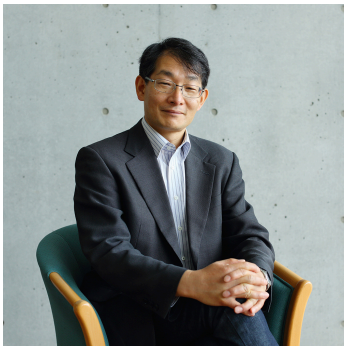
東北大学理学部の研究力

http://www.sci.tohoku.ac.jp/

TOHOKU
UNIVERSITY

■目次

はじめに 1
数学専攻
特異な空間上の微分方程式 ～空間と微分方程式を同時に動かす～ 2
離散群について語るとき、我々の語ること～群論、エルゴード理論、そして理論コンピュータ科学～ 5
物理学専攻
ビッグバン元素合成研究に残る最後の重要核反応の確率を初測定
ービッグバン元素合成の謎がさらに深まるー 8
光で磁石の性質を消す～磁石の起源を担う力が光で正反対となる原理～ 11
ディラック線ノードの直接観測に成功 -トポロジカル量子コンピューター基盤物質を発見- 14
天文学専攻
史上初、ブラックホールの撮影に成功 19
銀河系の端が見えてきた！ 21
地球物理学専攻
明滅するオーロラの起源を ERG（あらせ）衛星が解明
－宇宙のコーラスにあわせて密かに揺れる電子の挙動がつまびらかに－ 26
2011 年東北地方太平洋沖地震の発生メカニズムを解明
－上と下の両プレートのより固い岩盤同士のぶつかりあいで大地震が発生－ 30
世界初！地球近傍の宇宙で発生するプラズマと電磁波の相互作用発生域の可視化に成功
～最新の科学衛星「あらせ」と極北のオーロラ観測から宇宙の物理現象を理解～ 34
化学専攻
ランタン酸化物の超伝導体化に成功 高温超伝導体の絶縁ナノブロック層が超伝導を発現 39
ダーウィン以来の謎、就眠運動の仕組みを解明 物時計発見のルーツとなった生物現象 43
安定なケイ素版ケトンの合成に成功 純粋なケイ素－酸素二重結合の構造と反応性の解明 47
地学専攻
隕石中から太陽系最古の新鉱物を発見 初期太陽系進化過程の物理化学条件に新たな制約 51
月の地下に大量の氷が埋蔵されている可能性
月隕石から氷の痕跡である「モガナイト」を発見、月で利用可能な水資源に期待！ 54
桜島火山の大規模噴火に共通の前駆過程を発見～マグマはごく浅部から噴出～ 58
生物学科／生命科学研究科
鳥類の進化に関わった DNA 配列群を同定ー鳥エンハンサーの発見ー 62
海にすむ生物の複雑な関係性を捉える 緩い種間関係と種の多様性が生態系を安定化 66



東北大学
理学部長・理学研究科長
寺田 眞浩

科学の起源は、紀元前 6 世紀ころにあり、自然現象を観察し分類することから始まりました。したがって、自然を主な研究対象とする理学は、様々な科学分野のうちでも、最も伝統ある分野といえます。科学の英語表記である"Science"を理学の英語表記が同じく冠している通り、理学はまさに科学を代表する学問分野であるということが感じられると思います。

"Science（＝理学）"は「知りたい」や「面白い」といった純粋な探究心・好奇心に端を発する、「知の創造」をその本質に備えた学問分野です。理学部の使命は、先人達が明らかにしてきた「自然の理（ことわり）」を良く理解し、想像力とチャレンジ精神をもって「知の創造」を開拓することで人類共通の知的資産を生み出すとともに、その体系化を通じて未来へと継承することにあります。

本学理学部・理学研究科は、100 年以上の長い歴史を誇る国内でも最大規模の理学部の一つで、数学科、物理学科、宇宙地球物理学科、化学科、地圏環境科学科、地球惑星物質科学科、生物学科の 7 学科から構成されています。また、大学院理学研究科は、数学専攻、物理学専攻、天文学専攻、地球物理学専攻、化学専攻、地学専攻の 6 専攻から構成されており、幅広い分野にわたって最先端の研究を展開しています。このように多様な分野を包括する理学部・理学研究科は、分野の融合を通じて新たな「知の創造」の活力を生み出すばかりでなく、様々な人との交流をもたらします。異なるバックグランドを持つ人との出会いは新たな経験や知識の習得にとどまることなく、多様な価値観や世界観への気付きをもたらし、間違いなく皆さんの人生を豊かにします。

緑あふれる青葉山のキャンパスで、若き皆さんとともに新たな「知の創造」に向けた取り組みができることをとても楽しみにしています。

特異な空間上の微分方程式～空間と微分方程式を同時に動かす～

2017 年 11 月 15 日　数学専攻　准教授　本多 正平

概要

数学では「空間」という言葉が頻繁に現れます。どのような空間をどのような意味で調べるかによって様々な分野に分かれます。具体例をあげましょう。

たとえば、ドーナツの表面とコーヒーカップの表面は「本質的に同じ」空間である、と考える分野があり、それはトポロジーと呼ばれます（図 1）。ここでの、本質的に同じ、は両方を粘土のようなやわらかい材質でできていると思って粘土を伸ばしていくと、ドーナツの表面はコーヒーカップの表面に変身（より正確には変形）できることを意味しています。

図 1. これをドーナツと同じと考えるのがトポロジー（※wikipedia）

しかしドーナツを買うつもりで買い物に行ってコーヒーカップを買ってくる人はまずいないでしょう。それは両者の「形」が明らかに違うため、日常の感覚だとその二つは違うものだからです。より正確には、両者が鉄のような固い物質でできていると思ったら、上のような変形はできない、よって異なる、といえます。この「固い物質でできていると思ってその形を重視する幾何学の分野」をリーマン幾何学といい、私はそれを研究しています。

リーマン幾何学で現れる空間のことをリーマン多様体と呼びます。よってコーヒーカップの表面はリーマン多様体の一例です。そしてリーマン多様体の上では、様々な微分方程式を考えることができます。微分方程式とは現象を記述する方程式だと考えて OK です。

図 2.コーヒーカップ上の微分方程式の例

たとえば、コーヒーカップの表面のどこか一点に熱を浴びせたとき、その熱がコーヒーカップ全体にどのように伝わるか、という問いを考えます。どこかを熱くしたとき取っ手の部分がいつ熱くなって持てなくなるか、を考えているような感じです。この問いの答えは熱方程式と呼ばれる微分方程式をコーヒーカップ上で解くと得られます。熱方程式はコーヒーカップ上に限らず全てのリーマン多様体上で考えることができ、そこでも非常に重要な方程式の一例として知られています。（図 2）

私はリーマン幾何学の中でも特に、リーマン多様体の非常に弱い変形に興味を持っています。その変形とはグロモフ・ハウスドルフ収束 (注 1) と呼ばれ、空間のトポロジーが大きく変わってもよい、非常に弱い変形です。この変形を調べる分野をリーマン多様体の収束理論と呼びます。私

の研究分野はまさにここです。この理論は数学の大きな未解決問題であったポアンカレ予想(注 2)の証明の中でも本質的に使われ、近年非常に注目を集めている理論です。
リーマン幾何学に現れる空間、リーマン多様体は全てつるつるな、すなわち滑らかな空間ばかりなのですが、この収束理論では尖った、すなわち特異点もあるような空間を考えることが自然になります。ここでグロモフ・ハウスドルフ収束の例をあげましょう。

サイコロの表面を考えます。これは角が 8 つあるので滑らかではありません。このサイコロをビニール袋で優しく包みます。そして中の空気を一気に抜きます。すると、ビニール袋がサイコロの表面に張り付くことが想像できると思います。張り付くまではビニール袋に角はありません。すなわちビニール袋はリーマン多様体です。ですが張り付いた先のサイコロの表面には角があるため、それはリーマン多様体ではありません。この現象をビニール袋がサイコロの表面にグロモフ・ハウスドルフ収束するといいます。この例からもリーマン多様体の極限は滑らかとは限らないことがわかります。（図 3）

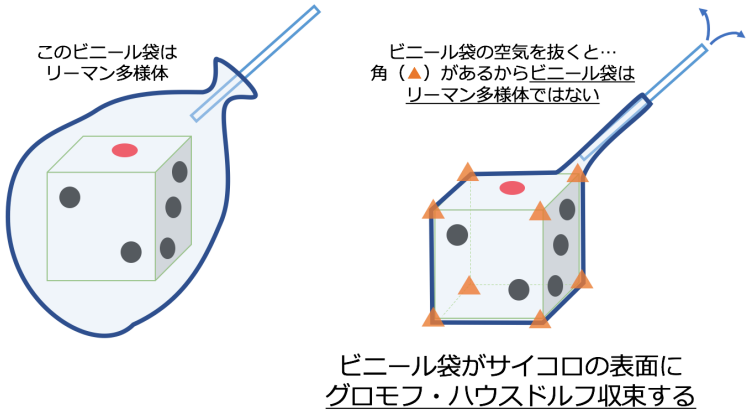


図 3. グロモフ・ハウスドルフ収束の例

私はこのようなグロモフ・ハウスドルフ収束のもとで、どのような微分方程式がおもしろく振舞うか、という問いに興味を持って調べています。実はその際、最も重要な方程式は、上で述べた熱方程式です。熱方程式をサイコロの表面のような角がある空間でも考えることがポイントです。それらを調べることで他の、非常に複雑な微分方程式も調べることができる、ということがわかってきました。

研究内容

どんなリーマン多様体の上にもテンソル(注 3)と呼ばれる量が定義できます。これはリーマン多様体の各点の上に行列を定めるようなものです。特に重要なものとして、どんなリーマン多様体にもリーマン計量と呼ばれる自然なテンソルが唯一つあります。これらはリーマン多様体のグロモフ・ハウスドルフ極限空間として現れる、（特異点があるかもしれない）空間でも同様であることが知られています。
例えば上で議論された、極限空間の一例であるサイコロの表面のリーマン計量とは、サイコロの表面の各点に 2×2 単位行列を置くことに他なりません。
私はリーマン多様体の列が、（特異点があるかもしれない）ある空間にグロモフ・ハウスドルフ収束している状況を考え、その各リーマン多様体上にテンソルを一つずつ取って、さらに極限空間上にもテンソルを一つ取って、それらテンソルの収束の概念を定義しました。

例えば、ビニール袋がサイコロの表面にグロモフ・ハウスドルフ収束している例を思い出してください。この例ではビニール袋のリーマン計量が、サイコロの表面のリーマン計量（各点に 2×2 単位行列が置かれているもの）に収束していることが示せます。
このテンソルの収束の概念とその基本的性質は応用が広く、これを用いて、等周問題、山辺の方程式、ホッジラプラシアン、p ラプラシアンといった微分方程式と、グロモフ・ハウスドルフ収束との密接な関係を与えることができました。それらを応用してリーマン多様体自身への応用も見つかりました。
このような研究の方法はリーマン多様体の社会学と呼ばれるもので、個々のリーマン多様体を調べるのではなく、その全体を調べることでなされるものです。その社会をグロモフ・ハウスドルフ収束理論の道具を用いて調べる、この方針でまだまだ研究をやっていきたいと思っています。

発表雑誌

Shouhei Honda, Ricci curvature and convergence of Lipschitz functions, Communications in Analysis and Geometry, 19 (2011), no.1, 79-158.
Shouhei Honda, A weakly second-order differential structure on rectifiable metric measure spaces, Geometry & Topology, 18 (2014), no.2, 633-668.
Shouhei Honda, Ricci curvature and L^p-convergence, Journal fur die reine und angewandte Mathematik, 705 (2015), 85-154.
Shouhei Honda, Spectral convergence under bounded Ricci curvature, Journal of Functional Analysis, 273 (2017), no.5, 1577-1662.
Shouhei Honda, Elliptic PDEs on compact Ricci limit spaces and applications, to appear in Memoirs of the American Mathematical Society.

用語説明

(注 1) ポアンカレ予想
1904 年にポアンカレによって予想され、2000 年代に入ってペレルマンによって解かれた、クレイ数学研究所が提出したミレニアム問題の一つ。この解決によってペレルマンに、フィールズ賞と約一億円の賞金が与えられることになったが、どちらも辞退した。

(注 2) グロモフ・ハウスドルフ収束
ハウスドルフ距離という古典的に知られていた距離があるが、それを内在的にしたものとしてグロモフが定義した概念。最近ではこの収束理論を本質的に使って、ケーラー・アインシュタイン計量の存在問題に関する大きな未解決問題も解かれた。

(注 3) テンソル
行列の一般化。例えば数を長方形の形に並べたものが行列であるが、直方体の形に並べるとそれはテンソルとみなせる。

離散群について語るとき、我々の語ること

～群論、エルゴード理論、そして理論コンピュータ科学～

2019 年 1 月 30 日　数学専攻　助教　田中　亮吉

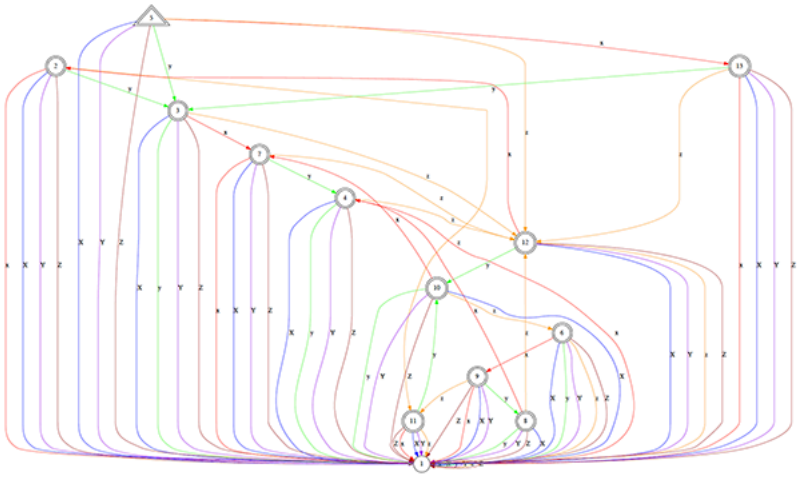


図. (4, 4, 4)三角形群のオートマチック構造（GAP により作成）

概要

ソーンダース・マックレーンは彼の著書の一つで次のように述べています。

群論[注1]は、あのような単純な公理系から出発しながらどうしてかくも深遠なものとなるのかという疑問が湧くかもしれない。これは群の公理系のもつ若干の特色によって説明できよう。その特色はたとえば次のようにまとめられるだろう。

(a) 起源が多様であること（幾何学的変換、代数的演算）
(b) 決定的な応用をもっていること（ガロア理論、幾何学、数論）
(c) そのほかにもいろいろに応用できること（量子力学、結晶構造）
(d) その概念を生み出すもとになったものを用いて正確に表現できること。つまり、任意の抽象群[注2]は（少なくともある 1 つの）変換群[注3]と同型[注4]になるということ
(e) モデルの多様性:有限群[注5]には多くの種類があり、それでいてあまり多すぎないという点

(『数学--その形式と機能』彌永昌吉監修/赤尾和男・岡本周一共訳(森北出版株式会社)、p.191)

著者が「モデルの多様性」と言ったとき、念頭にあったのは主として有限群であったと思われます。それでは有限群のように、離散的[注6]であって、かつ無限の要素からなる群はどうでしょうか？

例えば、結晶構造を記述する群にこのタイプの群が現れます。このような「離散無限群」を考えるとき、「多くの種類があり、それでいてあまり多すぎない」という指摘は示唆的であると思います。それはしばしば有限群のように「原理的には」分類が可能であるような性質と、真っ向から対抗するような構造を有しているからです。

近年、離散群論の進展には目覚ましいものがあります。特に際だった特色であると筆者が思う点は、様々な分野を巻き込んで研究が展開されているところです。それは歴史的に行列からなる群が物理現象の記述に自然に現れていたのと、やや異なった仕方のように見えます。数学内部において、これまでつながっていなかった分野たちの新しい接点を見出すような発展が多く見られます。以下、この研究分野の一端を紹介したいと思います。

研究内容

有限のアルファベットからなる「語(word)」の集まりである「言語(language)」を考えます（例えば、a と b のみのアルファベットの時、語は a, b, aba, など、です。）。この言語を少し大きくすることで、次のように群の構造を入れることが出来ます。何もない「空（くう）」な語も語に付け加えます。また、アルファベット a や b に対応して、大文字の A や B を付け加えて、さらに、アルファベットの大文字と小文字が連なる aA や Aa, bB や Bb は空な語と考えます（キャンセルのルール）。このとき、新しい語たちを並べて繋げるという操作（「・」（ドット）で表す）に、このキャンセルを行うことで群が出来上がります。（例えば aaB と ba という語については、aaB・ba=aaa となります。）これは、ある具体的な群の作り方の一つですが、群はいくつかの決まった公理系を満たす数学的対象として、より正確に定義されます。正確な定義を別にすれば、我々の拡張された言語である群が、有限個のアルファベットが構成する無限個の語からなることは、この例から想像できるのではないかと思います。

このような言語たちの数学的な構造を理解したいと考えます。特に、有限のアルファベットが作る無限の語からなる言語について、その仕組みを理解したい。この単純な動機は、新しい発想を呼び寄せ、多くの内容のある成果を生み出しています。ここで重要なアイデアは、この言語を幾何学の対象と見ることであったり、また、無限に長い語を、粒子のなす複雑な軌道と見たりすることであったりします。さらに、無限の語を生成するルールが有限個の規則で得られる場合には、理論コンピュータ科学における「オートマトン(注7)」によって、その仕組みを記述することができる場合があります。

例えば、平面幾何学の基本的なモデルは、平らな平面、球面（曲率が正）、双曲平面（曲率が負；いたるところ馬の鞍のように見える曲面）です。これらは空間の連続モデルとして、時空間の構造を記述する模型を研究するときに、基本的な役割を果たします。一方で、我々が相手にしたい対象は、離散的であり、その上で幾何学を考えることは、それ自体一つの問題となります。グロモフが定義した「双曲群」と呼ばれる群は、離散的な群であり、かつ負に曲がった空間の有する幾何学の性質が、離散的な形で実現されているものです。力学系では、負に曲がった空間において、粒子の等速直線運動（測地流）はカオス的に振る舞うことが知られています。双曲群を研究することで、その複雑さの性質を調べることが出来ます。また、双曲群は、言語として正規言語(normal language)、つまりある有限状態オートマトンで認識できるような群であることが知られています（サーストン、キャノンらによる）。その構造は、多くの場合、パリやロンドンの地下鉄の路線図より（はるかに）複雑です（図１）。

現在の私の研究はこれらの研究に根ざしています。発表雑誌の論文では、ヴェルシックというロシアの数学者の提起した「最大エントロピー(注8)を持つ有限生成群上のランダムウォークはいつ存在するか？」という問題について、双曲群の場合に、確率論、ポテンシャル論、エルゴード理論、そしてオートマトンに基づいた測地線のエンコーディングを援用して研究を行いました。

離散群について我々が語るとき、その語り方は実に多様です。ここで触れたのは、そのほんの一部にすぎません。

発表雑誌

Ryokichi Tanaka, Hausdorff spectrum of harmonic measure, Ergodic Theory and Dynamical Systems 37, 277-307 (2017).

用語説明

（注１） 群論

群とは数学における数ある代数構造の中で、もっとも基本的なものの１つである。群論は代数、幾何、トポロジー、解析あるいは物理学や情報理論などで出現するさまざまな群を研究する。いくつか仮想的な性質を仮定してその性質を満たす群を見つけること、あるいはそうした群は存在しないことを証明することも群論における基本的な研究方法である。

（注２） 抽象群

ある群が与えらるとき、それは往々にして生まれ持った出自が感じ取られるような記述のされ方をするが、これはその群の代数構造のみに着目したときの群のこと。

（注３） 変換群

図形や式、装飾あるいは結晶、さらに空間の対称性を記述するものとしての群のこと。

（注４） 同型

2つの群の群としての構造が一致しているとき、その2つの群は同型であるという。このとき、群としては抽象的な代数構造のみを考えている。

（注5） 有限群

要素が有限個の元からなる群のこと。例えば５個のアルファベットを入れ替える操作すべてのなす群は120個の要素からなる有限群である。

（注6） 離散的

連続的の対義語である。

（注7） オートマトン

有限個の状態の集合とその間の矢印からなる有限グラフの一種で、有限個のアルファベットからなる文字列を読み取るシステムが備わっているもの。

（注8） エントロピー

もともとは統計力学に由来する量であるが、情報理論や解析学においても基本的な量である。ここでのエントロピーは、典型的に起こりうる可能な軌道全てをコードするのに何ビット必要かを考えることで、軌道の複雑さを測っている。

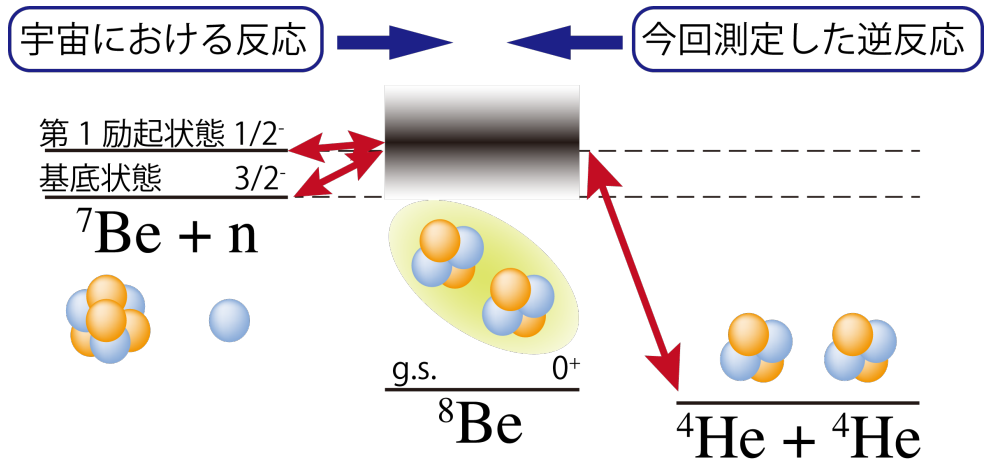
ビッグバン元素合成研究に残る最後の重要核反応確率を初測定
―ビッグバン元素合成の謎がさらに深まる―

2017 年 2 月 2 日　物理学専攻　准教授　岩佐　直仁

概要

川畑 貴裕 京都大学大学院理学研究科准教授、久保野 茂 理化学研究所仁科加速器研究センター客員主管研究員、岩佐 直仁 東北大学大学院理学研究科准教授らの研究チームは、大阪大学核物理研究センターの施設を用いて、ビッグバンによる元素合成で起こる ^{7}Be + n → ^{4}He + ^{4}He 反応の断面積[1]を初めて測定することに成功しました。ビッグバン元素合成で生成される元素のうち、^{7}Li は理論的に予測されているよりも少ない量しか観測されていません。「宇宙リチウム問題」と呼ばれるこの問題を解く仮説の一つとして、今回取り上げた反応が高い確率で起こっている可能性が指摘されていましたが、今回の測定結果によりこの仮説では説明が難しいことが分かりました。ビッグバン元素合成の謎がさらに深まることを示唆する結果です。本研究成果は平成 29 年 2 月 3 日、アメリカ物理学会発行の学術誌 Physical Review Letters に掲載されました。

なお、本研究は、学生教育を兼ねつつ、京都大学理学部の卒業研究科目「物理科学課題研究 P4」に所属する学部 4 年生の手によって実施されました。また、大阪大学核物理研究センターから、大学の枠を超えた教育用ビームタイムの提供を受けました。



1．背景

多くの物理学者は、今から約 140 億年前におこったとされる「ビッグバン」によって、我々の宇宙が誕生したと考えています。ビッグバン理論によると、宇宙開闢の約 10 秒後から 20 分後にかけて「ビッグバン元素合成」がおこり、水素、ヘリウム、リチウムなどの軽い元素が生成されました。宇宙初期における軽元素の生成量について、観測による推定値とビッグバン元素合成

[1] 量子力学的な粒子が衝突し、散乱ないしは反応を起こす確率を表す量のこと。

計算による予測値を比較することは、宇宙創生のシナリオを明らかにする上で極めて重要な知見をもたらします。

水素とヘリウムの同位体については、生成量の観測推定値と理論予測値が良く一致している一方で、^{7}Li については、生成量の観測推定値が理論予測値の約 1/3 でしかないという重大な不一致が知られています。この不一致は「宇宙リチウム問題」と呼ばれ、ビッグバン理論に残された深刻な問題として世界中の研究者の関心を集めています。

^{7}Li は ^{3}He ＋ ^{4}He → ^{7}Be ＋ γ 反応によって生成された ^{7}Be が、ビッグバン元素合成終了後に、53.3 日の半減期で電子捕獲崩壊[2]することで生成されたと考えられています。しかし、^{3}He ＋ ^{4}He → ^{7}Be ＋ γ 反応の断面積は、過去に十分な精度で測定がなされており、^{7}Be の生成確率を減少させることで宇宙リチウム問題を解決できる可能性は、すでに否定されています。

^{7}Be は電子捕獲崩壊して ^{7}Li に変化するほかに、原子核反応によって他の原子核に変化しています。^{7}Be に対して、最も高い確率で起こると考えられている反応は ^{7}Be ＋ n → ^{7}Li ＋ p ですが、この反応の断面積も、過去に十分な精度で測定されており、この反応がビッグバン元素合成計算による予測値を大きく変更する可能性も、すでに否定されています。次いで高い確率で起こると考えられている反応が ^{7}Be ＋ n → ^{4}He ＋ ^{4}He 反応です。しかし、ビッグバン元素合成に関係するエネルギー領域では実験条件が難しく、実際にこの反応の断面積が測定されたことはありませんでした。この反応の断面積によっては、大部分の ^{7}Be が電子捕獲崩壊する前に ^{4}He に変化してしまい、結果として ^{7}Li の最終的な生成量が減少することで、宇宙リチウム問題が説明できると期待されていました。

^{7}Be ＋ n → ^{4}He ＋ ^{4}He 反応では、鏡映反応[3]とよばれる陽子と中性子を入れ替えた反応、すなわち、^{7}Li ＋ p → ^{4}He ＋ ^{4}He 反応の断面積はすでに知られており、鏡映反応の断面積から原子核の荷電対称性[4]を仮定して、間接的に ^{7}Be ＋ n → ^{4}He ＋ ^{4}He 反応の断面積を推定しようという試みがなされていました。しかし、ビッグバン元素合成エネルギーのような低いエネルギー領域においてクーロン力の影響を正しく取り扱うことは簡単ではなく、推定結果の信頼性が低いため、直接に ^{7}Be ＋ n → ^{4}He ＋ ^{4}He 反応の断面積を測定することが強く望まれていました。

２．研究手法・成果

^{7}Be ＋ n → ^{4}He ＋ ^{4}He 反応は、7Be と n（中性子）がともに短寿命の不安定核であるため、この反応を測定することは容易ではありません。そこで、本研究では、逆反応である ^{4}He ＋ ^{4}He → ^{7}Be ＋ n 反応の断面積を測定する手法を着想し、実験を実施した結果から、詳細釣り合いの原理[5]を用いて ^{7}Be ＋ n → ^{4}He ＋ ^{4}He 反応の断面積を決定することに成功しました。

---

[2] 原子核の放射性崩壊の一種で、陽子過剰な原子核が電子を吸収して原子核内の陽子を中性子に変換すると同時に電子ニュートリノを放出する現象。電子捕獲崩壊した原子核は、質量数が同じで原子番号が 1 だけ小さな原子核に変化する。

[3] ある原子核反応において、反応に関与する原子核中の陽子と中性子をそっくり入れ替えた反応。例えば、本研究で注目した ^{7}Be ＋ n → ^{4}He ＋ ^{4}He 反応の鏡映反応は ^{7}Li ＋ p → ^{4}He ＋ ^{4}He となる。

[4] 原子核中の陽子と中性子をそっくり入れ替えても、電荷以外の性質は変わらないという性質。原子核において近似的に成り立つ。この性質に基づくと、電荷の影響を除けば、鏡映反応の断面積は近似的に等しい。しかし、本研究のように、低エネルギーの反応では電荷によるクーロン力の影響を正しく取り扱うことが難しく、荷電対称性を仮定した断面積の推定は信頼性が低くなる。

[5] 原子核反応の時間反転不変性から導かれる性質で、順方向の反応断面積と逆方向の反応断面積は、スピン多重度や状態密度などの運動学的条件を除けば厳密に等しいという性質。

測定は大阪大学核物理研究センターの中性子実験室において実施されました。同実験室は世界的に見ても優れた特徴を備えており、中性子の精密測定を行うことが可能です。加速した $^{4}He^{2+}$ ビームを He ガス標的に照射し、放出された中性子を測定することにより、^{7}Be の基底状態と第一励起状態が生成されたことを確認し、その生成断面積を決定しました。
本研究によって初めて測定された $^{7}Be + n \rightarrow {}^{4}He + {}^{4}He$ 反応の断面積は、これまでビッグバン元素合成の理論計算に広く用いられていた推定値より約 10 倍も小さい値であり、宇宙初期において中性子が ^{7}Be に衝突して 2 つの ^{4}He に分解する反応の寄与は非常に小さいことが明らかになりました。

３．波及効果、今後の予定

$^{7}Be + n \rightarrow {}^{4}He + {}^{4}He$ 反応の断面積は、これまでの推定値よりも約 10 倍小さく、この反応によって宇宙初期に ^{7}Be が分解し、^{7}Li 生成量が減少していたことが宇宙リチウム問題の原因であったとする可能性は否定され、ビッグバン元素合成の謎はさらに深まることになりました。
宇宙リチウム問題の有力な解決策が否定されたことにより、原子核反応率の見直しや、標準ビッグバン模型を超える新しい物理の探索など、宇宙リチウム問題へのさらなる研究を動機づけることになると期待されます。

４．研究プロジェクトについて

科学研究費補助金（JP26287058、JP15H02091）
本研究は、科学研究費補助金 基盤研究(B)（代表: 久保野 茂, JP26287058）の研究課題として、学部学生教育を兼ねつつ、京都大学理学部の卒業研究科目「物理科学課題研究 P4」の研究テーマとして実施されました。実験提案書の執筆、中性子検出器と He ガス標的システムの開発およびテスト実験、測定、解析、成果報告にいたる一連の過程は、教員らによる指導のもと、2014 年度から 2016 年度にかけて課題研究 P4 に在籍した 3 学年合計 20 名の学部 4 年生らによって実施されました。また、$^{4}He^{2+}$ ビームの利用にあたっては、共同利用・共同研究拠点である大阪大学核物理研究センターから、大学の枠を超えた教育用ビームタイムの提供を受けました。

論文タイトルと著者

Time-reversal measurement of the p-wave cross sections of the $^{7}Be(n,\alpha)4He$ reaction for the cosmological Li problem
T. Kawabata, Y. Fujikawa, T. Furuno, T. Goto, T. Hashimoto, M. Ichikawa, M. Itoh, N. Iwasa, Y. Kanada-En'yo, A. Koshikawa, S. Kubono, E. Miyawaki, M. Mizuno, K. Mizutani, T. Morimoto, M. Murata, T. Nanamura, S. Nishimura, S. Okamoto, Y. Sakaguchi, I. Sakata, A. Sakaue, R. Sawada, Y. Shikata, Y. Takahashi, D. Takechi, T. Takeda, C. Takimoto, M. Tsumura, K. Watanabe, and S. Yoshida
Physical Review Letters

光で磁石の性質を消す～磁石の起源を担う力が光で正反対となる原理～

2017 年 11 月 9 日　物理学専攻　教授　石原　純夫

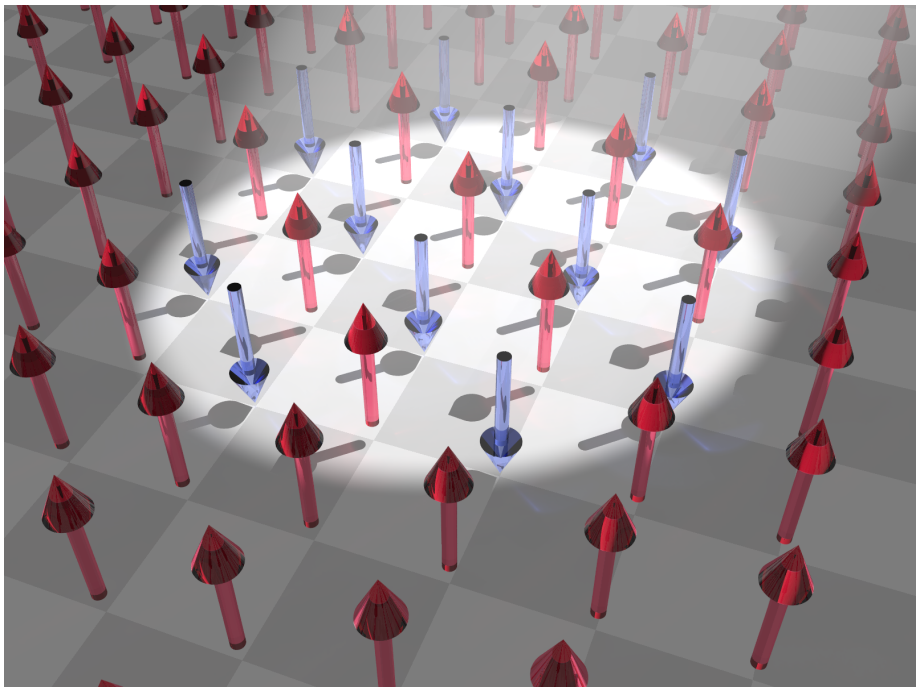
発表のポイント

- 磁石に光をあてることで、電子スピン(注 1)の配列を反対向きにして磁石の性質を瞬時に失わせる原理を解明することに成功
- 発見以来半世紀以上、磁石の性質を担うと考えられていた力が、光をあてることで正反対の性質を示すことを発見
- スピントロニクス(注 2)分野において、高速で双方向なスピン制御への貢献が期待される

概要

東北大学大学院理学研究科物理学専攻の石原純夫教授らの研究グループは、金属磁石に強い光をあてることで、全ての電子のスピンが同じ向きに揃った配列から互い違いに逆向きの配列となり、瞬時に磁石としての性質を失うことを理論計算シミュレーションにより示すことを成功しました。

本研究の成果は、2017 年 11 月 14 日（米国東部時間）オンライン版に公開（予定）、11 月 17 日発行（予定）の米国物理学会誌 Physical Review Letters に受理され、エディター推薦論文として選ばれました。



光をあてることで平行なスピン配列を反平行に変える。

詳細な説明

KS 鋼やネオジム磁石などをはじめとして、我が国は磁石の基礎・応用研究においてこれまでめざましい成果を挙げてきました。磁石では、電子の“スピン”と呼ばれる小さな磁石が全て同じ向きに配列することで全体として磁石の働きが現れます。電子のスピンをエレクトロニクスに利用するスピントロニクス研究が近年盛んとなっていますが、スピンを効率よく素早く操作することが大容量の情報を高速に取り扱うために重要であり、その原理を明らかにすることが強く求められています。最近のレーザー技術を用いることで非常に短い時間でこれを操作できる可能性が出てきました。これまでの研究により、スピンが互い違いに並んだ絶縁体に光を当てると、すべて同じ向きに揃った金属になることがわかっていました。

東北大学大学院理学研究科物理学専攻の石原純夫教授と小野淳（博士課程後期 2 年）は、その反対の操作が可能であることを示しました。つまり、電子スピンが全て同じ向きに揃った金属に強い光を当てると、互い違いに逆向きとなり、瞬時に磁石としての性質を失うことを理論計算シミュレーションにより示すことに成功しました。
磁石において全てのスピンが同じ向きに揃うのは、平行にする力がスピンの間に働くためです。今回の計算では、レーザーを当てることで、スピンを互いに平行にする力が反平行にする力に転換したことを意味しています。磁石の性質を担っている“スピンを平行にする力”は 1950 年代に発見され、それ以来半世紀以上にわたって多くの磁石の現象がこの力の原理に基づいて理解されてきました。本研究では発見以来初めて、強い光をあてることでこの力が正反対の性質を示すことが明らかになりました。また、この現象がおよそ 100-1000 フェムト秒（およそ 10 兆分の 1 秒から 1 兆分の 1 秒）という高速で起きること、またスピン配列のトポロジー（注 3）が重要な役割を果たしていることを計算により明らかにしました。

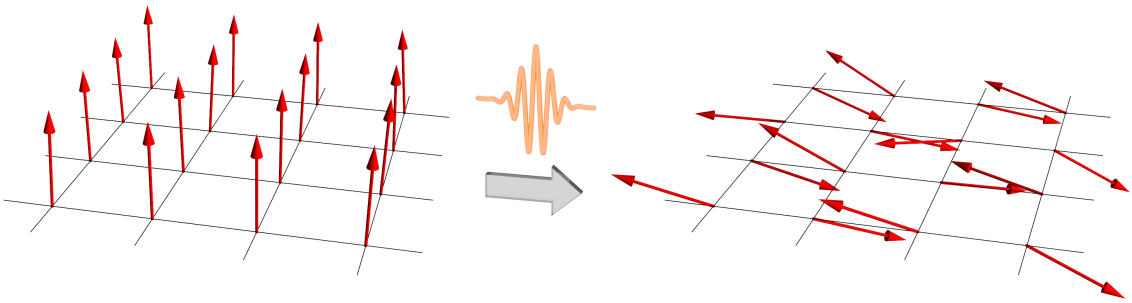
本研究では、光により瞬時にスピンの配列を平行から反平行に操作できる原理を明らかにしました。これまでの研究により、反平行から平行にする機構はわかっています。両者を併用することで、スピンの配列を双方向に高速に操作することが可能となることが期待されます。スピンの配列と電気の流れは深く関係していますので、スピントロニクスにおいて、超高速スイッチを利用したデバイス設計の指針を与えることが予想されます。

本研究成果は、文部科学省科学研究費補助金「軌道物理としての励起子絶縁体の電子状態の解明」研究代表者：石原純夫、ならびに「5 フェムト秒極超短赤外パルス光による強相関電子系の動的局在と秩序形成の研究」研究代表者：岩井伸一郎（東北大学大学院理学研究科教授）によって得られたものです。

論文情報

Physics Review Letters (Editors’ Suggestion)
（フィジカル・レヴュー・レターズ　（エディター推薦））
Double-Exchange Interaction in Optically Induced Nonequilibrium State: A Conversion from Ferromagnetic to Antiferromagnetic Structure
（光誘起非平衡状態における二重交換相互作用：強磁性構造から反強磁性構造への変換）
Atsushi Ono and Sumio Ishihara（小野淳、石原純夫）

参考図



磁石に強いレーザーを当てることで、スピンの向きが反平行となり、
磁石としての性質が瞬時に失われる。矢印は電子スピンの向きを表す。

動画

磁石に光を当てたときの電子スピンの数値計算シミュレーション。

URL:　http://www.cmpt.phys.tohoku.ac.jp/~ishihara/files/double-exchange.mp4

© 2017 Sumio ISHIHARA

用語解説

（注 1）電子スピン

電子は負の電気を帯びると共に、N 極と S 極からなる微小な磁石の性質をもち、これはスピンと呼ばれます。スピンの起源は相対性理論と量子力学から理解されますが、より簡単には電子の自転により生じると解釈できます。多くの磁石では全ての電子のスピンが同じ向きに配列することで、全体として磁石の性質を示します。

（注 2）スピントロニクス

パソコンやスマートフォンで利用されているダイオードやメモリなどのエレクトロニクス素子では、電子の電気的性質を利用しています。さらにスピンの性質を利用するエレクトロニクス技術はスピントロニクスと呼ばれています。電気の正負の情報に加えてスピンの向きの情報を利用することができ、より多くの情報を取り扱うことが可能となります。電子スピンを効率よく高速で制御する技術の開発と原理の解明について、近年盛んに研究がなされています。

（注 3）トポロジー

図形や物の配列において、それらを連続に変形しても変わらない性質を取り扱う数学はトポロジーと呼ばれています。コーヒーカップとドーナツの形を比較したとき、それぞれは大きく異なりますが「穴が一つ空いている」という点に着目すると、同じトポロジーの性質を持っている図形に分類できます。2016 年のノーベル物理学賞は「トポロジカル相転移と物質のトポロジカル相の理論的発見」の業績を上げた 3 名の理論物理学者に送られました。

ディラック線ノードの直接観測に成功

-トポロジカル量子コンピューター基盤物質を発見-

2018 年 7 月 31 日　物理学専攻　教授　佐藤　宇史

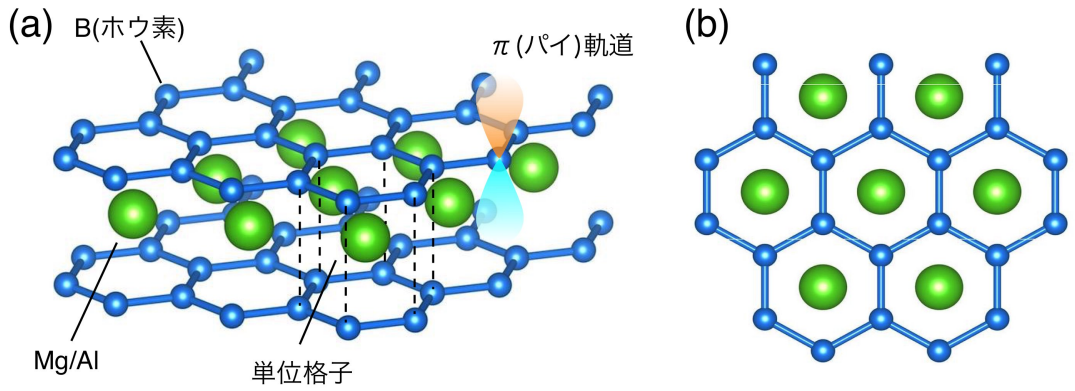


図 1　MgB_2(もしくは AlB_2)の結晶構造。(a)Mg/Al 原子が 2 枚のホウ素の蜂の巣格子により挟まれている。ホウ素原子は、面直方向に伸びたπ軌道を持っている。(b)結晶を上から見た図。

概要

東北大学大学院理学研究科の高根大地博士課程院生、木村憲彰准教授、佐藤宇史教授、同材料科学高等研究所の相馬清吾准教授、高橋隆教授、同多元物質科学研究所の組頭広志教授、および高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所の堀場弘司准教授らの研究グループは、グラフェンと同じ蜂の巣格子を持つ 2 ホウ化アルミニウム（AlB_2)という物質が、線ノード型のディラック粒子（注 1）という新しいタイプの電子状態をもつ物質であることを、放射光を用いた角度分解光電子分光実験（注 2）により発見しました。このアルミニウム(Al)をマグネシウム(Mg)で置き換えた 2 ホウ化マグネシウム(MgB_2)（注 3）は 39K で超伝導を示す高温超伝導体であり、この新たに発見されたディラック粒子を超伝導化することによって、今まで極低温でしか実現されていないトポロジカル超伝導体（注 4）の転移温度を一気に高温化できる可能性があります。この発見は、ノイズに強いトポロジカル量子コンピューター（注 5）の開発へ新たな道を拓くものです。
本成果は、米国物理学会誌 Physical Review B の速報注目論文（Rapid Communication & Editors' suggestion)に選ばれ、平成 30 年 7 月 17 日（米国東部時間）に、オンライン公開されました。

研究の背景

近年、「トポロジカル絶縁体」という、内部は電流を流さない絶縁体であるのに対して、表面に特殊な金属状態が現われる物質が大きな注目を集めています。この表面の電子は、「ディラック粒子（または、ディラック電子）」と呼ばれ、物質内部の電子よりも格段に高速で、かつ不純物に邪魔されずに動くという優れた特性を持ちます。この超伝導体版が「トポロジカル超伝導体」で、その表面には「マヨラナ粒子（注 6）」という電子状態が現れ、ディラック粒子と同様に、不純物などに対して頑強な性質を持ちます。マヨラナ粒子がディラック粒子と異なるのは、自分自

身（粒子）とその反粒子が同じである「粒子-反粒子対称性」を持つという点です。この対称性は本来、超伝導体が持つ性質ですが、それが表面の電子にも受け継がれてマヨラナ粒子となっています。マヨラナ粒子を演算素子に応用できれば、環境エラーに対して頑強なトポロジカル量子コンピューターを実現できることから、トポロジカル超伝導体とマヨラナ粒子の探索が精力的に進められてきました。しかしながら、これまで見つかったトポロジカル超伝導体候補物質は、そのほとんどが液体ヘリウム温度(4.2 K)以下の温度まで冷却する必要があり、またマヨラナ粒子の研究自体もまだ実証の段階であるため、より高い超伝導転移温度を持つ物質の発見が強く望まれていました。

このような状況下で最近、MgB_2という高温超伝導体(超伝導転移温度 39 K)が、実はトポロジカル超伝導体になるのではないかという提案がなされました。MgB2 は 2001 年に青山学院大学（当時）の秋光純教授らが発見した超伝導体で、ホウ素で組まれた蜂の巣格子シートが Mg を挟む層状物質です(図 1)。ホウ素は周期表で炭素の隣にあり、ホウ素の蜂の巣格子シートは炭素からなるグラフェン（注 7）とよく似た性質をもちます。とくに、蜂の巣格子シートに面直に伸びたπ軌道により、グラフェンと同様にディラック粒子を形成します。このディラック粒子もトポロジカルに頑強な性質を持っており、これが超伝導化すれば転移温度が一桁高いトポロジカル超伝導体が実現します。これは、マヨラナ粒子の研究や応用を大きく進めるものですが、MgB2 では電子配置の関係でπ軌道に電子が十分供給されず、トポロジカル超伝導体となりうるようなディラック粒子が本当に形成されているかが明らかでないという問題がありました。

研究の内容

今回、東北大学と高エネルギー加速器研究機構の共同研究グループは、MgB_2 の Mg を、電子が 1 個多い Al で置き換えた AlB_2 の高品質単結晶を作製し、放射光科学研究施設フォトンファクトリー(Photon Factory: PF)において、軟エックス線を利用した角度分解光電子分光（図 2）を用いて、AlB2 の電子状態を決定しました。その結果、図 3(a)に示すように、ディラック粒子の特徴である X 字型のバンド分散（注 8）を明確に観測しました。さらに高精度な測定から、AlB_2 のディラック粒子がエネルギーを変えながら面直方向に連なる「線ノード」型と呼ばれる特殊な電子状態をもつことを見出しました。これは、図 1(a) の点線で示すように AlB_2 の蜂の巣格子が、上の格子と下の格子の横位置が同じになるパターン（AA 積層という）で積層することに起因しています。AA 積層の場合、3 次元物質であるにも拘らず、そのディラック粒子はグラフェンのような単原子層物質と同様に、トポロジカルに頑強な性質を持ちます。このように、今回の研究成果から、

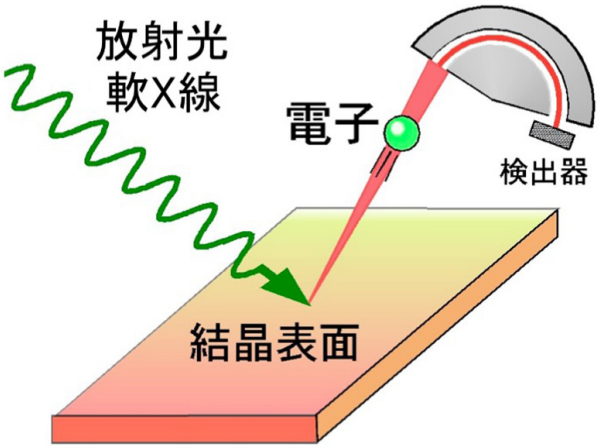


図 2：軟 X 線角度分解光電子分光の概念図。物質に高輝度軟 X 線を照射し、放出された光電子のエネルギーと運動量を精密に測定することで、物質の電子状態を決定できる。

AlB_2 がトポロジカル超伝導体になりうる特殊な電子状態を持っていることが明らかになりました。

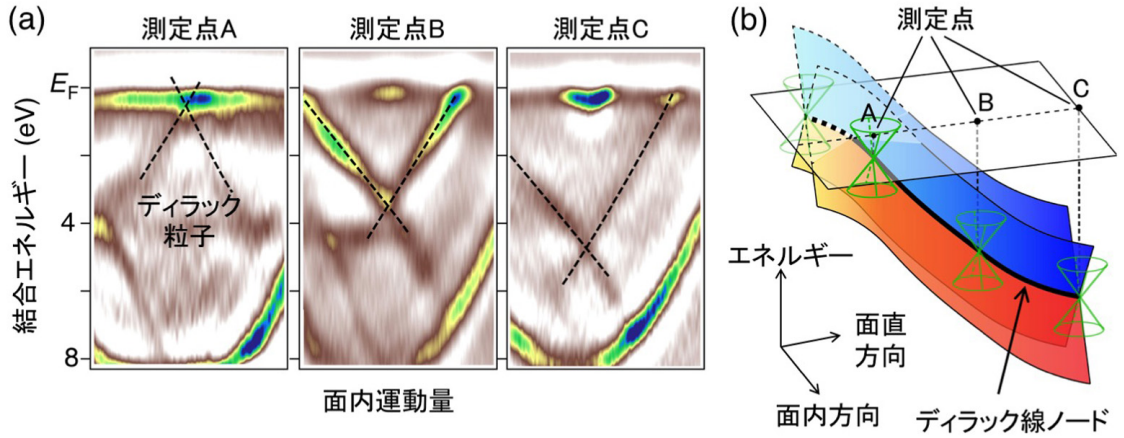


図 3: (a)角度分解光電子分光によって得られた、(b)に示した 3 ヶ所の測定点(A, B, C)における AlB_2 のバンド分散。ディラック電子による X 字型の直線的なバンド分散が観測され、それが C→A と移動すると、高いエネルギー側へシフトしていることがわかる。(b) AlB_2 における線ノード型のディラック粒子のエネルギー状態の模式図。

今後の展望

AlB_2 自体は非超伝導体ですが、MgB_2 と同型の結晶で電子が 1 個多いだけの物質であるので、その電子状態は非常によく似ています。そのため MgB_2 の超伝導を保ったまま、π 軌道に十分な電子を供給することができれば、これまでよりはるかに高い超伝導転移温度をもつトポロジカル超伝導体を実現できます。それは、エラーフリーの超高速トポロジカル量子コンピューターを構成する基盤物質となり、その実現に拍車がかかるものと期待されます。

本成果は、新学術領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」(領域代表者: 川上則雄)、科研費基盤研究(A)「角度分解光電子分光による原子層薄膜における超伝導とスピン軌道相互作用の研究」(研究代表者: 佐藤宇史)、同基盤研究(B)「スピン分解 ARPES によるフェルミオロジーに基づいた革新的原子層超伝導体の開発」(研究代表者: 高橋 隆)、高エネルギー加速器研究機構 PF 共同利用実験課題などによって得られました。

用語解説

（注 1）線ノード型のディラック粒子

ディラック粒子とは、約 80 年前に英国の物理学者ディラック(1933 年ノーベル物理学賞)が提唱した相対論的効果を取り入れた「ディラック方程式」に従う粒子のことを指します。このような状態にある電子は非常に動きやすい上に、半整数量子ホール効果などの通常の電子系とは異なる量子効果を示すという特徴があります。物質中のディラック粒子は、エネルギーの原点(ノード)が「点」状のものと「線」状のものがあり、これまでグラフェンやトポロジカル絶縁体の表面など、数多くの物質で確認されているのは点ノード型です。線ノード型ディラック粒子をもつ物質はほとんど例がなく、その探索が精力的に行われています。

（注２）放射光を用いた角度分解光電子分光実験
光電子分光とは、物質に紫外線やＸ線を照射すると電子が表面から放出される「外部光電効果」を利用した実験手法です。放出された電子を「光電子」と呼びます。その測定原理は 1905 年にアインシュタインが提唱した光量子仮説に基づいており、光電子の分析から物質中の電子のエネルギーや運動量を高精度で決定することができます。加速器から放射される「放射光」を光電子分光の光源に用いると、物質の電子状態を非常に高い精度で測定することができます。近年、高輝度放射光施設が世界中で建設されており、ナノ構造物質や新規材料、次世代デバイスなどの研究に大いに活用されています。

（注３）２ホウ化マグネシウム(MgB2)
2001 年に、青山学院大学（当時）の秋光純教授らによって発見された超伝導物質です。２つの電子が格子振動を媒介にして超伝導クーパー対を形成する従来型の金属超伝導体のなかでは、常圧下で最高の転移温度 T_c=39 K を示します。その高い T_c は、ホウ素の蜂の巣格子上を運動する電子が、共有結合に起因した高いエネルギーの蜂の巣格子の振動と強く相互作用するためと考えられています。

（注４）トポロジカル超伝導体
通常の超伝導は、物質が臨界温度を超えて冷却されたときに起こる、電気抵抗がゼロになる現象です。超伝導状態では、電気がエネルギーを失わずに物質中を流れます。トポロジカル超伝導体では、物質内部では、通常の超伝導体と同様に超伝導ギャップが開いているのに対し、その表面や端（エッジ）に、不純物に頑強な電子状態（マヨラナ粒子）が現れます。→（注６）マヨラナ粒子を参照。

（注５）トポロジカル量子コンピューター
異なる２つ以上の状態を量子力学的に重ね合わせて一度に信号処理する「量子コンピューター」は、従来のコンピューターでは天文学的な時間のかかる因数分解の問題などを、数時間で解くような超高速計算が可能になると考えられています。しかし、その計算の途中で、量子力学的な重ね合わせ状態が壊れないように保つ事が大変難しく、これを克服するアイデアとして、不純物に頑強なマヨラナ粒子を演算素子に利用することが提案されています。そのような環境ノイズに強い量子コンピューターは、トポロジカル量子コンピューターと呼ばれ、トポロジカル超伝導体の最も重要な応用と考えられています。

（注６）マヨラナ粒子
1937 年に Ettore Majorana （エットーレ・マヨラナ）が理論的に提案した粒子で、粒子がそれ自身の反粒子になる特徴（粒子-反粒子対称性）を持っています。素粒子ではニュートリノがマヨラナ粒子ではないかと言われていますが、まだ決着がついていません。物質中では、ディラック方程式に従い、さらに粒子-反粒子対称性をもつと見なせる電子状態のことを指します。トポ

ロジカル超伝導体や、磁性三角格子などのエッジ状態（物質の表面や端）に、マヨラナ粒子が発現すると考えられています。

（注７）グラフェン
炭素が蜂の巣のような６角形の網の目状につながったシート状の物質です。黒鉛(グラファイト)を、非常に薄く剥がすなどして得ることができます。グラフェン内の電子は、特殊な運動量とエネルギーの関係（ディラックコーンと呼ばれる）を持ち、その結果、ディラック方程式で記述される運動に従います。この物質内におけるディラック電子は、あたかも質量がゼロもしくは非常に小さい粒子のように振る舞い、さらに物質内の欠陥などに散乱されにくい、という性質を持っています。そのためグラフェンは高い電気伝導性や熱伝導性を示し、非常に少ない電力で動作する超高速電子デバイスなどへの応用が展開されています。

（注８）バンド分散
電子は、ある運動量に対して任意のエネルギーをとることはできず、そのエネルギーは運動量の関数となります。物質の中では、電子は結晶格子による散乱と干渉を受けるために、運動量とエネルギーの関係は複雑化します。運動量の関数としてグラフ化したエネルギー曲線を、電子のエネルギーバンド分散、あるいは単にバンド分散とよびます。電子の状態は、バンド分散の形状や個数、エネルギー位置で一義的に決まります。物質の多くの性質は電子のバンド分散によって決まるため、これを測定することは、様々な物性の起源の解明や、物質の機能を改良・制御する上で必要不可欠です。

論文情報
Observation of a Dirac nodal line in AlB2
D. Takane, S. Souma, K. Nakayama, T. Nakamura, H. Oinuma, K. Hori, K. Horiba, H. Kumigashira, N. Kimura, T. Takahashi, and T. Sato,
Physical Review B 98, 041105(R) (2018). (Editors' suggestion)
DOI: 10.1103/PhysRevB.98.041105
URL: https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.98.041105
2018 年 7 月 17 日 オンライン公開（米国東部時間）

史上初、ブラックホールの撮影に成功

2019 年 4 月 11 日　学際科学フロンティア研究所 兼務 天文学専攻　准教授　當真　賢二

イベント・ホライズン・テレスコープで撮影された、銀河 M87 中心の巨大ブラックホールシャドウ。リング状の明るい部分の大きさはおよそ 42 マイクロ秒角であり、月面に置いた野球のボールを地球から見た時の大きさに相当します。（Credit: EHT Collaboration）

イベント・ホライズン・テレスコープは、地球上の 8 つの電波望遠鏡を結合させた国際協力プロジェクトであり、ブラックホールの画像を撮影することを目標としてきました。2019 年 4 月 10 日、研究チームは世界 6 か所で同時に行われた記者会見において、巨大ブラックホールとその影の存在を初めて画像で直接証明することに成功したことを発表しました。このことは、アインシュタインの一般相対性理論が正しいことの強い証拠であり、銀河の中心に巨大ブラックホールが確かに存在することを意味します。すなわちブラックホールの撮像は、上述のような過去 100 年に渡る物理学的および天文学的な問いに対する、現代科学の究極的な到達点です。それと同時に、これまでの解像度の限界を突破し、直接撮像によりブラックホール研究を行うという、新たな時代の幕開けとなりました。特に、ブラックホール近傍から噴き出しているプラズマ流（ブラックホールジェット）の起源に迫る研究が活発化すると期待されます。この成果は、アメリカの天文学専門誌『アストロフィジカル・ジャーナル・レターズ』特集号に 6 本の論文として掲載されました。

詳細は以下をご覧ください。
https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/top
https://eventhorizontelescope.org/

イベント・ホライズン・テレスコープの建設と今日発表された観測成果は、何十年にもわたる観測的・技術的・理論的取り組みの賜物です。さらに、世界中から集まった 200 人以上の研究者たちの緊密な連携の結果でもあります。日本の研究者も、さまざまな面でこの研究に貢献しました。まず、日本と台湾・韓国、北米、欧州が共同で運用するアルマ望遠鏡は、観測に参加した望遠鏡の中でもっと感度が高く、イベント・ホライズン・テレスコープ全体の感度の向上に大きな貢献をしました。また、アルマ望遠鏡をイベント・ホライズン・テレスコープの一員とするために、山頂のアンテナ群から山麓施設にデータを伝送する装置は国立天文台が開発しました。さらに、日本はアジアのパートナーと共に東アジア天文台を設立しており、東アジア天文台がハワイのジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡の運用を担っています。

イベント・ホライズン・テレスコープ日本チームの代表である本間希樹 国立天文台教授・水沢 VLBI 観測所長は、「日本の研究者は、ソフトウェアや研究においても貢献をしています。私たちは、『スパース・モデリング』と呼ばれる新しい手法をデータ処理に取り入れました。これにより、限られたデータから信頼性の高い画像を得ることができました。最終的には、4 つの独立した内部チームが 3 つの手法でデータの画像化を行い、いずれもブラックホールシャドウが現れることを確認しました。」と語っています。

研究チームの一員で、東北大学 学際科学フロンティア研究所の當真賢二 准教授（理学研究科 天文学専攻 兼任）は、理論班の一人として、観測データと理論シミュレーションの比較の議論に携わりました。世界中のブラックホール理論専門家が集まった理論班は、アインシュタインの一般相対性理論とプラズマ物理に基づいた膨大な数の理論シミュレーションを行い、観測データが一般相対性理論の予言する回転ブラックホールが存在することと整合的であることを確認しました。當真准教授らはこれまでのブラックホールジェットについての理論研究による知見を提供し、ジェットの観測と今回の観測を組み合わせることで、厳しく理論モデルを制限できることを示しました。

銀河系の端が見えてきた！

2019 年 6 月 21 日　天文学専攻　教授　千葉　柾司

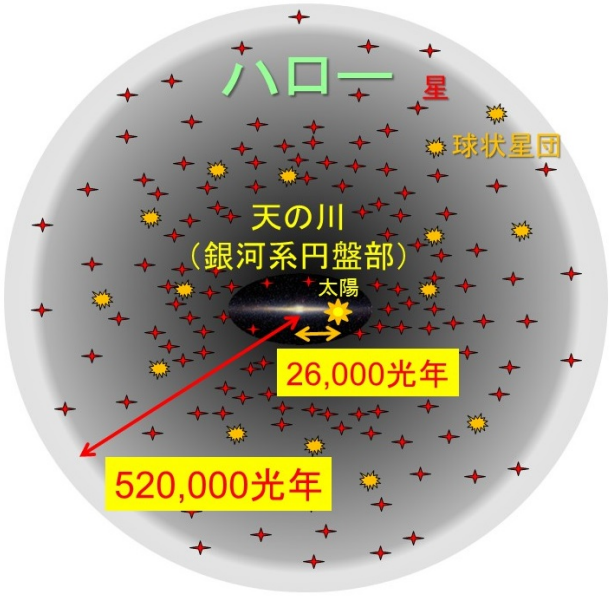


図 1：　銀河系の概念図。天の川にあたる銀河系円盤部には太陽を含めた約 1000 億個の星が円盤状に分布しています。銀河系中心と太陽までの距離は約 2 万 6 千光年です。天の川（銀河系円盤部）のまわりにはハローと呼ばれる広大な空間領域があって、年齢が 120 億年前後の古い星が約 10 億個、球状星団が約 150 個ほど分布しています。今回の研究から、このハローの半径が約 52 万光年にものぼることがわかりました。©東北大学

概要

東北大学、法政大学、東京大学、国立天文台などのメンバーからなる共同研究チームは、すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam（HSC）が撮像したデータを用いて、私たちの住む銀河系の最遠端、すなわち銀河系を形作る星ぼしの世界の境界をはじめて見極めることができました。その境界までの距離は半径約 52 万光年もあり、銀河系中心から太陽系までの距離（約 2 万 6 千光年）の 20 倍にもなることがわかりました（図 1）。このような銀河系の端まで広がる星ぼしは、年齢が 120 億年前後の最長老で、銀河系の形成初期に生まれたものであることから、銀河系がどのように形成されたかを知る上で大変重要な手がかりを与えてくれます。

詳細な説明

私たちが住む銀河系は、大きく分けて天の川にあたる銀河系円盤部とそれを取り囲むハローと呼ばれる広大な領域から構成されています。天の川には太陽を含めた約 1000 億個の星が円盤状に分布していて、年齢は数 10 億年の比較的若い星でできています。一方、ハローには年齢が 120 億年前後の古い星が約 10 億個、球状星団が約 150 個ほど存在していて、天の川の部分を囲む広大な領域に渡って分布しています（図 1）。つまり、ハローには銀河系の形成初期に生まれた星があり、銀河系が形成された当初はその大きさは現在の天の川の部分に比べて大変大きな状態で

あったことになります。これは銀河系が初期に多くの小銀河の合体を経て形成され、その痕跡が年齢の古い星の広がった分布として残っているからです。

では一体、このハローはどこまで広がっているのでしょうか。言い換えると、銀河系はその昔どのような空間領域で銀河形成が行われていたのでしょうか。これは、森の中にいて森全体の広がりを調べることと同じで、森の中にある木々（銀河系の中にある星ぼし）を隅々まで見通して決定する必要があり大変難しい作業になります。この目的には、ハロー全体に広がり、かつハローの端にあっても同定できるような明るい目印となる星を使うと便利です。そのようなものとして、青色水平分枝星（注 1）やこと座 RR 型変光星（注 2）と呼ばれる星があり、絶対等級（注 3）が明るくてどれもほぼ一定なので銀河系の中の標準光源として使用することができます。これまでもこれらのタイプの星を用いて銀河系ハローの地図作りが行われてきましたが、これまでの観測では口径 2.5 メートルから 4 メートルの中口径望遠鏡が使われていて、銀河系ハローの端にある見かけ上暗いものまではなかなか観測することができませんでした。

このような暗い星の探査には、8.2 メートルという大口径を持つすばる望遠鏡と超広視野焦点カメラ HSC の組み合わせが威力を発揮します。なぜなら、ハローの端にあるとても暗い天体でしかも数も減っていくものを発見するためには、広い視野を今までよりも暗い等級まで探査する必要があり、すばる望遠鏡と HSC は世界で最も効率の良い組み合わせだからです。私たちの研究グループでは、銀河系ハローの地図を作るための星として青色水平分枝星に着目し、HSC の戦略枠プログラム（通称 SSP: Subaru Strategic Program）で行われている広域測光サーベイのデータを解析しました。このタイプの星を同定するには、まず HSC-SSP の観測データの中から点源である銀河系内の恒星らしいものを選び、さらにこの中から複数の測光バンド（注 4）を組み合わせて、青色水平分枝星の候補天体を抽出します。この方法では、他の点源天体（A 型スペクトルの主系列星で通称青色はぐれ星、白色矮星、クエーサー、ならびに星と見分けのつかない遠方銀河）を天体の色の情報からうまく取り除く必要があり、注意深い統計解析が必要になります。

この HSC-SSP データに基づいて詳しいビッグデータの統計解析を行い、銀河系ハローにおける青色水平分枝星の大域的な分布を解明したのは、当時東北大学大学院博士課程前期在籍の福島徹也さんです。福島さんは、HSC-SSP の測光観測で用いられる g, r, i, z バンド（注 5）のデータを組み合わせた天体の色の情報から、青色水平分枝星の候補天体を確率論的に導出するプログラムを開発しました（図 2）。この方法では、太陽系からおよそ 120 万光年の距離まで星の性質を詳しく調べることができるので、今までの探査の 4 倍もの距離までとらえることができます。ちなみに、これまで行われてきた銀河系ハローの地図作りでは、距離にしてせいぜい 32 万光年くらいまでしか到達できなかったので、銀河系の端までは届きませんでした。福島さんの解析で得られた青色水平分枝星の空間分布（銀河系中心からの距離を変数とした数密度分布）は、図 3 に示すように銀河系中心からの距離とともに減少する傾向を示します。さらに、半径が約 52 万光年のところで急激に数が落ちていますので、このあたりが銀河系ハローの境界になっている可能性が高いという結果となりました。

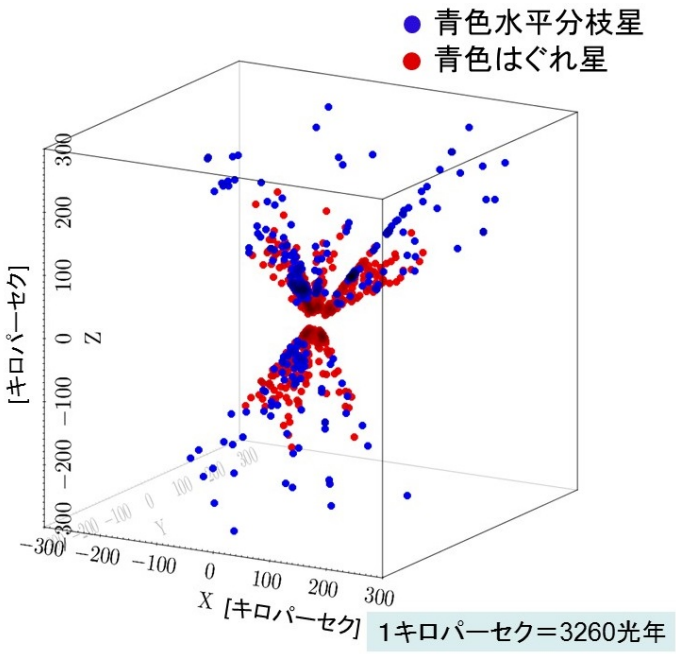


図 2：青色水平分枝星（青色）と青色はぐれ星（赤色）の空間分布。HSC-SSP は太陽系から見て特定の方向だけ観測しているので、太陽系から扇形の分布に見えています。©東北大学

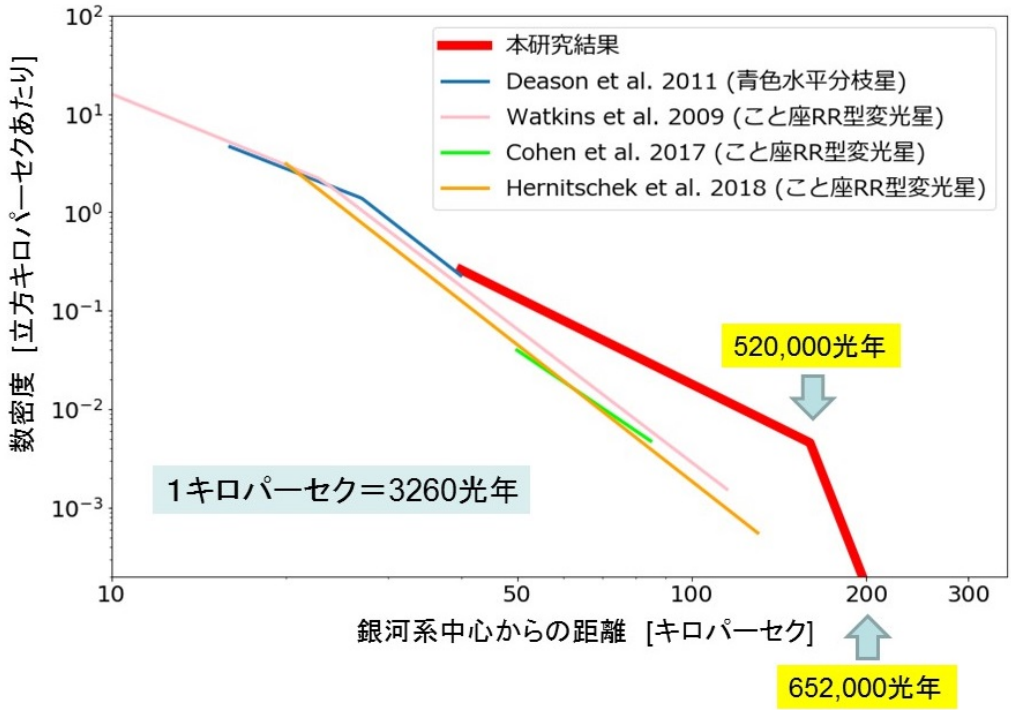


図 3：　銀河系ハローにおける青色水平分枝星とこと座 RR 型変光星の数密度分布。赤い実線が今回得られた青色水平分枝星の分布で、銀河系中心から 52 万光年の場所で急激に減少しています。他の色の線は先行研究の結果で、内側で数密度の減少率が外側の今回の結果と比べて急になっている傾向があります。これは、内側のハローと外側のハローでその形成機構が違うことを示唆していて、数値シミュレーションでも同様の傾向が報告されています。©東北大学

この研究プロジェクトを統括する千葉柾司さん（東北大学教授）は、このような銀河系ハローの分布は、銀河系初期に矮小銀河と呼ばれる小銀河が合体を繰り返し壊されながら銀河系が形成される過程を反映していると指摘しています。特に、その空間的な大きさは、銀河系を包むいわゆ

るダークマターの広がり（ダークハローとも呼ばれる領域）に匹敵しており、銀河系が矮小銀河を含む小さなダークハローの合体によって形成される過程を理解する上で大変重要な要素になります。ちなみに、銀河系のすぐ傍にあるアンドロメダ銀河のハローに関する観測研究も進んでおり、今の所アンドロメダ銀河中心から約 53 万 8 千光年の距離までアンドロメダ銀河のハロー領域が広がっていることが確認されています。アンドロメダ銀河ハローは銀河系ハローと様々な面で違っていることが多く、これは銀河系と異なる合体史を経て形成されたことを反映していると考えられています。

すばる望遠鏡では、HSC-SSP の広域観測サーベイを現在も実行中で、今回の研究成果はサーベイの途中段階のデータから得られたものです。今後 HSC-SSP の進行に従って、今後もっと多数の銀河系ハローの青色水平分枝星を検出することが予想されます。これにより、銀河系ハロー地図はさらに精密化され、銀河系の形成史に関する重要なヒントが得られるものと期待できます。

この研究成果は、日本天文学会の欧文研究報告に 2019 年 6 月 13 日付で掲載されました (Fukushima et al. 2019, “The stellar halo of the Milky Way traced by blue horizontal-branch stars in the Subaru Hyper Suprime-Cam Survey”)。論文のプレプリントは https://arxiv.org/abs/1904.04966 から入手可能です。また、この研究成果は、科学研究費補助金 JP25287062, JP16H01086, JP17H01101, JP18H04334, JP18H04359, JP18J00277, JP18J11326 のサポートを受けています。

研究チーム

福島徹也（東北大学大学院理学研究科）、千葉柾司（東北大学大学院理学研究科）、田中幹人（法政大学 理工学部 創生科学科）、林航平（東京大学宇宙線研究所）、本間大輔（国立天文台）、岡本桜子（国立天文台ハワイ観測所）、小宮山裕（国立天文台・総合研究大学院大学）、田中賢幸（国立天文台）、有本信雄（ソウル国立大学）、松野允郁（国立天文台・総合研究大学院大学）

用語説明

(注 1) 青色水平分枝星

青色水平分枝星とは、太陽よりも軽く年齢が古く進化が進んだ星で、その中心部でヘリウムが核融合反応を起こして輝いています。星の色・等級図（横軸に星の色、縦軸に星の絶対等級を示した図）の中で絶対等級が星の色によらずある一定の明るさになっていて、図の中で水平に分布する様子を示すので水平分枝星と呼ばれます（図 4）。

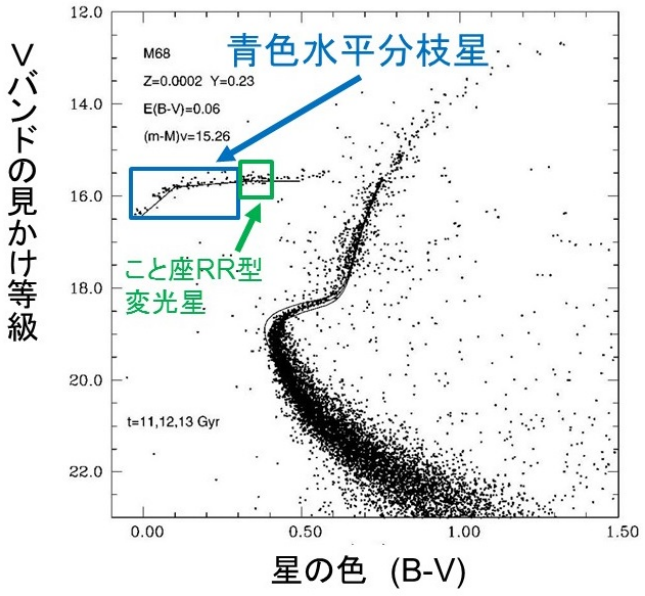


図 4：銀河系の球状星団 M68 の色・等級図。青色で囲んだ領域にある星が青色水平分枝星（Salaris et al. 1997, ApJ, 479, 665 より）

（注 2）こと座 RR 型変光星
半日程度の周期で変光し、ハローなどの古い恒星系に存在する典型的な変光星です。図 4 に色・等級図上での位置を示します。

(注 3) 絶対等級
天体の絶対的な明るさで、距離 10 パーセク（32.6 光年）に置いた時の見かけの明るさを基準とします。

(注 4) 測光バンド
天体の光度を測定する際の波長帯を指します。

(注 5) g, r, i, z バンド
HSC で用いられている測光バンドの名称で、それぞれの有効波長は 0.48μm、0.62μm、0.77μm、0.89μm です。

論文情報
日本天文学会欧文研究報告（PASJ: Publication of the Astronomical Society of Japan）
The stellar halo of the Milky Way traced by blue horizontal-branch stars in the Subaru Hyper Suprime-Cam Survey
Tetsuya Fukushima, Masashi Chiba, Mikito Tanaka, Kohei Hayashi, Daisuke Homma, Sakurako Okamoto, Yutaka Komiyama, Masayuki Tanaka, Nobuo Arimoto and Tadafumi Matsuno
https://academic.oup.com/pasj/advance-article/doi/10.1093/pasj/psz052/5514559

明滅するオーロラの起源を ERG（あらせ）衛星が解明

－宇宙のコーラスにあわせて密かに揺れる電子の挙動がつまびらかに－

2018 年 2 月 13 日　地球物理学専攻　准教授　熊本 篤志

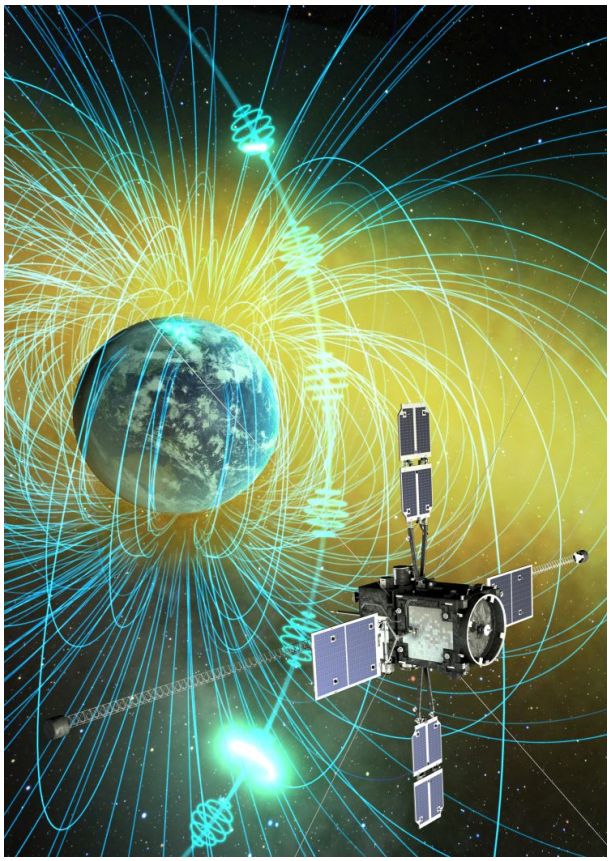


図 1　明滅するオーロラの起源を ERG（あらせ）衛星のプラズマ観測で解明

発表のポイント

- 明滅するオーロラの起源を、ジオスペース探査衛星 ERG（あらせ）の観測により解明しました。
- プラズマ波動「コーラス」に揺さぶられた電子が地球の大気に降り注ぐことでオーロラが発生するという予想が、初めて直接的に、しかも驚くほど明瞭に裏付けられました。
- 電子の降り込みがいつ、どこで起きるかを、今後より詳細に調べることで、オーロラと宇宙プラズマ物理過程の詳細や多様性の理解が進むと期待されます。

発表概要

高緯度地方の夜空を覆うオーロラ嵐は、磁気圏に蓄えられた太陽風 (注 1) のエネルギーが急激に解放されることで生じる現象です。典型的なオーロラ嵐では、よく知られたカーテン状の明るいオーロラに加えて、淡く明滅する斑点状のオーロラ（脈動オーロラ、 pulsating aurora）が現れて舞い乱れます。この明滅するオーロラは、磁気圏の高エネルギー電子が高度 100km 程度の上層大気に向けて降ったり止んだりすることで生じていますが、その間欠的な降り込みを起こす物理プロセスを観測的に捉えることは、これまで非常に困難でした。今回、東京大学大学院理学系

研究科の笠原慧准教授をはじめとする研究チームは、2017 年に観測を開始した JAXA のジオスペース探査衛星 ERG（あらせ）の電子・プラズマ波動データを解析し、明滅するオーロラの源たる物理プロセスの同定に成功しました（図 1）。これまでにない高精度で磁気圏の電子の分布を計測することにより、磁気圏内を往復運動する電子がプラズマ波動によって揺さぶられ地球の大気に向けて降り注いでいくという物理プロセスが、明瞭に示されました。電子の降り込みがいつ、どこで起きるかを、今後さらに詳細に調べることは、オーロラの多様性を理解するうえで非常に重要な情報となるとともに、宇宙空間で普遍的に起きているプラズマ波動と電子の相互作用の詳細な理解につながります。

発表内容

① 研究の背景・先行研究における問題点

高緯度地方の夜空を覆うオーロラ嵐は、磁気圏に蓄えられた太陽風のエネルギーが急激に解放されることで生じる現象です。典型的なオーロラ嵐では、まず夕方から真夜中にかけてカーテン状の明るいオーロラが現れ、これが爆発的に舞ったのち、朝側では、淡く明滅する斑点状のオーロラが現れて舞い乱れます。斑点ひとつのサイズは数十から数百 km で、高度 100 km 程度に現れ、数秒から数十秒の周期で明滅（脈動）を繰り返します。この明滅するオーロラ（脈動オーロラ）は、磁気圏の高エネルギー電子（数十キロエレクトロンボルト）が高度 100km 付近の上層大気に向けて降ったり止んだりして生じることが、過去の地球近傍（高度<1000 km）での観測からわかっています（電子が降り込むと、そのエネルギーで励起された大気の原子･分子が発光する）。しかし、そのような電子の間欠的な降り込みが磁気圏のどこで、どのように起こっているかが問題でした。通常、磁気圏内の電子は、磁力線方向に沿った南北運動を繰り返しており、地球の大気に降ってくることはありません（オーロラは見えない）。ところが、何らかの理由で往復運動が破れ、電子が地球の大気に到達することがあります（オーロラが見える）。この往復運動を破るメカニズムの違いが、オーロラの多様性を生みます。特に脈動オーロラの場合は、「コーラス波動 （chorus waves）」と呼ばれるプラズマ波動の一種が、電磁力で電子の往復運動を破り、大気への降り込みを駆動するものと考えられてきました（図 2）。しかしながら、そのような「電子の往復運動の破れ」の発生する現場を直接観測することは（60 年にわたる衛星観測の歴史のなかでも）実現できていませんでした。

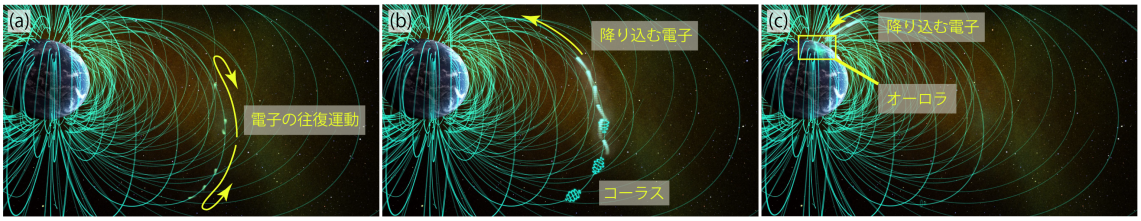


図 2 ：(a)磁気圏内で磁力線に沿って往復運動する電子。(b)コーラス波動の電磁力により往復運動が破られ、磁力線に沿って大気に降り込もうとする電子。(c)降り注ぐ電子で発生するオーロラ。©ERG science team

② 研究内容

この問題に挑むため、本研究では、ジオスペース探査衛星 ERG（あらせ）によるプラズマ観測と、米国の THEMIS 地上全天カメラによるオーロラ観測が、同時に実施された事例のデータを解析しました。ERG 衛星は 2016 年 12 月に JAXA（宇宙航空研究開発機構）内之浦宇宙空間観測

所から打ち上げられ、2017 年 3 月から定常観測を開始しています。この ERG 衛星は、ジオスペースにおけるプラズマ物理の解明を目的とし、6 台の粒子機器、2 台の電磁場観測器、1 台のソフトウェア型分析器を搭載しています。このうち、今回用いたのは、中間エネルギー電子分析器（MEP-e）、プラズマ波動・電場観測器（PWE）、 磁場観測器（MGF）の 3 台です(注 2)。一方、THEMIS 地上全天カメラはオーロラ観測を目的としてアラスカ・カナダの多地点に設置されています。今回着目したイベントは、全天カメラの一つが明滅するオーロラを捉えており、かつ、その視野の中に ERG につながる磁力線の根元（フットプリント、注 3）がある、極めて幸運なものでした。

このイベントにおける ERG 衛星のデータを解析したところ、間欠的に発生するコーラス波動と同期するようにして、降り込み電子も大きく変動する（コーラス波動が強まると、降り込み電子が現れる）様子が明瞭に捉えられました。これは、前述のようなコーラス波動による「電子の往復運動の破れ」の決定的証拠で、世界で初めて観測されたものです。また、磁気圏内で ERG が捉えた降り込み電子の変動と、全天カメラの捉えたオーロラ明滅との同期も期待されますが、実際に、それらの強度の間によい相関があることも確認できました。このように、（1）コーラス波動の発生 →（2）波動による電子の揺さぶり、「往復運動の破れ」→（3）電子の大気への降り込み →（4）オーロラの発光、という一連のプロセスが間欠的に起きることで、明滅するオーロラが発生していることが、決定的になりました。

③ 社会的意義・今後の予定　など

今回の解析対象イベントは、ERG 衛星の定常観測開始からわずか 5 日目のものです。一方、ERG 衛星はその後も順調に観測を続けており、より広範なデータが蓄積されてきています。今後、それらのデータを解析することで、上記のメカニズムが起こりやすい条件や、それ以外のメカニズムによる電子の降り込みについても追及し、オーロラと磁気圏プラズマ物理過程の多様性とその詳細の解明を目指します。 これらの知見は、地球周辺の宇宙環境がどのように変化するかの解明につながるとともに、木星や土星といった他の惑星の磁気圏も含めて、宇宙空間で遍く起きているプラズマ現象の詳細な理解にもつながることが期待されます。

発表雑誌

Nature（オンライン版：イギリス時間 2 月 14 日）

Pulsating aurora from electron scattering by chorus waves

笠原 慧[1★], 三好 由純[2], 横田 勝一郎[3], 三谷 烈史[4], 笠原 禎也[5], 松田 昇也[2], 熊本篤志[6], 松岡彩子[4], 風間 洋一[7], Harald U. Frey[8], Vassilis Angelopoulos[9], 栗田 怜[2], 桂華 邦裕[1], 関 華奈子[1], 篠原 育[4]

★：責任著者, 1：東京大学, 2：名古屋大学, 3：大阪大学, 4：宇宙航空研究開発機構（JAXA）・宇宙科学研究所, 5：金沢大学, 6：東北大学, 7：Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics, 8：University of California, Berkley, 9：University of California, Los Angels.

DOI 番号：10.1038/nature25505

用語解説

注 1 ：太陽風

太陽から吹きだすプラズマ（電子と陽子）の風のこと。平均的な速度は秒速 500km 程度。プラズマが太陽の磁場を引きずり出すようにしながら地球磁気圏に吹きつけることで、太陽風のエネルギー（の一部）が地球磁気圏内に蓄えられる。

注 2：MEP-e、 PWE、 MGF
MEP-e（Medium-energy particle experiments – electron analyzer、 中間エネルギー電子分析器）：7-87 keV の電子を計測する。主任研究者：笠原慧（現・東京大学、開発時の所属は JAXA 宇宙科学研究所）、副主任および共同研究者：横田勝一郎（現・大阪大学、開発時の所属は JAXA 宇宙科学研究所）、三谷烈史（JAXA 宇宙科学研究所）など。
PWE（Plasma wave experiment、プラズマ波動・電場観測器）：DC～10MHz の電場、および数 Hz～100kHz の磁場を計測する。電子密度の算出にも用いられる。主任研究者：笠原禎也（金沢大学）、共同研究者：松田昇也（名古屋大学）、熊本篤志（東北大学）、栗田怜（名古屋大学）など。
MGF（Magnetic field experiment、磁場観測器）：DC-100Hz の磁場を計測する。主任研究者：松岡彩子（JAXA 宇宙科学研究所）。

注 3：フットプリント
プラズマ観測をしている衛星の位置を、磁力線をたどって地球の電離圏高度まで投影したときの終点。プラズマ粒子は磁力線に沿って運動するため、衛星のフットプリントが地上カメラの視野に入っている場合、地上と衛星で対応したプラズマを観測していることになる。

2011 年東北地方太平洋沖地震の発生メカニズムを解明

-上と下の両プレートのより固い岩盤同士のぶつかりあいで大地震が発生-

2018 年 6 月 18 日　地震・噴火予知研究観測センター　教授　趙　大鵬

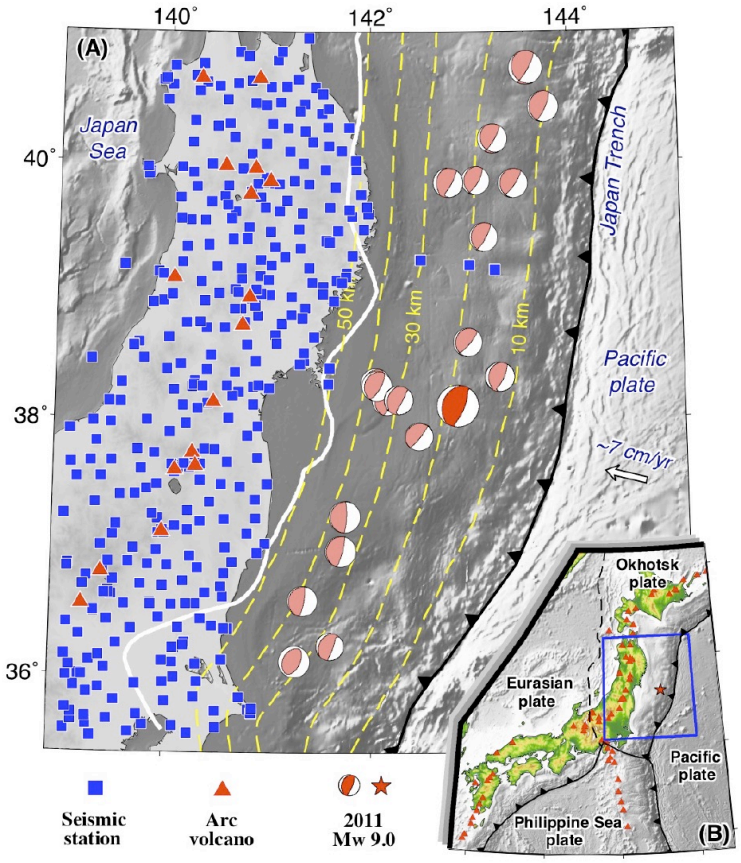


図 1. (A)本研究で用いた地震観測点(■)の分布図。赤色のビーチボールは 2011 年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)の断層面解[注 4]。ピンク色のビーチボールは 1917 年から 2017 年までに起こった地震(M が 7 以上)の断層面解。黄色破線は沈み込んでいる太平洋プレート上面の等深線。白線は震源断層面の下限。黒線は日本海溝。

発表のポイント

- 上と下の両プレート内の不均質構造が地震発生をコントロールした。
- 震源断層の上も下も周りに比べてより固い岩盤でできており、上と下の固い岩盤同士のぶつかりあいで大地震が発生した。
- 巨大地震発生メカニズムの重要な手がかりになる可能性がある。

概要

東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センターの趙大鵬教授とLiu Xin博士（現：中国海洋大学准教授）は、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域におけるプレート構造を調査し、この大地震の発生は、震源域上のオホーツクプレートとその下の太平洋プレートといった両方のプレート内部にある不均質構造にコントロールされたことを明らかにしました。また、震源断層の上も下も周りに比べてより固い岩盤ででき、それらがぶつかりあうことで大地震が起こりました。この研究結果は、謎が多いプレート境界域の巨大地震の発生メカニズムを明らかにするための重要な手がかりになると考えられます。

この研究成果は、2018 年 6 月 20 日 13 時（日本時間）に米科学雑誌「Science Advances」に掲載されました。

詳細な説明

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（マグニチュード（Mw）9.0）は、日本の観測史上最大規模の地震でした(図 1)。 本震の地震動とそれに伴う津波、およびその後の余震は東北から関東にかけての東日本一帯に甚大な被害をもたらしました。これまで世界の多くの研究者が、この地震の発生メカニズムについて研究してきましたが、まだ不明な点が多くあります。その中の大きな問題の一つは、震源断層の上にあるオホーツクプレート（または北米プレート）とその下に沈み込んでいる太平洋プレートのどちらが、この地震の発生をコントロールしたのか、という点です。多くの日本の研究者は、沈み込んでいる太平洋プレートの上面付近の不均質構造、例えば、沈み込んだ海山や堆積層の厚さの違いなどが、この地震の発生と震源断層面上の滑りの分布をコントロールしたと考えました。それに対して、欧米の一部の研究者はオホーツクプレート内の岩石組成の空間的変化が東北地方太平洋沖大地震をコントロールしたという研究結果を発表しました。

この問題を解決するために、趙大鵬教授の研究グループは、地下構造を画像化する「地震波トモグラフィー法」(注1) を、日本列島に設置された高密度かつ高精度の地震観測網(図1(A))で記録された大量の地震波伝播時間データ(図1(B))に適用することで、東北地方太平洋沖大地震の震源域周辺の3次元P波速度構造(注2) を詳細に求めました(図2(C,D)と図3)。また、東北沖の海底地形データと重力異常データ(注3) も解析し(図2(A,B))、得られたP波速度構造と合わせ震源域の微細構造を検証しました。これまでにも東北沖に地震波トモグラフィー法を適用した研究は幾つかありましたが、今回の研究ではトモグラフィーの分解能を高めました。また、海底地形、重力と地震波の三種類のデータを同時に用いて大地震震源域の3次元構造を推定するのは本研究が初めてです。

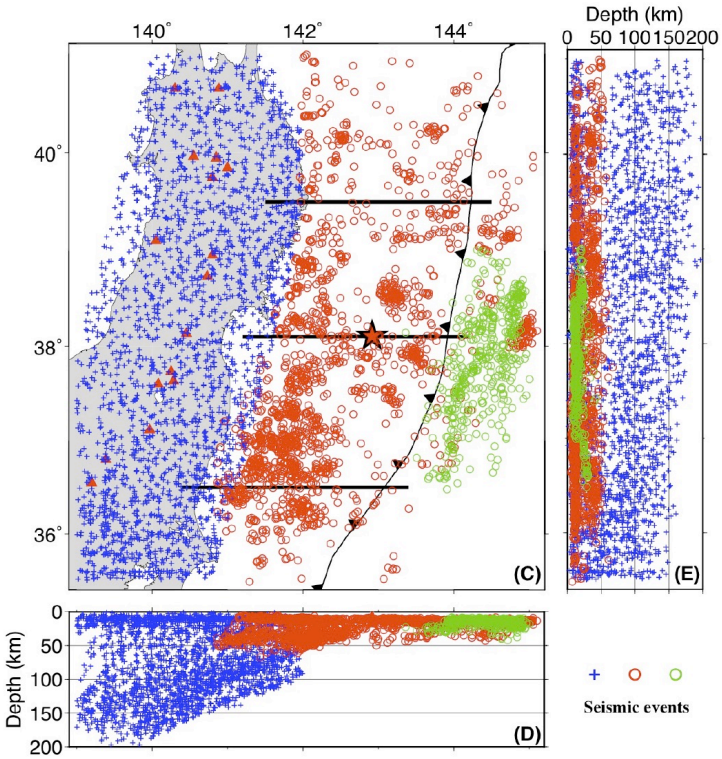


図 1. (B)日本列島とその周辺域にあるプレートの配置。青色の枠線は本研究領域。▲は活火山、★は 2011 年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)の震央。(C)本研究の解析で用いた微小地震の分布図。(D)と(E)は、それぞれ(C)の東西断面と南北断面。青色＋印は観測網の下で起った地震、赤色○は地震反射波データで正確に再決定した海底地震の位置、緑色○は海底地震計で決定した地震の位置。三つの黒線は図 3 にある東西断面の位置。

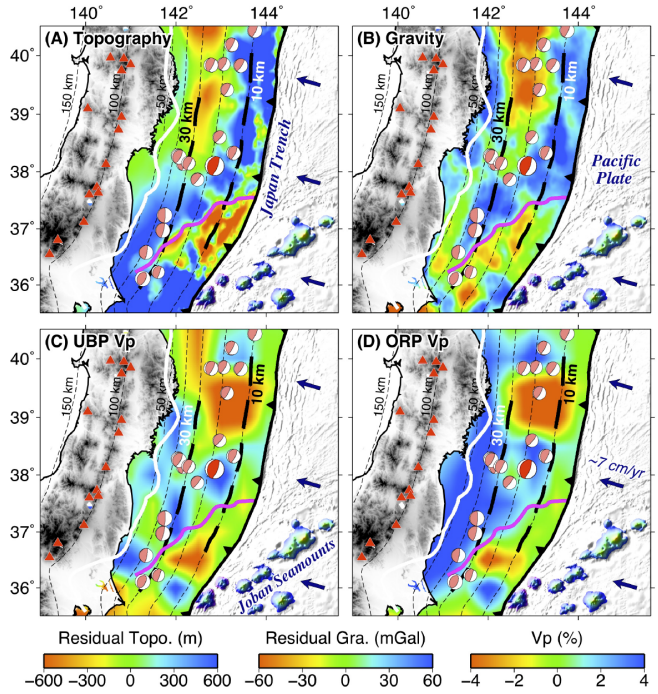


図 2.　(A)海底地形異常と(B)重力異常の分布図（Bassett et al. 2016 から変更）。 (C)沈み込んでいる太平洋プレートの上面に沿う震源断層面上の P 波速度分布。 (D)震源断層の上にあるオホーツクプレート内の平均 P 波速度分布。黒色の破線は沈み込んでいる太平洋プレート上面の等深線である。紫色の線はオホーツクプレート内の岩石組成の境界線を示す。

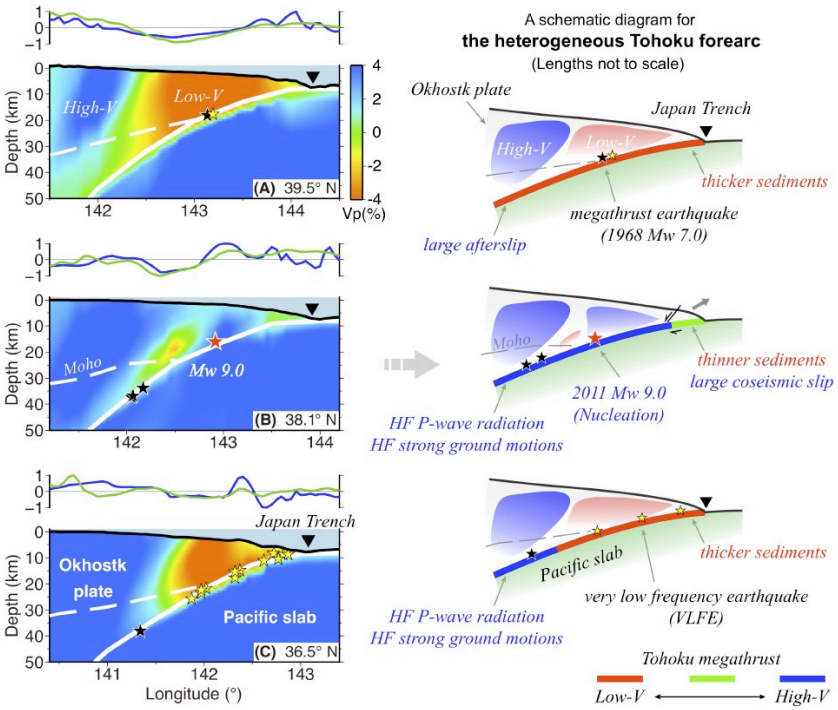


図 3. 左側は図 1(C)の三つの黒線に沿う P 波速度トモグラフィーの東西断面図。 右側はそれらに対応する模式図。赤色と青色はそれぞれ低速度と高速度、そのスケールは断面(A)の右。白い実線は沈み込んでいる太平洋プレートの上面に沿う震源断層面。白い破線はオホーツクプレート内のモホ面（地殻とマントルの境界面）。断面(B)にある赤色★は 2011 年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)の震源。黒色★は 1917-2017 年の期間に起こった地震(M が 7 以上)。黄色★は超低周波地震。各断面の上にある青色と緑色の線はそれぞれ海底地形と重力の異常を表す。

その結果、以下のことが明らかとなりました。

① 東北地方太平洋沖地震の震源断層面上に、顕著な不均質構造が存在します(図2参照)。東北地方太平洋沖地震は宮城県沖にある高速度域で起りました(図2(C)の青色の部分)。また、これまでの100年間(1917年—2017年)に発生した大地震(マグニチュードが 7 以上)のほとんどは断層面上の高速度域の中、あるいはその周りに位置しています(図2(C))。

② 東北地方太平洋沖地震の震源の上にも下にもP波速度が周りに比べて速くなっています(図3(B)にある赤☆の部分)。その上の高速度体はオホーツクプレート内にある固い花崗岩体ですが、その下の高速度体は沈み込んだ太平洋プレート上の海山や海底地形の高い場所だと思われます。東北地方太平洋沖地震は、このような両プレートの固い部分のぶつかりあいで生じたことが推測されます。

本研究で明らかとなったプレートの不均質構造と震源の位置関係(図 2 と図 3)は、謎の多いプレート境界型の巨大地震の発生機構を解明していくための重要な手がかりと考えられます。また、地下の微細構造の解明によって、大地震の震源の特定が期待できます。

論文情報

Science Advances
Upper and lower plate controls on the great 2011 Tohoku-oki earthquake
Xin Liu, Dapeng Zhao
DOI 番号：10.1126/sciadv.aat4396

用語解説

（注1）地震波トモグラフィー法
コンピュータで大量の地震波伝播時間のデータを処理することによって、地球内部の3次元地震波速度分布を求める方法です。その原理は医学分野のCTスキャンと同じです。地震波トモグラフィーは、現在地球内部構造の3次元画像を得る最も有力な手段となっています。

（注2）3次元P波速度構造
地震波速度とは地震波が地球の中を伝わる速さのことです。地震波には、性質の違うP波とS波があります。地震波速度は場所によって異なり、だいたい地中深くなるほど速くなります。地球内部構造を表すには幾つかの物理量（例えば、密度、温度など）を使うことができますが、現在は地球内部における地震波速度の空間分布が最もよく用いられています。また、地震波トモグラフィー法を使って、地球内部におけるP波（あるいはS波）速度の3次元分布を推定でき、得られた結果は3次元P波（あるいはS波）速度構造と言います。地震波速度の分布から、地球内部の密度、温度、強度などに関する情報も得られるため、P波（あるいはS波）速度の空間分布を使って、地球内部構造を表します。

（注3）重力異常データ
重力異常とは、重力の実測値（あるいは観測値）と、理論モデルから予測される値との差のことです。重力異常をデータとして解析することにより、地下の密度の空間分布に関する情報が得られます。

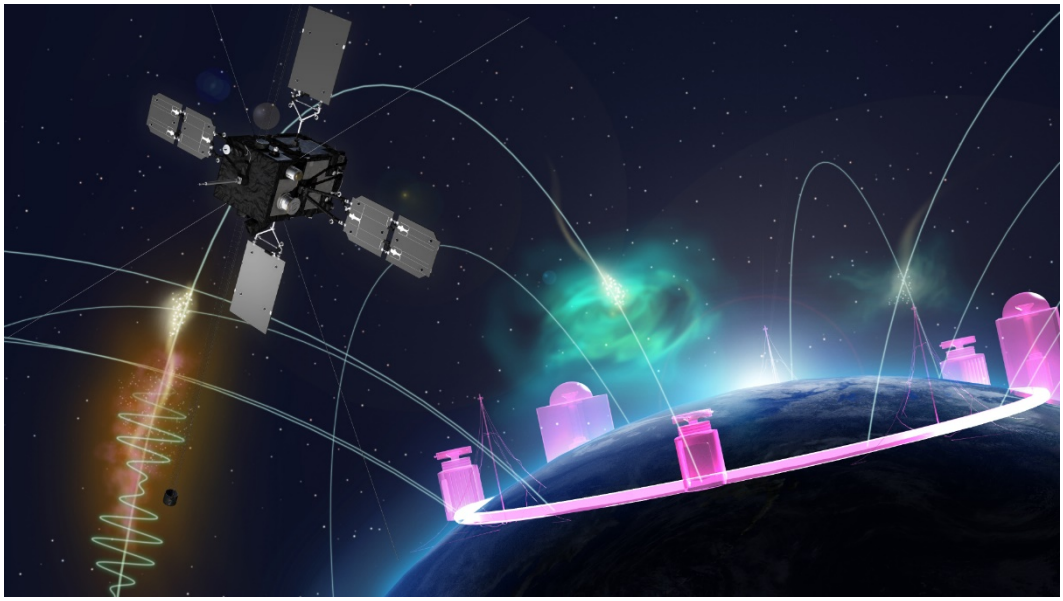
（注4）断層面解
ある断層の破壊で地震を起こした際における、地下での断層の位置や方向、地震の際の断層の動きのことです。発震機構解あるいは地震メカニズム解とも呼ばれています。しばしばビーチボールのようなマークで表されます。

本研究はJSPS科研費（基盤研究(S) 課題番号23224012）および文科省科研費（課題番号26106005）の支援を受けて行われました。

世界初！地球近傍の宇宙で発生するプラズマと電磁波の相互作用発生域の可視化に成功

～最新の科学衛星「あらせ」と極北のオーロラ観測から宇宙の物理現象を理解～

2019 年 1 月 15 日　惑星プラズマ・大気研究センター　助教　土屋　史紀



研究イメージ図(C)JAXA

金沢大学理工研究域電子情報通信学系の尾崎光紀准教授、名古屋大学宇宙地球環境研究所の三好由純教授、塩川和夫教授、電気通信大学の細川敬祐准教授、国立極地研究所、京都大学、東北大学、JAXA 宇宙科学研究所、フロリダ大学（アメリカ合衆国）、国立研究開発法人情報通信研究機構、アサバスカ大学（カナダ）などの国際共同研究グループは、地上で観測されるオーロラを使い、地球近傍の宇宙で発生する電磁波コーラス (※1) と高エネルギー電子が共鳴することで生じる波動粒子相互作用 (※2) 発生域の形状変化の詳細を世界で初めて明らかにしました。

コーラス波動と電子が引き起こす波動粒子相互作用という物理現象は、人工衛星に搭載される電子回路の故障や宇宙飛行士の被ばくなどを引き起こす有害な放射線を発生させます。また、宇宙の高エネルギー電子を地球の大気中へ降下させ、地球の大気組成に変化をもたらす可能性も示唆されています。しかし、波動粒子相互作用は目で見ることができないため、その形状変化の詳細は半世紀以上にわたり不明のままであり、現在もなお、国際観測研究が精力的に継続されています。

本国際共同研究グループは、コーラス波動が高エネルギー電子を地球の大気中へ降下させる際に特殊なオーロラを発光させることに着目し、地球周辺の放射線の様相を調査する科学衛星「あらせ」（2016 年打上げ）と地上観測網 PWING（study of dynamical variation of Particles and Waves in the INner magnetosphere using Ground-based network observations）との協調観測を行いました。その結果、科学衛星「あらせ」が地球から約 3 万キロ離れた距離でコーラス波動を捉えた

と同時に、そのコーラス波動に伴う波動粒子相互作用が引き起こした突発発光オーロラを地上で捉え、波動粒子相互作用発生域の形状変化が数十ミリ秒単位で非対称に発達することを明らかにしました。
本研究成果は、オーロラが宇宙電磁環境を可視化するためのディスプレイに成りうることを間接的に示したとともに、今後、オーロラを用いた宇宙電磁環境ハザードマップを作成することにより、安心安全な宇宙利用拡大に貢献することが期待されます。

本研究成果は、2019 年 1 月 16 日 10 時（英国時間）に英国科学誌「Nature Communications」のオンライン版に掲載されました。

研究の背景

地球周辺の宇宙空間（静止軌道高度程度までの空間をいう）には、自然現象で生じる放射線が飛び交っていることが知られており、商用衛星サービス（気象、通信、GPS など）への影響や有人月探査などにおける宇宙飛行士の被ばくが懸念されています。この地球周辺宇宙空間の放射線は、宇宙で発生する電磁波コーラスと高エネルギー電子が共鳴することで生じることが知られており、この現象を波動粒子相互作用と呼びます。波動粒子相互作用は、高エネルギー電子を放射線にまで加速させるだけでなく、宇宙の高エネルギー電子を発生域から磁力線に沿って地球の大気中へ降下させ、特殊なオーロラを発生させることも知られています。また、磁力線に沿って大気中に降下した高エネルギー電子は、オーロラを発生させるだけでなく、地球大気組成に変化をもたらすことが示唆されています。このため、宇宙の波動粒子相互作用発生域の詳細を明らかにすることは、宇宙電磁環境や地球大気組成への影響を知る手掛かりとなることから、半世紀以上前から現在に至るまで国際的に盛んに研究され続けています。しかし、コーラス波動を構成するパケットの存続時間は 1 秒以下と短く、かつ広大な宇宙空間を数少ない科学衛星だけで調べるには限界があり、特に、発生域の形状変化についてはよく分かっていませんでした。

研究成果の概要

本国際共同研究グループは、宇宙の波動粒子相互作用を探査する科学衛星「あらせ」で宇宙のコーラス波動のパケットを捉えるとともに、そのコーラス波動による波動粒子相互作用が引き起こした突発（数百ミリ秒）発光オーロラを科学衛星「あらせ」から約 3 万キロ離れた地上で同時に捉えることに世界で初めて成功しました。科学衛星と地上で同時に波動粒子相互作用に伴うコーラス波動と関連する突発的なオーロラを捉えるためには、適した軌道を有する科学衛星を打ち上げるだけでなく、科学衛星の軌道に応じた地上観測網の整備が必要になります。そこで、本国際共同研究グループは科学衛星「あらせ」に搭載する世界トップクラスの電磁波観測装置を開発するとともに、北半球を中心に地磁気的な緯度 (※3) がほとんど同じとなる場所で経度方向に地球を 1 周する地上観測網「PWING（study of dynamical variation of Particles and Waves in the INner magnetosphere using Ground-based network observations）」を構築しました。これにより、科学衛星「あらせ」でコーラス波動の詳細を捉えながら、いつ、どの経度でも地上から関連オーロラ

現象を捉えることを可能にし（図 1）、世界で初めて高時間分解能（10 ミリ秒）で両者の協調観測を成功させました。

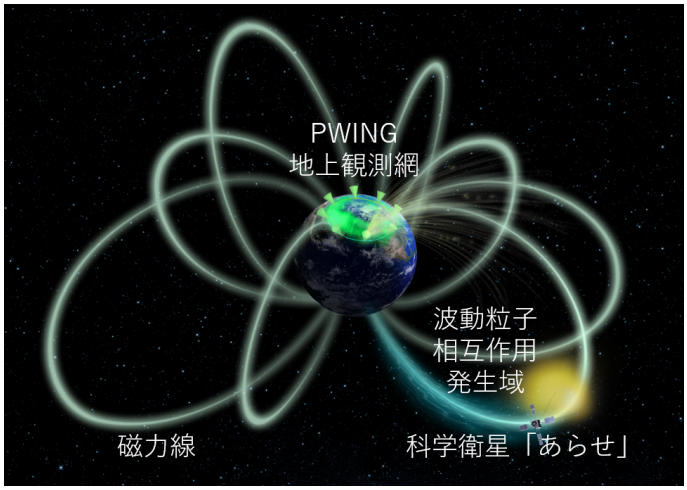


図 1. 科学衛星「あらせ」と PWING 地上観測網の協調観測イメージ

科学衛星「あらせ」による宇宙での詳細観測と磁力線に沿ったオーロラ観測を通じて地上から波動粒子相互作用発生域の空間分布を捉えることができる

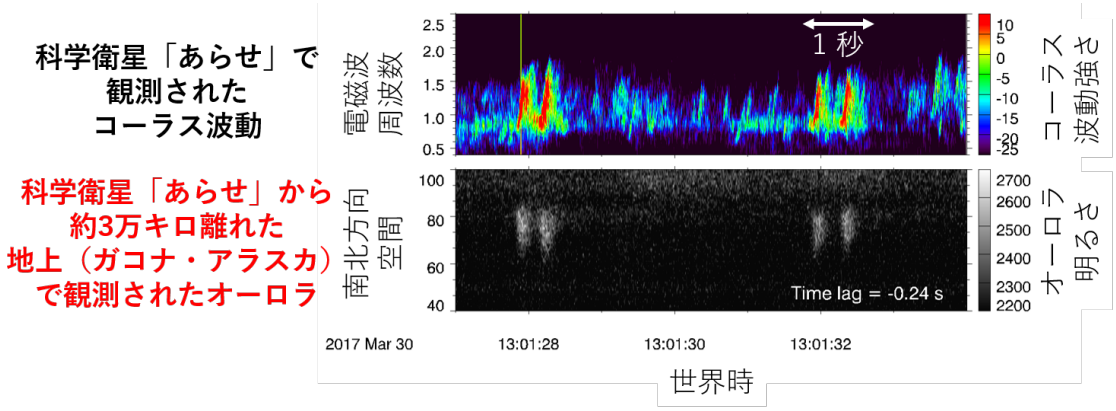


図 2. 科学衛星「あらせ」で観測した数百ミリ秒存続期間を示すコーラス波動のパケットと地上（ガコナ・アラスカ）で観測されたオーロラの一対一対応。宇宙で発生したコーラス波動に伴う波動粒子相互作用に関する情報が磁力線を通じて地上からオーロラとして仔細に可視化されている

その結果、科学衛星「あらせ」と磁力線でつながるアラスカ南部のガコナ（PWING 国際拠点の一つ）で観測された特殊な突発発光オーロラ現象は、数百ミリ秒の単位で宇宙のコーラス波動とオーロラの明るさと形状変化が一致する変化を示し（図 2）、このオーロラがコーラス波動に伴う波動粒子相互作用発生域の形状変化を表すディスプレイになることを明らかにしました。地上で捉えたオーロラの明るさと形状変化は、従来の科学衛星の点観測では捉えることのできなかった波動粒子相互作用発生域の詳細を可視化し、世界で初めて地磁気的な南北方向に非対称性を強く示すことを明らかにしました（図 3）。この変化は、電磁波と電子が効率良く共鳴することで磁力線に沿った方向の変化（オーロラの明るさの時間変化として観測される）だけでなく、磁力線を横切る方向の変化（オーロラ形状の空間変化として観測される）が起こっていることを意味します。そして、数百ミリ秒という短期間に限定された範囲で地球大気組成に変化をもたらしうる高エネルギー電子を大気中に急速降下させていることを示唆しています。

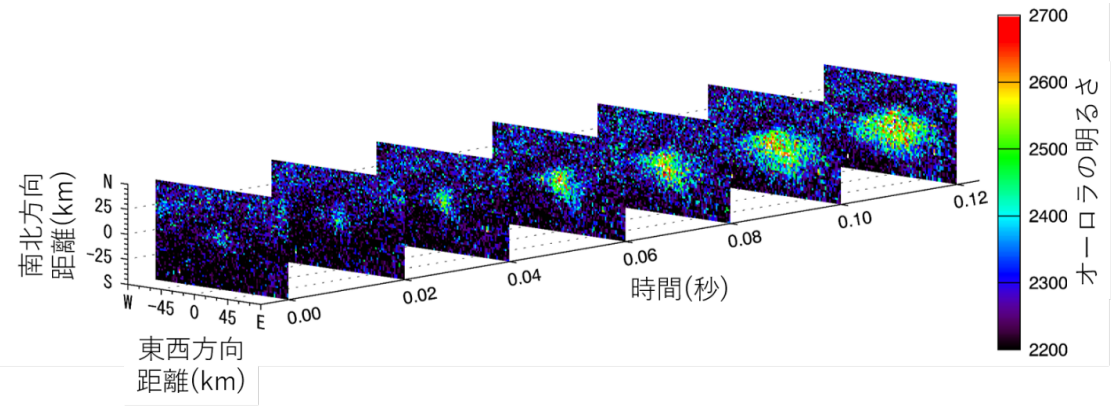


図 3. 観測された突発発光オーロラの南北方向の非対称形状変化。1 ピクセルの強度変化は磁力線に沿った時間変化を表し，形状変化は磁力線を横切る方向の空間変化を表す

今後の展開

本研究により、これまで知られていなかった磁力線を横切る方向の波動粒子相互作用発生域の形状変化が明らかになりました。本研究は、科学衛星と地上観測による事例解析でしたが、今後、突発発光する特殊な類似オーロラ現象を数多く解析することによって、普遍的な特徴をさらに明らかにできると考えられます。しかし、宇宙の波動粒子相互作用発生域の形状変化の詳細を表す特殊なオーロラは、数百ミリ秒の短い存続期間の現象であることが分かったため、従来のような解析者の目視による大量のデータ解析は困難が予想されます。これに対し、本国際共同研究グループは人工知能を用いてデータを解析することで、この課題を解決できる目途をすでに立てています。今後は人工知能の技術も組み合わせることでオーロラから宇宙の電磁環境を表すハザードマップを作成することにより、安心安全な宇宙利用拡大に貢献することが期待されます。また、固有の磁場を持つ惑星においてもコーラス波動と電子の波動粒子相互作用が生じていることも知られています。このため、本国際共同研究グループが開発した電磁波観測装置の搭載された水星磁気圏探査機「みお」（2018 年打上げ）などによる惑星探査への応用も期待されます。

本研究は、科学研究費助成事業（15H05747、15H05815、16H06286、16H04056、 17H06140、17K06456）および金沢大学先魁プロジェクトの支援を受けて実施されました。また、PWING 地上観測網データベース構築の一部は、IUGONET（Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork）の支援を受けました。科学衛星「あらせ」、地上観測データは、JAXA 宇宙科学研究所と名古屋大学が共同運用している ERG サイエンスセンターから配信されているものです。

掲載論文

Nature Communications
Visualization of rapid electron precipitation via chorus element wave-particle interactions
（コーラスエレメント波動粒子相互作用による急速電子降下の可視化）

Mitsunori Ozaki[1], Yoshizumi Miyoshi[2], Kazuo Shiokawa[2], Keisuke Hosokawa[3], Shin-ichiro Oyama[2, 4, 5], Ryuho Kataoka[5, 6], Yusuke Ebihara[7], Yasunobu Ogawa[5, 6], Yoshiya Kasahara[1], Satoshi Yagitani[1], Yasumasa Kasaba[8], Atsushi Kumamoto[8], Fuminori Tsuchiya[8], Shoya Matsuda[9], Yuto Katoh[8], Mitsuru Hikishima[9], Satoshi Kurita[2], Yuichi Otsuka[2], Robert C. Moore[10], Yoshimasa Tanaka[5, 6, 11], Masahito Nosé[2], Tsutomu Nagatsuma[12], Nozomu Nishitani[2], Akira Kadokura[5, 6, 11], Martin Connors[13], Takumi Inoue[1], Ayako Matsuoka[9], and Iku Shinohara[9]

（尾崎 光紀[1]，三好 由純[2]，塩川 和夫[2]，細川 敬祐[3]，大山 伸一郎[2, 4, 5]，片岡 龍峰[5, 6]，海老原 祐輔[7]，小川 泰信[5, 6]，笠原 禎也[1]，八木谷 聡[1]，笠羽 康正[8]，熊本 篤志[8]，土屋 史紀[8]，松田 昇也[9]，加藤 雄人[8]，疋島 充[9]，栗田 怜[2]，大塚 雄一[2]，Robert C. Moore[10]，田中 良昌[5, 6, 11]，能勢 正仁[2]，長妻 努[12]，西谷 望[2]，門倉 昭[5, 6, 11]，Martin Connors[13]，井上 拓海[1]，松岡 彩子[9]，篠原 育[9]）

1 金沢大学，2 名古屋大学，3 電気通信大学，4 オウル大学，5 国立極地研究所，6 総合研究大学院大学，7 京都大学，8 東北大学，9 JAXA 宇宙科学研究所，10 フロリダ大学，11 データサイエンス共同利用基盤施設，12 国立研究開発法人情報通信研究機構，13 アサバスカ大学

掲載日時：2019 年 1 月 16 日 10 時（英国時間）にオンライン版に掲載

DOI：10.1038/s41467-018-07996-z

用語解説

※1　電磁波コーラス

磁力線に沿った電子のらせん運動に伴う電磁波。特に、音声に変換すると鳥のさえずりのように聞こえるものをいう。

※2　波動粒子相互作用

無衝突プラズマ中における電磁波と宇宙プラズマの相互作用のこと。電磁波を媒介して宇宙プラズマがさらに高いエネルギーへの加速や、散乱されるなどの現象を生じる。

※3　地磁気的な緯度

地磁気の作る北極と南極を基準とした緯度のこと。地理座標における北極と南極は、地磁気の作る北極と南極からずれているため、地磁気に関連する現象を扱う場合に地磁気を参照した座標が用いられる。

ランタン酸化物の超伝導体化に成功

高温超伝導体の絶縁ナノブロック層が超伝導を発現

2018 年 6 月 8 日　化学専攻　教授　福村　知昭

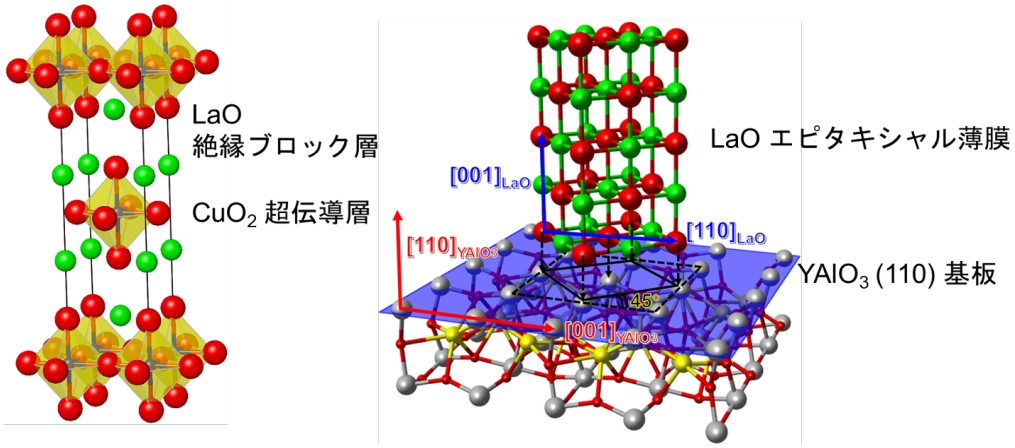


図 1　高温超伝導体の母物質 La_2CuO_4（左）と本研究で扱った LaO エピタキシャル薄膜（右）の結晶構造。$YAlO_3$(110)基板上では、LaO は基板に対して 45 度回転した状態でエピタキシャルに成長しています。

発表のポイント

- 従来、電気を流さないとされてきたランタン酸化物が、薄膜にして酸素原子を一部引き抜くことで超伝導体になることを発見しました。
- 今回超伝導を示したランタン酸化物は、銅酸化物高温超伝導体の結晶の部分構造である絶縁ブロック層として知られており、これまでの銅酸化物高温超伝導体に関する常識と相反するものです。
- このランタン酸化物は岩塩構造という単純な結晶構造のため、他の機能性酸化物とのナノブロック積層構造を作ることで、新奇な超伝導体をデザインすることが可能です。

概要

東北大学材料科学高等研究所の福村知昭教授らは東京大学大学院理学系研究科化学専攻の長谷川哲也教授と共同で、高温超伝導体結晶中の部分構造で絶縁体として知られるランタン酸化物が超伝導体となることを発見しました。

銅酸化物や鉄系化合物に見られる高温超伝導体は、いずれも電気を流さない絶縁ブロック層と超伝導を発現する電気伝導層が積み重なった層状構造を持ちます。この高温超伝導の発現メカニズムは、30 年以上も未解明のままです。

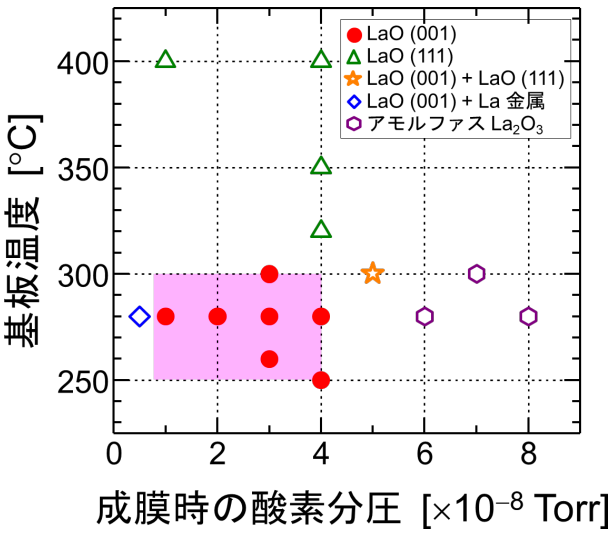
研究グループは、パルスレーザー堆積法と呼ばれる強力レーザーを用いる薄膜作製法で、超高真空中でランタン酸化物を合成しました。得られた化合物は、よく知られた絶縁体のランタン二三酸化物 La_2O_3 ではなく、銅酸化物高温超伝導体の結晶に含まれる絶縁ブロック層と同じ岩塩構造をもつランタン単酸化物（LaO）であることが分かりました。La_2O_3 は絶縁体ですが、その組成から酸素原子を一つ減らした LaO は良好な電気伝導性を示し、約 5K 以下でゼロ抵抗となる超伝導体になります。

今回の成果は、銅酸化物高温超伝導体中で絶縁ブロック層であった LaO 層の役割について再考を迫るものです。また、超伝導体の LaO と他の機能性酸化物をレゴブロックのように重ね合わせることで、新たな現象や別の新超伝導体の発見につながる可能性があります。
本研究成果は、2018 年 5 月 21 日付けで米国化学会誌「Journal of the American Chemical Society」にオンライン掲載されました。

研究の背景と経緯

超伝導[注1)]はゼロ抵抗や完全反磁性[注2)]を示す物理現象で、電力損失のない送電線、リニアモーターカーの磁気浮上技術、電力貯蔵などエネルギー問題の観点からも重要です。それらの実用化には、できるだけ室温に近い高温まで超伝導状態を保つことができる高温超伝導体[注3)]が必要です。1987 年に発見された銅酸化物高温超伝導体が通常の環境では一番高い温度で超伝導を示す物質です。それらの銅酸化物高温超伝導体は複数あり様々な結晶構造をもちますが、その共通として挙げられるのは、超伝導を発現する電気伝導層（CuO_2 層）と絶縁ブロック層の層状構造で構成されることです。その絶縁ブロック層の元素を別の元素で置換することで電気伝導層に伝導キャリアがドープされて超伝導が発現します。1986 年にベドノルツとミュラー（1987 年ノーベル物理学賞）が発見した最初の高温超伝導体である$(La,Ba)_2CuO_4$では、岩塩構造をもつ LaO 層が絶縁ブロック層に相当し、La^{3+}の一部を Ba^{2+}で置換することで超伝導体になります。
その LaO は 1981 年にバルク多結晶体の合成が一例ありますが、電気伝導性をもつことくらいしかわかっていませんでした。これは、ランタン酸化物はランタンの原子価が 3 価となる La_2O_3 が化学的に安定であるのに対し、2 価をもつ単相の LaO は大気中では不安定で合成が困難であることに由来しています。そのため、ランタン酸化物は絶縁体であると一般に考えられてきました。
本研究グループでは、パルスレーザー堆積法[注4)]で薄膜を作製することにより、様々な希土類元素の単酸化物がエピタキシャル薄膜[注5)]として合成できることを報告してきました。超高真空中という強い還元雰囲気では、大気下では合成が難しい希土類単酸化物の合成も可能になります。本研究グループではイットリウムやサマリウムの単酸化物の薄膜合成に成功しており、これらは良好な電気伝導性を示します。今回は LaO 薄膜の合成により、これまで報告のない基礎物性の解明を試みました。

研究の内容



本研究で作製した材料は岩塩構造をもつランタンの単純酸化物 LaO で、1981 年の高圧印加下で合成したバルク多結晶体の報告以降、研究の報告はありません。その 1981 年の報告では、良好な電気伝導性を示すことしかわかっていませんでした。図 1 のように、この材料は、銅酸化物高温超伝導体の母物質 La_2CuO_4 中の絶縁ブロック層と同じ結晶構造です。

図 2　$YAlO_3$(110)基板上の LaO 薄膜の合成条件。ピンクで示した基板温度領域と酸素分圧領域で LaO エピタキシャル薄膜が得られます。

今回、LaO と格子定数の近い $YAlO_3$ 基板を用いて、LaO を安定化するように工夫をしています。図 2 に示すように、非常に低い酸素の圧力かつ摂氏 250 度～300 度の限られた温度領域で、高品質な LaO エピタキシャル薄膜の合成に成功しました。$YAlO_3$ の格子定数は LaO より少し小さいので、LaO の結晶は薄膜面内方向に圧縮されます（図 3 挿入図左）。すると、薄膜面直方向の c 軸方向に LaO の結晶は 1-2 %ほど引き伸ばされます（図 1 右）。
得られた LaO エピタキシャル薄膜は、過去のバルク多結晶体と同様に良好な電気伝導性を示しました。それだけでなく、液体ヘリウム温度を超える最大 4.5 ケルビンで超伝導が発現することがわかりました（図 3、青線）。

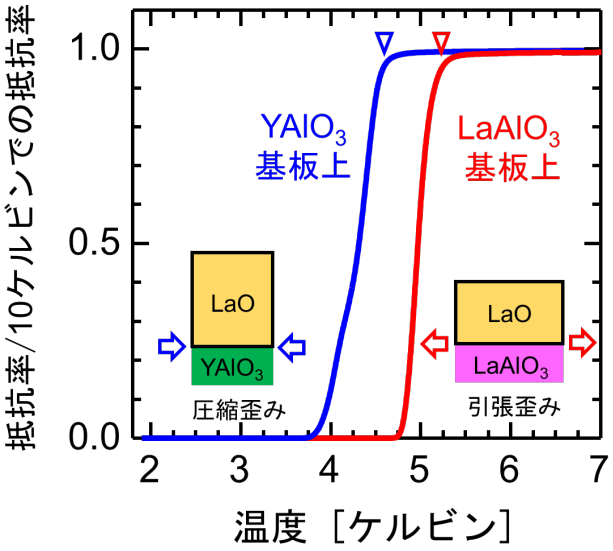


図 3　$YAlO_3$(110)基板上と $LaAlO_3$(001)基板上に成長した LaO 薄膜の電気抵抗率の温度依存性。逆三角形は超伝導転移が始まる温度を示す。図中はそれぞれの基板から受ける結晶格子の歪みの方向を示す。LaO はエピタキシャル歪みの効果によっても、超伝導転移温度が変化します。

LaO 薄膜は他の基板上でも成長します。$YAlO_3$ と異なり LaO よりも格子定数が大きい $LaSrAlO_4$ および $LaAlO_3$ を基板に用いると、LaO は基板から薄膜面内方向に引張歪みを受けて c 軸方向に 1-2%ほど収縮して成長します（図 3 挿入図右）。すると、$YAlO_3$ 基板を用いたときよりも高温の 5.2 ケルビンで超伝導を発現しました（図 3 左、赤線）。図 3 の二つの試料は電子キャリア密度がほとんど同じであることから、超伝導転移温度が異なるのは、結晶格子の歪みが異なることが原因として考えられます。この LaO のような単純な岩塩構造の超伝導体において、結晶格子の歪みの効果によって超伝導転移温度が変化した例はなく、理論的な解明が待たれるところです。

今後の展開

表 1 に示すように、構成元素が二つのみの二元系酸化物で超伝導を示した例は LaO 以外では過去に 4 化合物のみで、チタンとニオブの酸化物に限られていました。また、これまで絶縁材料とみなされてきた二元系希土類酸化物系で超伝導を発現したのは、LaO が初めてです。LaO は単純な岩塩構造をもっているので、レゴブロックを積むようにヘテロ構造[注6)]を作製することが容易と考えられます。他の機能性酸化物とのヘテロ構造をデザインすることで、複合機能をもつ新超伝導体の発見につながる可能性があります。
また、銅酸化物超伝導体中の絶縁ブロック層として知られていた LaO が、LaO 単相として単離することで超伝導体になったことで、高温超伝導発現のメカニズムの解明につながる可能性があります。

元素	二元系酸化物	超伝導転移温度［ケルビン］
Ti	TiO	7.4
	γ-Ti_3O_5	7.1
	Ti_4O_7	3.0
Nb	NbO	1.6
La	LaO	5.2（今回）

表１　超伝導を示す二元系酸化物。
LaO のデータは今回観測された最高の超伝導転移温度を用いました。

用語解説

注１）超伝導
金属、合金、化合物などの温度を下げていくと、ある種の物質で電気抵抗がゼロ（ゼロ抵抗）になり、完全反磁性を示す現象。超伝導転移温度よりも低い温度で超伝導状態になる。

注２）完全反磁性
常伝導状態から超伝導状態に変化したとき、試料内部を通っていた磁力線が外部にはじきだされてしまう現象。超伝導体のもつ基本的な性質である。マイスナー効果とも呼ばれる。

注３）高温超伝導体
一般に、絶対温度約 25 ケルビン（約マイナス 250 度）以上の超伝導転移温度　を持つ超伝導体。たとえば、銅酸化物や鉄系超伝導体が知られており、これまでの最高温度は約 150 ケルビンである（常圧の環境の場合）。

注４）パルスレーザー堆積法
強力な紫外レーザーを用いて、超高真空中で原料を瞬間蒸発させ、基板に原料　を薄膜として堆積させる合成手法。

注５）エピタキシャル薄膜
基板となる結晶の上に結晶成長を行なうことで、下地の基板の結晶面に対して一定の結晶方位で配列した薄膜。基板と薄膜の格子定数の違いが、エピタキシャル歪みとして薄膜に影響を及ぼす。

注６）ヘテロ構造
組成元素が異なる固体をパルスレーザー堆積法などの技術で積層させた接合体のこと。

論文タイトル
“Superconductivity of Rock-Salt Structure LaO Epitaxial Thin Film”
（岩塩型 LaO エピタキシャル薄膜の超伝導）
doi:10.1021/jacs.8b03009
※本研究は JST-CREST、JSPS 科研費基盤研究 A（JP18H03872）、公益財団法人三菱財団、東北大学スピントロニクス学術連携研究教育センター（CSRN）の助成を受けたものです。

ダーウィン以来の謎、就眠運動の仕組みを解明

生物時計発見のルーツとなった生物現象

2018 年 7 月 6 日　化学専攻　教授　上田　実

図　就眠運動は紀元前から人類を魅了した

発表のポイント

- 就眠運動はダーウィンの研究以来の 130 年の謎
- 昨年度ノーベル生理学医学賞の対象となった生物時計（注 1）は、植物の就眠運動の観察から見つかった
- 就眠運動を引き起こす分子（イオンチャネル（注 2））を初めて発見
- 生物時計は、隣り合う細胞間で分子の発現を不均等に制御することで就眠運動を生み出す

概要

マメ科植物には、夜に葉を閉じ、朝には再び葉を開く就眠運動というユニークな現象が見られます。就眠運動に関する最古の記録は、紀元前アレキサンダー大王の時代に遡り、進化論のダーウィンが晩年、膨大な観察研究を行いました。昨年度ノーベル生理学医学賞の対象となった生物時計は、植物の就眠運動の観察から発見されました。しかし、就眠運動の分子機構は、現在まで全く不明であり、関連する分子すら見つかっていませんでした。東北大学大学院理学研究科（兼務 同大学院生命科学研究科）の上田実教授らは、就眠運動を引き起こす分子（イオンチャネル）を初めて発見し、それらが葉の上面側と下面側の細胞で不均等に発現することで、葉の動きが生まれることを明らかにしました。今回の成果は、生物時計によって生物の行動が制御される仕組みの解明に大きく貢献することが期待されます。本成果は米国科学誌「カレント・バイオロジー」に掲載されました。

詳細な説明

１．背景

マメ科植物には、夜に葉を閉じ、朝には再び葉を開く就眠運動というユニークな現象が見られます。就眠運動に関する最古の記録は、紀元前アレキサンダー大王の時代に遡り、進化論のダーウィンが晩年、草分け的な膨大な観察研究を行いました。昨年度ノーベル生理学医学賞の受賞対象となった生物時計は、18 世紀に、植物の就眠運動から発見されました。このように、就眠運動は、太古の昔から人類の知的好奇心を刺激し、重要な科学的発見をもたらしました。しかし、その分子機構には謎が多く、1970 年代には、米国の植物生理学者が、就眠運動を生物時計解明の糸口を与える「ロゼッタストーン」に例えましたが、それを読み解くことができる者は現れませんでした。就眠運動は、高等学校の教科書にも記載される有名な生物現象ですが、ポストゲノム時代を迎えた現代においても、運動を制御する分子は発見されていませんでした。

２．これまでの知見と不可避な問題点

就眠運動の科学的研究には、マメ科の大型植物アメリカネムノキ（コマーシャルソング「この木なんの木」の植物）が用いられてきました。この大型植物は、各種の生理学的解析に適しており、葉の運動にはカリウムイオンが重要であること、それを制御するイオンチャネル（カリウムチャネル）が存在すると予想されること、など重要な知見をもたらしています。しかし、アメリカネムノキは非モデル植物 (注3) であり、遺伝子操作を行うことができないため、遺伝学的解析が進まず、また、マメ科モデル植物を用いた遺伝学的研究も、就眠運動の分子機構に関しては、見るべき成果を与えませんでした。

３．今回の成果

「葉を開く」運動には、葉の付け根の上面側と下面側に存在する運動細胞の膨張／収縮が関与します。葉の付け根の下面側細胞が縮むと葉が外側に倒れて開き、葉の付け根の上面側細胞が縮むと葉が内側に倒れて閉じます。

東北大学大学院理学研究科（兼務 同大学院生命科学研究科）上田実教授、及川貴也大学院生、石丸泰寛助教、東北大学大学院工学研究科　魚住信之教授、浜本晋助教、岡山大学大学院環境生命科学研究科 村田芳行教授、宗正晋太郎助教、岩手大学農学部　吉川伸幸教授らは、就眠運動を制御するイオンチャネルとして、アメリカネムノキから、カリウムチャネル SPORK2、陰イオンチャネル SsSLAH1 および SsSLAH3 を発見しました。このうち、陰イオンチャネル SsSLAH1 が、就眠運動のマスター制御因子として機能します。上田らは、葉の運動とイオンチャネルの関連を明らかにするため、葉の付け根の上下両面側の運動細胞を分離して、各々におけるイオンチャネル遺伝子の発現量を時間を追って調べました。細胞の収縮には、3 つのチャネル全てが必要ですが、陰イオンチャネル SsSLAH1 は、葉を開く朝方に下面側だけで発現しており、これによって下面側のみで運動細胞が収縮します。このようにして葉の下面側が縮むことで、それに引っ張られるように、葉が外側に倒れて「開く」ことがわかりました。

また、これらイオンチャネルの発現制御は、朝方に働く時計遺伝子 *SsCCA1* の支配下にあります。*SsCCA1* は、隣り合う細胞間で異なる制御パターンを持ち、葉の下面側でのみ SsSLAH1 遺伝子

の発現制御に関与します。葉の上面と下面という隣り合う細胞間で、時計遺伝子 *SsCCA1* が異なる遺伝子発現制御パターンを持つようになったことで、就眠運動という生物現象が発生したと推測できます。

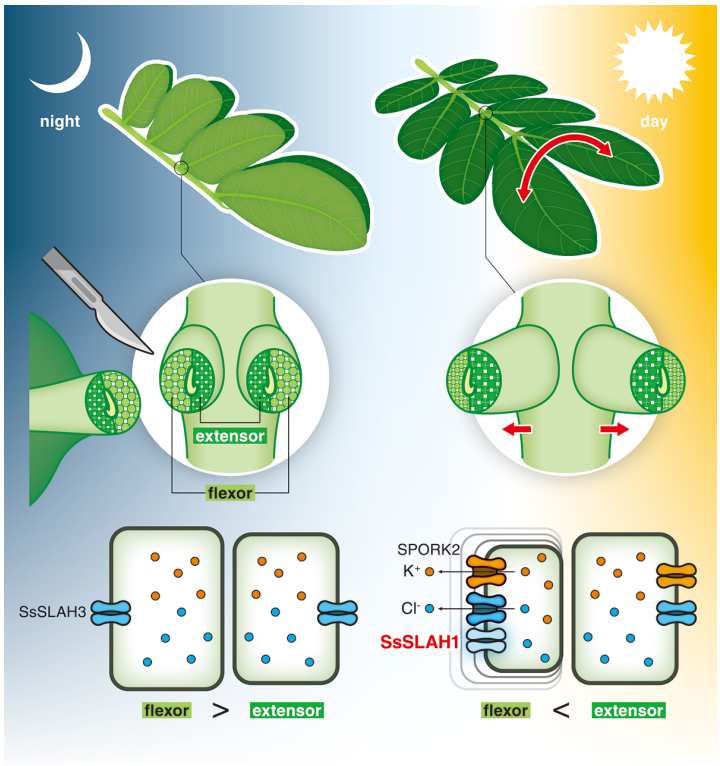


図　陰イオンチャネル SsSLAH1 は、朝方に葉の下面側（flexor）の細胞だけで発現し、葉の上面側（extensor）の細胞では発現しない。このため、朝方に葉の下面側の細胞が収縮し、それに引っ張られるように葉が外側に倒れて開く。（作図：ウチダヒロコ）

４．社会的意義と将来の展望

生物時計は、どのように個体レベルでの生物行動を制御するのか？その機構は、科学的に極めて注目度が高いのですが、遺伝子発現と行動との隔たりは大きく、個体レベルの現象を説明できる例は稀です。本研究は、ひとつの遺伝子の発現制御が、生物の個体現象をコントロールすることを明確に示しており、生物時計によって生物の行動が制御される仕組みの解明に大きく貢献することが期待できます。また、この発見によって、ダーウィン以来の謎であった植物の就眠運動現象の理解も大きく進むことになります。

用語解説

（注 1）生物時計

全ての生物に普遍的に存在する計時機構。各種の時計関連遺伝子が見つかっており、昨年度のノーベル生理学医学賞の受賞対象である。CCA1 は、植物において、朝方に起こる各種の生理現象（気孔開口など）をコントロールする時計遺伝子である。*SsCCA1* とは *Samanea saman*（アメリカネムノキの学名）の CCA1 の意。

（注 2）イオンチャネル（カリウムチャネル、陰イオンチャネル）

細胞の膜中に分布し、細胞の内外へ各種イオンの輸送を行うタンパク質。カリウムを輸送するものをカリウムチャネル、塩化物イオンなどの陰イオンを輸送するものを陰イオンチャネルと呼ぶ。陰イオンチャネルによって塩化物イオンが、カリウムチャネルによってカリウムイオンが、細胞外へ輸送されることで、膨圧が変化して細胞が収縮する。

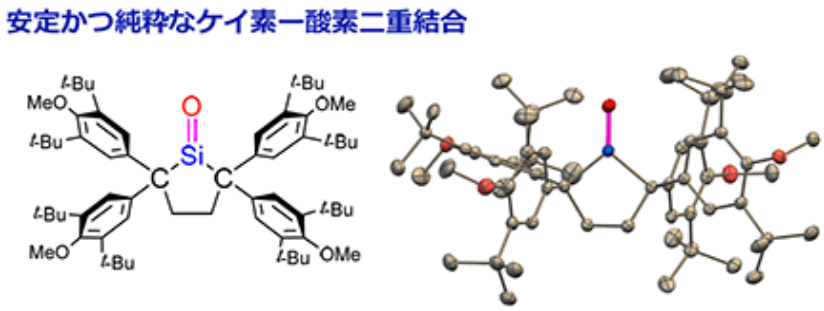
（注３）非モデル植物
全ゲノム情報が解読され、形質転換などによる各種遺伝子操作が可能となった、生物学において実験系として使用できる植物をモデル植物と呼ぶ。これに対して、これらが不可能な植物を非モデル植物と呼ぶ。昨今、全ゲノム情報の取得は容易になってきたが、未だに形質転換可能なモデル植物はシロイヌナズナ、イネ、タバコ、ヒメツリガネゴケ、マメ科ミヤコグサなどのごく少数に限られる。

論文情報
Current Biology
Ion channels regulate nyctinastic leaf opening in Samanea saman
T. Oikawa, Y. Ishimaru, S. Munemasa, Y. Takeuchi, K. Washiyama, S. Hamamoto, N. Yoshikawa, Y. Murata, N. Uozumi, M. Ueda
DOI 番号： https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.05.042
URL：https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(18)30678-X

安定なケイ素版ケトンの合成に成功

純粋なケイ素－酸素二重結合の構造と反応性の解明

2019 年 5 月 27 日　化学専攻　教授　岩本　武明



本研究：構造式と分子構造
（ピンク色の部分がケイ素ー酸素二重結合）

発表のポイント

- 純粋なケイ素－酸素二重結合を持つケイ素版ケトン(注 1) を安定な結晶として取り出し、その分子構造と、反応性を実験的に明らかにした。
- 今回合成したケイ素版ケトンは、150 年前から合成が追求されてきたケイ素－酸素二重結合を持つ分子で、ケイ素高分子シリコーンの単量体(注 2) にあたるものでもあり、これまでその合成に必須とされてきた、ケイ素－酸素二重結合が本来持つ大きな分極を軽減させる工夫（電子的安定化）を必要としない世界初の例である。
- 地上に豊富に存在する元素(注 3) であるケイ素から構成される化合物の可能性がさらに広がるものと期待される。

概要

東北大学大学院理学研究科化学専攻の岩本武明教授、石田真太郎准教授、小林良（博士課程後期 2 年、東北大学学際高等研究教育院博士研究教育院生 2 年）は、緻密な分子設計を施すことで、純粋なケイ素－酸素二重結合をもつケイ素版ケトンを安定な結晶として合成及び単離することに成功し、その分子構造とケイ素－酸素二重結合固有の高度な分極に由来する高い反応性を明らかにしました。ケイ素－酸素二重結合を持つ化合物は 150 年以上前から多くの化学者により追究されてきた化合物であり、今回合成した化合物は身の回りの様々なところで用いられている有機ケイ素高分子であるシリコーンの単量体に相当するものです。地上に豊富に存在する元素であるケイ素から構成される化合物の結合の理解が深まるだけでなく、これらの化合物の機能物質としての可能性が広がるものと期待されます。本研究の結果は、Wiley-VCH 社の一般化学雑誌である「Angewandte Chemie, International Edition」に 2019 年 5 月 17 日（日本時間）に accepted article 版がオンライン掲載されました。

詳細な説明

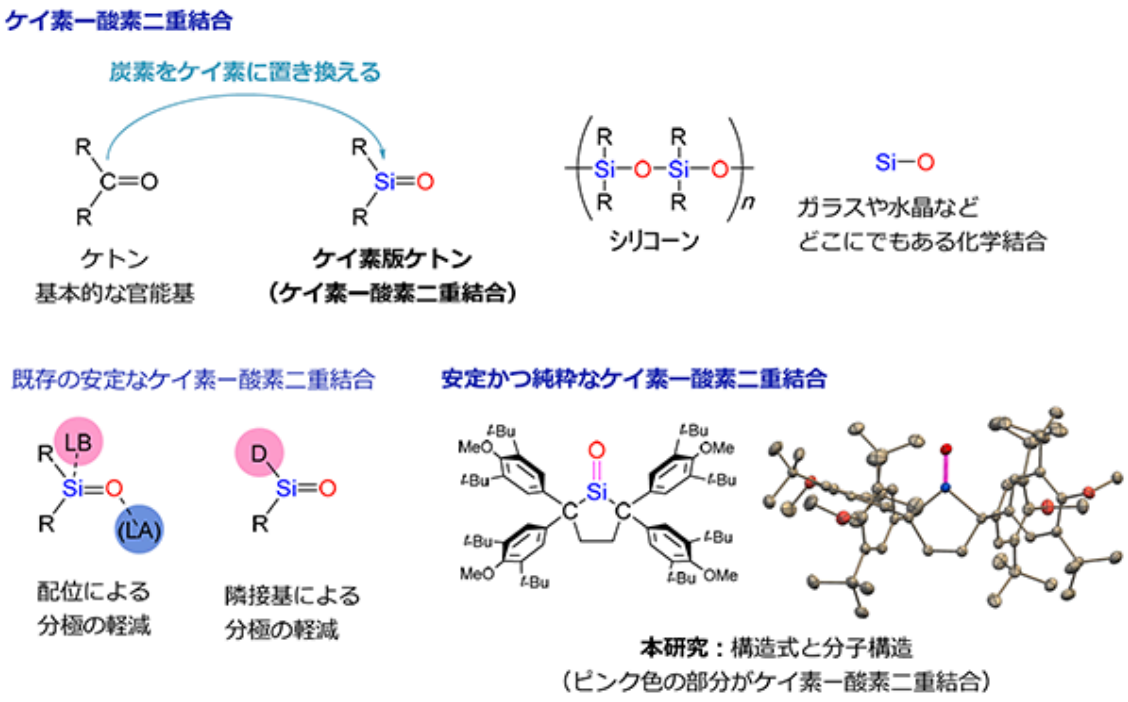


図 1.

メンデレーエフが元素周期表を取りまとめてから今年でちょうど 150 年になります。周期表の中でケイ素は炭素と同じ族に位置する元素であり、ケイ素が炭素と同様な化合物を形成するのか、という課題については当時から多くの化学者により追究され続けてきました。ケイ素と酸素の間に二重結合を持つ化合物（ケイ素－酸素二重結合化合物）は、150 年以上前からその合成が追究されてきたもので、本研究で注目する化合物は、重要かつ基本的な有機化合物であるケトン（炭素－酸素二重結合化合物）のケイ素版にあたります。ケイ素－酸素二重結合は電気陰性度の差から、ケイ素が正、酸素が負に大きく分極しているため、通常は容易に重合（注4）してしまいます（ケイ素版ケトンの重合体は有機ケイ素高分子「シリコーン」として知られ、身の回りの様々なところで用いられています。このようなケイ素－酸素単結合はガラスや水晶など、どこにでも存在する化学結合です。）。近年、ケイ素－酸素二重結合を持つ化合物が合成されるようになりましたが、これまで安定に合成されたものには、この分極を軽減させる工夫（熱力学的安定化）が施されていました（図 1）。ケイ素－酸素二重結合が本来持つ性質の理解には、このような結合の分極の軽減のない化合物が必要です。これまで、多くの化学者により、そのような分極の軽減のない、純粋なケイ素－酸素二重結合を持つ化合物が究極の合成目標として追究されてきましたが、いまだ達成されていませんでした。

純粋なケイ素－酸素二重結合を持つ化合物を安定に合成するのが困難であった理由は、ケイ素－酸素二重結合の性質を維持したまま、適切に重合のみを抑制する分子設計が難しかったところにあります。本研究では、立体的に大きな芳香族基を適切に配置した緻密な分子設計を施すことで、

純粋なケイ素－酸素二重結合を持つ化合物（ケイ素版ケトン）を安定な結晶として取り出し、その分子構造と、ケイ素－酸素二重結合固有の反応性を明らかにすることに成功しました。

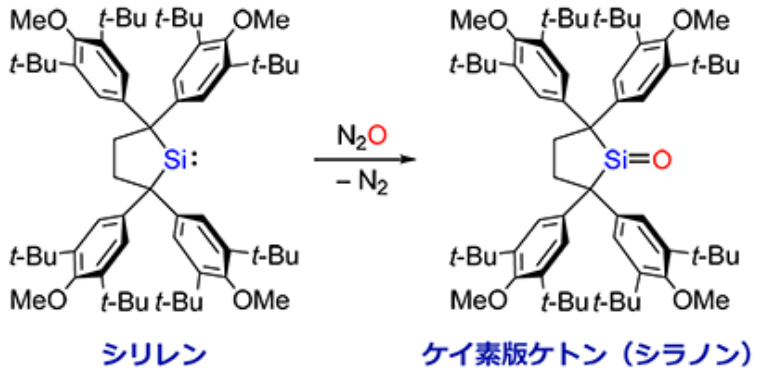


図 2.

具体的には、立体的に大きな芳香族基を適切に配置した保護基を持つケイ素二価化学種（シリレン）を合成し、このケイ素上への亜酸化窒素（N_2O）からの酸素原子移動反応でケイ素版ケトンを無色の結晶として合成しました（シラノン：図 2）。X 線単結晶構造解析により明らかにされたケイ素と酸素間の距離は 1.52 オングストローム（オングストロームは 10^{-10} メートル）で、これまで合成されてきた、ケイ素－酸素結合の中ではもっとも短い部類に入ります。また、この化合物のケイ素酸素周りには大きな保護基がありますが、様々な分子に対する反応性は維持されており、純粋なケイ素－酸素二重結合が本来持つ高い分極を反映した高い反応性（Lewis 酸性 (注 5)、Lewis 塩基性 (注 6)）を示すことが明らかになりました（図 3）。

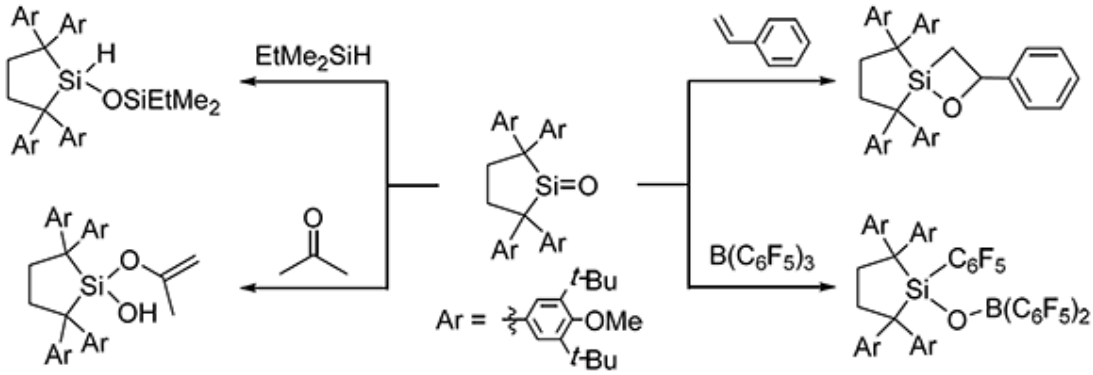


図 3.

本研究により、150 年前から追究されてきた、純粋なケイ素－酸素二重結合がもつ固有の性質を実験的に追究することが可能になりました。地上に豊富に存在する元素であるケイ素から構成される化合物の結合の本質の理解が深まるだけでなく、これらの化合物の機能物質としての可能性がさらに広がるものと期待されます。

用語解説

（注 1）ケトン
炭素－酸素二重結合をもつ化合物（カルボニル化合物）の中でも炭素上に炭素置換基を持つ化合物。有機化合物の中で最も重要な官能基の一つ。

（注 2）単量体
高分子を構成する単位になる低分子化合物。ケイ素高分子であるシリコーンは R_2SiO が構成単位になっている。

（注 3）地上に豊富に存在する元素
地上（地殻）で最も割合の多い元素は酸素（49.5%）であり、ケイ素はそれについて二番目に豊富な元素である（25.8%）。

（注 4）重合
二個以上の分子が互いに結合して、分子量の大きな化合物になる反応。ケイ素高分子であるシリコーンは R_2SiO が重合した構造を持っている。

（注 5）Lewis 酸性
電子対を受け取る性質。

（注 6）Lewis 塩基性
電子対を与える性質。

論文情報

Angewandte Chemie International Edition, Angewandte Chemie
An Isolable Silicon Analogue of a Ketone that Contains an Unperturbed Si=O Double Bond
Ryo Kobayashi, Shintaro Ishida, Takeaki Iwamoto
DOI 番号：10.1002/anie.201905198 and 10.1002/ange.201905198

隕石中から太陽系最古の新鉱物を発見

初期太陽系進化過程の物理化学条件に新たな制約

2017 年 4 月 12 日　地学専攻　教授　中村　智樹

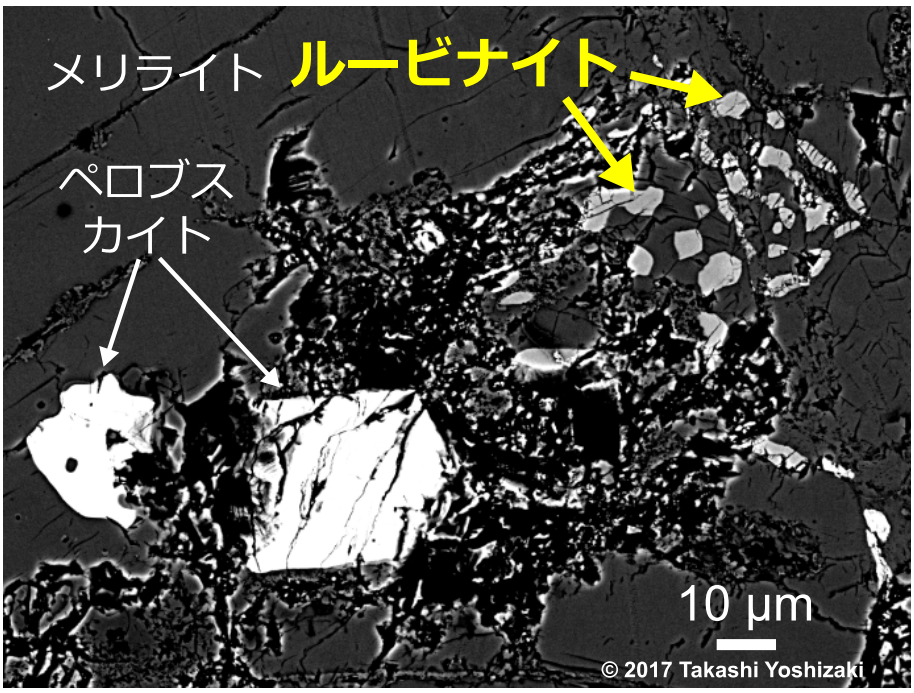


図 1 Allende 隕石中のルービナイト（薄灰色）の電子顕微鏡写真。メリライト（濃灰色）、ペロブスカイト（白色）はいずれも難揮発性包有物中に普遍的に含まれる鉱物である。

概要

東北大学大学院理学研究科地学専攻の吉崎昂（博士課程前期 1 年）、中村智樹教授、武藤潤准教授らは、カリフォルニア工科大学（California Institute of Technology）の Chi Ma 博士と共同で、隕石試料中に存在する太陽系最古の物質から新種の鉱物を発見しました。この鉱物は、隕石の研究で著名なカリフォルニア大学ロサンゼルス校（University of California、Los Angeles）の Alan E. Rubin 博士にちなんで Rubinite（ルービナイト）と命名され、国際鉱物学連合(International Mineralogical Association）により新鉱物と認定されました（図 1）。本成果により、太陽系誕生直後の固体物質の物質進化過程に新たな制約がもたらされることが期待されます。
今回発見された新鉱物は、2017 年 4 月に出版されるイギリスの学術雑誌 Mineralogical Magazine の New Minerals リストに掲載されました。

詳細な説明

太陽系は約 46 億年前に誕生し、それから数千万年の間に宇宙の塵が集積して小さな天体を形成し、それらが衝突合体を繰り返して原始惑星ができ、現在の姿へと進化したと考えられています（図 2）。太陽系誕生直後に原始太陽近傍の高温の星雲ガスから凝縮した 1 mm～1cm 程度の固体物質は、揮発性の乏しい Ca や Al、Ti 等の元素に富むため難揮発性包有物と呼ばれ、太陽系の

進化過程で溶融・分化を経験しなかった小惑星から飛来したコンドライト(注 1)という隕石に含まれています。難揮発性包有物は、太陽系最古の固体物質として太陽系誕生直後の情報を記録するとされ、太陽系の形成進化過程を理解するうえで重要な研究対象とされてきました。

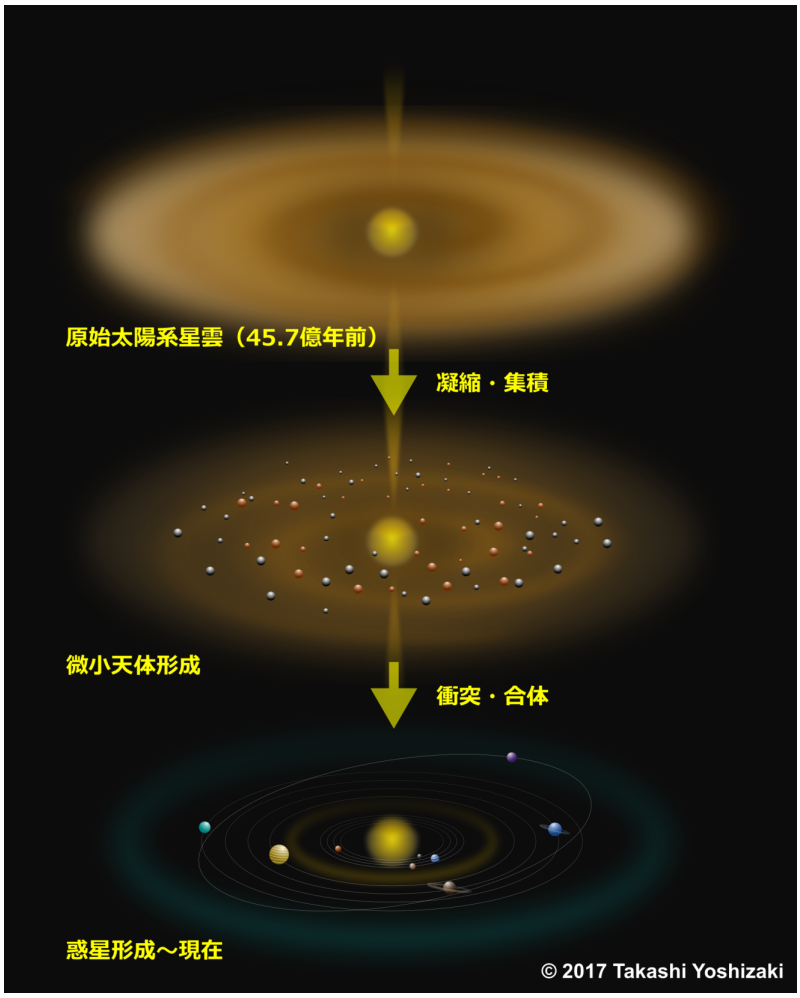


図 2 太陽系の進化過程の模式図。

近年の分析技術の進歩により試料中の微小領域（10μm 以下）の分析が可能になった結果、難揮発性包有物の微細組織分析により初期太陽系に関する新たな物質科学的情報が得られるようになりました。東北大学大学院理学研究科の吉崎昂大学院生らの研究グループは、始原的なコンドライト隕石の一種である Allende 隕石の走査型電子顕微鏡観察を行い、Ca、Ti、Si、O 等の元素から成る微小な鉱物を発見しました（図 2）。化学組成や結晶構造の詳細な分析の結果、この鉱物は $Ca_3Ti^{3+}_2Si_3O_{12}$ という化学式を持つザクロ石の新種であることが明らかとなりました。同じ化学式を持つ物質は既に人工的に合成されていましたが、天然鉱物として発見されたのは今回が初めてです。同様の鉱物は、カリフォルニア工科大（California Institute of Technology）の Chi Ma 博士によって別のコンドライト隕石（Vigarano 隕石）からも同時期に発見されました。

両者は 2016 年 12 月にこの鉱物を共同で国際鉱物学連合(International Mineralogical Association)の新鉱物命名分類委員会（Commission on New Minerals、 Nomenclature and Classification）に新

鉱物として申請を行い、2017 年 3 月に承認されました（注 2）。この新鉱物は、隕石の研究で著名なカリフォルニア大学ロサンゼルス校（University of California、Los Angeles）の Alan E. Rubin 博士（注 3）にちなんで Rubinite（ルービナイト）と命名され、2017 年 4 月に出版されるイギリスの学術雑誌 Mineralogical Magazine の New Minerals リストに掲載されます。

ルービナイトは、地球に比べ遥かに還元的な環境下でしか安定に存在しない Ti^{3+} を非常に多く含みます。これは、難揮発性包有物が凝縮した原始太陽系星雲内の環境が、非常に還元的であったことを強く示唆します。

難揮発性包有物に含まれる鉱物種の殆どは、現在広く受け入れられている原始太陽系星雲内の温度や圧力、化学組成等といった物理化学的条件下で安定に存在することが、熱力学的平衡モデル計算により示されています。しかし、今回発見された新鉱物であるルービナイトをはじめとするザクロ石はこのような条件下では安定に存在しないとされています。一方で、ルービナイトの産状や、Sc や Zr、Y 等といった難揮発性元素の含有量は、Allende 隕石中と Vigarano 隕石中で大きく異なっていました。このことは、ルービナイトが原始太陽系星雲中で形成した際の温度や圧力、ガスの化学組成等の物理化学的条件が多様であったことを示唆します。今後、ルービナイトの詳細な鉱物学的、岩石学的、同位体宇宙化学的分析等を行い、熱力学的計算結果等も組み合わせてこの鉱物がどのような条件下で形成したのかについて考察することで、原始太陽系星雲中の物理化学条件に新たな制約が与えられていくことが期待されます。

用語解説

注 1：コンドライト隕石

主にケイ酸塩鉱物からなる石質隕石のうち、コンドリュールという球粒を含む隕石。分化や溶融を経験していない小惑星から飛来したとされ、太陽系の起源や初期進化過程に関する情報を記録していると考えられている。特に 1969 年にメキシコに落下し 2t を超える大量の試料が回収された Allende 隕石は、揮発性元素に富み、また難揮発性包有物を多量に含む、それまで希少であった炭素質コンドライトという隕石の一種であったため、その分析結果は惑星科学の発展に大きく寄与してきた。

注 2：新鉱物承認過程

天然の試料中から新種の鉱物を発見した場合、その化学組成や結晶特性、産状等をまとめて国際鉱物学連合の命名・分類委員会に申請する。この委員会の厳しい審査を通過することで、新鉱物として承認される。

注 3：Alan. E. Rubin 博士

カリフォルニア大学ロサンゼルス校に所属する研究者。専門は宇宙化学。コンドライト隕石の鉱物学、岩石学、同位体宇宙化学等に基づき、初期太陽系における塵の物質進化過程や、小惑星における衝撃加熱過程、水質変成過程の解明に多大な貢献をしている。

月の地下に大量の氷が埋蔵されている可能性

月隕石から氷の痕跡である「モガナイト」を発見、月で利用可能な水資源に期待！

2018 年 4 月 27 日　地学専攻　助教　鹿山　雅裕

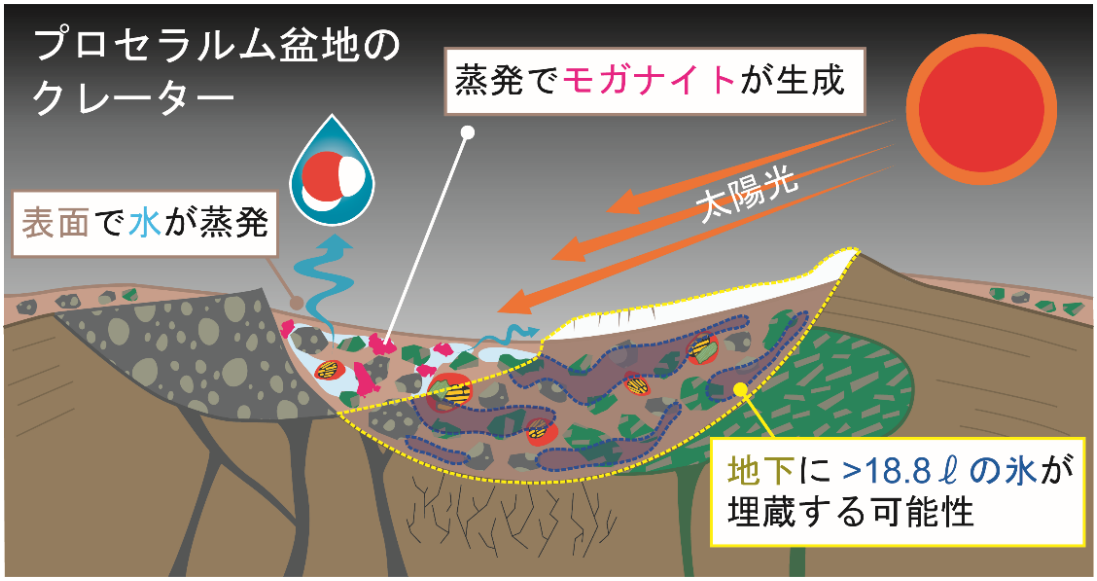


図 1 ：月の水は、太陽光で熱せられた表面では蒸発してモガナイトを作り、地下には氷として残る（illustrated by M. Sasaoka (SASAMI-GEO-SCIENCE)）

発表のポイント

- 月隕石から水が蒸発することで生成される「モガナイト」と呼ばれる鉱物を初めて発見
- モガナイトの生成には水が不可欠であるため、地球にしか存在しないと考えられていた
- 太陽光が当たる表面では月の水はすぐに蒸発、低温である月の地下には氷として現存
- 氷の埋蔵量は岩石 1 m^3 あたり 18.8 リットル、月で人類が利用できる水資源として期待

概要

東北大学学際科学フロンティア研究所・理学研究科の鹿山雅裕助教と共同研究チーム（JAMSTEC、神戸大、京都大、広島大、JASRI など）は、月隕石から「モガナイト」と呼ばれる、生成に水が不可欠な鉱物を発見し、これが月の地下に眠る氷の痕跡であることを突き止めました。
水が関与してできるモガナイトは、地球には広く産するものの、地球以外の天体では存在しないというのが定説でした。しかし、本研究で 13 種類の月隕石を対象に分析を行ったところ、NWA 2727 と呼ばれる月隕石からモガナイトを発見しました。

本研究の成果から、モガナイトの成因となる月の水は、水を豊富に含む天体が月のプロセラルム盆地（ウサギにみえる影模様）に衝突することで供給されたことが分かりました（図 1 ）。
また、月の水は太陽光で熱せられた表面では蒸発してモガナイトを作りますが、低温である地下数 m では氷として残ると考えられ、その氷の埋蔵量は岩石 1 m^3 あたり少なくとも 18.8 リットルにも達することから、月の地下に大量の氷が眠っている可能性が示されました。これは人類が月に居住する上で欠かすことのできない貴重な水資源（飲料水や水素燃料）であり、現在検討中の月探査計画でその詳細を明らかにすることが望まれます。

本研究の成果は、日本時間の平成 30 年 5 月 3 日（木）午前 4 時に米国科学誌「Science Advances」にオンライン公開されました。

詳細な説明

アポロ計画以来、月は水に乏しい天体であると考えられていました。しかし、昨今の月周回衛星※1（例えば、エルクロスなど）による成果から、月極域（北極と南極）付近に大量の水が観測されました。水の量は最大で 5.6–22 wt%と予想されており、最近では水がどこに集まっているのか、その起源は何かなどを突き止めるために、日本を含む各国で月への無人着陸探査計画※2が検討されています。月の水はこのような科学目的だけに留まらず、将来の有人探査や人類が月で居住する上で欠かせない貴重な資源（飲料水や酸素、食料プラント、火星などへの惑星間航行に必要な水素燃料など）であり、資源利用の観点からも大変重要なテーマです。

一方で月周回衛星による観測では、月の表面から深さ 1m 程度までの情報しか得ることができず、月の地下 1 m 以深に水があるかどうかについてはほとんど手がかりが得られていませんでした。シミュレーションの研究から、月の水は温度の低い地下数 m の領域に溜まりやすい性質を持つと予想されていますが、どれほどの量の水が、どの地域に埋蔵しているのか、そもそも実在しているのかなど、その実像は謎に包まれていました。

そこで私たちは、巨大天体の衝突で宇宙空間に放出された後に地球にやってきた月の岩石である月隕石に注目し、13 種類の月隕石に対してラマン分光計、大型放射光施設 SPring-8※3 の BL10XU の放射光 X 線回折装置及び電子顕微鏡を使った微小部分析※4 を行いました。その結果、NWA 2727 と呼ばれる月隕石（図 2）から「モガナイト」と呼ばれる水が関与してできる鉱物を発見しました（図 3）。これは地球外物質では初めての報告例です。

モガナイトは石英と同じ二酸化ケイ素（SiO_2）を主成分とする鉱物で（一方で結晶構造は異なる）、過去の合成実験により高い圧力条件（>100 MPa）でアルカリ性のケイ酸水溶液（H_4SiO_4）から沈殿してできることが判明しています。その沈殿反応（SiO_2 (*s*) + $2H_2O$ ↔ H_4SiO4 (*aq*)）には水が不可欠であることから、水に豊かな地球では堆積岩に広く分布していることが地質調査により明らかとなっています。しかし地球以外の天体に関しては、水に乏しいことからモガナイトは決して存在しないと考えられていました。今回の研究で月隕石からモガナイトが発見されたことにより、月でも同様の水の活動（水と岩石との反応や水からの沈殿）が生じていたことが明らかとなりました。

本研究で得られた成果を地球のモガナイトに関するデータと比較したところ、月のモガナイトは pH 9.5–10.5 かつ 90–126℃のケイ酸水溶液から数カ月間から数年間かけて沈殿したことが分かりました。つまり、その沈殿過程には月の外からもたらされたアルカリ性の水が不可欠であり、さらにその水が月の比較的温度が高い場所で蒸発する必要があります。このような事実をもとに、ここでは月への水の供給プロセスとモガナイトの沈殿に関する以下のようなモデルを提案しました（図 4）。

(0) プロセラルム盆地で月隕石の母体となる岩体がマグマから固化（約 30 億年前）
(ⅰ) アルカリ性の水に富む炭素質コンドライト※5 がプロセラルム盆地に衝突（27 億年前以降）
(ⅱ) 衝突で形成したクレーターの内部に月の地殻や炭素質コンドライトの破片が集積、その表面から底部では水が捕縛

（iii）捕縛された水は太陽光で熱せられた表面（最大 117–126°C）では蒸発してモガナイトを沈殿、地下数 m 以深やクレーターの影などの低温環境では氷として残存（1 億 3000 万年前？）
（iv）巨大天体の衝突でクレーターを構成する岩石の一部が宇宙へ放出（100–3000 万年前まで）
（v）宇宙を漂った後に地球の北西アフリカにある砂漠に月隕石として落下（1 万 7000 年前）

ケイ酸水溶液からモガナイトを沈殿させるためには水が不可欠であることから、その水の量を化学平衡計算により算出しました。ケイ酸水溶液が pH 9.5–10.5 かつ 90–126 ° C の条件でモガナイトの沈殿に必要な水の量は少なくとも 0.6 wt%にも達し、岩石 1 m^3 あたりに換算すると 18.8 リットル以上となります。

月の表面では太陽光の熱による水の蒸発でモガナイトが作られますが、温度が非常に低い地下やクレーターの影では氷となります。シミュレーションの結果から、月の氷は、太陽光が当たらない地下では数十億年以上も残り続けることが判明しているため、モガナイトが沈殿した当時だけでなく、現在もなおプロセラルム盆地の地下に大量の氷が眠っていることになります。これほど大量の水氷が月で報告された例は、月の極域以外では初となります。

今後の展望

月の水や氷は、科学目的だけに留まらず、人類が月面で活動するために欠かせない貴重な水資源でもあります。そのため、水資源の獲得と現地での資源利用を目的とした月の無人・有人探査が各国で計画されており、その機運が近年急速に高まっています。日本も将来的にこのミッションに参画することを現在検討しています。しかし、月の水や氷に関する科学データはまだまだ少なく、特に今回のような月の岩石を対象とした水の探索に関する報告例は未だ乏しいのが現状です。

従って、今後の展望として、未調査の月隕石やアポロ・ルナ計画で回収された月の試料に対して微小部分析を行い、そこから水や氷の痕跡を探る研究を予定しています。これにより、月の水や氷に関するさらなる事実の解明が期待され、現在検討されている月の探査計画の推進に繋がる科学データを取得することが可能となります。

※1 月周回衛星

月の観測を目的に打ち上げた無人探査機。各種カメラや分析装置が搭載されており、月を周回しながらデータを取得することで全球的に月の地質や重力、水に関する情報を得ることができる。日本の月周回衛星としては探査計画のため 2007 年に打ち上げられた「かぐや」がある。2009 年に打ち上げられたエルクロス（LCROSS）では、月の南極に位置するカベウス・クレーターに部品の一部を衝突させて、舞い上がった月の土壌を分光カメラで分析したところ、最大で 5.6 wt%にも及ぶ氷が存在することを明らかにした。

※2 日本を含む各国で検討中の月への無人着陸探査計画

これまでの月周回衛星による観測から、月極域（北極と南極）に大量の水が濃集している可能性が示されている。そのため、日本を含む様々な国で月の水を対象に科学目的と資源利用の観点から、月探査機の打ち上げと無人ローバーや着陸機による無人着陸探査計画が検討されている。

※3 大型放射光施設 SPring-8

SPring-8 の施設名は Super Photon ring-8 GeV（ギガ電子ボルト）に由来する。兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高性能の放射光を生み出す理化学研究所の施設であり、その運転と利用者支援などは高輝度光科学研究センター（JASRI）が行っている。

※4 微小部分析
マイクロメートルからナノメートルのスケールで物質の化学組成や結晶構造を決定することのできる手法。本研究では、レーザー光の散乱を利用したラマン分光計、放射光施設である SPring-8 で発生させた電磁波を用いた放射光 X 線回折装置、フィラメントから放出した電子をレンズで絞ったビームによる電子顕微鏡を使った。

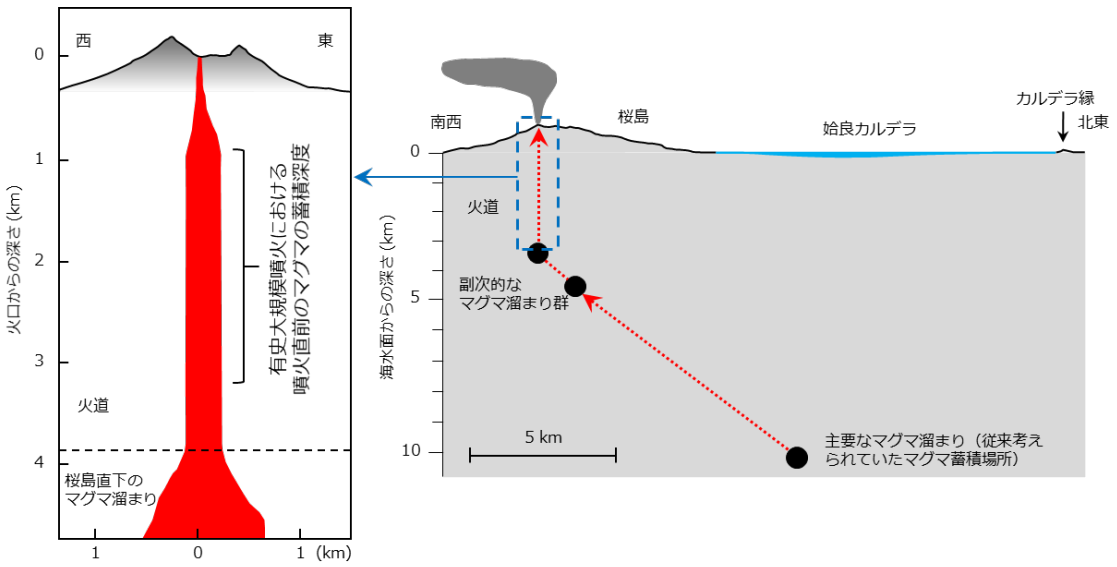
※5 炭素質コンドライト
太陽系創生時や太陽系形成前の情報を保持している隕石グループの総称であり、水や炭素、有機物などの揮発性成分を豊富に含んでいる。なお、探査機はやぶさ 2 が着陸を予定している小惑星リュウグウも、炭素質コンドライトと類似した物質とされている。

論文情報
Masahiro Kayama, Naotaka Tomioka, Eiji Ohtani, Yusuke Seto, Hiroshi Nagaoka, Jens Götze, Akira Miyake, Shin Ozawa, Toshimori Sekine, Masaaki Miyahara, Kazushige Tomeoka, Megumi Matsumoto, Naoki Shoda, Naohisa Hirao, Takamichi Kobayashi, Discovery of moganite in a lunar meteorite as a trace of H2O ice in the Moon's regolith. Science Advances, (2018)

桜島火山の大規模噴火に共通の前駆過程を発見

～マグマはごく浅部から噴出～

2019 年 2 月 14 日　地学専攻　教授　中村　美千彦



参考図：桜島山頂の火口から桜島直下のマグマ溜まりにかけての拡大図（左図）と桜島火山のマグマ供給系（右図）。左図のうち、赤い領域がマグマで満たされている領域であり、火道とマグマ溜まりの境界は火口から深さ 4 km 程度と推定されている。本研究での詳細な噴出物の分析により、大規模噴火を引き起こしたマグマが火道に相当する深さ（1～3 km）に位置しており、姶良カルデラ直下の主要マグマ溜まり（深さ約 10 km）や桜島直下の副次的なマグマ溜まり群（深さ 4～5 km）よりも浅かったことが明らかとなった。

発表のポイント

- 桜島火山において、有史に繰り返し発生した大規模噴火（1471 年、1779 年、1914 年）の直前にマグマが充填されていた深さを解明した。
- 軽石・火山灰として爆発的に噴出したマグマは、噴火の直前には、従来想定されていた深部（約 10 km）のマグマ溜りから、それより大幅に浅い火道（桜島直下の深さ 1～3 km）に移動していたことが判明した。
- 将来発生し得る大規模噴火が同じ前駆過程を経る場合、上昇開始からごく短時間で噴火が開始する可能性がある。

概要

東北大学大学院理学研究科地学専攻の博士課程学生新谷直己さん、中村美千彦教授、奥村聡准教授らの研究チームは、東京大学地震研究所・京都大学防災研究所・産業技術総合研究所地質調査総合センターなどとの共同研究で、鹿児島県の桜島火山において有史に発生した三度の大規模噴火（1471 年、1779 年、1914 年）において、爆発的噴火を引き起こしたマグマが、噴火の直前には、火山体直下の極めて浅い領域（深さ 1～3 km）に蓄積されていたことを突き止めました。従来の想定では、鹿児島湾北部の姶良カルデラの下、深さ約 10 km 付近に存在するマグマ溜まりからマグマが上昇してくると考えられていたため、この想定よりも大幅に浅い領域からマグマが上昇してきたことになります。本研究の結果は、有史の 3 回の大規模噴火と同程度の噴火が、将来もう一度、同様の前駆過程を経て起こると仮定した場合、噴火に先立って浅部へのマグマの

大規模な供給が起こることが予想されるとともに、浅部の火道に充填されたマグマが上昇を開始すると、ごく短時間のうちに地表に到達して噴火が開始する可能性があることを示しています。本研究の成果は、2019 年 2 月 13 日 10 時（英国時間）の Scientific Reports 誌に掲載されました。

詳細な説明

鹿児島県の桜島火山（図 1）は世界屈指の活動的火山であり、近年は主としてブルカノ式噴火（注 1）を繰り返しています。しかし、地殻変動の観測から、地下の深部マグマ溜まりには、直近の大規模噴火である 1914 年の大正噴火の際に放出されたマグマと同程度のマグマがすでに蓄積されていることが示されており、近い将来に、大規模なプリニー式噴火（注 2）が起きる可能性があると考えられています。大正噴火では、軽石や火山灰、火山ガスなどによって桜島島内を中心に鹿児島県内の広範囲で甚大な被害が発生し、引き続いて起こった溶岩の流出によって桜島と大隅半島が地続きになりました。今後こうした火山噴火による災害に備えるために、このような規模の噴火の発生メカニズムを解明することが急務となっています。

本研究では、1914 年に発生した大正噴火に加えて、同じ規模で類似した噴火推移を辿った 1779 年の安永噴火と 1471 年の文明噴火の 3 回の大規模噴火の噴出物に含まれていた斑晶メルト包有物（注 3）（図 2）と斜長石斑晶（注 4）の化学組成を詳細に分析することで、軽石として噴出したマグマが噴火の直前に蓄積していた深さを調べました（注 5）（図 3）。その結果、これらの噴火を引き起こしたマグマは、噴火の直前にはいずれも火山体直下の極めて浅い領域（深さ約 1〜3 km）に蓄積していたことを突き止めました。桜島で大規模噴火が起こる場合、鹿児島湾北部の姶良カルデラ下の深さ約 10 km にあるマグマ溜まりからマグマが上昇してくると想定されていましたが、爆発的に噴火したマグマを直接供給したのは、この想定よりも大幅に浅い領域であったことが本研究によって初めて解明されました。

補足：災害軽減に関する本研究の可能性と限界

歴史時代に 3 回繰り返されてきた大規模噴火のいずれにも共通した前駆過程が発見されたことから、今後、桜島で近い将来に起きる可能性がある同程度の大規模噴火も同じ様な噴火推移を辿る可能性があると言えます。そのため、噴火に先立つ火山体直下のごく浅い領域（深さ数 km）へのマグマの供給に引き続き注目して観測することが、効果的な災害軽減に繋がると考えられます。

一方、マグマが上昇を開始する深さが従来の想定よりも浅い（1/3 から 1/10 程度の深さ）ことは、仮にマグマの上昇開始が即座に捉えられたとしても、噴火の開始までの時間が短いことを意味します。他の火山で調べられているプリニー式噴火の際のマグマ上昇速度を考慮すると、マグマの上昇開始から最短で 1 時間程度で噴火が開始する可能性も考えられます。防災体制の検討においては、この点を考慮することが望まれます。

これまで歴史時代に 3 回繰り返されたものと同様の噴火が、将来も必ず発生するというわけではありません。これまでの研究により、マグマの化学組成は、歴史時代を通じて僅かながら粘り気の少ないものに変化してきていることが知られているので、次に大規模噴火が起こる場合、大正噴火と同様の爆発的噴火よりも爆発性の低い噴火（たとえば 1946 年の昭和噴火のような、溶岩流の流出を主体とする噴火）となる可能性もあります。

桜島火山において、大規模噴火前に、マグマが通常のマグマ溜まりよりも浅部に充填された理由や、その必然性は未だ理解できていません。他の火山噴火でも同様の前駆過程があったかどうかを調べるとともに、そのメカニズムを解明することによって、将来の桜島火山や他の火山における噴火災害軽減に貢献できる可能性があると考えられます。

助成

本研究は JSPS 科研費 JP16H06348、文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」および「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」の助成・支援を受けたものです。筆頭著者は東北大学博士課程リーディングプログラム「グローバル安全学トップリーダー育成プログラム」に在籍しています。

論文情報

Scientific Reports
Shallow magma pre-charge during repeated Plinian eruptions at Sakurajima volcano
Naoki Araya, Michihiko Nakamura, Atsushi Yasuda, Satoshi Okumura, Tomoki Sato, Masato Iguchi, Daisuke Miki, Nobuo Geshi
DOI 番号：10.1038/s41598-019-38494-x
URL：www.nature.com/articles/s41598-019-38494-x

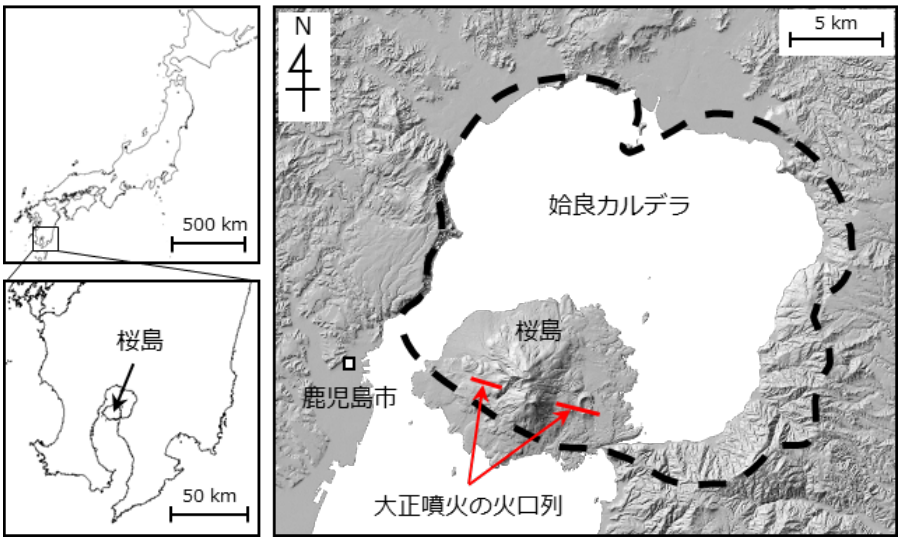


図 1. 桜島と姶良カルデラの位置関係。1914 年の大正噴火の火口から鹿児島市の市街地までは、最短で 7 km 程度である。

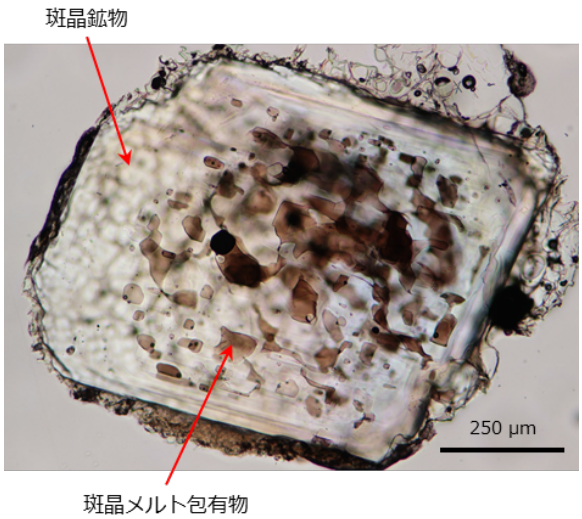


図 2. 斑晶鉱物（無色透明な部分）とその内部に含まれている斑晶メルト包有物（茶色い部分）。

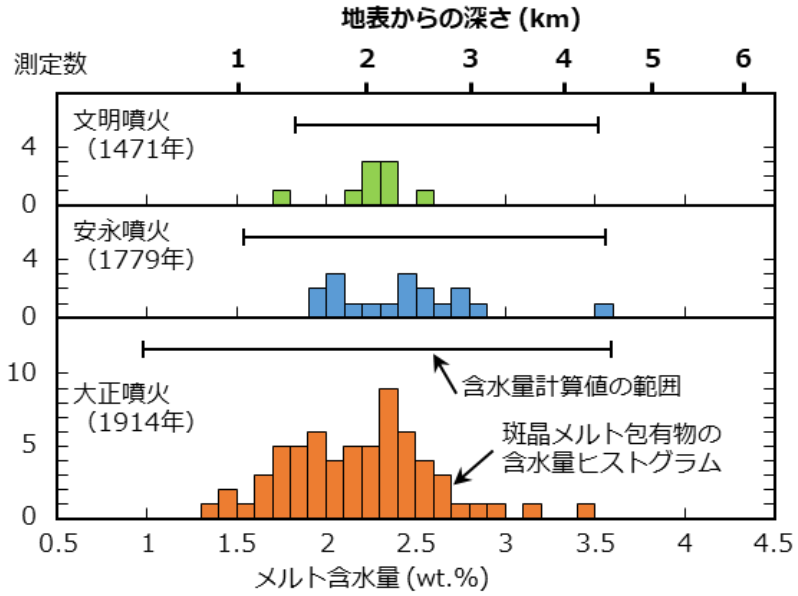


図 3. 噴出物の分析から明らかにしたメルト包有物含水量の頻度分布と斜長石の化学組成から計算したメルト含水量の範囲。上側の横軸には含水量から換算した深さを示している。

用語解説

（注 1）　ブルカノ式噴火

単発的に発生する爆発的な噴火。一度の噴火の継続時間は数分であり、後述するプリニー式噴火に比べて一回の噴火で放出されるマグマは少ない。

（注 2）　プリニー式噴火

大規模で爆発的な噴火。噴火が継続的に発生し、柱のように立ち上る噴煙が形成される。一度の噴火の継続時間は数時間から数十時間で、大量の軽石や火山灰・火山ガスを放出する。桜島で有史に発生した大規模噴火では各噴火で約 10^8 m^3 のマグマが放出された。

（注 3）　斑晶メルト包有物

斑晶（マグマに含まれる比較的大きな結晶で今回の研究で扱った噴出物では数百 μm～数 mm）には、それが結晶成長した際に周囲のマグマの液体部分（メルト）が取り込まれる場合があり、それらは噴火の際に冷却されることで火山ガラスとなる。結晶がカプセルの役割を果たし、マグマからガスとして逃げやすい水などの成分（揮発性成分）が保存されやすい。

（注 4）　斜長石

マグマに含まれる主要な構成鉱物の一つ。斜長石斑晶の外縁部と共存しているメルトの化学平衡関係から含水量を見積もることができる。

（注 5）　マグマ蓄積深度の見積もり

上部地殻（深さ約 10 km 以浅）では、マグマは水で飽和していると考えられ、その飽和溶解度は圧力が低くなる（マグマの蓄積深度が浅くなる）と低下する。この性質を利用して、メルトの含水量からマグマの地下での蓄積深度が推定できる。

鳥類の進化に関わった DNA 配列群を同定

―鳥エンハンサーの発見―

2017 年 2 月 3 日　生物学科、生命科学研究科　教授　田村　宏治

図１　鳥類に特有の形態。鳥類最大の特徴といえる飛翔能力に関与するもののひとつが、翼に存在する風切羽である。

発表のポイント

- 鳥だけに共通する DNA 配列を多数発見した。その多くは「タンパク質を作る配列（遺伝子）」ではなく、それらの使い方を決める「制御配列」であることを突き止めた。
- 新たに見つかった制御配列のはたらきにより、鳥の飛翔能力に重要な風切羽の形成場所において鳥のみで使われている遺伝子があることを発見した。
- 鳥の祖先から鳥への進化にあたって新しい遺伝子の獲得はほとんどなく、既存の遺伝子の使い方を変えたことが重要であった。

研究概要

鳥が恐竜の一部から進化したことは確実視されていますが、羽毛やクチバシなどの鳥らしい特徴をもつようになった仕組みはほとんどわかっていませんでした。東北大学大学院生命科学研究科の田村宏治教授のグループは、東京大学の入江直樹准教授、情報・システム研究機構 国立遺伝学研究所の関亮平研究員・城石俊彦教授、ならびに中国 BGI・コペンハーゲン大学らの国際共同チームにおいて、48 種の鳥の全ゲノム DNA を他の動物のゲノムと比較することにより、鳥らしさをもたらしている DNA 配列を探しました。解析の結果、鳥へと進化する過程において、新しいタンパク質を作る配列（または遺伝子）の獲得はほとんどなく、鳥への進化には、むしろ遺伝子の使い方を変えたことが決定的な役割を果たしたことが明らかになりました。遺伝子の使い方を決める DNA 配列のことを一般的に「制御配列」と呼び、遺伝子のスイッチをオンにしたりオフにしたりします。研究チームが見つけたのは、スイッチをオンにする鳥特有の制御配列、すなわち鳥エンハンサー（*）と言えます。例えば、今回見つけた鳥エンハンサーの１つは、ある遺伝子（*Sim1* 遺伝子）を、風切羽の作られる翼（前肢）ではたらくようにしていることが明らかになりました。さらなる解析の結果、*Sim1* 遺伝子が翼の風切羽だけでなく尾羽が形成される領域

でもはたらいていることもわかりました。*Sim1* 鳥エンハンサーはまだ恐竜がいた頃の時代に獲得されていた可能性が高く、風切羽と尾羽が同時に恐竜で進化していたというこれまでの知見と合わせて考えると、このような鳥エンハンサーを使って恐竜も風切羽や尾羽を進化させていた可能性があります。

このように、鳥の進化過程において新しい遺伝子の獲得はほとんどなく、既にもっていた遺伝子の使い方を変えることで、鳥らしい特徴を進化させてきたことがわかりました。鳥の進化に決定的に重要だったのは、新しい遺伝子ではなく、既にもっていた遺伝子の新しい使い方だったのです。

本研究成果は、Springer Nature (UK)発行の online 科学誌『ネイチャー・コミュニケーションズ』(Nature Communications) において 2 月 6 日午後 7 時（日本時間）に発表されました。

（*）エンハンサー：遺伝子の使い方を決めるゲノム DNA のひとつ。この配列があることで、遺伝子がいつどこでどれくらいのタンパク質を作り出すかが決められる。

背景

恐竜の生き残りである鳥類は、体を覆う羽毛や飛ぶために必要な風切羽をはじめクチバシや折りたためる翼状の前肢など、独特な特徴をたくさんもっています（図１）。鳥類しかもたないこのような特徴を生み出す仕組みは、生命の設計図とされるゲノム DNA のどこかに刻まれているはずですが、十分な数の鳥のゲノムが不明であったことなどから、それらを見つけ出すのはとても困難でした。爬虫類の一群から鳥類が進化する過程で、どのようなゲノム DNA の変化があったのかは大きな謎として残っていたのです。

研究成果

今回、東北大学、東京大学、情報・システム研究機構 国立遺伝学研究所ならびに中国 BGI、コペンハーゲン大学らの国際プロジェクトチームは、ニワトリやツバメ、ペンギンなどを含む 48 種もの現存鳥類の全ゲノム配列をマウスなど他の 9 種の動物のゲノムと比較することによって、鳥が進化する過程で起こった DNA の変化とその性質を突き止めました（図２）。鳥だけがもつゲノム DNA 配列を多数同定し、その性質を調べたところ 99%以上がタンパク質を作り出さない配列であり（つまり遺伝子ではなく）、その多くが遺伝子の機能を制御する特徴を備えたエンハンサーなどの DNA 配列（制御配列）であることがわかりました（図２）。これは、鳥類の進化には、鳥が進化する前からもっていた遺伝子群の使い方（いつどこでどれくらいタンパク質を作り出すか）を変えることが重要だったことを意味しています（図３）。実際、同定された鳥特有の制御配列の１つが、飛翔に必須である「風切羽」が作られる翼の領域において、ある遺伝子（*Sim1* 遺伝子）を活性化させる機能をもつ（エンハンサー配列である）ことを示しました（図４）。さらなる解析により、この *Sim1* 遺伝子の鳥エンハンサーはまだ恐竜が生きていた時代に獲得された可能性が高いこと（図５）、そして *Sim1* 遺伝子が翼の風切羽だけでなく尾羽が形成される領域でもはたらいていることもわかりました。その時代の恐竜が翼の風切羽と尻尾の尾羽を同時に進化させていたという化石からの知見（図５）と合わせて考えると、一部の恐竜も、現

存する鳥類に受け継がれた「鳥エンハンサー」を使って風切羽と尾羽を進化させていたのかもしれません。

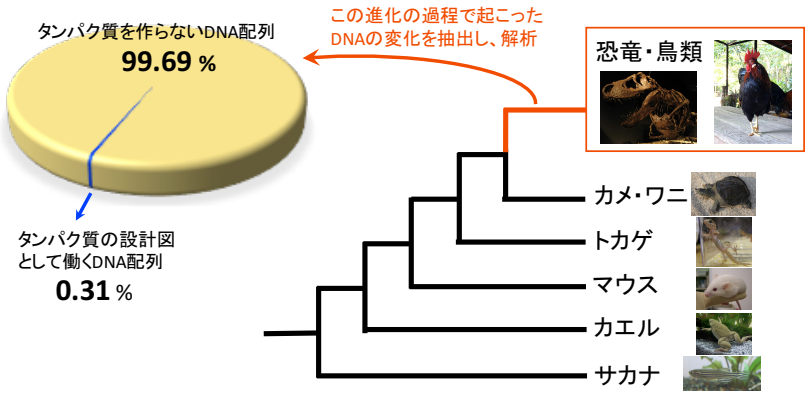


図２　鳥類が進化する際に、新たな遺伝子の獲得はほとんどなかった。鳥類 48 種のゲノムと鳥類以外の動物 9 種のゲノムを比較することで、鳥だけがもっている DNA 配列を特定したところ、そのほぼ全て（99.69%）がタンパク質を作らないものであった。

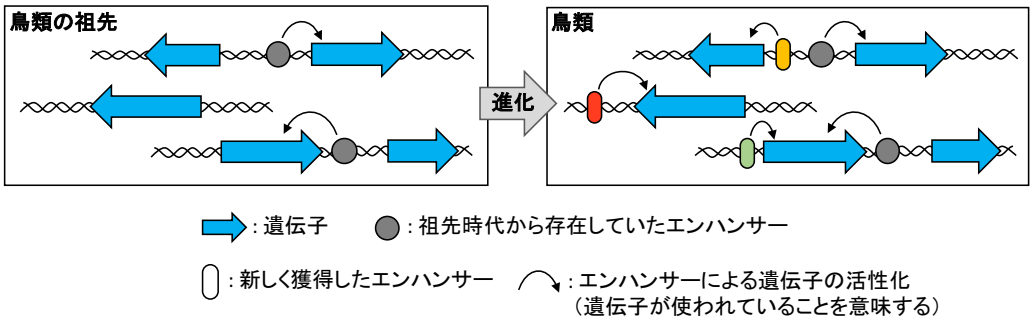


図３　鳥類は、進化の過程で新しい制御配列を獲得し、遺伝子の使い方を変えた。鳥類が進化する過程では、新しい遺伝子の獲得はほとんどなかった。鳥類が得たのは、遺伝子の使い方を制御するエンハンサーなどの DNA 配列であった。

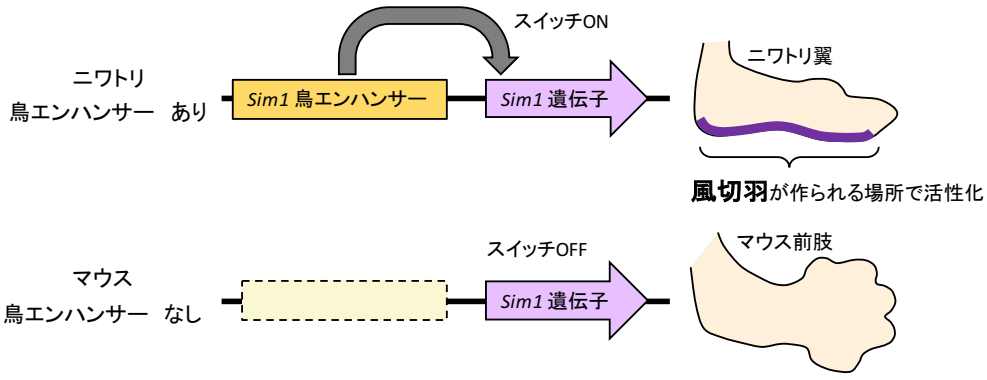


図４　Sim1 鳥エンハンサーは、遺伝子を風切羽領域で活性化する。Sim1 遺伝子そのものは鳥類以外の動物種にも存在し、脳などではたらいている。しかし鳥類では、鳥エンハンサーの存在により、翼（前肢）の風切羽の形成場所でも活性化している（上段）。その一方で、その他の動物（例えばマウス）の前肢では Sim1 は活性化していない（下段）。また、マウスに Sim1 鳥エンハンサーを人工的に導入すると、前肢の一部で遺伝子のスイッチがオンになることもわかった。

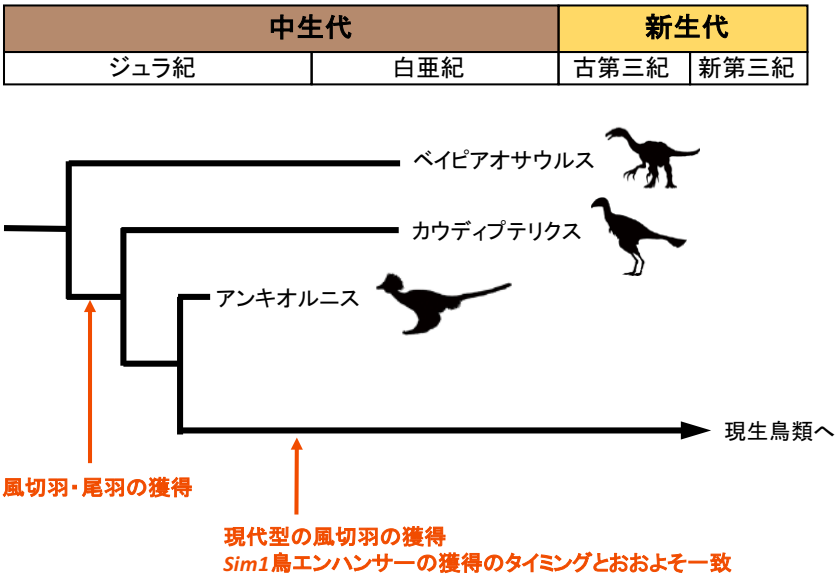


図５　Sim1 鳥エンハンサーは恐竜時代に獲得された。Sim1 鳥エンハンサーが獲得された年代を推定すると、現代型の飛行能力に長けた風切羽が進化した年代とおおよそ一致していた。

今後の展開

今後さらに解析を進めていくことで、鳥において実際に使い方が変わっている遺伝子を *Sim1* 以外にも多数特定できるでしょう。このことは、“鳥らしい特徴”が作られたメカニズムを解明する重要な糸口となります。また今回の研究では、鳥類とそれ以外の動物を比較しましたが、ひと口に鳥類といっても様々なサイズ・色・形の鳥がいます。今回のゲノム比較を応用することで、鳥の多様性を生み出した進化のシナリオにも迫ることができるはずです。

また、明らかにできるのは鳥類に留まりません。現存する恐竜がいない以上、その直接の子孫である鳥類から得られる情報は、化石と並んで最良のもののひとつです。今回の発見を皮切りに、恐竜の進化だけでなくその形態が作られる過程の理解に向けて、「鳥を使った恐竜研究」がより盛んになっていくことが期待されます。

掲載論文

Seki, R.[#], Li, C.[#], Fang, Q., Hayashi, S., Egawa, S., Hu, J., Xu, L., Pan, H., Kondo, M., Sato, T., Matsubara, H., Kamiyama, N., Kitajima, K., Saito, D., Liu, Y., Gilbert, M.T.P., Zhou, Q., Xu, X., Shiroishi, T., Irie, N.[*], Tamura, K.[*], and Zhang, G.[*] （#印は co-first authors、＊印は co-corresponding authors）

Functional roles of Aves class-specific cis-regulatory elements on macroevolution of bird-specific features

Nature Communications, DOI: 10.1038/ncomms14229

研究支援

本研究は、科研費（基盤研究 B、特別研究員奨励費）、最先端・次世代研究開発支援プログラム（ライフ・イノベーション）、ナショナルバイオリソースプロジェクト（ニワトリ・ウズラ）などの支援を受けて実施されました。

海にすむ生物の複雑な関係性を捉える

緩い種間関係と種の多様性が生態系を安定化

2018 年 4 月 5 日　生物学科、生命科学研究科　教授　近藤　倫生

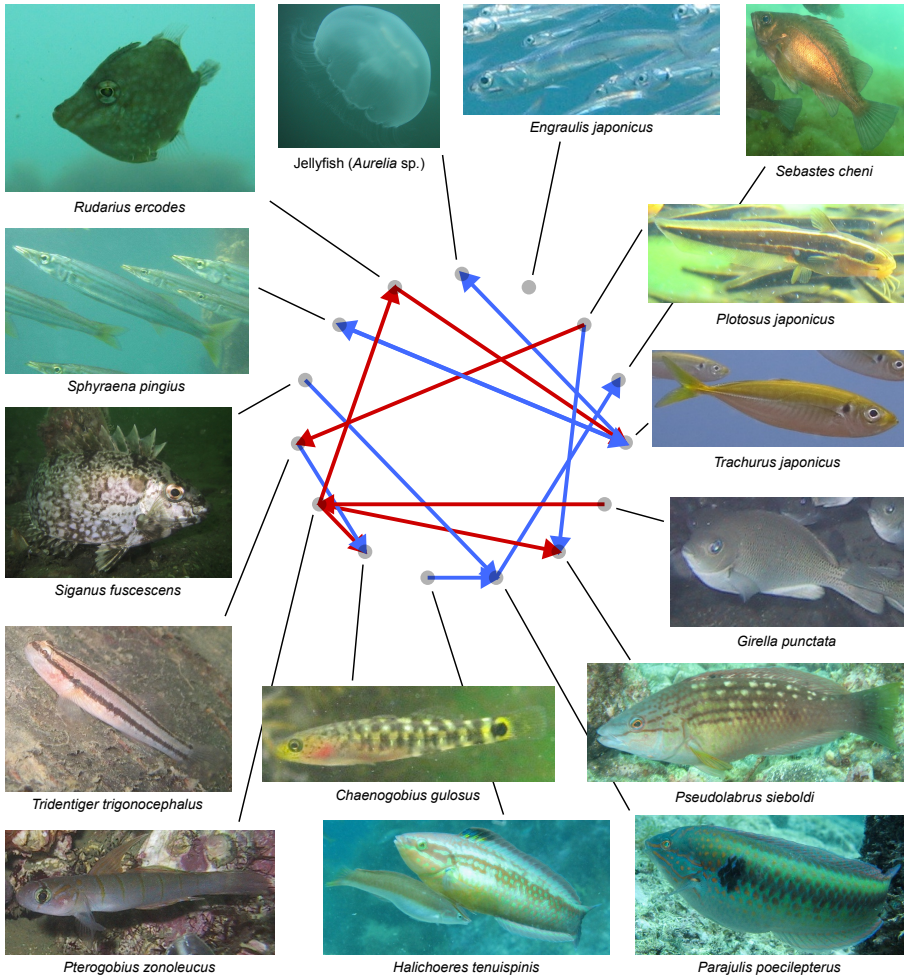


図 1. 本研究の対象となった舞鶴湾の 15 種の生物と、個体数変動データから明らかになった生物種間の 14 の関係性（種間相互作用）。矢印は影響を与える種から、影響を受ける種に向かって引かれている。色は影響の符号（正負）で、青色（正）は平均的には相手を増やす作用、赤色（負）は平均的には相手を減らす作用を表している。Nature より。

概要

理学部生物学科／生命科学研究科生態発生適応科学専攻の近藤倫生教授、京都大学／科学技術振興機構の潮雅之研究員、京都大学の益田玲爾准教授らの国際研究グループ（日本・台湾・アメリカ）は舞鶴湾での過去 12 年間におよぶ魚類とクラゲを含む 15 種の生物の個体数変動データを解析することで、種間の関係性が時間によって変動する様子を詳細に捉えることに成功しました。また、これに基づいて、種間の関係性と種多様性が生態系安定化の鍵であることを突き止めました。

野外の生態系における生物種間には、ある生物種の個体数が増減すると他の生物の個体数もその影響を受けて増減する、種間相互作用と呼ばれる力が働いていると考えられています。また、多様な生物種が相互作用する生物群集（注 1）にはその動態を安定化させる仕組み（注 2）が備わってお

り、環境が多少変化しても想定外の大変動や破綻が生じにくくなっているのではないかと考えられてきました。しかし、野外において種間相互作用（＝種間に働く力）を観察したり、個体数変動の安定性を測ったりすることはいずれも困難なため、多種の間に働く非常に多くの種間相互作用を詳細に描き出し、それが生物群集の安定性におよぼす影響を野外で検証した研究は過去に例がありませんでした。
本研究では、京都府の舞鶴湾で 12 年間に渡って続けられた潜水調査データ（注3）を、新しく開発した数理的手法（注4）で分析しました。その結果、① 湾内に生息する主要な 15 種の生物（14 種の魚とクラゲ）の間に働く相互作用を捉えることに成功しました。さらに、② 舞鶴湾の魚類群集は夏季に安定になり、冬季に不安定になるという季節変動を示すこと、③ 舞鶴湾の魚類群集は、魚種の種類が多くなり、種間相互作用が弱められることで安定になることを突き止めました。本研究で開発した数理手法の利用により、他の生態系でも生物種間に働く相互作用を検出することが可能です。また、過去の観測データが種間相互作用や群集安定性を検出する鍵となったことから、生態系の維持や反応を理解する上で、長期生態系観測が非常に有効であることが示されました。

研究内容

1. 背景

生態系には様々な種類の生物が共に生活していますが、いかなる生物の個体数（人口）も時と共に変動します（個体数変動）。自然界における個体数は変動してもだいたい一定の範囲に収まる安定性を有していて、個体数がゼロとなってしまうような「絶滅」現象や、特定の生物種の個体数のみが急激に増加する「大発生」現象は、頻繁には生じません。また、生物の個体数は無秩序に増減することは滅多になく、いつ頃増えて、いつ頃減少するといった「変動の規則性」が見られるのが普通です。このような個体変動に見られる「安定性」がもたらされる仕組みの解明は、生態学における重要な課題です。
生物の個体数は他種からの影響（種間相互作用）を受けて変動することが知られています。種間相互作用は、捕食-被食関係、助け合う関係、競争関係などの様々な生物間の関わりに由来すると考えられます。個体数変動の仕組みやその安定性を理解する上で、種間相互作用を把握することは必須です。しかし、種間相互作用は、ちょうど地球が私たちを引っ張る重力が目には見えないのと同様に、直接に観察することはできません。したがって、その強さや種類を知るには、大規模な野外実験などを行って推定するしかありませんでした。さらに、種間相互作用自体も変動するので、自然の中に共存する多様な生物の間に働く種間相互作用を正しく検出することは、非常に困難であると考えられています。
生態系に共存する生物種が多様だと、生物の個体数変動が安定化するという仮説があります。安定化のメカニズムには、種間相互作用が何らかの役割を果たしていると考えられていますが、役割の中身はよく分かっていませんでした。その理由として、第 1 に、自然生態系には多くの種類の生物種が存在し、それらの間の種間相互作用を正しく同時に評価することが困難であること、第 2 に、野外における個体数変動の安定性を評価することが困難であること、第 3 に、種多様性・種間相互作用・個体数変動の安定性の間の因果関係を明らかにすることが困難だったことがあります。

2. 研究の位置付け

本研究では、舞鶴湾の 14 種の魚と 1 種のクラゲに注目しました。マアジ、シロメバル、アミメハギ、カタクチイワシ、ゴンズイ、メジナ、ホシササノハベラ、キュウセン、ドロメ、ホンベラ、

チャガラ、アカオビシマハゼ、アイゴ、アカカマス、ミズクラゲです。これら 15 種の生物を 2 週間に一度の頻度で観測した過去 12 年分の個体数変動データを、新しく開発した数理的手法で解析することで、直接に目で見て観察することはできない生物種間相互作用の検出に成功しました。データ解析をさらに進めることで、生物群集の安定性が大きく変動していることや、群集安定性が高くなるとき、種の豊富さと種間相互作用の緩やかさが重要な役割を果たしていることが分かりました。以下に詳細を説明します。

15 種の生物の間から、様々な強さや符号（正負）の計 14 の種間相互作用が検出されました。従来は、種間相互作用の強さや符号（正負）は時間とともに大きく変動しないと仮定されていましたが、本研究から見えてきたのは全く異なる様相でした。多くの種間相互作用は、その強さが時間とともに大きく変動し、ときにはその符号（正負）までもが時間によって逆転するケースも見られました。

また、得られた種間相互作用を基に「局所リアプノフ安定性」と呼ばれる生物群集の安定性評価のための指標を計算することができます。局所リアプノフ安定性とは、生態系の状態（種組成）が本来の変化から少し外れてしまったときに、元の軌道に戻れるかどうかを表す指標です。舞鶴湾の生物群集を解析した結果、種間相互作用の季節変化が、群集の安定性に影響をおよぼしていることが分かりました。夏になると舞鶴湾に生息する生物の種数が増えます。すると、種間相互作用の力が複数の生物種に分散されて弱まる希釈作用が働いて、個々の種間相互作用は冬に比べて緩やかになります。その結果、群集の安定性は夏に高く、冬になると低くなるという季節周期を示すのです。これまで生態学の仮説によって予想されていたように、複雑な動物群集において、種多様性が高まった結果として、群集の安定性が高まる証拠を示すことに初めて成功しました。また、これまで種の多様性が群集安定性を高める際に種間相互作用が果たす役割はほとんど分かっていませんでしたが、本研究によって、種間相互作用が緩やかになることが安定化を高める役割を果たしていることが発見されました。

3. 本研究の意義と今後の展開

本研究には大きく分けて 3 つの意義と今後に向けての展開が考えられます。

1 つ目は、野外における生物種間の複雑な相互作用（種間相互作用）をその時間変化も含めて「ありのまま」捉えることに成功したことです。野外における種間相互作用の検出には、これまでは大掛かりな操作実験を行うなど、多大な労力を必要としてきました。したがって、多くの生物種の間の相互作用を同時に評価することは難しく、また、相互作用の時間変化を調べることは実質的に不可能でした。しかし本研究では、個体数変動のデータのみから多種間の相互作用を検出する数理的手法の利用により、複数の生物種間の相互作用を検出するだけではなく、その時間変動を示すことにも成功しました。種間相互作用は生物の個体数変動を理解する重要な要素です。本手法を他の様々な生態系に対しても広く用い、その結果を比較することで、野外における種間相互作用やその変動に関するより一般的なルールを見つけることができるかもしれません。

2 つ目は、生物群集の安定性を評価し、さらに安定性の季節変動を明らかにしたことです。これまで、種多様性や種間相互作用によって群集の安定性が影響を受けることは推測されていましたが、実際に野外の生態系で種多様性や種間相互作用の変動が、生物群集の安定性におよぼす影響を検証した研究はほとんどありませんでした。生物群集の安定性が変動するということは、言い換えれば、生態系には外からの撹乱の影響を受けやすいタイミングと受けにくいタイミングがあるということです。同じ撹乱でも、安定性の高い時期であれば生物群集に大きな影響を与えませんが、安定性の低い時期では大きな影響を与えてしまうのです。このタイミングを正しく捉えることができれば、より効果的に生態系を保全したり生物資源を利用したりすることが可能になり

ます。また、種多様性が生態系を安定化しているという発見から、生態系を安定に保つためには種多様性を保全しなくてはいけないという示唆が得られます。
3 つ目は、今回の研究は生態系や生物群集の長期にわたる観測が、生態系の変化や駆動原理を明らかにする上で、非常に有用な情報をもたらすことを示しています。今回利用した数理的手法は、時間変動データから多くの情報を取り出すことが可能です。実際、この研究では 2 週間に一度・12 年間の長期・精細な個体数変動データを利用することで、種間相互作用や生物群集安定性、さらには生態系に安定性をもたらす要因の特定することができました。現在、これまでにない速度で生物が絶滅し、生態系の機能不全が進行しています。舞鶴湾で行われてきたような生態系観測をもっと広域・多地点で実施することで、生態系の振る舞いの理解が進み、生態系保全を効果的に進めることが可能になると考えています。

[発表雑誌]
Fluctuating interaction network and time-varying stability of a natural fish community
野外の魚類群集における種間相互作用ネットワークの変動と安定性の時間変動
Nature（ネイチャー）
潮 雅之（京都大学/科学技術振興機構）・Chih-hao Hsieh（国立台湾大学, 台湾）・益田 玲爾（京都大学）・ Ethan R. Deyle（スクリプス海洋研究所、米国）・Hao Ye（スクリプス海洋研究所、米国）・Chun-Wei Chang（中央研究院, 台湾）・George Sugihara（スクリプス海洋研究所、米国）・近藤 倫生（龍谷大学）
※所属は論文掲載時のもの。

参考図

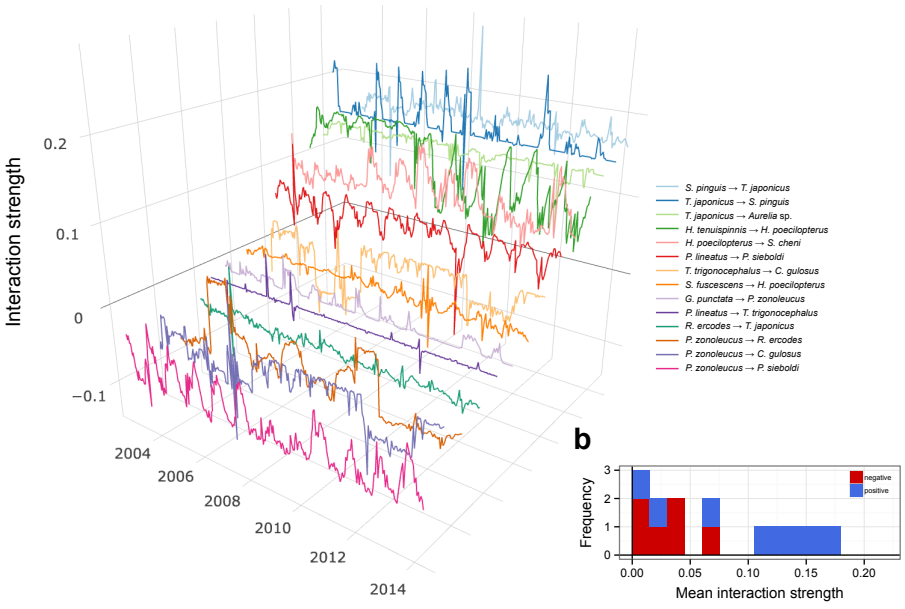


図2. 変動する種間相互作用。(a) 個体数変動データから明らかになった生物種間の14の関係性の時間変動。横軸は時間を表し、縦軸は効果の強さ（interaction strength）を表す。正の値は相手を増やす効果、負の値は相手を減らす効果を表す。(b) 異なる強度（mean interaction strength）の種間相互作用の頻度分布。Natureより。

用語説明

注１） 生物群集

生態系には様々な種類の生物が一緒に暮らして（共存して）います。特定の生息地で共存している生物種の集まりのことを生物群集と呼びます。例えば、本研究で注目している舞鶴湾に共存する14種の魚とクラゲは、同じ生物群集に属していると言えます。一般に、同じ生物群集に属する生物種は、捕食-被食関係、互いに助け合う関係、競争関係などの様々な関係性によって、互いの人口動態（個体数変動）に影響をおよぼしあっていると考えられています。捕食-被食関係で言えば、天敵となる生物種の個体数が増えると、被食生物種（餌種）の個体数は減りやすくなります。また、互いに敵対し競争関係にある2種がいれば、片方の生物種の個体数増加はもう一方の生物種の個体数減少につながります。

注２） 安定化の仕組み

生物群集ではある生物が増減すると、その影響を受けて他の生物種も増減することになります。したがって、生物群集は多くの生物種が互いの個体数に影響し、また影響される複雑系だと捉えることができます。多種が相互作用する複雑系は維持が難しいことが理論的に示されていますが、現実には、生態系は複雑であるにもかかわらず長い間維持されています。このことから、生態系には、その状態が大きく変化しないように調節する何らかの仕組み（安定化の仕組み）が備わっているのではないかと考えられてきました。

注３） 潜水調査データ（個体数変動データ）

本研究の舞台となった舞鶴湾は、京都府北部に位置する湾口700m、面積23平方キロ、最大水深20mの小さな湾です。舞鶴湾では、本研究にも参加した益田准教授により、2002年より2週間に一度の潜水調査（1回の潜水調査は約1時間）が欠かさず行われています。岸から10mほど離れた場所（水深1-10m）に幅2m・長さ600mの調査ラインが設けられており、益田准教授は潜水したままこの調査ラインに沿って位置を変え、そこに生息するすべての魚種とその数を記録し続けてきました。本研究はこの長期潜水調査で観察された生物のうち15種の生物に着目し、その時間変動データを解析しました。

注４） 新しく開発した数理的手法

潜水調査データは、個々の生物種の個体数の時間変動（人口動態）を表しています。今回新しく開発した非線形力学理論に基づく数理手法を利用することで、個体数変動の背後に隠された情報を取り出せます。具体的には、（１）生物種間の関係性とその時間変動、（２）生物群集の安定性、そして（３）要素（種数や関係性、生物群集の安定性）間の因果関係を調べることができます。

東北大学理学部の研究力

編集・発行　東北大学　理学部・理学研究科
〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3
Tel 022-795-6708
E-mail sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp
2019 年 7 月発行
冊子内の職階・所属表記は研究成果発信時のものになります。