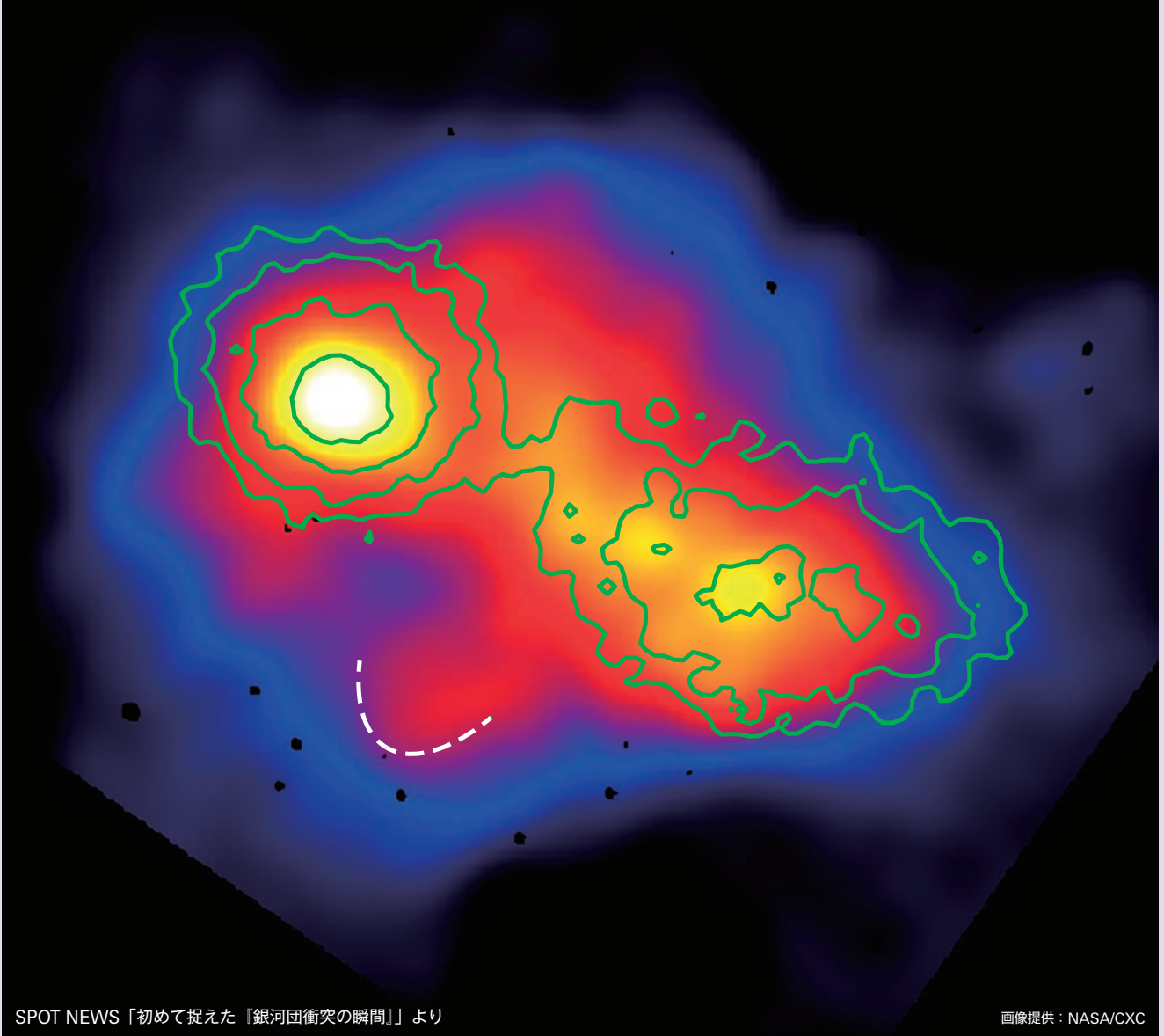


# RIKEN NEWS

No. **460** 2019 **10**



SPOT NEWS 「初めて捉えた『銀河団衝突の瞬間』より

画像提供：NASA/CXC

02 **研究最前線**

**染色体はどのようにしてつくられるのか？**

06 **特集**

**加速する理研の量子コンピュータ研究**

10 **特集**

**「京」から「富岳」へ**

12 **FACE**

アルツハイマー病の進行に関わるタンパク質を発見した研究者

13 **SPOT NEWS**

初めて捉えた「銀河団衝突の瞬間」

14 **私の「科学道100冊」**

三つのターニングポイント

15 **TOPICS**

- ・「科学道100冊2019」が始まります
- ・科学講演会2019
- ・神戸地区一般公開を開催

16 **原酒**

見えてきた銀河中心の  
超巨大ブラックホール

**科学道**

Dreams to the Future

染色体は、遺伝情報を母細胞から娘細胞へ、親から子へ伝えるという、生命にとって重要な役割を担っている。染色体には長大なDNAが折りたたまれているが、そのメカニズムは長年の謎だった。開拓研究本部 平野染色体ダイナミクス研究室の平野達也 主任研究員は、20年ほど前、染色体の凝縮に重要な働きをするコンデンシンというタンパク質複合体を発見、以来、この分野の研究を世界的にけん引してきた。2015年には、コンデンシンを含むわずか6種類のタンパク質があれば染色体ができることを明らかにし、大きな注目を集めている。生命現象の根本に迫る研究を紹介しよう。

## 染色体はどのようにしてつくられるのか？

### ■ DNAを1万分の1の長さに凝縮

染色体は、細胞が分裂するときに現れる棒状の構造体である。19世紀後半には光学顕微鏡で観察されており、分裂した細胞へ均等に分配されることから、遺伝情報を運んでいる担い手ではないかと予想されていた。しかし、染色体に含まれるDNAに遺伝情報が書かれていることが明らかになるのは、20世紀半ばを過ぎてからであった。「染色体の研究は100年を超える長い歴史がありますが、いまだに多くの謎が残されています」と平野主任研究員は言う。

染色体はDNAとタンパク質からつくられる。DNAは4種類の塩基が並んだ2本の鎖が対になった二重らせん構造を取っていて、遺伝情報は塩基の並び方で書かれている。ヒトの細胞が持つ

DNAは60億塩基対で、その長さの総計は2mに達する。ただし、DNAは細胞内で1本の長いひも状のまま存在しているのではなく、ヒトでは46本に分かれている。そして、それぞれがヒストンというタンパク質に巻き付いてヌクレオソームを形成し、ヌクレオソームが連なったクロマチンと呼ばれるコンパクトな構造を取る(図1)。これが、直径わずか0.01mmの細胞核に収められているのだ。細胞が分裂するときには、クロマチンがさらに凝縮して染色体がつくられる。46本の染色体の長さを合計すると、およそ0.2mm。2mのDNAが1万分の1の長さに凝縮されていることになる。

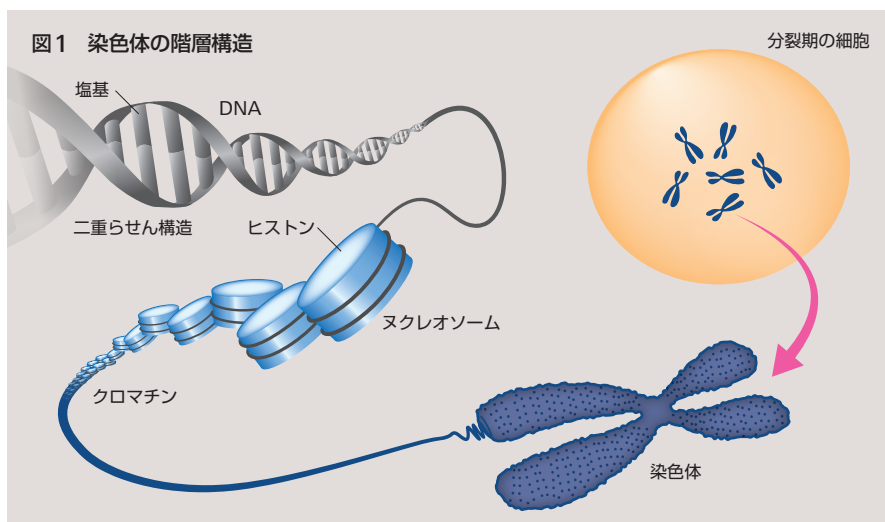
「1万分の1の凝縮というのは、東京スカイツリーの高さほどもある600mの細い糸を、高さ6cmの乾電池に収めるよう

なもの。力づくで押し込むと絡んだり切れたりして、染色体を正確に分配できなくなってしまうので、きれいに凝縮させる仕組みがあるはず。ところが私の大学時代の教科書では、クロマチンがどのように凝縮して染色体がつくられるか書かれていませんでした。分かっているのなら自分の手で解き明かそうと、染色体がつくられるメカニズムの研究を始めたのです」

### ■ 染色体凝縮の鍵、コンデンシンを発見

平野主任研究員は大学院生時代、分裂酵母の突然変異体の中から染色体の形が変化している株を見つけ、その原因遺伝子を突き止めようとしていた。「このやり方では染色体凝縮のメカニズムの本質にはなかなか到達できず、当時の遺伝学的手法の限界を感じていました。ほかのアプローチが必要だと考え、生化学的手法を学ぶために米国に渡りました」

そして、カリフォルニア大学サンフランシスコ校で研究していた1993年、アフリカツメガエルの卵から得られる抽出液に精子核を入れると、精子核のクロマチンから凝縮した染色体ができることを見いだした。卵抽出液を使った生化学的手法ならば、目的のタンパク質の働きを阻害したときに起きる変化の解析などから、そのタンパク質の機能に直接切り込んでいくことができる。「カエルの卵抽出液は染色体がどのようにつくられる



**平野達也** (ひらの・たつや)

開拓研究本部  
平野染色体ダイナミクス研究室  
主任研究員

1960年、千葉県生まれ。京都大学大学院理学研究科博士課程修了。理学博士。米国カリフォルニア大学サンフランシスコ校ポスドク研究員、米国コールド・スプリング・ハーバー研究所 准教授、教授を経て、2006年より理研で平野染色体ダイナミクス研究室主宰。2018年より現職。



かを試験管内で調べるには最適の実験系です。この実験系を手に入れたことで、研究が大きく動きだしました」

翌1994年には、この実験系を用いて染色体の凝縮に関わっている二つのタンパク質を発見した。そのタンパク質は現在、SMC2、SMC4と呼ばれている。染色体凝縮に関わるタンパク質の発見は、これが初めてだった。「遺伝学的な手法から生化学的な手法に思い切って変えたことが、良い結果をもたらしました」

平野主任研究員は1995年、DNAの二重らせん構造を発見したジェームズ・ワトソン博士が長年所長を務めていた米国コールド・スプリング・ハーバー研究所で新しい研究室を立ち上げた。そして、カエルの卵抽出液を用いた実験から、SMC2とSMC4がほかの三つのタンパク質と複合体をつくっていることを発見。この複合体を取り除いた卵抽出液では、染色体をつくる能力が完全に失われていた。このタンパク質複合体は染色体の凝縮において本質的な役割をして

いることから、凝縮を意味する英語のcondensationから「コンデンシン (condensin)」と名付け、1997年に発表した。

1998年には、バクテリアにもコンデンシンがあることが分かった。地球上にすむほぼ全ての生物がコンデンシンを持つということは、それが生命現象にとって重要であることを意味する。さらに、多くの真核生物が2種類のコンデンシンを持っていることが分かり、先に発見されていた方をコンデンシンⅠ、新たに発見された方をコンデンシンⅡと呼ぶことにした。コンデンシンⅡは、染色体の凝縮のほかにも多様な働きがあることが分かっている。

■ 接着を担うコヒーシンの登場

コンデンシンが発見された1997年には、染色体の構築に関してもう一つ大きな動きがあった。ほかの研究グループが出芽酵母を用いた遺伝学的手法によって、複製されたDNAからつくられる姉妹染色分体の接着に関わる遺伝子群を

発見したのだ。それらは、接着を意味する英語のcohesionから「コヒーシン (cohesin)」と名付けられた。

実は平野主任研究員も、コヒーシンが発見される以前から、コンデンシン以外にも染色体の構築に関わるタンパク質複合体があると予測し、卵抽出液からそれを見つけることを目指していた。そして1998年、コヒーシン複合体の精製に世界で初めて成功している。

「コンデンシンとコヒーシンは、どちらもSMCタンパク質を含む複合体であるという共通点がある一方、機能はそれぞれ異なります。二つがどのように協調して染色体をつくるのか、私はずっとそのメカニズムの解明に取り組んできました。2006年に理研で研究室を立ち上げても、その目標は変わっていません」

■ コンデンシンとコヒーシンの奇妙な形

コンデンシンとコヒーシンがいつ、どこで働いているか、その理解は進んでいる(図2)。DNA複製期の細胞ではDNA

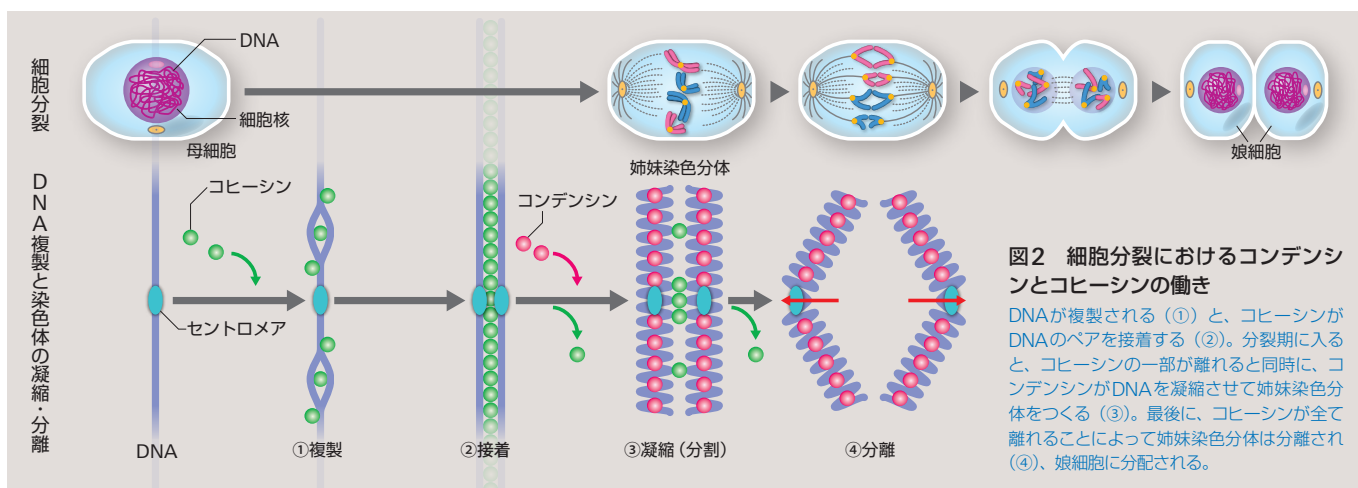
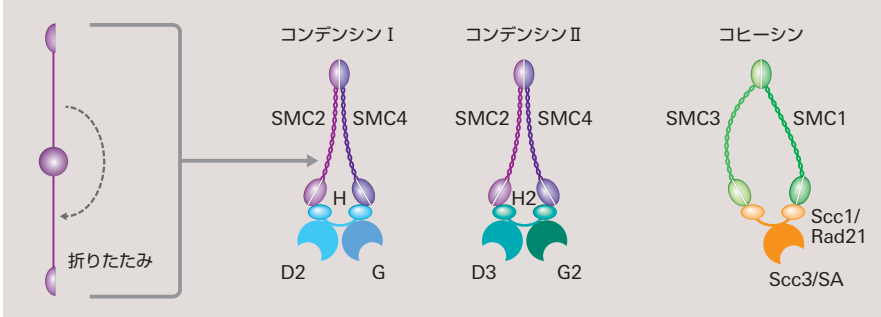


図3 コンデンシンとコヒーシンの特徴的な構造



の二重らせんが一時的にほどけて複製され、同じ配列を持った2本のDNAができる。コヒーシスは複製されたばかりの2本のDNAが離れ離れにならないように接着しておく役割を果たす。複製された2本のDNAを確実に娘細胞に分配するためには、複製後のペアを接着しておいた方が都合が良いのだ。分裂期に近づくと、コヒーシスの一部が離れると同時に、コンデンシンがDNAを凝縮させ姉妹染色分体をつくる。そして最後に、コヒーシスが完全に離れ、姉妹染色分体が分離される。

「両者の働きの概略は分かってきたものの、DNAやクロマチンとどのように相互作用して接着や凝縮を支えているのか、そのメカニズムの全貌はいまだによく分かっていません。コンデンシンとコヒーシスがまったく新しいタイプのタンパク質複合体であったことも、理解が遅れている一因です」

コンデンシンIとコンデンシンIIは、両者に共通する二つのサブユニット(SMC2とSMC4)と、それぞれにユニークな三つのサブユニットから構成されている(図3)。一方、コヒーシスはそれらの遠い親戚筋に当たる四つのサブユニットから構成されている。コンデンシンとコヒーシンの電子顕微鏡写真を初めて見たとき、平野主任研究員はとても驚いたという。SMCタンパク質が細長い形状を取るであろうことは、アミノ酸配列から想像できた。しかし、これまでに前例がないようなやり方で折りたたまれて

字構造をつくり上げていたのだ。

「コンデンシンとコヒーシンの奇妙な形を見たとき、DNAやクロマチンを束ねるのに都合が良さそうだと思います。実際にどのように働くのか、さまざまなモデルが提出され、現在もお活発な研究が続けられています」

■ 変異型コンデンシンで探る

平野主任研究員は、人工的に発現・精製したタンパク質を用いてコンデンシンを再構成することに成功している。そして、さまざまな変異型コンデンシンをデザインして、それらの機能を調べている。

手始めに、コンデンシンIのサブユニットの一つを欠損させ、卵抽出液でどのような染色体がつくられるかを観察した(図4)。コンデンシンIが正常に働くと、染色体に軸が形成され、軸の周りにDNAのループが規則的に並ぶ構造が形成される。サブユニットGを欠損したコンデンシンIでは、軸が細くなりループが大きく広がった。サブユニットD2を

関連情報

●2019年1月8日トピックス  
平野達也主任研究員が2018年度朝日賞を受賞

欠損したコンデンシンIでは、軸をつくることすらできなくなった。この結果からGは正常なループの形成に、D2は軸の形成に関わっていると考えられた。

研究には、コンピュータ・シミュレーションの手法も取り入れている。「実験とシミュレーションの両方で解析することで、コンデンシンによる凝縮の複雑なメカニズムを少しずつほどこしていこうとしています」

■ たった6種類のタンパク質から染色体をつくることができる

2015年、染色体凝縮の研究に大きな進展があった。「研究室の新富圭史 研究員(現 専任研究員)から、卵抽出液の代わりに精製タンパク質を使って染色体をつくることはできないか、という提案があったのです。当時は染色体をつくるのに何種類のタンパク質が必要なのか、まったく分かっていませんでした。正直に言うと、私はできるとは思いませんでした」と平野主任研究員は振り返る。

卵抽出液で形成された染色体には、

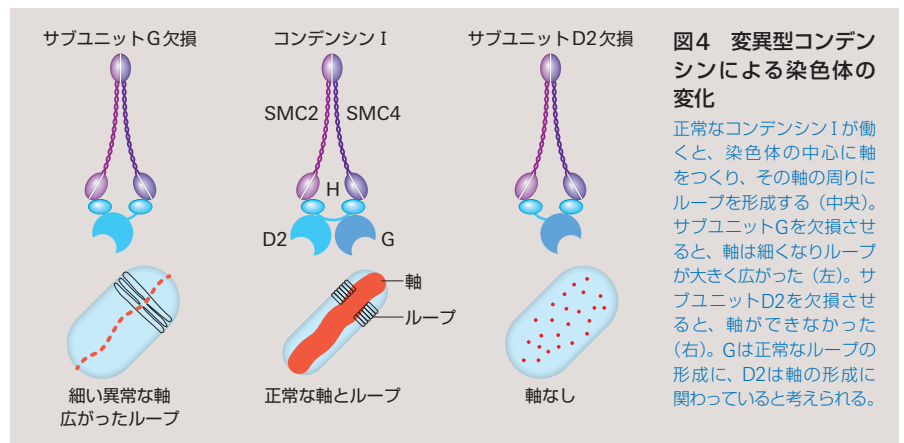


図4 変異型コンデンシンによる染色体の変化

正常なコンデンシンIが働くと、染色体の中心に軸をつくり、その軸の周りにループを形成する(中央)。サブユニットGを欠損させると、軸は細くなりループが大きく広がった(左)。サブユニットD2を欠損させると、軸ができなかった(右)。Gは正常なループの形成に、D2は軸の形成に関わっていると考えられる。

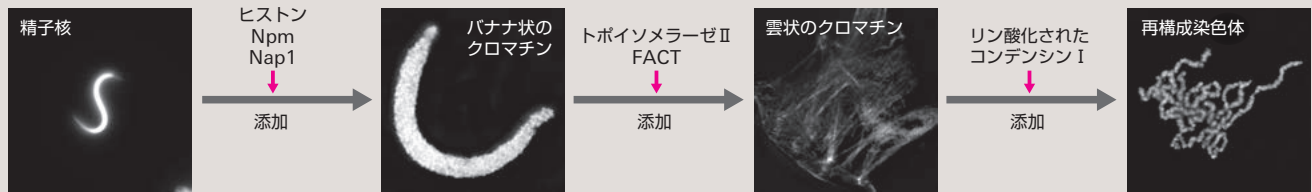


図5 6種類のタンパク質からの染色体再構成

試験管内で精子核に、ヒストンと2種類のヒストンシャペロン（NpmとNap1）を混ぜると、バナナ状のクロマチンができる。さらにトポイソメラーゼIIともう一つのヒストンシャペロンFACTを加えると、雲状のクロマチンへ変わる。最後に、リン酸化されたコンデンシンIを加えると、凝縮した染色体様構造がつけられる。これら6種類のタンパク質のうちどれか一つが欠けても、染色体は形成されない。

ヒストン、コンデンシンI、DNAの絡み合いを解消するタンパク質であるトポイソメラーゼIIが結合していることは、すでに分かっていた。この3種類は染色体をつくるために必須であるに違いない。また、ヒストンがうまく働くには、それを助けるタンパク質（ヒストンシャペロン）として、NpmとNap1と呼ばれる2種類が必要だと考え、合計5種類の精製タンパク質を準備した。そして、それらを試験管内で精子核と混ぜてみた。

「染色体はできませんでした。まだ何か足りなかったのです。そこで、卵抽出液から足りないタンパク質を精製していくという地道な実験に取り組んだ結果、FACTという別のヒストンシャペロンにたどり着きました。FACTを加えた6種類の精製タンパク質を使うと、見事に染色体をつくることができました。染色体の凝縮は複雑な現象だと考えていたので、わずか6種類のタンパク質で染色体ができたことに、私たちだけではなく世界中の研究者が驚きました」(図5)

平野主任研究員はコンデンシンは染色体の凝縮に一番重要なタンパク質であると確信していたが、この考えに対してはそれまで懐疑的な意見もあった。カエルの卵抽出液には何万種類ものタンパク質が含まれているため、コンデンシンのほかにも染色体の凝縮に重要な働きを持つ未知のタンパク質が存在するのではないか、という指摘があったのだ。「染色体の凝縮に必要なかつ十分なタンパク質を絞り込めたことで、コンデンシンが染色体の凝縮において最も重要であることを疑いの余地なく示すことができ

ました。そして、染色体をつくるには6種類のタンパク質があればいいと分かっただけで、そのメカニズムを考えることは格段に容易になります」

### ■ 第二のウェーブ到来

染色体の研究には、コンデンシンとコヒーシンの発見された1997年前後に第一の大きなウェーブがあった。斬新な研究成果が次々と生み出された時期だ。「続く2000年代は安定成長の時代でしたが、数年前からこの研究分野に第二のウェーブが到来しています。その背景には、染色体の立体構造を解析する新しい手法、Hi-C法の登場があります」

Hi-C法では、DNAがどのように折りたたまれているのかをヌクレオソーム数十～数千個の分解能で知ることができる。「顕微鏡とHi-C法による解析が相補的に働いて、コンデンシンやコヒーシンのような染色体構築の研究が大きく進みます」

2019年、理研の生命機能科学研究センター 細胞システム制御学研究ユニットの谷口雄一ユニットリーダーらがHi-C法を高度化したHi-CO法を開発した。Hi-CO法では、ヌクレオソーム1個の分解能で、しかもヌクレオソームがどちらを向いているかという配向まで知ることができる（『理研ニュース』2019年5月号「研究最前線」）。「染色体がつけられるとき、コンデンシンはクロマチンを束ねるだけでなくひねりを入れているらしいことが分かっています。Hi-CO法を使えばヌクレオソームの配向からひねりの情報を得ることができるはずです。解析に、

Hi-CO法を取り入れたいと考えているところだ」と平野主任研究員は展望を語る。

「生化学や遺伝学、細胞生物学だけでなく、物理学や物理化学、情報科学などさまざまな分野の研究者が参入しているのも、第二のウェーブの特徴です。染色体の謎を解くためには、これまで以上に多彩なアプローチが必要だと、研究者たちは気が付いたのです」

平野主任研究員は、コンデンシンの発見と染色体構築に関する研究により、2018年度の朝日賞を受賞した。朝日賞は、学術・芸術などの分野で傑出した業績を上げ、わが国の文化・社会の発展、向上に多大の貢献をした個人または団体に贈られる歴史ある賞である。「基礎科学を評価していただいたことを、とてもありがたく思います。近年、科学が社会や経済に与える有用性のみが評価される傾向が強くなっています。基礎科学とは本来どのようなものであり、どのような変遷をたどって現在の認識となったかを十分に理解した上で、未来の基礎科学はどうあるべきかを議論しなければいけません。私自身、あらためて科学史の本を読み直しているところです」

「受賞を励みに基礎科学を続けていきたい」と語る平野主任研究員。「進展の激しい研究分野でどれだけユニークで大きな貢献ができるのかを常に考えています。精製タンパク質から染色体をつくれるのは、世界で私たちだけ。この実験系を中心に、100年来の大きな問題の完全なる解明に向けて努力していきます」

(取材・執筆：鈴木志乃/フォトンクリエイト)

量子の性質を計算原理に用いる量子コンピュータの研究開発が

世界中の研究機関や企業で進められており、

近い将来、ある種の問題では従来のコンピュータを上回る

超並列・高速計算を実現できると期待されている。

創発物性科学研究センター（CEMS）では、

超伝導と電子スピンという二つの方式の量子ビットの研究開発を加速させ、

量子コンピュータの実用化を目指している。

## 加速する理研の量子コンピュータ研究

### ■ 量子の性質を用いて情報処理を行う

——量子コンピュータには、どんな特徴があるのですか。

**中村：**従来のコンピュータでも、量子力学の法則に従って電子が回路の中を動き回っています。しかし、情報処理の仕組みは量子力学の法則とは関係なく、電子が流れるか、流れないかを「1」と「0」に対応させた「ビット」をデータの基本単位として、AND、OR、NOTといった「論理ゲート」と呼ばれる回路で操作することにより、足し算や割り算などの計算を行います。

一方、量子コンピュータは「量子重ね合わせ」や「量子もつれ」という、一見不思議に思える量子の性質を用いて情報処理を行います。そこが根本的な違いです。従来のビットでは一度に表現できるのは1か0のどちらか一方ですが、量子コンピュータの基本単位である「量子ビット」は、量子重ね合わせによって1と0という2通りの状態を同時に表現することができるのです（図1）。ただし、量子ビットの状態を測定すると1か0のどちらか一方になります。例えば100回測定したとき、99回が1、残りの1回が0となる状態など、必ずしも1対1ではなく任意の比率で重ね合わせ状態をつくることができます。

図1 量子重ね合わせのイメージ

量子重ね合わせにより、1個の量子ビットで0と1の2種類の状態を同時に表現できる。

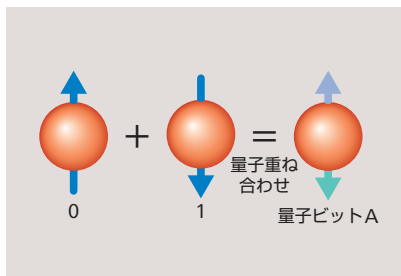
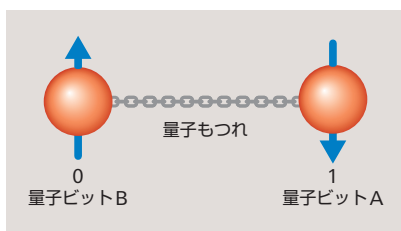


図2 量子もつれのイメージ

量子もつれは、例えば量子ビットAが1と測定されたときには、量子ビットBは必ず0と測定される、といった関係付けられた状態である。計算を行うには、論理ゲートで複数の量子ビットの量子もつれを操作する。



**樽茶：**「量子重ね合わせ」により、1個の量子ビットで「0」と「1」の2通り、2個の量子ビットであれば「00」「01」「10」「11」の4通り、という具合に、たくさんの量子ビットがあっても、その全ての組み合わせ状態を同時に表現できることになります。また、2個の量子ビットがあるとき、量子ビットAが0と測定された場合に、他方の量子ビットBは、測定しなくても必ず1となる、という関係付けを行える場合があります。そのような状態を「量子もつれ」と呼びます（図2）。このような性質を持つ2個の量子ビットを論理ゲートで操作することで、4通りの状態に対して同時に、そして高速に並列計算を行うことができます。量子ビットが1個増えるごとに一度に並列計算できる数は指数関数的に増えていき、3個で $2^3=8$ 通り、4個で $2^4=16$ 通り、50個ならば $2^{50}=1,000$ 兆通り以上の並列計算を高速で行えます。

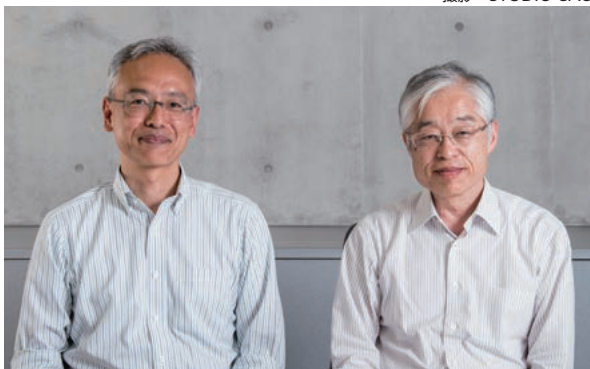
**中村：**このような量子コンピュータの原理が提案されたのは1980年代。そして1994年、量子コンピュータを使って素因数分解を行う計算手順が発表されました。次なる問題は、量子ビットを「どのような方法で実現するか」です。多くの実験系の研究者たちが、いくつかの方式の量子ビットの開発に取り組み始めました。

**樽茶：**その中で、現在主流となっている超伝導方式の量子ビットを、20年前に世界で初めて作製したのが中村先生です。

### ■ 10年後、100個の超伝導量子ビットで従来のコンピュータを超える

——超伝導方式の量子ビットとは？

**中村：**先行して光や溶液中の分子の持つ核スピンを用いた量子ビットが作製されていました。私は、核スピンや電子などに比べてサイズがはるかに大きな超伝導回路でも、量子に特有の状態を実現できるのではないかと考えていました。そして1999年、超伝導量子ビット回路を実現したのです。空中を進む光や溶液中の分子ではなく、固体中につくられた初めての量子ビットとして、大きく注目されました。現代の半導体集積回路のよ



右：樽茶清悟 (たるちゃ・せいご)

創発物性科学研究センター 副センター長、量子機能システム研究グループ グループディレクター

1953年、愛媛県生まれ。工学博士。東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了。日本電気株式会社 武蔵野電気通信研究所基礎研究部(現NTT基礎研究所) 主幹研究員、研究グループリーダー、ドイツ・マックス・プランク固体研究所 客員研究員、オランダ・デルフト工科大学 客員研究員などを経て、東京大学大学院理学系研究科教授(2005年3月まで)、同工学系研究科教授(2019年3月まで)。2012年より現職。

左：中村泰信 (なかむら・やすのぶ)

創発物性科学研究センター 超伝導量子エレクトロニクス研究チーム チームリーダー

1968年、大阪府生まれ。博士(工学)。東京大学大学院工学系研究科超伝導工学専攻修士課程修了。日本電気(株)基礎研究所 研究員、オランダ・デルフト工科大学 客員研究員などを経て、2002年、理研フロンティア研究システム フロンティア研究員。2014年より現職。2012年より東京大学先端科学技術研究センター 教授。

うに固体中ならば量子ビットを集積することが容易だろうと期待されたからです。2003年には、2個の量子ビットを量子もつれ状態にして計算する実験にも成功しました。これも固体中では初めてです。当時、作製した超伝導量子ビットは、現在と比べるとずっと精度の低いものでしたが。

——量子ビットの精度とは何ですか。

**樽茶：**先ほど紹介したように、例えば「量子重ね合わせ」でつくられた量子ビットの状態を100回測定したとき、99回は0、1回だけ1となるような状態を用意することができます。しかし、正確に制御しないと、98回が0、2回が1となるような、誤った状態もできます。どれだけ誤りを少なくして正しく制御できるか、というのが量子ビットの「精度」です。制御前に量子ビットを準備したり、測定したりするとき、また量子もつれ状態を用いて計算するときにも誤りが起きることがあります。

**中村：**量子ビットを操作している間に、外部からのノイズを受けて、量子重ね合わせが乱れて精度が落ちる場合もあります。量子重ね合わせ状態を保持できる時間を「コヒーレンス時間」と呼ぶのですが、私たちが初期に作製した超伝導量子ビットは、制御の精度も低く、コヒーレンス時間も1ナノ秒(10億分の1秒)のレベルと極めて短いものでした。量子コンピュータで問題の答えを導き出すには、量子ビットを何度も操作する必要があります。そのためには、制御の精度を高めるとともに、コヒーレンス時間を延ばさなくてはなりません。

——どのようにしてコヒーレンス時間を延ばしたのですか。

**中村：**超伝導体では、電子が対となって流れています。初期の実験では1 $\mu$ mほどの小さな超伝導回路の中の電極に、電子対が存在するか存在しないかを1と0に対応させました。回路が小さい方が、ノイズを受けにくいだろうと考えたからです。

しかし回路が小さいほど、超伝導電極表面の欠陥や不純物が量子ビットに与える影響が大きくなり、コヒーレンス時間が短くなるのが分かってきました。そこで、回路を大きくして欠陥や不純物の影響を小さくすることにしました。今では1mm弱の目に見える大きさの超伝導回路で量子ビットをつくることにより、コヒーレンス時間を100マイクロ秒(1万分の1秒)ほどと、初期よりも10万倍延ばすことができています。

——現在、研究開発中の量子ビットは、どのようなものですか。

**中村：**量子ビットをつくるには、1と0に対応させる二つの状態をつくり、重ね合わせる必要があります。私たちは超伝導材料でLC共振器と呼ばれる回路をつくり、その回路上で二つの状態をつくっています(図3・図4)。可視光や赤外線よりも波長が長く周波数が低い、すなわち極めて小さいエネルギーの電磁波にマイクロ波があります。超伝導体LC共振器ではマイクロ波の周波数、約10ギガヘルツ(ギガ=10億)で電流の振動が生じ、それに対応するマイクロ波の粒子(光子)が一つ存在する状態が「1」、存在しない状態が「0」となります。

——超伝導方式の今後の目標は？

**中村：**2016年10月から、5年計画の科学技術振興機構「ERATO 巨視的量子機械プロジェクト」を率っています。さらに2018年11月に文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)」内の「量子情報処理フラッグシッププロジェクト」

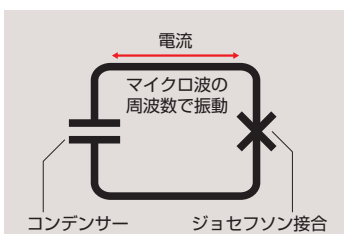


図3 最新の超伝導量子ビット

超伝導体LC共振回路の上でマイクロ波の周波数で振動する電流の形でエネルギーが蓄えられる。これに対応するマイクロ波光子が一つ存在する状態を「1」に、マイクロ波光子が存在しない状態を「0」に対応させる。ジョセフソン接合はコイルの役割を持つ。

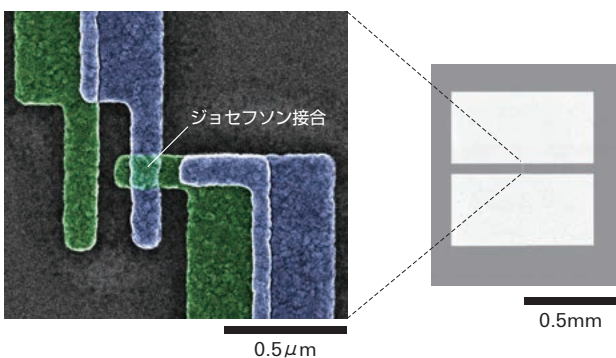


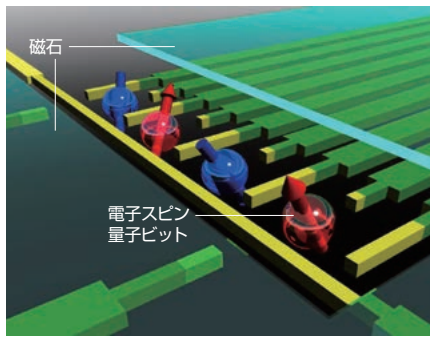
図4 超伝導量子ビットの顕微鏡写真

超伝導体LC共振回路を用いた量子ビット1個の光学顕微鏡写真(右)と、その一部を拡大した電子顕微鏡写真(左)。ジョセフソン接合は二つの超伝導体電極(青と緑に着色した部分)の間を薄い絶縁酸化膜で隔てた構造を持つ。

回路が小さいほど電極同士の距離も近くなり、その間に電界が集中する。そこに結晶の欠陥や不純物があると電界と結合し、量子ビットのエネルギーが奪われて量子重ね合わせが壊れやすくなるため、コヒーレンス時間が短くなる。そこで回路を1mm弱に大きくして電極同士の距離を広げて電界集中を防ぐことで、欠陥や不純物の影響を小さくしてコヒーレンス時間を延ばす工夫をした。

図5 電子スピン量子ビットのイメージ

半導体でつくった人工原子に電子1個を閉じ込めて、スピンの上向きと下向きを「1」と「0」に対応させる。量子ビットの操作にはマイクロ波を用いるが、その磁場成分は極めて弱いのでスピンの向きを変えることはできない。磁石で磁場をつくり、さらにマイクロ波で電子を左右に振動させることで、電子が磁場を感じてスピンの向きが反転する。



として、理研をはじめ東京大学、産業技術総合研究所が中心となり、さまざまな大学、研究機関、企業が参加する「超伝導量子コンピュータの研究開発」を開始しました。5年後に50個の量子ビット、10年後には100個以上の量子ビットを高精度で制御し、従来のコンピュータを上回る並列・高速計算を実現して、優位性を示したいですね。

### ■ 電子スピン方式の量子ビット

——一方、樽茶グループディレクターは電子スピン方式の量子ビットの研究開発を続けてこられましたね。

**樽茶:** 電子はスピンという自転に似た運動量を持つことで微小な磁石として働きます。私たちは1995年、半導体材料で人工原子という小さな入れ物をつくり、そこに電子を1個だけ閉じ込めて、スピンを制御したり測定したりする実験に世界で初めて成功しました。

私たちの実験を知った理論家が、電子スピンの量子ビットをつくるアイデアを発表しました。2006年には米国ハーバード大学の研究グループが、2個の電子で一つの量子ビットをつくりました。

一方、私たちは2008年、1個の電子で量子ビットをつくりました。スピンには上向きと下向きの2通りの状態があり、それを0と1に対応させたのです(図1)。

2010年には、2個の電子スピン量子ビットを量子もつれ状態にして計算を行う実験にも成功しています。私たちが開発した電子スピン量子ビットは、磁石を用いることがポイントです(図5)。磁石とマイクロ波を併用することで、スピンの向きを素早く反転させることができます。私たちが開発したその手法が現在、電子スピン量子ビットを操作する主流となっています。

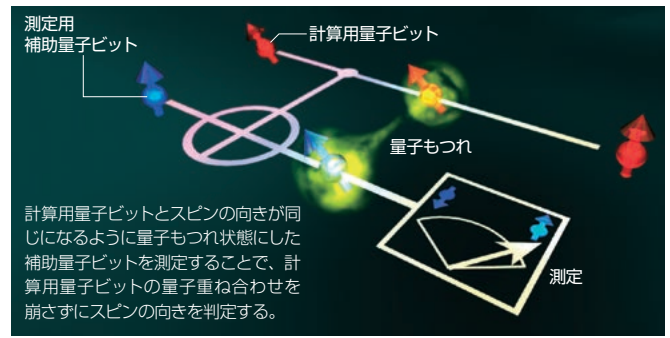
### ■ 量子ビットの精度を上げて集積化する

——電子スピン方式の課題は何ですか？

**樽茶:** 超伝導方式と同様に、まずは、制御の精度を高めることとコヒーレンス時間を長くすることですね。電子スピン方式では、扱いやすい半導体材料であるガリウムヒ素が用いられてきましたが、最近ではシリコンが主流になっています。

電子だけでなく、原子核にもスピン(核スピン)を持つものが

図6 電子スピン量子ビットによる量子非破壊測定イメージ



あります。ガリウムヒ素では量子ビット1個の電子の周囲にある100万個の核スピンの電子スピンと相互作用することが、コヒーレンス時間を短くし、誤りを引き起こしたりする原因になります。そのため、量子ビット1個を操作する精度は99%くらいが限界でした。つまり、たとえ100個の量子ビットを集積できたとしても、1回操作するだけで、どれか1個に誤りが発生してしまうのです。

私たちは2016年、核スピンを持たない質量数28のシリコン(<sup>28</sup>Si)を主成分とする天然のシリコンを用いて、量子ビット1個を99.6%の精度で操作することに成功しました。これは天然のシリコンを用いた場合の世界最高記録でしたが、最近、ほかの研究グループから99.7%を実現したという報告がありました。

天然のシリコンには、核スピンを持っている質量数29の同位体(<sup>29</sup>Si)が5%ほど混じっています。そのため、電子スピンの量子ビット1個につき100~1,000個の核スピンの相互作用します。私たちは<sup>29</sup>Siをできるだけ取り除くことで、量子ビットと相互作用してしまう核スピンを10個ほどに減らしました。そして2018年、その純化したシリコン中の量子ビット1個を99.9%の精度で操作することができました。超伝導方式ではすでに、量子ビット1個の操作を99.9%の精度で、さらに2個の量子ビットのゲート操作を99%の精度で行えることも報告されています。一方、電子スピン方式では、2個の量子ビットをゲート操作する精度はまだ95%程度にとどまっているので、それを99%に引き上げることが当面の大きな目標です。

**中村:** 精度が低いと、量子ビットを集積した分だけ誤りの数も増えてしまうわけです。たくさんの量子ビットで計算するには、超伝導量子ビットの精度も、さらに高める必要があります。前述のQ-LEAPでは100個以上の超伝導量子ビットで計算する際、量子ビット1個を操作する精度は99.95%、2個の量子ビットを操作して計算する精度は99.9%が目標です。誤りの原因となる超伝導回路上の不純物や欠陥をできるだけ減らし、量子ビットを高精度で制御する研究を進めています。

精度を上げると同時に、どうしても起きてしまう誤りを訂正しながら計算を進めていく仕組みの開発も必要です。

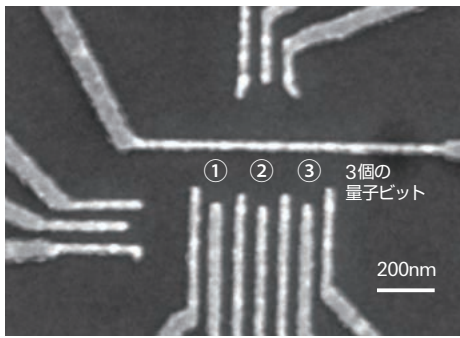
——どのようにして計算途中の誤りを訂正するのですか。

**樽茶:** それが量子コンピュータ開発の大きな課題です。誤りを



図7 電子スピン量子ビットの電子顕微鏡写真

電子スピン量子ビット  
1個のサイズは100～  
200nmほど小さい。



訂正するには、その前に、計算途中の量子ビットの状態を測定する必要があります。しかし測定すること自体がノイズとなり、量子重ね合わせが壊れて計算を続けられなくなってしまうのです。そこで私たちは測定用の補助量子ビットを用意し、計算用量子ビットとスピンの向きが同じになる量子もつれ状態をつくりました。そして2018年、補助量子ビットを測定することで、計算用量子ビットの量子重ね合わせを壊さずにそのスピンの向きを調べることに成功しました(図6)。

**中村:** 超伝導方式では2014年に、米国カリフォルニア州立大学サンタバーバラ校の研究チームが、5個の量子ビットを用いた回路の実験で誤りを訂正する基本原理を示しました。その研究が大きなブレイクスルーとなり、超伝導方式による量子コンピュータの研究開発競争に火が付いたのです。

**樽茶:** 電子スピン方式の研究者たちは、先行する超伝導方式で生み出された技術も参考にしながら開発を進めています。私たちの研究グループでは、3個の電子スピン量子ビットの回路で誤りを訂正する実験を進めています。しかし、高精度で誤りの訂正を行うには、2個の量子ビットを量子もつれ状態で操作する精度を99%以上にする必要があります。これを達成した後、5年後くらいには電子スピン方式でも5個の量子ビットの回路で高精度の誤り訂正を行うことを目指しています。これを当面の目標として、私たちのグループはQ-LEAP量子情報処理の基礎基盤研究の一つである「シリコン量子ビットによる量子計算機向け大規模集積回路の実現」に参加しています。

——超伝導と電子スピンの二つの量子ビットについて伺ってききましたが、両者の大きな違いはどこですか。

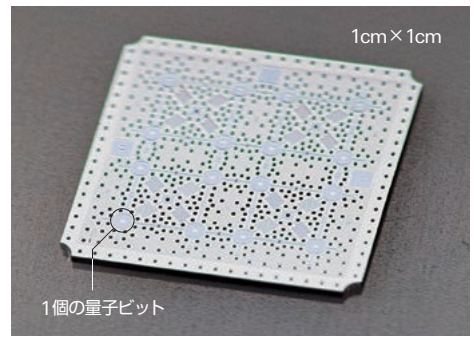
**樽茶:** 量子ビットのサイズです。電子スピン方式では量子ビット1個は100～200nmなので(図7)、単純計算では1cm四方に1億個のビットを集積できます。

**中村:** 超伝導量子ビットは、Q-LEAPで開発を進めているチップが1cm四方で16量子ビット(図8)、2cm四方で64量子ビットです。回路の配線の距離が近いと制御のための信号が混線しやすくなるので隙間を確保して、制御の精度を高めています。

**樽茶:** 電子スピン方式ではコヒーレンス時間が約100分の1秒と、超伝導方式より100倍ほど長いレベルを達成しています。ただしサイズが小さい分、制御が難しいという課題があります。

図8 Q-LEAPで開発中の超伝導量子ビットのチップ

1cm四方のチップに16  
個の超伝導量子ビットが  
つくり込まれている。



——将来、主流となるのはどちらでしょうか。

**中村:** まだ分からないですね。新しい方式が登場してくる可能性もあります。

### ■ 量子コンピュータで量子現象の本質を知る

——カナダ企業が開発した「D-Wave」という量子コンピュータが注目されていますね。

**樽茶:** それは量子アニーリング型と呼ばれ、量子ビットを用いますが論理ゲートを用いた計算は行いません。このタイプは、例えば、たくさんの色を塗り分けるとき、隣に同じ色が来ないように並べるといった「組み合わせ最適化問題」を解くことを目指しています。一方、私たちが取り組む、論理ゲートで計算するタイプは、量子ゲート型と呼ばれています。

——量子ゲート型で得意とするのはどのような問題ですか。

**中村:** 実は、それ自体も大きな研究課題です。Q-LEAP量子情報処理の基礎基盤研究では、複数のチームが量子ゲート型で具体的な問題を解くためのソフトウェアの開発を進めていて、私たちもそれらのチームと連携しています。

**樽茶:** 量子コンピュータは、量子力学の現象を理解するための計算に有効だと多くの研究者が考えています。量子力学の効果が大きく働く化学物質の性質を予測したり、素粒子や宇宙を理解したりするための計算に貢献できると期待されているのです。計算だけでなく、量子コンピュータの技術は量子現象を解明する強力な実験手法にもなります。例えば、先ほど紹介した電子スピンと核スピンの相互作用など、複雑な多体の量子現象を探る手段を提供できるでしょう。

**中村:** 量子力学は物理学の根本理論です。その量子力学の現象を操り、その性質を利用して機能を発揮するデバイスは、今まで存在しませんでした。それを初めて実現する研究の最前線は、とてもエキサイティングです。

**樽茶:** 量子を高精度で操ることで、量子現象の本質が初めて見えてくるかもしれません。それが面白いですね。量子コンピュータの研究開発は今、世界的にホットですが、これからの10年がとても大切です。今後10年で従来のコンピュータを上回る優位性を示すことができれば、実用化が加速的に進むでしょう。

(取材・構成: 立山 晃/フォトンクリエイト)

計算科学研究センター (R-CCS) では、  
2012年9月に共用を開始したスーパーコンピュータ「京」の運用を、  
2019年8月30日に完全に終了しました。  
現在、2021年ごろの共用開始を目指し、  
「京」の100倍のアプリケーション実効性能を持つ  
「富岳」の開発整備を進めています。

## 「京」から「富岳」へ

### ■ 2度のゴードン・ベル賞受賞をはじめ世界的な評価

「京」は、1秒間に1兆の1万倍=1京 (10ペタ) 回の計算性能を世界で初めて実現したスーパーコンピュータ (スパコン) です。半年ごとに発表されるスパコンの性能評価であるTOP500において、2011年6月と11月に世界1位に輝きました。

「京」の特長は、実際の科学技術計算に使われるアプリケーションの実効性能が高いことでした。2011年にはシリコン・ナノワイヤ、2012年にはダークマターを対象にした計算を「京」で実行した成果で、スパコンの世界で最も権威ある賞といわれるゴードン・ベル賞を受賞しました。また産業利用などのアプリケーションでよく使われる計算手法 (共役勾配法) の処理速度測定によって年2回ランキングを行うHPCG (High Performance Conjugate Gradients) で2016年11月、2017年6月および11月と3期連続で世界1位を獲得。ビッグデータ解析に必要なグラフ処理の幅優先探索問題の処理速度を競うGraph500 (年2回) で、2014年6月に世界1位を獲得し、2015年から2019年6月まで9期連続で世界1位を守り続けました。



図1 「ありがとう「京」シャットダウンセレモニー」の様子  
「京」の見学第一号だった兵庫県立北摂三田高等学校から出席した生徒さんらが見送る中、「京」の電源が落とされた。

### ■ 「京」の成果を「富岳」で発展させる

こうした高い性能を持った「京」は、さまざまな分野で数々の研究成果を上げました。ここでは「京」の成果の一例とそれらを後継のスパコン「富岳」でどのように発展させようとしているのか紹介しましょう。

#### ・ 巨大地震・津波の「想定外」を減らす

「京」は、東日本大震災で、巨大地震により引き起こされた、想定外といわれた強い揺れ、地殻変動、そして津波を一度に再現するシミュレーションを行いました。また、今後30年以内にマグニチュード8~9クラスの地震が70~80%の確率で起きると予測される南海トラフを対象に、そこで起き得るさまざまなパターンの巨大地震・津波のシミュレーションを実行。地震発生から時間を追って、各地でどれくらいの高さの津波が到達するか詳細に予測を行い、各自治体の防災計画、ハザードマップの作成に寄与しました。

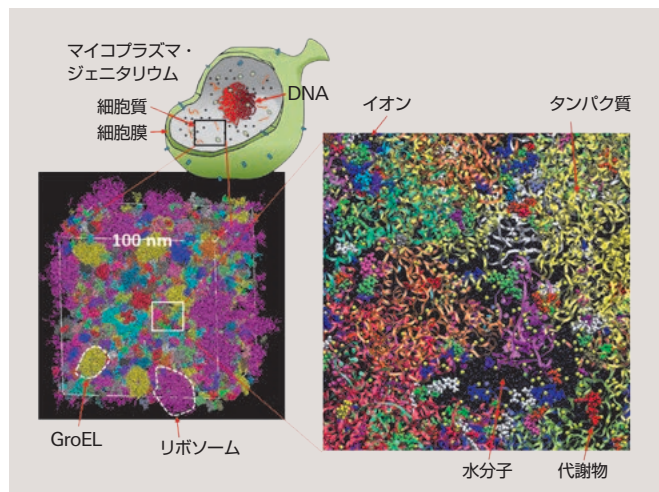
巨大地震・津波に備えるには、その規模に加えて、発生する季節や時間帯、場所、天気など、さまざまな条件下で、どのような被害が起き得るのか複合的に予測し、「想定外」を減らす必要があります。「京」では、災害が起こった場合の被害予測とそこからの復旧の予測を個々にシミュレーションしたのに対し、「富岳」ではこれらを複合的にシミュレーションすることが可能になると期待されています。「富岳」では、想定外をさらに減らし防災・減災に貢献します。

#### ・ 細胞内のタンパク質の動きを見る

細胞の内部 (細胞質) は、タンパク質をはじめとするさまざまな生体分子がぎっしり詰まった濃厚な水溶液の状態です。その中で生体分子が激しく動き回り、互いにくっついたり離れたりして機能を発揮し、細胞の活動が維持されています。その混み合った細胞質での生体分子の構造や動態、機能発揮のメカニズムについては、実験でも理論計算でも解明が難しく、原子・分子レベルの解像度では十分に理解されていませんでした。

理研と米国の研究者から成る国際共同研究グループは、「京」

図2 バクテリア細胞質の原子レベルのモデル



により世界最小のバクテリア（マイコプラズマ・ジェニタリウム）の細胞質に含まれるほとんどの生体分子の複雑な構造と挙動を原子レベルで解析することに成功しました（図2）。

このような研究は、生命現象の理解につながるとともに、創薬にも貢献します。病気の原因となるタンパク質に作用して、その働きを制御する分子が薬となります。これまで、多大なコストと時間をかけた実験による試行錯誤で薬となる分子が探索されてきました。それをシミュレーションに置き換えることで、薬効が高く副作用の少ない薬を短期間・低コストで探し出せると期待されています。

「京」では、病気の原因タンパク質と薬が結合する場面をありのままに描くことに成功しましたが、その薬がどのように結合したり離れたりするのかが、その様子までは計算できませんでした。「富岳」では、薬が病気の原因分子に近づくところから結合した後までを予測できます。しかも、「京」よりはるかに多く（数百倍）の組み合わせを調べることができるようになります。

・心臓シミュレータ

特定先端大型研究施設として、国内外に向けて広く共用資源として提供された「京」は、広い分野で研究の基盤を支えてきました。その成果の一つが、東京大学が開発した心臓シミュレータ「UT-Heart」です（図3）。ミオシンとアクチンというタンパク質の働きにより、心臓の筋肉が収縮することで心臓は血液ポンプとして機能しています。「UT-Heart」は「京」を使い、ミオシンとアクチンのレベルから心臓の動きをシミュレーションしたものです。心臓が活動する結果生じる心電図などの検査データも再現できます。

心疾患は常に日本人の死因の上位を占めています。「富岳」でも心臓シミュレータの研究開発をさらに進め、個人ごとの心臓の検査データを入力することで、心疾患の発症リスクを予測して予防に役立てたり薬の効果や副作用を予測したりすることを目指しています。

さらに「富岳」では検査データやゲノム情報などのビッグデータ解析と生体シミュレーションを組み合わせ、がんや脳・神経系などのさまざまな疾患の病態解明を進め、予防・早期発

図3 心臓シミュレータ「UT-Heart」  
画像提供：東京大学心臓シミュレータ「UT-Heart」  
HPCI戦略プログラム 分野1、理研

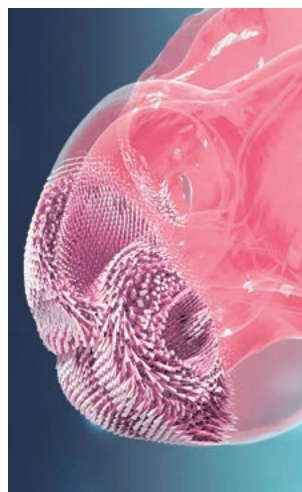


図4 車体の周りの空気の流れのシミュレーション  
画像提供：神戸大学、広島大学、理研、マツダ株式会社



見の手法や個人ごとに最適な治療の探索法の研究を進めます。

■「京」が変革し、「富岳」が躍進させる日本のものづくり

「京」の登場により、産業界でもスパコンの活用が拡大し、180社以上の企業が「京」を利用しました。理研は、産業界におけるコンピュータ技術を活用したものづくりCAE(Computer-Aided Engineering)を産学官連携でさらに推進するため、自動車用次世代CAEコンソーシアムと燃焼システム用次世代CAEコンソーシアムを設立しました。

例えば自動車の設計では、「富岳」を活用することにより、車体の周りの空気の流れ（図4）、ハンドル操作と車の運動、車内の騒音などを連携させて再現する統合設計システムをつくり、微細な設計変更で燃費や安全性、快適性などがどう変わるかを高速にシミュレーションして最適設計を実現することを目指しています。

■コデザインで始動する「富岳」

「富岳」の設計開発は、「計算機をつくる分野」と計算機を使って問題を解く「計算科学分野」が議論を繰り返し、協調して開発を行う「コデザイン (Co-design)」と呼ばれる手法で進められてきました。スパコン規模では世界的に見ても例のないことです。それが実現できたのは「京」という連携の核があったからです。

「京」が切り拓いてきた成果を礎に、「富岳」ではビッグデータ処理能力やAI(人工知能)への対応能力も強化します。「富岳」はその名の由来の富士山のように、高い性能と広いユーザー利用を目指し、世界の研究をリードし、新たな未来をつくり続けていきます。

【Society 5.0に向けた高性能計算科学研究支援及び研究者育成支援に関する寄附金のお願い】

理研では高性能計算科学に係る研究活動のご支援を募っています。ご支援頂いた方には、特典として「京」に搭載されていたCPU（シリアルナンバー付き）などをお送りします。

詳細は、<http://www.riken.jp/about/support/>よりご参照ください。

## アルツハイマー病の進行に関わるタンパク質を発見した研究者

日本では高齢化に伴って認知症の患者数が急増している。認知症患者の半数以上を占めるのがアルツハイマー病である。アルツハイマー病が進行する機構を明らかにし、治療薬の開発につなげようとしている研究者が、脳神経科学研究センター（CBS）にいる。神経老化制御研究チームの橋本翔子 基礎科学特別研究員（以下、研究員）だ。「性格なのでしょう、なかなか自分に自信が持てないんです。だからこそ、自信を持てるまで何度も検証する。それが私の研究スタイルです」。そう語る橋本研究員の素顔に迫る。



### 橋本翔子

脳神経科学研究センター  
神経老化制御研究チーム  
基礎科学特別研究員

#### はしもと・しょうこ

1984年、滋賀県生まれ。博士（理学）。関西学院大学理工学部生命科学科卒業。同大学院理工学研究科生命科学専攻博士課程修了。2012年、理研脳科学総合研究センター神経蛋白制御研究チーム研究員。2017年、同チーム基礎科学特別研究員。2018年より現職。

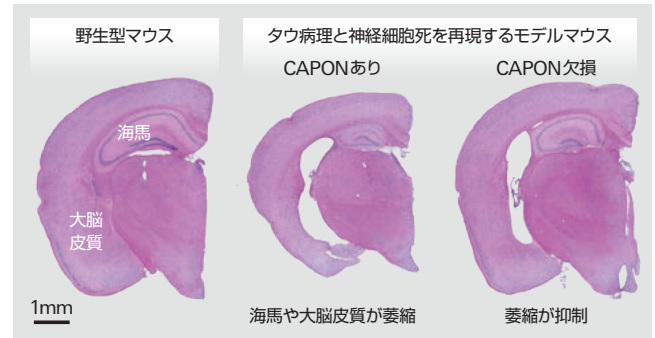
琵琶湖の近くで生まれた。小学生のころは、当時できたばかりで話題になっていた気象予報士の資格を取りテレビのお天気お姉さんになりたい、と思ったことも。3歳からピアノを習い始め、中学校と高校では吹奏楽部でクラリネット、パーカッションを担当した。音楽好きは今でも変わらない。

進路を決定付けたのは、高校の生物の授業だった。「ヒトゲノム計画が進行中で、遺伝子の機能を調べることで生物について分かるようになることを知りました。遺伝子の研究に興味を持ち、生命科学科のある大学を目指しました」。当時、関西の私立大学で唯一、生命科学科があった関西学院大学に進学。「大学院に進みましたが、修士課程を終えたら就職するつもりでした。ところがあるとき、自分は研究が好きだ、と気付いたのです。研究はパズルにも似ていて、問題を解く過程も楽しいのです。研究を続けよう決めました」

当時、プラスチックの原料のビスフェノールAが脳神経系に影響を及ぼすことが報告されていたことから、その機構の解明に取り組んだ。そして、ビスフェノールAが酵素であるプロテインジスルフィドイソメラーゼ（PDI）と結合すること、結合によりPDIの機能が阻害されることを明らかにした。PDIは、タンパク質が正しく折りたたまれるのを助ける働きをしている。

学位を取得すると、研究者としてどういうテーマに取り組んでいくべきか自問した。「何かを明らかにするだけでなく、

図 CAPONによるタウ病理・神経細胞死の促進



病気の治療薬につながるなど社会の役に立つことをしたい。PDIの研究経験からタンパク質の折りたたみの異常が発症に関わる病気を研究しようと、神経変性疾患をテーマに、2012年から理研脳科学総合研究センターで研究を始めました」

代表的な神経変性疾患であるアルツハイマー病は、アミロイドβタンパク質の断片が沈着するアミロイド病理が引き金となり、タウタンパク質が凝集するタウ病理を経て、神経細胞が細胞死を起こし脳が萎縮すると考えられている。しかし、どのように進行するのか、その機構はよく分かっていなかった。橋本研究員らはまず、CAPONというタンパク質がタウと結合することを発見。さらに、研究チームで開発したタウ病理と神経細胞死を再現するモデルマウスを用いて、CAPONはタウ病理と神経細胞死を促進することを明らかにした（図）。「この成果は新聞やニュースサイトなどでも紹介され、アルツハイマー病への社会の関心の高さを実感しました。CAPONの機能を阻害する薬を開発できれば、病気の進行を止められる可能性があります」。タウと結合するタンパク質を標的とするアルツハイマー病の治療薬はこれまでなく、新しいタイプの治療薬として期待できる。

現在は、アルツハイマー病で起きる神経細胞死の機構を明らかにしようと、研究を進めている。「CAPONによって引き起こされる神経細胞死には、さまざまな形態があることが分かっています。CAPONを介さない細胞死もあるでしょう。細胞死の全容が明らかになれば、細胞死を阻止し脳の萎縮を防ぐ治療薬の開発につながるかもしれません」

1歳の男の子の母でもある。「もう少し実験をやっておきたいのに、思うように研究に時間がかけられないこともあります。焦る気持ちがないわけではありませんが、今はほかの人とは比べないでいようと思っています」

今後は？「研究者としては長期のビジョンを持った方がいいのかもしれませんが、私はそのときにやりたいことを大事にしてきました。例えば5年後は、そのときにやりたいことをやっていたいですね」

（取材・執筆：鈴木志乃／フotonクリエイト）

## 初めて捉えた 「銀河団衝突の瞬間」

2019年7月8日プレスリリース

開拓研究本部 玉川高エネルギー宇宙物理研究室の<sup>グーリイ</sup>顧力意基礎科学特別研究員らの国際共同研究グループは、銀河団が衝突する瞬間に発生すると予測されていた衝撃波の存在を実際に観測することに、初めて成功した。

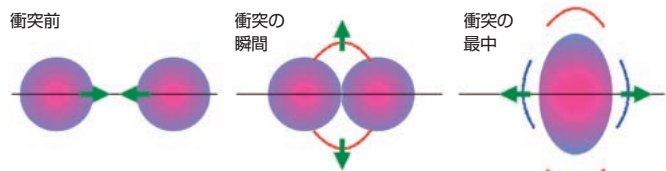
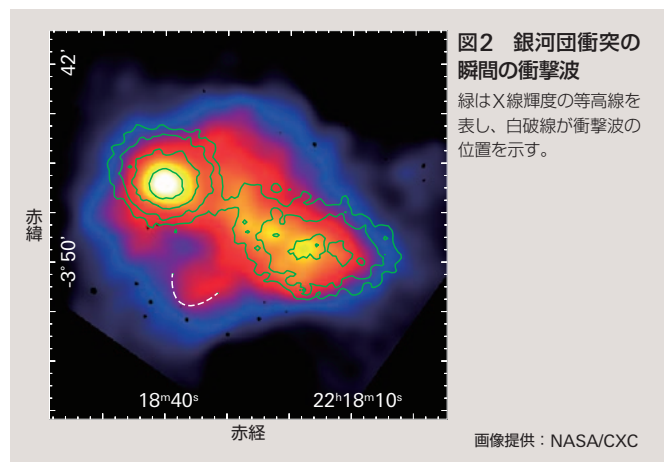
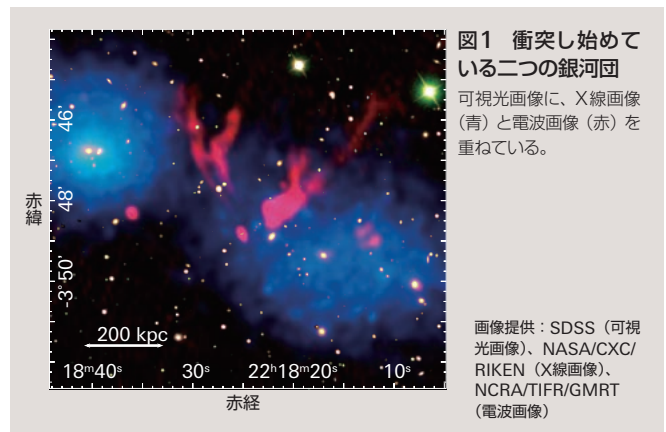
数百億～数千億個の星が集まってできる銀河が、さらに何百個も集まって形成されるのが銀河団だ。銀河団は宇宙最大の天体であり、約138億年前のビッグバン以降、互いに衝突・合体を繰り返すことで成長してきたと考えられている。

銀河団の直径は数億光年に達することから、銀河団同士の衝突現象は、その発生から合体が完了するまでに十億年程度が必要だと推定される。その時間は人間の寿命よりもはるかに長いので、人類がその全容を捉えるためには、異なる衝突段階にある何組もの銀河団を、スナップショットとして多数観測する手法を取るしかない。これまで、衝突が進んだ段階の銀河団は数多く観測されていたが、衝突が始まる「瞬間」はまだ観測されていなかった。

国際共同研究グループは、日本のX線天文衛星「すざく」をはじめ、米国や欧州のX線天文衛星や低周波電波望遠鏡、インドの電波望遠鏡を使った大規模な観測によって、地球から約12億光年離れた場所にある二つの銀河団が、まさに衝突し始めているという証拠を捉えることに成功した(図1・図2)。

まず、X線観測データから、二つの銀河団の間に7,000万度の高温プラズマが、約326万光年にわたる長大なベルト状に存在していることを突き止めた。その領域の端では高温プラズマの温度と密度が急激に下がっており、高温プラズマ中に衝撃波が存在すると考えられる(図2の白破線部分)。衝撃波の向きは衝突する二つの銀河団の進行方向(衝突軸)に垂直であることも明らかになった。このような衝撃波は、これまで確認されてきたような衝突が進んだ段階での衝突軸に沿った衝撃波よりも広大な空間に広がり、周辺の物質に大きな影響を与えると考えられる。

さらに、電波観測データから、二つの銀河団の間には約3,260光年にわたる直線状の電波放射が存在することも分かった。この放射は通常の天体で見られるような高周波(短波長)電波帯域では確認できず、低周波(長波長)でのみ明るいスペクトルを持っている。このことから、銀河の中心部にある天体などの強い放射によって一度加速された後、放射冷却などでエ



球の色は銀河団プラズマの温度を表し、赤が温度が高い領域、青が温度が低い領域、緑の矢印は銀河団および衝撃波の進行方向を示す。衝突の瞬間には(中)、赤円弧で示すように、衝突軸に垂直な方向へと衝撃波が走るが、衝突が進むと(右)、青円弧で示すように、中心部に衝突による加熱のため温度が高い領域が形成され、さらに衝突軸に沿った衝撃波が形成されると考えられている。画像提供: SRON/H. Akamatsu

ネルギーを失った電子が、銀河団衝突の衝撃波によって再加速された結果、生じたものと考えられる。

コンピュータによるこれまでのシミュレーションでも、衝突の初期段階、特に銀河団同士がまさに衝突した瞬間には、衝突軸の垂直方向に衝撃波が発生すると予測されてきた(図3中)。この衝撃波はより遠方まで伝播し、衝突による放出エネルギーを銀河団だけでなく周辺の大規模構造まで伝えると考えられる。本研究成果は、このような衝撃波を観測的に初めて確認したもので、今後、宇宙の大規模構造形成史の理解に向けた銀河団の進化過程とその基本原理の解明に貢献することが期待される。

●『Nature Astronomy』(2019年6月24日付)掲載

理研では、書籍を通じて、  
科学者の生き方・考え方や科学の面白さ・素晴らしさを届ける  
「科学道100冊」プロジェクトを進めています。  
理研の研究者たちは、どのような本に出会い、影響を受け、  
科学者としての生き方や考え方へつなげてきたのでしょうか。

## 三つのターニングポイント

菊地 淳 きくち・じゅん

環境資源科学研究センター 環境代謝分析研究チーム チームリーダー

昔も今も読書好きだが、子どものころは科学の本より歴史ものの小説やマンガを読むことが多かったという菊地チームリーダー（TL）。山が近い東京都の西多摩地区で育った。「毎日、多摩川や秋川の河原で遊んでいました。小学1年生のころは家庭や工場、農地からの排水で富栄養化し濁っていた川が、下水道の整備などが進み中学生のころにはアユの泳ぐ澄んだ川になりました。今から思えば、川の変動を目の当たりにした強烈な体験が、生態系や環境に興味を持つきっかけとなり、現在の研究へとつながったのでしょう」

大学では生物と化学、そして物質科学を学びたいと考えていた。テニス部に所属していたことや川遊びの延長から、ラケットや釣りざおに使われる最先端材料の開発にも憧れがあったからだ。それらを統合的に学べる学科に進んだ。

「振り返ると、大きな影響を受け最初のターニングポイントになった本が、デズモンド・モリスの『The Naked Ape(邦題：裸のサル)』です。英語の講義のテキストとして仕方なく読み始めたのですが、すぐに引き込まれました。動物行動学者である著者が、人間は体毛のないサルにすぎないという視点で人間の行動を分析し、人間としての生き方を説いています。興味の対象であった生物と自分自身が一気に近づき、人間も含めた生態系への関心につながりました」

大学院に進むと、より専門的な知識や技術を身に付けたいと思う一方、理系だけでいいのだろうか、自然界を研究対象とする理系と人間活動を研究対象とする文系の融合領域こそ面白く、自分がやりたいことなのではないか、という葛藤を感じ始めた。そんなときに読んだのが、フリッチョフ・カブラの『ターニング・ポイント』だ。「著者は物理学者で、西洋的な世界観である還元論から、東洋的な世界観である全体論的な考え方への転換を論じています。理系と文系の融合も全体論的な考え方であり、背中を押してもらったように思えました」

研究者になるならば新しい分野を切り拓きたい、と思っていた。「全体論とつながるキーワードが、複雑系でした。生態系や環境は多くの要素から成り、互いに影響し合って複雑に振る舞う、まさに複雑系です。科学の王道である還元論的に要素に分けていく方法ではなく、混沌としたものを複雑のまま捉える新しい手法を探ることにしたのです。『ターニング・ポイント』とミッチェル・ワールドロップの『複雑系』との出会

撮影：STUDIO CAC



いが私の第二のターニングポイントであり、全体論と複雑系を基調とする研究哲学の構築へとつながりました」

菊地TLは2004年に理研の研究者となり、その翌年に研究室を立ち上げた。「研究室の主宰者としてやっていくには、新しいアイデアが必要です。研究のヒントは、意外と身近なところにあるものです。そこで、身近な話題を扱っている新書をたくさん読むようになりました。第三のターニングポイントになったのは、このときに読んだ数々の新書でした。農水産業の環境と食、食の代謝と腸内細菌叢、排水処理と環境微生物叢など、身近な話題と先端研究をつなぐことで、社会の関心が高まっていく前にいち早く研究課題を設定できるようになりました」

そうした過程を経て菊地TLは現在、エコインフォマティクスと名付けた新しい手法で、人間活動を含む環境という複雑系を解析し、その変動を予測しようとしている。ビッグデータの解析には社会科学で用いられる手法も取り入れた。

読んだ本は、研究室の本棚に並べてある。「細部は忘れてしまっても、背表紙を見ると本質的な内容や感じたことを思い出すもので、本は見える場所に並べておくべきだ、という書誌学者・谷沢永一さんの著書を参考にしたのです」

歴史ものが好きなのは、今も変わらない。「歴史小説には、当時は無名だった人も登場します。なぜ彼らのことが伝えられているかという、手紙や日記が遺っているからです。私は、自らの足跡を歴史に遺したい。それが論文や本を書くモチベーションになっています。私の研究が今は認められなくても、文書として遺しておけば、将来誰かが見つけて評価してくれるかもしれませんからね」

(取材・執筆：鈴木志乃/フotonクリエイト)

## 「科学道100冊2019」 始まります

「私の『科学道100冊』」(左ページ)を6月号からスタートしましたが、お楽しみいただいていますか？

2017年に始まった「科学道100冊」プロジェクトは、書籍を通じて科学者の生き方や考え方、科学の面白さや素晴らしさを届けることを目指しています。これまでの大きな反響とご好評を受け、2019年からは毎年その年ならではの100冊を選書することになりました。

9月に発表した「科学道100冊2019」は、「元素ハンター」「美しき数学」「科学する女性」の3テーマによる選書50冊

と、時代を超えて読み継いでいきたい「科学道クラシックス」50冊で構成されています。

「科学道」とは理研がつくった言葉。過去の多くの科学者たちと未来の数々の科学者たちが、科学の力を信じ、社会への貢献を胸に歩む科学の道を表現しています。

10月27日～11月9日は読書週間です。読書の秋にぜひ「科学道100冊2019」を手にとって、未知に挑戦しながら未来を切り拓いていく科学者の生き方、考え方に思いをはせてみませんか？



## 科学講演会2019

理研の研究活動を紹介する「科学講演会」を、今年も文化の日に東京・丸の内で開催します。今年は、ライフサイエンス研究を支えるバイオリソース事業、南米チリにあるアルマ望遠鏡を使った次世代天文学、本誌2～5ページでも紹介している2018年度朝日賞を受賞したゲノムDNAの折りたたみについての研究を紹介する3講演のほか、数学者の小谷元子 理事による特別講演もあります。会場にて、「科学道100冊」展と理研グッズの販売も行います。

日時	2019年11月3日(日・祝) 13:30～16:30 (13:00開場)
場所	丸ビルホール(東京都千代田区丸の内2-4-1丸ビル7階)
アクセス	JR東京駅徒歩1分、地下鉄丸の内線東京駅・千代田線二重橋前駅直結
主催	理化学研究所
参加申し込み方法	参加無料。事前申し込み制・先着順(定員400名)。定員に達し次第締め切り。未就学児の参加はご遠慮ください。 <a href="https://www.riken.jp/pr/events/events/20191103/">https://www.riken.jp/pr/events/events/20191103/</a>
問い合わせ	理研 広報室 TEL: 048-467-9443 (直通)

## 神戸地区一般公開を開催

理研 神戸地区では「科学でわかる、科学がわかる」をテーマに今年も一般公開を開催します。神戸地区には3エリアがあり、西・東エリアでは「いきいき生きもん」をサブテーマに、顕微鏡やマイクロマンピュレーターなど実際に研究に使う機械を操作したり、白衣を着たり(写真左)、さまざまなクイズに挑戦

たりして、研究者気分を味わえます。南エリアでは「わくわく『富岳』」をサブテーマに、「京」の後継機であるスーパーコンピュータ「富岳」の試作機や工事中の計算機室を公開。スパコンをより身近に体感できるイベントや展示・講演もあります。雨天決行、東エリアでは理研グッズの販売も行います。



日時	2019年11月9日(土)10:00～16:30(入場は16:00まで)
場所	理研 神戸地区の下記3エリアで開催 西エリア:兵庫県神戸市中央区港島南町2-2-3 東エリア:兵庫県神戸市中央区港島南町6-7-3 南エリア:兵庫県神戸市中央区港島南町7-1-26
アクセス	西・東:ポータルライナー「医療センター」駅下車(西:徒歩3分、東:徒歩2分) 南:ポータルライナー「京コンピュータ前」駅下車(徒歩3分)
詳細	<a href="https://www.kobe.riken.jp/openhouse/19/">https://www.kobe.riken.jp/openhouse/19/</a>
問い合わせ	理研 神戸事業所 TEL: 078-306-0111 (代表)

# 見えてきた銀河中心の超巨大ブラックホール

水田 晃 みずた・あきら

開拓研究本部 長瀧天体ビッグバン研究室 研究員

米国のあるメディアが「世界中でおよそ40億もの人々が見た」とも報じた画像は、見事なドーナツ形をしていた(写真1)。2019年4月、国際共同研究プロジェクトチームがブラックホールシャドウの撮像に成功したと発表したのだ。いい観測ができたと以前から聞いてはいたが、予想以上の見事な観測結果に同じく宇宙を研究する者として興奮した。

撮像されたブラックホールは、だまぎん楕円銀河(M87)の中心に鎮座する超巨大ブラックホール。その質量は太陽の65億倍ほどと見積もられている。ブラックホールはアインシュタインが1915~16年に発表した一般相対性理論という重力を記述する理論から予言された。ブラックホールがつくり出す強い重力によって、「事象の地平面」という光さえも脱出できない領域が生じる。そのため、その名のとおりに暗黒の天体とイメージされがちである。

しかし、条件によっては非常に明るく輝くことがある。ガスがブラックホールに落ち込むような場合である。落ち込んでいくガスはその重力エネルギーの一部を熱に換え、事象の地平面に達する前に光を放つのだ。ブラックホールに入り込む前であれば光ははるか遠方の観測者にも届くため、観測によってブラックホールの存在を間接的にではあるが知ることができる。

ブラックホールの周辺からの光を見たときの特徴の一つが、今回観測されたブラックホールシャドウである。一般相対性理論に基づく計算によると、ブラックホールのごく近傍では、光は直進できずブラックホールの周りを周回する。軌道によってはブラックホールの重力に捉えられず、周回した後に出ていくことが可能であり、そのような軌道がある半径に集中することによって明るくなる。一方でその内側では光がブラックホールに吸い込まれてしまう。今回の観測ではガスの運動の影響もあってドーナツの部位に



写真提供：EHT Collaboration



写真1・国際共同研究プロジェクトチームが撮影したM87中心ブラックホール。ジェット形成の物理の理解が格段に進むだけでなく、ブラックホールシャドウ撮像そのものに対してノーベル物理学賞が贈られるのでは、と個人的にも期待している。

写真2・筆者近影。家族旅行で訪れた松本城にて長男と共に。

明るさのむらができたと考えられ、今のところ一般相対性理論と矛盾しない結果といわれている。

M87銀河は、少しズームアウトして見ると、細い棒状の明るい構造が銀河中心から銀河のサイズまで延びていることでも有名である。くしくも一般相対性理論の発表と同じ100年ほど前に発見され、当時は「光の矢」といわれ謎に包まれていたが、後に多くの銀河中心から同じような構造が発見され、ジェットと呼ばれるガス流が銀河中心付近から噴き出して矢のように見えることが分かった。ガス流はほぼ光速にまで加速されている。このジェット形成にもブラックホールが関わっているはずで、何でも吸い込むばかりと思われがちなブラックホールは、宇宙の加速器の役割も果たしているのである。しかし、強い重力を振り切って光速近くまで加速する「相対論的ジェット形成」問題は解決しておらず、宇宙物理学でも最大の謎の一つである。われわれの研究室では、数値流体実験によってジェット形成過程や伝播、放射の研究をしている。ジェットの根元に当たるブラックホールの表面近くの詳細な観測が今後進むことで、理論研究との答え合わせが可能となる日が、すぐそこまでやって来ている。

## 寄附ご支援のお願い

理研を支える研究者たちへの支援を通じて、日本の自然科学の発展にご参加ください。

問合せ先 ● 理研 外部資金室 寄附金担当

Tel: 048-462-4955 Email: kifu-info@riken.jp (一部クレジットカード決済が可能です)

