

# RIKEN NEWS

 理化学研究所

WINTER 2022  
No.480

特集 新春特別対談

## 社会の変革期に臨む……p.02

平野 俊夫 量子科学技術研究開発機構理事長

松本 紘 理化学研究所理事長

特集

## ポストコロナを見据えて……p.04

私の科学道

顕微鏡観察をきっかけに研究の道へ……p.19

原酒

タイムマシン、乗ったことありますか?……p.20

研究最前線

抗体の種類と量を30分で測定!  
新たな検査法を開発……p.06

光を操り「安全安心な空間づくり」……p.07

ゼブラフィッシュから迫る、  
ヒトの心や行動制御の原理……p.08

“微生物ダークマター”を追え!……p.10

イソギンチャクで動物の体の進化を探る……p.11

2年間流れ続けた永久電流  
—その意味とは?……p.12

惑星形成シナリオに新展開……p.14

超高速の世界を捉えるアト秒の光……p.15

いろいろなものを  
取り込むソフトな結晶……p.16

データの「共有」で生命科学研究の  
レベルをジャンプアップ!……p.18

科学道  
Dreams to the Future

# 社会の変革期に臨む

## 平野 俊夫 × 松本 紘

量子科学技術研究開発機構 理事長

理化学研究所 理事長

2020年3月に世界保健機関(WHO)が新型コロナウイルス感染症の流行を「パンデミック(世界的大流行)」と宣言してから、まもなく2年。ウィズコロナの生活が続く中、この問題を契機として、人類が抱えるさまざまな課題と科学技術の在り方に関心が高まっています。2022年の年頭にあたり、日本の科学技術研究の一翼を担う国立研究開発法人(国研)の二人の理事長が語り合いました。

### 融合的研究の広がり

**松本**：平野さんと私は共に関西出身。ほぼ同じ時期に国立大学の総長として大学改革に取り組んでいたこともあり、同志のように感じていました。さらに現職に就任したのも1年違いで、境遇が似ています。とはいえ平野さんは量子科学技術研究開発機構(QST)の初代理事長ですから、格別なご苦労があったのではないのでしょうか。

**平野**：QSTは放射線の安全性や、がんや認知症などの治療を手掛ける放射線医学総合研究所(NIRS)と、日本原子力研究開発機構(JAEA)の量子ビーム部門と核融合部門が再編・統合されてできた組織です。それぞれ研究のバックグラウンドも違うし、組織としての歴史、そして文化も違う。

大変な状況でしたが、逆にこれは新しいものをつくるチャンスだと考えて、各部門を融合させる取り組みを始めました。一つは、NIRSが世界で初めて開発した重粒子線がん治療装置の次世代機である「量子メス」の研究開発です。量子ビーム部門のレーザー科学や核融合部門の超伝導コイルなどJAEAの持つ技

術を取り入れ、小型化・高性能化し、世界に普及させて「がん死ゼロ健康長寿社会」を目指すプロジェクトを始めました。

もう一つは「生命とは何か」を追求する量子生命科学の創設。これからの生命科学は分子から量子の時代になると考えて、物理、化学、医学、生物学による融合研究の分野を、QSTの研究者を結集し、国内外の研究者とも連携してゼロから立ち上げました。

**松本**：理研は、1917年の創立当初から続く伝統ある物理、化学をはじめ、非常に分野の幅が広い。生命科学分野も組織や人材が充実しています。一方で理研には情報分野のボリュームが足りていないと感じました。情報分野の強化が自分のミッションの一つだと考えてロボットに関するプロジェクトをけいはんな地区に新設しました。自律的に考えるロボットの研究を、情報・機械工学・心理学の3分野が一体となり推進しています。社会が多様化している現在において、融合的研究は今後ますます重要になってくると思います。分野を超えて広げていきたいですね。

### 国研の使命を考える

**松本**：国研にはそれぞれ使命がありますが、国研同士で横の連携をつくり、協力する必要性を感じ、2016年に国立研究開発法人協議会(国研協)を立ち上げました。初代の会長は私が務め、平野さんは昨年3代目の会長に選任されました。

**平野**：国研の担当省庁は文部科学省、経済産業省、厚生労働省などそれぞれ違いますが、先ほどの融合的研究の広がりにも関連して、省庁の枠を超えて俯瞰的な視点で連携できる国研協ができた意味は大きいですね。

**松本**：一方で、国民の皆さまからすると、国研は遠い存在かもしれません。研究機関であるだけでなく、博士号を取得した人たちの教育機関でもあることを、ご存じの方は少ないのではないのでしょうか。国研を広く知ってもらうためにも、国研協は一つの足掛かりになると思います。

**平野**：社会は今、単にコロナ禍という意味にとどまらず、人類史20万年の中で“第5の波”とも言える大きな変革期にあると思うのです。産業革命による技術革新がもたらした種が成長し、良いこともたくさんありましたが、環境の汚染や破壊、エネルギーや食料の問題、人口爆発など、科学技術の負の側面が強く現れている。このような課題を国研は科学技術で解決していく大きな使命を有していると考えています。

**松本**：科学技術がもたらした、ある意味でネガティブな面は、科学だけの責任とも言い切れないと思います。科学は事実を明らかにしますが、それをどう使うかは、使う人間によるところ



松本 紘 (まつもと ひろし)

1942年生まれ。京都大学工学部卒業。工学博士。京都大学教授、同大学総長などを経て、2015年より現職。専門は宇宙プラズマ物理学、宇宙電波科学、宇宙エネルギー工学。2007年紫綬褒章、2021年瑞宝大綬章。



が大きいとも言えますよね。

**平野**：科学者は己の好奇心を原動力として純粋に真理を追究し、その成果がどんな結果をもたらすかまで考えが至らないことがあります。再生医学、iPS細胞、ゲノム編集などの技術が開発され、人間の平均寿命が生物学的寿命とされる120歳を突破する可能性が出てきました。生命科学は現在、生命誕生以来40億年の自然の摂理から離れ、人類史上稀有なターニングポイントにあるのではないのでしょうか。その意味をいろいろな側面から考える必要があると思います。

**松本**：その分岐点に立って、科学の進歩を見つめながら、社会とどう折り合いをつけていくのか、自然科学者と人文社会学者とが一緒に考えていく必要がありますね。2021年の国立研究開発法人理化学研究所法の改正によって、理研の研究対象は自然科学だけでなく人文社会科学にまで拡大されました。いよいよ文系の知識を持った人たちと真に協力していける組織となった、と考えています。

**平野**：国研の使命は、より社会貢献の意味合いが強くなってきていると思います。

## 科学者の知識が生きる社会へ

**松本**：国研の活動をぜひ国民の皆さまに、もっと知っていただきたいですね。研究成果の発信だけではどのような組織なのか、なかなか分からないものです。広報の面でも国研協に期待しています。科学の知見を政治へ生かすための提言も、国民に信用されて初めて可能になるのですから。

海外には、科学者が政治家の近くにおいてアドバイスをするという仕組みがあります。特定の期間やテーマを扱う委員会を都度設けるのではなく、政治家が科学的な知見に基づいて判断したいとき、常日頃から意見を求める相手が近くにいる、というのは良いことだと思います。

**平野**：私もそう思います。イギリスの新型コロナ対策を見ると、オックスフォード大学など大学の科学者コミュニティが状況に合わせて科学的根拠に基づいた提言を政府に行い、それをもとに政府の責任で決断し実行しています。アメリカでも国立アレルギー・感染症研究所の所長、アンソニー・ファウチ博士は何代もの大統領に科学者として提言し、政治判断の根拠となっていますね。日本においても、科学の発信力を強める必要があると思います。

## 来るべき変革に備えて

**平野**：新興感染症は、自然環境が破壊されて野生動物と人類社会の生活圏が限りなく密接になったことが原因と考え、いわば一つの環境問題です。はしかや結核などの伝統的な感染症は家畜由来でしたが、これからは野生動物由来の新興感染症が増えるでしょう。あるいは地球温暖化の影響から、マラリアのような熱帯地域の感染症が日本でも流行するかもしれない。それに加えスーパー台風などの自然災害もあります。新型コロナは単なる一つの現象にしか過ぎません。これからは感染症や大規模災害が起こると想定し、備えておく必要がありますね。

今年も、新型コロナと共生することになるでしょう。しかし、ワクチンが普及し、治療薬も使えるようになって、重症化事例は減少し、社会は正常化に向かうと考えられます。テレワークやオンライン会議など、新しい生活様式も含めて、今回学んだことをうまく取り入れていければいいですね。そういう意味では2022年は明るい年になるのではないのでしょうか。

一方で、前述したように今は生命進化の歴史を塗り替えるようなターニングポイントにあることも念頭に、将来に向け、国研としての使命を果たしていきたいと思います。

**松本**：理研もコロナ対策の研究には力を注いでいます。その一方で、基礎研究の成果を迅速に治療薬やワクチンとして社会実装するには課題があることを、今回改めて痛感しました。社会に貢献する理研のあり方を模索していくとともに、基礎研究の重要性を理解していただき、共感をえられる情報発信にも努めていきます。本日はありがとうございました。



**平野 俊夫** (ひらの としお)

1947年生まれ。大阪大学医学部卒業。医学博士。大阪大学医学部教授、同大学院医学系研究科長・医学部長、同大学総長などを経て、2016年より現職。専門は免疫学・生命科学。2009年クラフォード賞。

撮影：相澤正。

# ポストコロナを見据えて



2020年4月以来、理研は新型コロナウイルスに対する特別プロジェクトに、まさしく“オール理研”で取り組んできた。それからおよそ2年。飛沫感染のシミュレーションやPCRに代わる検査法、湿布のように貼るタイプの簡易ワクチンの研究開発など、幅広い分野の成果を次々に発信、現在はポストコロナの時代を見据えた研究も進みつつある。進捗状況や今後の展望について、小安重夫 理事に聞いた。

## 幅広い研究分野で国難に立ち向かう

新型コロナウイルスのパンデミック（世界的大流行）を受け、松本 紘 理事長が先頭に立って理事長裁量経費の投入を采配し、始動した特別プロジェクトの研究課題は総数30を超える。より迅速かつ効率的なウイルス検出法の開発、多角的なシミュレーション、人工知能（AI）、ICTなどを活用した生活や社会を持続させるための研究など、取り組む分野は幅広い。研究成果をいち早く社会に届けるために、研究課題の募集にあたり「早期実用枠」も設けた。

他機関の新型コロナウイルス研究への支援強化にも迅速に取り組んだ。大型放射光施設「SPring-8」、X線自由電子レーザー施設「SACLA」に加え、本格稼働前だったスーパーコンピュータ「富岳」の試用的運用を関係省庁と調整の上、急ぎ開始し、理

**小安 重夫**（こやす しげお）  
理事

1955年東京都生まれ。東京大学大学院理学系研究科。理学博士。米国ハーバード医科大学病理学助教授、内科学准教授、慶應義塾大学医学部教授などを経て、2014年に理研統合生命医科学研究センターセンター長に就任。2015年から現職。

研内外の研究を強力に後押し。新型コロナウイルスのタンパク質と治療薬候補化合物の相互作用に関するデータベースの公開も行った。

## がん免疫細胞療法を応用して ワクチン・治療薬開発へ

早期実用枠で採択されたプロジェクトの一つが、「人工アジュバントベクター細胞（aAVC）」を応用したワクチン・治療薬の開発だ。aAVCは、もともとがんの免疫細胞療法として開発された。糖脂質を認識する膜タンパク質やがん抗原のmRNAが組み込まれており、投与すると「自然免疫」と「獲得免疫」の両方を活性化。自然免疫はがんや病原体といった異物を非特異的に攻撃し、獲得免疫は異物の種類に応じて特異的に攻撃する免疫機能だ。がん抗原の代わりにウイルス抗原のmRNAを組み込むことで、ワクチンや治療薬として使える可能性があり、研究が進められている。



「既存のワクチンの有効性は実証されています。ですが、抗がん剤治療中の患者さんなどでは免疫が抑制され、十分な効果を得られないことがあります。aAVCは自然免疫にも働きかけるので、そのような方々への効果が期待できます。すでに、がんの治療薬として製薬企業とライセンス契約を結び、安全性を確かめる第1/2相の治験が始まっています。新型コロナウイルスに対しても、早期の臨床応用を目指しています」と小安理事は語る。

## ワクチンの効果が30分で分かる検査法

海外では、ワクチン接種完了から時間が経った後のブレイクスルー感染が問題になり、ワクチン効果を回復するためのブースター接種が始まった国もある。国内でも2021年12月から3回目接種が始まることが決定した。

ワクチンの効果測定に使われるのが血中の抗体価（抗体の量）だ。理研では、わずか1滴の血液で抗体価を測定できる「ウイルス・マイクロアレイ検出システム」が開発された（p.06「研究最前線」）。小さな基板（マイクロアレイ）上に新型コロナウイルスの複数のタンパク質を固定し、滴下した血液に抗体があれば結合して発光するように加工する。既存の簡易な抗体検査法より500倍ほど精度が高く、30分で結果が出るため、抗体の定量検査にも有用だ。

小安理事は「ワクチンの効果持続期間やブースター接種の効果などは世界的に関心が高い。迅速で高精度の抗体価検査法の原型が完成したので、できるだけ早く実用化に持っていきたい」と話す。

別途、ウイルス感染の有無が5分で分かるウイルス検出法の開発にも成功し、企業との共同開発も始まっている。

## 新型コロナ研究から広がる今後の展望

2021年4月の科学技術・イノベーション基本法の改正に対応し、理研の研究開発の対象は「科学技術（人文科学のみに係るものを除く）」から「科学技術」へ拡充され、社会課題の解決を目指す視点でもさまざまな新型コロナウイルスに関する研究が進められている。その一つが、コロナ禍で増加が懸念されている虐待や子どもの問題行動の予防と解決に向けた行動療法の研究だ。すでに世界で広く実践され効果が実証されている「親子相互交流療法」をリモートで実践し、実施前と後で親の脳の活

動に変化があったかどうかを脳機能的核磁気共鳴画像法で調べる。その効果を神経科学的に検証、さらにリモートでの家族支援に役立つノウハウの構築を目指す。

これからの研究のあり方について小安理事は、「今回の経験を、他の感染症や将来のパンデミックに生かす方向で研究を進めるべき」と強調する。例えば、抗体の一つである免疫グロブリンM (IgM) を高めるワクチン。既存のワクチンは免疫グロブリンG (IgG) 抗体にアプローチするが、デング熱のように、ワクチンでIgG抗体量が増加した後に感染するとむしろ重症化する「抗体依存性増強」が起きるものがある。IgM抗体を高めるワクチンならこれを回避できる。

さらに、「免疫の持続性に関する研究から、“免疫記憶のメカニズム”という免疫学における未解明の謎を解く研究へ発展させていきたい」と語る。ヒトは、病原体によっては、一度感染したら二度と感染しない「終生免疫」を獲得できる場合がある。一方、インフルエンザのように何度も感染する病原体もある。どうして免疫記憶の差が生じるのか、ヒトの免疫がどう働けば終生免疫が確立するのか、現時点では謎だ。「免疫記憶のメカニズムを解明できれば、免疫記憶を消すメカニズムの解明、さらには消去方法の開発により花粉症などのアレルギーや自己免疫疾患の治療にも応用できるかもしれない。新型コロナウイルス研究を、ぜひこの段階まで発展させたい」と将来の展望を語った。



たゆまず進むワクチン・治療薬の研究開発

# 抗体の種類と量を30分で測定！ 新たな検査法を開発

開拓研究本部 伊藤ナノ医工学研究室の伊藤嘉浩 主任研究員からは、指先などから採取した1滴の血液から複数の抗体の有無や量を一度に判定できる新しい検査法を開発した。判定にかかる時間はわずか30分ほど。2020年、アレルギー疾患の診断用として実用化され、2021年には新型コロナウイルスの迅速検査システムの開発にも成功した。

## 光を使ってさまざまな抗原を固定

伊藤主任研究員らが開発したのは、抗原（アレルゲンやウイルスなど）を基板に固定したマイクロアレイチップを用いて、抗体の種類や量を検査するシステム（図1）。血液などの患者の検体をマイクロアレイチップに載せて検査装置にかけると、わずか30分ほどで結果が出る。検体中に抗体があると発光し、光の強さで量も分かる。

多数の物質を基板に固定し検査を行うマイクロアレイ技術は

### 伊藤 嘉浩

(いとう よしひろ)

開拓研究本部  
伊藤ナノ医工学研究室  
主任研究員

創発物性科学研究センター  
創発生体工学材料研究チーム  
チームリーダー

1959年岐阜県生まれ。京都大学大学院工学研究科博士課程中退。工学博士。京都大学工学部助教授、徳島大学工学部教授などを経て、2004年より理研で研究室を主宰。2013年からチームリーダーを兼務し、2018年より現職。

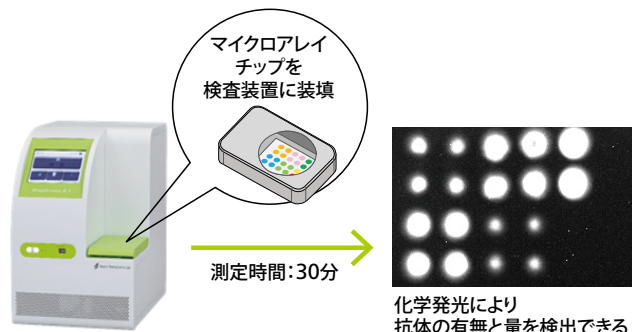


図1 マイクロアレイチップを使った検査の流れ

1990年代に登場した。DNAの断片を固定したDNAマイクロアレイは実用化しており、がんゲノム医療で遺伝子変異を判定する遺伝子パネル検査（がん関連遺伝子の変異を一度に調べる検査）に用いられている。しかし、種類によって形や性質が大きく異なるタンパク質を基板に固定するのはとても難しい。

伊藤主任研究員らは2003年、光に反応する高分子を利用した「何でも固定化法」を開発。光反応性高分子を塗布した基板上に物質を並べ、紫外線を当てると物質が固定されるという仕組みだ。タンパク質など、さまざまな生体分子のほか、細菌やウイルスも固定できる。

塗布する光反応性高分子には、患者の血液などに含まれるタンパク質が吸着しない特性を持たせてある。このため、ノイズの少ない正確な測定が可能になった。

## 応用領域の拡大を視野に

「何でも固定化法」を用いた検査は、すでに実用化が進んでいる。2020年、41種類のアレルギーを1回で検査できる自動検査装置と診断用キットが商品化された。これらによる検査・診断には健康保険も適用されており、全国の耳鼻咽喉科や小児科のクリニックなどでの導入が進む。伊藤主任研究員は「今後、抗原の種類や量とぜんそく発症の関係や、がんを含むさまざまな疾患に関連した生体分子と抗体の関連などを調べていくことで、健康状態がさらに詳しく分かるでしょう」と、応用が拡大することに期待をしている。

伊藤主任研究員は「人の役に立つものをつくるのが研究の動機」という。「研究者というのは、若い頃は基礎研究を手掛け、キャリアを積むと応用研究に進む人がどうやら多いようです。私も同じ。今は実用化を目標に、エンジニアリング的な思考で研究中です。これからも社会に役立つ成果を目指したい」と今後の抱負を語った。

# 光を操り「安全安心な空間づくり」

「今こそ研究者はその専門性を生かして状況の打開に当たるべき」。国難とも言えるコロナ禍に当たり、光子工学研究センター光子制御技術開発チームの和田智之チームリーダー（TL）は光技術による安全安心な空間づくりを目指して、2020年3月には研究をスタートさせた。独自の光計測技術を使って、飛沫が拡散する様子の可視化やマスクの性能評価の手法を開発。さらに、レーザー光による「コロナ不活性化光カーテン」も開発した。

## ウイルスの可視化とマスクの性能評価

新型コロナウイルスは、口から出る飛沫を介して感染が広がる。そのため感染予防には、人との間に十分な距離を取り、マスクで口と鼻を覆う。しかし、コロナ禍が始まった当初は、どれほどの距離を取れば良いのか、マスクの感染予防効果はどの程度なのか、よりどころとなる科学的な情報がなかった。

「飛沫は唾液が細かく散ったものですから、水分です。大気中を気流に乗って漂う“水分を簡単に見る”ことができる方法を開発しました」。和田TLが開発したライダー技術では、対象に向かって光を照射し、跳ね返ってきた光を観測することで対象を“見る”ことができるのが特長だ。このライダーを使い、まず人の口から出る飛沫の数とサイズ、スピードを計測するシステムを開発した。計測結果から、どの程度のサイズの飛沫が、気

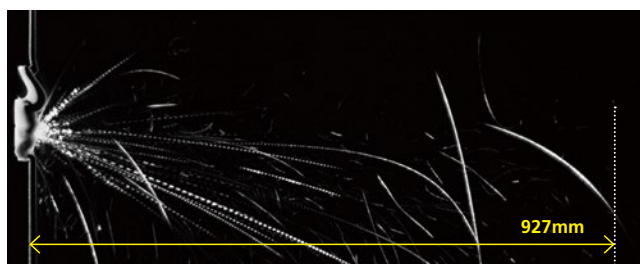


図1 ライダーによる飛沫の可視化  
口から飛んだ飛沫の軌跡。約1m先まで飛んでいることがわかる。

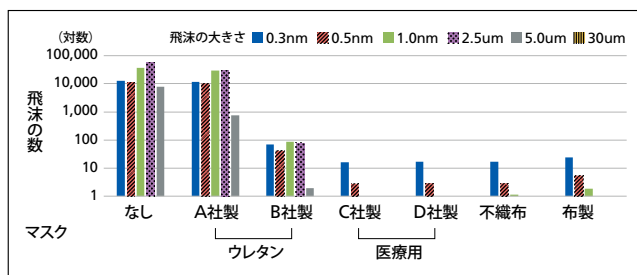


図2 マスクを透過する飛沫のサイズと数の比較  
ウレタンマスクの飛沫の透過度は高いが、不織布マスクは医療用マスク同様、透過度は低い。

### 和田 智之 (わだ さとし)

光子工学研究センター  
光子制御技術開発チーム  
チームリーダー

1963年埼玉県生まれ。東京理科大学大学院理学研究科博士課程修了。理学博士。1992年、理研基礎科学特別研究員を経て、2013年より研究室を主宰、2018年より現職。



流に乗ってどこまで飛ぶかを可視化できるのだ(図1)。

これを発展させて、飛沫がマスクをどれだけ透過するかを計測する装置もつくり、さまざまなマスクの性能を比較した(図2)。「医療用マスクはもちろん、一般的な不織布や布のマスクも飛沫を99%通していません。一方で、一部のウレタンマスクはほとんど透過しているので、マスク選びが重要です」と結果について説明する。さらに、「感染力の強いデルタ株の出現で、より少量のウイルス、すなわち、より小さくて遠くへ飛ぶマイクロ飛沫にも注意が必要になりました。一時はどうなることが心配でしたが、この結果から不織布マスクをしていればまず安全だと言えます」と和田TL。

## 紫外線カーテンでウイルスを不活性化

光でできることは、飛沫の可視化や計測だけではない。新型コロナウイルスは、紫外線によって不活性化させることで、感染力が減少することが分かっていた。そこで和田TLは、紫外線を使った「コロナ不活性化光カーテン」を開発した。

「装置の基本技術は公開できませんが、人に害を及ぼさないと考えられている波長230nm(1nmは10億分の1m)以下の紫外線ビームを発生させて、それをカーテンにしました」と和田TL。トンネルなどのコンクリート構造物の非破壊検査や宇宙観測など、これまでライダーで培ってきた、目的にあった光源をつくり制御する技術が、コロナ対策技術にも生かされている。実用化に向け、波長230nm以下の紫外線の安全性確認も行われていく。

飛沫に関するデータや開発した紫外線発生技術は、すでに企業で利用され始めている。そこから、また多くのコロナ対策が提案されるだろう。



# ゼブラフィッシュから迫る、 ヒトの心や行動制御の原理

メダカほどの小さな魚、ゼブラフィッシュ。脳は、つまよりの先くらいの大ささしかないが、動作原理はヒトの脳と共通している。ゼブラフィッシュを使って、学習に基づく適応的行動や社会的上下関係をめぐる闘争行動を制御する脳のメカニズムを研究している脳神経科学研究センター意思決定回路動態研究チームの岡本 仁チームリーダー (TL) に、なぜ魚でヒトの脳を研究するのか、魚でどんなことが分かってきたか、話を聞いた。

## なぜゼブラフィッシュ？

岡本TLはこれまでにゼブラフィッシュを用いてさまざまな脳と情動や行動の仕組みを解明してきた。近年は、ゼブラフィッシュを使って、意思決定や情動などヒトの高度な脳機能の仕組みを調べる研究が世界的に増えている。

「魚とヒトの脳は全く違うと考えられていましたが、2000年代初めに思考や記憶などをつかさどる終脳という部位が魚にもあり、脳の基本的な構造や機能は魚とヒトでかなり共通していることが分かってきました。ゼブラフィッシュの脳は哺乳類と比べて圧倒的に小さいため、脳全体の神経活動を観察でき、心

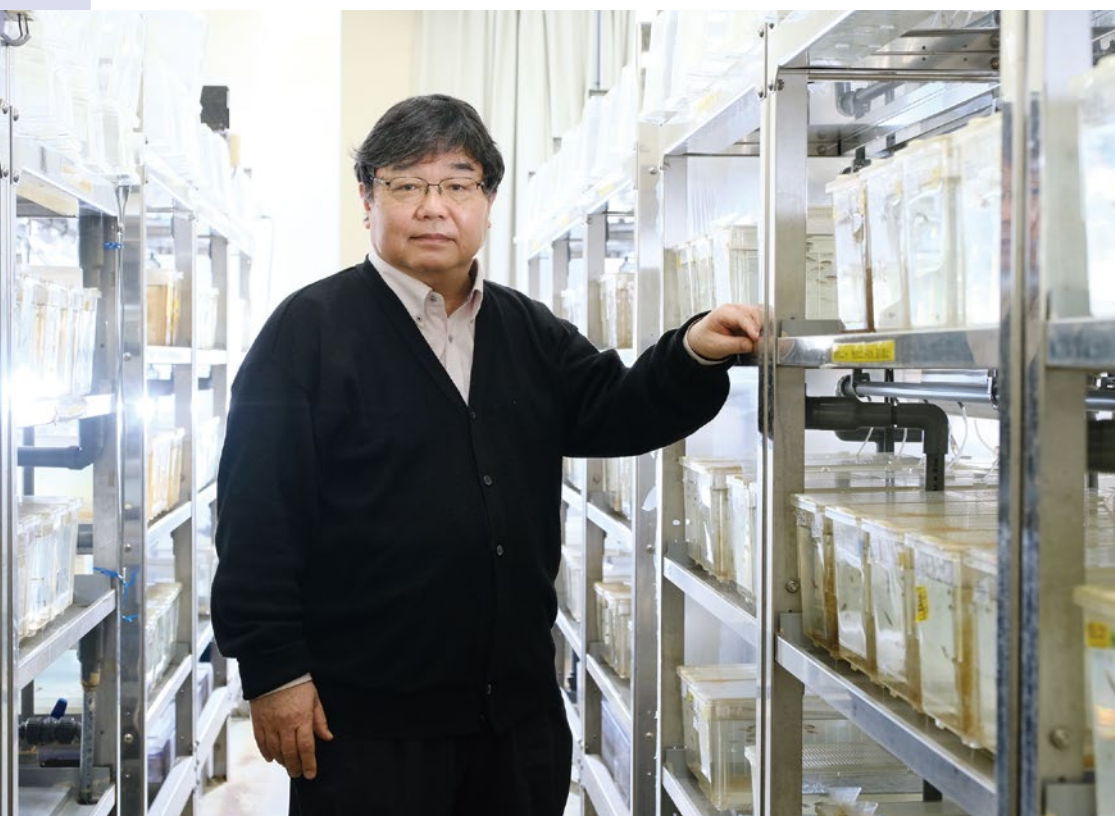


図1 水槽の中で戦うゼブラフィッシュ

や行動を生み出す脳の動作原理を調べるのに適しているのです」と岡本TL。

## 空腹だと粘り強くなる “ハングリー精神”を魚で実証！

現状に満足せずさらに上のレベルへ這い上がろうとする人を「ハングリー精神がある」と言ったりするが、文字通り、空腹の動物は食べ物を得ようと闘争心が高まることが知られている。岡本TLはゼブラフィッシュの実験によって、空腹が魚の行動に影響を与えていることを実証し、2020年に論文発表した。こうした闘争行動に関わる神経回路(手綱核-脚間核神経回路)に



岡本 仁 (おかもと ひとし)

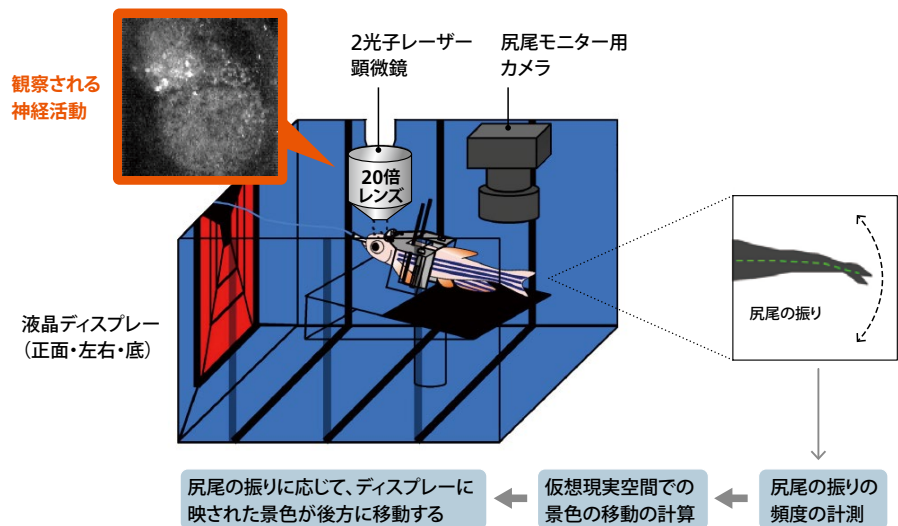
脳神経科学研究センター  
意思決定回路動態研究チーム  
チームリーダー

1958年愛媛県生まれ。東京大学医学部医学科卒、医師。東京大学大学院理学系研究科生物化学専門課程修了。博士(理学)。ミシガン大学研究員、岡崎国立共同研究機構基礎生物学研究所助手、慶應義塾大学講師、助教授を経て、1997年より理研脳科学総合研究センターで研究室を主宰、2018年より現職。



## 図2 仮想現実空間実験システム

魚が尻尾を振ると、前方のディスプレイに映された景色が後ろに流れ、魚は前に進んでいると感じる。頭部は固定されているため、リアルタイムで脳の神経活動を観察できる。



は、勝者の回路と敗者の回路の2種類があり、空腹になると勝者の回路が強化されて粘り強くなり、闘いに負けにくくなることが分かった。

さらに、勝った魚は水槽の中を自由に泳ぎ回り、負けた魚は水槽の底でじっとするという行動のパターンも見られた。「勝者の回路は自分の状態に注意を向ける“自分本位なモード”、敗者の回路は周囲の状況を気にする“他人本位なモード”をつくり出すことが分かってきました。このことが勝った魚と負けた魚の行動に反映されているのかもしれませんが。今後はこのメカニズムの全貌を明らかにしていきます」

## VRを魚に見せて、意思決定の脳メカニズムを探る

脳の機能の中でも、未来を予測して次はどう行動すべきかを判断することは、生きる上で特に重要だ。例えば、私たちは火災が起きたとき、避難口までの経路を思い浮かべ、目の前の状況と照らし合わせて、どう逃げるかを判断する。こうした意思決定ができるのは、脳内に未来の状況をシミュレーションする神経機構(内部モデル)が形成されるためと考えられている。現実の状況と内部モデルとを照合することによって、次はどう行動すべきかを導き出しているのだ。

岡本TLはこの内部モデル形成の仮説を裏付ける実験結果をゼブラフィッシュで確認した。そして、内部モデルと現実の状況との違い、つまり予測誤差が、特定の神経細胞集団の活動として脳内に表現されていることを明らかにし、2021年9月に発表した。

実験では、水中を泳ぎ回るゼブラフィッシュの脳の神経活動をリアルタイムで観察するため、仮想現実(VR)を魚に見せるというユニークな手法を取った(図2)。この実験システムを用い、見える色(赤と青)の違いによって魚が行動を変える課題を学習させた。

その結果、全体の3割ほどの魚に、脳の内部モデルと現実の状況との間の誤差を認知して、それを最小化しようと一生懸命泳ぐ行動が見られた。一方、現実の状況しか認知しない魚は、

休み休み泳ぐのだという。

「これらの魚の差を人間で例えると、夏休みの宿題をするにも、頭の中で計画を立てて予定通りに進んでいるかどうかを常にチェックしながら着実に進める人と、休みが終わるまでに済ませればよいと高をくくって適当に休みながら、夏休みが終わるまでに辛うじて仕上げる人でしょうか。ヒトの脳は複雑なのでまだ解明されていませんが、内部モデルが形成される仕組みや、脳内で予測誤差がどう導き出されるかといった基本的な原理を、ヒトの脳と共通点の多いゼブラフィッシュを使って明らかにしていきます」

## “人間らしい心”の解明、そしてAIへの展開も

こうした研究は、共感や思いやりといった“人間らしい心”の解明にもつながる。他者の心の動きをシミュレーションする内部モデルを脳に構築し、目の前の相手の表情や言動をその内部モデルと照合して、相手が今どんな気持ちなのかを類推しているとすれば、これが共感や思いやりを生み出す脳の仕組みの正体ということになる。

内部モデルの構築や予測誤差の算出は、「大脳皮質・基底核・視床ループ」という神経回路で行われており、ヒトの脳ではこのループが、いわゆる深層学習(ディープラーニング)で使われている回路網とは異なる形で、何層も重複した階層構造を形成している。このような回路を模した人工知能(AI)をつくることによって、AIに“人間らしい心”を持たせるという次の展開も期待できる。

『『疲れた』と言うと『大変だったね』と答えてくれるようなAIはすでにつくられています。これはビッグデータから規則を見だし、好ましい答えを導き出しているだけ。共感に基づいたものではありません。内部モデルや予測誤差によって生み出される心の仕組みを解明すれば、これをAIに実装することで、人間らしい心を持ったAIができる可能性があります。SFのような話ですが、心の友となるロボットが実現する日はそう遠くないかもしれません」

# “微生物ダークマター”を追え！

発酵食品や抗生物質をつくったり、環境中の汚染物質を分解したり、このような微生物の働きは私たちの生活のあらゆる場面で役立てられている。しかし、人類がその正体を明らかにしている微生物は、地球上に存在する全微生物のわずか1%程度にすぎない。残りの膨大な数の微生物は謎に包まれており、宇宙を満たす未知の暗黒物質（ダークマター）になぞらえて“微生物ダークマター”と呼ばれている。バイオリソース研究センター微生物材料開発室の加藤真悟 開発研究員（以下、研究員）は、そんな微生物ダークマターの一つを捉えた。

## 99%の微生物は謎に包まれている

微生物の機能を明らかにするには、その微生物だけを分離、培養し、増殖させる必要がある。しかし、その微生物がどのような条件で増殖するかを突き止め、その環境を実験室で再現することは簡単ではない。今のところ人類が培養できる微生物は、地球上に存在する数百万種以上の微生物のうち、わずか1%と見積もられている。

「そのわずか1%の微生物から、私たちはすでに多くの恩恵を受けています。残りの99%にもまだまだ有用な機能を持つ微生物がいるかもしれない。その中から超有用な微生物を発見することは夢物語ではありません」

そう話す加藤研究員は、これまで温泉や深海底の熱水噴出孔など、強い酸性や高温という特殊な環境に生息する微生物群集を採取し、その機能や生態系での役割を調べてきた。特に興味を引かれたのが鉄の酸化還元に関わる微生物だ。環境中の物質循環に重要な役割を担っているのではないかと考えたからだ。

## 常識を覆す微生物を発見！

2021年、加藤研究員は地球表層の大部分を占める中性pHの環境で、鉄を酸化も還元もする微生物を発見した（図1）。

「中性で酸素のある環境では、鉄は自然に酸化し、さびとなって沈殿してしまいます。今回発見した微生物は、鉄が自然にさ



図1 鉄を酸化、還元する微生物「MIZ03株」

茨城県つくば市の湿地帯で見つけた「鉄マット」と呼ばれるオレンジ色の酸化鉄沈殿物（左）から、鉄を酸化も還元もする新たな微生物を発見した。この「MIZ03株（JCM No.34246）」は微生物材料開発室で保存され（中）、研究機関などへも「バイオリソース」として提供される。（右）は電子顕微鏡写真。長径は約2μm（1μmは1,000分の1mm）。



加藤 真悟（かとう しんご）

バイオリソース研究センター  
微生物材料開発室  
開発研究員

1981年山口県生まれ。東京薬科大学大学院生命科学研究科生命科学専攻修了。博士（生命科学）。理研基礎科学特別研究員、米国デラウェア大学海外特別研究員、海洋研究開発機構特任研究員などを経て、2018年より現職。

びとなるより先に酸化することでエネルギーを得て増殖します。しかも、環境に酸素がなくなると、今度は酸化させた鉄さびを還元します。微生物が単独でこうした機能を持つことは、今までの常識では考えられませんでした」

微生物がつくるナノサイズの酸化鉄は重金属などを効率的に吸着させるため、有害な重金属の除去やレアメタルの回収など産業利用への応用が期待できる。さらに、1種の微生物単独で、鉄の酸化と還元の両方をコントロールできることは、利便性の面で大きなメリットだ。

## 地球上の微生物を「全て培養したい！」

今回の成果により、“微生物ダークマター”の一つが明らかになったが、まだ多くが闇の中だ。

「逆説的ですが、どうして培養できないか、その理由は培養できて初めて分かるんです。私の究極の目標は、地球上に存在する全微生物を培養し、微生物が持つ機能や有用性を全て明らかにすること。そのために、未開拓の微生物を分離・培養するための新たな方法論の構築にも力を入れていきます」



# イソギンチャクで動物の体の進化を探る

ヒトをはじめとする多くの動物の体は、左右相称(対称面が一つある)の構造をしている。一方、進化において祖先的な位置付けにある刺胞動物門のクラゲやイソギンチャクなどの体は放射相称(対称面が二つ以上ある)の構造をしている(図1)。なぜこのような違いが生まれたのか、動物の体の進化について研究するうちに、生命機能科学研究センター形態進化研究チームのサフィエ・エスラ・サルペル訪問研究員(以下、研究員)は日本近海に生息するタテジマイソギンチャクで興味深い発見をした。

## 一つの種に2種類の体の構造を発見

動物の体の構造がどのようにして放射相称から左右相称に変化したのかを調べることは、動物の進化の謎を解明する上で重要なテーマだ。

このような背景の下、サルペル研究員は、タテジマイソギンチャクが個体によって放射相称だったり左右相称だったりすることを発見した(図1)。一つの種内に2種類の体の構造が見られるのは極めて珍しい。

## 歯科医師から動物の進化研究の道へ

「来日前は母国のトルコで歯科医師として働いていましたが、生物や生命の本質的なところを深く学びたいと思い、大阪大学大学院歯学研究科に入学しました。発生学の観点からヒトの顔を研究するうちに、動物の体の構造や進化へと興味が広がっていったのです」とサルペル研究員。

そんなサルペル研究員を3年前に迎え入れてくれたのが、大阪大学大学院理学研究科生物科学専攻の藤本仰一准教授だった。2年前からは、藤本准教授の紹介で理研の倉谷 滋チームリーダーが率いる生命機能科学研究センター形態進化研究チームに参加。藤本准教授とも共同研究を続けている。



### Safiye Esra Sarper

(サフィエ・エスラ・サルペル)

生命機能科学研究センター  
形態進化研究チーム  
訪問研究員

1990年トルコ、イスタンブール生まれ。大阪大学大学院歯学研究科口腔科学専攻博士課程修了。博士(歯学)。2018年より理研生命機能科学研究センター研究生、2021年より現職。

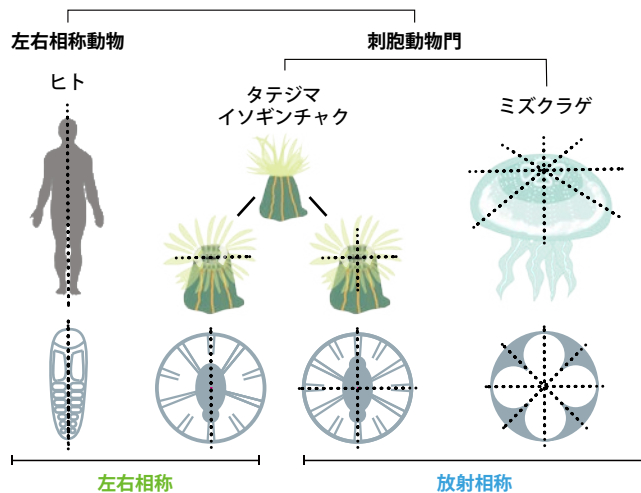


図1 ヒト、タテジマイソギンチャク、ミズクラゲの体の構造

タテジマイソギンチャクは、放射相称と左右相称の両方の個体が存在する。



図2

タテジマイソギンチャク

## 美しさに対する興味が発見につながる

「子どもの頃から海の生き物が大好きだったので、その調査から始めることにしました」。近くの海岸に行ったとき、日本に数多く生息するタテジマイソギンチャク(図2)をたまたま見つけ、オレンジ色の縦じまの美しさに心を奪われた。

「昔からもの数を数える癖があり、そのときも何気なくイソギンチャクの縦じまの数を数えてみました。すると個体ごとに数が異なることが分かり、なぜなのだろうという興味から研究を始めました。小さな興味から、放射相称と左右相称の両方の個体がいるという発見につながったのです」

## 基礎研究は芸術のようなもの

さらに、タテジマイソギンチャクが体の一部から個体全体を再生する時の形作りをコンピュータシミュレーションで再現すると、体のどの部分から再生するかで、放射相称になるか左右相称になるかが決まるという結果が出た。

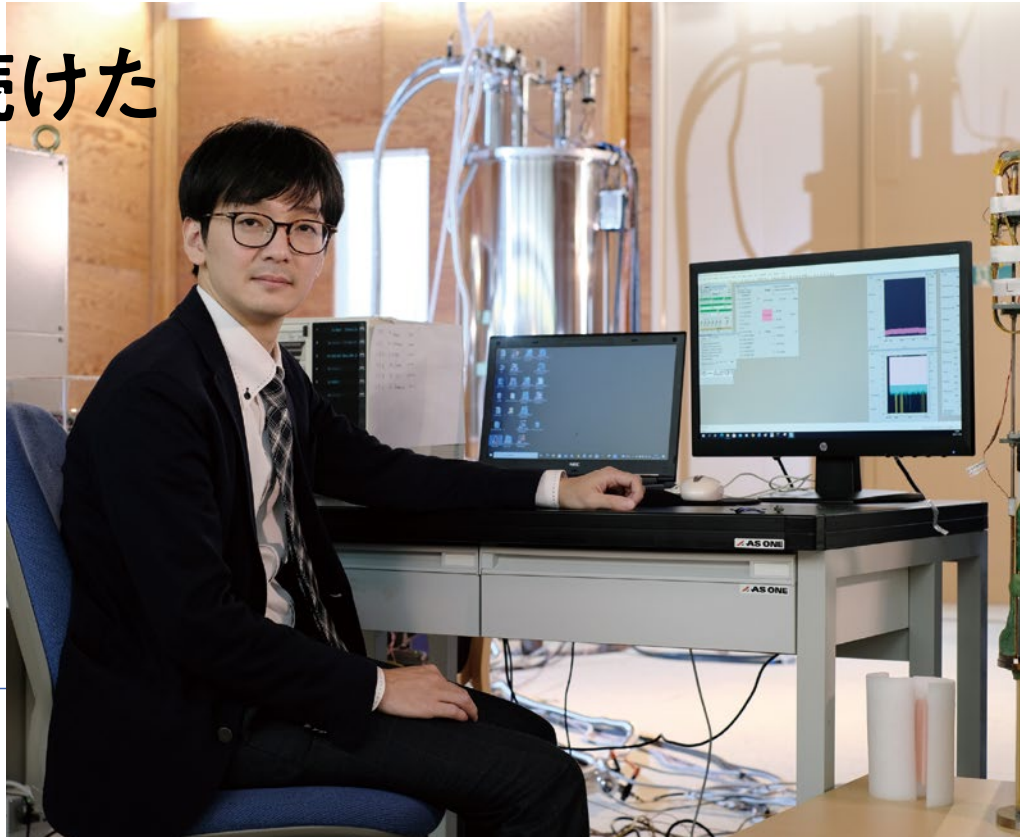
「もちろん、この発見一つで動物の進化の謎を解き明かせるとは思っていません。むしろ、このような基礎研究は、好きという気持ちや、やらずにはいられないという衝動が出发点であるという点で“芸術”のようなもの。今後も好きという気持ちを大切にしながら研究を深めていきたいですね」

# 2年間流れ続けた 永久電流 — その意味とは？

柳澤 吉紀 (やなぎさわ よしのり)

生命機能科学研究センター  
機能性超高磁場マグネット技術研究ユニット  
ユニットリーダー

1985年千葉県生まれ。千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。2013年より理研基礎科学特別研究員、2016年より研究室を主宰し、2021年より現職。



核磁気共鳴 (NMR) 装置は、科学研究や製品開発の現場で活用されている分析機器だ。しかし、この装置に用いる超電導電磁石は大型で、極低温に保つ大がかりな仕組みも必要であることから、設置場所は限られている。そこで、装置を小型化し手軽に使えるようにするため、生命機能科学研究センター機能性超高磁場マグネット技術研究ユニットの柳澤吉紀ユニットリーダー (UL) は高温超電導体を使った電磁石の開発に取り組んでいる。最近、電磁石に永久電流を2年間流し続けるという快挙を達成したが、それにはどのような意味があるのだろうか。

## 高温超電導体の導入が待たれる NMR 装置用電磁石

NMR装置は、分子の形や物質の性質を詳しく調べるための分析機器だ。強い磁場(磁石の作用が及ぶ空間)の中に液体や固

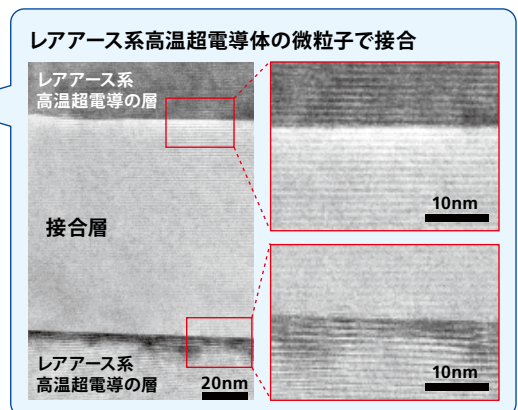
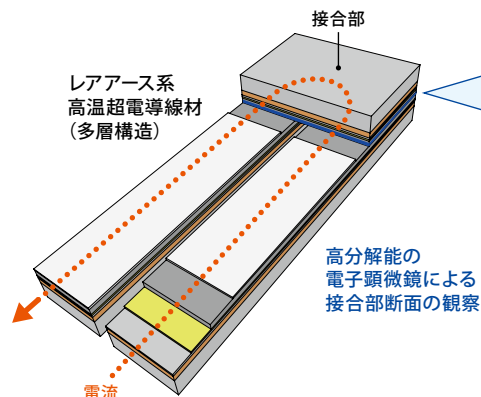
体の試料を置き、外から電磁波を当てたときに得られる信号を解析することで、物質を構成する原子の状態に関する情報が得られる。装置の名前は聞き慣れないかもしれないが、薬や材料の開発、生命科学や物理学の研究など幅広い分野で活用されており、私たちは知らないうちにその恩恵を受けている。ヨーロッパでは、ワインの産地偽装を見破る手法としても活躍している。

NMR装置は、磁場が強いほど(磁石の力が強いほど)分析性能が上がるため、強力な電磁石が求められる。そこで、超電導体の線材(ワイヤー)をコイル状に巻いた超電導電磁石が使われている。小学校の実験で使うような導線でも、流す電流を増やせば電磁石は強くなるが、電気抵抗があるため流せる電流の大きさには限りがある。電気抵抗がゼロの超電導体を使えば、とても大きな電流を流せるので非常に強い磁場を発生することができるわけだ。

ただし、現在広く使われている超電導体(低温超電導体)の線

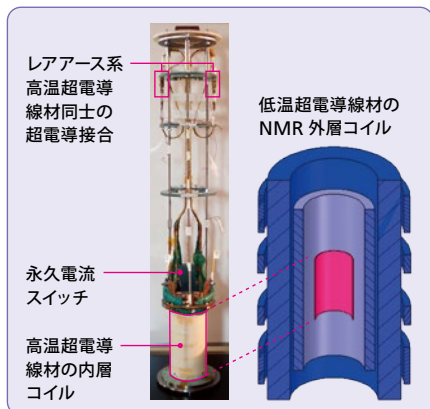
図1 高温超電導体の線材同士の超電導接合

線材は、金属やレアアース系の高温超電導体が重なった多層構造になっている。この線材を2本並べた上に高温超電導線材の薄片を載せ、接合部として使う。線材と薄片の間には、高温超電導材料の微粒子をはさみ、約800℃まで加熱する。すると、右の電子顕微鏡写真のように、微粒子の結晶の向きがそろって上下と一体化してつながる。これにより、接合部の電気抵抗がゼロとなる。



1nm=10億分の1m





NMR 装置の電磁石



NMR 装置のコンソール

図2 高温超電導電磁石を  
実装したNMR装置

レアアース系高温超電導体のコイルと永久電流スイッチとを、iGS®接合でつなぎ、低温超電導線材の外層コイルの内側に置いた。超高磁場の高性能NMR装置の実現には、低温超電導体と高温超電導体のコイルの組み合わせが必要となるため、それを想定しての実験。接合部分は磁場の影響を受けやすいため、コイルから離れた位置に設置した。この超電導電磁石をNMR装置の中に収め、-269℃の液体ヘリウムで冷やして永久電流を流した。右写真の手前に写っているのは、装置の制御や測定操作を行うためのコンソール(制御盤)。

材は、レアメタルのニオブを主体とするもので、電気抵抗がゼロになる温度(超電導転移温度)が-250℃以下と非常に低い。そのため、-269℃の液体ヘリウムを使って冷やしているが、液体ヘリウムは高価な上、取り扱うには大がかりな設備が必要となるため、NMR装置を導入できる研究機関や企業は限られている。

そこで注目されているのが、1980年代後半に発見された高温超電導体だ。「高温といっても超電導転移温度は、例えば-180℃くらいです。でも、ヘリウムより安価な液体窒素(-196℃)や極低温冷凍機で冷やせば超電導状態になるので、これまでに比べると装置をずっとコンパクト・高性能にでき、さらに量産も可能になるはずですよ」と、柳澤ULは説明する。これは、柳澤ULの夢でもあった。

## セラミックス同士をぴったりつなぎたい

だが、高温超電導体をNMR装置の電磁石に使うためには、高温超電導体の線材同士を電気抵抗ゼロでつなぐ「超電導接合」を実現しなければならない。これが難題だった。

低温超電導体の線材は針金のようなもので、超電導体のハンダを使って超電導接合をつくる技術が確立されている。一方、高温超電導体はセラミックス(焼き物)であり、線材は薄い金属テープの表面に高温超電導体を付着させたものだ。この線材とハンダはなじみが悪く、両者の境目で電気抵抗が発生するためハンダは使えない。では、どうすればいいのか。国内外の多くの研究者が知恵を絞り、試行錯誤を繰り返してきた。

そうした中で2017年、柳澤ULと住友電気工業株式会社の研究者を含む研究チームは、iGS®接合という斬新な方法を開発した(図1)。「この方法で接合し液体窒素で冷やしたところ、電気抵抗が見事にゼロになりました。高温超電導体の実用的な超電導接合に成功したという報告は、世界で初めてでした」と柳澤ULは胸を張る。

## MRIにもリニアにも高温超電導電磁石を

柳澤ULらは次に、高温超電導電磁石を実際のNMR装置の中に取り付けた。NMR装置は、「永久電流モード」で運転される

ことが多い。まず、超電導電磁石を外部の電源にコイルをつないで電流を流した後、外部の電源を切り離れた「閉回路」をつくる。この閉回路を冷やし続けて超電導状態を保てば、電流は減らずにずっと流れ続ける永久電流となる。これによって発生し続ける強い磁場を測定に使う。

ただし、閉回路全体を電気抵抗ゼロにするには、永久電流スイッチ(電源との接続を切り替えるスイッチ)とコイルとの接合部分も電気抵抗ゼロでなければならない。そこで、柳澤ULらは、その接合部分を、iGS®接合で作成した。そして、高温超電導電磁石をNMR装置内に設置し、永久電流を流した(図2)。2018年のことだ。それから2年間にわたり、発生する磁場を精密に測定することで永久電流がどのくらい減っていくかを調べたところ、減少率はごくわずかで、永久電流がゼロになるには300万年以上かかると計算された。

「2年間永久電流が流れ続けただけでなく、その間に、実際にNMR装置として測定もしています。今回の成功は、高温超電導電磁石を使ったNMR装置の広い実用化に向けた大きな一歩です」と、柳澤UL。もちろん、超電導接合は、線材を何本もつないで長くする際にも役立つ。線材を長くすると、コイルの巻き数を多くして電磁石を強くすることができるため、その点でも「使える」高温超電導接合を実現したことの意義はとても大きい。

さらに、高温超電導体は手軽なNMR装置だけでなく、これまでにない超高磁場を使う高性能NMR装置の実現にも貢献する。柳澤ULらは、国立研究開発法人科学技術振興機構の未来社会創造事業でそうした高性能NMR装置の開発を進めており、高温超電導接合をはじめ、開発で得られた成果を手軽なNMR装置の実現にも生かしたいという考えだ。

広い実用化へ向けて一つの問題は、高温超電導体の線材は加工に手間がかかるためとても高価なことだ。だが、エネルギー分野などで線材への巨大な需要が生まれれば、製造コストが下がる可能性は高い。そうなれば、NMR装置だけでなく、NMRの原理を応用して体内の様子を描き出すMRI(磁気共鳴画像)装置やリニアモーターカーにも、高温超電導電磁石が使われる日が来るだろう。その日がいつ来てもいいように、柳澤ULは着々と研究を進める。

# 惑星形成シナリオに新展開

惑星の“もと”になる、円盤状に広がるガスの寿命は300万～600万年と理解されてきた。ところが、観測技術の発達に伴い、1,000万年を超える長寿命ガス円盤が、特に2010年代に続々と見つかり、その理由を解き明かす研究が行われている。開拓研究本部 坂井星・惑星形成研究室の仲谷峻平 基礎科学特別研究員（以下、研究員）は、他の研究者から「そこは盲点だった」と鋭い着眼点を認められるシミュレーション研究で、従来の惑星形成のシナリオに一石を投じている。

## 誰も支持しなかった学説

太陽系のような惑星系が形成される時、まず星の“もと”になるガスや微粒子が集まり、太陽のように中心となる星（中心星）が生まれる。惑星のもとになるガスや微粒子は円盤状になって中心星を取り囲むが、惑星が成長するとともに中心星から出る紫外線、X線などの光からエネルギーを受け、ガスは蒸発する（図1）。これを「光蒸発」と呼ぶ。

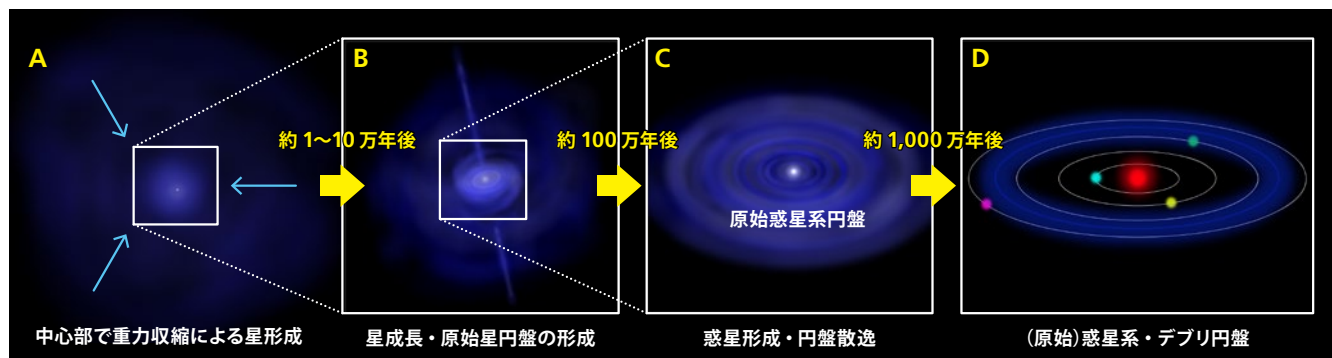
ところが近年、従来考えられていたより長い、1,000万年を超える長寿命のガス円盤が続々と見つかってきた。ガス円盤の長寿命化を説明する学説には、ガスが長期間維持される「始原ガス（生き残り）説」と、一度形成した原始惑星や微惑星が衝突してガスに戻る「2次ガス（生まれ変わり）説」がある。生まれ変わり説の研究は盛んだが、生き残り説ではうまく説明できないため、ほとんど研究が行われていなかった。

## “常識”の盲点をついた研究

仲谷研究員は惑星単体や銀河母天体など、大きさやその天体のできた時代が異なる多様な天体の光蒸発を研究してきた。宇

図1 標準的な惑星系形成過程の模式図

A：ガスや微粒子からなる分子雲の中心部が重力収縮し中心星の形成が始まる。B：中心星の周囲に原始星円盤が形成される。C：原始星円盤が原始惑星系円盤となる。その円盤の中で惑星の形成が始まり成長する。D：円盤中のガスは光蒸発し、(原始)惑星系と、惑星の衝突で生じた微粒子などからなるデブリ円盤ができる。



仲谷 峻平 (なかににりょうへい)

開拓研究本部  
坂井星・惑星形成研究室  
基礎科学特別研究員

1991年福岡県生まれ。2019年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修了。博士(理学)。2019年より現職。

宙研究といっても対象ごとに分野が細分化されており、横断的に扱っている研究者は多くはない。それぞれの対象の光蒸発の条件を厳密に検討した仲谷研究員は、生き残り説が否定される根拠に疑問を抱いた。というのも、観測された長寿命ガス円盤の中心星ではなく、若い中心星の値が使われていたのだ。

若い中心星が出す光は、光蒸発を駆動する効果が高い高エネルギーの光を多く含む。また、円盤に含まれる微粒子の粒径が小さいため、これらの値を使えばガス円盤の寿命は短くなる。「このことが盲点になっていたのです」と仲谷研究員。さらに、省略されていた熱化学反応、流体の動き方、光の輸送の計算を組み込み、世界で最も正確に光蒸発を再現できる計算コードを独自に開発し、シミュレーションを行った。そして、ガス円盤の質量がある程度減った時点から、ガスの減る速度が遅くなるという結果を得た。ガス円盤の寿命は従来の計算結果より10～30倍ほど長く、生き残り説でもガスの長寿命化を説明できる可能性を初めて見いだしたのだ。

世界でこれほど緻密なガス円盤のシミュレーションを行える研究者はいない、と自信をのぞかせる。第一線での研究に「子どもの頃に憧れた、世界を舞台に競うスポーツ選手に近づけている気がする」と仲谷研究員。「数百年後も使われるような理論を一つでも多く見つけ出したい。まずは、どんな対象にも対応できる光蒸発の理論を確立したい」と抱負を語った。夢は大きい。



# 超高速の世界を捉えるアト秒の光

アト秒はとても短い時間の単位で、0.00000000000000000001 ( $1 \times 10^{-18}$ ) 秒だ。物の動きを捉えるには、ストロボを使って連続写真を撮る方法があるが、もし電子のように素早く動く物を捉えようとする、アト秒レベルの短い間隔の光が必要だ。300アト秒だけ光っては消えるパルス光をつかった光子工学研究センター アト秒科学研究チームの鍋川康夫 専任研究員 (以下、研究員) に、アト秒の世界の光の話聞いた。

## 世界一の短パルス光の作り方

アト秒レベルで短く光り、しかも計測に使えるほど強いパルス光は、どのようにつくるのだろうか。光の研究の面白さについて「光には波の性質があり、波の山と山が重なって強まったり、山に谷が重なって強さを打ち消したりと、干渉します。そして電子などの粒子に当たっても、その性質は引き継がれます」と鍋川研究員。つまり、干渉をいかに使いこなすかが鍵となる。

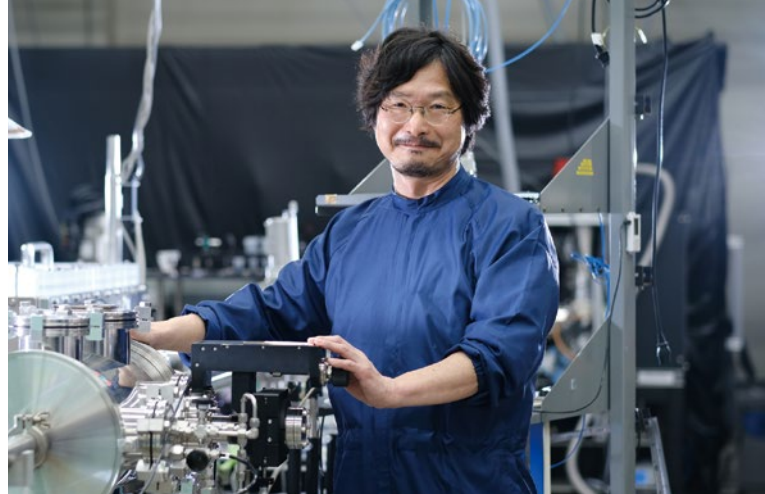
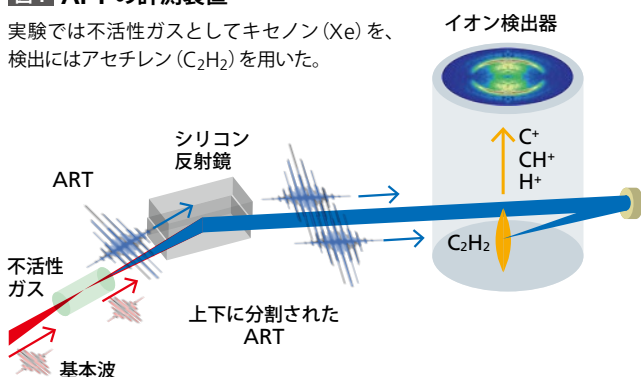
反応を起こしにくい不活性ガスに、強いレーザー光 (基本波、**図1**の赤線) を当てると、基本波の波長の奇数分の1の波長の光 (高次高調波) が発生する。それらの光は精密に干渉しているので、さらに波長の短いアト秒のパルス光 (APT: アト秒パルス列、**図1**の青線) となっている。この時点では基本波が混ざっているが、シリコン反射鏡に当てるとシリコン反射鏡に吸収され、APTだけを取り出すことができる。

## 1パルスの時間をどうやって測るのか

しかし、アト秒という短い光の時間幅を計測できる機器はないため、生成したAPTの時間幅はAPT自身で計測するしかない。これを自己相関計測という。シリコン反射鏡は上下に分かれており、入射したAPTの半分を上鏡で、残り半分を下鏡で反射する。そして、下の鏡だけを数nm (1nmは10億分の

**図1** APTの計測装置

実験では不活性ガスとしてキセノン (Xe) を、検出にはアセチレン ( $C_2H_2$ ) を用いた。



**鍋川 康夫** (なべかわ やすお)  
光子工学研究センター  
アト秒科学研究チーム  
専任研究員

1966年千葉県生まれ。早稲田大学大学院理工学研究科物理及応用物理専攻博士課程前期(修士)修了。博士(工学)。2001年理研入所、2018年より現職。

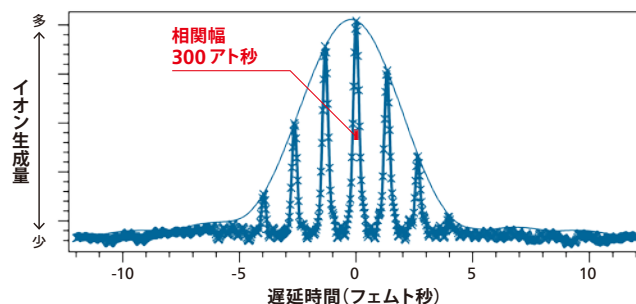
1m) 単位で後ろに動かすと反射にわずかな時間差が生じ、上下の反射光の波形が重なったときは光強度が高まり、離れたときは光強度が低くなる。その光をイオン検出器内でアセチレン分子 ( $C_2H_2$ ) に当ててイオン化する (**図1**)。

「光強度が高まるとイオンの生成量が多くなり、低くなると少なくなります。鏡を少しずつずらしながらイオンの生成量の増減を調べることでAPTの時間幅を計測できるのです」と鍋川研究員。この装置を使って、自己相関計測で世界最短の300アト秒を記録した (**図2**)。

## 温度管理の重要性

この成果には、鍋川研究員のある工夫があった。シリコン反射鏡は基本波を吸収すると発熱して位置がずれてしまう。そこで、シリコン反射鏡の温度を一定に保つ装置を導入し、影響を最小限に抑えたところ、**図2**のグラフが得られた。鍋川研究員は「これほど鋭いピークのグラフを見たことがなかった」とデータを得たときの興奮を振り返る。

さらなる発展のために、強い単一アト秒パルスを生成したり、高次高調波で検出イオン種を自在に制御したりするなどの新たな試みが注目されている。



**図2** アセチレン分子 ( $C_2H_2$ ) から生じた炭素イオン ( $C^+$ ) のAPT自己相関波形

1フェムト秒は1,000アト秒。炭素イオン ( $C^+$ ) 以外にも、メチンイオン ( $CH^+$ )、水素イオン ( $H^+$ ) の自己相関波形を得ている。これまでの研究では単一イオンしか発生しない単純な分子を用いていた。複数のイオン種を検出に用いたことも本研究の特長だ。

# いろいろなものを 取り込むソフトな結晶

“結晶”というと水晶やダイヤモンドなど硬い物質を思い浮かべる人も多いのではないだろうか。「柔らかい結晶ができれば面白い機能を発揮するのではないか」と発想した創発物性科学研究センター統合物性科学研究プログラム創発分子集積研究ユニットの佐藤弘志ユニットリーダー（UL）。柔らかさを実現するために佐藤ULが目にしたのは、結晶を構成する分子の形だった。

## きれいに並んだ分子は面白い

万華鏡の幾何学模様のようにきれいに並んだ原子たち（図1左）。この図を見て、黄色い部分に注目し「この孔はガスを吸着する機能を持つはず」と発想するのが化学者だ。孔の大きさは原子何個分が良いのか。どの原子を、どんな順に並べたら良いのか。原子を思い通りに並べるために、どのような化学反応を

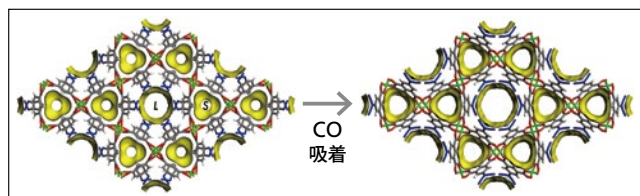


図1 一酸化炭素（CO）を吸着する多孔性物質

COが孔（LとS）に吸着すると孔がそれぞれ広がる。COの吸着が、さらにCOを呼び込むスイッチとなっていた。佐藤ULは2020年に「特異吸着機能を示す刺激応答性多孔体の創製」で日本吸着学会の奨励賞を受賞。

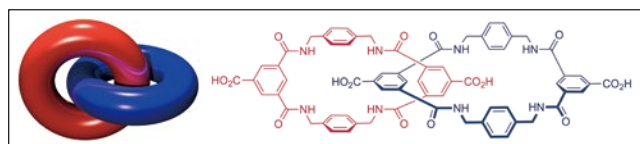


図2 カテナンのトポロジカル結合

図3 合成した柔らかい結晶、CTN MOF

濃度や反応温度などの条件検討を重ねた結果、カテナンとコバルトを短時間で一気に結合させるより、ゆっくり結合させるほうが、原子が整然と並ぶ結晶を合成できることが分かった。「結合したり離れたりを繰り返しながら、一番ひずみの少ない構造に落ち着くのです。整然と並んだときに一番安定します」と佐藤UL。

使えば良いか。そんな戦略を立てては、分子をつくる。そして、合成した物質の分子構造を分析し、狙い通りの機能を発揮するかを調べる。

佐藤ULはこれまでに、幾何学的な繰り返し構造を持つ結晶を数多く作り出してきた。特に、孔がたくさんある多孔性物質を合成し、構造と機能の関係を調べてきた。

例えば、図1の多孔性物質は、窒素（N<sub>2</sub>）と一酸化炭素（CO）が混ざったガスからCOだけを効率的に回収する機能を持つ。しかも、気体中で圧力をかけていくと、あるところで急にCOを大量に吸着し始めるというこれまでにない特殊な機能も持っていた。

## 柔らかい結晶への挑戦

このような研究をしていた佐藤ULが目にしたのが、二つのリング状の分子がつながったカテナン（図2）という構造だ。

カテナンの分子同士を直接つなぐ化学結合はない。しかし、二つのリングが鎖のようにつながっている。このつながりをトポロジカル結合といい、化学結合に比べるとリングが自由に動きやすい。

佐藤ULは、このカテナンをパーツとして立体的に並べたら、柔らかい結晶ができるのではないかと考えた。それまでもカテナンを並べた研究はあったが、それは隙間なく密に並べるもので、カテナンのリングは自由に動けなかった。「これではカテ



ナンの良さが生かされていない。多孔性物質のように隙間のある3次元構造なら、カテナンの動きが自由になるスペースをとれるはず」と考えたのだ。

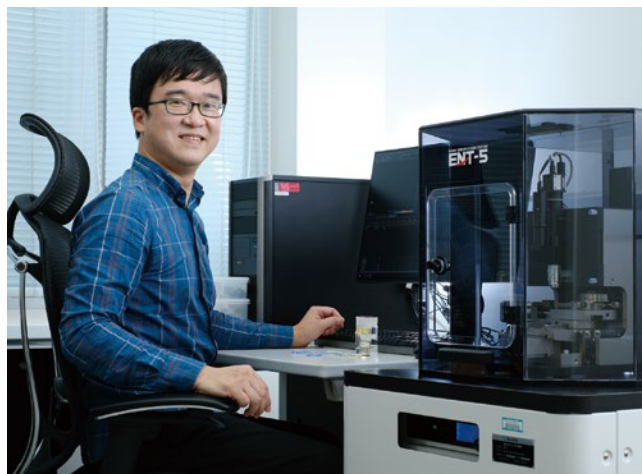
そこで、多孔性物質の合成法を応用して、カテナンのリング一つに対してジョイントパーツとしてカルボキシ基を二つ付けた。ジョイント同士をつなぐ役割は、金属イオンでできるはずだと考えたのだ。

そして、世界で初めて、カテナンとコバルトが3次的に組み上がった結晶、<sup>CTN</sup>MOFをつくり上げた(図3、4)。できあがった結晶を解析したときの様子を佐藤ULは「炭素や酸素などの原子の位置を示すデータを目の前にして、カテナンが一体どうつながっているのかを理解するのに2週間かかりました。ジャングルジムのように整然と並んでいるのを見て、とても驚きました」と語る。

## 柔らかさの理由を確かめる

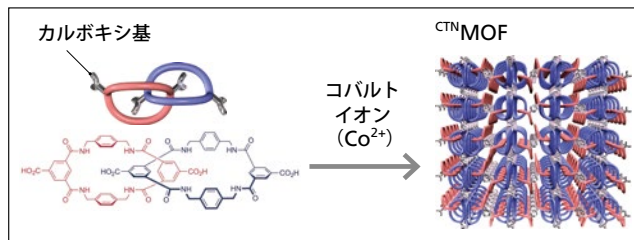
<sup>CTN</sup>MOFは本当に柔らかいのか。まず、針で結晶を押しした際の変形しやすさ「ヤング率」を測定した。すると、ペットボトルに使われる樹脂と同じくらいの柔らかさであることが分かった。しかも、通常は針を押し込むと残る針痕が、<sup>CTN</sup>MOFには残らない(図5)。まるでグミのように元に戻る性質も持っていた。

佐藤ULは、この柔らかさはカテナンのリングの動きによるものなのかを解明しようとした。だが、解析の専門家に相談しても「結晶を押しながら結晶構造を解析するのは無理だ」と返ってきた。諦めきれずにいたところ、「液体中で結晶をダイヤモンドの板ではさみ、圧力をかけながら解析すればできるかもしれない」という専門家が現れ、共同研究を始めた。解析を重ねたところ、圧力をかけるとカテナンのリング同士が寄っているというデータを得た。これは圧力を受けた際のカテナン結晶のリングの動きを世界で初めて明らかにした解析だと評価され、科学雑誌『Nature』に掲載された。



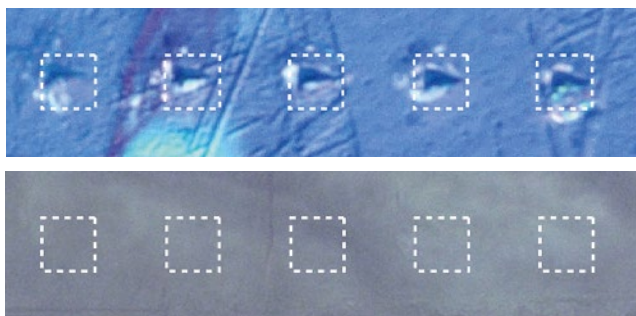
**佐藤 弘志 (せとうひろし)**  
創発物性科学研究センター  
統合物性科学研究プログラム  
創発分子集積研究ユニット  
ユニットリーダー

1980年大分県生まれ。2008年東京大学大学院工学系研究科化学生命工学専攻修了。博士(工学)。京都大学物質-細胞統合システム拠点、東京大学大学院工学系研究科化学生命工学専攻を経て、2021年より現職。



**図4 柔らかい結晶<sup>CTN</sup>MOF**

ジョイント(カルボキシ基:CO<sub>2</sub>H)を付けたカテナン(左)と柔らかい結晶<sup>CTN</sup>MOFの配列のイメージ(右)。MOFはMetal-Organic Frameworkの略で金属-有機構造体の意。



**図5 針を押しつけた結晶**

白点線部が針を押しつけた位置。HKUST-1という違う種類の結晶には針痕がくっきりと残る(上)が<sup>CTN</sup>MOFは痕が残っていない(下)。

## 人を驚かせる物質をつくりたい

他の多孔性物質と同様に<sup>CTN</sup>MOFは二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を吸着する性能を示した。佐藤ULは、<sup>CTN</sup>MOFがもっと柔らかくなれば、CO<sub>2</sub>を回収する使い勝手の良い結晶になると考えている。通常、CO<sub>2</sub>を吸着しやすい材料では、ひとたび吸着したCO<sub>2</sub>を引き離すために大きなエネルギーを必要とする。佐藤ULの理想は、小さい力で吸着したCO<sub>2</sub>を、ぎゅっと押し出せるスポンジのように柔らかい材料だ。「そのためにも、今より1,000倍くらい柔らかくするのが目標です。ただ、指でつまむという圧力をかけた状態でガス吸着量を測れる装置がないので、その装置もつくりたい」と楽しげに語った。「リングが三つ以上つながったカテナンを使ったり、ジョイントの数を減らしたりすれば、より柔らかい結晶になるのではないかと予想しています」

さまざまな戦略を練りながら物質をつくり出してきた佐藤ULは「ときには期待を超えた機能を持つ物質ができることもあります」と言う。現に、図1の物質が持つ機能は予想を超えたものだった。「自分でも思いもしなかったような、人をあっと驚かせる機能を持った物質をつくりたいですね」

そんな偶然の発見“セレンディピティ”に恵まれるために「目標を達成するための研究は、もちろんきっちり行う。でも、それだけではなく、その先に面白そう!や、新しい!と感ずることができそうな研究も試してみる、そんな研究を思い切りエンジョイする心を忘れないようにしています」と目を輝かせた。次は、どんな面白い物質が作り出されるのだろうか。

# データの「共有」で生命科学研究のレベルをジャンプアップ!

超解像度の顕微鏡や特殊な光学技術、電子線を用いた観測など、近年、生命科学分野では、さまざまな画像取得技術（イメージング技術）が急速に進歩している。しかし、そうした最先端の技術を使える研究者は少ないため、得られた画像データを公開し多くの研究者で共有しようという動きが世界中で広がっている。そのパイオニアとして世界をけん引する生命機能科学研究センター発生动態研究チームの大浪修一チームリーダー（TL）に、画像データを公開する意義について話を聞いた。

## 個人の研究から 世界規模のデータベースへ発展

学生時代から、生物の発生の仕組みを数学的に理解することに興味があった大浪TLは、顕微鏡画像から細胞の形や動きを自動的に検出したり、画像データを数値化したりするソフトウェアを独自に開発してきた。

「世界でも初めてのアプローチだったので、学会などで発表するうちに、『この画像も解析してほしい』といったリクエストを大量に受けるようになりました。そこで、画像や画像処理したデータを一カ所に集め、誰でもアクセスできるようにすれば便利だと考え始めました」

アイデアに賛同する英国の研究者と共同研究をスタートさせたのが2010年。そして、2013年9月に生命科学の画像データを共有する統合データベース「SSBD (Systems Science of Biological Dynamics) database」を開設した。2021年5月に

### 大浪 修一（おおなみ しゅういち）

生命機能科学研究センター  
発生动態研究チーム  
チームリーダー

1968年東京都出身。総合研究大学院大学生命科学研究科遺伝学専攻（国立遺伝学研究所）修了。博士（理学）。慶應義塾大学助教授、理研基幹研究所チームリーダーなどを経て、2018年より現職。

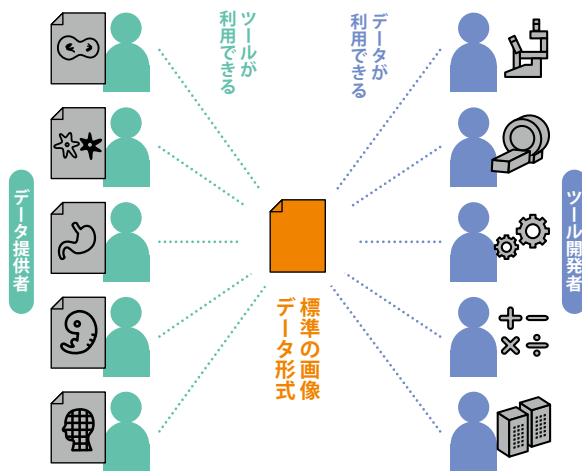


図1 画像データ形式の標準化のイメージ

現在は画像取得機器メーカーや画像解析ツール開発者それぞれが独自のデータ形式を用いることが多いため、データが十分に活用されていない状況である。データ形式を標準化することで、データ提供者はツール開発者が開発したあらゆるツールの利用が可能になり、ツール開発者はデータ提供者が取得したあらゆるデータを対象としたツールの開発が可能となる。これにより、データ解析およびツール開発が加速的に進展する。

は、大浪TLの主導により世界11カ国の研究者が、画像のデータ形式の標準化と共有のルールづくりに向けて国際的な提言を行った（図1）。

## データをオープンにするの意味とは？

当初は、研究成果が横取りされることを恐れ、画像データを公開、共有した人がほとんどだった。しかし最近では、積極的にデータを公開する人が増えている。

「画像データを公開すると、他の研究者から共同研究の誘いが増えます。今、生命科学の分野でトップレベルの成果を出すには、物理や数学、情報科学といった異分野との連携が不可欠です。データを公開した方が、チャンスが広がるという認識が経験を通して浸透してきたのでしょう」

すでにタンパク質の立体構造やDNAの塩基配列など国際的な情報共有の仕組みが整えられている分野もあり、いまやデータの公開が当たり前の時代を迎えつつある。しかし、「単に共有するだけではつまらない」と大浪TL。「タンパク質やDNAなど異なる種類のデータと画像データを組み合わせることで、画像を見るだけで将来のタンパク質の発現の様子や細胞の運命など、これまで見えなかった世界が見えてくるはず。それが生命科学研究のレベルをジャンプアップさせると期待しています」。オープンサイエンスの潮流の中、開かれた知の相互作用がますます加速していきそうだ。



私の  
科学道

環境資源科学研究センター  
合成ゲノミクス研究グループ  
研究員

くりはら  
えみこ  
栗原 恵美子

1982年山梨県生まれ。東京大学大学院新領域創成科学研究科先端生命科学専攻博士課程修了。博士(生命科学)。2012年理研入所、2018年から現職。



# 顕微鏡観察をきっかけに 研究の道へ

SDGs(持続可能な開発目標)達成のための資源としてバイオマス(動植物由来の資源)が注目されている。植物バイオマスの利用を効率化する化合物の探索を主な研究領域としている環境資源科学研究センター合成ゲノミクス研究グループの栗原恵美子研究員に話を聞いた。

## 顕微鏡から広がる研究テーマ

栗原研究員が取り組んできた主な研究テーマには、分裂中の植物細胞が作り出す代謝物質の探索、植物の発芽や成長に関わる化合物の機能探索などがある。そして2016年、植物細胞の細胞壁の成分である炭水化物「セルロース」の分解を促す化合物を発見した。

最新のテーマはゴムの生合成の仕組みの探索だ。ゴムの木が作り出す天然ゴムは耐摩耗性や耐熱性など総合的に優れた性質をもつ。それが、細胞内のどこで、どのようにできてくるかについてはいまだに謎だ。そのため、ゴムの木からつくった培養細胞とさまざまな化合物を駆使し、細胞内で天然ゴムの合成メカニズムや性質に関わる因子を明らかにしようとしている。

多彩なテーマを手掛けているように見えるが、一貫しているのは全て顕微鏡観察からスタートしていること。「多くの研究者は最初に取り組むべき課題を決めますが、私の場合、顕微鏡観察に興味を持った事象を課題にしていくという手法です」

最適な化合物を見つけ出すには、反応させては顕微鏡で観察するという地道な作業の繰り返しが必要となる。時には1万を超える化合物を調べることもある。

最新の顕微鏡は、リアルタイムでディスプレイに表示させることも画像を保存することもできるが、栗原研究員は1万を超える化合物の探索の場合でも、必ずレンズをのぞいて視野の全てを観察するという。「レンズ越しに見たときの違和感は大切」だからだ。

顕微鏡観察の魅力はなんといっても得られる情報量の多さだ。「対象物の大きさ、形、色、動き、密度、位置関係、細胞同士の接合の様子まで全部分かる。生物学の現象を捉えるのにこれほど素晴らしい手法はない」、栗原研究員はこう言い切る。

研究手法の原点は大学1年までさかのぼる。顕微鏡実習で、共焦点レーザー顕微鏡や電子顕微鏡まで扱う機会に恵まれ、観察

の面白さを存分に体験した。さらに修士・博士課程で在籍した東京大学大学院の馳澤盛一郎研究室で、顕微鏡画像の数値化など、単に見るだけではない顕微鏡観察の奥深さを知り、研究者への道を歩む決意を固めた。

## 絵本の蔵書が450冊に

研究に没頭するかたわら、ここ5、6年は絵本集めにも凝っている。その数はすでに450冊余り。特に科学絵本は、科学の魅力や不思議を絵で伝える必要があるため、見て楽しむという点でも、自身の研究に対する取り組みと相通じるものがあるという。

栗原研究員は同じ研究室の同僚と結婚している。夫は遺伝子のシーケンス解析が専門で、いわば設計図の読み解きから現象にアプローチしている。見た目(フェノタイプ)から取り組む栗原研究員とは研究手法が大きく異なるが、家でもよく議論し、認め合う良きパートナーだという。

座右の銘は「百聞は一見にしかず」。顕微鏡を武器に有用化合物を次々に見つけ出す若手研究者の信念として、これほどふさわしい言葉はなさそうだ。

# タイムマシン、乗ったことありますか？

望月 達矢 もちづき たつや

広報室 副主幹

「発掘現場で培った経験を……」

今から十数年前、筆者が何度も口にした就職活動の常套句。志望動機やら自己PRやらにこじつけた。それまでの人生、情熱の注ぎ先は“野球”か“発掘”の二択なのだから、どちらが就活向きかは自明の理。

考古学を修めるには座学だけではならず(訳:じっとしてられない子)、大学時代の多くを発掘現場で過ごした。主に埋蔵文化財を所管する自治体の調査補助員、ときには学術調査のボランティアだ。

発掘は単なる宝探しにあらず。区域・人員・予算・期間が制約された「調査」だ。道路の基準点から測量して調査区域を設定する。重機で表土を引き剥がし、区画の1辺を人幅に掘削する。その断面から地層を読み取り、平面を順番に剥いでいく。遺構や遺物が見つければ、何が、どの層で、どのような状態で出土したかを記録する。仕事は正確、丁寧かつ迅速に。一方で、無限に湧く地下水、ベルトコンベヤーの機械音、残土の山、防災用土嚢、コンテナ百箱単位で出土する数多の遺物。そして無慈悲なほど積み上がる整理作業(なお筆者は遺物の実測が大の苦手。弥生時代の絵画土器に四苦八苦していたところ、図面を見た上役が「土器がかわいそう。帰ってよし」と嘆くほどの腕前)。「インディ・ジョーンズ」『MASTERキートン』への道はかくも険しい。……映画や漫画の例えで恐縮だが。

初めて発掘に携わった1回生、静岡。全身筋肉痛に耐えながら熟練の方々に土の扱い方を一から教わった。水路、水田、丸木舟。弥生時代はやはり稲作だと実感した。夢に出るほど土器にまみれた2回生、奈良。現場技術はもちろん、



レバノン南部、ティール市ラマリ地区。調査の現場に立つ筆者

報告書に至るまでの過程を文字通り叩き込まれた。粘土層から出た昆虫の羽を集めて生態系を考察する、という貴重な体験もした。旧石器の鏃程度に自信が芽生えた3回生。同じく奈良で古寺の瓦に埋もれた。土器の反動でお寺熱が最高潮に達し「出家したいのか？」と周囲の動揺を招いた。そして集大成と意気込んだ地は中東レバノン。点在する古代ローマ遺跡の佇まい、特に石造りの壮大さに、当時の日本とは比較にならないほどの隆盛を垣間見た。

どこを掘っても自分の中では変わらない感覚があった。それは現代→近代→中世→古代と時代を掘り下げていく過程にはタイムマシンの趣があるということ。もちろん予期しない遺構や遺物を目の当たりにすれば心湧き立った。ただ、土地も年代も異なる地層を踏んだだけでも、史跡や博物館とはまた違った非日常を味わえた。きっと、汗と泥土にまみれた自分だけがほんのひとときでもその時代にたどり着いた、という達成感があったのだろう(はよ土ほかさんかい!と罵声が聞こえる)。

掘り下げて得た記録を積み上げて、在りし日のヒトの営みを立体化する。そこに現代の対象を投影し、比較することで、今の自分の有り様であったり立ち位置を知る。歴史を学ぶ意味はそこにあると考える。過去を顧みて今の自分の振る舞いを改めることには役立っていると信じていたい。

ところで、面接のとき「タイムマシンに乗ったことがあります!」とPRしていたら、今とは違った人生を歩んでいたのだろうか。「詳しく聞かせてもらおうか」なんて面接官、いるはずないよな……。



上の写真の現場をトレンチすると、そこにはローマ時代の地下墓がありましたとき。

最新記事はウェブサイトでご覧いただけます。

『RIKEN NEWS』は、理研の研究の最前線や研究者の人物像に迫るウェブコンテンツ「クローズアップ科学道」を再収録した季刊誌です。最新記事は理研ウェブサイトにて随時更新中。ぜひご覧ください。

[www.riken.jp/pr/closeup/](http://www.riken.jp/pr/closeup/)



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。  
問い合わせ先 外部資金室 寄附金担当

[kifu-info@riken.jp](mailto:kifu-info@riken.jp) [www.riken.jp/support/](http://www.riken.jp/support/)

