



ダーウィン生誕 200 周年 起源を越えて

www.nature.com/naturedigest

Nature Digestでは、より幅広い広告ニーズにお応えするため、

 nature asia-pacific

2009 年より広告掲示板セクション

natureDIGEST  NFORMATION を設けます。

毎号の Nature Digest 巻末に掲載されるこのセクションでは、下記 **広告を募集** しています。



- ☒ 求人
- ☒ 学会、講演会、シンポジウム
- ☒ 企画展・特別展など科学系イベントの告知
- ☒ 研究助成、賞
- ☒ サービス・インフォメーション
- ☒ 新刊書籍案内

その他、お気軽にご相談ください。

natureDIGEST  NFORMATION に出稿していただくと
Nature Digest Contentsメール 3行 広告*無料!

*配信数 14,464 (2008年11月現在) ; 1行あたりの文字数 35文字

掲載料金 (単価)

広告サイズ	1回	6回	12回
1/4 ページ (87mm x 122mm)	¥107,500 (¥112,875)	¥102,125 (¥107,231)	¥96,750 (¥101,588)
横1/2ページ (178mm x 122mm)	¥215,000 (¥225,750)	¥204,250 (¥214,463)	¥193,500 (¥203,175)
縦1/2ページ (87mm x 248mm)	¥215,000 (¥225,750)	¥204,250 (¥214,463)	¥193,500 (¥203,175)
1 ページ (178mm x 248mm)	¥430,000 (¥451,500)	¥408,500 (¥428,925)	¥387,000 (¥406,350)

申込締切り : 掲載希望号発行日の前月 5 日

原稿締切り : 掲載希望号発行日の前月 15 日

HIGHLIGHTS

- 02 vol. 456 no.7224
vol. 457 no.7225, 7226, 7227

EDITORIAL

- 06 起源を越えて **DARWIN 200**

NEWS FEATURE

- 08 進化の舞台裏 **DARWIN 200**
Tanguy Chouard
- 14 マンモスを作ろう **DARWIN 200**
Henry Nicholls

NEWS & VIEWS

- 22 マンモスのゲノミクス **DARWIN 200**
Michael Hofreiter

NEWS

- 24 ニオブ 3 スズで加速器は小さくなる？
Eric Hand

NEWS IN BRIEF

- 25 延期された火星探査計画を悩ませる
打ち上げ日程の問題

NATURE NEWS

- 26 境界を認識するニューロン
- 27 合成オパールが見せる色

JAPAN NEWS FEATURE

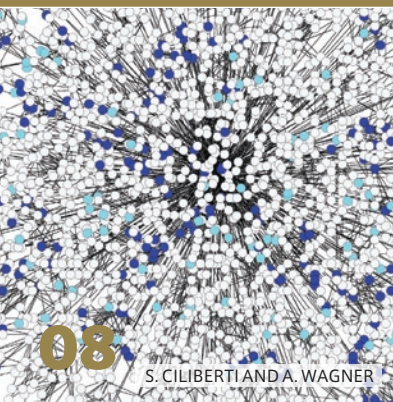
- 28 大学との連携で変わる動物園像
小島 あゆみ

JAPANESE AUTHOR

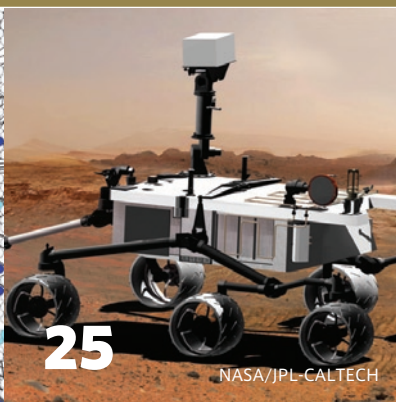
- 32 熱で磁気の流れを作るスピンゼーベック効果
を発見！ — 齊藤 英治、内田 健一
長谷川 聖治

英語で NATURE

- 34 Drillers hit Hawaiian magma
ドリル掘削機がハワイでマグマを掘り当てた



S. CILIBERTI AND A. WAGNER



NASA/JPL-CALTECH



RAYMOND SKJERPENG,
KAVLI INSTITUTE FOR
SYSTEMS NEUROSCIENCE



月本佳代美



Vol. 456 No. 7224
18/25 December 2008

LYN EVANS 氏:「今年の問題の人」は大型ハドロン衝突型加速器プロジェクトリーダー

NEWSMAKER OF THE YEAR: LYN EVANS, Large Hadron Collider project leader

Nature が選んだ「今年の問題の人」は、欧州原子核研究機構 (CERN) で大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) のプロジェクトリーダーを務める Lyn Evans である。今年、LHC は大々的な報道とともに華々しく稼働を開始した直後に、ヘリウム漏れによる巨額の修理費用を要する事故を起こして運転が停止され、Evans はいわば天国と地獄の両方を経験することになった。Geoff Brumfiel は、Evans のプロフィールと、CERN の今後 20 年間の素粒子物理学研究の礎となるこの新しい衝突型加速器の将来について論じている。表紙写真 Maximilien Brice/CERN。 [News Feature p.862](#), [Editorial p.837](#) 参照

化学: 新しいキラル触媒

A new chiral catalyst

アルケンメタセシス (オレフィンメタセシスまたはトランスアルキリデン化ともよばれる) は、医薬品、ポリマー、燃料などの合成に広く使われている有機反応である。その重要性は、2005 年、Y Chauvin、R Grubbs、R Schrock がメタセシスに関する研究でノーベル賞を共同受賞したときに広く認められるようになった。今週号では、非常にすぐれた効率とエナンチオ選択性でアルケンメタセシスを開始できる、新種のモリブデン系キラル触媒が報告されている。この新触媒は、金属立体中心をもち、単座配位子のみを有する。新触媒の有効性は、過去に報告されたどの触媒でも促進できないメタセシス反応を経由する、*Aspidosperma* 型アルカロイド quebrachamine のエナンチオ選択的合成で実証された。 [Letter p.933](#), [N&V p.883](#) 参照

生理: 概日リズムでスリムになる

Lean and quick

核内受容体コリプレッサー 1 (Ncor1) は、胚発生に必要な酵素ヒストンデアセチラーゼ 3 (Hdac3) の活性化因子だが、生理機能は不明である。Ncor1 をもたないノックアウトマウスを用いた実験で、Ncor1-Hdac3 の相互作用を破壊すると時計遺伝子の調節が乱れ、睡眠覚醒周期が正常な場合の 24 時間ではなく 23 時間に近づくなど、概日行動に異常が生じることが明らかになった。またこのマウスは、エネルギー消費が増加するために正常マウスよりもやせ形で、インスリン感受性が高くなった。*in vivo* で機能をもった Ncor1-Hdac3 複合体が失われると、一部の代謝遺伝子の振動パターンが変化したことから、正常なエネルギー収支に代謝の概日リズムの調節が不可欠ことが明らかになった。

かになった。Ncor1-Hdac3 酵素を標的にすることは、肥満や糖尿病といった栄養ストレスがかかわる病気の、極めて特異性の高い治療法になるかもしれない。

[Letter p.997](#), [N&V p.881](#) 参照

進化: LUCA の好みは変わりやすい

LUCA blows hot and cold

すべての現生生物がその子孫である「全生物の最終共通祖先 (LUCA)」についての研究は、人を引きつける。LUCA の生息していた 35 億 ~ 38 億年前については化石証拠が乏しいため、LUCA の生物学的特性や環境に関する情報は間接的な証拠から得るしかない。現生生物のゲノムから得られる遺伝学的レベルの証拠に基づいて再現された祖先のタンパク質のアミノ酸配列からは、当時の環境が高温で、LUCA は好熱性であったことが示唆されている。しかし、リボソーム RNA の塩基配列からは、それよりも温度の低い環境と一致する結果が得られている。この見かけ上の不一致が、「分子温度計」という新しい方法によって解決できたようだ。分子進化に関する最新の数理モデルを用いて、何百種もの現生種から得た rRNA 塩基配列およびタンパク質アミノ酸配列を分析した結果、環境の温度変化には 2 つの段階があったことが示唆された。LUCA のもとなった生物は当初は中温性で、約 60°C の水に生息していたが、その後 70°C を超える高温に適応して好熱性の共通祖先が生じた。この後、海洋が冷却されるにつれて、細菌および古細菌・真核生物が多様化した。

[Letter p.942](#), [Author page](#) 参照

宇宙: どこもかしこもメーザー、メーザー

Masers, masers everywhere

宇宙物理学でいうメーザーは、マイクロ波領

域で生じる誘導放射のスペクトル線源で、可視光のレーザーに似たものだ。水メーザーは、水分子が 22GHz 領域で発する放射で、活動銀河中心の超大質量ブラックホールに関係した高密度分子雲で見つかる。近傍の観測例から導き出された水メーザーの光度関数に基づき、中程度や高い赤方偏移ではメーザーはごくまれだろうと思われていたのだが、この仮定は確かなものではなさそうだ。重力レンズ効果による増光を利用して、赤方偏移 2.64 でクエーサーに水メーザーが見つかったのである。その光度は、近傍の最も強力な水レーザーの 2 倍で、知られている最も明るいメーザーの半分である。今回の発見は、こうしたメーザーは初期宇宙では、現在よりもずっと多く存在していたことを示唆している。

[Letter p.927](#) 参照

地球: 海底地形の起伏を調べる

The rough with the smooth

海底がでこぼこしているか、平らかは、海洋中の熱循環と混合や渦の力学的エネルギーの散逸に、相当な影響を及ぼす。海洋基盤の地形の制御に海底の拡大速度が果たす役割はよく知られている。今回、海洋重力データから得られた海底の粗度 (局地的なでこぼこ) が全球にわたって解析され、粗度の異常部分が海洋底の帯状の地域に広く残ることが明らかになった。過去にパンゲア超大陸によって覆われていたマントルの上に形成された大西洋の海洋底は非常に滑らかなのに、太平洋の大海膨の上に形成された海洋地殻では、予測どおりに海洋基盤がでこぼこになっている。この結果から、超大陸下と超海洋下でのマントル大規模上昇流の性質が根本的に異なることが明らかになり、古代の海洋の海底を再構築する枠組みが得られる。

[Letter p.938](#) 参照

進化: 元気な Y 染色体

A healthy Y chromosome

染色体の構成は、進化の過程で概して安定である。ショウジョウバエ属では、およそ 6300 万年前に分岐した 12 種をみても、95% 以上の遺伝子が同じ染色体腕領域にとどまっている。しかし今回、塩基配列を解読済みのショウジョウバエの Y 染色体を調べた研究で、キイロショウジョウバエの Y 染色体連鎖遺伝子のうち、ほかの 11 種でも同じく Y 連鎖遺伝子となっているのは、わずか 4 分の 1 だけであることがわかった。哺乳類の Y 染色体は何度も退化と遺伝子喪失を経てきたが、これとは対照的に、ショウジョウバエの Y 染色体では、遺伝子獲得が遺伝子喪失の 10 倍以上とはるかに上回っている。 [Letter p.949](#) 参照



Vol. 457 No. 7225
1 January 2009

世界天文年 2009：望遠鏡の誕生から 400 年 / 暗い夜空を取り戻すための運動 / ハッブル望遠鏡があげたすばらしい成果

A BIG YEAR FOR ASTRONOMY: The telescope turns 400 / Campaign for dark skies / Hubble's greatest hits

世界天文年 (IYA) を記念して、J Kanipe が 4 基の新しい大型望遠鏡、「ビッグ・フォー」の将来の見込みについて検討している。ハッブル望遠鏡が比類ない成果をあげただけに、その後継機であるこれらが担う責任は重い。「美しい星空を取り戻そう (Dark Skies Awareness)」は、IYA 2009 の 11 の基本企画の 1 つである。M Smith は、天文学研究を助けるだけでなく、人類の健康やエネルギー保全のためにもなるこうした変革を行うことの意義について論じている。また IYA 2009 は、望遠鏡誕生 400 周年記念祭でもある。O Gingerich は、技術の進歩と我々の世界像の変遷との関連をたどっている。R Poole の本『Earthrise』は、アポロ 8 号が撮影した月の地平線のかなたに浮かび上がった地球のイメージが与えた心理学的な影響に注目したもののだが、号の書評では、我々の地球に対する感じ方はそれほど変わっていないと考えられている。「秘密のお宝」訪問はパリ天文台、また宇宙飛行士の A Bean が、彼が描いた月の景色について語っている。

世界天文年 2009 特集 News Feature p.18, Review Article p.41 ほか参照

免疫：エイズワクチンの見直し

AIDS vaccine rethink

近年のエイズワクチン開発の失敗は、エイズワクチン全体について大規模な再評価を促すことになった。そこで問われた問題の 1 つが、T 細胞による HIV-1 ワクチン開発を継続すべきかどうかというものである。だが今回、サル免疫不全ウイルス (SIV) を攻撃接種したサルを使って新たなワクチンに関する研究が行われ、T 細胞を用いた方法はまだ見込みがあるらしいことが示唆された。このワクチンは、SIV の Gag タンパク質を発現する 2 種類のアデノウイルスベクター (rAd26 を初回免疫に、rAd5 を追加免疫に用いる) を用いて作製されたもので、強力な T 細胞免疫応答を引き起こし、感染をある程度防止した。これらの研究結果は、HIV-1 に対する新世代の T 細胞ワクチン候補の設計の方向性を示すものといえる。

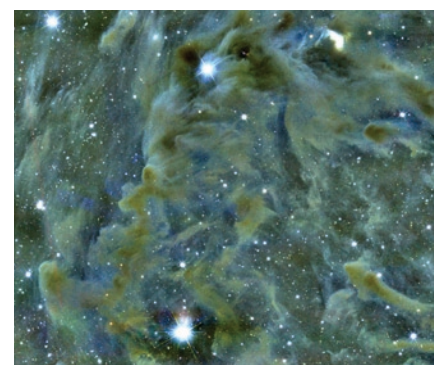
Letter p.87, Making the Paper p.6 参照

宇宙：星形成での自己重力

Self-gravity in star formation

恒星や惑星は、分子雲の分裂によって生成された高密度分子ガスのコアが重力収縮して形成される。自己重力は、星形成の後期では主要因子であることが知られているが、もっと早い時期、そしてもっと大きな長さスケールでの重要性は、はっきりしていなかった。Goodman たちは、従来得られていた高いダイナミックレンジのスペクトル線マップの「系統樹」解析を新たに行い、星形成が起きている分子雲 L1448 内部のガスの階層構造を明らかにしたことを報告している。この解析結果から、すべての領域においてではないが、観測で調べられたあらゆるスケールで、自己重力が重要な役割を果たしていることが示された。この結果は、自己重力を生じているのがわかった物質の量は現在のモデルの予測よりも少ないものの、「乱流分裂」を支持するモデルと定性的に一致している。

Letter p.63, N&V p.37, Abstractions p.6 参照



行動進化学：いい人であることの御利益

Benefits in kind

人間社会では、非協力者が悪い評判を得る場合に、利他行動が進化する。しかし、非協力者に懲罰を与え続けることは、どこまで賢明といえるのだろうか。それは、懲罰が与える側にも、与えられる側にもコストのかかるものだからである。大槻久たちは、全員が他者間の相互作用を観察し、さまざまな社会規範に従って他者の評判を定めるというゲーム理論モデルを用いて、懲罰が有利に働く状況を探った。コストを伴う懲罰は協力の進化を促進する場合があるものの、それは狭いパラメータ領域下でのみ起こることがわかった。間接互恵性は効率がより高くなるように進化するので、コストを伴う懲罰は非効率なものと考えられる。

Letter p.79, N&V p.39 参照

量子情報科学：限界までスクイーズする

Taken to the limit

量子測定結果は不確定性を伴い、不確定性は通常、位置と運動量のような対になった相補的な特性の間で等しく分配される。しかし、「スクイージング」として知られる手法を使うと、測定したい特性の一方の不確定性を、もう一方の不確定性を増大させるという犠牲を払って、小さくすることができる。これまでに作られた光スピンスクイーズド系は、ハイゼンベルグ限界で決まる実現可能

な最大スクイーズからはまだ数桁も離れている。Shalm たちは今回、光学系をほぼこの限界までスクイーズできる方法を実証した。彼らは、光ファイバー中で 3 個の光子を重ね合わせ、それらのスピンを操作して、複合粒子「トリフォトン」を生成させてこれを実現した。このような状態は、高精度の測定、リソグラフィ、情報処理に関する量子測定に大きな利点をもたらす可能性がある。

Letter p.67, N&V p.35 参照

細胞：骨髄のニッチ

A bone-marrow niche

造血幹細胞は、骨髄中でニッチとよばれる特殊な制御環境のもとにあることが知られている。このニッチの存在場所や特徴の詳細が、2 つの巧みな画像化研究によって明らかになった。L Celso たちは、生きた動物で個々の造血細胞を追跡し、骨芽細胞には微小血管が絡まっており、造血細胞集団は分化の程度に応じて異なった領域に位置することを見いだした。Xie たちは、新しく開発された *ex vivo* リアルタイム画像化技術と免疫測定法を用いて、蛍光標識した造血幹細胞が放射線照射に応じてホーミングするようすを追跡した。そして骨髄腔内側を覆う膜が、正常時には造血幹細胞を維持し、骨髄が損傷を受けたときには造血幹細胞の増殖を促進する働きを担う特殊な領域であることを明らかにした。 Letters pp.92, 97 参照



Vol. 457 No. 7226
8 January 2009

量子浮揚：とらえにくかった Casimir-Lifshitz 斥力の実験的測定 QUANTUM LEVITATION: Demonstration of the elusive Casimir-Lifshitz repulsion

空間は完全に空っぽというわけではない。真空は、量子力学的エネルギーゆらぎで満ちあふれており、非常に接近した物体の間に引力を発生させることができる。この「Casimir-Lifshitz」力は、ナノマシンで静止摩擦力、つまり「スティクション」を引き起こすが、その大きさは非常に小さいだろうとされている。これまで報告されたのは引力相互作用のみだが、真空を特定媒体に置き換えれば、理論的には Casimir-Lifshitz 力は斥力になると考えられる。今回、このことが実験的に確認された。流体中の相互作用物質の系を慎重に選ぶことで、引力よりも弱い、斥力が測定されたのである。いずれの力の大きさも、物質間の間隔が狭まるにつれて増大する。このような斥力によって、流体中の物体の量子浮揚がおそらく可能になると考えられ、静止摩擦力が非常に低い、新タイプのスイッチング可能なナノスケールデバイスにつながるかもしれない。浮揚は各物質の光学特性のみに依存する。表紙の左は、金の微小球とシリカ基板の間の斥力を示している。シリカを金に換えると、右のように力は引力に変わる。

Letter p.170, N&V p.156 参照

細胞：リボソームがもつ校正機構

Ribosomal proofreading

細胞でのタンパク質合成について報告されている高い忠実度は、*in vitro* での翻訳過程の研究からは完全に説明できていない。細胞のほかの主要な巨大分子合成装置の構成要素である DNA および RNA ポリメラーゼ複合体は校正機能を備えているが、リボソーム自体にはそのような活性がこれまで見いだされていなかった。今回 H Zaher と R Green は、ペプチド結合形成後に作用してタンパク質合成の忠実度を確実なものにする、これまで特性が明らかにされていなかった機構を見いだしたことを報告している。伸長中のポリペプチド鎖に誤ったアミノ酸が組み込まれると、リボソームの活性部位の特異性が全体的に低下し、それによって蓄積した誤りがペプチド合成を途中で終了させるのである。このペプチド転移後の編集機構は、*in vivo* のタンパク質合成で達成される非常に正確さの解明に役立つものだ。

Article p.161, N&V p.157 参照

宇宙：天体の磁場を生み出すダイナモ

Magnetic field generation

一部の惑星や恒星の多くには、対流によって駆動されるダイナモ過程で生じた磁場がある。恒星の磁場は、星が放出する光への影響から知られ、地球の磁場の 1000 倍もの強さであることも多く、こうしたすべての

天体で同じダイナモ機構が働いているとすれば、この機構は 3 桁も異なる磁場強度を生み出せることになる。Christensen たちは、もし恒星や惑星が十分速く自転しているのであれば、これらの天体に同じように適用できる、エネルギーフラックスと磁場強度を関連づける単純な法則を考案した。地球や恒星のダイナモを扱うコンピューターモデルはこの法則を支持しており、その予測は地球や木星、星の 2 つのグループで観測された磁場と一致する。中間的な質量の天体である褐色矮星や超大質量太陽系外惑星は、ダイナモ機構によって生じる、観測可能な強い磁場をもつはずである。しかし、太陽は自転が遅すぎて、この型に当てはまらない。

Letter p.167, N&V p.158 参照

細胞：炎症とがん

Inflammation and cancer

一部のタイプの慢性炎症といくつかのがんの間には、関連があることが知られている。今回、肝臓腫瘍組織の遺伝学的研究から、インターロイキン 6 受容体複合体の一部である gp130 をコードし、炎症性シグナル伝達経路の一部を担う *IL6ST* 遺伝子の機能獲得性変異が、良性肝臓腫瘍の発症の早期段階である可能性が明らかになった。この *IL6ST* の変異は β -カテニンの変異と共に見つかることが多く、この 2 つは腫瘍形成の促進に協調して働いている可能性が考えられる。

Letter p.200 参照

生理：脂肪を消費して生き延びる耐性幼虫

Burning off the fat

線虫 (*Caenorhabditis elegans*) の幼虫は、過酷な環境で生き延びるために、耐性幼虫 (dauer) になることがある。耐性幼虫になると、餌は食べないが生命活動は維持され、ストレスに耐性を示して非常に長く生きる。典型的な耐性幼虫では、インスリン様シグナル伝達が低下し、栄養が十分に貯蔵され、代謝全般が変化する。P Narbonne と R Roy は、AMPK (LKB1) シグナル伝達がないと、耐性幼虫は貯蔵エネルギーを速やかに消費し尽くし、致命的な臓器不全を起こして早く死んでしまうことを明らかにした。正常な耐性幼虫では、LKB1/AMPK がトリグリセリドの加水分解速度を下げることによって貯蔵脂肪が長持ちし、浸透圧の調節が適切に維持されるため、餌を必要とせずに確実に長生きできるのである。今回の知見は、老化、糖尿病、肥満に関する研究に関係がある。

Letter p.210 参照

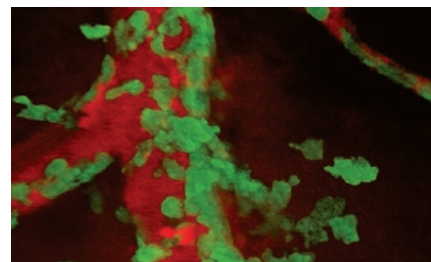
医学：非番のキラー細胞

Killer cells off duty

マウス中枢神経系へのリンパ球性脈絡髄膜炎ウイルス (LCMV) 感染は、慢性ウイルス性疾患のモデルとして広く使われている。この種の疾患には LCMV 特異的細胞傷害性 T リンパ球 (CD8⁺ T 細胞) がかわっているが、発症にどのような役割を果たすのかはよくわかっていない。このような T リンパ球のもつ「キラー活性」が発症に絡んでいると予想されていたが、二光子蛍光顕微鏡を用いた新たな研究が行われ、そうではないことが示唆された。細胞傷害性 T リンパ球は、単球や好中球を脳脊髄膜の血液脳関門へとよび寄せる働きをしているらしい。この部分の血管が漏出性になり、致命的なけいれん発作が起こる。このことから、これらの細胞がどのような仕組みで誘引され、また、どのようにして髄膜のこうした損傷を引き起こすのかという新たな疑問が出てくる。また今回の結果は、新しい薬剤標的をいくつか示唆している。

Letter p.191, N&V p.155,

Making the Paper p.128 参照





Vol. 457 No. 7227
15 January 2009

政権委譲：オバマはブッシュの失敗をどの程度正せるのか

HANDOVER: New opportunities, new obligations

オバマは本当に変化を起こせるのだろうか。政権委譲は来週行われる。今週号では、ブッシュ政権が残したものと、オバマ政権が行おうとしている政策について考察する。News Feature では、「ブッシュの遺産」のプラスの部分からまず取り上げる。PEPFAR（米国大統領エイズ救済緊急計画）は、多くの人々がブッシュ政権の主要な業績の1つと考えている。マイナス点として挙げられるのは、核兵器が増えたことだ。評論家は、その主な原因がブッシュの政策だとしている。代替エネルギー、宇宙開発研究、海洋資源や研究への財政支援問題全般などのほかの問題については、評価はさまざまである。Commentary の「大統領、受信ボックスを見てください」では、生物学的防護対策、環境、気候変動、保健衛生、国際協力、および幹細胞研究という6つの重要な政治問題について、それぞれ専門家が意見を述べている。News では、経済刺激対策の詳細が明らかになってきたことや、ローレンスバークレー国立研究所所長の S Chu 氏の長官着任によってエネルギー省で吹き荒れると予想される大嵐が論じられている。

News Features pp.250, 252, 254 ほか参照

細胞：培養系で疾患を模倣

Disease mimicked in culture

脊髄性筋萎縮症（SMA）は、小児の最も一般的な致命的神経疾患の1つで、2コピーある *SMN1* 遺伝子の両方に変異が生じた場合に起こる。SMA の発症機序はほとんど明らかになっていないが、その一因は、*SMN1* と *SMN2* の2種類の遺伝子が存在するのはヒトだけで、げっ歯類などの実験モデル候補動物には *SMN* 遺伝子が1種類しか存在しないことである。今回、細胞レベルで SMA 疾患の病因を調べるための新しい手段が開発された。SMA 患者である子どもの皮膚繊維芽細胞と、この病気にかかっていないその母親の皮膚繊維芽細胞（比較に用いるため）から、誘導多能性幹（iPS）細胞株が作られたのである。この細胞から培養神経前駆細胞が形成され、これからは疾患の表現型を維持した分化神経組織と運動ニューロンを作り出すことができる。培養細胞は、SMA に関連する変異型タンパク質を増加させることが知られている薬剤にも応答した。同様の iPS 技術は、ハンチントン病などのほかの遺伝性疾患の研究でも貴重なものとなるかもしれない。

Article p.277, N&V p.269 参照

物理：ポラリトン凝縮体

Polariton condensates

電子と正孔が結合した対である励起子は、比較的高い温度でボーズ・アインシュタイン凝縮体（BEC）のような状態を形成するはずである、と予測されてきた。最近、半導

体微小共振器中で励起子-ポラリトンによって BEC が形成されることの証拠が報告されたが、これは励起子と光子の混成状態である。そのようなポラリトン凝縮体では、超流動のような挙動が予想される。しかし、微小共振器ポラリトンは短寿命なので凝縮体が熱平衡状態になく、異常な性質を示す可能性がある。Amo たちは、微小共振器ポラリトン凝縮体を動かすパルス光励起技術を開発し、欠陥を横切る際に抵抗なく流れるなどの超流動特性をもつ集団ダイナミクスがはっきり現れることを観測している。今回の研究は、非平衡凝縮体のダイナミクスを研究するための新しい方向を示している。

Letter p.291, N&V p.273 参照

進化：魚類の進化史に誤り？

A false fishy trail?

棘魚類は大昔に絶滅した化石魚類であり、軟骨魚類と硬骨魚類との分岐点付近に位置づけられている。その形態は、有顎脊椎動物の初期進化に関して多くのことを明らかにする可能性がある。問題は、棘魚類の体の構造がよくわかっておらず、わかっている構造の大半はアカントーデス属のものに限られていることである。この属は、棘魚類の進化史上では後半にあたるペルム紀に存在していた仲間で、棘魚類の代表的分類群とはいえないと考えられる。今回 M Brazeau は、棘魚類が最も栄えていたデボン紀初期（約 4.15 億年前）の *Ptomacanthus* の頭蓋について、初めての詳細な記述を報告してい

る。その結果から、棘魚類はおそらく自然群ではなく、*Ptomacanthus* はごく初期のサメ類、または現代のすべての有顎脊椎動物の共通祖先に近い動物のいずれかであることが明らかになった。

Letter p.305, Making the Paper p.234 参照

細胞：概日周期で働く合成回路

A synthetic circadian system

出力が振動する合成遺伝子回路は、これまで細菌でしか開発されておらず、その場合でも安定した振動性をもつ回路を作るのはむずかしい。今回 Tigges たちが開発したのは、哺乳類細胞中で働く合成センス-アンチセンス回路で、自律的で自動持続可能であり、しかも調節可能な周期的遺伝子発現を生じる。この合成時計は哺乳類細胞における振動の研究に有用で、概日時計とそれに関連した病気の解明に役立ちそうだ。

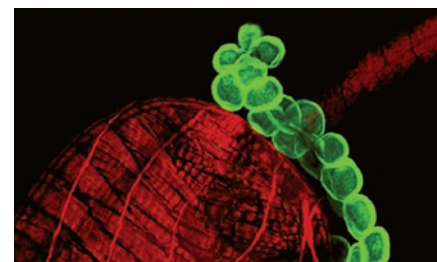
Letter p.309, N&V p.271 参照

細胞：昆虫にも足細胞に似た細胞がある

Kidney origins in insects

脊椎動物の腎臓にある糸球体は、足細胞とよばれる特殊化した上皮細胞からなり、血液濾過障壁によって血液を限外濾過して尿を生成する。糸球体と尿細管によって構成されるネフロンは、脊椎動物に特徴的な適応構造だと考えられている。しかし、「ネフロン様」の性質は、多くの無脊椎動物の排出系にも見いだされる。今回 Weavers たちは、ネフロサイト（nephrocyte）として知られる昆虫の濾過細胞に、足細胞と著しい類似点がみられることを報告している。腎臓のスリット膜を構成する主要成分のショウジョウバエにおける相同成分は、脊椎動物にみられるものとよく似た相互作用するタンパク質の複合体を形成する。ネフロサイト膜は、ネフリンまたは NEPH1 の相同体に変異したショウジョウバエでは完全に失われており、これはヒトの腎臓疾患である先天性ネフローゼ症候群（NPHS1）の表現型に類似している。このことは、昆虫のネフロサイトが、腎臓足細胞の生物学的性質や足細胞が関係する疾患を研究するためのモデルになることを示している。

Letter p.322 参照



社説

Beyond the origin

起源を越えて

Nature Vol.456(281)/20 November 2008

2009 年は、チャールズ・ダーウィンの生誕 200 周年および『種の起原』出版 150 周年である。ここではまず、今後 50 年間の展望を考えたい。

「天地創造は、紀元前 4004 年に起こった事象ではない。今から約 100 億年前に始まった 1 つの過程であり、それは今でも続いている」。これは 1973 年、遺伝学者テオドシウス・ドブジャンスキーの記した一文だ。生物学的な創造の過程は、言葉に尽くせないほど歴史が長く、かつ、今なお私たちの周囲で続いていると気づいたことは、史上最大の発見の 1 つである。大昔に始まり、今も絶え間なく続く天地創造だが、その発見自体は、比較的最近の 19 世紀中頃になったのことだった。

形態の変化と生物の進化に関する学説には、長い歴史がある。この点に関するチャールズ・ダーウィンの個人的見解にもまた、長い歴史があり、歴史学研究者には数々の「メシの種」を提供してきた(Nature 2008 年 11 月 20 号 p.295 『ダーウィン特集』および www.nature.com/darwin 参照)。しかし、ダーウィンの『種の起原』で示した証拠のまとめ方と主張の立て方は、それまでの学説とは明確に異なっており、間違いなく新時代の始まりを告げるものだった。2009 年 11 月に出版から 150 年目を迎える同書は、生物の過去と現在に初めて折り合いをつけ、生物の驚くべき多様性と同時に、その根本的な統一性を説明する方法を打ち出した。

ダーウィンの示した生物に関する見方は、その後 150 年の間に内容的に充実し、強化されてきたが、この傾向は今後も続いていくだろう。しかし今後の数十年間で、ダーウィンの考え方の対象となっていた領域が根本的に拡大していく可能性がある。1960 年代には遺伝暗号の普遍性が発見され(フランスの分子生物学者ジャック・モノーが、

「ゾウも大腸菌も同じ」と説明したのがその代表だ)、生物は共通祖先の下で統一性を有しているというダーウィンの考え方が見事に裏づけられた。しかし、事はこのままではとどまらないかもしれない。

1 つの可能性として注目されるのは、太陽以外の恒星を周回する惑星のスペクトルから地球外生物の存在を示す動かね証拠が見つかることである。今後 50 年の間に天文学者がそのような地球外生物の多様性や進化を観測できるとはほとんど考えにくいだが、しかし、そのような証拠だけでも発見されれば、生物誕生の頻度に関する知見が得られる可能性はある。さらにはそれが、地球における生物誕生の過程に関する手がかりとなるかもしれない。古典的ダーウィニズムでは、この点に関して、答えを出すのにひどく苦労している。

それ以上に可能性の高い展開は、この地球上で、新たな生物の創造がなされることである。生物個体全体を人工合成しようという構想的(合成)生物学の最初の実験、例えば、J・クレイグ・ベンター研究所(米国メリーランド州ロックビル)で行われているマイコプラズマの人工合成実験では、自然選択による既存の設計内容に忠実なマイコプラズマの人工合成をめざす。しかし、その先をめざした研究方法、例えば、複数の異なる遺伝子配列を使う方法も既に開発されている。複雑な生物の人工合成については、ここしばらくは夢物語のままとなる可能性があるが(同号 p.310、今号 p.14 翻訳参照)、自己複製する単一ゲノム単細胞生物を人工合成する新たな方法については、極めて実現の可能性が高い。そして、祖先ではなく、アイデアから生まれ

著作権等の理由により画像を掲載することができません。

1859年に出版された『種の起原』。

るそうした生物が進化しようとする傾向は特に食い止める必要があるがゆえに、かえってそれらが進化に関する新たな知見をもたらすことは間違いない。

将来、『種の起原』の出版200周年を祝うころには、科学者が研究対象とする生物は、現代の全生物のように、共通祖先の下で統一性を有する、というわけにはいなくなっているのかもしれない。その意味で、ダーウィンの世界観は、新たな考え方にとって代わられることになるだろう。しかし、別の恒星の周囲に存在する生物も、バイオリアクターの中で生きている生物でも、そのまま放置すれば、自然選択という単純で畏敬の念を抱かせるアルゴリズムに従って進化してしまうことには変わりはないはずだ。

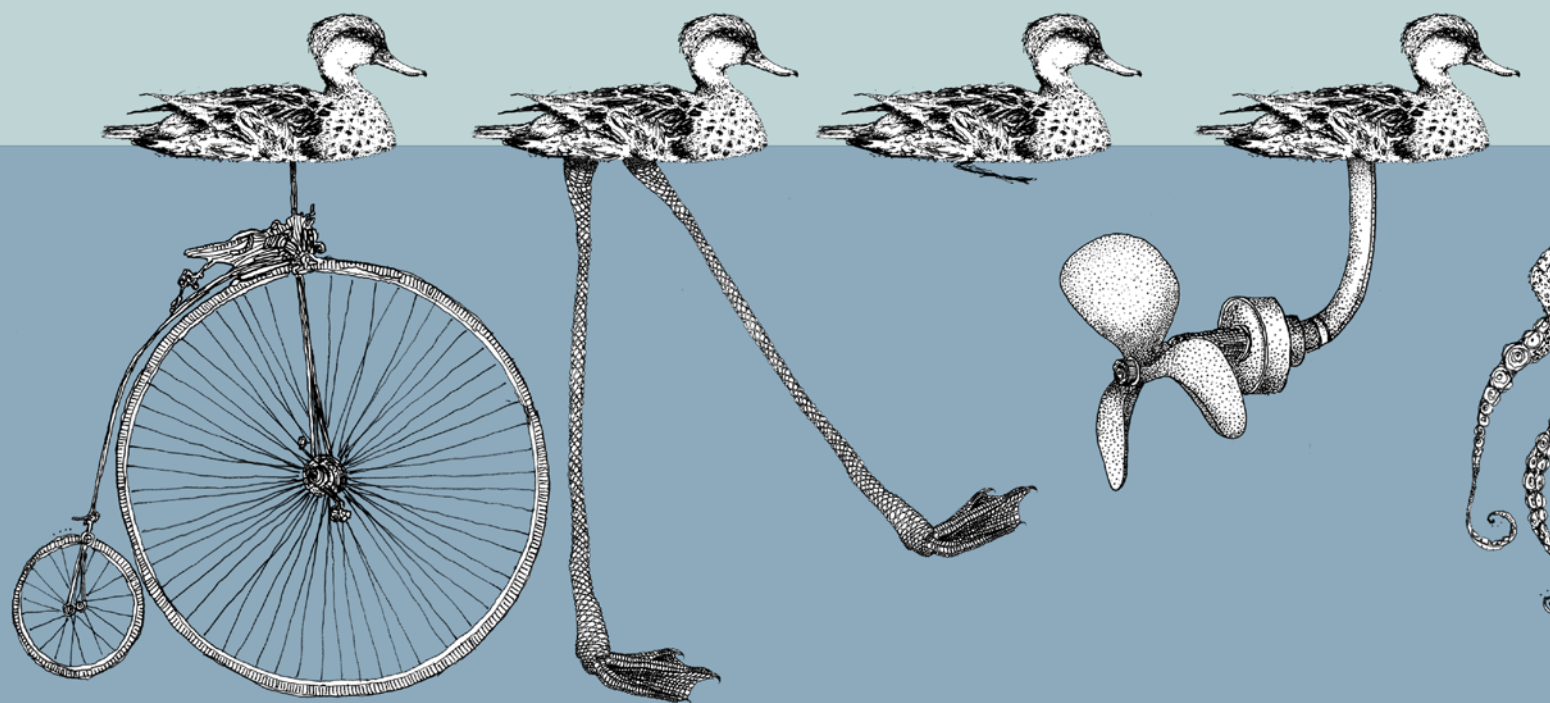
冒頭で引用したドブジャンスキーの小論は、「Nothing in biology makes sense except in the light of evolution (生物学は、進化に照らして考えなければ、何も意味をなさない)」という、今では有名な題名がついている。これは、分析的真理に非常に近い。すなわち、この題名には、生物(life)という言葉自体が必然的に意味していることが示されており、その真理性は将来にわたっても失われないと確信できる。しかし、そうした確信があるからといって、ダーウィンの漕ぎだした航海のなかで我々が将来的に発見していくだろう多様性や純粋な驚きは、けっして限られるようなものではないのである。 ■

*ダーウィンの著書 *On The Origin of Species* の邦題は、岩波文庫の『種の起原』に合わせました。

チャールズ・ダーウィン (1809-1882)

1809年 2月12日	イングランドの裕福な医師で投資家の家庭に生まれる。6人兄弟の5番目(次男)の子であった。
1825年	エディンバラ大学医学部に入学するも、医学に興味をもてず1827年に退学する。
1828年	ケンブリッジ大学神学部に入學し、1831年に卒業。
1831年	英国海軍の測量船「ビーグル号」に乗り込んで、世界一周の航海に出発。
1835年	ガラパゴス諸島を調査。
1836年	帰国。
1839年	『ビーグル号航海記』を出版。エマ・ウェッジウッドと結婚。
1859年	『種の起原』を出版。
1882年 4月19日	73歳で死去。

著作権等の理由により画像を掲載することができません。



Beneath the surface

進化の舞台裏

Nature Vol.456(300-303)/20 November 2008

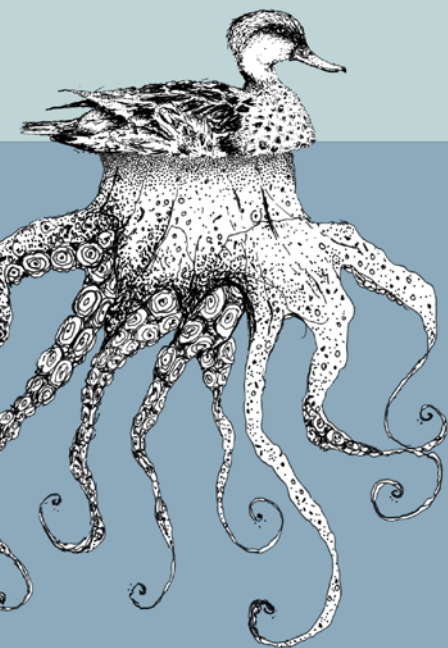
進化は、ひとたび何かを実現する方法を見つけたら、その方法に固執するものだと思われるかもしれない。けれども、よく似た形態の裏にまったく異なる配線が隠れている場合もある。Tanguy Chouardが報告する。

英国の発生学者である Lewis Wolpert が「生涯で最も重要なときは、誕生でも結婚でも死でもなく、原腸形成のときである」と、語ったことはよく知られている。原腸形成とは、原始胚細胞層が内部に向かって折れ曲がり（陥入）、分化した組織になっていく過程のことである。この過程

の一部を支配しているのが「スーパーマン形成体」とよばれる細胞群であり、発生生物学者たちは Wolpert に賛同して、この形成体ほど重要なものに手を加えることなどもってのほかだと考えていた。

そのため、2000年代の前半に被囊動物のスーパーマン形成体を探していた生

物学者たちは、自分たちの発見に仰天させられることとなった。彼らが調べていた被囊動物は「ホヤ」の名でお馴染みの、ヒトに最も近い無脊椎動物である。その幼生はオタマジャクシのような形態で、小型の脊椎動物胚によく似ているため、脊椎動物と同じように発生していくものと予



が、何億年にもわたる進化の歴史の中で驚くほどよく保存されているという発見により強化されてきた。

けれども最近、遺伝子の多くが保存されていても、その発現を制御する調節的なつながりが保存されているとは限らないことが、徐々に明らかになってきた。近縁種は、まったく異なる調節ネットワークで遺伝子をつなぎながら、一見、変わらぬ形態を維持していることがあるのだ。スイスのチューリヒ大学でバイオインフォマティクスを研究する Andreas Wagner は「生体システムでは、問題には多くの解決法があるのが普通なのです」と話す。研究者たちは今、進化がなぜ、どのようにしてその解決法を見いだすのかを解明しようとしている。こうした「水面下」の変化は自然選択されたものだとする研究者もいれば、たまたま出現したものにすぎないとする研究者もいる。また、どのようにして生じてきたにせよ、調節ネットワークの多様性は将来の進化の過程で優位となるとする見方もある。さまざまなデザインを「水面下」で試しておけば、進化による革新を密かに準備することができ、生物が新たな困難に直面したときの拠り所とすることができるというわけである。

こうした考え方はすべて、進化発生学に対する大きな問題提起となっている。研究者はもはや、1 個の遺伝子をみただけではもちろん、1 つのシグナル伝達経路の全体をみても、2 種の生物が同じようにできてきたと結論づけることはできないのである。入力、出力、それに両者のつながりによって、システム全体を考えなければならぬのだ。進化発生学 (evo-devo) がシステム生物学 (systems biology) と出会ったとき、「システム進化発生学 (systems evo-devo)」という新たな研究分野が誕生した。フランスのマルセイユ発生生物学研究所の Patrick Lemaire は「個人的には、こうした流行語のような専門用語は好みませんが、それが進化発生学に厳密さを加え、記述的になりす

ざるきらいのあるこの分野に機構という視点をもたらすならば、システムのな枠組みも役に立つのかもしれない」と話す。

保存のイデオロギー

保存の根が深いという思い込みを揺さぶるのは、容易なことではない。1980 年代以降、DNA 塩基配列解読法と遺伝子ノックアウト技術は、遺伝子とその機能がどの程度保存されているのかを解明してきた。そして、外見上の共通点がほとんどない動物のボディープラン（体制）を決める遺伝子の多くが、構造と機能の両面でほとんど同一であることを明らかにしたのである。例えば、ショウジョウバエとマウスでは、Hox 遺伝子の発現パターンが、頭から尾に向かう体軸において同一の位置価を規定していた。こうした発見は、遺伝子の配列と構成が保存されているなら遺伝子の機能も保存されており、機能の保存は遺伝学的な保存を意味するという直観的な考え方を補強した。しかし、遺伝子と機能との関係はそうに単純明快なものではないことが、ここ数年でわかってきた。極めて近縁の種であっても、ある機能が、同じ遺伝子の異なる組み合わせによるものだったり、異なる遺伝子の異なる組み合わせによるものだったりする場合があることがわかってきたのである。

例えば、昆虫の「頭・胸・腹」というボディープランは、極めてよく保存されている。このボディープランを分子レベルで解剖してみると、異なる遺伝子と異なる配線からよく似た形態が作り出されていることが端的に浮かび上がってくる。ショウジョウバエ *Drosophila* では、Hox 関連遺伝子の Bicoid がこの形態の成立に必要不可欠の働きをしている。1980 年代に始まった研究により、この Bicoid タンパク質をコードするメッセンジャー RNA は、卵の前端に付着することが明らかになっている。Bicoid タンパク質は受精後にこの場所へ翻訳されて胚の一端から他端に向けて拡散し、頭と尾の区別に関与するほか

想されていた。しかし実際はそうではなかった。「形成体の遺伝子」の多くが被囊動物のゲノムにあったが、それらは胚の別の部位で発現しており、まったく違う働きをしていたのである¹。それはまるで、エンジンの部品が後部座席にばらまかれているのに普通に走っている自動車を発見したようなものだった。

多くの生物学者は、意識的かどうかはさておき、生体システムを最適状態に調整されたものとして考える傾向がある。ある種の生物がむずかしい問題を複雑な方法で解決している場合には（オタマジャクシを作るためにスーパーマン形成体を利用することなど）、近縁種でも遺伝子は同じ方法でその過程を調整していると推測されることが多い。こうした考え方は、多くの遺伝子とそれがコードするタンパク質

の重要な遺伝子の活性を調整する。実際、Bicoid タンパク質は数多くの大仕事をこなしており、昆虫の発生の基礎となると広く考えられていた。

ところがそうではなかった。1990 年代後半以降、塩基配列データから、ショウジョウバエでは欠かすことのできない *Bicoid* 遺伝子が、ほかの多くの昆虫には存在していないことが明らかになってきたのである。この矛盾してみえる発見は、遺伝子調節ネットワークを全体として考えることによって初めて理解が可能になる。例えば、チュービンゲン大学（ドイツ）の Reinhard Schroeder の研究室と、ニューヨーク大学（米国）の Claude Desplan の研究室は、ショウジョウバエでは受精後に Bicoid タンパク質によって活性化されるいくつかの遺伝子が、コクヌストモドキ² やヤドリバチ³ では受精前に卵の内部に貯蔵されることを発見した。*Bicoid* 遺伝子の欠如は、発生ネットワークのほかの複数の遺伝子の作用が微妙に変化することによって補われている。

このように、シュペーマン形成体にせよ *Bicoid* 遺伝子にせよ、当てはまる規則は同じであるようだ。すなわち、同一の結果を得るために、それに寄与する因子を組み合わせる方法は多数存在するのである。「個々の遺伝子のレベルで考えていてはまったく理解できないことです」と Lemaire はいう。生物の機能を決める情報は、より高く、より抽象的なレベル、す

なわち、遺伝子やタンパク質やそのほかの因子が、一連の非線形的なフィードバックループの中で相互作用するネットワークの総体にあるのだ。その結果生じるボディープランや形質は、複雑系の研究者が「創発特性」とよぶものに相当し、部分の寄せ集めを超えるものである。

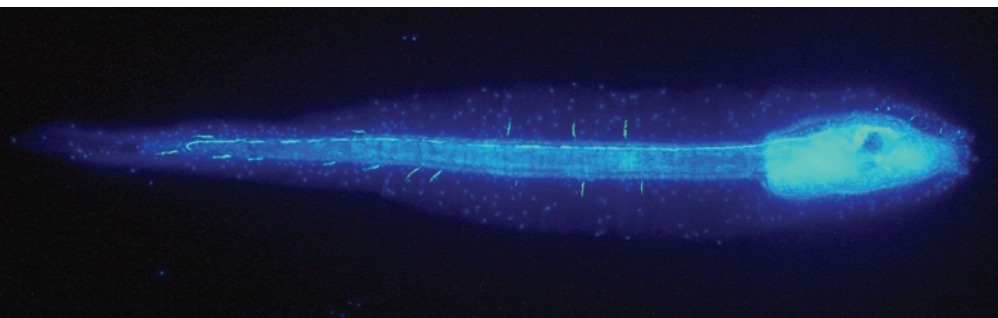
このようなシステムをイメージするのは困難である。人間が作る機械は個々の部品の不具合に左右されやすいため、遺伝子ネットワークにも同じような制約があり、その配線を少し変えるとシステム全体がおかしくなるといふ先入観があるからかもしれない。そのため、システムの出力を維持または改良しながら遺伝子とその相互作用を変えていく仕組みは、システム進化発生学の重要な問題となっている。この問題を解明するためには、多くの種を分子レベルで詳細に分析することを可能にする、極めて単純な実験系が必要となる。酵母の性分化はそうした系の一例であり、10 億年も前に分岐した種の間で保存されている。

多くの酵母には 2 種類の性（接合型）があり、「a」細胞では「a」遺伝子が、「α」細胞では「α」遺伝子が発現している。ヒトのカンジダ症の病原体である *Candida albicans* では、DNA 結合タンパク質 a2 によって活性化されなければ、a 特異的遺伝子は発現しない。しかし、ビール酵母やパン酵母を含む *Saccharomyces cerevisiae* では、a 特異的遺伝子のスイ

チがもともと入っており、これを止めるには抑制タンパク質 α 2 の作用を必要とする。両者は回路の働き方がまったく異なっているうえ、*S. cerevisiae* には *C. albicans* に不可欠な a2 遺伝子のコピーさえ備わっていない。しかし、両システムは降ってわいたものではなく、共通祖先のシステムから進化してきたはずなのだ。

その経緯を探ろうと、カリフォルニア大学サンフランシスコ校（米国）の Alexander Johnson らは、ゲノム配列が解読済みで系統樹上の位置が特定されている 16 種の酵母につき、a 遺伝子の調節の仕組みを調べた⁴。研究チームは、数多くの a 遺伝子を制御している調節 DNA を同定し、a2、α 2、MCM1 の結合配列を比較した。MCM1 は第三の DNA 結合タンパク質であり、酵母の種により a2 か α 2 のどちらかと結合する。研究チームは、こうしたタンパク質が相互作用するようすの変化も探索した。彼らは、タンパク質とその結合部位の変化から、ある調節システムが徐々に変化して別のシステムとなるようすを解明できるのではないかと推測した。

その推測は当たっていた。チーズ作りに利用されている酵母 *Kluyveromyces lactis* が、祖先型の *C. albicans* のロジックと *S. cerevisiae* のスキームの中間と考えられる状態を保持していることがわかったのである。その a 遺伝子の中には、a2 と結合するものもあり、α 2 と結合するものもあり、両方と結合するものもあった。また、MCM1 は a2 と α 2 の両方と結合することができた。「これはたいへんすばらしい成果です」と、ウィスコンシン大学マディソン校（米国）の発生生物学者である Sean Carroll はいう。「Johnson らが示した多数の断片から、進化の過程の全貌がみえてきたのです」。この再構成では機能の重複が重要となる。同じ機能を実現させる調節経路を複数もつことにより、1 つの経路がシステムを円滑に動かしている間に、別の経路が変化できるよう



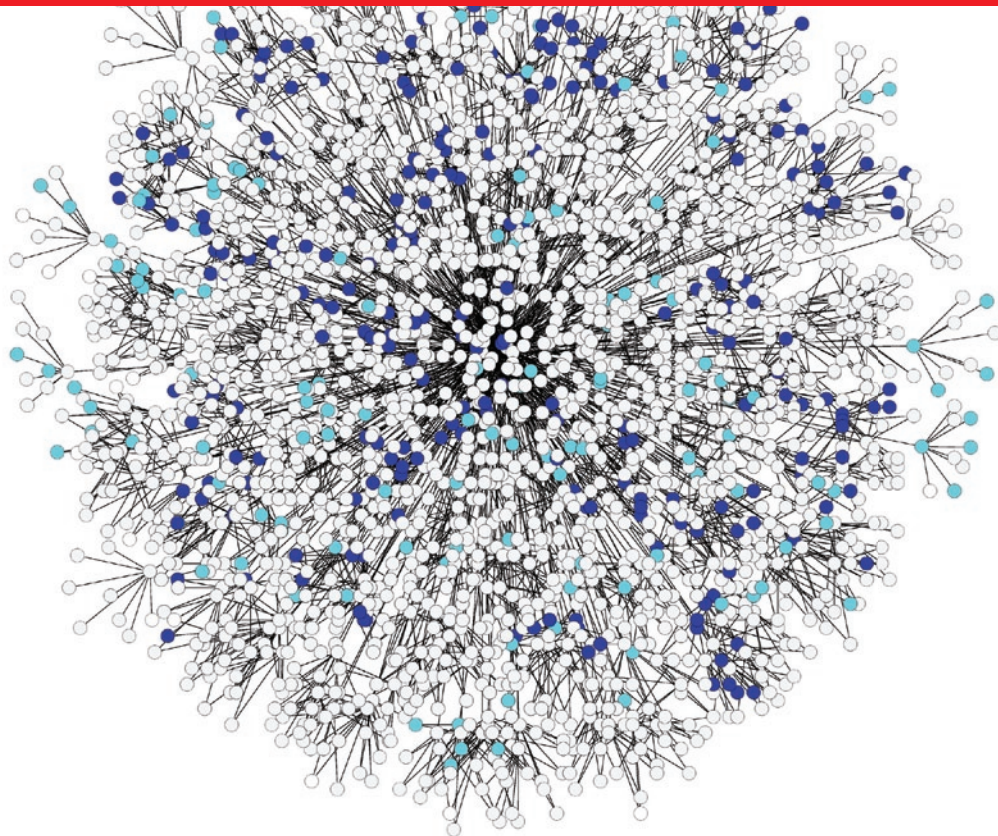
Ciona intestinalis のような被囊動物は、どんな脊椎動物の仲間とも異なる方式でオタマジャクシのような幼虫を発生させる。

になっているのだ。それは、2 個あるクリップのうち最低 1 個を常に命綱につないだ状態で、悪天候の中をボートで走りまわるようなものである。

Johnson の酵母研究は、生物が途中で適応度を低下させることなく 1 つの調節ネットワークから別の調節ネットワークへの切り替えを行う仕組みを明らかにした。しかし、こうした実験的研究では一度に 2 個の遺伝子しか取り扱うことができない。そこで、Wagner と 2 人のフランス人共同研究者は、大規模な遺伝子調節ネットワークに小さな変化が連続して起きた場合にもとのネットワークがどれだけ変化するかを、コンピュータを使ってシミュレーションした⁵。

Wagner のモデルは複数の遺伝子から構成されており、それぞれの遺伝子は、ほかの遺伝子を活性化または抑制する調節タンパク質をコードするものとされている。モデルの起点となる仮定の胚では、すべての遺伝子がある一定の発現レベルをもっている。ここから、各遺伝子の発現レベルがほかの全遺伝子に及ぼす作用を計算し、必要な変化を生じさせていく。こうして新しい発現パターンが得られたら、それが各遺伝子の調節に関してどのような意味をもつかを再び評価し、定常状態に落ち着くまで同じ作業を繰り返す。その結果が「生物」の発生の終点である。それぞれの「遺伝子型（どの遺伝子がどの遺伝子に何をするかという規定の集合）」は、異なる「表現型（最終状態）」を生じる。定常状態に落ち着かないシステムは、生存不能として棄却される。この種のモデルは、米国ニューヨーク州のストーニー・ブルック大学の John Reinitz らによって最初に開発され、これだけ抽象性が高いにもかかわらず、ショウジョウバエの発生の初期段階をよく表現し、表現型の変異を予測することもできた。

Wagner らは次に、自分たちのモデルにある問いかけをした。それは、同一の表現型を作り出せる遺伝子型はいくつあ



モデルの概観：個々の円は遺伝子制御ネットワークを表し、そのうち色つきの円は遺伝子の発現を変化させるネットワークを表す。

るか、言い換えれば、種の発生プログラムのうち、昆虫の完全なボディープランを作り出せるものは何種類あるかという問題である。彼らはこの問題を、任意の遺伝子型を小刻みに進化させ（遺伝子相互作用を 1 つずつ変化させ）、同じ表現型を作り出す遺伝子型のみを維持していくという方法で検討した。

こうした「中立的」な進化の段階を何百回も繰り返すことにより、考えられるすべての遺伝子型からなる全空間の中で、同一の表現型を作り出す遺伝子型からなる「中立空間」を推定することが可能になる。比較的少数の遺伝子でも「同一の表現型を作り出す遺伝子型の数は驚異的に多い」と Wagner はいう。遺伝子型は、数が多いばかりでなく、広がりも大きい。最初の遺伝子型を起点として、これに対応する表現型を維持したまま、その仮定の空間の一端から他端へと移動し、まったく異なる遺伝子型に行きつくことができたのである。

現実の世界がモデルのように動いてい

るなら、調節ネットワークは変化のそぶりをみせることなく、裏で劇的な再編を起こすことができるはずである。Wagner の研究は、そのように多様な（そして変化する）基礎の上に同じ建物を建てられる能力が進化の過程で優位となる可能性を示唆している。Wagner らは、起点となる遺伝子型から 1 つだけ変異を生じた新しい表現型に着目するよう、アルゴリズムを修正した。ここで、仮想の中立空間の中の遠く離れた 2 点に位置する、同じ表現型を生じる 2 つの遺伝子型を想像してほしい。その一方を小さく変異させると別の表現型を生じ、もう一方を小さく変異させると、これとはまったく違った表現型を生じるだろう。Wagner らのモデルは、革新を起こさせることを意図するものではない。しかし、表現型を変化させることなく幅広い可能性を探ってきた遺伝子型は、その後は多様な方向に変異することになるのである。このように、目に見えないネットワークの変化は、生物により確実な解決法を授け、来るべき新たな困

難により適切に対処できるようにしているのかもしれない。

最終的な結果

昨年、ゲノム調節センター（スペイン、バルセロナ）の Mark Isalan らは、実際の遺伝子ネットワークを再編させる研究を行った⁶。Isalan は、大腸菌 *Escherichia coli* がもつ DNA 結合性の調節タンパク質を 22 個選出し、所定のタンパク質をコードする DNA が別のタンパク質の調節制御のもとに置かれた遺伝子配列を 600 通り近く作り出した。続いて、これらの人工遺伝子を 1 つずつ通常の細菌に導入して、大腸菌が本来もっている調節ネットワークにいくつかの新しいつながりを追加した。

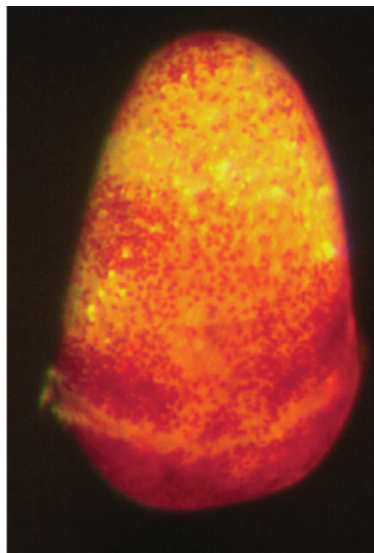
その結果、再配線された細菌の約 95% が生存したことから、細菌の調節ネットワークは恣意的な再配線に対して極めて安定であると考えられる。また、遺伝子組み換え細菌の中には、「熱ショック」などの培養条件を生き抜く能力に関して、元の細菌を上回るものもあった。遺伝子システムをコンピュータコードにたとえるなら、この発見は、航空交通管制ソフトウェアの中に恣意的に「Go-To」指令を挿入

してみたら、衝突事故がほとんど起こらなかったばかりか、定刻に目的地に到着できる飛行機が増えたというようなものである。研究チームは、少なくとも大腸菌に関しては、調節ネットワークの中にできた新たなつながりが問題を引き起こすことはまれであり、環境によっては適応度の向上につながる場合もあると結論づけた。

しかし、研究室内は自然界に比べて生物がさらされる環境の過酷さが足りないとして、研究室で行われた実験の進化的意義を疑問視する生物学者もいる。例えば、研究室で通常の方法で培養した酵母の遺伝子を体系的に欠失させる実験では、タンパク質をコードする全遺伝子の 80% 近くを欠失させても酵母は生存可能であることが示されている。しかし、これらの遺伝子が機能的配列としてゲノム中で維持されていることは、自然界での適応度に寄与していることを強く示唆している。そのため、コンピュータ・シミュレーションや研究室での実験により、ネットワークの再配線が無害、さらには有利となる場合さえあると示唆されたとしても、実際の生物が置かれる状況はそれとは違っている可能性がある。

酵母の接合型に話を戻そう。*S. cerevisiae*、*C. albicans* および *K. lactis* がもつさまざまな遺伝子ロジックは、2 種類の接合型を作り出すという点で同一の出力を生じているようにみえる。けれどもこれらは、人体や醸造所、チーズ工場といった多様な生態学的ニッチで有利となる未知の適応的特性をさまざまな生物に付与している可能性がある。「これらの酵母にみられるさまざまな接合型回路が、未知の優位性と結びついているのか、結びついているとすればどのような優位性であるのかは、まだわかりません」と Johnson は話す。

ウニの発生は、同じ成体ボディプランを作るための二者択一の選択が生活様式面での優位性を付与していると考えられる 1 つの例だ。例えば、*Heliocidaris* 属の 2 種のウニは南東オーストラリアの浅い水域に今なお共存しているが、その最後の共通祖先はチンパンジーとヒトの最後の共通祖先と同じ時期に生きていた。しかし、この 2 種の発生様式はまったく異なっている。*H. tuberculata* の胚は、まずは浮遊しながら餌をとる「プルテウス」という幼生になる。これは間接発生の一様態で、既知のウニ 1000 種の多くに共通しており、



Heliocidaris 属のウニは、幼生のときの形態はまったく異なっているが（左および中央）、成体の形態は類似している（右）。

この分岐群の原始的な様式であると考えられている。一方、*H. erythrogramma* は、わずか数日間で卵から成体を直接発生させるため、発生プログラムは全体にごちゃ混ぜになっている。その卵は *H. tuberculata* の卵の 100 倍も大きく、卵割後の各種細胞の運命もまったく違うものとなっている⁷。Wolpert があれほど神聖視した原腸形成の過程でさえ、再構築されている。それはあたかも、わずか 400 万年の間にチンパンジーが硬い殻をもつ卵として産み落とされ、発生し、最終的にはチンパンジーに似た生物となるように進化したようなものである。

複数の問題を解決する

2 種のウニの発生様式は、「棘に覆われ、岩に張りつく成体をどうやって作るか」という問題に対しては同様の解決法を採用し、「幼生時代を外洋でどうやって生き抜くか」という問題に対しては異なる解決法を採用したものであると考えられる。幼生時代に浮遊しながら餌を捕るウニは小さな卵をたくさん産み、地理的に広く分布し、捕食されて死ぬ確率が高い。一方、直接高速発生型のウニは大きな卵を比較的少数産み、隔離されたニッチにとどまることが多く、1 つの胚の生存率が高い。これらのウニについては、生物の表現型のある側面に関して「中立」な変化が、別の側面に関する優位性を付与していると考えられる。

こうした進化発生学的研究に異を唱える向きは多い。インディアナ大学（米国、ブルーミントン）で進化生物学を研究する Michael Lynch によれば、生物が高度なものへと進化していく背後には常に「自然淘汰の導き」があるという、一般的な見方は極めて誤解を招きやすく、ほとんどの生物学者が偶然の影響を過小評価しているという。特に、小さな集団では選択圧がなくとも「遺伝的浮動」の過程により、中立的な遺伝子の変化が多数派となっていく場合があることが過小評価されている

という。「集団遺伝学の観点からみないかぎり、進化の過程に意味のあることなどない」のだ。

遺伝子調節ネットワークに関しては、これが特によく当てはまる。遺伝子調節ネットワークは、点変異や重複、欠失による変化が起きても、全体的な機能にほとんど影響しないため、タンパク質をコードする遺伝子よりもはるかに速く偶然による進化を遂げる場合がある。例えば、調節タンパク質の新たな結合部位が出現したり消滅したりすることがあり、その変化は適応度を損なうことなく集団のなかにすばやく定着することができるのである⁸。こうした絶え間ない再編が、調節ネットワークを必要以上に複雑なものにしている。また、再編により重複が生じてネットワーク内の複数の部分が同じ役割を担うようになり、それがさらに別の再編を生じて、最終的には生体の機能を劇的に変化させることもある。Lynch は、Johnson の酵母の研究がこのことを如実に表していると考えている。

Lynch がよぶところの生物学的ネットワークのこうした「一見奇異な構造」は、発生生物学に対して、「個々の遺伝子を対象とする実験から、どうやってシステム全体を理解しようというのか」という疑問をつきつける。従来の発生生物学では、モデル生物のある遺伝子をノックアウトする実験から得られた機能に関する知見を、その遺伝子の配列が保存されているほかの種にまで拡張して適用していた。進化生物学者の Stephen Jay Gould は、「ほかの条件がすべて同じであるなら」と仮定して遺伝子の生物学的機能を論じるこの種の還元主義的手法を長年にわたり批判してきた⁹。システム進化発生学では、「ほかの条件がすべて同じ」である場合などないことを明確にした。どんな遺伝子の機能も、種に固有の背景を無視して規定することなどできないのである。

発生生物学者は、かつて生物間の共通性の根源を遺伝子に求めていたが、新し

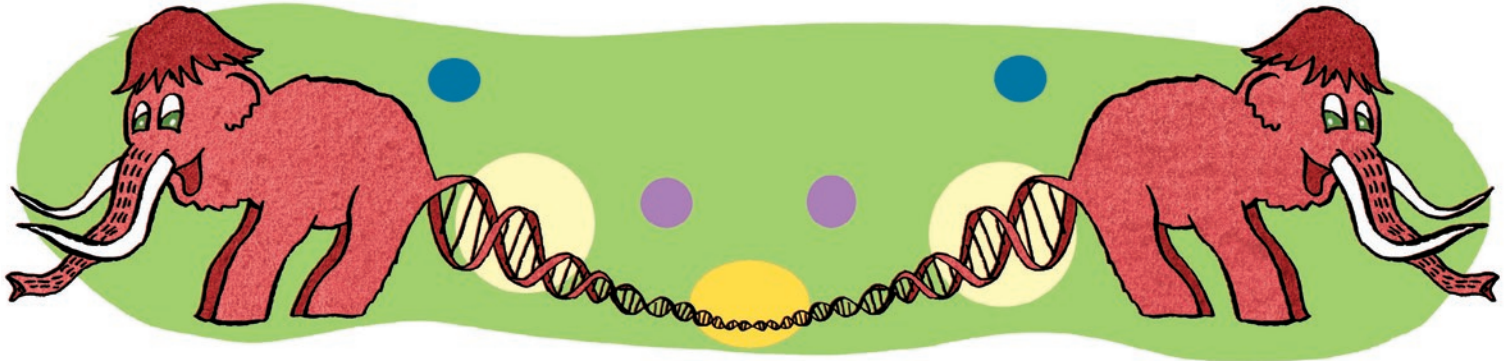
い説明法を見いだす必要がある。被囊動物と脊椎動物がともにオタマジャクシのような段階を経て発生するという事実からは、やはりそのプロセスを支配する共通の生物学的「規則」が存在しているはずだと考えられる。しかし、遺伝子も調節的なつながりも保存されていないとすれば、共有されているものとはいったい何なのだろう。共通の要素は、実際には調節ネットワークの別の特性にあるのかもしれない。

Lemaire らは現在、被囊動物を使ってこの問題に取り組もうとしている。被囊動物はボディープランが比較的単純で遺伝子の操作が容易であるため、その調節ネットワークの全容（発生の各段階で、すべての細胞の個々の調節遺伝子がどのように相互作用しているか）は、ほかのどんなモデル生物よりも解明に近づいている¹⁰。Lemaire は、原腸形成の過程を特徴づける「ネットワークシグネチャー」を抽出したいと考えている。それはおそらく、遺伝子間のつながりの密度や、利用されるフィードバックループの種類を記述する数式の形になるだろう。それができれば、シュペーマン形成体に誘導されて原腸形成が起こるヒトやほかの種の遺伝子調節ネットワークに、共通の要素があるかどうかを確認することが可能となる。

Wolpert の言が正しく、原腸形成が生涯で最も重要なときであるなら、その答えは知る価値があるだろう。 ■

Tanguy Chouard は、*Nature* のシニアエディター。

1. Lemaire, P., Smith, W. C. & Nishida, H. *Curr. Biol.* **18**, R620-R631 (2008).
2. Schroder, R. *Nature* **422**, 621-625 (2003).
3. Lynch, J. A., Brent, A. E., Leaf, D. S., Pultz, M. A. & Desplan, C. *Nature* **439**, 728-732 (2006).
4. Tsong, A. E., Tuch, B. B., Li, H. & Johnson, A. D. *Nature* **443**, 415-420 (2006).
5. Ciliberti, S., Martin, O. C. & Wagner, A. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **104**, 13591-13596 (2007).
6. Isalan, M. et al. *Nature* **452**, 840-845 (2008).
7. Wray, G. A. & Raff, R. A. *Dev. Biol.* **132**, 458-470 (1989).
8. Lynch, M. *Nature Rev. Genet.* **8**, 803-813 (2007).
9. Gould, S. J. *The Structure of Evolutionary Theory* (Harvard University Press, 2003).
10. Imai, K. S., Levine, M., Satoh, N. & Satou, Y. *Science* **312**, 1183-1187 (2006).



LET'S MAKE A MAMMOTH

マンモスを作ろう

Nature Vol.456(310-314)/20 November 2008

進化においては、生物がいったん絶滅すれば地球上から永遠に姿を消すというのが前提である。だが、そうではなくなるかもしれない。Henry Nicholls が、どうすればマンモスを冥界からよみがえらせることができるかを問いかけている。

今は亡きマイケル・クライトンは、1990年出版の小説『ジュラシック・パーク』で、絶滅した生物種を現代によみがえらせるというアイデアを、説得力あふれる巧みな表現と比類なきおもしろさを備えた作品として世に送り出した。その当時、塩基配列が明らかにされていた最も長いゲノムは、ウイルスのものだった。それから20年ほどの間に、数百種の動物ゲノムの塩基配列が決定された。そのリストに今週(2008年11月20日号)初めて、マンモス(*Mammuthus primigenius*)という、知名度が高く、絶滅に疑いの余地のない種のゲノムが加わった¹。生き返らせたいと思う絶滅種として、マンモスは恐竜と同じくらいドラマチックな生き物だろう。しかもマンモスの場合、ティラノサウルス・レックス(*Tyrannosaurus rex*)と違って、復活を手助けしてくれる近縁種が現代に生きているのだ。

完全なゲノムが手に入る可能性や、現代に近縁種が生きているという点からいえば、クライトンにとっても、恐竜よりマンモスをよみがえらせるほうが間違いなく簡単だっただろう。しかし、「相対的に容易」だからといって「実際に容易」なわけでは決してない。概要塩基配列という骨組みに肉づけをして、ゲノムから呼吸する生身の獣を作製するには、最低限でも以下のようないくつかの段階を踏む必要があるだろう。まず、復活させたい動物の(1つまたは複数の)塩基配列を正確に決定する。次に、これらの塩基配列から、完全な染色体セットを作り上げる。そして、これらを核膜で包み込み、できあがった核を発生のための卵に移植する。この卵を代理母の子宮内に着床させて、最終的に無事出産させる。しかし現在のところ、このうちのどの段階も不可能である。塩基配列の完全な解明から、現生ゾウ類から

の卵採取まで、現時点ではどの段階にも乗り越えられない大きな障害があり、これらの問題を解決しようと懸命に研究しているという話もいっさい聞かない。しかし、本当にこうした障害のために、夢が実現不可能なものになってしまうのだろうか。

塩基配列

「マンモスの復活」というこのむずかしい研究を成功させる第一歩は、生きた個体を作り出すための基礎情報として利用可能なほど精度の高い塩基配列を得ることである。マンモスのように死んでから長時間経過したDNAの塩基配列を決定するには、さまざまなレベルで劣化した配列断片を使用することになる。したがって、死後に起こりうる塩基対変化を検出して修正したり、細切れになった数百万もの短い断片を組み合わせてひとつづきの塩基配列を得る際に起こるエラーを回避したりすることが

必要となる。このためには、ゲノム 1 個分の DNA よりずっと多くの DNA 塩基配列を読み取らなければならない。「1 万塩基対につき 1 個未満のエラーしかない、十分な品質のゲノム塩基配列を得たいなら、試料として 12 倍の長さ（カバー率 12）の DNA を読み取る必要があるでしょう」と Svante Pääbo はいう。彼はマックス・プランク進化人類学研究所（ドイツ、ライプチヒ）の遺伝学部門の主任で、ネアンデルタール人のゲノムに関する研究を行っている²。今回報告されたマンモスゲノムのカバー率はおよそ 0.7 である。科学的には「十分な品質」だからといって、生き返らせようとする動物のゲノムの質も十分だというわけではない。ヒトゲノムにそのカバー率から想定されるエラーを適用すれば、変異 30 万個分に相当してしまうだろう。

カバー率は、配列決定に費やす資金が多いほど高くできるが、試料が古い場合にはかなりむずかしくなる。そういった試料は、細菌や菌類、その他の生物種の DNA によってたっぷり汚染されているから

である。Pääbo の話ではカバー率は 35 が上限であり、コペンハーゲン大学（デンマーク）の古代 DNA・進化研究グループの責任者である Eske Willerslev によると、このカバー率を達成するには「費用も時間もものすごくかかるだろう」という。しかしながら、塩基配列決定の費用はしだいに安くなっており、良好な保存状態と調整状態の試料が得られる可能性もあるので、解析の費用と時間は縮小されるはずである。Willerslev の見解では、現在解析ずみのどのゲノムにも劣らない品質のマンモスゲノムが、将来、いずれ作り出されることはまず間違いないだろうという。こうしたゲノムが生きた個体を作り出すのに十分かどうかは、まだ少々疑問の余地があるものの、時間と労力をかければ、エラーが十分に少ないゲノムにたどり着ける見込みは大きいだろう。

しかし、塩基配列情報だけでは不十分である。複数の染色体に、配列がどう配分されるのかを正確に解明しなければならないのだ。そのためには、損傷のない

マンモス細胞に含まれる染色体の数を数えて、ゲノムデータ全体の中で各染色体の開始部位と終了部位に当たる箇所を探し当てる必要がある。しかし、今回のように非常に保存状態のよいマンモス試料であっても、染色体に関する情報を得るにはほど遠い（下のコラム「必要なのは冷凍過程」を参照）。「マンモスの染色体数については、まだ何もわかっていません」。こう語るのは、マックマスター大学（カナダ、オンタリオ州）の遺伝学者、Hendrik Poinar である。ブロード研究所（米国、マサチューセッツ州ケンブリッジ）のゲノムシーケンス解析プログラムの共同責任者である Kerstin Lindblad-Toh は、同研究所が年内に、カバー率 7 でアフリカゾウ (*Loxodonta africana*) の塩基配列を発表できるだろうと述べている。そうなれば、マンモス遺伝学の研究者らがワッと殺到するだろう。しかし、アフリカにいたゾウ類の祖先種から 760 万年前にアフリカゾウ系統と分岐したマンモスが、その後に獲得したであろう染色体の変化

重要なのは冷凍過程

細胞核を人為的に作ることはむずかしいだろう。もしも既にその辺に転がっている好材料があるならば、わざわざ作る必要もないだろうが…。一部の研究者は、マンモスの復活には、核が良好な状態で保存されている冷凍マンモスを見つけてことが絶好の開始点になると考えている。

最近、日本の研究チームが、16 年間冷凍保存したマウス死体の細胞からクローン個体を作ることに成功した¹²。この成功によって研究チームは、「瞬間凍結や冷凍庫で保存さ

れたものとしてではなく、長期にわたって冷凍されていた組織から、核移植技術を使って動物個体を『よみがえらせる』」ことであえて言及している。彼らはその中で、特にマンモスについて取り上げている。しかし、古代 DNA を日々研究する人々は、これには同意していない。永久凍土層内で 1 年以上保存されていることは、研究室の -20℃ の冷凍庫で 16 年間保存することの代わりにはならず、また、凍結するまでにどれくらいの期間未凍結の状態であったか、誰にもわ

からないのである。

コペンハーゲン大学（デンマーク）で古代 DNA・進化研究グループを率いる Eske Willerslev は、凍結までには時間がかかるうえ、死んだ動物個体が永久凍土内に埋まるまでに、組織に損傷を与える凍結と解凍が何度も繰り返されることを指摘している。それによって、DNA が劣化する機会が大きく増すことになる。そのうえ、たとえ温度が 0℃ 以下でも多くの細菌が活動し、化石標本をさらに劣化させるのだと Willerslev は話す。彼に

よれば、核が損傷しておらず取り出して核移植が可能なマンモス細胞など、これまで見たことも聞いたこともなく、その理由は以上のことから説明できるという。マックマスター大学（カナダ、オンタリオ州）の Hendrik Poinar は、冷凍組織法に伴うこうした問題について、もっと簡潔にこう述べている「保冷温度が -20℃ の冷凍庫が 2 万年前からあったわけではないからね」。

H.N.

や遺伝子欠失、遺伝子重複、染色体の再配列などを、すべて見つけ出してその位置を特定するためには、膨大な量の作業を費やさねばならない。インドゾウ (*Elephas maximus indicus*) はアフリカゾウよりもマンモスに近いので、そのゲノム塩基配列は、アフリカゾウ以上に解析作業の助けになるかもしれない。

塩基配列決定において、とりわけむずかしい1本の染色体がある。それはY染色体である。哺乳類ではY染色体が通常非常に小さく、配列をえり分けるのがむずかしいのである。その理由の1つとして、Y染色体には反復配列が著しく多いことが挙げられる。アフリカゾウのゲノムでは、この問題を回避するために雌の塩基配列が決定された。「X染色体の配列を集めて並べることすらたいへんであり、Y染色体はそれ以上に、全染色体の中で最も構築がむずかしい染色体なのです」とLindblad-Tohはいう。『ジュラシック・パーク』に登場する恐竜たちはすべて雌となるように設計されていたが、これは不要な繁殖を避けるためだった。マンモスのクローン個体も、少なくとも第一世代についてはすべて雌になる可能性がある。ただしその理由は、単に、そのほうが簡単だからだろう。

十分な信頼度で塩基配列を決定するのが困難な反復配列領域はほかにもあり、なかでも最も注目すべきなのはセントロメアである。この領域は細胞分裂の際に、染色体の分配に必須とされる。セントロメアの正確な塩基配列を明らかにすることはほとんど不可能だと、エディンバラ大学ウェルカムトラスト細胞生物学センター（英国）のBill Earnshawは述べている。「どうにもならず、途方に暮れるほかありません。どの木もまったく同じに見える森の中に迷い込んだ気分になります」と彼はいう。

しかし、これは必ずしも障害とはならない。技術を駆使すれば、高精度での解析が可能となるからである。実際、2008年、Earnshawたちは、完全な機能をも

つ合成セントロメアを備えたヒト人工染色体を作り出した³。この方法は原理的にはマンモスの人工染色体にも有効だろう、とEarnshawはいう。同様に、染色体末端のテロメアとよばれる、もっと短い反復配列でも、代用が可能である。また、人工染色体の塩基配列には染色体複製を開始する特異的な部位も必要になるが、Earnshawは、「十分な長さのDNA鎖であれば、複製起点として機能できる配列を含んでいるはずだ」という。

最終的な疑問として遺伝的変異の問題がある。発表済みの哺乳類ゲノムの大半（マンモスの概要塩基配列も含まれる）は、ゲノム内のすべての塩基配列（すなわち、遺伝子をコードしている領域と非コード領域の配列をもつ）について、バージョンが1つだけしかない。しかし、哺乳類では個々の遺伝子について、母親由来と父親由来の2つのバージョンがある。対になる2本の相同染色体がまったく同じ塩基配列をもつマンモスをこの世に生み出すことは、至難の業といえるだろう。なぜなら、そこにあるすべての有害な遺伝子の影響が最大限に表れてしまうと考えられるからだ。遺伝子のさまざまなバージョンを見つけ出すことは、塩基配列解析の「やることリスト」の追加項目といえるが、マンモス復活を成功させるためには不可欠なことだろう。

DNA 合成

ゲノムの塩基配列を手間暇かけて詳細に決定し、エラーを修正し、染色体を特定し、重要な反復配列を適切に書き入れ、遺伝的変異を導入したなら、次は方向転換してDNA合成に向かう番だ。これまで作り出された最大の完全な人工合成ゲノムは、細菌のマイコプラズマ・ゲニタリウム (*Mycoplasma genitalium*) のものである⁴。このゲノムには58万2970塩基対が含まれているが、マンモスは47億塩基対で、ヒトゲノムの1.5倍である。マンモスがゾウと同じ数の染色体をもっているならば、そ

れぞれが平均およそ1億6000万塩基対からなる56本の染色体を、分担して作ることになるだろう。

ノースカロライナ大学チャペルヒル校カロライナ・ワクチン研究所（米国）の微生物学者Ralph Baricによれば、試験管の中で作られた塩基の短鎖をつなぎ合わせて、エラーの少ないおよそ8000塩基対の立派なDNA二本鎖を作ることができるという。さまざまな企業が、そうした塩基配列を1塩基対当たり1ドル未満で合成してくれるだろうし、試薬はそれ以下の値段である。しかし、隣り合う塩基配列を試験管内で互いに結合させるとき、DNA分子はしだいに不安定になる。マイコプラズマ・ゲニタリウムのゲノムを構築した、J・クレイグ・ベンター研究所（米国、メリーランド州ロックビル）の研究チームは、この問題に対処するために、不安定なDNA部分を「細菌の人工染色体」へ組み込み、大腸菌内の比較的快適な環境でさまざまな配列要素をつなぎ合わせた。そして最終段階で、大腸菌内で構築されて最大級の長さになった塩基配列を取り出し、それらを大腸菌よりも大きい酵母の人工染色体内へ組み込んだ。最後に、これらを生きている酵母細胞内で組み換



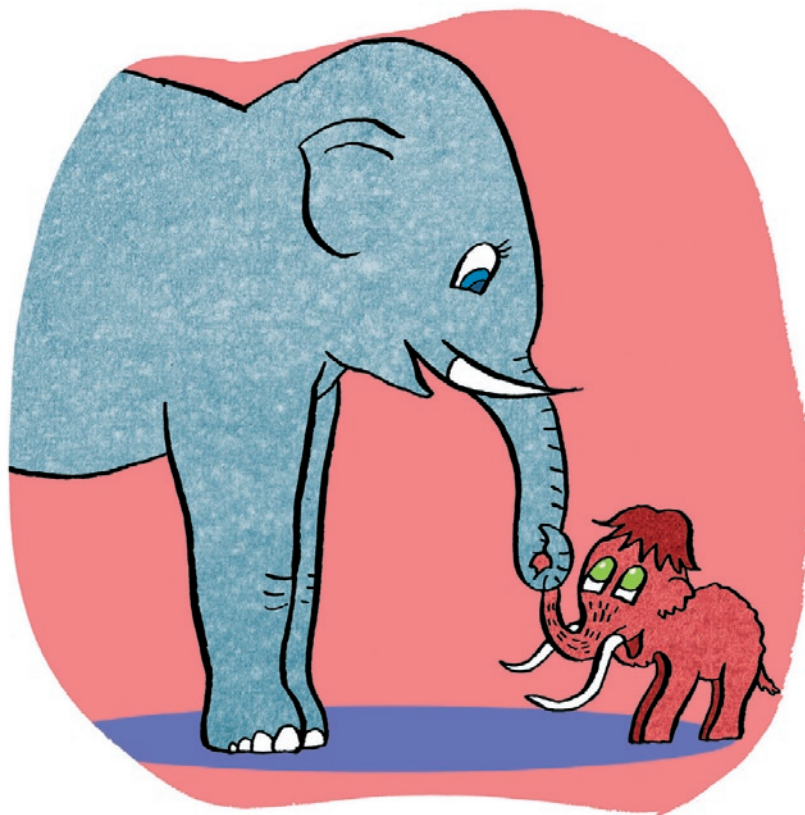
えて、完全なゲノムを内部に含む染色体を作り出した。

この手法は速さと費用の点からみてすばらしいものだ、とスタンフォード大学（米国、カリフォルニア州）生物工学部の Drew Endy は話す。しかし、その規模を拡大してマンモスの大きさの染色体に適応することは、直接的な方法では実現できそうにない。酵母の全ゲノムはゾウの中サイズの染色体よりはるかに小さく、結局のところ、1200 万塩基対余りが限界なのだという。「それに、酵母が、外部に由来するこれほど多くの DNA をうまく保持できるかどうか疑問に思えます」。Baric も同様の懸念を抱いている。「DNA 二本鎖が長いほど、片方の鎖に切れ目（ニックという）が入ったり二本鎖切断が生じたりしやすくなって、必須な遺伝子の劣化もしくは欠失が起こるのです」。

たとえ十分な品質で安定したマンモスの染色体を 1 本合成できるようになったとしても、続いてほかのすべての染色体にこの作業を繰り返さねばならないだろう。「そのうちすぐにマンモスに会えるとはとても思えません」と、Baric は結論づけている。しかし、合成生物学によって、ゼロから微生物ゲノムをある程度の信頼度で合成するまでには、そう時間がかからないだろうと彼はいう。これに使われる技術は、いずれマンモスなどの大型哺乳類のゲノムを再構築できるようになるかどうかを測る格好の指標になると、彼は考えている。忘れてはならないのは、現在のゲノム合成技術が、合成可能な最大の長さという点からいって、クライトンが『ジュラシック・パーク』を書いたころのゲノム塩基配列決定技術よりはるかに進んでいることだ。そして、それ以降、塩基配列決定技術がどのように進んだかを見てほしい。

染色体を包み込む

染色体が合成できたら、次は核の中に入れる必要がある。細胞は分裂のたびに染色体を核の中に再び格納するので、この



部分の過程はかなりよく研究されている。1980 年代に、むき出しの DNA をカエルの卵抽出物に加えると、すぐにタンパク質で包まれ、凝縮されてクロマチンになり、続いて膜断片が結合し融合して、そのクロマチンの周囲に機能性核膜が形成されることが明らかになった。「こうした人工の核は、DNA 複製や一部の DNA 転写を行うことができます」と、カリフォルニア大学サンディエゴ校（米国）で細胞発生生物学の教授を務める Douglass Forbes は話す。Forbes は、近い将来にマンモスの細胞核を作ろうとする者には、ゾウのようなマンモスに近縁な動物から得た核の断片を用いるのではなく、カエル卵抽出物を用いるよう助言すべきではないかと考えている。「体内受精で胎生の哺乳類の卵は、核の構築能力があまりないと考えられます」と彼女はいう。そうしてできたマンモスの「擬似的な核」をゾウ細胞の

細胞質内に移植すれば、擬似核に使われているカエル特異的な核タンパク質が、ゾウの核タンパク質に補完または置換されて、より哺乳類に近い感じになるのではないかと彼女はいう。

すべてのマンモス染色体が核膜に確実に包み込まれるようにすることも、やはり難題の 1 つだろう。「全染色体を注入したときに、何とかしてそれらがまとまった状態のままでいるようにする必要があります」と、ウェルカムトラスト・センターの Eric Schirmer はいう。これができないと、小型の核が複数できて、その中にランダムな組み合わせの染色体群が含まれる状態になってしまうかもしれないのだ。これらの染色体が互いにどのように共存するかによって、遺伝子の発現にも影響が出る可能性がある。今のところ、染色体を操作して正しい配置を取らせる方法は、まったくわかっていない。

卵の採取

次に、核移植の結果が予測できないことを検討したいところだが、それはゾウの卵を調達してからの話である。ゾウの卵は供給量が非常に少ないと見込まれるのだ。ゾウの雌は16週周期で排卵するが、妊娠や授乳のために排卵が5年前後止まるのが普通である。排卵周期に生じるこうした自然の空白期間をなくすことは、残酷であり有効でないと思われる。また妊娠していない雌のゾウは、大きな卵巣腫瘍を発生させる傾向が強い。さらに、ゾウの雌の排卵では、卵母細胞は1個しか放出されない。多胎妊娠・出産は、体の大きなゾウにとって致命的であり、双子は驚くほどまれにしか生まれない。

一方ゾウのメリットとしては、こうしたゾウの低頻度の排卵には早い段階の前兆があるということが挙げられる。これまで調べられている哺乳類の中では特異なこと

だが、ゾウの排卵では黄体形成ホルモンの急増が1回ではなく、18～20日後にもう1回ある。「最初のホルモンのピークによって膣粘膜が溶解し、1個の卵胞だけが発生に進みます。そして、2回目のピークで排卵が促されます」と、動物園・野生生物学研究所（ドイツ、ベルリン）のThomas Hildebrandtはいう。

ほかの動物では、前兆となるホルモンのこの急増後に、卵が発生中の卵胞を卵巣から採取することは非常に簡単だろう。超音波装置を利用して、卵を採取する器具を生殖器官までガイドしたり、腹腔鏡を使用したりすればよいのである。ただし腹腔鏡を使用するには、腹腔を膨らませて、外科的処置を行うためのスペースをあける必要がある。

残念ながら、ゾウは生物学的な特異性のために、これらの方法はどれも不可能である。大部分の哺乳類では膣口の位

置を見つけやすいが、ゾウは外界と処女膜の間に1メートル以上もある泌尿生殖道が存在する。この長さは雄ゾウのペニスと同じくらいであるため、交尾の後でも処女膜は無傷のままである。これはゾウの祖先が進化の過程で水中生活を送っていたころの名残なのかもしれない。Hildebrandtたちは、泌尿生殖道から、精子が通る処女膜の微小なすき間を抜け、さらに膣を通して子宮まで器具を挿入する方法を開発した。この方法を使って、性選別された精子で人工授精を行った。しかし、Hildebrandtの話では、こうした器具を子宮内へ挿入できても、何かほかのガイド法がないと、1個の成熟した卵胞の位置を特定することはほぼ不可能だという。しかも、ゾウの卵巣は、卵胞の正確な位置を超音波で明らかにするには、あまりにも腹腔の奥深くにある。また、ゾウは体壁と肺の間に胸膜腔がないので、腹腔鏡手術などは問題外である。「腹腔鏡手術の最中に腹腔を膨らませると、肺を圧迫してゾウを死なせてしまいます」とHildebrandtは話す。

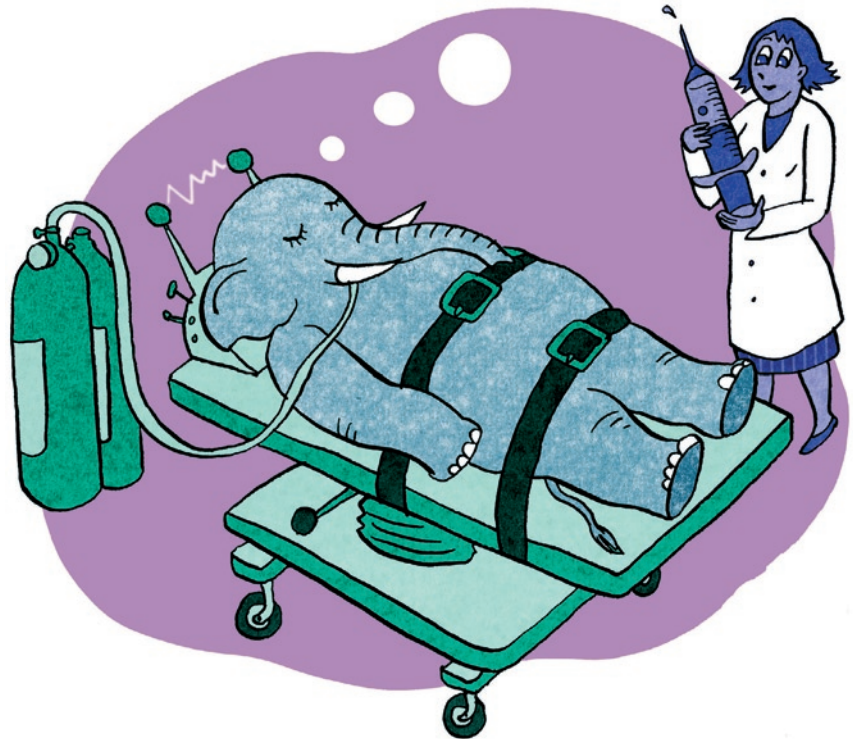
しかし、こうした難題を克服できるいい方法があるかもしれない。低温生物学では従来、1つの個体の卵巣から取り出した組織を別の個体の卵巣に移植している。この方法は、その組織がドナー個体から取り出されて冷凍保存され、レシビエント個体へ移植されるときに解凍処理を受けた場合でも、うまくいっていた。この研究は、化学療法後の不妊治療につながっただけでなく、絶滅危惧種から採取した卵巣組織を実験動物に移植し、必要に応じた卵供給源にできる可能性も高めた。ゾウの卵を確実に入手する唯一の現実的方法は、死亡して間もないゾウ個体の卵巣から組織を採取して、拒絶反応を起こさぬよう免疫系を抑制した実験用マウスもしくはラットにその組織のごく一部を移植することだろう、とHildebrandtは考えている。

これは実際には既に行われている。1990年代に、南アフリカのクルーガー



国立公園で間引き処分されたアフリカゾウから摘出した卵巣組織の冷凍保存試料を解凍し、マウスに移植したところ、成熟した卵胞のようなものの発達がみられたのである⁵。「ところが我々には、そうした卵が、要求にかなうかどうかを評価するための材料が十分になかったのです」と、ミズーリ大学（米国、コロンビア）の比較医学教授で、この解凍移植研究を率いた John Critser は振り返る。

ゾウでの研究はそれ以上進まなかったものの、異種個体に移植した卵巣組織に由来する卵から、生きていて見た目も健康な子を作り出すことは、既の実現している。しかし、そうした成功は、例えばマウス組織に対してホスト個体をラットにする⁶など、ごく近縁な種の間でのものだった。ゾウの卵がマウス体内でうまく成熟するかどうかを調べることは、はるかにむずかしいだろう。その理由は特に、マウスの発情周期がわずか4～6日しかないことにある。マウスの下垂体を摘出し、そのマウスにホルモンを投与してゾウの周期に近いホルモン周期を起こすことがおそらく必要だろう、と Critser はいう。「卵母細胞を得るために現在使っている簡便な方法のようなわけにはいかないのです。しかし、開発できないだろうと断言することはできません」。



核移植

卵を入手するお膳立てが整えば、ゾウの卵にもともとある核を除去して、マンモスの合成核を入れるスペースを作る技術を完成させるのに、そう長くはかからないはずである。しかし、核移植に必要な準備が、それですべてそろわなければならないと考えられる。呼吸によって細胞にエネルギー

を供給しているミトコンドリアにも、種によって特異的な独自のゲノムがある。確かに、ある種から採取した核と、別の種に由来するミトコンドリアを組み合わせても、生存能力のある雑種が生じうる。2001年には、ヒツジのミトコンドリアとムフロン（野生ヒツジの亜種）の核DNAをもつ胚から動物個体が発生・成長し、オン

マンモスのそっくりさんを作ろう

アフリカゾウ (*Loxodonta africana*) の全ゲノム塩基配列は、ブロード研究所（米国、マサチューセッツ州ケンブリッジ）からまもなく発表される見込みである。これは、アフリカゾウのゲノムと異なるマンモスのゲノム領域の解明や、マンモス固有の重要な遺伝的差異の探索開始に大いに役立つ

ずである。しかし同時に、偽マンモスともよべそうな動物を作る、もっと直接的で理にかなった方法につながる可能性もある。

例えば、体毛形成や体色、牙の成長に関与する遺伝子について大体わかれば、遺伝子操作や品種改良の技術を用いて、見た目がマンモスそっくり

のゾウを作り出せるのではないかと、マックス・プランク進化人類学研究所（ドイツ、ライプチヒ）の Svante Pääbo はいう。それは、純粋主義者や生態学者、そして現在の世界では失われた壮大な生き物を復活させようとする夢想家にとっては、マンモスとはいえず、満足できないものだろ

う。しかし、遊園地などのよび物としては、ひょっとすると十分かもしれない。しかもこの方法で、最もやっかいな合成生物学上の処理の一部を回避できるかもしれない。「せめてこれくらいは、私が生きているうちに見ることができそう」と、53歳になる Pääbo は語っている。 H.N.

ブレッタ (Ombretta) と名づけられた⁷。しかし、そこには不適合性のリスクが存在する。現生ゾウとマンモスの間では進化上の類縁関係が近いこと、不適合性の確率は低くなるが、アデレード大学（オーストラリア）の動物科学の教授である Stefan Hiendleder は、それでもまだリスクは存在するだろうと警告している。実際、ヒト細胞のミトコンドリアをほかの霊長類のミトコンドリアで置き換えた実験では、適切な呼吸が行われなかった⁸。これは、とりあえずマンモスの合成ミトコンドリアを急ぎょ作って、それらをゾウ卵の細胞質内に入れてみる必要があるということである。マンモスのミトコンドリアゲノムの塩基配列は既に十分に解読されているので⁹、この作業は比較的たやすいはずである。ただし、マンモスの合成ミトコンドリアを入れて雑種細胞を作る場合には、ゾウのミトコンドリアはすべて取り除かねばならないと、Hiendleder は注意を喚起している。

そうした懸念を抜きにしても、核移植は、新しい哺乳類を生み出す方法としてはいまだに偶然頼みの非効率的な方法である。核移植から胚の段階まで進めるのはほんの数例で、しかもそのすべてが無事に胎盤を形成できるわけではない。胎盤を形成できても、多くは自然流産を起こし、うまく誕生まで至ったほんの少数の個体も、高頻度で発生異常を起こす。

しかし、ことはもっとうまく運ぶかもしれないと期待してもいいだろう、とコネチカット大学（米国、ストアーズ）生殖生物学センターおよび動物科学学科の Xiuchun Tian は話す。核移植の非効率性についていちばんもっともらしい説明は、胚発生に適した方法で遺伝子が発現されていないからだ、というものである。Tian によれば、こうなるのはおそらく誤った「エピジェネティック」な信号のせいだろうという。エピジェネティックな信号は、DNA メチル化やヒストン修飾、マイクロ RNA の存在やクロマチン構造など、世代間で受け継がれるさまざまなパターンで、

どれも遺伝子発現に極めて大きい影響を及ぼす¹⁰。最近の研究で、核移植を少なくとも、正常な体細胞の核を胚様の状態へ誘導できることがわかっており、エピジェネティックな信号の影響やそれらの操作法を解明するうえで、この成果が役立つだろうと彼女は話している。

もっといい方法として、ぴったりのエピジェネティックな「衣装」で人工の核を「ドレスアップ」させるという、別の方法も考えられる。初期胚が妊娠出産までのすべての過程をまっとうできない運命にある場合でも、まだ、幹細胞の提供源として使用できる。これらを正常なゾウの胚に導入して、マンモスの細胞とゾウの細胞の混じったキメラを作るのである。こうしたキメラ個体は、妊娠出産までこぎつける確率が上がる可能性があり、マンモスにはならないが、これを使って次にマンモスを作り出す足がかりになると考えられる。

この方法で十分な数のキメラ個体を作り出された場合、その中には、卵巢もしくは精巣にマンモスの細胞が含まれる個体があるはずで、マンモスの卵もしくは精子

を作るゾウ個体が得られることになる。この種類の「生殖系列キメラ」は既に、いくつかの動物種で作られている。2004 年には日本の研究チームが、精巣にマスの細胞をもつサケを作り出し、このサケが作り出した精子は、マスの卵に受精して本物のマスの稚魚を生み出すことができた¹¹。

生殖系列キメラ個体から得られる配偶子は、適性なゲノム刷り込み（インプリンティング）を受けている可能性がかなり高い、と Tian はいう。実際、マンモスの卵とマンモスの精子が入手できれば、マンモス復活計画の実現は近いと考えてよさそうである。

胚移植

直接的な核移植で作られたものであれ、試験管内でキメラ個体由来のマンモスの卵にマンモスの精子を受精させたものであれ、マンモスの受精卵を入手できれば、「マンモスの復活」という難題もいよいよ最終ステージに入る。ゾウの卵は非常に入手しにくいので、ゾウの胚移植（子宮内に胚を注入すること）はまだ誰もやって



いないわけだが、Hildebrandt は胚移植のために何が必要なのかを考えてきた。彼によれば、まず最初に、ホルモン値がゾウの排卵を示した日に、泌尿生殖道にアーム状器具を挿入して、処女膜の方向に精子を含まないゾウ精液を少量注入するといったいう。「雌の子宮が胚を着床させる準備を整えるには、精子を含まない成分が必要だと思われます」と彼は話す。その後、クローンマンモス胚を子宮内に移植するが、そこまでの距離は合計およそ 2.5 メートルで、人工授精に使うのと同じ器具を用いることが可能なはずだと、Hildebrandt はいう。「卵管のすぐそばまで器具を挿入し、そこからクローン胚をゾウに戻すことになると思います」。4 細胞期の胚を、排卵の前後およそ 2 日の間に移植する必要があるだろうと彼はいう。

この時点で想定される最後の懸念は、マンモス胎児が代理母ゾウの子宮にうまく適合できるかどうかである。保存状態のよいマンモスから得られた情報からすると、少なくともサイズには問題がないはずだと考えられる。インドゾウの赤ん坊の出生時の体重はおよそ 120 キログラム、体高はおよそ 1 メートルである。1977 年にシベリア北東部で発掘され、「ディーマ (Dima)」と名づけられた有名な生後 7~8 か月の赤ん坊マンモスは、死亡した当時の体重と体高が、インドゾウの赤ん坊とほぼ同じだったと見積もられている。2007 年にロシアのヤマル半島で発見されて、「リューバ (Lyuba)」と名づけられた赤ん坊マンモスでも同じことがいえる。リューバの死亡当時の体重はまだはっきりと確認されていないが、最初の報告によれば体高はわずか 90 センチメートルで生後 4 か月だったと Daniel Fisher はいう。彼は、ミシガン大学 (米国、アナーバー) の生態学・進化生物学の教授で、この非常に保存状態のよいリューバの遺骸を詳細に調べた国際研究チームの一員である。こうした証拠の大半から、マンモスの新生児は現生ゾウの新生児とほぼ同じサイズだったと考

えられると彼は話す。「むしろマンモスのほうがもっと小さかったかもしれません」。どうやら幸いなことに、早産したマンモス胎児をどうやって保育するかは、心配なくとも済みそうである。

誕生とその後

人工的に作り出したマンモスが 1 個体のみであれば、それは種ではなく 1 匹の奇妙な動物にすぎない。いったん雌マンモスが生まれたら、ほかに次々と生まれるだろうし、その中に雄マンモスがいれば理想的である。生まれたマンモスたちのゲノムは、一定の多様性を確保するために調整する必要があるだろう。また、彼らが現代の生態系にうまく組み込まれるような生息地を見つけてやらなければならないだろう。これは、マンモスの染色体を人工合成し、核に格納して胚の段階まで進めると同じくらい、たいへんな仕事だと思われる。おそらく、きまじめな人たちにとっては、マンモス復活というアイデアは、あまりに奇抜で、あまりに高額な費用がかかり、そしてまったく非現実的で、まったく

魅力を感じないものであろう。しかし、哺乳類のクローン作製にしても、わずか 15 年前には非現実的なアイデアだとして多くの人々に無視された経緯がある。この事実からすると、実現不可能だと早々に言い切るべきではないと思われる。ダーウィン生誕 200 年に当たる 2009 年現在では、絶滅した動物種の復活は、まだ夢物語の域を出ないだろう。しかし、今後 50 年で、どんな動物がよみがえって生命を吹き込まれ、地球上を闊歩しているかは、誰にもわからないのだ。

Henry Nicholls は英国グリニッジ在住のサイエンスライター。

1. Miller, W. *et al. Nature* **456**, 387-390 (2008).
2. Green, R. E. *et al. Cell* **134**, 416-426 (2008).
3. Nakano, M. *et al. Dev. Cell* **14**, 507-522 (2008).
4. Gibson, D. G. *et al. Science* **319**, 1215-1220 (2008).
5. Gunasena, K. T. *et al. Anim. Reprod. Sci.* **53**, 265-275 (1998).
6. Snow, M., Cox, S.-L., Jenkin, G., Trounson, A. & Shaw, J. *Science* **297**, 2227 (2002).
7. Loi, P. *et al. Nature Biotechnol.* **19**, 962-964 (2001).
8. Hiendleder, S., Zakhartchenko, V. & Wolf, E. *Reprod. Fert. Dev.* **17**, 69-83 (2005).
9. Gilbert, M. T. *et al. Science* **317**, 1927-1930 (2007).
10. Yang, X. *et al. Nature Genet.* **39**, 295-302 (2007).
11. Takeuchi, Y., Yoshizaki, G. & Takeuchi, T. *Nature* **430**, 629-630 (2004).
12. Wakayama, S. *et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA* **105**, 17318-17322 (2008).

進化遺伝学

Mammoth genomics

マンモスのゲノミクス

Michael Hofreiter

Nature Vol.456 (330-331)/20 November 2008

マンモスのゲノム塩基配列の大半が再構築された。こうした研究は、絶滅した種の生物学的特徴や進化の解明に大いに役立つにちがいない。

時代は変わるものだ。哺乳類のゲノムの塩基配列を決定する作業（シーケンシング）は、高速処理技術が開発されたおかげで大きく様変わりした。当初は数年を要する数百万ドル規模の一大事業だったのが、10年足らずのうちに、1つの研究室で数か月以内に完了できるようになったのである。その進歩はめざましく、今では、絶滅したマンモスの核ゲノムの塩基配列を、ほぼ完全に決定することさえ可能になった。

Millerたちは今回、その成果を *Nature* 2008年11月20号の p.387 に報告した¹。これまでの研究で、ミトコンドリア由来のマンモス DNA については、既に塩基配列が解読されている（細胞内小器官であるミトコンドリアには、独自に小さいゲノムが備わっている）。しかし、マンモスの細胞核ゲノムは40～50億塩基対あって、ミトコンドリア DNA よりずっと大きく、生物学的情報はるかに多く含まれており、これを解読することは桁違いの難題だった。

およそ10万年も前の化石から得られる古代 DNA は、非常に細かく断片化していて、ごくわずかしかな存在しておらず、

そのうえ細菌や菌類の DNA にまみれているのが普通である。そのため、絶滅した生物種の全ゲノム塩基配列を読み取るなどということは、かつては到底思いもつかなかった。というのも、30年ほど前から大規模な塩基配列決定法として唯一使うことのできたサンガー法²は、こうした古代 DNA 解析に適していなかったからである。しかし2005年になって、新しい DNA 塩基配列決定法が報告された³。これは454法とよばれるもので、開発当初のシーケンシング能力でも1回当たり2000万塩基対と、サンガー法の100～1000倍になった。その後、シーケンシング能力は1回当たり約1億塩基対まで向上し、またほかに、Solexa、SOLiD、HeliScope という3種類の塩基配列決定法も登場した。これらの手法では、1回につき100億塩基対もの配列データが得られる。しかしこれらはすべて、「ショットガン」法とよばれる方法で、シーケンスできる塩基配列は短く、エラー率が極めて高い場合もある。そのため、個々のヌクレオチド部位についての信頼度が高い塩基配列を得るには、ゲノムを高いカバー率で幾重にも読み取る必要がある。Miller たちの試算では、今後マンモスの核 DNA についてさらに高い精度で塩基配列を決定するには、およそ10～20倍のカバー率が必要だろうという。シーケンシング能力が急速に向上していることを踏まえると、これもまもなく達成できるだろう。

こうした進歩によって、分子遺伝学についての考え方も変わり、絶滅種のゲノムを最終的にどうやって解明すればよいかも明らかになった。大事なことは、現生生物の DNA を研究するうえでは短所となる新手法のいくつかの側面が、古代 DNA を対象とする場合には長所になるということだ。サンガー法は1回の反応で、最大800塩基対の個々の DNA 鎖を配列決定できるが、新手法ではもっと短く、ときには30塩基対程度しか調べることができない⁴。これは、現生生物の DNA を調べる場合には短所となる。しかし、古代 DNA はそのほとんどが100塩基対以下の短い断片になっているので、問題とならないのである。



2007年5月、西シベリアのユリベ川付近で、約3万7000年前に絶命したとみられる、生後約半年の雌の凍結マンモスが発見された。「リユーバ」と名づけられたこのマンモスは、全身が非常に良好な保存状態で残り、今後の解析に大きな期待が寄せられている。

研究者たちはすぐに、こうした新しい可能性を有効活用した。454 法は、利用できるようになってからわずか数か月で、マンモスのゲノム解析に適用され、論文が発表されたのだ⁵。そこに報告されたのは 1300 万塩基対の配列で、これはサンガー法による最初の古代ゲノム解析研究⁶で対象範囲となった配列の、約 1000 倍以上にあたる。2006 年 1 月に発表されたこの論文⁵では、論文著者たちが、マンモスの全ゲノムの塩基配列決定も計画していることを明言していた。Miller たち¹は今回、マンモスのゲノムのおよそ 70% について報告しており、全ゲノム解読という目標を達成するために大きな貢献をしたことになる。

Miller たちにとって、配列決定の際に非常に助かったのは、絶滅生物にしては珍しいことに、マンモスの化石標本の一部が永久凍土層内で凍っていたことである。これは DNA の保存のためだけでなく、古代ゲノムの塩基配列決定に理想的な DNA 提供源である体毛の保存のためにも、理想的な状況である。体毛にまだ DNA が残っていれば、そのほぼすべてが体毛のもち主である絶滅種のものであり、骨の場合でよくみられる細菌や菌類由来の DNA ではないことになる。したがって Miller たちは、合計「わずか」41 億塩基対の配列決定をするだけで、およそ 33 億塩基対のマンモス DNA を得ることができた。研究チームの試算によれば、マンモスの全ゲノムはおよそ 47 億塩基対と見積もられ、ヒトゲノムの 1.4 倍の大きさだろうという。

マンモスのゲノムのサイズはヒトゲノムよりも大きい、DNA の塩基置換率はヒトゲノムより小さいらしい。塩基置換率とは、塩基が別の種類の塩基に置き換わっている率のことで、進化上の変化の尺度になる。マンモスと近縁種のアフリカゾウのゲノム間の置換率はわずか 0.6% である。この値はヒトとチンパンジーの間の置換率のおよそ半分だが、これら 2 種のゾウは、ヒトとチンパンジーの分岐と同じころか、それよりわずかに早く分岐したと考えられている¹。どういうわけか、ゾウ類の核ゲノムの塩基置換率はヒトと大型類人猿の間の値よりも小さいのだ。これはミトコンドリアゲノムについても同様で⁷、ヒトと大型類人猿の間の置換率はやはりゾウ類どうしの値の 2 倍を超えている。核とミトコンドリアのゲノムは異なる酵素群によって複製されており、ゾウ類でこの 2 箇所のゲノムがどちらも、ヒトと大型類人猿の間よりもゆっくりと進化している理由はまだ明らかになっていない。

今回得られたのはマンモスゲノムの概要配列であり、標準的な方法で遺伝子を予測するにはあまりにも断片化していてエラーも発生しやすい。それでも Miller たちは、ほかの 50 種の脊椎動物と比べて、マンモスに特有のタンパク質コード領域をいくつか見つけ出した。こうしたマンモス特有の差異の存在は、意外なことではない。それぞれの哺乳類種には、ほかの一部の哺乳類種にはない特有のアミノ酸置換があると

考えられているからである。例えば、ATP2C1 タンパク質のアミノ酸 52 個からなる断片には、マンモスに特有のアミノ酸置換が 1 つ含まれているが、この断片にはテンレックとフタツユビナマケモノにそれぞれ特有な 2 つのアミノ酸置換の部位も含まれている。また、タンパク質 C1orf190 のアミノ酸 30 個からなる断片内には、マンモスがほかの有胎盤哺乳類と異なるアミノ酸の部位があるが、同じ部位でジリスやカンガルーネズミでもアミノ酸置換が生じている。Miller たちは、見つけたアミノ酸の差異が「表現型効果が生じる可能性…を有意に高める」ものだと言っているが、彼らの解析は、1 個のアミノ酸置換が機能上の結果、もしくは適応上の価値をもつことを実証したものでは決していない。こうした疑問に対する解答は、対象となるタンパク質を精査することでしか得られないのである。

今回のマンモスゲノムからは、絶滅種の全ゲノム塩基配列決定が実際に可能であることや、そうした種の DNA 塩基配列には現生動物の配列と比較して違いがあることがわかった。では、このほかにいったい何を知ることができるのだろうか。多くの概要ゲノムプロジェクトと同様に、あまり多くのことはわからないだろう。しかし、概要ゲノムは物語の序章にすぎない。ゲノムプロジェクトの主な役目は、その後の研究のための情報提供源になることであり、このことは最初のヒトゲノム塩基配列決定を報告した論文^{8,9}が何千回と引用されていることから明らかである。

絶滅種の核ゲノム概要配列として次に手に入りそうなのは、ヒトに最も近いネアンデルタール人のものである。ネアンデルタール人については、ミトコンドリアゲノムの全塩基配列が既に公表されている¹⁰。ゲノミクスにおいては、今後しばらくは研究の多くが、ゲノム塩基配列について完全にその機能や生物学的意義を解明することと、全塩基配列を決定することになるだろう。実際、今回の絶滅したマンモスのゲノム塩基配列はもちろんのこと、現生脊椎動物の公表済みゲノム塩基配列の大半は、現在のところ概要配列にとどまっている。しかし将来的にはゲノミクス研究によって、塩基配列レベルでのどの違いが、マンモスと現生ゾウ類、あるいはヒトとネアンデルタール人の間で表現型の違いが生じる基盤になっているのかが解明されることだろう。そのためには、機能や生物学的意義が十分に解明されたゲノムが必要不可欠な基礎情報となる。

Michael Hofreiter、マックス・プランク進化人類学研究所（独）。

1. Miller, W. et al. *Nature* **456**, 387–390 (2008).
2. Sanger, F., Nicklen, S. & Coulson, A. R. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **74**, 5463–5467 (1977).
3. Margulies, M. et al. *Nature* **437**, 376–380 (2005).
4. Smith, D. R. et al. *Genome Res.* **18**, 1638–1642 (2008).
5. Poinar, H. N. et al. *Science* **311**, 392–394 (2006).
6. Noonan, J. P. et al. *Science* **309**, 597–599 (2005).
7. Rohland, N. et al. *PLoS Biol.* **5**, e207 (2007).
8. International Human Genome Sequencing Consortium *Nature* **409**, 860–921 (2001).
9. Venter, J. C. et al. *Science* **291**, 1304–1351 (2001).
10. Green, R. E. et al. *Cell* **134**, 416–426 (2008).

Can triniobium tin shrink accelerators?

ニオブ3スズで加速器は小さくなる？

Eric Hand Nature Vol.456 (555) / 4 December 2008

世界の粒子加速器のほとんどで使われている超伝導加速空洞は、改良の余地がなくなりつつある。しかし、これまで注目されていなかった超伝導材料を使えば、粒子を短距離で高いエネルギーに加速できる加速空洞を作れるかもしれないことが、新たな理論的研究でわかった。それが実現すれば、加速器の建設費用はずっと安くなるだろう。

しかし、ニオブ3スズなどの材料で作られた新しい加速器部品を開発し、テストするにはまだ何年もかかるだろう。

超伝導加速空洞の性能を改良するため、研究者たちは何十年も努力してきた。超伝導加速空洞を連続して並べ、マイクロ

波パルスを入力すると、荷電粒子を加速する強い電場ができる。加速された荷電粒子は、素粒子実験や、高強度光源となるシンクロトロンなどで使われる。加速空洞はニオブで作られることが多い。ニオブは金属で、絶対零度の数度上まで冷却されると超伝導を起こす。

飛躍的な性能向上

科学者たちは、この金属の性能の向上にも取り組んできた。溶接方法、巻き方、空洞形状、表面処理を工夫して「加速勾配」を着実に増加させてきたが、進みは遅かった。加速勾配は、加速空洞で粒子を特定の速度にどれだけ速く加速することができるかを示す尺度で、メガ電子ボルト毎メートル (MeV/m) で表される。1つの加速空洞による加速勾配は、実験室でのこれまでの最高の達成値で 59MeV/m だ。加速器全体は数百の加速空洞が連なっていており、現実的な条件のもとでは、実験室での半分の加速勾配を達成することもむずかしい。

ニホウ化マグネシウムやニオブ3スズなどのほかの超伝導材料も見つかっているが、それらで加速空洞を作る研究はほとんど行われてこなかった。コーネル大学 (ニューヨーク州イサカ) の物性理論研究者 James Sethna は「こうした新しい材料の性能は、ニオブよりもずっと悪いか、少なくともそれほどよくはないと考えられていました。しかし、私たちの見積もりによれば、これらの材料を使うことで劇的に高い性能を得ることができるはずだ」と話す。

Sethna はラトガーズ大学 (ニュージャージー州ピスカタウェイ) の Gianluigi Catelani とともに研究を行い、その結果は *Physical Review B* に掲載される。また、物理学プレプリントサーバー arXiv ですでに手に入る (<http://arXiv.org/abs/0810.4720>; 2008)。Sethna は「ニオブ3スズの加速勾配は最高で 120MeV/m、ニホウ化マグネシウムの場合は 200MeV/m に達する可能性があります」という。

そうした加速勾配を実現するまでには時間がかかるだろうが、将来の加速器建設費用を大きく減らすことができるかもしれない。例えば、70 億米ドル (約 6300 億円) の費用がかかると見積もられている計画の中の次世代加速器「国際リニアコライダー (ILC)」は、500 ギガ電子ボルトのエネルギーを達成するために、数千個の加速空洞と 31 キロメートルの長さのトンネルが必要だ。しかもそれは、ニオブ製の加速空洞が 30MeV/m 強という野心的な加速勾配目標を達成できたとしての見積もりである (右のグラフを参照)。もしも新材料で理論的に可能とされる 200MeV/m まで加速勾配を上げることができれば、ILC の長さははるかに短くなり、トンネルやビームラインなどの建設にかかる費用を減らすことができるかもしれない。

国際リニアコライダーに

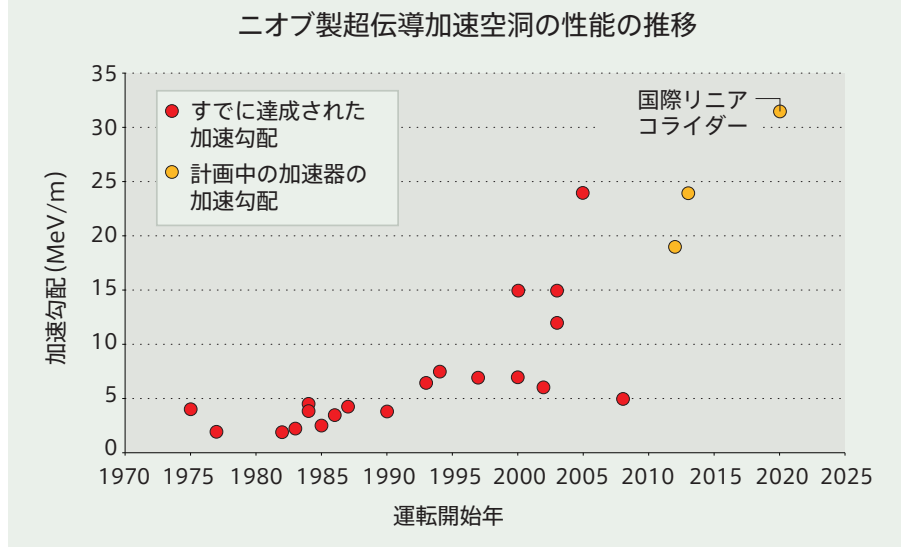
Sethna によると、超伝導材料の限界を記述する従来の古い理論では、運転温度の極端な低さや超伝導体の中にできる渦 (こうした渦は磁力線に対する障壁になる



現在の加速器の加速空洞は、ニオブで作られている。

ため、加速空洞はより高い勾配を実現できる)を正確に説明することができなかった。「実験家はこれまで、『私たちは一生懸命ニオブでやってきたのです。今さらなぜ、ほかの材料を試す必要があるのでしょうか?』と言い訳するのが常でした」とSethnaはいう。「そんな彼らに対して、私たちがにわかに『あなたたちは間違った理論研究者の意見を聞いていたのです』といい出したのです」。

コーネル大学の超伝導の専門家 Hasan Padamsee は、Sethna の研究結果に興味している。Padamsee は 1990 年代後半、ニオブ 3 スズで加速空洞の試作品を作ったが、ニオブで作られたものよりも性能は低かった。しかし、それはニオブ 3 スズの基本的な性質ではなく、特定の試料に伴う問題のせいだったのだと Padamsee は Sethna の今回の研究結果を見て思うようになった。



Padamsee は「新材料を使った性能のよい加速空洞を完成させるには、少なくとも 5 年のはかかるだろう」と話す。それでは、近い将来に ILC に使うには間に合わないが、ILC の性能をさらに上げるころには間に合うかもしれない。バージニア州ニューポートニュースにあるトマス・ジェファソン国立加速器施設の上級研究員 Peter Kneisel は、それほど楽天的で

はない。彼は、ニオブ製加速空洞を少しずつ改良し、また、その限界は受け入れるほうが良いと考えている。

「隣の芝生はいつも青く見えるものです」と Kneisel は話す。彼は、40 年にわたってニオブ製加速空洞を改良してきた。「今回の新材料だって、実際に加速器に使えるようになるのは 40 年後かもしれません」。

SOURCE: H. PADAMSEE

NEWS IN BRIEF

Scheduling problems beset delayed Mars mission

延期された火星探査計画を悩ませる打ち上げ日程の問題

Nature Vol.457(248)/15 January 2009

実施が延期された米航空宇宙局 (NASA) の「マーズ・サイエンス・ラボラトリ (MSL)」ミッション (右写真) が、ゆとりのない打ち上げスケジュールの中から打ち上げ日を決めようと動き回るなかで、さらなる問題に直面している。

原子力電池駆動の探査車 MSL は、火星上に生物が生息していたことを示す証拠を探索することになっており、当初の計画から 2 年遅れの 2011 年末までに打ち上げが予定されている。

MSL ミッションにとっての最初の打ち上げ可能時期は 2011 年 10 月だが、

その場合には、木星の磁場と重力場を調べるミッションであるジュノーの打ち上げが同年 8 月に予定されているために厳しい制約を受けることになる。第 2 の可能時期は 12 月なのだが、そうになると火星への着陸地点は北半球が有利になり、火星上で MSL が探査すべき地域をめぐる論争が再燃するおそれがある。このジレンマを解決するために、既に大幅な予算オーバーとなっている MSL ミッションに対して 5000 万米ドル (約 45 億円) の追加支出が行われる可能性があり、ミッション終了までの総



予算が最大 23 億米ドル (約 2100 億円) まで膨れ上がることが予想される。

この記事のロングバージョンは、<http://tinyurl.com/9j3ptj> を参照。

NASA/JPL-CALTECH

Neurons on border patrol

境界を認識するニューロン

Asher Mullard doi:10.1038/news.2008.1313 / 18 December 2008

行く手をさえぎる壁や溝を認識する特殊な脳細胞が見つかった。

自分の周囲の環境空間にある境界を見つけ、頭の中の地図を作製するのを助けるニューロンが、ラットで発見された。

これらのニューロンは「境界細胞 (border cell)」とよばれ、空間内の進路を見つけ出すのに役立つニューロン (神経細胞) としては、4 番目に見つかったものである。既に見つかったもののほかの 3 種類は、1 つ目が、決まった位置を通り抜けるときに発火、つまり興奮する「場所細胞」であり、これによって自分が今いる場所がわかる。2 つ目が「方向細胞」で、これは顔が特定の方向を向いているときに発火し、コンパスの役目をする。3 つ目の「グリッド細胞」は、環境空間に重ね合わせて六方格子状に配置し、自分がある特異点に対応する細胞が発火する。

今回、ラットの脳の嗅内皮質に境界細胞があることを初めて見つけたのは、ノルウェー科学技術大学の神経科学者である Edvard Moser が率いる研究チームである¹。彼らが単一ニューロンの活動を記録していたとき、頭の中の地図 (認知地図) に関連してはいるものの、地図作製にかかわる既知の 3 種類のニューロンのどれとも異なる応答をするニューロンをたびたび目にしたのである。

「初めのうちは、それらのニューロンを無視していました」と Moser はいう。しかし研究チームはやがて、理論から存在を予測されていた² 境界細胞という種類のニューロンを、自分たちが見つけた可能性があることに気づいた。

そこで Moser たちは、ラットが小さい部屋の中を走り回るときにこれらのニューロンがどのように応答するかについて、改めて集中的に取り組んだ。すると、この境界細胞は、ラットが壁に近づいたときに発火することがわかった。ほとんどの

場合、1 個の境界細胞は 1 つの壁面と関連していたが、一部の境界細胞は複数の壁面に応答した。

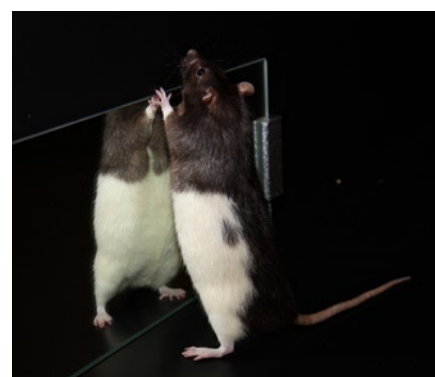
小部屋の壁を広げたところ、ラットがどれか 1 つの壁のどこに近づいても、その壁と関連するニューロンが発火した。このことから、これらのニューロンは境界全体に応答しているのであって、局所的な区画に応答するのではないことがわかった。また、境界を壁面ではなく垂直な崖状の構造にしても、ニューロンは壁面の場合と同じように応答したことから、ニューロンの活動を引き起こすのは壁面という構造ではなく、境界そのものであることが明らかになった。

「これらの境界細胞は、[自分の置かれた環境空間の] 構造を検知し、その空間がどのくらいの大きさなのかを知らせてくれるのです」と、ダートマス大学 (米国) の神経科学者、Jeffrey Taube はいう。

認知地図のモデル化

ロンドン大学ユニバーシティカレッジ (英国) の Neil Burgess は、境界細胞が存在するはずだと最初に主張した研究者の 1 人である。彼は、自分の予想が正しかったことが実証されたのを知って喜び、「ほとんどの人は私のモデルに見向きもしていなかったと思います」と語った。

Burgess も Moser も次のステップとして考えているのは、動物が 4 種類のニューロンによってどのように、自分の居場所を知るための認知地図を共同で作りに上げているのかを解明することである。Moser の予想では、例えば、境界細胞が何らかの仕組みでグリッド細胞を環境空間の適切な境界にそろえて整列させているのではないかと、いう。また彼は、境界細胞は、ラットが進路を考える際の



ラットには、自分の周囲にある物理的境界の認識に専念するニューロンが備わっている。

介助役として特に重要だと考えている。

認知地図作製にかかわるニューロンについての知見は、ラット以外の動物でも得られている。場所細胞はヒトで、グリッド細胞はマウスで、方向細胞はマウス、チンチラ、サルで既に見ついている。「[境界] 細胞も、ヒトをはじめとする高等な哺乳類に存在していると強く確信しています」と Moser はいう。

Moser は 4 年ほど前にも、グリッド細胞という予想もしなかった細胞を見つけ、認知地図の研究者たちを驚かせた。彼はこの業績を、運がよかったことと、嗅内皮質という正しい場所に注目したおかげだとしている。この場所は、海馬への主要な情報入力を行っている脳領域であり、現在わかっているように、頭部方向細胞やグリッド細胞、境界細胞の存在する領域でもある。「今回の論文を読んだとき、まさきに思いましたよ。この研究チームは次にいったい何を見つけるんだ」と Taube は語っている。

1. Solstad, T., Boccara, C. N., Kropff, E., Moser, M.-B. & Moser, E. I. *Science* **322**, 1865-1868 (2008).
2. Hartley, T., Burgess, N., Lever, C., Cacucci, F., O'Keefe, J. *Hippocampus* **10**, 369-379 (2000).

Synthetic opals show their colours

合成オパールが見せる色

Geoff Brumfiel doi:10.1038/news.2008.1334 / 24 December 2008

電氣的に色を切り替えられる材料が、安価な電子ブックや広告用ディスプレイの実現を約束する。

スイッチを切り替えるだけでどんな色にも変化する材料の開発に取り組む企業家と化学者グループが、その商業化を阻んできた重大な障害を乗り越えたと報告している。

「フォトニック・インク (P-Ink)」の開発者たちは、この材料は電子ブックや広告ディスプレイに利用できるという。最近 *Angewandte Chemie*¹ に掲載された報告によれば、その完成品は数ボルトの電圧をかけるだけでどんな色でも表示できるというのだ。

電子インクは、アマゾン社の電子ブックリーダー「Kindle」のような商品で既に実用化されている。現在の技術の大半は、電場を利用して油滴や色素粒子を操作しているが、これは電圧の有無に応じてディスプレイ上の画素が明るくなったり暗くなったりするもので、大部分は白黒表示しかできない。一方 P-Ink は、色素を用いることなくどんな色でも表示することができる。ここで利用されているのは、半貴石であるオパールを虹色に輝かせている効果（遊色効果）と同じものである。

輝かしい成功

オパールは、直径わずか数百ナノメートルの球状のシリカ（二酸化ケイ素）粒子が積み重なってできている。この粒子に光が当たって反射すると、干渉と回折によりその波長の一部が除去されて、材料に見かけの色が生じる。

トロント大学（カナダ）の Geoffery Ozin とブリストル大学（英国）の Ian Manners は、数年前から、電気によって光学的性質を調節できる合成材料を使ってこの効果を研究してきた。この材料を作るにはまず、ガラス板の上にシリカ粒子を 180 ナノメートルの幅で積み重ね、

これをテンプレートとする。次に、鉄原子を含む電気活性ポリマーをこれに加えて、粒子の周囲にゲルを形成させる。この材料を電解液とともに電解槽に入れて電圧をかけると、ポリマーゲル中の鉄原子と電解液の間で電子が動き回るようになる。ポリマーゲルの内部での液体の動きがこれを膨張または収縮させ、その光学的性質を変化させる結果、さまざまな波長の光が反射するようになる。

研究チームは、フッ化水素酸を使ってシリカのテンプレートの部分を溶解させることにより、この装置を改良することにも成功した。材料に蜂の巣状に小さな孔があき、この孔に電解液が入り込むことで、電子の移動速度が格段に大きくなるのである。

この改良によって、P-Ink はより明るく、より反応性が高くなると同時に、必要な電力が少なくなった。最新の P-Ink は、3 ボルトにも満たない電圧で可視スペクトルの全域にわたる色を出すことができ、数秒で色を変えることができる。

期待と課題

現在、この技術の開発に従事しているのは、操業を開始したばかりの Opalux 社である。トロントを本拠地とするこの会社は、Ozin のかつての教え子 André Arsenault が率いている。Ozin によると、Opalux 社は既に広告主から注目されているという。タイムズスクエアやピカデリー広場にあるような高価なカラー広告板とは異なり、P-Ink を使った広告は安価でエネルギー効率もよいものになるはずだ。「コストこそ、我々の成功なのです」と Ozin はいう。原理的には、この材料を使って、色を変えられる部屋や建物も建築可能だという。



合成オパールを利用した次世代の広告用ディスプレイは実現するだろうか？

電子インク企業 Liquavista 社（オランダ、アイントホーフェン）の主任技術者 Johan Feenstra は、「P-Ink は素晴らしい技術です」という。けれども彼は、この材料を大量生産する方法を考えることが次の課題になるだろうと付け加える。「はっきりした色を出せる製造プロセスを確立することがカギになります」と彼はいう。P-Ink の色はゲルの微細構造を完璧に作り上げるにかかっているため、それは「うんざりするような作業」になるかもしれないのだ。

Ozin によると Opalux 社は、融通の利く、既存の太陽電池製作技術に手を加えて、この材料を製造しようとしているという。 ■

1. Puzzo, D. P., Arsenault, A. C., Manners, I. & Ozin, G. A. *Angew. Chem. Int. Edn*, **48**, 943–947 (2009).



大学との連携で変わる動物園像

小島あゆみ（サイエンスライター）

2008年、2つの大学が動物園と研究・教育面での連携を開始した。1つは、誕生したばかりの京都大学野生動物研究センターと京都市動物園・名古屋市の東山動植物園、もう1つは、北海道江別市の酪農学園大学と札幌市の円山動物園の組み合わせだ。このような大学と動物園の包括的な連携は、双方がともに相手にない知識やノウハウをもっているという認識から出たもの。大学が動物園で何を始めるのか、その現状取材した。

幼稚園や小学校の遠足で、親や祖父母に連れられて、デートで、自分の子どもを連れて…、動物園はほとんどの日本人が行ったことのある場所といえるかもしれない。動物好きならば、飼育員になりたいと考えた人もいだろう。

日本は、世界的にみても人口当たりの動物園数が多いといわれている。そんな身近な動物園だが、その役割は案外認識さ

れていないのではないだろうか。動物園の社会的な役割は、一般にレクリエーション、自然保護、教育、研究の4つとされる¹。

日本の動物園はどの役割が弱いのか？

校外学習として子どもたちが動物園に出かける機会もあるだろうから、「教育」はイメージがわきやすいかもしれない。傷ついた野生生物を治療したり、不正輸入

された動物を保護したりしていることはよく知られているため、「自然保護」もわかりやすいだろう。しかし実際には、動物園がもつ教育や自然保護への寄与の範囲はもっと広い。自然環境と動物や人間とのかわりを伝える環境教育の場として、また絶滅危惧種など、展示されていない動物の飼育にも力を発揮していることはあまり知られていない。このような点から見ても、

日本の動物園の役割はレクリエーションとしての側面が強く、教育や研究の部分が弱いといわれている。

一方、欧米の動物園では、「王侯貴族の所有物の陳列場」が市民に開放され、「生きた動物を見せる博物館」として発展した経緯があり、野生動物を研究対象にし、同時に研究者のポストを確保している。京都大学野生動物研究センターの伊谷原一センター長（教授兼任）は「例えば、米国シカゴのリンカーンパーク動物園には30数人の研究者がおり、そのうち十数人が学位をもっています。また、類人猿などの研究で有名なドイツのマックス・プランク進化人類学研究所は世界のトップの研究者を集めていて、ライブチヒ動物園の霊長類舎のプロジェクトにかかわっています」と説明する。

海外の有名動物園のホームページを見れば、多くの研究プログラムがあり、博士号をもった研究者がいることや、動物園内だけでなく野生生物の生息域での研究や保護のプロジェクトに動物園がかかわっていることがわかる²⁻⁵。

これに対して、日本では獣医師を除き、学位をもった研究者が動物園に就職するのはレアケースだ。そのため、野生動物の研究者の研究成果が飼育方法や動物の展示、一般の人たちへの教育に生かされにくい。また、世界的にも評価が高い、日本の動物園が脈々と蓄積してきた飼育や展示のノウハウや動物に関する知識が科学的にまとめられて外に出る機会も多くはない。これは研究のための情報収集がしにくいということでもある（日本野生生物医学会は1996年に誕生しているが）。

日本の動物園に研究者がほとんどいない理由の1つは、日本の多くの動物園は公立で、予算や人事は自治体が決めるため、動物園の管理や飼育にかかわる役職は役所内のほかのポジションと同様に扱われることにある。全国の90の動物

園（都立、県立、市立、区立、国立など69、民間〔会社立〕20、その他〔財団〕1）と67の水族館が加盟する、（社）日本動物園水族館協会の北村健一専務理事（元円山動物園園長）は「規模と予算が大きい東京都立の動物園を除くと、研究者を職員として雇うことはできないのが現状です」と話す。

同協会が2008年3月に出した『日本の動物園水族館総合報告書』によると、アンケートに答えた157の動物園・水族館のうち、園長・館長に職員採用権があるのは55園・館（35%）、予算執行権があるのは84園・館（54%）。また90の動物園で常勤の獣医師がいるのは69園（77%）、常勤の学芸員がいるのは34園（38%）だった。

北村専務理事は「ワシントン条約や生物多様性条約など国際的な条約の発行でわかるように、動物保護は世界レベルで考える時代になっている一方で、動物園の運営は県・市レベルのまま。正直にいうと、世界を視野に動物園の運営を考えられる人材はなかなかいないのです」と語る。

野生動物保全学や動物園科学の創成が目標

2008年4月、世界的にも有名な霊長類研究所をもつ京都大学は、新たに野生動物研究センターを設立し、ほぼ同時にまず京都市動物園と、続いて6月に名古屋市の東山動植物園と、野生動物保全の取り組みについての協定を締結した。

これまで日本では、個々の研究者が直接交渉して動物園と付き合い、例えば、動物園で死んだ動物の解剖・死因の特定、動物行動学、動物園を取り巻く社会学などの研究を行ってきた。また、動物園で獣医師や飼育員として勤務した人が大学の教員になる例もある。ただ、同センターのように大学と動物園が包括的に連携することはこれまでなかった。

きっかけは、京都大学・尾池和夫総長の

「大学には植物園、水族館、博物館があるのに、動物園がないのはなぜか」という素朴な疑問からであった。もともと同大学では野生動物、特にシカ、クマ、イノシシなど身近な大型の野生動物はあまり研究されておらず、動物研究では1つの動物種をテーマとする場合が多い。

伊谷センター長は「その動物がいる環境、ほかの動物とのかかわりまで研究範囲を広げると、京都大学の基本理念である‘地球社会の調和ある共存’に結びつく。そこで野生動物をテーマに、動物園とも連携しようという発想になりました」と話す。そして、イルカの行動、希少動物の分子生物学など、これまで同大学になかったテーマを研究する研究者が集められ、同大学が得意とするフィールドワークやライフサイエンスを生かし、野生動物保全学や動物園科学を創成することを目標とした。

「京都市動物園や東山動植物園で働く人たちにも、動物園での動物の飼育、展示、教育を分析することによって、科学的なバックグラウンドをもった動物園になるように、一緒に動物園を発展させよう」と話しました。飼育員の人たちにも、研究に加わってほしいと考えています」と伊谷センター長。

京大では動物展示や環境教育の方法も助言

現在、同センターでは、霊長類研究所から異動してきた田中正之准教授が京都市動物園に常駐し、マンドリルやシロテテナガザルを対象に比較認知科学の研究を行っている（次ページの写真）。

また、村山美穂教授（動物遺伝学）らによる、ゴリラやチンパンジーの性格分析の研究も始まった。この研究は、動物園での繁殖に利用できるのではないかと期待されている。

京都市動物園は創立から106年と日本で2番目に古い歴史をもつ動物園だが、

広さは4ヘクタール弱と政令指定都市の動物園の平均面積の約4分の1しかない。かつ、平安神宮や南禅寺のすぐそばという観光地に位置しているため、拡張は不可能。「少子化によって来園者数が減るなかで、京都大学との連携によって特色を出すことができる」と長谷川淳一園長は歓迎している。

すでに田中准教授らの提案でゴリラやダチョウに対して、居住環境を豊かにするための環境エンリッチメントの試みが始められており、野生動物研究センターの協力のもと、来春には類人猿舎の新築によって、チンパンジータワーやチンパンジーの学習室ができあがる。夏休みの中学生の動物観察では、田中准教授が方法をアドバイスし、京都大学の大学院生もガイドに加わった。こうしたハード・ソフト両面からの連携が始まっている。また、東山動植物園では、同センターからの要請を受けて、霊長類研究所の研究者が実験研究や展示開発を行っている。

北海道では環境教育の充実をめざす

酪農学園大学（北海道江別市）と円山動物園（札幌市）が2008年5月に締結した「包括的な連携と協力に関する協定」では、環境教育の人材と場を相互に提供するという双方の「教育」の役割の強化の面が強い。もともと約20年前から、同大学獣医学部の新入生オリエンテーションが同動物園で行われていたが、2007年からは主に環境システム学部を中心に、学生の実習の場とすることを想定して、協議が始まった。

この協議の中心になったのは、環境システム学部生命環境学科の吉田剛司准教授。ウィスコンシン大学とイリノイ大学大学院で9年間、野生動物保護管理学を研究した。帰国後は、(財)自然環境研究センターの研究員として外来生物問題や希少種の保護に取り組み、動物園での講習会を企画してきた。「例えば、交通事故に遭う動物や、ペットとして輸入されたアライグマによる農業被害を考えるとよくわかりますが、野生生物の保護・管理は、結局は人をどう管理するかにつながります。アライグマの話を聞いて、アライグマをそばで見られる動物園は環境教育の場としてふさわしい」と吉田准教授はコメントする。大学に赴任してからは、動物園という場が学生たちのコミュニケーション力やマネジメント力の向上に役立つはずと考えていたという。

一方、円山動物園では、行政監査や市民アンケートを契機に2006年から動物園の改革が始まっていた。市民に「わたしの動物園」と自慢してもらえる動物園にするために、企業経営者、大学学長、旅行会社や新聞社の社員、教員らによる札幌市円山動物園リスタート委員会が設置され、2007年3月には基本構想を策定。札幌市の環境教育の拠点、北海道の生物多様性の基地となり、多様なメッセージを発信するメディアとなることが目標となった。

吉田准教授と札幌市環境局円山動物園経営管理課の鈴木真課長との出会いを契機に連携案が浮上、その後、約1か月で学長と園長の間で合意が成立。何ができるかを話し合い、試行する約1年間の「お見合い期間」後、協定の締結に至った。「動物園としてウイークポイントであった教育や研究を大学が担ってくれるという話は、タイミングがよかった」（鈴木課長）、「酪農学園大学は獣医学、酪農学、環境学の3つの学部があり、動物園にかかわりたいと考えている学生も多い。研究のフィールドとして、あるいは共同研究する相手として動物園はストライクでした」（吉田准教授）と相思相愛だったというわけだ。2007年冬には、吉田准教授の研究室が2008年の干支であるネズミの展示を任せられ、ネズミの捕獲、展示パネルの作成、展示場での案内を担当した。2008年5月以降は、同大学の学生による環境教育のボランティア団体「eco Ark（エコ・アーク）」が園内のこども動物園で、子どもたちにゲームを通して、生態系や動物の特徴などを教えている（コラム「大学生が動物園で環境教育を実践」を参照）。

提携によって、動物園で死んだ動物の解剖にも立ち会う機会ができ、「飼育員志望の学生に、飼育員になること、あるいは、なってからのたいへんさを理解してもらいやすくなった」と吉田准教授。来年度からは、円山動物園の獣医や飼育員らを講師に、動物園に関する講座を単位制にする計画もある。

吉田准教授らは、道内での発見例が少ないシロマダラ（ヘビの一種）の生息確認調査に着手しており、道内各地からシロマダラの出現情報を集めている。この研究には円山動物園のヘビの飼育員も加わっている。「飼育員たちの豊富な知識や経験はこれまで学問の体系に入れるのがむずかしかったが、大学と一緒に活動することで、勉強する機会を得ることが多く、モチ



京都市動物園での研究風景。京都大学野生動物研究センターの田中正之准教授が、マンドリルにタッチパネルを見せ、数の順序を覚えさせる学習実験を行っている。マンドリルは順番通りにタッチできると、ほうびとしてリンゴをひとつかけらもらえる。この実験を通じて、ヒトやチンパンジーとの比較の視点からマンドリルの知性を研究する。実験はマンドリルの檻の前で行われるため、動物園の入場者から質問が飛ぶこともある。

大学生が動物園で環境教育を実践

酪農学園大学の学生たちが組織した団体「eco Ark (エコ・アーク)」は、円山動物園の子ども動物園で環境教育を担当している。参加する子どもたちの人数に合わせて、オリジナルのゲームやアメリカの環境教育プログラム「Project WILD」のゲームから合うものを選び、子どもたちに遊びを通じて動物の特徴や食物連鎖、生態系のバランスなどを知ってもらう。現在のメンバーは48人。「子どもたちが楽しんでくれるとう

れしい」「子どもとふれ合いながら、環境について学べる」「プレゼンの練習になる」などの手応えを感じている。

結成のきっかけを作った同大学の吉田准教授は「動物園との交渉、プログラム作り、集客、わかりやすい話し方などを学生たち自身が工夫するようになり、性格が明るくなった学生もいる」と話している。来年度は小学校の授業に参加することも構想中だ。

A.K.



小島あゆみ

ベーションも上がりました」と鈴木課長。

また、酪農学園大学は西興部村と2007年5月から学術協定を結んでおり、この1月、吉田准教授の仲介により、円山動物園と西興部村が相互協力に合意、西興部村の自然を通じて、円山動物園が酪農学園大学とともに北海道の動物の保全と研究を進める準備が整った。このように協定締結の効果はさまざまな部分に表れている。「研究現場と動物園のつながりは、1人の研究者や1研究室がやっているだけでは長続きしにくい。今回の提携は紙1枚の協定ですが、双方のトップどうしの理解によって、情報が入りやすくなったし、研究の強化が期待できます」と吉田准教授は話している。

動物園だからこそできる研究や教育

動物園がもつ学術的・教育的な価値に目を向けた大学と、研究や教育にかけられる人材や資金が手薄な動物園が手を結ぶのは、ある意味自然なことなのかもしれない。まだ始まったばかりの連携・協力だが、当事者となった研究者たちには動

物園でできる新たな教育・研究が見えてくるようだ。

吉田准教授は「農業被害を避けるためにアライグマやエゾシカ、ヒグマを駆除している事実や、イグアナのように飼育にコストがかかるエキゾチックペット、もはや普通種となりつつあるアメリカザリガニや外国産クワガタなど外来生物を飼うのをやめようという話を動物園で伝えられるようになれば」と抱負を語る。

伊谷センター長は「例えば、アフリカのサバンナでゾウやキリン、サイなど動物どうしが出会ったときお互いをどう認知し、行動を決めているのかを野生のフィールドワークで調べるのはむずかしいが、動物園ではできる可能性があります」と話す。また、飼育下で異常行動だと思われる行動は、実際に野生では見られないのかをフィールドワークで観察することもできる。「こうして動物の行動を詳細に分析できるようになれば、動物園での展示方法も変わるかもしれません」。

さらに、ヒトの老化や長寿のように未解明の部分が多い研究分野や「第六感」の

ようにヒトが失いつつある感覚の研究において、動物の研究がヒントになることも期待される。

伊谷センター長は、京都市動物園で将来的に全面改修が行われるならば、入園者が減る夏の時期の暑さ対策も兼ねて、動物園全体を森にし、類人猿舎内に野外フィールドワークで使うテントを建ててほしいと要望している。長谷川園長は「アフリカやアジアの森で行う研究をここですということ。こういう発想は動物園関係者からは絶対に出てきませんね」と笑う。

今後、このような大学と動物園の連携がもっと進んでいけば、動物園で動物だけではなく、「研究者」を観察できる機会が増えるかもしれない。

1. (社) 日本動物園水族館協会
<http://www.jazga.or.jp/info/index.html>
2. ロンドン動物園
<http://www.zsl.org/conservation/>
<http://www.zsl.org/science/>
3. クリーブランド・メトロパークス動物園
http://www.clemetzoo.com/whats_new/research.asp
4. サンディエゴ動物園
<http://cres.sandiegozoo.org/>
5. フィラデルフィア動物園
<http://www2.philadelphiazoo.org/phil/Conservation/Wildlife-Research-at-the-Zoo.htm>

熱で磁気の流れを作るスピナーゼーバック効果を発見!

齊藤 英治、内田 健一

磁石の両端に温度差をつけることで磁気の流れ「スピン流」が発生する新たな物理現象を、慶應義塾大学理工学部で齊藤英治専任講師、東北大学金属材料研究所の前川禎通教授らの研究チームが世界で初めて確認した。新たな磁気デバイスの開発、発電源などに道を開く成果で、*Nature* 2008年10月9日号¹に掲載された。今回の実験は、齊藤研究室の大学院生内田健一さん（当時大学4年生）が卒業研究で行ったもので、その意義、苦労などを2人に聞いた。

独自の検出技術で、新たな熱エネルギー変換現象を見つける

Nature Digest — スピン流版のゼーバック効果の発見ですね。

齊藤 — 金属の両端に温度差をつけることで電圧が生成される現象「ゼーバック効果」は、ドイツの物理学者トーマス・ゼーバックが今から2世紀も前の1821年に発見しました。これを応用し、熱電変換能の異なる2つの金属を接合した素子「熱電対」は精密な温度計として広く利用されています。電流はマイナスの電荷を帯びた電子の運動ですが、電子には電荷のほかにもう1つスピンという微小磁石の性質があります。スピンは上向き、下向きの2つの状態があり、この偏りが磁石になるわけです。電流が流れない、このスピンだけの運動が「スピン流」とよばれるもので、簡単にいえば磁石の流れ。ゼーバック効果のように熱によってスピン流も生成できないだろうかと、世界中の研究者が長年、探し求めてきました。スピン流をとらえることが非常にむずかしかったのですが、我々は、2006年に発表した逆スピンホール効果^{2,3}を利用した独自の検出技術を駆使し、スピン流版のゼーバック効果（「スピナーゼーバック効果」と命名、図1）の実証に初めて成功しました。この検出技術が大きな前進を導いたことになります。

ND — 逆スピンホール効果とはどういうものですか？

齊藤 — スピンホール効果^{4,5}とは、金属や半導体に電流をかけると、電流と垂直な方向にスピン流が発生する現象です。逆スピンホール効果は、この反対の現象。つまり、スピン流が発生すると、その流れに垂直な方向に電圧が生じる現象のことです。電荷を伴わないスピン流によって電圧が生じるの

は、スピン流を担っている電子を横向きに曲げる力が物質中で働くからです。この現象は「スピン軌道相互作用」として知られていて、曲げる方向はスピンの向きに依存します。スピン流は、上向きのスピンをもつ電子と下向きのスピンをもつ電子がそれぞれ同じ数、逆向きに流れているため、上向きのスピンの流れと下向きのスピンの流れは同じ方向に曲げられるわけです。スピン流と横向きの力、この作用によってスピン流に垂直な方向に電圧が発生することになるわけです。

ND — 検出技術はこの逆スピンホール効果をとらえるわけですね。

齊藤 — そうです。逆スピンホール効果を検出するかぎりは白金です。白金がスピン流を効率よく電気変換するからです。我々は、鉄とニッケルの合金（ $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ ）と白金からなる素子を作製しました。合金に温度差をつけると、そこで励起されたスピン流が、白金によって電気変換され、その電圧を検出するという仕組みです（図2）。合金は、厚さこそ20nmと薄いですが、縦6mm、横4mmと大きいものです。これがよい結果につながりました。というのも、従来、スピン流の流れは、長くても数 μm のオーダーで消えてしまうために微小な試料を作製しなければならず、それが検出をむずかしくしていました。しかし、大きな素子では逆スピンホール効果による出力電圧が増幅されるため、効率よくスピン流を観測することができるのです。そして測定の結果、数mmの長い試料に流れるスピン流の観測に成功しました。従来の技術より1000倍以上の長い距離にわたってスピン流が生成可能であることも証明したわけです。

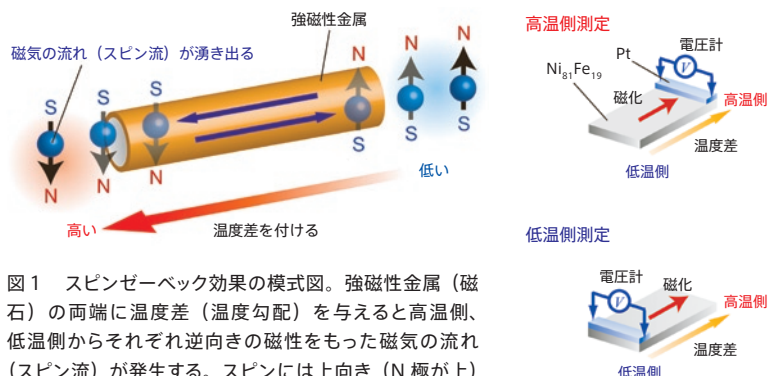


図1 スピナーゼーバック効果の模式図。強磁性金属（磁石）の両端に温度差（温度勾配）を与えると高温側、低温側からそれぞれ逆向きの磁性をもった磁気の流れ（スピン流）が発生する。スピンには上向き（N極が上）と下向き（N極が下）の2種類がある。

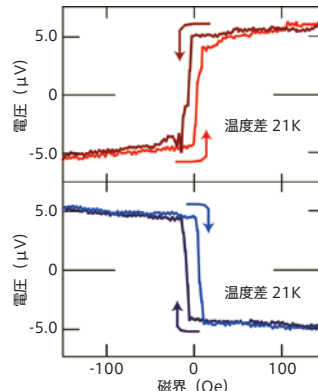
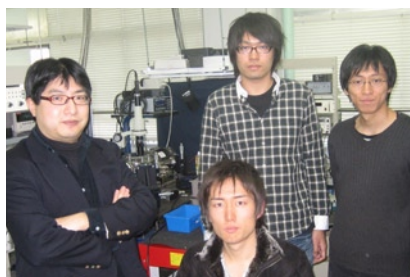


図2 逆スピンホール効果によって生じた電圧が磁場に依存することを示す実験。鉄とニッケルの合金（ $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ ）と白金からなる素子において、白金が高温側にある場合と低温側にある場合の測定で、それぞれ逆符号の起電力が観測された。このような起電力のふるまいは、温度差によってスピン流が生じたことを示す（スピナーゼーバック効果）証拠となる。温度差を大きくするほど、生じる起電力も大きくなる。



齊藤 英治（さいとう・えいじ）／慶應義塾大学理工学部物理情報工学科専任講師。工学博士。1971年、東京都生まれ。1996年、東京大学工学部物理工学科卒業。2001年、同大学院工学系研究科博士課程修了。同年、工学博士取得、慶應義塾大学理工学部物理学科助手。2006年より現職。2004年、英国ケンブリッジ大学キャンベディッシュ研究所客員研究員、2007年科学技術振興機構（さがけ）研究員。2002年、武井賞（日本応用磁気学会）、2008年、サー・マーティン・ウッド賞。

内田 健一（うちだ・けんいち）／慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻修士課程1年。1986年、神奈川県生まれ。2008年、同大理工学部物理情報工学科を首席で卒業。2008年、秋季応用物理学会の講演奨励賞など受賞多数。

左の写真は、今回の研究に携わった齊藤研究室のメンバー。左が齊藤専任講師、手前が内田さん。後方は博士課程1年の安藤和也さん（中央）と博士課程3年の針井一哉さん（右）。

卒論で未開拓分野を切り開く

ND — 今回の成果は学部生だった内田さんの卒論でもあります。その意味でも話題を集めました。

内田 — テーマは、最先端分野ですので、試行錯誤の連続でした。スピン流を捕捉するのに半年、その現象を的確に説明する理論を構築するのに半年かかりました。素子の作製は、そのプロセスが重要で、作製条件を変えながら何度も素子を作っては測定を繰り返しました。検出の精度は徐々に上がってきて、3か月ほどで手応えを感じました。理論は、スピン流の基礎を理解することから始めました。スピン流がなぜ起こるのか、その駆動力はスピンの濃度勾配（拡散方程式）が考えられていました。つまりスピンの蓄積の濃度差で、濃度の高いほうから低いほうへスピン流が起こるわけです。しかし、スピンゼーベック効果は、この拡散方程式では説明が付きません。そこで新たな仮説を立て、東北大学と共同で解析を繰り返し、新たな理論に至りました。それは拡散ではなく、スピントロピーという概念です。

ND — それは、どんな概念ですか？

齊藤 — 簡単に説明すれば、熱を与えたとき、その熱がどれだけ運動エネルギーに転換されるのかを表す量の違いです。同じ熱を与えたとき、スピンによって、運動エネルギーが高くなりやすいのか、なりにくいのかの差があり、スピンの運動エネルギーの高いほうから低いほうへ流れ、スピン流が生じるというものです。今回のスピンゼーベック効果は既存の理論では説明できない現象でしたが、実験と理論がうまくかみあって理解が進んでいくという意味で、理想的な成果だと思います。

スピントロニクスの中核を担う研究成果

ND — 今回の成果はどんな分野に応用できますか？

齊藤 — 大容量メモリとして期待される「MRAM」など磁気デバイスは、微小な磁石の向きを「0」「1」に置き換えて情報を記録します。現在、この向きの制御に電流や磁界を用いますが、消費エネルギーが大きく、限界があります。今回の成果は、磁石の両端に温度差をつけるという非常に単純な方法でこの壁を破る可能性を示すものです。熱でできたスピン流によって磁化の向きの制御をしたり、そのスピン流を電気

エネルギーに変換し、利用したりすることも可能になります。これまでない簡単な手法でスピン流源や電流源を確保でき、超低損失磁気デバイス開発などに道を開くものです。温度勾配さえあればスピン流を長距離にわたって生成できるので、スピン流に関する実験研究もしやすくなり、発展が期待できます。スピンの情報を利用して、新たな電子デバイスを開発するスピントロニクス研究の中核を担うと思います。

ND — この分野に進んだ経緯とおもしろさを教えてください。

齊藤 — 慶應義塾大学の物理学科で助手をしていたころは、ナノ磁性の研究をしていました。時はナノテックブームの真っただ中です。磁性体の研究では、スピン流が重要なかぎを握っていますが、実はその原理、概念はわかっていないことが多いことに気づきました。物理の根幹である概念に迫り、原理を開拓していこうと思いました。1988年の巨大磁気抵抗効果の発見など、スピントロニクス分野は発展の可能性が大きい。新しい金脈や新現象を見つけることができる、科学の進展に貢献できるというやりがい、満足感があると思っています。

内田 — 学部生のときに所属していた学科が工学系だったので、3年生のときは私も工学系の研究室に進もうと思っていました。でも研究室配属の直前に、最先端の基礎研究分野に大きな魅力を感じ、齊藤研究室を選びました。齊藤先生は若くて面倒見もよく、研究室も自由な雰囲気、環境もすばらしい。知的好奇心は尽きません。研究者の道をめざしたいと思っています。

ND — 最後に学生や若い研究者に送るメッセージを。

齊藤 — この研究室もそうですが、物理学の新たな概念の発見などは、1人というよりチームの共同作業なしに実現しません。今回の成果も研究室のほかのメンバーの蓄積の上に成り立ったものです。若い研究者には、そうした視点も忘れないでほしいと思います。

ND — ありがとうございます。

聞き手は、長谷川聖治（読売新聞科学部記者）。

1. Uchida K. et al. *Nature* **455**, 778-781(2008).
2. Saitoh E. et al. *Appl. Phys. Lett.* **88**, 182509 (2006).
3. Ando K. et al. *Phys. Rev. B* **78**, 014413 (2008).
4. Kato Y. K. et al. *Science* **306**, 1910-1913 (2004).
5. Wunderlich J. et al. *Phys Rev Lett.* **94**, 047204(2005).

暦の上では春とはいえ、温泉にでも行きたくなるような寒い日が続きます。

今回は、地熱発電のためのボーリングを行ったら、温泉ならぬマグマを掘り当ててしまった、というニュース記事を取り上げます。地質学者たちを沸き立たせたこの偶然の発見から、何が新たにわかったのかに注意しながら読んでみましょう。

NEWS nature news

語数：424 words 分野：地球

Published online 17 December 2008 | Nature | doi:10.1038/news.2008.1317

<http://www.nature.com/news/2008/081217/full/news.2008.1317.html>



ハワイ島キラウエア火山の溶岩流。

NEWS.COM

Drillers hit Hawaiian magma

Chance discovery allows up-close study of inner-earth processes.

Rex Dalton

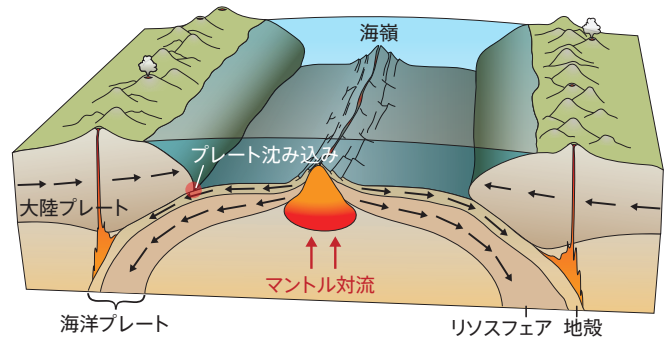
1. A geothermal drill rig in Hawaii has for the first time tapped into intensely hot, granite-like magma — allowing scientists to observe in place the process through which continents are born.
2. Researchers and an energy-services company inadvertently cut into the magma body at about 2.5 kilometres below the surface on the Big Island of Hawaii. They hope to turn the site — currently an operating geothermal development — into an observatory for scientific studies.
3. "I've worked in this field for more than 35 years, and I've never seen anything like this," says Bruce Marsh, a geologist at Johns Hopkins University in Baltimore, Maryland, who was called in for analysis.
4. Ormat Technologies, a firm based in Reno, Nevada, that led the drilling, hit the magma in 2005 at the Puna Geothermal Venture well field, which provides about 20 per cent of the electricity locally on the island. Team members presented their results on 16 December at the American Geophysical Union meeting in San Francisco, California.
5. The company generates energy from steam heated by Earth's interior to temperatures of about 350 °C. The magma, when the drillers hit it, was about 1,050 °C — so hot it dislodged carbide teeth from the drill bit and caused the drill string to seize up, says William Teplow, a consulting geologist with Ormat.
6. Most of Hawaii, a volcanic island chain, is composed of the dark iron-rich lava known as basalt. In contrast, the granitic magma was a clear, molten glass, composed of about two-thirds silica. Continents are made of such lighter material.
7. At a news briefing, team members said the granitic magma was sandwiched between basalt layers — suggesting that it had differentiated, or chemically separated, out from the darker material over time. This may be the first time "the actual process of differentiation of continental-type rock from primitive ocean basalt has been observed in situ", the team said.
8. Much to the scientists' surprise, the magma was what Marsh called "a docile animal", with few bubbles from volatile gases. In a typical geothermal well, engineers must constantly monitor well conditions because pressures can run to 2,000 pounds per square inch, increasing the risk of blowouts. The Puna field is also surrounded by an extremely active seismic zone, which experiences 10 to 12 small earthquakes a day.
9. Preliminary geochemical analysis indicates that the magma may have erupted onto the surface in 1924, then undergone more chemical processing underground before erupting again in 1955. The team plans further analyses, of lead and radon isotopes in the magma, to pin down this timing.

Pay dirt

TOPICS

magma とは？

マグマは、地球などの惑星の地下に存在する岩石の溶融体。性質は、二酸化ケイ素 (SiO₂)、水、二酸化炭素などの含有量により異なる。通常、温度は 600 ~ 1300℃ であるが、SiO₂ や水分が多くなるにつれ、粘性が高くなり温度が低くなる。SiO₂ の含有量によって、玄武岩質マグマと花崗岩質マグマに大別される(下記参照)。玄武岩質マグマは、マントル対流によってマントル上部に運ばれた岩石が、温度は低下せずに圧力が低下したために融解して生じる。このため海嶺(海底にあるプレートの裂け目)やホットスポット(マントルから地殻を突き抜けてマグマが上昇してくるところ)では、玄武岩質マグマが生じている。一方大陸では、上昇した玄武岩質マグマが、地殻上部の岩石を融解し、それが混ざったり、冷却されて成分の一部が結晶化したりして、花崗岩質マグマが生じるとされる。また海溝では、プレートが沈み込む際に発生したマントル上昇により下部から運ばれた高温のマントルが、沈み込むプレート中の海水を含んだ岩石と接触することで融解温度が下がり、花崗岩質マグマが生成されると考えられる。



海嶺とプレート沈み込み帯でのマグマの発生。

SCIENCE KEY WORDS

- granite: 花崗岩**
火成岩(マグマが固まってできた岩石)のうち、花崗岩質マグマがゆっくり冷えて固まり、含有成分が結晶化している深成岩。無色の石英や長石を多く含んでいるため、白っぽく見える。有色鉱物は主に黒雲母、ジルコン、リン灰石、磁鉄鉱、チタン鉄鉱などが含まれることもある。
- volcanic island chain: 火山島列**
火山島が連なっているもの。ホットスポットで上昇したマグマが形成した火山島はプレートとともに移動していくが、ホットスポットの位置は変わらないので、別の位置に新しい火山島ができ、島が連なっていく。
- lava: 溶岩**
火山が噴火する際に、地上に出てきたマグマと、それが固まったもの。玄武岩質マグマを起源とする溶岩は、流動的であるが、花崗岩質マグマを起源とする溶岩は、粘性が高く、しばしば爆発的な噴火を誘発する。
- basalt: 玄武岩**
火成岩のうち、玄武岩質マグマが急激に冷えて固まった、SiO₂ の含有率 45 ~ 52%、Na₂O+K₂O 含有率 5% 未満の火山岩。非晶質のものと、細かい結晶、大きな結晶が混ざり、斑状組織とよばれる形質を示す。磁鉄鉱、輝石、カンラン石に富んでおり、全体的に暗い色をしている。
- silica: シリカ**
二酸化ケイ素、無水ケイ酸ともいう。無色か白色の固体で、大陸地殻の約 60% を占める。腐食や摩耗に強く、ガラスの主成分でもある。
- in situ: 本来の場所で、自然の位置で、あるがままの状態**
地球科学では、岩石や川、森などの研究対象が自然にある場所で行う調査・観測することをいう。

- seismic zone: 地震帯**
地震の震源を世界地図にプロットしていくと、帯状に連なった地震頻発地帯ができあがる。これを地震帯という。
- lead: 鉛**
原子番号 82、元素記号 Pb。青灰色の重金属。同位体として、²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb、²¹⁰Pb があるが、安定しているのは ²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb で、残りの 2 つは放射性である。自然界に最も多いものは、²⁰⁸Pb である。
- radon: ラドン**
原子番号 86、元素記号 Rn。無色無臭の気体で、最も重い希ガス元素。4 つある同位体はすべて放射性である。このうち、²²²Rn は ²³⁸U (ウラン 238) が崩壊してできる。²²²Rn はさらに ²¹⁸Po (ポロニウム 218) へと崩壊し、²¹⁰Pb を経て安定な ²⁰⁶Pb になる。マグマから火成岩が形成される際、ウランなどは岩石結晶のすき間に析出する。ウランはラドンへと崩壊し、ラドンは鉛へと崩壊していくので、ラドンと鉛の同位体の比を解析すれば、噴出時期が特定できる。
- isotope(s): 同位体**
陽子の数は同じだが中性子の数が異なる原子どうしのことをいう。化学的性質はほぼ同じである。鉛やラドンの項で記しているような、元素記号の左上付数字は、質量数を表す。質量数は陽子の数と中性子の数を合計したものである。同位体では、質量数が互いに異なっている。放射性同位体は不安定で、電子や中性子、陽子などを放出したり、自身が核分裂したりしてより安定な別の原子になる(崩壊)。

WORDS AND PHRASES

- リード **chance discovery: 「偶然の発見」**
リード **up-close: 「間近で詳細に」**
up-close には「間近での」「詳細な」という 2 つの意味があるが、ここでは、両方とも当てはまると思われる。
- geothermal drill rig: 「地熱発電事業で使われているドリル掘削機」**
drill rig はドリル掘削機のこと。geothermal は「地熱の」という意味だが、この記事では「地熱発電事業で用いる」という意味。
 - tap(ped) into: 「入り込む」「接触する」**
 - observe in place: 「現場で観測する」「その場で観測する」**
7. の observed in situ と同義。
 - inadvertently: 「偶然に」**
 - pay dirt: 「掘り出し物」**
 - well field: 「地熱井のある区域」**
 - it dislodged carbide teeth from the drill bit: 「掘削装置のドリルビットからカーバイド歯が脱落した」**

dislodge は「取り外す」という意味。drill bit は掘削機の先端部分の切削工具で、carbide teeth は、このドリルビットに差し込んで使用するカーバイド製の歯のこと。

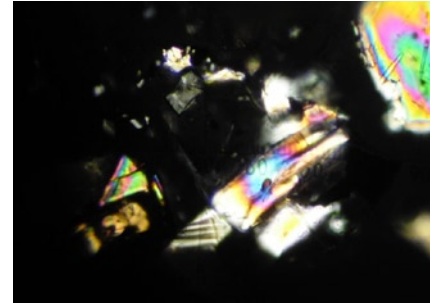
- the drill string to seize up: 「ドリルストリングが動かなくなった」**
drill string は、ドリルビット、ドリルカラー、掘り管などをつないで掘削するために坑井内に降ろされた一連のパイプのこと。seize up は「動かなくなる」「故障する」という意味。
- (be) sandwiched between ~: 「～の間に挟まれている」**
- differentiate(d): 「分化する」**
- docile: 「従順な」**
- preliminary: 「これまでの」**
「最終結果の出ていない、暫定的な」といったニュアンスをもつため、文脈に合った訳し方をする必要がある。
- erupt(ed) onto the surface: 「地表に噴出する」**
- pin down: 「特定する」「明確にする」**

参考訳

ドリル掘削機がハワイでマグマを掘り当てた

偶然の発見が、地球内部過程を間近で詳細に研究することを可能にする。

レックス・ダルトン



今回発見された花崗岩質マグマの偏光顕微鏡写真。二酸化ケイ素が結晶化している箇所が光っているのがわかる。

BRUCE MARSH

1. ハワイで地熱発電のためのボーリングを行っていたドリル掘削機が、非常に高温の花崗岩質マグマを掘り当てた。マグマが掘り当てられたのは初めてのことであり、これにより、大陸が誕生する過程を現場で観察できるようになる。
 2. 今回、研究者チームとエネルギーサービス会社が、はからずもマグマ体を掘り当ててしまったのは、ハワイ島の地下約 2.5 キロメートルのところである。この土地では現在、地熱発電事業が進められているが、彼らはこの場所を各種科学研究のための観測所に転用することを望んでいる。
 3. 分析を依頼されて現地を訪れたジョンズホプキンス大学（米国、メリーランド州ボルティモア）の地質学者 Bruce Marsh は、「この分野で 35 年以上も研究をしてきましたが、こんなものを見たのは初めてです」と話す。
- 掘り出し物**
4. マグマが掘り当てられたのは 2005 年のことだった。場所はハワイ島の電力の約 20% を供給するプナ・ジオサーマル・ベンチャーの地熱井のある区域で、掘削を行っていたのはオーマット・テクノロジーズ社（米国、ネバダ州リノ）である。研究チームのメンバーは、2008 年 12 月 16 日にカリフォルニア州サンフランシスコで開催された米国地球物理学連合の大会で、この発見について得られた結果を発表した。
 5. オーマット社は、地球内部の熱により約 350℃ に加熱された蒸気を利用して発電を行っている。同社の顧問地質学者の William Teplow によると、マグマが掘り当てられたときの温度が約 1050℃ と非常に高かったため、掘削装置のドリルビットからカーバイド歯が脱落し、ドリルストリングが動かなくなってしまったという。
 6. ハワイ諸島は火山島列であり、その大部分は、鉄分を豊富に含む黒っぽい溶岩（玄武岩という）からできている。これに対して、花崗岩質マグマは透明なガラスの溶融体であり、その成分の約 3 分の 2 がシリカ（二酸化ケイ素）である。大陸は、こうした軽い物質からできている。
- マグマの正体**
7. 研究チームのメンバーは記者会見の席で、この花崗岩質マグマが玄武岩層の間に挟まれていたことは、より黒っぽい物質から時間の経過とともに分化してきた（化学的に分離してきた）ことを示唆していると語った。今回の発見は、「原始的な海洋型玄武岩から大陸型岩石が分化してくる実際の過程が本来の場所で観察された」初めてのケースであるかもしれない、と彼らはいう。
 8. 研究チームにとって非常に意外だったのは、このマグマが、揮発性ガスに由来する気泡をほとんど含まない「従順な代物」（Marsh の表現）であったことである。典型的な地熱井では、地熱流体の圧力が 1 平方インチあたり 2000 ポンド（1 平方センチメートルあたり約 140 キログラム）まで上昇して、突然噴出するおそれがあるため、エンジニアが地熱井の状態を常に監視していなければならない。このプナの地熱井は、極めて活発な地震帯に囲まれており、小地震が 1 日に 10 ～ 12 回も発生する。
 9. 予備的な地球化学的分析からは、このマグマが 1924 年に地表に噴出し、地中でさらに化学処理されて、1955 年に再び噴出したという可能性が示唆されている。研究チームは、マグマ中の鉛同位体とラドン同位体のさらなる分析を行い、噴出時期を特定することを計画している。

“**Nature** — Global Leader in Science
... and You Know It !”



npg nature asia-pacific

www.naturejpn.com

「ネイチャー・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。

メールをお送りいただく際には、お名前・ご職業・「ネイチャー・ダイジェスト」購読年数のご記入をお願いいたします。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。お寄せいただいた内容は、今後の本誌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。

宛先: naturedigest@natureasia.com (「ネイチャー・ダイジェスト」ご意見係)

日本語で **nature** を読む

Nature Digest は、Nature を日本の皆様により身近に感じていただくために全ページ日本語で編集した月刊科学情報誌です。Nature 本誌、Nature オンラインニュースに掲載されている最新の科学ニュースや科学論説などの記事はもとより、日本オリジナルの企画編集記事も加わり充実した1冊となっています。一般メディアでは知ることのできない世界各国の科学関連ニュースをお楽しみください。



(本文 36 頁)



nature 翻訳・編集記事

- HIGHLIGHTS / 論文ハイライト
- EDITORIAL / 社説
- NATURE NEWS / 科学ニュース
- NEWS & VIEWS / 科学論説
- NEWS FEATURE /
科学ニュース読み物・
興味あるテーマを親しみやすく解説
- SNAPSHOT

オリジナル編集記事

- JAPANESE AUTHOR /
日本人科学者へのインタビュー記事
- 英語で NATURE /
NATURE に掲載の記事から
生きた英語を学ぶ

Nature Digest 定期購読お申込みはこちらから

www.naturejpn.com/digest-f09