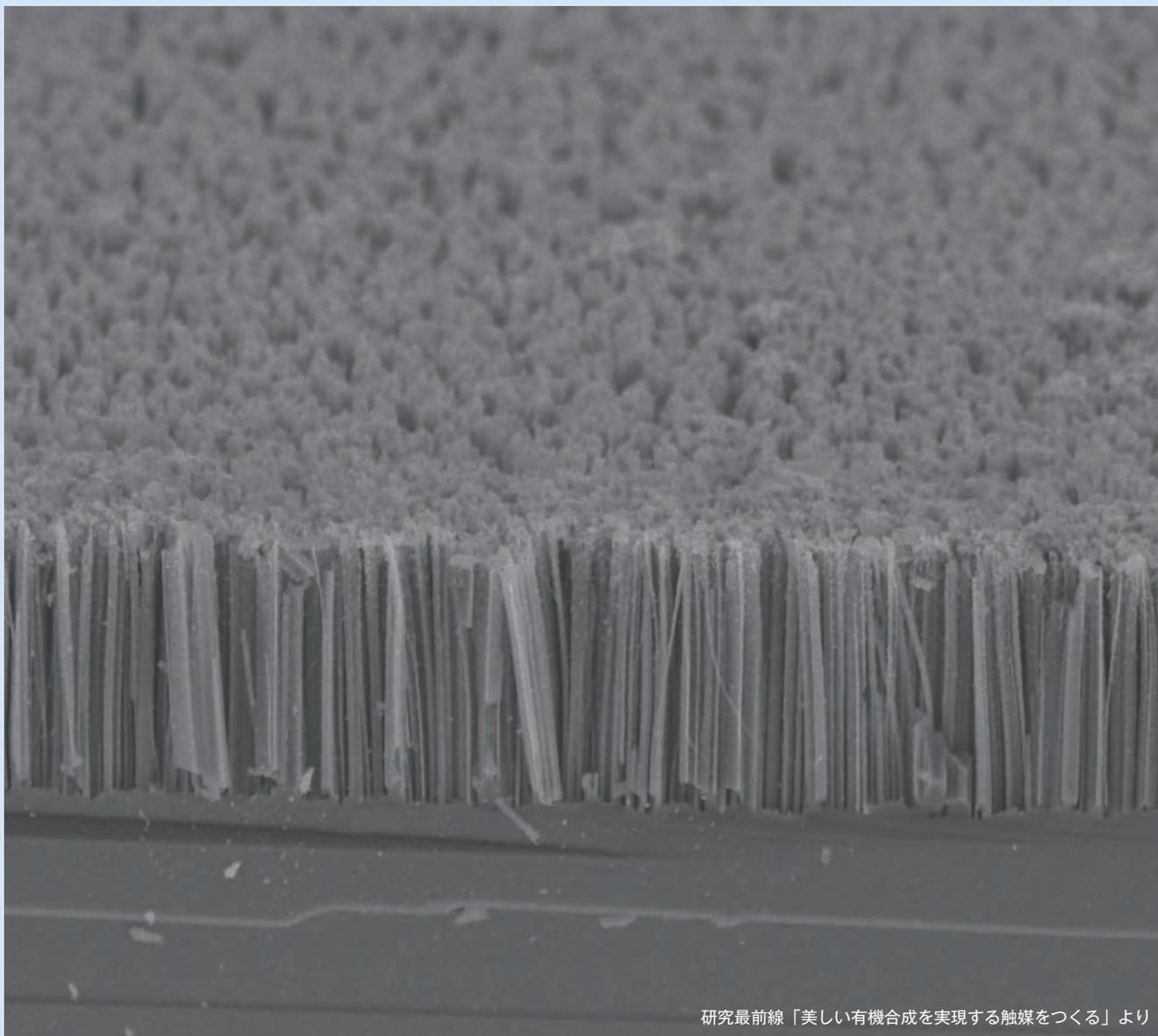


RIKEN NEWS

No. **470** 2020 **8**

研究最前線「美しい有機合成を実現する触媒をつくる」より

02 研究最前線

美しい有機合成を実現する 触媒をつくる

06 特集

SRILACで最初の ビーム加速試験に成功

10 SPOT NEWS

ビロリ菌感染を防ぐ
胃の免疫の働きを発見

11 TOPICS

・動画で新型コロナウイルスを
分かりやすく解説
・新研究室主宰者の紹介

12 原酒

夢の世界へと誘うタカラヅカ

石油化学製品や医薬品をつくるには、有機合成が不可欠である。

環境資源科学研究センターのグリーンナノ触媒研究チームでは、有機合成で用いる触媒の開発を行っている。

山田陽一チームリーダー（TL）が目指すのは、高い活性と再利用性を持ち、環境にも人にも優しい触媒だ。

そして、より少ない工程数で単純なものから複雑なものをスマートにつくり出す、

「美しい有機合成」を実現しようとしている。

美しい有機合成を実現する触媒をつくる

■ 触媒とは

プラスチックや化学繊維、医薬品、ガソリンなどの燃料……。私たちの周りには人工的につくられた有機化合物がたくさんある。それらの合成になくてはならないのが、触媒だ。

触媒とは？「それ自身は変化せずに、特定の化学反応の反応速度を速める物質、と化学の教科書には書かれています。理論的には、触媒は永遠に化学反応を促進し続け、生成物を無限につくり出すことができます。しかし実際は、1個の触媒で100個程度の生成物しかつくれません。私たちは、1個の触媒で生成物を100万個つくるくらい高効率で、何度も利用できる触媒、しかも環境にも人にも優しい触媒の開発を目指しています」と山田TLは語る。

■ 効率的なエステル化を可能にする触媒

有機合成で多く用いられている重要な反応の一つに、エステル化がある。カルボン酸（カルボキシル基を持つ化合物）とアルコール（メタノールやエタノール）から、触媒を用いてエステル（エステル結合を持つ化合物）と水を生成する反応だ。「高校化学にも登場するエステル化ですが、工業的な生産ではいくつか課題があります」と山田TLは言う。

エステル化は反対方向の反応と釣り合う平衡反応なので、生成したエステル

と水、原料のカルボン酸とアルコールの存在比が一定になってしまう。そのため、原料から理論上得ることができる生成物の量に対して実際に得られる生成物は100%にならず、収率が低くなる。エステルの収率を上げるには、平衡を偏らせるために脱水剤を加えたりして水を取り除く必要があるのだ。また、触媒には劇物である硫酸などを大量に使う。そうした課題を解決し、安全で効率的なエステル化を実現できる触媒の開発が求められていた。

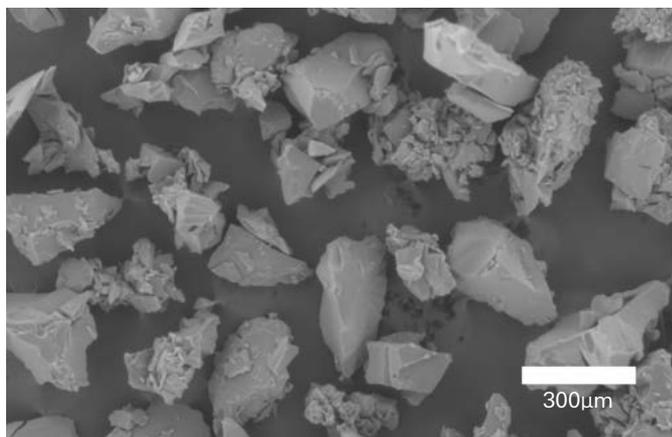
山田TLは、「現在使われているエステル化の触媒は水になじみにくい疎水性だから、逆に水になじみやすい親水性の触媒を使えばよいのではないか」と考えた。カルボン酸とアルコールは親水性、エステルは疎水性だ。触媒が親水性ならば、同じ親水性である原料のカルボン酸とアルコールは触媒に近づき反応

がより促進され、生成したエステルは疎水性なので触媒から離れていく。その結果、原料に戻る反応が起きずに済むと予測したのだ。

親水性の触媒として、フェノールスルホン酸とホルムアルデヒドを加熱混合してできるフェノールスルホン酸樹脂を選んだ（図1）。この触媒を使うと、さまざまなエステル化反応に対して機能し、水を除去しなくてもエステルを90%以上の高収率で得られることが確かめられた。触媒量は原料のモル（物質量の単位）に対する触媒のモルを%で表す。フェノールスルホン酸樹脂は0.7モル%という触媒量で機能する。現在は硫酸を数モル%と大量に使用しているので、触媒量の低減も実現できる。また、この触媒は水にも有機溶媒にも溶けないため、使用した後に回収しやすく再利用できるという特徴がある。

図1 フェノールスルホン酸樹脂触媒の走査型顕微鏡写真

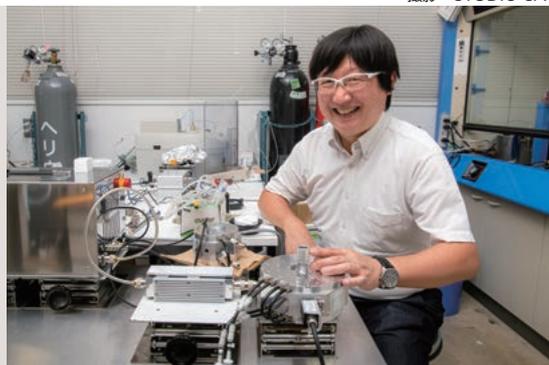
この触媒を用いると、エステル化反応が高効率で進行し、副生成物を除去する必要もなく、エステルを高い収率で得られる。



山田陽一 (やまだ・よういち)

環境資源科学研究センター
グリーンナノ触媒研究チーム
チームリーダー

1970年、東京都生まれ。東京大学大学院薬学系研究科分子薬学専攻博士課程修了。博士(薬学)。米国スクリプス研究所化学科リサーチアソシエイト、分子科学研究所助手などを経て、2007年より理研副チームリーダー。2018年より現職。



■ **第一世代バイオディーゼル燃料を高効率で合成**

こうしてフェノールスルホン酸樹脂触媒の有用性が示されたが、山田TLは、この触媒は改良が必要だと考えていた。耐久性や化学的安定性が十分ではなかったのだ。「原因と解決策は、化学の教科書に書かれていました」と山田TL。「触媒の原料にしたフェノールスルホン酸は、フェノール基がベンゼン環のパラ位という位置に付いています(図2左)。ほかにオルト位とメタ位があり、分子式が同じでもフェノール基が付く位置が違くと、性質が変わります。教科書には、パラ位のフェノール基は取れやすい、と書いてあります。パラ位では耐久性や化学的安定性が低かったのです。一方、メタ位は取れにくい、とあります。メタ位にフェノール基を持つメタフェノールスルホン酸(図2右)を原料に触媒をつくれればいいのだと気付いたのです。科学は基本が大事であることを再認識しました」

しかし、メタフェノールスルホン酸は市販されていない。「取れにくいということは付けにくく、合成が難しいからです。でも、有機合成が専門の私たちにとっては簡単なことです。自分たちでメタフェノールスルホン酸を合成し、それ

を使って触媒をつくってしまいました」改良型触媒の耐久性や化学的安定性を検証するため、フラスコを用いてエステル化反応を繰り返したところ、10回使用しても触媒活性は低下しなかった。改良前の触媒では数回の使用で触媒活性が低下していた。狙いどおり、改良型触媒は耐久性と化学的安定性が向上していることが確認できた。

山田TLがエステル化触媒の開発に取り組んだのは、バイオディーゼル燃料の合成への応用も見据えているからだ。バイオディーゼル燃料とは、植物由来の油脂からつくられるディーゼルエンジン用燃料のことで、化石燃料の代替品として利用の拡大が期待されている。現在最も一般的なバイオディーゼル燃料は脂肪酸メチルエステルで、植物由来の油脂とメタノールからエステル化によって生成されるのだ。

筒状の容器に改良型触媒を充填し、原料を連続的に流すフロー型と呼ばれる方法で15日間にわたって反応させたところ、触媒の活性が低下することなく、脂肪酸メチルエステルを90%以上の収率で得ることができた。品質の安定した生成物が連続的に得られるフロー型の反応ができることは、工業的に重要である。

「2019年にこの成果を発表すると、とても多くの企業が興味を持ってくれました。やっぱり皆さん、エステル化には苦勞していたのですね。私たちの開発した触媒が、バイオディーゼル燃料や石油化学品、医薬品などの合成に役立てばうれしいです」

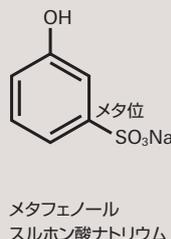
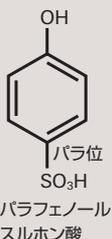
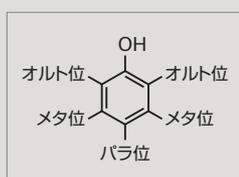
■ **異分野の融合から生まれたシリコンナノ構造体**

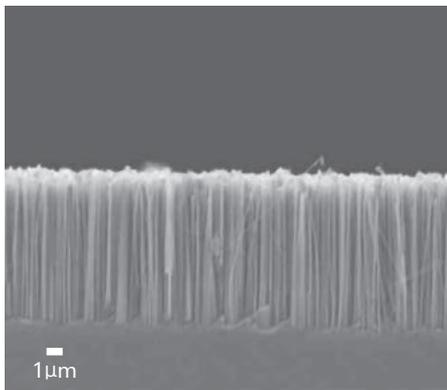
化石燃料の代替品として期待されるバイオディーゼル燃料だが、脂肪酸メチルエステルは分解されやすいためエンジンが傷みやすい、またエネルギー効率が不十分といった問題がある。そこで、第二世代のバイオディーゼル燃料として炭化水素が注目されている。植物由来の油脂を水素化してつくられる炭化水素は、現在使われているディーゼル燃料やジェット燃料の化学構造と同じであるため、第一世代の脂肪酸メチルエステルの問題が解決される。

しかし、第二世代型のバイオディーゼル燃料をつくる化学反応には、いくつか課題がある。まず、20~40気圧という高圧の水素下で反応させなければいけないこと。日本では10気圧以上の取り扱いが高圧ガス保安法で規制されるので、10気圧以下が望ましい。さらに触媒量が数モル%と高濃度であるにもかかわらず、4回目の再利用で活性が60%程度まで下がってしまう。「そうした課題を克服し、効率的な合成を可能にする触媒の開発が待たれていました。そこで私たちが開発したのが、シリコンナノ構造体の触媒です。その姿から“ナノ剣山”(表紙)

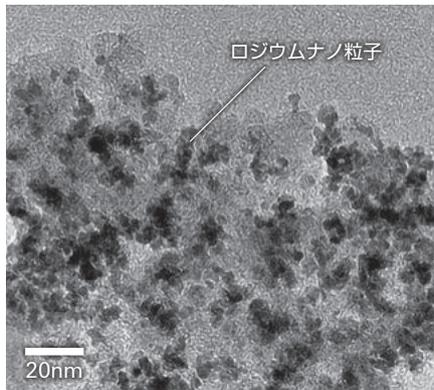
図2 フェノール基の付く位置の違い

ベンゼン環の置換基(ここではOH)の隣をオルト位、炭素を一つ挟んだ隣をメタ位、さらにその隣をパラ位と呼び、フェノール基(SO₃H、SO₃Na)がどの位置に付くかで性質が変わる。





触媒断面の走査型電子顕微鏡写真



さらに拡大した透過型電子顕微鏡写真

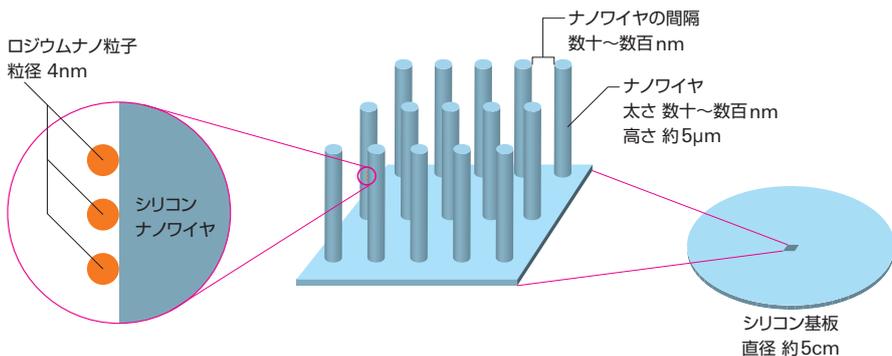


図3 シリコンナノ構造体にロジウムのナノ粒子を固定化した触媒

とも呼んでいます」と山田TLは言う。

シリコンでできた基板の上に、太さ数十～数百nm（1nmは10億分の1m）、高さ約5μm（1μmは100万分の1m）のシリコンナノワイヤがたくさん立っている（図3）。ワイヤとワイヤの間は数十～数百nmで、その空間に金属のナノ粒子が入り込みシリコンと金属結合している。シリコンナノ構造体は半導体にはよく使われているが、触媒に使った例はない。なぜ、このような触媒をつくったのだろうか。

山田TLは、シリコンナノ構造体より以前に、高分子とパラジウムという金属を用いた超分子触媒を開発していた。それはナノスケールの穴がたくさん開いたスポンジのような構造で、穴にパラジウムが入っているものだ。触媒には金属がよく使われるが、それらは高価で希少なものが多い。例えばパラジウムは1kg当たり700万円以上もする。コストと省資源の観点から使用する金属が少なく済むように、活性が高く、再利用性に優れた触媒が求められている。

「大きな空間では二つの化合物が出合うのに時間がかかりますが、空間が小さ

いほど出会いやすくなることから、触媒活性を高めるにはナノ空間を利用するのがいいと考えたのです。また、従来の触媒では金属が外れてしまうことがあり、すると活性が低下して再利用できなくなってしまいます。私たちが開発した超分子触媒は、高分子が金属をつなぎ留めてナノ空間から飛び出さないようになっているので、再利用性も高まります」

実際、超分子触媒は、高活性、高再利用性が確認されている。「超分子でうまくいったことから、ほかの方法でもナノ空間を実現できないか、と考え始めていました」。その当時、山田TLは、理研が1986年に立ち上げた革新的な研究組織・国際フロンティア研究システムに所属する副TLだった。「触媒化学と超分子化学と表面化学をそれぞれ専門とする三つの研究チームが一つの部屋を使っていました。分野が少しずつ違う研究チームと一緒に研究することで独創的なテーマに挑戦し新しい知見を生み出す、という狙いがあったそうです。しかし、同じ化学とはいえ、最初は話が通じませんでした」。例えば1μmの膜について、触媒化学の研究者は薄いと表現し、表面化

学の研究者は厚いと表現する。薄い・厚い、大きい・小さいといった言葉では通じないことが分かってからは、具体的な数字で話すようになったという。

「違いが意識できるようになると、次第に、研究チームを超えていろいろな話をするようになっていきました。そうした中で、表面化学の藤川茂紀さんからシリコンでナノ構造体をつくれるという話を聞き、そのナノ空間を使えば触媒活性や再利用性を上げられるのではないかと考えたのです。その後、藤川さんは九州大学に移られたのですが、今でも共同研究を続けています」

■ シリコンナノ構造体とマイクロ波の連携

山田TLは、作製したシリコンナノ構造体にロジウムという金属のナノ粒子を固定化した触媒を使い、植物由来の油脂から炭化水素をつくる反応を行ってみた。多くの有機合成反応は加熱によって加速されることから、オイルの実験用浴槽で200℃まで加熱したが、反応が進まない。さらに砂の浴槽で300℃まで加熱。それでも反応が進まない。「開発の終了も覚悟しました」と山田TL。そう思いながらも研究員たちに「マイクロ波を使って加熱してみよう」と指示を出した。「みんな、うまくいくはずないと嫌がっていましたね。ところが、マイクロ波で200℃に加熱したら、反応が進行したのです」。具体的には、植物由来の遊離脂肪酸であるステアリン酸を原料とし、触媒量は0.05モル%、10気圧下で40W程度のマイクロ波照射によって200℃に保

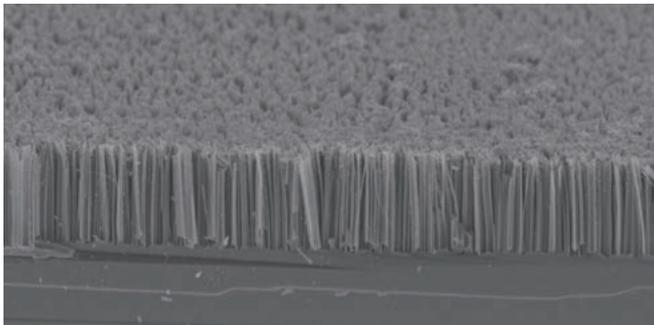


図4 シリコンナノ構造体にパラジウムのナノ粒子を固定化した触媒

走査型電子顕微鏡による俯瞰写真。シリコン基板上に立っているシリコンナノワイヤの表面にパラジウムのナノ粒子が金属結合している。

関連情報

- 2020年6月26日プレスリリース
150回繰り返し使える水素化触媒
- 2020年1月28日プレスリリース
「第二世代」バイオディーゼル燃料合成の触媒を開発
- 2019年12月17日プレスリリース
高活性・高耐久性のエステル化固定化触媒
- 2016年5月18日プレスリリース
副生成物処理が不要なエステル化反応の触媒を開発
- 2013年11月15日プレスリリース
従来の数万分の1の触媒量で機能するパラジウム触媒を開発

ちながら、24時間反応を行った。その結果、炭化水素を90%以上という高効率で得ることができた。

実は、山田TLにも、マイクロ波による加熱で反応が進む理由は分かっていない。マイクロ波の専門家に相談したところ、今まで知られていない興味深い現象であると、共同研究に発展。シリコンナノ構造体にマイクロ波を当てると強電界が生まれ、それが反応の進行に効いていることを示唆するシミュレーション結果が得られた。シリコンナノワイヤの間隔が狭くなると、その効果は強まることも分かった。しかし具体的な理論はまだ見つかっておらず、さらなる研究が必要だ。

なぜマイクロ波で加熱しようと思ったのだろうか。それは、ある成功体験からだ。米国のスクリプス研究所に留学していたころ、研究室の学生が「こんな装置もあるんだぜ」と自慢げに見せてくれたのが、マイクロ波装置だった。マイクロ波で加熱すると反応が加速するという話に興味を持ち、帰国し分子科学研究所で研究を始めるに当たって、マイクロ波装置を導入した。「ある触媒の開発を始めたのですが、どうしても反応が進まない。当時は、その研究がうまくいかないと職を失いかねない状況でした。半ばやけになって、マイクロ波で加熱したら反応が起きたのです。それ以来、反応がうまくいかないときはマイクロ波で加熱することにしています(笑)。とはいえ、今回のシリコンナノ構造体の触媒で、まったく反応が進まなかったものが収率90%になったのには、驚きました」

シリコンナノ構造体にロジウムのナノ粒子を固定化した触媒は、20回再利用しても80%以上の収率を維持している。従来の触媒では4回ほど再利用すると活性が大きく低下していたことから、再利用性が大きく向上したといえる。2020年1月にこの成果を発表すると、化学産業に加えマイクロ波産業からも多くの問い合わせがあった。「私は、出口をイメージしながら研究をしていますが、あくまでも基礎科学の研究者です。基礎的なブレイクスルーを、産業界の皆さんによってもつくりにつなげていただけたら、こんなうれしいことはありません」

■ 世界最高の触媒効率を実現

研究チームでは、シリコンナノ構造体にパラジウムのナノ粒子を固定化した触媒も開発している(図4、表紙)。「この触媒は活性が非常に高く、従来の数万分の1の触媒量に相当する0.000049モル%というごく少量で、溝呂木-ヘック反応が進行しました。しかも、触媒回転数200万回、つまり触媒1個で生成物を200万個合成することに成功しています」。この反応は、異なる分子同士を選択的に結合して一つの分子を生成するクロスカップリング反応の一つである。「200万回というのは、溝呂木-ヘック反応の触媒回転数として世界最高記録です」と山田TLは胸を張る。

また、この触媒を、化合物に水素原子を付加する水素化反応に用いたところ、少量でも、そして150回繰り返し使用しても活性が低下せず、生成物が100%近い収量で得られることも確かめ

られた。従来の工業用触媒では、20回の使用で59%、30回の使用で21%にまで収率が落ちる。クロスカップリング反応も水素化反応も、医薬品や石油化学製品などの合成製造において欠かせない反応であることから、高活性かつ再利用性に優れたシリコンナノ構造体にパラジウムのナノ粒子を固定化した触媒の貢献が期待されている。

■ 美しい有機合成を目指して

「表面化学やマイクロ波工学など、新しい分野との出会いはワクワクします。知らなかったことばかりで勉強になるし、思いもよらない発見につながることも多い。なにより、共同研究での実験は楽しくてしょうがありません」と笑う。

好きな言葉は、人事を尽くして天命を待つ。「私たち研究者は、うまくいかないことを、うまくいかにするのが仕事です。しかし、最先端の研究というのは、100回実験をやったら1回うまくいけばいい方です。実験がうまくいかず、悩んでいるときは、夢にベンゼン環などの構造式が出てくることもあります。考えられることは全てやり尽くす。そこまでやると、あっ！これだ！と思いつく瞬間があるのです。有機化学の神様が降りてきてくれるんですよ」

有機合成化学の魅力を尋ねると「単純なものから複雑なものをつくり出せること」と返ってきた。「より少ない工程数で単純なものから複雑なものをスマートにつくり出す。そういう美しい有機化学を実現する触媒をつくっていききたいですね」(取材・執筆：鈴木志乃/フォトクリエイイト)

仁科加速器科学研究センター 加速器基盤研究部は2020年1月、
理研超伝導重イオン線形加速器 (SRILAC) を用いた
ファーストビームの加速に成功した。

SRILACは、大強度のイオンビームを供給することで
原子番号119番以降の新元素の合成実験や、
新しい放射線がん治療法の開発に貢献する。

仁科加速器科学研究センター (RNC) 加速器基盤研究部

- 上垣外修一 かみがいと おさむ 部長、RNC副センター長
- 坂本成彦 サイクロトロンチーム チームリーダー
- 大関和貴 サイクロトロンチーム 専任技師
- 須田健嗣 サイクロトロンチーム 技師
- 今尾浩士 加速器高度化チーム 専任研究員
- 長友 傑 ながし たかし イオン源開発チーム 専任技師
- 山田一成 運転技術チーム 専任技師
- 内山暁仁 運転技術チーム 技師

SRILACで最初のビーム加速試験に成功

■ 大量のイオンを特定の速度に加速する

— 新たな線形加速器を開発する目的は？

上垣外: 2016年に113番元素がニホニウムと命名されたことをきっかけに「SRILAC」の開発を始めました。理研重イオン線形加速器 (RILAC) の後段に設置することで、性能の増強を図るためです (図1)。自然界に存在しない重い元素も含めて、118番元素まではすでに名前が付けられています。119番以降の新しい元素を合成する実験に大強度ビームを供給することがSRILACの目的の一つです。

— どのような方法で新しい元素を合成するのですか。

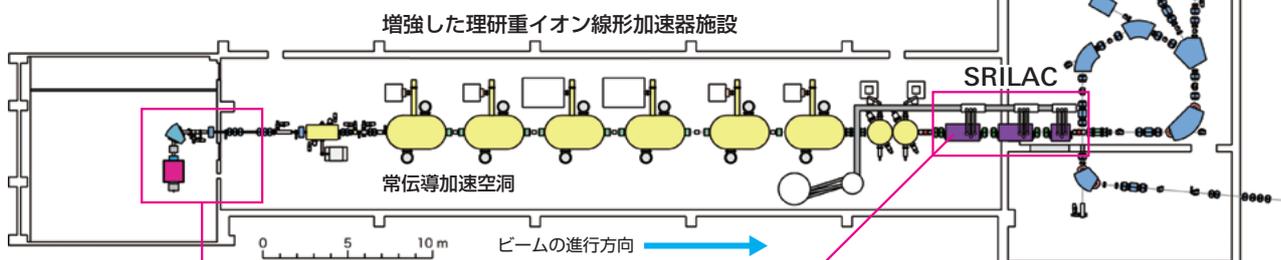
上垣外: 原子は原子核と電子から成り、元素の種類は原子核が持つ陽子の数で決まります。119番元素の原子核が持つ陽子の数は119個です。陽子をたくさん持つ重い新元素をつくるには、原子核を特定の速度に加速して標的の原子核に衝突させ、融合させます。電気的に中性な原子は加速できないので、原子からマイナス電荷の電子を剥ぎ取ってプラス電荷のイオンをつくります。加速器に発生させた電圧でそのイオンを加速します。

ニホニウムのときは、元のRILACによって亜鉛 (30番元素)

イオンビームを光速の10%に加速し、ビスマス (83番元素) 標的に当てて合成しました。119番元素は、バナジウム (23番元素) イオンをさらに高速に加速し、キュリウム (96番元素) 標的に当てて合成する計画です。

原子核の大きさは原子の約10万分の1です。極微の原子核同士が衝突して融合する確率はとても小さいので、たくさんのイオンを標的に当てる必要があります。未知の領域にある119番元素の合成確率は、理論によって大きなばらつきはありますが、実験グループはニホニウムの4分の1程度と予測して実験を進めています。120番元素の合成確率はさらに低くなります。119番元素以降の合成実験では、大量のイオンを集めた大強度ビームを供給することが求められているのです。

SRILACのもう一つの目的は、医療分野への応用です。「核医学治療」という、がんの治療法が注目されています。これは、放射線を出す原子核を持つ放射性同位元素 (ラジオアイソトープ)



超伝導 ECR イオン源 (右奥の赤色)



超伝導加速空洞

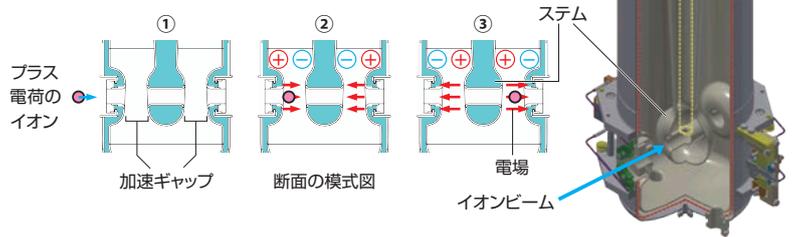
図1 超伝導 ECR イオン源と SRILAC

重イオン線形加速器は、理研の加速器施設「RIBF」の最上流に位置する。左写真の右奥の超伝導 ECR イオン源 (赤色) でイオンをつくり、手前の電磁石 (水色) で特定のイオンだけを加速器へ導く。常伝導加速空洞の後段に設けた非常に限られた場所に、超伝導加速空洞が10台設置された。それがSRILACだ。

常伝導加速空洞1台では150 kW (15万 W) の電力を消費しても650 kVの電圧しか発生させることができない。一方、SRILACの超伝導加速空洞1台では、わずか8 Wの電力で2,400 kVという高い電圧を発生させて効率よくビームを加速することができる。

図2 超伝導加速空洞の内部構造と加速の原理

加速空洞は高さ約1 m、直径約30 cm。①加速器の上流側（左側）からプラス電荷のイオンが加速空洞内に入ってくる。②ステムの上流側の加速ギャップに入ったイオンはマイナス電位に引かれて進行方向に加速する。③イオンがステムを通り抜け下流側の加速ギャップに入るタイミングでプラスとマイナスの電位を切り替えて、イオンをさらに加速する。



プ：RI) を、がん細胞に結合する性質を持つ分子に付けて患者に投与し、がん組織に集積させます。そのRIから放出された放射線ががん細胞をやっつけるというもので、全身に転移したがんや血液のがんなど、手術や外部からの放射線照射では治すことが難しいがんの治療法として期待されています。SRILACは核医学治療の候補物質である85番元素アスタチン (^{211}At) を大量に生成する技術の開発に貢献します。

—アスタチンはどんな特徴があるのですか。

上垣外： α 線だけを出し、ほかの放射線は出さない放射性同位元素です。 α 線は強力な放射線ですが、生体組織内での影響範囲は100 μm 以下と細胞数個分にすぎません。がん細胞だけに大きな損傷を与え、周囲の正常細胞に与える影響は小さいので、核医学治療に最適なのですが、アスタチンは天然には存在せず、人工的に大量生成する技術が求められています。アスタチンは、ヘリウム（2番元素）イオンを加速してビスマス（83番元素）標的に当ててつくることができます。

新元素の合成実験でも、アスタチンの大量生成技術の開発でも、私たち加速器基盤研究部の役目は、大量のイオンを目的に合った速度に加速したビームを供給することです。そのために、大量のイオンをつくり出す超伝導ECRイオン源を長友さんたちが開発し、その大強度ビームを非常に効率的に加速する超伝導加速空洞の開発を坂本さんが中心となって進めました（図1）。

■ 従来の5倍以上の量のイオンをつくり出す

—どのような方法で大量のイオンをつくるのですか。

長友：電子は磁力線の周りを回転します。その回転運動と同じ周波数の電磁波（マイクロ波）を当てると共鳴を起こして、マイクロ波のエネルギーを電子が吸収します。これを「電子サイクロトロン共鳴（ECR）」と呼びます。高エネルギーとなった電子は、装置に送り込んだガス状の原子と衝突して電子を剥ぎ取り、イオンをつくり出します。剥ぎ取られた電子もマイクロ波のエネルギーを吸収して高エネルギーとなり、次々に原子と衝突することで大量のイオンができます。

今回のイオン源の開発では、マイクロ波の強度を上げるとともに、共鳴周波数を高くしました。この結果、電子が磁力線の

周りを高速に回転して、時間当たりに電子が原子と衝突する回数が増えてイオン化が進みます。こうして電子とイオンから成る粒子集団（プラズマ）の温度と密度が高くなるので、新しく開発したイオン源では、さらにたくさんのイオンを生み出せるのです。

このとき重要なのが、プラズマを安定に閉じ込める強い磁場です。高温・高密度にするほど、より強い磁場で閉じ込める必要があるため、大電流を流すことができる超伝導コイルを用いるのです。ニホニウム合成のときは、常伝導コイルでイオン源の磁場をつくっていましたが、今度は超伝導コイルで発生させた強い磁場を使い、常伝導イオン源に比べて、時間当たり5倍以上の量のイオンを安定的につくり出すことに成功しました。

坂本：長友さんたちイオン源開発チームが開発した超伝導ECRイオン源（図1左写真）の性能は世界一です！世界中の研究グループも開発を進めていますが、理研のグループが達成した性能には達していません。

■ 超伝導でコンパクト化と省エネルギーを実現

—大量のイオンを加速する原理について教えてください。

坂本：私たちは加速空洞という装置を使います（図1右写真）。この空洞には、加速ギャップという空間が二つあります。そこに電流を流して、イオンが一つ目の加速ギャップに入ったときに、入り口側にプラス電位、出口側にマイナス電位を発生させます（図2②）。プラス電荷のイオンは出口側のマイナス電位に引き寄せられて進行方向に加速します。しかし、マイナス電位の先にある次のギャップに進もうとしても、そのままではマイナス電位に引き戻されてしまいます。そこで、ビームの速度に合わせ、プラス電荷イオンが次のギャップに進むタイミングで電位のプラスとマイナスを入れ替えることによりイオンを加速し続けるのです（図2③）。

—SRILACでは、なぜ超伝導を用いるのですか。

山田：119番以降の元素合成で求められるような、さらに高いエネルギーを持つ大強度のビームを限られたスペースで生み出すには、加速空洞に発生させる電圧を高くしなければなりません。ニホニウムの合成では、銅製の常伝導加速空洞でイオンを加速しました。しかし、銅には電気抵抗があるので、電流による発

図3 純ニオブ製
加速空洞の内部

空洞組み立て後、特殊な溶液で表面を研磨した直後の空洞内部を上側から撮影。下側中央にステムが見える。また、その周りの研磨された外筒にステムが映り込んでいる。この後、熱処理・再研磨・高圧超純水洗浄・ベキングの処理が施される。



熱を水で冷却する必要があります。今回のように電圧を高くするために加速空洞に流す電流を大きくするとさらに発熱して高温となり、やがて冷却が追いつかず溶けてしまいます。

その点、超伝導材料で加速空洞のサイズや形をうまく設計・製造すれば、極限まで小さい発熱量で高い電圧を発生させることができます。言い換えると、全長の短い加速器でエネルギーを上げて大強度のビームを加速することができるのです。超伝導 ECR イオン源で生み出した大量の低速イオンを、まず既存の常伝導加速空洞で加速した後、新たに設置した SRILAC の超伝導加速空洞 10 台で一気の実験に必要な速度まで加速します。

上垣外: SRILAC で加速できるビーム中のイオンの数は、元の RILAC の 5 倍以上です。その大量のイオンを集束させ、ビームとして目標の速度まで加速することを目指しています。

■ 10 台の超伝導加速空洞全てで高性能を実現

——超伝導加速空洞をつくる上での難しさはどこにありますか。

坂本: 超伝導とは一定の温度以下で電気抵抗がゼロになる現象です。私たちは 9.2 K (−263.95 °C) 以下に冷やすと電気抵抗がゼロになるニオブを使いました。ただし電気抵抗が厳密にゼロになるのは直流電流を流す場合だけです。加速空洞は、プラスとマイナスの電位を切り替えるために高周波電流（周波数の高い交流電流）が流れるのですが、そのとき、わずかな電気抵抗のため熱が発生します。高周波電流は導体の表面を流れるので表面抵抗と呼びます。4.2 K の液体ヘリウムで極低温に冷やしたニオブに交流電流を流す場合、表面抵抗の理論値は 2.2 ナノオームと、常温の銅の抵抗に比べて 100 万分の 1 になります。しかし実際の導体表面ではほこりなどの不純物や凹凸が存在し、それが表面抵抗を大幅に悪化させるという難しさがあります。また、発熱が銅の 100 万分の 1 だとしても、4.2 K という極低温へのその熱負荷は、常温に直すと数百倍の熱負荷に相当します。

大関: 極低温下の超伝導加速空洞には、外部から熱が伝わらないようにしながら、電力だけを効率よく供給しなければなりません。通常、電気抵抗を小さくするほど熱が伝わりやすくなるので、そのバランスを取ることが鍵となります。私は大きな電力を空洞に供給するカプラーという装置の設計・開発を進めて、その課題の克服に挑みました。

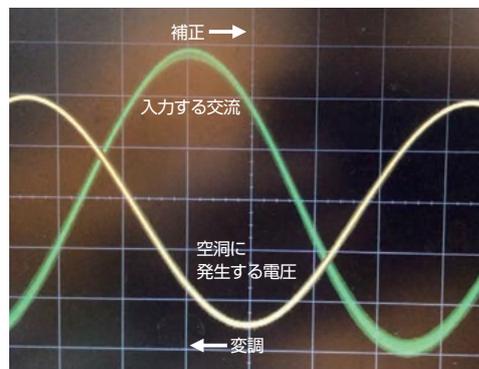


図4 空洞電圧の
変調の補正原理

加速空洞に発生する電圧のプラスからマイナスへの移り変わりを示す波（黄色）が左側（タイミングが早い側）へずれる変調が起きていれば、入力する交流（緑色）の位相を逆の右側へずらすことで変調を補正することができる。

坂本: 超伝導加速空洞の開発は、究極の清浄度と極低温が必要とされ、時間と労力が膨大にかかります。私たちはまず、高エネルギー加速器研究機構と共同研究を行い、内閣府の革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) 「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」の一環として、2015 年秋から超伝導加速空洞のプロトタイプ製作を始めていました（本誌 2017 年 9 月号「大特集」）。その上で、実際にビームを供給する加速器の開発では、世界中の研究機関で得られた知見を共有する国際共同研究 (TESLA Technology Collaboration) の枠組みに参加して研究を進めました。超伝導加速空洞を開発するに当たり世界各国の研究者と情報、とりわけ失敗事例を共有することが、この分野の効率的な発展に欠かせないということを感じました。

——加速空洞は楽器に似ているそうですね。

山田: どちらも共振を利用します。優れた楽器は小さなエネルギーで大きな音が出ます。同じように優れた加速空洞は共振により、わずかな電力を入力することで、高い電圧を効率よく発生させることができます。それには楽器と同様に、空洞のサイズと形が重要になります。私のところで緻密なシミュレーションを繰り返し、超伝導加速空洞の最適形状を求めて改良を重ねてきました。

坂本: 期待以上に性能が高いものができました。ImPACT 用プロトタイプは電気抵抗は 26 ナノオームでしたが、SRILAC 用では 10 台全てで理論値に近い 3 ナノオームという高性能を達成できました。複数台の装置を製作すると性能にばらつきが出ることが多いので、この結果は誇るべきことだと思います。

——どうやって 1 桁近く電気抵抗を小さくしたのですか。

坂本: まずはプロトタイプでどの部分の発熱が多いかを分析し、形状を最適化しました。また電気抵抗を下げるには、空洞内面を滑らかできれいな状態に保つ必要があります。それには表面の研磨法のみならず、組み立てに使う手袋の種類に至るまで、多岐にわたるノウハウの積み重ねが大事なのです。理研と共同研究先、協力企業、みんなで力を合わせて、試行錯誤により高い精度を実現しました（図 3）。

——イオンを加速するには、空洞を制御する必要がありますね。

坂本: 空洞に交流電流を流す際には、前述のようにイオンが通

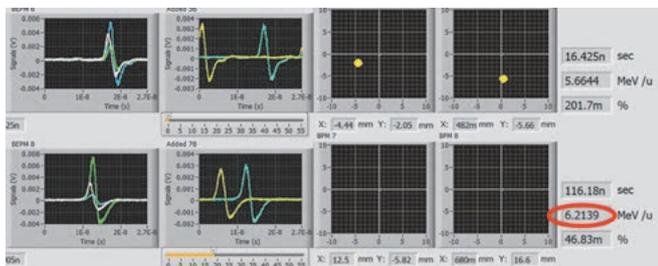


図5 SRILACによるファーストビーム加速の成功を示すデータ
飛行時間測定法により精密にビームのエネルギーと位置を測定することができる装置BEPMを開発。BEPMのモニターが、ビームのエネルギーを6.2 MeV/uまで加速できたことを示している(赤い印)。



超伝導ECRイオン源とSRILACを開発した加速器基盤研究部のメンバー
前列左2人目が山田一成 専任技師、右端が長友 傑 専任技師。中列左2人目から坂本成彦 チームリーダー、今尾浩士 専任研究員、須田健嗣 技師、内山暁仁 技師。後列左から上垣外修一 部長、大関和貴 専任技師。

るタイミングに合わせて加速ギャップに発生させる電圧のマイナスとプラスをタイミングよく切り替える必要があるため、高周波加速ではイオンが通るタイミングと同じ一つの周波数を使います。空洞もその周波数の「音が鳴るように」調整されているのです。ところが空洞自体が持っている機械的な振動により、その周波数が変わる、いわゆる「変調」が起きます。変調が起きると加速電圧もそれに合わせて変調を受け、加速されるビームのエネルギーを不安定にしてしまいます。常伝導加速空洞でも変調は起きるのですが、超伝導加速空洞は性能が高い分、周囲の振動に敏感に反応して大きく変調します。最初は、その激しさにとても驚きました。

—その激しい変調をどのように抑えたのですか。

須田：あるタイミングでプラスとマイナスが変わる交流を入力することで、空洞に電圧が発生します。空洞の共振周波数がずれると、ギャップに発生する電圧がそのずれに比例して変化します。ということは、そのずれを検出してずれがなくなるように、入力する交流のプラスとマイナスの切り替えのタイミングをわざとずらして(変調して)やればいわけです(図4)。私は今回、高速で動作するデジタルフィードバック回路を開発し、超伝導加速空洞1台ごとに状況が違う変調を補正して、10台全体として安定な加速電圧を実現することに成功しました。

■ファーストビーム加速に成功！

—常伝導加速空洞に超伝導加速空洞を組み込むと、装置全体の制御は難しくならないのですか。

内山：加速器は、19台の加速空洞と約100台の電磁石で大強度、すなわち大きなパワーのビームを加速します。加速器オペレーターがこれら多くの加速空洞と電磁石を操作してビームの調整を行うのですが、オペレーターが制御しやすいシステムが必要不可欠です。そのため装置全体をコンピュータで制御するシステムを開発しました。また、思わぬ装置の故障や設定の不具合などにより、大電力のビームが装置を壊さないよう高速で動作する安全装置も新たに開発しました。

今尾：完璧な超伝導加速器システムができたとしても、今回のように狭いスペースで、40年近く前につくられた常伝導加速器とつないで安定な運転が可能なのは、誰も分かりませんでし

た。安定運転に必要な「清浄度」と「圧力」が、常伝導と超伝導では懸け離れているためです。

清浄度について、超伝導加速空洞の内部表面は圧縮空気をひと吹きしても、目に見えないほど小さいちりの1個も舞い上がらない状態に仕上げています。一方、そのすぐ隣の常伝導加速空洞では数え切れないほど、おそらく100万個以上のちりが舞い上がるでしょう。圧力についても液体ヘリウムの温度まで冷やされた超伝導加速空洞では1億分の1パスカル以下の圧力となり、これは常伝導加速空洞の1,000分の1以下。両者はビームの通る穴を通じて直接つながっていて、そのままではちりやガスの流入・付着による劣化や故障で、せっかくの超伝導加速空洞を台無しにする可能性すらあります。常伝導と超伝導をつなぐ間隔は、わずか80 cm。その空間に、真空静電集じん機(電気力でちりを集める装置)と6種類の真空ポンプを内蔵させ、急激な環境の違いを吸収できる装置をデザインしました。その狭さに苦労しましたが、世界でも前例のない理研独自の装置で、国際会議などで発表すると大きな反響があります。

—さまざまな技術開発の成果を結集させることで、SRILACによるファーストビーム加速の成功につながったんですね。

坂本：まさにそのとおりです。一つでも欠けるとビームは加速できません。ヘリウム冷凍機、診断装置、真空装置、電磁石、電源、冷却装置、放射線安全システムなど、あまたの装置の信頼性が加速器を安定に動かす上でとても大事です。2020年1月28日、プロトタイプ製作開始から4年半で、要となる全ての装置がうまく働き、最初のビーム加速試験で規定のエネルギーまでのビーム加速に成功しました(図5)。これは、本当にすごいことなんです。ファーストビームは最終目標の20分の1ほどの強度でしたが、これからどんどん強度を上げていきます。

上垣外：超伝導ECRイオン源とSRILACで大強度ビームを供給して、ニホニウムに続く新元素の合成や、新しい医療技術の開発に貢献します。ご期待ください。(取材・構成：立山 晃/フotonクリエイト)

ピロリ菌感染を防ぐ 胃の免疫の働きを発見

2020年4月2日プレスリリース

ヒトの腸には全身の免疫細胞の6~7割が集中している。それらの免疫細胞が、100兆個を超えるといわれる腸内の共生細菌の状態を監視して増え過ぎた細菌を排出し、また、体内に侵入する病原菌を攻撃する働きを担っている。一方、強い酸性の胃液が分泌されている胃には共生細菌がほとんど存在せず、それらを監視する免疫の働きも弱いと考えられてきた。しかし近年の研究により、胃にも数は少ないが共生細菌が存在することが明らかになった。

胃がヘリコバクター・ピロリ（ピロリ菌）に感染すると、胃炎や胃癌の原因となることが知られている。だが、ピロリ菌保有者であっても症状が出ない時期もある。そこに何らかの免疫が機能しているのかどうか、よく分かっていなかった。

生命医科学研究センター（IMS）粘膜システム研究チームの大野博司チームリーダー（TL）、佐藤尚子 専任研究員（以下、研究員）らの国際共同研究グループは、胃では免疫の働きが弱いという従来の認識を覆し、ピロリ菌の感染を防ぐ免疫の働きがあることを発見した。

免疫には、あらゆる異物に対抗して速やかに働く「自然免疫」と、特定の異物を認識して攻撃する「獲得免疫」がある。近年、自然免疫で働くリンパ球「自然リンパ球」に多様な機能があることが分かり始め注目を集めている。

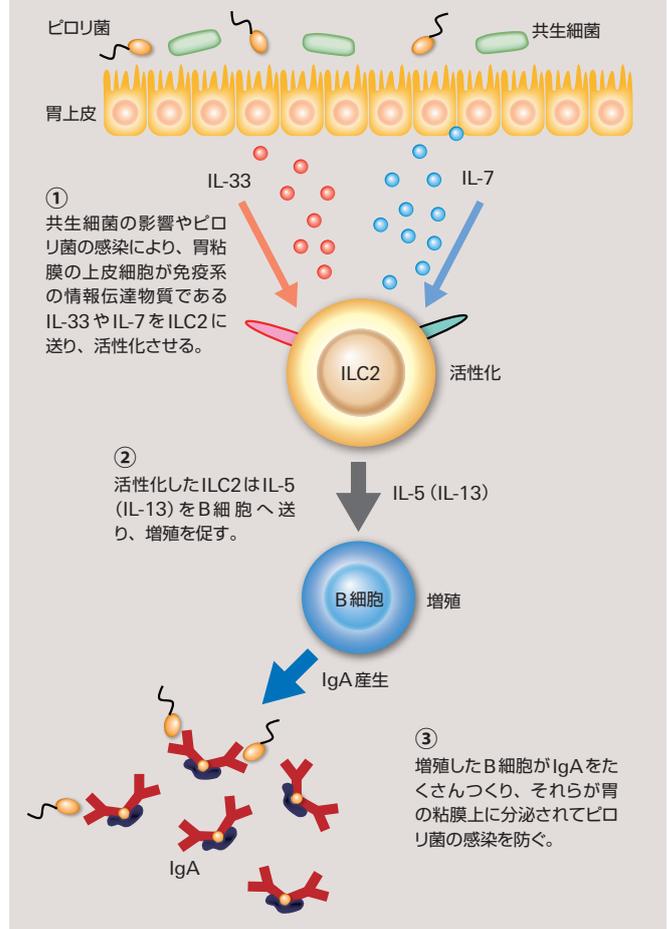
自然リンパ球には三つのタイプがある。1型はウイルスに感染した細胞を攻撃する。2型は腸で寄生虫感染からの防御で重要な働きをし、アレルギーや肥満、組織の線維化にも関与する。3型は細菌の感染を防ぐ。ただし、胃における役割は報告されていなかった。

佐藤研究員らがマウスの胃に存在する自然リンパ球を解析したところ、1型は小腸に比べて少なく、3型はほとんど存在せず、多くが2型（ILC2）で占められていることが分かった。

さらに佐藤研究員らは、マウスの実験により、胃ではILC2が次のような仕組みでピロリ菌の感染を防いでいることを解明した（図）。

- ①ピロリ菌の感染により、胃粘膜の上皮細胞がILC2を活性化させる物質を分泌する。
- ②活性化したILC2はB細胞に増殖を促す指令を出す。
- ③増殖したB細胞は免疫グロブリンA（IgA）を大量につくり、ピロリ菌の感染を防ぐ。

図 胃へのピロリ菌感染を防ぐILC2の役割



IgAは体内で最も多量につくられる抗体で、粘膜上に分泌されて病原菌やウイルスの感染を防ぐ。小腸にあるILC2は共生細菌の影響を受けず、IgAは常に一定量がつくられている。一方、マウスの胃では特定の共生細菌群の数が多ければILC2の数も増えていること、ピロリ菌に感染していないときでもそれら共生細菌群の影響でILC2が活性化してIgAがたくさんつくられていることも、佐藤研究員らは突き止めた。

この共生細菌群はS24-7科と呼ばれ、哺乳類の腸内に豊富に存在する。近年はヒトの特定の疾患に伴いS24-7科が増減していることが分かり、発症への関与も示唆されている。

胃では、このS24-7科の菌の中に、ILC2の数を増やし活性化させる働きをするものがあると考えられる。その菌を特定して、ヨーグルトなどの食品に取り入れて日常的に摂取することで、胃の免疫の働きを高めてピロリ菌の感染を防ぎ、胃炎や胃癌の予防に役立てることができると期待される。

（構成：立山 晃/フotonクリエイト）

●『Immunity』2020年4月14日掲載

動画で新型コロナウイルスを分かりやすく解説

全世界に感染が広がり、私たちの暮らしを一変させた新型コロナウイルスについて分かりやすく解説する動画「教えて！新型コロナウイルス」を制作しました。

「新型コロナウイルスとは?」「感染予防」「ウイルスを死滅させるには?」「重症化の仕組み」の全4話構成です。YouTube「理研チャンネル」をぜひご覧ください。



新研究室主宰者の紹介

新しく就任した研究室主宰者を紹介します。

①生まれ年、②出生地、③最終学歴、④主な職歴、⑤活動内容・研究テーマ、⑥信条、⑦趣味

科技ハブ産連本部 バトンゾーン研究推進プログラム



衛星姿勢軌道制御用レーザー開発研究チーム
チームリーダー

福島忠徳 ふくしま・ただのり

①1979年 ②埼玉県 ③東京都立科学技術大学院大学（現 東京都立大学大学院）航空宇宙工学専攻 ④JSAT(株)（現 スカパー-JSAT(株)） ⑤スカパー-JSATが進めるレーザーを使ったデブリ除去用衛星のレーザーアブレーションサブシステム（不用になった衛星をレーザーで移動させる衛星のミッション機器）の事業化に向けた設計開発の実施 ⑥I (We) can do it! ⑦糖質オフ、ヘルシーで手間をかけた料理にはまっています。ダイエットパンを焼いたりしています！



バイオモノマー生産研究チーム
チームリーダー

谷地義秀 やち・よしひで

①1976年 ②茨城県 ③東京大学大学院工学系研究科化学生命工学専攻修士課程 ④日本ゼオン(株)総合開発センター生産技術研究所 ⑤バイオプラスチックの微生物による生産と化学重合に関するプロセス開発 ⑥できるようにするには何をするか、を考える ⑦サッカー、書道



ロボティクスプロジェクト
心理プロセス研究チーム
チームリーダー

佐藤 弥 さとう・わたる

①1973年 ②愛媛県 ③京都大学大学院教育学研究科博士課程修了 ④京都大学白眉センター特定准教授など ⑤感情および感情コミュニケーションの心理学・神経科学 ⑥道の鍛錬する所 the way is in training (宮本武蔵) ⑦子どもと山や川に出かけること、体を動かすこと



ロボティクスプロジェクト
インタラクティブロボット研究チーム
チームリーダー

港 隆史 みなと・たかし

①1974年 ②兵庫県 ③大阪大学大学院工学研究科博士後期課程 ④大阪大学、科学技術振興機構、国際電気通信基礎技術研究所 ⑤人と自然に関わることのできるロボットの研究開発 ⑥物事の本質を考える ⑦古いもの、廃れたもの、地図・地形の古今比較

開拓研究本部



濱崎非平衡量子統計力学理研白眉研究チーム
理研白眉研究チームリーダー

濱崎立資 はまざき・りゅうすけ

①1992年 ②神奈川県 ③東京大学大学院理学系研究科博士課程 ④日本学術振興会特別研究員 (DC1) ⑤統計力学基礎論 (時間の向きはなぜ存在するか?)、量子力学、非平衡科学 ⑥Magis (「より高く」という意味を含んだラテン語で、母校・栄光学園高校の理念の一つ) ⑦バスケットボール

計算科学研究センター



運用技術部門
先端運用技術ユニット
ユニットリーダー

山本啓二 やまもと・けいじ

①1980年 ②大阪府 ③東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程 ④理研 ⑤スーパーコンピュータおよびデータセンターの運用技術 ⑥笑う門には福来たる ⑦料理、ボウリング

放射光科学研究センター



利用システム開発研究部門
物理・化学系ビームライン基盤グループ
物質系放射光利用システム開発チーム
チームリーダー

林 雄二郎 はやし・ゆうじろう

①1978年 ②福岡県 ③九州大学大学院総合理工学府博士課程 ④北海道大学電子科学研究所博士研究員、日本学術振興会特別研究員、(株)豊田中央研究所研究員 ⑤高エネルギー放射光利用システム開発、X線応力顕微鏡 ⑥努力・根性、迷ったら厳しい道を選ぶ ⑦スポーツ観戦、家庭菜園

バイオリソース研究センター



遺伝子材料開発室
室長

三輪佳宏 みわ・よしひろ

①1966年 ②山口県 ③京都大学 博士(理学) ④徳島大学歯学部助手、筑波大学医学医療系講師 ⑤バイオイメージング技術の開発と応用 ⑥創意工夫をもって前人未到の境地に至り、それを共有する ⑦美しいものや面白いもの(絵画・音楽・映画・水族館の生き物など)を鑑賞すること

夢の世界へと誘うタカラヅカ

Jane Hommerding ジェーン・ホマーディング

国際部国際課 課員

都内の大学に留学していた2011年、私は勉強疲れから逃れようと、あるオアシスを目指してたびたび出掛けていました。たどり着いたそのオアシスは、東京宝塚劇場。当時の劇場には、見るからに外国人という観客はまだ珍しかったと思いますが、「タカラヅカ」という夢の世界がアメリカ人の私を優しく迎えてくれて、今もお世話になっています。

子どものころからブロードウェイ系のミュージカルが好きでしたが、宝塚歌劇定番の「お芝居」と「ショー」の2本立ては目新しく、特にテーマを持って繰り広げられる豪華なショー（レビュー）にはただ驚くばかり。全員が女性で男役と娘役に分かれて役を演じることに興味を引かれました。ハマるきっかけは2回目に見た『ファントム』でした。これはお芝居1本立てで、私はスターたちのパワーやフィナーレの美しさにすっかり魅了され、夢から目覚めたくない!と思ったのです。

経済的に余裕がなく、もっぱら立ち見券で見る留学時代。勉強に疲れていても、劇場に行けば舞台のせりふや声を掛けてくださるご高齢のお姉さま方から、新しい単語や敬語を楽しく学べました。宝塚ファンは同じ演目に何度も通うことが多く、日本語の復習になるのに加え、お姉さま方も再会し、だんだん仲良くなっていきました。社会人になり立ち見を卒業してからも、ファン同士で積極的に話すことで友達をつくることができました。お芝居もショーも見れば見るほど理解が深まり、大好きになったのはもちろん、芸能だけでなく、ファン同士のコミュニティも大切な支えとなりました。宝塚は派手なメイクや大げさなラブストーリー、女性だけのものというイメージを持たれがちですが、公演を真摯につくり上げる歌劇団にも、熱心に活動するファンにも、老若男女を問わず誰でも楽しめるよう心掛けてくださる方がたくさんいます。

2014年に100周年を迎えた宝塚は、アニメや映画の潤色



写真1・アニメファンが「聖地巡礼」をするように、宝塚ファンは兵庫県にある宝塚大劇場に「遠征」する。100周年を記念して開館した殿堂の舞台体験コーナーにて。

写真3・変身後の筆者（中央）
© COMMON BEAT (第55期東京公演フォトレポートより)



写真2・和光地区の桜を楽しむ普段の筆者



(舞台化) やフレッシュな公演コンセプトに挑戦し、国内外のファンが急増しました。ハマった当時に比べれば、いわゆるチケット難で入手がしづらくなりましたが、世界中のファンとつながれてうれしいです。今はファン同士で英語でも話ができて、日本語があまり分からない方とは「Your favorite ジェンヌ was so cool on the 銀橋 during the 中詰め」というふうに宝塚用語と英語を混ぜて「ヅカ語」で盛り上がります。英語で説明することもあり、普段、理研内で所内文書の翻訳担当として使うスキルがこの場で輝くとは……(笑)。

そして、自分も舞台に立ってみたいという夢が、2月に実現しました。演劇を介して個性や多様性の素晴らしさを表現するミュージカルプロジェクト『A COMMON BEAT』に出演したのです。舞台の日には、理研の仲間が素敵なおちわを、ヅカファン仲間がお手紙やスタイリッシュなお菓子など宝塚風の「お差し入れ」を用意し、見に来てくれました。普段の自分(写真2)がスター(写真3)に変身した気分でした!

その公演直後から新型コロナウイルスの影響でしばらく宝塚の公演が中止となってしまいました。ファン仲間と直接会えない日々が続きそうですが、それぞれ持っているDVDを見てはオンライン交流会で語り合い、今もお互いを支えています。宝塚という夢の世界からは、私はもう目覚めません!



理研の活動をご支援ください。

理研の研究の充実、さらなる発展は、法人や個人の皆さまからのご寄附で支えられています。

●問合せ先

理研 外部資金室 寄附金担当

Tel : 048-462-4955

Email : kifuf-info@riken.jp



<https://www.riken.jp/support/>