

nature ダイジェスト

科学が深まる、世界が広がる

12
2018

宇宙ゴミ問題を解決できるか

- ▶ 04 タンポポの綿毛の秘密
- ▶ 07 ノーベル賞特集
- ▶ 34 木星の磁場は特異だった
- ▶ 06 FROM 日経サイエンス
産後うつメカニズム



NEWS FEATURE

宇宙ゴミ問題に 打つ手はあるか

地球周回軌道上では2万個以上の人工物が高速で飛び交っていて、運用中の人工衛星は日々、それをよける操作に時間と燃料を費やしている。宇宙ゴミと呼ばれるこうしたガラクタは、企業や個人による人工衛星打ち上げも加わり、今後も増加が予想され、宇宙空間は危機的状況にある。

NEWS IN FOCUS

02 パンケーキ形の奇妙な化石は 最古の動物だった

科学者を困惑させてきた太古の大型海生生物ディッキンソニア。その正体が動物であることが突き止められた。

03 マウスで同性の両親から仔、 雄同士では初

卵と精子のゲノム機能の差異の解析がさらに進み、二母性マウスだけでなく、二父性マウスも初めて作出された。

07 がん免疫学者2氏にノーベル医学・ 生理学賞

08 ノーベル物理学賞は革新的なレーザー 技術に

09 ノーベル化学賞は試験管内で タンパク質を進化させる手法に

11 パルサー発見者にブレイクスルー賞

ジョスリン・ベル・パーネルは同賞の賞金約3億円を、科学におけるダイバーシティ推進のために使うと話す。

nature ダイジェスト

#12

DECEMBER 2018

[nature.com/naturedigest](https://www.nature.com/naturedigest)

2018年12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: DOTTEDHIPPO/ISTOCK/GETTY

12 全米科学財団の厳しいハラスメント 防止規約が発効

同財団の助成金受給者がこの規約に違反した場合、所属研究機関は調査を行い、財団に報告することが義務付けられた。被害者や目撃者が直接財団に通報することもできる。

14 発見されたガリレオの手紙から新事実

1回目の異端審問で証拠とされたガリレオの手紙には版が2つある。果たして、どちらが本物の「原本」だろう？

16 ペイウォールをなくすための 過激な計画

欧州を代表する研究助成機関が、全ての科学論文を出版と同時に無料で読めるようにするための「プランS」を発表。

23 TOOLBOX | クラウドコンピューティング 入門

NEWS & VIEWS

36 タンパク質は合成と同時に複合体に 組み立てられる

真核生物で、タンパク質複合体の組み立ては、そのサブユニット群の合成が完了する前に始まることが示された。細胞毒性を示す凝集体になるのを防いでいる可能性がある。

NEWS SCAN

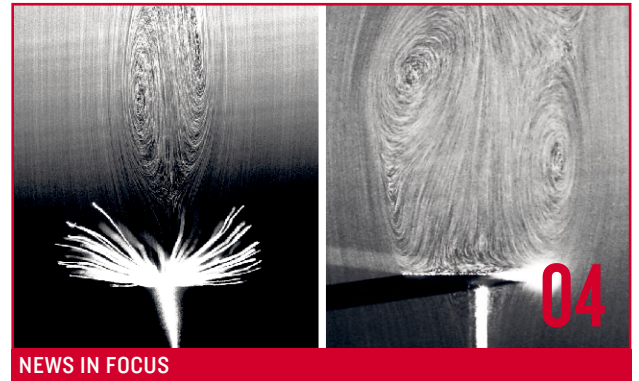
06 チーターのお見合いシステム 産後うつメカニズム

EDITORIAL

39 欲しい液体燃料を選択的に合成する触媒技術

HIGHLIGHTS

40 2018年10/4～10/25号



CHRISTOPHER RYNN/UNIV. DUNDEE

タンポポの綿毛の秘密

タンポポの種子についているふわふわの冠毛は隙間が多いが、この隙間が飛行を持続させるカギであった。



JEF MEUL/NIS/ MINDEN PICTURES/GETTY

浸透性農薬の根深い問題

ネオニコチノイド系農薬の後継品と目されるスルホキシイミン系農薬も、マルハナバチのコロニーに重大な悪影響を与えるようだ。



NASA/JPL-CALTECH/SWRI/MSSS/GERALD EICHSTÄDT/SEÁN DORAN

木星の磁場は特異だった

木星の磁場は、他のあらゆる既知の惑星の磁場と異なっていることが、木星探査機「ジュノー」のデータから分かってきた。

パンケーキ形の奇妙な化石は 最古の動物だった

太古の海生生物の化石から、動物がどのように大型化し複雑化したかに関する長年の疑問を解明するための足掛かりが得られた。

キノコのかさの裏側のような多数のひだが印象的なパンケーキ形の化石は、知られるうちで地球史上最古の「動物」の痕跡であるとする報告が、*Science* 2018年9月21日号に掲載された¹。この研究結果は、化石に残存する脂質分子の化学分析に基づいたもので、動物や他の複雑な生物が出現した経緯に関する現在の見方を変える可能性がある。

この化石はディッキンソニア (*Dickinsonia*) と呼ばれる分類群で、最初に発見されたのは1940年代後半のことだ。この種は、エディアカラ紀に当たる5億5800万年前の地球で海洋に最も広く生息していた生物の1つだった。当時の生物の大きさは大半が微視的サイズから長さ数mmまでだったが、ディッキンソニアは成長して長さ1.4mにもなるものがあった。

ディッキンソニアの大きさは科学者らの困惑の種となってきた。というのも、この生物が生息していた年代は、生物が大型化し大半の主要な動物分類群が出現した5億4100万年前の「カンブリア爆発」より数千万年も前なのだ(2016年5月号「カンブリア爆発の『火種』」参照)。そのため、ディッキンソニアの正体は原始的な動物なのか、それとも原生動物と呼ばれる巨大な単細胞生物や、細菌コロニー、あるいは全

く別の何かなのだろうかと、化石の発見以来ずっと議論されてきた。

化石に残る脂質

今回の研究成果を報告したオーストラリア国立大学(キャンベラ)の古生物地球化学者Jochen Brocksのチームは、化石に残存する環状の脂質分子ステロールを調べた。この分子は、細胞を包む膜に組み込まれて膜の柔軟性や流動性を維持する役目をする。植物や動物、菌類、細菌は全てステロールを含むが、大勢を占めるステロールの種類は分類群ごとに異なっている。動物は主にコレステロールを作り、岩の表面などに見られる彩り豊かな堅い地衣体を作る菌類(地衣類と呼ばれる)はエルゴステロールのみを持つ。ステロールは適切な条件下であれば数百万年にわたって残存可能なので、化石化した生物の進化上の類縁関係を決定する際に役に立つ。

このように残存するステロールを含む化石は稀にしかない。しかし、ロシア北西部の白海沿岸には、エディアカラ紀の生物が散在している地層があり、代表的な生物であるディッキンソニアなどの化石が、化石化した藻類マットに埋もれ、有機物や脂質が完全に保存された状態で薄層として残っていた。



5億5800万年前に海に生息していたディッキンソニアという奇妙な生物の化石。

「ディッキンソニアのミイラのようなものです。これらの化石を見つけれられたのは信じられないほど幸運なことでした」とBrocksは話す。

Brocksのチームがディッキンソニアや藻類マットなどの化石を解析してみると、バイオマーカー試料の組成に劇的な違いが見つかった。周囲の岩石や藻類マットではコレステロールが約10%のみで、緑藻に広く見られる別種のステロールが75%含まれていたが、ディッキンソニア化石にはコレステロールが93%も含まれていた。これは、ディッキンソニアがカンブリア爆発より1700万年前に生息していた太古の動物であったことを物語っている。

残存脂質を利用したBrocksらの解析手法は、ディッキンソニアの進化系統樹上の位置を決定する方法として従来と全く異なるものであり、「実に独創的だと思います」とクイーンズ大学キングストン校(カナダ)の古生物学者Guy Narbonneは話す。化学分析に基づいた今回の知見は、ディッキンソニアが原始的な動物であったことを示す他の証拠を補強するものだと彼は言う。他

の証拠とは、ディッキンソニアが餌を求めてあちこちへ動いたことを示す「移動の痕跡」の化石や、現在の大半の動物のものと一致する成長パターンなどだ。

今回の最新の研究は、先カンブリア時代（エディアカラ紀を含む）からカンブリア紀への移行が、ある動物群集が別の動物群集に置き換わるだけの普通の生物絶滅事象であったことも示唆しているとBrocksは話す。「ただし現在のところ、ディッキンソニア以外の全ての奇妙な生物たちについては正体が絞り込めていません」。

現存する生物のDNAを比較し、それらの進化系統樹をさかのぼって追跡した解析から、動物はカンブリア紀より1億年以上前に出現したことが示唆されている²。この年代はディッキンソニアの生息年代よりかなり前だ。しかし、そうした太古の動物と考えられる化石を見つけることも、また、それらが動物であると証明することも、いまだに難しい。

例えば、フラクタル状に分枝する管を備えたエディアカラ紀の奇妙なシダ様生物「ランゲオモルフ」は、現生生物との類縁関係がはっきりせず、いまだに謎に包まれた生物分類群である。「我々の次の重要な研究課題はこの生物です」とBrocksは話す。「これらの奇妙な生物の化石を手に入れて、その正体を解き明かそうと思っています」。

（翻訳：船田晶子）

World's first animal was a
pancake-shaped prehistoric
ocean dweller

doi: 10.1038/d41586-018-06767-6
2018.9.20 (Published online)

Jeremy Rehm

1. Bobrovskiy, I. et al. *Science* **361**, 1246–1249 (2018).
2. dos Reis, M. et al. *Curr. Biol.* **25**, 2939–2950 (2015).

マウスで同性の両親から仔、雄同士では初

哺乳類の発生には、母親由来のゲノムと父親由来のゲノムが必要だ。このほど、^{らん}卵と精子のゲノム機能の差異の解析がさらに進み、二母性マウスだけでなく、二父性マウスも初めて作出された。

このほど、雌マウス2匹を両親とする健康な仔マウス（二母性マウス）の作出に加えて、雄マウス2匹を両親とする仔マウス（二父性マウス）の作出にも初めて成功したことが報告された¹。この二母性マウスは体が正常サイズで、成熟して自分の仔を作ったものもあったが、二父性マウスの方は、最長で生後約2日しか生存できなかった（註：最初の二母性マウス作出の報告は、2004年に東京農業大学の河野友宏らの研究チームが行っており、同チームは2007年には、やや小ぶりだが生殖可能な二母性マウス作出も報告している）。

これらの仔マウスの作り方は、2018年11月1日号の*Cell Stem Cell*に掲載された。この研究では、哺乳類の健康な^{はい}胚の発生に必要とされる重要な遺伝的因子が、さらにいくつか明らかにされた。ただし、この手法をヒトに応用できるとは、研究者らは思っていない。

特定の鳥類種や魚類種、トカゲ種など一部の動物は、片方の性だけ、もしくは1個体だけで生殖可能だ。しかし哺乳類は、次世代の個体を作り出すために異性が必要である。

これは、遺伝的な「刷り込み」（ゲノムインプリンティングと呼ばれる）があるせいだと考えられている。つまり、

DNAに結合して遺伝子のスイッチを切る、小さな化学的タグが付いているためだ。そうしたタグはこれまでに100個ほど見つかっており、その多くは胚の成長に影響を与える遺伝子で見られる。

生殖細胞のゲノムを雌雄で比較すると、一方の性でタグが付いている遺伝子の多くは、もう一方の性ではタグが外れている。1個の胚で同じ遺伝子群が両方ともタグ付き（つまり両親が同性の際に生じるとされる状態）になると、その胚は死んでしまう。

タグの削除

この問題を乗り越えるため、今回の論文¹の著者である中国科学院（北京）の発生生物学者Qi Zhouのチームは、実験室で精子もしくは卵から作り出して培養した胚性幹（ES）細胞を使った。この種のES細胞は染色体セットを1組しか持っておらず、大半の細胞と同様に、化学的タグの付いた遺伝領域を含んでいる。

Zhouらは試行錯誤を繰り返し、また、同チームの以前の研究²で得られた成果も参考にしつつ、タグ付きの遺伝領域を何回かに分けて削除し、胚の発生が正常に進むかどうかを見ながら、取り除ける領域を絞り込んでいった。

そして、雌2匹を両親とする仔マウスを作り出すために、雌マウス由来のES細胞1個を、別の雌マウス由来の卵に注入した。一方、雄2匹を両親とする仔マウスを作り出すためには、雄マウス由来のES細胞を別の雄の精子と一緒に、核を除去した卵に注入した。

両親が共に雌である場合、ES細胞の3つの遺伝領域を削除することで、29匹の仔マウスが健康な状態で生まれ、そのうち7匹はさらに仔を作った。一方、両親が共に雄の場合だと、12匹の仔マウスを誕生させるのに7つの遺伝領域を削除する必要があった。しかし仔マウスは、たった2匹が約2日間生きただけであった。

これらの研究結果は、哺乳類で雌雄の組み合わせ以外の生殖が起こらないようにしている最も重要な遺伝領域のいくつかを明らかにするものであり、また、「哺乳類の同性間で仔を作るための新しい明確な手法」も示していると、

Zhouは話す。

リスクを伴うビジネス

ただし、この手法がヒトに応用できるかは疑わしい。「彼らが発生させた胚は、全てではないにしても大部分に異常があり、生存できないものだったのです」と、ワイツマン科学研究所（イスラエル・レホボト）の分子遺伝学者 Jacob Hanna は話す。今回の研究では、雌2匹を両親とする胚が無事に仔マウスとして生まれた率は14%にすぎず、雄2匹を両親とする胚に至っては2.5%という低さだった。「この手法の臨床応用が認められる可能性はほぼないと思います」とHanna。

「子どもを作ろうとする場合、親は全ての要因が良い結果につながってほしいと切実に願うものです」と、カーネギー科学研究所（米国メリーランド州ボルティモア）の生殖生物学者 Allan Spradling は話す。しかし、この手法

で生まれてきたマウスがどの程度病気にかかりやすいかなどを知る手だては何もなく、どの程度正常なのか分からないのだと、彼は説明する。

「こうした研究が、女性2人もしくは男性2人を遺伝学的な両親とするヒトが当たり前に誕生することにつながるとは思いません。ゲノムインプリンティングは十分に解明されておらず、同性2人を両親とするヒトを作り出すことはあまりにリスクが高いと思われます」と Spradling は話す。 ■

（翻訳：船田晶子）

Healthy mice from same-sex parents have their own pups

doi: 10.1038/d41586-018-06999-6

2018.10.11 (Published online)

Jeremy Rehm

1. Li, Z. et al. *Cell Stem Cell* **23**, 665–676 (2018).
2. Li, Z. et al. *Cell Research* **26**, 135–138 (2016).

タンポポの綿毛の秘密

タンポポの種子に付いているふわふわの冠毛は隙間が多いが、この隙間が飛行を持続させるカギのようだ。

タンポポの綿毛は、研究者が現実世界ではうまくいかないだろうと思っていた方法で空を飛んでいることが明らかになった。

動物や航空機、種子が空を飛ぶとき、翼や翼状の表面と接する所には、循環する空気の輪（渦輪）が形成される。こ

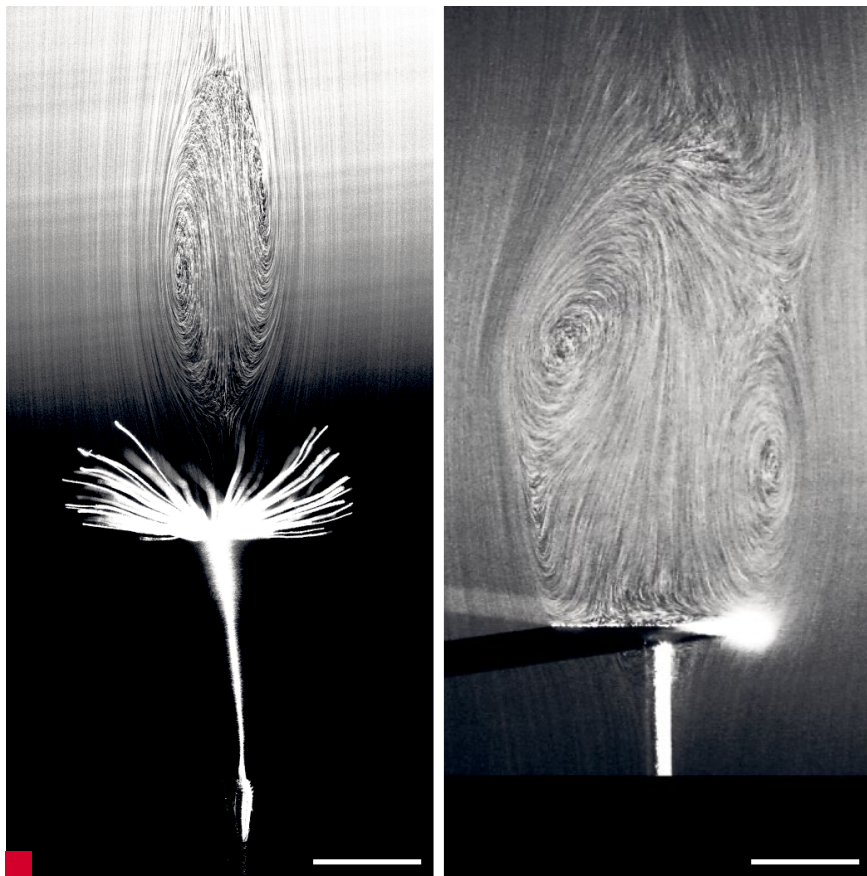
うした渦輪は、動物や機械や種子を空中に浮かせる力の維持に役立つ。

これまで研究者は、翼や翼状の表面に接していない渦輪は、不安定過ぎて自然界では存続できないと考えていた。けれども、*Nature* 2018年10月18日号に発表された報告¹によると、タン

ポポの軽い種子は、ふわふわした冠毛の表面のすぐ上にできた渦輪を利用して空中に浮き上がっていることが明らかになったのだ。

空中に浮かぶ仕組み

タンポポの種子のように見えるものは、正確には瘦果^{そうか}と呼ばれる果実である。この瘦果からは長い冠毛柄が伸び、その先端は、自転車の車輪のスポークのように放射状に開いている。この冠毛が飛行のカギになっているようだ。論文責任著者の1人であるエディンバラ大学（英国）の植物学者・中山尚美^{なかやまなおみ}は、こうしたフィルターのような構造物は昆虫^{はね}の翅や脚に比較的好く見られるため、飛



タンポポの綿毛が終端速度（綿毛にかかる重力と抵抗力が釣り合ったときの落下速度）で飛行する際に見られる、冠毛から剥離された渦輪（左）。同様の間隙率を持つシリコン製の円盤でも同様の渦輪が観測された（右）。スケールバーは、5mm。

んだり泳いだりする際に、表面から剥離された渦輪を利用するのは特に珍しくないのかもしれないと指摘する。

冠毛を持つタンポポの瘦果は、カエデなどの翼果（翼のような形の果実）など他の植物の果実とは大きく異なる外見を持つため、研究者たちはこれが空中にとどまる仕組みに興味を持っていた。鳥類や航空機の翼は、翼の上下に圧力差を作り出して飛ぶことを可能にしているが、タンポポの散布体（果実と冠毛からなる散布の単位）の構造も、同様の役割を担っていると考えられる。答えを探るため、中山らは垂直風洞の中にタンポポの散布体を置き、

レーザーを使って煙の粒子を光らせて、周囲の気流を可視化した。

実験の結果、冠毛の上空に渦輪が浮かんでいることが分かった。論文の第一著者であるエディンバラ大学の応用数学者 Cathal Cummins は、冠毛間の空間の大きさが、冠毛から剥離された渦輪の安定性のカギを握っているように見えたと言う。渦輪を作り出しているのは、冠毛の間を移動する空気の圧力と、瘦果の周囲を移動する空気の圧力の差である。

これまでの研究から、タンポポの瘦果には常に 90～110本の冠毛付いていることが分かっていた、と中山は言う。

そこには「驚くほどの一貫性」があり、その一貫性が、飛行に非常に重要な役割を持つことが明らかになった。

身近な自然が教えてくれること

研究チームはタンポポの冠毛を模倣するため、シリコン製の小さな円盤を使って、0%からタンポポの冠毛と同じ92%まで、さまざまな間隙率の模型を作った。これらの散布体の模型を風洞中に置いたところ、タンポポの冠毛に近い間隙を空けた円盤だけが、表面から剥離された渦輪を維持できることが分かった。

円盤の間隙の大きさがタンポポの冠毛の間隙の大きさから10%ずれただけでも、渦輪は不安定化した。間隙の多いタンポポの冠毛は飛行には効率が悪いように見えるが、この間隙が、表面から剥離された渦輪を安定化させている、と中山は言う。

ロンドン大学ロイヤル・ヴェテリナリー・カレッジ（英国ハットフィールド）の比較生物力学者 Richard Bomphrey は、私たちが日常的に目にしているが十分には理解していないものが分析されるのを見るのは非常に興味深いと言う。「人類はマッハ9で飛ぶ機械を作ることができるようになりましたが、未知の空気力学的機構が発見されれば胸が躍らずにはいられません！」

（翻訳：三枝小夜子）

Dandelion seeds fly using
'impossible' method never
before seen in nature

doi: 10.1038/d41586-018-07084-8
2018.10.17 (Published online)

Jeremy Rehm

1. Cummins, C. et al. *Nature* <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0604-2> (2018).

チーターのお見合いシステム

尿の匂いでマッチング

飼育チーターの繁殖を目指している動物園は、結婚相手選びで深刻な問題に直面している。だが、意外な解決策が見つかったようだ。独身の雌に雄の尿の匂いをかがせ、それに基づいてパートナーを選ばせるという方法だ。

雌のチーターはパートナー候補の雄の尿の匂いをかぐだけで遺伝的つながりの程度を感知でき、遺伝的に遠い雄を好んで選ぶことが最近の研究で分かった。この発見はチーターの飼育下繁殖を改善して保護に寄与する可能性がある。「尿に出てくる情報はとても多く、チーターが優れた結婚相手選びにこれを利用するのは理にかなっています」と、エンデンジャード・ウルフ・センター（米国ミズーリ州）の動物保護担当理事で、*Zoo Biology* 2018年7/8月号に掲載された研究論文の筆頭著者 Regina Mossotti は言う。

Mossotti によると、チーターの繁殖を計画している動物園は一般に、子孫の健康を損なう恐れのある近親交配を避けるため、他の施設と連携して動物を貸し借りしている。主に遺伝的類似性に基づいたお見合いシステムが使われているが、計算結果がめでたく結婚につながるとは限らない。

一方、野生の雌のチーターは広範囲を歩き回り、雄が縄張りに残したマーキングの匂いをかいで、パートナー候補を探しているようだ。そこで研究チームは、飼育下でパートナー候補を引き合わせるために尿を使う案を試すことにした。全米の動物園をドライブして回り、チーターの尿を収集。遺伝的関連がさまざまに異なる17頭の雄から得た尿サンプルを雌のチーター12頭にかがせ、反応を評価した。この結果、雌は遺伝的つながりが遠い雄の尿の近くで過ごす時間が常になることが分かった。

世界的な野生ネコ科動物保護団体パンセラのプログラムディレクターである Paul Funston は、この研究の有用性評価した上で、動物園での繁殖事業について疑問を投げ掛ける。「飼育下のチーターをうまく野生に戻せることを示す証拠は多くないのです」という。だが、特に絶滅が危惧される一部の亜種は飼育下繁殖を支持できると付け加える。

研究の次の段階は、この尿テストが繁殖成功率の向上に結び付くかどうかを調べることだ。いくぶん時間を要するだろうが、この研究はすでに飼育チーターの管理に関する動物園の考えを変えつつあると Mossotti は言う。

（翻訳協力：栗木瑞穂）

産後うつメカニズム

従来の抗うつ薬とは異なる作用機序の新薬候補

米国では毎年約400万人の産婦のうち10～20%が産後うつになる。この症状は母と新生児の絆を妨げ、子どもの発達を青年期まで危うくする恐れがある。的確な治療法はないが、有望な新薬がその状況を変えるかもしれない。

米国ノースカロライナ大学女性気分障害センターの周産期精神医学プログラム長である Samantha Meltzer-Brody は最近、この産後うつ治療薬の臨床試験を実施した。出産間もない母親に生じるホルモン変化を標的にした新薬だ。

アロプレグナノロンと GABA 受容体

産後うつ患者の多くは、選択的セロトニン再取り込み阻害薬（SSRI）などの抗うつ薬が処方される。だが、従来の抗うつ薬がどれだけ効くかは定かでない。産後うつでは、神経伝達物質セロトニンの果たす役割は明確でなく、産後うつの原因としては、別の生物学的過程が疑われている。

妊娠すると、生殖ホルモンのエストロゲンとプロゲステロンが劇的に上昇し、脳ではアロプレグナノロンというステロイドホルモンのレベルも急上昇する。アロプレグナノロンは通常、脳細胞に発火停止の信号を送る神経化学物質 GABA の受容体を活性化している。妊娠中はアロプレグナノロンによる GABA 受容体の過剰活性化を避けるため、GABA 受容体が休眠する。さもないと、妊婦は麻酔がかかったように感覚が麻痺してしまうからだ。出産後、これらはすぐに通常レベルに戻り、続いて GABA 受容体の活性レベルも急速に回復するが、一部の産婦ではこの回復に時間がかかり、それが産後うつを引き起こすと考えられている。

受容体の活性回復を支援

セージ・セラピューティクス社が開発した新薬は、アロプレグナノロンのレベルを上げる。これによって GABA 受容体を活性化し、健全なレベルに保つわけだ。21人の重度の産後うつ患者を対象に行われた第2相臨床試験では、この薬を投与された患者の70%が寛解した。重要なことに効果は投与直後に表れ、30日間持続した。セージ社はその後、計226人の産後うつ患者を対象に2件の第3相試験を実施しており、暫定的な結果は有望だ。米国食品医薬品局（FDA）は現在、この新薬「プレキサノロン」を審査中である。

（翻訳協力：栗木瑞穂）

がん免疫学者 2 氏に ノーベル医学・生理学賞

がん患者の余命を大幅に延ばすことのできる免疫療法は、今や、がん研究の最もホットな領域の1つとなっている。

2018年のノーベル医学・生理学賞は、がん治療の新しい道を切り開いた、テキサス大学MDアンダーソンがんセンターのジェームズ・アリソン（James Allison）と京都大学の^{ほんじよたすく}本庶佑に贈られる。2氏は、免疫細胞の表面にあるタンパク質を利用することで、免疫系ががん細胞を攻撃できるようにする方法を示した。こうした取り組みから、がん患者の余命を大きく延ばすことのできる治療薬が誕生した。中には、この種の薬剤によって、進行がんの患者でがんの徴候が全て消えてしまった例もある。「自分の研究が実際に人々の役に立つことは、私の願望の1つであり、誰もが夢見ることです」と、アリソンは10月1日の記者会見で述べている。同

日、賞金900万スウェーデンクローナ（約1億1000万円）が2氏に等分して贈られることが発表された。

1990年代、アリソンはカリフォルニア大学バークレー校（米国）で、T細胞と呼ばれる免疫細胞の表面にある免疫応答のブレーキ役（「免疫チェックポイント」と呼ばれる）として働くCTLA-4というタンパク質を研究していた。彼は同僚らとCTLA-4をブロックする抗体を作り、1997年には、その抗体によりT細胞の抑制が解かれ、がんを攻撃できるようになることをマウスで示した。やがて2010年の臨床試験で、CTLA-4の抗体が、皮膚がんの一種である悪性黒色腫の患者に著しい効果があることが明らかになった¹。

1992年、本庶はアリソンとは独立に、やはり免疫系のブレーキ役として働く別のT細胞タンパク質PD-1を発見した。ただし、働く仕組みはCTLA-4とは異なっている。ヒトでの臨床研究から、PD-1を特異的にブロックする抗体は肺がんなど数種類のがんに極めて有効であることが明らかになった²。この治療を受けた転移がん患者の中には、寛解状態が長く続き、治癒したと考えられる例もあるほどだ。

以来、「免疫チェックポイント療法」の臨床研究は急速に進んだ。PD-1を阻害する治療薬は、肺がんや腎臓がん、リンパ腫、悪性黒色腫に有効なことが明らかになった。また悪性黒色腫患者では、CTLA-4とPD-1の2つを標的とする併用療法が、CTLA-4のみを標的とした場合よりも有効な場合があることも分かった³。現在、免疫チェックポイント療法の有効性を評価するための臨床試験が、ほとんどの種類のがんを対象に進行中であり、また、標的となる他のチェックポイントタンパク質の探索も行われているところだ。

この分野の初期に重要な発見をした研究者は他にもいると、ダナ・ファーマーがん研究所（米国マサチューセッツ州ボストン）の免疫学者Gordon Freemanは話し、自らの貢献が認められなかったことを残念がっている。Freemanも、ハーバード大学医学系大学院（米国マサチューセッツ州ボストン）の免疫学者Arlene Sharpeやエール大学（米国コネティカット州ニューヘイブン）の免疫学者Lieping Chenと共に、複数のチェックポイントタンパク質や、PD-1に結合する分子「PD-L1」について研究してきたからだ。PD-1やPD-L1を標的とする薬剤は、既に米国食品医薬品局（FDA）によっていくつか承認されている。



2018年ノーベル医学・生理学賞を共同受賞した本庶佑（左）とジェームズ・アリソン。

LEFT: MEXT/CC BY 4.0; RIGHT: RICHARD DREW/AP/SHUTTERSTOCK

しかし、フランスの国立保健医学研究機関であるINSERM（パリ）の免疫学者Jerome Galonは、「第一候補を選ぶなら、明らかに本庶とアリソンの2人だ」と述べている。

がんの免疫チェックポイント療法が実現に至るまでの道のりは長かった。アリソンが最初、製薬会社に関心を持ってもらおうと試みた際には、まるで相手にしてもらえなかったのだ。しかし2012年になって、PD-1阻害剤が肺がんの有効なことが明らかになり、この領域は一気に盛り上がった。

免疫チェックポイント療法という領

域が発展するのをワクワクしながら見てきたと、Freemanは話す。「これほど多くのがん患者が良くなっている。素晴らしいことです」。

（翻訳：船田晶子）

Cancer immunologists scoop medicine Nobel prize

Vol. 562 (20-21) | 2018.10.4

Heidi Ledford, Holly Else
and Matthew Warren

1. Hodi, F. S. et al. *N. Engl. J. Med.* **363**, 711–723 (2010).
2. Topalian, S. L. et al. *N. Engl. J. Med.* **366**, 2443–2454 (2012).
3. Larkin, J. et al. *N. Engl. J. Med.* **373**, 23–34 (2015).

ノーベル物理学賞は革新的なレーザー技術に

女性がノーベル物理学賞を受賞するのは55年ぶりだ。

2018年のノーベル物理学賞は、強力なレーザー光線を利用して超高速プロセスを捉えたり微小な物体を操作したりする研究を行った3人のレーザー科学者に授与される。その1人であるワートリックランド大学（カナダ・オンタリオ州）のドナ・ストリックランド（Donna Strickland）は、女性として55年ぶりにノーベル物理学賞を受賞する。

賞金900万スウェーデンクローナ（約1億1000万円）の半分は、ストリックランドと、彼女のかつての指導教員で、現在はエコール・ポリテクニク（フランス・パレゾー）に所属するジェラル・ムル（Gérard Mourou）が分け合うことになる。残りの半分は、ベル研究所（米国ニュージャージー州ホルムデル）のアーサー・アシュキン（Arthur Ashkin）に授与される。

ストリックランドとムルは、持続時間がこれまでで最も短く、最も高強度の光のパルスを生成する手法を開拓した。こうした超短パルスは、今日の科学の全領域で、かつては瞬間的にしか見えなかったプロセス（例えば原子内の電子の運動）を解明するために利用されている。アシュキンの受賞理由は「光ピンセット」、すなわち、ウイルスや細胞などの微視的な物体をつまんだり制御したりすることができるレーザー光線の開発である。

10月2日に受賞を告げられた時、ストリックランドは「誰だって最初は『まさか』と思いますよね。私もそう思いました。今でもしょっちゅう、これは現実なのだろうかと思います」と語っている。

ストリックランドは、ノーベル物理学賞を受賞した3人目の女性である。2人目の女性受賞者であるマリア・ゲッパート・メイヤー（Maria Goeppert Mayer）の受賞は1963年のことだった。



今年のノーベル物理学賞の受賞者を発表するノーベル委員会のメンバーたち。

「うまい言葉が見つかりませんが、3人のうちの1人になれて光栄に思います」とストリックランドは言う。スウェーデン王立科学アカデミー（ストックホルム）の事務総長 Göran K. Hansson は、同アカデミーは女性科学者のノミネートを促すための「策を講じている」が、これらの策は今年の賞には影響を及ぼしていないと言う。

強力なパルス

持続時間の短いレーザーパルスは、一瞬で終わってしまうようなプロセスを探ることを可能にする。しかし、ストリックランドとムルの技術が開発されるまでは、そうしたパルスの強度は制限されていた。高強度のパルスを作ろうとすると、それを作るために必要な増幅器が壊れる恐れがあったからだ。2人の手法の画期的な点は、レーザーパルスを時間的に引き伸ばしたことだった。引き伸ばされた光の強度は低くなるため、従来の増幅器を使うことができる。この方法で増幅されたパルスを押し縮めれば、元のパルスを増幅できたことになる。この技術は、チャープ（時間的に周波数を変化させた信号）を操作することからチャープパルス増幅と呼ばれる。持続時間の短いパルスは生体を損傷しにくいので、レーザー眼科手術に応用できることも分かった。フランシュ＝コンテ大学（フランス・ブザンソン）の光物理学者 John Dudley は、「ノーベル賞は発見または発明に対して授与されます。今回の研究は、この2つに橋を架けるものです」と言う。

96歳のアシュキンは、これまでで最高齢のノーベル賞受賞者である。彼の受賞理由となった研究は、レーザーが発明された直後の1960年に始まった。レーザーが及ぼす小さな圧力を利用し

て微小な物体を破壊することなく操作できることに気付いたアシュキンは、 μm サイズの球体を使った実験で、光線中の強度が最も高い領域に粒子が引き付けられることを示した。この実験から、レーザーを集光して物体を捕捉したり、宙に浮かせたり、動かしたりする手法が生まれた。アシュキンは、この「光ピンセット」が細菌やウイルスや生きている細胞をつまめることに気付いた。グラスゴー大学（英国）の光物理学者 Miles Padgett は、アシュキンの研究がもたら

した影響の大きさは誰もが認めるところだと言う。今日、光ピンセットは、病原体に感染した血液から健康な血液細胞を選り分けたり、ナノスケールの材料を細工したりする際など、無数の用途に応用されている。

（翻訳：三枝小夜子）

Laser tricks win physics Nobel

Vol. 562 (20) | 2018.10.4

Davide Castelvecchi, Elizabeth Gibney
& Matthew Warre

ノーベル化学賞は 試験管内でタンパク質を 進化させる手法に

タンパク質の進化を研究室で制御する方法が開発されたことで、バイオ燃料や新しい薬剤の開発につながった。

タンパク質の進化を加速させ、それを制御する方法を編み出した3人の科学者に、2018年のノーベル化学賞が授与される。彼らが開発した手法は、地球に優しい化学製品を作る技術や、新しい薬剤の創出につながった。

カリフォルニア工科大学（米国パサデナ）の化学工学者フランシス・アーノルド（Frances Arnold）は、過去50年間でノーベル化学賞を受賞した2人目の女性となった。彼女には900万

スウェーデンクローナ（約1億1000万円）の賞金の半分が贈られ、残り半分はMRC分子生物学研究所（英国ケンブリッジ）のグレゴリー・ウィンター（Gregory Winter）とミズーリ大学コロンビア校（米国）のジョージ・スミス（George Smith）に等分される。

アーノルドは1990年代に、酵素の「指向性進化（directed evolution）」について先駆けとなる研究を行った。酵素とは、化学反応を触媒するタンパ



ノーベル化学賞の受賞者グレゴリー・ウィンター（左）、フランシス・アーノルド（中央）、ジョージ・スミス（右）。

ク質である。彼女は、まず単離した酵素の遺伝子にさまざまな変異を誘導し、それらを細菌に導入して酵素を産生させた。次に、目的の酵素活性を有する細菌をスクリーニングして選択するという方法で、酵素を目的の反応を触媒するものに効率的に進化させた。現在、この手法で改良された酵素は、バイオ燃料や薬剤の製造に使われている。

「生物に備わっている進化という1つの過程は、私たちが自然界で目にする素晴らしい複雑性の全てをもたらしています」と、彼女は受賞発表の直後に*Nature*に語った。自然に起こる進化作用は、自然選択に対しほとんど無関係な中立なものだが、アーノルドの技術は自然選択を加速することで、求める特性の酵素を効率的に得られるようにするものだ。「これは競走馬を育てるようなものです」とアーノルドは言う。

一方、スミスは1985年に、バクテリオファージ（細菌に感染するウイルス）の外殻に任意のタンパク質を発現させて、そのタンパク質と相互作用する分子を見つけ出す「ファージディスプレイ」という手法を開発した。ウィ

ンターは、この技術を改良・応用して、抗体を進化させる方法を編み出した。ファージに抗体の結合部位ライブラリーを発現させて、抗体と標的との結合の親和性と特異性を評価することで、治療薬として用いるのに適した抗体を選び出すのである。現在、この方法を用いて進化させた抗体は、毒素を中和したり、自己免疫疾患を緩和させたりする医薬品として用いられている。

ウィンターは1989年にCambridge Antibody Technology (CAT) 社を共同で設立し、この手法を用いてアダリムマブ（ヒュミラ）と呼ばれる最初のヒト型抗体を見いだした。アダリムマブは、2002年に関節リウマチ治療薬として承認を受け、その後さらに乾癬^{かんせん}と炎症性腸疾患の治療にも使われるようになっていく。2017年には、184億ドル（約2兆円）の売り上げがあり、世界で最も売れた薬となった。

「CAT社が発足した時には懐疑的な人が多く、投資家を見つけるのに苦労しました。世界中の誰もが、抗体治療がうまくいくなんて思っていませんでした」と、共同設立者のDavid Chiswell

は言う。Chiswellは現在、抗体技術を基盤とするバイオ医薬品会社カイマブ（Kymab；英国ケンブリッジ）の最高経営責任者である。

アーノルドも同様に、研究室でタンパク質を進化させるという考えを提案すると、すぐさま論争になったと、マサチューセッツ工科大学（米国ケンブリッジ）のタンパク質工学者Dane Wittrupは言う。当時、研究者らは、特定の機能を実行するタンパク質をコンピューターを使って合理的に設計できると考えていた。「しかし現在、主に指向性進化法によって目的とするタンパク質が作り出されています」。

ウィンターは、1人の女性患者との出会いが、自身の研究を実験室から臨床に向かわせたと話す。彼女は、ウィンターが開発したあるがん関連タンパク質に対するヒト型抗体を用いた治療を受けていた。この抗体は初期実験段階であったため、ウィンターが彼女に「効果は長続きしないかもしれない」と注意を促すと、彼女は「もう数カ月生きる必要があるだけです。死に近づいている夫の手助けができるように」と答えた。「私は胸がいっぱいになりました」とウィンターは言う。

アーノルドは、ノーベル化学賞を受賞した5人目の女性である。彼女の前は、結晶学者アダ・ヨナス(Ada Yonath)で、2009年に受賞。その前は1964年で、結晶学者ドロシー・ホジキン(Dorothy Hodgkin)に贈られた。

（翻訳：三谷祐貴子）

Nobel for test-tube evolution

Vol. 562 (176) | 2018.10.11

Elizabeth Gibney, Richard Van Noorden,
Heidi Ledford, Davide Castelvecchi &
Matthew Warren

パルサー発見者に ブレイクスルー賞

ジョスリン・ベル・バーネルはブレイクスルー賞の賞金約3億円を、科学におけるダイバーシティの推進のために使うという。

50年前にパルサーを発見した天体物理学者ジョスリン・ベル・バーネル (Jocelyn Bell Burnell) が、300万ドル (約3億3000万円) という高額の賞金で知られるブレイクスルー賞を受賞した。パルサーは高速で自転しながら電磁波を放射するコンパクトな天体で、彼女はその発見者でありながら、女性ゆえにノーベル賞を受賞できなかったといわれてきた。ブレイクスルー賞選考委員会は、75歳になったベル・バーネルの科学的業績と、この50年間の「人々を鼓舞するリーダーシップ」をたたえて、基礎物理

学ブレイクスルー賞の特別賞を贈った。フラットアイアン研究所 (米国ニューヨーク) の天体物理学者 Chiara Mingarelli は、「彼女以上にこの賞にふさわしい科学者は思い付きません」と言う。「ベル・バーネルは、この分野の先駆者であり、大家であるだけでなく、最高のロールモデルでもあります。科学に携わる全ての女性の擁護者です」。

現在オックスフォード大学 (英国) とダンディー大学 (英国) に所属しているベル・バーネルは、2018年9月6日に発表された同賞の受賞について「全

く驚いています」と語った。「生まれて初めて、言葉を失うという経験をしました」。彼女は賞金を使って科学界のマイノリティのための博士課程奨学金を創設したいと考えていて、すでに、英国とアイルランドの国立の物理学研究所と相談しているという。彼女はその理由について「ダイバーシティは非常に大切だからです」と説明する。「私が最も重要な研究を行ったのが学生時代だったからということもあります」。

ブレイクスルー賞は2012年に創設され、グーグルの共同設立者セルゲイ・ブリン (Sergey Brin) をはじめとする起業家たちが資金を提供している。基礎物理学、生命科学、数学の3つの賞があり、通常は12月に授与される。受賞者の選考に当たっては、誰でもオンラインで候補者を推薦でき、それに基づいて選考が行われるが、選考委員会は独自に特別賞の授与を決定することができる。特別賞はこれまで、スティーブン・ホーキング (Stephen Hawking) や、重力波を発見したレーザー干渉計重力波天文台 (LIGO) の研究チームに贈られた。

パルサーはほぼ中性子からなる高密度の恒星で、非常に正確な周期で自転しながら電磁波を放射している。1967年、ケンブリッジ大学 (英国) の天文学者アントニー・ヒューイッシュ (Antony Hewish) の研究室の博士課程学生だったベル・バーネルは、ケンブリッジの電波天文台が収集したデータを記録した数百メートルのチャート紙を分析していた時に、反復して現れる謎の「汚れ」に気付いた。彼女はこれらが、高速で自転する星 (パルサー) が発する電波パルス信号であることを確認できた (2017年10月号「正確な周期で電磁波を発する天体」参照)。「この発見は、彼女の好奇心、決意、創造性の証拠です」と

DAVID HARTLEY/SHUTTERSTOCK



ジョスリン・ベル・バーネルはケンブリッジ大学の博士課程学生時代にパルサーを発見した。



パルサーとは、高速で回転しながら放射を行う高密度の天体で、磁極から短い周期で光を放射しているため規則的に明滅する。

Mingarelliは言う。

1974年、ヒューイッシュは同僚の電波天文学者マーティン・ライル (Martin Ryle) と共に天体物理学の先駆的研究についてノーベル物理学賞を受賞した。ヒューイッシュはその後、「パルサーの発見に決定的な役割」を果たしたとされたが、ベル・バーネルの貢献は見落とされた。ベル・バーネル自身は、ノーベル賞が学生には与えられないことは分かっている、自分が受賞できなかったことは気にしていないと語っていた。

彼女の発見は半世紀後の今でも重要だ、とMingarelliは言う。例えば、今

年初めには、NASA (米航空宇宙局) の科学者たちが国際宇宙ステーション (ISS) のSEXTANT実験により、パルサーを利用した航法が可能であることを示した。未来のロボット宇宙船は、パルサーが放射するX線の正確な到達時刻を利用し、三角法を使って自分の現在位置を知ることができるかもしれない。■

(翻訳：三枝小夜子)

Pulsar discoverer wins
\$3-million prize

Vol. 561 (161) | 2018.9.13

Zeeya Merali

全米科学財団の厳しい ハラスメント防止規約が発効

全米科学財団の助成金受給者がこの規約に違反した場合、所属研究機関は調査を行い、財団に報告することが義務付けられた。被害者や目撃者が直接財団に通報することもできる。

2018年10月21日、全米科学財団 (NSF) によるセクシュアルハラスメントへの対策がようやく発効した。全ての新規助成案件と既存の助成の延長に対して適用される。以降、NSFの助成を受ける機関は、研究室の主宰者 (PI) や準主宰者 (co-PI) によるハラスメント (セクシュアルハラスメントや性的暴行、その他のハラスメントも含む) に関するあらゆる発見・調査事項をNSFに報告しなければならない。究明調査のため、研究者が休職扱いとなった場

合にも、報告する必要がある。2018年2月に指針案が発表されて以来、この規約には、200件近くの意見が寄せられていた。

今回発効した規約は、米国の研究助成機関によるセクシュアルハラスメント対策としてはこれまでで最も厳しいものである。例えば米国立衛生研究所 (NIH) は、9月17日に一元管理型のハラスメント報告システムの導入を表明したが、助成金支給には新たな条件を課していない。

しかし、専門家によると、NSFの指針は最初の一步としては素晴らしいが、最終段階には程遠いという。NSFの助成を受けた研究施設 (南極にある施設など) で安全性向上に取り組んできたスクリプス海洋研究所 (米国カリフォルニア州ラホヤ) の地質学者Jane Willenbringは、「ハラスメント対策規約の発効はうれしいニュースです。予想以上のものです」と話す。しかし、ハラスメント申し立てに関する調査は、被疑者側の学術機関に任せるのではなく、NSF自身が行うことを検討すべきだとも付け加えている。

ウィスコンシン大学マディソン校 (米国) の地球科学者Erika Marín-Spiottaは、対象が規約の発効以降に支給・延長される助成であることについて、現行の助成にもNSF政策を適用してほしいと話した。「今回の新規約は必要最低限でしかありません」。

NSF理事長のFrance Córdovaによると、今回の規約発効は、最終的なハラスメント対策措置ではないという。「今

はハラスメント対策に取り組もうとしている時であり、NSFの仕事が終わったとは考えていません」と彼女は説明する。

強制的な開示

今回の規約では、研究機関は、NSFの助成を受けているPIまたはco-PIによるハラスメント行為の発見後10営業日以内にNSFに届け出る必要がある。また研究機関は、ハラスメントの発見や調査に関連して、PIまたはco-PIを休職させるなどの管理的措置を取った場合にも報告の義務がある。しかし、NSFの指針では、研究機関は調査開始の際にはNSFに通知する必要がない。「申し立ての受け付けと、権限を与えられた人による適正手続きの間には、微妙なバランスがあるのです」とCórdovaは言う。「研究機関による調査で発覚した事案に対して具体的な措置が取られれば、その事実が動かしがたい証拠となり、NSFは措置を取ることができるのです」。

大学を含めておよそ2000の研究機関が、NSFの助成を受けている。それらの機関は、すでに連邦公民権法に従う法的責任を負っている。公民権法第9編は、性別に基づく差別を禁じており、大学でのセクシュアルハラスメントや性的暴行の対策に広く用いられてきた。しかし、報復の恐れや調査不徹底への危惧から、所属研究機関を通して報告が行われることはほとんどないと、Marín-Spiottaは指摘する。今回のNSFの新しい指針では、ハラスメントがあった際、直接NSFへの通報ができるようになり、研究機関を通して通さなくてもよいことになっている。

2月に報告ルールを提案してからこれまでに、助成受給者によるハラスメント発覚事項の報告を研究機関から5、6件受けた。しかし、助成受給者からハラスメントを受けた人、もしくはその行為を目撃した人からの通報は、「恐らく、少なくともその倍の数」だと、NSFの

コンプライアンス・プログラム・マネージャーのRobert Cosgroveは言う。

NSF助成受給者が関わったハラスメントは、オンラインで通報できる (nsf.gov/harassment)。対応のため、ハラスメント対応の経験を有するスタッフを数名増員したと、NSFの多様性統括室 (Office of Diversity and Inclusion) の室長Rhonda Davisは話す。また、いじめについてCórdovaは、NSF規則では「その他のハラスメント」として扱うと述べている。

広がる対策

科学界におけるハラスメント対策を進める動きは拡大しつつある。9月15日、米国科学振興協会 (AAAS; ワシントンD.C.) の運営審議会は、ハラスメントを含む不祥事や倫理違反が発覚した科学者に対してフェローの称号を取り消す手続きを定めることを決定した。また、米国連邦議会は、助成受給者が関与するセクシュアルハラスメントに対して各政府系助成機関がどう対処しているかに関して調査を開始するよう、米国政府監査院に要請した。

NSFなどの政府機関は、各政府機関においてハラスメント対策の調整が促進されるよう、上院で大統領府科学技術政策局の局長が承認されるのを待っているとCórdovaは言う。局長として、すでにオクラホマ大学 (米国ノーマン) の気象学者Kelvin Droegemeierが指名されているが、承認にはまだ至っていないという。

(翻訳: 藤野正美)



新規約では、NSFの助成を受ける研究者による規約違反が判明した際と、究明調査のために研究者が休職扱いになった場合、所属研究機関にNSFへの報告義務が課せられる。

NSF rolls out stringent anti-harassment policy

Vol. 561 (444-445) | 2018.9.27

Alexandra Witze

発見されたガリレオの手紙から新事実

1 回目の異端審問で証拠とされたガリレオの手紙には版が2つある。ガリレオは、主張の柔らかい方が原本で、裁判所には手が加えられたものが送られたと周囲に話していたが、事実は異なるようだ。

天文学者ガリレオ・ガリレイが「太陽が地球の周りを回っている」という教会の見解に逆らう説を最初に書き記した手紙の原本は、長い間、失われてしまったと考えられていた。この手紙がロンドンにある王立協会の図書館で偶然発見された。蔵書目録に間違った日付で登録されていたため、ずっと気付かれずにいたのだ。手紙を分析したところ、1633年に天文学者ガリレオが異端者として有罪判決を受けることになるまでの長い物語に関する重要な詳細が、新たに明らかになった。

7ページにわたるこの手紙は1613年12月21日付で友人に宛てて書かれたもので、「G.G.」と署名されていた。これは、キリスト教の権威者たちとの闘

いの最初の段階では、ガリレオが積極的に追及を最小限に抑える努力をし、自説の論調を和らげた版を広めようとしていたことを示す、これまでで最も強力な証拠である。

この手紙は多くの写しが作られ、2つの異なる版が存在している。一方はローマの宗教裁判所に送られたもので、もう一方は言葉遣いを抑えたものだ。しかし、手紙の原本は紛失したと考えられていたため、激怒した聖職者たちが異端のさらに強い証拠とするために手紙を手直したのか（ガリレオは友人に、手紙に手を加えられたと不満を訴えていた）、あるいはガリレオ自身が強い言葉を用いた手紙をまず書き、その後で、言葉遣いを和らげることを決

めたのかは明らかでなかった。

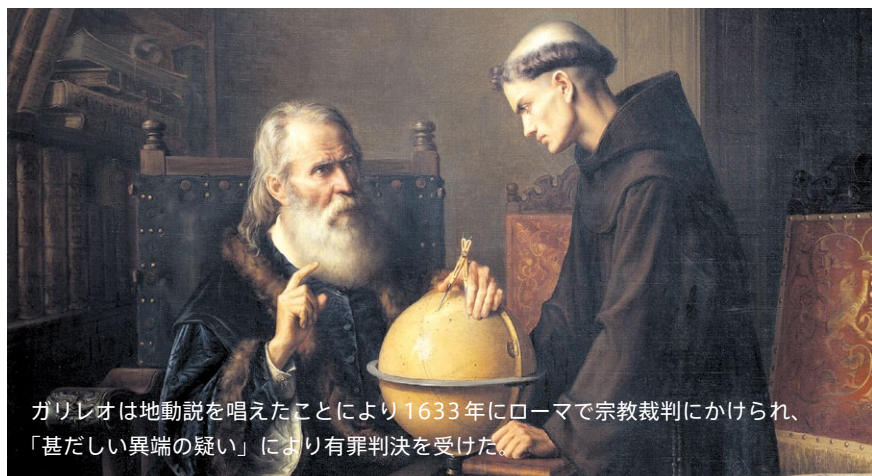
どうやら、手を入れたのはガリレオ自身だったようだ。修正箇所が散見されるこの手紙は、筆跡鑑定でガリレオの自筆であることが示唆されている。彼は、この文調を和らげた版の写しを「原本だ」と言って友人の1人に渡し、バチカンに送ってくれと熱心に頼んだ。

この手紙は、少なくとも250年間、王立協会に所有されていたが、これまで歴史家の目に留まることはなかった。しかし、2018年8月2日に、別の目的で王立協会の図書館を訪れ、オンラインカタログを閲覧したベルガモ大学（イタリア）の科学史研究者Salvatore Ricciardoによって再発見されたのだ。

「ほとんど全てのガリレオ研究者が『絶対に失われてしまった』と考えていた手紙を自分が発見したなんて、とても信じられませんでした」と、Ricciardoは言う。「しかも王立協会の図書館にあったのですから、さらに信じ難い気持ちが強まりました」。

Ricciardoと、共同研究者のベルガモ大学のFranco Giudiceおよびカリヤリ大学（イタリア）のMichele Camerotaは、王立協会の学術雑誌*Notes and Records*に2018年10月24日に掲載された論文で手紙の詳細と含意について説明している（M. Camerota et al. *Notes and Records* <https://doi.org/10.1098/rsnr.2018.0053>）。一部の科学史研究者は、今回の知見について、論文の精査後までコメントを控えたとしている。しかし、オックスフォード大学（英国）の科学史研究者で天文学史協会の会長であるAllan Chapmanは「これはとても貴重な発見です。極めて重要な時代についての新たな手掛かりが得られるでしょう」と述べている。

DEAGOSTINI/GETTY/PAINTING BY FELIX PARRA



ガリレオは地動説を唱えたことにより1633年にローマで宗教裁判にかけられ、「甚だしい異端の疑い」により有罪判決を受けた。

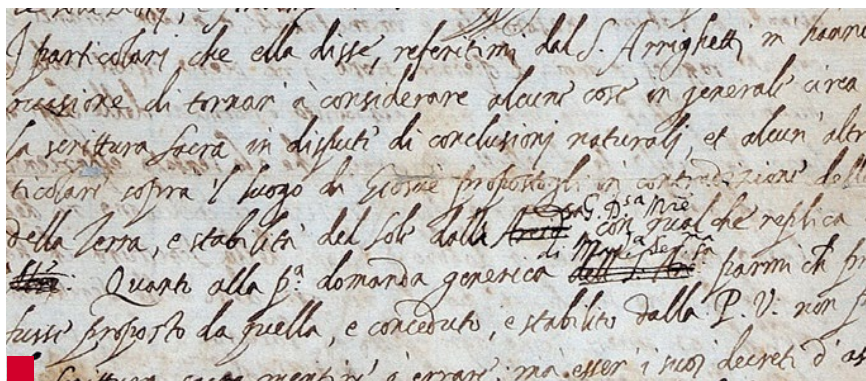
矛盾するメッセージ

ガリレオはこの手紙を1613年にピサ大学（イタリア）の数学者ベネデット・カステリに宛てて書いた。その中で、ガリレオは初めて、科学研究は神学の教義から離れているべきだという彼の主張を述べ始めた。

ガリレオは、聖書に記された天文学的な事象への言及はわずかであり、それを文字どおり取るべきではない、なぜなら聖書の筆者たちは、民衆が理解しやすいように記述を簡素化したからだと主張した。そうではないと論じているキリスト教の権威者たちは判断能力に欠けているとガリレオは書いている。最も重要なことに、ポーランドの天文学者のニコラウス・コペルニクスが70年前に提唱した、太陽が宇宙の中心にあり地球は太陽の周りを回っているというモデル（地動説や太陽中心説と呼ばれる）は、実際には聖書と両立しないわけではないとガリレオは論じた。

その頃にはフィレンツェ在住であったガリレオは、何千通もの手紙を書き、その多くが科学的論文であった。特に重要なものは複数の写しが作られ、広く人々に読まれた。中でもカステリへの彼の手紙は嵐を巻き起こした。

残存が確認されている2つの版のうち、1つは現在バチカン秘密文書館に収蔵されている。この版は1615年2月7日にニコロ・ロリーニというドミニコ会士によってローマの宗教裁判所に送られたものだ。カステリがその後、1613年の手紙の原本をガリレオに返したこと、そして1615年2月16日にガリレオが友人でローマの聖職者のピエロ・ディーニに手紙を書き、ロリーニが宗教裁判所に送った版には手が加えられていたかもしれないと示唆したことが歴史研究で明らかになっている。ガリレオは、それほど



手紙には、ガリレオ自身による修正が見られる。

怒りをかき立てない版を同封し、それが正しい手紙だと言って、バチカンの神学者たちに渡すようディーニに頼んだ。

ガリレオはディーニ宛ての手紙で、敵の「邪悪さと無知」について不満を述べており、「熱意と慈善という名の下に広まりつつあるこの欺瞞^{ぎまん}によって、宗教裁判所が幾分だまされてしまうかもしれない」という懸念を吐露している。ガリレオがディーニに送った版は、少なくとも12以上の写しが現在、異なる場所に収蔵されている。

Ricciardoによって発見された署名付きの手紙では、打ち消し線の下に書かれた元々の言葉遣いが判読でき、これはロリーニの写しと同じであった。これらの変更からさまざまなことが分かる。例えば聖書のいくつか特定の文言に触れ、「文字どおりの意味に解釈すれば間違っている」と述べた箇所、ガリレオは「間違っている」という単語を線で消し、「真実とは異なるように見える」に取り替えた。また別の、聖書はその最も基本的な教義を「隠している」という箇所では、より柔らかい「バールで覆っている」に変更している。

これは、ガリレオが自身の文言を和らげたことを示唆していると Giudice は述べる。手紙が本当にガリレオの手で書かれたという確証を得るために、3人

の研究者は、手紙の中の個々の単語を、ほぼ同時期にガリレオによって書かれた他の文章にある同様の単語と比較した。

偶然の発見

歴史家たちは現在、手紙が王立協会での程度長期間保管されていたのか、そしてどうやってそこに到着したかをたどろうとしている。目録では、この手紙は1613年10月21日付とされていたが、Ricciardoは手紙の中に実際には1613年12月21日という日付が入っていることを確認している。これが、この手紙がガリレオ研究者たちによって見落とされていた理由の1つであるかもしれないと Giudice は言う。手紙は1840年の王立協会目録にも含まれていたが、そこでもまた、1618年12月21日と、間違った日付が記されていた。

「ガリレオのカステリへの手紙は、科学の自由に関する最初の非宗教的な宣言の1つです。このようなスリリングな発見に関わったのは、人生で初めてのことです」と、Giudice は言う。■

（翻訳：古川奈々子）

Lost Galileo letter reveals he tried to dodge Inquisition

Vol. 561 (441–442) | 2018.9.27

Alison Abbot

ペイウォールをなくすための過激な計画

欧州を代表する研究助成機関が、全ての科学論文を出版と同時に無料で読めるようにするための「プランS」を発表した。

2018年9月4日、フランス、英国、オランダなど欧州の11カ国の研究助成機関が急進的なオープンアクセスイニシアチブ「cOAlition S」の発足を宣言した。このイニシアチブはわずか2年で科学出版の様相を一変させる可能性があり、発表の途端、学術出版社から抗議の声が上がった。

毎年総額1兆円以上の研究助成金を支出しているこの11機関は、2020年1月1日以降、自分たちが助成する科学者に対し、研究成果である論文を、出版と同時に無料で読めるようにすることを要求するという。つまり著

者は、論文に「自由出版許諾 (liberal publishing license)」を与え、誰でも論文をダウンロードでき、翻訳でき、またその他の方法でも再利用できるようにしなければならない。このイニシアチブの発足と同時に、その原則をまとめた「プランS (Plan S)」が発表され、そこには「いかなる科学もペイウォール (課金の壁) の後ろにしまい込まれてはならない！」という文言を含む前文が付されている。

ロンドン大学インペリアルカレッジ (英国) の構造生物学者でオープンアクセス擁護派であるStephen Curryは、

「非常に強力な宣言です。論争を呼び、人々の感情を強く揺さぶることでしょう」と評価する。科学論文をオンライン上で自由に利用できるようにしようとするオープンアクセス運動の進捗は遅いが、このイニシアチブのポリシーは「重大な変化」を引き起こすだろう。

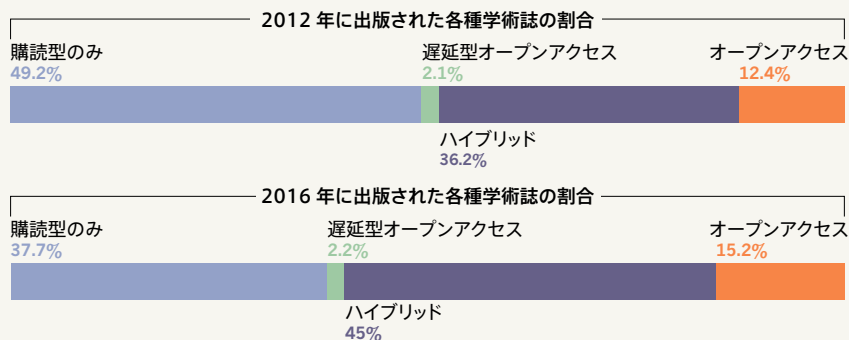
「プランS」の発効後は、研究者は即時オープンアクセスではない学術誌で論文を出版することができなくなる。そうした学術誌は全体の85%に上り、その中には、*Nature*や*Science*などの影響力の大きいものも含まれている。2017年の分析によれば、即時オープンアクセス方式をとる学術誌は約15%にすぎず、そうした学術誌は、著者に論文掲載料を課すか、著者の研究助成機関と交渉して一般的なオープンパブリッシング契約を結ぶなどして資金を得ている（「さまざまな出版形式」参照）。

現在でも3分の1以上の学術誌がペイウォールの後ろで論文を出版していて、典型的には、出版から半年以上経過した論文のみ、無料で読めるバージョンをオンラインで公開することを許可している。半数よりもやや少ない学術誌は、著者が希望すれば即時オープンアクセスとすることができるが、ほとんどの論文はペイウォールの向こうにあるという「ハイブリッド」出版モデルを採用している。けれどもプランSの下では、短い移行期間を過ぎたら、科学者たちはハイブリッド型学術誌で論文を出版することはできなくなる。プランSは、研究助成機関が負担するオープンアクセス出版費用に上限を設けるとしているが、どこを上限とするかは明記していない。

イニシアチブを立ち上げたのは欧州の研究助成機関と研究実施機関の擁護団体サイエンス・ヨーロッパ (Science

さまざまな出版形式

2012～2016年の間に、世界中で購読型のみの学術誌*の割合が減少し、オープンアクセス誌とハイブリッド型学術誌の割合が増加している。



*Scopus データベースより。ハイブリッド型学術誌は購読誌だが、著者が自分の論文の掲載料を支払うことで、論文ごとにオープンアクセス化ができる。数字は四捨五入してあるため、合計は100%にはならない。



欧州委員会のオープンアクセス担当特使Robert-Jan Smits。急進的なオープンアクセスイニシアチブ「cOAlition S」を推進する役割を担う。

Europe) で、欧州委員会のオープンアクセス担当特使Robert-Jan Smitsがこれを率いる。Smitsによると、プランSの「S」は、「科学、スピード、ソリューション、ショック (science, speed, solution, shock)」を表すという。プランSには、オーストリア、アイルランド、ルクセンブルク、ノルウェー、ポーランド、スロベニアの国家機関の他、スウェーデンとイタリアの研究助成機関も署名している（註：9月24日にはフィンランド、10月9日にはスウェーデンのもう1つの助成機関が加わり、イニシアチブに参加する国立研究助成機関は12カ国の13機関となった。また、11月5日には慈善団体としてゲイツ財団と英国のウェルカムトラストも加わった）。

SmitsはプランSの策定に当たり、世界的な慈善団体ビル&メリンダ・ゲイツ財団（米国ワシントン州シアトル）

のオープンアクセスポリシーを参考にしたという。ゲイツ財団のポリシーも即時オープンアクセスでの出版を要請しているが、プランSはハイブリッド出版を禁じている上、複数の研究助成機関が関わっているため、その影響ははるかに広範に及ぶことになる。

上述のとおり Smitsは欧州委員会の人間だが、欧州委員会自体はプランSに署名していない。しかしSmitsは、将来的には欧州委員会からの研究助成金にもこの要請が付されることを期待していると言う。彼はまた、より多くの研究助成機関の参加を期待しており、10月には米国でもプランSに関する話し合いを持ったと話す。

プランSについてコメントを求められた出版社は、深刻な懸念を持っていると回答した。彼らが特に問題視しているのはハイブリッド型学術誌での出版も

禁止されることである。145の科学・技術・医学出版社を代表するSTM国際出版社協会（International Association of Scientific, Technical and Medical Publishers、英国オックスフォード）のスポークスマンは、*Nature*のニュースチームに対して、査読付き科学論文へのアクセスを拡大しようとする研究助成機関の取り組みは歓迎するが、プランSの一部の項目は「学問の自由に対するあらゆる意図せぬ制限を避ける」ための慎重な配慮を必要とすると語る。中でも、オープンアクセス論文の利用可能性を広げてきたハイブリッド型学術誌を禁止することは「移行を大幅に遅延させる恐れがある」と指摘する。

出版社のエルゼビアは、STMのコメントを支持すると語った。シュプリンガー・ネイチャーのスポークスマンは、「研究助成機関には、相容れない小さなグループとして活動せずに、足並みを揃えてくれることを望みます」と語り、研究者から出版の選択肢を奪うことは、「科学とその対話は国際的なものであることを考えておらず、学術出版システム全体の土台を崩す可能性がある」と言い足した（*Nature*のニュースチームは同社に対し編集の独立性を保っている）。

Curryは、世界の出版ビジネスモデルが購読からオープンアクセスへと移行する過程で、新たな問題が生じる可能性がある」と忠告する。貧しい国の科学者が論文をオープンアクセス出版するにはどうすればよいか、という問題だ。「その点についても話し合う必要があります」と彼は言う。

（翻訳：三枝小夜子）

Radical plan to end paywalls

Vol. 561 (17-18) | 2018.9.6

Holly Else

サステナビリティ研究が拓く 持続可能な未来

—— 科学と社会の連携でSDGs達成を目指す ——

2015年の国連サミットで採択された

「持続可能な開発目標」(SDGs)。

2016～2030年の15年間で17の目標の達成を目指す。

そのために、学際的なサステナビリティ研究が

果たす役割は何か。2018年9月20日、

国連大学(東京・渋谷)で、本タイトルの下、

多分野の専門家が集まり熱心な議論が行われた。

このイベントは、最先端の

サステナビリティ研究を掲載する

*Nature Sustainability*が、

2018年1月に創刊されたのを機に

企画された。



主催 nature
sustainability

Sustainability
Science

共催



UNITED NATIONS
UNIVERSITY
UNU-IAS

後援



Grand
Challenges
Programme

SPRINGER NATURE

SDGsは多岐にわたっており、目標達成にはさまざまな分野の連携が不可欠である。イベントは、生態学・環境学の科学者、国際法が専門の法学者、持続可能な開発に関わるシンクタンクの政治学者、国内外の地域環境計画に携わる研究者、世界各地の教育政策の実践と評価を専門とする研究者、自治体の首長が参加し、2部構成で、それぞれ基調講演とパネルディスカッションが行われた。

■ 政治と科学が担う役割

第1部では、*Nature Sustainability*のアソシエイト・エディター、アイオラ・ザバラ氏を司会に、サステナビリティ研究における政治と科学のあり方について討論された。

開会に当たり、ザバラ氏は、「持続可能な社会実現が叫ばれて20年。転換期を迎え、サステナビリティ研究の重要性が高まってきた。そんな中、Springer Natureは、2018年1月に*Nature Sustainability*を創刊した」と語った。その上で「サステナビリティ研究には工学や自然科学だけでなく、社会科学など多分野の科学が貢献している」と、統合的な科学であるサステナビリティ研究の現状について展望した。

最初に登壇したのは、東京大学サステナビリティ学連携研究機構（IR3S）の機構長、武内和彦^{たけうちかずひこ}特任教授。Springer Natureが発行するもう1つのサステナビリティ研究の学術誌、*Sustainability Science*の編集長を2006年から務める。

武内氏は、サステナビリティ学は、課題解決型の科学であり、「研究者が最初から可能な限り社会と議論することが必要」と強調した。指数関数的に論文が増える中、「研究のコアの分野を環境システム、特に社会・生態システムが占めるようになり、エネルギー、経済、健康も重要になってきた」と、研究内容の質的な変化を語った。

また、自然と人間の関係も変化が求められていると指摘。かつては小規模に密接だった関係が、都市化やグローバル化によって分離されてしまった。しかし、持続可能な開発には両者が再び歩み寄ることが必要で、「バイオマス、風力、水力など、集中型ではなく分散型の資源を活用しなくてはならない」と述べた。

学術界にも変化が生まれ、2018年3月に国際科学会議（ICSU）が国際社会科学評議会（ISSC）と合併して国際学術会議（ISC）が誕生したことは、「自然科学と社会科学が統合した歴史的な快挙であり、学問分野の壁、学界と社会の壁を打ち破った」と言う。

さらにSDGs達成には、17の目標とその達成のための169のターゲットのつながり（関連性）を理解することが重要だと訴えた。

続いて、名古屋大学大学院教授、高村ゆかり^{たかむら}氏が基調講演を行った。まず、気候変動に関する政策の歩みを概観。1988年にIPCCが発足し、その評価報告書をもとに、92年に気候変動枠組み条約、97年に京都議定書、2015年にパリ協定が採択された。このように科学と政策は相





- 1 武内 和彦 氏 (IR3S 機構長・特任教授、IGES 理事長)
- 2 高村 ゆかり 氏 (名古屋大学 大学院環境学研究科 教授)
- 3 エリック・ザスマン 氏 (IGES 持続可能性ガバナンスセンター・リサーチリーダー)
- 4 齊藤 修 氏 (UNU-IAS アカデミックディレクター)
- 5 米原 あき 氏 (東洋大学社会学部 教授)
- 6 泉谷 満寿裕 氏 (石川県珠洲市 市長)
- 7 アイオラ・ザバラ (Nature Sustainability, アソシエイト・エディター)

互に影響し合ってきた。パリ協定の目標は、世界の平均気温の上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保つとともに、1.5℃に抑えるよう努力することだ。高村氏は「現時点での取り組みでは不十分。達成にはイノベーションを加速させる必要がある」と強調した。

次に、国際的投資家や国連などが主導するSBTイニシアチブに言及。これは、2℃目標達成のために科学的な対策を打ち出した企業を認証するものだ。高村氏はこうした流れの背景に、企業の社会的貢献、ブランド戦略、温暖化による流通への懸念、再生可能エネルギー市場へのビジネスチャンスを挙げた。だが、「最も大きいのは、投資家が企業の脱炭素への転換を監視するようになったことだ」と指摘。さらに、「金融機関も企業に低炭素への移行を求めている」と話した。

最後に演壇に立ったのは、IGES持続可能性ガバナンスセンター・リサーチリーダーのエリック・ザスマン氏。ザスマン氏は、SDGsの異なる課題が、どうつながっているか相関性の研究を進めている。IGESでは、その可視化ツールを作成、ホームページで公開している。

ザスマン氏は「気候変動は、大気汚染、公衆衛生と連関している。大事なのは、こうした連関性が政策に影響することだ」と話す。だが、そうした連関性の理解よりも重要なのは、課題解決に関わる政府機関、市民社会、ビジネス、そして学術界の「利害の調整」だと指摘した。その難しさの例として、スリランカで進めるSDGs11「住み続けられるまちづくり」の取り組みを挙げ、「10のターゲットがあり、30の政府省庁と103の機関が関わって

いる。1つの政府機関では調整はできない」と語った。

さらに、利害調整についての概念モデルも構築し、発表。そのモデルを使ったアジア太平洋地域のケーススタディを紹介。こうした利害調整で、どのアクターの関与が必要で、強化すべきかが分かるが、「(解決策は) 国、調整能力などによって異なることもある」と強調した。

■ ボーダレスな協力が必要

続いて行われたパネルディスカッションでは、研究はさまざまな学問分野が協力していくことが大事であり、経験の中で何をアドバイスできるかなどについて議論された。

「学際的な研究を進める上で大切なのは、現場に行き、地元の現状を把握することだ」と指摘したのは武内氏。SDGsの達成には地元の理解が必要で、「そのためにアフリカの現地で農家らとともに、地球温暖化、レジリエンス(回復力)に関するドラマを作った。地べたをはう研究協力 (on the ground research) が大事である」と語った。

ザスマン氏は、「学際的な研究を推進していくには、社会学者はもっと自然科学の論文を読んだ方がいい。また、専門分野外の人に自分の研究分野について教えること、学際的な形で教えることが重要だと思う」と指摘した。

高村氏は、研究の中で喫緊の課題は何か、ニーズがあるのに欠けている分野「ミッシングリンク」はあるのか、と武内氏に質問。まず前者について武内氏は、「私は地域循環・共生型の社会の構築が重要だと思う。ここでいう『循環』には、物質の循環だけでなく、CO₂の循環も含めるべきである」と回答。後者については、「重要な分野

は投資だと提案したい。危機を認識する段階は終わり、今は解決策を見いだす時。民間企業の投資と自治体の取り組みが不可欠である」と語った。

■ ローカルレベルでの取り組み

第2部の司会は、武内氏。SDGsの目標を達成するために、草の根レベルで、どんなことが行われ、何が求められているかについて、専門家や自治体の首長が議論した。

最初に、アフリカで活動する、国連大学サステナビリティ高等研究所の学術研究官、^{さいとうおさむ}齊藤 修氏が登壇した。齊藤氏は、SDGsの各目標のつながりを調べる研究について、「トレードオフを避け、相乗効果を増すことができる」と研究の貢献を強調した。

過去10年間（2008～16）、アフリカのSDGsに関連する研究論文や書籍は増えている。そのトップ3はSDGs5の「ジェンダー」、次いで13の「気候変動」、3番目が1の「貧困」。一方で、OECD（経済協力開発機構）などのアフリカへの経済支援データ約43万件では、SDGs3の「健康」と13の「平和と公正」が多かった。これらの分析とJICA（国際協力機構）側のニーズを踏まえて、SDGs9の「インフラ」と11の「都市」をアフリカでの重点目標とした政策研究プロジェクトを現在進めている。その一環として、2018年8月にはガーナのアクラなどアフリカ3都市でワークショップを開催。アクラでは、IGESの可視化ツールを使い、SDGs 9、11と他の目標とのつながりを明らかにした。「それを踏まえ、ステークホルダーと議論し、産業、経済、社会の観点から20の解決策を見いだした。さらにそれらの解決策の優先順位付けをワークショップ参加者と一緒に行い、その結果としてジェンダーの包摂性、経済インフラ、農業の近代化が上位3つの解決策となった。同様の解決策の特定と優先順位付けをマラウィと南アフリカで実施した」と、齊藤氏は語った。

次に、東洋大学社会学部教授の^{よねはら}米原あき氏が、SDGs達成に不可欠な教育の重要性について講演した。

2000年国連ミレニアム・サミットで採択された、ミレニアム目標（MDGs）に盛り込まれた教育の目標は、初等教育就学率や識字率などの指標を含む。「こうした定量的な指標は比較的评价が容易。一方、SDGs4の教育目標はより定性的で理念的だ。抽象的な目標は、ローカルな概念に翻訳しないと、評価のためのエビデンスが得られない」と強調した。

また、UNESCOが主導するESD（持続可能な開発のための教育）を実践する学校は、ユネスコスクールとして世界182カ国で1万校以上が認証されており、このうち10%近くが日本の学校だ。米原氏は、2015年に日本政府とユネスコが共同で創設したESD賞を受賞した、日本をはじめ、ジンバブエ、ヨルダンなど国内外の事例を紹介。例えば日本の事例について、「岡山市では、学校、自治体、民間組織などが協働し、ESDの活動が市全域で行われた。カフェセッションなどの場では、市民が集的に学ぶ場が設けられていた」と語った。

さらに米原氏は、「教育の評価は難しい。可視化されていない価値がどこにあるのか、科学的かつローカルなアプローチを駆使して価値を可視化し、それを評価し、グッドプラクティスのエビデンスを蓄積していかなければならない。現場の教育者は忙しいし、データ収集、社会調査のスキルや統計分析のスキルも十分ではない。研究者とこうした実践者とのコラボが必要だ」と語った。

続いて、石川県珠州市市長の^{いずみやま すひろ}泉谷満寿裕氏が、自治体としてのさまざまな実践を紹介した。珠州市は、能登半島の最先端に位置する。「地域の魅力を高め、人口減少を食い止めるのが最大の課題」と話す。

珠州市は、2011年の世界農業遺産認定を契機に、生物多様性の活用と保全を図っている。「2007年から、金

学際的な研究を進める上で大切なのは、現場に行き、地元の現状を把握することだ





沢大学とともに里山里海マイスター育成プログラムを始め、観光、農業など多彩な分野のマイスター165人が巣立った」と、泉谷氏は成果を語った。こうした取り組みが認められ、2018年6月には、「SDGs未来都市」に認定された。

さらに、企業、事業所が「大学と連携する中で、販路を拡大したり、商品を開発したり業績を伸ばすことを目的として、2018年10月1日に「能登SDGsラボ」を設立。泉谷氏は、「大学のグローバルネットワークを生かし、経済、人づくり、環境保全と技術開発を組み合わせた取り組みで、持続可能な未来を構築し、人口減少を食い止めたい」と語った。

■ グローバル目標からローカル実践へ

続くパネルディスカッションでは、珠洲市のマイスター育成プログラムについて質問が相次いだ。

齊藤氏は、若い人を動員し、新しいビジネスも生まれているのかと質問。泉谷氏は、「マイスターの中には、ゲストハウスや民泊などの宿泊施設、レストランやスイーツの販売などに携わる人々がおり、さまざまなビジネス機会が生まれている。最近では、佐渡から飛んでくるトキの餌場になるように、田んぼの農薬を減らしたコメ作りをやっているという動きがある。そうした付加価値を付けて、販売しようとしている」と答えた。

米原氏からは、学校教育ではどうなっているのかという質問があった。泉谷氏は、「学校現場では、潜在的な珠洲の魅力を感じてもらうために、小中高生らが生物多様性や生き物の調査をし、未来をどうすべきかを発表している。内容の質も相当高い」と回答。

世界農業遺産やSDGs未来都市への取り組みによって

住民の帰属意識が変わったのか、と尋ねたのは武内氏。これに対し泉谷氏は、「世界遺産、未来都市に選出されたことは、誇らしい。ただそれが魅力につながっているか、ビジネスにつながっているかは、これからだ」と語った。

会場からは、サステナビリティ学は自治体の活動に貢献できるのかと質問が続いた。泉谷氏は、「金沢大との連携は人材育成を目標に始まったが、SDGsが加わり、今後は、環境、社会、経済をどうつなげていくか、新たな付加価値の創出のために、産官学の連携はもとより、金融機関の資金との連携も重要だ」と語った。

その他、SDGsが2030年までに達成できないという失敗をサステナビリティ研究によって避けられるか、という質問が会場から寄せられた。齊藤氏は、「SDGsはグローバルにデザインされたもので、そのダウンスケーリング、すなわちローカルな文脈にどのように適用していくかが喫緊の課題である。(アフリカでの実践のように)ステークホルダーと議論し、どれが、解決法なのか議論することが大事」と語った。米原氏は、「評価がカギ。SDGsは、達成の評価が非常に難しい。MDGsは、就学率などのシーリングのある指標で達成度が評価できた。しかし、SDGsの指標はノンシーリングなものも多く、例えば、グローバルシチズンシップやジェンダーの質が100%というのはどういう意味なのか、定義するのは容易ではない。研究によって、この困難な状況を、オペレーション可能な『指標』に読み変えることができると考えている。それによって解決法を探し出せる」と指摘した。

■ 出版社として

第2部の終わりに武内氏は、「サステナビリティ学は最先端の課題に取り組むことは言うまでもなく、統合的な側面、社会的な側面に焦点を当てることも重要。*Sustainability Science*の編集長として、*Nature Sustainability*の創刊をうれしく思っている。2つの雑誌が連携できることを望んでいる」と語った。

そして最後にザバラ氏が、今回の議論はSpringer Natureが2017年11月に始めた「グランドチャレンジプログラム」の一環であると総括。このプログラムは、各国の政策決定者に、(*Nature Sustainability*などの)出版を通じて科学的成果を提示することを目標としており、持続可能な開発目標(SDGs)達成もその重要な分野の1つであると述べ、今回のイベントは終幕となった。

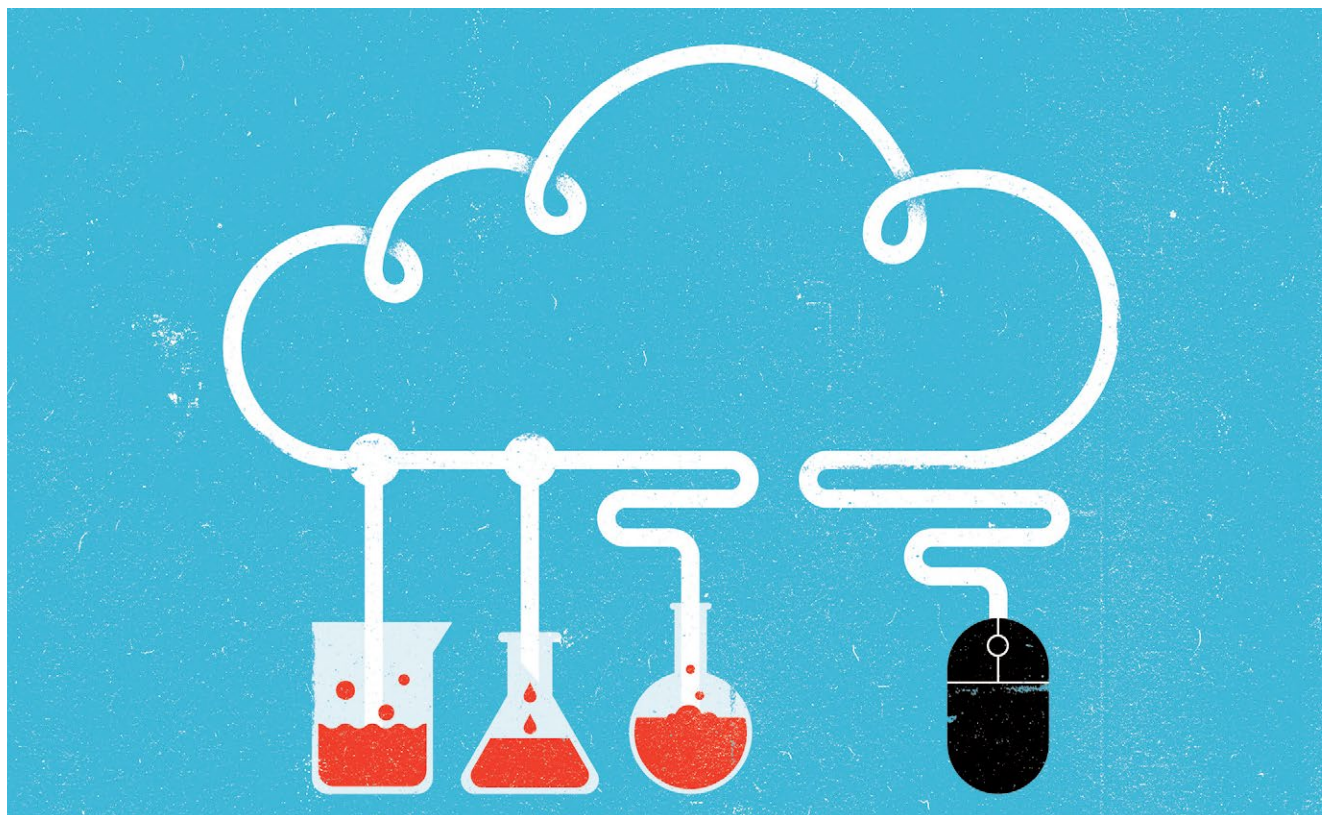


ILLUSTRATION BY THE PROJECT TWINS

クラウドコンピューティング入門

科学者たちを引き付けているクラウドコンピューティング。その始め方について、経験者が助言する。

2015年2月、ブラウン大学（米国ロードアイランド州プロビデンス）のコンピューター科学者Mark Howisonは、24種のクダクラゲ（クラゲやサンゴと近縁の海洋動物）から抽出したRNAを分析する準備をしていた。けれども大学の高性能コンピューターはメンテナンスを終えたばかりで、その信頼度はまだ十分には回復していなかった。そこでHowisonはアマゾンのAmazon EC2を起動し、未使用の計算能力があるときに入札者に割安な価格で提供さ

れる「スポットインスタンス」に入札した。約2時間の調整の後、彼は自分のソフトウェアを走らせる仮想マシンを構成し、クダクラゲの塩基配列をアップロードした。分析は14時間後に終わり、費用は61ドル（約6700円）だった。

近年、インターネットを利用してアマゾン、グーグル、マイクロソフトなどの商用プロバイダーから計算資源を借りるHowisonのような研究者が増えている。それは、緊急時のバックアップのためだけではない。米国立科学財

団（NSF；バージニア州アーリントン）の後援により2013年に作成された報告書で示されたように、クラウドは研究室に、他の方法では手が届かないような計算能力へのアクセスを提供しているからだ（go.nature.com/mxh4xy 参照）。例えば、地震発生後にセンサーのデータをくまなくチェックする地震学者や、宇宙望遠鏡からの観測データを処理する天文学者など、一時的に莫大な計算能力が必要な科学者たちは、常設のハードウェアに投資しなくても、

必要に応じて追加の計算能力を借りることで対応できるようになる。

科学者は、クラウド環境を自身の要件に合わせて設定することができる。つまりクラウドコンピューティングは、最先端のスーパーコンピューターやマシン間の高速通信を必要とするような分析を扱うことはできないが、デスクトップコンピューターで実行するには大き過ぎ、高性能スーパーコンピューターを利用するほどでもないようなプロジェクトにはぴったりだ。また、オンラインでデータやソフトウェア、設定の仮想スナップショットを共有することで、チームでの共同作業がやりやすくなる。

とはいえ、科学をクラウドに移行する作業は容易ではない。「技術的な予備知識が必要です。科学者のようなエンドユーザーのためにデザインされたものではありませんから」とHowisonは言う。ハードルは高いが、自分の研究グループや研究室のためにクラウド環境を設定したいと考えている科学者のために、ルートをいくつか紹介しよう。

DIY ガイド

ほとんどのクラウドプラットフォームは、ユーザーに対し、基礎的なコンピューティングスキルを要請している。コマンドラインでの作業の仕方や、オペレーティングシステムやファイル構造など、基礎を身に付けたら、クラウドコンピューティングに挑戦してみよう。

科学者向けクラウドの中で最もユーザーフレンドリーなのはAtmosphereというプラットフォームだろうと、ピュージェットサウンド大学（米国ワシントン州タコマ）の植物生物学者Andreas Madlungは言う。Atmosphereは、NSFが資金を提供し、米国の3つの大学とコールド・スプリング・ハーバー研

究所（米国ニューヨーク州ロングアイランド）が中心となって運営するiPlant Collaborativeという共同サイバーインフラプロジェクトの一環として作られた。iPlantは2008年の設立以来、植物科学コミュニティを対象としてクラウド上でのソフトウェアの共有や無料の分析サービスを提供してきたが、2015年にCyVerseと改称し、その対象を生命科学全般に拡大した。

科学者を念頭に置いてデザインされたCyVerseのインターフェースには、あらかじめ組み込まれたソフトウェアと、練習用のデータセットと、ユーザー同士が助け合って問題を解決するためのディスカッション・フォーラムが用意されている。学部生にバイオインフォマティクスの授業をしているMadlungは、クラウドコンピューティングを教える際、最初にUnixオペレーティングシステムを紹介し、次に学生たちに、その知識を活用してAtmosphere上のRNA配列データを分析させている。

CyVerseに登録した人は自動的に1カ月に約168時間相当の処理時間を与えられ、必要ならもっと要求することができる。ユーザーは自分が必要とするソフトウェアを仮想マシンに追加することができる。そのジョブが標準的な装置で扱うには大き過ぎる場合には、テキサス大学オースティン校のテキサス先端計算センター（TACC；米国）のスーパーコンピューターにタスクがオフロードされる（CyVerseはTACCにおいて保証された割り当てを持っている）。

カリフォルニア大学デービス校（米国）の生物学者Mike Covingtonが研究室での計算をクラウドで行うようになったきっかけは、当時、オーバーロード（過負荷）のせいで研究室のサーバーがクラッシュを繰り返していたことだっ

た。彼はクラウドを利用するようになったのと同時に、自分の仮想マシンのコピー（「イメージ」と呼ぶ）も作り、彼の共同研究者や、同じクラウドを利用する任意のユーザーがログインして、同じソフトウェアやデータ、設定にアクセスできるようにした。「私が数時間かけて設定したde novoゲノムアセンブリ（短いDNA断片から完全長配列を再構築すること）に最適な仮想マシンを、自身のデータでde novoアセンブリを行いたいと思っている世界中の科学者に、迅速かつ容易に提供できるわけです」とCovingtonは言う。

こうした仮想スナップショットは計算を必要とするプロジェクトの標準になるかもしれない。例えば、ある論文に書かれていた微生物ゲノム分析の結果を再現したいと思う人がいたら、アマゾンに計算時間分の費用を支払うだけで、クラウド上にある論文著者の仮想マシンのスナップショットにアクセスできるのだ（B.Ragan-Kelley et al. *ISME J.* 7, 461-464; 2013）。

クラウドを選ぶ

選択すべきクラウドが決まっている研究者もいる。例えば、欧州原子核共同研究機構（CERN；スイス・ジュネーブ近郊）の科学者たちは2013年からソフトウェアプラットフォームOpenStack上の巨大な内部クラウドにアクセスしている。コーネル大学（米国ニューヨーク州イサカ）やノートルダム大学（米国インディアナ州）など、いくつかの学術研究機関もコンピューティングクラウドを開発した。ノートルダム大学など一部の学術研究機関は、ユーザーのためにクラウドサービスを設定・管理する多国籍企業ラックススペース（Rackspace；米国テキサス州サンアントニオ）のような

クラウドで困っている人のためのガイド

研究者向けクラウド

最大規模の商用プロバイダーとしてはAmazon EC2、Microsoft Azure、Google Cloud Platformがある。その他のサービスとしては、研究機関向けとして始まったTerminal.com、NSFが後援するCyVerseのAtmosphere、CoCalc（旧SageMathCloud）、コーネル大学のRed Cloud、クラウドアプリの迅速なデプロイで知られるDigitalOcean、Rackspaceがある。ラックススペース社は、NASAと共同開発したオープンソースクラウド基盤ソフトウェアOpenStackを利用してクラウドを設定する企業である。

クラウドを活用する人に便利なリソース

マサチューセッツ工科大学（米国ケンブリッジ）が開発したStarClusterは、アマゾンのプラットフォーム上での研究用の仮想コンピューティングクラスターの構築に役立つツールである。Dockerは、研究者が分析に使用したコードやコンピューティング環境やデータのスナップショットを共有できるようにするオープンソースプラットフォームである。Project Jupyterは共有可能なノートブックで、データやコードや分析へのアクセスを容易にし、双方向的にする（H.Shen, *Nature* **515**,151–152; 2014）。アルゴンヌ国立研究所（米国イリノイ州）などが開発したNimbusは、通常のコンピューティングクラスターを遠隔ユーザーがアクセスできるクラウドシステムに変換するのに役立つ。

企業にクラウドをアウトソーシングしている。けれども、学内クラウドを当てにできない大学の研究者は、数多くの選択肢の中からクラウドを選ぶという冒険をしなければならず、それが実に悩ましい（「クラウドで困っている人のためのガイド」参照）。クラウドシステムの設定はさまざま、あるプロバイダーのシステムに精通していても、他のプロバイダーに容易に移行できるとはかぎらない。

ブラウン大学でHowisonと研究している進化生物学者のCasey Dunnは、学生の訓練に商用プラットフォームを使っている。「別の所でポストドクになっても、自分の研究室を構えたときにも、アマゾンにはログインできませんからね」と彼は言う。

スタンフォード大学ゲノミクス・オーダーメイド医療研究所（米国カリフォルニア州）のバイオインフォマティクス部門長であるSomalee Dattaは、同センターの膨大な量のゲノミクスデータや必要な計算能力を補うために、大学で利用できるサーバーだけに依存せずに、グーグルのクラウドプラットフォームも利用している。彼女がグーグルを選んだ理由は、グーグルの開発者がゲノミクス研究者向けのツールを積極的に作っていることや、グーグルがヘルスケア研究へ関心を示していること、そして何より価格が適正なことだという。

クラウドの懸念

Dattaらにとって、クラウドコンピュー

ティングを巡る主要な問題の1つはセキュリティだ。「非常に心配です。ハッカーはどこに価値があるかを理解していて、そこを狙ってくるからです」と彼女は言う。それでもDattaは、クラウドの安全性は、他のコンピューター・ネットワークと同程度だと考えている。例えば、大学のクラウドシステムの堅固さは大学のファイアウォールと同程度である。「私が個人もしくは小規模な大学・企業で仕事をしていたら、グーグルのクラウドの方が安全と感じるでしょう」とDattaは言う（なお、スタンフォード大学はセキュリティの監視のために独自にエンジニアを数人置いている）。重要なデータを扱っている人は、データをインターネットから完全に遠ざけておく方がよい。

これからクラウドコンピューティングに挑戦しようとする研究者にとって、重要な問題がもう1つある。自分がどのレベルの技術的サポートを必要とするかである。どのクラウドプロバイダーもトレーニングやチュートリアルを提供しているが、学内クラウドがある大学の方が専門のサポートスタッフがいることが多い。

ラックススペース社の副社長Darrin Hansonは、こうした困難にもかかわらず、クラウドコンピューティングは科学者をますます魅了するようになっていくという。「少し前までは開発の最前線にいる人々が大半でした。今は、新しい技術を利用し始める人々が殺到しています」。

（翻訳：三枝小夜子）

How to catch a cloud

Vol. 522 (115–116) | 2015.6.4

Nadia Drake

宇宙ゴミ問題に打つ手はあるか

地球周回軌道にはゾンビ衛星やロケットの残骸、衝突によって生じた破片など、
2万個以上の人工物があり、大きな交通リスクとなっている。
研究者らは、宇宙ゴミがもたらす脅威を減じる方法を模索中だ。

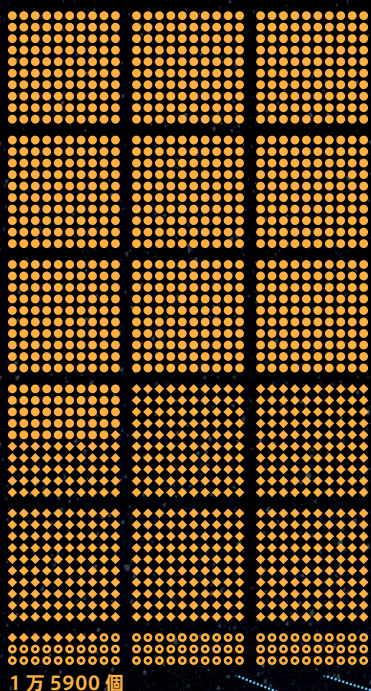
地球周回軌道の混雑

運用中および運用終了後の人工衛星やその他の人工のゴミ（ロケットの部品など）を追跡しているカタログによると、現在 2 万個以上の物体が地球を周回しているという。宇宙ゴミ問題は急激に深刻化している。2017 年には、すでに混み合っている空に 1800 個以上の新たな物体が加わった。

軌道上の物体の種類

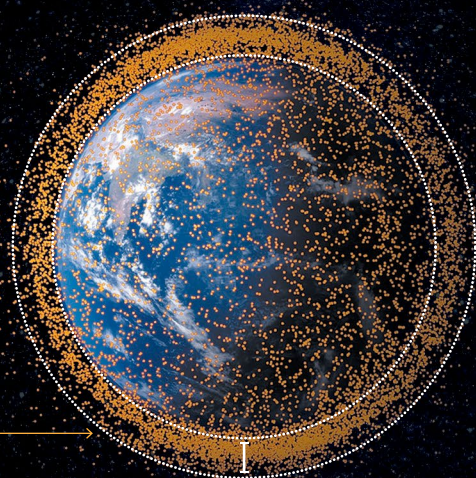
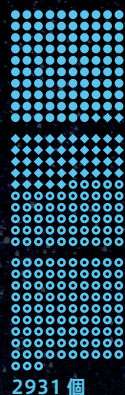
- = 10× ベイロード関連
- ◆ = 10× ロケット関連
- = 10× 不明

低軌道：高度 2000km まで
ここでカウントされる全ての物体が低軌道にとどまっているわけではなく、低軌道を通過して地球からもっと離れるものもある。

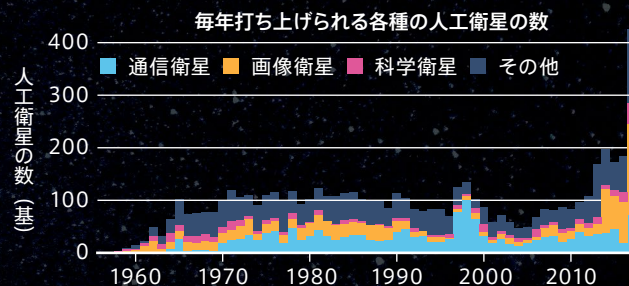
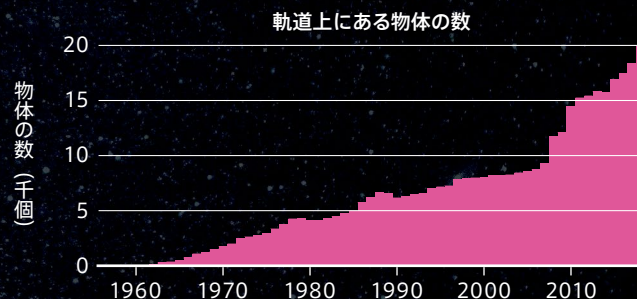


中軌道：高度 2000 ~ 3万 5000km

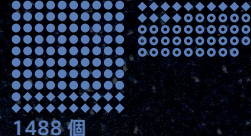
静止軌道：高度約 3万 5000km
一部の通信衛星と気象衛星が利用する軌道。このカウントには静止軌道を通過する物体も含まれている。



地球周囲軌道を行き交う物体を NASA が可視化したもの。



その他の軌道 中軌道を含む



2018年7月2日月曜日、地球上の氷を監視する欧州宇宙機関 (ESA) の観測衛星「クライオサット2」(CryoSat-2) は、平常どおり高度700kmの軌道を周回していた。けれどもその日、ESAのミッションコントローラーは1つの問題に気付いた。制御不能の1個の宇宙ゴミが、1億4000万ユーロ (約180億円) の人工衛星に接近しつつあることが分かったのだ。

技術者たちが衛星とゴミの経路の追跡を開始したところ、時間の経過とともに衝突の確率が徐々に上がっていったため、ミッションコントローラーは回避行動を余儀なくされた。7月9日、ESAはクライオサット2のスラスターに点火し、より高い軌道に遷移させた。それからわずか50分後、ゴミは秒速4.1kmの猛スピードで、衛星があった場所を通過していった。

このような軌道制御は、年々、日常的なものになってきている。地球の周りの宇宙空間がどんどん混雑してきているからだ。2017年には、営利会社、各国の国防省やその他の省庁、アマチュアなどが、400基以上の人工衛星を軌道に打ち上げた。これは、2000～2010年の年間平均の4倍以上の数である。現在、ボーイング社、ワンウェブ社 (OneWeb)、スペースX社などの企業が数年以内に数百～数千基の通信衛星の打ち上げを計画しているため、これらの「メガコンステレーション」計画が順調に進めば、衛星の数はさらに急増する可能性がある。計画中の衛星が全て打ち上げられたとしたら、その数は、人類が宇宙開発史の中で打ち上げてきた衛星の数とほぼ同じになる。

軌道上を行き交うこうした物体の全てが大惨事を引き起こし得る。2009年には、運用中の米国の商業衛星イリジウム33 (Iridium 33) が、すでに運用を終了していたロシアの通信衛星コスモス2251 (Cosmos-2251) と衝突する事故が発生した。この衝突により新たに生じた数千個の破片は、低軌道 (高度2000kmまでの軌道) にある他の衛星に対する脅威となっている。運用中の人工衛星から太陽電池パネルの破片、ロケットの部品に至るまで、現在、地球の周回軌道には約2万個の人工物が存在している。しかしオペレーターは、衝突が予想される全ての人工物を回避するわけにはいかない。人工衛星を動かせば、そのたびに本来の仕事に利用できるはずの時間と燃料を消費してしまうからだ。

宇宙ゴミへの懸念は人工衛星時代の幕開けの頃からあっ

たが、近年の軌道上の物体数の増加があまりにも急激であるため、研究者たちは新しい対処法を模索するようになった。いくつかの研究チームは、今後ますます混雑してゆく宇宙で、人工衛星のオペレーターがより効率良く仕事できるように、軌道上にある物体を評価する手法の改良に取り組んでいる。軌道上にある全ての人工物体に関する信頼性の高い情報など、膨大な量のデータの収集に着手した研究者らもいる。また別の研究者らは、宇宙ゴミの分類法を開発している。具体的には、物体の形状や大きさなどの特性を測定する方法を開発して、人工衛星のオペレーターが、接近してくる物体をどの程度心配すべきか判断できるようにすることを目指している。運用を終えた人工衛星が宇宙空間から素早く大気中に突入して燃え尽きよう、衛星を遷移させる特殊な軌道を探す研究者もいる。

宇宙ゴミを放置しておくわけにはいかない、と多くの人が言う。宇宙でほんの数回の制御不能の衝突が発生すれば、カスケード的に破片が生じて收拾がつかなくなり、地球周辺の宇宙空間を利用できなくなる恐れがある。パデュー大学 (米国インディアナ州ウェストラファイエット) のアストロダイナミクス (宇宙での人工物体の運動に関する研究) の専門家Carolyn Fruehは、「この調子で衛星の打ち上げが続けば、取り返しがつかなくなってしまう」と言う。

汚れる軌道

1960年代に米軍が地球周回軌道に数百万本の銅製の小さな針をまくという計画を発表した当初から、天文学者たちは宇宙ゴミに対する懸念を表明していた。針の散布は、高高度核実験によって電離層 (電波を反射する大気の層で、長距離通信を可能にしている) が破壊された場合でも電波通信を可能にするために考案された。空軍は1963年に実際に軌道上で針を散布し、電波を反射する人工の電離層を形成することに成功した。ほとんどの針はその後3年で自然に軌道から外れたが、宇宙「汚染」への懸念などにより、プロジェクトは終了した。

フィラデルフィア (米国ペンシルベニア州) 在住の科学史家で、米国歴史学会と米航空宇宙局 (NASA) のフェローであるLisa Ruth Randは、この出来事について、人々が宇宙のことを「きれいに保つべき風景」として見るようになったごく初期の事例だと言う。

1957年に旧ソ連が人類初の人工衛星スプートニクを打ち上げて以来、軌道上の人工物の数は急増し、1970年には約2000個、2000年には約7500個、現在は約2万個になっている。軌道上の宇宙ゴミの数は2007年と2009年に大きく跳ね上がった。1回目は中国政府がミサイルの試験で自国の人工衛星を1基破壊した時で、2回目はイリジウムとコスモスの衝突である。ESAのスペースデブリ対策室（ドイツ・ダルムシュタット）の室長Holger Kragは、それぞれの事象で新たに数千個の破片が生じていて、ESAが毎年20回以上行っている人工衛星の軌道制御の約半分が、これらの破片に対処するためのものであるという。

現在、米軍は宇宙ゴミの衝突に関する警報を1日平均21件発表している。2019年には、空軍が太平洋のクワジャリン島に建設した強力なレーダー施設の稼働が予定されている。現在の施設で検知できるのは低軌道にある10cmの物体までだが、新しい施設ではもっと小さな物体も検知可能になることから、米軍が追跡する物体の数は5倍に増える可能性がある。

いくら軌道上の物体を監視する能力を向上させたとしても、総数自体が同時に増えてゆく。そのため、宇宙進出をする全ての企業や各国政府、その他個人は、協力して新しい回避法を編み出し、共通の脅威に立ち向かわなければならない。2000年代以降、国際機関間スペースデブリ調整会議（IADC）などの国際グループは、宇宙の持続可能性を実現するための指針を策定してきた。指針の中には、耐用年数を過ぎた人工衛星は、爆発につながる恐れのある残存燃料やその他の高圧物質を投棄することなどが含まれている。政府間グループは、人工衛星が25年以内に大気中で燃え尽きるか分解するように高度を下げることも推奨している。

けれどもKragによると、これまでに「25年ガイドライン」を受け入れたミッションは半数程度にとどまっているという。計画されているメガコンステレーションのオペレーターたちは責任を持って衛星を運用すると言っているが、Kragは、彼らの意気込みに反して問題が悪化する可能性を危惧している。「失敗したり、破産したりした場合、彼らはどうするつもりなのでしょう？ 恐らく宇宙に残された人工衛星の除去費用を出すことはないでしょう」と彼は言う。

宇宙の交通巡査

理論的には、地球周回軌道には十分な空間があり、どの人工衛星も他の物体に接近することなく安全に飛行することができるはずだ。一部の科学者は、全ての宇宙ゴミの位置を高い精度で知ることによってこの問題を解決しようとして取り組んでいる。宇宙ゴミの位置が厳密に分かっていれば、衝突を回避するために行われている衛星の軌道制御の多くが不要になるはずだ。連邦出資研究開発センター「エアロスペース・コーポレーション社」（米国カリフォルニア州エル・セグンド）の宇宙ゴミの専門家Marlon Sorgeは、「全ての位置が厳密に分かっていれば、問題はほとんどありません」と言う。

この分野は道路や空の交通管理に似ているため「宇宙交通管理」と呼ばれる。テキサス大学オースティン校のアストロダイナミクスの専門家Moriba Jahは、空港の忙しい1日を想像してみてほしいと言う。空には飛行機が数珠つなぎになっていて、慎重に計画された手順に従って短い間隔で離着陸している。航空交通管制官は飛行機の位置を1mの精度で把握している。

宇宙ゴミについては同じことは言えない。軌道にある全ての物体が知られているわけではなく、データベースに記録された物体の追跡精度にはばらつきがある。その上、既知の全ての宇宙ゴミの軌道を正確に列挙した信頼できるカタログは存在しない。

Jahはこの状況を、自分が開発したウェブ上のデータベースASTRIAGraphを用いて実際に示してくれた。ASTRIAGraphは、米国やロシアの政府が維持するカタログなど、複数の情報源に基づいて宇宙にある物体の位置を可視化している。物体の識別子をASTRIAGraphに入力すると、その物体の軌道が紫色の線で描き出される。

しかし、いくつかの物体についてはこれではうまくいかない。その1つが、2007年に打ち上げられたロシアのロケットで、識別子32280を持つ物体だ。Jahがこの数字を入力すると、ASTRIAGraphは2本の紫色の線を描いた。米国とロシアの情報源が、同じ物体について、全く異なる2つの軌道を掲載しているからだ。Jahは、第三の情報源により正確な位置を照合できない限り、どちらが正しいかを知ることはほとんど不可能だと言う。

現在ASTRIAGraphは、宇宙の物体を追跡している主

な情報源のうち、一部しか取り込んでいない。米軍のカタログは、公開されているデータベースの中では最大のものだが、ほぼ確実に、機密扱いの衛星に関する情報は除外されている。同様にロシア政府も、多くのデータを非公開にしている。ここ数年で商用の宇宙物体追跡データベースがいくつか登場しているが、そのほとんどがデータを公開していない。

Jahは自分を宇宙環境保護主義者と呼ぶ。「私は宇宙を安全に活動できる場所にしたいのです。未来の世代が自由に利用できるように」。そうなるまでには、宇宙コミュニティーは、あらゆる宇宙飛行オペレーターが共有資源を汚染する「共有地の悲劇（共有の放牧地でそれぞれの放牧者が自分の利益を最大化しようとする、家畜が増え過ぎて放牧地が荒廃し、結局は共倒れになってしまうこと）」を経験することになるだろう。

宇宙環境保護主義者たちは、少なくとも米国の宇宙政策については前進しつつある。Jahは2017年、連邦議会で宇宙交通管理について証言した。彼を招致したテキサス州選出の共和党のテッド・クルーズ上院議員は、2018年7月に宇宙規制法案を共同で提出した。6月にはドナルド・トランプ大統領も、米国の公的な宇宙ゴミカタログの管理責任を国防省からそれ以外の省庁（恐らく商務省）に移管することを含む、宇宙政策に関する大統領令に署名した。

宇宙政策に関する大統領令は、米国政府の最高レベルで宇宙ゴミについて話し合う、めったにない機会である。いくつかの人工衛星を所有・運用しているマクサ・テクノロジーズ社（Maxar Technologies；米国コロラド州ウェストミンスター）の規制・政策・政府契約部長のMike Goldは、「私たちがこの問題について真剣に話し合うのはこれが初めてです」と言う。

軌道を周回する死者

地球の周りの宇宙空間はゾンビだらけだ。軌道上にある全ての物体の約95%が機能していない人工衛星もしくはその破片である。運用中の人工衛星の衝突進路に物体があるという警報が出たとき、オペレーターが飛来する破片がどのくらい危険かを知ることは有益だろう。「軌道上の物体がさらに増えるのに、現在のような不確実な情報

しかなかったら、ひっきりなしに警報が出てしまいます」とFruehは言う（ちなみに微小隕石は別の脅威であり、追跡のしようがない）。

迫り来る衝突のリスクを評価するためには、人工衛星のオペレーターは、その物体が何であるかを知る必要があるが、追跡カタログに掲載されている物体には、そうした情報がほとんどないものが多い。このような場合、軌道上の物体を追跡している軍やその他の機関は、衝突予想時刻までの限られた時間の中で、望遠鏡を使って手掛かりを収集する。

Fruehらは空軍と協力して、軌道上の物体についてはほとんど何も分かっているなくてもその詳細を迅速に解明できるような手法を開発中だ。例えば、物体が頭上を通過する際に太陽光をどのように反射するかを調べることで、それが回転しているか安定しているかを推論できる。これは、その物体が操作可能なものかどうかを知る手掛かりとなる。彼女のチームは物体の特性を評価するプロセスを高速化する機械学習アルゴリズムの実験も行っていて、2018年9月14日にハワイのマウイ島で開催された宇宙監視技術に関する会合で、この研究について発表した。

軌道を周回する物体が何からできているかが分かれば、その脅威を減らす方法はいくつか考えられる。SF風の提案としては、磁石を使って宇宙ゴミを掃除したり、レー

NASA



国際宇宙ステーション（ISS）が2012年に放出した小型人工衛星「キューブサット」。

ザーを使って軌道上の物体を消したり進路を変えたりする方法がある。9月18日には、RemoveDEBRISというプロジェクトを進めるサリー大学（英国ギルドフォード）の研究者らが、宇宙空間で網を使って試験衛星を捕獲する実験を成功させた。プロジェクトの最終的な目標は、捕まえた人工衛星を大気圏に再突入する軌道に投入することだ。

けれども、軌道上にある物体の多さを考えると、宇宙ゴミをこうした能動的なアプローチで掃除することは、長い目で見ると現実的でないかもしれない。一部の専門家は、受動的なアプローチこそが宇宙ゴミを減らす最善の方法だと考えている。このアプローチでは、太陽と月の重力の共鳴を利用して人工衛星を破壊の経路に移動させる。アストロダイナミクスの専門家であるアリゾナ大学（米国トゥーソン）のAaron Rosengrenは、その方法を開発中だ。

Rosengrenが最初にこの着想を得たのは、中軌道にある人工衛星がどうなるかを調べていた時のことだった。こうした人工衛星は、低軌道の終わりの高度2000kmから静止軌道が始まる高度3万5000kmまでの任意の高度を運動する。

低軌道の人工衛星は大気圏に再突入させて破棄することができるし、それほど混雑していない静止軌道の人工衛星のほとんどは、他の物体と絶対に相互作用しない「墓場」軌道に安置することができる。けれども中軌道では、人工衛星の軌跡は重力共鳴のため長期にわたって不安定化することがある。

人工衛星のオペレーターがこの現象を利用できる可能性を示唆する初期のヒントは、ESAが2002年に打ち上げたγ線宇宙望遠鏡インテグラル（INTEGRAL）からもたらされた。インテグラルは低軌道から中軌道を経て静止軌道まで、長く引き伸ばされた軌道を運動する。そのままならインテグラルは100年以上宇宙にとどまるはずだったが、ESAは2015年にその軌道を微調整することを決めた。ミッションコントローラーはインテグラルのスラスターを数回小さく燃焼させて、重力共鳴の影響を受ける経路に置いた。これにより、インテグラルは数十年後ではなく2029年には大気圏に再突入することになった。

2016年、Rosengrenとフランスとイタリアの共同研究者からなるチームは、中軌道にある物体の振る舞いを決定する、軌道共鳴の高密度の網の存在を示した（J. Daquin et al. *Celest. Mech. Dyn. Astr.* **124**, 335–366; 2016）。

Rosengrenは、これが宇宙ゴミの問題を解決するのではないかと考えている。この共鳴の網の中には、中軌道ではなく直接大気圏内に向かう経路がある。オペレーターは、これらの経路を利用して人工衛星を直接大気圏に突入させることができる。「私たちはこれを『共鳴と不安定を利用した受動的廃棄』と呼んでいます」とRosengrenは言う。「もっと気の利いた名前が必要ですね」。

同様のコンセプトは、以前にも他の研究者によって検討されたことがあるが、Rosengrenはこれを主流にしたいと考えている。「宇宙ゴミに関する新しい考え方です」と彼は言う。

人工衛星を宇宙ゴミの高速廃棄経路に乗せるのは、それほど難しくないかもしれない。Rosengrenらは2018年7月にパサデナ（米国カリフォルニア州）で開催された宇宙学会で、米国の軌道上地球物理観測衛星（OGO）に関する1960年代からの分析結果を報告した。科学者たちは、打ち上げの日時をわずか15分変えただけでも、衛星が軌道上にとどまれる期間は大きく変わってくることを見いだした。このような情報は、打ち上げに最適な時刻の計算に役立てることができる。

人工衛星のオペレーターは、クライオサット2の場合のように先を見越して行動することで、将来の問題を大きく減らすことができる。ESAが7月初旬に回避行動を取ることを決めた時、エンジニアたちは緊急に招集されて週末も休まず軌道制御の準備に追われた。ESAの宇宙ゴミ担当の技術者Vitali Braunによると、その後、宇宙ゴミをやり過ぎた衛星を通常の軌道に戻すのにも数日かかったという。

警報が止むことはない。その後の数週間、ESAのミッションコントローラーは宇宙ゴミを避けるためにさまざまな衛星を6回以上移動させなければならなかった。2018年8月23日には、打ち上げからまだ4カ月のセンチネル3B（Sentinel-3B）衛星が、初めて宇宙ゴミを回避する動きをした。

（翻訳：三枝小夜子）

The quest to conquer Earth's space junk problem

Vol. 561 (24–26) | 2018.9.6

Alexandra Witze

（米国コロラド州ボルダー在住のNature記者）

浸透性農薬の 根深い問題

生態学

スルホキシミン系の農薬への曝露^{ばくろ}が、マルハナバチのコロニーに重大な悪影響を与えることが示された。この知見は、ハチを殺虫剤にさらすリスクへの懸念がネオニコチノイド類のみに限定されるべきではないことを示唆している。

農業の集約化に伴い、我々は農薬に大きく依存するようになった。中でも殺虫剤は、害虫による作物の被害を抑えるのに有用だが、その影響は益虫にも及ぶことがあり、農家が頼りにしている益虫の害虫防除能力や花粉媒介能力¹を低下させてしまう可能性がある。実際、殺虫剤使用の増加は、花粉媒介昆虫の世界的な減少と関連付けられている要因の1つである²。特に、「ネオニコチノイド類」と総称される、世界で最も広く使用されている殺虫剤は、ハナバチに対して深刻な悪影響を及ぼすことが明らかになっており、昨今ニュースでも大きく取り上げられている。今回、ロンドン大学ロイヤル・ホロウェイ校（英国サリー）のHarry Siviterら³は、ネオニコチノイド類の後継品と目されているスルホキシミン系殺虫剤「スルホキサフロル」もまた、重要な花粉媒介昆虫であるマルハナバチに対して深刻な影響を及ぼすことを明らかにし、*Nature* 2018年9月6日号109ページに報告した。

花粉媒介昆虫がネオニコチノイド系殺虫剤の施用された植物で採餌を行うと、採餌個体はもちろん、一部のハナバチ種ではその個体が属するコロニーの幼虫も、花粉

や花蜜を摂取するたびに少量の殺虫剤にさらされることになる^{4,5}。ハナバチは通常、ネオニコチノイド類への慢性的曝露で死ぬことはないが、学習や採餌などの広範な行動が障害されたり⁴⁻⁸、営巣成功率やコロニーの発達、生殖に悪影響が及んだり⁷⁻¹²、花粉媒介能力が低下したり¹³といった亜致死的な影響を受けることがある。そのため、欧州をはじめ世界の一部の地域では、ネオニコチノイド類の使用に対して厳しい規制が導入されている。こうした規制は、ハナバチの健康を考えれば朗報といえるが、それは、ネオニコチノイド類に代わる殺虫剤がより害の少ないものである場合に限られるだろう。

ネオニコチノイド類の後継品候補の1つに、スルホキシミン系の殺虫剤がある¹⁴。この殺虫剤もネオニコチノイド類と同様、施用部分から吸収されて植物体全身に浸透移行することで殺虫力を発揮する「浸透性殺虫剤」だ。スルホキシミン類はすでに、世界各地で使用が認可、もしくは認可が検討されている。しかし、農薬が花粉媒介昆虫に及ぼす亜致死的な影響は、標準的な生態毒性評価では検出されることは滅多にない。そこでSiviterらは、農業で重要な役割を果たしている花粉媒介昆虫セイヨウオオマルハナバチ (*Bombus terrestris*) において、スルホキシミン系殺虫剤スルホキサフロルが亜致死的な影響を及ぼすかどうかを調べる先制的評価を行った。セイヨウオオマルハナバチは、野生に広く分布する他、作物の花粉媒介用に商業的に飼育されてもいる。実験には飼育コロニーを使う方が便利だが、研究チームは今回あえて野生の個体を使うことを選んだ。研究の生態学的な実在性を高める、評価に値する決断である。

Siviterらは、野生のセイヨウオオマルハナバチの女王を332匹捕獲して寄生虫検査を行い、寄生虫がいなかった249匹を用いて実験室内の巣箱でコロニーを形成させた。このうち、最終的にコロニーを形成した女王は52匹だったが、これは実験に十分なサンプル数である。続いて研究チームは、コロニーサイズ（ワーカー数）が同等のものをペアにして、一方を対照コロニー、もう一方を曝露コロニーとしてランダムに割り振った。そして、対照コロニーには砂糖水のみ、曝露コロニーには5ppbの濃度のスルホキサフロル（スルホキサフロルの噴霧施用で作物の花蜜に認められるのと同程度の濃度）を含む砂糖水を2週間にわたって自由摂取させた。その後、コロニー

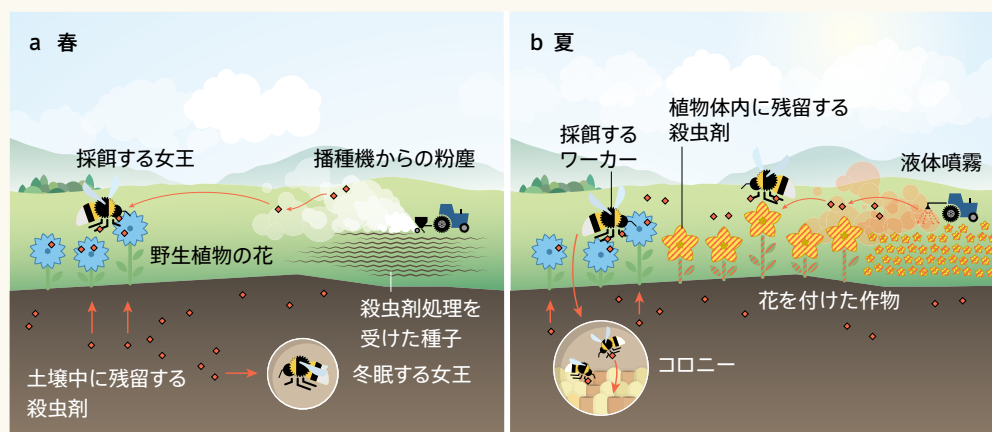


図1 マルハナバチの殺虫剤への曝露経路

Siviterら³は、浸透性殺虫剤スルホキサフルールへの曝露がマルハナバチのコロニーにどのような影響を与えるかについて、実験室と野外での実験を組み合わせた複合的な手法で調べた。浸透性殺虫剤への曝露には複数の経路が考えられる。

- a 春、殺虫剤で処理された種子がまかれると、播種機から放出された汚染粉塵は圃場全域を漂って、圃場外の野生植物の花にも付着する（赤色のひし形は残留した殺虫剤、赤色の矢印は拡散経路を示す）。土壌中には前年の施用に由来する殺虫剤が残留しており、マルハナバチの女王は、冬眠中に土壌中で直接的な影響を受けたり、土壌中の残留殺虫剤を取り込んだ野生植物の汚染された花蜜や花粉を摂取することによって曝露したりする。
- b 夏、殺虫剤処理を受けた種子から育った作物が花を咲かせ、汚染された花蜜や花粉が利用可能になる（赤色の縞模様）。一方、噴霧施用では、作物や近隣の野生植物の花で殺虫剤の濃度が高まる。マルハナバチのワーカーは、殺虫剤が施用された作物と汚染された野生植物の両方から、殺虫剤を含む花蜜や花粉を集めて摂取する^{17,18}。他、作物での採餌中、噴霧施用された植物の組織との接触によっても曝露する。ワーカーはさらに、殺虫剤を含む花粉や花蜜をコロニーへ持ち帰り、幼虫はそれを摂取する（図中にはない）。

をペアごとに野外の各地に移動させ（コロニー間での意図しない往来を防ぐため、各ペアの巣箱は20m離して設置した）、ハチの行動とコロニーの発達の様子を記録した。

その結果、スルホキサフルールへの曝露が、コロニーの成長速度に一貫して重大な影響を与えることが明らかになった。しかも、この影響はコロニーを野外に移動させてからわずか2～3週間で表れ始めた。曝露コロニーでは、生まれたワーカーの数が対照コロニーより少なく、誕生した生殖虫（女王と雄）の数も54%少なかった。この大きな差は、主に生まれた雄の総数の減少によって生じたものだが、新たに誕生した36匹の女王全てがわずか3つの対照コロニーに由来するという事実も反映している。女王の誕生数が対照コロニー間で大きく異なっていたことは想定内だったが、翌年の新たなコロニー形成には新たな女王の存在が必要であることを考えると、曝露コロニーで女王が1匹も誕生しなかったことは憂慮される。

コロニー成長と生殖におけるこうした障害は、ネオニコ

チノイド類への曝露の影響を調査した同様の研究での観察結果と似ている^{8-10,12,15,16}。この類似性は、これら2種の殺虫剤が共に同じ神経伝達物質の受容体に結合することで殺虫作用を発揮するため¹⁴、さほど意外ではない。しかし、ネオニコチノイド類に曝露したマルハナバチのコロニーに見られる影響が、花粉採餌能力の障害（これは幼虫の栄養不足につながる）によって引き起こされるようであるのに対し^{7,8}、今回の実験では、スルホキサフルールへの曝露で採餌能力に大きな差が生じたことを示す証拠は得られなかった。コロニー成長の初期段階やその後の生殖生産量に見られた影響は、発生中の幼虫に対するスルホキサフルールの毒性、あるいは他の何らかの間接的機構によってもたらされた可能性がある。いずれにせよ、コロニーの成長が減速したタイミングからは、初期段階での慢性的な亜致死性ストレスによって生殖が大幅に減退したことが示唆される¹⁵。

殺虫剤の影響を正しく判断するには、施用法（噴霧、土壌灌注、種子処理）によって変わる曝露量を正確に評価

する必要がある (図1)。例えば、噴霧では、施用後数日間は曝露量が比較的高濃度になるがその後はすぐに減少するのに対し、種子処理では、花蜜や花粉に殺虫剤が残留し続けることで曝露量は低濃度だがその影響は長期に及ぶ^{4,5}。スルホキサフロルもネオニコチノイド類と同様、噴霧と種子処理の両方での施用が可能だが、現在最も一般的なのは噴霧である。Siviterらの今回の実験は、「マルハナバチは噴霧施用後の作物で花蜜のみを摂取する」という筋書きに基づいて行われた。

この筋書きでは、花以外の植物組織との接触や花粉の摂取による曝露は考慮されておらず、採餌対象となる作物がスルホキサフロル以外の農薬の影響を受けていないことを前提としている。これらはいずれも、実際の環境では曝露量に大きく影響してくる要因だ。また、噴霧以外の方法を用いた場合は曝露の性質も変わってくるだろう。特に、最近の、そして今後導入されるであろうネオニコチノイド類の規制を受け、スルホキサフロルの施用法が多様化する可能性は高い。さらに、スルホキサフロルを種子処理や土壌灌注によって施用した場合には、この殺虫剤が圃場の外へ広がって野生植物に吸収され、それらの花蜜や花粉を汚染することで曝露量を増大させる可能性がある。この影響は実際に、ネオニコチノイド類の種子処理で示されている^{17,18}。そのため、スルホキサフロルの使用がもたらす影響の正確な評価には、ハナバチを誘引する作物の花蜜と花粉に含まれるスルホキサフロルの濃度について、さらに多くのデータが必要となる。

とはいえ、Siviterらの今回の研究は、スルホキサフロルへの曝露がハナバチに及ぼす影響を理解するための重要な第一歩といえる。一方、農業では他の種類の浸透性殺虫剤 (プテノリド類やアントラニルジアミド類など) も使用されているため、今後はネオニコチノイド類とスルホキシミン類の比較にとどまらない、より幅広い議論が必要になるだろう。そして、数多くの殺虫剤のうち、花粉媒介昆虫にとって潜在的なリスクが最も低いのはどれかを突き止めることが重要だ。しかし、現生のハナバチ類は2万種に上り、そのどれを研究対象とするかなど、比較リスク評価の進め方でその答えは大きく変わってくる。ハナバチ類には、生理、行動、生態に関して高い多様性があるからだ。こうした差異、特に社会性の程度については、殺虫剤に対するハナバチの感受性に影響して

いる可能性がある^{10,12,19}。例えば、低濃度の殺虫剤曝露による影響は、社会性が高くワーカー数が多いコロニーよりも、単独性のハナバチの方が大きいと考えられる。

世界の農業では、商業的に飼育された花粉媒介昆虫 (特にミツバチ) が大規模に利用されているが、実際には必要とされる作物の花粉媒介サービスが、これらのハナバチのみで全て賄われるわけではない²⁰。マルハナバチや単独性ハナバチなどの野生の花粉媒介昆虫もまた、役割を担っているのだ。こうした野生昆虫の役割は重要だが過小評価されており、今後作物の花粉媒介に関する需要が増すにつれ、その重要性はさらに高まると考えられる^{1,20}。従って、農薬の花粉媒介昆虫に対するリスクの理解、そして害虫駆除におけるさまざまな選択は、こうした現実を反映させ、それらに見合ったものに発展させていかなければならない。リスクのない選択などないが、今回Siviterらが提示したような情報が増えれば、地球環境および我々が依存する重要な生態系サービス (花粉媒介など) に取り返しのつかない危害を加えることなく、必要な食物の生産方法に関して、最も適切な意思決定を行うことができるようになるだろう。

(翻訳: 小林盛方)

A systemic problem with pesticides

Vol. 561 (40–41) | 2018.9.6

Nigel E. Raine

ゲルフ大学 (カナダ・オンタリオ州) に所属

- Garibaldi, L. A. et al. *Science* **339**, 1608–1611 (2013).
- Vanbergen, A. J. & the Insect Pollinators Initiative. *Front. Ecol. Environ.* **11**, 251–259 (2013).
- Siviter, H., Brown, M. J. F. & Leadbeater, E. *Nature* **561**, 109–112 (2018).
- Godfray, H. C. J. et al. *Proc. R. Soc. B* **281**, 20140558 (2014).
- Godfray, H. C. J. et al. *Proc. R. Soc. B* **282**, 20151821 (2015).
- Stanley, D. A. & Raine, N. E. *Funct. Ecol.* **30**, 1132–1139 (2016).
- Gill, R. J., Ramos-Rodriguez, O. & Raine, N. E. *Nature* **491**, 105–108 (2012).
- Stanley, D. A., Russell, A. L., Morrison, S. J., Rogers, C. & Raine, N. E. *J. Appl. Ecol.* **53**, 1440–1449 (2016).
- Whitehorn, P. R., O'Connor, S., Wackers, F. L. & Goulson, D. *Science* **336**, 351–352 (2012).
- Rundlöf, M. et al. *Nature* **521**, 77–80 (2015).
- Baron, G. L., Jansen, V. A. A., Brown, M. J. F. & Raine, N. E. *Nature Ecol. Evol.* **1**, 1308–1316 (2017).
- Woodcock, B. A. et al. *Science* **356**, 1393–1395 (2017).
- Stanley, D. A. et al. *Nature* **528**, 548–550 (2015).
- Brown, M. J. F. et al. *PeerJ* **4**, e2249 (2016).
- Bryden, J., Gill, R. J., Mitton, R. A. A., Raine, N. E. & Jansen, V. A. A. *Ecol. Lett.* **16**, 1463–1469 (2013).
- Ellis, C., Park, K. J., Whitehorn, P., David, A. & Goulson, D. *Environ. Sci. Technol.* **51**, 1727–1732 (2017).
- Tsvetkov, N. et al. *Science* **356**, 1395–1397 (2017).
- Nicholls, E. et al. *Environ. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06573> (2018).
- Arena, M. & Sgolastra, F. *Ecotoxicology* **23**, 324–334 (2014).
- Aizen, M. A. & Harder, L. D. *Curr. Biol.* **19**, 915–918 (2009).

木星の磁場は 特異だった

惑星科学

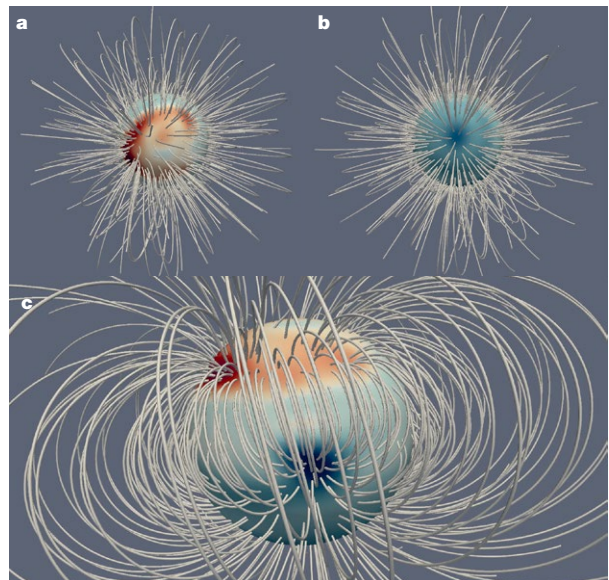
木星の磁場は、他のあらゆる既知の惑星の磁場と異なっていることが分かってきた。この観測結果は、大惑星（木星型惑星）の内部構造の解明に大きな意味を持つ可能性がある。

米航空宇宙局（NASA）の木星探査機「ジュノー」は現在、木星の磁場をこれまでになく詳しく測定している。磁場の原因は木星の内部にあるので、磁場を調べることで、木星の表層の壮観な渦巻く雲の下で何が起きているかを知ることができる。今回、ハーバード大学地球惑星科学科（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）のKimberly M. Mooreらは、ジュノーが送って来た観測データを分析し、木星の磁場は北半球と南半球とで大きく異なっていることを見だして、*Nature* 2018年9月6日号76ページで報告した¹。この非対称性を説明するため、Mooreらは木星の内部で何が起きているかを考察した。

ジュノーは2016年7月4日に木星に到着した。観測データを集め、木星の深部に関する私たちの理解を一変させつつある。これまで、木星の磁場については大ざっぱなことしか分かっていなかった²。ジュノーの観測によって木星磁場の描像ははるかに鮮明なものになり、木星磁場のモデルは作り直されつつある³。こうした進歩が可能になったのは、ジュノーが木星のすぐ近くまで接近したおかげだ。ジュノーは53日に1度、木星の重力場の奥深くに潜り込み、木星表面のわずか約4000km上空を



NASA/JPL CALTECH/SWRI/MSSS/GERALD EICHSTADT/SEAN DORAN



REF.1

ジュノーで観測された木星磁場の磁力線

a 北極上空から見た図、b 南極上空から見た図、c 赤道面付近から見た図。北半球の磁場は非双極子的で、南半球の磁場は双極子的になっている。球面は、木星半径の0.85倍の半径の球面を示している。球面の色は、そこでの磁場の動径成分の強さ（磁力線の密度）を示し、赤色は外向き、青色は内向き。

飛行する（木星の半径は約7万km）⁴。

木星は、太陽系の惑星で最も強い磁場を持つ。皮肉にも、この磁場がジュノーにとって最大の脅威だ。太陽から飛来する高エネルギー粒子が磁場に捉えられ、それがジュノーの電子機器に危険をもたらす。幸い、ジュノーはこうした粒子から保護されるように設計されており、今のところ、生き延びている。

木星の磁場は、木星内部を流れる電流によって維持さ

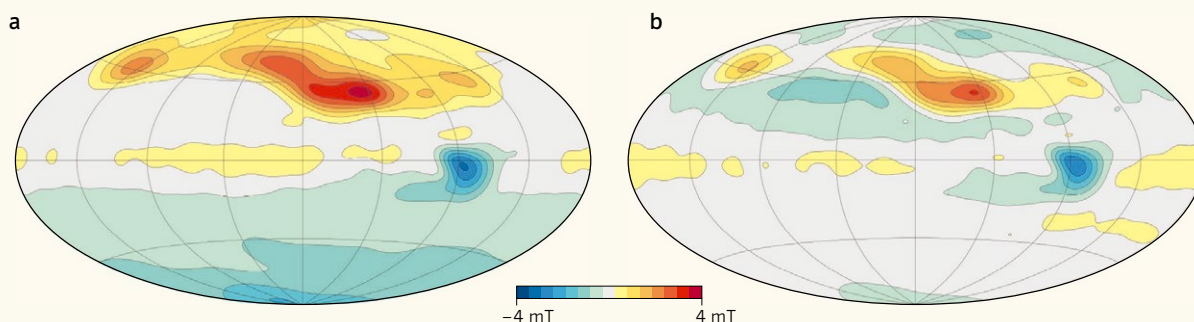


図1 木星の磁場の分布

- a Mooreらが報告した、木星磁場の動径成分(中心とその点を結ぶ方向の成分)の分布¹。北半球では、磁場の動径成分は主に正(外向き)だ(黄色ー赤色部分)。逆に南半球では、動径成分はおおむね負(内向き)だ(緑色ー青色部分)。こうした分布は双極子(ダイポール)と呼ばれる。カラースケールは磁場の動径成分の大きさを示しており、単位はミリテスラ(mT)。
- b 木星磁場の動径成分の非双極子成分の分布。木星磁場の動径成分の非双極子成分は、他のあらゆる既知の惑星磁場と異なり、ほぼ完全に北半球に集中している。aとbの分布図は、木星の中心から木星半径の90%の距離での磁場を示しており、木星内部の実質的な電流は、全てより中心に近い距離に存在すると仮定している。(参考文献1の図1eと図3aから改変)

れている。木星は主に水素とヘリウムでできているので、木星が電気を伝導できることはかなり驚きだ。しかし、木星内部の極端な高圧と高密度のため、水素は金属水素と呼ばれる状態になり得る⁵。金属水素は金属と同様の電気伝導率を持ち、電流が流れる。

大惑星は、誕生してから冷えるまでに数十億年かかる。このため、木星が太陽から受け取るのと同程度の量の熱が、今も木星の内部から出てきている。この熱は対流によって運ばれ、対流が木星内部をかき混ぜ、大赤斑などの渦巻く雲や嵐を作る。こうした雲や嵐は、ジュノーのカメラでとても美しく捉えられている。木星内部の流体の対流駆動流は木星表面の風よりも遅いが、十分強く、ダイナモ作用(ダイナモは発電機の意)と呼ばれるプロセスによって木星の磁場を作る^{6,7}。

地球の磁場も地球内部の対流駆動流によって作られるが、電流が流れるのは、鉄などでできた液体の中心核(外核)だ。木星と地球の磁場はどちらも、おおむね双極子(ダイポール)磁場だ。つまり、木星の磁場の動径成分(中心とその点を結ぶ方向の成分)はおおむね、北半球では正で南半球では負であり、まるで木星の内部に棒磁石があるかのようだ(図1a)。Mooreらは、木星の磁場の非双極子成分はほぼ完全に北半球に限定されていることを報告した(図1b)。これは、地球の磁場とは全く対照

的で、地球では磁場の非双極子成分は2つの半球に均等に分布している。

Mooreらは、こうした木星磁場の形態について、可能性のある説明をいくつか提案した。1つの説明は、木星の中心核に関係するものだ。木星の中心核がどのようなのかはまだ分かっていない。木星のモデルには、地球の約5倍の質量を持つコンパクトな中心核を想定したものもある⁸。しかし、ずっと大きく希薄な中心核である可能性もあり⁹、それが磁場生成に影響しているのかもしれない。

もう1つの説明は、木星の内部深くに、流体の安定な層が1つかそれ以上あるというものだ。土星は、その内部に安定な層を持つと考えられている。土星の磁場は木星や地球の磁場とは大きく異なり、土星の自転軸に関してほぼ完全に軸対称であるが、その理由を安定層の存在が説明する可能性がある¹⁰。木星では、こうした安定な層はそこで流体の組成が変わる領域で、木星の内部をいくつかのゾーンに分けているのかもしれない。もしも、こうした遷移(あるいは相転移)領域群がヘリウム濃度勾配を持てば、それらの領域は底の方が重く、木星内部の流体の流れを、つまりは磁場を変えている可能性がある。

今では、惑星磁場が生成される仕組みを調べるために、惑星内部の流体の流れと磁場を支配する基礎的な方程式を解くことが可能だ。ダイナモ作用の基本的な原理は1

世紀前に築かれたが¹¹、流体・ダイナモ方程式を解くことは難しかった。地球のダイナモをモデル化するために必要な計算をコンピューターが扱えるようになったのは1995年以降だ¹²。それにもかかわらず多くの進歩があり、現在では、ダイナモの計算機モデルは地球磁場の特徴の多くを再現できるようになった¹³。

この5年間で、こうしたモデルは、木星の内部と大気との間の大きな密度変化を扱えるように改良された^{6,7}。そして今、Mooreらによって推定された木星磁場とモデルを比較することができる。しかし、ダイナモモデルは惑星の内部構造に依存し、内部構造は惑星の熱力学的性質、電気伝導率特性、組成に依存する。これらの問題は、盛んに研究されてきたものの、いくつかの不確かさは残る。双極子磁場であるが大まかに言えば赤道に関して対称な磁場モデル群が開発された⁶一方、非対称だが双極子磁場ではない磁場モデル群も開発されてきた¹⁴。だから、課題は、非対称でかつ双極子磁場である磁場モデルを作り上げることだ。

今後、Mooreらが提案した木星磁場の形態の説明は、ダイナモモデル研究者らによって検証され、その説明が本当にジュノーの観測結果と合致しているのか、あるいは矛盾しているのかが分かるだろう。モデル研究者たちは、ジュノーから届いている情報を消化し、木星内部のより明瞭な描像を描き出し始めている。大惑星内部の研究にとって、わくわくする時代がやって来た。

(翻訳：新庄直樹)

Jupiter's magnetic field revealed

Vol. 561 (36–37) | 2018.9.6

Chris Jones

リーズ大学 (英国) 応用数学科に所属

1. Moore, K. M. et al. *Nature* **561**, 76–78 (2018).
2. Ridley, V. A. & Holme, R. J. *Geophys. Res. Planets* **121**, 309–337 (2016).
3. Connerney, J. E. P. et al. *Geophys. Res. Lett.* **45**, 2590–2596 (2018).
4. Bolton, S., Levin, S. & Bagenal, F. *Geophys. Res. Lett.* **44**, 7663–7667 (2017).
5. Wigner, E. & Huntington, H. B. *J. Chem. Phys.* **3**, 764–770 (1935).
6. Jones, C. A. *Icarus* **241**, 148–159 (2014).
7. Gastine, T., Wicht, J., Duarte, L. D. V., Heimpel, M. & Becker, A. *Geophys. Res. Lett.* **41**, 5410–5419 (2014).
8. French, M. et al. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **202**, 5–16 (2012).
9. Wahl, S. M. et al. *Geophys. Res. Lett.* **44**, 4649–4659 (2017).
10. Stevenson, D. J. *Geophys. Astrophys. Fluid. Dyn.* **21**, 113–127 (1982).
11. Larmor, J. *Rep. Br. Assoc. Adv. Sci.* **87**, 159–160 (1919).
12. Glatzmaier, G. A. & Roberts, P. H. *Nature* **377**, 203–209 (1995).
13. Schaeffer, N., Jault, D., Nataf, H.-C. & Fournier, A. *Geophys. J. Int.* **211**, 1–29 (2017).
14. Dietrich, W. & Jones, C. A. *Icarus* **305**, 15–32 (2018).

タンパク質は合成と同時に複合体に組み立てられる

分子生物学

酵母細胞のほとんどのタンパク質複合体は、そのサブユニット群の合成が完了する前に組み立てが始まっていることが分かった。この機構は、タンパク質が細胞毒性を示す凝集体になることを防いでいる可能性がある。

細胞過程の多くはタンパク質によって実行されている。タンパク質は一般的に、2つ以上の異なるサブユニットを含むヘテロマー複合体に組み立てられる。タンパク質のサブユニットは細胞内で自由に拡散して、無作為に起こる衝突を介して複合体を形成すると長い間考えられていたが、細胞内の環境は極めて混雑していることを考えると、これは事実ではなさそうに思われる。このほどハイデルベルク大学分子生物学センターおよびドイツがん研究センター（共にドイツ・ハイデルベルク）のAyala Shiberらは¹、真核生物（動物、植物、菌類が含まれる）では、細胞質のほとんどのタンパク質複合体が翻訳と同時に組み立てられる、つまり、組み立てはサブユニットの少なくとも1つがまだ細胞のリボソーム装置によって合成されている間に起こっている証拠を生細胞内（in vivo）で得たことを、*Nature* 2018年9月13日号268ページで報告した。

翻訳と同時に起こるタンパク質複合体の形成をin vivoで研究することは、2009年にリボソームプロファイリ

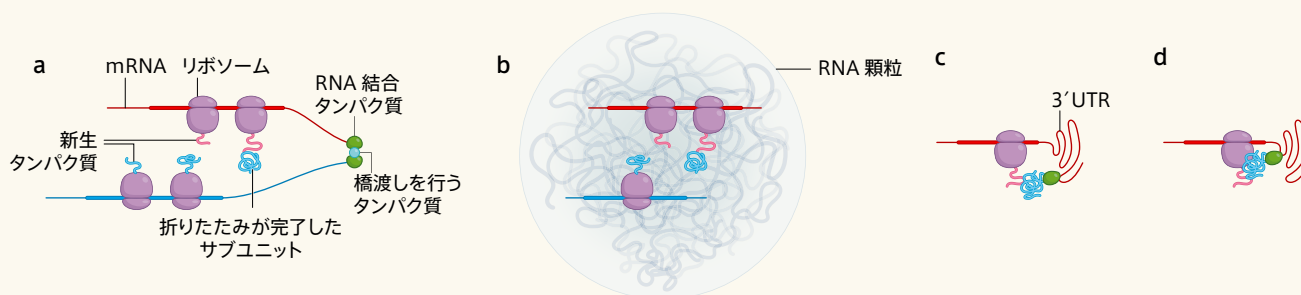


図 1 翻訳と同時にタンパク質複合体を組み立てるために、タンパク質サブユニットを集める方法の候補

- a** RNA 結合タンパク質が、直接的（図示していない）あるいは別のタンパク質を介して間接的（図示）に、2 つの mRNA の橋渡しをする可能性がある。この場合、1 つの mRNA 上で形成され、折りたたみが完了したサブユニットがリボソームから解離し（リボソームは解体されている。図示していない）、別の mRNA 上の新生タンパク質と相互作用する。mRNA の太線部分は翻訳領域を表している。細線部分は非翻訳領域。
- b** こうした 2 つの mRNA は、RNA ボディ内でも接近できる可能性がある。
- c** mRNA の 3' 非翻訳領域（3' UTR）として知られる非翻訳領域に、折りたたみが完了したサブユニットが RNA 結合タンパク質によって誘導されることで、この mRNA から新生されたタンパク質に近づくことができる。
- d** c とはわずかに異なる場合として、誘導されたサブユニットは、一時的にリボソームに位置し、次に新生タンパク質に移されることも考えられる。

ング²が開発されるまで困難であった。この技術により、メッセンジャー RNA (mRNA) 上のリボソームの位置が、RNA 断片の塩基配列解読で決定できるようになった。この技術は通常は、翻訳の追跡に用いられる。翻訳とは、リボソームが mRNA を解読し、mRNA を鋳型として用いてタンパク質合成を行う過程である。Shiber らは選択的リボソームプロファイリング³と呼ばれる改良プロトコルを用いた。この方法では、既に別のタンパク質と相互作用している新生タンパク質鎖を合成中のリボソームを単離し、次に、そのリボソームに保護されていた RNA 断片の塩基配列解読を行うことで、別のタンパク質と相互作用している新生鎖をコードする mRNA の塩基配列を明らかにする。このような塩基配列解読により、相互作用に関与するタンパク質ドメインも特定できるのは、選択的リボソームプロファイリングでは、選択した相互作用相手分子に結合しているリボソーム-新生鎖複合体 (RNC) のみを単離するので、この新生鎖には、完全に露出した相互作用ドメインが含まれているからである。

Shiber らは、出芽酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) において、安定で特徴がよく分かっている 12 のヘテロマー複合体について、それらのタンパク質複合体が翻訳と同時に組み立てられているかどうかを調べた。すると

12 の複合体のうち 9 つが翻訳と同時に組み立てられることが分かった。翻訳と同時に組み立てられるタンパク質複合体は一部にすぎないとこれまででは考えられていたため^{4,5}、これが広く行われている過程であるとする今回の結果は驚くべきものだ。また、組み立てが翻訳と同時に行われなかったと考えられた 3 つのタンパク質複合体は、専用のシャペロンタンパク質が組み立てを補助していた。Shiber らは、シャペロンの重要な機能が、タンパク質を折りたたむ際にタンパク質の誤った折りたたみやランダムな凝集を防ぐことである⁶ことを考えて、翻訳と同時にタンパク質複合体を組み立てることには同様の目的があるのではないかと仮定した。

Shiber らは次に、翻訳と同時に組み立てられる 9 つの複合体のうちの 6 つは、一方向性の組み立て様式であることを見いだした。つまり、1 つ目のサブユニットは、2 つ目のサブユニットの新生鎖と結合する前に、折りたたみが完了していなければならないが、折りたたみが完了した 2 つ目のサブユニットは、1 つ目のサブユニットの新生鎖には結合できないのだ。これは、2 つ目のサブユニットは常に、リボソームで翻訳されて新生鎖として出口トンネルから出ると同時に組み立てに加わらねばならない、ということである。Shiber らは、折りたたみが

不完全なサブユニットが作り出されるよう操作した酵母株を用いて研究を行い、この酵母では2つ目のサブユニットの新生鎖が凝集体を形成することを観察した。この結果は興味深い。つまり、翻訳と同時に組み立てを行うことで、細胞毒性を示す可能性のある凝集体の形成を実際に防いでいることを示している。

Shiberらの知見は、翻訳と同時のタンパク質複合体の組み立てが広く行われていることを示す説得力のある証拠だが、複合体が形成できるほどサブユニット同士を近づける仕組みについては明らかになっていない。これには有望な一般モデルが2つ提案されているが、この2つのモデルは相互排他的ではない。

1つ目のモデルは、サブユニットをコードする2つのmRNAが互いに近くで翻訳されるとするものである。このような近接性は、2つのmRNAに橋渡しをするRNA結合タンパク質によって達成されると考えられる (図1a)。このようなシナリオは、ヘテロマーのイオンチャネルの組み立てにおいて示唆されている⁷が、ヒトのRNAとタンパク質の相互作用についてのゲノム規模の解析からは⁸、2つの異なるmRNAが1つのRNA結合タンパク質で橋渡しされることは稀であることが分かっている。しかし、2つのmRNAを近づけるのに物理的な結合が必須、というわけではない。というのは、ある配列モチーフを共有するmRNAは、顆粒^{かりゅう}として知られるRNAボディに共局在する可能性があり (図1b)、この状態ならば、細胞内の特定の位置での翻訳が可能だ⁹。

2つ目のモデルは、2つのmRNAは互いに近づかないとするものである。その代わりに、RNA結合タンパク質が、折りたたみが完了したタンパク質サブユニットを、2つ目のサブユニットをコードするmRNAの非翻訳領域 (3' UTR) に誘導する。すると、このようなサブユニットは、2つ目のサブユニットが合成されると、相互作用できるようになる。哺乳類細胞では、mRNAの3' UTRにはタンパク質が誘導されること、続いて、そのタンパク質はmRNAから新生されたタンパク質と相互作用することが示されている¹⁰ (図1c)。また出芽酵母では、翻訳中のmRNAに誘導されるタンパク質は、その新生タンパク質鎖に移動する前に、一時的にリボソームに存在することが観察されている (図1d)¹¹。

3' UTRによる相互作用タンパク質の誘導は、細菌にお

ける、翻訳と同時のタンパク質複合体形成を連想させる。細菌の場合は、複合体を形成する各タンパク質サブユニットがオペロン (隣接遺伝子群のクラスターで、1つの転写単位として発現する) にコードされていることが多い^{12,13}。そのため細菌では、新生タンパク質と相互作用できる折りたたみが完了したタンパク質は、同一オペロンにコードされているサブユニットのどれかに限られる。それに対し、真核生物における3' UTRの使用では、いくつかの異なる相互作用分子を新生タンパク質に誘導できるので、さまざまなタンパク質複合体を翻訳と同時に組み立てることができる¹⁴。

相互作用するタンパク質サブユニットが近く集まる仕組みや、複合体の誤った組み立てを防ぐ仕組みを解明するためにはより多くの実験が必要であるが、Shiberらは、タンパク質複合体の形成が、拡散ではなく誘導機構に依存して、特異的なタンパク質間相互作用を達成していることを実証した。これらの知見は、ほとんどの細胞過程が相互に関係していることを示唆する多数のin vivo観察に付け加えられる。mRNAは、タンパク質をコードするだけでなく、細胞質においてタンパク質の区画化を補助したり、翻訳が起こる場所の局在を調節したりすることで、タンパク質複合体の成熟のための特異性も高めている。哺乳類細胞の安定なタンパク質複合体の大部分が翻訳と同時に組み立てられるかどうかは明らかではないが、恐らくそうだと考えられる。

(翻訳：三谷祐貴子)

Proteins assemble as they are being made

Vol. 561 (186–187) | 2018.9.13

Christine Mayr

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) に所属

- Shiber, A. et al. *Nature* **561**, 268–272 (2018).
- Ingolia, N. T., Ghaemmamghami, S., Newman, J. R. S. & Weissman, J. S. *Science* **324**, 218–223 (2009).
- Becker, A. H., Oh, E., Weissman, J. S., Kramer, G. & Bukau, B. *Nature Protocols* **8**, 2212–2239 (2013).
- Halbach, A. et al. *EMBO J.* **28**, 2959–2970 (2009).
- Duncan, C. D. S. & Mata, J. *PLoS Genet.* **7**, e1002398 (2011).
- Ellis, R. J. *Adv. Exp. Med. Biol.* **594**, 1–13 (2007).
- Liu, F., Jones, D. K., de Lange, W. J. & Robertson, G. A. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **113**, 4859–4864 (2016).
- Sugimoto, Y. et al. *Nature* **519**, 491–494 (2015).
- Yasuda, K. et al. *J. Cell Biol.* **203**, 737–746 (2013).
- Berkovits, B. D. & Mayr, C. *Nature* **522**, 363–367 (2015).
- Charlton, J. W., Hunt, K. C. L. & Frydman, J. *Nature* **536**, 224–228 (2016).
- Shieh, Y.-W. et al. *Science* **350**, 678–680 (2015).
- Wells, J. N., Bergendahl, L. T. & Marsh, J. A. *Cell Rep.* **14**, 679–685 (2016).
- Mayr, C. *Annu. Rev. Genet.* **51**, 171–194 (2017).

欲しい液体燃料を選択的に合成する触媒技術

巧みな触媒プロセスが開発され、航空燃料やガソリンなどの液体燃料の直接合成が実現に近づいた。

必要は発明の母とされる。今から100年前、世界各国が石油を必要としていた。石炭を燃やして船を走らせることはできたのだが、自動車や戦車にとって固形の燃料を燃やすのは現実的でなく、飛行機には不適切だった。また、当時ドイツでは、原油を入手できなかった。そこで、2人のドイツ人化学者が、石炭から合成石油を作り出すフィッシャー・トロプシュ（FT）法を発明した。1925年のことだった。

今日では、化石燃料の使用を段階的に縮小したいと考える国や企業が現れ、FT法はここでも役に立つ可能性がある。石炭を液体燃料に変換できるのであれば、理論的には、石炭よりも環境に優しい代替物質（例えばバイオマス）も液体燃料に変換できる可能性があるからだ。しかし、その実現に向けた研究の成果はこれまでのところ、効率が悪く、そもそも石油と競争できるほどの低価格が実現できていない。

この打開策となり得る研究成果が、*Nature Catalysis*で発表された。日本と中国の化学者がFT法を強化し、各種液体燃料を選択的に合成する過程を改善したのだ（J. Li et al. *Nature Catal.* <http://doi.org/ctxv>; 2018）。

FT法は、ガスをそのまま変換する、あるいは固体（石炭やピーナッツの殻をすりつぶしたものでもよい）から生成したガスを変換する点では優れているのだが、生成物に幅があり、ほとんどの場合、メタンなどの軽油から重質のワックスまでのさまざまな合成石油生成物のブレンドとなる。最も有用なガソリン、ディーゼル燃料、航空燃料（灯油）は、その中間に位置するため、分離、精製する必要がある。そのため、これらの燃料の大規模なFT合成は通常2段階プロセスで、それによりコストと複雑度が増し、環境汚染が深刻化している。

それ故、FT法を使った合成液体燃料の商業生産は、原料価格が極めて低い場合（中国には石炭を処理する生産施設がある）、または手段が他にない場合（南アフリカではアパルトヘ

イト政策の時代、経済制裁を受けて石油を輸入できず、同国のサソール社はFT法を用いた石炭液化技術を開発）に限られる。

今回の研究では、変換の選択性を高められることが明らかになった。研究チームは、使用する触媒（多孔質材料のゼオライトに、コバルトナノ粒子と希土類助触媒を担持させたもの）の組成を微調整することで化学反応を制御し、目的の液体燃料を選択的に合成できた。例えば、選択率74%のガソリンまたは選択率72%のジェット燃料を生成できる。鉄やコバルトを二酸化ケイ素や酸化アルミニウムに担持させた触媒を用いる従来のプロセスではこれまで、FT合成で選択率50%超の生成物を得ることは無理だった。

しかし、障壁の打破は、もう少し先の話だ。ゼオライト系触媒は失活しやすく、上記論文によれば燃料の合成は、指ぬきサイズの反応器の中でわずか1gの触媒を使って行われた。このプロセスの経済性向上には、このプロセスをもっと長い間安定的に実施し、100t以上の触媒を使える反応器にスケールアップする必要があると考えられる。合成燃料に対する熱意は、市況と共に変動する。石油価格が過去最高に達した10年前は合成燃料の人気は高かったが、今はそれほどでもない。今後、市場における合成燃料の需要が増し、必要な投資の機運が高まるという保証はない。

この研究を率いた富山大学大学院の化学者、^{つばきのりたつ}椿範立は、このプロセスを用いるとFT反応から灯油やガソリンを初めて「ワンステップ」で直接合成できる可能性が生まれる、つまり、高収率なので分離段階が不要になることがこのプロセスの大きな利点だと語る。また、既に航空会社数社がFT法による燃料供給を調査中で、椿らは研究知見に関して航空会社や航空機メーカーと接触する予定だと、彼は話す。必要性は明白に存在し、発明となりそうな技術も生み出されている。 ■

（翻訳：菊川要）

2018年10月4日号 | Vol. 562 No. 7725

科学の共有：社会と研究者が協働するとき

表紙の写真は、ミケア族の口述歴史家 Remisy (左) がマダガスカルのアラ大学の歴史家 Tsiazonera (右) と、マダガスカルの Namonte 盆地のある共同社会の歴史について意見を交わしている様子である。こうした統合的な試みは、研究の結果によって影響を受けることになる人々がそうした研究の計画や推進段階から関与するという、研究の協働 (co-production) の特徴である。こうした協働は、利害関係者、科学者、社会が変化をもたらすために協力して研究を進めることで、科学を取り巻く状況を一変させつつある。今週号の特集では、研究の協働の見込みと落とし穴について検討し、指針およびケーススタディーを示すとともに、こうした研究文化の変化によってどのように科学がより有意義で役立つものになり得るかに関するいくつかの個人的見解を紹介する。



Cover: nature.com/collections/nnqkvntryl

神経免疫学：ナルコレプシーの病因におけるヒボクレチン特異的な CD4 および CD8 T 細胞

今回 F. Sallusto らは、ナルコレプシー睡眠障害の患者において、ヒボクレチンを産生するニューロンに発現する自己抗原を標的とする CD4 T 細胞や CD8 T 細胞の存在を明らかにすることで、この疾患の原因が自己免疫によることを裏付ける強力な証拠を提示している。この結果は、適切な免疫調節療法の開発につながる可能性がある。 10.1038/s41586-018-0540-1

生化学：転写因子とヌクレオソームとの多様な相互作用

遺伝子調節領域では、ヌクレオソームは転写因子によって不安定化されると一般的に考えられている。今回 J. Taipale らは新しい手法を開発して、多様な構造ファミリーに属する 220 の転写因子とヌクレオソームとの相互作用を系統的に詳しく調べた。その結果、遊離の DNA とヌクレオソーム DNA に対する転写因子の結合には大きな違いがあることが分かり、主な相互作用パターンが 5 つ見つかった。ほとんどの転写因子の結合はヌクレオソームの解離を促進するが、中にはヌクレオソームを安定化するものもあった。 10.1038/s41586-018-0549-5

医学研究：原発性肝臓がんの発生

肝細胞がん (HCC) と肝内胆管がん (ICC) は、原発性肝臓

がんの 2 つの主要なサブタイプである。L. Zender らは今回、腫瘍微小環境によって肝臓がんのどちらのタイプが生じるかが決まることを明らかにしている。形質転換した肝細胞は、周囲の肝細胞がネクロトーシスを起こしている場合は ICC になるが、同じがん遺伝子により形質転換した肝細胞でも、周囲の肝細胞がアポトーシスを起こしていると HCC になる。機構として、著者らは、これをサイトカイン環境と遺伝子発現における違いに結び付けている。 10.1038/s41586-018-0519-y

神経科学：ここはどこ？

動物のナビゲーションには視覚系からの入力が必要なため、位置に関係する信号が視覚野で起こる可能性があると考えるのは当然のことで、実際それを示唆する証拠もある。今回 A. Saleem らは、視覚野におけるこうした位置信号の性質を明らかにし、動物の位置が、海馬と一次視覚野で同時に表現され、相関していることを見いだした。従って、ナビゲーションの表現は、これまで感覚刺激を表現するだけと考えられていた脳領域にも広がっているのかもしれない。

10.1038/s41586-018-0516-1

気候変動生態学：温暖化した世界のツンドラでは植物の高さが増加する

ツンドラは、地球上で温暖化が最も速く進行しているバイオームである。A. Bjorkman らは今回、約 30 年分に相当する植生調査データを用いて、世界各地のツンドラにおける気候と植物機能形質との関係を調べた。その結果、夏季の気温と 3 つの形質との間に強い関係があり、調査期間 (1989 ~ 2015 年) にわたって、温暖化に伴い群集の高さが増加していたことが明らかになった。今回の研究から、炭素の取り込みなど、植物の高さと関連する生態系機能が短期的な気候温暖化に伴って急速に変化することが示唆された。 10.1038/s41586-018-0563-7

生態学：暖かい春の影響

気候変動によって植物の生物季節のサイクルが変化し、春の始まりが早くなって秋の終わりが遅くなることにより、北方生態系の生育期間が長くなっている。さらに、より温暖で早く始まる春が生育期後半の植物生産力に及ぼす時間遅れの影響を示す証拠がいくつか存在する。しかし、そうした時間遅れの影響の方向性と地理的分布は、まだほとんど調べられていない。今回 W. Buermann らは、北方生態系全域にわたって温暖な春に対する時間遅れを伴う生産力の応答が広範囲に見られ、その特徴が地域によってさまざまであり、好影響よりも悪影響の面積の割合が大きいことを見いだしている。時間遅れの影響の地理的

分布と方向性の大半は、標高と降水の季節パターンによって決定されることが分かった。今回の結果は、北方の生態系は主に温度と太陽放射に制約されていると考えられるにもかかわらず、多くの北方生態系では、より温暖な春が生育期の生態系生産力に及ぼす好影響の大半が、季節的な水不足の積み重ねによって減少することを示唆している。 [10.1038/s41586-018-0555-7](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0555-7)



微生物学：グラム陽性細菌に見られる独特な細胞外電子伝達

細胞外電子伝達（EET）は微生物で見られる生体電気化学過程で、電子が細胞質から細胞外へと伝達され、電子を受け取るのは固体の細胞外基質であることが多い。EETは主に環境微生物で見つかり、この過程によって鉄がさびたりすることがある。今回D. Portnoyらは、ヒトの病原体であるリステリア菌（*Listeria monocytogenes*）がEETを行っており、これが非発酵性炭素源を使う増殖を助けており、マウス消化管という嫌気的環境中でリステリア菌が優位に生存できるようにしていることを明らかにした。この研究によってEET過程を担う8個の遺伝子からなる座位が突き止められ、特徴が調べられた。この座位は他の数百種ものグラム陽性菌に存在しており、これらの生物もEETを行う能力を持つと考えられる。

[10.1038/s41586-018-0498-z](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0498-z)

2018年10月11日号 | Vol. 562 No. 7726

英国バイオバンク：英国の50万人の人々から得られた遺伝学的データと健康データ

英国バイオバンクは、前向きコホート研究で、これまでに英国全域の40～69歳の約50万人の人々から遺伝学的データと表現型データが集められている。参加者らは、健康測定を受け、血液、尿、唾液の試料の他、自身の詳細な情報を提供するとともに、その後の健康追跡に同意している。J. MarchiniとP.



Donnellyらは今回、高分解能の遺伝学的データと遺伝学的関連研究におけるその使用の実証結果を含む、全コホートのデータセットを報告している。S. SmithとJ. Marchiniらは別の論文で英国バイオバンク参加者の最初の8428人の脳画像、そして3144の機能的および構造的な脳画像の表現型についてのゲノム規模関連研究の結果を報告している。彼らは、形質の多くが遺伝性であることを見いだすとともに、こうした構造的・機能的測定の結果に関連する多くの領域を明らかにした。英国バイオバンクのデータセットと研究結果は全て、オープンアクセスリソースとして利用できる。

Cover; [10.1038/s41586-018-0579-z](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0579-z); [10.1038/s41586-018-0571-7](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0571-7)

がん：BRCA1バリエントを分類する

生殖細胞系列のBRCA1機能喪失型バリエントは、早発性の乳がんや卵巣がんになりやすい傾向（素因）と関連付けられている。J. ShendureとL. Staritaらは今回、遺伝子バリエントの働きの解明を助けるために、BRCA1バリエントの機能的評価を行った。彼らはまず、BRCA1の機能に重要なRINGドメインとBRCTドメインをコードする13種のエキソンで、一塩基バリエント群の飽和ゲノム編集実験を行った。そして、塩基配列解読と細胞適応度アッセイを組み合わせ、機能を持つバリエントを判別し、BRCA1中の標的となったエキソン内のおよそ4000の一塩基バリエントに対する機能スコアを算定した。その結果、計算予想との相関が明らかになり、また専門家によってまとめられた病理性バリエントか良性のバリエントかという判別結果（ClinVarデータベースの情報）とも高レベルで一致することが分かった。また、臨床的塩基配列研究ではまだ公式に報告されていない3140のバリエントも見つかり、これらについても機能的分類が行われている。 [10.1038/s41586-018-0461-z](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0461-z)

発生生物学：内皮細胞の補完的な供給源

哺乳類胚では、最初に内皮細胞が指定された後、続いて起こる血管の成長は既存の内皮細胞の増殖のみに依存すると考えられてきた。しかし今回、血液細胞の初期の前駆細胞も、多数の器官の既存の血管系に誘導されて内皮細胞を供給することが明らかになった。これらの内皮細胞はそれぞれの器官で成体期まで存続し、内皮細胞のまた別の補完的な供給源となる。

[10.1038/s41586-018-0552-x](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0552-x)

計算機科学：滑空を学習する

自然界の生み出す複雑な対流の景観の中で上昇温暖気流を探しそれに乗って滑空する鳥の戦略はまだ十分に分かっているわけではないため、これを人工の機体にうまく「教える」こ

とは困難である。この関連で、特定の環境手掛かりから情報を得た一連の決定の形で効果的な航行戦略を突き止めるのに、強化学習に基づく方法が役立つ可能性がある。今回 M. Vergassola らは、適切な装備を施したグライダーが、野外において自律的に上昇温暖気流を捉えて航行できるようになる強化学習法を報告している。著者らは、この目的で、グライダーにかかる局所的な鉛直方向の風の加速度とロール方向のトルクを機上で見積もる方法を開発し、これらの加速度とトルクが航行の効果的な手掛かりとしての役割を果たすことを示している。このタイプの航行戦略は、今後の自律滑空機の研究に役立つ可能性がある。 [10.1038/s41586-018-0533-0](#)



上昇温暖気流を捉えて自律的に滑空するグライダー。

遺伝学：まれな神経発達障害のリスクはありふれた遺伝的変動の影響を受ける

J. Barrett と M. Hurles ら は 今 回、DDD (Deciphering Developmental Disorders) 研究の重度神経発達障害の患者 6987 人についてゲノム規模関連解析を行い、一般的には主に単一遺伝子性疾患であると推定されている、これらのまれな疾患のゲノム構造を示している。これらの疾患と単一バリエーションとの有意な関連は見つからなかったが（これは臨床表現型の不均一性と標本サイズに関係している可能性がある）、多遺伝子性リスクスコアと伝達不平衡試験を用いることで、リスクの分散の約 7.7% が遺伝性のありふれた遺伝的変動に起因すると推定された。また、この多遺伝子性リスクスコアと、より低い学歴、低下した知能、統合失調症リスクに相関があることも示された。これらの解析から、まれな遺伝的変動とありふれた遺伝的変動の両方が、まれな重度神経発達障害の疾患リスクと臨床症状に寄与することが実証された。 [10.1038/s41586-018-0566-4](#)

分子生物学：scMNase-seq 法を使って明らかになったヌクレオソームポジショニングの状況とクロマチンへの到達性

ヌクレオソームはゲノム中にランダムに配置されているのではなく、特定の位置を占めていて、このような配置は DNA への調節因子の到達に重要であると考えられている。今回 K. Zhao ら

は、単一細胞でのヌクレオソームのポジショニング（位置取り）とクロマチンへの到達可能性をゲノム規模で明らかにできる単一細胞 MN アーゼ塩基配列解読法（scMNase-seq）を開発し、細胞集団内でのヌクレオソームの構成の不均一性について調べた。この方法を NIH3T3 細胞、マウス胚性幹細胞および初代 T 細胞に適用したところ、調節領域周辺でのヌクレオソームポジショニングの細胞間のばらつきやヌクレオソームの間隔に関して、さまざまな知見が得られた。 [10.1038/s41586-018-0567-3](#)

2018 年 10 月 18 日号 | Vol. 562 No. 7727

読心術：皮膚のパターン形成の運動制御からコウイカの視覚を読み取る

周囲の環境の色や質感を模倣して身を隠すコウイカ、イカ、タコの特異な能力は、アリストテレスの時代以来、自然科学者らを魅了してきた。こうした軟体動物は、全ての動物の中でも独特



の拡大・収縮する細胞の「画素」に、運動ニューロンで直接動き掛けることによって外見を制御している。今回 G. Laurent らは、このニューロンと色素胞の対応を用いて、コウイカの脳を調べ、自然行動中の個体における数万個の色素胞の動態を数百分の1秒から数週間の時間スケールにわたって分析することで、制御ネットワークの推定構造を推測している。

Cover; [10.1038/s41586-018-0591-3](#)

物性物理学：ディラックフェルミオンの加速を画像化する

かつてない速さのエレクトロニクスを追求する場合、光駆動される電流によって光学的なクロックレートを実現できる可能性がある。同様に、トポロジカル絶縁体研究の進歩によって、ディラックフェルミオンのスピン-運動量ロッキングに起因するスピン流を探究できるようになり、エレクトロニクス向けの機会が生まれている。今回 R. Huber らは、テラヘルツパルスの印加によって生じる Bi_2Te_3 の表面状態のディラックフェルミオン加速を観測して、速度とトポロジカル絶縁体を結び付けている。この加速されたディラック状態からバンド占有の再分布が起こり、著者らはこれを、サブサイクル時間分解能の角度分解光電子放出分光法を使ってマッピングした。スピン-運動量ロッキングに起因して散乱が減る結果、数百ナノメートルという大きな平均自由行程と、半導体に比べて優れたコヒーレンス時間が得られる。こうした特性とスピン偏極電流によって、このプラットフォームは光波駆

動されるマイクロエレクトロニクスデバイスを探究する上で
の候補になる。 [10.1038/s41586-018-0544-x](#)

生物工学：トランスクリプトームの進化を監視する

細胞のトランスクリプトームは、内部や外部の合図に応答して絶えず変化している。トランスクリプトームの経時的進化に伴う変化を監視することができれば、こうした応答の理解に役立つと考えられる。R. Plattらは今回、CRISPRがファージ感染の記憶としてその塩基配列を獲得する系を利用することで、トランスクリプトーム変化の監視系を開発した。彼らはまず、DNAではなくRNA塩基配列を細菌ゲノムに取り込むことができるCRISPR-Cas系を突き止めた。獲得された配列を、増幅段階と塩基配列解読段階から構成されるプロトコル(Record-seq)を用いて読み出した。ゲノムのこれらの塩基配列を調べることで、1つの細胞事象の際に引き起こされる転写変化を再構築できる。 [10.1038/s41586-018-0569-1](#)

がん：基底細胞がんの再発機構を解明

基底細胞がんはSmoothened阻害剤で治療することができるが、再発も多い。著者らは今回、Smoothened阻害剤ピスモデギブが、基底細胞がん細胞の分化を促進することによって腫瘍を退縮させることを明らかにしている。彼らはまた、静止期にある細胞の小集団はピスモデギブの影響を受けず、再発の原因となることも示した。これらの細胞ではLGR5の発現が見られ、Wntシグナル伝達が活発であることから、この2つの治療標的候補とSmoothened阻害剤を組み合わせることで基底細胞がんを根絶できる可能性がある。固形腫瘍で分化を促進することによる治療効果が見つかり、非遺伝的な抵抗性を引き起こす細胞集団が明らかになったことで、がんの治療法の可能性が広がるかもしれない。 [10.1038/s41586-018-0603-3](#)

細胞進化学：Asgard 上門アーキアでは機能性プロフィリンがアクチン細胞骨格を調節する

R. RobinsonとC. Akilは今回、Asgard 上門アーキアに属するメンバーにコードされている真核細胞類似のタンパク質について、構造と機能を初めて解析したことを報告している。ロキ門の3つのプロフィリンに加え、トール門、ヘイムダル門、オーディン門のそれぞれ1つのプロフィリンについて、高品質な構造が解かれた。ロキ門のプロフィリンは、哺乳類アクチンと相互作用し、リン脂質依存的にGアクチンを隔離することが可能で、アクチンフィラメントの反矢尻端の伸長を促進できる。アーキアが持つ真核細胞様遺伝子の産物についてはほとんど分かっておらず、今回の研究はこのようなタンパク質が真核生

物のタンパク質と同じような挙動をするのかどうかの検証に向けた重要な一歩である。これらの結果は、アーキアと真核生物の最終共通祖先の細胞生物学的性質や本来の姿の推定に明らかに関係しており、また、これによってAsgard 上門アーキアに備わった真核生物様の特徴の1つに関する待望の機能データがもたらされた。 [10.1038/s41586-018-0548-6](#)

2018 年 10 月 25 日号 | Vol. 562 No. 7728

お守り毛布：乳幼児の腸マイクロバイオーームと疾患リスクが出生後の早い段階で形成される仕組み

出生から小児期までの腸マイクロバイオーームの発達は、1型糖尿病などの疾患病理に重要であると考えられているが、この時期のマイクロバイオーームの発達についてはまだ分かっていないこ

とが多い。今週号の2報の論文では、乳幼児のマイクロバイオーームに関するこれまでで最も包括的なデータセットを利用して、こうした過渡期に新たな光を当てている。TEDDY (The Environmental Determinants of Diabetes in the Young) 研究は、米国、スウェーデン、ドイツ、フィンランドの6カ所の研究施設にまたがって行われている。一方の論文ではJ. Petrosinoらが、3~46カ月齢の903人の小児から毎月得た約1万2000の糞便試料について、遺伝子配列解読技術を用いて分析している。彼らは、このコホートのマイクロバイオーームの発達の特徴を評価して3つの異なる段階に分けるとともに、重要な要因の中でも特に母乳哺育が、この過程にいかに大きく寄与しているかを突き止めている。もう一方の論文ではC. Huttenhowerらが、TEDDY研究において783人の小児から得られた約1万1000の糞便試料を分析して、1型糖尿病に関する小児期早期の腸マイクロバイオーームの特徴付けを行った。その結果、1型糖尿病を将来発症しない乳幼児のマイクロバイオーームには、発酵や短鎖脂肪酸の合成に関連する遺伝子がより多くあり、これらが1型糖尿病に対する保護作用を持つ可能性が示唆された。

Cover; [10.1038/s41586-018-0617-x](#); [10.1038/s41586-018-0620-2](#)

固体地球科学：隕石衝突構造にピークリングを作った強度の大きな岩石

太陽系の地球型天体上の大規模な隕石衝突構造には、衝突を受けた岩石が衝突後数分以内に隆起して形成された、明瞭な環状隆起地形(ピークリング)がある。こうした衝突を受けた岩石が長い距離を急速に流れるには、強度が劇的に弱められる必



要があり、こうしたピークリングを構築し維持するには、十分な強度をその後再び獲得しなければならない。今回U. Rillerらは、メキシコにある直径約200 kmのチクシュループ衝突構造を掘削した際に得られたデータを用いて、音響的な流動化がクレーター形成初期を支配する主要な物理過程であり、その後局所的な断層が増加し、岩石強度が増大して、ピークリングの形成に至ったことを示している。 [10.1038/s41586-018-0607-z](#)

微生物生態学：バチルス属細菌は病原性黄色ブドウ球菌の定着を排除する

今回、哺乳類の腸において病原体を排除するための新しい機構が報告されている。クオラムセンシングは、黄色ブドウ球菌 (*Staphylococcus aureus*) が腸に定着するために不可欠だが、バチルス属 (*Bacillus*) 細菌が分泌するリポペプチド fengycin 類によって阻止されることが示された。fengycin 類はクオラムセンシング阻害因子として機能し、マウスの腸に黄色ブドウ球菌が定着するのを阻止した。これらの知見は、タイ農村部の住民において、バチルス属細菌が定着している人には黄色ブドウ球菌が定着していない理由の説得力のある説明になると考えられる。さらに、バチルス属細菌は、この日和見病原菌に対するプロバイオティクスとして使用できるかもしれない。プロバイオティクスであるバチルス属細菌が感染を制限できる機構を解明することで、抗生物質に依存しない新しい治療法を開発するための道が開かれる可能性がある。 [10.1038/s41586-018-0616-y](#)

生化学：p300 アセチルトランスフェラーゼの活性化

ヒストンアセチルトランスフェラーゼの p300 は転写コアクチベーターで、遺伝子調節エレメントへ誘導され、そこでクロマチンのアセチル化を起こすことで転写を促進する。今回D. Panneらは、IRF3やSTAT1のような転写因子がDNA上で活性化されて二量体化すると、p300の持続的な活性化が起こることを明らかにしている。この活性化機構には、p300の自己阻害性ループが関わっている。リシンを多く含み、本来的に無秩序な構造をとっているこのループがHATドメイン中でトランス自己アセチル化されると、p300が活性化される。この知見は、クロマチン修飾酵素の活性化が転写因子二量体のDNAへの結合に密接に連携している仕組みを説明する例証となる。 [10.1038/s41586-018-0621-1](#)

化学生物学：メチオニン部位でのタンパク質官能基化

システインやリシンなどの求核性残基での選択的なタンパク質共役反応には数多くの方法が報告されている。一方、メチオニンは、別のさまざまなタンパク質官能基化を可能にする

かもしれないが、現在利用できる方法の選択肢はほとんどない。今回M. Gauntらは、超原子価ヨウ素試薬を用いてメチオニン部位で選択的な生体共役反応を起こす方法を報告している。この過程では、ジアゾエステルと結合したスルホニウム種が形成され、次にこの種が、さらなる誘導体化の反応性中間体として機能し得る。可視光による光触媒反応を用いれば、ジアゾ基を還元してタンパク質複合体の安定性を高めることも、さらに反応を続けることもできる。これによって、天然生体分子から多様なタンパク質複合体の形成が可能になる。

[10.1038/s41586-018-0608-y](#)

神経科学：神経変性における老化細胞の役割

D. Bakerらは今回、老化細胞の蓄積と認知機能に関連するニューロンの消失の間には、因果関係があることを明らかにしている。タウ依存的な神経変性疾患のマウスモデルでは、老化したアストロサイトやミクログリアの蓄積が認められた。これらの細胞が生じたときに除去することで、グリオシス、神経原繊維変化の沈着、大脳皮質や海馬のニューロンの変性が抑制され、認知機能が維持された。老化細胞を標的とすることで、神経変性疾患の新たな治療の道が開かれる可能性がある。

[10.1038/s41586-018-0543-y](#)

発生生物学：生殖細胞の数を適正に保つ

体細胞から生殖細胞を分離して確保することは、有性生殖を遂行する上で重要である。マウスでは、この分離は着床直後の胚で起こる。この分離事象には、生殖系列決定因子の活性化を介したBMP4シグナル伝達経路が関わっているが、胚の中で最初のごく少数の生殖細胞を誘導するよう指示するのが何であるかは不明であった。今回I. Chambersらは、in vitro と in vivo において、生殖系列の誘導は、最初は転写因子OTX2によって確実に抑制されており、Otx2の発現が低下して初めて進行することを発見した。Otx2が存在しないと、サイトカインを介した生殖系列転写因子BLIMP1の活性化が起こらなくても、細胞は生殖系列への運命を選択する。 [10.1038/s41586-018-0581-5](#)

腫瘍免疫学：LILRB4は腫瘍細胞の浸潤を誘導する

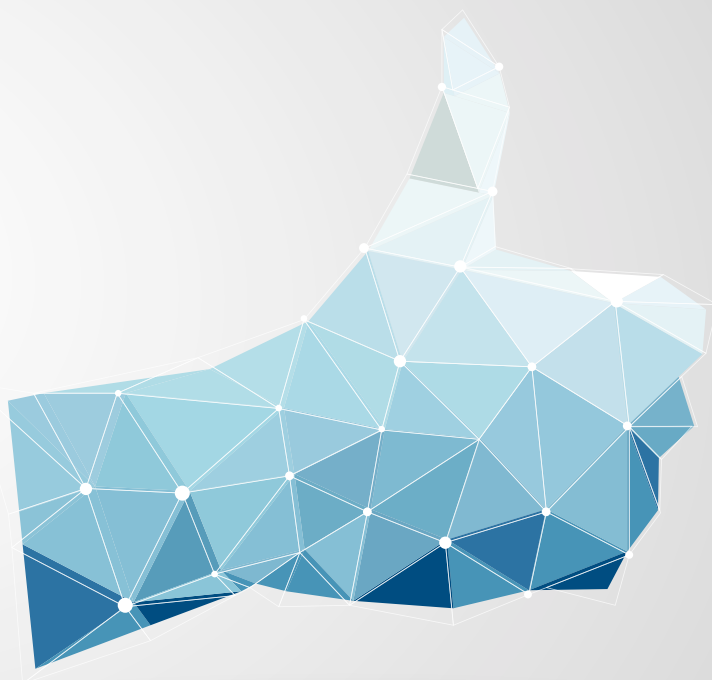
C. Zhangらは今回、急性骨髄性白血病細胞上のITIM (immunoreceptor tyrosine-based inhibition motif) を含む受容体LILRB4が、腫瘍の浸潤を促進して、T細胞応答を抑制することを示している。彼らはAPOEがLILRB4のリガンドであることを実証した。LILRB4シグナル伝達の阻害により急性骨髄性白血病の腫瘍形成が抑制される。従って、LILRB4は免疫応答抑制を解くための有望な標的である。 [10.1038/s41586-018-0615-z](#)

nature ダイジェスト

FOLLOW US!

  @NatureJapan

 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

EDITOR'S NOTE

子どもの頃、タンポポのふわふわの綿毛を「ふうーっ」と吹いて飛ばして遊んだことがあるという方は、たくさんいらっしゃると思います。今回、このタンポポの種子が飛行する機構が、これまでに知られていなかったものであることが明らかになりました（4ページ）。飛行のカギを握っているのは「剥離渦輪」と呼ばれるもので、タンポポの綿毛の上空には、物体に揚力を与えるこの剥離渦輪が安定して存在することが分かったのです。さらに、剥離渦輪がタンポポの綿毛の上空に安定して存在するためには綿毛の間隙率が重要であることが示され、綿毛のあのふわふわ加減が、計算され進化した結果であったということにも驚きました。タンポポの綿毛はこうした精緻なバランスによって揚力を得て、遠くまで飛んでいけるわけです。Natureでは以前、蚊が飛ぶ機構も他の生物では見られない独特な機構であることが報告されていて（2017年7月号「蚊が飛べる理由を解明」を参照）、未知な飛行の機構が身近なところにまだまだ潜んでいることが伺われます。また、大きな発見が身近なところに潜んでいることも実感できます。タンポポの綿毛の上空に浮かぶ剥離渦輪の様子は、nature videoで実際にご覧いただけるので、ぜひこちら (youtu.be/N2UbaDV9O9Q) にアクセスしてみてください。 

「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

（「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、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

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

掲載記事の無断転載を禁じます。

nature metabolism

ネイチャー・ダイジェスト
12月号

平成30年12月1日発行 第15巻 第12号
編集・発行人：大嶋郁子

発行所：ネイチャー・ジャパン株式会社
東京都港区虎ノ門4-3-1 城山トラストタワー5F

発売所：日本出版貿易株式会社
ISSN：2189-7778

投稿論文募集！

Metabolic pathways in health and disease

2019年創刊の *Nature Metabolism* は、オンライン限定ジャーナルで、代謝についての基礎科学研究から生物医学研究やトランスレーショナル研究まで、代謝研究の全領域を対象としています。

Find out more nature.com/natmetab

 @NatMetabolism