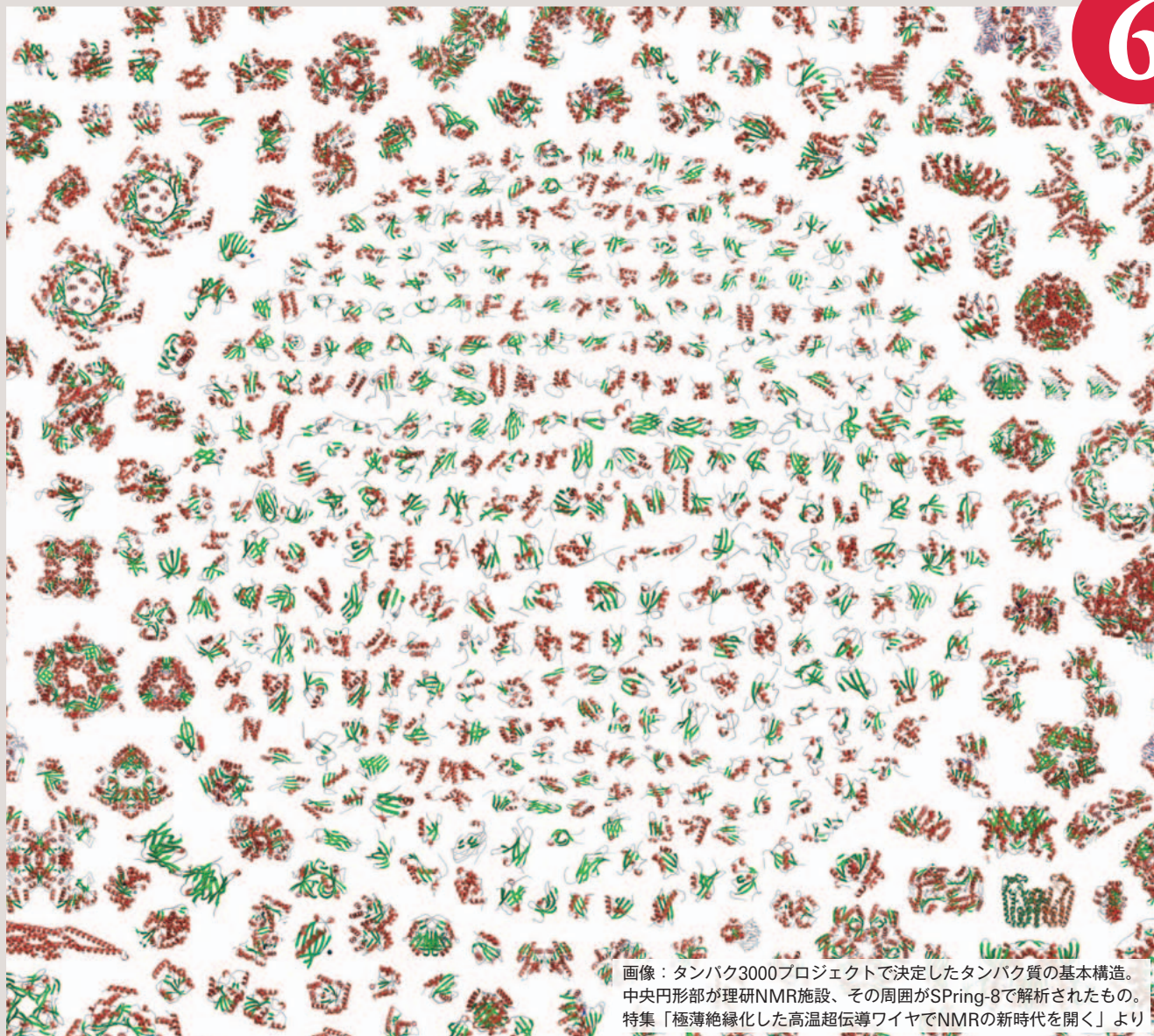


# RIKEN NEWS

No.396 June 2014

6



画像：タンパク3000プロジェクトで決定したタンパク質の基本構造。中央円形部が理研NMR施設、その周囲がSpring-8で解析されたもの。特集「極薄絶縁化した高温超伝導ワイヤでNMRの新時代を開く」より

研究最前線 ⑫

## 一細胞質量分析で世界を変える

研究最前線 ⑯

## 南極の氷床コアから 太陽活動と気候変動の関係を探る

特集 ⑩

## 極薄絶縁化した高温超伝導ワイヤで NMRの新時代を開く

SPOT NEWS ⑬

19世紀以来の謎、  
ホフマイスター効果に新説

FACE ⑭

量子色力学から核力の決定に挑む研究者

TOPICS ⑮

新研究室主宰者の紹介

原酒 ⑯

MAXIの装置論文が  
日本天文学会論文賞を受賞



細胞のどこに、どの分子が、どのくらいあるのか。

その分子が、どこに移動し、どう変化していくのか。

1個の細胞の中の分子変化を見ることは、生化学や生命科学、そして分析化学など多くの研究者にとっての夢だった。その夢、一細胞質量分析を世界で初めて成功させたのが、生命システム研究センターの一細胞質量分析研究チームを率いる升島 努チームリーダー（TL）である。一細胞質量分析は、創薬や医療、生命現象の解明を大きく進めるのに役立つと期待されている。しかも最近では、一細胞を超えて、細胞小器官ごとの分子変化を捉えることもできるようになっている。一細胞質量分析の最前線と、それがもたらす新しい世界を紹介しよう。

## 一細胞質量分析で世界を変える

### ■ 顕微鏡+ビデオカメラ+質量分析計

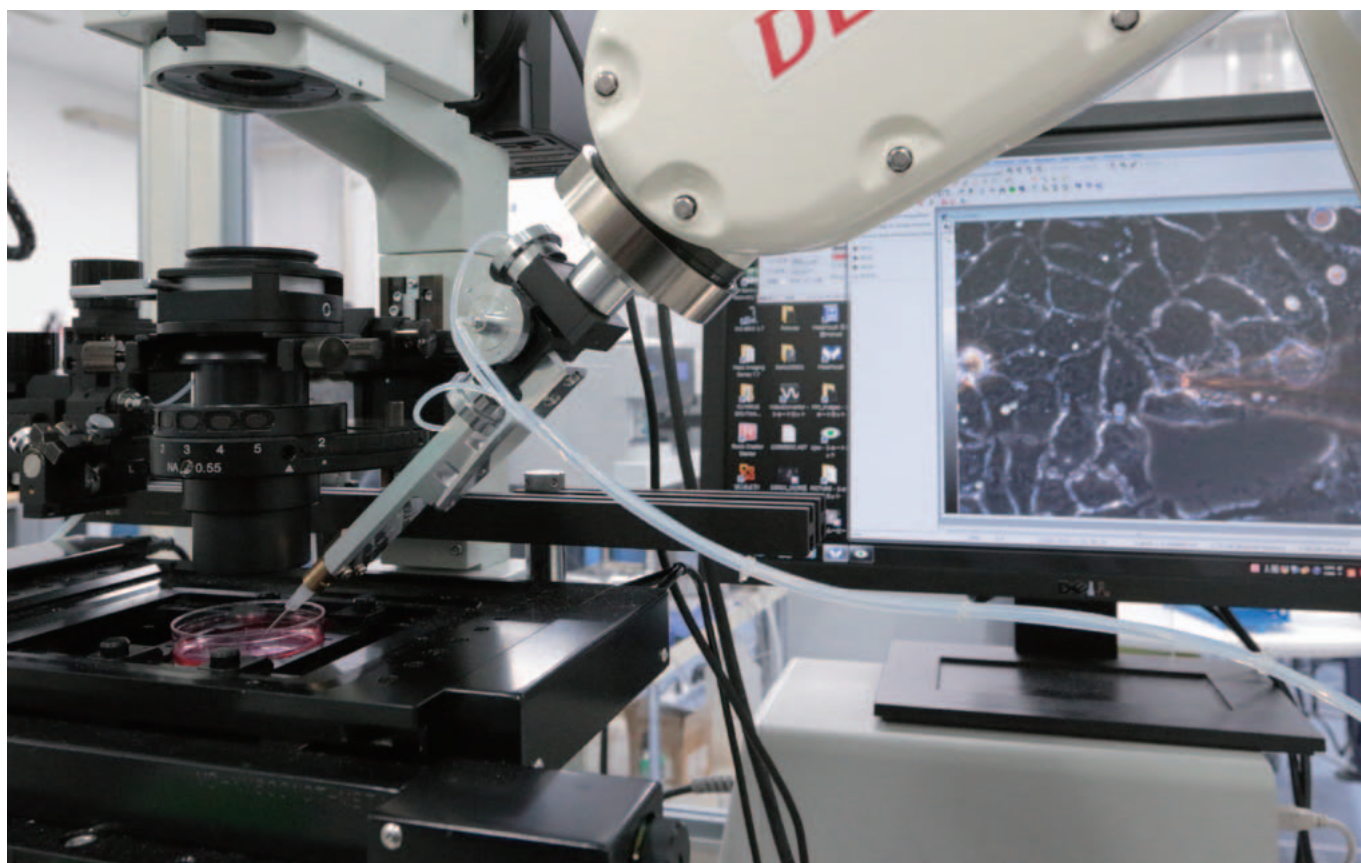
細胞を観察しながら、その細胞が変化した瞬間に、どの分子がどこにどれだけあるのかを捉えることができたらなあ——升島TLは1999年、オランダで開催された計測ミレニアムシンポジウムで、そんな夢を語った。「その実現に8年もかかるとは思わなかった」と笑う。

見たい分子を蛍光タンパク質などで標識することで、その動きを追うことは

できる。異なる色の蛍光タンパク質を使えば、数個の分子を追うことも可能だ。しかし、升島TLが見たいのは、それではない。「生命現象は、数個の分子で起きているわけではありません。数千、数万種類の分子がうごめいています。それらの分子を網羅的に見たいのです。どうすればそれが可能かを考え、質量分析計しかないだろうと狙いをつけました」

質量分析計とは試料中の分子の質量

を測る装置で、質量が分かればその分子が何であるかを特定できる。蛍光タンパク質で標識する方法は既知の分子にしか使えないが、質量分析計なら未知の分子も検出できる。升島TLは、顕微鏡にビデオカメラを取り付けて細胞の挙動を見ながら細胞1個について質量分析を行って分子を網羅的に調べるシステムを提言し、“ビデオマススペクトロスコープ”と名付けた。



撮影：奥野竹男

### 一細胞質量分析ロボット

ロボットがナノスプレーチップを取りにいて装着し、顕微鏡の焦点を合わせた細胞の真上まで自動で誘導する。モニターには顕微鏡に取り付けたビデオカメラの映像が映し出され、細胞とナノスプレーチップの先端が見える。

## 升島 努 (ますじま・つとむ)

生命システム研究センター  
細胞動態計測コア  
一細胞質量分析研究チーム  
チームリーダー

1949年、島根県生まれ。理学博士。広島大学理学部卒業。同大学大学院理学研究科博士課程修了。広島大学医学部総合薬学科助教授、米国ユタ大学化学科客員准教授などを経て、広島大学大学院医歯薬保健学研究科 教授。2011年より現職。



撮影：奥野竹男

早速その開発に着手したが、失敗の連続だった。「細胞1個の体積は、わずか1ピコリットル（1兆分の1リットル）です。そんな超微量の試料を質量分析計にかけようなんて、もともと無理なことだったのか、と落ち込みました。しかし、絶対に見たい、何か方法があるはずだと、しぶとく試行錯誤を続けました」

### ■ 世界初の一細胞質量分析

質量分析をするには、分子をイオン化して真空の装置に導入しなければいけない。このイオン化が難しいのだ。升島TLはさまざまな方法を試し、ナノスプレー法に行き着いた。ナノスプレー法では、ナノスプレーチップと呼ばれる、先端の口径が2~5 $\mu\text{m}$ （1 $\mu\text{m}$ は1mmの1,000分の1）、長さが3cmほどの細いガラス管を使う。顕微鏡下の細胞の挙動をビデオカメラで観察しながら、ナノスプレーチップの先端を細胞に刺して成分を吸い上げ、チップ後部からイオン化有機溶媒を入れる（図1・図2）。次に、チップの先端を質量分析計の導入部に近づけ、チップと導入部の間に高い電圧をかける。すると、微細な電荷を帯びた霧が発生する。その電荷が分子に乗り移りながら、つまりイオン化した分子が、装置に入っていく。質量分析の結果は、横軸に質量、縦軸に検出強度を取った質量スペクトルとして表示され、ピークが出ている位置とその高さから、分子の種類と量が分かる。

「ナノスプレーチップで1個の細胞から吸い出した試料を質量分析計に入れたら、質量スペクトルにたくさんのピーク

が出ました。世界で初めて一細胞質量分析に成功したのです。2007年でした」。当時、升島TLは広島大学大学院医歯薬学総合研究科（現・医歯薬保健学研究科）の教授だった。なぜ升島TLが世界初を成し遂げることができたのだろうか。

「鍵はナノスプレーチップです」と升島TL。「質量分析計は1台数千万円もするので、地方の大学の一研究室ではなかなか購入できません。それなら安くても高性能のものを自分たちでつくってしまおうと、質量分析計の開発を始めました。性能チェックでナノスプレーチップをたくさん使うのですが、1本1,000円もして、しかも使い捨てです。買うお金がないので、学生が工夫をしながら手づくりしていました。そのチップの品質が非常に良かったことが勝因です」

ナノスプレーチップに関する特許は、升島TLが創立したベンチャー企業、(株)HUMANIXが取得し、製造販売も行っている。「最初の成功から7年たった今

でも、私たちがつくったチップでなければ一細胞質量分析はできないようです」

### ■ 10分以内に一細胞で薬物代謝を分析

升島TLは2011年、理研生命システム研究センター（QBiC）の発足と同時に一細胞質量分析研究チームを立ち上げた。「一細胞質量分析に成功したとき、これで社会に恩返しできたらいいなと思いました」と升島TLは言う。「私たち研究者は、社会に支えられて研究を続けさせてもらっていますが、社会に役立つことをしてきたかと問われると、自信がありませんでした。この一細胞質量分析は、創薬や医療、生命科学の基礎研究の発展にも大きく貢献し、社会に恩返しできる技術ではないかと思ったのです」

創薬で最も重要なのが、薬物代謝の分析だ。投与された薬物は肝臓に運ばれ、さまざまな分子へと変化し、無毒化される。しかし、その代謝の過程で毒性の強い分子ができてしまい、副作用を引

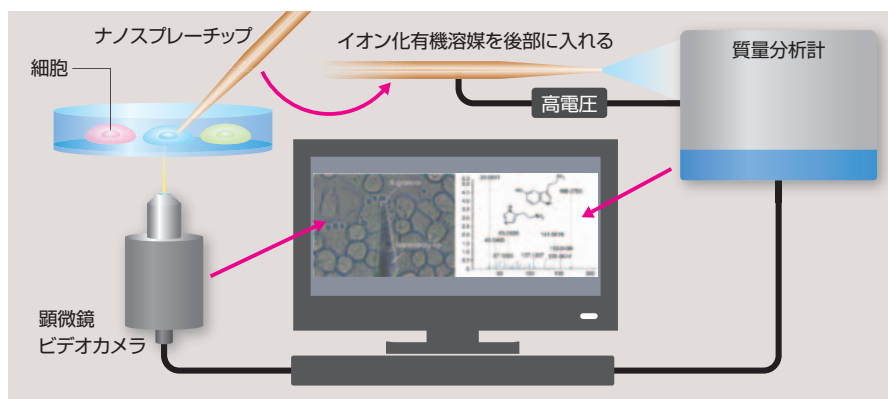


図1 一細胞質量分析

顕微鏡に取り付けたビデオカメラで観察しながら細胞にナノスプレーチップを刺し、成分を吸引する。ナノスプレーチップの後部にイオン化有機溶媒を入れ、質量分析計の導入部に近づけて高電圧をかける。分子はイオン化され微細な霧状になって装置に入り、質量が分析される。結果は質量スペクトルとして表示され、ピークが出ている位置とその高さから、分子の種類と量が分かる。



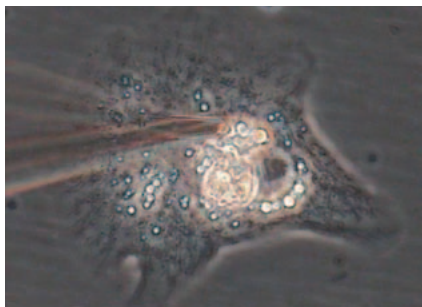


図2 ナノスプレーチップで細胞内の成分を吸い上げる様子

き起こすことがある。新薬の開発では薬物代謝を詳しく調べ、毒性の強い分子がつくられないことを確認する必要がある。最終段階ではヒトの肝臓の組織を使って調べるのだが、倫理上の問題もありヒトの組織は入手しにくく高価だ。また、組織をすりつぶし、分子を分離してから分析しなければいけないので、手間も時間もかかる。薬物代謝の分析は、創薬のボトルネックとなっているのだ。

升島TLは、製薬企業と共同で一細胞質量分析が薬物代謝分析に有効かどうかの検証を進めていった。2012年には、ヒト肝臓細胞に緑内障の治療薬であるタフルプロストを投与して細胞成分の質量分析を行い、タフルプロストが代謝されてきた多種類の分子の検出に成功した(図3)。薬を投与してから細胞成分を吸い出すまでの時間を変えていけば、分子の種類や量の時間変化を追うこともできる。細胞は1個1個異なる振る舞いをしている。組織をすりつぶして分析すると多数の死んだ細胞の平均しか見えないが、一細胞質量分析であれば、細胞が生きたままで細胞ごとの違いを見ることができるという利点もある。

一細胞質量分析では、試料を顕微鏡にセットしてから質量分析計に導入するまで5分、質量分析の計測に5分、合計10分だ。組織を使う方法では数時間かかる。一細胞質量分析は、創薬のコストダウンとスピードアップに貢献する。

一細胞質量分析は医療への展開も期待されている。同じ疾患でも患者さんによって薬の効果や副作用の出方が違うことから、一人一人に最適の医療を提供

するオーダーメイド医療が求められている。例えば、がんの患者さんは多くの場合、病変組織を採取して検査を行っている。一細胞質量分析ならば、採取した組織の細胞1個を用いて薬物代謝を調べ、その患者さんに最も効果があり副作用が少ない薬を選ぶことが可能だ。

また、1滴の血液や唾液、汗に含まれる分子を検出することもできる。患者さんに大きな負担を掛けることなく、病態やその進行度を診断する。そんな時代も遠くないだろう。

### ■一細胞から一細胞小器官へ

升島TLのもとには、一細胞質量分析の話聞きつけた製薬企業の研究者が次々と尋ねてくる。「研究に対して真摯に取り組んでおられる皆さんですから、私たちの持っている技術をすべて伝えていきます。私たちの技術が社会に役立てばうれしいですし、創薬の現場で何が必要とされているのか生の声を聞き、皆さんと共同研究することで技術も進化できます。実際、一細胞質量分析は進化し、すでに細胞1個ではなく、細胞小器官ごとに分析できるようになっています」と升島TL。

細胞の中には、小胞やゴルジ体、ミトコンドリア、液胞などの構造があり、細胞小器官と呼ばれている。升島TLらは、先端口径が1 $\mu$ mの非常に細いナノスプレーチップをつくって1個の細胞小器官から成分を吸い出し、その質量分析に成功している。どの分子がどの細胞小器官に局在しているか、分子がどの細胞小器官からどの細胞小器官に移

動していくかを知ることできる。「一細胞小器官までの質量分析によって、細胞1個で候補化合物の薬効・薬理から局在・到達、代謝、毒性まで一気に調べることが可能になりました。“一細胞創薬 (Single Cell Drug Discovery)”の時代が、もうすぐそこまで来ているのです」

### ■一細胞質量分析ロボットを開発

一細胞質量分析が製薬企業で使われ始めると、さまざまな要望が出てきた。「一番多い要望が、スピードアップでした」と升島TL。創薬の過程では、数千個の化合物が候補に挙がる。それらをすべて調べるには、もっと速さが欲しいのだ。一細胞質量分析の過程を検証すると、ナノスプレーチップを分析したい細胞の真上に持っていき動作に時間がかかり、熟練も必要であることが分かった。そこで、その過程を自動化したロボットを開発した(タイトル図)。

まず、ロボットがナノスプレーチップを取りにいった装着する。細胞の入ったシャーレは顕微鏡のステージに置き、分析したい細胞に焦点を合わせておく。するとロボットは、ナノスプレーチップの先端位置を自動で検出・補正し、顕微鏡の焦点位置の細胞のすぐ上まで誘導してくれる。細胞のどの部分からどのタイミングで成分を吸い上げるかは人が決め、人が作業する。細胞の変化の見極めや微妙な力加減が必要なため、この作業のみは人にやらせたい、というのが升島TLの考えだ。今後は、細胞成分を吸引したナノスプレーチップにイオ

ン化有機溶媒を注入する作業と、質量分析計へのセットも、ロボットが行うようにしていく計画だ。このロボットの導入によって、分析の高速化、効率化が大きく進む。

#### ■ 4次元代謝マップをつくる

「一細胞小器官の質量分析が可能になったことで、創薬のような応用だけでなく、基礎研究にも大きな貢献が期待されています」と升島TL。「私たちは今、4次元代謝マップをつくらうとしています」

生体内では、さまざまな分子が生合成や分解によって別な分子へと変化していく。その経路を図式化したものが代謝マップである。升島TLがつくらうとしている代謝マップは、従来のものとどう違うのだろうか。

「これまでの代謝マップはたくさんの細胞をすりつぶして調べた結果なので、細胞内のどこでどの代謝が行われているのかは分かっていません。私たちの手法を使えば、細胞小器官ごとに、しかも時間経過を追って中間代謝物も含めて調べることができるので、細胞内の分子の移動、変化を追跡することができます」

しかも升島TLは、安定同位体を使っ

て分子の移動、変化をより厳密に追跡しようとしている。安定同位体とは、原子番号（陽子数）は同じだが質量数が異なる同位体のうち、自然界で安定に存在しているものをいう。炭素12に対する炭素13、窒素14に対する窒素15などがある。例えば、出発点とする分子に含まれる炭素12を炭素13に置き換え、それを細胞に投与する。細胞内では炭素12と炭素13は区別されず同様に代謝され、代謝によって別な分子になっても炭素13の目印は残る。一方、質量分析では炭素12と炭素13は明確に区別できるため、同じ分子でも外から投与したものの元から細胞内にあったものか、判別可能だ。「一細胞質量分析と安定同位体を組み合わせることで、細胞内の分子の移動や変化を、糸を通すように追跡できるのです」

すでに、アレルギー細胞を用いて、4次元代謝マップづくりに着手している。「私たちの分析によって代謝マップは大きく書き換えられることになるでしょう。生命科学の新しい基礎をつくるんだ。そのくらいの気概で取り組んでいます」

#### ■ 第2世代の一細胞質量分析へ

すでに創薬、医療、生命現象解明へ

の応用を展開している一細胞質量分析だが、升島TLは「まだ未完成」と言う。課題は、定量性の向上と、識別できる分子の種類を増やすことだ。

定量性の向上とは、分子の量をより正確に測定することである。「試料が超微量なのだから、これ以上の定量性向上はできないだろうと、みんなは言います。しかし、できないと言った瞬間に発展はないのです。チャレンジするのみです」

現在の一細胞質量分析では、約2,000種類の分子を捉えている。しかし升島TLは、まだ細胞にあるすべての分子を捉えることができていないと考えている。質量数の近い分子が一つにまとめられてしまっているのだ。それらを個々の分子として捉えたい場合、クロマトグラフィーによって分子をあらかじめ分離してから質量分析計に導入する方法がよく用いられる。「私の頭の中には、まったく違う新手法が描かれています。それによって4,000~5,000種類の分子を捉えられるようになるの見込んでいます」。第2世代の一細胞質量分析の開発は着々と進んでいる。

「質量分析計の開発や創薬は、これまで欧米の独壇場でした。一細胞質量分析は、日本で生まれ、日本で育ててきた技術です。私たちは、この技術で世界を先導し、創薬の世界も変えたいですね」と升島TL。そして、こう結んだ。「一細胞質量分析を使った新薬の誕生が楽しみです。きっとそのとき泣くでしょうね」

(取材・執筆：鈴木志乃/フotonクリエイト)

肝臓の細胞1個から得られた質量スペクトル

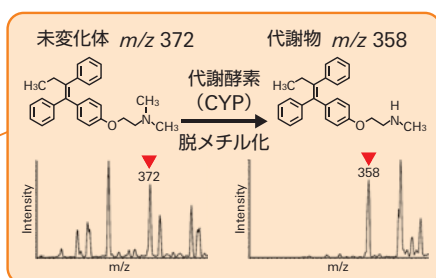
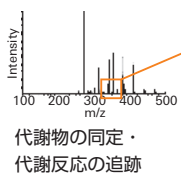


図3 タフルプロストの代謝物の検出

ヒト肝臓細胞にタフルプロストを投与して細胞成分の質量分析を行った。質量スペクトルの横軸は質量で、分子を特定できる。縦軸は検出強度で、分子の量に比例する。元の物質と脱メチル化によってできた代謝物が検出されている。



人類の活動に伴う二酸化炭素の大気への放出が地球温暖化を進行させていると指摘される一方で、太陽活動の低下により地球が寒冷化する可能性も議論され始めている。太陽活動と地球の気温にはどのような関係があるのか。望月優子 研究ユニットリーダー (UL) たちは、南極氷床を掘削したコア (円柱試料) の分析から、太陽活動と気候変動の関係、さらには、銀河系内で起きた超新星爆発の歴史を解説しようとしている。

## 南極の氷床コアから 太陽活動と気候変動の関係を探る

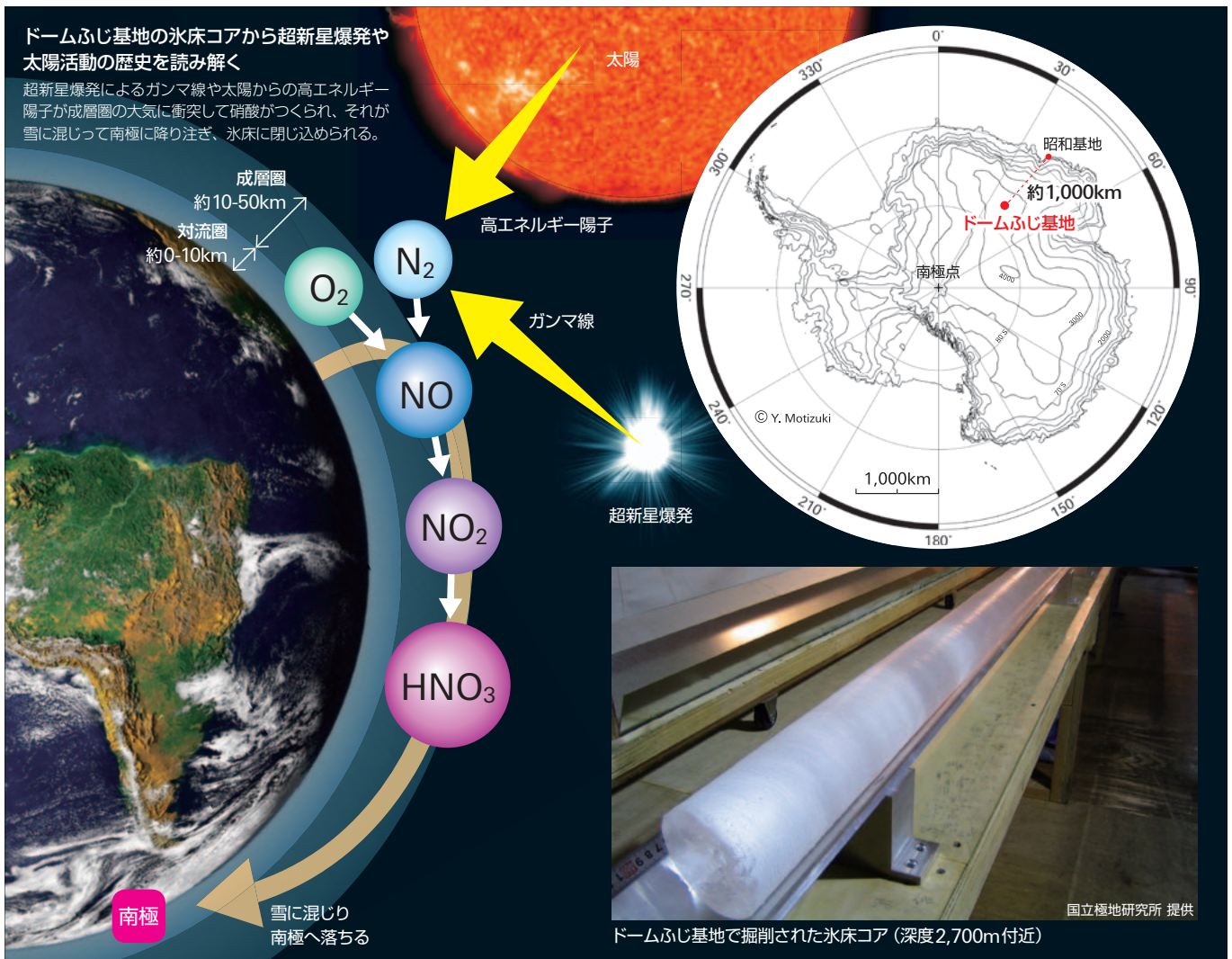
### ■ 元素誕生の謎と氷床コア

元素誕生の謎を解明する理論研究を進めてきた望月ULがなぜ、南極の氷床

コアの分析を始めたのか。「天の川銀河 (銀河系) の中で、どれくらいの頻度で超新星爆発が起きてきたのか、それが

知りたくて氷床コアに興味を持ち始めました。氷床コアはいわば宇宙を観る望遠鏡のようなものです」と望月UL。

超新星爆発とは、重い星が進化の最後に見せる大爆発のことだ。そのときに鉄よりも重い元素がつくられると考えられている。「1発の超新星爆発でつくられるそれぞれの元素の量は、加速器実験や理論研究により明らかになってきま



**望月優子** (もちづき・ゆうこ)

仁科加速器研究センター  
望月雪氷宇宙科学研究ユニット  
研究ユニットリーダー

神奈川県生まれ。博士(理学)(東京大学)。1995年、理研基礎科学特別研究員。仁科加速器研究センター研究員を経て、2011年より現職。理研ビデオ『元素誕生の謎にせまる』の著作者(2001年、文部科学大臣賞受賞)。同ビデオは現在でも国内外で広く教育に使用され、その貢献により国際天文学連合が小惑星9109を“Yukomotizuki”と命名した。



した。それは、<sup>いんせき</sup>隕石の分析と比較されて検証される、相対的な元素組成です。一方、銀河系に存在する元素の総量も、観測から明らかになっています」

超新星爆発1発当たりにつくられるそれぞれの元素の量と、銀河系が誕生してから現在までに超新星爆発が起きた回数の掛け算をすれば、銀河系に存在する元素の総量になるはずだ。「そこまですを確かめなければ、元素誕生の謎を真に解明したことにはなりません。しかし私たちの銀河系については、超新星爆発が起きた頻度が分かっていないのです。ある研究者は数年に1回、別の研究者は300年に1回などと、推定値に大きなばらつきがあります」

1979年、超新星爆発の痕跡が南極点の氷床コアに残されている、という研究論文が発表された。超新星爆発に伴い大量のガンマ線が発生して、地球の成層圏に降り注ぐ。雲ができて雨が降るといったさまざまな気象現象は、高度約10kmの対流圏で起きる。その上層の高度約50kmまでが成層圏だ。そこに超新星爆発に伴うガンマ線が降り注ぐと、大気の主成分である窒素(N<sub>2</sub>)や酸素(O<sub>2</sub>)と衝突して化学反応が進み、最終的に硝酸(HNO<sub>3</sub>)ができる(タイトル図)。

成層圏では、赤道域から上昇し高緯度域へと流れて下降する風が吹いている。その大気の循環に乗って硝酸は運ばれ、雪に取り込まれて南極大陸に降り積もる。その雪が固まり氷床となる。

その氷床を掘削したコアを分析したところ、硝酸イオン濃度が急激に高くなる“スパイク”があり、それが超新星爆

発の痕跡の可能性があると1979年の論文は主張していた。しかし、ほかの研究グループが掘削した別のコアにはそのスパイクは見え、また論文の筆者グループ自らもコアを切断したときの汚染をスパイクだと見誤ったと発表したことから、その研究は否定された形になっていた。

「しかし、最新の超新星爆発の理論や分析技術を駆使すれば、超新星爆発の痕跡を見つけることができるかもしれないと考え、国立極地研究所から貴重な氷床コアを提供していただきました」

## ■ 太陽活動と気温の関係を探る

その氷床コアは、南極沿岸から約1,000km内陸に位置するドームふじ基地で掘削されたものだった(タイトル図)。「予備的な分析を始めてみると、その氷床コアには太陽活動の歴史も刻み込まれているらしいことが分かりました」

太陽が放射する光(電磁波)には、赤外線や可視光とともに、エネルギーの高い紫外線やX線、ガンマ線も含まれている。さらに太陽は高エネルギーの陽子も放出している。それらが成層圏にぶつかることによっても、硝酸がつくられる(タイトル図)。

「一方、水を構成する酸素の同位体比(<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O)の分析により、雪が降り積もった当時の周辺地域の気温を復元する手法が確立されています。硝酸イオン濃度から太陽活動を知ることができれば、同一試料から太陽活動と気温の情報を得て、その関係性を探ることができるのです。ドームふじ基地がある南極の

内陸は、地球温暖化の影響があまり見られず、太陽活動と気温との関係を調べるのに適した場所です。また、ドームふじ基地は、成層圏からの風がちょうど下降してくる場所に位置し、その氷床コアには成層圏から運ばれる物質が多く含まれています。さらに、内陸にあるため海からの物質による汚染も少なく、成層圏からの情報を得るのに最適の場所です」

望月ULは、内閣府・総合科学技術会議の最先端・次世代研究開発支援プログラム(NEXT)に、「南極氷床コアからさぐる過去2千年の太陽活動に関する分野横断的研究」を提案、高い競争率の中から採択された。そして2011年7月、理研仁科加速器研究センターに望月雪氷宇宙科学研究ユニットを立ち上げた。「人や装置がそろい、実際に分析をスタートできたのは、2012年2月です。それからNEXTの終了期限である今年3月末に間に合うように、氷床コア2,000年分の硝酸イオンと酸素同位体比の分析を1年半で行いました。それは通常、10年かけて行う仕事量です」

## ■ 太陽活動と気温は連動している！

氷床コアに太陽活動の歴史は刻み込まれていたのか。「ドームふじ基地の氷床コアとしては初めて、1年刻みの細かさでデータを得ました。年代を精度よく特定できる西暦1550~1900年の硝酸イオン濃度のデータをまず解析したところ、約11年周期で濃度が高くなったり低くなったりしていることが分かりました」(図1・図2)

太陽は、表面の黒点の数が多いほど



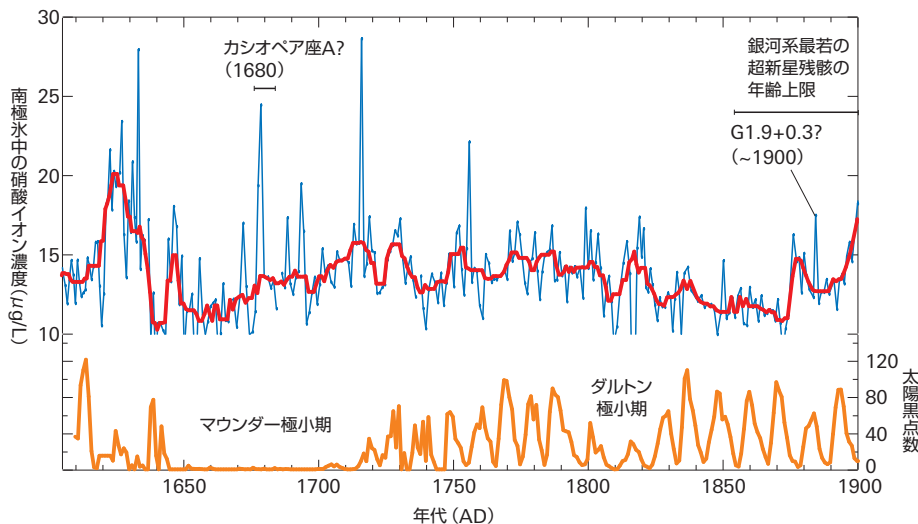


図1 太陽の黒点数 (オレンジ) と硝酸イオン濃度 (青: 生データ, 赤: ならされた値)

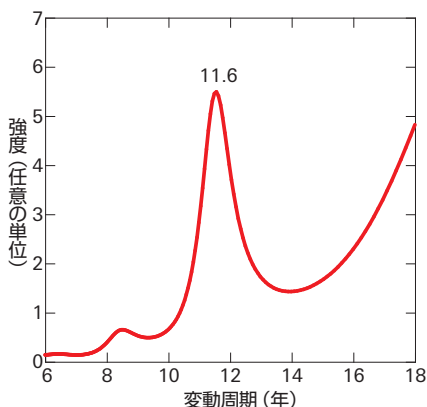


図2 硝酸イオン濃度の変動周期

活動度が高い。黒点数の観測から、活動度が高い極大期と低い極小期が11年の周期で繰り返されていることが知られている。「硝酸イオン濃度の11年周期は太陽の活動周期を反映していると考えられます。私たちは氷床コアの硝酸イオン濃度が太陽活動の指標となることを示すことができました」

一方、氷床コアの酸素同位体比の分析から何ができてきたのか。「1750～1940年のデータを分析したところ、約10年と約20年の周期で、気温が高くなったり低くなったりしていることが分かりました。その変動強度は約20年の周期の方が大きくなっています。実は太陽活動には11年周期の倍の22年周期もあります。現代の観測機器で計測された気温のデータも変動しており、その変動強度は22年周期が11年周期よりも強いことが知られています。つまり、酸素同位体比に基づく気温の代替データはまさ

に実測の気温の特徴を反映していると考えられます。そして太陽の黒点数の変動に、1年ほど遅れて同位体比から求められた気温も連動して変動する傾向が見られます。私たちは、太陽活動と気温とが連動している証拠を得たのです」

### ■ 太陽の異変で地球は寒冷化する？

太陽活動により光の放射量が変動すれば、地球の気温が連動して変動するのは当然だと思うかもしれない。しかし、極大期と極小期で光の放射量は0.1%しか変動しないことが、人工衛星による観測で確かめられている。「0.1%の変動が気温に影響を与えることはほとんどないと考えられます。ではなぜ、太陽活動と気温が連動して変動するのか。太陽活動が気温に与える影響について、いくつかの仮説がありますが、よく分かっていません」

太陽活動の指標となる黒点の観測が、ガリレオ・ガリレイたちによって始まったのは、1610年ごろだ。1645～1715年には黒点がほとんど現れない太陽活動の停滞期が続き、「マウンダー極小期」と呼ばれている (図1)。そのころのヨーロッパは、ロンドンのテムズ川が凍り付くなど、寒冷化したことが知られている。

太陽の11年周期は常に一定ではなく、9～14年ほどの幅がある。マウンダー極小期の前には、周期が11年よりも長くなったことが記録されている。

最近の太陽も、12.6年と活動周期が長くなっていることが報告されている。人類の活動に伴う二酸化炭素の大気への放出がもたらす温室効果により、地球温暖化が進行していると指摘されているが、太陽活動の低下により、逆に寒冷化が起きる可能性はあるのだろうか。

「それに答えるには、太陽活動の変動が気温に与える影響の大きさと、そのメカニズムを明らかにする必要があります。硝酸イオン濃度からは、過去の太陽の活動周期だけでなく強度も導き出せます。私たちが取得した酸素同位体比の生データの平均が示す気温の変動幅は±2℃程度です。ただしその数値が妥当かどうか、共同研究者と検証を進めているところです。そして、太陽活動の強度と気温の変動幅を比較することで、太陽活動が気温に与える影響の大きさを探っていきたいと思います」

ドームふじ基地では、過去72万年分の氷床コアが掘削されており、さらに過去100万年分の氷床コアを掘削する計画もある。そのコアを分析すれば、太陽活動と気温との関係を現在から過去100万年までさかのぼることができる。

「一方、太陽活動が気温に及ぼすメカニズムとして、私は、紫外線やX線、ガンマ線などの高エネルギーの光子、さらには高エネルギー陽子が大気に及ぼす影響に注目しています。私たちは、ガンマ線や高エネルギー陽子が成層圏の大気に衝突したとき、どのような化学反応が起きるのかについて理論研究を進め、成層圏を取り込んだイオン化学反応ネットワークモデルを世界で初めて構築しま



#### 関連情報

- 『過度なストレスから心と身体の健康を守ってよい研究を~知らないで損する10の知恵~』  
(<http://ribf.riken.jp/ag/motizuki/others.html>)

した。今後、そのモデルも駆使して、高エネルギーの光子や陽子が成層圏にもたらす影響が対流圏の気温にも及ぶのかどうかについても、研究を進展させていきたいと思っています」

気温に影響を及ぼす主な自然要因には、太陽活動のほかに火山噴火がある。火山噴火による大量の噴出物が大気を覆うことにより太陽からの光が遮られ、寒冷化を引き起こす。「氷床コアには火山噴火によって放出された硫酸イオンも含まれていて、私たちはNEXTでその分析も行いました。火山噴火の影響も考慮しながら、太陽活動と気温との関係を探っていく計画です」

#### ■ 超新星爆発とスーパーフレア

一方、銀河系内の超新星爆発の痕跡は、氷床コアに残されているのか。「超新星爆発が起きると、大量のガンマ線が半年間以上、降り注ぎます。理論的に考えると、その影響で氷床コアに硝酸イオン濃度のスパイクが現れてもおかしくありません。実際、超新星爆発の記録がある1680年付近(カシオペア座A)や、最近発見された超新星残骸(G1.9+0.3)に相当し得る1900年付近などにスパイクが見られます。スパイクの中には、記録が残っていない南天で起きた超新星爆発の痕跡もあるかもしれません。ただし、スパイクの要因としては、超巨大な太陽フレアも考えられます」

太陽フレアとは、太陽表面で起きる爆発現象のことだ。太陽フレアが起きると大量の高エネルギー陽子が地球に降り注ぎ、成層圏で硝酸がつくられる。「そ

の期間は1週間ほどです。ドームふじ基地の氷床コアの時間分解能は1年なので、太陽フレアによる影響は埋もれてしまいます。例えば、1859年に記録史上最大規模の太陽フレアが起きましたが、対応しそうなスパイクは見えません」

大規模な太陽フレアは、地球に磁気嵐を引き起こし、電力・通信網に被害を与える場合がある。1859年と同規模のフレアに、電力・通信網が発達した現代社会が襲われれば、その被害額は最大2兆ドル(約200兆円)に上るとの試算もある。大規模な太陽フレアは、巨大地震・津波クラスの被害を社会にもたらす可能性があるのだ。

さらに、京都大学の柴田一成教授たちは2012年、太陽系外の惑星を探索するケプラー衛星の観測データから、太陽とよく似た148の恒星で、最大級の太陽フレアの100~1,000倍もの規模の「スーパーフレア」が365回起きていることを発見、太陽でも800~5,000年に1回の頻度でスーパーフレアが起きる可能性がある」と指摘している。

私たちの太陽もスーパーフレアを起こしたことがあるのか。氷床コアの中のスーパーフレアの痕跡を探すには、超新星爆発と区別する必要がある。

「太陽フレアでは高エネルギー陽子、超新星爆発ではガンマ線が成層圏に降り注ぎ、いずれも硝酸ができますが、硝酸を構成する窒素の同位体比( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ )に違いが現れます。NEXTではその窒素同位体比も分析しました。私がまず知りたいのは銀河系内の超新星爆発の頻度です。今後、窒素同位体比のデータ

分析をさらに進めて超新星爆発によるスパイクを特定したいと思っています。過去2,000年の分析で超新星爆発の痕跡を探し出すことに成功すれば、次に、過去100万年分の氷床コアの分析を進めたいと思っています。頻度を知るには、100万年分をすべて分析する必要はありません。例えば1万年前、10万年前、100万年前など異なる時期を分析することで、頻度を割り出すことができます」

#### ■ 次世代を育て、新しい分野を拓く

望月ULは、日本学術会議研究連絡委員会幹事などを歴任し、自らのさまざまな体験から、ハラスメント問題などに取り組み、研究環境の改善を図っている(関連情報)。

また、若手研究者の指導・育成にも力を注いできた。「先日、ユニットに参加していた元教え子から、間違っことをしたときにちゃんと指導していただき、あらためて感謝しているというメールをもらいました。うれしかったですね」

最後に望月ULは、研究の展望について次のように締めくくった。「理研には、雪氷学の父といわれる中谷宇吉郎先生が在籍しておられました。また、初期の南極観測隊に参加して、宇宙線やオーロラの観測を進めた研究者もいました(本誌2001年7月号「記念史料室から:氷雪に散った若き研究者」)。そのような理研の伝統を受け継ぐとともに、新たな視点を加え、雪氷学と宇宙科学、気候学を融合した新分野を拓くことを目指していきます」

(取材・執筆:立山 晃/フォトンクリエイト)

「どのような性能のNMR（核磁気共鳴）装置を導入しているのか、NMRを分析ツールとして使う企業は決して公表しません。分析能力が明らかになってしまうからです」  
 理研ライフサイエンス技術基盤研究センター 構造・合成生物学部門 NMR施設の前田秀明 施設長はそう語る。  
 NMRはタンパク質の構造解析や材料開発などに幅広く利用されている分析手法だ。  
 NMRの感度を高めるには、磁場を強くする必要がある。前田施設長たちは、高温超伝導ワイヤを極薄絶縁化する独自技術で、従来の限界を超える高磁場・高感度のNMRを開発することを目指している。  
 前田施設長と、極薄絶縁化を担当している柳澤吉紀 基礎科学特別研究員、NMRによる測定を進めている山崎俊夫 上級研究員に、NMRの現状と展望を聞いた。

# 極薄絶縁化した高温超伝導ワイヤでNMRの新時代を開く

## ■ 高磁場化・高感度化の限界

——NMRとはどのような分析手法ですか。

**前田**：原理は携帯電話に似ています。タンパク質などの試料に強い磁場をかけた状態で電波を送り、「あなたの隣は？」と質問します。すると、試料中の水素や炭素などのそれぞれの原子核から、「30度の角度、0.3nmの距離にある炭素原子と共有結合しています」といった返事が電波のスペクトルで戻ってきます。その信号をもとに試料の構造や性質を知ることができます。

理研では、タンパク質の基本構造を解析する国家プロジェクト「タンパク3000」(2002～06年度)の「網羅的解析プログラム」において、大型放射光施設SPring-8とNMR施設を駆使して、2,600種類以上の基本構造を解析しました。そのうち、1,300種類以上はNMRによるものです(図1)。

——SPring-8とNMRはどのように使い分けるのですか。

**山崎**：SPring-8では、試料を結晶化してX線を当てるX線結晶構造解析という手法を用います。一方、NMRは試料を結晶化せずに構造解析ができるという大きな利点があります。ただし、

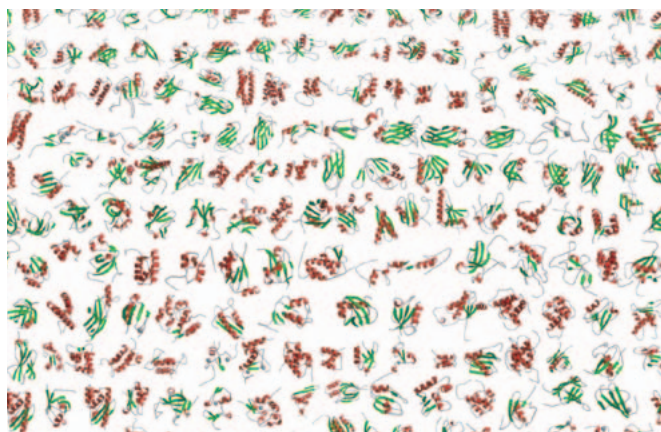


図1 タンパク3000プロジェクトにおいて理研NMR施設で解析されたタンパク質の基本構造の一例

アミノ酸が200個以下くらいの小さなタンパク質や、大きなタンパク質の部分構造が対象になります。また、1種類の解析を行うのに、1週間ほどの測定時間がかかります。それはNMRの感度があまり良くないため、1回の計測では弱い信号しか得られないためです。そこで、測定を何度も繰り返して強い信号を得る必要があるのです。

**前田**：試料にかける磁場を強くするほど、NMRの感度と精度が良くなります。このとき、かける磁場の強さに比例してやりとりする電波の周波数が高くなることから、NMRの磁場の強さを電波の周波数で表すのが通例になっています。これまでは周波数1GHzに対応した磁場の強さ（23.5テスラ）が限界でした。磁場が強くなると、磁場を発生させる超伝導コイルが超伝導状態ではなくなってしまうからです。

——超伝導は、ある温度以下で電気抵抗がゼロになる現象ですね。

**前田**：超伝導は、温度だけでなく、磁場の強さも関係します。ある温度で超伝導状態になっている物質に、磁場をかけていくと、ある強さで超伝導状態ではなくなり、電気抵抗が発生します。超伝導状態になる温度が低い材料ほど、弱い磁場でしか超伝導状態を保てない傾向があります。NMRのコイルには、極低温・弱い磁場で超伝導状態になる低温超伝導ワイヤが使われてきました。この低温超伝導ワイヤは、磁場が1GHz付近を超えると超伝導状態を保てなくなるため、1GHzまでしか磁場を強くできなかったのです。

これまで磁場を強くするために、コイルをどんどん大きくしてきました。強い磁場中ではローレンツ力がワイヤに加わり、超伝導の特性を劣化させます。このローレンツ力を抑えるために、コイル断面の単位面積当たりの電流を小さくしなければならぬのですが、そうするとコイルがとて大きくなくなってしまいます。それに伴い装置全体も大型化し、コストも高くなっています。漏れ出す磁場も強くなるため、装置を収納する建屋も





図2 第一世代高温超伝導ワイヤのコイルを組み込んだ1.03GHzのNMR装置

(独)科学技術振興機構の研究成果展開事業「先端計測分析技術・機器開発プログラム」の支援を受け、(独)物質・材料研究機構、(株)神戸製鋼所、(株)JEOL RESONANCEと共同で開発した。

大きくなります。従来の低温超伝導コイルで1GHzを超える磁場を発生できたとしても、装置は巨大で高価なものとなり、建屋も体育館並みのサイズとなるでしょう。多くの研究機関や企業が導入できる装置ではなくなってしまいます。

そこで私たちは、(独)物質・材料研究機構などと共同で、従来よりも高い温度・強い磁場でも超伝導状態を保つ高温超伝導ワイヤを用いたコイルで、NMR装置をつくることを目指しました。ところが開発を始めてみると、高温超伝導コイルそれ自体が強い磁性を帯び、試料にかける磁場を乱してしまうことが分かりました。私たちはその乱れを補正して磁場を安定かつ均一にする方法を開発し、500MHzの磁場において従来の装置と同じ精度の信号をタンパク質試料から得ることに、世界で初めて成功しました。そして1.03GHz NMRの超伝導コイルを完成することができました。しかしそれでも、装置や建屋はかなり大きくなってしまいました(図2)。その高温超伝導ワイヤを使って1GHzを大きく超えるNMRを開発するのは、現実的には難しいと思いました。

### ■ 極薄絶縁化で限界を超える

—たくさん電流を流せば、小さなコイルでも強い磁場を発生できるのではないですか。

柳澤：その通りです。超伝導ワイヤは電気抵抗ゼロなので大きな電流を流すことができますが、材料によって限界が異なります。私たちが1.03GHzの装置に用いた高温超伝導ワイヤは、1995年ごろに製品化された第一世代と呼ばれるビスマス系のもので、そのワイヤには1GHz以上の磁場では1mm<sup>2</sup>当たり100アンペアしか電流が流せません。ワイヤに大きなローレンツ力が加わり、その力に耐えることができないことが大きな要因です。その後、2009年にレアアース系の第二世代高温超伝導ワイヤが製品化されました。それは強いローレンツ力に耐え

撮影：STUDIO CAC

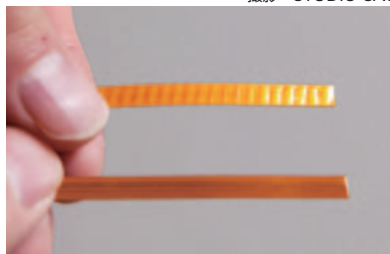
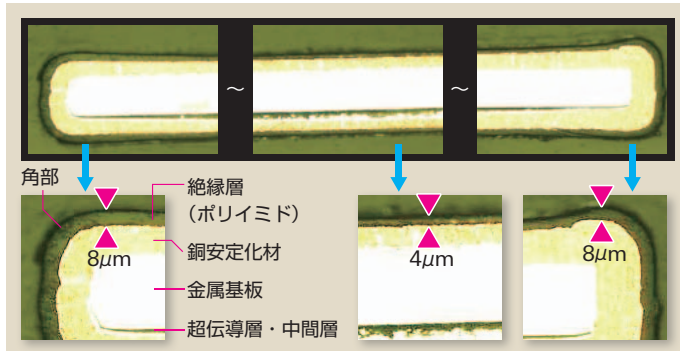


図3 第二世代高温超伝導ワイヤ

上は絶縁テープを巻いたもの、下が極薄絶縁化したもの。

図4 極薄絶縁化した第二世代高温超伝導ワイヤの断面



ることができ、1GHzを超える磁場の中でも1mm<sup>2</sup>当たり200～300アンペアと、2～3倍も大きな電流を流すことができます。私たちはそのワイヤを使ってNMRを開発することにしました。しかしそのワイヤにも大きな問題がありました。

第二世代の高温超伝導ワイヤは高強度の金属基板上に蒸着させてつくるため、幅が4～5mm程度、厚さが100～150μm程度という平たんな形状です。コイルにするには、ワイヤを絶縁層で覆う必要があります。断面が従来の円形のワイヤならば、絶縁材料の溶液に漬けて引き上げ、乾かすことで、薄い絶縁層で覆うことができます。しかし、平たんな形状では角の部分の絶縁層が薄くなり、ワイヤが露出してしまいます。そこで第二世代高温超伝導ワイヤでは、絶縁テープを巻く方法が用いられています(図3上)。その絶縁層の厚さは片側50μm、両側で100μmほどと、ワイヤと同じくらいの厚さです。エビの天ぷらに例えれば、ワイヤがエビで絶縁層が衣、衣がとても厚い天ぷらです(笑)。試料のある小さな空間に強い磁場をかけるには、ワイヤを密に巻く必要があります。ところが絶縁層が厚いとワイヤを密に巻けません。そのため、コイルを小さくできないという大問題が、第二世代の高温超伝導ワイヤにはあったのです。

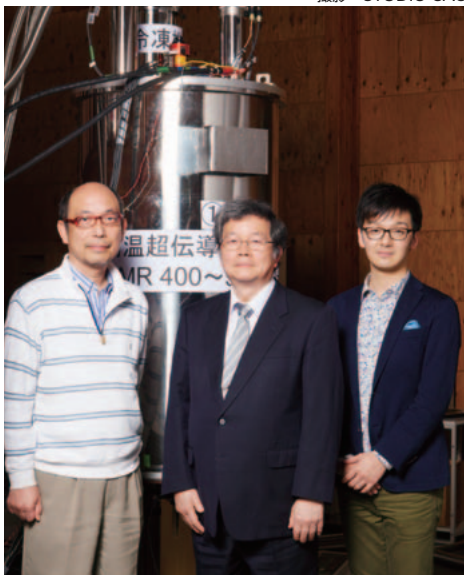
—それをどのように解決したのですか。

柳澤：メーカーと共同で金属メッキの原理を用いた手法を開発しました。マイナスに帯電させた絶縁材料(ポリイミド微粒子)の溶液に、プラスに帯電させたワイヤを漬けて引き上げ、乾かすという手法です。絶縁材料の粒子とワイヤが電氣的に引き合うことで、角が露出せずに、片側で4μmと従来の10分の1以下の極薄絶縁層で覆うことができました(図3下・図4)。条件にもよりますがコイルの体積を最大で8割小さくできるはずですが。

前田：絶縁材料の成分や帯電のさせ方、乾かし方、処理温度など、さまざまな条件を導き出してきました。私たちのノウハウとメーカー独自のノウハウとが相まって成功に至りました。

図5 第二世代高温超伝導ワイヤを用いたNMR装置 (400~500MHz)

左から、NMR施設の山崎俊夫 上級研究員、前田秀明 施設長、柳澤吉紀 基礎科学特別研究員。このNMR装置では、第二世代高温超伝導ワイヤは、従来の絶縁テープで巻いたものを使用。(独)科学技術振興機構の研究開発成果開業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」の支援を受け、(株)JEOL RESONANCE、(独)物質・材料研究機構、ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株)、千葉大学、山形大学と共同で開発を進めている。



## ■ 高温超伝導ワイヤの標準技術に

— 極薄絶縁化の手法の反響は？

**前田：**昨年、この絶縁を含めた高温超伝導コイル技術全体の基調講演を米国の学会で行いました。欧州のNMRメーカーで世界シェアNo.1のブルカー社の関係者が最前列で聴いていましたね。第二世代高温超伝導ワイヤの絶縁化は、私たちの手法で統一されると思います。超伝導コイルはNMRだけでなく、医療診断に使われるMRIやリニアモーターカーなどさまざまな装置に使われています。極薄絶縁化した第二世代高温超伝導ワイヤは、超伝導コイルの小型化、高磁場化、低コスト化を実現し、装置の性能を大幅に向上させることができます。加速器にも超伝導コイルが使われています。ヒッグス粒子を発見したCERN(欧州原子核研究機構)の超伝導コイル開発のリーダーが先日、私のところに訪ねてきました。CERNでは、ダークマター(暗黒物質)の解明を目指して外周が約100kmの次期大型加速器を計画していて、極薄絶縁化の手法に強い関心を示していました。

私たちは現在、従来の絶縁テープを巻いた第二世代高温超伝導ワイヤで、400~500MHzのNMR装置を開発しています(図5)。その後、極薄絶縁化したワイヤで、1GHzを超えるNMRを開発する計画です。原理的には2GHzも実現可能です。5年後くらいにはまず、1.2GHzのNMRを実現したいですね。

**柳澤：**それには、何十kmものワイヤの極薄絶縁化が必要です。そのための技術開発をこれから進めます。

## ■ タンパク質が機能するときの構造変化を時系列で捉える

— 1.2GHzのNMR装置ができれば、どのような測定が可能になりますか。

**山崎：**感度が高まることで、測定時間も短く、現状より大きなタンパク質の構造や性質も測定できるようになります。「タンパク3000」においてNMRで構造解析したタンパク質はすべて、水に溶けるものです。水に溶かした方が、感度よく測定できる

## 関連情報

- 2013年8月12日プレスリリース  
「絶縁部分が4μmの次世代高温超伝導ワイヤを開発」

からです。従来のNMRの感度では、水に溶けないタンパク質は測定に何ヶ月もかかってしまいます。1.2GHzのNMRならば、水に溶けない膜タンパク質なども短時間で測定することができるようになるでしょう。NMRの測定対象が大きく広がります。

—膜タンパク質は、薬のターゲットとなるものも多いですね。しかし結晶化が難しく、X線で構造解析ができていないものも数多く残されていると聞きます。

**山崎：**情報伝達物質が結合すると、穴が開いて外から物質を取り入れたりするチャンネルをつくる膜タンパク質があります。そのような膜タンパク質がどれくらいの速さで変形して穴が開くのか、1.2GHzのNMRならば、構造変化を測定できるかもしれません。そのような分析により、生命現象の理解が進むとともに、創薬に大きく貢献できます。

—理研播磨事業所にあるX線自由電子レーザー施設「SACLA」も、試料を結晶化せずに、タンパク質などの構造変化を捉えることができるそうですね。

**山崎：**SACLAや電子顕微鏡では、さまざまな状態の複数のタンパク質を測定し、それらの画像を時系列に並べることができれば、パラパラ漫画のようにして構造変化を理解することができます。一方、NMRでは分子を自然な状態において、(多くの分子の平均像ですが)構造変化の部位と速度を捉えることができます。タンパク質を機能させながら測定することが可能なのです。時空分解能を追求したSACLAと1.2GHzのNMRの両方の測定データが得られれば、タンパク質の構造が変化して機能する過程を詳細に明らかにすることができます。

—材料の開発にも威力を発揮するはずですね。

**山崎：**水素や炭素を含む有機化合物だけではなく、銅、コバルトや塩素など、現状のNMRでは困難な多くの無機材料が測定可能になってきます。例えば、繰り返し利用が可能な二次電池は、使っている間に性能が低下します。そのとき材料の中で何が起きているのか、原因を解明して、性能向上に貢献できるかもしれません。

**前田：**NMRの高磁場化に伴い、新しい測定手法が開発されてきました。私たちは、従来の限界を超える高磁場化を実現することで、NMRの新時代を開いていきます。

(取材・構成：立山 晃/フォトンクリエイト)



# 19世紀以来の謎、 ホフマイスター効果に新説

2014年4月17日プレスリリース

アミノ酸から成るタンパク質分子は、水の中では通常、正または負に帯電した親水性アミノ酸が外側に位置して水分子と水素結合する。これによりタンパク質分子と水との界面が水分子で覆われ、水に溶解する。そこに特定種のイオンを多量に加えると、タンパク質分子同士が引き合って凝集し、沈殿する。この現象を「塩析」といい、タンパク質を水溶液から分離・精製したいときによく使われる(図1)。

ドイツの化学者 Hofmeister<sup>ホフマイスター</sup>は1888年、タンパク質水溶液に陰陽さまざまなイオンを溶かし、各イオンの塩析能力を調べた。得られたイオン種ごとの塩析能力の順位を「ホフマイスター系列」(以下、系列)というが(図1)、その発現メカニズムはほとんど分かっていない。近年の研究で、陰イオンの系列がイオンと界面との吸着力に相関することが示唆されているが、陽イオンの系列が同様に吸着力で説明できるかは明らかでない。そのため、界面における水分子の構造がイオンによってどう変わるかが、メカニズム解明の鍵とされてきた。

しかし、界面の水の構造を知るのは難しく、ほとんど唯一の方法とされているのが、二次非線形光学の一種で、和周波光の強度を測定して界面の振動スペクトルを求める振動和周波発生分光法である。理研田原分子分光研究室の二本柳聡史<sup>にほんやなぎ</sup> 研究員と山口祥一<sup>しょういち</sup> 専任研究員、田原太平<sup>たへい</sup> 主任研究員らの研究グループは、和周波光の強度とともに位相も測定し振動スペクトルを得る「ヘテロダイン検出振動和周波発生分光法」を独自に開発。これと、水の同位体を使って振動スペクトルを解釈しやすくする同位体希釈法を組み合わせると、界面の水の配向と構造を決定できる。研究グループはこの方法を用いて、正または負に帯電する界面活性剤の単分子膜をタンパク質分子に見立て、それと水溶液との界面における水の構造を、系列のさまざまなイオンを加えて調べてみた。

正に帯電した界面では、静電引力が働くため陰イオンが界面近くに集まることが予測される。実験の結果、系列左側の陰イオンは界面に接触しないが、右側の陰イオンになると界面に接触吸着しやすくなることが分かった。つまり、陰イオンの系列は、陰イオンの界面との吸着力とよく相関しており、これまでの研究と同じ結果が得られた(図2上)。一方、負に帯電した界面では、陽イオンは界面近くに集まるものの接触吸着することではなく、系列と陽イオンの吸着力に相関は見られなかった。しかし、界面と陽イオンの間にある水分子の水素結合が、系列左

図1 ホフマイスター系列とタンパク質の塩析(概念図)

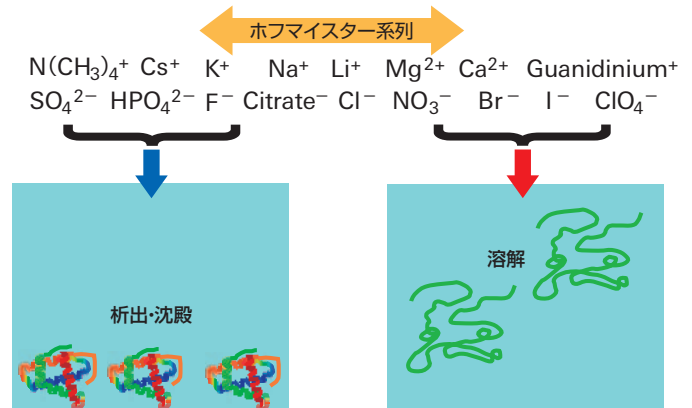
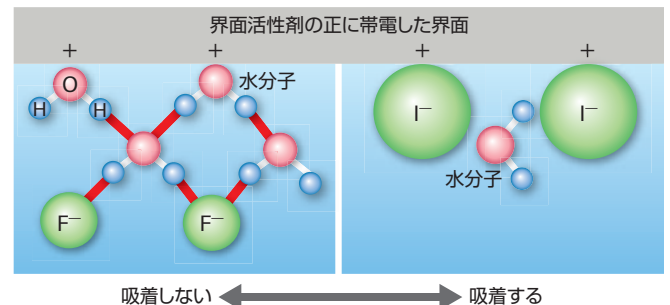
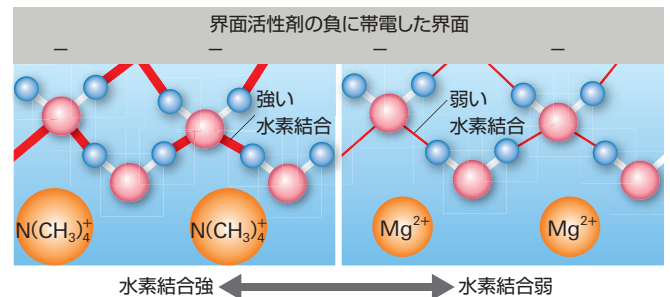


図2 今回の実験で示唆された界面の構造



水分子と強く結合する $F^-$ は、界面の水分子の水素結合を弱めることなく、界面に接触吸着しない(左)。水分子と弱く結合する $I^-$ は、界面の水分子を剥がし接触吸着する(右)。



陽イオンはいずれも界面に接触吸着しない。 $N(CH_3)_4^+$ は、界面の水分子の水素結合を弱めることはない(左)。 $Cs^+$ 、 $Li^+$ 、 $Mg^{2+}$ は、水分子の水素結合を弱くする(右)。

側では強く、右側では弱くなることが分かった。つまり、陽イオンの系列は、界面の水の水素結合強度とよく相関していた(図2下)。

以上よりホフマイスター系列は、①イオンが界面と接触吸着する場合はその吸着力、②接触吸着しない場合は界面の水の水素結合強度という、二つの因子が複合的に働き、決まると考えられる。本成果は、100年以上謎であったホフマイスター系列発現メカニズムに関する新たな提案である。今後、より生体に近い界面でのメカニズム解明が期待される。

- 『Journal of the American Chemical Society』オンライン版(4月17日)掲載

## 量子色力学から 核力の決定に挑む研究者

原子核は、核子と呼ばれる陽子と中性子から成り、核子はクォークから成る。クォークなどの素粒子の性質は「量子色力学 (QCD)」によって支配されており、クォークの間に働く力もQCDで説明できる。

しかし、核子の間に働く核力は、QCDからの説明ができていない。

素粒子物理と原子核物理の間にギャップがあるのだ。

仁科加速器研究センター 初田量子ハドロン物理学研究室の土井琢身 専任研究員 (以下、研究員) は、QCDに基づいて核力を決定し、そのギャップを埋めようとしている。それができれば、宇宙での元素合成や中性子星の構造など、宇宙天体物理の現象もQCDから理解できる道が拓けてくる。「QCDの方程式は非常にシンプルかつ美しいのですが、それを解くことは非常に難しい。しかし、さまざまな面白い現象の宝庫なのです。QCDに魅せられた土井研究員の素顔に迫る。



### 土井琢身

仁科加速器研究センター  
初田量子ハドロン物理学研究室  
専任研究員

#### どい・たくみ

1976年、広島県生まれ。博士 (理学)。東京大学理学部物理学科卒業。東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。理研BNL研究センター、米国ケンタッキー大学、筑波大学、東京大学原子核科学研究センターを経て、2012年より理研研究員。2014年より現職。

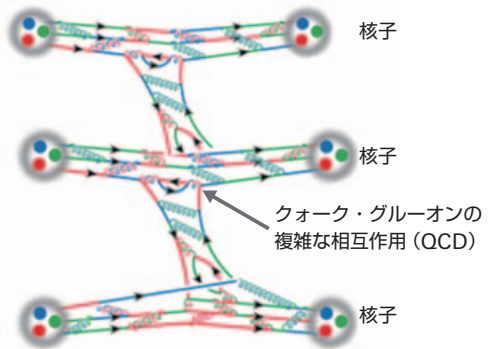
「子どものころから図鑑や文学全集、歴史、美術、いろいろな本を読んでいました。本に限らず文字を読むことが好きでした」と土井研究員。今でも、ラーメンをつくったときなど、袋に書いてある原材料や注意書きを読みながら食べることがあるほどだ。将来は小学校の先生になりたいと思っていた小学校高学年のころ、高温超伝導ブームが起きた。「親が買ってきた高温超伝導の本が面白くて、早く寝なさいと言われてながら、布団の中で隠れて読んでいました。今から思うと、それが初めて触れた物理の世界でした」

中高一貫教育の学校に進学。高校時代には、小倉百人一首かるた競技の全国大会団体戦に出場した。「将棋が好きで囲碁将棋部に入ったのですが、部員が少なく対局にも困るほどでした。そこで友達を勧誘したら交換条件を出され、彼が入っていた百人一首部に私が入ることになったのです。こちら競技人口が少なく、運よく全国大会に出られました」と笑う。

科学全般に興味があったため理学部か工学部か迷ったが、東京大学理学部物理学科に進んだ。「子どものころから、“解る”ということが好きでした。物理は、基礎が解ればさまざまな現象を理解できます。その点に引かれました」。数ある

### 図 三体力とは

3個の粒子の間に働く力のうち、2個の粒子の間に働く二体力の和では表せない力を三体力という。三体系特有の非常に複雑な力が現れる。



理論の中でQCDを選んだ理由は? 「QCDは難しく、解らないことがたくさんあります。そういう世界の方が面白いし、自分も何かできる可能性があると考えたのです」

素粒子・原子核・宇宙の諸現象をQCDから解明する——それが土井研究員の研究テーマである。そのためには、QCDを解いて核力を決める必要があり、理研や筑波大学などの研究者から成る共同研究チーム“HAL QCD Collaboration”で研究を進めている。しかし、クォークの質量が軽いほど計算量が膨大になるため、これまでは質量を現実より重くした計算しかできなかった。さらに、3個の核子間に働く力“三体力”の計算は、その複雑さから不可能だとさえ言われていた (図)。

その状況を変えた一人が、土井研究員である。2012年、同じ研究室にいたエンドレス研究員と共にまったく新しいアルゴリズムを提唱し、計算速度を劇的に向上させたのだ。そのほかの工夫も併せて、二体力計算は数十倍、三体力計算は約1,000倍に高速化した。「新アルゴリズムとスーパーコンピュータ『京』を組み合わせることによって初めて、現実のクォーク質量でQCDを解いて核力を計算することが可能になりました」と土井研究員。「間もなくその計算を『京』で始めます。実験屋からも、早く! とせかされています」。現実のクォーク質量においてQCDから決定された核力は、実験の検証や新たな実験の提案にも役立つと期待されているのだ。

「解る、ということ積み上げていきたい」と土井研究員。「そのためには、無知の知というか、自分は一体何が解って何が解っていないのかをよく考えることも大切です」。そのこだわりは日常生活でも現れる。「テレビドラマを見ていてつじつまが合わないところがあると、気になって仕方がありません。よく妻に、集中できないからちょっと黙っていて、と怒られます (笑)」。家にもQCDのことを考えていることが多いという。「アイデアがひらめいたら、手近にある紙を見つけて書き留めます。自分でも読めないような字ですが、その瞬間の感覚を残すことが大切なのです」。新たなアイデアがまたQCDに新しい展開をもたらすことだろう。

(取材・構成: 鈴木志乃/フotonクリエイト)



## 新研究室主宰者の紹介

新しく就任した研究室主宰者を紹介します。

①生まれ年、②出生地、③最終学歴、④主な職歴、⑤活動内容・研究テーマ、⑥信条、⑦趣味

### 光量子工学研究領域



眼疾患クラウド診断融合連携研究チーム  
チームリーダー

**秋葉正博** あきば・まさひろ

- ①1971年
  - ②山形県
  - ③山形大学大学院理工学研究科博士課程
  - ④山形県産業技術振興機構、(株)トブコン
  - ⑤眼科診断向け断層画像化手法およびシステム化に関する研究
  - ⑥気概を持ち、新たな挑戦をしよう
  - ⑦旅行、スキューバダイビング
- ※産業界との融合的連携研究制度によって設置されました。

### イノベーション推進センター



超高感度生体分子検出技術研究チーム  
チームリーダー

**近藤聖二** こんどう・せいじ

- ①1964年
- ②愛知県
- ③埼玉大学工学部環境化学工学科
- ④オリンパス(株)研究開発センター
- ⑤遺伝子解析技術の開発と実用化
- ⑥専門性と独創性を兼ね備えた技術を実用化して普及させていく
- ⑦読書



光電子デバイス工学研究チーム  
チームリーダー

**松下聖志郎** まつした・しょうしろう

- ①1955年
- ②富山県
- ③岡山大学大学院工学研究科修士課程
- ④協和発酵工業(株)、黒金化成(株)
- ⑤機能性有機材料の開発
- ⑦ゴルフ、お酒



レーザー多元機能開発チーム  
チームリーダー

**今井信一** いまい・しんいち

- ①1957年
- ②東京都
- ③慶応義塾大学工学部計測工学科
- ④(株)東芝、半導体MIRAIプロジェクト
- ⑤ハイブリッドレーザーの開発
- ⑥光あれ
- ⑦散歩

### 発生・再生科学総合研究センター



器官誘導研究グループ  
グループディレクター

**辻孝** つじ・たかし

- ①1962年
- ②岐阜県
- ③九州大学大学院理学研究科生物学専攻博士後期課程
- ④山之内製薬(株) (当時)、JT医薬探索研究所、東京理科大学
- ⑤器官再生の基盤技術開発とその応用
- ⑥未来を創造する
- ⑦磯釣り

### 放射光科学総合研究センター



構造可視化研究チーム  
チームリーダー

**高橋幸生** たかはし・ゆきお

- ①1977年
- ②石川県
- ③東北大学大学院工学研究科博士課程
- ④理研放射光科学総合研究センター、大阪大学
- ⑤コヒーレントX線回折イメージング
- ⑥大道無門



量子状態可視化研究チーム  
チームリーダー

**木須孝幸** きす・たかゆき

- ①1973年
- ②福岡県
- ③東京大学大学院工学系研究科博士課程
- ④理研基幹研究所、東京大学物性研究所、大阪大学大学院基礎工学研究科
- ⑤硬X線励起光電子利用分光法開発と物性研究
- ⑥縁を大切に
- ⑦機械工作



元素可視化研究チーム  
チームリーダー

**唯 美津木** ただ・みづき

- ①1979年
- ②東京都
- ③東京大学大学院理学系研究科博士課程中退
- ④東京大学、分子科学研究所、名古屋大学
- ⑤固体触媒表面の設計とin situ構造解析
- ⑥新しい価値を生む
- ⑦料理、犬、旅行

## MAXIの装置論文が 日本天文学会論文賞を受賞

三原建弘 みはら・たてひろ

グローバル研究クラスター

宇宙観測実験連携研究グループMAXIチーム 専任研究員

グローバル研究クラスターMAXIチームは、全天X線監視装置 (Monitor of All-sky X-ray Image : MAXI) を国際宇宙ステーション (ISS) に搭載し、全天のX線天体の強度を92分ごとにモニターしている。ISSから上を見上げていると、地球を1周する間に、北半球・南半球や昼側・夜側、すべての天空を見ることができる。これを利用すれば可動部がなくても全天走査ができる。常識を覆す独自の設計思想である。われわれは打ち上げ前の2009年に、MAXI製作の技術開発と、期待される宇宙物理学的な意義を記した論文を、日本天文学会の欧文学術誌 (PASJ) に掲載した\*。その後MAXIの成功を受けて、当論文の引用回数は5年間で100件を超えた。これはMAXIの前に活躍したNASAの全天X線監視装置の論文 (Levine et al., ApJL, 1996、出版から5年間の引用が112件) に匹敵するものである。そしてこのたび、2013年度の第18回PASJ論文賞を受賞するに至った。この賞は「欧文研究報告 (PASJ) に過去5年以内に掲載された論文の中から独創的で天文分野に寄与の大きい優れた論文 (毎年1~2論文) に授与される」ものである。

MAXIは「広く浅く」宇宙を見て、毎日500個のX線天体の変動をWebで公開 (<http://maxi.riken.jp>) するとともに、今までに6個のブラックホールX線新星を発見し、突発現象を世界に速報している。これは同じX線でも、「深く狭く」観測する「すざく」衛星と相補的であり、日本のX線天文学が持つ国際的地位を堅持する上で大きく貢献している。こうした活躍によりMAXIは、ISSに搭載された最もコストパフォーマンスの良い観測装置として、国内だけでなくNASAでも高く評価されている。

思い返せば、MAXIプロジェクトは1997年3月に採択され、当初は2003年打ち上げといわれていた。しかしH-IIロケットの失敗、スペースシャトル「コロンビア」の事故や宇宙予算の縮小が相次ぎ、1年たつと打ち上げが1



写真・日本天文学会から授与された第18回PASJ論文賞の賞状を手に、理研MAXIチームの5名。著者にはMAXIの設計・製作・試験、さらに地上の解析システムの開発に参加した32人が名を連ね、墨で名前を入れた賞状がめいめいに贈られた。前列左が筆者。

年延びるといって「逃げ水状態」が続いた。われわれはその間も、X線検出器を試作し、その改良など地道な努力を重ねた。2004年からは、実際に用いるX線検出器を1台ずつ製造しては理研で3ヶ月かけて学生・ポストドクと共に綿密な特性取得実験を行いメーカーへ搬出、という状態が続いた。次から次へと「わんこそば」のように試験を続け、12台が終わったのは2006年であった。完成したMAXIが2008年秋に米国ケネディ宇宙センターに運ばれてからも、シャトルの燃料漏れや緊急ミッションが割り込んだりと、なかなか打ち上げられなかった。2009年7月、ついにスペースシャトル「エンデバー (Endeavour)」により打ち上げられた。最後まで努力 (endeavour) なくしては上がらないプロジェクトであった。

なお、この論文賞には副賞が付いていた。その内容は「PASJの論文1編の掲載料を免除する」というものであった。有効期間は「受賞日から1年間」。急いで大論文を書かなくては。満開の桜のもとで飲まれてしまうような副賞に比べ、何と健全な副賞であることか。われわれは次世代の全天重力波天体監視プロジェクトも考えている。努力はまだ続く。

\* Matsuoka, M. et al., Publications of the Astronomical Society of Japan, 61巻 pp.999-1010, 2009年10月25日出版  
The MAXI Mission on the ISS: Science and Instruments for Monitoring All-Sky X-Ray Images.

### 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)



<http://www.riken.jp/>