

RIKEN NEWS

 理化学研究所

FALL 2026

No.499

- 
- なぜAIは賢いのか
原理を解明し、日本発の技術開発へ ——— p.02
- 脊髄が学習して、記憶する!? ————— p.04
- AIとスパコンで迫る天の川銀河の進化 ——— p.06
- 植物がどのように
葉緑体をリサイクルするかを探る ————— p.08
- 研究者からキャリアチェンジ アウトリーチに全力投球 ————— p.10
- 若さとロジカルな発想で指定難病「IgA腎症」に向き合う ————— p.11
- 馬好きのモンゴル旅行記 ————— p.12

なぜAIは賢いのか 原理を解明し、 日本発の技術開発へ

文章や絵をかき、質問に答える。目標を提示すると、推論を重ねて問題を解決する。AIは劇的に進化し、急速に身近な存在になった。ところが、なぜそこまで高い性能を発揮できるのか、専門家にも分からない点が多く残されている。この変化の激しいAI研究分野で「なぜ」を追ってきたのが、杉山 将 センター長率いる革新知能統合研究センター（AIP）だ。日本のAI研究開発力を高める拠点として発足11年目を迎えた2026年4月、新たな段階へと歩みを進めた。

すぎ やま まさし
杉山 将

革新知能統合研究センター センター長

誰も「機械学習」を理解していなかった時代に

2016年4月にAIPが発足するはるか昔から、日本でも「AI（人工知能：Artificial Intelligence）」という言葉は広まっていた。だが、AIとは何か、何ができるのかは、ほとんど理解されていなかったのが実情だ。

さかのぼれば、研究の世界では1990年代から機械学習に注目が集まっていた。人間がコンピュータに手順を教え込むのではなく、大量のデータからコンピュータで規則性を見つける技術だ。この技術が、今のAIの中核にある。

まだ若手研究者の一人だった杉山 センター長が機械学習の主要な国際会議で初めて論文発表したのは1999年。IBMやマイクロソフト、創業間もないGoogleが会議のスポンサーに名を連ね、この分野の研究者を競って採用していた。一方、日本ではこの分野の「冬の時代」が長く続いており、研究費の申請に「AI」と書くとおかしいと言われていた。2010年代に入ると日本でも機械学習の重要性が認識されるようになったが、欧米とは10年以上の開きがあった。どうしたら追いつけるのか。その危機感の中から、2016年に第1期のAIPが発足した。

あえて流行を追わず

第1期のAIPにはミッションとして、次世代基盤技術の開発、日本が強いサイエンス分野をAI技術によりさらに強化、社会課題の解決への貢献、倫理的・社会的課題への対応、人材育成——の五つが定められた。その中で杉山 センター長が土台に据えたのは一つ目の次世代基盤技術、つまり基礎的な数理分野の研究だ。当時、基礎研究を主軸としたAIの研究所は世界にもほとんどなかった。「私たちが力を入れたのは、いかにAIを使うかではなく、AIとは何かを根本的に探る研究です。原理が理解できてこそ、新しいAIをつくり出すことも可能になります」

変化の速いこの分野で流行を追えば、目標にたどり着いたと思ったころにはさらに先に進んでいる。杉山 センター長は、目の前の流行を追わず、あえて距離を置く姿勢を貫いてきた。2005年ごろ、機械学習におけるアルゴリズムの研究に多くの研究者が注目する中、杉山 センター長は「分布シフト適応」という、より基礎的なデータの部分に目を向ける道を選んだ。AIは世の中が変わらない前提で学習するが、現実の変化に合わせてシステムをどう適応させるかを探る理論だ。当時発表した論文は、20年を経た今も盛んに引用されている。「^{はや}勇気を持って流行らないことをやる人が、一定数は必要です」



2025年10月3日、AIP(理研 東京地区)で開催された「RIKEN AIP LLM×ML Workshop」の様子。AIPの研究者が集い、大規模言語モデルと機械学習の融合に関する研究成果や課題について活発に議論を交わした。

「予測の正確さ」を数理的に裏付ける

AIPの研究者たちが挑む謎は、センターが動き出すずっと前に生まれていた。脳の神経回路をまねた「ニューラルネットワーク」という仕組みを、何層も重ねる手法がある。ディープラーニング(深層学習)だ。2012年、画像に何が写っているかを正しく認識する国際コンテストで、ディープラーニングを使ったカナダのチームが、従来の手法を用いた他チームを大きく引き離れた。アカデミアも産業界もこの技術に一斉に飛びついたが、なぜこれほど認識の精度が上がったのか、その理由は誰にも説明できなかった。

AIPは数学に強い研究者を集め、ディープラーニングの原理の解明に挑んだ。

たどり着いた答えの一端は「次元」にあった。AIが扱うデータの項目数を次元という。例えば、医療情報では、扱う項目が年齢だけなら1次元、年齢と身長なら2次元。医用画像や遺伝情報になると、ピクセルごとの数値情報やDNA配列など何千次元から何百万次元にもなり、次元が上がるほど予測は難しくなる。この現象は「次元の呪い」と呼ばれ、古くから数学的に示されてきた壁だ。「私たちは、層を深く重ねたニューラルネットワークなら『次元の呪い』を避けられる場合があると、数学的に証明することに成功しました」。ディープラーニングの認識精度を高める原理の一部を数理的に裏付けたことになり、学术界に大きな影響をもたらした。AIPの10年間の大きな成果の一つに挙げられる。

取り組んだのは原理の解明だけではない。医学分野では早い段階からAI関連の研究が動き、AIPのがん探索医療研究チームなどが開発した胎児心臓超音波スクリーニング支援システムは、2024年に薬事承認を得て治療に生かされ、重い先天性心疾患の見落としを防ぐことが期待されている。社会実装に至った成果の一例である。

このほか、音楽や言語などのメディア領域や、哲学や法制度などの人文・社会科学の領域での研究にもいち早く取り組み、成果を上げている。

激動の中でスター研究者を育てる

AIPが原理の解明を進める間にも、AIは想像を絶するスピー

ドで姿を変えてきた。2022年以降、生成AIが急速に広まり、事実と異なる内容をもっともらしく答える「ハルシネーション」も知られるようになった。どんな原理で動き、どこで間違えるのかを技術者が理解していなければ、AIは制御できない。原理を解明する研究の必要性が、改めて認識された。

AIが社会に浸透するのに伴って情報分野の人材不足が深刻化し、特に国内では研究人材が絶対的に足りなくなっている。そこで、国際的に名が知れ渡るような「スター研究者」の育成に力を注ぐことにした。スター研究者のもとには、共同研究を希望する優秀な人材が世界中から集まるためだ。「厳しい競争の中でも、この10年でスター研究者の卵

が着実に育ちつつあります」と杉山 センター長はAIPでの実績に手応えを感じている。

新たな一歩を踏み出したAIP

AIPはもともと、文部科学省のプロジェクトとして発足したという経緯がある。プロジェクト終了後の2026年4月、AIPは今後の展開に向けて、新たな歩みを踏み出した。

杉山 センター長は「理研が取り組むべき基礎科学研究の一つの柱」として、AI研究の重要度がますます高まると考えている。研究体制も再編した。「マセマティカルインテリジェンス」は知能の原理を数理的に解明し、信頼性の高い新たな知能の原理を創出する。「ドメインインテリジェンス」は科学の知識や理論をAIモデルに統合し、多様な科学領域における研究方法論の革新に貢献する。「フィジカルインテリジェンス」は、実世界で自律的に判断・行動できる知能システムの原理構築と、実装可能なAIロボット技術の確立を目指す。三つのグループに分けてはいるが、数理を土台に置く点はどれも同じだ。ただ、数年先すら見通せない分野で、ゴールを決めて走るやり方は通用しない。「変化の波にのみ込まれないように、自らその波に乗らないといけませんね。目標をアップデートしながら方向を見定めていきたいです」

海外のAIプラットフォームの後追いではなく、日本が主導権を握れるような展開を目指す。「基礎研究でその突破口を開いていきます」。杉山 センター長は力強く言葉を結んだ。





たけ おか あや
竹岡 彩

脳神経科学研究センター
運動回路可塑性研究チーム チームディレクター

脊髄が学習して、記憶する!?

脊髄に学習能力があると聞けば、多くの人が「えっ? 学習をつかさどるのは脳では」と思うだろう。脊髄は情報を伝える単なるケーブルに過ぎないと考えられてきたからだ。世界を舞台に研究を続けてきた竹岡 彩 チームディレクターは、マウスによる実験で脊髄が運動学習機能と記憶形成機能を持つことを発見し、そのメカニズムを細胞レベルで示した。脊髄も、脳と同じように「学習」と「覚えたことを思い出す」という役割を担っているという驚きの成果だ。2024年、日本に拠点を移した竹岡 チームディレクター。理研での研究にも新たな発見が期待されている。

■米国の大学で運動機能研究に目覚める

脊髄の学習能力については、行動学的に100年以上前から指摘されていた。しかし、「学習は脳以外で行われないという先入観があり、本格的に研究しようという人はあまりいなかったようです」と話すのは、米国、スイス、ベルギーとグローバルに研究を進めてきた竹岡 チームディレクターだ。

大学は英語圏で学びたいと考え、東京都内の公立高校卒業後は米国へ。1999年、オハイオ州にある、履修の専門分野を絞らないリベラルアーツ系の大学に進学した。さまざまな理系分野を学び、「実際に観察したことを客観的に分析できる方が好きなので、運動機能の分析からアプローチできるパーキンソン病を卒業論文のテーマに選びました」。

同じパーキンソン病モデルのラットでも、毎日運動しているラットは運動しないラットより運動機能障害が進行しにくいという仮説を立てて実験。「指導教官は、学生の興味に基づいて自由にやらせてくれたので、研究の面白さに目覚めました」。1年かけた研究で、パーキンソン病の運動障害は毎日の運動で改善するという結論を導いた。

■米国、スイス、ベルギーで追い続けた「脊髄と学習」の謎

大学院はカリフォルニア大学ロサンゼルス校を選んだ。テーマは脊髄損傷後の歩行機能回復。この研究に際し、「動物実験の

文献を読んで脊髄の中だけで学習のようなことが行われていると感じました。それを患者さんの歩行トレーニングや治療などに使えるのではないかと考えたのです」と話す。もっと追究したいという強い思いから、大学院修了後にスイスの研究所に移った。さらに6年あまりを経てベルギーの研究所へ。そこで自分の研究室を構え、チームメンバーの支えを得て「脊髄と学習」の研究に臨んだ。



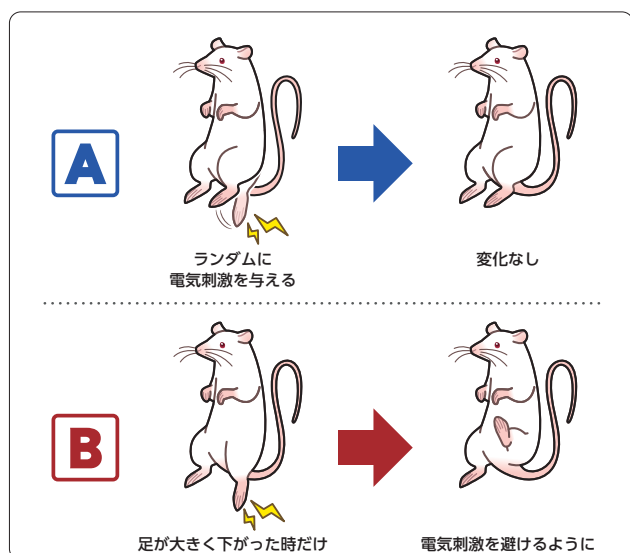
▲脊髄研究に「走って」貢献!
ベルギーのルーベン市、ケッセル・ローにて。2021年5月に開催された「Wings for Life World Run」という脊髄研究のための世界規模のチャリティー・ランイベントにラボメンバーと参加した。

「例えば、自転車に一度乗れるようになると、その後は特に意識しなくても乗ることができます。実際には多くの筋肉が極めて正確なタイミングで収縮、弛緩（しかん）をしています。すべてを脳が制御していたらパンクしてしまうでしょう。脳が信号や自動車の音

など重要な情報に注意を向けられるよう、運動制御の部分の脳以外でも担っているのではないのでしょうか」

■脊髄と学習の実験が本格始動

そこで、この仮説に基づき実験を開始した。まず、脊髄を損傷させ脳とのつながりを遮断したマウスの上体を固定し、後ろ足は自由に動かせる状態にした。Aにはランダムに電気刺激を与え、Bには足が大きく下がったときだけ電気刺激を与えた。(図1)



【図1】脊髄損傷のマウスの後ろ足に電気刺激を与えたときの反応の違い

10分ほど実験を続けると、大きく足を下げたときだけ電気刺激を与えられたBのマウスは、電気刺激を避けるように足を上げた状態を保つようになった。一方、ランダムに刺激を与えたAのマウスには同様の行動は見られなかった。

さらに、この学習が記憶されるかどうかを調べるため、24時間後に電気刺激の条件を入れ替えて実験すると、それぞれのマウスは前日の経験に基づいて後ろ足の位置を調整した。「脊髄を損傷して脳からの指令が断たれた状態でも、マウスは刺激を避ける動きを学習しました。しかも、その記憶は1日たっても残っていたのです」

■脊髄の背側で学習、腹側で記憶——困難を経て得た新たな発見

続いて、このメカニズムの解明に取り組んだ。「脳を調べるときと同じように、電極を使って脊髄の電位的変化を調べるのですが、従来の硬い電極では運動しているマウスの脊髄の計測には向きません」。だが、運のよいことに、このときラボを置いていたIMECという研究機関では、実験にうってつけの薄く柔軟性の高い電極を作製していたのだ。この電極を使って、脊髄のニューロンの活動を記録しようと試みた。

ところが、麻酔方法、出血、測定機器からの電気ノイズなどで失敗が続いた。2019年から始めた研究だったが、新型コロナウイルス感染症の流行もあって遅々として進まなかった。

ここで、研究室を主宰する立場ならではの悩みに直面した。実験というものはもちろん自分一人が進めているわけではなく、何

人もチームメンバーが携わっている。前例もなく成果の見えない研究を、若手研究者にいつまでも続けさせてよいのか。

「自分一人なら失敗続きでもめげずに続けられればよいのですが、研究室を持つと若手のキャリアや学位についても責任が出てきます。チーム運営の厳しさを痛感しました」。悩みながらも研究を続けられたのは、運動している動物の脊髄の電位的変化を計測できたらきっと大きな発見があると考えていたからだという。実験方法が安定し、10回やれば5、6回はデータを記録できるようになったのは2021年だった。

脊髄には、背中側と腹側でそれぞれ異なるタイプのニューロンが多々ある。足の動きに伴う電位的変化をそれぞれ計測した結果、最初の実験で足を上げた状態を保った、すなわち「学習した」マウスでは、背中側のニューロンに活動が見られた。ところが、24時間後に学習した行動を再び示す際には、学習に必要なだった背中側のニューロンはもはや必要ではなく、代わって腹側のニューロンが学習した行動を思い出すために必要となっていた。「脊髄の背中側のニューロンは学習を受け持ち、腹側のニューロンは学習したことを記憶し思い出させます。脊髄は役割を高度に分業しているのです」

■理研で広げたい研究の幅

この成果がまとまったのは2023年。翌年4月の科学雑誌『Science』に掲載された。しかし、その頃に転機が訪れる。研究室を立ち上げた頃から、いずれは別の場所で新たな挑戦をすることになると考えていた。それは、欧州各国で見られるように移民政策が厳格化し、長期的なパストを得るには、オランダ語の習得も求められていたからだ。「その頃、米国の学会で理研の研究者と出会い、理研の公募を知りました」。広い分野で世界一流の研究者がいる環境が魅力的に思えた。

採用が決まり2024年春に理研に移った。実際に研究を始めて改めて実感したのは、研究の規模、分野の幅、そして一つ一つの研究を深く掘り下げていける環境の豊かさだった。竹岡 チームディレクターが所属する脳神経科学研究センターには、「嫌悪」の経験がどのように脳の中で変換され行動や記憶形成を導くかや、行動するときに脳回路はどのように作用しているのかなどを研究し、脳科学の先端に行く世界的権威が集う。

「ベルギーの研究センターは研究室主宰者が6人の小さな組織で、全員がマウスで研究していました。理研は、モデル動物のバリエーションや実験のアプローチが多様で、点と点をつなげる要素がたくさんあります」。理研で新たな研究環境を得た今、自身の研究の核である脊髄への興味は大切にしつつ、さらに研究の幅を広げたいと考えている。例えば、脊髄の学習と脳の学習がどう統合されているのかなどだ。

「海外での研究生生活を通して、さまざまな分野の研究者と話をし、興味を広げることの大切さを実感してきました。優秀な人たちに囲まれ、いろいろなことを吸収できる理研という環境に、大変満足しています」

脊髄損傷患者の治療への応用も目標の一つだ。「今の私の研究は基礎的ですが、いずれは患者さんに役立つ研究につなげていくため、臨床の医師との連携を考えたいです」と、基礎研究と臨床応用との橋渡しも目指している。



ひらしま けい や
平島 敬也

数理創造研究センター
数理基礎部門 基礎科学特別研究員

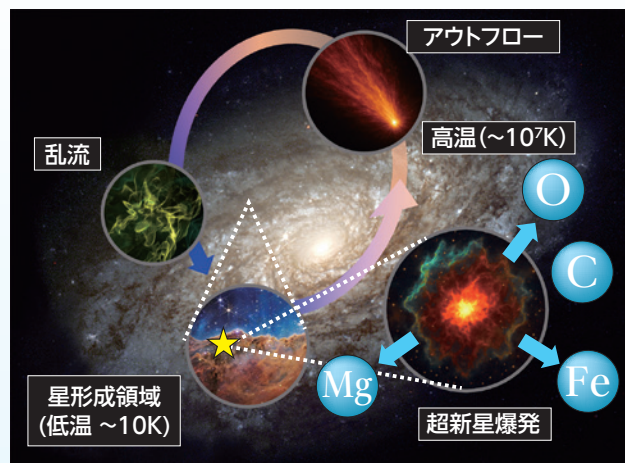
AIとスパコンで迫る天の川銀河の進化

さまざまなものが複雑に絡み合った私たちの世界では、どの現象においても過去を知り、未来を予測することは容易ではない。その難題を解決しようと、平島 敬也 基礎科学特別研究員は、スーパーコンピュータ「富岳」とAIを融合した世界最高レベルの能力を誇るシミュレーションコード「ASURA-FDPS-ML」を開発した。最初の実践例として取り組んだテーマは宇宙。約3,000億個の星一つ一つまで分解できるほどの高解像度で、天の川銀河の進化の一端を再現することに成功し、世界の注目を集めた。汎用性にも優れ、幅広い分野に利活用されることが期待されている。

■複雑な計算の高速化を実現する「サロゲート・モデル」

銀河は、太陽のような「星」、星のもととなる「ガス」、正体は謎だが存在が信じられている「ダークマター（暗黒物質）」という、主にこの三つの要素で構成されている。これらの成分が相互作用しながら、銀河の形成や進化は進んでいく。そこに影響を与えるものの一つが、質量の大きな星の一生が終わるときに起きる「超新星爆発」だ。膨大なエネルギーを放出することで、周囲のガスを加熱・かく乱すると同時に、酸素(O)や炭素(C)、鉄(Fe)、マグネシウム(Mg)といった天体や生命の起源に関わるさまざまな元素を放出し、銀河全体に蓄積させていく(図1)。

銀河の進化を知る上でとりわけ重要なのは、超新星爆発の衝撃波によるガスの膨張の複雑なプロセスの再現だ。これまで、スーパーコンピュータを用いた大規模計算により、銀河内の星の軌道やガスの構造進化を追跡するシミュレーションが行われてきた。しかし、超新星爆発の規模は100光年程度なのに対し、天の川銀河の直径は約10万光年とスケールが大きく異なる。しかも場所によってガスや物質の密度・温度の違いが極めて大きい銀河空間で超新星爆発を一つ一つ再現するとなると、計算量が膨大になるため最新のスーパーコンピュータを用いたとしても



【図1】超新星爆発による銀河内でのガスの循環
超新星爆発によって酸素(O)や炭素(C)、鉄(Fe)、マグネシウム(Mg)といった天体や生命の起源に関わる元素が放出される。Kは絶対温度の単位のケルビン。
背景画像は©The Hubble Heritage Team(AURA/STScI/NASA)、星形成領域の画像は©NASA、ESA、CSA、and STScI

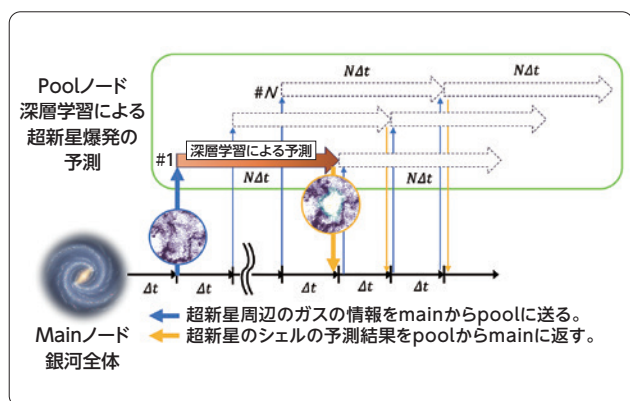
従来の手法でのシミュレーションは現実的に困難だった。

この課題を解決するために平島 基礎科学特別研究員が活用したのは「サロゲート・モデル」というAIを用いた高速化の手法

だ。サロゲートには代理という意味があり、天文分野にこの手法を持ち込んだのは初の試みだった。

銀河が形成されていく過程をシミュレーションしていくと、実際の宇宙と同様に多数の超新星爆発が起きる。あまりにも膨大な計算処理をどのように効率的に行うか。今回用いた方法では、このうちガス的高密度領域で起きた超新星爆発のみを検出した後、AIを担当する計算ノード*に送信し、衝撃波やガスがどのように広がっていくかなどを予測する。その予測結果がシミュレーション全体を担当する計算ノードに返送されていく(図2)。このAIモデルを銀河形成シミュレーションに組み込むことで、高速かつ精度の高い予測によって計算効率を改善し、従来の最大20倍程度の高速化を実現した。

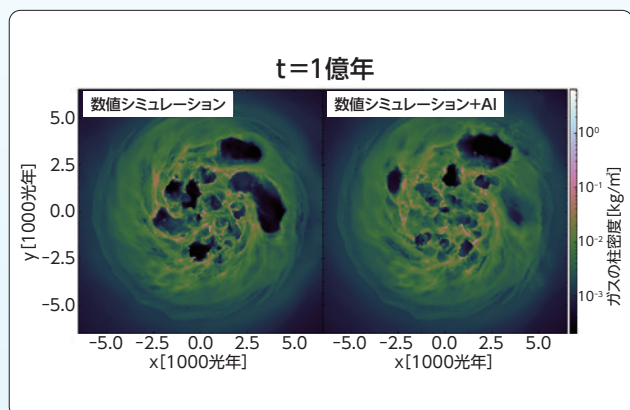
*ノード:「結び目」を意味する単語で、システムを構成するコンピュータの管理単位を指す。「富岳」だと約16万個の計算ノードがある。



【図2】AIを統合した新しいシミュレーションコードのフレームワーク
銀河の進化を計算するMainノードから、ガスの高密度領域で起きた超新星爆発現象のみを別のPoolノードに送信。処理後にMainノードに戻る。画像は©NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech)

■新手法で星一つ一つを再現

このシミュレーションコードの妥当性を検証するため、天の川銀河に対して銀河としては大きさと質量が小さい「矮小銀河」のモデルを用いて、従来のシミュレーションと、サロゲート・モデルを用いたシミュレーションによる結果を比較した(図3)。サロゲート・モデルを用いた場合でも、超新星爆発の後に残る大規



【図3】サロゲート・モデルを用いた新手法の検証
開発したシミュレーションコードによる矮小銀河の姿(右)。渦の様子やバブル(黒い部分)などで従来のシミュレーション(左)と同様の結果を導き、確からしさを証明した。(©Keiya Hirashima)

模なバブル構造やガスの流れなどが従来手法の結果とほぼ合致したほか、従来8カ月程度かかっていた銀河進化の計算を約2カ月で完了し、サロゲート・モデルが高速化と物理的に妥当な計算を両立できることを示した。

次に、太陽系が存在する天の川銀河のように、数千億個の天体が存在する銀河の進化を再現するため、計算規模を拡大し、シミュレーションを行うためのさらなるアップデートにも成功した。具体的にはシミュレーションコード「ASURA-FDPS-ML」に「富岳」向けの最適化を施し、「富岳」全系を用いて実行することで、従来の100倍以上も高解像度化し、星一つ一つの振る舞いまで浮き彫りにしながら追跡する。

さらに、このアップデートでは、GPU(画像処理装置)を搭載した東京大学情報基盤センターと筑波大学計算科学研究センターが共同運営するスパコン「Miyabi(みやび)」を用いたシミュレーションでも高い効率化を示した。「富岳」向けの最適化にとどまらず、他の計算システムにも成果を広げた。

今後は、このシミュレーションコード「ASURA-FDPS-ML」を用いて欧州宇宙機関(ESA)が打ち上げた天文観測衛星「Gaia(ガイア)」などの観測データと比較しながら、天の川銀河で起きているさまざまな元素の成り立ちやその後の動きなどを再現し、どのようにして星や太陽系などが形づくられてきたのかを化学的かつ力学的な視点で解明することを目指している。「生命のもととなる元素が、銀河のどこで、いつ生成され、運ばれてきたのか。人類が長年抱き続けてきた根源的な問いに答えを出すのが夢です」

■材料開発、気候変動など応用範囲は無限に

平島 基礎科学特別研究員は、米国と日本を行き来する新進気鋭の若手研究者だ。大学3年生のときに受けたコンピュータサイエンスの講義で、鉄が磁石になるプロセスをシミュレーションする課題が与えられた。折しも「富岳」が近く稼働する見通しとなっていた。大学院への進学を考えていたところに、天文学の分野でも大規模シミュレーションが活発に実施されていると知り、銀河に焦点を当てた研究をスタートさせた。

今回、開発したシミュレーションコードは世界のライバルの耳目を集めている。同じように時間と空間のスケールが大きくて多数の要素が関係する気候変動や核融合プラズマ、さらに品質の高い材料開発、航空機などが超音速で飛ぶことで生じる衝撃波の解析などにも応用できる可能性があるからだ。

時々刻々と進化しているAIに、一人一人の研究者はどのように向き合っていくのか。「AIはパソコン1台あれば簡単に使え、科学を始めるためのハードルを下げたのは確かです。研究活動においても非常に便利なツールとなりました。人々がAIを使うようになった世界では、作業コストが著しく減るので、研究者自身の知識や経験の多様性が相対的に重要になってくると思います」

AIを科学研究に組み込む「AI for Science」という潮流のなかで、AIと科学者との新たな関係が科学の進化を加速させている。科学の可能性を切り拓く、研究者たちの挑戦から目が離せない。



いずみ まさ のり
泉 正範

環境資源科学研究センター
分子生命制御研究チーム 上級研究員

植物がどのように 葉緑体をリサイクルするかを探る

稲穂が緑から黄金色になるとき、植物の中で何が起きているのだろうか。実は、光合成を担う葉緑体が役目を終えて分解されると、その成分は種子などをつくる栄養として再利用される。この栄養リサイクルの仕組みをうまく利用すれば、与える肥料を減らしても作物が十分に育つ農業が実現するかもしれない。多くの研究者がその仕組みの解明に挑む中、泉 正範 上級研究員らが発見した現象が研究を大きく前進させた。

■最大の栄養は葉緑体にあり！

植物は、自分の細胞の中身を分解して成分を再利用している。私たちが口にする穀物の多くは、このリサイクルの最後に栄養が集められた種子だ。

「光合成という大切な役割を担う葉緑体には、植物の栄養成分の多くが集まっています。重要な栄養成分の一つが窒素です。イネ科だと、葉の中の窒素の7～8割は葉緑体にあることが知られています。私が注目しているのは、この葉緑体の分解とリサイクルです」と泉 上級研究員。

植物が窒素をどのようにリサイクルしているのかが分かれば、その仕組みを利用して、少ない肥料でも十分に育つ作物をつくれるかもしれない。化学肥料に含まれる大量の窒素やリンが環境に流出して悪影響を与える問題がたびたび指摘されている。そのため、農業は「肥料を与えてたくさん収穫する」から「環境負荷を抑えながら植物自身の力を利用して十分な収量を確保する」へと、少しずつ軸足を移しつつある。泉 上級研究員が追いかけているのは、その転換を足元で支える基礎的な知見だ。

■鍵は植物の「オートファジー」

葉緑体などの分解を担うのが、「オートファジー（自食作用）」

と呼ばれる仕組みだ。細胞が自分の中身を自分で分解し、再び材料として使う機能で、ヒトを含む多くの生き物に備わっている。

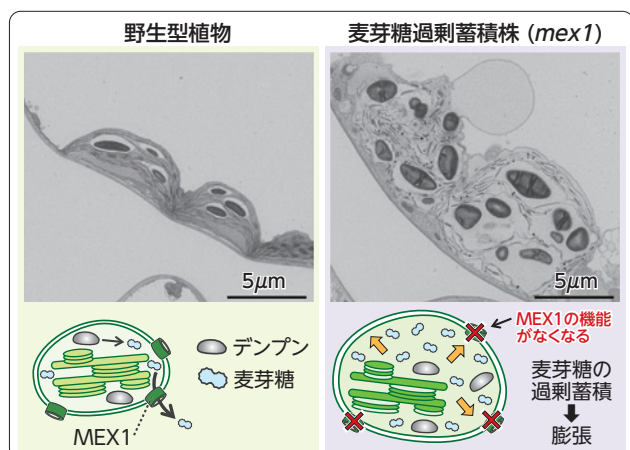
植物が強い日差しに長くさらされると、光を受け止める葉緑体そのものが傷つく。傷ついた葉緑体はオートファジーによって分解される。そこで泉 上級研究員は、強い光を当てることで葉緑体のオートファジーの仕組みを調べようと考えた。

ところが、研究はなかなか先に進まなかった。というのも、強い光を当てると、細胞内では葉緑体のオートファジー以外にも、損傷したタンパク質の修復など、さまざまな防衛反応が一斉に動き出してしまうからだ。「何が起きて葉緑体の分解が進むのかを絞り込むのが難しかったのです」

■分解の様子を生きた細胞で観察

そこで発想を変え、「光を使わずに葉緑体の分解を起こせないか」と考えた。手がかりはスイスの研究グループによる10年以上前の報告にあった。

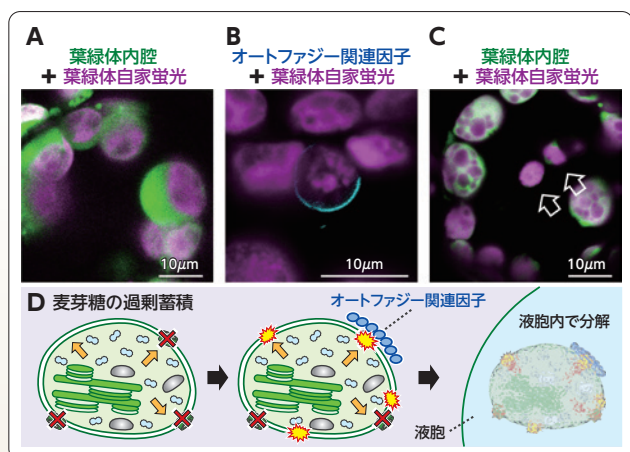
葉緑体は昼に光合成でデンプンをつくり、夜はそれを分解して麦芽糖（マルトース）にして細胞質へ送り出す。この運び出しを担うMEX1（メックスワン）というタンパク質の機能が失われると、葉緑体の中に麦芽糖がたまり、異常に膨れ上がる（図1）。そのとき、葉緑体の分解が起きているらしい、と報告されていたのだ。



【図1】正常な葉緑体と麦芽糖が蓄積して膨張した葉緑体（電子顕微鏡画像）
左：通常のシロイヌナズナ（野生型）では、麦芽糖が葉緑体の外へ運び出され、葉緑体は正常な形を保っている。
右：麦芽糖を運ぶMEX1が働かなくなった「麦芽糖過剰蓄積株 (*mex1*)」では、葉緑体が膨張している。

葉緑体の分解は本当に起きているのか。泉 上級研究員は、独自の顕微鏡技術を駆使し、モデル植物のシロイヌナズナの葉を生きたまま観察した。そして葉緑体が分解される一連の過程を捉えることに成功した。

「詳しく観察したところ、膨れた葉緑体の表面にオートファジーに関わる因子が集まり、その葉緑体が液胞へと運ばれ、液胞内で葉緑体が分解される様子を確認できました（図2）」。

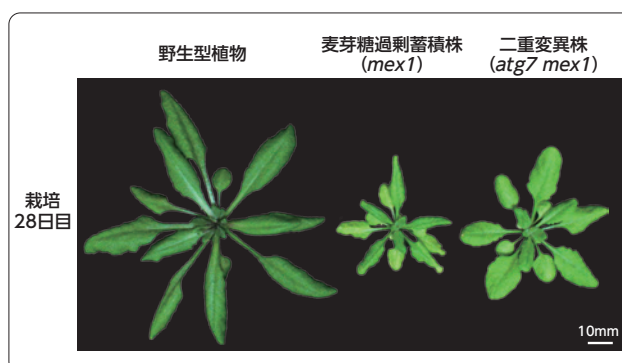


【図2】麦芽糖の過剰蓄積が引き起こす葉緑体分解現象
A～Cは、葉緑体の内腔（緑色）と葉緑体内の膜（ピンク色）、分解に必要な不要物に結合する「オートファジー関連因子」（青色）を色で識別できるようにし、レーザー走査型共焦点顕微鏡で生きたまま観察した画像。膨張した葉緑体が液胞内部に運ばれ、分解される様子を確認できた（Cの矢印で示したものが分解された葉緑体）。Dはその図解。

■葉緑体を壊しすぎている？

シロイヌナズナでの実験によると、麦芽糖がたまってオートファジーが起こっている麦芽糖過剰蓄積株（図3・中央）は、野生型に比べて生育が悪い。ここまでは、おおむね過去の報告通りだった。驚いたのはその先だ。葉緑体内に麦芽糖が過剰に蓄積し、なおかつオートファジーも機能しない二重変異のシロイヌ

ズナ（図3・右端）をつくって育てたところ、二重変異株の方が麦芽糖過剰蓄積株より生育が良かったのだ。



【図3】成長障害がオートファジー機能欠損により軽減？
葉緑体内に麦芽糖が過剰に蓄積したシロイヌナズナ（麦芽糖過剰蓄積株 *mex1*）は、通常（野生型植物）に比べて生育が悪い。この麦芽糖過剰蓄積株のオートファジー機能を欠損させたところ、生育が良くなった（二重変異株 *atg7 mex1*）。図は植物体写真をトリミングして作成。

「オートファジーは、本来、細胞内を正常に保つための機能です。それなのに今回発見した条件では、オートファジーが機能しない方がよく育つのです」

意外な結果だった。泉 上級研究員は、葉緑体の異常が引き金となり分解を促す指令が出過ぎている可能性を考えている。壊さなくてもよい葉緑体まで壊してしまい、成長の足を引っ張っているのではないだろうか。

この想定外の現象の発見は、研究に立ちはだかっていた壁を乗り越えるきっかけとなりそうだ。麦芽糖に由来する葉緑体分解を強く促す指令と強い光に由来する指令、両者に共通して関わる遺伝子を探せば、葉緑体の分解に直接関わる遺伝子を絞り込める。遺伝子に分かれれば、葉緑体の分解のコントロールが可能になるかもしれない。

■想定通りにいかないから、面白い

泉 上級研究員は「想定通りにいかないからこそ、研究は面白い」と言う。さらに「この栄養リサイクルの機能をオートファジーだけで説明できるかどうか分からないのです」と言葉をつなぐ。今は遺伝子を調べるだけでなく、植物のシグナル伝達に関わる物質（植物ホルモン）の影響を調べているところだという。そこにも予想外の結果が期待できそうだ。

「植物を研究していると、その仕組みの複雑さに驚きます。葉緑体のすぐ隣に液胞という壊す場所があるので、簡単に運び込むことができるようにも思えるのですが、実際には、複数の仕組みを経由しているようです。またある条件では葉緑体を少しずつぎり取って運ぶ経路も働きます」。葉緑体を一つ壊すために、何段階もの手順を踏んでいる。「植物は複雑な仕組みを上手に使って、生きるすべをつくり上げてきました。その仕組みを直接解き明かせることも、研究の大きな魅力の一つです」

植物がいつ、どれだけ葉緑体を分解するのか。その仕組みをつかめれば、分解のしすぎを抑えることも、必要に応じて葉緑体から栄養を回収させることも可能になるかもしれない。ストレスに強く、少ない肥料でよく育つ作物へ。その道を進む大きな一歩が今、踏み出されたのだ。

研究者からキャリアチェンジ アウトリーチに全力投球

安全・地区統括本部 和光事業部地区統括・調整課／
広報部 主事

かわのひろゆき
河野 弘幸さん

最先端のサイエンスを、親しみやすいかたちで人々に伝えるアウトリーチ活動。その活動に集中するため、河野 弘幸 主事は2023年春、研究職から事務職に身を転じた。研究所内外の体験授業などで講師を務め、深い知識と科学を楽しむ気持ちを携え、全力投球でアウトリーチ活動に挑んでいる。

「好き」を追いかけて、研究者に

陸上競技で実業団入りを夢見た少年時代を経て、高校で現在の「学士(工学)」に当たる「工学士」という響きにひかれて理系に進んだ。学生時代はレーザー分析化学を学び、そのための光源である高出力多波長超短パルスレーザーの開発を専門にした。

装置開発も手がけた。「世界唯一の装置をつくれば、世界唯一のデータが出る」。科学の面白さに胸を躍らせた。中学校の体育教師だった父の背を見て育ち、大学教員の道を志すようになった。

博士課程修了後、日本学術振興会の海外特別研究員としてドイツ・ハノーバー大学に赴任したことを機に、「研究所の研究者」が目標になった。「好きなことしかやってこなかったんです」

世代を超えて議論、充実した23年間

帰国後、理研に基礎科学特別研究員として着任してからは、若手の指導にも携わった。理研は連携大学院制度が充実し、研究所内で学ぶ学生も少なくない。「自由に研究させてもらい、世代を超えた議論もでき、研究者として過ごした23年間はとても充実していました」

だが「自分の研究は世の役に立っているだろうか」と自問したこともあった。そのような時でも、訪問客への研究に関する説明や所外での講演活動などでは確かな手応えが感じられた。

輝く瞳に背中を押されて

50代、何度目かの転機がやってきた。研究職から事務職への



キャリアチェンジの話が持ち上がったのだ。そんな折、2022年7月に高校生を対象に理研が実施した「RIKEN和光サイエンス合宿」で高校生に指導する機会を得た。

テーマは「身近にいる微生物たちが棲む超高速の世界」。「微生物ってすごいんです。単細胞で生命を維持し、多細胞生物の器官のような機能も備えています。その驚きを伝えたかった」と当時を振り返る。

実験では微生物のべん毛が1秒間に約50回のビートを刻む様子をレーザー顕微鏡で観察した。その様子を目の当たりにした瞬間、高校生は目を輝かせ、歓声を上げた。「こうやって自然科学の道に進む子をどんどん増やすことができれば」。そんな思いが胸にこみ上げ、河野 主事は翌年春、キャリアチェンジに踏み切った。

転身から約3年半、「事務職はチームプレー。仲間に支えてもらい、理研への愛着が一層深まりました」。2025年度に文部科学省が創設した科学技術教育アドバイザーにも任命され、今年度もその任に就いている。「アウトリーチ活動を通して、若者たちに科学者の種をまいているんです。世の役に立っているなあって実感できますね。究極的には、全員を理研ファンにしたいんです」



理研 和光地区(埼玉県和光市)での団体見学対応。近隣小学校の児童たちを前に、第4号サイクロトロン(後ろの巨大な遺構)について解説する河野 主事

若さとロジカルな発想で 指定難病「IgA腎症」に向き合う

生命医科学研究センター 共生微生物叢研究チーム
大学院生リサーチ・アソシエイト

はま ぐち しょう
濱口 翔さん

腎臓に炎症が起き、未治療の場合、約4割が末期腎不全に至る指定難病「IgA腎症」は、患者数が多いとされながら原因が分かっておらず、扁桃の切除やステロイド投与などの対症療法しかないのが現状だ。大学院博士（後期）課程の学生を育成する理研の大学院生リサーチ・アソシエイト（JRA: Junior Research Associate）制度において採用された濱口 翔 JRAは、臨床医として診療を続ける傍ら、IgA腎症の原因を究明するための研究を進めている。

疾患を深く理解するため理研へ

「僕、ロジカルにものごとを考えた人なんです」

進路について考えていた高校3年の秋、「組織の中で競争するビジネスマンより、知識と技術で患者を救う医者が合っている」と両親に勧められ順天堂大学に入った。卒業後の初期臨床研修で腎臓内科を選んだのは「患者さんのデータを見て、体液量と電解質の数値を管理するという論理的な世界と、透析という専門技術があるところに魅力を感じたから」。IgA腎症患者の臨床に立ち会いうち、ある思いが芽生える。「臨床医の仕事は好きでした。珍しい症例に遭遇すると学会で発表もしました。ただ、疾患を深く理解するには基礎医学の知識が不可欠でした。そこで基礎研究にも取り組みたいと思いました」

IgA腎症は、口腔内（唾液）に存在する特定細菌に反応してつくられたIgA抗体が腎臓に沈着し、炎症を起こすという見立てがある。口腔内には数百種の細菌が存在するとされており、唾液に含まれる口腔内細菌のDNAを解析することでその種類や数を特定できる。従来の解析法では、そのごく一部しか調べることができなかったが、理研にはDNAを網羅的に解析できるラボがあった。共同研究が始まる2023年、4月に大学院に進学した濱口 JRAは10月に研修生として理研の共生微生物叢研究チームの一



員に加わり、大学院生リサーチ・アソシエイトとして採用された。

教わりながらの共同研究

「DNAの抽出はピペットの使い方から教わりました」。DNA配列の解析はもっと未知の世界だった。「文字列が並ぶ解析用マシンの黒い画面に、ラボの皆さんがものすごい勢いでコマンドを打ち込んでいるのを見たときは『やばいところに来たな』と思いました。解析技術について、チーム全員で熱心に教えてくださったので、必死で学びました」

共同研究の結果、口腔内でどの細菌に対するIgA抗体が腎臓に沈着しているかは判明した。しかし、この細菌は健常者の口腔内にもほぼ同量存在しているものだった。なぜIgA腎症患者だけに抗体がつくられるのか。「困っていたところ、須田 亘チームディレクターから『疾病研究で前例はないが、もっと深くまで調べる方法があるよ』と提案されました。それが、口腔内に存在する小さなDNAの断片『プラスミド』などを解析する世界最高レベルの口腔メタゲノム解析でした」

根治療法の実現を目指して

解析の結果、IgA腎症患者では特定の細菌属を宿主とするプラスミドが増えていることがわかった。「増えたプラスミドが細菌の形質を変化させることで、その細菌に対するIgA抗体の産生が進み、IgA腎症が発症する——という仮説を立てて、現在、検証しています」

この研究によって、どの口腔内細菌とタンパク質がIgA腎症に関与するかが分かるという。「それを標的にすれば、発症を根本から止めることができる可能性があります」。濱口 JRAの研究が、対症療法を超えた「IgA腎症の根治療法」への扉を開こうとしている。

大学院生リサーチ・アソシエイト（JRA: Junior Research Associate）

- 対象は、日本の大学院博士（後期）課程に在籍する柔軟な発想に富む若手研究人材
- 研究分野は、数理学、物理学、化学、工学、生物学または医科学の科学技術分野で、理研において研究指導が可能な研究
- 給与が支払われる他、国内外での活躍に向けたサポートも充実

詳細は
こちら



検索 理研 JRA

原酒

馬好きのモンゴル旅行記

経営企画部 研究企画課 主査

鈴木花
(スズキ・ハナ)

馬

に乗って草原を駆け抜けた！

そのために今年7月中旬にモンゴルへ1週間行ってきた。成田からウランバートルまで飛行機で5時間。そこからさらに5時間車で移動して、滞在するゲル(移動式住居)に向かう。草原に轍(あと)はあるものの、舗装されていない道はでこぼこでアトラクションに乗っているような移動時間だった。ある日本車が人気らしく、砂まみれで草原を走る姿を時折見かけるのだが、まさかこんな場所を走るとは思わず工場で生まれたであろうことを思うと、健気さとおかしみを感じる。

草原に吹く風はハーブの香りがする。湿度が低く爽やかな空気が満ちて、動物たちが水辺に集まっている。21時を過ぎててもほの明るく、夕涼みできる時間が長い。

食べ物もいい。この土地の気候や生活に合った食文化であることがよく分かる。冷える朝夕も気温の高い日中も「スーテーツァイ」(さっぱりした温かい乳の遠くからお茶の香りが漂うような飲み物で、ほんの



草原で休憩している様子。どことなく馬も人も同じようにゆったり過ごしているように見える



日本の乗馬クラブで幸せに馬と戯れる筆者。馬が大好き。羽二重餅のような鼻で親しげに頬を湿らせてくるときのうれしさといったら!!

の何にも代え難い。駆けているときは風になつたような心地がする。

お互いが慣れてきたところで、昼食を持って遠出をした。草原を駆ける楽しさを味わったのはもちろん、この地では生活が馬ともにあることを実感した一日になった。昼になり、草原でシートを敷いて食事を取り、のんびり昼寝をしていると、馬も人間も同じように自然の中で生きている存在として境目がなくなるような不思議な気持ちになる。広大すぎる草原の中で、馬も人間も思い思いに寄り添って休んだり動いたりして過ごしていた。

一方で、遠くに見える丘と平原をいくつも越えてきた道のりを振り返り、人間だけで来ることができなかったなと思うと、馬と自分とはっきりと異なる存在であるとも感じる。半野生の彼らに触れることはできるけど、決して心が近づき過ぎることはない。それゆえに「移動手段」としてそばにいてもうることができるのかもしれない。

帰国して最初の出勤で思ったことは「馬で移動させてほしい……」。運動や競技の相棒として馬に乗るときに思ったことのない感覚だった。爽やかな草原にたたずむモンゴルの馬を思い出しながら、蒸し暑い日本で自転車をこぐ。

り塩味がある)を飲む。食事に含まれる肉の油が温かい飲み物ではどける。馬を貸してくださった遊牧民の方がつくってくれた「ウルム」も忘れ難い。乳脂肪がクリームの層となって固まった食べ物で、揚げパンにつけていただいた。とにかく幸せな味がしてスーテーツァイと一緒に口に含むと乾燥した空気にさらされていた喉が癒される。

さて、滞在の目的である乗馬はパートナの馬と数日かけて「合わせて」いった。私は日本でも乗馬を楽しんでいるが、普段乗っている馬と比べると小柄でずんべりむくりとしている。乗り方も馬具も異なるため、新鮮なことだらけだ。どんな合図だとうまくコミュニケーションが取れるかな、と探りながら乗るのは面白い。性格や他の馬との関係性も少しずつ見えてくる。息が合ってきて馬が応えてくれる瞬間は他

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 RIKEN」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。お問い合わせ先 連携促進部 寄附金担当

kifu-info@ml.riken.jpwww.riken.jp/support/