

# nature ダイジェスト

科学が深まる、世界が広がる

03  
2018

生命が居住できる星の条件

▶ 20 ピラミッドの巨大新空間を科学的に発見

▶ 37 記憶 T 細胞の起源

▶ 30 連載：学术界サバイバル術入門①  
Powered by Nature Research Academies

▶ 08 FROM 日経サイエンス  
隕石が作るダイヤの姿

OIST フォーラム 2018

# 世界的視野と社会貢献 — 科学の役割とは？

イノベーションとは何か。科学者はいかにして地域経済に貢献しつつ、地球規模の課題に取り組むべきか。次世代の科学者の育成に関わる教育関係者や起業家らが一堂に会し、今後、大学に求められる役割について活発な議論を行った。

大学発ベンチャーをサポートして、地域に新しい産業を興すエコシステムを構築したい — 沖縄科学技術大学院大学 (OIST) の技術開発センターで技術移転などを推進する市川尚齊は開会の辞でこう語った。有楽町朝日ホールで開催された「OIST フォーラム 2018」では、グローバルな視点から大学の運営やイノベーションや起業を推進する専門家による活発な議論が交わされた。

## 社会に与えるインパクト

フォーラムの前半では、立命館アジア太平洋大学学長の出口治明氏、S&R 財団理事長の久能祐子氏が基調講演を行っ

た。出口氏は、大学が日本の競争力の先行指標であるとし、とがった人や個性のある人、自分の考えやセンスを大事にする人を育ててイノベーションを生み出していくためにはダイバーシティあふれる環境や交換留学の機会を提供していく必要があると述べた。また、日本が直面している少子高齢化社会を乗り切るためには、「ヤング・サポーター・オール」ではなく「オール・サポーター・オール」に発想を切り替えていくことが重要と指摘した。

研究生活の中で出会ったビジネスパートナーと共に2つの会社を設立した久能祐子氏は、それぞれの会社で新薬の開発に成功した経験を披露し、自己



効力感を持つこと、すなわち、目標を達成するためには自身がどのようにすればゴールに到達できるかの道筋を認知できているかどうかの大切さを説いた。久能氏によると、イノベーションが連続して発展する際には、第一のイノベーションとそれに続く第二のイノベーションの間に大きなギャップがあるという。第二のイノベーションに大勢でジャンプすることは難しいが、起業家が1人で取り組むと身軽で有利である、と久能氏。また、0から1を生み出すイノベーションは科学者や芸術家、起業家が取り組むことができるが、1を10に伸ばすにはプルーフオブコンセプトの工程でチームの力が必要となり、10から100を作るには組織の力、さらに100から1000を作るには社会の力が重要だと話す。

久能氏によると、社会の抱える問題ニーズを解決したいと思うときには、ア

OIST FORUM 2018 THINK GLOBALLY. CONTRI



出口 治明氏  
立命館アジア太平洋大学学長



久能 祐子氏  
S&R 財団理事長



高橋 恒一氏  
理化学研究所  
生命システム研究センター チームリーダー



岡本 尚也氏  
Glocal Academy 理事長

## 世界的視野で考え 地域で行動し イノベーションを進める



アイデアから発明や発見を起こすポジティブサイクルが重要なのだという。このサイクルは、科学者とインキュベーターが互いに接することで回ると久能氏。論文という研究のアウトプットだけではなく、研究が社会に及ぼすインパクトを指標化して評価する重要性を説いた。

### 若い研究者へのメッセージ

フォーラム後半では、「世界にはばたく若い世代へ」をテーマにパネルディスカッションが行われた。モデレーターを務めたのはネイチャー・リサーチ編集開発マネージャーのジェフリー・ローベンス氏。理化学研究所生命システム研究センターチームリーダーの高橋恒一氏は、AI技術や創薬のための実験技術の自動化が未来の創薬にどのようにつながるかを紹介し、世界を

変えるような真のイノベーションは、既存の市場や雇用の形態、家族のあり方といった価値観について社会的変化をもたらすため、新しい技術が社会にどのように親和していくかを人文社会学者とともに考えていく姿勢が重要と説明する。

英国にて物理学の博士号を取得後、近代日本社会の研究も行ってきた一般社団法人Glocal Academy理事長の岡本尚也氏は、教育に関わる立場から、地方と世界を結び付ける視点として、若い世代が、基礎科学と社会科学に共通する科学の観点を身につける重要性を指摘する。岡本氏によると、イノベーションには2種類あり、量的な変化や効率性の改善を生む直線的なもの、質的な変化や新たな価値を生むような曲線的な変化をもたらすものがあるという。スマートフォンの開発に見られるように、直線的な変化の積み重ねによって曲線的な変化が多く生じる。直線的な変化を生みながら、曲線的な変化点を見つけることが必要だと岡本氏。

一般社団法人21 Foundation代表理事であり、TEDxTokyo共同創始者のパトリック・ニューエル氏はこれまで、日本の企業で大学との産学連携の橋渡しに携わってきた。その経験から、ニューエル氏は、イノベーションの促進には子供の好奇心がそのまま残るよう大人が邪魔をせず自由な競争をさせる環境が大事であると話し、人間には歳を取っても脳の配線をつなぎ替え

るようにしてイノベーションを促していく能力があると述べた。

### コラボレーションの重要性

OISTの博士課程学生であるジェームズ・シュロスは、さまざまな専門分野の研究者間の交流や、ネット上の科学コミュニティとの交流が重要だと述べる。イノベーションのためには、異なる領域の科学者同士が学際的な分野で力を合わせて変化を促す大規模な共同研究がこれからますます重要になると感じているのだという。

最後にローベンス氏が、若い世代のイノベーションを奨励するプログラムの例として、米国ノートルダム大学のノートンフェロシップを紹介した。アイルランドの主要な大学との間での、科学技術、エンジニアリング、医療の学生の1年間の交換プログラムだ。その他、英国では、『デイリー・テレグラフ』がスポンサーとなって、革新的なアイデアにUK STEM Awardsとして賞および賞金を提供しているのだという。さらにOISTが提供するリサーチ・インターンシップやサイエンスチャレンジなどの試みにも触れた上で、学生が、他分野の学生と交流したり、産業界で働く機会を持ったり、価値のあるメンタリングの経験を受けたりすることの重要性を述べ、「世界的視野で考え、地域で行動し、そしてイノベーションを進めましょう」と語り、フォーラムを締めくくった。

BUTE LOCALLY. - SCIENCE THAT MATTERS -



**パトリック・ニューエル氏**  
21 Foundation 代表理事  
TEDxTokyo 共同創始者



**ジェームズ・シュロス**  
OIST 博士課程学生



**市川 尚斉**  
OIST R&D クラスタプログラムセクション  
技術移転セクション シニアマネージャー



**ジェフリー・ローベンス氏**  
ネイチャー・リサーチ編集開発マネージャー



# 15

M. KORNMESSER/NICK RISINGER/ESO

# nature ダイジェスト

# #03

## MARCH 2018

[nature.com/naturedigest](http://nature.com/naturedigest)

2018年3月1日発行

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

掲載記事の無断転載を禁じます。

COVER IMAGE: STANDRET/ISTOCK / GETTY IMAGES PLUS/GETTY

## NEWS FEATURE

# 「第二の地球」の レシピを求めて

これまでに発見された太陽系外惑星の中に、地球と似た惑星はあるのだろうか。そもそも、生命を育むことのできる惑星とは、どのような条件を備えたものだろうか。それを明らかにするためには、太陽系外惑星を地質学的に理解する必要がある。

## NEWS IN FOCUS

### 02 「他者」の空間位置を把握する場所細胞

動物が自己の空間位置を把握する脳内ナビゲーションシステムは、他者の場所や動きを捉える際にも使われていることが、コウモリとラットの実験で明らかになった。

### 03 1回の血液検査で8種類のがんを診断

一度の検査で8種類の腫瘍マーカーを探し出すことができる上、塩基配列解析が不要な液体生検が開発された。

### 05 細胞はウイルス由来のタンパク質を使って情報伝達を行う

細胞が情報伝達を行う様式に、これまでに知られていないものが見つかった。長期記憶に関わるタンパク質Arcは、ウイルスが遺伝物質を運ぶのと似た形式でそれを行っていたのだ。

### 06 「ダークマター」DNA は正常な発生に不可欠

脊椎動物のゲノムに存在する、種を越えて超高度に保存された謎のDNA配列。その機能の一端が明らかになった。

### 09 鍼治療の臨床試験で論争再燃

過去最大規模の臨床試験の1つから結果が報告され、がん治療における鍼治療の役割を巡る議論が再燃している。

## 10 絶滅したフクロオオカミのゲノムから分かること

フクロオオカミの仔の保存標本から得られたゲノムの解析で、この種が絶滅に至った経緯が見えてきた。

## 11 翼竜は生まれてすぐには飛べなかった？

中国で翼竜の卵の化石が数百個見つかった。中の胚の骨から、孵化したての幼体は飛べなかったことが示唆された。

## 13 2018年、科学界はどう動く？

### PUBLISHING ACADEMY

## 30 学術界サバイバル術入門 第1回

競争の激しい学術界で成功するためのノウハウを提供する Nature Research Academies の講師が、学術研究入門者に手ほどき。第1回は「学術出版のすすめ」。

### NEWS & VIEWS

## 32 大きさも量も大規模化した DNA 自己集合

DNA を自己集合させて物体を作る技術はこれまで、形成できる物体の大きさも量も限定的でコストも高かった。このほど、これらの限界を突破できる手法が開発された。

## 34 大気の微量成分からエネルギーを得る南極の微生物

南極の土壌に棲む微生物群集には、光合成ではなく微量ガスの酸化でエネルギーを獲得しているものがあるようだ。

### NEWS SCAN

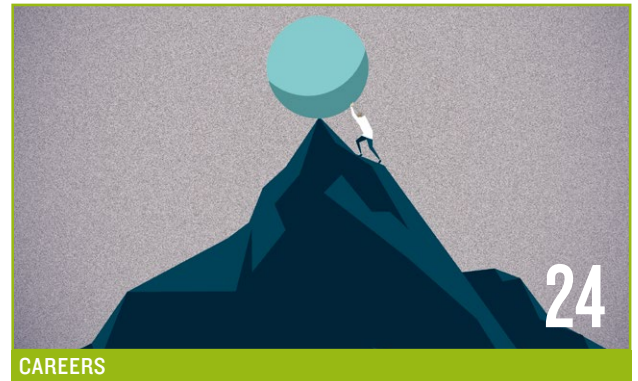
## 08 隕石が作るダイヤの姿 / サケの産卵、山を動かす

### EDITORIAL

## 40 遺伝子ドライブの研究は「安全第一」で

### HIGHLIGHTS

## 42 2018年1/4～1/25号



CAREERS

24

## 好き過ぎてつらい博士課程

博士課程学生への調査で、多くは博士課程に満足しているが、不確実な未来への不安や指導教官への不満が浮かび上がってきた。



NEWS &amp; VIEWS

37

## 記憶T細胞の起源

免疫の要、記憶T細胞。どの細胞から生じるか論争が続いていたが、DNA修飾を追跡した研究で、その起源が明らかにされた。



JAPANESE AUTHOR

20

## ピラミッドの巨大新空間を科学的に発見

クフ王ピラミッドの内部構造を宇宙線のミュオンで可視化することに成功した森島邦博・名古屋大学特任助教に話を伺った。

# 「他者」の空間位置を把握する 場所細胞

コウモリとラットで行われた2つの実験で、動物が自己の空間位置を把握するのに用いている脳内のナビゲーションシステムが、他者の場所や動きも捉えていることが示唆された。

動物の脳内ナビゲーションシステムについては、さまざまな機能を担う神経細胞（ニューロン）がすでに複数発見されているが、これまでの成果はいずれも「自己」の空間認知に関するものだった。そんな中、イスラエルの研究チームは今回、コウモリの脳で、同種他個体や物体などの「他者」の動きを把握するように特殊化したと見られるニューロンを突き止めた<sup>1</sup>。これらの細胞は、自己の場所を表現する「場所細胞」と同じく「海馬」と呼ばれる脳領域に存在している。また、日本の研究チームも、ラットの海馬が、自己の空間認知だけでなく他者の空間位置の把握にも使われていることを見いだした<sup>2</sup>。これら2つの成果は共に、*Science* 2018年1月12日号で報告された。この思いがけない知見は、哺乳類の脳の複雑なナビゲーションシステムをさらに踏み込んで解明するための足掛かりとなる。

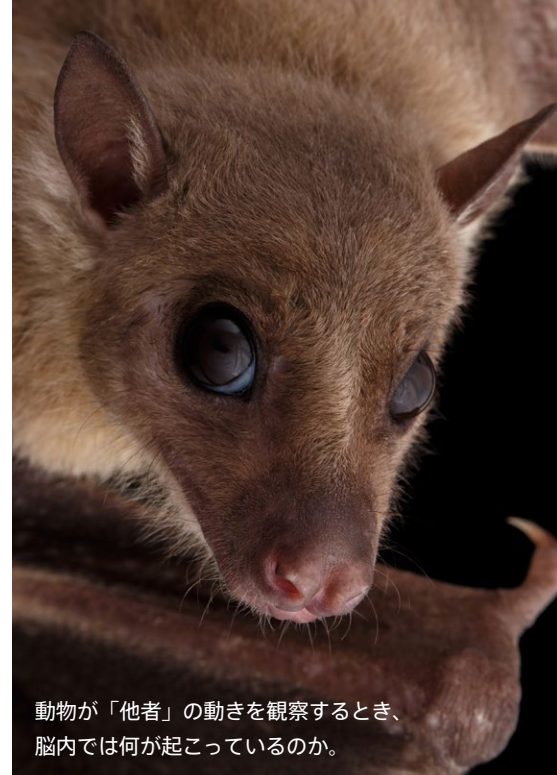
動物は、脳内の異なる種類のニューロンが出す信号をいくつも組み合わせることで、自己の空間内での位置を把握していると考えられている。例えば、海馬にある場所細胞や嗅内皮質（海馬に隣接する脳領域）にある「グリッド細胞」は、動物が特定の場所に来ると信号を出す。他にも、頭の向きに反応

してコンパスの役割をする細胞や、速度に反応する細胞が明らかになっている（*Nature* ダイジェスト2015年2月号「コウモリの3Dナビシステム」、同9月号「『速度計』ニューロンがラットの脳で見つかった」参照）。

今回の2つの報告が注目される点は、自己ではなく他者の動きに反応する細胞を初めて発見したことだ。コウモリもラットも社会性の動物であり、ヒトと同様に集団内の他の個体と交流したり、互いに学び合ったり、一緒に移動したりできるよう、仲間の場所を知ることが必要である。「当然、他者の場所も脳のどこかで符号化されているはずですよ。それが今回、自己の場所を把握するのと同じ脳領域で行われているらしいと分かりました。実に興味深いです」と語るのは、ノルウェー科学技術大学カブリシステム神経科学研究所（トロンハイム）のEdvard Moserだ。彼は、グリッド細胞の発見者の1人であり、その功績で2014年にノーベル医学生理学賞を受賞している（*Nature* ダイジェスト2014年12月号「空間認知に関わる脳細胞の発見に医学生理学賞」参照）。

## 仲間の動きを把握する

動物が他の個体の動きを観察するとき、



動物が「他者」の動きを観察するとき、脳内では何が起きているのか。

脳内では何が起きているのか。その答えを見つけるべく、ワイツマン科学研究所（イスラエル・レホヴォット）の神経生物学者Nachum Ulanovskyらは、エジプトルーセットオオコウモリ（*Rousettus aegyptiacus*）で観察学習課題実験を行った。2頭1組にして、まず一方（観察者）を始点にとどませ、もう一方（実演者）が部屋の反対側にある2つの着地点のいずれかへ飛んで行き、戻ってくる様子を観察させた。次に、少し時間を置いて観察者にも飛行をさせ、実演者と同じ経路をたどった場合にのみ報酬を与えた。これを繰り返すうち、観察者は報酬を期待して実演者の飛行をしっかりと観察するようになった。観察者の海馬には電極が埋め込まれており、Ulanovskyらはこれによって課題実行中のニューロン活動を記録した。

その結果、コウモリの脳には、自己の場所に対応して活動する標準的な場所細胞の他に、他者の場所に対応して活動する別の細胞群があることが明らかになり、Ulanovskyらはこれらの細胞を「社会的場所細胞」と名付けた。次

に、実演者の代わりにコウモリサイズのプラスチック製の物体を移動させ、同種他個体と無生物の物体とで観察中の脳活動にどのような違いが生じるか調べたところ、物体の場所を特異的に表現するさらに別の細胞群が見つかった。

これら3つの細胞群にはかなりの重複が見られ、例えば、自己の場所と他者の場所の両方を表現する細胞や、他者の場所と物体の場所の両方を表現する細胞もあった。「おそらく、これらが全て組み合わせられて1つのポピュレーションコードを構築し、近くを動いている動物や物体のうち、どれが一番重要で注意を払うべきかを判断しているのでしょう」とUlanovskyは説明する。

一方、理化学研究所脳科学総合研究センター（BSI；埼玉県和光市）の

藤澤茂義<sup>ふじさわしげよし</sup>らは、ラットで他者の位置を把握する脳細胞を探すため、T迷路を用いた他者観察課題実験を行った。その結果、コウモリと同様、ラットの脳でも標準的な場所細胞とは別に、他者の場所に対応して活動する別の細胞群が存在することが明らかになった。また、こうした細胞の中には、自己の場所と他者の場所を同時に表現しているものが数多くあったことから、藤澤らはこれを「同時場所細胞」と名付けた。この細胞群はさらに、他者の場所をより強く表現する「他者場所細胞」や、自己か他者かに関係なくその空間的な位置に対応する「共通場所細胞」などに分類されるという。標準的な場所細胞がそうであるように、今回ラットで発見された他者の空間認知システムもまた、ヒト

を含む他の哺乳類に備わっている可能性が高いと藤澤らは考えている。

今回報告された社会的場所細胞や同時場所細胞が、同種の他個体の動きを把握するためだけのものなのか、それとも、あらゆる物体の移動軌跡を符号化する海馬細胞系の一部なのかはまだ明らかでない、とMoserは語る。「でも、いずれにしてもワクワクする話です」。

（翻訳：船田晶子）

### ‘Bat-nav’ reveals how the brain tracks other animals

Article ID: d41586-018-00484-w  
2018.1.12 (Published online)

Alison Abbott

1. Omer, D. B., Maimon, S. R., Las, L. & Ulanovsky, N. *Science* **359**, 219–224 (2018).
2. Danjo, T., Toyozumi, T. & Fujisawa, S. *Science* **359**, 213–218 (2018).

## 1回の血液検査で8種類の がんを診断

液体生検の新しい手法が報告された。この方法で8種類の腫瘍と関連する遺伝的変異やタンパク質を血中から探し出すことができる上、塩基配列解析が必要なものに比べ安価に実施できる可能性がある。

1回の血液検査でさまざまな種類のがんを診断できる。そんな日が間もなく来ることを期待させる成果が、最近の予備的臨床試験で得られた。

ここ数年の間に、「液体生検」と呼ばれる実験的な検査法が数多く登場してきた。この検査法は、採血と検査のみで腫瘍の検出や追跡ができると期待さ

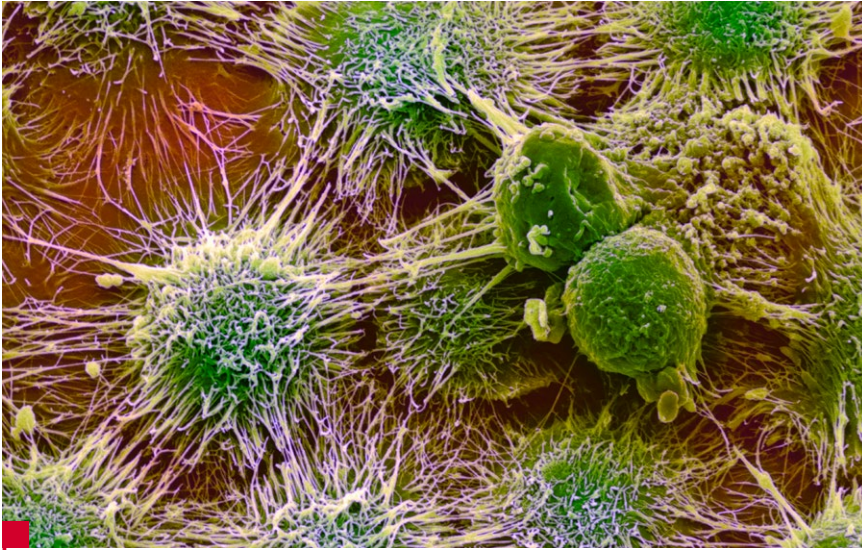
れている技術である。液体生検法の多くは、1種類のがんを対象とし、血中に遊離しているDNA塩基配列内で腫瘍関連の有無を調べて診断するよう設計されている（*Nature* ダイジェスト 2014年10月号「血流が運ぶ情報」、*Nature* ダイジェスト 2017年8月号「がん再発を早期探知できる液体生検」参照）。

ところが、2018年1月18日に*Science*で発表された最新の液体生検法は、DNAの変異だけでなく特定タンパク質の量の異常についても検査し、8種類のがんの検出に取り組むという点で異例のものだ<sup>1</sup>。これによって、診断済みのがん患者1000人余りの約70%でがんを検出することができた。

研究チームは今回の成果が最終的に、より簡便で安価な検査法につながってほしいと考えている。他の液体生検には、塩基配列解析を徹底的に行うものもあるからだ。「彼らの検査の成績は他の検査法と同程度ですが、費用対効果ははるかに高くなりそうです」と、ケンブリッジ大学（英国）のがん研究者Nitzan Rosenfeldは話す。

### 大海に針をすくう

学術界にしる医薬品業界にしる、液体



より高精度の血液検査法で、肝臓がん（写真）など、がんの早期発見が可能になるだろう。

生検を研究するグループは、がんの進行の追跡や、治療計画作成の目安を得ることに重点を置くことが多い。

しかし、ジョーンズホプキンス・キンメルがんセンター（米国メリーランド州ボルチモア）のがん専門医Nickolas Papadopoulosと同僚らは、治療がより容易な早期のがんを発見できる検査法を開発したいと考えた。

そのための血液検査法は特に難易度が高い。腫瘍が小さいと、血流中に放出されるDNAの量は大きい腫瘍よりも少なくなるのが一般的だからだ。また、検査対象として健常人の大規模集団を想定すると、偽陽性も懸念材料となる。誤った検査結果が出ることで、被検者がいたずらに過度のストレスを被ったり、不要で害を及ぼしかねない治療を受けたりする可能性があるからだ。研究チームは偽陽性のリスクを上昇させることなく液体生検の精度を上げる方法を模索した。そして彼らが開発したのが、タンパク質8種類の量と、遺伝子16個における変異の存在を調べる「CancerSEEK」という検査法だ。

Papadopoulosらは、この液体生検法を、8種類のがん（卵巣、肝臓、胃、膵臓、食道、直腸、肺、乳房）の1つがあるとすでに診断されている患者の集団で試した。その際、早期がんを重点的に見るために、がんが体の他の部位にまで広がっていた患者は除外した。

CancerSEEKの有効性は、がんの種類によって異なっており、卵巣がんだと98%を検出できたが、乳がんではわずか33%だった。患者の約63%では、がんの定着している臓器を正確に特定できた。ただし、検出の成績は早期がんよりも後期がんの方が良く、ステージIIIの腫瘍では78%を検出できたが、ステージIでは43%にとどまった。

### 精度の追求

たとえ早期がんの方の成績が劣っていても、これだけの検出率があれば、今後さらに研究を進める理由付けとしては十分だと、液体生検を扱うInivata社（英国ケンブリッジ）の科学部門主任でもあるRosenfeldは話す。「がんの半数を見つけられるだけでも素晴ら

しいことなのです」。ただし今回の研究では、CancerSEEKが未診断のがんを検出できるかどうかまでは明らかでないと、Rosenfeldは付け加えた。

もう1つの懸念は、一般集団で偽陽性率が高くなる可能性があることだと、モンペリエ大学（フランス）のがん研究者Catherine Alix-Panabièresは話す。一見健康でも、CancerSEEKが検査対象とするタンパク質の量を変化させるような炎症疾患を持っている人がいるかもしれないからだという。

こうした懸念を解消していくには数年を要するかもしれない。しかしPapadopoulosによれば、1万人以上の健常人でCancerSEEKを試験する研究がすでに始まっているという。彼は、組織・液体生検の製品開発を手掛けるパーソナル・ゲノム・ダイアグノスティクス（PGD）社（米国ボルチモア）の顧問も務めている。この研究では、被験者を5年にわたって追跡調査する予定である。

その間にも他の研究チームが、DNA塩基配列解析と他の血液検査法を組み合わせるのではないかと、カンディオーロがん研究所（イタリア・トリノ）のがん研究者Alberto Bardelliは期待を込めて話す。「今回の論文は刺激的ですね。全体像の中の一部だけを見てはいけなという事実を突き付けています。血液に含まれる情報の発信源全てに目を向ける必要があるのです」。

（翻訳：船田晶子）

### Simple blood test detects eight different kinds of cancer

Article ID: d41586-018-00926-5

2018.1.18 (Published online)

Heidi Ledford

1. Cohen, J. D. *et al.* *Science* <http://dx.doi.org/10.1126/science.aar3247> (2018).



# 細胞はウイルス由来の タンパク質を使って 情報伝達を行う

細胞が情報伝達を行う様式に、これまでに知られていないものが見つかった。長期記憶に関わるタンパク質Arcは、ウイルスが遺伝物質を運ぶのと似た形式でそれを行っていたのだ。

動植物のゲノム内には、ウイルス由来の塩基配列が至る所に存在している。これは、ウイルスが数億年前に自らのDNAを動植物のゲノムに組み込んだためだ。こうした配列の多くは活性を持たないが、今回、2つの研究チームが、マウスとショウジョウバエにおいて細胞の情報伝達に関与しているArcという遺伝子は、こうしたウイルス由来の配列の一部から進化したことをそれぞれ示し、2018年1月11日に*Cell*に報告した<sup>1,2</sup>。この2編の論文によれば、Arcにコードされるタンパク質は、そのウイルス様構造を利用して細胞間で情報伝達を行っているという。これは新しい形式の細胞間情報伝達であり、長期記憶形成などの神経学的機能に非常に重要な役割を果たしている可能性がある。

論文を発表したのは、ユタ大学（米国ソルトレークシティ）の神経科学者Jason Shepherdが率いるチームとマサチューセッツ大学医学系大学院（米国ウースター）の細胞生物学者Vivian Budnikが率いる研究チームで、両研究チームは、細胞外小胞をそれぞ

れ独立に調べていて、この現象にたどり着いた。細胞外小胞とは、細胞からくびれ切れて小胞となった細胞膜断片だ。細胞外に放出された小胞は、浮遊して体内を循環しているが、その機能についてはほとんど分かっていない。

## 保護殻

ShepherdらとBudnikらはいずれも、ニューロンから放出された細胞外小胞の多くがArc遺伝子を含んでいることを発見した。Arcは、ニューロン同士が接続を作るのを助けることが知られている。Arcを欠くマウスは、長期記憶の形成が損なわれており、またヒトでも、神経障害のいくつかはこの遺伝子に関連していることが分かっている。

ShepherdとBudnikはそれぞれ、マウスとショウジョウバエのArc遺伝子の塩基配列を解析し、それらがgagと呼ばれるウイルス遺伝子の塩基配列に似ていることに気づいた。HIVなどのレトロウイルスは、Gagタンパク質を使って、感染の際にウイルスの遺伝物質を保護しつつ細胞間で輸送するための「キャプ

シド」と呼ばれる外殻を組み立てる。

いずれの研究チームも、Arcタンパク質を高分解能顕微鏡下で観察し、このタンパク質がキャプシドに類似した構造を形成していて、その中にArcをコードするメッセンジャーRNA（mRNA）が含まれていることを見いだした。キャプシドはその後、細胞膜の断片に包まれ、細胞外小胞として放出された。

非ウイルスタンパク質がキャプシドを形成して細胞間でmRNAを伝達することが明らかになったのは今回が初めてだ。「革新的な発見です」と、ベルゲン大学（ノルウェー）の神経科学者Clive Bramhamは言う（彼は今回の研究には関わっていない）。

## 接続を作る

Budnikの研究チームは、ショウジョウバエでは、運動ニューロン（筋肉細胞に接続して、収縮のタイミングを指示するニューロン）が、Arcを含んだ小胞を作ることを見いだした。こうした小胞がニューロンから遊離して筋肉細胞に到達すると、筋肉細胞の膜に融合して、Arcタンパク質とArc mRNAを放出した。筋肉細胞がこのタンパク質とmRNAを何に使うのかは不明だが、Budnikは、Arc遺伝子を持たないハエでは、ニューロンと筋肉との接合が少ないことを示した。

一方Shepherdの研究チームは、マウス脳から採取したニューロンで同様の現象を見いだした。他のニューロンから放出された細胞外小胞を取り込んだニューロンは、一度刺激を受けて発火すると、Arc mRNAを用いてArcタンパク質を作り始める。

ShepherdとBudnikは、Arcを含む小胞は、動物の神経系が発達したり新しい環境や記憶に順応したりする際に、

ニューロンが長時間にわたる接続を形成したり、またその接続を壊したりするのを助けているのではないかと考えている。ただし、ハエとマウスのArcは似ているが、2種の異なるレトロウイルスから進化したものらしいことが分かった。このことからハエとマウスのゲノムに挿入された時期はそれぞれ異なると考えられる。Budnikは、この現象がマウスとハエの両方で見られることについて、「根本的に重要な、何かしらの役割があるに違いありません」と述べる。

### さらなる探求

細胞外小胞を研究する者たちは、この結果に興味している。小胞の体内での機能は、これまでほとんど分かっていなかったからだ。「確かに、何か新しいこ

とのように思われます」と、ジョンズホプキンス大学（米国メリーランド州ボルチモア）の分子生物学者で、HIVが細胞外小胞と相互作用する仕組みを研究しているKenneth Witwerは言う。

「今回の結果は、答えになるというよりもむしろさらに多くの謎を呼ぶことでしょう」と、オックスフォード大学（英国）で細胞外小胞を研究する生物学者Yvonne Couchは話す。彼女は、どのような刺激を受けてニューロンは細胞外小胞を作り始め、そして、隣接した細胞間で運ばれる物質には他にどのようなものがあるかを知りたいと考えている。

ShepherdとBudnikは、Arcについての研究をさらに進めるつもりだが、他のタンパク質にも同様の機能があるかどうかにも興味を持っている。ヒトの

ゲノムには、キャプシドを形成するタンパク質をコードできる可能性があるgag様遺伝子が100個ほど含まれている。Shepherdは、この新しいタイプの細胞間情報伝達は、私たちが思っている以上に一般的である可能性もあると言う。「これは始まりにすぎません」。

（翻訳：古川奈々子）

### Cells hack virus-like protein to communicate

Article ID: d41586-018-00492-w  
2018.1.11 (Published online)

Sara Reardon

1. Pastuzyn, E. D. et al. *Cell* <https://dx.doi.org/10.1016/j.cell.2017.12.024> (2018).
2. Ashley, J. et al. *Cell* <https://dx.doi.org/10.1016/j.cell.2017.12.022> (2018).

## 「ダークマター」DNAは正常な発生に不可欠

脊椎動物のゲノムには、種を越えて超高度に保存された、役割の分からないDNA配列が存在する。「超保存エレメント」と呼ばれるこれらの配列について、一部ではあるが、その正体がついに明らかになった。

ゲノムには「暗黒物質（ダークマター）」とも言うべき、謎のDNA配列が存在する。多種多様な動物の間で同一性が保たれているが、タンパク質をコードしておらず、機能が不明なのだ。10年以上にわたって科学者たちを翻弄してきたこの「超保存エレメント」の謎の一端を、今回、ローレンス・バークレー

国立研究所（米国カリフォルニア州）の研究チームがついに解き明かした。彼らは、脳の発生に重要なタンパク質をコードする遺伝子の近傍にある超保存エレメントのいくつかを欠失させることにより、これらの超保存エレメントがその遺伝子の発現を微調整し、脳の発生を誘導していることを明らかに

したのだ。この研究成果は、2018年1月18日付で*Cell*に掲載された<sup>1</sup>。

今回の発見は、アルツハイマー病などの神経疾患へのさらなる理解を促進する可能性がある。また、超保存エレメントの機能はほとんど分かっていないにもかかわらず、「全ての超保存エレメントは生物にとって重要なものだろう」と推測されていたが、研究チームはこの仮説を証明するための端緒もつかんだ。

「『論文の投稿は、それらの配列が何をしているかが分かるまで待つべきだ』と言われました。今回は、14年をかけてようやくそれを明らかにした、というところでしょうか」と、スタンフォード大学（米国カリフォルニア州）のゲノム学者Gill Bejeranoは話す。彼は、2004年に超保存エレメントについて最初に報告した人物である<sup>2</sup>。



## 何も起こらなかった

Bejeranoらが初めて超保存エレメントに気付いたのは、ヒトゲノムをマウス、ラットのゲノムと比較していたときだった。種間で信じられないほどよく似たDNA配列を481カ所発見したのだ。さらに、これらの配列はニワトリ、イヌのゲノムでも同様に高度に保存されていることが分かった。それは驚きだった。というのも、DNAは世代を重ねるたびに変異していくものであり、上述の生物たちは、最大2億年にわたって別々に進化してきているのだ。それにもかかわらず、これらの超保存エレメントはいずれも200塩基対以上にわたって、ほぼ100%の配列が一致していた。

タンパク質をコードする遺伝子は、変異が比較的少ない傾向にある。遺伝子が変異したことで対応するタンパク質に異常が生じ、その動物が生殖に至らずに死ぬと、変異した遺伝子は次世代に受け継がれないためだ。この論理に基づき、一部のゲノム学者は、超保存エレメントの変異も同様に自然選択で排除されたのではないかと考えた。タンパク質をコードしていないとしても、その機能が極めて重要なため、不

完全さが許容されないに違いないと考えたのだ。

しかしこの仮説は、2007年に壁にぶち当たった。ローレンス・バークレー国立研究所の研究チームが、マウスの超保存エレメント4個をノックアウトしてもマウスに異常は認められず、生殖も問題なく行われた、と報告したのだ<sup>3</sup>。Cell論文<sup>1</sup>の筆頭著者である同研究所のゲノム学者Diane Dickelは、「衝撃的でした。そのマウスは生きられないものとはかり思っていたのですから」と語る。

## よく調べる

Dickelらはゲノム編集ツールCRISPR-Cas9を用いて、再びその問題に取り組んだ。研究チームは、脳の発生に重要な遺伝子*Arx* (Aristaless関連ホメオボックス) の前後にある4個の超保存エレメントに注目し、マウスを用いて、これらの配列を単独またはさまざまな組み合わせで欠失させた。ノックアウトマウスは、またしても異常がなさそうに見えた。しかし、マウスの脳を解剖すると、異常が発見された。

ある配列が欠失したマウスには、脳細胞の異常な減少が認められた。この

症状は、アルツハイマー病の進行と関連付けられている。また、別の配列が欠失したマウスには、てんかんで見られるのと同様に、記憶の形成に関与する前脳の一部に異常が生じた。「普通は刃のように滑らかなラインを描くのですが、ノックアウトマウスでは辺縁がぐにゃぐにゃと波打っていたのです」とDickelは説明する。

Dickelは、こうした脳の異常によって認知障害が生じたマウスは、野生では危険にさらされる可能性があると考えている。その結果として、異常のある個体は正常な個体と比較して生殖の成功率が低くなるため、超保存エレメントの変異は個体群内に広がらないのかもしれない。

今回の研究を受けて、アルツハイマー病や、認知症、てんかんなどの神経疾患患者を対象に、これまで見逃されてきた非コード配列に変異を有しているかどうかを調べる研究が進められる可能性がある。他の多くの超保存エレメントの機能はまだ明らかにされていないが、Bejeranoは、それらの配列もまた不可欠なものであることが示されると確信している。しかし、一部の配列が示す最高100%という保存率の高さには、今なお戸惑いを覚えている。生物学では、軽微な変動が許容される場合が多いためだ。「テーブルの上にはまだ謎が残されています」とBejeranoは語る。 ■

(翻訳：小林盛方)

### 'Dark matter' DNA influences brain development

Article ID: d41586-018-00920-x

2018.1.18 (Published online)

Amy Maxmen

1. Dickel, D. E. *et al.* *Cell* <http://dx.doi.org/10.1016/j.cell.2017.12.017> (2018).
2. Bejerano, G. *et al.* *Science* **304**, 1321-1325 (2004).
3. Ahituv, N. *et al.* *PLoS Biol.* **5**, e234 (2007).

## 隕石が作るダイヤの姿

六方晶ダイヤモンドの形成過程が高速X線写真で明らかに

グラファイト（黒鉛）を含む隕石が地球に激突すると、衝突の熱と圧力によって炭素の形態が変わり、希少で非常に硬いタイプのダイヤモンドになる場合がある。この変化が原子レベルでどのように生じるのか、正確なところは長年の議論的だったが、衝突の瞬間をシミュレートしてこの変化が生じる過程をリアルタイムで観察することにより、いくつかの疑問に答えられるようになった。

ワシントン州立大学（米国）の物理学者Yogendra Guptaからはアルゴンヌ米国立研究所にある衝突チャンバーを用いて隕石の衝突を模擬した。実験ではグラファイトの円盤めがけてフッ化リチウムの弾丸を秒速5.1kmで撃ち込み、衝突の様子を超高輝度のX線によって毎秒1500億フレームの速度で“撮影”した。

グラファイトからダイヤモンドへの遷移が、圧縮の過程で起こるのか、衝突後の変形と応力解放の組み合わせによるものなのかという問いに対し、「圧縮の際に起こることを明確に示しました」とGupta。具体的には、結晶構造から「六方晶ダイヤモンド」と呼ばれるこのまれなダイヤが、圧力50万気圧においてナノ秒の時間スケールで形成される。これは、六方晶ダイヤモンドが、従来考えられていたほどには激しくない衝突でも生じ得ることを示している。

以前の研究では六方晶ダイヤモンドの形成にはこの4倍近い高圧が必要とされてきたが、「異論も多かったのです」とGuptaは言う。以前の研究のほとんどはグラファイトをゆっくり圧縮した場合の原子構造の変化を調べていた。Guptaらの今回の実験はこれと対照的に、突然の衝撃を受けたグラファイトから衝突方向とまさに一致した向きに六方晶ダイヤモンドが直接に形成されることを示した。2017年10月の*Science Advances*に発表。

「この研究の最もワクワクする点は、ある結晶構造から別の結晶構造へ変化する途中にある原子の正確な位置を突き止めた方法だ」とローレンスリバモア米国立研究所の物理学者Lorin Benedictは言う。

圧力が下がった後も六方晶ダイヤモンドはその形状を維持したが、応力がゼロになっても安定を保つかどうかを知りたいと、Guptaは考えている。そうした実験は工業用の人工ダイヤモンドの新製法につながるかもしれない。

（翻訳協力：鐘田和彦）

## サケの産卵、山を動かす

川底にくぼみを掘る行為が地形を変え得る

魚の生殖行動は重大事には思えないだろうが、何千年にもわたって無数のカップルが産卵すると、地形に痕跡が残る。米国北西部太平洋岸の河川にサケの産卵が与える影響をモデル化した最近の研究は、産卵が同地域の山腹の形成に実際に寄与していると結論付けた。

サケは繁殖のため、生まれ故郷の川に海から戻ってくる。雌はちょうど良い大きさの石がある場所を見つけると、くぼみを掘って産卵する。雄がこれに精子を振り掛けた後、雌は上流側に別のくぼみを掘り、その土砂で卵を覆う。このように掘り返していると、土砂が下流に動きやすくなって川底が侵食されると、研究論文を共著したワシントン州立大学（米国）の水生生態学者Alexander K. Fremierは言う。

### 川底を3割ほど余分に侵食

Fremierらは実験用水路でサケの産卵による侵食速度に関するデータを集め、それに基づいて実際の河川が数百万年でどう変わるかを推定した。その結果、産卵によって、川底が30%余分に削られて低くなった可能性があることが分かった。2017年9月の*Geomorphology*に発表。

ワシントン大学（米国シアトル）の地形学の教授David R. Montgomeryはこの研究を「通常は物理的過程と考えられている事柄と生物活動が関連していることを見事に示しています」と高く評価する。Montgomeryは自らの研究で、山の隆起がサケの多様化と特殊化、種分化を促進した可能性を示している。今回の研究は、それらの過程を、サケの産卵が侵食速度や河川の傾斜度を変えることによってさらに促進している可能性を示唆している。

そうした影響は隆起の影響と比べれば微々たるものだろうとMontgomeryは考えているが、雪崩式に生じる一連の現象について、Fremierらが「考えるきっかけを作ってくれました」と付け加える。

（翻訳協力：粟木瑞穂）

# 鍼治療の臨床試験で論争再燃

鍼治療でがん患者の痛みが緩和されるかを調べる臨床試験が複数行われている。今回、過去最大規模の臨床試験の1つから結果が報告され、がん治療における鍼治療の役割を巡る議論が再燃している。

2017年12月7日、米国テキサス州で開催されたサンアントニオ乳がんシンポジウムで、腫瘍専門医が行った発表によると、全米11カ所のがんセンターで乳がんのホルモン療法を受けている226人の女性患者を対象として鍼治療の臨床試験を行ったところ、本物の鍼治療を受けた患者では、治療の副作用として生じる痛みが有意に緩和されたという。彼らは、がん患者の命を救うホルモン療法に伴う痛みが鍼治療で緩和されて患者がホルモン療法を継続できるようになることで、患者の生存率を改善できる可能性があると考えている。しかし懐疑的な人々は、鍼治療において完全に厳密な二重盲検試験を行うことはほぼ不可能だと批判する。

鍼治療への関心が高まったのは、疼痛緩和に、不快な副作用と強い中毒性があることで知られるオピオイド鎮痛薬を用いることに対する懸念からであった。そうした状況から、米国の多くのがんセンターは疼痛緩和のための補完医療を提供しており、米国立がん研究所から指定を受けているがんセンターの90%近くが、患者に鍼治療を試すことを提案し、70%強が副作用の治療として鍼治療を行っている<sup>1</sup>。エール大学医学系大学院の神経科医Steven Novellaなどの懐疑的な人々は、この

事実を非常に残念に思っている。彼は、鍼治療には科学的根拠がなく、鍼治療の推奨は「患者に魔法が効くと言うようなものだ」と批判する。

そうした批判はあるものの、コロンビア大学医療センター(米国ニューヨーク州)の腫瘍専門医Dawn Hershmanは、乳がんの治療に一般的に用いられるホルモン療法剤の1つであるアロマターゼ阻害薬が引き起こす痛みを鍼治療で緩和できるかどうか調べることにした。アロマターゼ阻害薬は閉経後のホルモン感受性乳がん患者に使用され、エストロゲン濃度を低下させることで乳がん細胞の増殖を抑える効果があり、5～10年の継続服用により、がんの再発リスクを低下させることが知られている。しかし残念ながら、特に関節炎に似た痛みを引き起こすという副作用のため、半数近くの患者が定期的に服用しなくなったり、服用をやめたりしてしまうという問題が生じている。

## 意味のある疼痛緩和

小規模な臨床試験で肯定的な結果が出たのを受けて<sup>2</sup>、Hershmanらは大規模な臨床試験に着手した。参加した226人の女性患者を3つのグループに割り振り、1番目のグループには本物の鍼治療を、2番目のグループには経穴(つ

ば)ではない箇所を鍼を打つ偽の鍼治療を行い、3番目のグループには治療を行わなかった。また、鍼師たちを訓練して常に同じ治療を行えるようにし<sup>3</sup>、患者には痛みの記録を依頼した。

6週間の治療コースの後、本物の鍼治療を受けたグループでは、他の2グループに比べ、0から10までのスケールで評価する「最悪の痛み」が約1ポイント低くなっていた。これは統計的に有意な効果で、デュロキセチン(ホルモン療法を受ける乳がん患者の痛みを緩和するために用いられる抗うつ薬)などの効果よりも大きかった<sup>4</sup>。また、痛みが2ポイント以上改善した(Hershmanはこれを「臨床的に意味のある」変化とする)患者の割合は、どちらの対照群でも30%前後だったが、本物の鍼治療を受けたグループでは58%と、ほぼ2倍であった。さらに、デュロキセチンの場合とは違い、鍼治療の効果は治療コースの終了後も持続した。Hershmanはこれらの結果から、鍼治療はデュロキセチンやオピオイド鎮痛薬などの処方薬の「合理的な代替案」であると結論付けた。

ペンシルベニア大学(米国フィラデルフィア)の疼痛管理方針研究のディレクターで、*Pain Medicine*の編集長であるRollin Gallagherは、この臨床試験を歓迎する。「現在、鍼治療の臨床試験から中～高レベルのエビデンスが得られており、今回の結果もその1つと言えます」。

## プラセボ効果?

しかし、懐疑的な人々は研究を批判している。エクセター大学(英国)の名誉教授で補完医療の専門家であるEdzard Ernstは、臨床試験がどんなに厳密に行われたとしても、鍼師は自分が本物の治療をしているか偽の治療をし

ているかを知っていて、このことが患者の反応に影響を及ぼした可能性がある」と批判する。「今回の臨床試験もまた、鍼治療が『劇場型プラセボ』であることを示唆するものなのだと思います」。

しかし、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）の統合医療チーフのJun Maoは、参加者自身にどんな治療を受けているかが分かってしまう、緩和ケアや認知行動療法、運動などの手法を用いる研究に比べれば、今回のような鍼治療の臨床試験はよく盲検化されていると言う。にもかかわらず、懐疑的な人々は「前者の臨床試験の結果は簡単に受け入れるのに、鍼治療については特別視しています。たったこれだけの論拠で鍼治療の全体を否定するのは公平ではありません」と彼は指摘する。

Hershmanは、懐疑的な人々の懸念により、患者にとって最善なものが何であるかが見えなくなる恐れがあると考えている。「恐ろしい毒性を生じ得る薬を使う治療の方が良い、ということも問題です」と彼女は言う。「私たちは可能な限り厳密な方法で鍼治療の研究を行いました。つまるところ、ホルモン療法剤を服用し続けることができたり、患者のクオリティー・オブ・ライフ（QOL；生活の質）を改善できたりするなら、鍼治療を行う価値はあるのです」。

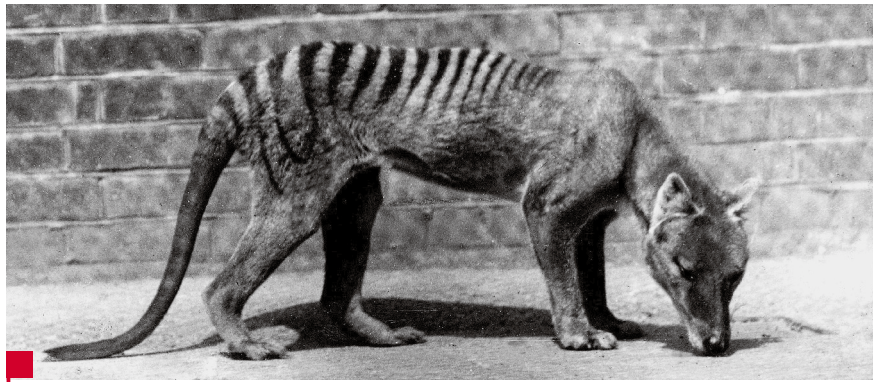
（翻訳：三枝小夜子）

### Acupuncture study reignites debate

Vol. 552 (157-158) | 2017.12.14

Jo Marchant

1. Yun, H. J., Sun, L. & Mao, J. J. *Natl Cancer Inst. Monogr.* **2017**, lgx004 (2017).
2. Crew, K. D. et al. *J. Clin. Oncol.* **28**, 1154-1160 (2010).
3. Greenlee, H. et al. *J. Acupunct. Meridian Stud.* **8**, 152-158 (2015).
4. Henry, N. L. et al. *J. Clin. Oncol.* <http://dx.doi.org/10.1200/JCO.2017.74.6651> (2017).



PAUL POPPER/POPPERFOTO/GETTY

フクロオオカミ（*Thylacynus cynocephalus*）は1936年に絶滅した。

## 絶滅したフクロオオカミのゲノムから分かること

フクロオオカミの仔の保存標本から得られたゲノムの解析で、この種が絶滅に至った経緯が見えてきた。

背中に特徴的な縞を持つことから「タスマニアタイガー」とも呼ばれるフクロオオカミ（*Thylacynus cynocephalus*）は、かつてニューギニアからタスマニアにかけて生息していた肉食性有袋類である。知られる限りで最後のフクロオオカミは、1936年9月7日にオーストラリアの動物園で死亡した。今回、この絶滅種のゲノムの全塩基配列が解読され、*Nature Ecology and Evolution*で報告された<sup>1</sup>。この成果は、フクロオオカミが個体数を減少させた経緯や、イヌ科動物に不思議なほど似ている理由を解き明かす糸口となる。

「フクロオオカミは奇妙で風変わりな動物でした」と、メルボルン大学（オーストラリア）の進化発生生物学者で、今回のゲノム解読論文の筆頭著者でもあ

るCharles Feiginは話す。「フクロオオカミはイヌやオオカミにそっくりな姿をしています、実際は有袋類なのです」。

人類の到来は、フクロオオカミにとって凶報となった。初期の狩猟採集民がオーストラリアのあちこちに広がって住み着くと、それに伴ってフクロオオカミの生息域は縮小していった。数千年前にオーストラリアにディンゴ（*Canis lupus dingo*）が持ち込まれたことで、フクロオオカミの個体数はさらに減り、タスマニアに隔離されていた個体群だけがかるうじて生き残った。その後、19世紀に入植した欧州人はフクロオオカミを牧羊にとっての脅威と見なし、死骸1頭につき1ポンドの報奨金を出した。報奨金制度は1909年になくなったが、その頃には野生のフクロオオカミは絶滅寸前

となっており、動物園はこの動物を入手するために大金を払うことをいとわなくなっていた。そして、残っていた個体は世界中の動物園に引き取られていった。

フクロオオカミのミトコンドリアゲノム（短いDNA鎖で、母性遺伝する）については、すでに塩基配列解読が行われている<sup>2</sup>。これは、スミソニアン研究所（米国ワシントンDC）の保管するフクロオオカミ標本から採取した体毛を使って解読されたものだ。メルボルン大学の発生遺伝学者 Andrew Pask が率いた今回のチームは、それよりはるかに長い核ゲノムを入手した。こちらは、1909年に母親の育児嚢で見つかったアルコール保存されていた、生後1カ月の仔の組織から得られたものである。

核ゲノムには、ミトコンドリアゲノムと比べてより多くの祖先に関する情報が含まれている。今回の核ゲノム解読で、フクロオオカミの遺伝的多様性が低下していたことが明らかになり、人類がオーストラリアに到来するずっと以前の約7万～12万年前に、すでに個体数が減少し始めていたことが示唆された。同様のパターンは、タスマニアデビル (*Sarcophilus harrisi*) のゲノムにも見られる<sup>3</sup>。Feigin は、気候の寒冷化が2つの種の生息域を縮小させ、それによって両種は人類による影響を受けやすくなったのではないかと考えている。

フクロオオカミはイヌ科動物とさほど近縁ではなく、両者の共通祖先は約1億6000万年前までさかのぼるが、頭部の形状は極めてよく似ている。このことから、フクロオオカミとイヌ科動物は捕食型の生活をしやすいするために類似の適応をした可能性があると考えられる。そうした「収斂進化」を検証する中で、Feigin と Pask らは、フクロオオカミとイヌ科動物の両方で類似の

DNA変化が見られる81個のタンパク質コード遺伝子を突き止めた。その中には、頭蓋の発生・発育に関わる遺伝子も含まれていた。ただし、これらの遺伝子の中で自然選択を受けて進化したと見られるものは、フクロオオカミにもイヌ科動物にも見つからなかった。

この結果から研究チームは、フクロオオカミとイヌ科動物で長く突き出た鼻などの共通する形質が見られる現象には、タンパク質のアミノ酸配列よりもむしろ、発現の仕方に影響を及ぼす「シス調節配列」のようなDNAの影響が大きいのではないかと考えている。

それは「もっともな推論」だと、ウィスコンシン大学マディソン校（米国）の進化発生生物学者 Sean Carroll は話す。新たな身体形質は、広範な動物で共有されている発生経路の発現が変化するときに出現する傾向があるからだ。■

（翻訳：船田晶子）

### Extinct Tasmanian tiger spills its genetic secrets

Vol. 552 (156-157) | 2017.12.14

Ewen Gallaway

1. Feigin, C. Y. et al. *Nature Ecol. Evol.* **2**, 182-192 (2018).
2. Miller, W. et al. *Genome Res.* **19**, 213-220 (2009).
3. Murchison, E. P. et al. *Cell* **148**, 780-791 (2012).

## 翼竜は生まれてすぐには飛べなかった？

中国で、立体構造を維持した翼竜の卵の化石が数百個見つかった。中には胚が保存されたものもあり、その骨の特徴からは、孵化したばかりの幼体は飛べなかった可能性が示唆された。

「翼竜」は、動力飛行（羽ばたき飛行）を進化させた最初の脊椎動物として知られるが、その初期の生活史については長く謎に包まれてきた。この空飛ぶ爬虫類が卵を産んでいたことが確認されたのは2004年になってからで、その後も卵の化石は少数しか見つかっていなかった。今回、中国西北部・新疆のトルファン・ハミ盆地で新たに発見された、前期白亜紀（約1億2000万年前）の翼竜「ハミプテルス・ティアンシャネンシ

ス (*Hamipterus tianshanensis*)」の卵の化石は、数が数百個に上るだけでなく、保存状態が良好で、立体構造を維持した胚も多数含んでいた点が注目されている。これらの化石の特徴からは、翼竜が生まれてすぐには飛べなかった可能性や、集団で営巣していたと見られることが示され、この成果は *Science* 2017年12月1日号で報告された<sup>1</sup>。

中国科学院古脊椎動物古人類研究所（北京）の Xiaolin Wang（汪篠林）ら



215個に上るハミプテルスの卵とそこに含まれていた胚の化石は、孵化直後の翼竜の姿を垣間見せてくれる。

は、2006年から10年がかりで約3m<sup>2</sup>の大きさの板状の砂岩層を発掘し、散乱したハミプテルスの骨と混在する、少なくとも215個の卵の化石を見いだした。これらの化石をコンピューター断層撮影（CTスキャン）や入念なクリーニングを行って観察したところ、42個の卵に内容物が認められ、そのうち16個には胚の化石が含まれていることが分かった。胚の発生段階は同じでなく、いくつかの異なる段階に分けられた。

リンカーン大学（英国）で鳥類と爬虫類の生殖を研究するCharles Deemingは、*Science* 同号に掲載された解説記事<sup>2</sup>で、今回の発見を翼竜研究における「重大な進歩」だと評価している。ポーツマス大学（英国）で爬虫類を研究するMark Wittonは、「ハミプテルスが、最も完全な知見が得られている翼竜の仲間入りを果たせる可能性が出てきました」と語る。

今回発見された卵の数々は、特定の

方向性を持たずに集積していることなどから、嵐による雨などでまとめて流され、湖に行き着いて化石化したものと推測された。また、卵のサイズや胚の発生段階が多様なため、複数の巣の卵が混ざったものと考えられた。Wangらは、これらの知見はハミプテルスが集団営巣していたことを強く示唆していると主張する。

### 飛べたのか？

胚の骨の詳細な分析からは、ある意外なことが明らかになった。これまで、翼竜は孵化の直後から飛んでいたと考えられていた。ところが今回発見された胚では、大腿骨は関節に至るまで十分に発達していたのに対し、飛行に必要な前肢を構成する骨は、骨化はしていたものの関節などは形成されていなかった。これは、後肢の発達が前肢に比べて著しく速かったことを示唆している。Wangら

は、「孵化直後のハミプテルスの幼体は、地上を歩き回ることではできても、空を飛ぶことはできなかった」と結論付けた。

しかし、Wittonは納得していない。彼は、翼竜の多くが孵化時にはすでに十分発達した翼を持っていたと考えており、翼の骨が未発達に見えるのは、構造の一部が軟骨でできていたために化石化しなかっただけではないか、と指摘する。「翼竜の孵化時の体重はわずか数gだったでしょうから、軟骨でも強度は十分だったはずですよ」とWittonは言う。

Wittonらは、2017年9月に英国バーミンガムで開催された古脊椎動物学・比較形態学シンポジウムで、別の翼竜2種の孵化幼体の化石に関する研究成果を発表し、これらの幼体の翼の骨は十分に発達しており、生まれてすぐに飛べたと見られると結論している<sup>3</sup>。

Deemingもまた、今回のデータセットはまだ限定的であるとし、あまりに多くを推測すべきではないと警告する。Wangらが分析したハミプテルスの胚は、孵化までまだ時間があつた可能性もあるからだ。今回の論文の共著者であるブラジル国立博物館（リオデジャネイロ）の古生物学者Alexander Kellnerは、新疆で現在発掘が進められている他の卵の化石が、今後空白の一部を埋めてくれるだろう、と期待する。「異なる発生段階の胚を見つけ、全体的な発生の流れを解明したいですね」とKellnerは語る。

（翻訳：小林盛方）

### Rare pterosaur eggs unearthed in China

Vol. 552 (14–15) | 2017.12.7

John Pickrell

1. Wang, X. et al. *Science* **358**, 1197–1201 (2017).
2. Deeming, D.C. *Science* **358**, 1124–1125 (2017).
3. Witton, M. P., Martin-Silverstone, E. & Naish, D. *PeerJ Preprints* **5**, e3216v1 (2017).



# 2018年、科学界はどう動く？

2018年の科学界では、キログラムの再定義、はやぶさ2の小惑星到着、遺伝子編集を応用した新たな治療の臨床試験、科学出版を巡る対立の決着など、さまざまな動きが予想される。

## 宇宙観測

カナダ・ブリティッシュコロンビア州に建設された電波望遠鏡「CHIME」（カナダ水素強度マッピング実験）が2018年、フル稼働し始める予定だ。その観測により、原因不明の現象、高速電波バーストが今ほど謎めいた現象ではなくなる可能性がある。高速電波バーストはミリ秒レベルのごく短時間の電波が観測される現象で、2007年に発見されたが、観測例は全部で数十例にすぎない。天文学者たちは、CHIMEを使って1日当たり数十例を観測したいと考えだ。4月には、欧州宇宙機関（ESA）の宇宙望遠鏡「ガイア」の2番目の観測データセットが公表される予定で、天文学者たちはすぐに解析に取り掛かるだろう。ガイアは、銀河系の10億個以上の星の位置と運動を精密に調べる計画であり、新たなデータは、銀河系の渦巻き形状に関する理解を進める可能性がある。

## 先史時代のアメリカ人

人類が南北米大陸にどのように広がったかに関し、古代のゲノムの研究結果が2018年にいくつも明らかにされる見込みで、その詳細が判明するかもしれない。南北米大陸への人類の拡散は、1万5000年ほど前に始まったと考えられているが、科学者たちはそれがいつ、どのように進んだかの見積もりを狭め、

その後の移動のタイミングとルートも明らかにしたいと考えている。こうした研究は、現在のアメリカ先住民集団に見られる遺伝的多様性を説明することにも寄与するかもしれない。

## 単位の再定義

数十年の地道な研究結果をもとに、アンペア、キログラム、ケルビン、モルの4つの測定単位の再定義が2018年末に行われる見通しだ。11月に国際度量衡総会が開かれ、58カ国の代表が新定義の採用について投票を行う。新たな定義は、人工物による定義や抽象的な定義ではなく、基礎物理定数の正確な値に基づいている。新たな定義は、同総会で承認されれば2019年5月に発効する。

## 月とその先へ

ドナルド・トランプ米大統領は2017年12月、月に再び宇宙飛行士を送ることを米航空宇宙局（NASA）に指示した。一方で、インドと中国も月面に無人ローバー（探査車）を着陸させる計画を進めている。インドの月探査計画「チャンドラヤーン2号」は2018年初めに、同国初の宇宙での軟着陸を月で試みる。12月には、中国の月探査計画「嫦娥（じょうが）4号」が世界初の月の裏側への軟着陸を行う。太陽系では、宇宙航空研究開

発機構（JAXA）の探査機「はやぶさ2」が、始原的な小惑星リュウグウに7月までに到着する予定だ。NASAの探査機「オシリス・レックス」も、2018年後半に小惑星ベンヌに達する見込みだ。両者は2020年代に小惑星サンプルを地球に持ち帰る。

## がんをゲノムから明らかに

がんの全ゲノム解読結果を多数のがん種を横断して解析する、国際共同研究計画「PCAWG」（PanCancer Analysis of Whole Genomes）の結果から、がんを制御する遺伝子に関する新たな知見が2018年に得られる可能性がある。大規模ながんゲノム解読計画「がんゲノムアトラス」も、33種の腫瘍のタンパク質コード領域（エキソームと呼ばれる）の分析結果を公開する。

## CO<sub>2</sub>削減目標の引き上げ

2015年のパリ協定に署名した国々は2018年、自国が約束した温室効果ガス排出量削減目標の引き上げを目指す「促進的対話」を行う。パリ協定は、世界の平均気温の上昇を産業革命前と比べて1.5～2℃に抑えることを目標にしている。一方、「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC）は、1.5℃の温度上昇の影響を説明する特別報告書を公開する。9月には、米国カリフォルニア州のジェリー・ブラウン知事が、パリ協定を支持する立場から大規模な気候変動対策会議を主催する。

## 高温高圧下での画像撮影

原子レベルの波長を持つX線自由電子レーザーが、米国、日本、韓国に続き、2017年にはドイツ・ハンブルクでも稼働し始めた。X線自由電子レーザーを使えば、高温、高圧下で変化する試

料の画像撮影が可能になる。惑星の中心核のような極端な条件下で、物質がどのように振る舞うかについて、多くの研究成果が得られるだろう。また、新たな仕組みを使った卓上型X線源が、ドイツ電子シンクロトロン (DESY; ハンブルク) やアリゾナ州立大学 (米国テンピー) で稼働すれば、生物学的反応や化学的反応の研究をより低予算で行えるようになるかもしれない。

### 中間選挙と EU 離脱

米国の中間選挙が11月に予定されている。歴史を振り返ると、ホワイトハウスをコントロールしている党 (現在は共和党) は、議会で議席を失う可能性が高い。しかし、民主党が、下院あるいは上院のどちらかで多数を占めることができるかどうかは分からない。また、記録的な数の科学者たちが、地方、州、連邦レベルの選挙に立候補しようとしていて、これも注目を集めるだろう。英国は、2019年の欧州連合 (EU) 離脱に関する交渉の第二段階に入り、離脱後のEUとの科学研究協力について話し合う。

### 宇宙産業の争い

初の民間資金による月面無人探査を競う、賞金総額3000万ドル (約33億円) の「グーグル・ルナ・エクスプライズ」が開催されている。勝ち残った5つのチームは、3月31日までにローバーを月に着陸させて走行させ、画像を地球に送り返さなければならない (勝者なく終了の見通し)。一方、米民間企業のボーイング社とスペースX社は、NASAの依頼により、宇宙飛行士を乗せて国際宇宙ステーションに向かう有人ロケットを打ち上げる。両社はそれぞれ、2018年内の打ち上げを目指している。



はやぶさ2を搭載したH-IIAロケットは2014年12月3日、種子島宇宙センターから打ち上げられた。

THE ASAHI SHIMBUN VIA GETTY IMAGES

### 遺伝子編集と iPS 細胞

CRISPR/Cas9などの遺伝子編集ツールを、臨床応用する取り組みが増えている。CRISPRのヒトでの初めての第一相臨床試験 (肺癌治療のために免疫細胞を編集する) は4月に終了する。ローカス・バイオサイエンシズ社 (Locus Biosciences; 米国ノースカロライナ州リサーチ・トライアングル・パーク) やエリゴ・バイオサイエンス社 (Eligo Bioscience; フランス・パリ) などは、バクテリオファージと呼ばれるウイルスを遺伝子操作し、CRISPRシステムを利用して抗生物質耐性菌をたたく治療を臨床試験に持ち込もうとしている。一方、京都大学は、ヒトのiPS細胞から作った神経前駆細胞でパーキンソン病を治療する臨床試験を2018年度中にも始めることを目指している。

### 粒子のサーフィン加速

プラズマの波の上で電子を加速するプラズマ航跡場加速にとって勝負の時がやってきた。2016年、欧州原子核共同研究機関 (CERN; スイス・ジュネーブ近郊) で、プラズマ航跡場加速の原理を検証する「AWAKE」実験の第一段階が行われ、陽子ビームで航跡場が形

成されることが確認された。実験の第二段階、外部から電子を注入して1ギガ電子ボルトに加速する実験が始まりつつある。成功すれば、より小さく、より安価な加速器が実現する可能性がある。

### オープンアクセス

ドイツの科学者たちと巨大出版社エルゼビア (本社オランダ・アムステルダム) とが、にらみ合っている。先に折れるのはどちらだろうか? 約200のドイツの研究機関は、購読価格に関するエルゼビア社との長期の争いが合意に達するまで、エルゼビア社の論文誌へのアクセスを2018年1月1日から失う。オープンアクセスの支持者たちは、ウェブサイト「Sci-Hub」の運命にも注目している。Sci-Hubは、有料購読者のみにアクセスが許された、膨大な数の論文を無許可で無料でダウンロードできるようにしたサイトで、米国の裁判所はそのドメインの一部を閉鎖する命令を2017年11月に下した。

(翻訳: 新庄直樹)

What to look out for in 2018

Vol. 553 (12-13) | 2018.1.4

Elizabeth Gibney

# 「第二の地球」の レシピを求めて

生命を育むことのできる惑星とは、  
どのような条件を備えているのだろう。  
それを明らかにする研究に、  
多くの実験地質学者が参入している。

スーパーアースの地質は地球と似ているのだろうか？ この画像は、スーパーアース「HD 85512 b」の想像図。欧州南天天文台の観測装置「HARPS」により2011年に発見された太陽系外惑星で、その軌道はハビタブルゾーンの限界付近に位置している。

Yingwei Fei（費英偉）らが苦勞して作った高密度のケイ酸塩のサンプルは、円形をしていて、厚さは1mmもなく、きらきらと光っていた。2017年11月初旬、1カ月がかりで作ったこのサンプルに別れを告げる時が来た。Feiはサンプルと数個のバックアップを丁寧に包んで発泡スチロールの容器に入れ、カーネギー研究所（米国ワシントンD.C.）からサンディア国立研究所（米国ニューメキシコ州アルバカーキ）へと発送した。この研究所のZパルスパワー施設（Zマシン）で、26メガアンペアの電流から発生する強力なX線を使い、各サンプルを高温・高圧にして粉碎してもらうためだ。

Zマシンは、爆発する核兵器の内部の極限条件を再現できる装置である。しかし、カーネギー研究所の地球物理学研究室の高圧実験地質学者であるFeiは、はるか遠い世界のことを考えている。彼の目標は、地球の深部で見られるケイ酸塩ペロフスカイトという鉱物が、太陽系外にある地球より大きい岩石惑星の内部の高温・高圧条件下で、どのように振る舞うかを解き明かすことにある。

このような研究は「惑星地質学 (exogeology)」と呼ばれる。惑星地質学は、太陽系外惑星が地質学的に見てどのような天体であるかを研究する学問分野で、天文学者、惑星科学者、地質学者が参入している。多くの科学者にとって惑星地質学は、生命を育むことのできる惑星を探る研究の自然な延長線上にある。天文学者はすでに数千個の太陽系外惑星を発見し、その質量や半径などの基本的なデータを収集している。主星の周りのハビタブルゾーン（その軌道を回る惑星の表面に液体の水が存在できるような温和な領域）にある惑星は、特に生命の居住に適していると考えられている。ハビタブルゾーンは、童話『三匹のクマ』で「適度なもの」を求めて物色する少女にちなんで「ゴルディロックゾーン」とも呼ばれる。

しかし、アリゾナ州立大学（米国テンピー）の惑星地質学者であるCayman Unterbornは、地球は大きさや質量、好ましい軌道以上の「好条件」に恵まれていると指摘する。例えば、地球の熔融コアは流動によって磁場を発生・維持しており、この磁場が、壊れやすい地球の大気を太陽風から保護している。また、テクトニックプレートの運動は、岩石と大気の間で二酸化炭素を循環させて、地球全体の温度を調節するのに役立っている。近年、太陽系外惑星の発見が相次いでいる。けれども天文学者たちは「今になってようやく、『ちょっと待て。私たちは切手でも集めるように太陽系外惑星を集めているが、もっと興味があるのは、こうした天体を理解することではないのか?』と気づき始めたのです」とUnterbornは言う。「そこに地質学者を引き込んで研究を進めるのは、ごく自然な流れです」。

研究者たちは、シミュレーションやFeiがZマシンで行っているような実験により、地球に似た地質を持っている太陽系外惑星はどのようなものかを明らかにしようとしている。この研究は、優先的に調査を進めるべき太陽系外惑星を決める際にも役立つかもしれない。

しかし、プレート運動がいつ、どのようにして始まったかなど、地球の地質の多くがいまだに謎に包まれていることもあり、惑星地質学はいくつかの困難に直面している。カーネギー研究所の地球化学者Richard Carlsonは、「プレート運動は、地質学を根底から変えた、重要な発見です。けれども私たちはまだ、プレート運動が生じる仕組みを知らないのです」と言う。さらに、太陽系外惑星が実際に地球に似た地質を持つかどうかを確認するのは難しいかもしれない。天文学者が太陽系外惑星を直接観察できることはめったにない上、観察できた場合でも、画像中の1画素分にしかない可能性があるからだ。

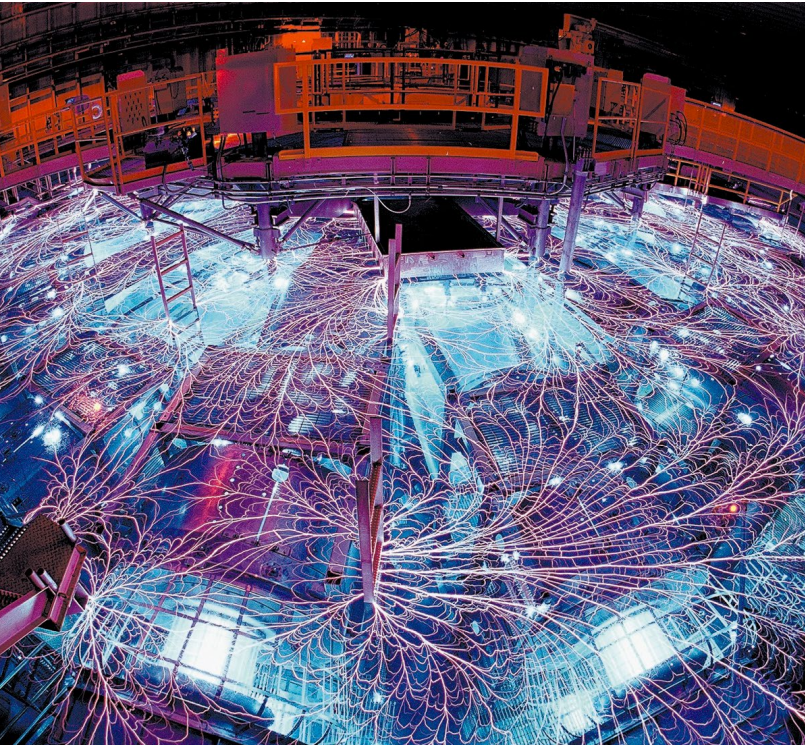
地質活動の間接的な証拠やごく小さな示唆でさえ、はるか彼方の惑星について、より一貫した描像を研究者に与え、生命の兆候を探すのに最適な太陽系外惑星を示すことができる。マサチューセッツ工科大学（米国ケンブリッジ）の天体物理学者Sara Seagerは、「証拠がほとんどない大きな事件の現場に当たったようなものです」と言う。「わずかな証拠を丹念にかき集め、それらを組み合わせることによって、全貌を明らかにしていくしかありません」。

## スーパーアースの謎

太陽系外惑星の科学の対象の中でも特に興味深い天体に、地球の数倍の質量を持つ岩石惑星「スーパーアース」がある。スーパーアースには地球の10倍の質量を持つものもあり、このような天体は太陽系には存在しないが、銀河系ではごく一般的な天体であることが分かっている。その多くはかなり大きいため、地球サイズの惑星よりも詳細に観測しやすいかもしれない。

約10年前に発表されたスーパーアースの地質に関する初期の研究は、スーパーアースが単純に地球を大きくしただけの天体であった場合にどのようなものになるかを考察していた。しかし、2004年に発見された超高温のスーパーアース「かに座55番星e」の分析で、スーパーアースが地球とは全く異なる天体である可能性が高まった。2011年の観察から、この惑星が地球の約2倍の半径<sup>1</sup>と8倍強の質量<sup>2</sup>を持つことが明らかになったのだ。

この結果は不可解であった。というのも、これだと平均密度は地球よりわずかに高いだけ、ということになる。



太陽系外惑星の組成を研究するために利用されたZマシン。

RANDY MONTVOYA

かに座55番星eが地球のように鉄のコアとケイ酸塩のマントルを持っているなら、この大きさではもっと質量があるはずだ。ここで、惑星全体を海洋が覆っていると考えると、密度を地球並みに下げることができる。しかし、この惑星は主星に非常に近い軌道を公転していて、星の側の温度が約2500ケルビンにもなるため、液体の水が長期にわたって存在することはできない。

かに座55番星eの密度を巡る謎は、エール大学（米国コネチカット州ニューヘイブン）の天文学者Nikku Madhusudhanらの新しいアプローチによって、2012年に解決された。それまでの研究から、かに座55番星eの主星の炭素/酸素比が、太陽に比べて大幅に高いことが示唆されていた。主星と惑星は塵とガスが渦を巻く同じ円盤から作られるため、かに座55番星eも炭素を豊富に含むと仮定することは理にかなっているように思われた。Madhusudhanが惑星の内部のモデルにこの炭素の割合を使用すると、かに座55番星eの質量と半径とよく一致する結果が得られた<sup>3</sup>。現在はケンブリッジ大学（英国）に所属するMadhusudhanは、「あれは啓示でした」と振

り返る。炭素を豊富に含む惑星は、地球とは全く違った天体になる。Madhusudhanは、かに座55番星eの地殻の主成分はグラファイトかもしれないと考えている。その内部では、膨大な量の炭素が高圧下で圧縮されてダイヤモンドに変わっているかもしれない。「太陽系の岩石惑星に比べると、かなりすごいものになっているでしょう」と彼は言う。

ダイヤモンドでできた惑星は私たちの想像力を大いに刺激するが、かに座55番星eの主星に含まれる炭素は、現在考えられているほど多くはない可能性がある。天文学者たちは、たとえ主星が多くの炭素を含んでいたとしても、惑星の組成が主星と一致していると単純に仮定すべきではないと言う。Seagerは、このような仮定では太陽系の惑星の多様性をうまく説明することができないと指摘する。エール大学の天文学者Gregory Laughlinも、「現時点では合理的な推測だと思いますが、完璧ではないことを忘れてはいけません」と言う。

## 太陽系外惑星を実験室で再現する

惑星地質学者は、この不確実性を受け入れ、遠方の惑星がどのように形成され、進化してきたかを解明しようと最善を尽くしている。科学者が出発元素のリストから地質学に到達するためには、どのような鉱物が形成され、いつ溶融し、圧力や温度に伴い、その密度がどのように変化するかを知っておく必要がある。こうしたデータを利用して、未分化の溶融したボールから層構造を持つ惑星が進化し、惑星が冷却するにつれて鉱物が形成され、沈み込んだり浮かび上がったりする過程をシミュレーションすることができる。アムステルダム自由大学（オランダ）の地質学者Wim van Westrenenは、「初期の惑星については、鉱物学的な『タマネギの皮』モデルを構築できます」と言う。それから数値モデルを使って、その惑星がどのように進化したか、物質の移動がプレートテクトニクスを駆動させるのに十分であるか否かを予想することができる。

これらのモデルに供給する情報を収集するため、地質学者たちは、Feiらのように、合成した岩石を高温・高圧にさらして太陽系外惑星の内部を再現する実験を行うようになった。実験の目標は新しいが、手法自体は新しいものではない。実験岩石学者たちは何十年前から、表面

下数cmの深さから地球のコアまで、地球内部のあらゆる深さの条件をシミュレーションするための装置を製作してきた。多くは、ダイヤモンドアンビルセル (diamond anvil cell) という装置を使う。この装置は、宝石レベルの品質のダイヤモンドを2つ使い、平らに研磨したそれぞれの先端同士を押し付けてサンプルに高圧をかける。圧力をかけている間に、レーザーを使って加熱することもできる。同時に、サンプルにX線を照射して結晶構造を調べ、高温・高圧になった物質がどのように変化するかを調べることができる。

アリゾナ州立大学の鉱物物理学者 Sang-Heon Dan Shimらのグループは、この手法を用いて、かに座55番星eの組成を再現していると考えられる、炭素を豊富に含むサンプルに圧力をかけてみた。その結果<sup>4</sup>、炭素の化合物である炭化物を多く含む惑星がどのようにして熱を輸送するかや、ケイ酸塩を多く含む地球のような惑星とどのように違っているかが明らかになった。

注目されている元素は炭素だけではない。Unterbornが「ビッグ3」として挙げるマグネシウム、ケイ素、鉄は、惑星全体の構造に影響を及ぼす他、マントル中の熱の流れを変化させてプレートテクトニクスの有無を決定したり、惑星のコアの相対的な大きさを変化させて惑星全体の磁場の有無を決定したりする。これらの元素の存在比は恒星ごとに大きく異なる。太陽はケイ素原子1個につき1個のマグネシウム原子があるが、他の恒星では、マグネシウム原子の数は0.5から2までばらつきがある。それほど大きな違いには見えないかもしれないが、同じ存在比の惑星が見つかったとなれば、地質学に大きな影響を及ぼす可能性がある。

ほとんどの教科書は、マグネシウムを豊富に含む岩石はケイ素を豊富に含む岩石よりも軟らかいとしている。だとすると、マグネシウムを豊富に含む惑星の表面を歩くときには、泥の上を歩いているような感じがするのかもしれない。Shimがダイヤモンドアンビルセルを使ってさまざまなマグネシウム/ケイ素比を持つ岩石を調べた結果、マグネシウムを豊富に含む惑星のマグマだまりは、ケイ素を豊富に含む惑星より深く、壊滅的な被害をもたらす火山が多いことが示唆された。しかしShimは、鉱物中の水分濃度など、他のパラメーターも考慮しないと正確な予想はできないと注意する。

## さらなる高圧を求めて

Shimがダイヤモンドアンビルセルを使ってサンプルにかけられる圧力は400ギガパスカルまでで、これは地球のコアの圧力より少し高い程度である。スーパーアースの内部を探るため、彼はSLAC国立加速器研究所 (米国カリフォルニア州メンロパーク) にあるLCLS (Linac Coherent Light Source: ライナックコヒーレント光源) という世界最高輝度のX線レーザーを利用した。この装置はサンプルの内部に衝撃を与え、600ギガパスカルという高圧をかけることができる。これは、地球の2倍の質量を持つ惑星のコアをシミュレーションするのに十分な圧力だ。

地質学者たちは、他の大規模施設も利用して、太陽系外惑星の組成を探ろうとしている。Zマシンは1000ギガパスカル (地球の3倍近い質量の惑星の内部で予想される条件) の圧力を発生させることができる。フランスのエコール・ポリテクニク (パレゾー) のLULI2000レーザーや、大阪大学レーザー科学研究所の「激光II号」レーザーシステムも、これに匹敵する圧力を発生させることができる。ローレンスリバモア国立研究所 (米国カリフォルニア州リバモア) の国立点火施設に頼った研究者もいる。ここは核融合の研究に利用される施設で、サンプルに木星深部の圧力に匹敵する5000ギガパスカルもの高圧をかけることができる。こうした施設では利用時間を巡る研究者間の競争が激しく、各種の基礎化合物のデータをゆっくりとしか蓄積できない。そのため、実験はまだ予備的な段階にある。

惑星地質学者たちの最終的な目標は、地球に似た地質を持つ太陽系外惑星がどのような元素の組み合わせからできているかを解明することにある。オハイオ州立大学 (米国コロンバス) の地質学者 Wendy Panero は、「組成のゴルディロックゾーンを特定したいのです」と言う。「軟らかすぎず、硬すぎないハビタブルゾーンの岩石の組成とは、どのようなものでしょうか?」。

明快な答えは出ないかもしれない。組成が完全に分かっていないとしても、惑星地質学者が惑星の状態について話せることは多くはない可能性がある。地球を例にとっても、現在の地球にはプレートテクトニクスがあるが、初期にはなく、今後も存在し続けるとは考えられて

いない。すぐ隣の軌道を公転する金星は、惑星進化の幅の大きさを痛感させる天体だ。地球と金星の質量、半径、組成、太陽からの距離はよく似ているが、地球には生命がいるのに、金星は二酸化炭素の霧に包まれた灼熱の死の世界だ。コロラド大学ボルダー校（米国）の地質学者 Stephen Mojzsis は、地球のプレートテクトニクスがなくなれば、最終的には金星と似た天体になるだろうと考えている。「それは必然です。ただ、いつそうなるかは分かりません」と Mojzsis。惑星地質学者が構築した初期の太陽系外惑星モデルのほとんどが組成に注目したものになっているが、こうした点を考慮すると、最終的には数十億年に及ぶ惑星の進化などの要素を追加する必要があるかもしれない。

惑星地質学的な研究から、天文学者が地球外生命探査の標的惑星を決定するのに役立つ情報が得られることを期待する人々もいる。惑星が何十億年も磁場を保持するのに必要な条件や、マントル対流を駆動するのに必要な元素の割合が明らかになれば、そうした基準を満たす惑星を詳細に調べるように助言することができるからだ。助言を受けた天文学者は、2019年に打ち上げが計画されている NASA（米航空宇宙局）のジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡などの強力な望遠鏡を使って惑星の大気を調べ、地球外生命の存在を示唆する特徴を探さることができよう。

地球にいながらにして、太陽系外惑星の地質学活動を発見できる可能性もある。例えば、大気中の硫黄濃度が一時的に急上昇するのは、活火山の存在を示す間接的な証拠なのかもしれない。また、惑星の自転に伴い反射率が変化するのは、大陸と海洋の存在、ひいてはテクトニック活動の存在を示唆しているのかもしれない。

実はすでに、かに座 55 番星 e の火山活動を検知した可能性がある。2016年、ベルン大学（スイス）の天文学者 Brice-Olivier Demory らは、NASA のスピッツァー赤外線宇宙望遠鏡を使って、この惑星の最初の熱地図を発表している<sup>5</sup>。この惑星は自転と公転が同期する潮汐ロックという現象により常に主星と同じ面を向けているため、一方の半球は永遠に光を浴び、他方の半球は暗いままだ。それなら、惑星の表面で最も高温になっている場所は主星に最も近いところであるはずだが、Demory らはそこからずれていることを明らかにし、溶岩流が熱

を輸送しているのではないかと推測している（より最近の研究<sup>6</sup>では、溶岩ではなく風が原因である可能性が示唆されている）。

かに座 55 番星 e が生命の居住に適した場所でないことは明らかだ。しかし、他の太陽系外惑星は、もっと生命に優しいかもしれない。Untertorn は 2017 年に、太陽に似た恒星 1000 個以上の元素組成を調べる研究を完成させた<sup>7</sup>。彼はこの組成を利用して、自分が調べた恒星の 3 分の 1 に、マントル中に沈み込めるだけの密度のある（つまり、数十億年にわたってプレートテクトニクスを起こすことができる）地殻を持つ惑星が存在する可能性があるかと推定している。

研究者たちが太陽系外惑星の地質を調べるようになってからまだ日は浅いが、Carlson によると、惑星が元の軌道から大きく移動したように見える証拠<sup>8</sup>をつかんだことなど、意外な発見がすでにいくつもあるという。この発見は、太陽系の進化について天文学者に再考を促し、同様の移動が、地球に氷などを運んでくるのに役立っていたとする理論の構築につながった。

「人間の想像力も創造性も、自然には到底及ばないと、私は思っています」と Carlson は言う。「宇宙に存在する天体の多様性を理解することで、私たちの目は、これまで考えつかなかった可能性に向かって開かれるのです。そうした可能性が、私たちの置かれた状況をよりよく理解するのを助けてくれるのです」。

（翻訳：三枝小夜子）

### The recipe for other earths

Vol. 552 (20–22) | 2017.12.7

Shannon Hall

（米国ニューハンプシャー州ハノーバー在住のフリーランスのジャーナリスト）

1. Endl, M. *et al. Astrophys. J.* **759**, 19 (2012).
2. Gillon, M. *et al. Astron. Astrophys.* **539**, A28 (2012).
3. Madhusudhan, N., Lee, K. K. M. & Mousis, O. *Astrophys. J.* **759**, L40 (2012).
4. Nisr, C. *et al. J. Geophys. Res. Planets* **122**, 124–133 (2017).
5. Demory, B.-O. *et al. Nature* **532**, 207–209 (2016).
6. Angelo, I. & Hu, R. *Astron. J.* **154**, 232 (2017).
7. Untertorn, C. T. *et al. Preprint available at* <https://arxiv.org/abs/1706.10282> (2017).
8. Triaud, A. *Nature* **537**, 596–597 (2016).

# ピラミッドの巨大新空間を科学的に発見

世界最大であるクフ王のピラミッド。森島邦博 特任助教が率いる名古屋大学の研究チームは、宇宙線のミュオンを利用して、まるでレントゲン写真を撮るように、ピラミッドを傷つけることなく、その内部構造を可視化することに成功した。するとそこには、謎の巨大空間が出現し、考古学者たちを驚かせている。

エジプトのクフ王のピラミッドに謎の空間を発見したことが話題になっていますね。

森島：大回廊の真上に旅客機大の未知の大空間を発見しました。そのことを報告する論文が2017年11月2日に*Nature*から公開され<sup>1</sup>、その2日後にはNHKで特集番組が放送されました。その後、いろいろなメディアが取り上げてくれて、大きな反響を呼びました。ピラミッドは人々の関心の高いテーマなのでですね。

エジプトの考古学者から批判的なコメントが出たとの報道もありました。

報道があったことは承知していますが、正式な批判コメントは出ていませんし、直接何か言われたわけでもありません。

ニュースなどから推測すると、「以前から知られていた空間だ」と言っている人がいるようですが、そのような空間の存在を唱えた説は見つかっていません。岩の隙間

に散らばる小さい空間を指しているのであれば、規模が違います。

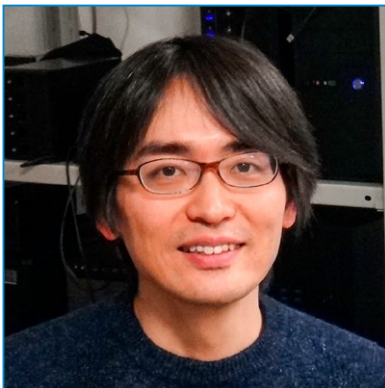
また、このような巨大空間があると、ピラミッドがつぶれてしまうという意見もあるようですが、物理学的に見ればそのようなことはなく、むしろ巨大空間は荷重軽減に役立つと考えられるくらいです。

エジプトの考古学者の中に、肯定的な人と否定的な人の両方がいるのは、不思議ではありません。考古学者の立場からいうと、「発掘」して初めて「発見」できるので、すし、「発見」に考古学的な解釈を加えることも非常に重要です。それに対し私たちは、発掘することなしに観測し、科学的に検証しようとしているのですから。

## ミュオンによる透視技術

### そもそもミュオンとは何でしょう？

ミュオンは宇宙線（素粒子）の1つで、大気上層部で生成され、地球上に絶えず降り注いでいます。上空から、



もりしま くにひろ  
森島 邦博

名古屋大学高等研究院  
特任助教

2010年 名古屋大学理学研究科博士課程終了。2014年より現職。フィルムを用いたミュオンラジオグラフィの研究は、「フットワーク軽く行えるので、自分たちのアイデアをどんどん反映できて面白い」という。ピラミッドの観測も、面白いに違いないし、技術開発にもなる、と決断した。とはいっても、新しい構造は何も発見できない可能性もあったから、大空間の存在は、ミュオンラジオグラフィの研究にとって本当にラッキーだった、と実感するそうだ。

AUTHOR PROFILE



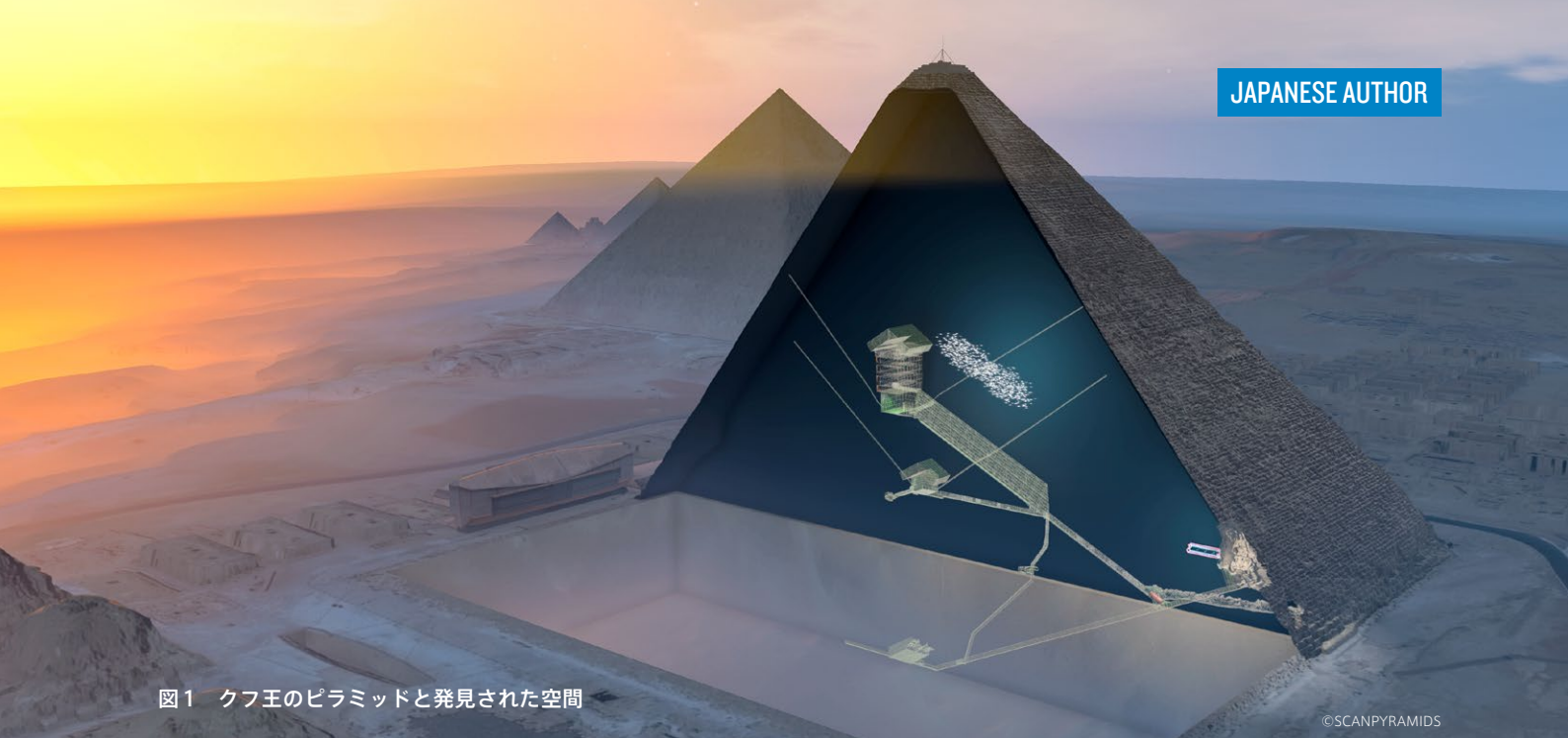


図1 クフ王のピラミッドと発見された空間

©SCANPYRAMIDS

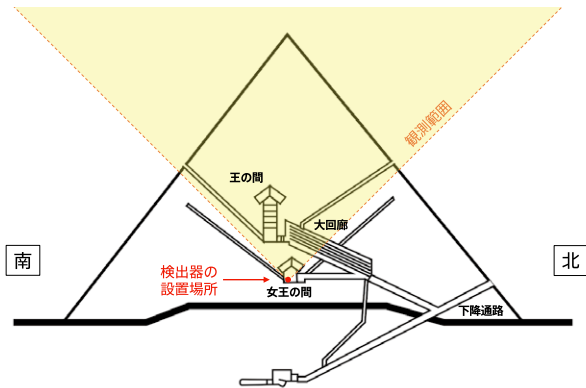


図2 クフ王のピラミッドに置いたフィルムの設置場所



図3 女王の間に続く洞穴に置いたフィルム

高速で直進してくるミュオンは、地上では1分間に1 cm<sup>2</sup>当たり約1個の割合で検出されます。

このミュオンは、物質を透過する力が非常に高いという特徴があり、1kmの厚さの岩盤でも通り抜けてしまいます。ミュオンのこの性質を利用しようというのがミュオンラジオグラフィです。

**ミュオンラジオグラフィをもう少し教えてください。**

ミュオンが物体を通過するとき、その通過しやすさは、物体の密度や内部構造によって変わります。そこで、検出器を置いて、どのくらいの数のミュオンが、どの方向から到達したかを測定します。そのデータから、物体を傷つけることなく、物体の内部構造を反映する画像を構築できるのです。

**画期的な新しい技術なのですね。**

ミュオンでピラミッド内部を見ようという発想は、実は1960年代にさかのぼります。しかし、実用化に至る技術開発は、私たちを含め、現在も進められている最中です。

私は物理学科での大学院生時代、ニュートリノの大規模な研究に携わり、素粒子の検出技術（原子核乾板と呼ばれるフィルム）の開発などを行ってきました。2010年に博士課程を修了し、ニュートリノの研究が一段落したときに、以前から興味を持っていたミュオンラジオグラフィの研究を始めました。まずは、東日本大震災で被害を受けた福島第一原子力発電所2号機の原子炉をミュオンラジオグラフィで透視し、内部の構造の画像化に成功しました（2015年に成果発表）。そして、2015

年10月に立ち上げられた国際共同研究「スキャンピラミッド計画」に参加して、ピラミッドの観測に乗り出したのです。

## いざエジプトへ

### スキャンピラミッド計画とは？

科学的手法によりピラミッドの内部や外部を調査することを目的に、エジプトの考古省とカイロ大学、フランスのNPOが立ち上げたプロジェクトです。調査の中核を担う技術がミュオンラジオグラフィで、それには私たちを含め、3チームが関わりました。

3チームは用いる検出技術の種類が異なっており、それぞれが独立して調査研究を進めました。私たち名古屋大学のチームの検出技術は、原子核乾板と呼ばれるフィルムです。臭化銀結晶を成分とする乳剤が塗ってあり、写真のフィルムと同様で、現像すると、記録されたミュオンの飛跡が見えるようになります。フィルムは、小さく軽く、電源不要なので、狭いところにも設置できて格段に安価です。リアルタイムの観測はできませんが、ピラミッドの調査には適していると思っています。

なお、日本の高エネルギー加速器研究機構（KEK；茨城県つくば市）のチームは、放射線が通ると光るプラスチックシンチレータを、フランスの原子力・代替エネルギー庁（CEA）のチームは、ガスの中で放電させるガス検出器を用いました。日本の2チームはピラミッド内部の、フランスチームは外部（稜線）の調査を主に担当しました。

### それで、クフ王のピラミッドの観測を進めたのですね。

いえ、最初の1年くらいは準備期間といえますか、観測手法の開発に費やしました。フィルムは名古屋大学の私たちの研究室で手作りするのですが、例えば、それを海外に運ぶときに、空港の荷物検査のX線に反応してフィルムが真っ黒になってしまわないとか、旅客機の飛行高度では地上より約100倍多い宇宙線を受け取るのですが、その影響はどうかと心配しました。

フィルムのいわば「感度」の確認も必要でした。石の厚さが100mあると、通過するミュオンの数は100分の1に減ると予想されます。クフ王のピラミッドは高さが約140mあるので、別のピラミッドを使わせてもらって、フィルムを試験的に置き、フィルムの枚数や設置期

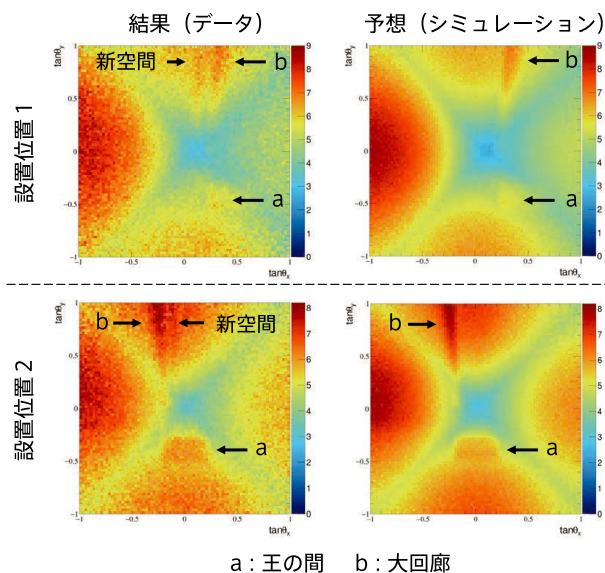


図4 新空間が映し出されたミュオンラジオグラフィの画像

間、乳剤の配合などを確認しました。また、既存の空間をミュオンラジオグラフィで画像化できることも確認し、調査手法を完成できました。

### 現像やデータの解析はどこで行うことにしたのですか？

フィルムはピラミッド内に2~3カ月間設置し、回収したフィルムは、大エジプト博物館保存修復センターに借りた部屋で、すぐに現像することにしました。それを日本に持ち帰り、飛跡の読み取りとデータの解析を行うことにしたのです。

私たちのチームは、私とポスドク、大学院生、学生の5~6人からなりますが、2~3カ月に1回、ほぼ全員でエジプトと日本を行き来しています。フィルムの回収と現像、新しいフィルムの設置は、かなりの作業量です。

## クフ王のピラミッドを観測

### いよいよクフ王のピラミッドで観測ですね。フィルムの設置場所は、どのように決めたのですか？

このピラミッドでは、観光客が立ち入らない場所には限られています。設置場所の選択肢は多くありません。その中で、私たちは、「女王の間」に着目し、そこの縦横1m程度の狭い洞穴内に置くことにしました。フィルムは、設置した上方向90度前後が観測範囲で、ちょうどピラミッドの中央部を観測できることになりました。



図5 女王の間にフィルムを設置

フィルムは1枚ずつ運んで、2枚重ねて設置。上下両方のフィルムに記録されたものが、その場での測定結果となる。

### 巨大空間は、どの段階で発見できたのですか？

最初に置いたフィルムの画像を見た瞬間から、怪しいと思いました。未知の大きな空間があるのではないかと。そこで、2回目には、フィルムの位置を約10mずらして置いてみることにしました。すると、その画像からも、同じく空間の存在を確認できたのです。2カ所からの観測で一致した結果が得られたので、これは確かな結果なのだろうと、とても興奮しました。

### 他のチームは発見できていなかったのですか？

発見は、私たちが最初でした。チームはそれぞれ独立して調査を進めていましたが、あるとき、日本の2チームが観測結果を討議することになりました。NHKの番組でもこのときの様子をご覧いただけだと思いますが、女王の間に検出器を置いたKEKチームの観測画像には巨大空間は映っておらず、私たちの結果に驚いていました。

詳しく検討した結果、KEKが検出器を設置した場所からは巨大空間と「王の間」が重なってしまい、一見判別できなかったと分かりました。そこで、KEKの検出器を

横に数m移動して観測したところ、巨大空間が映し出されました。

今度は巨大空間の位置を標的にしてCEAチームにピラミッド外部から観測してもらったところ、私たちの結果を支持するデータが得られました。3種類の異なる検出器を用いても、同じ結果が得られたのです。

### そこでNatureに投稿されたのですか。

いいえ。ピラミッドの調査結果は、まずエジプト考古省に報告しなければなりません。ですから、これまでの私たちの例では、プレスリリースとしての公表にとどまります。今回も、まずは考古省に結果を報告しました。すると、意外にも「外部の人たちによる評価を得てほしい」とのことでした。

おそらく、発見のインパクトの大きさから、第三者の評価を求めよとの返事になったのだと想像します。そこで初めて、Natureに投稿したというわけです。3チームの結果を1つの論文にまとめました。

### 今後はどのように研究を展開されていく計画ですか？

現時点では、発見した空間の詳細な形は不明なので、それを明らかにしていきたいと思います。そのためには、複数箇所から観測し、立体的なデータを得るようになければなりません。X線写真がCTスキャンになるようなものですが、その技術を今開発しているところです。

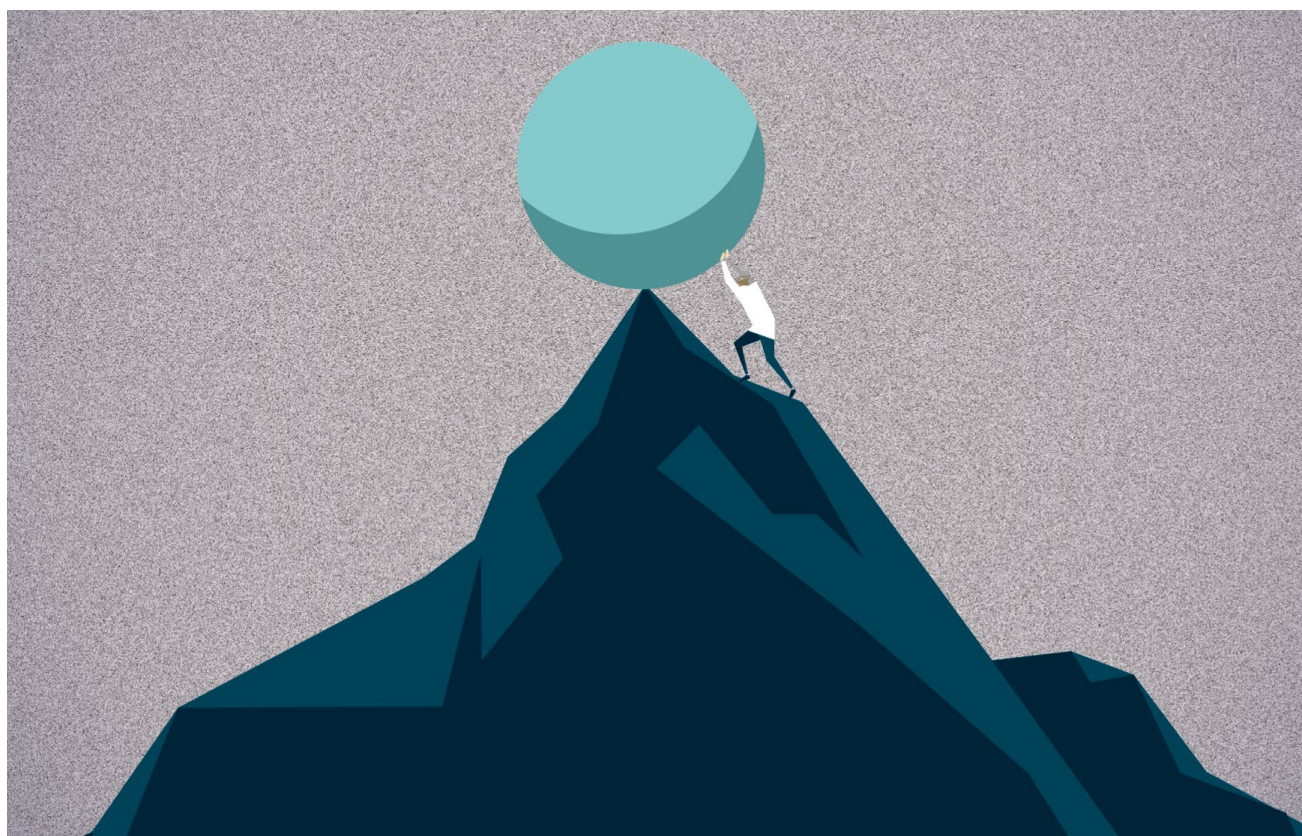
今回のことで、ミュオンを用いたイメージング技術、ミュオンラジオグラフィを多くの人に知ってもらえて、とてもよかったと思っています。今後も、ミュオンラジオグラフィでいろいろなものを観測していきたいと考えています。例えば富士山。観測スケールをアップすると考えると富士山かなと。

橋などのインフラ構造物の老朽化点検にも応用できるでしょう。フィルムは電源が不要で安価ですから、有望です。そのため、現在のフィルムは2~3カ月で劣化してしまうのですが、30°Cで1年間使用できる乳剤の開発にも取り組んでいます。

### ありがとうございました。

聞き手は藤川良子（サイエンスライター）

1. Morishima, K. et al. *Nature* **552**, 386–390 (2017).



ADAPTED FROM GETTY

## 好き過ぎてつらい博士課程

博士課程学生を対象とするアンケート調査から、不確実な未来への不安や、指導教官への不満が強い一方で、博士課程全般に対する満足度は高く、研究者としての就職を望んでいることが分かった。

理系の博士課程学生は、自分の研究生活を気に入っている。けれども彼らの多くが、そのことによって苦しんでいる。これは、*Nature*が世界各国の5700人以上の博士課程学生を対象に行った調査で明らかになった、最も重要な事実の1つだ。

*Nature*では、博士課程学生の生活と進路の目標をさまざまな角度から探るため、2年に一度、同様の調査を行っている。今回、回答者は博士課程全般に対して高い満足度を示していたが、かなり強い不安や心許なさを感じていることも分かった。回答者の4分の1以上が関心事にメ

ンタルヘルスを挙げていて、そのうちの45%（全回答者の12%）が、博士課程で研究に取り組むうちに感じるようになった不安や抑うつについて助けを求めたことがあるという（「困難な道に行く」参照）。多くの回答者が、研究に対して強いストレスを感じ、将来への不安に苦しみ、今の努力が納得のいく就職に結び付くか疑問に思っている。一部の学生はこうした状態に「もう耐えられそうにない」と吐露する。米国の大学で生態学を専攻するある学生は、アンケートのコメント欄に「全ての大学は、大学院生がすっかり参ってしまったときに閉じこもって泣くこ

とができる専用の部屋を設置するべきだ」と書いている。

アンケートからは、相性の良い指導教官につくことと学生の成功との間に強い（おそらく決定的と言ってもよいほどの）関連があることも明らかになった。良い指導教官は、学生の満足度を上げる主要な因子だ。ほとんどの回答者が自分の指導教官に満足していると答えているが、4分の1近くが「指導教官を代えられるなら代えたい」と回答した。学生は、山あり谷ありの博士課程を耐え、成長していく。これは普通、1人ではできないことだ。遺伝学を専攻する南アフリカの学生はコメント欄に「私は幸せな博士課程学生です」と書いている。「楽な生活ではありませんが、ずっと望んできたことなので、苦勞する価値はあります。理解があり、支援してくれて、私を次のレベルに押し上げる労をいとわない、素晴らしい指導教官にも恵まれました」。

## みんな苦しい

2017年のアンケート調査に回答を寄せてくれたのは、世界のほとんどの地域の、幅広い科学分野を専攻する博士課程学生たちであった。大部分を占めたのはアジア、欧州、北米からの回答で、ほぼ同数だった。調査への参加の呼び掛けは、nature.com上のリンク、シュプリング・ネイチャーのデジタル出版物、および電子メールキャンペーンで行った。調査データ ([go.nature.com/2kzo89o](https://go.nature.com/2kzo89o)) を肉付けするため、アンケートでNatureからの連絡を許可すると回答した一部の博士過程学生に対して取材を行った。

回答は肯定的なものが多かった。博士課程に進むという決断に、ある程度以上満足している回答者は全体の4分の3以上に上り、これほどの献身を要する決断にしては強く支持されていることが分かる。アントワープ大学（ベルギー）の労使関係の専門家Katia Levecqueは、この結果は、博士課程学生を対象とする別の調査結果とも非常に近いと指摘する。「博士課程学生の約80%が『満足している』か『非常に満足している』と言っています。これは、ほとんどの大学で一貫して見られる傾向です」。

回答者の12%が「博士課程研究に伴う不安や抑うつについて助けを求めたことがある」という事実から、大学院生が大きなストレスを感じていることが分かる

Levecqueは言う。「自分で選んだ道なのだから自力で何とかしようとするのでしょ、自力でどうにもできない問題というのはたくさんあります」。12%という数字には、自身が抱える悩みについて助けを求めた学生しか含まれていないので、不安や抑うつに苦しむ回答者の割合がもっと高いことはほぼ確実だ。

不安に苦しむ学生が必ずしも十分な支援を受けられるわけではないことも分かった。助けを求めた回答者のうち、所属機関で有益な支援を受けられたと回答した人は35%だけだった。20%近くが、所属機関に助けを求めたが十分な支援を受けられなかったと回答している。「助けを求めるには、文化的・経済的な壁が多すぎるのです」とLevecque。

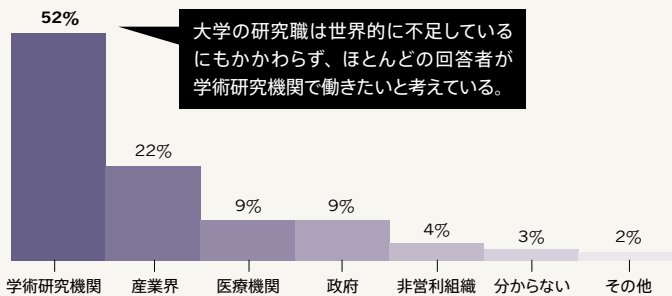
今回の調査で不安や抑うつについて助けを求めたことがあると回答した学生の50%近くが、博士課程には「満足している」「非常に満足している」と回答している。シドニー工科大学（オーストラリア）で薬理学を専攻するKate Samardzicは、こうした矛盾を抱えて生きる数百人の回答者の1人だ。彼女は博士課程には満足しているが、強いストレスを感じている。「研究者になるには、多くの不確実性に耐えなければなりません」と彼女は言う。「指導教官に気に入られ、一定の時間枠の中で全てをこなさなければならないというプレッシャーの下にいます。それなのに、自分が最終的にどんな仕事に就けるか分からないのです。道の途中を歩いているのに、道の行き先を知らないのです」。

Samardzicは、このような思いをしているのが自分だけではないことを知っている。彼女はLevecqueらが2017年3月に発表した論文（K. Levecque *et al.* *Res. Pol.* **46**, 868–879; 2017）を読んでいるが、この論文によると、博士課程学生がうつ病などの一般的な精神障害を発症するリスクは、一般集団の高学歴の人々に比べて約2.5倍も高いという。学生代表として大学理事会との連絡係を務めるSamardzicは、この問題を何とかしようと「リサーチ・レジリエンス（Research Resilience）」という学内グループの結成に協力した。このグループは、定期的にセミナーを開催して、博士課程学生が精神的苦痛へ対処できるよう手助けしている。「博士課程研究に不安を感じたり心を乱したりする学生への支援が十分でないことに気付いたのです。この問題の優先順位はもっと

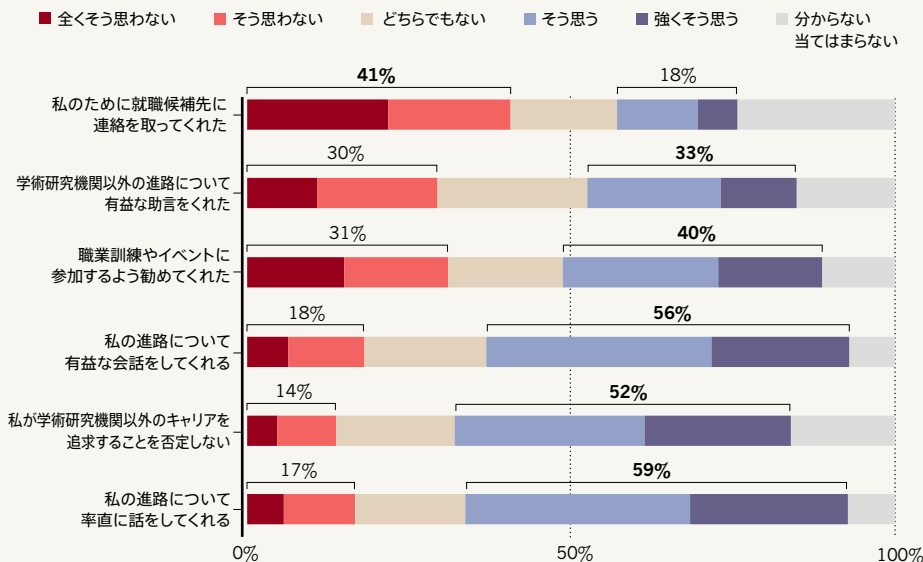
## 困難な道を行く

本誌が2017年に実施した大学院生を対象とするアンケート調査では、5700人以上から回答が寄せられた。世界各国の博士課程学生が何に苦しみ、何を求めているかを把握するには十分な回答数だ。その大半が博士課程に進んだことに満足していたが、自身が選んだ指導教官に対して後悔している人も少なくなかった。博士課程学生の道のりは平坦ではない。彼らは自身が負う責任と不確実な未来に不安を感じている。

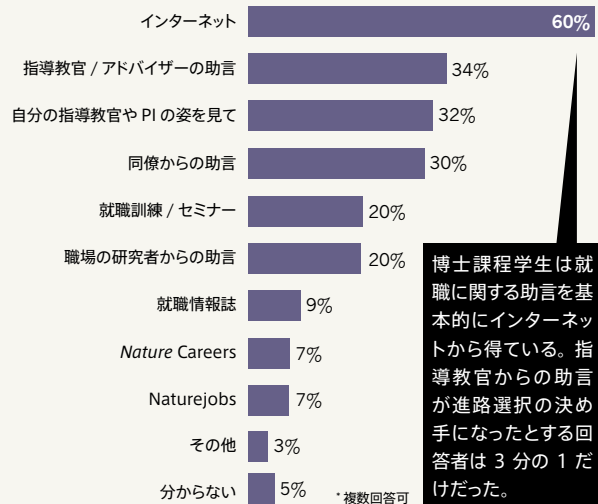
### Q どのセクターで働きたいですか？



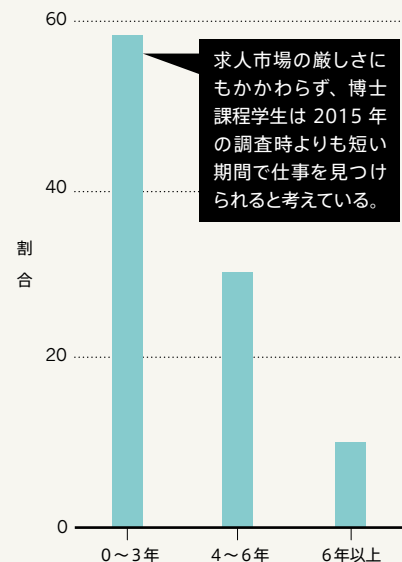
### Q あなたの現在の指導教官にどのくらい当てはまりますか？



### Q 現在希望するキャリアを決める際に、何を参考にしましたか？\*



### Q 終身在職のある仕事を見つけるのにどのくらいかかるとお考えですか？



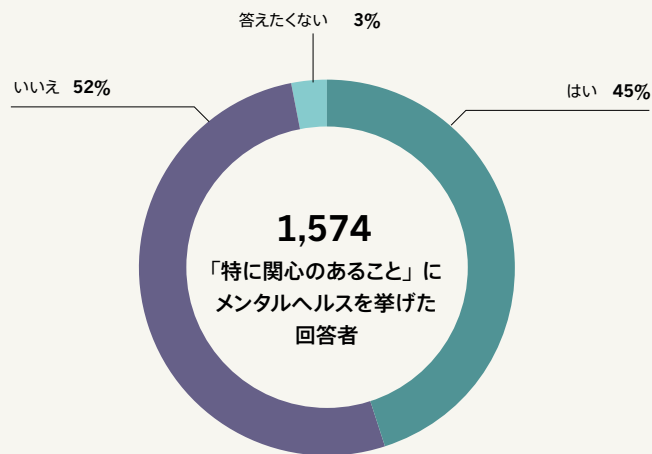
高いはずです」と彼女は話す。

リサーチ・レジリエンスは毎月セミナーを開催していて、30~40人の学生が参加している。最近のセミナーでは、マインドフルネス（自分の心と体に意識を向け、そこで起きていることに対して、評価を交えずに注意を集中すること）の秘訣や、博士課程学生が陥りやすいインポスター症候群（詐欺師症候群）などのトピックを取り上げた（[go.nature.com/2gtufgt](http://go.nature.com/2gtufgt)）。インポスター症候群とは、自分の成功を肯定的に捉えることができず、高く

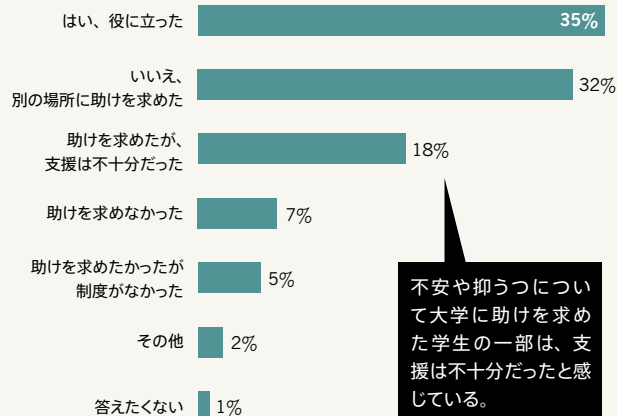
評価される自分を詐欺師のように感じる傾向のことで、博士課程学生を例にとると、本当の自分は博士課程にふさわしい人間ではないと感じてしまう（Nature ダイジェスト 2016年4月号「自分に自信が持てない研究者へ」参照）。「成績が良い人は特にこうした感情に陥りやすいのです」と Samardzic は言う。実際、調査に回答した学生の4人に1人近くが、自分が直面する問題としてインポスター症候群を挙げている。

トロント大学（カナダ・ピーターバラ）で物理化学を

**Q** 博士課程研究に伴う不安や抑うつについて助けを求めたことがありますか？

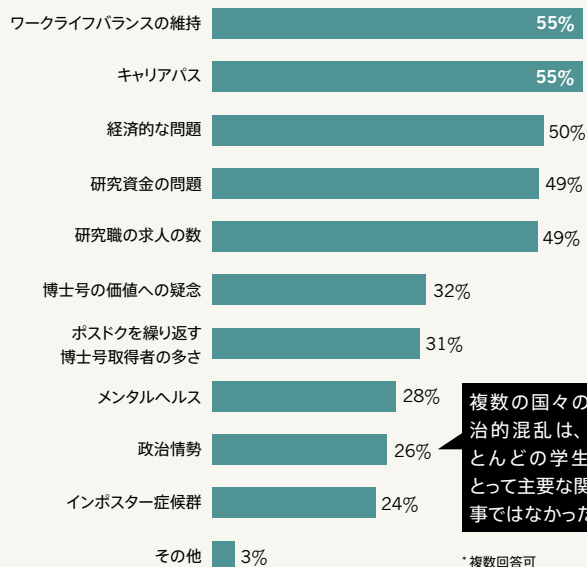


**Q** 不安や抑うつについて所属機関内で助けを求めましたか？\*

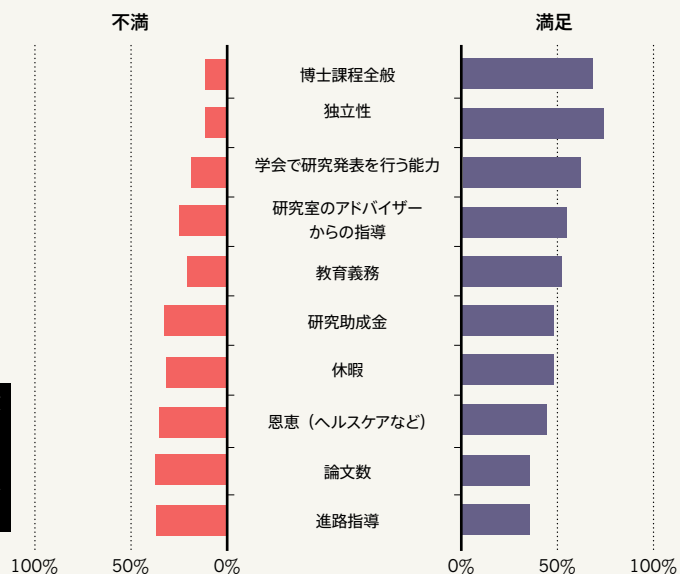


\*n=709。この質問は助けを求めた学生に対してのみ実施した。

**Q** 博士課程を始めてから特に興味があることは？ \*



**Q** 以下の各項目の満足度は？



専攻する Andrew Proppe もその1人だった。Samardzic と同じく、彼は博士課程には満足しているが、非常に強い不安を感じている。彼の場合、なじめない場所にしばらく身を置いていたことが原因で疎外感が増幅した。

Proppe はプリンストン大学（米国ニュージャージー州）で博士課程を始めたが、約1年半で中退した。彼は理想的な指導教官についていたのだが、「私は博士課程にもプリンストンの町にもふさわしくない」と感じてしまったからだ。豊かな文化があり、人口も多いモンリオール

で育った彼は、こぢんまりしたプリンストンの町で途方に暮れた。「全然楽しくありませんでした。私にとって環境がこれほど重要だったなんて、考えたこともありませんでした。故郷の全てを捨ててプリンストンに行ったのに、その価値がある場所には思えなかったのです。私は不幸でした」と彼は回想する。

Proppe の現在の指導教官であるトロント大学の Ted Sargent は、Proppe を研究室に迎えたいと熱望していた。「彼はプリンストン大学で、世界最高の物理化学者の1人

と研究をしていました。彼の持つ技術は、私の研究グループに利益をもたらすものだったからです」。Proppeは、前指導教官の研究室運営の仕方についても情報をもたらした。Sargentは冗談めかして、「私は彼をスパイとして送り込んだのです」と言う。「20年もやっていれば研究室の運営法ぐらい分かっているだろうと思われるかもしれませんが、まだまだ発展途上なのです」。

カナダに帰国したことで、Proppeは博士課程に戻ることができた。しかし、研究への不安を払拭できたわけではなかった。「私は毎日を頭でっかちに生きていました。午前3時にデータのことを考えたりしていたのです」と彼は言う。それまでの人生で大きなストレスや不安に直面したことがなかったため、問題を認識するまでに時間がかかったという。博士課程研究への不安が自分の生活にどれだけ大きな影を落としていたかを自覚した彼は、意識して生活を変えた。「夜の11時まで研究をするようにしていたのですが、それはやめて、ギターを弾いたり、運動をしたり、ガールフレンドと過ごしたりする時間を持つようにしました」と彼は言う。

## 努力は報われるか

博士課程学生が不安を抱く原因はいろいろある。*Nature*の調査から、多くの学生が将来の雇用に不安を感じていることが分かった。納得のいく職業に就くために、博士課程が「良い」または「非常に良い」準備になっていると回答したのはわずか31%だった。しかし、博士課程が研究者になるための良い準備になっていると思うかという質問に対しては、回答者の4分の3以上が「そう思う」または「非常にそう思う」と答えていて、研究者として働くことと「納得のいく職業に就く」ことは別物と考える学生が多いことを示唆していた。また、回答者の3分の2が、博士号を取得すれば就職の際に「かなり」または「劇的に」有利になると思うと回答していたが、3分の1はもっと冷めた見方をしていた。

このように、全ての回答者が、博士課程の苦勞とストレスが報われると確信しているわけではない。ロンドンがん研究所（英国）のデータ科学者Hannah Brewerは、彼女の専門分野の求人情報をグーグル検索で見かけるたびに「私は何をしているのだろうか」と思わずにはいられ

ないと言う。「こうした仕事の多くは修士号しか要求していないので、将来、博士号が役に立つかどうか分からないのです」と彼女は言う。それでも、博士号を取るという自分の決断には満足しているようだ。「過去に戻れたとしても、同じ選択をするでしょう。自分の仕事のスキルはなかなかのものだと自負していますし、研究も非常に面白いと思っています」。

## 助言が大切

今回の調査で、回答者の博士課程全般への満足度に最も大きく寄与する因子は指導だった。具体的には、アドバイザーからの指導と承認が最も重要だった。

残念ながら、回答者のかなりの割合が、自分が受けている指導に不満を感じていた。アドバイザーを代えられるなら代えたいと言った23%の他に、回答者の約5人に1人（18%）が、修了後の進路についてアドバイザーと有益な会話をしていないと答えている。アドバイザーは、博士課程学生が理想の進路を決め、それを追求する方法を学ぶのを補助するのに絶好の位置にいるはずなのだが、

回答者によると、指導教官との会話が特に少ないのは、学術研究機関以外の進路についてであるという。米国で化学を専攻するある学生はコメント欄に、「私のアドバイザーは学術研究機関以外での仕事を軽蔑し、そうした仕事はモチベーションの低い人間がやることだと思っている」と書いている。指導教官が学術研究機関以外の進路について有益な助言をくれるかを尋ねる項目では、約30%が「そう思わない」「全くそう思わない」と回答している。これは、*Nature*が2015年に大学院生を対象に行ったアンケート調査の結果とほぼ同じ割合だ。また、「指導教官はあなたが学術研究機関以外でキャリアを追求することを否定しない」と答えている回答者が半分よりわずかに多いという結果も、2015年と同じである。

学生が所属する機関が彼らのキャリア形成に無関心であることに気付いたSamardzicやその他の学生たちは、就職イベントを組織するようになった。そのイベントでは、大学院生とその他の専門家たちが、彼らが持ち得る選択肢について語り合う。Samardzicは最近、起業と生物医学分野の革新に関するワークショップに参加するために海外に出かけた博士課程学生による講演の準備を手



伝った。「こうしたイベントがもっとたくさん必要です。私自身、世の中にある仕事の半分も知らないんじゃないでしょうか」と彼女は言う。

アンケート調査の結果は、多くの博士課程学生が自身の未来について明確なビジョンを持っていないことを示唆している。回答者の約75%が博士課程修了後は学術研究機関で働くことを考えていると言うが、産業界で働くことを考えているという回答者は約60%いる。学生の優柔不断さも一因かもしれない。回答者の約半数が、両方のセクターでキャリアを追求する可能性が「ある」または「大いにある」と答えている。

学術研究機関への強い関心は2015年の調査でも見られ、回答者の78%が、就業機会が不足しているにもかかわらず学術研究機関でのキャリアを追求する可能性が「ある」または「大いにある」としていた。就業機会の不足については2015年に発表された分析でも強調されている (N. Ghaffarzadegan *et al. Syst. Res. Behav. Sci.* **23**, 402–405; 2015)、米国の生物医学分野では、学術研究機関の終身在職コースの求人1件に対して平均6.3人の博士課程学生がいるということだった。

博士課程研究をきっかけに、研究に人生を捧げることを考え直す学生はあまりいないようだ。2015年の調査では、自分が研究者としての道を歩む可能性が博士課程を始めたときに比べて「大きくなった」または「変わらない」とする回答は67%だったが、今回は80%近くまで増えた。

学術研究機関の求人市場はすでに厳しく、多くの博士課程学生には進路指導が必要だ。しかし、進路指導を受けるのは必ずしも容易ではない。所属機関で有益な就職情報を得られたという回答者の割合は、2015年の調査では18%だったが、今回は15%まで低下している。

多くの学生は、「キャリアカウンセラーは自分自身」という状態になっている。現在希望する就職先をどのようにして決めたいかという質問に対しては、約3分の2の回答者が、自力で調べた部分があるとしている。アドバイザーからの助言を挙げている学生は34%だけだった。

早い段階からアドバイザーと下準備をしておく、博士課程を格段に良いものにすることができるとProppeは言う。プリンストンを去りトロントに来た彼は、すぐに新しいアドバイザーであるSargentに直接会って話をした。「私はプリンストンで先に聞いておくべきだったと後悔し

ていた質問を全てしました」と彼は言う。おかげで、話が終わる頃には、研究室がどのように運営されていて、アドバイザーとはどのくらいの頻度で会うことができ、どのくらいの指導を期待できるかを把握することができた。

トリノ工科大学（イタリア）で航空宇宙工学を専攻する学生Alberto Brandlは、博士課程を始める前から共同指導教官たちを知っていた。「良い指導者だろうとは思っていましたが、実際に非常に満足しています」と彼は言う。アドバイザーたちは、博士課程が始まったばかりの彼に娘が生まれたときにも融通を利かせてくれた。「子どもを持つことは素晴らしいことだと言ってくれました。私はあまり休みを取りませんでした、彼らは私に『必要なだけ休むように』と言ってくれました」とBrandlは言う。彼は、アドバイザーたちは全てを指図することはせずに、彼が自分で決断するのに十分なだけの指導をしてきていると感じている。「それがボスとリーダーの違いです」。Brandlは、自分は幸運だと考えている。「指導者が原因で博士号を断念した人を何人も知っていますから」。

アンケート調査で分かるのはここまでだが、データの下には深い物語が隠されていることがある。シンガポール環境生命科学工学センターの微生物学者Yissue Wooは、自分のアドバイザーに高い点数をつけたが、指導教官と進路について話し合うことはないと言う。今のところ、Wooは勉強や研究で手一杯で、アドバイザーに進路の話題を切り出す余裕がないのだ。

Wooは博士課程全般に満足していると回答したが、それは彼が失敗を受け入れることを学んだことも関係している。「研究者になって、もう長いのです。いまさら挫折には驚きません。うまくいかないことがあっても、そんなものだと思うのです」と彼は言う。

おそらく、イスラエルで医学を専攻するある学生のコメントが、彼らの意見を最もよく代弁している。「博士課程研究はきつく、がっかりさせられることも多いです。けれども小さな成功が全ての苦勞を帳消しにしてくれます」。

(翻訳：三枝小夜子)

### A love-hurt relationship

Vol. 550 (549–552) | 2017.10.26

Chris Woolston

(米国モンタナ州ビルリングズ在住のフリーランスライター)



# 学術界サバイバル術入門

Powered by Nature Research Academies

TRAINING 1

## 学術出版のすすめ

『学術界サバイバル術入門』へ、ようこそ。Nature Research Academiesの講師、ジェフリー・ローベズです。1回目では、学術出版が科学者をどのように支えているかについて、① 研究結果の出版が重要な理由、② 学術誌の役割、③ 投稿先の重要性、の3つの観点から説明します。

### ① 研究結果の出版が重要な理由

まずは、学術出版の役割について考えてみましょう。そもそも、論文を出版する必要があるのでしょうか。また学術出版は、研究者にどのような恩恵をもたらすのでしょうか。私が強調したいのは、論文の出版とは、研究において不可欠かつ最終的な段階である、ということです。研究結果は、それが重要かどうかの前に、誰かに知らなければ影響力を全く持ちません。従って、あなたの研究結果を他の研究者に伝え

ることが、あなたの研究分野を前進させるために必須なのです。

「研究結果を出版する場所は重要ですか」と、私が主催するワークショップでよく聞かれます。出版の場は、研究成果の影響力を強めるのに重要です。そのためには、世界中の同分野の研究者の目に触れやすいプラットフォームに発表する必要があります。そのプラットフォームの認知度が高いほど、読まれる見込みが高くなるからです。

### ② 学術誌の役割

しかし、インターネットで何でも検索できる今、研究成果を学術誌に発表する必要があるのでしょうか。オンラインで掲示すれば十分と考える科学者もいることでしょう。確かに、著者にとっては効率的で簡単に思えます。しかし、読者の側からは便利とは言い難いでしょう。

学術誌とは美術館のキュレーターの

ようなものだ、私は考えています。美術作品を見に行きたくなくなったとき、展示の形式が異なる2つの美術館があるとしみます。一方は制限が全くない美術館で、誰もがそこに来て自分の作品を展示することができます。この美術館には完全な自由があるので、非常に質の高い芸術作品もあれば、稚拙な素人作品もあります。作品は整理されていないので、興味の湧く作品を探し出すには、長い時間と努力が必要でしょう。

もう一方の美術館はキュレートされています。つまり、美術の専門家により厳選された、質の高い作品だけが展示されているのです。さらに、作品はジャンルや時代によって分類されています。例えば、ある展示室では20世紀の日本の作品が、また別の展示室では19世紀のフランスの作品が見られる、という具合です。

あなたなら、どちらの美術館に行きますか？ ほとんどの人が後者の美術館を選ぶと思います。その理由は「鑑賞しやすいから」です。興味の湧く作品を簡単に見つけることができ、その美術作品は質の高いものだ確信を持って鑑賞できるからです。

学術出版において学術誌が担う役割もそれと同じで、学術誌は科学文献のキュレーターです。科学者が学術誌に論文を投稿すると、学術誌の編集者や査読者たちが、その研究が出版に値する質と関連性を有するかどうかを検討します。一方、学術誌の読者は、探しているものを短時間で見つけることができ、自分の研究に関連がなくて役に立つと確信できるわけです。

学術出版社の役割は、出版される論文を「ふるいにかける」ことと「改善する」ことであり、この活動が、科学的記

録の蓄積に役立っています。学術誌に投稿された研究論文がその学術誌の領域に当てはまるかどうかを最初に検討するのは、編集者です。彼らは、互いを裏付ける同様の研究同士をグループ化していきます。この活動により、読者も自分の研究に関連するものを見つけやすくなります。例えば、気象学者は、*Nature Climate Change*で発表された研究ならば、自身の研究におそらく関連して興味を持てるものだろうと考えるわけです。有用な研究を探すのにインターネット上をくまなく漁る必要がなくなり、時間を節約できるのです。

編集者は次に、その分野の専門家(査読者)の意見を聞いて研究を評価します。そして著者に、ロバストネス(堅牢性)と透明性という点において、論文原稿をさらに改善する方法を提案します。こうした過程を踏んで出版にこぎ着けた論文は、品質が最高のものとなっただけでなく、再現性も増進されているのです。

### ③ 投稿先の重要性

では、研究を発表する学術誌を選ぶ際に、用心すべき事項はあるのでしょうか。もちろんイエスです。過去10~15年間に、オープンアクセス出版が多くの関心を集め、人気を獲得してきました。この出版モデルでは、論文原稿の出版が認められた後に著者が論文掲載料(APC)の支払いを求められることが一般的です。

オープンアクセス形式で出版された論文は、世界中の誰もが自由にアクセスできるようになります。科学をより透明で開かれたものにするへの関心が高まっている今日、多くの国や研究助成金提供機関は、この出版モデルをサポート、あるいは奨励しています。また、発

展途上国の多くは学術誌の購読料を支払う余裕がなく、そうした国々の研究者が読むことができるのは、オープンアクセス形式で出版された論文のみです。つまり、オープンアクセス出版により、論文が読まれやすくなるのです。読まれるほどに世界的なインパクトは大きくなりますから、著者の国際的な評価の向上につながるという仕組みです。

しかし中には、オープンアクセス出版を騙り、研究者から金銭をだまし取ろうとする輩もいます。彼らは、怪しい出版社を立ち上げて、いわゆる「ハゲタカ(捕食)学術誌」を発行しています。ハゲタカ学術誌は、論文を選別したり改善したりしない代わりに、掲載料さえ払えば迅速かつ簡単に論文を発表できると著者に約束します。こうした学術誌が査読を行うことはまずなく、投稿されたものを何でも掲載するため、前述のような「真の学術誌」とは言えません。査読を受けていない研究論文は、その研究分野に害を及ぼすだけではなく、著者たちにも不利益をもたらします。このような学術誌は品質が十分でないため、研究者が論文検索に使う主要なデータベースにインデックスされません。つまり、ハゲタカ学術誌で論文を発表しても、その研究は検索結果に上らないのです。そして、著者は同じ研究を2度発表できないため、その研究は誰にも見られることなく埋もれてしまい、望んでいたようなインパクトを与えることも、認知されることもありません。

幸いなことに、上質なオープンアクセス学術誌を見つけることは難しくありません。まず、評価の高い出版社が発行する学術誌を探してください。例えば、Springer Nature、Elsevier、Wileyなどが発行する学術誌です。そこから、

評価の高い編集者や編集委員がいる学術誌を探します。学術誌は、Web of Science、Scopus、PubMed、Directory of Open Access Journalsなど、評判の良いオンラインデータベースにインデックスされている必要もあります。最後のポイントは、論文原稿の査読があり、APCの支払いが「掲載が正式に決まった後」であることです。こうした条件に合う学術誌は、あなたの研究を他の研究者の目に留まらせることのできる「高品質で信頼できるプラットフォーム」のはずです。

### まとめ

学術出版は研究者を支え、科学の進歩を促すことにおいて中心的役割を果たすものとお分かりいただけたでしょうか。信頼できる学術誌は、掲載論文が分野ごとに関連していることと、質の高い研究であることを保証します。一方で科学者は、投稿先の学術誌を慎重に評価する必要があります。あなたの研究がその分野の進歩においてインパクトを与えるためには、不可欠な作業なのです。

(翻訳：古川奈々子)

NEXT TRAINING: 「論文発表の倫理」は5月号掲載予定です。



nature research  
ACADEMIES

### ジェフリー・ローベンス (Jeffrey Robens)

ネイチャー・リサーチにて編集開発マネージャーを務める。ペンシルベニア大学でPhD取得後、シンガポールおよび日本の研究所や大学に勤務。自然科学分野で多数の論文発表と受賞の経験を持つ研究者でもある。学術界での20年にわたる経験を生かし、研究者を対象に論文の質の向上や、研究のインパクトを最大にするノウハウを提供することを目的とした「Nature Research Academies」ワークショップを世界各国で開催している。

# 大きさも量も 大規模化した DNA 自己集合

..... ナノテクノロジー .....

DNAは、自己集合によって目的の形状の物体を形成するよう設計することができる。しかし、形成できる物体のサイズと量は限られており、そのコストも高かった。今回、この問題を克服する方法が見いだされた。


自然界には、タンパク質折りたたみや脂質二重層の形成から、地球の生物系全体の確立に至るまで、さまざまな形の自己集合プロセスが存在している<sup>1</sup>。科学者らは長い間、研究用、工学用、医療用の人工細胞機械の構築を目指して、細胞や細胞小器官と同等の大きさ・複雑さを持つ人工物体を、自己集合によって作り上げたいと熱望してきた。このほど、こうした目標に向けた大きな進展が見られた。DNAでできたデザイナー自己集合ナノ構造体の大型化方法と大量生産方法に関する4編の論文<sup>2-5</sup>が、*Nature* 2017年12月7日号に掲載されたのである。

DNA、RNA、タンパク質などの生体高分子は、ナノスケールのデザイナー構造体を構成するビルディングブロック（構成要素）として用いられてきた。こうした構造体は、相互作用可能な生物模倣系を設計したり<sup>6</sup>生体機能を調節したりする<sup>7</sup>ことを目的として用いられてきた。中でもDNAは、相補鎖の塩基間で予測可能かつ安定な対が形成されるために「プログラム可能性」という特長を持ち、最も有用なナノスケール構成要素となつて

いる。さらに、DNAは構造的に安定で、その二重らせん構造の幾何学的特徴が十分研究されており、他の生体分子との相性が良いので、複雑な機能を有する「ヘテロ生体分子」を構築できる。これまで、さまざまなDNA自己集合法が開発され、非常に複雑な幾何形状とナノレベルの精密さを備えた人工構造体が構築されてきた<sup>8</sup>。

DNAナノテクノロジーにおける画期的出来事の1つは、DNA折り紙の発明である<sup>9</sup>。DNA折り紙とは、「ステープル」と呼ばれる短いDNA鎖を数百本用いて、長い1本鎖DNAを折りたたむことで目的の形状を作り上げるユニークな手法だ。ステープル鎖は、DNAの特定の長い領域と相補的になるよう設計されているため、折りたたみ過程を制御する役割を担う。これまでに、DNA折り紙法を用いて、多種多様な二次元（2D）および3Dのナノ物体が作製されてきた。これらの物体の多くは完全にアドレス可能<sup>10</sup>である。つまり、将来の応用に向けて、選択した箇所を必要に応じて修飾することができる。だが、個々のDNA折り紙ナノ構造体のサイズは、それを構成する足場DNAの長さによって制限される。例えば、広く用いられている足場鎖の1つは、およそ7200ヌクレオチド長のゲノムDNA<sup>9</sup>だが、これを折りたたんで折り紙構造体を作っても直径100nmほどにしかない<sup>9,10</sup>。

DNAナノテクノロジーにおけるもう1つの重要な設計戦略は、一本鎖タイル（SST）集合だ<sup>11</sup>。SSTは一本鎖DNAから作られたナノメートルスケールの2D長方形や3Dレンガであり、この戦略では、SST間にDNA二本鎖を形成させるよう設計してSST同士を連結させる。従って、SSTを多数集合させることで2Dシートや3Dブロックを形成でき、特定のSSTを取り入れたり排除したりするだけで、さまざまなパターンや形状を選択的に「造形」して作り上げることができる<sup>12</sup>。しかし、こうして作られたDNA構造体のほとんどは、折り紙ナノ構造体と同程度のサイズで、より大型の構造体を得ようとするとその収率は低かった。今回の一連の論文では、SST法と折り紙法を土台として、マイクロメートルサイズのDNA構造体の作製と、DNA構造体の大量生産化が報告されている。

Tikhomirovら<sup>2</sup>は、表面パターンを施した正方形のDNA折り紙を構成単位として使い、一辺がおおよそ0.7 $\mu\text{m}$ の2D DNA折り紙アレイを作製した（1a）。表面パターンは、折り紙表面から伸びたDNA鎖で作られており、折

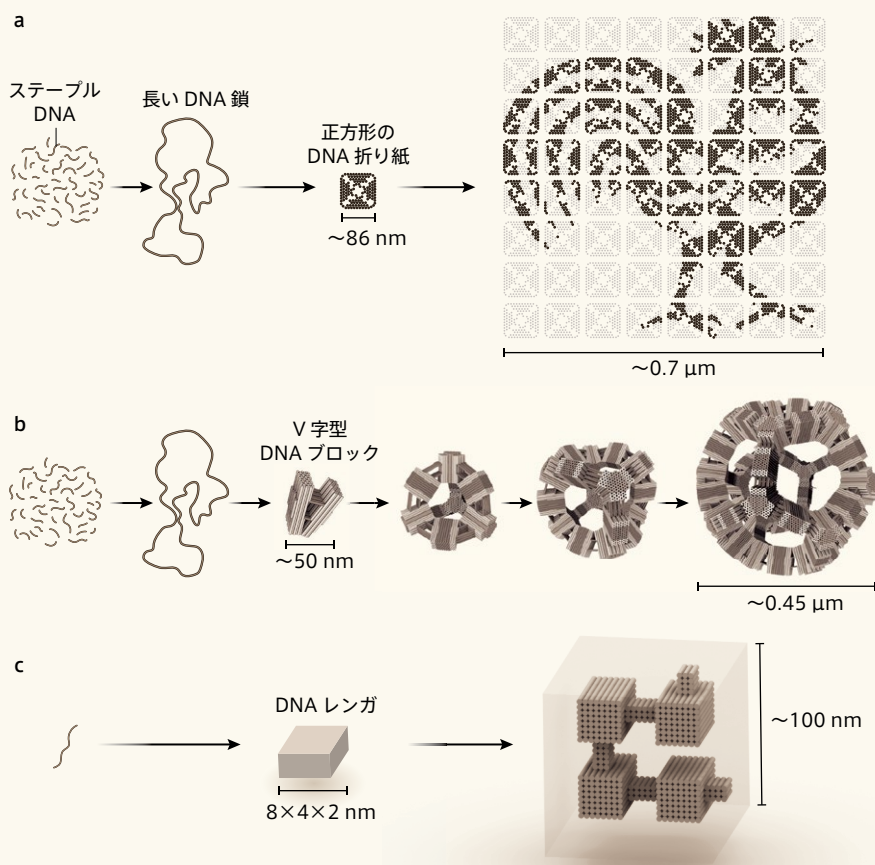


図1 マイクロメートルスケールのDNA構造体を作る方法

- Tikhomirovら<sup>2</sup>は、DNA折り紙法（短い「ステーブル」DNA鎖を用いて長いDNA鎖を折りたたんでいく手法）を用いて正方形を作製した。さらに、これらの正方形を集合させて、所望の表面パターンを有する8×8アレイを作製した。
- Wagenbauerら<sup>3</sup>は、DNA折り紙を用いてV字形の3Dブロックを作製し、これを階層的に集合させて多面体を作製した。
- Ongら<sup>4</sup>は、一本鎖タイル集合法という方法に基づいて、52ヌクレオチドを含む一本鎖からなるDNAレンガを作製した。各鎖には4つの結合ドメインが存在するため、レンガを集合させてより大きな構造物を形成できる。数千個のレンガを自己集合させて複雑な空洞を有する直方体を形成するようプログラムすることも可能である。

り紙と折り紙の間に短いDNA二本鎖を形成することによって折り紙同士が連結する。Tikhomirovらは、正方形折り紙間の相互作用をプログラムするためのフラクタル法を開発した。この方法では、局所的な集合理論を再帰的に用いることで、正方形折り紙アレイを階層的多段階プロセスによってどんどん大きくしていく。また、専門家でもDNA配列や実験手順を開発して大型DNAパターンを作ることができる「FracTile Compiler」という設計ソフトも制作した。Tikhomirovらは、DNAを用いてモナ・リザ、雄鶏、チェス盤などの「絵」を描き、この自動設計プロセスの有効性を実証した。

Wagenbauerら<sup>3</sup>は、また別の階層的自己集合法を用いて最大でマイクロメートルスケールの大きさの3D DNA折り紙構造体を作製した（図1b）。彼らは基本構成要素として、V字型のDNA折り紙ブロックを用いた。ブロックのVの角度は可変であり、幾何形状とブロック間相互作用を制御することによって、より高次の集合体を構築できる。Wagenbauerらは、直径350nm未満の平面リ

ングを積み重ねた長さ約1μmのチューブ（一部の細菌と同等のサイズ）や、3種類の多面体（最大で直径450nm）を構築することで、この手法の有効性を実証した。

Ongら<sup>4</sup>は、マイクロメートルスケールの3D SST DNA構造体を作る方法を報告している（図1c）。第一世代のSST系の原理を拡張することで、13ヌクレオチドからなる結合ドメインを4つ含む52ヌクレオチドで構成されるレンガ型DNAビルディングブロックを設計した。結合ドメインによってレンガ同士を結び付けることで、大型の構造物を形成できる。第一世代のDNAレンガは、8ヌクレオチドで構成された結合ドメイン4つによって構成されていたが、それと比較すると、今回の手法はDNAレンガの結合ドメインが長いために、大型集合構造体の収率と安定性が向上している。Ongらは、「Nanobricks」というソフトを開発して、目的の3D物体の作製に必要なレンガ鎖を設計し、一連のさまざまな複雑構造体を合成した。

Praetoriusら<sup>5</sup>は、DNA折り紙によく用いられる数百のステーブル鎖の作製コストを、バイオテクノロジーに

よって大幅に削減できることを報告している。Praetoriusらは、バクテリオファージとして知られるウイルスを用いて、数百のステーブル鎖配列を含む一本鎖前駆体DNAを作製した。この前駆体DNA中では、それぞれのステーブル鎖配列が「DNAザイム」配列によって隔てられており、この配列の所で自らを切断する。そこで切断されてできた生成物が、自己集合して指定のDNA折り紙形状を形成する。注目すべきことは、この方法での折りたたまれたDNA折り紙構造体の製造コストであり、1mg当たり約200ドル（2万2000円）から約20セント（22円）まで下がる。この方法によって、スケラブルで効率的なDNA折り紙構造体やSST構造体が安価かつ大量に生産可能になるため、治療、薬物送達系、ナノエレクトロニクスデバイスなどへの大規模応用の実現が見込まれる。

今回の一連の論文では、生体分子工学分野における長年の課題に対する解決策が示されている。つまり補完的な「トップダウン」型手法（バルク材料から構造体を削り出していく手法）を用いて作られた物体に組み込むことのできる大きさの自己集合構造体を、小さな構成要素から低コストで作製できることになるわけだ。さらに、報告されたDNA構造体は、治療用に細胞と相互作用するデバイスを製造したり、合成ポリマーの合成や細胞間相互作用のプログラムを行う精巧な分子機械や組み立てラインを作製したりするのに十分な大きさである。そうした自己集合構造体を人工細胞小器官に使えば、生細胞内の生物学的過程を検知・モニター・調節可能なシステムを構築できるようになるかもしれない。

（翻訳：藤野正美）

### DNA self-assembly scaled up

Vol. 552 (34–35) | 2017.12.7

Fei Zhang & Hao Yan

アリゾナ州立大学（米国）に所属

- Whitesides, G. M. & Grzybowski, B. *Science* **295**, 2418–2421 (2002).
- Tikhomirov, G. *et al. Nature* **552**, 67–71 (2017).
- Wagenbauer, K. F. *et al. Nature* **552**, 78–83 (2017).
- Ong, L. L. *et al. Nature* **552**, 72–77 (2017).
- Praetorius, F. *et al. Nature* **552**, 84–87 (2017).
- Chen, Y.-J., Groves, B., Muscat, R. A. & Seelig, G. *Nature Nanotechnol.* **10**, 748–760 (2015).
- Li, J., Green, A. A., Yan, H. & Fan, C. *Nature Chem.* **9**, 1056–1067 (2017).
- Zheng, J. *et al. Nature* **461**, 74–77 (2009).
- Rothmund, P. W. K. *Nature* **440**, 297–302 (2006).
- Douglas, S. M. *et al. Nature* **459**, 414–418 (2009).
- Wei, B., Dai, M. & Yin, P. *Nature* **485**, 623–626 (2012).
- Ke, Y., Ong, L. L., Shih, W. M. & Yin, P. *Science* **338**, 1177–1183 (2012).

# 大気の微量成分から エネルギーを得る 南極の微生物

微生物生態学

低温で栄養素に乏しい南極の土壤に棲む微生物群集が、光合成ではなく微量ガスの酸化からエネルギーを獲得していることが、先進的なゲノム解析手法によって示唆された。

南極大陸が完全に氷で覆われているわけではないと聞くと、意外に思う人もいるかもしれない。無氷地帯は南極大陸の0.4%に満たないが<sup>1</sup>、この地域の土壤の大部分は、水浸しから超乾燥状態まで、一般的な生物にとって過酷な条件が混在した状態であり、南極半島を別にすれば、この極端な土壤条件により多細胞植物の生育は阻まれている。その結果、南極大陸の寒冷な砂漠地帯では、重要な生態系サービスの多くが細菌によって提供されている。極めて重要なエネルギー捕捉過程の1つに、光によるシアノバクテリアの光合成がある。この過程では、大気中の二酸化炭素ガスがこの微生物の有機分子に固定される<sup>2</sup>。今回、ニューサウスウェールズ大学（オーストラリア・シドニー）のMukan Jiらは、南極の極限的な（シアノバクテリアが少ない、または全く存在しない）陸上環境では、光合成とは異なるエネルギー捕捉機構が働いている可能性を示し、これまでほとんど知られていなかったこの機構について、*Nature*2017年12月21日号に報告した<sup>3</sup>。

南極の土壤には、光合成を行う微生物がほとんど存在しないのが普通だ。例えば、研究チームが試料を採取し

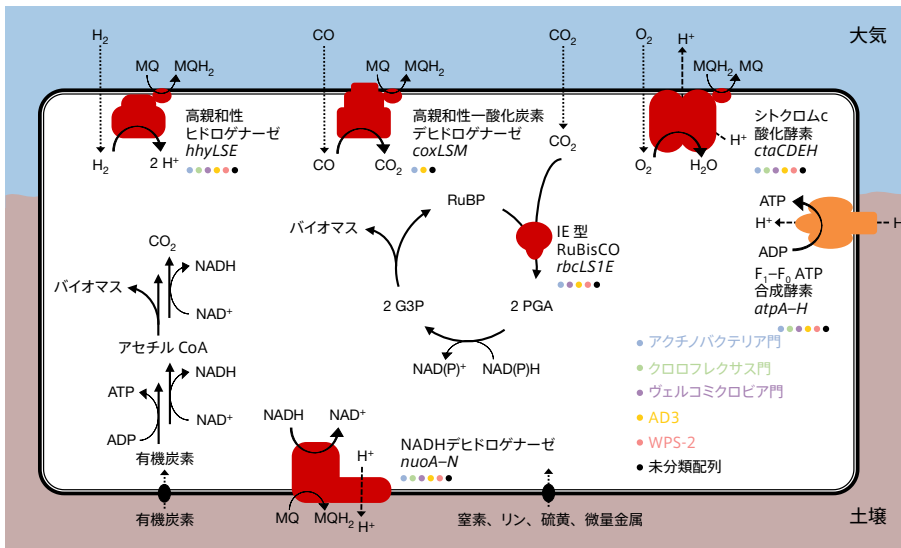


図1 南極ロビンソン・リッジ土壌の細菌群が大気中の微量ガスからエネルギーを得る仕組み（仮説）

5つの門に属する微生物は全て、大気中の水素から好気呼吸によってエネルギーを生むことができる。中には大気中的一酸化炭素を利用できるもの（アクチノバクテリア門、AD3）や、大気中の二酸化炭素を化学的に固定できるもの（アクチノバクテリア門、AD3、WPS-2）もいることが分かった。この微生物群たちはまた、土壌に含まれる微量の有機炭素も呼吸により取り込み、生物に利用可能な形にしていると考えられる。

た地域の土壌では、微生物の塩基配列の中でシアノバクテリアが占める割合は0.3%に満たない。そのような土壌において、また特に岩石を伴う環境では、細菌が生化学的循環の主な駆動者だと考えられているが、南極の土壌で進行している代謝過程のエネルギー源は明らかにされていない<sup>4</sup>。

Jiらは、先進的なゲノム解析や微量ガスの酸化を監視する機能的アッセイ、化学分析、エネルギー収支モデルを組み合わせて用いることにより、南極外縁部の砂漠土壌など、極めて不毛な一部の低温土壌が、これまで正しく認識されていなかった南極微生物の好氣的エネルギー獲得様式を支えていることを明らかにした。研究チームは、大気中の水素と一酸化炭素の酸化に依存する生物学的エネルギー捕捉過程が南極の微生物群集を支えていると考えた。気体の水素と一酸化炭素は、大気中のガス全体の1%にも満たないことから、「微量ガス」と呼ばれる。

研究チームは、南極の2つの場所（ロビンソン・リッジとアダムズ平原）の土壌試料数点からDNA塩基配列データセットを得て、複雑な手法を用いることにより、土壌中の重要な微生物の概要ゲノム配列を部分的に再構築した。この概要ゲノム配列には、アクチノバクテリア門、クロロフレックス門、プロテオバクテリア門、アシドバクテリア門の他、WPS-2およびAD3というあまり知られていない土壌微生物群のものも含まれている（図1）。この2種は、実験室で培養に成功した例はない。

研究チームは試料中試料に多く含まれる微生物種の代謝ポテンシャルを分析するため、概要ゲノム配列を元に、同定した遺伝子の機能を推測してアノテーションし、代謝経路についても推測した。すると、特に興味深い3種類の遺伝子が広く認められた。これらの遺伝子は、それぞれ高親和性ヒドロゲナーゼ、CoxLSM（高親和性一酸化炭素デヒドロゲナーゼ）、そしてタイプIEのRuBisCO（ルビスコ；CO<sub>2</sub>固定酵素）として知られ、エネルギーを発生させる細胞経路で微量ガスの酸化を支える酵素をコードしている。

これらの酵素は、微量ガスの酸化過程でカギを握っていると考えられる。実際にその役割は生化学的分析によって裏付けられた。同一の土壌試料が、CO<sub>2</sub>固定量の増加に伴って、理論上細菌の持続的な活動に十分な量の水素と一酸化炭素を高い再現性で取り込むことを、著者らは示したのだ。また、固定過程は光によって促進されなかったことから、光合成過程の関与がないことも示された。

しかし、このような知見を解釈する場合には注意が必要なものもある。研究チームが用いたゲノム解析手法は、大量に存在する生物に偏る場合がある<sup>5</sup>。シアノバクテリアの存在量が少なかったとしても、カギとなる生態系サービスに大きく貢献している可能性はある。研究チームによれば、光合成と論文で示した微量ガス代謝は、南極の土壌で同時に行われている可能性があり、主となる過程は、利用可能な水の量など、物理化学的な要因に依存す



図2 南極のマクマードドライバレー

Jiらが提案している過程<sup>1</sup>に関連する遺伝子はここで採取された微生物試料のDNA塩基配列データセットにも存在する。

る可能性が高いという。

Jiらは、この生体エネルギー論的機構の証拠が、南極の一部の局地化・特殊化された極限的な環境に限定されていることも指摘している。しかし、南極のマクマードドライバレー(図2)と呼ばれる乾燥土壌地域で採取された試料から得られた複数の微生物DNA塩基配列データセット(一般に公開されている)の中に、この代謝過程に必要な遺伝子を見いだしており、微量ガスは広域において微生物の生命活動のエネルギー源となっている可能性があると考えている。しかし、この現象がこれまで南極の土壌中から見いだされることがなかったのは、なぜだろう。考えられる理由は、この特別な生理機能を示す生物が南極の土壌から培養された例がないこと、そして、それほど極端でない環境の砂漠土壌では、主となるエネルギー獲得過程はシアノバクテリアの光合成であることだ<sup>6</sup>。

水素と一酸化炭素の代謝によるエネルギー生成は、過去に観察例がある<sup>7</sup>。基本的に嫌気性(無酸素)の条件下ではあるが、さまざまな微生物が、唯一のエネルギー源として水素を利用することによって、CO<sub>2</sub>固定を支えている。*Geobacter sulfurreducens*などの細菌<sup>8</sup>は、唯一のエネルギー源として大気中の一酸化炭素をかき集めることができ<sup>9</sup>、深海底下の堆積物などの、別の極限的な絶対嫌気性環境には、一酸化炭素デヒドロゲナーゼ遺伝子が広く存在する<sup>10</sup>。

Jiらが提案した好氣的エネルギー獲得過程が微生物群集の維持に十分なものである可能性については、懐疑論があ

るかもしれない。冷たく澄んだ南極の大気中に生物の支持に十分なレベルの水素と一酸化炭素が存在するという事は、直観的には考えにくいと思われる。研究チームは、ロビンソン・リッジやアダムズ平原の試料採取地点における局地的な大気中ガス濃度を示していないが、水素と一酸化炭素の酸化が理論的には南極土壌の微生物個体群のエネルギー必要量を支持できるという計算結果を示している。

こうした環境に棲息する生物は必ずしも活発ではなく、年間のかなりの期間で細胞が不活性な状態にあることは、留意に値する。総年間代謝期間(生物が代謝的に活性状態でいられる期間)は、温暖な気候の湿潤な土壌では何千時間にも上るのに対し、数百時間にすぎない可能性もある。ことによると、細胞分裂にかかる時間も、こうした環境では数日から数カ月を要するのかもしれない(さほど極端でない環境下では、細胞分裂にかかる時間は数分から数時間)。

今回提案された生理機能を明確に証明するには、最終的にはこの機能を持つ微生物を単離して実験室で培養するとともに、その微生物が水素と一酸化炭素をエネルギー源として利用し増殖できることを*in vivo*で示すことが必要と考えられる。Jiらの知見について、とりわけ宇宙生物学者にとって特に興味深いのは、存在可能と考えられているぎりぎりの場所に生息する生物の生存およびエネルギー充足機構の理解に新たな観点を加えていることだ。この研究結果は、他の極限的な環境での水素代謝の分布に関する今後の研究を刺激する可能性もある。

(翻訳:小林盛方)

### Energy from thin air

Vol. 552 (336–337) | 2017.12.6

Don A. Cowan & Thulani P. Makhallanyane

プレトリア大学微生物生態学ゲノミクスセンター遺伝学科  
(南アフリカ)に所属

1. Bockheim, J. G. in *Antarctic Terrestrial Microbiology* (ed. Cowan, D. A.) Ch. 16 (Springer, 2014).
2. Cary, S. C., McDonald, I., Barrett, J. E. & Cowan, D. A. *Nature Microbiol. Rev.* **8**, 129–138 (2010).
3. Ji, M. et al. *Nature* <http://dx.doi.org/10.1038/nature25014> (2017).
4. Chan, Y., Van Nostrand, J. D., Zhou, J., Pointing, S. B. & Farrell, R. L. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **110**, 8990–8995 (2013).
5. Wu, Y.-W., Tang, Y.-H., Tringe, S. G., Simmons, B. A. & Singer, S. W. *Microbiome* **2**, 26 (2014).
6. Wood, S. A., Rueckert, A., Cowan, D. A. & Cary, S. C. *ISME J.* **2**, 308–320 (2008).
7. Conrad, R. *Microbiol. Rev.* **60**, 609–640 (1996).
8. Geelhoed, J. S., Henstra, A. M. & Stams, A. J. M. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **100**, 997–1007 (2016).
9. Lalonde, I. & Constant, P. *Appl. Environ. Microbiol.* **82**, 1324–1333 (2016).
10. Hoshino, T. & Inagaki, F. *Lett. Appl. Microbiol.* **64**, 355–363 (2017).



# 記憶T細胞の起源

免疫学

以前に遭遇したことのある病原体から体を防御する「記憶T細胞」。この細胞の起源について論争が続いていたが、このほど、DNA修飾を長期間追跡した2つの研究によって、エフェクターT細胞から生じることが明らかになった。

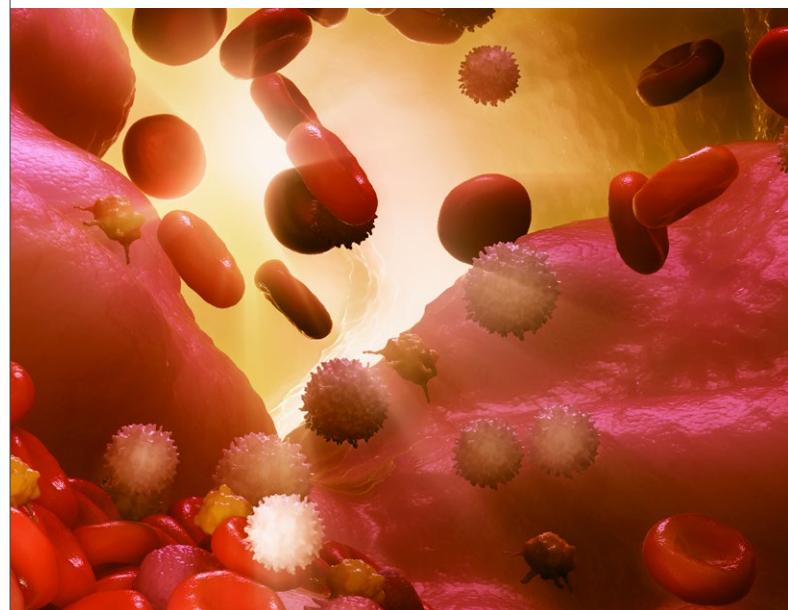
長期生存する記憶T細胞は、以前に遭遇した特定の微生物を「覚えて」いて、その病原体に再び曝露されると迅速な応答を開始する。ワクチン接種は記憶T細胞のこの能力を利用したもので、感染症による病状や死亡を大きく低減させてきた。免疫学的記憶が確立・維持される仕組みを理解することができれば、ワクチン設計を改良するための手掛かりが得られる可能性がある。このほど、記憶T細胞が生じる細胞集団と、その記憶T細胞集団が生じる過程が明らかにされ、2編の論文として報告された。エモリー大学医学系大学院（米国ジョージア州アトランタ）のRama S. Akondyらは*Nature* 2017年12月21号362ページ<sup>1</sup>に、同大学院および聖ジュード小児研究病院（米国テネシー州メンフィス）のBen Youngbloodらは*Nature* 2017年12月21号404ページ<sup>2</sup>に、それぞれ研究成果を報告した。

ナイーブT細胞とは、これまでに病原体に応答したことのない細胞である。ナイーブT細胞が病原体を認識すると、迅速に分裂し、感染と戦うのに役立つサイトカインタンパク質などの分子を発現する。このような応答を行っている状態の細胞は「エフェクターT細胞」（具体的に言うと、エフェクターT細胞の1種の細胞傷害性T細胞）と呼ばれ、炎症を起こしている組織に移動して、感染細胞を殺傷する能力を持つ<sup>3</sup>。病原体が除去されると、

ほとんどのエフェクターT細胞は細胞死を起こすが、長期生存する記憶T細胞の小集団が存続し、再び感染が起これば迅速に応答できるように備えている<sup>3</sup>。

記憶T細胞がどの細胞から生じるかについてはこれまでも大規模に調べられていて、一般的には2つの可能性（図1a、b）が提案されている。1つは、細胞死を起こさなかったエフェクターT細胞のサブセットから生じるとするもの（図1b）で、他方は、ナイーブT細胞が抗原に初めて遭遇して最初の細胞分裂をする際に、エフェクターT細胞の能力を持つ細胞と記憶T細胞の能力を持つ細胞の両者を生じるとするもの（図1a）である<sup>3</sup>。

今回の2つの研究では、記憶T細胞の起源についての議論に決着をつける目的で、1回の感染の過程でCD8<sup>+</sup>T細胞（細胞表面にCD8タンパク質を発現しているT細胞）を追跡した。Akondyら<sup>1</sup>は、黄熱ウイルスに対するワクチンを接種した複数の人を対象に研究を行い、一方のYoungbloodら<sup>2</sup>は、リンパ球性脈絡髄膜炎ウイルス感染のマウスモデルを用いて研究を行った。両研究ともに、ナイーブT細胞、エフェクターT細胞、記憶T細胞の集団において、エピジェネティックな修飾（細胞のDNAに加えられる化学修飾や構造変化で、遺伝性であるが、DNAの塩基配列を変化させない）について調べた。このような変化は遺伝子発現の調節に関連することが多く、特定の細胞とその子孫細胞は、エピジェネティックな修飾を用いて特定の遺伝子発現パターンを「ブックマーク」す



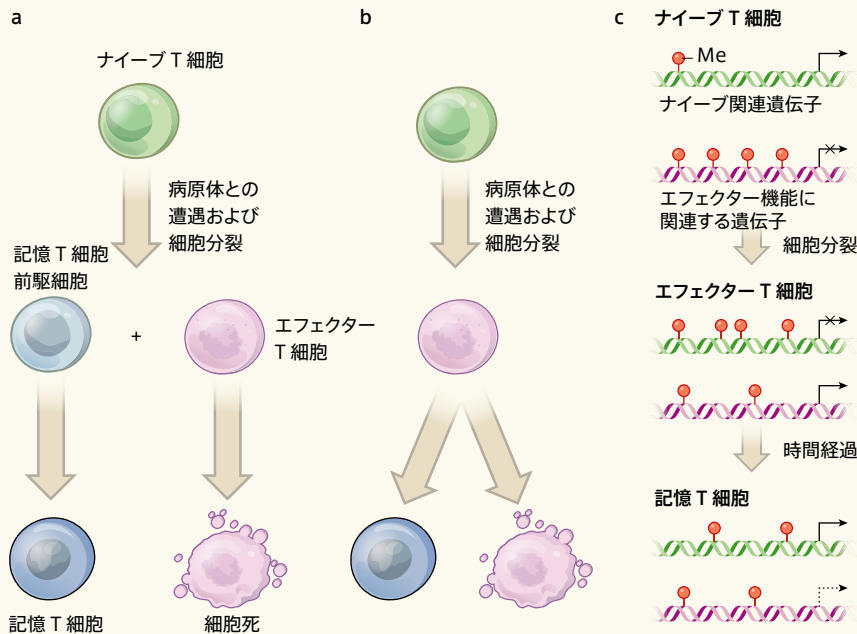


図1 記憶T細胞の形成

ナイーブT細胞は病原体に遭遇すると増殖し、感染と戦う多くのエフェクターT細胞を生み出す。このエフェクターT細胞は、感染が終息すると細胞死を起こす。また、病原体感染により、長期生存する「記憶T細胞」も生み出される。記憶T細胞は、以前に遭遇したことがある病原体に遭遇すると、迅速に応答する。記憶T細胞の起源については、2つのモデルが検討されてきた。

a. 記憶T細胞とエフェクターT細胞の両方の前駆細胞が、ナイーブT細胞から独立に生じるとするモデル。

b. エフェクターT細胞のサブセットから記憶T細胞が生じるとするモデル。

c. Akondyら<sup>1</sup>はヒトT細胞において、Youngbloodら<sup>2</sup>は*in vivo*のマウスにおいて、それぞれ記憶T細胞の形成を研究した。両研究チームともに、DNAへのメチル(Me)基の付加について追跡した。メチル基の付加は遺伝子調節に関連していて、通常は遺伝子発現が抑制される。ナイーブT細胞、エフェクターT細胞、記憶T細胞のそれぞれにおいて、ナイーブT細胞機能やエフェクターT細胞機能に関連する遺伝子のメチル化を解析することで、細胞の発生過程を明らかにした。また、これらの各細胞においてDNA接近性のパターンも解析した(この図には示していない)。エフェクターT細胞と記憶T細胞では、エフェクター機能に関連する遺伝子に同様のメチル化パターンが見られることが分かった。病原体に再感染した際に記憶T細胞がこれらの遺伝子を迅速に再発現できるのは、このためと考えられる(破線の矢印)。これらの証拠はbに示されたモデルと一致する。

ることが可能である。その修飾様式の1つであるDNAメチル化は、遺伝子を「オフ」の状態に固定できるので、メチル化された遺伝子の発現は抑制される<sup>4</sup>。

Akondyらは、T細胞においてDNA配置を調べることで、遺伝子発現装置が接近できない「閉じた」状態で密にパッケージングされているゲノム領域と、遺伝子発現が可能な「開いた」状態のゲノム領域<sup>5</sup>を突き止めた。RNAプロファイリングは細胞がその時に転写している遺伝子を反映するが、Akondyらが採用した手法は、エピジェネティックな変化を解析するものであり、特定の転写状態に至ったゲノム領域についての手掛かりを得ることができる。

一方、Youngbloodらは、ゲノム全域にわたるDNA

メチル化プロファイリングを用いることで、ナイーブT細胞がエフェクターT細胞に分化すると、DNAメチル化プロファイルが変化することを見いだした。つまり、エフェクターT細胞に分化すると、ナイーブ状態に関連する多くの遺伝子にはメチル基が付加され、対照的に、エフェクター応答の主要な構成要素をコードする遺伝子ではDNAの脱メチル化が観察された。

さらにYoungbloodらは、免疫応答の際の*de novo*メチル化を引き起こす重要な酵素がDNAメチルトランスフェラーゼDnmt3aであることを突き止めた。また、記憶T細胞に分化途中のエフェクターT細胞では、ナイーブ状態で発現する遺伝子が細胞分裂非依存的な過程で脱

メチル化されることも明らかにした。メチル基が除去されれば、ナイーブ関連遺伝子が再発現する可能性がある。このような再発現が可能ならば、それにより、長期生存する記憶T細胞集団の確立あるいは維持も可能になると考えられる。

特筆すべきは、記憶T細胞は、もはやエフェクター分子を発現していないが、エフェクター分子をコードする遺伝子のメチル化は低い状態で維持されると両研究ともに同じ結論に至ったことである (図1c)。Akondyらは、ワクチン接種の10年後に存在する記憶T細胞が、病原体に遭遇して再活性化されるまでは分裂もしないし、エフェクター分子の発現も行わないにもかかわらず、エフェクターT細胞に見られるのと同様な「開いた」ゲノムパッケージングパターンであることを明らかにしている。従って、記憶T細胞では、エフェクター関連遺伝子は、ナイーブT細胞集団よりもエフェクターT細胞集団に類似した配置で維持されているということであり、この結果は、記憶T細胞が再感染と戦う際に迅速にエフェクター分子を再発現できることと一致している<sup>3</sup>。

両研究は、記憶T細胞の起源は、以前にエフェクターT細胞機能に関連する遺伝子を発現したのある細胞集団であり、エフェクター遺伝子の発現をオフにしているが、その遺伝子を発現した「記憶」を保持している、とするモデルを支持する強力な証拠を示した。両研究結果から、記憶T細胞はDNA修飾を利用することで、病原体に再感染した際に、迅速にエフェクターT細胞になることができると考えられる。つまり、記憶T細胞は、その生涯において感染と戦った際に、エピジェネティックな修飾によりゲノムにブックマークを付けておくことで、再感染の際には迅速にエフェクターとしての能力を「思い出す」ことができるわけである。

両チームは、混合細胞集団を分離して遺伝性的なエピジェネティックな状態を比較することで、T細胞系譜を推定した。この方法は名案であるが、これだけでは、ナイーブT細胞の小集団から直接、エフェクターT細胞段階を経ることなく独立に記憶T細胞が生じる可能性を取り除くことはできていない。Akondyらはこの可能性に対処するために、重水素と呼ばれる放射性同位体を用いて、ヒトの分裂中のエフェクターT細胞の代謝回転と寿命を直接標識した。

その結果、ワクチン接種後1~2年の間に存在したウ

イルス特異的記憶T細胞では、重水素がほとんど希釈されていなかった。このことから、これらの細胞では最低限の細胞分裂しか起こっていないことが示された。また、細胞表面タンパク質を比較した場合、これらの記憶T細胞はナイーブT細胞に類似していたが、重水素標識によって、これらの記憶T細胞は分裂中のエフェクターT細胞集団から形成されたことが明らかになった。これらの結果から、ウイルス特異的CD8<sup>+</sup>T細胞は病原体を認識すると大規模に増殖し、エフェクター分子の発現を支えるようにDNAを修飾する、とするモデルが裏付けられた。その後、これらのエフェクターT細胞の一部は分裂を停止し、エフェクター遺伝子の発現を喪失して、T細胞の生存や移動に役立つ遺伝子など、ナイーブ状態に関連する多くの遺伝子を再発現するようになる。

全ての記憶T細胞が同じ挙動を示すわけではない。記憶T細胞の一部は、ナイーブT細胞のように、全身を循環して、再びエフェクター機能を発揮する場合に備えている。また、肺、皮膚、腸などの、病原体が体内に侵入する際の入り口となることが多いと考えられる組織に常在する組織常在型記憶T細胞は、再感染に対する防御の第一線で働く<sup>6</sup>。このような異なる種類の記憶T細胞が同一の経路から生じるかどうかは、まだ明らかになっていない。

今回の2つの研究から、ワクチン設計の目標は、記憶T細胞集団の起源となるエフェクターT細胞を刺激し、大規模でロバスタな応答を発揮させることであると考えられる。しかし、エフェクターT細胞から記憶T細胞への変換を促進する最良の条件を完全に明らかにする必要がある。Dnmt3aなどのDNA修飾装置を治療標的とすることは、ワクチンの有効性を上昇させる有益な戦略であるかもしれない。

(翻訳：三谷祐貴子)

### The origins of memory T cells

Vol. 552 (337–339) | 2017.12.21/28

Kyla D. Omilusik & Ananda W. Goldrath

カリフォルニア大学サンディエゴ校 (米国カリフォルニア州) に所属

1. Akondy, R. S. *et al. Nature* **552**, 362–367 (2017).
2. Youngblood, B. *et al. Nature* **552**, 404–409 (2017).
3. Kaech, S. M. & Cui, W. *Nature Rev. Immunol.* **12**, 749–761 (2012).
4. Winter, D. R., Jung, S. & Amit, I. *Nature Rev. Immunol.* **15**, 585–594 (2015).
5. Gray, S. M., Kaech, S. M. & Staron, M. M. *Immunol. Rev.* **261**, 157–168 (2014).
6. Chang, J. T., Wherry, E. J. & Goldrath, A. W. *Nature Immunol.* **15**, 1104–1115 (2014).

## 遺伝子ドライブの研究は「安全第一」で

科学者は、遺伝子編集が環境に及ぼす危険を指摘する努力を続けなければならない。

2017年12月5日からカナダのモントリオールで開催される会合で、科学者、環境保護活動家などの専門家が、遺伝子編集技術の一種「遺伝子ドライブ」が環境に影響を及ぼす可能性について議論することになっている。そして、遺伝子ドライブの推進派と反対派は、多くの点で意見が一致する傾向にある。遺伝子ドライブは、新しく登場した技術だが、強力な手法となる可能性を秘めており、これによって多大な恩恵をもたらされる可能性がある一方で、大きな被害が発生する恐れもある（*Nature*ダイジェスト 2015年11月号『「遺伝子ドライブ」の進歩に遅れるな』参照）。必ずリスクを綿密に調べ、その上で慎重に利用するのが望ましいとされる。多くの点で両派の意見が一致することについては、直ちに理解しづらい場合があるかもしれないが、議論において語気を荒らげる推進派と反対派は、こうした共通の基盤を忘れてはならない。

この会合とは、国連生物多様性条約（CBD）締約国会議に勧告を行う専門家グループの会合のことだ。CBD会議は、2016年に遺伝子ドライブ研究の国際的モラトリアムの提案を却下した。ただし、この提案は今後も繰り返される可能性が高い。この会合が開催される数日前、遺伝子ドライブの凍結を求める人々が大成功を収めたと主張した。彼らは、遺伝子ドライブ研究に取り組む米国の科学者が送受信した1000通以上の電子メールを情報公開法によって取得し、報道関係者に発表したのである。さらに、この発表と併せて「遺伝子ドライブの研究者と研究助成機関がPR会社と結託して、国連生物多様性条約の遺伝子編集への取り組みに不当な影響を及ぼしてい

る」と主張した。

これは、関係者にダメージを与え、意見の分裂を図る解釈を生み出そうとする不当な試みだ。これらの電子メールは、ほとんどが研究と会議に関する日常的なやり取りだった。国連での取り組みについて述べた部分では、科学者が遺伝子ドライブの専門知識を共有する方法とその潜在的影響について説明されていた。

遺伝子ドライブの影響を論じることは、ある程度役に立つことであるし、遺伝子ドライブに直接関与する人々と外から遺伝子ドライブを見つめる人々で見方が異なるのも自然なことだ。しかし、活動家が今回行ったように、こうした意見交換を不正行為だと主張することは、議論における意見の分裂をもたらすだけであり、国際的な視点で遺伝子ドライブの影響を考察するために現在利用できる数少ない仕組みの1つである国連の会議での科学者の役割の正当性が認められなくなる恐れもある。

そうなれば、この仕組みは弱体化すると考えられる。遺伝子ドライブは、動物の集団内で遺伝的修飾を急速に広めるため、種全体を改変し、マラリアなどの疾患を撲滅できる可能性を秘めている。そうした目的で遺伝子ドライブを導入された生物は、従来の遺伝子組換え作物や動物と異なり、国境に関係なく移動することになる。CBD会議は、遺伝子ドライブとその他の合成生物学ツールが生物多様性に及ぼす影響について、過去数年間にわたって検討してきた。12月5日からの会合では、翌年に議論をさらに進めるための舞台作りが行われる。

規制が存在しないのは、遺伝子ドライブの実施だけで



はない。実験室内で遺伝子ドライブ研究を安全に行うための規制も存在しない。そのため、科学者その他の関係者は、自分たちが遺伝子ドライブを慎重に管理していることを実証したいと考えている。12月1日には、研究助成機関が基本指針に合意したことが発表された (*Science* **358**, 1135-1136; 2017)。8月には研究者たちが、自主的なバイオセーフティー規則を取りまとめたことを発表している (*Nature Biotechnology* **35**, 716-717; 2017)。

遺伝子ドライブ技術は、各国政府による管理と国際的な管理が実施されるようになる可能性が非常に高い。オランダでは、2016年の報告書で遺伝子ドライブ研究のリスク評価に不十分な点があると指摘され、その後法律が改正された。現在は、遺伝子ドライブの研究を行う研究者は許可を得ることが義務付けられている。遺伝子ド

ライブ研究と自然界への放出に対する今後の法規制を決める際には、しっかりとした議論と科学者の確実な寄与が求められる。

今回の電子メールの公表は、2009年の国連の重要な会議の前に、ハッカーが気候科学者から盗んだ文書を公表した事件に似ている。そのときは、これらの電子メールに関する解説の大部分は、科学者が良からぬことをたくらんでいるという見方だった。後にそれは誤りと分かったが、それでもダメージは生じ、科学者に対する国民の信頼は低下した。同じ策略が用いられたのであれば残念なことだと言わざるを得ない。遺伝子ドライブに対する懸念の多くは遺伝子ドライブを研究する科学者により表明されてきただけに、なおさらだ。

(翻訳：菊川要)

### 細胞のソナー：音響レポーター遺伝子によって生体深部の細菌の画像化が可能に

消化管などの生体器官内部の微生物個体群をモニターすることはかなり難しい。今回 M. Shapiro らは、この問題に取り組み、超音波を用いて生体内の深部の細菌の画像化を可能にする手法を示している。彼らは、この手法を実現するため、音響レポーター遺伝子を発現する遺伝子組換え細菌を作製した。これらの遺伝子は、ガス胞（水生光合成生物が浮力の制御に通常用いている気体が充満したナノ構造体）の構成要素をコードしている。こうしたガス胞は音波を散乱するので、超音波によって検出できる。著者らは、消化管や腫瘍の内部で遺伝子組換えした大腸菌 (*Escherichia coli*) やネズミチフス菌 (*Salmonella typhimurium*) の個体群を非侵襲的に画像化できることを示し、マイクロバイームを調べたり、がんのプログレーションや治療効果をモニターしたりできる可能性がある方法を提示している。 Cover; [10.1038/nature25021](https://doi.org/10.1038/nature25021)



### 気候科学：過去の海水温を再構築する

過去の海水温を再構築する手法は、たくさんある。しかし、こうした手法の大半は、特定の深さや季節の研究にしか使用できないか、複雑であり解明されていない生物学的過程に基づいている。今回 B. Bereiter らは、氷床コア中の希ガスを用いて、最終氷期極大期から初期完新世の平均海水温を高分解能で再構築している。その結果、この期間に海洋全体が約 2.5°C 温暖化し、南極の気温の変動と密接に関連していたことが見いだされた。北半球高緯度域の陸塊の大半が急激に寒冷化したヤングドライアス期に、海洋では現在を上回る著しい温暖化が生じていたことも分かった。 [10.1038/nature25152](https://doi.org/10.1038/nature25152)

### 進化発生生物学：神経系の収斂進化

左右相称動物（左右相称で明確な前端と後端がある動物群）は、正中線に集中した腹側神経索を持つ単一の共通祖先から進化したと考えられることが多い。ショウジョウバエや環形動物、ヒトといった多種多様な動物で体軸に沿った分子発現パターンが共通して見られることが、このシナリオを裏付けている。今回 A. Hejnol らは、珍渦虫（左右相称動物の基部に位置する）やさまざまな冠輪動物（環形動物、腕足動物、輪形動物など）を含む幅広い種類の動物について、神経外胚葉

の中外側のパターン形成を調べた。その結果、中枢神経系最終的な解剖学的構造はパターン形成系とは無関係なことが分かった。著者らは、類似した中枢神経系の構造が左右相称動物の中で何度も独立に生じた、つまりこれが収斂進化の例であると結論付けている。 [10.1038/nature25030](https://doi.org/10.1038/nature25030)

### 天文学：初期宇宙の大質量銀河

初期宇宙の最も質量の大きな銀河は、非常にまれな天体であったので、成長段階にあるものを観測するのは困難である。今回 D. Marrone らは、宇宙誕生後 8 億年も経ていないこうした天体の 1 つを観測し、高分解能撮像によって、実際に一对の銀河が緊密に相互作用しているのが明らかになったことを報告している。大きい方の銀河は、星形成率が 1 年当たり太陽質量の 2900 倍で、太陽質量の 2700 億倍のガスを含んでいる。この急速な星形成は、近接した伴銀河との相互作用がきっかけになったと思われ、この伴銀河の性質は、近傍宇宙に観測される銀河の性質により近い。 [10.1038/nature24629](https://doi.org/10.1038/nature24629)

### ウイルス学：SIVの霊長類モデルのゲノム

スーティーマンガベイ (*Cercocebus atys*) は、サル免疫不全ウイルス (SIV) の非病原性感染の霊長類モデルである。G. Silvestri らは今回、ヤーキーズ米国立霊長類研究所で飼育されているスーティーマンガベイ 1 頭のゲノムの塩基配列解読を行った。これを他の霊長類のゲノム塩基配列と比較したところ、非ヒト霊長類間における SIV の病原性の違いに影響を与える可能性のある候補遺伝子がいくつか示唆された。研究チームはまた、同研究所のスーティーマンガベイ 10 頭のゲノムに見られる遺伝的変動と 14 の組織のトランスクリプトームも解析した。この研究は、比較ゲノミクスおよび SIV 病原性研究の情報資源となる。 [10.1038/nature25140](https://doi.org/10.1038/nature25140)

### がん：がん細胞は老化を回避する

細胞はストレス条件下では老化することができ、がんになる可能性のある細胞の拡大を防ぐ。C. Schmitt らは今回、化学療法によって誘発された細胞老化はがん細胞の「幹細胞性」獲得につながり、そうした細胞は老化を回避して腫瘍の増殖を促進できることを示している。興味深いことに、このような細胞は、老化を経験したことがない細胞と比べて、高い腫瘍イニシエーション能を獲得していた。 [10.1038/nature25167](https://doi.org/10.1038/nature25167)

### 構造生物学：補体受容体の構造

補体系は自然免疫応答の中心的な部分として働き、感染に対する基本的な防御機構となっている。C5a は補体系の活性化

によって生じる成分で、炎症性メディエーターとしてGタンパク質共役受容体 (GPCR) であるC5aR1受容体と相互作用する。そのため、C5aR1の阻害剤は敗血症、乾癩、関節リウマチなどでの抗炎症治療薬となる。今回F. Marshallらは、低分子アンタゴニストと結合した補体C5a受容体の結晶構造を報告している。この構造から、この種の受容体についての分子レベルの知見が得られ、これらを治療標的とするより良い方法が示唆された。最近報告されている他のGPCRの構造と同様に、リガンドは膜貫通ヘリックスが作るバンドルの外側のアロステリック部位であるポケットに結合する。この研究はまた、ヒトと齧歯類の受容体の薬理的性質の違いも説明している。

10.1038/nature25025

2018年1月11日号 | Vol. 553 No. 7687

### ねじれた眺め：反復高速電波バースト源の極めて強い磁場環境を示す回転する電波

表紙は、プエルトリコにあるアレシボ天文台のWilliam E. Gordon電波望遠鏡である。今回J. Hesselsらはこの望遠鏡を使って、唯一知られている反復する高速電波バースト源の物理的性質の解明を試みた。これらの電波バーストはそれぞれが約1ミリ秒間持続するもので、矮銀河の星形成領域に発生源がある。著者らは、バーストがほぼ100%直線偏波しており、ファラデー回転測度が非常に大きいことを観測した。こうした結果が得られるには、極端に磁化したプラズマという環境が存在する必要があるが、そうした環境はこれまで大質量ブラックホールの周囲でしか見られていない。結果として、著者らは、これらの電波バーストは、おそらくそうした環境にある中性子星に由来するのではないかと示唆している（ただし、彼らは、原理的には、極めて強く磁化したパルサー風星雲か超新星残骸のいずれかに囲まれた中性子星が、こうした電波バーストの起源である可能性にも言及している）。

Cover; 10.1038/nature25149



**幹細胞：アセトアルデヒドが幹細胞のDNA損傷を引き起こす**  
造血幹細胞 (HSC) の内因性DNA損傷が正しく修復されないと、悪性腫瘍につながる可能性がある。K. Patelらは以前、ファンコニ貧血遺伝子群に変異を持つ個体は、アルコール代謝産物のアセトアルデヒドによって引き起こされるDNA損傷を修正できないことを報告している。今回彼らは、アセトアルデヒド

によって誘導されるDNAの喪失や再構成の全体像を理解するために、単一HSCの移植に続いて全ゲノム塩基配列解読を行った。その結果、p53を欠失させるとHSCの生存を救済できるが、ゲノム安定性は回復しないことが分かった。このデータから、アセトアルデヒド依存的な損傷からHSCゲノムを保護する際に、p53経路とDNA修復経路がどのように関与するかが明らかになった。

10.1038/nature25154

### 材料科学：半導体の明るい未来

ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体ナノ結晶は、光物理的特性が優れているため、太陽電池や発光ダイオード用の材料としてかなりの関心を集めている。しかし、この半導体ナノ結晶が特別なのはどうしてだろうか。励起子は、ナノ構造半導体の発光特性に根本的に関与する電子励起状態であり、最低エネルギー励起子状態は寿命が長いため発光しにくい（すなわち「ダーク」である）と一般的に考えられている。今回M. Beckerらは、ハロゲン化セシウム鉛ペロブスカイトがこの考えに反すること、つまり最低エネルギー励起子がダークではなく異常に「ブライツ」であり、他の半導体ナノ結晶よりかなり速く光子を放出することを示している。さらに、この異常な振る舞いの原因となる構造的要因と電子的要因が特定され、同様の振る舞いをする可能性のある他の半導体材料を特定する重要な手掛かりが得られた。

10.1038/nature25147

### 保全生物学：統治が湿地の生物多様性に及ぼす影響

湿地は、地球上でも特に生物多様性が豊かで生産力の高い生態系だが、極めて深刻な脅威にさらされてもいる。天野達也（英国ケンブリッジ大学）らは今回、世界各地の2万5769地点で収集した調査データを用いて、水鳥461種の1990～2013年の個体数の変化と、そうした変化の駆動要因を調べた。その結果、群集レベルの個体数の減少は、西アジア、中央アジア、サハラ以南のアフリカ、南米などで最も大きいことが分かった。群集レベルの個体数変化の最も有力な予測因子は統治であり、統治の有効性が低い地域では個体数の減少がより急激だった。保護区に指定された湿地が広範に及ぶほど水鳥の個体数が増加していたが、この傾向は統治が有効な地域に限られていた。これらの知見は、生物多様性保全のための保護区の効果は、統治が有効な状況でしか得られないことを示唆している。

10.1038/nature25139

### 微生物学：大腸の炎症に対抗

腸内細菌科に属する通性嫌気性細菌の腸内での増殖は、ディスバイオーシス（微生物相バランスの乱れ）や炎症性腸疾患

と関連付けられている。今回S. Winterらは、タングステン酸塩を投与すると、炎症が起きている際のみ機能するモリブデン補因子依存的な細菌の呼吸経路が選択的に阻害され、大腸炎のマウスモデルで炎症が緩和されるが、腸内細菌相の構成は変わらないことを示している。この結果は、炎症性疾患への応答における微生物相の精密治療の有望な戦略の1つであるが、同様の手法がヒトでも有効であるかどうかを今後調べる必要がある。

10.1038/nature25172

### 生物工学：遺伝性難聴を治療する

難聴の全症例のほぼ半数は遺伝的要因により発症するが、遺伝性難聴に適用できる治療選択肢は限られている。D. Liuらは今回、優性（顕性）遺伝様式の難聴を標的とするゲノム編集手法を開発した。ヒト難聴のマウスモデルにおいて、変異型対立遺伝子をCRISPR-Cas9編集法により破壊し、難聴を軽減できた。この結果は、一部の常染色体優性遺伝性疾患に対する遺伝子編集戦略として、有糸分裂後の細胞へのタンパク質-RNA複合体の送達を利用できる可能性を裏付けている。

10.1038/nature25164

### がん：融合遺伝子が腫瘍の代謝を促進する

*FGFR3-TACC3* 遺伝子融合は発がん性を持ち、多くの種類のがんで見ついているが、これが腫瘍の増殖を促進する仕組みは分かっていない。A. Iavaroneらは今回、この融合タンパク質がミトコンドリアの代謝を活性化することを明らかにしている。これによってタンパク質合成が促進され、腫瘍の増殖が亢進する。著者らは、ミトコンドリア呼吸に対するこのような依存性が、*FGFR3-TACC3* 融合遺伝子を持つ腫瘍の治療に新たな道を開くかもしれないと述べている。

10.1038/nature25171

### 構造生物学：カルシウムチャネルのこれまで知られていなかったゲート開口方式

カルシウム (Ca) は生物学的に重要なシグナル伝達分子であり、その調節はヒトの生理学的性質で中心的な役割を担っている。TRPV6 (transient receptor potential vanilloid subfamily member 6) チャネルは構成的に活性化されていて、Ca選択性が高く、上皮組織でのCa<sup>2+</sup>取り込みを仲介していて、その発現は複数のがんと関係がある。しかし、その構成的な活性化とイオン透過の構造基盤は明らかにされていなかった。今回A. Sobolevskyらは、クライオ（極低温）電子顕微鏡によって得られた、ヒトTRPV6の開状態と閉状態の両方の構造を報告している。これらのデータから、四量体

イオンチャネルではこれまで知られていなかったゲート開閉機構が明らかになり、生理的状态と疾病状態でTRPV6が果たす役割に重要と考えられるアラニンヒンジが見つかった。

10.1038/nature25182

2018年1月18日号 | Vol. 553 No. 7688

### RNAポリメラーゼIIIの位置：タンパク質合成を駆動するのをRNAポリメラーゼIIIが助ける転写開始の秘密が、その構造から明らかになった

表紙は、RNAポリメラーゼIII (Pol III) と転写因子TFIIIBとDNAからなる複合体のトポロジーを示す、表面とリボンのハイブリッド画像である。



RNA Pol IIIは、細胞増殖時のタンパク質合成に不可欠な短いRNAの転写を触媒する。Pol IIIの調節は、主に転写開始段階で行われ、Pol III活性の調節異常はがんなどの疾患につながる。今回、A. VanniniらとC. Müllerらが別々の論文で、17個のサブユニットからなる完全なPol IIIと、TFIIIBの3つのサブユニットであるTBP（ピンク色）、Brf1（黄色）、Bdp1（オレンジ色）で構成される、酵母のPol III転写開始前複合体 (PIC) が、プロモーターDNAに結合しているさまざまな機能的状態のクライオ（極低温）電子顕微鏡構造について報告している（裂け目の両側のほどけたDNA鎖を安定化するループが明るい青緑色のリボンで描かれている）。この構造によって、Pol IIIが標的プロモーターへ誘導される詳しい仕組みや、プロモーターDNAが開いて安定した転写バブル構造が形成される仕組みを説明できる。さらに、こうしたPol IIIのPICの構造によって、Pol IやPol IIのPICと構造を比較できるようになった。Cover; 10.1038/nature25440; 10.1038/nature25441

### 微生物学：腸の流行性感染症の出現

腸内病原菌のディフィシレ菌 (*Clostridium difficile*) は、抗生物質に関連する下痢の主要原因の1つである。近年の流行では、重症化する強毒性リボタイプが出現しているが、これらの出現に關する要因は分かっていない。今回R. Brittonらは、系統発生的に異なる2種類の強毒性リボタイプRT027およびRT078が、低濃度の二糖類トレハロースを代謝する機構をそれぞれ独立に獲得したことを報告している。研究チームはまた、トレハロースを代謝するこの能力が、ヒト化マウスモデルで疾患の重症度と相関することも示している。これらのデータから、これらのリボタイプの出現と、トレハロ-



スが食品添加物として広く使われていることに相関関係があることが示唆された。  
10.1038/nature25178



今回、食品添加物のトレハロースとの関係が示唆された、デフィシレ菌 (*Clostridium difficile*) の3Dイラスト。

### ナノスケール材料：複数の刺激に対して応答する材料

外部刺激に対して応答する界面活性剤を設計することによって、界面活性剤で安定化された液滴をさまざまな方法で操作できるようになる。例えば、液滴の相互作用や集合化の制御が可能になる。今回B. Grzybowskiらは、光、電場、磁場などの複数の刺激に対してさまざまな応答を示す、ナノ粒子に基づく界面活性剤を合成することによって、このコンセプトをより複雑なものに進化させた。こうした多重応答性界面活性剤によって、界面活性剤で安定化された液滴系のこれまでにないレベルでの構造制御や動的制御が可能になり、そうした系では、必要に応じて液滴を操作し、集合させ、反応させることができる。  
10.1038/nature25137

### 地球化学：深海の酸素

地質学的過去における大気中の酸素濃度上昇に伴う深海の酸素化は、現在の海洋の生物地球化学的循環が出現したことを示す証拠であると考えられている。深海の酸素化とそれに関連する大気中の酸素濃度の上昇の時期は、約8億～4億年前と見積もられており、この見積もりは、一般的には深海の地球化学的状態を間接的に反映した地球化学的特徴に基づいている。今回、海底の玄武岩中の鉄の酸化状態に基づいて、始生代から新生代の深海の酸素量を、より直接的かつ定量的に絞り込んだことが報告されている。著者らは、深海の酸素化は顕生代に生じたもので、4億2000万年前以降の後期古生代までは生じていなかった可能性があることを示唆している。  
10.1038/nature25009

### 細胞生物学：ノンストップコドン

メッセンジャーRNA (mRNA) 塩基配列のタンパク質への翻訳は、多くのレベルで調節を受ける。今回P. Baranovらは、AMD1 mRNA上で起こる、脊椎動物で高度に保存されている新しい調節機構を報告している。彼らは、リボソームは時々終止コドンを通過して、3'非翻訳領域に進むことを見いだした。このようなリボソームは読み枠内で次の終止コドンに遭遇すると停止するが、mRNA上にとどまるので、リボソームの行列が形成される。この行列が2つの終止コドンの間のスペースを埋めると、そのmRNAは翻訳できなくなる。著者らは、この機構が各mRNAに寿命を与える働きをしていて、時間の経過とともにコード領域に損傷が蓄積して、異常な翻訳が起こることを防いでいると提案している。  
10.1038/nature25174

2018年1月25日号 | Vol. 553 No. 7689

### 細胞の逸脱物：不安定な染色体から遊離したDNAががんの転移を助ける仕組み

表紙は、染色体不安定性の結果としてDNAが小核を形成しているがん性細胞の想像図である。今回S. Bakhomuraらは、こうした小核が破れると、むき出しのDNAが細胞質中に流出し(緑色)、転移を助ける炎症応答を誘発することを明らかにしている。こうした知見から、染色体不安定性と転移との直接的な関連が得られ、転移を防ぐ新しい方法が得られる可能性がある。  
Cover; 10.1038/nature25432



### 神経科学：探索行動と逃避行動の脳による制御

動物は、探索行動ではゆっくりとしたロコモーション、脅威から逃避するには素早いロコモーションといったように、異なる状況に応じて異なるモードの運動をする必要がある。今回O. Kiehnらはマウスで、楔状核 (CnF) と脚橋被蓋核 (PPN) という脳幹の2つの神経核の興奮性ニューロンによって左右交互に足を出す歩行が可能になるが、高速の左右同期的なロコモーションに必要なのはCnFのみであることを示している。これら2つの領域の活動と解剖的結合性は、PPNが探索行動を、CnFが逃避行動を支えるとするモデルに符合する。  
10.1038/nature25448

### 構造生物学：代謝ホルモンの作用機構

内分泌型の繊維芽細胞増殖因子 (FGF19, FGF21, FGF23) は、

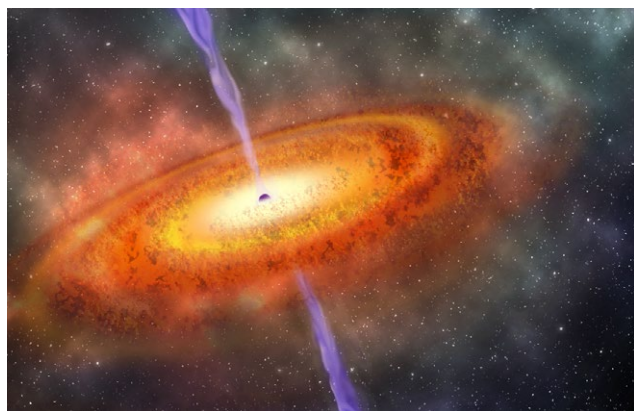
脊椎動物において重要な代謝機能および生理機能を調節する血中ホルモンである。古典的FGFは、FGF受容体を活性化するのにヘパラン硫酸プロテオグリカンを必要とするが、内分泌型FGFは代わりにクロトータンパク質に依存してFGF受容体を活性化する。クロトーには、異なる遺伝子にコードされる2種類があり、 $\beta$ クロトーはFGF19とFGF21に依存したシグナル伝達に必須であるのに対し、 $\alpha$ クロトーはFGF23に依存したシグナル伝達に必要である。今週号では、J. Schlessingerらが、 $\beta$ クロトーの細胞外ドメインについて、リガンドのない遊離状態とFGF21のC末端ペプチドに結合した状態の両方の結晶構造を報告している。さらに、別の論文でM. Mohammadiらは、膜に繫留された $\alpha$ クロトーから切断された細胞外ドメイン、FGFR1cのリガンド結合ドメイン、FGF23の3つが1:1:1の割合で含まれる三重複合体の原子構造を明らかにしている。これらのホルモンおよびその受容体は、代謝と生理機能において中心的な役割を果たしているため、非常に有望な薬剤標的となる。クロトーの姿を初めて明らかにしたこれらの構造から、内分泌型FGFによって調節されるシグナル伝達経路について長く待ち望まれてきた機構的手掛かりが得られた。

10.1038/nature25451; 10.1038/nature25010

### 天文学：初期宇宙における大質量ブラックホール

広範な探索にもかかわらず、7より大きな赤方偏移で見つかったクエーサーは、 $z = 7.09$ に1つだけである。E. Bañadosらは今回、宇宙がわずか6.9億歳であった $z = 7.54$ の位置に、質量が太陽の8億倍のクエーサーを観測したことを報告している。スペクトルから、クエーサーのライマン $\alpha$ 輝線が、中性水素をある程度含む銀河間物質によってかなり吸収されていることが明らかになり、この時期には再電離が終わっていなかったことが示された。

10.1038/nature25180



ビッグバンのわずか6.9億年後に相当する位置で見つかったクエーサーの中心にある、超大質量ブラックホールの想像図。

### 応用物理学：立体ディスプレイ

三次元動画は、長い間、SFの中の話であった。実際には、光を操作することによって三次元の外観に近づけることが多いが、そうした方法には、視野角が狭い、特殊な視覚装置を頭部に装着する必要がある、などの制約がある。今回D. Smalleyらは、この解決策を提示している。この方法では、三次元物体が実空間に表示され、表示された画像は、あらゆる角度から見るができるとともに、同じ物理空間を占める固体物体と共存し、包み込むことすらできる。不可視に近い光場によって、微小粒子がトラップされ、体積空間中を移動する。粒子が動く際に、赤色、緑色、青色のレーザー光を照射すると、任意の色の点光源が生成され、画像化対象物体の表面が描画される。粒子の走査速度が十分速ければ、人間の眼の「リフレッシュレート」が遅いことに起因する残像によって、固体三次元表面の外観に見える。走査速度をもっと速くすると、物体の像が動いているように見える可能性がある。

10.1038/nature25176

### 生物学：免疫細胞間の相互作用をLIPSTICで標識する

免疫系における細胞間相互作用を調べるための新規な方法を、G. Victoraらが報告している。彼らがLIPSTIC (Labelling Immune Partnerships by SorTagging Intercellular Contacts) と呼ぶこの方法は、遺伝学的に改変された受容体-リガンド対を使う化学標識付け(タグging)によるもので、この過程には細菌の酵素ソルターゼが関わっている。リガンド-受容体相互作用の履歴は、フローサイトメトリーもしくは顕微鏡法によって検出できるレポータータグの存在によって明らかになる。著者らはこの方法を使って、T細胞受容体がもはや相互作用に関わっていない非抗原特異的段階で、T細胞と樹状細胞の間で起こる予想外のCD40-CD40L相互作用を観察している。この方法はおそらく、他の*in vitro*や*in vivo*系にも応用可能だろう。

10.1038/nature25442

### がん：腫瘍は代償を払って治療抵抗性を獲得する

プリン類似体を用いた白血病の化学療法に対する抵抗性は、プリン代謝酵素NT5C2の機能獲得変異により誘導される。今回著者らは、抵抗性の獲得が進化的トレードオフであり、NT5C2活性の増加は細胞のプリンヌクレオチドプールを枯渇させることを明らかにしている。抵抗性変異は、がん細胞の適応度を低下させて副次的に脆弱性を生み出し得るため、これを将来的に併用療法に利用できる可能性がある。

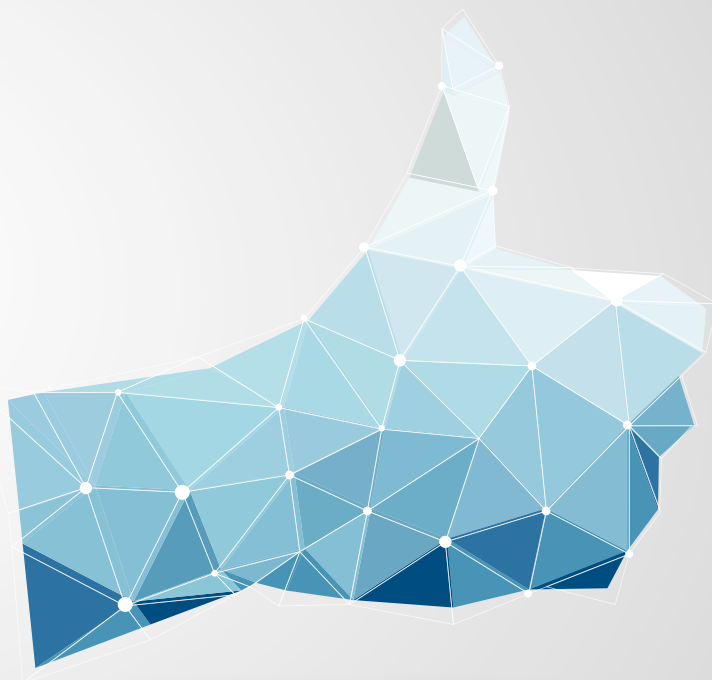
10.1038/nature25186

# nature ダイジェスト

## FOLLOW US!

  @NatureJapan

 [go.nature.com/jp-register](mailto:go.nature.com/jp-register)



**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!**

 @NatureDigest

[nature.asia/ndigest](http://nature.asia/ndigest)

### EDITOR'S NOTE

博士課程の学生を対象としたアンケート調査から、回答者の4分の1近くが関心事項に「メンタルヘルス」を挙げていることが分かりました（24ページ「好き過ぎてつらい博士課程」）。研究を進めているうちに自信をなくしていったり、就職に不安があることが関係しているようです。一方で、6割以上が将来は研究職に就きたい、と考えていることも分かりました（[go.nature.com/2kzo89o](http://go.nature.com/2kzo89o)）。では、進路を決める際にロールモデルである指導教官の話を参考にしたかというところ……決め手は「インターネット」と答えた人が大半という結果に。「研究室のアドバイザーからの指導に満足」している人はかろうじて半数以上であることを勘案すると、指導教官と腹を割ってじっくり話をしたいのに叶わない、と感じている博士課程学生が多いことがうかがえます。新年度が始まる4月は目前。この調査結果が指導する側にも指導を受ける側にも役立ちましたら幸いです。

そして今号より、学術研究に足を踏み入れたばかりの方や、研究に興味がある大学生や高校生の方たちに向けた「学術界サバイバル術入門」という連載を開始しました。指南役は、学術界で成功するためのノウハウを提供するワークショップ「Nature Research Academies」の講師、ジェフリー・ローベンズです。こちらどうぞご期待ください！



「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](mailto: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](mailto: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、泉奈都子、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.natureasia.com](http://www.natureasia.com)

© 2018 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.  
掲載記事の無断転載を禁じます。



# COMMUNICATIONS CHEMISTRY

2018年創刊！ 投稿受付中

ネイチャー・リサーチが提供する  
化学分野の新しい  
オープンアクセス・ジャーナル

*Communications Chemistry* は化学の全分野において高品質な論文・総説・論評を出版し、全ての化学者にとって重要な課題を審議するフォーラムを提供することを目指しています。本誌で出版される論文は、特定の研究分野に新たな知見をもたらす重要な進展情報です。

投稿の利点：

- 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



論文処理費用 (APC) : \$2570 (USD)\*

\*2018 年末までにアクセプトされた論文に適用

← 詳しくは日本語サイトで

 @CommsChem

