



## 「事業仕分け」を世界はどう見たか

ショウジョウバエの“豪快なプロレス技”も可視化!

ニュートリノとクジラの意外な結びつき

中国ミサイルの父・銭博士逝く

2010年開催

ネイチャー フォトニクス・テクノロジー コンファレンス

nature  
photonics  
Technology Conference

# 太陽光発電の 将来展望

## Future perspectives on photovoltaics

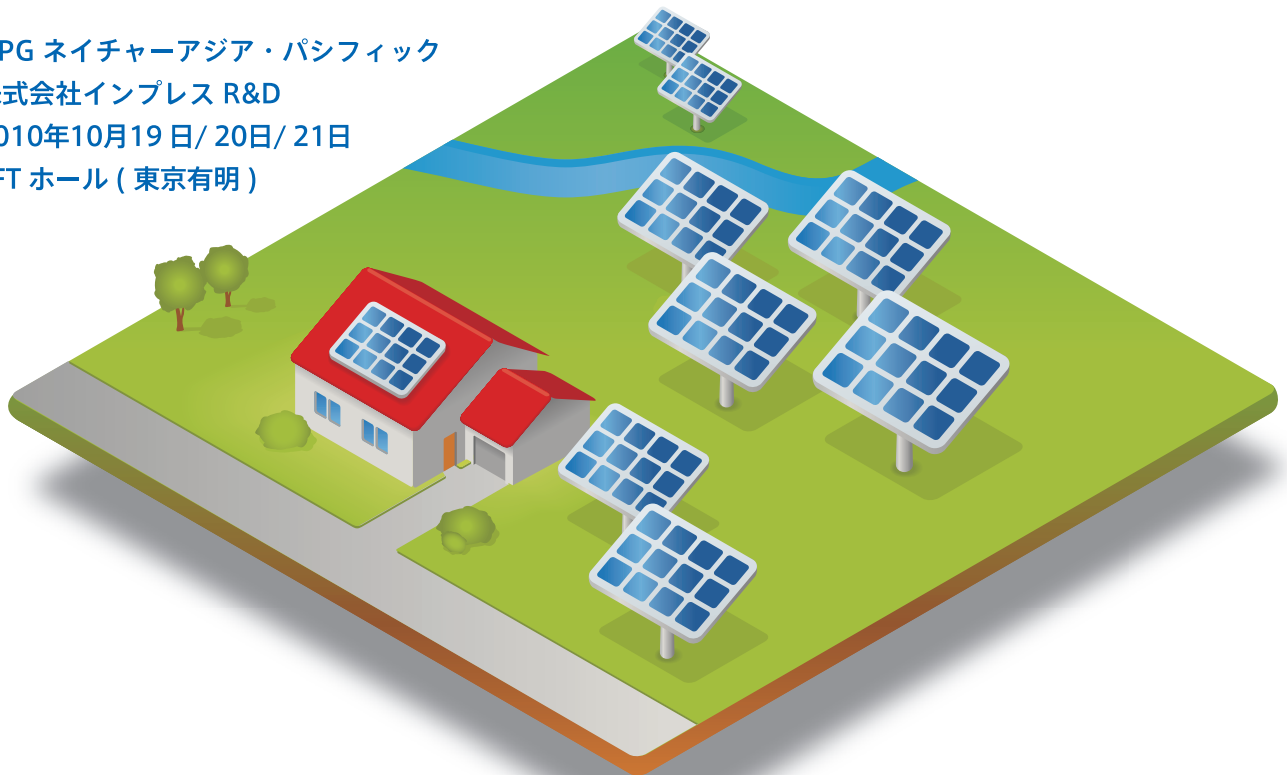
Nature Photonics Technology Conference—Future Perspective on Photovoltaicsは、世界の科学誌*Nature*の姉妹誌 *Nature Photonics*が贈る世界最高品質の国際コンファレンスです。同コンファレンスは、2007年にOptical Communication (光コミュニケーション)をテーマに開催されましたが、今回はいま世界がもっとも関心を寄せるホットなテーマ、Photovoltaicsにフォーカスを当て、新たな光電効果や新素材などのサイエンス、ナノテクを駆使したデバイステクノロジー、世界の企業がしのぎを削る製造技術開発、さらには太陽光発電システムの新展開について、ここ東京の地から*Nature*グローバル・ネットワークを通して全世界に向けて発信いたします。

主催：NPG ネイチャーアジア・パシフィック

共催：株式会社インプレス R&D

会期：2010年10月19日/20日/21日

会場：TFT ホール (東京有明)



[www.naturejpn.com/photovoltaics](http://www.naturejpn.com/photovoltaics)

a nature conference



npg nature asia-pacific

## 「事業仕分け」を世界はどう見たか

volume 7 no.2 February

COVER IMAGE: SPRING-8:© RIKEN/JASRI;「ちきゅう」:提供:独立行政法人 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)

## HIGHLIGHTS

- 02 vol. 462 no.7275, 7276  
vol. 463 no.7277, 7278

## EDITORIAL

- 06 民主主義・民主党の誤謬  
07 「生物多様性年」を迎えて

## NATURE NEWS

- 08 傷は治っても消えない痛み  
09 海底火山の噴火を撮影

## NEWS

- 10 大きく切られた日本の科学技術予算  
David Cyranoski  
11 科学技術予算削減に激しい抗議の声  
David Cyranoski  
13 日本の重要科学プロジェクトに  
予算復活の望み  
David Cyranoski

## NEWS

- 14 中国ミサイルの父・銭学森博士逝く  
Jane Qiu

## NEWS BRIEFING

- 15 宇宙観光旅行の新時代

## NEWS FEATURE

- 16 ニュートリノとクジラ  
Nicola Nosengo  
19 ハエの行動監視システム  
Lizzie Buchen

## NEWS

- 24 ミューオンライダーをめざして  
Eric Hand

## NEWS &amp; VIEWS

- 27 大地震の予兆か、それとも単なる余震か  
Tom Parsons  
29 解明が進んだアブシジン酸シグナル伝達  
Laura B. Sheard and Ning Zheng

## JAPANESE AUTHOR

- 32 磁性細菌を解析し、  
ナノ磁石の産業応用をめざす! — 新垣 篤史  
西村 尚子

## 英語で NATURE

- 34 Genome reveals panda's carnivorous side  
ゲノムが明かすパンダの肉食動物としての顔

[www.nature.com/naturedigest](http://www.nature.com/naturedigest)© 2010年 NPG Nature Asia-Pacific  
掲載記事の無断転載を禁じます。



Vol. 462 No. 7275  
17 December 2009

### 戦争の生態学：暴動やテロにみられる統計学的パターン

#### ECOLOGY OF WAR: Statistical patterns of insurgency and terrorism

一見ランダムあるいはカオス的にみえる人間活動の多くは、普遍的な統計学的パターンを示す。人間の間の紛争もその1つであり、戦争全体で総計した死傷者数のサイズ分布はほぼ、べき乗分布に従う。しかし、個々の戦争で起こるさまざまな事態についても共通のパターンがみられるのだろうか。N Johnson たちは、そうであることを明らかにした。アフガニスタン、イラク、コロンビアで起こったさまざまな紛争に関する詳細なデータセットを使って、反乱戦には互いに共通するパターンがあること、さらにそれは世界的テロ行為にも共通することを示し、破壊・暴力活動の規模や、それらが生じるタイミングを人間集団間の生態学的相互作用の観点から説明している。彼らのモデルは暴動に関する最近の仮説と整合しており、反乱での武力衝突やテロ行為と生態学との間の量的な関係を確立するものだ。また、このモデルと金融市場モデルとの類似性は、人間の暴力的行動と非暴力的行動との間の関連を示している。

Letter p.911, News p.836 参照

### 地球：海水準上昇に関するモデル

#### A model of rising sea levels

12万5000年前の最終間氷期には、現在よりも海面が高く、極域の気温も最大で5°C高かったため、この期間は人為起源の温暖化と似たところがあると見なすことができる。Kopp たちは、局地的な海面の高さ、つまり海水準の上昇の指標を集めて全球的なデータベースを作り、統計的手法を用いて最終間氷期における海水準を見積もった。全球の海水準は、現在の水準よりも8~9.4メートル高く、その上昇速度は100年当たり50センチメートルを超えていたことがわかった。これは、現在の氷床がかなり低いレベルの地球温暖化に対しても脆弱である可能性を示唆している。

Article p.863, N&V p.856 参照

### 細胞：SUMO と DNA 修復

#### SUMO and DNA repair

哺乳類のDNA損傷応答に、SUMO (small ubiquitin-like modifier) 化経路が重要な役割をもつことが確認された。SUMOタンパク質は、ほかのタンパク質に付加される小分子で、細胞周期やストレス応答などの多くの細胞過程に影響を与える。乳がん感受性遺伝子BRCA1の産物はDNA損傷応答に関与することが知られているが、Morris たちは、この産物のユビキチンリガーゼ活性がリガーゼであるPIASを介するSUMO修飾によって、DNA損傷後に活性化されることを明らかにしている。またGalanty たちは、PIAS1とPIAS4のという2つのリガーゼが、DNA二本鎖切断部位でさまざまな

DNA修復タンパク質にSUMOタンパク質を付加すること、またこのSUMO化は、これらの修復タンパク質の一部が続いてユビキチン修飾を受けるのに必要であることを示した。これらの研究は、SUMO修飾がDNA修復にかかわっているばかりでなく、がんの素因やがん発生にかかわる因子でもある可能性を示唆している。

Article p.886, Letter p.935, N&V p.857 参照

### 神経：記憶にかかわるシナプス構造

#### Synapse structure in memory

学習や記憶形成は、脳の回路の構造的変化に関連していると考えられている。この考えの実験的な証拠はこれまでなかなか得られなかったが、今回2つのグループが二光子励起画像法を使って、シナプス網の再編成が安定な記憶保持と密接に関連していることを示した。Xu たちは、餌に前肢を伸ばす課題でマウスを訓練すると、皮質ニューロンに構造的な反応、つまり新たな樹状突起棘の誘導が数時間以内に起こることを見いだした。異なる棘群、したがっておそらく異なるシナプスの複数のセットが、それぞれ別の運動技能を符号化しているらしい。また、学習の間に起こるニューロン間結合の再編成は、安定な記憶維持という背景の上に起こると考えられる。Yang たちは、マウス皮質でシナプス後の樹状突起棘を長時間観察し、学習に応じて棘の可塑性は進行しているにもかかわらず、2種類の安定な棘集団が記憶保持に寄与しているらしいことを見いだした。第一の集団は新たな体験によって作られるもので、その後ずっと選択的

に維持される。第二の集団は、出生後の脳発達初期に作られた大規模な集団に由来するものである。

Letters pp.915, 920, N&V p.859 参照

### 顕微鏡法：電子と光子を使う顕微鏡

#### Electrons in space and time

近接場光学顕微鏡は、微視の対象物のごく近傍の電磁場を測定することで光の回折限界を打ち破ることができるが、電子顕微鏡もつ原子スケールの分解能にはかなわない。今回Barwick たちは、これら2つの画像化方式を巧みに一体化した。つまり、こうしたエバネッセント電磁場に媒介されて増強された電子と光子の相互作用を超高速電子顕微鏡で検出し、空間的かつ時間的に十分高い分解能をもつエバネッセント電磁場の画像を生成する方法を示している。この研究は、光子誘起画像化法の一般的可能性や、特に界面における場のナノスケール研究向けの可能性を実証するものである。

Letter p.902, N&V p.861,

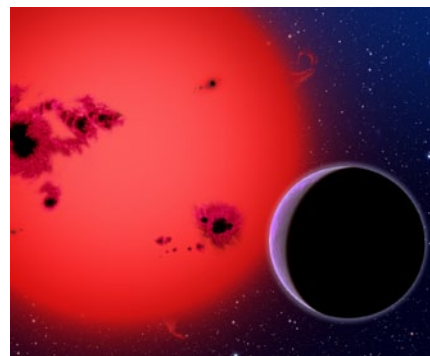
Making the paper p.824 参照

### 宇宙：注目すべき巨大地球型惑星

#### A super-Earth to study

「巨大地球型惑星」とは、地球の2~10倍程度の質量をもつ太陽系外惑星で、「木星型惑星」と見なすには小さすぎるものを指す。最終的には40センチメートルの望遠鏡8つを一組として使う予定のMEarthプロジェクトは、現在はそのうちの2つだけを使って観測を行っているが、太陽系近傍にある低質量星の前面を通過(トランジット)する巨大地球型惑星(GJ 1214b)を検出した。GJ 1214bは、地球の6.55倍の質量をもち、大きさは地球半径の2.68倍である。主星は小さく、13パーセントしか離れていないので、現在の観測法で惑星大気を直接調べることができる。

Letter p.891, N&V p.853 参照



地球から40光年の距離で赤色矮星の周りを回る巨大地球型惑星GJ 1214b (想像図)。



Vol. 462 No. 7276  
24/31 December 2009

## 「今年の問題の人」 Steven Chu 氏：ノーベル賞受賞者から米国エネルギー省長官へ

**NEWSMAKER OF THE YEAR: STEVEN CHU, Nobel prizewinner to US Energy Secretary**

Nature が選ぶ 2009 年の「今年の問題の人」は、バラク・オバマ大統領によって米国エネルギー省の長官に起用された Steven Chu 氏である。ノーベル賞を受賞した物理学者である Chu 氏に与えられたのは、世界最大である米国経済とそのエネルギー関連分野を変革して、21 世紀の需要への対処を円滑に進めるといった仕事である。ローレンスバークレー国立研究所 (LBNL) で所長を務めた 4 年間で、この研究所を代替エネルギー研究のリーダーに作り替えた Chu 氏は、LBNL が創設時代にマンハッタン計画にかかわったころのような戦闘精神を奮い起こして、今回の新しい仕事に取り組んでいる。もし米国が自国の科学・技術資源を気候変動への取り組みに結集させようというなら、1940 年代に原子爆弾の初期の研究を推進させたときのような緊迫感が必要だろう、と彼は述べている。コペンハーゲン・サミットを前に、Eric Hand が Chu 氏の計画についてインタビューした。

[Newsmaker of the Year p.978](#), [Editorial p.957](#) 参照

## 工学：単一分子トランジスターをめざして

**Now, that's small**

究極の小型電子デバイスは、分子 1 個からなる回路素子だろう。分子の軌道エネルギーの静電的な変調を利用した単一分子トランジスターは、理論的に可能である。今回、そのようなデバイスを実現したことが報告された。これによって、分子レベルで設計される電子デバイスへの期待が高まりそうだ。

[Letter p.1039](#), [N&V p.994](#) 参照

## 宇宙：青色はぐれ星についての研究 2 つ

**Two shades of blue straggler**

「青色はぐれ星」は、すべての星がほとんど同年齢である星団内の大質量星で、その光度からすると巨星や白色矮星へと進化しているはずの星である。このような星は、伴星との間の質量輸送か、または 2 つの星の間での衝突や合体のどちらかによって質量を獲得した通常の主系列星であると考えられている。星密度の非常に高い星団 M30 の研究から、星団コアの重力収縮の際にこれら両方のメカニズムが働いていることが示唆された。M30 には、青色はぐれ星について、2 つのはっきりと異なる系列が並行して存在している。「より青い」集団は星どうしの直接的な衝突に由来するもので、「より赤い」集団は近接連星の進化に由来している。一方、古い散開星団 NGC 188 中には 21 個の青色はぐれ星の観測からは、16 個 (76 パーセント) が現在連星系であることがわかった。これは、通常の太陽型

の主系列星の間でみられる連星の頻度の 3 倍にあたる。NGC 188 にある青色はぐれ星の大部分は、同じ表面温度をもつ通常の主系列星よりも速く回転している

[Letters pp.1028, 1032](#), [N&V p.991](#) 参照

## 構造生物学：細菌の DNA 伝搬

**Bacterial DNA transfer**

細菌の個体どうしの接合による DNA の伝搬は、細菌の進化の主要な要因であり、抗生物質耐性や毒性遺伝子の交換機構として実際的な見地からも重要である。ヒトにみられる病原性細菌の多くはグラム陰性で、こういう DNA 伝搬は IV 型分泌系によって仲介される。この系では、3 つのタンパク質が内膜と外膜を貫く円筒状の構造 (コア) を作るように配置されている。今回、IV 型分泌系の外膜複合体の結晶構造が決定された。これは 0.6 メガダルトンという大きさで、構造が知られている外膜複合体中で最大のものである。この構造は DNA が細菌の細胞膜を通過する機構を示唆しており、これによって、抗生物質耐性や毒性遺伝子の拡散に対処するための、IV 型分泌系を標的とする薬剤の開発が一步進むと考えられる。

[Article p.1011](#), [N&V p.992](#) 参照

## 系統学：解読するゲノムの選び方

**Choice genomes sequenced**

これまでに塩基配列が明らかにされている細菌および古細菌のゲノムは、主に生理学的特性に基づいて選ばれて、塩基配列解読

が行われている。それはそれで結構だが、系統的にみると、対象種に明らかな偏りが生じている。そこで今回、「細菌および古細菌のゲノム百科 (GEBA)」プロジェクトという、また別の切り口からの研究が発足した。このプロジェクトでは、系統樹中の細菌および古細菌の枝で塩基配列解読がなされていない空白部分を埋める目的で、系統学的位置に基づいて解読すべきゲノムを選ぶ。この方法が有用であることは、系統学的なカバー率が最大となるように選択された、培養可能な 56 種のゲノム塩基配列についての試験的研究によって実証された。これらのゲノム塩基配列の分析から、系統学、タンパク質機能、およびゲノムアノテーションに関する考察が得られる。 [Letter p.1056](#) 参照

## 生理：健康長寿と繁殖力のための食事

**A diet for life**

さまざまな生物種で食餌制限は、繁殖力の低下という犠牲を払って寿命を延長することが示されている。これは栄養素が生殖から体細胞維持へ再配分されるからであり、限りのある資源に対する競争の一例であると考えるのが普通だろう。Grandison たちは今回、ショウジョウバエ (*Drosophila*) では、食餌制限が栄養素の再配分を誘導していないことを明らかにした。寿命と繁殖力とは、制限しているアミノ酸が異なるのである。彼らは、長寿ハエの繁殖力低下が、メチオニンのみの添加で回復することを見いだした。したがって、食餌制限をしなくても、食餌中のアミノ酸の比率を調節してやれば、長寿命と高い繁殖力は同時に獲得できると考えられる。これらの知見は、食べる量を減らさなくても、食事の栄養素を調整することで、食事制限がもたらす恩恵を我々が享受できる可能性を示唆している。

[Letter p.1061](#), [N&V p.989](#) 参照

## 宇宙：X 線天文学の真打ち

**Star performers**

過去 10 年の間、X 線天文学では、周回軌道を回る 2 つの優れた X 線天文台、NASA のチャンドラ望遠鏡と欧州宇宙機関の XMM ニュートン望遠鏡により次々と得られる成果を享受してきた。今回の概説は、その成果の総括である。宇宙 X 線は、例えば中性子星やブラックホールの周囲にある重力場や磁場によって発生し、高エネルギーである。そして、チャンドラ望遠鏡や XMM ニュートン望遠鏡で得られたデータにより、宇宙 X 線のエネルギーを正確に測定し、すばらしい画像を作製することが可能になった。

[Review p.997](#) 参照



Vol. 463 No. 7277  
7 January 2010

## 大昔の四肢動物：最古の陸生脊椎動物化石よりはるかに古い脊椎動物の足跡の発見

**FOUR FEET IN THE PAST: Land vertebrate trackways millions of years older than earliest body fossils**

約4億年前の陸生脊椎動物（四肢動物）が残した足跡の化石が発見されたことは、四肢動物の起源の再検討のきっかけとなりそうだ。P Ahlberg たちが報告しているこの発掘物は、ポーランドのホーリークロス山脈の Zachelmie 採石場で見つかったものである。足跡の中には、保存状態が極めて良好で足部の形態の詳細な検討が可能なものがあり、初期の原始的な四肢動物であるイクチオステガ (*Ichthyostega*) と類似していることがわかった。しかし、この足跡化石に関して重要なのは、その年代である。これは四肢動物の体化石の最古のものよりも1800万年古く、魚類から四肢動物への移行型と考えられているティクタアリク (*Tiktaalik*) やパンデリクティス (*Panderichthys*) などの最古のエルピストステグ類と比較しても1000万年古い。この発見から、我々の知っているエルピストステグ類は移行型ではなく、むしろ遅い時期に生き残っていた名残と考えられ、陸生脊椎動物の初期の歴史に関する我々の知識の不足がはっきりした。表紙は、採石場内の足跡が見つかった岩と、掘り出された指が4本の足跡（木炭で印を付けた）である。

Article p.43, N&V p.40 参照

ている白色矮星からの形成を予測することができないのだ。2つの白色矮星の合体によってこのような現象が起こるだろうことは、ずっと以前から推測されていたのだが、今回、最新の数値シミュレーションによって、この考えがさらに裏付けられた。もし、それぞれ太陽質量の約0.9倍の大きさの等質量の2つの白色矮星が合体して、1つの共通外層をもつ段階を経るとするならば、こうした合体で暗い爆発が生じるのである。

Letter p.61, N&V p.35 参照

## 物理：量子粒子のジグザグ運動

### Quantum particles aquiver

1928年にポール・ディラックが相対論的量子粒子の振る舞いを記述するために提案したディラック方程式は、量子力学と特殊相対論を融合したものである。この方程式から、高速のジグザグ運動、つまり「ツイッターベヴェーグ」などの特異な効果が多数現れる。これは理論的にはしっかり確立されているが、現実の粒子での観測は難しい。C Roos たちは、自由な相対論的量子粒子として振る舞うようにした単一の捕捉イオンを使って、ディラック方程式の原理を証明する量子シミュレーションを開発した。この系の捕捉イオンの実験パラメーターを高いレベルで制御すると、ツイッターベヴェーグなどの相対論的量子物理学の典型的な例をシミュレートすることが可能になる。

Letter p.68, N&V p.37 参照

## 工学：摩擦の詳細

### The minutiae of friction

地震からハードディスクドライブに至る多様な系の挙動は、摩擦運動や摩擦の強さの影響を受けている。一見すると接触面間の連続的なすべり過程にみえるが、実際に起こっているのは、微視的スケールでの「すべり」と「固着」からなる一連の事象である。しかし、このレベルにおける摩擦強度の時間的変化の機構は、まだよくわかっていない。Ben-David たちは、すべり合う2つの物体 (PMMA プラスチックブロック) の間の局所的接触面積と界面運動の時間的変化を調べ、4つの段階が関与していることを見いだした。接触面積の減少は数マイクロ秒以内にすべて起こってしまう。次に、急速なすべりの段階が続いた後、ずっと遅いすべりへの急な遷移が起こり、「固着」段階に至って運動が停止する。数百マイクロ秒後、接触面積は再び増え始める。これらの結果から、技術的に重要な多くの状況において、この種の運動をよりよく理解するための基礎が得られる。

Letter p.76, Abstractions p.8 参照

## ウイルス学：ゲノムに残ったウイルスの「化石」

### Viral 'fossils' in the genome

内在性レトロウイルス由来のDNAは、哺乳類ゲノム中に広くみられる祖先由来の特徴である。これまで、ウイルスの仲間でのこの種の「化石記録」を残すことが知られているのは、レトロウイルスだけだった。今回、ヒト、非ヒト霊長類、げっ歯類、およびジリスの一種のゲノムで、内在性ボルナ様N (EBLN) エlementとよばれる塩基配列が見つかった。ボルナウイルスは非分節マイナス鎖RNAウイルスで、感染細胞の核内で複製する。霊長類では、このエレメントの起源は4000年以上前と非常に古いが、ジリスのEBLN配列は、もっと最近になって組み込まれたものである。霊長類のEBLNはオープンリーディングフレームが保存されており、mRNAとして発現していることから、宿主の遺伝的新奇性の供給源として機能している可能性が考えられる。

Letter p.84, N&V p.39 参照

## 臨床心理：恐怖の記憶を封印するには

### Appointment with fear

ヒトの記憶には、再固定という自然の仕組みがある。再固定の際には、想起したときに得られる新しい情報を古い記憶中に組み込むことができる。再固定を薬理的に阻害すると、恐怖の再生が阻止されることは、動物モデルで示されているが、こうした操作の多くはヒトに有害な化合物を使用する。今回 E

Phelps たちは、薬物を用いることなく恐怖記憶を書き換える非侵襲的な方法を報告している。この方法の土台になっているのは、安全な環境の中で、トラウマになった出来事を想起させる事柄に繰り返し直面させて、トラウマ記憶を「消去」という、既に確立された方法である。この方法にはある程度の効果があるが、記憶は消されたというより覆われた状態にあり、例えば時間の経過やストレスによって戻ってしまうことがある。新方法的改善点はタイミングにある。つまり、古い恐怖情報を再固定する際に「安全だ」という情報を導入することで、恐怖が再生されなくなる。この研究結果は、心的外傷後ストレス障害や不安障害に、新しい非侵襲的治療法が有効である可能性を示している。

Article p.49, N&V p.36, Making the paper p.8 参照

## 宇宙：やはり典型的だった超新星

### Supernovae true to type

Ia型超新星は、宇宙論的距離の指標として非常に貴重な存在になる可能性がある。しかし、もしそれらが、宇宙の膨張史や暗黒エネルギーの本質に対して信頼性のある物差しになるとするならば、それらがおおむね均質なものであるという証拠がもっと必要となるだろう。しかし、Ia型超新星の下部分類にある「暗い1991bg様の」天体は、この点が疑わしいことがわかっていて。現在のモデルでは、超新星の先駆天体と考えられ



Vol. 463 No. 7278  
14 January 2010

## けんか売りのショウジョウバエ：ショウジョウバエで見つかった攻撃フェロモンとその受容体

**SPOILING FOR A FIGHT: 'Aggression pheromone' and its receptors identified in *Drosophila***

攻撃性を制御するフェロモンは昆虫とマウスで見つかったが、これにかかわる神経回路の性質はまだ不明のままである。L Wang と D Anderson は、雄のショウジョウバエが産生する揮発性のフェロモン cVA (*cis*-vacccenyl acetate) が、cVA 受容体タンパク質 Or67d を発現する嗅覚ニューロンの活性化により、雄の間での攻撃を促進することを明らかにしている。この神経回路は、cVA が促進する攻撃性を介して、餌に対する雄の個体群密度を調節しているらしい。こうして雄の分散が起こると cVA 濃度が低下して、それにより攻撃性が減弱する。遺伝学の古典的モデルであるショウジョウバエを用いたこの研究は、*Nature* 2009 年 12 月 3 日号 p.562 で紹介されたマシンビジョン技術を使って行われた。これによって、攻撃行動の詳細な遺伝的操作や研究に道が開けるだろう。

Letter p.227 参照

する方法を開発した。アンキログラフィー (ankylography; 「湾曲した」を表すギリシャ語の *ankylos* と「書くこと」を表す *graphein* に由来する) と名付けられたこの新しい手法は、X 線回折顕微鏡法に類似している。つまり、X 線のコヒーレントなビームを球面からなる標的に当てると、二次元の回折像が完全な三次元構造として再構成されるのである。さらに開発が進み、検出器技術が進歩すれば、アンキログラフィーは物理学や生命科学の有用な手段となるかもしれない。

Letter p.214 参照

## 気候：山岳起源のモンスーン

**Monsoon from the mountains**

これまで、南アジアの夏のモンスーンを主に駆動しているのは、チベット高原から乾熱と水蒸気として放出される熱であると考えられてきた。しかし実際には、主に影響を与えているのは周辺の高山であることが新たな研究で示唆された。W Boos と Z Kuang は、大気モデルを用いて、チベット高原を平地にしても、ヒマラヤ山脈とそれを囲む山地に変化がないかぎり、モンスーンはほとんど影響を受けないことを明らかにしている。チベット高原は、その南端で局所的に降雨を増加させるが、大規模なモンスーン循環を駆動するのは、インド上空の暖かく湿った空気の蓄積であり、これがヒマラヤ山脈によって冷たく乾いた空気から隔離されているのだ。

Letter p.218, N&V p.163 参照

## 進化：最初のヒナが肝心

**Best of the nest**

托卵されて宿主（仮親）となる鳥種の多くは、学習によって托卵鳥の卵を排除するが、ひとたび卵が孵化してしまうと、たとえ大きさが自分のヒナととんでもなく違っていても、托卵鳥のヒナを排除することは非常に少ない。同一種内で托卵をするアメリカオオバンは、ヒナを排除する例の 1 つである。この鳥で行われた、巣内のヒナを入れ替える一連の実験から、仮親は同腹仔の中で最初に孵化したヒナを「参照用の鋳型」とし、それより後に孵化するヒナが「侵入者」かどうかをそれによって判別していることがわかった。この学習様式から、托卵鳥に対する仮親種の防衛手段として托卵鳥のヒナを見分けるといった方法が存在しないという謎が説明できるかもしれない。ほとんどの異種間托卵では通常、托卵鳥のヒナが先に孵化するため、そのヒナがうまく鋳型になってしまう可能性が高く、ヒナ識別は仮親側にとって非生産的なことと考えられる。

Letter p.223, N&V p.165 参照

## 遺伝：ダイズゲノムの解読

**Soybean sequenced**

ダイズ (*Glycine max*) はタンパク質と油の原料として重要な商品作物であり、窒素固定細菌と共生関係があるために、輪作農法にも有用な作物である。今回、このダイズのゲノム塩基配列が解読された。マメ科植物としては初めてであり、1.1 ギガ塩基対という大きさは、全ゲノム・ショットガン法によって配列解読された植物ゲノム中では最大でもある。ダイズの遺伝的経歴は華やかで、5900 万年前と 1300 万年前にゲノム重複が起こっており、その結果ゲノムは非常に重複の多いものとなり、遺伝子の 75 パーセント近くはコピーが複数ある形で存在する。ダイズの正確なゲノム塩基配列によって、改良品種の開発が促進されるだろう。 Article p.178 参照

## 遺伝：がんゲノムを比較する

**Cancer genomes compared**

今回発表された 2 種類のがんゲノム配列は、次世代シーケンシング技術によって、がんの発生にかかわる突然変異過程、修復経路、および遺伝子ネットワークに関してどのようなことがわかるかを明らかにしている。1 番目の論文は、小細胞肺癌患者の骨髄転移巣に由来する細胞株のゲノムに関するものである。このがんは喫煙によって誘発されるがんの典型で、その塩基配列には、タバコの煙に含まれる 60 を超える発がん物質のいくつかに特徴的な変異が含まれている。2 番目の論文は、1 人の患者の黒色腫細胞株の全ゲノム配列と、リンパ芽球様細胞株のそれとを比較したものだ。これは固形腫瘍の

完全な変異解析を行った初めての例であり、紫外線を浴びたことが原因の DNA 損傷を表す突然変異の主要な特徴が明らかである。

Articles pp.184, 191, Making the paper p.134 参照

## 構造生物学：Rubisco の再構築

**Rebuilding Rubisco**

自然界に最も大量に存在するタンパク質である Rubisco (リブロース-ビスリン酸カルボキシラーゼ) の form I は、多くの植物種やシアノバクテリアが行う光合成での大気中 CO<sub>2</sub> の吸収を触媒している。この酵素の低い触媒効率を改善できれば、改良種の作物を作出できる可能性があるため、これは生物工学での主要標的となっている。シアノバクテリアである *Synechococcus* 由来の Rubisco の *in vitro* 再構成と低温電子顕微鏡法による研究により、GroEL/GroES シャペロニンによるサブユニットの折りたたみが、「分子ホチキス針」として働くシャペロンタンパク質 RbcX<sub>2</sub> によって、サブユニットの集合と密接に共役して起こることが示された。このようにして Rubisco を再構成できれば、これはより効率の高い酵素を作出するための有用な手段となるだろう。

Article p.197, N&V p.164 参照

## 物理：加えられた次元

**An added dimension**

物体の像を三次元で生成するには、通常それを多数の視点から測定するか、断面ごとに走査しなくてはならない。今回 J Miao たちは、単色の入射ビームを使った 1 回の露光でナノスケールの三次元画像を作出

## 社説

## Democratic fallacy

民主主義・民主党の**ごびゅう**誤謬

Nature Vol. 462(389)/26 November 2009

公聴会方式で予算配分を決めようという日本の取り組みは、日本の社会や科学のためにはよいことかもしれない。しかし、今のやり方はそうではない。

日本政府は、今、少なくとも日本国内では革命的と思われる試みを進めている。官僚機構の外にいる人々が国家予算の決定過程を監視し、さらに過激なことに、その過程に国民が参加しているのである。

11月11日から27日まで開かれた公聴会(事業仕分け)では、民間の専門家と国民の代表からなる行政刷新会議ワーキンググループが、約220件の主要政府事業について官僚を厳しく追及し、各事業に対する自らの価値評価をもとに予算要求の妥当性を判定した。結果は、多い少ないはあるものの予算縮減、ないしは全額カットとなった。来年度予算については、例年、12月末までに財務省原案の提出と政府案の閣議決定が行われるが、今回の事業仕分け結果がどの程度の影響を及ぼすのか、今のところ不透明である。

日本の科学技術政策の最高決定機関である総合科学技術会議は、各事業を科学的に再評価する責任を負っており、ワーキンググループが進めている「社会的評価」と、対立的あるいは補完的な位置付けとなっている。ワーキンググループを監督する行政刷新会議の議員の1人が財務大臣であることから、ほとんどの論者は、事業仕分け結果には重大な影響力があると確信している(*Nature* 2009年11月19日号258ページ参照)。

事業仕分けは、数十件の科学事業と最も基本的な科学研究補助金制度の一部に対して行われているが、このことに日本の科学コミュニティの相当部分が苛立っている。しかし、理にかなった運営がなされれば、事業仕分けは前向きな展開となりうる。日本では、透明性と国民参加が不十分であり、それが確実に前進するはずだからである。これまでの日本の予算決定は、しばしば関係機関と官僚との間の取引によって進められてきたが、透明性と国民参加は、科学的必要性に基づいた予算決定へとつながっていく。

ただし、財務省としては、事業仕分け結果をどの程度重視するかを決める前に、事業仕分けというプロセスに潜むいくつかの重大な欠点を考慮すべきである。

例えば、総事業費が数千万ドル級の長期プロジェクト、特に10年以上前から継続している大型放射光施設SPring-8のような事業の場合、事業仕分けを担当するワーキンググループの19人のメンバーに科学者は数人しかおらず、この分野の専門家は1人もいない。たった1人の官僚が、ワーキンググループに対して事業内容を1時間で説明し、その事業の重要性について理解を得ることが望めるだろうか。SPring-8については30～50%という大幅な予算縮減と判定されたが、これを最終判断と見なしてよいのだろうか。このような事業仕分けで、予算縮減がもたらす影響を適切に評価できるのだろうか。

日本のスーパーコンピューター開発事業は、事業仕分け結果のとおりに進めば、おそらく中止ということになる。この事業を正当化するために使われた「世界最速」という国家主義的なうたい文句にワーキンググループが疑問を呈したのは正しかったかもしれない。しかし、この事業については、再検討、規模縮小、あるいは再交渉と判断する余地があった。事業規模を縮小しても、科学に十分貢献でき、事業存続を正当化できたかもしれないのである。ただ、総合科学技術会議でさえ、一般に科学的バックグラウンドのない官僚、そして産業界の代表者が大部分を占めていることを考えると、その再交渉では、事業仕分けよりももっと多くの科学者による情報提供が必要になるだろう。

全体的にみれば、これら科学事業の社会的価値をどう理解すべきなのか、ワーキンググループによって有益なフィードバックがもたらされたといえる。事業仕分けの対象になったような大型公共投資の場合、この視点は極めて重要であり、科学者が見落としがちな点である。ただし、それに引き続いて対話を行うことが必要である。一般国民に科学者の仕事の進め方を評価させるのなら、科学者にも自らを弁護する機会を与えなければならない。

ある研究者がいうように、今回の出来事は「悪い夢」であり、来年1月に目を覚ましたら、政府が事業仕分け



結果を十分に検討したうえで予算案を決定していた、ということになるかもしれない。また、これから数年で、事業仕分けも落ち着くべきところに落ち着き、研究者も自らの研究の正当性を説明するためにこの課題を受け入

れ克服できるようになるのかもしれない。しかし、今のままでは、事業仕分け結果が予算決定過程における最終判断となり、今後数十年にわたって壊滅的な影響を及ぼす可能性をはらんでいる。(菊川要 訳) ■

# The entangled bank unravels

## 「生物多様性年」を迎えて

Nature Vol. 462(251-252)/19 November 2009

「多くの種類の数多くの植物が地表を覆い、鳥が灌木に止まってさえずり、さまざまな昆虫が飛び回り、湿った地中をミミズがはいまわる。このように種のもつれ合った土手を思い浮かべるのはおもしろい」。チャールズ・ダーウィンの『種の起源』の最終段落はこう始まるが、2009年11月24日、この本が出版150周年を迎えた。ダーウィンは、こうした穏やかなイメージを使い、自然選択の過程を通じて、極めて美しく極めてすばらしい生物種（すべて）が、際限なく進化してきたことを強調しようとした。

しかし、もし彼が今日生きていれば、これほどの高揚感はないだろう。土手では、森林伐採によって在来植物種がほとんど失われ、侵入低木で占められるようになり、近くを流れる河川は汚染され、過剰な表面流出による堆積物がたまっているからだ。ダーウィンにインスピレーションを与えた生物の隆盛が、今では大きく損なわれていることは旧聞に属する。11月、国際自然保護連合(IUCN)がレッドリスト（絶滅のおそれがある動植物のリスト）に発表したデータによれば、哺乳類の1/5と両生類の約1/3が絶滅の危機にさらされている。植物も同様で、針葉樹など既知の裸子植物の約1/3が絶滅の危機に瀕している。

科学者や環境保護論者があれほど警告したにもかかわらず、各国政府がしたのは、この問題を心配することくらいだった。世界の約200か国は、生物多様性条約の締約国となり、生物多様性の減少率を2010年までに大きく減らすことを約束していた。ところが指導者たちは、目標が達成されないことを予想しており、そもそもこの目標が基本的に達成不可能なもので、むしろ政治声明としての意味合いが強かったことを認めている（Nature 2009年11月19日号263ページ参照）。

この1年、Natureはダーウィンの功績をたたえる特集を組んできたが（www.nature.com/darwin）、11月19日号はその最後として、生物多様性の減少に関する緊急

課題と問題解決への取り組みについて取り上げた。各国政府上層部は、ようやく生物多様性の危機に注目し始めたようだ。例えば国連総会では、2010年を「国際生物多様性年」とすることが決議され、来る9月には、米国ニューヨークの会議で各国元首がこの問題を取り上げる予定になっている。10月には生物多様性条約の締約国が名古屋市に集まり、今後数十年間にわたる各国の具体的かつ検証可能な生物多様性の目標を策定する。各国は今後11か月間に極めて重要な生態系の保護に着手し、成果を名古屋市での首脳会議で発表しようという意欲を高めている。

「生態系サービス」という概念、すなわち、多様な生態系によって大きな経済効果が得られることが徐々に認知されてきており、産業界や政界での環境保全に対する支援が強化されている。「生態系と生物多様性の経済学(TEEB)」という国際研究プロジェクトのリーダーは、政府は、自然の「公共財」を保護するための税制や給付金制度を定める必要がある、と主張している。

今日、生物多様性に対する最大の脅威は、生息地の急激な消失だ。現在では、全世界の陸地表面のわずかに約14%と領海の6%足らずが保護されているにすぎない。それでも、こうした保護区域が世界人口のほぼ1/6を支えるうえで役立っていることがTEEBの研究で明らかになっている。2010年までの目標を達成できない見通しが強まり、各国は次なる行動を考えている。なかでも、最も絶滅の危機に瀕した生物種の貴重な保護生息地を選定することは、極めて重要なテーマとなるだろう。

社会の最富裕層は、自然から最も離れたところで生活し、最貧層は、多様な生態系の果実に大きく依存する傾向がある。したがって、環境保全政策の策定にあたっては、人間、特に保護区域の設定によって間接的に被害を受ける現地のコミュニティーが絶対に犠牲にならないように配慮しなければならない。(菊川要 訳) ■

# Why pain sometimes lingers

## 傷は治っても消えない痛み

Lizzie Buchen    doi:10.1038/news.2009.1084/15 November 2009

動物には、やさしい愛撫で痛みを感じる神経がある。

外傷部位への接触に対する痛覚過敏に、これまで謎の存在だったある神経経路が極めて重要な役割をしているらしいことが、マウスを使った研究で明らかになった。

ヒトは足の骨折や日焼けなどの外傷を負うと、痛覚系が異常に敏感になり、歩いたりやさしくさすったりといった、通常は痛くない感覚に反応して痛みを感じる。こうした痛覚過敏により、傷を受けた組織は治るまで保護される。しかし時には、傷が治っても痛みが消えず、関節炎などの症状で慢性化することがある。

このほどカリフォルニア大学サンフランシスコ校（米国）の神経科学者 Robert Edwards と Allan Basbaum らの研究チームは、外傷がある場合、ある種の少数の神経繊維が本来は気にならない触覚を痛覚経路へ転送しているらしいことを見つけた<sup>1</sup>。実は、この神経繊維群は数十年前に発見されていたのだが<sup>2</sup>、その機能は今までわかっていなかった。

### 触られるだけで痛い

研究チームは、無髄の低閾値機械受容器（C-LTMR）とよばれるこの神経繊維群が、感覚が極めて強い場合のみ応答する標準的な痛覚神経繊維と違って、容易に興奮することに気づいた。ただし普段は、軽い接触は、C-LTMR ではなく別の主要

な感覚ニューロン群が感知する。そのため、C-LTMR の役割はこれまでよくわからなかった。しかも、C-LTMR 群を特異的に狙って調べることは困難だった。

しかし今回、C-LTMR が VGLUT3 というタンパク質を発現することがわかり、これが可能になった。C-LTMR が、シグナルを伝えるには VGLUT3 が必要だが、脊髄に連絡するほかの感覚ニューロンはいずれも、別のタンパク質 VGLUT1 か VGLUT2 を用いている。そこで遺伝子操作で VGLUT3 をもたないマウスを作り、すべての C-LTMR が作動しないようにした。C-LTMR が機能しないマウスは、軽い接触や極端な低・高温、あるいは前足を細いワイヤでつつくなど、強い痛みのある刺激を与えた場合は、正常なマウスと全く同じように反応した。さらに研究チームは、このマウスが次の3通りの方法で外傷を受けた場合に示す反応を調べた。1つ目は炎症を起こす化合物により、筋肉損傷から背骨のずれに至るさまざまな病態を発生させる。2つ目は切開により、外科手術後の痛みを再現する。そして3つ目は神経損傷である。正常マウスはワイヤで前足をつつくと、すべての場合でより過敏になり、すぐにワイヤを払いのけた。ところが C-LTMR が作動しないマウスの反応は、外傷を受ける前とほとんど変わらなかった。しかし、どちらのマウスも熱には過敏になったことから、C-LTMR によって、温度にではなく接触に対して過敏になるのだと考えられた。

また、外傷なしで、遺伝子操作マウスが正常マウスに比べて鈍感になる痛みの種類があった。それは、尻尾をクリップではさんだときに生じるような、強く持続する痛みである。C-LTMR が容易に興奮することを考えると、この知見は一見矛盾し

ている。1つの可能性として、VGLUT3 をもつごく少数のニューロンがこの種の痛みに反応するのだらうと、Basbaum はいう。

### 痛みへの道筋

以前から既に、動物が外傷を受けた後に痛覚過敏になる2つの経路が知られていた。1つは、感覚神経繊維が刺激に対してより敏感になる場合で、これは温度に対する過敏状態に関連していると考えられる。例えば、日焼けの後、普段は適温のシャワーを浴びても、ひどく熱く感じるような場合である。もう1つは、C-LTMR のように興奮の閾値が低くて軽い接触を感知するのに重要な別の神経繊維群が、脊髄の痛覚回路に動員される場合で、これらの繊維が伝える感覚がすべて痛みとして知覚されるのだと考えられる。

Basbaum は「これらは標準的な痛覚神経回路とは別のものであり、治療標的となる可能性もあります」と話し、外傷によっても C-LTMR が痛覚回路へ動員されるのだと考えている。さらに C-LTMR は、ほかの低閾値痛覚神経繊維と連携している可能性や、また、さまざまな刺激に対する知覚過敏にかかわっている可能性もある。

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）の神経科学者 Clifford Woolf は、「今回、これらの神経繊維の動員が、機械的刺激に対する痛覚過敏を生じる経路であることが新たにわかったのです。これは、異なる感覚ニューロンの組み合わせで特異な機能が発揮される、非常におもしろい例といえるでしょう」と語っている。（船田晶子 訳） ■

1. Seal, R. P. et al. *Nature* **462**, 651-655 (2009).

2. Bessou, P. & Perl, E. R. J. *Neurophysiology* **32**, 1025-1043 (1969).



ISTOCKPHOTO

# Erupting ocean volcano caught on film

## 海底火山の噴火を撮影

Naomi Lubick doi:10.1038/news.2009.1150/17 December 2009

海底で溶岩が流れ、岩となる過程がハイビジョン映像でとらえられた。

水深 1200 メートル付近の海底で起こった噴火のようすが撮影され、昨年 12 月にカリフォルニア州サンフランシスコで開かれた米国地球物理学連合 (AGU) の年会で公表された。50 時間以上にも及ぶこの映像は、ハイビジョン撮影され、背景音も録音されている。それはまさに、深海底で溶岩が流れ出した瞬間をとらえた映像だ。

この映像は、西太平洋のサモア諸島の南西約 200 キロメートルにあるウエストマタ海底火山で撮影された。オレゴン大学 (米国ユージーン) の Katharine Cashman は、「確かにこれは、海底を流れる溶岩を撮影した初めての映像ではありません。しかし、実にスペクタクルな映像です」と称賛する。今回の映像は、ウッズホール海洋研究所 (米国マサチューセッツ州) の「ジェイソン」というリモートコントロールの無人探査機 (ROV) を使って撮影された。Cashman の研究チームも昨年 4 月、同じジェイソンを使い、北マリアナ諸島ロタ島の北西約 60 キロメートルにある北西ロタ第 1 海底火山の溶岩のかすかな光を、水深 500 メートルというずっと浅い海底で撮影することに成功している。

今回の研究チームのリーダーである米海洋大気庁 (NOAA) の Joseph Resing は、「ウエストマタ火山噴火の映像は、ジェイソンを使って昨年 5 月に撮影されました。北西ロタ第 1 海底火山よりもずっと深い場所での噴火であり、実際に溶岩が流れているところがはっきりと映っています」と話す。Resing は、ワシントン州シアトルにある NOAA 太平洋海洋環境研究所を活動拠点にしている。

### 溶岩の実験場

「今回さらにジェイソンは溶けた溶岩に接

近し、固まりを採取しました」と Resing は説明する。ジェイソンはできたばかりのポニナイト (無人岩) を初めて持ち帰ったのだ。ポニナイトは、地球のマントルから噴き出したばかりのマグネシウムとシリカ (二酸化ケイ素) に富む岩で、日本を形作っている大昔にできた海底岩石などがそうだ。このウエストマタ火山円錐丘には、北西ロタ第 1 海底火山よりも古い、マグネシウムに富むマントルが流れているようだ。一方、北西ロタ第 1 海底火山の溶岩は、米国ワシントン州のセント・ヘレンズ火山のシリカに富んだ溶岩に似ている。

今回の映像は、枕状玄武岩溶岩とよばれる岩の形成過程に関する地質学者の仮説も裏付けた。映像からは、熱いマグマの泡が大きくなって破裂し、滝状になり、その後、表面が周囲の水によって冷やされて枕状の岩が形成されることがわかる。枕状玄武岩溶岩は地球で最もありふれた岩であり、海洋の地殻を形作るほか、プレート運動によって古代の海底から引き出されて大陸上にも現れる。

### 25 年目の成果

研究者たちは、約 25 年前、太平洋中央海嶺などの主要な海底拡大地域の中心で、枕状玄武岩溶岩が巨大な半球状にたくさん積み重なっているのを初めて目にした。しかし、枕状溶岩ができるようすが撮影されたのは、今回が初めてである。海底の拡大中心は新しい海洋地殻が形成される場所だ。拡大中心での火山噴火は、数日間で莫大な体積のマグマを噴き出すことがある。しかし、そうした現象の撮影は難しかったと、ウッズホール海洋研究所の Christopher German はいう。調査船を待機させると非常に費用がかかる



ウエストマタ海底火山で壮大な噴火のようすが撮影された。

うえ、いつ噴火するかわからない 6 万キロを超える海嶺の中から撮影場所を選ばなければならないからだ。

今回のウエストマタ火山をターゲットにしたのは、2008 年 11 月、調査船が航行中に、海底噴火が進行しつつある化学的な徴候を見つけたからだ。溶岩が流れ出す瞬間を撮影するには、噴火に間に合うようにウエストマタ火山に到着しなければならない。そのために Resing らは、研究資金を提供する機関を説得し、調査船のスケジュールの調整に奔走した。

オーストラリア国立大学 (キャンベラ) の火成岩研究者 Richard Arculus はこの研究には参加していないが、ウエストマタ火山と同じラウ海盆にあり、鉱物に富んだ近くの海嶺を研究している。Arculus は、「溶岩が流れる現象は激しい過程です。溶岩がどのように流れるのかを実際に観察することは、起こっている現象を理解するのに大いに役立ちます」と話す。

(新庄直樹 訳)

[http://www.nature.com/nature/newsvideo/West\\_Mata\\_eruption.mov](http://www.nature.com/nature/newsvideo/West_Mata_eruption.mov)  
[http://www.nature.com/nature/newsvideo/West\\_Mata\\_eruption\\_zoom.mov](http://www.nature.com/nature/newsvideo/West_Mata_eruption_zoom.mov)

## 「事業仕分け」を世界はどう見たか

2009 年末から日本で行われた「事業仕分け」は、全世界の科学技術関係者をびっくりさせた。Nature はそれをどう伝えたのか、時系列で掲載する（6 ページの社説も参照）。（nature DIGEST 編集部）

# Japanese science faces deep cuts

## 大きく切られた日本の科学技術予算

David Cyranoski

Nature Vol. 462(258-259)/19 November 2009

内閣府に新設された政府の諮問機関が科学事業に対する予算の大幅カットを提言したため、日本の科学界は騒然となっている。

今年 9 月に新設された「行政刷新会議」は、鳩山由紀夫首相が議長となり、11 月 11 日から、同会議ワーキンググループが約 220 件の政府事業の再評価を始めた。この「事業仕分け」の中には、数十件の卓越した科学事業も含まれている。

大幅な刷新の対象となるのは、大型放射光施設 SPring-8（兵庫県佐用町）、世界最速のスーパーコンピューター開発事業、深海地球ドリリング計画、基礎研究助成プログラムをはじめとする数多くの科学事業だ。

行政刷新会議の提言は、来年度予算を 3 兆円削減する作業の一環としてなされており、日本における研究の優先順位を長期にわたって総合的に変革しようという新政権の意思が、これまでで最も具体的に示されている。

しかし、科学者は今回の提言に失望しており、日本の終わりを予言する科学者すらいる。ある著名な結晶学者は、匿名を条件に次のように Nature に語った。「こんなことが続けば、日本の科学者は、若手を含めて海外へ流出し、日本の科学は死に絶えてしまうでしょう」。

鳩山政権は、無駄な事業への財政支出をやめ、高速道路の無料化のような一般

国民のためになる施策に予算を投入することを選挙公約に掲げ、8 月に政権交代を果たした。当時、鳩山首相は Nature に対し、こうした流れの中でも科学に対する支援は強化すると語っていた<sup>1</sup>。

しかしその後、鳩山政権は科学技術予算を削減している。10 月には、文部科学省が、最先端研究開発支援プログラム（FIRST）の 30 件の事業に配分することになっていた総額 2700 億円の研究費を、1000 億円に減額した<sup>2</sup>。

10 月 8 日には、日本の科学技術政策の最高決定機関である総合科学技術会議の本会議が開かれ、議長を務めた鳩山首相は、自分を含め数人の閣僚が理系出身者である現内閣は「たいへん珍しい」と指摘した。そしてさらに「私も研究をしていたからわかるが、研究者や学者というのは自分の研究に酔ってしまう」「新たな社会システムに合うように研究を発展させることがふさわしいのではないか」と話したことが日経産業新聞（2009 年 10 月 12 日）で報道された。

11 月に入り、東京では連日、行政刷新会議ワーキンググループによる事業仕分け作業が行われている。各対象事業の評価にかかる時間は、1 時間。この作業のライブ映像はインターネット配信されており<sup>3</sup>、また、それぞれの事業に関する提言内容は毎日更新されるウェブサイト上で公開さ

れ、評価の要点は赤字で表示されている。日本としては、これは驚くべき透明性といえる。通常、予算は、密室での官僚どうしの取引が成立した後に決定されてきたからである。「こうなってしまうと交渉するのが難しくなります」と政策研究大学院大学（東京都）科学技術・学術政策プログラムディレクターの角南 篤<sup>すなみあつし</sup> 准教授は話す。

科学事業を評価する第 3 ワーキンググループは 19 人のメンバーからなり、エコノミスト、金融ストラテジスト、地方自治体の官僚、その他の国民代表と数人の科学者によって構成されている。これに対して、評価対象事業を弁護するのは、通常、各省庁の官僚であり、科学者ではない。

第 3 ワーキンググループは、SPring-8 について、そのメリットが「十分に説明されていない」として、年間予算 108 億円を 1/3 から 1/2 程度縮減し、研究資金の一部を SPring-8 のユーザーから利用料を徴収して賄うことを既に提言している。

「SPring-8 予算の縮減は大打撃です。それ自体で大きな収益をあげられるような大型放射光施設は、世界中のどこを探したってありません」。こう話すのは、高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所（茨城県つくば市）に所属し、SPring-8 事業にも協力している構造生物学者の若槻 壮市教授である。若槻教授は、この事業仕分け作業が「一方的」だと嘆

き、科学者には、自らのプロジェクトを弁護する「真の機会」が与えられていないと話す。また、結晶学が専門の月原富武特任教授（兵庫県立大学）も、SPring-8で行われているタンパク質結晶構造解析やその他の基礎研究が打撃を受けると考えており、行政刷新会議の提言に抗議する運動を組織中だ。

日本国内に研究所のネットワークを擁する理化学研究所が計画するスーパーコンピュータは、今年の前半にエレクトロニクス大手の NEC と日立が、突然、事業から撤退し、既に混乱状態に陥っている<sup>4</sup>。この事業は、「今や『ほとんど白紙の状態』にあるはず」という見方をワーキンググループは示し、日本主導で世界最速のスーパーコンピュータを開発する必要性はないとした。

このほかにも第3ワーキンググループは、理研のバイオリソースセンターと植物科学研究センターに対する予算を1/3、深海地球ドリリング計画の予算を10～20%縮減し、海洋研究開発機構の地球内



大型放射光施設 SPing-8 は、1/3 から 1/2 の予算縮減という評決を受けた。

部ダイナミクス領域（神奈川県横須賀市）の予算を少なくとも半減させるよう提言した。さらに、多くの研究者の「生活の糧」である科学研究費補助金を含む競争的資金プログラムについて、「シンプル化、縮減」すべきだとした。本号の原稿締め切り後には、核融合が動力源になることを実証するための国際プロジェクト ITER の一環として計画されている、日欧協力による熱核融合実験炉に対する事業仕分けが実施される予定である。

こうした予算縮減の提言が、科学技術予算の増額という当初の公約に矛盾していないのか、また、提言された予算縮減

分は他の研究分野に対する予算を増額することで相殺されるのか、といった疑問点について、鳩山首相のスポークスマンは、「現在検討中だ」と語っている。ワーキンググループの提言は、行政刷新会議での検討を経て、財務省に提出される。同省による来年度予算の発表は12月後半の予定だ。（菊川要 訳）

David Cyranoski は Nature のアジア・パシフィック地域の特派員（以下同様）。

1. Cyranoski, D. *Nature* **460**, 938 (2009).
2. Cyranoski, D. *Nature* **461**, 854–855 (2009).
3. <http://www.cao.go.jp/sasshin/>
4. Cyranoski, D. *Nature* doi:10.1038/news.2009.495 (2009).

## Japan budget threat sparks backlash

### 科学技術予算削減に激しい抗議の声

David Cyranoski

Nature Vol. 462(557)/3 December 2009

日本の科学者が、新政権の予算削減方針に対する国内外の猛烈な抗議の声を結集させている。

いわゆる事業仕分けは、政府に任命された行政刷新会議ワーキンググループが、多くの大型研究事業を含む約220件の政府支出事業に対する予算の削減を提言する作業だ。各グループは約20人のメンバーで執り行われているが、特に批判の

対象になっているのは、その中に科学者がほとんど含まれていないことだ。ワーキンググループの提言は、来年度予算を3兆円削減する政府の取り組みの一環として進められている。

予算削減が提言された事業には、大型放射光施設 SPing-8（兵庫県佐用町）や世界最速のスーパーコンピュータ開発事業が含まれている。しかし提言は、そ

れにとどまらず、多くの科学者の命綱である研究補助金の減額にまで及んだ（前掲の11月19日号の記事参照）。

11月25日、東京大学で「ノーベル賞・フィールズ賞受賞者による事業仕分けに対する緊急声明と科学技術予算をめぐる緊急討論会」が開催され、出席した4人のノーベル賞受賞者と1人のフィールズ賞受賞者は、約1000人の参加者を前に、

予算削減によって受けるダメージについて語った。緊急討論会の終わりでは、客席から大きな拍手が沸き起こり、「大学予算と研究補助金の配分を決める際に学術と科学技術の専門家の意見を取り入れること」を政府に求めるという著名な科学者たちが作成した声明に対して、賛同の意思が示された。

日本の科学政策の世界は、普段はもの静かで落ち着いたところなのだが、この1週間、こうした緊急声明が相次いで発表された。11月24日には日本のトップクラスの国立、私立の9大学の学長が集まって、政府の方針は「世界の潮流とまさに逆行する」とし、若手研究者に対する研究補助金と大学運営費関連予算の維持を求める声明を発表した。

11月25日には、コンピューターや情報技術を専門とする9大学の関連研究機関の長が、存続の危機に瀕したスーパーコンピューター開発事業への支援を求める声明を発表した。東京大学では、17あるグローバルCOE拠点のリーダーが署名した、予算確保に関する要望書が、東京大学総長名で発表された。それに加えて、日本のトップクラスの国立、私立9大学の学長とさまざまなグローバルCOE拠点のリーダー31人も声明を発表した。

東京大学での緊急討論会を組織した同大学の石井紫郎名誉教授（法学）は、この突然の抗議の高まりが、日本史上でも騒然とした時期の1つだった1960年

安保闘争を思い起こさせると話す。当時は、日米安全保障条約の改定に反対する教員と学生が激しい抗議運動を展開した。

討論会翌日の11月26日には、4人のノーベル賞受賞者（化学者の野依良治博士、免疫学者の利根川進博士、物理学者の江崎玲於奈博士と小林誠博士）と科学者の代表団が鳩山由紀夫首相と会談し、科学技術予算削減の見直しを求めた。会談後、野依博士は*Nature*に対し、「会談の席で、スーパーコンピューター、加速器、バイオリソースといった世界的なインフラストラクチャーは、学界にとっても産業界にとっても、最高水準の科学技術研究を行ううえで絶対に必要だと指摘しました」と語った。

この会談で、日本在住の8人のノーベル賞受賞者全員が署名した要望書が鳩山首相に手渡された。要望書では、「資源の乏しいわが国にとって、科学技術の脆弱化は国家の衰退を意味する」と指摘している。これに対し、鳩山首相は、「サイエンスを強く支援していきます。ノーベル賞受賞者の意見を参考に、今後の方向を考えたいと思います」と答えた。

事業仕分けは11月27日に終了したが、最後の数日間にワーキンググループは、国際的なITER核融合プロジェクトの一環として計画されている、日欧協力による熱核融合実験炉について予算要求を全額認めた。これは、新エネルギー源とグリーンテクノロジーの開発に積極的な鳩山政権

の方針と合致している。

一方、宇宙航空研究開発機構を含むコンソーシアムが開発中の中型ロケットについては、予算計上の見送りという評価結果となった。また既に、ニュートリノ観測所「スーパーカミオカンデ」（岐阜県飛騨市）、マウナケア天文台（米国ハワイ州）に設置された国立天文台のすばる望遠鏡をはじめとする、主要な大学関連研究所の総額約970億円の予算についても縮減が提言されている。ただし、その額は明示されていない。

東京大学数物連携宇宙研究機構の村山斉機構長は、特に、海外の研究仲間からの支援を積極的によびかけてきた。「全世界の著名な科学者に、文部科学省副大臣宛てにEメールを送るよう要請してきました。現在私の知るかぎりでは、約100人の科学者が要請に応じてくれています」と村山機構長は話す。

また、ローレンスバークレー国立研究所（米国カリフォルニア州バークレー）のノーベル賞天体物理学者ジョージ・スムートは、予算の削減により「日本は信頼できるパートナーでないとの強いメッセージを世界に送ることになるでしょう」と語ったことが日本のメディアで報道された。

ハワイ大学（米国）の海洋地球物理学者グレッグ・ムーアは、JAMSTECが所有する世界最大の地球深部探査船「ちきゅう」を用いた深海地球ドリリング計画について、10～20%の予算縮減が提言されたことを嘆いている。ムーア氏は、「技術の至宝である『ちきゅう』の運営費を削減し、むだに放置するような行為を、日本政府が正当化できるとは到底思えません。全世界の海洋地球科学のコミュニティで、統合国際深海掘削計画（IODP）における日本の指導力に対する信頼は急速に低下していくでしょう」とした意見書を文部科学省に送った。

政府は、ワーキンググループの提言を検討中で、年内に予算案を発表する予定だ。（菊川要 訳）

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。

著名な日本の科学者が集まり、日本の競争力が失われる可能性に関する懸念を表明した。

# Hope for Japan's key projects

## 日本の重要科学プロジェクトに予算復活の望み

David Cyranoski

Nature Vol. 462(835)/17 December 2009

今年9月、日本で50年ぶりの政権交代が起こり、多くの日本国民は、民主党鳩山新政権に、国の再生を期待した。しかしその後、新政権が打ち出した政策により、研究者たちは、予算をめぐるジェットコースターのようなめまぐるしい変化に翻弄<sup>ほんろう</sup>されている。内閣府に設置され、鳩山由紀夫首相がともに議長を務める2つの機関が、11月から12月の数週間に、主要科学プロジェクトの財政的先行きについて、根本的に異なる提言を行ったからだ。

官僚組織の“脂肪”をそぎ落とすことを目的として9月に発足した行政刷新会議は、次世代スーパーコンピューター開発、大型放射光施設 SPring-8（兵庫県佐用町）、地球科学研究を含む多くの重要科学プロジェクトについて、予算の大幅削減を提言した。しかし、こうした予算削減に対して、科学者から激しい抗議の声が上がった（前掲の12月3日号の記事参照）。こうした中で、12月9日、日本の科学技術政策の最高決定機関である総合科学技術会議（CSTP）が、これらの事業やその他多くの科学事業に対する支援を継続すべきだという、行政刷新会議と正反対の意見を示したのだ。

例えば、SPring-8や博士課程研究プログラムの強化を目的としたグローバルCOEプログラムについては、予算の1/3以上の縮減が提言されていたが、総合科学技術会議は、「優先して資源を配分すべきもの」とした。また、完全廃止の可能性もあった次世代スーパーコンピューターについても、支援すべきだとした。

日本政府の政策決定では、通常、舞台

裏で官僚によって事前に調整され、そのコンセンサスが発表されてきた。今回のように明らかに矛盾する状況は珍しく、研究者は当惑している。スーパーコンピューター事業の渡辺貞プロジェクトリーダーは、「政策決定過程が不透明で、非常に不安です」と語る。

来年度予算の政府案は12月後半に決定されるが、鳩山首相は、総合科学技術会議の提言を「貴重な意見」といい、「予算に十分に反映できるように努力していきたい」と語った。多くの人々は、鳩山首相が、予算削減提案に対する激しい抗議にあつて、総合科学技術会議の提言を受け入れる方向に傾いているのではないかと考えている。科学政策を専門とする政策研究大学院大学（東京都）の角南篤准教授も、「今の時点では何もいえませんが、我が国の首脳が問題を認識したことは間違いなくと思います」と話す。

行政刷新会議は、外部から十分な情報を入手せずに、原則として担当官僚が1時間で事業仕分けチームにプロジェクト内容を説明しただけで予算削減を勧告したため、科学者の強い批判を受けた。なお、行政刷新会議は、多くの科学者の参加を得て、スーパーコンピューター事業に関する公開討論会を実施する計画であることが、日本のメディアによって報じられている。

一方で研究者は、大事なプロジェクトが中止の危機に瀕したことで、官僚や外部評価者はもちろんのこと、一般国民にプロジェクトの正当性を示す必要があることに気がついた。実際、スーパーコンピュー



科学者は、鳩山由紀夫首相が科学技術予算削減の提案を受け入れないことを願っている。

ター事業のリーダーたちはウェブサイト上で、事業の重要性に関する「よくある質問と回答」を掲載した。そこには「次世代スパコンの優れた点を説明して下さい」といった項目も含まれている。

渡辺プロジェクトリーダーは、スーパーコンピューター事業に国民の関心を引きつける長期戦略がまだできていない、と認める。しかし、スーパーコンピューターが、ナノ科学、生命科学、環境科学など日本の主要な研究分野において大きな役割を果たす点は強調したいと考えている。「我々は、この点こそを人々に伝えなければならないのです」。

角南准教授も、日本の研究者は、科学予算には国民の支持が得られるのが当たり前だと思っはならないと考えており、「たとえスーパーコンピューターとSPring-8の予算が小幅な減額ですんだとしても、科学者ももっと国民と向き合っていく必要があります」と語っている。（菊川要 訳） ■

# Qian Xuesen (1911-2009)

## 中国ミサイルの父・銭学森博士逝く

Jane Qiu

Nature Vol. 462(735)/10 December 2009

2009年10月31日、中国のロケット科学者銭学森（Qian Xuesen または Tsien Hsue-shen）博士が97歳で死去した。おそらく、彼ほど歴史に翻弄された人物はいないだろう。中国から米国に渡った彼は、ロケット推進に関する研究と第二次世界大戦中の米国のミサイル開発への貢献により、広く知られるようになった。しかし戦後、マッカーシズムが病的な高まりを見せた時期に共産主義者という真偽不明の嫌疑をかけられ、国外退去処分を受けた。帰国した彼は、中国を宇宙大国の地位に押し上げる原動力となった。

銭は、1911年に中国東部の杭州に生まれた。1911年といえば、辛亥革命で2000年におよぶ中国の封建制度が終焉を告げた年であり、彼は歴史の激動と社会の混乱の中を生きる運命を負わされた。上海交通大学工学部を卒業後、1935年、米国マサチューセッツ州ケンブリッジのマサチューセッツ工科大学（MIT）に進み、航空学を学んだ。当時のMITは実践を重視したカリキュラム編成になっていたため、理論寄りの銭は不満を感じ、まもなくカリフォルニア州パサデナのカリフォルニア工科大学（Caltech）に移った。Caltechでの日々を送る中で、彼は米国有数のロケット科学者として頭角を現していく。

銭はCaltechで伝説の理論空気力学者セオドア・フォン・カルマンに師事し、高速飛行の理論家として名を上げた。この2人は、その研究の危険さゆえに「決死隊」として知られたロケット実験家集団の主要なメンバーだった。彼らの研究は米国陸軍航空隊が注目するところとなり、

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。

Caltechは1939年に、小型ロケットを使って推力を補うことで重い航空機の離陸を助けるジェット補助離陸技術の開発を引き受けることになった。研究チームには銭も含まれていた。

1943年にドイツのロケット工学の進展具合が明らかになると、米国のミサイル開発は一気に加速した。銭も尽力してCaltechにジェット推進研究所が設立された（49年から55年まで教授）。2年後、銭は米国国防総省から国家機密事項取扱許可を受け、科学顧問委員会のメンバーとして最新の軍事機密技術について助言を行うようになった。1949年には、スペースシャトルの先駆けともいえる有翼ロケットつき宇宙航空機の理論的基礎を固めていた。

そんなとき、冷戦が始まって中国と米国の関係が悪化し、銭のキャリアは粉々に打ち砕かれる。1950年、彼は共産主義

者のスパイであるとして告発され（今日に至るまで、この申し立てを裏付ける事実は見つかっていない）、国家機密事項取扱許可は取り消された。この告発に深く傷つき、自分がもはや米国では歓迎されない存在であることを理解した銭は、中国への帰国を試みた。ところが今度はその行動ゆえに米国移民局に逮捕され、2週間にわたり収監されてしまった。その後5年間も軟禁に近い状態に置かれ、とぎれることのない屈辱といやがらせに耐えなければならなかった。とはいえ、その間もCaltechで教育に携わることはでき、制限つきではあったが研究を行うこともできた。朝鮮戦争で中国の捕虜となっていた11人のアメリカ軍兵士を釈放する条件の1つとして銭の帰国が認められたのは1955年のことだった。

中国に帰国した銭は英雄として迎えられ、まもなくミサイル開発を依頼された。電話が贅沢品だったような国でミサイルを開発しようというのだから、気の遠くなる挑戦である。銭は、中国の科学者と技術者を訓練しなおし、西側で訓練を受けた中国人研究者に誘いをかけて帰国させ、研究開発のための効率的な教育・運営システムを構築することから始めた。これらはいずれも、中国のロケット技術の発展に永続的な影響を及ぼすことになる。銭は1958年に共産党に入党し、信頼を得て、党の高官になった。毛沢東主席をはじめとする要人に面会することができた彼は、中国を発展させるために必要と思うことがあれば、当局者を説得して協力させることができた。



1956年、銭は北京に力学研究所を設立した。今日、この研究所は世界有数の航空学研究機関へと成長し、中国の多くの大学の工学教育に影響を与えている。銭のリーダーシップの下、中国はソ連のR-2中距離ミサイル（ナチスドイツが開発したV-2ロケットを改良したもの）の模倣から始め、1964年には国産技術に基づく中距離弾道ミサイルである東風2号を発射、その数か月後には最初の原子爆弾のテストを成功させた。さらにその2年後には東風2号を使って中国初の核弾道ミサイルを発射し、1970年には長征1号（東風4号を改良した人工衛星打ち上げ用の3段式ロケット）を使って中国初の人工衛星を軌道に投入した。

銭の尽力は対艦ミサイル海鷹（西側では「シルクワーム」として知られている）を生み出し、一連の野心的な宇宙開発への道を開いた。2003年には中国初の有人宇宙船である神舟5が打ち上げられ、2007年には中国初の月探査機である嫦娥1号が長征ロケットを使って軌道に投入された。

経済的にも政治的にもあれだけ混乱していた中国でミサイル開発と宇宙開発を軌道にのせることができたのは驚異的である。しかし、その道のりは平坦ではなく、「大躍進」の間は何度も延期された。「大躍進」とは1958年に毛沢東の主導によって始まった社会・経済計画だが、その名に反して中国経済を停滞させ、広範にわたる飢饉を引き起こすことになった。また、いかなる運命のいたずらか、同じく毛沢東の主導により1966年に始まった反革命分子狩りである「文化大革命」の際にも、いわれなき迫害を受けた。銭の友人や同僚の数人が反革命的であるとしてその地位を追われたため、ほとんど関係なかった銭でさえ、「自己批判書」を書くよう強制されたのである。

銭は米国で著しく不当な仕打ちを受けたが、Caltechで過ごした日々が彼の人生で最良の時期の1つであったことは明らかだ。恩師フォン・カルマンとの日々はにぎやかで充実していた。彼は恩師のジョークに笑い、しばしば白熱した議論

を交わした。彼はまた、Caltechで育まれていた知的な気風と創造的な精神についての思い出を深い愛着を込めて語り、これを中国の学術文化や科学的基盤と対比していた。彼は、中国の科学は真の科学的革新を起こすには至っておらず、このままではその可能性もないだろうと考えていた。

晩年の銭は寝たきりになっていたが、温家宝首相から定期的な訪問を受け、中国の科学の発展を阻害していると思われる問題について議論した。彼は、自分がその確立に尽力したミサイル開発や宇宙開発がめざましい進歩を遂げたことに喜んだ。しかし、自分がCaltechから持ち帰った知的な遺産は、中国のアカデミックな土壌に根付かなかつたと感じており、そのことを深く悲しんでいた。本人の思いはさておき、銭が中国の科学を変えていく種をまいたことは間違いない。（三枝小夜子 訳）

Jane Qiu は北京在住の Nature のライター。

## NEWS BRIEFING

### SPACE TOURISM'S NEW ERA

#### 宇宙観光旅行の新時代

Nature Vol1462(702)/10 December 2009

2009年12月7日、宇宙旅行の日を待ち焦がれる人々が、米国カリフォルニア州のモハーヴェ空港・宇宙港において、旅客宇宙船スペースシップ・ツー（写真中央：輸送機ホワイトナイト・ツーの下部に取り付けられている）と初めて対面した。この宇宙船は、英国人の億万長者 Richard Branson が資金を提供し、航空機デザイナーの Burt Rutan が開発したもので、乗客を大気圏と宇



宙の境界まで連れていく。旅行代金は1人あたり20万米ドルだ。Branson は、Virgin Galactic 社を世界初の民間宇宙旅行会社にしようとしている。同社によると、既に300人以上の人々が、ニューメキシコ州のまだ完成していない宇宙

港から出発するツアーに予約を入れたという。すべての飛行試験が順調にいったとしても、彼らが宇宙旅行に出発できるのは、早くても2011年になりそうだ。（三枝小夜子 訳）

# The neutrino and the whale

## ニュートリノとクジラ

Nicola Nosengo

Nature Vol. 462(560-561)/3 December 2009

深海での素粒子検出をめざす計画が、マッコウクジラの生息調査という意外な成果に結びつき、海洋生物学者と素粒子物理学者の間に新たに協力関係が生まれた。

2005年から2006年にかけて、イタリアのシチリア島東部にあるカタニアの港では、港湾労働者や船乗りたちが、いぶかしげに2人のよそ者を眺めていた。彼らは、毎月およそ1回、栈橋の端にある木造の大きめの小屋までやってきて扉のかぎを開け、小さい箱を取り出した後、またかぎをかけて翌月やってくるということを繰り返していた。

地元の人々は、この2人の男が何をやっているのか疑問を抱かずにはいられなかった。尋ねると、2人のよそ者は、何も心

配しなくていいと地元民を安心させた。2人は科学者だったのだ。2人の名前は、Giorgio RiccobeneとGiovanni Pavan。Riccobeneはカタニアにあるイタリア国立核物理学研究所(INFN)南部研究施設の素粒子物理学者、Pavanはイタリア北部にあるパビア大学の海洋生物学者である。彼らが回収していた箱はコンピューターのハードディスク・ドライブであり、沖合28キロメートルの地中海海底に置かれたハイドロフォン(水中聴音機)とよばれる水中マイクから、海中ケーブルを経由して送られてきた音響データが数時間分保存されていた。Riccobeneは、ハイドロフォンを使って、深宇宙からやってくるニュートリノとよばれる素粒子を検出できることを実証しようと考えており、Pavanは、Riccobeneを手助けして記録データの背景ノイズの処理をするために来ていた。

ところが、RiccobeneとPavanが音響データを聞いて見つけた事象のおかげで、翌年2人は役割を交代してこの港に戻ってくるようになった。物理学者のRiccobeneが生物学者のPavanを手伝う役回りとなり、彼らの調査ターゲットはニュートリノではなくマッコウクジラになったのである。

この予想外の展開になった経緯の発端は、Riccobeneがニュートリノ地中海観測所(NEMO)にかかわった10年ほど前にさかのぼる。NEMOは、海洋でニュートリノ観測をしたいと考える、INFNやそ

の他の研究機関の研究者およそ100人からなる共同研究組織である。宇宙から飛来するニュートリノは地球に絶えず降り注いで通り抜けており、超新星など遠く離れたその発生源について、計り知れないほどの情報をもたらしてくれる。しかし、ニュートリノは電荷をもっておらず、質量もゼロに近い。したがって物質と相互作用することは非常にまれであり、そのため、これを研究するには巨大な検出器が必要で、その規模は大きいほどよいとされる。それゆえ、NEMOの計画では、シチリア島南部にあるパッセロ岬沖の深度3500メートルの海域で、2立方キロメートル以上の空間に数千個の光検出器を配置することが必要だとしている。この検出装置で、水中に飛来したニュートリノがごくまれに水1分子と相互作用して光のパルスを発するのをとらえようというのだ。

Riccobeneは、この光検出能力を高める方法について研究していた。「理論上、高エネルギーのニュートリノは、検出可能な音波も発するはずだ。水中では光よりも音のほうが遠くまで伝わるので、音響検出装置を使うことでニュートリノ現象をとらえられる確率が高まると思われたのです」と彼はいう。これがうまくいくかどうかは誰にもわからなかった。しかし、いずれにしてもNEMOの計画では、光検出器の設置位置を決めるためにハイドロフォンの使用も必要だとされており、Riccobeneが2002年に海洋ノイズ検出実験(ONDE)

Giorgio Riccobene :  
素粒子物理学者。



Giovanni Pavan :  
海洋生物学者。



という予備実験の監督役を任された。ONDE は、カタールニア東方にある NEMO の深度 2000 メートルのテスト海域で行われることになった。

### ノイズ対策

Riccobene は自ら研修のためにパリに出かけ、音響によるニュートリノ検出に関するワークショップに参加した。しかし、すぐさま何か足りないと感じた。「背景ノイズについての話題がまるでなかったのです。深度が深ければ背景ノイズは非常に小さくなると、誰もが当然のように考えていました。しかし、それを実証した発表済みのデータはありませんでした」と彼は振り返る。Riccobene はカタールニアへ戻ると、ちょうどタイミングよく、地元的环境保護団体の主催で Pavan が講演していることを知った。Pavan は、1980 年代初めに海生哺乳類の発する音声をデジタル録音した草分け的存在であり、この分野では世界一流クラスの専門家の 1 人だと認められていた。彼が Riccobene の疑問に答えてくれる人物であることは明らかだった。つまり、深度 2000 メートルの深海で背景ノイズはどれくらいの大きさなのか、という疑問である。

しかし信頼できるデータはほとんどなく、Pavan は簡単に答えられなかった。「深海で音を記録するシステムが使えるようになったのは、ほんの 2、3 年前のことなのです」と彼はいう。Pavan が確信をもっていえたのはせいぜい、深海はニュートリノ物理学者が予想しているような無音の世界では到底ない、ということだった。

「最初、私は愕然としました」と Riccobene はいう。Pavan が推測したノイズの量は、ニュートリノ現象で予測される量よりはるかに大きかったのだ。だからといって必ずしも、ニュートリノ検出が実現不可能になるわけではないと、彼はいう。しかしこれは、除去しなければならぬ背景ノイズを正確に突き止めるまでは、NEMO の研究チームがニュートリノ信号を分離で



素粒子のニュートリノを検出するために設計された装置が、マッコウクジラのコミュニケーションをとらえた。

きる希望はみえてこないことを意味した。

Riccobene は Pavan に、ONDE チームでシチリア沖海底の音響環境を長期観測するプロジェクトに参加してくれるよう頼んだ。これほど深い海中での音響観測は、初めての試みだった。Pavan は参加し続けるだけの資金がなかったが、とにかく承諾した。Riccobene のおかげで、Pavan はほかでは決して到達できない深度までアクセスできるようになり、深海というほとんど未知の音響環境を研究できるようになったのである。Pavan が特にやりたいと思ったのは、そこでの「騒音公害」の程度を測定することだった。なぜなら、そうした騒音は、深海に潜る多くのクジラ類が座礁する原因になっている可能性があるからだ。また彼は、音響記録の中にクジラ類の音声も含まれているだろうと予想した。

Riccobene と彼の研究チームは、2005 年 1 月までに、NEMO の実験サイトに高感度ハイドロフォンを 4 個設置し、カタールニアの栈橋にある実験小屋へデータを送る光ケーブルを敷設した。直後からデータが送られ始め、そして 2005 年 4 月、Pavan は最初の記録データの試聴を始めた。

すると、Pavan が予測していたように、低く一定の背景ノイズが聞こえた。そのほとんどは自然の水の動きや船舶の航行で生じたものだった。それに加えて、時おり、

大型船のスクリュー音やソナーの発信音、果ては何かの爆発音といった、音源を特定できる音が集中して聞こえた。しかし、彼の注意を引いたのは、カチカチという、短く規則的に繰り返す連続的な「クリック音」だった。これは、マッコウクジラが呼吸器系で空気を圧縮して発する特徴的な音である。「クジラたちはおそらく、そうした音波を使って深さを測ったり、獲物の位置をつかんだりしています。コウモリがやっているのと同じように反響音を測定しているのでしょう」と Pavan は話す。時おりクリック音が聞こえるのは当然のことだった。この音は動物が発する音の中でも最も大きい部類に入り、水中で最大 20 キロメートル先まで届くからだ。意外だったのは、このクリック音が毎月、記録データに現れ続けたことである。「マッコウクジラはこの海域では非常にまれだと考えられています。公表済みのデータでは、個体数が非常に少ないことが示唆されているのです」と Pavan はいう。しかし、こうした調査は、目撃情報や海面近くでの音響記録に基づいているのが普通である。それに対して、ONDE の記録データが採取された深海域は、マッコウクジラが獲物を求めて潜り、1 日の大半を過ごす場所である。そのため、この海域では実は、従来考えられていたよりもマッコウクジラの個体数がかなり多いのではないかと思われた。

Riccobene と Pavan は、2006 年 11

月まで音響記録を取り続けた。その後、ハイドロフォンは撤去され、代わって光検出システムの試作機が設置された。このシステムはハイドロフォンと同じケーブルに接続された。この時点までに2人は、600時間を超える記録データを集めた。残念ながら、ニュートリノはいっさい見つからなかったが、満足していた。「このとき、私の興味は、深海での音響記録が実行可能であって、高品質データが得られることを実証することにありました。この段階では、私はニュートリノが検出できるとは期待していなかったのです」とRiccobeneは話す。その一方でPavanは、音響データから、背景ノイズ発生源として単純にリストアップされたもの以外にも、多くの情報を得られることに気づいた。

しかし、マッコウクジラの音声を聴き取ることと、その個体数を数えて信頼できる統計資料をまとめることは別物である。原理的には、1個のクリック音の音響的な特性から、その個体のサイズと性別を知ることができる。また、海面からのクリック音の反射も音響記録に表れている場合には、その個体の位置と、上昇または下降の軌跡を推定することが可能である。「しかし、これを行うには、ソフト用アルゴリズムを開発するか、もしくは長時間かけて大変な手動計算をすることが必要です」とPavanはいう。彼が同僚とともに2006年以降行ってきたのは、後者の手動計算だ。彼らにはソフト用アルゴリズムにかけられるほどの資金がなかったのである。

しかしそれでも、統計学的な全体像が徐々に見え始めているとPavanはいう。マッコウクジラは、記録をとった日数の半分で観察されている。これは既存の予測個体数ではちょっと説明がつかない。Pavanと同僚たちは、音響記録の中に季節性パターンや社会的行動を知るヒントも見つけ出すことができた。このデータを彼らは2009年9月にパビアで開催された会議で発表した。「マッコウクジラは春と秋により多く現れます。また、同時に移動

する個体が多く、おそらく同じ群れに属しているのでしょう」とPavanはいう。時には音響記録の中に、「コーダ」とよばれる特定パターンの短い連続クリック音が含まれていることもある。こうした音声は、通常は単独行動している雄たちが雌の集団の周りに集まったときにだけ発せられる。コーダは方言として機能しているらしく、個体群が異なると使用するコーダも異なっている。「地中海で最もよくみられるパターンは、3+1の型です。これはクリック音がすばやく3回連続し、その後1つが追加されるパターンです」とPavanは説明する。しかし、音響記録では2+1の型が予想より頻繁に現れることがわかった。これは、地中海海盆の外から一時的に入ってくる通りすがりのクジラがいることを物語っているのかもしれない。

### 深海の攪乱

一方でRiccobeneは、今ではニュートリノ物理学とほぼ同じくらい生物音響学を熱心に研究しており、欧州海洋観測所ネットワーク(ESONET)を巻き込んで、研究継続のお膳立てをした。ESONETは欧州の共同研究組織で、地中海にも深海観測施設のネットワークを構築しようとしている。ESONETは活動の重点を地球物理学と気候学に置いているが、LIDO(Listening Into the Deep Ocean)とよばれる新しい形のONDEプラットフォームに資金提供することに同意した。LIDOは3年間観測を続ける予定で、クジラの音声を聴き取るために、2010年3月にハイドロフォン4個一式をカタール沖に再び設置して始動する。今回は、継続的な記録セッションを最大1年間にわたって続け、アルゴリズムを使って、保存すべきデータと無視すべきデータを選別する予定である。正方形の各頂点に置いた4個のハイドロフォンで音響記録をとり、詳細に比較解析することで、検出したそれぞれのクジラ個体のサイズを算定することができる。また、マッコウクジラの個体数をより正確に見積もった

り、季節性の習性について情報を得たりすることができる。プロジェクトでは、将来的には、ジブラルタル海峡に近いカディス湾など、他の場所でも同様の観測ステーションを設置する構想がある。「我々の重要な疑問の1つは、地中海のマッコウクジラが1つの閉鎖個体群なのか、それとも外海の個体群とやりとりがあるのかどうかを解明することです」とPavanは話す。

Riccobeneと同僚たちは、結局現在でも、大規模になったNEMO観測所で素粒子物理学の研究を続けている。すべてが開発者たちの希望どおりにいけば、今後10年以内に観測所がパッセロ岬沖合に設置されるはずである。拡大したこのプロジェクトには音響観測システムも含まれる予定である。これによってニュートリノは検出できないかもしれないが、少なくとも検出器の設置位置を決めることはできる。今ではRiccobeneも、深海にはたくさんの背景ノイズがあることを知っている。しかし、ニュートリノを音響的に検出できるかどうかをはっきりさせるにはもっとデータが必要であり、またそれには、さらなる研究資金の獲得が必要だと、彼は考えている。また、NEMOで得られたデータは、生物学者や地震学者だけでなく、興味をもったすべての研究者と共有される。Pavanももちろんその中の1人であり、マッコウクジラだけでなくナガスクジラやオウギハクジラについてもぜひ調べたいと考えている。これらのクジラの発する音声は低周波で、深海では非常によく聞こえる。「このような深海底は、地球の中でも最も知られていない領域の1つであり、多くの研究者にとって研究材料の宝庫なのです」とRiccobeneは語る。「我々が深度3500メートルの海底にブロードバンド回線を敷設すれば、そこで得られるデータを求めて研究者が大勢集まってくると思いますよ」。(船田晶子 訳)

Nicola Nosengoは、ローマを拠点に活動するフランスのサイエンスライター。

# Flies on film

## ハエの行動監視システム

Lizzie Buchen

Nature Vol. 462(562-564)/ 3 December 2009

ハエの行動解明に自動スクリーニング法を取り入れるユニークな共同研究が行われている。今後、機械でヒトの行動を観察する方法にも変革が訪れるかもしれない。

その映像には、ショウジョウバエの喧嘩<sup>けんか</sup>が映っていた。喧嘩はまるで大したことがなく、2匹のショウジョウバエが何分の1秒間か接触しただけに見えた。しかし再生速度を20分の1に落とすと、鮮やかで豪快なプロレス技が映し出された。生物学者のDavid Andersonは、コンピューターで再生したこの粗い画質のモノクロビデオを、「ハエのルチャリブレ（メキシカンスタイルのプロレスリング）」とよんでいる。

1匹の雄バエが後肢で立ち上がって、隣のハエの背中をつかむやいなや、後ろに宙返りして相手を空中に放り投げる。この過程で、投げたハエ自身は2回も宙返りする。放り投げられたハエは、なすすべなく羽ばたきをしながら床に落ちて跳ね返り、その後正しい姿勢に戻って離れる（このビデオは、[go.nature.com/o8sRLs](http://go.nature.com/o8sRLs)で閲覧可。撮影は、ドイツのヴュルツブルク大学のMartin Heisenberg）。こうした「投げ技」は、Andersonがカリフォルニア工科大学（Caltech）で研究しているハエの数十種類の行動様式の1つにすぎない。

「我々は自分たちの住む世界全体について、全くわかっていないのです」と話す

のは、Andersonの共同研究者で、同じくCaltechに所属するPietro Peronaである。彼は、比較的最近になって、ショウジョウバエの世界に足を踏み入れた。これまで、コンピューターを使った視覚研究を行っており、20年間にわたってヒトの複雑な行動様式を検知・解明できる装置の開発を試みてきた。壮大な目標だが、彼はAndersonや行動神経科学者のMichael Dickinsonという同志を思いがけなく得ることができた。3人は2005年ごろから、ショウジョウバエの神経系の操作が容易にでき、攻撃や求愛といった複雑な社会行動を自動的に探知・追跡できるツールを作り出すために、共同研究を行っている。彼らは、ハエの行動の神経的基盤を解明したいと考えているのだ。このことは、ヒトの行動様式を解明することにつながる可能性もある。

2009年、共同研究チームは神経系の容易な操作と自動的に社会行動の探知・追跡が可能な2つのシステムを開発して報告した<sup>1,2</sup>。Andersonは、現在それらを使って、行動を支配する遺伝子や神経回路を解明するために、何千系統もの変

異ショウジョウバエをスクリーニングしているところである。また、Dickinsonは大規模集団内でのハエの社会的動態を調べているが、これを実験室内で行うのはこれまでほぼ不可能だった。

「これは一筋縄ではいかない問題です」と、カナダにあるトロント大学ミシサガ校の神経遺伝学者Joel Levineはいう。彼は2009年11月から、これらの新しいソフトウェア・プログラムの1つである「Ctrax」を用いている。「私はこれまで長きにわたって、たくさんの人材を採用して、この種のソフトウェアを作ろうとしてきました。しかし誰一人として成功した者はいませんでした」。

こうして開発されたプログラムは自由に利用できるもので、世界中のショウジョウバエ研究者が新技術を使って、それぞれ思いどおりの方向に研究を進め始めている。Peronaも、ハエを通じて、ヒトの行動様式を解明できる機械装置の構築という自身の目標に少しずつ近づいている。

このようなツールは、ハエの行動研究という分野、なかでも裏方的な仕事をしている学生や技官、ポスドクにとってありが



E. HOOPER

たい存在になるだろう。彼らはビデオ映像をひとコマごとに見て、飛びかかりの数をすべて記録し、すべての追い回し行動の時間を計り、羽による威嚇をすべて分類し、そしてこれらを繰り返し行っているからだ。

「ビデオの前に座ってハエの行動を手で記録していくのは、退屈でつまらない作業ですからね」と、Caltechの教職員用レストランでAndersonは、PeronaとDickinsonの2人と昼食をとりながら話した。しかも、単に時間の節約になるだけではないのだ、とPeronaが付け加える。回数を正確に数えるといっても、ハエの観察には主観が入る。「クリップボードとストップウォッチを使う方法をとっているとしましょう。Caltechには実際に、それをやっているポスドクが1人いますし、ノルウェーにも同様なポスドクが1人います」。しかし、もし観察結果が一致しなければ、答えを得ることは不可能に近くなるのだ。なぜなら「この2人のポスドクがどこかに職を得て研究室を去ったら、異なる見解が平行線をたどった状態で止まってしまう。基盤になるものがないため、その見解が事実かどうかを決して確認できなくなるからです」。

### すべて監視している

Peronaは、ヒトの動きを観察して、その行動や意図を理解できる機械の開発を試みてきた。こうした能力を備えた機械は、さまざまな方面に応用できる。例としては、

機械の操縦者が眠気でうとうとしたときに警告を発する作業監視カメラや、空港で不審な挙動を察知して知らせる防犯カメラなどがある。

こうしたシステムを構築するには、機械視覚という分野の研究者が、ごく一般的なラベルデータのコンピューター言語を使ってプログラミングする。これにより、例えば、交差点に進入する歩行者を数千例解析し、新規の状況での歩行者の行動を識別できるアルゴリズムを作成することができる。

しかし、「不審」もしくは「危険」な挙動を識別することが目標である場合、単純で特異的な行動を対象としてはいあまり役に立たない。Peronaはこの問題に対処するため、行動を複数の構成要素に分解することを試みている。

例えば、ワインをグラスに注ぐという動作には、瓶を手でつかんで持ち上げ、グラスのところまで持って来て、瓶の口をグラスに向けて下げた後、また上げるところまで含まれる。Peronaはこうした動作の構成要素を「moveme」と名付けた<sup>3</sup>。movemeは彼のいう「行動の階層構造」の基本である。複数のmovemeが組み合わせさせて、ワインを注ぐなどの1つのactionになる。そして、夕食をとるなど、時間のかかるactionが、activityといえる。しかし、彼によれば、こうした理論を検証するには、コンピューターで画像処理できるようにラベル付けしたビデオ映像のセッ

トが多数必要だというのが、こうしたビデオを用意するのは簡単なことではない。

「検証に必要な十分な量のデータは、まず得られません」とPeronaはいい、指を折って数えながらその理由を並べた。まず、本人の同意なしに録画するのは違法であり、また承諾を得るのも難しい。そして、たとえ承諾を得られたとしても、自然体の行動を撮影することは難しいのだという。「しかもヒトの観察は退屈です。パブで喧嘩が1つ見られるまで、どれくらい時間がかかるとお思いますか」とPeronaはいう。

Peronaは、生命科学研究から1つのヒントを見つけた。「生物学者は統合失調症のようなやっかいな問題に対処するとき、どうしますか」と彼は問いかけてきた。「彼らは、モデル生物を使うのですよ。モデル生物を使えば、体を傷つけてしまう侵襲的な実験も行うことができ、さくっと解答を得ることができるのです」。

彼は2、3年前から、Caltechの同僚たちに、彼らが研究に使っているモデル生物について尋ね始めた。ちょっとおもしろくて、しかしあまり複雑でない行動をするモデル生物を探したのである。一方Andersonは、そのころちょうど長期研究休暇から戻ってきたところだった。出向先では、ショウジョウバエがどのくらい動き回っているかを、既製ツールを用いて測定していた。

「そのツールは、まあ機能はしていましたが、洗練されたものとはいえませんでしたね」とAndersonは振り返る。



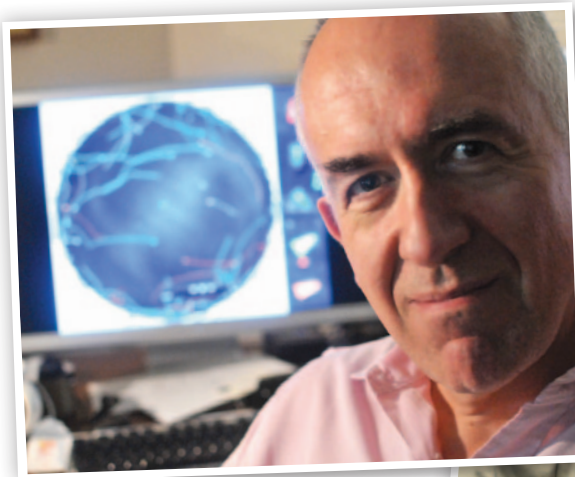
プロの戦士：ショウジョウバエの行動は大方の予想よりもずっと複雑だ。

Dickinson は、Anderson 自身が何か作り出すべきだと提案した。そこで Anderson は、ショウジョウバエの複雑な行動様式を記述することを Perona にもちかけた。Perona は非常に興味をそそられた。「私は当時、ハエというのは空中をブンブン飛び回ることぐらいしかしていないと思っていたのです」と彼は話す。

### 大志を抱く

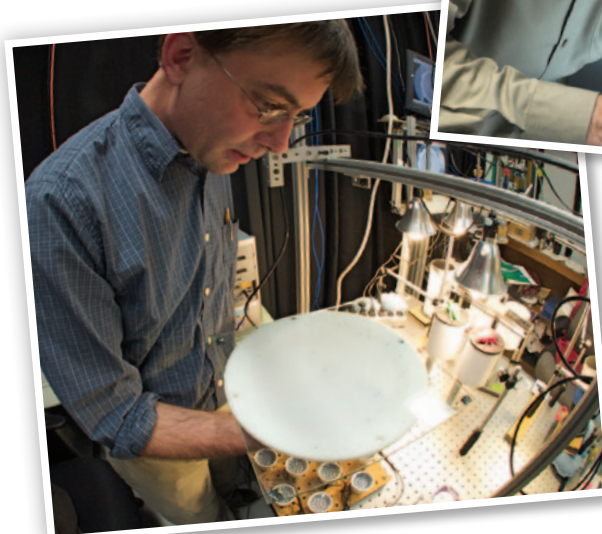
Anderson は、攻撃や求愛に際して現れる特定の行動様式を自動的に検出できるプログラムが欲しいと考えた。羽による威嚇、追い回し、レスリング、交尾などを自動的に数え、時間を測るのである。彼が求めていたのは、ハエのペアを同時に多数行動させるのを可能にすることと、ひとつひとつの行動がいつどこで、どんな順序で現れるかを記録し、そのデータを吐き出してくれる機械だった。

研究歴のほとんどを空気力学と生体力学に費やしてきた Dickinson は、数十匹から数百匹の集団内でハエたちがどのように振舞うかを解明したいと思った。これを実行するためには、ハエ1匹ごとの動きを追跡し記録したり、長時間にわたって同一個体のハエを追いかけたりする必要があったと考えられた。これは、誰もやったことがなかった。当時、ハエを追跡できるプログラムは2、3あったが、それらにはいわゆるオクルージョン問題（視点が変わると、同じ対象物でもそれぞれの視点か



Pietro Perona は機械視覚システムを使ってハエを追跡している。

B. PAZ



ハエの観察：Michael Dickinson (左) と David Anderson はコンピューターの視覚プログラムを使ってハエの行動様式の解明を進めている。

B. PAZ

P. PERONA

ら見えている部分が異なること)があった。だからもし、2匹のハエが接触したり同じピクセル内に入ったりしてしまうと、実験者はハエたちの分離処理法を機械に手を入力しないとなくなってしまうのだ。

AndersonとDickinsonのどちらの要望も、Peronaにとって難しい注文だった。「でも、それが共同研究のすばらしい点なんですよ。生物学者がまずほとんど不可能だろうと思っていることが、Pietro (Perona)のような別分野の研究者にとっては、実現可能な領域だったりするのです」とAndersonは話す。

Andersonのいう特殊な行動検知装置とDickinsonの望む探査・追跡装置には、さまざまなソフトウェアが必要だったが、そうした課題は意外と簡単だったようである。PeronaはKristin BransonというポストドクをDickinsonと共有しており、AndersonとはHeiko Dankertという別のポストドクを共有していた。Peronaは、当初、それぞれのプログラム作成に数か月程度かかると見積もっていた。「しかしご覧のように、完成までに3年かかってしまいました。まあ、問題はありませぬでしたけどね」とPeronaはいう。作業時間の多くは、システムを生物学者に理解できるものにするのと、他人の管理下で

も確実に機能できるよう安定かつ堅固なものにすることに費やされた。Dickinsonは、これを自動車組み立て工程にたとえて、「フェンダーや車体を取り付ける作業」とよんでいる。

一方、Dickinsonは解析のために、Bransonが開発したソフトウェアであるCtraxを利用できる環境を作り出そうと、いろいろ工作した。できあがったものは、サッカーボール1個が入るくらい大きい円形アリーナで、周囲には8個のハロゲンライトが取り付けられた。

内部には、羽を切られた50匹ものショウジョウバエが歩き回っている。羽を切ったのは、飛び上がって追跡システムが混乱してしまわないためである。アリーナ中央の上には1個のカメラが直接吊り下がっており、ハエの動きをとらえて、そのデータをそばのコンピューターへ伝送する。それぞれのハエがアリーナ内を探検すると、モニター上には細くて鮮やかな色の軌跡が残っていく。2、3分後、モニター画面は細い線で埋め尽くされ、まるで色とりどりの毛糸がからまった毛糸玉ようになる。

基本的に、このプログラムはハエを追跡するものにすぎない。このアイデアは、どの行動様式が興味深いものかを実験者が判断できるようにする、汎用的な追跡お

よび定量化の機械装置を作製することだった。そしてその機械に、何を探しているかだけでなく、何を探すべきなのかを学習する方法も入力することだった。

「今は、研究の最も刺激的な側面の1つ、つまり発見段階に当たります」とDickinsonはいう。Pietroは、彼らが突き止めた1つのおもしろい行動様式を説明してくれた。「ゆっくり進む1匹のハエがいて、もう1匹のハエがそれを追い越しました」と彼が指でハエたちの動きを真似しながら話した。「速いほうのハエが遅いほうのハエを追い越すとき、遅いほうのハエが止まりました。止まろうと決めたのは偶然なのかもしれません。しかしMichael (Dickinson)は実験をさらに進め、まったく同じ例をもう1つ見つけたのです。その発見により、我々は同じような経過をたどるハエどうしの出会いをすべて抽出するソフトウェアのプログラムを、すぐに作成できるのです」。研究者は直感だけで、ハエのこうした行動様式には理由があると考えて、とPeronaはいう。

しかし、実験者が、興味深い一連の動きや相互作用をいったん見つけたなら、仮説を立て、新しい解析によってそうした仮説を裏付ける証拠を見つけることができる。新しいデータは必要ではない。プログラムによって、ハエの個体ごとの各行動様式が定量的に記述される。こうした「エソグラム(行動目録)」によって、研究者は、例えば雌雄間や遺伝的変異をもつハエなど、ハエ個体群間の行動様式のわずかな違いを見つけ出して定量化できる。しかも、1つの個体群内の個体差、いうなればハエの「パーソナリティー」までもとらえることができる。

Dickinsonの研究チームは既にこのエソグラムを使って、いくつかの新しい観察結果を得ている。例えば雄バエは物怖じせず、別のハエに歩み寄って検分し、時には互いに小突き合うこともある。しかし、雌は自分のパーソナル・スペースを必要とし、互いに会ったときや歩き回るときに



ハエの行動解析の自動化は、安全を脅かす潜在的リスクを察知する機械の開発につながるだろう。



特定のエチケット・ルールに従う。

Dickinson の研究チームは、フィールド内にコーンや障害物を置き、もっと複雑な環境内では社会的なやりとりがどう変化するかも調べ始めている。彼は、ハエがコーンの頂上に登ろうとし、お互いにほかのハエを追い払って「お山の大将」になりたがることに気付いた。こうした新しい観察結果から、新たな仮説がいくつか導かれている。この行動は、食物供給源を見つけ出すのに有利な場所を確保するためのものだ、と Dickinson は話す。

そこから2、300メートル離れた実験室では、Anderson が CADABRA (Caltech Automated Drosophila Aggression-Courtship Behavioral Repertoire Analysis ; カルテック・ショウジョウバエ攻撃-求愛レパートリー自動解析) という彼のプログラムを使って、既に存在が知られている行動様式を定量的に観察している。これらには、ハエが攻撃を仕掛ける際に試みるレスリングやタックル、その他もろもろの技、交尾に至るまでの羽音による求愛の「セレナーデ」やダンスなどがある。

彼は現在、あるスクリーニング法を開発中で、既にさまざまなニューロン集団を遺伝学的に活性化したり抑制したりしている。こうした選択的機能破壊によって、各行動の神経回路を細かく分析することができる。攻撃を1つのまとまりとしてだけでなく、この行動様式の各構成要素の頻度や、1つの行動様式が別の行動様式につながる頻度も調べることができる。

彼の設定条件では、およそ1センチメートルの高さで、大きさがゴルフボールの直径ほどの12穴プレートのそれぞれの区画に、ハエを1対入れる。上にカメラが1台吊るされ、12の小部屋でのハエのやりとりを同時にすべて並行してフィルムにおさめる。その後、ビデオをコマごとに再生して CADABRA にかけることで、すべての行動様式の統計データが得られる。

CADABRA のエソグラムによって、例えば飛びかかりと追い回しそれぞれの頻度

が明らかになる。加えて、追い回しの後に、飛びかかる動作がくる頻度と、異性の気を引こうとする羽の伸展動作がくる頻度がどれくらいあるのかなど、動作の移行頻度も明らかになる。「これを1人の人間が手動で行ったとすると、延べ270時間を要します。でも我々はだいたい20分でやってみました」と Anderson はいう。

### 「ファイト・クラブ」

Levine は、自身と Dickinson が2009年夏、ウッズホール海洋生物学研究所（米国マサチューセッツ州）で講義をしていたときに、Ctrax について学んだ。彼は今、集団内の個々のハエを、いっさいの妨害なしに数日間にわたって追跡できるようなシステムを作っているところだ。

「集団での動態についてわかっていることは非常に少ないですね。どの個体がどの個体と相互作用するのか。一部の個体の交尾回数が多いのはなぜか。社会的相互作用は概日リズムにどのように影響しているのか。これらは研究するのがとても難しい分野でした。しかし今、Michael (Dickinson) と、この Ctrax というソフトウェアを味方にできたことで、ついに疑問の答えを出せます」。

ロックフェラー大学（米国ニューヨーク州）の神経科学者 Leslie Vosshall は、求愛行動の研究に Ctrax を使っている。彼女が使っているのは Dickinson の研究室で設計された改良版で、ハエはプラスチック製の蓋で覆われた円盤状のアリーナ内をうろろろできるようになっている。この改良版なら、ハエは羽を切られずに動き回ることができる。求愛行動には羽によるシグナルや羽音を伴っているため、これは極めて重要な改良点である。

また、Dickinson の下にいた大学院生で、現在はハワード・ヒューズ医学研究所 ジャネリア・ファーム研究キャンパス（米国バージニア州）にいる Michael Reiser は、Ctrax の融通のよさを利用して「ハエのオリンピック」を執り行っている。変異

バエに、歩行行動に対する視覚反射から匂いの知覚まで、次々と行動テストをやらせているのだ。

Perona は、自分の研究が生物学研究で実を結び始めていることがうれしい、と話す。また Anderson や Dickinson のプロジェクトによって、Perona が切望していたラベル付けした行動ビデオ映像が得られつつある。ハエの行動様式をエソグラムにまとめることで、Perona には行動の階層構造という自身の仮説を初めて検証する機会ももたらされている。この仮説によれば、求愛のように持続的で長い activity は複数の action に分解され、それぞれの action はさらに、単純ではあるが重要な意味をもつ motion に分解されるという。Perona は、この概念が総合的な行動コンピューテーショナル理論の土台になってくれればと考えている。

ハエの行動が単純なおかげで、Perona は自分の概念を発展させることはできる。しかし、今のところ彼ができるのはそこまでだ。「私は、ヒトが何をやっているかを把握できる機械の構築に近づいているのでしょうか。答えはイエスでもありノーでもあります。ハエはヒトよりも行動のレパートリーがずっと単純で、無駄に時間を費やすこともありません」。ハエの行動を詳しく観察することで、その仮説を検証するもっと確かな方法を得て、ヒトのデータに立ち戻ることができるはずである。しかし、Perona の目標は「進化」しつつある。ハエの行動はやればやるほどおもしろさが増してくると彼は話す。「すべてが解明されて、私が生物学にいくらかの貢献ができていれば、いうことはありません」と彼はいう。（船田晶子 訳） ■

Lizzie Buchen は、ワシントン DC に活動拠点を置く *Nature* のインターン。

1. Dankert, H., Wang, L., Hoopfer, E. D., Anderson, D. J. & Perona, P. *Nature Meth.* **6**, 297-303 (2009).
2. Branson, K., Robie, A. A., Bender, J., Perona, P. & Dickinson, M. H. *Nature Meth.* **6**, 451-457 (2009).
3. Del Vecchio, D., Murray, R. M. & Perona, P. *Automatica* **39**, 2085-2098 (2003).

# Muon collider gains momentum

## ミュオンコライダーをめざして

Eric Hand

Nature Vol. 462(260-261)/19 November 2009

フェルミ研究所は、今後も物理学の最先端を走り続けるために、まだ実証されていない技術に望みを託そうとしている。

スイスのジュネーブ郊外にあるヨーロッパ素粒子物理学研究所 (CERN) で、大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) の地下リングを陽子ビームが再び駆け巡り始めたのは、つい最近のことである。ところが物理学者たちは、早くもいくつかのチームに分かれて LHC の後継加速器のデザインを競い合っている。2009 年 11 月の上旬には、米国の科学者たちが大胆な計画を表明した。世界初の「ミュオンコライダー」の建造である。

コライダー (衝突型加速器) については、以前から準備されている計画が 2 つある。いずれも、長く、まっすぐなトンネルを通過して加速された電子と陽電子を衝突させようとするリニアコライダーである。しかし、米国イリノイ州バタヴィアのフェルミ国立加速器研究所 (フェルミ研究所) の一部の物理学者たちは、こうしたリニアコライダーの費用と実現可能性に不安を感じ、LHC 以上に物理学の限界を押し広げることができるかどうかも疑っている。彼らが

その代わりに推しているのが、電子の約 200 倍の重さをもつミュオンを衝突させるミュオンコライダーである。

フェルミ研究所は、2009 年 11 月 10 日から 12 日にかけてミュオンコライダーに関するワークショップを開催した。フェルミ研究所の所長である Pier Oddone は、「問題は、それを建造できるかどうかです」と語った。この会合は、1990 年代の中ごろに最初に提案されてから長く冬眠状態にあったアプローチの復活に向けて、重要な第一歩になるとみられている。これにより、ミュオンコライダーは、先行する 2 つの加速器計画と直接競合することになる。その 2 つとは、米国、欧州、アジアで分割して設計される全長 31 キロメートルの「国際リニアコライダー (ILC)」、そして既に LHC をもつ CERN が計画している全長 48 キロメートルの「コンパクトリニアコライダー (CLIC)」である。

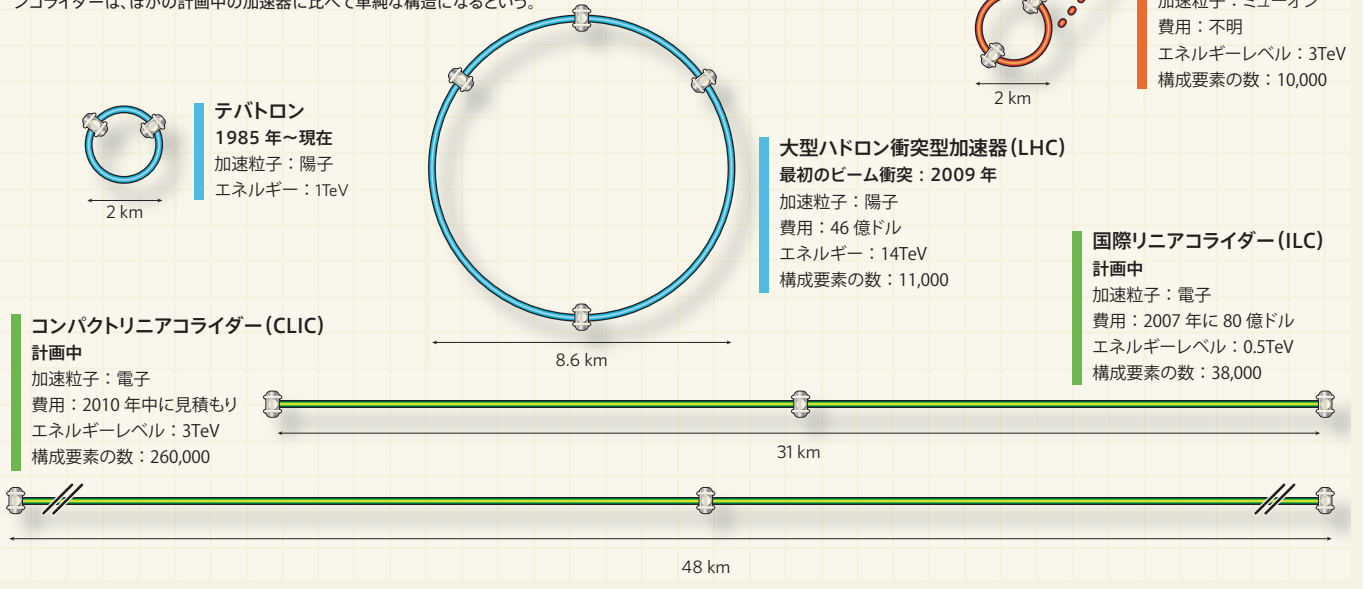
ミュオンコライダーの研究開発にはたいへんな困難が予想されるが、これが実現すれば、電子コライダーよりも優れている点が多くあると考えられている。例えば、ミュオンは電子に比べて重く、標的が広がるため、正面衝突しやすくなる。また、ミュオンコライダーがヒッグス粒子 (粒子に質量を与える機構の 1 つと考えられているが、まだ観測されていない粒子) を生成する能力は非常に高いと期待されており、ときに「ヒッグスファクトリー (ヒッグス粒子工場)」とよばれることもある。ただし、ミュオンの寿命は典型的には



フェルミ研究所 (上) は、これからも物理学の最先端を走り続けるために、ミュオンコライダーの建造をめざしている。

大きさがすべてではない

素粒子物理学の分野では、大型のコライダーほど高エネルギーでの衝突が可能になるが、その分、コストも高くなる傾向がある。しかし、ミュオンコライダーは、小さい設置面積と比較的低いコストで、高エネルギーでの衝突を可能にする。図中の5つの加速器のうち4つについて主要な技術的構成要素の数の見積もりを行った、フェルミ研究所の物理学者 Vladimir Shiltsev によれば、ミュオンコライダーは、ほかの計画中の加速器に比べて単純な構造になるという。



2.2 マイクロ秒であるため、ミュオンを光速に近いスピードまで急激に加速し、一般相対性理論の時間の伸びの効果を利用して、寿命を引き伸ばす必要がある。

ミュオンは、磁場をかけて円形加速器の中で加速してもエネルギーを失いにくい。比較的小さな（ゆえに安価な）リングで光速に近い速度まで加速することができる。一方、電子を円形加速器で加速する場合、これよりはるかに多くのエネルギーがX線の形で放射する（この光はシンクロトロン放射とよばれ、しばしば結晶学に利用される）。

数百ギガ電子ボルト（1ギガ電子ボルトは $10^9$ 電子ボルト）以上のエネルギーを達成する必要がある電子加速器では、電子の運動をまっすぐに保つことでシンクロトロン放射によるエネルギー損失を小さくすることができる。けれどもそのためには、より大規模で、より高価なコライダーが必要となる（上に示した図参照）。円形コライダーには、衝突率が高いという長所もある。粒子が加速器の中を何周も回

るため、標的に衝突する機会が複数回与えられるからである。これに対して、線形コライダーの中の電子は、近づいてくる陽電子と衝突する機会が1回しかないため、ビームの位置を厳密に調節することが非常に重要となる。

ロビー運動

Oddone は、つい数年前まで ILC（国際リニアコライダー）のためのロビー運動に奔走していたが（Nature 2005年6月9日号 728 ページ参照）、今ではミュオンコライダーの推進派になっている。理由の1つは、ミュオンコライダーが小さく、フェルミ研究所のキャンパスにすっぽり入るからである。フェルミ研究所には、現時点で世界最高エネルギーの粒子加速器テバトロンがあるが、LHC がその目標とする14テラ電子ボルト（1テラ電子ボルトは $10^{12}$ 電子ボルト）を達成すれば、トップの座から陥落する。一方で、フェルミ研究所は、まもなく独自にミュオンを生成できるようになる予定がある。あと1年か

2年でテバトロンの運用が終了したら、「プロジェクト X」を開始することになっているのだ。その強力な陽子ビームは、当初はニュートリノの研究に用いることになるが、ミュオンの生成に利用することもできる。Oddone によれば、段階的にミュオンコライダーの実現をめざすプログラムは、すべてを一気に完成させようとするプログラムよりも理にかなっているという。

フェルミ研究所は、国家レベルのミュオン加速器プロジェクトを組織することと、ミュオンコライダー研究のための補助金を年間900万ドルから1500万ドルまで増額することを米国エネルギー省に要請した。2009年10月22日にワシントンDCで開かれた高エネルギー物理学諮問会議では、米国エネルギー省科学局の局長 William Brinkman が、ILC が棚上げになった原因は、そのコストの高さにあったと指摘した。彼は、フェルミ研究所がミュオンコライダーのアイデアを進めていくことを望んでいる。「真の革新が期待できる方向をめざすのは、よいことです」。

ミュオンコライダー推進派でも、ミュオンコライダーの計画が ILC や CLIC の計画に大きく遅れをとっており、これらに追いつき、互角に渡り合えるようになるまでにはたいへんな努力をしなければならないことを認めている。Oddone は、次世代のコライダーが新しい物理学を生み出すために必要とされるエネルギーを LHC が明らかにする 2012 年までに、より詳細なデザインコンセプトを固めたいと考えている。

一方、ILC 計画のリーダーであるカリフォルニア工科大学（米国パサデナ）の名誉教授 Barry Barish は、ミュオンコライダーの推進派は、その技術が実際にうまくいくことを証明する必要があると指摘する。「フェルミ研究所の所長は、ミュオンコライダーの実現をめざしてロビー運動を繰り返していますが、だからといって、米国以外の国々でその可能性がまじめに受けとられているということにはなりません」と Barish。

### 泣きどころは費用

ILC は、かつては次世代コライダーのデザインの中で明らかに優位に立っていたが、この 2 年間は苦戦を強いられてきた。ILC は、急速に成熟してきた超伝導加速技術を誇り、その実現に向けて積極的なスケジュールが立てられていた。しかし、2007 年の末に米国と英国で ILC 関係の予算が削減された結果、その研究は事実上終わりを告げた（*Nature* 2008 年 1 月 10 日号 112 ページ参照）。

米国カリフォルニア州のローレンス・バークレー国立研究所に所属してヨーロッパの LHC 計画に取り組んでいる物理学者の Robert Cahn は、ILC が抱えている最大の問題は 200 億ドルの値札であると指摘する。ILC が建造される可能性について、彼はざっくりとだけ言及する。「ILC はもうおしまいですよ」。

Barish は、現在提案されているプロジェクトの中で ILC が最もよく練られていることには変わりはなく、実際のコストは、エネ

ルギー省が数十年前の価格を参照してはじき出した 200 億ドルという数字よりも、2007 年に提出された 80 億ドルという見積もりに近いだろうという。彼はまた、チームはデザインの変更を考えていて、これによりコストを 15% 削減できると付け加えた。

とはいえ Barish も、LHC がこれから出す結果次第では、ILC の建造をあきらめざるをえない事態になりうることは認めている。ILC の目標エネルギーは 500 ギガ電子ボルトで、もっと高いエネルギー領域を探る必要があることが明らかになった場合、スケールアップは困難であるからだ。より高いエネルギーを達成するためには、ILC をもっと大きくする必要がある。そのためには、さらなる超伝導空洞とトンネル掘削が必要であり、莫大な額の追加出費が必要になるからだ。

ILC で問題となるエネルギーの限界を、CLIC（コンパクトリアコライダー）は巧妙な方法で回避する。CLIC は ILC のような超伝導空洞は使用せず、従来型の磁石を、2 本のビームトンネルで使用する。第一のトンネル内でビームを加速したら、技師が急ブレーキをかけてエネルギーを吸い上げ、第二のトンネル内の電子ビームにそれを移すのだ。CERN で CLIC の研究チームを率いる Jean-Pierre Delahaye は、今年中にデザインの検討を終える予定なので、それまではプロジェクトの費用を見積もることはできないという。けれども、CLIC が目標とするエネルギーレベルは ILC のピークエネルギーの 6 倍に相当する 3 テラ電子ボルトであり、そのトンネルは ILC より 20 キロメートル近く長くなる予定であるため、費用は ILC よりはるかに高額になると見られている。また、CLIC は 440 メガワットという莫大な電力を必要とする。これは、小型の原子力発電所 1 基分の出力に相当し、CERN に供給されている電力を大幅に上回る。

3 つのデザインコンセプトの運命は、発見のために LHC がどのくらいのエネルギーを必要とするかによって決まってくる。

多くの理論家は、超対称性（「量子の動物園」にいる粒子の数を倍増させる理論）から新しい高エネルギー粒子が現れてくると予想している。LHC がこれらを 1 つも見つけられなかった場合、ILC の比較的低いエネルギーではおもしろいものは大して見つからない可能性が高まり、ミュオンコライダーを建造しようとするフェルミ研究所が有利になる。

ミュオンコライダーの研究開発の先頭に立つフェルミ研究所の Steve Geer は、低エネルギーの超対称性粒子を除外する実験から、間接的な証拠は既に得られているという。「いずれも、新しい物理学のためのエネルギースケールがより高いところにあることを示唆しています」。

ミュオンコライダーで到達できるエネルギーは 3 テラ電子ボルトにすぎないが、LHC では手の届かない領域の世界を探ることができる。LHC が陽子を衝突させるエネルギーははるかに高いが、陽子はクォークという小さい粒子からできているため、衝突はずっと汚く、電子またはミュオンを衝突させるコライダーと比べると有効エネルギーが 1/10 になってしまうからである。

フェルミ研究所の MuCool（ミュオンイオン化冷却研究開発）実験のスプークスマンである物理学者 Alan Bross らは楽観的だが、まずはミュオンコライダーに関して最もやっかいな問題を解決しなければならない。MuCool 実験は、加速しようとするミュオンが崩壊してしまう前に、高温のミュオンの雲を整列させ、低温の細いビームとして進ませる方法を見いだそうとしている。

Delahaye は、ライバルたちがミュオンの研究を行うことを歓迎しているが、ミュオンコライダーの有効性を実証できるようになるまでには長い時間を要するかもしれないという。彼自身、実に 1986 年から CLIC に取り組んできたのだ。「（ミュオンコライダーのほうか）単純で安価であるという結論に飛びつくのは軽率です」。（三枝小夜子 訳）

## 地球科学

## Lasting earthquake legacy

## 大地震の予兆か、それとも単なる余震か

Tom Parsons

Nature Vol. 462(42-43)/5 November 2009

地震はプレート境界だけでなく、大陸プレートの内陸部でも起こる。このプレート内陸部地震は、長期にわたる危険な場所を教えているのか、それとも、遠い過去に起こった地震の余震にすぎないのか。

1811年12月16日の早朝、米国中央部にあるミシシッピ州の小さな町ニューマドリッドの周辺をマグニチュード約7の地震が襲った。翌年2月7日までに、同程度のマグニチュードの地震がさらに3回発生した<sup>1</sup>。この地震は、アーカンソー州、ミズーリ州、テネシー州の州境界に沿った一群の断層を破壊し、大陸プレート内にある昔の断層を再び活発化させたと思われる<sup>2</sup>。

1886年8月31日、サウスカロライナ州チャールストンをマグニチュード7の地震が襲った。この場所では、現在もなお低レベルの地震活動が続いている。これらの場所の地震の危険性を予測すると、ニューマドリッドとチャールストンは約500年間隔で大地震に襲われるはずだという見方がある<sup>3</sup>。こうした場所では平均よりも強い揺れが予測され<sup>4</sup>、サンアンドレアス断層やカスカディア（カスケード）沈み込

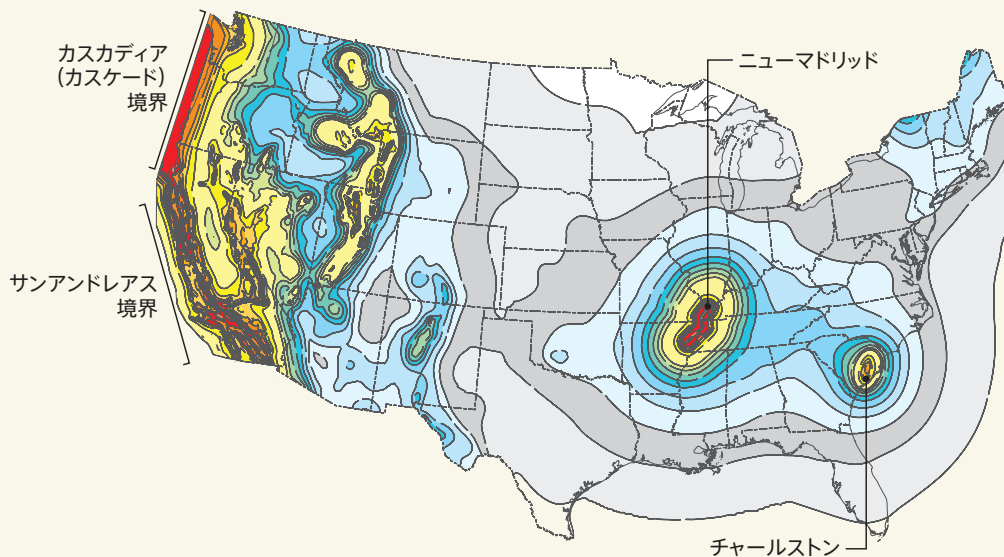


図1：米国の地震の危険性の確率的評価<sup>3</sup>。暖色系の色は、強い地震動が起こる可能性が最も高い地域を示している。そうした地域は、主要なプレート境界の近くにあるか、プレート境界に影響される場所にある傾向を示す。一方、ニューマドリッドやチャールストンなど大陸内陸部で地震が集中している場所は、大地震を頻繁に起こせるほどの変形が持続していることを反映していると解釈されてきた。このことと予測される地面の応答とを考え合わせ、これらの地域は西海岸のプレート境界地域に匹敵する危険性があると見積もられた。しかし、SteinとLiuは、低レベルの大陸内陸部地震活動は、長く続く余震なのではないかと提案した<sup>5</sup>。

み帯が位置するプレート境界に匹敵する地震の危険性がある、という見積もりが出されている<sup>3,4</sup>。その結果、全米地震危険度地図には、危険性の高いこれら2か所が射撃的のように示されており(図1)、その地域の建築基準や人々の安全に対する意識などに影響を与えている。

しかし、ニューマドリッドやチャールストンなどの大陸内陸部を、地震が再び襲うとは限らないとしたらどうだろう。ノースウェスタン大学(米国イリノイ州エバンストン)のSeth Steinとミズーリ大学コロンビア校(米国)のMian Liuは、ニューマドリッドや世界の他の場所の地震活動データから、余震の持続期間とプレート変形速度との間に逆相関があることを発見した(*Nature* 2009年11月5日号87ページ)<sup>5</sup>。大陸内の活動度が特定の場所で高いことは、定常的なプレート変形を反映していると解釈されているが、もしかすると「単に非常に長く続く余震かもしれない」とSteinらは主張している。

余震の発生率(単位時間あたりの余震回数)は、本震直後に最も高く、その後はおおむね時間の逆数に比例して減衰する(図2)。この法則は、1894年に地震学者の大森房吉(後に東京帝国大学教授)によって初めて見いだされ、現在「大森公式」とよばれている。SteinとLiuは、余震の減衰はプレートの変形がほとんどないときはとても緩慢で、数百年間続く可能性があることを示した<sup>5</sup>。対照的に、変形の速いプレート境界での余震発生率は、約10年でバックグラウンドレベルに戻る。

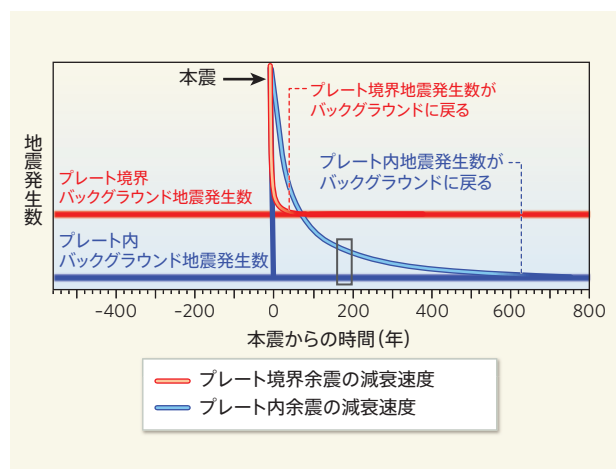


図2: プレート境界とプレート内地域との余震減衰速度の比較。本震は地震発生数を一時的に増やし、その持続期間はプレート変形速度によって決まる<sup>5</sup>。黒い長方形は、減衰しながら長く続くプレート内余震を現代の機器によって観測した期間を示す。観測期間は約40年にすぎず、バックグラウンドの定常的で低い地震発生率と余震とを区別することの難しさを示している。

「速度および状態依存摩擦構成則」とは、「断層の破壊は、最初は極めてゆっくりとしたすべり速度と断層中のある接触点群の持続時間(状態)とによって決まる」という考え方である。この仮説の主要な予測は「1つの断層の余震減衰期間は、プレート応力が蓄積する速度に直接的に依存するはずだ」というもので<sup>7</sup>、この予測がSteinとLiuの観察によって確かめられた。ニューマドリッドやチャールストンでの余震が減衰していることは、定常的な変形がほとんどないことと合わせて考えれば、地震の発生確率も同様に低下していることを意味するだろう。

プレートの変形が続いているかどうかを評価するには、異なる観測方法がいくつかある。その1つが古地震学によるもので、古地震学は、犯罪捜査のように有史以前の地震が残した地質学の手がかりを読み取っていく。ニューマドリッドで900年ごろと1450年ごろに起きた地震群は、この古地震学の手法で分析されてきた<sup>8</sup>。この分析では、1811~12年の一連の地震も考え合わせて、地震は500年間隔で繰り返すと見積もられ、それが危険度地図の作製に使われた<sup>3</sup>。一方、宇宙測地学は、宇宙に置かれた座標系を使って現在の地殻の運動を監視するもので、それによると、ニューマドリッド地域の現在の変形速度を教えてくれるが、大陸内陸部のほかの部分の変形速度と変わりが無い。このため、ニューマドリッドの断層は活動を終えつつあると解釈されてきた<sup>9</sup>。古地震学の記録をさらに詳しく調べると、地震が一時的に続いた時期の後、数千年にわたって活動しない時期があったことがわかった<sup>10</sup>。もし現在が静かな期間に入りつつある時期だとするならば、これら対照的な観測事実は矛盾なく説明できる。

ここで、地質学的時間尺度と人間の時間尺度の相違が問題になる。気象学者は、数百周期におよぶ季節変動を観察して、自分たちの天気予報を検証することができる。しかし、地震予測を研究する研究者らは、地球のどんな場所であろうと、いまだ、ゆっくりと変形していく大陸内陸部での地震周期を完全に観察したことがない。地震の予測は、1年間の天気を1月の1週間をみただけで予測することに似ている。SteinとLiuの研究もこの問題から逃れることはできない<sup>5</sup>。短い観察期間で長い余震減衰傾向を正確に予測することは難しい。地震を歴史的に長く観察できてはいることは、実際に危険でもある。インドネシアのスマトラ島や中国の四川省で最近、不意打ちといえる巨大地震があったにもかかわらず、将来の危険性を予測するとき、過去の地震を過度に重視する傾向がまだある。

最近の地震を過度に重視することを避け、大陸内陸部の地震活動をさらによく理解するためには、過去に破壊が起こっ

ていない地殻の弱い部分を見落とさないことが必要だろう。ニューマドリッドやチャールストンなどの場所が特別なのかどうかを知るためには、これまで断層地図作製や古地震学的研究を行っていない場所での調査や研究も必要かもしれない。同時に、定常的なプレート変形の信号とゆっくりと減衰する過去の地震の余震とを区別しなければならない。

大陸内陸部の地震周期の研究はまだ日が浅く、どうしても不確実なことが多い。このため、地震の予測は、大森公式にのっつて時間的に減衰する危険性評価を含め、論理ツリーのさまざまな可能性を考慮しなければならない。そうしたアプローチをとれば、地震被害軽減のために使える資金の範囲

内で、大陸内陸部地域の耐震建築設計基準を現実的かつ適切に決めることは可能だ。 (新庄直樹 訳)

Tom Parsons、米国地質調査所。

1. Mueller, K., Hough, S. E. & Bilham, R. *Nature* **429**, 284-288 (2004).
2. Braile, L. W., Keller, G. R., Hinze, W. J. & Lidiak, E. G. *Tectonics* **1**, 225-237 (1982).
3. Frankel, A. et al. *US Geol. Surv. Open-File Rep.* 02-420 (2002).
4. Frankel, A. *Seismol. Res. Lett.* **75**, 575-586 (2004).
5. Stein, S. & Liu, M. *Nature* **462**, 87-89 (2009).
6. Omori, F. *Rep. Imperial Earthquake Investigation Committee* **2**, 103-109 (1894).
7. Dieterich, J. H. *J. Geophys. Res.* **99**, 2601-2618 (1994).
8. Tuttle, M. P. et al. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **92**, 2080-2089 (2002).
9. Calais, E. & Stein, S. *Science* **323**, 1442 (2009).
10. Holbrook, J., Autin, W. J., Rittenour, T. M., Marshak, S. & Goble, R. J. *Tectonophysics* **420**, 431-454 (2006).

## 植物科学

# Signal advance for abscisic acid

## 解明が進んだアブシジン酸シグナル伝達

Laura B. Sheard and Ning Zheng

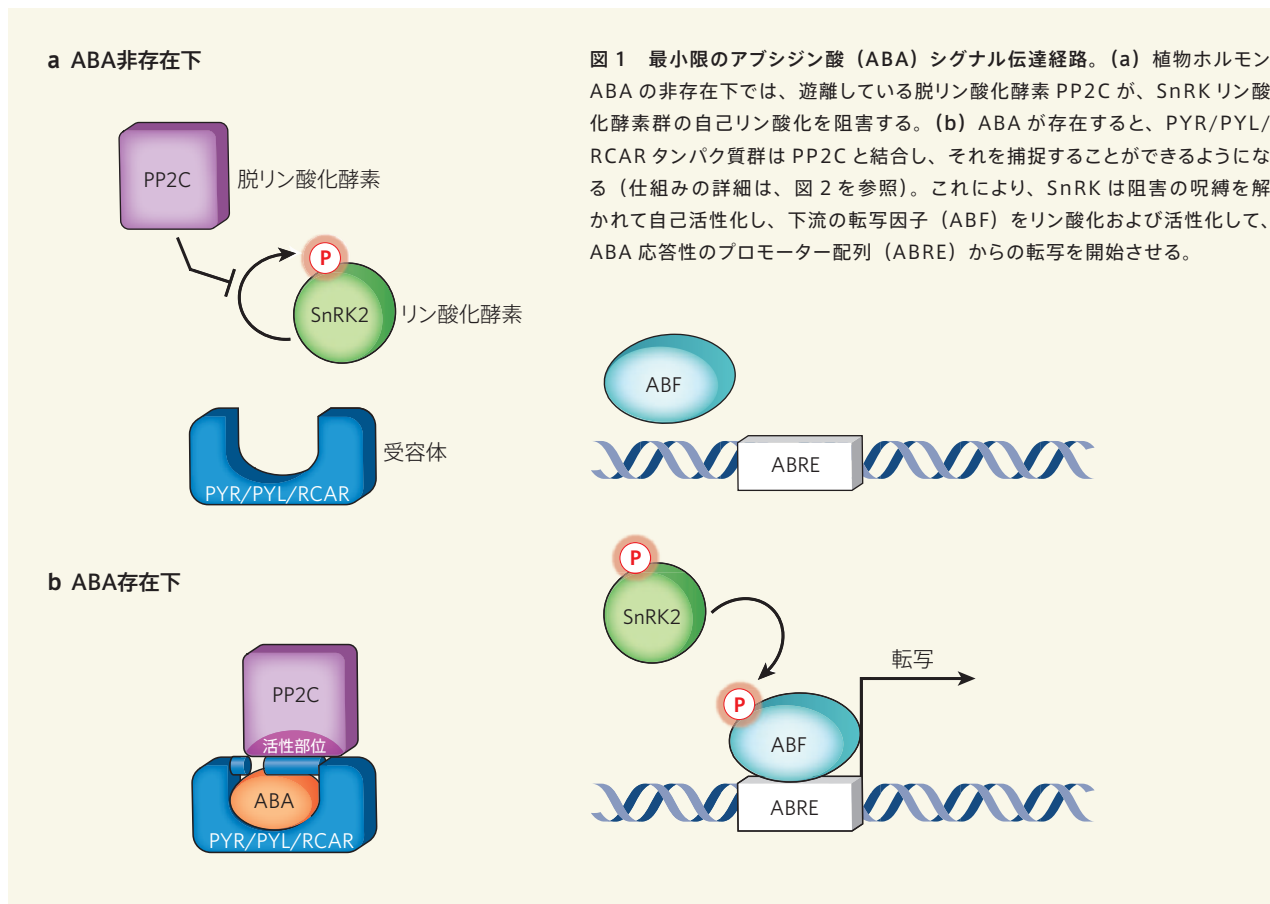
Nature Vol. 462(575-576)/3 December 2009

スタートでつまずき、長い間決め手に欠けていたアブシジン酸受容体の同定に、とうとう成功した。このほど、複数の研究チームから成果が一度に発表され、この植物ホルモンがシグナルを伝達する仕組みの詳細が明らかになったのだ。

急激に変化する環境条件を生き延びて繁栄していくために、植物はさまざまな種類のホルモンを利用して生長と生殖を調節している。なかでもアブシジン酸 (ABA) という植物ホルモンは、乾燥や極端な温度、高濃度の塩といったストレスに対する応答を調節するとともに、種子の成熟やつぼみの休眠など、ストレス以外の応答も調節している。ABA のシグナル伝達経路は、植物生理において重要な機能を果たすため、それを標的とすることは、将来の農業への応用が大いに期待されている。このほど、*Nature* 2009 年 12 月 3 日号に 4 本<sup>1-4</sup>、そのほかのジャーナルに 2 本<sup>5,6</sup> の論文が一挙に発表され、ABA シグナル伝達に関する構造的、機構的な見識がもたらされ、その期待が現実的なものとなってきた。

植物ホルモンの研究は、別の 2 種類のホルモン、ジベレリンおよびオーキシンの受容体が突き止められ、最近注目

の研究テーマとなっている。これらは、現在の ABA モデルと同様に、膜と結合していない可溶性の受容体である。しかしながら、ABA の受容体の発見は、困難を極めた。2006 年以降、いくつかのタンパク質が ABA 受容体ではないかといわれてきたが、いずれも ABA シグナル伝達で実際に担っている役割が明確ではなかった<sup>7</sup>。そんな中、2009 年 5 月、新種のタンパク質群が ABA センサーの候補として発表された<sup>8,9</sup>。そのうちの PYR/PYL/RCAR タンパク質は、ABA と結合し、既に ABA 応答への関与が明らかにされている 2C 型タンパク質脱リン酸化酵素 (PP2C) の活性を阻害していることがわかった。そして今回、6 組の研究チーム<sup>1-6</sup> により、この新たに発見されたタンパク質受容体 PYR/PYL/RCAR が ABA を感知する構造的・機能的メカニズムが、同時に明らかにされた。



Fujii ら<sup>3</sup> は鮮やかな再構成アッセイにより、植物のプロトプラスト (細胞壁を除去した細胞) と試験管内で、ABA のシグナル伝達の再現に必要な最小限の経路を突き止め、受容体、脱リン酸化酵素、および下流のリン酸化酵素シグナル伝達の構成要素を結びつけた。脱リン酸化酵素とリン酸化酵素は正反対の調節作用をもち、それぞれ基質タンパク質に対してリン酸基の除去、付加を行う。図 1 に示すように、ABA の非存在下では、脱リン酸化酵素 PP2C は、ある一群のリン酸化酵素 (SnRK2) を恒常的に抑制している。SnRK2 の自己リン酸化は、下流の標的に対するリン酸化酵素の活性に必要とされている。PYR/PYL/RCAR 受容体に ABA が結合すると、PP2C が捕捉され、脱リン酸化活性が抑制される。その結果、SnRK2 は自己リン酸化により活性化し、下流の転写因子をリン酸化して ABA 応答性の遺伝子の転写を促進する。この経路の魅力はその単純さにあり、ABA に関するこれまでの文献を矛盾なく補っている。

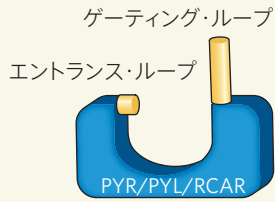
この経路で重要なのは、PYR/PYL/RCAR が、リガンドである ABA を検知して結合し、PP2C を阻害するステップ

である。Nature の 3 本の論文<sup>1,2,4</sup> を含む、5 組のチームによる結晶学的研究では、そろってこの過程の全体像が描かれており、さまざまな機能的状態の PYR/PYL/RCAR タンパク質群の構造が、原子レベルで明らかにされている。特に Melcher らの研究<sup>1</sup> では、PYL2 について、決定的に重要な意味をもつすべての型 (リガンド非結合型、リガンド結合型、およびリガンド/脱リン酸化酵素結合型) の構造が示されており、まずは ABA、続いて脱リン酸化酵素との結合で PYL2 が示す立体配座の変化が詳細に分析された。

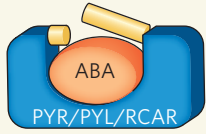
これらの研究の第一のポイントは、リガンド結合のメカニズムである。それは ABA 結合ポケットのゲーティング・ループの開閉によって調節されている。ABA の非存在下、PYR/PYL/RCAR には、開放された進入可能な穴が存在する。表面には柔軟なループが 2 本あり、付近にあるいくつかの構造要素とともに、穴への進入を監視している。水で満たされたこのポケットに ABA が入ると、一方のループがゲートのように閉まり、もう一方のループに近づいて ABA をポケットの中に閉じ込める (図 2)。ABA と接触するア



## a リガンド非結合型



## b ABAの進入



## c 脱リン酸化酵素の結合

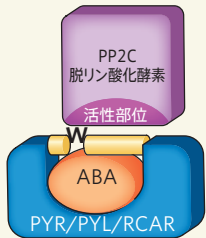


図2 ABAの作用に関する構造的メカニズム。(a) リガンド非結合型では、ABA受容体PYR/PYL/RCARは、開放された進入可能な穴をもっている。穴には、進入を監視する柔軟な表面ループが2本存在する。(b) ABAが穴に入り込むと、ゲーティング・ループがアロステリックに閉じ始め、もう一方のエントランス・ループに接近してABAをポケットに閉じ込める。これにより、ゲーティング・ループ上に疎水性の結合部位が出現する。(c) 脱リン酸化酵素PP2Cは、ゲーティング・ループ上の疎水性の部位に結合し、保存されたトリプトファン(W)をゲーティング・ループの隣に挿入して閉鎖状態に固定する。すると、ゲーティング・ループは、PP2Cの活性部位と接近して相互作用し、PP2Cが基質と結合する能力を遮断する。

として作用し受容体に対するABAの親和性を高めているのが、包括的に説明できる。

これらの論文は、ABAのシグナル伝達に関する統一的な見方を提示しているが、同時に今後の研究に対する問題も提起している。構造を研究したチームのうち3組<sup>4-6</sup>は、PP2Cの非存在下で受容体の二量体化を観察しており、残りの2組の研究<sup>1,2</sup>でも、本文中では言及されていないものの、構造モデルには二量体化が登場する。しかし、なぜ受容体が二量体化するのかは、まだ明らかにされていない。また、PYR1ホモ二量体の構造では、二量体1個につきABAが1分子しか結合できないのに対し、それと似たPYLホモ二量体の構造では、両方のサブユニットがABAに占有されている。どちらも、受容体のゲーティング・ループが二量体の界面に存在していることから、二量体化に機能的な意味がある可能性が示唆される。しかし、PP2Cとの複合体では単量体のABA結合型受容体しか見つかっておらず、受容体の二量体化は、ABAの最終的な作用には明らかに不要と思われる。

ホルモン依存的なPP2C結合部位を作り出すPYR/PYL/RCARのゲーティング・ループの動きは、GID1受容体がジベレリンの感知に用いる「閉じ蓋」メカニズムを想起させる。ジベレリンの場合、ホルモンと結合するポケットを覆うGID1のパーツがホルモンの結合によって動かされ、GID1が基質タンパク質と結合する部位が形成されて、ユビキチン化が開始する<sup>10,11</sup>。オーキシンの「分子のり」メカニズムとは異なり、ABAもジベレリンも、受容体がアロステリック型の構造変化を示す<sup>12</sup>。仕組みの細部は異なるかもしれないが、植物ホルモンの作用では可溶性の受容体に共通の特徴がある。リン酸化にせよユビキチン化にせよ、ホルモンのシグナルがタンパク質間相互作用を増強して重要な化学修飾を調節し、それが標的タンパク質の活性を変化させているのだ。そしていずれの場合も、ホルモンは、タンパク質間の界面そのもの、またはその付近にある部位に結合し、結合するタンパク質を補助受容体として働かせている。(小林盛方 訳)

Laura B. Sheard および Ning Zheng、ハーワード・ヒューズ医学研究所およびワシントン大学薬理学科 (米国)。

- Melcher, K. *et al. Nature* **462**, 602–608 (2009).
- Miyazono, K. *et al. Nature* **462**, 609–614 (2009).
- Fujii, H. *et al. Nature* **462**, 660–664 (2009).
- Santiago, J. *et al. Nature* **462**, 665–668 (2009).
- Nishimura, N. *et al. Science* **326**, 1373–1379 (2009).
- Yin, P. *et al. Nature Struct. Mol. Biol.* **16**, 1230–1236 (2009).
- McCourt, P. & Creelman, R. *Curr. Opin. Plant Biol.* **11**, 474–478 (2008).
- Ma, Y. *et al. Science* **324**, 1064–1068 (2009).
- Park, S. Y. *et al. Science* **324**, 1068–1071 (2009).
- Murase, K. *et al. Nature* **456**, 459–463 (2008).
- Shimada, A. *et al. Nature* **456**, 520–523 (2008).
- Tan, X. *et al. Nature* **446**, 640–645 (2007).

ミノ酸残基の多くが、2本のエントランス・ループの配列とともに、全PYR/PYL/RCARタンパク質群で進化的に保存されていることから、ABAの結合とゲーティングの開閉メカニズムは、この受容体ファミリーのすべてに共通のものと考えられる。

これら5組の研究チームのうち3組<sup>1,2,6</sup>は、結晶学的研究を進展させ、ABA結合型の受容体とPP2Cとが形成する複合体の構造を明らかにした。その構造から、ABA結合型の受容体が大きな相補形の界面を介してPP2Cと結合し、その界面にPP2Cの活性部位と受容体のエントランス・ループ2本が含まれていることが明らかにされた。PP2Cには保存されたトリプトファン残基があり、それが側鎖をゲーティング・ループの隣に差し込み、閉鎖状態で固定する。すると、ゲーティング・ループは、PP2Cの活性部位(基質と結合する)と接近して相互作用し、PP2Cが基質をとらえて脱リン酸化する能力を遮断する。こうした構造により、PYR/PYL/RCARがPP2C活性をどうやってABA依存的に阻害するのか、PP2Cがどうやって強力な補助受容体

# 磁性細菌を解析し、ナノ磁石の産業応用をめざす!

新垣 篤史

お酒やヨーグルトなどを作る発酵微生物、ペニシリンを産生する青カビなど、人類にとって有用な微生物は山ほど存在する。こうした中で、ちょっと毛色が変わったものに「磁性細菌」がある。この細菌は、菌体内でナノサイズの磁石を作り出す。東京農工大学大学院 共生科学技術研究院の新垣篤史助教は、磁性細菌のゲノムを解読し、磁石をつくるための遺伝子や磁石の形や大きさの制御について解析を進めている。ナノ磁石は工業に利用できる可能性があるという。

## 磁性細菌とは

**Nature Digest** — 磁性細菌とはどのような細菌なのでしょう?

**新垣** — 菌体内で磁石を作り出す微生物を総称して磁性細菌とよびます。1970年代に、米国の研究者により、ボストン近郊の塩湖で発見されました。その後、世界中の川、池、海岸、油田、深海などに広く分布していることがわかり、これまでに、少なくとも属レベルで10グループが存在することがわかっています。最も多くの種類が発見されているのは、根粒菌や光合成細菌などが含まれる「 $\alpha$ プロテオバクテリア」に属するグループで、らせん状や球状の細菌などが知られています。いずれの磁石も脂質二重膜に覆われ、形の整った50~100ナノメートルほどのもの10~20個が、数珠のように連なっているのが特徴です(図2)。ただし、培養可能になっているのは、私たちの研究室で分離された3株を含め、世界に20株もないといわれています。

**ND** — 磁性細菌はなんのために磁石を作り出しているのでしょうか?

**新垣** — 「磁石(鉄)をエネルギー源にしているのではない」、「細胞内に多量にあると有害な鉄イオンを無毒化する機

構ではないか」などの説があり、現在も議論が続いています。一般的な解釈は、「自身の磁石によって地磁気を感じし、最短距離で最適な生息環境に移動するため」というものです。地球は大きな磁石で、北極はS極、南極はN極です。このような環境中では、磁性細菌内の数珠状磁石はコンパスのように機能し、菌体が地磁気と同方向に配向します(図1)。磁性細菌は嫌気性で、酸素の少ない川底表面の泥などを好みますが、氾濫などで頻りに水面に巻き上げられます。そのとき、磁石による配向を利用すれば、最短距離で生息環境に戻れるのではないかと考えられます。ただし、磁石はあくまでもコンパスの機能を果たすだけで、移動はべん毛の推進作用によります。ちなみに、栄養分や低酸素状態の整った実験室の中では、遺伝子操作などで磁石を合成できなくしても、生存には無関係であることがわかっています<sup>1</sup>。

実は、体内で磁石を作り出す生物は、意外に多いことが知られています。たとえば、海岸の岩場に張り付いているヒザラ貝の歯の表面は、磁性を帯びています。また、回遊魚や渡り鳥の中にも磁石を作ると報告されているものがあり、地磁気を利用できるように進化した結果だと思われるが、詳細は不明です。

## 磁性細菌のゲノムを解読

**ND** — 今回は、どのような磁性細菌のゲノムを解読されたのでしょうか?

**新垣** — 1993年に和歌山の水田から分離された硫酸還元菌の仲間属する磁性細菌(RS-1株)を対象に、製品評価技術基盤機構のチームと共同で、全ゲノムをほぼ100%の精度で解読しました<sup>2</sup>。RS-1株は、これまで分離されている磁性細菌の中で、唯一「 $\delta$ プロテオバクテリア」という種類に分類される細菌です。RS-1株のゲノムは染色体と2つのプラスミドからなりませんが、染色体のゲノムサイズは525万塩基対、プラスミドはそれぞれ5.8万(プラスミド1)と0.9万塩基対(プラスミド2)でした。遺伝子は、染色体上に4629個、プラスミド1に65個、プラスミド2に10個ありました。ゲノムサイズは一般的な硫酸還元菌よりもかなり大きく、遺伝子も多かったといえます。全ゲノムを見渡すと、シグナル伝達

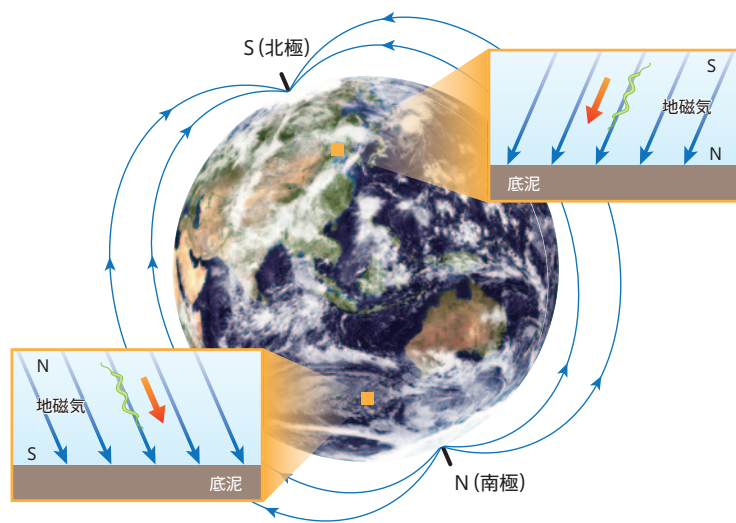
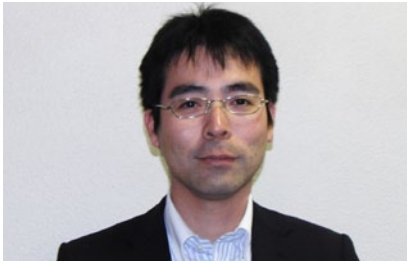


図1 磁性細菌は自身の磁石によって地磁気を感じし、最適な生育環境へと移動する。



新垣篤史 (あらかき・あつし) / 東京農工大学大学院 共生科学技術研究院 生命機能科学部門 助教。専門は生物工学。1997年に東京農工大学工学部を卒業。1997～2003年まで、東京農工大学大学院工学研究科で松永是教授の指導を受ける。磁性細菌の基礎研究を進め、生物の作る磁石結晶の形成に直接かかわるタンパク質を初めて分離・同定した。2003年に博士(工学)取得。1998～1999年、ハワイ大学自然エネルギー研究所に留学。2003～2005年、早稲田大学理工学研究科で生体分子間反応の磁気および光学的検出技術の開発に従事。

2005年に東京農工大学に異動し、2007年より現職。磁性細菌の合成する磁気微粒子の形成機構解明とその工学的利用を目的として、特に結晶のサイズや形態制御に着目して研究を進めている。一方で、マイクロ流体デバイスを用いた細胞解析技術の開発を進めており、稀少細胞の分離・検出などへの応用に取り組んでいる。

関連遺伝子が多いことがわかりました。

**ND** — 磁石を作り出す仕組みについては、どのようなことがわかったのでしょうか？

**新垣** — 今回のRS-1株と、既にゲノム情報が得られているαプロテオバクテリアの磁性細菌とで塩基配列を比較したところ、どちらにも、磁石の合成にかかわる同一の遺伝子 (*mamAB* 遺伝子クラスター) が存在し、部分的に組み換えが起きた痕跡やトランスポゾンが多くみられました。この *mamAB* 遺伝子クラスターは他の磁性細菌にも広くみられ、私たちは、この遺伝子が異種の磁性細菌間で交換・伝播されている (水平伝播されている) と結論付けました。一方で、RS-1株だけにみられた遺伝子もあり、この中には、RS-1株に特徴的な「弾丸状粒子」の磁石を合成するものが含まれると考えています<sup>3</sup>。

磁石は、細胞表面から鉄イオンを取り入れることで作られています。菌体内に侵入した鉄イオンは、細胞膜が陥入することでできた小胞の中に蓄積されます。一方、菌体内には末端から末端に伸びるレールのようなタンパク質 (フィラメント) があり、このフィラメントに沿って小胞が配置されるとともに、鉄イオンと複数のタンパク質を材料にして、磁石が合成されていきます。鉄はイオンの状態でもわずかながら磁気的な性質をもっていますが、ある大きさの結晶構造になると、強い磁気を帯びるようになります。こうしてできた磁石は、細胞分裂の際にはきちんと二等分されます。

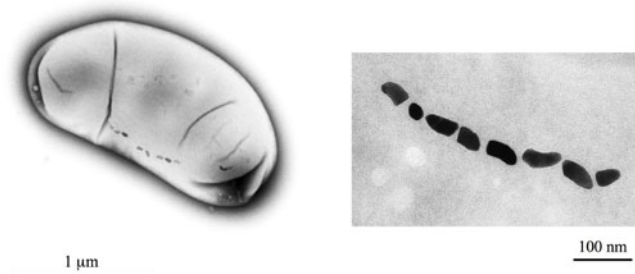


図2 磁性細菌 (*Desulfovibrio magneticus*, RS-1株) の透過電子顕微鏡写真。細胞の中に並んだ粒上のが磁気微粒子。拡大すると、磁気微粒子の形態が弾丸状に制御されていることがわかる。

### 「バイomagネット」をめざして

**ND** — 磁性細菌が作る磁石を産業などで応用することはできるのでしょうか？

**新垣** — それをめざしているのです。私は、実用化をめざす意味を含めて、磁性細菌由来の磁石を「バイomagネット」とよんでいます。日常生活では、コピー機のトナー、パソコンの記録部品など、ナノサイズの磁石を利用しているものが多くあります。磁性細菌に、必要な形とサイズをもつ磁石を大量に作らせることができれば、工業的にさまざまな使い道があるでしょう。私は、特定の遺伝子を操作することで、磁石の結晶構造を認識するタンパク質を変化させ、形や大きさを制御できるのではないかと考えています。

また、バイomagネットは脂質二重膜に覆われているので、タンパク質などを結合させるのに好都合だという利点もあります。創薬のスクリーニングなどでは、磁石に蛍光タンパク質を結合させることで、目的の分子だけを集めるといったことをしますが、人工の磁石に脂質二重膜をコーティングするのは容易ではありません。私たちは、既に一部の磁性細菌株を使って、実用化に向けた試みを始めています。さらに、脂質二重膜がコーティングされていると、水中などでの磁石の分散性が上がるという利点もあります。

一方で、有害な重金属を磁性細菌に取り込ませて菌体ごと回収する、磁性細菌を「磁石以外のナノサイズのデバイス」を作る装置として利用する、といったことも考えられると思います。

**ND** — 今後の課題や目標は？

**新垣** — まずは、磁石の形と大きさの制御の分子メカニズムを詳細に解明したいですね。大量培養の手法は既に確立されているので、環境にやさしく、低コストで、精密な構造のデバイスが大量生産できる仕組み作りにつながるかと考えています。進化的にみると、磁性細菌はバクテリア全般に渡って分布しているような印象があるので、古細菌に属する新種の磁性細菌を探したいとも考えています。

**ND** — 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 Arakaki A. et al. *J.R Soc Interface*, **5**, 977-999 (2008)
- 2 Nakazawa H. et al. *Genome Res*, **19**, 1801-1808 (2009)
- 3 Matsunaga T. et al. *Proteomics*, **9**, 3341-3352 (2009)

愛くるしいパンダは世界中の人気者です。今回、パンダの全ゲノムが解読され、パンダは本来肉食系なのに、肉のおいしさがわからないということがわかりました。お肉の味がわからないパンダは、私たちより人生の楽しみがちょっと少ないかもしれませんね。

## NEWS nature news

語数：591 words 分野：生態・生物保全・遺伝・進化

Published online 13 December 2009 | Nature | doi:10.1038/news.2009.1141

http://www.nature.com/news/2009/091213/full/news.2009.1141.html



ISTOCKPHOTO

# Genome reveals panda's carnivorous side

Bamboo-eater seemingly has no genes for cellulose-digesting enzymes.

Jane Qiu

1. The complete genetic sequence of the giant panda has revealed that the **iconic** Chinese bear has all the genes required to digest meat — but not its **staple** food, bamboo.
2. The international team sequenced a three-year-old female panda called Jingjing, who was also a mascot of the 2008 Beijing Olympics, and found that she lacks any recognizable genes for **cellulases** — enzymes that break down the plant material cellulose. "The panda's bamboo **diet** may be **dictated** by its **gut bacteria** rather than by its own **genetic composition**," says Wang Jun, deputy director of the Beijing Genomics Institute in Shenzhen, Guangdong province, who led the sequencing project.
3. The researchers also discovered that the *T1R1* gene, which encodes a key receptor for the **savoury** or 'umami' flavour of meat, has become an inactive '**pseudogene**' due to two mutations. "This may explain why the panda diet is primarily **herbivorous** even though it is **classified as** a carnivore," says Wang.
4. The research, published in *Nature*<sup>1</sup>, shows that pandas have about 21,000 genes packed into 21 pairs of **chromosomes**, including one pair of **sex chromosomes**. Of all the mammals that have been sequenced, pandas are most similar to dogs — with 80% similarity — and are only 68% similar to humans.
5. But the bear's genome has undergone fewer genetic changes **over time** than those of dogs and humans, suggesting that it evolved more slowly. The panda is often regarded as a 'living fossil' because its **ancestors** are thought to have lived in China more than eight million years ago.
6. The study also shows pandas have a high degree of **genetic diversity** — about twice as much as humans. "This shows that the panda has a good chance of survival despite its small population size," says Wang.
7. "The study has laid the biological foundation to better understand pandas, and has the potential for improving conservation by controlling diseases and boosting reproduction of the species," says Jianguo Liu, a **conservation biologist** at Michigan State University in East Lansing, Michigan who was not involved in the study.
8. But critics stress that protecting the panda's increasingly fragmented and shrinking **habitat** is a more pressing issue in their conservation. China is thought to be home to around 1,600 wild pandas — though the actual number is hotly debated. Another 300 or so live **in captivity**.
9. Some conservationists, such as Fan Zhiyong, director of the conservation group WWF's China species programme, believe that the panda genome will have little **impact on** conservation efforts. "Protecting pandas in the wild remains the top priority, but their habitats are becoming smaller and smaller," says Fan. "If we don't have any wild pandas one day, what can we do with their genes?"
10. Although China has set up several panda sanctuaries since the 1960s, economic development often **takes precedence over** conservation. Consequently, pandas' habitats are often invaded by construction projects such as dams and highways. Tourism is also a big threat because pandas are **reclusive** creatures. For example, Jiuzhaigou, a panda sanctuary in Sichuan, is visited by millions of tourists every year. "You don't see any pandas there anymore," says Fan. "This is hardly surprising."
11. There is "no doubt" that information from the genome and habitat protection are both crucial for conservation efforts, says Wang. The panda genome, the first **in a string of** sequencing efforts by the Shenzhen institute, will be a test of how such genetic information can **help in** the conservation of endangered species, he adds. The team has got a draft genome map of the polar bear, and has started sequencing the genome of the **Tibetan antelope**.

#### Reference

1. Li, R. et al. *Nature* **463**, 311-317 (2009).

## TOPICS

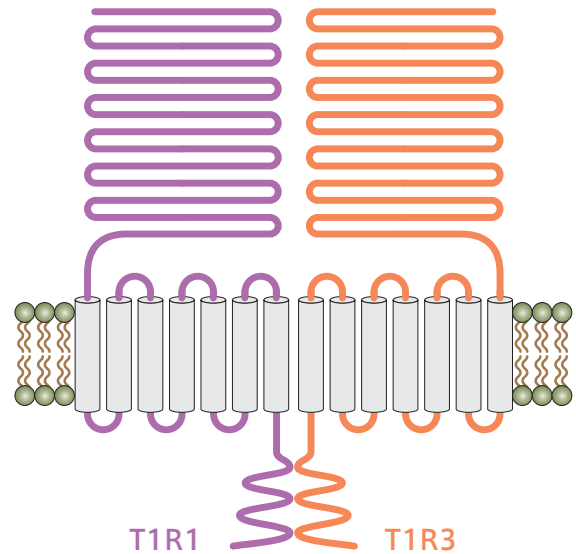
## うま味とうま味受容体

味覚の基本は、甘味・苦味・酸味・塩味・うま味である。現在、味を感じる受容体として、7回膜貫通型のGタンパク質\*共役型受容体T1RとT2Rファミリーが同定されており、甘味はT1R2/T1R3ヘテロ二量体、苦味はT2Rファミリーが感知する。

うま味の物質は、グルタミン酸ナトリウム、アスパラギン酸などのアミノ酸系と、イノシン酸、グアニル酸などの核酸系が挙げられる。うま味の受容体は、甘味と共通のT1R3とT1R1のヘテロ二量体と考えられている(右図参照)。しかしながら、種によって応答に差があり、げっ歯類のT1R1/T1R3は20種類のアミノ酸すべてに応答するが、ヒトのT1R1/T1R3はグルタミン酸ナトリウムとアスパラギン酸に非常に強く応答する。そしていずれのT1R1/T1R3も、イノシン酸やグアニル酸などの核酸系うま味によって、アミノ酸系うま味に対する応答が強く増強される。

肉がおいしく感じられるのは、肉に含まれるアミノ酸にうま味受容体のT1R1/T1R3が応答するためである。今回パンダのゲノム解析では、この二量体の一方のT1R1をコードする遺伝子が機能をもたないことがわかり、アミノ酸のうま味を感じできないと推測された。

\*Gタンパク質：グアニンヌクレオチド結合タンパク質。細胞外からの情報を細胞内に伝える機構で役割を果たす。



## SCIENCE KEY WORDS

リード **cellulose-digesting enzyme(s): セルロース分解酵素**

セルロースを分解する酵素セルラーゼ(下記参照)のこと。セルロースは、植物細胞の細胞壁の主成分である多糖。分子式(C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>で表される。化学的には、β-グルコースが1,4-グリコシド結合して重合したものだ。

2. **cellulose(s): セルラーゼ**

セルロースの1,4-グリコシド結合を加水分解して、グルコースにする酵素。主として細菌や植物で産生され、動物はごく一部を除き産生できない。このため、ウシやウマなどの草食動物は腸内にセルラーゼ産生細菌を共生させることにより、植物を分解して栄養を得ている。

2. **gut bacteria: 腸内細菌**

動物の腸内に共生している細菌。セルラーゼを産生するなどして、宿主の食物の消化を助けたり、外部からの細菌の増殖を抑制したりしている(詳細は、2009年10月号「英語でnature」のTOPICS参照)。

2. **genetic composition: 遺伝的組成**

ゲノムにどんな遺伝子があるのかということ。

3. **pseudogene: 偽遺伝子**

生体内で機能をもつ遺伝子と塩基配列に高度な相同性があるにもかかわらず、機能をもたないDNA領域。かつては機能をもつ遺伝子産物をコードしていたものが、突然変異を起こしたりして、機能を失ったと考えられる。元の正常な遺伝子が残っている場合が多いが、今回のように単独で偽遺伝子になったものもある。

4. **chromosome(s): 染色体**

真核生物でみられる、遺伝情報をもつ長いDNAがコンパクトに折りた

たまれた構造。生物によって本数が決まっている。

4. **sex chromosome(s): 性染色体**

性決定に関与する染色体。雌雄によって異なる形や数を示す。雄が異型・雌が同型(大部分の哺乳類)のXY・XX型、雄が同型・雌が異型(鳥類)のZZ・ZW型のほか、YあるいはWがないと雄や雌になるものもある。

6. **genetic diversity: 遺伝的多様性**

生物の種内および種間で、どのくらい異なる塩基配列の遺伝子が存在するのかということ。種内および種間での相同遺伝子の違いを量的に測定。こうした多様性は、塩基置換や欠失、重複、組み換えなどに起因する。遺伝的多様性が高いということは、種としてさまざまな種類の遺伝子をもつことを意味し、すなわち、環境変化等に適応して生き残る確率が高いということになる。

7. **conservation biologist: 保全生物学者**

保全生物学とは、生物の多様性や生態系の維持を目的とした新しい学問領域。例えば、どのくらいの森林があれば多様な生態系を維持できるのか、どのくらいの個体数があれば絶滅を防げるのか、あるいは、ヒトの活動が自然に及ぼす影響からどのようにして生態系を守っていくかを研究する。

11. **Tibetan antelope: チルー、別名チベットレイヨウ、チベットカモシカ。**  
チベット地方やインドのラダック地方北部の3700~5500m以上の高地に生息するウシ科の動物。雄には70cmにもなる角がある。背高は約70~90cm、頭胴長120~140cm、体重は30~50kg。雌は雄よりひとまわり小さい。

## WORDS AND PHRASES

タイトル **carnivorous: 「肉食性の」**

3. のcarnivoreは「肉食動物」。“-vorous”は、「～を餌とする」、「～を習慣的に食べる」という意味の接尾辞。

1. **iconic: 「象徴的な」、「代表的な」**

“iconic Chinese bear”は、「ジャイアントパンダ」の言い換え。5. の“bear”もパンダのこと。

1. **staple: 「主要な」、「基本的な」**

“staple food”で「主食」

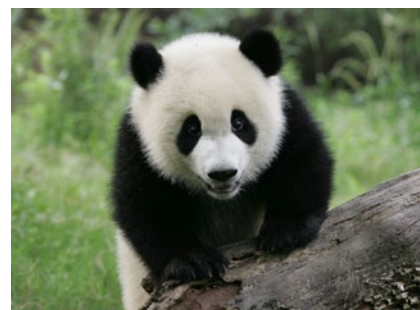
2. **diet: 「食餌」**2. **be dictated by ~: 「～によって決まる」、「～によって決定づけられる」**3. **savoury: 「おいしい味」、「うま味」**3. **herbivorous: 「草食性の」**3. **be classified as ~: 「～に分類される」**5. **over time: 「時の経過とともに」**5. **ancestor(s): 「祖先種」**8. **habitat: 「生息地」**8. **in captivity: 「飼育下で」、「飼育されている」**9. **impact on ~: 「～に影響を与える」**10. **take(s) precedence over ~: 「～に優先する」**10. **reclusive: 「孤立して生活する」**11. **in a string of ~: 「一連の〜」**11. **help in ~: 「～に役立つ」**

## 参考訳

## ゲノムが明かすパンダの肉食動物としての顔

竹を主食とするパンダは、セルロース分解酵素の遺伝子をもっていないらしい。

ジェーン・チュー



ゲノム配列が解読された3歳の雌のパンダ「晶晶（ジンジン）」

1. ジャイアントパンダのゲノム塩基配列が完全解読され、中国を象徴するこのクマ科の動物が、肉を消化するのに必要な遺伝子はすべてもっているのに、主食である竹を消化するのに必要な遺伝子をもっていないことが明らかになった。
2. 国際的な研究チームが、2008年北京オリンピックのマスコットでもあった3歳の雌のパンダ「晶晶（ジンジン）」のゲノム塩基配列を解読したところ、植物質のセルロースを分解する酵素セルラーゼの遺伝子とみられるものがないことがわかった。今回の塩基配列解読プロジェクトのリーダーである北京ゲノム研究所深圳（中国広東省深圳）のWang Jun 副所長は、「パンダの主食を竹に決めたのは、パンダ自身の遺伝的組成ではなく、その腸内細菌だったのかもしれない」という。
3. Wang たちはまた、肉のうま味の重要な受容体をコードする *TIR1* 遺伝子が2つの変異によって不活性な「偽遺伝子」になっていることも発見した。「パンダが肉食動物に分類されているのに植物を主食としている理由はこれなのかもしれません」と Wang は話す。
4. *Nature*<sup>1</sup> で発表された研究成果によると、パンダの21対の染色体（そのうちの1対は性染色体）には、約2万1000個の遺伝子が詰め込まれているという。その塩基配列は、これまでに塩基配列が解読された哺乳類の中ではイヌに最もよく似ていて、類似度は80%である。ちなみに、ヒトとの類似度は68%にとどまっている。
5. また、年月の経過とともにパンダのゲノムに生じた遺伝的変化はイヌやヒトほど多くなく、パンダの進化速度がイヌやヒトより遅いことを示唆している。パンダは、その祖先種が800万年以上も前から中国で生息していたと考えられているため、しばしば「生きた化石」とよばれている。
6. 今回の研究からは、パンダの遺伝的多様性がヒトの約2倍という高さであることも明らかになっている。「このことは、パンダの個体群が小さくても生き残れる可能性が高いことを示しています」と Wang は話す。
7. ミシガン州立大学（米国ミシガン州イーストラッシング）の保全生物学者 Jianguo Liu は、今回の研究には関与していないが、「この研究は、パンダをより深く理解するための生物学的基盤となるだけでなく、パンダの疾病を防除し、繁殖を促すことにより、その保全の強化に役立つ可能性があります」と話す。
8. その一方で、パンダの保全のためには、（ゲノムを解析することよりも、）ますます断片化し、縮小していく生息地を保護することのほうが切迫した課題であるとする批判もある。中国には現在1600頭前後の野生のパンダが生息していると考えられているが、実際の生息数については激しい論争がある。そのほかに、約300頭のパンダが飼育されている。
9. 自然環境保護団体である世界自然保護基金（WWF）の中国生物種プログラムの Fan Zhiyong ディレクターをはじめとする一部の保全活動家は、パンダのゲノムが保全活動に与える影響はほとんどないと考えている。「野生のパンダの保護が最優先課題であることに変わりはないのに、その生息地は縮小の一途をたどっています。野生のパンダがいなくなってしまうときに、その遺伝子で何ができるというのでしょうか?」と Fan はいう。
10. 中国では1960年代から複数のパンダ保護区が設定されてきたが、生物保全よりも経済発展が優先されることが少なくなかった。その結果、パンダの生息地はしばしばダムや高速道路などの建設プロジェクトに侵食されている。野生のパンダは人目を避けて生活するため、観光も大きな脅威となる。例えば、パンダ保護区の1つである九寨溝（四川省）には毎年数百万人の観光客が訪れるが、「ここでパンダを見ることはできなくなりました」と Fan は話す。「当然のことです」。
11. パンダの保全活動にとって、ゲノムから得られる情報と生息地の保護のどちらが欠けてもいけないことは「疑う余地はありません」と Wang は話す。彼はまた、パンダのゲノムは、北京ゲノム研究所深圳の一連の塩基配列決定プロジェクトの最初の成果であり、こうした情報が絶滅危惧種の保全にどのように役立つのかという試金石になるだろうと付言する。Wang の研究チームは、ホッキョクグマのゲノムの概要配列を完成させており、チルー（チベットレイヨウ）のゲノム塩基配列の解読にも着手している。（菊川要 訳）

‘ *Nature* – Global Leader in Science

... and You Know It ! ’



*nature*

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

# nature

 グローバルな視点から「科学」を読む

Nature 定期購読なら、世界の最先端の科学関連ニュースを英文オリジナルコンテンツと、日本語翻訳でお楽しみいただけます。



## 国際ジャーナルを読む

グローバルな視点から、幅広い分野の情報と「世界の動き」をタイムリーに把握できます！

### Nature 定期購読なら...

- **Nature Digest 無料定期購読**  
(Nature Digest Online 無料アクセス含む)
- **Nature オンライン版**  
(PDF, HTML)  
フルテキストへの  
無料アクセス



## 日本語編集版を読む

Nature の中から吟選した記事を、日本語に翻訳した科学月刊誌です。「世界の科学」を日本語でお楽しみいただけます。  
Nature 定期購読者には、Nature Digest を毎月無料で送付いたします。

### 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** / 研究成果解説
- **NEWS FEATURE** /  
読み物・注目の分野をあらゆる  
側面から親しみやすく解説
- **OPINION**

### オリジナル編集記事

- **JAPANESE AUTHOR** /  
日本人研究者へのインタビュー記事
- **英語で NATURE** /  
NATURE (印刷版およびオンライン版)  
に掲載の記事から生きた英語を学ぶ



(本文 36 頁)

Nature・Nature Digest 定期購読お申し込みはこちらから

[www.naturejpn.com/subscribe](http://www.naturejpn.com/subscribe)