

nature ダイジェスト

科学が深まる、世界が広がる

11
2016

無限の可能性を秘めたポリマー

- ▶ 02 アルツハイマー病新薬候補に有望な結果
- ▶ 04 放射線からDNAを守るクマムシタンパク質
- ▶ 15 太陽系から最も近い恒星に、地球に似た惑星
- ▶ 08 FROM 日経サイエンス
クローン動物短命説は誤りだった



XXLPHOTO/ISTOCK/GETTY IMAGES

nature ダイジェスト

#11

NOVEMBER 2016

www.nature.com/naturedigest

2016年11月1日発行

© 2016 Nature Japan K.K. All rights reserved.

掲載記事の無断転載を禁じます。

COVER IMAGE: MARTIN MCCARTHY/E+/GETTY

NEWS FEATURE

ポリマーの 可能性は無限大!

高分子（ポリマー）という概念は1930年頃まで信じられていなかったが、今では生活に欠かせないものとなっている。そして至る所で使われているが故に問題も生じている。持続可能かつ未来を切り開く新素材が生まれる可能性を秘めているが、その開発には分野横断的な取り組みが必要だ。

NEWS IN FOCUS

02 アルツハイマー病新薬候補で認知機能低下が鈍化

アミロイドβ仮説に基づくアルツハイマー病治療薬候補の小規模臨床試験で、認知機能低下の鈍化が観察された。

04 クマムシ固有のタンパク質に放射線からDNAを守る作用

クマムシから発見された新規タンパク質をヒト培養細胞に導入すると、放射線耐性が向上した。

05 ゾウの進化史が書き換えられる？

絶滅したゾウのゲノムから、思いもよらない類縁関係が明らかになった。ゾウの系統樹は再検討の必要がありそうだ。

06 37億年前の「生命の痕跡」を発見か

グリーンランドで見つかった構造物は、地球に生物が誕生した時期を約2.2億年さかのぼらせるという。

09 人工ブラックホールで「ホーキング放射」を確認

実験室で作られ出した「音のブラックホール」で、ホーキング放射に極めて近い現象が観察された。

11 次の LHC を建設するのは誰？

ヒッグス粒子を発見した大型ハドロン衝突型加速器 (LHC)。その後継建設の見通しはまだ立っていない。

15 太陽系から最も近い恒星に、地球に似た惑星

地球からわずか 4.2 光年、プロキシマ・ケンタウリと呼ばれる赤色矮星の周囲に、地球サイズの惑星が見つかった。恒星からの距離も適度で、液体の水があると期待される。

16 ヒトと動物の「キメラ」研究が米国で解禁に？

米国立衛生研究所は、ヒトと動物のキメラを扱う研究プロジェクトへ資金を提供する方向に動き出した。

17 公開データは自由に再利用してよいか？

データをネット上に公開する者も、公開データを再利用したい者も、知的財産権について最低限の知識が必要だ。

NEWS & VIEWS

29 シナプスの要、ナノカラム

シナプス前部にある神経伝達物質分子を放出する領域と、それを捕獲するシナプス後部の位置が合うように調節する「ナノカラム」なる構造が発見された。

31 完全にソフトなロボット

完全に柔らかい材料だけで作られた最初のロボットが報告された。これまでの機械を超える可能性を秘めた「ソフトロボット」時代の幕開けだ。

NEWS SCAN

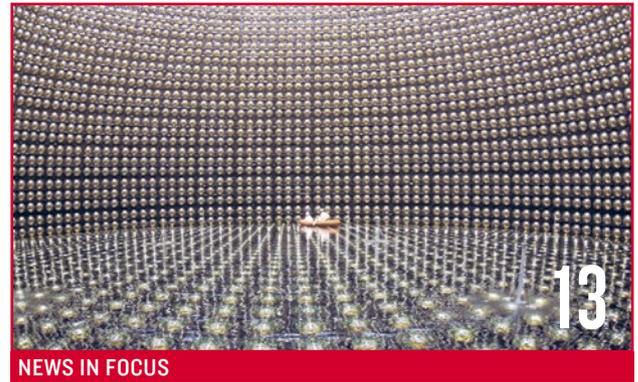
08 クローン動物短命説は誤りだった 乳房にマイクロバイオーム

EDITORIAL

34 21 世紀の原子力発電に対する懸念

HIGHLIGHTS

35 2016 年 9/1 ~ 9/29 号



KAMIOKA OBSERVATORY, ICRR (INST. FOR COSMIC RAY RESEARCH), UNIV. TOKYO

宇宙の謎を解くカギ、ニュートリノ

日本の T2K 実験チームが、ニュートリノと反ニュートリノのふるまいが異なることを示唆するデータを得た。



DESMOND BOYLAN FOR NATURE

ジカ熱を相手に善戦するキューバ

ジカ熱が蔓延するカリブ海地域で、患者数を 1 ケタで食い止めているキューバ。一体どんな対策を行っているのだろうか。



ALFRED PASIEKA/SPL/GETTY

標的遺伝子だけオンに! エピゲノム編集登場

アルツハイマー病新薬候補で 認知機能低下が鈍化

アミロイドβ仮説に基づくアルツハイマー病治療薬候補の小規模臨床試験で、認知機能低下の鈍化が観察された。現在、大規模な研究によりこの有望な初期データが裏付けられるか調査中である。

初期の臨床試験ではあるが、アデュカヌマブ (aducanumab) と呼ばれる抗体医薬の投与により、アルツハイマー病の引き金と考えられる毒性タンパク質を脳から取り除くことができる可能性が示された。この結果は、*Nature* 2016年9月1日号に掲載された¹。ただし、この臨床試験の主な目的はアデュカヌマブの安全性をヒトで確認することであり、この薬剤がアルツハイマー病に関連する記憶障害や認知障害を軽減する作用を持つかどうかについての最終的な判断は、より大規模な2つの第III相臨床試験が完了するまで待たなければならない。それらの第III相臨床試験は現在進行中であり、少なくとも2020年まで試験継続が計画されている。

アデュカヌマブは、バイオジェン社 (米国マサチューセッツ州ケンブリッジ) が開発したヒトモノクローナル抗体で、凝集したアミロイドβに選択的に結合する。この研究では、165人の患者を2群に分け、一方の群にはアデュカヌマブを、他方の群にはプラセボが静脈内注入された。アデュカヌマブ投与群では、103人の患者に対し月1回の頻度で最大54週まで投与が続けられ、脳に凝集したアミロイドβが投与量依存的に減少することが観察された。

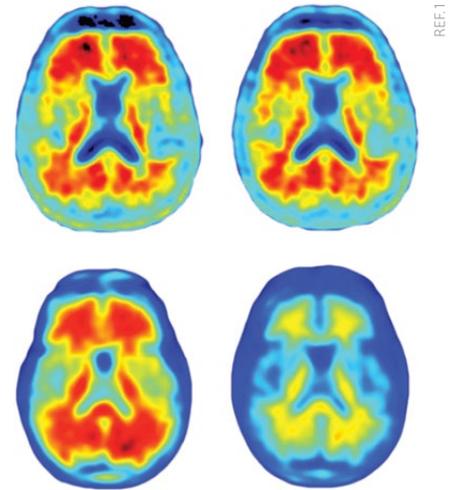
マウスでの前臨床研究においても、アデュカヌマブにより脳のアミロイドβ斑が除去されたと考えられる結果が得られており、今回の論文¹で合わせて報告されている。

「アデュカヌマブは、アミロイド斑の負荷を軽減する効果がこれまでの薬剤よりも顕著です」と、アルツハイマー病の予防と治療のために他の手法を検討しているバナーアルツハイマー病研究所 (米国アリゾナ州フェニックス) の所長で精神科医のEric Reimanは言う。彼はこの論文に対し、「今回の知見は非常に衝撃的で、しかも有望です。大きな進歩です」とコメントを寄せている。

「今回の結果は、アルツハイマー病研究に捧げた私の25年間で最も良いニュースです。アルツハイマー病の患者や家族の希望となるでしょう」と、この臨床試験を行っている研究チームに属するバトラー病院 (米国ロードアイランド州プロビデンス) の神経科医 Stephen Sallowayは言う。

慎重に続ける

アデュカヌマブ投与群の患者はさらに、投与量により4つのグループに分けられた。投与量の最も多いグループは、アミロイド斑の減少も最も大きかった



アミロイド沈着状態の変化

投薬前のアミロイド沈着状態 (左列) と、54週にわたるアデュカヌマブ投与後 (右下)。右上はプラセボ。

(「アミロイド沈着状態の変化」参照)。54週間の治療を受けた91人からなる患者群は、プラセボ投与患者群に比べ、認知機能低下の鈍化が観察された。

アミロイドβの蓄積が記憶障害やアルツハイマー病の他の症状を引き起こすかどうかについては、長い間議論が続いている。今回の臨床試験は、アミロイドβタンパク質自体の除去がアルツハイマー病の症状を軽減する可能性を示し、「アミロイド仮説」を裏付けている。

それでもReimanは、今回の臨床試験は小規模なため、アデュカヌマブが実際に機能すると証明することはできないと注意を促す。他の多数のアルツハイマー病治療薬はこれまで、初期段階の臨床試験では有望に見えたが失敗に終わっていた。

アルツハイマー病に対する抗体の臨床試験では過去に、一部の患者が脳に炎症を起こし死亡している。そのため、アルツハイマー病の臨床試験ではそのような異常が詳しく追跡される。ア

デュカヌマブも、患者の3分の1未満ではあるが、脳に異常を引き起こすことが脳画像検査で分かった。

ただし、今回報告された脳画像検査での異常の全てが最終的には約4~12週で消失し、患者が入院することはなかった。脳画像検査で異常を示した一部の患者は、その副作用にもかかわらず、アデュカヌマブの投与を受け続けた。アデュカヌマブの高投与量群の患者あるいは、アルツハイマー病の遺伝的リスク要因がある患者では、脳に異常が生じやすいと考えられたからだ。

アデュカヌマブを作製したバイオジェン社は、第III相臨床試験では、アデュカヌマブの投与量の調整と、アルツハイマー病の遺伝的リスクのある人を追跡するためのスケジュール調整を行っている。

Reimanは、致命的となり得るような脳炎症を引き起こさずに強力な効果

を十分発揮できる「最適な」投与量があるかどうかを製薬会社が検討し、見つけ出す必要があると言う。

今後の展望

アルツハイマー病治療の分野では、数年間にわたって抗体や他の種類の薬剤の臨床試験の失敗が続いており、アデュカヌマブはそんな中で現れた明るい話題である。同じく抗体医薬のソラネズマブ (solanezumab; イーライ・リリー社) は、2013年に2つの大規模な臨床試験で認知機能低下を抑える効果を示すのに失敗したが、現在、評価項目を変更した複数の臨床試験が進行中である。その1つは軽度のアルツハイマー病患者を含んでおり、早ければ2016年の終わりには結果が報告されるだろう。

アルツハイマー病を対象とした他の治療戦略による臨床試験で現在進行中のものには、アミロイドタンパク質のプ

ロセシングに関与する β セクレターゼ1と呼ばれる酵素を標的とする薬剤や、アミロイド斑に見られる「ピログルタミル化修飾」型のアミロイドタンパク質を攻撃する標的抗体、アルツハイマー病に関与すると考えられているタウと呼ばれるタンパク質を標的とする薬剤がある。

「脳内に入り標的に結合してアミロイド斑を除去できる抗体が現在ある、という事実が重要な進歩であり、第III相臨床試験の結果を、他の薬剤も含めて非常に楽しみにしています」と、Reimanは言う。

(翻訳：三谷祐貴子)

Alzheimer's treatment appears to alleviate memory loss in small trial

doi: 10.1038/nature.2016.20509
2016.8.31 (Published online)

Erika Check Hayden

1. Sevigny, J. et al. *Nature* **537**, 50–56 (2016).

大隅良典氏がノーベル医学・生理学賞を単独受賞!



カロリンスカ研究所 (スウェーデン) は 10 月 3 日、オートファジー (自食作用) の仕組みを解明した大隅良典・東京工業大学名誉教授に 2016 年のノーベル医学・生理学賞を授与すると発表した。

細胞内の部品が膜で取り囲まれ、分解を担う細胞小器官リソソームに送られてリサイクルされることが最初に観察されたのは 1960 年代。この現象は「自分自身 (auto-)」、「食べる (phagein)」という意味で autophagy と名付けられた。その仕組みは長らく不明であったが、1990 年代に大隅氏 (当時、東京大学助教授) が酵母の液胞でオートファジーをつぶさに観察し、必須遺伝子を次々と単離したことを皮切りに解明が進み、

現在では疾患との関連も明らかになってきている。授賞委員会はこの分野の開拓者として高く評価したようだ。

大隅氏は *Nature* ダイジェストの取材の中で「酵母は優れたモデル生物であり、大勢の人たちに研究されていましたが、液胞だけは別でした」と語るように、誰も注目しなかった液胞でオートファジーを観察した。また、この現象は飢餓状態でしか現れない。遺伝子は「生存に必須でない」と見過ごされていた。手掛かりがほとんどない中、大隅氏は生命の基盤にある重要な機構を独自に見いだしたのである。詳細は 2015 年 10 月号 23 ページ「誰も注目しなかった液胞でオートファジーを発見」(nature.asia/NA-interview2015) を参照されたい。

(編集部)

ノーベル賞各賞に関する記事は来月号に掲載予定です。

クマムシ固有のタンパク質に放射線からDNAを守る作用

クマムシから発見された新規タンパク質をヒト培養細胞に導入すると、放射線耐性が向上した。

緩歩動物、別名クマムシは、体長0.1～1mm程度の水生無脊椎動物で、イモムシとハダカデバネズミの間のようなずんぐりした姿をしている。クマムシは究極の耐性を備えた生物で、ほぼ完全な脱水状態や宇宙空間など、さまざまな極限環境に耐えることができる。

今回、緩歩動物の数ある超絶能力の1つについて、その源の一端が明らかにされた。有害なX線に対する抵抗力をもたらす保護タンパク質がクマムシゲノムに見つかったのだ。さらに、その「抵抗力」は、ヒト培養細胞にも導入可能であることが示された。この研究成果は *Nature Communications* に9月20日付で掲載された¹。

研究を主導した東京大学の分子生物学者、國枝武和は、「X線耐性は、この動物が過酷な脱水に適応した際の副産物と考えられます」と話す。過酷な脱水は生体内の分子に大打撃を与え、X線のようにDNAを切断することもあると國枝は説明する。

研究チームは、緩歩動物がそのような過酷な条件からどのようにして身を守っているかを明らかにしようとした。國枝によれば、クマムシの遺伝子を哺乳類細胞に導入することで、その遺伝子の役割が調べやすくなるという。そこで研究チームはまず、ストレス耐性の特



クマムシは極限環境に耐える能力でよく知られている。

に強いヨコヅナクマムシ (*Ramazzottius varieornatus*) という種のゲノム塩基配列解読に着手した。次に、ヒトの培養細胞を操作してクマムシ体内のパーツ（部品）を産生させ、クマムシに抵抗力を与えている要素を特定した。

最終的に國枝らは、Dsup (Damage suppressor) というクマムシ固有の新規タンパク質が、放射線や酸化ストレスからヒト培養細胞のDNAを守り、X線によるDNAの傷害が約40%抑制されることを発見した。

ゲノムの宝物の発見

クリシャンスタード大学（スウェーデン）で緩歩動物を研究する進化生態学

者 Ingemar Jönsson は、「DNAの保護と修復はあらゆる細胞の基本的な構成要素であって、がんや加齢を含む多くのヒト疾患において主要な問題となっています」と語る。

このことから、國枝らの今回の研究成果は「医学的にも興味深い」と Jönsson は言う。ヒト細胞のストレス抵抗力を強化できる可能性を秘めており、いつの日か、放射線治療を受ける患者の利益となる可能性があるのだ。

國枝も今回の研究成果について、放射線物質を扱う施設で労働者を放射線から保護したり、あるいは火星のような極限環境で作物を栽培したりするのに役立つかもしれないと話す。

別の緩歩動物種のゲノム塩基配列解読²に協力したノースカロライナ大学チャペルヒル校（米国）の生物学者 Bob Goldstein は、今回の研究について、興味深く巧みなものだと評価する。そして、著者らの「今後もこうした発見が次々となされるだろう」という予測を妥当なものと考えてもいる。

「緩歩動物は、多種多様な極限環境に耐えることができます」と Goldstein は言う。つまり、緩歩動物は身を守る術をいろいろ持っていると考えられるわけだ。「私たちはまさに、緩歩動物のゲノムにある宝物を探り始めたばかりなのです」と Jönsson は語る。

（翻訳：小林盛方）

Tardigrade protein helps human DNA withstand radiation

doi: 10.1038/nature.2016.20648
2016.9.20 (Published online)

Jason Bittel

1. Hashimoto, T. et al. *Nature Communications* <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms12808> (2016).
2. Boothby, T. C. et al. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **112**, 15976–15981 (2015).

ゾウの進化史が 書き換えられる？

絶滅したゾウのゲノムから、思いもよらない類縁関係が明らかになった。どうやらゾウの系統樹を再検討する必要があるようだ。

大型のゾウ化石種のゲノムが今回初めて解読され、ゾウの系統樹を根本から揺るがすような結果が出た。

現生のゾウは3種に分類されている。アジアゾウ (*Elephas maximus*) と、2種のアフリカゾウ、すなわちシンリンゾウ (別名マルミゾウ; *Loxodonta cyclotis*) およびサバンナゾウ (別名ソウゲンゾウ; *Loxodonta africana*) だ。アフリカゾウは当初、単一の種だと考

えられていたが、2010年になって2種に分かれることが確認された。

一方、約10万年前まで欧州の森林地帯に生息していたアンティクスゾウ (*Palaeoloxodon antiquus*) という古代の巨大なゾウは、化石上の証拠からアジアゾウに近縁だと考えられてきた。

ところが実際には、このゾウ化石種はアフリカのシンリンゾウに最も近縁であることが、今回の遺伝解析で明らかになった。さらに驚いたことに、コンゴ盆地に生息しているシンリンゾウは、現在のアフリカのサバンナゾウよりも、絶滅したアンティクスゾウの方により近縁なことが分かった。また、マンモス由来の古代ゲノムについて新たな情報が得られ、総合的な解析が可能になったことで、過去にさまざまなゾウ種やマンモス種が交雑したことも明らかになった。

「ショッキングな結果です」と、デンマーク自然史博物館 (コペンハーゲン) の進化遺伝学者 Tom Gilbert は話す。アンティクスゾウのことは、専門家の間でもほとんど知られていないと彼

アンティクスゾウは牙がほぼ真っすぐで、下に向かって生えている。約10万年前まで欧州の森林地帯に生息していた。

は言う。「私にしても、このゾウのことを聞いたのは、今回のゲノムの話が最初でしたから」。

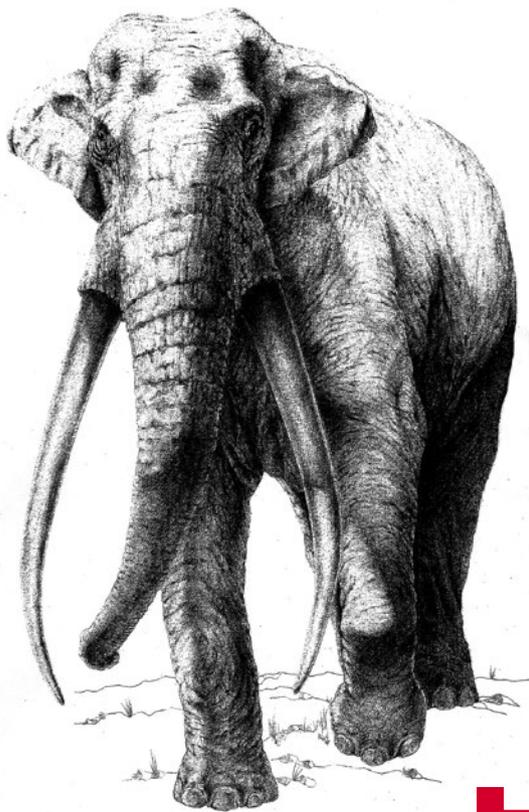
スウェーデン自然史博物館 (ストックホルム) の古遺伝学者 Love Dalén は、この研究成果によってゾウの系統樹の再構築が進むだろうと話す。「そもそも、*Loxodonta* という属名が妥当ではありません」と彼は言う。サバンナゾウやシンリンゾウとアンティクスゾウとの類縁関係をもっとよく表すために、系統分類学者らがこの古代ゾウに新しい学名を付ける必要があるのではないかと Dalén は考えている。

今回の研究成果は、2016年9月15日に英国オックスフォードで開催された第7回国際生体分子考古学シンポジウムで発表された。研究を行ったのは、ハーバード大学医学系大学院 (米国マサチューセッツ州ボストン) の進化遺伝学者 Eleftheria Palkopoulou および集団遺伝学者 David Reich とポツダム大学 (ドイツ) の進化遺伝学者 Michael Hofreiter らのチームだ。アンティクスゾウのゲノム解析には、ドイツで見つかった12万年前の化石標本2例が使われた。

古代の交雑

Palkopoulou らは、アンティクスゾウ以外の古代動物ゲノムも解読した。その中には、ケナガマンモス (*Mammuthus primigenius*) 4例や、北米産のコロンビアマンモス (*Mammuthus columbi*) 1例 (この種では初めての全ゲノム解読)、北米産のアメリカマストドン (*Mammuthus americanum*) 2例が含まれている。

それらのゲノム解析の結果、さまざまなゾウ種やマンモス種の多くが交雑していたという証拠が得られた。アンティクスゾウは、アジアゾウともケ



ナガマンモスとも交雑していた。また、現在アフリカに生息するサバンナゾウとシンリンゾウは交雑していることがすでに分かっており、雑種がコンゴ民主共和国の一部などに分布しているが、両種ははるか昔にも交雑していたようだ。Palkopoulouは、こうした交雑がいつ起こったのかを明らかにしたいと考えている。

英国の国際シンポジウムに出席した科学者らは、この研究結果は古代ゲノミクスの画期的な成果だと口をそろえて言う。アンティクスゾウのゲノムは、これまで得られた中で最古の古代ゲノムではない。カナダの北極圏で冷凍状態で見つかった78万～56万年前のウマの骨に由来するゲノムが、今のところ最古である（*Nature* ダイジェスト 2013年10月号「70万年前のウマのゲノムを解読」参照）。しかし、温暖な環境から得られた全ゲノムとしては、アンティクスゾウのゲノムが最古だ。今回の標本から得られたゲノムの1つは、DNAの塩基1個当たりの読み取り回数が平均15回にもなり、多くの科学者が驚嘆するほど高品質だった。

「これらの成果は古生物学の範疇に入ります」とGilbertは話す。「つまり、今日の進化遺伝学者は、この領域にいるということです」。「これまで誰ひとりとして、アンティクスゾウのゲノムを解読してみようとは考えませんでした。はるか古代にさかのぼって調べるなど、ばかげていると思われていたのです」とDalénは話す。

（翻訳：船田晶子）

Elephant history rewritten by ancient genomes

doi: 10.1038/nature.2016.20622
2016.9.16 (Published online)

Ewen Gallaway

37億年前の「生命の痕跡」を発見か

グリーンランドの岩石から発見された構造物は、37億年前の生物によって作られたものだとする研究結果が報告され、論争が巻き起こっている。

オーストラリアと英国の地質学者のチームが、地球上の生命に関する最古の証拠を発掘したとの報告が、*Nature* 2016年9月22日号に掲載された¹。その証拠とは、グリーンランドの37億年前の岩石の中に含まれていた「ストロマトライト」である。ストロマトライトとは、微生物の粘液により炭酸塩や堆積物が固定されてドーム状に積み重なった縞状構造物で、カリフラワーのような形をしている。この発見にはさらなる裏付けが必要だが、誕生して間もない地球で、生命が急激に出現したことが示唆されるという。

一方で、この発見を疑問視する声も多い。研究者たちは通常、岩石の微細な特徴を調べることで化石化したストロマトライトを特定する。問題は、この構造物が含まれている岩石が、数十億年にわたるプレート運動に伴い高温・高圧になったことである。高温・高圧下では岩石の結晶組織が変化するため、微細な特徴の多くは消え去ってしまうのだが、この岩石は、地球上でも有数と言ってよいほど物理的に痛めつけられているのだ。そのため、今回の発見をめぐる論争が早くもヒートアップする事態になっている。ワシントン大学（米国シアトル）の地球生物

学者Roger Buickは、「疑問点と問題点が14もあります。それらが解決されないかぎり、私は彼らの主張を信じることはできません」とまで言う。

今回の発見の舞台となったグリーンランドのイヌア地域は、研究者たちが以前から数十億年前の生命の痕跡を探し続けてきた場所だ。イヌア地域の岩石の化学的性質に関するこれまでの研究（炭素同位体を分析した1999年の論文²など）からは、この地域の岩石に初期の生物の「バイオマーカー（生物指標化合物）」が微量に含まれていることが示唆されている。けれども、長年にわたりさまざまな説が提唱されており、決着はまだついていない。

万年雪の下から現れたもの

今回は、雪解けが新しい手掛かりをもたらした。ウロンゴン大学（オーストラリア）の地質学者Allen Nutmanが率いるチームは、イヌア地域の気温の上昇により万年雪が解けて露頭が現れた場所を訪れた。そこで37億年前の岩石の塊を切り出し、オーストラリアに持ち帰って分析した。

研究チームはその岩石中に、太古の生命に関する他の手掛かりと一緒に、ストロマトライトと思われる構造物を



この岩石中の隆起した層は、初期の生命の痕跡なのかもしれない。

発見した。チームの一員であるニューサウスウェールズ大学（オーストラリア・シドニー）の地質学者Martin Van Kranendonkは、「タイプの異なる証拠が手に入ったことが、今回の発見をより説得力のあるものにしました」と胸をはる。

Van Kranendonkらによると、岩石中の構造物は高さ1~4cmの小さな隆起で、その形状や内部の層状構造は古代や現代のストロマトライトによく似ているという。構造物周囲の岩石の組織から、この岩石が浅い海底で堆積してできたことが示唆される。これは、今日のバハマ諸島や西オーストラリアなどで成長するストロマトライトと同じである。また、岩石にはドロマイト（苦灰石）などの炭酸塩鉱物が含まれていた。こうした鉱物は新しいストロマトライトでもよく見られる。

最古の生命の証拠として現在広く受け入れられているのは、西オーストラリアのピルバラ地域で発見された約35億年前のストロマトライトだ³。今回グリーンランドで見つかった構造物は、それよりさらに約2億2000万年も古い

ことになる。「グリーンランドの岩石から見つかった構造物の厚みは、オーストラリアのものに比べると非常に薄いのです」と話すのは、NASAのジェット推進研究所（米国カリフォルニア州パサデナ）の宇宙生物学者Abigail Allwood。「とはいえ、元の状態をほとんどとどめていない岩石中に何らかの構造物が見つかるだけでも、信じられないくらい幸運なのです。だからこそ注目に値するのです」。

疑問の声

古代のストロマトライトを研究する上で問題になるのは、層状構造が生命とは無関係な過程によっても形成し得ることだ。実際、海底に沈殿する鉱物が、バスタブの輪じみのような層状構造を残すことがある。これはストロマトライトのように見えるが、もちろん違う⁴。

オーストラリア・パース在住の古生物学者で、古代のストロマトライトの研究をしてきたKathleen Greyは、「これらの構造物は、せいぜい『擬似ストロマトライト (pseudostromatolite)』とでも分類するべきものです」と言う。

「残念ながら私には、最古の生命という主張の根拠となるような説得力のある証拠だとは思えません」。

マサチューセッツ工科大学（米国ケンブリッジ）の地球生物学者Tanja Bosakは、研究チームがストロマトライトだとしている構造物の内部や近くに少量の有機物があるかどうかを調べてみたいと言う。岩石中の各種の炭素を比較すれば、その構造物が生物起源であるか否かを明らかにする役に立つかもしれないからだ。

またAllwoodは、グリーンランドの岩石は少なくとも、宇宙生物学者にとって有益な情報となるに違いないと考えている。彼らは、2020年に予定されているNASAの火星ミッションにより初めて地球にもたらされるであろう火星の岩石を分析するための準備を進めている。今回の「ストロマトライト発見」という報告は、生命の証拠といえる要素とは何であるかを科学者たちが議論する最初の機会になるかもしれない。

そして、Allwoodはこう続ける。「例えば、火星で今回のようなものを発見した場合に、そこにただ旗を立てて『これが生命の証拠だ』と言うでしょうか？私はそうは思いません」。

（翻訳：三枝小夜子）

Claims of Earth's oldest fossils tantalize researchers

doi: 10.1038/nature2016.20506
2016.8.31 (Published online)

Alexandra Witze

1. Nutman, A. P., Bennett, V. C., Friend, C. R. L., Van Kranendonk, M. J. & Chivas, A. R. *Nature* <http://dx.doi.org/10.1038/nature19355> (2016).
2. Rosing, M. T. *Science* **283**, 674–676 (1999).
3. Walter, M. R., Buick, R. & Dunlop, J. S. R. *Nature* **284**, 443–445 (1980).
4. Grotzinger, J. P. & Rothman, D. H. *Nature* **383**, 423–425 (1996).

クローン動物短命説は誤りだった

初の厳密な検証が行われ、通常の動物と同じであることが判明した

20年前のクローンヒツジ「ドリー」の誕生は、哺乳動物の成体細胞から抽出したDNAを未受精卵に注入することによってドナーと全く同じ遺伝情報を持つ動物を作製できることを証明した。だがドリーは若くして死んだため（6歳で死亡）、クローン動物の寿命は短いという印象が残った。

クローン動物は「自然に生まれた」動物よりも生まれつき不健康なのだろうか？ それを明らかにするために、ノッティンガム大学（英国）の発生生物学者Kevin Sinclairは、ドリーのクローン姉妹であるデビー、デニス、ダイアナ、デージーの4頭を、誕生から中年期まで追跡調査した。この4頭はドリーと同じ凍結乳腺細胞に由来するクローンヒツジだ。Sinclairらはこの他、別の細胞から作られた9頭のクローンヒツジも観察した。

これら13頭は現在9歳を超えているが（人間では70歳代から80歳代に相当）、全て通常のヒツジと同程度に健康であることが、骨スキャンと血糖値、詳細な血圧測定から明らかになった。「これらのクローンヒツジは完全に正常だと言えます」とSinclair。彼らはこの成果を*Nature Communications*に報告した。

ではドリーはどうして早世したのだろうか？ ドリーの研究に携わっていた研究者らは、ドリーは同じ群れに広まっていた伝染病によって死亡したのであって、クローン特有の問題が原因ではないという。確かにドリーはひざに関節炎を起こしていたが、ドリーが生まれたロスリン研究所（英国エディンバラ）の遺伝学者Helen Sangは、室内で飼育されドリーと同様に頻りに餌を与えられたヒツジは皆、関節に問題が生じるだろうと言う。

クローン作製は、20年たった現在も、自然交配よりも効率が悪。だが今回の研究は、クローン動物が胎内で無事に育って出生後の数週間を健康に乗り切れば、自然に生まれた仲間と同様に生き延びると期待できることを示している。

クローン技術は現在、研究用の胚性幹（ES）細胞の作製や、高付加価値の家畜の育種に用いられている。クローンに長寿あれ！

（翻訳協力：栗木瑞穂）

乳房にマイクロバイーム

乳がんリスクを左右している可能性も

人体で繁殖している細菌群の研究が爆発的に増えており、その主役は腸のマイクロバイームだ。だが*Applied and Environmental Microbiology*に掲載された最近の研究によると、細菌は女性の乳房組織にも存在し、やはり健康に重要な影響を与えているらしい。

米国女性の8人に1人は一生の間に乳がんと診断されるが、ほとんどの場合、発病の原因は不明だ。年齢、遺伝的素因、環境変化との関連が考えられている。そして、細菌の存在が環境要因の1つである可能性をうかがわせる研究結果が蓄積してきた。早くも1960年代には、授乳によって乳がんのリスクが低下する傾向があることを示した研究がいくつかあり、その後、これは母乳が有益な細菌の成長を助けているためである可能性が示唆されている。

ウェスタン・オンタリオ大学（カナダ）細菌学・免疫学教授のGregor Reidらはこの可能性を確かめるため、乳腺腫瘍摘出術や乳房切除術を受けた女性58人の乳房組織試料と、健康だが乳房縮小または豊胸手術を受けた女性23人の組織試料について、試料中の細菌のDNAを解析した。この結果、乳がん患者では、腸内細菌科の細菌やブドウ球菌属、パチルス属などの細菌が多いのに対し、乳がんではない女性ではラクトコッカス属や連鎖球菌属などの細菌が多いことが分かった。

乳房組織に微生物がいること自体は不思議ではないと、ジョン・ウェインがん研究所（米国カリフォルニア州）で乳がんを研究している免疫学者Delphine Leeは言う。「ただし、乳がんの近くで特定の細菌が見つかる原因が、それらの細菌が乳がんを引き起こしているためなのか、単に腫瘍環境の方が細菌にとって繁殖しやすいためなのかはまだ分かりません」。

ある種の細菌が乳がんを誘発している場合、どんなメカニズムで誘発しているのだろうか？ 腸内細菌科やブドウ球菌属の細菌にはDNAを傷つけるものがあるらしい。DNAの損傷はがんにつながる。炎症を引き起こす細菌もいるだろう。

正確なメカニズムをつかむにはさらに動物実験を重ねる必要があるが、いずれは患者の細菌構成をがんスクリーニング検査のバイオマーカーとして利用できるようになるとReidは期待している。

（翻訳協力：栗木瑞穂）

人工ブラックホールで 「ホーキング放射」を確認

実験室で作り出された「音のブラックホール」で、ホーキング放射に極めて近い現象が観察された。

強大な重力によりあらゆるものを吸い込むブラックホール。その名前は、光でさえここから脱出できないことに由来しているが、実は「真っ黒」ではないという。ケンブリッジ大学（英国）の理論物理学者Stephen Hawkingが40年以上前に提唱した説によれば、ブラックホールは放射を出して徐々に縮小し、最終的には消滅する。理論物理学界を揺るがしたこの現象は「ホーキング放射」と呼ばれており、これをめぐる論争はいまだに決着をみていない。

テクニオン・イスラエル工科大学（ハイファ）の実験物理学者Jeff Steinhauerは、7年前から、人工のブラックホールを作る研究にほとんど一人で取り組んできた。そしてこのほど、実験的に生じさせた量子ゆらぎから人工のブラックホールを作り出し、ホーキング放射のような現象を観察した。この研究成果は2016年8月15日に*Nature Physics*¹に発表された。Steinhauerは、ホーキング放射の理論と他の理論の間に生じるジレンマの解決に役立つだけでなく、量子力学と重力理論の統合への道筋を示してくれるかもしれないと言う。

本物のブラックホールでホーキング放射を観察することはほぼ不可能であるし、これまでに行われた人工ブラックホールの実験で観察された放射は自発

的なゆらぎに由来するものではなかった。そう考えると、Steinhauerが観察した現象は、これまでで最もホーキング放射に近いものといえるかもしれない。

物理学者たちはSteinhauerの研究に大いに感心しているが、その結果についてははっきりしない点があると指摘する。またノッティンガム大学（英国）の理論・実験物理学者Silke Weinfurter

は、「論文に書いてあるとおりなら、この実験は本当に素晴らしいと思います。ただ、天体物理学的ブラックホールの周りにホーキング放射があることを証明するものではありません」と言う。

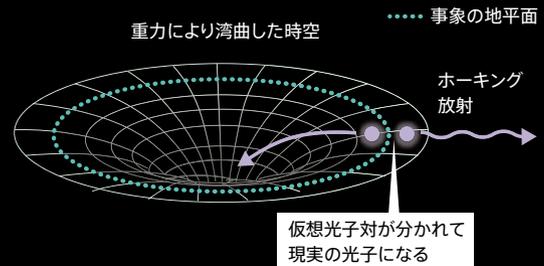
ブラックホールに落ち込むと、ある面を境に光でさえ逃げ出せなくなる。「事象の地平面」と呼ばれるこの境目が、物理学にとって特別な結果を持つことをHawkingが発見したのは1970年代半ばであった。出発点となったのは、量子論が要請するランダムさが「完全な無」の存在を否定していることだった。真空の宇宙空間にもエネルギー場のゆらぎがあり、仮想的な光子対が絶えず生成と消滅を繰り返している。けれども、特定の場合には仮想の光子が現実の光子になることができる。それは、対生成した光子がたまたま事象の地平面の内側と外側に分かれて、

人工ブラックホールの作り方

極低温の原子の雲を利用して、実験室でブラックホールの事象の地平面（そこを超えると重力が強くなりすぎて光でさえ脱出できなくなるところ）のようなものが作られた。この人工のブラックホールは、一種のホーキング放射を出しているようだ。

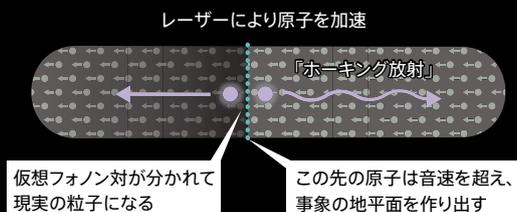
本物のブラックホール

宇宙空間の真空の量子ゆらぎから仮想光子が対生成する。時に、仮想光子が対消滅する前に一方の光子が事象の地平面の内側に捕らえられると、両者は現実の粒子になる。ブラックホールから逃れた光子はホーキング放射として外に出る。



人工のブラックホール

チューブ中の極低温原子は、量子ゆらぎにより仮想粒子（ここでは量子化された音波「フォノン」）のペアを生じる。フォノン対の一方が超音速領域に落ち込んでトラップされると、音のホーキング放射が出る。



対消滅しないときである。このとき、一方の光子はブラックホールの内側に捕らえられ、他方の光子はブラックホールの外側の宇宙空間へと逃げていく。

Hawkingは、このようにしてブラックホールから非常に弱い放射が出ることに加え、ブラックホールの中に落ち込む粒子が常に「負のエネルギー」を持っているためブラックホールは質量を奪われて縮小し、最終的には消滅することを示した。彼はさらに、ブラックホールが消滅すると、その中に落ち込んだ物体に関する全ての情報が失われるとして物議を醸した。宇宙にある情報の総和は不変であるという、広く受け入れられている原理に反するからだ (*Nature* ダイジェスト 2014年8月号「地平線に見えてきた複雑性」参照)。

1980年代初頭、ブリティッシュ・コロンビア大学(カナダ・バンクーバー)の物理学者William Unruhは、Hawkingの予想のいくつかを検証する方法を提案した²。滝のある川で流れに逆らって泳ぐことを考えてみよう。滝に近づくと水の流れが加速するため、ある点を超えると流れに逆らえなくなって滝に落ちてしまう。同様に、流れに沿って流速が増すような媒質中を伝わる音波は、媒質の流速が音速以上になる点を過ぎると、媒質の流れから逃れられなくなる。Unruhは、この点は事象の地平面と等価であり、音のホーキング放射が観察できると予想した。

Steinhauerはこのアイデアを、絶対零度に限りなく近い温度まで冷却したルビジウム原子の雲を媒質に使うて実現した。長さ数mmの葉巻形チューブに閉じ込められたこの原子は、ボース・アインシュタイン凝縮体と呼ばれる量子状態になっている。このときの音速はわずか秒速0.5mmだ。彼は、ルビ

ジウム原子を加速して一部の原子を秒速1mm以上の超音速にすることにより、事象の地平面を作り出した(「人工ブラックホールの作り方」参照)。

極低温のボース・アインシュタイン凝縮体では、宇宙の真空中で生じるものに似た、ごく弱い量子ゆらぎが生じる。真空のゆらぎから光子対が生成するように、このゆらぎからはフォノン(量子化された音波)のペアが生成するはずだとSteinhauerは言う。そして、フォノン対の一方が事象の地平面の超音速側に落ち込み、他方は「ホーキング放射」として出ていくという。

音の事象の地平面の超音速側では、フォノンはトラップされる。Steinhauerがボース・アインシュタイン凝縮体の写真を撮影したところ、事象の地平面をはさんで等距離のところにある原子の密度に相関があった。このことは、フォノン対が量子的にもつれていることを示していて、同じ量子ゆらぎから自発的に生成したものと分かると彼は言う。つまり、ボース・アインシュタイン凝縮体からホーキング放射が生じたということだ。

彼が以前のバージョンで観察した放射は、ボース・アインシュタイン凝縮体そのものから生じたものではなく、誘発されたものだった³。また、UnruhとWeinfurterが率いる研究チームが以前行った水の波を使った実験は、量子効果を証明しようとするものではなかった⁴。ワイツマン科学研究所(イスラエル・レホヴォット)の物理学者で、光ファイバー中のレーザー波を利用してホーキング放射を実証しようとしているUlrich Leonhardtは、「先駆的な論文です」と言うものの、量子もつれの証拠は不十分に見える指摘する。Steinhauerの実験では比較的高エネルギーのフォノ

ンの相関が示されただけで、低エネルギーのフォノン対は相関していないように見えるからだ。彼はまた、Steinhauerの媒質が本当にボース・アインシュタイン凝縮体なのか確信が持てないとも指摘する。つまり、ホーキング放射に似たものを生じる、別の種類のゆらぎが存在する可能性も考えられるのだ。

人工ブラックホールの観察から、本物のブラックホールの謎解明の手掛かりが得られるかまだ分からない。スタンフォード大学(米国カリフォルニア州)の理論物理学者Leonard Susskindは、「いわゆる情報パラドックスの解明につながるとは思えません」と言う。天体物理学的ブラックホールとは違い、ボース・アインシュタイン凝縮体は蒸発しないため、Steinhauerの音のブラックホールで情報が失われることはないからだ。

とはいえ、Steinhauerの実験の結果が裏付けられれば、「ヒッグス粒子の検出がHiggsらに勝利をもたらしたのと同じ意味で、Hawkingに勝利をもたらすでしょう」とSusskindは言う。ヒッグス粒子の存在を疑う研究者はほとんどいなかったが、2012年に実際に発見されたことで、この粒子の存在を予言したPeter HiggsとFrancois Englertはノーベル賞を受賞した。 ■

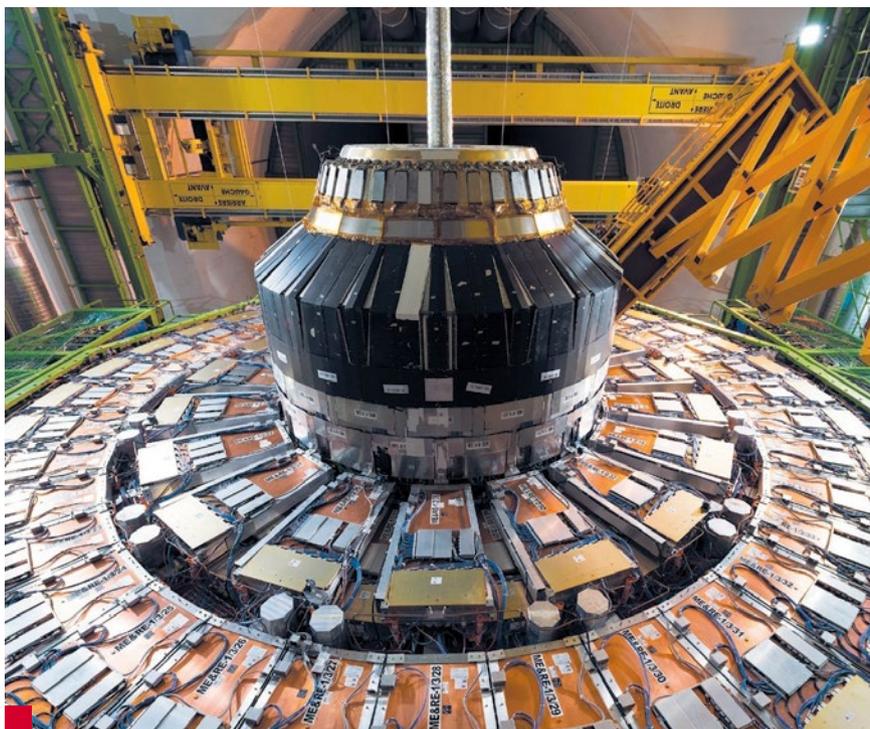
(翻訳：三枝小夜子)

Black-hole mimic triumphs

Vol. 536 (258-259) | 2016.8.18

Davide Castelvecchi

1. Steinhauer, J. *Nature Physics* **12**, 959-965 (2016).
2. Unruh, W. G. *Phys. Rev. Lett.* **46**, 1351-1353 (1981).
3. Steinhauer, J. *Nature Physics* **10**, 864-869 (2014).
4. Weinfurter, S. et al. *Phys. Rev. Lett.* **106**, 021302 (2011).



大型ハドロン衝突型加速器（LHC）は、素粒子物理学の標準模型では説明できない現象をまだ見つけていない。

次のLHCを建設するのは誰？

ヒッグス粒子を発見した大型ハドロン衝突型加速器（LHC）の後継になる次世代の巨大加速器を、誰がどこに建設するのか。明確な見通しは立っていない。

欧州原子核共同研究機関（CERN；スイス・ジュネーブ近郊）の世界最大の粒子加速器、大型ハドロン衝突型加速器（LHC）を使って、2012年にヒッグス粒子が発見された。今後の素粒子物理学を支える次世代の巨大加速器は、ヒッグス粒子などの既知の粒子、さらには近い将来発見されるかもしれない新粒子の性質を精密測定することが主目的になる。しかし、その建設を誰が

どこで進めるのか、複数の計画があるが明確な見通しは立っていない。今後の展望は、素粒子物理学の標準模型では説明できない現象がLHCで発見されるかと、LHC後継機の建設に意欲を見せている中国の計画が実際に進むかにかかっている。

LHCでは、標準模型に含まれるヒッグス粒子の他、以前から予言されている超対称性粒子など、標準模型の枠外

の粒子の発見も期待された。LHCは実験を続けているが、標準模型で説明できない現象はまだ発見されていない。2016年8月3～10日に米国シカゴで第38回高エネルギー物理学国際会議（ICHEP）が開かれ、多数の物理学者が参加したが、そこでの議論は、素粒子物理学が次にどう進むべきか、これまでほど明確ではないことをうかがわせた。

後継加速器計画の中で最も具体的に進んでいるのが、国際リニアコライダー（ILC）計画だ。日本、欧州、米国で進んでいた線形加速器計画が2004年に統合されたもので、電子と陽電子を全長31kmの直線軌道で加速して衝突させる。LHCが全周27kmの円形軌道で陽子同士を衝突させるのとは対照的だ。国際研究グループにより、大まかな設計は終わっている。

きれいな衝突

陽子は3つのクォークでできた複合粒子なので、陽子同士が衝突すると雑多な破片が生じる。ILCで使われる電子と陽電子は基本粒子であり、陽子よりも「きれいな衝突」が起こり、高精度の測定に適している。このため、ヒッグス粒子と、1995年に発見された最も重い基本粒子であるトップクォークの詳細な研究を行うことができる。標準模型では説明できない物理現象も発見できるかもしれない。物理学者たちにとっては、ILCを建設する理由としては十分だ。

日本の物理学者たちは、ILCを日本に建設することを提案し、2013年、国内の建設候補地に東北地方の北上山地を選んだ。ILCを誘致した国は、巨額の建設費の半分程度の負担を求められるとみられる。欧米は財政難などから誘致に消極的で、文部科学省が把握し

ている範囲では今のところ、政府レベルで誘致を表明している国はない。日本政府が誘致を表明すれば実現する可能性が高いとみられる。ILCの実験開始は2030年ごろとされ、ILCの日本での建設を受け入れるか、日本の文部科学省が2016年に決定することが期待されていた。

しかし、文部科学省が設置した「国際リニアコライダーに関する有識者会議」（座長＝平野眞一・名古屋大学名誉教授）は2015年6月、「ILCでヒッグス粒子とトップクォークの精密測定だけでなく、新粒子を発見できる可能性の見通しを得るべきであり、衝突エネルギーを13テラ電子ボルト（TeV）に高めた改良LHCでの最初の実験（2017年末までの予定）の結果を踏まえるべきだ」という提言をまとめた。

高エネルギー加速器研究機構（KEK；茨城県つくば市）の機構長、山内正則は、ICHEPでの今後の研究施設に関する分科会の講演者の1人だった。山内は「有識者会議の提言は、『LHCが新たに何を見つけるかに関係なく、ILCは建設されるべきだ』という主張に有識者会議が納得していないことを意味しています。それが提言の隠れたメッセージです」と話す。

もしもLHCが新たな現象を発見したら、ILCで研究すべきテーマが増え、新加速器を建設する意義は増す。

米国の物理学者たちは以前から、線形加速器の建設を支持してきた。山内は「100億ドル（約1兆円）と見積もられているILCのコストを削減する方法を、文部科学省と米国のエネルギー省が共同で検討しています。約15%の削減は可能です。しかし、日本政府が公式に日本での建設に同意するには、建設費を他の国々も負担するという約

世界の加速器計画

欧州原子核共同研究機関（CERN）の大型ハドロン衝突型加速器（LHC）よりもさらに大きな粒子加速器の建設計画が、世界各地に進んでいる。

— 陽子衝突型

— 電子・陽電子衝突型



束が得られることが必要でしょう」と話した。

中国の巨大加速器

日本を追いかけているのは中国の研究チームだ。ヒッグス粒子の発見後もなく、中国科学院高エネルギー物理学研究所（北京市）の所長、王貽芳（Wang Yifang）が率いる物理学者たちは、中国が2030年代に加速器を持つ計画を提案した。この加速器は全周50～100kmの円形の電子・陽電子衝突型で、ヒッグス粒子などの高精度測定が主目的だ。この計画も各国に建設費の一部負担を求めている。エネルギーはILCに及ばないとみられるが、建

設に伴い作られるトンネルを利用すれば、LHCよりもはるかに大きな陽子・陽子衝突型加速器を低コストで建設できる可能性がある。

王らはICHEP分科会で、この計画の研究開発を理由に中国科学技術部から3500万元（約5億3000万円）の研究資金を2016年に獲得したと報告した。また王は「私たちはさらに8億元（約120億円）の資金要請を行いました。中国の国家発展改革委員会は2016年7月、それを却下しましたが、資金獲得ルートは他にもまだあります」と話した。王らは今後、この計画への国際的な関心を高める活動を行うつもりだ。

「中国の提案は、ヒッグス粒子物理学に対する世界的な関心を示すもので、ILC建設の意義を高めます」と山内は話す。しかし、もし中国の計画が先に進めば、各国の研究資金がILCではなく、中国に流れてしまうかもしれない。「中国の計画は、ILCにとってマイナスの影響を持つ可能性はあります」と山内は話す。

スーパー LHC

中国の計画はCERNの計画にも影響するかもしれない。CERNは、全周100kmの円形軌道を建設してLHCの7倍以上のエネルギーで陽子同士を衝突させる加速器を計画している（「世界の加速器計画」参照）。しかし、CERNは2030年代半ばまでは、LHCの陽子ビームの強度を上げる改良で忙しいはずだ。それまでに中国が陽子衝突型加速器にも使えるトンネルを建設すれば、CERNのこの「スーパーLHC」が各国の支援を得ることは難しくなるかもしれない。

CERNの所長Fabiola Gianottiは、ICHEPで暫定的なアイデアを提案した。

2035年頃までにLHCに新世代の超伝導磁石を導入し、LHCのエネルギーを現在の14TeVから28TeVに上げるといふものだ。しかし、この上昇幅はそれほど大きくはない。「LHCが14TeVで新しい物理現象を見つけたら、この計画は強い科学的根拠を持つことになります」とGianottiは話す。改良費用は50億ドル（約5000億円）で、CERNの通常の予算内で賄えるかもしれない。

この数十年間、物理学者たちは新たな加速器を建設しては標準模型が予言した粒子を順に見つけてきた。しかし今後は、新たな粒子が見つかる保証があるわけではない。ICHEP分科会の出席者の発言には、この分野の将来について若い研究者を安心させようとする言葉や、研究資金を巨大加速器ではなく、別の研究方法に使った方がいいのではないかという声もあった。

米国は巨大加速器建設ではなく、ニュートリノ研究に注力する方針だ。ニュートリノは基本粒子であり、ニュートリノを調べることで標準模型を超える物理現象が見つかる可能性がある。フェルミ国立加速器研究所（イリノイ州バタビア）は、10億ドル（約1000億円）の予算で「長基線ニュートリノ施設」を建設し、ニュートリノ物理学の世界の中心地になることを目指している。この施設は、1300km離れたサウスダコタ州にある検出器へニュートリノビームを送る実験を行うもので、実験開始は2026年の予定だ。施設の建設費は2017年に米国議会で承認される必要がある。

（翻訳：新庄直樹）

Who will build the next LHC?

Vol. 536 (383-384) | 2016.8.25

Elizabeth Gibney

宇宙の謎を解くカギ、 ニュートリノ

ニュートリノと、その反粒子である反ニュートリノが異なるふるまいをすることが確認されれば、現在の宇宙に反物質がほとんど存在していない理由を説明できるかもしれない。

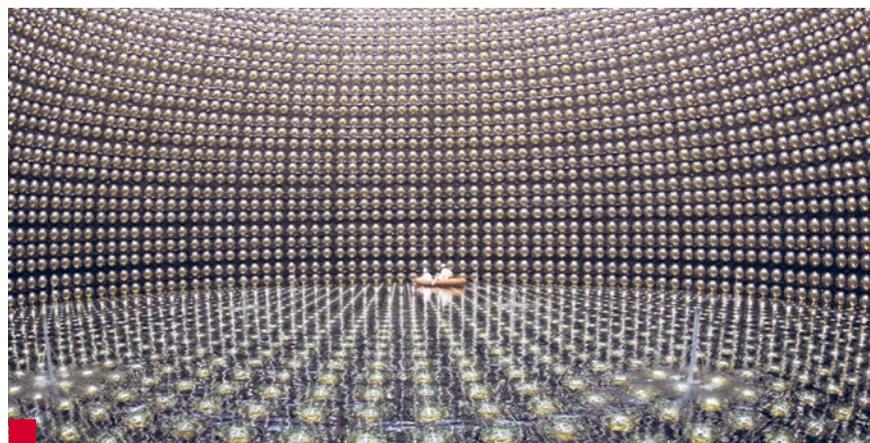
宇宙が誕生したときには物質と反物質が同じ数だけ生成したはずなのに、現在の宇宙にあるのは物質ばかりで反物質がほとんど存在していない。現在日本で行われている実験は、この物理学最大の謎の1つについて、答えを暗示している。素粒子のニュートリノと、その反粒子である反ニュートリノは、異なるふるまいをするようなのだ。

この報告は、米国イリノイ州シカゴで開催された高エネルギー物理学国際会議（ICHEP）で8月6日に発表された。ただし、確実に違いがあると言うためにはもっと多くのデータが必要だ。ノースウェスタン大学（米国イリノイ

州エバンストン）の理論物理学者 André de Gouvêa は、「まだ断定する段階ではありません」と言う。

そうであっても、この発表によりニュートリノ研究への期待はますます高まるだろう。ニュートリノはどこにでも存在しているが、その検出は非常に困難だ。その一方で、近年では、物理学のあらゆる問題の解決のカギを握ると考えられるようになってきている。

物理学の標準モデルは、不完全ではあるものの、なかなかうまくいっている理論である。この理論によれば、ニュートリノの質量はゼロであるはずだったが、予想に反して質量があるこ



スーパーカミオカンデは、5万tの超純水を蓄えた水タンクと、その壁に設置された約1万2000本の光電子増倍管からなる検出器で、ニュートリノと反ニュートリノを分析している。

KAMIOKA OBSERVATORY, ICRR (INST. FOR COSMIC RAY RESEARCH), UNIV. TOKYO

とが1990年代に明らかになった (Y. Fukuda *et al. Phys. Rev. Lett.* **81**, 1562; 1998)。フェルミ国立加速器研究所 (米国イリノイ州バタビア) のニュートリノ実験NOvAに従事する物理学者Keith Materaによれば、それ以来、世界中でニュートリノ実験が盛んに行われるようになり、研究者たちは、物理学の新しい説明を探しているならニュートリノを調べるべきであることを知ったという。「ニュートリノは標準モデルの『ひび割れ』なのです」。

ビッグバンの後に物質と反物質が同じ量ずつ生成したなら、対消滅により放射だけを残して全て消滅していただろう。K中間子やB中間子のように、粒子と反粒子が異なるふるまいをすることが確認されている粒子もあるが、これだけでは今日の宇宙に反物質がほとんど存在しない理由を説明できない。

目指すは3 σ

1つの答えとして、初期宇宙で非常に重い粒子が非対称に崩壊し、反物質よりも多くの物質を作り出したという考え方がある。一部の物理学者は、ニュートリノの仲間の重い粒子がその「非常に重い粒子」かもしれないと考えている。この理論では、今日のニュートリノと反ニュートリノが異なるふるまいをするのなら、初期宇宙のニュートリノと反ニュートリノの同じような不均衡により、反物質がほとんど存在しない理由を説明できるとされている。

この理論を検証するため、日本のT2K実験 (東海-神岡間長基線ニュートリノ振動実験) の研究者たちは、ニュートリノと反ニュートリノにおける「ニュートリノ振動」の違いを調べた。ニュートリノ振動とは、ニュートリノが空間を飛んでいくときに3つの

フレーバー (電子型、ミュー型、タウ型)の間を移り変わる現象だ。研究チームは、茨城県東海村のJ-PARC (大強度陽子加速器施設) で生成したミューニュートリノのビームを、295km以上離れた岐阜県飛騨市神岡鉱山内の地下1000mに位置するニュートリノ検出器「スーパーカミオカンデ」に打ち込んで、飛行中のミューニュートリノのうち電子ニュートリノに変化したものが何個出現したかを数えた。続いて、J-PARCで反ミューニュートリノのビームを生成して、同様の実験を繰り返した。

ICHEPで発表を行ったロチェスター大学 (米国ニューヨーク州) の物理学者・岩本康之介^{いわもとこうのすけ}は、T2K実験の全てのデータを組み合わせて解析した。その結果、ミューニュートリノのビームと反ミューニュートリノのビームは若干異なるふるまいを示したと言う。

ニュートリノと反ニュートリノが同じようにふるまうなら、約6年に及ぶ実験の間に、スーパーカミオカンデ検出器は24個の電子ニュートリノと7個の反電子ニュートリノを検出するだろうと予想された (反電子ニュートリノの数が少ないのは、反物質は生成も検出も困難であるため)。けれども実際に検出されたのは、32個の電子ニュートリノと4個の反電子ニュートリノだった。ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校 (米国) の物理学者でT2K実験のメンバーであるChang Kee Jungは、「複雑な数学を持ち出さなくても、物質と反物質が同じように振動していないことを示唆しているのは分かります」と言う。

T2K実験とNOvA実験からの予備的な知見は、同様のことを示唆していた。けれども、これまでの観測結果は偶然のゆらぎにすぎない可能性がある。

Jungによれば、信頼度は約2 σ (95%) で、ニュートリノと反ニュートリノが同じようにふるまう場合でも、20回実験すれば1回ぐらいはこのような結果になるという。現在のT2K実験が終了する2021年には、現時点の5倍の量のデータが得られているはずだ。しかし、ほとんどの物理学者がデータを合理的なものとするための信頼度は3 σ (99.7%) 以上であり、今回の発見の信頼度を3 σ にするためには現時点の13倍の量のデータが必要だ。それでも非対称性の証拠としては不十分なのだ。

T2Kチームは必要なデータを収集するため、実験を2025年まで延長する提案をする一方で、T2K実験の結果をNOvA実験の結果と組み合わせることでデータ収集のスピードアップを目指している。NOvAでは、フェルミ研究所から810km離れたミネソタ州北部の鉱山に向かってニュートリノビームを打ち込んでいる。2017年には反ニュートリノビームに切り替えて同様の実験を行う予定だ。Jungによると、T2KとNOvAは共同で分析を行うことに合意済みで、2020年頃には合計で3 σ に届く可能性があるという。ただし、正式な発見とされるのに必要な5 σ (99.9999%) に到達するには、現在世界中で計画されている新世代のニュートリノ実験が必要かもしれない。

ニュートリノについては、ほぼ毎年のように新しい発見がある、とde Gouvêaは言う。「素粒子物理学の時間スケールでは、これは本当に急速な変化です」。

(翻訳: 三枝小夜子)

Neutrino clue to Universe riddle

Vol. 536 (261-262) | 2016.8.18

Elizabeth Gibney

太陽系から最も近い恒星に、地球に似た惑星

プロキシマ・ケンタウリの周りを公転する地球サイズの惑星には、液体の水があるかもしれない。もしかすると生物もいるかもしれない。

太陽系に最も近い恒星プロキシマ・ケンタウリの周囲に、地球サイズの惑星が見つかった。さらにその惑星の軌道は、液体の水が存在するのにちょうどよい距離にあるという。ロンドン大学クイーンメアリー校（英国）の天文学者で、今回の発見をした研究チームを率いる Guillem Anglada-Escudé は、「ここから生命探査が始まるのです」と言う。この発見は、*Nature* 2016年8月25日号¹に発表された。

人類がこの惑星を探検する最初の機会は、数十年後に訪れるかもしれない。起業家ユーリ・ミルナー（Yuri Milner）らが2016年4月14日に発表した「ブレイクスルー・スターショット」計画のターゲットになっているからだ。このプロジェクトでは、超小型のレーザー

推進式星間宇宙船を建造し、その船団の帆に地球からレーザーを照射し光速の20%まで加速させることで、地球からプロキシマ・ケンタウリまでの1.3パーセク（4.2光年）の距離を約20年で旅することを目指している。

プロキシマは赤色矮星^{わいせい}で、太陽よりもはるかに小さく、非常に暗い。その惑星の質量は地球の1.3倍以上あり、公転周期は11.2日だ。コロンビア大学（米国ニューヨーク）の天文学者 David Kipping は、「液体の水があって生命が存在する可能性のある、まさに典型的な惑星です。わくわくします」と語る。

見えない惑星を探す

プロキシマを周回する惑星の存在は、複数の研究結果から示唆されていた。科

学者たちは2000年から、チリのラ・シヤにある欧州南天天文台（ESO）の超大型望遠鏡VLTの紫外線・可視光エシエル分光器（UVES）を使って、惑星の重力によってふらつく恒星の光の変化を探していた。観測結果は、11.2日の周期でプロキシマに何か起きていることを示していたが、天文学者たちは、その信号がプロキシマの周りを公転する惑星によるものなのか、別の種類の活動（プロキシマのフレアなど）によるものなのかを見極められずにいた。

2016年1月、Anglada-Escudéらは、プロキシマの惑星を確認するための観測に着手した。ESOは彼らの要請に応じて、1月19日から3月31日までのほぼ毎晩、3.6m望遠鏡の高精度視線速度系外惑星探査装置（HARPS）を使って20分ずつ観測できるようにした。「10日間の観測を終えた時点で、惑星の存在ははっきり分かっていました」と Anglada-Escudéは言う。

1990年にNASAの宇宙探査機ボイジャー1号がはるかかなたから地球を撮影した有名な写真「パール・ブルー・ドット」にちなみ、今回のプロジェクトは「パール・レッド・ドット」と名付けられた。プロキシマは赤色矮星なので、その惑星は地球の夕焼けのような赤やオレンジがかった色に見えるだろうと予想されたからだ。

この惑星は、液体の水が存在するのにちょうどよい程度にプロキシマから離れているが、それ以外の要因により生物が生存できない環境になっていることも考えられる。例えば、惑星とプロキシマの間で「潮汐ロック」が起きていて、惑星がプロキシマに常に同じ面を向けている可能性がある。その場合、プロキシマに向いている面は焼け付くような高温で、反対側の面は凍え



新たに発見された惑星は、11.2日周期でプロキシマ・ケンタウリの周りを公転している。

ような低温だろう。また、活動的なプロキシマは、時に危険なX線フレアを惑星に浴びせてくるかもしれない。だがこの惑星に、X線フレアから惑星表面の生物を守る大気があるかどうかはまだ分からない。

プロキシマは単独の恒星ではなく、ケンタウルス座α星という三重連星の1つである。残りの2つの恒星はα星A、α星Bと言い（プロキシマにはα星Cという別名がある）、2012年にはα星Bに地球程度の質量の惑星があるとする論文が発表されたこともあった²。こちらの論文は現在ほとんど否定されているが^{3,4}、太陽系外惑星の専門家たちは今回の結果から、プロキシマに惑星があるのはほぼ確実に見ている。

Anglada-Escudéのチームは、2016年1月に行われた新しい観測データと、2000年に始まった古い観測データを組み合わせたことで、今回の発見の信頼性を高めることができたという。研究チームのメンバーであるテキサス大学オースティン校（米国）の天文学者Michael Endlは、「信号は、位相の点でも振幅の点でも、長期にわたってしっかり存在しています。惑星の存在を示す明確なサインです」と言う。またこのデータは、プロキシマの周りを100～400日周期で公転する第2の惑星が存在する可能性も示唆している。

研究者たちは現在、この惑星がプロキシマの前を横切る「トランジット」現象を地球から見るができるか調査中である。こうした現象からは、惑星に大気があるかどうかを明らかにできる可能性がある。Kippingが率いる研究チームは、プロキシマの周りのトランジットを独立に探していて、現在、その信号を探し出すために猛然とデータ処理を進めている。

ペンシルベニア州立大学（米国ユニバーシティパーク）の天体物理学者Steinn Sigurdssonは、「プロキシマの惑星の発見は、科学者たちが矮星の周りの小さな惑星に関心を寄せるようになった時期とうまく重なった」と言う。NASAのケプラー宇宙望遠鏡による観測から、矮星の周りには岩石惑星がよく見つかることが分かっている。その上、矮星は銀河系で最も一般的なタイプの恒星だ。「矮星の周りで地球に似た惑星を探すという戦略の正当性は、これらの事実によって裏付けられます」。

いつの日か、プロキシマの惑星が、惑星研究の新たなステージの第一歩とし

て見られるようになるかもしれない。「この惑星が、次世代の望遠鏡の目標かつ焦点になるのです。いつか人類がこの惑星を訪れることさえあるかもしれません」とKippingは語る。 ■

（翻訳：三枝小夜子）

Nearby star hosts planet

Vol. 536 (381–382) | 2016.8.25

Alexandra Witze

1. Anglada-Escudé, G. et al. *Nature* <http://dx.doi.org/10.1038/nature19106> (2016).
2. Dumusque, X. et al. *Nature* **491**, 207–211 (2012).
3. Hatzes, A. P. *Astrophys. J.* **770**, 133 (2013).
4. Rajpaul, V., Aigrain, S. & Roberts, S. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **456**, L6–L10 (2016).

ヒトと動物の「キメラ」研究が 米国で解禁に？

米国立衛生研究所は、ヒトと動物のキメラを扱う研究プロジェクトへ資金を提供する方向に動き出した。

2015年9月、米国立衛生研究所（NIH；メリーランド州ベセスダ）は、動物胚にヒト幹細胞を導入して両者の細胞が入り混じった「キメラ」を作り出す研究への資金提供を一時停止した。しかし2016年8月4日にNIHは、この一時停止措置を一部の場合を除いて解除する方針案を打ち出した。またそれに伴い、倫理性を検討したり、助成金申請の見落としがないよう監視したりするための委員会を設置する。

今回のNIHの方針案では、ヒト細胞をヒト以外の霊長類胚に導入できる発生期間の幅を狭め、中枢神経系がで始める前の導入を認めていない。こうすることで、キメラ個体の脳に組み込まれるヒト細胞の数を少なく抑えられる。また、この案では、ヒト細胞を含む動物個体の繁殖も禁じており、非ヒト動物の子宮内でキメラ胚が成長したり、両親よりも「ヒト化」した動物個体が誕生したりすることを防ごうとし

ている。判断が難しいグレーゾーンの助成金申請は、委員会で検討されることになるだろう。

委員会が特に注意を払うことになる研究プロジェクトは、霊長類やごく初期の発生段階の哺乳類を扱うもの、あるいは、ヒト細胞が動物個体の脳に影響を及ぼす可能性があるものだ。齧歯類胚が、脳の発生に影響を及ぼす可能性のあるヒト細胞を含む場合でも、ある特定の時点を過ぎれば、委員会の検討対象から外される。齧歯類胚がヒトに似た個体になる可能性はほとんどないからだ。NIHの科学政策の副ディレクターであるCarrie Wolinetz（ワシントンD.C.）は話す。

研究者らは現在、初期の胚発生やヒト疾患を調べる用途でキメラを使っている。だが、キメラ研究の大きな目標の1つは、動物個体を操作して、その体内でヒトの臓器を成長させ、それを患者に移植することだ。

なお、米国と違って英国では、たとえ民間の資金提供による場合でも、承認を受けずにキメラ研究を行うことは違法である。

ロチェスター大学（米国ニューヨーク州）の神経科学者Steven Goldmanは、米国の2015年の資金提供停止は行き過ぎであり、解除されることになってホッとしたと話す。ロックフェラー大学（米国ニューヨーク）の発生生物学者Ali Brivanlouは、新しいルールでは、改変操作を行える胚発生の時期を制限するより、動物個体のヒト化の度合いを制限することに重点を置くべきだと話す。

また、ダルハウジー大学（カナダ・ハリファックス）の生命倫理学者Françoise Baylisは、ヒト要素を持つキメラ動物を研究で使う場合にどう扱

うべきかについて、現在のところ明確な指針がないことを心配している。こうした問題は、いずれ、キメラ研究を監督する委員会が助成金申請を審査する際に検討されることになるだろうとWolinetzは話す。今回のNIHの方針案については、広く一般からの意見を30日間にわたって受け付け、検討の後、NIHが最終方針を公表する。

Wolinetzは、2017年1月からの助成金サイクルにNIHの方針決定が間に合っていると考えている。

（翻訳：船田晶子）

US to lift ban on funding for human-animal hybrids

Vol. 536 (135) | 2016.8.11

Sara Reardon

公開データは自由に再利用してよいか？

データをネット上に公開する科学者も、公開データを再利用したい科学者も、知的財産権について最低限の知識を持つておく必要がある。

第三者がネット上の公開情報に基づいて何かを作ろうとする場合、その利用許可を得るのは驚くほど困難だ。無料オンラインリソース「Hetionet」は、28のパブリックリソースに置かれている薬物と遺伝子と疾患に関するデータを相互に結びつけたもので、数百万件の生物学研究から得られた知見が1つのネットワークにまとめられている。このデータベースを作ったペンシルベニア大学（米国フィラデルフィア）のデータ科学者Daniel Himmelsteinは、データベース構築のために研究者たちと連絡をとった際、研究者の何人かから「ネット上の公開データの再配布について許可を求められたことに驚いた」と言われた。オーストリア科学アカデ

ミー分子医学研究センターのバイオインフォマティシャンJörg Mencheは、「公開しているデータのライセンスが問題になる場合があるとは、夢にも思いませんでした」と話す。

Mencheはすぐに利用を許可したが、誰もが彼のように協力的だったわけではない。ある研究グループは一度も返事をよこさず、別の3つの研究グループの返事には法的に不明瞭な点が残っていた。Himmelsteinは結局、彼が利用したかった公開データセットから再配布を明確に禁じていた1つを除いただけで、再配布に関する利用許諾がまだ明確でない3つを含めた状態でHetionetの最終版を2016年7月に公開した。難航した上、法的に不明瞭な

状態を残してしまったのは、ネット上にデータセットを公開しただけでは第三者が合法的にそれを再配布できることにはならないことを、多くの研究者が分かっていないことにある、というのがHimmelsteinの見方だ。

科学者がネット上にデータセットを公開しても、その扱い方に法的に曖昧な点があると、第三者はそれらを有用なリソースとして活用することを躊躇する。そのため、科学の進歩の妨げになる恐れがあるとHimmelsteinは指摘する。科学者たちがネット上で公開する情報の量が増えるにつれ、この点はますます大きな問題になるだろう。「科学がデータの再利用に頼る割合はどんどん高くなっています」とHimmelstein。

データベース権

1つ1つのデータ（単なる事実）を著作権で保護することはできないため、多くの科学者は、アクセスに関する条件が明記されていないかぎり、公開されているデータセットは法的問題なしに再配布できているかもしれない。けれどもノッティンガム大学（英国）の知的財産権制度の専門家Estelle Derclayeによると、そうとは限らないという。

データベースを作成するために行われた投資を保護するために、欧州連合（EU）は著作権とは独立に「データベース権」を認めている。EU加盟国の科学者によって作成されたデータセットをHimmelsteinのような研究者が再配布する際には、この権利が壁となる。

EU以外の国々では、データベース権の法的保護の手厚さにはばらつきがある。けれども、データベースを対象とする特別な権利が存在していない米国のような法域でさえ、判断に迷う場合がある。前述のとおり「事実」は著作権

の対象にはならないが、データベースを作成する方法に十分な創造性がある場合には、著作権の対象になる可能性があるからだ。デジタル・キュレーション・センター（英国エディンバラ）の指針によると、「任意の状況におけるデータの利用法について、特に指定のない場合に法的にどのような立場をとるべきかを明らかにするのは難しい」という。

そのため、データ共有推進者は、公開データベースを作成する研究者に対し、第三者によるデータの再利用・再配布をどのように想定しているか、また、データベース権を放棄するか否かを明示することを勧めている。

合法か違法か

Himmelsteinのプロジェクトでは、彼が利用しようとしたデータセットのいくつかはライセンスが明示されていて、多くは無制限の再配布が可能であったが、それを禁止するものも一部あった。彼は作業中、第三者によるデータセットの再配布を許諾するかどうかを作成者が明確にしていないために良いデータが利用されずに終わってしまうのが



Daniel Himmelstein.

何よりも歯がゆかったと言う。

ブリストル大学（英国）の知的財産法の専門家であるAndrew Charlesworthは、Himmelsteinが苦勞することになった原因は、周囲に知的財産権制度について明確な助言ができる研究者がいなかったことにあるのかもしれないと指摘する。「法律上の疑問に答えられる仲間が誰もいないときに、『それなら自分が調べよう』と思う科学者は少ないのです」。

法律事務所Policy Bandwidth（米国ワシントンD.C.）に所属する弁護士で、知的財産法を専門としているJonathan Bandによれば、Himmelsteinがデータセットに付されている条件に違反しないかぎり、明確な許諾がなくても、Hetionetを発表することにより罰せられる可能性は低いという。ネット上でデータを公表する学者は通常、無料で自由に再配布されてかまわないと思って提供しているからだ。実際、Himmelsteinが行ったようなプロジェクトでトラブルになった人はまだいないという。

それでもHimmelsteinは、Hetionetが法的に全く問題がないと断言する気にはなれず、このような曖昧さが、第三者による学術データの再配布を阻害しているのかもしれないと感じている。明確な許諾なしに商品開発を進めようと、高くつく恐れがあるからだ。「ここはほぼ未知の領域だと思います。法廷闘争にでもなれば問題をはっきりさせられるのですが、ほとんどの学者はそんなリスクを負える立場にありません」と彼は言う。

（翻訳：三枝小夜子）

Legal maze threatens to slow data science

Vol. 536 (16-17) | 2016.8.4

Simon Oxenham



燻蒸作業員がハバナの民家で蚊を駆除するために殺虫剤を噴霧しているところ。キューバ全土の駆除活動がジカ熱の侵入阻止に役立っている。

ジカ熱を相手に善戦する キューバ

キューバは、カリブ海地域でジカ熱の蔓延を何とか食い止めている国の1つだ。国民総出の地道な努力が成果を挙げている。

雨が止むと、キューバのピッグス湾近くにある高級観光リゾート地の警備員詰め所には、無数の蚊がたちまち群がってくる。すると、1人の警備員が机の下にさっと手を伸ばして、大型のヘアドライヤーのような装置を取り出した。「モスキートガンだよ」と彼は言い、詰め所の周囲を歩きながら燻蒸剤を噴霧した。小屋は白く濃い煙に包まれ、蚊が徐々にいなくなった。

キューバでは、住宅やその周辺に殺虫剤が雲のように漂っていることがよくある。このように市民が徹底して対策を実行していることもあって、キューバはカリブ海地域の中で、ジカ熱（ジカウイルス感染症）の国内感染が最も遅く起こった国の1つとなった。キューバで、国外感染ではなく国内の蚊によって感染した患者は、2016年8月11日の時点でわずか3人である。それ

に対して、近隣国のプエルトリコで確認された感染者は8766人に上る（「カリブ海地域のジカ熱」参照）。

ジカ熱がついにキューバに上陸したことを知って、科学者や保健当局の関係者らは落胆したものの、驚いてはいない。「ジカ熱の持ち込みを阻むのは容易ではありません。キューバには、さまざまな場所から大勢の人がやってくるから」と、ペドロ・コウリ熱帯医学研究所（ハバナ）のウイルス学部門責任者 Maria Guzmán は話す。キューバで国外からの輸入症例として確認されたのは、これまでのところ30例ほどである。

ジカ熱の特に油断ならない特徴は、感染しても大半が無症状か、あるいは、他の疾患でも見られるような発熱など一般的な症状しか現れないことだ。しかしキューバでは、2016年3月に国内で1人が感染したものの、8月までジカ熱患者の発生がほぼ抑えられている。

国を挙げての厳戒態勢

キューバのジカ熱対策の成功は、この国の優れた医療システムと、ベクター媒介性疾患に対して35年前に政府が設けた大掛かりな監視プログラムの賜物だと、キューバ保健省の科学技術ディレクターである Ileana Morales は話す。

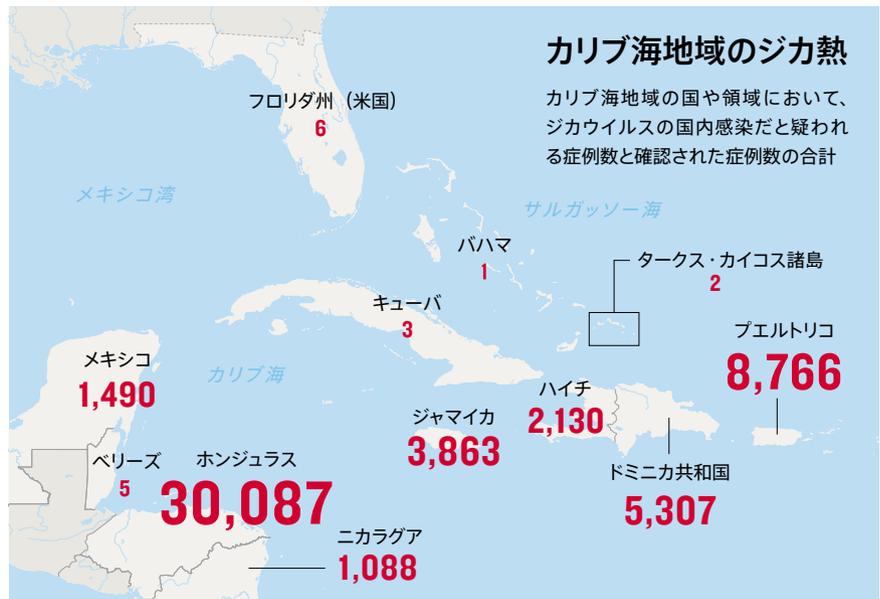
1981年、アメリカ大陸で初のデング出血熱流行が発生し、34万4000人余りの感染者が出た。「それを見た我々は、この疫学上の出来事を好機として捉えました」と Morales。キューバはデング出血熱の流行地域に医療関係者を派遣し、また、この感染症を媒介するネッタイシマカ (*Aedes aegypti*) を駆除するために殺虫剤の集中的な噴霧を始めた。

キューバはさらに、全国的な報告システムや、各省庁が協力し合うための枠組みを構築した。また、一般市民への啓蒙活動も行い、殺虫剤の噴霧や、蚊に刺されたかどうかの自己チェックを、大人はもとより子どもにも奨励した。最も有効だった対策の1つは、家の敷地内で蚊が繁殖していることが分かった場合に高額な罰金を課すことだったと、デューク・シンガポール国立大学医科大学院の感染症研究者 Duane Gubler は言う。キューバはこれらの対策を全て実施し、デング出血熱の流行を4カ月で終息させた。

現在、ジカ熱という別の感染症が流行する恐れが出ているが、「既存のシステムを強化したり、過去に行った取り組みをさらに徹底したりすればよいので、我が国にとってはたやすいことです」と Morales は話す。

キューバ政府は、国内でジカ熱患者がまだ見つかっていなかった2016年2月の段階で、軍の兵士9000人を各地に派遣して、住宅やビルに殺虫剤を噴霧させた。その一方で、保健当局の職員らは河川などの生息地にいる蚊の幼虫（つまりボウフラ）を駆除した。空港の職員は、ジカ熱感染者の出ている国から到着した人をスクリーニングし、医療関係者は戸別訪問をして、ジカ熱の症状が出ている人がいないかどうか確かめた。キューバは医療制度の中ですでに広範な出生前検査を行っており、そのため、小頭症などのジカ熱による先天異常を見つけ出すことができる。

全米保健機構（PAHO）のキューバ駐在員である Cristian Morales によれば、他の国がキューバの蚊対策プログラムを単にまねても、おそらく現実的ではないだろうと話す。キューバの医療ネットワークは発展途上国のものと



SOURCE: PAHO/WHO

してはトップクラスであり、また、政権が数十年にわたって安定していることで、政策の継続性や罰金などの対策強化が確保されてきたのだ。彼はさらに、どの国であっても、ジカ熱に対応するには各省庁間の協力や監視の強化が最も重要になると話す。

全員の課題

「キューバはおそらく、蚊の対策という点ではアメリカ大陸のどの国よりも成果を上げていますが、その有効性は完全ではありません」と Gubler は話す。その一因は、財源の減少にある。1997年のデング熱の再流行はおそらく、キューバの主要な貿易相手国であったソビエト連邦（現 ロシア連邦）の崩壊が遠因となった。ソ連崩壊がキューバの経済に大打撃を与え、公衆衛生への資金投入が減退したのである。

もう1つの負の影響は、米国が1960年から実施している対キューバ禁輸措置によるもので、キューバは米国で製造された成分や部品を含む薬剤や医療用品を輸入できない。そのため、こう

した医薬品を中国などから買わなければならない、コストが高くつく場合も多い。

だが、こうした問題があっても首尾は上々だ。PAHOによると、キューバ・オルギン州南東部でジカ熱を発症した最新の患者2人の各自宅150m以内で、保健当局職員が殺虫剤を噴霧し、蚊が繁殖できるような貯留水を撤去するなど、徹底的な対応策をとった。また、当局職員は現在も、感染者がいなか各戸を調べ、調査用の蚊を採集している。Guzmánによれば、キューバの研究者らがジカ熱ワクチンの研究計画を立て始めたという。

ジカ熱と闘うキューバや他の国々を支援するには国際協力が重要だろうと、Guzmánは話す。「これは我々全員の問題であり、世界にとっての新しい課題なのです」。

（翻訳：船田晶子）

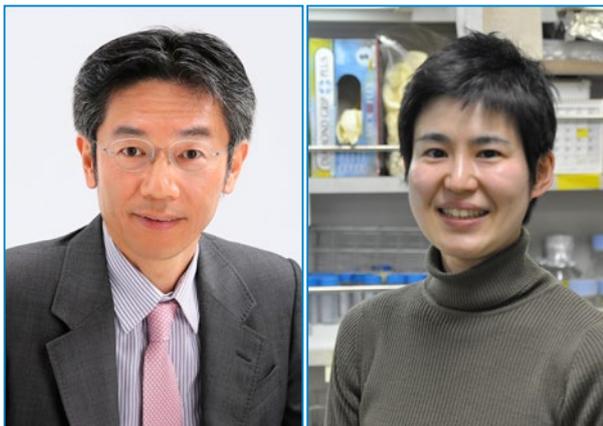
Cuba's epic battle with Zika

Vol. 536 (257-258) | 2016.8.18

Sara Reardon

標的遺伝子だけオンに！ エピゲノム編集登場

2012年に登場するやいなや、世界中で使われるようになったゲノム編集技術CRISPR-Cas9。狙ったDNA配列を簡単に操作できることから、DNAの修飾状態を改変する「エピゲノム編集」への応用も期待されている。今回、群馬大学 生体調節研究所の畑田出穂教授と森田純代研究員は、狙った遺伝子のスイッチだけをオンにするDNA脱メチル化技術を完成させた。



はただ いずほ
畑田 出穂 (左)

群馬大学

生体調節研究所附属生体情報ゲノムリソースセンター
ゲノム科学リソース分野 教授

1990年、大阪大学大学院理学研究科博士課程修了、国立循環器病センター研究所、MRC 臨床科学センター（英国）、群馬大学准教授などを経て2011年より現職。ゲノムワイドな解析法の開発（RLGS法）をきっかけに、エピジェネティクスの研究を行っている。

もりた すみよ
森田 純代 (右)

群馬大学

生体調節研究所附属生体情報ゲノムリソースセンター
ゲノム科学リソース分野 研究員

2000年、東京大学医学系研究科 国際保健学専攻・博士課程修了。博士（保健学）。

ゲノム編集技術の応用で、画期的な成果を挙げられました。

畑田：私は一貫してエピゲノムの研究領域にいます。ゲノム研究は1990年頃から飛躍的な進歩を遂げてきましたが、当時は網羅的な解析手法がありませんでした。そのような状況で私は、制限酵素の切断部位を指標に、ゲノム上の多数の位置を1枚のゲル上で網羅的に示す技術（RLGS法）の開発に携わっていました。その過程で、メチル化された塩基を特異的に切断する制限酵素を使って、ゲノム上のメチル化の変化を観察する手法を完成させました¹。この成果がエピゲノム研究の原点になりました。現在では、マイクロアレイや次世代シーケンサーなどでメチル化を詳細に観察できるようになりましたが、観察と対をなす「操作」については、十分な技術がまだありません。こうした状況において、今回、メチル化をピンポイントで操作する技術の1つを開発できたといえます。

森田：私は人類遺伝学やシグナル伝達の研究室を経てこちらに来ました。ゲノムインプリンティングと肥満関連遺伝子などの研究を進めていましたが、CRISPR-Cas9の登場を機に、今回の研究を始めました。

そもそも、メチル化やエピゲノムとは？

畑田：多くの真核生物では、DNAを構成する4種類の塩基のうちシトシンだけがメチル基の付加・除去という修飾を受けます。遺伝子発現を制御する領域（プロモーター）中に多く見られるCpG配列（シトシン-グアニンの2塩基からなる繰り返し配列）においてシトシンがメチル化されると、遺伝子スイッチをオンにするためのタンパク質がアクセスできなくなるので、スイッチはオフ

AUTHOR PROFILE

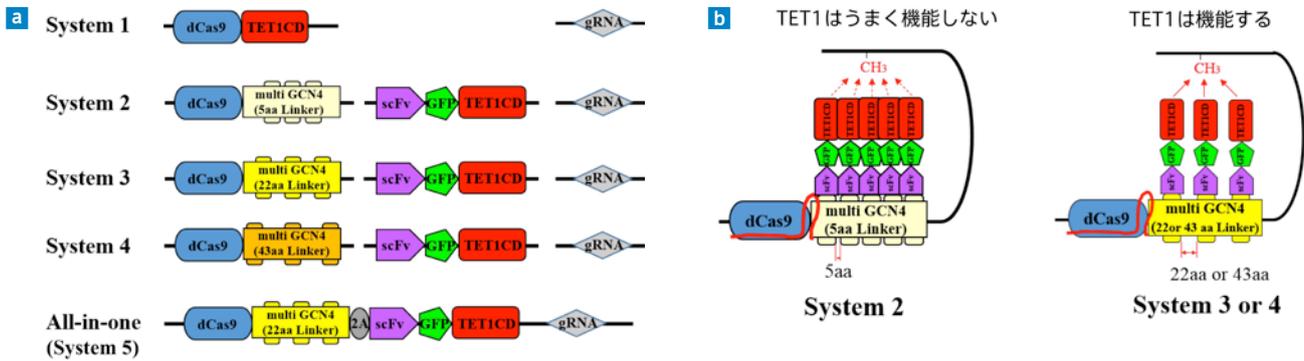


図1 DNA脱メチル化システムの調整過程

a DNA脱メチル化システム (System1~5) の各構成。SunTag系のGCN4タグ (黄、橙) に、TET1を融合した抗体が結合する。
b タグ間の距離が5アミノ酸残基だとTET1はうまく機能しなかった。だが、アミノ酸残基数を22と43に伸ばした系は機能した。

になります。逆に、脱メチル化されるとスイッチはオンになります。このように、遺伝子配列はそのままの状態です。遺伝子のオン・オフが制御されることをエピゲノムといい、DNAメチル化はその代表格です。

今回、特定のDNAメチル基を外す手法を開発されました。

畑田 : DNAメチル基は、TET1と呼ばれる酵素によって外されます。生体内では、別の因子が働くことで、TET1が必要な領域でだけ作用して脱メチル化が起こり、遺伝子がオンになるように制御されているわけですが、実験レベルで特定の領域だけを脱メチル化することは困難でした。ところが、画期的なゲノム編集技術が登場し、状況が一転しました²。CRISPR-Cas9のシステムは、狙った配列にDNA切断酵素Cas9を誘導する「ガイドRNA」(gRNA)などをうまく設計することで、ピンポイントにDNA二重鎖を切断できます。するとDNA修復機構が発動し、標的遺伝子のみを改変できるのです。

CRISPR-Cas9以前にもZFNやTALENというゲノム編集ツールがありましたが、CRISPR系は圧倒的に簡便です。また、ZFNやTALENを応用して脱メチル化を行う試みもありましたが、効率は高くありませんでした。そこで私たちは、CRISPR-Cas9をベースにした技術を模索することにしました。

森田 : 具体的には、標的とする配列に結合してもDNAを切断しないCas9変異体「dCas9」に、TET1をつないでみました (System 1)³。それをマウスES細胞株に導入

し、メチル基が外れるかどうかを調べました。標的としたのは、グリア繊維性酸性タンパク質 (GFAP) をコードする遺伝子 *Gfap* のプロモーター領域です。 *Gfap* は、脳の神経幹細胞がアストロサイトに分化するために必須の遺伝子です。胎生中期には *Gfap* のプロモーター領域は高度にメチル化されていますが、胎生後期に脱メチル化されると、アストロサイトへの分化が誘導されます。

うまく脱メチル化されたのでしょうか？

森田 : いいえ、初めはうまくいきませんでした。System 1では、DNA脱メチル化の効率はわずか10%でした。研究室内で原因と改善策について話し合い、「1つのdCas9に複数のTET1が結合すれば効率も上がるのではないか」との考えに至りました。そこで、SunTag (短いペプチドとその抗体を利用したシステム) を使って約10分子のTET1が結合できるようにし、GFPも導入して蛍光標識できるようにしました。これがSystem 2です。しかし予想に反して効率は上がりませんでした。

畑田 : 再考の過程で森田さんが、「TET1が結合するタグ (GCN4) の間が狭すぎるのでは」と言いました。互いのTET1が邪魔しあって立体障害を引き起こし、うまく機能しないのではないかとこのことです。そこで、タグの間 (5アミノ酸残基) を22アミノ酸残基 (System3)、43アミノ酸残基 (System4) に伸ばした系を作りました (図1)。すると、System3で脱メチル化効率が約40%に上昇し、System4では約30%とやや下がることが分かりました。

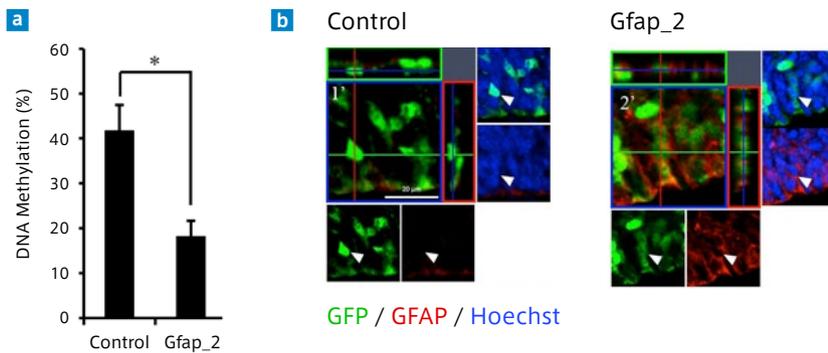


図2 生きたマウス胎仔の脳による検証
胎生14日目に母体から胎仔を取り出し、脳室帯に、*Gfap*のプロモーター領域を標的とするAll-in-oneベクター (System5) を導入。母体に戻して1日後、標的領域でDNA脱メチル化を確認 (a)。4日後には、脳室帯でGFAPタンパク質の発現 (赤) を観察 (b)。なおControlは、gRNA未挿入ベクターを導入したもの。

System3導入細胞をGFPの蛍光を指標にセルソーターで分別して脱メチル化効率を調べたところ、なんと90%を超えていました。そこで完成形として、タグの間を22アミノ酸残基にし、全てを同一のベクターにつないだ系 (System5) を作製しました。国立成育医療研究センターの秦 健一郎部長、中林一彦室長、岡村浩司室長にご協力いただき、この系によって脱メチル化された領域を次世代シーケンサーでゲノム全体にわたって検証したところ、標的とする領域を含む約400bpが脱メチル化されていました。その他の部位では非特異的な脱メチル化が起きていないことも確かめました。

生体レベルでも検証されたのでしょうか？

畑田：はい。生きたマウス胎仔の脳に導入して調べました。この実験は、九州大学大学院医学研究院の中島欽一教授、野口浩史特任助教にお願しました。胎生14日目のマウスの脳室帯 (発生期の脳室を取り囲む層のうち最も脳室に近い層) にエレクトロポレーション法でSystem5を導入し、母体に戻して発生を続けさせた上で解析しました。胎生中期の神経前駆細胞では、*Gfap*のプロモーター領域はメチル化されているはずですが、この時期にSystem5を導入すると、母体に戻して24時間後にはプロモーター領域が脱メチル化されていました (図2)。母体に戻して4日後には、免疫染色によりGFAPタンパク質の発現も確認できましたので、生体においても狙った領域の脱メチル化を誘導できると結論付けました。

応用が期待されますね。

畑田：そう思います。実際に、骨髄異形成症候群に対して、DNAメチル化を阻害するアザシチジンという薬が

使われています。骨髄異形成症候群は、造血幹細胞の分化が異常になることで引き起こされ、高い確率で白血病に移行する難病です。異常細胞中にはDNAのメチル化異常が認められます。エピゲノムの異常は、がん、慢性炎症、精神疾患など、実に多くの疾患と関与していることが分かってきていますので、さまざまな応用先が考えられます。私の研究室でできることは限られますが、疾患への応用を検討していきたいと考えています。

今回のご苦労や工夫についてお聞かせください。

森田：*Nature Biotechnology*とのリバイスが大変でした。「本当に確かな技術なのか」と問われ、かなりの数の実験を追加し、最初の投稿から受理までに1年かかってしまいました。実験では「なんとなくそうしてみた方がよい」といった直感が役に立つことがあると思っています。今回は、System2がうまくいかなかった時にイラストを描いてみて、「なんだか間が狭そう」と感じました。距離を長くしてみたところ良い結果につながりました。

畑田：私たちと似たアイデアを持っている研究者が多数いることは認識していました。実際に論文としても出始めていたので、時間との戦いだったといえます。成功のカギは、森田さんの発案でタグ間の距離をいろいろと変えた点にあると思います。今回のような技術開発的な研究は、少しだけ条件を変えていろいろ試し、理屈は後付けで考えるのが良いような気がします。

ありがとうございました。

聞き手は西村尚子 (サイエンスライター)

1. Hatada, I. *et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA* **88**, 9523-9527(1991).
2. Jinek, M. *et al. Science* **337**, 816-821(2012).
3. Morita, S. *et al. Nature Biotechnology*
<http://dx.doi.org/10.1038/nbt.3658>(2016).

ポリマーの可能性は無限大!

プラスチックに代表されるポリマーは、現代生活のほぼ至る所に浸透している。
その可能性はまだまだ底知れない。

ドイツの化学者ヘルマン・シュタウディンガー (Hermann Staudinger) は平和主義者だったが、この戦いだけは勝つと心に決めていた。1920年、チューリヒ工科大学 (スイス) の教授だった彼は、ゴムやセルロースなどの天然化合物が、多数の小分子 (モノマー) が化学結合で鎖状につながった高分子 (ポリマー) であると提唱し、こうした長い鎖を形成する反応を「重合」と呼んだ¹。ところが当時の化学界では、これほど大きな分子は存在し得ず、「ポリマー」とされた化合物は単に小さな分子が会合して分子間力により凝集したものだと考えられていたため、シュタウディンガーの主張は全くのでたらめだとして強い反発を受けたのである。しかし、シュタウディンガーも後には引かず、この争いは10年に及んだ。

この間、シュタウディンガーは自らの主張を裏付けるべく研究を続け、数々の実験データを提出した。1930年に入る頃には、彼の概念が他の化学者たちに徐々に受け入れられるようになり、最終的には正しいことが証明された。シュタウディンガーは1953年、この業績によりノーベル化学賞を受賞し、今では「高分子化学の父」と称されている。

それから半世紀、シュタウディンガーが提唱した分子の鎖は、今では衣類や塗料、包装材から、薬物送達や3D印刷、自己修復材料まで、現代生活のほぼあらゆる面に入り込んでいる。合成ポリマーの2015年の世界生産量は約3億トンに上り、ボーイング社の最新旅客機787型機「ドリームライナー」も、重量の半分はポリマー系の複合材料でできているのだ。

誕生以来、目覚ましい発展を遂げてきた高分子化学だが、これからは一体どこへ向かうのだろうか。2016年8月17~18日、米国の国立科学財団 (NSF) が主催する10年に1度のワークショップがバージニア州アーリントン



生分解するバイオベースポリマーのベレット。

ンで開催された。「ポリマー科学技術のフロンティア (Frontiers in Polymer Science and Engineering)」と題された今回のワークショップでは、過去10年間の成果を振り返るとともに、今後の最重要課題や可能性、新興領域を見極めるべく幅広い意見交換と調査が行われた。概要と調査結果については後々公開される予定で、そこから、この疑問に対する答えが得られそうだ。

「全般的な傾向としては、これまでポリマーが使われてこなかった分野への進出があります」と語るのは、ミネソタ大学 (米国ミネアポリス) の高分子化学者で *Macromolecules* 誌の編集者でもある Tim Lodge だ。応用分野の拡大はこれまで、ポリマー科学のあらゆる側面が進歩することで促進されてきた、と彼は説明する。新しい分子合成法や分子解析法の開発、理論モデルの改良、自然界に見られる高分子の模倣といった研究の進展はもとより、ポリマー科学に対する姿勢の変化も影響したという。ポリマー科学はかつて、あまりに泥臭くて日常的・商業的過ぎ、学术界で扱うには値しない、と大学では敬遠されていた。しかし「今では、ほとんどの化学系の学科でポリ

マーが扱われています」とLodgeは言う。そして、最先端の高分子研究はますます学際的になってきている。

それは当然といえよう。高分子化学の研究者たちは、ポリマー鎖の化学構造を作り上げる技術を次々と手にしているが、そうした技術で得られる化合物が、例えば膜や薬物送達に必要な特性を備えたものになるかどうかは、予測できないことが多い。そうした課題に対処するためには、ナノメートルからメートルまでのあらゆるスケールにおいて、ポリマーの化学構造がどのように物理的特性を決定するのか、より深く理解する必要があるのだ。

環境に優しいポリマー

ポリマーは至る所に存在する。だが、問題もそこにある。「日常生活で使用するポリマーのほとんどが、石油系製品に由来しています。それらは、使う時は耐久性があって便利ですが、廃棄された後も耐久性を発揮してしまうのです」とミネソタ大学・持続可能なポリマーセンター (Center for Sustainable Polymers ; CSP) のディレクター Marc Hillmyer は語る。プラスチック包装材の約86%が一度使用されただけで捨てられ²、廃棄物となって河川や埋め立て地に残り続け、汚染物質を放出し、野生生物に害を与えているのだ。

こうした状況を受け、再生可能資源でできたポリマーや、害を及ぼさずに容易に生分解するポリマーへの関心が、この10年で爆発的に高まった。そうした研究の成果として、天然でんぷんから作られたポリマーが、すでに市場に出回っている。また、生物由来のラクチドや乳酸を重合させて作るポリマー、合成ポリ乳酸 (PLA) は、ティーバッグから医療用インプラントまで幅広い製品に使用されている。

しかし、そうした持続可能なポリマー (サステイナブルポリマー) の割合は、まだプラスチック市場全体の10%にも満たない、とHillmyerは指摘する。サステイナブルポリマーの普及を阻む壁の1つは、コストが掛かり過ぎることである。もう1つは、天然ポリマーを構成するモノマーが、石油系プラスチックの原料となる炭化水素よりも多くの酸素原子を含む傾向にあることだ。こうした特徴は、最終生成物であるポリマーに硬化などの影響をもたらす。つまり現状では、ポリエチレンやポリプロピ

レンといった安価で柔軟なプラスチックを、サステイナブルポリマーで直接的に置き換えることは難しい。天然物由来のポリマーが従来型の石油系ポリマーと互角に戦えるようになるには、巧みな化学が必要だ。

別のアプローチとして、PLAなどのサステイナブルポリマーを、従来型のポリマーとブレンドすることによって改良する方法がある。この方法には、プラスチックの透明性が損なわれることがある、というマイナス面があるが、ミネソタ大学CSPの研究者たちは、疎水性部分と親水性部分を併せ持つ安価な石油系ポリマーをたった5重量%加えることで、この問題を回避した³。この石油系添加剤は、集まって球状構造体を作ることで、透明性を損なわずにPLAの靱性を大幅に向上させることができる。

Hillmyerのチームはまた、部分的にリサイクル可能なポリウレタンフォームも作製している⁴。ポリウレタンフォームは、断熱材やシートクッション、ガasket (固定用シール材) など多くの製品に使われている。Hillmyerらが開発したポリウレタンフォームには、遺伝子組換え細菌が産生するモノマーから作製したポリ(β -メチル- δ -バレロラクトン) (PMVL) と呼ばれる安価なポリマーが含まれており、このフォームを200°C以上に加熱すると、ポリウレタンが分解されて、モノマーが抽出・再利用できるという。

こうしたサステイナブルポリマーが商品化されるかどうかは、まだ分からない。「多くの場合、最大の課題は大量生産で、経済的な有利性が求められます」とHillmyerは語る。彼は、この分野においては、モノマーの化学的構造が重合反応の速度や温度、収率にどのように影響するのか、また、生成したポリマーが他の材料とどのように相互作用するのか予測できる、一般的な設計基準を確立する必要があると考えている。実際、彼のチームはPMVLの成分に関するそうした指針を開発し⁵、2016年初めに、それを活用するための会社Valerian MaterialsをCSP内に立ち上げた。

一方、生物由来のモノマーを重合するのではなく、天然のポリマーを直接利用する方法に取り組んでいる研究者たちもいる。例えば、グルコース分子が鎖状につながったセルロースは、並んで「フィブリル」と呼ばれる繊維を形成し、植物の堅い細胞壁を構成している。植物の多くの部位において、セルロースの鎖は、幅が最大で20nm、長さが数百nmにも及ぶ結晶性の塊を形成しており、こ

これらの塊はセルロースパルプから化学的に抽出することができる。結晶性のセルロースは、複合材料の強化や断熱フォームの形成、薬物送達、組織修復用の足場などの用途に使える可能性があるという⁶。

セルロースのナノ結晶や、より長い「ナノフィブリル」は、すでに商業規模で製造が始まっているが、その応用は、まだ紙の強化剤や液体の増粘剤にとどまっている。フリブル大学アドルフ・メルクレ研究所 (Adolphe Merkle Institute; スイス) のディレクター Christoph Weder は、こう話す。「コストを削減し、サステイナブルポリマーが持ち得る独特な長所を証明するには、さらなる研究が必要になるでしょう。バイオベースポリマーにはまだ、ロードマップと呼べるものがないのです」。

分離膜としてのポリマー

ポリマーには、混乱した世界に秩序を取り戻す、という能力もある。事実、ポリマー膜はすでに、ガス分離や海水の淡水化、燃料電池内での分子の隔離などの目的で、分子ふるいとしてその能力を発揮している。しかし Lodge によると、ポリマー膜の役割は、将来的には今よりはるかに大きくなる可能性があるという。「もっと優れた膜があれば、多くの問題が解決できます」。

膜を使った混合物の分離は、蒸留（混合物液体を加熱して蒸発させた後に凝縮させることで、沸点の異なる成分を分離する操作）に比べ、必要なエネルギーがはるかに少なく済むだけでなく、スクラバー（化学反応によって汚染物質を捕捉する装置）を使うより必要な空間が小さくて済む。また、ポリマー膜は安価に大量生産できる上、広い面積にも利用可能で、構造欠陥の発生がほとんどないため、膜で捕捉すべき分子を誤って通してしまう恐れもない。

ポリマーを用いたガス分離膜は、天然ガスから水素と二酸化炭素を分離する用途で、すでに工業利用されている。だが、膜をさらに改良すれば、プロパンとプロペンといったよく似た炭化水素を区別するなど、より困難な課題をも克服できる可能性がある。丈夫で化学的に耐久性の高い膜が実現すれば、高温の燃料排ガスから二酸化炭素を除去できるようになるかもしれない。

テキサス大学オースティン校 (米国) の膜化学者 Benny Freeman は、水圧破碎 (フラッキング) 時の廃水処理を

改善したいと考えている。水圧破碎法とは、高圧の水を注入して地下の岩体を割り、天然ガスを放出させる方法だ。使用後の水は汚れが酷く、標準的なろ過膜ではすぐに詰まってしまう。そのため、水を通す際には高い圧力が必要になり、また、薬剤を使ったらろ過膜の洗浄も必要になることから、ろ過膜の寿命が短くなるという問題があった。そんな中、Freeman は、ろ過膜を「ポリドーパミン (PDA)」という極めて薄い物質でコーティングすることで、この問題を回避できることを見いだした。PDA は、イガイ科の貝が岩に付着するときに使う耐水性の接着物質を模倣したポリマーである。試験的に、この PDA コーティングを米国テキサス州フォートワース付近の水圧破碎の廃水処理施設で使用したところ、膜に水を通す際に圧力を半減できることが分かり、処理システムの小型化・高効率化につながることが実証された⁷。Freeman らのチームはすでに、この技術を用いてビルジ水 (船底にたまる油分を含む污水) の浄化装置を製造し、米国海軍に提供しているという。

2015年12月、米国のオバマ大統領政権は、水の持続可能性を高めるため、適切な水管理を目指す「moonshot for water」というイニシアチブを打ち出した。この一環として同エネルギー省は、2017年に淡水化研究ハブの設置を計画している。そこでは、ポリマー膜が大きな役割を果たすことになるだろう、と Freeman は言う。「ポリマーの利用拡大の取り組みが大幅に強化されるはずだ」。

より優れた淡水化膜を設計するためには、ポリマー中の荷電基の分布などの要因がイオン透過性にどのような影響を及ぼすか、予測できなければならない。Freeman らは2016年1月、そうした予測を行う初めてのモデルを発表した⁸。このモデルを使えば、置換基を調節したり分子を架橋したりすることによって、特定の特性を膜に組み込むことができるという。「構造と特性の関係について疑問を持ってもらうことが私の使命だと思っています。この関係こそが合成の指針になるのですから」と彼は言う。

ところで、分離膜の究極の形とは、一体どのようなものだろう。それは、分子1個分の厚さの膜かもしれない。2004年に報告されたグラフェンの単離以降、単層材料に対する関心が高まっているが、二次元 (2D) ポリマーもまた、その波に乗ろうとしている。

単層ポリマーは、ありふれた線状ポリマーからなる極薄の膜ではなく、固有の2D化学構造を持つ。分子サイ

ズの穴がたくさん開いたメッシュ構造をしており、まるで網の目が規則正しく並んだ漁網のようだ。こうした2Dポリマーの表面は、さまざまな化学修飾を施すことが可能で、それにより1つ1つの穴を精密に設計して特定の分子だけを通す機能を持たせることができる。

とはいえ、2Dポリマー分離膜の作製は簡単ではない。メッシュを成長させている間に、誤って穴を1つでも塞いでしまうと、膜がねじれて三次元(3D)の乱雑な形状になってしまうのだ。チューリヒ工科大学の高分子化学者Dieter Schlüterは、10年以上この問題に取り組んだ末、2012年によく成功にこぎつけた。

彼の手法はこうだ。まず、入念に設計したモノマーを層状に結晶化させる。次に、青色光を照射して同一面上のモノマー間で化学反応させて重合し、ポリマー層が積み重なった結晶を新たに作る。そして、ポリマーの各層を剥がしてバラバラにすると、分子1個分の厚さの2Dポリマーシートが複数得られるのである(「2Dポリマー膜の作り方」参照)。

Schlüterと、ネバダ大学リノ校の化学科長であるBenjamin Kingは、共にこの方法を用いて、異なる種類の2Dポリマーをほぼ同時期に作製した^{9,10}。その後共同研究者となった2人は今、こうした2Dシートを少しでも早くキログラム単位で製造し、世界中の研究グループにサンプルとして提供したいと考えている。

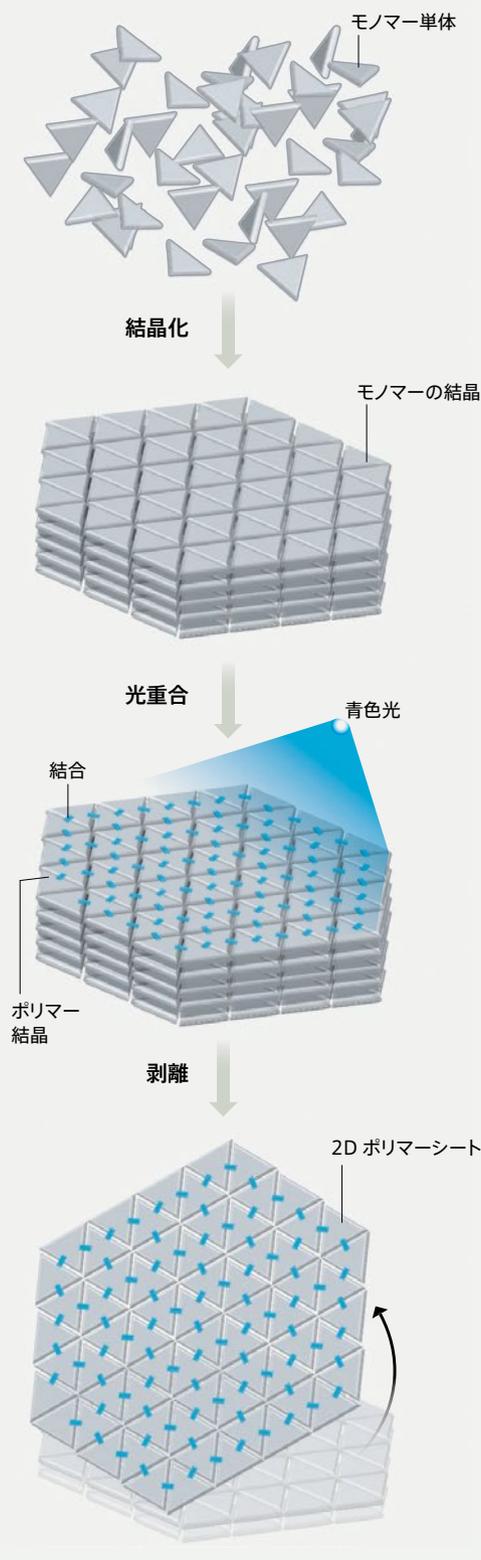
Schlüterは、2Dポリマーの将来性について懐疑的な見方をされたことがあると語る。「けれども、疑うのは健全なことです。それに、私はとても頑固なので決して諦めません。2Dポリマーの開発には大きな可能性がある」とSchlüter。

特化型ポリマー

ポリスチレンやポリエチレンといった広く普及しているポリマーは、同じモノマーがいくつも繰り返つながった構造をしている。それはまるで、1つの音のみで奏でる一本調子の旋律のようで、実に単調で、ある意味つまらない。一方、これと対照的なのが、DNAやタンパク質といった天然のポリマーである。4種類のモノマーでゲノム全体をコードするDNAは、4チャンネルで聴く交響曲のようであり、23種類のアミノ酸から複雑な3D構

2D ポリマー膜の作り方

2Dポリマー膜を作るには、まずモノマーを層状に結晶化させて3D結晶を作る。次に、青色光を照射して、同じ面にあるモノマー同士を重合する。そして各層を1枚ずつ剥がし取ることで、2Dポリマー膜が得られる。



造を築き上げるタンパク質は、さながらバロック音楽の傑作といえるだろう。

ポリマー研究で最も難しい最先端領域は、合成ポリマーをDNAやタンパク質と同じ精密さで作り上げ、その電子的特性や物理的特性を微調整できるようにすることだ。「この5年間で、かなり人気が出てきた領域です」と、ストラスブール大学（フランス）の高分子化学者Jean-François Lutzは言う。配列を制御しながら重合することが可能になれば、モノマーがあらかじめ決められた順序で並んだ、特定の長さのポリマー鎖を形成することができるようになるだろう。

マサチューセッツ工科大学（米国ケンブリッジ）の化学者Jeremiah Johnsonが率いるチームは2015年、2種類のモノマーをつないで二量体を作り、次にそれらの二量体を2つつないで四量体を作るというように、繰り返し指数関数的にポリマーを成長させることによって、配列の制御が可能になることを示した¹¹。成長サイクルの間に各モノマーの側鎖を修飾すれば、さらに複雑な分子を生み出すことができる上、こうした工程は半自動システムでそれほど手間をかけずに行うことができる¹²。

Johnsonは現在、こうした配列制御型ポリマーを薬物送達に応用できないか検討している。米国食品医薬品局（FDA）によって承認されている12の薬剤では、体内の免疫システムから保護したり、溶解性を高めたり、体内滞留時間を延ばしたりする目的で、ポリエチレングリコールというポリマーが使われている。これを配列制御型ポリマーで代用できるようになれば、全ての鎖の長さや形状を均一にできる上、最適な薬物送達が可能になるよう化学的性質を詳細に設計できるため、生物学的効果が予測しやすくなるだろう、とJohnsonは説明する。

また、配列制御型ポリマーを使えば、従来の半導体技術よりも小型で安価なデータ記憶装置を実現できるかもしれない。ポリマーを用いたメモリーでは、各モノマーが1ビットの情報に相当する。Lutzは2015年5月に、この目標に向けて重要な一歩を踏み出した¹³。彼は、2種類のモノマーに1と0のデジタル情報を持たせ、それらの間にスペーサーとして第3のモノマーを配置した。各モノマーは、成長するポリマーとだけ結合する化学基を持つため、モノマー同士がランダムに反応することはない。一連の1と0の情報は、質量分析計の中でポリマー

が分解する様子を調べることで読み取ることができる。

2016年8月、Lutzは次いで、さまざまなポリマー鎖のライブラリーで32ビットのメッセージをエンコードできることを示した¹⁴。人工DNA分子に1.6ギガビットの情報を記憶させたこと（go.nature.com/2b2ve0u参照）と比べれば、見劣りするかもしれないが、ポリマーによるデータ記憶の分野が勢いづいていることは確かだ。2016年4月、情報コミュニティのハイリスク研究に資金提供する米国の機関である知能高等研究計画局（IARPA）は、バイオテクノロジー業界や半導体業界、ソフトウェア業界の代表者を集めて、ポリマーによるデータ記憶をテーマにしたワークショップを開催した。「この領域の研究者は増えており、活気に満ちています」と、ワークショップの主催者の1人であるIARPAのテクニカルアドバイザーDavid Markowitzは言う。

しかしながら、こうした技術へのポリマーの利用には、合成に時間とコストが掛かり過ぎるという大きな技術的課題が存在する。データ記憶の問題をはじめ、最先端の高分子化学が直面している数々の問題を解決するカギは、ポリマーの特性予測や合成の微調整を可能にする優れた方法を開発することだろう。それには、一致団結した取り組みが必要になる。「物理学者、材料学者、理論化学者の間に協力関係を築く必要があります」とLutzは言う。「新しい分野を作り上げる必要があるのです」。

（翻訳：藤野正美）

Fantastic plastics

Vol. 536 (266–454) | 2016.8.18

Mark Peplow

（英国ケンブリッジに拠点を置く科学ジャーナリスト）

1. Staudinger, H. *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **53**, 1073–1085 (1920).
2. *The New Plastics Economy: Rethinking the Future of Plastics* (Ellen MacArthur Foundation, 2016); available at go.nature.com/2bdyexp
3. Li, T., Zhang, J., Schneiderman, D. K., Francis, L. F. & Bates, S. F. *ACS Macro Lett.* **5**, 359–364 (2016).
4. Schneiderman, D. K. *et al.* *ACS Macro Lett.* **5**, 515–518 (2016).
5. Schneiderman, D. K. & Hillmyer, M. A. *Macromolecules* **49**, 2419–2428 (2016).
6. Lin, N. & Dufresne, A. *Eur. Polymer J.* **59**, 302–325 (2014).
7. Miller, D. J. *et al.* *J. Membrane Sci.* **437**, 265–275 (2013).
8. Kamcev, J. *et al.* *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**, 6021 (2016).
9. Kissel, P., Murray, D. J., Wulfstange, W. J., Catalano, V. J. & King, B. T. *Nature Chem.* **6**, 774–778 (2014).
10. Kory, M. J. *et al.* *Nature Chem.* **6**, 779–784 (2014).
11. Barnes, J. C. *et al.* *Nature Chem.* **7**, 810–815 (2015).
12. Leibfarth, F. A., Johnson, J. A. & Jamison, T. F. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **112**, 10617–10622 (2015).
13. Roy, R. K. *et al.* *Nature Commun.* **6**, 7237 (2015).
14. Laure, C., Karamessini, D., Milenkovic, O., Charles, L. & Lutz, J.-F. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* <http://dx.doi.org/10.1002/anie.201605279> (2016).

シナプスの要、 ナノカラム

神経科学

シナプス前部にある神経伝達物質分子を放出する領域と、それを捕獲するシナプス後部の領域をつなぐ「ナノカラム」構造が発見された。シナプス間隙をまたぐこの構造は、シナプスの組織化と調節の機構についての手掛かりを与えてくれる。

ヒトの脳は全ての認知プロセスを司る精緻な組織で、脳の認知プロセスによって、我々は自身を自意識のある社会的な個人と感じることができる。認知プロセスは、根本的にはシナプスと呼ばれる単一の機能ユニットの働きに基づいている。シナプスは、ニューロン間の迅速な信号伝達を担い、高度に特殊化した2つの小区画からなる。これらの区画はニューロン間に存在する狭い隙間（シナプス間隙）の前部（信号を送る側）と後部（信号を受け取る側）に位置している。これまで、この2つの小区画がうまく向き合うようにシナプス間隙をまたいで調整している構造があると考えられてきたが¹、その存在を示す直接的証拠はほとんどなかった。今回、米国メリーランド大学のAi-Hui Tangらは、精巧な超分解能光学顕微鏡と数学モデルを組み合わせて用いることで、シナプス前区画とシナプス後区画を連結する、タンパク質を主成分とする個別のナノカラムが存在するという証拠を示し、*Nature* 2016年8月11日号210ページに報告した²。

ニューロンが信号を発する際には、活動電位と呼ばれる電気インパルスが、シナプス前ニューロンからの神経伝達物質分子の放出を引き起こす。この放出には神経伝

達物質を含むシナプス小胞と、シナプス間隙に面した細胞膜領域（アクティブゾーンと呼ばれる）との融合が関与している。また、シナプス小胞の膜への連結と融合はそれぞれ別の場所で行われるわけではなく、シナプス小胞融合部位を提供する、複数の大きなマルチドメインタンパク質³から構成される細長いタンパク質の足場の中で起こる。

こうした足場がどのように組織化されるかを調べるための手段は、長年にわたって電子顕微鏡に限られてきた。電子顕微鏡ではライブ画像を捉えることはできない。しかし、こうした限界が、超分解能光学顕微鏡の開発⁴により克服され、個々のタンパク質構成を効率的に視覚化できるようになった。そうした研究の1つでは、シナプス前の足場が物理的にシナプス小胞と接触していることが明らかになっている⁵。このような物理的接触によって、シナプス小胞の連結が促され、決められた融合部位での神経伝達物質の放出がプライミングされるのだろう。また別の研究では、足場タンパク質の1つであるRIMが、シナプス小胞の連結に重要な役割を果たすことが示されている。RIMはMUNC-13ファミリーのタンパク質と相互作用して^{6,7}、カルシウムチャンネルタンパク質のクラスター化を促進する⁸。それが引き金となり、融合プロセスが起こる。

Tangらは今回、シナプス前のアクティブゾーンのナノスケールの構成をさらに詳しく解明するために、確率論的再構築光学顕微鏡法（STORM）と呼ばれる高分解能の光学顕微鏡法⁹を使うことにした。著者らは3D STORMを用い、マウス海馬由来の*in vitro*培養ニューロン間のシナプスを調べた。海馬は、学習と記憶に関係する脳領域であり、観察したシナプスは神経伝達物質のグルタミン酸を放出する。分析の結果、RIMは、アクティブゾーン近辺の直径約80nmのタンパク質ナノクラスター内に限定して存在することが明らかになった。対照的に、MUNC-13やBassoonなどの他の足場タンパク質や融合因子は、より一様な分布を示した。

では、RIMが豊富に含まれるナノクラスターの位置は、小胞融合部位と関係するのだろうか？ 著者らは、シナプス前膜における融合の様子を、小胞-膜融合後に蛍光を発するタンパク質センサーを使って観察し、その蛍光パターンの数学的モデル化を行った。その結果、融合部位は、膜の特定の領域に限定されることが明らかになっ

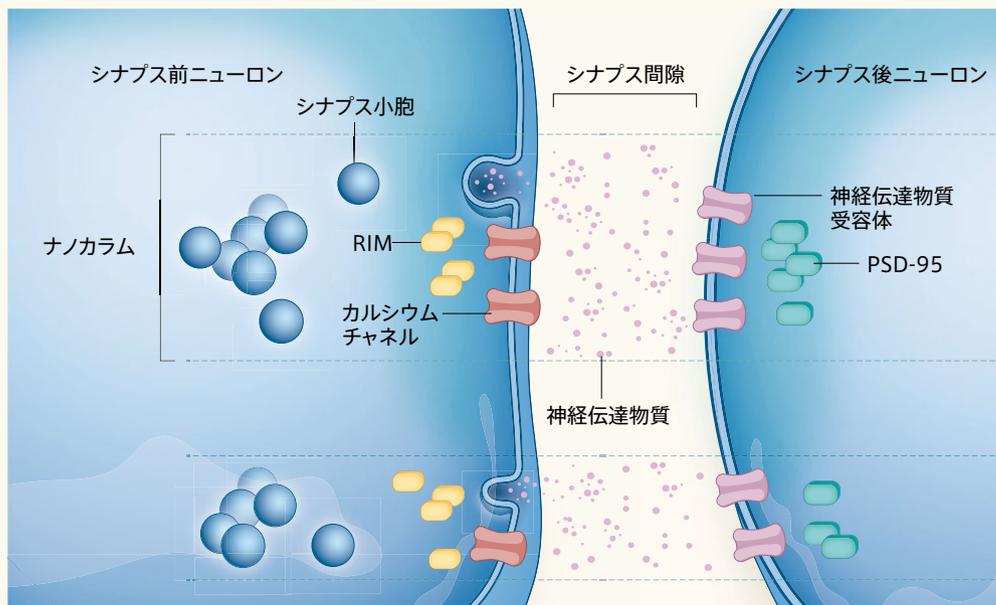


図1 シナプスの構成

Tangら²は、ニューロン間のシナプス結合がナノカラム構造によって橋渡しされていることを示した。足場タンパク質のRIMは、シナプス前膜の直径80nmのクラスターに豊富に存在している。シナプス前膜では、シナプス小胞がカルシウムチャネルに近接した部位に融合し、神経伝達物質分子をシナプスへと放出する。シナプス後ニューロンでは、足場タンパク質PSD-95が豊富に存在する部位に神経伝達物質受容体タンパク質のクラスター群が含まれている。RIMの豊富な領域と、PSD-95が豊富な領域は向かい合っており並び、ナノカラムを構成する。

た。また、ライブ画像化が可能な光活性化局在化顕微鏡法(PALM)と呼ばれる別の種類の超分解能の光学顕微鏡法によって、RIMの密度が、融合部位から40nm以内の領域で高くなっていることが確認された。

Tangらはさらに、RIMが豊富な融合部位が、神経伝達物質信号を専門に受け取るシナプス後部の装置の位置とうまく合うように調整されているのかどうかを調べた。シナプス後膜の近くには精巧な足場が存在しており、足場の構成要素の1つはマルチドメインタンパク質のPSD-95である。このタンパク質は、AMPA型およびNMDA型グルタミン酸受容体タンパク質のクラスター化に関与している^{10,11}。RIMとPSD-95の密度の正確な測定から、RIMとPSD-95との間には明確な空間的相関があることが分かり、従って著者らは、シナプス間隙をまたぐナノスケールのカラム状構造が、RIMが豊富に存在するシナプス小胞融合部位と、シナプス後部のPSD-95ナドメ

インとを向かい合わせていると結論付けた(図1)。

最後にTangらは、ナノカラムが安定した構造モチーフといえるものなのか、また、認知機能にとって極めて重要なシナプス強度の調節性変化にナノカラムが関与しているかどうかを調べた。NMDA受容体を薬理的に活性化してシナプス強度を低下させたところ、ナノカラムの構成は即座には変化しなかった。しかし、25分後には、RIMのナノクラスター群の一部が突然大きくなった。ただし、大きくなったクラスターは、シナプス後部のPSD-95ナドメインと向き合っておりナノカラム内に存在するものだけだった。これは特筆すべき観察結果である。従って、シナプス後変化に応答したシナプス前放出の上方調節を仲介する逆行性信号が、足場タンパク質およびシナプス後グルタミン酸受容体の反対側に位置する放出装置を特異的に標的とし、シナプス強度を調整しているのかもしれない。つまりナノカラムは、重要な調

節プラットフォームを提供している可能性がある。

今回の結果から、次に解決すべき新たな疑問が生じる。例えば、ナノカラム形成を調節しているものを突き止めることである。ここから、ナノカラムの物理的性質を理解するための手掛かりが得られる可能性があるからだ。ナノカラム形成を仲介する因子の候補は、当然、シナプスをまたぐような細胞接着膜タンパク質のペアということになる。おそらく、このような接着分子が、RIMの配置と動員を最終的に制御しているのだろう。

また、拡散性の信号がシナプス間隙を横断して、ナノカラムの組み立てを数十nmのスケールで特異的に引き起こしているという可能性も考えられる。加えて、RIM自身がナノカラム形成に関係している可能性もある。RIMはカルシウムチャンネルの細胞内部分に結合する中心ドメインを含んでいて¹²、それが最終的にシナプス-小胞融合を引き起こす。

ナノカラムの概念は今後、その妥当性を検証し、拡張していくべきである。そのためには、シナプスの細胞接着タンパク質や細胞質の足場タンパク質などもっと多くのタンパク質を調べ、画像化法と遺伝子操作とを組み合わせる必要がある。シナプス間をまたぐ調整やそれに関係するタンパク質の詳細は、シナプスのタイプや生物によって異なるということが明らかになるかもしれないが、ナノカラム構成モチーフは、シナプスを形作るための基本的かつ一般的な原則だと思われる。 ■

(翻訳：古川奈々子)

Nanocolumns at the heart of the synapse

Vol. 536 (151–152) | 2016.8.11

Stephan J. Sigrist & Astrid G. Petzoldt

ベルリン自由大学生物学研究所

およびシャリテ・ベルリン医科大学（ドイツ）に所属

1. Chia, P. H., Li, P. & Shen, K. *J. Cell Biol.* **203**, 11–22 (2013).
2. Tang, A.-H. *et al. Nature* **536**, 210–214 (2016).
3. Ackermann, F., Waites, C. L. & Garner, C. C. *EMBO Rep.* **16**, 923–938 (2015).
4. Maglione, M. & Sigrist, S. *J. Nature Neurosci.* **16**, 790–797 (2013).
5. Matkovic, T. *et al. J. Cell Biol.* **202**, 667–683 (2013).
6. Fernández-Busnadiego, R. *et al. J. Cell Biol.* **201**, 725–740 (2013).
7. Deng, L., Kaeser, P. S., Xu, W. & Südhof, T. C. *Neuron* **69**, 317–331 (2011).
8. Han, Y., Kaeser, P. S., Südhof, T. C. & Schneggenburger, R. *Neuron* **69**, 304–316 (2011).
9. Rust, M. J., Bates, M. & Zhuang, X. *Nature Meth.* **3**, 793–795 (2006).
10. Nair, D. *et al. J. Neurosci.* **33**, 13204–13224 (2013).
11. MacGillivray, H. D., Song, Y., Raghavachari, S. & Blanpied, T. A. *Neuron* **78**, 615–622 (2013).
12. Kaeser, P. S. *et al. Cell* **144**, 282–295 (2011).

完全にソフトな ロボット

ロボット工学

タコ型ロボット「オクトボット」が開発された。これは、完全に柔らかい材料だけで作られた最初のロボットだ。化学反応で動力を得て、流体論理回路で制御されている。これまでの機械を超える可能性のある、「ソフトロボット」時代の幕開けを告げるものだ。

ロボットは、明確に決まった環境である製造現場で使われることが多い。この場合、ロボットはあらかじめ決められた手順どおりに動くことができ、人間の操作員との相互作用は安全上の理由から制限されている。しかし、もしもロボットが工場の外の現実の環境に出たら、不確かな状況に対処し、変化する状態に反応・適応して、人間を含む生物と安全に相互作用しなければならない¹。硬い材料でできた従来技術のロボットでは、達成が難しい課題だ。一方、柔らかく、変形可能な材料で作られたロボット²は、未知の物体をつかんで操ることや、形が決まっていない荒れた地形を進むのに適していて、人間に対する安全性も高いだろう。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Michael Wehnerらは今回、硬い構造や硬い制御システムを全く持たない最初のロボットを開発し、*Nature* 2016年8月25日号451ページで報告した³。

自然界の多くの動物で、柔らかいボディーパーツが重要な役割を果たしている。例えばイカ、ヒトデ、ミミズなどは、ほとんど完全に柔らかい材料と液体からできて

いて、彼らに適応性と丈夫さを与えている。このため、柔らかい材料を使えば、ロボットが長く伸びたり、狭いところを進んだり、登ったり、成長したりするなど、現在のロボット工学技術では不可能なことが可能になるのではないかという考えが広がっている。例えば、タコからヒントを得た柔らかいロボットアームは、長く伸びることが可能だし⁴、イモムシをまねたソフトロボットは、丸まって転がり、ジャンプもできる⁵。

2011年、Wehnerらと同じ研究グループの研究者らは、完全に柔らかいロボットの開発という注目すべき試みを報告した⁶。この研究では、ロボット自身は柔らかい材料だけで構成されていたが、さまざまなタイプの運動を空気の力によって実現する（駆動する）ため、従来のポンプ・バルブシステムが使われ、それが細いチューブでロボットに接続されていた。Wehnerらは今回、技術的な限界を大きく広げた。彼らのロボットは、体と駆動ユニットが柔らかいだけでなく、ロボットに組み込まれている制御システムと動力源も柔らかい。このロボットは、チューブやケーブルでつながれずに動作できる、完全に柔らかい最初のロボットだ。

Wehnerらは、このタコ型ロボットを「オクトボット」と名付けた（図1）。オクトボットの大きさは6cmほどで、8本の足にはアクチュエーター（駆動装置）として働く膨張性の区画が2つずつ埋め込まれている。燃料である過酸化水素水（液体）は、白金触媒を含む反応室に入ると分解して圧力の高い酸素（気体）を生じ、それが足のアクチュエーターを膨らませて足の運動を引き起こす。生

じた酸素などはやがて小さな穴から外へ抜ける。

Wehnerらは、オクトボットの一連の足の運動を、柔らかい材料だけでできた液体回路を使って制御した。この液体回路は、バルブが論理ゲートの構成要素になっている。スイッチバルブと呼ばれるバルブを2個使っていて、これが圧力に応じて開閉し、電子回路のトランジスタに似た働きをする。この液体回路に、燃料貯蔵室からの圧力のかかった燃料が入ると、その下流にある2つの反応室（それぞれ4本の足につながっている）に流れ込む燃料の量が交互に増減する。この燃料流量の振動は、システムが燃料を使い果たすまで続く。この結果、オクトボットは、4本の足を持ち上げたまま、他の4本の足を下げ、次にその逆を行うという運動のサイクルを繰り返す（図2およびgo.nature.com/2b3cn3s参照）。ロボットの体は、液体回路を含め、全てがシリコンを基礎にした材料でできていて、それらは、さまざまなサブシステムの機能上の要求に合わせて、多様な力学的性質を持つように作られている。

自律したソフトロボットを実現するには、さまざまな材料と、駆動、動力供給、論理回路などの機能を統合することが必要であり、このオクトボットは、このアプローチの可能性を実証する最小のシステムだ。Wehnerらはこれらを統合するために、微小型成形⁷、ソフトリソグラフィ⁸、多材料埋め込み3D印刷技術⁹など、高度な製作技術を組み合わせ、長さスケールで数桁にわたる多様な液体導管を埋め込んだ、弾性のある構造を作った。構造は一見複雑であるにもかかわらず、製作過程がカスタ

図1 オクトボット

Wehnerらは、完全に柔らかい材料だけでできたタコ型ロボットを作った³。ロボットの本体部分に、液体燃料の供給源と、足の周期的運動パターンを制御する液体システムが収められている。足の中に見える紫色の長方形は、足を持ち上げるためのアクチュエーターだ。スケールバーは10mm。



L. K. SANDERS, R. TRUBY, M. WEHNER, R. WOOD
& J. LEWIS/HARVARD UNIV.

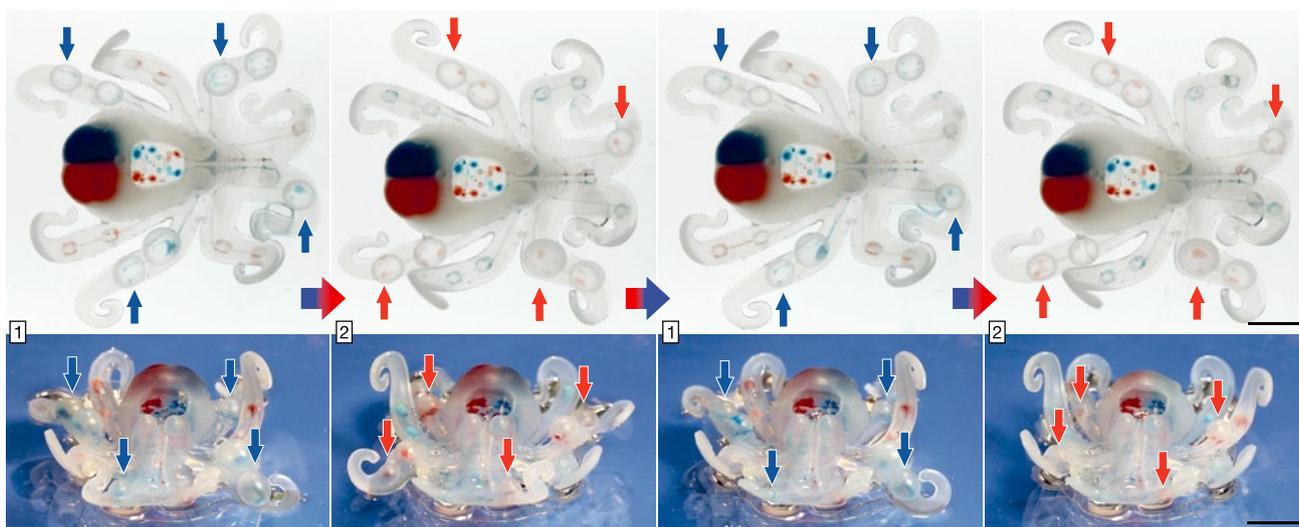


図2 オクトボットの動作

- 1** オクトボットは、アクチュエーターが膨らんだ4本の足（青色矢印）を下げる。残りの4本は持ち上げたままだ。
2 次に、持ち上げていた4本（赤色矢印）のアクチュエーターが膨らんで足を下げる。さきほど下げていた4本は気体が抜けて上がる。このサイクルを繰り返す。矢印の先端は膨らんだアクチュエーターを示している。スケールバーは10mm。

マイズ可能であるため、Wehnerらは、設計の修正が妥当であるかを素早く検証して試行錯誤を重ね、装置を短時間で最適化できた。

Wehnerらが今回使用したのは、柔らかい材料と連続変形（回転ジョイントで接続された硬い構造が作る動きではなく、足を連続的に屈曲することで生じる運動）である。これは、さらなる科学的、技術的発展への道を開く。次のステップは、もっと広範囲の運動を可能にするコンピューター制御システム（さらに高度な液体回路など）を開発すること、ソフトロボットののための新たな設計ルールを定めること、新たな製作技術を採用して改良することだ。

課題は残っている。例えば、ソフトロボットが環境に物理的に及ぼすことができる力が限られているために、その応用が限定される可能性がある。また、制御システムに従来のエレクトロニクスではなく液体論理回路を使うと、ロボットに複雑な振る舞いをさせることが難しくなるかもしれない。現実の状況の中でロボットを望みどおりに振る舞わせるためには、柔らかい材料の性質と、それらが制御システムや環境とどのように相互作用するかについてさらに深く理解することも必要だ¹⁰。

ソフトロボット工学はまだよちよち歩きの段階にあるが、機械装置の検査や整備、捜索・救助活動、探検など

の応用につながる可能性が高いと期待される。ソフトロボットは、健康や生活の質を改善するための新たなアプローチももたらすかもしれない。全方向に曲がり、伸びることもでき、硬さも調節可能な柔らかい内視鏡¹¹や、足首と足の機能修復のために使われる柔らかい装具¹²はすでに実現している。Wehnerらの成果は、こうした方向の研究を導くのに役立ち、この新たな研究分野の知識体系の柱になるものだ。

（翻訳：新庄直樹）

Generation soft

Vol. 536 (400–401) | 2016.8.25

Barbara Mazzolai & Virgilio Mattoli

イタリア技術研究所マイクロバイオリボティクスセンターに所属

- Pfeifer, R., Lungarella, M. & Iida, F. *Science* **318**, 1088–1093 (2007).
- Rus, D. & Tolley, M. T. *Nature* **521**, 467–475 (2015).
- Wehner, M. et al. *Nature* **536**, 451–455 (2016).
- Mazzolai, B., Margheri, L., Cianchetti, M., Dario, P. & Lasch, C. *Bioinspir. Biomim.* **7**, 025005 (2012).
- Lin, H.-T., Leisk, G. G. & Trimmer, B. *Bioinspir. Biomim.* **6**, 026007 (2011).
- Shepherd, R. F. et al. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **108**, 20400–20403 (2011).
- Hecke, M. & Schomburg, W. K. *J. Micromech. Microeng.* **14**, R1–R14 (2004).
- Qin, D., Xia, Y. & Whitesides, G. M. *Nature Protocols* **5**, 491–502 (2010).
- Wu, W., DeConinck, A. & Lewis, J. A. *Adv. Mater.* **23**, H178–H183 (2011).
- Paul, C. *Robot. Auton. Syst.* **54**, 619–630 (2006).
- Ranzani, T., Gerboni, G., Cianchetti, M. & Menciassi, A. *Bioinspir. Biomim.* **10**, 035008 (2015).
- Park, Y.-L. et al. *Bioinspir. Biomim.* **9**, 016007 (2014).

21世紀の原子力発電に対する懸念

原子力発電所で低炭素発電が行われることに価値を見いだして、既存の原子力発電所を優遇するのは理にかなったことだが、原子力産業が21世紀を生き抜いて繁栄するためには、なすべきことが数多くある。

米国ニューヨーク州政府は、2030年までに発電全体の50%を再生可能エネルギーによる発電とする方針を2015年12月に示したが、その際に、当然のことながら原子力発電に関する問題が持ち上がった。現在、同州内の電力の30%以上を賄っているのは、4つの発電所で稼働する6基の原子炉による発電で、これが同州内の低炭素電力源の半分以上を占めている。だが、低コストの天然ガスによる発電にかなわないという単純な経済的理由で、4基の原子炉に閉鎖の恐れがあったのだ。

これに対してニューヨーク州の規制当局は、原子力を使った発電の「環境価値」を考慮して、2016年8月1日に助成金を新設した。同州は、温室効果ガスの排出によって生じる損害、つまり「炭素の社会的費用」から手をつけたのだ。米国政府の全国レベルでの推算によれば、二酸化炭素1t当たりの社会的費用は、現在は38ドル（約3800円）だが、2030年には50ドル（約5000円）に増加する。一方、原子力発電所の収入は社会的費用を著しく下回っているため、その差額を埋めるための「ゼロエミッションクレジット」を受け取る資格があるというわけだ。この助成金は、施行後の2年間だけで約9億6500万ドル（約965億円）に上る可能性がある。エクセロン社（米国イリノイ州シカゴ。ニューヨーク州内に2つの原子力発電所を保有し、現在は3カ所目の購入交渉中）は、原子力発電所の操業を続ける計画を推進したいと話している。

ここから最初に学び取れることは、二酸化炭素の価格が大きく影響することだ。ニューヨーク州は、排出量取引制度に参加している東部9州の1つだが、現在の取引価格は二酸化炭素1t当たり平均4ドル（約400円）と極めて安いので、原子力発電が天然ガスによる発電と対抗できなかった。

米国の原子力産業と一部の原子力発電を支持する環境保護主義者は、ニューヨーク州の助成金制度を先例として歓迎した。

その評価は正しい。この制度は、原子力発電が同じような経済的障害に直面している米国の他州にとってのモデルとなり得るし、もっと広く言えば、2015年に締結されたパリ協定の美辞麗句とは裏腹に、気候変動対策が前途遠慮であることを我々に再認識させてくれたからだ。

原子力産業にとっての苦難は、これだけではない。現在、全世界で約440基ある原子力発電所が電力の11%を供給しているが、設置されてから平均で30年を経過している。現在、60基以上の原子炉が建設中だが、古い発電所の閉鎖が進む今後数十年間は、原子力産業がどんなに苦勞してもエネルギーミックスにおける原子力発電の割合はせいぜい現状のままだ。

また、ニューヨーク州は助成金新設の一方で、インディアナポイントエネルギーセンターにある2基の原子炉の耐用年数を延長しようとする活動に対し、安全性の観点から異議を唱えている。事業者は、米国原子力規制委員会（NRC）に対して原子炉の耐用年数を40年から60年に延長するための許可を申請しているが、地下水のトリチウム汚染やさまざまな機器の故障に関する質問に答えていない。

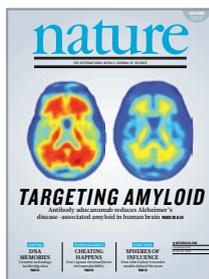
原子力発電所を安全に稼働させることが実証できるのであれば、世界的な温室効果ガス排出削減活動に対する寄与を奨励すべきだ。しかし、現実には、事故の潜在的なコストが高すぎると政府とコミュニティが判断する発電所が存在する。今後、原子力産業が何らかの有意義な発展ができるかどうかは、いまだに実証されていない次世代型の超安全な（accident-proof）原子炉にかかっているといえるかもしれない。今のところ、原子力産業は数少ない原子炉の使用延長に注力しているが、ニューヨーク州が再生可能エネルギーに期待しているのは明白だ。

（翻訳：菊川要）

2016年9月1日号 | Vol. 537 No. 7618

環境科学：アメリカ大陸への人類移動は海沿いの経路で

最終氷期の大半の期間は、シベリアから現在のベーリング海峡にまたがる「ベーリングア」と呼ばれる陸橋を経た北米への人類の移動が、大陸氷床によって妨げられていた。ある時点で、コルディエラ氷床とローレントイド氷床の間に道が開けたが、この長さ1500 kmの無氷回廊はあまりにも寒冷で、人類の移動経路として機能することはなかったと考えられている。今回E. Willerslevらは、かつてこの無氷回廊だった場所の湖底堆積物コアを採取し、それに基づいた一連の環境構築結果を明らかにした。そのデータから見ると、この回廊は、氷床以南のアメリカ大陸に人類が到達したことが分かっている時期より後になっても、人類の生存に適さない場所であったと考えられる。このことは、人類が海沿いの経路で北米に移動したことを意味しており、その経路は後の海水準上昇で現在は海面下に沈んでいる。



10.1038/nature19085

MIKKEL WINTHER PEDERSEN



1万3000年以上前に氷床の退氷によってできた無氷回廊の、南側の領域の現在の風景。

発生生物学：発生中の多能性幹細胞における種ごとの違い

今回、斎藤通紀（京都大学）らは、サル胚に単一細胞RNA発現解析法を用いて、このサル種の初期発生中の遺伝子発現を解析し、マウスおよびヒトの初期胚での遺伝子発現と比較することで、哺乳類における多能性の個体発生過程での特徴を種横断的に明らかにした。意外なことに、ニューロン分化過程にあるサル細胞は、原腸形成期にも多能性関連遺伝子群を発現し続けていた。この解析結果は、主要な動物種における発生段階ごとの多能性幹細胞の相対的な特徴を知るための手

掛かりとなり、*in vitro*でのヒト多能性の調節を向上させる基盤の確立に役に立つだろう。

10.1038/nature19096

惑星科学：ロゼッタが一掃きした彗星の塵

今回M. Bentleyらは、宇宙空間に打ち上げられた最初の原子間力顕微鏡であるロゼッタ探査機搭載装置MIDASを使って得られた、67P/チュリュモフ・グラシメンコ彗星（67P）の塵粒子の*in situ*測定の結果を報告している。67Pの塵粒子は、より小さな細長い粒子の集合体であり、異なるサイズの粒子の構造は、階層的な集合を示していることが明らかになった。塵粒子は、小さな単一粒子から大きな多孔質集合体粒子まで、コンドライト多孔質星間塵粒子に似たさまざまな形態であり、多孔質星間塵粒子が彗星起源であるという主張を裏付けている。

10.1038/nature19091

生態学：種の共存の根源

生態系内で限定されている資源が複数あると、種間のトレードオフが可能となって種共存の可能性を高めることが、理論によって示唆されている。今回W. Harpoleらは、この理論について、全球規模で展開された栄養素添加実験である「Nutrient Network」共同研究のデータを用い、植物群落を対象として検証を行った。複数の大陸の45の草原で実施された複数年にわたる栄養素添加実験のデータを集約して解析した結果、添加した栄養素の数が増えると植物種の多様性が低下することが分かった。これらの知見は、地中の資源をめぐる競争が植物種の多様性を高めていることを示唆している。

10.1038/nature19324

がん：進行乳がんに見られる2つの細胞集団

進行したエストロゲン受容体陽性/HER2陰性乳がんの患者の循環腫瘍細胞の特徴が明らかになり、それらの循環腫瘍細胞は2つの異なる状態間を相互転換できることが分かった。HER2を発現するようになった細胞亜集団は、複数のRTKシグナル伝達経路の活性化を示し、増殖能が高い。もう1つの細胞亜集団はHER2を発現しないが、Notch1レベルが上昇している。このHER2陰性集団は増殖性が低く、細胞毒性薬に強い耐性を示すが、Notch1阻害剤に感受性である。増殖性循環腫瘍細胞亜集団と薬剤耐性循環腫瘍細胞亜集団間で迅速な相互転換が見られることから、同時併用療法に臨床的価値がある可能性が示唆される。

10.1038/nature19328

構造生物学：カルシウムチャネル遮断薬の構造

高血圧の治療に主に使われるジヒドロピリジンと心臓不整脈の管理に使われるフェニルアルキルアミンという2種類の力

ルシウムチャンネル遮断薬の作用の構造基盤が今回、明らかにされた。Ca_vチャンネルのホモ四量体モデルである細菌のCa_vAbの活性は、ジヒドロピリジンとフェニルアルキルアミンによってナノモルの親和性で状態に依存する様式で抑制される。L. Tangらは、Ca_vAbにこの2種類の薬剤が結合する仕組みについて、結晶学および機能的解析を行った。ジヒドロピリジンの結合部位はチャンネル小孔の外側の脂質に面した表面に位置しているが、フェニルアルキルアミンの結合部位は小孔の中央のキャビティ内であって、選択性フィルターの細胞内部側に位置していることが分かった。これらの結果は、これら2種類のカルシウムチャンネル遮断薬の作用機序を明らかにしており、副作用がより少なく有効性の高い新規拮抗薬の設計と開発を促進すると考えられる。 [10.1038/nature19102](https://doi.org/10.1038/nature19102)

2016年9月8日号 | Vol. 537 No. 7619

創薬：痛みを標的とするデザイナーオピオイド

ケシから採れるモルヒネなどのアルカロイドは、μオピオイド受容体のアゴニストで、何世紀にもわたって痛みの治療に使われてきた。今回、計算科学の手法を使い、300万個以上の小分子についてμオピオイド受容体への結合状態が調べられた。そして、最も有望な構造群を選んで構造を基盤とする最適化を行い、強力なアゴニストであるPZM21が見つかった。PZM21はμオピオイド受容体に対して非常に高いサブタイプ選択性を示す。PZM21はマウスで強力な鎮痛作用を発揮し、この作用はμオピオイド受容体ノックアウトマウスでは完全に失われる。小分子であるPZM21は痛みの情動的要素を低減するようで、反射行動には検出できるほどの変化は引き起こさず、呼吸抑制もほとんど見られない。 [10.1038/nature19112](https://doi.org/10.1038/nature19112)



構造生物学：ニア原子分解能で得られた真核生物Ca_vチャンネルの構造

電位依存性カルシウム (Ca_v) チャンネルは、膜で生じた電気シグナルをCa²⁺が仲介して起こる細胞内事象に変換する。例えば、Ca_v1.1は骨格筋で発現され、興奮収縮連関の電位センサーとして働いている。今回、ウサギ由来Ca_v1.1の3.6 Å分解能での低温電子顕微鏡構造が報告された。中核となるα1サブユニットの高分解能構造が得られ、イオン透過経路を詳しく調べることが可能になり、複数の伸びた細胞外ループが選択性

フィルターの上部に「開口部のあるドーム」を形成しているという予想外の構造が明らかになった。Ca_v1.1複合体のこのニア原子構造によって興奮収縮連関の構造解明の基盤が確立され、Ca_vおよびNa_vチャンネルの機能と疾患機序の分子レベルでの説明のための三次元モデルが得られた。 [10.1038/nature19321](https://doi.org/10.1038/nature19321)

構造生物学：分岐したスプライシング複合体の構造

RNAからのイントロンの除去は協調的に進行する過程ではなく、スプライソソームによる2つのエステル交換反応が関わる順序立った過程である。第1段階では5'スプライス部位が切断され、イントロンの端がラリアット（投げ縄）構造を形成するように結合する。長井潔（英国MRC分子生物学研究所）らは今回、低温電子顕微鏡単粒子再構成の手法を使って、この1番目のエステル交換（分岐）反応直後で停止した出芽酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) スプライソソームの、全体分解能3.8 Åでの構造を捉えた。複合体内のRNAの立体構造は、2番目の過程であるエキソン連結反応に先立って構造の改変が起こることを示唆している。 [10.1038/nature19316](https://doi.org/10.1038/nature19316)

ナノ科学：個々のナノチューブを通る水流

カーボンナノチューブは、脱塩などへの応用に関心を集めている。これは、カーボンナノチューブを通して動く水の速度が極めて速いためである。しかし、単一のナノチューブの浸透率の明確な測定が難しかったため、その基礎となる水輸送の機構の特性はこれまで十分に評価されてこなかった。L. Bocquetらは今回、単一のナノチューブから周囲の流体中へ水流が噴出する際の流体ダイナミクスを観察することによって、浸透率を正確に測定できることを示している。この結果から、カーボンナノチューブには半径に依存する大きな表面すべりがあるのに対し、窒化ホウ素ナノチューブには表面すべりが少ないことが明らかになった。これら2つの系の固液界面に原子スケールの微妙な違いがあることがこうした相違の原因と考えられ、ナノ流体工学が、流体力学の連続的描像が物質の原子的性質と出会う最前線であることを示す例となっている。 [10.1038/nature19315](https://doi.org/10.1038/nature19315)

進生物学：指と鰭条の発生に関わるHox遺伝子群

Hox遺伝子群は、四肢類の肢や指の発生において主要な役割を担っていることから、魚類の鰭から四肢類の肢への移行にこれらの遺伝子が関与しているのかどうか、関与しているならばどのようにかという疑問が生じる。今回N. Shubinらは、ゼブラフィッシュの鰭においてHox遺伝子の細胞系譜解析とノックアウト解析を行い、鰭と肢におけるHox遺伝子の機能を比較した。それによって、HoxAとHoxDの遺伝子クラス

ターを欠損したゼブラフィッシュでは、鰭条が縮小し、軟骨要素が増えることが分かった。この結果は、肢の指と鰭の輻射骨ふくしゃこつを作り出す発生プログラム間の相同性を明らかにするものであり、四肢類の水中から陸上への移行と進化を解明する上で重要な一歩となる。 [10.1038/nature18648](https://doi.org/10.1038/nature18648)

免疫学：胚中心での酸素制限

酸素の送達と局所的低酸素状態は、がんの免疫生物学との関連で固形腫瘍において詳細に研究が行われてきたが、2次リンパ器官の異なる領域における細胞周囲の酸素濃度の微細構造についてはほとんど分かっていない。酸素の供給は中間代謝にとって非常に重要であるが、今回、酸素は胚中心では自然に制限されており、Bリンパ球の機能に影響を及ぼすことが明らかになった。特筆すべきことに、M. Boothbyらは、胚中心の低酸素状態が、mTORC1の活性およびシトシンデアミナーゼAIDに対する影響を介して、抗体のクラススイッチを調節していることを示している。 [10.1038/nature19334](https://doi.org/10.1038/nature19334)

2016年9月15日号 | Vol. 537 No. 7620

知られざる才能：カレドニアガラスと同じく「巧みに道具を使う」ことが明らかになったハワイガラス

表紙は、棒状の小枝を道具として使って太い枝の中から餌を引き出すハワイガラス。カラス科の鳥類は知能が高いことで有名である。ニューカレドニアに生息するカレドニアガラス (*Corvus moneduloides*) は、餌を採るために道具を作り、それを使うことがよく知られている。C. Rutzらは今回、こうした習性を持つ鳥はカレドニアガラスだけではないことを明らかにした。太平洋のハワイ諸島に生息する別種のカラスであるハワイガラス (*C. hawaiiensis*) がその仲間に加わったのである。ハワイ語の名前の「アララー (Alala)」の方でよく知られているこのカラスは、幼鳥期に自然に道具の使い方を覚え、道具を巧みに使う能力はこの種の全体にわたって見られる。著者らがこのことを確信を持って言えるのは、ハワイガラスは野生ですでに絶滅しており、今回の実験は全て飼育下にある109羽の生存個体のうちの104羽について行われたからである。今回の研究結果は、熱帯のカラスの技術的熟練は、離島に見られるどちらかという異例の生態環境、つまり潜んでいる餌を捕食することに対する競争が少ないことや、低い被食リスクなどによって助長された可能性を示唆し



ている。道具を使用する第二のカラス種が発見されたことは、動物での道具の使用に関する比較研究に興味をそそる道を開くことになりそうだ。 [Cover; 10.1038/nature19103](https://doi.org/10.1038/nature19103)

神経科学：青斑核による記憶の固定化

記憶の保持は、記憶符号化の直前または直後に、何か新奇な事象や範疇はんちゆう的に関連のあることが起こると強化され得る。これを「フラッシュバルブ記憶」という。従来、この現象には、腹側被蓋野由来のドーパミンに基盤を置く機構が関係すると考えられてきた。しかし今回、通常はノルアドレナリン性の信号とされる、青斑核から発して海馬へ向かう投射が、おそらくドーパミンの局所放出を介してこの新奇事象による記憶強化効果を駆動することが示唆された。 [10.1038/nature19325](https://doi.org/10.1038/nature19325)

構造生物学：クラスA GPCRでのシグナル伝達

血管収縮ペプチドであるエンドセリンとそのGタンパク質共役受容体 (GPCR) は、肺動脈性肺高血圧症などのさまざまな病気の発症に関わっており、治療標的として重要である。今回、ヒトエンドセリンB型受容体の、リガンドが結合していない状態と内在性アゴニストであるエンドセリン-1と結合した状態のX線結晶構造が報告された。構造解析と変異解析により、エンドセリン-1とエンドセリン-3というイソペプチドを識別する選択機構が明らかになった。M2ムスカリン受容体との比較から、クラスA GPCRのシグナル伝達には共通する機構があると考えられる。 [10.1038/nature19319](https://doi.org/10.1038/nature19319)

エピジェネティクス：長鎖非コードRNAであるXISTのメチル化

XISTとして知られる長鎖非コードRNAは、哺乳類の雌の発生期に、2本のX染色体の一方にある遺伝子の転写サイレンシングに必要である。今回S. Jaffreyらは、XISTが高度にメチル化されており、RNAの全長にわたって少なくとも78個のN⁶-メチルアデノシン (m⁶A) 残基を含んでいることを示した。XIST結合タンパク質であるRBM15は、WTAPとMETTL3 (RNA m⁶Aメチルトランスフェラーゼ) の複合体をXISTに誘導することが明らかになり、核内m⁶AリーダーのYTHDC1が遺伝子サイレンシング機構を活性化することが分かった。 [10.1038/nature19342](https://doi.org/10.1038/nature19342)

地球化学：地球の組成の代理指標としてのコンドライト隕石

今回C. Burkhardtらは、地球の前駆天体はコンドライト隕石いんせきに比べ、遅い中性子捕獲過程 (s過程) の元素合成によって作られるネオジウム (Nd) に富んでいたことを示している。s過程過剰は高い¹⁴²Nd/¹⁴⁴Nd比をもたらすため、この効果を

補正すると、入手できる地球の試料とコンドライト隕石の $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比は、5ppmの精度では区別できない。従って、入手できる地球のケイ酸塩部分の試料とコンドライト隕石の ^{142}Nd の相違は、地球ではs過程で生成されたNdの比率が高いことを示しており、初期の分化過程を反映しているのではない。著者らは、過去に提案されたような隠れた貯蔵庫や「超コンドライト的」地球モデルは不要であり、コンドライト隕石は地球よりも太陽から遠い所で作られ、地球とは異なる太陽系前駆物質の混合物を含んでいるが、それにもかかわらず地球の総化学組成の良い代理指標となる可能性があるとして結論付けている。

10.1038/nature18956

免疫学：慢性ウイルス感染を抑制するCD8⁺T細胞

ウイルス抗原が長期間にわたって存在すると、CD8⁺エフェクターT細胞の機能の疲弊が進むが、慢性ウイルス感染の際にはこのような疲弊したT細胞でも病原体をある程度まで抑制できる。今回、このような免疫細胞が果たす抗ウイルス性の役割の基盤となる機構が、2つの研究グループによって調べられた。L. Yeらは、リンパ球性脈絡髄膜炎ウイルス (LCMV) 慢性感染のマウスモデルとヒトHIV患者について研究を行い、慢性ウイルス感染によって生じた、部分的に疲弊したCXCR5⁺CD8⁺T細胞集団がB細胞濾胞^{ろほう}に存在し、ウイルス複製を抑制していることを報告している。ウイルス特異的CXCR5⁺CD8⁺T細胞の分化やエフェクター機能はId2-E2Aシグナル伝達経路によって調節されている。抗PD-L1抗体の投与は、養子移入されたCXCR5⁺CD8⁺T細胞と相乗的に働いて、マウスでのウイルスの複製を阻害することが分かった。一方、R. Ahmedらは、LCMVに慢性感染したマウスで、濾胞性ヘルパーT (T_{FH}) 細胞に似たシグネチャーを持つウイルス特異的CD8⁺T細胞集団の誘導が促進されることを示した。このようなT細胞は、抑制性受容体PD-1を発現していたが、同時に補助刺激分子も発現していて、記憶CD8⁺T前駆細胞や造血幹細胞に似た遺伝子シグネチャーを示した。これらの知見はT細胞疲弊の解明を進め、またPD-1を標的とする免疫療法の最適化にも関係してくる。

10.1038/nature19317; 10.1038/nature19330

老化：食餌制限のマウスモデル

食餌制限は、多くの生物で寿命を延ばし、老化のさまざまな兆候の発現を遅らせる方法としてよく確立されているが、その機序はまだ解明されていない。J. Hoeijmakersらは今回、DNA修復に欠陥があり、ヒトの早老症候群（小児で急速な老化を引き起こす疾患）によく似た症状を示す2種類のマウス

モデルで食餌制限を行い、その影響を検証した。どちらのマウスモデルでも、30%の食餌制限によって寿命が著しく延長したことは特筆すべきである。また食餌制限したマウスでは、対照群に比べてより多くのニューロンが維持され、運動機能もより良好だった。著者らは、今回用いた*Ercc1^{Δ/+}*マウスが、食餌制限の影響の研究や、治療的介入の試験において有効なモデルになるだろうと考えている。

10.1038/nature19329

2016年9月22日号 | Vol. 537 No. 7621

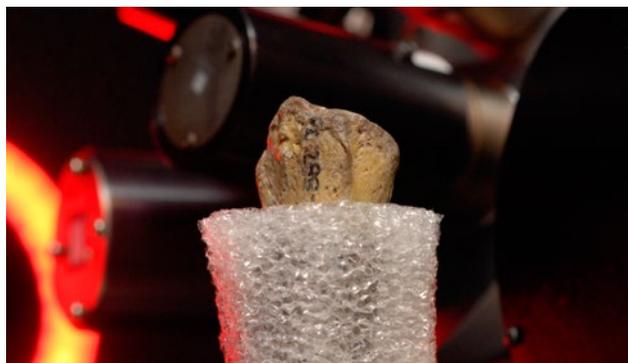
研究室の中の不平等：不平等について詳細に調べる

今号の「科学と不平等」と題した特集では、現象としての不平等について科学がどのようなことを言えるのか、また、科学の分野で働く全ての人々の中で不平等がどのような形で進行し、何をもたらすのかに注目している。経済学者のBranko Milanovicは、歴史的データを用いて100年のスケールで不平等の変遷をたどり、社会学者のMike Savageは、「社会階級」が実際はどういうことを意味するのかという疑問について論じている。また、2つのNews Featuresでは、科学界自体の中で不平等が何を意味するのか、詳細に調べられている。



古生物学：猿人「ルーシー」は墜落死した？

「ルーシー」は、絶滅ヒト族であるアウストラロピテクス・アファレンシス（アファール猿人）の有名な部分骨格標本である。彼女は、300万年余りに前に現在のエチオピアに当たる地域で生活していた。今回J. Kappelmanらは、ルーシーの骨を新たに分析してその死因を絞り込んだ。その結果、高木からの落下で負った怪我が命取りになったことが示唆された。ア



CTスキャンによる、「ルーシー」の橈骨遠位端の観察。

MARSHA MILLER, UT-AUSTIN

ファール猿人は、二足歩行する能力がありながら、木登りも得意であったと長年考えられてきた。しかし、そうした適応には他の諸リスクが伴い、それでルーシーの命運が尽きてしまったのかもしれない。
10.1038/nature19332

ゲノミクス：胚の表現型と致死遺伝子

国際マウス表現型解析コンソーシアム (International Mouse Phenotyping Consortium ; IMPC) のS. Murrayらは、5000系統のノックアウトマウスを作製して表現型の特徴を明らかにするプロジェクトの第1段階として、胎生致死変異の表現型を特徴付ける初めての系統的取り組みを報告した。最初の1751の単一遺伝子ノックアウトマウスの作製過程で、410の致死遺伝子を明らかにし、高分解能三次元画像化法などの包括的な表現型解析パイプラインでそれらの遺伝子の特徴付けを行った。意外なことに、同一遺伝的背景であっても、致死性が変動するいくつかの遺伝子ノックアウトなど、複数の不完全浸透の表現型が見られた。また、これらのマウスに不可欠な遺伝子のオルソログはヒトの疾患関連遺伝子に豊富に存在していることも分かり、ヒト集団における純化選択の証拠が示された。
10.1038/nature19536

音響学：プレート上の音響ホログラム

音波、特に超音波を用いると、液体中や空気中の物体に触れずに操作でき、この現象は、医用イメージング、非破壊試験、非破壊計測に応用されている。通常は所望の音場を変換器アレイによって作り出すが、この変換器アレイは注意深く結合し制御しなければならない。今回P. Fischerらは、音響ホログラムを作る比較的簡単な手法について説明し、この手法の

物質操作への使用の可能性を実証している。彼らは、3D印刷によってポリマープレートに音響ホログラムを符号化し、次にそれを使って、物体の非接触操作に使用できる音場を作っている。この方法は、再生の自由度が既存の方法より2桁大きい複雑な場を生成できる。このホログラムは安価で、作製に時間がかからないため、この手法は幅広く採用され、超音波操作の新しいさまざまな応用を可能にするかもしれない。

10.1038/nature19755

発生生物学：胚発生におけるクロマチン状態

初期胚におけるクロマチン状態のゲノム解析は、解析のために使える細胞数が限られているため技術的に困難であった。本号では3編の論文が、極めて高感度なChIP-seq解析法を用いて、初期マウス胚発生中のヒストン修飾の動的パターンを明らかにしている。A. Klunglandらは、^{らんぼ}卵母細胞ゲノムでは広域な非カノニカルH3K4me3ドメインが見られ、これがDNAメチル化の蓄積の防止に働いていることを見いだした。W. Xieらは、卵母細胞ゲノムでは広域な非カノニカルH3K4me3ドメインが見られ、これらのドメインは低DNAメチル化ドメインとオーバーラップしていて、遺伝子サイレンシングに関与しているらしいことを発見した。S. Gaoらは、着床前胚でヒストンH3K4me3修飾とH3K27me3修飾をマッピングし、接合子ゲノム活性化の際のヒストン修飾の再構築に着目した。H3K4me3ドメインの幅は非常に動的であり、H3K4me3はプロモーター領域で速やかに再構築されるが、H3K27me3はこれらの領域にはほとんど存在しない。以上の結果と、最近報告された研究とを総合すると、卵母細胞は特徴的なエピゲノムを持つことが明らかになり、これらの研究によって、母親由来の遺伝子発現プログラムが接合子の遺伝子発現プログラムに移行する仕組みに関する手掛かりが得られた。

10.1038/nature19360; 10.1038/nature19361; 10.1038/nature19362

植物科学：フォトリピンは光合成調節に関わっている

過剰な光は植物や藻類の光合成系を壊滅させることがあり、細胞に損傷を引き起こし、さらには細胞死にまでつながりかねない。そのため、植物はこうした光の過負荷を防止するような系を発達させてきた。G. Finazziらは今回、緑藻の*Chlamydomonas reinhardtii*で青色光受容体であるフォトリピン (PHOT) が、光強度が十分に高い場合にLHCSR3 (light-harvesting complex stress-related protein 3) の発現を誘導することを明らかにした。こうした応答は、光化学系IIにおける過剰な光の散逸を引き起こす。PHOT活性が無いと緑藻の適応度は大幅に損なわれる。
10.1038/nature19358

KAI MELDE



音響ホログラムで生成された超音波によって、ハトの形に寄せ集められた水中のマイクロビーズ。

構造生物学：細菌細胞壁の完全性の カギとなるSEDSタンパク質

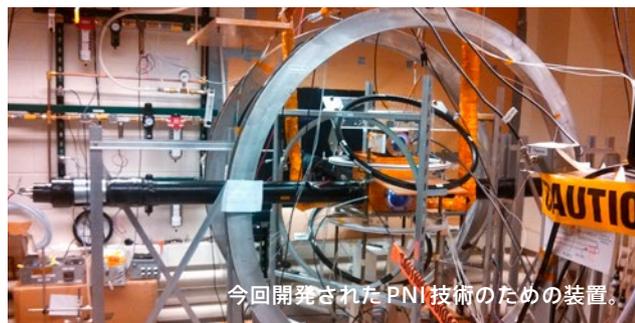
細菌外骨格のペプチドグリカン、クラスAペニシリン結合タンパク質(PBP)により合成されると一般的に考えられている。今回D. Rudnerらは、枯草菌 (*Bacillus subtilis*) での遺伝的操作、系統発生的解析、機能実験を用い、SEDSファミリータンパク質が、クラスA PBPよりも広く保存されている主要なペプチドグリカンポリメラーゼであることを明らかにした。特に枯草菌において、桿菌の伸長^{かんきん}に關与するRod複合体の広く保存された構成要素であるSEDSタンパク質RodAは、クラスB PBPと共に、細胞の伸長・分裂装置の主要な細胞壁シンターゼとして働くことが示された。著者らは、枯草菌およびおそらくほとんどの細菌が、2つの異なるクラスのポリメラーゼを用いて外骨格を合成すると結論付けている。また、SEDSファミリータンパク質は抗生物質開発における有望な標的となり得ることも示唆された。10.1038/nature19331



分子画像化法：「PNI」画像として捉えられた共鳴線

今回Y. Zhengらは、核スピンを操作する磁気共鳴画像化の能力とγ線検出器の高い感度を組み合わせ、新しい画像化・分光法を考案している。偏極核画像化法 (polarized nuclear imaging ; PNI) と呼ばれるこの手法では、少量の放射性トレーサーを系に導入し、次に従来型の核磁気共鳴 (NMR) 法によってその偏極を操作する。しかしPNIは、こうしたトレーサーに伴う弱い高周波信号を検出するのではなく、高度に偏極した核から放出される異方的なγ線を測定することによって機能し、単一のγ線を検出できるため、必要なトレーサーの量は、従来型のNMR信号検出に比べて極めて少ない。今回の新しい手法は、非生物学的な画像化と分光にすぐにでも応用できると思われ、おそらくいずれは医学診断に使われる可能性がある。

10.1038/nature19775



今回開発されたPNI技術のための装置。

化学：単純な有機系における振動反応

散逸的な化学反応ネットワークは、平衡から外れて働く系であり、連続的な成分再生や自律的な調節などの特徴を示す。生体細胞は、そうした平衡から外れた化学ネットワークの1つである。これまで、前生物的地球に關係する単純な有機分子を用いて、この種の動的挙動を再現することは不可能であった。今回G. Whitesidesらは、反応ネットワークに組み込むと自己触媒し振動する特徴を示す、数種類の成分からなる相互作用有機種の系を実証している。これらの有機成分は全て、比較的単純であり、反応に酵素の触媒作用を必要としない。

10.1038/nature19776

神経科学：Chd8変異マウスの自閉症様行動

クロマチンリモデリング因子をコードする遺伝子CHD8の変異は、自閉症スペクトラム障害 (ASD) と強く関連している。なかやまけいいち中山敬一 (九州大学) らは今回、Chd8の変異をヘテロ接合で持つマウスがASD様の行動を示し、その脳内の遺伝子発現に、小さいが全体的な変化が見られることを明らかにした。遺伝子セット濃縮解析 (GSEA) から、Chd8変異マウス胚では神経発生の遅延が見られることが分かった。REST (RE-1 silencing transcription factor) の標的遺伝子の発現は、Chd8変異マウス胚の脳や、ヒトのASD患者の脳で低下していた。また、CHD8はマウス脳組織においてRESTと物理的に相互作用することが分かった。これらのデータは、CHD8のハプロ不全が、RESTの異常な活性を介して脳内の遺伝子発現に影響を及ぼしている可能性を示唆している。

10.1038/nature19357

神経科学：予期的渇きを引き起こす神経回路

哺乳類にとって、体内の水の平衡を維持することは死活問題である。渇き応答行動と体液バランスの維持とを結び付ける神経生物学的機構は、この両者が異なる時間スケールで作動するため、興味深い問題を提起する。今号の2つの論文で、マウスの渇きに応答する脳領域と渇きを予期する脳領域が明らかにされた。Z. Knightらは、脳弓下器官 (SFO) の渇きを促進するニューロンの役割を示した。飲食中には、口腔からSFO (脳室周囲にある3つの感覚器官のうちの1つ) へのフィードバックが、血液組成に関する情報と統合され、これにより体液バランスが経口摂取によってどの程度変化しそうかについての指標がもたらされて、行動が調節される。一方C. Bourqueらは、入眠直前の予期的飲水を生理的要求とは無関係に駆動する、中枢時計ニューロンからの投射を明らかにした。この特定時刻に合わせた水分摂取量増加がないと、マウスは睡眠期の終わり近くになって脱水を起こす。10.1038/nature18950; 10.1038/nature19756

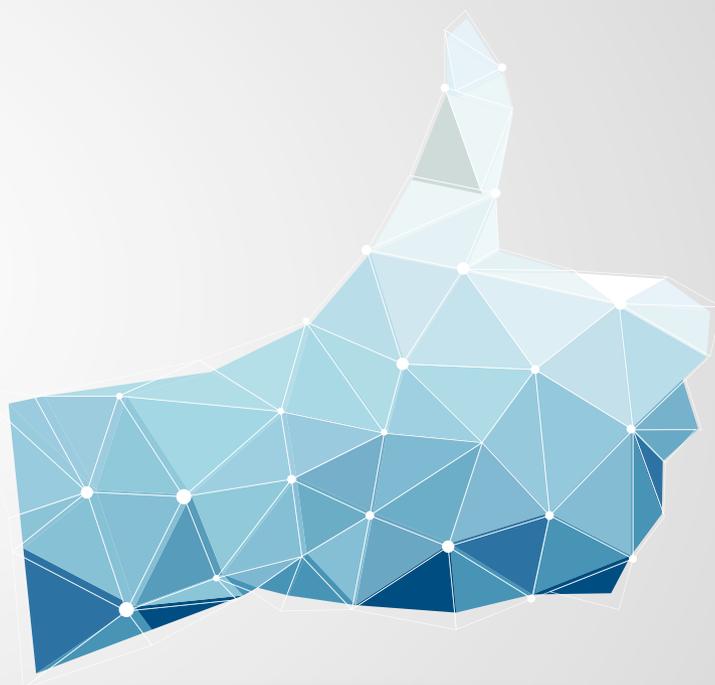
nature ダイジェスト

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

地球に生命が誕生した年代を約2億年さかのぼらせるストロマトライトの化石が発見されました（6ページ「37億年前の『生命の痕跡』を発見か」）。この記事で触れられている西オーストラリアの「現代のストロマトライト」を、以前訪れたことを思い出しました。そこは深く入り組んだ湾で、外洋と隔たれているため塩分濃度が一般的な海水より2倍も高く、ストロマトライトを形作る微生物（特にシアノバクテリア類）を捕食する生物が少ない環境であるために、ストロマトライトは現在も1年に0.3mm程度、ゆっくりと成長を続けているそうです。現在の地球にこれだけの酸素があるのは、太古のシアノバクテリア類による光合成のおかげと考えられていて、私たちはその酸素で生きています。微生物と私たちは密接な関係にあり、食生活はもちろんのこと、体に存在する常在菌がさまざまな疾患と関連することも分かってきました（8ページ「乳房にマイクロバイーム」）。現生のストロマトライトが見られる西オーストラリアの海辺は、美しくとても静かで、生命や微生物についてじっくり思いを馳せるには最適な場所です。少々アクセスは悪いですが、機会があればぜひ訪れてみてください。 **MI**

お詫びと訂正：2016年10月号p.6の写真がハエ目になっておりました。ウェブ、PDFおよびアプリを訂正いたしました。お詫び申し上げます。

「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

Tel: 03-3267-8765 (広告部)

Email: 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

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

Tel: 03-3267-8751 (代表) Fax: 03-3267-8754

www.naturejpn.com

© 2016 Nature Japan K.K. All rights reserved.

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)

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)

さらに
+1,000円
で

詳しくは
nature.asia/ND-subscribe

SPRINGER NATURE