研究最前線「 $\pi$ 電子が示す多様な物性を探究する」より

研究最前線 02

 **$\pi$ 電子が示す多様な物性を探究する**

量子スピン液体と質量のないディラック電子の新展開

研究最前線 06

**“その細胞らしさ”は  
いかにして継承される？**

特集 10

**数理創造プログラム iTHEMS**

自然科学と数理科学の共進化を図る

FACE 14

分子の相互作用に基づいて新材料をつくり出す

TOPICS 15

- ・ 林 芳正 文部科学大臣が理研和光地区を視察
- ・ 理研サマースクールを開催

原酒 16

仕事も趣味も山だったころ

炭素はほかの原子と結合する手を4本持ち、多様な構造の分子をつくることができる。炭素60個がサッカーボール状に集まったC<sub>60</sub>フラーレン、正六角形状の炭素がつくる原子1層分のシートであるグラフェン、炭素を含む導電性プラスチックの研究は、それぞれノーベル賞の対象となった。「それらの物質の性質はいずれもπ電子が生み出しています。炭素を含む分子がつくる多様な構造を持つ舞台の上で、π電子はさまざまな振る舞いを見せます」と加藤礼三 主任研究員。π電子が見せる量子スピン液体と質量のないディラック電子に関する加藤分子物性研究室の最新研究を紹介しよう。

# π電子が示す多様な物性を探究する

## 量子スピン液体と質量のないディラック電子の新展開

### ■ 圧力をかけたら質量のないディラック電子が現れた！

まず、π電子とは何かを簡単に紹介しよう。原子同士が2個ずつ電子を出し合って結び付くことを二重結合という。二重結合はσ結合とπ結合と呼ばれる2種類の結合から成る。結合力の強いσ結合は分子の骨格をつくる。σ結合よりも結合力が弱いπ結合を担っているのが、π電子だ。π電子は物質の中をかなり自由に動くことができる場合がある。例えばベンゼンは、6個の炭素が二重結合と単結合で交互につながり正六角形をつくっている。その正六角形の中を6個のπ電子がぐるぐると回り、これによりベンゼンは安定性を示している(図1)。

有機化合物の一種であるプラスチックは普通、電気が流れない絶縁体だ。白川英樹 博士は1970年代、電気が流れる導電性プラスチックをつくり出し、2000年にノーベル化学賞を受賞した。

白川博士はポリアセチレンというプラスチックに臭素やヨウ素を加えてπ電子を動きやすくさせることで電気が流れるようにしたのだ。

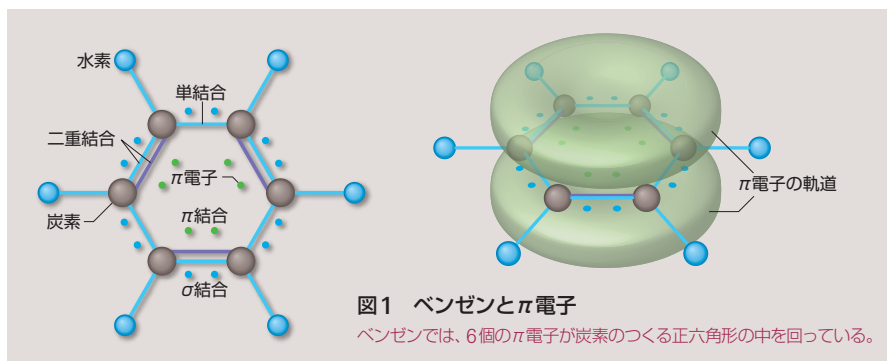
分子や結晶の性質は、その中の電子状態で決まる。分子の中で電子はいくつかの軌道を回っており、電子はエネルギーの低い軌道から順に詰まっていく。電子が詰まった分子軌道の中で最もエネルギーが高い軌道を「最高占有分子軌道(HOMO)」と呼ぶ。一方、電子が詰まっていない分子軌道の中で最もエネルギーの低い軌道を「最低非占有分子軌道(LUMO)」と呼ぶ。

次に、分子が集合してできた結晶の中では、電子はさまざまな波長を持つ波として振る舞い、そのエネルギーは、波の波数(波長の逆数)に依存するエネルギーバンドとして表される。分子のHOMOやLUMOは、結晶の中で、それぞれエネルギーバンドをつくる。

電気を流すためには、「エネルギーバンドが電子で部分的に詰まっていること」が必要である。電気を流す分子性結晶は、HOMOから電子を放出しやすい分子と、LUMOで電子を受け入れやすい分子という異なる2種類の分子から成り、両者の間を電子が移動して、エネルギーバンドが電子で部分的に詰まった状態になって電気が流れる、というのが典型例だ。一方、1種類の分子だけが集まって結晶化した単一成分の分子性結晶では、エネルギーバンドは完全に詰まっているか完全に空であるためπ電子は動けず、電気を流すことは不可能だと考えられていた。これは、「1個の独立した粒子」という従来の分子の概念から考えれば、当然ではある。

「ところが2001年、日本の研究グループが、普通の金属と同じように電気が流れる単一成分の分子性結晶をつくることに成功しました。日本は、有機分子などが集まった分子性結晶の物性研究で間違いなく世界のトップを走っています」と加藤主任研究員は言う。

同研究室の崔 亨波 研究員は、中心のパラジウム(Pd)に炭素や硫黄を含む原子団(配位子)が結合した[Pd(ddd)]という分子(金属ジチオレン錯体)から成る、単一成分の分子性結晶に、高い圧力をかける実験を行った(図2)。その結晶は電気が流れない絶縁体だが、圧



**加藤礼三** (かとう・れいぞう)

加藤分子物性研究室  
主任研究員

1955年、山口県生まれ。理学博士。東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。東邦大学理学部助手、東京大学物性研究所助教授を経て、1999年より現職。



力をかけることで同じ分子のHOMOとLUMOのエネルギーバンドが重なり、 $\pi$ 電子が部分的に詰まったエネルギーバンドができて電気が流れ、さらに、電気抵抗がゼロとなる超伝導が現れるのではないかと期待したのだ。

ダイヤモンド・アンビル・セルという装置を用いて、微小な試料をダイヤモンドで挟んで超高压をかける。電気抵抗を測定するために、長さ0.1mmほどの試料に太さ0.005mmの金線4本を電極として取り付ける(図3)。「このような細かい作業ができる人は世界でも限られています。その一人が崔さんです。

彼のところには国内外から測定の依頼が来ます」と加藤主任研究員。

圧力を少しずつ上げながら電気抵抗の温度依存性を測定する実験を続けると、約12.6万気圧で驚くべき現象が現れた。「質量のないディラック電子の存在を示す振る舞いが現れたのです。まったく予想外の結果でした」

■ **質量のないディラック電子が現れる仕組みをモデルで解明**

電子は陽子の1,836分の1の質量を持つ。ところが、ある種の物質の中では、電子の質量が見掛け上ゼロになる可能

性が理論的に予測されていた。「この電子の運動方程式は、相対論を量子力学に組み込んだディラック方程式に類似しているため、質量のないディラック電子と呼ばれ、結晶の中で非常に動きやすくなっていると考えられています」

鉛筆の芯にも使われる黒鉛(グラファイト)は、正六角形状の炭素のシートであるグラフェンが積み重なってできている。グラフェン中の $\pi$ 電子が質量のないディラック電子となることは、理論的に予測されていた。しかし20世紀中は、黒鉛から原子1層分のグラフェンだけを取り出すことは誰もできなかった。21世紀に入り、スコッチテープを使って黒鉛からグラフェンを簡単に単離できることが発見され、質量のないディラック電子の存在が実験的に確かめられた。この研究には、ノーベル物理学賞が贈られた。

同研究室の田嶋尚也 客員主管研究員(元 専任研究員、現 東邦大学 教授)は2009年、 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>と呼ばれる分子性結晶でも質量のないディラック電子が現れることを実験的に示した(『理研ニュース』2010年7月号「FACE」)。「それは2次元結晶のグラフェンとは異なって、3次元的な結晶の中で質量のないディラック電子が確かめられた最初の例でした。その物質は、二つの成分からできた分子性結晶です。その後は、質量のないディラック電子が現れる分子性結晶は見つかりませんでした」

加藤主任研究員たちは、[Pd(dddt)<sub>2</sub>]の単一成分の分子性結晶に圧力をかけると、何が起きているのかを調べた。圧力をかけたときの結晶構造を実験的に

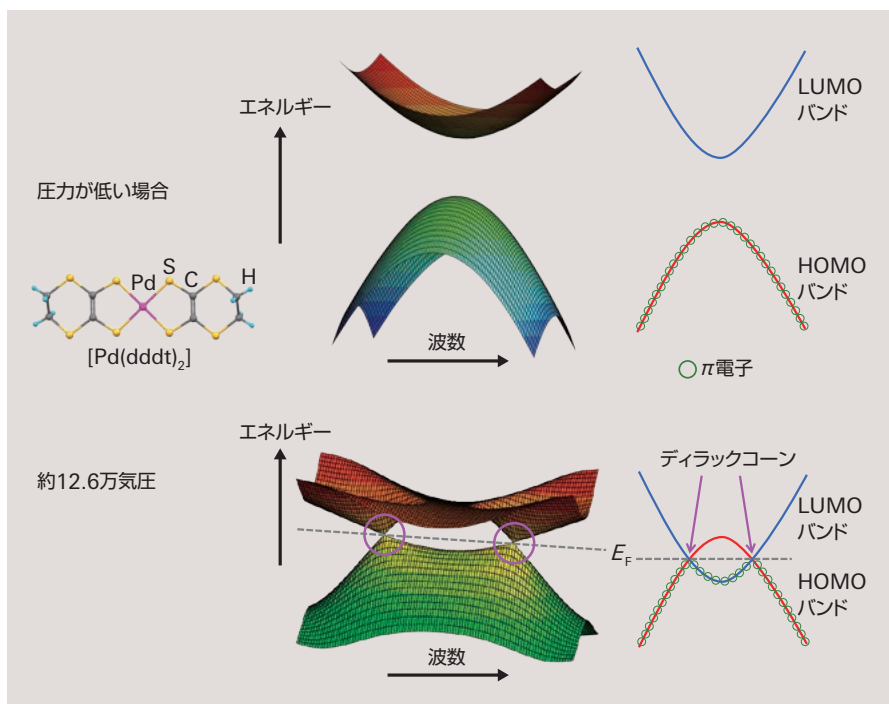


図2 高圧下の分子性結晶[Pd(dddt)<sub>2</sub>]で現れる質量のないディラック電子

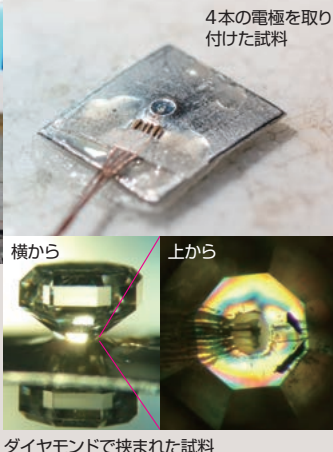
この結晶では、圧力が低い場合には、LUMOとHOMOのエネルギーバンド(この図では、2次元のベクトルで表される波数の関数)が離れており、HOMOのバンドは電子で完全に詰まり、LUMOのバンドは完全に空である。このとき、 $\pi$ 電子は動くことができず絶縁体になっている(上)。圧力を約12.6万気圧にすると、二つのエネルギーバンドが“点”で交わり、ディラックコーンと呼ばれるバンド構造となった。エネルギーバンドは、交点のエネルギー値( $E_f$ )まで $\pi$ 電子で詰まっている。このときの $\pi$ 電子は、質量のないディラック電子となり、高速で結晶中を動き回ることができる。

顕微鏡下で試料に配線する 崔 亨波 研究員



図3 圧力をかけて電気抵抗などを測定する実験

長さ0.1mmほどの試料に4本の電極（直径0.005mmの金線）を取り付け、上下からダイヤモンドで挟んで圧力をかけて測定を行う。極めて細かい手作業。



ダイヤモンドで挟まれた試料

調べることは難しいので、同研究室の圓谷貴夫 客員研究員（元 特別研究員、現物質・材料研究機構 ICYS 研究員）が、圧力下の結晶構造と電子状態（バンド構造）を量子力学に基づく第一原理計算で求めた。「圧力を高くしていくと離れていたLUMOとHOMOのエネルギーバンドが“点”で交わり、ディラックコーンと呼ばれる質量のないディラック電子に特徴的なバンド構造になることが分かりました」（図2下）と加藤主任研究員。

もちろん、圧力をかけてもほとんどの物質には質量のないディラック電子は現れない。「この物質では、なぜ二つのエネルギーバンドが“点”で交わるのか、第一原理計算だけではその仕組みまでは分かりません。私は適切な近似を用いたモデルをつかって、その仕組みを明らかにしました。このモデルを用いれば、どのような条件ならば質量のないディラック電子が現れるのか予測できるようになります。それによると、質量のないディラック電子は、 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>のような2成分の分子性結晶よりも、むしろ単一成分の分子性結晶の方で現れやすいことが分かりました。圧力をかけない常圧でも質量のないディラック電子が現れる可能性もあります」

そう語る加藤主任研究員たちは今後、モデルに基づき常圧で質量のないディラック電子が現れる単一成分の分子性結晶を発見することを目指していく計画だ。

質量のないディラック電子は物質中を

高速で移動することができる。それを利用した処理速度が速い情報処理素子の開発などが期待されている。質量のないディラック電子が現れる分子性結晶の研究は将来、超高速の情報処理素子の開発に貢献する可能性がある。

### ■ 量子スピ液体ができる 仕組みが見えてきた

電子は電荷とともにスピンという自転に似た性質を持つ。結晶の中で全ての電子スピンの向きが互いに逆になった「反平行のペア」をつくらうとする。

正三角形の各頂点に1個ずつ電子がある場合を考えよう（図4）。電子AとBが反平行のスピンのペアを組むと、残りの電子Cのスピンはどちらを向けばいいのか。「これは、あちらを立てればこちらが立たずという三角関係で、フラストレーション効果と呼ばれます。普通の物質は、絶対零度（0K=-273.15℃）まで温度を下げるまでに、結晶内でのスピンの向きは定まり固定します。いわば、スピンの固体状態です。しかし、フラストレーション効果が強いと、絶対零度でもスピンの向きが定まらないで揺らいでいる量子スピ液体になることが、1973年に理論的に予言されていました」

20世紀中には、そのようなまったく新しい磁性状態を示す物質は見つからなかった。「正三角形でも3個のスピンの向きが互

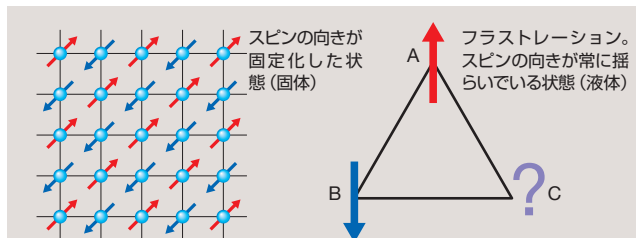


図4 スピンのフラストレーション

多くの物質では、スピンの向きが反平行になって固定化する（左）。正三角形の頂点に並んだ3個の電子は、フラストレーションによりスピンの向きが定まらず常に揺らいでいる可能性がある（右）。

いに120度の向きになれば安定化して、量子スピ液体は存在しないという説が、学会で優勢だった時期もありました」

2003年、日本の研究グループが、ある有機物を主成分とする分子性結晶が量子スピ液体の有力候補であることをついに発見した。さらに2008年、加藤主任研究員たちは、Pd(dmit)<sub>2</sub>という金属ジチオレン錯体を含む分子性結晶も、量子スピ液体になる有力候補であることを発見した。「私たちは0.019Kまで冷やしてもスピンの向きが定まらないことを確かめました。しかし、絶対零度を実験的に実現して確かめることは不可能なので、正確には有力候補という言い方をしています」

量子スピ液体はどのような仕組みで現れるのか。それを探るため、同研究室の山本貴客員研究員（元 訪問研究員、現愛媛大学 准教授）は大型放射光施設 SPring-8 などを使って、Pd(dmit)<sub>2</sub> を含む分子性結晶の分子構造や電子密度を測定した。この結晶では2個の分子がひと固まり（2量体）になって一つのユニットをつくり、三つのユニットがつくる三角形が結晶全体に並んでいる（図5上）。 $\pi$ 電子は各ユニットに1個ずつあるが、隣のユニットにも $\pi$ 電子があつて互いの電荷の反発が強いからだ。このような理由で電気が流れない物質をモット絶縁体という。

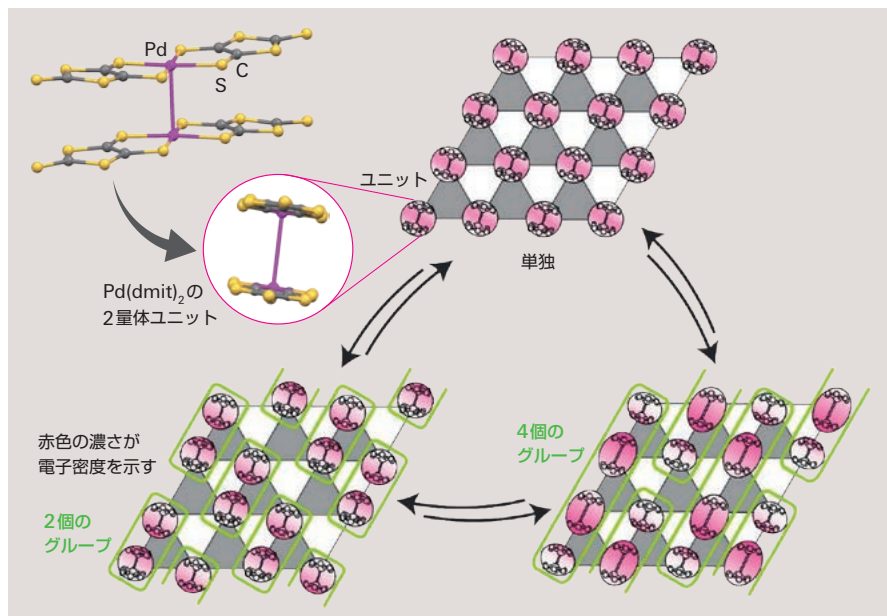
「山本客員研究員が行った測定により、Pd(dmit)<sub>2</sub> を含む分子性結晶では、ユニット（分子2個）が単独で存在する状態、ユニット2個（分子4個）がグループ

## 関連情報

- 2017年10月11日プレスリリース  
分子結晶におけるスピン液体の起源を解明
- 2017年3月16日プレスリリース  
「質量のないディラック電子」系を発見

### 図5 Pd(dmit)<sub>2</sub>を含む分子性結晶が量子スピン液体になる仕組み

この分子性結晶では、Pd(dmit)<sub>2</sub>の2量体(分子2個)が一つのユニットをつくり、三つのユニットが作る三角形が結晶全体に並んでいる。SPRING-8などを使った振動スペクトルの測定により、ユニット(分子2個)単独の状態、ユニット2個(分子4個)がグループをつくる状態、ユニット4個(分子8個)がグループをつくる状態が絶えず組み替わっていることが分かった。それにより、 $\pi$ 電子同士の距離が短くなったり長くなったりして電子密度が変わり、電子間の反発を緩和している。それがスピンの向きが定まらない量子スピン液体になる仕組みに重要だと考えられる。



をつくる状態、ユニット4個(分子8個)がグループをつくる状態があって、それら三つの状態が絶えず組み替わることが分かりました。それにより、 $\pi$ 電子同士の距離が短くなったり長くなったりして電子密度が変わり、電荷による反発を緩和しています(図5下)。絶対零度でも $\pi$ 電子の密度が常に変動することが、スピンの向きが定まらない量子スピン液体ができる仕組みに重要だと、私たちは考えています」

量子スピン液体が興味深いのは、それが日常の世界とは懸け離れた、まさに量子力学の現象である点だ、と加藤主任研究員は指摘する。「量子スピン液体は、スピンの向きのパターンが時間とともに変動しているようなものではありません。結晶の中であり得る膨大な数のパターンが全て重なって同時に強く影響し合っている『量子もつれ』という状態だと考えられています。実は、量子スピン液体の状態は、量子力学の式で記述することが、現在もできていません」

量子もつれを利用して、膨大な量の計算を瞬時にやる量子コンピュータの開発が進められており、量子スピン液体を量子コンピュータに使うことを検討している研究者もいる。

## ■有機と無機の強相関電子系

1986年、銅酸化物で、従来よりも高

い温度で電気抵抗がゼロとなる「高温超伝導」現象が発見された。超伝導になるには、反発し合う電子がペアを作ることが必須だと考えられている。ただし、高温超伝導体において、電子がペアを組む仕組みは、現在でも完全には解明されていない。

銅酸化物高温超伝導体の母体は、電子が反発し合って電気が流れないモット絶縁体だ。このとき電子は、狭い原子軌道に閉じ込められる。これが、分子性結晶のモット絶縁体では、空間的な広がりを持つ分子軌道となり、この違いが重要となる。いろいろな手段を使って、モット絶縁体の電子を動けるようにすると超伝導現象が現れる。

加藤主任研究員たちは2006年、Pd(dmit)<sub>2</sub>を含む分子性結晶が、超伝導になることを発見した。その物質ではフラストレーションが重要な役割を果たしており、銅酸化物とは異なる仕組みで超伝導が起こる可能性を発見したのだ(『理研ニュース』2008年5月号「研究最前線」)。

「最近、Pd(dmit)<sub>2</sub>の分子性結晶の超伝導において珍しい現象が見つかり、論文にまとめているところです。その論文は超伝導研究に大きな議論を巻き起こすことでしょう」

現在までに発見されている超伝導体はいずれも極低温に冷やす必要がある。物性科学の大きな目標の一つは、高温

超伝導が起こる仕組みを解明して、室温で超伝導が起こる物質を開発することだ。最近、硫化水素分子に超高压をかけると、約-70℃という最も高い転移温度を持つ超伝導体となることが、大きな話題となった。室温で電気抵抗がゼロになる超伝導体が開発できれば、エネルギーロスのない送電や蓄電が可能となり、エネルギー問題の解決に大きく貢献すると期待されている。

モット絶縁体のような、電子が強く反発し合っている物質は、強相関電子系と呼ばれる。強相関電子系では、高温超伝導や量子スピン液体以外にもさまざまな現象が現れると期待され、研究が活発に行われている。強相関電子系には、金属酸化物のような無機物と、有機分子を含む分子性結晶がある。

「理研の創発物性科学研究センター(CEMS)では、無機物の強相関電子系の研究が強力に推進されています。私たちの分子性結晶とは舞台が異なりますが、強い電子相関という共通性があり、両者の成果が組み合うことによって、強相関電子系の総合的な理解が得られるといえます」

加藤主任研究員たちは、今後も分子性結晶で多様な構造を持つ舞台をつくり出し、 $\pi$ 電子にさまざまな振る舞いをさせることで、物性科学をけん引していく。

(取材・執筆：立山 晃/フォトンクリエイト)

生物の体は、さまざまな種類のたくさんの細胞によって構成されている。それらは全て同じ遺伝情報を持っている。しかし、遺伝情報を同じように使っていたのでは、形や働きの違う細胞をつくることはできない。それぞれの細胞が、その細胞らしさを示すのは、「エピジェネティクス」というシステムによって細胞の種類ごとに遺伝子の発現パターンが決められているからである。それぞれの細胞らしさは、細胞分裂しても受け継がれ、維持される。眞貝細胞記憶研究室では、エピジェネティクス、そして細胞記憶の制御メカニズムを明らかにすることで生命現象を理解しようとしている。

## “その細胞らしさ”はいかにして継承される？

### ■ 細胞記憶とは

研究室名の「細胞記憶」とは？「よく混同されるのですが、脳の記憶とは違います」と眞貝洋一主任研究員。「細胞には、さまざまな種類があります。それぞれの細胞らしさを決めている情報が細胞分裂を経ても維持されることを、私たちは『細胞記憶』と呼んでいます」

生物1個体を構成する細胞は全て、1個の受精卵から始まっている。つまり、全ての細胞が持っている遺伝情報は同じである。遺伝情報は4種類の塩基の配列によってDNAに書かれていて、その一部に遺伝子がある。遺伝子領域のDNAはRNAに転写され、その塩基配列に基づいてアミノ酸が連なってタンパク質がつけられ、さまざまな働きをする。

この過程を遺伝子の発現と呼んでいる。

細胞は種類によって形や働きが違うが、同じ遺伝子を同じように使っていたのでは形や働きの違う細胞をつくることはできない。実際には、細胞の種類によって遺伝子の発現のパターンが違うのだ。例えば肝臓の細胞が増殖するときには、遺伝子の発現パターンを維持したまま細胞分裂して、できた細胞も肝臓の細胞になる。この細胞記憶がなければ、肝臓の細胞がいきなり神経細胞になったりして、生物は破綻してしまうだろう。

「塩基配列を変化させずに遺伝子の発現を制御するシステムをエピジェネティクスと呼びます。私たちはエピジェネティクス、そして細胞記憶のメカニズムを明らかにすることを目指しています」

### ■ エピジェネティクスの代表は化学修飾

「エピジェネティクスにはいろいろありますが、よく研究されているのがDNAやヒストンの化学修飾です」と眞貝主任研究員。DNAは二重らせん構造をしていて、ヒトのDNAの長さは約2mにもなる。DNAはヒストンというタンパク質に2周ずつ巻き付いていて、ヌクレオソームを形成している(図1)。ヒストンは、H2A、H2B、H3、H4というタンパク質が2個ずつ集まっている。ヌクレオソームがたくさんつながったものをクロマチンといい、それが折り畳まれて染色体となり、核の中に収められている。DNAやヒストンにメチル基やアセチル基、リン酸基などが付くことを化学修飾といい、どの化学修飾がどこに付くかによって遺伝子の発現状態が変わる。

哺乳類では、DNAのシトシンにメチル基が付いてメチル化されると、多くの場合、遺伝子の発現は抑制される。ただし、化学修飾が遺伝子の発現を直接抑制するのではなく、目印として使われている。DNAにメチル基が付いていると、それを目印にして遺伝子の発現を抑制するタンパク質が運ばれてきて、その結果、遺伝子の発現が抑制されるのだ。

ヒストンのメチル化も目印として使われているが、どのヒストンのどのアミノ酸にメチル基が付くかによって、遺伝子発現を抑制するか活性化するかが変わる。ヒストンH3の9番目のリジン(ヒス

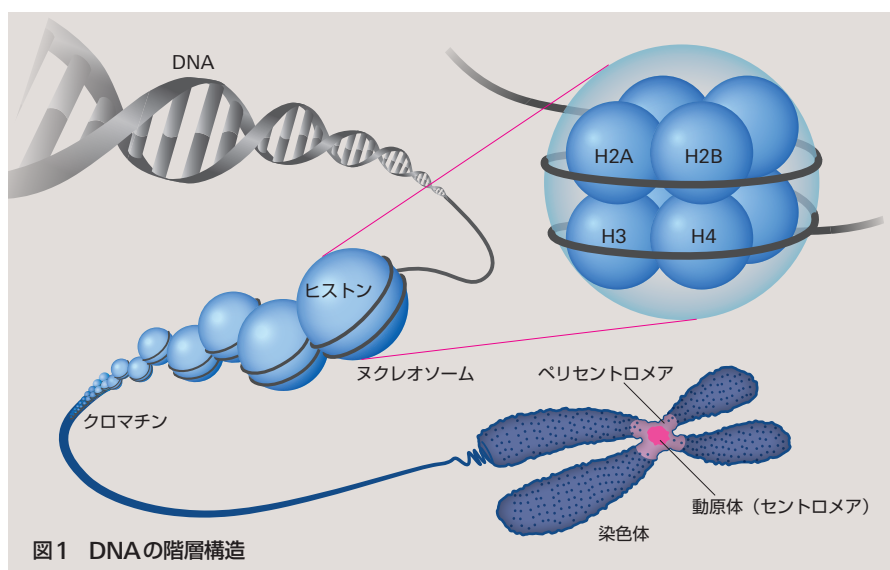


図1 DNAの階層構造

**眞貝洋一**（しんかい・よういち）

眞貝細胞記憶研究室  
主任研究員

1961年、神奈川県生まれ。医学博士。順天堂大学大学院医学研究科博士課程修了。米国コロンビア大学医学部、米国ハーバード大学医学部 博士研究員、日本ロシウ株式会社 主幹研究員、京都大学ウイルス研究所 教授などを経て、2012年より現職。



トンH3K9) のメチル化は遺伝子発現の抑制の目印であることが知られている。

「私たちの研究室では、ヒストンのメチル化、特にヒストンH3K9のメチル化に関する研究を進めてきました。そして、ヒストンH3K9のメチル化に関わるクロマチンの凝集のメカニズムを明らかにして、2017年8月に発表しました」と眞貝主任研究員。この研究を中心的行ったのが、白井温子研究員である。

■ ノンコーディングRNAが

ヒストンメチル化酵素を連れてくる

白井研究員が注目したのは、染色体の動原体（セントロメア）に隣接するペリセントロメアと呼ばれる領域である（図1）。動原体とは、細胞が分裂するときに両極の中心体から伸長してきた紡錘糸が結合する、染色体の正常な分配にとって重要な部位だ。ペリセントロメア領域には、クロマチンが凝集した構造となっていて存在している。「凝集したクロマチンはヘテロクロマチンと呼ばれ、転写が強く抑制されています。その構造がどのように形成されるのかを詳細に明らかにすることを目指しました」と白井研究員は説明する。

ヘテロクロマチンは、Suv39h1というヒストンメチル化酵素がヒストンH3K9にメチル基を3個付けて、そのトリメチル化部位をHP1というタンパク質が認識して結合し、さらにHP1同士が連結することでクロマチンが凝集して形成されることは、すでに分かっている（図2⑥）。さらに、酵母やショウジョウバエでは、ヘテロクロマチンの形成にRNA

干渉という現象が関わっていることが知られている。哺乳類でも、ヘテロクロマチンの形成にRNA干渉やRNAを介したほかの機構が関与しているのか。それが大きな謎となっていた。

「ヘテロクロマチンはクロマチンが凝

集して固く閉ざされていますが、ペリセントロメア領域のヘテロクロマチンはわずかながらDNAからRNAに転写されていることが知られていました。このRNAはタンパク質に翻訳されないノンコーディングRNAです。無駄なものが

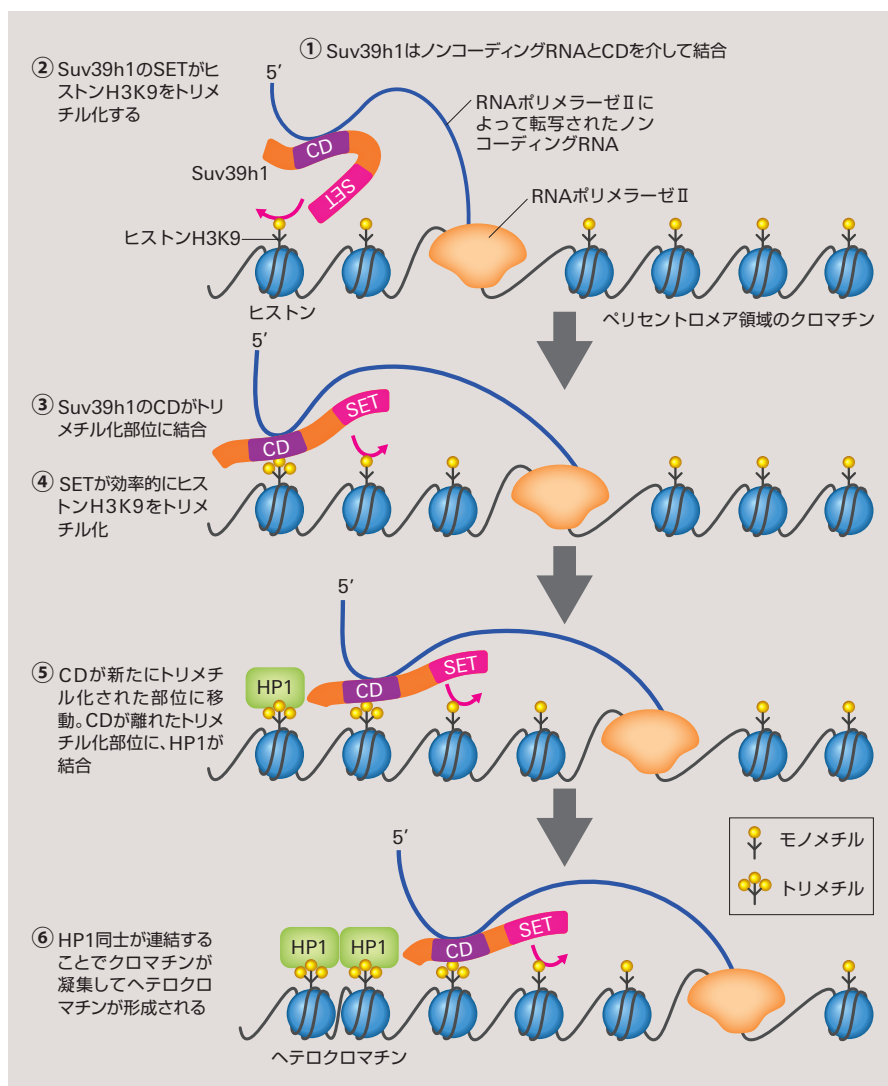


図2 RNAが関与する哺乳類のヘテロクロマチン形成機構

Suv39h1は、ヒストンH3の9番目のリジン（ヒストンH3K9）をメチル化するヒストンメチル化酵素で、クロモドメイン（CD）とメチル化を行うSETドメイン（SET）を持っている。ヘテロクロマチンの形成には、タンパク質をつくらないノンコーディングRNAが重要な働きをしていることが明らかになった。

つくられているとは思えませんから、そのノンコーディングRNAにも何かの働きがあるはず。だとしたら、哺乳類でもヘテロクロマチンの形成にRNAが関与してくるのではないかと。そう予測しました」と白井研究員。「私が以前所属していた理研 発生・再生科学総合研究センター（現 多細胞システム形成研究センター）クロマチン動態研究チームで中山潤一チームリーダー（現 基礎生物学研究所 細胞生物学領域 クロマチン制御研究部門 教授）らは、酵母ではヒストンメチル化酵素Clr4のクロモドメイン（CD）という領域にRNAが結合できることを明らかにしています。Clr4とSuv39h1は遺伝子の構造・機能が似ていて、Suv39h1にもクロモドメインがあります。そこで、哺乳類でもSuv39h1のクロモドメインにRNAが結合しているのではないかと考え、マウスの系を用いて実験を行いました」

いくつかの実験の結果、Suv39h1のクロモドメインにノンコーディングRNAが結合できることが明らかになった。また、RNAが結合できないようにSuv39h1を変異させると、ヘテロクロマチンの形成

に異常が見られ、ヘテロクロマチン領域へのSuv39h1の蓄積が低下することが分かった。これらの結果から、哺乳類ではSuv39h1がクロモドメインを介してノンコーディングRNAと結合し、クロマチンに運ばれてきてヒストンH3K9をトリメチル化し、さらにクロモドメインがトリメチル化部位に結合することで効率的にヒストンH3K9をトリメチル化してヘテロクロマチンを形成する、というメカニズムが示された（図2）。

「RNAが結合できないようにSuv39h1を変異させると、ヘテロクロマチンが形成されなくなると考えていましたが、実際には異常が見られるもののヘテロクロマチンは形成されました。Suv39h1とRNAの結合はヘテロクロマチンの形成にとって重要ではあるものの、必須のものではないようです。ほかに重要な機構があるのではないかと考え、研究を進めているところだ」と白井研究員は語る。

■ 運命的な出会いからスタート

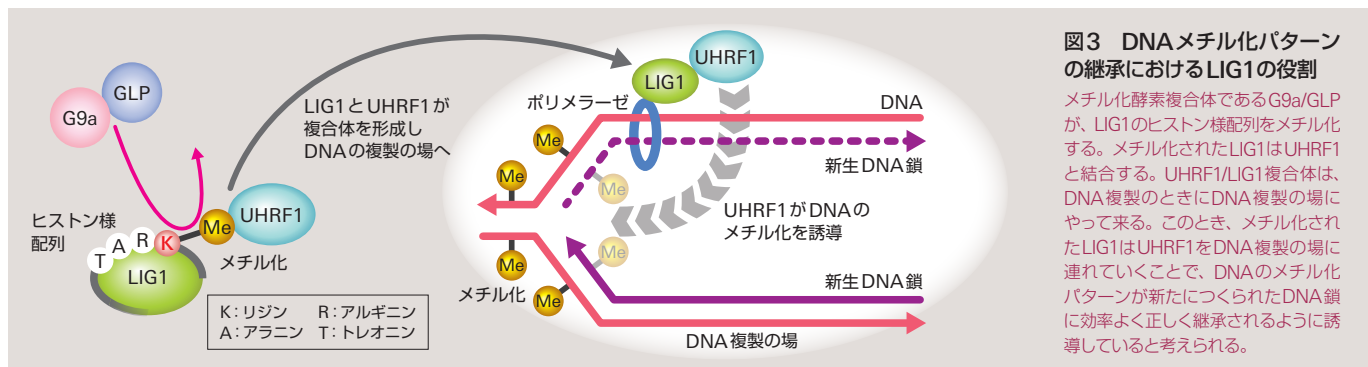
研究室では2017年8月にもう一つ、「細胞記憶の理解に新たな糸口」というタイトルで研究成果を発表している。「この

研究は、運命的な出会いからスタートしました」と眞貝主任研究員。

研究室では、眞貝主任研究員が2001～05年に発見したG9a/GLPというタンパク質複合体について研究を行ってきた。「G9a/GLPはヒストンH3K9のメチル化酵素として発見しましたが、その後、ヒストン以外のタンパク質もメチル化するという報告が出てきました。そこで、G9a/GLPがメチル化するタンパク質を一網打尽に調べようと考えたのです」。そして理研の袖岡有機合成化学研究室との共同研究によってG9a/GLPと反応するタンパク質を網羅的に探索できる実験系を立ち上げ、G9a/GLPによるメチル化の標的となり得る候補タンパク質のリストを得た。

「リストを見ると、上の方にDNAリガーゼ1（LIG1）がありました。LIG1はDNAの複製のときに岡崎フラグメントという短いDNA断片をつなげる酵素です。LIG1がメチル化されることは知られていなかったもので、意外な思いでリストを眺めていました」と眞貝主任研究員は振り返る。

このリストを得た日の午後、フランス







左から、白井温子 研究員、眞貝洋一 主任研究員、津坂剛史 大学院生リサーチ・アソシエイト。

#### 関連情報

- 2017年8月11日プレスリリース  
細胞記憶の理解に新たな糸口
- 2017年8月1日プレスリリース  
哺乳類高次クロマチンでのRNAの機能を発見

から訪れた研究者が理研でセミナーを行うことになっていた。そのホストを務めたのが眞貝主任研究員だ。「彼は、LIG1はUHRF1というタンパク質と結合することを発見していました。UHRF1は、DNAのメチル化パターンの継承、つまり細胞記憶に必須であることが知られています。そこでセミナーの後、実は私たちの実験からLIG1はG9a/GLPによってメチル化されるかもしれないという結果が出ているのだが一緒に研究しないか、と声を掛けたのです。もしリストを受け取ったのが次の日だったら、共同研究はしていなかったかもしれません。そして、その1週間後に大学院生の津坂剛史さんが研修生として研究室に来て、G9a/GLPとLIG1、さらにUHRF1との関係を解き明かしていったのです」

#### ■細胞記憶の理解に新しい糸口

津坂さんはまず、リストに載っている全てのタンパク質のアミノ酸配列を調べた。すると、ヒストンH3K9周辺と似たアミノ酸配列が含まれているものが複数あり、そのほとんどがリストの上位にあることが分かった。リストの上にあるほどG9a/GLPによるメチル化標的である可能性が高い。その中にはLIG1が含まれており、津坂さんはLIG1のヒストン様配列がG9a/GLPによって実際にメチル化されることを証明した。

この時点で眞貝主任研究員は、LIG1がメチル化されることでUHRF1と結合し、DNA複製の場に運ばれてくるのではないかと仮説を立てた。そこで津坂さんは、メチル化酵素を欠損させて、

LIG1とUHRF1の挙動を調べた。するとLIG1とUHRF1が結合できず、さらにLIG1は正常にDNA複製の場に来るものの、UHRF1はDNA複製の場に来なくなった。そして、DNAのメチル化パターンの継承もうまくいかない。これらの結果から、眞貝主任研究員の立てた仮説のとおり、LIG1とUHRF1との結合にはLIG1のメチル化が必須であり、LIG1がUHRF1をDNA複製の場に連れていくことで、DNAメチル化パターンの継承が効率的に行われていることが分かった(図3)。

眞貝主任研究員は、「UHRF1がDNA複製の場にどのように運ばれてくるのか、これまでよく分かっていませんでした。そのメカニズムを明らかにできたことは、細胞記憶の理解に向けた大きな一歩です」と、この研究の意義を語る。津坂さんは、「エピジェネティクスの研究は、DNAとヒストンの化学修飾が主役です。ヒストン以外のタンパク質のメチル化の意義はベールに包まれたままです。今回、DNAメチル化パターンの継承にはヒストン以外のタンパク質のメチル化が重要であることが明らかになったのは、面白い」と語る。「現在は、網羅的探索でG9a/GLPによってメチル化されることが分かったほかのタンパク質についても解析を進めています」

#### ■疾患の診断、治療へ

がんなどさまざまな疾患でエピジェネティクスの異常が観察されている。エピジェネティクスの異常は疾患に直結するのだ。眞貝主任研究員は、エピジェネ

ティクスの基礎研究を疾患の診断や治療につなげることを目指している。「化学修飾は付けたり取ったりができます。つまり、化学修飾を操作することで治療が可能になると期待しています。5年ほど前から理研の中で横断研究プロジェクトを立ち上げ、エピジェネティクスの制御によって疾患の診断や治療を可能にすることを目指して連携研究をしています」。G9a/GLPがメチル化するタンパク質のスクリーニングも横断研究プロジェクトの枠組みを利用したものだ。

「エピジェネティクスはまだ分かっていないことが多い」と眞貝主任研究員。メチル化酵素はたくさん知られている。その多くはどこをメチル化するかという特異性はない。しかし、ランダムにメチル化しては、メチル化パターンを正しく継承することはできない。「メチル化酵素には特異性はなく、満遍なくメチル化しているのかもしれませんが。その後、脱メチル化酵素が不要な部位のメチル化を取っていく。そういう仕組みになっているかもしれないと考えています」

眞貝主任研究員は、「エピジェネティクス、そして細胞記憶のメカニズムが少しずつ明らかになってきましたが、私はまだ登場人物が足りないという気がしています」と指摘する。「修飾を入れる酵素、修飾を取る酵素、その目印を認識する分子、それらを運んでくる分子……。エピジェネティクスに関わる登場人物を全て見つけ出し、それらのつながりを明らかにする。それを今後10年くらいで成し遂げたいと思っています」

(取材・執筆：鈴木志乃/フォトンクリエイト)

理論科学と計算科学、さらに純粋数学の研究者が分野を超えて共同研究を行う数理創造プログラム (iTHEMS: interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences Program) が2016年11月に設立された(図1)。「現在の自然科学で使われている数学は、20世紀のものです。

21世紀の現代数学を使うことでサイエンスを次のステップへ進めることを目指します」理論物理が専門の初田哲男プログラムディレクター (PD) はiTHEMSの設立趣旨をそう語る。

iTHEMSで目指すものを、初田PD、宇宙物理や計算科学が専門の長瀧重博 副PD、純粋数学(幾何学)が専門の坪井 俊 副PDに聞く。

# 数理創造プログラム iTHEMS

自然科学と数理科学の共進化を図る

## ■ 分野を超えて共通する数理の手法

—iTHEMSは、理論科学連携研究推進グループ (iTHES: interdisciplinary Theoretical Science) の活動を受け継ぎ、発展させるものと伺いました。iTHESをどのような趣旨で設立したのですか。

**初田:** 理研には、物理や化学、生物などの理論科学や計算科学の研究者がいます。話をしてみると、研究対象は異なりますが、問題を解くための数理の手法は分野を超えて適用できそうなことが分かりました。それぞれの数理の手法を共有して新しいサイエンスを創成することを目指して、2013年4月にiTHESをスタートさせました(～2018年3月)。

iTHESでは延べ20名を超える若手研究者を雇用し、自分の専門分野のところが研究をすると同時に、ほかの分野の研究者と交流して異分野の研究も進めてほしいとお願いしました。そして、異分野間の交流を促すためにいくつかの仕掛けを設けました。まず、さまざまな分野の基礎科学の動向を聴くために第一線の研究者を招いたコロキウムと、企業や社会で数理がどう使われているかを知るために企業の方を講師に招いた産学連携レクチャーを、隔月で開催してきました。さらに長瀧さんの発案で、異分野の若手研究者が気楽に交流する場として2014年から毎週、金曜コーヒーミーティングを開いてきました。また、iTHESの活動を共有するために電子メールによるニュースレターを毎週発行してきました。

私自身も、理論生物学が専門の望月敦史 主任研究員 (iTHESではチームリーダー、iTHEMSでは副PD) が率いる研究室のセミナーに毎週参加して、生物における重要な問題は何かを学び、その問題を物理の数理手法で解くことができるか検討する作業を2年間ほど続けました。

—実際に分野を超えた共同研究は進展したのですか。

**初田:** うまくいくかどうか心配していましたが、意外と早く、研究成果が次々と出てきました。二つだけ紹介しましょう。

一つは、私や望月さんが加わり、素粒子論が専門の小川軌明 特別研究員が中心となって進めた、魚の網膜の形成過程を再現する研究です。魚の網膜では、赤・緑・青・紫外線をそれぞれ感知する4種類の細胞が規則的なパターンを形成します。その網膜のパターンがどのような仕組みでできるのかという問題を、物質の磁性(電子スピンの向き)の問題に読み替えて数理モデルをつくり、パターン形成過程を再現することに成功しました(図2)。私は、その数理モデルに基づき視覚センサーをつくりたいと思っています。

もう一つは、原子核理論が専門の境 祐二 特別研究員(当時)が中心となって進めた、細胞分裂において複製されたDNAがきれいに分配される仕組みの研究です。境さんは分子動力学シミュレーションを行い、絡み合いそうになるとDNAが切り貼りされる仕組みが、分配に必要であることを見いだしました。その仕組みが、実際のDNAに働いていることが知られています。この研究は高く評価され、境さんは東京大学医学部の助教に採用されました。

## ■ 数学との連携の必要性

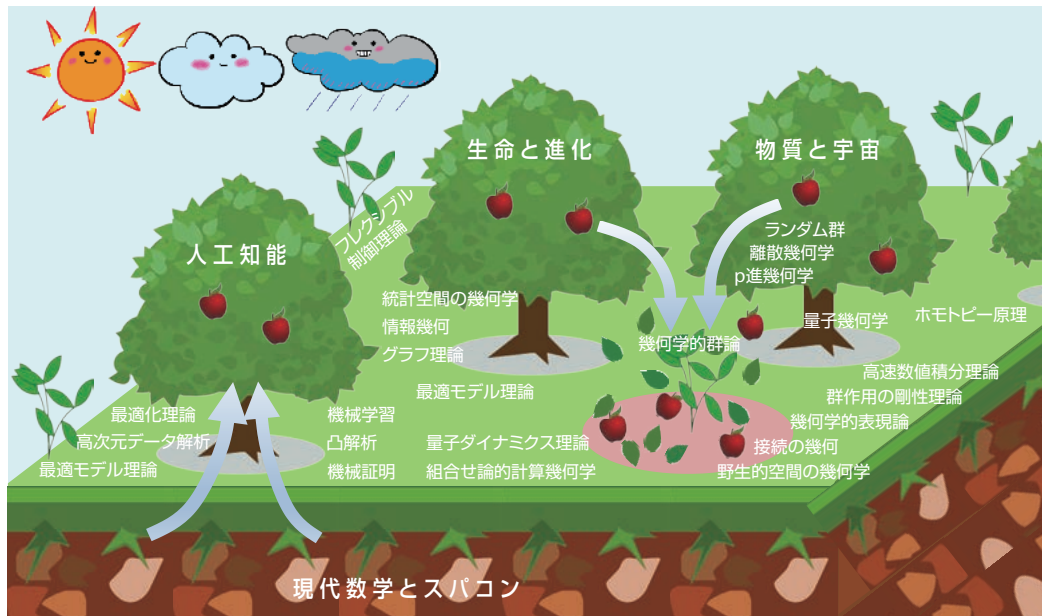
—iTHESにM (Mathematical) を加えてiTHEMSを設立した趣旨をお教えてください。

**初田:** 20世紀後半以降に生み出された現代数学を本格的に使うことで初めて、自然科学は次のステップに進めるはずでした。1917年に設立された理研の初代所長は数学者でしたが半年で離職し、百年間、理研には純粋数学者がいませんでした。そこで、日本数学会の理事長などを歴任された坪井さんに副PDに就任していただき、純粋数学の若手研究者にiTHEMSに参加してもらうことにしました。iTHEMSに対して日本の数学界全体からご支援を頂いています。

—日本の数学界がiTHEMSを支援する理由は何ですか。

**坪井:** まず、数学研究の流れについて簡単に振り返ってみま

図1 iTHEMSにおける自然科学と数理学の共進化のイメージ



しょう。20世紀初め、数学の正しさをどこまで証明できるのかという論争があり、20世紀の数学は抽象化に向かいました。その抽象化により数学は大きく力をつけ、具体的な問題への適用範囲が広がったと思います。確率論の基礎づけは20世紀の数学の大きな成果の一つです。日本は確率論の研究が盛んで、伊藤 清先生の確率解析の理論を生み出しましたが、それは、株価予測などにも適用されています。1980年代になると、物理学に現れる数学を重視しようという動きなど、抽象化から具体化へ戻る流れが出てきました。

日本の数学界では特に10年ほど前から、企業や自然科学が抱える問題に現代数学を適用する取り組みを進めてきました。ただし、そのような取り組みは海外が先行しています。欧米では、伝統ある数理の研究所が活動を続けてきました。さらに中国や韓国、インドでも、数理の研究所が次々と設立されています。一方、日本の大学では長い間、ある程度の規模の数理研究所は京都大学の数理解析研究所しかありませんでした。21世紀に入り、九州大学のマス・フォア・インダストリ研究所 (IMI) や明治大学の先端数理科学インスティテュート (MIMS) が設立されましたが、現代数学をさまざまな分野に適用する取り組みをさらに進展させるには、多くの数学者や自然科学者、企業の人たちが集まる拠点が必要です。自然科学のあらゆる分野の最先端研究が行われている理研に数学者が参加することで、さまざまな相互作用が生まれると期待して、日本の数学界はiTHEMSに協力しています。

——どのような相互作用が生まれそうですか。

坪井：同じ視点の人たちで議論を進めても、あるところで行き詰まってしまうことがよくあります。その問題は別の問題と関係しているのではないかと、異なる見方を提示する人がいると議論は進みます。数学者は自然科学者とは異なる見方を提示することができるでしょう。数学は、代数、幾何、解析の3分野に大きく分かれます。それぞれの分野でも見方が異なり、同じ

方程式を解く場合でも異なる解き方をするケースがあります。

初田：自然科学の中で物理は数学に近い分野だと思いますが、iTHEMSで数学者と話をしてみて、用語や議論の展開の仕方が違うことを実感しています。物理学では、たくさんの具体例を挙げてから最後に抽象化した結論を述べます。一方、数学者は逆で、最初に抽象化した結論を述べてから最後に具体例を挙げるので、物理学者の私たちは戸惑います。iTHEMSで理論生物学が専門の望月さんたちと議論を始めたときも、用語が分からず戸惑いましたが、数年後には分野を超えた共同研究の成果が出てきました。iTHEMSでも数年後には、数学と自然科学の共同研究による新しい研究成果が次々と生まれてくることでしょう。

## ■多くの研究者が集まる数理の拠点をつくる

——理研の中でiTHEMSはどのような役割を担うのですか。

初田：理研には、脳科学総合研究センターなど、さまざまな分

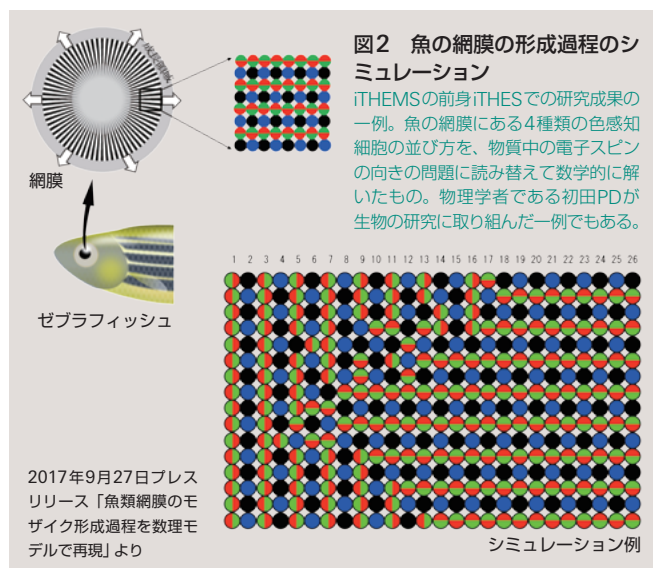




図3 iTHEMSのランチミーティングの様子(2017年10月20日)

10月16日に発表された中性子星合体の重力波観測を中心に報告と議論が行われ、理研の松本 紘 理事長(右端)も参加した。iTHESIに続きiTHEMSでも交流ミーティングを頻繁に開催している。

野のセンターがあります。それらの分野を横断する共通言語は数学です。iTHEMSはセンターと同格で、センター群を横につなぐ役割を担います。

海外には、100名の規模で研究者が集まる数理の研究所が数多くあります。iTHEMSでは、最低でも常時30名ほどの若手研究者を雇用することを目指しています。さらに国内外の大学や研究機関との連携拠点づくりを進めています。私が共同研究を進めてきた米国のローレンス・バークレー国立研究所にも連携を打診したところ、ぜひ使ってほしいと部屋を用意してくれました。

——長瀧 副PDは、iTHESIから参加されています。iTHESIやiTHEMSに参加することで、どのようなメリットがありますか。

長瀧: 私は宇宙の研究に専念するつもりで2013年に理研に入りましたが、2014年から正式に参加したiTHESIを通じて、研究活動が予想外の方向へ発展しました。現在、iTHEMSの一環として、全国の大学の研究者も巻き込んで、人工知能(AI)と宇宙を考えるワーキンググループをつくり、先日2017年9月にはiTHEMSの連携拠点がある東北大学でシンポジウムを行いました。そこでは、言語学や哲学の研究者にも参加していただき議論をしました。私の専門は宇宙物理ですが、中高生のころには生物や数学、さらに哲学にも興味がありました。iTHESIやiTHEMSの活動でさまざまな分野の人と出会い、中高生のころの好奇心が再び刺激されています。iTHEMSに加わった数学者から現代数学のレクチャーを受ける機会もあり、とても

楽しいですね。

——AIは宇宙物理の研究にどのように役立つのですか。

長瀧: 宇宙の観測が進展し、世界中から膨大な観測データが公開されています。とても人が目を通すことのできない量のビッグデータです。AIはそのビッグデータから、面白そうなデータを絞り込んでくれます。AIが絞り込んだものが本当に面白いデータかどうかを人が検討して研究を進める、といったことができます。例えば、これまでX線による宇宙観測のスペクトル解析では、複数のプラズマ状態が混ざった複雑なスペクトルを長年の経験による職人技で解釈し、個々のプラズマ状態を推定していました。そのような複雑なデータをAIで解析することで、経験の浅い大学院生でも正しく解釈できるようになります。AIの有用性は宇宙物理においても非常に高いことを実感しています。

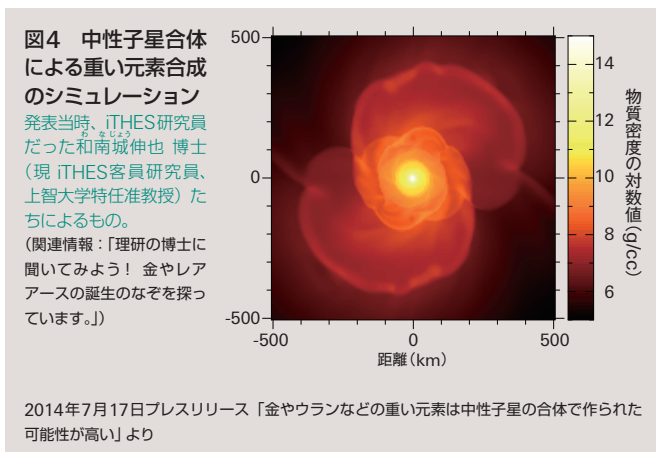
——iTHESI やiTHEMSでは産業界との連携にも力を入れているそうですね。

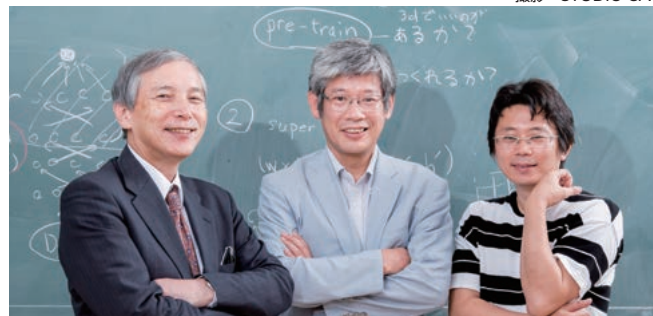
長瀧: 産学連携レクチャーで、企業で活躍している研究者の話を聴き、大学や研究機関で学んだ基礎科学や数理の手法を企業で活かしていることを知りました。企業の研究者との交流がきっかけとなり、iTHESIの研究者で企業に就職した人もいます。初田: iTHEMSでも、自然科学や産業界を含め多様な分野の人たちと連携を図っていく計画です。そのような数理の拠点は世界的にも珍しいと思います。

## ■ iTHEMSで目指すもの

——iTHEMSには、どのような研究を行うチームやグループがあるのですか。

初田: iTHEMSにはチームやグループは設けません。縦割りの組織には、絶対にしたくないからです。iTHEMSの研究者全員が一つの研究室に所属しているイメージです。ただし、さまざまな分野の交流を促すために、現時点で「極限宇宙」「生命進化」「数理AI」「新しい幾何学」という四つの「セル」を設けています。セルは、研究室にあるテーブルのようなもので、離合集散ができる緩やかなつながりです。先ほどの長瀧さんのAIと宇宙の話題で出てきたワーキンググループは、研究員からの発案で設けたもので、セルの前段階です。やがてセルに成長す





左から、坪井 俊 副プログラムディレクター、初田哲男プログラムディレクター、長瀧重博 副プログラムディレクター。

る可能性があります。

——まず、「極限宇宙セル」の研究内容をご紹介ください。

**長瀧**：宇宙の研究は、とてもホットな時代が始まりました。きっかけは今年2017年10月16日に発表された中性子星合体の観測です（図3）。2015年にブラックホールの合体による重力波が初めて観測され、貢献した研究者たちに2017年のノーベル物理学賞が贈られました。ただし、ブラックホールの合体からは光（電磁波）は出てきません。一方、中性子星合体では重力波とともに電磁波が発生します。その電磁波を世界中の望遠鏡が観測しました。中性子星は、原子核をつくる中性子を主成分とする半径10kmという小さな天体ですが、太陽ほどの質量があると推定されています。そのような超高密度の極限天体は、原子核の理論や中性子をつくるクォークの理論で説明されます。それらの理論がどこまで正しいのか、中性子星合体の重力波と電磁波の観測データにより検証することができます。また、中性子星合体により金やプラチナなどの重い元素が合成されるという仮説があります（図4）。その仮説を観測データにより検証することもできるようになります。今後、さまざまなタイプの中性子星合体の観測データが次々に出てくるはずですよ。

**初田**：それらの観測データの分析により、物理学は大きく変わると思います。私も、とてもわくわくしています。

**長瀧**：また、私がiTHEMSで目指す究極の目標は、宇宙がどのように始まったかを理解することです。私はブラックホールを深く理解することでこの目標を達成できるかもしれないと考えています。例えば、ブラックホールの計算では無限大の量が出てきてしまいます。すると計算を先に進めることができなくなります。現代数学を使って無限大をうまく回避できないかと期待しています。

**坪井**：無限大は、数学において大きな議論的になってきたテーマです。ブラックホールや宇宙の始まりなどの物理研究には、数学としても面白いテーマがたくさんあるはずですよ。

——「生命進化」「数理AI」「新しい幾何学」の各セルでは、どのような研究を進めるのですか。

**初田**：「生命進化セル」では生命進化の解明に挑みます。ただし現在の多様な生命の進化をいきなり扱うのは難しいので、単純な原始生命がどのように進化したのかをテーマに、副PDの

望月さんたちが解明していきます。

「数理AIセル」の目標は二つです。一つは、人の長年の経験に基づく匠の技の本質をAIで解析することです。技のこつを言葉で説明するのは難しい場合が多いですね。私たちはスポーツを題材に、サッカーや重量挙げの選手の計測データをAIで解析して、優れた選手に共通するフォームやタイミングの特徴を引き出す研究を進めています。もう一つの目標は、AIの原理の解明です。実は、AIがなぜうまく学習して答えを出せるのか、原理がよく分かっていません。その原理を解明して、さらに現在よりも優れたAIの新原理をつくり出すことを目指します。その研究は、理研の革新知能統合研究センター（AIP）とも連携して進めます。

iTHEMSでは、自然科学の研究だけでなく、新しい数学を生み出すことも目指します。それが「新しい幾何学セル」の目標です。

**坪井**：数学理論から考えると計算できないはずの現象について、物理学ではうまく計算を行っている例があります。それは数学理論に不十分な点があるからかもしれません。物理学の計算を検証することで新しい数学理論を生み出せるかもしれません。

また、AIは数学から見ても新しい現象です。AIが学習して答えを出す原理を数学で記述できていません。それを記述する新しい数学をつくることができれば、AIを改良することもできるようになるでしょう。

——理論物理が専門の初田PDが分野の枠を超えて、iTHESやiTHEMSの活動に力を入れてきた理由は何ですか。

**初田**：長瀧さんと同じで、私も子どものころから、いろいろな分野に興味を抱いてきました。かつてサイエンスは一つでした。それが数学や物理、化学、生物などの分野に細分化しました。21世紀は、細分化された分野を再融合して、共通の概念を見いだす時代だと思います。

相対論を確立したアインシュタインも、それが百年後にGPSなどの技術に役立てられるとは、想像すらできなかったでしょう。iTHEMSの研究者たちには、ぜひ壮大なテーマに挑み、百年後に役立つ理論の確立を目指してほしいと思います。

（取材・構成：立山 晃/フォトンクリエイト）

## 分子の相互作用に基づいて 新材料をつくり出す

新しい材料の開発に挑戦し続けている研究者が創発物性科学研究センターにいる。創発ソフトマター機能研究グループの宮島大吾 上級研究員（以下、研究員）だ。熱しても冷やしても形成される超分子ポリマー、湿度の揺らぎを動力源として半永久的に駆動する装置（アクチュエーター）、原料を混ぜるだけで超分子ポリマーを精密合成する手法などを次々と開発している。「ばらばらのことをやっていると思われるかもしれませんが、分子同士の相互作用を利用して新しい機能を持つ材料をつくるという点では共通しています。新材料の開発に必要なのは、絶対見つけてやるという執念。そう語る宮島研究員の素顔に迫る。



### 宮島大吾

創発物性科学研究センター  
創発ソフトマター機能研究グループ  
上級研究員

#### みやじま・だいご

1984年、埼玉県生まれ。博士（工学）。東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻博士課程修了。米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校訪問研究員などを経て、2013年より理研創発物性科学研究センター特別研究員。同基礎科学特別研究員を経て、2017年より現職。

「どういう職業に就きたいか、子どものころは一切考えたことがなかった」と宮島研究員。大学受験に向けた勉強をする中で生命の起源に興味を持ち、研究者になろうと決めた。

東京大学工学部化学生命工学科に進学すると、1年生のときからケミカルバイオロジーの菅 裕明 教授の研究室に通い、大学院生と実験をしていた。生命誕生の初期に存在したと考えられる触媒活性を持つRNAの発見を目指したもので、研究の面白さに引き込まれていった。しかし4年生での本配属では、現所属のグループリーダーでもある材料化学の相田卓三教授の研究室に。「ある目的では欠点となる性質も、違う目的では長所になり得る。材料科学はアイデア次第でいくらでも逆転ホームランを打てるというのが、自分に合っていました」

2013年から理研に。「既存の材料を改良するのではなく、分子同士の相互作用に注目して分子設計をすることで、今までにない機能を持つ新材料の開発に挑戦しています」

その一つが超分子ポリマーだ。通常のポリマー（高分子）は小さなモノマー（単量体）が共有結合という強い力でつながっているのに対し、超分子ポリマーはモノマーが水素結合などの弱い力でつながっている。超分子ポリマーはモノマー同士のつながりを物理的な力で引き離すことができ、力を緩めれば再接着することから、ダメージを自身で修復できる材料として注目されている。しかし加熱するとモノマーに戻って

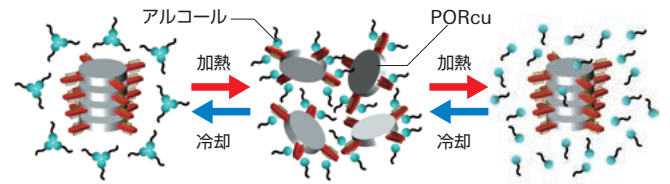


図 加熱・冷却により超分子ポリマーが形成される様子の模式図

十分な量のアルコールがあるとPORcuのアミド基とアルコールの水酸基が水素結合を形成し、PORcuはばらばらに存在する（中央）。加熱・冷却するとアルコールがPORcuから離れ、PORcuのアミド基同士が水素結合して超分子ポリマーが形成される。

しまうため、応用が制限されていた。「超分子ポリマーを加熱するとモノマーになるというのは熱力学の法則にのっとった現象です。その常識を覆せないか、と考えたのが始まりです」。そして、PORcuというモノマーから成る超分子ポリマーを開発。その溶液に十分な量のアルコールを加えるとモノマーになり、加熱するとアルコールが外れて超分子ポリマーが形成される（図）。さらに、想定していなかったことだが、モノマーの状態から冷却してもアルコールが外れて超分子ポリマーが形成された。加熱しても冷却しても超分子ポリマーができるユニークな材料の誕生だ。「新材料がすぐに製品に使えるわけではありませんが、材料開発における新たな設計指針を提示することが私たちの使命だと思っています」

光触媒材料として注目されながら、溶媒に溶けない粉末のため応用が難しかったグラフィティック・カーボンナイトライド（GCN）の薄膜化技術も開発。これだけでも大きな成果だが、宮島研究員は新しい用途を模索した。「薄膜を乾燥させるためにヒーターに近づけたら少し動いたのです。空気の対流で動いたのかと思いましたが、薄膜が吸着した水分子が追い出されることで薄膜が曲がっていることに気が付きました。その性質を利用し、わずかな湿度の揺らぎを動力源として駆動するアクチュエーターを開発しました」

次々と新材料を開発する秘訣は？「まだ誰もやっていないことをしたい、と走り続けてきただけ」と笑う。「多くの場合、青写真どおりにはいきません。予想外のことが起きると落ち込みますが、そこにこそチャンスが眠っています。執念深く諦めずに考え抜くとアイデアが浮かび、新材料にたどり着けるのです。いつも分子設計を考えているので、家族に話し掛けられたときに空返事をして怒られることもあります……」

性格を聞くと「しつこい」と返ってきた。趣味は？「研究以外には興味がなく、夫婦での食べ歩きくらいかな。行列に並ぶのは苦になりません」。研究以外でも執念の人のようだ。

今でも生命の起源には興味がある。「生命の誕生でも分子の相互作用が働いているはず。アイデアを練りながら生命の起源の研究に参入する機会を虎視眈々と狙っています」

（取材・執筆：鈴木志乃／フotonクリエイト）

## 林 芳正 文部科学大臣が理研和光地区を視察

2017年10月25日、林 芳正<sup>よしまさ</sup> 文部科学大臣が和光地区をご視察されました。

和光地区にある脳科学総合研究センター、創発物性科学研究センター、仁科加速器研究センターの研究の現場をご覧いただきました。各センターでは、双極性障害の原因となる遺伝子変異を探る研究、記憶・学習における睡眠中の脳活動の研究と最新の顕微鏡開発、トポロジカル絶縁体やスキルミオンに関する研究成果、量子コンピュータの実現に向けた量子情報技術開発、加速器を使ったイオンビーム育種や新元素ニホニウムの合成について説明しました。視察を終えて林大臣は、「世界最先端の研究現場の視察はとても興味深かった。現場を見るというのは大事ですね」と話されました。



仁科RIBF棟サイクロペディアにて（写真左が林大臣）

## 理研サマースクールを開催

2017年9月1～2日、第9回となる理研サマースクールが千葉県木更津市のかずさアカデミアホールで開催されました。理研サマースクールは研究分野や国籍を超えた交流の場であり、異文化・異分野の研究者同士のコミュニケーションの中で国際的に活躍できる研究人材の育成を目指すものです。今年は、国内大学から受け入れている大学院生リサーチ・アソシエイトと、理研と国際連携大学院協定を結ぶ60以上の海外大学・機関からの国際プログラム・アソシエイト、計107名が参加しました。

全参加者が英語によるポスター発表と分野を超えての研究ディスカッションを行いました。ポスター発表は研究内容のみならず、異分野の人にいかに分かりやすく説明できるかもポイントとして、神谷勇治 名誉研究員ほか理研内各分野のPI（研究室主宰者）や若手研究者によって審査され、各分野で計11名が受賞しました。

### 小安重夫 理事

竹市雅俊チームリーダーによる基調講演に続き、若手PIによる講演も行われたが、質疑応答では「PIになるにはどうすればよいか？」という質問も飛び出し、聞いていてなかなか面白かった。サマースクールの中心は何といっても参加者によるポスター発表であり、最終日のポスター賞を目指して大盛況のポスターセッションが行われた。人の腕をつかんで自分のポスターの所へ連れていく猛者もあり、筆者も連れていかれた一人になった。異分野の研究者に対しても一生懸命に説明する姿はなかなか頼もしいもので、これが理研の素晴らしいところだと、改めて感じた次第である。ポスターを前にした夜の交流会でも多くの異分野の研究者との会話を楽しんでおり、深夜にわたる議論が続いた。これからも理研らしい異分野交流がこのような形で続くことを期待している。



### ベストポスター賞

#### 津坂剛史

大学院生リサーチ・アソシエイト  
眞貝細胞記憶研究室

本会では、普段あまり出会う機会のない、理研各地区から集まったさまざまな研究領域の大学院生たちと交流することができました。素晴らしいポスター発表が数多くされており、中でも綿村直人さん（和光地区）のアルツハイマー病に関する研究は、分子生物学や生化学、マウスモデルを駆使し治療につなげようとする意気込みが感じられ、宮島優里奈さん（横浜地区）の研究では自然リンパ球と脂肪細胞の関係をひもことうという情熱が感じられました。また、賞の審査員であった各分野のPIや基礎科学特別研究員の方たちとお話することができ、非常に刺激的でした。今回、受賞したことは次の研究へのモチベーションになっています。



### ポスター賞（生物科学分野）

#### Chai Gopalasingam

国際プログラム・アソシエイト  
放射光科学総合研究センター ビームライン基盤研究部

サマースクールはさまざまな分野・国籍の学生たちと交流できる素晴らしい機会でした。自分の研究から離れ、異なる分野の研究を知ることはとても刺激的でした。学术界で生き抜く方法や充実した研究生生活へのヒントがいっぱいの若手研究者の講演も興味深く、勉強になりました。参加して本当によかったです。次回は若手研究者として次世代に伝える立場で参加したいですね。

## 仕事も趣味も山だったころ

大石善雄 おおいし・よしお

広報室 嘱託職員

私は現在、本冊子『理研ニュース』の編集をしています。以前はどんな仕事をやっていたの？と問われると返答に窮します。たいていは「いろいろ」とごまかします。いろいろの中の一つ、大学卒業後に数年間従事した「屈折法地震探査」という仕事を紹介します。これを知る人はほとんどいないでしょうね。

地表付近でダイナミートを発破して小さな地震を起こすと、地震波（P波）の一部が地下で反射・屈折して地表に戻ってきます。戻ってきた屈折波を直線状に配置したたくさんの地震計で観測し、その到達時刻から地下のP波速度構造を推定するというものです。P波速度は地盤強度の指標になるので、屈折法地震探査はダムや原子力発電所などの立地調査でよく用いられます。

さて、探査する場所は人の住まない山や原野なので道がありません。どうやって調査するのか。偉い人が地図上に鉛筆で測線を引くと、それに従って測量チームがナタで草木を伐採して作業用の道を真っすぐにつくります。道といっても何とか歩ける程度のもので、まあ獣道ですね。私たち探査チームは、各自10～30kgの機材を担いでその獣道を移動しながら観測します。真っすぐですから崖もあるし沢もあります。山野ですからマムシもいますし、毛虫・やぶ蚊・ダニは当たり前です。体力的にきついので、この仕事で戦力になるのはたぶん40歳くらいまででしょう。

世の中には少数ですがこの道のプロがいます。彼らの体力は尋常でなく、少々の崖ならザイルなしで登ってしまいます。しかもダイナミートの扱いに慣れた技能集団です。有事の際には特殊工作部隊でしょう。新人の私は立場上責任者ですが、できるのは荷物運びくらい。彼らに迷惑を掛けないように必死に後についていくだけでした。急斜のザレ場で足を取られ一向に前に進めない自分が情けなく、とんでもない世界に入ったもんだと悔やんだものです。で



写真・1月の宝剣岳にて（20代後半の私）

もうれいしいこともありました。月の半分以上は山ごもりだったので、たまに都会に出ると、会う人会う人みんな美人に見えて楽しいったらありゃしない。

1年ほどやっていると体が慣れてきました。火薬取り扱いの免許を取得して発破手になれたときはうれしかった。発破した瞬間のおなかに響くズーン！がいいのです。北海道の原野で2週間くらい毎日探査していたとき、宿舎で朝、同僚に非難されたことがあります。「夜中、おまえの大声で飛び起きたんだぞ」って。発破する前には必ず四方に大声で注意喚起するのがルールなのです。どうやら夢の中でも「発破するぞー！」と。

あるとき、会社の同僚から山に登ってみたいかと誘われ、生まれて初めて八ヶ岳の頂に。知らぬ間に体力がついていたようで、意外にすいすいと。仕事で山、趣味で山ってどうなの、と思われるかもしれませんが、全然違うのです。森林限界を越えた稜線歩きの爽快さ、下山したときのたまったアクが抜けた感じ、実にいいのです。はまってしまいました。しばらくして冬山にも（写真）。白の世界の静けさは格別でした。

その後、新しい探査手法の開発を命じられソフト開発の面白さにはまり、その道に転身。ところがそこでも「やる人がいないから」と調査の仕事を命じられ、これも面白いな、と。やれることは何でもやってみたくなり、しまいはフリーに。そして縁あって今の職場に。屈折法地震探査とも山とも疎遠になってしまいましたが、一皮むけて生きているなど実感できた大切な思い出です。

### 創立百周年記念事業への寄附金のお願い

創立百周年（2017年）の記念事業へのご支援をお願いします。

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

理研 寄附金  
Support RIKEN

理化学研究所 創立百周年  
RIKEN 100th Anniversary



http://www.riken.jp/