

RIKEN NEWS

 理化学研究所

SPRING 2022
No.481

研究最前線

**タピオカの原料
“キャッサバ”で世界を救う**……p.02

物理学と統計学で脳を理解する……p.04

質の良いiPS細胞を効率的につくる……p.05

**すべての骨関節疾患の治療を
目指す、遺伝子ハンティング**……p.06

タンパク質の進化から生命誕生の謎に挑む……p.08

ゲノム情報に隠された進化の法則を探る……p.09

小脳全体の可視化がもたらした新発見……p.10

個人情報管理に最適な新しいシステム……p.11

**厚さ0.003mm!
未来を変える
次世代の太陽電池**……p.12

グリーン水素の低価格化を非貴金属触媒で実現……p.14

ポータブルで超小型のNMR装置の開発に成功……p.15

**国際プロジェクトを率いて
原子核のスピン之谜に迫る**……p.16

重イオンビームで温州みかんの品種改良……p.18

私の科学道

雲の成長から知る自然の構造パターン……p.19

原酒

料理好き研究者のサラダ日記……p.20

科学道
Dreams to the Future



関 原明 (セキ・モトアキ)

環境資源科学研究センター
植物ゲノム発現研究チーム
チームリーダー

1966年兵庫県生まれ。京都大学農学部卒業。広島大学大学院理学研究科博士課程修了。博士(理学)。理研植物分子生物学研究室先任研究員を経て、2006年より研究室を主宰。2013年より現職。

タピオカの原料 “キャッサバ”で世界を救う

日本でもブームとなったタピオカ。あまり知られていないが、その原料であるキャッサバは、世界の約10億人の食糧やエネルギー源などとなっている重要な作物で、イネ、トウモロコシ、コムギに次ぐ第4の炭素資源としてSDGsの観点からも注目されている。関 原明チームリーダー (TL)らはキャッサバの研究基盤を築き、食糧問題など地球規模の問題解決に向けたキャッサバ研究を進めている。

実はすごい、キャッサバという植物

キャッサバは、アフリカや東南アジアなどの熱帯で栽培される作物で、茎の根元にできる塊根(イモ)は世界中の多くの人の食糧となっている。

まず、キャッサバのすごいところは、栄養や水の乏しい土地でもグングン育つ成長力だ。切った茎を土に挿しておけば、1年ほどで2~3mに成長し、土の下には1株に約20kgものイモができる。

また、タピオカでんぷんなどの加工品の世界的な取引量は年々増えており、生産農家の収入源になっている。さらに、バイオプラスチックや燃料用バイオエタノールの原料としても使用されている。

関TLは2000年代の半ばにキャッサバの研究を始めた。「先進国の主要作物であるイネやトウモロコシなどと比べて、キャッサバは研究者人口が圧倒的に少なく、研究基盤が整っていませんでした。有用な品種をつくるには、遺伝子などの解析システムが必要です。私たちは理研が持つ解析技術を活用しながら、

キャッサバの研究基盤の整備を進めてきました。それがようやくひと段落し、今まさにこの研究基盤を使って、さまざまな面白い研究を進めているところです」

イモの形成メカニズムを解明

持続的な食糧・バイオマス生産を維持する方法の一つは、より大きなイモをつける品種をつくることだ。イモは根が膨らんだもの。そこで、関TLらは、根からイモになる塊根形成のメカニズムを調べた。

植物の成長には「植物ホルモン」と呼ばれる物質が大きな役割を果たしている。植物ホルモンにはさまざまな種類が知られているが、キャッサバの塊根の形成にどのような植物ホルモンが関与しているかは分かっていなかった。



図1 無菌栽培の実験系による塊根の形成実験

オーキシンとサイトカイニンという植物ホルモンに根を太くする働きがあることが分かった。これらの植物ホルモンで処理した根(上)は、無処理の根(下)に比べて太さが3~4倍になった。

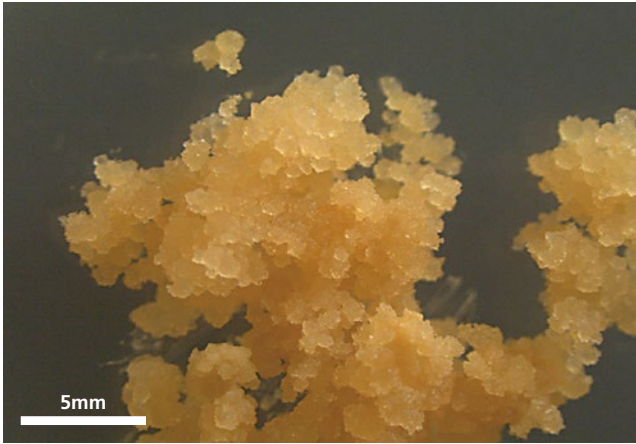


図2 キャッサバの腋芽から誘導したカルス

葉の付け根にできる腋芽を特殊な培地に置くと、細胞が増殖し、カルスができていく。遺伝子の導入やゲノム編集はこのカルスを用いて行う。

関TLらは、キャッサバの塊根を用いて植物ホルモンを一齐に分析し、根を太くする植物ホルモン(図1)と、逆に根を太くすることを阻害する植物ホルモンを明らかにした。

「私たちはキャッサバのゲノム編集技術も開発しています。ゲノム編集を用いて、根を太くするのを阻害する植物ホルモンの遺伝子を壊せば、根はもっと太く膨らみ、大きなイモをつける品種を開発できる可能性があります」

ゲノムレベルで迅速な品種改良へ

しかし、遺伝子導入やゲノム編集技術を使って植物に新たな形質を持たせるには、クリアしなければいけない重要なステップがある。それは、キャッサバの植物切片から「カルス」という細胞の塊をつくることだ。

葉や根などの植物の一部を特殊な培地に置くと、葉や根などに分化する前の状態に戻った(どんな組織にもなりうる)細胞がモコモコと増えてくる。これがカルスだ。外来の遺伝子を導入したり、ゲノム編集で標的の遺伝子を改変したりするには、カルスを用いる。そして、カルスを植物体へと再分化させることで、新たな形質を持った植物をつくり出すことができる。

「私たちは、東南アジアで栽培されているキャッサバの主要品種について、よく増殖するカルスを効率的につくるための培地の条件を明らかにしました(図2)。これにより、ゲノムレベルでの迅速な品種改良が可能になり、現在、生産性の向上やストレス耐性、耐病性を高めたキャッサバの作出を進めています」

図3 キャッサバの花

ベトナム北部の山間部バツカム省では、9～11月ごろに多くの個体が花を咲かせた。



開花の謎を解明し、 交配育種の可能性を広げる

交配による従来の品種改良も、重要な育種の手段の一つだ。しかし、キャッサバはめったに花を咲かせない。花が咲かないと、受粉させることができず、異なる品種間や個体間で交配をすることができない。

「生産地で『山ではキャッサバの花が咲く』というわさを聞きましたが、本当のところはよく分かっていませんでした。そこで、ベトナムとカンボジアのいくつかの地域でキャッサバを栽培したところ、本当に山間部や高原地帯で多くのキャッサバが花を咲かせました(図3)」と関TL。

さらに、キャッサバの開花に関わる分子メカニズムを調べた。「面白いことに、こうした地域では開花に関わる遺伝子のほかに、乾燥や低温といった植物にとってストレスとなる環境に置かれたときに応答する遺伝子の発現も増えていました。乾燥や低温にさらされると身の危険を感じ、生き残るために子孫を残そうと開花のスイッチが入るのかもしれない。動くことのできない植物の生存戦略でしょう」

グローバルな頭脳循環も加速

関TLはキャッサバ研究を推進させるとともに、研究人材の国際連携も進めてきた。今では、関TLが率いる理研のチームは、ベトナム、タイ、カンボジア、コロンビア、台湾、ドイツの研究機関などとグローバルな共同研究体制を築いている。

「私の研究室でも、ベトナムやタイ出身の研究者が活躍しています。海外の若い研究者は、日本の科学技術を学びたいという気持ちが強く、日本に対する期待の大きさを感ずることもたびたび。博士号を取得した後、母国でキャッサバ研究のリーダーとして活躍している人もいます。人材育成や頭脳循環に貢献しつつ、彼らとのパートナーシップによって私たちも研究を発展できる。こうした海外の人との連携も、キャッサバ研究の面白いところです」

物理学と統計学で脳を理解する

脳は私たち人間の思考をつかさどる重要な器官。過去の経験をもとに学習することで、目や耳に入ってくる感覚入力から外の世界の状態を推論し、適切な行動を起こさせる。このとき、脳の内部では何が起きているのだろうか？近年注目される脳の理論「自由エネルギー原理」を使って、知覚から行動にいたる神経回路の普遍的な特性の解明を目指すのが磯村拓哉ユニットリーダー（UL）だ。

二つのアプローチ

高校の物理を習った方はご存知のように、電気回路のふるまいは方程式を解くことで計算できる。同じように、脳を構成する神経細胞のふるまいも電気回路として表せて、方程式により計算できることが知られている。図1の電気回路図と古典的な神経細胞モデルを比較すると、よく似ていることに気付くだろう。電気回路の方程式をエネルギーの式から導くことができるように、神経細胞の方程式もまたポテンシャル関数（位置エネルギーのようなもの）から導くことができる。脳を数理的に理解することを目指し、神経科学の理論研究者たちは、日々このような数式と格闘しているのだ。

脳の理論にはもう一つ別の考え方もある。近年の高校の授業では統計や情報がますます重視されているが、私たちの脳自身もまさに統計学によって世界を知覚していると考えられている。例えば、図2のように壁とリンゴがあるとき、私たちはリンゴが壁の形に欠けているとは考えず、リンゴの一部が壁に隠れていると考える。こうした経験に基づいた推論は、統計学の基本定理である「ベイズの定理」により表すことができ、自由エネ

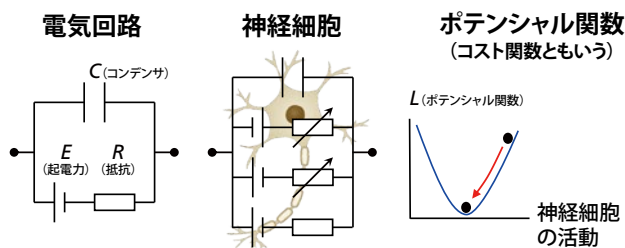


図1 神経細胞は電気回路として説明できる

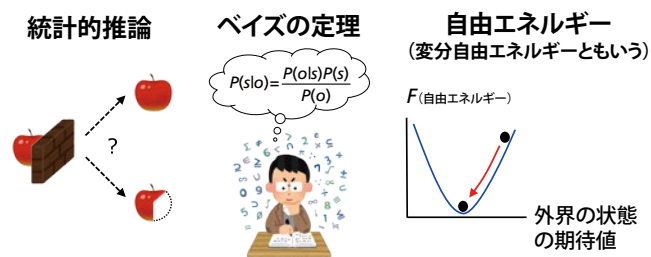


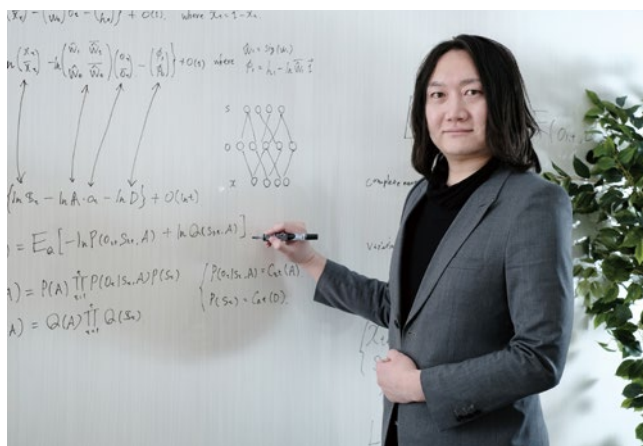
図2 脳は統計学によって世界を知覚している

ギーと呼ばれる式を最小化することで期待値を求めることができる。脳が、この自由エネルギーを最小化することで推論を行っているとする説は「自由エネルギー原理」と呼ばれ、近年多方面から注目されている。しかし、個々の神経細胞がどのように自由エネルギー原理を実装しているのかはまだ分かっていない。

ブレークスルーに期待！

「神経細胞の方程式と自由エネルギー原理をきれいにつなぐ、新たな方法を見つけたのが私たちの研究」と磯村UL。「ポテンシャル関数を微分して神経細胞の式を導く研究はたくさんあります。でも、古典的な神経細胞の方程式を積分したらどんなポテンシャル関数になるかを考えた人は、めったにいませんでした」。磯村ULらは、古典的な神経細胞のポテンシャル関数と統計学の自由エネルギーの間に美しい等価性があることを、数学を使って明らかにした。「どんな神経細胞も推論を行っていると思なせます。脳の基本単位である神経細胞が自由エネルギー原理に従っていることを示唆する結果です」

脳と心の理解は自然科学の最後のフロンティアとも言われる。今回の成果は大きなブレークスルーを引き起こすのではないかと期待する磯村UL。脳の仕組みや心の病気の理解を深めるだけでなく、人間のように考える人工知能 (AI) の開発にもつながるかもしれない。「物理や数学、AIに興味がある方たちには、ぜひ理論神経科学にも触れてみてほしいです。きっと興味を持ってもらえると思います」



磯村 拓哉

(イソムラ・タクヤ)

脳神経科学研究センター
脳型知能理論研究ユニット
ユニットリーダー

1988年愛知県生まれ。2017年東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻博士課程修了。博士(科学)。2017年、理研基礎科学特別研究員、2020年より現職。

質の良いiPS細胞を効率的につくる

2006年にヒトiPS細胞が初めてつくられて以来、医療への応用が少しずつ進んでいる。林 洋平チームリーダー (TL) は、品質の高いiPS細胞を効率良くつくるための新しい初期化因子を開発。患者由来のiPS細胞を使った再生医療の実現に近づきつつある。

細胞移植の理想は「My iPS細胞」

iPS細胞の大きな利点は、本人の体細胞からiPS細胞をつくり、そこから必要な細胞を分化誘導できることだ。これによって拒絶反応のない移植やオーダーメイド医療が期待できる。

だが、現在は多くの人に適合するタイプの他人由来iPS細胞をあらかじめつくって貯蔵し、必要に応じて分化させるバンク方式が採用されている。患者自身の体細胞からiPS細胞をつくることは、質の良い細胞ができにくく、検証にも手間がかかる点で、現実的ではないからだ。

「もっと効率的に良質のiPS細胞をつくることができれば、『My iPS細胞』を使って本来の利点を活かす医療が実現するはず」。林TLをはじめ、多くの関係者はそう考えている。

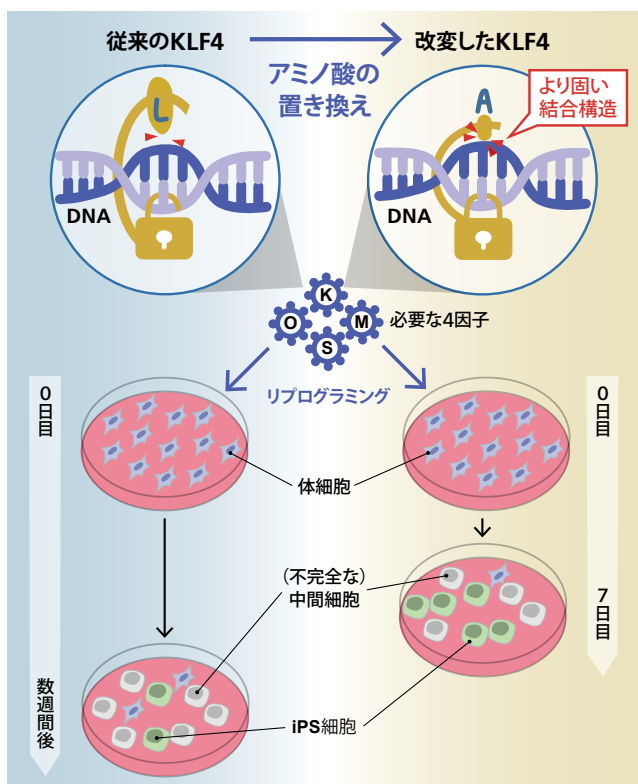


図1 KLF4 改変体による高品質 iPS 細胞作製の効率化

KLF4のアミノ酸ロイシン(L)をアラニン(A)に置き換えた改変体を、他の初期化因子3種類とともに体細胞に導入したところ、均一で高品質なiPS細胞を効率良くつくることができた。

林 洋平 (ハヤシ・ヨウヘイ)

バイオリソース研究センター
iPS細胞高次特性解析開発チーム
チームリーダー

1981年愛知県生まれ。2009年東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻生命環境科学系修了。博士(学術)。米国グラッドストーン研究所博士研究員、筑波大学などを経て、2018年より現職。



初期化因子をつくり変える新手法

iPS細胞を作製するには、通常4種類の初期化因子を働かせて皮膚細胞などの体細胞を初期化(リプログラミング)し、どんな細胞にも分化する能力を持つ幹細胞に戻してから、目的の細胞に分化させる。

iPS細胞の品質と収率の向上を目指して、初期化因子を加えたり、別の因子に置き換えるなどの工夫がこれまでも行われてきた。それに対して、研究チームが開発したのは初期化因子そのものの構造をつくり変えるという画期的な方法だ。

対象は、iPS細胞誕生以来使われてきた初期化因子の一つKLF4。「この因子が細胞のDNAと結合する部分のアミノ酸19個に着目し、それらを分子の小さい別のアミノ酸、アラニンに置き換えてみました。すると、ある位置のロイシンをアラニンに置き換えたときだけ、迅速にDNAに結合し、均一で高品質なiPS細胞がたくさんできたのです(図1)」

改変KLF4とDNAがどのように結合しているか、分子構造をコンピューターでシミュレーションしたところ、アミノ酸とDNAとの間に新しい水素結合ができて、両者がしっかりと結びついていることが分かった。「いずれはコンピューター上で目的にかなう分子をデザインできるかも」と、林TLは思いを巡らす。

世界最大規模のiPS細胞バンクに期待

学生時代、林TLは発生生物学を学んだ。「生命の原理といった基礎的な関心より、実際に応用できるところに魅力を感じた」のが、専攻を選んだ理由だ。学位取得後、米国グラッドストーン研究所でiPS細胞生みの親である山中伸弥博士のもと、博士研究員を務めた。以来、iPS細胞はいつも傍らにある。

所属するバイオリソース研究センターは、生物遺伝資源を収集・保存して研究開発用に提供している。そのうち、疾患特異的iPS細胞バンクは世界最大規模で、疾患400種類の約3,400株を保存し、再生医療や薬剤開発などを行う研究機関などに提供しており、国内外から頼りにされる存在だ。その役割は今後も重みを増すことだろう。新開発の初期化因子が「My iPS細胞」実現に一步近づくことと並んで期待される。

すべての骨関節疾患の治療を目指す、 遺伝子ハンティング

骨や関節は、体を支え動かすための重要な土台だ。その骨や関節が変形したり壊れたりする骨関節疾患に多くの人が苦しんでいる。しかし、根本的な治療法はまだほとんど見つかっていない。池川志郎チームリーダー（TL）は、遺伝性の難病から、変形性関節症や骨粗しょう症などの身近な疾患まで、骨関節疾患の発症に関わる遺伝子を次々と見つけ、診断法や治療法の開発につなげようとしている。

骨関節疾患に苦しむ患者さんを助けたい

大学卒業後、池川TLは東京大学医学部付属病院で整形外科医として勤務した。「骨関節の難病に苦しむ患者さんが日本中から私たちに頼って来てくれるのですが、根本的な治療法がなく、痛かったら痛み止め、腫れたら冷やすというような対症療法しかできないこともままありました。そのたびに『これでいいのか』とジレンマを感じていました」と当時を振り返る。

転機となったのは、生まれつき骨や関節に異常のある小児患者を担当するようになったことだった。

「子どもたちが苦しんでいる姿を目の当たりにし、どうにか助けたいという気持ちが次第に強くなっていきました。先天性の

難病は、一つの遺伝子の異常が原因で生じる単一遺伝子病であることが多いです。そこで、病気の原因となっている遺伝子からアプローチすれば、有効な治療法の開発につながるのではないかと考え、37歳のときに基礎研究の道に転向したのです」

骨関節疾患の原因遺伝子を次々と発見！

骨関節疾患には、大きく分けて単一遺伝子病と多因子遺伝病がある（図1）。多くの人が経験する、膝や股関節などの関節痛（変形性関節症）や骨粗しょう症なども、実は遺伝的な要因が影響する多因子遺伝病だ。多因子遺伝病は、数百もの遺伝子による影響が複雑に絡み、そこに生活習慣の影響が加わって発症するため、関連する遺伝子を特定するのは難しい。

しかし、臨床経験と遺伝子解析研究経験の両方を持つ池川TLは、「こういう病気ならこの遺伝子の可能性が高い」といった絞り込みに独自のノウハウを持つ。こうした強みを生かし、単一遺伝子病の原因遺伝子だけでなく、多因子遺伝病の発症に関わる遺伝子も次々と明らかにしている。まさに狙いを定めて遺伝子を捉える「遺伝子ハンティング」だ。



池川 志郎（イケガワ・シロウ）

生命医科学研究センター
骨関節疾患研究チーム
チームリーダー

1957年、兵庫県生まれ。東京大学医学部医学科卒業。博士（医学）。東京大学医学部付属病院整形外科、心身障害児総合医療療育センター整形外科医長、東京大学医科学研究所助手などを経て、2000年より理研にて研究室を主宰。2018年より現職。

新たな難病「Ikegawa型大理石骨病」

遺伝性の難病の中には患者数が少ないため、疾患として定義できていないものもある。苦しんでいる患者にとって、治療法がないだけでなく、病名すら分からないのは辛いことだ。

こうした状況を打開しようと、池川TLは骨・関節の難病に関する情報や経験の共有を目的としたコンソーシアムを設立し、世界中からデータを集めている。

2021年12月には集まった難病の大理石骨病のデータの中から、新たなタイプを発見し、「Ikegawa型大理石骨病」と名付けた。

大理石骨病とは、骨が異常に多くつくられてしまう病気だ。X線(レントゲン)写真で大理石のように白く写ることから、こう呼ばれている。骨は硬いが、チョークのように脆いため、骨折しやすくなってしまふ。

「大理石骨病は、遺伝の仕方や症状の表れ方が異なる10以上のタイプが知られていました。今回発見したIkegawa型では、これまで知られている大理石骨病とは異なる特徴がありました(図2)」

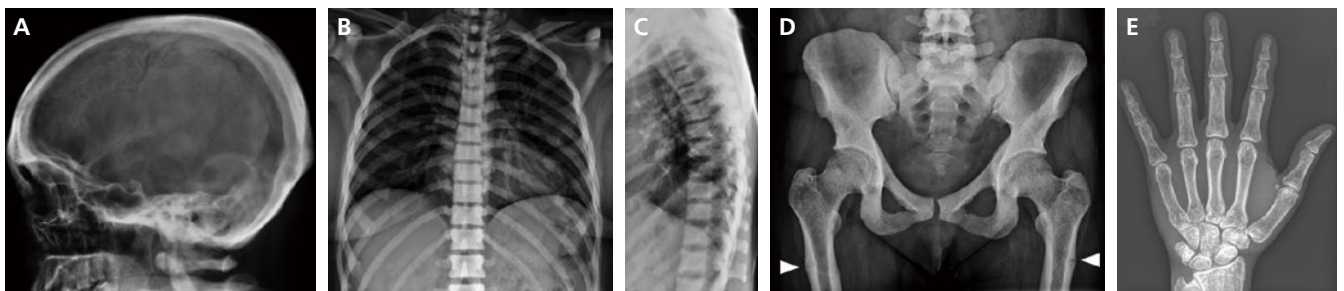
破骨細胞の分化の仕組みを解明

骨は硬くて変化していないものと考えがちだが、実際の骨の中は、壊してはつくり、壊してはつくりが繰り返され、絶えず変化している。こうした骨代謝は、骨を壊す破骨細胞と、骨をつくる骨芽細胞が行っている。この二つの細胞がバランスよく働くことで、常に骨の量や強度が適切に維持されている。しかし、大理石骨病では、破骨細胞の機能に異常が生じており、骨芽細胞ばかりが働いてしまう。そのため、全身の骨の量が異常に増えてしまうのだ。

今回、池川TLは、Ikegawa型大理石骨病の原因がSLC4A2という遺伝子であることを特定した。また、SLC4A2が破骨細胞の分化に関わる仕組みを分子レベルで解明し、この遺伝子が機能を失っているため、破骨細胞が正常に分化していかないことを明らかにした。「破骨細胞の分化にSLC4A2がどう関わって

図2 Ikegawa型大理石骨病患者のX線像

X線像により以下A~Eの特徴があることが分かった。
A：頭蓋骨がぶ厚い。B、C：脊椎は一樣に骨濃度が高い。D：骨盤と大腿骨の骨濃度が高く、大腿骨の偽骨折(日常のちょっとした動作で骨に亀裂が入ること)が見られる(白矢印)。E：手の骨の表面を構成する皮質が厚い。



単一遺伝子病

一つの原因遺伝子を持っていれば発症

① 軟骨無形成症、骨形成不全症などの先天性難病



多因子遺伝病

原因遺伝子が複数集積し、さらに環境因子が加わって発症

② 変形性関節症、骨粗しょう症など



図1 単一遺伝子病と多因子遺伝病

池川TLは、これまで30の単一遺伝子病の原因遺伝子と、八つの多因子遺伝病で疾患感受性遺伝子を発見した(多因子遺伝病は複数の要因があるため「疾患感受性遺伝子」という)。

いるか、その仕組みが初めて明らかになりました。難病の原因遺伝子を見つけることは、骨代謝のメカニズムの解明にもつながるのです」

単一遺伝子病から多因子遺伝病の治療へ

Ikegawa型大理石骨病という新たな難病を発見し、その原因遺伝子と分子レベルのメカニズムが分かったことで、この疾患の診断法や治療法を開発する道が開かれた。「遺伝病だからといって遺伝子を治さなくては症状がよくなるというわけではありません。発症の分子メカニズムを明らかにし、それを抑える効果のある治療薬を見つければ、症状を元から緩和させることができます。現在は治療薬のターゲットを検討しているところです」

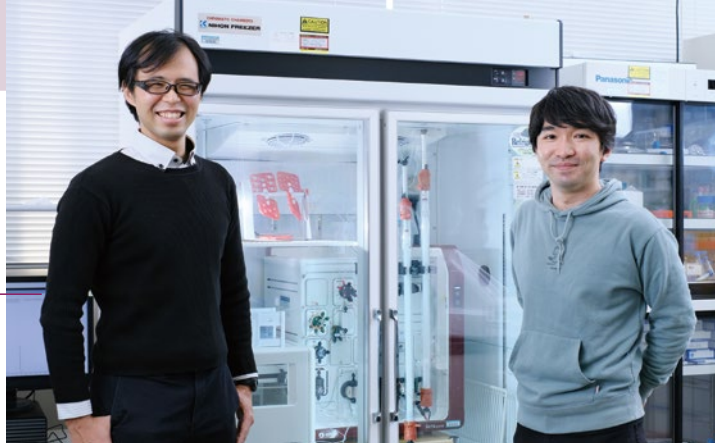
また、こうした単一遺伝子病の治療薬開発を、多因子遺伝病の治療に発展させることも期待できる。「単一遺伝子病の中には多因子遺伝病と似ているものがあり、原因となっている遺伝子が共通していることが分かってきました。つまり、単一遺伝子病の薬が多因子遺伝病にも効く可能性があるのです」

実際、製薬会社と共同で治療薬の開発を進めているものもある。「すべての骨関節疾患の患者さんを助けたい」という思いで始めた池川TLの研究は、着実にその実現に向けて進んでいる。

田上 俊輔 (タガミ・ジュンスケ)

生命機能科学研究センター
高機能生体分子開発チーム
チームリーダー

1982年神奈川県生まれ。東京大学大学院理学系研究科生物化学専攻博士課程修了。博士(理学)。英国MRC分子生物学研究所を経て、2015年から理研で研究室を主宰。2020年から現職。



タンパク質の合成実験を担当する八木創太基礎科学特別研究員(写真右)と、高速液体クロマトグラフィーシステムの前で。

タンパク質の進化から生命誕生の謎に挑む

どのようにして地球上に生命が誕生したのか——これは生命科学の最も大きな謎の一つだ。分子工学の手法を用いて古代のタンパク質を再現する試みを通して、この謎の解明に取り組んでいる田上俊輔チームリーダー (TL) に話を聞いた。

非生命と生命をつなぐ進化の解明を目指す

地球上にいつ最初の生命が誕生したかは定かではないが、生命誕生以前にDNAやRNAなどの核酸、タンパク質の元となるアミノ酸などは存在していたと考えられている。では、非生命の世界から生命が誕生するまでには、どのようなプロセスがあったのか。田上TLが目指す究極の目標が、この非生命と生命をつなぐ進化の解明だ。

全ての生物は遺伝子としてDNAを持ち、その情報をもとに「RNAポリメラーゼ」というタンパク質がRNAを合成する。タンパク質の合成を担うのはRNAとタンパク質の複合体(リボソーム)なので、RNAとタンパク質は、いわば、お互いをつくり合う関係にある。このような仕組みは、生命進化のごく初期に成立したに違いない。

田上TL率いる研究チームでは、RNAポリメラーゼの進化に焦点を当て、生命誕生の謎解きに取り組んでいる。

現在のRNAポリメラーゼは、3,000個以上のアミノ酸から成る非常に大きなタンパク質だが、最初から巨大だったわけではなく、まず中心となる構造ができて、次第に他の部分が加わったと考えられる。そこで田上TLらは、中心部分の構造「DPBB」に注目した。

実はDPBBは、RNAポリメラーゼ以外にもさまざまなタンパク質に見られる共通構造だ。DPBBがどのように誕生したかが分かれば、多様なタンパク質の進化を解く鍵となるかもしれない。では、DPBBの原初の姿はどんなものだったのだろうか。

約90個のアミノ酸からなる現在のDPBBの配列をよく見ると、前半と後半が似たような配列であることが分かる。つまりDPBBの起源は、長さが現在の半分(約45個)の、より短い単純

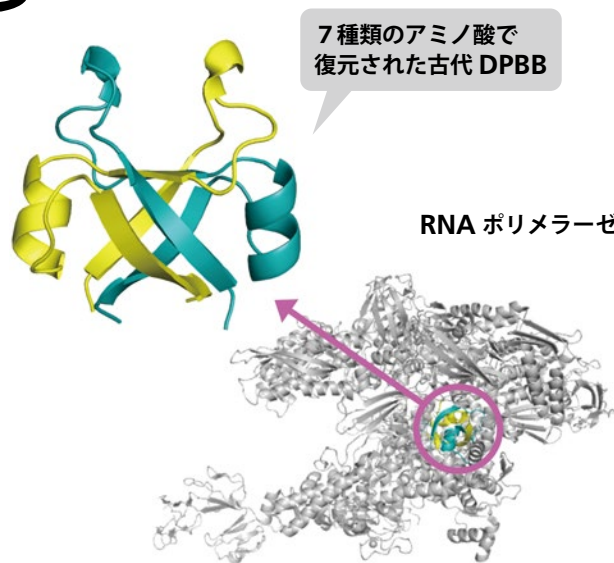


図1 DPBB とその構造

DPBB構造は現在のRNAポリメラーゼの中心部にも認められる(右下)。田上TLらのチームは7種類のアミノ酸から成る古代DPBB(左上の青と黄色のリボンモデル。約45個のアミノ酸から成り、お互いの配列は同一)を設計した。二つの古代DPBBが結合すると、現在の生物が持つDPBBタンパク質(約90個のアミノ酸)と同様の立体構造を取ることができる。

な「古代DPBB」だったらいい。古代DPBBの配列を実験や理論的手法で設計したところ、現在の生物が使う20種類のアミノ酸のうち、わずか7種類でDPBBと同じ構造を取りうる事が示された(図1)。

「タンパク質の形はその機能と密接に関係します。利用できるアミノ酸が少ない環境でもタンパク質の重要な基本構造がつけられるのなら、非生命からの“自然な進化”によって生命が誕生したことの一つの立証になると考えられます」と田上TL。

研究対象が道を示してくれた

田上TLは高校生の頃、細胞の分子メカニズムなどに興味を持ち、大学院で構造解析に取り組んだRNAポリメラーゼに魅せられたという。それが今も取り組み続けている研究テーマになった。

「研究対象が進むべき道を示してくれました。RNAポリメラーゼは、生命が誕生し複雑化してきた歴史の中心キャラクターの一つです。このテーマを見つけるまでに時間がかかってしまいましたが、一生かけて取り組みたいと思います」と決意を語った。

ゲノム情報に隠された進化の法則を探る

地球上に生命が誕生して約40億年。長い年月を経て生物は多種多様に進化してきた。これはゲノムの進化の歴史でもある。種ごとの違いはどのようにして生じてきたのか、ジェフリー・フォーセット上級研究員（以下、研究員）は、数理科学のアプローチを取り入れながらこの謎の解明に挑戦していく。

A、G、T、Cが語るあらゆる生物の進化の歴史

2000年ごろからヒトをはじめ、さまざまな生物のゲノム（全遺伝情報）が解読されるようになった。当時、学生だったフォーセット研究員は、ゲノムをデータと捉えコンピュータを用いて進化を調べる研究を始めた。

「ゲノムの塩基配列は、種や個体によって異なります。塩基配列の違いはどのようなプロセスで生じたのか、そこにどんな法則があるのかに興味を持ちました。どんな生物でもアデニン（A）、グアニン（G）、チミン（T）、シトシン（C）という塩基のデータにすれば“共通の言語”として扱えます。ゲノムの類似性などを調べ、種としての近さや共通祖先からいつ分岐したかを調べています」

研究対象は熱帯樹木から競走馬まで

多くの生物は両親から受け継いだ2セットのゲノムを持つ。しかし、近年のゲノム解析から、遠い昔のある時点でゲノムが重複して倍になる「全ゲノム重複」がさまざまな生物種で起きていることが分かってきた。フォーセット研究員が、東南アジアの熱帯雨林に多く自生するフタバガキ科の樹木（図1）のゲノムを解析したところ、白亜紀（約1億4,500万年前から6,600万年前）の末ごろに全ゲノム重複が起きたと推定された。

「重複した遺伝子はその後どちらかが失われることが多いので



図1 ゲノム解析に使われたフタバガキ科の樹木

フタバガキ科の1種 *Shorea leprosula*
写真提供：マレーシア森林研究所、横浜市立大学 (Ng 主任研究員ほか著『Communications Biology』より)
原論文情報：DOI 10.1038/s42003-021-02682-1

すが、驚いたことに、現存のフタバガキは乾燥応答遺伝子が重複して残っていました。この地域は湿潤ですが、まれに大規模な乾燥が起こります。その異変に対応する能力が、この種の繁栄に不可欠であった可能性があります」

進化には人為的なものもある。競走馬（サラブレッド）は、18世紀初頭に品種改良された個体群がもとになっており、その子孫で交配が繰り返されてきた。そのため、現在のサラブレッドは速く走ることができる遺伝子を共通に持っている可能性が高い。フォーセット研究員はサラブレッドと他の馬の品種の遺伝情報を比較して、サラブレッドたちが共通で持つ遺伝子を複数見つけた。「走力に関わる遺伝子はまだ特定できていませんが、将来的にはゲノム情報を競走馬の遺伝病の回避や、より効率的な選抜交配に活用したいと考えています」

「数理」との融合で新たな展開

所属する数理創造プログラムでは、数理科学を軸に数々の学際的研究が進められている。フォーセット研究員も、メンバーたちとの議論を通して、新たな試みのヒントを得たという。

「これまでどの遺伝子がどの遺伝子を制御しているかを表す『遺伝子ネットワーク』の進化も調べていましたが、これを理解するにはネットワークそのものの研究が必要だと分かってきました。今は遺伝子に限らず、ネットワークの理論的な研究を行っています。新たなアプローチで研究がどう展開していくか自分でも楽しみです」



Jeffrey Fawcett

(ジェフリー・フォーセット)

数理創造プログラム
上級研究員

1980年マレーシア生まれ。ベルギー・ゲント大学バイオインフォマティクス専攻修了。博士（理学）。総合研究大学院大学先端科学研究科日本学術振興会特別研究員、公益財団法人かずさDNA研究所先端研究部特任研究員を経て、2018年より現職。

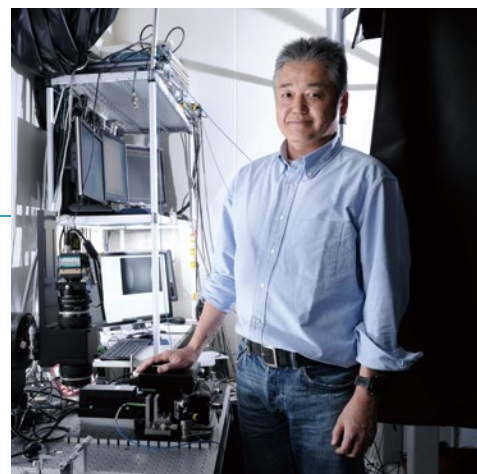
小脳全体の可視化がもたらした新発見

脳は、どのように働いているのか。神経細胞のレベルでの研究は進んできたが、全容を捉えるには、より広い範囲で脳の活動を見る必要がある。20年にわたって小脳の観察に挑んできた道川貴章 研究員は、小脳全体の活動の可視化に成功。その先には、感覚入力に関する大きな発見があった。

道川 貴章
(ミチカワ・タカユキ)

光量子工学研究センター
生命光学技術研究チーム
研究員

1964年東京都生まれ。東京大学大学院医学系研究科修士。博士(医学)。東京大学医科学研究所、英国ユニバーシティ・カレッジ・ロンドン、埼玉大学脳科学融合研究センターなどを経て、2013年より現研究チーム。2018年より現職。



小脳に「体部位再現地図」はあるか？

脳の働き方には、特定の領域がそれぞれ異なる身体機能を担うと考える「局在論」と、脳全体が協調してさまざまな機能を担うと考える「全体論」の二つの考え方があり、長年議論が続いている。大脳皮質の局在論では、身体を動かす指示を出す部分や触覚情報を受け取る部分など、身体の各部位に対応する脳の領域があることを示す「体部位再現地図」があるとされてきた。では、小脳はどうか。道川研究員らの発見により、小脳には「体部位再現地図」がないことが分かった。

これを可能にしたのは、小脳の表面全体でニューロン(神経細胞)のシグナルを可視化する技術。「ニューロンが活動するとカルシウム濃度が上がります。脳内のカルシウムを感知できる

よう遺伝子組換えをしたマウスと、広い範囲を観察できるマクロ顕微鏡システムを組み合わせ、小脳皮質からの出力を担うプルキンエ細胞の活動を計測しました(図1)。

浮き上がってきた十字形の構造

小脳皮質の表面全体を可視化することで観察できるプルキンエ細胞は2万個以上。その全ての活動電位(スパイク発火)を測定して小脳の感覚入力を調べた結果、身体刺激に対する反応は小脳全体に及んでいることが分かった。さらに、個々のプルキンエ細胞が独立して活動しているのではなく、道川研究員らが「セグメント」と名付けたプルキンエ細胞の小集団(クラスター)ごとに同期して発火していることも分かった。

マウスの四肢を前後左右別々に刺激した場合には、常に小脳全体が反応するが、そこに整然とした構造があることも見えた(図2)。「小脳皮質の活動は十字形の構造になっており、十字の中央部分の発火が増加すると、四つの先端の発火が減少するというように、相互相関があったのです。このような構造は予想外だったため、モニターに目がくぎ付けになりました」

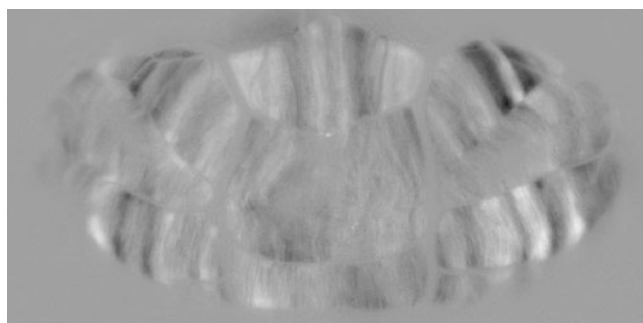


図1 小脳の大規模可視化に成功

小脳皮質の背側全域を同時に計測可能な実験システムの開発に成功し、時々刻々と変化する細胞の様子を可視化した。

統計手法で応答から刺激を読み解く

次に、現象から原因を推定する統計手法(ベイズ推定)を用いて、観測で得た小脳皮質の発火から、どの筋肉が刺激されたかを読み取った。その結果、単一のセグメントではなく、集団でのセグメントの活動パターンの組み合わせが、時々刻々と変化する感覚入力(筋肉の刺激)の情報伝達を担っていることが明らかになったのだ。

「1秒に1回とゆっくりしたリズムで発火するプルキンエ細胞の働きは長年の謎でしたが、細胞2万個に及ぶ全体像が見えたことで、小脳の神経回路の動作原理に関する全く新たな知見を得ることができました。感覚入力と運動制御の相互作用を明らかにすることで、将来的には運動障害などのリハビリテーションやブレイン・マシン・インターフェイスなどの開発にも役立つと思います」

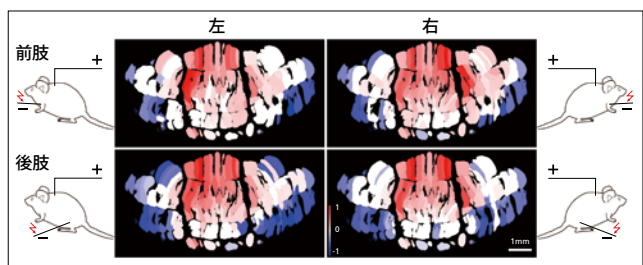


図2 マウスの四肢への電気刺激に対するスパイク発火

筋肉への電気刺激により発火が増加したセグメントを赤、減少したセグメントを青で示している。四肢への刺激から、小脳内に局在した反応の領域がないことが分かる。

個人情報管理に最適な新しいシステム

ICT (情報通信技術) はいまや、医療や教育など、身の回りの社会活動にも広く活用されている。その一方で、情報漏えいなど個人情報の取り扱い事故に関するニュースも目にするようになった。一人一人の情報という資源を、安全に活用していくにはどうすればよいのか。柴田健一 特別研究員 (以下、研究員) は、その問いへの一つの答えとして、データを分散管理するシステムを研究開発している。

個人に関するデータの「貯蔵庫」で問題を解決!

超高齢社会へ突入した日本では、医療機関や介護事業者が連携して高齢者を支援する地域包括ケアシステムの構築が推進されている。支援の対象である高齢者の暮らしや健康に関するデータを共有できれば理想的だが、問題となるのが個人情報の扱い方だ。複数の事業者から集約したデータを自治体のサーバーなどで集中管理する場合、常に情報漏えいのリスクがつきまとい、対策にも膨大なコストがかかる。この問題を解決する新たな手法として、柴田研究員が所属するチームが提唱しているのが、パーソナルデータ (個人に関するデータ) を分散管理するPLRシステムだ。PLRとは、Personal Life Repositoryの略で、直訳すると「個人の生活の貯蔵庫」となる。

新たに提案するPLRシステムでは、パーソナルデータの管理は個人に委ねられる。といっても、実際のデータはクラウドサー



柴田 健一 (シバタ・ケンイチ)
革新知能統合研究センター
社会における人工知能研究グループ
分散型ビッグデータチーム
特別研究員

1988年長野県生まれ。2017年静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育情報科学専攻修了。博士 (情報学)。同年、一般社団法人みんなの認知症情報学会事務局調査研究部長、2021年より現職。

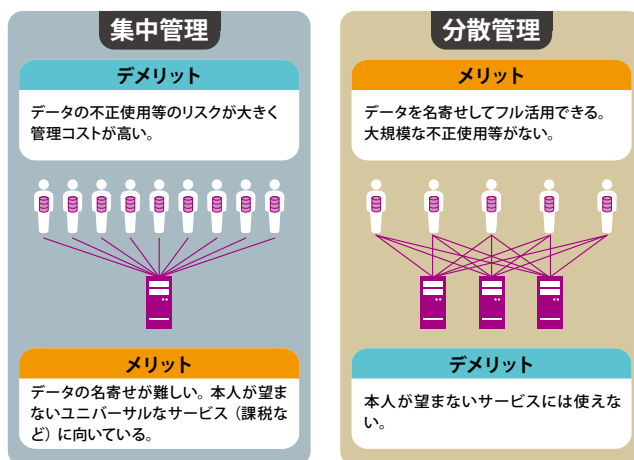


図1 集中管理と分散管理の違い

複数のパーソナルデータを自治体などのサーバーで管理する集中管理に対し、分散管理はパーソナルデータを本人が安全に活用できるメリットがある。なおどちらの場合も、形式が異なる複数事業者のデータを集約する際に、統合する技術だけでなく相互利用のための同意などの手続きが必要になる。

バーに保管されており、必要に応じて、個人が自らの意思を持って特定の相手とだけデータを共有できるという仕組みだ。「データはクラウドに保存されますが、すべて暗号化されています。集中管理と違って一度に何十万人分ものデータが流出するようないリスクはありません」と柴田研究員。このシステム運用には、「Personary (パーソナリー)」というアプリを使用する。データの暗号化やクラウド共有、データの作成・閲覧などの機能を備えたツールで、すでに電子母子手帳のシステムなどで実用化が始まっている。

AIでパーソナルデータを管理運用

柴田研究員が所属する分散型ビッグデータチームが目指すのは、パーソナルデータをスマートフォンなど本人の端末からでも安全かつ安価に扱える仕組みで、高齢者支援などのサービスを社会実装すること。分散管理には形式が異なる複数のデータを用途に応じてまとめる技術が必要になるが、それをPLRに付随する本人専用のパーソナルAIエージェント (PAIA) が助ける。本人に代わってパーソナルデータを管理運用するシステムの構築なども視野に入れ、応用研究も進む。「これらは橋田浩一チームリーダーの知見があってこそ実現できる研究」と語る柴田研究員は、目下、認知症当事者とその家族や支援者が、本人の望む範囲でパーソナルデータを安全に共有できるシステムを企業と共同開発中だ。ゆくゆくは一般向けの学習支援や健康管理にも応用していきたいという。情報が重要な資源となった現代社会で、人生の全体最適化を目指し、未知の領域への挑戦は続く。

厚さ0.003mm! 未来を変える 次世代の太陽電池

超薄型の有機太陽電池。その電池を他のデバイスとつなぐ接合部も超薄型にする研究をするうちに、福田憲二郎 専任研究員（以下、研究員）らは、これまで全く知られていなかった抵抗増加0の接合方法を発見した。この発見は、超薄型有機太陽電池の可能性を広げ私たちの未来の生活を変えるだけでなく、いろいろな業界の抵抗増加問題を解決する可能性を秘めている。

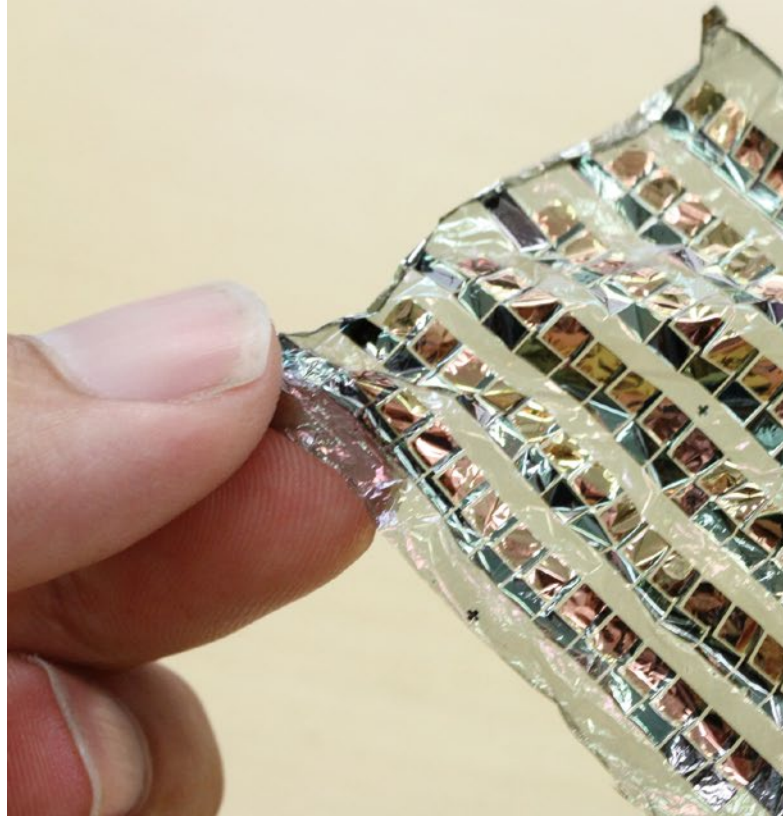
次世代型太陽電池 有機系太陽電池への期待

屋根の上や広大な敷地などに設置されるソーラーパネル。現在主流のシリコン系太陽電池は、重い、折り曲げられない、製造工程が複雑なためコストが高いなどの短所がある。これらを解消する「次世代型太陽電池」として1990年代から世界中で研究されてきたのが、プラスチック製の有機系太陽電池だ。有機系太陽電池は軽くて薄いため、湾曲した外壁や窓ガラスも太陽光発電の場にできると期待されている。

かつて、有機系太陽電池はシリコン系に比べて発電効率が低いことが最大の課題だった。発電効率とは、太陽光が持つエネルギーをどれだけ電気エネルギーに変換できるかを示す値だ。しかし、2022年1月現在の有機系太陽電池の発電効率最高値は18.2%まで向上。シリコン系（単結晶）の23%に近づきつつある。

くしゃくしゃにしても発電可能

福田研究員は自らの研究を「あり得ないほど薄く、でもしっかりと働く有機太陽電池の研究」と説明する。その厚さはわずか0.003mm（図1）。「分厚い紙の束を折り曲げるのは大変ですが、



紙一枚なら、いともたやすく曲がります。薄いことで折り曲げやすくなるのです。私たちがつくる太陽電池は、湾曲どころか、くしゃくしゃと握りつぶしても、発電し続けます」と胸を張る。

通常の柔軟な有機系太陽電池の厚さは0.1mm程度だ。福田研究員がつくる0.003mmは、まさに「桁違い」。これほどの薄さでも発電効率は15.8%を誇る。折り曲げても発電機能がしっかりと持続するのが特長だ。

超薄型にする秘訣

福田研究員はどのようにしてそれほど薄い太陽電池をつくり上げたのだろうか。主に二つの工夫がなされている。

一つ目は、製造工程での工夫だ。超薄型の有機太陽電池は、ガラスの上にポリマー（高分子）で超薄型基板を形成して、その上にさまざまな機能を担う層をいくつも積み重ねた後、ガラスから剥がしてつくる。非常に薄いフィルム状なので剥がす工程で破れやすい。そこで、こびりつかないフライパンに使われるようなフッ素樹脂をガラスにコートして、剥がれやすくしている。ただし、その「剥がれやすさ」は度が過ぎると、積み重ねる層をつくるための液体をはじいてしまい、液体が均一に広がりにくくなる。これでは望みの厚さの層をつくれぬ。「ガラスに塗布しやすいが、太陽電池は剥がれやすい」最適なフッ素樹脂を探し出したのだ。

二つ目は、材料面での工夫だ。以前はパリレンというポリマーを使っていたが、このポリマーは表面の凹凸が大きい上に熱を加えたときの変形が大きい。熱に強く、薄い層にしても表面が粗くなりにくいポリマーを探索し続けた結果、透明ポリイミドにたどり着いた。電池表面が平坦になったことで発電効率が高まった。

さらに発電を担う半導体ポリマーにも発電効率の高い分子構造を取り入れ、15.8%の発電効率を実現した。



福田 憲二郎（フクダ・ケンジロウ）

開拓研究本部
染谷薄膜素子研究室
専任研究員

1983年長崎県生まれ。東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了。博士（工学）。山形大学大学院理工学研究科電気電子工学分野 助教などを経て、2015年理研入所、2018年より現職。



図1 厚さ0.003mmの有機太陽電池
折り曲げても発電することができる。

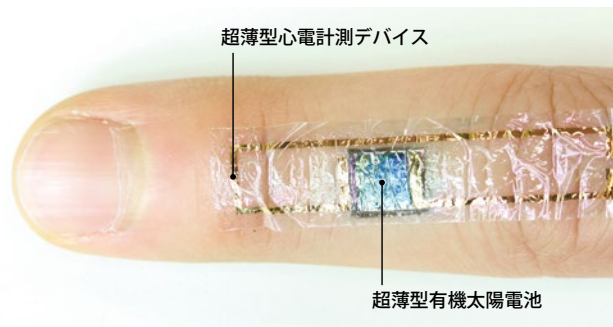


図2 超薄型有機太陽電池で動く超薄型心電計測デバイス

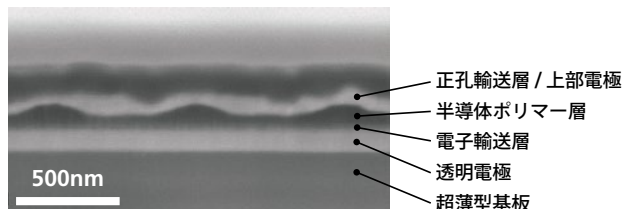


図3 ナノグレーティング構造

電子輸送層は半導体ポリマー層で生成された電子(-)を陰極に、正孔輸送層は半導体ポリマー層で生成された正孔(+)を陽極に輸送させる層。

皮膚に貼れて、太陽電池で動く心拍計測デバイス

薄くて耐熱性があり、折り曲げ可能な太陽電池をつくった福田研究員は「この太陽電池をどのような場面で使うと、その強みを生かせるのか、それを示すことも必要だと考えています」と語る。

その代表例が2018年に科学雑誌『Nature』に発表した皮膚に貼れる心電計測デバイスだ(図2)。

太陽電池は、光が斜めに入ると発電効率が低下する。そこで福田研究員は、折り曲げ可能な超薄型有機太陽電池の特長を生かして、700nm(1nmは10億分の1m)の周期で微細に波打った状態(ナノグレーティング構造)で層をつくった(図3)。波打つことで光の入射角度の影響を受けにくくなり、心電計測デバイスを動かすのに十分な発電が可能となった。

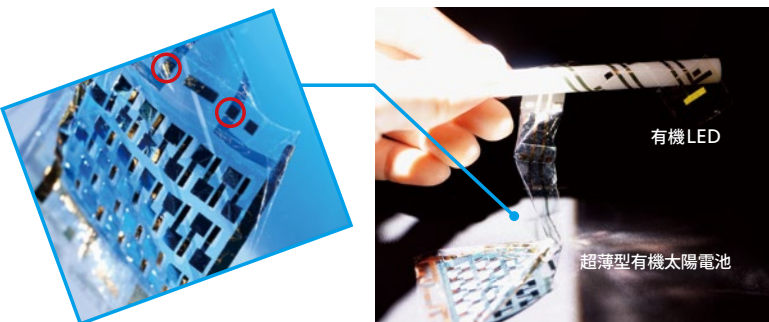


図4 超薄型有機太陽電池と水蒸気プラズマ処理で金接合した有機LED

超薄型有機太陽電池によって有機LED(右上)が黄色く光っている。赤丸の内面で電池とデバイスが金接合している。

超薄型電子デバイスを抵抗増加ゼロでつなぐ方法を発見!

だが、福田研究員は、この心電計測デバイスに一つの問題点を感じていた。「デバイスと電池を別々につくり、電気回路を組むようにつなげなければ将来的に困る」。開発した心電計測デバイスは太陽電池と一体型のデザインのため、どちらか一方に不具合が生じたら、全てをつくり直さなければならない。

別々につくるなら、二つをつなぐ技術が必要となる。そこで、ポリマーを接合できることで知られる水蒸気プラズマ処理を試したところ、ポリマー部ではなく、電池とデバイスをつなぐための金電極部分がくっつくという、電気回路には願ってもない結果となった。材料開発の分野でも知られていない、世界初の発見だった。

研究を重ねると、水蒸気プラズマ照射によって金表面に水酸基(-OH)が生じていると分かった。この状態で、金電極同士を密着させて常温常圧で一晩放置するだけで、金属結合でつながってくれる(図4)。

従来は、電気を通す物質を分散させたテープで電極を接合していたが、この方法では、テープでとめた部位が分厚くなってしまい、曲がりにくくなったり、電気抵抗が上がってしまったりした。しかし、水蒸気プラズマによる接合は、厚みが増さないため曲がりやすく、接合前後で電気抵抗の変化もない。

福田研究員は「この接合技術を求めている業界は他にもあるはず。想像もしないような分野でも発展してほしいですね」と目を輝かせる。

超薄型有機太陽電池の基礎研究に打ち込みながら、自らの電池の強みを示すための共同研究をしてきた福田研究員。最後に「次は“伸びる”超薄型有機太陽電池を生み出したい」と今後の抱負を語った。

グリーン水素の低価格化を非貴金属触媒で実現

太陽光、風力など再生可能なエネルギーから得た電力で水を電気分解（水電解）してつくるグリーン水素。製造時にも使用時にも二酸化炭素（CO₂）を出さない「カーボンフリー」なエネルギーとして注目されている。リソなグループの「SDGs推進私募債」を通じて、賛同企業からの寄附金による応援を受けながら、孔 爽 特別研究員（以下、研究員）はグリーン水素をこれまでより低コストで製造できる触媒の研究を進めている。

水素の低価格化に挑む

石油などの化石燃料を水素で代替する。そんな水素社会を実現するために重要な課題の一つが水素の低価格化だ。グリーン水素の製造に使われる「固体高分子（PEM）型水電解」というシステムの触媒には高価な希少金属、イリジウム（Ir）が使われている。その価格が水素製造コスト全体の25%を占めるという試算もある。

Irに代わる触媒として非貴金属を対象に研究を進めている孔研究員は「高い活性を示す触媒の研究が盛んに行われています。しかし、コストだけでなく安定性にも優れた触媒でなければ実用化できません」と指摘する。例えば、比較的安価な金属の一つ、コバルト（Co）は触媒としてIrと同程度の活性を持つが、たった数時間の水電解で腐食し、機能なくなってしまう。

「価格・活性・安定性」の三拍子そろった触媒

孔研究員らは実用化を視野に入れ、まず、酸性の水電解環境でも腐食しない非貴金属酸化物を探した。すると、二酸化マンガ（MnO₂）には、酸性でも1.23V以上の電位では、理論的に溶け出さない領域があると分かった。MnO₂（γ型）は乾電池にも使われており、安価だ。

図1

触媒塗布部から酸素が発生する様子。もう一方の電極からはこの2倍量の水素が発生する。



©Makoto Oikawa

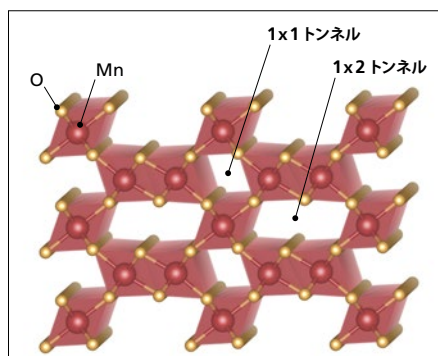


図2

γ-MnO₂の結晶構造（断面図）

1×1トンネル構造と1×2トンネル構造、2種類の隙間構造を持つγ-MnO₂。

次に、MnO₂の最適な結晶構造を探索。γ型MnO₂の特徴として2種類の大きさのトンネル状の構造を有する（図2）。2種の組み合わせの比率が変わると触媒性能も変わる。理研の大型放射光施設「SPring-8」で水電解中の触媒構造の変化を追い、触媒としての機能劣化と結晶構造の関係を調べ、安定性の構造支配因子を解明した。

触媒の活性の高さは電流密度の大きさを測ることができる。非貴金属の触媒ではこれまで0.01A/cm²程度の電流密度しか出せなかったが、孔研究員は0.2A/cm²で1,000時間以上の水電解が可能なた触媒を合成した（図1）。その成果は、2年半に渡る論文査読を経て科学雑誌『Nature Catalysis』に受理された。

しかし、実用化に求められるのは1A/cm²以上だ。孔研究員はさらに検討を重ね、MnO₂にIrを少量混ぜると飛躍的に性能が向上することを発見。MnO₂に微量のIrを混ぜたところ、固体高分子（PEM）型電解槽において1A/cm²で3,000時間以上もの安定稼働が可能になった。この成果を受け、現在、企業との実用化研究も進んでいる。

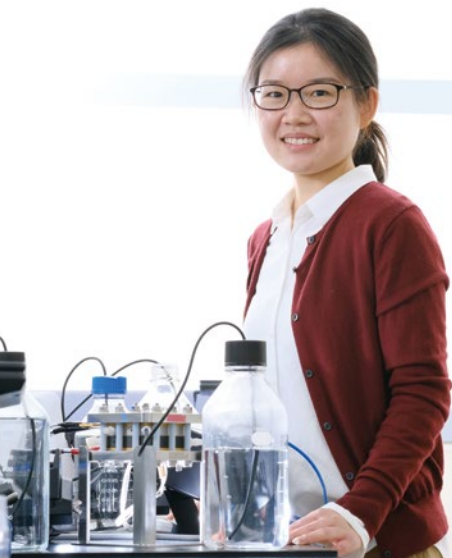
触媒研究でSDGsに貢献したい

「水電解の研究がとても好き。持続可能な社会づくりに貢献できるから」と目を輝かせる孔研究員は現在、水電解触媒の安定性が何によって決定づけられるのかを突き止めようとしている。そして最後に「水電解で発生する水素は、水電解時にCO₂と反応させれば燃料に、窒素（N₂）と反応させれば肥料になります。将来的にこれらの触媒も研究したいですね」と抱負を語った。

孔 爽（コウ・ソウ）

環境資源科学研究センター
生体機能触媒研究チーム
特別研究員

1990年中国生まれ。2017年中国科学院大学理学系研究科物理化学専攻修了。博士（理学）。2018年理研にテクニカルスタッフとして入所、2019年より現職。



ポータブルで超小型の NMR 装置の開発に成功

1911年に「超電導」という現象が発見されて100年余り。超電導体は核磁気共鳴 (NMR) 装置やMRI装置に実装され、リニアモーターや電力ケーブルへの応用も期待されている。しかし、その現象を起こすには超電導体を極低温に冷やす必要があり、大掛かりな冷却設備が不可欠だ。そこで、仲村高志 特別嘱託技師 (以下、技師) が企業と共同で新たに開発したのが、高さ約1m、人が運べるサイズのNMR装置だ。

24年間かけ“不可能”に挑戦

特定の金属や化合物を極低温まで冷やすと電気抵抗がゼロになる「超電導」。超電導体に大電流を流して得られる超電導磁石は、材料や生体組織を分子レベルで高精度に分析するNMR装置や、画像診断のためのMRI装置に欠かせない。しかし、超電導体を極低温まで冷やすには、 -269°C の液体ヘリウムなどの冷媒が不可欠だ。そのため、NMRには大掛かりな冷却設備が必要で、設置場所も限られてくる。

2021年12月、冷媒の代わりに電気で冷却する超電導磁石を使うことで、どこにでも運べる超小型のNMR装置の開発に成功したのが、仲村技師だ。「研究開発に着手したのは約24年前。技術開発を行うイムラ材料開発研究所 (現イムラ・ジャパン株式会社) から、新たな超電導磁石を発見したので実用化したいと相談を受けたのがきっかけです」と振り返る。

現在、NMR装置などに使われている超電導磁石は、超電導体を細長い線状にしてコイルに巻いたものである。高温超電導体の発見により、線状にはせずバルク (かたまり) のまま使っても、液体ヘリウムより何十度も高い約 -220°C の温度で強い磁場を発生する超電導磁石ができることが知られていた。とはいえ、



図1 ポータブルで超小型の NMR 装置

従来のNMR装置 (左奥) は冷媒による冷却容器など装置が大掛かりになるため移動は難しい。今回、仲村技師らが開発したNMR装置 (右手前の銀色の筒) は台車に乗せて人が運べるサイズ。しかも移動させても性能は低下しない。

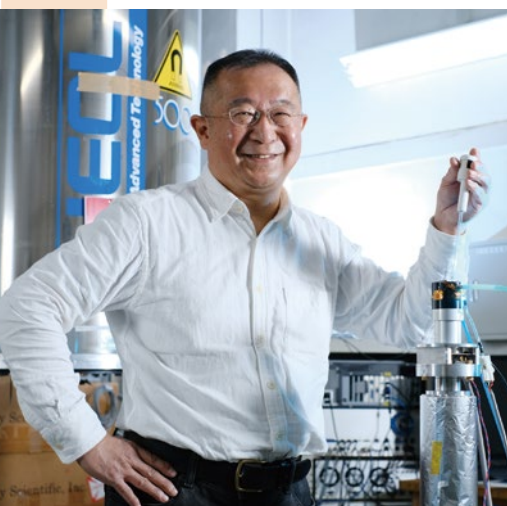
NMR装置に求められる非常に均一な磁場をバルクの超電導磁石で実現できるとは誰も思っていなかった。しかし、その挑戦を始めたのだ。

極地や深海、宇宙で活躍する日を夢見て

試行錯誤の末、2011年にはまず、超電導バルク磁石を用いた世界初の超小型MRI装置の開発に成功。その後、さらに開発した超小型MRI装置の成果をもとに、超小型NMR装置の開発を目指した。「NMR装置には、2011年に我々が開発したMRI装置に比べて、さらに磁場の均一性を高める必要がありました。そこで、磁場の乱れを低減する技術の開発や磁石の改良を繰り返すことで、2021年、ついに従来の超電導NMR装置に近い性能を持つポータブルの超小型NMR装置の開発に成功しました。通常の実験であれば十分な精度です。また、高価な液体ヘリウムを使う必要もありません」と胸を張る。

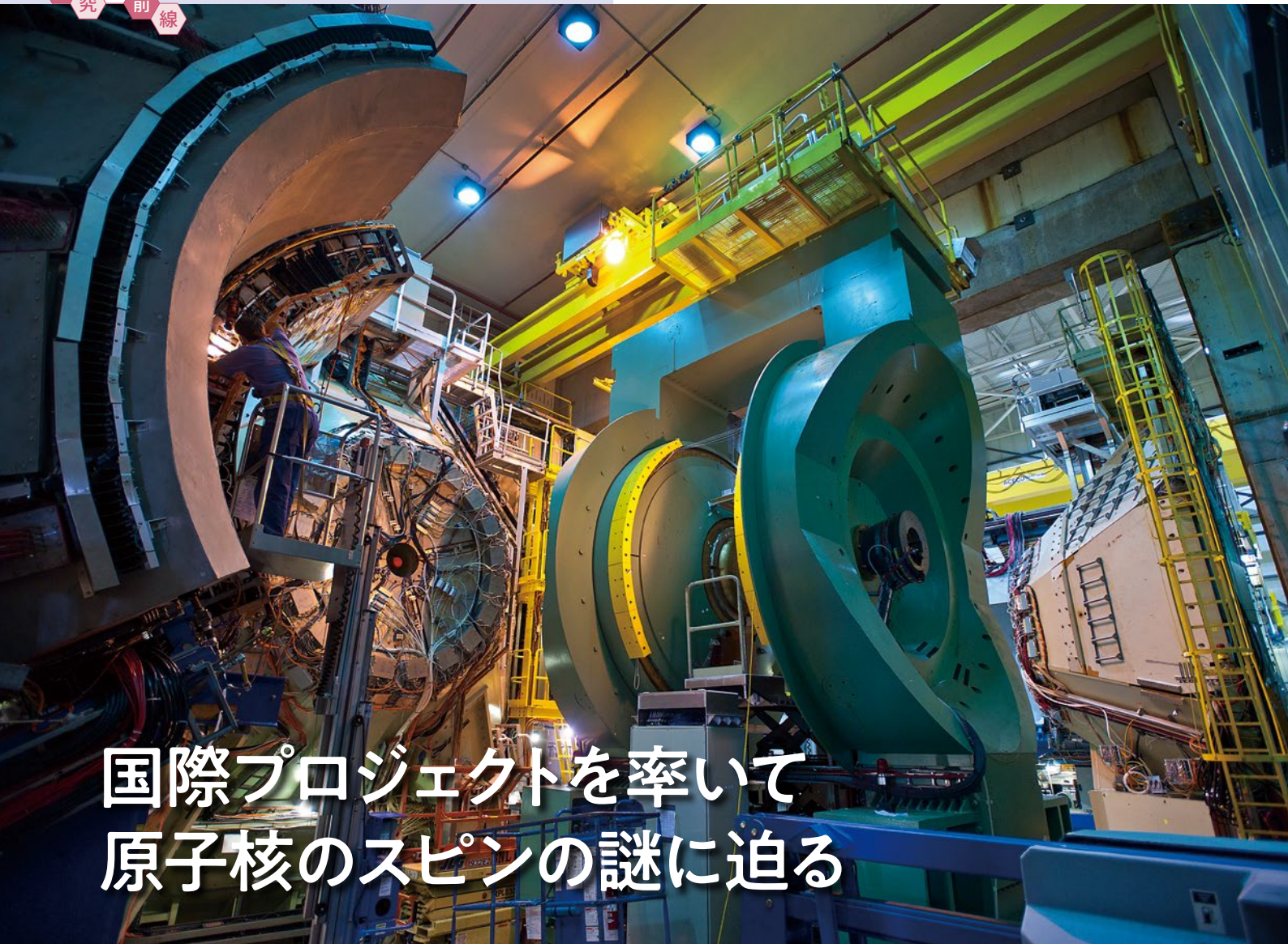
今後は、研究現場に卓上のNMR装置として導入されることを目指すほか、極地や深海、宇宙で活用してほしいと夢を膨らませる。「最新鋭の調査船でも、NMR装置までは搭載していません。このNMR装置なら、電力さえあれば使えるので、現地で採取した試料をただちに分析できます。これにより新たな発見につながれば、研究者冥利に尽きるというものです」

NMR装置のポータブル化は、幅広い分野の研究開発に大きなインパクトを与えるだろう。



仲村 高志 (ナカムラ・タカシ)
生命機能科学研究センター
構造NMR技術研究ユニット
特別嘱託技師

1962年高知県生まれ。高知大学大学院理学研究科物理専攻修士課程修了。筑波大学大学院数理物理学研究科電子・物理工学専攻修了。博士 (工学)。大塚電子株式会社にて小動物用のMRI装置や固体NMR装置の研究開発などに従事した後、1998年理研入所。2022年より現職。



国際プロジェクトを率いて 原子核のスピンの謎に迫る

最先端の科学研究では、世界中の研究者が力を合わせるチャレンジが分野を問わず進められている。例えば、物理学の分野では、宇宙誕生直後の状態を再現し、物質を成り立たせている素粒子の本質を明らかにしようとする大規模な国際プロジェクトが実施されている。2021年10月には陽子のスピンに関する大きな成果が発表された。米国と日本を行き来しながらこの国際プロジェクトを率いている秋葉康之グループリーダー（GL）に話を聞いた。



秋葉 康之 (アキバ・ヤスユキ)

仁科加速器科学研究センター
理研BNL研究センター
実験研究グループ
グループリーダー

1959年東京都生まれ。東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。博士(理学)。東京大学原子核研究所などを経て、2003年理研入所、2008年より現職。1992年からPHENIXプロジェクトに参加。

図1 PHENIX 検出器群

装置の約1/3を日本グループが建設・運用した。2000年稼働。2016年にデータ収集を完了し、その後、データの解析が進められてきた。
写真提供：米国ブルックヘブン国立研究所

衝突型加速器「RHIC」と 「PHENIX」プロジェクト

約138億年前に誕生したと言われる宇宙。開びやく直後は超高温状態で、物質を構成する最小の基本粒子(素粒子)であるクォークやグルーオンがバラバラのプラズマ状態で宇宙空間に存在していたと考えられている。この状態を「クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)」という。QGPの状態を人工的に作り出し、その性質を研究することを第一の目的に建設されたのが、米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)にある衝突型加速器「RHIC」だ。ここでは、国際的な枠組みで大規模実験がいくつも進められており、その一つである「PHENIX」プロジェクトは世界14カ国、78研究機関が参加する国際共同実験だ。理研を含む日本が測定装置の設計・建設から深く関与している(図1、2)。2016年からPHENIX実験代表者として数百人の研究者を束ね、率いているのが秋葉GLだ。

偏極陽子ビームで陽子内部のスピンを観測

秋葉GLはこう話す。「PHENIXプロジェクトでは、2005年に金の原子核同士を衝突させてQGPが生み出されることを確認し、RHIC建設の第一の目的を果たしました。並行して、原子核を構成する陽子の性質を知るための実験を進めてきました。その最近の大きな成果が2021年10月に発表した陽子のスピン構造の観測です」

原子核は陽子と中性子でできており、陽子と中性子はクォークおよびクォーク同士を結びつけるグルーオンと呼ばれる素粒子でできている。陽子にはスピンと呼ばれるコマの回転のような自転の性質がある。この陽子のスピンは、陽子を構成しているクォークとグルーオンが生み出している(図3)。かつては、陽子のスピンはクォークのスピンの合計であると考えられていた。しかし、1980年代に陽子の中にあるクォークのスピンの観測されるようになると、陽子のスピン全体の約3分の1を担っているにすぎないことが判明した。残り3分の2を何が担っているのか。それを解明するために始められたのが、理研が提案した「RHICスピン物理研究プログラム」だった。

「理論研究から、陽子のスピンを発生させているのはクォークのスピン、グルーオンのスピン、クォークと反クォークの回転運動、グルーオンの回転運動の四つであると考えられています(図3)。回転運動とは、自転する地球が太陽の周りをぐるぐると公転するように、自転するクォークやグルーオンが陽子のスピンの軸を中心に公転するといったイメージですね」

秋葉GLらはこのスピン発生源に関する理論が正しいか、実験での検証に取り組んだ。「陽子のスピン構造を知るには、まず、複数の陽子のスピンの向きをそろえた“偏極陽子”が必要です。偏極陽子同士を衝突させて破壊し、陽子内部から放出された素粒子の動きを観測するのです」

通常、陽子のスピンの向きはバラバラだが、特別な磁石を使うとスピンの向きをそろえることができる。RHICはこうしてつくった偏極陽子をビームとして高エネルギーで衝突させることができる世界で唯一の衝突型加速器なのだ。RHICの偏極陽子ビームは理研の提案・主導で実現した。

2002年に偏極陽子衝突実験を開始し、2016年、ついにグルーオンのスピンの向きがわからながら陽子のスピンを担っていることが分かった。さらにグルーオンの回転運動の観測へと実験は展開した。

予想よりも小さかった グルーオンの回転運動

「グルーオンの回転運動の大きさは、陽子同士を高エネルギーで衝突させたときに生じる“直接光子”と呼ばれる素粒子を測定することで分かります。ところが直接光子の測定は非常に



図2 PHENIX国際共同研究実験チーム

写真後部の測定器の設計・建設に理研は大きな役割を持った。
写真提供：米国ブルックヘブン国立研究所

難しく、1995年に一度だけ行われた先行実験では測定精度が低く、回転運動を確認できませんでした。今回は、RHICを使って発生させた直接光子を先行実験の約50倍の精度で測定することに成功しました」

2021年10月、大量の観測データからようやく導き出された解析結果は、測定精度の範囲内で0と一致した。これはどういうことなのだろうか。

「グルーオンの回転運動は、我々の高精度な測定をもってしても測定できないほど小さい、ということです。実験精度は現在提唱されている理論モデルの予想値の最大値より小さいのですが、捉えることができていません。これは、グルーオンの回転運動は、理論モデルの最大予想ほどは大きくないということを意味しています。科学、特に物理の分野ではこれまで、理論と実験が両輪となって発展してきました。理論の誤りを修正するために実験が果たす役割は大変大きく、今後も実験物理学者として、理論物理学者と二人三脚で科学の発展に貢献していきます」と秋葉GL。

現在、RHICスピン物理研究プログラムでは、sPHENIXという新たな実験に向け、測定器のアップグレードに取り組んでいる。「2023年開始予定のsPHENIX実験により、さらに高精度で直接光子を観測できれば、今度こそグルーオンの回転運動を確認できるかもしれません。一方で、その結果が0、つまりグルーオンの回転運動はなかった、という可能性もありえます。もし理論に誤りがあれば、それを明らかにすることが実験の役目です。いずれにせよ今後、理論モデルの修正が進められていくことになるでしょう」

2020年3月以前は月に1回程度、BNLへ渡航していた秋葉GLだが、コロナ禍のため2年近く現地入りできないでいる。「PHENIX実験のデータ解析とsPHENIX実験の準備を、日本国内、米国、台湾などのチームとリモートでつなぐことで何とか進めています。毎週数回、米国とオンライン会議をしています」と語る。それでも実験物理学者としては、現場での実験があつてこそ。日米を往復する日々の再来が待ち遠しいという。

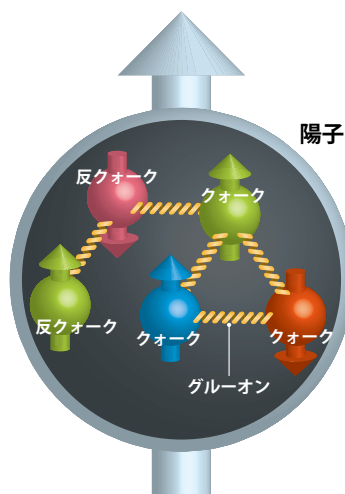


図3 陽子のスピン

陽子のスピンの発生源は、その中にあるクォークやグルーオンのスピンと回転運動と考えられている。

重イオンビームで 温州みかんの 品種改良

阿部知子チームリーダー（TL）は重イオンビームを使った植物や微生物の品種改良のパイオニアだ。最近では、静岡県と共同で静岡県名産の温州みかんを品種改良し、果実の収穫時期が遅い新品種「春しずか」を開発。これにより、収穫や出荷などの作業が一時期に集中していた生産農家の負担解消に貢献した。

生物照射の始まりは花見の宴での一言

阿部TLがポスドクとしてアスパラガスの研究をしていたある春の夜、サイクロトロン研究室（当時）恒例の花見に誘われた。理研構内の桜の木の下で、当時の主任研究員から、がん治療の研究のためにたくさんのネズミに照射していた重イオンビームを「植物に照射してみないか」と勧められた。「面白そうだなと、二つ返事で引き受けました」と阿部TL。当時、重イオンビームを品種改良技術開発の目的で植物に照射し、体系的に研究した例はなかった。

原子核を光速の半分近くまで加速した重イオンビームは、1粒子の破壊力が大きく、遺伝子にピンポイントで変異を起こすことができる。周辺の遺伝子を傷つけないので、成長を妨げることも少ない。加速器では、透過力の強い高速のビームを出せるため、枝などを容器に入れたまま照射できる。阿部TLらの取り組みで、重イオンビームによる変異誘発技術が確立した。

約20年かけて新品種「春しずか」誕生

これまでに実用化した改良品種は新色のペチュニアや桜など30種以上。静岡県とは、温州みかん「青島温州」の品種改良に2000年から取り組んできた。穂木に重イオンビームを照射し、静岡県農林技術研究所で接ぎ木して育てながら、有用な性質を

図1 春先に出荷可能な温州みかんの新品種「春しずか」



育種を手掛けた静岡県農林技術研究所果樹研究センター果樹生産技術科長 中村茂和さん（右）と。



阿部 知子（アベ・トモコ）

仁科加速器科学研究センター
副センター長
イオン育種研究開発室
生物照射チーム チームリーダー

東北大学大学院農学研究科農学専攻修了後、同大遺伝生態研究センターで日本学術振興会特別研究員。1990年に基礎科学特別研究員として理研入所、2008年から研究室を主宰し、2018年より現職。

持つ変異株を選んでいった。

結果、青島温州より収穫時期が1カ月遅い、皮と果肉の間に隙間が空く「浮き皮」が起こりにくいため長期貯蔵が可能といった特長を2018年に最終確認し、新品種が誕生した。「収穫や出荷作業を青島温州とずらすことができるため、生産農家の作業負担を軽減できます。近年マーケットニーズが高まっている3～4月に出荷できることを受け、「春しずか」と命名しました」。ミカンには、苗を植えてから実がなるまでに約5年かかることもあり、2021年、ようやく「春しずか」は新品種として登録出願、公表された。

植物や微生物の育種を目的とした照射件数は年に1,000から2,000。照射を終えた結果待ちの種もたくさんある。照射を担う加速器基盤研究部の福西暢尚 副部長は、「最近では、半導体に照射して宇宙空間での耐久性を確認するなど、重イオンビームの応用分野が広がっている。その先駆けが生物照射でした」と話す。

照射する原子核の種類やビームの強さ、照射する種子の状態、サンプルの組織や部位など、変異を誘発しやすい条件について

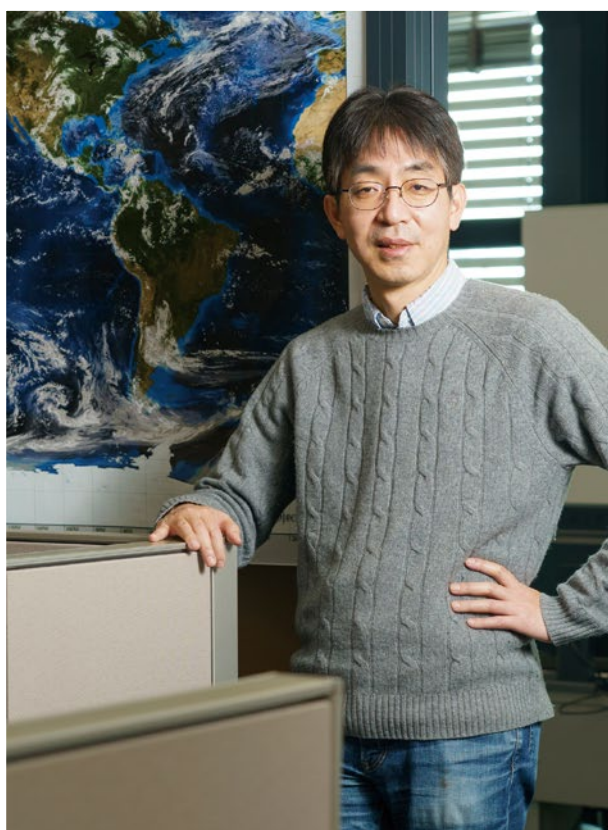
の知見はかなり集積された。一方、生物学的、あるいは物理学的に「変異」がどのような現象なのかはまだ分かっていない点も多い。もともと、「メンデルの法則を知って生物学を志した」と阿部TL。今は、潜性（劣性）と顕性（優性）の変異の違いに注目する。「ゲノムを詳しく解析できるようになったので、顕性になる変異の特徴を解き明かしたい」と興味のタネは尽きないようだ。

私の
科学道

計算科学研究センター
複合系気候科学研究チーム
チームリーダー

とみた
ひろふみ
富田 浩文

1969年京都府生まれ。東京大学工学部航空宇宙工学科卒業。東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター主任研究員などを経て、2011年より理研で研究室を主宰、2018年より現職。



雲の成長から知る 自然の構造パターン

2021年のノーベル物理学賞でも話題になった「気候モデル」。地球規模の大気シミュレーションに関わる富田浩文チームリーダー (TL) は、複雑な気象現象に秘められた秩序に目を凝らしている。

紙飛行機から流体へ

バックグラウンドは航空宇宙工学。「父親も研究者で、子どもの頃はよくプラモデルやラジオをつくらされましたね」と笑う。特に熱心だったのが紙飛行機だ。のりで貼り合わせ、重りをつけてゴムで飛ばす。「のりしろがないやんけ」などと口を出されながら培われた感覚は今も忘れていない。

大学は航空宇宙工学科に進んだが、大学院生になる頃には航空機やロケットの設計より、その周りの空気の流れなど、流体の本質的な性質に強い関心を抱いた。「例えば味噌汁を置いておくと、澄んだ部分と濁った部分で模様ができますよね。何もない状態から、構造的なものが生まれる過程、自己組織化が興味の本中心になったんです」

雲の再現でブレークスルー

「いろいろなものの流れを再現してみたい」と気象力学へ方向転換し、前職では地球シミュレータを使った全球雲解像モデル「NICAM」のシミュレーションに携わった。当初は技術者として応募したのだが、勧められて研究者の道へ。

それまでの地球規模での大気シミュレーションでは、雲の時間発展のような物理現象を追うのは難しいため、雲の影響はあらかじめ見積もった上で計算に組み入れていた。しかし、これでは実際の大気現象を再現するにはほど遠い。そこで、富田青年は世界で初めて雲そのものを再現したNICAMモデルを提唱し、当時の最高解像度(格子間隔3.5km)での全球シミュレーションに挑んだ。

「モデルを一新したことで大転換が起きました。熱帯域の巨大な積乱雲群では、一つの積乱雲から始まる階層構造まで再現できたのです」。より忠実に物理現象に従った気象モデルは、全球大気シミュレーションの質的ブレークスルーに

つながった。

ランダムな状態から生まれる 構造的な秩序

その後理研に入所し、スーパーコンピュータ「京」を使って格子間隔870mごとの超高解像度を達成。現在は「富岳」を駆使しながら、「より精度の高い地球規模の大気シミュレーションを実現するためには、乱流など、まだ、きちんと組み込めていない物理現象の基礎研究が重要」とさらなる高みを目指す。

大気シミュレーションでは、物理法則に従い雲が集積し、秩序ある階層構造が生み出される。富田TLは、「このような仕組みは、分野を超えて普遍的に見られるのではないかと考える。例えば、細胞から臓器、そして身体となる生物の階層構造には、共通する仕組みが存在するのではないかと。その思考を今、次の学問につながる数理的な自己組織化論へと発展させたいと考えている。

料理好き研究者のサラダ日記

大谷 義近 (オオタニ・ヨシチカ)

創発物性科学研究センター
量子ナノ磁性研究チーム
チームリーダー

6:30起床、まずコーヒーマーカーをスイッチオン、さて今日は何のサラダをつくらうか？ 昨晚妻がセットしてくれたランチョンマットと食器を見て想像力を膨らませる。基本は私の好物のトマト、昨日買ったインゲンも添えよう！ 少し電子レンジで加熱して。熱したフライパンにオリーブオイルを垂らし強力な脇役、舞茸も仲間に加えて、焼き色をつける。野菜の次はドレッシング。オリーブオイルとワインビネガー大さじ1杯ずつにバルサミコ酢を少々とレモン汁・塩コショウを適量加えてレモンドレッシングのでき上がり。最後にドレッシングとバルミジャーノ・レッチャーノをまどわせてサラダの完成だ。(右の写真上段中央)

4年ほど前、朝食に植物繊維を取ると血糖値の上昇を抑えることができると知り、このサラダ日記を始めた。最初は、記録として写真を撮りためていたが、妻からインスタグラムを勧められた。公開することに抵抗があったが、始めてみると記録を後から見ることができ、家族との楽しい話題にもなる。一人で調理からテーブルセットまで悪戦苦闘していたが、そのうち見かねた妻がランチョンマットをつくってくれ、もともと好きだった食器選びに合わせたテーブルセットをしてくれるようになり、夫婦のコラボが始まった。私も器好きであったので、陶磁器の知識とともに数も増大した。ハッシュタグの存在を知り、メモ代わりに食材と陶磁器の種類を記入してみたら、「いいね！」が増えた。ささやかなメッセージの交換も始まった。皆オリジナリティ溢れる投稿をしていて大いに驚いた。記録日記とはいえ、価値観を共有する人からの「いいね！」はうれしいものだ。新型コロナウイルス感染拡大前は海外出張時に一休みができたが、この2年ぐらゐの間は、ほぼ毎日の更新だ。

2021年夏から秋にかけて、フランス、グルノーブルのCEA Spintec研究所に招かれ夫婦で3カ月間滞在した。日本からランチョンマットを持参し、フランス滞在中もサラダ日記を続けた。ご存じのようにフランスのマルシェは有名だ。町のあちこちに市が立ち、地元の農家直送の新鮮野

Instagram
(@yoschika3) から著者近影(左)、
フランス、グルノーブルにて。

菜や^{ドフイネ}Dauphiné地方のチーズが手に入る。サラダづくりにはもってこいの環境だ。好物のトマトは、見た目はグロテスクでも皆美味である。名前もユニークだ、真っ赤で表面が波打つCoeur de boeuf(牛の心臓)、赤黒いNoire de Crimée(クリミアの黒トマト)、黄色いTomate Ananas(パイナップルトマト)などなど。サラダによく利用するミニトマトも太陽を十分に浴びて甘い。日本ではなじみのないシューラーヴ、エンダイブ、アーティチョークなどさまざまな食材が並んでいる。私の創作意欲もかき立てられた。マンネリ感を打破するために、早速シューラーヴを使ったフレンチサラダに挑戦した。

^{シューラーヴ}Chou-rave、別名コールラビ、は日本の蕪にも大根にも食感が似ていて、シャキシャキとした食感が何とも言えずおいしい。ミント、イタリアンパセリそしてセサミで脇を固め、隠し味にニョクマムを使ったドレッシングで全体を整えてTrès bon(まさに美味)。こんな具合に日々インスタを更新している。さて、明日のサラダは？

最新記事はウェブサイトでご覧いただけます。

『RIKEN NEWS』は、理研の研究の最前線や研究者の人物像に迫るウェブコンテンツ「クローズアップ科学道」を再収録した季刊誌です。最新記事は理研ウェブサイトにて随時更新中。ぜひご覧ください。

www.riken.jp/pr/closeup/

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。
問い合わせ先 外部資金室 寄附金担当kifu-info@riken.jp www.riken.jp/support/