

nature ダイジェスト

科学が深まる、世界が広がる

12
2019

日本の再生医療政策は世界へ

- ▶ 03 低・中所得国での耐性菌増加と食肉需要に関連
- ▶ 28 科学と政治の150年
- ▶ 33 オンラインヘイトの力学
- ▶ 05 FROM 日経サイエンス
先延ばしを防ぐ支援ツール

STEM CELLS

幹細胞



ILLUSTRATION BY FABIO BUONOCORE

NEWS FEATURE

日本の再生医療政策 がもたらすもの

2014年、日本は再生医療の規制緩和へと大きく舵を切った。再生医療が迅速に市場に出る筋道をつける2つの法律が成立したのだ。これにより、希望者は幹細胞を使った治療を受けられるようになり、この政策は国際的な広がりをも見せている。だが、迅速な認定や承認と引き換えに、患者が代償を払う羽目になる危険性もはらんでいる。

NEWS IN FOCUS

03 低・中所得国での耐性菌増加と食肉需要に関連

食肉生産が急増する開発途上国では、家畜がより多くの薬剤耐性菌を保有していることが明らかになった。

06 細胞が酸素濃度を感知し応答する仕組みの解明にノーベル医学・生理学賞

07 ノーベル物理学賞は系外惑星観測のパイオニアに

09 世界を変えた電池にノーベル化学賞

11 北極地方の異常な夏に海氷の融解が駄目押し

2019年夏、激しい山火事やグリーンランドの氷床融解などの劇的な変化が起きた北極地方は、悲鳴を上げている。

14 カンブリア爆発より古い動物の這い跡

動物は「カンブリア爆発」で急激に多様化したとする説に、先カンブリア時代の動物の化石が疑問を投げ掛けた。

nature ダイジェスト

#12

DECEMBER 2019

natureasia.com/naturedigest

2019年12月1日発行

© 2019 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

掲載記事の無断転載を禁じます。

COVER IMAGE: ANDREW BROOKES/CULTURA/GETTY

17 薬剤で生物学的時計が巻き戻った？

ヒトの生物学的年齢を刻むエピジェネティックな時計を薬剤の投与で巻き戻せることが、小規模臨床試験で示された。

18 高速電波バーストの反復型の発見例
増える

謎の天体現象、高速電波バーストのリピーターが新たに8個発見され、天文学者たちは発生源の解明に一步近づいた。

NEWS IN JAPAN

27 欧州の生命科学研究と地続きに

EMBO ディレクター、マリア・レブチン氏が来日。

NEWS & VIEWS

33 オンラインヘイトの力学

ソーシャルメディアプラットフォーム上でヘイトスピーチを禁止する現行の手法がうまくいかない理由がわかった。そこから、その撲滅に有効と思われる策も見えてきた。

36 小地震も大地震も始まりは似ている

小さな地震と大きな地震の始まりは似ているのだろうか。日本周辺の地震を分析した結果から、一部のケースでは、それらはほぼ同一であることが分かった。

38 フッ素とアミド基の連続導入に成功

フッ素原子とアミド基を近接して持つ化合物は、これまで合成が不可能だったが、このほど、実用的な合成法が考案された。創薬分野で大いに役立つ可能性がある。

NEWS SCAN

05 羽根の罫 / 先延ばしを防ぐ支援ツール

EDITORIAL

41 出版社は引用情報を公開せよ

HIGHLIGHTS

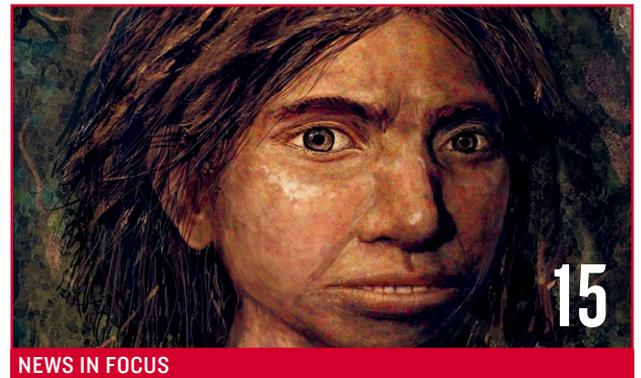
43 2019年10/3～10/31号



NEWS IN FOCUS

試験管内の「原始スープ」から
RNA 塩基を合成

地球上に現れた最初の生命体は RNA を主要成分としていたとする仮説を補強する化学的な証拠が得られた。



NEWS IN FOCUS

エピゲノムからデニソワ人の肖像

エピジェネティクスに基づいて描かれたデニソワ人の肖像は、ネアンデルタール人に似た幅広の顔立ちであった。



COMMENT

科学と政治の150年

Nature 創刊から今日まで、研究システムはどのように形作られ、変化してきたかをたどるエッセイシリーズ。今回は、政府による科学支援のルーツをたどる。



MARK GARLICK/SPL/GETTY

試験管内の「原始スープ」から RNA 塩基を合成

地球上に現れた最初の生命体はRNAを主要成分としていたとする仮説を補強する化学的な証拠が得られた。

Thomas Carellの主張が正しければ、約40億年前の地球は、地表の大部分が灰色がかった茶色の物質で覆われていた可能性がある。それは普通の鉱物ではなかった。現代の科学者たちがアデニン (A)、ウラシル (U)、シトシン (C)、グアニン (G) と呼んでいる有機分子の結晶を含んでいたのだ。そして、Carellの説に従えば、その一部を材料としてRNAが生成し、DNAが出現する前の最初期の生命体の進化を駆動し

たとえられる。

今回、有機化学者であるCarellと共同研究者らは、原始地球を模した条件下で、水や窒素などの単純な分子からA、U、C、Gを(原理的には)作ることができる化学反応経路を実証した。反応によって大量に生成したこれらの核酸塩基は、何千年もの時間をかけて蓄積し、厚い層をなしていた可能性がある」とCarellは言う。彼の研究チームは*Science* 2019年10月4日号で結果

を報告している¹。

ルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘン(ドイツ)に所属しているCarellは、この結果は「RNAワールド」仮説の信憑性を高めるものだと話す。「RNAワールド」仮説では、自己複製するRNA遺伝子から生命体が誕生したとされる。近縁分子であるDNAに遺伝情報を保存する能力を生命体が獲得したのは、その後のことである。この研究で実証された化学反応経路は、RNAを主要成分とする生命体の出現はとてつもなく幸運な出来事だったというわけではなく、他の多くの惑星でも起こり得ることを示す「強い証拠」でもあると、Carellは付け加える。

Carellの研究チームは、核酸塩基AとGを自発的に生成する化学反応を2016年に報告している²。一方、残る2つの塩基UとCについては、2009年に別のグループが同様の実験を報告していた³。しかし、これら2つの反応経

路は温度やpHなどの条件が大きく異なり、並行して同時に進行することはあり得ないように思われた。

Carellの研究チームによる今回の報告は、4種類全ての核酸塩基が一連の条件下で同時に生成し得ることを実証したものだ。原始スープの2つの池があったとする。季節が巡るに従って、その環境条件は湿潤と乾燥、高温と低温、酸性と塩基性の間を循環する。時には一方の池から他方の池に原始スープが流れ込むこともある。Carellらは、まず単純な分子を熱水中で反応させ、得られた混合物を冷却して蒸発乾固し、2つの有機化合物の結晶を含む残留物を得た。そこに再び水を加えて生成物の

1つを溶解させ、別の容器に分取した。その後、残った不溶性の生成物をさらに反応させた。全ての生成物を再び混合して反応させることで、核酸塩基が得られた。

「この論文は、全てのRNAヌクレオシドを作るために起こる必要がある化学反応経路を見事に実証したものです」と、スクリプス研究所(米国カリフォルニア州ラホヤ)の化学者Ramanarayanan Krishnamurthyは言う。ただし、この研究や類似の研究は結論から出発しているため、実際に生命が誕生した経緯を明確に証明しているとは必ずしもいえない、と警告する研究者も多い。Krishnamurthyもその1人だ。

最終的にRNAが形成されるためには、リボースという糖が核酸塩基に結合する必要がある。どのような反応でリボースが生成したかという問題に今後は取り組んでみたいとCarellは考えている。

(翻訳：藤山与一)

Lab-made primordial soup yields RNA bases

doi: 10.1038/d41586-019-02622-4
2019.10.4 (Published online)

Davide Castelvecchi

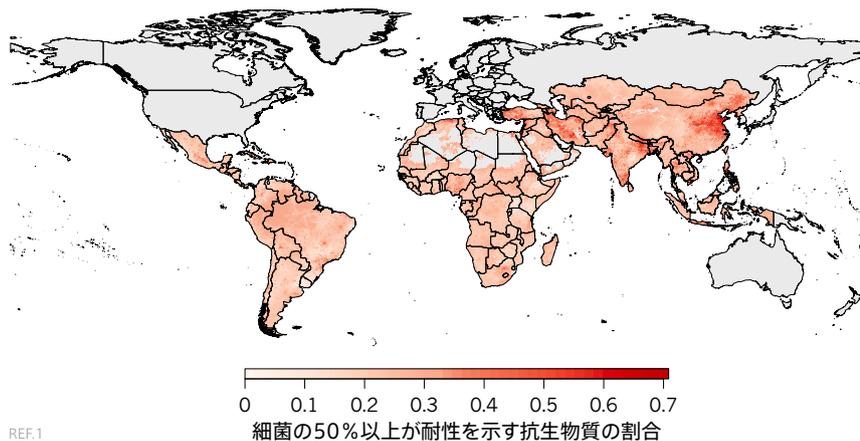
1. Becker, S. et al. *Science* **366**, 76–82 (2019).
2. Becker, S. et al. *Science* **352**, 833–836 (2016).
3. Powner, M. W., Gerland, B. & Sutherland, J. D. *Nature* **459**, 239–242 (2009).

低・中所得国での耐性菌増加と食肉需要に関連

食肉生産が急増する開発途上国が薬剤耐性菌のホットスポットに。

耐性菌のホットスポット

食肉生産が急増している国では、家畜はより多くの薬剤耐性菌を保有している。



REF.1

鶏、豚、牛などの家畜に投与される抗生物質に対する耐性が、インドや中国東北部で上昇していることが明らかになった。この憂慮すべき傾向は、開発途上国における食肉生産の増加と関係しているという。この調査結果は、*Science* 2019年9月20日号で報告された。

アジア、アフリカ、南アメリカの家畜が保有する抗生物質耐性菌を調査したこの研究¹によれば、ケニア、ウルグアイ、ブラジルにも薬剤耐性菌のホットスポットが出現している。これらの地域では、家畜の成長促進と感染症予防のために抗生物質を投与するような集約的な畜産経営が行われるようになり、2000年以降、食肉生産量は急激に増加している。

論文の共同著者であるチューリヒ工科大学(スイス・バーゼル)の疫学者Thomas Van Boeckelは、「(家畜で)抗生物質耐性が上昇していること、そして低所得国や中所得国では特に急速



QIU HAIYING/ACG VIA GETTY IMAGES

に上昇していることを示すいくつかの証拠が、初めて得られました」と話す。増大する脅威への対策を各国政府が講じるべきであり、世界規模での連携もまた必要だと彼は指摘する。

耐性が時間とともにどのように出現してきたかを明らかにするために、Van Boeckelらは4つの一般的な細菌（サルモネラ、カンピロバクター、黄色ブドウ球菌、大腸菌）に焦点を当て、開発途上国で行われた901の疫学研究を分析した。その情報に基づいて、多剤耐性がすでに出現している場所と出現しつつある場所とを地図上に落とし込んだ。

彼らの結果はまた、家畜の体重増加促進目的で最も広く使われている抗生物質4種（テトラサイクリン系、スルホンアミド系、キノロン系、ペニシリン

系）に対する耐性率が最も高いことを示している。細菌が耐性を獲得した薬剤の割合は2000～2018年の間に鶏と豚で約3倍に、牛では2倍に増えた。

抗生物質耐性の専門研究機関であるルサラ財団研究所（メキシコシティ）の微生物学者Carlos Amábile-Cuevasは、ホットスポットが存在する国のいくつかは毎年何千tもの食肉を輸出しているため、状況は深刻だと話す。世界中で消費される鶏肉と豚肉の約5分の1が、そうした地域で生産されているのである。

各国政府が家畜に対する抗生物質の使用を法的に規制したとしても、一方で抗生物質を使って生産された食肉を輸入していたのでは意味がない。「この問題に国境はないのです」とAmábile-

Cuevasは指摘する。

1950年代から抗生物質を使ってきた高所得国は、耐性が上昇しつつある国で安全な畜産経営が行われるよう財政支援すべきだとVan Boeckelは主張する。「この世界的な問題は私たちが生み出したのですから、私たちには大きな責任があります」と彼は言う。■

（翻訳：藤山与一）

Alarm as antimicrobial resistance surges among chickens, pigs and cattle

doi: 10.1038/d41586-019-02861-5
2019.9.20 (Published online)

Emiliano Rodríguez Mega

1. Van Boeckel, T. P. et al. *Science* **365**, eaaw1944 (2019).

羽根の罠

落とし穴で虫を捕まえるアリ

羽根が落ちていても特に危険を感じないが、ブラジルの熱帯サバンナにいる虫は落ちて羽根にうっかり近づいてはいけぬ。Pheidole oxyopsというオオズアリ属のアリが地中の巣につながる入り口の周囲に疑似餌として羽根を置き、近づいた生き物を巣に引きずり込んでいることが新たな研究で示された。積極的に獲物を狩るのではなく疑似餌や罠を使う行動は、アリとしては珍しい。

ヴィソールザ連邦大学（ブラジル）の生態学者Inácio Gomesは最初に市街地の公園で、次いで大学のキャンパスで、アリの巣の入り口の周りに羽根があることに気付いた。彼は罠を仕掛けるアリを報告した科学文献を見たことはなかったが、改めて調べると2つの仮説が見つかった。羽根は乾燥した地域で朝露を集めるためのものであるという説と、疑似餌として置かれているという説だった。

Gomesらはこれらの説を実験的に検証し、その結果を2019年8月の*Ecological Entomology*に報告した。彼らが湿った綿の玉を置いていてもアリは羽根を集めたので、水を集めるために使われているのではないと考えられる。周囲に羽根を置いた罠と羽根のない罠を作って比較したところ、羽根のある罠の方が多くの節足動物を捕らえた。

オオズアリの罠にダニやトビムシ、他種のアリなどの獲物が落ちると、巣穴の入り口が軟らかいのでよじ登って脱出するのは難しく、巣の主の餌食となる、とGomesは言う。

ハーバード大学（米国）の生物学者Helen McCreeryは、「カリスマ的な驚くべき行動です。巣を離れずに餌を得るアリの例は非常にまれです」と言う。

そもそもなぜ獲物が羽根に引きつけられるのか、McCreeryはいぶかる。Gomesは羽根の匂いと形に引きつけられるのだろうとみている。「土壌昆虫は一般に好奇心がとても旺盛です。落とし穴型の罠が非常に有効な理由もそこにあります」とGomesは言う。科学者は野生の標本を採集するのに同様の罠を使っている。

*P. oxyops*は単独で食物を探すこともあれば、他の種と同じように集団で狩りをすることもあるが（Gomesはこのアリがカマキリを解体しているのを見たことがある）、獲物の乏しい長い乾期を切り抜けるために羽根の罠で狩りを補っているのだろうとGomesは言う。

（翻訳協力：粟木瑞穂）

先延ばしを防ぐ支援ツール

課題ごとにご褒美ポイントでやる気引き出す

すぐに満足を求めるか、それとも将来の利益のために我慢するか。この選択で人は近視眼的な決定をしてしまうことが多い。例えばジムに行くのではなくテレビを見続け、難しい課題に取り組まずにソーシャルメディアをスクロールする。「目の前のご褒美と長期的な価値をうまく評価できないため、長期的に見て自分にとって最善なことをするのがひどく難しい場合が多いのです」とマックス・プランク・インテリジェントシステム研究所（ドイツ・チュービンゲン）の認知科学者Falk Liederは言う。

Liederらは、各個人を最善の選択に導くためのデジタルツールを開発した。彼らが「認知補助装置」と呼ぶこのツールは、ある決定がすぐにもたらす利益と長期的な価値を人工知能によって比べ、「やることリスト」全てに対する人の意思決定を助けることができる。課題リストと各課題に対する個人の主観的な抵抗感、費やせる時間の量などさまざまな要素を考慮する一連のモデルとアルゴリズムを開発した。このシステムはユーザーに合わせて各課題にご褒美ポイントを割り当て、ユーザーが全ての課題を完了するように仕向ける。

「人が現実世界で行っている困難な取り組みをゲームのような環境に変えようというアイデアです。ご褒美ポイントは最も手近で達成可能な目標をユーザーに与え、ユーザーは自分が前進していることが分かります」とLieder。

2019年8月の*Nature Human Behaviour*に報告されたこのAI支援システムは、被験者がより適切な意思決定を迅速に行うのに寄与し、物事の先送りが減った。また、与えられた課題を全て完了する率が上がった。被験者120人に複数の作文課題のリストを示した実験では、ツールを使った被験者の85%が全課題を完了したのに対し、ツールを使わなかった被験者では56%にとどまった。

Liederによれば、現在のツールを、より多くの課題項目に対応できるようスケールアップを図っている。同時にCompliance社という企業と共に、このツールを既存のタスク管理アプリに組み込む作業を進めている。この認知補助装置が現実世界の環境でどれほど有効かも調べられる予定だ。

（翻訳協力：鐘田和彦）

細胞が酸素濃度を感知し 応答する仕組みの解明に ノーベル医学・生理学賞

受賞者3氏の発見は、貧血やがんなどの疾患解明の基盤となるものだ。

2019年のノーベル医学・生理学賞は、細胞が酸素濃度の変化を感知して、遺伝子のオン・オフを切り替えることで応答する仕組みを解明した3氏に贈られる。この発見は、がんや貧血などのヒト疾患を解明する上で重要な足掛かりとなっている。

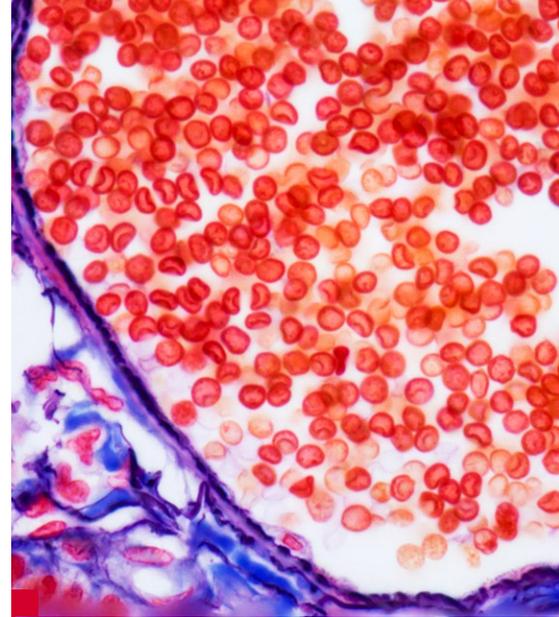
今回受賞した3氏は、ダナ・ファーマーがん研究所（米国マサチューセッツ州ボストン）のがん研究者ウィリアム・ケリン（William Kaelin）、オックスフォード大学（英国）およびフランス・クリック研究所（英国ロンドン）の医師で科学者のピーター・ラトクリフ（Peter Ratcliffe）、ジョンズホプキンス大学（米国メリーランド州ボ

ルティモア）の遺伝学者グレッグ・セメンザ（Gregg Semenza）である。3氏は、2016年にアルバート・ラスカー基礎医学研究賞も共に受賞している。

彼らの研究は、体が低酸素状態に応答して、赤血球を増産したり新しい血管を伸ばしたりして順応する仕組みの解明に大きく役立った。

「これは、彼らが貢献した基礎的発見の1つです」とペンシルベニア大学（米国フィラデルフィア）のがん生物学者Celeste Simonは話す。「全ての生物は酸素を必要とします。ですから、この発見は本当に重要なものなのです」。

「低酸素への応答という研究分野は、この発見を軸として成長しました。そ



体の組織も腫瘍も、低酸素状態に応答して赤血球増産や血管新生を行う。

してこの発見は、3氏のそれぞれの知見が支え合って結実したものです。ちょうど三脚椅子のようなものですね」と、ケンブリッジ大学（英国）およびカロリンスカ研究所（スウェーデン・ストックホルム）の生理学者で同研究所ノーベル賞会議のメンバーでもあるRandall Johnsonは言う。

酸素欠乏

体の組織は、運動中や、脳卒中などで血流が遮断された場合に酸欠状態になることがある。細胞が酸素濃度を感知する能力は、胎児の発生や胎盤の発達に重要なだけでなく、腫瘍の増殖にも不可欠である。急速にたくさんの細胞が増殖することで、腫瘍の内部で酸素が欠乏する可能性があるからだ。

3氏は1990年代に行った研究で、体内の酸素濃度に応答するために細胞が進行させる分子過程を見つけた。彼らは、この過程の中心にあるのが、低酸素誘導因子（HIF）およびVHLと呼ばれるタンパク質が関与する機構であることを明らかにした。

セメンザとラトクリフは、エリスロポエチン（EPO）というホルモンの調



2019年のノーベル医学・生理学賞受賞者。ピーター・ラトクリフ（左）、ウィリアム・ケリン（中央）、グレッグ・セメンザ（右）。

節について研究した。EPOは、低酸素状態に反応して赤血球の生産を促進するのに重要である。セメンザのチームは、タンパク質複合体であるHIFを形成する2つのタンパク質それぞれの遺伝子を特定した。HIFは、低酸素状態になると、複数の遺伝子のスイッチをオンにしてEPOを増産させる。

一方ケリンは、細胞が酸素濃度に反応する仕組みに、VHLという遺伝子も関与しているらしいことを見つけた。彼は、フォン ヒッペル・リンダウ病と呼ばれる遺伝性症候群を研究していた。この疾患が発生する家系はVHLに変異があり、この疾患があると特定のがんになるリスクが上昇する。

ラトクリフのチームはその後、酸素濃度が上昇すると、VHLにより発現されるタンパク質がHIFの構成要素の1つと相互作用し、そこに分解のための目印を付けることで、低酸素状態への応答を停止させることを見つけた。

2001年にはケリンおよびラトクリフのチームが、それぞれこの過程についてさらに詳しく解明した。彼らが発見したのは、酸素存在下ではVHLタンパク質に「プロリンの水酸化」という化学的修飾が起こって、VHLがHIFに結合できるようになり、それがHIFの分解を招くことだ。しかし、細胞が酸素欠乏状態になると、この化学的修飾が妨げられてHIFの活性が蘇る。

その結果、細胞は単にHIFの分解を阻害するだけで低酸素状態に反応できるのだと、デューク大学（米国ノースカロライナ州ダラム）のがん生物学者Mark Dewhirstは説明する。「細胞は数分で応答可能です」。

医薬品開発

3氏の研究は、がんで見られるものも含

めた酸素濃度感知過程を標的とする医薬品の開発につながった。VHLがHIFに結合するのを阻害してHIFの分解を引き起こす「プロリン水酸化酵素阻害剤」と呼ばれる薬剤は、貧血や腎不全の治療薬としても研究されている。2018年には中国の規制当局が、プロリン水酸化酵素阻害剤を初めて承認した。

「この感知応答機構のいくつかの側面は、考え得る全ての疾患に深く関わってくると言えるでしょう」とSimonは話す。また、同じ分野の研究者らは、3氏を科学者のお手本だと称賛する。「彼らは非常に謙虚な人たちです」とDewhirstは話し、Simonはさらに、「3人とも、科学的な厳密性と再現性について最高度の絶対的な基準を貫いています」と述

べている。

特にケリンは、自分の研究領域で、有力な証拠の裏付けがないがん治療薬候補が追求されていることに対して批判的だ。彼は、2018年に米国立衛生研究所(NIH; メリーランド州ベセスダ)で行った講演で、科学者らを前にこう話した。「科学において最も危うい結果とは、期待していた通りの結果です。なぜなら、そこで勝利を宣言して手を抜いてしまうからです」。

(翻訳: 船田晶子)

Biologists who decoded oxygen sensing win Nobel

Vol. 574 (161-162) | 2019.10.10

Heidi Ledford & Ewen Callaway

ノーベル物理学賞は系外惑星観測のパイオニアに

2019年のノーベル物理学賞は、太陽に似た恒星の周りを公転する系外惑星を発見した2人の天文学者と、宇宙の進化を記述する理論を構築した宇宙論研究者に授与される。

宇宙論研究者ジェームズ・ピーブルズ (James Peebles) と天文学者ミシェル・マイヨール (Michel Mayor) およびディディエ・ケロー (Didier Queloz) が、宇宙の進化と宇宙の中で地球が占める場所についての発見により、2019年のノーベル物理学賞を受賞した。

1995年、ジュネーブ大学 (スイス)

のマイヨールと、彼の当時の学生だったケローは、太陽に似た恒星の周りを公転する惑星を初めて発見した (M. Mayor and D. Queloz *Nature* 378, 355-359; 1995)。彼らの研究から、今日の天文学で最も活気がある分野の1つが始まった (2016年2月号「太陽系外惑星探査: 次の20年」参照)。彼らは惑星

の重力によって恒星がわずかにふらつく現象を利用して、ペガス座51番星の周りを公転するペガス座51番星bを発見した。この手法は、現時点で存在が知られている4000以上の系外惑星の一部の研究に利用されている（2013年1月号「わずか4.4光年先に、地球大の惑星！」参照）。

一方、プリンストン大学（米国ニュージャージー州）のピーブルズは、宇宙の歴史の現代的な理解の基礎となる理論的枠組みを構築した（P. J. E. Peebles and J. T. Yu *Astrophys. J.* **162**, 815; 1970）。中でも重要なのは、ビッグバンの「残照」である宇宙マイクロ波背景放射（cosmic microwave background: CMB）の理論の基礎を打ち立て、宇宙の進化に関する現在の「標準モデル」の確立に寄与した点である。このモデルでは、暗黒物質として知られる謎の物質が、銀河や銀河団などの宇宙の大規模構造の形成に中心的な役割を果たしたとされている。

900万スウェーデン・クローナ（約1億200万円）の賞金の半分をマイヨールとケローが分け合い、残りの半分をピーブルズが受け取る。

宇宙科学研究所-CSIC（スペイン・バルセロナ）の天文学者 Guillem Anglada-Escudé は、マイヨールとケローの発見から「現代の系外惑星科学が始まりました」と言う。それ以前にも、系外惑星は発見されていた。ただしその惑星は、パルサーと呼ばれる、死んだ恒星の核が高速で自転している中性子星の周りを公転していた。太陽に似た恒星の周りを公転する、つまり、生命が存在できる可能性のある系外惑星は、2人が発見したペガス座51番星bが最初であった。2人の発見は、当初意外なものとして受け止められた。ペガス座



2019年ノーベル物理学賞を受賞したディディエ・ケロー（左）、ジェームズ・ピーブルズ（中央）、ミシェル・マイヨール（右）。

LTOR: UNIV. CAMBRIDGE; TORBJORN ZADIG; INAMORI FOUNDATION

51番星bは巨大ガス惑星だったからである。天文学者たちは、このタイプの惑星は惑星系の外側の軌道を公転していると考えていたが、ペガス座51番星からペガス座51番星bまでの距離は太陽から水星までの距離よりも近かった。これは、他の惑星系が私たちの太陽系に似ているとは限らないことを示唆する初期の兆候となった。

Anglada-Escudéは、彼らの発見は疑いの余地がほぼなく、速やかに確認された点で、特筆に値するものだったと説明する。

最初の光を探る

一方、ピーブルズの理論は、宇宙論研究者がCMBと宇宙の始まりについてよりよく理解することを可能にした。

ストックホルム大学（スウェーデン）の分子物理学者で、2019年ノーベル物理学賞選考委員長である Mats Larsson は、この賞の授与を発表したときに、「ピーブルズによる理論的発見がなければ、過去20年間の素晴らしく高精度なこの放射の測定結果から、私たちはほとんど何も理解できなかったでしょう」と語った。

ピーブルズは「冷たい暗黒物質」理

論と呼ばれる宇宙進化モデルを考案した。これは、高温・高密度状態から始まった宇宙が膨張して冷えてゆく際に、宇宙論的構造がどのように形成されたかを記述する理論である。その後、この理論に暗黒エネルギーに関するアイデアが追加されて、現代宇宙論の標準的な枠組みとなった。

暗黒物質の性質はまだ正確には解明されていないが、CMBの研究や、空の広大な領域での銀河の地図の作成など、宇宙のいくつかの高精度観測からは、この理論を裏付ける結果が得られている。パリ天体物理学研究所（フランス）の天文学者 François Bouchet は、「もっと前に受賞してもおかしくない業績です」と言う。

系外惑星と宇宙論の研究が同じ賞を分かち合うのは異例だが、どちらの研究も「宇宙の中で人間が占める場所について、新鮮な視点を与える」ものであることは明らかだ、と Bouchet は言う。■

（翻訳：三枝小夜子）

Planet pioneers win
physics Nobel
Vol. 574 (162) | 2019.10.10
Elizabeth Gibney & Davide Castelvecchi

世界を変えた電池に ノーベル化学賞

充電式リチウムイオン電池の開発に貢献した3氏にノーベル化学賞が贈られることが決まった。

スウェーデン王立科学アカデミー(ストックホルム)は2019年10月9日、エネルギー貯蔵に革命を起こしたリチウムイオン電池の開発につながる研究をしたジョン・グッドイナフ(John Goodenough)、スタンリー・ウィットニングム(Stanley Whittingham)、吉野彰^{よしの あきら}の3名にノーベル化学賞を授与することを発表した。ノーベル化学賞委員会は、この技術は携帯電話をはじめとする現代のポータブル電子機器に電力を供給する充電式軽量リチウムイオン電池の開発に寄与しただけでなく、将来的に「化石燃料を使わない社会を可能にする」と説明した。

テキサス大学オースティン校(米国)の97歳の固体物理学者グッドイナフは、ノーベル賞史上最高齢の受賞者となった。「大変光栄です。素晴らしいことです。けれども受賞後も私は私。何も変わりませんよ」とグッドイナフは*Nature*に語った。

旭化成名誉フェローで名城大学(名古屋)の化学者でもある吉野は受賞発表後、「素晴らしいです。とても驚きました！」と記者に語った。賞金の900万スウェーデン・クローナ(約1億200万円)は3等分される。

充電池が開く世界

「受賞は遅過ぎでしょう」とバース大学

(英国)の材料化学者Saiful Islamは言う。「でも、材料化学の重要分野が認められてよかったと思います。ご存じの通り、『ポータブル革命』を後押ししたのはリチウムイオン電池ですから」。

リチウムイオン電池は、放電時にリチウムイオンが負極から電解質を通過して正極へと移動し、充電時に逆方向に移動するという仕組みで動作する。

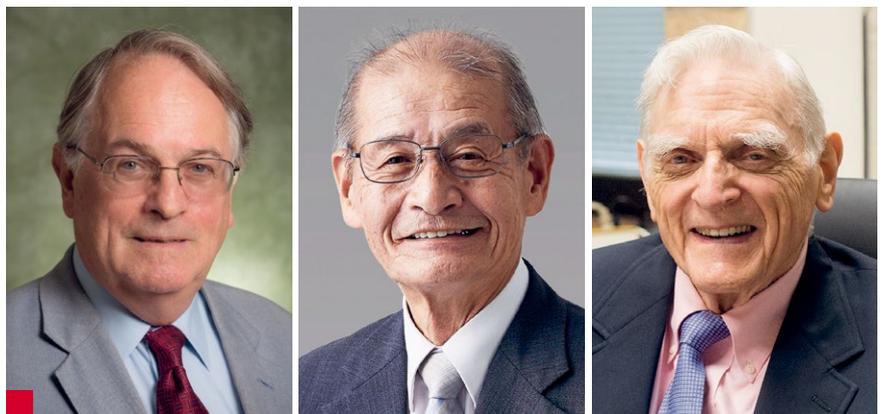
1970年代、石油会社エクソンに勤めていたウィットニングム(現在米国ニューヨーク州立大学ビンガムトン校に所属)は、充電式リチウム電池のアイデアを提示し、負極材料にリチウム金属を、正極材料に二硫化チタンをそれぞれ用いた試作品を開発した。この電池は、エネルギー密度が高く、正極

へのリチウムイオンの拡散が可逆的なので充電可能である。しかし、製造コストが高く、安全性への懸念もあったため、商業化はされなかった。

1970年代後半から1980年代初頭にかけて、グッドイナフはリチウムイオンを貯蔵できるコバルト酸リチウムという層状酸化物を正極として用いた充電電池を開発した。これにより電池のエネルギー密度が大幅に増大した。コバルト酸リチウムは、今なおリチウムイオン電池の最適な正極材料となっている。

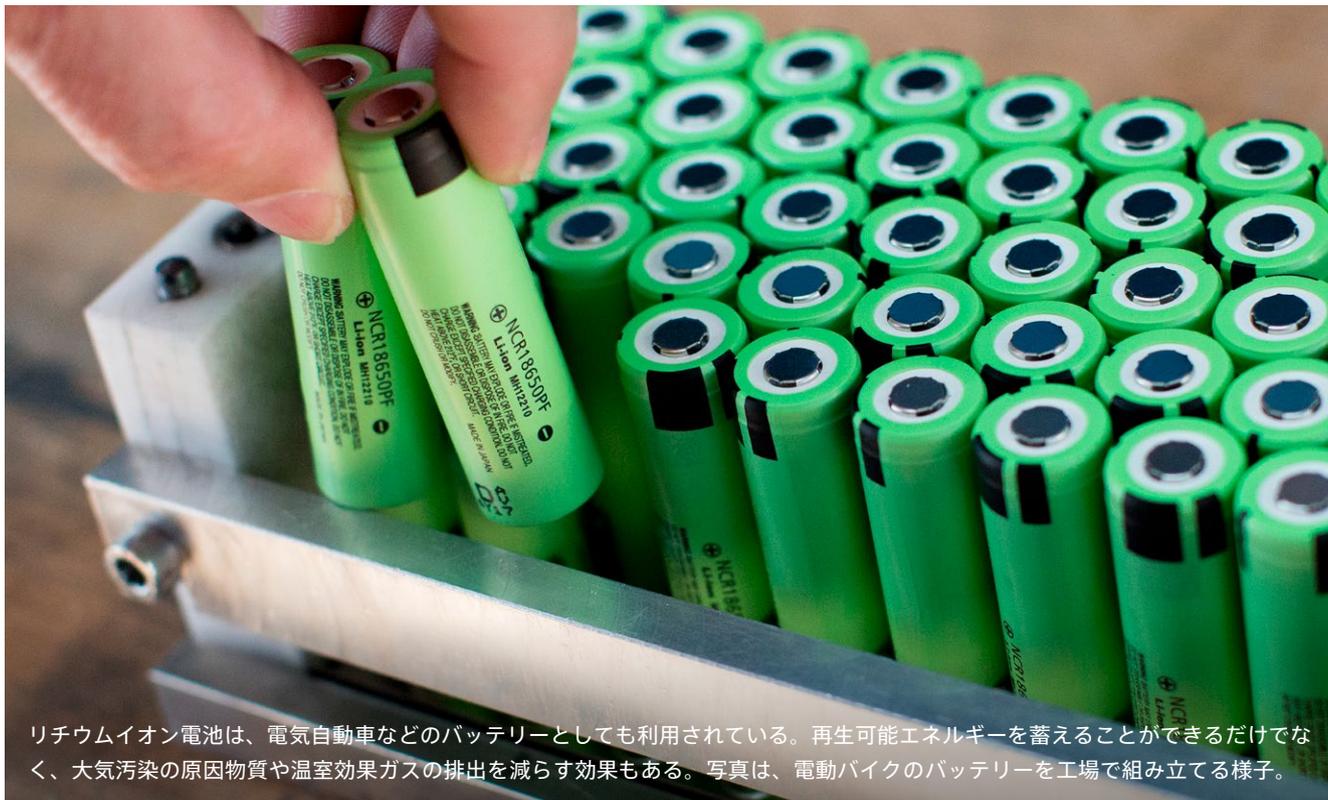
そして1980年代、吉野は負極材料を取り替えて安全性を劇的に向上させ、リチウムイオン電池の商業生産を可能にした。リチウムイオンを取り込むことのできる炭素系材料を初めて負極として用いたのだ。「1981年に開発に着手し、1985年にリチウムイオン電池を発明しました」と吉野は話した。

世界中の研究所で、リチウムイオン電池に代わり得る代替技術の実験や、既存の電池をより安全に、より持続可能に、より長持ちさせる開発が精力的に行われている(2014年6月号「充電池開発の最前線」、2014年12月号「安価で性能に優れた液体金属電池」参照)。しかし、現在の電池の基本設計が今後



2019年のノーベル化学賞は、スタンリー・ウィットニングム(左)、吉野彰(中央)、ジョン・グッドイナフ(右)の共同受賞となった。

L TO R: BINGHAMTON UNIV./THE JAPAN PRIZE/UNIV. TEXAS AT AUSTIN



LISI NIESNER/BLOOMBERG VIA GETTY IMAGES

リチウムイオン電池は、電気自動車などのバッテリーとしても利用されている。再生可能エネルギーを蓄えることができるだけでなく、大気汚染の原因物質や温室効果ガスの排出を減らす効果もある。写真は、電動バイクのバッテリーを工場ではり立てる様子。

優位性を維持すると思われ、電気自動車や電力網向けのエネルギー貯蔵電池を通して、経済の脱炭素化に向けて重要な役割を果たし得ると、ケンブリッジ大学（英国）の材料化学者 Clare Grey は言う。「現在のリチウムイオン電池は、今後もしばらく使われるでしょう」。

持続可能な未来

また、ノーベル賞委員会は、太陽や風力などの再生可能資源から得たエネルギーの貯蔵に、近年ますます電池が使われている点を指摘し、各国が化石燃料からの脱却を試みる中、より持続可能な未来を築く上でリチウムイオン電池が果たし得る役割を強調した。

「実用的な研究の重要性を認めたノーベル賞委員会を、称賛したいと思います」と、マサチューセッツ工科大学（米国ケンブリッジ）の化学者 Donald

Sadoway は言う。電気自動車用に開発されている充電電池は、温室効果ガス排出を減らすだけでなく、大気質を向上させる重要な役割を果たすだろう、と Islam は話す。

ノーベル化学賞委員会の一員であるマサチューセッツ大学ローウェル校（米国）の化学者 Olof Ramström は、今年の化学賞は真に学際的な取り組みを認めたものと力説した。「多くの化学領域が関わっており、物理学や工学とも関係しています」と授賞発表時に語った。「これらの分野全てが協力し合った、大変良い例となっています」。

リチウムイオン電池技術の開発に貢献した人は数多くいるが、ノーベル賞委員会は良い選択をしたと、ウィットニングムの共同研究者 Grey は話す。特に、グッドイナフは、材料研究分野の「知の巨人」であり、電池以外の分野で

も基盤となる多くの貢献をした。「グッドイナフは、それまでの磁性に関する考え方を換え、電子伝導の説明に尽力しました」と Grey は言う。

最も楽しかったのはリチウム電池の研究かと尋ねられると、グッドイナフは「いいえ。一番楽しかったのは、モット転移という過程を調べる研究に思います」と *Nature* に語った。モット転移とは、材料中の電子が自由に動ける状態から個々の原子に束縛されて動けなくなる状態へ移り変わる過程のことである。

（翻訳：藤野正美）

World-changing batteries win Nobel

Vol. 574 (308) | 2019.10.17

Davide Castelvetti & Emma Stoye

北極地方の異常な夏に 海氷の融解が駄目押し

激しい山火事からグリーンランドの氷床の融解まで、北極地方は悲鳴を上げている。

2019年7月、ベーリング海での研究航海の途中でアンカレジ（米国アラスカ州）に上陸したChelsea Wegnerは衝撃を受けた。州内各地で発生中の山火事による煙が空を暗くし、ちょうど熱波に見舞われていたアンカレジの気温は観測史上初めて32℃を上回っていたのだ。

メリーランド大学（米国ソロモンズ）の海洋生物学者であるWegnerは、異例の暖かさによりベーリング海の海氷がほとんど全部溶けてしまったことも

知った。「現実とは思えない瞬間でした」と彼女は言う。

その後、カナダの砕氷船に乗ってアラスカ沖を航海していたWegnerは、セイウチたちが開放水面で泳ぐ姿を目にした。彼らが普段よじ登って体を休めたり、北極圏の夏の間に出産して子育てをしたりするための海氷は、周囲に浮かんでいなかった。

2019年10月3日、米国立雪氷データセンター（National Snow and Ice

Data Center；コロラド州ボルダー）により、この夏の海氷融解について最終的な数字が発表された。1978年に人工衛星を利用した記録が始まって以来、海氷の面積は最小に近い水準となった。

極北の異例の夏が終わった今、北極地方が直面する無数の問題について検証したい。

北極海の海氷が急減

北極海の海氷は、毎年、長い夏の間溶けて冬に凍るというサイクルを繰り返している。しかし、北極地方の冬から春にかけての予想外の暖かさのせいで十分な量の氷が形成されず、この夏に海氷が激減する原因を作ってしまった（「最小記録に迫る」参照）。

この傾向が特に顕著だったのがベーリング海である。ウィリアムズカレッジ（米国マサチューセッツ州ウィリアムズタウン）の極域科学者Alice Bradleyは、「ベーリング海では1月から5月頃まで海氷が形成されませんでした。過去には見られなかった現象です」と言う。「2月には、ベーリング海の上空に低気圧が居座って、南からの温かい空気を送り込み、ようやく形成された小さな海氷を北の海域に押しやってしまった。

春と夏を通じて、ポーフォート海（北極海の一部で、アラスカの北方の海）や北極海中央部の海氷は、例年よりも速く溶けた。7月には氷の面積と体積が観測史上最小を記録し、8月初旬にはアラスカ沖の陸地から240km以内の

今年の夏、ロシアとアラスカの間広がるチュクチ海（ベーリング海峡の北方にある北極海の一部）では、海氷はまばらにしか見られなかった。

YURI SMITYUK/TASS VIA GETTY



海に海水が全くない状態となった。

海水の面積は9月18日に最小を記録後、増加に転じた。2019年の融解シーズンは、2012年9月17日に観測された338万7000km²という最小記録を破ることはなかったものの、海水が減少のスパイラルに陥っていることを裏付けるさらなる証拠となる。

過去5年間、9月の海水の面積は1981～2010年の平均値よりかなり少ないところを推移していた。そして、北極海の海水の体積も急激に減少している。2019年7月に記録された8800km³という体積は、1979～2018年の平均値より47%も少ない。

再び海水が形成される季節が始まっているが、形成される水の多くは薄い「一年氷」であるため、翌年には溶けてしまう可能性が高い。

グリーンランドの氷床が融解

2019年の夏、グリーンランドの巨大な氷床も熱波に見舞われた。島全体で気温が上昇し、例年の7月末の平均気

温より12℃も高くなったのだ。

氷床で最も標高の高い地点にある観測基地「サミット・ステーション」では、7月30日と31日に気温が0度を上回った。これがどんなに珍しいことであるかは、氷床コア記録から分かる。サミット・ステーションの氷は、西暦500年から1994年までの間に8回しか溶けたことがないのだ。

熱波に襲われた5日間で、グリーンランドは550億tの氷を失った。特に8月1日には24時間で130億tもの氷が失われたと見積もられている。これは、1950年に観測が始まって以来、最多の融解量である。

グリーンランド全体で、氷床の表面のうち2019年の夏にいくらかでも溶けた部分は約60%であった（「大規模な融解」参照）。これは、氷床の約98%が何らかの表面融解を起こした2012年の夏に次ぐ記録である。

リエージュ大学（ベルギー）の極域科学者Xavier Fettweisによると、グリーンランドは2019年、小規模なと

ころでは氷床の表面からの水の溶け出しにより、大規模なところでは氷山の分離により、恐らく1.5mm強の海面上昇に寄与したという。

今後、研究者らが夏に融解した氷の質量を、冬の積雪により加わった質量と比較すれば、2019年のグリーンランドは極端な減少が起きた2012年と少なくとも同程度の氷を失ったという結果になる可能性がある。

急上昇する気温

欧州委員会（EC）のコペルニクス気候変動サービス（Copernicus Climate Change Service：C3S）と米国海洋大気庁（NOAA）によると、2019年7月は、世界中で観測史上最も暑い月になったという。なお、過去5年間の全ての年が、観測史上最も暑い7月の上位5位までに入っている。

アラスカ、カナダ西部、ロシア中央部の北極地方の1月から7月までの平均気温は、いずれも例年より2℃以上高かった。7月の最初の週には、アラスカ南部の多くの都市で観測史上最高の気温が記録された。7月と8月には、アラスカ沖の海水温が例年に比べて高かったせいで、数千羽の海鳥が主に飢餓で死んだ。この現象は5年連続で発生している。

アラスカの気温は9月初旬になっても記録更新が続いた。同州北端のいくつかの都市では、観測史上最も暑い9月となった。

スウェーデンでは、7月26日にマルクスヴィンサ（Markusvinsa）村で34.8℃を記録した。これは、北極圏内に位置するこの地域で記録された気温としては観測史上最高だ。7月末にグリーンランドの氷床を溶かした熱波は、そこに到達する前に欧州西部に大きな被害を



2019年の熱波の影響により、アラスカでは森林火災が例年より長期間続いた。

もたらし、ベルギーとオランダでは観測史上初めて気温が40℃以上になった。

広がる山火事

高温により、北方森林はいつ爆発するか分からない火薬庫と化した。2019年夏、アラスカでは州の南部と中央部を中心に、100万ヘクタール以上の森林が燃えた。山火事のシーズンは例年になく早い4月に始まり、例年より長期にわたって続いている。州当局は、燃え続ける山火事に対応する消防士を確保するため、公式の山火事シーズンの終わりを例年の8月末から9月末まで1カ月間延長しなければならなかった。

シベリアでは7月以降260万ヘクタール以上の森林が燃え、ロシア東部全域の都市を煙で包んだ（「各地で上がる山火事の煙」参照）。高温と風と雷雨によって火花が起り、火災を拡大させた。ロシア政府は7月末にシベリアのいくつかの地域に非常事態宣言を出した。

アラスカとシベリアの山火事の多くは8月には終息に向かい始めたが、それでも北極地方の山火事の持続期間としては記録的な長さとなった。6月だけでも大気中に5000万tの二酸化炭素が排出された。C3Sによると、これはスウェーデンの年間の二酸化炭素排出量にほぼ等しく、過去9年間の7月の北極地方での山火事による二酸化炭素排出量の合計にほぼ等しいという。

山火事がほとんど発生しないグリーンランドでも、この夏の記録的な熱波の間に数件の山火事が発生した。 ■

(翻訳：三枝小夜子)

Dramatic sea-ice melt caps
tough Arctic summer

Vol. 573 (320-321) | 2019.9.19

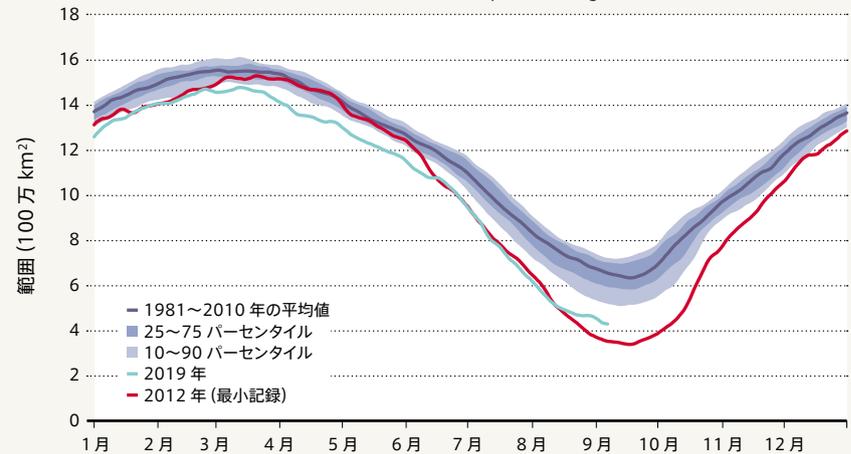
Alexandra Witze

変わりゆく北極地方

2019年の夏には北極地方の全域で劇的な変化が起きた。北極海の海氷で覆われている領域は激減し、グリーンランドの氷床は広い範囲で融解し、アラスカ、カナダ、ロシアでは異例の頻度と激しさで山火事が発生した。

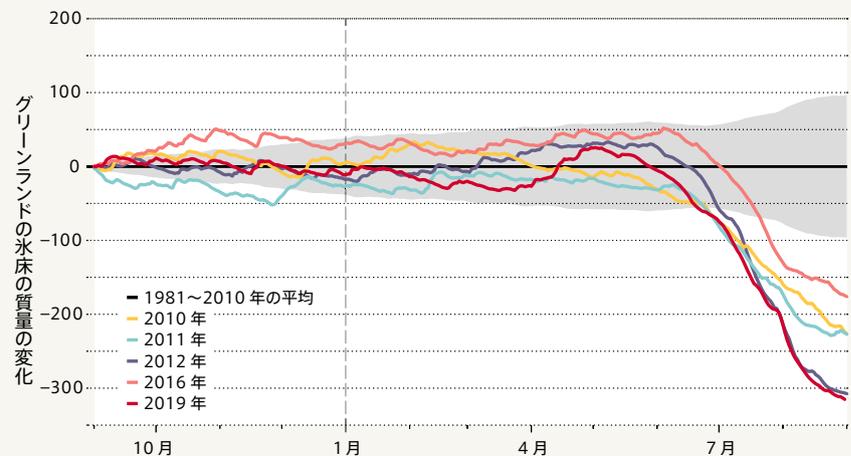
最小記録に迫る

北極海の海氷で覆われている領域は、この夏、1978年に人工衛星での観測が始まって以来有数の小ささになった。（訳註：グラフはサイトに随時更新中である。http://nsidc.org/arcticseaicenews）



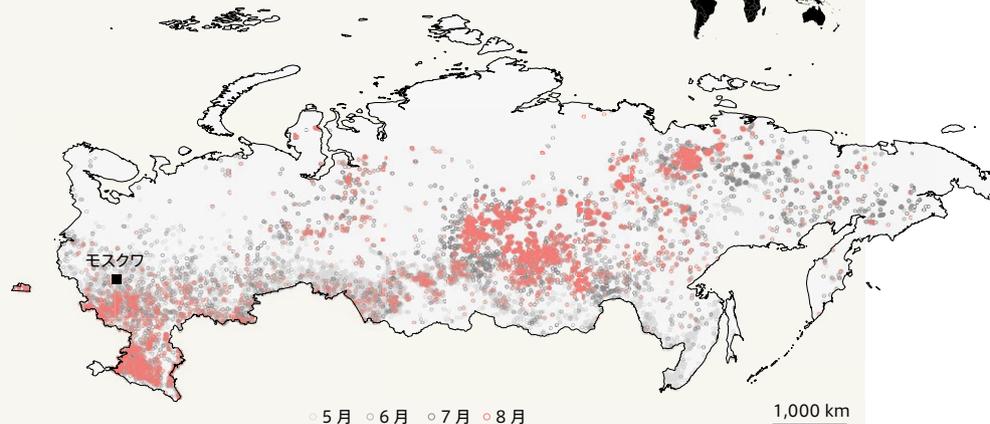
大規模な融解

2019年の夏、グリーンランドの巨大な氷床では、広い範囲にわたり異例の表面融解が発生した。



各地で上がる山火事の煙

この夏の高温は、シベリアやロシア国内の他の地域で激しい山火事を引き起こした。



*Yilingia spiciformis*の化石と、その這い跡。

Z. CHEN ET AL./NATURE

カンブリア爆発より古い動物の這い跡

動物は「カンブリア爆発」で急激に多様化したとする説に、先カンブリア時代の動物の化石が疑問を投げ掛けた。

先カンブリア時代のエディアカラ紀末期に当たる5億5100万～5億3900万年前のこと。蠕虫^{ぜんちゅう}様の奇妙な動物が、泥の積もった海底を這^はって移動している最中に死んだ。その動物の体と這い跡は、そのままの状態に残され、長い時を経て化石化した。そして今、それらの化石は、動物がいつどのように進化したかを再検討するための手掛かりとなってくれる。地球上の動物は、約5億3900万年前に始まったカンブリア爆発と呼ばれる事象で爆発的に進化したと考えられているが、現在この説に対して疑問を投げ掛ける証拠が徐々に増えてきており、そこにまた1つ、今回の化石が加わったわけである。中国湖北省の夷陵^{いりょう} (Yiling) 区で見つかったエディアカラ紀のこの化石

は、*Yilingia spiciformis*と名付けられ、解析結果と共にNature 9月19日号で報告された (Z. Chen et al. Nature <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1522-7>; 2019)。

「この発見により、動物の爆発的多様化の時期はエディアカラ紀までさかのぼることが、いっそう濃厚になりました」と、エディンバラ大学 (英国) の地球科学者 Rachel Wood は話す。もはやカンブリア爆発が地球の生命史において劇的な出来事だったとは思えないと、彼女は言う (2016年5月号「カンブリア爆発の『火種』」参照)。

岩石の記録から、エディアカラ紀の海が生命に満ちていたことはすでに明らかになっているが、この年代の化石の多くは、現在の生物とは異なる奇妙

な構造的特徴を持っている。そのため古生物学者らは、エディアカラ紀の生物と古生代初期のカンブリア紀の動物をなかなか関係付けることができなかった。そこで、カンブリア爆発の際に現在見られるような種類の動物が劇的に出現したとする見方が強まった。

しかし、見解は変わり始めている。一部のエディアカラ紀生物は、風変わりな構造ではあるが動物だと認定されており、このことから考えて、動物の多様化はカンブリア爆発の数百万年前に始まったと見られる (I. Bobrovskiy et al. *Science* 361, 1246-1249; 2018 および *Nature* ダイジェスト 2018年12月号「パンケーキ形の奇妙な化石は最古の動物だった」参照)。

*Yilingia spiciformis*は、そうした見方にうまく当てはまる存在であり、動物がカンブリア爆発以前に多様化したという説を補強するものだ。*Y. spiciformis*は最大で体長27cm、幅2.5cmにもなる。その体は分節していて、全長にわたって左右対称であり、明らかにカンブリア紀の動物に似た構造をしていると、この化石を見つけて分析した研究チームのメンバーであるバージニア工科大学 (米国ブラックスバーグ) の古生物学者 Shuhai Xiao は話す。

「かつて生物学者らは、エディアカラ紀とカンブリア紀の違いを重要視しました」と Xiao は話す。「しかし考えてみると、生物はこの2つの時代の境界を生き抜かねばなりませんでした。一部の系統は生き残ったに違いありません」。

(翻訳：船田晶子)

Worm fossil recasts origins of animal life

Vol. 573 (15) | 2019.9.5

Colin Barras

エピゲノムから デニソワ人の肖像

エピジェネティクスに基づいて描かれたデニソワ人の肖像は、ネアンデルタール人に似た幅広い顔立ちであった。

絶滅した古代人集団「デニソワ人」は、どのような顔かたちをしていたのだろうか。そのDNAのエピゲノムを解析することで、このほど初めてその一端が明らかになった。シベリアの洞窟で発見されたデニソワ人の骨片が2010年に報告されて以来、研究者たちは、その謎のヒト族の姿に関する手掛かりを求めて世界中を探し回った。デニソワ洞窟からは小さな化石がさらに少数得られ、また2019年には、チベット高原で見つかった下顎骨によって細かな情報が加わったが、そうした化石の中

には、多数の細かな解剖学的構造を復元できるほどの大きさや完全さが備わっているものが全くない（2011年3月号「デニソワ人が語る人類祖先のクロニクル」および2019年8月号「デニソワ人化石をチベットで発見」参照）。

今回、計算生物学者たちが、DNAのエピジェネティックな変化（遺伝子の活性を変化させることができる化学修飾）に基づいて、デニソワ人の解剖学的構造のラフスケッチを制作した。その取り組みから、デニソワ人は外見がネアンデルタール人に似ていた一方で、顎と頭

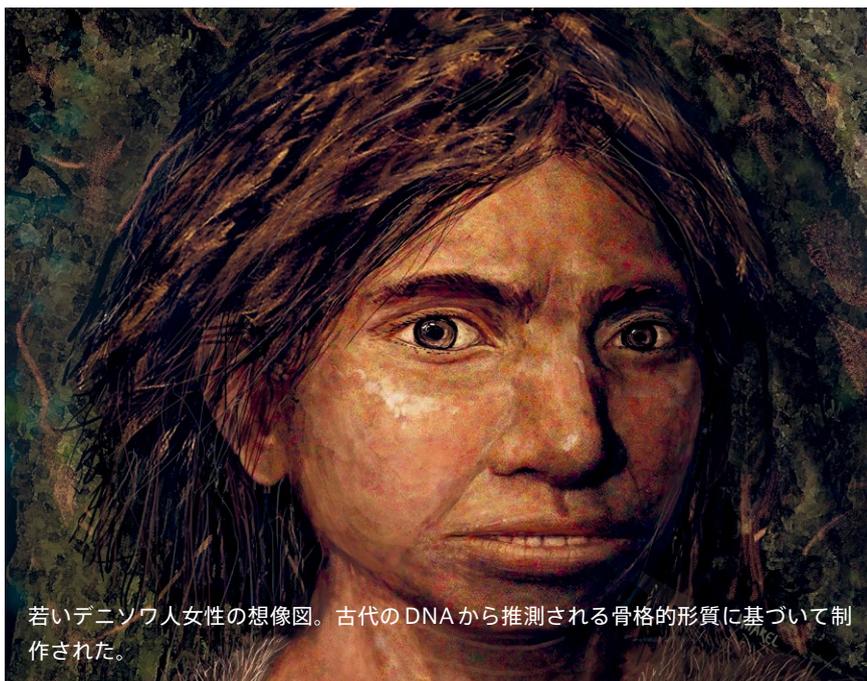
蓋の幅が広いなどの細かな違いもあることが明らかになった（D. Gokhman et al. *Cell* <http://doi.org/dbqk>; 2019）。

「この手法は、デニソワ人の外見について、これまで以上に明快な像を描くのに間違いなく役立ちます。それほどしっかり形態を推測するのにDNAが使えるというアイデア自体が、とても素晴らしいものです」。こう話すBence Violaはトロント大学（カナダ）の古人類学者で、今回の研究には加わっていないが、デニソワ人の骨を分析している。

メチル化のマッピング

DNAのエピジェネティックな修飾は、生涯を通じて多くの生物学的形質に大きな影響を与える。同じゲノムを持つ細胞同士であっても違いが生じるのは、エピジェネティックな修飾の作用の差異により遺伝子発現の仕方が異なるためである。エピジェネティックな変化のうち研究がよく進んでいるものとして、DNAの塩基へのメチル基（炭素原子1個と水素原子3個からなる化学基）の付加がある。メチル化と呼ばれるこの修飾は、遺伝子の活性を抑制することが多い。

エルサレム・ヘブライ大学（イスラエル）の計算生物学者Liran Carmelがリーダーの1人として率いる研究チームは、古代DNAのかつてメチル化されていた領域を明らかにする方法を発見した。時とともにDNAに蓄積する化学的損傷のパターンを解析することでそれが分かるという。2014年、Carmelらはネアンデルタール人とデニソワ人のゲノムの全体にわたってメチル化パターンのマッピングを行い、両絶滅集団と現生人類との間でメチル化パターンが異なる四肢発生遺伝子を発見した（D. Gokhman et al. *Science* **344**, 523-527; 2014）。



若いデニソワ人女性の想像図。古代のDNAから推測される骨格的形質に基づいて制作された。

Carmelと、今回の研究論文の筆頭著者で同僚の計算生物学者David Gokhmanの2人は、デニソワ人とネアンデルタール人のゲノム上に、メチル化パターンが現生人類とは異なる領域をさらに数千カ所発見した。それを、遺伝子発現に対する影響が明らかにされているヒト組織のエピジェネティック修飾のデータベースと比較した結果、古代人集団と現生人類とで発現量が異なっていると考えられる数百個の遺伝子のリストが得られた。このリストを解剖学的形質と結び付けるために、研究チームは、希少疾患患者の遺伝子変異と身体的影響を一覧化した別のデータベースに着目した。DNAのメチル化によって引き起こされる遺伝子発現量の低下は、こうした疾患原因変異が及ぼす作用にほぼ近いと考えたのだ。

この手法をデニソワ人に当てはめる前に、研究チームは、数百点の化石から解剖学的構造が明らかにされているネアンデルタール人で、それを的確に推測できるかどうかをまず検証した。

この方法を利用して行われる身体的外観の推測は定性的で相対的なものだ

と、Carmelは説明する。「比較対象よりも指が長いとは言えるが、指が2mm長いとは言えない」のだという。研究チームは、ネアンデルタール人の33の形質がメチル化パターンから推測され得ることを見いだした。DNAメチル化マップ分析の結果、それら形質のうち29個を正確に推測することができた。ネアンデルタール人は現生人類よりも顔面の幅が広く頭部が平たかった、というのがその一例だ。

次に、研究チームはその手法をデニソワ人に用いた。その結果、低い前頭部や幅広の胸郭など、多くの形質がネアンデルタール人と共通であることが推測されたが、顎と頭蓋の幅が広いことなど、いくつかの違いも見いだされた。このほど描かれた肖像がどれだけ正確かを知ることはできないが、その推測の中にはデニソワ人の骨から得られた証拠によって支持されるものもある。デニソワ人に関して化石記録で最もよく分かっている特徴は、巨大な臼歯だ。研究チームは、エピゲノムからそれを推測することはできなかったが（用いたデータベースに臼歯の大きさが含まれていな

かったため）、デニソワ人の歯列弓は長かったと断言した。長い歯列弓は、大きな歯への適応だった可能性がある。

チベット高原で発見された16万年前の下顎骨の4つの形質のうち3つは、チームが推測した結果と一致した。そして、Violaが学会で発表したデニソワ洞窟の頭蓋骨片（ただし論文では未発表）からは、その集団が幅広の頭部を有していたことが示唆された。これは、エピジェネティックな修飾に基づく復元の結果と一致する。

「その像は、大筋では正しいでしょうが、個人の形質のために大きな幅があります」とViolaは語る。Violaは今回の推測に感心しているが、デニソワ人が実際にはどのような姿だったのかを明らかにする上でそれがどれだけ役立つかは明確に分らないと言う。デニソワ人のものと考えられる骨は極めて希少なため、その多くはすでにDNAやタンパク質が調べられている。現時点では、それが骨を絶滅集団と結び付ける唯一の方法だ。

フランシス・クリック研究所（英国ロンドン）の集団遺伝学者Pontus Skoglundによれば、将来的には、エピジェネティクスを利用することによって、ヒト族の断片的な化石や、場合によっては土壌中に見つかったヒト族のDNAからも、その解剖学的構造が復元される可能性があるという。しかし、その方法が最も有効なのは、化石記録に形が残らない「行動」などの形質の推測かもしれないと、Skoglundは考えている。 ■

（翻訳：小林盛方）



DNAメチル化データを基に3Dプリンターで復元したデニソワ人の顔。覆いを外しているのは、この研究のリーダーの1人であるLiran Carmel。

Denisovan portrait drawn from DNA

Vol. 573 (475-476) | 2019.9.26

Ewen Callaway

薬剤で生物学的時計が 巻き戻った？

ヒトの生物学的年齢を刻むエピジェネティックな時計は、3種の薬剤の併用によって巻き戻せることが、小規模臨床試験で示された。

DNAのメチル化レベルなどのエピジェネティックな変化は、生物学的年齢の指標となることが知られている。このほど、米国での小規模な臨床研究で、薬剤投与により体のエピジェネティックな時計を巻き戻せる可能性が初めて示唆された。この結果は、2019年9月8日に *Aging Cell* で報告された (G. M. Fahy et al. <http://doi.org/c985>; 2019)。

この試験では、9人の健康な被験者を対象に、1年間にわたって3種類の一般的な薬剤（成長ホルモンと2種の抗糖尿病薬）を併用投与した。すると、エピジェネティックな変化から求めた被験者の生物学的年齢が平均2.5歳若返っていたのだ。さらに、被験者の免疫系にも若返りの兆候が見られた。

この結果には、臨床試験の実施者でさえも驚いた。だが、アーヘン工科大学（ドイツ）の幹細胞生物学者 Wolfgang Wagner は「非常に小規模な研究で、対照群が設けられていないため、確固たる結果ではありません」と言う。

被験者のエピジェネティックな変化を解析したカリフォルニア大学ロサンゼルス校（米国）の遺伝学者 Steve Horvath は、「エピジェネティックな時計が進むのを遅らせるのではないかと期待していましたが、時計を巻き戻せるとは思っていませんでした」と言う。

エピジェネティックな時計は、体のエピゲノムに依存している。エピゲノムとは、ゲノムやヒストンを標識するメチル基などの化学修飾に規定される遺伝情報のことである。DNA上のこうした標識のパターンは時間の経過とともに変化するので、個人の生物学的年齢を追跡する手段となる。生物学的年齢は、実年齢より進んでいる場合もあれば、遅れている場合もある。

科学者たちは、ゲノム全体から一連のDNAメチル化部位を選択することで、エピジェネティックな時計を構築した。Horvathは、生物学的年齢がエピジェネティックな変化から算出できることを提唱した先駆者である。

免疫ブースト

今回の臨床試験は、ヒトにおいて胸腺の組織を回復するために成長ホルモンを使用することの安全性を調べるものだった。肺と胸骨の間に位置する胸腺は、免疫が効率的に機能する上で重要である。胸腺は、体が感染やがんと闘うのに役立つ特殊なT細胞の発達を促すからだ。しかし、胸腺は思春期の後に退縮し始め、脂肪に置き換えられる。

動物での研究やヒトでのいくつかの研究からは、成長ホルモンが胸腺の再生を刺激することを示す証拠が得られ

ている。けれども成長ホルモンは、糖尿病を促進する可能性がある。このため、今回の臨床試験では、2種の抗糖尿病薬であるデヒドロエピアンドロステロン (DHEA) とメトホルミンが、成長ホルモンと併用された。

TRIIMと名付けられたこの臨床試験は、2015年5月に米国食品医薬品局 (FDA) により承認され、その数カ月後にスタンフォード大学医療センター（米国カリフォルニア州パロアルト）において、51～65歳の9人の白人男性を対象に開始した。試験を率いたのは、Intervene Immune社（米国ロサンゼルス）の最高科学責任者で共同創業者である免疫学者 Gregory Fahy である。

Fahyが胸腺に興味を持ったのは1986年にさかのぼる。このとき彼は、成長ホルモン分泌細胞を移植したラットで、免疫系が若返ったことを示唆する研究を目にした。しかし、この研究を臨床試験で追跡調査しようとした人は現れなかった。10年後、46歳になったFahyは、それを自身で試した。成長ホルモンとDHEAを1カ月間服用した結果、彼の胸腺は部分的に再生した。

TRIIMでは、被験者から薬剤服用中に採取した血液試料の解析により、各被験者の血球数に若返りを示す兆候が見られた。また、この研究の開始時と終了時に、磁気共鳴画像法 (MRI) を用いて胸腺の組成を調べた結果、7人の被験者で、胸腺に蓄積された脂肪が再生された胸腺組織によって置き換わっていたことが分かった。

時計を巻き戻す

被験者のエピジェネティックな時計に薬剤が影響を及ぼしたかどうかを調べてみようとしたFahyが思い付いたのは、試験の後だった。つまり、FahyがHorvath

に解析を依頼したときには、この臨床研究は終了していたのである。

Horvathは、エピジェネティックな時計を測る4種類の統計モデルを使って、各被験者の生物学的年齢を評価した。すると、それら全てにおいて全員の時計が大きく巻き戻されていることが分かった。「治療の生物学的効果が確実なものだと分かりました。さらに、6人の被験者から臨床試験終了6カ月後に得た最終血液試料から、効果は持続していることが見いだされました」とHorvath。

「我々は被験者ごとに変化を追跡できましたし、その効果は全ての被験者で非常に強く見られたので、私はこの結果を楽観視しています」とHorvath。

メトホルミンについてはすでに、一般的な加齢に伴うがんや心疾患などの疾患を防止する可能性を調べる試験が始まっている。Fahyは、今回投与された3種類の薬剤のそれぞれが、独特の機構を介して生物学的老化への影響に關与している可能性があると言う。Intervene Immune社は、女性を含む、さまざまな年齢や民族の人々を対象とした大規模な研究を計画している。

胸腺を再生することは、高齢者など、免疫系の機能が低下している人に役立つとFahyは言う。70歳以上の人の主要な死因は、肺炎などの感染症である。

ヘリオット・ワット大学(英国エディンバラ)のがん免疫学者Sam Palmerは、「血液中の免疫細胞の構成が若返ったのは興味深いです。感染症だけでなく、がんや老化全般にも大きな影響があると考えられます」と言う。

(翻訳：三谷祐貴子)

Trial hints at age-clock reversal

Vol. 573 (173) | 2019.9.12

Alison Abbott



カナダ西部のブリティッシュコロンビア州にあるCHIME電波望遠鏡。それぞれ長さ100m、幅20mの固定反射鏡を備えたアンテナ4基からなる。

CHIME COLLABORATION

高速電波バーストの 反復型の発見例増える

謎の天体現象、高速電波バーストのリピーター(反復型)を新たに8個発見したことが報告された。バーストの発生源の解明に天文学者たちは一歩近づいた。

高速電波バースト(fast radio burst; FRB)と呼ばれる謎の天体現象は、極めて強い電波をごく短い時間、放射するものだ。FRBの謎を解くために重要な、放射を繰り返すタイプ(リピーター)のFRBを新たに8個発見したことを、カナダの電波望遠鏡で観測している研究グループが2019年8月、報告した。発見されたリピーターは計11個になり、天文学者たちは、FRBの発生源と発生原因の解明に向けて一歩前進した。

FRBは、極めて強い電波を出す現象で、わずか数ミリ秒ほどしか続かない。発生源は、空のあらゆる方向に分布していて、銀河系(天の川銀河)の外にあるとみられている。最初のFRBは2007年に発見されたが、原因は今も謎のままだ。

天文学者たちは、1回きりのFRBではなく、電波を繰り返し放つFRBを調べれば、その原因の解明に役立つと考えている。リピーターであれば、高解像度の望遠鏡で追跡観測を行って発生源を探し出しやすいからだ。2019年8月

の報告の前までに見つかっていたFRBは約75例あったが、リピーターであることが分かっていたのは2個だけだった。初めて発見されたリピーター、「FRB 121102」(2012年に初観測)は徹底的に研究された。

カナダの電波望遠鏡「CHIME」(カナダ水素強度マッピング実験)で観測を行っている研究グループは2019年1月、2個目のリピーターの発見を報告した。CHIMEグループは2019年8月9日、さらに8個のリピーターを発見したことを報告する論文をarXivプレプリントサーバーに投稿し、リピーターは決して稀^{まれ}ではないことを示した(B. C. Andersen et al. <https://arxiv.org/abs/1908.03507>; 2019)。

オーストラリアなどの研究グループも2019年8月、同国西部にある電波望遠鏡オーストラリア・スクエア・キロメートル・アレイ・パスファインダー(ASKAP)が2017年に観測した1例のFRBについて、再び放射が見られたことをarXivに報告し、発見されたリピーターは全部で11個になった。

CHIMEは2018年にFRBの探索を開始した(2018年3月号「2018年、科学界はどう動く?」参照)。CHIME計画の研究者でトロント大学(カナダ)の天文学者Bryan Gaenslerは、ツイッター上で2019年8月12日、1回限りのFRBも数百例発見していることを明らかにした。彼は、「発見したイベントは研究グループでまだ分析中です。今回の観測計画は、私の25年間の天文学研究で間違いなく最もエキサイティングな計画です」と書いた。

発生原因は何か?

マックス・プランク電波天文学研究所(ドイツ・ボン)の天文学者Laura

Spitlerは、「今回のCHIMEの報告は、相当興味深いものです」と評価し、「現在の天文学者たちの優先事項は、こうしたリピート信号がやって来る銀河を突き止めることです」と話す。ホスト銀河を突き止めることは、何がFRBを起すのかという謎を解くために不可欠だからだ。

現在、FRBの発生原因にはたくさんの説がある。天文学者たちは、FRBは、若いマグネター(強い磁場を持つ中性子星)からの放射、あるいは宇宙ひも(時空の位相的欠陥の一種)からの放射ではないかと提案する。FRBが発生する環境が分かれば、多数ある説を絞り込むことができるはずだ。

Spitlerは「今回の発見は、1回限りのFRBと比較できるだけの数のリピーターが集まり、2種類のFRBが同様の環境で生じるのかを調べることができるようになってきたことを意味しています」とも指摘する。全てのFRBの原因が、基本的には同じである可能性はある。FRBは繰り返していたが、その一部は今まで検出されていなかっただけなのかもしれないし、あるいは、FRBの発生源はある条件下でのみFRBを放つのかかもしれない。一方、繰り返すものと繰り返さないものは、異なる現象によって引き起こされている可能性もある。

CHIMEグループはすでに、この疑問に答えるための手掛かりを見つけている。8個のリピーターは、1回限りのFRBと同様の距離範囲にあるらしい。しかし、リピーターの信号の平均の持続時間は、1回限りのFRBよりも長いことをCHIMEグループは報告している。Spitlerは、「もしもこの傾向が確かなら、2つの別の現象が異なるタイプのFRBを起こしている証拠かもしれません。持続時間はFRBを生む基本的なメ

カニズムを反映するからです」と話す。

CHIMEのデータは、リピーターが放射される環境の違いも明らかにしている。FRB 121102はホスト銀河が決定された唯一のリピーターだが、電波の偏光面が回転していて、磁場の中を電波が通過して来たことを示していた。新たに見つかった8個のリピーターの1つも、電波の偏光面が回転していることが分かった。しかし、新しいリピーターの偏光面の回転の程度は、FRB 121102と比べてわずかで、リピーターが発生する環境が1つではないことをほのめかした。

全てではないが、新たに見つかったリピーターの多くも、最初の2つのリピーターと同じ特徴を持っている。つまり、信号は、狭い周波数範囲の単純な信号ではなく、周波数が時間とともに下がる。CHIMEグループは、この特徴を「悲しいトロンボーン」に例えている。Spitlerは「そうした『悲しいトロンボーン』信号はかなり稀で解明が難しいものです。それを説明することも理論研究者の課題です」と話す。

Gaenslerは「今回の報告は、『CHIMEで得られるすごいこと』のちょっとした予告編にすぎません」ともツイッターで書いている。CHIMEは、カナダのブリティッシュコロンビア州ペンティクトン近郊にあり、スケートボードなどの競技に使われるハーフパイプに似た形状の電波望遠鏡だ。建設費1600万カナダドル(約13億円)で、当初は初期宇宙からの電波を観測するために計画された。

(翻訳:新庄直樹)

Haul of mysterious cosmic bursts excites astronomers

Vol. 572 (425-426) | 2019.8.22

Elizabeth Gibney

STEM CELLS

幹細胞

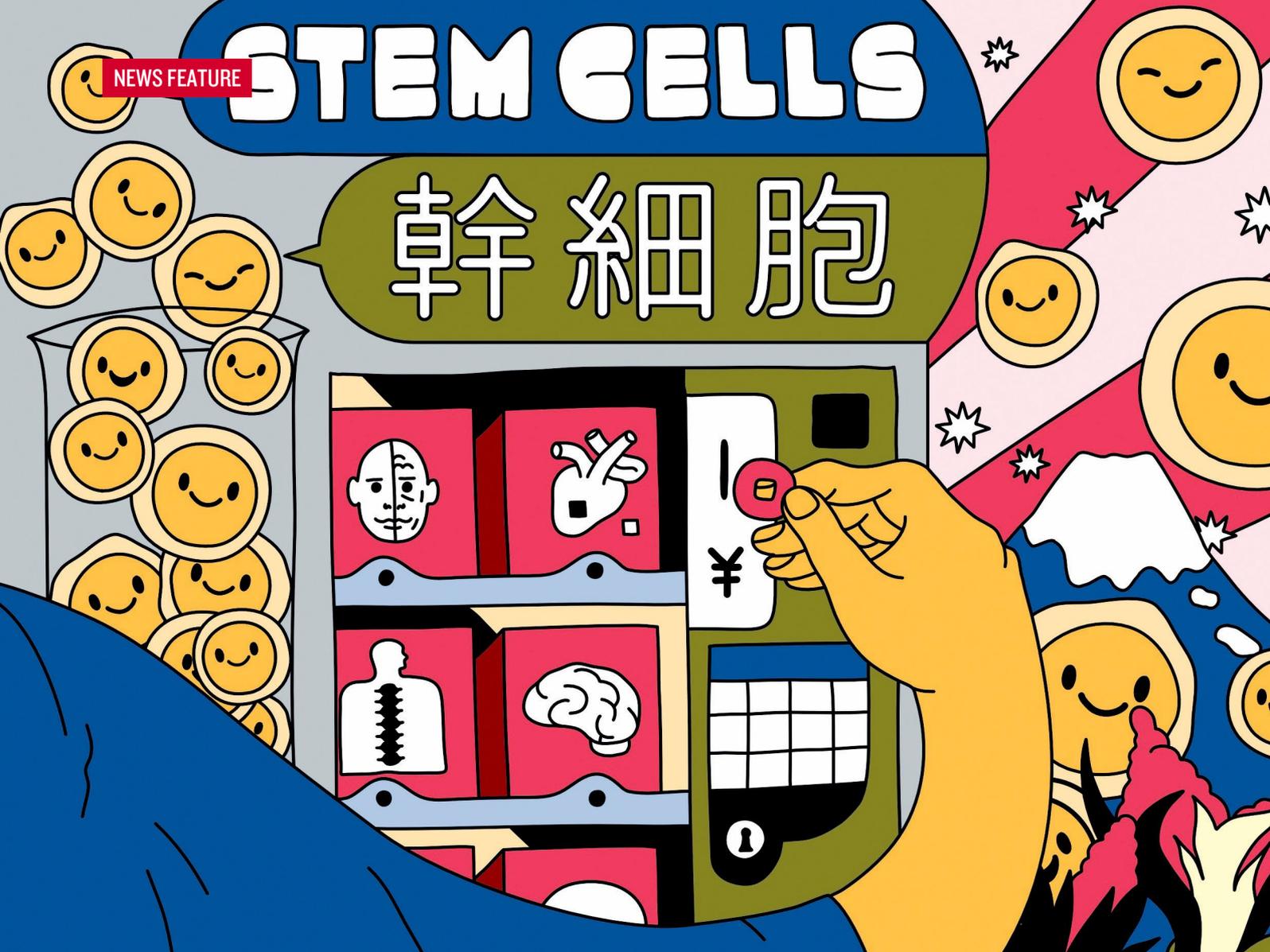


ILLUSTRATION BY FABIO BUONOCORE

日本の 再生医療政策が もたらすもの

日本は再生医療の規制緩和へと大きく舵を切った。この政策は国際的な広がりを見せているが、世界中の患者が代償を払う羽目になる危険性もはらんでいる。

東京で最もトレンドリーな街の1つ、南青山。ネイルサロンや宝飾店がひしめくその界隈で、フランスの高級パティスリーが1階に店を構えるビルの3階に「表参道ヘレネクリニック」はある。そこでは医師らが、心血管疾患の治療のために患者に幹細胞を注入している。襟元に大きな蝶結びをあしらったお洒落な制服姿の女性コンシェルジュが、アクアリウムのあるロビーを歩き来しては、中国人のメディカルツーリスト（医療目的の観光客）を診察室へと誘導している。

このクリニックの典型的な治療の1つでは、医師が患者の耳の後ろから皮膚を生検し、検体内部の脂肪組織から幹細胞を取り出す。次に幹細胞を増殖させ、それらを静脈内に注入して、損傷箇所（この場合はアテローム性動脈硬化で硬くなった動脈）に向かわせるのだという。

クリニックの壁には2枚のポスターが貼られている。大

手製薬会社の後援を受けて有名な学術雑誌に発表された有望な研究結果を大まかに説明したものだ。正当性があるという雰囲気醸し出すには役立つが、どちらのポスターにも、このクリニックが提供する治療に関するデータは提示されていない。訪問客が（ジャーナリストだとは名乗らず）詳細を尋ねると、コンシェルジュは、クリニックのサービスが症状の治療に有効だという証拠を提供することはできないと答えた。その理由は主に、結果が患者によって異なるからだという。彼女は最終的に、この治療はどちらかといえば予防的なものだと説明し、「アンチエイジングのためです」と話した。

その後Natureがヘレネクリニックに問い合わせ、代表者の1人に一連の質問をしたところ、行っている幹細胞治療が有効だとする証拠や、治療を受けた人の数や治療の結果に関する情報を提供することはできないと断られ、今後の学会発表で結果を公表する予定だという回答を得た。ヘレネクリニックは、施術に必要な全ての審査や承認を法律に従って受けており、これまで患者に副作用は出ていないと彼は断言した。

有効性が実証されていない細胞治療を提供するこの種のクリニックは新しいものではなく、また日本に固有のものでもない。メキシコからウクライナ、インド、オーストラリアに至る世界各地ですっかり普及しており、各国の規制当局はその拡散速度に遅れまいと苦労しているのが現状である。米国では、証拠による裏付けがなく、治療を受けた人を害する場合もある治療法を売り物にするクリニックが続々と登場しており、関係当局がそれに対処している。しかし、日本における幹細胞治療クリニックの増え方はちょっと違っている。事業を活性化し、日本が再生医療界の世界的リーダーになるために策定された2つの規制法のおかげで、この種の治療が内閣官房レベルで認められ、奨励されているのだ。

日本がこれらの規制法を採択してから5年経った現在、日本国内では、さまざまな幹細胞治療を含む3700種類以上の治療法が数百のクリニックで提供されており、海外の企業も日本に次々とクリニックを開設している。「日本は、革新的な治療法を開拓するための拠点の1つとなっています」と、バイオテクノロジー企業アセルシス（Athersys；米国オハイオ州クリーブランド）の最高責任者 Gil Van Bokkelen は話す。同社は、脳卒中や呼吸器疾

患に対する幹細胞治療の臨床試験を日本で進めようとしているところだ。

しかし多くの企業は、厳格な試験を回避して自社の治療法を市場に早く出すために、この規制法を巧みに利用している。こうした治療法を利用する人々は恐らく、有効性のある治療を受けてはいないだろうと科学者らは指摘する。深刻な疾患のために承認された幹細胞治療の大半は、裏付けとなる証拠が乏しく、すでに有害事象の報告が少なくとも4件あり、そこには1件の死亡例が含まれる。これらの規制法を支持する公的研究機関や学術機関の研究者でさえ、改正が必要だと話す。

クリニック側は、法律の範囲内で施術しているとの主張を崩さない。また政府関係者は、日本の制度は提供される治療法を逐一チェックするので、他国のものより安全だと言っている。しかし、こうした政策は、幹細胞治療がどの程度有効かについて人々に誤った期待を抱かせてしまう可能性がある。

一方、日本の思い切った実験的な規制緩和は、他の国々にも影響を及ぼし始めている。例えば、台湾やインドは日本の後を追いついており、他の国々の規制当局は、企業や患者その他の団体から、治療法の承認手続きを迅速化させようとする圧力を受けていると感じている。「もし我々が規制に関して、複数の非常に異なるグローバルスタンダードを持ち続けなければ、重大な問題になるでしょう」と、米国食品医薬品局（FDA）の生物製剤評価研究センター所長である Peter Marks は話す。

最も厳しい批判者の1人である京都大学の心臓専門医、由井芳樹^{ゆいよしき}は、これらの法律は事業開発という点から見れば短期間で利益を上げたが、目先のことしか考えないものだと話す。「彼らは、事がうまくいかない場合にどうなるかを考えていないのです」と由井は言う。

安全だが有効ではない

2012年12月に総理大臣に就任して間もなく、安倍晋三^{あべしんぞう}は今後10年間で人工多能性幹（iPS）細胞研究に1100億円を投じることを約束し、再生医療の実用化・産業化を力強く進めるために大胆に規制・制度を見直していく、と述べた。このように強気の姿勢を示したのは、京都大学の山中伸弥^{やまなかしんや}がiPS細胞に関する研究でノーベル医学・

生理学賞を受賞してわずか数カ月後のことだ。安倍は、再生医療研究において日本は世界のリーダーだと誇らしげに言う一方で、臨床応用の歩みの遅さを残念がった。彼は、そうした状況を変えたいと考え、すぐに2つの方策を打ち出した（「2つの法律で規制緩和」参照）。

そのうちの1つが、2014年11月に採択された「再生医療等の安全性の確保等に関する法律（再生医療等安全性確保法；ASRM）」である。これにより医療機関は、医薬の有効性を実証するための通常の臨床試験を経ないで細胞治療を提供することができる。医療機関がそうした治療の提供を始めるには、厚生労働省から認定を受けた細胞培養加工施設を保有していることを示し、次に、作成した提供計画が独立した審査委員会による審査に合格する必要がある。この審査委員会も厚生労働省の認定を受けたものとする（2016年3月号「再生医療製品の早期承認制度は果たして得策か」参照）。

こうした法律の変更前に、怪しげなクリニックが急に次々と開設されて、医療観光をうまく利用しようとした。ASRMは全ての医療機関に確実に登録させることを意図して作られたので、これは当然の成り行きだったと、日本再生医療学会の主要メンバーの1人である眼科医の高橋政代は話す。厚生労働省の諮問機関の1つ、再生医療等評価部会のメンバーでもある高橋は、「この戦略では、全ての医療機関をまず含めてから、どれがリスト掲載にふさわしいかを徐々に詰めていくのです」と話す。

しかし批判派は、ASRMの計画番号による登録制度は誤解を招く恐れがあると言う。理化学研究所多細胞システム形成研究センター（理研CDB；兵庫県神戸市）で規制政策を研究するDouglas Sippによれば、ASRMは「再生医療業界に従来よりも高い透明性」をもたらしたという。ASRMによって、悪徳な医療機関も、ある程度の基準に合わせざるを得なくなったからだ。ただし、患者がクリニックの計画番号取得を「ある種の認証」だと見なししてしまう危険性があるとSippは話す。

例えば、東京の医療施設というよりはスパのようなスタイリッシュな外観の「アヴェニューセルクリニック」は、自施設の治療法がASRMの計画番号を取得したことを、ウェブサイト上に目立つように掲載している。ここでは少なくとも10人の患者が、神経変性疾患である筋萎縮性側索硬化症（ALS）の治療もしくは進行を遅らせる

目的で、脂肪由来の幹細胞を血中に注入した。

アヴェニューセルクリニックの顧客サービス担当者は、電話をかけてきた相談者（ジャーナリストだとは名乗っていない）に対して、治療後には患者の50～70%で症状が改善したと話した。費用は投与1回につき150万円で、治療が有益と感じた患者には2～3カ月ごとの細胞注入を続けるようアドバイスする。「この価格でも支払えるお客様はいらっしゃいます」と担当者は言った。このクリニックは、ALS以外の適応に関して年間約1000人の患者がいる。

この記事を書くために、ALSの再生医療を研究する5人の研究者に話を聞いたところ、この種の幹細胞治療がALS

2つの法律で規制緩和

2014年に日本で導入された2つの法律は、幹細胞を使った治療や他の種類の再生医療が迅速に市場に出る道筋をつけるものだ。再生医療等安全性確保法（ASRM）の下で、企業は治療法を3段階のリスクの1つに登録できる。

分類	必要条件	登録された治療法の数 (2019年6月まで)
クラスIII (低リスク)	患者由来の細胞を使い、細胞が本来持つものに似た機能を発揮させる治療法（がんと闘うよう活性化した免疫細胞など）。	3,373
クラスII (中リスク)	患者由来の細胞を使うが本来のものとは異なる機能を発揮させる治療法（脂肪由来幹細胞を筋萎縮性側索硬化症の治療に使う場合など）。	337
クラスI (高リスク)	高リスクの細胞（胚性幹細胞や遺伝子編集した細胞、他人由来の細胞など）を使う治療法。	0

医薬品医療機器等法により、一部の臨床試験を通過した治療法の条件付き承認が可能になった。この承認を受けると、企業は国内での治療法の販売と保険適用を受けることが可能になるが、7年の期限で有効性に関する追加データを集めなければならない。この承認をこれまで受けたのは3件の治療法のみである。

治療法	目的
ハートシート	骨格筋由来の細胞を使って、損傷した心筋の治療を助けるよう設計された組織シートを作る。
ステミラック注	骨髄由来の幹細胞を使って脊髄損傷の治療を試みる。
CLBS12	造血幹細胞を使って重症虚血肢を治療。

患者に効くという説得力のある証拠はなく、また、この治療法に効き目がないと考えられる理由がいくつかある、とのことだった。シーダーズ・サイナイ再生医療研究所（米国カリフォルニア州ロサンゼルス）でALSを研究するRobert Balohは、「インチキな^{えんぎ}似非療法で患者から直接金を取るやり方は数百年も前からあり、これも全く同じ代物です」と言い切っている。アヴェニューセルクリニックの代表者の1人は、*Nature*からの公式のインタビュー依頼を断ったが、同クリニックはASRMに従って運営していると電子メールで述べた。ALS研究者からの意見に対するコメントを求めると、患者の治療で忙しいので回答できないと、その代表者は返答した。

科学的証拠や有効性に関する疑問に加えて、そうした療法の登録を認める審査委員会の適格性や独立性についても懸念がある。厚生労働省は、これらの委員会の構成を5～8人とし、細胞生物学や再生医療、臨床研究、細胞培養の専門家を含めることを求めている。また、法律家や生命倫理学者、生物統計学者からの情報提供も求めている。しかし、委員会の利害の対立に関する規定は緩く曖昧である。

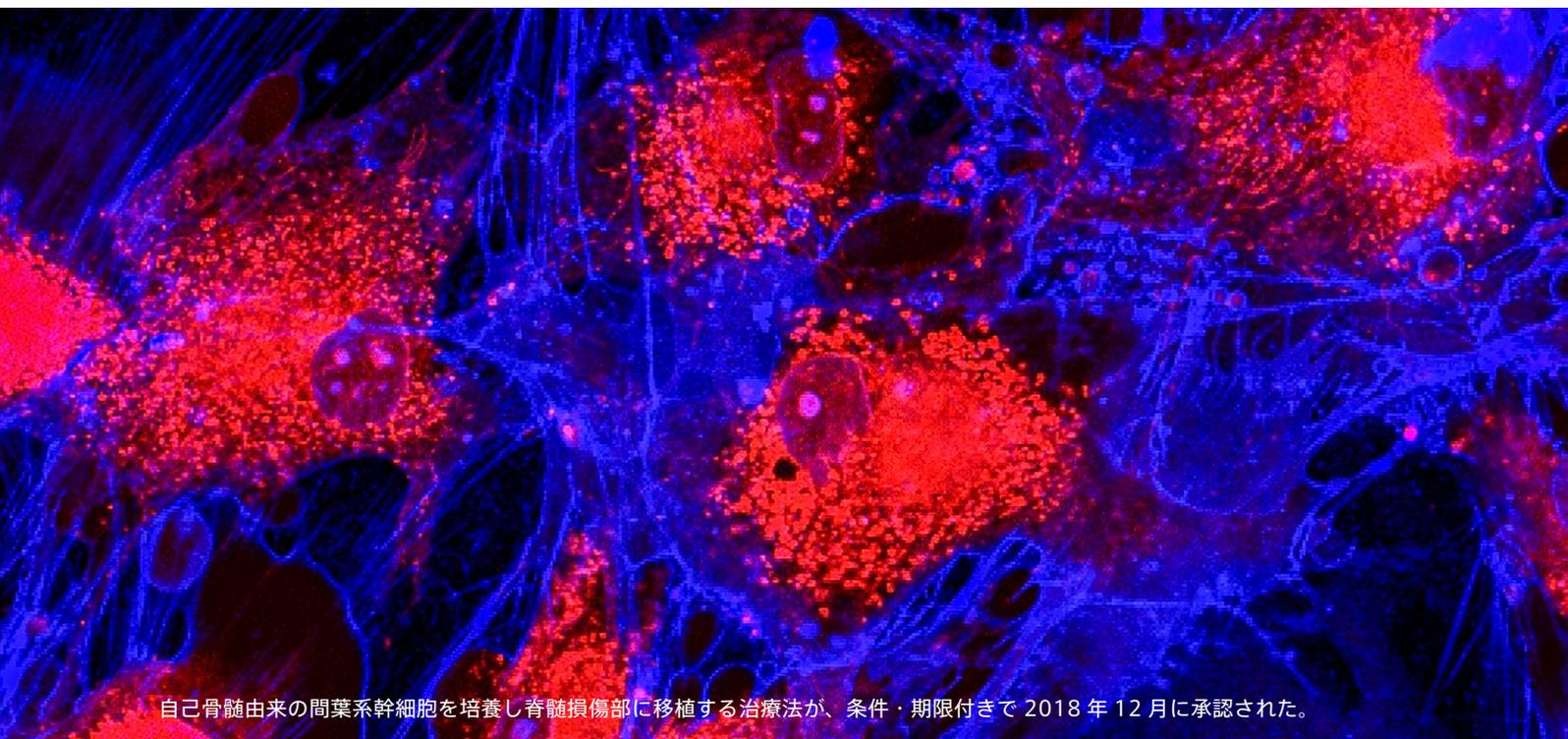
例えば、ヘレネクリニックの場合は内部委員会を組織し、アテローム動脈硬化の治療など、施す治療法のいくつかをそこで承認した。代表者の1人によれば、この療

法はまだ患者に施されておらず、同クリニックは現在、独立した第三者委員会を利用しているという（同クリニックの内部委員会は、厚生労働省によって2019年3月に解散させられた）。また、アヴェニューセルクリニックが提供するALS治療や他のいくつかの療法は、同クリニックの勤務医1名を含む委員会によって承認された。同クリニックは、これに関する質問に回答してくれなかった。

厚生労働省は2019年4月に、こうした利害の対立を防ぐための方針を設けた。しかし、たとえ完全に独立した審査委員会があっても、クリニックは欲しい答えを求めて委員会をはしごすることができる。国立医薬品食品衛生研究所（神奈川県川崎市）の再生・細胞医療製品部の部長で、自身も2つの委員会に籍を置く佐藤陽治は、こうした「委員会サーフィン」が大きな問題になっていると話す。

日本政府は、この委員会制度の改善のために、研修を求めるなど追加の措置を検討中である。「委員会に利害の対立があったり、治療が有効でなかったりするかもしれませんが、現時点ではそれが我々の限界なのです」と佐藤は話す。

それでも、日本のこの制度は、悪徳クリニックを規制当局が絶えず追い掛ける方式の米国の制度よりも優れていると彼は話す。佐藤は、有効性が証明されておらず承



自己骨髄由来の間葉系幹細胞を培養し脊髄損傷部に移植する治療法が、条件・期限付きで2018年12月に承認された。

認めされていない幹細胞治療を米国フロリダ州で受けた2人が、その後失明した事例を挙げた。FDAがその企業に問題の治療の提供を止めさせるのに4年かかり、複雑な法廷闘争も繰り上げられた。日本では、委員会の承認がない療法であれば、「警察が関係者を逮捕することができます」と佐藤は話す。

条件付き承認

安倍政権が2014年に実施した別の重要な政策は、「医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性の確保等に関する法律（医薬品医療機器等法／薬機法）」の制定だ。この法律の下では、企業が（1カ所のクリニックや病院ではなく）日本全国で治療法を販売するための「条件付及び期限付承認」を獲得でき、承認された治療法は保険適用となる。ASRMの場合と異なり、企業は小規模な臨床試験により有効性を示唆するデータを提示する必要があるが、その後、より高い有効性を示すデータを収集するという名目で、最大7年間その治療法を販売できる。これまでに条件付き承認を獲得した治療法は、脊髄損傷、心疾患、重症虚血肢（強い疼痛を伴う重度の四肢血行障害）の3件のみである。

しかし、条件付き承認に必要なこの簡易型の臨床試験が、研究界の懸念をかき立てている。国際幹細胞学会（ISSCR）の2016年の報告によれば、小規模な臨床試験に基づいて販売を承認することで、治療法の厳正な評価が遅くなり、「この領域の科学的水準に対する信頼が損なわれてしまう」可能性があるという¹。

あまり表には出てこないが、中には問題点を報告した人もいる。プライバシーを守るため匿名を条件に話してくれた男性は、慢性の心臓病を患っていた。彼は、患者の大腿部から採取した骨格筋芽細胞を使って薄い組織シートを作り、開胸手術をしてシートを損傷した心臓に貼り付けるという、試験的な治療を受けることにした。この治療法の一つである「ハートシート」は、2015年に虚血性心疾患による重症心不全の治療法として、条件付きで承認された。この技術の共同開発者の1人で、大阪大学の外科医、澤芳樹^{さわよしき}に面会したこの男性は、別のタイプの心疾患を患っていたが、澤から「この試験的な治療の適用にふさわしい候補者だ」と告げられた。

この男性はハートシートが移植されると誤解していたも



2013年に理化学研究所の発生・再生科学総合研究センター（現 多細胞システム形成研究センター）を訪れた、安倍晋三総理大臣（手前）。すぐ後ろが当時の理化学研究所理事長の野依良治、その奥が幹細胞生物学者の山中伸弥。

の、拡張型心筋症という彼と同じ病気でこの治療を受けた患者がほとんどいなかったことや、自身がそれ以前に一度も心臓手術を受けていなかったことから、心配になった。しかし彼は最終的に、シート開発陣にチャンスを与えた。

この男性によれば、症状が改善したとは一度も感じなかったという。施術の9カ月後、彼は突然、それ以前に経験したことのない息切れを感じるようになった。彼は心不全の診断を受けて1カ月入院し、退院の1カ月後にまた入院した。

施術から1年余り経った頃、男性は心臓移植が必要だと告げられた。「事態が悪化していると言われました」と彼は話す。

もっと情報がないと、この試験的な治療がその男性の心不全の一因となったのかどうかを言うことはできない。これは一例にすぎず、他の説明も可能である。しかし、こうした不確実性から問題の一部が見えてくる。ハート

シートを条件付き承認に導いた臨床試験は、わずか7人で行われたものだった。ハートシートを販売しているテルモ（東京都）では、虚血性心疾患に対する有効性に関するデータを現在も収集中だ。同社によれば、この患者は治療の際にハートシートの移植を受けていないという。治療を受けた人が遭遇する可能性のある有害事象の発生率や種類については、ほとんど分かっていない。

日本の政策を巡るこの議論の要は、無作為プラセボ対照試験がどういう価値を持つかだ。従来、この種の試験は臨床研究における至適基準だと考えられているが、日本政府は日本再生医療学会が2012年に提案した見解に従った。同学会は、有効性を証明するための試験設計に、プラセボもしくは従来の治療を受ける対照群を必ずしも求める必要はないと規定しているのである。

澤は、ハートシートの承認につながった臨床試験で、この種の患者では病状が自然に進行して着実に悪化すると予測されると述べた。ハートシート療法を受けた7人のうち5人は悪化せず、そのためこの治療は役に立ったように見えた。しかし、日本で約3500人の心不全患者を調べた研究からは、澤の試験で治療を受けた人たちと同程度に重度の心疾患を持つ人々の多くは、極端な治療的介入をしなくても症状が改善もしくは安定することが示されている²。澤にコメントを求めたが回答は得られなかった。

厚生労働省は、再生医療のプラセボ対照臨床試験に対する自らの姿勢に苦慮している。2019年5月に発売されたSTR01（販売名ステミラック注）と呼ばれる脊髄損傷の幹細胞治療に対する批判を受けて、厚生労働省医薬・生活衛生局長の宮本真司^{みやもと しんじ}は、この治療法の二重盲検法での試験は「構造的に不可能」だと主張し、偽処置やプラセボでは「倫理的問題が生じるだろう」と述べた³。

生命倫理学者らは以前から、臨床試験で偽処置によって起こる害の可能性についてや、偽処置が被験者に対して公平かどうかを議論してきた。臨床試験の方針について日本政府に助言したことのある、マギル大学（カナダ・モントリオール）の生命倫理学者Jonathan Kimmelmanは、一部の偽処置は確かに害が大き過ぎると話す。しかし、脊髄損傷の幹細胞治療を研究する医師らによれば、脊髄損傷に関してはプラセボ対照試験が比較的容易だろうという。

札幌医科大学（北海道）の神経外科医でSTR01を提供する本望修^{ほんもう おさむ}は以前、脳卒中歴のある患者でSTR01の有効

性を実証するための二重盲検プラセボ対照試験を提唱したことがある。2016年の発表⁴から見て、今ごろ彼はその種の試験を実施している最中だと予想された。そこで*Nature*は、その種の対照試験をいかにして、脊髄損傷ではなく脳卒中で生じた損傷の治療に適するような形にするのかを本望に問い合わせたが、彼からの返答はなかった。厚生労働省の担当者によれば、脊髄損傷の場合だと偽処置は倫理に反するのだという。その理由は、患者の治療は特定の限られた時間内に行う必要がある、それ以降だと治療があまり有効でなくなる可能性があるからだという。しかし、そうした議論はその処置が有効なことを前提にしたものだ。

日本の何人かの著名な研究者は*Nature*に対して、STR01は脊髄損傷用として承認すべきではなかったと語った。「安倍内閣は、科学分野における1～2件の成功例を急遽必要としているのです。安倍内閣は進め方が強引過ぎます」と、ある心臓専門医は匿名を条件に話した。政府にコメントを求めたが回答はなかった。

世界を見据えた野望

制度に欠陥があるにもかかわらず、日本はこうした再生医療政策を他の国にも採らせようとしており、そこには自国の治療法の市場を確保する狙いも潜んでいる。2019年3月に厚生労働省の医薬品規制担当部署が発表した5カ年計画によれば、政府は「再生医療製品を規制するための日本製モデルを発信し、日本の規制当局に対する信頼を育み、他国に日本の規制モデルを導入してもらうこと」を目指す支援計画に予算を投入する。

これらの取り組みは各方面に影響を与えているようだ、佐藤は話す。台湾では、日本の法律をベースに再生医療のための条件付き承認の法案が起草されており、韓国では2019年8月に日本の法律に似た制度が承認された。インドは2015年に、最初の再生医療条件付き承認につながった審議で日本の制度に言及している。また中国は2019年に、医療機関が幹細胞を「医療手段」として自由に使えるようにする試案を発表した。「他にもいくつかの国が同様の対応をしており、患者の幸福よりも経済競争力という歪んだ視点の方を優先しています」とSippは言う。

英国には、日本と同様の制度があってほしいと考える人々もおり、欧州連合からの脱退（ブレグジット）が迫



る今こそがそのタイミングだと言う声も上がっている。心疾患治療用の「ハートセル」という細胞治療薬を製造するセリキサ社 (Celixir; 英国スタンフォード・アポン・エイボン。2016年に社名をCell Therapy社から変更) の共同設立者で、最高責任者でもあるAjan Reginaldは、2018年2月のBBCのインタビューで、ブレグジットは英国に、自前の迅速な認証手続きを導入するチャンスを与えてくれるだろうと語っている。

「英国の一部の人々は、日本のモデルを採用することにかなり熱心です」と、リバプール大学 (英国) の幹細胞生物学者Patricia Murrayは話す。ただし、日本で実施されたような規制緩和だと、「企業がインチキな治療法を消費者に直接売りつけることも可能になってしまいます」と彼女は言う。

また、開発のスピードの速さも、他国の規制当局にとって難題の1つとなっている。FDAは、業界や患者団体 (カリフォルニア再生医学研究所や保守系シンクタンクのハートランド研究所などを含む) から、日本の制度にもっと近いやり方を採用するよう徐々に圧力を受けている⁵。

Marksによれば、問題なのは、人々が日本を指差して「FDAにいるあなた方はちっとも承認していませんね」と言ってくるのだという。Marksは2019年5月に米国メリーランド州ボルティモアで開催された医療ジャーナリズムの会議で質問に答え、彼のグループが、日本などで承認された新しい治療法を知りたがっていることを認めた。「我々は、それらの治療法が安全で有効なことを

確かめたいだけなのです」。

こうした圧力をプラスとして捉えているのは、皮膚若返り製品のライセンスを化粧品会社の資生堂 (東京都) に2016年に供与した再生医療企業レプリセル社 (RepliCel; カナダ・バンクーバー) の最高責任者Lee Bucklerだ。彼によれば、医薬品をすぐに利用したい人々が、日本で何が起きているかを知って、「自国での同様の利用を強く求める」のだという。

幹細胞生物学や再生医療の分野で日本が上げた成果に対する誇りは、再生医療産業を育てる取り組みに大きな役割を果たしている。しかし、これらの成果に関して最も有名な人物の1人である山中は、規制緩和についてはほぼ静観する姿勢をいまだに貫いている。

山中の研究所は、幹細胞治療を臨床段階へ持っていくことに力を注いでおり、規制緩和の急速な流れに乗った国内の他の研究機関とは対照的に、臨床試験を急いで終わらせようとはしていないようである。「二重盲検対照試験は、可能であれば常に検討されるべきです」と山中は*Nature*に話した。また彼は、こうした試験が一部の細胞治療に関しては困難な場合もあると理解しているが、そうした場合でも、「科学者は、臨床試験をできるだけ客観的かつ科学的なものにするためにベストを尽くすべきです」と言う。

客観的で科学的な手段がなければ、何を信じるべきか、また誰を信じるべきかが分からなくなると、何人かの幹細胞研究者が口をそろえて語った。「問題はあります。この法律は性善説に基づいて作られました。世の中には良からぬ人も多くいます」と高橋は言う。それでも、彼女の眼はずっと先を見据えている。「10年経てば細胞治療はとて良くなっているはず。そう思うから、我々は現在の批判を耐えることができるのです」。

(翻訳: 船田晶子)

Stem cells 2 go

Vol. 573 (482-485) | 2019.9.26

David Cyranoski

(北京のシニアレポーター)

追加取材は Brendan Maher による

1. Daley, G. Q. et al. *Stem Cell Rep.* **6**, 787–797 (2016).
2. Tsuji, K. et al. *Eur. J. Heart Fail.* **19**, 1258–1269 (2017).
3. Miyamoto, S. *Nature* **569**, 40 (2019).
4. Honmou, O. *Jpn J. Neurosurg.* **25**, 979–984 (2016).
5. Sipp, D. & Sleeboom-Faulkner, M. *Science* **365**, 644–646 (2019).

欧州の生命科学研究と地続きに

EMBOが、欧州以外の地域の若手研究者を応援する新しいプログラムを創設した。日本の研究者も利用可能なのだろうか。2019年10月、京都で開催されたSTSフォーラムのために来日したEMBOディレクター、マリア・レプチン氏に話を聞いた。

ドイツに本拠を置くEMBO（欧州分子生物学機構）が2019年、Global Investigators Network（GIN）プログラムをスタートさせた（embo.org/funding-awards/global-investigators）。欧州以外の地域のライフサイエンス分野における若手リーダー研究者に対し、欧州の研究者とのネットワーク形成や共同研究の機会の提供と助成を行うプログラムだ。

日本人にとってEMBOといえば、EMBL（欧州分子生物学研究所）を設立し、EMBOジャーナルを発行する組織として有名かもしれない。しかし、EMBOの活動はそれだけではない。欧州の基礎研究者を支援するさまざまな活動を長年にわたり行っている、研究者にとってありがたくも重要な組織なのである。特に、次世代を担う欧州の若手研究者の育成プログラム（Young Investigators Programme: YIP）に力が注がれてきたが、今回、その対象を欧州外へ広げたのがGINだ。

ただし、GINには応募条件があり、応募者はEMBOと提携を結んだ国の研究者でなければならない。そして残念ながら日本はまだ提携国ではないため、現時点では応募できない。しかし、多様な研究者の受け入れが良い効果を生むことは、EUの大型科学技術助成金（フレームワークプログラム：FP）

でも認識されている（*Nature* 2019年8月23日号 Editorial および *Nature* ダイジェスト8月号「欧州連合の優れた取り組みとは何か」など参照）。そうした背景もあり、EMBOは日本の若手研究者に大きな期待を寄せ、日本との提携に向けた積極的な働きかけを行っているのである。

日本の研究者にとっても、欧州の研究者とのネットワーク構築は魅力的に違いない。欧州のライフサイエンス分野の研究者同士は、EMBOの貢献もあり、国境を超えた情報交換や共同研究もたやすい。自分の研究分野の共同研究者を探すのも容易だから、共同研究のスタートも素早い。GINのプログラムを利用できれば、日本の研究者にとっても欧州は、いわば地続きとなり、人や情報へのアクセスが容易になってくる。しかも、欧州の研究論文の被引用数は大きく、欧州の研究が世界の研究に与える影響も大きい。英国のEU離脱後の欧州における研究の未来を展望した*Nature*の特別号（2019年5月23日号）からも、それはうかがえる。

GINの応募資格は、「研究室で研究グループのリーダーを1年以上6年未満務める」と「ラストオーサーとなった論文が少なくとも1本ある」だ。前者は、日本の大学ならば、教授、准教授、助教などであること（特任であるなし

にかかわらず）だろう。難しいと思われるのは、後者だ。日本では、若手研究者の論文のラストオーサーはその指導者、というのが通例だからだ。ほとんどの若手研究者は、後者の応募資格を満たせないのではないか。EMBOのディレクター、マリア・レプチン氏に尋ねてみた。「国ごとの事情は考慮する。重要なのは、独立して研究を実施できる研究者であること」だという。若手研究者も責任著者になり、責任ある立場にあることを示す必要がありそうだ。

なお、現時点で日本から応募可能なEMBOのプログラムとして、短期奨学金がある（embo.org/funding-awards/fellowships/short-term-fellowships）。これは、共同研究あるいは技術習得のための3カ月未満の滞在に対するもので、日本からは2020年に限り、年間を通して応募可能である。また欧州でポスドクを目指す人のための奨学金（embo.org/funding-awards/fellowships/postdoctoral-fellowships）もある。EMBOは、世界各地でさまざまなワークショップや研究会を主催しており、2020年には日本で3回開催が予定されている。興味をお持ちの方は、いずれかへの参加をお勧めしたい。

藤川良子（サイエンスライター）



ILLUSTRATION BY SEÑOR SALME

科学と政治の150年

Nature 創刊からの150年間に研究システムがどのように形作られてきたかを振り返るエッセイシリーズの第一弾として、政府による科学支援のルーツをたどる。

1609年8月末、イタリアの天文学者ガリレオ・ガリレイは義弟への手紙で、その夏に起きた怒涛のような出来事について興奮した様子で報告した。さかのぼること数週間、ガリレオはフランドル（今日のベルギーの一部）で小型望遠鏡が発明されたという噂を聞きつけた。彼は早速その改良版を製作して新たな噂の発信源となり、間もなくベネチア元老院から発明品の威力を見せるように求められた。ガリレオは義弟に、「大勢の紳士や元老院議員」が「ベネチアで一番高い鐘塔の階段を苦勞して登り、私の小型望遠鏡を使って海上の帆船などを見たが……そ

の船が肉眼で見えてきたのは2時間以上たってからだった」と自慢している。元老院は直ちに採決を行い、ガリレオをパドバ大学（イタリア）の終身教授に任命し、破格の俸給（毎年1000フローリン）を支払うことにした¹。

ガリレオにとって、それは始まりにすぎなかった。新しい望遠鏡を夜空に向けた彼は、木星の周りを公転する4つの衛星など、いくつかの発見をした。抜け目のない彼は、トスカーナ大公コジモ2世・デ・メディチに敬意を表し、これらの衛星を「メディチ家の星々」と名付けた。この策略は功を奏し、ベネチアでの成功を報告する手紙

から1年もたないうちに、ガリレオはトスカーナ大公国王室付き自然哲学者として、フィレンツェでさらに高額の俸給（と教授義務の免除）を手にするようになった²。

ガリレオは官僚や宮廷のパトロンに研究を支援させるのが上手だった。支援者を乗り換えながら業績を重ねる彼の姿を追っていると、企業家精神の旺盛な今日の科学者を見ているような気がしてくる。しかし、ガリレオの時代から250年が経過した頃、政府と科学の間には、これとはかなり違った関係が生まれ始めていた。

天文学者ノーマン・ロッキヤー (Norman Lockyer) が*Nature*を創刊した1869年は、世界各地で政府と科学の関係が大きく変化している時期だった。

帝国の建設と科学

19世紀中頃、大英帝国は地球の陸地の約4分の1まで拡大し、総人口の4分の1近くを支配していた。かつての首相や未来の首相を含め、傑出した英国人政治家たちは、科学と技術がもたらす富をさらに増やす方法を探していた。1840年代、ロバート・ピール (Robert Peel)、ベンジャミン・ディズレイリ (Benjamin Disraeli)、ウィリアム・グラッドストーン (William Gladstone) らは、化学を集中的に研究することは国家にとっても帝国の野望にとっても利益になると信じ、王立化学学校 (Royal College of Chemistry) の設立を支援するために私財を寄付した。1860年代には、多くの研究者が、こうした期待に沿うべく研究に励んでいた。物理量を精密に測定できれば基礎科学の理解が進み、産業の進歩を加速できるという信念の下、英国各地の大学で多くの研究所の建設が始まった。

1870年頃からの「第二次産業革命」時代を代表する発展として挙げられる電力の利用や電信、鉄道網の拡大、鉄鋼の大規模生産などは、いずれも標準の単位と度量衡を必要とする。政府は太平洋横断通信や電気標準、遠洋航海、蒸気力などの問題に挑むための高レベルの委員会を設立し、ジェームズ・クラーク・マクスウェル (James Clerk Maxwell) やウィリアム・トムソン (William Thomson、のちのケルビン卿) などの一流研究者がそのメンバーとして電磁気力や熱力学の理解を深めてゆくと、新たな相乗効果が生じた³。

ある意味、英国人は巻き返しを図っていた。19世紀中頃からドイツ語圏の国々では、地方大学が格式を高めるために優秀な学者をかき集めていた。当代のガリレオとも言えるような科学者たちは、政府が出資する機関に横取りされていった。プロイセン王国が普仏戦争 (1870~71年) でフランスに勝利して1871年にドイツ統一を果たすと、このパターンはますます激化した。ドイツ政府は、中央集権化された教育省の下、迅速な工業化という大きな野望を抱いて、大学の自然科学研究全般に巨額の投資を行った⁴。

これだけの支援があっても、ヴェルナー・フォン・ジーメンス (Werner von Siemens) などのドイツの主だった実業家たちは、自国が優位を失いつつあるのではないかと危惧していた。彼らの協調したロビー活動により、1887年に政府資金による新しい研究所がベルリンに設立された。ドイツ帝国物理工学研究所 (Physikalisch-Technische Reichsanstalt: PTR) である。物理学者ヘルマン・フォン・ヘルムホルツ (Herman von Helmholtz) が所長を務めるこの研究所の使命は、基礎科学と応用研究と工業開発が交わる場所の研究を加速することにあった。設立から数年もたないうちに、新たな分野を生み出すことになる重要な研究が行われた。きっかけは、広い範囲に設置する街路灯にどの方式を採用すべきかを評価することになったPTRが、装置から放射される光を高い精度で測定したことだった。彼らが厳密に測定した黒体放射のスペクトルのデータは、当時の物理学理論では説明できないことが明らかになったのだ。この結果に興味を持った物理学者のマックス・プランク (Max Planck) は、不本意ながらもマクスウェルの電磁気理論を捨て、量子論への最初の一步をためらいがちに踏み出した⁵。

一方、ドイツの東に位置するオーストリアでは、1866年の普墺戦争でプロイセンに敗北したことで、政府と科学に大きな変化が起きていた。1867年に成立したオーストリア=ハンガリー帝国は、気象学と気候学の大規模な研究を立ち上げた。その狙いは、各種機関の広域ネットワークを構築することで、各地方の法律的、宗教的、言語的伝統の寄せ集めからなる帝国に、新しい共通の目的意識を育むことにあった。大学や博物館や政府が支援するその他の機関は、天気の詳細を収集し、標準化して、局所的なパターンが大規模な現象とどのように関連しているかを理解しようとした。広大な帝国を1つにまとめる

必要性が触媒となって、微気候から大気候までの各スケールにおける地域間の相互作用と相互依存という近代的な響きの概念について、最先端の研究が行われたのだ⁶。

同じ頃、ロシアの皇帝アレクサンドル2世も独自の近代化計画を推し進めていた。1861年からは、後に「大改革」と呼ばれることになる一連の法令を發布した。農奴制廃止の直後には国立大学の見直しも行われ、地方政府や司法制度も大きく変わった。巨大な官僚機構が誕生したことで、野心的な知識人は新たな出世の機会を得た。化学者ドミトリ・メンデレーエフ (Dmitri Mendeleev) もその1人だった。彼は、ドイツのハイデルベルクで2年間研究を行った後、1861年に故郷のサントペテルブルクに戻り、地元の大学で化学を教えた。そして*Nature*が創刊されたのと同じ1869年に発表したのが、今ではすっかりおなじみになった元素の周期表の最初のバージョンである (2019年4月号「元素周期表150周年」「周期表の発展を支えた女性科学者たちの物語」参照)。

メンデレーエフがそれから歩んだ目覚ましいキャリアは、当時の科学と技術の役割の広がり象徴するものだった。彼は間もなくロシア財務省と海軍の顧問となり、最終的には度量衡局の局長として、ロシアでのメートル法導入のために尽力した。ドイツ建国の父と呼ばれるオットー・フォン・ビスマルク (Otto von Bismarck) らと同様、アレクサンドル2世はロシア国内の全域で産業の育成を図ろうとした。こうした努力の中心となったのは、精密計測への多額の投資だった。皇帝は、メンデレーエフのような意欲的で高い専門技術を持つ自然科学者が大いに役に立つことを知っていた⁷。

日本もこの時代に大きな変化を遂げた。それまで外国との交流を絶っていた日本は、1868年の明治維新により外に向かって国を開いた。明治天皇が新政府の基本政策として宣布した「五箇条の御誓文」には、「智識を世界に求め大に皇基を振起すべし (知識を世界に求めて、天皇が統治する国家の基礎を大いに奮い起こすこと)」という文言がある。政府は製造業やその他の産業の改革のための投資を始めた。また、新しい公立学校を設立したり、国費留学生に海外の進んだ科学を学ばせたり、国立機関での教育の質を高めるために英国や米国から高名な科学者を招聘したりした。この国の指導者たちも、近代国家の建設に向けて、政府が支援する研究機関を優先するようになった⁸。

遅れて参入した米国

米国はそうした動きとは頑固に距離を置き続けた。1860年代は、新たな投資を行うべきタイミングとは思えなかった。1861～65年の南北戦争は米国史上最悪の死傷者を出し、終結直後にはエイブラハム・リンカーン (Abraham Lincoln) が暗殺された (南北戦争での戦死者数は、第一次および第二次世界大戦、朝鮮戦争、ベトナム戦争、アフガニスタン紛争、イラク戦争での米軍の戦死者数の合計よりも多かった)。科学研究や科学機関の連邦レベルでの支援は、19世紀末までごくわずかし行われていなかった。実際、第一次世界大戦中に米国の科学技術の準備が相対的に不足していたことについて、主だった政策立案者のうち数人が非難されたほどだった。

米国の改革者たちは、研究に対する政府の支援を強化しようと取り組んでいたが、その努力は「教育は連邦政府ではなく州や地方自治体の管轄でなければならない」とする米国の伝統によって阻まれていた。独自研究を重視し始めた各地の単科大学や総合大学が、研究室のインフラ整備を進めていたのだ。だが、その成果は好意的に見てもむらがあった。1927年、量子論を学ぶためにドイツを訪れた若き物理学者イシドール・ラビ (Isidor Rabi) は、現地の大学図書館では米国の学術誌*Physical Review*が年に一度、1年分まとめて注文されていることを知った。それ以上の頻度で取り寄せる必要性が感じられないような内容だったからだ⁹。1930年代の大恐慌の際には、フランクリン・D・ルーズベルト (Franklin D. Roosevelt) 大統領のニューディール政策により、連邦政府が多くの事業を中央集権化した。その時期でさえ、科学はほとんど無視されていた。

米国連邦政府は1940年代初頭になって初めて、戦時緊急動員の下、研究開発の大規模支援を行った。レーダー、核兵器、近接信管など数十の軍事プロジェクトには、数十億ドルの費用だけでなく、抽象的な研究と実用的な開発との緊密な連携が必要だった。

戦時体制の有効性は、政治家、軍事計画者、大学管理者に強い印象を与えた。平和が訪れると、彼らは戦争が培った関係を維持するための新しいインフラを大急ぎで整備した。米国の物理科学と工学分野の予算は以後も増加を続け、その資金のほとんど全てが連邦政府から出ている。



1969年、大学の科学者と軍との結び付きに抗議する米国の学生たち。

JOYCE DOPKEEN/THE BOSTON GLOBE/GETTY

1949年には、米国の物理科学分野の基礎研究に対する全ての助成金の96%が国防関連の連邦機関から出ている。非軍事的な米国立科学財団（NSF；バージニア州アーリントン）が設立されてから4年後の1954年にも、その割合は98%まで上昇した¹⁰。

その後、米国の政策立案者は研究を支援する新たな理由を見いだした。研究は、国内の産業振興と国防という目標の達成に役立ったばかりでなく、国際関係においても重要な要素となった。彼らは、フランスやイタリア、ギリシャなどで科学者が共産主義になびくのを食い止めたのは、戦争により荒廃した欧州全域の科学機関に対する連邦政府の投資だったと言えるかもしれない、と考えたのだ。第二次世界大戦後に米国占領下にあった日本で実施された大学制度改革も、米国モデルを広めるのに役立った。科学に対する投資は、心や精神に対する投資になった^{11,12}。

連邦政府による安定した投資により、米国の科学研究とインフラはかつてないほどの成長を遂げた。第二次世界大戦終結からの25年間に自然科学の訓練を受けた若者の人数は、それ以前の人類の歴史全体で訓練を受けた人

の総計よりも多かった。米国政府は国立研究所システムを構築し、大学での幅広い研究を支援した。その大半は軍事計画とはほとんど関係のない研究だったが、こうした支出はしばしば、広い意味での「戦時への備え」として正当化された。冷戦が実際の戦争へと発展した際に備え、集中的な軍事プロジェクトに従事可能な訓練された人員を大量に養成しておくという理由だ¹³。

その間、進取の気性に富む科学者たちは、支援者である米軍との密接なつながりがもたらす機会を最大限に利用した。米国海軍が潜水艦での戦いを懸念したことから集中的な海底探査が行われ、新しいデータと装置を手にした地質科学者は、プレートテクトニクスの動かぬ証拠を発見した¹⁴。また、機密ミサイル防衛計画の助言を求められた物理学者たちは、非線形光学などの新しい研究分野の発展を促した¹⁵。

多様化するポートフォリオ

この「新しい常態」は25年ほど続いた。*Nature*が創刊100周年を迎えた1969年、米国の軍事会計検査官が「Project Hindsight（後知恵プロジェクト）」と称する長大な分析結果を公表し、連邦国防機関は科学に対して制約を設けずに投資してきた結果、ほとんど見返りを受けられていないと主張した。その年、民主党のマイケル・マンズフィールド（Michael Mansfield）上院議員（モンタナ州選出。米国史上最長期間にわたり多数党内総務を務めた）が、1970年の連邦国防権限法を土壇場になって修正し、国防総省からの助成金は「特定の軍事機能と直接的かつ明確な関連」のない「いかなる研究プロジェクトや研究の実施にも」利用できないと明記させた。

科学研究の支援における政府の役割を巡って、全米の大学キャンパスでは議論が戦わされた。ベトナム戦争が激しさを増す中、科学者と学生は、高等教育の中での国防費の位置付けを模索した。コロンビア大学（ニューヨーク州）とウィスコンシン大学マディソン校では、軍の助成を受けている研究室を過激派が爆発物で狙うという事件も起きた。その他の多くのキャンパスでも、怒りに燃える抗議者を警察が催涙ガスや警棒で追い散らした¹⁶。

1970～80年代の間に、科学者たちは民間企業や慈善団体とパートナー関係を結ぶようになった。このような関



ベネチア元老院議員たちに望遠鏡を披露するガリレオ。ルイジ・サバテリ作

DEAGOSTINI/GETTY IMAGES

係は、米国をはじめ世界の多くの国々で国防費と教育への支出が大幅に削減されたことにより加速していった。こうした時代に誕生したバイオテクノロジーとナノテクノロジーを支えたのは、第二次世界大戦後の核物理学研究を支えた財政支出とは異なる支援システムだった¹⁷。

最近の混成型の支援では、中央政府からの助成金に強く依存した状態が今も続いている。このことは、科学者たちが米国議会などの毎年の予算編成サイクルに注目している様子からも明らかだ。ただし、今日の研究への支援の仕方は、核の時代の初期とは異なる。当時は、望む結果を得るためには投資を集中させるのが当然だと考えられていたが、経済協力開発機構（OECD）と世界銀行のデータによれば、現在、国内総生産（GDP）の2%以上を研究開発に投資する国は20カ国未満である（訳注：日本は3%強）。さらに、これらの国々の一部では政府の支援の在り方が変化していて、長期的な研究プロジェクトよりも、短期間で結果が出て実際的な応用が可能なプロジェクトの方が優先されることが多くなっている。

ロッキヤーが*Nature*創刊号の原稿を印刷に回したときにはすでに、英国、欧州大陸、アジアの一部で、近代科学事業の多くの要素が生まれつつあった。けれども、今日の科学者が研究資金確保のためにあちこちで結んでいる関係を理解するには、ガリレオをイメージする方がい

いかかもしれない。科学者たちは、ベネチア元老院の現代版と言える機関の助成金を探し回りながら、メディチ家の宮殿に負けず劣らず輝くカプリ研究所やサイモンズ財団センターで個人寄贈者を口説いている。

■
(翻訳：三枝小夜子)

Discovery is always political

Vol. 573 (487-490) | 2019.9.26

David Kaiser

(マサチューセッツ工科大学の科学史と物理学の教授)

1. Drake, S. *Isis* **50**, 245–254 (1959).
2. Biagioli, M. *Galileo, Courtier: The Practice of Science in the Culture of Absolutism* Ch. 2 (Univ. Chicago Press, 1992).
3. Morus, I. R. *When Physics Became King* (Univ. Chicago Press, 2005).
4. Clark, W. *Academic Charisma and the Origins of the Research University* (Univ. Chicago Press, 2006).
5. Cahan, D. *An Institute for an Empire: The Physikalisch-Technische Reichsanstalt, 1871–1918* (Cambridge Univ. Press, 1989).
6. Coen, D. R. *Climate in Motion: Science, Empire, and the Problem of Scale* (Univ. Chicago Press, 2018).
7. Gordin, M. D. *A Well-Ordered Thing: Dmitrii Mendeleev and the Shadow of the Periodic Table* (Basic, 2004).
8. Kikuchi, Y. *Anglo-American Connections in Japanese Chemistry: The Lab as Contact Zone* (Palgrave Macmillan, 2013).
9. Rigden, J. S. *Rabi: Scientist and Citizen* 4 (Basic, 1987).
10. Forman, P. *Hist. Stud. Phys. Biol. Sci.* **18**, 149–229 (1987).
11. Krige, J. *American Hegemony and the Postwar Reconstruction of Science in Europe* (MIT Press, 2006).
12. Kaiser, D. *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics* Ch. 4 (Univ. Chicago Press, 2005).
13. Kaiser, D. *Hist. Stud. Phys. Biol. Sci.* **33**, 131–159 (2002).
14. Oreskes, N. *Nature* **501**, 27–29 (2013).
15. Wilson, B. *Hist. Stud. Nat. Sci.* **45**, 758–804 (2015).
16. Moore, K. *Disrupting Science: Social Movements, American Scientists, and the Politics of the Military, 1945–1975* (Princeton Univ. Press, 2008).
17. Mirowski, P. *Science-Mart: Privatizing American Science* (Harvard Univ. Press, 2011).

オンラインヘイトの力学

社会科学

ソーシャルメディアプラットフォームにおけるオンライン上のヘイトグループの力学の分析から、ヘイトスピーチを禁止する現行のアプローチではうまくいかない理由が明らかになり、オンラインヘイト撲滅に有効な可能性のある4つの戦略の基礎が示された。

オンライン上のヘイトグループの生態系は、ソーシャルメディアプラットフォーム上にしぶとく存在し続ける。その仕組みはどのようなものなのか、そして、その存在を効果的に減少させるためにはどんな対策を取ることができるのか？ これらの疑問に対し、ジョージ・ワシントン大学（米国ワシントンD.C.）のNeil Johnsonら¹は、複数のソーシャルメディアプラットフォームに存在するオンラインヘイトコミュニティの挙動に関して、*Nature* 2019年9月12日号261ページに興味深い報告をしている。Johnsonらは、オンラインヘイトグループの構造と力学を解明し、その結果を踏まえて、オンラインソーシャルメディア上にはびこるヘイトコンテンツを減らすための4つのポリシーを提案している。

私たちは、高度な社会的相互接続の時代に生きている。そのため、1つの地域でシェアされる意見は、その場所のみに限定されるわけではなく、オンラインソーシャルメディアを介して急速に地球全体に拡散していく可能性がある。この拡散の速さは、ヘイトスピーチを取り締まる側にとつ

ては問題である。一方、複数の悪意に満ちた組織にとっては、彼らのメッセージをシェアして、新規参加者の募集活動を世界的に広げる機会を生み出す。ソーシャルメディアの取り締まりを効率的に行えない場合、オンラインの生態系は過激な人々にとって強力なツールとなり得る²。従って、ヘイトコミュニティの力学を支配するメカニズムを理解することは、この「オンライン戦場」でそのような組織と戦う効果的な方法を提案するために、非常に重要である。

Johnsonらは2つのソーシャルメディアプラットフォーム（FacebookとVKontakte）におけるヘイトクラスターの力学を数カ月にわたって調べた。ここでいうクラスターとは、同様の視点や関心、または表明している目的をシェアする個人を組織化してコミュニティとしたオンラインページかグループのことである。ソーシャルメディアプラットフォーム上のこれらのページやグループは、ユーザーが参加できる、同様のコンテンツを持つ他のクラスターへのリンクを含んでいる。Johnsonらは、これらのリンクを通じて、クラスター間のネットワーク接続を確立して、1つのクラスターのメンバーがどのように他のクラスターにも参加しているかを追跡することができた。2つのクラスター（グループまたはページ）が互いにリンクを含んでいる場合、その2つは接続されていると考えられた。このアプローチには、クラスターのメンバーであるユーザーの個人レベルの情報を必要としないという利点があった。

Johnsonらは、オンラインヘイトグループが非常にレジリエントな（復元力のある）クラスターとして組織されていることを示している。これらのクラスターのユーザーは、限定された地域に集まってはいるが、異なる国々、大陸、および言語にまたがってオンラインヘイトの拡散を促進する「ハイウェイ」によって、世界的に相互接続されている。例えば、ヘイトグループがソーシャルメディアプラットフォームの管理者によって削除されるなど、これらのクラスターが攻撃を受けたとしよう。この場合、クラスターは即座につなぎ換えを起こして自己修復し、これらのクラスターをシェアしているユーザーたちによって、化合物の共有結合のような強い結合がクラスター間で作られる。時には、複数の小さいクラスターが合わさって大きいクラスターを形成することがある。Johnsonらは、この過程を原子核の融合に例えている。彼らは自分たちが考案した数学的モデルを使用して、単一のプラットフォーム上



でヘイトスピーチを禁止するとオンラインヘイト生態系を悪い方向に刺激して、プラットフォームの取り締まりでは検知できないクラスター（彼らはこれを「ダークプール」と呼んでいる）の創設が促進されることを示した。ダークプールではヘイトスピーチは規制されることなくはびこることができる。

オンラインソーシャルメディアプラットフォームは規制に苦慮しており、政策立案者はオンライン上のヘイトスピーチを減少させる実用的な方法の提案について考えあぐねている。すでに、ヘイト関連コンテンツを禁止、削除する努力は、効果がないことが立証されている^{3,4}。また、ここ数年間でオンラインでのヘイトスピーチの報告件数は増えており⁵、悪意に満ちたコンテンツの拡散との戦いに敗れつつあることを示している。これは私たちの社会の幸福と安全にとって、不吉な傾向である。さらに、ソーシャルメディア上のオンラインヘイトに触れたり関わったりすることによって、オフラインでも攻撃性が促進されることが示唆されており⁶、実際に、暴力的なヘイトクライムの加害者の一部がそのようなコンテンツに関わっていたことが報告されている⁷。

以前の研究（例えば、文献8）では、ヘイトグループは個々のネットワークと考えられたり、あるいは相互接続さ

れた複数のクラスターをひっくるめた1つの世界的なネットワークと考えられたりしてきた。しかし、Johnsonらの新しいアプローチでは、複数のヘイトクラスターからなるコミュニティの相互接続された構造が「ネットワークのネットワーク」として研究された⁹⁻¹¹。「ネットワークのネットワーク」では、クラスターはハイウェイによって相互接続されているネットワークである。さらに、彼らは有効な介入のための4つのポリシーを提案している。それらのポリシーは、この研究で明らかにされたメカニズム、つまり、オンラインヘイト生態系の構造と力学を支配しているメカニズムから得た情報に基づいている。

現在、ソーシャルメディア企業は、どのコンテンツを禁止すべきかを決めなければならないが、コンテンツの圧倒的な量と、国によって異なるさまざまな法的制約や規制上の制約に対処しなければならないことが多い。Johnsonらが推奨する4つの介入法（ポリシー1～4）では、グループや個々のユーザーを禁止することに関連する法的な問題を考慮に入れている。特に、彼らが示唆する各ポリシーは、プラットフォーム間で機密情報をシェアする必要はなく、個々のプラットフォームによって独立に実行でき得ることが重要である。そうした機密情報のシェアは、ほとんどの場合、明確なユーザーの同意なし

には法的に許されていないのだ。

ポリシー1では、Johnsonらは、最も大きいオンラインヘイトのクラスターを除去するのではなく、比較的小さいヘイトクラスター群を禁止するよう提案している。このポリシーは、オンラインヘイトのクラスターのサイズ分布はべき乗数傾向に従う、すなわち、ほとんどのクラスターは小さく、大きいものはほんのわずかだという今回の発見を利用している。最も大きいヘイトクラスターを禁止することは、無数の小さいクラスターから新しい大きいクラスターが構成されることへつながると予測される。対照的に、小さいクラスターは非常に数が多いので場所を特定するのが比較的簡単であり、それらを排除すれば、他の大きいクラスターの出現を防ぐことができるというのだ。

グループのサイズにかかわらず、ユーザーのグループ全体を禁止すれば、結果的には、ヘイトコミュニティを激怒させ、言論の自由への権利が抑え付けられているとソーシャルメディアプラットフォームに対する非難が起る可能性がある¹²。それを避けるためにポリシー2では、グループ全体を禁止する代わりに、オンラインヘイトのクラスターから無作為に選ばれた少数のユーザーを禁止することを勧めている。この無作為標的アプローチは、ユーザーたちの居住地を特定したり、機密のユーザー・プロフィール情報（特定のユーザーを標的とするために適用することはできない）を使用したりする必要もないので、プライバシー規則に違反する可能性を避けられる。しかし、このアプローチの有効性はソーシャルネットワークの構造に大いに依存する。なぜなら、ネットワークのトポロジカルな特性が、無作為な障害や標的型攻撃に対するクラスターのレジリエンスに強く影響するからだ。

ポリシー3は、クラスターは当初無秩序だったユーザーグループから自己組織化されるという研究結果を利用している。ポリシー3では、プラットフォームの管理者がアンチヘイトユーザーのクラスターの組織化を促進することを推奨している。そうしたクラスターは、ヘイトクラスターと戦ったり対抗したりする「ヒト免疫系」のような働きをする可能性がある。ポリシー4は、オンライン上のヘイトグループの多くは対立する見解を持っているという事実を利用している。このポリシーでは、プラットフォームの管理者が人工的なユーザーグループを導入して、対立する意見を持っているヘイトクラスター間の

相互作用を促すことを提案している。その後、ヘイトクラスターが互いの意見の相違を巡って争うことを期待するわけだ。Johnsonらはモデル化により、そのような争いによって、対立する意見を持つ大きいヘイトクラスターを効果的に消せることを証明した。ポリシー3と4はいったん実行に移されると、プラットフォームの管理者による直接的介入をほとんど必要としないだろう。しかし、対立する意見を持つクラスター同士を仲たがいさせるには、細部まで考え抜いた戦略が必要だろう。

Johnsonらは、それぞれのポリシーを採用する利点と欠点を評価する際には注意が必要だという。あるポリシーの実施を実現できるかどうかは、利用可能なコンピューターリソースおよび人的リソース、そしてプライバシーに関する法的制約によって決まるからだ。加えて、どのポリシーを採用してどれを不採用にするかは、実証的分析とこれらのクラスターの綿密な監視によって得られたデータに基づいて決定されなければならない。

過去数年間で、オンラインヘイトに対処する効果的な解決策と、オンラインソーシャルメディアプラットフォームから生じる法的な問題およびプライバシーの問題は、個々の産業部門のみから生まれるわけではないこと、その代わりに、テクノロジー企業、政策立案者、および研究者の共同の努力が必要とされることが明確になってきた。Johnsonらの研究は、貴重な手掛かりを提供し、そして、彼らが提案したポリシーは今後の取り組みのためのガイドラインとなり得る。

(翻訳：古川奈々子)

The dynamics of online hate

Vol. 573 (203–204) | 2019.9.12

Noemi Derzsy

AT&T ラボのデータ・サイエンス & AI 研究組織
(米国ニューヨーク) に所属

1. Johnson, N. F. et al. *Nature* **573**, 261–265 (2019).
2. Hernandez, D. & Olson, P. *Wall Street J.* (5 July 2019); available at go.nature.com/2oxoqdw
3. Wakefield, J. *BBC News* (15 March 2019); available at go.nature.com/2kabi2p
4. O'Brien, S. A. *CNN Business* (28 February 2019); available at go.nature.com/31c2nny
5. *BBC News* (17 March 2018); available at go.nature.com/2h04gci
6. SELMA (23 April 2019); available at go.nature.com/2yghkx1
7. Benner, K. & Spencer, H. *New York Times* (27 June 2019).
8. Mathew, B. et al. *Proc. 10th ACM Conf. Web Sci.* 173–182 (2019).
9. Havlin, S. et al. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **223**, 2087–2106 (2014).
10. Palla, G. et al. *Nature* **446**, 664–667 (2007).
11. Jarrett, T. C. et al. *Phys. Rev. E* **74**, 026116 (2006).
12. Coaston, J. *Vox* (14 May 2019).

小地震も大地震も 始まりは似ている

地球科学

小さな地震と大きな地震の始まりは、よく似ているのか、あるいは異なっているのか、という問題は、地震学の長年の課題だ。日本周辺の地震を分析した結果、一部のケースでは、小さな地震と大きな地震の始まりはほぼ同一であることが分かった。

ある地震がどれだけ大きくなるのかが分かるのはどの時点だろうか？ 1つの地震のマグニチュードは、その成長の始まりの状況とダイナミクスに左右されるのだろうか？ もし左右されるのであれば、初期の地震波の観測により、あるいは地震が起こるであろう地域の観測によっても、地震動の早期警報が可能になるかもしれない。一方、左右されないなら、そうした短期予測の可能性は低い。東京大学大学院理学系研究科の井出哲はこのほど、日本周辺で起こった数千回の大きな地震と、それらに近い震源を持つ小さな地震について、互いの始まりの地震波の波形を比較し、*Nature* 2019年9月5日号112ページに報告した¹。井出は、今回分析した地震波の周波数範囲では、大きな地震の約20%の始まりの地震波は、それらと震源が近い小さな地震の始まりの地震波と区別がつかないことを見いだした。

地震は、小さな振幅の波だけの短い段階で始まり、その後、最終的な大きさの地震に成長することが多い^{2,3}。この観測を説明する1つのメカニズムはカスケード破壊であり、

断層の1つのパッチ（断層面の一領域）がランダムに破壊され、破壊による応力変化が、ドミノ倒しのように他のパッチを破壊するというものだ。この場合、ある地震のマグニチュードは、地震が成長する際の動的な条件に左右され、地震が減速するか止まる前に予測することは不可能だ。

もう1つの可能性は、スロースリップ（ゆっくり滑り）という現象に関係する。スロースリップは断層の両側の岩石の相対的な運動だ。このスリップは地震計では検出されず、断層の限定された領域の中で徐々に加速し、その後、臨界速度に到達し、領域外に拡大して最終的な地震の大きさに達する。これが正しければ、地震のマグニチュードは、先行して起こるスロースリップ領域の大きさ、あるいは初期の波の特徴によって決定されるかもしれない。さらに、もしもこうした特性を観測し、解釈できるなら、短期的な予測が可能かもしれない。

地震計記録の研究には、地震のマグニチュードは、地震の最初の数十ミリ秒には依存しないことを見いだしたものや⁴、さらに長い時間にも依存しないことを見いだしたものもある³。しかし、これらの研究の分析対象は数回の地震に限定されていた。一方、最終的な地震の大きさは、地震の始まりに依存することを示唆した研究もある^{5,6}。しかし、これらの分析は、データの間接的なパラメータ化を含み、地震波が地球を進むときのエネルギー損失を正確に考慮していない可能性がある⁷。

今回、井出は、震源が互いに近い、さまざまなマグニチュードの地震の始まりを比較し、地震の始まりが最終的な地震の大きさの手掛かりを与えるかどうかを決定した。彼は、2002年6月～2018年4月の間に日本海溝の長さ約1100キロメートルにわたる領域に起こった、十分詳細に記録された大きな地震のすべての包括的な分析を行った。日本海溝は沈み込み帯であり、そこでは、太平洋の下にある太平洋プレートが、日本の下にあるオホーツクプレートの下に潜り込んでオホーツクプレートに押されている。彼は、繰り返し地震と呼ばれる現象を同定するために使われてきた手順に従った⁸。繰り返し地震は同じような大きさの地震で、その地震計の記録はとてもよく似ているので、断層の同じパッチの繰り返し同様の運動に関係していると考えられる⁸。

井出は、同じような大きさの地震を探す代わりに、1654回の大きな地震（マグニチュードが4.5よりも大き



図1 2011年東北地方太平洋沖地震による被害

2011年3月11日、日本の近代地震観測史上最も強い地震が発生して津波を引き起こし、壊滅的な被害を与えた。井出は、大きな地震の始まりは、小さな地震の始まりとほぼ同一である場合があることを見いだした¹。これは、地震の最終的な大きさの予測に関わる知見だ（写真は2011年3月21日、自宅の片付けをする男性。宮城県気仙沼市で）。

な地震)を、その震源から約100メートル以内と十分に近くに震源があって位置が区別できない、すべての既知の小さな地震（マグニチュードが4よりも小さな地震）と比較した。彼は、これらの地震の地震計記録の最初の0.2秒の類似性を計算した。

その結果、200の大きな地震の始まりが、ほぼ同じ位置の小さな地震の始まりととてもよく似ていることが分かり、とてもよく似た始まりを持つ、大きな地震と小さな地震の対が390対発見された。彼はこの発見を、大きな地震の始まりは小さな地震の始まりと同一である場合があり、つまり、地震の初めの状況とダイナミクスはそのマグニチュードを決定しないことを示している、と解釈した。

井出は、2011年東北地方太平洋沖地震（図1）などの沈み込み型とその他のタイプに地震を分け、沈み込み型地震はその他のタイプよりも対になる地震がある可能性が高いことを発見した。また、沈み込み型地震の対は10年を超えて離れていることがあるが、他のタイプの地震の対は、大きな地震に時間的に近い小さな地震に限定されることも見いだした。

井出は、これらの結果を1つのモデルを使って解釈した。このモデルでは、1つの地震断層は複数のパッチからなり、パッチはさまざまな大きさと比較的一定の破壊特性を持つ。そうしたパッチの1つの滑りは、さらに大きな周辺のパッチの滑りを引き起こし、以下同様に続くのかもしれない。この描像は、繰り返し地震を説明するために提案された数値モデルと調和する⁹。長期にわたる始まりの類似性は、長期的な特徴的構造が存在して、大きな地震と小さな地震を繰り返し起こすことができることを意味する。

震源が同じ位置なら、小さな地震と大きな地震の地震波は、両方とも同じ経路を通して測定地点に至る。井出は、震源が同じ場所に位置する地震を考慮することにより、地球の中のさまざまな経路を進む波からのバイアスを除去した^{3,4}。地震の始まりは地震の最終的な大きさを左右しないという彼の結論は、米国カリフォルニア州パークフィールドのサンアンドレアス断層で詳細に記録された観測と一致する¹⁰。またこの結論は、世界的な大地震の統計的収集とも調和する^{5,7,11}。この収集では、すべての地震

はおおよそ同じペースで成長し、破壊が減速の徴候を示す時点で達した後、違いが現れ始めることが分かった。

日本周辺の地震の大半は、沖合いあるいは地下深くで起こり、地震計に近くはなく、記録の空間的カバーと周波数範囲が制限される。井出は、高周波数波（1ヘルツ以上）を分析した。従って、井出の分析は、より低い周波数での始まりの違いを捉えていない。大きな地震は、エネルギーの大半をより低い周波数で放出する。井出の分析はまた、実験室実験と数値モデルで観察されたような、地震に先行するスロースリップも捉えられないだろう¹²。実際の地震の前に起こるスロースリップの、信頼できる矛盾のない観測は困難なままだ。

もう1つの問題は、井出は大きな地震と小さな地震を比較しようとしているが、390対の地震の約60%はマグニチュードの差が1.5よりも小さく、これは一連の繰り返し地震で見られる変動に近い⁸。390対のうち、マグニチュード差が2を超えるのは約8分の1だけだ。

地震多発地域の住民は今のところ、地震早期警報システムに頼らなければならない。地震早期警報システムは、アジアでは以前から導入されていて、カリフォルニア州では数年前に導入された。地震警報システムは、震源に近い地震計を使ってマグニチュードを見積もり、この情報を、被害を与える速度の遅い地震波より先に住民に送る¹³。今回の井出の結果は、地震の始まりをより深く理解するための重要な一歩だ。その知見は、地震早期警報システムの速度と精度の改善につながる。

（翻訳：新庄直樹）

Similar starts for small and large earthquakes

Vol. 573 (42–43) | 2019.9.5

Rachel E. Abercrombie

ボストン大学（米国マサチューセッツ州）に所属

1. Ide, S. *Nature* **573**, 112–116 (2019).
2. Ellsworth, W. L. & Beroza, G. C. *Science* **268**, 851–855 (1995).
3. Abercrombie, R. & Mori, J. *Bull. Seism. Soc. Am.* **84**, 725–734 (1994).
4. Mori, J. & Kanamori, H. *Geophys. Res. Lett.* **23**, 2437–2440 (1996).
5. Olson, E. L. & Allen, R. M. *Nature* **438**, 212–215 (2005).
6. Colombelli, S. et al. *Nature Commun.* **5**, 3958 (2014).
7. Meier, M.-A. et al. *Science* **357**, 1277–1281 (2017).
8. Uchida, N. & Bürgmann, R. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **47**, 305–332 (2019).
9. Noda, H. et al. *J. Geophys. Res. Solid Earth* **118**, 2924–2952 (2013).
10. Uchide, T. & Ide, S. *J. Geophys. Res. Solid Earth* **115**, B11302 (2010).
11. Noda, S. & Ellsworth, W. L. *Geophys. Res. Lett.* **43**, 9053–9060 (2016).
12. Kaneko, Y. et al. *J. Geophys. Res. Solid Earth* **121**, 6071–6091 (2016).
13. Allen, R. M. & Melgar, D. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **47**, 361–388 (2019).

フッ素とアミド基の連続導入に成功

有機化学

これまで合成が不可能だった、フッ素原子とアミド基を近接して持つ化合物群の実用的な合成法が考案された。この反応は、創薬分野で大いに役立つ可能性がある。

「アミド基」として知られる原子団（官能基）は、医薬品化学の花形である。2018年に最も売れた医薬品の上位40種類のうち、実に36種類にアミド基が含まれているのだ（go.nature.com/30f709w参照）。一方、薬剤の安定性などを高めるには、フッ素原子が導入されることが多い。しかし、アミド基とフッ素原子が近接して存在する有望な化合物群*N*-トリフルオロメチルアミド類は、これまで合成がほぼ不可能とされてきた。今回アーヘン工科大学（ドイツ）のThomas Scattolinら¹は、*N*-トリフルオロメチルアミド類を直接的に合成する巧妙な方法を開発し、*Nature* 2019年9月5日号102ページで報告した。この方法は多様な関連化合物に応用可能であることから、創薬に利用可能なアミド類の幅が一気に広がると期待される。

カルボニル基（C=O）の炭素原子に窒素原子が結合した構造を持つアミド基は、医学的に重要な数多くの化合物に含まれるが、これは、この官能基が非常に安定な（反応性が低い）だけでなく、極性を持つ（正電荷の密度が高い領域と負電荷の密度が高い領域を有する）ことにも

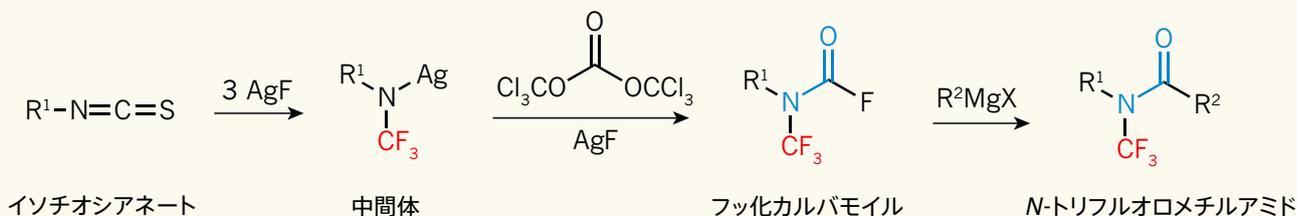


図1 *N*-トリフルオロメチルアミド化合物の合成反応

N-トリフルオロメチルアミド類は、アミド基（青色）とトリフルオロメチル基（赤色）が結合した化合物群であり、その合成はこれまではほぼ不可能だった。R¹およびR²は任意の官能基を表す。今回 Scattolinら¹は、創薬的に関心の高いこうした化合物の実用的な合成方法を開発した。この方法では、まずイソチオシアネートをフッ化銀（AgF）で処理して、窒素原子にトリフルオロメチル基が結合した反応中間体を得る。次に、この中間体をフッ化銀の存在下で炭酸ビス（トリクロロメチル）（CO（OCCl₃）₂）と反応させて、フッ化カルバモイルとした後、これをグリニャール試薬として知られる有機マグネシウム試薬（R²MgX；Rは有機基、Xはハロゲン原子）で処理して、*N*-トリフルオロメチルアミドを得る。この図では反応の副生成物は示していない。

よる。こうした電荷の偏りに起因して、アミド基を持つ薬剤は生体内の受容体や酵素と相互作用することができるのだ。アミド基はタンパク質のアミノ酸残基間をつなぐ結合部に見られ、そうした意味では、薬剤にアミド基を使うのは自然界の例に倣うものといえる。だが薬剤は、単に生物学的な標的と相互作用すればよい、というわけではない。人体という複雑な環境において、迅速な代謝分解に耐えねばならないのだ。

代謝分解から薬剤分子を守る確立された方法の1つに、フッ素原子の導入がある。炭素とフッ素の結合（C-F結合）は、極性を持ち反応性が低いという点ではアミド基と似ているが、この結合はアミド基とは異なり、生物界にはほとんど見られない。これはつまり、生物の代謝酵素はフッ素を含む分子を素早く分解できないことを意味する。従って、フッ素原子の導入は、薬剤化合物の代謝安定性など望ましい特性を向上させる効果的な方法となる²。

そのため、アミド基とフッ素原子を組み合わせることは、医薬品開発にとってとりわけ有益な戦略になり得る。実際、史上最も売れている薬剤である「アトルバスタチン」というコレステロール低下薬には、アミド基とフッ素原子の両方が含まれている。ただし、アトルバスタチンのアミド基

とフッ素原子は分子内の別々の場所にあり、これらが近接して存在する分子に関しては合成が非常に難しいことが分かっている。フッ化アミド類の構築では、過酷な反応条件が必要とされることが多く、そうした条件では目的の分子内の敏感な官能基が分解されてしまうからだ。

今回 Scattolinらは、これまで合成不可能とされていた、*N*-トリフルオロメチル基（N-CF₃）を持つフッ化アミド群である*N*-トリフルオロメチルアミド類を合成する実用的な解決策を見いだした（図1）。研究チームは、比較的反応性の高い「フッ化銀（AgF）」という塩を用いることで、「フッ素イオンは有用反応に関与しにくい」という問題を巧妙に克服し、有機化学者にはおなじみだがめったに併用されることのない2つの試薬間の結合形成を促進させたのである。

1つ目の試薬は「イソチオシアネート」という硫黄化合物で、タンパク質やペプチドのアミノ酸配列決定に古くから用いられている「エドマン分解法」の試薬として知られる。Scattolinらの研究グループなどは以前、銀イオンを用いることで、硫黄原子をフッ素原子で置換する反応を促進できることを報告した^{3,4}。フッ化銀は今回の研究でも同様に、イソチオシアネートから硫黄原子を引き抜いてそれ

を3個のフッ素原子に置換し、トリフルオロメチル基 (CF₃) を持つ反応中間体を形成する役割を果たしている (図1)。

2つ目の試薬は「炭酸ビス (トリクロロメチル)」で、この試薬はアミド類やアミド様誘導体の合成に用いられることが多い⁵。トリフルオロメチル基を含む中間体は通常、非常に反応しにくいですが、Scattolinらによると、炭酸ビス (トリクロロメチル) はフッ化銀と併用すると、この中間体を捕捉して「フッ化カルバモイル」と呼ばれる化合物を形成するようになるという。今回の研究で概念的ブレークスルーをもたらしたのは、このフッ化カルバモイルだった。

窒素原子へのトリフルオロメチル基の導入は困難だが、フッ化カルバモイルにはすでに炭素と窒素の結合 (C-N 結合) が含まれているため、フッ化アミド類の合成に伴うこの難題を回避できる。また、フッ化カルバモイルは単離できるほど安定である一方、アミド類合成の構成要素として用いるのに十分なほど反応性が高い。Scattolinらは、フッ化カルバモイルと、「グリニャール試薬」として知られる一連の有機マグネシウム化合物を反応させることで、多様な *N*-トリフルオロメチルアミド類を合成した (図1)。この最終段階では、尿素基を持つ *N*-トリフルオロメチル尿素類やカルバメート基を持つ *N*-トリフルオロメチルカルバメート類なども容易に合成できる。Scattolinらは実際に、多様な官能基を持つ関連化合物を数十種類合成することで、この化学反応の応用可能性がアミド類以外にも拡張できることを示した。

今回の研究で Scattolin らは、併用できないと考えられていた極めて反応性の高い複数の試薬の反応を實に見事な順序とタイミングで組み合わせ、完璧に制御した。そして、この巧妙な手法によって、単純な *N*-トリフルオロメチルアミド分子だけでなく、アミノ酸系分子、薬剤の骨格、ポリマー材料合成用モノマーなど、化学的に敏感な分子を多数合成できることも実証した。

医薬品化学にとって、今回報告された反応は重要な意味を持つ。この反応を用いることで、創薬化学者たちはこれまで合成不可能だった多くの化合物を合成し、さまざまな創薬プログラムで試験できるようになるからだ。そうした化合物の中には、新しい生物活性を示すものがあるかもしれない。薬剤候補化合物の生物活性は分子のコンホメーションを変えることで変化させることができ、そ

の手法としては、アミド基の窒素原子へのメチル基付加が長く用いられてきた⁶。今回、*N*-トリフルオロメチルアミド類の合成が可能になったことで、こうした戦略の幅も広がるだろう。

だが、今回の新しい化学反応には、医薬品製造に必要な工業規模へとスケールアップする前に取り組むべき欠点がある。主な問題点は、この反応がかなりの量のフッ化銀を必要とすることだ。フッ素原子を1個導入するごとにフッ化銀分子1個が必要だが、反応途中で2個のフッ素原子が出ていくため、反応全体ではフッ化銀が5当量必要になる。創薬の初期段階 (リード化合物の開発と最適化) であれば、扱うのは一般的にミリグラム量からグラム量と少量のため、容認できる量だろう。しかし、臨床試験に必要なキログラム規模の合成では、費用面と大量の廃棄物の問題から持続可能ではないとみられ、さらに大きな、工業生産の規模に至っては言うまでもない。そのため、*N*-トリフルオロメチルアミド類の持続可能な大規模合成法を見いだすために、別のブレークスルーが必要になると考えられる。

医薬品化学以外の分野に目を向けると、Scattolinらの今回の知見は、窒素原子と結合したトリフルオロメチル基の前駆体としてイソチオシアネート基が使えることを明示しており、こうした反応には、化学合成においてより広範な用途が見いだされる可能性がある。トリフルオロメチル基で置換した窒素化合物を合成できるこの画期的な反応は、新しい特性を持つ触媒や材料の設計と合成をも促進することだろう。

(翻訳：藤野正美)

Fluorine and amide groups together at last

Vol. 573 (37–38) | 2019.9.5

Jonathan Clayden

ブリストル大学 (英国) に所属

1. Scattolin, T., Bouayad-Gervais, S. & Schoenebeck, F. *Nature* **573**, 102–107 (2019).
2. Purser, S., Moore, P. R., Swallow, S. & Gouverneur, V. *Chem. Soc. Rev.* **37**, 320–330 (2008).
3. Tyrre, W. J. *Fluor. Chem.* **109**, 189–194 (2001).
4. Scattolin, T., Deckers, K. & Schoenebeck, F. *Angew. Chem. Int. Edn* **56**, 221–224 (2017).
5. Eckert, H. & Forster, B. *Angew. Chem. Int. Edn* **26**, 894–895 (1987).
6. Yamaguchi, K. et al. *J. Am. Chem. Soc.* **113**, 5474–5475 (1991).

出版社は引用情報を公開せよ

ほとんどの科学者が、被引用数指標の中身を自分自身で判断したいと考えている。
そのためには、論文に記された引用情報を自由に利用できるようにすることが必要だ。

評価指標（例えば、被引用数）に基づいて科学者がランク付けされ、報酬を得ている状況では、できれば少しでも評価点を上乘せたいと考える科学者が出てくる。*Nature* 2019年9月12日号174ページでは、論文の査読者が、自分の論文を引用することを論文著者に繰り返し要求した複数の事例について、エルゼビア社が調査していることが報じられている。

これは、決して特殊な事例ではない。*Nature* 2019年8月29日号の記事（578～579ページ）では、被引用数の多い科学者上位10万人のうち少なくとも250人は、その被引用数の50%以上を自身の論文もしくは共著者の論文で稼いでいたという分析結果について取り上げている。50%以上というのは、これらの科学者の研究分野やキャリア段階における通常の割合よりもかなり大きかった。

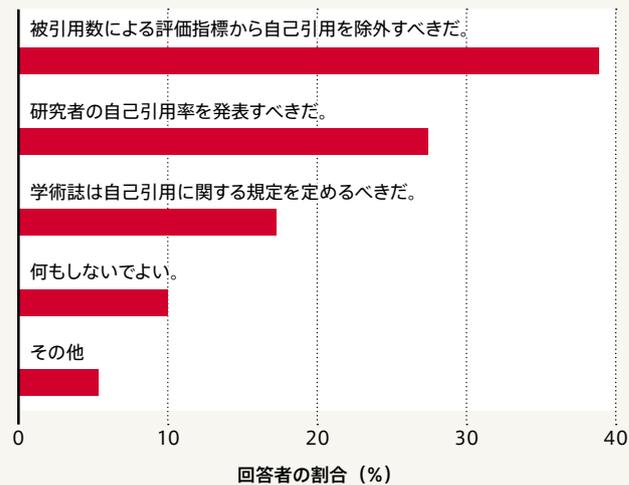
こうした事例は、驚くべきことでもない。計測システムがゲーム化することはよく知られているおり、経済学でグッドハートの法則と呼ばれる。この名称は、この概念を記述した経済学者チャールズ・グッドハート（Charles Goodhart）に由来する。この法則は、人類学者マリリン・ストラザーン（Marilyn Strathern）によって精緻化され、1つの指標が目標になってしまうと、もはや良い指標でなくなると記述された。

こうした状況に対する分かりきった解決策の1つは、研究機関と研究資金配分機関が、研究者を評価する際に、被引用数指標を「重要性」や「質」の代理指標として使わないことだ。2019年8月に実施された*Nature*のオン

ライン意見調査で、過剰な自己引用を抑制するためにできることがあるとすれば、それは何かという問いに対して、1人の読者が「つまらない数字いじりはやめろ」と語気を強めて回答した。評価指標に基づく分析は、確かに研究に関する有益な知見をもたらす。しかし、被引用数による評価指標に従って科学者に報酬を与えるという

数のゲーム

*Nature*の意見調査では、「過剰な自己引用を抑制するためにできることがあるとすれば、それは何か」という質問をした。回答者は、被引用数による指標は有用だが、その展開において、微妙な差異がもっと明らかになるようにし、自由に利用できるようにすべきだと答えた。



5575人の回答者のうち、2183人がh指数のような被引用数指標から自己引用を除外すべきだと回答し、1541人が研究者の自己引用率を公表すべきだと回答し、968人が学術誌は適切なレベルの自己引用に関する規定を定めるべきだと回答した。何もしないでよいと回答したのは565人で、その他は318人。

評価手順は、それをゲームと考える者を生み出すようになってきているのだ。

総合的に考えると、過剰な自己引用はささいな問題であり、特に対応する必要はないともいえる。*Nature*のオンライン意見調査に回答した5000人を超える読者の10%は、何もする必要はないと答えた。ある回答者は、「自己引用する研究者については、現役の研究者自身の手で結論を導き出せるようにし、評判が自然に形成されるようになればよい」と記している。

これに対して回答者の大部分は、被引用数による指標について、有用だがその展開において微妙な差異がもっと明らかになるようにし、また、自由に利用できるようにすべきだと感じている。最も多かった回答は、自己引用が除外されるように被引用数による指標を調整すべきだということと、自己引用率を他の指標とともに発表すべきだということだった（「数のゲーム」参照）。全体として回答者は、自己引用を含めることが適切な場合とそうでない場合を自身で判断できるようにしてほしい、また、さまざまな分野間で自己引用を比較できるようにしてほしいと考えていた。

しかし、ここに深刻な問題がある。多くの論文被引用数データは、各出版社独自のデータベースの中に封じ込められているのだ。2000年以降、研究論文の参考文献情報をクロスレフ（Crossref）に登録する出版社が増えてきている。クロスレフは、ウェブ上の論文を識別する文字列であるデジタルオブジェクト識別子（DOI）に登録する非営利機関だ。ただし、全ての出版社が自社保有の参考文献リストを公開して、誰でもダウンロードして分析できるようにすることを許可しているわけではない。現在のところ、クロスレフに登録された約4800万の論文のうち、参考文献リストが公開されているものは全体の59%にすぎない。

それでも解決策はある。学術引用データの公開を促進することを目的としたInitiative for Open Citations (I4OC) が2017年に設立されたのだ。2019年9月1日現在、会員企業はセイジ出版やテイラー&フランシス、ワイリーをはじめとして1000社を超え、シュプリンガー・ネイチャーも2018年に加盟した。一方、米国化学会とエル



ILEXX/ISTOCK / GETTY IMAGES PLUS/GETTY

セビア社、そして最も大きな米国電気電子学会（IEEE）は、I4OCに加盟していない。

I4OCの共同設立者であるDavid Shotton（英国のオックスフォード大学オックスフォードeリサーチセンター）は2018年1月に、全ての学術出版社がI4OCに加盟することを強く求めた（*Nature* 2018年1月11日号129ページ参照）。この業界の全社が加盟すべきだと我々も考える。過剰な自己引用を排除することはできないが、研究者であろうとなかろうと、誰もが自由に引用データにアクセスできるようになれば、これまで判然としなかった部分を明らかにするのに役立つだろう。I4OCに学術誌の参照文献情報が今よりもっと増えねば、自己引用データを分析するために必要なこのような取り組みは中途半端に終わってしまう。

（翻訳：菊川要）

2019年10月3日号 | Vol. 574 No.7776

親の導き：イチゴヤドクガエルでは 刷り込みが種分化につながる

表紙のカエルはイチゴヤドクガエル (*Oophaga pumilio*) で、中米に生息し、さまざまな皮膚色を示すことが知られている。今回Y. Yangらは、イチゴヤドクガエルにおいて、母親の影響が、子の配偶相手の選り好みや競争をどのように形作るのか、そしてこれがいかにして新たな種の形成を駆動し得るのかについて明らかにしている。刷り込みでは、子は親から形質を学び、これは後に、行動の形成に役立つ。著者らは、イチゴヤドクガエルの雌の子は、母と色が同じ雄の個体との交配を選ぶことを見いだした。同様に、雄の子は母と色が同じ雄に対してより攻撃的だった。著者らが示唆する総合的な結果は、こうした刷り込みによって、分岐的な交配形質の多様性を有する個体間の遺伝子流動が低下するため、それが性選択によって種分化が生じる準備となるということである。 [Cover; 10.1038/s41586-019-1599-z](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1599-z)



物性物理学：Sr₂RuO₄の超伝導の再検討

Sr₂RuO₄は非従来型の超伝導体であり、スピン三重項状態という特異な秩序パラメーターの対称性を持つ。この状態は20年以上前に、核磁気共鳴の測定結果にナイトシフトの変化がないことを基に特定された。今回A. Pustogowらは、こうした実験を再検討し、さらにSr₂RuO₄試料に圧力をかけて、ナイトシフトが変化することを実証している。2つの測定結果の不一致は、実験プローブと関係するわずかな加熱効果を考察することで解決された。この結果から、ここ数年にわたって議論的であったSr₂RuO₄の秩序パラメーターが明らかになった。 [10.1038/s41586-019-1596-2](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1596-2)

物性物理学：100 Kを超える温度での励起子のボース・アインシュタイン凝縮

ボース・アインシュタイン凝縮体は極めて低い温度における希薄気体の物質状態であり、この凝縮体ではほとんどのボース粒子が最低の量子状態を占めている。この凝縮体はまた、半導体の量子井戸状態やグラフェンに見られるように、結晶物質中で、励起子のようなボース準粒子によっても形成され得る。今回K. Makらは、二次元遷移金属ジカルコゲニドのファンデルワールスヘテロ構造において、100 Kを超える温度でも層間励起子の凝縮が起こることを実証している。こうした

物質では励起子結合エネルギーが大きく、二層構造とトンネル障壁を用いることで励起子の寿命が最大になるため、ボース・アインシュタイン凝縮体が高温で存在する。今回の結果は、凝縮体を用いたオプトエレクトロニクスや励起子媒介超伝導への第一歩である。 [10.1038/s41586-019-1591-7](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1591-7)

神経科学：一日の時間帯に応じた色の好み

ヒトや哺乳類では、色に対する先天的な選好性については科学的な議論が分かれており、無脊椎動物モデルでの研究は、二者択一試験程度しか行われていない。今回S. Syedらは、ショウジョウバエ (*Drosophila*) に対する複数色アッセイ法を開発し、色に対する先天的な選好性は一日の時間帯に依存しており、ニューロン経路と分子経路の複雑なセットが関与することを明らかにしている。(1) 青色光は一日を通して忌避され、主にmd (multidendritic) ニューロンを介して起こり、ロドプシン7とTRP (transient receptor potential) チャネルPainlessを必要とし、概日時計とは無関係である。(2) 緑色光に対する選好性は朝と夕方にピークがあり、ロドプシンを視物質とする光受容器を必要とし、概日時計に制御されている。(3) 緑色光に対する選好性は正午ごろに低下して薄明光を好むようになり、それにはTRPチャネルであるdTRPA1とPyrexiaが必要で、そのタイミングはやはり概日時計により決められている。 [10.1038/s41586-019-1571-y](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1571-y)

発生生物学：in vitroでの器官間の相互作用

器官形成では、複数の器官の間で組織が相互作用する必要があるが、これをin vitroでモデル化することは難しい。武部貴則 (米国シンシナティ小児病院医療センターほか) らは今回、ヒトの多能性幹細胞から作製した前方と後方の腸スフェロイドを混合することで、腸の発生における動的な形態形成現象のモデル化を可能にした。このモデルでは、前腸と中腸のスフェロイド間の境界に肝臓や膵臓の出現が誘導される。彼らは、この境界領域の誘導におけるNotchシグナル伝達の役割を明らかにし、ヒトの発生を研究する上でのこのモデル系の可能性を例示している。 [10.1038/s41586-019-1598-0](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1598-0)

構造生物学：ヘリオロドプシンの構造から得られた知見

ヘリオロドプシンは、光感受性タンパク質からなる大型のロドプシンスーパーファミリーに属することがメタゲノム解析により最近突き止められた。濡木理 (東京大学) らは今回、テルモプラズマ目 (Thermoplasmatales) に属するアーキア

こと以外は、タイプ1微生物由来ロドプシンと似ている。ヘリオロドプシンの生理的役割はまだ分かっていないが、非常にゆっくりした光反応動態からシグナル伝達光受容体として機能していることが示唆されている。原子間力顕微鏡による測定からは、テルモプラズマ目ヘリオロドプシンは二量体として機能していることが確認された。 [10.1038/s41586-019-1604-6](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1604-6)

2019年10月10日号 | Vol. 574 No.7777

衝突する星々：大質量の磁気星の形成を追跡する星の合体のシミュレーション

表紙は、2つの大質量星の合体をモデル化したシーケンスの一段階を示す画像である。今回F. Schneiderらが報告したシミュレーションでは、合体過程で磁場が生成される仕組みを調べている。大質量星（質量が太陽質量の1.5倍以上の星）の約10%には強い表面磁場があり、これは星の合体の結果である可能性を示唆している。著者らは、三次元磁気流体力学的シミュレーションを用いて、この仮説を検証した。表紙の画像では、より重い主星が、伴星と合体する際に破壊されている（色が明るいほど磁場が強いことを意味する）。大きな黒色のらせんは、主に主星に由来するガスの位置を示しており、磁場はまだ存在しない。中心部の黒い部分は伴星のコアで、そこにもまだ磁場はない（合体が進行するにつれて、磁場が全体に広がる）。このシミュレーションは、こうした合体によって強い磁場を持つ星が実際に形成されることを明らかにしている。著者らは、合体によって形成された天体が、その一生の終わりに最終的に超新星として爆発して、マグネター（磁場の強い中性子星）を残すと示唆している。



Cover; [10.1038/s41586-019-1621-5](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1621-5)

地震学：余震と前震を区別する

大地震が起きたときに、それが「本震」なのか、あるいはまだ発生していないより大きな地震の「前震」なのかは、今のところ分からない。今回L. GuliaとS. Wiemerは、多くの場合、継続的に起こっている一連の地震が減衰する余震系列なのか、あるいはやがて起こる大地震の前震なのかを判別できる可能性があることを提案している。彼らは、その後より大きな地震が起こる確率をリアルタイムで評価するための、地震分布の**b**値の変化に基づく単純な交通信号分類を提示している。

[10.1038/s41586-019-1606-4](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1606-4)

免疫学：肝細胞によるCD8⁺T細胞のプライミング

M. Iannacone, A. Bénédicet, G. De Simoneらは今回、B型肝炎ウイルス（HBV）に慢性感染した状態で典型的に見られるような寛容化・鈍化した免疫応答と、炎症性抗ウイルス免疫応答とを区別する、時空間的および分子的特徴付けに取り組んだ。その結果、クッパー細胞によってプライミングされたCD8⁺T細胞は、二次リンパ器官でプライミングされた細胞と区別できないエフェクター細胞へ分化することが明らかになった。対照的に、肝細胞によるプライミングは、CD8⁺T細胞の機能不全を生じ、この細胞はサイトカインを産生する細胞傷害性のエフェクター細胞への分化ができない。しかしIL-2で処理すると、これらの異常は部分的に回復する。この研究は、活性化の条件がCD8⁺T細胞機能をどのように決定するかについて新しい知見をもたらしている。これはT細胞研究にとって重要であり、その意義は今回用いられたモデルだけにとどまらない。

[10.1038/s41586-019-1620-6](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1620-6)

考古学：先史時代の育児

今回、ドイツ・バイエルン州の青銅器時代と鉄器時代の乳児の墓から出土した小型の飲み口付きの土器3点には、かつてははんすう反芻動物の乳が入られており、場合によっては粥状の肉も少量混ぜられていた可能性があることが明らかになった。この研究は、先史時代の乳児に食餌を与えるため、または離乳のために用いられていた食品の種類に関する直接的な証拠をもたらすものである。調べた器のうち2点は、バイエルン州の前期鉄器時代の墓地から出土したもので、年代は紀元前800～紀元前450年と推定されている。第3の器は後期青銅器時代（同じくバイエルン州）のもので、推定年代は紀元前1200～紀元前800年である。乳児に食餌を与えるために用いられていた可能性のある器で最古のものは、5000年以上前の新石器時代までさかのぼる。

[10.1038/s41586-019-1572-x](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1572-x)



後期青銅器時代（紀元前1200～紀元前800年）の哺乳瓶。

腫瘍生物学：マラセジア属の菌類は膵臓がんを促進する

G. MillerとB. Aykutらは今回、膵臓微小環境中の菌類相であるマイコバイオームが、腸あるいは正常な膵臓のものと比較して、発がん過程で量的および質的な変化を受けることを示している。彼らは、マラセジア属（*Malassezia*）という特

定の菌類だけで膵臓がんの発生の促進に十分であることを明らかにしている。マラセジア属菌類が腫瘍を促進する能力は、マンノース結合レクチン (MBL) がマラセジア属菌類に結合して補体カスケードの活性化が起こることが原因であり、この活性化は補体C3が腫瘍細胞上のC3受容体に結合するため引き起こされる。

10.1038/s41586-019-1608-2

がん治療：肝臓がんの効果的な治療法の開発

今回、R. Bernardsらは、肝臓腫瘍に「連続パンチ」を浴びせる戦略をとった。彼らはまず、CDC7阻害剤が、p53変異を持つ肝臓がん細胞特異的に老化を誘導することを明らかにし、次に、それらの老化細胞を選択的に除去する (senolytic) と考えられる化合物をスクリーニングして、その化合物によるmTOR阻害の効果について調べた。著者らは、CDC7阻害剤とこの化合物の併用療法により肝臓がんを治療できる可能性があるとしている。

10.1038/s41586-019-1607-3

分子生物学：白血病で見られるスプライシングとDNAメチル化の協調的変化

O. Abdel-Wahabらは今回、急性骨髄性白血病試料の大規模データセットを解析し、これらの試料では、RNAスプライシング因子のSRSF2と、多様な作用を持つが、とりわけクロマチン調節による遺伝子発現調節が主な機能であるIDH2という2つの遺伝子の両方に変異が生じている頻度が高いことを明らかにしている。この2つの変異が存在すると、スプライシングへの影響がより重大なものになった。こうした影響には、インテグレーター複合体の構成因子であるINTS3のスプライシング変化が含まれ、これはINTS3の発現低下を引き起こし、白血病発生の促進につながる。INTS3の脱調節は、スプライシング異常だけでなく、INTS3のDNAメチル化上昇にも依存する。これらの知見は、がんでのRNAスプライシングとエピジェネティック調節の間のつながりを明確に示している。

10.1038/s41586-019-1618-0

2019年10月17日号 | Vol. 574 No.7778

喫煙のシグナル：ニコチン嗜癖と糖尿病リスクの増大をつなくニューロンのフィードバックループ

喫煙は2型糖尿病のリスクを劇的に高めるが、こうした効果の根底にある機序はまだよく分かっていない。今回P. Kennyらは、ラットでは、ニコチン



ンによって活性化される脳内のニューロンと、膵臓による血糖調節を結び付けるシグナル伝達回路を、転写因子TCF7L2が媒介していることを明らかにしている。著者らは、脳の内側手綱領域のニューロンに発現するニコチン性アセチルコリン受容体 (nAChR) がニコチンによって活性化されると、膵臓によるグルカゴンとインスリンの放出だけでなく、ニコチンに対する有害な応答も生じることを示している。この結果、血糖レベルが上昇し、糖尿病の発症リスクが高まる。さらに、血糖レベルの上昇は、内側手綱領域のニューロンが発現するnAChRを抑制することによってフィードバックループを生み出し、喫煙に対する有害な応答を妨げるため、ニコチン嗜癖が強くなるのを助ける。TCF7L2は、シグナル伝達回路全体を変化させるので、ニコチン嗜癖と糖尿病リスクの増大とを結び付けている。

Cover; 10.1038/s41586-019-1653-x

健康科学：世界の乳幼児死亡の不均衡

多くの国々で、過去数十年間に乳幼児の生存が国家レベルで改善されてきたが、地域的な進捗には今なお大きなばらつきがある。5歳未満児 (乳幼児) の予防可能な死亡を2030年までに国際連合の持続可能な開発目標 (ゴール3) のターゲット3.2の通りに減少させる取り組みに情報をもたらすため、S. Hayらは今回、地球統計学的モデルを用い、99の低所得国の5歳未満の乳幼児に関して、2000年から2017年までの死亡率および死亡数の高分解能の地図を製作した。それらの地図から、2030年までに乳幼児死亡率を低下させることに向けた進捗の程度には、一部の国では、いまだに大きな地理的不均衡が存在することが明らかになった。死亡率の高い地域、死亡率削減の進捗の代表例、地理的不均衡を特定することにより、研究チームは、究極的にはさらに的を絞った介入および公衆衛生投資に情報をもたらすことになると期待している。

10.1038/s41586-019-1545-0

加齢：RESTと神経興奮は寿命に影響を及ぼす

ヒトの寿命を延ばすものは何か。B. Yankner, J. Zullo, D. Drakeらは今回、非常に長寿な人々の脳において、神経興奮の下方調節に関与すると考えられる転写シグネチャーを明らかにしている。転写抑制因子RESTが、これらの変化を仲介すると予測される。彼らは、線虫の一種 *Caenorhabditis elegans* をモデルとして用い、神経興奮の抑制により実際に寿命が延長すること、そしてこの過程は、RESTや線虫オルソログの転写因子により仲介されていることを実証した。RESTオルソログの機能喪失変異は、神経興奮を上昇させ、長寿命の *daf-2* 変異個体の線虫の寿命を短縮したのに対し、RESTオルソログの過剰発現

は、野生型線虫個体の寿命を延長した。同様に、脳でのREST遺伝子の条件的欠失は、加齢マウスにおいて大脳皮質の活動やニューロンの興奮性を上昇させた。RESTやその線虫オルソログおよび神経興奮低下はいずれも、長寿命に関連するフォークヘッド型転写因子FOXO1(哺乳類)とDAF-16(線虫)を活性化させる。従って、線虫からヒトに至るまで、神経興奮の状態は、RESTや関連転写因子により調節される老化過程の中心的モジュレーターである可能性がある。 [10.1038/s41586-019-1647-8](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1647-8)

進化遺伝学：平行進化の経路

収斂^{しゅうけん}が自然界でこれほどよく見られるのはなぜだろうか。この現象の顕著な例の1つは、昆虫が、強力な植物毒素に対する耐性を進化させてきた機構である。例えば、強心配糖体という毒素は、通常はNa⁺/K⁺-ATPアーゼを標的とするが、昆虫綱の6つの目では、この酵素のアミノ酸置換を平行進化させることにより、このような毒素に対する耐性を獲得している。しかし2つの疑問が残っている。1つ目は、これらの繰り返し進化した4回のアミノ酸変異は耐性を付与するのに十分なのかどうか。2つ目は、これほど遠縁の昆虫に、これらの平行進化した変異が生じたのはなぜなのか、である。N. Whitemanらは今回、キイロショウジョウバエ (*Drosophila melanogaster*) においてCRISPR-Cas9を用いて、オオカバマダラの系統で観察される変異経路の進化の順序で、この4つのアミノ酸置換のそれぞれをノックインして調べた。オオカバマダラは、これらの毒素に耐性があるだけでなく、その毒素を体内に蓄積して自己防御する種である。今回の結果は、収斂形質の教科書的な例の起源と機能的な遺伝学的基盤について最初の包括的な解析を示すことで、進化生物学の基本的な問題に関する手掛かりを示している。 [10.1038/s41586-019-1610-8](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1610-8)

神経科学：ニューロン膜電位の単一光子顕微鏡画像化

現在のニューロン活動記録法はどれも、それぞれ特定の限界がある。例えば、電極による記録法では複数のニューロンを正確にマッピングできないし、カルシウム画像化^{いまいち}法は、高速の閾値下振動や正確な発火回数を追跡できない。今回E. Boydenらは、ニューロン細胞体を狙って膜電位指示物質を導入することにより、感度や信号雑音比の大幅な量的向上を達成し、覚醒下行動中のマウスのニューロン十数個からの同時記録に成功した。遺伝的にコードされたこの改良型蛍光指示物質(SomArchonと名付けられた)は、電気生理学の正確さと光学的画像化の空間分解能を併せ持ち、複数の脳領域(皮質、海馬、線条体)において、ごく一般的な高価でない単一光子顕微鏡で利用できる。 [10.1038/s41586-019-1641-1](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1641-1)

がんゲノミクス：SF3B1の変異が腫瘍発生を促進する仕組み

SF3B1は、がんで最も変異していることの多いRNAスプライシング因子である。今回R. Bradleyらは、その発がん作用の基盤となる機序の1つを明らかにしている。SF3B1の変異によってBRD9のスプライシングのパターンが変化して分解につながるため、BRD9が減少する。BRD9は、非カノニカルBAF複合体と呼ばれるクロマチンリモデリング複合体の成分で、これが失われるとゲノムの特定の座位で非カノニカルBAFの変化が起こり、それによって遺伝子の発現に異常が生じる。著者らは、BRD9が失われると黒色腫の発生が促進されることを明らかにした。BRD9のスプライシング異常を修正すると腫瘍増殖が抑制されるので、この結果はSF3B1変異を持つがんの新しい治療法につながる可能性がある。 [10.1038/s41586-019-1646-9](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1646-9)

2019年10月24日号 | Vol. 574 No.7779

量子超越性：量子チップが初めて古典的なスーパーコンピューターの性能を超えた

今回J. Martinisらは、量子コンピューティングにおける重要な一歩について報告している。プログラム可能な量子コンピューターが、世界一強力な従来型プロセッサより性能が優れている

こと、すなわち量子超越性と呼ばれる状況が、初めて実験的に実証されたのである。著者らは、機能的な53個の量子ビット(キュービット)でできた量子プロセッサを使って、乱数を生成する量子回路の出力のサンプリング(量子回路のキュービットの数が多くなればなるほど要求が厳しくなるタスク)を伴うタスクに取り組んだ。この量子プロセッサは、Sycamoreと呼ばれ、約200秒で量子回路から100万個のサンプルを集めることができる。これを最先端のスーパーコンピューターで実行すると、約1万年かかると思われる。表紙は、Sycamoreチップの想像図。 [Cover; 10.1038/s41586-019-1666-5](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5)



ナノスケール材料：反芳香族壁に囲まれたナノケージ

ナノケージは、さまざまな用途においてゲスト化学分子の汎用的なホストとして用いることができる。そうしたケージは、金属-配位子結合などの相互作用を通して構成要素から組み立てられることが多い。ナノケージの「パネル(壁)」は、形状を維持するために剛直である必要があり、芳香族ユニットから形成されることが多い。今回J. Nitschkeらは、反芳香族のパネルと金属イオンの「ノード」から組み立てた新たなナノケージ

について報告している。芳香族パネルと比較して反芳香族パネルの合成が難しいことはさておき、反芳香族パネルを配置することで、ホスト-ゲスト化学に使用できる可能性がある特異な特性を中央のナノ空間が持つようになる。このことは、ナノケージに封入された多環芳香族炭化水素ゲストの核磁気共鳴シグナルが低磁場方向に極端にシフト（約24 ppm）したことによって例示されている。 [10.1038/s41586-019-1661-x](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1661-x)

がんゲノミクス：正常大腸細胞における変異の全体像

M. Strattonらは今回、大腸がん発生の最初期を理解するために、42人の被験者（15人の大腸がん患者と、大腸疾患の徴候のない27人）から2035の大腸陰窩を採取し、個々の陰窩の正常な大腸上皮細胞の塩基配列解読を行った。彼らはまた、追加の陰窩で、90個の既知の大腸がん遺伝子の塩基配列を解読した。その結果、複数の変異過程のシグネチャーが見つかり、それらの中には広範囲に見られるものもある一方で、一部の被験者や陰窩、そして一生のうちの特定の時期に特異的なものもあることが分かった。著者らは、ドライバーと思われる変異が、およそ50～60歳の被験者の約1%の大腸陰窩に存在していたと見積もっている。大腸がんゲノムの全体像と比較したところ、大腸がんのゲノムでは変異負荷が平均的に高いが、散発的あるいは普遍的な変異過程の負荷には違いが見られなかった。 [10.1038/s41586-019-1672-7](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1672-7)

遺伝学：正常肝臓と硬変した肝臓における変異の全体像

P. Campbellらは今回、5人の健康な人と9人の肝硬変患者を含む14人に由来する、マイクロダイセクション法によって得た100～500個の肝細胞からなる482個の試料のゲノム塩基配列解読を行った。その結果、硬変した肝臓では、変異負荷が高く、複雑な構造的多様性が見られるとともに、患者間や患者内でも多様性が大きいことが分かった。肝硬変のゲノムの全体像を肝細胞がん（HCC）と比較して調べたところ、非悪性肝臓細胞ではドライバー変異負荷が低い（約1～5%）ことが分かった。さらに、正常な肝細胞における変異の約75%、硬変した肝細胞における変異の50～75%を占める、主要な肝細胞シグネチャーが特定されるとともに、HCCでより活性の高いシグネチャーも明らかになった。 [10.1038/s41586-019-1670-9](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1670-9)

神経科学：微生物相は学習に影響を及ぼし得る

微生物相が宿主のニューロン機能、ひいてはその行動にも影響を及ぼし得ることを示す証拠はあるものの、こうした相関関係を駆動する機構についてはほとんど分かっていない。今回D. Artisらはマウスで、微生物相の操作が、迷走神経とは

無関係な様式で恐怖消去学習に対し負の影響を及ぼし得ることを明らかにしている。特定の発生期間に典型的な微生物相を再定着させると、成体期の消去学習が正常なものへと回復した。従って、微生物相に由来するシグナルは、初期の脳発生と成体の両方において、学習に影響を及ぼし得る。

[10.1038/s41586-019-1644-y](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1644-y)

エピジェネティクス：新規なヒストン修飾

乳酸は、ワールブルク効果が見られる際に生じる化合物で、エネルギー供給源であり、代謝の副産物でもある。今回Y. Zhaoらは、哺乳類細胞でヒストンのリシン残基がラクチル化されることを明らかにした。この修飾は、低酸素状態や細菌への曝露によって促進される。M1マクロファージの極性化の際には細胞内乳酸が増加し、ヒストンのラクチル化レベルの上昇と恒常性に関わる遺伝子の誘導が起こる。ヒストンのラクチル化について今後さらに研究が進めば、乳酸産生が関わっているさまざまな細胞過程や病気に関する理解を深めるのに役立つだろう。 [10.1038/s41586-019-1678-1](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1678-1)

2019年10月31日号 | Vol. 574 No.7780

多様性の根源：トランスクリプトーム解析によって浮き彫りになった緑色植物の進化

表紙は、ダーウィンが『種の起源』の結びで、種間の複雑な相互作用を表す例えとして用いた「雑踏した堤」の一例である。ここに写っているのは、シダ類のアメリカシラネワラビ (*Dryopteris intermedia*)、コケ類のウマシギゴケ (*Polytrichum commune*)、シノブゴケ類の一種 *Thuidium delicatulum* の3種で、緑色植物の著しい多様性を構成する50万種近い植物のほんの一部である。今回「1000植物トランスクリプトームイニシアチブ (One Thousand Plant Transcriptomes Initiative)」のJ. Leebens-MackとG. Wongらは、緑色植物門（緑藻類や陸上植物を含む）、灰色植物門、紅色植物門（紅藻類）からなる植物の多様性を網羅する、1124種の栄養組織のトランスクリプトームについて報告している。著者らは、系統ゲノミクスの枠組みを構築し、これを用いて種間関係を推測し、緑色植物の歴史における多様化事象のタイミングの図示を行った。その結果、遺伝子ファミリーの大幅な拡大は緑色植物、陸上植物、維管束植物の起源に先立って起きていた一方で、全ゲノム重複は顕花



植物とシダ類の進化を通して繰り返し起きていたと思われることが分かった。 [Cover; 10.1038/s41586-019-1693-2](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1693-2)

ナノ科学：ねじれ2層グラフェンにおける超伝導と電子相関

魔法角ねじれ2層グラフェンにおいて超伝導と相関絶縁状態が発見された後、多くの理論研究によってこうした観測結果の微視的起源の解明が試みられた。しかし実験的には、そうした系の知見の拡大は、デバイス作製が非常に難しいため進展していない。今回D. Efetovらは、より均一な魔法角を有するデバイスの作製に成功した。今回のデバイス品質の向上は、新たな超伝導ドーム、軌道磁性体、チャーン絶縁状態など、これまで観測されていなかった状態の報告につながっている。さらに、超伝導転移がより低い電荷キャリア密度で起こり、臨界温度が上昇した。広範なモアレバンド充填範囲にわたって超伝導ドームが見いだされたことは、物性物理学において議論的になっている超伝導の微視的起源という問題を理解するのに重要である。 [10.1038/s41586-019-1695-0](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1695-0)

神経科学：食餌中の塩が認知機能に影響を及ぼす仕組み

今回、一連の動物実験により、塩の摂取と認知機能障害を結び付ける生物学的機構が調べられた。この過程には、脳低灌流による機構とタウ関連機構が関係することが示唆されているが、著者らは、認知障害が脳低灌流ではなくタウ関連機構を介して起こることを示している。この経路は、リンパ球の免疫応答、インターロイキンの産生、一酸化窒素合成の減少、それに続く（ニトロシル化の減少による）カルパインの活性化、カルパインによるp35のp25への切断、サイクリン依存性キナーゼ5（CDK5）の活性化、CDK5によるタウのリン酸化を介して進行する。タウのヌルマウスあるいは抗タウ抗体を投与したマウスでは、脳低灌流や神経血管機能障害が持続するにもかかわらず、高塩分の食餌を摂取させても認知機能が維持された。これらの結果がヒトに拡張できるのであれば、過剰な塩の摂取を避けて血管の健康を維持することは、高齢期の認知機能低下の原因となる病態の防止に役立つ可能性がある。 [10.1038/s41586-019-1688-z](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1688-z)

保全：節足動物の個体数、生物量、多様性の広範にわたる減少
数多くの研究で節足動物の個体数や多様性が最近減少していることが報告されているが、そうした研究は分類群や調査地点が限定的なため、得られた知見をどの範囲まで当てはめることができるのかは不明である。今回S. Seiboldらは、約2700種からなる100万を超す節足動物個体に由来するデータを用いて、ドイツの3地域での2008～2017年に

ける節足動物の多様性、生物量、個体数の変化を調べた。これらのデータは、150の草原調査地と140の森林調査地から得られた標準化された複数のインベントリーに基づいている。解析の結果、節足動物の種数はこの期間、全ての調査地で減少していたことが明らかになった。生物量と種数は草原と森林の両方で大幅に減少していたが、個体数は草原でのみ著しい減少が見られた。草原では、こうした減少の規模は周辺地域の耕作可能地の割合に対応しており、これは、少なくとも草原では節足動物の喪失を食い止めるには景観レベルの政策が必要であることを示唆している。 [10.1038/s41586-019-1684-3](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1684-3)



JANI GERHARDS-OSTEHR / EYEEM / GETTY IMAGES

がん：CD8⁺T細胞を介した腫瘍拒絶にはCD4⁺T細胞の助けが必要である

これまでの研究で、CD4⁺T細胞の応答が防御的な抗腫瘍免疫に関与することが示されていた。しかし、CD4⁺T細胞の正確な役割はまだ明らかにされていない。著者らは今回、この疑問に答えるために前臨床腫瘍モデルを構築した。この研究は、抗腫瘍応答の成功にはCD4ネオアンチゲンとCD8ネオアンチゲンの両方の発現が必要であること、そしてチェックポイント阻害療法やワクチン接種によるロバストなT細胞免疫の誘導と腫瘍拒絶は、誘導段階とエフェクター段階で両方のT細胞サブセットが共同で作用したときのみ生じることを明らかにしている。 [10.1038/s41586-019-1671-8](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1671-8)

クロマチン：アルコールの代謝物は脳のクロマチンへ送られる

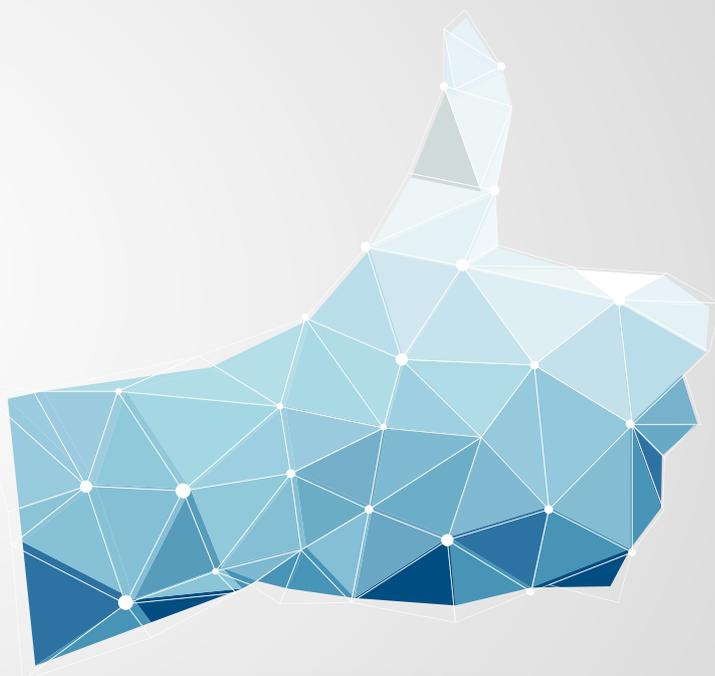
細胞の代謝状態は、ヒストンの化学修飾に影響を及ぼし、これがさらに遺伝子発現に作用を及ぼす可能性がある。今回S. Bergerらはマウスモデルを使って、肝臓でのアルコール代謝によって生じる酢酸が、クロマチンに結合した酵素ACSS2によってアセチルCoAへと変換され、脳でのヒストンアセチル化の一因となることを明らかにしている。ヒストンアセチル化のこの急激な増加は、遺伝子発現の変化と関連しているので、これがアルコール摂取に関連した行動の原因なのかもしれない。 [10.1038/s41586-019-1700-7](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1700-7)

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

中国のエディアカラ紀末期の地層から、現代の蠕虫に似た動物の化石が発見されました（14ページ）。恐竜ほどの派手さはありませんが、これは驚きと感動をもたらしてくれる注目すべき研究成果です。まずは何より、この動物が堆積物の上を這い回っている途中で生き絶えた状態の化石として見つかったこと。論文のタイトルに「死の行進」という表現が入るほど、これは本当に珍しい発見です。この場面がそのまま化石化されたことはもちろん、その化石を実際に発見できたことにセレンディピティを感じます。そして、こうした動物がエディアカラ紀にすでに存在したことは、通説となっている「カンブリア爆発」の概念を覆す強力な証拠になるでしょう。このように、古生物の標本には、その姿だけでなく行動や生活までも垣間見せてくれるものが少なくありません。私たちはそうした標本を目にして遠い過去に思いを巡らせるわけですが、ふと現実に戻って周りに目を向けると、人工の物質や構造物ばかりに囲まれていることに圧倒されます。人工物で世界を覆い尽くしているばかりか、自らの姿や生活、思想ですらさまざまな形で記録している私たち。再び5億年の時が流れた時、未来の生命体は一体、そんな人類の痕跡にどんな思いを抱くのでしょうか。

SA

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

宛先：naturedigest@natureasia.com

（「Nature ダイジェスト」ご意見係）

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

広告のお問い合わせ

T 03-4533-8094（広告部）

E advertising@natureasia.com

編集発行人: Antoine Bocquet エグゼクティブ・アドバイザー: Sara Phillips

編集: 宇津木光代、松田栄治、菫蒲さやか、泉奈都子

編集協力: 山西三穂子、田中明美

デザイン/制作: 中村創 広告: 大場郁子 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

© 2019 Nature Japan K.K. Part of Springer Nature.

掲載記事の無断転載を禁じます。

nature cancer

2020年1月創刊!

OPEN FOR SUBMISSIONS

Nature Cancer は、基礎研究からトランスレーショナル研究、臨床研究まで幅広い範囲を対象とし、特に重要な進展を掲載します。本誌の幅広い対象範囲は、がんに関する生物学、遺伝学、ゲノミクス、診断法や治療法の開発や送達のための新たな手段、がんの世界的な社会的影響を理解する新たな方法など、新たな知見を提示するあらゆるがん研究をカバーしています。

Nature Cancer がカバーするトピック

- がんの生物学
- がんの遺伝学やゲノミクス
- 腫瘍の進化と不均一性
- 腫瘍と宿主間の相互作用
- 腫瘍の免疫学
- 転移
- がんモデル
- システム生物学
- がん治療と免疫療法
- 臨床研究
- 社会的、倫理的、政策的な話題

皆様の研究成果をご投稿ください

nature.com/natcancer

 @NatureCancer

