

# RIKEN NEWS

No. **452** 2019 **2**



研究最前線「植物はどうやって再生するのか？」より

02 研究最前線

## 植物はどうやって再生するのか？

06 研究最前線

## スキルミオンの新現象が見えてきた

10 記念史料室から

## コンピュータ開発史に輝く後藤英一の挑戦

14 **FACE**

高温プラズマから  
銀河の進化を読み解く研究者

15 海外事務所から

アジアと理研をつなぐ、  
シンガポール事務所

16 原酒

スポーツ科学との関わり

植物は、ヒトなどの動物と比べて高い再生能力を持つ。  
 小さな植物片からも完全な個体を再生できることは紀元前から知られ、  
 その高い再生能力は農業や園芸で活用されてきた。しかし、再生のメカニズムは分かっていなかった。  
 そうした中、環境資源科学研究センター（CSRS）細胞機能研究チームでは、  
 再生には傷のシグナルが不可欠であること、傷によって再生が誘導される仕組み、  
 また再生を抑制する仕組みなどを次々と解明。それらの知見を農業や園芸だけでなく、  
 動物における再生の理解に役立てることも目指している。  
 植物の再生研究の最前線を紹介します。

## 植物はどうやって再生するのか？

### ■ 再生ルネサンスの到来

「この数年は『再生ルネサンス』といわれるほど、植物の再生についての研究が再び活発になっています」と杉本慶子チームリーダー（TL）。そのきっかけをつくり、現在も先頭を走っているのが、杉本TL率いる細胞機能研究チームだ。

植物の再生は、身近なところでも見ることが出来る。例えば、枝や葉を切ると、根や葉が出てきて新しい個体になる（挿し木、葉挿し）。また種苗店やホームセンターなどでは、病気に強い品種の植物体の上に、きれいな花が咲く品種やたくさん実がなる品種の植物体をつないだ接ぎ木苗が売られている。接ぎ木の接続面は新たに分裂・増殖した細胞によって埋められ、水や栄養を運ぶ維管束もつながって一つの個

体になっている。

植物が高い再生能力を持っていることは古くから知られ、挿し木で植物体を増やすことは紀元前に書かれた旧約聖書にも登場する。1950～70年代に行われた研究で、1個の分化した細胞からでも個体全体を再生できること（分化全能性）が証明され、植物の再生研究が注目を集めた。そして組織の一部を取り出して試験管内の培地で培養することで植物体を増やす組織培養の技術開発が盛んに行われるようになり、農業や園芸で活用されている。一方で、杉本TLは「なぜ植物は再生できるのか、どのように再生するのかについては、分かっていません。植物の再生はあまりに身近であったために、その解明に挑む人がいなかったのではないのでしょうか」と語る。

### ■ 鍵となる遺伝子 *WIND1* を発見

再生ルネサンスは、当時基礎科学特別研究員として細胞機能研究チームに参画していた岩瀬 哲 研究員を中心としたカルスの研究が重要な発端になった。植物に傷が付くと、細胞の塊が形成されることがある。それがカルスだ。植物組織の培養によっても形成される。カルスは、特定の種類に分化していた細胞が分裂を再開し増殖したもので、細胞が再びさまざまな細胞に変化できる能力（多能性）を獲得（脱分化）していることもある。「岩瀬研究員は、まずカルス細胞と分化した植物体で発現している遺伝子を比較しました。そして、カルス細胞で強く発現している遺伝子を見つけたのです」と杉本TL。

その遺伝子について詳しく調べると、次々と興味深いことが分かってきた。まず、その遺伝子は傷口で非常に強く発現していた（図1上）。その遺伝子を過剰発現させたところ、傷を付けなくてもあらゆる器官でカルスが形成されるようになった（図1下・右）。逆に、その遺伝子の機能を抑えると、傷口でカルスが形成されにくくなった。

「これらの結果から、この遺伝子は傷口で起きる脱分化を促進する機能を持っていることが分かりました。そこで、この遺伝子を *WIND1* と名付け、2011年に発表しました。植物に傷が付くと脱分化が促進されるという現象は古くから

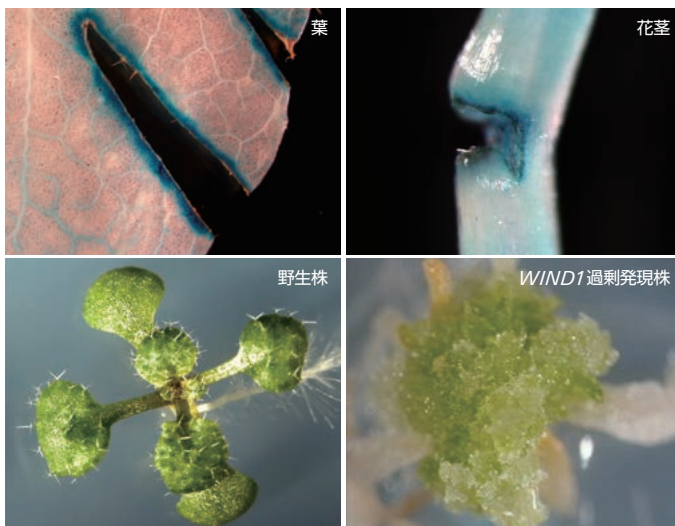


図1 *WIND1* 遺伝子の発見と過剰発現体  
*WIND1* 遺伝子は、傷口に近い細胞で特異的に発現が促進される（上・左右）。青く染まっている部分が、*WIND1* 遺伝子が発現している部位。*WIND1* 遺伝子をシロイヌナズナで過剰に発現させると、カルスを形成する（下・右）。下段左は正常な植物体（野生株）。

**杉本慶子** (すぎもと・けいこ)  
 環境資源科学研究センター  
 細胞機能研究チーム チームリーダー

1971年、広島県生まれ。大阪大学大学院理学研究科生理学専攻修士課程修了。オーストラリア国立大学大学院植物科学専攻博士課程修了。Ph.D. (植物科学)。英国ジョン・イネス・センター ポストドクトラルフェロー、グループリーダーなどを経て、2007年より理研植物科学研究センター 細胞機能研究ユニット ユニットリーダー。細胞機能研究チーム チームリーダーを経て、2013年より現職。



知られていましたが、その現象の仕組みを分子レベルで明らかにしたのは私たちが初めてです。これをきっかけに、植物の再生メカニズムを遺伝子やタンパク質など分子レベルで明らかにしようという機運が高まってきました」

WINDは傷口での脱分化の促進を意味する Wound Induced Dedifferentiation の略だが、この研究成果が植物細胞の脱分化や再生の研究に新しい風 (wind) を吹き込む契機となるように、という願いも込められている。

### ■ 再生は傷シグナルで始まる

「植物に傷が付くとWIND1遺伝子が発現し、細胞の脱分化が促進されることが分かりました。では、その後、どのようにして茎葉や根などの細胞へ再分化し、新しい植物体が再生するのか。次の研究として私たちは、傷から再生までをつなげて理解することを目指しました」と杉本TL。

WIND1遺伝子がつくるタンパク質WIND1は転写因子である。転写因子は、特定の遺伝子のプロモーターと呼ばれる領域に結合して、その遺伝子の発現を制御する。まず、WIND1によって発現が促進される遺伝子を探した。杉本TLいわく「あの手この手を駆使して」、WIND1はESR1遺伝子の発現を促進していることを突き止めた。

ESR1遺伝子がつくるタンパク質ESR1も転写因子である。そこで、ESR1が発現を制御している遺伝子も探索した。その結果、ESR1によって少なくとも5個の遺伝子の発現が促進されていることが

明らかになった。

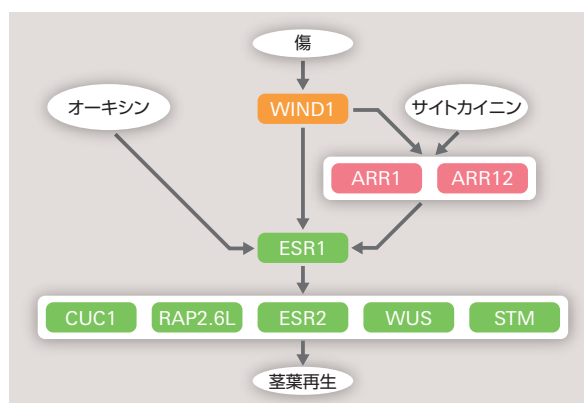
ESR1遺伝子は、茎葉の再生を誘導する遺伝子としてすでに報告されている。しかし、ESR1遺伝子が傷シグナルによって活性化されることはまったく知られていなかった。「私たちは、傷ができるとWIND1がつくられてESR1遺伝子の発現が促進され、次にESR1によってさらに別の5個の遺伝子の発現が促進され、その結果、茎葉が再生するという経路を明らかにしました(図2)。傷から再生につながる一連の分子経路を解明したのは、世界で初めてです」

この研究で明らかになったWIND1の下流にある遺伝子は、いずれも茎頂分裂組織(茎頂メリステム)で発現していることが分かっている。茎頂分裂組織とは、茎の先端で細胞が盛んに分裂し、新しい器官をつくっている場所である。「植物は、もともと持っている分子経路を利用して再生をしているのです。再生のためだけの特別な分子経路を用意するより、効率的なのでしょう」

この成果は2017年に発表された。杉本TLは、「この研究成果では重要なポ

イントがあと二つある」と言う。「一つ目は、植物ホルモンとの関係です」。植物ホルモンとは、植物によって生産され低濃度で植物の生理過程を調節する物質である。カルスに植物ホルモンの一つであるサイトカイニンを加えると茎葉ができやすいことが知られているが、その分子経路は分かっていなかった。杉本TLらの研究によって、傷ができてWIND1が発現している状態で、サイトカイニンとオーキシンという二つの植物ホルモンが適度に存在すると、ESR1遺伝子の発現がさらに促進されることが明らかになった(図2)。植物の生理過程は植物ホルモン抜きでは語れない。傷口の再生において転写因子と植物ホルモンをつなぐ経路の一端が初めて見えてきたのだ。

実験では、サイトカイニンとオーキシンを加えただけではESR1遺伝子の発現は促進されないことも明らかになった。「傷ができてWIND1が発現している状態で、という点が重要なのです。つまり、再生を起こすためには傷が不可欠なシグナルであることを意味します。それが二つ目のポイント。当たり前と思うかも



**図2 茎葉の再生を誘導するWIND1-ESR1経路**

傷シグナルによって発現する転写因子WIND1は、ESR1遺伝子のプロモーターに直接結合してESR1遺伝子の発現を促進する。このときオーキシンとサイトカイニンの両方が適度に存在することで、ESR1遺伝子の発現がさらに促進される。ESR1も転写因子であり、少なくとも5個の遺伝子の発現を制御することで、傷口でのカルス形成を促し茎葉の再生を促進していると考えられる。

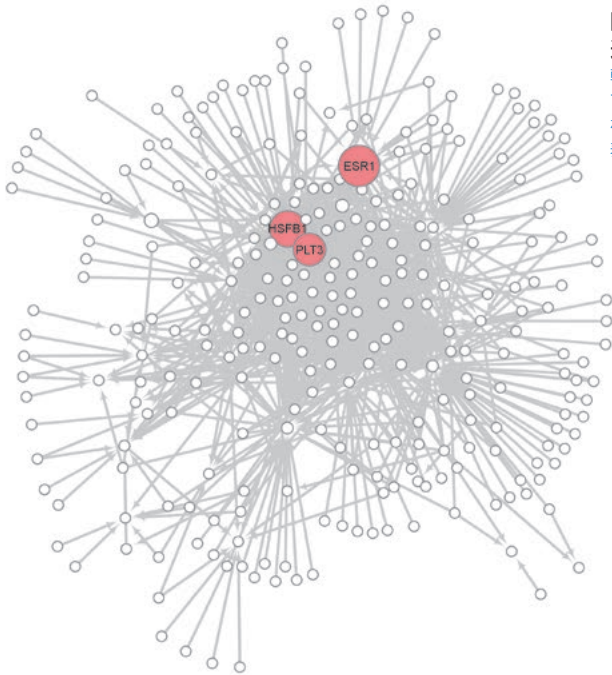


図3 植物の再生をつかさどる遺伝子制御ネットワーク

転写因子252個と遺伝子48個について酵母ワンハイブリッド法で大規模解析を行い、明らかになった制御関係を表している。

しませんが、傷シグナルは、これまで注目されていなかった新しい視点です」

### ■ 制御ネットワークが見えてきた

「特定の種類に分化していた細胞が脱分化し、さまざまな種類の細胞へ再分化して個体を再生する過程では、とても多くの遺伝子が働いています。しかも、互いに発現を抑制したり促進したりして関わり合い、複雑な制御ネットワークを構築していると考えられます。私たちは制御ネットワークの鍵である *WIND1* 遺伝子を発見しましたが、やはり制御ネットワークの全体像を知りたい。そこで、再生に関わる遺伝子同士の制御関係を網羅的に調べることにしました」

具体的には、細胞増殖、根や茎葉の発生、植物ホルモンのオーキシンやサイトカイニン、傷シグナルなど再生に関わると思われる転写因子を252個、制御ネットワークに重要と考えられる遺伝子を48個選び、どの転写因子がどの遺伝子のプロモーターに結合するかを調べた。転写因子がプロモーターに結合するかしないかは、酵母を用いたワンハイブリッド法で判定できる。しかし、調べたい組み合わせは252×48で1万2,000を超え、一組ずつ調べていくのは不可能だ。そこで半自動化システムを利用し、合計1,162個の相互作用を検出した。

「検出された相互作用を図にすると、制御ネットワークが複雑に絡み合った様子が描き出されました。中でも *ESR1* と *PLT3* は、複数の遺伝子と相互作用していて重要な位置にあることが分かりました」と杉本TLは解説する(図3)。*ESR1* は、*WIND1* によって発現が促進され再生において重要な転写因子であることを、すでに杉本TLらが明らかにしている。*PLT3* は、再生に関わっていることがほかの研究グループによって明らかになっている転写因子だ。

今後、各遺伝子について機能の解明を進める計画だ。一方で、さらに多くの遺伝子について制御関係を調べることも欠かせない。「植物の再生をつかさどる遺伝子制御ネットワークの全体像を正確に詳細に描く。それが一つの目標です」

### ■ 再生のブレーキをつかさどっていたエビジェネティクス

「植物は高い再生能力を持ちますが、勝手に再生を始めてしまっても大変です。必要なとき・場所以外では再生を始めないための仕組み、いわばブレーキがあるはず。私たちは再生を抑制する仕組みの一端を2015年に明らかにしました。この研究では岩瀬研究員と池内桃子 基礎科学特別研究員が素晴らしいブレークスルーをもたらしてくれました」

細胞機能研究チームでは、カルスに関わるさまざまな変異体入手し、詳細に解析をしていた。その中にポリコム抑制複合体2 (PRC2) を欠損した変異体があった。「PRC2の変異体は、芽生えがカルス化しやすいことが知られています。ところが、入手した変異体を観察すると、根毛細胞がカルスを形成していたのです。とても驚きました」(図4)

根毛細胞とは、根の表面にたくさん生えている毛状の細胞である。1本の根毛は細長く肥大化した1個の細胞から成り、根毛細胞は水分と栄養分を吸収するように特化している。「根毛細胞のように高度に分化した細胞が脱分化し、カルスを形成することは考えられないのです。しかも、カルスから不定胚と呼ばれる一種の胚組織が形成されました(表紙、図4)。胚は、種子の中に形成される幼植物体で、植物体をつくる全ての幹細胞を有しているものです。高度に分化した根毛細胞から胚ができるというのは、にわかには信じられませんでした」

そこで、カルスや不定胚が本当に根毛細胞の脱分化によって形成されたのかを明らかにするため、顕微鏡で詳細に観察し、写真や動画で追跡した。するとまず、PRC2変異体でも完全に分化が完了した根毛細胞が形成されていることが分かった。それにもかかわらず、その根毛細胞が分裂を始めた。分裂した根毛細胞がカルスを形成し、さらに不定胚を形成する様子を捉えることにも成功。「本来、分化が完了した根毛細胞は分裂することはありません。常識外れの現象ですが、細胞分裂の様子を動画で見れ



細胞機能研究チームの国籍も性別も多様なメンバー

関連情報

- 2018年2月15日プレスリリース  
植物の再生を司る遺伝子制御ネットワーク
- 2017年1月17日プレスリリース  
植物が傷口で茎葉を再生させる仕組み
- 2015年6月30日プレスリリース  
植物の分化全能性抑制の分子メカニズムの一端を解明
- 2011年3月11日プレスリリース  
植物細胞の脱分化を促進するスイッチ因子を発見

ば、疑う余地はありません」

杉本TLらは、PRC2変異体では分化が完了した根毛細胞がなぜ脱分化し、カルスを形成するのか、その理由を探った。すると、DNAの塩基配列の変化を伴わない遺伝子の発現制御であるエピジェネティクスが関わっていることが分かった。DNAは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、ヌクレオソームがたくさんつながってクロマチンという構造をつくっている。ヌクレオソームが凝集してクロマチン構造が閉じているか、ヌクレオソームの間隔が離れてクロマチン構造が開いているかによって、その領域にある遺伝子の発現のしやすさが変わる。これがエピジェネティクス制御の一例だ。

PRC2は、ヒストンにメチル基を付加

することでクロマチン構造を閉じた状態に変化させ、特定の領域にある遺伝子の発現を抑制する。杉本TLらがPRC2によって根で発現が抑えられている遺伝子を探索すると、脱分化を促進させるWIND3遺伝子や、胚発生を制御するLEC2遺伝子の発現が抑制されていることが明らかになった。PRC2は、再生が起きては困るところで再生に関わる遺伝子が発現しないようにしていたのだ。PRC2の変異体ではヒストンのメチル化が起きず、クロマチン構造が開いた状態になり、WIND3遺伝子やLEC2遺伝子が発現してしまう。その結果、カルスや不定胚が形成されたと考えられる。

これは植物の脱分化や再生を抑える仕組みの一端を明らかにした画期的な成果であり、大きな注目を集めた。「正常な植物体では、傷ができると1時間以内にPRC2によって抑制されていた遺伝子が発現します。その間にPRC2がかけているブレーキが外れるのではないかと考えています。しかし、その1時間に何が起きているのか、まったく分かっていません。それを明らかにするべく、研究を進めているところです」。また杉本TLは、脱分化や再生のブレーキは一つではなく、いくつもあると考えている。それらの探索も今後の課題だ。

■ 植物再生研究の先にあるもの

これらの研究はモデル植物のシロイヌナズナを用いて行われている。「シロイヌナズナを用いた研究で明らかになったことを、農業や園芸に応用したい」と杉本TL。植物は再生能力が高いといわれ

るが、再生が難しい植物もたくさんある。イネやトマトなどの作物でも再生できる品種は限られていて、例えばイネの中でコシヒカリは再生能力が低い。優良品種の量産や品種改良を目指す場合、そのような品種の再生能力をいかに高めるかが、大きな課題になっている。

現在、優良品種をつくるために遺伝子導入やゲノム編集が行われている。多くの場合、カルスをつくり、その段階で遺伝子導入やゲノム編集を行い、カルスを植物体に育てている。再生能力が低い植物では、カルスがつくれなかったり、そこから植物を再生できなかったりするため、遺伝子導入やゲノム編集ができないのだ。

再生のブレーキに関わる遺伝子が働かないようにしてしまえば再生がしやすくなるが、あちこちで再生が起きてしまっては困る。「PRC2の機能を阻害するなどエピジェネティクスを調整する薬剤を用いれば、必要なときだけ再生のブレーキを外すことができるかもしれません。それが実現すれば、優良品種を効率よくつくり出せるようになるでしょう」

植物の再生研究の応用先として期待されているのは、作物にとどまらない。「なぜ植物では再生が起りやすいのかが分かれば、なぜ動物では再生が起りにくいのかという問いへの答えのヒントが見つかるかもしれない。最終的には、どうしたらもっと効率的に動物で再生を起こせるのか、を理解したいですね」と杉本TL。「植物の再生は何て面白いんだろう。そう思いながら研究しています」

(取材・執筆：鈴木志乃/フォトクリエイト)

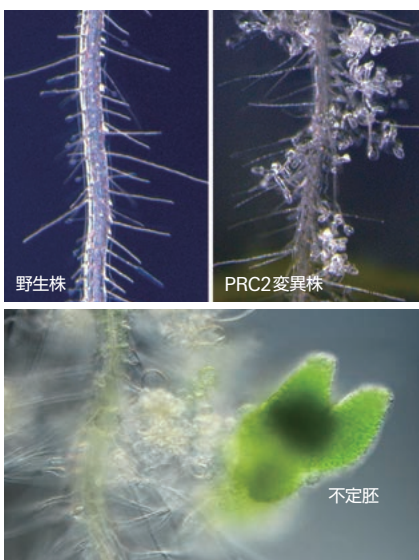


図4 PRC2変異体の根毛が分裂・脱分化し不定胚を形成する様子

上段左は正常な根毛（野生株）。上段右はPRC2変異体の根毛で、カルス化している。下は根毛細胞のカルスから形成された不定胚（胚のような多能性を持つ組織）。

創発物性科学研究センター（CEMS）の十倉好紀センター長らは、磁石の中のできる電子スピンの渦構造「スキルミオン」の研究を進め、従来の電磁気学では想定できなかった現象を次々に観測している。「物性科学の世界では今、重要な変革が起きつつあります」そう語る十倉センター長らによるスキルミオン研究の最前線を紹介しよう。

## スキルミオンの新現象が見えてきた

### ■ 室温スキルミオン物質を発見

電子は、スピンという自転に似た性質を持つことで、微小な磁石として働く。多くの電子スピンの向きが同じ方向にそろうことで、物質全体が磁力を持つ磁石（強磁性体）となる。

ある種の磁石に特定の温度で磁場をかけると、多数の電子スピンの渦を巻いた構造をつくり、1個の粒子のように振る舞うことがある。その磁気構造体がスキルミオンだ（図1左）。

ドイツの研究グループが中性子小角散乱法を用い、磁石の中に多数のスキルミオンが並んだ結晶状態を観察することに初めて成功したのは、10年前の2009年。ただし、その手法ではスキルミオン1個ずつを直接観察できるわけではなかった。

2010年、CEMS電子状態マイクロコピー研究チームの于秀珍チームリーダー（TL）は、薄膜試料に電子線を透過させるローレンツ電子顕微鏡法により、鉄（Fe）・コバルト（Co）・ケイ素（Si）

から成る $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ に現れたスキルミオンを1個ずつ直接観察することに世界で初めて成功した（図1右）。

さらに同研究チームは、極めて弱い電流でスキルミオンが移動することを確認した。スキルミオンの直径は数~100nm（1nmは10億分の1m）と極小なので、高集積化も可能だ。スキルミオンの有無を1と0に対応させるなどして情報の記録や計算に利用できれば、究極の省エネルギー情報技術を実現できると期待される（『理研ニュース』2015年2月号「研究最前線」）。

スキルミオンは特定の温度と磁場で生成されるが、当初、その温度は極低温に限られていた。室温以上で生成できなければ、スキルミオンを情報処理に広く応用することは難しい。

CEMS強相関物質研究グループの田口康二郎グループディレクター（GD）、徳永祐介 客員研究員（東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授）らは2015年、コバルト（Co）・亜鉛（Zn）・マ

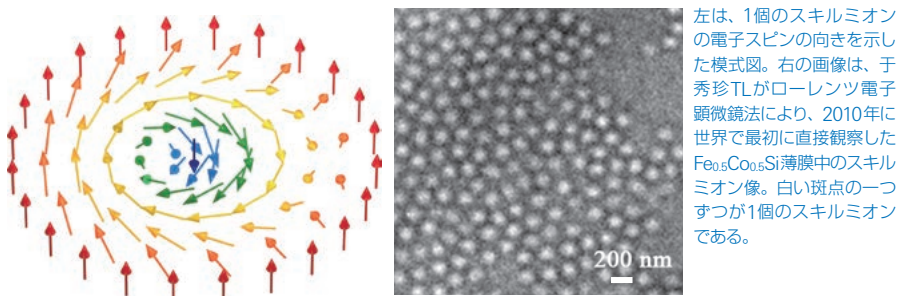
ンガン（Mn）の合金である $\text{Co}_x\text{Zn}_y\text{Mn}_z$ （ $x+y+z=20$ 個の原子）において、組成に応じて室温付近から70℃以上の高い温度でスキルミオンを生成することに成功した。

### ■ スキルミオンをポケットで持ち運べる手法を発明

スキルミオンを情報処理に応用するには、もう一つ大きな課題があった。特定の狭い温度・磁場領域を維持しないと、スキルミオンが安定して存在できないことだ。磁石の温度を高くしていくと、一定方向にそろっていた多数の電子スピンの向きが熱によって大きく揺らぎ始め、ある温度を超えると磁力は失われる。その温度を「磁気転移温度」と呼ぶ。スキルミオンは磁気転移温度直下の狭い温度・磁場領域でしか安定して存在できなかったのだ。

強相関物質研究グループの軽部皓介 特別研究員（以下、研究員）、田口GDらは2016年、この問題を解決する手法を発明した。「それは、先行する二つの研究に基づいて実現できました」と軽部研究員は語る。一つは、前述の徳永客員研究員らによる、室温でスキルミオンを生成する研究。もう一つは、CEMS動的創発物性研究ユニットの賀川史敬ユニットリーダー（UL）らによる、“急冷実験”だ（『理研ニュース』2017年5月号「研究最前線」）。

図1 スキルミオンの電子スピンの向きと直接観察像



### 十倉好紀 (とくら・よしのり)

創発物性科学研究センター センター長

1954年、兵庫県生まれ。工学博士。東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。1994年より東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻教授。産業技術総合研究所強相関電子技術研究センター長などを経て、2007年、理研グループディレクター。2013年より現職。



2009年にドイツでスキルミオン結晶が観察された物質はマンガンとケイ素から成るMnSiだが、スキルミオンが安定して存在できるのは、27~29K(約-246~-244℃)という極低温の狭い温度領域に限られていた。賀川ULらは、同じ物質を用いて27~29Kでスキルミオンをいったん生成した後、毎秒100度以上の冷却速度で急冷した。すると、23Kから絶対零度(0K=-273.15℃)付近までの広い温度領域でスキルミオンが存在し続けることを発見した。

鍵は「準安定相」だ。この言葉について少し説明しよう。例えば、炭素の結晶構造は地上の室温・大気圧では黒鉛(グラファイト)が最も安定な状態(安定相)だが、地球深部の高温・高圧力下ではダイヤモンドが安定相だ。深部のダイヤモンドをゆっくり冷やしながら室温・大気圧にすると黒鉛に構造が変化する。しかし火山の噴火活動などで短時間のうちに地上に運ばれて急冷されたダイヤモンドはそのままだ。この状態を準安定相と呼び、真の安定状態ではないものの、一度生成すると非常に長い時間(人間の時間感覚では、ほぼ永遠に)存在し続けることができる。

「私たちは、室温でスキルミオンができる $\text{Co}_8\text{Zn}_8\text{Mn}_4$ を冷やしてみました。室温でスキルミオンをいったん生成した後、1分間に1度程度のゆっくりとした速度で冷却しただけで、絶対零度付近・ゼロ磁場まで含めた非常に広い温度・磁場領域で、スキルミオンが準安定相として存在し続けることが分かりました」と軽部研究員は説明する(図2左)。

十倉センター長は次のように評価する。「 $\text{Co}_8\text{Zn}_8\text{Mn}_4$ には結晶構造内に原子配置の乱れが存在しており、それがスキルミオンの安定性に有利に働き、普通の冷却速度でもスキルミオンの準安定相が生成されたと考えられます。軽部さんたちは、特定の温度・磁場でいったんスキルミオンを生成して冷やすという、とても簡単な手法で、スキルミオンが存在できる温度・磁場領域を大幅に拡張できることを示しました。また、この手法を約120℃の高温でスキルミオンが生成する $\text{Co}_9\text{Zn}_9\text{Mn}_2$ に適用することで、室温かつゼロ磁場を含む環境にスキルミオンをつくり出すことにも成功しています。つまり、スキルミオンが存在する物質をそのままポケットに入れて持ち運べるようになったのです」

### ■ スキルミオン結晶の崩壊と再結晶化

「軽部さんたちの実験では、もう一つ重要な発見がありました」と十倉セン

ター長は指摘する。

「室温付近で生成されたスキルミオンは三角格子の結晶状態で観測されます。準安定相になってからさらに温度を下げると、その結晶が四角格子に構造変化したのです(図2右)。これはまったく予想外の現象でした」と軽部研究員。

多数の電子スピが集まって、直径数~100nmというスケールのスキルミオンをつくる。さらに多数のスキルミオンが集まり結晶をつくる。その大きなスケール階層にできるスキルミオン結晶の構造が変化し得ることが分かったのだ。

では、どのような変化が起き得るのか。于TLはローレンツ電子顕微鏡法を使い別の物質で調べてみることにした。鉄(Fe)とゲルマニウム(Ge)から成るFeGeを急冷して準安定相のスキルミオンを広い温度・磁場領域で生成し、磁場の強さだけを変えることでスキルミオンの結晶構造がどのように変化するかを観察した。準安定相のスキルミオンは、

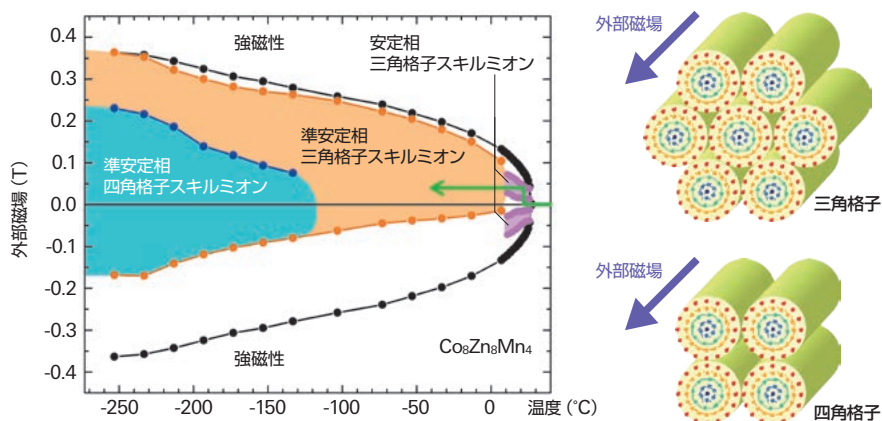


図2 室温を含む広い温度・磁場領域に存在するスキルミオン

$\text{Co}_8\text{Zn}_8\text{Mn}_4$ において、22℃・外部磁場0.04T(テスラ)で安定相スキルミオン三角格子を生成した後、外部磁場をかけたまま冷却した(緑色の矢印)。すると、広い温度・磁場領域で準安定相スキルミオンが存在し続け、さらに低温では四角格子に構造が変化した。

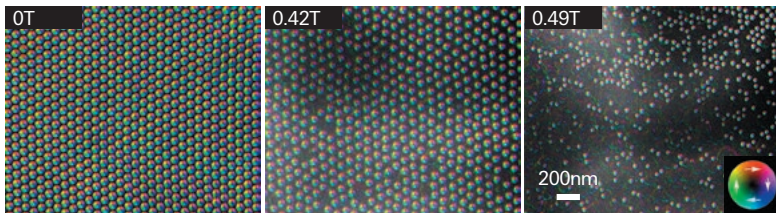


図3 スキルミオン結晶の崩壊

FeGe薄膜に0.1Tの磁場を加え、室温から極低温まで急冷すると広い温度・磁場領域に準安定相のスキルミオンが存在し続ける。極低温で外部磁場をかけないゼロ磁場にしても、スキルミオンは三角格子の密な結晶を保つ(0T)。外部磁場を強くしていくと、スキルミオンのない領域がランダムにでき始め(0.42T)、結晶が崩壊してばらばらになる(0.49T)。カラー粒子はスキルミオンのスピンの向きを色分けしたもので、右下方例が色とスピンの向き(矢印)の対応。黒色は薄膜試料に垂直なスピン。



左から、于 秀珍チームリーダー、十倉好紀センター長、軽部皓介 特別研究員。

ゼロ磁場でも三角格子の結晶をつくった。しかし、磁場を強くしていくとスキルミオンが存在しない領域が現れ、磁場をさらに強くすると、スキルミオンはばらばらになり、結晶が崩壊した(図3)。

「結晶が壊れた状態から、逆に磁場を弱めていくと、スキルミオンは三角格子をつくって再結晶化しました。このように磁場の強さで結晶構造を簡単に操作できる性質を、情報処理に応用できるかもしれません」と于TLは説明する。

■ スキルミオンを生成・安定化させる新しい要因を発見

スキルミオンは、主にキラルな結晶構造を持つ磁石で観測されてきた。キラルな構造とは、右手に左手を重ねても同じ形にならないように、鏡に映した形が元の形と重ならない構造のことだ。

「室温でスキルミオンを生成できるCo-Zn-Mn合金もキラルな結晶構造を持つ磁石です。この合金でマンガン比率を高くすると、磁気フラストレーションと

呼ばれる、磁石の性質とはまったく別の複雑な磁気相互作用が強くなります。私は、この磁気フラストレーションがスキルミオンにどのような影響を及ぼすのかを調べてみました」と軽部研究員。

Co-Zn-Mn合金の結晶構造には、正三角形が連なるネットワークがある。電子スピンの二つある場合、互いに反対向きの反平行に並ぶと安定する。しかし正三角形の各頂点にある電子スピンは二つが反平行になっても残り一つの向きが定まらず、安定しにくい。そのような状態が磁気フラストレーションだ(図4)。

軽部研究員らは、Co<sub>7</sub>Zn<sub>7</sub>Mn<sub>6</sub>に着目し、スキルミオンが生成される磁気転移温度直下の温度・磁場領域とは別に、磁気フラストレーションの影響が強く現れる低温領域でスキルミオンが新たに出現することを発見した(図5)。

十倉センター長は次のように解説する。「この新しい領域に出現したスキルミオンは安定相です。私は、キラルな構造に磁気フラストレーションが加わると、電

子スピンの渦構造の形成が妨げられるだろうと予想していました。しかし実際には、磁気フラストレーションがむしろ、スキルミオンの生成・安定化に有利に働くと考えられます」

スキルミオンがあると、物質中を通過する伝導電子は巨大な磁場があるかのように軌道が曲げられる。「それは極めて巨大な磁場で、私たちは『創発磁場』と呼んでいます。創発磁場は従来の電磁気学では想定していません。磁気フラストレーションが働くと、スキルミオンの直径が小さくなって非常に安定化し、さらに巨大な創発磁場を発生させます」と十倉センター長。

軽部研究員は、「CEMS内の最近の研究で、キラルな構造を持たず、磁気フラストレーションだけが働く物質でも、スキルミオンが生成できることが分かってきました」と続ける。「これまで、磁気フラストレーションが働く物質の研究は盛んに行われてきましたが、スキルミオンが生成できるかどうかは調べられていま

図4 電子スピンの磁気フラストレーション

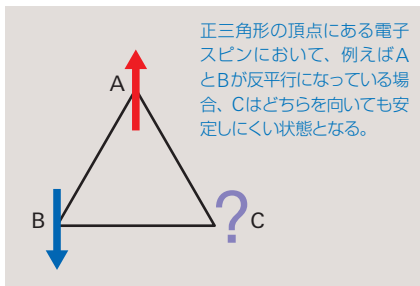
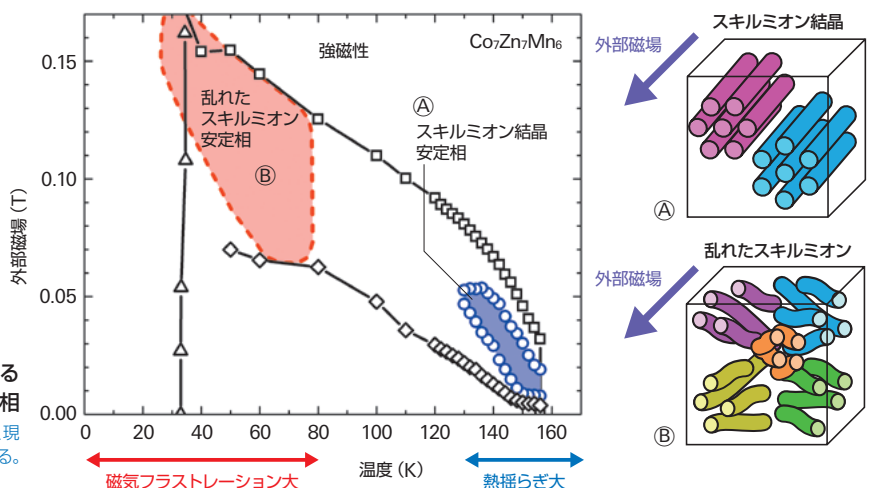


図5 磁気フラストレーションで生成されるもう一つのスキルミオン安定相

磁気フラストレーションが働くCo<sub>7</sub>Zn<sub>7</sub>Mn<sub>6</sub>では、その影響が大きく現れる低温の広い温度領域で安定相のスキルミオンが新たに出現する。それらのスキルミオンのひもは蛇行し、乱れた配置になる(ⓐ)。





関連情報

- 2018年12月6日プレスリリース  
磁気渦と反渦の正方格子を世界で初めて観察
- 2018年9月15日プレスリリース  
三次元的に乱れた新しいスキルミオン相の発見
- 2018年5月29日プレスリリース  
スキルミオン結晶の崩壊と再結晶化を直接観察
- 2018年1月30日プレスリリース  
磁気構造のトポロジーを用いた熱から電気への高効率変換技術
- 2016年9月20日プレスリリース  
室温スキルミオン格子の構造転移
- 2015年7月2日プレスリリース  
室温以上でスキルミオンを生成する新物質を発見

せん。今後、それを確かめる実験を進めていきたいと思ひます。想定外の現象をさらに発見できるかもしれません」

■ 磁石の中に現れるモノポール

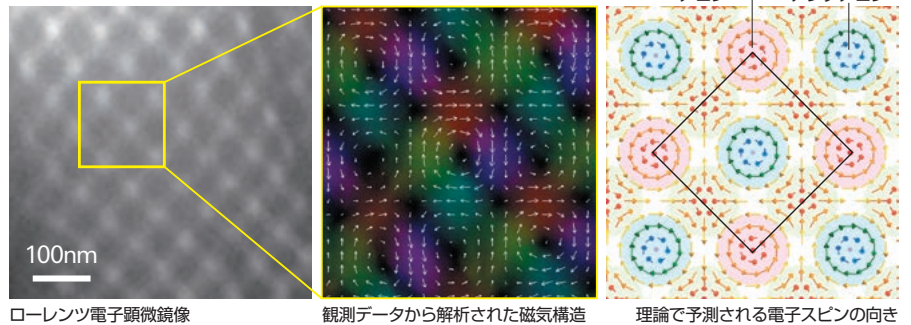
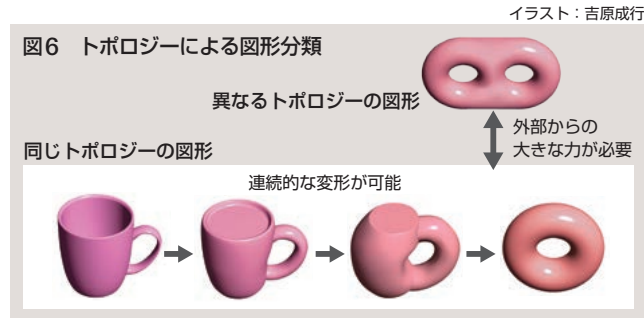
3次元で1個のスキルミオンを見ると、電子スピンの渦巻き構造が一方向に積み重なり、細長いひも状になっていると推測される(図2右・図5右)。直径は数~100nmほどで、長さは数mm~数cmに及ぶひもだ。仮に直径を10cmとすれば、長さ100kmという比率になる。

Co<sub>7</sub>Zn<sub>7</sub>Mn<sub>6</sub>では、磁気転移温度直下の温度・磁場領域にできるスキルミオンのひもは、直線状で規則正しく並ぶ。一方、磁気フラストレーションの影響が強くなる低温領域では、スキルミオンのひもは蛇行して不規則に並んでいることが観測データから推測された(図5右)。

十倉センター長らの実験によって、スキルミオンのひもがちぎれると、その切断面はN極だけ、あるいはS極だけの単極の磁石、すなわち「モノポール」のように働くことが分かってきた。

宇宙が誕生した超高エネルギー状態で存在したと考えられているモノポールだが、従来の電磁気学では想定外で、実験的にもその存在は実証されていない。ところが、スキルミオンのひもの切断面が電子に対してモノポールと同じように働いて、磁石の中で運動する電子の軌道を曲げることが確かめられつつあるのだ。宇宙誕生のときと似た現象が、磁石の中で起きていることになる。

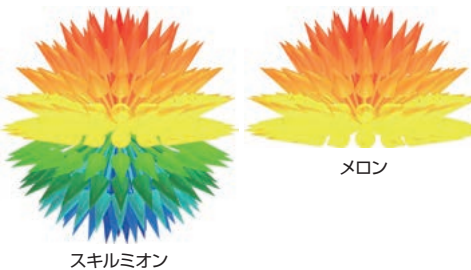
「S極とN極のモノポールに相当する、スキルミオンのひもの切断面を近づける



ローレンツ電子顕微鏡像

観測データから解析された磁気構造

理論で予測される電子スピンの向き



スキルミオン

メロン

図8 スキルミオンとメルンのトポロジー

トポロジーは連続変形を行っても変化しない量(トポロジカル数)を用いて、形を分類する理論である。スキルミオンをつくる電子スピンの矢印の始点を1点に集めると、終点は全球を覆うようにあらゆる方向を向く。そのトポロジカル数は-1である(左)。電子スピンの内向きの反スキルミオンのトポロジカル数は+1。  
一方、メルンの電子スピンの矢印の終点は全球ではなく半球だけを覆い、トポロジカル数は-1/2(右)。アンチメロンは電子スピンの内向きで、トポロジカル数は1/2である。

と、非常に大きな磁場の揺らぎが発生します。すると電子はどちらかに曲がればよいか分からなくなって、電気抵抗が大きくなります。また、その大きな磁場の揺らぎにより、熱を電気に換える熱電変換の効率が上がることも、私たちの実験で分かってきました。電子が強く散乱されると熱電変換の効率が上がるという理論があり、その効果が効いているのかもしれない」と十倉センター長は解説する。

■ スキルミオンで物性科学を変革する

多数の電子スピンの作るスキルミオンが、なぜ1個の粒子のように安定して存在できるのか。その理由は、トポロジー理論で説明される。それは図形を分類する理論だ(図6)。コーヒーカップは一つ穴のドーナツに連続的に変形できる。ただし、二つ穴のドーナツをつくるには、外部から大きな力を加える必要がある。コーヒーカップと一つ穴のドーナツはトポロジーが同じだが、二つ穴のドーナツはトポロジーが異なる。

スキルミオンもいったん生成されると、外部から大きな力を加えない限りトポロジーが変わらないため、安定して存在すると考えられているのだ。

于TLらは2018年、Co<sub>8</sub>Zn<sub>9</sub>Mn<sub>3</sub>において、スキルミオンとはトポロジーが異なる電子スピンの渦構造を発見した(図7・図8)。理論計算により予言された「メロン」「アンチメロン」と呼ばれる構造で、電子に対して創発磁場として働く。

「電子スピンの磁性とトポロジーが出合うことで、物性科学では今、重要な変革が起きています」と十倉センター長は指摘する。21世紀に入り、グラフェンやトポロジカル絶縁体、質量のないディラック電子、粒子と反粒子が同一のマヨラナ粒子など、新しい物質の状態や現象が次々と見つかり始めている(『理研ニュース』2010年7月号「研究最前線」)。

そうした中、十倉センター長らは、スキルミオンを主要な研究対象の一つにして、物性科学の変革を推し進めている。

(取材・執筆：立山 晃/フォトンクリエイト)

## コンピュータ開発史に輝く 後藤英一の挑戦

コンピュータ開発のパイオニアとして知られる後藤英一氏（1931～2005年）が理研情報科学研究所の主任研究員となったのは、およそ50年前の1968年である。自ら「研究者ではなく発明家」を標榜し、出願した特許の数は理研在職期間だけでも109件。これは創立百年を超える理研の歴史の中でも上位に入る数だ。その内容も、超高精度ブラウン管、可変面積型電子ビーム露光法、数式処理専用計算機FLATS、量子磁束パラメトロンなど多岐にわたる。

後藤氏は、なぜ、どのように、さまざまな研究開発に取り組んだのか。それらの技術や後藤氏の研究開発に対する理念は、現在どのように活かされているのか。また、天才と称されるその素顔とは。情報科学研究所の副主任研究員を務めるなど、1973年から約20年間にわたって後藤氏と共に研究開発に取り組んだ出澤正徳氏に聞いた。

### 安心して使える計算機をつくりたい

後藤英一氏の名前を一躍有名にしたのが、計算機の演算素子パラメトロンである。1954年、東京大学大学院の学生だった



後藤英一（ごとう・えいいち）

1931年、東京府生まれ。理学博士。東京大学大学院、助手、助教授を経て、1970～91年、教授。1968～91年、理研情報科学研究所 主任研究員。1989年、紫綬褒章受章。1991～96年、理研後藤特別研究室 特別招聘研究員。1991～2004年、神奈川大学理学部教授。2005年逝去（74歳）。

写真は、1956年12月、東京大学の研究室にて。『アサヒグラフ』1957年新年特大号「世界に知られた日本人」に掲載。（提供：朝日新聞社）

後藤氏は、所属していた研究室の教授だった高橋秀俊氏の指導のもとパラメトロンを発明した。当時は真空管を用いた計算機が主流だったが、安定せず、壊れやすいという問題があった。安心して使える計算機をつくりたい、という思いで試行錯誤の末に発明したのが、パラメトロンである。パラメトロンは、フェライトという磁性体のリングを芯にして周りに導線を巻いたフェライトコイルから形成されている。パラメトロンという名前は、パラメトリック励振という振動状態の位相を利用して演算を行うことに由来する。

後藤氏らは1958年、パラメトロンを用いた計算機「PC-1」を完成させた。パラメトロンは真空管に比べて動作が安定し、寿命が長く、また安価であったことから、パラメトロン計算機が日本の複数の企業によって次々と製品化された。だが、程なくトランジスタの性能向上によって、安定性が高く動作速度が速い計算機が普及し始めた。そのため、パラメトロン計算機の製品化や利用は国内にとどまり、1961年を最後に新しい製品は出ていない。とはいえ、パラメトロンが計算機の開発史に大きな足跡を残したことは間違いない。日本の計算機開発は米国より10年遅れてスタートしたといわれるが、パラメトロンの登場によって一気に米国に肩を並べるまでになったのだ。

### 私は研究者ではない、発明家だ

後藤氏は1968年、理研情報科学研究所の主任研究員となる。

1972年、出澤氏はコンピュータグラフィックスの研究会で後藤氏の発表を聴いた。「後藤先生は超高精度ブラウン管について発表されました。このときの話では、理研に着任してすぐ、研究所内を案内してくれた職員が『ここが特許課です。先生には関係がないと思いますが』と言って通り過ぎようとしたとか。すると後藤先生は『いや、一番関係がある』と答え、実際、すぐに超高精度ブラウン管の特許を出されたそうです」。後藤氏は後に「私は研究者ではない、発明家だ」と言っていたとされるが、それにつながる逸話である。

研究会からしばらくして、出澤氏は情報科学研究所の採用に応募するための面接で、後藤氏と初めて言葉を交わした。「実験室から出てきた後藤先生はゴム製長靴を履いていました。当時は、NかSの一方の磁極のみを持つ磁石、磁気単極子（モノポール）を探索していたので砂鉄を扱っていたのでしょう。学生に呼び止められると、HLispシステムの開発についてひとしきり話をして、指示を出していたことを覚えています。ちょっと変わった、そして頭の回転が並外れて速い人。それが後藤先生と初めて話をしたときの印象です」。出澤氏は情報科学研究所に入り、1973年から約20年間、後藤氏とさまざまな研究開発を行い、苦楽を共にすることになる。「刺激的な日々でした」

と笑う(図1)。

### 回路パターンの描画をぬり絵から矩形のスタンプへ

後藤氏が理研で最初に取り組んだのが、前出の超高精度ブラウン管である。電子ビームの画面上での位置精度を著しく向上させた超高精度ブラウン管は製品化され、例えば物理学の分野では泡箱と呼ばれる荷電粒子検出器で撮影した写真の解析にも用いられた。

さらに後藤氏は、電子ビーム露光装置の研究開発に着手。1960年代前半には、計算機の演算素子は真空管からトランジスタへ移り変わった。1960年代後半になると、トランジスタやコンデンサー、ダイオードなどの部品を小さな基板の上にまとめたIC(集積回路)が開発され、計算速度が向上した。1970年代には数万個の部品を基板上にまとめたLSI(大規模集積回路)が登場したが、より速い計算を実現するためにさらなる集積化が求められていた。しかし、回路パターンは細く絞った電子ビームで描くため時間がかかり、それが高集積化した超LSI実現の障害となっていた。そこで後藤氏は、高速に回路パターンを描ける電子ビーム露光装置の実現を目指したのだ。

LSIの回路を観察していた後藤氏は、それが縦長や横長の矩形(長方形)の組み合わせでできていることに気付いた。それまでは、細く絞った電子ビームを何度も往復させて矩形を描いていた。その方法を「細い鉛筆でぬり絵をするようなもの」と出澤氏は例える。「後藤先生は、ぬり絵ではなく、矩形のスタンプを押せばいいのではないかと、思い付いたのです。回路パターンに応じて矩形の電子ビームを生成し、それらを組み合わせて照射すれば、大面積にも速く回路を描くことができるはずだ。面白そうだ、やってみよう、ということになったのです」(図2)

発想もさることながら、その後の進め方も“後藤流”だった。当時の理研には半導体の権威である難波 進氏(半導体工学研究室主任研究員)がいた。「自分たちは半導体の素人だから専門家の意見を聞くべきだと、すぐ簡単な図面をつくり難波先生を訪ねました」と出澤氏。図面を見た難波氏は、「こんな方法は聞いたことがない。ひょっとしたら、うまくいくかもしれない」と言ったという。それを聞いた後藤氏は、すぐに特許課の担当者呼び、特許出願を行った。「特許課にはアイデアの段階から相談に乗ってもらい、分からないことがあると詳しい理研の研究室や研究者を紹介してもらったりもしました。優れた発明を生み出し、特許化し、さらには実用化するには、このような役割の人たちが不可欠でした」と出澤氏は振り返る。

### 可変面積型電子ビーム露光装置を実用化

1975年に「電子ビームの投射方法」として特許を出願すると、



**出澤正徳** (いでさわ・まさのり)  
電気通信大学 名誉教授

1943年、茨城県生まれ。工学博士。東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻博士課程修了。1973年より理研情報科学研究室研究員補。同研究室研究員、副主任研究員を経て、1993～2009年、電気通信大学大学院情報システム学研究科教授。

撮影：STUDIO CAC

実用化を目指した。しかし、電子ビーム露光装置の開発には多額の費用が必要なため、理研では難しかった。コンピュータメーカーならばこの技術を必要としていると考え、実用化を持ち掛けてもみた。だが、どの会社からもいい返事をもらえなかった。そして数社目に訪ねたのが、日本電子株式会社だ。「担当者は興味を示してくれたものの、当時、日本電子は業績が悪化して半導体分野からの撤退も検討されていたので、厳しいだろうと思っていました。ところが訪問した翌朝、『重役会で認められました！やらせてもらいます』と電話が入ったのです」と出澤氏。そして1カ月後には、矩形電子ビームを生成できることを実験で確かめたと報告があった。しかし、超LSIの回路パターンを描画するには $1\mu\text{m}$ 幅の矩形電子ビームを $10\text{mm}$ 四方の領域に $0.1\mu\text{m}$ の精度で偏向し投射することが必要とされ、収差と呼ばれる収束レンズと偏向系におけるずれが問題となる。その問題を解決したのも、後藤氏の発明だった。

それが、数式処理システム「HLisp-Reduce」だ。「Lisp」というプログラミング言語にハッシュという手法を導入することで数式処理システム「Reduce」の速度を向上させた。数式処理とは、公式などの数式を導くことをいう。その数式に数値を入れて計算するのが、数値計算である。数式処理は従来、紙に手書きで計算していた。計算はノート数冊分になり時間もかかる。出澤氏は「数式処理の手計算では、何度も痛い目に遭いました」



図1 1974年ごろの情報科学研究室にて

左から、寺島元章氏、柴田進吉氏、相馬 嵩氏、後藤英一氏、出澤正徳氏。後藤氏は写真嫌いで、研究室でちゃんと撮影した写真はこの1点のみである。

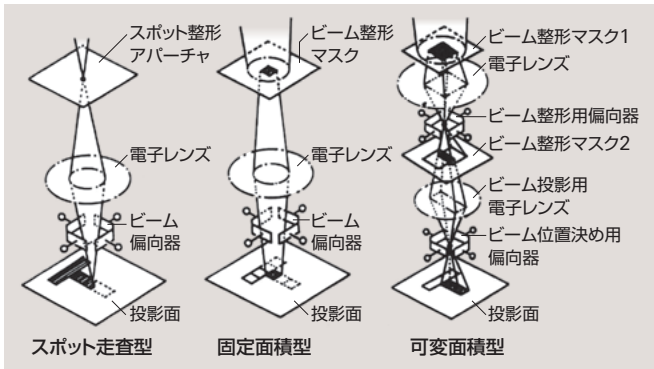
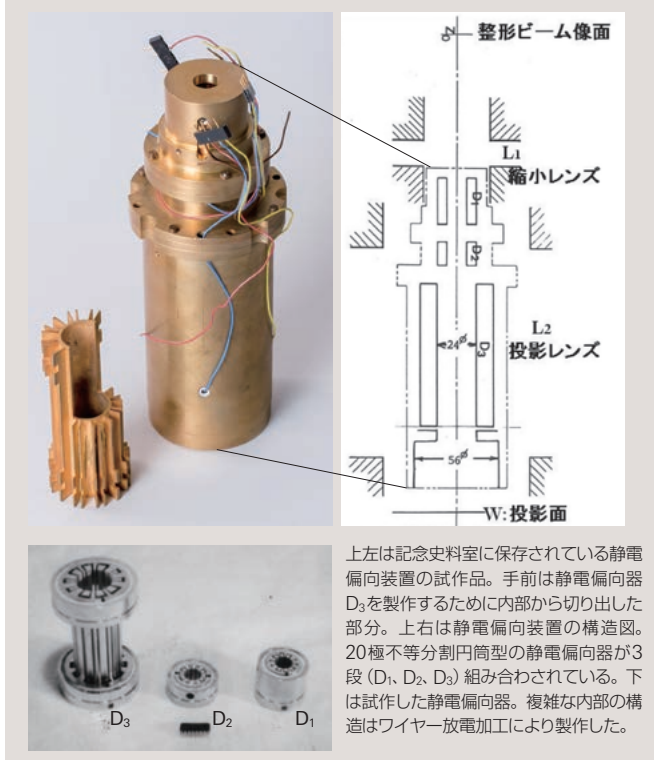


図2 電子ビーム描画装置の方式

スポット走査型は、細く絞った電子ビームを照射しながら動かして回路パターンを描く。電子ビームを正方形マスクに通すと断面が正方形になる。固定面積型は、正方形電子ビームを組み合わせて回路パターンを描いていく。可変面積型では、正方形マスクに通した電子ビームを偏向させて2段目の正方形マスクを通すことで、矩形的電子ビームを生成する。回路パターンに応じた矩形電子ビームを組み合わせて照射することで高速に描画できる。

図3 可変面積型電子ビーム露光装置に使用する静電偏向装置の試作品



上左は記念史料室に保存されている静電偏向装置の試作品。手前は静電偏向器D<sub>3</sub>を製作するために内部から切り出した部分。右上は静電偏向装置の構造図。20極不等分割円筒型の静電偏向器が3段(D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>)組み合わされている。下は試作した静電偏向器。複雑な内部の構造はワイヤー放電加工により製作した。



図4 日本電子の最新型可変面積型電子ビーム露光装置「JBX-3200MV」

LSIや超LSIは、レチクル(写真のフィルムに相当)に描かれた電子回路をウェハー上に焼き付け、エッチングなどの工程を経て作製する。可変面積型電子ビーム露光装置は、レチクル製作時の回路描画に使用される。(提供: 日本電子株式会社)

と言う。「手書きなので途中で間違ってしまうことがよくあるのです。だから後藤先生は、コンピュータを使って正確に速く数式処理ができるようにしたいと考えたのでしょう」

高性能の可変面積型電子ビーム露光装置を実現するには、収差が最小になるように設計する必要がある。しかし、装置の形状や寸法を変えると収差がどうなるかを計算しようにも、当時、使える収差計算の公式がなかった。そこで「HLisp-Reduce」を用いて収差の公式を導き、その公式を使って数値計算を行い、露光装置を設計した。そして、試作と実験を繰り返し、可変面積型電子ビーム露光法による描画装置の1号機モデルを1977年に完成させた(図3)。

「HLisp-Reduce」は、電子ビーム露光装置のために開発していたものではない。「後藤先生の興味は幅広く、分からないことを知りたい、できないことを可能にしたいと、いくつかの研究開発を並行して進めていました。すると、違う目的で進めていたものが別の研究開発に役立つことがあるのです。それも後藤流ならではの醍醐味でした」

可変面積型電子ビーム露光装置は日本電子のほか、株式会社日立製作所と株式会社東芝でも製品化された。描画速度が従来の1,000倍になり、10万個以上の部品を基板上に集積させた超LSIの製作も可能になった。そうした功績が認められ、後藤氏は1989年、紫綬褒章を受章した。

理研の特許は2007年5月に失効したが、特許権の存続期間の販売台数は51台、特許実施料収入は約4億4,000万円に上る。その後も販売台数は伸び、正確な数は把握できていないが、現在でも50台以上が稼働中と思われる(図4)。スーパーコンピュータ「京」のCPU(中央演算処理装置)を構成している超LSIの製作にも可変面積型電子ビーム露光装置が使われた。

「可変面積型電子ビーム露光装置は半導体産業を支える重要な技術になっていますが、それが理研発であることはあまり知られていません。少し寂しいですね」と出澤氏。後藤氏は、どう感じていたのだろうか。「直接聞いたことはありませんが、残念だと思っていたでしょう。でも、それに対していろいろ言う暇があったら、新しいことを考えた方がいい。後藤先生ならそうおっしゃったでしょう」

### 数式処理の高速化を目指し専用計算機FLATSを開発

可変面積型電子ビーム露光装置の設計にも重要な役割を果たした数式処理に関する研究開発には続きがある。「HLisp」は汎用コンピュータで実現していたが、より高速で処理できるようにハッシュ処理をハードウェア化した数式処理専用の計算機の開発に取り組んだのだ。それが、FLATSである。

FLATSは1984年に完成(図5)。数式処理専用の計算機は世

界初で、数式処理の速度が汎用計算機の1,000倍になった。小型化したFLATS-2も開発されたが、その後の進展はなかった。「汎用計算機が高速化し、専用計算機でなくても十分な速度で数式処理ができるようになったのです。汎用計算機が高速化したのは可変面積型電子ビーム露光装置によって超LSIが実現したからなので、うれしいことではあるのですが……」と、出澤氏は少し複雑な表情を見せる。



図5 数式処理専用コンピュータFLATS

### 量子磁束パラメトロン<sup>1)</sup>の発明から脳科学へ

1986年には量子磁束パラメトロンを発明。「後藤先生が理研のマイクロ波物理研究室でジョセフソン接合を研究していた太田 浩さんと話しているうちに、ジョセフソン接合に興味を持ったことが、発明のきっかけです」と出澤氏は言う。ジョセフソン接合とは二つの超伝導体を弱く結合したもので、その間にトンネル効果によって超伝導電流が流れる。量子磁束パラメトロンはジョセフソン接合を利用した素子で、超伝導回路内の磁束量子に変化を起こさせる。量子磁束パラメトロンを用いた回路で超高速動作を実現した。

後藤氏が大学院生時代に発明したパラメトロンとの関係は？「ロジックの上では似ていますが、動作原理は異なります」と出澤氏は答える。「パラメトロンは、トランジスタの普及に伴い姿を消してしまいました。後藤先生から直接聞いたわけではありませんが、いつかパラメトロン<sup>2)</sup>の名前を復活させたいと思っていたのではないのでしょうか。量子磁束パラメトロンを用いた超高速計算機の実用化が期待されたが、集積化が難しいこと、極低温まで冷却する必要があることなどから実現していない。しかし、非常に高速な動作が求められる宇宙望遠鏡のセンサーなど特殊な用途では活用されている。

実は、後藤氏にとって量子磁束パラメトロン<sup>3)</sup>の発明には、超高速計算機とは別の狙いがあった。「ジョセフソン接合に興味を持ったころの後藤先生は、『脳は分からないことがたくさんある、次は脳科学をやりたい』と言っていました」と出澤氏は振り返る。量子磁束パラメトロンを用いると、微弱な磁場を捉えることができる。脳の神経細胞が活動すると、微弱な磁場を生じる。そこで、量子磁束パラメトロンを磁気センサーとして使い、脳の活動を計測しようと考えたのだ。そうした試みは、理研での本格的な脳科学研究の開始、そして1997年の脳科学総合研究センター設立への後押しとなっていた。

### 再び注目される後藤流の研究開発とパラメトロン

後藤氏は、「はやっていない課題に取り組む、はやりだしたらやめてほかの課題に転換」を研究開発のモットーとしていたという。まいた種が芽を出し、ほかの人が育ててくれるように

なったら任せて、また新しい種をまく。文部科学省科学技術・学術政策研究所は、多くの研究者が取り組んでいる分野は「大陸型」、その周辺分野は「半島型」、新しい分野は「島型」と呼ぶことを提唱し、科学を大きく進展させるには島型の新分野を開拓する必要があるとしている。後藤氏の研究開発はまさに島型であり、それを50年も前から実践していたのだ。

近年、パラメトロンが再び注目されている。後藤氏とは異なるさまざまな物理系でパラメトロンを実現したという報告が相次ぎ、基礎物理の学問的な追究だけでなく、革新的性能を持つ新しいコンピュータ開発という観点からも関心が集まっているのだ。創発物性科学研究センター超伝導量子シミュレーション研究チームの蔡 兆申<sup>4)</sup>チームリーダーらを中心とする研究グループも超伝導回路を用いてパラメトロンを実現している。この研究では、後藤氏が発明したパラメトロン<sup>5)</sup>の動作原理を応用して、量子コンピュータの実現に必須な量子エラー訂正技術の開発が進められている。パラメトロンが再び科学技術の最前線に躍り出る日が来るかもしれない。

後藤氏は「天才」といわれるが、出澤氏はそれを否定する。「非常な努力家です」。行きつけの天ぷら屋でも「勉強しておかないとな」と、お酒を飲み食事をしながら英語の専門書を読んでいた、通勤電車でアイデアを研究ノートに書き留めるのに夢中になり降りる駅を何度も乗り越してしまった、といった逸話がいくつもある。「自分が知らないことを知りたい。そのために専門家の意見を聞き、しかし、うのみにはせず自分で納得するまで考え、誤りに気付けば自分のアイデアでも躊躇なく否定し、そして失敗を恐れず大胆に挑戦する。後藤先生は努力し挑戦する天才です」

後藤氏は1991年3月まで情報科学研究室の主任研究員を務めた。その後、企業などから受け入れる資金で特別に研究を推進する理研の特別研究室制度の第1号として招聘され、1991年5月から1996年11月まで「コンピュータと計測における量子力学的限界の研究」をテーマに研究開発を行った。2005年6月逝去。74歳だった。

(取材・執筆：鈴木志乃/フotonクリエイト)

## 高温プラズマから 銀河の進化を読み解く研究者

X線天文衛星を用いて、太陽系が存在する天の川銀河の高温プラズマを観測している研究者がいる。

開拓研究本部 玉川高エネルギー宇宙物理研究室の

中島真也 基礎科学特別研究員（以下、研究員）だ。

夜空を見上げると、たくさんの星が輝いている。

それは、星が私たちの目に見える光、可視光線を出しているからである。

一方、プラズマとは原子が電離し陽イオンと電子に分かれて

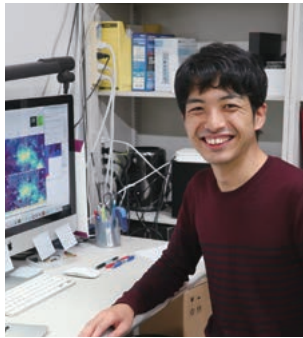
動き回っている状態で、高温のプラズマは可視光線では見えない。

数百万度のプラズマは、可視光線ではなくX線を出して輝いているからだ。

「X線を用いると、激しく変動する宇宙の姿が見えてきます。

それに惹かれてX線天文学に進みました」

そう語る中島研究員の素顔に迫る。



### 中島真也

開拓研究本部  
玉川高エネルギー宇宙物理研究室  
基礎科学特別研究員

#### なかしま・しんや

1985年、茨城県生まれ。博士（理学）。  
京都大学理学部理学科卒業。同大学大  
学院理学研究科物理学・宇宙物理学専  
攻博士課程修了。日本学術振興会特別  
研究員DC1、宇宙航空研究開発機構宇  
宙航空プロジェクト研究員を経て、2017  
年より現職。

中島研究員は小学生のころ、毎月、楽しみにしているものがあつた。小学生向けの学習雑誌『科学』だ。「大好きで、繰り返し読みました。『科学』を読んでいなかったら、今、私はここにいないかもしれない」と言う。「太陽はなぜ東から西へ動くのかなど、ものの仕組みに興味があり、当時から科学者になりたいと思っていました」

京都大学理学部理学科へ進学。そして研究をやってみたくて、大学院へ。中島研究員が入った宇宙線研究室のX線グループは、日本のX線天文衛星「すざく」の開発に携わり、2005年の打ち上げ後は運用にも参画していた。「私も年に数回、鹿児島県にある宇宙航空研究開発機構（JAXA）の内之浦宇宙空間観測所に1~2週間滞在し、『すざく』の運用を行いました。コマンドと呼ばれる命令を送信して地上550kmの宇宙空間を飛行している衛星を制御し、観測データを受信します。初めてのときはとても緊張しました」。観測データを用いて研究を行い、天の川銀河の中心で爆発的な現象が起き、高温プラズマが噴き出していることを明らかにした。「誰も知らなかったことを自分の手で明らかにし、それを論文として発表する。研究は、何てエキサイティングで面白いのだろう。X線天文

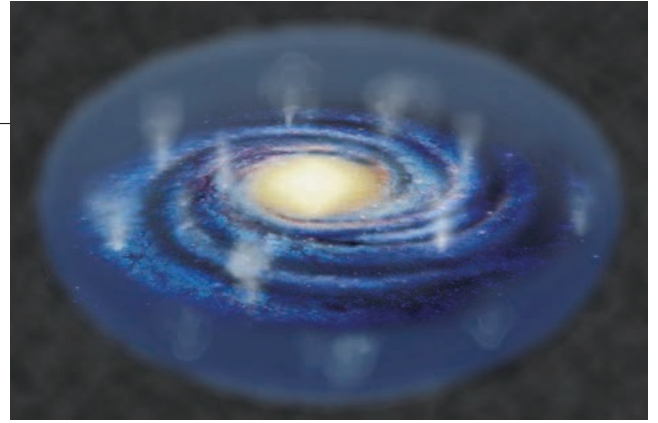


図 天の川銀河の円盤から超新星爆発で生成された高温プラズマが噴き出し、銀河全体を包み込んでいる様子の想像図

学研究者として生きていこう、と決めました」

学位取得後は、JAXAでX線天文衛星「ひとみ」の開発に取り組んだ。2016年2月に打ち上げられたが、3月に異常が発生し、4月に運用を終了。「異常発生前にいくつか観測を行っていたデータを解析すると『すざく』では見えなかったものがはっきり見えていただけに、とても残念」と中島研究員。

2017年、理研へ。2018年には、天の川銀河全体を包み込んでいる高温プラズマの起源を明らかにした（図）。その存在は知られていたが、高温プラズマは希薄なためX線が弱く、分布や物理的な性質が分からず起源は不明だった。「すざく」は、希薄な高温プラズマが出すX線に対して過去最高の感度を持つ。そこで中島研究員らは、「すざく」の観測データを用いて高温プラズマの温度や密度、元素組成を正確に求めることに成功。その結果、天の川銀河を包み込んでいる高温プラズマは、重い星が一生涯の最後に起こす大爆発（超新星爆発）によって生成された高温プラズマが銀河円盤から噴き出したものであること、それは円盤状に分布していることが分かった。高温プラズマは10億年くらいかけて冷えて銀河円盤に戻り、新しい星の材料になると考えられる。高温プラズマは銀河内の物質循環や銀河の進化を解明する重要な鍵となることから、この成果は大きな注目を集めている。「『すざく』の10年分の観測データを使っています。私が内之浦で運用したときのデータも入っているので、感慨深いですね」

高校から始めた弓道を、大学でも続けた。「弓道は、決められた一連の動作を正確に行うことが重要です。それが性に合っていたのでしょう。集中して好きなことをやるのは得意です」。では今、好きなことは？「やっぱり研究かな」と笑う。

日本では、2020年度にX線天文衛星「XRISM」の打ち上げを予定している。中島研究員も開発に参加し、「見える世界が変わる」と楽しみにしている。「私の野望としては、天の川銀河以外の銀河についても高温プラズマの分布を調べ、銀河の進化、そして宇宙の進化を解き明かしたい。それを可能にする次世代のX線検出器の開発にも取り組むつもりです」

（取材・執筆：鈴木志乃/フotonクリエイト）

## アジアと理研をつなぐ、シンガポール事務所

### 理研シンガポール事務所

理研シンガポール事務所は2006年、シンガポールの科学技術関係機関が集まったワン・ノース地区に開設されました。以来約13年にわたり、現地での情報収集、南洋理工<sup>ナランヤン</sup>大学やシンガポール国立大学など研究機関・大学との連携・協力のほか、東南アジアやインドなどの周辺国の研究機関・大学との協力関係を築いてきました。

現地の研究者に理研を紹介するほか、シンガポール在住の元理研の研究者や日本人研究者ネットワークとの交流・支援も進めています。

シンガポール国立大学での社会人向け講座や現地関係機関での講演などの地域連携活動のほか、2018年は、日本貿易振興機構シンガポール事務所の企画によるイノベーションビジネス商談会「Innovfest Unbound 2018」への、理研の産業連携部および微細藻類生産制御技術研究チーム（共同研究先：(株)ユーグレナ）の出席支援や、タイ・バンコクにて在タイ日本大使館が企画したタイ科学技術博覧会に出展（写真2）するなど、アジア地域での理研の産業連携活動も支援しています。

### シンガポールの科学技術ニュース

シンガポールでも1991年以降、5カ年計画の科学技術政策を策定しており、第6次（2016～20年）の現在は、学際的協力の推進と競争的資金の増額、研究者の適性を生かす教育を目標としています。競争的資金への配分は、科学技術予算の約40%、前5カ年計画の2倍となっていることが注目されます。

重点分野として、スマートネーション構想や、生産性向上を目指すスキルズフューチャー構想を実現するという点が強調されています。その内容は、人工知能、ビッグデータ、IoTなどを駆使した先端的なものづくり、高齢化に伴う医療関係技術・サービスの向上、都市での移動効率、健康増進情報技術、サービス業の生産性向上、温暖化対策、新エネルギー開発、自動運転などスマートシティの推進など。日本が直面している課題と重複する分野も多く、現地の研究者からは、こうした分野での理研の先端的な研究者との共同研究への期待も多く寄せられています。現地からの期待と理研にとってのメリットを勘案しながら、さらなる連携を強める機会を模索している状況です。

### 事務所長 津澤元一から

シンガポールといえば、2018年6月の米国 トランプ大統領と北朝鮮 金正恩委員長との歴史的な会談が記憶に新しいところだと思えます。会談後の夜、金委員長が突然訪れたマライオン、マリーナベイ・サンズの展望台、植物公園ガーデンズ・バイ・ザ・ベイ（写真3）や、その洗練された夜景を、メディアを通じてご覧になった方も多いことでしょう。同じ場所が、ハリウッド映画『Crazy Rich Asians』（邦題『クレイジー・リッチ!』、2018年9月公開）の舞台として、もっと派手な演出で使われましたが、この映画は、シンガポール観光局などが積極的に米国内での宣



写真1  
シンガポール事務所  
津澤元一 所長と、開設  
当初から事務所を支え  
る堀 美保子さん。



写真2  
タイ科学技術博覧会  
（2018年8月）  
理研がタイ・チュラロ  
ンコン大学などで行っ  
ている共同研究などに  
ついて英語とタイ語で  
紹介した。



写真3  
スーパーツリー  
植物公園のシンボル  
は、シンガポール国内  
の観光地ベスト5に入  
る人工樹木のアトラ  
クション。高さ25～  
50m、地上22mにあ  
る空中回廊からの眺  
めや夜間のライトア  
ップが人気。

伝活動を行ったこともあり、米国で興行収入トップとなり、またいっそうこの国が注目されることとなりました（もっとも、この映画に登場するシンガポールは「ハリウッド的に脚色された」ものです）。

小国であることから、この国は生き残るために、常に最先端の産業・技術を追求しなければならず、またそのための国内の資本・資源・人材も限られていることから、外国との連携を求めなければならないという宿命を背負っています。他方で、それを進めるために、外国人にとっても快適な研究・生活環境を整備するとともに、政府関係機関による迅速な意思決定も行われることから、世界の多くの主要研究機関・大学が当地に進出し、共同研究を実施しています。その点で、この地は、東洋と西洋の科学技術の連結点となっており、当地での共同研究は、シンガポールのみならず世界の研究機関・大学との関係強化の場ともなっています。そうした地で、理研と現地をつなぎ、理研、ひいては日本の科学研究のさらなる発展に寄与できることを期待して、日々の活動を進めていきたいと考えています。

## スポーツ科学との関わり

藤井慶輔 ふじい・けいすけ

革新知能統合研究センター 汎用基盤技術研究グループ  
構造的学習チーム 研究員

現在私は、革新知能統合研究センターの研究員として、身体運動などの複雑な時系列データを扱う機械学習の技術について研究を行っている。それ以前は9年ほど、スポーツ科学の研究を行っていた。理研でも趣味としてスポーツを行っている人は多いと思うが、スポーツ科学を研究している人は少ないということを知ったので、スポーツ科学を中心に書いてみたい。

■  
学問としてのスポーツ科学には、大まかに二つの分け方がある。一つは単純にスポーツの種目に分ける方法で、いくつかの代表的なスポーツに関する学会が存在する（例えば私は、「日本バスケットボール学会」という学会に入っている）。しかし、一般性を追求する科学の考え方からいえば、複数のスポーツの種目には共有できる知見も多いと考えられるので、二つ目として研究方法による分け方がある。例えば、私が所属する日本体育学会（会員数は約6,000人）においては、心理学・生理学・物理学・哲学のような基礎的な学問分野の考え方に基づく分野のほかに、さまざまなスポーツを特定の視点（例えば歴史やアダプテッド・スポーツなど）から理解するという計14の分野がある。

■  
私が研究を始めたきっかけは、多くのスポーツ科学の研究者がそうであるように、これまで続けてきたスポーツ（バスケットボール）だった。しかし、当時の先行研究を調べると、対人のスポーツであるにもかかわらず、相手と切り離された特定の動作（ドリブルなど）や、得点などの記録に基づく統計的な研究がほとんどであった。上の分野でいうと、心理学・生理学・物理学などそれぞれの分野に基づいた「別々の」研究があるものの、（対人スポーツでは本質的だが）それらを総合的に組み合わせたような研究は非常に少なかった。そこで大学院生時代は、1対1に焦点を当て、力学に基づいて相手の動きを予測したり、それをかわしたりするメカニズムを明らかにする研究を行っていた。幸運なことに、テレビ番組の協力で、当時FCバルセ

写真1・初めての5対5の計測。手づくりで反射シートを貼り工夫した。

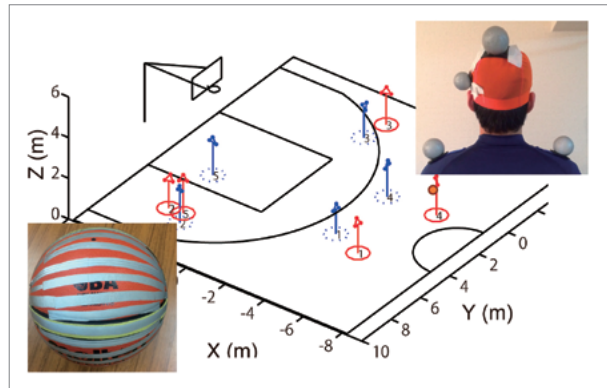


写真2・筆者近影（妻撮影）。昨年、息子が生まれた。

ロナに所属していたサッカー・ブラジル代表ネイマール選手の1対1の動作を分析したりもした。

■  
ポストク時代には、ついに体育館で5対5の選手位置データを計測できるようになった（写真1）。しかし、5対5だと1対1よりもさらに相互作用が複雑になるので、上記の基礎学問分野の知識がまったく適用できなかった。そこで、動物の群れの運動を扱う生物物理など、学問分野の幅をさらに広げて試行錯誤を繰り返した。しかし、集団スポーツの運動は相手の裏の裏を読んだりするため、動物の群れよりさらに運動が複雑になる。そこで、具体的なモデルの仮定を最小限にして、得られたデータから重要な情報を抽出する情報学的なアプローチが適切ではないかと思ひ、さまざまな縁もあって現職にて働いている。

■  
このように時には失敗もあるが、ひるまずに広い分野を視野に入れて挑戦してきたつもりである。長い目で見ると着実に前に進んでいるので、歩みを止めずに研究を続けていきたい。ちなみに今は育児にも奮闘中である（写真2）。

### 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)

