなく、人文科学や社会科学なども巻き込んだ学際的な取り組みが必要だと言えます。このように、人類とエネルギーの関係を考え直し、多様な学問分野の知識を結集して、エネルギー問題を解決する道筋を具体的に考えていこうとする試みが「エネルギー学」です。

工学的な観点からいえば、半永久的に利用できるエネルギーを実用化する技術開発をはじめ、エネルギー効率の高い機器開発などが課題です。

これらを実現する鍵として、私が最も関心をもっているのが、エネルギー変換技術です。現在、人類が用いているエネルギーのほとんどは、化石燃料をもとにした化学エネルギーを変換したものです。化石燃料を燃焼させて熱機関で力学的エネルギーに変換することで動力として利用したり、さらにその動力を電気エネルギーとして取り出すことで、幅広く利用しているのです。化石燃料が生み出す化学エネルギーに代わるエネルギー源としては、核エネルギーが重要視されてきましたが、信頼性が大きく揺らいでいるのは周知の事実です。そこで私たちの研究室では、太陽光エネルギーを変換して、電気エネルギーを賄う新しい技術に着目して研究を進めています。

### 太陽光が1時間照射するエネルギーは 全世界の人類が1年で使うエネルギーに相当

太陽光エネルギーは無尽蔵で膨大です。わずか1時間に地球に照射するエネルギーが、全世界の人類が1年間に消費するエネルギー量に相当します。ですから、太陽光エネルギーを効率的に利用することができれば、エネルギー問

題はかなり軽減されるはずなのです。

太陽光エネルギーは現在、次の3種類のエネルギーに変換されて利用されています。

第1は、熱エネルギーへの変換です。アメリカやオーストラリアなどの日照時間の長い地域では、この熱エネルギーで蒸気タービンを回す太陽熱発電が実際に稼働しています。また、サハラ砂漠で太陽熱発電を行い、ヨーロッパなどに電力を供給する「デザーテック」計画も提唱されています。

第2は、電気エネルギーへの変換です。これは太陽電池により実現されています。しかし現在主流のシリコン太陽電池は、投資金額を利益で回収するまで22～27年かかるといわれ、高コストが普及の妨げになっています。

第3は、化学エネルギーへの変換です。具体的には、太陽光エネルギーで水を分解し、水素に変換したものを燃料や各種の物質合成のためのエネルギーに使うものです。

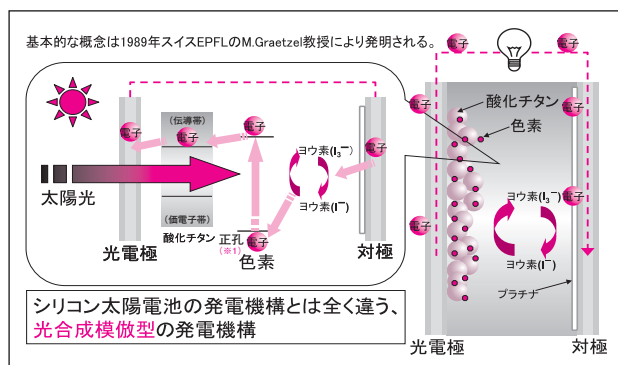
これらの3種類の太陽光エネルギー変換技術の中でも、私たちの研究室では、2点目の太陽光エネルギーを効率よく電気エネルギーに変換できる安価な太陽電池の研究と、3点目の水素製造の研究を重点的に進めています。

## 低コストで利用範囲が広い 植物の光合成を模倣した「色素増感太陽電池」

前述の通り、現在の太陽電池の主流はシリコン太陽電池です。しかし、シリコンの精錬には大きなエネルギーがかかる上、高温・高真空などの大規模な製造設備が必要なため、製造コストは高くなりがちです。そこで私たちの研究室では、それらの問題解決のため、作動原理が全く異なる「色素増感太陽電池」の研究を進めています。

色素増感太陽電池は、太陽光のエネルギーを吸収した色素が電子を放出し、それが対極に流れることで発電します。色素を使った太陽電池は、植物が行っている光合

<図表1>色素増感太陽電池の構造と作動原理



(荒川先生提供)

(※1) 正孔…本来は電子で満たされているべき価電子帯の電子が不足した状態。

成の原理とほぼ同じです。色素とは、可視光のうち特定の波長域の光を吸収する性質のある物質を指します。植物の持つ色素であるクロロフィル(葉緑素)はその代表で、クロロフィルが赤色域と青色域の光を吸収するために、植物の表面は緑色に見えます。クロロフィルが主に赤色光を吸収して電子を放出し、それが起点となって光合成は始まるのですが、この電子放出の仕組みを模倣したのが、色素増感太陽電池なのです。

その構造は<図表1>のようになっています。まず、透明な電導層を表面に塗布したガラス基板に多孔質の酸化チタンを塗布・焼成し、そこに広い波長域の光を吸収できるルテニウム系の色素を吸着させたものを電極とします。このように太陽光のエネルギーを吸収する物質を吸着させた側の電極を光電極と呼びます。さらにヨウ素を含む電解質を挟んで対極を設置します。太陽光が光電極にあたると、色素分子の持つエネルギーの値が上がり、電子を放出し、その電子が酸化チタンに渡され対極に流れます。電子を失った色素は、電解質中のヨウ素イオンから電子を奪って元に戻り、一方、ヨウ素イオンは対極から放出された電子を受け取って元に戻るというサイクルで発電するのです。原理が単純で、入手の難しい原料も必要としないため、現在の主流であるシリコン太陽電池が持つ、金銭的負担が大きい点と、製造時に大量のエネルギーが必要である点というデメリットを解消できます。

また利用範囲が広がることも色素増感太陽電池の魅力です。住宅の屋根に置くシリコン太陽電池は分子の向きが一律なので、入射角度の小さい日の出、日の入り前後などの時間帯は発電効率が落ちますが、色素増感太陽電池の場合、色素内の分子の向きが多様なため、どの角度からの光もキャッチ

## PROFILE



荒川裕則  
(あらかわ・ひろのり)  
東京理科大学工学部  
工業化学科  
複合工業化学第2研究室  
教授  
(太陽光エネルギー変換・  
触媒化学専攻)

1949年富山県生まれ。1976年東京工業大学大学院理工学研究科化学工学専攻博士課程を修了し、通産省工業技術院東京工業試験所に入所。1989年同院化学技術研究所研究室長、1997年同院物質工学工業技術研究所基礎部長を経て、2001年(独)産業技術総合研究所光反応制御研究センター長に就任。この間、アメリカ・カリフォルニア大学バークレー校博士研究員、フランス・ストラスブール大学招聘教授、東京工業大学客員教授、東京理科大学理工学部客員教授を歴任。2004年より現職。2009～2010年、大学院総合化学研究科長。触媒化学および太陽光エネルギー変換プロセスの開発を専門とし、色素増感太陽電池の開発、太陽光触媒による水素製造、炭酸ガスの再資源化などに取り組む。



でき、時間帯によるムラがありません。またプラスチックなどの薄い基板を用い、着色シースルーにすることも容易なため、住宅の窓に太陽電池を貼りつけることもできます。その他、室内の蛍光灯などの弱い光にも反応するので蛍光灯の光の届く箇所に絵のように掛けるなど建築物に合わせ多様な利用が可能です。

ただし、一般的なシリコン太陽電池の約15%というエネルギー変換効率に対して、色素増感太陽電池は現時点では最大でも約11%と差があります。そこで私たちは、できるだけ幅広い波長域の光を吸収する色素の開発や、色素に効率よく電子を受け渡す新たな物質の探索などにより、世界最高変換効率の色素増感太陽電池の実現を目指しています。同時に、面積を広くしても電気抵抗の少ない構造の追究や、耐久実験なども行い、実用的な太陽電池製作を念頭においた研究を続けています。

### 人間の夢「人工光合成」を実現する 太陽光触媒による水からの水素製造

太陽光による水素製造も、光合成と同じ作動原理を利用します。植物が太陽光やクロロフィルなどを用いて行う水の酸素と水素への分解を人工的に構成したものです。

特定の物質に光を当てると触媒の役目を果たし、酸化還元の効果で、水を水素と酸素に分解することができます。このように光を受けることで他の物質に化学変化を起こす物質を光触媒といいます。私たちは酸化タングステンを光触媒に使った水素製造に取り組んでいます。しかし、水中で酸化タングステンを塗布した光電極に太陽光を照射すると、酸素は発生しますが、水素は発生しません。水素の発生のためには少量の電気エネルギー（電圧）をかける必要があります。

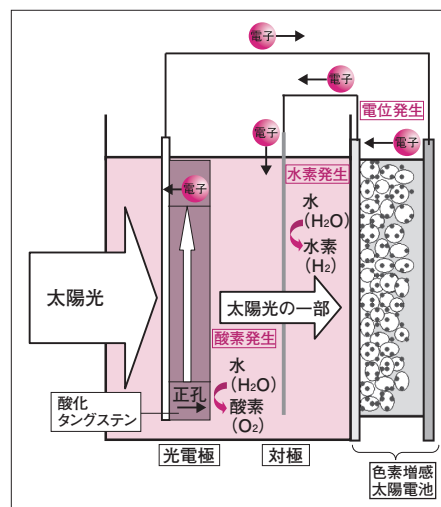
そこで考えられたのが、「タンデムセル」という方法です。光触媒による水素発生装置の後ろに、前述の色素増感太陽電池を置いた構造になっています<図表2>。酸化タングステン光電極を半透明とし、対極のプラチナ電極をメッシュ状にすれば、460nmまでの波長の光は酸化タングステんで吸収され、それ以上の波長の光は光電極も対極も透過して色素増感太陽電池に到達します。そしてこの電池が水素を発生するのに十分な電位を発生させ、対極から水素を発生させる仕組みです。私たちは、

(※2) 蓄電池…充電を行うことで電気を蓄え、繰り返し使える電池。充電電池。

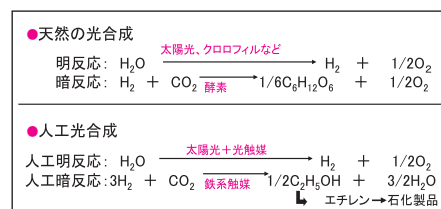
(※3) 燃料電池…電気化学反応（水素と酸素など）によって継続的に電力を取り出せる発電装置。

1 cm角の酸化タングステン光電極を使ったタンデムセルで、水分解における太陽光エネルギー変換効率3.3%を達成することができました。将来的には、安価で豊富な酸化鉄を光触媒に使った太陽光吸収システムを考えており、変換効率10%を目指して研究を進めています。

<図表2>タンデムセルによる水素発生装置の構造と作動原理



<図表3>人工光合成技術



(<図表2><図表3>とも荒川先生提供)

こうして製造した水素はボンベに詰めておけば、半永久的に化学エネルギーとして保存できます。蓄電池(※2)のように自然放電でエネルギーが減少することはありません。水素を動力源とする燃料電池(※3)自動車や発電機など幅広い分野で利用できます。

さらに<図表3>のように植物が酵素を用いて、水素と二酸化炭素から糖類と酸素を作る活動を真似、前述のように発生させた水素を、二酸化炭素と反応させます。するとエチレンやプロピレンなどの有用物質を化石資源を使わずに合成できるようになります。まさに人工の光合成プラント(炭酸ガス資源化プラント)といえます。

このように、「色素増感太陽電池」と、「光触媒による水素製造システム」のエネルギー変換効率を高め、実用化することができれば、いずれは化石燃料に頼ることなく、人類が使うエネルギーのすべてを、半永久的に利用できる太陽光エネルギーでまかなうことも夢ではありません。化学技術による太陽光を使ったエネルギー変換技術は、究極的には、太陽と水と二酸化炭素だけで人類が利用するすべての物質の循環を可能にするグリーンアースの実現に大きく貢献することができるのです。