

実用化につながる新たな基盤技術の構築を目指して

# 次世代太陽電池への

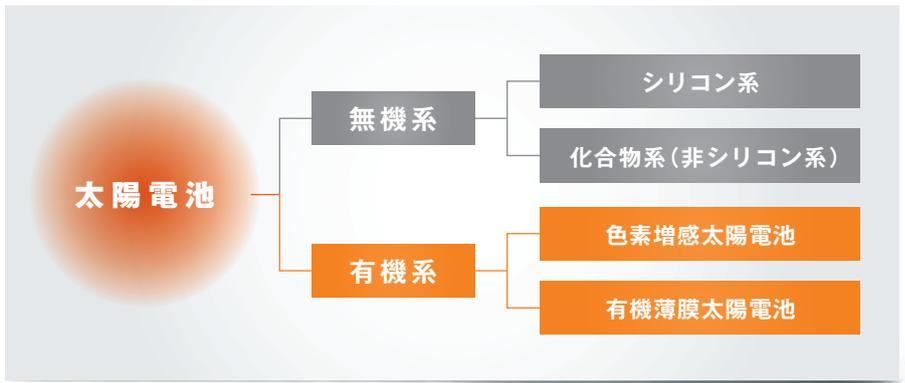
## タービンを使わない 太陽光発電の革新性

この春まで、日本の将来の電力供給のシナリオは、原子力発電が主役に描かれていた。地球温暖化の解決が人類共通の課題とされるなか、原子力発電は二酸化炭素などの温室効果ガスを排出しない“クリーンエネルギー”として推進されていたのだ。

ところが、3月11日の東日本大震災と、それともなう福島第一原子力発電所の重大事故で事態は一変した。日本のエネルギー政策の転換が迫られ、注目されてきたのが再生可能エネルギーによる発電、とりわけ太陽光発電だ。

太陽光や風力、地熱、バイオマスなど、自然現象から取り出せて、何度利用しても枯渇しないエネルギー資源は「再生可能エネルギー」とよばれ、地球温暖化の緩和につながるものとして期待されている。なかでも太陽光発電は、タービンを用いた火力発電などの発電方法とは大きく異なり、太陽電池を用いて光エネルギーから直接電気エネルギーをつくり出す、画期的な発電システムだ。太陽電池は、原子力や火力発電所のような大がかりなメンテナンスが不要となることで、保守や運用面での利点もあり、家庭や事業所などの自家発電用システムとして

## ●太陽電池の種類



徐々に普及してきた。

## コストのハードルを越えるための 2つの方向性

「太陽光発電を日本の電力供給の大きな柱とするためには、越えなければならないハードルがある」と、九州工業大学大学院教授の早瀬修二さんは指摘する。

「特に重要なのは、発電コストの課題です。太陽光発電は、タービンを使った発電方法に比べると効率が劣り、大きな発電コストがかかります。普及が進み、量産されれば価格は下がるでしょうが、電力料金を現在のレベル以上に上げないためには、太陽光発電のコストをこれまでの半分程度に下げなければいけません」

このハードルを越えるための研究開発の方向は、大きく2つある。1つは、既に実用化されている無機系太陽電池(\*)の変換効率(光から電気に変える効率)を上げていく方向、もう1つは、新しい有機系(\*\*)材料を用いた太陽電池の開発方向だ(上図参照)。

### \*無機系太陽電池

シリコンもしくはシリコン以外の無機化合物を材料とする太陽電池。特にシリコン太陽電池は、1950年代からの歴史をもち、変換効率が20%を超えるものもあるため、実用化が進んでいる。

### \*\*有機系太陽電池

有機物を材料とする太陽電池。製造工程が簡便で、無機系に比べて安価に量産できる。柔軟性があり、色もつけられることから、高い市場性が期待されており、現在は実用化に向けた研究開発が進められている。

無機系太陽電池には実用化実績があり、構造などに工夫を重ね、変換効率を上げることで、発電コストを下げるための研究も続けられている。ただし、そこには限界もある。

「無機系太陽電池の場合、製造工程で高いエネルギーを用いて高温にしたり、高価な装置を用いて真空にしたりする必要があるので、どうしても製造コストがかかってしまう」

研究総括

早瀬修二

はやせ・しゅうじ

大阪大学大学院理学研究科高分子化学専攻前期課程修了。理学博士。(株)東芝研究開発センターを経て、2001年から九州工業大学大学院生命体工学研究科教授。09年からJST さきがけ「太陽光と光電変換機能」研究総括。JST戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)「フレキシブル浮遊電極をコア技術とする新太陽電池分野の創成」研究リーダーを兼務。



“有機系”の登場で、太陽電池開発が活気づきました。

## 道

日本のエネルギー政策について抜本的な見直しが迫られている昨今、再生可能エネルギーによる発電、とくに太陽光発電への期待が高まっている。発電コストなどの課題を解決する次世代太陽電池の開発が今、着々と進められている。

その点、有機物を材料にできれば、高温や真空にする必要がなく製造できるため、コストを大幅に下げることができる。しかし、有機系太陽電池は変換効率が極端に低く、太陽電池としての実用化は難しいというのがかつての常識だった。それを打ち破ったのが、1991年にスイスのグレッツェル教授によって見出された新しい色素増感太陽電池(\*\*\*)だ。

## \*\*\*色素増感太陽電池

有機系太陽電池の一種で、色素が光を吸収して、電子を放出することで発電する。グレッツェル教授は、放出された電子をチタニア(酸化チタン)によって取り込むことで、従来は1%以下だった変換効率を10%を超えるものに高めた。

太陽電池は光を吸収して電気を得る。しかし、さまざまな波長をもつ太陽の光をすべて利用できるわけではない。光を吸収する色素を工夫することで、無駄になっていた光を利用し、変換効率をさらに向上させることもできるのだ。グレッツェルの高効率な色素増感太陽電池の出現は、太陽電池研究に新しい風を吹き込んだ。

「有機物も十分に太陽電池の材料となることが示され、多くの有機物の研究者たちが太陽電池の分野に参画するようになりました。私もそのひとりでした」

有機系に特有な  
耐久性という課題

これまでの自分の研究が、次世代の太陽電池開発につながるかもしれない。夢をふくらませた研究者たちが集い、研究現場はにわかには活気づいた。それほどに期待を集めた色素増感太陽電池だが、まだ実用化には至っていない。課題は大きく2つある。1つは変換効率のさらなる向上だ。現段階ではまだ無機系太陽電池と比べると劣っており、実用性に足るとはいえない。そしてもう1つの課題が、耐久性の向上だ。

「材料がシリコンなどの無機系は、いわば石できているようなものですから、簡単に

作用極  
(チタニア/色素)

集電電極

ガラス管

電解液層

対極(チタン/白金)

円筒型色素増感  
太陽電池の構造

円筒型のガラス管の内側に、液体の電解質や電極などを含めた構造の太陽電池。従来の2枚の平面状ガラス板で挟んだ構造に比べ、電解質漏れのリスクや空気・水による劣化を軽減し、耐久性を向上させた。



早瀬さんの研究室では色素増感太陽電池を中心にさまざまな研究に取り組んでいる。「家庭用や企業用だけでなく、有機系のメガソーラー(大容量の太陽光発電所)を造るのが私の夢です」(早瀬教授)

は劣化しません。ところが有機系は、空気と水に弱いのです。色素増感太陽電池は電解質として液体を使っていることもあり、耐久性を向上するためには、厳しく封止する——すなわち、外界から遮断しなければなりません。しかし、それではコストがよりかかってしまい、有機系のよさが失われてしまいます」

この問題を解決する1つの道筋として期

待されているのが、「円筒型色素増感太陽電池」(上図参照)だ。早瀬さんが、JSTの研究成果展開事業戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)において、新日鐵化学(株)と進める研究開発課題「フレキシブル浮遊電極をコア技術とする新太陽電池分野の創成」を通じて開発したもので、室内で使用できる見込みが立ってきた。しかし、太陽電池という性質上、屋外での使用に耐えることは必須であり、さらなる研究が待ち望まれる。

このような太陽電池の課題を、若手研究者たちの革新性に富んだ基礎研究を通じて解決し、次世代太陽電池開発の道を開こうとしているのが、早瀬さんが研究総括を務めるJSTさきがけの研究領域「太陽光と光電変換機能」だ。

「次世代太陽電池には、新しい構造の提案、材料の開発、低コストの製造方法など、さまざまな分野での画期的な研究が必要です。研究者たちが集まり、現状や問題点を共有しながら刺激しあうことで、研究のベクトルをそろえ、新しい太陽電池のための基礎を築くという1つの方向に向かっていけたらと思っています」

そんな活気あふれる場から、ブレイクスルーにつながる研究が生まれつつある。次に、その成果の1つを紹介しよう。

# 有機薄膜太陽電池の高効率化を実現

## 有機薄膜に色素増感の考え方を導入

6ページの「太陽電池の種類」の図にあるように、有機系には色素増感太陽電池のほかに「有機薄膜太陽電池」(\*)がある。

### \*有機薄膜太陽電池

2種類の有機物を混ぜ合わせて塗ることのできる太陽電池。色素増感太陽電池よりもさらに製造が容易で、コストをさらに低くできると期待されている。

有機薄膜太陽電池の大きな特徴は、その構造にある。一般的な無機系太陽電池も有機系の色素増感太陽電池も、複数の材料が整然と重なった層状構造をしており、その界面で電子がやりとりされる。しかし、有機薄膜太陽電池は、複数の材料を混ぜて基板に塗るだけだから、材料が層状に重なるような整然とした構造ができていない。その有機薄膜太陽電池に興味を抱いたのが、京都大学大学院工学研究科准教授の大北英生さんだ。

「私はもともと太陽電池ではなく、高分子化合物における電子のふるまいなどを研究していました。それを太陽電池に生かせるのではないかと考えたのです」

研究対象としたのは「高分子太陽電池」(\*\*)だ。

### \*\*高分子太陽電池

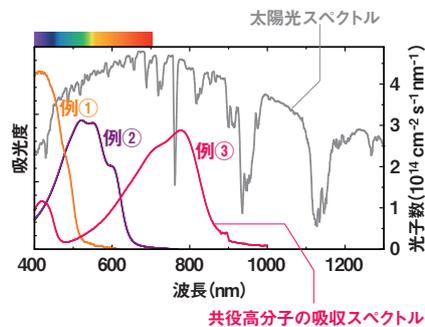
有機薄膜太陽電池の一種。高分子材料とフラーレン(炭素原子によるサッカーボール状の構造物)を混ぜて作られることが多い。

「太陽電池の原理は、2つの物質の界面で電子などが受け渡されることにあります。そこで、当初は、“人為的”に界面を制御した構造を用いて、効率をアップさせようと考えていました」

ところが、なかなかうまく成果が上がらない。そもそも、薄膜という形態は構造を測定することが難しく、界面を人為的に制御することが容易ではないのだ。そこで、大北さんは別のアプローチから研究してみることにした。

「高分子太陽電池は、混ぜて塗るだけで

## ●高分子太陽電池の弱点



高分子材料とフラーレンを混ぜて塗るだけで太陽電池になる。しかし、高分子材料の光吸収帯域は狭いため(例①~③)、広範な太陽光スペクトルのほんの一部しか使えない。特に波長が760nm以上の近赤外領域にまで、光吸収帯域を拡大することが課題の1つだ。

発電に適した構造が“自発的”に構築されていると考えられます。だとしたら、“人為的”に構造を制御するのではなく、“自発的”に太陽電池の変換効率がさらにアップする構造になるよう工夫できないかと、考えたのです」

高分子太陽電池の弱点は、光吸収帯域が狭いために、特定の波長の光しか吸収せず、変換効率が下がってしまうことにある(上図参照)。ひらめいたのが、色素増感太陽電池と同様に、色素を高分子太陽電池にも利用して効率アップを図るアイデアだ。「色素を入れて光吸収帯域を広げるというアイデアは高分子の世界では決して珍しくなく、カラーフィルムなどにも使われています。そこで、高分子材料とフラーレンの2種類のほかに色素を加えた、3種類を混ぜて塗ったら、もっと効率がよい構造になるのではないかと考えました。それには理由があります。結晶化の高い高分子に色素を導入すれば、色素が結晶相か

らはじきだされ、界面に“自発的”に偏在して、変換効率を上昇させるのではないかと考えたのです」

従来の色素増感太陽電池は、“人為的”に色素が界面にくるように制御している。それとは違い、“自発的”に色素が界面にくる、新しいタイプの「色素増感高分子太陽電池」を生み出そうというのだ。さっそく試してみたが、結果は正反対で、むしろ変換効率は下がってしまった。調べたところ、色素が凝集してしまい、はたらいっていないことが原因だと判明した。どうすれば凝集を防げるのか。

大北さんは、平面的な分子構造をもつ色素だと、紙がくっつくように張り付いて、凝集しやすいのではないかと考え、立体的な分子構造を含む色素を選ぶことで、見事にこの問題を解決した。こうして、高分子材料とフラーレン、色素の3種類を混ぜて塗るだけで、変換効率をアップさせた色素増感高分子太陽電池の作製に成功した。

## 色素が自然と界面に存在するカギは表面エネルギーにあり

しかし、大北さんはこれで満足しなかった。色素が自発的に界面に存在する理由は、高分子の結晶化の高さ以外にもあるはずだと考え、その原理の解明に取り組んだのだ。

「原理がわからずとも、効率アップできれば実用化につながると思うかもしれませんが、

実用化には原理の解明が必要です。

## 大北英生

おおきた・ひでお

京都大学大学院工学研究科博士課程修了。英国インペリアルカレッジ客員研究員などを経て、2006年から京都大学大学院工学研究科助教授(現・准教授)。専門は高分子光物理、光化学。09年からJSTさきかけ「太陽光と光電変換機能」領域の研究課題「高分子太陽電池の新発電原理の分子論的探求」研究者。



## せよ!

そんなことはありません。企業の方に研究成果を話しても、必ず『原理はどうなっているのですか?』と問いかねられます。原理がわからなければ、実用化に向けた次のステップには進められません」

大北さんが文献などを調べ気づいたのが、表面エネルギー(\*\*\*)の重要性だった。

## \*\*\*表面エネルギー

物質表面に存在する、物質内部に比べて高いエネルギーのこと。物質の種類によって異なる。表面エネルギーが大きく異なる2種類の物質(AとB)に、両者の中間的な表面エネルギーをもつ物質(C)を加えると、CがAとBの界面にきて、表面エネルギーの差を緩和しようとする。石鹸が水と油の界面に入り込んで汚れを落とすのも、同じ原理だ。

色素の表面エネルギーが高分子とフラレンの中間に位置すれば、この原理がはたらい、色素は「自発的に」界面に存在するはずだ。そう考えた大北さんは、さっそく3種類の物質の表面エネルギーを調べた。結果は予想どおり、「高分子<色素<フラレン」の順。さらに詳細な実験を重ね、この原理が正しいことを証明した。

## さまざまな分野の研究者が同じベクトルを向いて

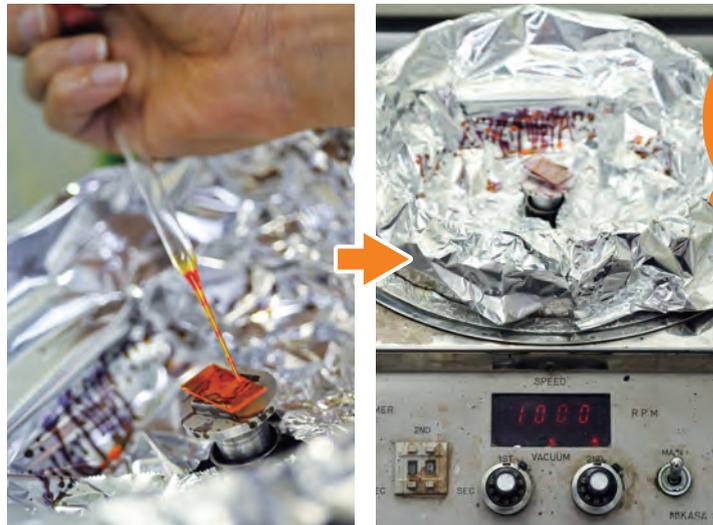
こうして色素増感高分子太陽電池の原理が明らかになったことは、今後の開発の重要な指針となる。

「加える色素は1種類とは限りません。色素によって吸収する光の相は異なりますから、複数の色素を組み合わせれば、さまざまな相の光を吸収する、より変換効率の高い太陽電池を実現できます」

そして、さきがけという場の存在がそんな開発への動きを加速させることを、大北さんは実感している。

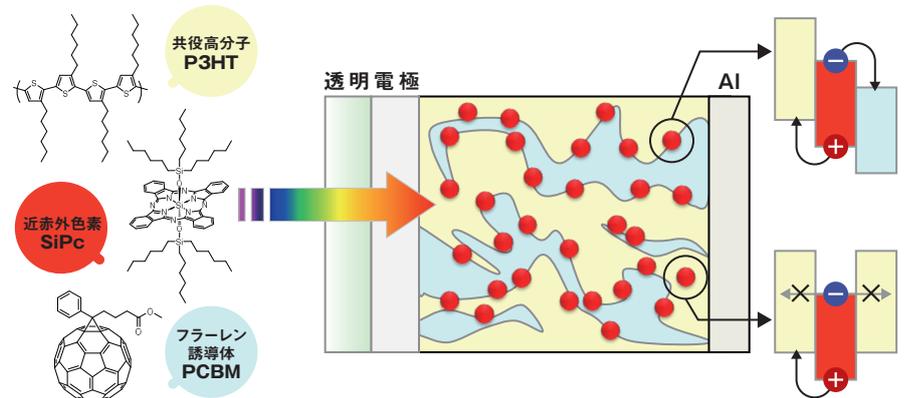
「材料の開発や色素については、私の専門分野ではないので詳しくありません。しかし、さきがけには高機能な新規色素を開発されている先生も参加しているので、色素増感高分子太陽電池にも適用できそうな

## ●色素増感高分子太陽電池



3種類を混ぜた液体を塗り、高速で回転!

高分子材料、フラレン、色素の3種類を混ぜた液体を塗り、高速で回転させる。そうした簡単なプロセスで、色素が高分子材料とフラレンの界面に位置した太陽電池になる。



黄色が高分子材料、赤色が色素、青色がフラレン。3種類を混ぜて塗るだけで、互いの表面エネルギーの関係から、図のように高分子材料とフラレンの界面に色素が位置する。ここに光を当てると、色素に生じた電子(-)がフラレンに、正孔(+)が高分子材料にそれぞれ渡され、電流が発生する。色素が界面ではなく高分子材料内にある場合は、正孔は高分子に渡せるが、電子は色素にとどまるため、電流は発生しない。

色素を分けてもらったり、新規に開発してもらうこともできます。それは、互いの研究をレベルアップさせるうえでも、次世代太陽電池の開発につなげるためにも貴重だと思います」

色素増感高分子太陽電池の実用化に向けては、高効率化だけでなく、耐久性というハードルも存在する。研究者がひとり立ち向かうには高すぎるが、さきがけのように、さまざまな分野の研究者が結集し、同じベクトルを向いて力を合わせる場があれば、それを乗り越えられる日も来るだろう。■

