



令和4年度 全国発明表彰 — 未来創造発明賞受賞者にさく —

令和4年度全国発明表彰において未来創造発明賞に輝いたのは、樋口昌芳氏、林灯氏、Kurth Dirk G.氏による「超低消費電力型多彩エレクトロクロミック材料の発明」である。この発明は、従来のエレクトロクロミック材料が抱える弱点のほとんどを解消した画期的な新材料であり、今後さまざまな場所での応用が考えられる。そこで、未来創造発明賞を受賞された樋口氏と林氏に、発明の経緯や今後の展望などを聞いた。

※本文中、一部敬称略

※画像提供：国立研究開発法人物質・材料研究機構



樋口 昌芳 氏

国立研究開発法人物質・材料研究機構
機能性材料研究拠点
グループリーダー

EC材料とは

令和4年度の未来創造発明賞は、従来のエレクトロクロミック材料(以下、EC材料)の弱点を解消した「超低消費電力型多彩エレクトロクロミック材料」に授与された。

この発明の偉大さを理解するには、EC材料のことを知る必要がある。EC材料とは、電圧をかけると色が変わる材料のことであり、似たような材料として、光を当てることで色が変わるフォトクロミック材料や温度の変化によって色が変わるサーモクロミック材料などがある。これまで、代表的なEC材料として、酸化タングステンやビオロゲンと呼ばれる物質が知られていた。

酸化タングステンは、透明と不透明を切り替えることができる調光ガラスなどに使われているが、製膜の際に真空装置が不可欠で、かつ、基板を高温に加熱する必要があるため、高温に耐えるガラス基板にしか利用できないという弱点があった。大きなデバイスを作るには大型の真空装置が必要にな

り、コストがかかる。

ビオロゲンは、大型旅客機ボーイング787の客室の窓や、車の防眩ミラーとして実用化されている。しかし、液体の電解質にビオロゲンを溶かした状態で利用するため、周囲を封止しなければならず、やはり大型化が難しい。また、色を変えるためには、常に電圧をかけ続ける必要があり、省エネ性は期待できない。

このように、従来のEC材料はいくつもの弱点を抱えており、幅広い用途における実用化には高いハードルがあった。

新EC材料の特徴

受賞発明の新エレクトロクロミック材料(以下、新EC材料)は、メタロ超分子ポリマーと呼ばれる材料であ

代表的な EC 材料	大型化	フィルム基材	多色性	メモリ性
酸化タングステン (調光ガラス)	△	×	×	△
真空装置を用いて製膜される。基板は製膜時に加熱する必要があるため、耐熱性のあるガラスに限られる。デバイスの大型化にはそれを入れる大型の真空装置が必要であり、サイズが大きくなればなるほど設備投資が高額となる。その結果製造費用(=価格)が上昇する。				
ビオロゲン (ボーイング 787)	×	×	×	×
ボーイング 787 の客室の窓や、車の防眩ミラーとして実用化されている。ビオロゲンを溶かした電解液を封入するので、液漏れを防ぐため周囲の封止が不可欠。液漏れのリスクが高まるためデバイスの大型化が難しい。また、メモリ性を持たないので省エネへの貢献は期待できない。				
メタロ超分子ポリマー	○	○	○	△
塗布で製膜するのでデバイスを大型化する際、高額な設備を必要としない。基板としてガラス以外にプラスチックなどのフィルム素材を使用できる。固体電解質を用いることでデバイスを切ったり、曲げたりできる。また、電源を切ってもその表示状態が維持されるメモリ性を有する。				

る。金属錯体（金属イオンを中心に配位子と呼ばれる原子が取り囲む形の化合物。血液中のヘモグロビンなどもその一例）が多数数珠つなぎになったユニークな高分子構造を持ち、金属イオンの電気化学的酸化・還元によって色が変わる性質を有する。

この新EC材料は、モル吸光係数が数万以上と大きく、数百nmという極薄膜でも大きな透過率の変化を示す（1nmは100万分の1mm）。また、メモリ性があるため、表示を切り替えるときだけ電圧をかければよく、超低消費電力での表示が可能になる。さらに、塗布によって製膜できることから、ガラスだけでなくプラスチックなどの素材も基板として利用でき、大型化も容易である。

色についても、従来のEC材料は決まった色から決まった色にのみ変化する

ものがほとんどであったが、新EC材料は、金属イオンや配位子の種類を変えることで、紫や青、緑、黄、赤など多彩な発色が可能だ。

このように、新EC材料は従来のEC材料の弱点をほとんど解消した画期的な新材料であり、ECの実用化のハードルを大きく下げるポテンシャルを秘めている。開発リーダーである樋口昌芳氏は、新EC材料について次のように語る。

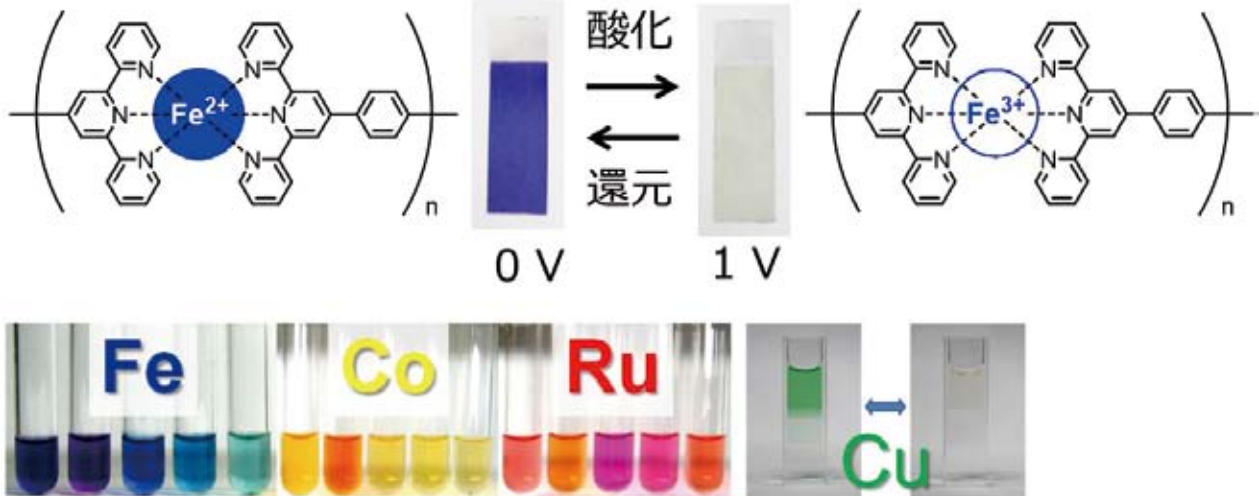
「この材料はとても素性がいいと思っています。繰り返し耐久性も10万回はあります。そこまで実験を重ねたデータがあるEC材料はほとんどなく、普通は50回とか100回程度です。また、応答速度も他のEC材料よりずっと速いです。従来のEC材料は低温になると応答速度が遅くなるものの、新EC材料はその点も問題ありません。

車載用途で使う場合は温度がマイナス20℃くらいになることもありますが、私たちのEC材料なら、低温でも応答性が高いので、車載用途にも使えるはずです。もしこの材料でダメなら、今世の中で知られているどのEC材料でも無理だということになります」

樋口氏らが開発した新EC材料は、電圧をかけることで色が消失するが、0.8V程度の低い電圧でも駆動できる。その色が変わる原理は、金属イオンから配位子への電荷移動吸収によるものである。

例えば、下の図に示した鉄イオンを利用した「Poly (Fe-btpyb) Purple」の場合、2価の鉄イオン (Fe^{2+}) の状態では電荷移動吸収が580nm付近にあるため、紫色に見える。電圧をかけて、この鉄イオンを電気化学的に2価から3価に酸化させると、電荷移動吸収が

新EC材料（メタロ超分子ポリマー）のEC変化と金属種や有機分子を変えることによる豊富なカラーバリエーション例



なくなり、無色となる。このときの応答速度は0.2～0.3秒程度と、EC材料としては非常に高速である。

調光ガラスで省エネに寄与

新EC材料は、従来のEC材料の弱点を解消しているため、より広い領域での利用が想定される。なかでも有望な分野が、オフィスビルなどの窓に使われる調光ガラスである。

最近では、オフィスビルの高層化やオープンスペース化が進み、外壁に大きな窓を使うことが多くなってきた。しかし、窓から部屋に差し込む日光によって室温が上がってしまうため、せっかく大きな窓があっても、ロールカーテンやブラインドなどが設置され、外の景色が隠されてしまう。

塗布での製膜が可能な新EC材料なら、低コストで大型の調光ガラスを実現できる。それをビルの窓に用いれば季節や天候に応じて窓の遮光性を自由に変更できるようになり、空調に必要

新EC材料（メタロ超分子ポリマー）を用いた調光デバイスのサンプル



な電力の削減につながる。さらにロールカーテンやブラインドも不要になり、それらの設置コストや清掃コストもかからない。

なお、調光ガラスはガラス自体にEC機能を持たせたものだが、薄い調光フィルムデバイスを作り、設置済み窓の内側に張り付けることでも、同様の効果を得られる。

すでに、2020年9月から2021年3月まで、つくばスタートアップパーク（茨城県つくば市）で実証実験を行い、その耐久性などは検証済みだ（設置された調光ガラスはp.9）。樋口氏は今後の展開について次のように語る。

「基本的にはフィルムデバイスを作り、それを今ある窓の内側に張るといった建材としての使い方、それから車の窓に使うという車載。今は主にこれら2つの実用化を目指して進めています。実際にはいろいろな提案があります。今までのEC材料と違って、多様な色を出せますので、図柄や絵を描いたりもできるんですね。ですから、デザイン性という点からファッション用途も考えて、美術大学との共同研究も進めています。さらに、メモリ性を生かした表示デバイス、ディスプレイの共同研究も行っています。表示デバイスとしては液晶や有機ELといった非常に優れたデバイスがありますが、EC材料を使ったディスプレイは、それらの代わりというわけではなく、電

源を切っても表示が消えないという特徴を発揮できる利用方法を考えています。例えば、従来の材料を用いて、スマートフォンの裏側にEC表示デバイスを搭載した製品が中国メーカーから発売されています」

一般販売で広がる可能性

樋口氏が在籍している国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）と東京化成工業株式会社は、共同で新EC材料であるメタロ超分子ポリマーを安定供給できる合成プロセスを確立しており、東京化成工業によって2020年6月30日から、「Poly (Fe-btpyb) Purple」という製品名で一般販売が開始されている。この量産のための合成プロセスを確立したことも、重要なポイントだと樋口氏は言う。

「実用化を考えると量が大切です。いろいろな大学や研究所が新材料を開発したというプレスリリースを出しますが、『面白そうなので、サンプルを100gください』と言っても、『0.1mgしかありません』というケースが多いんです。私たちも当初は研究所で作る量くらいしか提供できなかったのですが、量産できる合成プロセスを確立しましたので、将来的には、10kg、100kgというスケールで手に入ります。そうになると、先ほど述べたようなファッションを含め、いろいろな新しいところにも使ってもらえるチャンスがくる

と思います。すでに世界中でこのEC材料を購入可能です」

さらに、東京化成工業は2021年8月からメタロ超分子ポリマー合成用の前駆体配位子の一般販売も開始している。これを利用すれば、簡単にさまざまな発色を呈するメタロ超分子ポリマーを合成できる。

新EC材料を使って研究開発を行いたいというニーズに応えられる体制が、すでに整っているのだ。

EC現象の発見

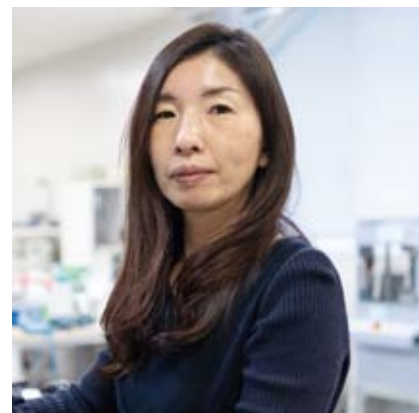
このように、新EC材料は世の中を変えるポテンシャルを秘めた材料だが、そのきっかけとなったのが、一人の女性研究員による意外な発見だ。樋口氏は、その経緯を次のように述べる。

「もともと金属材料技術研究所と無機材質研究所という2つの国立研究所があり、それらが2001年に合併してNIMSができました。その際、有機材料の分野がなかったため、本件の共同発明者にもなっているドイツのKurth Dirk G.博士を^{しょうへい}招聘したのです。彼は金属錯体をつなげてポリマーを作る研究を始めていて、私はNIMSの職員としてグループのマネジメントをしていました。そこに入ってきたのが、電気化学を専攻していた林^{あかり}灯氏さんです。彼女には、金属錯体をつなげたポリマーの電気化学的な物性を調べてもらっていたのですが、ある時、出張か

ら帰ってくると林さんに呼ばれて、『樋口さんが絶対に喜ぶすごい発見があった』と言われました。電気化学測定をするためにポリマー膜を電極に塗り、電圧をかけて何ボルトで酸化するかを調べていたら、膜が見えなくなっていたというのです」

これは、樋口氏にとっても予想外の結果であった。樋口氏は大学生時代にECを研究していたのだが、この時点では金属錯体ポリマーがEC材料になるとは思っていなかったようだ。林氏の観察眼の鋭さと幸運が、この新EC材料の発見につながったといえるだろう。当時の様子を林氏は、次のように振り返る。

「2005年1月にNIMSのポスドク研究員に着任しました。この発見があったのは、実験装置の準備ができて実験を開始してすぐ、2005年の2月ごろです。まずは、何かおかしい、何か変なことをしたのではないか、青い膜がなくなってしまった……と思いましたね。その後、冷静に考えて、これは電圧の変化で、青い膜の色が変わって透明になったのだと気づき、そこでやっと面白い現象を発見したという気持ちになりました。樋口さんにすぐ報告しようとしたのは覚えています。とりあえず、同僚にもその現象を見せました。そして、樋口さんが出張から戻られた時に『いいものを見せてあげる』と報告しました」



林 灯 氏

国立大学法人九州大学
エネルギー研究教育機構/
工学府水素エネルギーシステム専攻 教授

単に電気化学的な測定をするだけなら、膜の色などは見ていないことが多いだろう。この発見につながったのは、何よりも林氏が実験の経過をしっかりと観察していたことが大きい。なぜ、膜の色の変化に気付いたのか、林氏に聞いてみた。

「私は研究が大好きなので、いつもそこで何が起きているのかをじっくり観察します。確かに、現在学生を指導している立場から言うと、ほとんどの学生さんは装置をスタートさせたらそれで完了といった感じで、途中の経過観察を怠っていることが多く、この現象も見過ぎてしまうだろうと思います。ただ、私にとっては、実験経過を観察することはごく普通なので、気付いたのも当然のことです」

研究はスムーズだったが……

樋口氏と林氏は、本件の発明に関して、特に苦労した点はなかったと口をそろえる。

「かなり幸運でしたね。この現象が見つかった直後にさきがけ^{*1}に申請し、採用されました。その後CREST^{*2}、すぐにまた別のCREST、次に若手研究 Grant^{*3}などに選ばれたり……今は未来社会創造事業^{*4}と環境省のプロジェクトの対象になっています。こういったプログラムの採択が途中で欠けてしまっていたら、ここまでは到達できなかったと思います。やはりある程度の予算がついていないと研究を継続できないからです。そういう意味では非常にラッキーだったと思っています」(樋口氏)

「私はこの後、産業技術総合研究所

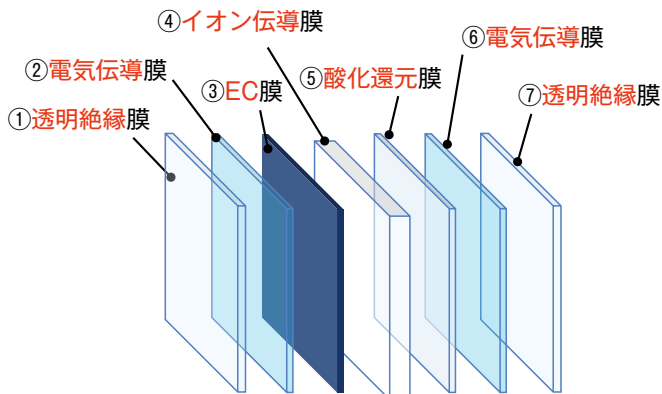
(AIST) で燃料電池の研究を始めましたから、NIMSでこの研究に携わったのは1年程度です。賞をいただけるような実績につながったのは、樋口さんのご尽力によるところが大きいと思います。そういう意味でも私が苦労した点はありませんね。私が携わった1年間は、青色以外にも色を出そうと取り組みました。具体的には、用いる金属イオンの種類を変えたりといった試行錯誤です。苦労というよりもむしろ楽しかった記憶が多くありますね」(林氏)

また、長年研究生生活を送ってきた樋口氏は、材料に関する一種の勘のようなものが働くようになっており、今回の新EC材料は、これはいけるという確かな予感があったという。

「研究にもいろいろなブームがあり

ましたが、ブームに^{ほんろう}翻弄されずに材料の本質を見ていきたいですね。研究者は、自身の研究のことをよく分かると思うですよ。例えば『これをやりま^す』と提案しても、心の中で『これは無理かな』とか。ある材料を作るのに4段階、5段階の反応過程が必要なら、『絶対に高いものになってしまうだろう』とか。あるいは『これは劣化する特性があるから、実用化には向かない』とか。そういう研究者が持っている認識とか勘のようなものがあると思うんですけど、私もそういう認識を大事にしている、ダメなほうに向かわないように心がけています。新EC材料はどうかというと、いろいろな他の材料を研究してきたなかでも、これは作りやすく、使いやすいんです。みんなにも使ってもらえそうだなという

新EC材料（メタロ超分子ポリマー）の調光ガラスの構造



用語解説

- ※1) さきがけ 文部科学省が定めた戦略目標の下、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）が実施する戦略的創造研究推進事業の一つで、個人研究を対象とする。若手研究者が研究者ネットワークを形成しながら、チャレンジングな研究を推進。
- ※2) CREST JSTの戦略的創造研究推進事業の一つで、チーム型研究を対象とする。国内トップ研究者が率いる複数のチームが、チームに参加する若手研究者を育成しながら、研究を推進。
- ※3) 若手研究 Grant 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業（NEDO法15条1項3号）。大学・研究機関等の若手研究者が取り組む産業応用を意図した研究開発を対象とする。
- ※4) 未来社会創造事業 経済・社会的にインパクトのあるターゲットを見据えた目標を設定し、戦略的創造研究推進事業や科学研究費助成事業等の有望な成果の活用を通じて、実用化の可否を見極められる段階（概念実証）を目指した研究開発を行うJSTの事業。

感覚があって、それを信じているというか。このEC材料はそういった意味でもいけると思いました」

樋口氏は、自分の研究人生はラッキーだったと語ったが、新EC材料の用途については紆余曲折もあり、調光デバイスに使えろと言いつつ使えなくなったのは、耐久性や耐熱性などがしっかり検証できてからの、ここ2～3年だという。

「それまではディスプレイだとか、電子ペーパーだとか、そのときそのときで思いつく用途を挙げていました。それらに対して『それはダメだよね』『おかしいよね』といったたくさんのダメ出しを受け、現在に至っています。そういう意味では、このEC材料が何が一番向いているのか、いまだに分かりません。それは私が見つけれられることではなく、世の中の誰かが見つけてくれることなのかもしれないですね。今は調光ガラスを大きな用途の一つと位置付け、そのためには材料が大量に必要なということがたくさん作っています。理想的には、色が変わる材料に関心を持ってくださる人が増え、実際に使っていただき、何か驚くような用途を発見してもらいたいですね」

研究は楽しむべし

長年研究に携わってきた樋口氏に、研究や仕事について聞いてみた。

「もう実験はしていません(笑)。研

究者あるあるですけど、偉い先生が突然白衣を着てどうしたのかなと思っただけで、なんかの撮影だったと(笑)。ただシニアになってきて自ら実験しなくなり、学生やポスドクから出てきたデータを見てチェックするだけになると、私自身怖いと感ぜますね」

実験する立場と管理する立場のギャップは、同じようなキャリアを歩んできた多くの人も感じることであろう。しかし、樋口氏は管理者側の難しさについても決して悲観的に捉えているわけではない。

「何が正しくて何が正しくないかは実験者にしか分からないのに、出てきた成果だけを見て判断するなんて恐ろしいことですが、この問題を回避する方法があって、それがまさにECなんです。例えば私が大学で研究していた触媒反応は、『1時間で収率が90%になった』とか、『50%までしかできなかった』というときに、なぜ50%や90%なのか分からないですし、実験者の技量の問題や計算間違いもあるかもしれない。でもECなら、ひと目で判断できます。『とてもいい結果でした』とポスドクの人が言ったとしても、実際に駆動させてすぐへたってしまったら『おかしいね』となりますから。研究が間違った方向に行きにくいんです。実は、私がこの分野に取り組んでいる理由の一つにはこういう観点もあるのです」

一方、林氏は研究や指導における心がけについて、次のように語る。

「心がけているのは、妥協しないということです。妥協というのは、自分のなかでの線引きであり、客観的に評価することは難しいので、自分の思うところの妥協にはなりません。妥協しないと決心すると、それなりの体力が必要になりますし、大変です。しかし、共に時間を過ごした学生が育って社会に旅立っていく姿を見ると、今はやりがいのある仕事ができていると感じています」

こうした林氏の研究や指導に対する真摯な態度は、EC現象を発見した17年前から一貫して変わらない。

林氏は現在、九州大学の教授として学生を教えているが、そうした立場から学生や若い研究者へのメッセージをいただいた。

「若手研究者のなかでもかなり若い研究者、つまり修士課程の学生さんにメッセージを送りたいと思います。残念ながら、現在の日本の社会は、修士課程のほとんどの時間を就職活動のために使うような仕組みになってしまっています。そのため、修士課程では片手間で仕方なく研究を行っているように見えることもあります。しかし、楽しまなければ、研究をしてもよいものは生まれません。是非、研究を楽しんでください」

(文責：石井 英男)