

特集「魔法数」の謎を解く」より

02 研究最前線

脳の想像力とカオスの縁

06 研究最前線

植物×微生物で農業を変える

10 特集

「魔法数」の謎を解く

13 FACE

ヒトの冬眠に挑む研究者

14 SPOT NEWS

共鳴と光の回折に
共通する仕組みを発見

15 TOPICS

- ・株式会社理研数理を設立
- ・羽田みらいサイエンスギャラリーがオープン
- ・埼玉りそな CSR 私募債
～理研SDGs応援ファンド～より
寄附金を受贈

16 原酒

球蹴りの効能

豊泉太郎チームリーダー（TL）率いる

脳神経科学研究センター 数理脳科学研究チームでは、

数値モデルの解析を通して、脳の情報処理の仕組みや神経ネットワークが環境に対して適応・学習するメカニズムの研究を行っている。

最近発表した研究のキーワードは「主体感」や「カオスの縁」「雪崩現象」だ。

脳の想像力とカオスの縁

■ 主体感を測る心理実験

まず、豊泉TLらが2019年に発表した「主体感」の研究から紹介しよう。

主体感とは何か？「自らの意志で行動して、その行動をコントロールすることで周囲に意図どおりの影響を与えている、という感覚のことです。自分が意図した行動により予測したとおりの帰結になると主体感は強くなり、逆に他人の指示による行動や予測外の帰結のときは主体感が弱くなります」と豊泉TLは説明する。

「学習や仕事で主体感が強ければ、やる気生まれ効率も高くなります。一方、統合失調症などの精神疾患では、自分が意図したはずの行動に主体感を感じなかったり、逆に自分が行っていないことに主体感を感じてしまったりと、主体感に異常が見られることもあります」

疾患がなくても、何か失敗をしたこと

に主体感を強く感じ過ぎると、精神的に不安定になってしまうことがある。何らかの方法で主体感の強弱をコントロールできれば、仕事や学習の効率を高めたり、精神疾患の治療に役立てたりすることができるはずだ。それにはまず、主体感の強弱を測る客観的な指標が必要だ。

「主体感をどれくらい感じているか、設定された質問への回答という形で測る方法が考えられますが、設問の仕方によって答えも変わります。主体感を直接問うのではなく、時間を問うことで得られる主体感の指標が提案されたのは2002年、21世紀に入ってからのことです」

それは次のような実験だ。被験者がボタンを押すと0.25秒後に音が鳴る。このとき被験者は3秒程度で一周するタイマーの針を見ながら、ボタンを押した時刻と音が鳴った時刻を答えるということは何度も繰り返す。

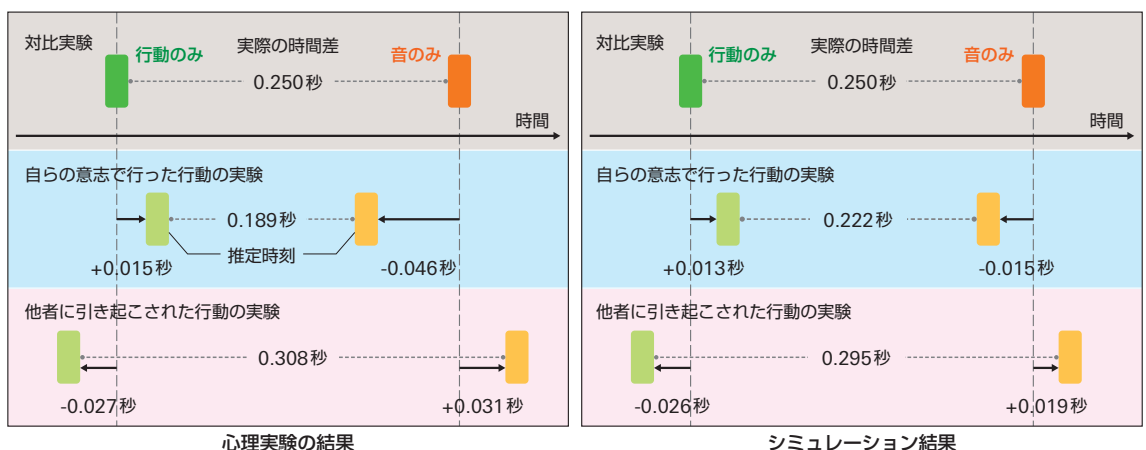
「タイマーを見ているので、正確な時刻を答えられるはずだ、と思うかもしれませんがね。しかしこの実験では0.01秒の単位で時刻を答えなければいけません。それはとても難しいことなので、どうしても推定が働きます」

実験の結果、自らの意志でボタンを押す、すなわち主体感が強い場合には押してから音が鳴るまでの時間差を0.25秒より短く感じる事が分かった。一方、脳に磁気刺激を与えて意志に関係なく指を動かしボタンを押させた場合、すなわち主体感が弱い状況では、逆に時間差を0.25秒より長く感じるという結果になった（図1左）。「この時間差の長短が、主体感の強弱の指標になると提案されたのです」

しかしこの時間差は、主体感以外の要因からも影響を受けることが2013年に報告された。例えば、雑音を流して音

図1 主体感に関わる心理実験とシミュレーション

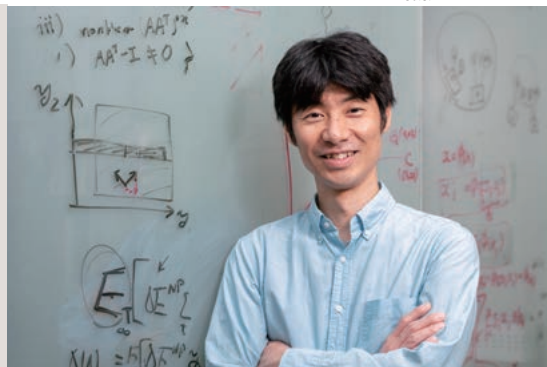
Haggardらは、ボタンを押した後に音が鳴るそれぞれの時刻を被験者がタイマーを見ながら報告する実験を行った。すると、自らの意志でボタンを押す主体感が強い状況では両者の時間差は短く、主体感が弱い状況では逆に時間差を長く感じるという結果となった（左）。豊泉TLらは、ベイズ理論に基づく最適な時間推定モデルのシミュレーションを行い、心理実験と同様の結果を得た（右）。



豊泉太郎 (とよいずみ・たろう)

脳神経科学研究センター
数理脳科学研究チーム
チームリーダー

1978年、東京都生まれ。東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻博士課程修了。博士(科学)。米国コロンビア大学博士研究員などを経て、2010年理研脳科学総合研究センター研究員、2011年チームリーダー。2018年より現職。



を聞きづらくすると帰結の感覚が不確かとなる。すると主体感は下がるはずなのに、逆に時間差を短く感じる、という結果になったのだ。「音を聞き取れたかどうか、といった感覚の確かさも時間差に影響を与えるため、時間差だけでは主体感の強弱を測るのが難しいことが分かったのです」

■ ベイズ理論で主体感の

客観的な指標を導き出した

豊泉TLらは、数学的な手法により主体感を測る客観的な指標を導き出すことを目指した。そのためにまず、ベイズ理論に基づく最適な時間推定モデルをつくって心理実験のシミュレーションを行った。「ベイズ理論とは事前の知識に基づき、ある事象が起きる確率を推定する統計学的手法です」と豊泉TLは説明する。

この心理実験の例でいえば、ボタンを押す行動と音が鳴るといふ帰結に因果関係がある場合には、これくらいの一定の時間差があるものだ、という事前知識に基づき、実験ごとに時刻を推定する。

因果関係があると判定した場合には、ボタンを押すという行動から音が鳴るまでの時間差には一定の規則性があるはず

なので、両者の時刻を個別に推定するよりも、時間差を考慮して一緒に推定する方が合理的だ。一方、因果関係がないと判断した場合には、時間差には規則性がないはずなので、両方の時刻を個別に推定するしかない。

そのような考え方に基づく時間推定モデルによってシミュレーションを行ったところ、主体感が強い状況で時間差を短く感じ、主体感が弱い状況で時間差を長く感じるという心理実験の結果と一致した(図1右)。

では、この時間推定モデルの一連の計算過程の中に、主体感の強弱を測る指標はあるのか。「このモデルでは、因果関係があると判定した場合に、その推定が正しい確率CCE (Confidence in causal estimate) を計算します」

図2がその計算式だ。式の分母には音を聞いたという帰結の感覚の不確かさの項(σ_o)がある。雑音がある状況ではその不確かさが増して σ_o の値が大きくなり、最終的なCCEの計算値は小さくなる。

先述のように、心理実験では主体感が強い状況では時間差を短く感じる。しかし雑音があって主体感が下がる状況でも時間差を短く感じるの、時間差を短く感じただけでは主体感が強いとは限

らなかった。「一方、このCCEは、雑音があって主体感が低下する状況では値が小さくなり、雑音がなく主体感が強くなる状況では値が大きくなります」

豊泉TLらは、主体感の指標となる数式を導き出すことに成功したのだ。

■ 主体感をコントロールする

「ベイズ理論に基づく時間推定モデルで心理実験の結果をうまく説明できるということは、脳内でもベイズ理論と同じような計算方法を使っていることを示唆しています。CCEの計算も脳内で行っているとしたら、その数式の項を操作することで主体感を強めたり弱めたりできるかもしれません」

例えばバーチャルリアリティーを利用した学習システムをつくる場合、帰結を伝える音をはっきりさせて雑音をなくせば、帰結の感覚の不確かさ(σ_o)は小さく、CCEは大きくなって、主体感が強まり学習意欲を高めることができるだろう。

CCEは、統合失調症などで主体感に異常を来す症状の原因解明にも役立つはずだと豊泉TLは言う。「脳活動を高い時間分解能で観察することで、CCEの値と相関する脳活動を特定できれば、その活動が健康な人と統合失調症の患者さんでどう違うかを比較して、主体感に異常が表れる仕組みに迫っていくことができる」と期待しています」

■ カオスの縁で雪崩現象が起きる

次に、豊泉TLらが2020年に発表した、神経ネットワークにおける「カオスの縁」(図3)と「雪崩現象」(図4)の研

分母の三つの不確かさから導かれる値 ($\sigma_{tot}^2 \equiv \sigma_A^2 + \sigma_O^2 + \sigma_{AO}^2$)

$$CCE = \frac{\sigma_{tot}}{2\pi\sigma_A\sigma_O\sigma_{AO}} \hat{p}_{causal}$$

行動感覚の不確かさ
帰結感覚の不確かさ
行動と帰結の相対的な不確かさ
行動と帰結に因果関係がある確率

図2 主体感の指標CCEを導き出す数式

ベイズ理論に基づく最適な時間推定の過程で、因果関係があると判定した場合に、その推定が正しい確率CCEを計算する。CCEは行動と帰結の間に因果関係がある確率だけでなく、感覚情報の確かさに応じてその大小が変わる。

関連情報

- 2020年7月8日プレスリリース
二つの臨界現象をつなぐ
- 2019年9月18日プレスリリース
最適な感覚統合で「主体感」を定量化

究を紹介しよう。

脳は膨大な数の神経細胞がつながり合って巨大な神経ネットワークをつくり情報処理を行っている。1個の神経細胞は多数の神経細胞から信号を受ける。受け取る信号の強さの総和が一定の閾値に達するとその神経細胞も信号を出す活動を起こし、ほかの神経細胞に信号を伝える。

神経細胞同士の結合点はシナプスと呼ばれ、そこでの信号の伝わりやすさをシナプス強度という。シナプス強度に応じて神経ネットワークはさまざまな活動パターンを示す。シナプス強度が、神経ネットワークの情報処理の基盤となっているのだ。

それでは、「カオスの縁」とは何か？カオスとは、一般的には混沌や無秩序を表す。数学では、過去にたどってきた状態の履歴によって未来がたった一つの状態に定まる決定論的な法則に従っているにもかかわらず、過去の履歴がわずかに変わるだけで未来がまったく異なってしまふような、不規則で複雑な状態だ。一方、非カオスは、同じような過去の履歴に対しては常に同じような未来となる規則的な状態。そしてカオスの縁とは、カオスと非カオスの境界で、カオスと非カオスを行ったり来たりできる状態である(図3)。

脳では、少数の神経細胞がまばらに活動する神経ネットワークの状態が実験的に観察されている。この状態がカオスの縁に対応するのではないか、という仮説がある。

豊泉TLらは2011年、数学的に抽象

図3 「カオスの縁」の模式図

神経活動は、非カオスでは規則的(左)、カオスでは不規則(右)な状態となる。カオスの縁は、非カオスとカオスの境界にあり、両者を行き来することができる状態である。

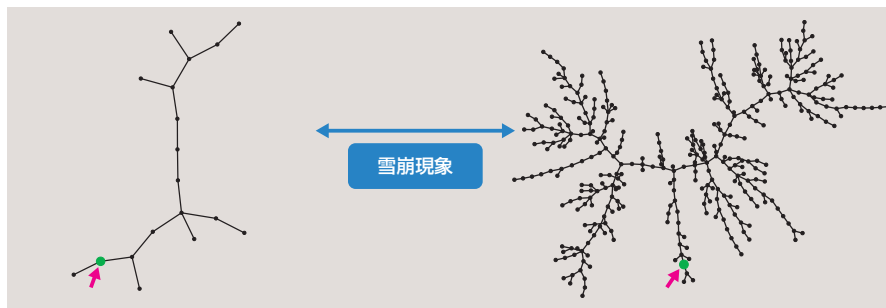
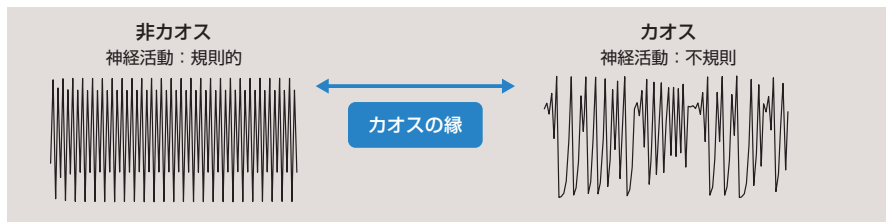


図4 「雪崩現象」の模式図

神経ネットワークにおいて、1カ所の神経細胞(赤矢印)の活動をきっかけに、規模の小さな連鎖活動(左)と大きな連鎖活動(右)が連続的に起きる状態が雪崩現象である。豊泉TLらは、コーシー分布の神経ネットワークモデルのシミュレーションと理論解析を行い、カオスの縁において雪崩現象が起きることを明らかにした。

化した神経ネットワークモデルの理論研究により、カオスの縁の状態において計算効率が高まり、表現できる情報量が増えることを報告した。「しかし実際の脳の神経ネットワークがカオスの縁の状態を安定に保っているかどうかは、まだ分かっていません」

シナプスには、信号が伝わりやすい(強度が強い)ものもあれば、信号が伝わりにくい(強度が弱い)ものもある。どの強度のシナプスがどれくらいの割合で存在するか、というシナプス強度の分布について、従来の神経ネットワークモデルでは数学的に解析しやすいガウス分布(正規分布)を想定していた。ガウス分布では分布の裾野が薄く、飛び抜けて強いシナプスはほとんどない(図5)。

ガウス分布を想定した神経ネットワークでは、少数の神経細胞がまばらに活動する状態は安定に維持できない。ガウス分布では飛び抜けて強いシナプスがほとんどないため、多数の神経細胞が一斉に活動しないと信号を受けた神経細胞は活動せず、神経ネットワークの活動は維持できないのだ。

結局、ガウス分布を想定した神経ネットワークでは、神経細胞がまったく活動しない非カオスの状態か、あるいは多数

の神経細胞が一斉に不規則な活動をするカオスの状態か、どちらか一方が安定となる。「非カオスとカオスの状態は断絶してしまい、両者を行き来するカオスの縁の状態を安定に保つことができません」

近年、脳を計測する技術の進展により、脳のさまざまな領域のシナプス強度を調べることができるようになった。すると、実際のシナプス強度はガウス分布よりも裾野が厚いことが明らかになった。裾野の厚い分布の一種にコーシー分布がある(図5)。

「私たちはコーシー分布を想定した神経ネットワークモデルのシミュレーションを行いました。すると少数の飛び抜けて強いシナプスがあるため、神経細胞がまばらに活動する状態でも神経ネットワークの活動を安定に維持して、カオスの縁の状態を保つことができることが分かりました」

もう一つのキーワード「雪崩現象」とは何か？それは、雪崩や地震のように、典型的な規模を持たず、大小桁違いの規模で生じる現象を指す。脳の神経ネットワークで生じる神経細胞の連鎖活動の規模も、その頻度分布を調べると雪崩と同様の特徴を持つことが実験的に報告

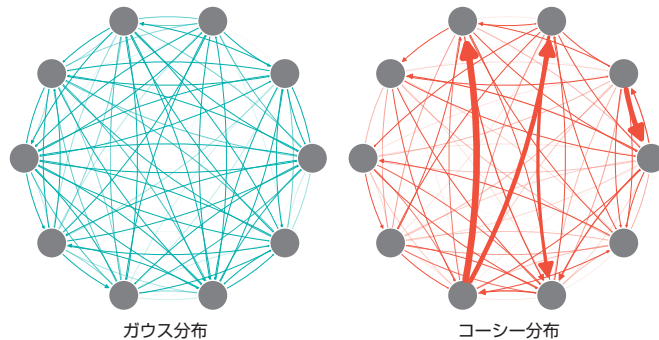
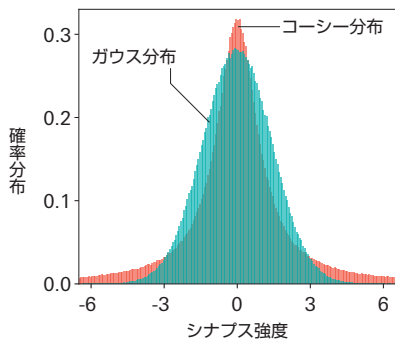


図5 シナプス強度のガウス分布とコーシー分布

左側のグラフはシナプス強度の分布。ガウス分布（緑）ではシナプス強度の分布の裾野が薄いのに対し、コーシー分布（赤）は裾野が厚い。

右側の二つは神経ネットワークの模式図で、丸が神経細胞、矢印の太さがシナプス強度を示す。

されている（図4）。

しかしガウス分布の神経ネットワークモデルでは、カオスの縁も雪崩現象も再現できない。また、カオスの縁と雪崩現象の関係も分かっていなかった。「私たちはコーシー分布の神経ネットワークモデルを解析し、カオスの縁において雪崩現象が起きることを示しました」

平均的に1個の神経細胞の活動が1個より多くのほかの神経細胞の活動を引き起こす場合には連鎖活動の規模が大きくなり、逆に、1個未満の神経細胞の活動を引き起こす場合には連鎖活動の規模が小さくなる。カオスの縁はちょうどその中間で、平均的に1個の神経細胞の活動が、一つの飛び抜けて強いシナプスを介して、ほかの1個の神経細胞の活動を引き起こす。その結果、大小さまざまな規模の連鎖活動が生じるのだ。「つまり、このモデルでは、カオスの縁と雪崩現象は、同じ現象の別の側面として理解できました」

■ カオスの縁が想像力の源？

カオスの縁や雪崩現象の研究と、最初に紹介した主体感の研究には、どのようなつながりがあるのか。

「ここからの話は、研究で分かったことではなく、私の仮説です」。豊泉TLはそう断った上で、次のように続ける。

「脳のさまざまな情報処理において、いろいろな状況をあらかじめ想像し予測しておくことが必要なのだと考えられます。例えば、主体感に関わる時間推定で紹介したように、ボタンを押すことと音に因果関係がある場合、これくらいの

一定の時間差で音が鳴るものだ、という事前知識があります。そのような予測に基づき脳は推定の確からしさCCEを計算し、その結果として主体感を感じているのではないのでしょうか」

特別な感覚刺激のない安静時にも、脳では特定の領域が同期して活動していることが実験で観察されており、「デフォルトモードネットワーク」と呼ばれている。その活動は絶えず不規則に揺らいでいて、脳のさまざまな情報処理において基本的な役割を担うと考えられている。

「脳が無意識のうちにいろいろなことを想像したり予測したりする活動が、さまざまな規模の神経活動の揺らぎとして表れ、その揺らぎを利用して高度な情報処理が可能になると、私は考えています」

さらに、神経活動が非カオスとカオスの状態を行き来することで、新しいことを発見したり思いもよらないアイデアが生まれたりする、と豊泉TLは予測する。

「さまざまなアイデアを思い浮かべるには、いろいろな神経活動のパターンを示すカオスの状態が適しています。それらのアイデアは根拠のない答えではなく、それまでの学習によって神経ネットワークのシナプス強度が変化したことを反映しています。そしてカオスの縁で起きる雪崩現象によって神経活動の揺らぎの規模も大小さまざまなものが生じます。活動する脳部位にも多様性が生じて想像できることの範囲やアイデアのバリエーションが広がるのでしょう。このような“カオスの縁が想像力の源であ

る”という仮説を理論的に示せたら面白いと思います」

■ 未知の知能にたどり着きたい

「生物は環境により良く適応するように進化してきました。脳は神経ネットワークを変化させることで生物が環境に適応するスピードを加速させています。ヒトの複雑な思考や意識、知性は環境や社会に適応する中で発達してきたのではないのでしょうか。環境への適応という原理から導かれるシナプスの学習法則などを通して脳の情報処理を理解することが、私の一貫した研究のモチベーションとなっています。神経活動の持つ揺らぎの利用や主体感の計算も、突き詰めれば、そのような学習法則に基づいて生じたのではないかと思うのです。ただ、そう考えると、私たちの脳はシナプスの学習法則から生じた一つの解（計算方法）にすぎないので、それ以外の解があってもよいこととなります。ですから、脳をヒントにして、しかし必ずしも脳のやり方にとらわれない有用な計算手法を探索する研究も進めています」

人工知能（AI）はその好例だ。「現在のAIで主流の手法となっている深層学習では、答えを導き出す計算の過程がブラックボックスだと指摘されています。そこで、人間の学習が段階的に進むことにヒントを得て、計算過程を理解しやすくするAIの新しい手法を考えています。脳とも現在のAIとも異なる、未知の知能にたどり着きたいのです」

（取材・執筆：立山 晃／フotonクリエイト）

多くの植物は、微生物と共に生きている。

植物と微生物の共生関係を明らかにすることが、

バイオリソース研究センター（BRC）植物-微生物共生研究開発チームのミッションの一つである。

さらに、実験室を飛び出し、農業現場における植物-微生物-土壌の複雑な相互作用を可視化しようとしている。

得られた知見をもとに持続的な作物生産を可能にする新しい農業を実現する、

それが研究開発チームの目指すゴールである。

植物×微生物で農業を変える

■ 微生物を利用した新しい農業へ

「日本の農業に役立つ研究をしたい」と市橋泰範チームリーダー（TL）は語る。

これまでの農業は、新品種の開発によって作物の収量や品質を向上させてきた。しかし、高い収量を確保するために化学肥料や農薬が過剰に使用され、環境汚染や土壌の劣化、健康被害といった弊害も生じている。農薬の使用量を抑えるため、除草剤や害虫に耐性のある品種が遺伝子組み換え技術を用いて開発されてもいる。しかし、遺伝子組み換え作物については社会的に受け入れられるかという別の課題がある。また、大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会から、環境への負荷が少なく持続的で発展可能な社会への転換が求められており、農業も例外ではない。

「持続的な作物生産が可能な農業を実現する方法が、世界中で模索されています。そうした中で私たちは、品種改良

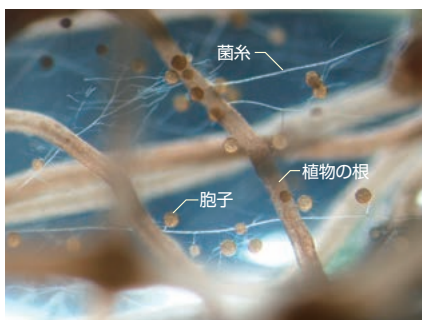


図1 アーバスキュラー菌根菌

アーバスキュラー菌根菌は植物の根に入り込み、菌糸を土壌中に伸ばしてリン酸を吸収し、植物に供給している。

や化学肥料に頼らず、微生物の力を利用することで、新しい農業を実現しようとしています」

■ 植物と微生物は共に生きている

「土壌中には、膨大な数の多種多様な微生物がいます。その中には、植物の成長を手助けしているものがあり、そうした微生物を農業に利用することを目指しています。特に注目しているのが、菌根菌と根粒菌です」

菌根菌はカビの仲間で、植物の根に入り込む。そして菌糸を伸ばし、土壌中のリン酸を吸収して植物に供給する（図1）。一方で根粒菌は、植物が光合成でつくった栄養をもらう。菌根菌と植物は、持ちつ持たれつの共生関係にあるのだ。

リン酸は、窒素とカリウムとともに植物の生育に欠かせない三要素といわれ、肥料として土壌に施すことも多い。しかし植物は根から数mm以内にあるリン酸しか吸収できないため、肥料の効果が得られにくい。過去に使用されたリン酸肥料の大部分は、植物に吸収されないまま土壌中に大量に蓄積しているのだ。

「菌根菌は、根が吸収できる範囲より遠くまで菌糸を伸ばしてリン酸を吸収し、植物に供給します。菌根菌を農業に利用すれば、土壌中に蓄積しているリン酸肥料も吸収できて、新たに使用する量を減らすことができるのではないかと期待しているのです」。日本は、リン

酸肥料の原料であるリン鉱石のほぼ全てを輸入に頼っている。リン鉱石は枯渇が危惧され価格が高騰しているため、費用面でのメリットもある。

もう一つの根粒菌は細菌で、マメ科の植物の根に根粒と呼ばれるこぶをつくる。その中で大気中の窒素分子からアンモニアを合成して、植物に供給する。一方で、根粒菌は植物が光合成でつくった栄養をもらっている。

窒素もまた植物の生育に欠かせない三要素の一つであり、農業では窒素肥料が補われている。窒素肥料の原料は、大気中の窒素と水素を500℃もの高温、1,000気圧もの超高压で反応させて合成したアンモニアだ。「人間が大気中の窒素からアンモニアをつくるには膨大なエネルギーが必要ですが、根粒菌は数mmの根粒の中でいとも簡単に窒素からアンモニアをつくることができます。そうした理由から、農業に役立つ微生物として根粒菌に注目しているのです」

■ 難しいといわれる菌根菌の培養に挑む

菌根菌がリン酸を、根粒菌が窒素を植物に供給していることは以前から知られ、農業で利用されている例もある。しかし市橋TLは、「まだ微生物の力を、十分に活用できていない」と言う。「菌根菌と根粒菌はそれぞれ多くの種類があり、どの微生物とどの植物が共生するといった基礎的なことですら、実はよく

市橋泰範 (いちはし・やすのり)

バイオリソース研究センター
植物-微生物共生研究開発チーム
チームリーダー

1982年、愛知県生まれ。東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。博士(理学)。米国カリフォルニア大学デービス校ポスドク研究員、理研環境資源科学研究センター基礎科学特別研究員、科学技術振興機構さきかけ研究員などを経て、2018年より現職。



分かっていないからです。共生関係の実態を詳しく調べたくても、微生物を培養することが難しいのです」

微生物について詳細な解析を行うには、培養して数を増やす必要がある。だが、地球上にいる微生物のうち培養できるのは1%以下といわれている。「私たちは、植物と共生するさまざまな微生物を収集し、それを培養する技術の開発から始めることにしました」

まず取り組んだのが、アーバスキュラー菌根菌(図1)の培養法の開発である。アーバスキュラー菌根菌は最も代表的な菌根菌で、300種類以上あり、陸上植物の約8割がこの菌と共生しているといわれている。にもかかわらず、2018年の植物-微生物共生研究開発チーム発足当時、培養ができて研究に使えるアーバスキュラー菌根菌は10種類足らずだった。

「微生物を培養できるかどうかは、やってみなければ分かりません。ひたすらトライアンドエラーを繰り返していきます」と市橋TL。「そして苦勞の末、アーバスキュラー菌根菌を単離・培養する技術を開発しました。これまでにイネやネギ、クローバー、オタネニンジンなどに共生するアーバスキュラー菌根菌を20種類以上収集し、ようやく13種類の

培養に成功したところですよ」

植物-微生物共生研究開発チームが所属するBRCでは、実験動物や植物、細胞や遺伝子、微生物など研究に使われるバイオリソースを収集・保存し、品質を精査した上で国内外の研究機関へ提供している。「植物と共生する微生物について培養できる種類を増やし、バイオリソースとして整備していくことも、私たちのチームのミッションです」

■ 微小液滴の中で共生関係にある微生物を培養

「微生物を培養するときは、培養液の成分や濃度、温度などを細かく変え、微生物が増殖できる条件を探ります。しかし微生物の99%以上が培養困難といわれているということは、重要な条件を見落としているのではないかと考えました。そこで思い当たったのが、微生物と微生物の共生です。土壌中の微生物は、互いに関係し合う共生関係を形成しています。中には、一緒になければ増殖できない組み合わせがあるのかもしれません。そうした考え方に基づいた新しい微生物培養技術を開発しています」

新しい培養技術のポイントは、微小液滴を使うことである。微小液滴とは、直径30μm程度の液体のしずくで、タン

パク質の合成や結晶化、化学反応など、さまざまな用途に使われている最先端技術だ。微小液滴は、マイクロ流路システムを用いて短時間にたくさん作製できる。100万個の微小液滴を使って100万通りの条件を同時に試し、目的に合ったものを選別する、といったハイスループットスクリーニングにも適している。

その微小液滴の中に単独もしくは複数の微生物を閉じ込めて培養する(図2)。たくさんの微小液滴を使ってさまざまな組み合わせを試せば、微生物が増殖している液滴が見つかる可能性が高まる。そして微生物が増殖した微小液滴中のゲノムを解析することで、どの微生物とどの微生物が共生関係にあるかが分かる。この手法は、難しいとされてきた微生物の培養を可能にするだけでなく、これまでほとんど分かっていなかった微生物の共生関係を知ることに役立つものだ。

市橋TLは、「この微小液滴を使う培養技術の登場によって、微生物のバイオリソースの概念が変わるかもしれない」と言う。「これまで、目的の微生物だけを取り出して培養し、それを提供していました。今後は、微生物を培養できる組み合わせで提供していくようになるかもしれません」

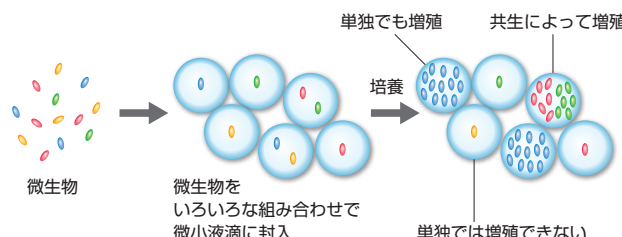
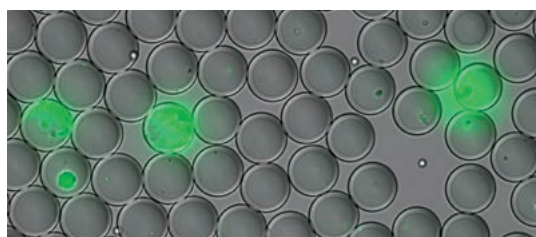


図2 微小液滴による微生物培養
液滴は直径約30μm。単独もしくは複数種類の微生物を1個の液滴に封入して培養する。左の写真では微生物を蛍光試薬で可視化している。



共生なし 共生あり

図3 ミナトカモジグサとアーバスキュラー菌根菌の共生

ミナトカモジグサはイネ科の1年草である。草丈は30cmほどと小さく、ライフサイクルが3~4カ月と短いため、実験に適している。アーバスキュラー菌根菌が共生すると、よく成長する(右)。

■ 植物と微生物の共生関係を調べる

アーバスキュラー菌根菌が植物に共生すると、植物にリン酸を供給するだけでなく、水分吸収の促進、乾燥ストレスや病原菌への耐性向上など植物の成長を促進する効果があることが知られている。しかし、アーバスキュラー菌根菌の数、共生する植物、肥料や農薬の使用状況などによっても、その効果の大きさは変動する。ほかの微生物も同じだ。

「微生物を農業で利用するには、植物と微生物が、どのような条件で、どのような相互作用をするのかを理解しておく必要があります。そのための実験系の構築にも取り組んでいます」

ここでの最初の問題は、どの植物を使うかだった。こういう場合、まず考えられるのはモデル植物のシロイヌナズナだ。しかし、アーバスキュラー菌根菌

には共生できない植物種がいくつかあり、その一つがアブラナ科である。シロイヌナズナはアブラナ科なのでアーバスキュラー菌根菌の実験には使えないのだ。

そこで市橋TLらが注目したのが、イネ科のミナトカモジグサである(図3)。小型で、遺伝学的な解析技術も開発されているので、さまざまな実験をやりやすい。「農業に有用な植物とアーバスキュラー菌根菌の組み合わせや、その機能を見つけていきたい」と市橋TLは意気込む。

■ 農業生態系をデジタル化する

「私たちの目標は、新しい農業を実現することです。それには、農業の現場を知る必要があります」と市橋TL。実験室での研究と並行して、農業現場を対象とした研究を進めてきた。

「農業現場では、植物と微生物と土壤

の多様な要素が、さまざまな階層で複雑に絡み合っており、農業生態系を構成しています。全ての要素の相互作用の総和として、作物の収量や品質が決まります。そこで、農業生態系を構成する全ての要素を網羅的に計測し、その情報をもとに複雑な関係性をデジタル化して可視化することで、生態系全体として理解することを目指しました。この解析手法は「フィールドアグリオミクス」と呼ばれている。オミクスとは、特定の事象をあらゆる方法で網羅的に解析することという。

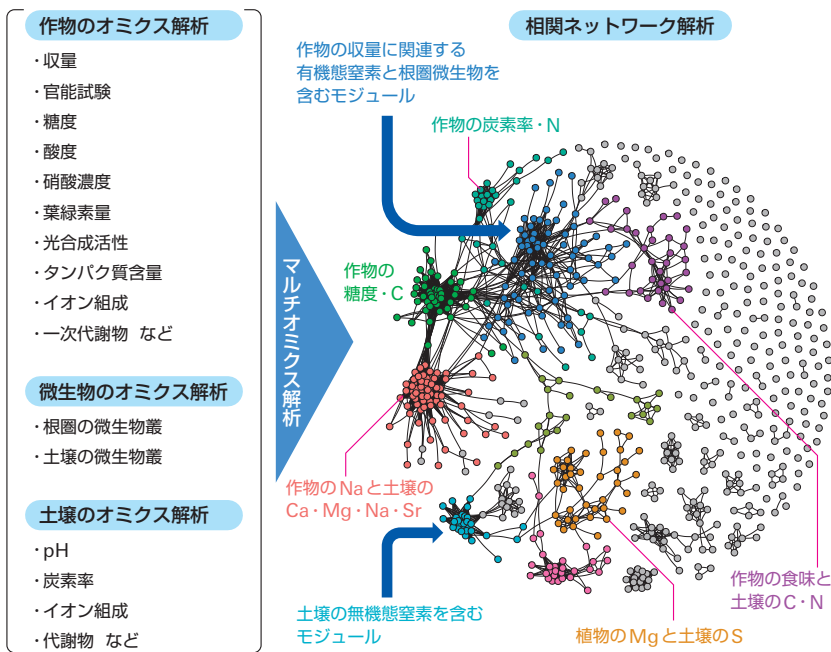
市橋TLらは、千葉県八街市の農家の協力のもとでフィールドアグリオミクスを実施。その農家では、コマツナ栽培に有機農法の一環として太陽熱処理を行っている。太陽熱処理とは、畑をマルチシートで数日間覆い、土壤を高温に

図4 マルチオミクス解析による農業生態系のデジタル化

圃場を分割して異なる農法でコマツナを栽培し、それぞれ作物、微生物、土壤のマルチオミクス解析を実施した結果、農業生態系は作物の形質と特定の微生物種や土壤成分で構成されたモジュールが複数組み合わせられて織り成されるネットワークを形成していることが分かった。これまで作物の収量は土壤中の無機態窒素(アンモニアや硝酸など)の量と相関すると考えられていたが、今回の解析から、それぞれ異なるモジュールであることが分かった。



計測
分析機器を用いて
さまざま





植物-微生物共生研究開発チームのメンバー

して病害虫や雑草の種子を死滅させることで、農薬を使わずに良好な土壌環境を維持する手法だ。太陽熱処理をした圃場ではコマツナの収量が増える。しかし、その理由を明確に説明することができていなかった。

太陽熱処理した区画と処理しない区画に圃場を分け、それぞれでコマツナを栽培。土壌と微生物と作物について、さまざまな分析機器を用いて網羅的に計測した。これまでも土壌診断として、窒素、リン酸、カリウムなどの無機成分や温度、pH（水素イオン濃度）などが計測されていたが、項目数は30程度だった。今回の項目数は300を超える。対象ごとにオミクス解析を行い、さらにそれらのオミクス解析を統合したマルチオミクス解析を行って、農業生態系の構成要素がどのように相互作用しているかを求めた(図4)。

「米国ではすでに土壌中の微生物に注目し、土壌診断の項目に微生物を加え始めています。私たちはそれに加えて作物も計測し、より多くの項目を設定しているので、さらに一歩先を行っていると言えるでしょう。マルチオミクス解析は、実験室では最近よく使われるようになりましたが、農業現場に対して行ったのは世界でも初めてではないでしょうか」と市橋TL。

解析の結果、興味深いことが分かった。1840年にリービッヒが提唱した、植物は無機物で栄養を吸収するという「無機栄養説」が現在の農業の基礎になっていることから、収量が上がった太陽熱処理をした区画では土壌中の無機物が多

いと予測していた。ところが、処理した区画と無処理の区画で無機物の量に差はなかった。「無機栄養説で説明できないことに驚きました。そこで実験室での検証実験も行い、太陽熱処理によってアミノ酸のアラニンと栄養素のコリンが土壌中に蓄積すること、それらが農作物の収量を増やす作用があることが分かりました」。また、太陽熱処理によってコマツナの根の近傍（根圏）に生息する微生物の種類が変化し、特定の微生物の数が多くなっていた。「コマツナの成長促進に関与しているアミノ酸やコリンは、太陽熱処理によって土壌中に増えた有機物と根圏に生息する微生物の相互作用でつくられた最終産物と考えられます。つまり、無機栄養を補う化学肥料に頼らなくてもアミノ酸や微生物を活用することで、持続可能な作物生産が可能であることが示唆されたのです」と市橋TLは解説する。

■ サイバー空間で農業をする

この成果を2020年6月に発表すると、農業従事者を中心に大きな反響があった。しかし市橋TLは、「これはまだ序章にすぎない」と言う。「計測項目を数千、数万と増やしたフィールドアグリオミクスを現在行っています。その結果を検証することで、作物の収量や品質にとって何が一番重要なのが導き出せるでしょう。それを指標とすれば、経験が浅い人でも熟練した人に匹敵する作物を生産できるようになると期待しています」

この研究には、多くの大学や企業、農家が参加している。「植物と微生物と

関連情報

- 2020年6月9日プレスリリース
農業生態系のデジタル化に成功

土壌、それぞれの研究者はこれまで別々に研究してきました。研究者と農家の方の間に考え方の違いもあります。それらの垣根を越えて研究を進めていくのは、とても難しいけれども面白いですね」

分野横断型の研究を進める上で重要なこととは？「ほかの分野に対するリスペクトを忘れないこと。そして、常に心をフレッシュに保って、新しい分野に挑戦し学ぶことだと思います」

市橋TLは、植物の発生学で学位を取得した。「分からないことを知りたいという思いで研究をやってきました。しかし、2016年に植物と微生物の共生の研究を始めたころから意識が変わり、社会に貢献したいと思うようになってきました。その思いはどんどん強くなっています」

「究極的には植物-微生物-土壌の関係性をモデル化したサイバー空間（仮想空間）で農業ができるようにしたい」と市橋TLは語る。20歳から70歳まで農業に従事したとして50年、一つの作物を栽培できるのは1年に1回。つまり、毎年さまざまな工夫をして栽培しても50回しか試せない。「サイバー空間ならば何度でも試すことができます。さらに、その年の気温や降水量の予測値を入れてシミュレーションすることで、収量や品質を最大化するにはどの微生物を使い、肥料は何をどのくらい使えばいいかといった最適解が得られます。それに基づいてフィジカル空間（現実空間）で栽培する。そういう新しい農業の実現が、私の夢です」

(取材・執筆：鈴木志乃/フotonクリエイト)

2、8、20、28、50、82、126。

原子核をつくる陽子と中性子の個数には「魔法数」という特別な数があることが知られている。

陽子あるいは中性子が魔法数の数だけ存在すると、その原子核は比較的安定な状態になり、崩壊しにくくなる。

仁科加速器科学研究センター（RNC）では、重イオン加速器施設「RIビームファクトリー（RIBF）」での

国際共同研究により、魔法数の研究で世界をリードしてきた。

櫻井博儀センター長に魔法数研究の意義や展望について聞いた。

「魔法数」の謎を解く

■ 魔法数を持つ原子核はなぜ安定なのか

——魔法数はいつごろ発見されたのですか？

櫻井：陽子あるいは中性子の個数が魔法数になると原子核は比較的安定になる、という実験データは、1940年代までに得られていました。しかしなぜ安定するのかは分かっていませんでした。1949年、理論家のメイヤーとイェンゼンはその理由を説明する「殻構造モデル」を提唱しました。原子では原子核の周りを電子が特定の軌道で回っているように、陽子や中性子にもそれぞれ特定の軌道があるというモデルです。軌道は内側から外側へ行くほどエネルギーが高くなります。エネルギーが近い軌道のまとまりを「殻」と呼び、殻と殻の間にはエネルギーの大きな差「エネルギーギャップ」があります（図2）。

魔法数を持つ原子核は球形で、エネルギーが最も低い一番内側の殻には2個、次の殻は6個、3番目の殻は12個の陽子あるいは中性子が入ります。陽子も中性子もエネルギーの低い軌道と殻から順番に入っていく、それぞれの殻が完全に埋まった状態を「閉殻」といいます。最初の殻は2個、次の殻までで8個

(2+6)、3番目の殻まで埋まると20個(2+6+12)で閉殻となります。これら閉殻となる数が魔法数です。閉殻の原子核から陽子や中性子を引き抜いて壊すには、大きなエネルギーが必要です。つまり壊れにくくとも安定なのです。これは、ヘリウムやネオンなど希ガスの電子軌道が閉殻となり、化学的に安定になることに似ています。

メイヤーとイェンゼンは、この殻構造モデルによってさまざまな実験データを説明することに成功し、1963年のノーベル物理学賞を受賞しました。しかしその翌年くらいから、2人の理論では説明できない実験データが報告され始めたのです。

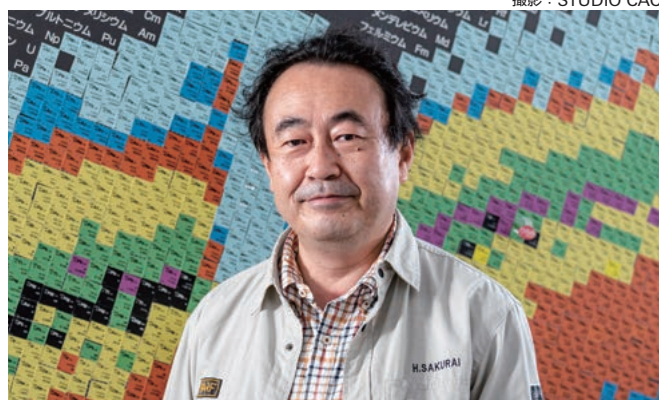
そもそも自然界で安定に存在する原子核（安定核）は270種類ほどで、それらでは陽子と中性子の数はほぼ同じです。このため、縦軸を陽子数、横軸を中性子数として原子核を分類した核図表（図1）では、左下から右上へと安定核が分布します。それら安定核の一部が、魔法数を持つ特別に安定な原子核です。

原子核は、理論的には7,000~1万種類が存在し得ると考えられていますが、核図表を見ても分かるように、安定核は膨大な数の原子核のほんの一部です。メイヤーらの理論は、安定核に限られた実験データに基づいたものにすぎなかったのです。その後、加速器を使って、陽子と中性子の数が大きく異なり寿命が短い不安定核をつくり、その性質を調べる実験が行われるようになりました。すると、核図表で安定核より右下側に位置する、すなわち陽子に比べて中性子の数が極めて多い中性子過剰領域では、8や20の魔法数を持つ原子核が安定でなく、魔法数が「消える」ことが分かってきたのです。

——それがメイヤーらの理論で説明できないケースですね。なぜ魔法数が消えてしまうのですか。

櫻井：陽子と中性子はそれぞれ別の軌道にありますが、互いに力が働いていて、両者の数が同じくらいだと軌道は安定しています。陽子の数を少なくしていくと、ある軌道に陽子が存在しなくなります。するとその軌道のパートナーである中性子の軌道が不安定となって殻構造が変化し、魔法数が消えてしまうのです。

撮影：STUDIO CAC



櫻井博儀（さくらい ひろよし）

仁科加速器科学研究センター センター長、RI物理研究室 室長

1963年、京都府生まれ。東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。博士（理学）。東京大学助手、助教授などを経て、2005年 理研 主任研究員、2011年 東京大学教授、2013年 本センター副センター長。2020年4月より現職。

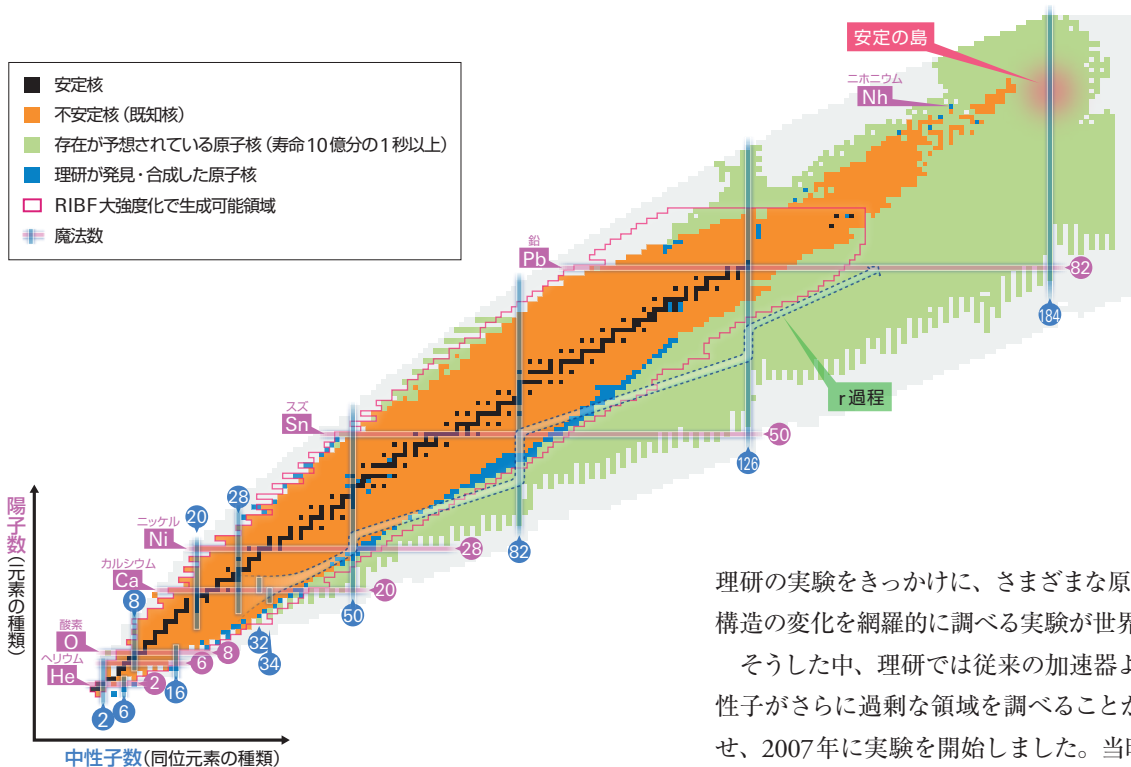
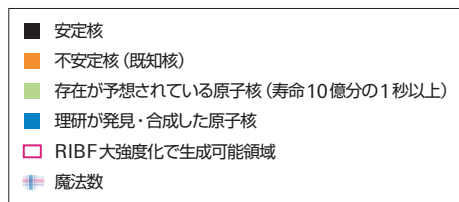


図1 核図表と魔法数

核図表上で安定核の右下に位置する中性子過剰領域で、従来の魔法数8、20、28が消えたり、新しい魔法数6、16、32、34が現れたりする現象が見つかっている。

RIBFでは現在、二重魔法数を持つスズ-100（陽子数50+中性子数50）の性質を詳しく調べている。中性子数58や90が新しい魔法数である可能性があるが、その魔法性が現れる中性子過剰領域を調べるには、RIBFの性能をさらに向上させる必要がある。

理研の実験をきっかけに、さまざまな原子核について軌道や殻構造の変化を網羅的に調べる実験が世界中で始まりました。

そうした中、理研では従来の加速器よりも、陽子あるいは中性子がさらに過剰な領域を調べることができるRIBFを完成させ、2007年に実験を開始しました。当時、欧米の加速器で実験していた研究グループが、中性子数32が新しい魔法数となることを予測し、その領域に近い34には兆候がない、と報告していました。けれども私たちは、核図表上でカルシウム-54（陽子数20+中性子数34）やその周辺にある中性子過剰核を調べることで、中性子数34が新しい魔法数であることを2013年に発表しました。RIBFだからこそ、それまでつくることが難しかったカルシウム-54などの中性子過剰核を大量につくることができ、新魔法数を発見できたのです。

—どのような方法で新魔法数を発見したのですか。

櫻井：原子核は特定のエネルギーが与えられると励起状態となり、やがてγ線を放出して元の基底状態に戻ります。放出するγ線を測定すれば励起エネルギーを調べることができるのです。魔法数を持つ原子核は、核図表上で周囲にある原子核よりも励起エネルギーが高いという特徴があります。そこでカルシウム-54の励起エネルギーが高いことを突き止め、中性子数34が新しい魔法数であると実証したのです。

2019年には、カルシウム-54が理論どおり閉殻になっていることを確かめました。このときはカルシウム-54のビームを水素標的に当てて中性子を1個引き抜き、カルシウム-53をつくる実

■ 理研で新魔法数16と34を発見！

—新しい魔法数が発見されることもあるのですか。

櫻井：理研では2000年に、フッ素（陽子数9）、酸素（陽子数8）、窒素（陽子数7）の中性子過剰領域では中性子数16が新しい魔法数であることを発見しました。「新しい魔法数」が現れることを加速器実験により初めて示したのです。

先ほどの魔法数が消えてしまう場合と同様に、中性子に比べて陽子の数がとても少ない原子核では、ある軌道に陽子が存在しなくなることで、パートナーである中性子の軌道が不安定になります。3番目の殻は6個、2個、4個が入る軌道から成りますが（図2）、4個の軌道が不安定になってエネルギーが高くなることで、2個の軌道との間に新たにエネルギーギャップができます。こうして12個が入る殻から4個の軌道が抜けて8個しか入らない殻に変化します（図3）。すると20個で閉殻のはずが4個少ない16個で閉殻となり、新魔法数16が現れたのです。

原子核の性質は、陽子や中性子の殻構造や軌道によって決まります。特に魔法数が消えたり新しい魔法数が現れたりすると、原子核の性質は大きく変化するのです。そのことを示した

図2 殻構造モデルと魔法数

球形の原子核では、最もエネルギーが低い殻には陽子あるいは中性子が2個で埋まる1本の軌道、2番目の殻には4個と2個で埋まる軌道、3番目の殻には6個、2個、4個で埋まる軌道がある。従って最もエネルギーの低い殻は2個、2番目の殻は6個（4+2）、3番目の殻は12個（6+2+4）の陽子あるいは中性子が埋まる。それらの殻が完全に埋まり閉殻となる数は、2、8（2+6）、20（2+6+12）であり、それらが魔法数となる。

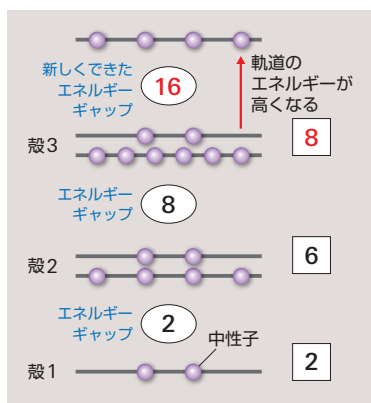
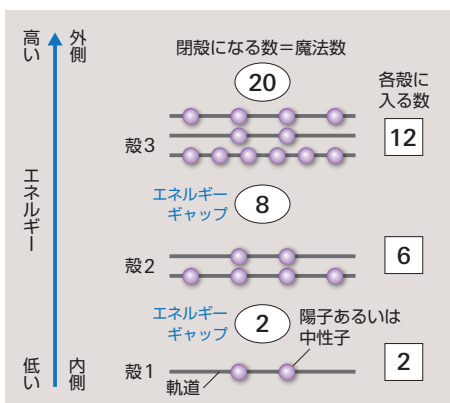


図3 殻構造の変化と新しい魔法数16の出現

中性子過剰領域では、ある軌道に陽子が存在しなくなることで、パートナーである中性子の軌道が不安定になる。3番目の殻を構成していた中性子4個が入る軌道が不安定となってエネルギーが高くなり、2個が入る軌道との間に新たなエネルギーギャップができる。すると、この殻に入る中性子の数が12から8へ減り、16で閉殻となる。こうして中性子の新魔法数16が出現する。

図4 「HiCARI」実験を進めるメンバー

左から、鈴木大介 研究員、Kathrin Wimmer 客員研究員、Pieter Doornenbal 専任研究員、Frank Browne 基礎科学特別研究員、Benoit Mauss 訪問研究員。「HiCARI」は「High-resolution Cluster Array at RIBF」の略で、「ヒカリ」と発音する。γ線が「光」の一種であることにちなんで国際共同研究チームが命名した。高いエネルギー分解能を誇るゲルマニウム検出器を放射状に並べ、励起した原子核から放出されるγ線のエネルギーと放出角度を精度よく測定する。これにより、原子核の励起状態のエネルギーの決定精度を高め、陽子や中性子の軌道のエネルギーを正確に調べることが可能になる。



験を行いました。カルシウム-54が閉殻ならば、特定の励起状態のカルシウム-53が生成されやすくなります。その生成確率を調べて、閉殻構造であることを確認したのです。

魔法数が消失するかどうかを調べる実験もRIBFで進め、中性子過剰領域では中性子数28の魔法数が消えてしまうことを明らかにしました。では、次の魔法数50はどうか。ニッケル-78（陽子数28+中性子数50）は陽子と中性子のどちらも魔法数を持ちます。これを二重魔法性といい、原子核が特に安定することが知られていましたが、本当にニッケル-78が二重魔法性を持ち特に安定なのかは長年の謎でした。私たちはRIBFで励起エネルギーを調べ、2019年にニッケル-78が二重魔法性を持っている証拠を得ることができました。

ニッケル-78は、魔法数の最後のとりです。核図表でニッケル-78の隣にあるニッケル79（陽子数28+中性子数51）やコバルト-77（陽子数27+中性子数50）は、陽子あるいは中性子の一方が魔法数を持ちますが、今まで得ている情報を総合すると、魔法性が失われると予想しています。

中性子数82の魔法数についても調べていますが、陽子数46のパラジウムまでは魔法性を持つことを確かめました。

■「安定の島」の原子核で理論を検証する

——今後の目標は？

櫻井：原子核物理学の大きな夢は、「安定の島」の原子核をつくることです（図1右上）。安定の島とは、陽子と中性子の両方が、従来知られる最大の魔法数126を超える、新しい二重魔法数を持つ原子核の周辺領域です。理研が合成した113番元素「ニホニウム」の寿命は1,000分の1秒ほどですが、二重魔法数を持つ安定の島の原子核は、1日から1年ほどの寿命を持つと考えられています。さまざまな理論家が原子核を説明する理論モデルをつくっていますが、いずれの理論モデルでも中性子の新魔法数は184。一方、陽子の方は112~120まで、理論によって予測が異なります。陽子はプラス電荷を持つので、数が増えるとプラス電荷同士の反発力が強くなって軌道が変化すると考えられ、陽子の新魔法数を予測するのは難しいのです。安定の島の原子核を合成できるようになれば、どの理論モデルが正しいのかが分かるでしょう。

新魔法数である中性子184個の原子核を合成するために、魔法数を持つ安定な中性子過剰核同士を反応させることが考えられています。そうすれば、壊れずに融合する確率が上がると考えられるからです。このように魔法数は、原子核同士を反応させたときの現象を予測する際にも重要なのです。

——宇宙で重い元素が合成される過程でも魔法数が関係するのでしょうか。

櫻井：重い星が一生の最後に見せる超新星爆発や、中性子星という超高密度な天体同士の合体において、原子核が中性子をどんどん捕獲してさまざまな中性子過剰核ができ、それらがすぐに壊れて鉄よりも重い元素の安定核が短時間にできたと考えられています。この仮説を「r過程」と呼びます（図1）。魔法数を持つ原子核は中性子を捕獲しにくい性質があります。しかし、魔法数が消えれば、中性子を多量に捕獲する反応が進むはずです。中性子過剰領域のどこで魔法数が消え、どこで新しい魔法数が現れるかによって、r過程のシナリオが劇的に変わります。世界の研究者は今、プラチナ（白金）や金の合成に関わる魔法数126に注目しています。

——RIBFのライバルとなる海外の加速器の動向は？

櫻井：2022年に始動する米国の希少同位体ビーム施設FRIBが強力なライバルとなるでしょう。フルパワーになると、RIBFよりも強力な重イオンビームを生み出すことができるからです。

RIBFの強みの一つは、質量を測る専用施設があること。原子核の質量を精密に測定できるので、エネルギーギャップや殻構造がどう変化するかを調べることができます。

もう一つの強みは、ビームのエネルギーが高いので厚い標的が使い、原子核同士の反応実験を高効率に行えること。2020年10月、反応で生まれた励起状態の原子核を調べる「HiCARI」実験をスタートしました。大阪大学や欧米、中国からゲルマニウムγ線検出器を集結させて放射状に並べ（表紙）、γ線を精密に測定します（図4）。それにより、陽子や中性子の軌道の1本ずつのエネルギーが分かります。

私たちは、さまざまな手法で原子核の性質を精密に調べることと魔法数の背後にある法則性を見だし、未知の原子核の性質を予測することで、原子核物理学の完成を目指し、世界をリードしていきます。

（取材・構成：立山 晃／フotonクリエイト）

ヒトの冬眠に挑む研究者

ヒトを冬眠させようとしている研究者が生命機能科学研究センターにいる。老化分子生物学研究チームの砂川玄志郎 上級研究員（以下、研究員）である。「人工冬眠が実現すれば、助けられる命を増やせる可能性があります。私は冬眠で医療を変えたいのです」そう語る砂川研究員の素顔に迫る。



砂川玄志郎

生命機能科学研究センター
老化分子生物学研究チーム 上級研究員

すながわ・げんしろう

1976年、福岡県生まれ。小児科医。大阪赤十字病院、国立成育医療研究センターで医師として勤務。京都大学大学院医学研究科博士課程修了。博士（医学）。2013年より理研生命システム研究センター一研究員。生命機能科学研究センター基礎科学特別研究員などを経て、2020年より現職。

福岡県で生まれ、2歳のとき循環器内科の医師で研究者でもあった父の留学に伴い渡米した。「5歳ごろには父のパソコンを勝手に使ってプログラムを書いていました。英語の説明は分かりませんでした。父の机にあった入門書に書かれているとおりにアルファベットや記号を打ち込んでいくと文字が動いたりするのが楽しくて、夢中になったのを覚えています」

小学1年生のときに帰国。「その年にファミコンが発売され、ゲームばかりやっていました」。中学・高校時代は、プログラミングとコンピュータゲーム漬けの日々を送った。「5人兄弟の長男だからか子どもが好きで、子どものためになる仕事をしたいと思っていました。プログラマーになって子どもが楽しめるゲームをつくらうと決め、大学では情報工学を学ぶつもりでした」。ところが父に「プログラミングはもうできるのだから、医学部を受けたらどうだ」と言われ、「小児科医という道もあるな」と京都大学医学部へ進んだ。子どもたちが幸せに暮らせる社会をつくるために政治家になりたいと思ったりしながらも、実習で病気の子どもたちを目の当たりにすると、この子たちを助けたいという思いが強くなり、小児科医に。

重症の子を多く診てきた。「病院への搬送に耐えられれば治療できたのに、症状のピークを乗り越えられれば助けられたのに、という悔しい経験を何度もしてきました。やりがいの一方で医療の限界を感じていたころ、当直明けの休憩室で偶然、冬眠するサルを世界で初めて発見したという論文に出会ったのです」。小児科医となって5年目、2005年のことだ。

「体温のグラフに衝撃を受けた」と振り返る。冬眠中の体温が20℃まで低下していたのだ。ヒトは体温が30℃を切ると死

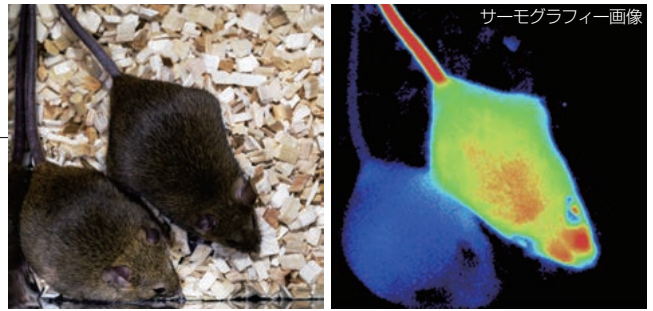


図 冬眠のような状態に誘導したマウス（左下）と通常時のマウス（右上）
Q神経を興奮させて冬眠に似た状態にしたマウスは体温が大きく低下している。

に至る可能性が出てくる。だが、そのサルは何のダメージもなく復活する。「冬眠中は代謝が低下しているため、少ないエネルギーで生命を維持できます。もしヒトを冬眠させることが可能になれば、搬送中や症状のピーク時を省エネルギー状態で切り抜けることができ、助けられる命を増やせるはずです。ヒトを冬眠させたい。そのために研究の世界に入ろうと決めました。すぐ大学院入試について調べ、分子生物学の教科書を買って、その夜から勉強を始めました」

2006年、京都大学大学院に入り直し、連携大学院協定を結ぶ理研の上田泰己^{ひろき}チームリーダーの研究チームで、まずは睡眠の研究を始めた。「すぐに冬眠の研究をしたかったのですが、大学院生のテーマとしては挑戦的過ぎると論されたのですが、それでも気落ちすることはなく、睡眠の研究をしながら、これをどう冬眠の研究につなげていこうか、と常に考えていました。楽観的なんです」

冬眠の研究を本格的に始めたのは2015年。リスやクマといった冬眠動物は入手も飼育も解析も難しい。しかも冬眠中の動物を調べることは1年に1回しかできない。代わりに注目したのがマウスである。マウスは冬眠をしないが、条件がそろって数時間にわたって代謝が低下した日内休眠という状態になる。砂川研究員はマウスを日内休眠に誘導する安定的な方法を確立し、それを手掛かりに研究を進めてきた。

しかし日内休眠と冬眠は違う。冬眠そのものを研究できない歯がゆさを感じていたが、最近、大きな進展があった。マウスの脳の一部に存在する神経細胞群を興奮させると、体温と代謝が数日間にわたって著しく低下し、冬眠のような状態になることを発見したのだ。筑波大学の櫻井武教授らとの共同研究による成果で、その神経細胞群をQ神経、引き起こされた低代謝の状態をQIHと名付けた。「冬眠しないマウスでできたということは、ヒトを冬眠のような状態に誘導できる可能性もある」と砂川研究員は声を弾ませる。今後、マウスや冬眠動物のQ神経を刺激して低代謝状態を誘導し、代謝が低下しているときに細胞や臓器の機能がどう変化しているかを調べていく計画だ。「ヒトを冬眠させたい。その思いは、あの論文を見た日からまったくぶれていません。人工冬眠を実現し、医療に応用することが私の役割だと思っています」

（取材・執筆：鈴木志乃／フotonクリエイト）

共鳴と光の回折に 共通する仕組みを発見

2020年9月11日プレスリリース

放射光科学研究センター 回折限界光源設計検討グループの平岩聡彦 研究員、早乙女光一 客員研究員、田中 均 グループディレクター (GD) の共同研究チームは、従来まったく別の現象だと考えられてきた共鳴 (共振) と光の回折が、特定の条件では同じ数式で記述できることを見いだした。

ブランコに乗る人をタイミングよく押すと大きく揺れる。このように外からの力で揺れが大きくなる現象が共鳴だ。ブランコなどの振り子やばねに付けた重りのように定点を中心に振動するものを、調和振動子という (図左下)。調和振動子は、その長さや重りの違いによって固有の振動数 (1秒間に振動する回数) を持つ。その固有振動数と同じ振動数で外から力を加えると、共鳴を起こすことができる。

一方、光が障害物の裏側に回り込む現象が回折だ。細い隙間 (スリット) に光を通すと光の波面がゆがみ、スリットと、その先にあるスクリーンそれぞれの位置に応じて、二つの光の波のたどった距離の差 (光路差) が生じる。これにより、スクリーン上に、光の波の山と山が強め合い谷と谷が弱め合う強度のむらをつくる (図左上)。このときの光の回折の特徴は、スリットの幅、光の波長、スリットとスクリーンの距離から計算される「フレネル数 (N_F)」によって定義できる (図右上)。

平岩研究員らは、調和振動子の長さや重りの変化に伴って固有振動数がゆっくりと変化する場合、その時間変化率と外から

の力の動作時間から計算される数 (\tilde{N}_F) によって、共鳴の特徴を光の回折と同じ数式で定義できることを発見した。つまり、 \tilde{N}_F と N_F が同じ値の場合、共鳴の特徴を示すグラフ (図右下) が、光の回折の特徴を示すグラフ (図右上) と同じ形になるのだ。これは両者に共通する仕組みが働いていることを示している。

この成果は、放射光施設の課題を検討する研究からもたらされた。放射光施設では円形加速器のリングの中を高密度の電子ビームが周回しており、最終的にはそれを安全に廃棄する必要がある。廃棄方法の一つは、加速器のパワーをオフにして電子ビームを減速させるというものだ。電子ビームはゆっくり減速して軌道を内側へ縮めながらリング内壁に衝突し廃棄される。そのとき壁の損傷を防ぐために電子ビームの密度を大きく低減させる必要がある。平岩研究員らは、減速しながら周回する電子ビームを固有振動数が変化する調和振動子に見立てた数理モデルをつくり、電子ビームを周回ごとに電磁場の中で空間的に拡散させ、密度を低減させる最適な条件を探った。その検討の過程で、共鳴と光の回折の共通性を発見したのだ。

共鳴は物質の運動を扱う力学、回折は光の性質を扱う光学の分野で研究されてきた。今回の成果は力学と光学に新たな視点をもたらし、二つの分野の融合研究を推進すると期待される。「今回の発見は、泥の中から砂金を見いだしたようなもの」と田中GDは語る。電子ビームを安全に廃棄することは工学分野の現場レベルの課題だが、取り組み方によっては物理の本質に迫る発見につながることを示す成果となった。

(構成: 立山 晃/フォトンクリエイト)

●『Physical Review E』(9月10日) 掲載

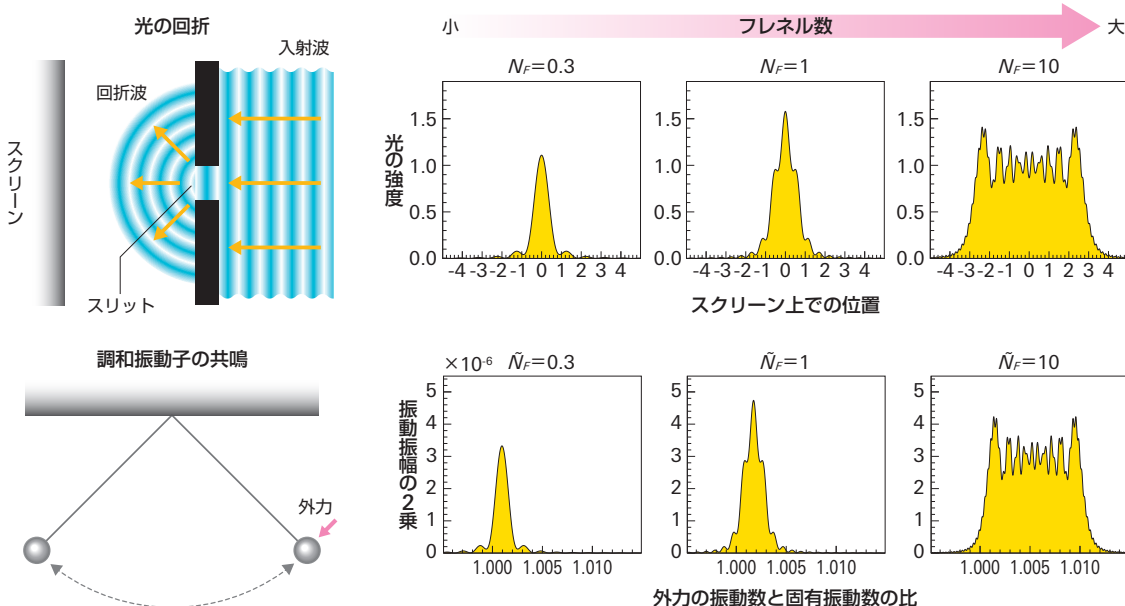


図 光の回折と調和振動子の共鳴の共通性

N_F は光の回折のフレネル数、 \tilde{N}_F は固有振動数の時間変化率と外力の動作時間から計算される数。 N_F と \tilde{N}_F の値が同じ場合、光の回折と共鳴の特徴を示すそれぞれのグラフが同じ形となる。

株式会社理研数理を設立

理研は2020年10月1日、株式会社理研理研、株式会社JSOLと共同で株式会社理研数理を設立しました。理研にとっては初となるベンチャー企業への出資です。この理研数理は「社会の基本的な問題解決に数理科学を最大限活用する企業」を目指し、数学や物理学をはじめとする数理科学分野のアカデミア人材と産業界の研究者・技術者が、お互いの強みを持ち寄って協業します。



設立に関する記者会見（10月23日）にて。左から、(株)理研数理 初田哲男 Chief Science Advisor、江田哲也 代表取締役社長、理研 松本 紘 理事長、(株)理研理研 油谷好浩 代表取締役社長、(株)JSOL 前川雅俊 代表取締役社長。

羽田みらいサイエンスギャラリーがオープン

東京の、そして日本の玄関口である羽田空港。そこに隣接する大規模複合施設「羽田イノベーションシティ」内に、理研の研究の一端を体験できるスペースが誕生しました。理研の監修による常設展示「ハローマイワールド わたしたちは細胞でできている展」では、五感に反応する脳の中の細胞をタッチパネルで探索したり（写真下）、組織透明化の研究で実際

に使用した試料を観察しながら、細胞の研究の一端に触れることができます。

会場	羽田みらいサイエンスギャラリー 東京都大田区羽田空港1-1-4 羽田イノベーションシティ Zone K 2階
アクセス	天空橋駅（京浜急行電鉄空港線 および東京モノレール）直結
入場	無料
開場時間	8：00～19：00



埼玉りそなCSR私募債～理研SDGs応援ファンド～より寄附金を受贈



りそなグループのSDGs推進私募債は、債券発行手数料の一部をSDGs実現に貢献する機関・組織へ寄附するものです。今回、理研内部公募の奨励課題（若手研究者の発想に基づく発案を促進し、新たな分野開拓に

つながる研究課題）に当該私募債からの寄附金を主な原資とするSDGs枠を設け、四つのプロジェクト（下表）を採択しました。健康、技術革新、海洋資源、材料開発など幅広い分野に貢献する研究を進めていきます。

推奨課題（SDGs枠）採択者とその研究テーマ



環境資源科学研究センター
合成ゲノミクス研究グループ
栗原恵美子 研究員
ゴム培養細胞とシングルセル解析を駆使した天然ゴム生合成メカニズムの解明



開拓研究本部
田中生体機能合成化学研究室
Tsung-che Chang
(ツンチェ・チャン) 特別研究員
生体内金融媒を用いた免疫療法：がん細胞の標的組織での免疫療法薬の合成



開拓研究本部
新宅マイクロ流体工学
理研白眉研究チーム
塩見晃史 特別研究員
細胞老化と機械特性に対する網羅的解析法の開発



生命医科学研究センター
応用ゲノム解析技術研究チーム
尾崎 心 副チームリーダー
神経変性疾患の発症機序におけるランダム単アレル発現の役割の解明（パイロット研究）

球蹴りの効能

今尾浩士 いまお・ひろし

仁科加速器科学研究センター 加速器基盤研究部
加速器高度化チーム 専任研究員

私は理研で「ストリッパー」の研究をしています。こう言う誤解されやすいのですが、夜の街の研究をしているわけではありません。理研RIビームファクトリー（RIBF）という加速器施設で仕事をしていて、ここでいう「ストリッパー」とは加速している重イオンがまとう衣（=電子）を剥ぎ取る装置を指します。最近の目標の一つは「チャージストリッパーリング」という新しいアイデアを実現してRIBFの重イオンビームの強さを倍増させ、原子核物理研究をさらにブーストさせるということです。

扱っている加速器は研究者のつくる最も大きなものの一つ。埼玉県和光市にあるRIBFには東京タワーの約2倍の重さの加速器がありますが、世界を見渡せば山手線1周と同じスケールの加速器もあります。革新的な技術に挑戦し、緻密な設計を行い、多くの人たちと協力しながら研究を進めていきます。規模の大小こそあれ、加速器に関わる者は研究者であると同時に発明家、デザイナー、そして実業家でありながら、最後は現場作業者であることも求められるのです。

そんなこともあってか、研究室周りの諸先輩方と酒盛りを行う機会も多く、そこでの雑談に近い議論が研究テーマの源泉となることもしばしば。私自身もお酒は嫌いではなく、お互いにお気に入りの店を紹介し合って、そこに赴き雑多な議論をすることは大きな楽しみでした（写真1）。コロナ禍のさまざまな影響の中では取るに足らない問題かもしれませんが、そうした雑談の機会が大幅に奪われていることはやはり残念に思います。

ところで、趣味といえるかどうか分かりませんが、研究の息抜きとして、サッカー好きの同い年の同僚に誘われて昼休みのグラウンド（本当は雨水調整池）でボールを蹴るようになったのは7年ほど前のことです。以来ほぼ毎日球蹴りをしています。理研内でも人数が集まればサッカーの



写真1・研究室周りの方々との酒宴（コロナ禍前）の後。筆者は右から2番目。RNCの元センター長矢野安重氏（右）から当コラム「原酒」の名は、当時「原子力からお酒まで」などと表現された理研の研究分野の幅広さに、書き手の生の声が聞けるという意味合いを掛けたものと聞きました。



写真2・理研グラウンドでサッカーの後（コロナ禍前）。筆者は後列左から3番目。

ゲームができて、かなり多国籍なサッカーを体験することができます（写真2）。それ以外の日はごく小人数で球蹴りを小一時間、やっていることは「蹴鞠」に近いかもしれません。サッカー経験者でもない研究者が四十を過ぎて球蹴りをしているのは奇妙に思えるかもしれませんが、蹴鞠は日本において1,300年以上の歴史があり、ボールを強く思いどおりに蹴りたいという欲求はかなり根源的である気がします。

その昔、平安時代後期に「蹴聖」と呼ばれた藤原成通という人の蹴鞠日記「成通卿口伝日記」の中に面白い話があります。成通卿が「鞠の精」の御託宣を受けたという一節で（以下意識）、鞠の精いわく「蹴鞠が盛んな世は、国栄え、立派な人が出世し、福あり、命長く、病なく、来世までも幸せになる」。来世までもというのは言い過ぎでは？と問い返すと、鞠の精は「人の心は常に乱れるものだが、鞠を蹴っている間は無心となり、良い縁起が生まれ、功德が進む」と答えたといひます。球蹴りの効能は思っていたよりもずっと深遠なようです。

「ストリッパー」の研究には楽しいことだけでなく厳しさや難しさもあり、まだまだコロナ禍で大変な時代ではありますが、無心で（ただしソーシャルディスタンスは保って）ボールを蹴り合うことはとてもよい息抜きになっています。



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

Email: kifu-info@riken.jp



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