
東北大学 理学部の 研究力

2018.07 作成

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



数学専攻

微分方程式の解～金融から画像処理まで～ 1

ディリクレ形式とマルコフ過程～日本人が考案した一つの構成法～ 4

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 7

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

天文学専攻

130 億光年彼方での一般相対性理論の検証

～アインシュタインは間違っていなかった？～15

世界初！アルマ望遠鏡で暗黒矮小銀河の光をとらえる22

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

ー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ー25

2011 年東北地方太平洋沖地震の発生メカニズムを解明

ー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ー ..30

化学専攻

新たな触媒が拓く新たな有機合成～"最強"の不斉有機塩基触媒による反応開発～37

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41

地学専攻

隕石衝突で DNA 構成分子が生成～生命誕生前の核酸塩基の新たな生成過程～46

恐竜やアンモナイト等の絶滅は

「小惑星衝突により発生したすすによる気候変動」が原因だった50

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53

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58

平成 29 年 4 月 7 日

微分方程式の解 ～金融から画像処理まで～

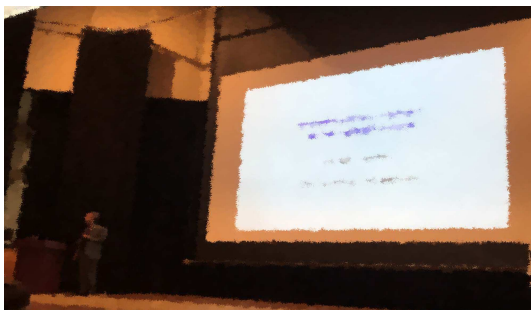
【はじめに】

数学専攻小池茂昭教授が、「完全非線形楕円型・放物型偏微分方程式の L^p 粘性解理論」の業績により、第 15 回日本数学会 解析学賞を受賞しました。本賞は、解析学及び解析学に関連する分野において著しい業績をあげた方に授与されるものです。この業績について小池教授に解説いただきました。

【概要】

微分方程式とは、関数の微分が入った方程式のことです。二次方程式の解が数であったのに対し、微分方程式の解は関数です。微分方程式は、物理現象を中心に様々な現象を表します。様々な現象には、原子・分子のような、それ自体に意志のない「物」の現象と、人間に代表される意思を持った「者」が引き起こす現象があり、対応する微分方程式は一見似ていますが、本質的に異なります。分かり易い例で言うと、お風呂の温度分布が満たす微分方程式と、金融商品の適切な価格を決定するために解く微分方程式は、似ていますが、人の意思が入るおかげでタイプが異なります。

他にも、画像処理に現れる微分方程式も似ています。ある国で、デモをしていた一般人を警官が暴行した事件がありました。警官は、暴行はなく、もともと傷があったと主張しましたが、ヘリコプターで離れた場所から撮られた映像を画像処理によって鮮明化し、判決が下されたそうです。その際、その映像が正しいことを保証するために数学者が法廷で証言したそうです。



画像処理の例（解析学賞受賞特別講演 3月25日）

今は、パソコンを用いて一瞬で金融商品の売買ができるため、少しでも金融商品価格に「穴」があれば、そこをついて巨額の資産を得られます（個人レベルでは難しいですが）。このように、金融商品の価格決定は現実には重要な問題ですが、対応する方程式は株価変動が、あるモデル方程式を満たすという大前提の下で成立します。ですから、モデルが正しくないと、その金融商品の価値が適切かどうかわからないのです。しかし、モデルが正しいと仮定して、数学者が「この価格が適切である」と証明すると、その金融商品の売れ行きが上がることもあったそうです。

【研究内容】

微分方程式はたいいていの場合、解けません。つまり、具体的な関数で微分方程式の解を表せるのはごく稀です。微分方程式の研究では、適切な意味で解があることを示すのが精一杯です。多くの場合、解の存在を示すことすら困難です。そこで、解の候補を探すことになり、これを弱解と呼びます。一方、扱う現象により解の意味合いが変わります。私の研究は比較的最近研究が始まった、意思を持った「者」の現象を扱います。そのような微分方程式は非発散型と呼ばれるタイプで、よく知られた超関数解^(注1)が使えません。そこで、非発散型の場合を扱うため、粘性解^(注2)という弱解の概念が80年代初頭に導入されました。私の研究は、そのような粘性解の基本的性質に関するものです。今回の解析学賞は、「ABP 最大値原理」や、その応用に関するものです。

高校で習う最大値原理は、「最大値をとる点では、その関数の二階微分は非正である」というものです。逆に、「二階微分が非負な関数の値は、境界（考えている領域の端の点）で最も大きくなる」とも言えます。これの「非負」の部分で正か負かわからない一般の関数にしたらどうなるか？という問いに答えるのが最大値原理となります。さらに、最大値という、点での情報を積分量で与えるというのが ABP 最大値原理の特徴で、積分量と相性の良い超関数解の理論との接点になります。今後は、様々な応用が期待できる、両者の融合的研究を試みようと考えています。

【発表雑誌】

解析学賞は、一連の研究に与えられるので、最も大事と思われる論文を挙げておきます。

S. Koike and A. Swiech, Maximum principle for fully nonlinear equations via the iterated comparison function method, *Mathematische Annalen*, 339 巻 2 号(2007 年), 461-484.

S. Koike and A. Swiech, Weak Harnack inequality for fully nonlinear uniformly elliptic PDE with unbounded ingredients, *Journal of Mathematical*

Society of Japan, 61 巻 3 号 (2009 年), 723-755. (Outstanding Paper Prize 受賞)

【用語説明】

(注 1) 超関数解 :

部分積分を通して得られる、偏微分方程式の弱解の一種。発散型方程式に対して扱い易い。

(注 2) 粘性解 :

最大値原理を通して得られる、偏微分方程式の弱解の一種。非発散型（退化）楕円型方程式に適切である。

平成 30 年 5 月 14 日

ディリクレ形式とマルコフ過程 ～日本人が考案した一つの構成法～

【はじめに】

数学専攻竹田雅好教授が、「対称マルコフ過程の確率解析とその応用」の業績により、第 16 回（2017 年度）日本数学会 解析学賞を受賞しました。本賞は、解析学及び解析学に関連する分野において著しい業績をあげた方に授与されるものです。この業績について竹田教授に解説いただきました。

【概要】

ランダムな時間発展のモデルのなかで、マルコフ過程と呼ばれるマルコフ性を持つ確率過程のクラスがあります。マルコフ性とは「現在の情報が分かっているならば、未来の確率情報は過去の情報に依らない。」とか「現在の情報が分かっているならば、過去と未来は独立である。」と表現される性質のことです。そのうちでさらに時間反転で法則が変わらない対称マルコフ過程の性質を調べるのが私の研究テーマです。

【研究内容】

マルコフ過程の研究においては、与えられた適切なデータをもとにマルコフ過程を構成し、その性質を調べるのが最も基本的な問題です。平面や空間の領域においては、強力な構成法として伊藤清による確率微分方程式の理論があります。確率微分方程式は必ずしもマルコフ性をもたない確率過程の構成も可能であり、既に深い理論と広汎な応用が展開されています。一方、1970 年代頃から、様々な物理モデルの研究を通じて、関数の空間やフラクタル集合^(注1)など、局所構造が古典的なものと本質的に異なる特異な空間上にマルコフ過程を構成し、その確率解析を行うことが注目されるようになりました。この場合には、係数にある程度の滑らかさを必要とする確率微分方程式の理論は適用不可能となります。そのため、福島正俊により構築されたディリクレ形式^(注2)によるポテンシャル論的構成方法の有用性が認識されるようになりました。この二つは適用範囲が異なり、それぞれ相補う理論と言えます。ディリクレ形式は、マルコフ性をもつ正値二次形式として定義され、「その定義域に十分豊富な連続関数を含む。」という容易な条件を確認することで、対称マルコフ過程が構成されます。状態空間として特段の構造を必要としない柔軟さが大きな利点であり、ここ 40 年間に理論と応用の両面で大きな進展を遂げました。

ディリクレ形式による構成方法は福島正俊によると述べましたが、彼は私の先生です。

私の大学院生時代には、上で述べた構成方法を内容に含む先生の著書「Dirichlet forms and Markov processes」(1980)は既に出版されていました。本が出版されるとそのテーマについては一段落するものですが、上で述べた進展は出版後で、テーマに応じて新たな課題も出てきました。ディリクレ形式論について福島先生から勉強するように言われたことはありませんでした。当時助教授であった方に「福島先生の本を読みませんか。」と誘って頂き読み始めました。(伊藤清先生は福島先生の先生ですが、伊藤先生も弟子に伊藤解析を勉強するように勧められなかったと聞いています。) それ以後は、マルコフ過程から定義される様々な確率的性質とディリクレ形式から定義される解析的性質の対応関係を用いて、対称マルコフ過程の研究を一貫して行なってきました。

一次元拡散過程は対称マルコフ過程の重要な典型例であり、フェラーの境界分類^(注8)をとおして詳しく道の性質を調べることができます。最近の私の研究は、一次元拡散過程に近い性質を持つ対称マルコフ過程のクラスを定義し、一次元拡散過程の次に詳しく研究すべき対象と考えて、そのスペクトル的な性質を調べています。フェラーは名著「確率論とその応用」で名高い確率論学者です。1985年に開催された関西確率論セミナーにおける講演のなかで伊藤先生は、フェラーから聞いたヒルベルトの言葉「非常に簡単な問題について、人よりずっと詳しく研究しなさい。そうすると、一般の場合が本当に分かる。」を紹介されています。その言葉をかみしめて研究を続けたいと思っています。

【発表雑誌】

著書「Dirichlet forms and symmetric Markov processes」(福島正俊, 大島洋一との共著) Walter de Gruyter (2011)の5章, 6章のいくつかの節の中で、特に、6.4節:Donsker-Varadhan type large deviation principle で、最近の研究について書きました。

【用語説明】

(注1) フラクタル集合

普通の図形は複雑にみえても拡大していくと滑らかになっていきますが、いくら拡大しても複雑さが変わらない図形があります。このような特徴をもつ図形を、マンデルブロがフラクタルと名づけました。

(注2) ディリクレ形式

従来ポテンシャル論は、ニュートン核やリース核など核に応じて考察されましたが、核によらないポテンシャル論構築のためブーリンとドゥニが導入しまし

た。

（注3）フェラーの境界分類

フェラーは、一次元区間上の拡散過程が境界点の近傍でどのような挙動をするか調べるために、正則、流入、流出、自然の4つに境界点を分類しました。

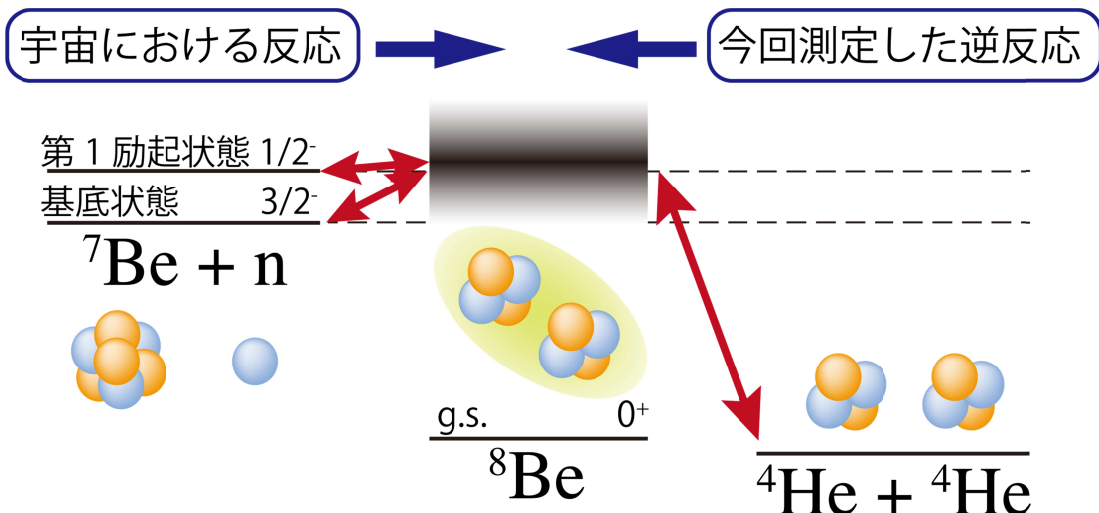
平成 29 年 2 月 2 日

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—

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 ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 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、 ${}^7\text{Li}$ 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* に掲載されます。

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

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。

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、 ${}^7\text{Li}$ 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。

${}^7\text{Li}$ は ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ 反応によって生成された ${}^7\text{Be}$ 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、 ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ 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、 ${}^7\text{Be}$ 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。

${}^7\text{Be}$ は電子捕獲崩壊して ${}^7\text{Li}$ 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。 ${}^7\text{Be}$ 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 ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^7\text{Li} + p$ 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 ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 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 ${}^7\text{Be}$ が電子捕獲崩壊する前に ${}^4\text{He}$ に変化してしまい、結果として ${}^7\text{Li}$ 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。

${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 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、 ${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 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 ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 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

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 ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応の鏡映反応は ${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 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。

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 ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 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

${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応は、 ${}^7\text{Be}$ 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 ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + n$ 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 ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 反応の断面積を決定することに成功しました。

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 ${}^4\text{He}^{2+}$ 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、 ${}^7\text{Be}$ 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 ${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 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 ${}^7\text{Be}$ に衝突して 2 つの ${}^4\text{He}$ 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

${}^7\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ 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 ${}^7\text{Be}$ が分解し、 ${}^7\text{Li}$ 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

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。

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、 $^4\text{He}^{2+}$ 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>

タイトル： Time-reversal measurement of the p -wave cross sections of the $^7\text{Be}(n, \alpha)^4\text{He}$ reaction for the cosmological Li problem

著者： 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

掲載誌： *Physical Review Letters*

平成 29 年 11 月 9 日

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～

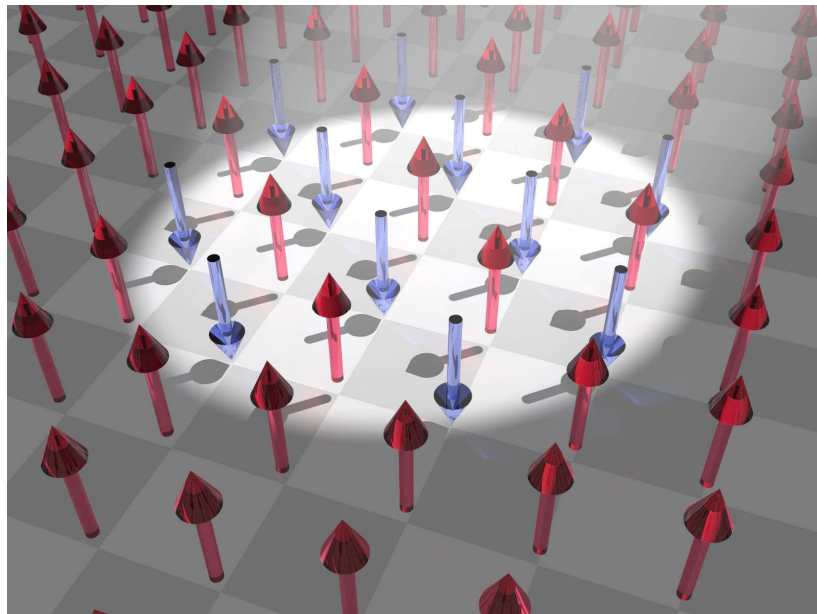
【発表のポイント】

- 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、スピンの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、電子スピンの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の向きが揃うのは、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、スピンの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、この現象がおおよそ 100-1000 フェムト秒（おおよそ 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】

雑誌名： Physics Review Letters (Editors' Suggestion)

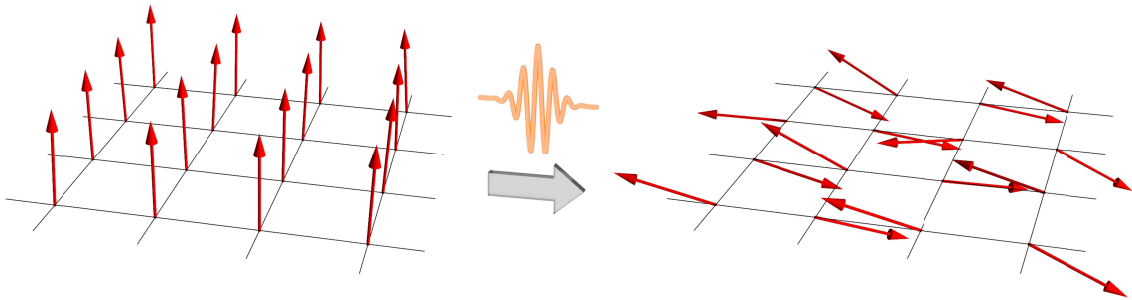
（フィジカル・レビュー・レターズ （エディター推薦））

論文タイトル： 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）

著者：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によって、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

2017 年 11 月 30 日まで公開予定

【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の向き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、電子の電氣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。

平成 29 年 11 月 9 日

130 億光年彼方での一般相対性理論の検証 ～アインシュタインは間違っていなかった？～

1. 発表のポイント:

- 宇宙の加速膨張の謎に迫るため、すばる望遠鏡を用いて遠方宇宙（130 億光年）にある約 3000 個の銀河の距離を測定し、立体地図を作成した。
- 銀河の運動を詳しく調べることで、宇宙の大規模構造が形成される速度を、このような遠方（過去）の宇宙において世界で初めて測定し、一般相対性理論が重力理論として正しいかを検証した。
- 得られた測定結果は、一般相対性理論の予言値と一致していた。宇宙の加速膨張は、アインシュタインが導入した「宇宙定数」によって説明できるとする説をさらに支持する結果となった。

2. 発表概要:

東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構(Kavli IPMU)の奥村哲平特任研究員と日影千秋特任助教、東京大学大学院理学系研究科天文学専攻の戸谷友則（とたに・ともり）教授を中心に、東北大学大学院理学研究科天文学専攻の秋山正幸（あきやま・まさゆき）准教授及び京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻の岩室史英（いわむろ・ふみひで）准教授、太田耕司（おおた・こうじ）教授らから成る国際研究グループは、すばる望遠鏡を用いた FastSound（ファストサウンド）という銀河サーベイにより、平均して 130 億光年もの遠距離にある約 3000 個もの銀河までの距離に基づく宇宙 3 次元地図を完成させました。

さらに地図中での銀河の運動を詳しく調べ、重力によって大規模構造が成長していく速度の測定に初めて成功しました。そして、そのような遠方宇宙でも構造形成速度がアインシュタインの一般相対性理論の予想と一致することを確認しました。今回の結果は、一般相対性理論は正しく、アインシュタインが導入した宇宙定数により宇宙の加速膨張が起きているという説をさらに支持するものです。

本研究成果は日本天文学会の発行する Publications of the Astronomical Society of Japan (欧文研究報告) のオンライン版に 2016 年 4 月 26 日付で掲載されました。

3. 発表内容:

宇宙はビッグバンで誕生して以来、膨張を続けています。単純な理論予想では、そ

の膨張は減速していくはずですが、近年の詳細な宇宙の観測から、逆に加速膨張していることがわかっています。その原因は謎に包まれており、ダークエネルギーと呼ばれる謎のエネルギーが宇宙を満たしているか、あるいは、宇宙論が基礎に仮定している一般相対性理論が破綻しているのか、という二つの可能性が考えられ、精力的に研究が続けられています。一般相対性理論は約 100 年前にアインシュタインによって確立した重力の理論です。太陽系以下のスケールでは高い精度で実験的に検証されていますが、100 億光年を超えるような宇宙論的なスケールでも成り立つかどうかはわかりません。

そこで、宇宙論的なスケールで重力が一般相対性理論に従っているかどうかの検証が必要となります。そのために最も有力な観測の一つは、銀河のサーベイ観測によって多数の銀河までの距離を測定し、宇宙における銀河の 3 次元分布、いわゆる宇宙大規模構造を調べることです。宇宙の大規模構造に沿って個々の銀河がどのくらいの速度で運動しているかを調べると、大規模構造の成長速度がわかります。この速度が、一般相対性理論の予想とあっているかどうかを調べることで、一般相対性理論の検証ができます。

しかし、これまでの大規模構造成長速度の測定は、赤方偏移（注 1）の値が 1、共動距離（注 2）にして 約 100 億光年までの比較的近傍の宇宙に限られてきました。東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構(Kavli IPMU)の奥村哲平特任研究員と日影千秋特任助教、東京大学大学院理学系研究科天文学専攻の戸谷友則教授を中心に、東北大学大学院理学研究科天文学専攻の秋山正幸准教授及び京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻の岩室史英准教授、太田耕司教授らからなる研究グループは、FastSound（ファストサウンド；FMOS Ankoku Sekai Tansa（暗黒世界探査）Subaru Observation Understanding Nature of Dark energy）という銀河サーベイを遂行し、赤方偏移の値が1を超える宇宙での重力理論の検証を行いました。FastSound は、ハワイ島マウナケア山のすばる望遠鏡に、京都大学とオックスフォード大学が主導し開発した FMOS（Fiber Multi-Object Spectrograph 注 3）という分光器を取り付けて、赤方偏移の値が 1.2 から 1.5 すなわち、共動距離で約 124 億光年から 147 億光年の宇宙における銀河までの距離を測定する銀河サーベイです。2012 年から 2014 年にかけて観測が行われ、昨年、約 3000 個もの銀河からなる宇宙の 3 次元大規模構造マップが完成しました（図 1）。奥村研究員らは、その中での個々の銀河の運動を調べ、大規模構造の成長速度の測定に成功しました。測定の統計的有意度は 99.997% で、100 億光年を超える遠方宇宙でこれだけの有意度で成長速度を測定できたのは世界で初めてのことです。その測定値を一般相対性理論の予想値と比較したところ、測定誤差の範囲で一致していることがわかりました（図 2）。

アインシュタインはかつて、自らが信じる「静止した宇宙」を可能とするため、一般相対性理論の基礎方程式である「アインシュタイン方程式」に「宇宙定数」と呼ばれるものを追加しました。のちにハッブルによって宇宙の膨張が発見され、宇宙定数の導入を「生涯最大の過ち」として撤回したことは有名です。しかし、現在の加速する膨張宇宙は、一般相対性理論にこの宇宙定数を加えることで説明できることが知られています。今回の観測結果は、この宇宙モデルにさらなる支持を与えるものです。

しかし、宇宙定数の物理的な起源は依然として謎に包まれています。また、今回の測定誤差の範囲内で、わずかに重力が一般相対性理論からずれている可能性もまだ否定できません。Kavli IPMU が主導して開発が進むすばる望遠鏡の新観測装置、PFS (Prime Focus Spectrograph 注 4) は FastSound よりもさらに大規模な銀河サーベイを可能にします。FastSound によって得られた今回の結果は PFS による観測へと発展し、宇宙論研究で世界的な結果を出していく重要なステップと位置付けることができます。

本研究の中心となった奥村哲平（おくむら・てっぺい）特任研究員は成果について「宇宙の三次元マップを作るための本格的な銀河サーベイを日本が主導して行ったのは初めてのことで、それによって一般相対性理論誕生から 100 年という節目に、史上最遠方の一般相対論の検証結果を発表できて、感慨無量です」と述べています。

本研究は、日本天文学会の発行する Publications of the Astronomical Society of Japan (欧文研究報告) のオンライン版に 2016 年 4 月 26 日付で掲載されました。

4. 発表雑誌:

雑誌名:「Publications of the Astronomical Society of Japan (欧文研究報告)」
Vol. 00 (2016) No. 0

論文タイトル: The Subaru FMOS galaxy redshift survey (FastSound). IV.

New constraint on gravity theory from redshift space distortions at $z \sim 1.4$

著者: Teppei Okumura (1), Chiaki Hikage (1), Tomonori Totani (2), Motonari Tonegawa (2), Hiroyuki Okada (2), Karl Glazebrook (3), Chris Blake (3), Pedro G. Ferreira (4), Surhud More (1), Atsushi Taruya (1,5), Shinji Tsujikawa (6), Masayuki Akiyama (7), Gavin Dalton (8,9), Tomotsugu Goto (10), Takashi Ishikawa (11), Fumihide Iwamuro (11), Takahiko Matsubara (12,13), Takahiro Nishimichi (1,14), Kouji Ohta (11), Ikkoh Shimizu (15), Ryuichi Takahashi (16), Naruhisa Takato (17), Naoyuki Tamura (1), Kiyoto Yabe (1), and Naoki Yoshida (1,14,18),

著者所属:

- 1 Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI),
The University of Tokyo Institutes for Advanced Study, The University
of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa 277-8583, Japan
- 2 Department of Astronomy, School of Science, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan
- 3 Centre for Astrophysics & Supercomputing, Swinburne University of
Technology, P.O. Box 218, Hawthorn, VIC 3122, Australia
- 4 Department of Physics, University of Oxford, Denys Wilkinson Building,
Keble Road, Oxford, OX13RH, United Kingdom
- 5 Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto
606-8502, Japan
- 6 Department of Physics, Faculty of Science, Tokyo University of Science,
1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8601, Japan
- 7 Astronomical Institute, Faculty of Science, Tohoku University, 6-3
Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan
- 8 Astrophysics, Department of Physics, Denys Wilkinson Building, Keble
Road, Oxford OX1 3RH, U.K.
- 9 RALSpace, STFC Rutherford Appleton Laboratory, HSIC, Oxford OX11
0QX, UK
- 10 Institute of Astronomy, National Tsing Hua University, No. 101,
Section 2, Kuang-Fu Road, Hsinchu, Taiwan 30013
- 11 Department of Astronomy, Kyoto University,
Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan
- 12 Department of Physics, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku,
Nagoya 464-8602, Japan
- 13 Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the
Universe (KMI), Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya
464-8602, Japan
- 14 CREST, JST, 4-1-8 Honcho, Kawaguchi, Saitama, 332-0012, Japan
- 15 Department of Earth & Space Science, Graduate School of Science,
Osaka University, 1-1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043,
Japan
- 16 Faculty of Science and Technology, Hirosaki University, 3 Bunkyo-cho,
Hirosaki, Aomori 036-8561, Japan
- 17 Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 650
North A'ohoku Pl., Hilo, HI 96720, USA
- 18 Department of Physics, School of Science, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

DOI:10.1093/pasj/psw029 (2016 年 4 月 26 日掲載:オンライン版)

論文のアブストラクト(Publications of the Astronomical Society of Japan のページ)

<http://pasj.oxfordjournals.org/content/early/2016/04/25/pasj.psw029.abstract?keytype=ref&ijkey=luqXXzHiOH0Frrh>

プレプリント (arXiv.org のページ)

<http://arxiv.org/abs/1511.08083>

5. 用語解説:

(注 1) 赤方偏移

天体が観測者から離れる運動をしている際、観測される光の波長が実際より引き伸ばされる現象。宇宙は膨張しており、遠方の天体ほど赤方偏移は大きくなるため、距離の指標として用いられる。

(注 2) 共動距離

宇宙論で用いられる距離の定義の一つ。観測する天体からの光が我々に届くまでの時間に、これまでの宇宙の膨張を考慮し算出される距離。本プレスリリースでは共動距離を用いている。

(注 3) FMOS (Fiber Multi-Object Spectrograph)

ハワイのマウナケア山に位置するすばる望遠鏡に搭載されたファイバー多天体分光器。400 本の光ファイバーを用い多数の天体を同時に近赤外線分光観測できる。

(注 4) PFS (Prime Focus Spectrograph)

ハワイのマウナケア山に位置するすばる望遠鏡に搭載予定の広視野分光器で 2019 年に観測開始予定。2400 本の光ファイバーを用い多数の天体を可視光から近赤外線の領域で同時に分光観測出来る。Kavli IPMU のほか、国立天文台や台湾中央研究院天文及天文物理研究所、カリフォルニア工科大学など各国研究機関が参加している。PFS は、広天域深宇宙銀河サーベイである「すばる望遠鏡 SuMIRe プロジェクト」の柱の一つとして分光観測を担う予定で、もう一方の柱であり、撮像観測を担う広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) は、2014 年 3 月に観測を開始している。

6. 参考画像:

画像は <http://web.ipmu.jp/press/201605-fast-sound> からダウンロード可能です。

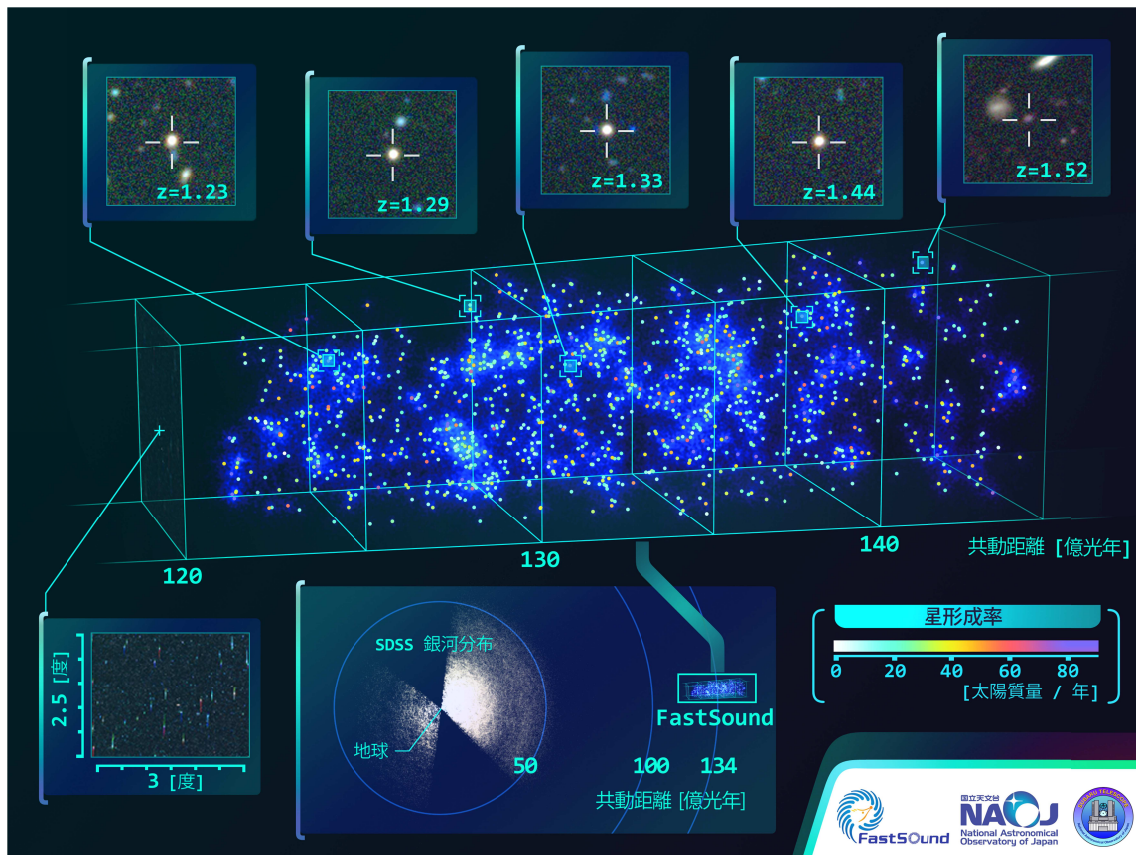


図 1. FastSound サーベイによって明らかになった 3 次元銀河地図 (2013 年 8 月 7 日の国立天文台ハワイ観測所のプレスリリース「史上最遠方の宇宙立体地図が完成、ダークエネルギーの謎に迫る研究が進行中」より)。(クレジット:国立天文台, 一部データ提供:CFHT, SDSS)

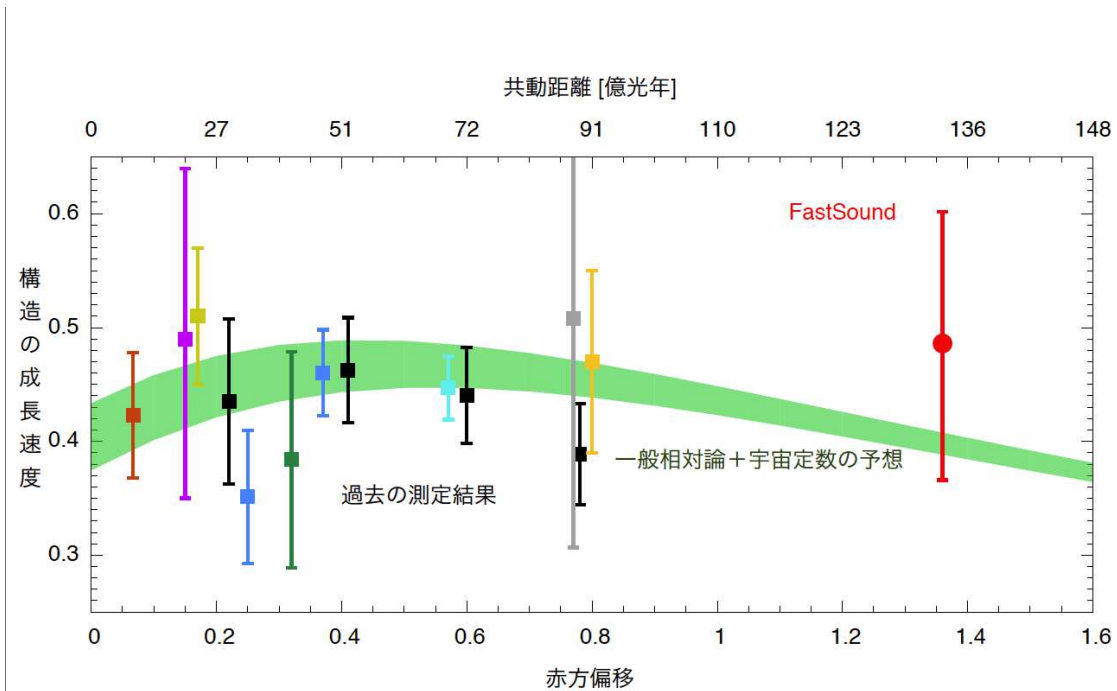


図 2. 宇宙の大規模構造の成長速度とその進化。横軸が赤方偏移あるいは共動距離。縦軸は宇宙の構造が成長するスピードを表すパラメータで、値が大きいほど成長が速い。緑の帯は一般相対性理論と宇宙定数から予想される宇宙の成長速度の値の範囲。赤い丸が **FastSound** から得られた制限で、その他の点は先行研究で得られたもの。本研究により、より遠方（過去）の宇宙における構造の成長スピードを求められたことが分かる。(クレジット:Okumura et al.)

平成 29 年 2 月 9 日

世界初！ アルマ望遠鏡で暗黒矮小銀河の光をとらえる 謎に包まれた暗黒矮小銀河の正体解明への第一歩

近畿大学理工学部の井上開輝准教授を主とし、本学理学研究科天文学専攻の千葉柁司教授を含む国際研究グループは、チリ共和国に設置された世界最高の性能を誇る巨大電波干渉計「アルマ望遠鏡^(注1)」による観測で、暗黒矮小銀河^(注2)（大変小さく暗い銀河）の冷たい塵が放つ微弱な光と考えられるシグナルを世界で初めて検出しました。この発見は、謎に包まれた暗黒矮小銀河の正体を解明する手がかりになると期待されています。本件に関する論文が、平成 29 年（2017 年）1 月 30 日に米国の学術雑誌「The Astrophysical Journal Letters」に掲載されました。

【本件のポイント】

- 世界で初めて、暗黒矮小銀河の塵が放射する微弱な電波らしきシグナルを検出
- 国際プロジェクトによる世界最大の電波干渉計「アルマ望遠鏡」で観測
- 宇宙の謎の一つである「行方不明の矮小銀河問題」解明への第一歩

【本件の概要】

宇宙は未だに謎に満ちていますが、研究が進むなかで理論と観測が合わない問題がいくつか生じています。その一つが「行方不明の矮小銀河問題」です。矮小銀河とは、私たちの住む天の川銀河の約 1000 分の 1 以下の質量しかない小さな銀河のことですが、観測されている矮小銀河の数が理論予測より著しく少ないのです。その理由として推測されるのは、宇宙にはほとんど光って見えない暗黒矮小銀河がたくさん潜んでいるのではないかということです。暗黒矮小銀河とは、名前の通り大変暗い天体でその正体は謎に包まれています。その謎を解明するには、暗黒矮小銀河の放つ微弱な光を直接とらえるか、重力により近くを通る光の経路を曲げる「重力レンズ効果」を使って質量を測定するか、どちらかしかありません。

本の研究グループは、地球から 114 億光年離れた天体をアルマ望遠鏡で観測しました。その結果、観測対象の天体のすぐそばに、冷たい塵（小さな岩や氷の粒）によるものと考えられる微弱な電波を検出しました。その場所に暗黒矮小銀河があると仮定すると、天体の観測結果に現れたいくつかの現象が説明できることが分かりました。今後追観測を行うことで、暗黒矮小銀河の大きさや距離などを精密に測定し、その正体に迫りたいと考えています。

【研究の詳細】

本研究グループは、アルマ望遠鏡で重力レンズ天体^(注3)「MG0414+0534」を観測しました。「MG0414+0534」は、単一の光源が手前の銀河の「重力レンズ効果」によって 4 つのレンズ像^(注4)として見えている比較的まれな天体です（図 1）。

4つのレンズ像には理論予測と異なる明るさの違いがあり、大きな質量をもつ銀河による重力レンズ効果だけでは明るさの比を説明できないため、暗黒矮小銀河も小さなレンズとして働いているだろうと考えられてきました。

観測の結果、1つのレンズ像(A2)のすぐそばで、冷たい塵(小さな岩や氷の粒)によるものと考えられる微弱な電波(波長約0.9ミリ)を検出しました(図2)。その方向に(地球から約60~80億光年先)暗黒矮小銀河があると仮定すると、レンズ像の明るさの比を説明できることが分かりました(図3、図4)。さらに、可視光で観測されている、塵によるレンズ像の減光も同時に説明できることが分かりました。これらのことから、微弱な電波の起源は暗黒矮小銀河であると考えることがもっとも妥当である、という結論に達しました。

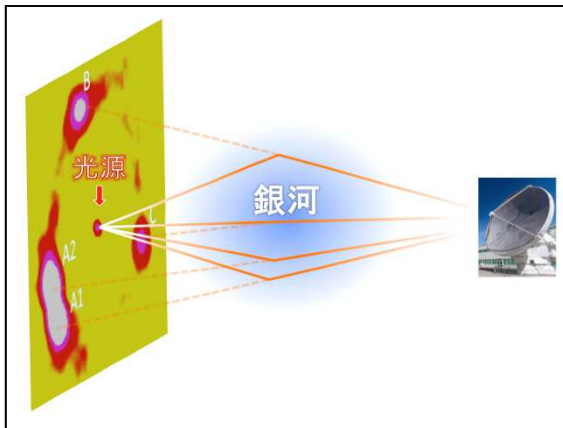


図1 重力レンズ効果による光路の曲がり。単一の光源が手前の銀河により4つのレンズ像A1, A2, B, Cに分裂して見える。

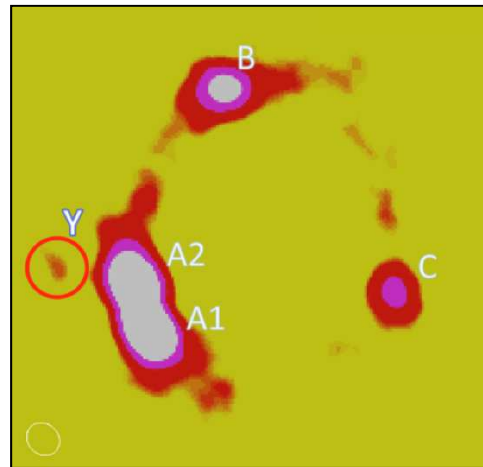


図2 アルマ望遠鏡によるMG0414+0534のサブミリ波画像。赤い円内が暗黒矮小銀河(Y)由来と考えられる光。

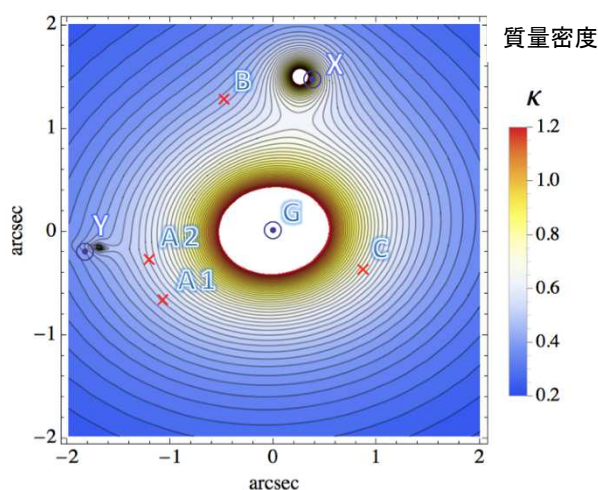


図3 レンズ天体の質量密度のモデル予測。Gが一番大きい銀河、Xが二番目に大きい銀河、Yが今回発見された暗黒矮小銀河の中心を表す。

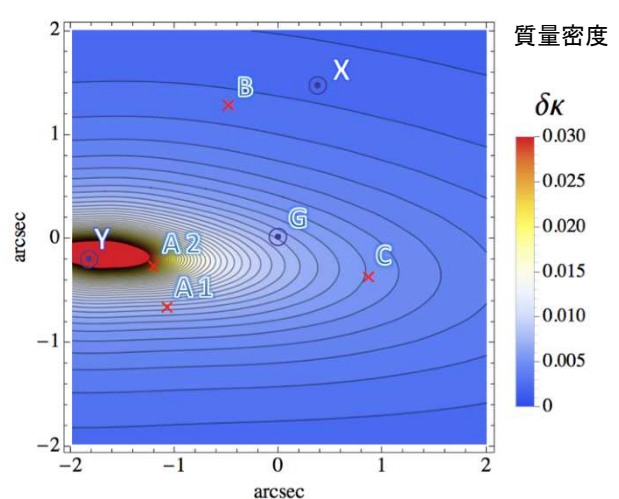


図4 暗黒矮小銀河の質量密度のモデル予測。図3でGとXの寄与を引いたものをプロットしている。暗黒矮小銀河はつぶれた楕円の形をしている。

【今後の展望】

本研究により、謎に満ちた暗黒矮小銀河の微弱な光を電波（サブミリ波）で観測するという新しい手法が有効であることが分かりました。研究グループは、今後より高い解像度で観測を行い、重力レンズ像のわずかな歪みから、暗黒矮小銀河までの距離や質量分布などを測定し、その正体の解明に向けた研究をさらに進めていきます。

【掲載誌】

■雑誌名：『The Astrophysical Journal Letters』

■論文名：Evidence for a Dusty Dark Dwarf Galaxy in the Quadruple Lens MG 0414+053

（4重像レンズ MG0414+0534 にみられる塵に富む暗黒矮小銀河の証拠）

■著 者：Kaiki Taro Inoue, Satoki Matsushita, Takeo Minezaki and Masashi Chiba

【用語解説】

（注1）アルマ望遠鏡……東アジア・北米・ヨーロッパ・チリの諸国による国際プロジェクトによって、チリ共和国北部アタカマ砂漠の標高約 5000 メートルの高原に設置された干渉計方式の巨大電波望遠鏡。

（注2）暗黒矮小銀河……太陽質量のおよそ 10 億倍以下の質量をもつ極めて暗い小さな銀河。

（注3）重力レンズ天体……手前の天体の重力により、遠方の単一光源が複数の像としてみえている天体。

（注4）レンズ像……重力レンズ天体の像を指す。

平成 30 年 2 月 13 日

「明滅するオーロラの起源を ERG（あらせ）衛星が解明

ー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

1. 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。

2. 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。

3. 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。

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り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。

4. 発表雑誌：

雑誌名：「*Nature*」(オンライン版：イギリス時間 2 月 14 日)

論文タイトル：Pulsating aurora from electron scattering by chorus waves

著者：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. Frey⁸，Vassilis Angelopoulos⁹，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 Angeles.

DOI 番号：10.1038/nature25505

5. 注意事項：

日本時間 2 月 15 日(木) 午前 3 時 (イギリス時間：14 日午後 6 時)以前の公表は禁じられています。

6. 用語解説：

注1：太陽風

太陽から吹き出すプラズマ（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。

7. 添付資料：

日本語テロップ付解説動画は、こちらからダウンロードいただけます。

<https://www.dropbox.com/s/dd44t9cwfb177sy/pulsatingaurora180125.zip?dl=0>

※閲覧用パスワード:erg_MEPe_20170327 ※本動画のクレジット:(c)ERG science team

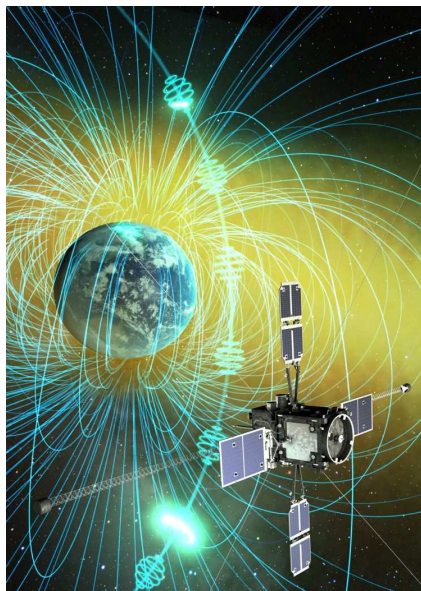


図1 明滅するオーロラの起源をERG（あらせ）衛星のプラズマ観測で解明

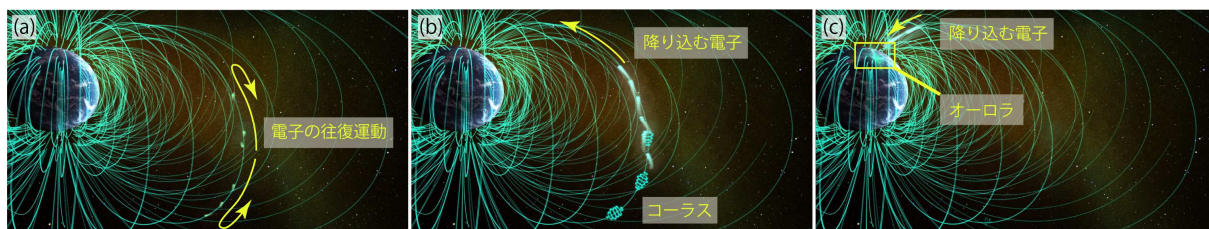


図2：(a)磁気圏内で磁力線に沿って往復運動する電子。(b)コーラス波動の電磁力により往復運動が破られ、磁力線に沿って大気へ降り込もうとする電子。(c)降り注ぐ電子で発生するオーロラ。©ERG science team

平成 30 年 6 月 18 日

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-

【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きました。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」に掲載予定です。

【論文情報】

雑誌名： Science Advances

論文タイトル：Upper and lower plate controls on the great 2011 Tohoku-oki earthquake

著者： Xin Liu, Dapeng Zhao

DOI 番号：10.1126/sciadv.aat4396

【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（M_w）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。

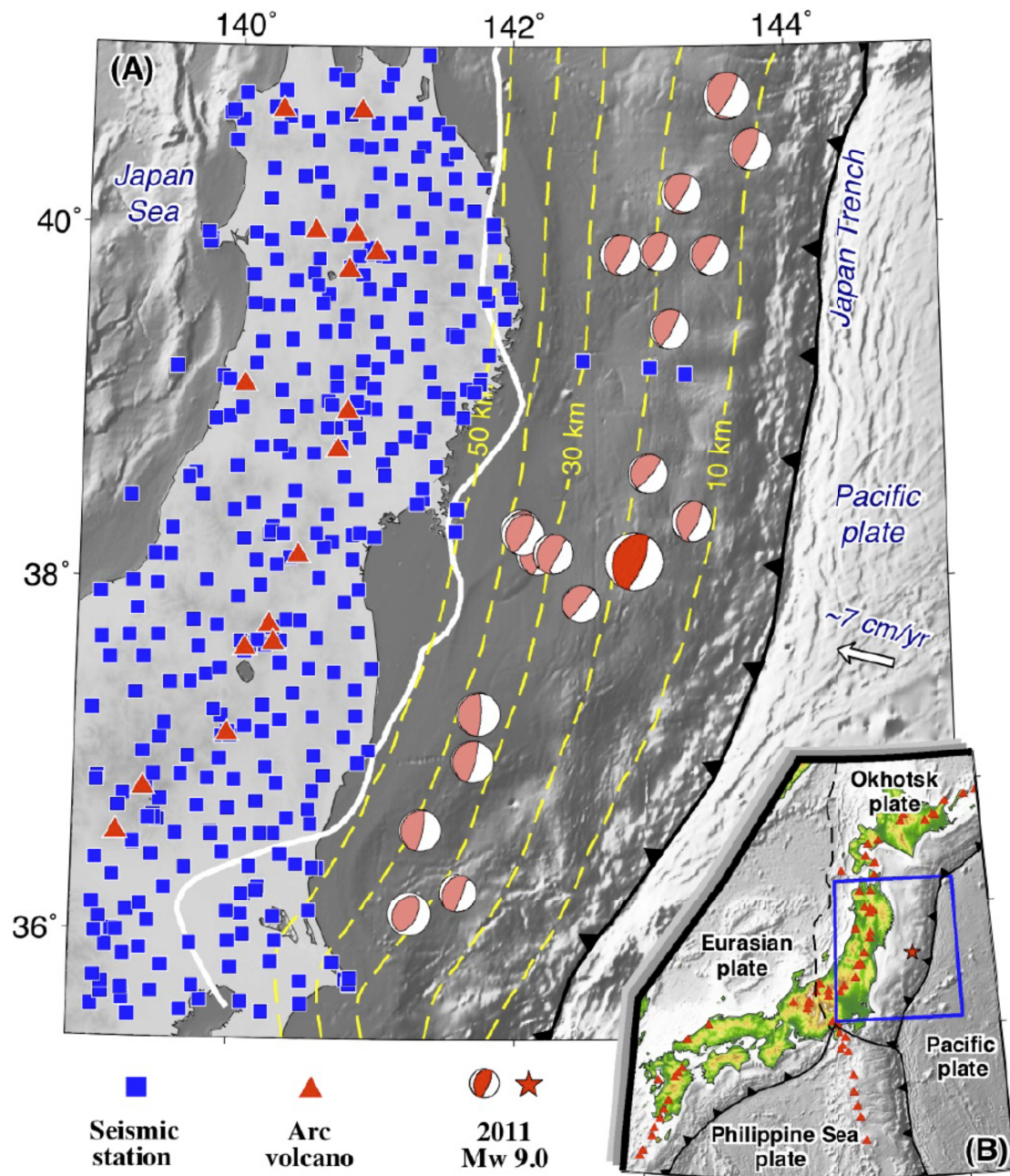
この問題を解決するために、趙大鵬教授の研究グループは、地下構造を画像化する「地震波トモグラフィー法」^(注1)を、日本列島に設置された高密度かつ高精度の地震観測網(図1(A))で記録された大量の地震波伝播時間データ(図1(B))に適用することで、東北地方太平洋沖大地震の震源域周辺の3次元P波速度構造^(注2)を詳細に求めました(図2(C, D)と図3)。また、東北沖の海底地形データと重力異常データ^(注3)も解析し(図2(A, B))、得られたP波速度構造と合わせ震源域の微細構造を検証しました。これまでも東北沖に地震波トモグラフィー法を適用した研究は幾つかありましたが、今回の研究ではトモグラフ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

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。

【参考図】



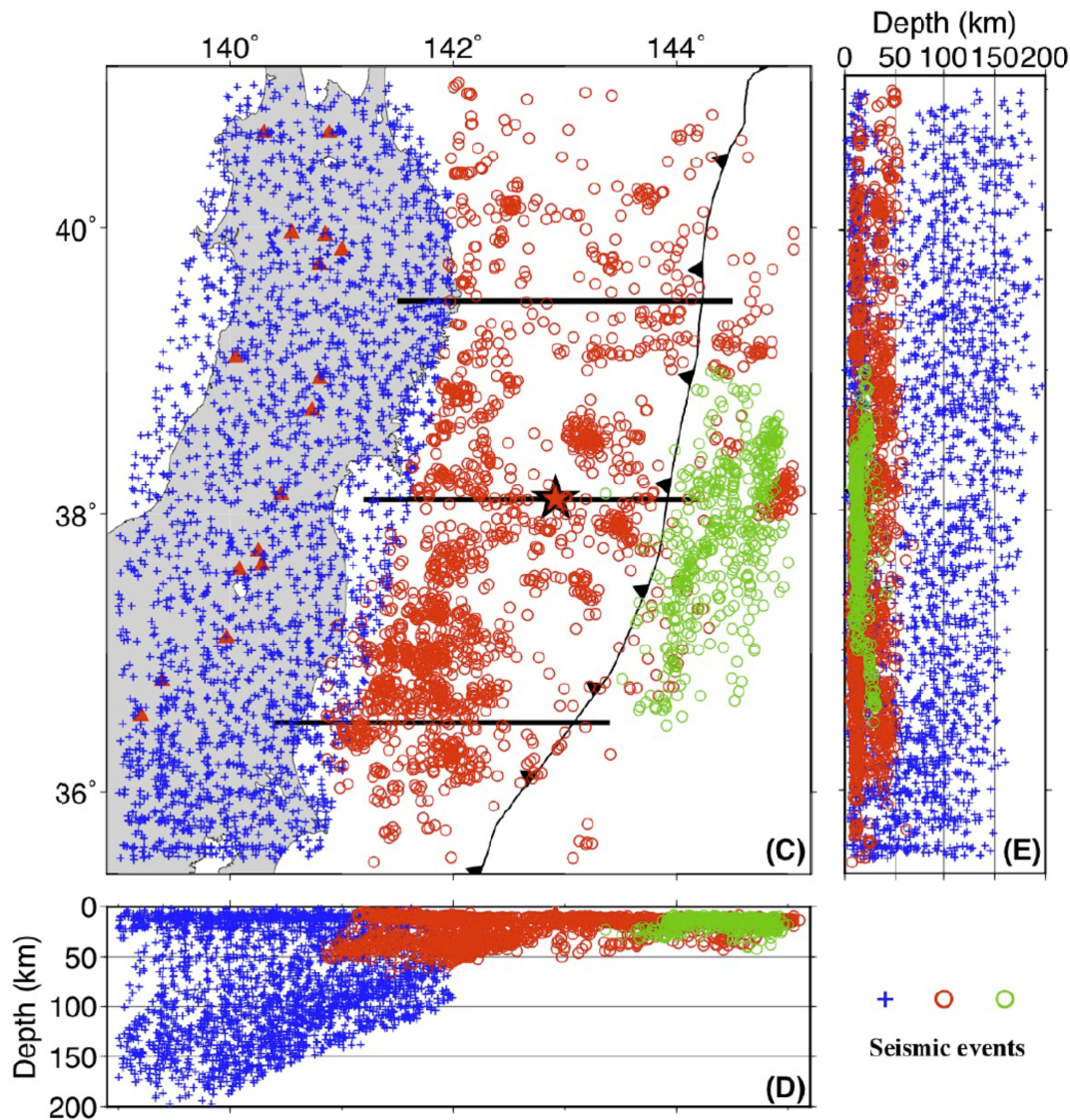


図 1. (A) 本研究で用いた地震観測点(■)の分布図。赤色のビーチボールは 2011 年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)の断層面解^(注 4)。ピンク色のビーチボールは 1917 年から 2017 年までに起こった地震(M が 7 以上)の断層面解。黄色破線は沈み込んでいる太平洋プレート上面の等深線。白線は震源断層面の下限。黒線は日本海溝。(B) 日本列島とその周辺域にあるプレートの配置。青色の枠線は本研究領域。▲は活火山、★は 2011 年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)の震央。(C) 本研究の解析で用いた微小地震の分布図。(D) と (E) は、それぞれ (C) の東西断面と南北断面。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。

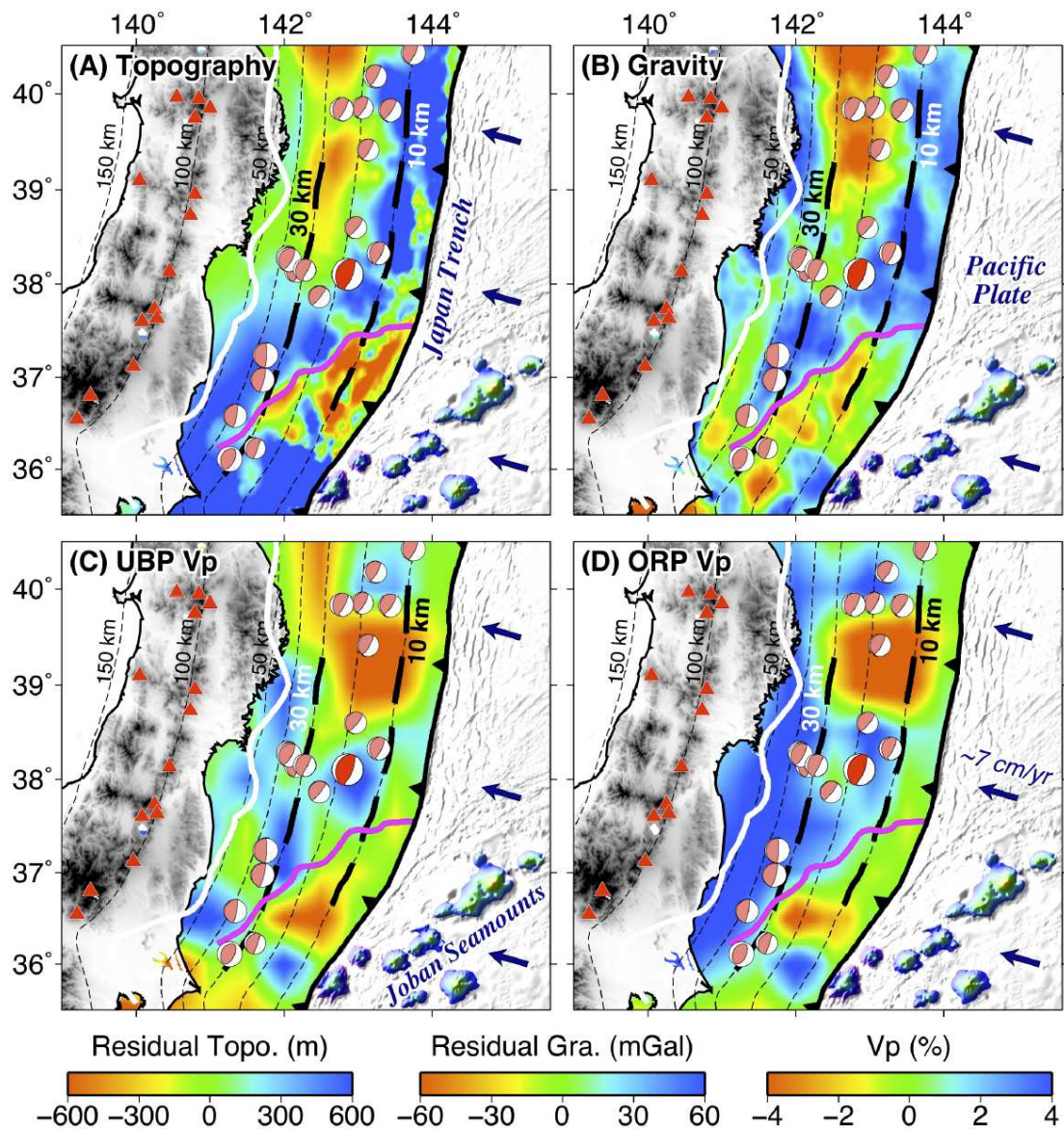


図 2. (A)海底地形異常と(B)重力異常の分布図 (*Bassett et al.* 2016 から変更)。 (C)沈み込んでいる太平洋プレートの上面に沿う震源断層面上のP波速度分布。 (D)震源断層の上にあるオホーツクプレート内の平均P波速度分布。黒色の破線は沈み込んでいる太平洋プレート上面の等深線である。紫色の線はオホーツクプレート内の岩石組成の境界線を示す。

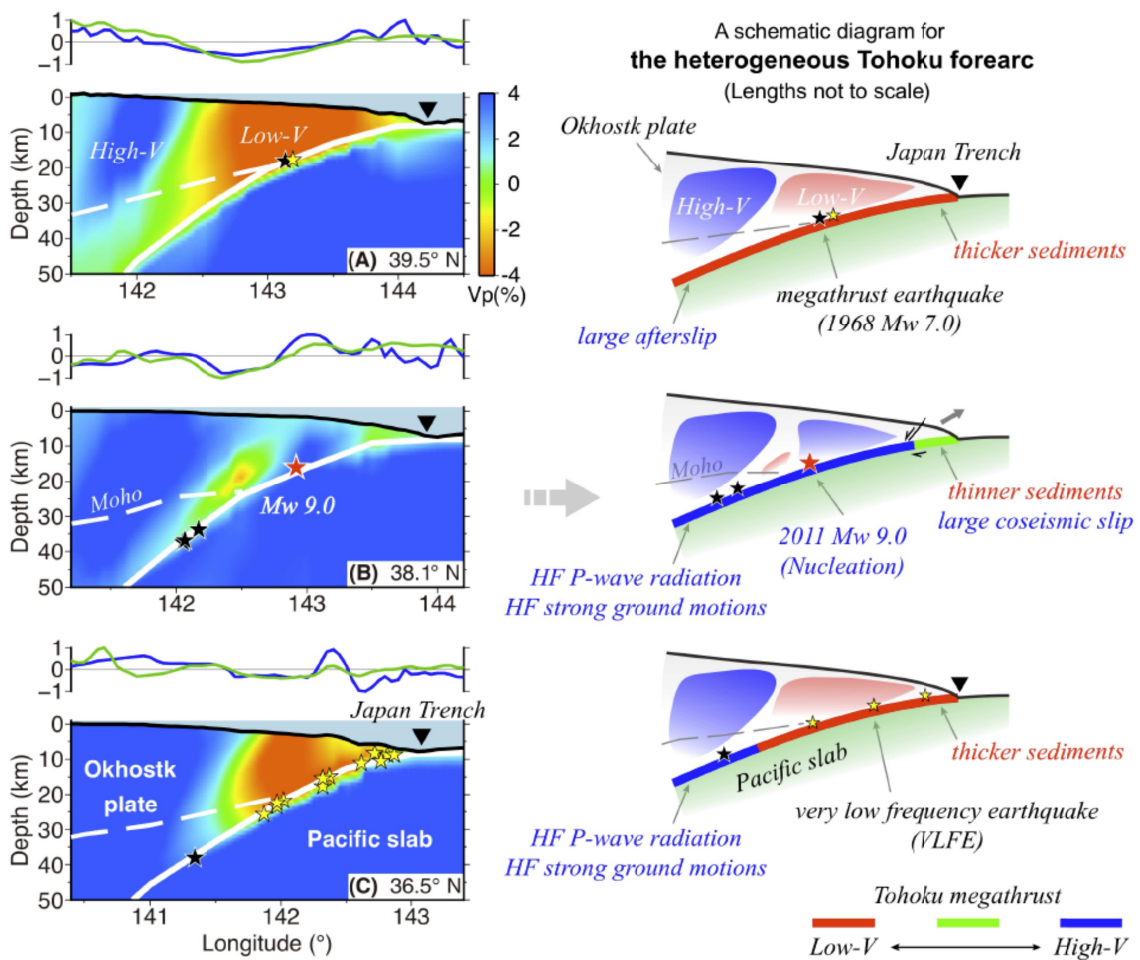


図3. 左側は図1(C)の三つの黒線に沿うP波速度トモグラフィの東西断面図。右側はそれらに対応する模式図。赤色と青色はそれぞれ低速度と高速度、そのスケールは断面(A)の右。白い実線は沈み込んでいる太平洋プレートの上面に沿う震源断層面。白い破線はオホーツクプレート内のモホ面（地殻とマンタルの境界面）。断面(B)にある赤色★は2011年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)の震源。黒色★は1917-2017年の間に起こった地震(Mが7以上)。黄色★は超低周波地震。各断面の上にある青色と緑色の線はそれぞれ海底地形と重力の異常を表す。

【用語解説】

(注1) 地震波トモグラフィ法

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。

平成 28 年 5 月 25 日

新たな触媒が拓く新たな有機合成 ～ “最強” の不斉有機塩基触媒による反応開発～



図 1. 『Angewandte Chemie International Edition』 54 巻 52 号表紙より。強力な塩基触媒を強い鷹に見たて、「触媒が基質からプロトンを引き抜き、生成物に与える」過程を、「鷹が水中（基質）から魚（プロトン）を力強く取り、巣（目的地＝生成物）に運ぶ」絵で表現しています。

【初めに】

現代の社会において、新たな医薬品や機能性有機材料の開発が強く求められています。その実現には、元となる化合物群の自在な合成を可能にする有機合成反応の開発が必要不可欠です。特にキラル（注 1）な化合物の片方のエナンチオマー（鏡像異性体）を選択的に合成すること（不斉合成）は精密な有機合成を行う上で極めて重要です。エナンチオマー間では化学的、物理的な性質はほとんど同じです。その一方で、生体内での作用の仕方は異なることが多く、片方のエナンチオマーが薬で他方が毒であるということもあります（例えば、サリドマイド：図 2）。したがって、望みの片方のエナンチオマーのみを選択的に合成することができれば、このような問題を回避することができます。不斉合成の方法の一つとして、ラセミ体（注 2）またはアキラル（注 3）な出発物質からエナンチオ選択的な反応により不斉合成する方法があります。そして高効率かつ高選択的な不斉合成を目指し、不斉触媒反応の開発研究が近年盛んに行われています。新たな不斉触媒反応の開発の鍵となるのは、反応に用いる不斉触媒です。これまでに金属触媒を中心とした様々な不斉触媒が開発され、それらを用いた数多くの分子変換反応が開発されてきました。また最近では、それらの触媒に加え、不斉有機分子触媒（注 4）が

環境調和型の不斉触媒として注目を集めています。

【研究内容】

寺田眞浩教授の研究グループでは「従来の触媒とは一線を画す高い性能を持った不斉有機分子触媒の開発」と「これまでにない高度な分子変換反応の開発」を目指し、研究を行っています。そして最近、非常に高い塩基性を持つ不斉有機塩基触媒として「キラルビス(グアニジノ)イミノホスホラン触媒 **1**」(図 3)を開発しました。今回、この触媒の類まれな高い塩基性(おそらくこれまでに報告されている不斉有機塩基触媒の中で最も高い塩基性)を活用した高度な分子変換反応の開発を目指し、研究を行いました。その結果、ジチアン化合物 **2** のイミン **3** へのエナンチオ選択的な付加反応の開発に成功しました(図 4)。ジチアン化合物は有用なビルディングブロック(注 5)として古くから有機合成に頻繁に用いられてきた化合物です。しかし、これまでにこの化合物を不斉触媒反応に用いた例はほとんど報告されていません。これは、ジチアン化合物の酸性度(注 6)の低さに起因します。一般に塩基触媒反応は、触媒による基質(今回の付加反応ではジチアン化合物 **2**)の脱プロトン化によってアニオン中間体(**A**)が生成し、求電子剤(今回の付加反応ではイミン **3**)と反応することで進行します(図 5)。しかし、従来の不斉有機塩基触媒は塩基性が低く、比較的酸性度が低いジチアン化合物を基質として用いた場合に効率よく脱プロトン化が進行しません。そのため、これまでジチアン化合物を不斉触媒反応に用いることができませんでした。これに対し、キラルビス(グアニジノ)イミノホスホラン触媒 **1** はジチアン化合物 **2** を脱プロトン化するのに十分な塩基性を持っています。加えて、イミン **3** への付加における高い立体制御能(*R*体を与えるか*S*体を与えるかの制御能)を有しており、その結果、今回のエナンチオ選択的な付加反応の実現に至りました。この反応により得られる化合物(*S*)-**4**はさらなる分子変換が可能であり、キラルビルディングブロックとして有機合成への利用が期待されます。今回の研究成果は、不斉有機塩基触媒の塩基性を高めることで「従来の触媒では実現できない不斉触媒反応」の実現が可能であることを示した重要な成果です。ジチアン化合物 **3** のように、酸性度の低さに起因してこれまで不斉触媒反応の基質として用いることができなかった化合物は数多くあります。それらの化合物をターゲットとしたさらなる高度な分子変換反応の開発を目指し、今後研究を展開していきます。

【発表雑誌】

この研究は東北大学の近藤梓助教、寺田眞浩教授(研究代表者)らの研究グループにより行われました。研究成果は2015年12月21日にWiley-VCH社の一般化学雑誌である『Angewandte Chemie International Edition』54巻52号に掲載されました。(A. Kondoh, M. Terada *et al.* “Enantioselective Addition of a 2-Alkoxy carbonyl-1,3-dithiane to Imines Catalyzed by a Bis(guanidino)iminophosphorane Organosuperbase” *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2016, 54 (52), 15836)。この研究は科学研究費補助金のサポートを受けています。

【参考図】

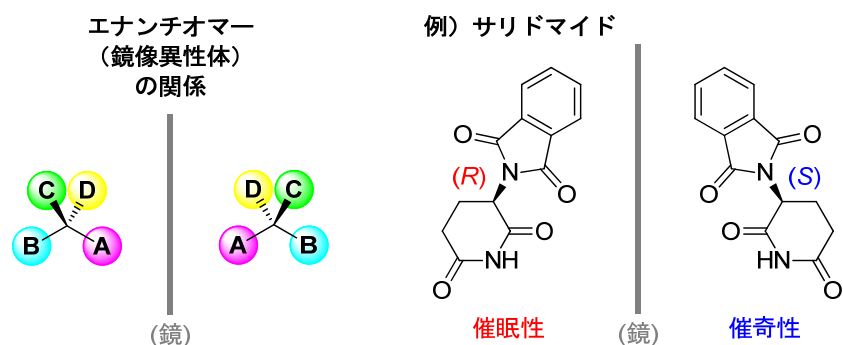


図 2. エナンチオマーの関係について

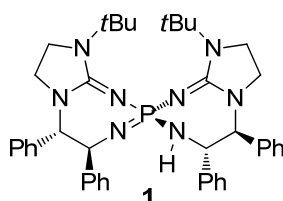


図 3. キラルビス (グアニジノ) イミノホスホラン触媒 1

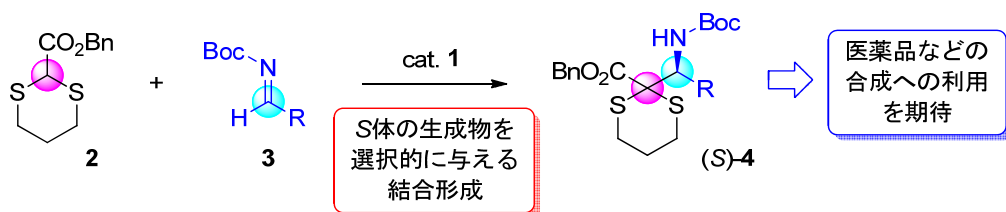


図 4. ジチアン化合物 2 のイミン 3 へのエナンチオ選択的付加反応

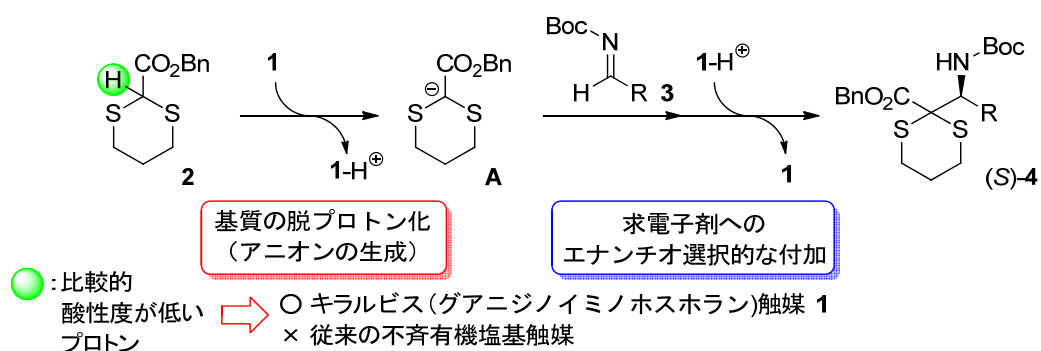


図 5. 不斉塩基触媒反応のメカニズム

【用語説明】

(注 1) キラル

自らの鏡像と重ね合わせることができない分子をキラルであるといいます。右手と左手の関係。

(注 2) ラセミ体

キラルな化合物の両エナンチオマーの等量混合物のことを指します。

(注 3) アキラル

キラルでないことをアキラルであるといいます。

(注 4) 有機分子触媒

金属元素を含まず、炭素・水素・酸素・窒素・リン・硫黄などの元素から成る低分子有機化合物による触媒を指します。

(注 5) ビルディングブロック

様々な分子変換が可能で有機合成に利用できる小分子のことをビルディングブロックと呼びます。

(注 6) 酸性度

酸としての強さの程度のことを酸性度といいます。通常指標として酸解離定数の負の常用対数 (pK_a) で表します。

平成 30 年 7 月 6 日

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

【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。

図 就眠運動は紀元前から人類を魅了した

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。

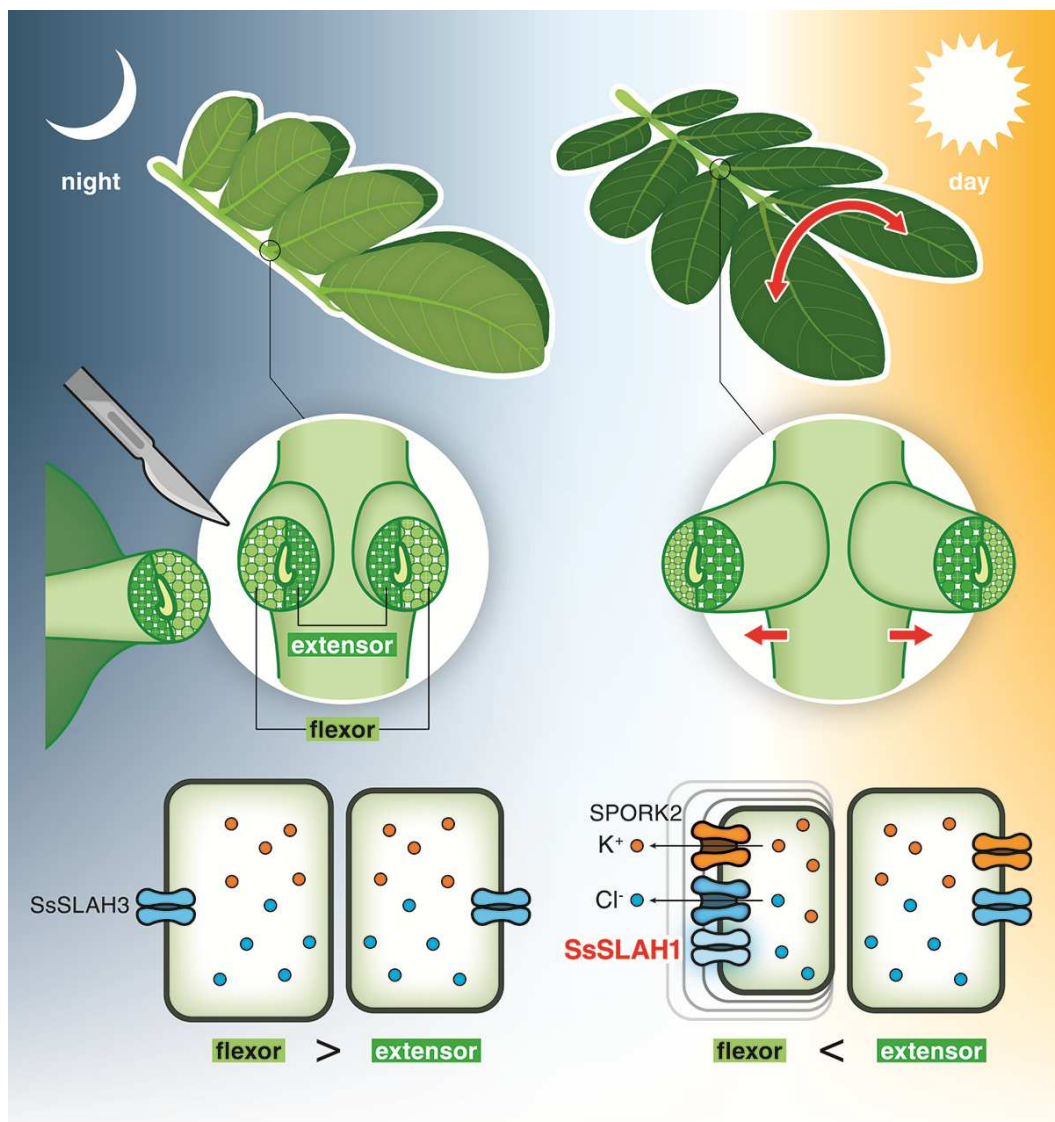


図 陰イオンチャネル *SsSLAH1* は、朝方に葉の下面側 (flexor) の細胞だけで発現し、葉の上面側 (extensor) の細胞では発現しない。このため、朝方に葉

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】

雑誌名： Current Biology

論文タイトル： Ion channels regulate nyctinastic leaf opening in *Samanea*

saman

著者 : 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](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(18)30678-X)

平成 27 年 8 月 18 日

隕石衝突で DNA 構成分子が生成 ～生命誕生前の核酸塩基の新たな生成過程～

【概要】

東北大学理学研究科 古川善博助教らは、物質・材料研究機構 小林敬道主幹研究員、広島大学大学院理学研究科 関根利守教授と共同で、生命誕生前の地球の海洋に隕石が衝突する(図 1)際に起こる反応を模擬した実験を行い、無機物から DNA および RNA^(注1)の構成物質である核酸塩基^(注2)(シトシンおよびウラシル)や、タンパク質の構成物質である種々のアミノ酸が生成することを明らかにしました。

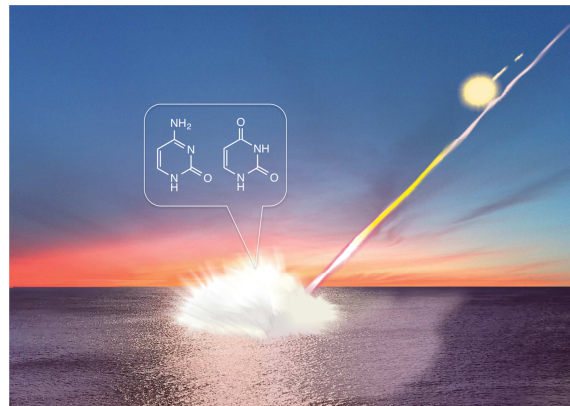


図 1: 隕石の海洋衝突による核酸塩基生成の模式図

核酸塩基は DNA と RNA の両方で合計 5 種類しかなく、遺伝情報を伝える重要な文字として働いています。また、タンパク質を構成するアミノ酸も生命の起源に重要な物質と考えられています。これまでの研究では、無機物で構成される生命誕生前の地球では、核酸塩基の生成が難しいと考えられてきました。

今回の研究では、生命誕生前の地球の海洋に鉄を含む隕石が衝突する過程を模擬した衝突実験を行い、生成物を分析しました。その結果、鉄、水、重炭酸、アンモニアなどの無機物から、衝突反応により、最大2種類の核酸塩基および最大 9 種類のアミノ酸が同時に生成することが明らかになりました。このことは、生命誕生前の地球における遺伝物質の新たな供給源を示唆しています。

本研究の成果は、平成 27 年 8 月 17 日(日本時間)公開の欧州科学雑誌「*Earth and Planetary Science Letters*」電子版に掲載されました。

【発表論文】

論文題目

Nucleobase and amino acid formation through impacts of meteorites on the early ocean

著者名

Yoshihiro Furukawa*, Hiromoto Nakazawa, Toshimori Sekine, Takamichi Kobayashi & Takeshi Kakegawa

* Corresponding author (責任著者)

掲載誌

Earth and Planetary Science Letters オンライン版

DOI 番号

10.1016/j.epsl.2015.07.049

【詳細】

1. 研究の背景

生命の遺伝情報は DNA に記録されており、その情報は RNA を介してタンパク質の合成に使われ、タンパク質は生体内の様々な反応をコントロールしています。これらの物質を構成する核酸塩基やアミノ酸、リボースなどの有機物は生命起源にとって不可欠な物質ですが、生命誕生期の地球でこれらの重要な物質がどのように誕生したのかは分かっていませんでした。

これに対して、中沢弘基博士(物質・材料研究機構名誉フェロー、元 東北大学教授)は鉄を含む隕石の衝突でこのような有機物が生成するという仮説を提案しました(参考文献 1,2)。古川助教らの研究グループは、この仮説に基づき 2009 年に隕石の衝突によりアモルファス炭素を炭素源として最も単純なアミノ酸であるグリシンが生成することをつきとめていました(参考文献 3)。しかし、隕石の衝突を含めた他の環境でも、当時の地球で利用可能な無機物から核酸塩基を生成する反応や地質学的イベントはこれまで報告されていませんでした。

2. 研究の内容と意義

今回の研究では、当時の地球大気の主成分である二酸化炭素が海洋に溶解して生成する重炭酸に炭素源を変更し、約 1 km/s の超高速衝突実験を物質・材料研究機構において行い(図 2)、東北大学で生成分子の分析を行いました。その結果、これまでに比べはるかに種類、多量のアミノ酸が生成し、さらに複数の核酸塩基も生成することを発見しました。

このようにして生成された核酸塩基が最初の生命の遺伝情報の蓄積や伝達に使われるようになった可能性があり、この研究成果は地球上で最初の遺伝物質がどのようにして誕生したのかという問題解決に対して、重要な手がかりを与えてくれる可能性があります。隕石の衝突は刻々と変化する多様な環境を形成するため、全容の解明や

当時の地球での生成量の詳細な見積りには今後の研究の進展が必要となります。



図 2: 衝突実験に使用した一段式火薬銃(物質・材料研究機構)

【用語の説明】

注1) RNA

生命がDNAに記録された遺伝情報からタンパク質を合成する際に情報を伝達する役割を担っている有機分子。核酸塩基、リボース、リン酸から構成される。

注2) 核酸塩基

DNA、RNAにおいて遺伝情報を記録する文字の役割を担う有機分子。アデニン、グアニン、シトシン、チミン、ウラシルの5種類がある(図3)。

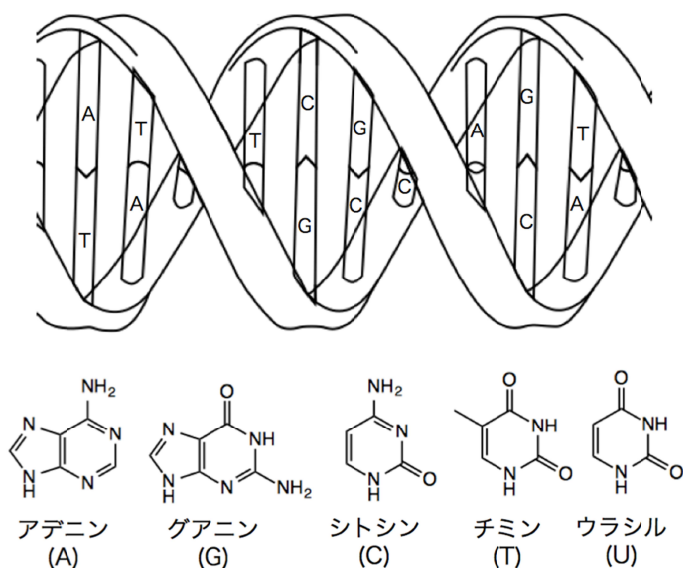


図 3: DNA の構造と核酸塩基

【参考文献】

1. 中沢弘基 著 2006 年 生命の起源・地球が書いたシナリオ (新日本出版)
2. 中沢弘基 著 2014 年 生命誕生 地球史から読み解く新しい生命像 (講談社)

現代新書)

3. Furukawa *et al.*, Biomolecule formation by oceanic impacts on early Earth. *Nature geoscience* 2, 62-66 (2009).

【謝辞】

本研究は、JSPS 科研費(Grant Number: 22654063 and 24244084, and 23740402)の助成を受けたものです。

平成 28 年 7 月 14 日

恐竜やアンモナイト等の絶滅は “小惑星衝突により発生したすすによる気候変動”が 原因だった

—大量絶滅時のグローバル気候変動が明らかに—

【概要】

東北大学大学院理学研究科地学専攻の海保邦夫教授、気象庁気象研究所の大島長主任研究官らのグループは、約 6600 万年前に小惑星の地球への衝突により成層圏に放出されたすす^(注1)が、地球規模の気候変動を引き起し、恐竜やアンモナイト等の絶滅を起こしたことを、有機分子分析と気候モデル計算により解明しました（図 1）。大量絶滅時の地球規模の気候変動を詳細に解明したのは世界で初めてのことです。小惑星の地球への衝突から恐竜やアンモナイトの絶滅にいたるプロセスが見えて来たと言えます。

本研究の成果は平成 28 年 7 月 14 日（英国時間）付けで、Scientific Reports 誌に掲載されます。

【詳細な説明】

約 6600 万年前に小惑星の地球への衝突により地下から成層圏に放出されたすすが、地球規模の気候変動を引き起こし、恐竜やアンモナイトなどの絶滅を起こしたことが、有機分子分析と気候モデル計算により解明されました。小惑星衝突と白亜紀生物の絶滅事件の同時性により、小惑星衝突が恐竜やアンモナイトなどの絶滅を起こしたことはわかっていましたが、なぜ絶滅したのかのプロセスがよくわかっていませんでした。

隕石の衝突現場であるメキシコのユカタン半島^(注2)では、有機物が堆積岩に濃集していました。海保邦夫教授らの研究グループは、小惑星衝突時にハイチとスペインの海底に堆積した堆積岩中の有機分子を分析し、すすを形成する有機分子が異常に多いことと、また、有機分子はユカタン半島の地下に存在した有機物が衝突により燃焼し放出されたすすであることを明らかにしました。

成層圏に放出されたすすは地球全体に拡散し、数年間成層圏中に浮遊することで、太陽光を効率的に吸収し、地上に到達する太陽光を減少させます。海保教授が成層圏に放出されたすすの量を推算し、気象庁気象研究所の大島主任研究官らのエアロゾル^(注3)・気候研究グループが同研究所の気候モデルによる計算を実施し、得られた変化量から海保教授が白亜紀末の値を求めることで、成層圏すすエアロゾルによる大気や海洋などの気候変動を復元したところ、今迄の恐竜絶滅のシナリオとは全く違う結果が得られました。これまでは、衝突の冬といわれる寒冷化が原因とされてきましたが、低緯度は恐竜が棲める気温であることがわかりました。しかし、降水量が砂漠並みであり、陸上植物が枯れ、

食物連鎖的に絶滅、海は光合成帯が縮小、その後、海は水温低下が起き、アンモナイトが絶滅に追い込まれたと考えられます。ワニやイカなどの生き残りや一部のアンモナイトの絶滅の遅れの理由もわかりました。

【今後の展望】

海保教授らは、別の時代の大量絶滅についても同様の研究を進めていますので、気候変動と生物の大量絶滅の関係が、他の時代についても明らかになることが期待されます。

【参考図】

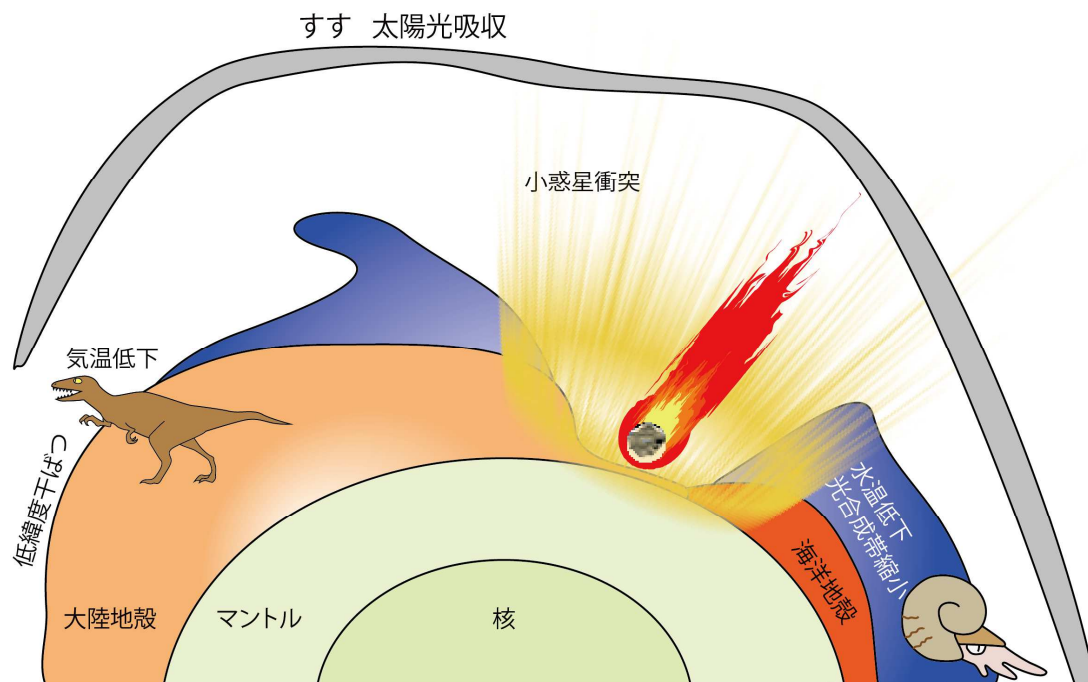


図1 小惑星衝突が有機物を燃やし、すすを成層圏に放出、太陽光吸収により、気温低下、低緯度干ばつ、水温低下、海洋光合成帯の縮小を起し、恐竜やアンモナイトなどが絶滅した。

【用語の説明】

注 1. 小惑星衝突により発生したすす

衝突現場の地下の堆積岩中の有機物が衝突エネルギーにより燃焼し、成層圏へ放出されたもの。

注 2. ユカタン半島

メキシコの南東部にあり、北に張り出す半島。メキシコ湾の南に位置し、世界有数の油田地帯である。

注 3. エアロゾル

大気中に浮遊する微小な液体または固体の粒子の総称。小惑星衝突時に発生

したすすもエアロゾルに含まれる。

【論文情報】

Kunio Kaiho, Naga Oshima, Kouji Adachi, Yukimasa Adachi, Takuya Mizukami, Megumu Fujibayashi, Ryosuke Saito, Global climate change driven by soot at the K-Pg boundary as the cause of the mass extinction. Scientific Reports, 6, (2016)

(URL: www.nature.com/articles/srep28427, DOI: [srep28427](https://doi.org/10.1038/srep28427))

平成 29 年 2 月 3 日

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—

【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）に発表されます。

（*）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ない。

【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。



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。

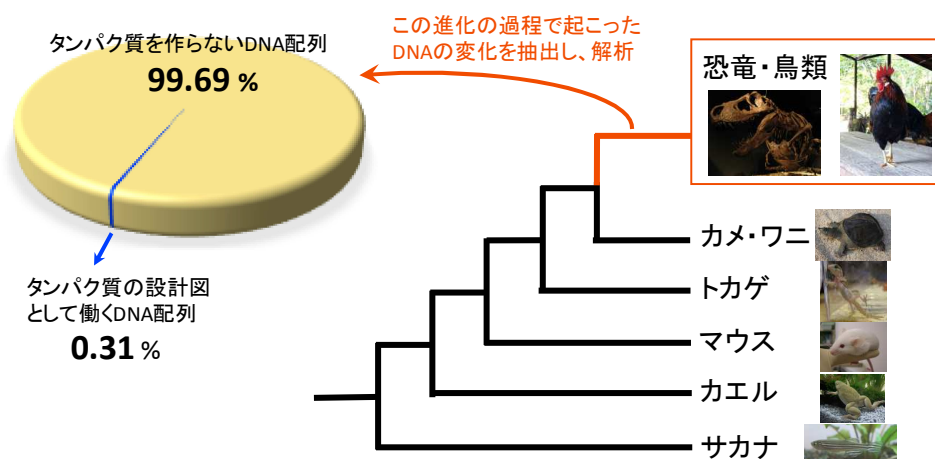


図2 鳥類が進化する際に、新たな遺伝子の獲得はほとんどなかった

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。

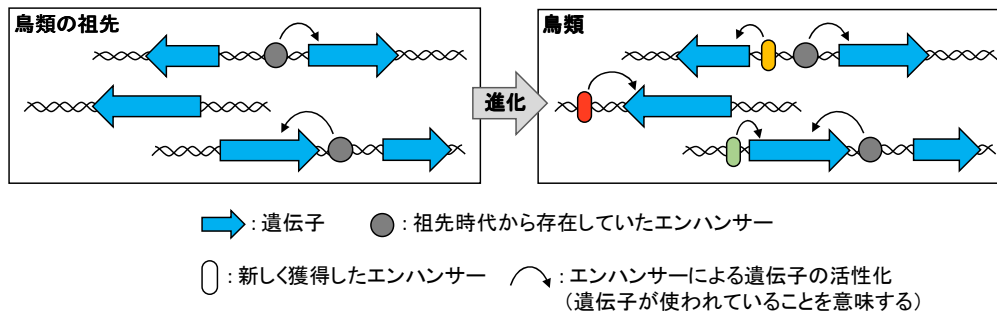


図3 鳥類は、進化の過程で新しい制御配列を獲得し、遺伝子の使い方を変えた

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。

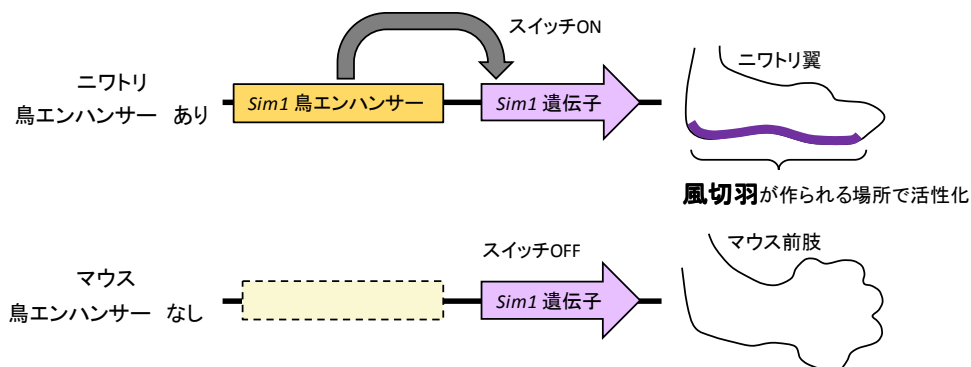


図4 Sim1 鳥エンハンサーは、遺伝子を風切羽領域で活性化する

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。

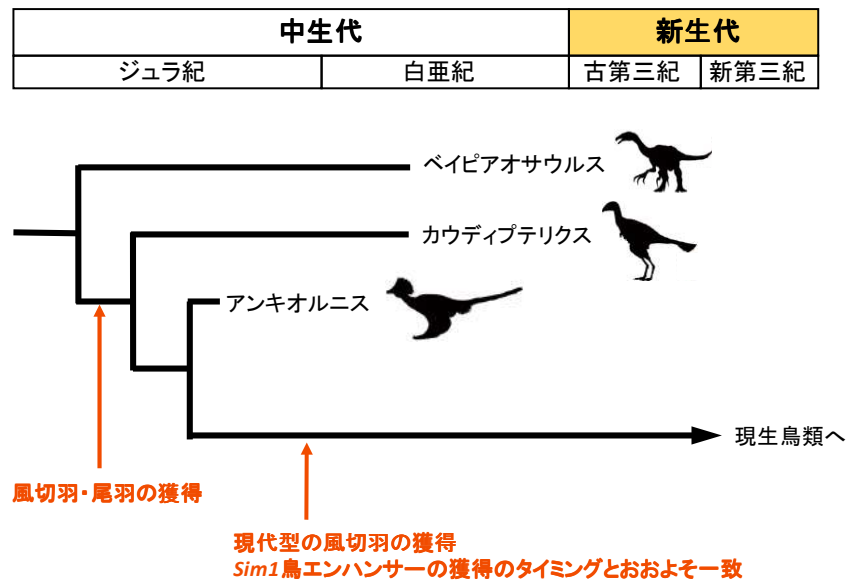


図5 *Sim1* 鳥エンハンサーは恐竜時代に獲得された

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。

【掲載論文】

〈著者〉

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)

〈題目〉

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

〈掲載誌〉

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。

平成 30 年 4 月 5 日

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

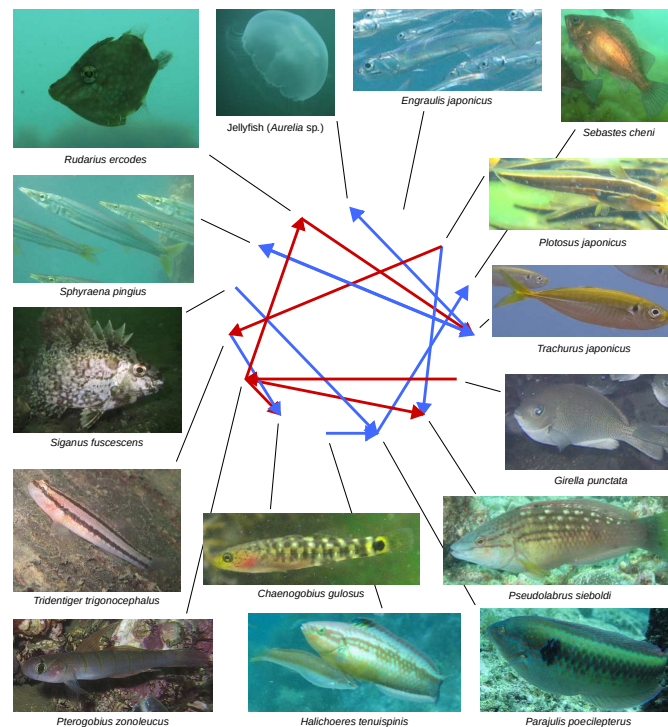


図 1. 本研究の対象となった舞鶴湾の 15 種の生物と、個体数変動データから明らかになった生物種間の 14 の関係性（種間相互作用）。矢印は影響を与える種から、影響を受ける種に向かって引かれている。色は影響の符号（正負）で、青色（正）は平均的には相手を増やす作用、赤色（負）は平均的には相手を減らす作用を表している。Nature より。

【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 年間におよび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（注 3）を、新しく開発した数理的手法（注 4）で解析することで、直接に目で見え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時、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、多くの生物種の間で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。生物群集の安定性に変動するという事は、言い換えれば、生態系には外からの攪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。同じ攪乱でも、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なら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]

英文タイトル： Fluctuating interaction network and time-varying stability of a natural fish community

タイトル和訳： 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

掲載雑誌： Nature (ネイチャー)

著者： 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】

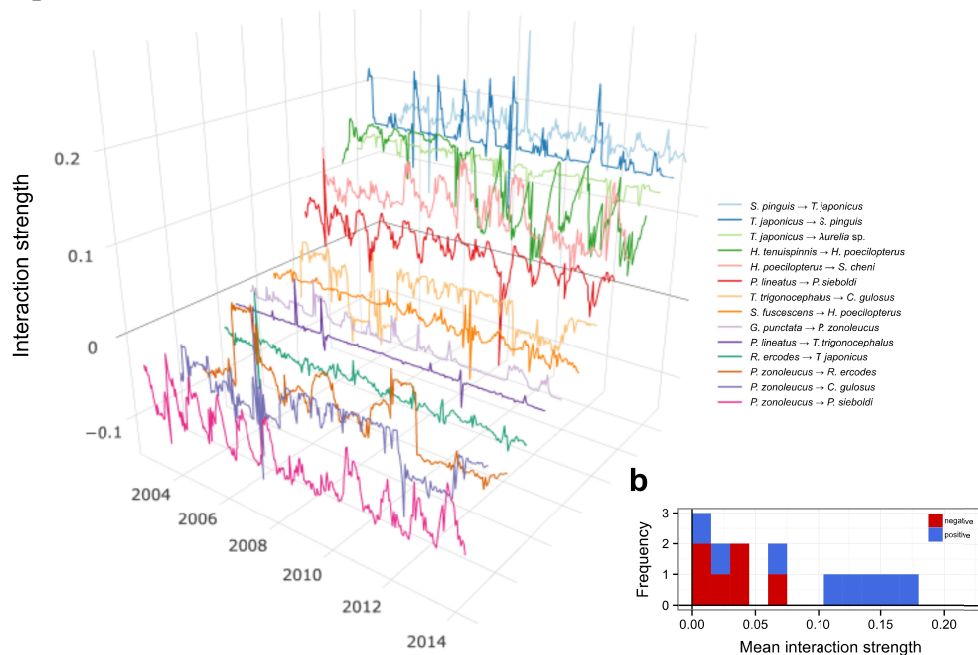


図 2. 変動する種間相互作用。(a) 個体数変動データから明らかになった生物種間の 14 の関係性の時間変動。横軸は時間を表し、縦軸は効果の強さ (interaction strength) を表す。正の値は相手を増やす効果、負の値は相手を減らす効果を表す。(b) 異なる強度 (mean interaction strength) の種間相互作用の頻度分布。Nature より。

【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。