

JST news

未 来 を ひ ら く 科 学 技 術

1

January
2016

FEATURE 01 3次元ナノ多孔質グラフェンで
電気自動車をガソリン車並みのパワーに

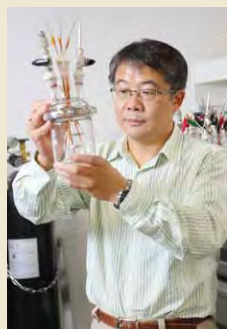
FEATURE 02 脱石油化学への挑戦
環境と資源の危機を「触媒」で乗り越える



国立研究開発法人
科学技術振興機構
Japan Science and Technology Agency

3 「TOP100 グローバル・イノベーター 2015」JSTが受賞

4 濱口理事長インタビュー

海図のない近未来へ
イノベーションの先導役を6 FEATURE 01
3次元ナノ多孔質グラフェンで
電気自動車をガソリン車並みのパワーに10 FEATURE 02
脱石油化学への挑戦
環境と資源の危機を「触媒」で乗り越える14 NEWS&TOPICS
あらゆる人に開かれた科学と社会をつなぐ広場 サイエンスアゴラ ほか16 さきがける科学人 Vol.45
ブレークスルーをもたらす、カッコいい分子をデザインしたい
深澤愛子（名古屋大学大学院理学研究科 准教授）

表紙写真

研究室でコインセル型リチウム空気電池を手にするCREST研究代表者の陳明偉さん。ナノ多孔質グラフェンによる電極が実用化されれば、リチウム空気電池の性能が飛躍的に向上し、電気自動車がガソリン車並みのパワーを発揮するはずだ。



・特許の
影響力を評価
・公的機関で
日本初の快挙

「TOP100 グローバル・イノベーター 2015」 JSTが受賞

JSTが「TOP100 グローバル・イノベーター 2015」を受賞しました。世界的な情報サービス企業のトムソン・ロイター社が保有する特許データを基に知的財産や特許動向を分析し、独創的な発明のアイデアを知的財産権で保護し、事業化に成功した企業・機関100社に贈られます。5回目となる今年は日本から世界最多となる40社が選出されました。JSTは日本の公的機関としては初の受賞です。

授与式は昨年12月3日、JST東京本部別館で行われ、トムソン・ロイター社の棚橋佳子取締役日本営業統括部長から、濱口道成理事長にクリスタルのトロフィーが贈られました。

同賞は「特許数」、「成功率」、「グローバル性（欧州、米国、中国、日本に出願している割合）」、「引用における特許の影響力」の4つの評価軸で分析して選出されます（分析対象は過去5年間。「グ

ローバル性」のみ過去3年間）。

棚橋取締役は、JSTの初受賞について「『影響力』の評価が100社中トップであった」ことを明らかにしました。それを受けて濱口理事長は、「JSTの仕事が単に特許数が多いだけではなく、その成果が着実に社会実装されて、世の中の役に立っていることが客観的に評価されたもので、何よりも嬉しい」と喜びの声をあげ、「ノーベル賞は数十年前の成果が評価されるが、今回の受賞はJSTの今現在の活動、現場の人た

ちの活力がリアルタイムで総合的に評価された証で、その意義は大きい」と話しました。

今年選出された企業・機関の数は、日本が40社、2位の米国は35社。昨年に続き、今年も日本の企業・機関の受賞数が米国を抜いて世界最多でした。ソニー、富士通、オリンパス、トヨタなど国内15社が5年連続で受賞し、12社が今年初めて受賞しました。アジアからの選出は、韓国3社と台湾1社。北米からは36社、ヨーロッパからは20社でした。



授与式の様子。左からJST 安藤理事、濱口理事長、トムソン・ロイター社 棚橋取締役、堀切シニアセールスマネージャー。

濱口理事長インタビュー

海図のない近未来へ イノベーションの 先導役を

—— 就任3カ月が過ぎました。まずJSTの印象はいかがですか。

濱口理事長●想像以上に規模の大きな組織で、内外への影響力も強いことを知りました。私たちのあり方次第では10年後、20年後の日本の活力にもつながるはずで、とても責任が重い。

JSTは、海図なき時代のイノベーションの先導者です。イノベーションは社会的価値の創出や、役に立つ出口というのが必要です。しかしこうやれば良いとの必勝法がありません。その中でも成功を導く人材育成やファンディング（研究資金の配分）のやり方がきつとあるはずで。

注目したいのは、研究開発戦略センター（CRDS）のシンクタンク機能です。大学や研究者の実情、産業界のニーズ、国内外の動向についての調査能力も持っています。世界を俯瞰しながら日本の強みや弱みをデータに基づいて分析し、社会へ提言のできるシンクタンクはここだけでしょう。この力量と役割の重要性を実感しています。

——これからどの方向に力を入れていくと考えていますか。

濱口●若者の行動を見ていると、私の息子もそうですが、違う世界に生きているように感じます。情報通信の環境が劇的に変化し、世の中の構造や価値観、コミュ

ニケーションが大きな変化を起こしています。その情報は玉石混交ですが、時にはどこにもない重要な情報がポロッと出てくることがあります。ツイッターなどで、誰でもナマの意見を発信できるようになりました。明治以来の日本の情報構造が土台から変化しているのです。それに合わせて科学技術政策も大きく変わる必要があるし、このエネルギーをうまく取り込み利用できれば、もっと大きな力が出せるようにも思います。その具体的な戦略や方策が見えていないのですね。

（科学ジャーナリスト・浅羽雅晴）

科学技術と社会の関係も大きく変わり始めています。専門家が知識に基づいて説明をし、市民が黙って聞くという時代から、両者がフラットに議論できるようになりました。これが実は非常に大事なのです。そこから日本の次のあり様が形作られていくのだと思います。その意味でも、毎年11月に東京・台場で開かれる科学と社会をつなぐ広場「サイエンスアゴラ」には注目しています。

研究者の意識も変えながら、幅広い市民の方々と対話するためにも、アゴラを全国各地で通年展開し、各大学の先生方にも参加、運営協力していただくような場を作りたいと考えています。

私は数年前に、英国王立国際問題研究所、通称「チャタムハウス」にならない、名古屋大学で学生や研究者らと半日のイベントを実施しました。日本の政治、経済、教育などをテーマに議論し、そこでの要点は匿名で公開しました。結論は出さないやり方ですがとても効果がありました。

大学が社会に対して積極的に発信している時代なので、JSTもそれをサポートしながら新たな協力関係を作りたい。これができれば私たちの存在が研究者にもっと知られるようになるでしょう。単なる大型の研究費を配分する組織というイメージから、科学技術の大黒柱だとの認識に変わってくるかもしれません。

—— 新たな柔構造のやり方ですね。科学と社会の関係を深めるには大切です。

濱口●ICT時代に合わせた取り組み方を持ちたいものです。中身はそこから出てくると思います。その中でもう一度、東日本大震災の問題も取り上げたい。今年は福島などの被災地に出かけ、「震災の今を語る」ような形で、議論したいと考えています。

—— 大震災を機に、科学者の信頼が大きく低下しました。

濱口●そう思います。地震予知など科学技術への過大な期待を生んだ反面、それが裏切られた落胆や絶望や、救済を求める声に、科学者からの十分なサポートがなかったからでしょう。しかし、東日本大震災では各大学の医学部の救援活躍はめざましいものがありました。名古屋大学は震災2日後から4トントラックで3、4台分の救急・救援資材をかき集めて被災地入りし、スタッフは寝袋で寝泊まりしながら交代で1年半以上も働き続けました。被災地にも大変感謝されましたが、学生や若い医師たちにとっても貴重な勉強になったようです。

—— 日本は災害大国です。地震、台風、津波、山崩れ、さらに温暖化によって海面上昇や気候激変が心配されます。安全や減災の科学技術を磨くことは、国内だけでなく途上国支援にもつながるはずです。

濱口●災害に対処できる新たな専門家を育てるべきですね。研究者は実験室などで、過去のデータ分析をする能力には長

けていますが、社会とか大きな自然構造の中で、リアルタイムで起きていることに対応するには弱い面がありますから。

名古屋大学総長の時代に「減災連携研究センター」を作りました。愛知県内の市町村の古文書を集めて分析しています。過去にどこでどんな地震が起き、どんな被害があったかを収集し、ハザードマップを作り、地域を知ることから始めたのです。市町村の防災担当職員を大学に派遣してもらいトレーニングしています。同じ様な地震でも地域によって被害も対策も違うからです。

このセンターについて、アメリカの科学雑誌「サイエンス」の女性編集長と話したことがあります。彼女は、テキサス湾でオイル流出事故の際に、政府の一員として対策に動いた方だったのです。彼女は「アクタブルサイエンティストが必要になる」と話していました。災害緊急時に現地に直接入って、実際にリアルタイムで対策を立てる科学者のことです。科学技術の力で人命被害を最小限に抑えるのです。こういう形の科学者と科学が本当に必要な時代になりました。

—— 国の科学技術予算が縮小気味の中で、JSTも選択と集中が必要になってきます。再構成が迫られるのはどこなところでしょうか。

濱口●まだ勉強中ですが、JSTの組織構造は高度成長期のように予算が増加し、事業を拡張したそのままに残っており、以前の大学の姿を見るようです。もっと時代に合った組織に変える必要があると感じています。

JSTが担当する科学技術はハイリスク・ハイリターン分野です。国がサポートを決めたからには挑戦してもらわないといけない。大きな発明や仕事というのは、それ自体が革命的であり社会に大きな影響を与えます。青色発光ダイオードの発明がそうで、ノーベル賞の受賞理由にも「15億の人に光を与えた」と書かれています。すごいインパクトですね。こうした研究支援をこれからもめざしたいですね。

—— 昨年暮れには新設したインドのリエゾンオフィス（連絡事務所）に行かれました。インドにはどんなことを期待しますか。



濱口●インドには非常に優秀な人がたくさんいますので、その人材を日本に紹介したいのです。私も仲の良いインド人の友人がいます。国民は二桁の掛け算が暗算できるくらい訓練されていますが、古い社会制度のカースト制でそうした能力が生かされているわけではありません。また主要な言語だけで15もあります。価値観の多様性の奥深さは日本とは比べようありません。現代社会はそうした多様性が発展の原動力になるはずで。

日本は多様性という柔軟性を失っている。インドの人たちとの交流でそれを回復し、また日本の中でマイノリティーの立場の女性ももっと活躍し、発言できるように国にすることが求められています。

ダーウィンの言葉にもあります。「この世の中で生き延びるのは、最強の生物ではない。最も賢い生物でもない。環境に適応した生物のみが生き残るのだ」と。

—— 最後に座右の銘とか、趣味などを紹介してください。

濱口●よく父から言われたことは、「^{かんなん}艱難^{しんく}辛苦、汝を玉にする」でした。苦労は買ってでも経験をするもので、それで人間は磨かれるものだという意味でしょう。

趣味は絵を描くことです。花の咲き誇る勢いの生命感がいいですね。園芸も好きで、暇のあるときはバラや季節の花々を育てます。花が育って咲き始める姿には命の力を感じ取ります。まるで学生を育てることに似ていて楽しみです。

—— 命を尊ぶお医者さんの目と、人を育てる教育者の眼差しを感じました。ありがとうございました。

3次元ナノ多孔質グラフェンで 電気自動車を ガソリン車並みのパワーに

繰り返し充放電できる2次電池（バッテリー）の中で現在、リチウム空気電池が注目を集めている。東北大学の陳明偉教授らが開発した3次元構造を持つナノ多孔質グラフェンを正極に用いることで、高容量、高効率のリチウム空気電池開発に道を開いた。「日本のチーム力」での研究に秘訣があるという。

陳 明偉 チン・メンウェイ 東北大学原子分子材料科学高等研究機構教授

1995年、中国上海交通大学材料専攻博士課程修了、博士（工学）。94年中国上海交通大学助手、助教授、97年東北大学金属材料研究所客員研究員、99年米国海軍大学院 NRC フェロー、2000年米国ジョーンズ・ホプキンス大学助手、研究助教授、03年東北大学金属材料研究所教授を経て、10年より現職。11年よりCREST 研究代表者。



大きな表面積と高い導電性能を持つ理想的な電極材料

二酸化炭素の排出が少ない「低炭素社会」を実現するには、自動車の排出ガス削減も重要だ。1つの有力な解決策が電気自動車だが、現状ではフル充電での走行距離は200キロメートルほどで、遠

出には物足りない。充電スタンドというインフラの不足と共に、電気自動車のバッテリーの電気容量（総電力量）が小さい点が高い壁となっている。

現在最も多く普及しているリチウムイオン電池では、負極に炭素化合物、正極にリチウムとコバルトやマンガンの酸化物を使っている。これに対し、リチウム空気電池は負極にリチウム金属、正極の材料に導電性多孔質体を用いることで、リチウムイオン電池の5～8倍の容量が得られると期待されている。しかし、充電と放電の両方の化学反応に対応した電極材料や触媒は開発途上で、金属や炭素系材料を用いた激しい競争が繰り広げられている。

東北大学原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR) の陳明偉教授らは、容量を大幅に増やすことができるリチウム空気電池向けの画期的な電極材料を開発した。将来、この電極材料を用いたリチウム空気電池が実用化できれば、充電1回あたりの走行距離は500～600キロメートルに伸び、100回以上の繰り返し使用も可能になるという。鍵となったのは、ナノ多孔質グラフェンだった。

リチウム空気電池は、負極にリチウム金属、正極に空気が使われる。空気そのものが電極になるのではなく、実際には正極に導電性多孔質体に触媒金属を堆積させたものを使う。放電時には負極のリチウムがリチウムイオンとなって電解液を通過して正極の多孔質体に入り、空気中の酸素と結合して過酸化リチウムになる。充電時にはこの過酸化リチウムが分解してリチウムイオンを放出し、電解液を通過して負極に運ばれる。

リチウム空気電池は、リチウム金属と

導電性多孔質体を電極材料として固体・液体・気体の三相界面上で電子のやりとりをする。このため、液体と気体を効率よく混ぜることができ、かつ触媒上で放電の際に起こるリチウムイオンの酸化と充電時に起こる過酸化リチウムの分解を起こすことができる導電性多孔質体が正極に使われる。

金属を鋳型にして多孔質物質を作る

10年以上前から、金やニッケルで3次元の多孔質物質を作る研究を続けてきた。その中から「金属を鋳型にして作る」というアイデアが生まれた。その方法はユニークだ。「炭素を蒸発させてガス化し、多孔質の金属などに付着させるのです。その後、鋳型の金属を溶かしてやれば炭素だけが残

陳さんはすでに2012年の論文で、ナノ多孔質の金を用いたリチウム空気電池の可能性を示していた。グラフェンはシート状に結合した炭素で、1枚の紙のような形状をしている。「紙をくしゃくしゃに丸めても表面積は変わりませんね。同じように、2次元のグラフェンを3次元にまとめれば、広いスペースを使わずに表面積を確保で

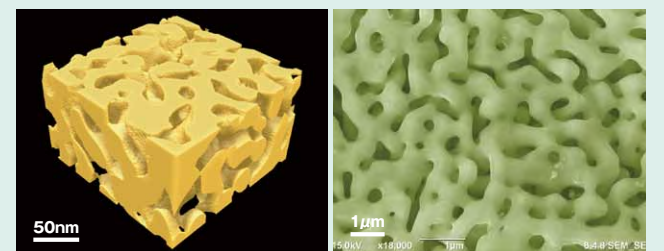
きるのです」と特徴を語る。さらに、「グラフェンは優れた導電性能を持っています。そこで、3次元で多孔質のグラフェンを電極として使えば、空気も電解質も電子も大量にかつ自由に動くことができます。反応がより早く進むので、充電時の過電圧も低く抑えることができます」と、理想的な電極材料であることを強調した。

グラフェンシートと変わりがなく、電気デバイスとして使うめどが立った。

「こうしてできた3次元ナノ多孔質グラフェンには、100～300ナノ(10億分の1)メートルの微細な孔が大量にあります。孔の中に生成物である過酸化リチウムを貯蔵でき、大きな表面積を持っているので分解反応が促進されやすいという効果もあります」。

図1 3次元ナノ多孔質グラフェン

化学気相蒸着法でグラフェンを成長させると3次元ナノ多孔質グラフェンができる。左はその鋳型となるナノ多孔質金属の3次元立体図。右はナノ多孔質ニッケル上に成長した3次元ナノ多孔質グラフェン。



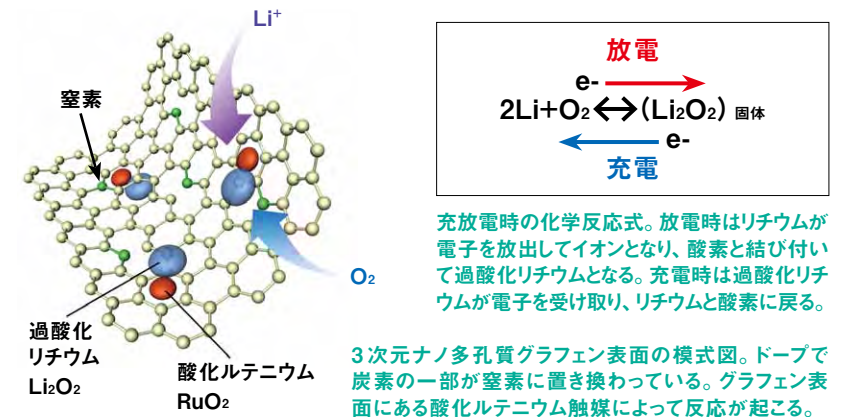
鼻薬のドープで化学マジック

電極の性能向上には、結晶の物理的性質を変化させるために不純物を鼻薬のように加える「ドープ」という手法も使う(図2)。結晶構造の一部がドープされた物質と置き換わる。

「純粋なグラフェンは炭素のみでできていますが、いろいろな物質をドープすることで、表面積を変えたり、導電性能を変えることができます。これは一種の化学的なマジックです。3次元ナノ多孔質グラフェンには窒素をドープしています」と陳さんは説明した。

グラフェンに窒素をドープすると、炭素の1つが窒素に置き換わるため、平面の形が歪んで立体化する。

図2 ドープと触媒で性能アップ



「どんな元素をドーピングするかは、まず物性を調べて計算するのですが、それだけではうまくいきません。あとは試行錯誤ですね。計算と試行を両方やってみることで確率を高めていけます。計算だけで見つかるほど単純ではありません。もちろん、幸運もありますね」。

効率の良い化学反応を促進させるには、触媒も重要で、その作用を促すために少量のルテニウムという貴金属も添加している（7ページ図2）。

「触媒に使った酸化ルテニウムのナノ粒子は、添加しても電極自体が持つ大きな表面積や導電性能を損なうことはありません。むしろ、3次元ナノ多孔質グラフェンの特性と、触媒としての酸化ルテニウムの2つが共に働くことで、より効率的に性能が発揮できます。炭素のみの多孔質グラフェンではこうはいきません」。

通常、2次電池では、充電に要する電気を100パーセント放電に使うことはできない。放電するときの電気を充電に

必要な電気で割ったものをエネルギー利用効率と呼ぶ。同じ3次元ナノ多孔質グラフェンでも、酸化ルテニウムを添加した場合のエネルギー利用効率は72パーセントで、添加しない場合の58パーセントを大きく上回った。複数回の充電後にも、酸化ルテニウムが壊れずに触媒として機能していることもわかった（図3）。

「ルテニウムは希少金属なので安くはありません。より安く効率の良い触媒がないか、探索しています。まだ3次元ナノ多孔質グラフェンに別の物質を添加することで、より効率が良くなるということを示したにすぎません。もっと電極の性能を上げられると思います」。

しかし、リチウム空気電池にも大きな課題はある。

「今回開発したナノ多孔質グラフェンはサンプルとしては十分なサイズですが、実用化を考えるとまだまだ小さなものです。大型のものをどうやって作るかが今後の課題です。装置も大型化し、新たな技術も開発する必要があります。企業と組んで研究を進めることも考えています」。

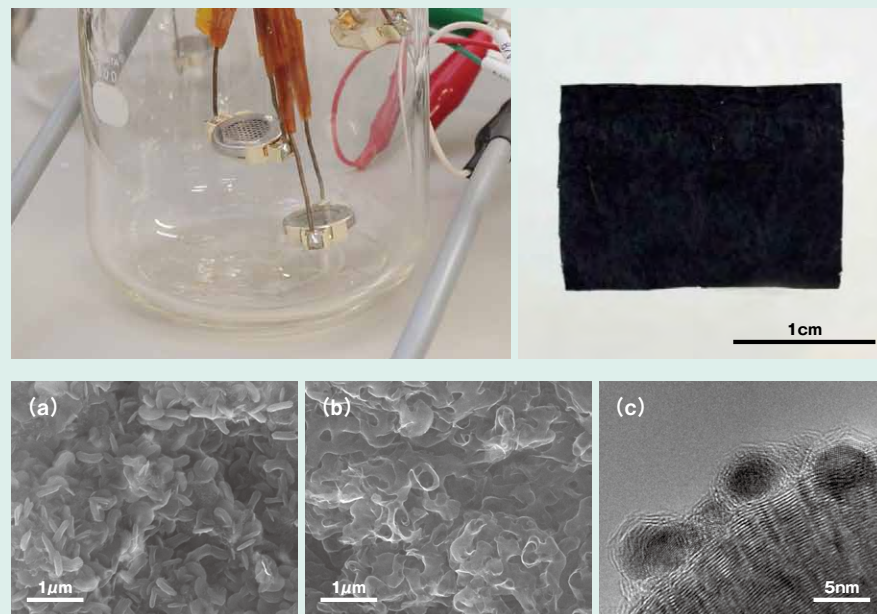
ナノ多孔質グラフェンによる電極が実用化されれば、リチウム空気電池の性能が飛躍的に向上し、電気自動車がガソリン車並みのパワーを発揮し、爆発的に普及するはずだ。



窒素をドーピングした3次元多孔質グラフェンを作製する機械。写真右は金属鋳型を除去する前の3次元多孔質グラフェン。金属鋳型を溶かすと、図3右上のように黒くなる。

図3 リチウム空気電池と 充電実験時の 電子顕微鏡写真

コインセル型リチウム空気電池（左上、2つとも）と窒素をドーピングした3次元多孔質グラフェン（右上）。下は3次元多孔質グラフェンの表面の走査型電子顕微鏡写真。(a)が充電前、(b)が充電後。(c)は(b)の拡大（透過型電子顕微鏡写真）。グラフェンの層に覆われた酸化ルテニウムのナノ粒子（丸く黒い部分）が充電後も壊れずに存在していることがわかる。



日本、中国、アメリカのエネルギーシステムを変えたい

リチウム空気電池だけが、3次元ナノ多孔質グラフェンの用途ではない。現在、並行して研究を進めている重要なテーマに水素発生装置の電極としての使用がある（図4）。

「窒素と硫黄をドーピングして作った3次元ナノ多孔質グラフェンを、水から水素を電気分解するときの電極として用いると、大変効率良く水素を発生させます。通常、

水素発生装置の電極には白金が使われますが、非常に高価です。これを、炭素、窒素、硫黄などありふれた物質で作ることができれば大変安価になります。必要な電圧も、白金の代替として使われるニッケルとほぼ同じです」と自信を見せる。

水素は、燃焼後の生成物として炭酸ガスを出さず、水だけが残る。水からは再び水素を取り出せるので、エネルギーの循環

システムとして非常に優れている。手軽に使うことができれば、低炭素社会の実現に大きく寄与できるというのだ。

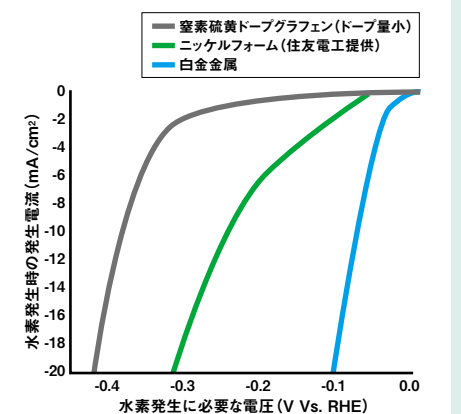
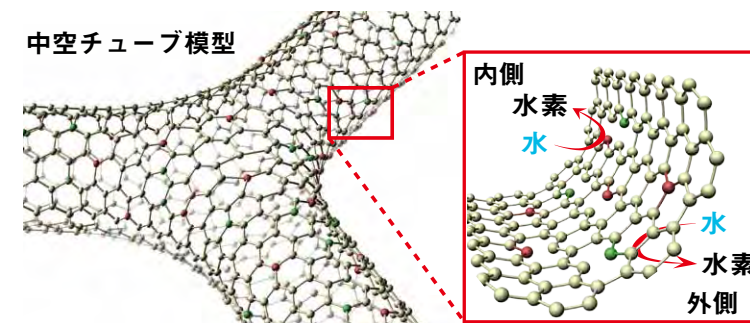
「今や地球上の炭素の全排出量は日本と中国、アメリカで50パーセントを占めています。3つの国のエネルギーシステムが変われば、世界が変わります。3次元ナノ多孔質グラフェンでそれを実現するのが、この3つの国で暮らしてきた私の夢です」と語った。

図4 水素発生電極としての応用

窒素と硫黄をドーピングした3次元ナノ多孔質グラフェンの中空チューブ模型。ナノ多孔質グラフェンを電極に用いると、これまでのニッケルや白金に比べて、同じ量の電流を発生させるのに必要な電圧が低くて済む（右のグラフ）。

窒素と硫黄を含有した3次元ナノ多孔質グラフェン

中空チューブ模型



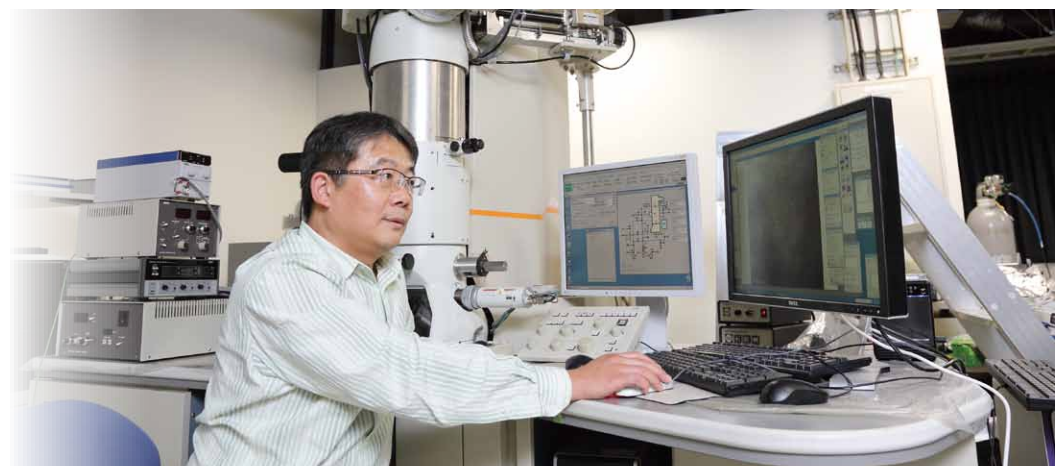
日本のチーム型研究で大きな夢の実現を

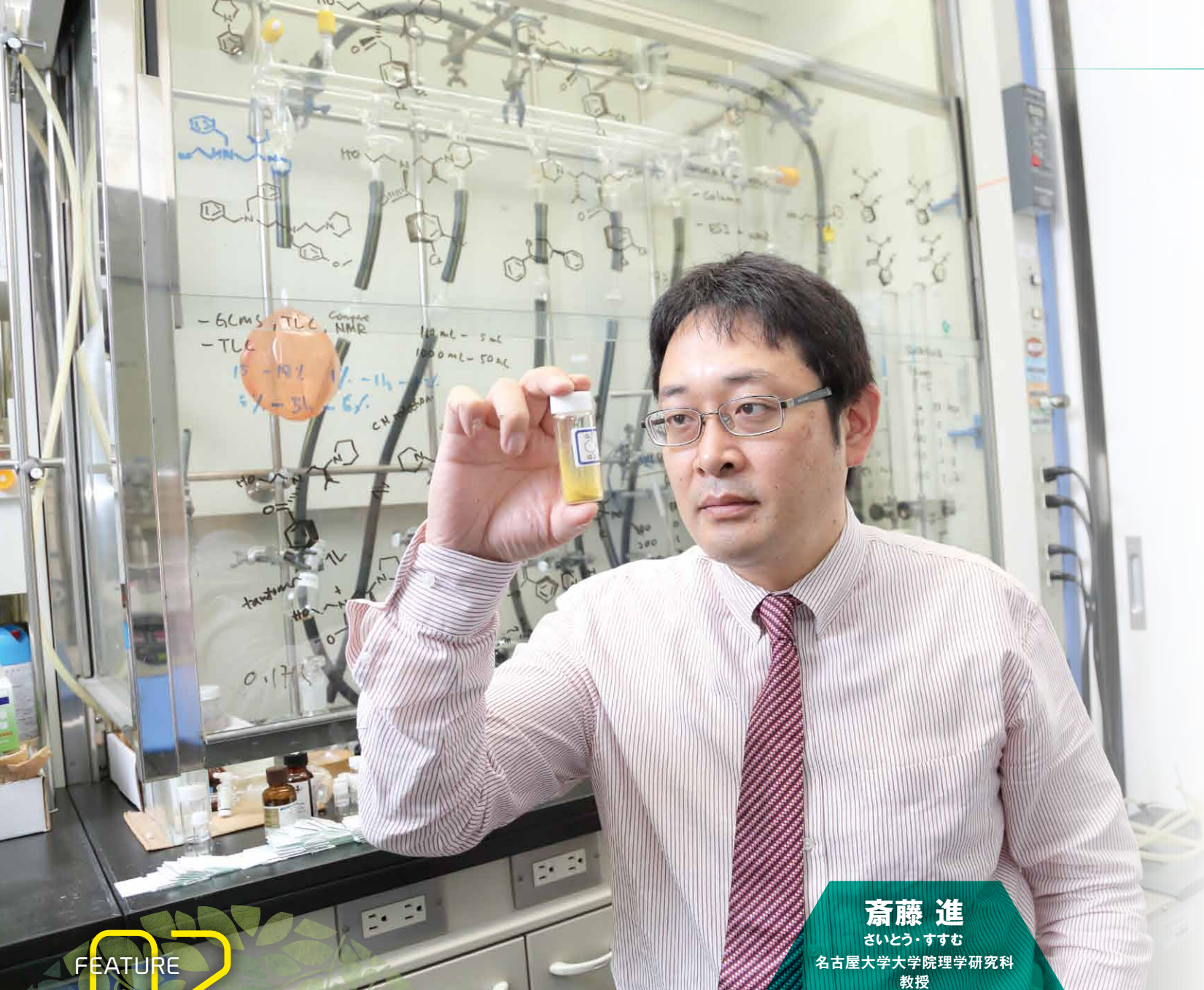
夢の実現へ向けてまい進する陳さんだが、研究の環境としては日本が一番合っているという。

「私の幸運の1つは、ここ日本で素晴らしい研究チームを持てたことです。メンバーはみんな優秀で自分たちの役割をしっかりと果たしています。私は彼らにアイデアを与え、成果が出せるようまとめ役として動いているにすぎません。アメリカでも研究生活を送っていましたが、アメリカでは研究者が経営者のように研究室を運営します。いわば個人が単位です。日本はチームで研究を進めていけるので、私には魅力的です。いいチームに、東北

大学の素晴らしい施設とJSTのCRESTの資金援助システムもある。日本の環境は、私に実によく合っています」。

満足そうに語る陳さんの目には、3次元ナノ多孔質グラフェンがもたらす未来が映っている。





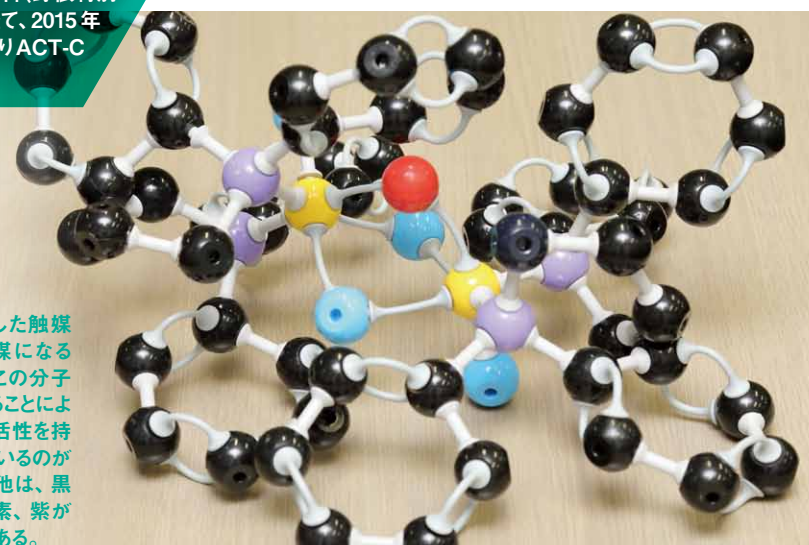
齋藤 進

さいとう・すすむ

名古屋大学大学院理学研究科
教授

1993年、名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了、94年米国ハーバード大学化学科訪問研究員、博士(工学)。名古屋大学大学院助手、同大高等研究院および同大学院理学研究科(野依特別研究室)准教授を経て、2015年より現職。12年よりACT-C研究代表者。

齋藤さんが開発した触媒の「前駆体(触媒になる前の化合物)」。この分子の一部が変化することにより、触媒としての活性を持つ。黄色で表しているのがルテニウム。その他は、黒が炭素、青が塩素、紫がリン、赤が酸素である。



難攻不落の物質、カルボン酸への挑戦

触媒とは「化学反応を引き起こしたり促進したりするが、反応前後で自身は変化しない物質」をいう。多彩な機能を持たせることができる触媒は、エネルギー、産業、環境などあらゆる分野に関わっている。プラスチックや風邪薬を作るのにも欠かせない。自動車の排気ガスから有害物質を取り除くにも使われている。このすそ野の広さが触媒研究の魅力だと、齋藤さんは目を輝かせて語る。

「低エネルギーで持続できる社会を築かなくてはなりません。そのために解決すべき地球規模の課題はさまざまです。触媒の研究が進めば、多くの課題に答えを出せます」。

その1つにつながるものとして、齋藤さんは多くの種類のカルボン酸を効率的にアルコールに変換できる画期的な触媒を開発した。

カルボン酸とは分子中に「カルボキシ基

($-\text{COOH}$)」を持つ有機化合物である。樹脂や繊維の原料として石油から作られる一方、自然界にも多く見られる物質で、私たちの日常生活に身近な存在だ。リンゴに含まれるリンゴ酸、魚に多いDHA(ドコサヘキサエン酸)や、私たちの体を構成するアミノ酸もカルボン酸の仲間だ。

カルボン酸は天然に豊富に存在し、工業的に大量生産する研究も進んでいることから、再生可能資源として注目され、アルコールに変換するための研究が世界中で行われている。アルコールは、少ないエネルギーで燃料や医薬品、農業や化粧品の原料にもなる。使い道は多種多様だ。

カルボン酸をアルコールに変換する方法の1つが「水素化」である。水素分子の結合を切って、2つの水素原子を両方とも反応物質に結合させる。ここではカル

ボン酸に水素原子を付けることを指す。水しか排出しないクリーンな反応だ。

だがそこには大きな問題があった。カルボン酸はエネルギー的に非常に安定した構造の物質で、固体触媒を使用し、200度以上の高温や、100気圧ほどの高水素圧にしないとアルコールに変換できないことが多い。多大なエネルギーを必要とする上に、変換できるカルボン酸の種類も限られる。温度を上げると余計な反応を誘発して副生成物が多くなり、アルコールだけを取り出すには手間がかかる。「私たちが追い求めているのは、今までのものとはまったく違います。もっと省エネルギーで、もっと効率よく、いろいろなカルボン酸をアルコールに変換できる触媒です」。

難攻不落なカルボン酸を崩して社会に役立てたいと、齋藤さんは果敢に挑んだ。

ルテニウム錯体は歴史ある触媒

齋藤さんが開発した触媒は「ルテニウム錯体」だ。ルテニウムという金属を中心に持ち、その周りを有機分子が取り巻いている(図1)。珍しい物質ではなく、この構造を持つ錯体が触媒として機能することは50年以上前から知られていた。

触媒の種類は、「溶けて働く」タイプと「溶けずに働く」タイプに大きく分けられる。ルテニウム錯体は「溶けて働く」分子性の

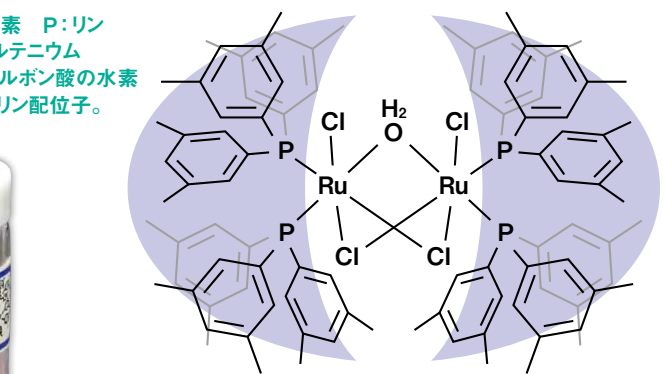
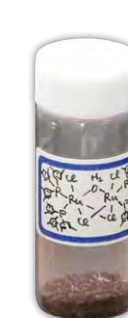
触媒(分子触媒)である。一方、「溶けずに働く」タイプには固体でできた触媒(固体触媒)があり、自動車の排気ガスを浄化するシステムなどに利用されている。ルテニウム錯体のような分子触媒は精密な化学反応を起こすことができ、ファインケミカルと呼ばれる精密化学品を作るのに欠かせない。分子触媒が作られるようになってから、医薬品のように精密さを必要とするさ

まざまな化合物が合成できるようになった。

「固体触媒はいわば力技で相手をねじ伏せるような触媒です。炭素原子の連なった石油などの分子をズチズチと切っていくような反応が得意。一方の分子触媒は、ある分子のある結合を1つだけ切るといった精密な反応を起こせるのが利点です」。カルボン酸をアルコールに変換する反応で、ルテニウム錯体はどのように働くのだろうか。

図1 齋藤さんが開発したルテニウム錯体の構造

H:水素 O:酸素 P:リン
Cl:塩素 Ru:ルテニウム
紫色の部分はカルボン酸の水素化に有効な有機リン配位子。



分子触媒は粉末状で、使用する際は反応液に溶解する。

FEATURE 02

脱石油化学への挑戦

環境と資源の危機を「触媒」で乗り越える

私たちの生活は石油によって支えられている。燃料だけでなく、身の回りのあらゆるものの原料でもある。それ故、石油文明とも呼ばれる。しかし石油依存には大きな問題がある。限りある資源であるとともに、温室効果ガスの二酸化炭素を発生し、地球環境に悪影響を与えている。こうした危機的な状況を触媒の力で打破し、低エネルギーで持続可能な未来社会を切り開こうとする化学者がいる。名古屋大学大学院理学研究科の齋藤進教授だ。



原点に戻ったとたんに、女神がほぼ笑む

カルボン酸に水素原子を付ける反応を手助けする触媒として、水素化反応で優れた性質を示すことが多いルテニウム錯体に注目した。

「ルテニウムには6本の手があります。手が2本だったら、買い物袋を2つ持ったらふさがってしまいます。でも6本あれば、買い物袋を下げるだけでなく、傘を持って、自転車にまで乗ることができます」と例えるように、6本の手で6つの原子と結合でき、手がふさがれば安定した状態となる。いろいろなものをくっつけて、いろいろな機能を持たせることができる、便利な原子なのだ。

高温や高水素圧をかけずに水素化できるルテニウム錯体の開発は、苦難の道だった。

「私たちはアミドやウレタン（カルバメート）など安定な物質を水素化する触媒の開発に成功してきました。その経験を生かせば、カルボン酸を水素化する触媒も作れると考えていました。いろいろな構造を試しましたが、全部ダメでした」。

何年も失敗し続け、原点に立ち戻る決

意をした。この分野の原点というべき存在で、1973年にノーベル化学賞を受賞したイギリスの化学者、ジェフリー・ウィルキンソンが活躍した1960年代に戻って出直すことにした。

ウィルキンソンは、金属も有機分子を付ければ水に溶けて分子触媒になることを発見して金属のイメージを一新した。ルテニウム錯体が水素を活性化できることも発見した。

研究し尽くされ、もはや過去のものと思われていたウィルキンソンの触媒をもとに研究を再開したところ、カルボン酸を水素化する糸口が見つかった。ついに女神がほぼ笑んだのだ。

「ウィルキンソンのルテニウム錯体そのままでは、カルボン酸は水素化できませんでした。ところが、特殊な添加剤を加えることで、高温・高水素圧の条件下に限ってですが、水素化できるようになったのです」。ルテニウム錯体に付いている塩素は、添加剤によって結合が切断され、手が空く。その空いた手が水素をつかまえ、

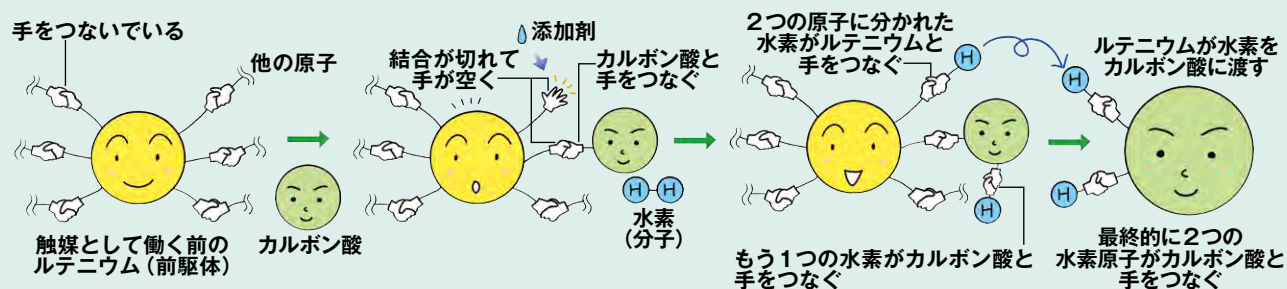
うまくカルボン酸に手渡してくれた（図2）。

水素化反応の向上をめざして、ルテニウム錯体の構造設計に試行錯誤したところ、有機リン分子と手をつなぐルテニウム錯体が、カルボン酸の水素化触媒として非常に優れていることを発見した。安定な水素分子とカルボン酸の両方が反応しやすい状態になり、120～160度、10～60気圧ほどの、比較的温和な条件でアルコールに変換できる、まったく新しい構造を持つルテニウム錯体の開発に成功した。変換できるカルボン酸の種類も大幅に増え、副生成物も少ない。反応の過程で排出されるのは水だけだ。さらに、カルボン酸と類似した構造を持つエステルやアミドが含まれていても、カルボン酸だけを変換できる。

「謙虚な気持ちで研究に取り組まないと、絶対に見つかりません」。わかっていないのに、わかったつもりになっていても、いいものは生まれないと強調する。「とても勇気がいりますが、行き詰まったときは原点に立ち返ることが必要です」と繰り返した。

図2 触媒がカルボン酸に水素を付ける

触媒前駆体の段階ではルテニウムの手は6本全部がふさがっている。しかし、添加剤を加えると手が空き、水素やカルボン酸をつかまえられるようになり、最終的に水素はカルボン酸に渡される。



元素には他の原子と結合することのできる「手」がある。手の本数は元素によって決まっており、酸素は2本、炭素は4本、そしてルテニウムは6本である。

脱石油化学への挑戦

環境と資源の危機を「触媒」で乗り越える

不老不死のルテニウム錯体を

画期的な触媒を開発したにもかかわらず、斎藤さんは触媒の質にまだまだ納得していない。

触媒は反応の前後で変化しない。ルテニウム錯体は、カルボン酸をアルコールに変換している最中は自らの構造を変化させるが、反応が終了すれば元の構造に

戻る。そして次のカルボン酸をアルコールに変換する仲介をする。触媒はこのようなサイクルで化学反応を行う。

現状では、このサイクルを100回くらい回すことができる。しかし何サイクルも反応を繰り返すうちにどうしても劣化し、やがて壊れてしまう。1つの触媒で1,000個、1

万個のカルボン酸をアルコールに変換できるまで活性を上げないと工業化は難しい。

「めざすのは不老不死の触媒です。劣化を防ぐカギとなるのは触媒の構造の安定化。どんな形なら安定性を高められるのか、可能性をしらみつぶしに探っています」。

廃棄物が資源になる未来

扱いにくいカルボン酸をアルコールという「資源」に変えたことは、持続可能社会の構築にとって非常に重要な成果だ。

これまでの分子触媒ではサイズの小さいカルボン酸しか水素化できなかったが、斎藤さんが開発した触媒なら、大きいカルボン酸も水素化できる。食品廃棄物やもみ殻、木くずといったいわゆる「バイオマス」に大量に含まれる大きいカルボン酸の有効活用にも道が開かれたのだ。

斎藤さんにはさらにめざすべきゴールがある。カルボン酸以上に安定な化合物である二酸化炭素を資源化することだ（図3）。

「工場や発電所などで発生する二酸化炭素からカルボン酸を合成し、そのカルボン酸からアルコールを作るという流れを実現したい。そうすれば、開発した触媒はもっともっと生きてきます」。

すでに二酸化炭素からカルボン酸を作る研究に着手した。研究のポイントは「触媒」と「光」の組み合わせだ。

「熱で二酸化炭素をカルボン酸に変える現在の方法では、大量の廃棄物が出てしまいます。光をエネルギーとすれば廃棄物を出すことなく、二酸化炭素をカルボン酸にできます。何とか光を利用した実用的な方法を編み出して、産業界に提案したいのです」。

これまで化学は石油の利用法を研究することで社会に貢献してきた。今後は脱石油化学で貢献しなくてはならない。「それが化学者の使命なのです」と強い決意を語った。

いつか枯渇してしまう石油に頼らず、豊富で再生可能な資源を活用する、そんな地球の未来のために、斎藤さんの挑戦は続く。

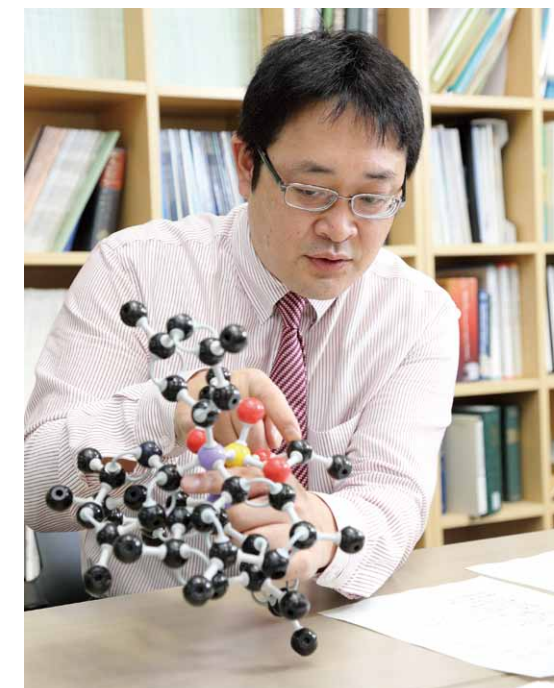
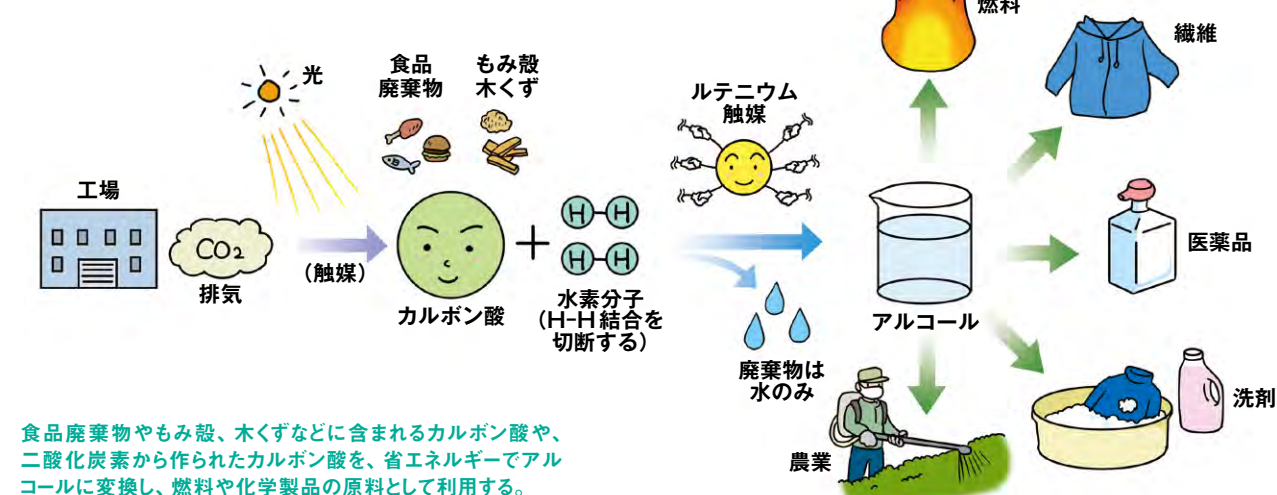


図3 二酸化炭素や廃棄物からアルコールを作る



食品廃棄物やもみ殻、木くずなどに含まれるカルボン酸や、二酸化炭素から作られたカルボン酸を、省エネルギーでアルコールに変換し、燃料や化学製品の原料として利用する。

あらゆる人に開かれた科学と社会をつなぐ広場 サイエンスアゴラ

「つくろう、科学とともにある社会」を掲げて、「サイエンスアゴラ2015」が11月13日から3日間、東京・台場の日本科学未来館など6会場で開かれました。参加者は親子連れや中高生、大学生から研究者、企業や行政の方など9,000人を超え、盛況でした。

開幕セッションの特別講演では、青色発光ダイオードを開発した成果で2014年にノーベル物理学賞を受賞した名古屋大学の天野浩教授が、「科学の実験は手づくり

の装置で行うのが、一番。ビール瓶を使って、実験用コイルを巻くなど苦労したものです」と話し、会場をわかせました。また自由な研究活動ができ、それが大きな成果につながったと語りました。

約200を数える企画には、「アンバサダー・プログラム」のように高校生や大学生が中心の内容も多く、サイエンスアゴラが科学技術分野で次世代の人材を育む広場になることも期待できそうです。

閉幕セッションでは、優れた企画に対して主催・共催機関らが選ぶ機関各賞の発表・表彰が行われました。そして、これからのサイエンスアゴラを、科学が人類・社会の未来のためになるよう、科学者・研究者と市民が一緒になって考えていく大切な「広場」にし続けていくことを確かめました。

2016年は、11月3日から4日間、開催予定です。あなたもこの広場の仲間にご加わってみてください。

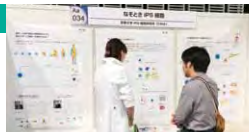
JST 賞

オープンサイエンス革命
～オンラインコラボレーションによる研究推進の可能性～
academist



日本科学未来館賞

なぞときiPS細胞
京都大学 iPS 細胞研究所 (CiRA)



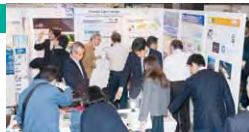
産業技術総合研究所賞

SSH 高校生ディベート
「遺伝子組換え食品は安全か」
岐阜県立岐阜農林高等学校



日本学生支援機構東京国際交流館賞

ヨーロッパライトハウス
駐日欧州連合代表部



フジテレビ賞

どきどきわくわく!
科学工作をつくってあそぼう!
東京工業大学公認サークル東工大 ScienceTechno



リソーピア賞

図形と空間の不思議
～敷き詰め模様で遊ぼう!～
日本テセレーションデザイン協会



KADOKAWA 賞

サイエンス・エンジェルと語る
理系女子の現在過去未来
東北大学サイエンス・エンジェル



■ 参加者特別賞 (同得票につき2件)

君たちも化学者
～光と電池の実験をしよう!～
日本化学会普及交流委員会



物理ゲーム館「種は風にのって」
東京電機大学理工学部「物理ゲーム館」



※参加者特別賞は、参加者の投票により決定

●サイエンスアゴラ2015 開催報告 <http://www.jst.go.jp/csc/scienceagora/reports/2015/>

「熟練研究者」の匠の技を高度に再現

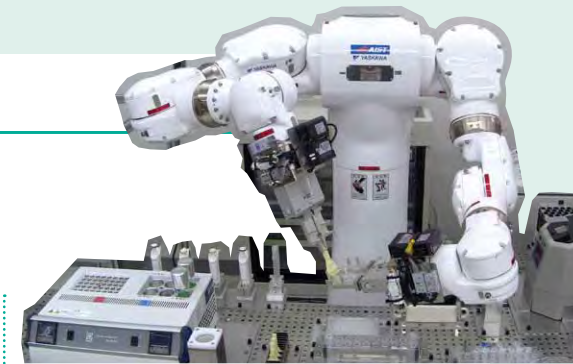
JSTは、産業技術総合研究所の技術移転ベンチャー、ロボティック・バイオロジー・インスティテュート社 (RBI) への出資を受けました。

ライフサイエンス分野の実験は^{かくはん}攪拌やろ過など手順の組み合わせが多岐にわたります。また作業の上手、下手によって結果が左右され、いわゆる経験やノウハウによる部分が多いのが特徴です。実際に抗体のスクリーニングや分析前処理においても、実験や作業結果の追試に失敗する例が少なくありません。

RBIの提供する実験用双腕ロボットシステ

ム「まほろ」は、産総研と安川電機社が共同開発した専用の双腕ロボットを進化させ、人が通常使うツールや実験機器をそのまま使って実験し、熟練者にしかできない実験・作業を高度化し精度よく再現できる、「汎用ヒト型ロボットシステム」として開発されました。

同じプログラムで作業をすれば、何回やっても同じ結果が精度よく得られるのが特長で、研究現場に革新をもたらすことが期待されます。さらに、実験のプログラムとその結果を、電子的な記録 (実験ノート) として管理することで、改ざんなどの不正を根本から排除できます。また「実験プロセスを研究



実験用双腕ロボットシステム「まほろ」。

者間で共有できる」ことで研究生産性の大きな向上が期待される技術です。

出資型新事業創出支援プログラム (SUCCESS) は、JSTの研究開発成果の実用化をめざすベンチャー企業に対しJSTが出資並びに人的、技術的に援助し、ベンチャー企業が行う事業活動を通じJSTの研究開発成果の実用化・社会還元を促進させることを目的としています。

戦略的創造研究推進事業 チーム型研究 (CREST)
研究領域「人工多能性幹細胞 (iPS 細胞) 作製・制御等の医療基盤技術」
研究課題「iPS 細胞を用いた組織幹細胞誘導の確立と分子基盤の解明」

人間のiPS細胞で作った腎臓組織をマウスに移植 尿を作る機能へ大きく前進

人間のiPS細胞 (人工多能性幹細胞) から作った腎臓組織をマウスの腎臓の表面に移植すると、人間の糸球体にマウス生体の血管がつながることを、熊本大学発生医学研究所の太口敦博助教、西中村隆一教授らが明らかにしました。移植された腎臓組織では、マウスの血液をろ過する兆候も観察されました。

多くの腎臓疾患では、尿を生産する糸球体のろ過機能に支障がでます。その機能が低下することから老廃物や毒素が体内にたまり、やがて尿毒症になります。糸球体は、血

管が糸球のように集まっており、血管に接する「ボドサイト」がろ過機能を担います (図1)。腎臓の機能は一度低下すると移植以外では回復が難しいため、患者は人工透析治療を一生続けなければなりません。そこで、さまざまな細胞への分化が可能なiPS細胞への期待が高まっています。

太口助教らは2013年に人間のiPS細胞から試験管内で腎臓の組織を作ること成功していますが、作られた組織が生体のものとどの程度似ているか、また生体内で機能するかは不明でした。今回は腎臓組織中の糸球体に焦点を当て、その構造と機能を詳しく検証しました。まず、iPS細胞を遺伝子操作してボドサイトを観察しやすした腎臓組織を試験管内で作り、糸球体ができる過程を解明しました。この時できたボドサイトは、

実際の腎臓が作られる初期段階のボドサイトに非常に似ていましたが、血管と接していないために未成熟の状態でした。

そのため、この人間の腎臓組織をマウスの腎臓の表面に移植して観察を続けたところ、移植後10日目には人間のiPS細胞由来の糸球体にマウスの血管が入り込み、20日目にはボドサイトの形態が複雑化し、より成熟したろ過膜が形成されました。さらに、ろ過膜の外側にある糸球体の空間が拡がり沈殿物が見られたことから、血液がろ過されている可能性が示唆されました (図2)。

人間のiPS細胞由来の糸球体が生きたマウスの血管とつながったのは世界初の成果です。iPS細胞の腎臓づくりは、患者の機能回復と共に、腎臓病の原因解明や新薬開発にもつながるものです。

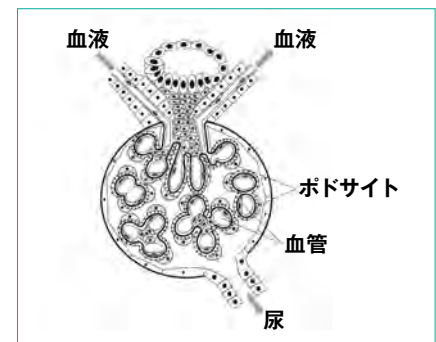


図1 腎臓の糸球体の構造

糸球体では、糸球のように集まった血管に接した「ボドサイト」がろ過機能を担っている。特殊なろ過膜により老廃物の含まれた水分は尿として分離され、生体に必要なたんぱく質などは漏れないようになっている。

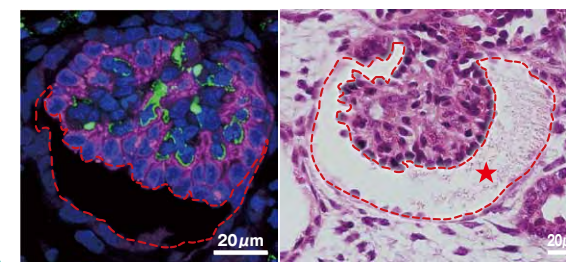
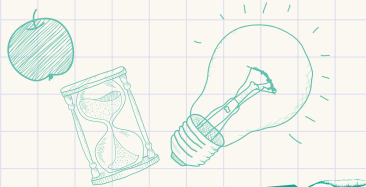


図2 マウスの血管を取り込んだ人間のiPS細胞由来の腎臓糸球体

マウスの血管 (緑色) が人間のiPS細胞由来のボドサイト (桃色) の間に入り込んでいる様子 (写真左)。点線は糸球体下部の隙間が拡張したところ。★印に尿のでき始めかもしれない物質が確認できる (写真右)。



さがける

科学人

Vol.45



Fukazawa Aiko

深澤 愛子

名古屋大学大学院理学研究科
准教授

先導的物質変換領域(ACT-C)
研究課題「ブタジエンを鍵とする
非平面 π 電子系の創製と機能発現」
研究代表者

Profile

奈良県出身。京都大学大学院工学研究科博士後期課程中退。2008年、博士(理学)取得。13年より現職。14年、日本化学会進歩賞受賞。中学、高校とバスケットボール部に所属。

ブレークスルーをもたらす、
カッコいい分子をデザインしたい

新しい「価値」を作りたい

研究者としての原点は高校時代にあります。大阪教育大学の付属高校だったので授業がユニークで、物理、化学、生物、地学の理系4科目全部を学び、高校でできる実験のほとんどを体験しました。自分で実験を計画するチャンスもあり、好奇心や探究心を伸ばせる恵まれた環境でしたね。サイエンスの楽しさを知ったことが、その後の進路を決定づけました。

高校時代はバスケットボール部の活動や文化祭の運営委員を満喫し、本気で進路を考え始めたのは3年生の春。価値ある新しい物質を作れるのは化学しかない、と、京都大学工学部工業化学科をめざしました。入学後はアルバイトやサークル活動に熱中。

3年になって専門的な授業が増えていく中で、自分の好みや向いている分野がつかめてきました。その後「新しい物質を作りたい」との初心を思い起こし、化学研究所の玉尾皓平教授の研究室に決めました。元素科学をキーワードに新しい価値作りをめざす研究室に、他とは違う「新しい何か」を感じたからです。

有機化合物の炭素をケイ素に置き換えた化合物作りから始め、その性質を追いました。炭素の化合物では見られない特性や機能を引き出したいのです。今は「新しい機能を持った材料を作りたい」、「そのためには分子をどうデザインしたらいいのか」と、より踏み込んでいます。

原動力は好奇心

准教授として、学部と大学院両方の授業を担当しています。研究はもちろん、教育にもやりがいを持っています。学生には有機化



休日の散歩。家族3人で過ごす時間が宝物だ。

学の基礎的な知識や実験手法を学ばせるだけではなく、それが最先端の研究とどう結び付いているのかを、しっかり伝えるようにしています。

夫も研究者で、家事や1歳の長男の育児は2人で同じように分担しています。研究と家庭の両立は大変ですが、楽しいです。周りの人に頼れることは思い切って頼り、仕事に優先順位をつけて、限られた時間でも研究に専念できるように工夫しています。男性も家事や育児に積極的に参加するのが当たり前前の世の中になるといいと思います。科学に興味のある女性は、「女性は研究者に向かない」なんて思わずに、どんどん自分が興味のあることに突き進んでほしいですね。

私にとって、研究は生活の一部です。研究とは、自分の中に自然と沸き起こる好奇心を満たすための手段です。これは、と思うものができた瞬間は、武者震いがしますよ。うまくいわずに落ち込むこともありますが、そんなときは、子どもと思い切り遊び、ぐっすり眠って、気分転換しています。

化学者は、分子構造の姿に感動するものです。同じ機能を実現するにも、よりシンプルな構造ほど、カッコいい。誰も実現できなかった、不可能を可能にする機能を持つ分子を作りたい。いつか自分の名刺代わりになるような、カッコいい分子をデザインするのが究極の目標です。

先導的物質変換領域(ACT-C)

「ブタジエンを鍵とする非平面 π 電子系の創製と機能発現」

固体で優れた性質を示す材料を作るには、それを構成する分子の並びが重要です。平らな分子を思い通りに並べるのは難しいので、ねじったり曲げたりして「非平面」の分子を作ること、分子の並びをうまくコントロールすることをめざしています。独自の分子デザインで、機能性材料に大きなブレークスルーをもたらしたいと思います。

実験室で学生を指導する深澤さん(左)。



TEXT: 佐野美穂 PHOTO: 田中昭俊(麹町企画)

リサイクル適性(A)

この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。

270

古紙/バブル配合率70%再生紙を使用

JSTnews

January 2016

発行日/平成28年1月4日
編集発行/国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)総務部広報課
〒102-8666東京都千代田区四番町5-3サイエンスプラザ
電話/03-5214-8404 FAX/03-5214-8432
E-mail/jstnews@jst.go.jp ホームページ/http://www.jst.go.jp
JSTnews/http://www.jst.go.jp/pr/jst-news/



最新号・バックナンバー