

日本語で読む世界の最新科学ニュース

nature ダイジェスト

10
2012

ロンサム・ジョージの遺訓

キュリオシティ、火星着陸!

昔、複数のヒト属がいた

3D印刷が科学に革命を

皮膚常在細菌が免疫を活性化

ドーピングはどこまで
運動能力を高めるのか

子どもの頃の脳に戻る
—— 臨界期の再開

アルツハイマー病に
なりにくい遺伝子変異

トウモロコシ粉懸濁液の
上を走れる訳

FDAが内部告発者を
監視していた

FROM 日経サイエンス

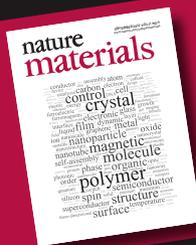
小児向け医薬が抱える問題

割に合わない銀行強盗

定価 680円

IMPACT FACTOR 2012

nature
materials



32.841

nature
nanotechnology



27.270

nature
chemical biology



14.690

nature
photonics



29.278

nature
physics



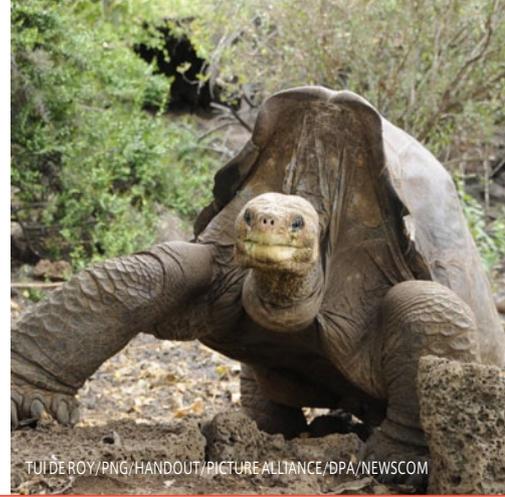
18.967

nature
chemistry



20.524

2011 Journal Citation Reports (Thomson Reuters, 2012)



TUI DE ROY/PNG/HANDOUT/PICTURE ALLIANCE/DPA/NEWSCOM

ロンサム・ジョージの大いなる遺産 16

表紙画像：THE ASAHI SHIMBUN/GETTY IMAGES

ガラバゴスゾウガメの一種ピンタゾウガメ最後の生き残り、ロンサム・ジョージが亡くなった。だが、彼の死は無駄ではない。

NATURE NEWS

- 03 遠い星からの SOS
- 04 皮膚細菌叢も免疫応答に重要
- 05 ねじれを感知できる電子センサー
- 10 アルツハイマー病を防ぐ遺伝子変異
- 11 100歳以上の高齢者100人のゲノム解読を競うコンテストが開催
- 15 RESEARCH HIGHLIGHT | 好奇心の強いハイエナほど、問題を解決

- 27 RESEARCH HIGHLIGHT | グリーンランド氷床が融解する周期

NEWS FEATURE

- 28 3D印刷がもたらす革命

NEWS SCAN

- 06 小児向け医薬が抱える問題
- 06 割に合わない銀行強盗

NEWS & VIEWS

- 24 トウモロコシ粉懸濁液の上を走れる理由
- 26 電圧で、絶縁体を金属に変える！

JAPANESE AUTHOR

- 18 分化能を失った神経系前駆細胞が、再びニューロンを作り出した！
— 後藤 由季子

EDITORIAL

- 31 三次元印刷技術は、何をもたらすか
- 32 内部告発者の保護強化のための法整備を急げ

HIGHLIGHTS

- 33 2012年8/2～8/30号

英語で Nature

- 38 自爆してコロニーを守るシロアリ

12 アスリートはどこまで超人化するか？

ドーピングは違法行為で厳しく罰せられる。だが、もし規制がなければ、人の運動能力はどこまで向上するのだろうか。



ISTOCKPHOTO

20 脳のロックを解除する

脳には臨界期があり、その時期を過ぎると言語習得などが難しくなる。それをリセットして、神経回路を再編しようという研究が行われている。



ISTOCKPHOTO

07 火星探査ローバー「キュリオシティ」が無事に着陸！

水の痕跡や生命の有無の確認など、さまざまなミッションの成功に期待したい。



NASA/JPL-CALTECH

02 ヒトの祖先には複数の近縁種がいた

約200万年前のアフリカ。ヒトの祖先は孤独ではなかった。少なくともほかに2種のヒト属と共存していたのだ。



F. SPOOR

ヒトの祖先には複数の近縁種がいた

Fossils point to a big family for human ancestors

MATT KAPLAN 2012年8月8日 オンライン掲載 (doi:10.1038/nature.2012.11144)

約200万年前の化石から、かつてアフリカの平原には、少なくとも3つのヒト属種が存在していたことがわかった。

新たに発見された頭蓋骨の化石の解析により、200万～170万年前には、少なくとも3種の初期ヒト (*Homo*) 属種が共存していたとする論文が、トゥルカナ盆地研究所(ケニア・ナイロビ)の古生物学者 Meave Leakey を中心とする研究チームにより、*Nature* 8月9日号に発表された¹。この成果により、古人類学の長年にわたる論争に決着がついた。

1972年、比較的平らな顔を持つ大きな頭蓋骨の化石が発見された。後に *Homo rudolfensis* というヒト属に分類された、標本番号 KMN-ER 1470 のその化石には、下顎したあごがなかった。それ以降発見された、頭蓋骨が大きな化石のいくつかも、*H. rudolfensis* に属するとされてきたが、顔と下顎がそろっているものはなかった。古人類学では、標本を特定の種(リンネ式二名法で、「*rudolfensis*」のような2番目の単語が表す)に分類するうえで、顔と顎が指紋のような役目を果たしている。属のような幅広い分類(リンネ式二名法では、「*Homo*」のような先頭の単語が表す)を決めるのとは訳が違うのだ。このため、これらの標本が、*Homo habilis* や *Homo erectus* といった、同時代に生存していたヒト属種に属する可能性を否定できず、論争となっていた。

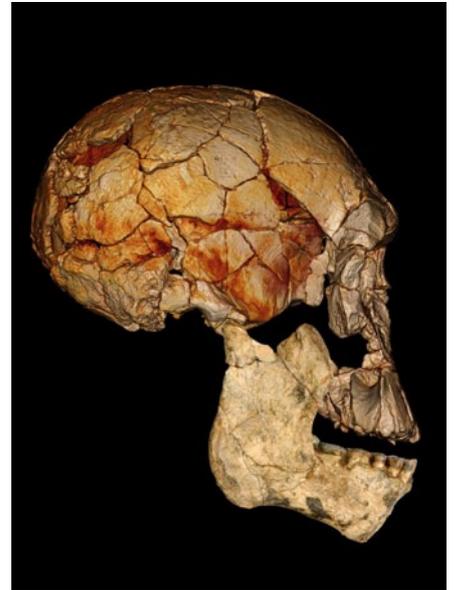
新たな化石は、ケニア北部のクービ・フォラと呼ばれる砂漠地帯で発見された。それは、2つの下顎と、子どもの顔の下部という3つの化石だった。「周囲の岩の中から子どもの顔が徐々に現れ、KMN-ER 1470 との類似がはっきりしたときには、とても興奮しました」と Leakey は振

り返る。子どもの顔には、頬骨と口蓋との結合部が大きく前に出ているという特徴が見られた。さらにこれらの化石の解析を進めると、歯列弓(口の前部の歯が形成する弧)が KMN-ER 1470 の頭蓋骨の口蓋構造ときわめてよく似たほぼ長方形であることが明らかになった。これに対し、平均的な現代人の歯列弓はカーブしている。

ヒト属は何種いたのか

一方、今回の知見から、新たに多くの疑問も生じてきた。例えば、KNM-ER 1802 という下顎の化石標本は、*H. rudolfensis* のものと広く考えられているが、今回の化石に比べ、歯列弓が丸みを帯びているように見える。このことから Leakey らは、KNM-ER 1802 がおそらく別のヒト属 *H. habilis* に属するのではないかと考えた。これに対し、ジョージ・ワシントン大学(米国ワシントンD.C.)の古生物学者 Bernard Wood は、「確かに *H. habilis* かもしれませんが、別の種である可能性もあります」と語る。*H. habilis* の骨がもつと発見されるまでは、確かなことは何も言えないのだ。

進化史の一時期に、少なくとも3種のヒト属が共存していたとすれば、異なるヒト属は互いの仲間内でどのように振る舞っていたのだろうか。さらに、ヒト属が何種類存在していたのか、そしてそれらが同時に生存していたのかどうかかわれば、ヒト系統の進化の歴史の中で、複数のヒト属どうしの激しい競争があったのか、それともある種から別の種へ肅々



今回発見された下顎と KMN-ER 1470 の頭蓋骨上部を組み合わせた復元画像。共に謎のヒト属種 *Homo rudolfensis* のものと考えられている。

と移行してきたのかがわかるだろう。

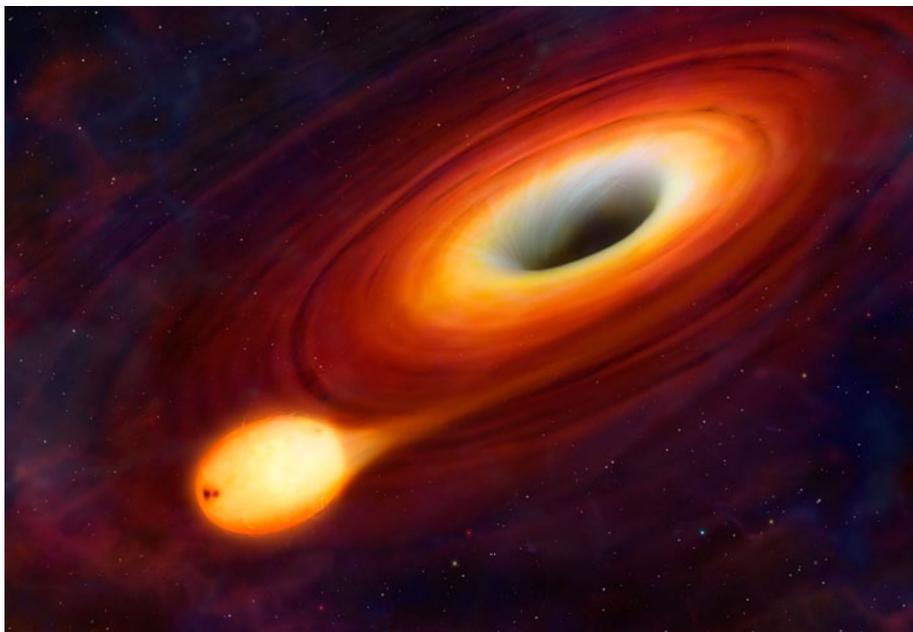
Wood はこう語る。「地質学的年代測定では粗すぎるため、こうした種が同時代に同じ場所にいたと断言することは、現状ではできません。しかし、そうした種の間で相互作用があった可能性は十分にあります。もしそうならば、それがどんな相互作用だったか知りたいですね」。

しかし、カリフォルニア大学バークレー校(米国)の古生物学者 Tim White は、Leakey らの研究は本末転倒だと主張する。「わずかな歯や顎、顔の下部をもとに、いったいどうやったら正確に化石の種を特定できるんですか。現存するたった1つの種である我々 *Homo sapiens* にだって、個体間に大きなばらつきがあることがわかっているんですよ」。

だが、Leakey は一歩も引かない。「今回の化石と KMN-ER 1802 との間に見られるのと同じくらい特徴にばらつきがある何らかの霊長類を見つけて、反論しますよ」と息巻いている。

(翻訳：小林盛方、編集：編集部)

1. Leakey, M. G. et al. *Nature* **488**, 201-204 (2012).



星が超大質量のブラックホールに近づくと、その重力によって引き裂かれてしまう（想像図）。

遠い星からのSOS

Satellites watch stellar death throes

GEOFF BRUMFIEL 2012年8月2日 オンライン掲載 (doi:10.1038/nature.2012.11107)

遠いブラックホールに飲み込まれる寸前の星から最後の叫びをキャッチした。

ブラックホールによってばらばらにされ、死にゆく星が放ったとみられる特徴的なX線を観測したという論文が、ミシガン大学アナーバー校（米国）のRubens Reisらにより発表された¹。今回の観測から、遠く離れた宇宙にある超大質量ブラックホールと、我々の住む天の川銀河内にある小さなブラックホールとの関係が解明されるかもしれない。

ブラックホールの餌食になったこの星は、2011年3月、米国航空宇宙局の観測衛星「スウィフト」が発見した²。スウィフトは、ガンマ線バーストという高エネルギー光子の噴出現象の観測衛星で、ある遠い銀河からやって来るガンマ線やX線を1か月以上にわたって観測していたのだが、その信号はやがて消えていっ

た。その後の分析から、この信号は、未知のブラックホールによって分解されている最中の星からのものと考えられた（Nature ダイジェスト2011年11月号22ページ参照）。

今回Reisらは、日本のX線天文衛星「すざく」と、欧州宇宙機関のX線観測衛星「XMM-Newton」の観測データを分析し、この星がブラックホールに飲み込まれる直前に放ったX線であることを示す特徴を発見した。200秒周期で強度が増減するX線のパルスが見つかったのだ。Reisらは、このX線パルスは星の最後の破片から届いたもので、その破片はブラックホールの周囲を回っていて吸い込まれる直前にあると分析した。Reisは、「この200秒周期の信号から、ブラックホー

ル周囲の物質の軌道についての基本的なことがらわかります」と話す。

事象の地平線の直上に

一般相対性理論に基づいた研究から、ブラックホールに飲み込まれる前の物質が、その周囲を安定して回ることができる距離には最小値があることがわかっている。Reisらはこれに基づき、この星の残骸は、事象の地平線からわずか100万kmのところにあると見積もった。事象の地平線は、それを越えてブラックホールに近づくと、いかなるものもブラックホールから逃れられなくなる境界である。さらに、パルスの周期をもとに、ブラックホールの質量を太陽の50万～500万倍と算出した。

パルス状のX線は天の川銀河にある小さなブラックホールの周囲でも見つかっている。だがReisは、「これほど大きいブラックホールからのパルスを検出したのも、これほど遠いブラックホールからのパルスを検出したのも、今回が初めてです。こうしたX線パルスを研究すれば、遠いブラックホールのようなすがわかる可能性があります」と話す。巨大なブラックホールも小さなブラックホールも同じように振る舞うはずだという説も確かめられるかもしれない。

一方、レスター大学（英国）のSimon Vaughanは、発光源はブラックホールの非常に近くにある何かであることに異論はないが、疑念を感じている。「遠いブラックホールからの光は暗く、明滅しており、信号には雑音がとても多いのです」。Reisらの観測データは、偶然得られた可能性も否定できないというのだ。「今後、同じようなパルス状のX線が見つければ私も納得しますが」とVaughanは話す。

Reisによると、パルス状X線の探索は現在も行われている。

（翻訳：新庄直樹、要約：編集部）

1. Reis, R. C. *et al. Science* <http://dx.doi.org/10.1126/science.1223940> (2012).
2. Burrows, D. N. *et al. Nature* **476**, 421-424 (2011).

皮膚細菌叢も免疫応答に重要

The skin's secret surveillance system

VIRGINIA GEWIN 2012年7月26日 オンライン掲載 (doi:10.1038/nature.2012.11075)

長い間、外部からの病原体に対して単なる物理障壁と考えられてきた皮膚。その皮膚に共生する細菌が、宿主の免疫系の活性化に重要であることが明らかになった。

皮膚の表層には、しわや毛包、皮脂腺などが存在する。こうした多種多様な環境にさまざまな細菌が共生しており¹、外部からの病原体の侵入を妨げているとされてきた。だが、それ以上の役割があるようだ。米国立アレルギー・感染症研究所（メリーランド州ベセスダ）の Yasmine Belkaid 率いる研究チームが、皮膚に常在する細菌叢^{さいきんそう}の役割を調べ、宿主の免疫応答に影響を及ぼすことを明らかにしたのだ²。

論文筆頭著者の Shruti Naik は、「今回我々は、皮膚での免疫細胞の適切な機能に、皮膚常在細菌からのシグナルが必要であることを初めて示しました」と語る。

常在細菌が免疫系や炎症を制御する仕組みについての研究は、腸管に焦点を当てたものがほとんどである。というのも、腸管は細菌に最もよくさらされている器官であり、常在細菌の種類も非常に多様だからだ。一方、皮膚にも多様な細菌叢が存在する。Belkaid たちは、皮膚細菌叢が腸内細菌叢と同じような機能を発揮するかどうかを突き止めようと考えた。

「皮膚細菌叢について、免疫反応に関与しているのか、同様に独自の常在細菌叢を持つ腸管内での免疫の作用機序と似ているのか、誰も知りませんでした」。ハーバード大学公衆衛生大学院（米国マサチューセッツ州ボストン）の計算生物学者で、ヒトマイクロバイームプロジェクト（HMP）のメンバーである Curtis Huttenhower は、こう話す。「今回の論文により、皮膚細菌叢が腸内細菌叢と同様に免疫応答作用を持つことが、初めて

明らかになりました」。

細菌からのシグナル

研究チームは、皮膚細菌叢の影響を調べるため、無菌環境で飼育された無菌マウスと皮膚常在細菌を持つ通常マウスで、免疫細胞の1つであるT細胞が産生する炎症に関与する分子IL-17AとIFN- γ を比較した。すると、無菌マウスは通常マウスに比べ、これらの分子の産生が少ないことがわかった。

これが、腸内細菌叢がないことではなく、皮膚細菌叢がないことが原因であることを確かめるため、研究チームは、通常マウスに抗生物質を経口投与し、腸内細菌叢のみについて構成や密度を変化させた。その結果、皮膚のT細胞のIL-17AやIFN- γ の生産性に影響は見られなかった。このことから、皮膚細菌叢は皮膚の免疫細胞が適切に機能するために必要であることが示唆された。

次に研究チームは、無菌マウスに、ヒトの皮膚に常在する表皮ブドウ球菌 *Staphylococcus epidermidis* を植え付けた。するとそれだけで、皮膚のT細胞はIL-17Aを産生できるようになったが、腸管ではそうした現象は起こらなかった。また無菌マウスは、病原微生物リーシュマニア (*Leishmania major*) に対する免疫応答 (IFN- γ がかわる) を引き起こすことができなかったが、表皮ブドウ球菌を植菌すると回復した。「我々は、皮膚の免疫が皮膚細菌叢により活性化されることを示したのです」と Naik は言う。

またさらなる実験から、無菌マウスで

は、IL-17A産生を制御している別の炎症関連分子IL-1の産生が減少しており、IL-1受容体アンタゴニストのRNAも増加していることがわかった。これらは、表皮ブドウ球菌の植菌で回復できた。一方、IL-1受容体とMYD88 (IL-1受容体のアダプタータンパク質) の欠損マウスでは、皮膚のT細胞のIL-17Aの産生は減少するが、腸管のT細胞のIL-17A産生には影響が見られなかった。こうしたことから、皮膚細菌叢はIL-1/MYD88を介したシグナル伝達に必要であることが示唆された。

「これまでにも、皮膚に共生する細菌に抗炎症作用があるという報告はありました。今回の研究は、さらに一歩前進し、細菌がT細胞の成熟に影響を及ぼすことを示しています」と、カリフォルニア大学サンディエゴ校（米国）の皮膚科科長 Richard Gallo は言う。つまり、皮膚細菌叢は、宿主の免疫細胞の応答制御に寄与しているということだ。

腸内だけでなく

「今回我々は、腸内ではなく皮膚の細菌叢に依存した防御免疫を発見しました。皮膚細菌叢は、今まではないと思われていた特異的な役割を持っていたのです」と、論文共著者で、米国立ヒトゲノム研究所（メリーランド州ベセスダ）の Julie Segre は言う。「腸内と皮膚の細菌叢には、共通の役割があるかもしれません。でも、重要な違いもあるでしょう」。

Segre は、今回の発見は皮膚細菌叢と免疫系の研究における第一段階であると言いつつ、今後、腸内や皮膚、口腔内の細菌叢がお互いに直接情報をやりとりしているのか、それとも単に皮膚の細菌叢が免疫系を活性化するのかを詳細に調べたいと考えている。「ここ10年、腸内細菌叢が注目されてきました。今度は皮膚細菌叢の出番です」と、Segre は語っている。■

(翻訳・編集：編集部)

1. Grice, E. A. & Segre, J. A. *Nature Rev. Microbiol.* **9**, 244-253 (2011).
2. Naik, S. et al. *Science* <http://dx.doi.org/10.1126/science.1225152> (2012).

ねじれを感知できる電子センサー

Electronic sensor rivals sensitivity of human skin

KATHERINE BOURZAC 2012年7月29日 オンライン掲載 (doi:10.1038/nature.2012.11081)

甲虫の翅^{はね}からヒントを得て、ねじれを感知できるセンサーが開発された。
これを応用すれば、微妙な触覚を持つロボットが誕生するかもしれない。

2枚のブラシマットを向かい合わせにかみ合わせたような構造を持つフレキシブル触覚センサーが、ソウル国立大学(韓国)のKahp-Yang Suhの研究チームにより開発された¹。この触覚センサーは、テントウムシが歩くのを検知できるほど感度が高く、人間の皮膚のようにせん断力とねじり力を区別できる。手首に取り付ければ心拍計として使用することも可能だ。

「このセンサーは、甲虫の翅の構造からヒントを得て設計されました」と、Suhは言う。止まっている甲虫の翅は、翅に生えた多数の毛が、ファンデルワールス力という一種の静電引力によって、体に生えた多数の毛とかみ合うことで固定される。Suhのセンサーは、甲虫の翅の毛のような多数のポリマーナノファイバーが「生えた」シートを用いている。ナノファイバーは、直径100nm、長さ1μmで、電気を通すよう金属でコーティングされている。2枚のシートをナノファイバーが向かい合うようにくっつけると、甲虫の翅の毛のようにナノファイバーどうしが互いにかみ合う。そして、センサーには電流を流せるよう配線が施され、柔らかい保護ポリマーが貼られている。

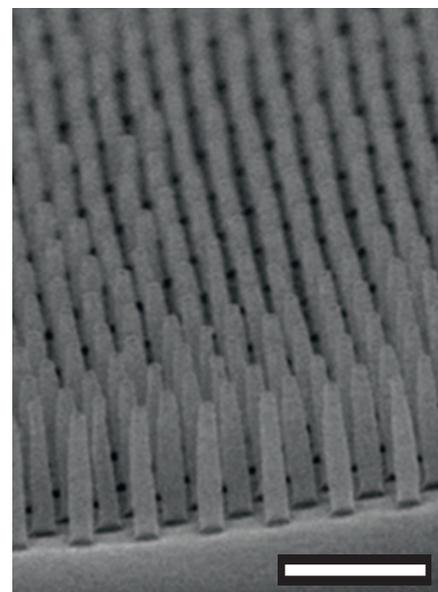
センサーを押ししたり、ねじったり、こすったりすると、金属でコーティングされたナノファイバーの位置が変化し、センサーの電気抵抗が変わる。この設計で、わずか5パスカル程度の微小圧力が検知できる。これは、人が感知できる最も弱い触覚より小さい圧力だ。Suhらは、電気抵抗が機械的応力に反応してどのよう

に変化するか、また応力を除去するとどのように回復するかを解析し、3つのタイプの機械的ひずみ、つまりまっすぐ押す圧力、表面をこするせん断、ねじる動きを区別することに成功した。「これらの信号を分離することができるのです」とSuhは説明する。

人間の皮膚はこれら3種のひずみを区別できるが、ほとんどの人工センサーは区別できない。スタンフォード大学(米国カリフォルニア州パロアルト)で別のタイプのフレキシブルひずみセンサーを開発している材料科学者のZhenan Baoは、「せん断とねじれを区別して検知することは難しいのです」と話す。Suhによれば、ほかのセンサーは力をまとめて検出するだけなので、力の方向については何もわからないのだという。「電氣的読み出しによってひずみの性質を調べるSuhの方法は今後も研究が必要ですが、フレキシブルセンサーからひずみの情報を得るというアイデアは独創的です」と、Baoは言う。

応用に向けて

こうした微妙な触覚の入力は、人間とやりとりするロボットの開発に大いに役立つであろう、とロボット開発に取り組むウィローガレージ社(カリフォルニア州メンロパーク)の研究者Matei Ciocarlieは言う。カメラは、周囲環境に関する情報を多く収集できるが、障害物に妨げられることがある。また、情報量が多すぎる傾向もある。ところが、触覚センサーは接点のみでデータを集めるので、情



ナノファイバーがブラシの毛のように整列したシートを2枚向かい合わせにかみ合わせるによって、圧力、せん断、ねじりを検知できるようになる。スケールバーは1μm。

報収集が妨げられることはない。

「皮膚は、ロボット工学の分野で見落とされてきた部分なのです」とCiocarlieは言う。それは難しい課題があるからだ。丈夫さ、高い感度、柔軟さだけでなく、大面積化が必要なのである。しかし、大きい鑄型を作れば大型シートセンサーの作製は容易だし、コストもそれほどかからないはずだ、とSuhは反論する。

さらに、電子皮膚に应用する場合、圧力がかかる位置を特定するために高い空間分解能が必要であるが、Suhらは、64ピクセルからなる8×5cmのセンサーネットワークを用い、高い分解能を実証している。センサー表面を歩く2匹のテントウムシの位置を検出できたのだ。そのうえ、跳ねる水滴による動的負荷を検出・記録でき、センサーシートを手首に取り付けば脈拍を測定することも可能だ。Suhによると、現在、この材料を使った心拍モニターの開発について、ヘルスケア会社と話を進めているとのことである。

(翻訳：藤野正美)

1. Pang, C. et al. *Nature Mat.* **11**, 791-801 (2012).

小児向け医薬が抱える問題

小児薬で、安全性が臨床試験で証明されたものは少ない

小児科医を何十年も悩ませている問題がある。それは、子どもが病気にかかって薬が必要になっても、小児用に認可されている薬が少ない、ということなのだ。

最近の調査と2月に米国政府がまとめた報告書によると、ほとんどの場合、医師は適切なデータがないままに大人用の薬を処方せざるをえず、過剰投与や副作用、長期にわたる健康問題などのリスクに、子どもたちをさらす結果となっている。米国議会は6月末に関連の法律を強化し、製薬会社に小児患者を対象にした臨床試験を進めるよう促したが、長期的安全性に関する問題は解決しそうにない。

製薬会社は、子どもを対象とした臨床試験の実施に抵抗している。その理由は、リスクが高く、費用がかかり、困難であるうえ、小児用医薬品が世界市場に占める割合が小さいため、ビジネスの観点からすると、ほとんど割に合わないからだ。

だが、薬の代謝は子どもと大人で異なる。「子どもは小さな大人ではない、という格言は真実です。単純に投与量を大人より減らせば、子どもにも同じ効果が期待できるかという、そうではないのです」と、フィラデルフィア小児病院の小児科医で薬理学者でもあるPeter Adamsonは言う。

例えば2000年に行われたある研究では、抗てんかん薬ガバペンチン（商品名ニューロンチン）の場合、5歳未満の患者には、単純に予想される量よりも投与量を増やさねばならず、そのため、攻撃性や過剰行動といった副作用を引き起こす可能性があることが明らかになった。鎮痛剤や抗生物質、ぜんそく治療薬なども、オフラベル処方（医師の判断に基づいて、承認されていない用法・用量で使用すること）されることが多い。

Adamsonは、米国科学アカデミー医学院の2月の報告書（共著）の中で、小児薬の安全性に関する別の問題点も取り上げている。全く公表されていない研究があること、小規模すぎて臨床的に有用なデータを得られていない研究があること、子どもに投与した場合の長期的影響を調べた研究はわずかであること、といった問題だ。

6月の法改正によって、米国食品医薬品局（FDA）が製薬企業に対して、臨床試験を完遂し、新生児に対する臨床試験を行い、過去の研究を公開するよう求める権限が強まるのは確かだ。しかし、子どもたちの長期的健康に薬がどう影響するかという重要なデータを、いかにして入手するのか、そのための対策が抜け落ちている。

（翻訳協力：栗木瑞穂）

割に合わない銀行強盗

統計データによると、やはりリスクのほうが大きい

銀行の機密データの解析結果によると、強盗を待っているのは大金の山でなく、監獄だ。米国統計学会と英国の王立統計学会が隔月刊で発行する*Significance*誌6月号に掲載された論文で、経済学者たちは「平均的な銀行強盗で得られるのははしたなげな端金にすぎない」と書いている。

サリー大学（英国）のNeil RickmanとRobert Witt、およびサセックス大学（英国）のBarry Reillyは、英国銀行協会と何か月も交渉を重ねた末に、2005年から2008年までに英国で発生した364件の銀行強盗を詳細に記録した機密文書を手に入れた。そして、統計解析した結果、英国の銀行強盗に関与した犯人は1件当たり平均1.6人で、1件の取奪金額は平均3万1900ドル、標準偏差（ばらつき）は8万4000ドルとなった。均等に山分けしたとすると、1件1人当たりの取り分は平均1万9900ドルとなる。これはコーヒーショップで働くバリスタの年取とほぼ等しい。

銃を使った場合、取奪金額は平均で1万6100ドル増える。共犯者が多い場合も増える。しかし実入りは単独犯のほうがよい。1人当たりの取り分が減ってしまうからだ。

総額はかなりの金額だが、銀行強盗はリスクの大きな商売だとRickmanは言う。英国の場合、約33%は一銭も奪えずに終わり、約20%は御用となっている。逮捕される確率は、犯人が銀行強盗を繰り返すたびに高まり、例えば4度目で逮捕される確率は59%にもなる。「もっとうまくやっていると思い込んでいたので、実際のデータを見て意外な気がしました」とRickmanは言う。

しかし、イタリアのトリノ大学カルロ・アルベルト・カレッジの経済学者Giovanni Mastrobuoniは、この論文がプロの存在に目を向けていないと指摘する。実際、2005～2008年に発生した英国の銀行強盗事件の被害総額1160万ドルの大半をかっさらったのは一部のプロだと思われる。

また、論文では「高速で展開する防弾幕を導入すれば銀行強盗の成功率が30%以上減るだろう」と述べているが、これにも反論する。「プロは綿密に下調べをしてから犯行に及ぶ訳で、防弾幕を設置した銀行を狙うのは間抜けな強盗だけでしょう」とMastrobuoniは言う。「プロのデータに関しては警察と銀行の機密情報を入手する必要があり、ずっと難しい」とRickman。ともあれ、今回の報告が銀行強盗データの量と質を向上する必要性を浮き彫りにした点では、経済学者の見解は一致している。

（翻訳協力：鐘田和彦）



火星探査ローバー「キュリオシティ」が着陸直後に送ってきた画像から、シャープ山の北側斜面のほうを向いて着陸したことがわかった。

火星探査ローバー 「キュリオシティ」が無事に着陸！

Mars rover sizes up the field

ERIC HAND 2012年8月9日号 Vol. 488 (137-138)

2012年8月6日、火星探査ローバー「キュリオシティ」は、複雑な降下過程を完璧にこなして火星のゲール・クレーターに着陸した。科学チームは、まずはローバーをどちらの方向に動かすべきか、検討を始めている。

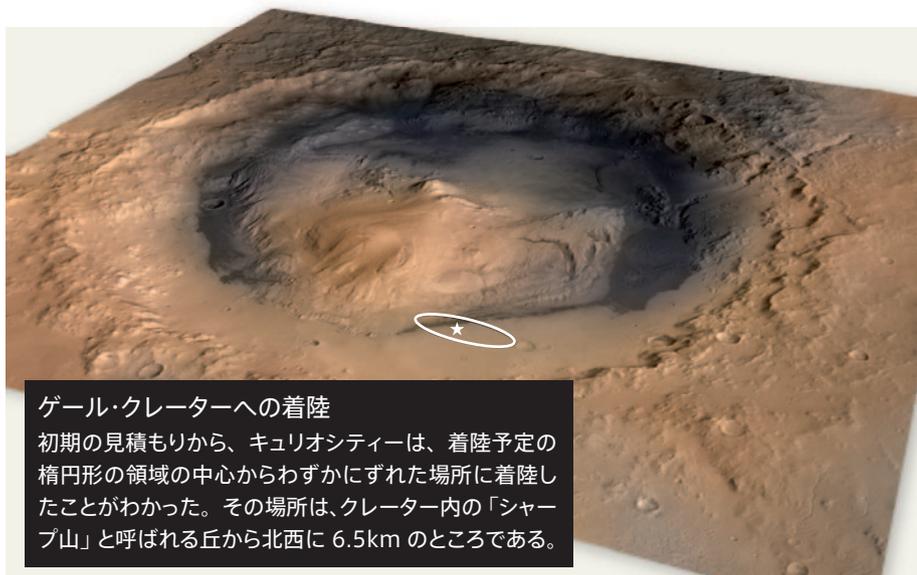
その山は、遅い午後の日差しを浴びてそびえている。ローバーにとっては、気の遠くなるほど大きな踏破目標だ。ローバーが火星の表面に着陸して数分後に撮影した写真では、長く伸びた自分自身の影が、今にも山の斜面に届きそうに見える。NASAの「マーズ・サイエンス・ラボラトリー」ミッションの火星探査ロー

バー「キュリオシティ」は、この山を登るために製作された。

2012年8月6日、キュリオシティは、目的地である火星のゲール・クレーターの底に着陸した。クレーター内の面積は、北米のオンタリオ湖(約1万9000km²)ほどある。キュリオシティの目的は、火星の古い岩石を調べて、有機分子や、生

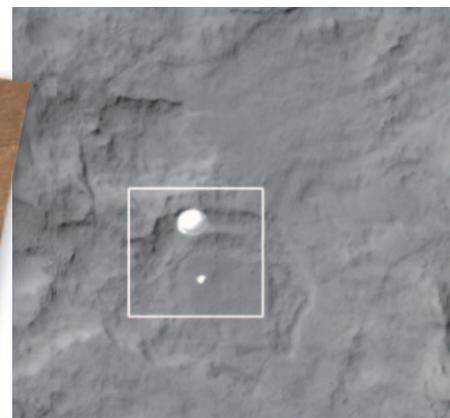
命の生息地となっていた可能性のある水環境の痕跡を探すことである。この調査は、クレーターの中心部にそびえているアイオリス山を登りながら行われることになる。このミッションに従事する科学者たちは、この山を非公式に「シャープ山」と呼んでいる。シャープ山は、火星の数億年分の歴史を刻み込んだ高さ5.5kmの岩石層からできている。その斜面を登る重量900kgのキュリオシティは、これまでに火星に送り込まれたローバーの中で最も多くの種類の観測装置を搭載している。それとともに、このミッションを将来の火星有人探査の序幕と位置付けている技術者や探検家の、夢と希望も載せているのだ。

キュリオシティが火星に着陸してまもなく、NASAの長官 Charles Bolden がジェット推進研究所 (JPL、米国カリフォルニア州パサデナ) で状況説明を行った。彼は感きわまったようすで、「キュリオシティの車輪が、火星の表面に人類の



ゲール・クレーターへの着陸

初期の見積もりから、キュリオシティは、着陸予定の楕円形の領域の中心からわずかにずれた場所に着陸したことがわかった。その場所は、クレーター内の「シャープ山」と呼ばれる丘から北西に6.5kmのところである。



キュリオシティがパラシュートを開いて火星の表面に降下する際、NASAのマーズ・リコネッサンス・オービターがその上空を通過して撮影した写真。

足跡を刻みはじめました」と語った。400人強からなるキュリオシティの科学チームは、この25億ドル(約2000億円)のミッションが、これまでに行われたすべての火星ミッションよりも多くの成果を挙げられるように、知恵を絞っていかねばならない。

キュリオシティをシャープ山とゲール・クレーターの壁との間に正確に着地させるためには、複雑な技術が必要であった。彼らは、熱シールド、パラシュート、逆推進ロケット、「スカイクレーン」を組み合わせて、秒速5900m以上あったローバーの落下速度を7分かけて秒速1m未満まで減速し、火星の表面にそっと着陸させた(*Nature* 488, 16-17; 2012参照)。

JPLの突入・降下・着陸オペレーションチームのリーダーであるAllen Chenは、緊張が続く中、常に冷静で安定した声を響かせていた。その彼が「着陸確認」と宣言した瞬間、スタッフは感情を爆発させた。一斉に抱擁し合い、ハイタッチをし、安堵の涙を流したのだ。そのすぐあとに、ローバーの前後に取り付けられた障害物回避カメラが最初の写真を撮影し、その画像を、ゲール・クレーターの上空を通過したマーズ・オデッセイ(11年前から火星の軌道を周回しているオービター)を経由して地球に送信した。

NASA本部(ワシントンD.C.)の火星探査プログラムの責任者であるDoug McCuistionは、10年以上の年月をかけて開発した新しい着陸システムを1回きりのものにしてはならないと考えている。彼によると、キュリオシティのようなローバーは、今ならもっと安価に、短時間で製作することができるという。なぜなら彼は、「同じものを何度も繰り返して製作するつもりで取り組む」ようにJPLを指揮してきたからだ。今回と同じミッションをもう1度実施するなら、ローバーは5億ドル(約400億円)は安く製作できるだろう。とはいえ、それでもまだNASAの惑星科学プログラムの予算を超えている。そもそもNASAは、現時点ではこれ以上の火星着陸を予定していない。しかし、2018年に7億~8億ドル規模の火星ミッションを行う機会がある。NASAの科学チーフJohn Grunsfeldは、この機会を最大限に活用するための探査ミッションを検討しており、今年の8月中に、その結論を明らかにする予定である。

着陸を成功させた降下チームがスポットライトを浴びている一方で、ミッション技術者たちは自動車サイズのローバーの試験に着手した。ローバーが火星に着陸した当初の数時間は、データを地球に送信する速度が比較的遅かった。データ速度を速くするため、技術者たちは翌日、

ローバーに指示を出して、通信アンテナを使える状態にした。さらにその翌日には、予定どおり複数のカメラを搭載したローバーのマストを立てて、着陸地点のカラー写真を次々と地球に送りはじめた。走行に挑戦するのは数日後となる。

ローバーが探査を始めた地点は、ほぼミッション・プランナーが希望した場所だった。着陸の翌日、Malin Space Science Systems社(カリフォルニア州サンディエゴ)の社長で、ローバーの腹側に搭載されたカメラの主任研究者であるMike Malinは、ローバーの降下の最後の150秒間を記録した劇的なビデオを公開した。NASAのマーズ・リコネッサンス・オービターも、パラシュートを開いて火星の表面に降下するキュリオシティの姿を、上空からとらえていた。Malinは、キュリオシティのビデオをオービターの高解像度写真と照合することにより、キュリオシティの着陸地点がシャープ山からちょうど6.5km離れた不毛の平原であることを特定した(『ゲール・クレーターへの着陸』参照)。

キュリオシティが踏み出す最初の一步は、どの方向になるのか? それはカリフォルニア工科大学(パサデナ)の地質学者で、プロジェクト科学者であるJohn Grotzingerが決めることになっている。シャープ山のほうを向いて着陸したキュ



キュリオシティが計画どおりに着陸したことを喜び合うミッション・チーム。

リオシティを反転させて、クレーター
の縁にある興味深い地形に向かわせる可
能性もある。この地形は沖積扇状地と呼
ばれ、クレーターの縁の堆積物が水に洗
い流されたことにより形成されたと考え
られるからだ。オデッセイの観測装置は、
この扇状地の物質が、火星の寒い夜の
間に周囲の土壌よりも長く熱を保ってい
ることを明らかにした。Grotzingerによ
ると、扇状地の物質が、ほかの場所の物質
よりも強く固められているせいかもしれ
ないという。「水が、これらを固めた可
能性があるのです」。

反対に、キュリオシティをシャープ
山の裾に向かわせることも考えられる。
ここの基岩は水によって変性した粘土と
硫酸塩を含んでいるからだ。どちらの方
向を選ぶにしても、Grotzingerは、着陸
地点の近くの岩石を調べて、シャープ山
のふもとの堆積物層が沖積扇状地の層と
どのように混ざっているかを明らかにし、
堆積した順序を明らかにしたいと考
えている。その答えは、ローバーの近く
の小さなクレーターや、岩層を横切るそ
の他の特徴にあるかもしれない。した
がって、ミッション・チームは、これら
の地形の観測も考慮してルートを決める
ことになる。「周回軌道上から特定でき
る重要そうな地形をできるだけ多く通る
ルートを決めて、それに沿って移動しな

がら調べていこうと考えています」と
Grotzingerは言う。

キュリオシティは、NASAのこれま
での火星探査ローバー「スピリット」や
「オポチュニティー」よりも馬力があり、
平面だけでなく、高低差のある三次元領
域を効率よく探査することができる。そ
して、クレーターとシャープ山の地層は、
時間という第四の次元まで、たつぷりと
見せてくれる。Grotzingerによれば、ス
ピリットとオポチュニティーは、2004年
に相次いで火星に着陸して以来、合わせ
て42km以上も移動したが、横断した地
層の厚さはわずか数十mであったとい
う。シャープ山に登るキュリオシティは
5500mもの地層を横断することになる。

キュリオシティには十分な持ち時間
がある。名目上の寿命は2年だが、エネ
ルギー源である原子力電池が、はるかに
長期間の活動を可能にする。キュリオシ
ティを直ちに山登りに向かわせるのも
魅力的だが、Grotzingerは我慢するのも
悪くないと感じている。「到達に1年か
かったとしても、全然かまいません」と
彼は言う。 ■

(翻訳：三枝小夜子)

訳注：2012年8月17日、キュリオシティが最初に向
かう場所は、着陸地点から400m東の、3種類の地形が
交差するグレネルグという領域に決まったと発表された。
シャープ山に向かうのは、その後になる。



nature
COMMUNICATIONS

論文募集

Nature Communications は
オンライン限定の新しい学際的な
ジャーナルです。生物化学、化学、
物理科学など多岐における質の
高い研究論文を掲載しています。

www.naturejpn.com/ncomms

npg nature asia-pacific

アルツハイマー病を防ぐ遺伝子変異

Gene mutation defends against Alzheimer's disease

EWEN CALLAWAY 2012年7月12日号 Vol. 487 (153)

アイスランド人で見つかった非常にまれな遺伝子変異が、
認知機能の低下を抑制する可能性がある。
アルツハイマー病の治療法の開発に向けて、期待が高まる。

アルツハイマー病患者は世界に約3000万人いる。2050年までにはその4倍に達すると予想されているが、現状、医師は有効な治療法を提供できないし、科学者もこの病気の基本メカニズムを解明できないでいる。

そんな状況の中で、朗報がもたらされた。このほど、アルツハイマー病の発症を自然に防いでくれる遺伝子変異を持つ、幸運な人々がいることがわかったのだ。この研究成果は*Nature* 8月2日号に発表された¹が、今回の発見の意義は2つある。第1は、これまで疑われていた現象が、実際にアルツハイマー病の根本原因であると特定されたことだ。そして第2は、多くの高齢者に見られる認知機能の低下が究極的に進行した結果として、アルツハイマー病が起こるらしいということだ。

“幸せの変異”は、アミロイドβ前駆体タンパク質(APP)を産生する遺伝子の中に存在していた。アルツハイマー病に対してプラスの効果を示す遺伝子変異としては、初めての例である。

APPは、25年前、遺伝性アルツハイマー病(中年期に発症するまれな疾患)の患者で発見された^{2,5}。脳における役割は解明されていないものの、発見以来、アルツハイマー病の主要な原因ではないかと考えられてきた。

APPは、脳において、アミロイドβと呼ばれる小さな分子へと切断される。そして、患者の剖検脳でこのアミロイド斑(アミロイドβの塊)が観察されることが、

アルツハイマー病の特徴である。しかし、アミロイド斑がこの疾患の直接の原因なのか、それとも、関連するほかの生化学的変化が原因なのか、長い間議論が続いてきた。今回の知見は、アミロイドβがアルツハイマー病の原因であるとする研究を支持するものだ。今回の発見を受け、アミロイドβは今後「主要な治療標的」になる、とマサチューセッツ総合病院(米国ボストン)の神経学者Rudolph Tanziは言う。彼は、25年前にAPP遺伝子を発見した4つの研究チームのうちの1つに属していた。

今回の研究を率いたデコード・ジェネティクス社(アイスランド・レイキャビク)の最高経営責任者Kári Stefánssonは、「アミロイド斑がアルツハイマー病の原因であることが確認されれば、脳細胞が破壊されるこの深刻な疾患に対して、治療あるいは予防をめざし、アミロイド斑の形成を抑制する薬剤の開発に拍車がかかるでしょう」と話す。

彼らの研究チームは、1795人のアイスランド人の全ゲノム配列を病歴と比較することで、この遺伝子変異を発見した。さらに研究チームは、約40万人以上のスカンジナビア人を対象に、この変異を調査した。

この変異は、アイスランド人の約0.5%、フィンランド人、スウェーデン人およびノルウェー人の0.2~0.5%にしか見られないが、たった1コピーを受け継ぐだけで、非常に大きな幸運がもたらされる。アイスランド人の場合、この変異を持つ

人は、持たない人に比べて、アルツハイマー病と診断されることなく85歳を迎える可能性が、5倍以上にもなる。また、この変異を持つ人は長寿でもあり、半数以上が85歳の誕生日を祝うことができる。

この変異は、ほとんどの高齢者が経験する軽度の精神機能障害にブレーキをかけているようだ。この変異を持つ人は、記憶障害などの認知機能の低下が生じることなく85歳を迎えることができる可能性が、変異を持たない人の約7.5倍も高い。

Stefánssonは、アルツハイマー病と認知機能の低下は、いずれもアミロイド斑の形成によって生じると考えている。つまり、アルツハイマー病を発症しない高齢者というのは、アミロイド斑の形成の程度が低いだけで、「病理学者は、アルツハイマー病と正常な加齢に伴う変化は、かなりの部分が共通しているのではないかと考えています」と指摘する。「この変異と同様の効果を薬剤で実現することができれば、認知機能の低下を遅らせたり、アルツハイマー病を防いだりできると思います」。

通常、APPはβ-セクレターゼ1(BACE1)という酵素により、小さなアミロイドβ断片に切断される。Stefánssonの研究チームは、今回発見した変異が、BACE1によるAPPの切断部位に隣接するアミノ酸の1つを変化させることを見いだした。このアミノ酸の変化ゆえに、APPはBACE1によって切断されなくなっていたのだ。

ただし、「BACE1を阻害してアルツハイマー病を治療する」という考え方は新しいものではない。製薬会社は10年以上もの間、「BACE阻害剤」の開発に取り組んでおり、現在、臨床試験中の薬剤もいくつかある。Stefánssonたちの研究が示唆しているのは、BACEによるAPPの切断の阻害が、実際にアルツハイマー病を予防する可能性があるということだ、とパスツール研究所(フランス・リール)の疫学者Philippe Amouyelは言う。さらに、カーディフ大学(英国)のアルツハ

イマー病専門の遺伝学者Julie Williamsは、この研究からアミロイドβの関与が強く示唆されることは認めるが、「治療という点からはまだ、アミロイドβが標的にすべき唯一の因子であるとは言い切れません」と付け加える。

今回、Stefánssonの研究チームは、全ゲノム配列解読により、非常にまれな変異を見つけ、そしてその変異が、一般的な疾患の理解の手がかりになることを見事に証明した。Stefánssonは、ヒトの個人差は疾患リスクのようなものも含め、大

部分はありふれた遺伝子変異によって決定されると主張する。それぞれの遺伝子変異は、疾患を発症する確率をわずかに上げたり下げたりするだけ、という訳だ。

一方、まれな変異は、ヒトの疾患リスクに強く影響を及ぼしている印象があるが、その影響は一部の患者に限定される。Stefánssonは、「まれな変異からは、疾患について多くの情報が得られる訳ではなく、疾患の発症機構のカギとなる知識が得られるのでしょ」と話す。彼らのチームは、まれな遺伝子変異が、卵巣が

んや痛風など、ほかの疾患のリスクに及ぼす影響について、研究成果をまもなく発表する予定だ。「今後も一般疾患のリスクに影響を与えるまれな遺伝子変異はたくさん見つかるでしょう」。

(翻訳：三谷祐貴子、要約：編集部)

1. Jonsson, T. et al. *Nature* **488**, 96-99 (2012).
2. Kang, J. et al. *Nature* **325**, 733-736 (1987).
3. Goldgaber, D., Lerman, M. I., McBride, O. W., Saffiotti, U. & Gajdusek, D. C. *Science* **235**, 877-880 (1987).
4. Robakis, N. K., Ramakrishna, N., Wolfe, G. & Wisniewski, H. M. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **84**, 4190-4194 (1987).
5. Tanzi, R. E. et al. *Science* **235**, 880-884 (1987).

100歳以上の高齢者100人のゲノム解読を競うコンテストが開催

Contest to sequence centenarians kicks off

MONYA BAKER 2012年7月26日号 Vol. 487 (417)

このコンテストでは、ゲノム配列解読の技術、精度、コストが競われる。

2013年9月、Xプライズ財団(米国カリフォルニア州プラヤビスタ)により、ゲノム解読技術と精度の向上およびコストの削減をめざした、「Archon Genomics X Prize」コンテストが開催される。100歳以上の高齢者100人のゲノム配列を、1人当たり1000ドル(8万円)以下のコストで、30日以内に最も正確に解読したチームに、1000万ドル(8億円)の賞金が授与される。Xプライズ財団の最高経営責任者Peter Diamandisは、このコンテストが、患者の診断あるいは治療に必要な、「医療グレード」ゲノムの基準の確立に役立つだろうと言う。

このコンテストは2013年5月までエントリー可能で、主催者はこのコンテストが過去のものより盛況となることを期待している。2006年のコンテストでは、参加チームはあったものの、賞の獲得に

は至らなかった。

今回、Xプライズ財団は、2006年のコンテストで10日間だった解読期限を、30日間と緩和し、解読の対象は100歳以上の高齢者(長寿にかかわる遺伝的变化を持つ可能性がある)に限定した。コンテストの勝者は初めて、100人すべての全ゲノム配列の98%の領域を、100万塩基対当たり1個未満の誤差で解読する、ということになる。なお、このコンテストの基準を完全に満たすチームがなかった場合でも、最優秀賞が用意されている。「すべての基準を満たすチームが現れたら驚きだ」と、*Bio-IT World*の編集長で、*The \$1000 Genome* (Free Press、2010年発行)の著者であるKavin Daviesは言う。

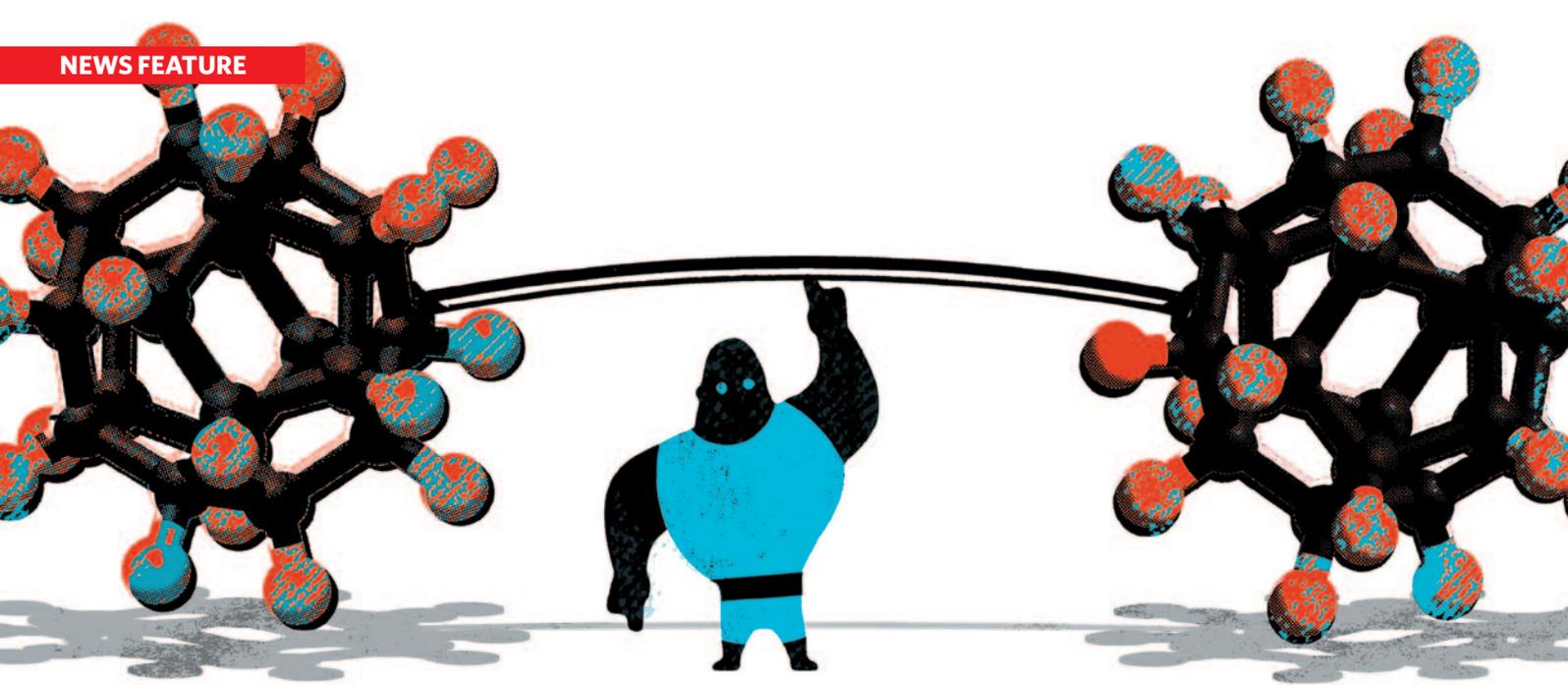
2012年7月23日、ライフテクノロジー(米国カリフォルニア州カールスバッド)のIon Torrentは、自社の半導体を

基盤とする技術を引っ提げて、このコンテストへのエントリーを発表した。彼は、自分たちの半導体技術が勝利すると確信している。伸長中のDNA鎖では、特定の塩基が付加されるたびにpHがわずかに変化するが、彼らの技術はその変化を測定するのだ。配列解読技術のほとんどは、塩基が取り込まれる時に放出される光を検出するため、光学装置を組み込む必要があり、コストがかさむ。

Daviesは、このコンテストでは、オックスフォードナノポアテクノロジーズ(英国オックスフォード)がライバルになる可能性があると考えている。この会社は、ナノメートルスケールの穴にDNA鎖を通し、穴を通過していく各塩基を解読するという技術を持っている。ただ、オックスフォードナノポアテクノロジーズをはじめとして、そのほかの配列解読受託会社が、このコンテストにエントリーするかどうかは未定だ。

Craig Venterは、このコンテストの主要な課題は、解読技術ではなく、ゲノム配列が生物学や医学にとってどのような意味を持つかを理解することだと言う。「解決すべき難しい問題の中で、解読技術の問題はささいなものです」とVenterは言う。「優良な技術は確かに必要ですが、それだけでは十分ではありません」。

(翻訳：三谷祐貴子、要約：編集部)



アスリートはどこまで超人化するか？

Superhuman athletes

HELEN THOMPSON 2012年7月19日号 Vol. 487 (287-289)

ドーピングなどの方法で運動能力を向上させることは、スポーツ界では違反行為とされている。しかし、それらの規制をすべて撤廃すれば、科学は人間の運動能力の限界を打ち破ってしまうかもしれない。

2012年8月、英国の短距離走選手 Dwain Chambers は、生涯で最も重要なレースに臨んだ。彼は、2012年ロンドンオリンピックでメダルを獲得することで、2003年のドーピングによる2年間の出場停止処分が始まった、長く不名誉な日々を決着をつけたいと願っていた（訳注：Chambers は100m走と400mリレーに出場したが、いずれもメダル獲得には至らなかった）。

ドーピング事件以降、Chambers は、運動能力を向上させる薬物に手を出さないよう人々に呼びかけることに、多くの時間を捧げてきた。彼は、スポーツ規制当局が禁止する6種類の物質を使用していたことを認めている。その内訳は、回復を早めるための2種類のアナボリック・ステロイド（1つは分子構造改変薬、

もう1つはテストステロン・クリーム）、赤血球の産生量を増やしてトレーニングを何度も繰り返すことを可能にするエリスロポエチン（EPO）というホルモン、回復のためのヒト成長ホルモン、だるさを軽減するためのリオチロニンという甲状腺ホルモン、そして、覚醒を高めて反応時間を短くするためのモダフィニルというナルコレプシー治療薬である。

人類は運動競技とほぼ同じ長い歴史をかけて、運動能力を向上させる究極の方法を求め続けてきた。古代ギリシャの医師ガレノスは、剣闘士の医師として蓄積した知識をローマにもたらし、ハーブやキノコや動物の睾丸を食することの効果と称えた。Chambers の物語は、運動能力のさらなる向上をめざす現代のスポーツ選手の探求が、全く新しい段階に入っ

たことを示す実例の1つにすぎない。

生命倫理と公共政策の研究機関であるヘースティングズ・センター（米国ニューヨーク州ギャリソン）の前所長である Thomas Murray は、「運動能力を向上させる技術の進歩には、軍拡競争のようなところがあります」と言う。

その結果、スポーツ界のドーピング騒動は跡を絶たず、そのたびに、Murray 自身を含めた多くのスポーツファンを幻滅させている。アマチュアとして自転車競技を楽しむ Murray は言う。「私だって、EPO を摂取すれば、4マイルの上り坂をもっと速く走れるようになるかもしれません。けれども、自転車にモーターをつければ、ずっと速く走れるでしょう」。モーターの力を借りて速く走るのは自転車競技の本質を損なうことであ

り、薬物を使うのも同じだと彼は言う。国際オリンピック委員会を筆頭に、プロ・アマを問わず、すべてのスポーツ団体がこの姿勢をとっている。

しかし、中には、「運動能力を向上させる薬物は普及しすぎている。安全に使用するかぎり、スポーツ選手が望む薬物を好きなだけ使えるようにすることが、スポーツ規制当局にとって唯一の現実的な選択肢である」と言う人々もいる。

ウェストオブスコットランド大学(英国スコットランド州エアー)の生命倫理学者Andy Miahは、「ドーピングを規制する目的が選手の健康を守ることにあると言うなら、医師の監督の下でドーピングを行うようにしたほうがよいと言えるのではないのでしょうか」と話す。「もっとよいのは、世界アンチドーピング機関と対をなす『世界プロドーピング機関』を設立して、より安全な形で運動能力の向上を追求することです」。

この論争が提起する倫理的問題は非常に難しく、科学だけでは解決できない。けれども科学は、「運動能力を向上させる技術を好きなだけ使ってよいとしたら、人間の運動能力はどこまで高めることができるか?」という純粋に技術的な問題なら、答えることができる。

魔法の薬

筋力を高める薬物として最も有名なものが、膨大な種類にのぼるアナボリック・ステロイドであろう。このグループの薬物は、薬物検査に引っかからないよう少しずつ構造が改変され続けており、その種類はコンスタントに増えている。カリフォルニア大学ロサンゼルス校の薬理学者Don Catlinは、「ステロイド分子には約2000種類の改変方法があり、いずれも、人間の体を大きく、強くすることができます」と言う。これらの化合物は、体内でテストステロン(男性ホルモン)と同じような働きをし、タンパク質合成を活発にして、筋組織を増大させる。ステロイドの摂取と運動を組み合わせることにより、男性では筋力を38%も高め

ることができ、女性ではそれ以上の効果が出る可能性がある。

ヒト成長ホルモンも、筋力を高める薬物としてよく知られている。ヒト成長ホルモンは、インスリン様成長因子1(IGF1)というタンパク質の濃度を高めることにより筋肉の成長を促すが、筋肉の成長が本当に筋力アップにつながるのかどうかについては、議論がある。ヒト成長ホルモンの有効性を示すために、余暇にスポーツを楽しむ人々を対象にして行われた唯一の研究では¹、ヒト成長ホルモンを摂取した人々の短距離走の能力は4%向上していた。この数字は小さく見えるかもしれないが、クイーンズランド大学(オーストラリア・セントルシア)の内分学者で、この論文の共著者であるKenneth Hoは、50m自由形の水泳選手や100m走を専門とする短距離走選手にとっては大きな意味がある、と言う。「この種の競技は、0.01秒のレベルで競われているのですから」。

持久力がカギを握るスポーツでは、筋力を高めることよりスタミナをつけることのほうが重要であり、血液ドーピングにより酸素を運搬する赤血球の数を増やすことで劇的な効果が得られる。血液ドーピングは、血球輸血かEPOの投与の形で行われる。ある研究によると²、血液ドーピングは健常者のスタミナを34%高めることができ、別の研究によると³、トレッドミルで8km走るタイムを44秒短縮させたという。2012年6月にチューリッヒ大学(スイス)のMax Gassmannらが発表した研究によると⁴、EPOが脳に影響を及ぼして、スポーツ選手のトレーニングへの意欲を高めている兆候も見られるという。

現在、製薬会社が合法的に販売している薬物も、スポーツ選手によって違法な形で使用されるおそれがある。筋ジストロフィーなどの筋萎縮を引き起こす疾患の治療薬は、筋肉の発達を抑制するミオスタチンというタンパク質の活動を抑制する。また、貧血や腎疾患の治療に用いられるHIF安定薬は、EPO遺伝子など、

赤血球の産生にかかわる遺伝子を活性化させるタンパク質を制御する。運動能力の向上に、向知性薬が役に立つ部分があるかもしれない。エセックス大学(英国コルチェスター)の生化学者Chris Cooperは、「疲労時にも明晰に思考できるようにする化合物が、いくつか提案されています」と言う。

運動能力の向上のために摂取される物質は、薬物だけではない。スポーツ選手は合法的な栄養補助食品にも強く依存している。「98.5%は誇大宣伝です」と、バース大学(英国)の運動生理学者Conrad Earnestは言う。しかし、クレアチンという栄養補助食品は、運動時にエネルギーを運搬するATPという分子の合成に関与する物質で、一部のスポーツ選手に効果があることが知られている。クレアチンを摂取しているスポーツ選手の成績は8%も向上することがあると、Earnestは見積もっている。

もう1つの効果的な栄養補助食品は、ビートルート(赤い色をした食用ビートの根)のジュースである。エセックス大学の研究者は、このジュースに含まれる硝酸塩が体内の一酸化窒素(NO)濃度を増加させ、筋肉が酸素を利用する効率を高めることを発見した。彼らの研究によると、ビートルートジュースを飲んだダイバーは、通常より11%も長い時間、息をとめていられたという⁵。これは、息継ぎの回数をできるだけ少なくしたい短距離泳者の役に立つだろう。

ただし、運動能力を向上させる物質の大半は、多くの副作用を持っている。ステロイドは、高血圧、心臓弁の肥厚、生殖力と性欲の低下、女性では胸毛の出現、男性では睾丸の萎縮などの変化を引き起こすことがある。また、赤血球の数を大幅に増やすと、血液が濃くなり、脳卒中の発症リスクが高くなる。

運動能力を向上させるという薬物の中には、がん、エイズ、筋ジストロフィーなどの重い病気の治療薬もあり、こうした薬物の臨床試験は、基本的に、成長因子やホルモンのレベルが正常値を下回る

重症患者を対象に行われている。重症患者に関するデータをスポーツ選手に正しく当てはめる方法はわかっていないと、Cooperは言う。「一流のスポーツ選手は、競技能力の高さによって選抜されているうえ、多くのトレーニングを積んでいます。彼らは、遺伝的に強化されているという意味で、一般人とは大きく異なる生物なのです」。

さらに、スポーツ選手が摂取しているのと同じ組み合わせの薬物を同じ量だけ健常者に投与して試験を行うことは、倫理的に大いに問題がある。ペンシルベニア州立大学(米国ステートカレッジ)のスポーツ科学の名誉教授であるCharles Yesalisは、「ステロイドと栄養補助食品と特別食のいろいろな組み合わせにどのような長所があるのか、明らかにするのは不可能です。魔女が大釜で煮込んで作った薬の効果を解明しろ、と言うようなものです」と言う。

遺伝子ドーピング

スポーツ選手のロッカールームでは、10年ほど前から、遺伝子を追加したり改変したりすることで運動能力を向上させる「遺伝子ドーピング」の噂があった。自然に起こる突然変異のうち、スポーツ選手にとって好ましいものはたくさんある。フィンランドのクロスカントリースキーマン選手で、1960年代初頭に3個の金メダルを獲得したEero Mantyrantaの遺伝子には、体内のEPO受容体の効率を高めるような突然変異があった。2004年には、小さなボディビルダーのような体格の幼児に、ミオスタチンを働かなくする突然変異があることが明らかになり、話題になった。また、身体能力を高める遺伝子として注目されているアンギオテンシン変換酵素をコードする遺伝子には、酸素送達能力と毛細血管密度を高めて持久力を高める変異と、筋肉の発達や筋力と関連したもう1つの変異が見つまっている^{6,7}。

遺伝子治療の進歩により、いつの日か、どんなスポーツ選手でも自分のDNAを強化できるようになるかもしれない。例



えば、高齢者の筋ジストロフィーの治療を目的とする実験では、ペンシルベニア大学(米国フィラデルフィア)の生理学者Lee Sweeneyが率いるグループが、マウスにIGF1の過剰発現を引き起こす遺伝子を導入した。この治療により若い成体マウスの筋力が14%も高まったため、このマウスには「マイティー・マウス」というニックネームがついた⁸。

薬物を使って遺伝子をオンにしたりオフにしたりする研究者もいる。2008年には、ソーク研究所(カリフォルニア州ラホヤ)のRonald Evansらが、筋肉中の速筋線維に対する遅筋線維の割合を高める遺伝子を活性化する薬物GW1516を使った研究を行った。その名が示唆するとおり、遅筋線維は速筋線維に比べてゆっくり収縮するが、有酸素活動の効率がよい。Evansらは⁹、GW1516と運動を組み合わせることで、マウスの持久力を70%も向上させることができた。

とはいえ、EvansもSweeneyも、スポーツ選手がこうした治療を受けた場合の効果については懐疑的だ。「マウスを使った実験では、最も大きな効果があったのは運動不足の個体でした。運動したのと同じ効果をもたらす薬物の効き目については、ヒトでもマウスでも基本的に同じ結果になると思います」とEvansは言う。「持久力を要するスポーツの選手は、優

れた肉体を持っているため、最も効果が少なくなると思われます」。

遺伝子治療は、健康に害をなすおそれもある。その一例が、遺伝物質を細胞内に輸送するのに用いられるウイルスに対する激しい免疫反応だ。また、遺伝子治療の効果を制御するのも困難であるかもしれない。「EPOのようなホルモンをコードする遺伝子をオンにできるようにしたいなら、それをオフにすることもできたほうがよいでしょう」とCatlinは言う。「遺伝子ドーピングはよいアイデアではないと思いますが、どこかで誰かが挑戦していたとしても、私は驚きません」。

機械の体

薬物だけが、運動能力を向上させる方法ではない。外科手術や、最終的には工学的な強化も、表彰台に上がろうとするスポーツ選手に手を貸すことができる。損傷した肘関節の代わりに膝関節または前腕の腱の組織を移植する手術を受けた野球のピッチャーたちは、2年間のリハビリを終えた後、以前より強くボールを投げられるようになったと主張する。けれども、Hospital for Special Surgery(米国ニューヨーク市)の整形外科医Scott Rodeoは、ピッチャーたちの証言は科学的に裏付けられている訳ではないと警告する。「肘が本当によくなったと言うのは、やや誇張です」とRodeoは言う。

一流のスポーツ選手の場合、関節全体を人工関節に交換する手術により運動能力が向上する可能性はない。ねじが多すぎるとあちこちで緩む可能性があるし、人工関節は生身の関節の機構と完全には一致していないからだ。さらに、一流スポーツ選手に酷使されたら、人工関節の材料はわずか数年で摩耗してしまうだろう。それでも、研究室で人工の皮膚や腱などの交換パーツを作成する技術が大きく進歩すれば、こうした手術の評価も変わるかもしれないとRodeoは言う。

Miahは、もっと大胆な外科的強化も可能になるかもしれないと考えている。「例えば皮膚移植により、手や足の指の間に

ある『水かき』を大きくして泳力を高める手術です」と彼は言う。「ほかの選手より少しでも優位に立とうとする選手が、自分の肉体にこの程度の微調整をすることは大いに考えられます」。もう1つのフロンティアはナノテクであるとMiahは言う。研究者たちはすでに、緊急時に使用するための血液サプリメントの実験をしている。このサプリメントは、酸素を運搬するナノ粒子をベースにしているが、そこから、「体内に導入して、高い能力をずっと維持できるようにするようなナノ装置を製作することはできないかと、盛んに議論されています」と彼は言う。

機械的な競技用義肢は、すでに現実のものになっている。その一例が、2008年の北京パラリンピックの金メダリストで、2012年のロンドンオリンピックにも出場した南アフリカ共和国のOscar Pistoriusのような下肢切断者が使う「チーター・スタイル」の義足である。しかし、現段階の義足が生身の脚より有利になるかどうかについては、科学者たちの間でも意見が分かれている。

ボーンマス大学(英国)の義肢装具工学研究のBryce Dyerは、Pistoriusのばねのような義足は、レース終盤の加速を可能にするが、スタート時にかがんだ姿勢

から走り出すときや曲線コースを走るときには不利になると説明する。「彼がまっすぐに走っているときには、最終的には、トランポリンの上で跳ねているような、自然に調和のとれた状態になります」とDyerは言う。「けれどもそうすると、進行方向を変えることができずに、走路からはずれてしまうことがあるのです」。

Pistoriusの義足には人間の足首のような剛性がないため、地面を蹴ったときに、地面から同じ大きさの上向きの力を受けることができない。この欠点を補うため、Pistoriusは脚の上げ下げを速くしている。マサチューセッツ工科大学(MIT、米国ケンブリッジ)の生体工学研究者Hugh Herrは、「生体力学的に見て、彼の走法は普通とは違っていますが、それが有利であるという証拠はありません」と言う。

これらの問題は、生体工学技術の進歩が解決するかもしれない。「数十年後には、生身の四肢の機能を完全に模倣した、精巧な義肢が開発されて、オリンピック委員会に認可されているかもしれません」とHerrは言う。MITにある彼の研究室は、現在、競技用の義足の開発に取り組んでいる。「生身の脚の制約を受けない機械的な義足を装着した選手が競い合う

パラリンピックのレースは、人間とマシンの一体化がカギを握る、自動車レースのようなスポーツになっていくのかもしれない。

Herrは、人間の運動能力を向上させる技術は、人間の限界を超えることを可能にするだけでなく、独自のオリンピックが開催されるころまで行き着くだろうと考えている。「パワーランニング、パワースイミング、パークライミングなど、それぞれの分野で新しいスポーツが誕生するでしょう」と彼は言う。「自転車の発明によってサイクリングというスポーツが生まれたように、さまざまな新しいスポーツが生まれてくるでしょう」。

(翻訳：三枝小夜子)

Helen Thompsonは、*Nature* ワシントンD.C. オフィスのインターン。

1. Meinhardt, U. et al. *Ann. Intern. Med.* **152**, 568-577 (2010).
2. Buick, F. J., Gledhill, N., Froese, A. B., Spriet, L. & Meyers, E. C. *J. Appl. Physiol.* **48**, 636-642 (1980).
3. Williams, M. H., Wesseldine, S., Somma, T. & Schuster, R. *Med. Sci. Sports Exerc.* **13**, 169-175 (1981).
4. Schuler, B. et al. *FASEB J.* <http://dx.doi.org/10.1096/fj.11-191197> (2012).
5. Engan, H. K., Jones, A. M., Ehrenberg, F. & Schagatay, E. *Respir. Physiol. Neurobiol.* **182**, 53-59 (2012).
6. Montgomery, H. E. et al. *Nature* **393**, 221-222 (1998).
7. Williams, A. G. et al. *Med. Sci. Sports Exerc.* **37**, 944-948 (2005).
8. Barton-Davis, E. R., Shoturma, D. I., Musaro, A., Rosenthal, N. & Sweeney, H. L. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **95**, 15603-15607 (1998).
9. Narkar, V. A. et al. *Cell* **134**, 405-415 (2008).

RESEARCH HIGHLIGHT

好奇心の強いハイエナほど、問題を解決

Curious hyenas crack puzzles

2012年8月16日号 Vol. 488 (256)



S. BENSON-AMRAM

ブチハイエナの中でも、探索行動がより多様で幅広い個体のほうが、問題解決能力が高いことが明らかになった。これは、創造力が問題解決を助ける人間の場合と全く同じだ。

ミシガン州立大学(米国)のSarah Benson-AmramとKay Holekampは、開けるのにひと工夫いるスチール製パズル箱を考案し、その中に厚切り肉を仕込んだ(写真)。2人は1年かけて、ケニアに生息するブチハイエナ(*Crocuta crocuta*)の2つの群れにいる62頭が、この箱に対してどんな行動をとるかを観察した。箱に触りたがらないかどうか(新奇なものを恐れる気持ちの代理指標になる)や、箱を開けようとするのに使った戦術的行動(噛みつく、押す、ひっくり返すなど)の種類数を調べた。すると、成獣でも子どものハイエナでも、より多様な行動を見せた個体のほうが、箱を開けるのに成功する確率が高かった。

(翻訳：船田晶子)

ロンサム・ジョージの大いなる遺産

The legacy of Lonesome George

HENRY NICHOLLS 2012年7月19日号 Vol. 487 (279-280)

今年6月、ガラパゴスゾウガメの一種、
ピンタゾウガメ最後の生き残りであるロンサム・ジョージが死亡した。
彼の死により、ガラパゴスの保全活動が勢いづいている。

死してなお、カリスマ性を輝き放つロンサム・ジョージ。この有名なガラパゴスゾウガメの訃報に際し、エクアドルのラファエル・コレア大統領は、その死を悼み、期待を込めて、「いつか科学技術の力で彼をクローンとしてよみがえらせることができるだろう」と演説した。

バイオテクノロジーを駆使した復活が可能かどうかを判断するのは時期尚早だろう。しかし、すでに最初の一步は踏み出されている。研究者たちはジョージの死後、数日以内に彼の細胞を生きた状態で保存し、組織を採取した。さらに、本土から遠く離れた飼育地ガラパゴス諸島サンタクルス島まで液体窒素を運び、生存能力のある培養細胞を将来作り出せるように、試料を保存している。

たとえこの努力が失敗に終わったとしても、ジョージの死はすでに、ほかのゾウガメたちに希望の光をもたらした。7月上旬、ロンサム・ジョージを偲ぶ国際ワークショップがサンタクルス島プエルトアヨラで開催された。その目的は、ほかのガラパゴスゾウガメ種やその生息域の減少・消滅を防ぐための活動を盛り上げることだ。「種も重要ですが、一番大事なのは生態系の保全です」と、ガラパゴス国立公園の保全・環境維持開発主任 Washington Tapia は話す。

ジョージは1971年にピンタ島で見られ、翌年、プエルトアヨラにあるチャールズ・ダーウィン研究所に移送された。保護活動家たちは、ガラパゴス諸島のほかの島にいる、ピンタゾウガメ

(*Chelonoidis abingdoni*) と遺伝的に近い種の雌ガメと交尾させる繁殖計画を立ち上げた¹。だが、なかなか結果が出ないまま月日が流れた。2008年には、彼が2頭の雌と暮らしていた施設内で複数の卵が見つかり、期待が大きく膨らんだが、残念ながら無精卵であった²。

そして今年6月24日、ガラパゴス国立公園の保護官で、長年にわたってジョージを世話してきた Fausto Llerena が、施設内でぐったりとしているジョージを見つけた。まもなく死亡が確認され、その亡骸は、数時間足らずのうちに、冷蔵保存庫に収納された。

2008年、エクアドルは憲法を改正し、世界で初めて、自然とそこに生息する生き物たちに基本的権利を付与することを憲法に明記した国となった。そのためもあって、ジョージの遺骸は完全に解剖され、死因などが調べられた。執刀した獣医の Marilyn Cruz は、「我々がなすべき最後のことは、彼の組織を調べることです」と話す。Cruz は、ガラパゴス検疫機関の責任者を務め、現在、ジョージの遺骸の法的保護管理者となっている。

解剖では明らかな疾患が見つからなかったため、Cruz は、自然死の可能性が高いとする結論を出した。しかし、「肝臓と腎臓には少し異常があるように見える」ため、それについては研究者が詳しく調べる必要があると Cruz は話す。彼女も、培養のためにジョージの皮膚細胞の試料を採取した。こうした細胞から将来的に、幹細胞や生殖細胞、あるいはさ

らに、ジョージのクローンを作製することもできるかもしれない。

ジョージが死亡したことで、ガラパゴスゾウガメの生存種は10種になった。これらのゾウガメ個体群は、過去数百年にわたる乱獲や生息地の破壊、有害外来種の移入によって危機にさらされてきた。一部の個体群は保護活動のおかげで個体数を増やしているが、ゾウガメは通常、性的成熟まで20~30年かかり、個体群の回復は非常にゆっくりである。

実は、7月上旬のワークショップは数年前から準備されていた。このため、もともと予定されていた議題の1つは、「ジョージが死んだ場合にどう処理すべきか、あるいは、ジョージがまだ生きているうちにその細胞を採取すべきかどうか」というものだった。後者はもはや不可能となってしまう、生き残っているゾウガメを保護するための10年計画を打ち出すことに焦点が絞られた(次ページ図参照)。

「我々が今やろうとしていることは、生態学者、遺伝学者、保護区管理官、すべてを集めて、そのスタンスを統合することです」と、ワークショップのまとめ役で、ガラパゴス自然保護組織「Galapagos Conservancy」(米国バージニア州フェアファクス)の科学顧問 Linda Cayot は話す。彼女によれば、ワークショップの成果はひとまとめの提言として、ガラパゴス国立公園に伝えられるだろうという。

ワークショップでは、国際自然保護連合(IUCN)の絶滅危惧種レッドリストでのガラパゴスゾウガメのランクを検討する作業にも着手した。ガラパゴスゾウガメのレッドリスト入りは1996年までさかのぼるため、早急に見直しが必要だと、IUCN/種の保存委員会/カメ類専門家グループの委員長 Peter Paul van Dijk は話す。中には、絶滅危惧リストでカテゴリーのランクが下がった(絶滅の危険性が下がった)種もある。しかし、「野生絶滅」だったピンタゾウガメは、今後は「絶滅」に分類されることになる。

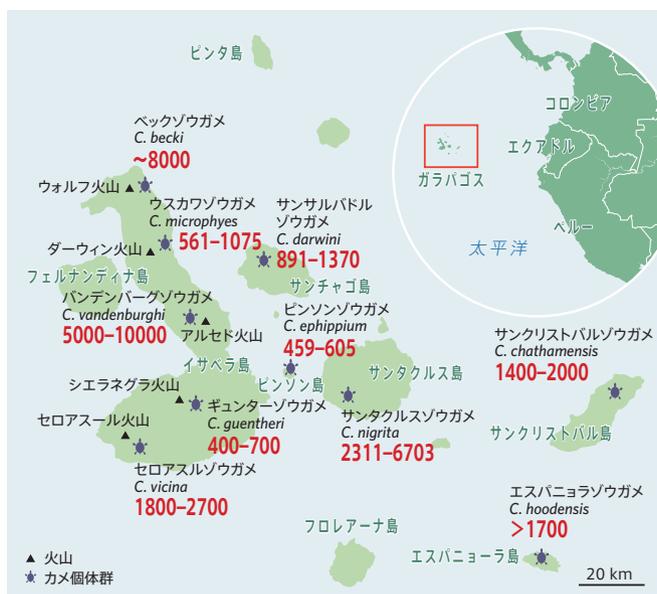
観光客など、ガラパゴス諸島を訪れる

一部の人々には、どの島のゾウガメも同じに見えるかもしれない。しかし、1835年にガラパゴスに短期滞在したチャールズ・ダーウィンがその違いを認識してから、それぞれの島や主要な火山の周辺には固有な種類のゾウガメがいると見なされ、現在すべて別々の種に分類されている。そして、遺伝学的な違いから、ロンサム・ジョージ自身の祖先は約30万年前に、何らかの経緯でエスパニョーラ島からピンタ島へ旅をして、それ以来ずっと棲み着き、元の仲間から分かれてしまったのだと考えられている。

環境管理の視点から見ると、「それぞれの島は何から何まで異なっている」とCayotは言う。彼女は、1980年代初頭、ガラパゴスゾウガメの行動生態学の詳細な調査³を最初に行った研究チームの1人である。「ピンソン島にはネズミがいますし、サンチャゴ島にはブタとヤギがいます。ピンタ島には20年間だけヤギがいました。エスパニョーラ島にはおそらく100年間にわたってヤギがいました。そのおかげで、ガラパゴス諸島はとても興味深い場所になっているのです」と彼女は説明する。

最も興味を引く個体群の1つは、イサベラ島の北端にあるウォルフ火山周辺に生息している。エール大学(米国コネチカット州ニューヘイヴン)の遺伝学者Adalgisa Cacconeのチームは、この混沌とした個体群の祖先を過去10年にわたって研究してきた。彼女は、数十頭の個体から得た血液試料に基づく解析⁴から、エスパニョーラ島とサンクリストバル島由来のゾウガメが、250 km以上の距離を越えてウォルフ火山に到達したという証拠を得た。おそらく海賊船や捕鯨船で運ばれて海を渡ったのだろう。研究チームはさらに、博物館に残っている試料のDNAを使って、ウォルフ火山には、絶滅してかなり経つフロレアナゾウガメや最近絶滅したピンタゾウガメの子孫たちがいることを明らかにした^{5,6}。

Cacconeらは、フロレアナゾウガメやピンタゾウガメに近い種の生息地を突き



絶滅が危惧されるガラパゴスゾウガメ

ガラパゴス諸島には現在、10種のガラパゴスゾウガメ(ナンベイリクガメ属 *Chelonoidis*)が生息しており、そのすべてが絶滅の危機に瀕している。しかし、それぞれの個体数の算定はきわめて難しく、データの一部は10年以上前のものである。

止めるため、ウォルフ火山の調査を来年また行いたいと考えている。理論的には、これらのゾウガメを飼育下で繁殖させることも可能だろう。

フロレアナ島は生息地破壊や外来種の影響を大きく受けてしまっており、150年以上前からゾウガメは生息していない。しかし、ここにかつていたフロレアナゾウガメに近いゾウガメがウォルフ火山におり、フロレアナ島の生態を回復させる長期計画に役立つかもしれない。ピンタ島の状況はもっと差し迫っており、飼育下繁殖プログラムが成功するまで待てそうもない。ピンタ島の原植生は、手つかずの状態であるが、かつて優占的な草食動物だったゾウガメがいなくなったために、一部の植物種が先細りになって消滅してしまう危険性もある。

ピンタゾウガメに近い系統を使うという手っ取り早い解決策に活路がない場合、保護活動組織が別の島からゾウガメ種を移入しようとする動きが強まるかもしれない。「エスパニョーラ島から来たゾウガメが、ピンタ島に上陸して最初の個体群を築き、それらがピンタゾウガメへと進化したことを考えると、我々の手でエスパニョーラゾウガメをこの島に再び定着させることに問題があるとは思えません」とCayotは言う。

エスパニョーラゾウガメはかつて絶滅の危機に瀕していたが、現在は1700頭以上まで回復し、数に余裕があるため、その一部をピンタ島へ移入させることも可能である。しかし、こうした計画的移入はガラパゴスではまだ前例がなく、そのため研究者たちは慎重になっている。先行実験として、滅菌処置をしたおよそ40頭の雑種ゾウガメがピンタ島に移入され、それらが島の生態系にどんな影響を与えるかを、現在、衛星で追跡観察しているところだ。

Cayotに言わせれば、ピンタ島へのゾウガメの繁殖個体群の移入は、ロンサム・ジョージのクローン作製よりもずっと合理的な案である。「10万年あれば、進化の過程を経てガラパゴスにピンタゾウガメが現れるでしょう」と彼女は言う。「10万年の時間スケールは、私の準備範囲です」。

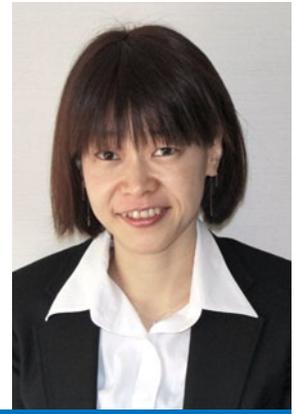
(翻訳: 船田晶子、要約: 編集部)

編集部註: ガラパゴスゾウガメの分類と学名については複数の意見があるが、本文では原文に沿っている。

- Nicholls, H. *Nature* **429**, 498–500 (2004).
- Nicholls, H. *Nature* <http://dx.doi.org/10.1038/news.2008.1221> (2008).
- Cayot, L. J. *Ecology of giant tortoises (Geochelone elephantopus) in the Galapagos Islands*. PhD Thesis, Syracuse Univ. (1987).
- Caccone, A. et al. *Evolution* **56**, 2052–2066 (2002).
- Poulakakis, N. et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **105**, 15464–15469 (2008).
- Russello, M. A. et al. *Curr. Biol.* **17**, R317–R318 (2007).

分化能を失った神経系前駆細胞が、再びニューロンを作り出した！

脳内でネットワークを構築し、高度な機能を発揮するニューロン。その大半は、胎生期の神経幹細胞（神経系前駆細胞）が増殖と分化を繰り返すことで作られる。そして、生後は、ごく限られた部位を除いてニューロンへの分化能が失われる。しかし東京大学分子細胞生物学研究所の後藤由季子教授らは、ある遺伝子をマウス大脳の神経系前駆細胞に導入することで、誕生後に再びニューロンへと分化させることに成功した。



後藤 由季子

—— Nature ダイジェスト：はじめから神経幹細胞の研究をされていたのでしょうか？

後藤：いいえ、元は東京大学理学部や京都大学のウイルス研究所において、MAPキナーゼ経路の同定や、この経路による細胞増殖制御の研究をしていました。細胞は、外からの情報に従ってMAPキナーゼ経路を活性化させ、核内にシグナルを伝えます。私は、研究の過程で、このシグナルが細胞の増殖だけでなく、分化にも関わっていることを見いだしました。同じシグナル伝達経路を利用しながら、細胞が状況に応じて巧妙に応答を変えることに、驚きと感動を覚えました。

この成果から、「細胞の運命を制御するシグナル伝達」、そして「生体をかた

ちづくる幹細胞の運命制御」へと興味を広がっていきました。さらに、生体の中で最も複雑かつ精緻で高度な機能を担う脳が、構造体としてどのように作られるのか、その根本の原理を探りたいと思うようになりました。まず、留学先のフレッド・ハッチソンがん研究所とハーバード大学において、MAPキナーゼの研究を続けながら脳研究の基本を学びました。1999年に帰国し、東京大学分子細胞生物学研究所で独立する際に、本格的に脳神経系の発生研究を始めました。

分化能を失う「神経系前駆細胞」

——神経幹細胞というと、成人の脳にも存在することが明らかになっていますね。はい、成人でも海馬と側脳室に幹細胞が

あります。ただし、これらと、今回、私たちが対象にした「胎生期の神経幹細胞」とでは、性質が大きく異なります。幹細胞の定義は、「自己複製能と多分化能を併せ持つ細胞」とされています。成人の神経幹細胞は、まさに、幹細胞と呼ぶべき細胞です。

ところが、胎生期における神経幹細胞の多くは、胎生中期には盛んに増殖しつつニューロンを作りますが、胎生後期から生後になるとニューロンを作る能力を失い、グリア細胞を作って、やがて分裂しなくなります。つまり、神経幹細胞というよりは「神経系前駆細胞」と呼ぶべき細胞といえます（以降は、胎生期の神経幹細胞を神経系前駆細胞とする）。

——その神経系前駆細胞を用いて、どのような実験をされたのでしょうか？

ニューロンは、突起、膜構造、機能などが特異な細胞です。神経系前駆細胞がニューロンに分化する際には、非常に多くの遺伝子の発現状態が変わりますが、そのカギを握る根本のプログラムは明らかにされていません。一応、「ニューロン分化決定因子」が同定されていますが、ニューロンに分化するにはこの因子だけでよいのか、この因子がどのような仕組みでニューロン分化に寄与しているのか、といった点には未解決の部分が多く残されています。

今回の研究は、助教の岸雄介きしゆうすけさんが、ニューロン分化プログラムの制御とクロマチン構造との関連に興味を持っていた

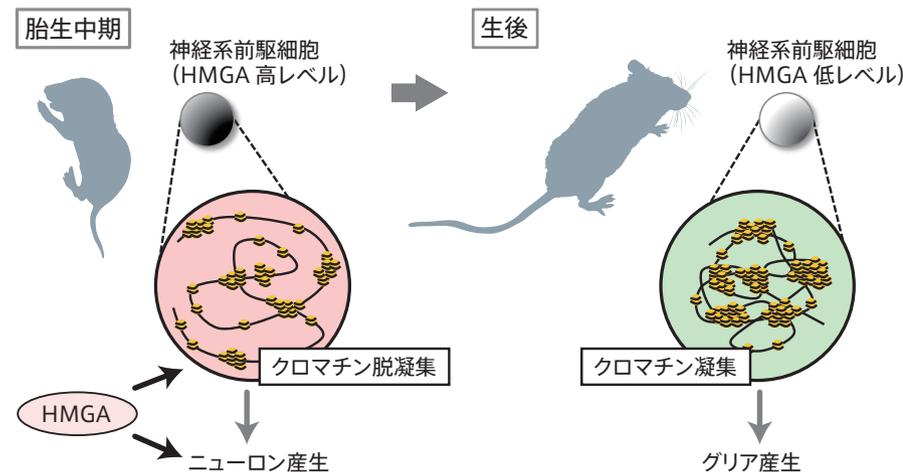


図1 マウスの神経系前駆細胞（大脳新皮質）における、クロマチンの凝集レベルの変化。胎生中期にはHMG A遺伝子が多く発現し、クロマチン構造は緩く、ニューロンへの分化能が維持されている。胎生後期および生後になると、HMG A遺伝子の発現レベルが低下し、クロマチンが凝集してニューロンへの分化能が低下する。

ことから始まりました。クロマチンはDNAとタンパク質からなる構造体で、その束ねられ方、つまり凝集のレベルの変化が、遺伝子の発現レベルを変えることがわかってきています。

具体的には、マウス的大脑を対象に、ニューロン分化能を持つ胎生中期の神経系前駆細胞と、グリア細胞しか作れなくなった胎生後期の神経系前駆細胞とで、クロマチン状態を比較してみました。それぞれの神経系前駆細胞から核を取り出し、DNAを切断する酵素（ヌクレアーゼ）で処理したうえで、電気泳動したのです。クロマチンの凝集度が高ければ、ヌクレアーゼはDNAに近づけないので、泳動されるDNA断片は大きくなります。逆に凝集度が小さければ、DNAはヌクレアーゼによって切断され、小さな断片になります。解析の結果、胎生中期ではヌクレアーゼで切断されたDNA領域が全ゲノムの42%だったのが、胎生後期では11%に減ることがわかりました¹。このことは、胎生中期と後期とでは、神経系前駆細胞中のDNAの束ねられ方が大きく異なることを示唆しています。

クロマチン構造に関わる *HMGA*

—— *HMGA* に注目された理由は？

ここまでの段階で、私たちは、これだけ大きなクロマチン構造の変化は、もしかすると多くの遺伝子の発現を一括して制御し、「ニューロンを作れるのか、グリアしか作れないのか」という分化能を根本的に制御しているのではないかと考えました。そこで、胎生中期と後期のマウスの神経系前駆細胞で発現が大きく変化する遺伝子を対象に、「クロマチン構造の変化に関わることが知られている遺伝子」を探したところ、*HMGA* が出てきたのです^{2,3}。*HMGA* は、胎生期のさまざまな部位でたくさん発現しているのですが、加齢とともに減少することが知られており、細胞の増殖に関与するタンパク質であるとされてきました。ところが、ニューロン分化能への寄与については全く知られていませんでした。

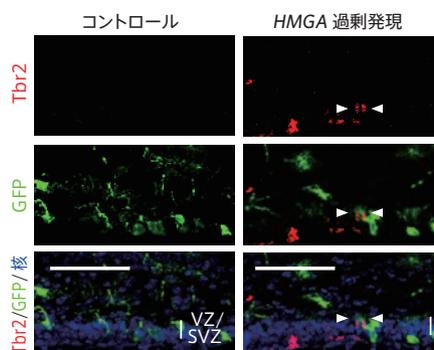


図2 右は、出生後に *HMGA* 遺伝子を導入したうえで強制発現させ、生後8日目に固定した大脳新皮質の蛍光顕微鏡写真。左は何も操作を加えない場合。

—— 実験による検証もされましたか？

はい、「胎生中期において *HMGA* 遺伝子の発現を抑制する実験」と、「*HMGA* 遺伝子の発現が低くなる胎生後期および出生後に強制発現させる実験」を行いました。前者では、神経系前駆細胞からニューロンが作れなくなりました¹。後者では、胎生15日目あるいは出生後1日目のマウスの神経系前駆細胞（脳室の内側部位）に、*HMGA* 遺伝子を導入して強制発現させました。このとき、発現マーカーとなる GFP 遺伝子も付けておきました。ニューロンへの分化が終わり、グリア細胞しかできなくなる生後8日目に標本固定し、さらにニューロン前駆細胞だけを赤く染める操作を加えました。その結果、*HMGA* 遺伝子の発現部位には、正常ならばすでに失われているはずのニューロン前駆細胞が存在し、再びニューロンを作り出せるようになっていることがわかりました¹。

—— 一連の結果から、どんなことが示されるのでしょうか？

HMGA 遺伝子が存在すると、ニューロンへの分化の終了時期が先延ばしされることを端的に示したといえます。さらに、通常はニューロン分化できなくなっている生後の神経系前駆細胞であっても、*HMGA* 遺伝子を導入するだけでニューロンを再び作るようになった。す

なわち、生体内で「神経系前駆細胞の若返り」と呼べる現象が見られたことが、特に新しく、特筆すべき点だと思います。私たちは、*HMGA* 遺伝子が機能することでクロマチン構造が一括して緩まり、ニューロン分化に関わるさまざまな遺伝子のスイッチをオンにする因子がアクセスできるようになるのではないかと仮説を立て、分子レベルの検討に入っています。*HMGA* 遺伝子の発現が胎生期のさまざまな部位で高いことを考えると、今回明らかにした現象が、ほかの組織や臓器が作られる際にも見られる可能性が高いと思っています。

期待される応用

—— 今回の成果は、医学分野に応用できるのでしょうか？

可能性としては、*HMGA* 遺伝子の発現を操作することで、本来ニューロンが作られないような部位でニューロンを作らせたり、脳損傷後にニューロンとグリア細胞をバランスよく分化させるといったことが考えられますが、治療に結びつかどうか、全くわからない状況です。

脳構造を作るためのルールを解明するのが私の夢ですが、今回の成果はその一歩になったと思います。

—— ありがとうございます。 ■

聞き手は西村尚子（サイエンスライター）。

1. Kishi, Y. et al. *Nat. Neurosci.* **15**, 1127-1133 (2012).
2. Nishino, J. et al. *Cell* **135**, 227-239 (2008).
3. Sanosaka T et al. *Neuroscience* **155**, 780-788 (2008).

AUTHOR PROFILE

後藤由季子（ごとう ゆきこ）

東京大学分子細胞生物学研究所 情報伝達研究分野 教授。1987年3月に東京大学理学部卒業、1992年に理学博士を取得。その後、京都大学ウイルス研究所 助手、フレッド・ハッチンソンがん研究所 (Jonathan Cooper ラボ) 研究員、ハーバード大学医学部 (Michael Greenberg ラボ) 研究員を経て、1999年東京大学分子細胞生物学研究所 助教授として研究室を主宰。2005年より現職。

脳のロックを解除する

Unlocking the brain

JON BARDIN 2012年7月5日号 Vol. 487 (24-26)

脳の神経回路の大部分は、子ども時代に確立し固定される。

近年、それをリセットする方法が見つかってきており、さまざまな神経疾患の治療にもつながるのではと期待されている。

米国マサチューセッツ州にあるボストン小児病院の神経科学者、Takao Hensch (ヘンシュ貴雄) は、ニューヨーク市郊外で育った。父はドイツ人、母は日本人。父親からはドイツ語を、母親からは日本語を、そして周囲の人々からは英語を学んだ。「いつも不思議に思っていましたよ。子どもの頃はあれほど簡単に言葉を覚えたのに、大きくなるとなかなか覚えられなくなるのは、いったいどういう事なんだろうとね」とHenschは話す。

Henschは現在、この疑問を分子レベルで詳しく解明しようとする研究の最前線にいる。言語習得は、「感受性期」もしくは「臨界期」と呼ばれる期間のあるさまざまな発達過程の1つである。臨界期とは、脳の発達段階で、言語習得などさまざまな能力を獲得する過程にかかわる神経回路が、体験によって再編されたり、つなぎ替えを起こしたりすることが可能な期間のこと(22ページ図参照)で、こうした脳の柔軟性を可塑性という。臨界期にある子どもは、自分に似た顔の特徴を判別したり、話し言葉を認識したり、空間内の物体の位置を把握したりする能力を急速に発達させる。しかし、臨界期という、それぞれの能力が発達する「チャンスの窓」は、数か月もしくは数年でぱったり閉じてしまい、それ以降は、不可能ではないにしても、新しいことを覚えることは簡単にはできなくなる。

だが、そうとも言い切れないようだ。臨界期に関する研究分野は、今のところ小規模だが急速に発達しており、Henschら研究者たちにより、「チャンスの窓」を

こじ開けることが可能なデータが示されつつある。「臨界期の基盤にある生物学的機序が、明らかになり始めているのです」とHenschは言う。これが解明されれば、成人の弱視(一方の目からの情報が脳で正しく処理されないために視力が低下する視覚障害)などの難治性障害、ひいては自閉症といったさまざまな神経疾患を治療する方法が見えてくるかもしれない。さらには、脳の可塑性を変化させて学習能力を高めたり、心の傷となった記憶の消去を助けたりする飲み薬が生み出される可能性もある。

「Takaoの行った研究で非常に興味深い点は、こうした臨界期を過ぎてもまだ、臨界期の状態に戻って能力を身につけられる可能性があることと示したことです」と、ボストン小児病院の神経科学者Charles Nelsonは話す。Nelsonは、ルーマニアの孤児たちが幼少期に被った社会的剥奪(social deprivation: 周りのコミュニティと正常な文化的・社会的交流が妨げられること)が、発達にどう影響したかを研究している。「臨界期を過ぎた後でも何らかの方法で治療的介入をしてやり直せる可能性がある、という考え方には説得力があります」。

発達の臨界期という考え方は、オーストリアの動物行動学者、コンラート・ローレンツによって広まった。1930年代、ローレンツは、ハイロガンのヒナが孵化して2、3時間以内に自分が母親に成り代わると、ヒナは成鳥になるまで彼を母親と思って後を追いつけることを発見し、このプロセスを「刷り込み」と名

付けた。こうした動物の行動に関する先駆的研究により、ローレンツは1973年、ノーベル医学生理学賞を共同受賞した。

「抑制される」という新たな概念

臨界期の神経基盤を最初に調べた研究者は、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)の神経生理学者David HubelとTorsten Wieselだった。1960年代初頭、2人は、視覚系を対象に研究を行った。彼らはまず、大人のネコの脳の視覚皮質にある多くの細胞が、どちらか一方の目からの信号に応答することを発見した。次に、子ネコの片目を縫合して見えなくすると、通常であれば縫合したほうの目に応答して発火する(活動する)はずの個々の細胞が、開いているほうの目に応答し、結果的にふさいだ目が弱視になることを明らかにした¹。一方、おとなのネコの目を縫合しても何も起こらないことから、視覚皮質の細胞は、発達に重要な生後のほんの数か月の期間にプログラムされたと考えられた。

HubelとWieselは、プログラム化が分子レベルでどのように行われるかを分析するまではいかなかったが、1981年、この発見により2人はノーベル医学生理学賞を受賞した。Henschは、2人の発見に大いに刺激され、ついには大学の専攻をコンピューター科学・人工知能研究から神経生物学へと大きく方向転換してしまった。「HubelとWieselの研究のおかげで、脳の生物学的特性にはわかっていないことがたくさんあると知ったので



す」と彼は言う。

その後、Henschは、PhD取得のためにカリフォルニア大学サンフランシスコ校 (UCSF、米国) にあるMichael Strykerの研究室で神経科学の研究を始めた。そこで彼は、脳について学ぶすばらしい機会を得た。Strykerの研究チームは、この分野の多くの研究者と同様に、臨界期の一般的なモデルとして視覚系の臨界期を研究しており、その解明への新たなアプローチの足がかりとなる一連の論文を発表していたのだ。

当時、すでに何年か前から、脳の可塑性、あるいは臨界期の学習能力の高さは、興奮性ニューロンの働きによるものだと考えられていた。興奮性ニューロンとは、隣接するニューロンを発火させる（つまり電気的興奮を起こす）ニューロンである。しかしStrykerの研究で、隣接するニューロンの活動を抑える抑制性介在ニューロンが何らかの関与をしていることが示唆された。Strykerのチームは、臨界期にニューロン抑制を増大させる薬剤を子ネコに投与すると、HubelとWiesel

の実験トリックに視覚皮質が「ひっかからなくなる」ことを見つけた。視覚皮質にある多くのニューロンが、開いている目ではなく閉じられた目に応答して発火し始めたのである²。

Henschは、この研究の追跡実験を、理化学研究所脳科学総合研究センター（埼玉県和光市）のMichela Fagioliniたちと共同で行った。彼らは、抑制性の神経伝達物質であるγ-アミノ酪酸 (GABA) の産生量をやや少なくした遺伝子操作マウスで、臨界期を調べた。GABA低減の影

響は、HenschやStrykerが想像していた以上に大きかった。実験対照のマウスは片目をふさぐと通常の臨界期を経た後に弱視となったが、GABA欠損のマウスは弱視にならないか、あるいは臨界期が全くなかった(可塑性が見られなかった)のである。可塑性は、GABAの抑制性の効果を増強させるベンゾジアゼピンの投与により、回復させることができた³。

これらの結果から、視覚の臨界期を発動させる隠れた影響力の1つは「抑制」だと、研究チームは結論を出した。「当時、こうした考え方は既成概念とまるで相いれないものでした」とHenschは振り返る。「我々は常識を覆したのです」。

よくできた仕組み

それ以降、「抑制」が働く仕組みを明らかにするための研究が始まった。

2008年、Henschはコレージュ・ド・フランス(パリ)の神経科学者Alain Prochiantzと、出生後のマウスが最初に目を開けたときに、OTX2というタンパク質が網膜から視神経を通じて視覚皮質へと輸送されることを見つけた。細胞レ

ベルでいうと、これはマラソン並みの距離である。

輸送先の視覚皮質では、OTX2が蓄積することで一連の出来事が誘発されてパルブアルブミン(PV)を含有する抑制性ニューロン(PV介在ニューロン)が成熟し、視覚の臨界期が開始する。しかし、このOTX2輸送は、視覚入力を受けた後にしか起こらない。したがって、暗室中で育ったマウスでは視覚皮質にOTX2が輸送されず、臨界期は起こらない⁴。「これは、自然が編み出した実に巧妙な仕組みだと思えます。なぜなら、末梢の器官がちゃんと機能していて、信号もちゃんと届くことがわからなければ、わざわざ可塑的になる必要はないんですから」と彼は言う。

しかし、PV介在ニューロンがどうやって臨界期を始動させるのかは不明だった。その重要な手がかりの1つは、Strykerが、同じくUCSFのArturo Alvarez-BuyllaおよびSunil Gandhiたちとともに行った研究からもたらされた。介在ニューロンになる運命の胚細胞を幼少マウスの脳に移植したところ、Alvarez-Buyllaの

言葉を借りれば、「臨界期を2回持つようになった」のだ。つまり、マウス自身の介在ニューロンが起こした通常の臨界期と、その後、移植された介在ニューロンが成熟を始めて引き起こされた臨界期である⁵。

Strykerによれば、移植した細胞が、臨界期システムの「リセットボタン」を押したのだという。成体の大脳皮質では、成熟した介在ニューロンが一部のニューロンを抑制し、その他を抑制しないことで神経回路を確立している。情報は、その回路を通して伝達される。ところが、この移植実験では、胚細胞から成熟していく介在ニューロンが、元からあるニューロンと弱い接続(シナプス)を多数作り、すべてのニューロンを等しく抑制して、それまで定まっていた脳回路を無効にしまったのだ。それらの新しいニューロンが成熟すると、ようやくシナプスが「剪定^{せんてい}」、つまり取捨選択され、強化され、最終的に新しい永久的な神経回路が作り出された。これらの知見は、PVシナプスの増設とその後の剪定という仕組みと同じものが、すべての臨界期の基盤にあることを物語っている。

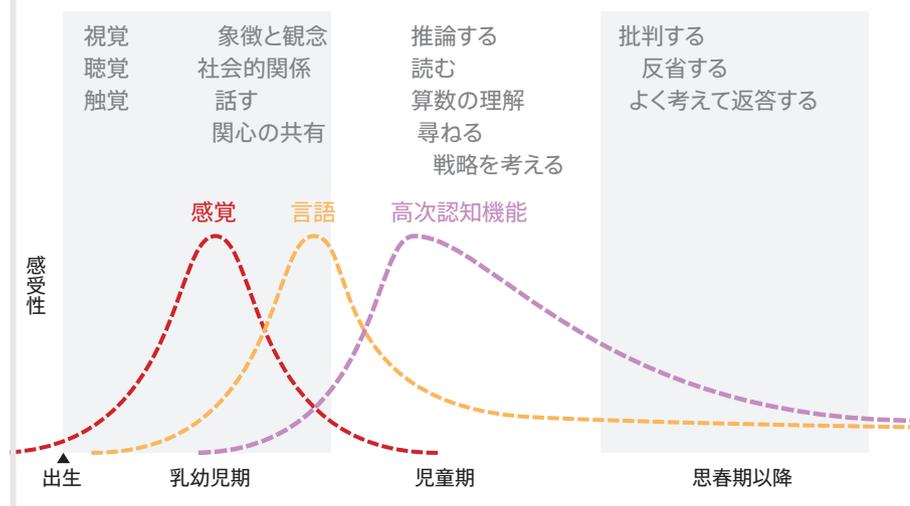
Henschたちは、PV介在ニューロンが成熟すると臨界期がだんだんと終わる訳ではなく、脳が「可塑性ブレーキ」をかけることで臨界期がシャットダウンすることを見つけた。これはおそらく、新しく最適化された神経回路が、さらなる入力を受け取って乱れてしまわないようにする方法なのだろう。

Henschは、こうした「可塑性ブレーキ」を「構造的ブレーキ」と「機能的ブレーキ」の2つに分類している。構造的ブレーキは、神経細胞周囲網(perineuronal net: PNN)などの物理的構造からなる。PNNは、臨界期の終了時期の前後にPV介在ニューロンに接着する高分子複合体で、神経回路が変化できる程度を制限しているとみられている。成体ラットでPNNを化学的に分解させると、神経回路の再構築が起こりやすくなる⁶。

一方、機能的ブレーキはLynx1などの

開いては閉じる

学習に対するヒトの脳の感受性(習得しやすさ)には、3つの大きなピークがあるようだ。視覚などの感覚(赤色)を担う皮質領域の臨界期は、乳児期に開始してその後きつちりと終了する。言語(黄色)や高次認知機能(紫色)の臨界期はそれより遅く開始し、完全に終了することはない。このように臨界期の波が順序よく連続して訪れるおかげで、子どもはしだいに複雑な技能(灰色文字)を習得していくことができる。



化合物である。Lynx1はHenschたちが見つけた分子で、神経伝達物質アセチルコリンの作用を弱めることで、皮質の興奮と抑制のバランスを変化させる。マウスでの実験から、臨界期の終了時に脳内のLynx1量が増加することや、成体脳からLynx1を除去するとPNNを分解した場合と同様に、脳の可塑性が回復されることが明らかになった⁷。

機能的ブレーキで特に注目すべき点は、比較的簡単に解除できることだとHenschは言う。その一例が、カリフォルニア大学バークレー校（米国）の検眼医Roger LiとDennis Leviが弱視の成人のために開発した行動的介入療法だ。

幼少期に白内障や内斜視などの問題があつて片方の目への入力が増え、弱視になり、立体視ができないままになる。この障害は、臨界期を過ぎてしまうと、治療は不可能だと考えられてきた。しかしLiとLeviが、弱視の被験者に、問題のないほうの目に目隠しをしてTVゲームを40～80時間プレイしてもらったところ、大半の人が、視覚機能がかなり改善されたと回答した⁸。生まれつき内斜視で、奥行きのある世界を見たことがなかった1人の被験者の反応について、Liはこう紹介している。「彼女は自分が立体視をある程度できると気付くと、たちまち声をあげて泣き出しました」。

Henschは、TVゲームをプレイすることで、脳の機能的ブレーキの一部が解除されるのだと考えている。TVゲームのプレイ中によく見られる高い集中力は往々にして、アセチルコリンの働きを高めることが明らかになっており、そうした高まりがLynx1の抑制的作用を中和するのではないかと、Henschは指摘する。

「チャンスの窓」をこじ開ける

薬剤を使って臨界期を再開させようとする実験は、すでに始まっている。

Henschとボストン小児病院の眼科医David Hunterは、この5月に、脳内アセチルコリン量を増加させる薬剤で弱視を治療するための第I相臨床試験の認可

を受けた。同じような研究が、2010年、カリフォルニア大学バークレー校の神経科学者Michael Silverのチームから発表されている⁹。正常視覚の被験者にアセチルコリン量を増加させる薬剤を投与すると、プラセボ（偽薬）を投与した被験者に比べて視力が大きく改善されるというものだ。

また、ピサ高等師範学校（イタリア）の神経生物学者Lamberto Maffeiのチームは、鬱病治療によく使われる選択的セロトニン再取り込み阻害剤（SSRI）で弱視を治療するための第II相臨床試験に取りかかっている。

こうした研究から、経口薬や注射薬によって、重度の脳損傷からの回復を助けたり、あるいは、新しい言語をたやすく覚えたり、恐ろしい記憶を忘れてたりできるようになるのではないかという期待が膨らむ。Henschは、可塑性ブレーキの解除は自閉症などの複雑な疾患の治療にも有用かもしれないと言う。自閉症では、誰かの顔の表情を見ながら話の内容を聞き取るといった、一度に多数の感覚から入ってくる情報の統合が困難になっている。そうした入力情報の統合には、それぞれの感覚の臨界期が特定の発達順序で連続的に起こることが必要なかもしれないというのだ。「自閉症は、こうした各種の感覚の臨界期がタイミングを誤った場合に不都合な結果になりうることを示していると思います」とHenschは話す。

Henschの考えには、ある程度の実験的証拠はある¹⁰が、自閉症などの複雑な精神医学的障害の神経基盤に関していえば、まだ限られている。もし、一部の発達障害のリスク因子を見つけだすための検査法が考案できれば、いずれは臨床で、臨界期の最中に生物学的情報に基づいた治療的処置を施し、脳の可塑性を利用して正しい方向に発達させることができるかもしれないと、Henschは言う。

ただし、この分野の研究者は誰も、脳の臨界期を不用意に操作すべきではないと考えている。「臨界期を再開させる場

合、当然のことながら、不都合な結果になる可能性を捨てきれません」と、ハーバード大学医学系大学院の神経科医Alvaro Pascual-Leoneは言う。彼は、弱視などの障害は、本来の臨界期に有害な入力があったために起こるのだと指摘している。

また、構造的ブレーキは、機能的ブレーキに比べて解除するのがはるかに難しい。例えば、2009年に、マウスでPNNを化学的に破壊すると恐怖の記憶が容易に消去されることが報告され、こうした方法が心的外傷後ストレス障害（PTSD）などの疾患の治療に使える可能性が示唆された¹¹。しかし、ヒトでこんなことをすれば脳に広範な損傷を起こしてしまい、治療による恩恵よりも弊害のほうが大きくなってしまふおそれがある。結局のところ、脳が臨界期を終了させる仕組みは非常に複雑であり、この仕組みにはかなりのエネルギーが必要なのだとHenschは説明する。「ですから、一定期間で閉じる臨界期という仕組みが進化したのは、何らかの理由があつたのだと思われまふ」。

Strykerは、最後にこう釘を刺している。「年をとってもまた臨界期を体験できるという考え方は、ロマンチックなあこがれにとどめておくほうがよいのですよ。中にはどうやっても起こらないことだってあるんですから」。

（翻訳：船田晶子）

Jon Bardinは、ニューヨークを活動拠点とするフリーランスライター。

1. Wiesel, T. N. & Hubel, D. H. *J. Neurophysiol.* **26**, 1003-1017 (1963).
2. Reiter, H. O. & Stryker, M. P. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **85**, 3623-3627 (1988).
3. Hensch, T. K. *et al. Science* **282**, 1504-1508 (1998).
4. Sugiyama, S. *et al. Cell* **134**, 508-520 (2008).
5. Southwell, D. G., Froemke, R. C., Alvarez-Buylla, A., Stryker, M. P. & Gandhi, S. P. *Science* **327**, 1145-1148 (2010).
6. Pizzorusso, T. *et al. Science* **298**, 1248-1251 (2002).
7. Morishita, H., Miwa, J. M., Heintz, N. & Hensch, T. K. *Science* **330**, 1238-1240 (2010).
8. Li, R. W., Ngo, C., Nguyen, J. & Levi, D. M. *PLoS Biol.* **9**, e1001135 (2011).
9. Rokem, A. & Silver, M. A. *Curr. Biol.* **20**, 1723-1738 (2010).
10. Rubenstein, J. L. R. & Merzenich, M. M. *Genes Brain Behav.* **2**, 255-267 (2003).
11. Gogolla, N., Caroni, P., Lüthi, A. & Herry, C. *Science* **325**, 1258-1261 (2009).

ソフトマター工学

トウモロコシ粉懸濁液の上を走れる理由

Running on cornflour

MARTIN VAN HECKE 2012年7月12日号 Vol. 487 (174-175)

トウモロコシ粉と水を混ぜた液には粘性があり、それでプールを満たすと、忍者のようにその上を走ることができる。ところが立ち止まると沈んでしまう。この現象はどのような原理で起こるのか、今回、新たな実験に基づく考え方が提案された。

スープやソースを作るとき、トウモロコシ粉（コーンフラワー）を少量加えると、とろみを付けることができる。しかし、水に大量のトウモロコシ粉を加えると、ベタベタした奇妙な物質になる。この物質は、液体と固体のどちらにも変わることができる不思議な性質を持っている。この液をたたくような、短時間の変形をさせようとする、固体のようになって頑強に抵抗する。こうなるとスプーンですくい上げることはほぼ不可能だ。しかし、動揺させずに放置すると希薄な液体になり、別の器にゆっくり注ぎ込むこともできるようになる。

この愉快的な性質が多くの人々を魅了している。動画投稿サイトは「コーンフラワーモンスター（スピーカー上でトウモロコシ粉液を振動させてできる物体）」や、この液で満たされたプールの上を走る人の動画でいっぱいだ¹。

このベタベタした物質の上では、走ることはできるのに、立ち止まるとゆっくりと沈んでしまう。多くの研究者はこれまで、この現象は「ずり粘稠化」（粘稠化とは粘性が高まること）によって起こると考えてきた²⁻⁵。流体内の流速差で液体の層に「ずれ（剪断変形）」が生じると粘性が急激に増加するという考え方だ。

しかし今回、シカゴ大学ジェームズ・フランク研究所（米国イリノイ州）と同大学物理学科に所属するScott WaitukaitisとHeinrich Jaegerは、この現象のカギ



ぎゅっと握ると固体のようになるが、放置すると流体状になる。

は、液体の層が互いにずれる、ずれ（剪断変形）ではなく、「圧縮」にあることを示す強力な証拠を得た。そして、その結果を*Nature* 2012年7月12日号205ページで報告した⁶。

懸濁液（液体中に粒子が分散したもの）は、粒子の濃度が増加するとともに粘性が高くなる。これは直観的に理解しやすい。それに比べ、流速が上昇すると懸濁液の粘性が突然増加するという「ずり粘稠化」の概念は理解しにくい。しかし、それは、さまざまな場面において重要な意味を持っている。血液、セメント、粘土はすべて、ずり粘稠化を示すことがある。セメントをパイプに通して送っているとき、破裂する惨事を引き起こすことがある。もちろん、役に立つこともある。例えば、振動を減衰させるスポーツ用具

や、トウモロコシ粉懸濁液に似た懸濁液を使った防弾チョッキなどもある。

懸濁液で見られる「ずり粘稠化」の正確な原因については、今も活発な議論が続いている。1つの考え方は、流れによって一時的に粒子が集まった「流体クラスター（hydrocluster）」が形成され、流体が粘性を持つというものだ^{2,3}。もう1つは、粒子が流れによって互いに通り過ぎようとするとき、粒子の集団が膨張せざるを得ない「不可避の膨張」が起こるといったものだ。これが最終的に、懸濁液を閉じ込めている固い境界（容器などの壁）や自由表面（壁に接していない液面）に力を伝え、懸濁液を固くする^{4,5}。

WaitukaitisとJaegerは、トウモロコシ粉懸濁液の上を走ることができる理由は、どちらのメカニズムでも説明できないと主張する。いずれのメカニズムで生じる力も、最大でも人を支えるには小さすぎるからだ。また、走る人の足の下で観測された粘稠化は容器の壁に到達しないことが多い。それに、懸濁液の上に飛び乗るとき、実際には液を剪断変形しているのではなく、圧縮している。では、粘稠化の原因は何なのだろうか。

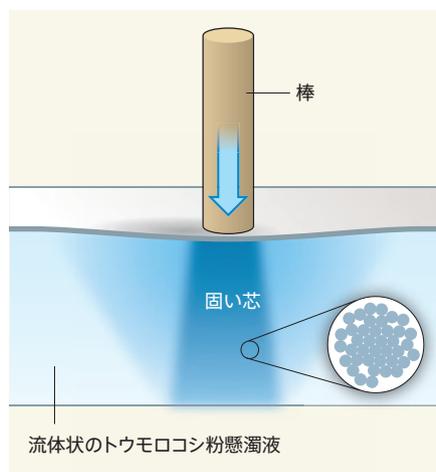
WaitukaitisとJaegerはこの難問を解くため、容器に入れたトウモロコシ粉懸濁液に円柱状の棒を勢いよく突っ込むという実験を行った（図1）。実験では、高速ビデオ撮影、X線撮影および応力の測定を行った。その結果、彼らは重要な現

象を発見した。棒で突かれた場所の下では、トウモロコシ粉懸濁液の固化「前線」ができて急速に広がり、固化領域ができることがわかったのだ。また、広がる速さは溶媒の種類を変えても変化しなかったことから、粒子の流体クラスターができるという考え方が正しくないことがわかった。流体クラスターは、溶媒の粘性に影響されると考えられているからだ。

固化前線が広がる理由を理解するには、乾いた粒子を詰め込むときに起こる、ジャミング（粒子が詰まることによって起こる渋滞現象）という現象と、質量の保存という制約を考えると理解しやすい。ジャミングは、粒子濃度が高く、固体を形成するほど粒子が密に詰め込まれているときに起こる⁷。例えば、衝撃を加える前の粒子密度がジャミングが起こる密度よりも10%低いとする。そこへ衝撃を加えると、質量の保存のため、固化前線は衝撃を与えたものの速度よりも10倍速く進む。だから、走る人の足が5cm沈むと、固化領域は50cmと急速に成長する。

この効果に、溶液の自由表面と容器の壁は関係しているだろうか。それを調べるため、彼らは容器の深さを変えて実験を行った。その結果、棒が沈まないように止める力の強さには、特定のタイミングの2つのピークがあることがわかった。最初の強いピークは固化領域の急速な成長に対応し、ずっと弱い2番目のピークは、固化領域が容器の底に到達することに対応している。この結果は、力をトウモロコシ粉懸濁液にすばやく伝える固い「芯」が固化領域に生じたことを示していた。また画像撮影から、この芯とともに下へ動く、トウモロコシ粉懸濁液の大きな塊があることがわかった。この固い芯と塊の質量は大きいので、衝撃を与える棒から運動量を吸収する。運動量の移動は棒には大きな力として働き、棒を停止させ、沈むことを防ぐ。

このメカニズムでは、容器の壁がなくともトウモロコシ粉懸濁液は固くなる。トウモロコシ粉懸濁液の上を走るとき、



一歩ごとに巨大な「トウモロコシ粉懸濁液の足」ができ、走り続けるかぎり、この足が人を支え続ける。だが動くのを止めると、この足は溶けて消えてしまう。しかし、重要な未解決問題が残っている。粘稠化は動的かつ一時的な現象であり、固化領域のジャミングの解除（粒子がバラバラになること）は何がコントロールしているのかは、まだ明らかになっていない。

今回の研究は、複雑流体のレオロジー（流動学）において、「圧縮」と「固化領域」が重要であることを示した。水などの単純流体は、圧縮することが非常に難しく、その流れの性質は圧力にほとんど依存しない。このため、従来のレオロジーの研究は「ずれ（剪断変形）」に集中し、WaitukaitisとJaegerが提案した「衝撃によって引き起こされる固化」のような考え方は見過ごされてきた。

しかし複雑流体（血球を含むものもあれば、気体の泡を含むもの、油の小滴を含むもの、固い粒子を含むものもある）はジャミングに敏感で、圧力とジャミングはそうした流体の豊かなレオロジーを理解するために非常に重要な要素だ。1つの際だった例は、懸濁液中の粒子濃度の増加とともに見られる粘性の増加について最近なされた再解釈だ⁸。驚くべきことに、この粘性の増加は、粒状媒質の圧力に強く依存したレオロジーで説明される。

もう1つのめざましい進展は、複雑流

図1 WaitukaitisとJaegerが提案した、圧縮による粘稠化のメカニズム

懸濁液の中に円柱状の棒を突っ込むと、棒の運動が懸濁液中のトウモロコシ粉粒子（点）を圧縮し、トウモロコシ粉粒子はぎゅうぎゅう詰め（ジャミング）になる（円内の拡大図）。懸濁液は動揺させずに放置すれば流体状で、粒子は近接しているが接触はしていない。ジャミングが起こると固い芯が形成される。その周りをトウモロコシ粉懸濁液の大きな塊が取り囲んでいて（中間の濃さの青色の部分■）、芯とともに下向きに動く。この芯と塊が棒を押しとどめる大きな力を与え、棒が沈むことを防ぐ。

体でジャミングが起こっている領域は振動や攪拌^{かくはん}を伝えることができ、乳濁液⁹や乾いた粒状媒質¹⁰などのさまざまな物質で、非局所的なレオロジー（ある場所の流れが別の場所の物質を流動化する）につながるということがわかったことだ。

今回の研究成果は、粘稠化、つまり、何らかの理由で引き起こされる固化の研究に新たな考え方を提案した。しかし、この新しい考え方でどれだけ複雑流体のレオロジーを説明できるのか、さらに研究が必要だ。例えば、突然のずれも一時的な固化領域を作るのだろうか。また、振動によって引き起こされる粘稠化も、本質的には圧縮が原因なのだろうか。そして、トウモロコシ粉と同じサイズのガラスビーズを水と混ぜても、トウモロコシ粉懸濁液で観察されたような強い粘稠化を示すのだろうか。粘っこい問題が、まだいくつも残っている。

（翻訳：新庄直樹）

Martin Van Hecke は、ライデン大学数学・自然科学部カマリング・オネス研究所（オランダ）に所属。

1. youtube.com/watch?v=S5SGiwS5L6l
2. Wagner, N. J. & Brady, J. F. *Phys. Today* **62**(10), 27-32 (2009).
3. Cheng, X., McCoy, J. H., Israelachvili, J. N. & Cohen, I. *Science* **333**, 1276-1279 (2011).
4. Fall, A., Lemàître, A., Bertrand, F., Bonn, D. & Ovarlez, G. *Phys. Rev. Lett.* **105**, 268303 (2010).
5. Brown, E. et al. *Nature Mater.* **9**, 220-224 (2010).
6. Waitukaitis, S. R. & Jaeger, H. M. *Nature* **487**, 205-209 (2012).
7. Liu, A. J. & Nagel, S. R. *Nature* **396**, 21-22 (1998).
8. Boyer, F., Guazzelli, É. & Pouliquen, O. *Phys. Rev. Lett.* **107**, 188301 (2011).
9. Goyon, J., Colin, A., Ovarlez, G., Ajdari, A. & Bocquet, L. *Nature* **454**, 84-87 (2008).
10. Nichol, K., Zanin, A., Bastien, R., Wandersman, E. & van Hecke, M. *Phys. Rev. Lett.* **104**, 078302 (2010).

デバイス物理学

電圧で、絶縁体を金属に変える!

Put the pedal to the metal

JOCHEN MANNHART AND WILFRIED HAENSCH 2012年7月26日号 Vol. 487 (436-437)

印加電圧を変えるだけで、絶縁体を金属に変える方法と材料が発見された。

これを利用すれば、これまでなかった新世代の電子スイッチを実現できるかもしれない。

電圧を変えるだけで、絶縁体を金属に、また逆に金属を絶縁体にできたら、何とすばらしいだろう。しかもこの過程は非常に高速で起こり、エネルギー損失がほとんどない。

この「究極の電子スイッチ」という発想は、20世紀初頭にまでさかのぼる。当時の研究者たちは、材料の電気抵抗を変えようと、可動電荷を加えたり取り除いたりしていた。可動電荷は、材料表面に取り付けたゲート電極に電圧をかけ、電界を発生させることによって生成する。こうした方法で導電性材料の抵抗を変えるデバイスは、現在、電界効果トランジスタと呼ばれており、これに関する特許は1925年という早い時期に出願されている¹。今回、「究極の電子スイッチ」への扉を開く電界効果デバイスが、中野^{なかの}匡規^{まさき}ら²によって報告された (*Nature* 7月26日号459ページ)。

電界効果トランジスタ (FET) の場合、ゲートに加わった素電荷の分だけ伝導チャンネルの可動電荷キャリアが増えるが、チャンネルに導入された電荷キャリアの一部が欠陥でトラップされると、可動電荷キャリアは少なくなる。いずれにせよ、このような半導体チャンネルの電界によるスイッチング法は、今日使用されているほぼすべての電子デバイスの基礎であり、エレクトロニクス社会の中核となっている。また、電子密度を変化させることによって物質の研究が可能になるため³、この方式は基礎科学にとっても有用である。

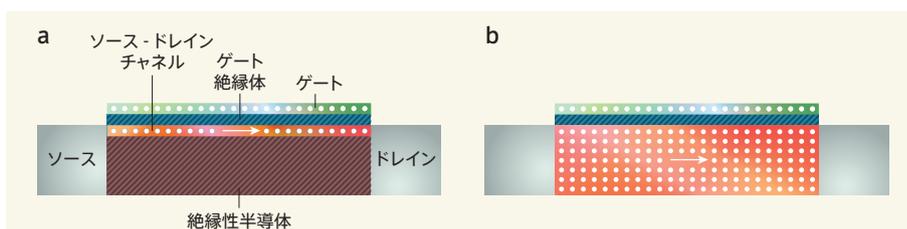


図1 2種類のトランジスタの「オン状態」を表す断面図

a. 従来型電界効果トランジスタに電圧をかけると、ゲート電極に加えた電子 (白点) によって、可動電子が生成する。これらの電子は、半導体材料の薄い伝導層からなるチャンネルを、ソース電極からドレイン電極へ向かって流れる (矢印)。チャンネルはゲート絶縁体と半導体の絶縁性部分に挟まれている。

b. 中野ら²が観測した二酸化バナジウムの転移のように、絶縁体-金属相転移を示す材料を利用したトランジスタでは、電子が流れるチャンネルは膜全体に広がっている。チャンネル中の可動電子の数は、ゲートに加えられる電子の数よりはるかに多い。

電界スイッチングの難点は、薄い表面層でのみ起こり、チャンネル材料全体では起こらないことであった。スポーツカーでもアクセルを少ししか踏まなければ、スピードが出ないとよく似ている。さらに、いくつかの例外を除けば、電界で調節できたのは半導体の抵抗だけであり、金属を絶縁体に変えたり、絶縁体を金属に変えたりすることはできなかった。という訳で、電界による絶縁体-金属相転移が実現すれば、改良型トランジスタが誕生する可能性がある。

ここで中野らの研究チームが登場する。彼らは、実験で二酸化バナジウム (VO_2) 膜表面のイオン液体 (主にイオンからなる液体) に電圧をかけて、巨大な電界を発生させたのである。 VO_2 はユニークな固体である。室温では絶縁体で

あるが、340K (ケルビン) まで加熱すると金属に変わる。さらに、 VO_2 は強相関酸化物であり、電子同士の相関が強く、ある電子の振る舞いは隣の電子の振る舞いに左右される。

中野らは実験で、イオン液体への電圧印加によって VO_2 が絶縁体から金属に転移する (スイッチングする) ことを明らかにした。意外なことに、この転移は一部の薄い層だけでなく、調べた全サンプル (最大膜厚70nm) の膜全体で起こっていた。膜全体で転移が起こることは、スポーツカーでたとえるなら、「アクセルを思い切り踏み込む」ことに相当する。さらに、従来型のFETと異なり、 VO_2 が絶縁体から金属に変わるとき、ゲートに加えた電荷キャリアよりもはるかに多い可動電荷キャリアが生成している。こ

れは、動くことのできなかった多くの局在電荷キャリアが、転移によって自由に動けるようになり、非局在化したことによる(図1)。この過程はすべて室温付近で起こる。

こうした実験では、至る所に落とし穴が隠されているものである。そこで彼らは、スイッチングが本当にVO₂膜全体で起こっていることを確かめるため、X線回折、抵抗測定、ホール効果測定という3つの方法を動員した。結果はすべてイエスであった。3つの測定結果はすべて膜全体でスイッチングが起こることを証明したのである。詳細なスイッチング機構は不明であるが、まずイオン液体が表面層をスイッチングすることにより、絶縁体-金属相境界が生じるようである。相の境界部分に大量のエネルギーが集中するため、格子構造の集団的変形が駆動され、絶縁体-金属相転移が膜全体を走り抜けるように進むようである。電界とイオン液体の荷電分子がどの程度スイッチングに影響を及ぼすのか、まだ明らかにされていない。

これらの実験は、電圧による絶縁体-金属転移の制御が可能であり、転移により材料の電子物性に大きな変化が生じることを示している。特に、表面に電界をかけるとVO₂膜内の局在電荷が非局在化するという現象を利用すれば、将来、

新世代の電子スイッチを作製できるかもしれない。新しいFETではチャンネルの可動電荷キャリア密度が従来型FETよりかなり大きい、トランジスタを小型化するために、まさにこのような高いキャリア密度が望まれているのだ。

中野らは、絶縁体-金属転移、つまり「オフ」状態から「オン」状態へのスイッチング現象を、現実的な電圧と温度で観測した。彼らのVO₂デバイスは、印加ゲート電圧を100ミリボルト変化させると、チャンネル電流が10倍に増加した。専門用語で表現するなら、オン/オフスイング約100mV/decadeである。このデバイスは、オフ電流に対するオン電流の比(測定値)が約100であり、原理上、ゲート電圧1Vで動作可能である。ちなみに、現在の携帯用低電力電子デバイスの場合、オン/オフ電流比は10⁶が望ましく、ゲート電圧約1.5Vでオン/オフスイングは約90mV/decadeである。

中野らのデバイスはゲート電圧1Vで動作可能なので、スイッチング性能を改善できれば、低電力技術分野で使用される見込みがある。スイッチングに関与する構造変化は電子的变化よりゆっくり起こることが多いため、スイッチング速度は遅くなりがちである。しかし、相転移が膜全体を通して音速で進行したとしても、最終的にはスイッチング時間が1ナ

ノ秒を大幅に下回るようになるであろう。

むしろ応用で問題になるのは、イオン液体を固体絶縁体に置き換えた場合でもスイッチング可能かどうかである。この条件は、素子を集積して電子回路を形成する際に要求される。もちろん、スイッチング可能な最大デバイス厚さ、つまり、どの程度の厚さまでスイッチングが起こるのかがわかるとおもしろい。このデバイスのスイッチング機構の理解が深まり、材料工学が進歩すれば、固体の電子スイッチが実現するかもしれない。

相転移が物質中を高速で移動することによってスイッチングが起こるので、考えられるデバイス応用は、我々が知っているFETをはるかに超えるかもしれない。類似のスイッチングに使えるような材料の数は膨大にあり、*ab initio*計算の予測力は進歩を続けている。おそらく、スイッチング性能を改善する材料の組み合わせが発見され、電子回路への応用に適したデバイスが実現されるであろう。

(翻訳：藤野正美)

Jochen Mannhart はマックス・プランク固体研究所、Wilfried Haensch はIBM社T.J.ワトソン研究センターに所属。

1. Lilienfeld, J. E. US Patent 1745175 (1930).
2. Nakano, M. *et al. Nature* **487**, 459-462 (2012).
3. Ahn, C. H., Triscone, J.-M. & Mannhart, J. *Nature* **424**, 1015-1018 (2003).

RESEARCH HIGHLIGHT

グリーンランド氷床が融解する周期

Abrupt changes in Greenland ice cycles

2012年8月9日号 Vol. 488 (132)



J. BALOG/AURORA/GETTY

航空写真の分析から、グリーンランド北西部の氷床の消失は、海水と大気温度変化に起因する不連続な現象の結果として起こることがわかった。

コペンハーゲン大学自然史博物館の Kurt Kjaer の研究チームは、1985年以降の航空写真を利用して、氷床の消失と発達に関する三次元モデルを作成した。このモデルから、氷床が融解するスピードは一様ではなく、1985～93年と2005～10年の2回、融解のピークがあったことが明らかになった。研究者たちは、この氷床の消失を、例年に比べて海水温が高く夏の気温が高かったことと結びつけた。信頼度の高い予測をするためには、このような変動を説明できる氷床モデルが必要だ。

Science **337**, 569-573 (2012)

(翻訳：三枝小夜子)



3D印刷された模型は、分子の機能の解明に役立つ。

3D印刷がもたらす革命

The print revolution

NICOLA JONES 2012年7月5日号 Vol. 487 (22-23)

立体物を印刷できる3Dプリンターの進歩が、科学研究の新たな地平を開こうとしている。

Christoph Zollikoferは、現代初のネアンデルタール人誕生の場面に立ち会った。2007年、チューリッヒ大学(スイス)の彼の人類学研究室で、モーターがブンブンうなり、プラスチックがシューシューと音をたてる。ネアンデルタール人 *Homo neanderthalensis* の乳児の頭蓋骨は、20時間にわたる無痛分娩を経て、コピー機サイズの機械の中に姿を現した。

この現代の奇跡の懐胎期間は非常に長かった。Zollikoferの共同研究者がネアンデルタール人の新生児の骨片の中から適当なものを見つけ出し、CTスキャナーで分析し、コンピューター・スクリーン上でそれらをデジタル的に組み合わせるまで何年もかかった。しかし、分娩の手

順は簡単だった。Zollikoferはただ、三次元(3D)プリンターの「印刷」ボタンを押すだけでよかった。

Zollikoferは、3D印刷を研究に利用する研究者の先駆けである。20年前に彼がこの技術を利用しはじめたときの試作機は、今よりもっと高価で、その材料も溶媒も有毒なものを必要としたため、ほとんどの科学者は興味を示さなかった。けれども今では、より新しく、より安価な技術が用いられるようになっている。インクジェットプリンターが紙の上に1行ずつインクを吹き付けて絵や字を描き出していくように、最新の3Dプリンターの多くは、表面に材料(通常はプラスチック)を1層ずつ吹き付けて立体を形

成していく。液体または粉末状のプラスチックが入ったバットに紫外線や赤外線照射し、1層ずつ溶融固化させていく方式のものもある。

3D印刷では、どんなに複雑な形でも印刷することができる。形によっては、一時的に足場を利用して印刷し、後でこの部分を溶かしたり削り取ったりすることもある。米国コロラド州フォートコリンズに拠点を置くコンサルタントのTerry Wohlersの市場分析によると、最近では、個人用の3D印刷キットがわずか500ドル(約4万円)で入手でき、産業用3D印刷システムの平均価格は7万3000ドル(約584万円)であるという。また、2011年には世界中で3万台近くの3Dプリン

ターが販売され、1万5000～3万ドルという価格帯の製品の3分の1が学術研究機関により購入されたという。

早い時期に3D印刷を採り入れた研究者は、複雑な分子を調べたり、独自の研究ツールを製作したり、珍しい人工遺物を共有したり、本物の心臓のように脈動する心臓組織を作製したり、この技術を使っていろいろなことを試みている。実際、古生物学や人類学の学会では、3D印刷したお気に入りの化石や骨を持参する人が増えた。「人類学者は全員、しかるべきコンピューター・グラフィックス技術と3Dプリンターを持っている必要があります。さもないと、DNAシーケンサーを持たない遺伝学者のようなことになってしまいます」と、Zollikoferは言う。

3D出力は、従来の研究方法では不可能だった洞察を可能にする。例えば、ネアンデルタール人の新生児の化石は非常に珍しく、また壊れやすいため、通常の石膏模型で標本の複製を作るのは危険である。このためZollikoferは、冒頭で紹介したように、3D印刷により新生児の頭蓋骨標本の複製を作ったのだ。さらに、ネアンデルタール人の成人女性の骨盤も3D印刷で作った。分娩過程を文字どおり再現し、詳細に調べたのだ。一部の研究者は、ネアンデルタール人は現代人より骨盤が広いため、容易に分娩できたはずだと推測していた。しかしZollikoferは、ネアンデルタール人の新生児の頭蓋骨は現代人の新生児の頭蓋骨より大きく、骨盤の広さという利点は相殺されてしまうことを実験により示すことができた(M. S. Ponce de Leon *et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA* 105, 13764-13768; 2008)。現代人と同じくネアンデルタール人も、生後に早く発達できるように、頭(と脳)が限界まで大きくなってから生まれてくるようになっていたのである。

Zollikoferは、この研究で、3D印刷した模型だけでなくバーチャル模型も利用している。コンピューター上の模型は、体積を計算したり、骨片をつなぎ合わせたりするのに都合がよい。しかし、バー

チャル模型ばかり扱っていると、「化石に触れたときの感覚はもちろん、化石の寸法の感覚さえ忘れてしまうので要注意事項なのです」と言う。そもそも、各部分をどのように組み合わせるべきかを確認するにも、実体のある模型を使ったほうが、はるかにやりやすいという。

分子模型をもてあそぶ

化学者や分子生物学者は、分子の構造の感じをつかんだり、X線データや結晶学データを理解したりするために、ずっと前から模型を利用してきた。かのJames WatsonとFrancis Crickが1953年にDNAの構造を明らかにしたときにも、玉と棒を組み合わせて製作したグラグラの分子模型が役に立った。

30年前にスクリプス研究所(米国カリフォルニア州ラホヤ)で分子グラフィックス研究室を立ち上げたArthur Olsonによると、最近では、3D印刷を利用して、相互作用する数千個のタンパク質からなる分子環境など、はるかに複雑な系の模型さえも製作できるようになったという。3D印刷以外の方法でこうした系の模型を製作するのは不可能で、もしできるとしても非常にやっかいである。しかし3Dプリンターさえあれば、「誰でも独自の模型を製作することができるのです」とOlsonは言う。ただ、研究者の多くは、3Dプリンターを簡単には利用できる環境でなかったり、出力サービスを利用するという選択肢に気付いていなかったり、出力サービスを利用する資金的な余裕が

なかったりする(3D印刷の出力サービスは1点100ドル以上になることがある)ため、誰もが3D印刷を利用しているという訳ではない。

けれどもOlsonは、3D模型は我々に重要な洞察をもたらしてくれる可能性があると言う。彼は同僚のために、チャンネルを構成するあるタンパク質を3D印刷したことがあった。すると彼らは、この模型をもてあそんでいるときに、分子の内部を曲がった「トンネル」が貫いていることに気付いた。そのトンネルは、コンピューターのスクリーンの上ではよく見えなかったのだが、3D模型の片側から息を吹きこんでみたところ、反対側から空気が抜けてきたのである。こうしたトンネルの長さを決定できれば、そのチャンネルが分子を輸送するのかどうか、輸送する場合にはどのような仕組みになっているかを解明する役に立つ。コンピューター上で長さを決定するには新しいプログラムを追加しなければならないが、模型なら紐1本で足りる。

Olsonによると、ディスプレイ上で分子をねじったり回転させたりするソフトウェアは非常に有用だが、それでもまだ能力が不十分だという。現状、最新のソフトウェアでさえ、2個の原子が同じ場所を占めてしまうことがある。そのうえ、コンピューターの中で分子をいじくるとは骨が折れる。コンピューターは、回転のたびに時間をかけて画像を表示しなおさなければならないし、人間の側も、絵を解釈するために頭を働かせなければな



ネアンデルタール人の小児(左)と新生児(右)の頭蓋骨の3D印刷模型。

らない。これに対して、現実の模型をもてあそぶことは、本当の遊びに近い。「私は何も考えずに、ただ手を動かしています」とOlsonは言う。

Olsonは今、手で触られるという3D印刷模型の長所を、コンピューターの能力と組み合わせようとしている。彼は3D印刷模型に小さな紙のラベルを付け、これをウェブカメラで認識させることで、「拡張現実」を眺められるようにした。こうすることでユーザーは、3D印刷模型をもてあそびながら、コンピューターを利用して、任意の分子の配列のポテンシャルエネルギーなどを調べることができる。Olsonはさらに、固い材料と柔軟な材料をもっと容易に切り替えられる3Dプリンターを使って、タンパク質の折りたたみなどの分子の挙動を、より忠実に再現できるようにしたいと考えている。

立体的な細胞組織構造

3Dプリンターの「インク」は、プラスチックに限定されない。生物学者は、自然に融合するヒト細胞を、1つずつまたは複数の細胞からなる小塊として印刷する実験をしている。この技術を用いて、すでに血管や脈動する心臓組織を作製することができた。ただ、機能する臓器を印刷するという究極の夢は、たとえ実現することがあるとしても、まだまだ遠い未来のことになる。しかし、近いうちに、3D印刷した細胞構造は、ペトリ皿（シャーレ）の中で成長させた細胞によく見られる平べったい構造よりも、はるかに現実の細胞組織構造に近いものになるだろうと考えられている。

例えば、カリフォルニア州サンディエゴに拠点を置くOrganovo社は、医薬品の試験に使える3D組織構造を作るためのプリンターを開発した。彼らがこれまでに作った模型の中で最も進んでいるものは、線維症（臓器の内側の細胞と外層の間の相互作用により堅い線維性組織が過剰に形成され、はんこん癍痕を形成した状態）の模型である。同社が次にめざすのは、この系を使って薬物の試験をすることで

ある。化学工学技術者で、同社の最高責任者であるKeith Murphyは、「3D印刷は、そのための唯一の方法ではないかもしれませんが、よい方法です」と言う。

細胞を成長させるための足場の作成に、プラスチックまたはコラーゲンの3D印刷を利用しているグループもある。米国国立標準技術研究所（メリーランド州ゲイサースバーグ）の生体適合材料グループの生物学者Carl Simonは、足場の形状の複雑さが、細胞の成長のしかたや、幹細胞が各種の細胞へと分化する仕組みの解明に役立つという。3D印刷があれば、研究者は、さまざまな形状の足場を綿密に調べ、どの形状の足場が最もよく細胞を成長させるかを確認することができる。これに関しては、1つ問題がある。ほとんどの3Dプリンターが数十～数百 μm の構造までしか印刷できないのに対して、細胞は $1\mu\text{m}$ レベルの違いを感知できるのだ。シェフィールド大学（英国）で3D印刷の研究をしているNeil Hopkinsonによると、現時点で最高品質の3Dプリンターは、非常に短い波長のレーザー光を利用することにより100nmの解像度を実現しているが、これは「まだ研究段階のもので」と言う。

オリジナルの研究ツールを手軽に

その一方で、一般的なプラスチック3Dプリンターの性能も大いに向上してきているため、研究者が研究ツールを特注する必要がなくなる日も、そう遠いことではないかもしれない。グラスゴー大学（英国）の化学者Leroy Croninは、今年、3D印刷による小規模化学用プラスチック製反応容器「リアクションウェア（reactionware）」を発明したことで話題になった（M. D. Symes *et al.* *Nature Chem.* 4, 349-354; 2012）。Croninは市販の2000ドル（約16万円）のプリンターの「インク」を、シリコンベースのシャワー封水剤と触媒と反応物に交換して、全反応機構を出力できるようにした。目標は、カスタマイズ可能な化学が多くの研究者に利用されるようにするこ

とにあると彼は言う。彼の論文は、リアクションウェアを利用して新しい化学物質を作り出したり、少量の特異的な医薬品をオンデマンドで提供したりする可能性を示した。今のところ、ほかの化学者たちは、このアイデアを巧妙な新機軸と見て、次にはどんな応用が可能になるのかと待っている。

レンセラー工科大学（米国ニューヨーク州トロイ）の環境工学者Philippe Baveyeは、この技術を今すぐ応用できる用途を見つけた。彼は3D印刷を利用して、土壤に浸透する水の流れを測定する浸透計という装置のカスタムパーツを製作している。日常的な調査には市販の装置で十分だが、より正確な調査を行うためには独自の装置を設計しなければならない。従来は何時間も旋盤に向かってこの作業をしなければならなかったが、3D印刷を利用できるようになったおかげで、各段に容易に製作できるようになったという。

Baveyeにとっておそらくもっと重要なのは、デザインファイルを公表するだけで、自分の製品を人々と共有できることである。「文献で説明される実験を再現できるという概念に、新しい意味が付与されようとしているのです」と彼は言う。

ほかの人々の意見も、3D印刷の本当の威力は、多くの人々の手に科学を届けられるようにすることにあるという点で一致している。Croninは、アフリカの僻地でも宇宙でも、誰もが自分の小さな製薬工場を3D印刷できるようにしたいと考えている。博物館は、すでに珍しい化石やデリケートな化石の正確なコピーを好きに印刷して配布することができる。学生たちは、どんな分子でも3D印刷して、じかに手で触れ、理解することができる。「3D印刷は、現実の模型を製作する能力を大衆化したのです」とOlsonは言う。

（翻訳：三枝小夜子）

Nicola Jonesは、バンクーバー（カナダ）近郊を拠点とするフリーランスの記者。

三次元印刷技術は、何をもたらすか

Print preview

2012年7月5日号 Vol. 487 (6)

活版印刷機は人類の歴史を変えた。人々の識字率を高め、旧弊たる世界に光明をもたらした。普及が始まった三次元 (3D) 印刷技術は、同様の社会変革をもたらすだろうか。

SF小説には“レプリケーター”が欠かれない。名前もわからないネバネバした材料をこの装置に投入すると、栄養たっぷりでも味も抜群の食事から高出力プラズマ連続体濃縮発電機まで、何でも作り出すことができるのだ。

現実世界でこのレプリケーターにあたるのが三次元印刷機で、分子模型から希少な化石まで、どんなものでも大量複製できる。ごく最近まで、三次元印刷はきわめて高コストで、時間がかかり、新奇な化学物質が使用されていた。しかし、本誌28ページの記事 (*Nature* 2012年7月5日号22ページ) で紹介されているように、今日の三次元印刷は、コストも少し下がり、所要時間の短縮も図られ、さまざまなインク (例えば浴室用シリコン系シーラント) も使えるようになっていく。

科学、製造業、建設業、経済、生活に対する三次元印刷の影響となると、予測するのは簡単ではない。おもしろそうな機械があってもそれを家庭で複製できるなら、店やインターネットで購入することはしないだろう。しかし、そんなことをすれば、知的財産がらみの紛争が起これば、想像にかたくない。同様の紛争のために、音楽産業は原形をとどめないほど変容し、出版業でも同じことが起ころうとしている。

ただし、二次元印刷であっても、安価なインクカートリッジが使えて、5分おきに問題を起こすことのない低価格プリ

ンターは、まだ発明されていない。

そもそも印刷がヨーロッパに到来したのは15世紀のことである。George Sampson は *The Concise Cambridge History of English Literature* (Cambridge University Press, 1941) の中で、「頑固な中世精神の外殻を打ちつけるハンマーの音が鳴り響き、それによって、旧世界はばらばらになっていった」と記した。

ヨハネス・グーテンベルクが初めて印刷した聖書は1455年にドイツのマインツで出版された。「印刷の到来は、15世紀で最も重要な出来事である。なぜなら、ペンが剣よりも強いと同様に、印刷機はペンよりも強いからだ」とSampsonは記した。ヨーロッパで印刷された初期の書物はラテン語で書かれていた。これに対して、1476年にイングランド初の印刷所を開設したWilliam Caxtonは、英語で書かれた書物の印刷を始めた。その多くは、彼自身が英語に翻訳し、学問的序文を書き加えたものだった。

その後まもなく、Caxtonの印刷所には、自らの著作を書物という劇的な媒体で出版しようと、数多くの文筆家が列をなした。「いくつかの歴史書の印刷を終え、偉大な征服者や諸侯による歴史的な業績や現在の成果を伝える出版を構想しているとき、イングランドの貴族や高貴な人々が印刷所を訪れてきて、何度も印刷出版を求めようになった」。Caxtonは1485年版のトマス・マロリーの『アーサー王の死』の序文で、こう記した。こ

うした初期の書物は特注品であり、その流通量は過去に発行された手写本よりは少し多い、という程度だった。

その後のことは、歴史が物語っている。印刷は、識字能力の向上に貢献し、英語に計り知れない影響を与えた。印刷が登場するまで、英語は、相互にほとんど理解不能な方言の集合体であって、文筆家は、話し言葉をそのまま文章にしていた。

現代の読者がジェフリー・チョーサーの14世紀の小説『カンタベリー物語』をさほどの苦勞を感じずに読めるのは、現代英語がロンドンの方言を起源としており、チョーサーがロンドンで活躍していたからにすぎない。『ガウエイン卿と緑の騎士』は、チョーサーと同時代の無名の作家によって書かれたが、イングランド北西部の作家だったため、チョーサーも頭を悩ませたであろうし、現代の読者にとっては、それ以上に難解な著作となっている。それでも、印刷のおかげで、現代の書き言葉の英語は、17世紀までにほぼ標準化された。

Caxtonの二次元印刷機は、我々が使う印刷機と同様に、おそらく技術的問題や機械的問題に悩まされたと思われる。それでも、印刷が社会、経済と言語に与えた影響は、重大かつ劇的なものだった。果たして、三次元印刷は、こうした大革命をもう一度引き起こすことになるのだろうか。

■ (翻訳：菊川 要)

内部告発者の保護強化のための法整備を急げ

Secret disservice

2012年7月26日号 Vol. 487 (405)

政府機関の職員監視制度による内部告発者の権利侵害は許されない。
ところが、米国食品医薬品局がそのような権利侵害をしたとして告訴されている。

米国食品医薬品局 (FDA) が、局内の職員を秘密裏に監視していたことが発覚した。この監視活動によって得られた約8万ページの文書が、皮肉にも、インターネット上に流出したことが発覚のきっかけだ。

FDAは「5人の科学者職員が、FDAによって承認され、あるいは承認過程にあった乳がんと大腸がんの画像診断装置の安全性に対する懸念を公表した」という疑いを持ち、監視ソフトを用いて、この5人の科学者の通信内容を収集した (*Nature* 2012年7月26日号418ページ参照)。結果、そのうちの4人が失職するに至った。

この監視活動は、2010年の春に始まり、政府から科学者職員に支給されたパソコンによる通信内容がすべて収集され、弁護士との通信、科学者職員相互の通信、少なくとも1人の連邦議会議員、そのほか、議会の職員、マスコミとの通信内容まで把握されていた。この監視活動によって、21人の関係者のリストが作成され、その中には、別の4人の科学者職員も含まれていた。

これらの科学者職員は、政府を相手取って訴訟を起こした。訴訟記録によれば、FDAの監視活動では、科学者のプライベートな時間に私的なネットワーク上で私有のパソコンを用いて私的な電子メールアドレスに送受信された私的な電子メールまで、収集対象になったとされている。この事件の調査にあたっている共和党のCharles Grassley上院議員

(アイオワ州選出) は、監視活動全体が、FDA法務部長の許可の下で行われたと話している。

これについてFDAは、局内の職員が法的許可を得ずに商業的機密情報を公表することは、連邦食品・医薬品・化粧品法違反だと指摘しており、この点は正しい。またFDAは、「少人数のFDA職員が……固有情報の無許可開示を行った可能性を示唆する証拠を得ていた」と付言している。そして、「可能ならば、無許可開示を行った者を特定し、それ以外にも無許可開示がなかったかどうかを明らかにすることだけが目的だった」と表明した。

FDAの言い分を十分に聞いてくれるのは裁判所だけであろう。現代社会では、監視ソフトを使えば、キーワードによる通信内容の収集ができるため、FDAの監視活動の対象範囲は、息をのむほど広く侵害的だといえる。訴訟記録によれば、この監視活動で、秘密保持特権が認められる科学者とその弁護士との通信内容、この事件で科学者職員が政府の特別法務官室 (内部告発者の告発を調査する役割を担う) に対して行った正式な告発、そして司法省とFDAの上位官庁である保健社会福祉省 (DHHS) の監察長官との通信内容までが収集されていた。DHHSの監察長官は、無駄、不正行為、権力乱用の一掃を通じて、DHHSの各制度の品位を保つことを任務としている。

気がかりなのは、DHHS監察長官が一貫した決定を繰り返したのに、それをFDAが無視した点だ。FDAは、2010年

の5月中旬に疑惑の科学者職員の調査を監察長官に要請したが、その際、監察長官は、FDAが犯罪行為を示す証拠を有していないという決定をすばやく下し、何らの措置も発動しなかった。

訴訟記録によれば、FDAが主張する科学者職員による情報開示は、内部告発者の行為として保護されていることが、監察長官の決定において指摘されていた。その時点で、FDAは、科学者職員のパソコンのうちの1台しか監視していなかった。その後も監視は中止されず、数週間後には、他の4人の科学者のパソコンにもスパイウェアが導入され、監察長官は、FDAから再調査を要請された。監察長官は、再び措置の発動を留保し、その際に司法省が不起訴とした事実も指摘したことが訴訟記録に示されている。特別法務官室はFDAの行動に危機感を抱き、2012年6月、政府の全部署に対して、その監視活動によって内部告発者の権利を踏みにじってはならない点を強調する警告を発した。

今回の事件によって、公務員の悪行を内部告発しようとする者が不安を感じるのは確かだ。そうした不安感を解消するためにすばやく行えることが1つある。この5月、米国上院は、科学者を含む連邦政府職員による内部告発に対して、その法的保護を著しく高めるための法案を満場一致で可決した。法制化には下院での可決が必要であり、下院は迅速に動くべきである。

■ (翻訳: 菊川 要)



Volume 488
Number 7409
2012年8月2日号

根に棲むものたち：植物の根のマイクロバイオームに含まれる細菌群集の構造は、土壌の種類と宿主の遺伝子に左右される

ROOT DWELLERS: Soil type and host genes determine bacterial communities in the plant root microbiome

陸生植物の健全な生育には、その根に定着する土壌微生物との関係が重要だが、植物の根がどのように共生菌を選択しているのかはわかっていない。こうしたマイクロバイオームの理解が進めば、植物の生長や病原体感受性の制御、特に持続可能な農業管理に役立つだろう。今回、2つの研究グループがそれぞれ、シロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) の根の微生物相の特徴を明らかにした。研究は、2つの大陸で5種類の異なる土壌について行われたが、両グループの結論はよく似たものだった。それは、根の2つの区画（根のすぐ近くを取り巻く根圏と、根の内側の内生区画）に生育する細菌群集に最も大きな影響を与えるのは土壌の種類であったが、それに次いで宿主植物の遺伝子型が影響を与えているというものであった。天然の土壌で生育するシロイヌナズナには、アクチノバクテリア類、プロテオバクテリア類、バクテロイデス類、クロロフレクサス類が選択的に定着している。しかし、管理環境条件下で育ったものであっても、その根の土壌細菌選択性は、天然環境中で育った植物のそれを模倣するのだ。この発見は、今後の研究に大いに役立つだろう。

遺伝：髄芽腫ゲノムを詳細に調べる

The medulloblastoma genome dissected

髄芽腫は小児で最も多く見られる悪性脳腫瘍であり、現在、生物学的な性質などの違いによって4つのサブグループに分類されている。今週号の4つの論文では、全ゲノム塩基配列解読などの解読技術を用いて、髄芽腫の遺伝学的性質やゲノミクスについての詳細な全体像が報告された。中でも注目すべき成果は、これまで髄芽腫との関連が示されていなかった遺伝子に頻発している変異や、サブグループごとの臨床転帰に関連する有意な遺伝学的差異が見つかったことである。また、髄芽腫サブグループ3ではTGF- β シグナル伝達系で、サブグループ4ではNF- κ B シグナル伝達系で、遺伝子のコピー数異常が高頻度に見られることもわかった。標的にできる体細胞コピー数変化の発見によって、治療に道筋が見えてきた。

気候：東南極における亜熱帯期間

A subtropical spell in East Antarctica

始新世初期(約5500万～4800万年前)、大気中の二酸化炭素濃度はおそらく現代の3倍だった。緯度方向の温度勾配はおおむね小さく、地球の両極は現在よりもはるかに温暖だったと考えられている。近い将来、地球の二酸化炭素濃度は高くなると予測されており、この時期の気候については大いに関心が持たれている。しかし、重要な南極の気候については、まだほとんどわかっていない。今回、始新世初期における温室期の最も温暖な時期からその後の寒冷期にわたる、南極の陸域の気候と植生動態の記録が報告された。このデータから、当時、東南極では熱帯に似た生態系が維持されており、冬の気温が10℃以上に達していたことが明らかになった。この結果は、今後の地球の生態系の応答を理解するための手がかりになりそうだ。

医学：アルツハイマー病に対する「自然」防御

'Natural' protection against Alzheimer's disease

アルツハイマー病の特徴は、脳内にアミロイド斑が存在することである。アミロイド斑は、アミロイド β 前駆体タンパク質 (APP) が切断されて形成される。K. Stefánsson のグループは今回、アイスランド人約2000例のゲノムのスクリーニングを行い、その結果、アルツハイマー病の症状の見られない高齢者には、APP 遺伝子のコード領域に変異が生じており、この変異がアルツハイマー病や認知機能低下に対して強力な保護作用を示すことを見いだした。この変異は、APP のアスパルチルプロテアーゼの β 部位に隣接しており、*in vitro* でアミロイド形成ペプチドの産生を約40%低減させる。つまり、APP の β 部位での切断を低減すればアルツハイマー病を防ぐことができるという仮説の裏付けとなるわけだ。またこの結果は、高齢者のアルツハイマー病と認知機能低下が機構的に関連している可能性も示唆している。

医学：筋ジストロフィーのアンチセンス治療

A muscular dystrophy rescued by antisense therapy

遺伝性神経筋疾患では一般的な筋強直性ジストロフィー1型は、主に骨格筋で発現するプロテインキナーゼをコードする *DMPK* 遺伝子に変異が生じ、その転写物が毒性のRNA分子として核内に滞留することで生じるRNA機能獲得性疾患である。C. Thornton たちは今回、骨格筋でこの毒性RNAを迅速に発現低下させる「アンチセンスオリゴヌクレオチド (ASO)」を用いた治療によって、マウスモデルだが、この疾患の身体的、組織学的徴候の軽減に成功したことを報告した。この効果は、治療中止後1年間持続した。別の核内滞留RNAもASOに感受性を示すことから、この戦略はほかのRNA機能獲得性疾患の治療にも使える可能性がある。



Volume 488
Number 7410
2012年8月9日号



群衆の中の1つの顔：トゥルカナ湖の化石から初期ヒト属の種間多様性が明らかになる

A FACE IN THE CROWD: Lake Turkana fossils reveal diversity among early Homo species

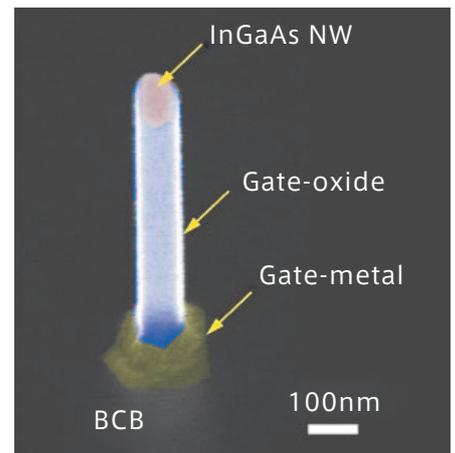
トゥルカナ湖（ケニア）の東岸に位置するクービ・フォラで、ヒト属（*Homo*）の化石が新たに発見された。発見されたのは、下顎、下顎の断片および顔面の3点で、保存状態はきわめて良好であった。これは、1973年にRichard Leakeyによってネイチャーに最初に報告されたヒト属頭蓋骨 KNM-ER 1470 の謎を明快に説明し、ヒト属の初期放散に関する理解を大きく向上させるものとなりそうだ。この化石は、195万～178万年前には、ホモ・エレクトゥスのほかに少なくとも2つのヒト属種が更新世初期のアフリカ東部に同時に存在したという説を、大筋で裏付ける証拠となる。表紙は、下顎の写真からの復元画像と KNM-ER 1470 のデジタル画像を組み合わせたもので、両者は同じ種に属すると考えられる。

ほどの能力を持ち、ほかの微量気体も酸化できる可能性がある。この化合物は、安定化されたクリーギー中間体（2つのフリーラジカル部位を持つカルボニルオキシドまたはその誘導体）と考えられ、大気の活性を高め、硫酸の生成、ひいては大気中エアロゾルの形成に寄与しているようだ。また、この化合物の化学反応は、森林から放出される揮発性有機化合物と密接に関連していることが示唆された。

電子工学：コア・マルチシェル型高速トランジスタ

Fast multishell alloy transistors

マイクロエレクトロニクス産業では、トランジスタの高性能化・微細化が進んでおり、そうした中、最近では三次元ゲート構造のトランジスタが採用されつつある。また、トランジスタを高性能化するもう1つの方法として、シリコンより高い電子移動度を持つ半導体材料を用いることが挙げられるが、このような材料は作製が非常に困難である。富岡克広^{とみおかかつひろ}（北海道大学）たちは今回、この2つの方法を組み合わせて、構造面と材料面の両方からトランジスタの高性能化を試みた。つまり、6面すべてをゲートで囲んだ六角柱状のコア・マルチシェル型 InGaAs（インジウム・ガリウム・ヒ素）系垂直ナノワイヤを、シリコン基板上に正確に成長させたのだ。完成したデバイスは、良好なオンオフスイッチング特性と高速動作が確認され、優れたトランジスタ性能が実証された。



地球：地下水利用の収支を合わせる

Striking a balance on groundwater usage

地下水は、世界中で農業や生活に利用されており、自然回復によって補うことができる速度よりも早く汲み出されていると考えられる。しかし、真の水収支を調べる方法がなく、よくわかっていなかった。今回、T. Gleeson たちは「地下水フットプリント」という新しい概念を用いて、自然回復速度と生態系を維持するために必要な供給量とを比較した。「地下水フットプリント」とは、地下水利用と地下水に依存する生態系への供給を維持するのに必要な面積のことである。その結果、全球では地下水フットプリントは帯水層（地下水の貯留層）面積を約3.5倍上回っていることが明らかになったり、特に、アジアと北米の帯水層において過剰開発が集中していた。この概念は、NASAのGRACE衛星によって明らかになった全球地下水枯渇データセットの分析に役立つ可能性がある。

物理：地球規模の量子ネットワークに向けて

Towards a global quantum network

光が野外を自由に伝搬する「自由空間チャンネル」は、量子通信の点で光ファイ

バーよりも有利である。それは、光子損失が少なく、デコヒーレンスも少ないためである。今回 J. Yin たちは、多光子エンタングルメントを使って、97kmの1リンク自由空間チャンネルにわたる独立したキュービットの量子テレポーテーションを報告した。また、2リンクチャンネルを使って、101.8kmにわたるエンタングルメント配送も実証した。この結果は、地球規模の量子ネットワーク実現への重要な一歩である。またさらに、この実験で開発された高周波と高精度な捕捉・指向・追尾の技術は、将来、衛星を使った量子通信や量子論の基礎の大規模検証に利用できそうだ。

気候：大気中の知られていなかったもう1つの酸化物質

Unknown 'extra' atmospheric oxidizing agent

オゾン、ヒドロキシルラジカル、硝酸塩は、強力な酸化作用を持ち、大気から汚染物質などの微量気体を取り除く主要な化学物質と考えられている。今回、フィンランドの森林領域での大気観測と室内実験および理論的考察を組み合わせた結果、酸化作用を持つこれまで知られていなかった化合物がもう1つ同定された。この化合物は、二酸化硫黄を酸化させる



Volume 488
Number 7411
2012年8月16日号



レーザーの再来：机の上の「電波レーザー」の使い道

RETURN OF THE MASER: Bench-top 'radio laser' seeks practical applications

レーザーは、マイクロ波周波数領域でのレーザーの先輩であり、今は広く普及しているレーザーも、かつては「光レーザー」と呼ばれていた。レーザーがレーザーに比べ普及しなかった主な理由は、扱いの不便さである。その1つが、レーザーを発生させるのに真空や低温という条件が必要な場合が多いことだ。しかし、こうした障害を克服できれば、技術革新につながるかもしれない。例えば、分子生物学から電波天文学までの多様な科学研究分野において、非常に高感度の測定が可能になるかもしれないし、レーザーが発展してきたように、想像もしなかった用途が出てくるかもしれない。今回、M. Oxborrow、J. Breeze および N. Alford は、有機分子結晶を使って室温で動作する固体レーザーを開発した。これは、科学技術研究手段としてのレーザーの可能性を高めるものとなりそうだ。表紙は、サファイアリング内部のレーザー結晶。

医学：新しい種類の抗がん治療標的

A new type of anticancer target

今回、がんゲノムの「コラテラル・ダメージ（巻き添え欠損）」が、治療戦略の基盤として使える可能性が提唱された。R. DePinho たちは、機能の重複する2個の遺伝子の一方が、がんの遺伝的欠損部分に含まれるパッセンジャー遺伝子（腫瘍抑制因子遺伝子に隣接していて巻き添えで欠損した遺伝子）となった場合、もう一方の遺伝子がコードするタンパク質を薬理的に阻害すると、がん細胞選択的に脆弱性が生じるだろうと考えた。そこで、細胞代謝などの「ハウスキーピング」機能について、重複する2個の遺伝子の組み合わせをいくつか検討したところ、解糖系酵素の ENO1 と ENO2 でこの考えが実証された。ENO1 遺伝子は、染色体 1p36 にあり、神経膠芽腫でホモ接合性欠失になっている場合が多い。実際、1p36 欠失のある神経膠芽腫細胞は、ENO2 のノックダウンあるいは小分子エノラーゼ阻害剤の作用を受けやすかったのだ。また、こうしたハウスキーピング遺伝子のほかの組み合わせについて、既存のがんゲノミクス・データセットを解析したところ、高頻度に欠失している腫瘍抑制因子遺伝子の近傍に存在している

ものがさらに1つ見つかった。この概念は広く一般に適用できる可能性があり、新しい治療戦略になると考えられる。

物理：核スピンを使う量子コンピューティング

Nuclear spins for quantum computing

核スピンを量子コンピューターの能動素子として利用できないだろうか。核スピンは、電子スピンとは異なり環境から十分に分離されているので、安定な量子コヒーレンスを実現するのに好都合なのだ。しかし、核スピンのアドレス指定と操作という難題が立ちだかっている。今回 R. Vincent たちの研究により、核スピン利用の実現に一步近づいた。1個の単分子磁石内に組み込まれた1個の金属原子の長寿命核スピン状態を電子的に読み出せることを示したのである。また著者たちは、数十秒という長い核スピン寿命を観測し、スピン状態ダイナミクスの決定も行うことができた。

発生：エピジェネティックな幹細胞プログラミング

Epigenetic stem-cell programming

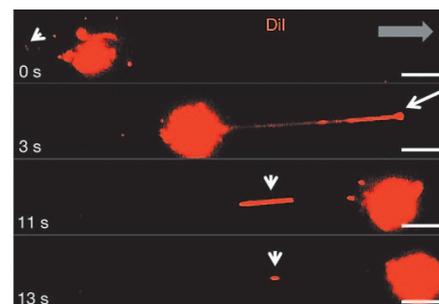
ゲノムのエピジェネティックな変化は、細胞の再プログラミングの重要な特性の1

つだが、この過程でクロマチンや DNA の修飾を担う因子についてはあまりわかっていない。今回 J. Hanna たちは、ヒストン H3K27 の脱メチル化酵素 Utx が、体細胞の再プログラミング開始に非常に重要な制御因子であることを報告した。Utx を欠く細胞は、既知の「転写因子カクテル」による再プログラミングができず、また、キメラマウスでの生殖細胞系列伝達に寄与することができない。つまり Utx は、*in vitro* と *in vivo* で、体細胞と生殖系列の両方の再プログラミングに必須と言える。この研究により、*in vitro* での iPS 細胞作製の機構と、初期生殖系列の発生制御とのつながりが浮かび上がってきた。

生物物理：好中球がローリングし続ける秘訣

What keeps neutrophils on a roll?

炎症が起きると、白血球の一種である好中球は、炎症部位に向かって血管内皮細胞上を転がり（ローリング）、完全に停止した後に血管内皮細胞間をすり抜けて組織に入り込む。好中球はほかの白血球と異なり、高い粘着力の下でもローリングできる能力を持つが、その詳しい仕組みは完全には解明されていない。今回、K. Ley たちは、ローリングする好中球の前方に、古代の投石器に似た「スリング」状の構造が出現することを発見した。膜の一部から作られた細長いスリングは、先端部を基質に接着させ、好中球はそれを引き綱として前方へ回転していく。血管内皮細胞の P-セレクトリンに接着する分子 PSGL-1 をとこところに発現しているため、一段ずつ内皮からうまく剥がれる仕組みとなっている。



P. SUNDE ET AL.



Volume 488
Number 7412
2012年8月23日号



父親の年齢：子どもが持つ変異と疾病リスクは受胎時の父親の年齢が高くなるにつれて上昇する

FATHER FIGURES: Children's mutation and disease risk increases with father's age at conception

de novo 変異は、進化における多様性の供給源としてばかりでなく、疾患に直接的な影響を及ぼす点でも重要だ。デコード・ジェネティクス社の研究者たちは、アイスランド人の両親と子の3人を1組とした78組について全ゲノム塩基配列解読を行い、ヒトの変異率を調べた。その結果、一塩基多型の変異率に見られる多様性は、子の受胎時の父親の年齢に支配されることを発見した。受胎時の父親の年齢が1歳増えるごとに、変異の数はおよそ2個増加する。ランダムな変動の影響を除くと、*de novo* 変異数の変動のほとんどは、父親の年齢による影響と推定できたのだ。男性が子を持つ年齢には人口動態の推移が影響を与えるが、今回の結果は、こうした推移が、統合失調症や自閉症のような疾患のリスクにかなりの影響を与えている可能性を示唆している。

細胞の機能的階層構造の頂点に位置するように見え、腫瘍の増殖を維持する能力を持つ細胞、すなわちがん幹細胞に相当する可能性がある。この細胞群と、もっと増殖性の高い大多数のがん細胞の両方を標的とすれば、治療転帰の改善につながるかもしれない。

植物：低リン酸土壌に耐えるイネ

Rice tolerant to low-phosphate soils

イネは、アジアの多くの地域で主要な作物である。しかしこれらの地域では、リン肥料が十分手に入らないことや、農業用水を降雨のみに依存する天水栽培法のため、コメの収量が低い。今回 S. Heuer たちは、*PSTOL1* (phosphorus-starvation tolerance 1) という、リン欠乏に対する耐性をイネに与える遺伝子の特徴を解析した。この遺伝子は、在来イネ品種の Kasalath には存在するが、イネの参照ゲノムおよびそのほかの近代のリン欠乏非耐性品種には存在しない。*PSTOL1* は、根の初期発育の促進因子として作用し、植物体に対しリンをはじめとする栄養素の取り込みを増進することがわかった。この遺伝子を地域に適応したイネ品種に導入すれば、低リン条件下での生産性が向上すると考えられる。

地球：ヒマラヤ山脈の氷河質量損失の再計算

Recalculating glacier mass loss in the Himalayas

アジアの高山地域における氷河の変化は、水資源と海水準に連鎖的にその影響を及ぼすことがあるが、氷の質量の変化を正確に測定することは難しい。以前、氷で覆われた地域の質量損失を重力測定を用いて調べた結果が報告され、アジアの高山地域が21世紀初頭にはほぼ平衡状態にあったことが示唆された。今回、A. Käb たちは、人工衛星による高度測定を用いてより詳細な解析結果を提示した。データが不足しているヒンドゥークシュ・カラコルム・ヒマラヤ地域で、小さいものの統計的に識別可能な質量損失があることを示したのだ。ヒンドゥークシュ・ヒマラヤ地域の大部分に大きな質量損失が見られるが、カラコルム地域の質量損失がかなり小さいため、氷河質量収支は部分的に相殺されていた。

物理：クーロンドラッグの損失をカットする

Cutting the losses in Coulomb drag
1つの導体を流れる電子流は、クーロン相互作用と呼ばれる電子間の斥力によって、空間的に離れたもう1つの導体に

電子流を生じさせることができる。これを「ドラッグ電流」と言い、通常小さいが、特定の場合には駆動電流と同じ大きさになりうると考えられている。今回、2層の二次元電子系において「完全ドラッグ」が実証された。この系は、電子層が同数の正孔が存在する別の層と結合することで、共同して励起子凝縮体を形成することができる。第一の層の電子流が、第二の層に反対符号で大きさの等しい電流を駆動できることが示された。

医学：がん細胞の階層

A cancer-cell hierarchy

今回 L. Parada たちは、神経膠芽腫のマウスモデルで、この腫瘍が生じるもとになる神経幹細胞で選択的に発現する緑色蛍光タンパク質 (GFP) レポータータンパク質を使って、内因的環境下でのがん細胞の追跡を試みた。彼らは、このレポーターによって、大多数の神経膠腫細胞に比べると比較的増殖性の低い少数の腫瘍細胞群を標識した。この GFP⁺ 細胞は、細胞傷害性の抗がん剤テモゾロミド投与後に腫瘍の再増殖を引き起こし、また、この細胞の選択的除去とテモゾロミド投与とを組み合わせると、腫瘍の増殖を効果的に阻止できる。この細胞群は、がん

細胞：テロメアが無制限に伸びないようにする仕組み

How telomeres are kept in check

直鎖状の染色体が複製する際には、末端にあるテロメアと呼ばれる部分が少し短くなる。テロメラーゼという酵素は特殊なポリメラーゼで、細胞周期のS期にテロメアの反復DNA配列上で働き、短くなったテロメアをほぼ60ヌクレオチド分伸長する。J. Lingner たちは、三量体のCST複合体(テロメアと相互作用するタンパク質)が、S期の末期にテロメアのプライマーやPOT1-TPP1複合体に結合して、テロメラーゼ活性を阻害することを発見した。個々のテロメアは1細胞周期ごとに1回だけテロメラーゼによって伸長されるが、この機構のおかげでテロメアが無制限に伸びることはないわけだ。



Volume 488
Number 7413
2012年8月30日号



歩法を調節する遺伝子：単一の変異がウマの神経回路を 改変し、歩法のレパートリーに「ペース」を加えた

GAIT KEEPER: A single mutation reshapes horses' neural circuits to add pacing to their repertoire

ウマはすべて、常歩 (walk)、速歩 (斜対歩を指す、trot)、駢歩 (canter)、襲歩 (gallop) ができる。しかし一部のウマ、特に繋駕速歩競争に用いられるアメリカンスタンダードブレッドや全地形対応のアイスランドホースには、一般的な歩法に加え「ペース (側対歩、pace)」といった特殊な歩法が可能なのがある。今回、アイスランドホースの全ゲノム関連解析によって、DMRT3 遺伝子の中途終止コドンと「ペース」を行う能力との間に連関が見いだされた。マウスでの実験から、Dmrt3 は、脊椎動物で歩幅を制御する脊髄回路の形成に関係するニューロン群で発現していることがわかったのだ。この変異は、家畜ウマの多様化に大きな影響を及ぼしており、いくつかの品種の変わった歩法にはこの変異が必要なようだ。表紙は、Landsmót 国際コンペティションで競技する純血種のアイスランドホース。

物理：X線と光の混合を実現

Now X rays and light do mix

光と物質の相互作用は科学分野の中心を担っている。しかし、光が物質を変化させる微視的な詳細は観測が難しく、ほとんど解明されていない。X線と光波を混合した「X線散乱過程」を使えば観測できることが約半世紀前に提案されていたが、当時の技術では実現できなかった。今回 E. Glover たちが、LCLS (X線自由電子レーザー) を用いた研究を行い、ダイヤモンド中のX線と光の混合 (すなわち和周波数発生) を報告した。原子スケールの観測に十分な強度のX線が利用可能になったことで、今後は化学結合の形成や破壊を直接可視化できるだろう。

気候：炭素循環の歴史と気候変動

A history of carbon cycles and climate change

炭酸塩補償深度は、炭酸塩が溶存する海洋の深さのことであり、大気中に存在する二酸化炭素の量を反映し、地質学的な時間スケールでの気候の手がかりとなる。今回、赤道太平洋における炭酸塩補償深度を過去 5300 万年間にわたって詳細に再構築された。その記録から、新生代の 5600 万～5300 万年前で

は 3.0～3.5km だった補償深度が現在では 4.6km と深くなっており、海洋の寒冷化を示していた。また、約 4600 万～3400 万年前の炭酸塩補償深度に観測された急激な変動は、風化作用と海底へ供給される有機炭素の種類の変化によって、ある程度は説明できる可能性がある。

免疫：T細胞は肺を通して脳へと侵入する

T-cell access to the brain via the lungs

免疫細胞がどのようにして脳に侵入するのかという問題は、中枢神経系 (CNS) の生理学および病理学的過程の解明に非常に重要である。今回、病気を引き起こすエフェクター T 細胞の脳への侵入を可能にする機序が報告された。実験的自己免疫性脳脊髄炎 (EAE) のラット養子細胞移入モデルで、脳炎誘発性の T 細胞は肺に一時的に定着した後に CNS に集積する。この T 細胞は、CNS まで移動する間に遺伝子発現プロファイルと機能的性質を再プログラム化して、最終的に血液脳関門を越えられるようになる。肺は、外部環境と直接接触しており、宿主防御に関係する免疫細胞にとっては理にかなった移行先である。おそらくは、自己免疫性細胞が発生する際のニッチにもなっていると考えられる。

微生物学：低用量の抗生物質で体重が増える仕組み

How low-dose antibiotics add body mass

家畜の体重を増加させる目的で、低用量の抗生物質投与が何十年も前から行われている。しかし、体重が増加する仕組みはよくわかっていない。今回、幼若マウスに治療量以下の抗生物質を投与すると、腸内微生物群集の構成が変化し、微生物の代謝経路の活性が変化して短鎖脂肪酸が産生されることで、体脂肪量が増加することが明らかになった。この結果は、正常な代謝活性の維持には特定の微生物群が重要なことを強調するものだ。

再生医学：iPS細胞作りの第一段階

First steps in iPS cell formation

人工多能性幹 (iPS) 細胞を生じる際の初期のエピジェネティックな機構はわかっていない。今回 A. Abeliovich たちは、細胞の再プログラム化を行ってから 4 日目までに、2つの DNA 修飾酵素 Parp1 と Tet2 が、Nanog や Esrrb などの内在性の多能性遺伝子座へ動員され、その結果、修飾されたシトシン塩基 5mC と 5hmC の局所的な蓄積につながることを明らかにした。Parp1 と Tet2 は相補的に働き、転写活性と相関する 5hmC/5mC 比を調節している。これらの知見は、5hmC がエピジェネティックな再プログラム化においてさらに別の役割を持つことを示唆している。

||||||| ネイチャーからのご案内 |||

nature video

Web: www.youtube.com/NatureVideoChannel

モバイル:



携帯電話で Nature Video チャンネルの科学関連動画を見ることができます。(一部の機種を除く)

nature podcast

Web: www.nature.com/nature/podcast

モバイル:



Nature に掲載された研究成果をポッドキャストでチェックできます。(英語; iPhone™のみ対応)

敵に突撃して爆破し、皆を守る。映画でよくあるシーンです。こうした利他的行動は、人間だけのものではありません。アリやハチ、シロアリなどの社会性昆虫も、自分よりも社会の利益を優先し、自己を犠牲にすることで巣を守ることもしばしばです。今回は、高度に進化した自爆行為で敵を撃破するシロアリのお話です。ただし、このシロアリで自爆するのは、年取った働きアリ。採餌や育児に貢献できなくなった彼らは、自爆で敵を攻撃して巣を守るのです。ちょっと切ないお話ですね。

nature news

語数：561 words 分野：昆虫行動学・昆虫生態学・行動生態学

Published online 26 July 2012 | doi:10.1038/nature.2012.11074

Termites explode to defend their colonies

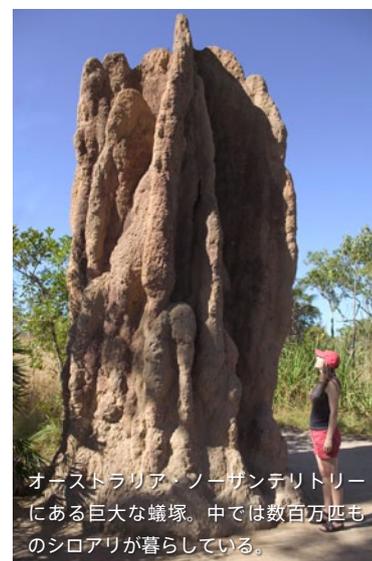
Older workers use chemical reaction to increase toxicity of 'explosive backpacks'.

Zoe Cormier

1. A species of termite found in the **rainforests** of French Guiana takes **altruism** seriously: aged workers grow sacks of toxic blue liquid that they explode onto their enemies in an act of suicidal self-sacrifice to help their colonies (see video: <http://nature.asia/ND1210en>).
2. The "explosive backpacks" of *Neocapritermes taracua*, described in *Science* today¹, grow throughout the lifetimes of the worker termites, filling with blue crystals **secreted** by a pair of **glands** on the insects' **abdomens**. Older workers carry the largest and most toxic backpacks. Those individuals also, not **coincidentally**, are the least able to **forage** and **tend for** the colony: their **mandibles** become **dull** and **worn** as the termites age, because they cannot be sharpened by **moulting**.
3. "Older individuals are not as effective at foraging and nest maintenance as younger workers," says Robert Hanus, who studies termite biology at the Institute of Organic Chemistry and Biochemistry in Prague, and led the study.
4. But when the workers are attacked, he says, "they can provide another service to the colony. It **makes** perfect **sense** to me because theories predict that social insects should perform low-risk, **laborious** tasks such as housekeeping in the first part of their life and risky tasks such as defence as they age."
5. Self-destructive behaviour is common among the **sterile** worker **castes** of **eusocial** insects such as termites and honeybees. The workers **forego** reproduction, so they **are free to** evolve **altruistic behaviours** that benefit the colony as a whole rather than themselves as individuals. Defensive **suicidal rupturing** — termed **autothysis** — has evolved independently in a number of termite species, suggesting that the behaviour is highly adaptive.
6. Looking at defence mechanisms in other species of termite shows how the explosive backpacks might have evolved, says Hanus.
7. Many termites fight off enemies by simply **defecating onto** them, sometimes **with** remarkable **accuracy from a distance**.
8. Other species **go a step further**, by actively squeezing their own **abdominal muscles** until a specialized thin portion of abdominal wall explodes **showering** the enemy **with excrement**. In the next stage of suicidal rupturing, some species of termites produce a toxic chemical that showers the enemy when the abdomen ruptures.
9. *N. taracua* has added a yet another step, by using a reaction to make its defensive chemical even more toxic. The **pouches** holding the **copper**-containing blue crystals are located near to the **salivary glands**. When the termites are attacked, their enemies bites cause these **swollen** pouches burst and the crystals mix with salivary secretions, producing the toxic blue liquid.
10. "It is the two-component chemistry that underlies the exceptional toxicity in this species," says Hanus.
11. His team **dosed** members of an enemy termite species with blue liquid from the older workers, white salivary gland liquid from younger workers, white liquid that had been treated with blue crystals, or liquid from the older workers with the blue crystal removed. The blue liquid from older workers proved the most toxic, followed by the white liquid that had been treated with blue crystals.
12. "The **sophistication** of this is remarkable: we have never seen an external pouch like this before that adds one **substance** that needs to be mixed with another substance," says Olav Rueppell, an evolutionary biologist from the University of North Carolina Greensboro, who studies social evolution in honeybees. "This kind of **adaptation** would not evolve **in a solitary context**; this shows the power of eusociality, and why these insects are so successful."

Reference

1. Šobotník, J. et al. *Science* **337**, 436 (2012).



オーストラリア・ノーザンテリトリーにある巨大な蟻塚。中では数百万匹ものシロアリが暮らしている。

SUZY BENNETT/ALAMY

TOPICS

社会性昆虫 (social insects)

さまざまな役割を分業する階級制によって維持されている集団で生活する昆虫。ハチやアリの仲間、シロアリ、アブラムシやアザミウマの一部など。コロニーには、生殖階級(女王や王)、労働階級(育児、採餌などをするワーカー)、防衛階級(敵と戦う兵隊)などが存在している。こうした階級が協同で集団を支えており、個体は集団を離れて生存できない。

ハチ目(ハチやアリ)の社会は、繁殖期に外に飛び立った女王と雄が交尾する。女王は精子を蓄える器官を持ち、その後産卵

し続ける。受精卵からは雌が、未受精卵からは雄(数%しかいない)が生まれる。雌は成虫になると、ワーカーや兵隊となる。一方、生殖だけを行う雄は繁殖期に飛び立ち、交尾の後死ぬ。女王は生まれた雌の中で、栄養状態のよいものになる(ミツバチの場合、ロイヤルゼリーを摂取した幼虫)。

シロアリ目の場合、雄と雌がペアとなり、王と女王になって営巣する。王と女王は交尾と産卵を繰り返す。雄と雌が生まれ、働きアリや兵隊アリになる。一部は羽を持った生殖虫になり、繁殖期に巣から出て行く。



女王バチは、卵を産み続ける。

ISTOCKPHOTO

SCIENCE KEY WORDS

タイトル **termite**: シロアリ

昆虫綱シロアリ目(等翅目) Isoptera に属する昆虫の総称。全種が真社会性昆虫。ゴキブリに近縁で、約 2600 種が知られる。腸内に共生するセルラーゼを分解する原生動物や細菌によって、木材や落ち葉を分解する。

タイトル **colony**: 個体群、コロニー

空間的に集合している同一種または複数種の生物の群落や群れ、あるいは細菌やカビ類、細胞などを培養したときに形成される細胞集団のこと。

リード **toxicity**: 毒性 **toxic** は形容詞。

1. **rainforest**: 熱帯雨林

1. **altruism**: 利他主義、利他的行動
下記 altruistic behaviour 参照。

2. **secrete**: 分泌する

細胞が代謝産物を細胞外へ排出することを分泌という。体液中に放出する内分泌(ホルモンなど)と、体外や体腔内に放出する外分泌(汗、消化液など)がある。

2. **gland**: 腺

分泌を行う細胞集団のこと。

2. **abdomen**: 腹部

2. **mandible**: 大あご

昆虫の口器にある、左右一対の器官。左右から食物を挟み込むようになっており、内側にぎざぎざの歯を持つ。昆虫の種類によって、大きく形態が異なる。

2. **moulting**: 脱皮

5. **sterile**: 不妊の

5. **caste**: カースト、階級

昆虫のカーストは、上からの命令なしで動き、個体は集団を離れて生存できない。

5. **eusocial**: 真社会性

不妊のカーストを持つ社会性生物のこと。

5. **altruistic behaviour**: 利他(的)行動

利他主義とは、自分よりも他者の利益や幸福を優先的に考えることをいい、利他的行動とは、自分がコスト(犠牲)を払うことで、他者に利益をもたらすような行動のことをいう。

5. **autothysis**: オートシシス

動物が、自分の体内の器官を破裂させて内部から毒液などを分泌し、敵から集団を守る自爆的な自己犠牲。社会性昆虫によく見られる。

7. **abdominal muscle**: 腹筋

8. **copper**: 銅

8. **salivary gland**: 唾液腺

唾液を分泌する腺。

10. **dose**: 投与する

11. **adaptation**: 適応

生物がある環境下で生息し生殖するのに都合がよいように、その形態、生理、生態などの形質が変化すること。

WORDS AND PHRASES

2. **coincidentally**: 「偶然に一致して」、「偶然に符合して」

2. **forage**: 「採餌する」、「餌探しをする」

2. **tend for**: 「~の世話をする」、「~の面倒をみる」

2. **dull**: 「鋭さを失う」、「鈍くなる」

2. **worn**: 「すり減る」、「摩耗する」

4. **make sense**: 「理にかなう」、「筋が通っている」

4. **laborious**: 「多くの時間と労力を要する」

5. **forego**: 「~をしないですます」

5. **be free to**: 「自由に~できる」

5. **suicidal**: 「自殺行為的な」

5. **rupture**: 「破裂する」、「爆発する」

6. **defecate onto**: 「~の上に糞をする」

6. **with accuracy**: 「正確に」

6. **from a distance**: 「遠くから」、「離れたところから」

7. **go a step further**: 「さらに一歩先に行く」、「さらに一段階進む」

7. **shower with**: 「~を浴びせる」

7. **excrement**: 「糞便」

8. **pouch**: 「嚢」

8. **swollen**: 「膨らんだ」

11. **sophistication**: 「高度さ」、「精巧さ」

11. **substance**: 「物質」

11. **in a ... context**: 「…の文脈の中で」、「…の状況で」

参考訳

自爆してコロニーを守る シロアリ

年長の働きアリは、2種類の化学物質を混ぜ合わせて反応させることにより、「爆発する背囊^{はいのう}」の毒性を強めている。

ゾーイ・コーミア



シロアリの一種 *Neocapritermes taracua* の老働きアリは（右上と右下）は、青い有毒な液体を含む背囊を持ち、敵めがけて破裂させる。頭部が黄色いシロアリは、兵隊アリ。

R. HANUS

1. フランス領ギアナの熱帯雨林に生息するシロアリの一種は、利他主義の思想をまじめにとらえている。このアリが年をとると、有毒な青い液体の入った囊が背中に形成されてくる。そして、アリがコロニーを守るために戦うときに、この囊が敵めがけて破裂する。年長の働きアリたちは、自殺行為的な自己犠牲という形でコロニーに貢献するのだ（動画参照：<http://nature.asia/ND1210en>）。
2. このシロアリ *Neocapritermes taracua* の「爆発する背囊」に関する論文が、本日、*Science* に掲載された¹。この囊は、働きアリが死ぬまで成長を続け、その中には、腹部にある一对の腺が分泌する青い色をした結晶が詰まっている。年をとった働きアリの背囊が、最も大きく、最も有毒だ。働きアリの大きさは、脱皮によって鋭さを取り戻すことがないので、年をとると鋭さを失い、すり減っていく。そのため、採餌とコロニーの世話をする能力が最も低いのも、年をとった働きアリということになる。能力が低下した個体が爆発する背囊を背負っているのは、決して偶然の符合ではない。
3. 「年をとった働きアリは、若い働きアリほど上手に餌探しや巣の手入れをすることができません」。こう話すのは、有機化学・生化学研究所（チェコ共和国プラハ）でシロアリの生物学を研究する Robert Hanus だ。彼は今回の研究のリーダーを務めた。
4. けれども、働きアリたちが攻撃を受けたとき、「年をとった働きアリは、別のやり方でコロニーに貢献することができるのです。これは非常に理にかなっていると思います。理論的に、社会性昆虫は、若いうちは巣の維持管理などのリスクが低くて手間のかかる作業に従事し、年をとってからは防衛のようなリスクの高い作業に従事すべきであることが予測されているからです」と Hanus は言う。
5. 自己破壊的行動は、シロアリやミツバチなどの真社会性昆虫における不妊の働きアリ階級で頻繁に見られる。働きアリは生殖をしないため、それぞれの個体ではなくコロニー全体に利益をもたらす利他的行動を進化させることができるのだ。防御のための自殺行為的な破裂「オートシーシス (autothysis)」が、いくつかのシロアリ種で独立に進化していることは、これが高度に適応的な行動であることを示唆している。
6. ほかのシロアリ種における防御機構を調べれば、爆発する背囊の進化過程が明らかになると Hanus は言う。多くのシロアリは、単に敵の上に排便することにより、敵を撃退する。その際、離れたところから、驚くべき正確さで敵を狙い撃ちすることもある。
7. より強力な手段を用いるシロアリ種では、自分の腹筋を激しく圧迫して、腹壁の特別に薄くなった部分を破裂させ、排泄物を敵に浴びせる。次の段階の自殺行為的な破裂として、有毒な化学物質を産生し、腹部の破裂によって、その化学物質を敵に浴びせるシロアリ種もいる。
8. さらにもう一段階強力なのが *N. taracua* で、ある化学反応を利用して、その防御用化学物質の毒性を強めている。このアリの唾液腺の近くに、銅を含む青い結晶の入った囊があり、攻撃を受けて敵に噛まれると、膨らんだ囊が破裂して、結晶と唾液が混ざって有毒な青い液体ができるのだ。
9. 「このシロアリ種が示す並外れた毒性の基礎にあるのが、2つの成分からなる、この化学反応なのです」と Hanus は言う。
10. 彼の研究チームは、*N. taracua* の年をとった働きアリから採取した青い液体、若い働きアリから採取した白い唾液腺液、青い結晶で処理した白い液体、年をとった働きアリから採取した液体から青い結晶を除去したもののいずれかを、*N. taracua* の敵であるシロアリ種に投与した。その結果、最も毒性が強いのは年をとった働きアリから採取した青い液体で、その次に強いのは青い結晶で処理した白い液体であることがわかった。
11. ミツバチの社会進化を研究するノースカロライナ大学グリーンズボロ校（米国）の進化生物学者 Olav Rueppell は、「これは非常に高度な機構です。別の物質と混ぜ合わせる必要のある物質を追加する外部囊なんて、これまでに見たことがありません。このシロアリが単独で生活する昆虫なら、この種の適応が進化することはなかったでしょう。この仕組みは、真社会性の力を示すものであり、このシロアリの繁栄の理由なのです」と言う。

(翻訳：菊川 要)

定期購読を
始めたいな!



Fujisan.co.jp
雑誌のオンライン書店

当社サイト、Fujisanなら
バックナンバーの購入、
定期購読も可能です。

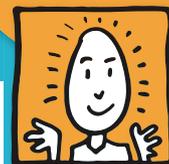
帰りに
買いたい!



全国の書店・生協

全国の書店、生協で
扱っています。

いつも
利用している
Amazonで!



amazon.co.jp

Amazonで
最新号の予約購読も

*詳しくは、www.naturejpn.com/bookstores をご覧ください。 AmazonおよびAmazonのロゴは、Amazon.com, Inc. またはその関連会社の商標です。

弊社のサイトからのお申し込みはこちらから

www.naturejpn.com/nd-sub

npg nature asia-pacific

EDITOR'S NOTE

今月の英語で Nature は、餌採りも育児もできなくなった老働きシロアリは、自爆行為で敵を攻撃して巣を守るというお話です。執筆していたのは8月。ふと思い浮かんだのが、太平洋戦争末期の特攻隊です。特攻隊は10代、20代の若い人が行ったもの。何とも言えない戦術です。もう2年前になります。『永遠の0』(百田尚樹著、講談社文庫刊)という本を読みました。零戦乗りで、最後には特攻隊で戦死した祖父の軌跡をたずねる話なのですが、ありがちなお涙ちょうだいのものとは一線を画しています。読み終わった後、徐々に心を揺さぶられ、涙が自然とあふれてきました。好みもありますが、ぜひお勧めしたい一冊です。(ふる)

*翻訳記事は、原則として原文に沿っております。一部、Nature ダイジェスト編集部でよりわかりやすいように編集しております。



npg nature asia-pacific

NPG ネイチャー アジア・パシフィック
〒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

©2012 Nature Japan K.K., trading as NPG Nature Asia-Pacific.
All rights reserved. 掲載記事の無断転載を禁じます。

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: David Swinbanks
副発行人: 峯村宏
編集: 松田栄治、宇津木光代
デザイン/制作: 村上武、中村創
広告/マーケティング: 米山ケイト、藤原由紀
池田三知世

編集協力: 白日社

「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。

受賞歴のあるビジネスクラス「クラブワールド」では、自分だけの時間をお楽しみいただけます。静かなラウンジ、そして機内では自分だけの快適な空間。お客様のスペース、プライバシーを大切にしたキャビンでは、お好きな時間に、お仕事、ご就寝、おくつろぎいただくことができます。

今すぐ、ba.comでご予約ください。



平成24年9月25日発行 第9巻 第10号
編集発行人：David Swinbanks

発行所：ネイチャー・ジャパン株式会社
東京都新宿区市谷田町2-37 千代田ビル

発売所：日本出版貿易株式会社
ISSN：1880-0556

