

RIKEN NEWS

 理化学研究所

SPRING 2025
No.493

研究最前線

- 「富岳」で協力行動の進化メカニズムに迫る……p.04
- 社会的な意思決定をする「脳」をモデル化……p.06
- 究極の時計「原子核時計」への挑戦……p.08
- 量子シミュレーターで探る磁気の臨界輸送現象……p.12
- 触媒研究者の夢、「新たなアンモニア合成」に挑む……p.14
- 多発性硬化症を悪化させる腸内細菌を発見……p.16
- 高齢者の困りごとを対話で聞き取るロボット……p.18

特集

- 第5期中長期計画が始動！
専門知の横断的協働で
科学への信頼をはぐくみ
共感を礎とする未来社会へ……p.02
- 理研にある宇宙線試験室……p.10

私の科学道

- タンパク質の立体構造を解析し、
研究を成功に導く……p.19

原酒

- 批判恐怖症……p.20

第5期中長期計画が始動！

専門知の横断的協働で 科学への信頼をはぐくみ 共感を礎とする未来社会へ

五神 真 (ゴノカミ・マコト)
理事長

2025年度のはじまりにあたり、ご挨拶申し上げます。

理化学研究所(理研)は、1917年の創立から108年目をむかえ、本年度より特定国立研究開発法人として7年間の第5期中長期計画の期間に入ります。この1世紀あまりのあいだ、人類は科学とそれにもとづく技術と社会成長の牽引力として、めざましい発展をとげてきました。しかし、地球温暖化や環境破壊、経済格差、国家間の調整を基軸とする国際協調システムの行きづまりなど、世界は人類の未来をおびやかす地球規模の深刻な課題に直面しています。

21世紀に入ってインターネットの進化や計算科学の発展に象徴されるデジタル技術は、生成AIや量子計算技術の革新によってさらに進み、社会の様相を大きく変貌させました。これらの先端技術が人類社会を衰退させる契機となるのか、あるいはより良い成長へのパラダイムシフトをもたらすのか、人類はその選択の岐路に立っています。新たな科学と技術を生み出すことを使命とする私たち理化学研究所は、他人まかせの受け身ではなく、より良い未来を能動的に切り拓く原動力となることをめざします。

2025年度からの7年間は、人類社会全体のこれからの未来を決める、きわめて重要な期間です。理研が生み出す価値の源泉は、研究者一人ひとりの好奇心に根ざして羽ばたく自由な発想です。なによりも、そうした創造力をより効果的に発揮できる環境を整えます。同時に未来の人類社会の姿をみんなで考え、

共有することも欠かせません。この両者をしっかり重ね合わせることで、研究者として発見の喜びと、社会に対する責任を果たす手ごたえと充実感が生まれるはず です。

この「探求」と「社会に対する責任」を世界最高水準において妥協なく追求する国立研究開発法人となるために、いっそう精進してまいります。そしてその輪を、国内外のアカデミア、産業界、政府へと広げます。みなさんのご支援とご協力を、ひきつづきよろしくご依頼申し上げます。

卓越した研究を支える新たな研究体制

最新の先端研究の動向を的確にとらえ、理研の総合力を生かす運営を迅速におこなうため、「研究領域」という仕組みを導入しました。物理学、生命科学、数理・計算・情報科学、環境科学と、分野を超えて新たな学知創出をめざす開拓科学の五つを研究領域として設定し、理事長のもとで意思決定をおこなう理事会に各領域総括をくわえました。この体制により、高度な専門知にもとづく横断的な協働をうながし、新たな知の創出を加速します。

領域を超えた連携の促進策として、2022年から開始した「TRIP(Transfornative Research Innovation Platform of RIKEN platforms)」構想を拡充し、データ駆動によるアプローチをいっそう強化します。TRIP構想はすでに理研全体に浸透し、

TRIP 事業

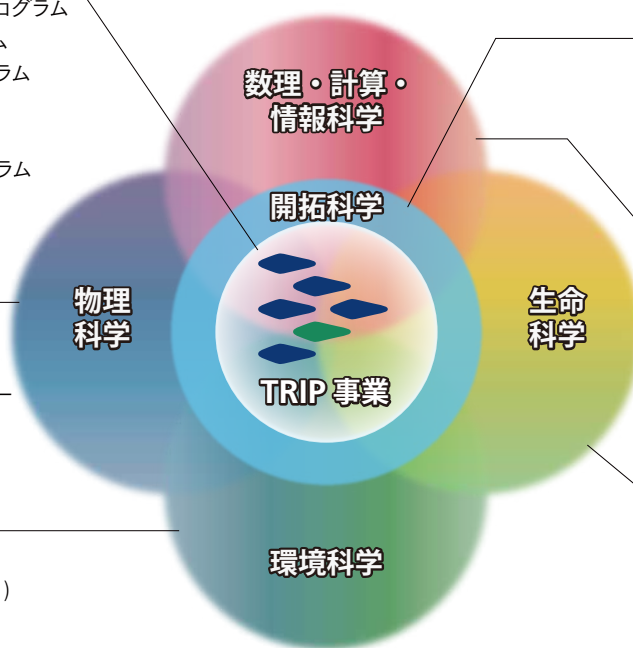
統合データ・計算科学プログラム
科学研究基盤モデル開発プログラム
基礎量子科学研究プログラム
創薬・医療技術基盤プログラム
先端半導体科学プログラム
理研産業協創プログラム
バトンゾーン研究推進プログラム

物理学領域

創発物性科学研究センター
光量子工学研究センター
仁科加速器科学研究センター
放射光科学研究センター

環境科学領域

環境資源科学研究センター
(バイオリソース研究センター)



開拓科学領域

開拓研究所

数理・計算・情報科学領域

数理創造研究センター
計算科学研究センター
量子コンピュータ研究センター
革新知能統合研究センター
情報統合本部

生命科学領域

生命医科学研究センター
生命機能科学研究センター
脳神経科学研究センター
バイオリソース研究センター

※TRIP (Transformative Research Innovation Platform of RIKEN platforms)
最先端研究プラットフォーム連携

AIや量子コンピュータを活用したデータ解析や計算科学の成果が幅広い研究領域で活用されています。これにより異分野融合研究が進み、革新的な成果を創出する速度が上がっています。

持続可能な研究環境の構築

次世代計算基盤「富岳NEXT」や第4世代放射光施設「Spring-8-II」の開発・整備を本格化し、国内外の研究者がアップグレードされた最先端研究基盤を利用できる環境を整備します。また、理研全体の研究活動の環境負荷を抑えるために、二酸化炭素排出削減をめざし、持続可能な研究環境を構築します。また、理研が所有する研究設備について所内のみにとどまらず所外の研究者にも共用化を進め、利用効率の向上に努めます。

次世代人材育成と大学との連携強化

次世代を担う研究者を育成するため、理研ECL (RIKEN Early Career Leaders Program) 制度を充実させ、女性・外国人研究者の積極登用、大学・企業との研究人材交流を推進します。また、近年劣化が指摘されている日本の研究環境基盤の改善・強化にも貢献し、理研の研究者が大学や他機関へ転出後も水準の高い研究を継続できるように支援制度を整備します。大学とのクロスアポイントメントの活用も進め、日本全国どこにいて

も研究者が最先端の研究に参加し、未来社会へ貢献できるような機会をさらに拡げて提供していきます。

未来ビジョンの達成に向けて

本中長期期間中にはじまる2030年代が人類社会にとってきわめて重要な時代となることは間違いありません。人類社会を健全に成長できる軌道に乗せるために、いま準備すべきことをしっかりとらえて行動しなければなりません。

地球環境と調和するエネルギー創出、無駄のないエネルギー消費、サイバー空間とフィジカル空間が融合するなかで他者を思いながら行動すること、それらをうながす経済システム、こうした理想を実現するために必要となる新しい科学を生み出していきます。なにより重要なことは、科学が共感を生み出す原動力となることです。そのためには、科学研究活動が、研究者コミュニティ内はもとより、社会からも厚く信頼される必要があります。それがあってはじめて、科学の普遍性が共感の醸成につながるのです。

理化学研究所は、科学への信頼をさらに高めることをめざし、未来社会とそこに生きる人々の生活を豊かにすることに貢献します。理研の取り組みへのご理解をいっそう深めていただき、みなさんのさらなるご支援とご指導を賜りますよう、お願い申し上げます。



「富岳」で協力行動の進化メカニズムに迫る

村瀬 洋介 (ムラセ・ヨウスケ)

計算科学研究センター
離散事象シミュレーション研究チーム
上級研究員

社会的な動物といわれる私たち人間は、他人とも力を合わせて助け合う「協力行動」を取る。村瀬 洋介 上級研究員ら国際共同研究チームは、そこで重要な役割を果たす「評判」に着目した。スーパーコンピュータ「富岳」を用いて「評判」という情報のダイナミクスを解析した結果、見えてきたのは、協力行動によって、人類が進化してきた道筋だった。

「他人のために」を数理で考える

意思決定の仕組みを数理的に考える「ゲーム理論」には、「囚人のジレンマ」という代表的なモデルがある。2者が協力せずに自分の利益を最大化しようとする、協力した場合よりも、結果として悪い状況に陥るといったものだ。ゲーム理論は主に経済学の分野、例えばビジネスや社会における意思決定の分析に用いられるが、村瀬 上級研究員はその数理モデルを用いて、人間社会における集団的意思決定の本質に迫る研究に取り組んでいる。

「テーマは『協力の進化』です。人間は血縁関係のない他者とも協力する能力において特に優れています。私は人間社会において協力行動が維持されるメカニズムを『富岳』を用いた大規模計算によって解明しようとしています」

互いに利益を与え合うことを表す「互恵性」という言葉がある。ここにAさんとBさんがいるとしよう。AさんがBさんに何か協力し、Bさんがそれに対して何らかの協力を返すとき「直接互恵性」が成り立つ。

それに対して「間接互恵性」(図1)は文字通り間接的だ。介

在するのは「評判」。例えば、AさんがBさんに協力する。その様子が評判となり、後に第三者であるCさんがAさんに協力するという現象が起こる。こうした社会では、Aさんは最初の段階では一方的に損をしているように見えるが、良い評判となるような協力行動を取った結果、長期的に見れば利益を得ることができる。

だが、評判がCさんに伝わらなかった場合はどうだろうか。協力という行為がAさんからBさんへの一度しか行われず、Bさんのみが得をすることになる。一次的な損得のためにAさんが協力を惜しめば、長期的な利益は失われ、冒頭の「囚人のジレンマ」と同じような状況に陥ることになる。『『間接互恵性』はこれを解決する手段として発展してきたといえるのです」

「贈与ゲーム」で評判を更新する

このケースを数理的に表してみよう。まず、多数の人が暮らす社会を想定する。単純化のために、それぞれの人は「Good」または「Bad」の2種類の評判を持つとしよう。それぞれの人は各時刻に相手がランダムに選ばれ、その相手の評判に応じて①協力する②裏切る(協力しない)という二択をする「贈与ゲーム」を行う。

この行動は周りで見られており、その行動に応じて自分の評判が更新される。例えば、「Good」の評判を持つAさんが「Good」のBさんに協力しなかったとすると、Aさんの周囲からの評判は「Bad」に更新されるといった具合だ(図2)。「誰が誰に何をしたか」に応じて評判が決まるのだが、その評判を決

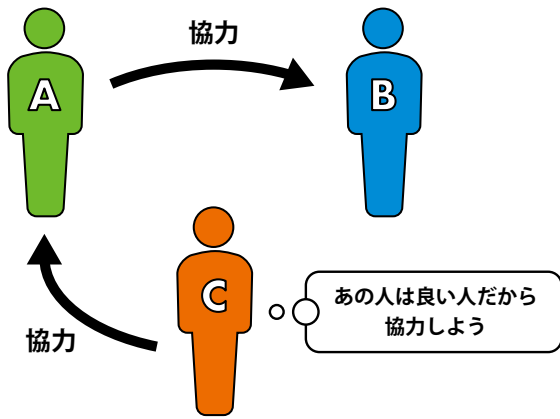


図1 間接互惠性の仕組み

人の社会では、ある人(A)が誰か(B)に協力すると、それを見た人たちの間で良い評判となって社会に広まり、協力した人は後に第三者(C)から協力を得られ、間接的に利益を得ることができる。

めるルールが「社会規範」である。

「協力が安定に維持されるためには、適切な社会規範が必要です。例えば、裏切ったとしても評判が悪くならないのであれば、誰も協力をしようとは思わないでしょう。先行研究*で協力を安定に維持する社会規範を網羅的に調べた結果、8種類の社会規範が見つかりました。この八つは“leading eight”と呼ばれ、その後の理論研究に大きな影響を与えました」(図2)

協力行動が進化しにくい社会、しやすい社会

村瀬 上級研究員は、間接互惠性の理論をさらに発展させた。着目したのは「間接互惠性による協力行動はいつ、どのように進化するのか」。集団の中の各個人は、ある社会規範に則って行動するが、他者と利益を比較し、より高い利益を得られる社会規範を新たに学習していくだろう。つまり、より成功した社会規範は広まり、劣った社会規範は消滅するという「社会規範

図2 協力を安定に維持する社会規範の一例

左表はleading eightの中の一例(L1、L6)。右図は左表における「GoodがGoodを裏切る」例。Good(A)がGood(B)を裏切ると、周囲のAに対する評判はBadに変わる。

「評判」を規定するルール	社会規範の例	
	L1	L6
GoodがGoodに協力する	g	g
GoodがBadに協力する	g	b
BadがGoodに協力する	g	g
BadがBadに協力する	g	b
GoodがGoodを裏切る	b	b
GoodがBadを裏切る	g	g
BadがGoodを裏切る	b	b
BadがBadを裏切る	b	g

g = Good b = Bad

の進化」が起きる。村瀬 上級研究員は集団内でどのように社会規範が進化するかを研究した。

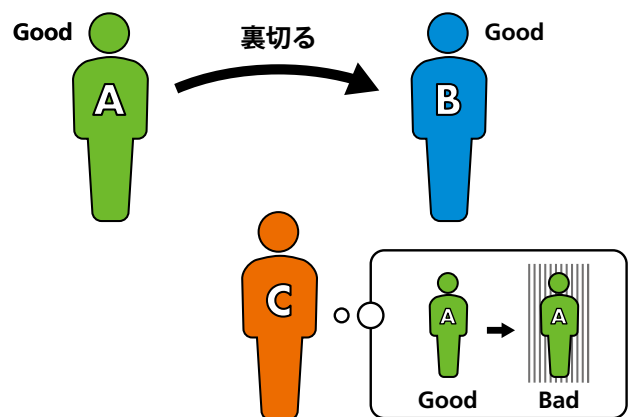
「これまでの理論研究のほとんどは、社会の中に社会規範がすでに確立している状態を考え、その中で協力行動が安定するかを考えていました。私が明らかにしようとしたのは、そもそも最初にどのように社会規範が現れるかです。これは根源的に重要な問題ですが、考えなくてはならない進化的な経路の数が膨大になるため未解決でした。そこで『富岳』を使った大規模計算で、通常の方法では困難な難問に挑んだのです」

この研究の結果、集団が単一の均質な集団から成る場合、協力を促す社会規範が進化しないという結果が導き出された。実は、先行研究では協力を促す社会規範が維持される可能性が示唆されており、この結果は意外な発見であった。一方で、集団が内部でいくつかのグループに分割されている場合には、協力的な社会規範が進化することが分かった。その際には、数ある社会規範の中でも「L1」という社会規範が特に重要であることも明らかとなった。社会規範と評判、集団の構造の複雑な相互作用を理解することが、協力行動の進化の解明につながることを示唆している。

集団的意思決定の最適解に迫る

村瀬 上級研究員にとって、この結果はまだ道半ばだ。今後はゴシップ情報によって各プレイヤーの評判が変動するモデル、意思決定を支援するAIシステムなどが人の社会に加わるモデルなど、さらに発展的な数理モデルによって「間接互惠性の進化」を追究していくという。

「私が本質的に興味を持っているのは、個人の行動を最適化していくと社会全体にとって良くない方向に進む『社会的ジレンマ』です。気候変動などの環境問題や軍拡競争などがその一例です。AI、量子計算など科学はますます進歩していく一方で、社会的ジレンマに起因する社会問題は依然として難問のままです。人間とコンピュータの高度な協力によって、集団の意思決定を最適化できないかと考えています」



社会的な意思決定をする 「脳」をモデル化

中原 裕之 (ナカハラ・ヒロユキ)

脳神経科学研究センター
学習理論・社会脳研究チーム
チームディレクター



何かを選ぶ場面で「どちらにしようかな」と考えるとき、または「他の人はどちらを選ぶだろう」と予想するとき、脳内ではどのように情報処理が行われているのだろうか。中原 裕之 チームディレクターは、人が意思決定をするときの脳の働きを実験と理論の両方向から解明しようとしている。

他者の選択が、 自分の選択にどう影響するか

人はいくつかある選択肢の中からどれかを選び、行動を決めるとき、自分以外の他者に影響を受けている。例えば、自分の選択によって、目の前の他者が望んだ結果になったり、ならなかったりするときには、自分の利益だけを重視する人もいるが、相手の利益につながることを選ぶ人もいる。

また、「あの人はそっちを選ぶだろうから、自分はこっちにしようかな」というように、他者の選択を考慮して、自分の選択が変わることもある。こうした意思決定のプロセスを、その脳の働きにフォーカスして、中原 チームディレクターは研究を行っている。

「私が関心を持っているのは、意思決定のプロセスの中でも、特に他者と関わりながら考えて行動する、社会的動物としての人間ならではの思考や判断(社会知性)です。思考や知性、そして心の働きも、突き詰めれば脳の計算によるもの。脳内の情報処理の仕組みが分かれば、社会知性を持つAIエージェントの発展につながると考えています」

意思決定実験中の脳をfMRIで観察

中原 チームディレクターらの研究は、fMRI(機能的磁気共鳴画像測定)を利用した実験的アプローチと、脳計算モデルによる解析という理論的アプローチの両方向から取り組んでいることが特徴だ。実験では20~28歳の男女48人が被験者となり、fMRIスキャナーの中に横たわりながら図形と数字を使った課題に取り組んでもらった。fMRIは、脳の神経活動によって変化する血流や酸素代謝を観察する装置で、被験者の脳活動を可視化できる。

被験者に与えられたのは、二つの選択肢から「自分にとっての報酬(数字)が大きくなるほうを選択する」「他者がどちらを選ぶか予測する(予測が当たれば報酬がもらえる)」「他者がどちらを選ぶかを予測した上で、自分の報酬につながるほうを選ぶ」という三つの課題。三つ目の課題では、他者の選択によって報酬が変わるという前提があり、二択のうち片方の報酬量が明らかに多い場合と、二択の両方ともさほど報酬量が変わらない場合を用意した。となると、前者のほうが予測は簡単で、後者のほうが難しくなる。

被験者は、他者の予測が簡単なときは、その予測に基づいて、自分の報酬が最大になるような決定をする傾向にあった。一方で、予測が難しいときは、他者の選択肢の両方それぞれに応じた選択をする傾向にあることが確認された。

「この実験は、他者の選択をシミュレーションすることによって、自己の選択がどのように切り替わるかを理解するためのもので

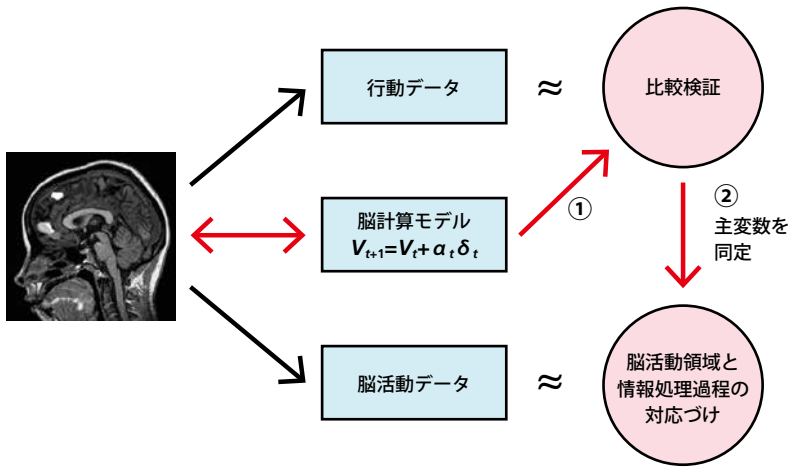


図1 脳計算モデルの解析手法

①脳計算モデル(仮説)を被験者の「行動」と比較検証して、その行動の脳情報処理の主要変数を見つけ出す。
②その変数をfMRIで観察した脳活動データの解析に適用して、その情報処理がどのような脳活動として表れているかを検証する。これにより行動、脳活動、脳計算の三つが連動した解析となる。

図2 他者の選択肢を予測して自らの意思決定を行う脳回路

他者の選択が「ありそう」か「なさそう」かで、脳活動の部位が異なる。左半球の脳内における各部位の情報処理のネットワークを推定する分析でも、「ありそう」「なさそう」で二つの経路(矢印)に分岐することが分かった。最終的な意思決定は内側前頭前野で行われる。

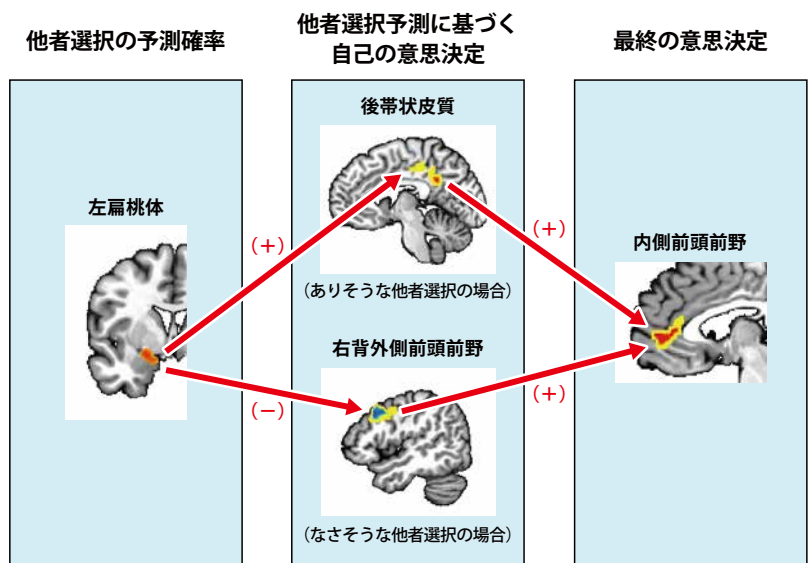
す。しかし、実験による行動データとfMRIによる脳活動観測を対照するだけでは、意思決定の脳の情報処理を理解することにはなりません。私たちは、意思決定に関する脳計算モデルに基づいて解析を行い、その脳計算モデルの主要な変数の変化と実際の脳活動の変化の対応を調べることで、他者の選択を考慮する意思決定の脳回路を調べました(図1)

他者選択の予測に基づく意思決定の脳回路を発見

行動データと脳活動データから脳回路を調べた結果、他者選択の予測が簡単なときと、他者選択の予測が難しいときでは、自己選択の際にそれぞれ別の脳部位が働いていることが明らかになった。

他者の選択を予測するときは左半球の扁桃体に脳活動が見られた。「他者の行動選択の予測確率に対応する脳活動が、扁桃体を含むいくつかの脳部位に起きることは、以前の研究でも分かっていました。本研究でも『他者がどちらを選ぶか予測する』ときを調べると、それらの脳部位で活動が見られました。面白いのは、それらの活動のうち、扁桃体だけに、三つ目の課題『他者を予測して、自分自身の選択をする』で、他者の行動選択の予測に対応する明確な脳活動があったことです。これは他者の予測を自分の選択に生かすという場面では、とりわけ扁桃体の他者予測の活動が重要になることを示しています」

さらに、他者選択の予測が難しい時には、他者の「ありそう」と思える選択に基づいて自分の選択を判断するのは後帯状皮質、「なさそう」という選択に基づいて判断するのは右背外側前頭前野と、それぞれ別の部位で脳活動が見つかった。その上で、最終的な意思決定を行っていたのが内側前頭前野だ(図2)。「他者のありそうな選択となさそうな選択、それぞれの予測に応じて別々の脳部位で自己の選択を計算する脳活動部位が見えたこ



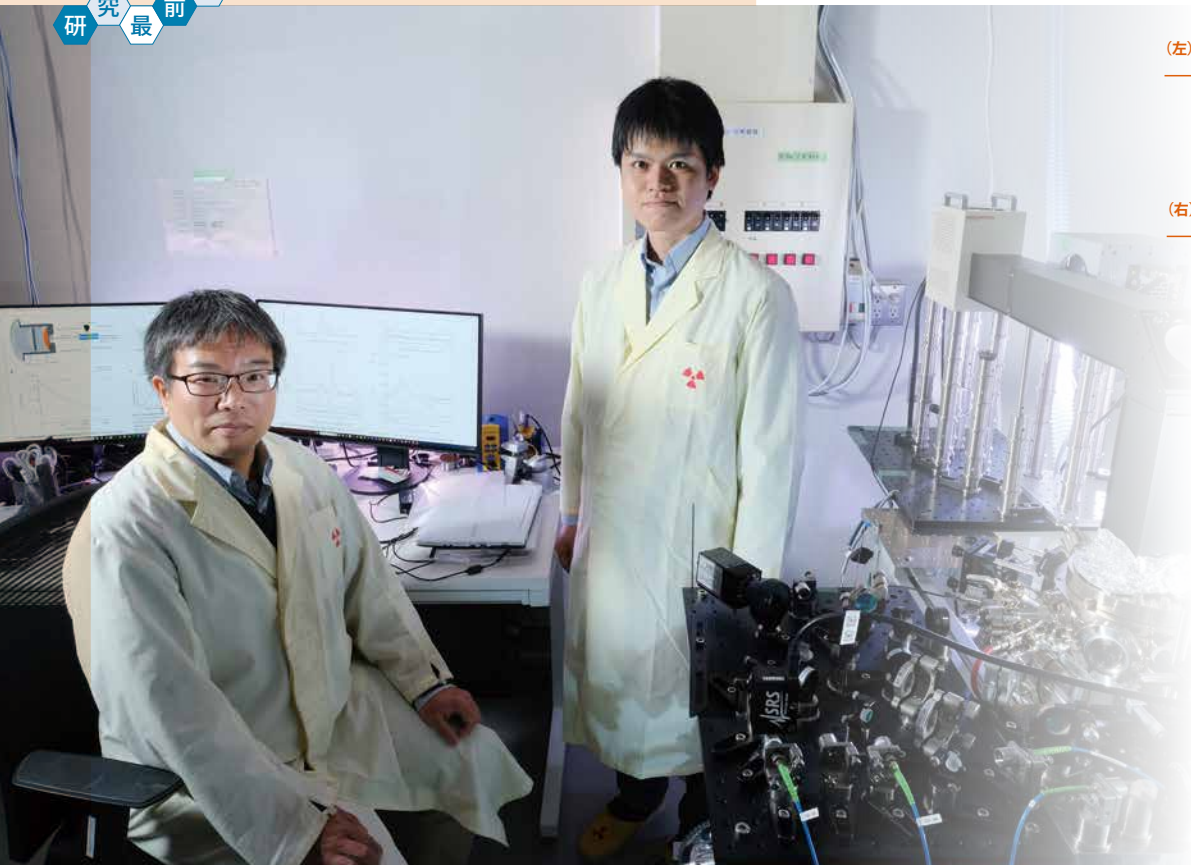
とに今回の研究の意義があります」

社会知性を持つAIの実現に貢献

これまでも脳活動データと脳計算モデルを統合した研究が行われ、その成果がニューラルネットワーク(脳内の神経ネットワークを模した数理モデル)の発展につながっている。中原チームディレクターは、そこに他者の意思決定の予測を組み込み、「社会的意思決定」を数理的に解析しようとしている。

「1981年にノーベル生理学・医学賞を受賞したトルステン・ウィーセルとデイヴィッド・ヒューベルは、子ネコの片目を一時的に覆った実験により初期視覚野の神経細胞活動を解明しました。その発見は視覚の脳計算の基礎となるもので、現在の顔認証システムなどにつながっています。今私たちが取り組んでいる脳計算モデルも、社会知性を人工的に実現するようなAIの発展につながるものとして、期待しています」

そのような未来を見据えた上で、「行動データ・脳活動データ・脳計算モデルという三位一体を読み解く、実験と理論の融合研究が重要」だと強調する。脳を学ぶことで人間や社会への理解を深め、より良い社会づくりに貢献していく。



(左) 山口 敦史 (ヤマグチ・アツシ)

開拓研究本部
香取量子計測研究室
専任研究員 (取材当時)

(右) 重河 優大 (シゲカワ・ユウダイ)

仁科加速器科学研究センター
核化学研究開発室
特別研究員 (取材当時)

究極の時計「原子核時計」への挑戦

現在、最先端の原子時計の周波数精度は18桁にもなる。しかし、未知の物質であるダークマター (暗黒物質) の解明をはじめ、超ミクロ、超高速の現象を実験で扱うためには、さらなる正確さが求められる。そこで注目されているのが「原子核時計」の開発だ。理研を中心とする研究グループはその第一歩として2024年、原子核が励起されたトリウム229 (トリウム元素の同位体) の寿命の決定に成功した。

原子時計のその先を目指す

1967年以来、1秒の長さの定義には15桁の精度を持つ「セシウム原子時計」が使われてきた。今後、数年以内に予定されている1秒の再定義では、香取量子計測研究室の香取 秀俊 主任研究員 (取材当時) が開発した18桁の精度を持つ「光格子時計」が新たな基準の最有力候補となっている。そして、理研ではすでにその先を見据えた研究が始まっている。それが「原子核時計」だ。香取 主任と共に光格子時計の研究に携わってきた山口 敦史 専任研究員はこう語る。「セシウム原子時計は、原子内の“電子”の軌道の遷移を利用して1秒を定義しています。一方、原子核時計は“原子核”そのものの遷移を利用するため、より正確な時計をつくるのが可能になります。しかし、そのためには、原子核が励起状態を維持する時間の長さ (寿命) を確かめる必要がありました」 (図1)

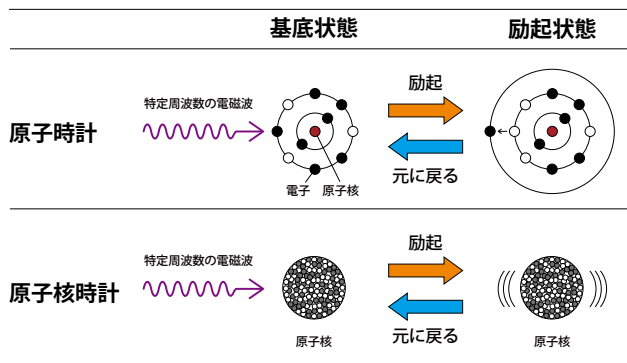
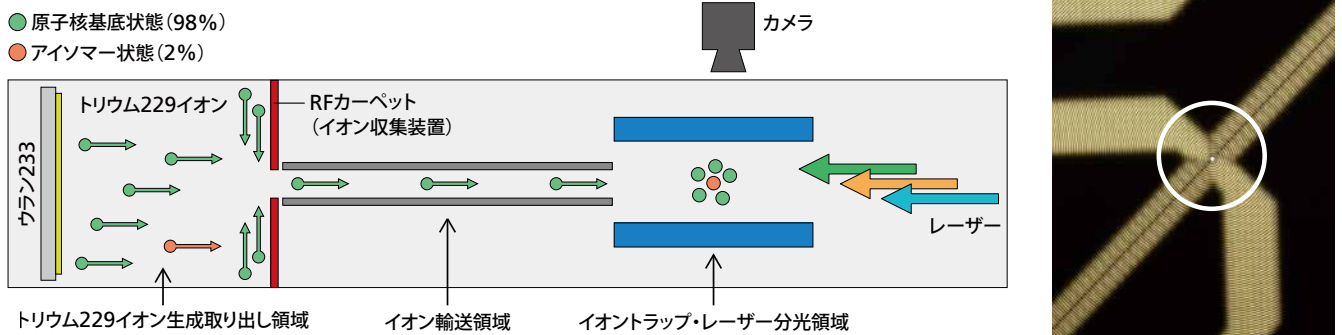


図1 電子の遷移と原子核の遷移

電子も原子核も、特定の周波数の電磁波のエネルギーを吸収して、より高いエネルギーを持つ状態 (励起状態) へと移る (遷移する)。この周波数を「共鳴周波数」という。

2016年の発見により 現実味を帯びた「原子核時計」

原子時計では、電子を励起させる特定の周波数の電磁波 (マイクロ波やレーザー) を時計の「振り子」として使う。セシウム原子時計の場合、9,192,631,770Hzという大きな周波数 (振



【図2】 今回の実験で開発したイオントラップ装置の概念図

ウラン233からトリウム229イオンを生成して「RFカーペット」で収集。この装置の内部にはトリウム229イオンの速度を抑制するため、ヘリウムガスが入っている。RFカーペットの中央には直径0.3 mmの極めて小さな穴を開けており(右写真中心部)、その穴からトリウム229イオンを引き出し、直径5 mmの管を通してイオントラップ・レーザー分光領域に移動させる。レーザー照射でアイソマー状態のトリウム229イオンのみを光らせ、検出したものの寿命を測定する。

動数)であるため、極めて短い周期の振り子として使えるのだ。一方、正確な振り子であるためには安定性が必要だ。ところがこの振り子の周波数には、地球の磁場や装置自身が放つ、かすかな赤外線などが微妙に影響してしまう。

これに対して「原子核は電子よりも環境の影響を受けにくいので、原子核の共鳴周波数を使えば、理論上、現在最先端の原子時計よりも、さらに1桁精度を高めることができると期待されています。しかし、これまで原子核時計が開発されてこなかったのは、原子核を励起させるのにエックス線領域のレーザーが必要だからです。そのため、原子核時計は実現困難と見なされてきました」(山口 専任研究員)

ところが、2016年にドイツの研究グループによる大きな発見があった。トリウム229の原子核が、真空紫外波長のレーザーで励起できる極めて低エネルギーの励起状態を持つことが明らかとなったのだ。この発見によりにわかに原子核時計が現実味を帯びてきた。「原子核が励起された状態のうち、その寿命が長い(一般的にはおよそ10億分の1秒以上)ものを『アイソマー状態』といいます。トリウム229に低エネルギーのアイソマー状態があることは1970年代から予測されていましたが、アイソマー状態から基底状態に戻る際に放出される放射線のエネルギーが極めて低かったため、実証実験が非常に難しかったのです」と説明するのは、実験による原子核研究で世界をリードする仁科加速器科学研究センターの重河 優大 特別研究員だ。

それでも、原子核時計の実現に向けては乗り越えるべき大きな壁があった。それがアイソマー状態のトリウム229の原子核の寿命の決定だ。寿命とは、励起状態の原子核が基底状態に戻るまでの時間(半減期)のこと。寿命が長ければ長いほど原子核時計の精度を高めるのに有利になる。そこで、2020年、山口 専任研究員らの研究グループは、その測定実験を開始した。

理研の総力を結集

山口 専任研究員らが目をつけたのが、ウラン233を使う方法だ。「ウラン233はアルファ線(ヘリウム4の原子核)を放出して+3価のトリウム229イオンに変わります。都合の良いことに、このトリウム229イオン中には約2%の割合でアイソマー状態のトリウム229イオンが含まれています。そこで、この現象を利用してアイソマー状態の寿命を測定するため、まずはト

リウム229イオンを収集する装置の開発に着手しました」(山口 専任研究員)

その装置とは次のようなものだ(図2左)。まず、直径9 cmの金属基板の表面にウラン233の薄膜をつくる。するとその薄膜からトリウム229イオンがおおよそ秒速270kmというものすごい速さで次々と飛び出してくる。これをヘリウムガスと衝突させて減速させた後、「RF(ラジオ波)カーペット」と呼ばれるイオン収集装置を使って収集する。「RFカーペットはもともと理研が加速器で生成した放射性原子核を効率よく取り出すために開発した装置です。ここには、理研の原子核物理実験に関する経験が生かされています」(重河 特別研究員)

次に、収集したトリウム229イオンの中から微量に含まれるアイソマー状態のトリウム229イオンを検出する。ここで、収集してトラップ(捕獲)したトリウム229イオンにレーザーを照射して電子状態を励起し、原子核の状態に応じてイオンを光らせる。基底状態とアイソマー状態では励起する波長が異なるが、重なる部分もある。そこで、基底状態のみで光る波長と、基底状態に加えアイソマー状態でも光る波長の両方を当てその差を取ることで、アイソマー状態のみを検出する。ここには、理研のレーザー分光実験に関する知見が生かされた。そして、アイソマー状態のトリウム229イオンが光らなくなるまでの時間を計測した。この時間こそが、アイソマー状態のトリウム229イオンの寿命である。

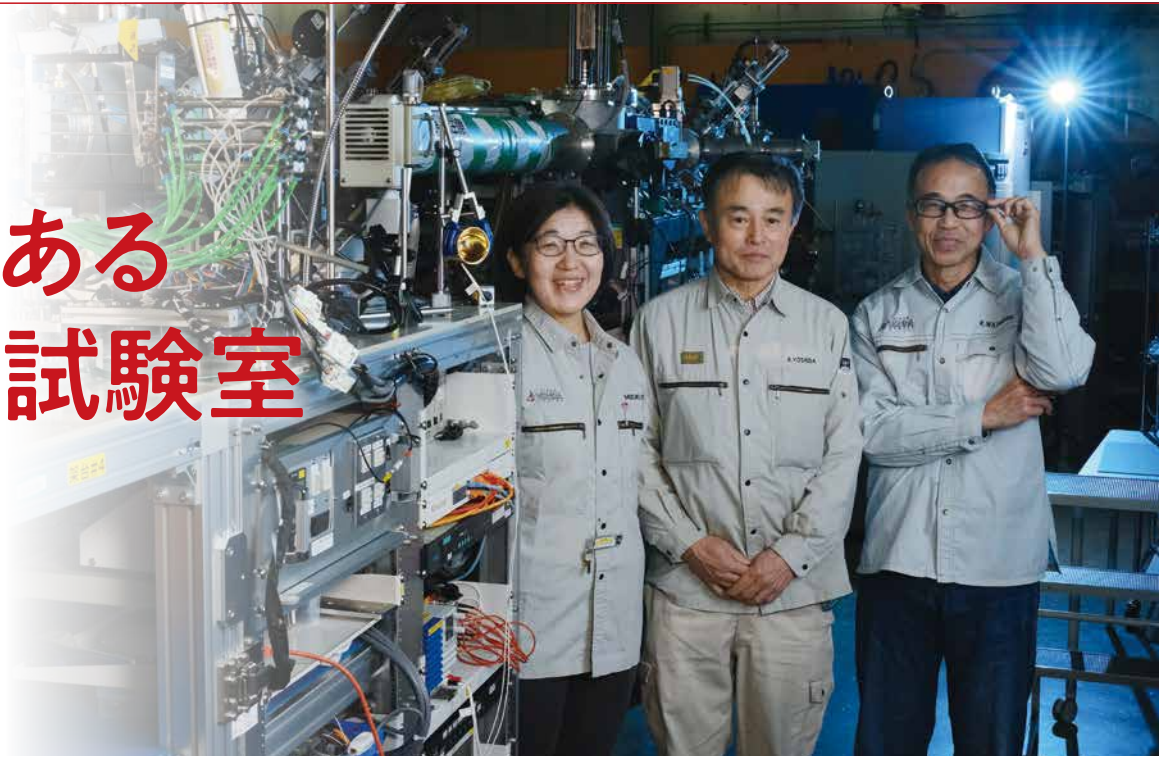
この実験は見事に成功し、その寿命は1400秒であることが分かった。「原子核時計を実現する上では十分な寿命です。原子核時計の開発に向けた大きな一歩となりました」(山口 専任研究員)、「アイソマー状態を観測できたこと自体がすごいこと。トリウム229イオンの収集からレーザーによる寿命の測定に至るまで、まさに理研の総合力を結集した実験であったと感じています」(重河 特別研究員)と二人は振り返る。この成果を基に、原子核時計の実現に向けたさらなる挑戦は続いていく。

理研にある 宇宙線試験室

吉田 敦 (ヨシダ・アツシ)

仁科加速器科学研究センター
核化学研究開発室
産業利用開発チーム
チームリーダー

産業利用開発チームのメンバー
西村 美月 協力研究員(左)、
渡邊 剛 特別嘱託技師(右)と。



ひとたび宇宙に打ち上げたら、正常に動くことを見守るしかない人工衛星。しかし、宇宙を飛び交う放射線(宇宙線)は人工衛星に搭載する半導体に容赦なく降り注ぎ、故障を引き起こす。どのくらいで半導体が壊れるのかを調べるため、理研には宇宙線を模擬した重イオンビームを活用する半導体試験装置があり、多くの宇宙関連企業が利用している。

半導体にとっての過酷な宇宙環境

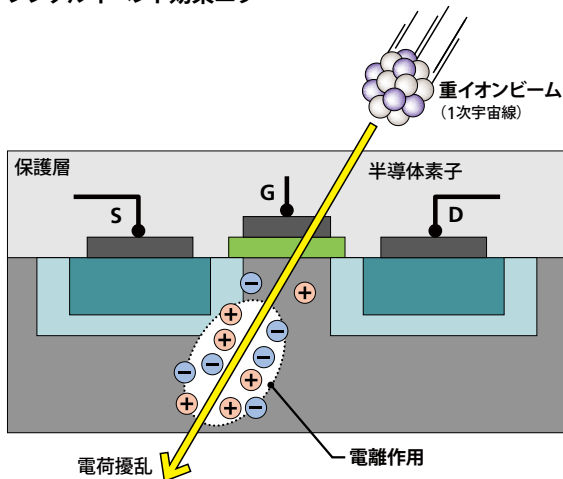
スマートフォンやPCなど情報機器に使われる半導体。そのほかにも、直流を交流に変換したり、電圧や周波数を調整するインバーターにもなる半導体は、輸送機器、送電システムにも使われており、宇宙開発にも不可欠だ。

宇宙線による半導体への悪影響は、主に2種類ある(図1)。一つは電子、陽子や α 線など太陽起因の軽イオン線による半導体特性の劣化で、これをトータルドーズ効果エラーと呼び、照

射された線量の大きさでエラー頻度が増す。もう一つは、宇宙を飛び交う高エネルギー重イオン線による半導体の劣化で、半導体の回路層まで宇宙線が到達すると、半導体中の原子が励起しイオン化(電離作用)されて電気的な擾乱を生じ、メモリー回路のビット反転エラーの原因となる。重症な場合は回路が故障してしまう。これをシングルイベント効果エラーと呼び、最近の高集積化した半導体ほどその発生頻度が増し、問題視されている。

地上で半導体が正常に機能するのは、地球表面の磁気圏や大気圏が宇宙線を遮ってくれているからだ(図2)。電荷を持った宇宙線は、地磁気によってその進路を曲げられ、真っすぐ地上に到達できない。さらに大気圏という100kmの分厚い空気の層が水なら約10m、鉛板なら約90cmの厚さに相当する強力な遮蔽壁として地球を守ってくれている。ほとんどの宇宙線は大気中で減衰し、地表には中性子線やミュオン線のような軽粒子しか到達できない。

シングルイベント効果エラー



トータルドーズ効果エラー

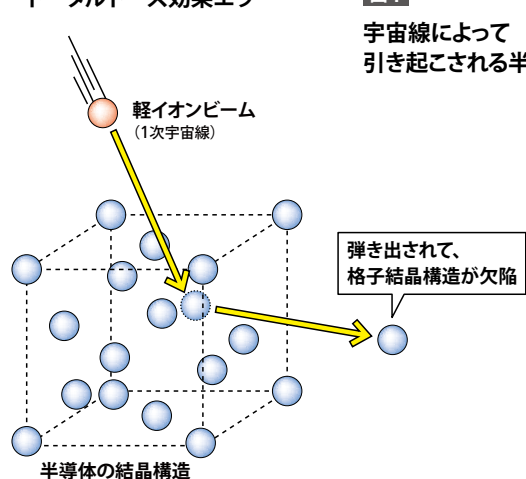


図1

宇宙線によって
引き起こされる半導体損傷

民間企業やスタートアップによる人工衛星の打ち上げや、日本も参画する国際的な月探査プログラム「アルテミス計画」など、宇宙開発は活況を帯びている。「月には磁気圏と大気圏のバリアがないので、地球の約200倍もの放射線が降り注いでいるそうです。宇宙で正常に機能する半導体の開発は宇宙開発にとって非常に重要な課題の一つなのです」と吉田チームリーダーは説明する。

宇宙用半導体の開発は急がれており、日本政府は地上用の半導体の中から宇宙線に強い半導体を探し出し、宇宙に転用する方針を打ち出している。

地上でできる宇宙線試験

宇宙環境で正常に動作する半導体を開発するには、宇宙を模倣した環境で耐性試験を何度も繰り返さなければならない。理研の重イオン加速器施設「RIビームファクトリー（RIBF）」では、原子核を光速近くまで加速することができる。この施設でつくられる原子核のビームを半導体に照射することにより、地球にいながらにして宇宙線環境での半導体耐用試験ができるのだ（図3）。

「半導体が宇宙のどこで、どのくらいの期間使われるかによって、半導体を受ける宇宙線量は変わってきます。RIBFでは、炭素やアルゴン、クリプトン、キセノンなどの原子核を、空気中に取り出せるほど高エネルギーになるまで加速できます。これ

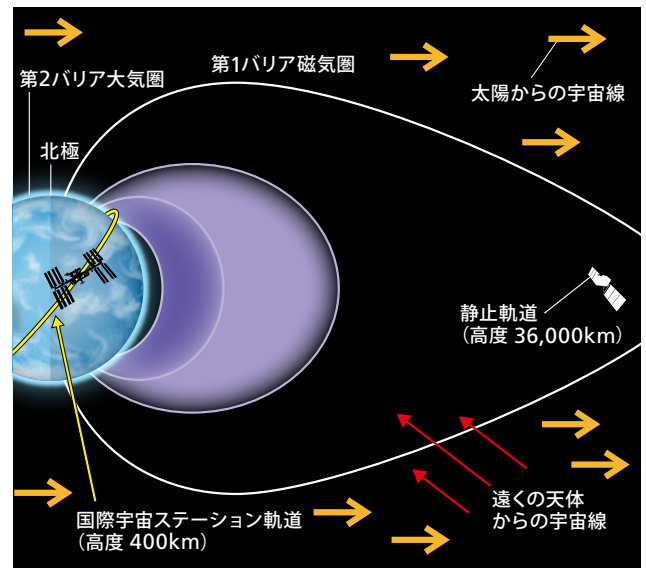


図2 地球を宇宙線から守る磁気圏と大気圏

は、さまざまな宇宙線に対する耐用試験ができることを意味しているのです」

加速器科学で支える宇宙開発

産業利用開発チームは、宇宙利用半導体デバイスの重イオンビーム耐性評価試験ビームコースを整備し、2014年から国内の企業などに公開してきた。外部利用者からは「空气中照射試験は宇宙のような真空環境ではないので、会社でセットアップした半導体をそのまま持ち込めて使いやすい」、「照射試験用の設備が細かい所まで行き届いて整備されているので、自社で用意する必要がなく、試験に集中できる」と好評だ。

「私たちは、日本の宇宙開発を支える重イオン照射試験の環境を提供できます。ただし、ビームを有償で提供するだけで受託試験はしていないので、半導体の試験そのものは利用者に実施してもらっています。初めて利用する方にもビームタイムを割り振るように配慮していますので、これまで宇宙産業の経験がないベンチャー企業などにもぜひ利用していただきたいです」

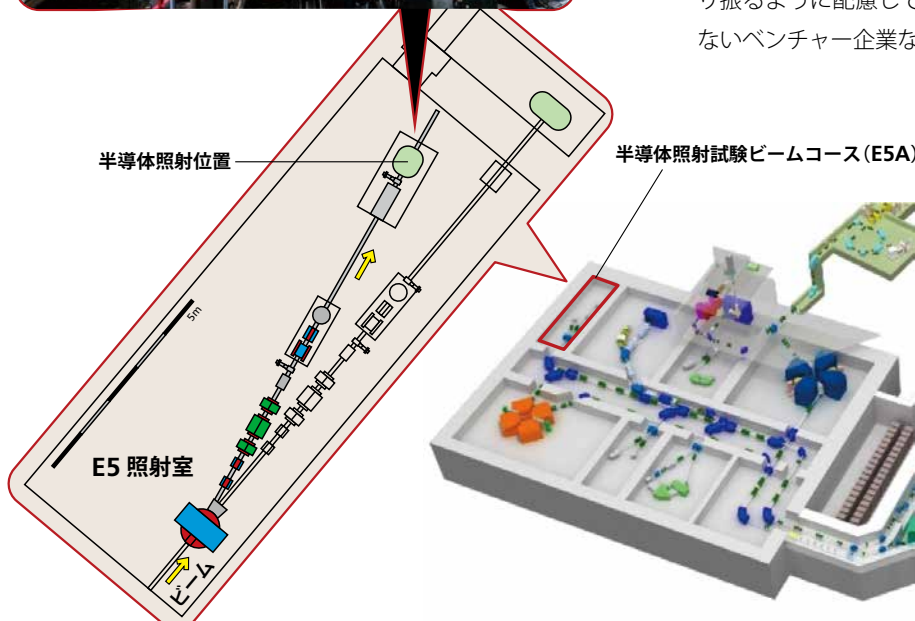
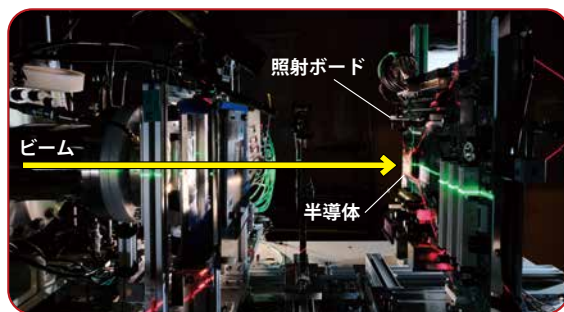


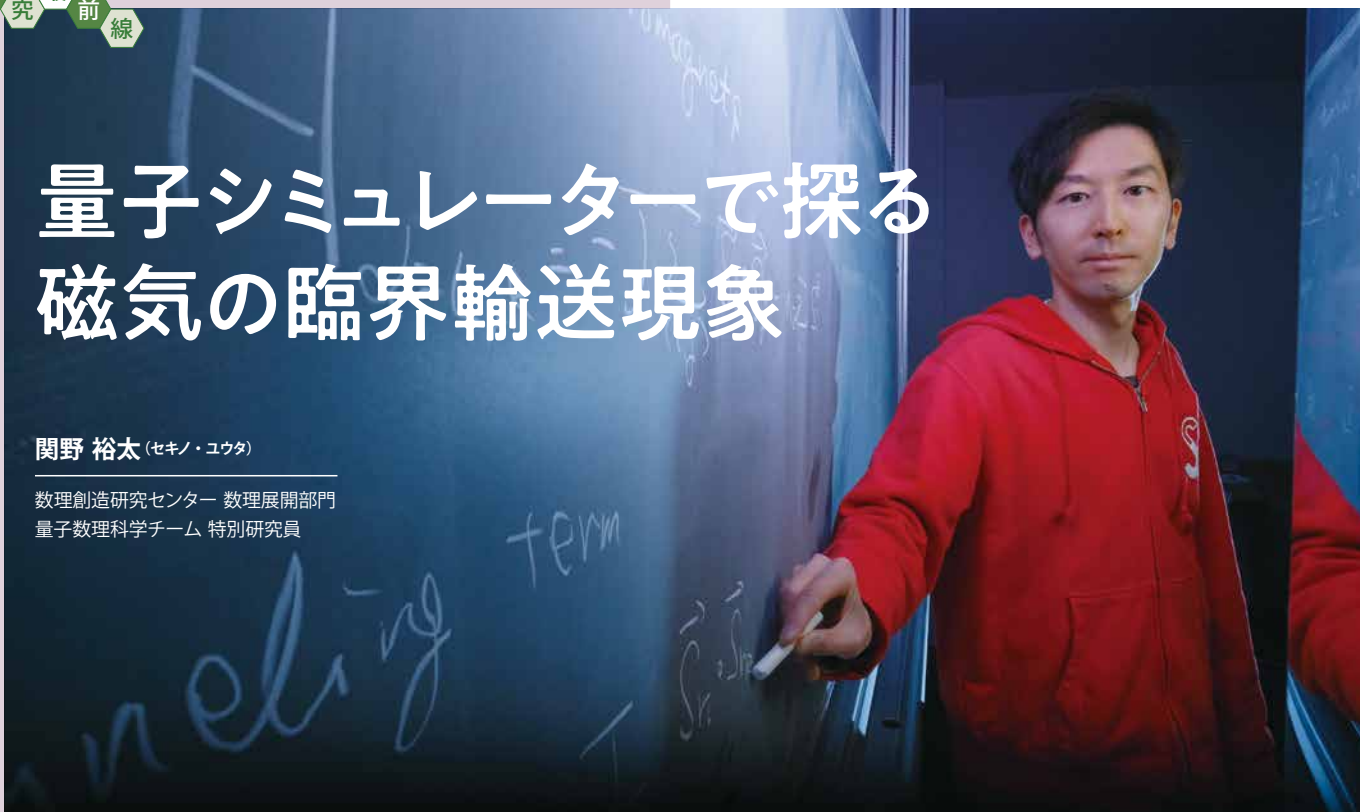
図3 宇宙用半導体の空气中照射試験ビームコース (E5A)

加速器から供給されるビームを直径5cm程に広げ、空气中に取り出す。ビーム量検出器やエネルギー減衰板を通過させてから半導体試験基板に照射する。

量子シミュレーターで探る 磁気の臨界輸送現象

関野 裕太 (セキノ・ユウタ)

数理創造研究センター 数理展開部門
量子数理科学チーム 特別研究員



粒子の集団である「多粒子系」の振る舞いを理論面から追究している関野 裕太 特別研究員。レーザーでつくる極微の格子(光格子)に原子を1個1個閉じ込め、その中で磁気の流れを捉える新たなモデルを考案した。そして、そのモデルの理論計算から、不思議な磁気の輸送現象を見いだした。

電子スピンの振る舞いを 人工結晶で検証する

関野 特別研究員は、新たなシミュレーションの着想に至った経緯から話を始めた。「この着想には二つの前提があります。磁性の源である『電子のスピン』の重要性と、多数の冷却原子を対向するレーザー光の干渉で形成された光格子に閉じ込めた、いわば人工の結晶システムの存在です。人工の結晶システムにおいてスピンの振る舞いを理論的に検証するためのものです」

結晶中の電子には電荷とスピンという二つの性質がある。もともと電子工学の分野では、電荷、つまり電流のコントロールに着目した研究が主流で、その成果はさまざまに応用され、ネット社会の基盤を形づくるまでになった。しかし、電子が物質中を移動するため抵抗による発熱など、エネルギーロスの大きさが問題になっている。この点、磁性はあるが電流を通さない磁性絶縁体では、電子自体は移動せずに隣の電子に自分のスピンの向きを波のように伝えることができるので、エネルギーロスが非常に小さい。そこで現在、世界中でスピンを有効活用した工学応用を目指すスピントロニクスの研究が精力的に進められている。

また、この四半世紀、レーザーで冷却した多数の原子(原子

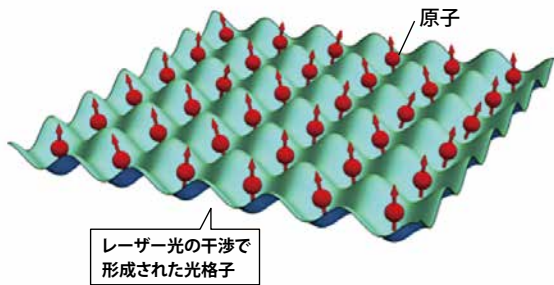
気体)を対象として、粒子の量子力学的な振る舞いを調べる研究が理論と実験の両面で進んでいる。このような冷却原子気体のシステムは「量子シミュレーター」とも呼ばれ、最近ではこれに光格子を加えた人工結晶システムの研究も盛んになっている(図1)。この人工結晶には通常の固体の結晶で見られるような欠陥がなく、レーザーで詳細に原子状態のコントロールや観測ができるので、量子現象を詳細に捉えることができる。さらに、光格子でトラップされた原子を電子に見立てて、電子の量子力学的な振る舞いを調べる研究も行われている。

関野 特別研究員が今回の理論研究で利用したのも、この「冷却原子を結晶中の電子に見立てる」方法だ。「電子のスピンの値は二つですが、原子のスピンは構成要素である電子・陽子・中性子の複合的なもの。そこからレーザーの当て方や磁場のかけ方によりスピンの二つの状態だけを取り出します。また、各原子は光格子でトラップされて動かないので、電子自体が動かない磁性絶縁体のモデルとして扱うことができます」

磁性絶縁体を極細の流路でつなぐ

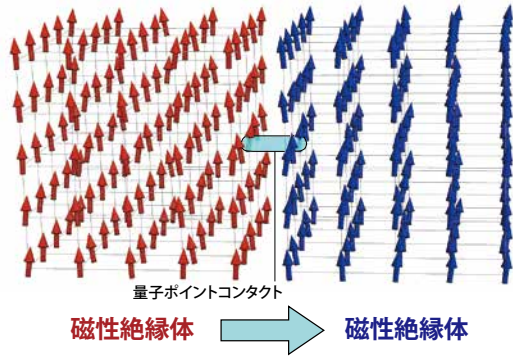
こうして固体結晶中の電子を模擬したモデルはできた。では、次にどのような条件を設定すれば、電子スピンの振る舞いをきちんと把握できるのか?それを考えたときに、関野 特別研究員の頭に浮かんだのは、二つの磁性絶縁体を、レーザーを使った極細の流路でつなぐというモデル(磁気的量子ポイントコンタクト)だ(図2)。

「この量子シミュレーターでは、磁気の状態が次々と隣の原子に伝わっていく『磁気の波(マグノン)』と熱だけが伝わるので、それらの動きを理論的に追うことができます」。このモデルに、



【図1】量子シミュレーターに光格子を加えた人工結晶システム

レーザーを干渉させてつくった光格子に原子を1個1個閉じ込める。



【図2】磁気的量子ポイントコンタクトの模式図

左右の原子気体のスピン（赤と青の矢印）が磁性絶縁体を模しており、水色の磁気的量子ポイントコンタクトによってつながっている。この量子ポイントコンタクトを通じて、左右の原子気体系は磁気と熱の交換を行うことが可能である。

量子力学に基づく計算を適用したところ、磁気抵抗などの計算結果はすぐに出た。しかし、「それが物理的に何を意味するのか、どんな重要なことが隠れているのかを、今回は考えさせられました」と関野 特別研究員は振り返る。ここで前提となる重要なポイントは、磁気波であるマグノンは量子力学では準粒子と見なされ、「ボース粒子」だということだ。

磁気抵抗が無限に小さくなり、磁気緩和時間が著しく長くなる

粒子にはフェルミ粒子とボース粒子の2種類がある。電子も陽子も中性子も、パウリの排他律というルールに従うフェルミ粒子だ。一方、光子や質量数が偶数の原子核（例えば陽子2個中性子2個からなるヘリウム4の原子核）はこのルールに従わな

いボース粒子である。ごく簡単に言えば、ボース粒子の大きな特徴は多数の粒子が同時に特定の一つの状態をとることができることで、極低温の状態ですべての粒子が一つの状態になることを「ボース・アインシュタイン凝縮」と呼ぶ。「理論計算の結果から、ボース・アインシュタイン凝縮を起こす直前のところで、磁気抵抗がものすごく小さくなる、凝縮に近づけば近づくほど限りなくゼロに近くなることが分かりました」。逆に言えば、これは磁気伝導度が無限に大きくなることを意味する（図3）。

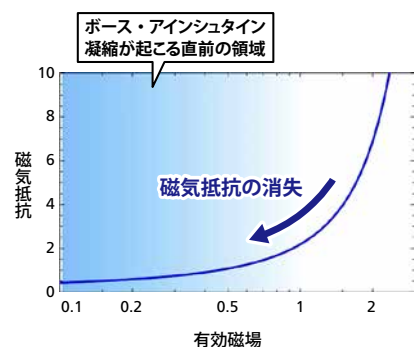
理論計算でもう一つ明らかになったことがある。磁気的量子ポイントコンタクトを挟んで左右の磁性絶縁体の間に磁気と熱の流れが生じるが、やがては左右の状態が同じになって平衡に達し、磁気も熱も流れなくなる。熱い物と冷たい物を接触させると、やがては同じ温度になるのと同じだ。これを緩和というが、緩和にかかる時間が磁気と熱とでは、大幅に異なったのだ。通常は熱の差（温度差）と磁気差（磁化差）は互いに影響を及ぼし合いながら緩和するので、両者の緩和時間は同程度になる。しかしながら、スピンの働く外部からの磁場（有効磁場）が小さい場合、磁化差の緩和はゆっくりで、温度差の緩和は早いという計算結果となった（図4(a)）。さらにスピンの有効磁場が小さくマグノンの量子性が強くなる領域、いうなればボース・アインシュタイン凝縮の直前領域では、緩和時間が非常に長くなることが判明した（図4(b)）。

「水が氷になるように、物質のある安定した状態（相）が別の安定状態にガラッと変わることを相転移といいます。その直前のところで臨界現象という面白い現象がいろいろと見つかっています。ボース・アインシュタイン凝縮も相転移なので、今回の発見もそうした面白い現象の一つと言えますね」

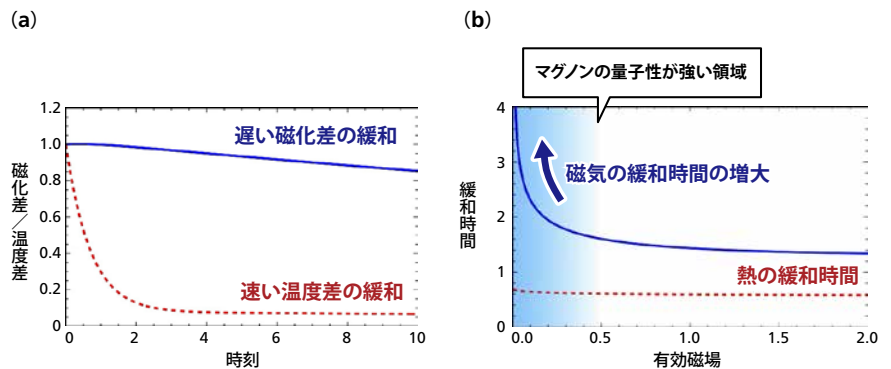
相転移の向こう側には？

現在、次世代磁気メモリ開発において磁気の流れの持続が大きな課題となっている。ゆっくりした磁気緩和を生み出す機構は、その突破口になることが期待される。また、磁気抵抗が無限に小さくなる現象は、ボース・アインシュタイン凝縮の向こう側へと私たちの想像をかき立てる。固体物質の研究で示唆されてきたような、磁気抵抗ゼロの磁気超流動のようなものが光格子系でも存在するのだろうか。ぜひとも相転移の向こう側をのぞいてみたいものだ。

【図3】ボース・アインシュタイン凝縮を起こす直前の磁気抵抗



【図4】マグノンの持続的な磁気の流れ



取材・構成：由利 伸子／撮影：相澤 正。

触媒研究者の夢、 「新たなアンモニア合成」 に挑む

上口 賢 (カミグチ・サトシ)

環境資源科学研究センター
先進機能触媒研究グループ
専任研究員



アンモニアは肥料や化学製品の原料になるなど、現代社会では非常に重要な化合物だ。100年以上にわたって主にハーバー・ボッシュ法で合成されているが、高压高温条件が必要で消費エネルギーが大きいことが問題とされ、代替法の研究開発が盛んに行われている。2024年、上口 賢 専任研究員は、「重金属の一種、モリブデン (Mo) の金属クラスターから創製したアンモニア合成触媒は、窒素分子の強固な三重結合を省エネルギーで切断する上に、試薬は安全で取り扱いが易しい」と発表した。

金属クラスターの触媒活性を発見

「金属原子の集合体である金属クラスターを使った研究がライフワークになっています」と話す上口 専任研究員は、大学院生の頃から金属クラスターを研究してきた。博士課程の学生だった1990年代後半までは、新しいものをつくり構造や物性を調べる研究が主たる分野だったが、次第に新しい方向性を開拓する必要性を感じるようになっていったと言う。

理研に入所した2000年頃からは「金属クラスターを世の中に役立てられないか」と考えて、触媒への応用を模索するようになった。触媒は、それ自体は変化しないが化学反応が進みや

すくなるように手助けする物質である。モリブデンなどいくつかの元素の金属クラスターにハロゲンが結合した化合物は、大気中でも化学的に安定で、合成が比較的容易である。これらの特徴が触媒として用いるのに有利だと考え、触媒利用の研究に着手した(図1)。

ハロゲンが結合した金属クラスターを触媒にするにはどうしたらいいのか。「安定なままでは触媒として機能しないので、加熱しながらクラスターに水素などのガスを流通させてハロゲンを部分的に外し、不安定にしました」。こうして得られた金属クラスターがさまざまな反応に対する触媒活性を示したことで、「金属クラスターの触媒利用」という新たな道を見いだした。

「最高峰の反応の一つ」、アンモニア合成

「ハロゲンが結合した金属クラスターが触媒になることを2000年代初期に初めて示したことは、それなりにインパクトがありました。そこで次の段階として、アンモニア合成触媒をつくりたいと考えるようになったのです」

アンモニア (NH₃) は通常、窒素分子 (N₂) と水素分子 (H₂) から合成される。このときに非常に強いN₂の三重結合 (N≡N) を切断しなくてはならないところに、アンモニア合成の難しさがある。肥料の原料などとして現代社会に欠かせないアンモニアは、工業的には、ハーバー・ボッシュ法で合成されている。150~350気圧、350~550℃という高压高温条件が必要とされ、消費エネルギーの大きさから代替法の開発が望まれてきたが、非常に難しかったために、アンモニア合成は今でも触媒研究者にとって「最高峰の反応の一つ」であり続けているのだ。

ゼオライトに埋め込み、Moの凝集を防ぐ

「アンモニア合成にMoのクラスターを選んだのは、ハー

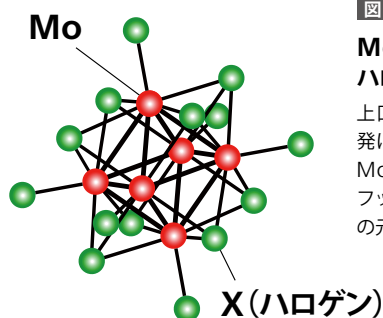
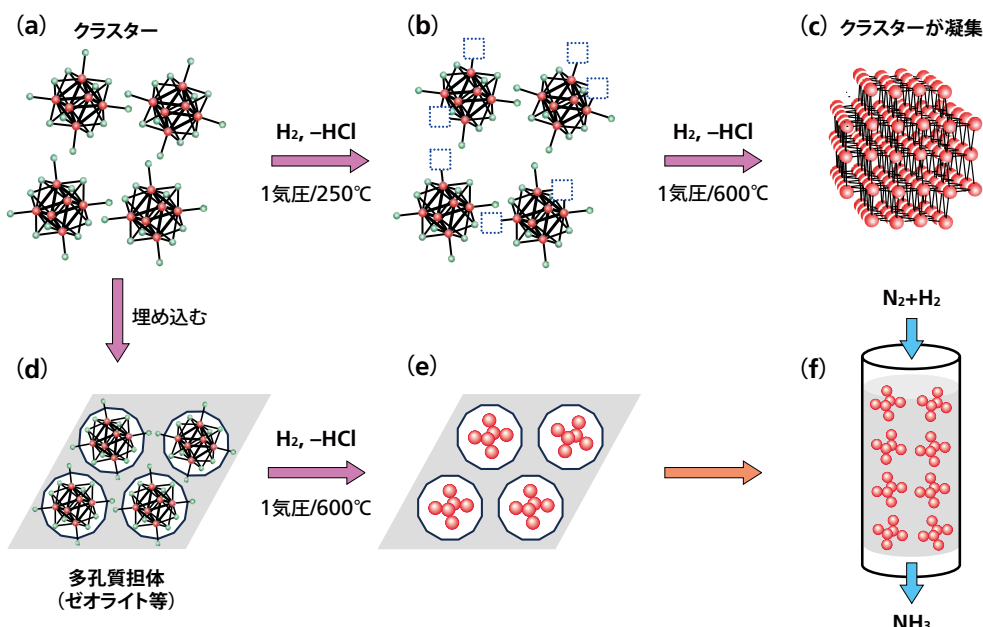


図1
Moの金属クラスターに
ハロゲンが結合した化合物

上口 専任研究員が一連の触媒開発に用いた金属クラスター。赤がMo、緑がハロゲン。ハロゲンとはフッ素 (F) や塩素 (Cl) など第17族の元素のこと。

図2 Moクラスターを用いたアンモニア合成

ハロゲンが結合した6原子のMoから成る金属クラスター (a) に水素ガスを流通させながら温度を上げていくと、ハロゲンが徐々に外れて触媒活性を示すようになる (b)。ところが、600℃まで加熱して全てのハロゲンが外れるとMoが凝集してアンモニア合成に対する活性が得られない (c)。そこで、金属クラスターを同じくらいのサイズ(100万分の1mm以下)の細孔を持つ多孔質担体に埋め込み (d)、水素ガスを流通させながら600℃で加熱。すると、ハロゲンが全て外れた後でも凝集せずに、6原子から成るMoクラスターがほぼ保たれた (e)。そこで水素ガスとともに窒素ガスを流通させるとアンモニアが合成された (f)。



バー・ボッシュ法で使われている鉄や、そのほかのアンモニア合成法で使われているルテニウムなどに比べて、 N_2 の三重結合を切る作用が強いという報告があったからです。また、ルテニウムに比べて値段が安いこともMoを選んだ理由の一つになりました」

ところが、さらに加熱しながらMoクラスターに水素ガスを流通させて少しずつハロゲンを外していても、Moが N_2 の結合を切ることは難しく、アンモニア合成は一向に進まなかった。結局、全てのハロゲンを外すことになったが、Moクラスターが凝集してしまい、結果として反応に関与できる表面にあるMoの数が減ったためアンモニア合成触媒として使えなかったのだ (図2 (a)、(b)、(c))。

Moクラスターを凝集させないために見いだしたのが、たくさんの孔のあいた別の物質にクラスターを埋め込んで加熱する方法だった。「ゼオライトはシリカ (SiO_2) からできている多孔質の物質で、孔の大きさなどの違いから100種類以上が知られています。さまざまなゼオライトにMoクラスターを埋め込んで試したところ、水素ガスを流通させながら加熱してハロゲンを全て外しても、Moが凝集しないものを見つけたのです」

こうして、ハロゲンを全て外した後に、水素ガスに加えて窒

素ガスを流通させることでアンモニアが合成できる触媒の開発に成功した (図2 (d)、(e)、(f)、図3)。

Moはどのようにして窒素分子の三重結合を切断するのだろうか。「電子状態の計算によると、3個程度のMoが窒素分子の切断に同時関与しているようです。Moの数が少なすぎると複数のMoによる協同効果を生かせず、多すぎると凝集が起こって一部のMoが埋め込まれてしまう。どうやら6個程度といった最適な数のクラスターがあるようです」と上口 専任研究員。アンモニア合成のメカニズムも徐々に分かりつつある。

安定、安全、省エネルギーのアンモニア合成法

今回のアンモニア合成の特徴は、鉄やルテニウムより窒素の三重結合を切りやすいMoを使ったため、従来のアンモニア合成触媒に必要とされる電子を供与するための、過度に反応性の強い試薬を使わずに済むことが挙げられる。また、アンモニア合成自体にも特殊な試薬を使わず窒素ガスと水素ガスのみを使っている。さらに、50気圧200℃でアンモニア合成を520時間 (21日以上) にわたって続けても、触媒活性は落ちなかった。当初、課題となっていたアンモニアの合成効率が少ない点についても、最近、解決の糸口が見つかっている。

このようにMoクラスターからつくるアンモニア合成触媒は、いいことばかりのようだが実用化は近いのだろうか。「ハーバー・ボッシュ法は大規模設備を用いたアンモニアの大量合成に適しています。一方、アンモニアはこれまでの肥料などの用途に加えて、二酸化炭素を排出しない燃料としての需要が大幅に増えると見込まれます。今後、アンモニアを増産するには、低温低圧条件で運転でき、小型化した製造設備をさまざまな場所に設置できるような新しいアンモニア合成法も選択肢として検討されるべきではないでしょうか」。環境負荷の少ない合成法による新たな生産方法を実現すべく、上口 専任研究員は努力を続けている。

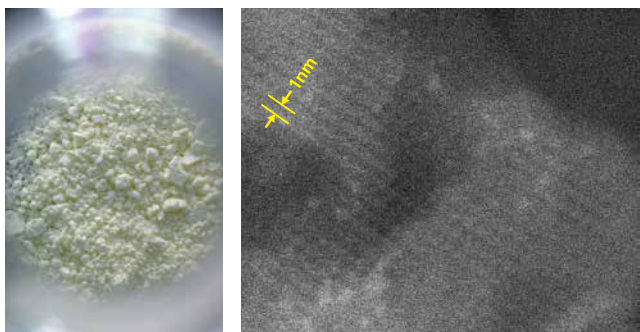


図3 ゼオライトに埋め込まれた粉末状のMoクラスター

(左) 水素処理前実際の写真 (図2dに相当)。
(右) 水素処理後の電子顕微鏡写真 (図2eに相当)。1nmは100万分の1mm。

多発性硬化症を悪化させる腸内細菌を発見

須田 互 (スタ・ワタル)

生命医学研究センター
共生微生物叢研究チーム
チームディレクター



私たち人間には一人当たり40兆もの細菌が共生していると考えられていて、その大部分は大腸に存在する腸内細菌だ。近年の研究で、病気になると腸内細菌の種類や数が変化するだけでなく、腸内細菌の種類や数が変化することによって特定の病気が引き起こされることも分かってきた。腸内細菌と病気の間には密接な関係がある。須田 互 チームディレクターは、最先端のメタゲノム解析技術によって、難病の一つである「多発性硬化症」を悪化させる可能性のある腸内細菌を見つけることに成功した。

入り込んでいた多数の外来遺伝子

「ティザレラ菌B株」。これが多発性硬化症 (Multiple Sclerosis : MS) の悪化に関係していることが新たに判明した腸内細菌の名前だ。MSは脳や脊髄の神経に炎症が生じて、運動や感覚、視力などの機能が障害される自己免疫疾患の一種である。ティザレラ菌は健康な人の腸内にも存在する一般的な腸内細菌の一つだが、比較的症状が重いMSの患者の腸内には、健康者や比較的症状が軽いMSの患者と比べて、ティザレラ菌B株が多く存在することが分かった。

B株という名から想像がつくように、ティザレラ菌にはA株もある。基本となる遺伝子は両者で共通しているが、B株はほかの細菌から多くの遺伝子 (外来遺伝子) を獲得しているのが特徴だ。そのせいでB株のゲノムDNAの全長はA株より約16%も長くなっている (図1)。

異なる個体や生物の間で遺伝子を取り込まれる現象を「水平遺伝子伝播」と呼ぶ。「一般的に生物は、水平遺伝子伝播を防ぐ働きを担う一連の遺伝子を持っています。しかし、B株はそれらの遺伝子の一部が失われていることが分かりました。そのため、外から遺伝子がたくさん取り込まれてしまったのではないかと須田 チームディレクターは話す。

べん毛が炎症を引き起こす？

MSの重症度と腸内のティザレラ菌B株の量に相関があることが分かった後、研究チームはB株のどんな性質がMSの症状悪化に関与しているのかを詳細に調べた。

B株の中に取り込まれた外来遺伝子を分析してみると、MSの症状悪化に関係すると考えられる遺伝子がいくつか見つかった。例えば、「べん毛」の遺伝子だ。本来のティザレラ菌 (A株) はべん毛を持っていない。B株はべん毛を獲得したことで大腸の表面の細胞に接着しやすくなり、大腸で炎症が誘導されるようになる。その炎症が脳などの神経細胞に影響を及ぼすことで、MSの症状が悪化すると考えられた。

腸内細菌を持っていない無菌の疾患モデルマウスの腸に、ティザレラ菌のA株とB株をそれぞれ定着させる実験を行った。その結果、「B株を定着させたマウスでは、麻痺などの神経障害が悪化しました。やはりB株はMSの悪化に関係している可能性が強く示されたのです」

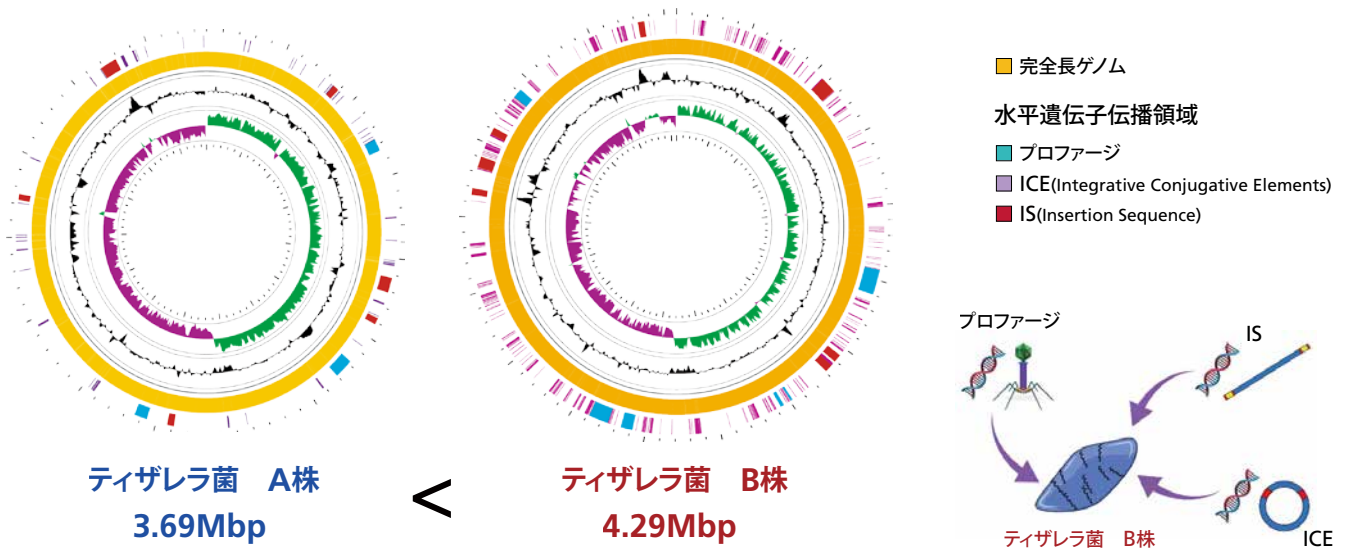


図1 ティザレラ菌A株とB株のゲノム構造の違い

両者のゲノム構造を比較した図。B株のゲノムには外部から取り込まれた遺伝子が多数見つかっている。その結果、B株のゲノムDNAの全長(4.29 Mbp)は、A株(3.69 Mbp)より長くなっている。Mbp：メガベースペア。ゲノムサイズの単位で、Mは100万、bpは塩基対を表す。

株の違いを見つけ出した最先端技術

ティザレラ菌にゲノム構造が異なるA株とB株が存在することが分かったのは、研究チームが新たに導入した最先端のメタゲノム解析技術によるものだ。メタゲノム解析とは、ふん便などのサンプル中に含まれるゲノムDNAを片端から解読する手法で、どんな微生物がサンプル中に存在するかを網羅的に明らかにすることができる。

ただし、従来の一般的なメタゲノム解析の技術では、サンプル中に含まれる細菌の「種」を特定することはできても、同じ細菌の種の中に異なるゲノム構造を持つ複数の「株」が存在することを明らかにするのは難しかった。なぜなら現在主に使われているシーケンサーでは、一度に解読できるDNAがせいぜい150塩基と短いからだ。それだとゲノムの断片的な情報しか得られないため、種の特定には十分でも、それぞれの細菌のゲノムが持っている遺伝子の細かい違いまでは分からない。

そこで須田 チームディレクターらは、一度に1万塩基以上のDNAが解読できるよう改善された「ロングリードシーケンス」という最先端の技術を取り入れることで、ティザレラ菌の全ゲノム配列を決定した(図2)。「全ゲノム配列を解読しなければ、ティザレラ菌にA株とB株があることや、さらにはMSの症状悪化に関わるのがB株のみであることは分かりませんでした。これからの腸内細菌研究では、種だけではなく株の違いまで見ていくことが重要になると考えています」

データ駆動型研究で新しい現象を発見したい

「ヒトの腸内細菌は、まだ分からないことだらけです。疾患に関係する細菌どころか、健康な人の腸内細菌がどのようなゲノム構造を持っていて、どんな遺伝子を持っているのかの全容もまだ明らかにされていません」。腸内細菌の全体像を明らかにするため、須田 チームディレクターらはまず、健康者の腸内細菌の完全ゲノムのデータベースをつくらうとしている。そのた

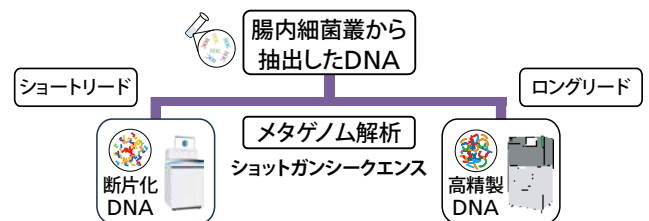


図2 研究チームが開発したメタゲノム解析の手法

一般的なメタゲノム解析では、DNAを短く断片化し、大量に短いリードを解読する「ショートリード」シーケンサーが従来から広く使われている。今回の研究では、DNAを短く断片化せず長いリードを解読する「ロングリード」シーケンサー技術を併用することで、ティザレラ菌の全ゲノム配列を正確に決定できた。

めに上述のロングリード技術を駆使した1,000人規模の詳細なメタゲノム解析を実施中である。

さらに腸内細菌の「時間変化」にも注目している。「マウスでは、腸内細菌の構成が年齢と共にどう変化するのか、それが寿命とどう関係するのかといった研究が進んでいます。ヒトでも腸内細菌の時間変化と健康や寿命の関係について迫ってみたいと考えています」

一般的な科学研究の進め方は、仮説を立てて、その正しさを実験などで検証するというものだ。「自分で立てた仮説にこだわりすぎると、面白い発見を見逃したりする可能性もあります。だから私はなるべく細かいデータを取得し、データ主導で研究を進めることを心掛けています。これまで取得できていなかった腸内細菌の数時間単位の時間変動など、さまざまな新しいデータを集めることで、腸内細菌に関する未知の現象が見えてくるはずですよ」



高齢者の困りごとを 対話で聞き取るロボット

熊谷 和実 (クマガイ・カズミ)

革新知能統合研究センター
目的指向基盤技術研究グループ
認知行動支援技術チーム
特別研究員

内閣府の「令和6年版高齢社会白書」によると、2035年には日本における65歳以上の人口割合を示す高齢化率が32.3%になると予想されている。そんな時代において、認知症への対策は極めて注目度の高いテーマだ。AI・ロボット分野を専門とする熊谷 和実 特別研究員は、ロボットとの対話を通じた認知症進行抑制や予防など、課題解決に向けた研究に取り組んでいる。

認知機能が低下しても暮らしやすい環境を

超高齢社会において、健康寿命を延伸することは社会課題の一つだ。医療・介護現場の人材不足も叫ばれる中、注目されるのがAIやロボットの活用。熊谷 特別研究員は、高齢者から生活の「困りごと」を聞き取るロボットの研究に取り組んでいる。

「研究テーマは、ロボットによる高齢者との対話です。ロボットが『困りごと』を聞き取り高齢者とコミュニケーションを取ることで、高齢者の認知機能が低下しても暮らしやすくなるようにすることが目的です。これは慶應義塾大学医学部との共同研究になります」

この研究における「困りごと」とは、「料理の味付けが分からなくなる」、「お金を数えられなくなる」など、日常生活を送る上で「高齢者自身が」困っていると感じていることを指す。高齢者の見守りに関しては、さまざまな先行研究が進んでいるが、対話ロボットによるアプローチにはどのような課題があるのだろうか。

信頼関係を築く「声かけ」を設計

「ポイントとなるのは、高齢者とロボットの信頼関係の構築です。困りごとを打ち明けるのは、相手が人間でも信頼関係がなければ難しいですね。そこで私はロボットが発するセリフの内容に重点を置き、困りごとの聞き取りに特化した声かけ設計を行いました」(図1)

実験では、まず高齢(65歳から85歳)の健常者10名を対象に、ロボットがどのように声をかければ、困りごとを打ち明けやすくなるのかを検証した。「移動と運転」「食」「買い物」「住居」の4カテゴリーで質問を設定し、続く声かけとして、「ロボットも困っていることを示す内容」、「困りごとの解決策を示す内容」、

発話者	発話内容
ロボット(声かけ1)	外出先でお手洗いに行ったとき等に、もといた場所や来た場所に戻れないことはありませんか？
高齢者(返答例)	初めて行く場所だと分からなくなることがあります。
ロボット(声かけ2)	そうですね。ぼくは初めて行ったところだとよく迷っちゃうんですよ。

図1 困りごと聞き取り用「声かけ」の例

高齢者の回答に対して、共感を示す発話パターンを用意しておく。

「困りごとを明るく受け止める内容」を用意した。話し相手は、理研がオリジナルで開発した会話支援ロボットBONO(ボノ)-06が務め、音声も男声・女声・中間的声など計5種類から被験者が好きなものを選んでもらい、ロボットに対してどのように返答するか検証した。

「実験の結果、5種類の音声の中でも『高い女声』が好評でした。アンケートでは『困っていない』と答えていても、『実は困るときもあります』とロボットに打ち明けた人がいる一方で、打ち明けない人もいました。ロボットと人間の信頼関係は、まだまだできていないと考えます。しかし、ロボットとの対話中に発言量が増えた人たちの様子を見てみると、少しずつ関係性を構築しているのではと感じました」

いずれはAI技術で一人一人にカスタマイズ

熊谷 研究員の専門分野は、HRI(ヒューマン・ロボット・インタラクション)。学生時代は、人間の表情などを感知して行動を決定するロボットの研究に取り組んでいた。そこでは機械学習を用いて人間の表情パターンを分析し、感情を予測するモデルを構築していた。AIを用いた研究ノウハウは今回の研究でも生かされそうだ。

「今後は認知機能が低下した人を対象にした研究も行っていく予定です。対話内容の学習データが集まれば、機械学習などを用いて、高齢者一人一人の性格に合わせた『声かけ』のカスタマイズも可能になるでしょう。研究に協力していただいた高齢者施設では、BONO-06に愛着を持つ人が多いとの報告もあります。AI技術を用いて、認知症の早期対策や進行抑制に貢献できればと考えています」

私の
科学道

シロウズ
ミカ
コ
白水美香子
生命医科学研究センター
タンパク質機能・構造研究チーム
チームディレクター



タンパク質の立体構造を解析し、
研究を成功に導く

2002年から5年をかけて、約3,000種ものタンパク質の立体構造を解析した国家プロジェクト「タンパク3000」の立役者の一人であり、数々の重要なタンパク質に関わる研究論文に共著者として名を連ねる白水 美香子 チームディレクターの素顔に迫る。

立体構造解析研究をマネジメント

「科学者への道を進むきっかけは、高校で生物クラブに入ったことです。植物細胞の培養を黙々とやるうちに、自分では実験に向いていると感じたという。

東京大学で生物化学を専攻してから研究を続け、博士号を取得して7年目のときに、文部科学省が主導する「タンパク3000」という大型研究プロジェクトが始まった。その中心になったのが大学時代の指導教官だった横山 茂之 主任研究員（現 理研名誉研究員）だ。

「卒業研究で横山研究室を選択したことが研究人生を決めた」と今でも思う。理研の主任研究員となった師と共に理研へ移り、チームリーダーに^{ぼってき}抜擢され、「タンパク3000」をはじめ、数十もの研究室から解析を依頼される中、多いときには

80人ものスタッフの役割分担をしたり、データをチェックしたりと忙しい日々が続いた。最適なデータになるように研究者とディスカッションするのも大事な仕事だ。そのころからずっと、実験そのものよりマネジメントに携わってきたため、「自分は“科学者”というより研究支援者の」と自己分析する。これも師の「先見の明」かもしれない。

機能を定める立体構造

タンパク質は、アミノ酸が鎖状につながった大きな分子である。その鎖が折り畳まれて立体的な構造になることで機能が生じるため、生命のメカニズムを解き明かすには、立体構造の情報が欠かせない。また、立体構造が分かるとタンパク質に結合し、機能を制御する分子も設計ができる。それゆえ薬の開発などにも利用されている。

立体構造の解析法には、結晶化させたタンパク質にX線を当てて調べるX線結晶構造解析や強い磁場中で原子核の共鳴現象を観測する核磁気共鳴(NMR)法、クライオ電子顕微鏡による観察などがある。2017年のノーベル化学賞の受賞対

象となったクライオ電子顕微鏡法は、瞬間的に凍結させたタンパク質の画像を観察するもので、立体構造解析を大きく進展させた。最先端の技術は導入して終わりではなく、ニーズがあればすぐに使いこなせるよう、体制を整えておくことにも余念がない。気がつけば、いろいろな分野のさまざまな研究者との共同研究で数多くの成果を上げること。どんなこともほどほどに面白がれるからこそ、今までやってこれたと笑う。

新しい方法を取り入れ次の時代へ

「タンパク3000」の成果をはじめ、これまでの数々の知見が、2024年のノーベル賞で注目されたタンパク質の立体構造予測AI「AlphaFold」の礎となった。「立体構造解析も次の時代に入ったと感じます。科学の魅力は論理的に物事を進められること。正しいサンプルを正確に測定・解析することがもちろん大事ですが、立体構造は元の測定データも併せて公開されるため、誰でも検証可能で信頼性があります。私たちが解析した構造からより多くの知見が生み出されるよう、これからもこつこつと仕事を進めていきたいです」

批判恐怖症

小長谷 有美 (コナガヤ・ユミ)

生命機能科学研究センター
定量的細胞運命決定研究チーム
チームディレクター



筆者近影。神戸総合運動公園のコスモスの丘にて。

「フィードバック・サンドイッチ」という言葉が使われるようになって久しい。フィードバック・サンドイッチとは、改善すべきネガティブなコメントを伝える際に、相手が受け入れやすいようにポジティブなコメントで挟み込むコミュニケーション手法である。例えば、資料を作成した同僚や部下に対してまず「資料の作成、本当に分かりやすく助かりました!」とポジティブなコメントから会話を始める。次に「次回は、最新のデータをもう少し取り入れていただけるとさらに説得力が増すと思います」とネガティブなフィードバックを伝え、最後に「普段から細かい部分まで気を配れるのは本当に素晴らしいと思います。これからも期待しています!」とポジティブなコメントで締めくくるといった具合だ。これにより、相手に対して前向きな印象を残しつつ、改善意欲を引き出そうというわけである。

しかし、フィードバック・サンドイッチがもてはやされるようになった一方で、この効果を疑問視する指摘もある。人はポジティブな意見の方が気持ちよく受け入れられるので、最初と最後のポジティブなコメントばかりに気を取られてしまい、結局ネガティブなコメント、つまり改善を要する点が頭に残らないという危険性をはらんでいるというのだ。

フィードバック・サンドイッチはもともとビジネスで使われるようになった手法だが、アカデミアでも似たような手法を耳にすることがある。例えば学会の質疑応答での、「〇〇先生、大変興味深い発表をありがとうございました。素人質問で恐縮ですが、〇〇の条件で実験を行うと結果が変わる可能性があると思われませんか? (本当に言いたい批判) ……」といった問いかけである。このように相手を批判

することを恐れて婉曲的な表現を利用し、あえて批判が伝わりづらいコメントをしてしまっていないだろうか? そもそも、学会等におけるネガティブなフィードバックが昔に比べて少なくなってきたという声も聞く。時代の流れなのか、周りの人々に嫌われたくないがあまり、ネガティブなコメントを控える人が増えているのかもしれない。

私はこのような状況を非常に憂慮している。なぜなら科学において批判的思考(クリティカル・シンキング)は必須だからである。批判的思考とは、証拠に基づいて論理的に考え、仮説を吟味することだ。そして科学的な議論において相手を批判することは、あくまで相手の主張に対してであって、相手の性格などに対する批判とは切り離されるべきものである。自分の過去の研究生活を振り返ってみても、実際に研究を建設的に前進させるきっかけとなったのは、うわべだけのお世辞や誉め言葉ではなく、ネガティブなコメント、時には痛烈な批判であった。それゆえ、批判的なフィードバックを下さった周りの人々に心から感謝したい。

日常生活における会話ではこの限りではないと思うが、少なくとも科学的な議論においては相手の主張を批判することを恐れない文化が存続して欲しいと願うばかりである。大学院で厳しく批判し、指導して下さった恩師の言葉を懐かしく思い出しながら。

“日本語の勉強が必要ですね——”

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。
問い合わせ先 外部資金室 寄附金担当



kifu-info@riken.jp www.riken.jp/support/

