

nature ダイジェスト

科学が深まる、世界が広がる

05
2017

暑いほどエコな太陽熱冷房

▶ 02 恐竜の分類法が変わる?! 新説登場

▶ 24 チャーチルの地球外生命論

▶ 29 AI が皮膚がんを正確に判定

▶ 07 FROM 日経サイエンス
アヒル目隠し実験



EXTREME-PHOTOGRAPHER/E+/GETTY

NEWS FEATURE

ホットでクールな 太陽熱冷房

大量の電力を消費する冷房。その需要は高まっていて、冷房用の電力需要は2100年までに2000年の30倍以上になると予想される。そうした状況を受け、暑さの原因である「太陽熱」を利用した空調システムに注目が集まっている。

NEWS IN FOCUS

04 ハチは仲間のプレーでサッカーを覚える

ハチ本来の仕事とは無関係の作業であっても高度な学習能力を示し、それをさらに改善することもできるようだ。

05 HIVの潜伏性リザーバーのマーカーが初めて明らかに

HIVが潜伏感染している免疫細胞の特定に役立つ細胞表面マーカーが発見されたかもしれない。潜伏性リザーバーを標的とする薬剤ができれば治癒可能になると期待される。

09 トリアンギュレンの合成に成功

走査型プローブ顕微鏡の探針を使った原子操作によって、不安定な炭化水素「トリアンギュレン」が合成された。

11 南極大陸の棚氷に巨大亀裂

南極大陸の4番目に大きな棚氷「ラルセンC」に、長さ175kmの亀裂が発生している。近く、東京都の2倍を超える面積の氷山を分離しそうだ。

13 細胞単位で参照できる体の地図作りが熱い！

最先端の画像化法と分子生物学を融合して、がんやヒト組織の単一細胞ごとの地図を作成する競争が加速している。

nature ダイジェスト

#05

MAY 2017

nature.com/naturedigest

2017年5月1日発行

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

掲載記事の無断転載を禁じます。

COVER IMAGE: EXTREME-PHOTOGRAPHER/E+/GETTY

14 CRISPRの特許争いにひと区切り

米国特許商標庁はゲノム編集技術の特許をめぐる争いで、ブロード研究所に軍配を上げた。

NEWS IN JAPAN

08 科学者の国会が『軍事研究を行わない』と決議

日本学術会議は、戦後維持してきた軍事研究拒否の声明を継承すると決定した。軍事研究に対する同組織の立場表明は50年ぶりだ。

NEWS & VIEWS

29 AIによるがん診断支援が現実味を帯びてきた

皮膚がんを画像だけで判定できるよう訓練したコンピューターが、一部の皮膚がんを皮膚がん専門医と同程度の精度で識別できることが報告された。

31 異種動物の体内で作製された膵臓で糖尿病を治療する

膵臓発生のマスター調節因子を欠損したラットで成長させたマウス膵臓を糖尿病マウスに移植すると、血糖値が制御され、拒絶反応は短期間の免疫抑制剤投与で回避できた。

NEWS SCAN

07 アヒル目隠し実験 / 空気清浄網戸

EDITORIAL

34 冥王星の復讐

HIGHLIGHTS

35 2017年3/2～3/30号



NEWS IN FOCUS

恐竜系統樹の枝ぶりが変わる？

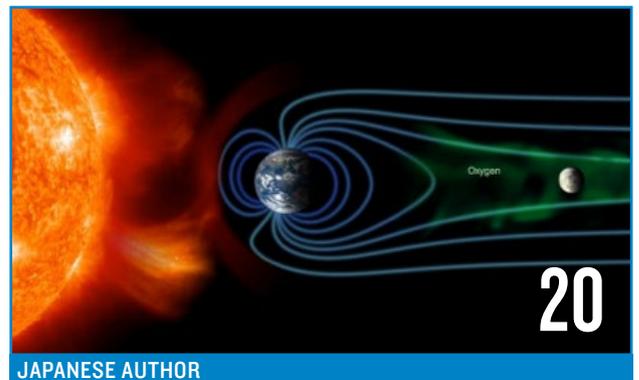
多様な恐竜の骨を細かく調べた研究から、従来の二大分類を覆す類縁関係が浮かび上がった。例えば、竜盤類のT.レックスは、ステゴサウルスなどの鳥盤類と同じ枝になる。



COMMENT

チャーチルの地球外生命論

英国の偉大な政治家ウィンストン・チャーチルが、地球外生命の存在の可能性について科学者顔負けの考察を繰り広げるエッセイが見つかった。



JAPANESE AUTHOR

月に届く地球の風

地球の高層大気圏から流失した O^+ が月にまで届いていることが、大阪大学、名古屋大学、JAXA（宇宙航空研究開発機構）の共同研究により突き止められた。

恐竜系統樹の 枝ぶりが変わる？

74の分類群に属する多様な恐竜について、骨の解剖学的特徴を細かく調べた研究から、主要な系統群の間に新たな類縁関係が浮かび上がった。恐竜の分類に関する長年の定説を根本から覆す今回の新説で、「教科書の書き換え」が必要になるかもしれない。

『恐竜は、骨盤が鳥類に似た「鳥盤類」と骨盤が爬虫類に似た「竜盤類」の2群に分類される』。この、130年間にわたって広く認められてきた分類法が、もはや意味をなさなくなる可能性が出てきた。見慣れた恐竜の進化系統樹を根本から書き換えるような新説が、*Nature* 2017年3月23日号501ページで発表されたのである¹。この論文では、現在の系統樹に対する数々の修正が提案されているが、中でも特に大きな変更は、これまでの枠組みでは同じ「竜盤類」に分類されていた、「竜脚類（ブラキオサウルスなどの巨大種に代表される長い首と尾を持つ植物食恐竜）」と「獣脚類（ティラノサウルス・レックスなどの二足歩行をする肉食恐竜）」が、類縁関係

が遠く離れた別々の分類群へと割り振られたことだろう。

「これは教科書の書き換えにつながる成果です。この説が広く認められるようになれば、の話ですが」。そう称賛するのは、メリーランド大学カレッジパーク校(米国)の古脊椎動物学者Thomas Holtzだ。「1つの研究チームによる分析結果にすぎませんが、徹底した分析で、評価に値します」。

今回の研究を率いたケンブリッジ大学(英国)の古脊椎動物学者Matthew Baronによると、この研究では、系統樹全体にまたがる多様な恐竜74種の類縁関係を、450を超す解剖学的特徴を比較して類似性や相違点を調べることで評価したという。

分類の見直し

今回の研究で分析された種の多くは、約1億8000万年間にわたって続いた恐竜時代の最初の1億年間に存在していたものだ。既知の最古の恐竜は、約2億4300万年前の化石から明らかになっており、その後長く繁栄を遂げた恐竜は、約6600万年前に小惑星が現在のメキシコ・ユカタン半島の北の海域に衝突したことで、そのほとんどの種が他の多くの生物とともに絶滅した。この大量絶滅事象の後に、恐竜の子孫として残ったのが鳥類である。

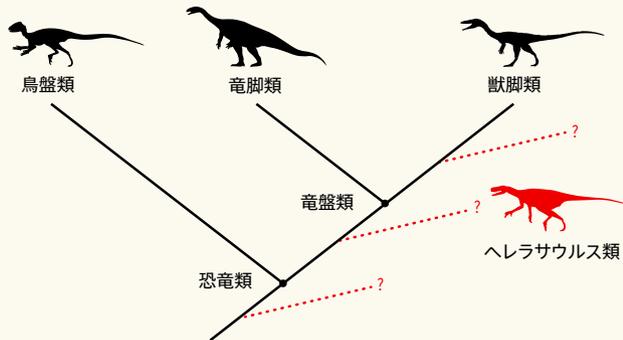
Baronらが提案する新たな恐竜系統樹では、これまで竜盤類の枝の一部を構成していた獣脚類系統が、ステゴサウルスやトリケラトプスなどの鳥盤類恐竜全てを含む枝へ、丸ごと「接ぎ木」されている。分析の結果、これら2つの主要分類群を構成する種には、上顎の特徴的な隆起から足根骨の一部と中足骨との融合まで、全身にわたり21もの共通する解剖学的特徴(共有派生形質)が見られることが明らかになったのだ。こうして新たに姉妹群である可能性が示された獣脚類と鳥盤類には、これら2群をまとめた名称として「Ornithoscelida」が当てられた。ギリシャ語で「鳥の後肢」を意味するこの名称は、1870年に英国の生物学者トーマス・ハクスリーによって鳥類様の後肢を有する全ての恐竜を含む分類群名として提案されながら、その後支持が得られず使われていなかったもので、今回のBaronらの提案によって復活を遂げることになるかもしれない。

今回の研究の注目すべき成果は、それだけではない。Baronらの新たな分類の枠組みで描かれた系統樹では、根の近くに位置する恐竜やそれらに近縁な恐竜形類の多くが北半球で発見され

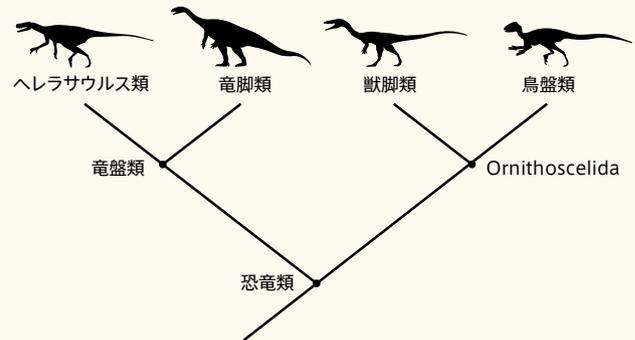


今回の研究で姉妹群である可能性が示された、獣脚類のティラノサウルス・レックス(右)と鳥盤類のトリケラトプス(左)。

a 従来の系統樹



b 新しい系統樹



恐竜の進化系統樹

- a 従来の系統樹では、恐竜は骨盤の形状に基づいて「鳥盤類（ステゴサウルスやトリケラトプスなど）」と「竜盤類」の2群に分類されており、竜盤類はさらに「竜脚類（ブラキオサウルスなど）」と「獣脚類（ティラノサウルス・レックスなど）」に分けられていた。
- b 今回Baronら¹によって提唱された新たな系統樹では、これまで位置付けが定まっていなかったヘレサウルス類と竜脚類で1つの枝が形成され（これを「竜盤類」として再定義している）、獣脚類と鳥盤類からなる新たな枝には「Ornithoscelida」という分類群名が当てられている。

ていることから、最初の恐竜がローラシア大陸（超大陸パンゲアの北半分；現在のユーラシアおよび北米）で出現した可能性が示唆されたのである。これは、恐竜の初期進化が Gondwana 大陸（パンゲアの南半分；現在のアフリカおよび南米など）で起こったとする、数十年にわたり支持されてきた説とはまさに対照的だ。また、恐竜が出現した年代も、これまでの推測よりわずかに古い約2億4700万年前であると示唆された。

挑発的な再評価

論文と同時に掲載された解説記事「News & Views」²の中で、カリフォルニア大学バークレー校（米国）の古脊椎動物学者 Kevin Padian は、Baronらの今回の研究を「恐竜の起源と類縁関係に関する独創的で挑発的な再評価」と表現している。彼はまた、Baronらが用いた手法は、独自の新たなものではなく、共有派生形質を手掛かりに

系統関係を調べるという分岐分類学の標準的な解析方法であるため、その結果を異見や単なる憶測として簡単に切り捨てることはできないと指摘する。これまでと異なる結果が導き出されたのは、従来の研究では分析されなかった分類群の恐竜を含めたり、取り上げられたことのない形質についても考慮されたからなのだ。こうした状況を受け、Padianは「研究者たちは、原点に立ち戻って考え直す必要があるでしょう」と語る。

スミソニアン国立自然史博物館（米国ワシントンD.C.）の古脊椎動物学者 Hans-Dieter Sues は、今回の研究が議論を巻き起こすことになるだろうと予想する。「だからといって、恐竜の系統樹を直ちに書き換えるべきではないでしょう」と彼は続ける。古生物学者が行う系統分類学の解析の結果は、どの種を検討の対象にするか、そしてどの解剖学的特徴をどのように分析に盛り込むかに大きく左右されるからだ。

今後、新種の恐竜や既知の恐竜のより完全な標本が発見された際に、それらを含めた分析の結果、現在受け入れられている系統樹に近いものへと押し戻される可能性もある、と Sues は指摘する。近年、南米では新たな恐竜の化石が相次いで発見されている。また、Suesによれば、南米では恐竜時代の最初期に相当する地層が徹底的に調べられているが、この時代に対応する北米の堆積層では、まだそれほど調査が進んでいないという。

「世界には、まだまだ我々の知らない化石記録がたくさん眠っているのです」と Sues は語る。

（翻訳：小林盛方）

Dinosaur family tree poised for colossal shake-up

doi: 10.1038/nature.2017.21681

2017.3.22 (Published online)

Sid Perkins

1. Baron, M. G., Norman, D. B. & Barrett, P. M. *Nature* **543**, 501–506 (2017).
2. Padian, K. *Nature* **543**, 494–495 (2017).

ハチは仲間のプレーで サッカーを覚える

ハチは、本来の仕事とは無関係の作業であっても高度な学習能力を示し、教わったことを改善することさえできる。

サッカーでゴールを決めたハチには甘い褒美がある。他の個体がボールを扱うのを目撃したハチは、それだけで、またたく間に昆虫版のサッカーをマスターするという。小さな送粉者に高度な学習能力があることを示唆する論文が、*Science* 2017年2月24日号に掲載された¹。

この実験ではまず、複数のマルハナ

バチに仲間のハチがボールをゴールへ運び、報酬として大量の砂糖水をもらう様子を見せた。観察していたハチは、すぐに同じプレーを行うことができた。ハチたちは、その報酬をさらに小さな労力で手に入れる方法まで見つけた。論文の共著者であるロンドン大学クイーンメアリー校（英国）の行動生態学者Olli Loukolaは、「ハチはただやみ

くもにまねをしているわけではありません。改善もしています」と話す。

これまでの研究で、昆虫には高度な認知的作業を行う能力があることが示されていた。しかし、昆虫が本来の仕事（今回であればハチとしての仕事）とはかけ離れた作業でもうまくやれるようになることが示されたのは今回が初めてだと、著者らは言う。訓練の長い積み重ねではなく、仲間を観察することによってハチが複雑な技能を習得した、という事実も新しい発見だった。

Loukolaらは、セイヨウオオマルハナバチ (*Bombus terrestris*) のグループを訓練し、木製のボールを台の中央へ移動させると砂糖水がもらえることを覚えさせた。まず、訓練済みのハチが砂糖水をもらう様子を試験集団のハチに観察させるというプロセスを3回繰り返した。その後、試験集団のハチにボールを操作させたところ、ハチはほぼ毎回ゴールを決めることができた。事前の観察なしのコントロール集団では約30%しかゴールを決められなかったことを考え合わせると、試験集団のハチは、訓練済みのハチを観察して社会的な手掛かりを読み取っていたことが示唆される。

社会的学習

ハチが習得したこの能力を向上させるため、研究チームは、インストラクター役のハチにボールを3個提示した。2個はその場に貼り付けられていて動かないが、ゴールから最も離れた1個のみ自由に転がすことができる。まず、インストラクター役のハチが苦労してその1個をゴールへと運ぶ様子を試験集団のハチに観察させた。その後、この試験集団に自由に転がるボール3個を提示した。するとハチは、インストラ

STEFANIE AMM/VEEEM/GETTY



ハチに社会性のあることはよく知られた事実だが、今回ハチとしての仕事を離れた作業を学習できる能力が確認された。

クターをまねて最も遠いボールを動かすよりも、もっと楽な方法を見つけ出した。ゴールに最も近いボールを動かしたのだ。

マッコーリー大学（オーストラリア・シドニー）の神経行動学者Ken Chengは、この結果に感心している。「確かに『ゴールエミュレーション』とでも呼ぶべきものようです」とChengは話す。つまり、機械的な模倣ではなく、目標を目指す行動だ。そうであれば、「かなり高度なものです」。

レーゲンスブルク大学（ドイツ）のTomer Czaczkesは、「社会的学習のおかげ」という解釈に懐疑的だ。試験集団のハチは、ボールと目標が「興味深い」ものだということを学習し、「台の中央にいちばん近いボールに触れたら動いたのでそれを運んだだけ」ではないか、とCzaczkesは見ている。

論文の共著者であるロンドン大学クイーンメアリー校の認知神経行動学者Clint Perryは、仲間のハチから教わった集団が、手本のハチがいなかった集団（ボールを磁石で動かして見せた集団と、全く何も見せなかった集団）よりも好成績を収めたことを指摘する。「社会的情報が大いに役立っています」とPerry。

「脳が小さいからといって単純だとは限らない、という考えが強く支持されます。ハチのような小さな脳も、我々の想定を超えていろいろなことができるのです」とPerryは語る。

（翻訳：小林盛方）

Bees learn football from their buddies

doi: 10.1038/nature.2017.21540
2017.2.23 (Published online)

Traci Watson

1. Loukola, O. J., Perry, C. J., Coscos, L. & Chitka, L. *Science* **355**, 833–836 (2017).

HIVの潜伏性リザーバーのマーカーが初めて明らかに

HIVが潜伏感染している免疫細胞（潜伏性リザーバー）の特定に役立つマーカータンパク質CD32aが発見された。細胞表面に発現しているこのタンパク質を用いることで、こうしたリザーバーを排除できるようになるかもしれない。

ヒト免疫不全ウイルス（HIV）の治療では、静止期CD4 T細胞という特定の免疫細胞にHIVが潜伏できることが障害となっている。HIVが潜伏感染している静止期CD4 T細胞は、体内の免疫系による感知を長年にわたって逃れて生存し、見つけ出すことも、研究することも、殺傷することも難しいからだ。HIV研究者は、このような細胞（HIVリザーバー）を確実に突き止めることを最優先の目標としてきたが、これまでそうした成果は限られていた。

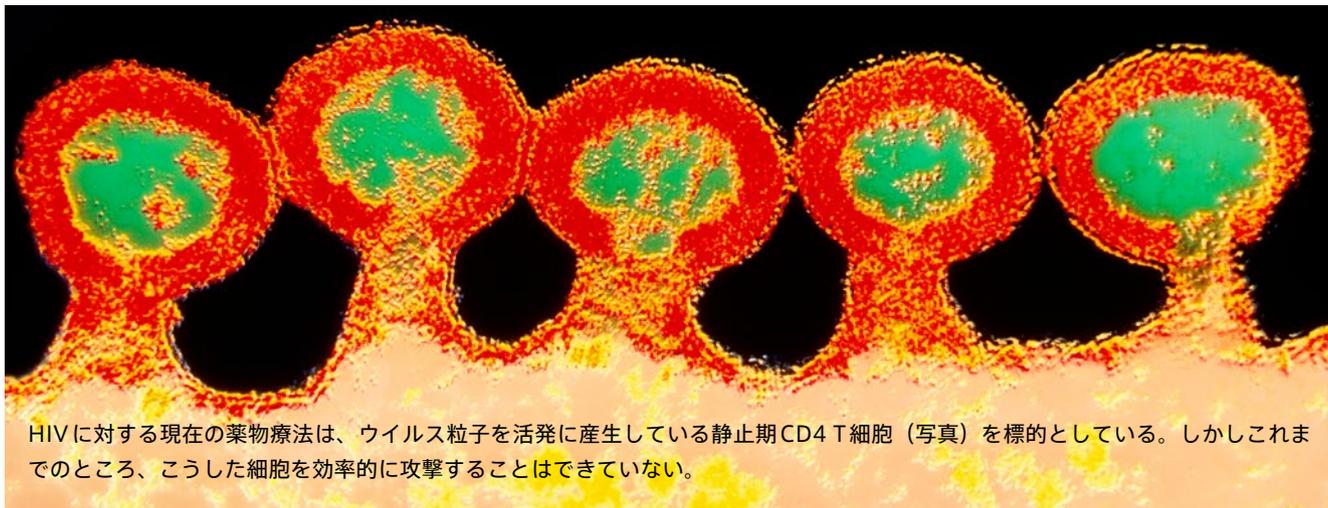
このほどモンペリエ大学（フランス）のウイルス学者Monsef Benkiraneが率いる研究チームは、HIVに感染している静止期CD4 T細胞の表面には、CD32aと呼ばれるタンパク質が存在することを突き止め、*Nature* 2017年3月23日号564ページに報告した¹。この成果は、HIVの診断や治療を取り巻く状況を変える可能性がある。犯罪者の似顔絵をもとに追跡する警察のように、HIVに感染している静止期CD4 T細胞と他の免疫細胞とを識別する方法がもたらされるからだ。さらに、静止期の感染細胞を標的として殺傷することも可能になるかもしれない。

抗レトロウイルス薬は、ウイルスが全身に広まるのを防ぎ、免疫系は、ウイルスDNAを活発に転写する細胞を殺傷する。しかし、HIV感染T細胞のうちの一部は静止期にあり、その内部のウイルスゲノムは転写されていないため、薬剤でも免疫系でもこの侵入者を検出することができない。「潜伏性リザーバー」として知られるこうした細胞は、HIV治療の障害となる。HIV患者が抗レトロウイルス療法を中止すると、ウイルスは徐々に活動を開始し、自由に複製するようになるのだ。

ショック・アンド・キル法

Benkiraneは、「潜伏性リザーバーを殺傷することは、（HIVの診断・治療に大きな進展のあった）1996年頃からの夢でした。しかし、その細胞を識別する方法がなかったので、どうすることもできなかったのです」と語る。

HIV研究者は2012年に、静止期の感染T細胞を標的とする新しい手法を試みた。「ショック・アンド・キル」法と呼ばれるこの治療法では、潜伏性リザーバーを刺激して、ウイルスの複製を開始させる。これにより、理論的に



NIBSC/SPL/GETTY

HIVに対する現在の薬物療法は、ウイルス粒子を活発に産生している静止期CD4 T細胞（写真）を標的としている。しかしこれまでのところ、こうした細胞を効率的に攻撃することはできていない。

は、免疫系やHIV薬が潜伏性リザーバーに作用して攻撃できるはずだ。

しかし、「この方法では期待されたほどの結果は得られませんでした」と、カリフォルニア大学サンフランシスコ校（米国）のウイルス学者Steven Deeksは言う。おそらく、潜伏性リザーバーにウイルス複製を開始させるための薬剤が、複製を十分に促進しなかったのだろう。

潜伏性リザーバーを体内で見つけ出すことは非常に難しいため、ウイルス学者はこの細胞に関する基礎知識すら得られずにいた。Benkiraneの率いる研究チームはこの問題を解決するため、潜伏性リザーバーの目印を探すことを目指し、このほど、CD32aというマーカータンパク質を見いだした。Benkiraneらは、まず、実験室でHIVが感染可能なように調整した静止期CD4 T細胞に蛍光標識したHIVを暴露した。次に、標識されたウイルスが感染した細胞と感染していない細胞で、遺伝子発現の差違を調べた。その結果、静止期の感染細胞の一部ではCD32aをコードする遺伝子が発現していたが、非感染細胞ではCD32aの発現はほとんど見られなかつ

た。また、HIVを活発に産生している細胞では、CD32aがあまり発現していないことも分かった。

Benkiraneらは、CD32aに対する抗体を用いて、HIV感染者のヒト血液試料からCD32a発現細胞を選別して確認したところ、これらの細胞は予想されたとおりHIVが潜伏している静止期T細胞だった。「リザーバー細胞を識別できることを実証したのは、我々が初めてです」と、Benkiraneは言う。

希望

試料中のウイルス量を測定する試験法は、1990年代後半の抗レトロウイルス療法の開発に役立った。それと同様に、新しいタンパク質標的、つまりバイオマーカーによって、HIVの治癒に向けた研究が加速することをDeeksは期待している。

「次の段階は、性別、民族、年齢、病期の異なる患者の血液をスクリーニングし、今回の知見の再現性を調べることでしょう」と、国立アレルギー・感染症研究所（米国メリーランド州ベセスダ）の所長Tony Fauciは言う。HIVが感染するのは通常、腸やリンパ

節であり、こうした組織も検討する必要があるだろう。CD32aが信頼できるマーカーであることが確かめられれば、これを利用して潜伏性リザーバーを標的とする薬剤を開発することが最終的な目標となる。

今のところFauciは、この結果に心を躍らせているものの、CD32aの可能性については慎重な姿勢を崩さない。治療法の探索に20年もの時間が費やされてきたにもかかわらず、HIVを治癒させることのできる治療法はいまだにないからだ。「CD32aが潜伏性リザーバーのマーカーとなることを心から願っています。この研究が非常に優秀な研究者たちによって行われていて、データが信頼できそうだという事実から、私は樂觀視しています」とFauciは言う。■

（翻訳：三谷祐貴子）

Hidden HIV reservoirs exposed by telltale protein

doi: 10.1038/nature.2017.21639
2017.3.15 (Published online)

Amy Maxmen

1. Descours, B. et al. *Nature* **543**, 564–567 (2017).

アヒル目隠し実験

ヒナ鳥の刷り込みは左右の目で別々

2015年夏、オックスフォード大学(英国)の動物学者Antone Martinho IIIとAlex Kacelnikは、実にかわいらしい実験を始めた。アヒルのヒナに目隠しを付けて行う実験だ。左右どちらの目を使えるかが母鳥の「刷り込み」にどう影響するのかを調べるのが狙いだ。しかし、なぜ目の左右が関係するのか？ 人間では当たり前のある脳領域が鳥にはないからだ。

片目を隠して刷り込み

人間の脳の左右の半球の間には「脳梁」という神経の太い束がある。脳梁は情報の橋渡しをしており、左右の半球が素早く情報を伝達し、一体として働くことを可能にしている。鳥の脳は完全には左右に分かれていないものの、この経路のメリットを得られない。このちょっと変わった神経構造が、無理からぬ実験につながった。「ロンドンのセントジェームズ公園に行ったとき、湖にアヒルのヒナが親鳥と一緒にいるのを見ました」とMartinhoは言う。「このとき、刷り込みを使って脳内の情報伝達を調べる実験を思いついたのです」。

彼らは、64匹のヒナの片目を隠した後、赤または青のアヒル成鳥の模型を見せた。すると、この色付きの偽アヒルが「母鳥」として刷り込まれ、ヒナはその後ろをついて回るようになった。だが、ここで一部のヒナの目隠しを他方の目に付け替え、それまで隠していた目で見るところ、もはや「母鳥」を認識できなくなったようで、赤のアヒルと青のアヒルに同じ親和性を示した。

これらのヒナが赤と青のいずれかを選好するようになるまでには3時間かかった。一方、片方の目で赤のアヒル、他方の目で青のアヒルを見て別々に刷り込まれていたヒナの場合、両目が見えるようしたところ、赤青どちらを選好することもなかった。この成果は昨年末の*Animal Behavior*に報告された。

脳梁なしで生きる適応

この実験結果から、鳥の脳の左右半球の間に素早いコミュニケーションは根本的に存在しないこと、そして片方の目から入った情報は片方の半球にだけ伝えられることが明らかになった。このように脳の左右に記憶を分けておくのは優

れた戦略とは思えないかもしれないが、トレント大学(イタリア)の神経科学者Giorgio Vallortigara(今回の研究には加わっていない)は、脳梁がないと生きていく上で有利になる点があるかもしれないとみる。例えば、それぞれの脳半球が特定種類の記憶に特化できるようになるだろう。

鳥は普通、両目を使って見て、脳の2つの半球を調和して働かせている。「つまり、鳥は2つの不連続な情報の流れを統合して決定を下すために、とてつもない行動的適応をしているということです」とMartinhoは言う。「鳥であるということは、私たちの想像をはるかに超えています」。

(翻訳協力: 粟木瑞穂)

空気清浄網戸

ナノファイバーをコーティングして粒子状物質の90%を除去

汚染物質をとらえるナノファイバーを使った新しい網戸によって、スモッグに煙る都市の住民が一息つくことができるようになるかもしれない。このナノファイバーは素素を含むポリマーでできており、「ブロー紡糸」という方法で網戸に吹きつけられる。ポリマー溶液の小さな糸が気流によって噴霧の中に広がり、非常に薄いナノファイバーの層が形成される。

このほど、スタンフォード大学(米国カリフォルニア州)と清華大学(中国・北京)の科学者たちは、通常の網戸を通過して肺に達してしまう有害な粒子状物質の90%以上を除去できるブロー紡糸ポリマー(一般にゴム手袋やテントに使われている)を開発し、*Nano Letters* 2017年2月号に報告した。汚染物質吸着ナノファイバーは、ロールから毎分1m弱の速度で引き出される柔軟なナイロンメッシュに対して吹きつけられた。研究チームはまた、金属被膜のメッシュにもナノファイバーを吹きつけ、大量の粒子状物質を吸着した後に、膜をティッシュでぬぐって調べた。

スモッグのひどい北京で12時間の実地試験を行った結果、ポリアクリロニトリル・ナノファイバーをコーティングしたこの網戸は、肺がんや心臓病の原因となり得る有害な粒子状物質の90%を除去し、新風を吹き込んだ。

(翻訳協力: 鐘田和彦)

科学者の国会が 「軍事研究を行わない」と決議

日本学術会議は、戦後維持してきた軍事研究拒否の声明を継承すると決定した。軍事研究に対する同組織の立場表明は50年ぶりだ。

日本の科学者の代表機関である日本学術会議は、2017年3月24日、「軍事目的のための科学研究を行わない」とする過去2回の声明の継承を決定した。

科学者が戦争協力したことへの反省から、同会議は1950年と67年に戦争と軍事目的の研究を拒否する声明を決議した。1950年の声明は、世界的に有名な「ラッセル・アインシュタイン宣言」より5年早い。科学のあり方と平和への決意を世界に先駆けて示したのだ。

だが近年の防衛省による研究助成制度創設などを受け、同会議は安全保障との関わり方を探るために2016年6月から過去の声明の見直しを検討してきた。

学術の健全な発展には、研究の自主性・自律性、研究成果の公開性が担保される必要がある。だが、特定秘密保護法や、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度はそれを危うくする。新声明は、軍事的安全保障研究は学問の自由および学術の発展を阻害する懸念が

あるとし、これを拒否する姿勢を改めて確認した形となった。加えて、安全保障技術研究推進制度について、「政府による研究への介入が著しく、問題が多い」と述べ、大学などに研究の適切性を審査する制度の設置を望むとした。なお、声明は通例どおり幹事会で決議されたが、新声明の影響から4月の総会での採決を求める意見もあった。

デュアルユース問題

科学や技術には、デュアルユース（軍民両用）可能なものがある。例えば、ロボットや防毒マスクは、軍事だけでなく災害時にも有用だ。一方で、科学や技術が大量破壊兵器へ悪用されてきた過去がある。また、科学者の意図を離れて軍事に転用される可能性もある。

同会議は2013年1月に「科学者の行動規範」を改訂してデュアルユースに関する項目を加えている。科学者は悪用される可能性を認識し、社会に許容される適切な手段と方法で研究実施と成果公表を行うように、とある。

では、「悪用」は何を想定したらよいのだろうか。例えば、生命の機能の一端を解明するどんな研究も、将来、大量破壊兵器につながる可能性がないと断定できないのではないだろうか。

科学は善にも悪にも使うことができる故に、それを扱う科学者は特別の責務を負うと、今日のさまざまな科学者憲章の原型である世界科学労働者連盟の科学者憲章に記されている。また、悪用を防ぐために最善を尽くさねばならないとし、具体的に、戦争準備や大量破壊兵器開発の阻止を掲げている。つまり科学者の責務とは、社会の問題を科学で解決し戦争を防ぐことにある、ということではなからうか。

■
(編集部)

ラッセル・アインシュタイン宣言

人類という種の一員として考えてほしい。哲学者バートランド・ラッセルは1955年7月9日、物理学者アルベルト・アインシュタインをはじめとする著名科学者ら計11名の連名で、核兵器廃絶を世界に呼び掛けた。湯川秀樹もその1人だ。

端緒となったのは、1954年のビキニ環礁水爆実験であった。第五福竜丸の乗組員が被曝し、その灰を分析した物理学者の西脇安が、既知の原子爆弾では生じ得ない放射性物質を検出したことを英国の物理学者ジョセフ・ロートブラットに伝えた。ロートブラットは、これが水素の熱核反応を利用した新型の爆弾で、その威力が大都市を破壊するレベルに達していることを突き止め、ラッセルに知らせたのである。大量破壊兵器の開発が進み戦争に使われれば人類は存続できない。危機感を持ったラッセルは、科学者と共同で声明文を作成することを思いつき、アインシュタインに連絡を取ったのだ。

ラッセル・アインシュタイン宣言を受け、1957年8月、核兵器廃絶をはじめとする科学と社会の諸問題に取り組む組織「パグウォッシュ会議」が設立される（日本でも物理学者の湯川秀樹と朝永振一郎が中心となり、同年10月に日本パグウォッシュ会議が設立）。同組織は1995年にノーベル平和賞を受賞した。

トリアンギュレンの合成に成功

走査型プローブ顕微鏡の探針を使った原子操作によって、不安定な炭化水素「トリアンギュレン」が合成された。

IBM社のチューリッヒ研究所（スイス）に所属するLeo Grossらは、走査型プローブ顕微鏡の探針を用いて原子を操作することで、これまで合成困難だったトリアンギュレンという分子の合成に成功し、*Nature Nanotechnology*に報告した¹。トリアンギュレンは、グラフェン（炭素原子が六角形の網目状につながった原子1個分の厚さのシート）を三角形に切り取ったような平坦な分子である。不対電子を持つため非常に不安定で、無置換のトリアンギュレンは従来の化学合成法では合成できないが、不対電子は磁性の原因となるため、エレクトロニクスへの応用が期待されている。

従来法で合成できない不安定分子が、探針による原子操作で合成されたのは、今回が初めてではない。しかし、今回

の例は特に価値がある。「トリアンギュレンは、化学者たちが懸命に努力しても合成できなかった分子です。その合成に私たちが初めて成功したのです」と、IBM社の研究チームを率いたGrossは言う。

トリアンギュレンの合成は新しいタイプの化学合成法を実証するものだと、ノッティンガム大学（英国）で分子操作を専門とするナノ科学者Philip Moriartyは言う。従来の合成方法では、分子同士を反応させてより大きな分子構造体を組み立てていく。今回の方法では、顕微鏡の探針を使って個々の分子の中の原子を物理的に操作して目的の分子を合成する。

しかし、分子を1個ずつ合成する手法が役に立つのは、ごく限られたケースであろう。しかもこの手法は、形状や構造

が複雑な分子には適用できそうにない。

トリアンギュレンは、炭素原子からなる6つの六角形が辺を共有するようにつながって三角形を形成している。外周部の炭素には水素原子が結合しており、その中の2個の炭素原子だけがそれぞれ不対電子を持っている。これらの不対電子は、他の電子と対になって安定な化学結合を形成することができずにいる（「三角形のラジカル分子トリアンギュレン」参照）。

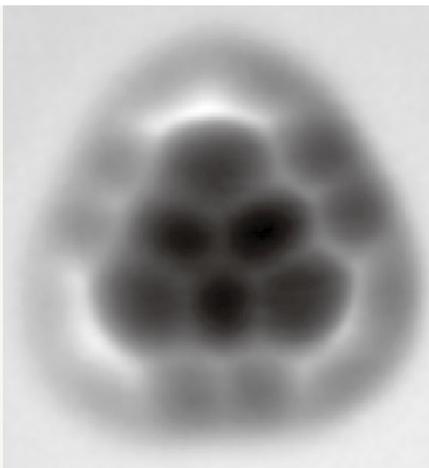
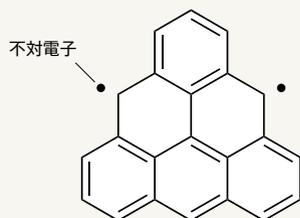
不対電子を有する分子は、周囲の物質と反応しやすいので非常に不安定だ。「合成後、直ちに酸化するでしょう」と、研究チームのNiko Pavličekは言う。不対電子の反応性の高さという問題を回避するため、大阪大学の中筋一弘^{なかつじかずひろ}らと大阪市立大学の工位武治^{たくいたけじ}らの研究チームは、トリアンギュレン骨格に大きな炭化水素基を導入することで、従来法でトリアンギュレン骨格に不対電子を持つ分子を合成することに2001年に成功した²。この分子は、空气中で安定であった。

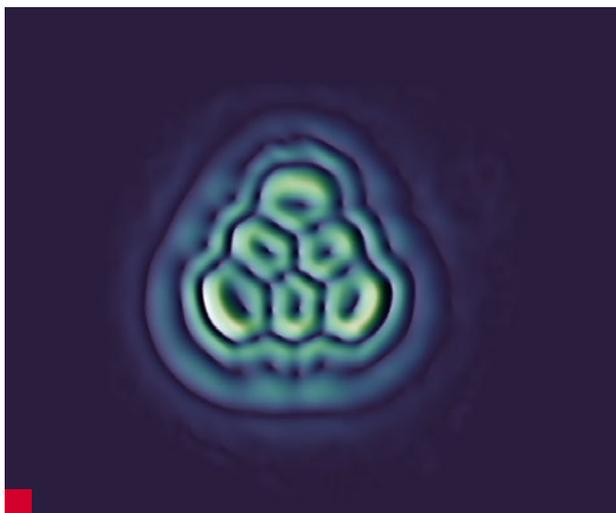
IBM社の研究チームは、探針で物質の形状を探ることができる「走査型プローブ顕微鏡」に目を向けた。走査型プローブ顕微鏡法は、通常、探針と試料の間の引力や探針と試料の間に流れる電流を測定することによって分子を画像化する手法である。Grossらは2009年に、探針の先端に一酸化炭素（CO）などの小分子を結合させると、化学の教科書に出てくる球棒モデルのような高分解能画像が得られることを示した³（*Nature* ダイジェスト 2010年10月号「分子の形を感じる」参照）。2015年には、走査型プローブ顕微鏡を使って化学反応を進め、不安定な「中間体」分子を合成できることを実証している⁴。

REF.1

三角形のラジカル分子トリアンギュレン

トリアンギュレンは、六角形の網目状につながった炭素原子の周囲に水素原子が結合した平坦な三角形分子である（下）。IBM社の研究者らは、走査型プローブ顕微鏡の探針を使って原子を操作することで、トリアンギュレン分子を合成、画像化した（右）。





銅の表面のトリアンギュレンを走査型プローブ顕微鏡で画像化 (左)、Leo Gross氏 (中央)、Niko Pavliček (右)。

今回は、トリアンギュレンの合成を目指し、出発物質として、反応性不對電子を持たないジヒドロトリアンギュレンという前駆体分子を選んだ。

研究チームはまず、ジヒドロトリアンギュレンを固体表面（塩化ナトリウム、固体キセノン、銅のいずれも適していた）に蒸着し、走査型プローブ顕微鏡で調べた。次に、慎重にジヒドロトリアンギュレン分子の上に探針を配置し、連続した2回の電圧パルスで2個の水素原子を吹き飛ばし、不對電子を生成させた。そして、水素原子を失ったこの分子を、COを結合させた探針を用いて画像化した。得られた高分解能画像には、トリアンギュレンのものと予測された形状と対称性を持つ分子が映し出されていた¹。この分子は、高真空、低温という実験条件下で、観察中ずっと安定していた。

「私の知る限り、これが非置換トリアンギュレンの初めての合成例です」と工位は言う。

またMoriartyは、今回の研究を「素晴らしい」と称え、銅の表面でトリアンギュレンが安定であることに驚いた

と話す。彼は、トリアンギュレンは銅と反応すると予想していたようだが、一連の実験では、トリアンギュレンは合成後4日間、銅の表面でじっとしていたとPavličekは言う。

研究チームは、トリアンギュレンの磁気的特性も調べた。その結果は予想どおりで、2個の不對電子のスピンの向きが揃っていることが分かった。この量子力学的特性によって、分子は磁性を示すようになる。

従って、トリアンギュレンはエレクトロニクス分野で役立つ可能性がある、研究チームのメンバーは言う。工位も同じ考えで、量子コンピューティングや量子情報処理への応用に加え、電子スピンを操作することによって情報の符号化や処理を行うスピントロニクス分野への応用を予見する⁵。

分子を1個ずつ作る合成法はさほど有望とは思えないかもしれないが、現在の量子コンピューターは少数の量子ビット（キュービット）しか使用しておらず、各ビットを単一分子に対応させることも可能かもしれないと、Grossは指摘する。そうした分子を100個

「手作業で」作る必要があったとしても、「その作業をやり遂げる価値はあると思います」とGross。

また、今回の手法が「平坦ではない分子」にどれほど容易に適用できるかは定かでないが、3D分子でもある程度は操作が可能だとGrossは言う。

トリアンギュレンや断片化グラフェンのような関連化合物にも「やるべき面白いサイエンスがたくさんあります。IBM社の研究チームは社会に還元するために高いハードルを設定し続けます」と、Moriartyは言う。

(翻訳：藤野正美)

Elusive triangulene created by moving atoms one at a time

Vol. 542 (284) | 2017.2.16

Philip Ball

1. Pavliček, N. *et al.* *Nature Nanotechnology* **12**, 308–311 (2017).
2. Inoue, J. *et al.* *J. Am. Chem. Soc.* **123**, 12702–12703 (2011).
3. Gross, L., Mohn, F., Moll, N., Liljeroth, P. & Meyer, G. *Science* **325**, 1110–1114 (2009).
4. Pavliček, N. *et al.* *Nature Chemistry* **7**, 623–628 (2015).
5. Morita, Y., Suzuki, S., Sato, K. & Takui, T. *Nature Chemistry* **3**, 197–204 (2011).

南極大陸の棚氷に巨大亀裂

南極大陸の4番目に大きな棚氷「ラルセンC」に、長さ175kmの亀裂が発生している。近く、東京都の2倍を超える面積の氷山を分離しそうだ。

南極大陸の4番目に大きな棚氷「ラルセンC」に、長さ175km（2017年1月19日現在）の巨大な亀裂が発生している。亀裂を監視してきた科学者たちは、数週間から数カ月以内に亀裂が海に達し、東京都の2倍余りの面積に相当する約5000km²の巨大氷山をウェッデル海に分離する可能性がある、と指摘する。今後、ラルセンC全体の崩壊につながる可能性があり、地球温暖化との関連や海面上昇が早まることが懸念される。

棚氷は、陸上の氷河が海上に流れ出し、巨大な氷板となって海に浮いてい

るものだ。ラルセンCは、南極半島の東側にある棚氷の1つで、全体の面積は約5万km²（九州本島の約1.4倍）、厚さは約350mある。亀裂は、英国の研究チームなどにより2014年から追跡され、2017年1月1日から同月19日までの間に10km拡大した。亀裂の幅は2016年11月の観測で90m以上あり、棚氷を底まで貫通している。

南極半島は、世界中でも特に気温上昇が著しい場所の1つで、2000年までの50年間で約2.8度の上昇が観測された。南極半島では棚氷の崩壊が進んでいて、ラルセンCの北にあった、ラル

センA棚氷は1995年に、ラルセンB棚氷は2002年に崩壊した。

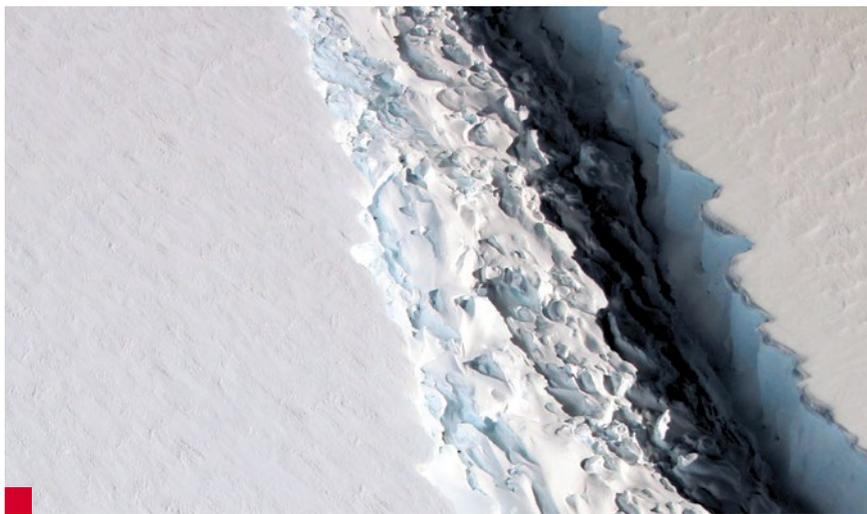
研究者たちは今、ラルセンCが今後どうなるかを解明するため、ラルセンAとラルセンBの歴史を再検討している（「ラルセン棚氷の状況」参照）。現在拡大している亀裂は、ラルセンCが長期的な衰えを見せ始め、最終的には完全に崩壊することが避けられないことを示す兆候だと、多くの研究者が恐れている。ラルセンCが完全に崩壊するならば、氷山を分離した後、崩壊までにどれだけの時間が残っているのかは分かっていない。

カリフォルニア大学アーバイン校（米国）の雪氷学者Eric Rignotは、「衛星画像はラルセンCが1980年代から縮小し続けていることを、レーダー測定結果はラルセンCの氷が薄くなりつつあることを示しています」と話す。研究者たちは、ラルセンCの表面上に氷が解けた水で池が生じていることも観測している¹。ラルセンBでは、こうした池が氷に穴をうがち、亀裂を拡大させて崩壊を早めたとみられている。

ラルセンCは、好都合な海底形状によって、急速な崩壊からある程度は守られている。ラルセンCを囲む2つの水中の隆起が摩擦力を及ぼし、海への氷の流れを遅くしているのだ。

「それでも、状況はラルセンBの衰退と極めてよく似ています」と、英国のスウォンジー大学の雪氷学者Adrian Luckmanは指摘する。彼は、今回のラルセンCの亀裂を監視してきた研究チームのリーダーである。ラルセンBでは、1995年に大きな氷山分離イベントがあった。その後、ラルセンBは徐々に縮小し、氷山分離の7年後に完全に崩壊した。「ラルセンCが、差し迫った分離イベントの後、どれだけす

NASA



ラルセンCにできた巨大な亀裂。幅は90m以上で、棚氷の底まで貫通している。NASAの調査で2016年11月に撮影された。ラルセンCは南極半島東側にある棚氷で、面積は約5万km²、厚さは約350mある。

ぐに崩壊するかは分かりません。しかし、同様のパターンをたどる可能性があります」と彼は話す。

ラルセンCの状況の意味を理解するには、ラルセンBの崩壊で得られたことを知る必要がある。米航空宇宙局(NASA)ジェット推進研究所(カリフォルニア州パサデナ)の雪氷学者Ala Khazendarは「ラルセンBの崩壊は、最後の氷河期以降で最大の棚氷崩壊で、棚氷の役割の解明における転換点になりました。氷床内部から海への氷の動きを棚氷がどのように調整しているかを説明する役目をしたのです」と話す。

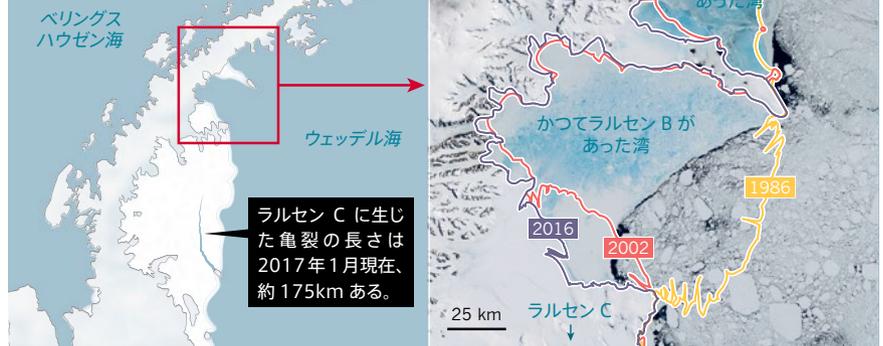
陸上の氷河が海へと流れていくことは避けられないが、棚氷はコルク栓のように働き、氷河の流れを遅くする、とみられている。棚氷は、氷河を支えるのにどの程度寄与しているのか。研究者たちは、ラルセンBの崩壊までの数十年にわたって議論してきた。

ラルセンBの崩壊後に観測された人工衛星データにより、議論はおおむね収束した^{2,3}。Rignotによると、ラルセンAとラルセンBが崩壊した後、この2つの棚氷につながっていた氷河が海に流れる速度は最大で8倍まで上昇したという。「一部の氷河は速度を少し落としましたが、それでも以前よりも5倍速く流れています」とRignotは指摘する。Khazendarらは、ラルセンBへ流れる2つの氷河は、その崩壊前から加速し始めていたことを見いだした。ラルセンBが衰えたことが原因とみられた。

ラルセンBの崩壊後、氷床のシミュレーションモデル開発者らは、氷河の流れを駆動する力をより正確に反映し、コルク栓効果を定量化するようにモデルを改良してきた。彼らは、ラルセン棚氷の限られた観測結果をより広く応用できるという自信を深めている。

ラルセン棚氷の状況

南極半島のラルセン棚氷は、1990年代後半から劇的に変化してきた。ラルセンAは1995年に、ラルセンBは2002年に崩壊した。現在、ラルセンCに大きな亀裂が拡大している。



棚氷の崩壊は、南極大陸を遠く離れたにも影響する。棚氷は海に浮かんでいるので、氷山が分離・融解しても地球の海面水位への影響はわずかだ。しかし、ラルセンCに流れ込む氷河は、地球全体の海面を5~10cm程度上昇させるだけの水を含んでいると見積もられている。この水は、棚氷がなくなればより速く海に流れ込むとみられる。地球の海面は、1年に約3mmのペースで上昇していて、最近の研究によると、その3分の1は、南極大陸とグリーンランドの氷の喪失が原因であると思われている⁴。

今のところ、研究者たちは心配しながら、ラルセンCの拡大していく亀裂を監視している。スバルバル大学センター(ノルウェー)の雪氷学者Chris Borstadは、ラルセンCの「縫合帯」に特に興味を持っている。縫合帯は、陸から海上に流れ出た幾筋もの氷河の氷が互にくっつき合う領域だ。氷河から流れ出た氷は、縫合帯で下(海)側から凍った氷によって結合されていることが多く、縫合帯の氷は比較的柔らかい。

「数十本のかなり大きな亀裂がラルセ

ンCの縫合帯の1つへ走っていて、そこで止まっています」とBorstadは指摘する。拡大している亀裂は、そうした亀裂の1つだが、2014年になぜか縫合帯を突破し、それ以来ずっと拡大し続けてきた。なぜ亀裂が柔らかい氷を突破することができたのか、また、他の亀裂も今後数年間で同じように突破するかどうかは明らかではない。

Borstadは、「縫合帯には、亀裂を止めるのにとっても効果的な何かがあるようです。それが何なのかはまだ分かりませんが、棚氷の崩壊現象を解明するカギかもしれません。そのカギを見つけるために、私たちは現場に行き調べる必要があります」と話す。

(翻訳:新庄直樹)

Larsen C's big divide

Vol. 542 (402-403) | 2017.2.23

Jeff Tollefson

1. Luckman, A. et al. *Antarct. Sci.* **6**, 625–635 (2014).
2. Rignot, E. et al. *Geophys. Res. Lett.* **31**, L18401 (2004).
3. Scambos, T. A., Bohlander, J. A., Shuman, C. A. & Skvarca, P. *Geophys. Res. Lett.* **31**, L18402 (2004).
4. Forsberg, R., Sørensen, L. S. & Simonsen, S. *B. Surv. Geophys.* **38**, 89–104 (2017).

細胞単位で参照できる 体の地図作りが熱い！

最先端の画像化法と分子生物学を融合して、がんやヒト組織の単一細胞ごとの地図を作成する競争が加速している。

初めて腫瘍の間を通り抜けて飛んだとき、ケンブリッジ大学（英国）の分子生物学者Greg Hannonは、驚愕するとともに、ある考えがひらめいた。Hannonらは、バーチャルリアリティモデルを使用して、血管の中に入った外へと飛び出したり、浸潤する免疫細胞を調べたりしていた。そして、これまで前例のない「腫瘍アトラス」というアイデアを思いついたのだった。

「なんてこった！こいつはすごいことになるぞ」と考えた、と彼は回想する。

2017年2月10日、英国ロンドンがん研究所は、分子生物学者、天文学者、そしてゲームデザイナーからなるHannonの研究チームに、これから5年にわたって、乳がんの対話型バーチャルリアリティ地図を開発するための研究資金として最高2000万ポンド（約27億円）供与すると発表した。

Hannonが飛び回ったバーチャルリアリティモデルの中の腫瘍は実物大の模型だったが、実際のモデルには、腫瘍の各細胞内の数千の遺伝子発現と数十個のタンパク質に関するデータも含まれることだろう。うまくいけば、この空間的、機能的な詳細によって、治療に対する腫瘍の反応に影響を及ぼす要因について、もっと多くのことが明らかになるかもしれない。

このプロジェクトは、新世代の細胞アトラス作りを目的とした一連のプロジェクトの1つにすぎない。細胞アトラスとは、各細胞の位置や構成を微に入り細に入り描写する、器官や腫瘍の地図だ。英国がん研究所は、代謝物質とタンパク質に焦点を合わせる同様の腫瘍地図を作ろうとしている別の研究チームにも、最高1600万ポンド（約22億円）を供与した。2017年後半には米国立精神衛生研究所（NIMH；メリーランド州ベセスダ）が、分子情報を桁外れに詳細に表すマウス脳の地図を作るための助成金を誰に交付するかを発表することになっている。

そして、2月23、24日には、ヒト細胞アトラス（Human Cell Atlas；人体のあらゆる細胞を地図化するプロジェクトだが、まだ研究資金の提供を受けていない）の計画を継続するために、研究者たちがスタンフォード大学（米国カリフォルニア州）に集まった。

「この話題には、非常に多くの関心が集まっています」と、ワイツマン科学研究所（イスラエル・レホヴォット）で免疫系のゲノミクスを研究しているIdo Amitは言う。「この研究では『位置』が全てです。この分野の研究者たちは、位置こそが次のステップだと考えています」。

過去数年間、研究者たちは、個々の

細胞内に存在する全種類のRNAの塩基配列解読を可能にする技術に群がってきた。こうしたRNAは何万個もあり、これらによってどの遺伝子が発現しているかが分かるとともに、ある器官または腫瘍内で、ある細胞が持っている独特の機能についての手掛かりが得られる。

しかし、塩基配列解読法では、通常、細胞をまずその細胞が含まれている組織から引きはがさなくてはならない。だが、いったん組織から取り出してしまうと、細胞がどこにあって、どのような近隣細胞と相互作用しているかという貴重な情報が失われてしまう。そうした情報は、その細胞がどんな機能を持つのか、また、組織が病的状態になるとその細胞がどのように障害されるかに関して、新たな手掛かりを提供してくれる可能性がある。

「単一細胞塩基配列解読技術には非常に心が躍りますし、大きな将来性があります」と、カロリンスカ研究所（スウェーデン・ストックホルム）の分子生物学者Nicola Crosettoは言う。「けれども、がんや複雑な生理学的組織を考えるとときには、そうした情報を空間的な状況の中にはめ込むことができなくてはなりません」

それを実現する技術が登場し始めている。2月6日に、Amitとワイツマン科学研究所の同僚Shalev Itzkovitzの研究チームは、マウス肝小葉の細胞ごとの地図を作成したと報告した（K. B. Halpern *et al. Nature* **542**, 352.356; 2017）。これには各細胞の全RNA塩基配列解読情報も含まれている。肝小葉は従来、同心円状の層に分割される。研究チームは、2つの層の間の界面に存在する細胞で、独特な遺伝子発現パターンが見られることを発見した。「肝

小葉組織のこの領域はただの移行ゾーンではなく、特殊な機能を持つ新しいゾーンなのです」と、Itzkovitzは言う。

一方、Hannonは、ハーバード大学（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）の生物物理学者 Xiaowei Zhuang と研究チームを組んだ。Zhuangは、画像化技術を用いて細胞内で読み取ることができるバイナリバーコードを、RNAにコードする方法を開発した。これにより、画像化技術を使って、近隣の細胞から細胞を引きはがすことなく、1個の細胞で同時に何千個ものRNAを検出することができるのだ。「バーコードが飛び出して見える画像を見るたびに、私は映画『マトリックス』を思い出します」とZhuangは言う。

RNAの分子地図作成は、タンパク質

などの分子と比べると簡単だ。英国立物理学研究所（NPL；テディントン）のJosephine Bunchらが開発中の腫瘍アトラスには、タンパク質などの巨大分子とともに、脂質や薬剤、代謝物質などの小分子に関する詳細な情報がついている。彼女の研究チームは、この方法で1試料当たり約50個のタンパク質を評価できるだろう。

他の技術で何千個ものRNAを調べられることに比べると、50個という数はそれほど印象的でないかもしれないが、特定の組織に合わせて選択可能な、さまざまなコンピネーションの約50個のタンパク質に関する情報は、主要な細胞タイプを明らかにし、その細胞で働いている重要な分子経路を調べるには十分だと、スタンフォード大学の分

子生物学者Garry Nolanは言う。

タンパク質は、ある細胞の機能についてRNAよりもより直接的な展望を与えてくれるし、研究者は自分たちのデータを数十年前からある細胞アトラスに当てはめやすくなる、と彼は言う。

頂点に立つ方法が何であっても、データを表示する新しい方法も開発しなければならないだろう、とHannonは言う。「バーチャルリアリティは非常にパワフルです。しかし、情報量が非常に膨大になるので、情報と対話する新しい方法が必要になるでしょう」と彼は言う。■

（翻訳：古川奈々子）

Cell atlases race to map the body

Vol. 542 (404) | 2017.2.23

Heidi Ledford

CRISPRの特許争いにひと区切り

米国特許商標庁はゲノム編集技術の特許をめぐる争いで、ブロード研究所に軍配を上げた。

米国特許商標庁（USPTO）は、CRISPR-Cas9系を使った遺伝子編集技術についての一連の特許権が、ブロード研究所（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）にあるとする判断を示した。大きな収益が見込めるゲノム編集技術の知的財産権をめぐる、同研究所（マサチューセッツ工科大学とハーバード大学の共同運営）とカリフォ

ルニア大学（米国）の対立が続き、USPTOの判断が待たれていたが、これでひとまず決着がついたことになる。

ゲノム編集技術に関する特許を先に取得したのはブロード研究所だったが、出願はカリフォルニア大学の方が先だった。カリフォルニア大学側は、この技術をブロード研究所の研究者らよりも先に発明したと主張している。カ

リフォルニア大学側の弁護士らはブロード研究所の特許を無効にしようと、「抵触審査（インターフェアランス；先発明者決定）」の手続きを申請した。しかし2017年2月15日、抵触はなかったと判断された。つまり、ブロード研究所の発明はカリフォルニア大学の発明とは別物ということであり、ブロード研究所の特許は有効となる。カリフォルニア大学の特許出願は特許審判抵触審査部から審査官に差し戻されるだろうが、法的な異議申し立ては今後も続く可能性がある。

抵触審査手続きの宣言があったのは2016年1月で、ブロード研究所の弁護士らはこの手続きの中で、「カリフォルニア大学の特許出願には、マウスやヒトなど真核生物の細胞にCRISPR-Cas9系ゲノム編集技術をどのように適用できるかが明記されていない」と

主張した。ブロード研究所の特許はこの区別をつけており、その結果、両者の対応特許群は重ならないと考えられると、ブロード研究所の弁護士らは述べている。この戦略のおかげでブロード研究所は、植物や家畜、ヒトでのCRISPR-Cas9系による遺伝子編集という、最も利益が見込めそうな用途を掌握できることになる。

ただし、カリフォルニア大学の関係者らは今回のUSPTOの裁定を受けて、同大学の特許はそれでもなお、真核細胞とそれ以外の全ての細胞におけるCRISPR-Cas9系の使用に及ぶと主張している。この特許に関する発明者の1人である同大学パークレー校の分子生物学者Jennifer Doudnaはテニスボールになぞらえ「ブロード研究所が申請しているのは緑色のテニスボールに関する特許ですが、我々が申請しているのは全てのテニスボールに関する特許なのです」と説明し、今回の状況を、緑色のテニスボールを使いたい人々が特許権を得るようなものと話す。

たとえそうだとした場合、この特許に関してブロード研究所とライセンス契約を結んでいるバイオテック企業、エディタス・メディシン社(米国マサチューセッツ州ケンブリッジ)の株価は、USPTOの裁定結果公表直後に急上昇した(「株価上昇」参照)。「我々はUSPTOの判断に満足しています」と、同社社長Katrine Bosleyは談話の中で述べている。「この重要な判断は、ブロード研究所の研究の『進歩性(先行技術に基づくだけでは容易に発明できないこと)』を支持するものです」。

「今回の裁定は公正だと思います」と、知的財産権を専門とするHGF社(英国ヨーク)の特許専門弁護士Catherine Coombesは話す。カリフォルニア大

株価上昇

エディタス・メディシン社(米国マサチューセッツ州ケンブリッジ)の株価は、同社がライセンス契約済みの特許が有効になる見通しだと明らかになった際に大きく上昇した。



学の発明は、CRISPR-Cas9系による遺伝子編集において、DNA切断酵素Cas9をゲノムの特定部位へ差し向けるという重要な段階を担うガイドRNA分子の設計を対象にしている。しかしCoombesによれば、そのシステムを真核細胞で働くようにさせることは、さらに別の「進歩性」だという。

USPTOの裁定が明らかになった直後の記者会見で、カリフォルニア大学の代理人であるLynn Pasahowは、同大学のチームが控訴するかどうかはまだ決まっていないと話した。

両者が和解に至る可能性もまだ残されている、と話すのは、法律事務所McDonnell Boehnen Hulbert & Berghoff(米国シカゴ)のパートナー弁護士Kevin Noonanだ。今回の特許をめぐる争いは、両者とも発明者が学術機関の研究者でありながら、尋常でない激しさであり、抵触審査手続きに移行する前に和解に至れなかったことには驚きの声も上がっていた。

今回のUSPTOの裁定は、現時点では、真核細胞でこの技術を使いたいと思っている企業にとって不確実性を生み出すものとNoonanは話す。「誰

もが、この特許のライセンスを手放したくないのです。この状況は、人々にとって最大級の不確実性をもたらします。両方とライセンス契約を結ぶ必要があるかもしれないのですから」。

企業が両者からライセンスを得るほかにないとするれば、CRISPR-Cas9系による遺伝子編集技術を商業化するコストが高くなってしまわないかと、Noonanは付け加える。「これらの問題は大学間で和解に持っていきけるはずですが。今回の争いは、大学は本来特許ビジネスに手を出すべきでないと考えられる人々に、さらに多くの批判材料を与えてしまうでしょう」と彼は話す。

Doudnaは記者会見で、研究界におけるゲノム編集技術の普及の速さを考えれば、今回の争いは研究の妨げにはなっていないと述べている。

デラウェア大学(米国ニューアーク)の技術移転責任者であるJoy Goswamiは、同大学が所有するCRISPR-Cas9系の農業応用に関する特許の一部について、ある大手企業がライセンスを取得するかどうか迷ったことをきっかけに、今回の特許をめぐる訴訟を追跡し始めた。おそらく、今回のような特許の状況をめぐり不確実性がその企業の「ためらい」の一因になったのだろうと、Goswamiは話す。しかし、こうした不確実性はバイオテクノロジーの世界では珍しくないことなのだ。

「USPTOの今回の裁定が大きな影響を与えるかどうかは分かりません。概して、予断を許さない状況が続いていると言えるでしょう」とGoswami。■

(翻訳：船田晶子)

Court rules on CRISPR

Vol. 542 (401) | 2017.2.23

Heidi Ledford

ホットでクールな太陽熱冷房

大量のエネルギーを消費するエアコン。この需要が高まっている今、一部の人は、暑さの原因である太陽熱に問題解決のカギがあると考えている。

ミャンマー南部の都市ダウェイにあるスター・サファイア・ホテル。外は蒸し蒸しする熱帯夜だが、客たちは空調の効いた快適な室内でココナッツジュースを飲んでくつろいでいる。一方、ダウェイから西に7000km離れたスーダンの首都ハルツームにある国連病院。ここの空気はカラカラに乾いていて、病院は灼熱の砂漠の中にあるが、患者たちは空調の効いた快適な病室で体を休めている。

種類の異なる暑さの中にある2つの建物だが、その快適な環境は同じ空調技術によって作り出されている。太陽エネルギーを冷却力に変える黒いガラス管を利用した空調ユニットである。この装置は、太陽光を取り入れて電気を作るおなじみのソーラーパネルとは違い、熱力学の巧妙なトリックにより、太陽熱を使って建物を冷房する。従来型エアコンは大量のエネルギーを消費するため、今後、世界中で燃料需要が爆発的に増えることが懸念されているが、研究者やエネルギー専門家の一部は、太陽熱冷房と呼ばれるこうした冷房システムによってそれが緩和されることを期待している。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、冷房用の電力需要は、2100年までに2000年の水準の30倍以上になっているだろうと予想している。可能性に満ちた太陽熱技術が大きな転換期にさしかかっていると考えた研究者たちは、世界各地のホテルやショッピングセンターやその他の建物に、自分たちが開発したシステムを設置し始めた。現在、そうした施設は世界中に約1200あり、その数は10年前の10倍以上にのぼる。太陽熱冷凍機を製造する企業によれば、施設のタイプと規模によってばらつきはあるものの、ほとんどの建物に設置されている従来型エアコンに比べて電力使用量が30～90%も少なくなるという。研究者たちは、システムのさらなる効率アップを目指すのと同時に、より安価に製造できるよう

にしようと努力している。

しかし、この太陽熱技術の前には厄介な障害が立ちふさがっている。一部の専門家は、電動圧縮機を用いる従来型のエアコンが全世界で毎年1億台ずつ増えていることを考えると、ニッチ産業以上の存在になれるのか疑問しいと言っている。太陽エネルギー技術会社テクソル社（Tecsol；フランス・ペルピニャン）の技術者Daniel Mugnierによると、太陽熱冷凍機は以前に比べれば安くなっているもののまだまだ高価で、一般的には従来型エアコンの約5倍だという。もっと競争力をつけるためには助成金と投資が必要だが、太陽熱冷房装置にはどちらも無い。

太陽熱冷凍機の長所を高く評価するMugnierは、こうした現状を残念に思っている。太陽熱冷凍機によりピーク時の電力需要を減らすことで、停電が減り、クリーンでないエネルギー源に頼る必要性も減る。従来型エアコンに比べて静かだし、環境にやさしい冷媒を用いることが多い。2016年10月のモントリオール議定書締約国会議で、ほとんどのエアコンや冷蔵庫の冷媒として使われている代替フロン（ハイドロフルオロカーボン（HFC））の生産の段階的な削減に170カ国以上が同意したことで、この長所は新たな重要性を帯びてきた。そして何より、冷房の需要が高い場所ほど、大量の太陽熱が手に入る。ロンドン大学インペリアルカレッジ（英国）の太陽熱エネルギーの研究者Christos Markidesは、「絶妙の組み合わせなのです」と言う。

太陽熱エアコンへの期待と課題

エアコンのカギは蒸発にある。液体が周囲からエネルギーを吸収して蒸発し、気体へと相転移するときに冷却が起

従来型エアコン

2. 蒸発器

低温の冷媒が室内の空気や水から熱を吸収して蒸発し、冷たい空気が建物内を循環する。

3. 圧縮機

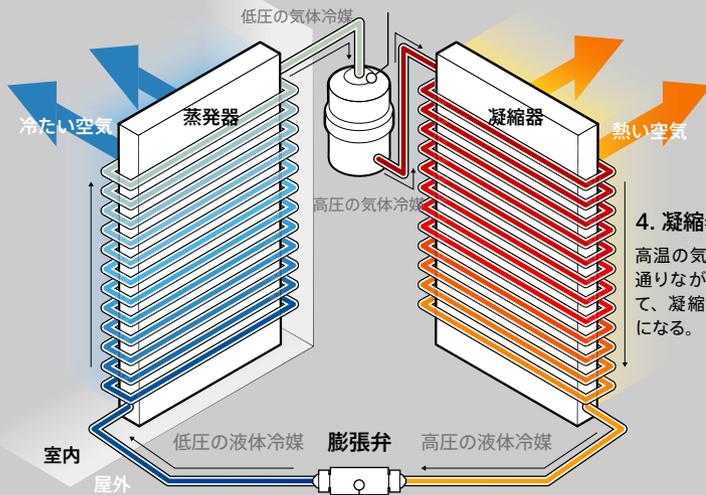
電動圧縮機が気体冷媒を圧縮して高温の気体にする。

4. 凝縮器

高温の気体が管を通りながら熱を捨て、凝縮して液体になる。

1. 膨張弁

液体冷媒は細いノズルから広い蒸発器へと押し出され、圧力と温度が急激に下がる。



太陽熱エアコン

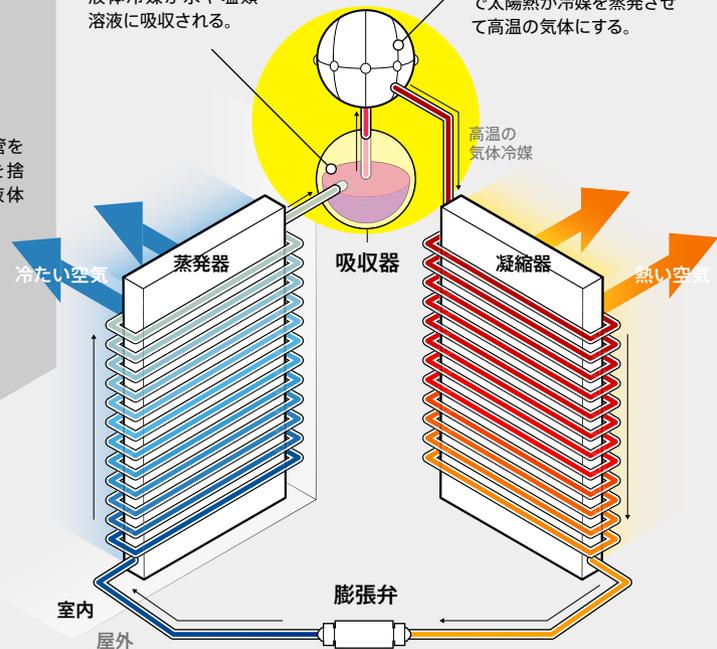
太陽エネルギー

吸収器

液体冷媒が水や塩類溶液に吸収される。

発生器

溶液が発生器に入り、ここで太陽熱が冷媒を蒸発させて高温の気体にする。



冷房の2つの方式

従来型エアコンは大量のエネルギーを消費する電動圧縮機に

依存しているのに対して、太陽熱エアコンは太陽熱を利用することで電力使用量を減らしている。

WES FERNANDES/NATURE

こる。発汗により体が冷えるのもこのためだ。そして、小型の窓用エアコンからカタールの巨大ビルで使われている長さ8mの超大型エアコンまで、ほとんどのエアコンが同じ原理で動いている。

電気を使う現代のエアコンでは、液体冷媒が細いノズルから広い蒸発器へと押し出される。これにより圧力が急激に小さくなり、速やかに蒸発して、室内の空気から熱を奪う。気体になった冷媒は電動圧縮機に送られ、ここで圧縮されてさらに温度が上昇する。高温になった気体冷媒は凝縮器（くねくね曲がった細い管であることが多い）を通り、ここで熱を室外に捨てて液体に戻る。液体に戻った冷媒は再び蒸発器に送り込まれ、一連のプロセスが繰り返される。

スター・サファイア・ホテルの空調システムを開発したエコライン社（Ecoline；シンガポール）の共同設立者Colin Chiaの説明によると、気体を圧縮するステップがあるのは、熱を効率よく室外に捨てるために、冷媒を高温にしてから凝縮器に通す必要があるからだという。電気を使う空調ユニットでは、このプロセスは機械的に行われる。けれどももう1つ方法がある。単純に、熱を使うのだ。

この原理を利用した最古のエアコンの1つは、木材を燃やして熱を供給するもので、1878年のパリ万国博覧会で紹介された。大規模な太陽熱冷暖房システムを専門に手がけるソリッド社（SOLID；オーストリア・グラーツ）の最高経営責任者Christian Holterは、これを「昔

の驚くべき機械」と呼ぶ。吸収式冷凍機と呼ばれるこの装置では、冷媒を溶かした溶液を作り、太陽熱を利用して溶液から冷媒のみを蒸発させる（典型的には塩類溶液から水を、または水から気体のアンモニアを分離する）。気体になった冷媒は、圧縮機を用いるエアコンの場合と同じように凝縮と蒸発を経て室内に冷たい空気を送り出す（「冷房の2つの方式」参照）。

圧縮機を用いるエアコンが市場の大半を占めているのは、「買ってきて、プラグを差し込み、スイッチを入れるだけで簡単だからです」とHolterは言う。けれども1980年代から、このタイプのエアコンに使われている冷媒によるオゾン層の破壊が問題視されるようになり、熱を使って冷媒の温度を上げるシステムへの関心がよみがえった。しかし、この方式が普及することはなかった。安い電気で動く従来型エアコンとは競争にならなかった上、熱源（バイオマスまたは天然ガスの燃焼）の管理が難しかったからである。

しかし、太陽熱にはこれらの問題はない。現代の太陽熱冷房システムでは、特殊な集熱管や集熱板で太陽エネルギーを吸収し、その熱を吸収式冷凍機に送る。ソリッド社はこれまでに10カ国で18の学校やオフィスや倉庫に大規模な太陽熱冷房システムを設置している。中でも、米国アリゾナ州の高校の冷房に使われている太陽熱冷房システムは現時点で世界最大だ。ちなみにアリゾナ州では、空調にかかる電気代が年間の電気代のかなりの部分を占めている。

学術研究者と企業は、別の面からも太陽熱冷房システムの性能を向上させようとしている。ソリッド社のシステムを含め、ほとんどの吸収式冷凍機は冷媒を80℃程度までしか加熱していないが、120～170℃まで加熱することができれば、より多くの冷媒が蒸発してシステム内を気体として循環するようになるため、ユニットの効率が高くなる。

そのためには、集熱器が太陽熱をもっと効率よく集められなければならない。一部の特殊な集熱器は太陽を追尾することで温度を400℃まで上げているが、これらは高価だ。もっと安価な装置を開発するため、カリフォルニア大学マーセド校（米国）の工学者Roland Winstonの研究チームは、集熱管のデザインの改良に取り組んでいる。彼らの集熱管には特殊な金属片が入れてあり、内

側の銅管内のグリコール液に速やかに熱を伝えられるようになっている。

Winstonのチームはまた、外側の集熱管の下にカーブをつけた反射材を置き、太陽の位置が変わっても十分な太陽エネルギーを集められるようにしている。このシステムはグリコール液を200℃まで加熱することができ、現在はさまざまな冷凍機で試験中である。

他のチームは吸収式冷凍機を捨てて、全く新しいシステムを構築している。オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO；オーストラリア・ニューカッスル）のStephen Whiteが率いる研究チームは、デシカント空調システムを開発し、2016年6月からヴィクトリア州バララットのショッピングセンターで稼働させている。このシステムでは、デシカント（吸湿材）が入った車輪がゆっくりと回転していて、これに空気を通すと、高温になり乾燥する。この乾燥した空気が蒸発器に送られ、水を蒸発させることにより、温度を下げる。冷たく湿った空気



ユナイテッド・ワールド・カレッジ 東南アジア・カレッジ（シンガポール）の屋根に設置された、ソリッド社の太陽熱冷房システム。

は、別の管を通ってきた建物内の空気を冷やすのに利用される。続いて、この湿った空気は外に捨てられ、太陽熱を利用して車輪の中のデシカントを乾燥させる。

キャンベラ（オーストラリア）で民間向け太陽熱技術のコンサルタントをしているMike Dennisは、吸収式冷凍機は高額で建造も複雑なので、新たなアプローチが登場したのだという。「吸収式冷凍機はナンセンスです」と彼は言う。ソーラーパネルを使って太陽光を電気に変えて、電動圧縮機を用いる従来型エアコンを動かす方が簡単だ。ソーラーパネルの価格は下がっているので、このタイプのシステムの魅力は増している。

ソーラーパネルは今、政府からの巨額の助成金と投資があるだけでなく、大量生産により生産コストも低下している。だが太陽熱技術にはそれらが無い、とMugnierは言う。「競争が不公平なのです」。

もう1つのアプローチは、ハイブリッドを作ることだ。大量のエネルギーを消費する従来型の電動圧縮機を太陽

熱で補助するのだ。スター・サファイア・ホテルのエコライン社の空調システムは、その例だ。

システムを構築するため、Chiaはそれぞれの集熱管の中にU字型に曲げた銅管を入れ、銅管同士をつなぎ合わせて長いリボン状にした。管の内側のグリコールは、管からの熱を速やかにグリコール槽へと移す。もう1セットの銅管には冷媒が入っていて、槽の中を蛇行して冷媒の温度を上げる。冷媒は続いて圧縮機を通るが、すでに高温になっているため、標準的なシステムよりもはるかに容易に気体が変わる。

同社はすでに6カ国で1000台以上の空調ユニットを設置していて、2018年中頃には、南洋理工大学（シンガポール）の寄宿舎の空調を開始する予定だ。エコライン社によると、比較試験では、同社のエアコンは標準的な高効率エアコンより35%の省エネになったという。ハイブリッド・システムは設置費用が15%高くなるが、運転コストが安いと、シンガポールの電力価格で計算すると、余分にかかった費用は2年で取り戻すことができるとChiaは言う。

太陽熱エアコンの推進派は、市場が拡大すればコストは大幅に下がるだろうと確信している。WinstonのチームのポスドクLun Jiangは、太陽熱温水器に使われる真空管は、1990年代には1m当たり100ドル（約1万1000円）以上もしたが、中国でこのシステムが普及して大量生産されるようになった今では、わずか2~3ドル（約220~330円）になったと指摘する。

太陽光技術は光しか利用できないが、太陽熱技術は廃熱を利用できると主張する人々もいる。これらは、高温の都市、産業プラント、データセンターに集中するエネルギーを「片付ける」ことができる。エコライン社は現在、インドネシアのデータセンター管理会社と協力して、廃熱を利用した冷房に取り組んでいる。

こうしたアプローチは、熱的には何ら問題はないとChiaは言う。「暑ければ暑いほど良いのです」。

（翻訳：三枝小夜子）

Cooling with Heat

Vol. 542 (23-24) | 2017.2.2

Xiaozhi Lim

（米国マサチューセッツ州ボストン在住のジャーナリスト）

ROSLAN RAHMAN/AFP/GETTY IMAGES



月に届く地球の風

地球に一番近く、空を見上げればそこにある月。このなじみ深い天体を日本の探査機「かぐや」が調査したことは、よく知られている。このほど、地球の高層大気圏から流失した O^+ が月にまで届いていることが、大阪大学・名古屋大学・JAXA（宇宙航空研究開発機構）の共同研究により突き止められ、2017年創刊の *Nature Astronomy* 2月号に発表された。太古から現在に至るまで、月が常に地球由来の物質にさらされてきたことを明らかにした初めての成果である。研究の中心となった、寺田健太郎・大阪大学大学院教授と横田勝一郎・JAXA 宇宙科学研究所助教に話を伺った。



寺田 健太郎 (右)

大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻 教授

太陽系の美しさ・不可思議さ、広く希薄な宇宙空間における地球誕生の偶然性・必然性に魅せられて、現在に至る。専門は同位体宇宙地球化学。太陽系の年表を再構築するのが夢。

横田 勝一郎 (左)

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系 助教

「かぐや」から最近ではジオスペース探査衛星「あらせ」といった宇宙機搭載の粒子計測器・質量分析器の開発に従事。趣味はフットボール、水泳。座右の銘は「塞翁が馬」。

AUTHOR PROFILE

今回の研究¹は、かぐやの観測データを解析して行われたものですね。まず、かぐやについて簡単にご説明ください。

横田: かぐやは、月の起源と進化の解明を目的に作られました。地形カメラや高度計、 γ 線やX線の測定器など、14種類の観測装置を搭載したフルパッケージの月周回衛星です。2007年9月に打ち上げられ、約1年、予定どおりの観測を行った後、追加観測を半年行いました。極軌道を周回し、2機の子衛星（「おきな」と「おうな」）により、これまで謎の多かった月の裏側や極域を含めほぼ全域を観測することができ、裏側の重力異常や月全体の地形などを明らかにしました。現時点で、軌道上から観測できることはほぼ全部行ったと思います。

かぐやから得られたデータのうち、プラズマ観測のデータが今回の研究の根拠になったのですね。

横田: はい。私の研究テーマはプラズマで、かぐやに搭載された観測機器のうち、電子と陽イオンの計測を行うプラズマ分析器の開発に携わりました。電場や磁場の観測データの分析も合わせて月周辺のプラズマ環境について解析しています。本論文は、かぐやがプラズマシートという領域を通過したときのデータを基にした成果です。

プラズマシートとは何ですか？

横田: 地球には磁気圏という太陽風から守られている領域があります。プラズマシートは地球磁気圏の一部で、地球の夜側（太陽と反対側）にある尾のように伸びている領域



図1 かぐやの観測イメージ

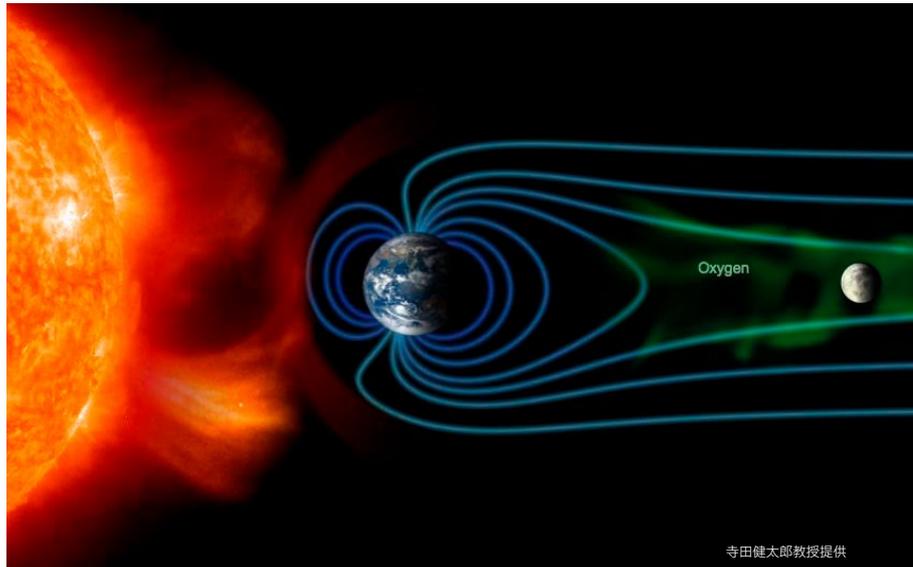


図2 プラズマシートを横切る月（地球軌道を真横からみたところ）

です（図2）。通常、磁気圏は密度がかなり低いのですが、プラズマシートでは、イオンや電子が沈降して密度や温度が高くなった吹きだまりのような状態になっています。

始まりは、偶然の出会い

プラズマシートに注目された経緯を教えてください。

寺田：私は、主に月の石について研究しています。アポロ計画によって採取された月の砂の解析から、酸素の同位体（酸素には ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O という同位体が3つ存在する）の構成が異なる成分が3つあることが、分かっています。まず月本来の同位体比の成分、2つ目は ^{16}O が多い成分²、最後に ^{16}O だけが少ない成分³です。 ^{16}O が多い成分に関しては、2011年に太陽風の酸素イオンが月面に貫入していることで説明されました⁴。一方、 ^{16}O だけが少ない成分については謎のままです。ただ、この成分の同位体比が地球のオゾン層と瓜二つであることから、「地球から月に酸素イオンが流れて出ていると考えれば説明がつく」と、一見、荒唐無稽ともいえる推論を立てたのです。

そんなとき質量分析の研究会で、横田さんと知り合い、「月が地球の夜側に来たときに観測したら、何か地球から流出しているものが見つかると思うので、解析してほしい」とお願いしました。月は高エネルギーの太陽風にさらされていますが、地球の夜側に来たときにはそれが遮られ、地球からの流失物質が見えると考えられるか

らです。すると、「出ていましたよ」との報告。私は興奮しました。ところが、横田さん、冷めていたんですよ。

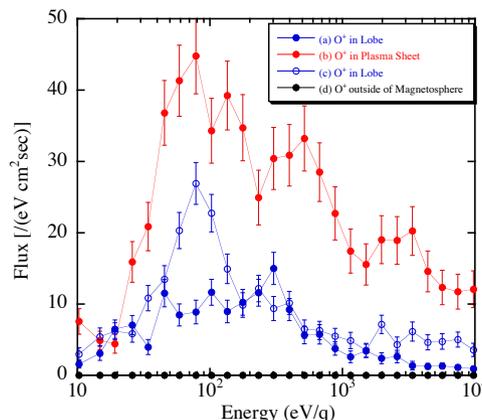
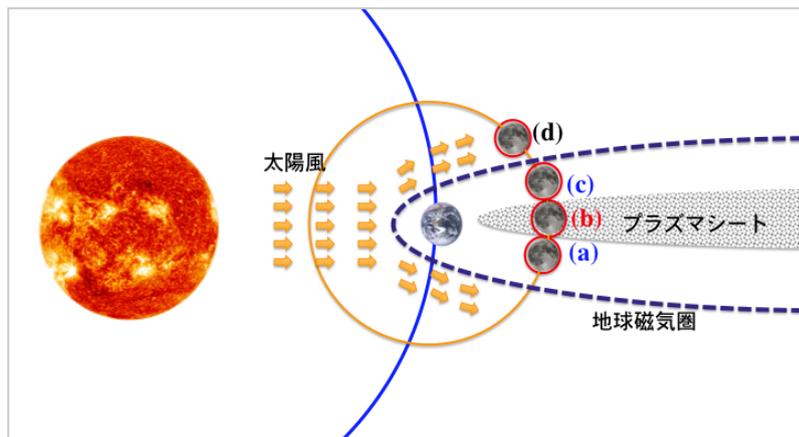
横田：私は全く驚きませんでした。地球の酸素がイオンになって磁気圏に漏れ出ている現象は既知のことだったので、月に届いているかと聞かれれば、「あり得ますね」ということになります。我々プラズマ研究者たちは、どういう物理機構で漏れていくのかに注目していて、月にイオンが届いているかにはあまり関心はなく、ましてや宇宙地球化学的に重要な意味を持つとは考えもしませんでした。ただ、そのことをきちんと観測して研究した論文はなく、こうしたイオン観測はかぐやにしかできないなと思いました。データを解析すると、月とかぐやがプラズマシートを通過するときに、 O^+ が検出されていたのです（図3左）。

お二人の温度差が大きかったんですね。

寺田：温度差という点では、他の共著者も当初は淡々とした感じでした。でも私は高ぶる感情を抑えきれず、解析データを入手するや否や、数週間、睡眠時間3～4時間で、一気に論文を仕上げました。

地球からやってきた O^+ は、月面に貫入できる

太陽風には O^{5+} 、 O^{6+} 、 O^{7+} といった多価の酸素イオンが大量に含まれていますが、地球からの酸素イオンは一価なのです。



寺田健太郎教授提供

図3 左図は地球と月の軌道を真上からみたところ。かぐやと月がプラズマシートを通過したときにだけ、高エネルギーの O^+ が検出された（グラフの赤丸）。

寺田：多価のイオンになるには、高いエネルギーが必要です。太陽と違って地球上層では、 O^+ ができる程度のエネルギーしかありません。今回の論文では、地球から O^+ が月に届いているだけでなく、観測された O^+ のエネルギーが高いことも重要なポイントです。検出された O^+ は1～10keVのエネルギーを持っていました（図3右）。

このくらいのエネルギーを持つイオンは、月の砂の表面から数十nmの深さまで貫入できます。この「貫入できる」ということが、非常に重要です。月の石や砂の質量分析は、ビームを当てて表面を少しずつ削りながら行います。酸素同位体の構成が月本来のものと異なる領域は、表面から数百nmのごくごく浅い所にあり、それより深い所は月本来の同位体比になります。月面のこうした酸素同位体の構成は、酸素イオンが貫入することでできるのです。

つまり、地球からやってくる O^+ が、月面の酸素同位体比に影響を与えていると？

寺田：はい。先ほども触れたように、 ^{16}O が多い成分は太陽風の酸素イオンの貫入で説明されています。 ^{16}O だけが少ない成分すいせいに関しては、彗星が衝突し、氷が蒸発してできた酸素イオンによるという説もあります。問題は、その酸素イオンが月面の砂に入り込めるのかどうかで、論争となっています。しかし、今回検出された O^+ のエネルギーなら十分貫入できます。もう1つ注目すべきは、 ^{16}O が少ない成分の同位体構成です。これは、地球

のオゾン層と全く同じです（オゾン O_3 は、 ^{16}O が3つだと不安定なために選択的に分離してしまい、その結果、オゾン層の酸素同位体の構成は ^{16}O が少ない状態になる）⁵。

このことは知識としては知られていたのですが、これまで月の ^{16}O だけが多い成分と結びついていませんでした。それが、横田さんとの出会いで、パズルのピースがぴたっとはまりました。今回、地球のオゾン層から流失した O^+ が月面に貫入できることが分かり、このために月面の粒子の内部で ^{16}O だけが少ない成分が生じていると考えれば、うまく説明できるのです。

O^+ はオゾン層から月までどのように流出するのですか？

寺田：いくつかのモデルがありますが、まだよく分かっていません。以前の研究から、地上数十kmのオゾン層から高度数百km辺りまで ^{16}O だけ少ない O^+ が到達し得ること⁶や、太陽活動によって高度数百kmから地球大気の酸素が宇宙空間に漏れ出すことは知られていました。ただ一次元のシミュレーション計算で導かれた同位体の変位量は、月の砂で観測されるほど大きな値ではありませんでした。今後の詳細なシミュレーションで証明されれば、我々の説はより確実なものになります。

今回の論文で興味深かったのは、酸素という地球生物由来のものが月に届いていることでした。

寺田：私自身もそこにワクワクしました。地球環境が力学的に安定したのは月の存在によるわけで、そのおかげ

で地球に生命が誕生しました。生命は酸素を生成し、今度はその酸素が月に化学的に作用しているのです。一方、月からも隕石がいまだに飛来していて、太古から現在に至るまで月と地球はお互いに元素をやりとりしているといえます。地球から月に今でも物質が飛んでいっていると分かったとき、童心に帰ったように心が躍りました。それ以来、満月を見るのが楽しくてしかたありません。

Nature Astronomyに投稿されました。

寺田：実は、当初は*Nature*本誌に投稿したんです。こんなに面白い現象は、世界中のたくさんの人に知ってもらいたいと思い、まずは閲覧数の多い*Nature*を考えたのです。すると、編集部の方から、新創刊の*Nature Astronomy*を紹介され、「それならばぜひ」と投稿を決めました。掲載後の反響は大きく、引用件数が多かっただけでなく、多くのメディアにも取り上げられました。海外メディアからの取材も多く、研究室で「もしもし」と普通に電話を受けたら英語だったり、スカイプでの取材を受けたりもしました。多くの人に興味を持っていただけたのでうれしかったですね。

月は地球の映し鏡

ポストかぐやとなる月探査計画はありますか？

横田：JAXAでは、SLIM (Smart Lander for Investigating Moon) という、月着陸プロジェクトが進行中です。このプロジェクトの第一の目的は、目的の場所にピンポイントで着陸できるようにする技術の検証です。

寺田：月からのサンプルリターンはこれまで、アポロ計画が6カ所、ルナ計画が3カ所からで、全て月の表側です。裏側に着陸すれば、興味深いものが見つかるはずですよ。

月を研究する魅力は何でしょう？

寺田：私は、月を調べて地球の過去を復元したいと考えています。月には風化がないので、昔の歴史がそのまま残っています。月のクレーターの形成年代を解析すると、40億～38億年前頃に大量の天体が衝突したことが分かります。一方、地球上では、40億～39億年前より古い時代の岩石は、細かい鉱物の形では堆積岩中に見つっていますが、いわゆる岩盤という形での岩石は見つかりません。つまり、この時期、月—地球システムに激

しく天体が衝突し、当時の地殻は粉々に砕けてしまい、その後、現在の大陸が形成されたと推測されています。同時期、地球では生命が誕生しました。これらの天体の衝突との関連を考えている研究者も少なくありません。

私が解析している月の砂は、ものすごく細かく、粉のようです。顕微鏡で見ると球状のガラス玉があるのですが、これには2種類あります。1つは、かつての火山活動の際に飛び散ったものが地面に落ちるまでに表面張力で丸くなって固まったもの。もう1つは、天体衝突で融けたものが飛び散って同様に固まったもの。成分を調べればどちらの起源かが分かります。月のいろいろな場所で採取されたガラス玉について、その固まった年代を系統的に調べれば、月面にクレーターを作るような天体衝突がいつ、どの程度起こったかも分かります。もし天体衝突が月全体で激しく起こっていたとすると、太陽系全体から見れば月と地球は一心同体ですから、地球にもその影響があったかもしれません。現在の地球は、海の有無や火山活動など風化が激しいため、数十億～数億年前のクレーターはほとんど残っていません。太古の地球の天体衝突史を調べるのに月は良いサンプルなのです。

最後に、今後の抱負をお聞かせください。

寺田：私は、「私たちは、どこから来てどこへ行くのか」に興味があり、隕石を解析しています。隕石の年代が分かれば、太陽系形成の年表ができます。一方、私たちの体を作っている「元素」は、太陽系が誕生する46億年前よりも前に合成されたはずですよ。宇宙の歴史の中で元素が合成されていく順番を考えると、生命に必須な元素は宇宙誕生からすぐにはできないと思われます。では、いつ頃、どのようにしてできたのでしょうか？ 私は、隕石の同位体の研究から解明したいと思っていて、そのための質量分析装置の開発も行っています。新しいものを解析するには、新しい装置を作るしかありませんから。

ありがとうございました。

聞き手は田中明美（サイエンスライター）

1. Terada, K. *et al. Nature Astronomy* **1**: 0026 (2017).
2. Hashizume, K., & Chaussidon M. *Nature* **434**, 619-622 (2005).
3. Ireland, T. R. *et al. Nature* **440**, 775-778 (2006).
4. McKeegan K. D. *et al. Science* **332**, 1528-1532 (2011).
5. Thiemens, M. H. *Science* **283**, 341-345 (1999).
6. Hiraki, Y. *et al. Geochim. Cosmochim. Acta* **84**, 525-533 (2012).



1939年、机に向かうウィンストン・チャーチル。歴史だけでなく科学に関する著作も多く、そのテーマは進化論から核融合エネルギーまで多岐にわたる。

チャーチルの地球外生命論

英国の偉大な政治家ウィンストン・チャーチルが地球外生命の存在の可能性について科学者顔負けの考察を繰り広げるエッセイが発見された。

ウィンストン・チャーチル（1874～1965）は、多彩な才能の持ち主で、第二次世界大戦中の英国の首相として、また、20世紀で最も影響力のあった政治家の1人として有名だけでなく、洞察力に富む歴史家、ノーベル文学賞を受賞した文筆家、雄弁家としても知られる。彼はまた科学とテクノロジーにも強い関心を寄せていた。

名門に生まれ、陸軍士官学校を卒業して陸軍に入った彼は、1896年、インドに赴任していた22歳のときにダーウィンの『種の起源』と物理学の入門書を読んだ。軍隊

での体験記で文名を上げ、やがて政治家に転身したが、1920年代から30年代にかけては、新聞や雑誌に進化論や細胞に関するポピュラー科学エッセイも執筆していた。1931年に *The Strand Magazine* に書いた「Fifty Years Hence (50年後)」¹ という記事では、核融合エネルギーについて解説し、「1ポンド（約0.45kg）の水に含まれる水素原子を互いに結合させてヘリウムを形成させることができれば、1000馬力のエンジンをまる1年間動かすことができる」と書いている。おそらく、彼の友人で、後

に科学顧問となる物理学者Frederick Lindemannとの会話から情報を得たものと思われる。

第二次世界大戦中、チャーチルはレーダーの開発と英国の核開発計画を支持した。また、「電波天文学の父」と呼ばれるBernard Lovellをはじめ、科学者たちとも定期的に会っていた。ドイツ軍の潜水艦Uボートへの対策に統計学を用いることをめぐって空軍元帥Arthur Harrisとの間で交わされた言葉には、チャーチルの考え方がよく表れている。「爆撃屋」のニックネームを持つHarrisが、「我々はこの戦争を武器で戦うのでしょうか、それとも計算尺で戦うのでしょうか？」と不満を言うと、彼は「計算尺を試してみようではないか」と答えたという²。

チャーチルは1940年代初頭にLindemannを雇い入れ、英国首相として初めて科学顧問を置いた。彼は英国に科学を大切にす環境を作った。研究機関や望遠鏡や技術開発には政府からの助成金が支給され、戦後、分子遺伝学からX線結晶学まで、幅広い分野で数々の発見と発明を生み出すことになった。

私はチャーチルと科学の関わりについてこの程度は知っていたが、2016年に米国立チャーチル博物館（ミズーリ州フルトン）を訪問した際に、Timothy Riley館長からチャーチルのエッセイをタイプした原稿を手渡されたときにはすっかり驚いてしまった。チャーチルは、「Are We Alone in the Universe (宇宙には我々しかいないのか?)」という題名の11ページのエッセイの中で、地球外生命探査について時代を先取りした考察を繰り広げていた。

彼が最初の草稿を書いたのは、欧州で戦争が始まる直前の1939年で、英国の日曜大衆紙*News of the World*に載せるためだったと思われる。当時のタイトルは「Are We Alone in Space?」だった。そして1950年代後半に、彼の本を出していた出版業者Emery Revesの南仏の別荘に滞在しているときに、軽く手を入れた。このとき、科学的理解と用語の変化を反映して、タイトルを「Are We Alone in the Universe?」に改めている。Revesの妻Wendyは、1980年代にこの原稿を米国立チャーチル博物館アーカイブに寄贈した。

2016年5月に博物館長に就任したRileyが原稿を発見したのは、最近のことだという。彼の知るかぎり、このエッセイはRevesの個人コレクションになっていて、一度も公表されたことがなく、科学的にも文学的にも検証

されたことはないという。自分がこのエッセイを検証する最初の科学者なのかもしれないと思ったときの私の興奮を想像してみてほしい。

以下ではチャーチルの考察のあらましを紹介する。多くの政治家が科学を敬遠している今、科学にこれほど深い関心を寄せていた指導者がいたことに感動を覚えずにはいられない。

現代的な思考

チャーチルの論考には、宇宙生物学における多くの現代的な議論が反映されている。彼は本質的に、「宇宙の広大さを考えれば、地球上の人類が唯一無二の存在であると信じるのは難しい」とする「コペルニクス原理」の上に立っている。エッセイは、生物の最も重要な特徴を定義することから始まる。彼によれば、それは「子孫を産んで増えていく」能力だ。続いて、一部のウイルスは結晶化でき、分類が困難である点を指摘して、「比較的高度に組織化された生物」（おそらく多細胞生物）だけを考えることにしようと決める。

彼は最初に、「我々が知っている全ての生物は水を必要とする」と主張する。生物の体も細胞も水を主成分としている。水以外の液体を利用する生物の可能性を最初から否定してはいけないが、「現段階でのいかなる知識も、我々がそうした可能性を考えることを許さない」とする。液体の水の存在は、火星や、土星および木星の衛星や、太陽系外惑星での地球外生命探査の指針にもなる。地球上の生命の誕生に不可欠だった水は、宇宙に豊富に存在している。水は、ほとんど全ての物質を溶かすことができる万能溶媒で、リン酸塩などの化学物質を細胞内に運び込んだり、運び出したりすることができる。

チャーチルは次に、いわゆる「ハビタブルゾーン」を定義する。恒星の周りの、温度が高すぎもせず低すぎもせず、岩石惑星の表面に液体の水が存在するのにちょうどよい、限られた領域のことである。チャーチルは、生命は「マイナス数度から水の沸点まで」の温度でしか生きられないとし、地球の温度が太陽からの距離によって決まる仕組みを説明する。惑星が大気を保持する能力についても考察する。気体が高温になるほど分子の運動速度が大きくなり、惑星から逃げ出しやすくなるため、長



期にわたって惑星上に気体をとどめておくには、より強い重力が必要になる。

これらの要素を考え合わせると、太陽系で地球以外に生命がある可能性がある惑星は火星と金星だけである、というのがチャーチルの結論だった。彼は、火星より外側の惑星は温度が低すぎるとして除外し、水星については、日の当たる側は温度が高すぎ、日の当たらない側は低すぎるとして除外し、月と小惑星については、重力が小さすぎて大気をとどめておけないとして除外した。

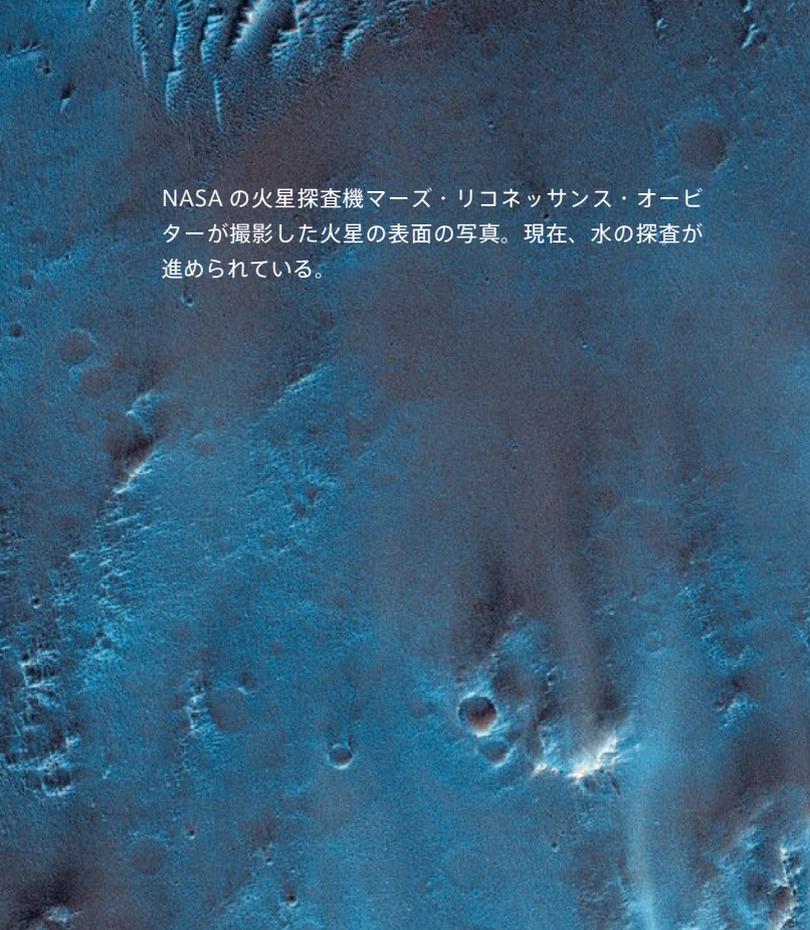
チャーチルがこのエッセイを書き始めたのは、H・G・ウェルズの1898年の小説をもとにしたラジオドラマ『宇宙戦争』が1938年に米国で放送されたばかりで、マスコミが「火星フィーバー」をあおっていた頃である。火星に生命がいるのではないかという推測自体は19世紀後半からあった。きっかけは、1877年にイタリアの天文学者ジョヴァンニ・スカパレリが、火星の表面に「直線的な模様 (canali)」が見えると報告し、これが「canal (運河)」と英訳されたことで、何らかの文明によって建設された人工物だと考えられるようになってしまった。やがて、これらの模様は目の錯覚であることが明らかになっ

たが、火星人の概念は人々の心にいつまでも残った。火星人を扱うSF小説は枚挙にいとまがない。その頂点に位置するのが、1950年に米国ダブルデイ社から出版されたレイ・ブラッドベリの『The Martian Chronicles (火星年代記)』だった (英国では、1951年にルパート・ハート＝デーヴィス社から「Silver Locusts (銀のイナゴ)」というタイトルで発表された)。

壮大な展望

チャーチルは次に、他の恒星が惑星を持つ可能性を評価する。前提となるのは、「太陽は銀河系にある数十億個の恒星の1つにすぎない」という認識と、1917年に天体物理学者James Jeansが提案した惑星形成モデルである。これは、恒星のすぐ近くを別の恒星が通りかかるときにガスが引きちぎられ、それが固まって惑星が形成されるというモデルだ。チャーチルは、恒星同士がそこまで接近することは非常にまれであり、「我々の太陽のように惑星を持つのは本当に例外的で、唯一無二の恒星であるかもしれない」と推論する。

NASAの火星探査機マーズ・リコネッサンス・オービターが撮影した火星の表面の写真。現在、水の探査が進められている。



NASA/JPL/UNIV. ARIZONA

ここからがチャーチルの本領発揮だ。続く「けれどもこの推論は、特定の惑星形成モデルに依拠している。もしかすると、このモデルは間違っているのかもしれない。我々は、何百万もの連星があることを知っている。連星がこれだけたくさんあるのだから、惑星系がもっとあっても不思議はないではないか？」というくだりには、彼の健全な科学的懐疑主義が見てとれる。

実際、今日の惑星形成理論はJeansの理論とは大きく違っていて、岩石惑星のコアは多数の微小天体の降着によって形成されたと考えられている。チャーチルは、「我々の太陽が宇宙でただ1つの惑星系を持つ恒星であると信じるほど、私はうぬぼれていない」と言う。

こうして彼は、太陽系外惑星のかなりのものが「表面に水を保持し、大気をとどめておくのにちょうどよい大きさ」で、その中のいくつかは「生命の存在に適した温度を維持できる程度に主星から離れている」だろうと結論付けた。

1990年代以降、数千個の太陽系外惑星が発見されているが、チャーチルがこのエッセイを書いたのは、その何十年も前のことだ。また、天文学者のFrank Drakeが、

宇宙広しといえども電波を使って通信できるような生命体がどれほど少ないかを1961年に確率的に見積もっているが、これよりも古い。ケプラー宇宙望遠鏡のデータから推定すると、銀河系には、太陽と同じくらいかそれよりも小さい恒星の周りのハビタブルゾーンに、地球サイズの惑星が10億個以上あるようだ³。

チャーチルは、太陽系外惑星までの遠さを考え、そうした惑星に「動物や植物がいるかどうか」を私たちが知ることは決してないだろうと結論付けた。

より大きな描像

チャーチルは太陽系探査が実現する可能性は高いと考えていて、「いつの日か、もしかするとそう遠くない将来、月や、もしかすると金星や火星にさえ行けるようになるかもしれない」と書いている。しかし、恒星間の航行や通信は本質的に難しいと考えていて、太陽から最も近い恒星まで行って帰ってくるのに光でも5年はかかり、銀河系から最も近い大きな渦巻星雲（アンドロメダ星雲のこと。当時は渦巻銀河を「渦巻星雲」と呼んでいた）は、その何十万倍も遠いとした。

地球外生命についての彼の考察は、「星雲は数十万もあり、それぞれに数十億個の恒星があるのだから、生命が存在できるような惑星を持つ恒星は限りなく多いと思われる」という楽観的な見積もりで終わる。ここから、チャーチルが天文学者エドウィン・ハッブルの研究成果を知っていたことが分かる。ハッブルは、1920年代後半から1930年代初頭にかけて、銀河系のほかにも多くの銀河があることを発見していた。最近の見積もりによると、その数は約2兆個であるという⁴。

しかし、当時の厳しい時代背景を反映して、チャーチルは次のように続けている。「私個人としては、地球上で我々が築き上げた文明など、大層なものとは思っていない。だから、この広大な宇宙の中で、思考する生物が地球にしか存在しないとは思えないし、広大な時空に現れた生物の中で、ヒトが精神的にも肉体的にも最高の発達を遂げているとも思えない」。

それから80年近く経った今、チャーチルを夢中にさせた問題は、科学研究の最もホットなテーマの1つになっている。火星では地中で生命の兆候を探すプロジェクト

2017年4月13日にNASAは、土星の氷衛星エンセラダスのプリューム（表面の割れ目から宇宙空間に吹き出している水蒸気と氷粒子）に水素分子が含まれていることを確認したと発表した。この水素分子は、海底に熱水噴出孔があり、そこで海水と岩石が反応したことで生じた可能性が高いという。水素は微生物のエネルギー源になり、また太古の地球は、こうした環境で生命をはぐくんできたと考えられている。



NASA/JPL-CALTECH

が進められているし、金星の気候のシミュレーションは、この惑星がかつては生命が住める環境だったことを示唆している⁵。天文学者は、数十年後には、太陽系外惑星の大気中に生命が存在している、あるいは過去に存在していた兆候を発見するか、少なくとも、生命の存在がどのくらいまれであるかを絞り込むことができるだろうと期待している⁶。

タイムリーな発見

このエッセイからは、チャーチルが社会の発展には科学と技術の成果が欠かせないと考えていたことがよく分かる。彼は、ケンブリッジ大学（英国）にチャーチル・カレッジを設立するための準備に携わっていた1958年に、「人類を科学と工学の新世界に導くことによってのみ、我々は将来にわたってこの地位を守り、生きていくことができる」と記している⁷。

けれども彼は、人文科学を理解していない科学者が、道徳への配慮なしに動いてしまう可能性を危惧していた。「我々の世界には科学者が必要だが、科学者の世界は必要ない」と言っていた⁸。チャーチルは、科学を「人類の主人ではなく僕にする」ため、人道主義的価値観にのっとった適切な指針を置かなければならないと感じていた。

1949年にマサチューセッツ工科大学（米国ケンブリッジ）の卒業式で述べた式辞でも、「現代科学のこれだけの資源がありながら、世界の飢饉を回避することができないなら、我々全員に責任がある」と語っている。

チャーチルは科学のファンで支持者だったが、人間的な価値観に立って重要な科学的問題を考察していた。今日のような政治的状況では、政治家はチャーチルに倣って常任科学顧問を任命した方がよいだろう。そして彼らにしっかり働いてもらうのだ。

（翻訳：三枝小夜子）

Winston Churchill's essay on alien life found

Vol. 542 (289–291) | 2017.2.16

Mario Livio

Mario Livioは天体物理学者で、作家でもある。近刊は『WHY? What Makes Us Curious（なぜ？ 好奇心の起源）』。

1. Churchill, W. 'Fifty Years Hence' *The Strand Magazine* (December 1931).
2. Jones, R. V. in *Churchill* (eds Blake, R. & Louis, W. R.) 437 (Clarendon Press, 1996).
3. Dressing, C. D. & Charbonneau, D. *Astrophys. J.* **767**, 95 (2013).
4. Conelice, C. J., Wilkinson, A., Duncan, K. & Mortlock, A. *Astrophys. J.* **830**, 83 (2016).
5. Way, M. J. *et al.* *Geophys. Res. Lett.* **43**, 8376–8383 (2016).
6. Livio, M. & Silk, J. 'Where Are They?' *Physics Today* (in the press).
7. Churchill, W. 'Churchill College' *The New Scientist* 12 (15 May 1958).
8. Humes, J. C. *Churchill: The Prophetic Statesman* 82 (Regnery History, 2012).

AIによる がん診断支援が 現実味を帯びてきた

医学

皮膚がんを画像解析だけで判定できるようコンピューターを訓練したところ、一部の皮膚がんについては皮膚がん専門医と同程度の精度で識別できた。これは医学的診断の未来にどのような意味を持つのだろうか？

1960年代に放映されたSF連続テレビ番組『スター・トレック』では、医師のレナード・マッコイが「トライコーダー」と呼ばれる携帯診断装置を使って、船長のジェイムズ・カークをはじめエンタープライズ号の乗組員たちの健康状態を調べるという未来像が描かれていた。当時は想像上のものでしかなかったが、今ではヒトの皮膚を画像化して何種類かのがんを識別できるモバイル装置が登場^{1,2}するなど、ヒトがかかる病気を非侵襲的に診断できる装置が現実のものになりつつある。今回、スタンフォード大学（米国）のAndre Estevaらは、画像認識技術を用いた診断をさらに次のレベルへと押し上げる成果を示し、*Nature* 2017年2月2日号115ページで報告している³。彼らは、コンピューターを訓練することで、少なくとも皮膚がんの専門医と同程度の正確さで皮膚病変のデジタル画像を識別できることを実証した。

皮膚に病変が出る疾患は、3つの主要グループに分類できる。①非増殖性のもの（にきびをはじめとする炎症性疾患など）、②良性腫瘍（細胞増殖性疾患の一種で、健

康に有害な影響を及ぼさない）、そして③悪性腫瘍である。無秩序に増殖するがん細胞や転移がん細胞からなる悪性腫瘍は、体内の別の部位へと移動する能力を持つため、特に医学的に注意が必要である。がんの中には、表面の手触りなどの「非視覚的」な手掛かりが診断の助けになるものもあるが、皮膚科医は主に視診によって皮膚病を分類する。皮膚科医が患者の体を実際に診察した場合と、病変の写真調べた場合とを比べると、皮膚がんの種類によっては診断結果に「比較的良好」～「ほぼ完璧」な一致が見られたという報告がある⁴。従って、初期診断を下す、または経過観察を必要とする状態かどうかを特定するには、画像評価だけで十分な可能性もある。画像を用いた評価が正しいかどうかは、病変を生検（病変部の組織試料を採取して顕微鏡検査などで細胞の異常の有無を明らかにする検査法）によって直接評価している診療所で確かめることができる。

Estevaらは今回、ディープラーニングと呼ばれるアルゴリズム技術を使って、パターン認識で人工知能を発達させるようコンピューターを訓練し、皮膚病を画像分析によって判定できるようにした。医師たちとコンピューターが判定の際に使う視覚的な分析方法には、おそらく多くの違いがある。例えば、皮膚科医が黒色腫と呼ばれる悪性のがんかどうかを診断する場合、ABCDE [各文字は、評価する特徴の頭文字。例えばAはasymmetrical lesion shape（非対称性の病変）の略]と呼ばれる評価基準⁵を用いることが多く、また、病変部の微細な視覚的特徴の識別は、医師自身の経験に基づいている。一方、コンピューターは、必ずしもこの意思決定のアプローチをまねる必要はない。その疾患に関係する手掛かりとなるパターンについて独自の評価基準を見つけ出せばよいわけで、人間の画像診断法によって規定されたルールを使わずにデータセットを使って訓練を積むのである。コンピューターはまた、人間の目では感知することのできない画像中の情報も評価できる。

Estevaらは、コンピューターを訓練するため、診断済みの2032の皮膚病変例についての12万9450の皮膚病変画像とその画像の病名のセットを使用した。病名は、皮膚科医が病変の非侵襲的な視診あるいは生検によって診断している。

Estevaたちは次に、以前に見せたことのない皮膚病変

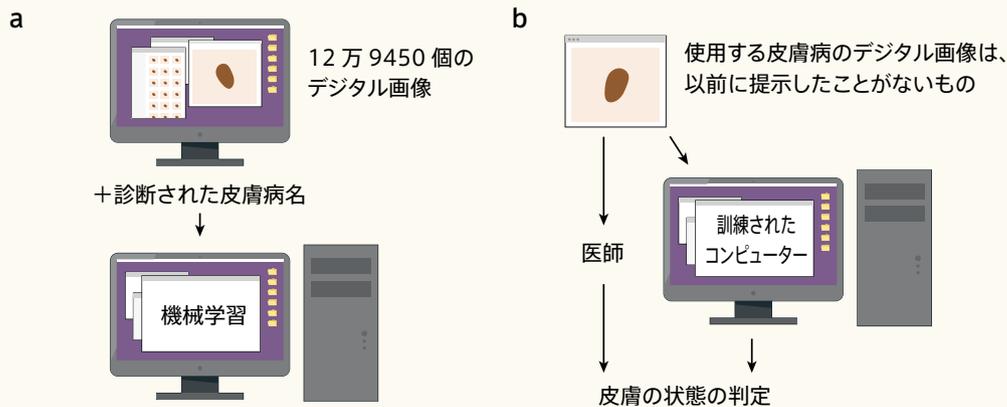


図1 コンピューターによる正確ながんの判定

- a Estevaら³は、医学的に診断された病変のデジタル画像12万9450枚をコンピューターに提示し、ディープラーニング手法によって皮膚病を認識できるよう訓練した。
- b 訓練されたコンピューターによる判定の正確さを調べるため、コンピューターと21人の皮膚科専門医に初見となる画像を提示し、病変がさらなる医療を必要とする状態かどうかを判定する試験を行った。画像は2種類の細胞から生じた良性と悪性の病変のもので、診断が確定している。コンピューターによる判定結果は、医師たちと同程度、あるいは医師たちよりも優れていた。

のデジタル画像（生検によって診断済み）のセットを、訓練されたコンピューターと21人の医師に見せた上で、画像中の病変にさらなる医学的な介入が必要かどうかを質問した。するとコンピューターによる診断精度は、皮膚科医の診断と同程度、あるいはそれよりも優れていることが分かった（図1）。（人間と機械のこの競争は、1997年にコンピューターのディープブルーがチェスの世界チャンピオン、Garry Kasparovを破ったときのことを思い出させる）。ただしEstevaらは、医師の診断能力が、病変の評価をデジタル画像を使って行ったのか、実際に患者を診察したかで変わるかどうかは調べていない。

画像を用いた検証試験は、それぞれ良性病変と悪性病変を含む2項目について行われた。一方は、ほくろや黒色腫などメラノサイトと呼ばれる着色性皮膚細胞に由来する病変、もう一方は、良性脂漏性角化症や非メラノサイト性がんなど主としてケラチノサイトと呼ばれる皮膚細胞に由来する病変だ。しかし、コンピューターの判定性能を評価する際には、皮膚科医を悩ませるいくつかの難しい問題についても検討する必要がある。例えば、著者たちは、黒色腫と良性脂漏性角化症など外見がよく似た病気をコンピューターが見分けることができたかどうかについては示していない。またコンピューターが、メ

ラン欠乏性黒色腫と悪性のがんをどれくらい正確に識別できるかも分かっていない。

Estevaらが用いた画像の訓練セットのサイズは、類似のアプローチ⁶で使われたセットの約100倍大きい。今回、機械による判定がうまくいったのはこのためかもしれない。そして、機械による判定は今後さらに改良の余地がある。システムにもっと多くのデータが加えられれば、コンピューターは誤りを修正しながら学び、その性能をどんどん向上させる。Estevaらの研究は、改善曲線のピークの地点ではなく、最初の地点なのだ。著者らが今回の報告で用いたモデルアルゴリズムはInception v3と呼ばれるものだが、今では、訓練時間と精度がさらに改良された新しいプログラムとアルゴリズムが使えるようになっている。

しかし、アルゴリズムの正確性は、参照情報と同程度あるいはそれ以下でしかない。もしコンピューターが病変を悪性と判定しても、病理学者が生検で確認して悪性ではないと判定したなら、その機械判定は「不正確」だったということになるだろう。ただし、病理学者よりコンピューターが正しい場合はどうだろうか？ 機械と人間の相対的な判定精度については、診断された病変が時間経過とともにどのように進行したかを追跡することで検証できるだろう。

人工知能を使った診断支援技術により、高品質な医療を受けやすくなるという社会的恩恵がもたらされるのは明らかだと思われる。こうした技術を用いたスマートフォンアプリが登場すれば、既存の医療システムで提供されるよりも個別化された医学的評価を、より効果的かつ容易に、しかも低コストで得られるようになる可能性がある。今回の皮膚がん検出を原理の証明として使うことにより、画像に基づいたがん診断を行っている放射線領域などの他の医学分野にも変革がもたらされる可能性もある。

しかし、人工知能による病気の診断支援は、意図せず有害な結果をもたらすかもしれない。医療スタッフは、時折はコンピューターによる判定結果を覆すこともあるだろうが、普段は機械の診断決定に従うだけの単なる技術者になってしまうことはないだろうか？ また、疑わしい病変に対して、患者が医師の診察を受けることなく自己診断を下すことが多くなれば、皮膚がんのリスクが高い人が外科医による定期的な皮膚検査を受けなくなる可能性が高くなるのではないだろうか。定期検診を受けていれば、がんによって命を奪われずに済む可能性があるにもかかわらずだ。

治癒の可能性が最も高いがんの早期に、正確かつ簡便に診断を下せるというのは、現実というよりむしろ「SFの世界でのこと」程度に長い間考えられてきた。しかし、スター・トレックのトライコーダーのスマートフォン版が現実のものとなるまでには、それほど長い時間はかからないだろう。私たちは心の準備をし、そしてしっかりと意思を固めて、勇気を持ってこの技術をこれまでどんな技術も到達したことのない場所へと押し上げるべきだ。 ■

(翻訳：古川奈々子)

The final frontier in cancer diagnosis

Vol. 542 (36–38) | 2017.2.2

Sancy A. Leachman & Glenn Merlino

Sancy A. Leachman はオレゴン健康科学大学（米国）に所属
Glenn Merlino は米国立がん研究所に所属

1. Maier, T. *et al.* J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol. **29**, 663–667 (2015).
2. Gareau, D. S. *et al.* Exp. Dermatol. <http://dx.doi.org/10.1111/exd.13250> (2016).
3. Esteve, A. *et al.* Nature **542**, 115–118 (2017).
4. Warshaw, E. M., Gravely, A. A. & Nelson, D. B. J. Am. Acad. Dermatol. **72**, 426–435 (2015).
5. American Academy of Dermatology Ad Hoc Task Force for the ABCDEs of Melanoma. J. Am. Acad. Dermatol. **72**, 717–723 (2015).
6. Carrera, C. *et al.* JAMA Dermatol. **152**, 798–806 (2016).

異種動物の体内で作製された膵臓で糖尿病を治療する

再生医療

ラットの体内で成長させたマウスの膵臓^{すいぞう}を、1型糖尿病モデルマウスに移植すると、血糖値が制御された。また、拒絶反応は短期間の免疫抑制剤投与だけで回避できた。この成果から、治療用に臓器を成長させる興味深い方法が垣間見えてきた。

移植のためのヒト臓器は極度に不足している。この解決策の1つとして、動物の体内でヒト臓器を成長させる方法が考えられる。この方法は概念的には簡単であるが、技術的（および倫理的）な課題が伴う。現時点ではまず、異なる種の体内で固形臓器を成長させることができるかどうか、また、それを疾患の治療に用いることができるかどうかを明らかにする必要がある。このほど、東京大学医科学研究所の山口智之^{やまぐちともゆき}および中内啓光^{なかうちひろみつ}（スタンフォード大学兼任）らは、ラットの体内でマウスの膵臓を成長させることに成功しただけでなく、摘出後に膵島（ランゲルハンス島）に分離して糖尿病モデルマウスに移植するとマウスは糖尿病から回復することを実証し、*Nature* 2017年2月9日号191ページに報告した¹。

哺乳類の成体の臓器は構造的に複雑で、細胞量が非常に多い。成体の臓器となるためには、特殊化した多数の細胞種から構成される数十億個の細胞が一体となり、1

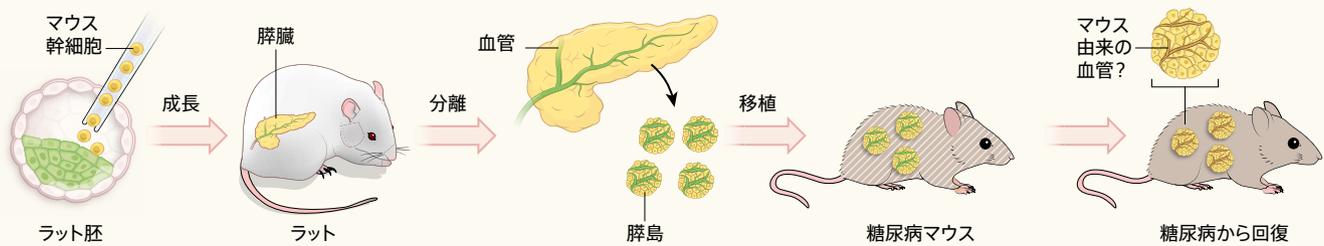


図1 ラット体内で成長させたマウス膵臓により、糖尿病マウスを治療

山口ら¹は、膵臓発生のマスター調節因子である *Pdx1* 遺伝子を欠損するラット初期胚に、マウスの多能性幹細胞を注入した。この手法で作製されたラットは通常、全ての組織においてラットとマウスの両方に由来する細胞系譜を含むが、この胚では、膵臓はマウスの細胞からできる。膵臓は、マウス由来の細胞（黄色）と、両方の種の細胞系譜が混在した血管や一部の支持組織（緑色）から構成される。このラット由来のマウス膵臓から、インスリン分泌細胞を含む膵島と呼ばれる細胞クラスターを分離し、それを1型糖尿病モデルマウスに移植した。移植された膵島は、糖尿病によって生じる高血糖を抑制した。この膵島のラット由来血管は時間の経過とともに消失したが、おそらくこれはレシビエントマウス自身の血管によって置き換えられたと考えられる（図は引用文献1より）。

つの解剖学のおよび機能的な単位としてまとまらなければならぬ。培養皿で細胞を組み立てることで臓器前駆体類似物（オルガノイドと呼ばれる）を作製する技術が習得され始めているが²、オルガノイドの大きさは顕微鏡サイズで、基本的な組織化が見られるのみであり、成体の臓器にはほど遠い。つまり、幹細胞生物学や生物工学が進歩した現在にあっても、成熟した移植可能臓器を *in vitro* で作製できるようになるのはずいぶん先のことだと考えられる。

新しいヒト臓器を得る別の方法として、異種動物の体内でヒト臓器を成長させる方法が考えられる³。近年、この「異種間での臓器成長」という新しいアイデアの可能性が探られていて、近縁な2つの実験動物であるマウスとラットを使って研究が始まっている。中内らの研究グループは2010年に、マウス体内でラットの膵臓を成長させることに成功した⁴。しかし、その膵臓は成長してもマウスの膵臓の大きさにとどまり、体がはるかに大きいラットに移植して機能を評価するのに十分な量の膵島が得られなかった。

今回、山口らは、2010年とは逆の実験を行った。ラットの体内でマウスの膵臓を成長させたのだ。この成果は、

マウスの多能性幹細胞（体のあらゆる細胞を作り出すことができる）を、受精後数日のラット胚（胚盤胞）に注入することで達成された。注入されたマウス幹細胞はラット幹細胞と混ざり合って共に増殖および分化を行い、ラットに成長する。つまり、ほぼ全ての臓器や組織は、ラットとマウスの両方の細胞の混合物になる。しかし山口らは、遺伝的改変により膵臓発生のマスター調節因子である *Pdx1* 遺伝子⁵を欠損させた胚を用いることで、ラット細胞由来の膵臓の成長を抑制した。そうすることで、膵臓本体は、完全にマウス細胞だけで作られる（図1）。

次に、このようなラットからマウス膵臓を摘出し、膵臓内で内分泌を担う「膵島」と呼ばれる球状の細胞クラスターを分離したとされる球状の細胞クラスターを分離した。膵島には、インスリンを分泌するβ細胞が含まれている。この膵島を、化学的にβ細胞を除去して糖尿病を発症させたマウスに移植した。このマウス（ストレプトゾトシン誘発糖尿病マウス）は、β細胞の不可逆的な喪失により起こる非常に重症型の糖尿病である1型糖尿病（通常は小児期に発症）のモデルとして知られる⁶。移植された膵島は生着し、もともとのβ細胞に置き換わった。そして、インスリンを分泌して血糖値の上昇を抑制

し、血糖値を正常範囲内に戻すことができた。

異種であるラットの体内で成長させた膵臓では、細胞の大部分はマウス細胞由来であるが、血管や支持細胞の一部はラット由来である。よって、マウスへの膵島移植の後にこれらの細胞が長期的に破壊的な免疫応答を誘導する可能性が考えられる。しかし山口らは、マウスに軽度の免疫抑制剤を膵島移植から5日間投与しただけで、破壊的な免疫応答を阻止することができた。その上、ラット由来の細胞は時間の経過とともに移植膵島から消失したという証拠も示している。

マウスの膵島は比較的小さな細胞クラスターで、各膵島は数百個の細胞しか含んでいない。膵島内のラット由来血管は、移植の際にマウスの免疫系に認識されて迅速に除去されるため、長期的な免疫応答は起こらないと考えられる。おそらく、移植と同時にレシピエントマウスの血管が膵島細胞クラスターに迅速に進入して血液供給が再確立され、組織の破壊を防いでいるのだろう。ただし、ほとんどのヒト治療での最終目標は、臓器全体の移植である。臓器全体の場合は、血管は臓器内に深く埋め込まれている上に大規模な血管構造であるので、レシピエントの体内でこれほど迅速に置き換えが進むことはないと考えられる。そのため、より強い免疫応答と大きな臓器損傷を引き起こされる可能性がある。

また、この戦略を用いて腎臓や心臓などのさらに複雑な臓器を成長させるのは、はるかに困難なことだと予想される。腎臓や心臓は、膵臓とは異なり、別個の生物学的経路によって制御される複数種の前駆細胞から生じるからだ^{7,8}。腎臓や心臓の成長を全体として抑制するには、いくつかの遺伝子を欠失させるといった簡単な方法では行えないと考えられるので、おそらく、より複雑な戦略が必要であろう。

マウスとラットは異なる種であるが、遺伝的構成の多くは共有されている。それにもかかわらず、マウス組織でのラット細胞の増殖あるいはマウス組織へのラット細胞の統合に対する分子障壁はいまだ明らかになっていない⁴。そのため、次の課題として、今回と同様の戦略を用いてより遠縁の種の臓器を成長させることができるのだろうか、といった疑問が生じる。おそらく遠縁の種間では分子障壁の問題が大きくなると考えられるからだ。このような戦略の最終目標は、ヒト臓器をブタやヒツジの

体内で成長させることだろう。ブタやヒツジの臓器はヒト臓器に匹敵する大きさである。しかし、ヒト細胞が動物胚とあまり混じり合わないことや、異種動物の免疫系によってヒト臓器が拒絶されることなど、おそらく技術的に重要な課題が待ち受けている。

ヒト間での臓器移植の後には、臓器の拒絶を防ぐために、生涯にわたって免疫抑制剤を用いなければならない。免疫抑制剤には毒性があり、重篤な副作用を示す。しかし、患者特異的な人工多能性幹 (iPS) 細胞を用いてこのような異種間手法で移植用臓器を作ることができれば、理論的には免疫適合性臓器を作り出すことができる。iPS細胞は、患者の皮膚あるいは血液の細胞を採取し、その細胞に *in vitro* で多能性状態を獲得させることで作製された一種の多能性細胞である。例えば、iPS細胞から得られたヒト膵島は、細胞のドナーと免疫学的に適合すると考えられる。山口らは今回の実験で、胚由来の多能性幹細胞とともに iPS細胞も用いており、^{げっし}齧歯類では両方の技術が利用可能なことを示している。

ヒト臓器を動物体内で成長させる手法の開発には、技術的に多くの課題を克服し、倫理的問題や法的な問題に取り組む必要があると考えられる。しかし、臨床では移植用の臓器が緊急に必要なこと、また利用可能な他の良い選択肢がないことを考えると、このような研究を継続する必要がある。

(翻訳：三谷祐貴子)

Interspecies pancreas transplants

Vol. 542 (168–169) | 2017.2.9

Qiao Zhou

ハーバード大学 (米国マサチューセッツ) 所属

1. Yamaguchi, T. *et al. Nature* **542**, 191–196 (2017).
2. Clevers, H. *Cell* **165**, 1586–1597 (2016).
3. Rashid, T., Kobayashi, T. & Nakauchi, H. *Cell Stem Cell* **15**, 406–409 (2014).
4. Kobayashi, T. *et al. Cell* **142**, 787–799 (2010).
5. Offield, M. F. *et al. Development* **122**, 983–995 (1996).
6. Bluestone, J. A., Herold, K. & Eisenbarth, G. *Nature* **464**, 1293–1300 (2010).
7. McMahon, A. P. *Curr. Top. Dev. Biol.* **117**, 31–64 (2016).
8. Srivastava, D. *Cell* **126**, 1037–1048 (2006).

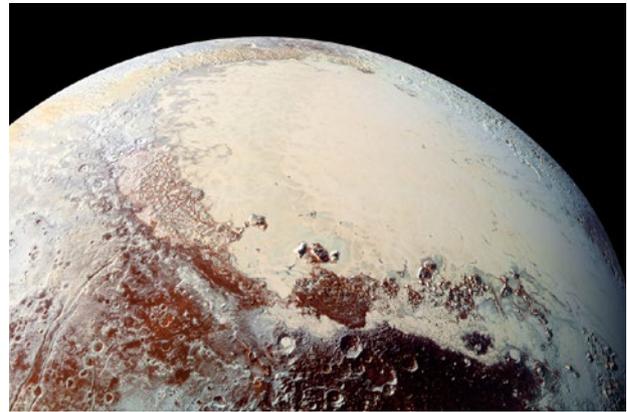
冥王星の復讐

惑星に分類される天体の数を大幅に増やすという提案がなされ、数々の興味深い論点を提起している。

英国チェシャー州マックルズフィールドにあるジョドレルバンク天文台には、美しい機械式の太陽系儀が天井からつり下げられており由緒あるもののように見える。しかし、この太陽系の模型は、2013年に設置された非常に新しいものだ。なぜ新しいものなのか。この太陽系儀自体が大きなヒントになっている。この太陽系儀を見上げる場所に集まった子どもたちには、太陽系の惑星が8つ描かれた課題シートが与えられ、それぞれの名前を記入するようになっている。2006年に国際天文学連合（IAU）が新しい惑星の定義を決定して以降、冥王星は描かれていない（若い読者のために説明すると、年長の読者は、9つの惑星が太陽のまわりを回っていると学校で習ったのだ）。

冥王星の格下げは、科学者全員が受け入れたものではなかった。そしてこのほど、一部の科学者が冥王星を惑星として復活させる提案を作成した（提案した科学者らは、米国NASAが冥王星に飛ばした「ニューホライズンズ」探査機に関係しているのだが、これは決して偶然ではない。ニューホライズンズは計画時には惑星探査機だったのだが、2015年に冥王星に到達した時には天体探査機となっていた）。ジョドレルバンク天文台の職員は、この新しい太陽系儀が時代遅れになるような提案を恐れていることは間違いない。だが、この新しい太陽系儀の下に集まっていた生徒たちも、この提案のことを心配すべきだと思う。なぜならば、この提案が採択されれば、課題シートに書かなければならない太陽系内の惑星の数が100を超えることになるからだ。

この提案は、2017年3月に米国テキサス州ウッドランズで開催された月惑星科学会議で発表されたが、事前にインターネット上で発表されていた。その目的は、大ざっぱに言うと、惑星かどうかの分類を天体の宇宙空間での位置ではなく、天



NASA/JHUAPL/SWRI

体内部の地球物理学的性質に基づいて行うことにある。この提案の著者は、IAUが惑星の定義を変更したことで、想定外の影響が出ていると話す。つまり、一般市民がかつてほど冥王星を探査の対象として面白いと思わなくなったというのだ。この新提案によれば、惑星とは「恒星より小さな質量の天体で、核融合が起きたことがなく、軌道パラメーターにかかわらず三軸楕円体として記述することが適切な回転楕円形状になるために十分な自己重力を有するもの」あるいは「宇宙空間に存在する、恒星より小さな丸い天体」とされる。

ざっと見たところ、この定義では、月が惑星の仲間入りをするのは当然のことと思われる。それ以外にも数多くの衛星が惑星に分類されて、太陽系の惑星が大幅に増えることになる。これがどの程度真剣な提案なのかは現時点で明確になっていないが、大きな利点があると考えられる。学校に通う子どもたちは、地球の周辺の惑星の名前を覚えるためにさらなる努力を求められるかもしれないが、人類が足跡を残したもう1つの「惑星」についても学ぶことになると考えられるからだ。 ■

（翻訳：菊川要）

2017年3月2日号 | Vol. 543 No. 7643

生化学：メタン触媒の分子構造

微生物によるメタンの生合成では、1年当たり約10億トンのメタンガスが生成されており、地球温暖化に多大な影響を及ぼしている。補酵素F₄₃₀はニッケル含有修飾テトラピロールで、メタン生成を触媒するが、この補酵素が形成される仕組みは完全には明らかになっていない。今回M. Warrenらは、F₄₃₀の生合成を触媒する遺伝子群を見だし、その経路の各段階で働く主要な酵素の活性を実証している。ニッケルを内包する分子構造がメタン生成を最適化するように構成されていく仕組みが明らかになり、この補酵素合成経路の解明によって、修飾テトラピロール化合物群の他のメンバーの合成機構についても完全な理解が得られた。



10.1038/nature21427

細胞生物学：機械ストレスに応答した細胞分裂

上皮細胞層は臓器を覆って障壁として機能するが、ここでは常に細胞分裂と細胞死が繰り返されている。では、このような動的な過程が起こっていても上皮の障壁機能が損なわれないのはどのような仕組みによるのだろうか。J. Rosenblattらは以前に、上皮細胞が過密になると、伸展活性化チャネルPiezo1が活性化されて細胞が押し出され、それらの細胞は後に死に至ることを報告している。今回、彼らは過密の反対の状況、つまり細胞死による密度の減少という状況に上皮がどのように対処するかを検討した。細胞死の後、周囲の細胞は低密度になる。この低密度状態もまたPiezo1活性化を引き起こし、それによって細胞分裂が開始して細胞数のバランスが回復することが分かった。著者らは、細胞の伸展が細胞分裂を誘発する分子機構についての手掛かりを示し、細胞が受ける機械的な力の種類によってPiezo1が細胞分裂または細胞の押し出しのどちらかのシグナルを出すのではないかと考えている。

10.1038/nature21407

古生態学：熱水噴出孔に存在した初期生命

海底の熱水噴出孔は、地球上における最初期の、生物が息可能な環境の1つであったと考えられている。今回M. Doddらは、少なくとも37億7000万年前の熱水噴出孔の内部および周囲に見られる生命の痕跡と推定されるものが、地球最古の生命の証拠である可能性を示唆している。カナダ・ケベック州北部に由来する碧玉^{へきぎよく}および炭酸塩岩には、糸状微生物の

存在を示すと考えられる構造体が保存されており、こうした構造体には赤鉄鉱からなる管状のものも含まれていた。これらの管状構造体は、今回のものよりはるかに新しい堆積岩中で発見されている微生物活動を示す形態を保持している。

10.1038/nature21377



DOMINIC PAPINEAU

今回、管状および糸状の微化石が見いだされた、カナダ・ケベック州ヌブアギトゥク表成岩帯の赤鉄鉱チャートの団塊。

材料科学：歯のエナメル質から着想を得た強靱な材料

生体模倣複合材料は、板状小片が層状に並んだ真珠層のような形態をとることが多い。今回、N. Kotovらは、歯のエナメル質などの生体複合材料に見られるナノスケールの柱状構造から着想を得て、1層ずつ積層させる工程を用い、垂直配向ナノワイヤー層を含む新しいナノ複合材料を作製した。この柱状構造体は、硬さと高いエネルギー散逸性^{じんせい}（靱性）を兼ね備えている。今回作製された複合材料は、軽くて堅く、優れた減衰能を持っている。これは、耐荷重性の必要な用途に役立つ特性の組み合わせである。

10.1038/nature21410

地球科学：地球の核の内部での結晶化

地球の核は大量の鉄（Fe）を含んでいるが、その密度は、純鉄より約10%小さく、ケイ素（Si）や酸素（O）などの軽元素^{ひるせけい}が外核に含まれている可能性を示している。今回、廣瀬敬（東京工業大学）らは、原始地球をシミュレートするためにレーザー加熱式ダイヤモンドアンビルセル装置を使って行った、地球の核の圧力下における液体Fe-Si-O合金の溶融実験について報告している。その結果、初期のFe-Si-Oの核が冷えるにつれて二酸化ケイ素（SiO₂）の結晶を晶出する可能性があることが見いだされた。著者らは、仮に核の最上部から結晶化が始まれば、SiO₂が枯渇したFe-Si-O液体の沈下に

よって原始地球内の核の対流やダイナモを十分駆動できた可能性があると結論付けている。 [10.1038/nature21367](https://doi.org/10.1038/nature21367)

植物科学：光化学系IIでのO=O結合形成

光化学系複合体の構造は、X線自由電子レーザー（XFEL）のような技術の進歩によってさらに詳しく調べられるようになり、プロトン移動や結合形成の機構についても手掛かりが得られるようになった。沈建仁（岡山大学ほか）らは今回、時間分解連続フェムト秒結晶学という新たな手法を用いて、XFELで2回のフラッシュを照射した後に形成される中間体状態を調べた。こうした照射を行うと、まず1個の水分子が消滅し、それによってもう1つの水分子が酸素原子の方へと移動することが明らかになり、これはプロトン移動を反映している可能性がある。また、O=O結合が形成されると考えられる位置に新たな酸素原子が挿入されることを示唆する証拠も得られた。こうした結合が形成されるだろうことは以前から考えられていたが、実際にはまだ検出されていなかった。これらの知見は、光化学系IIにおける水の酸化機構についての理解をさらに深めるものだ。 [10.1038/nature21400](https://doi.org/10.1038/nature21400)

2017年3月9日号 | Vol. 543 No. 7644

時間結晶：新しいエキゾチックな物質状態を初めて観測

表紙は、時間結晶の想像図。通常の結晶と同様に、時間結晶も高い構造秩序度を示す。しかし、通常の結晶の周期性は空間的要素の規則的な繰り返しから生じるのに対して、時間結晶は時間とともに同じ構造が繰り返し現れるエキゾチックな物質状態である。時間結晶は数年前に予測されたが、実験的な実証はこれまでできなかった。今回、2つのグループが、この捉えどころのない物質形態を実験的に観測したことを示す証拠を提示している。M. Lukinらは、実験プラットフォームとしてダイヤモンドの窒素空孔系を用いて、離散的な時間結晶を作り出しており、J. Zhangらは、相補的な論文において、捕獲イオンを用いて同様の成果を得ている。こうした時間結晶はロバストな量子メモリーに応用できる可能性がある。 [Cover; 10.1038/nature21413](https://doi.org/10.1038/nature21413); [10.1038/nature21426](https://doi.org/10.1038/nature21426)



考古学：シルクロードの謎を解く

シルクロードは、はるか昔から続く、中央アジアを横断する古代の交易路ネットワークである。では、シルクロードはど

のように始まったのだろうか。従来のモデルでは通常、このネットワークの一部であったことが知られている遺跡同士を結ぶ最も楽な道を推測することから始まる。しかしこれは、既知の事柄へと結果を偏らせるため、循環論法を招いてしまう。今回M. Frachettiらは、別の手法を用いて、山岳地域での経路ネットワークが、季節に応じて高地と低地の間で家畜を移動させる牧畜民同士の数百年にわたる相互作用によって形作られてきたことを明らかにしている。これにより、シルクロードのネットワークが遊牧民の古来の局地的な移動パターンから徐々に出現したことが示唆された。この知見は、考古学での古代の接続性の発展に関する研究において、より繊細な説明を可能にすると考えられる。 [10.1038/nature21696](https://doi.org/10.1038/nature21696)

遺伝学：長鎖ノンコーディングRNAのカatalog

FANTOMコンソーシアムのA. ForrestとP. Carninciらは今回、ヒトの長鎖ノンコーディングRNA (lncRNA) 遺伝子と、ヒトの主要な細胞種や組織、細胞株に由来する試料におけるその発現プロファイルについてのCatalogを作製した。複数のデータセットの統合解析により、信頼度の高い5'末端を持つ2万7919種のlncRNA遺伝子と、機能的と考えられる1万9175種のlncRNA座位のサブセットが明らかになった。このlncRNA Catalogと注釈付けは、ウェブ上で公開されており、自由に利用可能である。 [10.1038/nature21374](https://doi.org/10.1038/nature21374)

幹細胞：幹細胞の「健康」はオートファジーによって維持される

老化している造血幹細胞 (HSC) は、若いHSCと同じように血液細胞を再生することができず、特定の細胞系列に偏った分化が見られるようになる。だがこれまでの研究で、オートファジーが代謝ストレスの影響からHSCを守ることが明らかになっている。E. Passeguéらは今回、HSCでオートファジーが起こらなくなるとミトコンドリアが蓄積し、代謝が亢進して、HSCの自己複製能と再生能が妨げられることを明らかにした。このような変化は老化したHSCで見られる変化と似ているが、老化したHSCの約3分の1ではオートファジーが高レベルで起こり、代謝は抑制状態に保たれて、HSCの再生能力の維持を助けている。 [10.1038/nature21388](https://doi.org/10.1038/nature21388)

ナノ科学：単一原子の読み書き

古典的な小型データ記憶媒体の究極の限界は、単一原子磁気ビットを使用することであると思われる。ホルミウム原子は、磁気緩和時間が長く容易には情報を失わないため、単一原子磁気ビットの有望な候補と見なされている。今回、F.

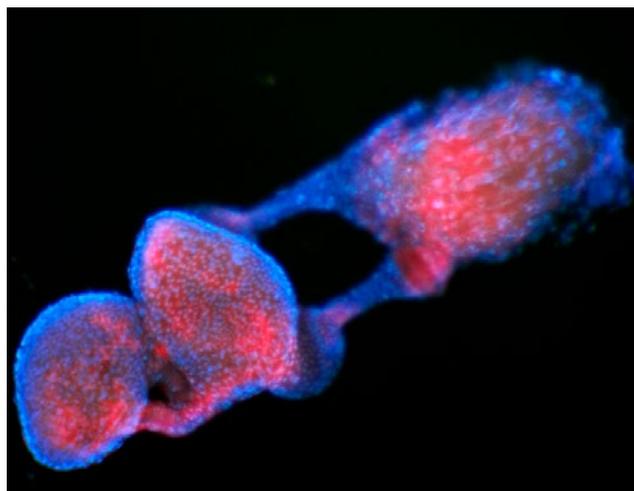
Nattererらは、走査型トンネル顕微鏡を用いて単一ホルミウム原子の磁気を読み書きを実現し、個々の原子が長時間にわたって自身の状態を維持することを示している。著者らは、こうしたホルミウム原子を用いて2ビットメモリーを作製し、とり得る4つの状態を書き込んだ。次に、近接する磁性鉄原子をセンサーとして用いて、磁性状態を確認した。今回の研究結果は、単一原子磁気メモリーを実現できるはずであることを示唆している。

10.1038/nature21371

微生物学：ボルバキア菌による昆虫の生存操作

ボルバキア属 (*Wolbachia*) の細菌はさまざまな節足動物に感染し、こうした節足動物にはヒトに感染する多くのウイルスを媒介する蚊も含まれる。ボルバキアの感染では「細胞質不和合」という現象が起こり、感染した雄と非感染の雌との交配で生じた胚が死に至るために、集団中での感染雌の割合が上昇する。この不和合の分子基盤はこれまで不明だった。今回S. Bordensteinらは、比較解析と遺伝子導入の手法を用いて、ボルバキア由来のプロフェージWOがコードする2つの遺伝子が、細胞質不和合を再現することを見いだしている。これらの細胞質不和合性因子の発見により、WOに誘導される生殖変化を遺伝的に操作できるようになり、節足動物が媒介するウイルスのヒトへの伝播^{でんぱ}を制御するための試みが後押しされる可能性がある。

10.1038/nature21391



宿主である昆虫の精巣（青色で染色）に感染したボルバキア（赤色で染色）の顕微鏡画像（倍率は100倍）。

免疫学：組織常在型記憶T細胞は外来性脂質を取り込んでいる

組織常在型記憶T (T_{RM}) 細胞は皮膚に存在し、そこで病原体から宿主を守っているが、この細胞が一体どうやって長期間生存し続けるのか、その仕組みについては明らかになってい

なかった。今回T. Kupperらは、この細胞がセントラル記憶T細胞やエフェクター記憶T細胞に比べると、外来性の遊離脂肪酸の取り込みにより大きく依存していることを報告している。さらに、 T_{RM} 細胞は脂質の取り込みと細胞内輸送に関わる脂肪酸結合タンパク質4および5 (FABP4およびFABP5) などの複数の分子を高いレベルで発現することが明らかになり、マウスとヒトの T_{RM} 細胞では*Fabp4*と*Fabp5*が外来性脂肪酸の取り込みに非常に重要なメディエーターであることが示された。

10.1038/nature21379

2017年3月16日号 | Vol. 543 No. 7645

危機に瀕するサンゴ礁：20年間にわたる調査で明らかになった、サンゴの白化の壊滅的な広がり

表紙は、2016年にグレートバリアリーフ北部で撮影された白化したサンゴの画像。今回、T. Hughesらの研究によって、過去20年間に起きた複数のサンゴ白化事象の分布を累積すると、グレートバリアリーフのほぼ全域に広がるようになった。2016年の白化事象は最も深刻で、個々のサンゴ礁の91%が影響を受けていた。著者らは、航空機観測および水中観測のデータと、衛星観測による海面水温のデータとを組み合わせて用い、繰り返すサンゴの大規模白化事象における地理的分布の変化を評価した。今回の結果は、気候変動がグレートバリアリーフに及ぼす影響の深刻さを明らかにしており、著者らは、サンゴ礁の未来を守るには、世界規模の速やかな行動が必要であると主張している。

Cover; 10.1038/nature21707



生理学：骨による食欲調節

骨は腎機能やグルコースの恒常性を調節するホルモンを分泌する、多機能の内分泌器官と考えられている。今回S. Kousteniらは、骨芽細胞から分泌されるタンパク質であるリポカリン2 (LCN2) が、インスリン分泌を誘導し、耐糖能とインスリン感受性を向上することでグルコース恒常性を維持することを見いだしている。注目すべきことに、LCN2は血液脳関門を通過して、視床下部のニューロンでメラノコルチン4受容体 (MC4R) に結合し、MC4R依存的な食欲抑制経路を活性化して食欲を抑制する。著者らは、LCN2は食物摂取を抑制することができる骨由来代謝調節ホルモンであると結論し、食欲は部分的に骨により制御されることを示唆している。

10.1038/nature21697

宇宙物理学：初期銀河の暗黒物質はそれほど多くなかった

冷たい暗黒物質に基づく宇宙論では、銀河のバリオン成分（星やガス）は、バリオンでない非相対論的な暗黒物質と混在していて、この暗黒物質が銀河やハローの総質量の大部分を占めていると考えられている。近傍宇宙では、暗黒物質が星形成銀河の円盤外側のバリオン領域の大部分を占めるため、円盤内部の目に見える物質の回転速度が円盤半径方向に一定になっているか増加しており、これが、暗黒物質モデルの本質的な特徴となっている。R. Genzelらは今回、大質量で高赤方偏移を示す6つの星形成銀河の円盤外側が示す回転曲線について報告し、半径が増加するにつれて回転速度が減少していることを見いだしている。この理由について彼らは、(1) こうした高赤方偏移銀河ではバリオンが圧倒的に多く、暗黒物質の果たす役割は近傍宇宙より小さい、(2) 円盤に観測された半径方向の圧力勾配によって、回転速度が半径の増加とともに遅くなる、という2つの要因が組み合わさっていると提案している。これらの要因の影響はいずれも、赤方偏移とともに大きくなっているように思われる。

10.1038/nature21685

細胞生物学：ストレスを受けたタンパク質はミトコンドリアに取り込まれる

老化や神経変性疾患に関連する細胞異常には、タンパク質凝集体の蓄積やミトコンドリアの機能不全などがある。疾患に関連するタンパク質はミトコンドリア内に見られることもあり、酵母では、老化やストレスによりタンパク質凝集体がミトコンドリアに繫留されることがある。R. Liらは今回、細胞の品質管理にミトコンドリアが関与しているという証拠を示している。凝集しやすい酵母タンパク質は、熱ショックストレスに曝露^{ばくろ}されると、ミトコンドリアへの移入装置との相互作用によって、細胞質からミトコンドリア内に移動することが分かった。この過程は、ストレスがなくても起こることがあり、これによって凝集しやすいタンパク質はミトコンドリアの膜間腔やマトリックス内に入ることができる。ミトコンドリアへの移入を阻害すると、細胞質でのタンパク質の分解が妨げられることから、ミトコンドリアへの移入は、分離したタンパク質を積極的に除去することで、分解を促進している可能性が考えられる。

10.1038/nature21695

分子生物学：秩序立った構造を持たないタンパク質スイッチが低酸素応答を停止させる

酸素濃度の変動に細胞が適応していくには、低酸素応答遺伝子を活性化する調節タンパク質と抑制する調節タンパク質の

間の競合の微妙な調整が必要である。P. Wrightらは今回、NMRを使って、負のフィードバック調節因子CITED2が、調節因子の共通の標的である転写コアクチベーターTAZ1ドメインに強く結合している活性化因子HIF-1 α に置き換わる仕組みを明らかにしている。この過程では、CITED2とHIF-1 α の両方がTAZ1に結合した三者複合体が中間体として形成され、それによってTAZ1のコンホメーション変化が誘導されて、HIF-1 α の解離速度が高まることが分かった。こうして生じる一方向性のスイッチが持つ高い感受性は、これらのタンパク質中にある秩序立った構造が本来的に見られない領域によっている。このような領域は、ヒトをはじめとする複雑な生物が持つシグナル伝達タンパク質の間に広く存在している。

10.1038/nature21705

2017年3月23日号 | Vol. 543 No. 7646

恐竜の分類：進化系統樹を根本的に書き換える

表紙は、始祖鳥科の非対称な風切羽が落ちてくるのを見上げている鳥盤類恐竜 Kulindadromeus の想像図である。こうした風切羽は、獣脚類でしか知られていないが、M. Baronらが今回提示した恐竜の類縁関係につ



ての仮説が裏付けられれば、こうした分類は見直さなければならなくなるだろう。彼らは、「恐竜は竜盤目と鳥盤目の2群に分けられる」という現在広く認められている進化系統樹を書き換える必要性を示している。竜盤目には、ティラノサウルス・レックスなどの肉食獣脚類やディプロドクスなどの巨大な竜脚類が含まれており、鳥盤目には、イグアノドンなどの鳥脚類やトリケラトプスやステゴサウルスなどの角や装甲を持つ恐竜が含まれる。著者らは、初期の鳥盤類に基づいてこの分類に異議を唱え、竜脚類を、初期の肉食性のヘレラサウルス類と同じ群に分類し、鳥盤類と獣脚類を同じ群に分類すべきであると提案している。

Cover; 10.1038/nature21700

神経科学：非社会的遺伝子

15番染色体のある領域（15q11-13）の重複は、臨床的な発達障害候群を引き起こし、自閉症もその中に含まれる場合がある。自閉症患者は、母親から受け継いだUBE3A遺伝子のコピーを余分に持っており、UBE3Aは脳の複数の領域で発現する。今回M. Andersonらは、マウスでUbe3aタンパク質レベルが増加すると社会的な行動が抑制されること、そし

てこの抑制は報酬と嫌悪の処理に関わるとされる脳領域である腹側被蓋野での *Cbln1* の発現低下と関連することを示している。てんかん発作は一部の自閉症患者でよく見られ、この経路を介する社会性低下を悪化させる。著者らは、この回路で *Cbln1* の発現を回復させるだけで、Ube3a が過剰でてんかん発作を起こすマウスの社会性を回復させられることを見いだした。

10.1038/nature21678

植物科学：根の微生物相は植物の栄養と免疫を統合する

植物は土壌の細菌群集に囲まれて生きており、細菌群集の構成は土壌中の栄養の変化によって変わり得る。そのため、有益な土壌微生物であっても、栄養に関して植物と競合することがある。J. Dangl らは今回、微生物群集の存在下で、植物がどのようにして自身の免疫応答と栄養の不足を調整しているのかを調べている。その結果、リン酸ストレス応答を制御する遺伝的ネットワークは、十分なリン酸存在下においても局所的な微生物群集の構成に影響を与えることが明らかになった。この観察から、リン酸ストレス応答の転写調節因子は、植物の防御応答を直接抑制できる機構論理が示された。今回の発見はまた、植物が防御応答より栄養不足に対する応答を優先することを示唆している。

10.1038/nature21417

分子生物学：ゲノムの編成状態のマッピング

核内ゲノムの三次元の編成状態については、顕微鏡法の発達と3C法 (chromatin conformation capture; 核内で三次元的に近接する領域を検出できる) に基づいた分子技術の開発によって、飛躍的に解明が進んでいる。今回 A. Pombo らは、クロマチンの接触状況を調べる新しい手法を開発し、GAM (genome architecture mapping) と命名した。GAM では、核の凍結薄片片を多数そろえて DNA 塩基配列を解読し、3C法とは違ってライゲーションは不要で、偏りのないやり方で接触を捉えることができる。この方法では、3C法を基礎にした手法が持つ限界の一部が克服されており、ゲノム全域にわたって多数の三方向の接触があることが明らかになった。

10.1038/nature21411

有機化学：可逆的に結合するテンプレートを用いたC-H活性化

化学合成のステップ数を減らす方法の1つは、官能基を結合させなくても特定の炭素に反応が起こるようなC-H活性化を使用することである。しかし、有機分子には多くのC-H結合が存在するので、C-H結合を1つだけ確実に活性化するために、取り外し可能なテンプレートを用いて反応を誘導する手法が開発されてきた。今回 J. Yu らは、このアイデアを拡張し、可

逆的な金属-配位子結合を介して一時的に結合させた配向テンプレートを用いて、3-フェニルピリジンの遠隔C-H活性化を可能にしている。この方法は、より離れたC-H結合の活性化を実現できることを意味しており、さらに、テンプレートは可逆的に結合させられるため、その結合と除去を別々のステップで行う必要がなく、ステップ数を減らすことができる。

10.1038/nature21418

生態学：女王バチの保全

花粉媒介昆虫の全球的な減少の主な原因の1つは、農業の集約化である。今回 C. Carvell らは、英国でマルハナバチについての野外実験を行い、春の花資源などの価値の高い採餌環境の近くに位置するコロニーの方が、その後冬眠して生き残り、春に活動を再開して新しいコロニーを創設する女王バチの生まれる確率が高いことを明らかにしている。この知見によって、景観レベルでの保全介入が農業地帯の野生花粉媒介者に正の影響を与えるという証拠が、また1つ加わった。

10.1038/nature21709



CLAIRE CARVELL

ムラサキツメクサの花で花粉と花蜜を集めるマルハナバチの一種 *Bombus pascuorum*。

発生生物学：生殖幹細胞の生存を調節

始原生殖細胞や精原幹細胞の生存には、RNA 結合タンパク質の DND1 が必要である。T. Tuschl らは今回、特定の mRNA で、DND1 を誘導するモチーフを見いだし、DND1 の結合が CCR4-NOT 複合体の誘導につながり、mRNA の分解を開始させることを明らかにしている。このモチーフを持つ mRNA には、アポトーシスや多能性の調節因子が含まれる。著者らは、分化中の転写遺伝子発現の変化によって起こる発生の推移は、このクラスの転写産物の DND1 を介した不安定化により促されると考えている。

10.1038/nature21690

2017年3月30日号 | Vol. 543 No. 7647

自由航行権：転移におけるがん幹細胞の重要な役割

表紙は、血流に乗って転移するがん幹細胞の想像図である。がん幹細胞は、腫瘍の増殖と転移性播種を支えていると考えられているが、多くの種類のがんではその実験的証拠は十分でない。今回 F. de Sousa e Melo らは、大腸がんでは、可塑性によって Lgr5⁺ 幹細胞が原発性腫瘍の増殖に不要となることを明らかにしている。Lgr5⁺ 細胞を除去しても、予期された退縮は見られず、腫瘍は、Lgr5⁻ 幹細胞によって維持されたのである。しかし、Lgr5⁺ 細胞の除去によって大腸がんの肝臓への転移性播種と肝臓での増殖が大きく阻害されたことから、Lgr5⁺ がん幹細胞は、この過程に重要であり、転移性疾患を管理するための標的となる可能性が示された。



Cover; 10.1038/nature21713

がん：脂質代謝に関わる腫瘍抑制因子

がんはほとんど全ての種類の細胞から生じ得るが、心臓や骨格筋、脳など、ある種の組織は著しい抵抗性を持つと思われる。これらの組織の細胞（例えば筋肉における筋細胞）は概して非増殖性で、非常に特殊化しており、解糖ではなく酸化的リン酸化によってエネルギーを産生する。こうした特性の全ては、がん細胞とは明らかに対照的である。そのため R. Weinberg らは今回、これらの細胞がある種の腫瘍抑制因子を持っている可能性を検討した。マウスおよびヒトで行った *in vitro* および *in vivo* 研究の結果から、著者らは、ミトコンドリアタンパク質の LACTB がミトコンドリアの新規腫瘍抑制因子であることを明らかにしている。乳がんでは、LACTB はミトコンドリアでの脂質代謝と細胞分化の促進をつなぐ役割を介して、腫瘍の形質転換を阻害した。 10.1038/nature21408

化学：光を発する鉄

遷移金属錯体は、光増感剤や光触媒として用いられる他、発光デバイスにも用いられている。こうした用途の場合、遷移金属錯体は、基底状態から電荷移動状態に励起される必要があり、この電荷移動状態は、効率的な性能を確保するには一般的に寿命が長くなければならない。このため、こうした錯体に用いられている希少な高性能貴金属を、地球上に豊富に存在するもっと安価で毒性の低い金属に置き換えることが困難であった。今回 P. Chábera らは、電子的特性に優れた配

位子を利用する設計戦略によって、電荷移動状態の寿命がこれまでになく長い鉄錯体が得られることを示している。この方法をさらに発展させれば、発光体や太陽エネルギーデバイスの光増感剤として使える鉄系材料が得られる可能性がある。

10.1038/nature21430

神経科学：脳内で音をマッピングする

空間的ナビゲーションについての研究から、海馬で物理的空間が地図様に表現されている様子が詳細に報告されているが、この空間表現が、音など他の連続変数を符号化する、より一般的な機構の一部なのかどうかは分かっていない。今回 D. Tank らは、連続的な周波数の音の出力をジョイスティックで操作する課題をラットに行わせ、その間の海馬ニューロンの活動を記録した。ニューロン群は、この課題中の全局面を符号化しており、特定の周波数の音に反応して別個の発火領域を形成した。音の高低軸を表現する海馬細胞は、ナビゲーション中に空間位置を表現する細胞と重複していた。著者らは、ナビゲーションの際に使われる機構と類似した神経表現機構が、より広範な認知プロセスで諸変数を符号化している可能性があることを示唆している。

10.1038/nature21430

腫瘍免疫学：腫瘍ネオアンチゲンが明らかに

がん体細胞変異が生み出すネオアンチゲンによって、悪性細胞と正常細胞を区別できるが、それらを個体ごとに確認・検証することが難題となっている。今回 M. Khodadoust らは、ヒト B 細胞リンパ腫では MHC クラス II 分子に提示されるネオアンチゲンが豊富に存在するという証拠を示している。ゲノミクスとプロテオミクスを統合した戦略を用いて、彼らは、変異腫瘍抗原がリンパ腫の免疫グロブリン重鎖および軽鎖に由来すること、そしてそれらが CD4 T 細胞を介した細胞傷害性を誘導することを見いだした。

10.1038/nature21433

がん：遺伝子融合タンパク質を2種類の薬の標的にする

BCR-ABL1 変異を標的とする現行の阻害剤はこれまでに多くの命を救ってきたが、抵抗性をもたらす変異のために適用範囲が限られている。今回、ABL の新しいアロステリック阻害剤 ABL001 の詳しい性質が調べられた。ABL001 は、BCR-ABL が原因の悪性腫瘍で新しい機構で酵素活性を阻害するので、抵抗性が生じている症例にも使用できる可能性がある。著者らは、この薬の効力と抵抗性出現の機序が他の BCR-ABL キナーゼ阻害剤とは重複しないことを指摘している。

10.1038/nature21702

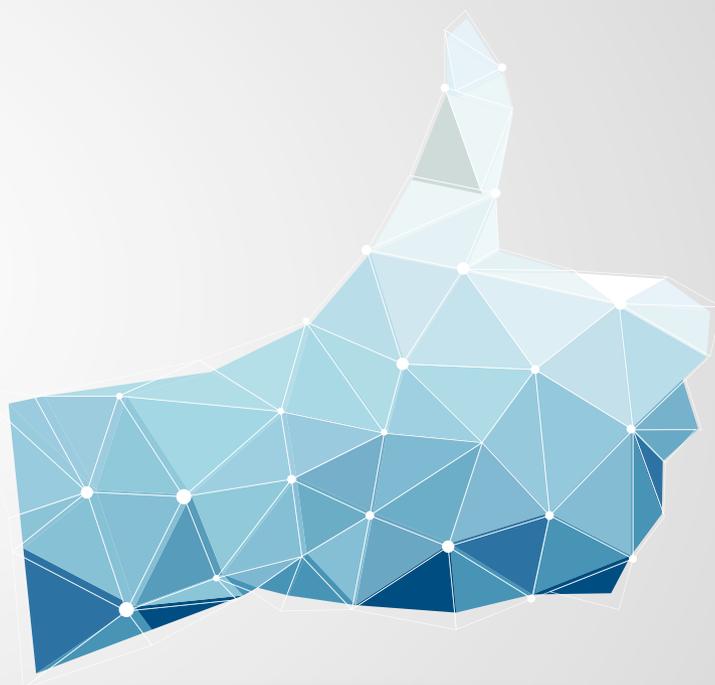
nature ダイジェスト

FOLLOW US!

 facebook.com/NatureJapan

 twitter.com/naturejapan

 nature.asia/jp-regist



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

SPRINGER NATURE

EDITOR'S NOTE

近年の学術と軍の接近に対し、日本学術会議は3月24日、軍事研究拒否を継承すると発表しました（8ページ「科学者の国会が『軍事研究を行わない』と決議」。冷戦終結から約四半世紀、国際情勢の変化から防衛のためと軍備増強する国が増えつつあります。平和推進を掲げるEUも例外ではありません（2015年8月号「軍の接近を懸念する日本の研究者たち」、2017年3月号「EUが軍事研究に研究費助成」）。こうした状況下で、科学者には「私の研究は軍事とは関係ないと思っていた」では済まない出来事が起こり得ます。その実例について、池内了・総合研究大学院大学名誉教授が『科学者と戦争』（岩波書店）で解説しています。また、福島雅典・京都大学名誉教授は『科学』（同上）4月号巻頭言で科学と軍事が結びついて起こった悲惨な史実に触れ、医師の視点から“科学者に与ふるの文”として軍事研究への関与を強く戒めています。24ページ「チャーチルの地球外生命論」では、第二次世界大戦中の英国首相チャーチル氏が、科学者にhumanityを求めていたことが伺えます。科学者はどう考えて何をすべきなのか迷われれば、ぜひ科学者憲章をご覧ください。多くは世界科学労働者連盟の科学者憲章をもとにしています。大戦後に科学者たちが自らのあり方について宣言した憲章です。 **MU**

「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 03-3267-8765 (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、石田みか、山西三穂子

デザイン/制作：中村創 広告：藤原由紀 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

〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-37 千代田ビル

T 03-3267-8751 (代表) F 03-3267-8754

www.naturejpn.com

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



自分だけの Nature ダイジェストを始めてみませんか？

個人向けプランはいつでもどこでも読み放題！

オンラインマガジンは
バックナンバーも
読み放題で

PDFもダウンロードできて

2011年までぜんぶ読めます！

年間購読
8,210円 (税込)

さらに
+1,000円
で

Nature ダイジェスト・コンボなら
アプリでも
読み放題

アプリは通常価格 5,200円 (iOS/Android)

4,200円もお得！

年間購読
9,210円 (税込)

詳しくは
nature.asia/ND-subscribe

SPRINGER NATURE