

# RIKEN NEWS

 理化学研究所

FALL 2023  
No.487

## 特集

神戸市の防災計画に  
デジタルツインを生かす……p.02

量子コンピュータ開発に挑む  
若手研究者たち……p.16

## 研究最前線

励起した分子1個の光電流を計測……p.06

「心の病を治したい」根治療法を求めて……p.08

ゲノムの未開拓領域を切り開く!……p.10

転写の瞬間を撮影して、

生物学上の長年の謎を解決!……p.12

がんの治療に新元素合成で貢献……p.14

## 私の科学道

「システム生物学」で分子生命科学に革新を……p.19

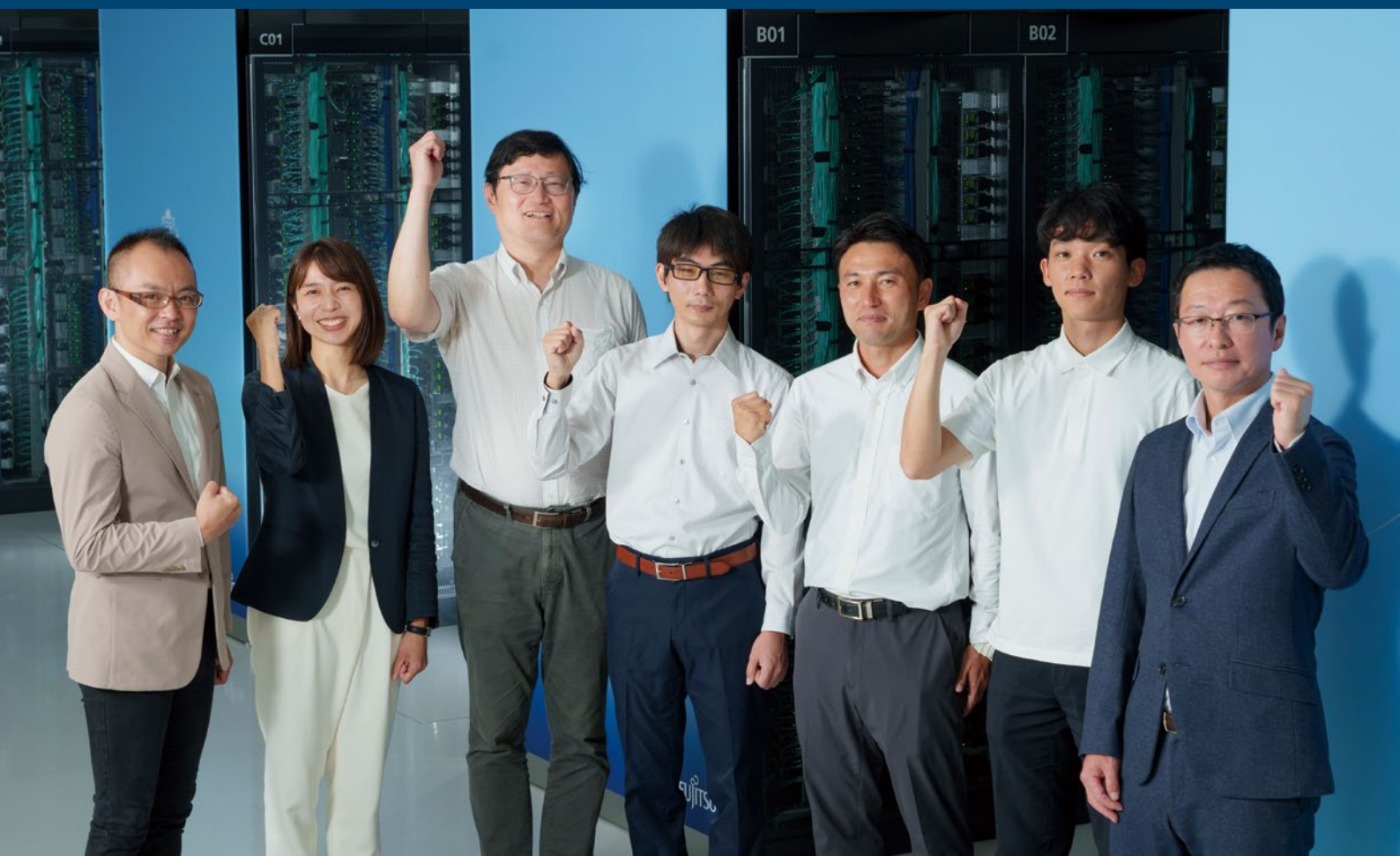
## 原酒

新たなる桃の発見 山梨での旅……p.20

科学道

# 神戸市の防災計画に デジタルツインを生かす

「デジタルツイン」とは、コンピュータの中に現実世界を再現し、  
 その中でシミュレーションを行う技術のことで、さまざまな課題の解決に使われ始めている。  
 2022年4月、理研は神戸市、株式会社NTTドコモとともに、  
 デジタルツインを防災計画に生かすプロジェクトをスタートさせた。  
 その狙いとこれまでの成果、今後の展望について、  
 プロジェクトに関わる理研、神戸市、NTTドコモのメンバーに語ってもらった。



株式会社NTTドコモ クロステック開発部  
 複合価値創出担当

**安部 孝太郎** (アベ・コウタロウ) 担当課長

**土居 奈々子** (ドイ・ナナコ)

理研 計算科学研究センター  
 離散事象シミュレーション研究チーム

**伊藤 伸泰** (イトウ・ノブヤス) チームリーダー

**榎本 大悟** (ウメモト・ダイゴ) 研究員

神戸市 危機管理室

**蔵元 良平** (クラモト・リウヘイ) 係長

**道上 祐輝** (ミチガミ・ユウキ)

**能勢 正義** (ノセ・マサヨシ) 課長

\*各組織左から。本文中は敬称・肩書略

## ニーズ、実データ、 解析技術がそろったプロジェクト

### —今回のプロジェクトが始まったきっかけは？

**能勢（神戸市）** 神戸市は1995年に阪神淡路大震災を経験しています。さらに、最近では異常気象に伴う豪雨などが頻発していることもあり、大規模災害に備えた街の防災対応力強化が非常に重要と考えています。具体的には現在、「都心・三宮の再整備」事業を軸にハード面の整備を進めています。一方で、神戸市民に加えて来街者の安全のためのソフト施策の充実もとても重要です。

そのような中、2016年から事業連携協定を締結しているNTTドコモに加え、2022年に理研の参画を得て、災害が起きたときに来街者の安全を守る避難誘導のシミュレーションを行い、帰宅困難者対策に反映させるという今回のプロジェクトに取り組むことになりました。

**安部（NTTドコモ）** 私たちは通信に関連する先進技術を社会実装することを目指しています。神戸市危機管理室の皆さんが強靱なまちづくりのための施策の一つとして、帰宅困難者対策に真摯に取り組まれていることを知り、私たちの技術やデータが役に立つのではないかと考えました。

帰宅困難者の動きを把握するためには何通りもの人流のシミュレーションが必要になります。しかし、それには膨大な時間と労力が必要です。神戸市の皆さんと検討を重ねるうちに理研に相談してみようということになりました。スーパーコンピュータ「富岳」を使えば何百万通りものシミュレーションが瞬時に実行できることを期待して、伊藤先生との打ち合わせに臨んだのを覚えています。

**伊藤（理研）** 計算科学研究センターは、「富岳」の前の「京」以来、スパコンで何ができるかを追究してきました。その一つが社会シミュレーションです。社会シミュレーションでは、ドコモの安部さんが言われた通り、可能性のあるパターンを網羅的に探索することが特に役立ちます。コンピュータ側でデジタル

ツイン、つまり、現実世界の映し鏡になるモデルをつくり、いろいろなパターンで何が起るかをシミュレーションする。すると、その結果をもとに、どのような対策が有効かを検討することができるのです。しかし、われわれには、現実世界のデータと、実際の社会でそれをどのように応用するかという知見が足りませんでした。

今回のプロジェクトでは、阪神淡路大震災以降、日本の防災行政における中核的な自治体の一つとなっている神戸市、実際の人流データのみならずその他のデータも保有しているNTTドコモ、「富岳」を有する理研の三者がタッグを組むことで、ニーズ、実ビッグデータ、それを解析する技術を組み合わせることが可能になりました。その中で、本当に役に立つ社会シミュレーションには何が必要なかを洗い出して研究テーマにしていこうと考えたのです。

## 結果を伝え、市民の理解と行動へつなげる

### —具体的にはどのようなシミュレーションを行っているのですか？

**榎本（理研）** 「富岳」を使って多数のパターンのシミュレーションを行うには、いろいろな準備が必要です。そこでまず、研究室のワークステーションや計算科学振興財団のスパコン「FOCUS」などを使って、いくつかのパターンについてシミュレーションを行うことにしました。最初に行ったのは、神戸市の新港エリアから鉄道駅のある三宮へ1万人が避難するという想定でのシミュレーションです。新港は三宮の南1.8kmほどのところにあり、再開発が進み大規模イベント会場の建設も計画されています。もしイベント中に災害が起きたら、大勢の参加者が歩いて三宮に向かうことになります。この状況をシミュレーションしました。避難経路を指定する／しない、信号をすべて青にする／しないといったパターンに分けて、道の混雑具合や全員の避難にかかる時間などを比較しました。その際に、NTT



図1 神戸市の旧居留地

江戸時代の終わりに神戸港が開港した後、外国人の居留地となった場所。三宮の南西にあり、現在は、オフィスビルや商業施設が建ち並ぶ。比較的新しいビルが多いことから、災害時には事業所の勤務者に一斉帰宅抑制を行うことが考えられている

写真提供：神戸市

ドコモのデータを活用し、ふだん三宮周辺にいる人数の推定を行いました。

**土居 (NTTドコモ)** 私たちは皆さんにスマートフォンをいつでもどこでも使っていただけるよう、電波を定期的に基地局で捉える仕組みを備えています。その情報を、個人の特定につながらないように非識別化したうえでモバイル空間統計® というサービスとして提供しています。今回は、三宮周辺を500m×500mのメッシュに区切り、ある日のある時間帯に各メッシュの中に何人いたかというデータを活用しました。

**榎本** 対象エリアを少し広げて、旧居留地(図1)の「一斉帰宅抑制」のシミュレーションも行いました。災害が起こったとき、多くの人が一斉に帰宅しようとする道や駅に滞留が発生し、スムーズな避難が困難になります。これを避けるため、安全な施設に一定時間とどまっていただくのが一斉帰宅抑制です。旧居留地には多くの事業所があり、そこに勤務する人が大勢いるほか、商業施設を訪れる人も多くいます。そこで、事業所にいる約4万人の帰宅を12時間遅らせた場合と、すぐに帰宅を始めた場合で、三宮に向かう道の混雑の様子や避難完了までの時間などに差が見られるかを、シミュレーションで調べました(図2)。

**能勢** こうしたシミュレーションの結果は、神戸市の帰宅困難者対策に生かせると考えています。例えば、現在の神戸市の「三宮駅周辺地域帰宅困難者誘導マニュアル」では、避難誘導を行う誘導員が立つ場所を定めています。三宮周辺地域の大規模災害時の避難のシミュレーションを行うことにより、誘導員の配



NTTドコモ  
安部 孝太郎 担当課長(左)  
土居 奈々子 氏(下)



置の検証に役立つものと期待しています。

一斉帰宅抑制も帰宅困難者対策の柱の一つです。一斉帰宅抑制で混雑が緩和されることが分かれば、それを広報動画にし、繁華街の大型モニターで流すなどして、市民や事業者はその効果を広く伝えていきたいですね。

**土居** 私たちの責務の一つに、市民の皆さんに研究成果を分かりやすく伝えることがあります。能勢 課長が言われるような形で帰宅抑制の効果を伝えることができれば、実際に災害が起こった際に、多くの方が帰宅を控えて下さることにつながるのではないかと思います。

## デジタルツインの実現に必要な地道な作業

——シミュレーションで苦労したのはどういう点ですか？

**榎本** 人流のシミュレーションに適した地図づくりです。意外な感じがすると思いますが、無料で利用できる正確な地図のデータは世の中にほとんど存在しないのです。そこで次善の策

図2 一斉帰宅抑制の人流シミュレーション

一斉帰宅抑制を行った場合(A)と、行わない場合(B)の人流シミュレーションのスナップショット。(A)は、事業所勤務者が事業所に12時間とどまった場合。滞留の程度の違いが分かる。



神戸市  
能勢 正義 課長

パターンを試験的にシミュレーションしただけですが、今後は、パターンを少しずつ増やしてシミュレーション結果を避難誘導に生かすための検討を進め、大規模なパターン探索が必要となったらすぐに「富岳」に移行したいと考えています。

## 結果の実装に向けて

——これまでの成果は、2023年11月にスペインのバルセロナで開催される「Smart City Expo World Congress 2023」という国際イベントで発表されると聞いています。

伊藤 神戸市、理研、バルセロナ市、バルセロナ・スーパーコンピューティング・センターが共同で発表する予定です。神戸市とバルセロナ市は姉妹都市協定を結んでいますし、研究者同士の交流も活発です。今回のプロジェクトの成果について紹介するのはもちろんですが、バルセロナ市側では、行政・医療サービスへのアクセシビリティの解析といった、われわれとは異なる社会シミュレーションに取り組んでおり、両者の組み合わせによる新たな展開について報告したいと考えています。

——デジタルツインが発展すれば、防災計画だけでなく、行政のさまざまな場面に社会シミュレーションが役立ちそうですね。最後に、今後への期待をそれぞれお聞かせください。

能勢 理研、NTTドコモとの協力により今後、高精度のシミュレーションが実現すれば、その結果は、経験に基づくこれまでの計画やマニュアルを検証する上での科学的な根拠になると期待しています。学術研究機関や企業が持つ知見や技術、データなどを活用した成果を社会実装したり、市民のための施策に反映させたりすることは非常に重要ですが、それらをうまくマッチングさせることは、一般的には行政機関にとって少しハードルの高い部分もあると考えています。その点、今回は三者の協力が非常にうまくいっており、今後さまざまな形に発展させることができると考えています。

土居 神戸市の防災計画をはじめ、社会課題の解決につながるような活動に携わっていることに、やりがいを感じています。今後は、いま顕在化している課題のみでなく、まだ見えていない課題にも取り組んでいけるように努めていきたいと思います。

伊藤 今回のプロジェクトでは、神戸市からも数多くの具体的なフィードバックがあり、われわれのシミュレーション技術を現実社会に応用する上での弱点や長所を認識できました。こういう場合は非常に貴重だと感じています。

今回のプロジェクトを通して、一研究者というより一国民としての自覚が高まったように思います。ゆくゆくはこうした取り組みが日本中に広がって、世の中の安心・安全に寄与するサービスになることを願っています。



理研  
伊藤 伸泰  
チームリーダー（上）  
榎本 大悟  
研究員（右）

として、OpenStreetMap (OSM) というオープンソースの地図 (<https://openstreetmap.jp/>) を利用することにしました。OSM は、多くのユーザーが自発的に情報を寄せてつくっており、誰でも使用できます。

ただし、そういう作成法なので、情報が足りない部分や現実と異なっている部分があります。特に、人流のシミュレーションでは、歩道の有無や幅、横断歩道に信号がついているかといった情報が重要ですが、残念ながらそれらの情報は不十分です。そのため、足りない情報をどうやって地図に加えるか、ドコモの皆さんとともに苦労しました。いろいろ検討した結果、例えば、横断歩道には一律に信号をつけるといった規則をつくって対応することにしました。手作業の部分が多く、膨大な時間がかかりました。

安部 私たちも今回の取り組みで、“歩道幅など細部が整えられた地図データ”の整備が必要であることを再認識しており、NTTグループ内でも連携して研究を進めています。私たちは、今回のようなプロジェクトを全国にスピード感を持って展開するには、他に何が足りないのかを神戸市や理研の皆さんと検討しつつ、社内でも共有し、今後に生かしていくつもりです。

——コンピュータの中に現実世界のモデルをつくるのは簡単ではないのですね。シミュレーションにも苦労はあったのでしょうか？

榎本 人流のシミュレーションには、産業技術総合研究所が開発したCrowdWalkというオープンソースアプリケーションを使いました。このアプリを「富岳」で動かせるようにするのに苦労しました。CrowdWalkは「富岳」のために書かれたプログラムではないので、「富岳」で動かすには仮想化技術というものを使います。その難しさに加え、ほかにもさまざまな調整を行う必要があったのです。

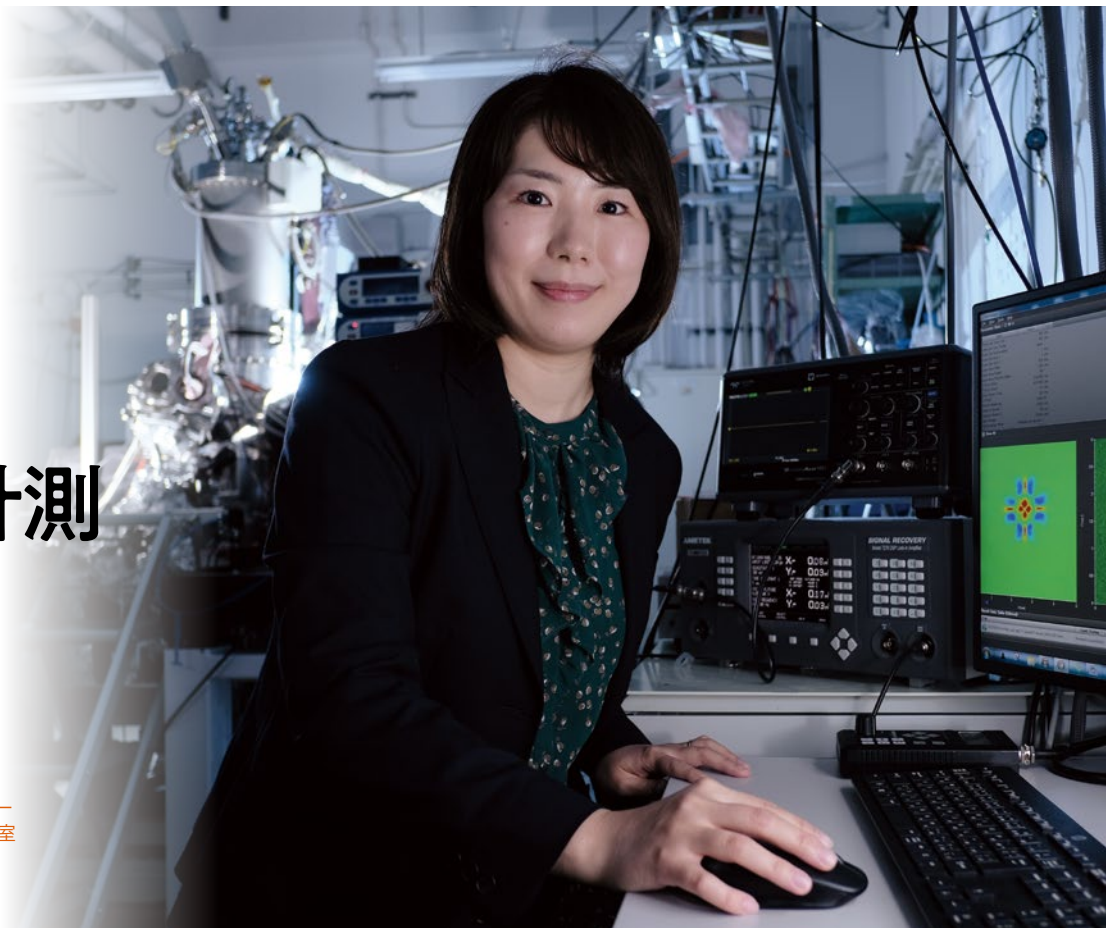
伊藤 榎本さんのがんばりで、「富岳」で何百万通りものシミュレーションをする準備は整いました。これまでは、いくつかの

# 励起した 分子1個の 光電流を計測

今井 みやび

(イマイ・ミヤビ)

開拓研究本部 Kim表面界面科学研究室  
基礎科学特別研究員



「このデータを目にしたとき、自分がつくり出した計測法によって変わっていく科学研究のシーンが次々に頭に浮かんだ」という今井 みやび 基礎科学特別研究員。誰も捉えたことがない、高いエネルギー状態(励起状態)の分子1個が生み出す電流を、原子よりも細かい分解能で計測し可視化する方法を開発した。この計測法は太陽光発電、人工光合成、光触媒などの研究の知見を次々に書き換える可能性を秘めている。

## だったらホームランを狙おう

博士課程時代に、研修生として理研で研究していたとき、体調を崩し1日2時間ほどしか研究できない時期が続いた。「ある日突然、研究ができなくなるかもしれない。だったら、限られた時間で一発ホームランを狙おう」と思い立った。

分子は光を受けると、その光からエネルギーを吸収して励起状態になる。励起状態は不安定なため、発光や発電(光電流)、発熱、化学反応などによりエネルギーの低い安定な状態になるようにする。励起状態からの変化は、安定状態より格段に計測しにくい。

金 有 洙 主任研究員が率いるKim表面界面科学研究室は、2016年に励起状態の分子1個が放つ「光」の測定に成功していた。しかし、励起状態の分子1個に流れる「電流」の測定法は誰も確立しておらず、その実現を太陽光発電や人工光合成、光触媒などの研究開発者らが待ち望んでいた。今井 基礎科学特別研

究員が目指したのは、その励起状態の分子1個に流れるマイクロ電流測定だった。

## 極微の電流を測るための工夫

計測に使用したのは走査トンネル顕微鏡(STM)。トンネル電流は、探針と試料の距離が約1nm(10億分の1m)まで近づいたときに、両者の間に流れる電流だ。探針で試料をスキャンしながらトンネル電流の強さを測定すると、分子の形を把握できる。このSTMに、分子を励起するための光を照射する仕掛けをつけた「光STM」を開発した。

今井 基礎科学特別研究員は、分子1個に流れる極微の電流を捉えるために、効率よく分子を励起させるための二つの工夫をした(図1)。一つ目は、光の強度が数桁強くなる近接場光で分子を励起すること。近接場光とはナノサイズの原子に光を当てた際にそこから近接した狭い領域ににじみ出る強い光だ。探針の先に光を当てるとそこから近接場光がにじみ出る。二つ目は、光の波長を微調整できる波長可変レーザーを使うこと。試料となる分子の構造によって励起に必要な光の波長は異なる。波長可変レーザーなら最適な波長の光のみを照射できる。

## 分子1個に流れる光電流を可視化

研究対象に選んだのは、フタロシアニン分子(図2右)だ。こ

の分子は、光を吸収して励起状態になると電流を流す性質を持つ。フタロシアニン分子が励起できるエネルギー（1.8eV）のレーザー光を照射すると、約-0.7pA（1pAは1兆分の1A）の光電流が流れた。探針で1分子を細かくスキャンしながら電流を計測したところ、レーザーを当てない状態では電流は流れなかった（図2左）が、当てたときは光電流が流れた。励起状態のフタロシアニンに流れる光電流値を世界で初めて実測で捉えた瞬間だった。電流値を2次元のマッピングに描き起こしてみると、その形は花のようで、フタロシアニンの特徴がよく現れていた（図2中央）。「レーザー光のエネルギーがほんのわずかでもずれたら、電流は流れません。波長（エネルギー）を変えられるようにするという工夫が功を奏しました。はじめは不安定で計測が難しかったのですが、探針の針先をナノメートルレベルで同心円状に対称にとがらせればよいことが分かりました。私たちは、この探針製作法も含めて光電流計測法の特許を取得しています」

## 0と±0は大違い

この結果を得て「光電流はどのような過程を経て流れているのかを調べよう」とさらなる挑戦を始めた。フタロシアニンには、電流が流れる際に経由すると考えられるエネルギー状態が2種類（HOMOとLUMO）ある。しかし、どのような過程で電流が流れているかを確かめた人は誰もいなかった。

基板と探針の電位差を変えながら計測すると、基板に対する探針の電位差が0VのときはHOMO経由で正の電流が流れること、-2.0VのときはLUMO経由で負の電流が流れることが明らかになった（図3）。

さらに、電位差-0.25Vのときは、LUMO経由の負の電流とHOMO経由の正の電流が同じ量だけ流れており、分子1個トータルでは、±0アンペアと分かった（図3中央）。従来のマクロな測定法では「電流は流れていない」という結果しか得られなかったが、1分子を原子レベルの分解能で測定してみると「電

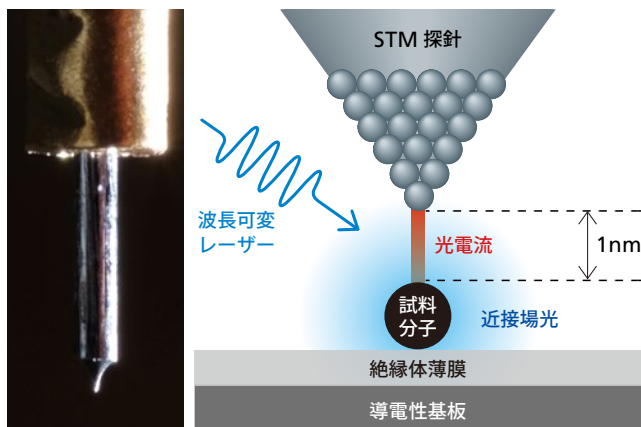


図1 研究室で作製した探針（左）と光STMを用いた単一分子の光電流計測の仕組み（右）

近接場光という非常に強い光で狭い領域のみを照射できるように工夫をした。

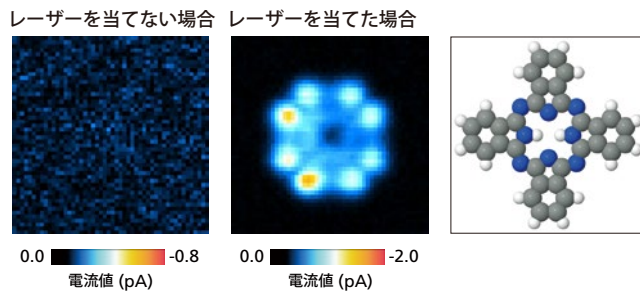


図2 フタロシアニン1分子の光電流2次元マップとフタロシアニンの構造（右）

右図のグレーが炭素、青が窒素、白が水素を表す。白金やマグネシウムなどの金属が中心に入っているフタロシアニン分子も観測している。

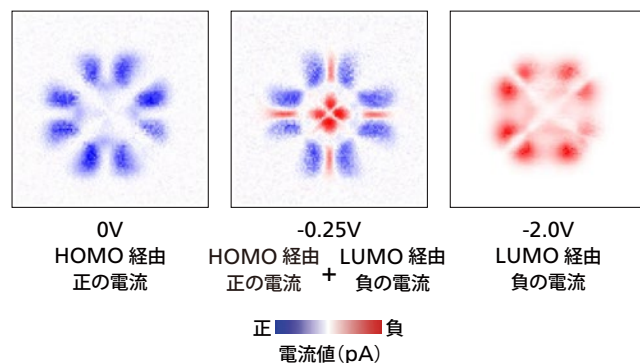


図3 フタロシアニンに流れる光電流像

探針の電位を調整すると、探針からHOMOを介して基板へ流れる電子移動によって正の電流が生成されたり、基板からLUMOを介して探針へ流れる電子移動によって負の電流が生成されたりする。HOMOとLUMOは、化学反応で重要な役割をするエネルギー状態。

流は流れている」のだ。「初めてこのデータを見たときは、目を疑いました」と振り返る。太陽光発電など光電変換材料の開発に「ミクロな実験的検証」という重要なピースが加わった。

## 光合成を手本にクリーンなエネルギーをつくりたい

太陽光発電の効率を左右する光電変換材料。光から電気への変換効率は、有機薄膜の場合、高いものでも20%程度だ。「光合成の第1段階、光から電気への変換効率はなんと100%です。その謎を私が開発した計測法で解き明かしたいのです」と抱負を語る。

単一分子の光電流計測装置のアイデアを考えついた当初、夫でこの成果を記した論文の第二著者でもある今田 裕<sup>いまだ ひろし</sup> 上級研究員は「ホームランを狙うより、今できることを着実にやろう」と、勇み足になりがちな妻を心配したという。けれど、初めてデータが取れたときには、その価値を誰より理解し喜んでくれた。

家庭では、二人で協力しながら1歳の子を育てる。「時間をやりくりして、いかに研究成果を上げるかを意識するようになり、研究者としても成長できた」と二人でよく話しているそうだ。

林(高木) 朗子  
(ハヤシ・タカギ・アキコ)

脳神経科学研究センター  
多階層精神疾患研究チーム  
チームリーダー



# 「心の病を治したい」 根治療法を求めて

脳は、いまだに謎の多い器官だ。脳神経科学研究センターでは脳の機能の解明や疾患の診断法・治療法の開発を行っている。中でも林(高木) 朗子 チームリーダーは、神経細胞の接点であるシナプスから精神疾患に迫ろうとしている。シナプスが示す現象の意味の本質を問いつける研究への思いと、医師から研究者への転身で得た成果について話を聞いた。

## 根治できない無力感

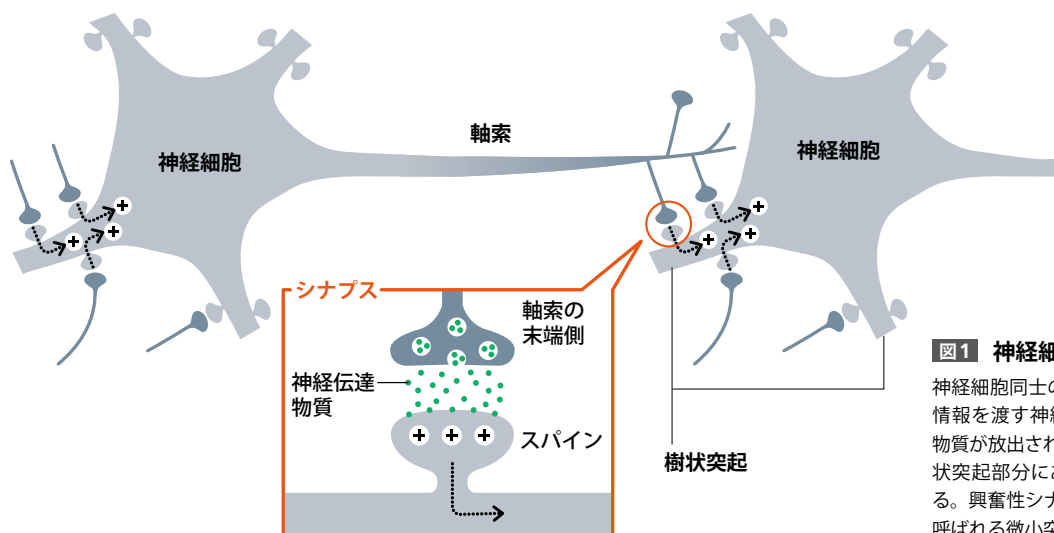
「好きな作家は太宰 治です。私自身が究極の陰キャなので…。ただ同じ太宰作品でも、その時々彼の境遇を分かって読むと、心の状態で作風が違っていることに気付きます」。子どもの頃から“人の心”に興味があったと言う林チームリーダーが、最初に選んだ職業は心の病を治療する精神科医だった。ところが「何でも治せる」と思っていた精神科に飛び込んでみて、それは幻

想だと気付いた。「当時、日本の自殺者数は年間約3万人。心の病はそこに大きく関わっています。なのに、根本的な治療法がありませんでした」と、当時のやりきれない思いを話す。

例えば、統合失調症は幻覚や妄想が現れる精神疾患だ。治療薬のクロロプロマジン、1950年代に偶然その薬効が発見されたが、その後、神経伝達物質であるドーパミンを抑制していることが分かり、同じ作用を持つ薬が次々に開発された。「この発見は薬物療法の大きなブレイクスルーとなりました。それから半世紀以上経った今、精神疾患を根本から治せようと思ったのです」

## 精神疾患を解明する鍵の一つ「シナプス」

精神疾患のメカニズムを解明するために精神科医から研究者へ転身。2007年、留学先の米国ジョンス・ホプキンス大学で、



**図1 神経細胞とシナプス**  
神経細胞同士のつなぎ目のシナプスでは、情報を渡す神経細胞の軸索から神経伝達物質が放出され、それを別の神経細胞の樹状突起部分にあるシナプス後部で受け取る。興奮性シナプスの多くは、スパインと呼ばれる微小突起構造上に形成される。



シナプスの研究を始めた。「最初は手探りでしたが、シナプスの研究を続けるうちに、重要だと確信するようになりました」

私たちの心をつくり出す脳は、約1,000億個の神経細胞の巨大なネットワークでできている。神経細胞と神経細胞のつなぎ目であるシナプスでは、神経細胞の軸索が放出した神経伝達物質を、別の神経細胞の樹状突起にあるトゲ状の構造（スパイン）で受け取る（図1）。神経伝達物質には、グルタミン酸やGABA（ギャバ）、ドーパミン、セロトニンなどがあり、どれも精神疾患で重要とされる分子だ。

2000年代に入ると、精神疾患に関係する遺伝子の多くがシナプスで次々に見つかり、精神疾患へのシナプスの関与は疑いようがなくなった。

## シナプスと記憶の関係が明らかに

2010年、日本に戻ると、マウスの脳を生きたまま2光子顕微鏡を使って直接観察する技術を持つ、東京大学の河西 春郎教授のもとで研究を続けた。そこで「シナプスが記憶の正体だ」とする通説が正しいことを示した。「これまで、シナプスの変化を観察しても、現象の意味が分かりませんでした。シナプスをなくしたところ学習・記憶も消えたのです」

これを示すためには、記憶によって新生したシナプスを追跡し、それをなくすと記憶が失われることを示す必要があった。そのために、五つの遺伝子を組み合わせ、光感受性シナプスプローブ「AS-PaRac1」をつくった（図2）。この人工遺伝子からつくられるタンパク質は、スパインに取り込まれることで、好きな時にスパインを縮小させ、シナプスをなくすことができる。「五つとも既に知られていた遺伝子ですが、普通、いろいろな機能を持つ遺伝子を組み合わせても、思うように働かないことのほうが多いのです。それを五つも。周りからはクレイジーと言われました」と笑う。

開発した複雑な人工遺伝子はマウスの脳で期待通りに働いた。研究成果は国際的に高く評価され<sup>\*1</sup>、AS-PaRac1もスパインを人為的に操作できる新たなツールとして、世界中で活用され次々と重要な研究成果<sup>\*2</sup>を生み続けている。

## シナプス民主主義の破綻か？

研究はいよいよシナプスが関与すると考えられる病態を明らかにする段階に入った。シナプスの変調は精神疾患の原因の一つと考えられる。その具体的なメカニズムを探るため、統合失調症に関与すると考えられる神経伝達物質グルタミン酸に注目し、モデルマウスを使ってシナプス伝達から行動までを多階層に検証した。「その結果、巨大なスパインが現れてシナプスの“民主制”を乱していることが分かったのです」

神経細胞は神経伝達物質を受け取ると、電気信号を発する。この電気信号によって神経細胞間の情報伝達が行われるが、一つのスパインが神経伝達物質を受け取ったからといって、電気信号が生じるわけではない。これを民主的な投票の仕組みになぞらえて、「シナプス民主主義」と呼ぶ人もいる。ところが、林

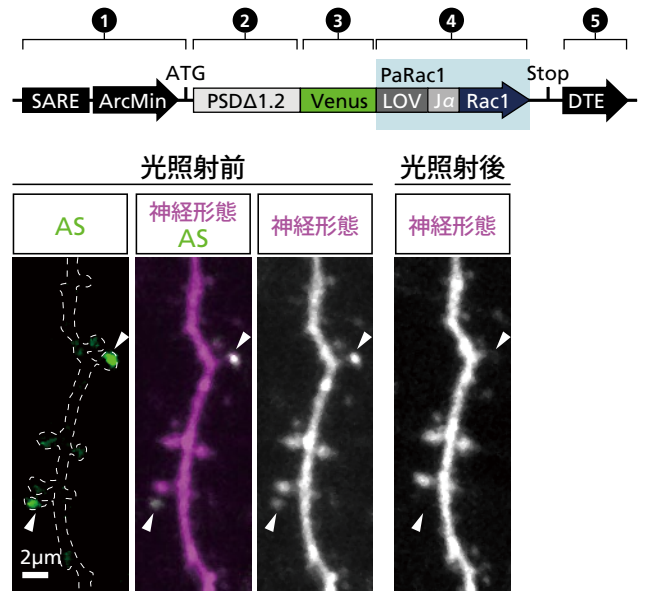


図2 光感受性シナプスプローブ「AS-PaRac1」の巧みなメカニズム

図中①～⑤が、つないだ五つの遺伝子。それぞれ、①活動する神経細胞で発現する、②スパインの表面のタンパク質をつくる、③緑の蛍光を発するタンパク質をつくる、④光が当たると活性化してスパインを収縮させる、⑤情報の入力のあったスパインに集まる、といった働きをもつ（上）。

これらの遺伝子が協調して働くことで、産生したタンパク質は、新しく生じたり成長したりしたスパインの表面に組み込まれて緑に光る。さらに光を照射して④の遺伝子を働かせることで、好きな時にスパインを収縮させられる。

写真は左から、光感受性シナプスプローブ、神経と光感受性シナプスプローブ、神経がそれぞれ可視化されている。光を照射すると、光感受性シナプスプローブを持つスパインだけが収縮し、シナプスがなくなる様子が観察される（右）。

チームリーダーが見つけた巨大スパインは影響力が他より大きいことが分かった。実験では巨大スパインの数が多いマウスは神経回路が不安定になり、作業記憶が低下した。ヒトの統合失調症患者由来の死後脳でも、巨大スパインの数が多いことが確かめられた<sup>\*3</sup>。「今回の研究で、巨大スパインが統合失調症の病態に関与している可能性が提唱できました。従来とはまったく異なる神経伝達物質で新たな治療戦略の可能性を見いだしたことに、大きな手応えを感じています」

## 若い人に続けてほしい研究者という仕事

2019年、林チームリーダーは最高の研究環境を求めて理研に移ってきた。「脳を研究する世界レベルの仲間と気軽に話せますし、研究所のスタッフや事務職員から温かいサポートも受けることができるので、研究所一丸となって成果を出そうという雰囲気があります。ここで人生最高の仕事をしたいです。研究を続けるのはものすごく大変です。それでも“やった〜”と思える瞬間の喜びが、ほかの何にも代えがたい。それは研究を志す若い人たちにも味わってほしい楽しさです」と話す。最近、iPS細胞や死後脳を利用した「ヒトの神経細胞研究」にも研究の幅を広げており、精神疾患の根治に向け、ますます研究に力が入る。

\*1 原論文情報：Nature, 2015 DOI:10.1038/nature15257  
 \*2 原論文情報：Science, 2019 DOI: 10.1126/science.aat8078  
 \*3 原論文情報：Science Advances, 2023 DOI: 10.1126/sciadv.ade5973

# ゲノムの未開拓領域を切り開く！

岩崎 由香 (イワサキ・ユカ)

生命医科学研究センター  
非コードゲノム機能研究チーム  
チームリーダー

岩崎 由香 チームリーダーが取り組む研究テーマは、ゲノム(全遺伝情報)の「非コード領域」だ。生物のゲノムには、その生物を構成するためのタンパク質の情報が書かれて(コードされている)。非コード領域とは、ゲノムの中でタンパク質をコードしていない領域のこと。役に立たないと思われていたこの領域こそが、実はヒトのような複雑な生物で重要な役割を果たしていることが明らかになりつつある。

## ヒトと線虫は遺伝子数では変わらない？

すべての生物は、細胞の中に生命の設計図を持っている。それが「ゲノム」だ。ゲノムの情報は、DNAを構成する4種類の塩基(A/G/C/T)の配列によって記されている。ゲノムには私たちの体を構成するタンパク質をつくるための情報「遺伝子」が含まれている。遺伝子には、例えば筋肉を構成するタンパク質をつくるためにはどのアミノ酸をどんな順番でつなげればよいかといった情報が塩基配列として「コード」されているのだ。遺伝子の情報に基づいてタンパク質がつくられる過程では、まずDNAをもとにRNAが合成される。これを転写と呼ぶ。そして、RNAをもとにタンパク質が合成される。これを翻訳と呼ぶ。

ただし、ゲノムの全領域にタンパク質のつくり方がコードされているわけではない。ヒトゲノムの場合、「コード領域」はわずか1~2%に過ぎない。それ以外の98~99%、つまりほと

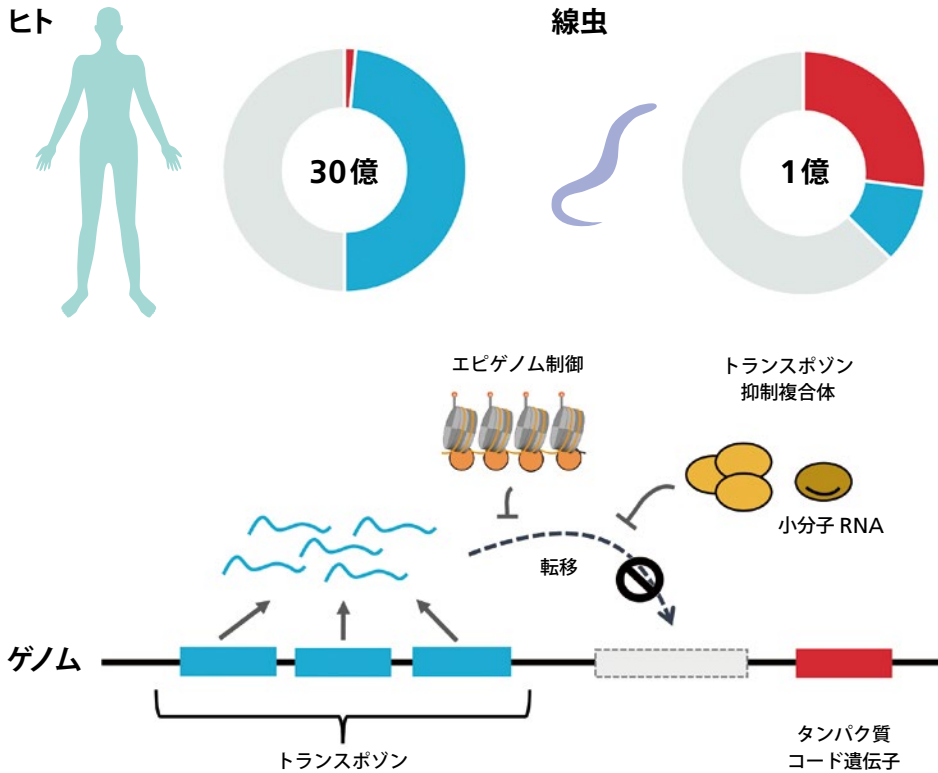
んどはタンパク質の情報が書かれていない「非コード領域」なのである(図1)。しかしタンパク質にならない非コード領域にも、実はDNAからRNAへの転写までは行われている領域がたくさんある。ここでつくられたさまざまな種類の「非コードRNA」が、タンパク質を発現するための調整を行っているということが近年分かってきた。

「ヒトの遺伝子の数は約2万だと言われています。遺伝子の数だけ見れば、線虫のようなもっと単純な生物と大きく変わりません。両者のゲノムで何が違うかといえば、ヒトは線虫より圧倒的に非コード領域が大きいのです。こういったことから、ヒトのような複雑な生物を成立させる上で、実は非コード領域が重要な役割を果たしているのではないかと考えています」

## 「動く遺伝子」を追って

ヒトのゲノムの中で最大の割合(50%弱)を占めるのが「トランスポゾン」と呼ばれる非コード領域の塩基配列である。トランスポゾンは「動く遺伝子」とも呼ばれる。なぜなら塩基配列自ら、ゲノム上を移動することができるからだ。トランスポゾンは、移動するだけでなく、時に自分の配列をコピー&ペーストしながら増殖していく。

かつてトランスポゾンは、無秩序な動きでゲノムの構造を変えてしまう厄介者のように考えられていた。しかし、研究が進み、



**図1**  
ヒトと線虫のゲノムの構成と  
トランスポソンの制御  
(上)ヒトおよび線虫ゲノムのタンパク質コード遺伝子領域(赤)、トランスポソソ領域(青)、その他の非コードゲノム領域(灰)の割合を示す。数字はおおよそのゲノムサイズ。  
(下)ヒトゲノムの大きな割合を占めるトランスポソソはさまざまな機構により制御されている。

トランスポソソは特定の遺伝子発現のスイッチ、つまりタンパク質をつくるかどうかのオン・オフを切り換える役割などを果たすこともあることが分かってきた。また、その役割を果たすために多様なRNAが関与していることも分かってきている。

「私の研究では、トランスポソソの発現が非コードRNAをはじめとしたさまざまな抑制機構によってどのようにコントロールされているかを明らかにすること、さらにはそういった非コード領域で起こる制御が生体にとってどのような意義を持つかを解明していくことを目指しています」

これまで、トランスポソソを抑制する小分子RNAを研究してきた岩崎チームリーダーは、2023年1月、理研で自身が主宰する研究室をスタートさせた。

## 理研のゲノム研究の系譜

理研には、ゲノム研究の長い歴史がある。例えば、現在の特定の病気や体質の特徴などに関連する遺伝的な特徴を見つけるために行われる手法「ゲノムワイド関連解析(GWAS)」は、2002年に理研が世界に先駆けて報告した成果である。

また、RNAの機能解明を目的とした理研の国際コンソーシアム「FANTOM」では、2003年の第3期(FANTOM3)に非コード領域を含むDNA全体の70%以上がRNAに書き写されるが、そのほとんどがタンパク質をつくらずRNAのまま機能していることを示し、RNAという重要な研究分野が世界的に発展するきっかけとなった。とはいえ、非コード領域はまだまだ分からないことだらけであり、今なおゲノムの未開拓領域なのだ。

岩崎チームリーダーは「日本で理研ほど恵まれた研究環境は他にない」と話す。「共同で使える実験設備や解析装置が充実し

ていて、他のチームの研究者ともフランクに話し合えます。早速、私も他のチームとの共同研究を立ち上げようと準備しています。研究の種を見つけてから育てていくうちに、当初は思いもよらなかったものになっていくことも多く、それがとても楽しいです。理研でも新しいデータを生み出したり、さまざまな人とインタラクションしたりすることで、面白い研究を育てていきたいです」

## トランスポソソを病気の治療につなげたい

今後、トランスポソソの機能を解明し、ヒトの病気のメカニズム解明や治療につなげていきたいと語る。「例えば生殖組織でトランスポソソの発現がうまく抑制されない動物は不妊になることが報告されています。この制御機構を理解することで、不妊の原因の解明やその先の治療につながる可能性があります。トランスポソソがさまざまな遺伝子の発現や生体機能にどのような影響を及ぼすか理解し、さらにその制御技術を確認することができれば、他の病気の治療への応用も期待できると考えています」

研究者を続けてきた中で、少し寂しく思っていることがあるという。それは同世代の女性研究者が少ないことだ。「研究者ほど自由度が高く創造的な仕事はなかなかないと思っています。自身がこれまで蓄積してきたテクニックや知見によって、初めて世界の新しい側面が見えるってロマンチックですよ。ライフイベントを経て仕事を続けやすい社会になってきていますし、アカデミアは頑張っって面白いことをしようとしていると助けてくれる人がたくさんいます。学生のときに研究が好きだと思ったら、ぜひ女性も研究者を仕事にしてほしいですね」

# 転写の瞬間を撮影して、 生物学上の 長年の謎を解決！

関根 俊一 (セキネ・シュンイチ)

生命機能科学研究センター  
転写制御構造生物学研究チーム  
チームリーダー



生命の設計図、ゲノムDNAは糸巻きのようなタンパク質に巻き付いて、細胞の核の中にコンパクトに収納されている。DNAの中にある遺伝子を読み取るときにはDNAを糸巻きから外す必要があるが、外した後の糸巻きがどうなるかは謎だった。関根 俊一 チームリーダーらの研究グループは、外れた糸巻きが元通りになるまでの一連の過程を撮影することに成功し、この謎を解決に導いた。

## 遺伝子発現に潜む謎

私たちの細胞の中にある染色体46本分のDNAを全部つなぐと、約2mの長さになる。DNAは「ヒストン」というタンパク質に2周ほど巻き付いて「ヌクレオソーム」という小さな構造をつくる。膨大な数のヌクレオソームが数珠つなぎになったものが

「クロマチン」である。「クロマチン構造は、長大なDNAを小さな核の中に収納する仕組みであるとともに、DNAのどの部分をいつ働かせるかということを制御する重要な機能を担っています」

DNAにはさまざまな遺伝子の情報が書かれている。遺伝子を利用する(発現させる)には、DNA上の必要な部分の情報を読み取って、RNAをつくる(転写する)必要がある。そのためには、RNAをつくる酵素(RNAポリメラーゼ)がDNAに結合しなければならない。RNAポリメラーゼがいつどこに結合するか情報はDNAに書かれている。実はヒストンにも、自分に巻き付いているDNAのところにRNAポリメラーゼを呼び込む(あるいは遠ざける)ための情報が載っている。「エピジェネティクス」と呼ばれる遺伝子発現制御の仕組みだ。

RNAポリメラーゼが転写を行う際には、ヒストンは一度DNAから外れなければならない。ただし、外れたヒストンがまた同じDNA領域に結合しないと、エピジェネティクスの仕組みを維持できない。そのため、外れたヒストンを元通りにする何らかの仕組みがあるはずだが、その仕組みは長年、不明だった。

## 一度壊された後、 復元された現場を押さえた！

2022年8月、この謎がついに解明された。関根チームリーダーらの研究グループが、転写の際にヌクレオソーム構造が一度解体されたり、元通りに復元されたりしている一連の過程を「撮影」することに成功したのだ。

実際に撮影した画像が図1である。一つ一つの粒子は、RNAポリメラーゼやヌクレオソーム、およびその両者が結合したも

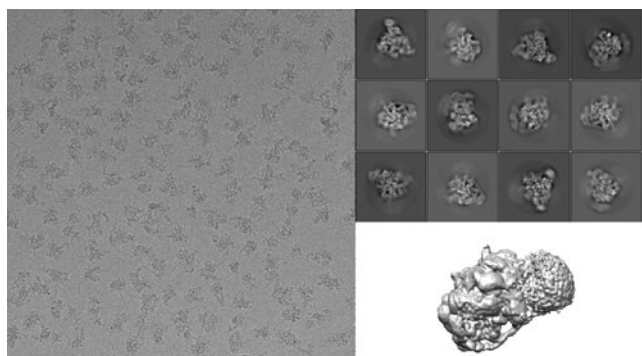


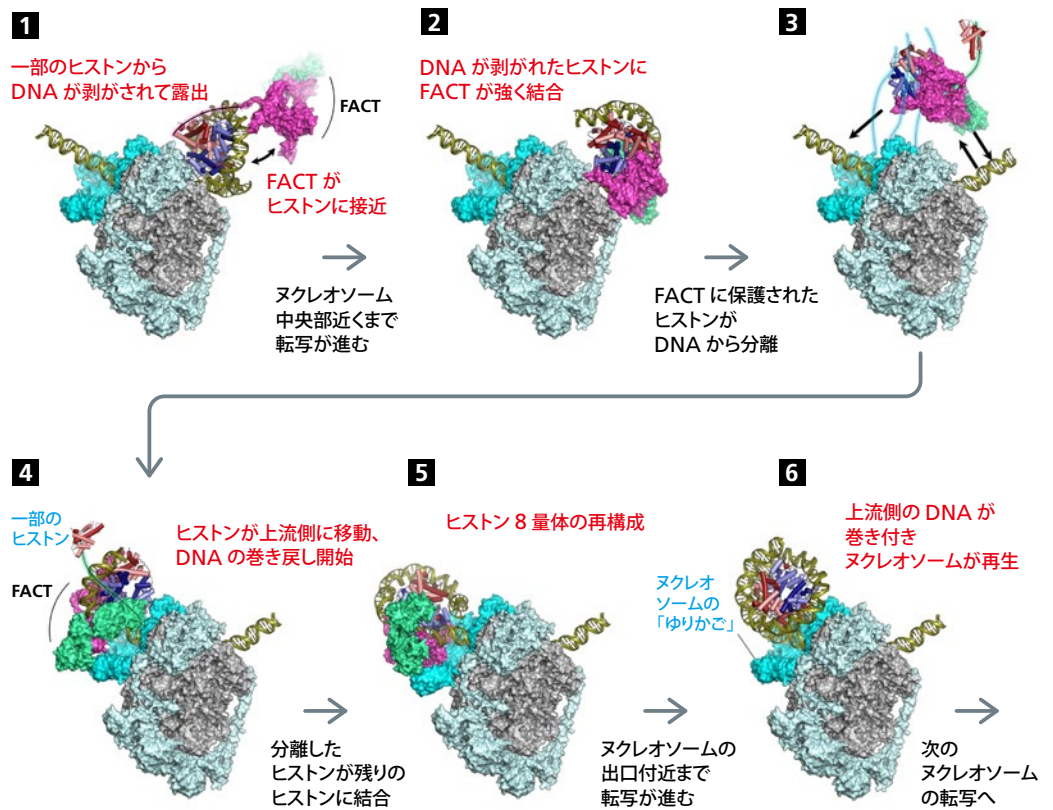
図1 転写の現場をとらえた画像とクライオ電子顕微鏡解析

(左)クライオ電子顕微鏡で撮影された画像。画像の横幅は約0.5 $\mu$ m。この画像中には約200個の粒子(反応中の酵素やヌクレオソーム)が写っている。(右上)多数の画像から、同じ種類、同じ向きの粒子を集めて得られた二次元平均像。(右下)三次元再構成によって得られた密度マップ。

図2

## ヌクレオソームの解体と復元

一度DNAから外れたヒストンに、再びDNAが巻き付くまで。実際に撮影された写真から、各段階の形が明らかになった。FACT: 補助因子(ヒストンシャペロン)



のだ。RNAポリメラーゼが、これからDNAを読み進めようとするところや、ヌクレオソーム構造が復元される場所など、転写のさまざまな段階が写っている。これらの粒子を基に立体構造を導き出し、転写のどの段階であるかを特定してから、反応の進行順に並べると、転写の一連の過程のコマ撮り写真が出来る。

今回の研究では、RNAポリメラーゼと複数のタンパク質が連携しながら、ヒストンからDNAを剥がす様子や、転写後に再びヒストンにDNAが巻き付く様子などを捉えることができた。こうして、ヌクレオソーム構造を維持しながら転写を行う一連の仕組みを、解明したのだ(図2)。

## 反応中の酵素やDNAを凍らせて撮影

画像の撮影には、観察対象を凍らせたうえで原子レベルの極小の世界を観察できる「クライオ電子顕微鏡」(左ページ上写真の背後の装置)が使われた。関根チームリーダーらはまず、一連の反応を起こすために必要なDNAやヒストン、RNAポリメラーゼなどを試験管に入れて、実際に細胞の中で転写が起きている様子を再構成した。そして、反応中の溶液をごく薄い氷の中に瞬間的に凍結し、ヌクレオソーム構造を閉じ込めた上で撮影を試みた。こうして撮影したのが図1左の画像というわけだ。撮影した画像をコンピュータで解析し、高精度の立体構造を導き出すことで、それらがどのような反応段階のものであるかが特定できる(図1右)。

クライオ電子顕微鏡では、1種類のタンパク質だけを凍らせて撮影することが多い。1種類のタンパク質の一つの構造だけでは、画像の解析もしやすく、少ない撮影枚数でもそのタ

ンパク質の構造について十分な情報が得られる。

しかし、今回の実験で撮影したのはDNAとヒストン、RNAポリメラーゼに加えて、10以上のタンパク質。ただでさえ多い“登場人物”がいろいろな組み合わせでさまざまな転写反応の段階にあるので、狙った反応段階が1枚の画像中に写る確率は低くなる。そのため、転写の各段階のデータをそろえるためには、大量の画像が必要となってくる。最終的に今回の実験では、図1のような画像を十数万枚も撮影した。

## 成果の裏に、研究の蓄積あり

今回の研究は、東京大学の胡桃坂<sup>くるみざか</sup> 仁志<sup>ひとし</sup> 教授らの研究グループと共同で行われた。関根チームリーダーらはRNAポリメラーゼ、胡桃坂教授らはヌクレオソームの研究を長年行ってきた。「両者の得意分野が相乗効果を発揮して、今回の世界初の成果につながったのだと思います」

今後は“登場人物”をさらに増やして撮影に挑む予定だ。「今回の解析で、結合した状態は分かったのですが何の役に立っているか分からないものがあります。さらに、今回使った材料のほかにも、実際の転写にはもっと多くの因子が関与しています。それらの因子を増やして反応させたり、ヒストンの状態を変化させたりで反応させたりして、さらに詳しく転写の仕組みを明らかにしたいと考えています」

転写に異常が生じると、がんなどの病気や老化につながるということが指摘されている。「今後も生物学の根本的な問題に答えて、教科書を書き換えるような仕事をしていきたいですね。生物の基本的なメカニズムの理解が進むことで、病気や老化の理解にもきっと役立つはず」



羽場 宏光  
(ハバ・ヒロミツ)

仁科加速器科学研究センター  
核化学研究開発室 室長

## がんの治療に新元素合成で貢献

原子番号85のアスタチンは、自然界にはほとんど存在せず、加速器によってつくられた人工の元素だ。アスタチンには中性子の数が異なる「同位体」が約40種類知られているが、すべて放射性的同位体 (RI) だ。中でもアスタチン-211 ( $^{211}\text{At}$ ) は、がん治療に有効な $\alpha$ 線と呼ばれる放射線を放出するため、近年、需要が急速に高まっている。しかし、不安定なため短時間のうちに壊変するという問題があり、半減しても十分な放射線を得られる大量生産が期待されていた。仁科加速器科学研究センターにある重イオン加速器施設「RIビームファクトリー (RIBF)」で、 $^{211}\text{At}$ を大量に製造する技術開発に成功したのが、核化学研究開発室の羽場 宏光 室長の研究グループだ。

### がん治療に需要が高まるアスタチン

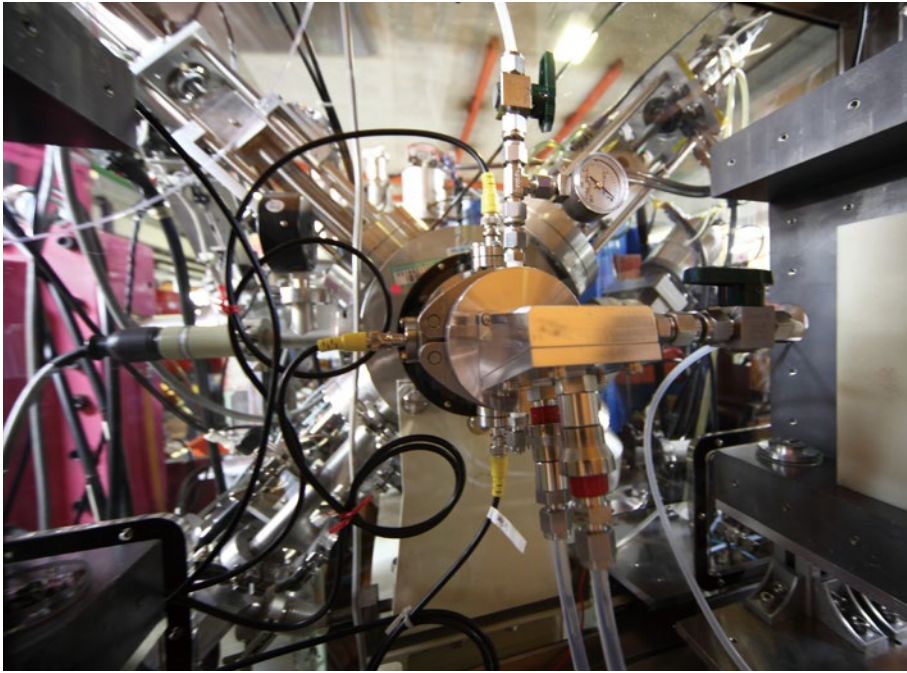
がんは、日本人の2人に1人が生涯のうちに罹患するといわれている。医療が進歩する中、近年、抗がん剤をがん細胞のみに選択的に届けるDDS (ドラッグ・デリバリー・システム) 薬剤の開発が進んでいる。その一つが、 $^{211}\text{At}$ を用いた甲状腺がんや前立腺がんに対するDDS薬剤で、 $^{211}\text{At}$ が放出する $\alpha$ 線を

使ってがん細胞のみを効率的に殺傷する。 $^{211}\text{At}$ の需要が増す中、羽場 室長の研究グループは、RIBFの重イオン加速器を用いて $^{211}\text{At}$ を大量かつ安定に製造する技術を開発。2020年2月、その業績によって第2回日本オープンイノベーション大賞 日本学術会議会長賞、2023年4月、科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞を受賞した。

### 国内での製造が必須の元素

$\alpha$ 線を放出する放射性元素には他にもウランやトリウムがある。しかし、いずれも核燃料物質として取り扱いが厳しく制限されている。それに比べ、 $^{211}\text{At}$ は取り扱いが容易であるだけでなく、加速器を用いてビスマスにヘリウムのイオンビームを照射し、二つの元素を融合するというシンプルな工程で製造できる。

「ビスマスは天然に豊富に存在する元素なので、入手に困ることはありません。ただ、 $^{211}\text{At}$ は $\alpha$ 線を放出して別の元素に壊変し、7.2時間たつと半分の量になってしまいます。DDS薬剤として利用するには、国内での製造が必須です」



**図1 水・ヘリウム冷却式標的照射装置**

ビスマスの面を斜め15°にして冷却面積を増やし、さらにビーム軸を回転させることで高強度のビームによるビスマスの融解を抑制する。生成した $^{211}\text{At}$ は、別途開発した化学分離装置を用いて取り出す。

実は、 $^{211}\text{At}$ の国内製造は大阪大学や放射線医学総合研究所（現 量子科学技術研究開発機構量子生命・医学部門）が先行して進めていた。しかし、加速器の更新などにより供給が途絶えるリスクがあるため、国内に安定した供給ネットワークを構築することが求められた。そこで、2015年に羽場 室長らも $^{211}\text{At}$ の製造に着手したのだ。

## 大量かつ安定に製造できる技術

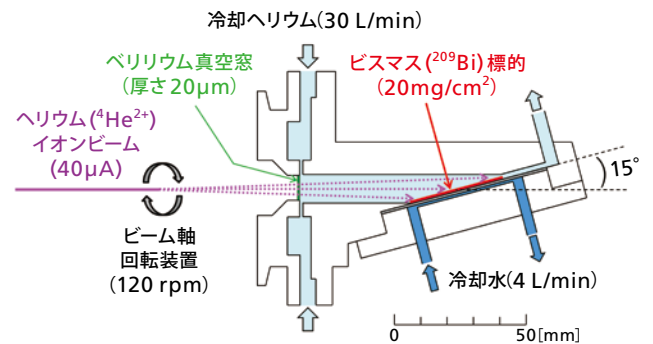
特に注力したのは、 $^{211}\text{At}$ を大量かつ安定に製造する技術の開発だ。前述したように、半減期の短さから医療現場の近くで製造する必要があると考えられていたが、大量に用意できれば遠隔地に運ぶ間に半減してしまっても治療に十分な放射線量を確保できる。そうなれば供給範囲も広がり、より多くの患者への投与が可能となる。

「 $^{211}\text{At}$ を大量に製造するには、より高強度のヘリウムのビームをビスマスに照射する必要がありました。しかし、金属ビスマスは融点が約271℃と低いため、高強度のビームを照射するとすぐに融けてしまい、 $^{211}\text{At}$ ができないというジレンマに直面しました」

そこで、羽場 室長らは、水とヘリウムを使ってビスマスを効率よく冷却しながら高強度のビームを照射する装置（図1）を開発した。それにより、ビスマスの融解を抑えることができ、 $^{211}\text{At}$ の大量製造を成功させたのだ。

「理研の加速器は、1937年に仁科 芳雄 先生がアメリカに次いで開発に成功して以来、80年以上にわたる長い歴史を持っています。今回の成功も長年にわたり蓄積されてきた高い技術力や知識、ノウハウがあってこそその成果です」

現在、RIBFで大量に製造した $^{211}\text{At}$ は、大阪大学医学部附属病院や国立がん研究センターなどに安定的に供給されている。



大阪大学では、その $^{211}\text{At}$ を使い、2021年に甲状腺がん、翌年には前立腺がんに対するDDS薬剤の開発に相次いで成功した。現在、前者は治験の段階で、医薬品としての早期実用化が待たれている。

## 医療応用に向けた新たな元素を

現在、羽場 室長らは、 $^{211}\text{At}$ に次ぐ $\alpha$ 線を放出する元素として、アクチニウム-225 ( $^{225}\text{Ac}$ )の製造にも着手している。

「 $^{225}\text{Ac}$ は $^{211}\text{At}$ と全く異なる化学的性質をもっています。そのため、つくることができるDDS薬剤が異なり、半減期も約10日間と $^{211}\text{At}$ に比べれば長いことから、病巣にゆっくり集積する薬剤の開発において有効だと考えられます」

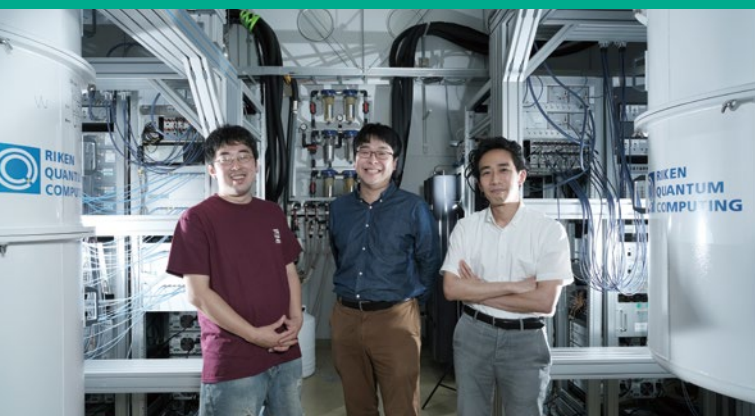
近年、欧米を中心に $^{225}\text{Ac}$ を使ったDDS薬剤の開発が盛んに進められており、世界的に需要が高まっている。それに伴い、海外から日本への輸出量が激減しており、 $^{225}\text{Ac}$ も日本での製造が必須なのだ。

「今後も、仁科加速器科学研究センターが掲げる基礎研究と応用研究による社会貢献という目標のもと、『二ホニウムに続く新元素の発見からがん治療まで』をスローガンに研究開発にまい進します」



# 量子コンピュータ 開発に挑む 若手研究者たち

希釈冷凍機の白い容器の中には、金色に輝く複雑な装置。超伝導量子ビット 64 個が配置されたチップの底部からマイクロ波の配線が無数に延び、さまざまな部品と結合している。2023 年 3 月にクラウド公開した量子コンピュータの本体だ。実機の組み立て、デバイスの開発、回路設計など、それぞれの側面から携わった、量子コンピュータ研究センター（RQC）の 3 人の研究者を取材した。



## 独自の「垂直配線パッケージ」を採用

今回の開発では、64 個の超伝導量子ビット（64 ビット）を配置した 2cm 角の基板、配線、減衰器、増幅器など全ての部品を、内部温度 10mK（約 -273℃）の冷凍機内に収めるため、直径と高さがおよそ 50cm の空間に組み上げることを主に担当しました。

開発した量子コンピュータは、4 個の量子ビットをつないだ基本ユニットが平面に 16 個配置された 64 ビットの「2 次元集積回路」となっています。量子ビットの制御にはマイクロ波を用いるのですが、そのマイクロ波を導くケーブルを基板の横からではなく、底面から垂直につなげています。この「垂直配線パッケージ」が理研の超伝導量子コンピュータの大きな特長です。最低でもビット数の 1.5 倍ほどの数の配線が必要になるため、ビット数が増えると、基板の横からでは配線しきれなくなる可能性があります。その点、底面には当面賅えるだけの余地があります。

図面通りにつくるのは結構大変です。例えば、図面の配線では手が入らない場合にスペースをつくったり、壊れた部分だけを外せるようにするなど、一筋縄ではいかない苦労がありました。こうして自分の手でつくり上げたシステムが、64 ビット全体として量子力学の重ね合わせの原理で動いていると思うと、「オッ、すごいな」と素直に感動しますね。

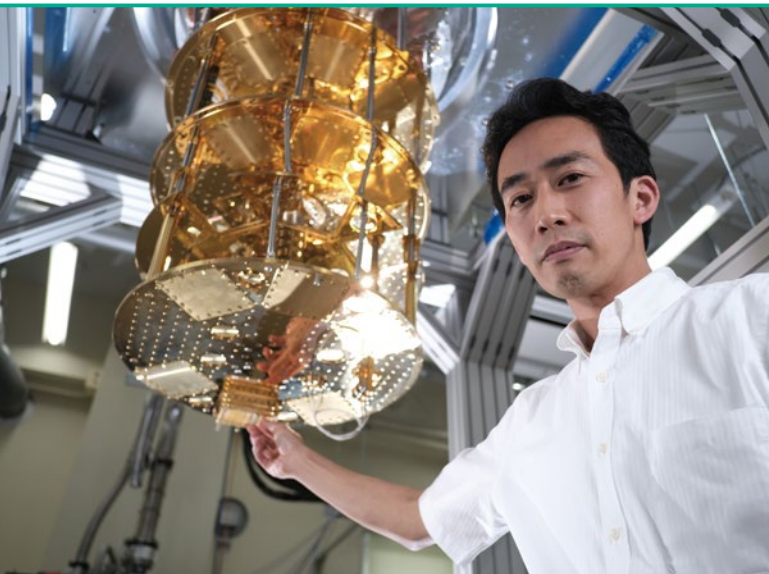
## 中村センター長との出会いが 研究のきっかけ

超伝導量子ビットとの出会いは 2011 年、大阪大学の博士課程在学中に、茨城県つくば市にある株式会社 日本電気（NEC）のグリーンイノベーション研究所でインターンシップに参加したときです。同年 3 月に東日本大震災が起きて途中で大阪大学に戻ることになりましたが、NEC での中村 泰信 先生たちとの出会いが今に至る原点です。学位取得後はポスドクとして、東京大学の中村研究室に進みました。そして JST の ERATO「中村巨視的量子機械プロジェクト」（2016 年～2022 年）に参加し、超伝導量子コンピュータの基礎的な研究に携わりました。

中村研では、マイクロ波を使ってきちんと制御できる超伝導量子ビット（超伝導量子ゲート）の原型づくりに取り組みました。そして、ERATO が始まると、今度はこれをどうやって並べていくか、いかに 2 次元の集積回路にするか、その検討を始めました。そのうちに、回路設計が得意な玉手さん（後出）が加わったので、回路設計は彼に全部お任せして、私は量子コンピュータのハード回り、例えばマイクロ波の精密な制御装置などの研究開発を進めました。

超伝導量子コンピュータは、マイクロ波の周波数と照射時間を制御して、各量子ビットへの演算を行います。また、計算結果も、マイクロ波を超伝導量子ビットに当てて、その反射波の





**阿部 英介**  
(アベ・エイスケ)

量子コンピュータ研究センター  
超伝導量子エレクトロニクス連携研究ユニット  
ユニットリーダー

## 世界基準で挑む課題の数々

当面の目標は144量子ビットのコンピュータの実現です。これも組み立てを担当します。今のペースだと毎年1台は立ち上げることになりそうです。

ビット数の拡張、高性能化を図るのは、RQCの中村 泰信 センター長が研究代表を務めるプロジェクトの方針です。科学技術振興機構 (JST) の「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) 」(2018年度～2029年度)の「量子情報処理」プログラムの一つで、慶應義塾大学の伊藤 公平 塾長がプログラムディレクターです。実は、私は伊藤 研究室の出身で、そこで量子コンピュータ開発への第一歩を踏み出しました。

量子ビットの数を増やしていくのは、ある意味分かりやすい指標です。しかし、今の量子ビットは、まだまだ非力でエラーも多い。そのため、基礎的な研究をおろそかにすることはできません。量子ビットの品質向上や素子の小型化、そして量子ビットの数を増やすための量子要素技術の研究開発が必要です。米国IBMの量子コンピュータは理研と同じ超伝導方式です。しかし、着実にビット数を増やしてきただけでなく、品質を上げることに力を注いでおり、性能がすごい。それと競り合っていくために、量と質の向上の一端を担えればと思っています。

状態から読み出します。ですから正確かつ、小型化・集積化が可能なマイクロ波の発生装置の開発はとても重要です。今回の64ビットの実機は、ERATOでの研究開発の成果が土台になっていますね。

## いずれは誤り訂正に取り組みたい

今回の実機にはまだ足りないものがあります。「誤り訂正」です。環境中のいろいろな雑音により、量子ビットのデータに誤りが生じます。従来のコンピュータにも誤り訂正の機能はありますが、量子コンピュータでは量子特有の性質から誤り訂正が難しいのです。

量子ビットでは0と1の間の全ての値を採れますが、誤りの有無を探ろうとそれぞれのビットを観測すると、0か1かに決まってしまう。そこで量子もつれという現象を使います。各量子ビットのペアをつくり、ペア相手の状態から量子ビットの状態を知る手法です。さらに面白い考え方を使います。「トポロジカル量子相」という不思議な秩序を持つ安定な相を観測によって動的につくろうとするものです。量子ビットを観測してもつれをつくり、安定なトポロジカル量子相をつくっていく。するとエラーになっているところに<sup>そせい</sup>素励起(=エラー情報)が対で生じます。これをうまくペアリングしてやると、誤りが訂正されるのです。最近の研究はこの方向で進んでいます。



**田淵 豊**  
(タブリ・ユタカ)

量子コンピュータ研究センター  
超伝導量子計算システム研究ユニット  
ユニットリーダー

誤り訂正の根本は符号理論で、情報科学です。私は、高専時代は情報工学専攻でした。大学以降は物理、電子工学が主領域ですが、いずれは情報に戻って誤り訂正に取り組めればと思います。

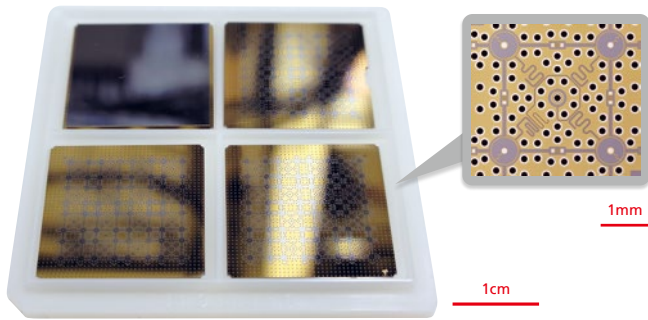
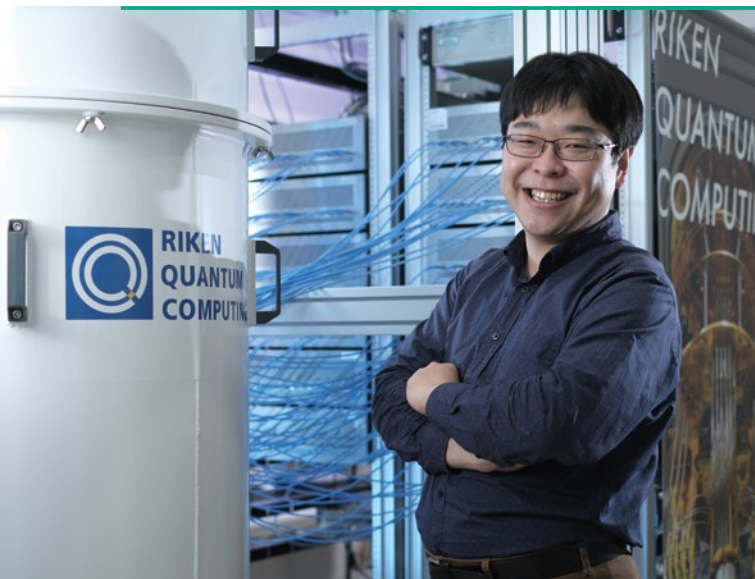


図1 64量子ビット集積回路チップ

(左) 量子計算を行う64量子ビット2次元集積回路チップ。4量子ビットからなる基本ユニットを16個並べた設計で、超伝導体である窒化チタン膜により金色に輝く。

(右) 四つの量子ビットからなる基本ユニットの模式図。正方形四隅に量子ビットが並び、中央に読み出し回路を配置している。



玉手 修平  
(タマテ・シュウヘイ)

量子コンピュータ研究センター  
超伝導量子エレクトロニクス研究チーム  
研究員

## パズル的な面白さが原動力

量子コンピュータとの関わりは一直線とは言えません。2007年、京都大学工学部の北野 正雄 教授(当時)の研究室に学部4年生のときに入り、量子光学の実験研究で学位を取りました。ですが、北野研に入った当時は量子光学の研究に特別興味を持っていたわけではありませんでした。学部時代に北野先生の著書『電子回路の基礎』を読んで、数学的に厳密に回路素子の動作をモデル化し、その上でデバイス設計をするというスタイルに興味を引かれていました。手を動かすことが好きだったので工学部に入りましたが、数学も大好きでした。一言で言えば、「パズル的な面白さ」が好きで、それが私の研究開発の原点になります。

大学院では2年上の物理工学科の藤井 啓祐さん(現 RQC 量子計算理論研究チーム チームリーダー)たちと議論を重ね、理論的な部分を鍛えられました。当時、藤井さんは日本で唯一と言っていいほど、誤り訂正に打ち込んでいた方で、量子コンピュータ開発に興味をもったのは、量子誤り訂正符号のパズル

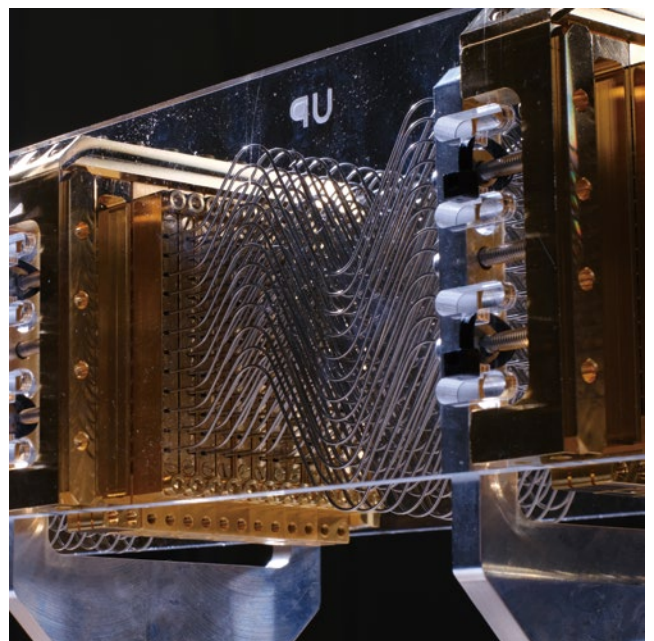
的な面白さに引かれた部分が大きいです。

学位取得後の2013年からポスドクとして理研の山本 喜久 グループディレクター(創発物性科学研究センター量子光学研究グループ、当時)のところで、光子量子コンピュータの実験を行い、その後、東大の中村研に特任助教として移って、超伝導量子コンピュータの研究開発に携わるようになりました。以後ずっと回路設計担当で、北野先生の著書に惹かれた興味の原点に回帰できました。そして約2年前にまた理研に戻ってきたのです。

## フィルター回路で高速に読み出す

今回の64量子ビットでは、とにかく多くの配線を限られた空間内にどう収めるかを考え、さらに新しい素子の設計開発も行いました。それが、計算結果の読み出し効率を上げるためのフィルター回路の設計です。量子ビットに当たったマイクロ波の反射波から計算結果が0か1かを高速に測定する必要がありますが、マイクロ波をあまり強く結合させると量子ビットの状態が壊れることがあります。量子ビットの状態を保ちつつ、測定操作を高速化させるためには、読み出し用のマイクロ波をきちんと通し、しかも量子ビットからの輻射は逃さないようなフィルターを間に設置する必要があります。64ビットでの設計業務は、始めはほとんど一人でやっていましたが、途中でこういった回路設計に長けている助っ人が現れました。オックスフォード大学からきたポスドクのピーター・スプリングさんと、最終的なものは一緒に設計しました。

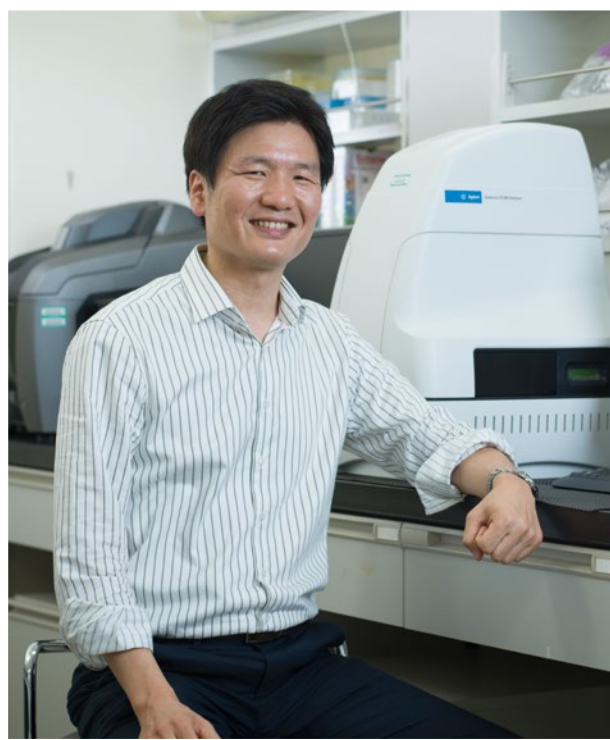
目標の144ビットについては、回路設計をどうやって単純化できるかを考えているところです。また、4量子ビットのユニットセルを並列に並べていったらどういう性能が出るのか、評価方法についても検討しています。このような評価は大規模化には必要不可欠です。大学院時代に面白さを知った誤り訂正も少し追いかけていますが、そちらの“原点回帰”はもっと先になりそうです。



私の  
科学道

生命医科学研究所  
統合細胞システム研究チーム  
リーダー

ユキ  
キ  
カツ  
ユキ  
柚木 克之



# 「システム生物学」で 分子生命科学に革新を

生命現象をシステムと捉える「システム生物学」。柚木 克之 チームリーダーは、生物のビッグデータや既存のデータベースを基に細胞内分子のネットワークを解明し、生命科学の方法論を刷新したいと考えている。生命システムを俯瞰的に眺める発想の源は、子どもの頃からの知的好奇心だ。

## 自分に合った理科を見つける

子どもの頃、算数や数学は得意だったのですが、正直、理科は嫌いでした。特に生物。植物各部の名称を覚えることなどが性に合わなかったのです。しかし中学3年生の頃、物体の落下が2次関数で表されることを知り、自然法則と数学がつながっていると分かった時に、理科の中には自分の性に合う分野もあるのだと気がきました。

科学者には新種を発見して分類するのが好きな博物学者タイプと、法則を発見して複数の現象を統一的に説明したいと考える自然哲学者タイプがいると思います。私の場合は後者でした。とくに惑星と地上の物体の運動法則を統一したニュートンを「すごい」と思う気持ちは年々強まっています。

## 辺境から俯瞰する

システム生物学は生命現象を「化学反応から成るシステム」と捉えて数式で表現します。大学ではこれに関心を持ち、肺炎の原因菌であるマイコプラズマの中で起きている化学反応や、ヒトをはじめとする真核生物の呼吸に関わる細胞小器官であるミトコンドリアの代謝をコンピュータ上に再現することに没頭しました。

この頃、システム生物学はまだ一つの分野として確立しておらず、学会でも「新技術・その他」のようなくくりで発表は会場の隅でした。いわば辺境からスタートした研究だからこそ、俯瞰的な見方で生命科学に革新をもたらす存在になり得るとも思っています。「これまでは生物のハードウェアを調べることに重点が置かれていた。しかしこれからは生物のソフトウェアを解明しなければならない」。当時の指導教授の言葉です。今もたまに思い出し「ハードウェアに偏っていないだろうな？」と自己点検しています。

## 細胞の中にある分子の地図をつくる

ヒトゲノムが解読されて20年、いまだに多くの遺伝子の機能がよく分かってい

ません。一つ一つを解明するには膨大な時間とコストがかかるので、システムの本質に迫るための大局的な方法論をつくりたいと考え、生物のビッグデータや既存のデータベースを基にした細胞内の分子ネットワークの地図づくりを進めています。この地図があれば治療の標的になる遺伝子や分子を効率的に見つけられるはずですよ。

競争相手のいない市場を、経済用語でブルー・オーシャンと呼びますが、私の研究テーマにもそういうところがあります。人が群がっている流行テーマにはなんとなく背を向けたくなるんですよ(笑)。競争相手が少ないと理解者も少ないので、「既にあるデータを集めて統合しただけでは？」と言われたこともありましたが、これに答えることは、自分の研究を高めることにつながりました。尊敬する実業家の稲盛 和夫さんの「能力は自分のためだけでなく世のため人のために使いなさい」という言葉を胸に、生命システムの根底にあるニュートンらの法則を信頼して、研究を進めています。痛快的サイエンスを突き詰めて、結果が世のため人のためになれば言うことなしですね。

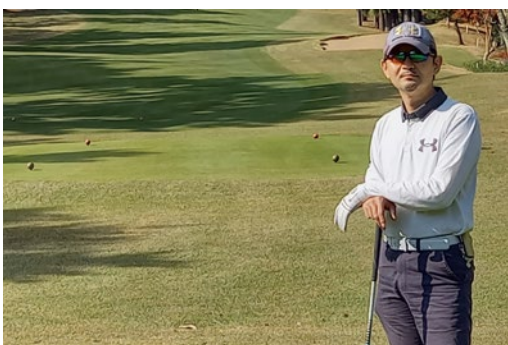
# 新たなる桃の発見 山梨での旅

黒川 原佳 (クロカワ・モトヨシ)

情報統合本部 情報システム部 部長

過日、山梨県へゴルフを楽しむための旅に出かけました。その際、地元特産の桃を試しました。やわらかく甘いその桃は非常においしかったです。この旅は桃だけでなく、他にも新しい体験がありました。それが甲州市勝沼の「ぶどうの丘」にある地下ワインカーヴです。そこには試飲用の甲州系のワインが200本近くそろっていて、赤白ロゼなど一体どれを選べば良いのか頭を悩ませました。悩むより飲もうとしましたが、すべてを飲むなんて無理だろうと思いつつ、選りすぐりのワインを楽しみ、すっかりいい気分になっておりました。次の日は勝沼周辺のワイナリー巡りをして、個性豊かで実力のある甲州・信州系のワインをさらに堪能したのでした。

後日、妻がたくさんの地元情報を提供してくれた山梨県出身の同僚に旅の報告をしたところ、その方は意外なことに困った顔で言ったそうです。「それは“山梨の桃”ではないです。今回はぜひ硬い桃を食べてください!」と。そのことを聞いて、私は混乱しました。それまで知っていた桃とは全く異なる説明なのです。しかし、話をよくよく聞くと、山梨の桃はもぎたての段階では果肉が非常にしっかりしており、りんごのように硬いのだと言います。われわれが購入したのは事前に収穫されて熟したお土産用だったようです。私はその話に驚き、そういうものがあるのかと思い、



筆者近影。ゴルフの腕前はまだまだですが、芝生を歩き、ショットに一喜一憂。心地よい気分転換となっています。



初めて出会った“山梨の桃”。まるまるとした見た目と鮮やかな色と甘い香りが印象的です。

次回山梨に行った際には、その硬い桃を食べてみようかと心に決めました。

それほど日を置かず、やはり硬い桃を食べてみなければと、再び山梨へと向かいました。今度もゴルフと桃狩りを目指す旅でした。桃農園に着くと、エリア内で自由に桃を選び、時間内に好きなだけ食べて良いとのこと。ちなみに木になっている桃は力強くつかんでみて少し弾力を感じるものが美味しいと教えてもらいました。その考え方には驚きました。「桃を力強くつかんでいいのだろうか?」と思いましたが、農園の方は木になっている桃は水分がしっかり回っているから、多少へこんでも次の日には元に戻ると教えてくれました。

そんな話を聞きながら、大きくておいしそうな桃を選び、皮をむいて試食してみました。地元の方はむかずにそのまま食べるそうですが、初心者であることを忘れず皮をむきました。食べた瞬間、その食感が私が思っていたものとは全く異なり、桃の甘さとりんごのような硬さが口の中で交錯しました。これは新たな発見であり、非常においしかったです。

ところが、硬い桃に触れて、こんなのは桃ではないと怒って帰る方もいると農園の方から聞きました。その話を聞いて私は思いました。「人間は物事に対して先入観や予断を持たずに触れた方が、新しい体験や驚き、人生を豊かにする材料がいっぱいあるのだな」と。

これまでと違う視点や価値観との出会いこそ旅の醍醐味。それを楽しめるみずみずしい感性を思い出させてくれた桃に感謝しつつ、次はどんな旅をしようかと思いを馳せるのでした。

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/)



高級ハルフ配合率90%再生紙を使用



この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。