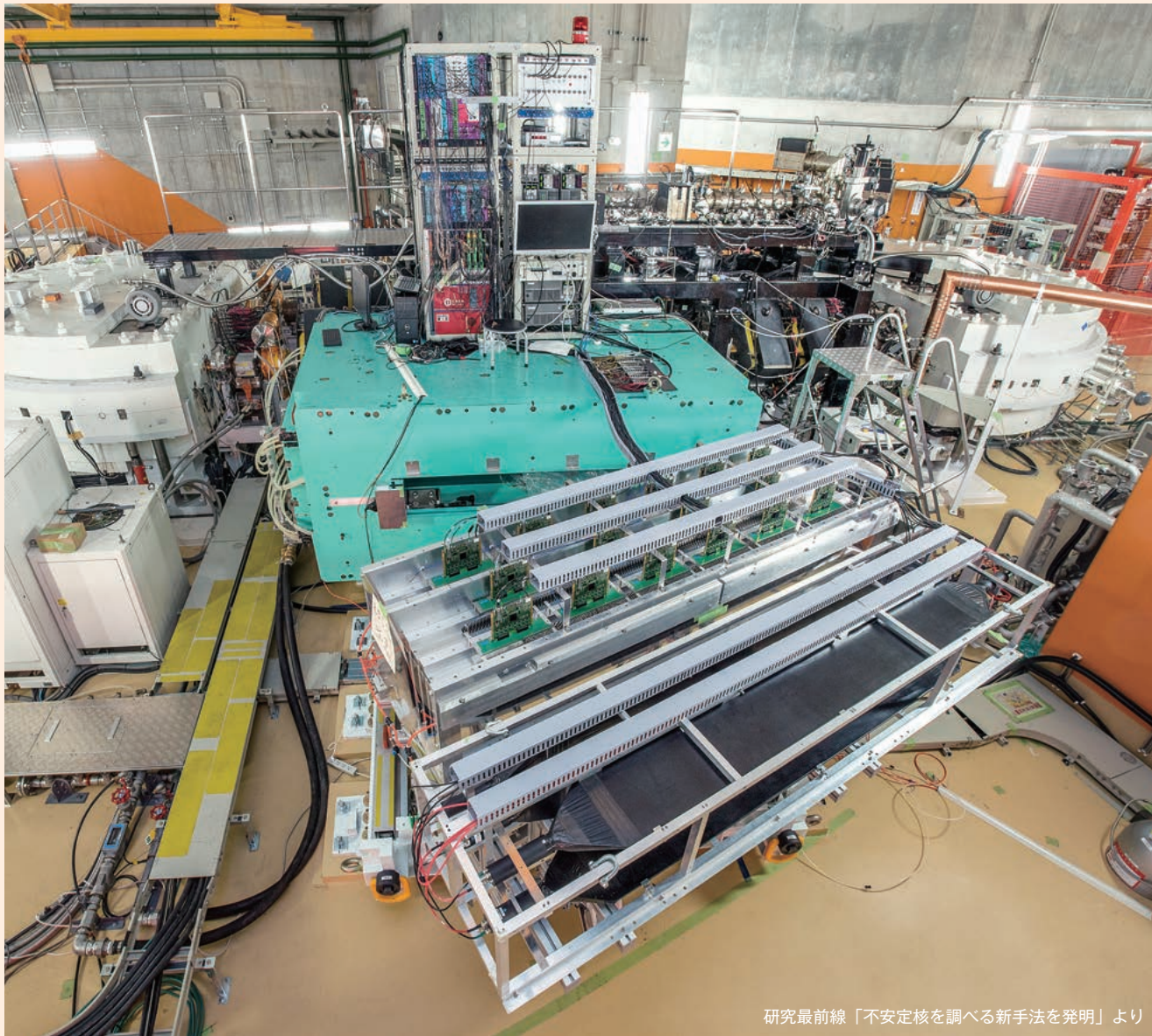


# RIKEN NEWS

No. 459 2019 **9**



研究最前線「不安定核を調べる新手法を発明」より

02 研究最前線

## テラヘルツ波は未踏から実用へ

06 研究最前線

## 不安定核を調べる新手法を発明

10 特集

## IPS由来NKT細胞による がん免疫療法の治験へ向けて

12 FACE

テラヘルツ量子カスケードレーザーを開拓する研究者

13 私の「科学道100冊」

植物ってすごいな

14 TOPICS

- ・新しいSaFE農薬が発売
- ・片山内閣府特命担当大臣がAOI-PARCを視察
- ・平井内閣府特命担当大臣が神戸地区と播磨地区を視察
- ・新研究室主宰者の紹介

16 原酒

ファゴットと私

科学道

Dreams to the Future

「テラヘルツ波は、未踏の光、夢の光、未来の光などといわれてきました。

しかし最近では、そうした形容が似合わないほど、実用化に近づいています」

そう語るのは、光量子工学研究センター テラヘルツ光源研究チームの南出泰<sup>ひろあき</sup>チームリーダー (TL) である。

テラヘルツ波の発生と検出は難しいといわれる中、同チームでは

世界に先駆けて高性能で高出力な光源や、常温で動作する高感度な検出器を開発してきた。

そして2017年には、手のひらに載るほど小さく、検出器としても使える光源を開発。

この光源・検出器の登場により、テラヘルツ波の実用化が大きく進むと期待されている。

# テラヘルツ波は未踏から実用へ

## ■ 未踏の光、テラヘルツ波とは

テラヘルツ波は、電磁波の一種である。電磁波は周波数によって分類され、周波数が0.1~100テラヘルツ (THz、テラは1兆=10<sup>12</sup>) の電磁波をテラヘルツ波あるいはテラヘルツ光という (図1)。周波数とは波が1秒間に振動する回数で、周波数が高いほど、波長が短く、エネルギーが高くなる。テラヘルツ波は、電波と光の境界領域に当たり、電波と光の両方の性質を持っている。そのためテラヘルツ波は、電波のように物質をよく透過し、光のように高い空間分解能で観察できる。また、物質はそれぞれ決まった周波数のテラヘルツ波を吸収するため、物質に照射し透過してきたテラヘルツ波の分光スペクトル (周波数ごとの強度の分布) を調べると、その物質が何であるかを特定できる。

「テラヘルツ波は、非破壊検査やセキュリティチェック、医療、通信などさまざまな分野に役立つ可能性を持つ、

とても魅力のある電磁波として1990年代から注目されてきました。しかし、電波の技術で扱うには波長が短すぎ、光の技術で扱うにはエネルギーが低すぎるため、発生させることも検出することも難しく、未踏の光とも言われてきました」

と南出TLは解説する。  
テラヘルツ光源研究チームでは、テラヘルツ波の光源と検出器の研究開発に取り組んできた。「テラヘルツ波の発生と検出の技術を一からつくるのは、ハードルが高く、時間もかかります。私たちは、実用可能な光源と検出器をいち早く開発し使えるようにすることが重要だと考え、ほかの電磁波で確立されている技術を借りてきて足りない部分を集中的に開発するという戦略を取っています」

## ■ 非線形光学結晶を用いた光源を開発

南出TLらが注目したのは、光の領域で確立されている周波数 (波長) 変換の技術である。非線形光学結晶という特

殊な結晶にレーザー光を入射すると、周波数が変わる。この技術を使ってテラヘルツ波を発生させようと考えたのだ。

最初に開発したのが、非線形光学結晶の一つ、ニオブ酸リチウムを用いた光源である (図2)。励起光として近赤外線レーザー光をニオブ酸リチウム結晶に入射すると、光パラメトリック発生という非線形光学現象によって、周波数の異なる二つの光が発生する。近赤外線レーザー光を結晶に入射する角度を変えると、発生する光の周波数が変わり、0.4~4.7THzの範囲で任意の周波数のテラヘルツ波を発生させることができる。入射角度を変えるには結晶を回転させるだけでよく、100分の1秒で任意の周波数に切り替えることが可能だ。

DASTやBNAという別の非線形光学結晶を用いた光源も開発。前出のニオブ酸リチウムは無機、DASTやBNAは有機の非線形光学結晶である。これらの有機結晶は、広い周波数のテラヘルツ波を発生できる。DAST結晶を用いた光源では0.2~50THz、BNA結晶を用いた光源では0.1~30THzの範囲で任意の周波数のテラヘルツ波を、差周波発生という非線形光学効果によって発生させることができた。

「さまざまな応用分野で使える光源にするには、広い範囲で周波数を選び、しかも瞬時に周波数を切り替えることができなければならないと考えています。私

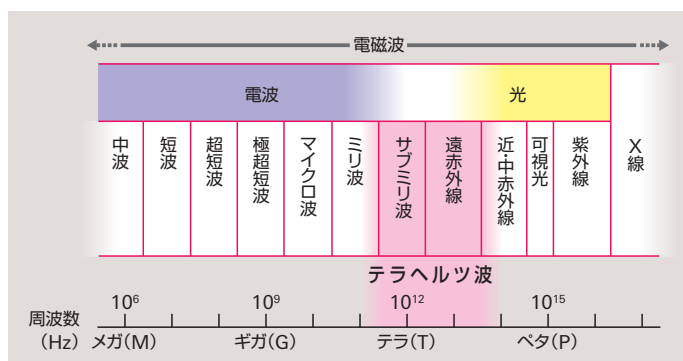


図1 電磁波の種類と周波数

周波数が0.1~100THzの電磁波をテラヘルツ波またはテラヘルツ光という。電波と光の境界領域に当たり、両方の特性を持つ。

**南出泰亜** (みなみで・ひろあき)

光量子工学研究センター  
テラヘルツ光源研究チーム  
チームリーダー

1969年、和歌山県生まれ。東北大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了。博士（工学）。1999年、理研フォトダイナミクス研究センター フロンティア研究員。テラヘルツ光源研究チーム研究員、副チームリーダーを経て、2010年より現職。



たちは、その条件を備えたテラヘルツ光源の開発に成功したのです」

**■ 100万倍の高出力化に成功**

光源の基礎開発に成功した南出TLらが次に目指したのは、高出力化である。出力が低いと検出が難しいため、実用で使えるようにするには1ワット（W）を超えるような光源の高出力化が欠かせない。しかし、ニオブ酸リチウム結晶を用いたテラヘルツ光源の最高出力は開発当初0.1W程度だった。

「非線形光学の理論に基づいて計算すると、もっと出力が高くなるはずなのです。なぜ出力が低いのか、どうすれば高くできるのか、これまでの実験データを見直したり、文献を読んだり、さまざまな実験をしたりして検討しました。しかし、ヒントすら見つからない。そんなときです、東日本大震災が起きたのは。研究チームがある理研仙台地区の建物や実験装置も被害を受けました。大変なことがたくさんありましたが、実験ができない分、考える時間をつくることができました」

そして、ニオブ酸リチウム結晶を用いた光源では誘導ブリルアン散乱という非線形光学現象がテラヘルツ波の発生を阻害しているのではないかと、思い至った。誘導ブリルアン散乱を取り除く方法を整え、被災した光源の修理が済むとすぐに実験を行った。

「結果は予想以上でした」と南出TL。「100kWを超える非常に強いテラヘルツ波が発生したのです。それまでは最大0.1Wでしたから100万倍です」

誘導ブリルアン散乱は光の領域ではよく知られている現象だが、それがテラヘルツ波の発生を阻害しているという報告はなかった。「テラヘルツ波の領域では未知の現象も多く、その発生メカニズムという基礎的なことでも理解が進んでいないところもありました。メカニズムが分かったことで、テラヘルツ波を効率よく発生させるにはどうしたらよいか、ようやく分かってきました」

**■ 近赤外線に変換して検出**

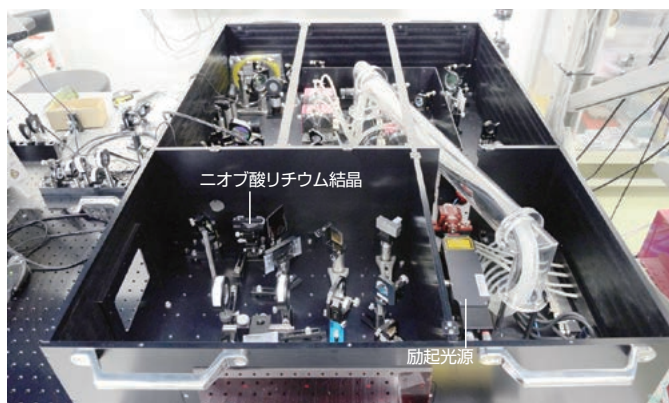
従来のテラヘルツ波の検出器は、感度を高めるために液体ヘリウム温度の4.2K（約-269℃）まで冷却しなければならず、使い勝手が悪い。常温で動作する高感度な検出器の実現が、大きな課題となっていた。

南出TLは「発想の転換をしました」と言う。「私たちは、光をテラヘルツ波に変換することに成功しています。ならば逆、つまりテラヘルツ波を光に変換することもできるはず。光領域には常温で高感度に動作する検出器がすでにあるので、光に変換してしまえば、その検

出器を使うことができます」

そして実際に、非線形光学結晶を用いてテラヘルツ波を近赤外線に変換し、それを近赤外線検出器で計測することに成功。常温で高感度にテラヘルツ波を検出できる画期的な検出器である。しかし南出TLは、「いくら画期的な検出器だとしても、自分たちが開発した高出力の光源で発生したテラヘルツ波を、自分たちが開発した装置で検出しているので、手前みそなんです」と言う。「私たち以外が開発した光源で発生したテラヘルツ波も検出できなければ、社会で広く使われる検出器にはなりません」

そこで、東京工業大学 科学技術創成研究院の浅田雅洋 教授らが開発した共鳴トンネルダイオードで発生させたテラヘルツ波を、南出TLらが開発した光波変換によるテラヘルツ光検出装置で検出する実験を行った（図3）。共鳴トンネルダイオードとは、半導体のナノ構造で生じる量子力学的な共鳴トンネル現象を利用してテラヘルツ波を発生させる電子デバイスである。実験の結果、1.14THzのテラヘルツ波について約5nWという低



**図2 超広帯域周波数可変テラヘルツ光源**

ニオブ酸リチウム結晶を用いて光パラメトリック発生によって0.4～4.7THzの範囲で任意の周波数のテラヘルツ波を発生可能。かつ100分の1秒で周波数を切り替えることができる。大きさは、約80cm×120cm。

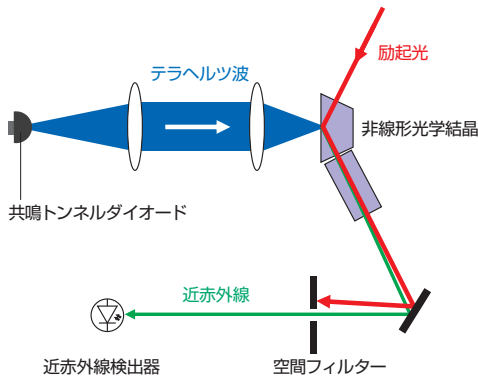


図3 光波変換によるテラヘルツ波検出実験の概要

共鳴トンネルダイオードから発生したテラヘルツ波を非線形光学結晶であるニオブ酸リチウムにレンズで集光させる。そこにパルスレーザー光を励起光として用い、テラヘルツ波を近赤外線に変換した。空間フィルターを用いて励起光と近赤外線を分離した後、近赤外線検出器を用いて検出する。

関連情報

- 2017年10月2日プレスリリース  
光波長変換による後進テラヘルツ波発振を実現
- 2017年3月2日プレスリリース  
光波長変換によりテラヘルツ波を高感度に検出

い出力まで検出できた。

検出された近赤外線の出力から、変換前のテラヘルツ波の出力を求めることができるのが、この検出方法の特長である。研究チームで開発した光源で発生させたテラヘルツ波は高出力のため、テラヘルツ波のまま測定する従来の検出器でも検出可能で、正確な値になるように調整された検出器を使って出力が分かっている。さらに、そのテラヘルツ波の出力と、それを光波変換によって検出した近赤外線の出力との対応を正確に調整してあるので、光源が変わってもそのデータから算出できるのだ。「技術が広く使われるためには、利用者が扱うものの特性を知ることが欠かせません。応用展開につなげることを強く意識しながら基礎研究を行うのが、私たちの研究方針です」

■ 危険ガスを微量でも高速で検知

テラヘルツ波はセキュリティ分野への応用が期待されている。その使用例として、危険ガス検出システムを試作した(図4)。このシステムは、人が装置の前を通過するとき、空気を吸入する。その人が揮発性の危険物を持っていれば、空気中にそのガス分子も含まれることになる。吸い込んだ空気にテラヘルツ波を照射し、透過してきたテラヘルツ波を検出器で捉えて、分光スペクトルを得る。登録してある危険ガスの分光スペクトルと一致すれば赤色の表示が点灯する、という仕組みだ。メタノールを用いた実験では、1秒以下で1ppm(100万分の1)レベルで検出できている。

駅や空港、スタジアムなど、人が集ま

る場所では、危険物の持ち込みを防がなければいけない。1人ずつ目視での手荷物検査は時間がかかり見落としもあるため、高速で高感度に危険物を検出できる技術が求められている。この危険ガス検出システムは、社会の安全・安心の確保に役立つと期待されている。

■ 人工結晶で小型化に挑む

危険ガス検出システムのように、テラヘルツ波の応用利用に向けた動きが加速している一方、越えなければいけないハードルがある。小型化だ。

「私たちは、常に小型化を意識してきました。光源と検出器も、テーブルに載るくらいのサイズになっています。自分たちの感覚では十分に小さいと思っていました。ところが、テラヘルツ波を使いたいという人に見せると、『ずいぶん大

きいんですね』と驚かされてしまうのです」と南出TLは声を落とす。

「皆さん、装置を持ち運びたいと言います。それには小型であることに加えて、丈夫であることも必要です。各部分を少しずつ小さくしていくのでは限界があります。また、現在の光源や検出器は、ミラーやレンズ、フィルターなどたくさんの光学素子と複数のレーザーから構成されるため、振動に弱く、持ち運びに向いていません。では、どうしたらいいのだろうと、とても悩みました。そして出した答えが、これまで使用していた天然の単結晶ではなく、独自にデザインした人工結晶を使う、ということでした」

天然の単結晶では自発的に結晶の向きがそろっているので、電気的な偏りの方向(分極方向)もそろっている。一方、結晶に電圧をかけて分極方向を周期的

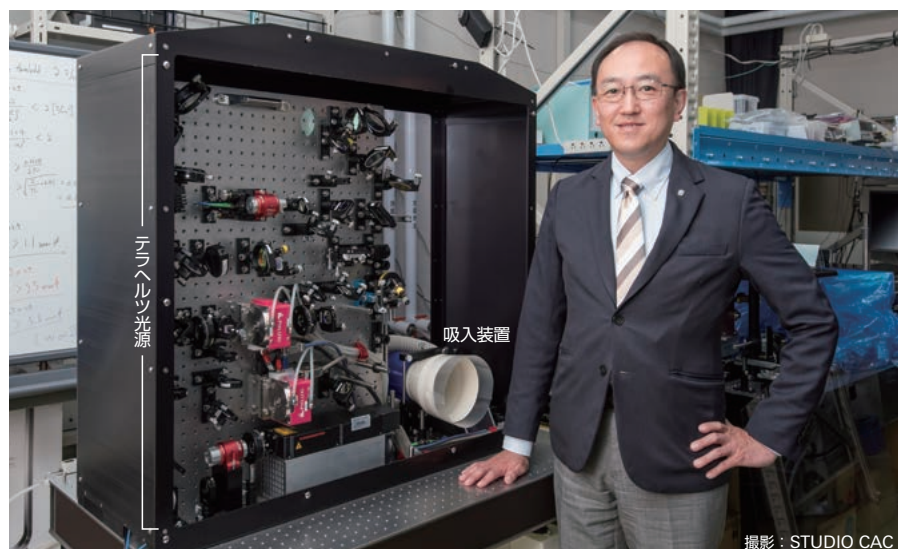


図4 危険ガス検出システムの試作品

写真はカバーを外した状態で、テラヘルツ光源と空気の吸入装置が見えている。裏側には、テラヘルツ波を空気に照射する筒と、テラヘルツ波検出器が設置されている。駅の改札を通るように装置の前を通過するだけで、1ppm以上の危険ガスを1秒で検知できる。

撮影：STUDIO CAC

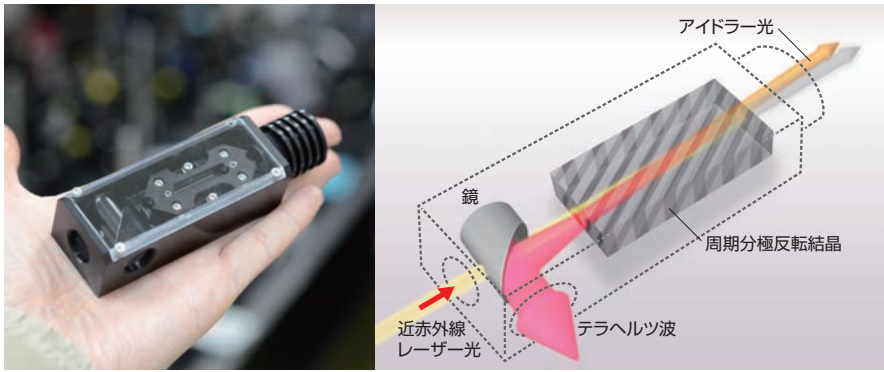


図5 周期分極反転結晶を用いたテラヘルツ光源

左は試作品、右はテラヘルツ波発生仕組み。独自にデザインしたニオブ酸リチウム周期分極反転結晶に近赤外線レーザー光を入射するだけで、ほかの光学素子を用いずにテラヘルツ波を発生できる。このとき周波数変換により、テラヘルツ波と対になるアイドラー光が発生する。テラヘルツ波は結晶の手前に設置したミラーで反射させて取り出す。

に180度反転させた人工結晶を、周期分極反転結晶という。分極の反転周期や角度をデザインすることで、単結晶より効率的に入射光を目的の周波数に変換することができる。周期分極反転結晶を用いた周波数変換は、光の領域では確立されている技術だ。

周期分極反転結晶の反転周期は、光の領域では入射光に対して垂直のものが多く、南出TLらは、反転周期を入射光に対して斜めにするとう光をテラヘルツ波に変換できることを計算から求め、計算どおりのニオブ酸リチウムの周期分極反転結晶を作製した。「最終的にはこの周期分極反転結晶を用いてテラヘルツ波を発生させたいのですが、発生がとても難しいことは、これまでの経験から身に染みて分かっていました。そこで、まずはこの結晶でテラヘルツ波を光に変換できるかを検証することにしました」

実験を始めてすぐ、テラヘルツ波を周期分極反転結晶に入れると近赤外線に変換されることが確かめられた。「これならば、逆に光をテラヘルツ波に変換するのも簡単に違いないと、すぐに発生の実験に着手しました」

### ■ 手のひらに載るテラヘルツ光源

ニオブ酸リチウムの周期分極反転結晶を用いたテラヘルツ波の発生実験は、縄田耕二 研究員と時実 悠 研究員(研究当時、現 徳島大学 特任助教)が中心となって行った。「実験を始めて1週間たっても、2週間たっても、テラヘルツ波が発生したという報告はありませんでした。すぐ成功すると思っていた私は、3週間

目にはしびれを切らし、『きちんと実験をやっているの?』と聞いてしまったほどです。縄田さんの答えは『やっています!でもテラヘルツ波が出ないんです』。検出器が壊れているのではないかと調べてみましたが、壊れていない。頭を抱えてしまいました」と南出TLは振り返る。

それから議論が繰り返された。あるとき縄田研究員が、「結晶を抜けてきた近赤外線レーザー光のすぐ横に光が出ているようだ」とつぶやいた。調べてみると、確かに光が出ているがテラヘルツ波ではない。しかも、その位置に光が出るとは、どの教科書、どの論文にも書かれていない。すると時実研究員が、「未知の現象なのではないか」と言ったのだ。「私たちは、観測されている現象を説明できる仮説を立ててみました。すると、テラヘルツ波は入射光の進行方向に対して逆方向、つまり後ろ向きに出ると予測されました。すぐに結晶の手前に検出器を置いてみると、テラヘルツ波が検出されたのです。私たちは入射光の進行方向に対して横に出ると思っていましたから、ものすごく驚きました」と南出TL。

あらためて調べると、1966年の論文で米国スタンフォード大学のステーブ・ハリス博士が存在を予測していた後方波発振であることが分かった。それだけではない。「その論文では、発生する光の周波数を変えられると述べていましたが、具体的な方法については言及していませんでした。私たちの仮説では、結晶を回転させるだけでテラヘルツ波の周波数を変えられるはずだと予測できました。実験してみると、発生したテラヘ

ルツ波の周波数が仮説とびたりと一致したのです」

2019年5月、南出TLはハリス博士と会う機会があった。「後方波発振を実証したことを話すと、とても驚いていました。しかも、結晶の角度を変えるだけで周波数が変わるというのは想定外だったようです」

南出TLは、周期分極反転結晶による後方波発振について、「夢の光源であり、テラヘルツ波の実用化に大きな革命を起こすに違いない」と言う。「周期分極反転結晶だけでテラヘルツ波を発生でき、発生自体にミラーやレンズは不要です。そのため手のひらに載るほど小型です。しかも、センシングなどに使ったテラヘルツ波を結晶に戻せば、検出器としても使えます。励起光源を含めて両手に載るくらいにすることを目指し、さらに開発を進めているところです」(図5)

この技術は、どのような用途に応用できるだろうか。「ここまで小型化したのですから、宇宙に持っていくのもいいかもしれませんね。テラヘルツ波は水に吸収されます。その性質を使えば、観測する天体に水が存在しているかどうか、ひいては生命存在の可能性が分かるかもしれません」

南出TLは最後にこう語る。「電波や光、X線など、どの周波数領域の電磁波も人類に欠かせないものとなっています。テラヘルツ波も間もなく、人類にとって重要な役割を担う電磁波となることでしょう。そのとき私たちが開発した技術が活かされていたら、うれしいですね」

(取材・執筆: 鈴木志乃/フォトンクリエイト)

すぐに壊れてほかの種類になってしまう不安定な原子核（不安定核）には、現在の原子核理論では説明できない性質を持つものがある。

仁科加速器科学研究センター（RNC）実験装置開発室 RI・電子散乱装置開発チームの若杉昌徳チームリーダー（TL）らは、従来は不可能と考えられていた短寿命の不安定核を集めて標的をつくる新手法を発明。それを駆使して、不安定核の性質を調べ、あらゆる原子核を統一的に説明できる究極の原子核理論の構築に貢献しようとしている。

## 不安定核を調べる新手法を発明

### ■ 不安定核も説明できる 究極の原子核理論を築く

原子を構成するのは原子核と電子だ。さらに原子核は正電荷の陽子と電荷を帯びていない中性子から成る。

原子では原子核の周りを陽子の数と同数の電子が回っている。それらの電子によって原子の化学的性質が決まる。元素の種類は陽子数で定められているが、同じ元素でも中性子の数が異なる同位体が存在する。その多くが放射線を出してすぐにほかの種類原子核に変わってしまう不安定核（放射性同位体：RI）だ。

自然界で安定に存在する原子核（安定核）は約280種類。原子核はほぼ球形で、中心から表面までおおむね一様な密度で陽子と中性子が均等に分布していることが、さまざまな実験で確かめられていた。

ところが1985年、米国の加速器施設において日本人研究者らが質量数（陽子

数+中性子数）11のリチウム（ $^{11}\text{Li}$ ：陽子数3、中性子数8）という不安定核の実験により、不思議な現象を見つけた。陽子と中性子が一様に分布しているのではなく、原子核の表面付近では中性子だけが薄く広がって分布していたのだ。「それは中性子ハローと呼ばれています。この実験により、不安定核は安定核とは異なる性質を持つことが初めて分かったのです」と若杉TLは指摘する。

安定核では陽子と中性子の数はほぼ同数で大きな差がない。理論的に1万種類が存在すると予測される原子核の中で、安定核の割合はわずか3%。ほとんどの原子核は、陽子あるいは中性子の数が過剰な不安定核なのだ。

従来の原子核理論は、安定核というたった3%の「特殊な」原子核の実験に

より築かれた。しかしその理論では説明し切れない現象が不安定核で次々と見つかっている。不安定核の性質を詳しく調べ、その実験データとそれらを説明する理論的研究に基づき、安定核と不安定核を含むあらゆる原子核を統一的に説明できる原子核理論の構築が求められているのである。

### ■ 標的がつかない不安定核の 電子散乱実験は実現困難だった

「現在の原子核理論を築く上で、1950年代から行われた電子散乱実験が重要なデータになりました」と若杉TL。

電子散乱実験の原理は電子顕微鏡と同じだ。見たい試料を薄膜状にした標的に電子ビームを当てると、標的を構成する物質によって電子が散乱する。例え

図1 SCRITの原理

電子ビームの負電荷により不安定核の陽イオンが集まり、ビーム軌道上に閉じ込められて標的となる。

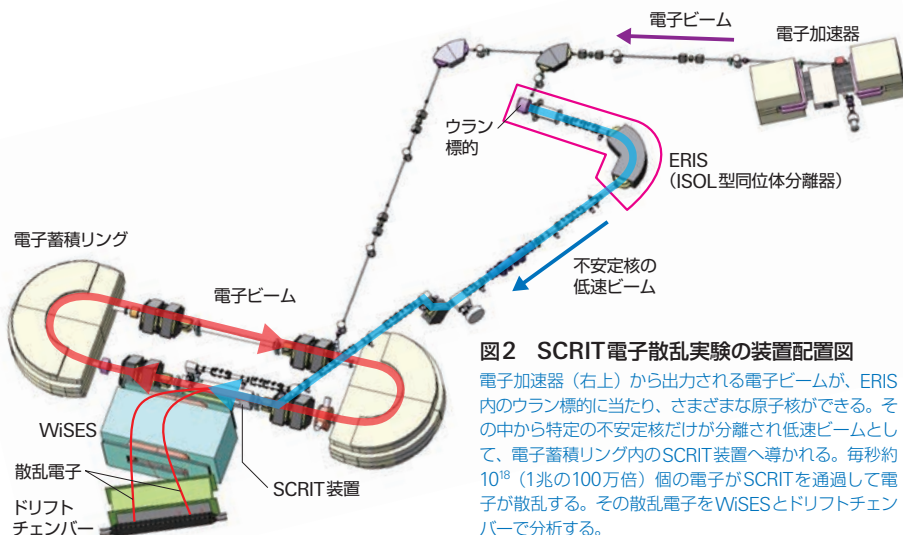
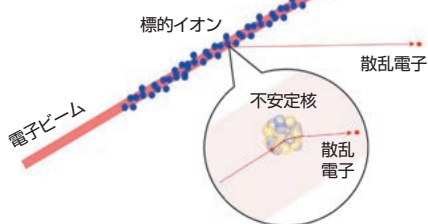


図2 SCRIT電子散乱実験の装置配置図

電子加速器（右上）から出力される電子ビームが、ERIS内のウラン標的に当たり、さまざまな原子核ができる。その中から特定の不安定核だけが分離され低速ビームとして、電子蓄積リング内のSCRIT装置へ導かれる。毎秒約 $10^{18}$ （1兆の100万倍）個の電子がSCRITを通過して電子が散乱する。その散乱電子をWISESとドリフトチェンバーで分析する。

**若杉昌徳** (わかすぎ・まさのり)

仁科加速器科学研究センター  
実験装置開発室 室長  
RI・電子散乱装置開発チーム  
チームリーダー

1961年、大分県生まれ。理学博士。広島大学大学院理学研究科博士課程修了。1992年、理研サイクロトロン研究室 研究員。2008年より現職。2018年より、京都大学化学研究所附属先端ビームナノ科学センター 粒子ビーム科学研究領域 教授。



ば、丸い物と四角い物とでは当たった場合の散乱の仕方が異なる。電子の散乱データから標的を構成する物質の形を導き出すことができるのだ。

電子顕微鏡は、直径が約0.1nm (100億分の1m = 1Å) の原子を見ることが出来る。原子核は原子の10万分の1、すなわち1,000兆分の1mほどの大きさだ。それを見るには、電子をより高速に加速した高エネルギーの電子ビームが必要だ。電子が原子核に当たった散乱データから、原子核における電荷の分布を決定することができる。それはほぼ陽子の分布に相当する。

陽子ビームを用いる散乱実験もある。原子核に当たった陽子の散乱データから、原子核をつくる核子（陽子あるいは中性子）の分布が分かる。この陽子散乱実験では陽子と中性子を区別できないが、電子散乱実験で決定した陽子分布を引き算することで、中性子だけの分布を導き出せる。

ただし、陽子散乱実験のデータの解釈には注意が必要だ。陽子や中性子の間に働き、原子核をつくる強い力を「核力」と呼ぶ。陽子の散乱実験では、陽子と原子核の間に主に核力が働き、陽子が散乱する。核力の性質はまだ完全には分かっていないので、陽子散乱データの解釈には、ある程度仮定が入ってしまうのだ。

これに対し、電子散乱実験では電磁気力だけが働いて電子が散乱する。電磁気力の理論はすでに確立されている。「電子散乱データの解釈には仮定が入らず、疑問の余地のない電荷分布（陽子分布）を決定することができます」

究極の原子核理論をつくるため、不安定核を調べるには、信頼性の高い電子散乱実験が必須だ。しかし不安定核での実験は極めて困難だった。「従来手法では原子核に電子が当たる確率が低いため、十分な散乱データを得るには $10^{20}$  (1兆×1億) 個以上の原子核を集め

た標的が必要でした。すぐに壊れてしまう不安定核をそれほど大量に集めることは現実的には不可能です。不安定核の標的がつかれないため、その電子散乱実験の実現は難しいと考えられていたのです」

## ■ 不安定核が自ら集まり

### 標的をつくるSCRITを発明

1990年代、理研では新種を含むたくさんの種類の不安定核をつくり、その性質を詳しく調べる加速器施設「RIビームファクトリー (RIBF)」計画の検討が進められた。「RIBFの大きな目標の一つが、不安定核の電子散乱実験を行うことでした。そのために巨大な衝突型加速器MUSESの計画が持ち上がり、それを格納する広大なスペースの建設も進められました」

MUSESでは、不安定核ビームと電子ビームをそれぞれ細く絞り込んで密度を高め、正面衝突させる。「しかしその手法は技術的にとても難しく、装置の建設にも大きなコストがかかります。私は当時のRNCセンター長の矢野安重さん（現 特別顧問）と、電子と不安定核をもっと簡単に衝突させることはできないか検討し、不安定核の標的をつくる新しい手法を考え出しました。その原理は簡単なものです」

電子ビームの軌道に、不安定核の陽イオン（正電荷の原子）を流し込んで標的をつくる（図1）。「このとき私たちは、正確な位置に陽イオンを流し込む必要はありません。電子ビーム軌道の近くに流し込めば、電子ビームの負電荷に引き寄

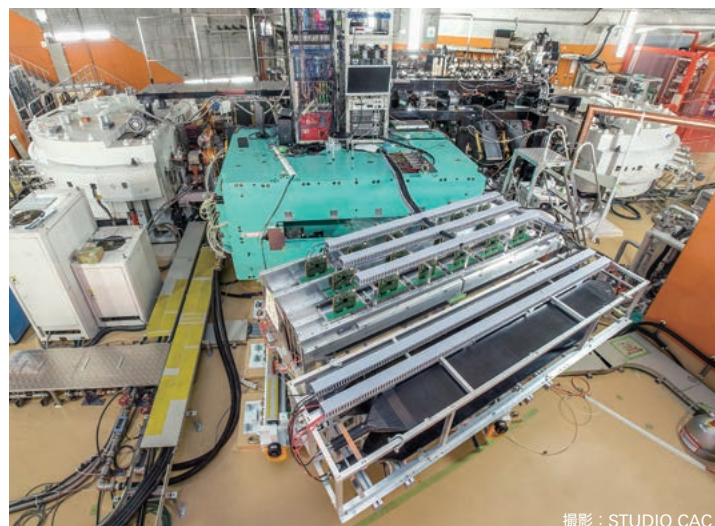


図3 SCRIT電子散乱実験装置群

手前がドリフトチェンバー、奥（二つの白い半円形）が電子蓄積リング。WiSES（緑色）の背後にSCRIT装置がある。

撮影：STUDIO CAC

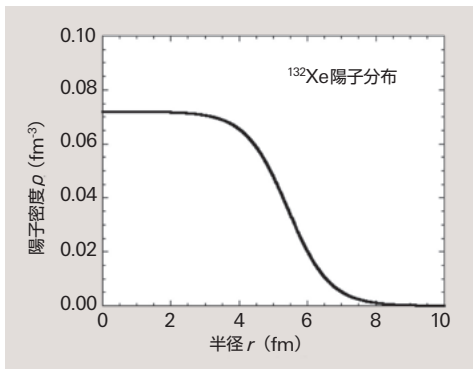


図4 SCRIT電子散乱実験で決定された<sup>132</sup>Xeの電荷分布(陽子分布)

究極の原子核理論には、陽子と中性子の数から、電子散乱実験で決定された電荷分布を正確に導き出すことが求められる。1fm(フェムトメートル)は1,000兆(10<sup>15</sup>)分の1m。

せられます。さらに陽イオンに含まれる電子が電子ビームにはじき飛ばされることで正電荷が強くなり、電子ビーム軌道に閉じ込められるからです。不安定核が電子ビーム軌道上に自ら集まり閉じ込められて標的となるのです。そこで、私たちはこの手法を、自己閉じ込め型不安定核標的(SCRIT: Self-Confining RI Ion Target)と名付けました」

標的が電子ビームの軌道上にできるため、電子との衝突確率は格段に上がる。若杉TLらは2002年、SCRITの特許を出願。不安定核の電子散乱実験をMUSESの手法からSCRITへ転換した。「シミュレーション計算では、従来の方式より何桁も少ない量の不安定核標的で、十分な電子散乱データが測定できるという結果が出ました」

しかし、その実証のために必要な実験設備は当時、理研にはなかった。そこで電子蓄積リングがある京都大学化学研究所の協力を得て、安定核を用いたSCRITの実証実験を開始。2007年4月、その実証に成功した(『理研ニュース』2011月2月号「研究最前線」)。

幸運なことに同じ年、住友重機械工業(株)から理研へ、使わなくなった電子蓄積リングを無償譲渡したいという申し出があった。当初はMUSESのために準備されていたスペースにその電子蓄積リングを移設、電子散乱実験に必要な装置の設計・開発が進められた。

実験の主な流れは、次のとおりだ。まず、ERIS (ISOL型同位体分離器)内で、ウラン標的に電子ビームを当ててさまざまな種類の原子核を生成する。そのなか

ら特定の種類の原子核だけを分離した低速ビームを生成。その低速ビームを電子蓄積リング内のSCRITに流し込み標的をつくる。そこに電子が当たり、散乱した電子をWiSES(散乱電子分析電磁石)とドリフトチェンバー(飛跡検出器)で測定する(図2・図3・表紙)。

### SCRIT電子散乱実験のスタンダードを世界に示す

2015年、SCRIT電子散乱実験装置群が完成。若杉TLらは、安定核のキセノン132(<sup>132</sup>Xe)でSCRIT電子散乱実験を行い、その電荷分布を決定することに成功し、2017年に発表した(図4)。「従来の標的には10<sup>20</sup>個の原子核が必要でした。SCRITでは、その1兆(10<sup>12</sup>)分の1の量、1億(10<sup>8</sup>)個の標的で電子散乱実験を行い、電荷分布を決定することができました。小型な装置であるERISでも、これくらいの量ならば、さまざまな種類の不安定核をつくることができます」

現在の原子核理論によれば、陽子あるいは中性子の数が、2、8、20、28、50、82、126の原子核は、陽子や中性子がしっかりと結合して安定している。それらの数は「魔法数」と呼ばれる。「陽子あるいは中性子の数が1個増えるごとにその分布半径は大きくなります。しかし魔法数に近づくほど分布半径は小さくなり、魔法数になるとぎゅっと小さく結合します」

ただし不安定核の中には、魔法数のはずなのに不安定なもの(魔法数の消滅)もあれば、従来知られている魔法数

#### 関連情報

- 2017年6月28日プレスリリース  
原子核を見る新型電子顕微鏡の完成

以外で安定する、すなわち新しい魔法数を持つものが発見されている。

今後、若杉TLらは、不安定核であるスズ132(<sup>132</sup>Sn)の電子散乱実験を始めの計画だ。<sup>132</sup>Snは陽子数50、中性子数82と二重に魔法数を持つ不安定核である。「安定核の実験では、陽子数82、中性子126という二重魔法数を持つ鉛208(<sup>208</sup>Pb)が特に詳しく調べられ、それを標準にして、ほかの安定核の実験も進められたのです。私たちは<sup>132</sup>Snを用いてSCRIT電子散乱実験のやり方やデータ解析のスタンダードを世界に示すことを目指しています」

二重魔法数を持つとはいえ、<sup>132</sup>Snの寿命(半減期)は約40秒。つまり約40秒で半数以上が崩壊してしまう。「現状のSCRIT装置群では、寿命が10秒くらいまでの不安定核ならば電子散乱実験が可能はずです。3年以内を目標に、ぜひ<sup>132</sup>Snの電荷分布を決定したいと思います。私たちの電子散乱実験に、究極の原子核理論の構築を目指す世界中の理論家たちが期待しています。理論を築く上で必要なのは、疑う余地のない実験データだからです」

低速の不安定核ビームをつくり出すERISと同型の装置は、世界中で稼働している。そこに電子蓄積リングなどSCRIT電子散乱実験に必要な装置群を導入することは、比較的lowコスト・小スペースで可能だ。「私たちがスタンダードを示すことで、さまざまな種類の不安定核の電子散乱実験が世界中で始まるでしょう」

実際にフランスの研究グループは、





図5 RUNBAの概念図

次世代型SCRITによる不安定核の標的を通る軌道を、不安定核ビームが周回することで、不安定核同士を無駄なく衝突させる。

SCRITと同様の仕組みで、寿命1秒を切る不安定核の電子散乱実験を行うことを目指して、検討を始めている。

「1万個の標的で電子散乱実験が可能になれば、さらに寿命が短い不安定核も調べることができるようになります。私には、それを可能にするアイデアがあります。その実現が将来の大きな目標の一つです」

## ■ RUNBAで不安定核同士を衝突させて安定の島を目指す

2019年6月、新たに重イオン蓄積リングがSCRIT装置群の隣に運び込まれた。「不安定核の標的をつくるSCRITの技術を使えば、電子散乱実験以外にも、さらに新しい実験が可能になります。その一つが、不安定核同士を衝突させて、新しい原子核を合成する実験です」

これまで原子核同士を衝突させる実験では、必ず一方が安定核だった。不安定核の標的をつくることができなかつたため、不安定核同士を衝突させる実験は実現不可能だったのだ。

「重イオン蓄積リングで不安定核を周回させます。その軌道上の一部に『次世代型SCRIT』を組み込み不安定核標的をつくれれば、不安定核同士を効率よく衝突させることができます」(図5)

現在のSCRITは、電子蓄積リングで周回する電子ビーム軌道上に不安定核標的をつくる。しかし次世代型SCRITには電子蓄積リングは不要で、重イオン蓄積リングの一部に電子ビームを流して不安定核標的をつくるのが可能になるはずだ、と若杉TLは言う。「次世代型

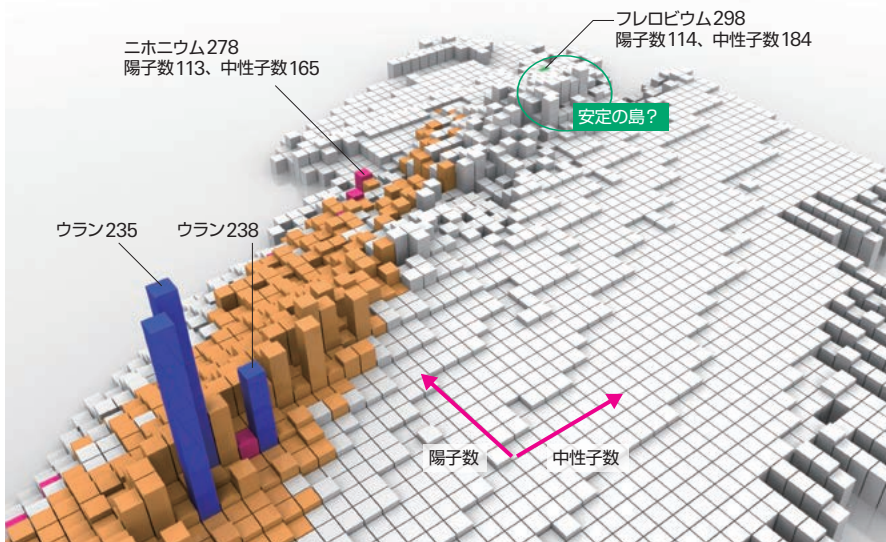


図6 安定の島

原子核の寿命を高さを表した核図表。オレンジがすでに合成された不安定核。ピンクは理研で合成されたもの。白は未知の原子核。中性子が非常に過剰だが準安定な超重元素が、安定の島と呼ばれる領域をつくっていると予測されている。RUNBAで不安定核同士を衝突させることで、フレロビウム298など安定の島の原子核を合成する技術が開発できると期待される。

SCRITの原理も、とても簡単なのですが、まだ秘密です(笑)」

その次世代型SCRITを重イオン蓄積リングの一部に組み込み、不安定核同士を衝突させるこの新手法を、RUNBA (Recycled Unstable Nuclear Beam Accumulator) と若杉TLは名付けた。「不安定核ビームを無駄なくリサイクルして使うという意味です」

薄膜の標的にビームを当てる従来手法の衝突確率は低いため、大半の原子核は通り抜けて無駄になる。「RUNBAでは、標的を通り抜けて衝突しなかつた不安定核も、リングを周回して再び標的に戻って衝突するので無駄がありません」

理研では、亜鉛70 ( $^{70}\text{Zn}$ : 陽子数30、中性子数40)とビスマス209 ( $^{209}\text{Bi}$ : 陽子数83、中性子数126)の安定核同士を融合させて質量数278の113番元素ニホニウム ( $^{278}\text{Nh}$ : 陽子数113、中性子数165) を合成することに成功している。その寿命(半減期)は0.002秒ほどだ。

質量数289の114番元素フレロビウム ( $^{289}\text{Fl}$ ) もすでに合成されており、その寿命は2.6秒だ。前述のように魔法数を持つ原子核は安定しやすいが、現在知られている魔法数以外にも、未知の魔法数がある可能性がある。例えば陽子数

114、中性子数184はいずれも魔法数で、それら二重魔法数を持つフレロビウム298 ( $^{298}\text{Fl}$ ) は、寿命が長く準安定だという理論予測がある。そのような、中性子が極めて過剰だが準安定な超重元素が、縦軸を陽子数、横軸を中性子数にした核図表上で $^{298}\text{Fl}$ の周りに集まっている可能性がある。そこは「安定の島」と呼ばれる(図6)。

「RUNBAで開発する技術は、それら安定の島の原子核を合成する有力な手法になると思います」と若杉TL。「安定の島の原子核を合成するのに、安定核同士の融合では中性子の数が足りません。中性子過剰な不安定核同士を融合させる必要がありますが、それを実現できる手法は今は存在しません。RUNBAを使えば安定の島の原子核を合成する手法が開発され、安定の島の存在の可否が明らかになるでしょう」

安定の島の原子核を合成し、寿命や質量などの基本的な物理量を決定できれば、究極の原子核理論を構築し、検証する上で重要なデータとなる。「私の仕事は不安定核を調べること。そのために、世界のどこにもないような実験装置群をつくり、その新手法を世界に示していくことが、私の夢です」

(取材・執筆: 立山 晃/フォトンクリエイト)

理研と千葉大学は、国内初の試みとなる、iPS細胞を利用したがん免疫療法の治験を、2020年に開始する予定だ。鍵を握るのはナチュラルキラーT細胞（NKT細胞）。第4のリンパ球と呼ばれるこの免疫細胞を、iPS細胞から分化させて投与するのだ。理研がNKT細胞の製造、千葉大学が附属病院で治験を主に担当する。理研 生命医科学研究センター（IMS）の古関明彦 副センター長と、千葉大学大学院医学研究院の本橋新一郎 教授（免疫細胞医学）に、これまでの研究成果と実用化へ向けた取り組みを聞いた。

## iPS由来NKT細胞によるがん免疫療法の治験へ向けて

### ■ 免疫系にがんを攻撃させるNKT細胞

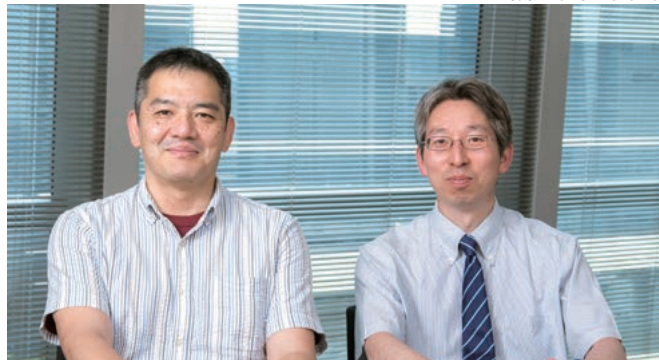
——NKT細胞とは、どのような細胞なのですか。

**古関：**千葉大学で谷口 克 先生（現 千葉大学名誉教授、元 理研 免疫・アレルギー科学総合研究センター センター長）らがマウスにおいて1986年に発見した免疫細胞で、T細胞の仲間です。さらに谷口先生らは1997年、その特殊な働きを解明しました。NKT細胞にある受容体が、樹状細胞のCD1d分子に結合した糖脂質 $\alpha$ -ガラクトシルセラミド（ $\alpha$ -GalCer）を認識して活性化すると、免疫系ががん細胞を攻撃するようになることをマウスの実験で明らかにしたのです。その後の研究で、あらゆる異物に対して最初に反応する自然免疫系のNK（ナチュラルキラー）細胞と、特定の異物（抗原）を認識して攻撃する獲得免疫系のキラーT細胞の双方が、活性化したNKT細胞の指令によりがん細胞を攻撃することが分かりました（図1）。

ヒトにもNKT細胞があります。本橋先生たちは2001年から、NKT細胞を活性化させるがん治療のための臨床研究を始め、最初の研究報告を2005年に発表されました。

**本橋：**進行性肺がんの患者さんから採取した末梢血の樹状細胞を増殖させ、そこに $\alpha$ -GalCerを結合させて患者さんの体内に戻しNKT細胞を活性化させる「樹状細胞療法」です。それにより、治療効果が期待できます。しかし、研究によって有効な免疫反応が認められたのは半数ほどの患者さんに限られました。

撮影：STUDIO CAC



古関明彦 副センター長（左）と本橋新一郎 教授

免疫反応が認められなかった患者さんには、機能が正常なNKT細胞を大量に投与すれば効果が表れるだろうと考えました。

### ■ 他家iPS由来のNKT細胞を投与

**古関：**2006年、マウスのiPS細胞が樹立されました。私たちは、マウスiPS細胞をNKT細胞に分化させ、がんを持つマウスに投与する実験を行いました。すると高い抗がん効果が見られました。そこで、ヒトを対象にした新しいがん「免疫細胞療法」の研究を2011年から本格的に始めました。健康なヒトからNKT細胞を採取して、iPS細胞をつくり増殖させます。それを再分化したNKT細胞を純化・増殖させてバンクに蓄積し、患者さんの腫瘍部位に投与する計画です（図2）。樹状細胞のCD1dもNKT細胞の受容体も、全てのヒトで共通です。私のNKT細胞をあなたに投与しても、あなたの樹状細胞上のCD1dに結合した $\alpha$ -GalCerで私のNKT細胞が活性化されるはずですよ。

——本人の自家NKT細胞を増殖させることは難しいのですか。

**古関：**ヒトを対象に自家NKT細胞投与と樹状細胞療法を併用する臨床研究が行われ、腫瘍が縮小したり増殖が抑制されたりする効果が認められ、副作用も少ないことが報告されています。しかしNKT細胞は血液中に0.01~0.1%程度しか存在せず、ある人のNKT細胞はうまく増殖できても、別の人では増殖が難しいといった個人差があります。つまり必要な量のNKT細胞が得られないケースが多いのです。しかも、NKT細胞の増殖には時間もコストもかかります。一方、iPS細胞は容易に増殖させることができます。他人の他家NKT細胞でiPS細胞をつくり増殖させた方が、低コストで必要な量のNKT細胞を用意できるのです。多くの研究者がiPS細胞を用いた基礎研究や臨床応用の研究を進めています。その知見や技術も用いることで、このがん免疫療法をいち早く実用化につなげることができるはずですよ。

——採取しやすい皮膚細胞などからつくったiPS細胞では、NKT細胞に再分化させることはできないのですか。

**古関：**T細胞の受容体（TCR）には、とてもたくさんの種類が

図2 iPS由来NKT細胞によるがん免疫療法

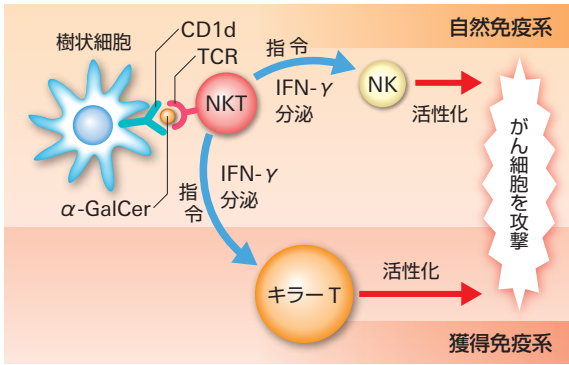


図1 NKT細胞の働きの模式図

NKT細胞は、受容体 (TCR) で樹状細胞のCD1dに結合したα-GalCerを認識して活性化。インターフェロンガンマ (IFN-γ) という物質を分泌して指令を出し、自然免疫系のNK細胞や、獲得免疫系のキラーT細胞を増殖促進・活性化させ、それらががん細胞を攻撃する。

あります。TCRの多様な遺伝子は、受容体の部品となる複数の遺伝子のランダムな組み合わせ（遺伝子再構成）によってつくられます。NKT細胞でなければ、NKT細胞に特有の組み合わせの再構成は起きません。ですから、ほかの細胞からつくったiPS細胞は、普通の方法ではNKT細胞へ分化させることはできないのです。私たちは2013年、ヒトのNKT細胞由来のiPS細胞（ヒトNKT-iPS細胞）の樹立に成功しました。さらにマウスでの研究に基づき、ヒトNKT-iPS細胞をNKT細胞に再分化させる方法を2014年に確立しました。

**本橋**：米国では、iPS由来の免疫細胞（NK細胞）を用いたがん免疫療法として世界初の臨床試験が、2019年2月に始まりました。私たちも、頸部や舌などにできる頭頸部腫瘍を対象にした医師主導治験を2020年に開始することを目指しています。

### ■ 頭頸部腫瘍を対象にした治験の開始へ

——なぜ頭頸部腫瘍を対象にすることにしたのですか。

**古関**：肺がんに対しては、1回に20億個ほどのNKT細胞の投与が必要と考えられます。私たちの技術ではまだ、それほど多くの量を用意することは難しいので、少ない量で効果が期待できるがんを探し、頭頸部腫瘍を対象にすることにしました。

**本橋**：まず3名の患者さんを対象に、腫瘍へ栄養を運ぶ動脈にカテーテルを通し1回につき約5,000万個のNKT細胞を投与します。それを2週に1度、3回行います（図3）。

——異物である他家NKT細胞を投与することで、大きな副作用が出る恐れはないのですか。

**本橋**：他家NKT細胞の表面には異物のマークも付いているので、免疫系によって排除されていきます。投与したNKT細胞が何カ月も体内に残り、強い免疫反応を起こし続けて大きな副作用が出る可能性は低いと考えています。がん細胞を特異的に認識して攻撃するように改変したキラーT細胞を投与するCAR-Tという療法では、全身に強い炎症が現れる副作用が知られています。同様の炎症が、今回の治験で起き得る最大の副作用だと考えられます。万が一、そのような最悪の事態が起きても対処できる体制を準備して治験に臨みます。ただしNKT

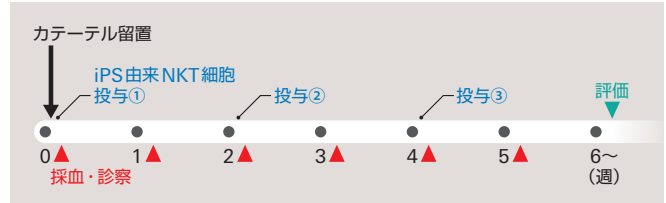
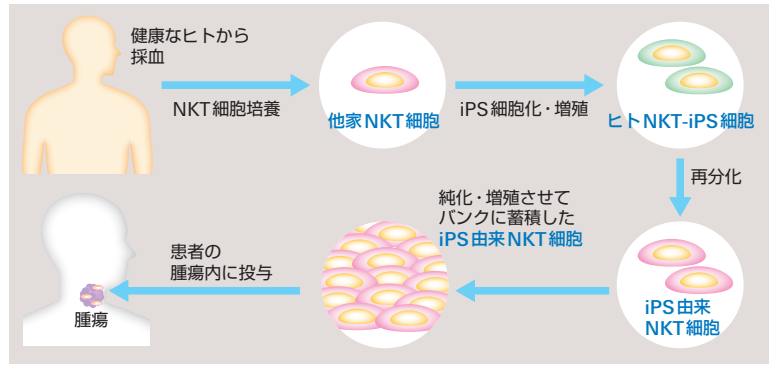


図3 頭頸部腫瘍を対象にした治験のスケジュール

まず3名の患者を対象に、カテーテルを通し1回当たり約5,000万個のiPS由来NKT細胞を腫瘍に投与。それを2週に1度、3回行う。その結果により、投与する細胞数を変えて治験を続ける。

細胞を活性化させるこれまでの実験で、致死的な免疫反応や全身に及ぶ炎症は、マウスでもヒトでも確認されていません。

**古関**：NKT細胞による免疫反応は、腫瘍がある局所で優位に引き起こされます。そして短期間に一定量のNKT細胞を投与すると、長期間にわたり効果が表れて生存期間を延ばします。その仕組みはまだよく分かっていません。

——異物である他家NKT細胞の指令によって免疫系ががん細胞を攻撃するが、やがて他家NKT細胞が異物であることに気が付いた免疫系によって排除される、ということですか。

**本橋**：おそらくそうだと考えています。少なくとも、投与したNKT細胞が一定期間排除されずに免疫系を活性化しなければ、効果が表れません。最初の治験では安全性の確認が主要評価項目ですが、がんをX線CTで確認したり、末梢血を採取して投与したNKT細胞がどれくらいの速度で減っていくのかを調べる計画です。最初の治験で安全性を確認できれば、次の段階の治験で患者さんの数を増やして有効性を詳しく確かめます。

**古関**：NKT細胞がすぐに排除されてしまい効果が弱い場合には、投与するNKT細胞を改変することも可能です。ヒトNKT-iPS細胞をつくる利点は、そのような改変がiPSの段階で容易にできることです。ゲノム編集などの技術で、他家NKT細胞が異物と認識されてしまうマークの一つを消すことで、免疫系に排除される速度を遅くすることができるでしょう。

——2020年代に実用化できそうですか。

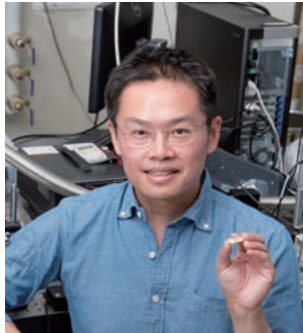
**本橋**：まず頭頸部腫瘍についての治験が順調に進み、早期に承認を得られることを期待しています。

**古関**：ほかの種類のがんについても治験を始めることができるように、さらに大量のNKT細胞を用意するための技術開発も進めていきます。

(取材・構成：立山 晃/フォトンクリエイト)

## テラヘルツ量子カスケードレーザーを開拓する研究者

光と電波の間の周波数領域にあるテラヘルツ波は、非破壊検査や高速通信など幅広い用途での利用が期待されている。テラヘルツ波を発生させる方法は複数あり、その一つが量子カスケードレーザーである。高効率で長寿命、安価と優れた特徴を持つ反面、低温にしなければいけないという問題がある。動作温度が高くなると出力が低下してしまうため、液体ヘリウム温度（4K、 $-269^{\circ}\text{C}$ ）まで冷却することが多く、装置も大型化してしまう。その状況を打開すべく、高温動作と高出力が可能なテラヘルツ量子カスケードレーザーの開発に取り組んでいる研究者が光量子工学研究センターにいる。テラヘルツ量子素子研究チームの林 宗澤<sup>リン ソウタク</sup> 研究員だ。その素顔に迫る。



撮影：STUDIO CAC

### 林 宗澤

光量子工学研究センター  
テラヘルツ量子素子研究チーム 研究員

#### リン・ソウタク

1982年、台湾・新竹市生まれ。国立交通大学電子工学科卒業。同大学大学院電子工学専攻修士課程修了。東北大学大学院工学研究科博士課程修了。2010年、理研 光量子工学研究領域 テラヘルツ量子素子研究チーム 特別研究員。2016年より現職。

台湾の北部に位置する新竹市<sup>シンジュー</sup>で生まれた。「IT関連企業や研究機関、大学が集まっていて、台湾のシリコンバレーとも呼ばれています」と林研究員。外遊びが好きで、小学生になると野球チームに入った。「台湾でプロ野球が誕生したところで、野球人気が高まっていました。ポジションはセカンドとピッチャーで、大学まで続けました」。アンプをつくったり、自転車を改造したり、ものづくりも好きだった。新竹にある国立交通大学の電子工学科、そして大学院へ進んだ。

国立交通大学では多くの学生が大学院に進み、修士課程を終えると新竹の企業に就職する。「私も就職活動をしましたが、企業での応用研究より基礎研究をしたいと感じていました。そんなとき、半導体工学で有名な東北大学の<sup>大野英男</sup>先生（現 東北大学総長）の講演を台湾で聴く機会がありました。その内容に興味をかき立てられ、大野先生のもとで研究をしたいと、2006年に東北大学大学院の博士課程に進学しました」

来日しても日常会話には困らなかった。「ラジオやアニメなどで日本語に触れているうちに覚え、大学の第二外国語でも学びましたから。歴史が好きなので、藤原周平さんの江戸時代が舞台の小説も読んでいました。話すのは少し苦手でしたが、文法が間違っていないととにかく話せば通じるものです」



図 テラヘルツ量子カスケードレーザー発振システム

本体部分である量子カスケードレーザーアレイ（左下の写真で林研究員が手に持っているもの）は複数の量子カスケードレーザーで構成されている。

研究テーマは量子カスケードレーザーを選んだ。カスケードとは階段状に流れる滝を意味し、半導体の結晶を成長させて量子力学的な階段をつくり、電子が階段を落ちていくときに「量子単位間の光学遷移」という現象によって光を発するものだ。当時大野研究室では、中赤外線の発振に成功し、次はテラヘルツ波の発振を目指そうとしていた。海外では2002年に成功していたが、動作温度と出力の向上、周波数の拡大など実用化には課題があった。「半導体の種類や、階段の高さや数によって、周波数や出力が変わります。設計の自由度が高いことにも面白さを感じ、張り切って始めたのですが、1年半、何の成果も出ませんでした。つらかった」。それでも諦めず実験を続けた。「私の性格は、真面目で細かい。緻密さが要求される設計や結晶成長に向いていたのかもしれない。2009年、従来より高い動作温度、高出力でのテラヘルツ波の発振に成功しました」。学位を取得し、2010年に理研へ。

テラヘルツ量子カスケードレーザーの高性能化に取り組み、2019年に大きな成果を発表した。「発光層中の全ての電子の振る舞いを計算する方法を開発し、電子密度と電流の分布などをシミュレーションした結果、本来流れない経路から電流が漏れ出していることが分かりました。このリーク電流が高温での動作や出力に影響していたのです」。リーク電流を抑制する構造の発光層を設計して作製し、システムを組み上げ、液体窒素温度（77K、 $-196^{\circ}\text{C}$ ）での高出力の発振に成功した（図）。単位面積当たりの出力では世界トップレベルの成果だ。「この改善方法を用いることで、より高温での動作と高出力化も実現できると考えています」

休日は、ロードバイクで遠出をしたり、サーキットで自動車レースに参加したりしている。「レースと研究は似ている」と林研究員。「レースでは、周りに合わせてスピードを変えるのではなく、ゴールまで自分のペースを保って走った方が、順位が高くなります。研究でも、うまくいかないからと早く結果が出そうなテーマに変えるのではなく、自分のペースで進めていく方が良い成果が得られると思うのです」。林研究員にとってのゴールは？「テラヘルツ量子カスケードレーザーの室温での連続動作を実現し、テラヘルツ波がいろいろな用途で使われるようになることです」（取材・執筆：鈴木志乃/フォトンクリエイト）

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。

## 植物ってすごいな

岩瀬 哲 いわせ・あきら

環境資源科学研究センター 細胞機能研究チーム 研究員

「生物の宝庫といわれるボルネオ島で2歳半まで過ごしたことや植物好きの両親の影響があったのか、植物や虫が大好きで、野山を駆け回っているような子どもでした」。よく読んでいたのが、加古里子の『宇宙』だ。ノミがどれだけ高く遠くまで飛ぶか、という話から始まって、生物や乗り物、星や銀河を比較しながら宇宙の果てまで行く。「世界はこんなに広いんだと、この本で知りました。そして“このひろいうちゅうがあなたのかつやくするところです”という最後の言葉に、胸が熱くなりました。同じ作者の『地球』も好きでした。知っている虫が森にいたり、化石が地層に埋まっていたり、ページをめくるとに発見があってわくわくしました。比較や発見は科学の始まりです」

小学3年生のころ、富山和子の『森は生きている』を読んだ。「水も土も生物も気候も、そして人間も、全て植物によってつながり支えられていることを知り、植物ってすごいなと感動し、植物がもっと好きになりました」

宮沢賢治が好きな姉から薦められて『やまなし』を読んだ。4年生のときには、教室にあった『銀河鉄道の夜』、そして『グスコーブドリの伝記』を読んだ。「科学の力を使い、最後は自分が犠牲になって人々を救うブドリの姿に感動し、この本を下さいと先生にお願いしたほどです」。一番好きな作品は、中学時代に読んだ『慶十公園林』だ。「生き方に指針を与えてくれました。慶十のように新しいことを行い知見や物を創る人、慶十の家族のようにそれを育む人、帰郷した博士のようにその価値を見いだす人。どの立場も大切で、どれかになればいいんだと分かり、気持ちが楽になりました」

高校生になって母に薦められて読んだのが、内村鑑三の『後世への最大遺物』だ。「この取材の前に読み返し、生き方こそが誰にでも遺すことのできるものだという言葉に感動し、信念をもって生きることの大切さを再認識しました」。同じ文庫本に収録されていたのが『デンマルク国の話』で、それが進路を決定付けた。「不毛な土地が、ある親子の発見と植林によって肥沃になり国が豊かになったという話で、『森は生きている』『グスコーブドリの伝記』『慶十公園林』と相通じるものがありました。植物を知るだけでなく、植物の力を役立てたいと考え、大学は農学系に進みました」

2005年に学位を取得。翌年、学会の販売ブースで「ジャケ



撮影：STUDIO CAC

買った」というのが、トム・ウェイクフォードの『共生という生き方』（遠藤圭子 訳）である。「ピーターラビットの作者でもあるピアトリクス・ポターの地衣類の研究から、共生による進化、社会科学への影響まで紹介されていて、とても面白かった。異なる生物が助け合うことで新しい環境に適応していく。それが原動力になった進化もあるのです。共生の役割と意義について知ることは、持続可能な開発目標（SDGs）の達成が求められている現代の社会にとっても不可欠です」

岩瀬研究員の研究のバイブルとなっているのが、原田 宏・駒嶺 穆 編の『植物細胞組織培養』だ。「学部4年生のときに初めて買った専門書です。この数十年で生物学は大きく進展しましたが、残されている謎もあります。この本には研究の種が潜んでいるのです」

研究の合間には時々、薄葉 重の『虫こぶハンドブック』を眺めている。「植物に昆虫が入り込むことで形成される虫こぶも、共生の一種かもしれません。いろいろな色や形の虫こぶがどのようにしてできるのか、植物にとって何か利点があるのかを解明したいという科学的な興味もありますが、そもそも図鑑が大好きなんです。図鑑を見ると、いろいろな生き物がいること、それらがつながっていることが分かります。息子が3人いるのですが、彼らにも生物の多様性やつながりを知ってほしくて、家にもたくさんの図鑑があります」

岩瀬研究員は、植物の再生メカニズムの研究をしている。「科学者は知見や物を創る人だと思っていましたが、人を育むことも、何かの価値を見いだすこともできます。三つの立場になれる科学者でいられることが、とても幸せです」。誕生日に妻が宮沢賢治全集をプレゼントしてくれた。「また『慶十公園林』を読んでみようかな」

（取材・執筆：鈴木志乃/フォトンクリエイト）

## 新しいSaFE農薬が発売

### コナジラミ類成虫忌避剤「ベミデタッチ®」

理研では1960年代から安全な農薬の開発を重要な研究テーマの一つとしてきた。1970年代以降は、有本<sup>ゆたか</sup> 特別招聘研究員（以下、研究員）を中心に、昔から食品や食品添加物として食べられてきたものを有効成分とする「SaFE（Safe and Friendly to Environment）農薬」の開発が進められている。

1993年、有本研究員らは重炭酸カリウムを用いた重カリコーティング剤によって病原菌を抑制する植物病害治療薬を開発。葉や茎が白いカビに覆われるうどんこ病などの防除に高い効果と安全性が認められ、「カリグリーン®」という商標で発売された。以来、農業や家庭園芸に広く活用され、適用植物や病原菌の種類も拡大されている。

2019年に発売された新SaFE農薬「ベミデタッチ®」は、コナジラミ類という害虫を殺さずに、飛来、吸汁や交尾を阻害する行動抑制剤である。

タバココナジラミ（*Bemisia tabaci*）に代表されるコナジラミ類は世界中に広く分布し、植物の葉や茎から吸汁し、それによってトマト黄化葉巻ウイルスを媒介し、農作物に深刻な被害をもたらすことで知られている。また、甘露と呼ばれる排せつ物にカビが発生して枝葉や実が黒くなるすす病を発生させる。

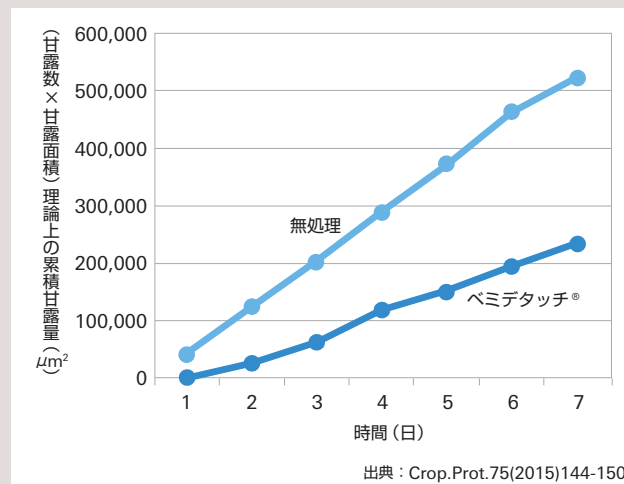
有本研究員率いる有本特別研究室では、コナジラミ類が定着する植物とそうでない植物があることに注目した。例えばキク科のツワブキとウリ科のキュウリは葉の色や形が似ているが、タバココナジラミはキュウリにしか定着しない。だが、両種の葉に糊をスプレーして観察すると、どちらにも同じだけのコナジラミが付着することが分かった（図1）。つまり、コナジラミ類はどんな葉であれ、まずは触れ、その後、定着するか否かを判断しているようである。そうであれば、植物の葉に何らかの化合物を塗布することで、葉に触れたコナジラミ類の判断を狂わせ、定着を防ぐことができるのではないか？

この仮説のもと、研究室では食用油や食品に使われているさまざまな添加物を塗布した植物にタバココナジラミを放飼して比較した。その結果、化合物の種類によって葉に定着する個体



図1 タバココナジラミはどの葉にも止まる

表面に糊をスプレーしてみると、ツワブキ（左）の葉にも、キュウリ（右）と同程度のタバココナジラミが付着した。



出典：Crop.Prot.75(2015)144-150

図2 甘露排せつ量の比較

トマトに対し、ベミデタッチ®を散布した場合と、無処理の場合の7日間の甘露排せつ量には大きな差が出た。

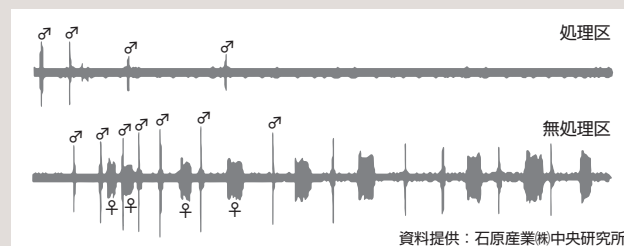


図3 交尾行動への影響

コナジラミ類は交尾の際に信号音を発する性質を持つ。ベミデタッチ®を散布したトマトの葉の上では、雄（♂）の信号音は数回のみ、雌（♀）はまったく信号音を発しなかった。

の数に顕著な違いがあることが分かった。中でも最も忌避効果が高かったのがアセチル化グリセリド（グリセリン酢酸脂肪酸エステル）である。アセチル化グリセリドは日本をはじめ、欧米でも乳化剤などの食品添加物としてチューインガム、ケーキミックス、パンなどに用いられている。

研究室ではアセチル化グリセリドを主成分とした乳剤を開発し、さらなる検証のため、本剤を噴霧したミニトマトの苗にタバココナジラミの成虫を1週間にわたって放飼した。その結果、甘露排せつ量が低減（図2）。これは吸汁量が減少していることを示唆しており、これを裏付けるように、吸汁によって媒介されるウイルス感染株率も低減した。また、定着した成虫においても求愛行動が抑制され、交尾に至らなくなっていた（図3）。

2019年6月、石原産業株式会社により上市。本製品の開発には、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「次世代農林水産業創造技術」の研究成果を活用している。現時点での適用はトマト、ミニトマトである。捕食性昆虫などを利用した生物農薬と共に使用することで、コナジラミ類およびウイルス病の被害を大きく軽減する効果が期待できる。

## 片山内閣府特命担当大臣がAOI-PARCを視察

2019年6月8日、片山さつき内閣府特命担当大臣（地方創生）が静岡県沼津市のAOI-PARC<sup>アオイパーク</sup>を視察されました。AOI-PARCは、静岡県内外の研究機関や企業などが互いの技術力やアイデア力を持ち寄り、協創して農業の生産性革新に取り組むイノベーション拠点であり、理研の光量子工学研究センターも同拠点で研究開発に取り組んでいます。今回の視察では、同センター光量子制御技術開発チーム<sup>かんとし</sup>の和田智之チームリーダー（写真中央奥）が、次世代栽培システム室内における装置や研究内容を説明し、片山大臣（写真奥右から2人目）も熱心にお聴きになりました。



## 平井内閣府特命担当大臣が神戸地区と播磨地区を視察

平井卓也 内閣府特命担当大臣（科学技術政策）が2019年6月22日、理研神戸地区の計算科学研究センター、生命機能科学研究センター、神戸市立神戸アイセンター病院、および理研播磨地区の放射光科学研究センターを視察されました。



計算科学研究センターの計算機室でスーパーコンピュータ「京」が稼働している様子（当時）を間近で視察される平井大臣（中央左）。



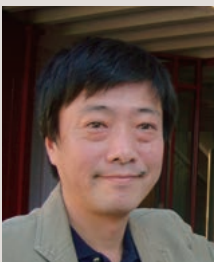
放射光科学研究センターでX線自由電子レーザー施設「SACLA」を視察される平井大臣（左）。

## 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。

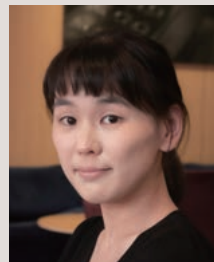
- ①生まれ年、②出生地、③最終学歴、④主な職歴、  
⑤活動内容・研究テーマ、⑥信条、⑦趣味

### 科技ハブ産連本部



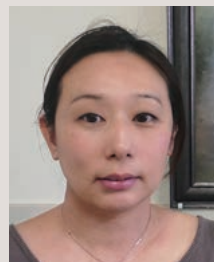
医科学イノベーションハブ推進プログラム  
開放系システム総合信頼性チーム  
チームリーダー  
**横手靖彦** よこて・やすひこ  
①1960年 ②東京都 ③慶應義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻後期博士課程修了 ④ソニーグループを経て、サイバーアイ・エンタテインメント(株)および合同会社ポインクを起業 ⑤開放系総合信頼性工学、並列分散システム ⑥Peace, Openness, Purpose, Opportunity ⑦散歩、システム・プログラミング

### 開拓研究本部



武石多感覚統合神経回路理研白眉研究チーム  
理研白眉研究チームリーダー  
**武石明佳** たけいし・あすか  
①1984年 ②岡山県 ③東京大学大学院薬学系研究科博士後期課程 ④米国ブランダイス大学 ⑤行動を制御する分子メカニズムと神経回路の解明 ⑥なぜば成る、なぜなば成らぬ何事も ⑦フルート

### 脳神経科学研究センター



多階層精神疾患研究チーム  
チームリーダー  
**林朗子** はやし・あきこ  
①1974年 ②群馬県 ③群馬大学大学院医学系研究科博士後期課程 ④理研、米国ジョンス・ホプキンス大学、東京大学、科学技術振興機構さきかけ研究 ⑤精神疾患を分子・シナプス・細胞・回路という多階層で解明する ⑥限りなくとがった研究をする ⑦ネコと晩酌

## ファゴットと私

馬場秀忠 ばば・ひでただ

仁科加速器科学研究センター

実験装置運転・維持管理室 情報処理技術チーム チームリーダー

ファゴット、それは私が愛してやまない楽器だ。バイオリンやフルートと同じようにオーケストラで活躍する楽器なのだが、どうも世の中での知名度は低いと感じる。そこで、この場を借りて少しでもファゴットの知名度アップを図りたいと思う。そもそもファゴットという名前自体がちょっとややこしい。ドイツ語やイタリア語では「ファゴット」、英語では「バスーン」、フランス語では「バソン」と、国によって呼び方が違うのだ。日本だと口語ではファゴットが優勢であるが、書面ではバスーンと表記されることも多い。

私とファゴットの出会いは高校生のとき。吹奏楽部に見学に行った際のことで。低い音。赤茶色の本体。あり得ないぐらい多いボタン。地味&メカニカル!! (例えばトランペットはキラキラと派手過ぎるしボタンも三つしかなく、まったく眼中になかった) その場で私はファゴットに一目ぼれし、それからもう四半世紀ほどアマチュアで演奏を続けている。ファゴットのスペックは、身長140cm程度、体重4kgぐらい。本体はカエデ(メープル)であり、これはバイオリンなど弦楽器にも使われる木材だ。ちなみに私のファゴットは購入から何年かした一時期にメープルシロップのような甘い香りがしていたのだが、ほかのファゴット奏者にこの話をしても、共感してくれる人はいない。

肝心の発音体はリードと呼ばれるものを使う。アシの仲間を材料とする手づくり工芸品である。普段は自作しないが、せっかくなので今回のために久しぶりにリードをつくった。写真2でお分かりになるように、ファゴットリード



写真1・所属するアマチュアオーケストラの仲間と共に。右から2番目が筆者。ちなみに一番右の楽器はコントラファゴットといって、ファゴットよりもさらに1オクターブ低い音が出る。

は上下に2枚の板が向かい合わせになっており、この2枚の板が息によって振動することで音が出る。この特徴からダブルリードと呼ばれ、同じダブルリードの発音体を用いる楽器としてはオーボエやチャルメラがある。で、このリードが厄介者なのである。ファゴット演奏はリードとの闘いと言ってもいい。リードによって高い音が出なかったり、低い音が出なかったり、湿度・気温でも状態が変わる。寿命も数カ月しかない。なので常日ごろからリードの状態を良くするためにちょっと削ったりして微調整を繰り返していく。削り過ぎても駄目、削らなくても駄目。リードは天然素材からつくられるわけで、状態が安定せず苦勞するのだが、近年の研究の成果により天然素材と遜色ない高級プラスチック製リード(長寿命!)も登場し、リード楽器業界に衝撃を与えている。ぜひ試してみたいと思いつつ、価格が高めでまだ手を出せずにいる。

ファゴットを知っていた人も知らなかった人も、まずはその音色を聞いていただきたい。残念ながら誌面では音を伝えることはできないのだが、1曲だけファゴット業界で有名な曲を紹介しておこう。フランスの作曲家サンサーンスの『ファゴット・ソナタ』。冒頭の部分だけでも聴いてもらえると、こんな音なのかー……、というのが分かると思う。ちなみに、テレビアニメを見ているとBGMで必ずと言っていいほどファゴットの音色が聞こえてきたりする。これを機にファゴットの音を覚えてもらい、テレビを見ているときに「あ、ファゴットの音だ!」と気付いていただけたらと思う。

写真2・リードづくりの手順



### 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)

