

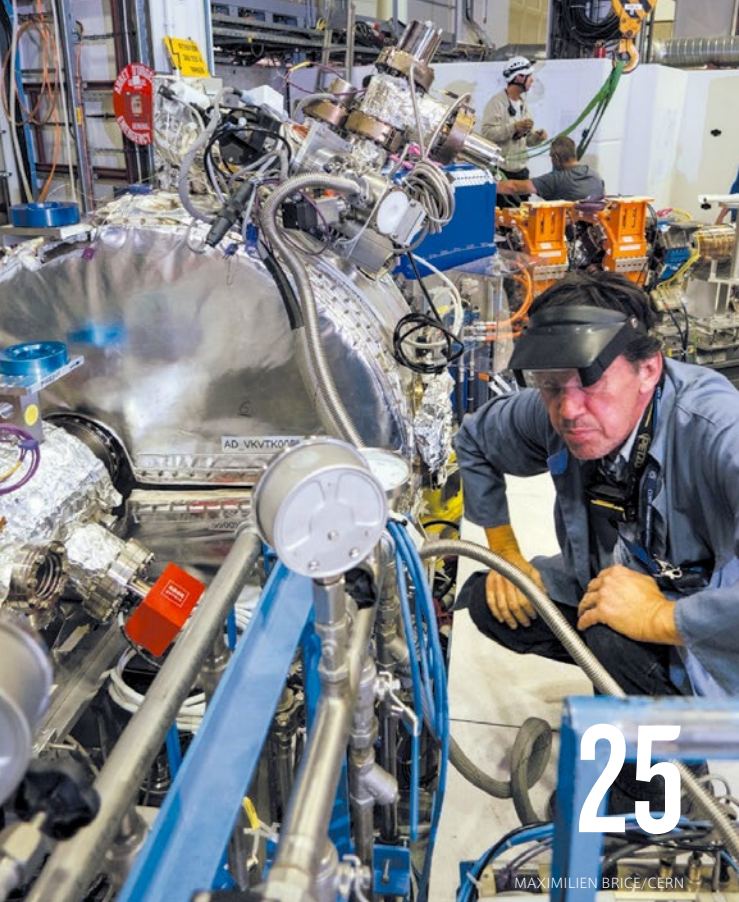
nature ダイジェスト

科学が深まる、世界が広がる

11
2017

反物質が消えた謎に迫る

- ▶ 02 iPS細胞でサルのパーキンソン病症状が緩和
- ▶ 05 フラビーの母乳は第2の胎盤
- ▶ 14 乱流の謎が明らかに
- ▶ 08 FROM 日経サイエンス
ソーラー推進宇宙船に期待



25

MAXIMILIEN BRICE/CERN

NEWS FEATURE

反物質研究の 最前線

物質の鏡像である「反物質」。物質と反物質は初期の宇宙では同じだけ生成したとされるが、反物質は宇宙にはほとんど存在していない。この謎を解明しようと、欧州原子核研究機構では、6つの実験チームが反物質と物質の性質のわずかな違いを探してしのぎを削っている。

NEWS IN FOCUS

04 コウモリはガラス張りのビルが「見えない」

ガラス張りのビルのように平滑面で覆われた垂直な建造物は、コウモリの反響定位システムでは「見えない」らしい。

06 「鎧竜」の鋭い突起はディスプレイ用だった？

保存状態が極めて良好な曲竜の新種の化石について軟組織の詳細な分析が行われた。

09 タヒチの蚊の掃討作戦

蚊の共生細菌ボルバキアを使う手法で、南太平洋諸島から蚊を一掃する試みが進んでいる。

11 エルニーニョ現象で熱帯の森林が二酸化炭素の放出源に

強いエルニーニョ現象による高温や干ばつで、熱帯の森林が放出する二酸化炭素量が大きく増加していたことが判明。

12 Ia型超新星の発生プロセスは2つ？

宇宙の距離計として使われているIa型超新星。この発生シナリオを裏付ける特徴的な観測結果が初めて得られた。

nature ダイジェスト

#11

NOVEMBER 2017

nature.com/naturedigest

2017年11月1日発行

© 2017 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

掲載記事の無断転載を禁じます。

COVER IMAGE: ALFRED PASIEKA/SPL/GETTY

14 乱流の謎が明らかに

乱流の物理学は、未解決の難題として知られる。このほど、流体の中に生じる大小の渦がエネルギーを受け渡して散逸させる過程がシミュレーションによって再現された。

16 宇宙の物質分布の「むら」は意外に小さかった

暗黒エネルギーサーベイの観測結果に基づく、宇宙の物質分布の地図が報告された。

18 統計学の大物理学者が P 値の刷新を提案

科学者が好んで用いる P 値の閾値は 0.05 から 0.005 に引き下げるべきであると、統計学の大家たちは主張する。

19 生態学者らが大規模な再現研究を実施

野外研究の信頼性向上への筋道をつけるため、欧州の複数研究室が「研究の再現性」を確かめる実験を行った。

31 TOOLBOX | 文献管理ソフト 8 選

NEWS & VIEWS

34 系外惑星大気にオゾン層に似た層を発見

系外惑星科学の最先端技術リモートセンシングで、ホットジュピターに、地球のオゾン層に似た層が見つかった。

36 苦味と甘味の知覚に必要なガイドンス分子を発見

味覚に関する情報は、それぞれの味覚に特異的な経路を介して舌から脳へ伝達される。このほど、苦味と甘味の経路の配線を誘導している分子がそれぞれ突き止められた。

NEWS SCAN

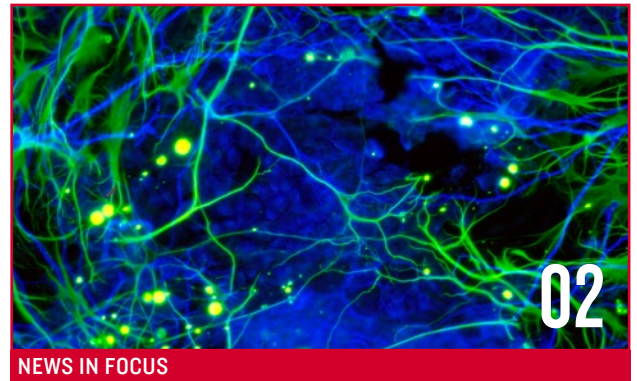
08 ソーラー推進宇宙船に期待

EDITORIAL

39 日出ずる国の黄昏

HIGHLIGHTS

40 2017年9/7～9/28号



NEWS IN FOCUS

iPS細胞でサルのパーキンソン病症状が緩和

サルに移植された iPS 細胞由来のニューロンは、2年間にわたり症状を改善し、その間、有害な作用を引き起こすことはなかった。



NEWS IN FOCUS

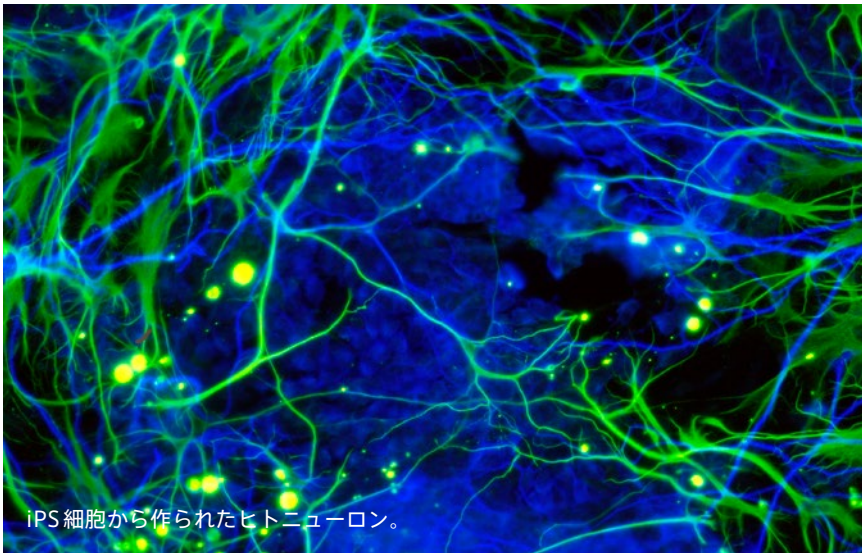
ワラビーの母乳は第2の胎盤

高機能の胎盤を持たないとされる有袋類だが、遺伝子発現解析から、胎盤様の構造と乳がその役割を果たしていることが分かった。



JAPANESE AUTHOR

ゲノム刷込みを維持し高効率にES細胞作製



iPS細胞から作られたヒトニューロン。

iPS細胞でサルの パーキンソン病症状が緩和

iPS細胞から作製したニューロンをパーキンソン病モデルのサルに移植したところ、2年間にわたって症状の改善が観察され、その間、移植ニューロンは有害な作用を引き起こさなかった。

京都大学の幹細胞科学者、高橋^{たかはしじゅん}淳らは、人工多能性（iPS）幹細胞から作製したニューロンをパーキンソン病モデルのサルの脳に移植するという実験的治療で有望な結果を得たことを、2017年8月31日号の*Nature*に報告した¹。彼らは、この治療によってパーキンソン病の症状が改善すること、また、この治療が安全であるらしいことを示している。

移植された細胞が少なくとも2年間、体に有害な影響を及ぼさず脳で生存し続けた、という今回の知見は重要なものであり、幹細胞を使ったパーキンソン病治療の臨床試験（治験）の

実施を計画する研究者たちを大きく後押しすると考えられる。

高橋淳らの研究チームは、2018年末までに、iPS細胞から作製したニューロンを移植する治験を始める計画だという。

現在、世界中で複数の研究チームが、幹細胞を使ったパーキンソン病治療法について異なるアプローチで研究しており、いくつもの治験が近く実施される予定だ。高橋らのこの研究成果は、そうした他の研究チームにも活気を与えるだろう。

*Nature*はこの最新の研究を分析し、これが幹細胞治療の未来にどのような

意味を持つかを検討した。

幹細胞はなぜパーキンソン病の有望な治療法なのか？

パーキンソン病は、中脳の黒質と呼ばれる領域においてドーパミン産生ニューロン（ドーパミンと呼ばれる神経伝達物質を作る）が死ぬことで引き起こされる神経変性疾患である。このニューロンは運動に関わっているので、患者にはこの病気に特徴的な振戦と筋強剛が見られるようになる。現在の治療法はこうした症状に対処するものであり、病気の根本の原因に対する治療法は今のところない。

研究者たちは、パーキンソン病患者の死んでしまったドーパミン産生ニューロンを、多能性幹細胞（体内のあらゆるタイプの細胞を作り出せる）を用いて置換すれば、病気の進行を食い止めたり病気を回復させたりすることができるのではないかと考え、追究してきた。ヒト^{はい}胚から得られた胚性幹（ES）細胞にはこうした能力があるが、人の生命の萌芽である胚を破壊する必要があるので、倫理的な議論の対象となっている。iPS細胞は同様の多能性を持つが、成体の細胞を誘導してES細胞様の状態にしたものであるため、倫理的な懸念はない。

今回の最新の研究で発見されたことは？

高橋らのチームはまず、健常者とパーキンソン病患者の両方から作出したiPS細胞からドーパミン産生ニューロンを作製した。そして、カニクイザルのドーパミン産生ニューロンを毒素によって殺してパーキンソン病状態を誘導した後に、iPS細胞から作製したニューロンを移植した。

その結果、移植されたニューロンは

少なくとも2年間生存し、サルニューロンとの神経回路が形成された。細胞治療を受けたサルがケージの中で頻繁に動くようになるのが観察されたのは、こうした神経回路が形成されたことによる可能性がある。

この研究はなぜ重要なのか？

重要なのは、高橋らのチームの研究では、移植した細胞が腫瘍化したことを示す証拠や、免疫抑制剤によって制御不能な免疫反応が引き起こされた証拠が全く見られなかったことだ。前者は、多能性細胞による治療において、主な懸念事項とされる。

「ヒトに細胞を移植する研究に自信を持って進むためには、事前に調べておかねばならない一連の重要な問題があります。高橋らの研究はそうした問題に取り組んでいるのです」と、 Lund 大学（スウェーデン）の神経科学者 Anders Bjorklund は言う。

治験はいつ始まり、どのように行う予定なのか？

「我々は、2018年末までには治験を始めたいと考えています」と高橋。これは、iPS細胞によるパーキンソン病治療の初めての治験となるだろう。なお、ヒトへのiPS細胞移植が初めて行われたのは2014年で、最初の患者は加齢黄斑変性の70代の日本人女性であった。

iPS細胞は、理論上、自分自身のiPS細胞を用いた移植治療が可能となる。このため、外来組織の移植で懸念される拒絶反応を抑えるための薬は必要ない。

しかし、患者ごとに自己iPS細胞を作るには費用がかかり、また、誘導して培養するには2カ月ほどかかる可能性があるという。高橋は述べる。そこで高橋らはまず、頻度の高いHLA（Human

Leukocyte Antigen；ヒト白血球型抗原）型の健常者の細胞からiPS細胞株を樹立し、治療を行うパーキンソン病患者にHLA型が適合するiPS細胞株を移植する計画を立てている。これならば、費用を抑えつつ、拒絶反応（と、拒絶反応を和らげる薬）を最小限に抑えることが期待できる。

高橋らの研究チームは、2017年8月に *Nature Communications* に掲載された関連論文²で、カニクイザルのiPS細胞から誘導したニューロンを、別の個体に移植している。その結果、HLA型が適合するサル同士のニューロンの移植で引き起こされる免疫拒絶は弱いことが分かった。

幹細胞を用いたパーキンソン病治療として試験中のものには、他にどのようなものがあるのか？

2017年の初めには、中国人研究者たちが別のアプローチによる試験を開始した。この試験では、ES細胞から作製した神経前駆細胞を患者に移植する。脳内で成熟したドーパミン産生ニューロンに分化させることが目的だ。2016年には、オーストラリアの患者が別の試験で、ES細胞由来の神経前駆細胞の移植を受けている。しかし、未成熟の移植細胞は発がん性変異を起こす可能性がある、と懸念を表明した研究者たちもいる。

一方、GForce-PDと呼ばれるパーキンソン病に対する細胞治療コンソーシアムに属する研究者たち（高橋もその一員）も、また別のアプローチを採用した治験の準備を進めている。米国、スウェーデン、および英国のチームが計画している治験は全て、ES細胞から作製したドーパミン産生ニューロンをヒトに移植するというものだ。既に樹立

されたES細胞株には、よく研究されていて大量に培養できるという利点があり、そのため全ての治験参加者が標準化された治療を受けることができると、同じくGForce-PDコンソーシアムのメンバーであるBjorklundは述べる。

スクリプス研究所（米国カリフォルニア州ラホヤ）の幹細胞科学者Jeanne Loringは、患者自身の細胞から作製したiPS細胞由来のニューロンを移植するという方法を支持している。高価ではあるが、このアプローチなら副作用が問題となる免疫抑制薬を使用しないで済むと彼女は言う。そして、iPS細胞は患者一人一人のために新たに樹立するので、移植に用いられる細胞の分裂回数は比較的少なく、発がん性の変異が生じるリスクを最小限にできる。Loringは、自身のチームの治験を2019年には始めたいと考えている。「これは競うべきものではありません。私たちは全ての研究の成功を応援しています」と彼女は言う。

スローン・ケタリング記念がんセンター（米国ニューヨーク州）の幹細胞研究者Lorenz Studerは、ES細胞から作製したニューロンを使用する治験に取り組んでいるが、1回の移植に必要な細胞数など、解決すべき問題がまだあると述べる。しかし彼は、今回の高橋らの研究成果について「前へ進む準備ができた、という証です」と話す。■

（翻訳：古川奈々子）

Reprogrammed cells relieve Parkinson's symptoms in trials

doi: 10.1038/nature.2017.22531

2017.8.30 (Published online)

Ewen Callaway

1. Kikuchi, T. et al. *Nature* **548**, 592–596 (2017).
2. Morizane, A. et al. *Nature Communications* **8**, 385 (2017).

コウモリはガラス張りのビルが「見えない」

ガラス張りのビルのように平滑面で覆われた垂直な建造物は、コウモリの反響定位システムでは「見えない」らしい。

「後ろでゴツンという音がしたんです」と、マックス・プランク鳥類学研究所（ドイツ・ゼーヴィーゼン）の動物学者 Stefan Greif は思い返す。彼はその音を聞いて、研究用の飛行実験室の壁に立てかけてあった金属板にコウモリが衝突したことを知った。その後 Greif の率いるチームは、コウモリが窓ガラスなどの垂直な平滑面によく衝突する理由の説明付けを、*Science* 2017年9月8日号で発表した¹。コウモリの発する超音波は、ガラス板のような平滑面に当たると他の方向に反射してコウモリ自身に戻ってこないため、反響定位がうまく働かないというのだ。

コウモリは暗闇では反響定位を頼りに飛行する。超音波を発生し、その反響音を聴き取って、対象物の位置や性質を捉えているのだ。Greifらは今回、ホオヒゲコウモリ属の一種 (*Myotis myotis*) の野生個体21匹の反響定位の様子を実験室内で調べた。飛行実験室の突き当たりの側壁に、表面が滑らかで平らな金属板を取り付けたところ、コウモリはその金属板を通り抜けた。しかし、その隣のフェルトで覆われた側壁の方は通り抜けたしなかった。各個体につき平均約20回の試行で、21個体のうち19個体が、金属板に1回以上衝突した。研究チームは、野生コウモリのコ



ロニー近くにも表面の平滑な板を垂直に置き、実験室と同様の結果になることを観察した。

コウモリたちの混乱は、平滑面の持つ「音響ミラー (acoustic mirror)」という特性のせいである。対象物にでこぼこがあれば、コウモリの発した超音波の一部はコウモリ自身に跳ね返ってくるが、平滑面の場合は、超音波は全て、コウモリから離れた方向に反射してしまっただけで戻ってこないため、何も無い空間に「見えて」しまう。コウモリが平滑面の方を向き、面に対して垂直に発した超音波が自分に跳ね返ってこない限り、コウモリは自分の思い違いに気付かない。一部のコウモリが板に

衝突する1秒前に危険な航路から逸れようとする理由は、こういう仕組みによって説明できる。ただし、1秒前だと衝突回避に間に合わないことが多い。

目よりも耳

では、コウモリが視覚の面で混乱した可能性はないのだろうか。ブリストル大学（英国）の行動生態学者 Gareth Jones によれば、その可能性は排除できるという。Greifらの実験はコウモリには見えない赤外光の下で行われ、コウモリは反響定位のみを頼りに飛行したと考えられるからだ。今回の結果から、他の動物種が直面している感覚上の問題にヒトがどれほど無頓着かがよく分かると、ライプニッツ動物園・野生動物研究所（ドイツ・ベルリン）でコウモリを研究する Christian Voigt は話す。

Greifは2010年に、水平な平滑面に対するコウモリの反応を調べて報告している²。地面に滑らかな表面の板を置くと、コウモリはそこに降下してきて水を飲む仕草をするのだ。自然界でコウモリが音響ミラーに遭遇するのは、湖や池の水面においてである。コウモリはどうやら、滑らかな平面上を飛んでいて垂直方向に超音波がはね返ってくれば、そこに静かな水面があると解釈するように適応したらしい。

反響定位を惑わせる垂直な構造物が出現したのは、わずか数十年前のことだと Jones は指摘する。今回の実験で使ったコウモリたちは、実験装置のサイズが限られているおかげで飛行速度が制限されて傷を負わなかったが、野生環境のコウモリはもっと速く飛ぶので、人工構造物によって被害を受ける危険性があるだろうと Grief は話す。

ビルがコウモリ個体群に与える被害についてはまだよく分かっていない。

もし、人工構造物が深刻な脅威になると分かった場合には、コウモリの重要なコロニーや主要な異動路の近辺で生じる被害を軽減させるために、例えば、平滑面素材の利用を避けるといったことをGriefらは提案している。より実現可能な解決策として、コウモリの生態に重要な場所に建っているビルの近くに、超音波を発するスピーカー群を設置するのも手だとGrief。「現実的な

対応が必要だと思います」。

(翻訳：船田晶子)

Bats slam into buildings because they can't 'see' them

doi: 10.1038/nature.2017.22583

2017.9.7 (Published online)

Bruno Martin

1. Greif, S., Zsebök, S., Schmieder, D. & Siemers, B. M. *Science* **357**, 1045–1047 (2017).
2. Greif, S. & Siemers, B. M. *Nature Communications* **1**, 107 (2010).

ワラビーの母乳は第2の胎盤

高機能の胎盤を持たないとされてきた有袋類だが、胎盤様の構造と乳がその役割を果たしているようだ。

哺乳類の胎盤は、胎児を保護し養育する器官である。この胎盤に関するこれまでの科学的な常識が今回、ワラビーに蹴散らされてしまったようだ。有袋類のダマヤブワラビー (*Macropus eugenii*) では、従来の見方に反して、母体内に機能を持った胎盤ができ、なおかつ、出産後の母乳に胎盤が通常果たす機能の一部が備わっていることが明らかになったのである¹。

哺乳類の系統分類では、有袋類（カンガルーやワラビー、ウォンバットなど）と有胎盤類（真獣類 [Eutheria]）ともいう。マウスやヒトなどを分けるのが普通である。このように分ける理由の1つは、有袋類に胎盤がないと考えられているためだ。しかし、この分け方は適切でないと考える研究者も

多い。彼らが指摘するのは、有袋類でも妊娠末期に単純だが胎盤様の構造ができることだ。この構造ができて間もなく、新生仔は未熟な状態で産出されて育児嚢の中まではって移動し、そこで乳を飲んで大きくなる。この胎盤様構造は2種類の細胞単層の厚さしかないが、発育を促す酸素や栄養素、分子シグナルを胎児に与えつつ、母体の免疫系から胎児を守っている。

有袋類の「胎盤」の構造が他の哺乳類のものとは違っていても驚くには当たらない。ごく近縁な哺乳類種同士でも、胎盤の形状が大きく違っているが同じ機能を果たしていることがあるからだ。イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校（米国）の進化生物学者Derek Wildmanは、「解剖学や生理学の観点

から言えば、胎盤は哺乳類で最も変化に富む器官なのです」と話す。

母乳がカギ

有袋類の妊娠期間は同サイズの哺乳類と比べて著しく短い。ダマヤブワラビーの成獣は体重6～9 kgだが、妊娠期間はわずか26.5日と、ラットよりわずかに長い程度である。しかし、授乳期間は他の哺乳類よりも長く、約1年にわたる。こうした発育と授乳の仕方から、ワラビーの新生仔発育の大部分は、母乳の特殊な性質によって支えられているのではないかと推定されていた。

今回、スタンフォード大学（米国カリフォルニア州）の進化生物学者Julie Bakerと進化発生生物学者Michael Guernseyらは、出産前の有袋類の胎盤が真獣類の胎盤と同様に機能しているかどうかを見極めるため、ダマヤブワラビーの胎盤で発現する遺伝子群を解析した。それらの発現パターンをマウスおよびヒトのものと比較したところ、ワラビーの仔が生まれる前の数日間の胎盤では、真獣類の妊娠初期の胎盤で発現するのと同じ遺伝子群が発現していた。Bakerらは次に、育児嚢に仔がいる雌ダマヤブワラビーの乳腺で発現している遺伝子を解析した。すると、この腺組織では、真獣類の妊娠後期に胎盤で発現しているのと同じ遺伝子群が発現していることが分かった。

今回の知見は、動物の胎盤が、解剖学的な構造の違いにかかわらず同じ遺伝子群を発現している可能性があることを示唆しているとGuernseyは話す。また、そうした構造の違いが生じたのは、胎盤が他の器官に比べて急速に進化したためかもしれない。

胎盤が胎児を母体の免疫系から効果的に守るには、そうした急速な進化が

必要だったとBakerは考えている。母体の免疫系は、胎児を外からの侵入者だと見なしてしまうからだ。「胎盤は母体からの攻撃を免れようと進化しており、実に奇抜な戦略を編み出しています。その一例が、液状の形態を取るこのワラビーの母乳です」と彼女は話す。

またWildmanによれば、今回の知見から、真獣類の胎盤が進化するより前に「乳の分泌」が進化した可能性が示唆されるという。出現年代が有袋類や真獣類よりも古いカモノハシやハリモグラといった卵生哺乳類が、胎盤を持たないが乳を分泌するという事実も、この可能性を裏付けている。Wildmanは今回のBakerらの論文を賞賛しているが、マウスとヒトの2種だけでなくもっと多くの種で遺伝子発現を比較してもよかったのではないかと指摘する。Wildmanのチームは、主要な真獣類と有袋類の計14種の哺乳類胎盤で発現する遺伝子プロファイル調べ、胎盤の適切な組織化と機能に極めて重要なコア遺伝子群を明らかにした²。

胎盤の発達についてもっと多くのことが明らかになれば、動物の進化だけでなく、ヒトの胎盤の機能を解明する上でも助けになるかもしれないとBakerは話す。胎児に悪影響を及ぼす可能性を考えると、ヒトの胎盤をリアルタイムで調べることは不可能だからだ。■

(翻訳：船田晶子)

Wallaby milk acts as a placenta for babies

doi: 10.1038/nature.2017.22587
2017.9.12 (Published online)
Sara Reardon

1. Guernsey, M. W., Chuong, E. B., Cornelis, G., Renfree, M. B. & Baker, J. C. *eLife* **6**, e27450 (2017).
2. Armstrong, D. L. et al. *Placenta* **57**, 71–78 (2017).

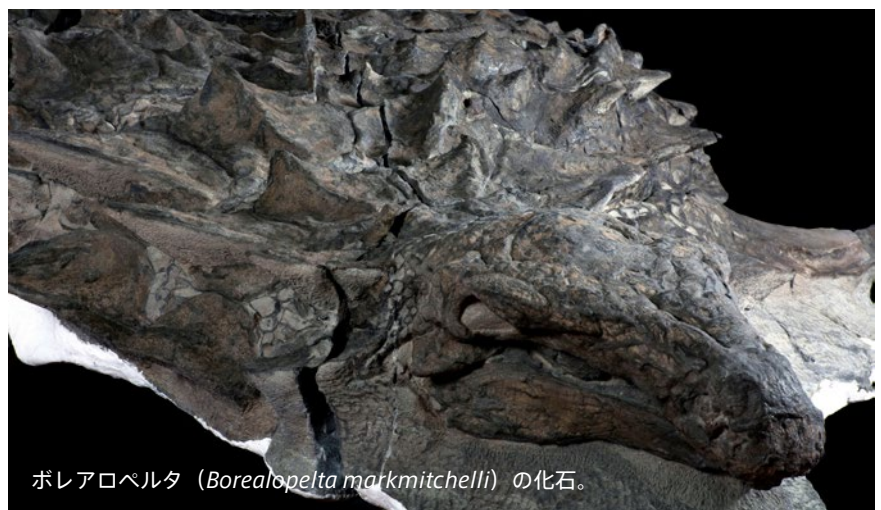
「鎧竜」の鋭い突起はディスプレイ用だった？

保存状態が極めて良好な曲竜の新種の化石について軟組織の詳細な分析が行われ、この恐竜が、派手な棘状の突起を仲間へのディスプレイとして使っていた可能性が示唆された。

ジュラ紀から白亜紀にかけて生息した草食恐竜に、全身が分厚い装甲で覆われた「曲竜類」と呼ばれる一群がいた。鎧を身にまとっているようであることから「鎧竜」とも呼ばれるこの恐竜には、鋭い突起を持つものも多く、こうした構造は、腹をすかせた肉食恐竜の攻撃から身を守るのにつけてあるように見える。ところが、新たに発見された保存状態の極めて良好な曲竜化石の特徴は、そうした棘状の突起が主に配偶相手やライバルに向けたディスプレイに使われていた可能性を示唆していた。

2011年にカナダのアルバータ州で見つかったこの化石は、曲竜類に属するノドサウルス類の新属新種であることが

分かり、ボレアロペルタ (*Borealopelta markmitchelli*) として2017年8月3日付で *Current Biology* に記載された¹。論文の著者である王立ティレル古生物学博物館 (カナダ・ドラムヘラー) の古脊椎動物学者 Caleb Brown によれば、ボレアロペルタの化石に見られる特徴的な突起の構造は、レイヨウなどの現生ウシ科動物の角のものに近いという。これらの動物では、角が防御とディスプレイの両方に使われていることから、彼は「これらの突起は、仲間に誇示するための看板だった可能性があります」と説明する。Brownらはさらに、この化石標本に色素が残されていることを見だし、この恐竜の体色パターンに



ボレアロペルタ (*Borealopelta markmitchelli*) の化石。

ROYAL TYRRELL MUSEUM OF PALAEOLOGY, DRUMHELLER, CANADA

ついても手掛かりを得た。

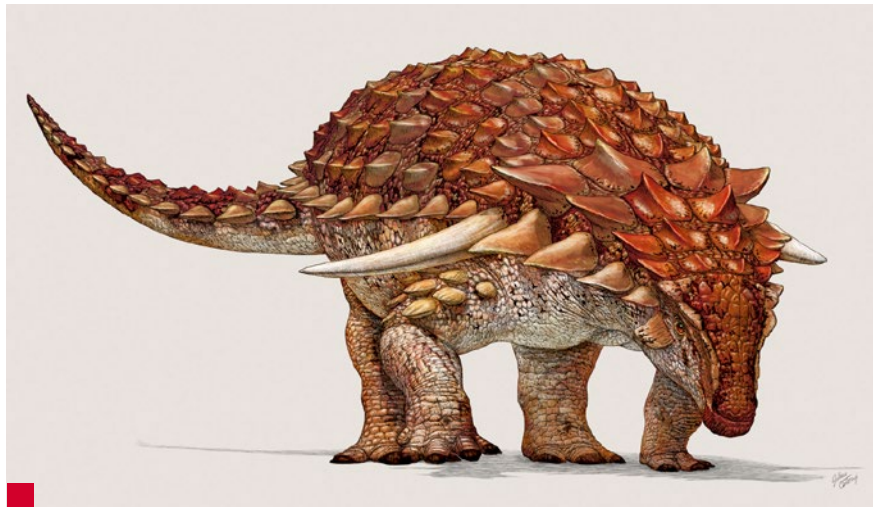
曲竜類の化石はこれまでも数多く見つかったが、生きていたときの突起のサイズに関しては、情報はわずかしが得られていない。というのも曲竜の装甲は、皮骨板とそれを覆うケラチン質の柔軟な組織からなるが、こうした軟組織は化石記録として保存されることが滅多にないからだ。そのため、ケラチン質の覆いの厚さや多様性については長く不確かなままだった。

しかしその状況は、ボレアロペルタの化石が発見されたことで一変する。前期白亜紀（1億1000万年前）に生息していた全長5.5m、体重1300kgと推定されるこの曲竜の標本には、表皮を形作る軟組織が、頭部から尾の付け根に至るまで広範囲にわたり、立体構造を維持したままほぼ完全な状態で保存されていたのである。Brownらが、体の各部位の皮骨とケラチン質の覆いの両方を詳細に調べたところ、胴体や尾の付け根では小さな突起の並んだ皮骨板が薄いケラチン質の鱗で覆われていたのに対し、首から肩にかけてはより大きな突起が分厚いケラチン質の尖った鞘に覆われていた。特に、両肩から横に突き出た牙のような棘状の突起では、その長さの3分の1をケラチン質の鞘が占めていたという。

この恐竜の全身の傾向として、皮骨板の突起が大きいほどケラチン質の鞘は厚く、Brownによると、こうしたパターンは現生のウシ科動物などの角でよく見られるという。現生動物では、こうしたパターンの角は仲間合図を送ったり敵から身を守ったりするのに使われている。

魅せる装甲

ボレアロペルタの最も目立つ装飾である両肩から突き出た大きな突起は、現



ボレアロペルタの想像図。今回の化石標本の軟組織からは色素も検出されており、その分析からは、この恐竜の体色が赤褐色で、「カウンターシェイディング」（背部が暗くて腹部が明るい）と呼ばれる隠蔽色を有していたことが示唆された。一方で、両肩から突き出た大きな棘状の突起は白っぽい色をしていたと考えられ、Brownらは、こうした色のコントラストもディスプレイ説を裏付けていると述べている¹。

生動物の角と同様、体の前方に位置しており、これらがディスプレイ用であったことが窺える。2頭のボレアロペルタが対峙した際には、この大きな棘が互いの目に飛び込んできたことだろう。

得られた一連の情報は、ボレアロペルタの派手な突起の進化が、社会的コミュニケーションの必要性によって駆動されたことを示唆している。現生動物の角さながらに、ボレアロペルタの突起も、ライバルに対する威嚇ディスプレイや潜在的な配偶相手に対する求愛ディスプレイ、もしくはその両方に使われていた可能性がある。

メリーランド大学（米国カレッジパーク）の古脊椎動物学者 Thomas Holtz は、「恐竜の装甲に、損傷を和らげる以上の意味があることを示す好例です」と、Brownらが導き出した結論の合理性にうなづく。

また、ジャクソンビル州立大学（米国アラバマ州）の古脊椎動物学者 Michael Burns も、ボレアロペルタの

標本からは「信じられないほどさまざまなこと」が学べると評価する。彼は、この標本は、装甲のパターン形成や進化の道筋を解明するのに役立つとしても、まだ1個体分のデータしかないため、この曲竜の棘状の突起が配偶行動に役割を持っていたという解釈は推測の域を出ないと話す。

Brownも、自らの考えが決定性に欠けることは認めている。「同じくらい保存状態の良い化石が他に見つければ、今回の結論を裏付けることにつながるでしょう」と彼は語る。「でも、ボレアロペルタに匹敵するほどの化石を見つけられる幸運に恵まれるまでには、長い時間を要する可能性があります」。

（翻訳：小林盛方）

Dinosaurs' spiky armour may have been status symbol

doi: 10.1038/nature.2017.22511
2017.8.26 (Published online)

Traci Watson

1. Brown, C. et al. *Curr. Biol.* **27**, 2514–2521 (2017).

ソーラー推進宇宙船に期待

「ライトセイル2号」が近く打ち上げられる

宇宙にガソリンスタンドはない。米航空宇宙局（NASA）と数社の航空宇宙企業は、手頃な価格の軽い宇宙船を長距離飛行のミッションに送り出すため、太陽光を利用する方法を追求している。可能性としては風の代わりに太陽光を受けて進む反射膜の“帆”や、次世代のソーラー電力推進エンジンなどがある。

民間の支援による「ライトセイル2」というプロジェクトが、今後数カ月内に弁当箱サイズの衛星を軌道に打ち上げ、駐車スペース2台分の大きさのポリエステル樹脂製の帆を展開する予定だ。成功すれば、火星やその先を目指す将来のNASAの宇宙船に採用されるかもしれない。

衛星操作から恒星間飛行まで

ソーラーセイルはSF物語ではない。2010年、日本のイカロス探査機が金星への惑星間ミッションを通じて概念実証に成功した。今回のライトセイル2の実証実験は非営利団体の惑星協会が資金提供している総額545万ドル（約6億円）のプロジェクトであり、支持者たちによると、この技術で地球軌道上のキューブサットという低コスト衛星を、燃料なしで操作できる可能性があるという。ライトセイル2の実績はNASAが2019年に打ち上げる予定の地球近傍天体探査機ニア・スカウト（NEA Scout）に生かされるかもしれない。

「ソーラーセイルが真価を発揮するのは、積載重量が小さく、ミッション期間が長く、必要な推進力が小さくて構わない場合です」とNASAマーシャル宇宙飛行センター（アラバマ州ハンツビル）でニア・スカウト向け技術の代表研究者を務めているLes Johnsonは言う。太陽光の圧力（帆を押す力は1m²当たり0.007g足らず）を受け続けると、小さな探査機は徐々に加速できる。また、帆を傾けると太陽光が反射する角度が変わり、宇宙船を操舵できる。この技術はニア・スカウトが計画している小惑星監視のように、ペイロードが小さく比較的安価で時間がかかりそうなミッションに最適だ。

木星の軌道付近になると届く太陽光が弱くなり、ほとんどのソーラーセイルは推進できなくなる。だが、ワシントンにあるNASAの宇宙技術ミッション部門の主任技師Jeffrey SheehyとJohnsonは、この技術が恒星間ミッションの道を開く可能性があると考えている。強力なレーザーによってセ

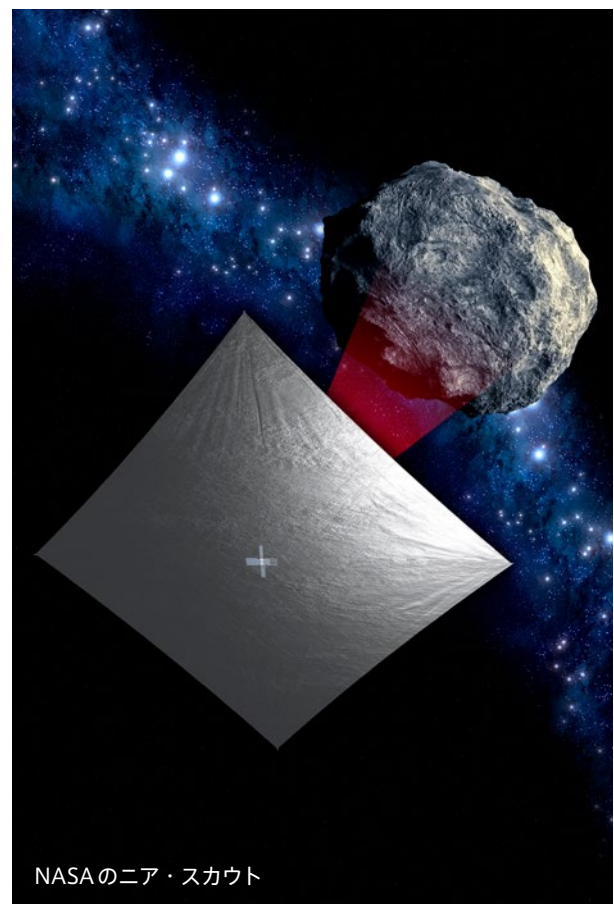
イル付き宇宙船を光速の10分の1に加速するのだ。ブレークスルー・スターショットという民間プロジェクトは、30年以内にそうした宇宙船を地球に最も近い恒星ケンタウルス座α星にフライバイ（接近通過）させたいと考えている。

ソーラー電力利用エンジンを大出力に

太陽光を直接の動力にするのではなく、いったん電力に変えて利用する間接的な方法なら、もっと大型の無人探査機や有人宇宙船を駆動することもできるだろうとSheehyは言う。太陽電池パネルで電力を供給し、ガスを宇宙船の推進力となるプラズマのブルームに変換する高効率の推進エンジンを駆動する。

既にNASAはエアロジェット・ロケットダインやアド・アストラ・ロケット・カンパニーなどの企業を起用してそうしたシステムの出力を高めている。「現在のソーラー発電推進システムは出力わずか数キロワットにすぎませんが、まずは数十キロワットに高め、それを足掛かりに数百キロワットを目指します」とSheehyは話す。

（翻訳協力：鐘田和彦）





タヒチの蚊の掃討作戦

蚊の共生細菌ボルバキアを使う手法で南太平洋諸島から蚊を一掃する試みが進んでいる。

南太平洋の島々は地上の楽園として昔から船乗りや旅行者の憧れの地となっているが、現在、生物学者らがこの地域をさらに魅力的にする試みに取り組んでいる。タヒチにある生物医学研究所が、すぐ近くの小島から蚊をほぼ一掃することに成功したのだ。また、ヒトが恒久的に居住するもっと大きい島から蚊を排除するための準備も進められている。

この取り組みの最終目標は、太平洋で流行しているデング熱やチクングニア熱、ジカ熱といった、蚊が媒介する感染症の伝播経路を断つことだ。研究者らは、蚊の個体数削減は地域の鳥類個体群を助けることにもなると考えている。ハワイ島など他の島々では、蚊が媒

介する鳥マラリアにより鳥類個体群が壊滅する恐れすらある状況だからだ。

蚊がもたらすこうした問題は、南太平洋のソシエテ諸島では10年以内に解決されるかもしれないと、ルイ・マラルデ研究所（タヒチ島パエア）の蚊研究室の昆虫学者でプロジェクトの代表研究者であるHervé Bossinは話す。ソシエテ諸島はフランス領ポリネシアの一部で、タヒチ島やモーレア島、ボラボラ島、フアヒネ島、ライアテア島などを含む。

Bossinのチームは、共生細菌ボルバキア（*Wolbachia*）の特定の系統を蚊に感染させる方法を使って、蚊を減らそうとしている。全世界の昆虫の約65%がボルバキアを保有しているが、その系統はさまざまである。系統の異

なるボルバキアを保有する蚊同士が交配すると、生まれた卵は適切に発生できず、孵化に至らない（ボルバキアによる「細胞質不和合性」を利用した生殖操作の1つ）。こうした「不毛」な配偶の数が十分に多ければ、地域の蚊の個体群は消滅してしまうことになる。

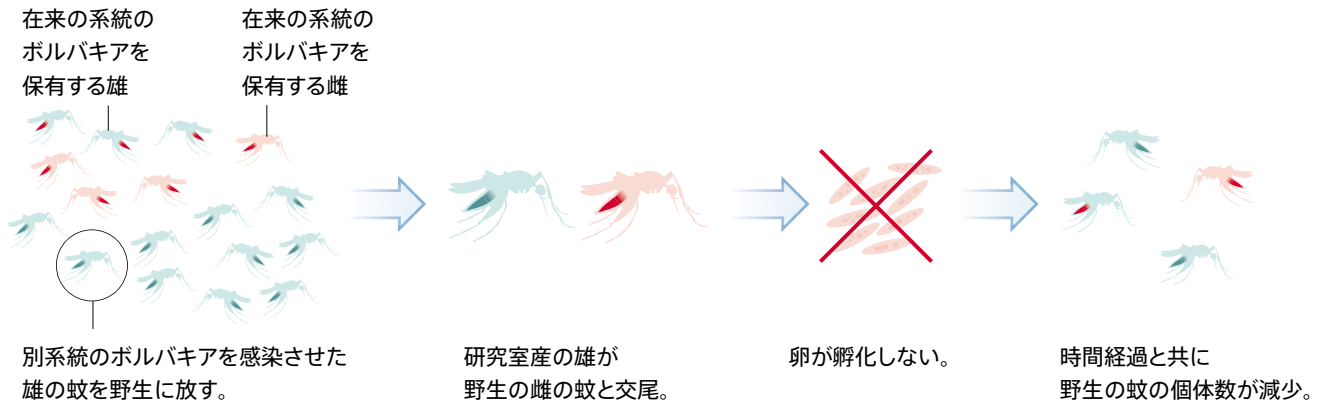
ただし、この手法を用いるためにはまず、雌と雄を選別する必要がある。タヒチ島の東岸にある、ココヤシと芳香を放つ白いティアレの花に囲まれた小さくて小ぎれいな研究所で、上級技師のMichel Cheong Sangはその選別作業をしている。ある角度にセットした2枚のガラス板の間に水を注ぎ、ポリネシアヤブカ（*Aedes polynesiensis*）の幼虫数十匹を流し込むのだ。雌の幼虫は雄より大きいので、途中で板の間に詰まって止まり、雄の幼虫は小さいので、それより少し先まで落ちて、ガラス板の後ろに黒っぽいうごめく帯を形成する。このローテクな手法で、蚊の幼虫の99%以上を正確に雌雄選別できるのだとBossinは説明する。

幼虫には全て、特定系統のボルバキアを感染させる。これは、ポリネシアヤブカに近縁なリバースシマカ（*Aedes reversi*）から採取された系統であり、フランス領ポリネシアには本来存在しないものだ。標的とする地域には雄のみを放ち、野生の雌の蚊と交尾させる。現在この取り組みを行っているのは計5カ所であり、その大半はソシエテ諸島の高級ホテル敷地内にある（「ボルバキア法」参照）。

現在、ボルバキアを利用する手法は島しょ部の蚊を減らすための標準手法となっていると、ミシガン州立大学（米国イーストランシング）の衛生昆虫学者Zhiyong Xiは話す。彼のグループはこの手法を使って、中国広州の居住

ボルバキア法

細菌ボルバキアを使うことで、10年以内に南太平洋の島々から蚊がいなくなるかもしれない。



者のいる2つの小島からヒトスジシマカ (*Aedes albopictus*) をほぼ一掃した。「この手法は今後5年間で大規模に利用されるようになり、10年も経たないうちに、国土の広い熱帯諸国でも蚊がいなくなると私は予測しています」とXiは話す。ブラジルや米国でも同様の試験が行われており、米国の3つの州では野生ヒトスジシマカの個体数は3年間で70%減少した。

ボルバキア法は自然に存在する細菌を利用するため、遺伝子操作した蚊を使う実験的手法に比べると批判の声はさほど強くない。それでもBossinや他の研究者は、ゲノム技術を使う手法の進展に注目している。こうした手法の方が最終的に、ボルバキア法よりも即効性が高く費用も安く済む可能性があるからだ。

Bossinのチームが最初に大規模研究をスタートさせたのは、2015年、環礁州島テティアロア島においてだった。ここは映画スターのマーロン・ブランドがかつて所有していた島で、タヒチ島から飛行機で20分の距離にある。Bossinらのモニタリング調査によれば、

プロジェクト早期の2016年の段階では、1つのトラップで見つかる雌の蚊の数は1日当たり1匹だったが、現在では1週間で約1匹となっている。

テティアロア島のこの予備研究には、フランス領ポリネシアとフランス政府からの資金提供があり、島の小規模なリゾート施設からの「後方支援」もある。また、2017年現在Bossinがその敷地で試験を行っている複数のホテルも、彼の研究に資金を提供している。

限界はない

Bossinらは現在、永続的にヒトが居住する1つの島全体から蚊を一掃するための準備を整えている。彼らは、この計画を実行する島をもうじき公表する予定であり、ボルバキアを感染させた雄の蚊を2年間放飼したいと考えている。すでに、必要な幼虫増産量に対処するための実験施設拡大用の資金も得ている。成功すれば、この島は南太平洋で初めて蚊から解放された島になるだろう。

Bossinは、ボルバキアによる細胞質不和合性を利用したこの手法の規模を

さらに拡大して、太平洋全域の島々から、そしておそらく諸大陸からも刺咬性昆虫を一掃できるのではないかと考えている。「唯一の制限要因は、幼虫生産施設の規模です」と彼は話す。

ピサ大学（イタリア）の昆虫学者Giovanni Benelliは、大陸の蚊の撲滅はそう簡単にはいかないのではないかと見ている。さらに彼は、いかなる場合でも蚊が全く消えてしまう状態は望ましくないと考えており、「蚊の生態学的な役割は今でもまだ重要なのです」と話す。蚊の幼虫は一部の海生動物の餌になっており、また、蚊の成虫は感染症を媒介することで哺乳類や鳥類の個体数を調節するのに役立っているのだとBenelliは説明する。

一方Bossinは、蚊の繁栄は、ヒトが居住する場所でなければ大いに結構なのだが、と言う。

(翻訳：船田晶子)

Mosquitoes meet their match
in Tahiti

Vol. 548 (17-18) | 2017.8.3

Emma Marris

エルニーニョ現象で熱帯の森林が二酸化炭素の放出源に

強いエルニーニョ現象による高温や干ばつで、熱帯の森林が放出する二酸化炭素量が大きく増加していたことが分かった。

2014年夏から2016年春にかけての強いエルニーニョ現象の影響により、ピーク時（2015年5月～2016年4月）の1年間に熱帯の陸地の生物圏（森林など）から放出された二酸化炭素量は、ラニーニャ現象が起きていた2011年と比較して33億トン（炭素換算）増えていたことが、米国の観測衛星の測定と分析で分かった。2015年の1年間でみても2011年に比べて25億トンの増加だった。研究チームは、熱帯地域の生物圏は全体で、2011年は二酸化炭素を吸収していたが、2015年は放出に変わった、とみている。

科学者グループが2016年11月に発表したレポート「地球炭素収支2016¹」によると、化石燃料の燃焼と産業活動

で排出される二酸化炭素は、2006～2015年の平均で年間93億トン（炭素換算）。一方、地球の陸地全体は平均で年間31億トンを吸収している。大気中の二酸化炭素の増加量は平均では年に45億トンだが、2015年は年間63億トンに上昇していた。

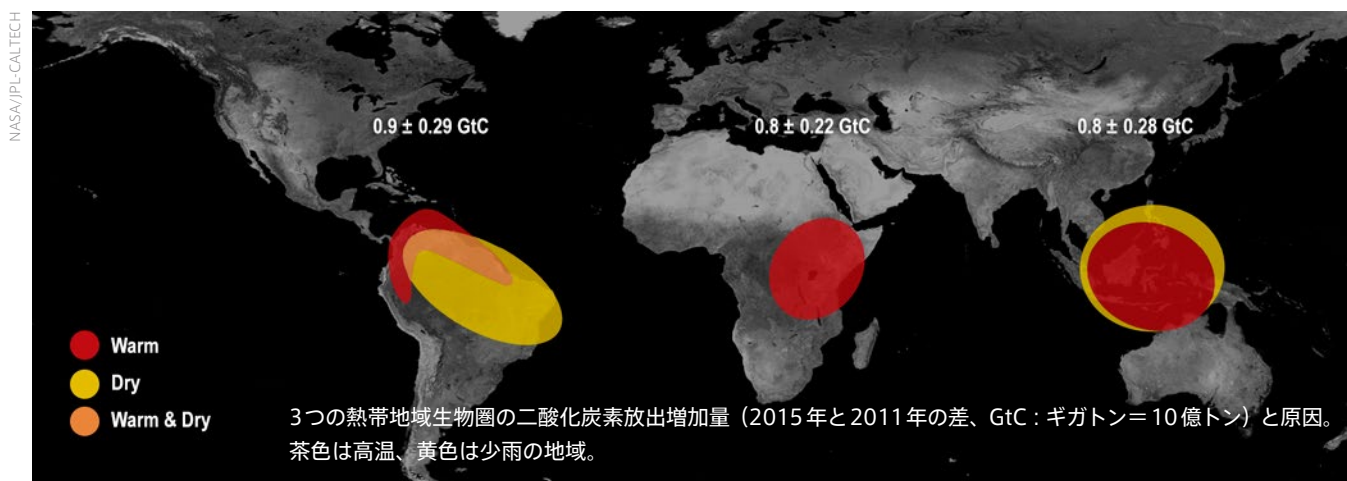
今回の観測結果は、米航空宇宙局（NASA）が2014年7月に打ち上げた観測衛星OCO-2（Orbiting Carbon Observatory-2）で得られたもので、NASAジェット推進研究所（カリフォルニア州パサデナ）の炭素循環・生態系研究者Junjie Liuらが2017年10月13日に*Science*で報告した²。研究チームは、吸収と放出の絶対量は明らかにしていない。

OCO-2は、地表で反射して戻ってくる太陽光を観測し、大気中の二酸化炭素による太陽光の吸収から二酸化炭素量を測定する（*Nature* ダイジェスト 2014年9月号「地球の呼吸を探る、NASAの炭素観測衛星OCO-2」参照）。日本の温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」などの観測結果も分析に使われた。

分析の対象地域はアジア、南米、アフリカの熱帯地域。生物圏は、樹木などの植生、土壌からの寄与、動物など、陸地の全ての生物を含む。分析値は、生物の呼吸、光合成、バイオマスの燃焼（火災）を含んでいる。

分析結果によると、2015年の二酸化炭素放出量は3地域でいずれも同じくらい増加したが、その理由は異なっていた。①東南アジアでは高温と干ばつが相まって野火の発生数が増加し、甚大さも増した。②アマゾンの熱帯雨林では干ばつが植物の成長を妨げ、熱帯雨林が吸収する二酸化炭素量を減らした。③アフリカでは、降水量は通常程度で気温が高かったため、枯れた樹木の分解などによる放出が増えた。

気象庁によると、このエルニーニョ現象期間中の監視海域海面水温は、基準値に対しプラス3度に達し、1949年



以降で3番目の記録だった。現象発生期間も1949年以降で最長だった。

Liuらの論文は「二酸化炭素放出量のエルニーニョ現象への応答は地域によって異なり、考えられていたよりも複雑であることが分かった。また、エルニーニョ現象時の気候は、熱帯地域での高

温や干ばつなど、地球温暖化をもたらす気候に近いとされている。今回の結果は、化石燃料の燃焼で放出される二酸化炭素を熱帯地域の生物圏が吸収する効果は、将来弱まる可能性があることを示している」としている。 ■

(翻訳：新庄直樹)

El Niño drove up carbon emissions

Vol. 548 (269) | 2017.8.17

Gabriel Popkin

1. Le Quéré, C. et al., *Earth Syst. Sci. Data* **8**, 605–649 (2016).
2. Liu, J. et al., *Science* **358**, eaam5690 (2017).

Ia型超新星の発生プロセスは2つ？

宇宙の距離計として使われているIa型超新星について、よく知られた旧来の発生シナリオを裏付ける特徴的な観測結果が初めて得られ、発生プロセスは2つあるという見方が強まっている。

Ia型と呼ばれる超新星は、絶対的な明るさがほぼ一定なので、天文学者たちは「標準光源」として使っている。つまり、Ia型超新星の見かけの明るさから宇宙論的な距離を測定することができ、これを基に宇宙の加速膨張も発見された。しかし、Ia型超新星がどのようにして発生するかについては、現在も議論が続いている。2つのシナリオが有力視されているが、そのうち、伴星から白色矮星^{わいせい}への物質の降着で生じるという旧来のシナリオを裏付ける特徴的な観測結果が今回初めて得られた。もう1つのシナリオを支持する観測結果も多く、発生プロセスは2つあるという見方が強まっている。

今回の研究を行ったのは、カリフォルニア大学サンタバーバラ校(米国)の天文学者Griffin Hosseinzadehらで、

論文は2017年6月27日にarXivプレプリントサーバーに投稿され(arXiv:1706.08990)、*Astrophysical Journal Letters* 2017年8月20日号に掲載された。

Ia型超新星は長く「標準光源」として使われている。遠方のIa型超新星を観測することにより、宇宙の膨張速度は加速していることが1998年に示され、ダークエネルギーが存在する証拠にもなった。この成果は2011年のノーベル物理学賞を受賞した(*Nature* ダイジェスト 2011年12月号「宇宙の加速膨張の発見に物理学賞」参照)。

しかし、Ia型超新星爆発がどのようにして起きるかというシナリオは、まだ明確になっていない。Hosseinzadehは、「科学者たちが、この宇宙論の道具を完全に理解していないという事実は

恥ずかしいことです。20世紀の最大の発見の1つはIa型超新星に基づいているわけですが、私たちはそれが本当は何なのかを知らないのです」と話す。

かつては、Ia型超新星は流れ作業で一律に作られる花火のようなもので、みな同じ仕組みで生じていると考えられていた。しかし、1990年代になってIa型超新星の実際の明るさにはばらつきがあることが分かった。だが、このばらつきは明るさの減衰速度を基にした経験則でよく補正できることが分かり、宇宙の加速膨張の発見につながった。

それでも、「標準光源」が互いにくらか異なっているように見えるという事実は、天文学者たちにとって懸念材料だ。ノートルダム大学(米国インディアナ州)の天文学者Peter Garnavichは、「Ia型超新星の明るさのばらつきを補正できても、ばらつく根本的な理由は分かっていません。宇宙の膨張速度を1%の精度で測定しようと試みる時、こうした差異があると、私たちはIa型超新星を誤って理解しているのではないかと不安になります」と話す。

2つのシナリオ

天文学者たちは、Ia型超新星爆発を起こすのは白色矮星だと確信している。白色矮星は、比較的軽い星が進化の最終段階でたどり着く、地球サイズの小



伴星（右）から物質を吸い上げる白色矮星（左）の想像図。

さな星だ。しかし、何が白色矮星を爆発に至らせるかは、はっきりとは分かっていない。白色矮星は安定していて、自ら爆発することはないからだ。爆発過程をスタートさせるのは伴星だと考えられている。伴星は、太陽に似た星（主系列星）、巨星などの場合の他、もう1つの白色矮星である可能性もある。

Ia型超新星爆発を説明する有力なシナリオは2つあり、伴星のタイプが異なっている。伴星が主系列星や巨星であれば、やがて白色矮星は伴星から物質を徐々に吸い上げるだろう。この結果、白色矮星の質量は徐々に増加し、その重力による収縮、温度・密度の上昇により、ある限界質量で熱核融合反応の暴走が始まる。一方、伴星も白色矮星だったら、2つの白色矮星の連星は、重力波を放出しつつ、らせん状の軌道を描きながら互いに近づき、合体して限界質量を超え、熱核融合反応で爆発するだろう。この場合、超新星の明るさはいくらかばらつく可能性がある。

研究者たちは、この2つのシナリオのどちらが正しいかを知るため、生まれたばかりの超新星を探している。その理由の1つは、前者のシナリオで生じた超新星は、爆発後間もなくにはっ

きりした証拠を示すはずだからだ。爆発で外側へ放出される物質が、まだ損なわれていない伴星にぶつかって明るく輝くはずなのだ。一方、白色矮星同士のコ合体によって生じた超新星では、2つの白色矮星は完全に破壊されてしまうだろう。

天文学者たちが近年見いだした証拠は、2番目のシナリオを支持するものが多かった。Hossein-zadehらの研究チームは今回初めて、伴星からの物質を吸い上げた白色矮星が爆発した結果、その放出物が伴星に衝突したとみられる明瞭な観測結果を得た。

グローバル望遠鏡ネットワーク

今回の発見の最初の兆候が見つかったのは2017年3月10日だった。アリゾナ大学（米国トゥーソン）の天文学者で、今回の論文の共著者であるDavid Sandはこの日、1つの超新星が、地球から1690万パーセク（5500万光年）離れた渦巻銀河NGC 5643の周辺部に現れたことに気付いた。彼は、毎晩約500個の銀河を走査する超新星観測プロジェクト「DLT40超新星サーベイ」のデータを調べていて、この超新星を発見した。

Sandは、彼が見つけたものが星の爆発であり、未知の小惑星ではないことを確かめるため、急いで画像をもう1枚撮影した。彼は数分以内に、ラス・クンプレス天文台グローバル望遠鏡ネットワークに警報を出すべき事態であることを悟った。同ネットワークは、世界の8カ所にある18基の望遠鏡で作る観測ネットワークで、天体を24時間連続して観測することができる。

今回の超新星は、超新星爆発の始まりから1日以内、おそらく、数時間で発見されたとみられるという。Hossein-zadehとSandらは、最初の5日間は約6時間ごとに、その後も爆発の40日後まで毎晩1回、この超新星を観測し、光度の変化を調べた。その結果、爆発から約5日の間に、紫外光の明るさの一時的な上昇が起こっていたことが分かった。超新星から放出された物質が伴星（太陽の約20倍の直径の準巨星と推定される）にぶつかって光を放ったためとみられる。

「これは、標準的なIa型超新星における伴星への衝突現象の、これまでで最も良い証拠です」とGarnavichは話す。Sandはアリゾナ大学の取材に対し、「おそらく、Ia型超新星の発生プロセスには2種類あるのでしょうか。今後の研究の目標は、どちらがよりありふれているかを見いだすことです」と話している。

Hossein-zadehは、「私たちは、使い方を知っているが、働く仕組みを知らない道具を持っているようなものです。使っている道具の物理的な仕組みを理解することは、やみくもに使っているだけよりもずっと良いはずですよ」と話す。■

（翻訳：新庄直樹）

Supernova origins probed

Vol. 548 (380–381) | 2017.8.24

Shannon Hall

乱流の謎が明らかに

乱流の物理学は、未解決の難題として知られる。このほど、流体の中に生じる大小の渦がエネルギーを受け渡して散逸させる過程がシミュレーションによって再現された。

「神様に会ったら聞きたいことが2つある。1つは、相対性理論が成り立つのはなぜかということ、もう1つは、なぜ乱流をお作りになったのかということだ。第1の問いには必ず答えがあるはずだ」

真偽のほどは疑わしいが物理学者ヴェルナー・ハイゼンベルク (Werner Heisenberg) のものとされているこの言葉は、多くの科学者が乱流についてどんな感情を持っているかをよく物語っている。川の水が岩の周りを流れるときやコーヒーに入れたミルクが混ざっていくときなど、流体 (液体または気体) の整然とした流れが崩れて予測不能に見える渦になる現象を乱流という。

とはいえ研究者たちも手をこまぬいているわけではなく、乱流の物理学の理解は着実に深まっている。スペインの航空工学者チームが乱流のカスケードモデルを *Science* 8月25日号に発表したのだ¹。これは、乱流におけるエネルギーの移動をめぐる長年の謎を解く助けになると考えられる。またこの1年ほどの間に、乱流が流体のエネルギーの散逸を促し、その運動を止める仕組みの解明に関して、数学者たちが大きな成果を上げている。

乱流についての理解が進み、乱流とエネルギー輸送との関係がもっと明らかになれば、銀河団のガス流のモデル化に取り組む天体物理学者から海流に



乱流 (写真は煙) はモデル化が困難なことで知られる。

よる熱輸送のシミュレーションを行う気候学者まで、科学者たちは大きな報酬を手にすることができる。

スケールの問題

流体の物理学は、理論的には、200年近く前に導かれたナビエ-ストークス方程式でうまく記述することができるが、この方程式を解くのは非常に難しい。だから技術者も科学者も、流体の流れを予想するときには、単純化した理論モデルを作るか、数値シミュレーションを行うのが普通である。けれどもこのアプローチには限界がある。乱

流のモデル化はスーパーコンピューターにもお手上げなのだ。このほど、マドリード工科大学 (スペイン) の航空工学者 José Cardesa らは、乱流がスケールの大きい渦から小さい渦へと運動エネルギーを拡散させていく様子を初めて完全にシミュレーションすることができたと報告した。例えば、大きいタンク内の水流のコンピューター・シミュレーションでは、直径1mの1個の大きな渦が、1分ほどの間に直径12cmの複数の渦へとエネルギーを輸送する過程を追跡することができた。

シミュレーションの結果は、ロシアの数理論物理学者アンドレイ・コロモゴロフ (Andrei Kolmogorov) が1940年代初頭に定式化した理論の正しさを証明している。この理論からの帰結の1つは、乱流はカスケード的に生じるといふことだ。つまり、大きな渦が分裂して小さい渦ができ、それが分裂してさらに小さい渦ができるというフラクタル的なパターンになるというのである。このモデルでは、リレーの走者がバトンを受け渡していくように運動エネルギーの輸送が起こる、と Cardesa は言う。普通のリレーと違っているのは、走者がどんどん小さくなり、人数が増えていくことだ。

コロモゴロフの描像では、エネルギーは大きい渦からすぐ近くの小さい渦へと拡散し、遠距離には拡散しない。ジョンズホプキンス大学 (米国メリーランド州ボルティモア) の理論物理学者 Gregory Eyink は、このことは数学的定理からある程度支持されていたが、Cardesa のチームによって確証が与えられたと言う。Cardesa は、こうした動力学の理解は、空力抵抗などの現象におけるエネルギー流の予測の向上につながるはずだと期待する。

ラルス・オンサーガー：隠れた天才

理論物理学者で化学者のラルス・オンサーガー（1903～1976）は、リチャード・ファインマン（Richard Feynman）のような天才でさえ話しかけるのをためらうような科学者だったといわれている。理論物理学者Gregory Eyinkによると、このノルウェー生まれの博識家は、「小さな声で、簡潔な言葉で、格言でも唱えるように研究成果を報告」したという。「彼は常に正しかったのです」。

オンサーガーは1949年に、こうした手短な報告の1つとして、流体に粘性がなくても乱流はエネルギーを散逸させるという驚くべきアイデアを発表した。このアイデアは現在、数学的に証明されている。

オンサーガーによる発表から長い時間が経過してから、ようやくその意味が理解されることもあった。1990年代にEyinkはエネルギーの散逸に関するオンサーガーの議論の立証に向けて初めて大きな一歩を踏み出したが、後に、オンサーガー自身が証明に着手していたことを知った。証明は、未発表のノートの中に、暗号を使って書かれていた。オンサーガーが乱流に関するこれらの研究成果を発表しようとしなかったのは、1968年に彼にノーベル化学賞をもたらすことになる研究をはじめ、他の研究で忙しかったこともあったが、研究者仲間が当初、彼のアイデアを冷たくあしらっていたことも無関係ではなかった⁴。

1940年代に米国を代表する乱流の専門家とされていた

ハンガリー生まれの航空工学者セオドア・フォン・カルマン（Theodore von Kármán）は、オンサーガーがよした手紙について同僚に打ち明け、「彼の手紙には突拍子もないことが書かれていた。彼が何か意味のあることを言っているのだとしたら、私に簡単に教えてくれないだろうか」と頼んだことがある。ノーベル化学賞を受賞したライナス・ポーリング（Linus Pauling）も、オンサーガーからの手紙に対して、「あなたの研究は非常に興味深いと思いますが、私の理解を超えているようです」と返事をしている。

ノルウェーのトロンハイム大学にはオンサーガーのノートや手紙が保管されていて、Eyinkらの尽力により、そのうちの約10%がデジタル化され、誰でもネット上で読めるようになっている。Eyinkは、他の研究者がこれらの資料を検討すれば、流体力学だけでなく、熱力学や物性物理学など、オンサーガーが取り組んだ他の多くの分野についても洞察が得られるだろうと言う。

20世紀の数学者シュリニヴァーサ・ラマヌジャン（Srinivasa Ramanujan, 1887～1920）が残した神託のような研究ノートについて、実際にこのようなことが起きている。彼がノートに走り書きをただけで発表することはなかった謎めいた方程式から、この10年間に、新たな成果がいくつか導かれているのだ。

（オンライン掲載記事 [nature.2017.22474](https://www.nature.com/news/2017/22474) より）

乱流カスケード

流体は、たとえ低粘性流体（大気中の気体など、動いている層の間で抵抗がほとんどない流体）であっても、乱流が生じると運動エネルギーを速やかに熱に変えて減速していくが、研究者たちは、その仕組みも「乱流カスケード」で説明できると考えている。乱流はエネルギーを小さい渦へ、より小さい渦へと拡散させてゆくが、スケールが小さくなると局所粘性が高くなる。この粘性が固体間の摩擦のように流体の層の間の抵抗を大きくすることにより、

運動エネルギーを熱として散逸させる。

数学者たちは低粘性流体を極限のところで探っている。物理学者で、化学者で、数学者でもあったラルス・オンサーガー（Lars Onsager, コラム参照）は1949年に、理論的には、流体の粘性が非常に小さくなっても、それどころか（現実世界ではあり得ないが）ゼロになったとしても、エネルギーを散逸させることができると示唆した。この仮説的なシナリオでは、流体の運動は分散を続けて極小の渦となり、やがて消えてゆく。テキサス大学オースティン校（米

国）の数学者Philip Isettは「ある意味、衝撃的なアイデアでした」と言う。

オンサーガーは、乱流は特定の条件下でのみ非粘性流体を減速させることができ、それ以外の条件では、多くの人が考えるように非粘性流体は永遠に流れ続けるだろうと予想した。Eyinkは1990年代に、オンサーガーの予想の正しさを数学的に証明した。また、Isettは2016年にプレプリントサーバー上で、ある種の非粘性流体が乱流のみによって実際に減速し、静止することを示すナビエ-ストークス方程式の解

を発表した²。彼の論文は*Annals of Mathematics*に掲載される予定である。

これらの解が記述する流体の運動は、静止していた流体が魔法をかけられたように動き始めて、やがて静止するというものであり、あまり現実的ではない。Isettのこの研究はチューリヒ大学のCamillo De Lellisやライプチヒ大学(ドイツ)のLászló Székelyhidiらの数学者の研究を基礎にしていた。De LellisやSzékelyhidiらは2017年に、同じ方程式に対するもう少し現実的な解を発見し、最初から動いていた流体が減速される過程を記述している³。

数学者の研究が現実世界に当てはめられるようになって初めて、物理学者は彼らの最新の研究成果に注意を払うようになると、Székelyhidiは言う。最初は粘性があるが、徐々に薄くなり、ついには無限に薄くなるような流体を記述する解の発見が、その始まりになるのかもしれない。けれどもミシガン大学アナーバー校(米国)の数理論理学者Charles Doeringは、このアプローチが、最終的には、ナビエ-ストークス方程式よりも使いやすく、どんな状況にも当てはまるような乱流モデルへの道を示してくれるかもしれないと期待する。それは「壮大な夢です」と彼は言う。

(翻訳：三枝小夜子)

On the trail of turbulence

Vol. 548 (382-383) | 2017.8.24

Daive Castelvecchi

1. Cardesa, J. I., Vela-Martín, A. & Jiménez, J. *Science* **357**, 782-784 (2017).
2. Isett, P. Preprint at <https://arxiv.org/abs/1608.08301> (2016).
3. Buckmaster, T., de Lellis, C., Székelyhidi, L. Jr & Vicoli, V. Preprint at <https://arxiv.org/abs/1701.08678> (2017).
4. Eyink, G. L. & Sreenivasan, K. R. *Rev. Mod. Phys.* **78**, 87 (2006).

宇宙の物質分布の「むら」は意外に小さかった

暗黒エネルギーサーベイの観測結果に基づく地図が報告された。予想外の結果だが、宇宙論の標準モデルと矛盾するほどではなかった。

宇宙の構造を表す、これまでで最大の地図が作られた。宇宙の物質分布の「むら」は、これまで考えられていたほど大きくないらしいことが明らかになった。

この地図は、暗黒エネルギーサーベイ(Dark Energy Survey: DES)という国際共同研究プロジェクトの一環として作成されたもので、質量が光を曲げる「弱い重力レンズ効果」の測定などによって調べられた宇宙の物質分布を表している(*Nature* ダイジェスト 2012年12月号「重力レンズでダークエネルギーに迫る」参照)。これまで、宇宙の進化のカギとなる物質分布の見積もりには、ビッグバンの名残である宇宙マイクロ波背景放射(cosmic microwave background: CMB)の測定データに基づく地図が用いられ、これが宇宙論の基準になっていた(*Nature* ダイジェスト 2013年6月号「初期宇宙の最も高精度な『地図』」参照)。弱い重力レンズ効果の測定によりCMBの地図に近い精度のデータが大量に得られたのは、今回が初めてだ。DESチームを率いるフェルミ国立加速器研究所(米国イリノイ州バタビア)の宇宙論研究者Joshua Friemanは、「ようやく、他のプロジェクトと肩を並べられるようになりました。私たちも、宇宙論に束縛条件を与えられるような成果を上げることができたのです」と言う。

質量分布のむらなどの測定結果については、過去の観測といくらか食い違いがあるものの、実験の誤差の範囲内である。弱い重力レンズ効果研究の先駆者であるカリフォルニア大学デービス校(米国)の宇宙論研究者Anthony Tysonは、今後、DESの地図の範囲がさらに広がれば、この食い違いが現実のものかどうか明らかになるはずだと指摘する。「彼らは非常に慎重で、控えめに解釈していると思います」。

400人以上の研究者が参加するDESは、セロ・トロロ汎米天文台(チリ)の4mビクター・M・ブランコ望遠鏡を使って、2013年からデータを収集している。現在の地図は測定を始めた年のデータに基づくもので、南天の2600万個の銀河の位置と見かけの形を示している。

アルベルト・アインシュタイン(Albert Einstein)の一般相対性理論によれば、質量は空間をゆがませる。地球から他の銀河を見たときに、その手前に大きな質量があれば、空間のゆがみによって銀河から来る光が曲がり、銀河はわずかにつぶれて見える。銀河の手前にある質量が通常の物質であっても、目に見えない暗黒物質(ダークマター)であっても、効果は同じだ。もちろん、実際につぶれた形をしている銀河もあるし、向きによってつぶれて見えるだけの

銀河もある。けれども空の特定の領域にある多くの銀河が、平均して同じ方向にゆがんで見えているなら、原因はおそらく重力レンズだ。

DESの宇宙論研究者たちは、代々のCMB観測プロジェクト（最新の観測は欧州宇宙機関（ESA）のプランク衛星を使って行われた）と同様の方法を用いて宇宙の組成を明らかにすることができた。DESチームによる観測結果は、通常物質が宇宙の全物質のたった4%しか占めていないことを示していたが、これはプランク衛星の観測に基づく見積もりと同じだった。しかし、DESチームの見積もりでは暗黒物質の割合は26%で、プランク衛星チームの29%という見積もりよりもわずかに少なく、残りは宇宙の膨張を加速させる「暗黒エネルギー」ということになる。

さらに興味深いことに、DESが観測した今日の物質分布と、プランク衛星によるCMBの観測結果から予想される物質分布との間には食い違いがあるようだ。今から140億年前の宇宙が誕生したばかりの頃には、通常物質と暗黒物質は一樣に分布していたが、今日の銀河の分布は一樣ではない。重力が物質を集合させて銀河団や銀河フィ

ラメントからなる網目状の構造を形成させ、網目の間には巨大なポイド（空洞）が広がっている。DESが測定した物質分布のむらは、宇宙論の標準モデルに基づく予想より7%小さかった。

ギャップへの関心

両者の食い違いは統計的に大きいものではなく、1標準偏差（ 1σ ；約68%）内に収まっている。けれども、DESとは別の重力レンズ観測プロジェクトであるキロ・ディグリー・サーベイ（KiDS）も2016年に、同様の食い違いを発見している（H. Hildebrandt *et al. Mon. Not. R. Astron. Soc.* <https://doi.org/10.1093/mnras/stw2805>; 2016）。

この食い違いの存在が裏付けられれば、宇宙の歴史の中で、質量分布のむらは宇宙論モデルによる予想よりゆっくり形成されていることになる。その場合、暗黒物質と暗黒エネルギーあるいは新しいタイプのニュートリノの間の予想外の相互作用など、新しい物理学が見えてくる可能性がある。2017年8月3日、DESチームはフェルミ国立加速器研究所で開かれた米国物理学会の会合で研究成果を発表し、一度に10編の論文をネット上に投稿した（go.

nature.com/2ubhr8l）。

この数十年の宇宙論的観測の結果は、矛盾のない詳細な描像に向かって収束しつつあるが、弱い重力レンズ効果の観測の他にも研究者の頭痛の種になっている観測がある。例えば、宇宙はプランク衛星の観測データに基づく予想よりも速く膨張していることが明らかになっている。ケンブリッジ大学カブリ宇宙論研究所（英国）の所長で、プランク衛星チームとDESチームの両方に参加しているGeorge Efstathiouは、宇宙の物質分布のむらに関する食い違いは、宇宙の膨張に関する食い違いよりも気掛かりな存在になり得ると言う。

とはいえ、研究者たちは基本的に、新しい道具によって宇宙をますます詳細に探れるようになったことを喜んでいる。シカゴ大学（米国イリノイ州）の天文学者Wendy Freedmanは、「こうした測定は、宇宙論モデルを確かめるための素晴らしい試験になっていると思います。今後、その精度と正確さはますます向上していくことでしょう」と語る。

DESの最後の観測は2018年に終了する予定で、全天の8分の1をカバーすることになる。その結果は2020年中に出るはずだとFriemanは言う。DESの最終的な目標は、十分に広い領域の地図を作成して、宇宙の最近の歴史の間に暗黒エネルギーの影響がどのように現れてきたを明らかにすることにある。「考えただけでワクワクします」とTysonは言う。「弱い重力レンズ効果の未来は明るいと思います」。

（翻訳：三枝小夜子）

Cosmic map reveals a not-so-lumpy Universe

Vol. 548 (143-144) | 2017.8.10

Davide Castelvecchi

DARK ENERGY SURVEY



暗黒エネルギーサーベイ（DES）のカメラが撮影した、地球から約6500万光年^{かなた}の彼方にあるNGC 1398銀河。DESは、この銀河をはじめとする2600万個の銀河の位置と形の地図を作った。

統計学の大物学者が P値の刷新を提案

新発見の統計的有意性を評価するために、科学者が好んで用いるP値の閾値は0.05から0.005に引き下げるべきであると、統計学の大家たちは主張する。

今日の科学は「再現性の危機」に苦しんでいて、研究者も助成機関も出版社も、学術文献は信頼できない結果にまみれているのではないかと不安を募らせている。このほど72人の著名な研究者が、新たな発見をしたと主張する際の証拠の統計的基準の低さが再現性の危機の一因になっているとする論文を発表した。

多くの研究分野では、発見の有意性はP値によって判断される。P値は、帰無仮説（一般に、検定される効果が存在しないと仮定する）が成立する確率で、仮説の検定を行う際に、仮説を棄却するために用いられる「有意水準」である。一連の結果について、P値が小さいほど、そのような結果が偶然に生じた可能性は小さくなる。P値が0.05を下回ると、結果は「統計的に有意」と見なされる。

けれども多くの科学者は、P値の閾値を0.05とする論文で、多くの偽陽性が生じていることを問題視している。この問題を悪化させているのが、研究者が検定を行う仮説を立てることなくデータを収集し、結果が出てから「統計的に有意である」と報告できるようなパターンを探す「P値ハッキング（P hacking）」と呼ばれる行為だ。

2017年7月22日、「社会科学と生物医学ではP値の閾値は0.005にするべきだ」と提案するセンセーショナルな論文のプレプリントが、心理学分野のプレプリントサーバーPsyArXivに投稿され¹、9月1日に最終版が*Nature Human Behaviour*で発表された²。

論文の責任著者の1人である南カリフォルニア大学（米国ロサンゼルス）の経済学者Daniel Benjaminは、「研究者は、P値を0.05とするときに、それがどれほど弱い証拠であるかが分かっていないのです」と言う。彼は、P値が0.05～0.005のときの主張は、確固たる知識ではなく、単なる「示唆的な証拠」として扱うべきだと考えている。

この論文の共著者には、再現性の大家が2人含まれている。1人は科学研究の信頼性に関する研究で知られるスタンフォード大学（米国カリフォルニア州）のJohn Ioannidisで、もう1人はオープンサイエンス・センター（米国バージニア州シャーロッツビル）の所長であるBrian Nosekだ。

サンプルサイズを大きくする

計量心理学と統計学の研究者であるフローニンゲン大学（オランダ）のCasper Albersは、P値の閾値を小さくすること

の問題の1つは偽陰性率が高くなることだと指摘する。偽陰性とは、実際にはその効果が存在しているのに、存在しないと判断してしまうことだ。Benjaminらは、研究者がサンプルサイズを70%大きくすれば、この問題は生じないと提案する。サンプルサイズをここまで大きくすれば、偽陰性率を上げることなく偽陽性率を劇的に下げられるという。これに対してAlbersは、研究資金がよほど潤沢にある科学者でないと、そんなやり方はできないだろうと考えている。

イリノイ工科大学（米国シカゴ）のコンピューター科学者Shlomo Argamonは、問題の解決は容易ではないと言う。「どの信頼度を選ぶにしろ、実験を設計する方法がいろいろあれば、1つくらいは偶然に『統計的に有意』な結果が出るような方法があると思われるからです」。彼は、新しい方法論的基準や研究インセンティブなどの抜本的な変化が必要であると主張する。

レディング大学（英国）の認知神経科学者Tom Johnstoneは、P値を小さくすると、ネガティブな結果が出た研究は出版されないという「お蔵入り問題（file-drawer problem）」も悪化するのではないかと心配している。この点についてBenjaminは、P値にかかわらず、全ての研究が出版されなければならないと述べる。

動くゴール

P値の取り締まりに乗り出した科学分野もある。2015年には、心理学の学術誌*Basic and Applied Social Psychology* (BASP) が、P値の使用を禁止している。また、今回の論文の責任著者の1人であるテキサスA&M大学（米国カレッジステーション）の統計学者Valen Johnsonによると、原子の衝突実験から大量の

データを収集する素粒子物理学者たちは、ずっと前から、*P*値を甘くすると間違っただ主張につながる恐れがあるとして、*P*値を0.0000003 (3×10^{-7}) 未満にすることを要求しているという。遺伝学者たちも10年以上前に、同じような経緯から、ゲノムワイド関連解析 (GWAS；ヒトDNA中の数十万カ所の一塩基多型の遺伝子型を比較して、疾患がある人とない人の違いを調べる手法) については、*P*値の閾値を 5×10^{-8} としている。

*P*値の使用をやめて、ベイズ統計などの、より洗練された統計ツールを用いる科学者もいる。ベイズ統計による仮説検定では、研究者は対立する2つの仮説を定義して検定を行う必要がある。しかしJohnsonは、全ての研究者がベイズ統計を行うのに必要な専門知識を持っているわけではないと言い、ある仮説が証拠によって支持されるかどうかを評価するのに*P*値はまだ役に立つと考えている。「*P*値自体は、必ずしも悪いものではないのです」。

(翻訳：三枝小夜子)

訳注：9月18日、アイントホーエン工科大学（オランダ）の実験心理学者Daniel Lakensをはじめとする88人の科学者がPsyArXivに論文を投稿し（<https://psyarxiv.com/9s3y6>）、再現性をめぐる問題は*P*値を一律に0.005にすれば解決するというものではなく、科学者は実験を設計する際に*P*値の閾値を選択し、選択の理由を十分に説明するべきだと反論した。

Big names in statistics want to shake up much-maligned *P* value

Vol. 548 (16-17) | 2017.8.3

Dalmeet Singh Chawla

1. Benjamin, D. *et al.* <http://osf.io/preprints/psyarxiv/mky9j> (2017).
2. Benjamin, D. J. *et al.* *Nature Human Behaviour* <http://dx.doi.org/10.1038/s41562-017-0189-z> (2017).

生態学者らが 大規模な再現研究を実施

野外研究の信頼性向上への筋道をつけるため、欧州の複数研究室が「研究の再現性」を確かめる実験を行った。

欧州各地14の生態学研究室が手を組み、同一の土壌と種子を使って草本の生育を観察するという、異例の「再現性を確認する」研究が行われた。生態学研究の信頼性向上を目的として開始された活動の一環であるこの研究の成果は、2017年8月8日にプレプリントサーバーbioRxivで公開された (A. Milcu *et al.*; Preprint at bioRxiv <http://dx.doi.org/10.1101/080119>; 2017)。

近年科学界では「再現性の危機」 (*Nature* ダイジェスト 2016年8月号 [『再現性の危機』はあるか?] 参照) が認識されつつあり、心理学と生物医学の分野では特に、この問題の改善を目指した議論が盛んに行われている。この流れを受け、生態学者らも自らの領域の研究結果の信頼性に疑念を受ける恐れを認識し始めている。そうした学者の1人であるフロリダ大学 (米国ゲインズビル) の植物生態学者Emilio Brunaは、2017年5月、一度も反復されたことがない「重大な熱帯生物学実験10件の再現実験を行わないか」という提案を各方面へ行った。

しかし、Brunaによれば、野外実験の反復には懐疑的な生態学者が多く、生態学的野外研究では決して同じ結果を得ることができないという主張もあるという。例えば、パナマの森林で行

われた研究の結果は、コスタリカでは再現できないかもしれない。たとえ樹木が同じ種であったとしても、他の環境要因、例えば周囲の草食動物は異なる可能性があるからだ。

「『全ての研究はひとひらの雪だ。あなたが私の研究を再現しようとして結果が同じにならないければ、それは条件が違うせいであって、再現性の検証には意味がないのだ』と言う人々がいるのです」。こう話すTim Parkerは、ホイットマンカレッジ (米国ワシントン州ワラワラ) の生態学者で、大学生が将来再現研究に参加できるようになることを目指した授業科目群に携わっている。

フランス政府の基礎研究機関CNRSが運営する人工生態系エコトロン (モンフェリエシュルレ) で今回の草本栽培研究を主導した生態学者Alexandru Milcuによれば、そういった反論は、実験室で行われる単純化されたモデル生態系実験の再現性にも当てはまるといふ。「試料など、実験に関わる全てのものの標準化に取り組むことは可能ですが、実験に影響を与える変数を全て考慮に入れることはできません。研究者自身、気付いてすらいなものもあるからです」とMilcuは話す。

そこでMilcuは、少なくとも実験室での研究に関しては、実験に多様性を



MONTY RAKUSEN/CULTURA/GETTY

再現実験を行うため、複数の研究室がイネ科のモデル植物ミナトカモジグサ (*Brachypodium distachyon*) をさまざまな環境下で育生した。

組み込むことにより結論の確かさを増すことを提案している。このアイデアは、2010年に行われたマウス研究にヒントを得ている。マウスの年齢やケージの数などの要因を意図的に変化させると、行動試験でおかしな結果が出るのが少なくなることを発見した研究だ (S. H. Richter *et al. Nature Meth.* 7, 167-168; 2010)。

Milcuらは、イネ科草本がマメ科植物(大気から窒素を取り込んで土壌を肥やす)と組み合わせられた場合によく生育するという原理を検討した。これは広く支持された理論であり、クローバーなどのマメ科植物を利用した輪作の根拠となっている。あるセットの実験では、14の研究室ができる限り全ての変数を制御し、別のセットでは、意図的にさまざまな土壌条件で系統が混ざっ

た草本を播種した。まだ査読は行われていないものの、この研究によって、イネ科草本とマメ科植物を一緒に栽培することで得られる利益について、管理強度が低い実験では各研究室の結論が同様の結論に達しやすいことが分かった。Milcuによれば、各研究室のデータのノイズを増やすことで、多くの条件下で一般化が可能な、確かな影響が際立つのだという。Milcuはこの戦略について、特定の系では、小さくても重要な局地的影響が見過ごされる可能性があると認めながらも、この可能性は実験の規模を大きくすることで緩和できるだろうという。この考え方を野外研究にどう反映できるかは不明だが、Milcuは探る価値があると考えている。

Brunaは、生態学者らの再現研究に対する抵抗感は、再現研究の目標と、

再現研究が生態学の理論に与える影響に対して誤解しているせいだと考えている。Brunaによれば、再現研究は、研究を完全に復元しなくても有用なのだという。というのも、ある熱帯生態系で観察された影響が別の熱帯生態系に当てはまらないとみられることは、元の研究が誤っていたことを意味するわけではないからだ。「我々生態学者は、これほどのばらつきが生じる理由を探りたいのです」とBrunaは話す。「多くの人は、『木を見て森を見ず』になっているように思われます」。

(翻訳：小林盛方)

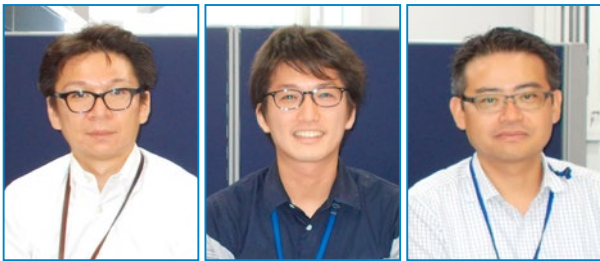
Ecologists sow seeds of trust

Vol. 548 (271) | 2017.8.17

Ewen Callaway

ゲノム刷込みを維持し高効率にES細胞作製

多くの研究室でES細胞を容易に樹立できるようになったのは、培養成分の改良によるところが大きい。2008年には血清の代わりにMEK1/2阻害剤とGsk3 β 阻害剤を添加する画期的な手法が登場し、均一で質の良いES細胞を高効率で樹立できるようになった。ところが、この手法で樹立したES細胞では、親から受け継いだはずのゲノムインプリンティングが消去されていて、厳密なレベルでの個体発生能を持たないことを、山田泰広・京都大学iPS細胞研究所（CiRA）教授らは突き止めた。そのうえで、ゲノムインプリンティングを維持したES細胞を高効率に樹立する方法も見いだした。



やまだ やすひろ
山田 泰広 (右)

CiRA 未来生命科学開拓部門 教授

1997年に岐阜大学医学部卒業後、1999年岐阜大学医学部助手。2003年マサチューセッツ工科大学（MIT）ホワイトヘッド研究所研究員。帰国後、岐阜大学大学院・講師、准教授を経て2009年にCiRA主任研究員に。2012年より現職。

やまもと たくや
山本 拓也 (左)

CiRA 未来生命科学開拓部門 特定拠点講師

2001年に京都大学理学部卒業後、2006年同大学大学院にて博士号取得（生命科学）。同年に同大学大学院博士研究員、2009年同大学物質・細胞統合システム拠点（iCeMS）助教、2010年CiRA特定拠点助教を経て、2016年より現職。

やぎ まさき
八木 正樹 (中央)

CiRA 未来生命科学開拓部門 大学院生

2013年大阪市立大学工学部卒業。2015年に京都大学大学院に進学し、博士後期課程に在籍。

ES細胞のゲノムインプリンティングに着目され、大きな成果を上げられました。

山田：はい。DNAのメチル化に代表されるように、ゲノムは部分的な化学修飾が施されることで、遺伝子発現が抑制されたり、促進されたりといった制御がなされています。このような、塩基配列によらない遺伝子制御の仕組みを「エピゲノム」といいます。私の研究室では、エピゲノムの異常が発がんやがんの進行にどのように関与しているかについて、解明を続けてきました。

例えば2013年には、細胞を中途半端に初期化するとエピゲノムが異常になり、遺伝子に変異がなくてもがん化することをマウスで示しました¹。今回は、エピゲノムの1つであるインプリンティング（ゲノム刷込み）がES細胞において正常に保たれているのか、何らかの異常があるとしたらそれがES細胞の分化能とどのように関与しているのかといったことを解析しました²。ウエットな実験を担当したのは、博士課程3年の八木君です。

ゲノムインプリンティングとはどんな機構ですか？

山田：私たちのゲノムは両親から半分ずつ等しく受け継いだもので、母親由来の遺伝子と父親由来の遺伝子は機能的に差がないように制御されています。ただし、ごくわずかに例外があります。発生前、つまり生殖細胞の段階で、一方に由来する遺伝子しか働かないように、メチル化により不活化されているものが、約150個あるのです。この仕組みは、遺伝子にあたかも印（インプリント）

AUTHOR PROFILE

が付けられているように見えることから、ゲノムインプリンティングと呼ばれています。ゲノムインプリンティングは全ての体細胞で一生涯保たれますが、生殖細胞では消去と書き込みを経て次世代に受け継がれます。哺乳類の発生過程では、この記憶の維持が極めて重要であることなどが分かっています。

八木さんが今回の研究を手掛けた経緯は？

八木: 私は工学部バイオ工学の出身で、学部生時代は、研究ツールとして使うモノクローナル抗体の作製などを主なテーマにしていました。生物学を勉強し始めたのは大学入学後で、iPS細胞のことを知って、iPS細胞やES細胞に関連した研究がしたいと漠然と考えるようになりました。2013年、山田先生の研究室に修士課程の学生として入ることができ、体細胞からiPS細胞への初期化過程でゲノムインプリンティングが安定して維持されているかどうかを主にマウスで検討することになりました。

研究の一環で、iPS細胞の対照用にES細胞も樹立したのですが、そのメチル化を調べてゲノムインプリンティングが消去されていることに気がきました。このES細胞は、2008年に開発された新しい手法(2i/L法)で樹立したものでした。そこで、従来法(S/L法)で樹立したES細胞でも調べたところ、こちらはゲノムインプリンティングが維持されていました。ほぼ同じ頃、「2i/L法ではゲノム全体で脱メチル化が起きる」との報告もあり、2i/L法ではゲノムインプリンティングの記憶が消えてしまうのではないかと思ひ至り、今回の研究を始めました。

次世代シーケンサーによる解析部分は、山本先生が担当されたのですね。

山本: はい、今回の研究で私は、八木君が持ち込む生データのメチル化解析や遺伝子発現解析を担当しました。彼が欲する形に「見える化」するドライ作業が任務だったといえます。私はウエットな実験生物学者でもあり、私の研究室では体細胞の初期化や分化の研究を行っています。大学院時代には細胞周期などのシグナル伝達系の研究をしていて、情報生物学を専攻したことはないのですが、コンピューターが好きでプログラミングなども手掛けるようになりました。次世代シーケンサーを使った解析を始めたのはCiRAに着任してからです。

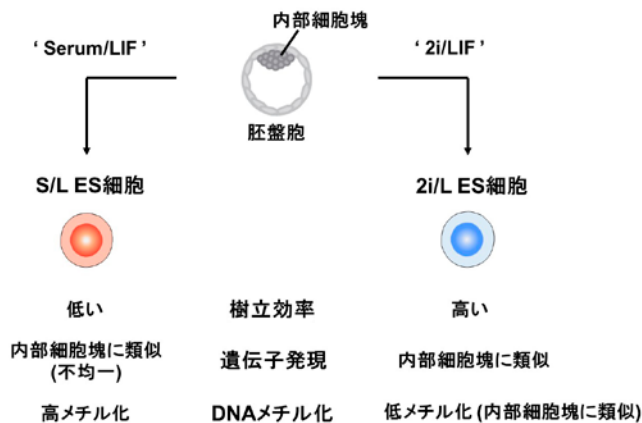


図1 マウスES細胞の樹立方法と得られた細胞の性質の違い

2008年に開発された2i/L培地は、S/L培地に比べてES細胞の樹立効率が高く、多能性関連遺伝子の発現の均一性を保ち、ゲノム全体でのDNA低メチル化を誘導することが知られている。

ES細胞の樹立法についてご説明いただけますか？

八木: マウスのES細胞は、受精卵が胚盤胞期まで発生が進んだところで内部細胞塊(胚盤胞内部にある、多能性を持つ細胞集団)を取り出し、特殊な培地で樹立します。1980年代以降2007年ごろまで使われていた培地は、血清(Serum)と白血球遊走阻止因子(LIF)を加えたS/L培地でした。ただし、S/L法には、ES細胞の樹立効率が低い(マウスで約30%)、できたES細胞のコロニーごとの遺伝子発現レベルが不均一、メチル化レベルが内部細胞塊に比べて高い、など課題がありました。

これらを解決する新手法として2008年に登場したのが2i/L法です。2i/L法はあっという間にS/L法に取って代わりました³。新手法では、血清の代わりにMEK1/2阻害剤(MAPキナーゼシグナルを遮断)とGsk3β阻害剤(Wntシグナルを活性化)を添加し、樹立効率はマウスで約90%と極めて高いのが特徴です。2013年ごろまでに、2i/L法で培養したES細胞の遺伝子発現レベルやメチル化の解析も進みました。コロニーごとの遺伝子発現レベルが均一であること、ゲノム全体でDNAメチル化レベルが低くなること、ゲノムインプリンティング領域のメチル化に異常ないことなどが、次々と報告されたのです^{4,6}。

このうちの3点目は、私が2013年に見いだしたゲノムインプリンティングの異常と矛盾するのですが、その理由は、使われていたES細胞が、S/L法で樹立された後

に短期間2i/L法で継代培養されたものだったためと考えられました。そこで私は、2i/L法で新たにES細胞を樹立し、メチル化の記憶が正常に維持されているかどうかをきちんと調べてみることにしたのです。

2i/L法で樹立したES細胞が解析に用いられなかったのはなぜでしょうか？

山田：最大の理由は、メチル化解析に適した系統のマウスが手に入らなかった点にあると思います。今回のようにゲノムインプリンティングを詳細に解析するには、対象とする遺伝子が父方由来か母方由来かを見分ける必要がありますが、遺伝的に均一な実験用マウス由来のES細胞では不可能です。幸運なことに、私たちは国立遺伝学研究所（静岡県三島市）の敷地内で捕獲された野生種由来のマウス（MSM系統）を使うことができ、これが研究を成功に導きました。MSM系統は、一般的な実験用マウスと遺伝的に大きく離れており、ゲノム配列は約100塩基対に一塩基対の割合で異なっています。私たちは、父方をMSM系統に、母方を一般的な近交系マウスの129系統（あるいは、その逆）にし、配列の差を目印にすることで、解析している遺伝子のゲノムインプリンティングが父母のどちら由来なのかを厳密に区別できるようにしたのです。

具体的に、どのような手順で解析されたのですか？

八木：まず、MSM系統と129系統のマウスを交配し、2i/L法で4株（雌雄各2株）、S/L法で4株（雌雄各2株）のES細胞を樹立しました。そして各株からゲノムを抽出し、ゲノムインプリント領域として知られる16の領域について、DNAのメチル化と発現レベルを大規模に解析しました⁷。高精度な解析には、計1億リード程度読む必要があるのですが、1500万リード読めば十分な技術を山本先生が開発されたことで、研究を加速できました。

その結果、2i/L法によるES細胞では父親由来、母親由来ともに、ゲノムインプリンティングが消えていることが明らかになりました。ただし、消去の程度には雌雄差があり、雌のES細胞ではゲノムインプリンティングによるメチル化が全て消去されており、雄のES細胞では一部のメチル化が外れた程度でした。完全な証明はできていないのですが、このような雌雄差は、活性型X染色体を2本持つ雌ES細胞では、メチル化維持に関与する遺伝

子 (*Uhrfl*) のタンパク質レベルが低いことが原因ではないかと考えています。

山田：先行研究において、2i/L法による雌のES細胞を使うことで研究結果がおかしくなった、といった報告はありません。多くの研究者が、自身が研究に用いたES細胞の分化能を確認するために、ES細胞を注入した受精卵を子宮に戻し、キメラマウスとして生まれてくるかどうかを検証しており、2i/L法による雌のES細胞を使っても正常な雌マウスが生まれることが確かめられています。

今回は、より厳密に分化能を検証しようと考え、キメラマウスではなく「全身がES細胞でできたマウス」として生まれてくるかどうかを、核移植と四倍体補完法という2つの方法で調べました。核移植によるクローンマウス作製は、山梨大学生命工学科発生工学研究センターのわかやまてつひこ若山照彦教授に全面協力いただきました。

一方の4倍体補完法では、2細胞期胚を電気刺激により融合させて染色体を倍化 (4n) させ、得られた胚盤胞にES細胞を導入して個体を得ます。4nの胚は胎盤形成には至るのですが、染色体異常のため体細胞には分化せず、胎仔には寄与しません。ES細胞にない胎盤形成能部分のみを4nの細胞に補ってもらうわけです。

どのような結果だったのでしょうか？

八木：核移植によるクローンマウスも4倍体補完法によるマウスも、発生が途中で異常になり、生まれてきませんでした。このことは、ゲノムインプリンティングを失ったES細胞には正常個体を発生させる能力がないことを端的に示しています。対照実験としてS/L法で樹立したES細胞でも行いましたが、こちらは正常なマウスが生まれてきました。

本当に、培地だけが原因でゲノムインプリンティングが消えてしまったのか。この点を確認するために、培養条件を変えて同じ実験を試してみました。MAPキナーゼ経路の抑制とDNA脱メチル化を関連付ける先行研究⁸があったことから、MEK1/2阻害剤に原因があるのではないかと考え、MEK1/2阻害剤濃度を5分の1 (0.2μM) にした「t2i/L培地」と、MEK1/2阻害剤の代わりにSrc阻害剤を用いた「a2i/L培地⁹」でES細胞を樹立し、一連の実験を行ったのです。Src阻害剤は、MEK1/2阻害剤とは異なるルートで細胞分化を抑制する因子です。

結果、樹立後早い段階のES細胞では、雌雄ともにゲノ

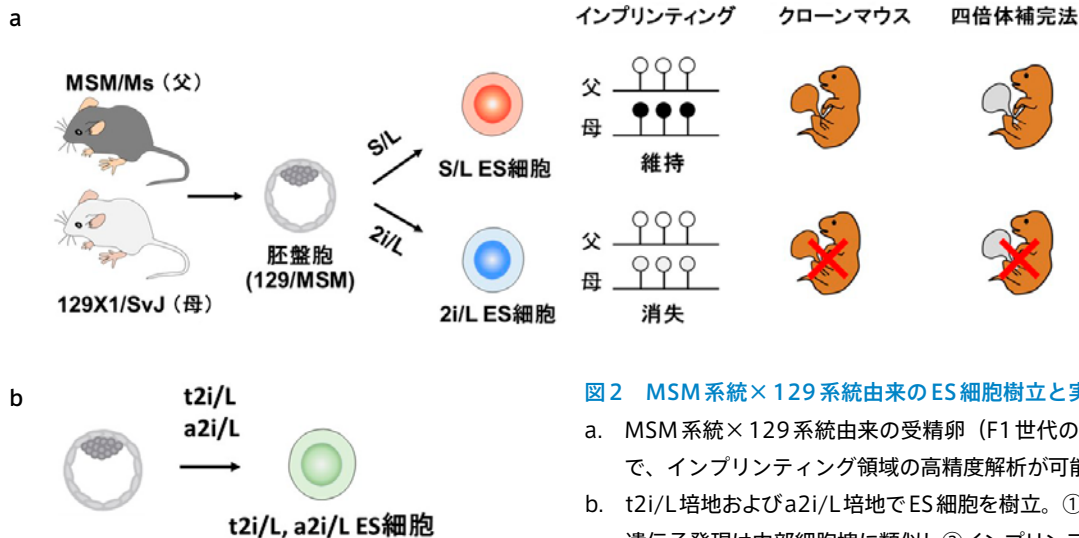


図2 MSM系統×129系統由来のES細胞樹立と実験フロー

- a. MSM系統×129系統由来の受精卵（F1世代の胚）を用いることで、インプリンティング領域の高精度解析が可能に。
- b. t2i/L培地およびa2i/L培地でES細胞を樹立。①樹立効率が高く②遺伝子発現は内部細胞塊に類似し③インプリンティングを維持し④高い個体発生能を有していた。

ムインプリンティングが維持されており、4倍体補完法によって正常なマウスが生まれてくることが確認できました。一方で、継代を重ねるほど、雌のES細胞ではゲノムインプリンティングが徐々に消去されていくことも分かりました。原因はすでに述べた Uhrf1 タンパク量レベルの低下にあると予想しています。

一連の成果から、どのようなことが言えるのでしょうか？

山田：まず言えるのは、私たちのt2i/L法やa2i/L法によるES細胞は、樹立直後の状態では、雌雄ともにゲノムインプリンティングを維持した高品質な細胞だということです。今回のような知見が増えることで、用途に応じたES細胞の樹立を行えるようになるかもしれません。

今回の成果はマウスでのものですが、ヒトの多能性幹細胞の応用にも重要だと考えています。マウスと異なり、ヒトのES細胞やiPS細胞は着床後胚の性質に類似しており、ゲノムインプリンティングは維持されていると思われます。ところが最近になって、このようなヒトのES細胞やiPS細胞を2i/L培地を用いて「着床前胚に類似した細胞」へ変換させると、得られた細胞ではゲノムインプリンティングが消失しているとの報告がありました¹⁰。今後、医療応用を目指す場合には、ゲノムインプリンティングの問題が再生医療に影響を及ぼすのかどうか、そうであれば、どう影響するのかといったことを、慎重に見極める必要があると考えます。

山本先生にお伺いします。情報解析を担当され、どのような苦勞がありましたか？

山本：八木君は、非常に綺麗なデータを出してくれて、どのようなイメージの結果を希望するかなども実に丁寧に説明してくれたので、大きな苦勞はありませんでした。私自身がウエットの実験も行うので、膨大な数のパラメータをどう調整したらよいかや、どこにバイアスが入りやすく、何を排除したらよいかなどを明確に見極めながら進められたのが大きかったのかもしれない。

山田：今回のような解析は、プロトコルを組み立てていけば可能なのだと思いますが、それがなかなかできない。私たちを含め、多くの方が苦勞されている部分だと思います。実は、山本先生のすごさは広く知られつつあり、「データ解析は山本先生に」とご指名が入ることも多々あるようです。もちろん、八木君が非常に緻密にサンプリングし、丁寧に実験を積み重ねたからこそ、の情報解析だったことは言うまでもありません。

ありがとうございました。

聞き手は西村尚子（サイエンスライター）

- Ohnishi, K. et al. *Cell* **156**, 663–677 (2014).
- Yagi, M. et al. *Nature* **548**, 224–227 (2017).
- Ying, Q.-L. et al. *Nature* **453**, 519–523 (2008).
- Ficz, G. et al. *Cell Stem Cell* **13**, 351–359 (2013).
- Habibi, E. et al. *Cell Stem Cell* **13**, 360–369 (2013).
- Marks, H. et al. *Cell* **149**, 590–604 (2012).
- Tomizawa, S. et al. *Development* **138**, 811–820 (2011).
- Choi, J. et al. *Cell Stem Cell* **20**, 706–719 (2017).
- Shimizu, T. et al. *Stem Cells* **30**, 1394–1404 (2012).
- Pastor, W. A. et al. *Cell Stem Cell* **18**, 323–329 (2016).



CERNの新しい反陽子減速器ELENAは、2017年内に稼働し始める予定である。

反物質研究の最前線

脚光を浴びるCERNの大型ハドロン衝突型加速器（LHC）の陰で、新しい物理学を模索する複数の実験チームがしのぎを削っている。

欧州原子核研究機構（CERN；スイス・ジュネーブ郊外）の実験棟の高い天井の下では、「宇宙で最も捉えがたい存在」の謎を解き明かそうと、6つの実験チームが競い合っている。お互いの距離は数mしか離れていない。場所によっては上下に重なっていることもある。彼らの頭上には、ショッピングセンターのエスカレーターのように交差する、金属材を支える重さ数トンのコンクリートの塊が迫っている。

AEGIS実験チームを率いる物理学者のMichael Doserは、「私たちは常にお互いを意識しています」と言う。彼らの目標は、「反物質」が重力にどのように反応するかを

最初に解明することだ。反物質とは物質の鏡像に相当する物質で、自然界にはほとんど存在しない。

Doserとライバルたちは、CERNで仲良くやっていくしかない。反陽子（電荷と磁気モーメントの符号が逆である以外は陽子と全く同じに見える粒子）を供給できる施設は、世界中でCERNしかないからだ。CERNの反陽子減速器（Antiproton Decelerator；AD）は円周182mのリングで、より大型の有名な大型ハドロン衝突型加速器（Large Hadron Collider；LHC）と同じシンクロトロンから粒子を供給されている。ADは、光速に近い速度で入ってくる反陽子を減速し、各実験チームはこの低

速の反陽子を交代で使って実験を行う。反陽子の操作は慎重に行わなければならない。物質と出合った途端、エネルギーに変わって消滅してしまうからである。

科学者たちは数十年前から、反陽子や、これを利用して作る反水素原子を閉じ込めて、その性質を調べるために努力してきた。この数年の進歩は目覚ましく、十分な数の反粒子を制御できるようになった実験家は反物質の精査に乗り出し、その基本的な性質や内部構造を測定する精度はどんどん向上している。ALPHA 実験を率いる Jeffrey Hangst は、自分たちのチームは、少なくとも原理的には、他の研究者が水素で行っていることなら何でも反水素でできるようになったと言う。「私は、今のために25年間努力してきたのです」と Hangst。

彼らの実験からは多くのことが明らかになるはずだ。物質と反物質にほんのわずかでも違いがあれば、この宇宙にもが存在している理由を説明することができる。現時点で分かっているところによれば、物質と反物質は初期の宇宙で同じ量ずつ生成し、お互いに激しく反応して消滅したはずだ。けれども実際にはそうはならず、物質ばかりが残って、反物質はほとんど存在していない。この根本的な不均衡の起源は、物理学の最大の謎の1つとされている。

この謎が、CERNでの実験により近いうちに解き明かされる可能性は低い。これまでの実験から、反物質は腹立たしいほど物質とよく似ていることが分かっている、多くの物理学者は、おそらく違いはないだろうと考えている。物質と反物質に違いがあったら、現代物理学の基礎が揺らいでしまうからだ。CERNでの反物質実験は30年前に始まり、現在も6つの実験が行われている。反物質のパラドックスを説明できるような未知の粒子を探す LHC がいまだに何も見つけられていないことから、この6つの実験に改めて注目が集まっている。さらに、反物質を操作する技術が急速に進歩したことを受け、CERNの反陽子生成装置が大幅に改良されることになった。2017年末までに、最先端の反粒子減速器が稼働し始め、最終的には現在の100倍以上の数の粒子を使って実験できるようになる予定だ。

CERNで反物質実験に取り組む数十人の物理学者は、自分たちの挑戦の厳しさをよく知っている。反物質の扱いは厄介だし、チーム間の競争は激しく、新たな発見ができる可能性は低そうだ。それでも彼らは、宇宙をのぞ

き込む新しい窓を開きたいという希望に突き動かされている。「これは離れ業としか言いようのない実験です。何らかの答えが得られれば、それがどんなものであっても、大いに誇りに思っよいのです」と Hangst は言う。反物質研究から大発見が得られる保証はない。しかし、「何かをつかんだら、無視することはできないでしょう」。

反物質の発見

反物質物理学の始まりは、英国の物理学者ポール・ディラックが光速に近い速度で運動する電子を記述する方程式を書いた1928年まで遡ることができる¹。ディラックは、自分の方程式には正の解と負の解の両方があることに気付いた。彼はその後、この数学的な思い付きを、今日の陽電子に相当する「反電子」の存在を示唆するものとして解釈し、それぞれの粒子に対応する反物質が存在しているとする理論を立てた。

1932年には実験家のカール・アンダーソンが、磁場中を運動する際に電子とは逆方向に曲がる軌跡になること以外は電子と全く同じように振る舞う粒子を発見して、陽電子の存在を確認した。物理学者たちは間もなく、衝突によって陽電子を作れることに気が付いた。十分なエネルギーを持つ素粒子同士を衝突させると、エネルギーの一部が物質と反物質のペアに変わるのだ。

1950年代までには、エネルギーから粒子への転換を利用して反陽子が作られるようになっていた。しかし、反陽子を捕獲して調べるのに十分な量を作る方法を見いだすまでには、それから数十年を要した。研究者たちの夢は、反陽子と陽電子を対にして反水素原子を作り、よく研究されている水素原子と比較することだった。

陽電子を作るのは大して難しくない。陽電子はある種の放射性崩壊によって生成し、電場と磁場を使って容易に捕獲することができる。しかし、陽電子に比べて質量の大きい反陽子はそうはいかない。反陽子は、高密度の金属に陽子を叩きつけることで作れるが、衝突によって生成した反陽子は高速すぎて電磁トラップでは捕獲できないのだ。

反物質ハンターは、反粒子を大幅に減速する（つまり冷却する）方法を見つける必要があった。CERNでは、反物質を減速して貯蔵する試みは、1982年の低速反陽子リング（Low Energy Antiproton Ring；LEAR）か

CERNの反物質実験

CERNの6つの反物質実験チームは、反物質と物質の性質のわずかな違いを探している。6つの実験は、反陽子を操作できる速度まで減速する反陽子減速器（AD）の内側で行われている。各実験チームはここからさらに粒子を減速し、一部のチームは陽電子と混ぜ合わせて反水素原子を作っている。

反物質

反陽子

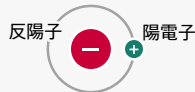
陽子の反物質に当たる粒子で、高エネルギー衝突により生成し、大幅な減速を必要とする。

陽電子

電子の反物質に当たる低質量粒子で、放射性崩壊により生成する。

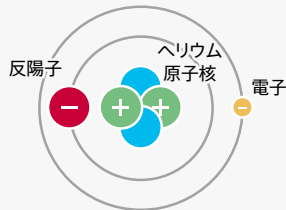
反水素原子

反陽子と陽電子を混ぜて作られる反水素原子は、反物質の新しい性質を調べるのに利用できる。



反陽子ヘリウム原子

ヘリウム原子の2個の電子のうち1個を反陽子と置き換えて作られるエキゾチックな原子。

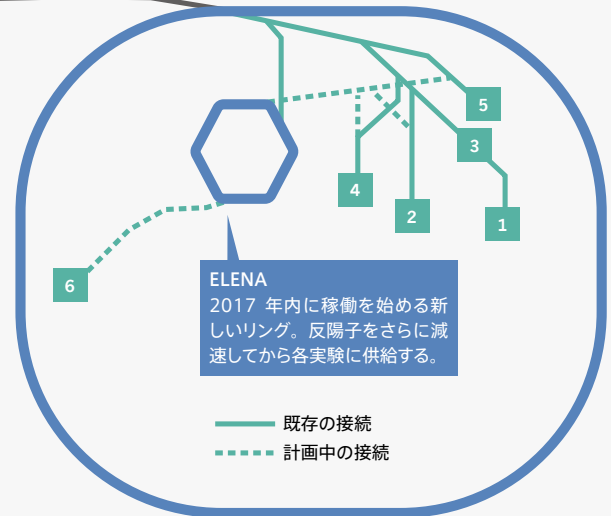
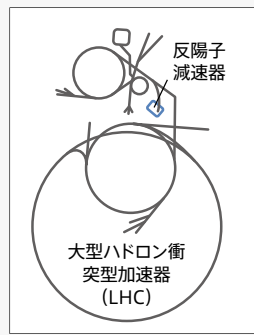


減速器

反陽子減速器 (AD)

円周 182m のリング。電磁場と電子ビームを利用して、入射粒子の速度を 100 秒間に 10 分の 1 程度まで減速する。

反陽子の生成
CERN の加速器から供給される陽子をイリジウム標的に衝突させて反陽子を作る。



ELENA
2017 年以内に稼働を始める新しいリング。反陽子をさらに減速してから各実験に供給する。

— 既存の接続
- - - 計画中の接続

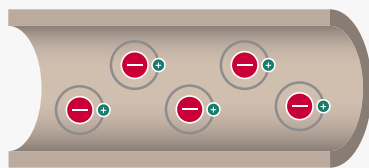
反物質実験

1 ALPHA

開始：2005 年

研究テーマ：反水素原子の電荷、分光、重力の下での加速度

手法：複雑な電磁トラップの中で反陽子と陽電子を混ぜて反水素原子を作り、レーザーを使って調べる。



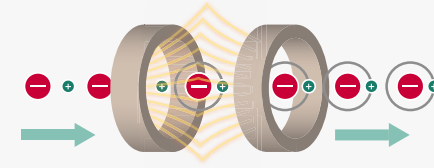
磁気トラップ

2 ASACUSA

開始：2000 年

研究テーマ：反陽子の（電子と比較した）質量、反水素原子と反陽子ヘリウム原子の分光

手法：反物質原子を閉じ込めて偏極したビームとし、マイクロ波放射やレーザーを用いて調べる。

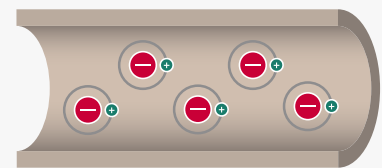


3 ATRAP

開始：2000 年

研究テーマ：反陽子の磁気モーメントと質量電荷比；反水素原子の分光を計画。

手法：閉じ込めた反陽子や、冷たい陽電子と反陽子を混ぜて作った反水素原子を調べる。

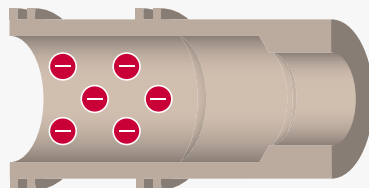


4 BASE

開始：2014 年

研究テーマ：反陽子の質量電荷比と磁気モーメント

手法：反陽子を貯蔵してから、トラップ中の軌跡を観察したり、各種のトラップに粒子を送り込んでさまざまな性質を測定したりする。

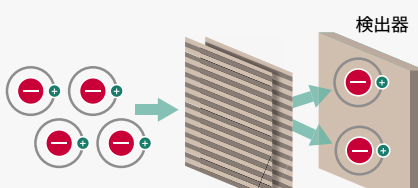


5 AEGIS

開始：2015 年

研究テーマ：重力による反水素原子の加速度

手法：励起した低速反水素原子を格子に入射させ、出てきた平行なビームが作り出すパターンを観察する。



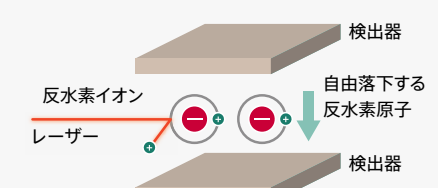
モアレ干渉計

6 GBAR

開始：2017 年

研究テーマ：重力による反水素原子の加速度

手法：レーザー冷却されたベリリウムイオンが、1 個の反陽子と 2 個の陽電子からなる反水素イオンを冷却する。反水素イオンの 1 個の陽電子をレーザーで弾き飛ばすと、反水素原子が重力の下で自由落下する。



ら始まった。この施設の反陽子を使って最初の反水素原子が作られたのは、LEARの運転が終了する前年の1995年のことだった²。

ADは、LEARに代わる反陽子減速器として、2000年に3つの実験と共に稼働し始めた。LEARと同様、ADも反粒子を減速する装置で、最初に磁石を使って反陽子を収束させ、次に強い電場を使って減速する。電子ビームも反陽子との間で熱をやり取りしてこれを冷却するが、反陽子に触れることはない。どちらの粒子も負の電荷を持っていて、互いに反発するからだ。一連のプロセスにより、反陽子の速度は光速の10分の1まで遅くなる。それでも調べるには速すぎるので、6つの実験はそれぞれの技術を使って反陽子をさらに減速して閉じ込めている。

減速の過程で反陽子の数は大幅に減少する。1回の「ショット」では12兆個の陽子を標的に衝突させ、生成した3000万個の反陽子を実験チームに供給する。HangstのALPHA実験の場合、反陽子を十分に減速し、陽電子とペアにして反水素を形成させた時点で、粒子は30個しか残っていない。残りは逃げ出したか、消滅したか、速すぎたり調べるのに適さない条件になっていたりするなどの理由で捨てられる。こんなに少数の反水素原子で実験を行うのは本当に骨が折れるとHangstは言う。「これだけ少ない材料で研究をしていると、物理学の他の分野の見方がすっかり変わってしまいますよ」。

いろいろな反物質

CERNでの反物質研究は、将来的には、ドイツのダルムシュタットにできる国際加速器施設FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research、反陽子・イオン研究施設)と競い合うことになる。FAIRの建設費は10億ユーロ(約1200億円)で、2025年ごろに完成する予定である。それまでは、精密に測定できる低速の反陽子を作れるのはCERNだけという状況が続く。

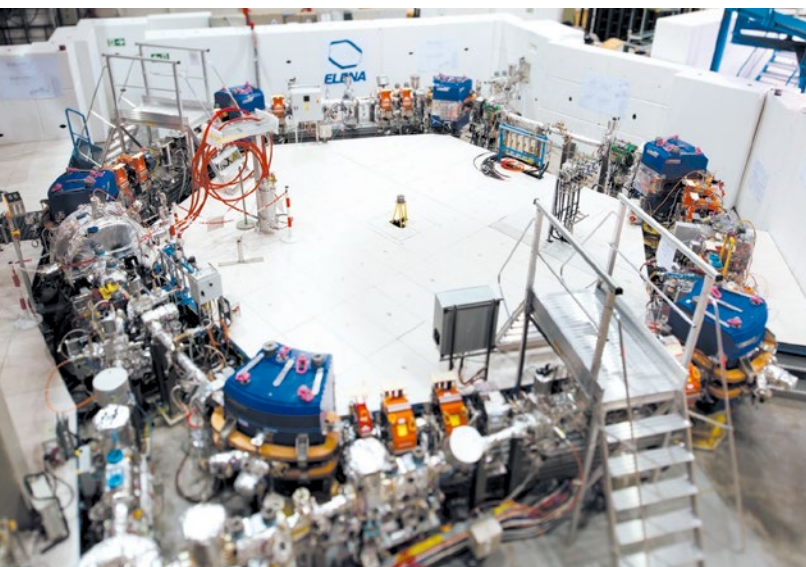
CERNの反物質研究施設では現在、6つの実験のうち5つが行われている(GBAR実験はまだ建設中であるため)。それぞれの実験は独自の方法で反陽子を調べていて、他では行っていないような実験をしているチームもあるが、しばしば同じ性質の測定を競い合い、お互いの測定値を独立に検証している(「CERNの反物質実験」参照)。

実験チームは1本のビームを共有しているため、2週間の実験期間中、5つの実験のうちの3つだけが8時間交代でビームを利用できるようになっている。精密な測定が台無しになることがないように、実験チームは週に1度調整会議を開いて、隣のチームが磁石を使う時間が分かるようにしている。彼らはこんなに近いところで実験しているにもかかわらず、隣のチームの論文を読んで初めてそのブレイクスルーを知ることが多いという。「私たちは常に競争しているのです。悪いことではありません。やる気を奮い立たせてくれますから」とHangst。

6つの実験のうち、ADから供給される反陽子をそのまま調べているのはBASE実験だけである。BASE実験では、粒子を縦方向に閉じ込める電場と円運動させる磁場を組み合わせたペニングトラップの中に反陽子を捕獲する。反陽子は1年以上貯蔵することができ、研究チームはトラップ中の反陽子の軌道を利用して粒子の質量電荷比を記録的な精度で決定した³。また、複雑な手法を用いることで、反陽子の磁気モーメント(磁石としての強さと向きを表す物理量)の測定にも成功した⁴。この測定では、個々の粒子を2つの別々のトラップの間で素早く切り替え、振動するマイクロ波場のわずかなシフトが引き起こす変化を検出した。共同実験チームを率いる日本の理化学研究所(埼玉県和光市)の物理学者Stefan Ulmerは、大変な努力を重ねてこの技術を完成させた。「私の心血を注いだ技術です」と彼は言う。

CERNでは反水素原子の実験をしているチームもあるが、この実験には特有の難しさがある。電氣的に中性な反水素原子は電場に反応しないため、制御することがほとんどできないからだ。実験では反水素原子の弱い磁気的性質を利用することになり、粒子を「磁気瓶」に閉じ込めている。磁気瓶に反水素原子を閉じ込めるためには、瓶の内部の磁場に大きな勾配をつける必要があり、わずか1mmの間に1テスラ(スクラップ置き場で自動車を持ち上げる磁石の強さ)も変化させなければならない。その上、反水素原子の温度を0.5ケルビン未満にしないと、反水素原子は磁気瓶から逃げ出してしまふ。

高速の反陽子を使って作られた最初の反水素原子は、約400億分の1秒しか存在し続けることができなかった。2002年に、ATRAPとATHENA(ALPHAの前の実験)の2つは、反陽子を十分に減速してまとまった量の反水



新しい反陽子減速器 ELENA の試験は 2016 年末から始まっている。

素原子を作ることに初めて成功し、それぞれ数千個の原子を集めた⁵。大きなブレイクスルーがあったのはそれからほぼ10年後で、研究者は反水素原子を何分間も閉じ込められるようになった⁶。彼らはそれ以来、反水素原子の電荷や質量などの性質を測定したり、レーザー光線を使ってエネルギーレベルを調べたりしてきた⁷ (*Nature* ダイジェスト 2017年2月号「反水素原子の分光測定に成功」参照)。ALPHA 実験は *Nature* 2017年8月3日号66ページで、反水素原子の超微細構造（反水素を構成する反陽子と陽電子の相互作用によって生じるエネルギー単位の細かい分裂）をこれまでで最も高い精度で測定できたと報告している⁸。

このように、CERNの反物質実験チームは、反物質のさまざまな性質を調べて、物質との違いはないかと探っている。反物質の専門家としてASACUSA実験を率いる堀正樹ほりまさきは、全員の目標は不確実性を小さくしていくことだと言う。彼らの実験では、反水素原子がトラップによって壊されることがないように、飛行中の反水素原子をレーザーを使って調べている。研究チームは2016年、反陽子ヘリウム原子（ヘリウム原子の2個の電子のうち1個が反陽子と置き換わったエキゾチックな原子）を使って、電子と反陽子の質量比を精密に測定した⁹。これまでに行われた他の測定と同様、物質と反物質の違いは全く示されなかった。しかし、測定結果が出るたびに、物質と反

物質が本当にお互いの鏡像になっているかが、どんどん高い精度で検証されていくのだ。

物質と反物質の違い

実験により物質と反物質の違いが検出されたら、それはCPT（荷電共役変換、パリティ反転、時間反転）対称性の破れを意味し、物理学の根幹に関わる発見になる。CPT対称性によると、反物質だけからなり時間が後ろ向きに進む「鏡像の宇宙」では、私たちの宇宙と同じ物理法則が成り立つことになる。CPT対称性は相対性理論や場の量子論の背骨であり、その破れは、ある意味、物理学の破綻を意味する。実際、反物質実験から何らかの新しい発見があると予想するのは、標準理論から外れた理論だけである。

こうした理由から、LHCの物理学者たちは、隣で反物質実験をする研究者たちに「当惑しつつも注目している」と、30年にわたり反物質実験に取り組んできたDoserは言う。「彼らは反物質に興味は持っていますが、新しい発見があるとは思っていません」。CERNの理論家Urs Wiedemannも、そう考えているようだ。彼は、実験チームが反物質を操作する能力には「圧倒される」ものがあるし、理論を検証する必要があるのは当然だが、「新しい発見を期待する物理学的根拠があるかと問われれば、私は『ない』と答えるでしょう」と言う。

とはいえ、LHCも反物質の謎の解決に貢献しているとは言いがたい。1960年代の実験から、ある種の物理過程（エキゾチックなK中間子をもっと一般的な粒子に崩壊する過程など）には、物質を優位にするような小さな対称性の破れがあることが分かっていた。LHC実験は、そうした対称性の破れの他の例を探すだけでなく、初期宇宙における振る舞いから今日の物質と反物質の大きな不均衡を説明できるような未知の粒子も探している。これらの粒子は、素粒子物理学の難問を解決するために提唱された超対称性理論から予想されるものであり、存在すると考えることには十分な根拠がある。それにもかかわらず、LHCで8年間探してもいまだに見つかっていない。超対称性理論の魅力は単純でエレガントな点にあるが、現在、最も単純で、最もエレガントなバージョンはほぼ否定されている。「今のLHCは、理論による指針がほとんどないまま、あるかないかも分からない仮説的な粒子を探していま

す。ある意味、私たちと同じ状況です」とDoserは言う。

いくつかのチームは現在、重力の下での反物質の加速度を測定するという次なる大きな課題に挑戦している。ほとんどの物理学者は、反物質は物質と全く同じように落下するだろうと考えている。しかし、少数派の理論の中には、反物質は「負の質量」を持ち、物質との間では引力ではなく反発力が働くと予想するものがある。反物質がこのような性質を持っていれば、正体不明のダークエネルギーやダークマターの作用を説明できるかもしれない。しかし、主流派の理論家のほとんどは、そのような宇宙は本質的に不安定だと考えている。

反物質は上に「落ちる」か

自由落下する反水素原子を測定するには、これまでと同様、十分に冷却することが課題となる。ごく小さな熱揺らぎでさえ、落下する原子からのシグナルを覆い隠してしまうからだ。さらに、この実験には反水素原子のように電氣的に中性な粒子しか使えない。粒子が電荷を持っていると、遠くに電磁場源があるだけで、重力よりも大きい力を受けてしまうからである。

Hangstのグループは、2018年に、有効性が証明されている技術（彼らのALPHA実験を縦にしたもの）を使って、重力を受けた反物質が上と下のどちらに「落ちる」かを最終的に決定することを目指している。「最初に成功するのは私たちだと確信しています。そうでなければやりません」と彼は言う。しかし、DoserのAEGIS実験と反物質実験施設の新参メンバーであるGBAR実験も、Hangstのチームを激しく追い上げている。両チームはレーザー冷却技術を利用して精度を大幅に高めていて、現在ALPHA実験が検出できる物質と反物質の加速度の差よりも小さな差を検出できるようになる予定だ。AEGIS実験が水平の反水素ビームの屈曲を測定するのに対して、GBAR実験では反水素原子を20cm自由落下させる。どちらの実験も、反水素原子の温度を絶対零度より1000分の数度だけ高い温度まで下げることで、重力加速度を100分の1の精度で測定する。将来的には、さらに精度を上げていく予定だ。

今、ADの内側には超低速反陽子リングELENA (Extra Low ENergy Antiproton decelerating ring) がある。

ELENAはADから供給される反陽子をさらに減速するために2500万スイスフラン（約27.5億円）を投じて建設された新しいリングで、円周は30mだ。反物質実験チームは2017年中にELENAから供給される反陽子を利用できるようになる。最初に利用するのはGBAR実験だが、最終的には、全ての実験に、ほとんど同時に粒子を供給できるようになる。反陽子の速度は7分の1になり、より収束したビームになって到着する。初期段階でより効率よく冷却されるので、各実験は、より多くの粒子を閉じ込められるようになると期待される。

実験チームの努力により反物質の操作やテストが可能になったことで、より多くの物理学者が反物質の測定に興味を持つようになった、とHangstは言う。実験のアイデアを提案してくる研究者や、チェックすべき数値を教えてくれる研究者もいる。反物質実験チームは外に目を向け、自分たちの技術を他の研究分野に役立てることはできないかと考えるようになった。例えば、GBAR実験チームは、不安定な放射性元素の中性子の地図を作るために、反陽子をCERNのISOLDE実験に持って行くための携帯用トラップを開発中だ。

Doserは、技術的な行き詰まりによって進歩が滞ったりしなければ、物理学者は2020年代の終わりまでに反物質の扱いに習熟し、反物質原子時計を制作するなど、原子物理学のさまざまな偉業を反物質を使って再現できるようになるだろうと予想している。「どんどんアイデアが出てくるのです。この分野が順調に前進している証拠です」と彼は言う。「後は私自身がCERNから追い出されないことを祈るだけです。何しろ私は、今後30年分の計画を持っているので」。

(翻訳：三枝小夜子)

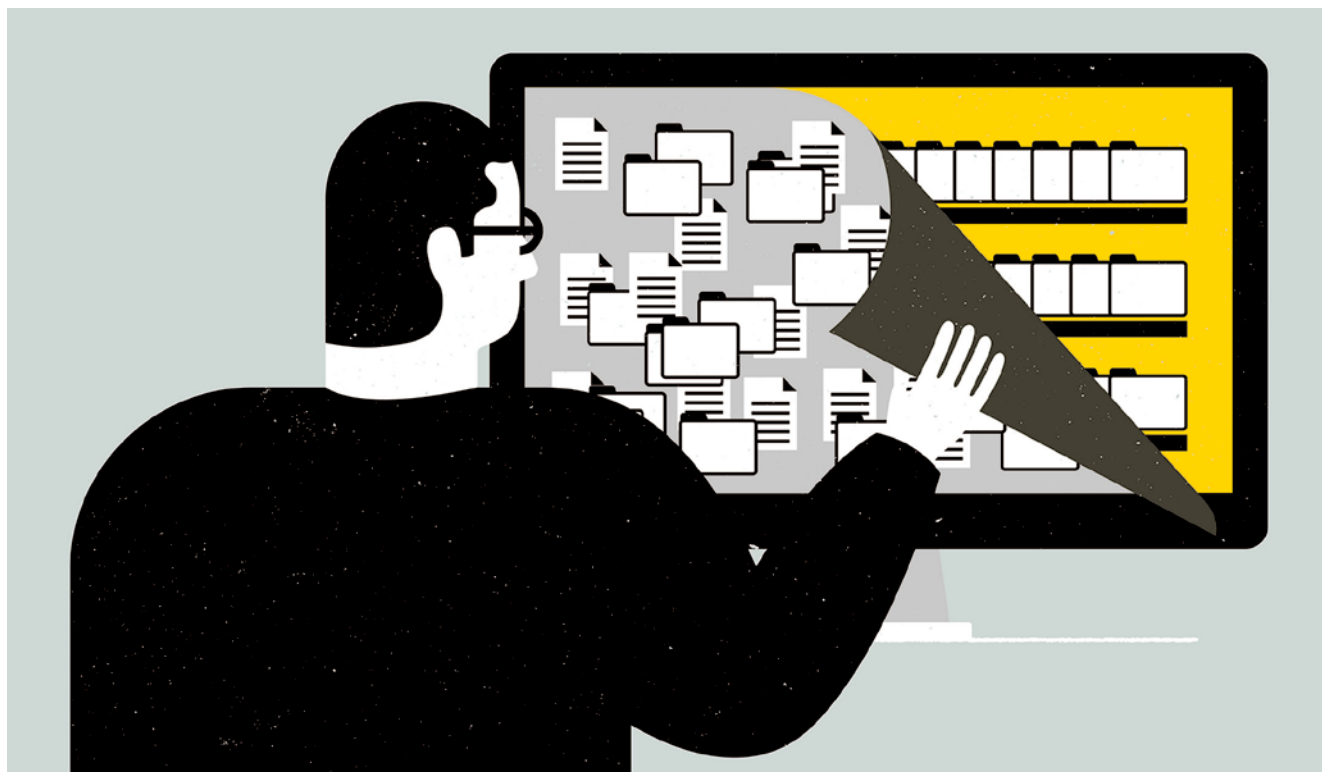
The Antimatter Race

Vol. 548 (20–23) | 2017.8.3

Elizabeth Gibney

(ロンドン在住の *Nature* 上級記者)

1. Dirac, P. A. M. *Proc. R. Soc. A* **117**, 610–624 (1928).
2. Baur, G. *et al. Phys. Lett. B* **368**, 251–258 (1996).
3. Ulmer, S. *et al. Nature* **524**, 196–199 (2015).
4. Nagahama, H. *et al. Nature Communications* **8**, 14084 (2017).
5. Amoretti, M. *et al. Nature* **419**, 456–459 (2002).
6. ALPHA Collaboration *Nature Physics* **7**, 558–564 (2011).
7. Ahmadi, M. *et al. Nature* **541**, 506–510 (2017).
8. Ahmadi, M. *et al. Nature* **548**, 66–69 (2017).
9. Hori, M. *et al. Science* **354**, 610–614 (2016).



文献管理ソフト 8 選

今や、科学者向けの文献管理ソフトはよりどりみどりだ。その中から代表的な 8 つを検討した。

Adam Rockerは、自分のデジタル文献ライブラリを管理しているソフトウェアが、研究に役立つ巧妙な手法を教えてくださいとは思っていなかった。音楽ファイル管理プログラムがユーザーにお薦めの曲を知らせてくれるのと同じように、Rockerのお気に入りの電子ファイリングシステム「ReadCube」は、定期的に彼のライブラリをスキャンして、関連する論文を勧めてくる。その機能が彼に予期せぬ宝物をもたらしたのだ。

現在オタワ大学（カナダ）で医学を学ぶ大学院生のRockerは、当時、ゼ

ブラフィッシュの細菌感染症の研究をしていた。そんな彼にReadCubeが、マイクロ流体力学を利用して魚を閉じ込める方法に関する論文を勧めてきた。普通なら彼が読むことなど絶対のない分野の論文だったが、そこで述べられていた手法は、彼自身の手法に比べてはるかに簡便だった。Rockerはプロジェクトを既にかかなりのところまで進めていたため、新しい手法を採用するには至らなかったが、この研究に目を向けさせられたことは「本当にためになりました」と言う。

実際、今日の文献管理ツールは単なる電子ファイリングツール以上のものになっていて、いずれもスイス・アーミーナイフのように多様な機能を展開することでユーザーに訴えかけている。

この記事では、「colwiz」「EndNote」「F1000Workspace」「Mendeley」「Papers」「ReadCube」「RefME」「Zotero」という代表的な文献管理ソフト 8 種類のツールについて検討する（「代表的な文献管理ソフト」参照）。あるものは文献ライブラリの閲覧や構築を効率よく行えるようにし、またあるも

のは参考文献リストを作成したり、共通のワークスペースを提供して共同研究を補助したり、ユーザーが興味を持ちそうな論文を薦めたりする。

文献管理ツールの目的は、研究者がダウンロードして散らかしてしまったPDFを整理できるようにすることにある。彼らが学術誌のウェブサイトからPDFファイル（ファイル名はしばしば、アルファベットと数字を組み合わせた意味不明なものが割り振られていたりする）を取得し、適当なフォルダに入れると、たちまちカオス状態になる。これは、ほとんどの科学者が頭を悩ませている問題だ。バルヴィージェ生物医学研究所（スペイン・バルセロナ）の神経科学者Raúl Delgado-Moralesは、「少なくとも私の経験では、科学者のデスクトップのフォルダにはよく分からない名前のPDFファイルが3000個ぐらい入っていて、ファイルが必要になったときには決して探し出すことができないのです」と言う。

文献管理ツールは、ハードディスクのインデックスを作成することにより、この混乱に対処する。典型的な機能としては、PDFをドラッグ・アンド・ドロップでアプリのウィンドウに入れると、ソフトウェアがDOIまたはタイトルを使って識別を試みたり、関連のあるメタデータ（タイトル、キーワード、著者名など）をオンラインサーバーから検索してきたりする。

ファイルを入れる特定のフォルダをソフトウェアに監視させることもでき、そうしておけば、著者名、キーワード、あるいは自分が付けたメモを検索するだけで、PDFを探し出すことができる。例えばDelgado-Moralesは、ユーザーが選択した方法で自動的にファイル名を変更する便利なアプリ「Papers」を

使って文献ライブラリを整理することで、問題を解決できた。同様の機能を提供しているツールは他にもある。例外はRefMEで、PDF自体ではなく文献リストのみ保管する。

コア機能

文献管理ツールのほとんどは、研究者がさまざまなオンラインソースから文献をインポートするのを補助する機能を備えている。多くのツールは、「PubMed」や「Google Scholar」などの外部データベースのアプリ内検索の他、学術誌のウェブサイトなどから文献データや関連するPDFを収集するウェブブラウザのプラグインも提供している。

無料のオープンソースソフトウェアプロジェクト「Zotero」は、ウェブブラウザから情報を抽出するという課題を解決するために2005年に立ち上げられた。Zoteroのプロジェクト・ディレクターであるジョージ・メイソン大学（米国バージニア州フェアファックス）のSean Takatsは、「これがZoteroの主要な特徴であり、他の文献管理ツールと比較したときの強みでもあります」と言う。一方、RefMEには、スマートフォンのカメラでバーコードを読み取ることで参考文献を追加するという珍しいオプションがある。

文献管理ツールの機能の中で一般的なのは、論文の文中に引用文献を挿入したり、任意のフォーマットで参考文献リストを作成したりする機能だ。EndNoteは広く利用されている市販ソフトウェアで、数十年前からこの機能を提供してきたが、今日では多くの新しいツールとの競争にさらされている。

文献管理ツールの多くは一般的なワープロソフトと連動していて（通常は「Microsoft Word」と連動している

が、フリーウェアである「OpenOffice」や関連するフリーウェアスイートと連動しているものもある）、ユーザーが論文を執筆する際には、言及したい論文を選んでボタンをクリックするだけで、文書にコードが挿入されて文中に引用を示すことができる。さらにユーザーは、プルダウンリストの中から選択するだけで、各学術誌の指定する書式で参考文献リストを作成したり文中で引用したりすることができる。

ほとんどのツールには、論文を読んで注釈を付けるためのPDFリーダーが組み込まれている他、これらのコメント（やPDF自体）をiPadとデスクトップコンピューターの間などで同期させるクラウドベースの機能もある。ReadCubeとcolwizは、PDFの読み取りをさらに充実させている。例えばReadCubeでは、PDFの本文中の引用と著者名がアクティブなハイパーリンクとして表示され、引用された文献や参考文献リストに直接アクセスできる。提携する出版社のウェブサイトにあるPDFを閲覧したり注釈を付けたりする際にも、同じ機能を利用することができる。

こうしたツールの多くは、ライブラリ中の特定の項目に関連した論文を識別したり、ライブラリの内容に基づいてユーザーが関心を持ちそうな論文を勧めたりすることができる。F1000Workspaceは、ReadCubeと同様にアルゴリズムを用いて論文を勧めるが、1万人程度の専門家コミュニティが推薦する論文も勧める。なお、論文を勧めるスタンドアローンソフトも多い（*Nature* 513, 129-130; 2014）。

共有への動き

多くの文献管理ツールは、研究者がグループライブラリを設定したり、重要

代表的な文献管理ソフト

さらに詳細な比較については、go.nature.com/xbp9ot参照。

製品名	URL	プラットフォーム	料金
colwiz	colwiz.com	デスクトップ/ウェブ/モバイル	無料
EndNote	endnote.com	デスクトップ/ウェブ/モバイル	無料だが一部の機能は制限される
F1000Workspace	f1000.com/work	ウェブ	有料
Mendeley	mendeley.com	デスクトップ/ウェブ/モバイル	無料だが一部の機能は制限される
Papers	papersapp.com	デスクトップ/ウェブ/モバイル	有料
ReadCube	readcube.com	デスクトップ/ウェブ/モバイル	無料だが一部の機能は制限される
RefME	citethisforme.com	ウェブ/モバイル (文献リストを保管するだけ)	無料
Zotero	zotero.org	デスクトップ/ウェブ/モバイル	無料だが一部の機能は制限される

な論文を遠方の共同研究者と共有したりすることを可能にするが、このプロセスは出版社の著作権を侵害しないように注意深く管理されている。例えば、Mendeleyのパブリックグループでは、論文に関する情報、すなわちライブラリのカatalogのエントリに相当するものしか共有できない。PDFを共有し、変更することができるのはプライベートグループのユーザーだけで、3人以上で共有するときには有料アカウントにアップグレードする必要がある。

ミネソタ大学 (米国ミネアポリス) で組織心理学の博士号取得予定の Brenton Wiernik は、共同研究で自分の専門分野の文献の系統的なレビューとメタ分析を行うために、Zoteroの共有ライブラリを利用している。彼は、こうした研究には、論文を共有ライブラリにダウンロードする人や、それを読む人の他、注釈とタグを付ける人や主要なデータのログを記録する人など、15~20人は必要だと考えている。このプロセスはDropboxのフォルダ共有に似ているが、Zoteroにはメタデータやメモや注釈を追跡・保管できるという利点がある、とWiernik。例えば研

究者は、論文に専用のタグを付けて作業中であることを示すことで、共同研究者に別の論文の作業をするように促し、二度手間を回避することができる。

F1000Workspaceにもcolwizにも、文献を共有するだけでなく、原稿を準備したりプロジェクトを管理したりする機能がある。F1000Workspaceでは、研究者がプラグインを利用してMicrosoft Wordの原稿を安全な場所にアップロードすることにより、チームのメンバーが共有するコピーにコメントを付けることが可能だ。ただし、同社の製品開発マネージャーであるJoão Peresによると、原稿のテキストをブラウザで編集することはできないという。Peresは、F1000Workspaceから学術誌のエディターに直接論文を送る「ワンクリック」投稿機能の提供を計画していて、*F1000Research*からそれを始めようとしている。colwizのユーザーもオンラインドライブで書類を共有し、チームのメンバーが閲覧したりコメントしたりすることができる。

このように文献管理ツールの機能にはかなりの重複があるため、ユーザーがどれを選ぶかは、個人的に何を重視

するかによって決まることが多い。例えば、サンディア国立研究所 (米国カリフォルニア州リバモア) の材料科学者Richard Karneskyは、オープンソースの精神への共感からZoteroを選んだ。

研究者が文献管理ツールを利用する最大の理由は、おそらく、この技術が記憶を検索できるようにしてくれるからだ。製薬会社イーライリリー社 (米国インディアナ州インディアナポリス) の上級リサーチサイエンティストであるBoyd Steereは、PDFがぎっしり詰まったデジタルフォルダを、プリントアウトした紙が山積みになった机に例える。あちこちに付箋紙が貼られ、欄外に書き込みがあり、落書きやメモ書きや矢印がちりばめられた紙の山から必要な情報を探し出すのは一苦労だ。けれどもデジタル文献管理ツールがあれば、埋もれていた知識は単純なキーワード検索になるのだ。

(翻訳：三枝小夜子)

Eight ways to clean a digital library

Vol. 527 (123–124) | 2015.11.5

Jeffrey M. Perkel

系外惑星大気に オゾン層に似た層を 発見

天文学

系外惑星の大気の性質が盛んに議論されている。ホットジュピターと呼ばれる系外惑星の熱スペクトルから、組成は不明だが、地球のオゾン層に似た層の存在が明らかになった。

系外惑星科学のこれからの研究最前線は、リモートセンシング技術による大気の化学的特性の解明だ¹。リモートセンシングとは、遠くの対象物を観測機器などを用いて探査する手法である。恒星間航行が実現されていない現状では、系外惑星に生命が存在するか、存在可能かを探る唯一の手段はリモートセンシングと考えられる²。ホットジュピターは、木星ほどの大きさで公転周期が短く(概して数日)、表面温度が非常に高温な系外惑星の一種である。そうした特徴からホットジュピターは、より小型で大気温の低い系外惑星の探査方法を研究している天文学者にとって、観測技術と理論的手法を磨く良い出発点となる。このたびエクセター大学(英国)のThomas M. Evansらは、WASP-121bというホットジュピターの熱スペクトルから水を検出したことを、*Nature* 2017年8月3日号58ページで報告した³。今回の発見から、WASP-121bでは、地球の大気と同様に大気温が高度とともに上昇する「温度逆転」現象が起こっており、その大気にオゾン層に似た層を含んでいることが示唆された。

Evansらの発見を理解するためには、地球との比較に

よる類推(アナロジー)が有効である(図1)。地球の下層大気は、対流圏と成層圏という異なる2つの領域に分けられる。対流圏の上に位置する成層圏はオゾンを含んでいる。オゾンは、存在度は比較的低いが、太陽からの紫外線放射を極めてよく吸収する。この吸収によって、成層圏では高度とともに温度が上昇し、温度逆転が起こる。これに対して、対流圏では高度とともに温度が低下し、対流圏界面(対流圏と成層圏の間の境界領域)と成層圏界面(成層圏とその上の中間圏の間の境界領域)の温度はほぼ一定となる。成層圏が比較的穏やかなのに対し、対流圏では活発な対流が起こっている。

当初、天体物理学者たちは地球との比較・類推から、ホットジュピターを温度を基準にして2つに分類し、温度逆転は温度の高いホットジュピターでは起こるが、温度の低いホットジュピターでは起こらないという説を提唱していた。この説は、ホットジュピターの大気中では、酸化チタン(TiO)と酸化バナジウム(VO)が太陽系外版のオゾンのような働きをするという理由に基づいている⁴。この説の妥当性は、物理学とアナロジーの両方に関連している。TiOとVOはいずれも、可視光から近赤外までの波長領域の放射を極めてよく吸収する⁵。そして、太陽よりも小さい恒星や褐色矮星(系外惑星になるには質量が大き過ぎるが、本格的な核融合を維持する恒星になるには質量が小さ過ぎる天体)のスペクトルでは、TiOとVOがよく検出される⁶。

しかし、こうしたアナロジーには限界がある。「成層圏」という用語は、ホットジュピターにはそぐわない。ホットジュピターは恒星によって赤道から両極までさまざまに激しく熱せられているため、上層大気をかき乱す激しい風が発生している⁷。また、褐色矮星とホットジュピターの生い立ち(形成機構や進化の歴史など)が共通しているかはまだ確認されていない。さらに、TiOやVOを検出したという主張は全て、かなり低いスペクトル分解能で行われた研究に基づいており、尤度しきい値の程度も異なっていて⁸⁻¹¹、温度逆転に関する論文において広範な議論的となっている¹²⁻¹⁹。

Evansらは今回、系外惑星の水検出用として標準的な主力機器となっているハッブル宇宙望遠鏡搭載の広視野カメラ3(WFC3)を用いて、1.1~1.6 μm の波長範囲をカバーするWASP-121bの熱スペクトルを得た。スペ

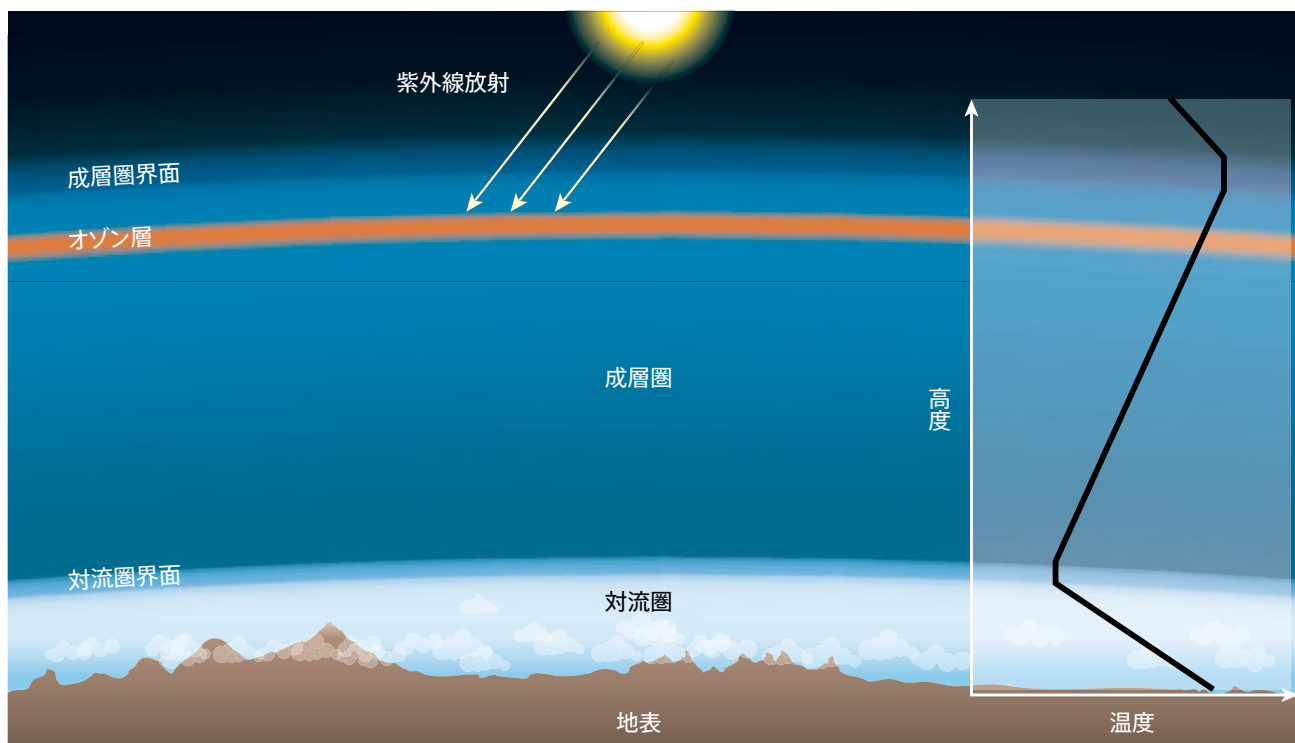


図1 大気温度逆転

地球の下層大気は、対流圏と成層圏という2つの異なる領域に分けられる。成層圏は、太陽からの紫外線放射を吸収するオゾン層を含んでいる。この吸収によって、成層圏の温度が上昇し、大気温が高度とともに上昇する「温度逆転」が起こる。これに対して、対流圏では高度とともに温度が低下し、対流圏界面（対流圏と成層圏の間の境界領域）と成層圏界面（成層圏とその上の中間圏の間の境界領域）では温度が一定になる。Evansら³は、系外惑星 WASP-121b の大気は、地球と同様に温度逆転が起こることを報告し、地球のオゾン層に似た層を含んでいることを示唆している。

クトル分解能は、個々の分子スペクトル線を分解するには不十分であったが、分子のバンドヘッド（重なり合った多数の未分解線に起因するスペクトルの特徴）の形状を明らかにできた。

Evansらは、約1.2 μm と約1.4 μm の波長においてバンドヘッドを観測した。特に興味深いのは、水に関する1.4 μm のバンドヘッドで、谷ではなく緩やかなピークを形成していたことだ。Evansらは、このバンドヘッドを水の吸収線ではなく輝線に起因するものと解釈した。高度とともに温度が低下する大気中では、水が吸収線として観測される。一方、水が輝線として観測されるためには、温度逆転の存在、ひいては上層大気温度の上昇をもたらす恒星放射の強い吸収体が必要である。1.2 μm のバンドヘッドはVOの存在とは矛盾しないが、VO分子が確実に検出されたとは言い切れない。また、記録され

たWFC3スペクトルでは、TiOの有無は不明だ。

スペクトルの特徴が吸収線ではなく輝線だと主張するためには、リファレンス（参照）データを用いる必要がある。そこでEvansらは、WFC3スペクトルを、大気リトリーバルと呼ばれる手法を用いて解析した。この手法は、スペクトルから大気にどのような化学種が含まれ、分布しているかを求めるものである。この手法では、分子の存在度は解析における自由パラメーターであるため、化学的にもっともらしくない存在度が許される。そして著者たちは、リファレンスとして、このWFC3スペクトルとおおむね同じ波長範囲にわたって測定された2つの褐色矮星のスペクトルデータを用いた。これらの褐色矮星のスペクトルには、天体大気中の高温水蒸気に関する1.4 μm 付近に深い吸収線があり、それらとの比較からWASP-121bの1.4 μm のバンドヘッドが輝線であること

が示された。大気リトリーバルが放射、化学、大気運動を自己矛盾なく扱っているわけではないため、Evansらの研究には限界があるが、この技術の専門家たちをうまくかわすには今のところ申し分ない。

ホットジュピターでTiOとVOが検出されたとの報告が増え続けているので、これらの分子の存在は他の手法で検証可能かもしれない。ホットジュピターの化学は、炭素と酸素の比によって細かく調節されている²⁰。水が少なくメタンが多い他、炭素が豊富な大気には、一酸化炭素も多く含まれている。一酸化炭素は、利用可能な酸素原子をほとんど捕捉し、残ったわずかな酸素がTiOとVOを形成する。従って、TiOとVOが太陽系外版のオゾンといえるなら、温度逆転を起こすのは炭素の少ない高温大気のみであるはずだ。スペクトルの測定と化学的特性の推測が行われた十分な大きさのホットジュピターサンプルがあれば、これは反証可能な仮説となる。さらに、温度逆転は、非平衡な化学過程に対抗し、大気を化学平衡に向けて駆動する可能性がある。この仮説は、最先端技術で解析された質の高いスペクトルを用いれば、検証可能かもしれない。

(翻訳：藤野正美)

Ozone-like layer in an exoplanet atmosphere

Vol. 548 (38–40) | 2017.8.3

Kevin Heng

ベルン大学宇宙ハビタビリティ研究センター（スイス）に所属

- Deming, L. D. & Seager, S. *J. Geophys. Res.* **122**, 53–75 (2017).
- Seager, S. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **111**, 12634–12640 (2014).
- Evans, T. M. *et al. Nature* **548**, 58–61 (2017).
- Fortney, J. J., Lodders, K., Marley, M. S. & Freedman, R. S. *Astrophys. J.* **678**, 1419–1435 (2008).
- Sharp, C. M. & Burrows, A. *Astrophys. J. Suppl.* **168**, 140–166 (2007).
- Kirkpatrick, J. D. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **43**, 195–245 (2005).
- Showman, A. P. & Guillot, T. *Astron. Astrophys.* **385**, 166–180 (2002).
- Désert, J.-M. *et al. Astron. Astrophys.* **492**, 585–592 (2008).
- Haynes, K., Mandell, A. M., Madhusudhan, N., Deming, D. & Knutson, H. *Astrophys. J.* **806**, 146 (2015).
- Evans, T. M. *et al. Astrophys. J.* **822**, L4 (2016).
- Mancini, L. *et al. Mon. Not. R. Astron. Soc.* **461**, 1053–1061 (2016).
- Burrows, A., Hubeny, I., Budaj, J., Knutson, H. A. & Charbonneau, D. *Astrophys. J.* **668**, L171–L174 (2007).
- Harrington, J., Luszcz, S., Seager, S., Deming, D. & Richardson, L. J. *Nature* **447**, 691–693 (2007).
- Knutson, H. A., Charbonneau, D., Allen, L. E., Burrows, A. & Megeath, S. T. *Astrophys. J.* **673**, 526–531 (2008).
- Charbonneau, D. *et al. Astrophys. J.* **686**, 1341–1348 (2008).
- Madhusudhan, N. & Seager, S. *Astrophys. J.* **707**, 24–39 (2009).
- Stevenson, K. B. *et al. Astrophys. J.* **754**, 136 (2012).
- Line, M. R., Knutson, H., Wolf, A. S. & Yung, Y. L. *Astrophys. J.* **783**, 70 (2014).
- Diamond-Lowe, H., Stevenson, K. B., Bean, J. L., Line, M. R. & Fortney, J. J. *Astrophys. J.* **796**, 66 (2014).
- Madhusudhan, N. *Astrophys. J.* **758**, 36 (2012).

苦味と甘味の知覚に必要なガイダンス分子を発見

神経科学

苦味や甘味などの味覚に関する情報は、それぞれの味覚に特異的な経路を介して、マウスの舌から脳へ伝達される。このたび、セマフォリンタンパク質がこれらの経路の配線を誘導していることが明らかになった。

食べ物を口に入れてすぐに「おいしい」と感じられるのは、舌から味覚の情報が脳へ伝達されるためである。味の正確な知覚は動物の生存に不可欠である。というのは、苦味を引き起こす分子は、通常、毒物であることを警告しており、甘味のある分子は栄養のある食物を示しているからだ。そのようなシグナルを忠実に伝達するために、味覚系はどのように配線をつないでいるのだろうか？ このほどコロンビア大学（米国ニューヨーク）のHoojoon Leeら¹は、マウスにおいて苦味と甘味の経路の配線を誘導するガイダンス分子としてセマフォリンファミリーの2つのタンパク質を突き止めたことを、*Nature* 2017年8月17日号330ページに報告した。

マウスの舌には数百もの味蕾^{みらい}が存在する。各味蕾には、苦味、甘味、酸味、塩味、うま味の5つの基本味質を検出できる味受容器細胞（TRC）が数十個含まれている²。多くの場合、各TRCが伝える情報は、発現する味受容器によって決定される1つの味質のみである。味受容器は、細胞表面タンパク質で、味の知覚を刺激する分子との結

合により活性化される。TRCは、情報を脳に送るために、頭頸部の2つの味覚応答性ニューロクラスター（膝神経節および岩様部神経節）のニューロンから伸びてTRCへと投射している軸索に結び付けられている。これら2つの神経節は、味覚の合図を脳へと伝える際の中継所として機能している²。

ほとんどの神経節ニューロンは、TRCと同様に、1つの味質を伝えるよう調整されている³ことから、味覚情報は各味に調整された特異的経路を介して主に脳に伝えられると考えられる。例えば、甘味TRCは甘味応答性神経節ニューロンに忠実に接続され、苦味応答性神経節ニューロンには接続されないし、苦味TRCについてはこの逆が成り立つ。では、味蕾には5つの味質の1つを知覚する各TRCが混在していることを考えると、甘味神経節ニューロンの軸索はどのように接続すべき甘味TRCを見つけて出しているのか、という疑問が浮かび上がる。

Leeらはこの疑問に取り組むために、苦味と甘味のTRCの遺伝子発現プロファイルを調べ、TRCの種類によって発現に差のある分子を探索した。このような分子は軸索ガイダンス分子（軸索を目的の場所まで誘導する因子）として機能する可能性があるからだ。その結果、苦味TRCではセマフォリンであるSema3Aが、甘味TRCではSema7Aが高発現していることが突き止められ、ガイダンス分子候補として浮かび上がった（図1）。

セマフォリンは、分泌型あるいは膜繫留型のタンパク質で、細胞の運動を調節し、軸索ガイダンスに関与することが知られている⁴。Leeらは、苦味経路の配線にSema3Aが必要であるかどうかを検討するために、活性化されると蛍光を発するように膝神経節ニューロンを遺伝的に改変したマウスを作製して用いた。これにより、どの味がニューロンの活性化を引き起こすか決定することができた。このマウスの苦味TRCからSema3Aをコードする遺伝子を欠失させると、苦味応答性ニューロンの約50%が、苦味だけでなく他の味質にも応答するよう調整された。野生型マウスで2つの味に反応するよう調整されている苦味神経節ニューロンは9%であるので、これは大幅な上昇である。この結果から、Sema3Aを除去すると苦味神経節軸索の配線に混乱が引き起こされることが分かった。

そこでLeeらは、甘味TRCにSema3Aの誤発現を引き起こした。すると、味覚経路が再配線されて苦味神経

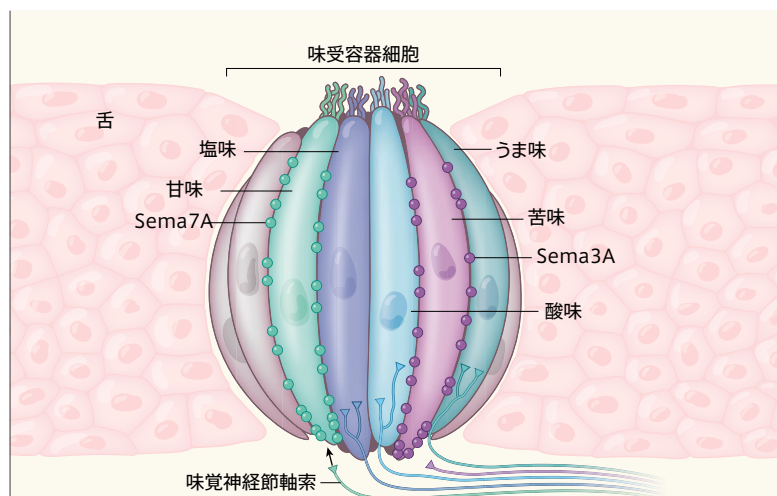


図1 マウスにおける味覚系の配線

舌の各味蕾には数十もの味受容器細胞（TRC）が存在している。その大部分は、苦味、甘味、酸味、塩味、うま味という5つの味質の1つのみを知覚する。マウスでは、TRCは頭頸部の神経節と呼ばれるニューロクラスターから伸びTRCへと投射している軸索に接続される。神経節は主に味質特異的に味覚情報を伝達する（味質特異的な軸索はTRCと同じ色で示す）。例えば、甘味に反応するTRCは、甘味応答性神経節ニューロンから伸びる軸索に接続される。Leeら¹は、セマフォリンファミリーの2つのタンパク質がこのような配線パターンを誘導することを示した。苦味TRCによって産生されるSema3Aは、苦味神経節ニューロンとの接続を誘導する。一方、Sema7Aは、甘味経路に対しSema3Aと同様の役割を担っている。

節ニューロンの一部の軸索が甘味TRCに向けられ、苦味と甘味の両方の味質に反応するよう二重に調整されたニューロンの割合が上昇した。次に、苦味TRCからSema3Aを除去して、さらに甘味TRCにSema3Aの誤発現を引き起こすと、苦味神経節ニューロンの70%が1つ以上の味質に反応するよう調整された。それを裏付けるように、このような修飾を受けたマウスは苦味物質に対する忌避行動が大きく減少していた。

この結果を受け、LeeらはSema7Aについても同様の実験を行った。苦味あるいは酸味のTRCにSema7Aの誤発現を引き起こすと、苦味-甘味あるいは酸味-甘味の二重の調整を受けた神経節ニューロンの数が増加した。このことから、Sema7AはSema3Aと同様の方法で機能するが、Sema3Aが苦味経路で働くのに対し、甘味経路で働くことが示された。

Sema3Aは苦味、Sema7Aは甘味の経路を確立するガイド分子であることが実証された。Sema7Aは細胞膜に繫留されるが、Sema3Aは分泌型のガイド分子である⁴。だが今回Leeらは、Sema3Aは分泌型であるにもかかわらず、さまざまな種類のTRCが混在して密に集合している味蕾において、神経節ニューロンの軸索を特定のTRCに誘導する能力を持つことが示された。この知見から、分泌型ガイド分子が単一細胞の分解能で局所的に作用できることが明らかになり、「分泌型ガイド分子は遠くまで拡散して機能を発揮する」という従来の知見に異議が唱えられた。

TRCは急速に代謝回転し、その寿命は一般的に3週間未満である。対照的に、舌の神経節ニューロンの軸索は生涯にわたって存続する。従って、このような軸索は、新しい結合相手のTRCに繰り返し接続し直されなければならない。舌へ投射する軸索が持つこの能力は恒久的に維持されると考えられるが、これは他の多くの系の軸索とは対照的である。というのは一般に、他の細胞との接続は発生過程で形成される上に、この配線過程を可能にしている遺伝

的プログラムはニューロン成熟後徐々に失われるのだ^{5,6}。

苦味や甘味の経路を再配線すると顕著にその出力が変化するが、このような味覚系は優れたロバスト（頑健）性も示した。Leeらが苦味TRCからSema3Aを除去して、さらに甘味TRCにSema3Aを誤発現させた場合でも、改変マウスの苦味応答性軸索ニューロンの30%は苦味を刺激する分子のみに応答するよう調整されていて、苦味物質にある程度の忌避行動を示した。これは、他の系で突き止められた配線シグナル⁷⁻⁹がセマフォリンと協調して機能し、この忠実性に関与する可能性を示している。例えば、細胞接着タンパク質のDscam11やPcdhgb7は苦味TRCに選択的に発現していることが明らかになっていることからおそらく、これらのタンパク質が味蕾の配線の特異性を調節している可能性がある。

LeeらはTRCに発現する2つのシグナル伝達分子を突き止めたが、これらのシグナルに対する神経節ニューロンの軸索上に存在する受容体は解明されていない。これらのニューロンの大部分が、1種類のTRCに特異的に接続されていると考えられるので、おそらく各種類の神経節ニューロンは、対応するTRCが作り出すシグナルに合致する1つ以上の種類の受容体を発現している。これらの受容体を特定すると、味覚系の発達についての我々の理解が裏付けられると考えられる。同時に、遺伝的改変は種類特異的に神経節ニューロンの機能を調べる手段となり、従って、神経節と脳の間味の回路の検討が可能になると考えられる。

(翻訳：三谷祐貴子)

A bitter-sweet symphony

Vol. 548 (285-287) | 2017.8.17

Jiefu Li & Liqun Luo

スタンフォード大学（米国カリフォルニア州）に所属

1. Lee, H., Macpherson, L. J., Parada, C. A., Zuker, C. S. & Ryba, N. J. P. *Nature* **548**, 330-333 (2017).
2. Yarmolinsky, D. A., Zuker, C. S. & Ryba, N. J. P. *Cell* **139**, 234-244 (2009).
3. Barretto, R. P. J. *et al. Nature* **517**, 373-376 (2015).
4. Kruger, R. P., Aurandt, J. & Guan, K.-L. *Nature Rev. Mol. Cell Biol.* **6**, 789-800 (2005).
5. Zhang, K. X., Tan, L., Pellegrini, M., Zipursky, S. L. & McEwen, J. M. *Cell Rep.* **14**, 1258-1271 (2016).
6. Li, H. *et al. Preprint at* <http://www.biorxiv.org/content/early/2017/06/03/145045> (2017).
7. Kolodkin, A. L. & Tessier-Lavigne, M. *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* **3**, a001727 (2011).
8. Zipursky, S. L. & Sanes, J. R. *Cell* **143**, 343-353 (2010).
9. Hong, W. & Luo, L. *Genetics* **196**, 17-29 (2014).



MASKOT/GETTY

日出ずる国の黄昏

理研での騒動は、日本の科学研究の低迷が最重要研究機関にも広がったことを反映しており、政策的取り組みが求められる。

日本で唯一の自然科学の総合研究機関、理化学研究所（理研）は、2017年に創立100周年を迎え、4月26日の記念式典には天皇、皇后両陛下のご臨席を得た。しかし、かつて「研究者の楽園」と呼ばれた理研は、今やその影もなく、財政の不確実性に直面した日本政府が科学予算の削減を進めるにつれて、ほころびが目立ち始めた。

その影響を受けた研究者の1人が、同研究所脳科学総合研究センター（BSI；埼玉県和光市）の西道隆臣（さいどうたかおみ）（神経蛋白質制御研究チーム、シニア・チームリーダー）だ。上述の記念式典が行われた頃、西道は、その研究に対する年間予算の43%カットを通告された。これに対して西道は、「事前通告はあったが、スタッフに対する報酬と実験用マウスの維持管理に要する費用を別の方法で調達する準備が必要と感じる厳しい内容ではなかった」と主張する怒りの声明をインターネット経由で世界約250カ所の研究室に向けて送信したと話す。

これは、科学政策上の優先順位に端を発する問題であり、現在の優先事項は、7月に文部科学省が公表した科学技術白書（平成29年版）の目次に見事に現れている。この白書は、イノベーション（技術革新）に関する議論と、イノベーション達成のために産学交流を活発化させる方法に関する記述が大半を占めている。その方法の1つが基礎研究の予算削減であり、そのしわ寄せが、大学と研究機関に及んでいるのだ。

理研の予算は、過去10年間に20%以上削減され、その間にBSIは、主任研究員を61人から41人に減らして対応した。

大学も同様の苦境に立たされていて、2004年に国立大学を法人化する改革が実施されて以降、運営費交付金は毎年度1%減額され続けている。法人化の目的は、大学が産業界のニーズや軍事的ニーズに合わせた研究を実施することで機動的・戦略的な運営を実現し、競争力を強化することだった。ところが、この改革で想定外の負の影響が生じた。教授の新規

採用が停止され、研究スタッフは、契約職員として新規採用され、研究助成金を渡り歩いて研究生活を維持しているのだ。

その結果「不安定な雇用条件やそれに伴う経済的不安の下に置かれた若手研究者は、短い任期中に業績を積むことを強いられるなど、真の独創性や創造性を十分に発揮しづらい状況を生み出している」ことを、科学技術白書は認めている。

影響が及んでいるのは若手研究者だけではない。大学の研究者の事務負担と助成金申請書作成の負担が増え、総労働時間に占める研究時間の割合が減り、2002年には半分弱だったのが今では3分の1強だと証言する大学研究者がいる。

日本への経済的、政治的逆風は強まっている。こうした不安定な時期こそ、日本の政策決定機関と行政当局は科学研究に対する支援を増強すべきだ。大学は、予算削減予定をなるべく早期に表明する必要がある。理研は、研究予算が先細り傾向にあることについて研究者の注意を喚起してきたと言うが、西道は大幅削減を示唆する話はなかったと言う。

研究機関も自らの透明性を高める必要がある。西道の苛立ちに共感する理研の研究者たちは、自身の地位に不安を感じているためこの問題を公然と論じることを恐れていた。理研の各研究施設で組織改革が予定されていることも大きな懸念材料だ。

日本は、重要な科学的知見を生み出し出版する力が衰えたことを残念がっているが、これは決して予想外の結果ではない。日本の論文出版実績は2000年以降横ばいで、科学技術への投資額の推移と見事に重なるのだ。日本の研究者は、研究論文数から算定された国際競争力の低下（世界第4位〈2004年〉から第10位に〈2014年〉）を突き付けられ、研究予算も論文出版率も増えている中国などを羨望の眼差しで見ている。日本は過去の科学研究実績を誇ってしかるべきだが、日本の科学の未来を守るには一層の施策強化が必須だ。

（翻訳：菊川要）

海の変化：サンゴ礁魚類の進化史から明らかになった、島嶼と海山周辺での海洋生物の多様化機構

表紙は、ブラジルの東方約1170 kmにあるトリングデ・マルティン・ヴァス諸島の一部であるマルティン・ヴァスの島々である。今回H. Pinheiroらは、これらの火山島に注目し、この諸島の近海のサンゴ礁に棲む魚類の進化史を調べている。島の生物地理学では、島嶼の陸上生物、および陸上生物の多様性が海水準の変動、侵略、固有性によってどのような影響を受けるかに重点を置く傾向があり、島嶼の周囲に棲む海洋生物はこれまであまり注目されてこなかった。今回のPinheiroらのサンゴ礁魚類の分析は、こうした島嶼の水域環境を形成する過程に光を当てている。分析の結果、海水準変動が海洋生物の種分化を促進したが、魚類は陸上生物より分散しやすいため、外来生物の流入によって多様性の増大が促進されていることが見いだされた。著者らは、島嶼の地理、地質史、海水準変動が、陸上生物へ及ぼす影響とは異なる形で海洋生物の分散に影響を及ぼしている、と結論している。

Cover; [10.1038/nature23680](https://doi.org/10.1038/nature23680)

量子物理学：軌道に乗る量子セキュリティー技術

量子物理の法則から、非常に安全な暗号や量子通信のプロトコルが得られる。しかし、地球規模のネットワークに役立てるには、こうしたプロトコルが衛星を用いて機能するものでなければならない。既存のプロトコルをそうした長距離まで拡張することは、実験的に途方もなく困難である。J. Panらは、今週号の2報の論文で、低軌道衛星Micius（墨子）によって地球規模の量子ネットワークの実現に向けて前進したことを報告している。著者らは、地上と衛星の間において、量子暗号システムに不可欠な量子鍵配送を1200 kmにわたってキロヘルツレートで実証するとともに、1400 kmにわたる単一光子キュービットの量子テレポーテーションを実証した。量子テレポーテーションは、量子物体の正確な状態を、物体自体を物理的に移動させることなく、ある場所から別の場所へ転送することであり、多くの量子通信プロトコルにおける主要な過程となっている。今回の2つの実験は、Miciusが地球規模の量子インターネットにおける初の構成要素となる可能性を示唆している。

[10.1038/nature23655](https://doi.org/10.1038/nature23655); [10.1038/nature23675](https://doi.org/10.1038/nature23675)

微生物学：微生物はヒトのシグナル伝達を模倣する

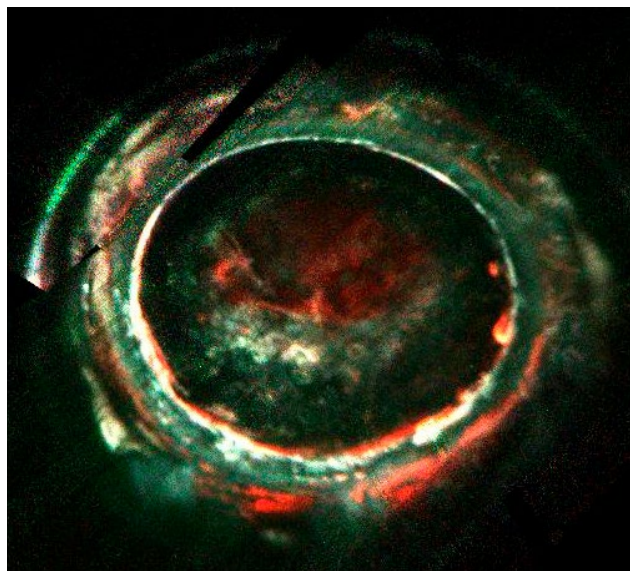
微生物相が産生する代謝産物が、ヒトの生理機能に何らかの機能を果たしたり影響を及ぼしたりしていることが、次第に分かってきている。今回S. Bradyらは、腸内細菌が産生するN-アシルアミドが、宿主のGPCR受容体と相互作用することを明らかにしている。マウスモデルおよび細胞を用いた解析によって、これらの細菌代謝産物がGPR119のアゴニストとして働くこと、そして、マウスにおいて代謝ホルモンおよびグルコース恒常性を調節する可能性があることが分かった。これらの知見は、微生物相由来のリガンドが真核生物のシグナル伝達分子を模倣できることを示唆しており、将来的にはこうした模倣を治療介入に利用できる可能性がある。

[10.1038/nature23874](https://doi.org/10.1038/nature23874)

惑星科学：木星の見事なオーロラ

地球上で最も強いオーロラは、電子がコヒーレントに加速される離散的 (discrete) 過程によって生じる。もっと弱いオーロラは、磁氣的に捕獲された電子の波動散乱に起因する。木星のオーロラは地球のオーロラより数桁強力なので、離散的過程によって生じると考えるのが自然だったが、探査機ジュノーによる初期の *in situ* 観測では、この離散的過程の証拠は見つからなかった。今回B. Maukらは、オーロラの交差点上のいくつかで電子の離散的な下向きの加速を報告しているが、そのエネルギーフラックスは広帯域過程に起因するエネルギーフラックスよりはるかに小さく、広帯域特性は地球とは大きく異なる。

[10.1038/nature23648](https://doi.org/10.1038/nature23648)



G. RANDY GLADSTONE

探査機ジュノーの紫外線分光計が撮影した、木星の南極領域のオーロラ。

植物科学：コケにおける性の話

イオンチャンネル型グルタミン酸受容体は、動物では神経伝達を仲介する陽イオンチャンネルとして働く。J. Feijóらは今回、神経系を持たない生物であるコケにおける GLUTAMATE RECEPTOR-LIKE (GLR) チャンネルの役割を明らかにしている。陸上植物の基部に位置するこの植物は、動物のように運動性の精子を持ち、これらの精子は受精のために走化性によって雌の生殖器官を目指す。著者らは、GLRチャンネルを欠失させるとこの過程が起こらなくなり、GLRはカルシウムを介したシグナル伝達の調節や、接合子発生に必須な転写因子の発現に必要とされるようであることを見いだした。動物の受精でもグルタミン酸受容体が機能しているかどうかは興味深い疑問である。

10.1038/nature23478

がん：免疫回避の調節

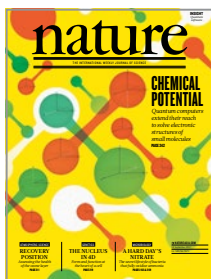
PD-1/PD-L1 阻害抗体は、さまざまながんの治療に効果を挙げている。今回 M. Dawsonらは、ゲノム規模の CRISPR-Cas9スクリーニングを行い、CMTM6がPD-L1発現の新規調節因子であることを突き止めている。CMTM6は、PD-L1のリソソームによる分解を阻害して再利用を促進することにより、細胞膜でPD-L1を維持する働きをしていることが明らかになった。またこれとは別に、T. Schumacherらは、細胞表面のPD-L1発現に影響する分子や経路を発見するために行った、一倍体遺伝学的スクリーニングについて報告している。彼らは、ケモカイン様因子CMTM6とCMTM4がPD-L1の安定性を調節する細胞内性因子であることを明らかにし、この軸を治療標的にすることで、がんの免疫療法の改善につながる可能性を示唆している。

10.1038/nature23643; 10.1038/nature23669

2017年9月14日号 | Vol. 549 No. 7671

がん：脳腫瘍細胞の階層性

がんには、患者間や腫瘍細胞間で不均質性が見られる。腫瘍増殖に最も大きく関与する細胞亜集団や、治療標的となる細胞亜集団を明らかにするのはいまだに難しい。X. Lanらは今回、バーコード付けした腫瘍細胞を用いて、ヒト神経膠芽腫 (GBM) 亜集団の動態を探索した。彼らは、増殖の階層性が確率論的な細胞運命決定を介して生じていると示唆している。このモデルでは、細胞周期の遅い幹細胞から、腫瘍増殖を促す増殖の速い前駆細胞が生じ、それが次に短命で増殖しない細胞を



生み出す。これは、選択される細胞の適応度の違いに基づくクローン進化モデルとは対照的である。また著者らは、GBMの一般的な治療法であるテモゾロミド (TMZ) 療法には抵抗性だが薬物併用療法の標的になり得る、GBM細胞のまれな亜集団も明らかにしている。

10.1038/nature23666

構造生物学：リポ多糖の輸送は「トラップ・アンド・フリップ」機構によっている

膜二重層を横切る脂質の反転移動は、膜での脂質の非対称性を維持するのに重要だが、これは膜交通やシグナル伝達にも関わっている。この過程はフリッパーゼにより触媒されていて、細菌ではATP結合カセット輸送体がリポ多糖 (LPS) を反転移動させる。LPSの輸送は細菌の生存にとって重要であるため、この輸送体は抗生物質開発の標的の1つでもある。今回 M. Liaoらは、大腸菌 (*Escherichia coli*) のフリッパーゼ MsbAによるLPS認識の構造基盤を示し、LPSの移動経路を明らかにしている。脂質が細菌の膜を横切って移動する際の複数の状態の構造が低温顕微鏡法を使って捉えられ、その1つからMsbAの膜貫通ドメイン中にLPSに当たると考えられる電子密度が検出された。これらの知見から、LPSは輸送体の奥深くに入り込むことで、通常のフリップ・フロップを経ずに移動するという「トラップ・アンド・フリップ」機構が提案されている。

10.1038/nature23649

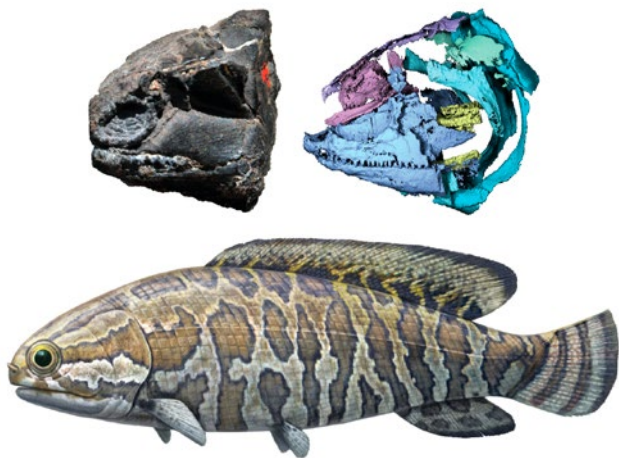
進化学：ポリプテルス類の起源を紐解く

ポリプテルス科の魚類 (ポリプテルスおよびアミメウナギ) は、極めて原始的な魚類の生き残りであり、現在はアフリカの淡水環境にのみ生息している。肉鱗^{にくき}や肺^{うろこ}、厚い鱗を併せ持つことから、ポリプテルス類はデボン紀の肉鱗類、さらには両生類とさえ関連付けられることもあったが、現在は他の全ての条鱗類魚類の現生姉妹群とする説が広く受け入れられている。しかし、硬い鱗に覆われているにもかかわらず、ポリプテルス類の化石記録は疑わしいほどに不足している。わずかに存在する化石記録がさかのぼれるのは白亜紀までで、クラウン群条鱗類が進化したと考えられているデボン紀の間には非常に長いゴースト系統が残されている。ポリプテルス類はまた、三疊紀の原始的な条鱗類であるスカニレピス型類 (Scanilepiformes) とも比較されたことがあるが、その類似性は表面的なものでしかなかった。今回、スカニレピス型類の1種である *Fukangichthys* の化石標本をコンピューター断層撮影法で解析し、さまざまな近縁種と比較した結果、ポリプテルス類が実際にスカニレピス型類に属することが明らかになった。こうした条鱗類の系統樹の書き換えによって、ポ

リプテルス類の起源はデボン紀から三畳紀へと一気に押し上げられ、さらには、クラウン群条鰭類の進化もデボン紀ではなく石炭紀というより新しい年代に起きたことが示唆された。

10.1038/nature23654

ANDREY ATUCHIN



2億5000万年前の化石魚 *Fukangichthys longidorsalis* の頭蓋骨 (上左) とそのバーチャルモデル (上右)、そして全身の再現図 (下)。

幹細胞：m⁶Aによる幹細胞の運命指定

最近の研究で、メッセンジャーRNA (mRNA) へのN⁶-メチルアデノシン (m⁶A) の修飾付加が、mRNAの翻訳や分解を調節することが報告されている。しかし、脊椎動物の発生に対するこの修飾の影響については、今のところ不明である。F. Liuらは今回、m⁶Aの付加が、ゼブラフィッシュの最初期の造血幹細胞の運命指定において細胞の運命を決定することを明らかにしている。Notchシグナル伝達を調節する遺伝子群へのこの修飾付加を阻害すると、最初期の造血幹・前駆細胞として指定されるべき前駆細胞で、内皮運命が維持された。

10.1038/nature23883

免疫学：ニューロンによる免疫細胞の調節

2型自然リンパ球 (ILC2) は、炎症や組織修復に関与する自然免疫の調節因子である。今回H. Veiga-Fernandesらは、ILC2がニューロメジンU受容体1 (*Nmur1*) を発現し、隣接した腸のニューロンが発現するニューロメジンに応答することを示している。この相互作用は、マウスで、寄生性線虫 *Nippostrongylus brasiliensis* の感染に対し、より強力な迅速なILC2の初期応答を引き起こした。またD. Artisらも、ILC2がNMUR1を発現していて、ニューロメジンに応答できることを報告している。この応答はマウスにおいて組織保護に働く2型応答を増強し、消化管からの *N. brasiliensis* の排除を促進した。

10.1038/nature23469; 10.1038/nature23676

2017年9月21日号 | Vol. 549 No. 7672

メモリースティック：細胞系譜において後の世代がさらに分裂するかどうかは、受け継がれた因子が決め

ている
増殖中の細胞集団が有糸分裂を完了する際には、新しく生じた娘細胞の一部は直ちに次の細胞周期に入るが、他の細胞は静止状態に切り替わる。今回T. Meyerらは、母細胞から受け継いだ競合する記憶によって、次の細胞周期を停止するか開始するかを娘細胞が決定する仕組みを明らかにしている。増殖シグナルによって、母細胞にサイクリンD1メッセンジャーRNA (mRNA) が蓄積される一方で、DNA損傷によって活性化したp53がより多く細胞に含まれるようになる。これらは娘細胞に受け継がれ、サイクリンD1 mRNAがタンパク質に翻訳されるとともに、p53がp21タンパク質の生成を促進する。より多くのサイクリンD1を受け継いだ娘細胞は次の細胞周期を通して活動を継続し、活性化したp53を大量に持つ娘細胞は活動を停止する。これは、DNAの損傷歴が少ない細胞を優先的に選んでより頻繁に増殖させることで、増殖中の細胞集団の健全性を最大にする細胞周期制御システムをもたらしている。

Cover; 10.1038/nature23880



免疫学：ニューロンによる免疫細胞の調節

V. Kuchrooらは今回、単一細胞RNA塩基配列解読法を用いて、上皮細胞由来のサイトカインであるIL-25やIL-33に対するマウスの肺自然リンパ球の応答を解析した。彼らは、ニューロメジンU受容体NMUR1が、2型自然リンパ球 (ILC2) の亜集団が特異的に発現する受容体であることを明らかにし、この受容体はIL-25と神経ペプチドリガンドであるニューロメジンU (NMU) によって活性化され、肺の炎症応答を誘導することを示している。このことから、NMU-NMUR1シグナル伝達は、アレルギー性肺炎を軽減する可能性がある。

10.1038/nature24029

冶金学：工業合金の3D印刷

金属の3D印刷、つまり積層造形は、粉末を合金化するためにレーザーや電子ビームのような直接的なエネルギー源を使用するが、そうしたことを行うことができるのは一部の金属のみである。多くの場合、凝固段階において大きな柱状粒子と亀裂が生じる。今回、J. Martinらは、これまで3D印刷できなかった航空宇宙用アルミニウム合金でこの問題に挑んで

いる。彼らは、それぞれの合金に合わせた細粒化用ナノ粒子で金属粉原料を修飾した。こうしたナノ粒子の組成は、結晶の格子間隔と密度の整合を特定することによって計算され、これによって低エネルギーの核形成障壁が実現された。この造核剤によって、凝固中に生じる応力に、より容易に適応する小さな等軸粒が生成され、亀裂が形成される可能性が低減された。得られた構造の機械的特性は、こうした細粒化剤の無い場合よりも優れており、展伸材のそれに匹敵する。

10.1038/nature23894



3Dプリンターにセットされた、ナノ粒子で修飾された金属粉末。

ゲノミクス：ランの起源

顕花植物の約10%を占めるラン科の植物は、形態も生活様式も非常に多様である。ヤクシマラン亜科を構成するヤクシマラン属 (*Apostasia*) は、ラン科の中で最も早い時期に分岐した系統の1つである。今回Z. LiuとY. Van de Peerらは、ラン科植物の進化と多様性について調べるため、中国南東部に見られる自家受粉性のラン *Apostasia shenzhenica* のゲノム塩基配列を解読した。彼らはまた、セッコク亜科の2種、ヒメコチョウラン (*Phalaenopsis equestris*) とキバナセッコク (*Dendrobium catenatum*) のより高精度なゲノム塩基配列を明らかにするとともに、他の亜科の代表種のトランスクリプトームの解析結果も報告している。ラン科の全ての亜科を網羅した今回の解析により、ランの起源やゲノムの進化、適応、多様化に関する洞察が得られた。 10.1038/nature23897

がん：色素沈着を誘導して皮膚がんを防ぐ

赤毛で色白、かつ日焼けしにくい人は、黒色腫を発症するリスクが高い。このような人たちはメラノコルチン1受容体 (MC1R) のバリエーションを持っていることが多く、このバリエーションはより広く見られるMC1R型に比べると色素沈着を誘導する能力が低い。R. Cuiらは今回、マウスでタンパク質のバルミトイル化という修飾を行うと、バリエーションMC1Rの色素

沈着誘導能が増強される仕組みを明らかにし、これが黒色腫発症の低下とつながることを示している。このような手法が実用化できるかどうかはまだ不明だが、今回の知見は黒色腫の予防戦略を示唆している可能性がある。

10.1038/nature23887

構造生物学：基本転写因子の構造

転写因子TFIIH (TFIIH) は、真核細胞でのRNAポリメラーゼII (Pol II) による遺伝子転写開始に必要とされる基本転写装置の一部である。TFIIHはまた、ヌクレオチド除去DNA修復に必要とされ、ヒトの遺伝疾患のいくつかでは、そのサブユニットの一部に変異が生じている。今回E. Nogalesらは、10個のサブユニットからなるヒトTFIIHの低温電子顕微鏡構造を決定し、ATPアーゼである2つのサブユニットXPBとXPDが支配的な役割を担っている構造を明らかにした。また、疾患に関連する変異もこの構造上に位置付けられた。遊離のTFIIHの構造と、Pol II開始前複合体と複合体を形成したTFIIHの構造との比較から、コンホメーション再編成に関する最初の手掛かりが得られ、転写開始機構の完全な解明がさらに一歩近づいた。

10.1038/nature23903

2017年9月28日号 | Vol. 549 No. 7673

免疫学：行動異常の背景となる脳の小領域

妊娠中のウイルス感染と母体免疫活性化 (MIA) は、子の行動異常との関連が示されている。今回G. ChoiとJ. Huhらは、体性感覚皮質の特異的な皮質小領域が、機能不全の決定的領域であることを突き止め、この



ような皮質小領域の存在とそのサイズが、特定の社会的行動と相関することを示している。彼らはさらに別の論文で、MIAを介する異常な行動表現型には、インターロイキン17 (IL-17) を産生する17型ヘルパーT (T_H17) 細胞を誘導する特定の腸内共生細菌が必要とする証拠を示している。この結果は以前彼らが示した、この関連性におけるT_H17細胞の役割と一致する。 10.1038/nature23909; 10.1038/nature23910

天文学：ブラックホールの周りがすっかりきれいなことが多い理由

物質を降着させることによって「活発に」活動する超大質量ブラックホールのは大半は、ガスと塵に隠されている。これま

でのいくつかの研究では、降着が増大するにつれて遮蔽が減少することが観測されているが、なぜこのようなことが起こるのかは分かっていない。今回C. Ricciらは、塵やガスに加わる輻射圧ふくしつがその説明になることを見いだしている。これは、遮蔽物質の大半がブラックホールの数パーセクから数十パーセク以内に存在することを意味している。著者らは、ブラックホールが遮蔽されているかされていないかの違いは、質量で規格化したブラックホールの降着率によって決まると結論付けている。

10.1038/nature23906

進化学：地球誕生の時期に迫る最古の生命の証拠

地球上の有機生命体の起源は、既知で最古の堆積岩に見いだされた証拠によって、年代がさかのぼりつつある。小宮剛こみやつよし（東京大学）らは今回、カナダ・ラブラドルの堆積岩に有機炭素が存在し、グラファイトと炭酸塩の安定同位体比の間に大きな分別が見られることから、有機生命体の存在した年代が39億5000万年以上前までさかのぼると主張している。最近の研究では、日光が届く浅瀬に生息するストロマトライトや、深海の熱水噴出孔に生息する細菌など、約37億年前には既に多種多様な生物が存在していたことを裏付ける証拠が示されており、今回の研究はこれらの結果と合わせて、生命にはそのすみかである地球に匹敵するほど長い歴史があることを示している。

10.1038/nature24019

遺伝学：親の年齢が新しい変異に影響を及ぼす

D. Gudbjartssonらは今回、両親の年齢や性別が*de novo*変異（DNM）の発生率や範囲にどのような影響を及ぼすかを調べた。アイスランド人1万4688人（両親と子で構成される1548トリオを含み、そのうちの225トリオについては少なくとも1人の孫の世代を含む）のゲノムの塩基配列解読が行われた。その結果、これまでで利用可能なものの中で最も大規模なヒトDNMのデータセットが得られ、10万8778個の高品質DNMが明らかになり、1トリオ当たり平均70.3個のDNMが存在することが分かった。また、どちらの親の年齢が上昇しても、DNMの種類の変化と、DNM数の増加が見られるが、母親の年齢に比べて父親の年齢による増加率の方が高いことが見いだされた。

10.1038/nature24018

神経科学：アルツハイマー病のリスク因子がタウ病変を増悪させる

APOE4は、遅発性アルツハイマー病発症における最も強力な遺伝的リスク因子であり、ApoE4は他のApoEアイソフォームに比べ、脳内アミロイドβ病変を増加させる。しかし、APOE

がこれとは独立してタウ病変にも影響を及ぼすのかどうかはこれまで不明だった。今回D. Holtzmanらは、ApoE4がアミロイドβ病変に対する作用とは全く別個に、タウ病変、神経炎症、およびタウを介した神経変性を増悪させることを示している。ApoE4は「毒性」の機能獲得作用をもたらす一方で、ApoEの欠損は防御的に働くことが明らかになった。

10.1038/nature24016

がん：脳腫瘍への道を阻むもの

脳腫瘍の増殖は、正常な脳の微小環境に影響を受ける。今回、著者らは正常なニューロンによるニューロリギン3（NLGN3）の分泌が関与する微小環境のシグナル伝達経路を明らかにしている。NLGN3は細胞外プロテアーゼにより切断され、神経膠腫細胞で発がん性シグナル伝達を刺激し、転写の変化を誘導する。腫瘍微小環境内のNLGN3切断を抑制すると、脳腫瘍異種移植片の*in vivo*での増殖が妨げられた。この結果から、この経路や微小環境シグナル伝達全般への干渉は、脳腫瘍の治療戦略となる可能性があることが示唆された。

10.1038/nature24014

がん遺伝学：胚のDNAメチル化プロファイルとがんとのつながり

ゲノム全体のDNAメチル化パターンは胚発生の初期に再プログラム化されるが、がんではこうしたメチル化状態の分布が異常になることがある。今回、A. MeissnerとF. Michorらは、マウス胚でDNAのメチル化が再獲得される複数の段階、すなわち着床前胚から初期の胚盤葉上層、あるいは胚体外外胚葉が生じる段階について、ゲノム規模のDNAメチル化とトランスクリプトームのプロファイルを決定し、胚盤葉上層と胚体外外胚葉ではDNAメチル化のゲノム内分布が異なることを明らかにした。胚体外エピゲノムではCpGアイランドのプロモーターの多くが新たにメチル化され、特に発生調節因子に関連するプロモーターでそれが著しい。メチル化獲得のこのパターンは、ヒトの腫瘍で見られる異常な過剰メチル化の獲得とよく似ている。この結果は、腫瘍発生の際に起こる発生関連遺伝子のプロモーターのメチル化が、発生に関して潜在的にコードされているエピジェネティックな全体像の再獲得を再現している可能性を示唆している。

10.1038/nature23891

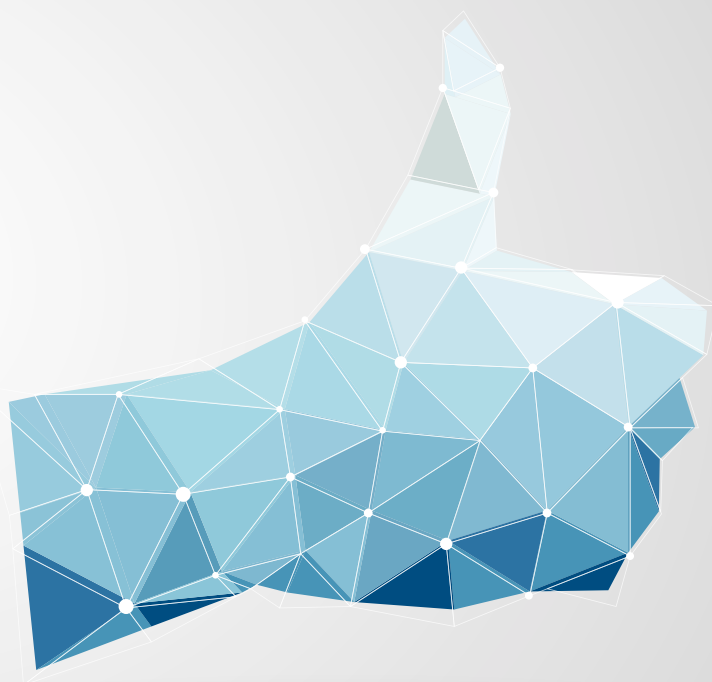
nature ダイジェスト

FOLLOW US!

 facebook.com/NatureJapan

 twitter.com/naturejapan

 nature.asia/jp-regist



Nature、Nature ダイジェスト、Nature 関連誌の最新情報をフォローしよう!

SPRINGER NATURE

EDITOR'S NOTE

2011年にカナダの鉱山で発見された白亜紀の曲竜の化石が、今回ついにノドサウルス類の新属新種として記載されました(6ページ)。「北の盾」を意味する「ボレアロペルタ」と名付けられたこの恐竜は、ミイラさながらに表皮までもがそのままの形状で保存されています。これは、死骸が勢いよく海底に沈み、背を下にして堆積層に埋まった後、それが分解される前に周囲の堆積物が団塊を形成した、というように複数の偶然が重なって実現したとか。また、表皮からは赤褐色の色素「フェオメラニン」の存在を示す化合物が見つかり、その分布パターンから、ボレアロペルタが赤褐色をしていて、カムフラージュで身を隠していた可能性も示唆されました。恐竜の色といえば、8月末には、オビラプトル類の羽毛恐竜ヘュアンニアの卵の新たな解析結果がPeerJに報告され、2種類の色素「プロトポルフィリン」と「ピリベルジン」の検出に基づいて、これらの卵が青緑色をしていた可能性が示されました。現生の飛べない鳥エミューも青緑色の卵を産むことから、ヘュアンニアも同様にカムフラージュで卵を守っていたと考えられるそうです。現生の鳥類や爬虫類を考えれば当然ですが、恐竜の世界も相当カラフルだったに違いありません。私たちはようやく、そうした色を「見る」ことのできる標本や技術を手に入れたのです。 **SA**

「Nature ダイジェスト」へのご意見やご感想、ご要望をメールでお寄せください。

宛先：naturedigest@natureasia.com
〔「Nature ダイジェスト」ご意見係〕

掲載内容についてのご意見・ご感想は、掲載号や記事のタイトルを明記してください。今後の編集に活用させていただきます。皆様のメールをお待ちしております。

広告のお問い合わせ

T 03-4533-8094 (広告部)

E advertising@natureasia.com

編集発行人：大場郁子

編集：宇津木光代、松田栄治、菖蒲さやか、山西三穂子

デザイン/制作：中村創 広告：高井優子 マーケティング：池田恵子

SPRINGER NATURE

シュプリンガー・ネイチャー

〒105-6005 東京都港区虎ノ門 4-3-1 城山トラストタワー 5F

T 03-4533-8050 (代表)

www.naturejpn.com

© 2017 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.
掲載記事の無断転載を禁じます。

OPEN FOR SUBMISSIONS

投稿募集中



COMMUNICATIONS
CHEMISTRY




nature.com/commschem



COMMUNICATIONS
BIOLOGY



nature.com/commsbio



COMMUNICATIONS
PHYSICS



nature.com/commsphys

化学、生物学、物理学の全ての領域の高品質な一次研究論文、総説、論評を出版する3つの新しいオープンアクセスジャーナルが誕生します。

全ての投稿論文は、社内の専門エディターが担当し、社外の専門編集委員のサポートを経て、審査、出版されます。

投稿することで得られるメリット

- ネイチャー・リサーチの高い編集基準
- 簡便な投稿プロセス
- 行き届いた査読
- 迅速な掲載可否判断
- 出版コンテンツの高い露出度
- CC-BY を標準としたオープンアクセス出版