

JST news

未来をひらく科学技術

特集

物理法則の新たな 歴史を創るスピン流

ギ酸の力で 水素エネルギー を有効利用

4

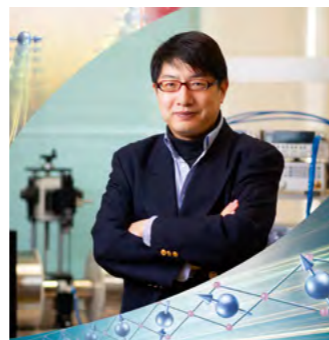
April
2019



03

特集1

物理法則の新たな歴史を創るスピン流



表紙解説

基礎物理法則の歴史に新たな1ページを刻むスピン流を追究する東京大学の齊藤英治教授。従来のエレクトロニクスにはない設計原理で材料や素子を開発できると期待が高まる。

08

特集2

ギ酸の力で水素エネルギーを有効利用

12

数字に見る科学と未来

1人2役の駆動装置で2分の1サイズレーザーのちらつきを低減

14

NEWS & TOPICS

ラットの体内でマウス由来の腎臓を作製 再生医療への応用に期待

16

さきがける科学人

生命科学の課題解決に貢献するサービスを開発したい

バイオサイエンスデータベースセンター 研究員
三橋 信孝

編集長：上野茂幸
科学技術振興機構(JST)広報課
制作：株式会社伝創社
印刷・製本：株式会社丸井工文社

特集1

物理法則の新たな歴史を創るスピン流

従来のエレクトロニクスは電子の持つ電荷に注目して構築されてきたが、20世紀後半のナノテクノロジーの発展は、電子の自転であるスピンの利用を可能にした。スピンの流れ、すなわちスピン流の物理現象に世界に先駆けて着目し、スピン流の基礎物理法則を解明してきたのが、東京大学大学院工学系研究科の齊藤英治教授だ。スピン流を組み込んだ電磁気学の体系化とともに、新しいエネルギー技術の開発や次世代磁気デバイスへの応用を目指す。

方程式に潜む角運動量を発見 物理学の体系化を決意

「現代の物理学者にも、ニュートンやアインシュタインのように、新しい基礎物理法則を発見できるチャンスはあります」。東京大学大学院工学系研究科の齊藤英治教授の言葉は力強い。

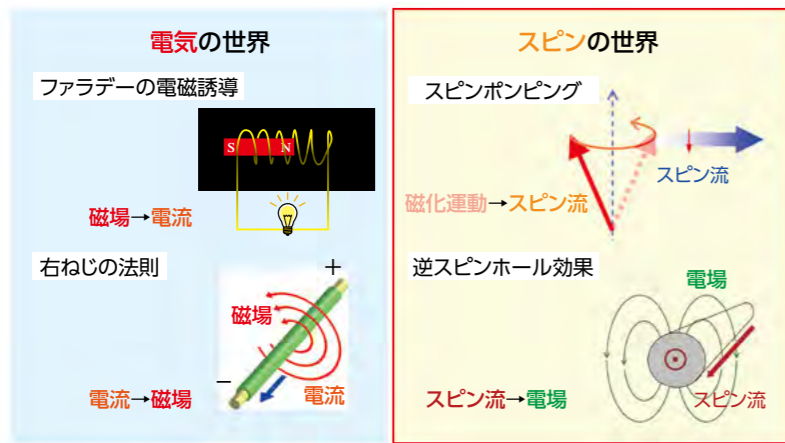
2006年、初めて自分の研究室を立ち上げるに当たって、齊藤さんは新しい科学の出発点となるような研究を探していた。そして見つけたのが、ある物理現象が物理学の論理体系に記述されていないことだった。「物理方程式の中に、スピン流という未知の物理量が潜むことに気付いた時の興奮は、今でも鮮明に記憶しています」と振り返る。



さいとう えいじ
齊藤 英治

東京大学 大学院工学系研究科 教授

2001年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。慶應義塾大学理工学部専任講師、東北大学金属材料研究所教授などを経て、18年より現職。07~11年さきがけ研究者、10~15年CREST研究代表者、14年よりERATO齊藤スピン量子整流プロジェクト研究総括。



■ 図1 スピン流は電流の基礎法則と対応する法則を持つ。磁性体の磁化が変化すると、磁石に接した金属にスピン流が流れる。この効果はスピンポンピングと呼ばれ、磁場が変化すると電流が流れるファラデーの電磁誘導の法則に対応する。逆スピンホール効果は、電流が流れると磁場が生じるアンペールの右ねじの法則に対応する。

電子は、電気(電荷)の性質とともに、電子の自転によって生まれる磁石の性質(スピン)を持つ(図1、P6コラム)。電荷の流れとして電流があるのと同じように、スピンの回転運動の大きさ(角運動量)の大きさ(物体の回転運動の大きさを表わす量)の大きさがある。

しかしエレクトロニクスの基礎となる従来の電磁気学や力学では、ミリメートル以上の距離を流れる電流のみが扱われ、スピン流の記述は見当たらなかった。固体中のスピン流はわずか1マイクロメートルで消えてしまうからだ。

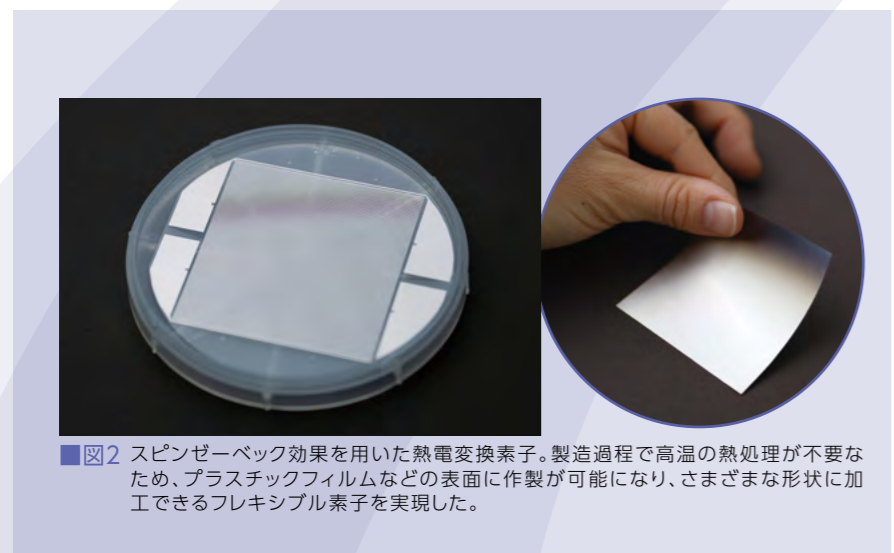
ところが1990年代半ば、ナノテクノロジーが進展すると、「マイクロスケールやナノスケールの微細加工が可能となり、スピンやスピン流が見えてきました」。電荷を利用するエレクト

ロニクスに次いで、電荷とスピンの両方を利用するスピントロニクスが注目されるようになった。

一方で、スピン流を制御するために必要なスピンの物理法則はほとんど知られていなかった。「物理法則を探り、スピン流という物理量を組み込んだ物理体系に自らの手で書き換えよう」と齊藤さんは決意した。こうして、物理法則の新たな歴史を創る壮大な挑戦が始まった。

測定方法の開発に成功 精密科学の対象に

スピン流の存在は理論的には知られていたが、測定する方法がなかった。短い距離で消えるスピン流を、どうやって測るか。



■ 図2 スピンゼーベック効果を用いた熱電変換素子。製造過程で高温の熱処理が不要なため、プラスチックフィルムなどの表面に作製が可能になり、さまざまな形状に加工できるフレキシブル素子を実現した。

電流が流れると周りに磁場が生じる。この磁場の力を捉えることで電流を測定できる。「それならば逆に、磁石の性質を持つスピン流を流せば、電場が生まれてスピン流を測定できるのではないか」とひらめいた。

スピン流を作るのも測るのも、あらゆることに初めてだったが、1年後、世界で初めてスピン流の測定に成功した。白金の薄膜を使った実験で、スピン流の流れに対して垂直に電圧が生じたことを確認できたのだ。電流からスピン流が生成される「スピンホール効果」とは逆の新しい物理現象であることから、「逆スピンホール効果」と名付けた。「この実験結果を論文にして科学雑誌に投稿したところ、『あまりにも話が出来過ぎていて、最初は信じられなかった』と査読者に言われました」と齊藤さんは笑う。

スピン流の物理現象は室温で現れることが多く、比較的短い期間で応用に結び付けられると期待される。測定方法の開発によって、スピン流は実験科学や精密科学の対象となり、スピン流の物理現象のさらなる探索や、発見された物理法則の応用への道が拓いた。

新しい発電原理の発見 熱電変換素子に応用

磁気デバイスの発展には、スピン流を自在に操ることが欠かせない。齊藤さんは、スピン流の物理体系の基礎となるスピン流の基礎物理現象の開拓を進めた。

08年、熱でスピン流が生成される物理現象、すなわち、スピン流を利用した全く新しい熱電変換原理を発見した。電流や磁界を使わずとも、磁性体の両端に貼った金属膜に温度差を与えるだけで、熱流からスピン流が生成される。このスピン流が、さらに逆スピンホール効果で電流に変換されて、温度差に比例した電圧が生じる仕組みだ。金属の両端に温度差を与えると電圧が生じる現象「ゼーベック効果」に由来して、そのスピン版として「スピンゼーベック効果」と呼ぶこととした。

スピンゼーベック効果に基づく熱電

変換素子は、磁性体と金属を貼り合わせた単純な構造なので、半導体を使った従来のゼーベック効果の素子と比較して低コストで製造できる(図2)。エレクトロニクスにはない設計原理で材料や素子を開発できると、スピン流への期待は大きい。

スピン流だけを流す物質 エネルギー損失の低減に期待

半導体や絶縁体など、物質は電流の流れやすさで分類されている。「電流は流れずにスピン流が流れる物質も多数あるはずだ。スピン流の流れやすさで物質を分類し直したいと考えました」。

10年には、電気を通さない絶縁体にスピン流を流して、電気信号を伝えることに成功した。絶縁体であるイットリウム鉄ガーネットの両端に白金電極を取り付け、一方の電極から電流を流したところ、まるで絶縁体を通り抜けたかのように、もう一方の電極に伝わるのを確認できた。これは、入り口の電極ではスピンホール効果により電流がスピン流に変わって絶縁体中を伝わり、それが出口の電極で逆スピンホール効果により再び電流に変わったことを意味している(図3)。

スピン流だけを流す物質は、まだ世界で知られていなかったが、期待は高まっていた。エレクトロニクスの課題は、電流を流して電気信号を伝える過程で、電気抵抗によって発生



■ 図3 イットリウム鉄ガーネット(YIG)結晶に付けた白金電極に直流電流を流すと、スピンホール効果によってスピン流が誘起される。このスピン流がYIGの中にスピン波スピン流を作り、絶縁体中を伝播する。このスピン波はスピンポンピングで白金の出口電極にスピン流を生成し、逆スピンホール効果によって電圧に変換される。

したジュール熱がエネルギーを放出してしまうことだ。スピン流だけが流れる物質であれば、エネルギーの損失を抑えた情報処理や通信を実現できる。

さらにスピンゼーベック効果が絶縁体でも現れることを見だし、絶縁体を使って熱発電する実験に成功した。従来の常識では考えられなかったことだが、絶縁体から電気や磁気エネルギーを取り出す新手法としての可能性が示された。

応用研究に向けて、「スピン量子整流・スピンゼーベックアソシエーション」という産業界向けの組織を立ち上げ、スピンゼーベック効果に関心のある企業との情報交換会議を開催している。技術シーズを提供するとともに、産業界のニーズを掘り起こして、

革新的デバイスの開発につなげていくことが狙いだ。

熱力学と流体力学の 方程式を書き換える

通常、物体を回転させるには外部からエネルギーを加える必要があり、その回転はいつか止まる。しかし電子のスピンの回転が止まることはない。

「スピンは永遠に一方に回転し続けます」。これを物理用語で「時間反転対称性を破る」と呼ぶ。時間反転とは、動画を逆再生するように時間の流れを逆向きにする。電流は時間を逆向きにすると反対側に流れるが、スピン流は変わらない。永遠に自立回転するモーターともいえる。「量子力学に固有な量でこの特性を持つのは、

スピンとブラックホールしかありません。この2つは非常に良く似ていて、両者を相補的に研究することで、それぞれの物理を読み解けるのではないかと推測しています」。

熱力学や流体力学の基礎方程式に時間反転対称性の破れを明確に取り入れる方法はわかっていない。「スピンという物理量を考えた場合、2つの力学が角運動量保存の法則を満たしていないことは明白」と、流体の運動量と質量の保存則のみだったナビエ・ストークス方程式を書き換えた。

これらの理論研究を基に、齊藤さんはMEMS(微小な電気機械システム)にスピン流を取り入れたデバイスの設計にも着手した。メカニクスとスピンの融合であることから、既存のスピンロニクスをさらに広げたスピンメカニクスと呼べる新たな研究領域の創造だ。

ランダムな運動を整流 エネルギー変換の効率化

電気とスピンは、それぞれ得意なものや不得意なものがある。相反していることが多く、電気が苦手なものほどスピンは得意だという。スピントロニクスとエレクトロニクスは相互に

補完しながら活用されていくと考えられる。「一方で、スピンだからこそ実現可能な機能を見つけ出すことも重要です。最も注目している性質が、整流性です」と齊藤さんは強調する。

物質のランダムな運動を一定の方向にそろえる整流は、電気には難しい場合がある。しかしスピン流として一方向に流れを整えれば、外部から大きなエネルギーを加えることなく、スピン流を別のエネルギーに変換したり、情報処理したりできるようになる。

スピンゼーベック効果で熱発電できたのも、原子や分子の熱によるランダムな運動に整流機能が働いたからだ。これまで別の物理量を使っていた仕事をスピン流に置き換えることで、効率性を高められる。

14年に発足したERATOプロジェクトでは、「スピン量子整流」を掲げ、原子核物理や固体物理、材料科学の研究者も参画して、理論構築と実験実証の両輪で研究を進めている。

あらゆる回転で 電気や運動を作る

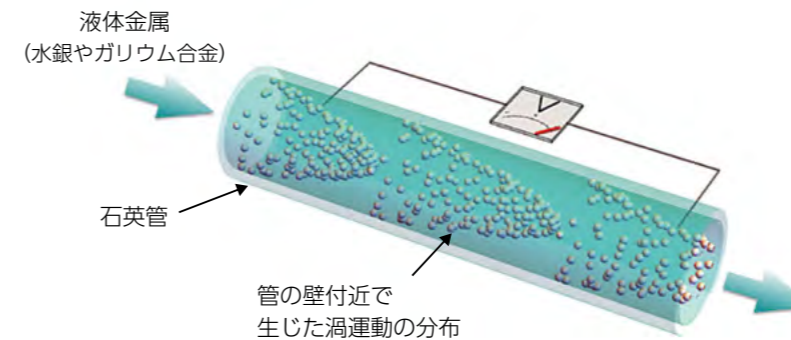
スピンの整流性を利用すれば、熱のみならず、光や音など環境中のエ

ネルギーから電力や運動を取り出せると、齊藤さんは考えた。

単にスピンといえば、電子の自転を指すが、自転する量子は電子だけではない。原子核や光の量子である光子(光子)も自転がある。音にも光子と同じような性質があり、齊藤さんの最近の実験により、スピン流に変換できることがわかった。

これから本格的に到来するIoT(モノのインターネット)社会で鍵を握るのは、あらゆるものに搭載され、大量の情報を処理するセンサーだ。「スピン流を利用すれば、1つのセンサーで、多様なエネルギー源を同時に測定可能です。しかもスピン流は電流に変換されるので、発電システムも兼ね備えています。まさに、究極の理想的なセンサーを実現できるのです」。

15年には、液体金属を流すだけで電気エネルギーを取り出せるという、驚くべき現象を発見した。数百マイクロメートルの細い管に液体金属を流すと、管の壁付近で液体金属中に渦運動ができる。この渦が磁場として働いてスピン流が生成され、100ナノボルトの電気信号が得られた。電子スピンの流体の渦の回転も、同じ角運動量で説明できる物理現象だ(図4)。



■図4 直径数百マイクロメートル(実証実験では400マイクロメートル)の石英管に水銀やガリウム合金などの液体金属を流すと、管の内壁面の近くに液体金属の渦運動が生じる。実証実験では、この渦運動の分布により発生する電圧を、管の流入・流出口に設置した端子により測定した。

核スピンとスピン流を利用したスピントロニクスの実現へ

齊藤さんが解明してきた数々の基礎物理法則は、スピントロニクス領域の新たなデバイス開発への道筋を示す。

半導体を利用した熱電変換素子は、p型とn型という種類の異なる半導体を直列につなげた構造により、熱と電気を変換する。齊藤さんは、超伝導体に磁束が浸入するときのポルテックス(渦糸状態)を回転の流れ(ほぼスピン流)と見なせることに気づき、上向きスピンと下向きスピンの超伝導体をつなぐアップダウン接合を使うことで渦糸の流れの整流に成功した。「非常に高感度で、極微小な環境のゆらぎでも検出できます。理論的には、宇宙の未発見の構成物質である『ダークマター』も、ダークマターの正体が何であるかに依存しますが、

検出できる可能性を示しました」。

このセンサーは超伝導体を使っているため極低温でなければ動作しないが、齊藤さんはこう語る。「地球上で生活していると常温動作に関心がいきがちですが、宇宙環境での動作を考えれば、常温動作にこだわる必要はありません」。

超伝導量子ビットを使った量子コンピューターを実現するには極低温環境が不可欠だが、極低温では熱機関は動作しない。従って、極低温環境下で熱機関に代わるものが必要となる。

「それを実現するものが、原子核の自転である核スピンです」。齊藤さんは18年に核スピン由来のスピン流を電圧として検出することに成功した。核スピンは電子スピンよりも長い時間、スピンの情報を維持できる特徴を持つ。「ERATOプロジェクトでは、スピン流と核スピンをつなぐ技術を

研究しています。この技術が確立すれば、核スピンによる熱機関が実現します。あと1、2年で実現する目途が立っています」。

前人未踏の分野を拓く 現象の普遍性を追求

スピン流物理の構築を先導し、次々と先駆的な成果を挙げてきた齊藤さんに、その秘訣を語ってもらった。「前人未踏の分野を切り拓いていくことは大きなリスクを伴いますが、自分自身がワクワクしていないと、最初の一步は踏み出せません。この方向に進めば宝物を掘り当てられるというセンスを失わないためには、決して惰性で研究をしないこと。心底から科学が好きで、面白いと思わなければ、他人の研究の後追いになってしまいます」。

「これまでの成果は全てJSTの支援なしには成し得なかったことで、感謝は尽きません」と、研究総括の裁量による機動力の高さと、人的ネットワークを作ることができる仕組みを挙げた。「世界のスピードに伍していくには、即断・即決が求められます。その点で機動力の高さには大変助けられました。また、スピン流の研究開発には、幅広い分野の研究者の協力が不可欠であり、JSTのプロジェクトを通して多くの研究者との共同研究が実現したことは大きな財産となりました」。

高校時代に音楽家を目指していた齊藤さんは、予備校の授業をきっかけに物理学に魅了された。「物理学は理路整然とした学問で、音楽の芸術性や美しさと似ています。紙1枚に十分収まるほどの理論体系で神羅万象を説明できることが、非常に不思議でエキサイティングだと思いました」。

スピントロニクスの発展には、物理現象の普遍性と、高度に完成された論理体系が、土台として必要だ。今後の目標は、スピン流など角運動量を軸とする物質科学を確立すること。そして、これまでにない動作原理で稼働する革新的な情報処理デバイスを実現することだ。

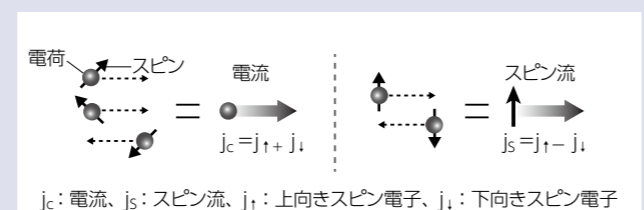
電流とスピン流

ナノテクノロジーという舞台上でスピン流が主役となるのはなぜか。電荷やスピンは流れる過程で電子の不純物やフォノン(音子)と衝突する。電荷の流れである電流は、衝突で散乱を受けるので、ある衝突から次の衝突までに進む距離の平均(平均自由行程)は、1~10ナノメートルと短い。一方、スピンの流れであるスピン流は、衝突しても散乱を受けにくい。そのため、スピン拡散長(電子がスピンの情報を失う長さスケール)は、電流の平均自由行程より長く、強磁性金属で5~10ナノメートル、非磁性金属では100ナノメートル~1マイクロメートルにもなる。

量子論では、磁場などによって決めた量子軸に対して、右ねじがプラスの方向に進む回転を持つスピンを上向き、マイナスの方向に進むスピンを下向きと呼ぶ。磁場がない状態では、それぞれランダムな方向を向いている。スピン流には、

磁性金属中で伝導電子が運ぶもの(伝導電子スピン流)と、磁性絶縁体で磁化の波動運動であるスピン波が運ぶもの(スピン波スピン流)がある。

図左は伝導電子が運ぶ場合で、上向きと下向きの数や流れが異なると、電流を伴うスピン流となる。図右のように上向きと下向きが同じ数で互いに逆向きに流れると、電荷の流れが打ち消されるので、電流を伴わないスピン流、すなわち純粋スピン流となる。



スピン科学の世界に飛び込もう!



最先端の物理学をわかりやすく伝えるとともに、次世代科学の社会普及を通じて未来を創造していきたいと、大学院生や若手研究者を対象としたスクールの開催や、中高生向けの解説サイト「スピンワールド」の運営、LINEスタンプ(左)の作成など、アウトリーチ活動にも力を入れている。



<http://www.spinworld.jp/>

ギ酸の力で水素エネルギーを有効利用

地球温暖化対策の鍵を握ると期待されるのが、化石燃料に代わって水素を利用する水素社会の実現だ。水素は太陽光や風力などを用いて製造可能で、利用の際に二酸化炭素を排出しないことから、再生可能エネルギーの有効利用に適している。一方、普及を阻むのが貯蔵や輸送の難しさで、水素を効率良く貯蔵、輸送できる物質「水素キャリア」が盛んに研究されている。新たなキャリア候補物質として「ギ酸」を利用するため高性能触媒や反応プロセスの研究に挑むのが、産業技術総合研究所の姫田雄一郎上級主任研究員、川波肇上級主任研究員らの研究チームだ。



かわなみ はじめ
川波 肇
産業技術総合研究所
化学プロセス研究部門
上級主任研究員

1997年 東北大学大学院理学研究科博士後期課程修了。学術博士(理学)。2001年 産業技術総合研究所研究員を経て、18年より現職。

ひめだ ゆういちろう
姫田 雄一郎
産業技術総合研究所
創エネルギー研究部門
上級主任研究員

1991年 大阪大学大学院理学研究科博士後期課程退学。学術博士(理学)。同年 通産省工業技術院(現 産業技術総合研究所)研究員。2014年より現職。12~18年 ACT-C 研究代表者、13年よりCREST研究代表者。

エネルギーの無駄をなくす貯蔵や輸送を可能にする技術

再生可能エネルギーによる発電は、気候や時間帯の影響を受けやすく発電量の調節が難しいことが問題だ。例えば、九州電力は2018年、太陽光発電による電力の受け入れを一時的に制限した。日照条件に恵まれ太陽光発電が盛んな九州では、発電量が需要を超えてしまい、電力網に送電できないためだ。せっかく発電しても無駄が生じる一方で、発電量が不足する日もある。安定的な電源として利用するためには、安価な蓄電技術の確立が不可欠だ。

一方、消費地と離れた砂漠などが太陽光発電や風力発電に適したケースが多い。その場合、蓄電ではなく、その電力を水電解によって水素に変換

し、水素として消費地へ運搬することが想定されている。しかし、水素を液化するには、非常に低い温度まで冷却する必要があり、そのコストが課題となっている。

そこで盛んに研究が進められているのが水素をアンモニアや有機ハイド

ライドなどの化学物質(キャリア)に変換する技術である。産業技術総合研究所の姫田雄一郎上級主任研究員は触媒化学の力で、タッグを組む川波肇上級主任研究員はプロセス化学の力で、新たな水素キャリアとして「ギ酸」の道を拓こうとしている(図1)。

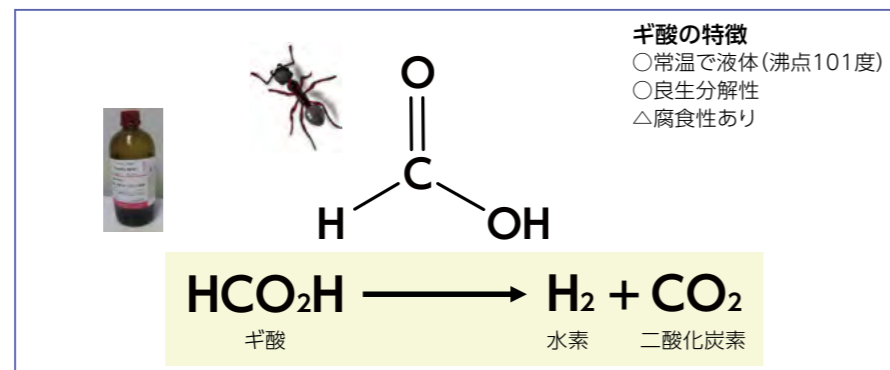


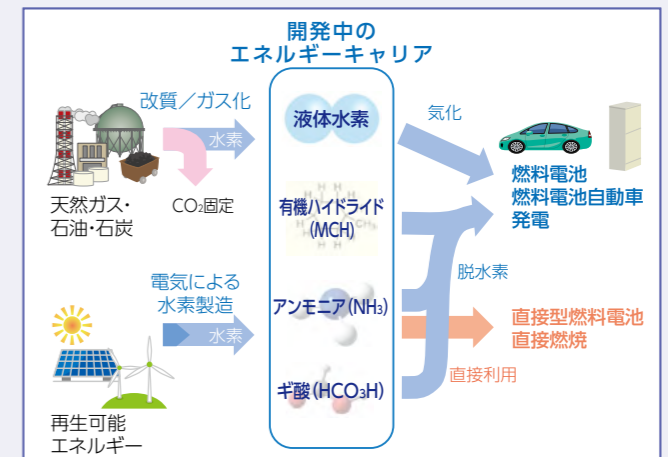
図1 アリから発見されたことにより「蟻酸」と名付けられた。家畜飼料の防腐剤、皮なめし剤、凍結防止剤などとして利用され、年間約100万トンが製造されている。これは燃料電池自動車40万台に供給できる水素量に相当する。

研究が進む多彩なエネルギーキャリア

エネルギーキャリアとは、エネルギーを大規模に貯蔵したり、大陸間などの長距離を輸送したりするための化学物質である。

現在、再生可能エネルギーを水素に変え、これを利用する方法が提案されている。しかし、そのままの形で水素を貯蔵、輸送するためには、莫大なエネルギーを使って水素を液化する必要がある。このため、生産した水素からメチルシクロヘキサンなどの有機ハイドライドや、アンモニアなどの貯蔵や輸送に適した物質(水素キャリア)に変換して、これを利用する方法が研究されている(図a)。現在、さまざまな水素キャリアの研究が進められているが、それぞれメリットとデメリットがあり、用途に合わせた利用が重要になっている(図b)。

CREST「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出」研究領域はさきがけとの複合領域で、エネルギーキャリアの新しい可能性を切り拓くことに重点を置いている。京都大学大学院工学研究科の江口浩一教授が研究総括を務める。エネルギーキャリアの製造から、エネルギーを取り出し利用する過程まで幅広い技術の開発に挑むため、電気化学、触媒化学、材料科学、プロセス工学といった分野の垣根にとられない異分野間の融合型研究を推進している。



図a さまざまなエネルギー源から製造可能な水素は、燃料や発電などに使用でき、大幅なCO2排出量の削減を可能にする。常温で気体の水素は運搬や貯蔵が困難であるため、水素を大量輸送する技術(エネルギーキャリア)の開発が重要になる。

	アンモニア	有機ハイドライド	液体水素	MeOH/H ₂ O	ギ酸
沸点(K)	240	374	20	338	374
密度g/mL	0.682*	0.769	0.071	0.79/1.0	1.22
体積水素密度wt%	17.8	6.2	100	12.1	4.3
重量水素密度g/L	121*	47	70	103	53
熱量ΔH(kJ/molH ₂)	31	68	0.899	43.8	31 (ΔG 4aq.)
課題	法規制 *1 MPa	量確保 (トルエン生産量: 0.3億トン/年)	冷却 エネルギー	CO ₂ 排出(CO ₂ 利用技術の観点からは強み) CO ₂ からの製造法の確立	赤:長所 青:短所

図b エネルギーキャリアの特徴

研究総括から一言

研究領域が立ち上がった2013年頃には、研究が先行していた有機ハイドライドやアンモニアと比べ、ギ酸が実用的なエネルギーキャリアになるという可能性はほとんど論じられていませんでした。しかし、新たなキャリア候補物質を提案することは、本領域の重要な任務です。CRESTの姫田課題の他にも、さきがけの森浩亮研究者(大阪大学大学院工学研究科准教授)によるギ酸の合成触媒や、辻口拓也研究者(金沢大学理工研究域准教授)によるギ酸形燃料電池の開発などを推進しました。これらの研究から得られた数々の成果は、ギ酸を新たなエネルギーキャリアとして、その利用可能性を世の中に示す、重要な一歩となるでしょう。

手持ちの触媒が流れを変えた新たな水素キャリアを目指す

姫田さんは二酸化炭素(CO₂)の有効活用を目指し、20年ほど前からCO₂と水素からギ酸を合成する触媒を研究していた。ギ酸を分解し水素を取り出すという逆の反応に着手するきっかけは欧州の研究グループによる1報の論文だった。「合成したギ酸を何に使えるか考えていたところ、ギ酸から水素を取り出したという論文を読んだのです。試しに手持ちの触媒で実験すると水素が容易に発生したので、ギ酸は水

素キャリアとして有望なのではと考えました」と、姫田さんは振り返る。

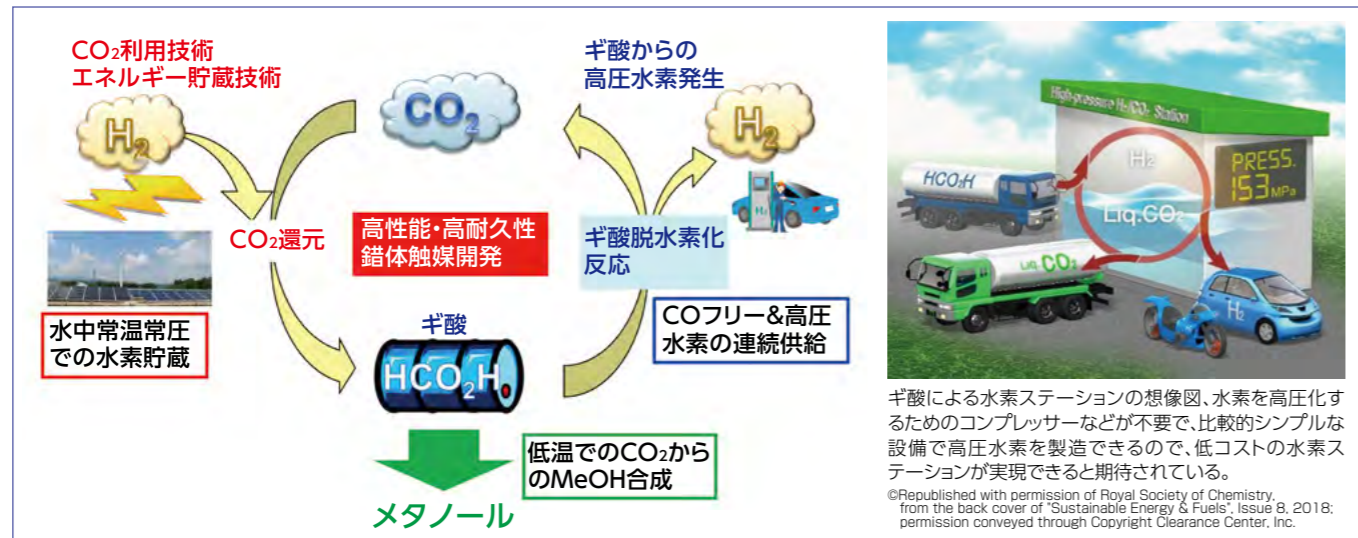
ギ酸は室温では液体で、水素の含有量で言えば水素ガスを600倍に圧縮できる計算だ。毒性や可燃性も低く、瓶などに入れて容易に貯蔵、輸送ができるという利点がある。また原料となるCO₂は無尽蔵に存在する。

このため、水素キャリアとして使うという概念が1960年代に提唱されたが、研究はほとんど進んでいなかった。従来のギ酸脱水素化触媒は、200度以上の加熱や有機溶媒、添加物が必要で、エネルギー効率が低いためだ。また、反応の

際に燃料電池電極の劣化の原因となる一酸化炭素も副生する問題もあった。この状況を変えたのが、姫田さんが読んだ論文にあった触媒だった。100度以下という穏やかな条件で、一酸化炭素を含まない水素を取り出せることが示され、ギ酸に注目が集まり始めた。

脱水素化触媒を開発ギ酸が実現する水素サイクル

ギ酸をエネルギーキャリアとして利用する際、想定されるエネルギーシステムは次のようなものである(図2)。太陽



■図2 ギ酸サイクルの概念図



ギ酸による水素ステーションの想像図、水素を高圧化するためのコンプレッサーなどが不要で、比較的シンプルな設備で高圧水素を製造できるので、低コストの水素ステーションが実現できると期待されている。

©Republished with permission of Royal Society of Chemistry, from the back cover of "Sustainable Energy & Fuels", Issue 8, 2018; permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.

光や風力などの再生可能な電力により生産された水素は、CO₂と反応させることにより、ギ酸に変換される。製造したギ酸は各地の水素ステーションなどに運ばれる。水素ステーションではギ酸から水素が取り出され、燃料電池による発電などに利用される。反応の際に発生するCO₂は分離・回収されて、再利用される。

このサイクルでは「水素貯蔵」のためのCO₂の水素化反応と、「水素製造」のための脱水酸化反応という2つの重要な反応があり、いずれも触媒が重要な役割を担っている。

姫田さんが開発したのは、ギ酸から水素を取り出す脱水酸化触媒だ。「ギ酸が水素キャリアとして普及するには、

簡便なプロセスで安価に水素を取り出すことが必要です。10年ほど研究を重ね、ようやく高性能な触媒が開発できました」と姫田さんは説明する。

消費エネルギーを大幅削減 効率良く高圧水素を製造

開発した触媒の特長は、水に溶けて、80度以下の温度でも反応が起こる点だ。特に100度以下では一酸化炭素は発生しないため、除去作業も不要。ギ酸水溶液に触媒を入れて加熱するという簡便な操作できれいな水素を取り出すことができる(図3)。さらに、ギ酸水溶液の連続的な供給により、15ミリグラムの触媒を利用して1時間あたり50

リットルの水素ガスを100時間以上にわたり発生させることにも成功した。

「特殊な設備無しでギ酸から水素ガスを効率良く取り出せるので、アンモニアなどと比較すると水素製造にかかるエネルギーは大幅に削減できるでしょう」と姫田さんは自信をのぞかせる。しかし、開発した触媒の利点はこれだけではない。

水素ガスを電気自動車などの燃料電池で使用する場合には、水素を82メガパスカルまで加圧する必要がある。このために大きなエネルギーが必要であるところに問題があった。しかし、川波さんの高圧プロセス技術を組み合わせることで、この点も解決可能となったのだ。

「私たちが開発した触媒を密閉した容器内で使用すると、発生したガスによって100メガパスカル以上に圧力を上げられることがわかりました。そのため、取り出した水素をわざわざ別のエネルギーを使って加圧する必要がない点は、他の水素キャリアにはない大きなアドバンテージだと考えています」と川波さんはギ酸の特色を強調する(図4)。

活性と耐久性の向上が課題 低炭素社会を目指す

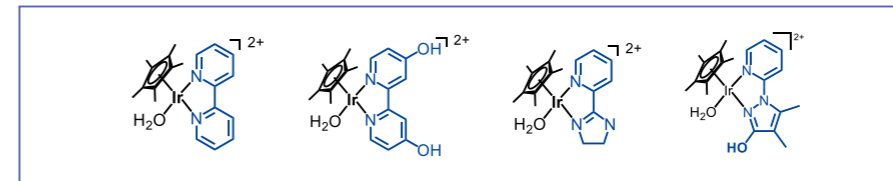
ギ酸利用の拡大に期待がかかるが、実用化にはまだ課題が残る。姫田さんが指摘するのは、触媒の一層の性能向上、具体的には活性と耐久性の向上だ。耐久性については、現在は2カ月保



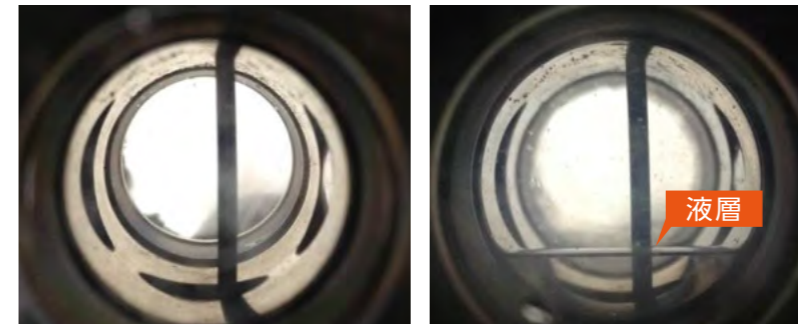
■図3 50度以上に加熱したギ酸に触媒(右上)を加えると、勢いよく水素ガスが発生する。



■図4 密閉容器中のギ酸脱水酸化反応。高性能の触媒を使用することで、より高圧の水素を発生させることが可能になる。実際には水素と同量のCO₂も発生する。



■図5 開発されたギ酸脱水酸化触媒の化学式。プロトタイプ(左)の基本骨格を生かし、配位子と呼ばれる含窒素有機化合物を変えることで、活性や耐久性を向上させることができる。



■図6 高圧のCO₂を冷却すると液化するため、水素をガスとして、CO₂を液体として分離できる。冷却前(左)では均一のガスだが、冷却すると(右)CO₂が液化して容易に取り除くことができる。

つとを最低1年まで延ばしたいと考えている。開発した触媒は、イリジウムに含窒素有機化合物が結合した錯体だ(図5)。この含窒素有機化合物の種類を変えることで、活性や耐久性の向上を目指している。

一方で、ギ酸を水素とCO₂に分解する逆の反応、すなわち水素とCO₂からギ酸を合成する反応の触媒開発も困難な課題であり、まだ研究は途上段階にあるという。さきがけの森浩亮研究者もギ酸合成触媒の開発に取り組んでおり、従来より活性の高い触媒開発に成功している。実用化まで少し時間が必要だが、今後が楽しみな技術だ。

また、水素と同時に発生するCO₂を分離する方法についても検討中である。有力視されているのが、高圧のCO₂を冷却すると液化する性質を利用した気

液分離法だ。密閉容器内で触媒を使用することで発生するCO₂も高圧となるため、より少ないエネルギーで液化し、水素ガスと分離できる(図6)。マイナス78度まで冷却することで得られる水素ガスの純度は96パーセント、水素の回収率は99パーセントを達成しており、見通しが立ってきたという。

川波さんは「高圧」を課題に挙げる。「1メガパスカルを超える気体を扱う場合、設備にさまざまな規制がかかりますので、それをクリアしなくてははいけません。また、高圧の水素やCO₂を取り扱うための容器やシール材などの検討も必要です。さらに、水素とCO₂ガスが発生する際にギ酸を含むミスト(ごく微小な水滴)が発生するので、その対策も考えていく予定です」。

エネルギーキャリアとしてのギ酸は、

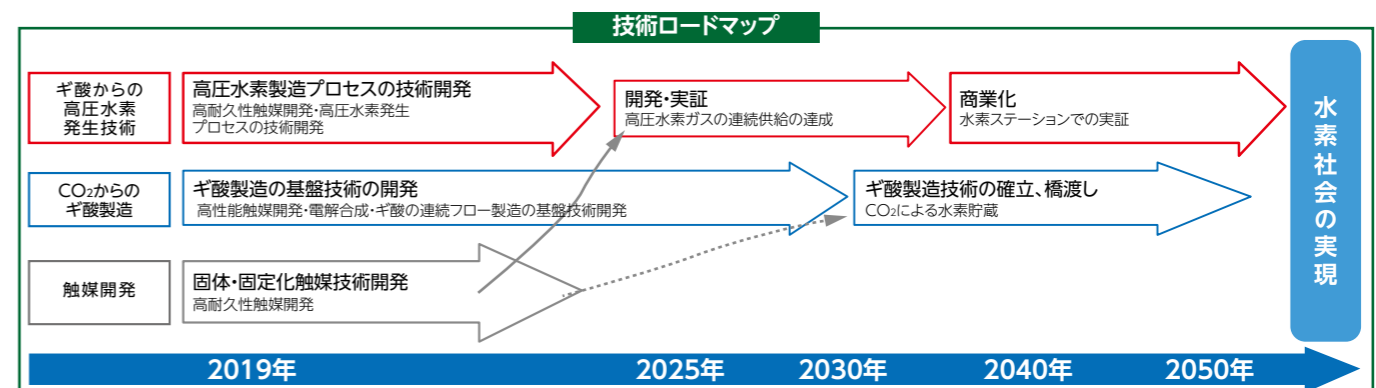


宮城県(主に仙台市内)で運行されている水素タクシーと姫田さん、川波さん

水素の発生源としての利用に加え、多彩な用途への展開も研究されている。例えば、ギ酸を直接利用する方法として、ギ酸燃料電池が提案されており、さきがけでは、金沢大学の辻口拓也研究者により研究が実施された。また、化学原料としてのギ酸活用も検討されている。ギ酸をメタノールなどに変換することで、さまざまな有機化合物の合成原料にできる。

「まずは、高圧水素ガスの連続供給の実証を目指して、ギ酸脱水酸化触媒の改良や高圧プロセスの開発を行っていきます。ギ酸利用の道を開き、CO₂排出量の削減や低炭素社会の実現に貢献したい」と姫田さんは意気込む(図7)。

ギ酸が新たなエネルギーキャリアとして利用される未来に大きな期待がかかる。



■図7 実用化までのロードマップ

9 4 0 6 . 1
数字に見る
科学と未来
Vol.8

1人2役の駆動装置で 2分の1サイズ レーザーのちらつきを低減

プロジェクターをはじめとしたディスプレイの光源として、明るく色再現性の高い半導体レーザーが注目されている。しかし、レーザー光源には独特の細かいちらつき(スペックル)が発生するという課題があった。スペックルをいかに低減するかが、レーザー光源が普及する鍵を握っている。この低減技術に挑んだのがリコー工業ソリューションズの永瀬修花巻生産センター担当理事と藤村康浩シニアスペシャリストだ。

期待が高まるレーザー光源

壁やスクリーンに画像や映像を投影するプロジェクターは、教室や会議室から映画館、テーマパークまで幅広く普及している。現在、光源の主流は超高圧水銀ランプだが、水銀汚染防止や小型化の観点から、LEDやレーザーといった固体光源への転換が進んでいる。その中で次世代の光源として期待されているのが、LEDよりエネルギー効率を高くできるレーザーだ。明るさだけでなく広い色再現が可能で、高コントラストの画像を投影できるという強みもある。

「レーザー光源の普及には、価格、安全規格、レーザー特有の細かいちらつき(スペックル)、の3つの課題があります。このうち価格については量産によるコスト低下が期待できます。安全規格も整備されてきました。残された

課題がスペックルです」と、リコー工業ソリューションズの永瀬修花巻生産センター担当理事は説明する。

光学素子を動かし干渉を抑制

スペックルを低減するためには、レーザーの干渉を目立たなくする必要があり。そのためには、レーザー光ではそろっている波の形(位相)や波の方向(偏光)をずらすことが有効だ。今回開発されたスペックル低減モジュール(機能を担う部品)で用いられているのは、光学素子と半導体製造などで使われる微細加工技術で作られた微小な機械(MEMS)を用いた方法だ。

藤村康浩シニアスペシャリストらは、マイクロ(100万分の1)メートルサイズのレンズ数万個と偏光板を2ミリメートル角の基板上に作り込むことに成功した(図1)。これによってレーザー光の干

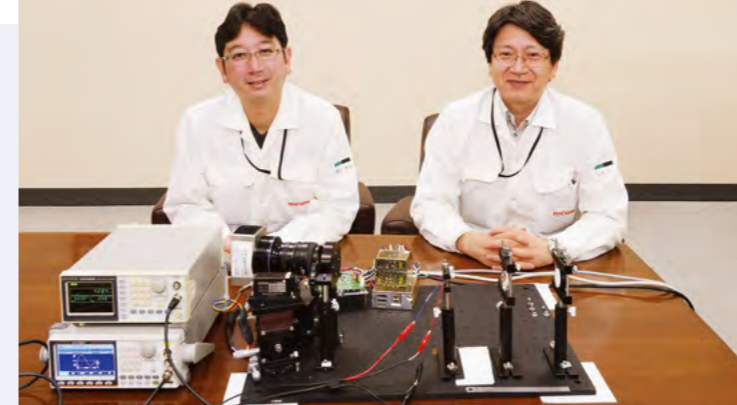
渉が起こりにくくなり、スペックルの低減が可能になった。

「私たちはレンズなどの光学素子を作るメーカーなので、マイクロレンズと偏光板を組み合わせた光学素子の開発には得意の技術を活かすことができました」と藤村さんは振り返る。

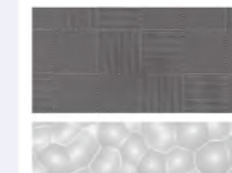
しかし、光学素子による対策だけでは十分にスペックルを低減することは難しい。

「スペックル低減に使用する光学素子は拡散板と呼んでいますが、拡散板を動かすことで、さらにスペックルを抑制できます。従来はモーターを使って

藤村さんと永瀬さんの手前があるのがスペックル観察装置。



■図1 開発された光学素子(イメージ図)。偏光板(分割素子)を通してレーザー光の波の方向をさまざまな方向に変化させ(偏光)、マイクロレンズを通して、レーザー光の波の形(位相)を変化させる。



■図2 スペックル低減モジュールの駆動部分。従来モデルでは、X軸用とY軸用の2つのアクチュエーターが必要だった(左)が、斜めに配置することでアクチュエーターを1つに集約し小型化が可能になった(右)。

いましたが、小型化が難しいのが課題でした」と永瀬さんは指摘する。

MEMSで大幅に小型化

次世代のディスプレイ光源として期待されるレーザー光源であるが、モーターを使用してスペックル低減対策を行うと、装置サイズが大きくなってしまふ。小型プロジェクターや車載用途などを想定すると、小型化は普及の鍵ともなる重要な技術課題だ。

「以前から共同研究を行っていた東北大学大学院工学研究科の田中秀治

教授が小型の共振アクチュエーター(駆動装置)を研究していました。この技術を使うことで、小型化への道筋が見えてきました」と藤村さん。

田中教授が研究しているのは、圧電素子を用いたアクチュエーターをMEMSで作製する技術だ。圧電素子に電圧をかけると伸びたり縮んだりする。この性質を利用する。「田中教授の技術を応用し、拡散板を動かすモーターをMEMSに置き換えました。これにより大幅な小型化が可能になりました」と永瀬さんはMEMSの有効性を強調する。

配置の工夫で2軸駆動を実現

スペックル低減モジュールの開発を進めていくうちに、藤村さんはさらなる小型化の可能性に気づいた。モジュールは、拡散板をX軸とY軸の2つの方向に動かすことでスペックルを低減する(図2)。そのため、当初はアクチュエーターを2つ使用していた。

「さまざまな実験やシミュレーションを繰り返していくうちに、アクチュエーターを斜めに配置し共振駆動すれば、X軸とY軸の両方の動きを1つの圧電素子で実現できることが分かってきました。1つの圧電素子にX軸用とY軸用の2つの役割を担わせるわけです。これにより、モジュールをさらに2分の1まで小型化できたのです」と藤村さんは胸を張る。

スペックルの度合いは「スペックルコ

ントラスト」という指標で表され、数字が大きいほどスペックルが目立つことを示す。何も対策しない場合のスペックルコントラストは1となる。今回開発したスペックル低減モジュールを使用すると、スペックルコントラストを0.14まで低減することができた。

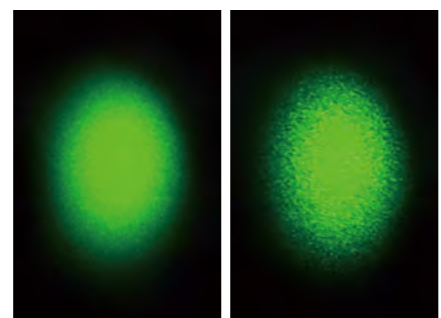
「今回のモジュール開発のような基盤的な研究には、企業の予算が付きにくい。A-STEPでは開発のフェーズに応じた支援を受けられますし、企業単独ではなく研究機関とタッグを組んで申請できます。このような制度が日本のものづくりを支え、発展させる上で重要だと感じています」と永瀬さんは支援政策の有効性についても触れる。「評価委員や担当者からの的確なアドバイスにも助けられました」と藤村さんも付け加える。スペックル低減モジュールは、産学官の活動がうまく連携し、実を結んだ成果なのだ。

レーザー光源の弱点であったスペックルの低減により、今後、手のひらサイズの小型プロジェクターや大規模なプロジェクションマッピングなど、さらに活用の幅が広がると予想される。さらなる小型化が進めば、自動車のフロントガラスにさまざまな情報を表示するヘッドアップディスプレイへの適用なども期待できる。開発されたスペックル低減モジュールは、今後のレーザー光源の普及を支え色鮮やかな美しい映像を届けてくれるだろう。

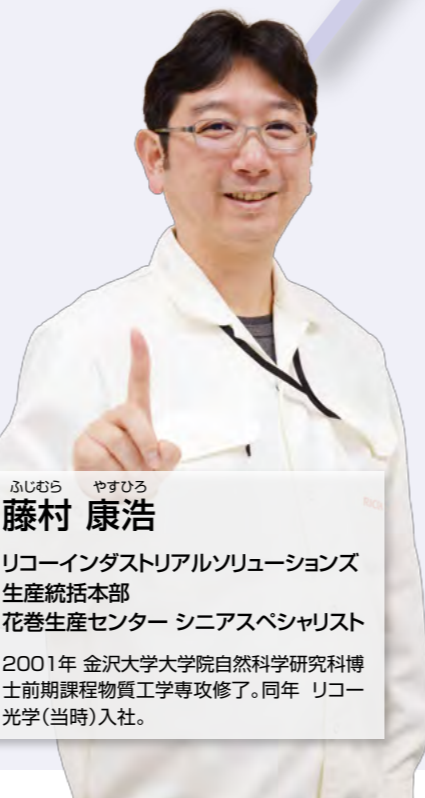
スペックル(ちらつき)とは?

光は波の性質を持っているが、波の形や方向がそろった光が「レーザー」である。光の波が重なることで弱め合ったり強め合ったりする現象を「干渉」と呼ぶが、レーザーでは干渉が起こりやすいという特徴がある。

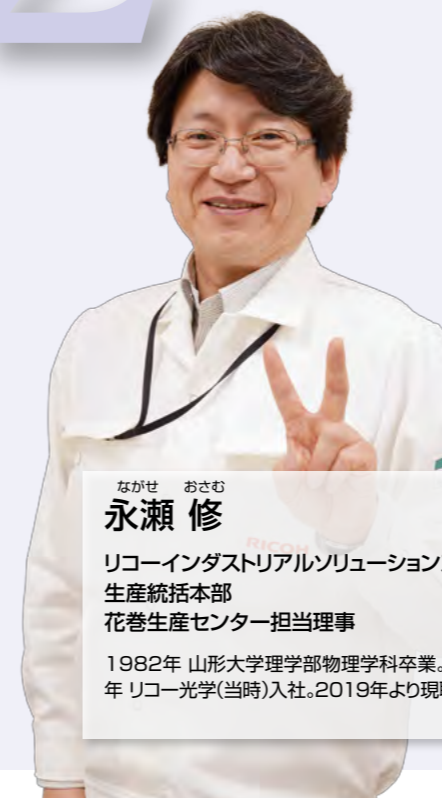
レーザーを光源に用いたプロジェクターでも干渉が発生し、輝度に点状のばらつきが生じ素早く変化するためちらついて見える。これが「スペックル」と呼ばれ、見る人に目の疲れや、不快感を与える原因になる。



緑色レーザーのスペックル。開発したスペックル低減モジュール作動時(左)と非作動時(右)。非作動時にはスペックルが生じ、「ざらついて」見えるのがはっきりとわかる。



ふじむら やすひろ
藤村 康浩
リコー工業ソリューションズ
生産統括本部
花巻生産センター シニアスペシャリスト
2001年 金沢大学大学院自然科学研究科博士前期課程物質工学専攻修了。同年 リコー光学(当時)入社。



ながせ おさむ
永瀬 修
リコー工業ソリューションズ
生産統括本部
花巻生産センター 担当理事
1982年 山形大学理学部物理学科卒業。同年 リコー光学(当時)入社。2019年より現職。



研究成果

戦略的創造研究推進事業ERATO
中内幹細胞制御プロジェクト

ラットの体内でマウス由来の腎臓を作製 再生医療への応用に期待

臓器移植のドナーが見つかるまでには何年も待ち続けなければなりません。問題解決の糸口となり得るのが、移植用の臓器を人工的に作製する技術で、その1つが2012年度に終了したERATOプロジェクトで確立した「異種胚盤胞補完法」です。特定の臓器が作れないよう遺伝子操作を施した受精卵にES細胞やiPS細胞を注入し、欠損するはずだった臓器が補われた個体を作製する胚盤胞補完法を異種間で実現する技術で、日本医療研究開発機構(AMED)に研究が引き継がれた後も臓器作製の研究の進展に貢献しています。

自然科学研究機構生理学研究所の平林真澄准教授と東京大学医科学研究所の中内啓光特任教授らは、遺伝子操作

で腎臓を欠損させたラットの中にマウス由来の腎臓を作製することに成功しました。ラットとマウス両方の遺伝情報を持たせた個体の体内に異種胚盤胞補完法を用いることで、マウス由来の腎臓を作製できることを実証しました。この成果は、移植用の臓器を動物の体内で作製し、多くの患者に届ける未来の移植医療への重要なステップといえます。

動物の体内でヒトの臓器を作製する研究は国内で禁止されてきましたが、数年にわたり議論された結果、19年3月に条件付きで解禁されました。技術の安全性だけでなく、乱用防止や生命倫理の議論など、社会全体で科学技術の健全な運用を考える意味でも、本研究の進展から学べることは多そうです。



研究成果

戦略的創造研究推進事業CREST
研究領域「多様な天然炭素資源の活用に関する革新的触媒と創出技術」
研究課題「高効率メタン転換へのナノ相分離触媒の創成」

温室効果ガスを有用化学原料に変える触媒を開発 地球温暖化抑止への突破口に

一酸化炭素(CO)と水素(H₂)の混合ガスは、ガソリンやアルコールなどさまざまな化学製品の原料として利用されています。この混合ガスを、天然ガスの主成分であり、また代表的な温室効果ガスとしても知られているメタン(CH₄)と二酸化炭素(CO₂)から触媒を利用して合成する「メタンドライリフォーミング(DRM)」が、天然ガスの高効率利用と地球温暖化抑止の観点から注目されています。

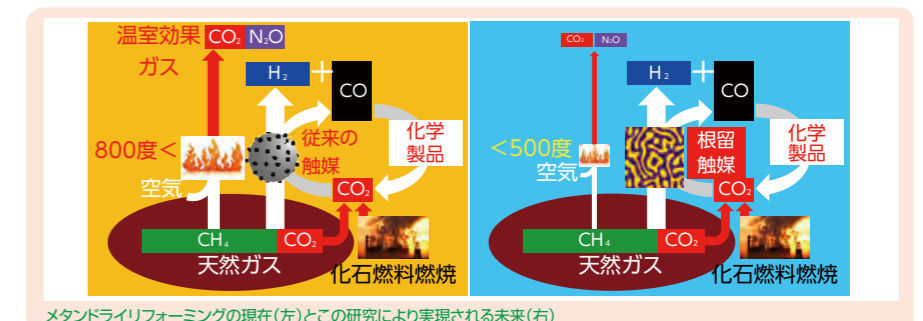
しかし、従来の触媒は、反応の副産物として大量のすすが発生し、生産効率の低下や装置の劣化を引き起こします。そのためDRMは、すすが発生しにくい800度以上の高温領域で行われてきましたが、多くの燃焼エネルギーを必要とすることから、工業規模の実用化には

至っていませんでした。

物質・材料研究機構の阿部英樹首席研究員らは、繊維状の金属ニッケル(Ni)と酸化イットリウム(Y₂O₃)が組みひものように互いに絡み合う特殊な構造を備えた「根留触媒」を開発しました。根留触媒の利用によって、従来の触媒では困難とされていた低温領域(500度未満)で、

1000時間以上、すすの発生を抑えながら安定してDRMを促進することに成功しました。

シェールガスなど非在来型化石燃料の市場拡大や新興国の経済成長に伴い、温室効果ガスの排出量は増え続けています。根留触媒は、地球温暖化対策に貢献するものと期待されます。



話題

国際科学技術共同研究推進事業 戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)



日本-EUの「災害初期対応」共同研究の新規課題が決定

自然および人的災害は世界的に激甚化し、多くの国や地域で防災、減災に対する技術発展の重要性が高まっています。

JSTは、欧州委員会移民・内務総局(EC DG HOME)と協力し、2018年3月から全欧州規模で実施している研究・イノベーションプログラム「HORIZON 2020」における災害初期対応技術分野の共同研究公募に参加しました。そして、応募16件のうち、小型救助ロボットの開発と安全な情報処理システムの構築に関する2課題を19年2月に決定しました。支援期間

は19年5月から3年間で予定しています。

ロボット開発は、瓦礫からの人命救助を行うソフト小型ロボットとドローンによる災害救助キットCURSORの開発を目的とし、日本側チームはソフト小型ロボットを研究開発します。

情報処理システム構築は、過酷な環境下における災害初期対応者の保護、状況把握やコミュニケーションに関する能力の強化を目的とし、日本側チームは、情報を分散管理するブロックチェーン技術を用いることで、災害初期対応者の任務を

妨げる過剰な情報の錯綜などの解決を目指します。

この共同研究は、警察や消防など防災当局と強く連携し、開発した技術や機器の実証を経て、あらゆる災害の解決に結び付くような研究開発を目的としています。EUとの共同研究を通じて、日本側の強みである技術の国際標準化や迅速な海外展開を目指します。



プロジェクト名	研究代表者	協力国
災害救助活動のための小型ロボットと先端センサーの協調活用 (CURSOR)	日本側：田所諭 (東北大学大学院教授) EU側：クラウス・ディーター・ビュッテゲン (ドイツ連邦技術支援庁研究部長)	8カ国 16機関
安全かつ効率的な災害初期対応 (FASTER)	日本側：ジュリア・アドリアン・ティヘリノ (関西学院大学教授) EU側：ペトリス・ダラス (ギリシャ科学・技術センター研究員)	11カ国 23機関



イベント

日本科学未来館

市民が研究者と共につくる新しい市民科学 未来館の「オープンラボ」

来館者を交えた実証実験や研究調査などを研究者が行う「オープンラボ」を、2017年から日本科学未来館で実施しています。これまで、工学や心理学などさまざまな分野の多様な実験を受け入れてきました。

年間100万人以上が訪れる未来館でのオープンラボは、豊富な実験データを取得できるだけでなく、参加者との対話によって新たな視点が得られる、研究室と社会の橋渡しの場になります。ロボットの自律知能を研究している研究者は「上手いかわからないことも含めて、研究の現場を見てもらえるのが良いところ。参加者から寄せられた声を開発に反映させ、また次の実験にチャレンジしています」と語ります。この研究グ

ループでは、自律移動ロボットが人混みで最適経路を見つけ出す実証実験を未来館で行って論文発表し、米国電気電子学会誌「IEEE-IRIS2017」でベストペーパー賞を受賞しました。

参加者からは「研究者にもまだわからないことがたくさんある、と聞いて驚いた。今日の実験に協力して、少しでも研究が進むとうれしい」と、研究者への共感や前向きに協力したいという声が聞かれました。

未来館はオープンラボを新しい市民科学の1つの形と捉え、市民と研究者が共に未来をつくることを目指し、共創の場づくりを進めていきます。



ロボットが周囲の人の動きから通路を判断し、避けながら目的地へ向かっている様子。

Profile

滋賀県出身。1996年 東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。97年 三井情報開発 (当時) 入社。ライフサイエンス統合データベースセンター (DBCLS) 研究員を経て、2011年より現職。日本人ゲノム多様性統合データベース「TogoVar」をNBDCやDBCLSの研究員と共同開発している。



生命科学の課題解決に貢献するサービスを開発したい

研究員
三橋 信孝
Nobutaka Mitsuhashi



Q 2018年に運用開始した「TogoVar」とは?

A ヒトゲノム配列の個人差の膨大なデータを収集したデータベース。

ヒトのゲノム配列にはバリエーションと呼ばれる個人差があり、それが体質や疾患と関連していることがあります。例えば12番染色体のある塩基配列1文字の違いは、お酒に「強い」か「弱い」かに影響することが知られています。バリエーションと体質や疾患との関連を発見するためには、多角的なデータの分析が必要です。しかしそうした情報はさまざまなデータベースに散在しているため、研究者はデータの収集と整理に多くの時間を取られています。

この課題を解決するために、バリエーションの情報を網羅的に収集して整理した統合データベース「TogoVar」を開発しました。「TogoVar」では、ある集団に存在するバリエーションの割合の情報に加えて、バリエーションと疾患との既知の関連性や文献の情報などもワンストップで簡単に入手できます。今後もデータの拡充や機能強化をしていく計画です。将来的には疾患発症の仕組みの理解や治療法の開発につながり、ゲノム医学の進展に貢献できると期待しています。



Q 今の仕事に就いたきっかけは?

A 大学時代に生物情報科学に出会ったから。

大学院を修了した後、9年間民間企業で働いていましたが、指導教官の高木利久先生 (現NBDCセンター長) から声をかけてもらい、生命科学の統合データベースの構築を目指して新しく設置されたDBCLSの研究員になりました。11年には設立されたばかりのNBDCの研究員になり、17年4月から「TogoVar」の開発に携わりました。高木先生から「1年で開発してほしい」と言われ、プレッシャーはありました。当初の予定より少し遅れてしまいましたが無事に公開され、これまでお世話になった先生によりやく恩返しできたと思います。



Q 研究において大切にしていることは?

A 理念や課題の共有とそれを形にしてみること。

統合データベースの構築は、研究活動の過程や成果をできるだけ社会に開かれたものにするオープンサイエンスやデータの共有、統合といった理念の下に、どちらかと言えばデータ統合の現場の課題をボトムアップに解決してきた印象があり、生命科学の課題解決に直接どのように役に立つのかが見えにくいという指摘がありました。「TogoVar」は、これまで培ってきた情報技術や経験をエンドユーザーが直接利用するサービスにしたいという思いで、センター長と研究員が議論して生まれました。5年間のNBDCヒトデータベースの運用を通して把握したニーズを反映したシステムです。

まだまだ改良や発展の余地がありますが、理念や課題の共有とそれを形にしてみることの大切さを実感したからこそ、要望や意見を少しでも形にしたいです。「TogoVar」を、今後の研究の方向性を示したり、研究スタイルを変えたりといった、先導的な役割を果たす存在に近づけたいと思います。

