

研究最前線「カーボンナノチューブから一粒の光を取り出す」より

## 02 研究最前線

## カーボンナノチューブから 一粒の光を取り出す

## 06 特集

## 「富岳」を支える冷却システム

## 09 FACE

タンパク質3Dプリンティングの  
実用化を目指す研究者

## 10 私の「科学道100冊」

一歩先へ踏み出す想像力

## 11 TOPICS

- ・新理事に原山優子氏
- ・国産マグネシウムインゴット、  
化学遺産に認定
- ・RIKEN和光サイエンス合宿2020の  
お知らせ

## 12 原酒

ユニホームを着替えて思うこと

一粒の光（単一光子）が持つ性質を利用すれば、盗み見ることができない暗号を用いた量子通信が実現できる。現状では、単一光子を発生させる既存の半導体装置は低コスト化や小型化が難しく、それが量子通信の普及における大きな課題となっている。加藤ナノ量子フォトニクス研究室の加藤雄一郎 主任研究員らは、カーボンナノチューブから室温で単一光子が発生することを見いだした。その仕組みの解明を進めて、量子通信の普及に貢献しようとしている。

# カーボンナノチューブから一粒の光を取り出す

## ■ カーボンナノチューブの種類を自動的に見分ける独自装置を開発

カーボンナノチューブ（CNT）は、炭素原子のシートが巻かれたチューブである。その直径は1~3nmとナノサイズ、長さは1~100 $\mu$ mほどだ。CNTにはシートの巻き方により構造の異なるたくさんの種類がある（図1）。

CNTにレーザーなどでエネルギーを与えると、CNTの種類ごとに異なる波長の光を出す。「CNTはナノサイズの光源として期待されています。光通信では、光ファイバーで伝送したときに最も減衰しにくい通信波長帯（1,200~1,600nm）の近赤外光が使われています。光通信用のナノデバイスとして利用するには、通信波長帯の光を出す特定種類のCNTを用意する必要があります。しかし普通にCNTを合成すると、特定種類と一緒に30種類ほどができてしまい選別することができません」。

加藤主任研究員は応用に向けた課題をそう指摘する。

2014年、中国の北京大学の研究グループが、特定種類のCNTだけを化学的に合成することに成功した。「ところが、その合成技術を持つのは、現在でもその研究グループだけです。世界中のほかの研究グループは、一緒に合成されてしまう多種類のCNTから特定種類だけを化学的に分離する手法の開発を進めています。しかし10本に1本は違う種類が混じってしまい、それ以上の精度を達成するのは難しいようです。物理が専門の私たちは、化学的手法とは異なる第三の道を選びました。たくさんのCNTを1本ずつ自動的に計測して種類を特定し、選別するという手法です」

そのための全自動顕微分光装置（図2）の開発を中心となって進めたのが、石井晃博 特別研究員（以下、研究員。現 東京エレクトロン宮城株式会社）だ。石井

研究員は加藤主任研究員が理研へ移る前、東京大学で主宰していた研究室に大学院生として在籍していた。

「CNTに当てるレーザーと発生する光の波長や強度を調べることで、CNTの種類を特定できます。しかしナノサイズのCNTが発する光は微弱です。そのため高精度に計測できる装置を開発する必要がありました」と石井研究員は言う。

## ■ 励起子が1個だけ生き残り室温で単一光子が出る

加藤主任研究員は、「開発した装置で実験を進めているうちに、半導体などでは極低温にしないと出ない単一光子が、CNTでは室温で出るという不思議な現象が起きることを見いだしたのです」と振り返る。

2016年、加藤主任研究員は理研に研究室を立ち上げた。「私たちは実験データを解析してCNTから室温で単一光子が出る仕組みを解明し、2017年に発表しました」

単一光子とは何か。加藤主任研究員は次のように説明する。「蛍光灯やLED照明から出る普通の光は、ホースから流れ出る水のようなものです。水がたくさんの水分子からできているように、光もたくさんの粒からできています。その光の粒が光子。そして1個だけ孤立した状態の光子が単一光子です」

LED照明では、半導体中の多数の電

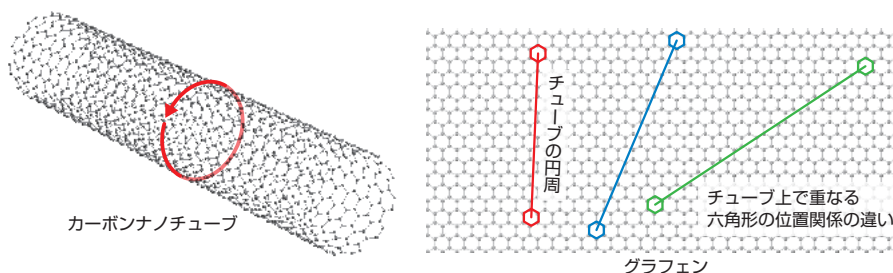


図1 単層のカーボンナノチューブ（CNT）とその種類

炭素原子がつくる六角形が並んだシートをグラフェンと呼ぶ（右）。単層のCNTは、1枚のグラフェンが巻かれた構造をしている（左）。実際にはグラフェンを巻いてCNTを合成するわけではないが、グラフェン上のどの位置関係にある六角形が重なるように巻いているかによって、構造が異なるさまざまな種類のCNTがある。そしてその種類ごとに発光波長が異なる。

### 加藤雄一郎 (かとう・ゆういちろう)

開拓研究本部  
加藤ナノ量子フォトニクス研究室  
主任研究員

1977年、東京都生まれ。Ph.D. 米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校物理学専攻博士課程修了。米国スタンフォード大学 博士研究員、東京大学大学院工学系研究科 准教授を経て2016年、理研 准主任研究員。2017年より現職。2016年より光量子工学研究センター量子オプトエレクトロニクス研究チーム チームリーダーを兼務。

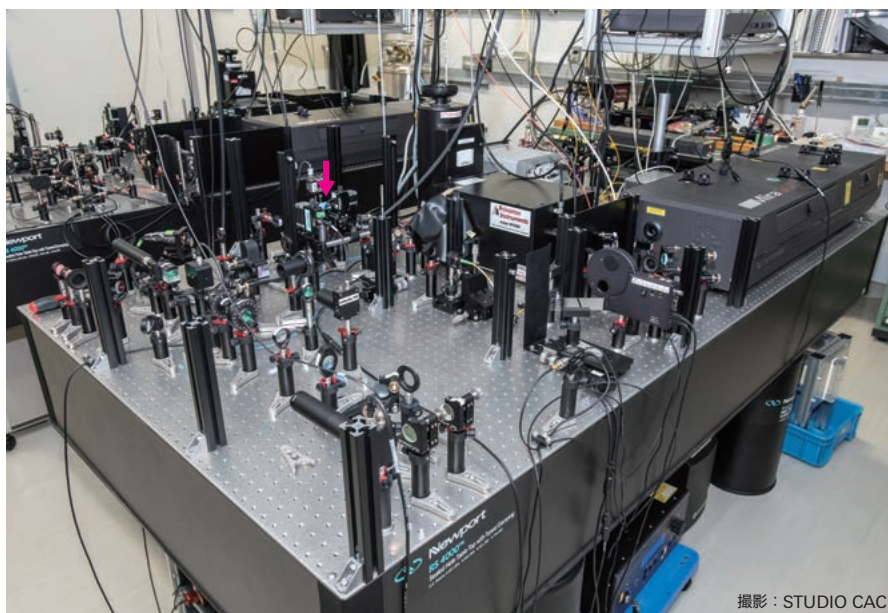


図2 CNT全自動顕微分光装置と計測データ

装置(左)の矢印の箇所に基板をセットし、基板にあるさまざまなCNTにレーザーを当てて、1本ずつの励起と発光の波長と強度を調べる(下)。それによりCNTの構造(種類)を自動的に特定することができる。

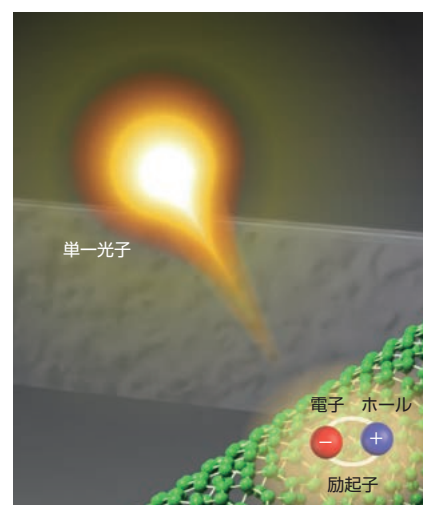
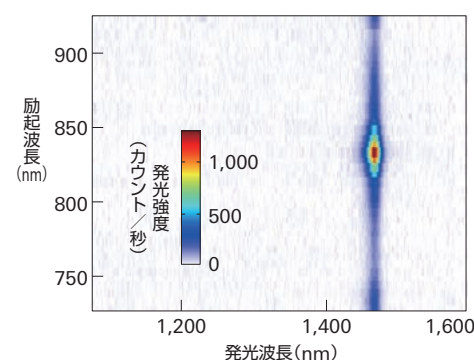


図3 単一光子を発する励起子

励起子は電子とホールが静電気で結合したものだ。電子とホールは重なり対消滅して、単一光子を発する。

子と、電子が抜けた孔である多数のホール(正孔)が至る所で直接衝突してたくさんの光子が発生する。

では、単一光子を生み出すには、どうすればよいのか。CNTにレーザーなどを当ててエネルギーを与えると、「励起子」が生成される。マイナス電荷の電子とプラス電荷のホールが一定距離を保ち静電気で結び付いた粒子、それが励起子だ。やがて電子とホールはぴたりと重なって対消滅するが、そのときに単一光子が発生するのである(図3)。ただし、たくさんの励起子から複数の光子が出てしまうと、単一光子の性質を利用できなくなるため、励起子1個だけの孤立状態をつくる必要がある。

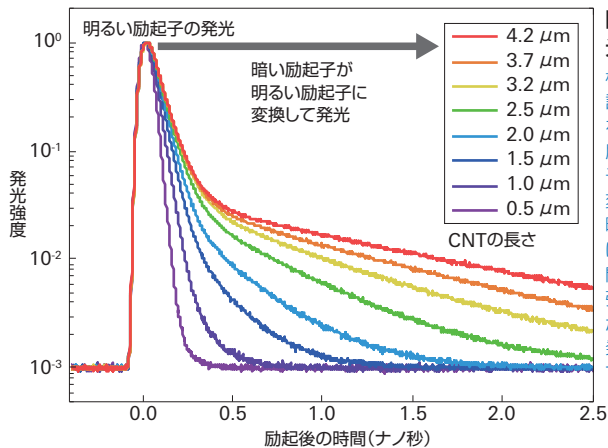
実は、単一光子を出す半導体装置がすでに市販されているが、こちらは極低温でなければ働かない。理由の一つは、半導体中では電子とホール間に働く静電

気力が周囲の物質に遮られて弱められるため、 $-269^{\circ}\text{C}$ 以下の極低温でなければ熱で電子とホールがばらばらになってしまう励起子ができないからだ。一方、原子1層から成るチューブというCNTの特殊環境では、周囲の物質に遮れることがほとんどないため静電気が強く働き、常温をはるかに上回る温度でも励起子ができる。

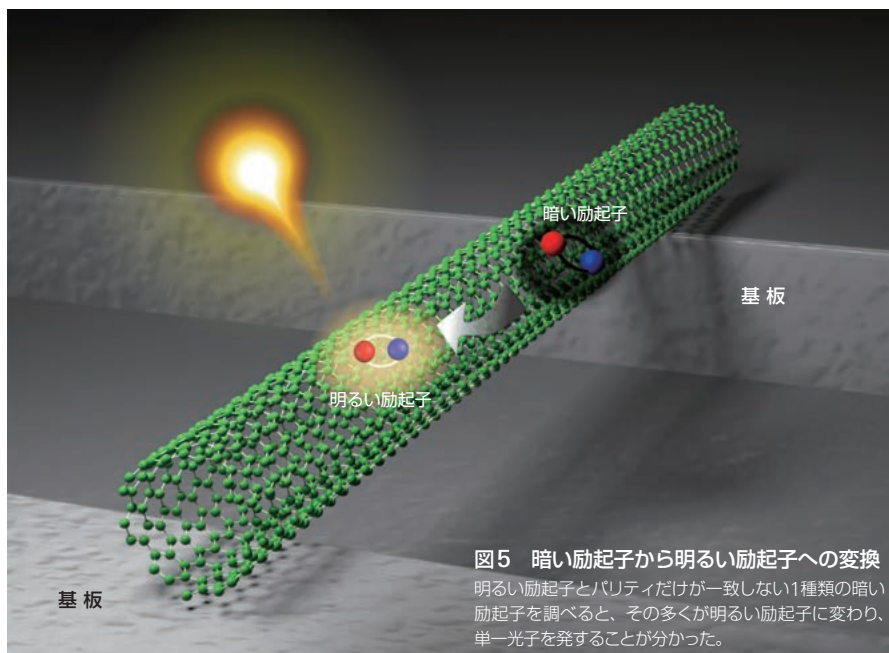
さらに半導体では、たとえ励起子ができたとしても、熱があると動き回ってしまうので孤立させることが難しい。それが極低温にするもう一つの理由だ。

「CNTでは、室温でも励起子を孤立させることができます。その仕組みを私たちが解明したのです。励起子同士が衝突すると、一方が消滅する性質があります。基板に溝を掘り、橋渡しするようにCNTを設置し、そこにレーザーを当てると複数の励起子ができます。このと

きCNTが短いと、励起子がCNT両端に次々と達して、光る前に基板と接触して消えてしまいます。実はその消える仕組みもよく分かっていないのですが、結局、単一光子が出ないのです。ところが、長さが $1\mu\text{m}$ 以上あると、CNT内で励起子同士が次々に衝突して最後は1個だけが生き残って孤立し、そこから単一光子



**図4 CNTの長さによる発光強度**  
 構造が同じで長さの異なるCNTを計測した。レーザーでエネルギーを与えて励起させた直後は明るい励起子が光る。その後も暗い励起子は残り、一部が明るい励起子に変わり発光する。CNTが長いほど、暗い励起子がCNT両端で消える前に明るい励起子に変わり、発光時間が延びることが分かった。発光強度 $10^{-3}$ は、ダークカウント（光が検出器に入っていない状態でも発生する信号）で、CNTは発光していない状態。



**図5 暗い励起子から明るい励起子への変換**  
 明るい励起子とパリティだけが一致しない1種類の暗い励起子を調べると、その多くが明るい励起子に変わり、単一光子を発することが分かった。

「光らない暗い励起子は直接計測することができないため、詳しく研究されていませんでした。私たちは、その手付かずの研究に挑んだのです」と加藤主任研究員。

石井研究員らは、構造は同じで長さだけが異なるCNTの発光強度の時間推移を詳しく調べた(図4)。「レーザーを当てた直後、明るい励起子が光り発光強度が高くなります。その後も暗い励起子はしばらく残り、その一部が明るい励起子に変わり発光します(表紙、図5)。このとき、CNTが短いと、暗い励起子がすぐに両端に達して、明るい励起子に変わる前に消滅します。CNTが長いほど両端に達する前に多くの暗い励起子が明るい励起子に変わり光るため、発光が長く続くと考えられます」と石井研究員は解説する。

さらにCNTの直径が大きいほど、暗い励起子が明るい励起子に変わる変換効率が高いこと、直径が同じでも構造によって変換効率が異なることを石井研究員らは突き止めた。

前述のように、励起子の電子とホールが重なって光る特定の状態は1種類だけだ。今回の実験は、運動量とスピンはその状態と一致するが、パリティだけが一致しない別の1種類の暗い励起子を調べたものだ。

「CNTに空気中の分子が付着していると変換効率が高くなることも分かりました。調べた中で最も高い変換効率を示したCNTでは、パリティだけが一致しない1種類の暗い励起子の50%以上が明るい励起子に変わることも確認しま

が出るということが分かったのです」と加藤主任研究員は説明する。

同じころ、ほかの複数の研究グループにより、CNTの1カ所に構造が異なる箇所(欠陥)をつくると、そこに励起子1個が孤立して、単一光子が出るということが報告された。

こうして数年前から、単一光子を室温で発生できる光源としてCNTが世界中で注目を集め始めた。

**■ 暗い励起子が明るい励起子に高効率で変わることを発見**

現在でも、CNTの種類を特定できる全自動顕微分光の技術を持ち、実験に用いているのは、世界で加藤ナノ量子フォトニクス研究室だけだ。その独自技術を駆使して、加藤主任研究員や石井研究員らは、「暗い励起子」の研究を進

め、2019年に大きな成果を発表した。

「実は、CNTにできる励起子は16種類あります」と石井研究員。

励起子をつくる電子とホールの組み合わせは、量子力学で記述されるパリティ(空間反転対称性)という性質で2通り、運動量で2通り、自転に似たスピンの向きで4通り、合計 $2 \times 2 \times 4 = 16$ 通りの状態がある。

その中で、重なって光子を出すことができる組み合わせは1通りだけだ。つまり16種類の励起子の中で、単一光子で光る「明るい励起子」は1種類だけ。残りの15種類は、光らずに消えてしまう「暗い励起子」である。

CNTに与えたエネルギーに比べて、発光エネルギーはその数%と、発光効率が低い。その主な原因は暗い励起子が大半を占めることだと考えられる。

## 関連情報

●2019年12月6日プレスリリース

暗い励起子から明るい励起子への変換機構を解明

した。理論的には空気中の分子などが付着していないまさらなCNTでは、暗い励起子が明るい励起子が変わることはないと考えられています。たとえ空気中の分子などが付着して効率が上がったとしても、50%以上という高い変換効率は、大きな驚きです」

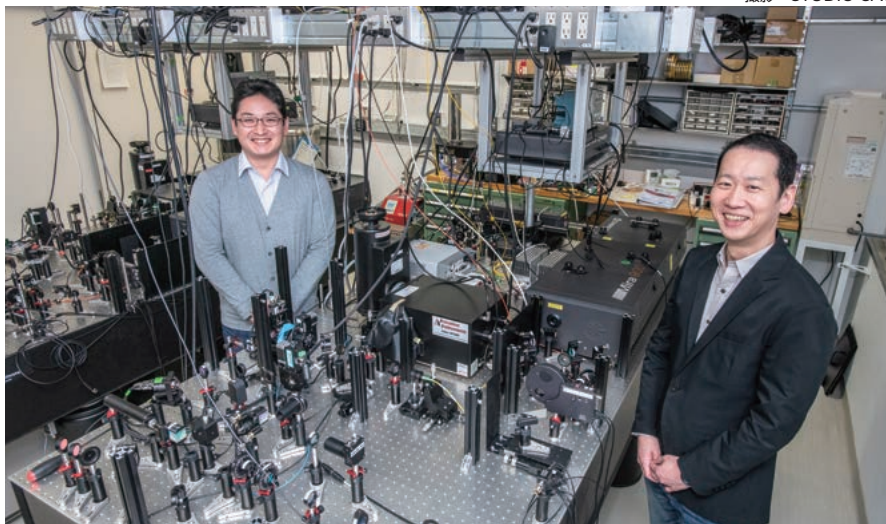
加藤主任研究員は、次のように続ける。「明るい励起子だけを考えていては、どうしても理解できない実験データがありました。でも、暗い励起子が明るい励起子に高効率で変わり光っていたと考えたと納得でき、長年の謎が解けました。暗い励起子は、空気中の分子と相互作用するなど何かのきっかけでパリティが変わり、明るい励起子に変わるのでしょう。変換効率をさらに高めて、CNTの発光効率を向上させることもできそうです。運動量も変えることで、15種類の暗い励起子のうち3種類を明るい励起子に変換できると予想しています。しかしスピンの向きを変えることは難しいので、スピンの一致しない残りの12種類は、変換が難しいかもしれません」

## ■ 基礎研究が実用化への

## ブレークスルーをもたらす

量子コンピュータは将来、現在用いられている通信暗号を短時間で解読できるようになるといわれている。しかし、量子コンピュータの技術が進展しても、単一光子を使えば、原理的に盗聴ができない安全な通信が可能だ。

単一光子の偏光という性質を利用して、暗号を解く鍵となる情報を伝送する方法が考案されている。もし途中で単



加藤雄一郎 主任研究員（右）と石井晃博 特別研究員（研究当時）。独自に開発した世界唯一のCNT全自動顕微分光装置を挟んで。

一光子を盗み見ると偏光が変化してしまい、その状態を完全には復元できないことが量子力学によって保証されている。第三者が秘かに暗号を解読することが不可能な通信が実現できるのだ。

単一光子による通信を普及させるには、単一光子を発生させる装置の低コスト化や小型化が望まれる。しかし既存の半導体装置は極低温に冷やさなければならず、低コスト化や小型化に限界がある。一方、室温で単一光子を出すCNT装置は、低コスト化や小型化ができる可能性が大きいと期待されている。

「装置の小型化などCNTの応用研究は、私が主宰する別の研究室（光量子工学研究センター量子オプトエレクトロニクス研究チーム）で進めています」

装置開発の大きな課題の一つは、確実に単一光子を発生させることだ。「現在は、CNTで生み出す光の8割程度は単一光子として発生できますが、2割は複数の光子が混じってしまいます。具体的な方法はまだ公表できませんが、私たちには、暗い励起子を利用して単一光子の発生確率を高めるアイデアがあります。応用研究はもちろん大事ですが、それだけでは実用化は進みません。暗い励起子を調べるなど、一見地味な基礎研究により、実用化への突破口となる新しい発想が生まれてくると信じています」と加藤主任研究員。

## ■ 理研の研究環境が

## 新しい発想を生み出す

理研で二つの研究室を率いる加藤主任研究員は、研究環境について次のように語る。「初めて理研に研究室を立ち上げたとき、設備工事などで施設課の人たちが手厚く支援してくれて、とても驚きました。大学では独りぼっちで研究をしている感がありましたが、理研には研究を支えてくれる仲間がたくさんいて、研究成果を最大化する体制が整っていると思います」

加藤主任研究員は2018年度、理研の研究系職員の組織である研究員会議の代表を務め、その間、参加する研究員数を増加させただけでなく、その研究分野を拡大させることにも尽力した。

「理研の全ての地区からさまざまな分野の研究者が集まる理研大交流会や異分野交流の夕べが年数回、開催されています。私は米国の大学院で教育を受け、研究をしていた期間が長かったのですが、日本の大学では米国に比べて狭い専門分野だけを学んで博士になる人が多いと感じています。一方理研は、米国と比べても、より広い分野の研究者と交流できる環境があります。異なる分野の新しい研究の話の聞けるのは、とても楽しく幸せなことです。それが間接的に自分の研究に関するアイデアにつながることもあるはずですよ」

（取材・執筆：立山 晃／フotonクリエイト）

計算科学研究センターでは今、スーパーコンピュータ「富岳」の共用開始に向けた準備が大詰めを迎えようとしている。  
2019年に引退した「京」の100倍にもなるアプリケーション実効性能を安定して発揮するための大きな課題の一つが、電力消費に伴い巨大な熱変動を起こす「富岳」の冷却だ。  
運用技術部門 施設運転技術ユニットの塚本俊之ユニットリーダーに、「富岳」における熱との闘いについて聞いた。

## 「富岳」を支える冷却システム

### ■ 1,000℃にも達する発熱密度

——もし「富岳」を冷却しないと、どうなるのでしょうか？

**塚本：**コンピュータで計算に使われた電力は、半導体回路などの電気抵抗により最終的には熱に換わります。一般的なパソコンはファンを回してCPU（中央演算処理装置）を空気で冷却しています。もし冷却しなければ100℃以上となり、壊れてしまうでしょう。CPUの性能向上に伴い、面積当たりの発熱量（発熱密度）も増加してきました。「京」のCPUでは発熱密度は約15kW/m<sup>2</sup>。家庭用電気ストーブ1台が発する熱が約1kWですから、1m四方の面積にストーブ15台分の熱が集中するような状態でした。それが、CPUをさらに高密度に集積した「富岳」では80kW/m<sup>2</sup>以上の発熱密度となり、冷却しなければあっという間に1,000℃を超える温度となってしまいます。

「京」の消費電力は最大で約15MWでした。数万世帯の消費分に相当する電力が熱になるのです。「富岳」では最大で「京」

の倍以上の電力を消費するため、全体の発熱量も増大します。2019年11月、「富岳」のプロトタイプは、スパコンの省電力性能を示すランキングGreen500で世界1位を獲得しました。その優れた省電力性能により、電力消費は2倍余りに抑えながら、最大で「京」の100倍の実効性能を目指しています。その実現と「富岳」の安定運用には「冷却」が欠かせないのです。

### ■ 「京」の2倍以上の水で冷却

——冷却の仕組みについて教えてください。

**塚本：**「富岳」は「京」があった場所に設置するので、「京」の冷却設備を増強して使います。CPUを搭載したシステムボードに水を流して冷却する仕組みです。ただし、冷却の比率は「京」では空気1：水2でしたが、発熱密度の高い「富岳」では空気1：水9と、水冷が圧倒的な主役となります。

水は一次系と二次系の冷却回路を流れます（図1）。「京」では96個のCPUを収納したラック1台につき、直結する二次系から15℃の水を毎分44リットル以上送り込んでいました。するとCPUの熱を奪い取り約17℃の水になって戻ってきます。上昇した熱を熱交換器で一次系に受け渡し、再び15℃に冷やした水をラックに送り込みます。一次系は計算機棟と熱源機械棟の間を結ぶ回路になっています。熱源機械棟にある冷凍機で一次系の水を冷やし、最終的には屋上から熱を大気へ放出します。

CPUなどの半導体回路は、30℃を超えると設計された回路から「漏れ電流」が増え始めて、エラーの発生確率が上昇するために計算効率が低下し、故障頻度も増えていきます。「京」では空冷と水冷を組み合わせることで、CPUを計測値で20℃以下に冷却しました。計測できなかった部分も、理論上30℃を超えることはないため、安定運用と低い故障率を実現できました。

「富岳」ではラック1台当たりの発熱量が「京」より大幅に増えます。そこで、「京」の2倍を超える量の15℃の水をラックに流し込み、「京」のときの17℃を上回る幅で上昇して戻ってくる水をまた15℃にするために必要な冷却を継続します。

撮影：奥野竹男



#### 塚本俊之 (つかもと としゆき)

計算科学研究センター 運用技術部門 副部門長  
施設運転技術ユニット ユニットリーダー

1957年、熊本県生まれ。名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程満了。1986年、富士通株式会社入社。2013年より「京」の運用のために理研へ。2018年より現職。

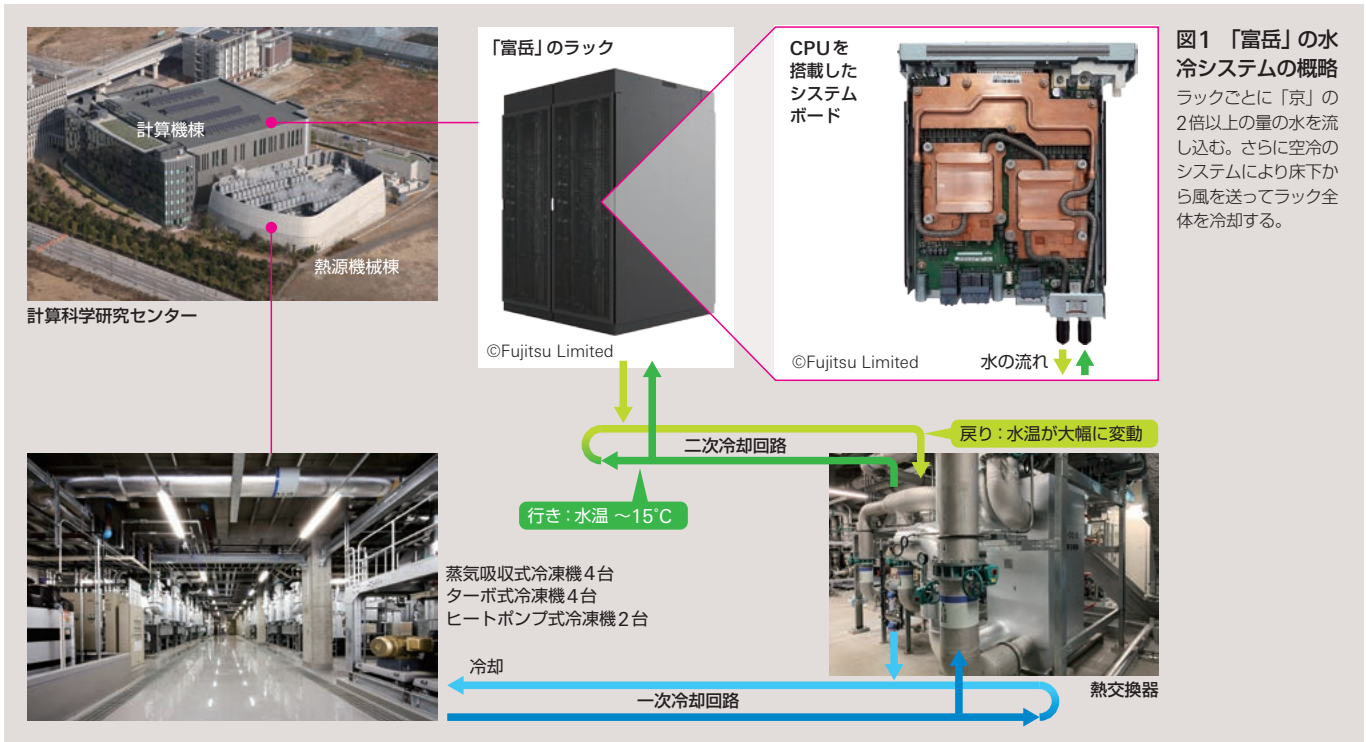


図1 「富岳」の水  
冷システムの概略  
ラックごとに「京」の  
2倍以上の量の水を流  
し込む。さらに空冷の  
システムにより床下か  
ら風を送ってラック全  
体を冷却する。

## ■「京」の数倍の熱変動に追従する

——「富岳」を冷却する難しさはどこにありますか。

塚本：発熱量が常に一定ならば、冷却はそれほど難しくないので。ところがスパコンでは計算プログラムによって消費電力が1万分の1秒の時間スケールで大きく上下し、それに比例して発熱量も変動します。「京」では消費電力の変動幅が最大5MWでした(図2)。「富岳」ではその数倍になります。

CPUの発熱量が大きく変動しても、二次系からラックに送り込む水の温度と量は常に一定であることが求められます。二次系を一定に保つために、二次系を冷やす一次系の水量と、一次系から熱交換器へ送り込む水量を細かく調節します。さらに、一次系の水を冷やす冷却機の運転を制御して、熱変動に「追従」しなければなりません。

産業界では、0.1℃の単位で水温を一定に保つことが求められる生産現場もあります。しかし、これほどの巨大な熱変動への対応が求められるのはスパコン施設しかなく、それ専用の冷却機があるわけではありません。世界のスパコン施設を見ると、最大消費電力は約20MW。それが「富岳」ではさらに大きくなり、変動幅も大きくなるため、「富岳」には参考になる前例がないのです。最悪の事態が起きないように冷却システムを組まなければなりません。

——最悪の事態とは？

塚本：ラックに送る水の温度が上がり、冷却がうまくいかずにCPUの温度も上昇すると、計算機の安全機構が働いて停止してしまいます。これによって計算機が壊れることはないのですが、冷凍機が壊れてしまう恐れがあります。冷凍機が復旧するまで何カ月間も、「富岳」の最大能力を発揮できなくなってしまう、それが最悪の事態ですね。

——コンピュータではなく冷凍機が壊れてしまうのはなぜですか。

塚本：一次系の水を冷却する冷凍機には三つの方式があります。代替フロンガスを使うターボ式、家庭用エアコンに似たヒートポンプ方式、水を冷媒に使う蒸気吸収式です。蒸気吸収式冷凍機は単体としての冷却能力は高いのですが、熱変動に追従する能力は低いという特徴があります。「富岳」では最大で「京」の数倍以上に発熱した後、逆に「京」の最低温度よりも低くなる、といったことが起こり得ます。それにより一次系の水が冷え過ぎた場合、蒸気吸収式はいきなり停止することができません。すると冷凍機内部を通る細いパイプ内の水が凍って体積が増え、パイプが破裂して冷凍機が壊れます。それが怖いのです。「京」の変動幅ならば、ターボ式冷凍機1台を制御することで熱変動に追従できました。「富岳」の巨大な熱変動は1台では追従できません。方式の異なる複数台の冷凍機を制御して追従する必要があります。

——どうやって異方式・複数台の冷凍機を制御するのですか。

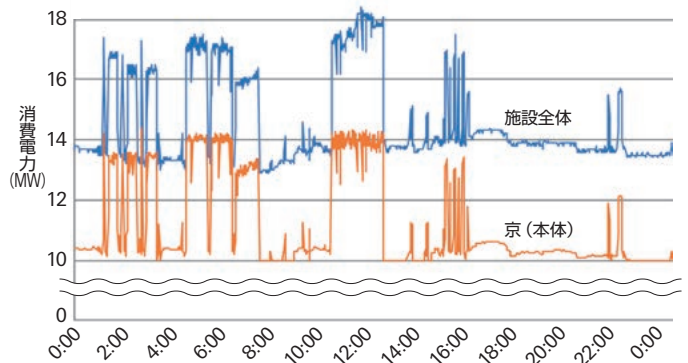


図2 「京」の消費電力の変動

大規模な量の計算を実行した1日間(2016年4月14日)のデータ。「富岳」では「京」の数倍の幅で消費電力が変動し、それに伴う巨大な熱変動が生じる。

図3 ラックの設置が進む「富岳」(2019年12月18日撮影)  
「京」が稼働していたスペースに、最終的に400台以上のラックが設置される。



**塚本:** どのような熱変動が起きたら、冷凍機のどれとどれを使う、といった対応パターンを決めておきます。そうはいつても、実際の熱変動は、計算機でプログラムを動かしてみないと正確には分かりません。「京」ではプログラムを動かしたときの電力消費の変動を予測するシステムをつくって運用の参考にしていました。「富岳」でもその予測システムを駆使する必要がありますが、予測には誤差があります。計算機の熱変動が二次系と一次系を経て冷凍機まで伝わるのに約5分の猶予があるので、実際の消費電力を計測し、予測と計測を組み合わせると5分後に伝わる熱変動に追従して冷凍機を制御する準備を進めているところです。

### ■ 停電によるトラブルに備える

——停電があった場合、スパコンはどうなるのですか。

**塚本:** 「京」を運用しているときに、電力供給を受けている関西電力の送電網が落雷などで0.1~0.2秒間、停電したことがありました。電気を蓄えたり放出したりするコンデンサーが機能するので0.5秒間以内ならば、水を送るポンプ群や冷凍機は止まりません。幸いなことに、これまで0.5秒以上の停電はありませんでしたが、そのような停電が起きると冷却に必要な設備はほとんど停止してしまうでしょう。停電に備えて、ガスタービン発電機による5MWの自家発電があるので、ディスクに記録されたデータなどは消えることなく守られます。「京」のときは冷凍機の電力も自家発電で賄うことができました。「富岳」では冷凍機を増強したので、全機はカバーできません。フル稼働していた冷凍機が停電でストップした場合の対処や再稼働の方法など、「京」のときには想定していなかった事態についても「富岳」の完成までに準備しておく必要があります。

### ■ 安定運用と省エネルギーの両立を目指す

——共用開始に向けて、現在はどのような段階にあるのですか。

**塚本:** 「富岳」のラックの設置が始まっています(図3)。一部のラックを動かして、冷却システムの部分的な試験を始めています。全てのラックの設置が完了した後に、「富岳」をフル稼働させたときや、大きな熱変動を起こしたときにも適切に冷却して安定運用ができるかどうかを確認する予定です。

その後、省エネルギー機能の試験も行います。「京」では、計算に使っていないラックにも常に一定以上の電力を送り続ける必要があり、消費電力が全体で10MWを下回ることはありませんでした。一方、「富岳」では、使っていないラックについては、停止したり、省エネルギーモードやスタンバイモードにしたりして、電力を節約する省エネルギー機能があります。しかし、消費電力が低い状態からいきなりフル稼働すると、それに伴う巨大な熱変動に冷却システムが追従できなくなるリスクもあります。「富岳」の省エネルギー機能と冷却システムをどのように制御すれば安定運用と省エネルギーを両立できるのか、共用開始までに詳細にわたって運用法を探っていかなければなりません。

### ■ システム全体を俯瞰するエキスパートたち

——以前は計算機を使う側で仕事をされていたそうですね。

**塚本:** 民間企業で人工衛星管制システムのプログラムを作成し、それを計算機で運用する仕事をしていました。やがて計算機の構成などにも携わるようになりました。

——特技は「トラブル收拾」とか。

**塚本:** 納期に間に合わない、システムが正常に動かない、などのトラブルがあると呼ばれて、何が原因かを把握し、どういう順番で何に対応するか計画を立て、予算を確保し、人員を割り当ててトラブルを收拾する。そんなことばかりしていました。一度、トラブルを收拾すると、次のトラブルでも「あいつを呼べ」となるんですね。私は一貫してシステム・エンジニアリングの仕事をしてきた、といえると思います。

電力や冷却施設を含めた計算機システム全体の運用の最適化に取り組み始めたのは、「京」の仕事で理研に来てからです。電気系統も冷却系の機械も知らないことがたくさんあって奥が深く、周りの仲間に教えてもらうことが多いですね。

「富岳」を支える電力や冷却施設を構成する一つ一つは、実は既存の技術や一般的な機械にすぎません。しかし、それらが組み合わさって巨大なシステムとなると、運用上の難しい未知の問題が発生します。「富岳」を安定運用するためには「京」以上に俯瞰的に見る事が重要となり、そこが面白いところです。

(取材・構成: 立山 晃/フotonクリエイト)



## タンパク質3Dプリンティングの実用化を目指す研究者

タンパク質分子だけを使った

3Dプリンティングの技術開発に成功した研究者がいる。

光子工学研究センター 先端レーザー加工研究チームの  
Daniela Serien 特別研究員（以下、研究員）だ。

子どものころから漫画など日本文化に親しんできたと語る  
Serien研究員の素顔とは。



### Daniela Serien

光子工学研究センター  
先端レーザー加工研究チーム  
特別研究員

ダニエラ・ゼリーン

1987年、ドイツ・ベルリン生まれ。博士（情報理工学）。東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻博士課程修了。2016年、理研 光子工学研究領域基礎科学特別研究員などを経て、2020年より現職。

「小学生のころ、動物が好きで将来は獣医さんになりたかったですね」というSerien研究員はドイツのベルリン育ち。「漫画も好きで、欧米の作品のほか、10代になると『美少女戦士セーラームーン』など日本の作品も読むようになりました。『NARUTO』の登場人物のコスプレをしたことも（笑）」

生物学が好きで、数学が得意だったと語るSerien研究員は、ベルリン・フンボルト大学に進み、生物物理を専攻。「光に反応するチャンネルロドプシンというタンパク質について学びました。光が当たる位置によって、さまざまな現象が起きます。数学を駆使したコンピュータ・シミュレーションや量子力学により、その現象の仕組みを探っているうちに、タンパク質という分子が面白くなったのです」

修士課程の途中で交換留学生として東京大学へ。さらに同大学の竹内昌治 教授の研究室で博士課程に進んだ。「ドイツで出会った日本語の美しさと、日本で2カ月間のボランティア活動経験から、日本で学ぶことを決意しました。竹内研究室は微小デバイスをバイオ分野に応用する研究を行っていて、そこでレーザーによる3Dプリンティングに出会ったのです」

3Dプリンティングでは、レーザーの強度が高くなる焦点だけで、材料となる分子同士が結合する化学反応が起きる。その焦点を3次元に走査することで、微小な立体構造をつくる。「材料に化学合成ポリマーを使った研究が多いのですが、私は天然のタンパク質を結合させることに挑みました」（図左）。先行研究では、光を吸収して結合を促進させる光活性剤を混

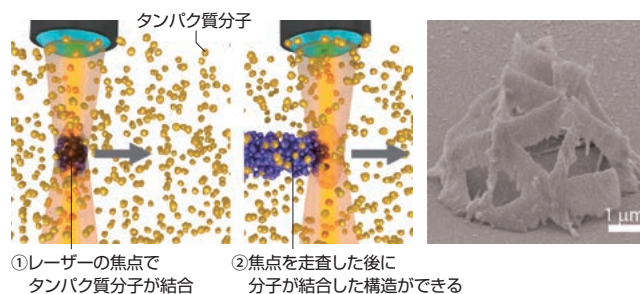


図 タンパク質3Dプリンティングの原理（左）と立体構造

タンパク質分子を純水に溶かして薄膜状にする。そこに極短時間の光（パルス）であるフェムト秒レーザーを当てると、焦点で分子同士が結合する。焦点を3次元で走査することで立体構造をつくることのできる。右は、ウシ血清中のアルブミン分子を結合させたもの。

ぜる手法が用いられてきた。「その光活性剤の濃度をさまざまに変えて実験を行った結果、光活性剤がなくても結合できることが分かったのです」

2016年、理研へ。「私はタンパク質の形や機能をなるべく変えずに結合させることを目指しています。大学ではDMSOという溶媒にタンパク質を溶かしていましたが、タンパク質の形や機能を変化させる可能性があり、純水に溶かすことにしました。そして2019年、タンパク質分子だけを結合させたマイクロサイズの立体構造の作製に成功したのです」（図右）

タンパク質製の微小立体構造は、どんな分野に応用できるのか。「人体の臓器や組織は、さまざまな種類の細胞が立体的に結合してできています。例えば、それらの細胞同士をつなぐ足場として利用できるでしょう。細胞や人体に用いる際、光活性剤などタンパク質以外の物質が混じっていると悪影響を及ぼす可能性があります。そのため、タンパク質だけを結合させることを目指していたのです」

「実用化に向けて、タンパク質とレーザー光の相互作用を調べる基礎研究を積み重ねて、結合のさせ方を改良する必要があります」とSerien研究員。「今の技術では、タンパク質同士がランダムな部位で結合していますが、それではタンパク質の機能を利用できないケースがあるので、特定部位で結合させる技術も必要です」

「レーザーを扱うのが大好きだし、立体構造をデザインするのも楽しい。タンパク質という分子の可能性をさらに広げていきたいですね」。もちろん、日本を楽しむことにも意欲的だ。「今は和太鼓を習っています。通っている和太鼓教室は、アットホームな雰囲気です。私にとって気持ちをリフレッシュする大切な時間となっています。胸を張り腰を落として打ち鳴らす和太鼓は、全身を使って演奏する“音楽”であり“スポーツ”です。太鼓演奏を通して日本の伝統と文化を深く感じることが出来ます」

（取材・執筆：立山 晃／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。

## 一歩先へ踏み出す想像力

宮道和成 みやみち・かずなり

生命機能科学研究センター  
比較コネクティブ研究チーム  
チームリーダー

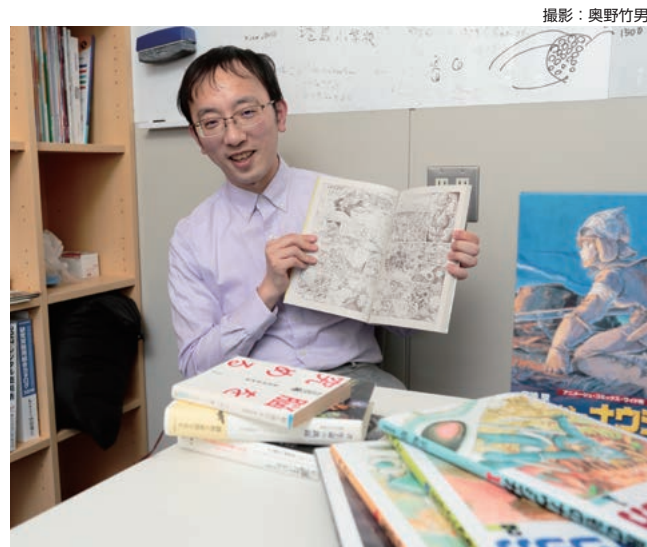
「夕食後、テレビを見る家庭が多いでしょうが、うちではみんながリビングに集まり、それぞれが黙々と本を読んでいます」と小学生のころを振り返る宮道和成チームリーダー（TL）。「家にあったものを中心に、さまざまなジャンルの本を手取るようになり、小学6年のころ、宇宙関係の本や科学雑誌の影響で天文学者になりたいと思うようになりました」

ところが進学した高校では、天文や宇宙を扱う地学は履修できなかった。「生物の授業が充実していて、その副読本だった『精神と物質』（立花 隆・利根川 進）に衝撃を受けました。本誌2月号でも木村 航TLが紹介していますが、現在40歳前後の分子生物学者の2人に1人が、高校時代に会って人生を変えられた本だと思います」。どこに魅せられたのか。「1987年にノーベル賞を受賞されて間もない利根川先生が、受賞対象となった免疫系の遺伝子の研究について熱く語っているところです。研究の背景が分かりやすく、論文の実験データの意味まで掘り下げています。研究現場の臨場感が伝わってきて、自分もこういう研究をやってみたいと思ったのです。その本で利根川先生は、これから脳研究へ進むと書かれていました。そこで次に立花さんの『脳を究める』を読みました」

「脳科学の最先端の研究内容を、実験手法や今後の方向性まで踏み込み、高校生でも分かるレベルにかみ砕いて書かれているところが面白かったですね。中でも、においを識別する嗅覚系の研究から受けた印象が強くて、東京大学理学部の生物化学科に進み、利根川先生のもとで免疫学研究でも大活躍された坂野 仁 教授の研究室で嗅覚系の研究を始めました」

脳研究の魅力は？「神経細胞や神経回路の“美しさ”ですね。特に嗅覚系の神経回路の配線はとともきれいです。嗅覚系の神経細胞が突起を伸ばして、なぜ正しい相手に接続できるのか、その謎を遺伝子工学の手法を使って解く研究を続けました。そのころ私たち学生が集まる部屋には漫画本が並んでいて、その中に高校生のときに読んだ『風の谷のナウシカ』（宮崎 駿）を見つけ、何度も読み返しました。これって実は、遺伝子工学を究極的に突き進めた世界の物語だと思うんです。設定が面白い作品は多いのですが、そうした世界の細部をリアルに描き出す宮崎さんの想像力は飛び抜けています。最近も読み直してみて、改めてそう感じました」

「実験やデータの分析は論理的に進めますが、そもそもどん



撮影：奥野竹男

な実験を始めるのか、5年後にどんな研究が面白くなりそうか、一歩先へ踏み出すときには想像力やセンスが重要で、そこは小説家や漫画家の物語をつくる仕事と似ていると思うのです」

学位取得後に米国で研究を進め、2018年、理研に研究チームを立ち上げた。「米国では嗅覚系からの情報が伝わる神経回路の研究をしました。現在は、それまでに開発した手法も駆使して、さらに脳深部の神経回路の配線を調べ、さまざまな条件で回路の機能がどう変化するか探っています。脳深部の配線はぐちゃぐちゃに見え、その配線にどんな意味があるのかわかりません。それを調べるための技術も限られています。そんなとき、どう研究を進めるべきか。卓越した科学者とは、次に進むべき研究の方向性を見いだす能力に優れている人です」

「利根川先生はまさに天才的です」と続ける。「挑むべきは、今の技術でみんなが解ける問題でも、まったく手も足も出ない問題でも駄目。自分が培ってきた技術や手法を改良すれば解けそうな問題で最も重要なものはどれか、それを見抜く必要があります。利根川先生は、大腸菌と遺伝子の研究室で学位を取得されてから、唐突に免疫学の研究所に移りました。最初は免疫系のことは右も左も分からなかったでしょう。しかしすぐに自分の解くべき問題を見だし、免疫系の遺伝子について大発見を成し遂げたのです」

今、お薦めの本は？「体重が比較的軽いキリンは女性が解剖するのに向いた動物、と語る気鋭の若手研究者が書いた『キリン解剖記』（郡司芽久）。漫画なら画力が卓越している『トンがり帽子のアトリエ』（白浜 鷗）。本や漫画を読むことが、直接的ではなくとも、次の研究のイメージが降りてくるのに役立ちます。そうした想像力を糧に利根川先生のように一歩先へ踏み出していきたいと思います」（取材・執筆：立山 晃／フotonクリエイト）

## 新理事に原山優子氏

2020年4月1日、理化学研究所の理事に、原山優子氏が就任しました。

当研究所の発展に尽力された小谷元子氏は2020年3月31日をもって退任しました。



### 原山優子 (はらやま・ゆうこ)

1973年、フランス・ブザンソン大学理学部卒業。1996年、スイス・ジュネーブ大学大学院教育学研究科博士課程修了（教育学博士）。1997年、同大学大学院経済学研究科博士課程修了（経済学博士）。ジュネーブ大学経済学部助教授、東北大学大学院工学研究科教授、経済協力開発機構（OECD）科学技術産業局次長を経て、2013年3月から2018年2月まで総合科学技術会議議員（常勤）。

## 国産マグネシウムインゴット、化学遺産に認定

かつての理研産業団の一つである日満マグネシウム株式会社が1935年に製造した金属マグネシウムインゴット2本が、わが国の化学と化学技術に関する貴重な歴史資料として、公益社団法人日本化学会が主催する「日本化学会化学遺産」に認定されました（認定番号第053号）。理研ならびに日満マグネシウムの流れをくむ宇部マテリアルズ株式会社が共同で認定証を受領しました。

大正末期、理研は海水から金属マグネシウムを製造する独自の融解電解法を開発し、時代のニーズに応じて産業化を

推進。原料も輸入に頼らず純度99.8%という高い品質を誇った金属マグネシウムは、一時は英国はじめ海外にも輸出されるほどでした。

認定されたインゴットは、現存する純国産金属マグネシウムとして最古の製品であり、2018年に宇部マテリアルズから関連史料一式と共に理研に寄贈されたものです（『理研ニュース』2019年1月号「記念史料室から」）。

金属マグネシウムのインゴット（左）と、日本化学会から授与された認定証の盾。



## RIKEN和光サイエンス合宿2020のお知らせ

理研の和光地区では、この夏も全国の高校生などを対象に、最先端の科学に触れる2泊3日の合宿を開催します。物理・化学・生物（脳科学）の3分野に分かれて研究者と一緒に実験を行い、最終日には和光地区内のホールで3コース合同の研究発表会に臨みます。

※新型コロナウイルス感染症の状況によっては、内容を大幅に変更もしくは開催を中止することがあります。最新情報はウェブサイトにてご確認ください。



昨年のサイエンス合宿開催風景

### 三つのコースの内容

- Aコース（物理分野）**「物質中のディラック粒子の振る舞いを見よう！」（石橋極微デバイス工学研究室）
- Bコース（化学分野）**「1個の分子を蛍光顕微鏡で観察してみよう！」（田原分子分光研究室）
- Cコース（生物【脳科学】分野）**「『絆』を生み出す脳の活動を捉えよう！」（神経回路・行動生理学研究チーム）

日程	2020年8月18日（火）～20日（木）（2泊3日）
会場	理研 和光地区（埼玉県和光市広沢2-1）
募集人数	各コース4名 合計12名（申込書をもとに選考）
詳細・申し込み	<a href="https://www.riken.jp/pr/events/events/20200818/">https://www.riken.jp/pr/events/events/20200818/</a> 参加申込書を上記ウェブサイトよりダウンロードし、記入の上郵送
参加申し込み締め切り	5月29日（金）必着

## ユニホームを着替えて 思うこと

猪口真基 いのくち・まさき

施設部 施設課 副主幹

私たち施設部のセクションは、研究所の設備の運用とインフラを守ることはもちろん、新築・改修工事、エネルギーの使用状況など多岐にわたる施設関連の業務に携わっています。敷地計画・工事計画・施工・運用と建物の計画に始まり、それを活用しつつ維持していく。そのために部員は日々奮迅しています。業務の種別は主に「建築・電気・機械」と分かれており、その中で私は「電気」を中心に担当しています。

電気には電圧の種別があり、低圧と高圧と特別高圧に分類されます。低圧とは交流600V以下・直流750V以下、高圧とは交流で600Vを超え7,000V以下、直流で750Vを超え7,000V以下、特別高圧とは交流・直流とも7,000Vを超えるものです。低圧は私たちが日常で使うコンセントや照明など、より身近に使用されているものです。一方、高圧や特別高圧といわれるものは、電気設備に携わっていない人にはあまりなじみがないでしょう。

電気を使用している建物（つまり、ほとんどの建物）は電気工作物と呼ばれ、一般電気工作物と自家用電気工作物に分類されます。一般電気工作物とは低圧で電気を受けている戸建て住宅などのこと。自家用電気工作物とは電力会社から600Vを超える電圧で電気を受けている設備で、工場・オフィスビル・大学などの建物がこれに当たります。理研和光地区の建物は特別高圧で電気を受けているため、自家用電気工作物です。全国の設置状況を割合で見ると、特別高圧の需要家（利用者）は、ほんの数%にすぎません。つまり、和光地区ほど大規模な施設はまれなのです。

電気設備は建物にとって神経のような役割を持っており、何か起きてしまうと停電などで建物の機能が維持できなくなったり、感電・火災といった事故につながったりしてしまいます。それを健全に保つべく点検したり、古くなった



写真1 ● 筆者近影。電気設備のメンテナンス作業中。



写真2 ● 空手の道着に身を包んで

ものを工事したり、新しい建物・設備の工事をしたりするために、時には電気を止めて作業を行います。確実に、そして何より安全を第一に考え一つ一つの作業に細心の注意を払うため、とても気を使います。実験施設ではなおのことです。ただ、部員一丸となって進めていくこと、目標が明確なことで、部員内には「皆で進めているんだ!」という一体感と気概があります。だからこそ、成し遂げたときの達成感は格別です。

私は趣味で空手道をたしなんでいます。空手道は大きく分けると、相手と対峙して技を出し合いポイントを取り合う「組手」と、相手と対峙しているイメージを持ちつつ一人でさまざまな技を出す「型」に分かれます。どちらも基本が大事で、そこから学んでいくことが必要です。一挙動ごとに集中し自分の体に動作に伝えて「えいっ!」と気合とともに繰り出す技、自分のイメージどおり決まったときは何とも言えません。自分の技を磨き、仲間と切磋琢磨もよいものです。

仕事では作業着というユニホームを着て仕事に励み、空手道では道着というユニホームを着て稽古に励む日々。仕事も空手道の稽古も心の持ちようは変わらないものだな、そして人の根っこの部分ってあまり変わらないな、と感じています。今後も仕事に空手道にと仲間たちと共にまい進し、生き生きと励んでいきたいと思っています。



理研の活動をご支援ください。

理研の研究の充実、さらなる発展は、法人や個人の皆さまからのご寄附で支えられています。

●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



<https://www.riken.jp/support/>