

# nature DIGEST

日本語編集版  
DECEMBER 2006  
VOL. 03, NO. 12

# 12

[http:// www.nature.com/naturedigest](http://www.nature.com/naturedigest)



うつ  
と  
脳



# 12月8日OPEN!

～つくば・関西を中心とした研究職お仕事サイト～

# 研究職 .com



## お仕事をお探しの方

- 求人検索・応募ができます!
- 人材登録ができます!  
(スカウト制度あり)

## 研究職をお探しの方

- 人材検索ができます!
- 求人登録ができます!

ただのお仕事サイトではありません。  
担当コーディネータが、みなさんの求職活動をサポートします。

[www.研究職.com](http://www.研究職.com)

検索



# うつと脳

表紙：月本佳代美

## HIGHLIGHTS

02 vol. 443 no. 7113, 7114, vol. 444 no. 7115, 7116, 7117

## EDITORIAL

04 環境保護活動家たちと手を結ぶべきか手を切るべきか

## NEWS@NATURE.COM

06 笑顔の遺伝子?

07 雨は大地を震わせる

## SPECIAL REPORT

08 地球を救うのに必要な金額は?

Jim Giles

## NEWS FEATURE

11 ローマ帝国時代に建造された大聖堂の秘密

Virginia Hughes

14 ウェブ上によみがえる大科学者の生涯

Henry Nicholls

## NEWS & VIEWS

17 社会性昆虫の「設計図」が手に入った

Edward O. Wilson

## JAPAN NEWS FEATURE

20 うつと脳 — 相次ぐ分子異常の発見でくつがえる仮説

西村尚子

## BUSINESS NEWS

24 ナノテクと電気ドリルの「良縁」

Colin Macilwain

## 英語でNATURE

26 Whitefly infestations: The Christmas Invasion  
At the sharp end

コナジラミの来襲：クリスマス侵攻作戦  
最前線にて



nature  
DIGEST

12 volume 3 no.12  
December  
www.nature.com/naturedigest

© 2006 年 NPG Nature Asia-Pacific  
掲載記事の無断転載を禁じます。

発行人：デービッド・スウィンバンクス  
編集：北原逸美  
デザイン/制作：村上武  
広告：米山ケイト  
マーケティング：吉原聖豪

NPG ネイチャー アジア・パシフィック  
〒162-0843  
東京都新宿区市谷田町 2-37  
千代田ビル  
Tel.03-3267-8751 Fax.03-3267-8754

**銀河大衝突****Galaxies go head-to-head**

アンドロメダ銀河 (M31) は、銀河進化の研究で重要な存在である。最も近くにある渦巻き銀河であるというだけでなく、局所銀河群の中で最も大きいものの1つだからだ。しかし、アンドロメダ銀河は奇妙な形をしており、その外観は研究者の頭を悩ませてきた。この銀河は、外側のリングが銀河中心核に対してずれていることや、外側の円盤が歪んでいることがよく知られている。今回、ずれた塵のリングがさらに内側にあることが、スピッツァー宇宙望遠鏡の撮影した赤外線画像で見つかった。どちらのリングも、伴銀河が M31 の円盤中心にほぼ正面から突っ込んだ際にできたものであることが、数値シミュレーションを使って示された。突っ込んだ天体は、矮小銀河 M32 であった可能性が高いと考えられる。

19 October 2006 Vol.443 / Issue 7113

Letter p.832, N&V p.762 参照

**中間選挙騒動:****米議会中間選挙での科学という切り札****MID-TERM SQUALL: Playing the science card in the US elections**

11月の米議会中間選挙は大きな山場である。民主党が過半数を占めるためには、上院で6議席、下院で15議席を勝ち取る必要があり、ジョージ・W・ブッシュ大統領にとっては、残る任期の間に勢いを盛り返すか、死に体となって何もできずに交代を待たなければならないという大きな違いになる。激しい選挙戦



では、民主党も共和党も取って付けたように科学の問題を取り上げて、有権者を動かそうとすることがある。胚性幹細胞研究に対する大統領の最近の拒否権発動は、共和党、民主党のどちらにとっても、自党と他党の候補者の違いを際立たせるよい材料となった。3つの州では、候補者が気候変動、幹細胞、それに(カリフォルニア州ではお決まりといえる)クリーンエネルギーなどの「科学的問題」を主な争点として現職に挑んでいる。今週の News Feature 特集では、選挙戦で科学がどのような役割を演じているかに注目する。

19 October 2006 Vol.443 / Issue 7113

News Feature p.740, Editorial p.723 参照

**角膜に血管が存在しない謎****Bloodless evolution**

体内の組織でその中を血管が通っていないものはわずかしかないが、角膜はその1つである。血管の存在しない孤立した場所である角膜は、がん、関節炎、アテローム性動脈硬化症、糖尿病などの病的な血管新生によって悪化する疾患のための抗血管新生療法にテストに使われることが多い。角膜を取り囲む組織には血管が非常に多いため、角膜の血管の欠如はとて目立つ。さらに、角膜には強力な血管新生分子 VEGF-A (血管内皮増殖因子) が多量に含まれることがわかって、この特徴はもっと注目すべきものとなった。そして今回、可溶性 VEGFR-1 として知られる VEGF-A のトラップ分子も角膜に存在し、角膜に血管が存在しないのはこの分子の働きだけによるものであることがわかった。この発見は、薬剤設計の観点から重要となりそうだ。血管がある角膜をもつことが知られている生物は、マナティー、変異マウス、および Pax6 に変異がある無虹彩症の患者の一部などごく少数であるが、これらがすべて角膜の可溶性 VEGFR-1 を欠いていることは興味深い。

26 October 2006 Vol.443 / Issue 7114

Letter p.993, N&V p.928 参照

**ミツバチゲノムの解読: 社会構造の青写真****HONEYBEE GENOME:****A blueprint for social organization**

セイヨウミツバチ (*Apis mellifera*) のゲノム全塩基配列が、国際ミツバチゲノム解読コンソーシアムから公表された。セイヨウミツバチは、授粉媒介者として地球の生態系に不可欠な存在であり、社会的行動の重要なモデル動物でもある。ほかの昆虫に比べると、ゲノムに含まれる先天性免疫関連遺伝子、クチクラ形成タンパク質遺伝子、味覚受容体遺伝子の数が少ないが、嗅覚受容体遺伝子は多く、また花蜜や花粉の利用にかかわる新規遺伝子も見つかった。集団遺伝学的研究からは、アフリカ化ミツバチは交雑によってアメリカ大陸に広まったのか、それとも原産種に取って代わったのかどうかの手がかりが得られた。News and Views



では E O Wilson が、このゲノムに、「ミツバチを高度な社会構造をもつ昆虫へと向

上させた」重大な生物学的変化がどのように表れているかを考察している。

26 October 2006 Vol.443 / Issue 7114

Article p.931, N&V p.919, News p.893, Editorial p.884 参照

**脊索動物は1つの門である****Spinal tip**

大量のゲノム解析データのおかげで、生物学者たちは動物学において最も古くから取り組まれ異論も最も多い問題の1つを解明することができるようになった。それは、脊椎動物とその他の動物との類縁関係である。一見奇妙にみえる系統分類の枠組みが最近いくつか提案されたが、今回 Bourlat たちは、新たな研究でこれらの問題を解き明かし、脊索動物が1つの「門」であることを確認した。また、蠕虫に似た珍渦虫 (*Xenoturbella*) という謎の多い動物が、進化の面からみれば無脊椎動物の中で我々に近い仲間にも属することもわかった。

2 November 2006 Vol.444 / Issue 7115

Letter p.85 参照

**万能ミラー****It's all done with mirrors**

メカニカル共振器の冷却は、重力波検出などの超高精度測定へ応用が可能のため、盛んに研究が行われている。また、この技術を使うと、力学系における古典的なふるまいと量子的なふるまいの間の遷移が観測できるため、こうした冷却は基礎研究においても関心がもたれている。今週号では3つの研究グループが、この分野での進歩を報告している。Gigan たちと Arcizet たちは、放射圧を用いて、微細なマイクロメカニカル共振器、すなわちマイクロミラーの熱振動を凍結した。このミラーは適切な条件下では、外部から影響を受けることなく、室温から約 10 ケルビンまで冷却できた。この技術を改良すれば、マイクロミラーをもっと低い温度まで冷却し、その量子基底状態を実験で観測することが可能になると思われる。3番目の論文では、D Kleckner と D Bouwmeester が、光フィードバックによって、マイクロミラーを1ケルビン以下の温度まで冷却したことを報告している。

2 November 2006 Vol.444 / Issue 7115

Letters pp.67, 71, 75, N&V p.41 参照

**イスラムと科学: イスラム世界は科学の低迷に甘んじるべきか****ISLAM AND SCIENCE: Must the Muslim world stay science-poor?**

※「今週号」とは当該号を示します。

今週号では、イスラム世界の科学と科学者についての特集が組まれている。イスラム教徒が多数を占める国の多くでは、政治権力が世俗主義的な政権から、過去何世紀にもわたって権力を握ってきたイスラム政権やイスラム法へ戻っている。近年、イスラム諸国の多くは、科学や高等教育の分野における実績が低かった。しかし、新しいイスラム政府の中には高等教育の拡大を開始したものもあり、多くが軍事目的の研究とはいえ、研究への投資も行われている。国によって事情はさまざまだが、一部の国では学問の自由への制約も残っている。さらに詳しい状況については19ページ、およびオンライン版の<http://www.nature.com/news/islam>を参照されたい。



2 November 2006 Vol.444 / Issue 7115

News Feature p.19, Commentary p.33, Editorial p.1 参照

### 気候のシーソー

#### A climate seesaw

EPICA プロジェクトの一環として行われた、南極大陸のドローニング・モード・ランドでの掘削で得られた新しい氷床コアは、次の2つの理由から特別なものである。1つめの理由は、その地理的位置である。このコアが南大西洋に面していることから、グリーンランドの氷床コアの記録に直接対応するものが南極域で初めて得られたことになり、これは、両地域が大西洋の子午面循環によって関連している可能性を示唆している。第2の理由は、ほかの近傍の掘削点と比べて堆積速度が大きいために、解像度が高くなったばかりでなく、グリーンランドの記録との同期が改善された点である。この新しいコアに含まれる15万年間の気候記録から、「バイポーラ・シーソー (bipolar seesaw)」の機構によって南極大陸における大規模な温暖化を説明できるだけでなく、北半球のより小さいダンスガード・オシュガーイベントが南極大陸の各イベントに対応することも説明できることがわかる。南半球における温暖化の変化の振幅は、同じ時期に起こった北半球の亜氷期の持続期間と比例関係をもっており、バイポーラ・シーソーの考えを支持する独立した証拠となる。

9 November 2006 Vol.444 / Issue 7116

Letter p.195, N&V p.152 参照

### 四肢動物：陸上生活への長い助走

#### Tetrapods: the long march

進化の過程で起きた水中から陸上への移行は、常に強い興味をもたれてきた話題の1つである。最近、カナダでこの移行途中にあたる化石が発見されたり、かつて魚類に分類されていた化石が四肢動物（もしくは四肢動物に近い動物）として再解釈されたりして、この話題への関心は高まっている。ところが、陸上生活の兆しはもっと前の時代にもみられるのである。オーストラリアのデボン紀層で出土したゴゴナスス (Gogonassus) という3億8000万年前の保存状態の極めてよい魚類の化石は、多くの点で魚類に似ているが、耳や四肢の特徴は予想外の進化を遂げていた。

9 November 2006 Vol.444 / Issue 7116

Letter p.199 参照

### 網膜の修復：

#### 視細胞前駆体で損傷した網膜を修復

##### RETINAL REPAIR:

#### Photoreceptor precursors restore damaged retina

視細胞の欠損は、多くの網膜疾患において不可逆な失明の原因となる。成体の網膜に脳または網膜の幹細胞を移植して損傷を修理しようとする試みでは、新たな視細胞ができることはなく、また、移植された細胞が網膜のニューロンと連結する徴候も視覚を取り戻した徴候もほとんどみられず、大半は失敗に終わっている。今週号では、マウスを使った実験により、移植される細胞が、発生の特定の段階にある分化の方向づけがされた桿体視細胞前駆体である場合、成体の網膜は新しい視細胞を取り込むことができることを示す。発生上の段階は転写因子 Nrl の発現によって示される（表紙中央の細胞の緑色で標識された部分；桿体視細胞の感光色素であるロドプシンは赤色で示される）。今回の研究の結果により、胚または成体由来する幹細胞から移植に適する細胞を作製することへの道が開かれるであろう。さらにこの知見は、中枢神経系の修復には未分化の幹細胞が最適とする一般的な思い込み、異議を唱えるものでもある。



9 November 2006 Vol.444 / Issue 7116

Letter p.203, N&V p.156 参照

### ケーキを食べても大丈夫

#### Let them eat cake

「もうケーキをあきらめなくてもいい!」、「太って飲み放題でも健康でいられる!」、「若さの泉」といった見出しは、本誌オンライン版の論文「レスベラトロールは高カロリー餌摂取マウスの健康を増進させ、寿命を延長させる」の発表に際してのものだ。この論文は、高カロリー食を与えられているマウスに、赤ワインに含まれるレスベラトロールを経口投与すると、低カロリーの食餌を与えられているときの生理的影響の多くを再現でき、健康と寿命に改善がみられることを明らかにしている。投与量は、ヒトの場合に換算して摂取可能な量（ただし赤ワインでの摂取では1日何百本も飲むことになり、副作用が出てしまうので不可）である。今週はこの論文をじっくりと読みましょう!

16 November 2006 Vol.444 / Issue 7117

Article p.337, N&V p.280 参照

### ネアンデルタール人のゲノミクス：

#### 100万塩基対分のDNAを解読

##### NEANDERTHAL GENOMICS:

#### A million DNA base pairs sequenced

ネアンデルタール人を示す形質は、およそ400,000年前にヨーロッパや西アジアの人類化石記録に現れ、およそ30,000年前に消失した。ネアンデルタール人は我々現生人類に最も近い絶滅人類であり、そのため、DNA技術が進歩するにつれて、完全な現生人類に特徴的な遺伝的変化を解剖学的に突き止められるのではないかという期待が高まっている。今回、100万塩基対を超えるDNAを抽出できるほど良質の、38,000年前のネアンデルタール人の骨が見つけ出された。これはもともと、1980年にクロアチアのヴィンディヤ洞窟（表紙写真）で見つかったもので、この骨のDNAをチンパンジーゲノムおよびヒトゲノムと比較したところ、ネアンデルタール人とヒトの祖先の有効集団サイズは、類人猿の場合とは違って、ヒトの場合に似た小さいサイズであることが明らかになった。この研究で使われた技術からすると、ネアンデルタール人の概要ゲノム配列は2年以内に得られそうである。



16 November 2006 Vol.444 / Issue 7117

Article p.330, N&V p.275, News p.254 参照

# 環境保護活動家たちと 手を結ぶべきか手を切るべきか

## To build bridges, or to burn them

Nature Vol.443(481)/5 October 2006

論説

科学技術に苛立ちを強めている環境保護活動家たちを、理屈が通じない相手として退けるべきではない。

「誰の意見も等しく貴重だとは限らない。」

もしこの言葉が驚きをよぶとすれば、それは、教室の中やラジオのトーク番組、ブログや政治活動などで、誰かがいった独断的な意見にもすべて価値があるとみなされる文化が存在していることの証である。こうした文化が、科学研究施設への放火など各種の戦法を用いる少数の環境保護団体を生み出したとっては誇張になるだろう。しかし、両者はつながっている、という主張は確かにできる。

*Nature* 10月5日号には、米国北西部での過激な環境保護運動に関する記事が掲載されている。それによると環境保護活動家たちは、彼らが望ましくないとみなした研究を行っている研究施設を襲撃したとされる。この襲撃に実際に関与した人々の数は案外少なかったが、彼らの支援母体はかなり大きい。

環境保護研究に携わる科学者は、この大きい支援母体との対話を維持すべきである。ただし、それは容易なことではない。感情的な議論に対して上から物をいう態度、もしくは懐疑的な態度を少しでもみせてしまえば、論理性があいまいでも非常に固い信念に支えられている一部の世論は、直ちに遠ざかっていくだろう。

問題の襲撃事件の実行者たちは「地球解放戦線」(ELF)のメンバーだと名乗っている。彼らが放火したのは、例えば樹木の遺伝子操作や野生動物の間引きにかかわっていると彼らが確信した研究施設だった。彼らの動機はまず間違いなく、問題とする科学研究の倫理性に関する自分たちの判断が他のすべての人々の判断に勝る、という信念からきている。おそらくそれに加えて、犯罪行為そのものがもたらすスリルもあっただろう。

### 感情的な反応

ELFの公式声明や著作物、その犯罪行為の支援者とのインタビューなどをみると、多くのこうした活動家たちが、直感や感情的な反応、個人主義にあまりにも大きな価値を置き、その中で堂々巡りをしていることが明らかである。この種の活動家は、ロマン主義の情熱的なアメリカ人だとみることもできよう。ただし、崇高なものを単にあがめるだけではすまず、それを守るために他者を攻撃しようとするところを避けばの話だが。

活動家たちのこうした見方が科学的方法と衝突することは、しごく容易に想像できる。科学的方法とは、感情を排して客観的計測と合理性を優先するものであり、また、自らも批判的審問を受けることで前進するものだからである。

しかし、この内在していた衝突が、多くの過激な環境活動家がイメージする科学者像によってさらに大きく燃え上がり、膨れ上がっている。彼らは科学者を、事実を装った見解を表明する抑圧的なエリート階級だとみているのだ。こうした科学者の見解は、金持ちや権力者の利益にかなうように簡単にねじ曲がるものだと、活動家の多くが感じている。また、社会問題を科学的に解決するともてはやされたもの（例えば DDT、サリドマイド、原子力）が、うたい文句通りの成果を上げなかったと考える活動家もいる。そのため、この新世代の環境活動家の多くは、科学技術に対して深い不信感を抱いている。

研究所やその他の標的への襲撃を引き起こす少数派の新世代活動家たちには、若さ、情熱、そして抑えきれない自信がある。彼らは憤りを感じており、理想主義的で、自分のなすべきことを感じ取り、切迫した気持ちになっている。そして、自分が正義のために戦っていると考えており、そのためにはもはや科学を必要としていない。この点は創世記を信ずる人々と似ているが、これ以外の点で両者の間に共通性はほとんどない。こうした環境活動家の場合、真実とは自らの心の中から聞こえるものだ。そして彼らは、個人主義的で相対主義的な文化において、自分たちの意見も他人の意見も等しく正当だと考えている。彼らは一部の研究を認めず、特に遺伝子操作や動物実験が関係するものはいっさい容認しない。そこで、「ドッカーン」とやるわけである。

こうした過激な活動を支援する数名の話によれば、長期にわたって辛抱強く行われた野外研究やコンピューターモデル、入念なデータ探索などは軽蔑の対象でしかないのだという。環境は危機的状態にあり、今こそ行動の時だと彼らは話す。彼らの中には、科学それ自体に、維持するだけの価値がないと考えている者もいる。科学とは、芯まで腐った文明の一側面だ、と彼らは考えているのだ。

### 主張の応酬

科学的方法と真っ向から対立する規範があり、それが長年の熱狂的な主張の応酬を通じて強化されてきたコミュニティの人々に対して、なぜ科学者のほうからわざわざ対話をもちかけるべきなのだろうか。それは、この集団がもっと大規模な環境保護運動の内部に影響力をもっており、したがって今日の政治状況において強力で建設的な要素となる可能性を秘めているからである。

科学界がこのようなむずかしい領域に対して影響力を保持するための最も有力な手段は、自らのありのままの姿を学校や大学、テレビ、そしてインターネット上で熱心にたゆまずみせていくことである。その姿とは、エリートが上意下達で決めた一連の規範などではなく、人類が直面する困難、もしくは解決困難に近い山ほどの問題を調べる一連の方法である。

科学界とその支援者は、例えば自然の生息環境がどう機能しているかを知るうえで、科学がいかに関与するかを強く主張すべきである。そうすることで、科学の本質的要素がじっくりと育まれることになる。冷静さと補足説明を十分に伴えば、ときには科学も政策立案者の心を動かすことができる。また、技術の中にも貴重な資源を浪費しないですむものがある。こうした技術の多くは、むしろ貴重な資源を節約してくれるだろう。

過激派の中でも過激な ELF と「動物解放戦線」(ALF) の信奉者は、決して納得することはないだろう。しかし、それほど過激ではないが環境について積極的に考えている支持者たちは、もっと大きなグループを形成しており、各地でデモ行進に参加し、科学に対する見方も共通している。もし研究者が感情的な主張を鼻であしらうことをやめ、科学の窓を通してみれば、この世界がより明確に見えることを実証していけば、このグループにいる大勢の人々が科学に抱く考え方を変える可能性は高まるだろう。 ■

# 笑顔の遺伝子？

## Is your smile in your genes?

顔の表情は遺伝する可能性のあることがわかった。

doi:10.1038/news061016-2 / 16 October 2006

Anisa Abid

INTLST. CLAIR PHOTOGRAPHY / PICTUREARTS / NEWS.COM

兄弟や両親に表情がそっくりだといわれた経験、誰にでもあるのではないだろうか。家族とは一緒に過ごす時間が長いから、自然と表情が似るのだと思われるかもしれない。ところが研究の結果、こうした家族の「しるし」は、遺伝する可能性のあることがわかった。

ハイファ大学（イスラエル）の Eviatar Nevo たちは、表情をまねて似せているのと遺伝の影響とを区別するために、生まれつき目の見えない人たちに着目した。

Nevo たちは、「目の見えない人たちは、他者の顔に触れることで表情を識別している」という世間の認識には誤解がある、と指摘した。顔がどのように見えるかというメンタルモデルがないことには、目の見えない人たちが、手で触って感じられる表情を実際の感情に翻訳するのはむずかしいという。

### 表情を比較する

Nevo が率いる研究チームは、目の見えない参加者 21 人とその血縁者 30 人に対して、特定の感情をよび起こすような記憶や状況を頭に思い浮かべてもらい、その面談の際の表情をビデオカメラで撮影した。この面談を通じて研究チームは、43 種類の表情（連続的な表情も含む）のカタログを作成し、その一部には被験者間で共通性がみられることを認めた。

次に、研究チームはコンピューターで表情を解析し、似た表情の対応関係を調べた。しかし、実験への参加者が少なかったことから、研究チームは統計解析の精度を上げるためにここでひと工夫した。まず、目の見えない被験者 1 名を選び、残りの全参加者を無作為に 2 つのグループに分けて、対象被験者の表情がどちらのグループの表情



その笑顔はママゆずり、パパゆずり？

とよりよくマッチするかをみていった。この操作を繰り返し行い、全参加者をあらゆる組み合わせで 2 つのグループに分けては、対象被験者と 2 グループとの表情の比較を続けて行った。

その結果、目の見えない人の表情は、その家族が含まれるほうのグループと 80% の確率でマッチすることが判明した。研究チームは、笑顔や険しい表情の裏には遺伝的特性が存在することを確信した。

あらゆる表情の中でも、怒りの表情が血縁者間で最も高い確率で似ていた。続いて似ているのが、順に、驚き、嫌悪、喜び、悲しみで、何かに集中したときの表情が最も似ていなかった。研究の成果は、*Proceedings of the National Academy of Science* に報告されている<sup>1</sup>。

### 表情の遺伝子を探る

顔の表情に普遍的な類似性があることを報告した研究は過去にもある。例えば、怒りの表情は、文化が異なってもほぼ同じように見える。あのダーウィンも 130 年ほど前に、目の見えない人たちが健常者とほぼ同じ表情を見せる

ことについて言及している。

しかし、家族間の類似性に注目した研究は、これまでほとんどなかった。過去に双子を対象に行われた研究はいくつかあったが、幸福や恐怖の表情に類似性が認められるとされたものの、多くの場合で被験者となった双子は一緒に生活していたため、類似性の原因が「模倣」であることを除外できなかった。

それが今回、目の見えない被験者を対象としたことで、新たな探求の道が開かれた。「研究のアイデアそのものがとても興味深い」と、ミネソタ大学ミネアポリス校（米国）の心理学者 Thomas Bouchard Jr は語る。「家族の表情を生まれてから一度も目で見たことがない人たちに注目した今回の研究は、とてもユニークなアプローチだ」。

この研究の次の段階は、関与する遺伝子を見つけることにある。そうした情報が得られれば、顔の表情が失われる疾患の研究にも役立つものと考えられる。■

1. Nevo E., et al. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **103**. 15921-15926 (2006).

# 雨は大地を震わせる

## Rain makes the ground shake

大量の雨が降ったときには、地震に気がつけたほうがいいかもしれない。

doi:10.1038/news061016-15 / 20 October 2006

Philip Ball

大量の雨が降ると、それだけで地震が起こりうる。ドイツの地質学者たちの研究チームは、バイエルン地方の山地における微小地震を観測した結果、こう結論づけた。

研究を行ったのは、ポツダム大学の Sebastian Hainzl らのグループだ。Hainzl は、雨が地面に染み込むと多孔質の岩の中の水圧が上昇し、わずかな変化によってすべりが起きる状態にある断層が、地震を起こす引き金となりうるという。Hainzl の共同研究者で ルードヴィヒ・マクシミリアン大学（ドイツ、ミュンヘン）の Toni Kraft は、「小さな変化が大きな結果を引き起こす」と話す。

岩の間隙水圧の変化が地震の引き金になりうる、という考えは広く知られている。だとすれば、地震活動は、降水量の変化に変動のある季節ごとに変化している可能性がある。

しかし、降雨と地震の関連はまだ立証されていない。一般には、地震が起きるには、降雨によって生じる流量よりもずっと大量の水の流れが必要だと考えられている。

例えば、満杯になった貯水池が地震を引き起こすことがある。その理由は、水の重みのためか、あるいは岩に水が浸透するためかのいずれかだとみられている。なかでも最もよく知られた例の1つが、1967年にインド西部で起きたマグニチュード7で、1962年に完成したコイナダムによってできた貯水池が引き金になったと考えられている。この地震では、200人が死亡した。

雪解けによる圧力の変化も、地震につながる可能性がある。しかし、降雨による地下水の量や流れの変化は、雪解けに比べてずっと小さい。



雨の多い季節は地震活動も多く観測された（ドイツ・バイエルン地方）。

### 雨で微小地震が激増

Hainzl たちは2002年、ドイツ南東部バイエルン地方のシュタウフェン大山塊にある、ホッホシュタウフェン山（標高1775メートル）の地下で起きる地震を監視した。そこでは通常、年間1000回を超える微小地震が起きる。彼らは、雨が比較的多い夏に、地震活動がほかの季節よりも活発だったことを発見した。

雨と地震が関連しているかどうかを検証するため、研究者たちは、日ごとの降水量を基に、岩の中の水圧がどう変化するかを推定した。そして、得られた水圧変化の記録から、地震の発生率を予測した。するとこの予測は、毎日の地震動の数と大きさによく一致したのである。

特に3月と8月には雨が大量に降った。「その後、1日に1～2回だった地震活動が最大で40回にまで増加した」と Kraft は話す。

### 破壊寸前の地殻

研究チームは、この地域の断層は既にすべり始める瀬戸際の状態にあるため、

ほんのわずかな変化によって地震が引き起こされるのだと考えている。

では、雨が地震の引き金となりうる地域というのは、もっと大きく、もっと危険な地震が起こりうる地域でもあるのだろうか。「私はそう考えている」と Kraft は話す。かつて、世界のほかの場所でも、地震活動と降水量との関連が指摘されているところがあった。今回の研究結果は両者の関連を支持するもので、そうした場所もまた、地殻の破壊が始まる間際にあるのかもしれないと Kraft はいう。

スタンフォード大学（米国カリフォルニア州）の地球物理学者 Mark Zoback も、この意見を支持する。「多くの場所で、浅く、もろい地殻が壊れ始める寸前にあり、雨が地殻破壊のきっかけとなることは十分にありうる」と彼は話す。しかし、もっと深いところで起こる地震に関しては、水がそこまで染み込むのに何年もかかる可能性があり、はっきりとした因果関係を示すのはむずかしいだろう、と Zoback は指摘している。 ■

1. Hainzl S., et al. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L19303 (2006).

# How much will it cost to save the world?

## 地球を救うのに必要な金額は？

Nature Vol.444(6-7)/2 November 2006

スターン報告書は、地球温暖化がもたらす経済的損失をめぐる議論に決着をつけるものではない。むしろ、議論をヒートアップさせる材料として意義がある。Jim Giles が報告する。

ニコラス・スターン (Nicholas Stern) は、高く評価されている研究者であり、かつては世界銀行のチーフエコノミストとして活躍していた。その彼が、英国の財務大臣にして次期首相のよび声の高い Gordon Brown の依頼を受けて、1年がかりで報告書を書き上げた。この作業には、英国屈指の頭脳をもつ20人以上の官僚と学者が協力している。はたしてスターンは、気候変動が世界経済に及ぼす影響をめぐる議論に終止符を打つことができたのだろうか。

もちろん、そんなことは不可能である。10月30日に発表された『気候変動の経済的影響に関するスターン報告書』は、「今後の模範となるべき、質の高い、徹底した報告書」として多くの経済学者から賞賛されている。しかし、「気候変動対策にかかる費用は、なんの対策もとらなかった場合に生じる損失のわずか20分の1である」という主張をはじめとする過激な結論は、右派のコメンテーターやその他の経済学者からただちに攻撃された。一部の論者は、「この報告書は相当に複雑な問題にまで言及しており、科学文書というよりはむしろ政治文書と見るべきだ」とも指摘している。気候学の有効性をめぐる議論が終息しつつある今、気候変動対策のために世界はいくら支払うべ

きかという問題をめぐって、新たな論争が始まろうとしている。

「温室効果ガスの排出量が今日のペースで推移すれば、22世紀初頭には世界の国内総生産 (GDP) の5~20%が失われる」と予測するスターン報告書は、一見、厳しい規制を求める人々に有利な材料を提供しているように思われる。「これにより初めて、気候変動がもたらす損失をドルで示せるようになりました」と、非営利団体『全米環境トラスト』(米国ワシントン DC) の Philip Clapp は話す。

「同じくらい重要なのは、気候変動対策には多額の費用がかかるという石油石炭業界のキャンペーンに反論するための根拠を与えたことです」と Clapp はいう。報告書では、温室効果ガスの濃度を産業化以前の2倍程度で安定させるための費用は、GDPの1%という比較的少額ですむとされている。これは、排出枠の義務化や環境保全技術に対する公共投資といった政策を強力に擁護することになる。肝要なのは、今、着手すれば、あとで着手するよりもずっと少ない費用ですむということだ。

一部のマスコミは、スターン報告書にセンセーショナルな見出しをつけて報道した。英国のある新聞は、「直ちに行動しなければ、母なる地球は永遠に失われてしまう」とまでいい切った。

けれども、マスコミの騒ぎぶりは、スターン報告書の信頼性とは無関係である。同報告書の擁護派は、この報告書が最高レベルの手法に基づいて作成されていることを強調する。数十年間の社会的変化や経済的变化を考慮しながら、気候変動がもたらす損失を見積もることは、非常にむずかしい。しかし同報告書は、気候変動対策費用に関する既存の研究の包括的なメタ分析を行っているほか、気候変動が世界のGDPに及ぼす影響に関する既存の研究に基づいてモデルを作り、そこから新たな知見を導き出してもいるのである。

### 避けられない批判

報告書では、気候変動によるGDPの損失が最大で20%に達するとされており、従来の見積もりに比べて高い値になっている。これにはいくつかの理由がある。1つは、エコノミストが現在と将来のコストを比較する際にパラメータとして用いる公定歩合を、低めに設定していることである。もう1つは、気候感度(温室効果ガスの濃度が一定量増加したときに地球全体の気温がどれだけ上昇するか)につき、幅のある値を採用していることである。幅のある値を用いると、GDPの損失の上限が高くなるが、その方がより現実的なのである。

ロンドン大学インペリアルカレッジのエネルギー経済学者であり、スターン報告書の作成にもかかわった Michael Grubb は、「この報告書が過去の経済分析に比べてはるかにすぐれていることは明らかです」と胸を張る。とはいえ、同報告書が多くの仮定に立脚していることは否定できない。多くの右派コメンテーターがこの点を根拠に報告書を批判しており、なかには報告書の発表前から批判を始める者もいた。とくに批判されているのは、報告書が採用した世界開発シナリオである。地球の総人口が150億人になるとするこのシナリオは、人口統計学者から非現実的だと批判されている。

経済学者の反応も早かった。プリンストン大学の経済学者である Richard Tol は、報告書の発表から数時間でまとめた全4ページの論評の中で、スターンが引用する研究報告には偏りがあると批判している。「スターン報告書は、水、農業、健康、保険に関して、常に最も悲観的な研究文献を選んでいきます。」

Tol は海面上昇の問題を例にとり、海岸防護の強化が果たす役割が過小評価されていると批判する。気候変動対策の専門家であるコロラド大学ボルダー校の Roger Pielke 2 世も、自然災害と気候変動との関係について、文献の中から危機感をあおるような部分だけを選んで紹介していると批判する。

チンダル気候変動研究センター（英国ノリッジ）のセンター長である Mike Hulme は、スターン報告書がこのような批判を受けるのはしかたがないことだと考えている。Hulme はいう。「私自身も、気候変動対策の総費用に関する研究をしてくれないかと、英国政府から何度も依頼されてきましたが、そのたびに断っていました。研究者に答えられる問題ではないと感じていたからです。海岸防護などの対策の効果を推測することのむずかしさは、問題の一部にすぎません。種の絶滅がもたらす経済的損失の評価など、その他の仮定も加わってくると、不確定要素が多くなりすぎて、

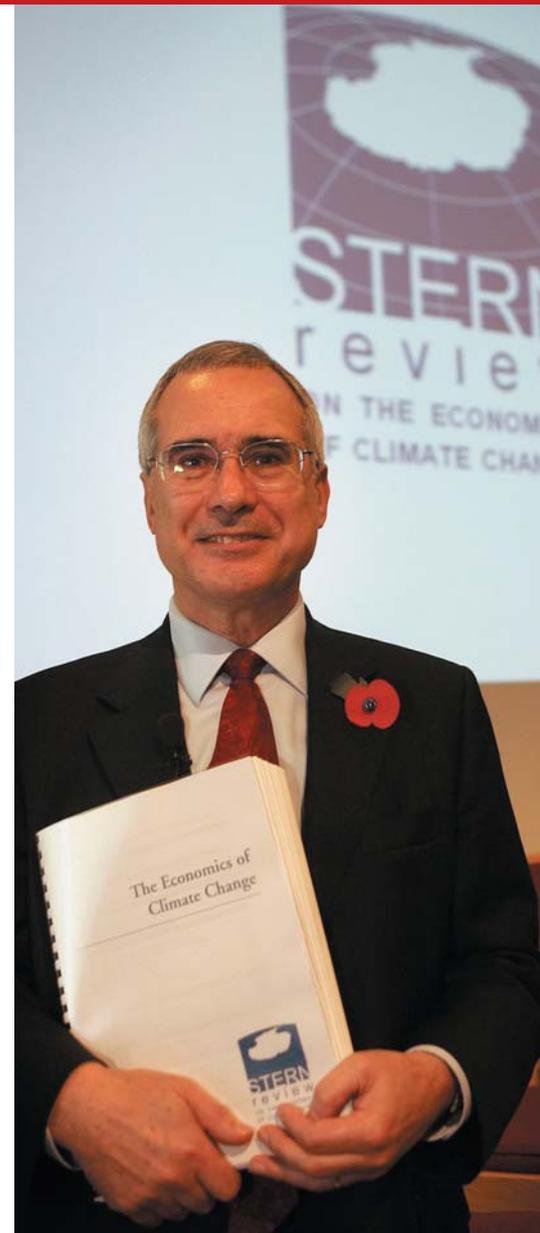
結果の正当性を主張することができなくなるといったのです。」

Hulme は、スターンのチームが良い仕事をしたと評価する一方で、その報告書が、政府に任命されたチームにより、多くの仮定にもとづいて作成されたことを忘れてはならないと指摘する。「これは、科学者や経済学者が出した結論ではなく、官僚が出した結論なのです。」

### 答えは何兆ドル？

スターン報告書の作成にかかわった学者の1人は、「報告書における仮定は、いずれも信頼できる科学原理や経済原理に基づいており、不確定要素が結論に及ぼす影響についても明記されています」と *Nature* に語った（これはスターンチーム全体の意見であるという理由から、彼は匿名でインタビューに応じた）。彼はまた、官僚の関与によって報告書が政治的色彩を帯びているという批判は的外れであるだけでなく、危険でもあると主張する。「高めの数値を出せという政治的圧力が加わったことはありませんでした」と彼はいう。

こうした批判は当初から予想されていたものであり、それによって報告書の影響力が弱まるということはない。11月6日から京都議定書の今後についての交渉が行われることになっている（「京都議定書以降の展望」参照）が、この報告書は、温室効果ガスの排出規制を強化していきたい英国などの国々に強い論拠を与えることになるだろう。スターン報告書では、こうした規制を実現するための方法についても検討されている。1つは、欧州連合内で現在実施されている排出権取引制度を全世界に広げるといった方法であり、報告書の作成が始まった当初からブラウン財務大臣が支持していたものである。同報告書は、公共部門のエネルギー研究費の大幅な増額の必要性にも言及している。温室効果ガスの排出量を削減するためには太陽電池やバイオ燃料の改良などの技術開発が必要であるが、市場要素だけではこうした動きを作り出せないからである。



金庫番：ニコラス・スターンの報告書は気候変動に値段をつけた。

スターン報告書は、気候変動がもたらす損失を具体的な数字で表現したことではなく、気候変動関連予算をめぐる論争を活性化させたことで評価されることになるのかもしれない。Hulme は、新聞の見出しを飾った結論の背後にある仮定を疑問視しながらも、スターン報告書は基本的に正しいと考えている。「ある意味、具体的な数字を信じるかどうかは取るに足らないことなのです。スターン報告書は、対策をとるための費用から、対策をとらなかった場合の損失へと、論争の焦点を転換させることになるでしょう。」 ■

## 京都議定書以降の展望

11月6日から、180か国以上の代表者数千人がケニアのナイロビに集まり、気候変動にかんする京都議定書についての会議を行う。これは、一部で批判されているような「不毛な官僚主義の見本」になるのだろうか、それとも、外交的・経済的な突破口を開くことができるのだろうか。

京都議定書は、その構想時から各国の意見が二分していた。この議定書の締約国は、2012年までに温室効果ガスの排出量を平均5%削減（1990年比）することが義務づけられる。削減義務を負うのは先進国だけであり、中国、インド、ブラジルなどの主要開発途上国は義務を負わない。2001年には、国内経済への悪影響を理由に、米国とオーストラリアが議定書から離脱した。

その後、2005年にロシアが議定書を批准し、批准した先進国の1990年時点の二酸化炭素排出量の合計が全体の55%に達したことで、京都議定書はようやく発効した。

排出量の測定と評価が行われる第1約束期間は2008～2012年であるが、いくつかの取り組みはすでに始動している。欧州では排出量取引制度が2005年1月にスタートし、二酸化炭素排出量の多い企業が少ない企業から排出権を買い取っている。この制度により実際に排出量が減少したのかどうかは明らかではなく、排出枠の設定が高すぎるという批判もある。しかし、この制度はよく機能していると評価されており、欧州の排出権取引市場が世界の排出権取引制度の中核となると考えられている。

京都議定書は、代替エネルギーや森林再生プロジェクトへの資金提供などを通じて開発途上国の排出量の削減やゼロ化に協力した先進国にクレジットを与えている。2005年にスタートしたクリーン開発メカニズム（CDM）は開発途上国への協力を対象としており、2006年10月にスタートした共同実施

（JI）制度には、中東欧の先進工業国との協力も含まれている。

これらの制度は、富裕国の二酸化炭素の排出量を実際に削減させるために考案されたものである。しかし、「富裕国が国内のエネルギー効率を向上させるための努力を怠ることを可能にする制度であり、安易な排出量削減を目標とするプロジェクトばかりで、新技術への投資を促進するものになっていない」と批判する人もいる。

それでも、取り組みは着々と進んでいる。計画中または進行中のCDMまたはJIプロジェクトは約4000件に達しており、そのほとんどが、欧州連合（EU）および日本の民間投資家からの資金提供を受けている。そのすべてが成功するわけではないにしても、うまくいけば2.2ギガトンの二酸化炭素に相当する排出量が削減されることになる。これは、EUが2012年までに削減しなければならない排出量の約7倍に当たる。

このような制度が必要であることは明らかだ。京都議定書締約国のうち、カナダ、日本、一部のEU加盟国をはじめとする多くの国々が目標達成にはほど遠い状態にあり、今後、たいへんな努力が必要になると予想されるからである。

排出量の削減が進まない理由は、国によってさまざまである。日本では、産業の成長がその理由である。2012年までに1990年当時の94%まで温室効果ガスの排出量を削減しなければならないというのに、現時点では反対に同108%まで増えてしまっている。カナダでは、政権交代とアルバータ州の油田からの収益への期待により、京都議定書のための取り組みが政策課題から抜け落ちてしまった。この3月には、2012年の目標達成が絶望的であることを早々と宣言している。

イタリア、スペイン、オーストリア、フィンランドも苦戦しており、2012年が近づくとつれて、多くの国々が余剰

排出権の買い集めに走ることになる予想されている。その際に、ロシアとウクライナが問題を引き起こす可能性がある。旧ソビエト連邦の政治的・経済的崩壊により両国の排出量は大きく減少したが、今後、排出権の余剰分を売却する可能性が高い。両国が短期間のうちにこれを大量に売却すれば、排出権の取引価格が急落するおそれがあるのである。

もう1つの問題は、各国が目標を達成できたか否かを判定する方法と、目標を達成できなかった国に対する措置が明確にならないことである。議定書では、目標を達成できなかった国は排出権の取引ができなくなり、2012年以降の第2約束期間に未達成分の1.3倍を削減することになっている。しかし、京都議定書遵守委員会では、各国の二酸化炭素排出量を測定する方法や、議定書を遵守しない国々に遵守を強制する方法を決めていない。目標を達成できないおそれの出た国々に対する早期警告すら発していないのだ。

各国が目標を達成するには厳しい決定をしなければならないが、これだけの不確定要素があると、そのような決定をする意欲がもてるかどうか不透明になってくる。排出量の評価と議定書の遵守に関する問題はナイロビで討議されることになっているが、2012年以降の交渉については議題にすらあがっていない。

この不透明さにうんざりした一部の気候政策アナリストは、京都議定書を廃棄して、より多くの国（とくに米国）や地域の支持が得られる新たなタイプの条約を締結するべきだと主張している。京都議定書がこの先も生き続けるかどうかはわからないが、気候に関する将来の取り決めにとって確固たる基盤となることは明らかである。

Quirin Schiermeier

# Shaken, not stirred

## ローマ帝国時代に建造された大聖堂の秘密

Nature Vol.443(390-391)/28 September 2006

トルコのイスタンブールにある見事なビザンチン建築の大聖堂、ハギアソフィア。このおごそかな建築物は、1500年近くの間、数多くの地震が起こる地域で堅固に立ち続けている。そのわけを Virginia Hughes 記者が探った。

イスタンブールは動いている都市だ。仕事を求めて地方から流れ込む移住者の増加により、その人口はここわずか40年の間に200万人から1000万人へと急増した。移住者の多くは、大急ぎで建設された耐震性の考慮されていない高層コンクリート建築に住む。

これは問題だ。というのも、イスタンブールは北アナトリア断層（次ページ地図参照）の近くにあり、文字通り「動いている」からである。1999年、マグニチュード7.4の地震が起こり、イスタンブールから東へ100キロにある都市イズミットとその周辺の約1万8000人が死亡、1万5000棟を超える建物が崩壊した<sup>1</sup>。イスタンブールにあるボアジチ大学の地震工学者 Mustafa Erdik らが

行った最近の分析によると、もし、同規模の地震がトルコ最大の都市であるイスタンブールを襲えば、死者はおよそ2倍、約4万棟の建物が壊れるかもしれないという<sup>2</sup>。そして心配なことに、そうした地震が起こる可能性は高い。

しかし、イスタンブールの著名な建築物の中には、1500年もの間さまざまな地震に耐えてきた歴史をもつものがある。それがハギアソフィアだ。高さ55メートルで円蓋（ドーム）をもつ、レンガとモルタルでできた建造物である。この建造物はどうやって地震の応力に耐えてきたのか。はたして設計者は耐震性を考慮に入れて設計を行ったのか。建築史学者たちは、何十年もそうした議論を繰り返してきた。近年、コンピューターに

よるモデル解析と化学分析が進み、こうした長年の議論を再燃させるような手がかりが得られつつある。東ローマ帝国時代の建設者は、新技術を発明したのだろうか。あるいは単に幸運に恵まれただけだったのだろうか。イスタンブールが次の大地震に見舞われたとき、ハギアソフィアは崩壊するのだろうか。あるいは、がれきの中に立ち残る、唯一の建築物となるのだろうか。

### 斬新な構造

ハギアソフィアは、地球物理学的にも政治的にも宗教的にも不安定なことで有名な、この土地で持ちこたえてきた。イスラム教のオスマントルコが1453年に侵入してきたとき、彼らはハギアソフィア

をキリスト教のバシリカ式聖堂からモスク（イスラム教寺院）に変えた。そして1935年、トルコ政府は、ハギアソフィアを博物館に変え、宗教色を打ち消した。

もともとの建物の建設が始まったのは西暦532年。東ローマ帝国の皇帝ユスティニアヌス1世の命令で作られた。ハギアソフィアはギリシャ語で「聖なる英知」を意味し、伝統的なバシリカ式聖堂の長方形の設計と、ローマのパンテオンなどの帝国の建物にみられる、中央部に円蓋のある作りを組み合わせた最初の建造物となった。皇帝は費用を惜しまなかった。この教会の建設には、金に換算して14万5000キロ（現在の約3500億円相当）の費用がかかり、かつて作られたものの中でも最も高価な建造物の1つである。

そして、世界最高の教会を建てるにあたり、当時の最高の専門家2人選ばれた。トラレスのアンテミオスと、ミレトスのイシドロスである。プリンストン大学（米国ニュージャージー州）の地震工学の名誉教授であるAhmet Çakmakは「アンテミオスはユスティニアヌス大帝が抱えていた最高の軍事工学者だった。イシドロスは世界最大の科学アカデミーのトップだった。いわば、自宅を建てるのに（物理学者で原爆開発を指揮した）オープンハイマーを雇うようなものだ」と話す。

Çakmakは子供時代にハギアソフィアを何度も訪れたが、ずっと地震に興味を持ち続けた。そして23歳のとき、プリンストン大学で教えるためにトルコを去り、10年あまり後にイスタンブールの人口が急増し始めるときには、すでに工学系学科の教授になっていた。Çakmakの興味の中心は理論的な研究にあり、子供時代によく訪れた建造物の実際的な研究に関心をもったのは、1980年代も半ばになってからのことだったという。

彼の工学的研究の共同研究者であるRobert Markは当時、建造物がどうやってその荷重を支えるのかを示すコンピュータモデルを作っていた。Markの研究で明らかになったことの1つに、

中世の建築者たちはおそらく、モルタルのひびを観察することで「フライング・バットレス（飛び梁＝建物の壁を横から支えるために控え壁へ渡した弓形の梁）」を発明したであろうということがある<sup>3</sup>。ÇakmakはMarkに、ハギアソフィアを対象に同種の研究をするようにすすめた。「この技術はまだ使われ始めたばかりだった」とMarkはその頃を振り返って話す。

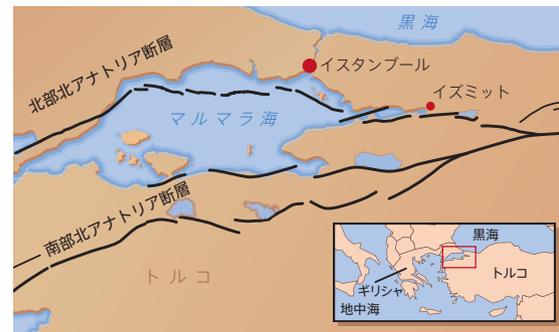
2人は協力して、地震などのさまざまな条件のもとでハギアソフィアがどのように揺れるかをシミュレーションできるコンピュータモデルを作り上げた。以来、2人はシミュレーション結果について議論を繰り返すことになる。

現在のハギアソフィアは、円蓋、バットレス（控え壁＝建物の壁を外から支える出っ張り構造）、支持壁、そしてミナレット（イスラム教寺院に付属する高い塔）の寄せ集めだ。これらは宗教上や修復の名目で何度もつけ加えられた。しかし、コンピュータモデルは、ハギアソフィアの構造上の強さは、もともとある四角形の中心部に由来することを示している。

ハーバード大学（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）の建築史学者Rabun Taylorは「ハギアソフィア以前のほぼすべての円蓋構造は、基本的に円筒形の上に円蓋を載せる構造だった」と話す。対照的に、ハギアソフィアは、四角形の各側面に作られた4つのアーチの最上部に円蓋が載っている構造で、円蓋を支えるアーチはそれぞれ、四角形の隅にある支柱まで延びている。「これは新しい構造だった」とTaylorは話す。

ハギアソフィアのペンデンティブも新しいものだった。ペンデンティブとは、正方形の平面の上に円蓋を作るために四隅に設けられた三角形の曲面部分のことだ。レンガとモルタルで作られ、円蓋の下辺と4つのアーチの頂上との間が滑らかにつながるようになっている。

しかし、アンテミオスとイシドロスは、微積分やニュートンの力学法則の発見の前に、どうやってこうした構造



を設計したのだろうか。工学者と建築史学者の間では、2人が持っていたであろう知識と技術革新の程度については意見に食い違いがあるものの、当時の建築家は、単純な幾何学的比率とパンテオンなどの既存の建物の実例にもとづいて設計したはずだという点で大多数は一致している。

### 窓と軽いレンガと特殊なモルタル

Markが1980年代後半にパンテオンの円蓋をモデル化するまで、ほとんどの建築史学者は、ハギアソフィアの円蓋の窓は単に視覚的効果のために設けられたものと考えていた。直径31メートルの円蓋には全部で40個の窓があり、円蓋を支えるレンガとモルタルのリブ（ろっ骨状の補強）の間に1つずつある。Markの研究で、この窓はひび割れを避けるためにつけ加えられたらしいことがわかった<sup>4</sup>。「当時の建築家はパンテオンを調べ、その場所では窓の軸方向に沿ってひび割れる傾向があることを知った。だから彼らは、ひび割れをある意味あえて自らつける目的で窓を作ったのだ」と彼は説明する。

コンスタンチノーブル（イスタンブールの旧称）で地震活動が活発なことは、当時から知られていた。円蓋に設けられた窓は効果があったはずだ。ハギアソフィアはゆうに10回を超える大地震にあったが、損害は部分的なものにとどまり、持ちこたえた。その理由として、まずはアーチとペンデンティブが考えられる。揺さぶられたとき、それらが円蓋の重さを4つの支柱に均等に分配するからだ。しかし、この教会を作り上げているレン

ガとモルタルそのものにも理由があった。

現代の耐震ビルは、振動に耐えるために、軽かつ柔軟に設計されている。ハギアソフィアも軽くて柔軟で、時代のはるか先を行っていた。レンガは、帝国の当時のほかの建物で使われたレンガよりもずっと軽く、より多孔質だ。Çakmakの研究で、レンガは砂と石灰を正しく反応させるため、約750°C未満という比較的低温で焼かれたにちがいないことがわかった<sup>5</sup>。「温度がそれより高ければ、砂はガラス質で、高密度になる」と彼は話す。

ハギアソフィアの建築者は、特殊な種類のモルタルも使用した。Çakmakはアテネ国立技術大学（ギリシャ）の研究者との共同研究で、モルタルには今日のポルトランドセメントに使われているものと似たカルシウムとケイ素の化合物が含まれていることを見いだした<sup>6</sup>。この混合物は張力に対する強度が高く、そのおかげでハギアソフィアは大地震の振動を吸収できるのだ、とÇakmakはいう。研究チームは2002年、驚くべきことに1500年たっとなお、モルタルの中のカルシウムとケイ素がまだに反応することを報告した<sup>7</sup>。「このモルタルは自分自身を修復することができる。地震のたびに微小なひび割れができるが、それは時間とともに修復される」とÇakmakは説明する（一

方Markは、モルタルの高い堅牢性は、建造物の中でも使用されている場所によって異なるかもしれない、ハギアソフィアの耐久性のすべてを説明することはできないと主張している）。

この建物に使われているレンガとモルタルの比率も、その強さに貢献している可能性がある。石工は、より速く建てるためだろう、時にはレンガそのものよりも厚いくらい、極端に厚いモルタルを使った。厚いモルタルは、材料を「鉄筋コンクリートのようにする」とÇakmakは話す。ただし、この技術はハギアソフィアで使われたような強いモルタルがあってこそ可能な話だ。

はたして建築者は、耐震性をもつべく意図的に設計したのだろうか。「ハギアソフィア以前の建築家たちは、地震に耐えるようにしたいときは、単にとても重い建物を作っていた」とÇakmakは話す。しかし、アンテミオスは耐震性の問題に興味をもち、伝えられるところによると、独自に地震模擬装置さえ作ったという。「力学系における力は質量に比例することを、彼は理解していた。だから、石の代わりにより軽いレンガと柔軟なモルタルを使うという彼の考えは極めて合理的だった」とÇakmakはいう。

しかし、MarkはÇakmakとは意見が異なり、多くの建築史学者の見方を

支持している。「Çakmakは、当時の建築家はもっていなかったはずだと私が考える知識を、彼らもっていたと考えているようだ」とMarkは話す。

### M7.5にも耐える

そのような疑問は別にしても、多くの人は、ハギアソフィアは次の大地震に耐えることができるのかを気にしている。イスタンブールのすぐ南の地域では、今後数十年のうちにマグニチュードがイズミット地震と同程度かさらに大きな地震が2回起こると予測されている<sup>8</sup>。1991年、トルコと米国の研究者チームは、ハギアソフィアにいくつかの振動センサーを取り付けた。Çakmakは、小地震で集めたデータをもとに、大地震の際にどのように建物が動くかを予測できる、3次元のコンピュータシミュレーションを作った<sup>9</sup>。このモデルから、マグニチュード7.5の地震の振動が襲ったとき、ハギアソフィアの壁は震え、前後に大きく揺れ動くことがわかった。アーチの頂上には最大の応力がかかる。しかし、円蓋は無傷のまま残り、教会は地震後も立っているだろう。

もし、地震がマグニチュード7.5よりも大きかったら？「地震がマグニチュード7.5よりも大きかったら、私たちにできることはほとんどない」とÇakmakはいう。確かにもしも最悪の予測が現実になったなら、ハギアソフィアが立ち残るかどうかが、人々にとってはそれどころの話ではないのかもしれない。 ■

Virginia Hughes はニューヨーク市のサイエンスライター。



大昔の新機軸：三角形のペンデンティブが、巨大な円蓋と支持アーチをつないでいる。

1. Parsons, T. *et al. Science* **288**, 661-665 (2000).
2. Erdik, M. & Durukal, E. *Nat. Hazards* (in the press).
3. Bork, R., Mark, R. & Murray, S. *J. Soc. Arch. Hist.* **56**, 478-493 (1997).
4. Mark, R. *Am. Sci. March/April* 142-150 (1987).
5. Moropoulou, A., Çakmak, A. & Polikreti, K. *J. Am. Ceram. Soc.* **85**, 366-372 (2002).
6. Moropoulou, A. *et al. in Wessex Inst. Trans. Built Environ.* **15**, (eds Brebbia, C. A., Hernandez, S. & El-Sayed, M.) (WIT Press, 1995).
7. Moropoulou, A., Çakmak, A. S., Biscontin, G., Bakolas, A. & Zendri, E. *Constr. Bldg Mater.* **16**, 543-552 (2002).
8. Hubert-Ferrari, A. *et al. Nature* **404**, 269-273 (2000).
9. Çakmak, A., Moropoulou, A. & Mullen, C. L. *Soil Dynam. Earthquake Eng.* **14**, 125-133 (1995).



# A life online

## ウェブ上によみがえる大科学者の生涯

Nature/Vol.443(746-747)/19 October 2006

ダーウィンは現時点で「最新」の偉大な科学者である。ただし、オンライン上にアーカイブが作られたという意味においてだが。こうしたオンライン・アーカイブは我々の歴史理解をどのように変えるのか、Henry Nicholls が取材報告する。

チャールズ・ダーウィンが、「適者生存」という象徴的で極めて観念的な言葉を初めて使ったのは、正確にはいつのことだろうか。それは、1868年刊行の『The Variation of Animals and Plants Under Domestication』（『家畜・栽培植物の変異』）初版第1巻第1号の6ページ目である。この言葉のみが、翌年刊行の『On the Origin of Species』（『種の起原』）第5版にも登場してくる。

こんな知識をもっているのは、おそらく、ダーウィンの伝記を書いたり考え方を分析したりした James Moore や Janet Browne、Adrian Desmond、David Quammen といった専門家たちぐらいだろう。しかし今や、ご想像の

とおり、こうした豆知識を掘り起こすのに何年も研究する必要はない。2006年10月19日に開設された「ダーウィン・オンライン」（Darwin Online）<sup>1</sup>のおかげで、こうした疑問に答えるのが朝飯前のことになったのだ。

ダーウィン・オンラインでは、インターネットに接続可能であれば、誰でも自由にダーウィンの全著作を（ページのスキャン画像と検索可能なテキストという2通りの形式で）閲覧することができる。また、「ビーグル号」で航海中に記したメモなど、重要な未発表原稿も若干収載されている。現在、1人の科学者の全業績を綿密に調べ上げることができるこの種の資料格納サイトが、次々と登場している。その

推進派は、こうしたサイトのおかげで、自転車や列車、ときには飛行機に乗って「現実の古文書」の保管場所までわざわざ出かけなくてもすむだけでなく、歴史の研究にも新たな活力がもたらされると考えている。

ダーウィン・オンラインの壮大な構想は、英国ケンブリッジ大学の科学史家である John van Wyhe が2002年に打ち出したものだ。van Wyhe の記憶によれば、ダーウィンの著作物は当時ウェブ上に多数掲載されていたものの、明確な編集基準のないさまざまなサイトに分散しており、「まったくの混沌状態だった」。著作物や書簡がデジタルアーカイブ化されている偉大な科学者が多いことを踏まえると、このギャッ

ブはぜひとも埋める必要があった（コラム「その他の代表的な科学者アーカイブ」を参照）。「ほかの科学者には立派なデータベースがあるのにダーウィンにはないなんて、もってのほかだ」と van Wyhe はいう。

van Wyhe は、ダーウィン生誕 200 年と『種の起原』刊行 150 周年である 2009 年までに、ダーウィンの発表した著作のすべての版と翻訳を当サイトに加えることを目指している。この計画の最終目標は、『種の起原』の草稿、実験の解説、さらには家計簿なども含め、世界中に散らばる約 3 万 5000 ものダーウィンの手書き原稿をスキャンしてテキスト化することである。その目指すところは、私信以外にダーウィンの書き残した物を網羅することである。私信に関しては、やはりケンブリッジ大学の「ダーウィン書簡プロジェクト」(Darwin Correspondence Project) が以前から独自のウェブサイトを取り組んでいる<sup>2</sup>。

研究室に高価な装置を揃えるような学問分野とは異なり、人文科学という学問分野の基準からみると、このようなプロジェクトは金額的に安くはない。Van Wyhe は英国芸術人文科学研究会 (AHRC) から 28 万 6000 ポンド (約 6400 万円) の助成金を受けているが、彼が目指す形で同プロジェクトを完遂するにはさらに資金が必要である。アイザック・ニュートンの著作物と書簡に関する最も権威あるオープンアクセスのレポジトリ (情報保管庫) を目指す「ニュートン・プロジェクト (Newton Project)」は、AHRC から合計 90 万ポンド (約 2 億円) の助成金を受けている。この資金があれば、ニュートン理論の莫大な文書群 (ニュートンの著作物のほぼ半数にあたる) と光学関連の未発表文書の半分以上を 2010 年までにテキスト化し、脚注をつけ、オンライン公開するのに十分なはずである。同プロジェクトもダーウィン・オンラ

インと同じく、長期的にはニュートンの全著作の公開を目指しているが、数学の記号表記が特にむずかしいだろう、とプロジェクトの編集責任者を務めるロンドン大学インペリアルカレッジの歴史学者 Robert Iliffe は指摘する。

Iliffe は、このベンチャー事業には出資額に十分見合うだけの価値があるのだと胸を張る。かつて、数千ポンドを投じてニュートンの業績の印刷版を作成しようという計画があったが、しぶしぶながらも現金でそれを購入しようとした研究施設はごくわずかだった。「今回のオンライン媒体は非常に多くの閲覧者をよび寄せるものだ」と Iliffe は語る。

### 大ヒットの大物サイト

それを先行して実証しているのが、「アインシュタイン・アーカイブズ・オンライン」(Einstein Archives Online)<sup>3</sup> である。このサイトが現在自慢しているのは、科学関連かどうかを問わず、アインシュタインの約 1000 点にのぼる著作物からの 3000 ページを超えるスキャン画像である。彼の著作物はほぼ例外なくドイツ語で書かれたものであるにもかかわらず、こうした文書に寄せられる関心は非常に高い、とカリフォルニア工科大学 (米国パサデナ) で「アインシュタイン論文プロジェクト (Einstein Papers Project)」の責任者を務める Diana Buchwald は話す。アインシュタイン・アーカイブズ・オンラインが 2003 年に立ち上がったとき、最初の 5 日間で同サイトへのユーザーアクセス数は 25 万件近くにのぼったという。

ダーウィン・オンラインでも、それと同じくらいのアクセス数を期待している。ダーウィンの説の支持者も曲解者も、この資料公開サイトの検索能力を活用するからだ。ダーウィンのファンが特に関心を寄せるとされる文書は、数点ある。なかでも特筆すべきは、ビーグル号でガラパゴス諸島を調査したときに書かれ、これまで未公開であった『備忘録』であ

る。その原本は 1983 年に盗難に遭ったようで存在しないが、ケンブリッジ大学図書館がマイクロフィルムを所蔵している。ダーウィンが発表した図解もすべて調べることができ、視覚障害者は全テキストの音声ファイルをダウンロードすることができる。

特殊創造説 (聖書の創世記にある考え方) を信奉する人はぜひ見るとよいだろう、と van Wyhe は言う。「ダーウィンのことがそれほど気になるのなら、他人の解釈に頼るだけではなく、ダーウィン自身の言葉を実際に読む労をいとわないことだ」。こうした人々がたとえそれで自然選択による進化論を信ずるようにはならないにしても、ダーウィンが反キリスト教主義だったという一般に信じられている話は誤解だとはっきりわかるだろう、と彼は語る。「ダーウィンが目指したのはキリスト教を否定することではない。彼は 1 人の科学者として、この世界がどのように動いているかを説明しようとしたにすぎないのだ」。

しかし、挑戦的なほど反宗教的だったフランシス・クリックについては、事情が異なる。礼拝堂を建てるというチャーチル大学 (英国ケンブリッジ) の決定に激怒したクリックは、大学が名を冠するウィンストン・チャーチルに宛てて、礼拝堂と一緒に売春宿を建てるようにと 10 ポンド (約 2200 円) を同封した手紙を送りつけた。残念ながら、この手紙は現在ロンドンのウェルカム図書館が所蔵しており、「クリック・アーカイブ」ではなく「チャーチル・アーカイブ」の中にある。今のところ、クリックの記録文書は、ごく一部だけが米国立医学図書館のウェブサイトによってオンラインでアクセスできるようになっている。「これは古い世代の研究者が利用することのできなかつた、すばらしい新ツールだ」と、最近クリックの伝記<sup>4</sup> を出版したばかりの Matt Ridley はいう。「そこにもっと多くの書簡があればいいのにと思うほどだった」。

### 今ある難題

しかし、クリックをはじめとする現代科学の「巨人」の場合、記録文書に関してダーウィンやニュートンにはなかった問題が起こってくる。「文書データが膨大になり、それにつれて索引作成も困難になっている」と話すのは、ロックフェラー・アーカイブセンター（米国ニューヨーク）の常任理事である Darwin Stapleton だ。彼のファーストネームは、19 世紀の偉大な博物学者にちなんで父親がつけたものである。クリックの共同研究者でもあったジェームズ・ワトソンなど現代の科学者の記録資料は、Eメール、表計算シート、発表用スライド、音声記録やテレビ映像など、100 万点を超える可能性があり、どれをとっても索引作成が厄介である。「ダーウィンのコレクションではできることが、20 世紀の人物ではできない」のだと Stapleton は話す。

現代史に関してはほかにも難題が生じており、その最たるものが著作権問題である。多くの場合、著作権の所有者は

簡単にわからない。「手紙を所有していたとしても、その著作権は書いた人にある」とコーネル大学図書館（米国ニューヨーク州イサカ）で知的財産権を担当する Peter Hirtle は語る。書簡が多く含まれる資料では「潜在的著作権者が山ほどいる」ことになる。そのため、書簡のアーカイブ・プロジェクトでは、出した手紙のみを発表して受け取った手紙を非公開とするのが、現実的にみて唯一の選択肢である場合が多い。

とはいえ、資料がほぼ完全に検索可能なアーカイブがとうの昔に亡くなった人物に限られてしまうとしても、こうしたアーカイブにも学問的に新たな可能性がまだいろいろ残されている。昨年、ハーバード大学ダナ・ファーバーがん研究所（米国ボストン）の物理学教授である Albert-László Barabási らは、ダーウィン書簡プロジェクトとアインシュタイン論文プロジェクトのデータを使い、この 2 人が受け取った手紙に返事を出すまでの時間を比較した<sup>5</sup>。文書の日付を使って執筆・通信

パターンを知ることができれば、その科学者が生活や研究をどのようなスケジュールで過ごしていたかについて知る手がかりが得られるのではないかと Barabási は話す。van Wyhe は、ダーウィンのどのテキストを誰がオンラインで読んでいるかある程度知ることができるだろうから、このリソースの使われ方を調べることによって「研究者の研究」もできるはずである。全員が「適者生存」を探すのか、あるいは、これまで以上におもしろい脇道を掘り進む人々がいるのか。1 人の科学者の生涯をこうした新しいツールからとらえることで、新たな偉大さを見いだせるかもしれない。 ■

Henry Nicholls はロンドンを拠点とするフランスのサイエンスライター。

1. <http://darwin-online.org.uk>
2. [www.lib.cam.ac.uk/Departments/Darwin/index.html](http://www.lib.cam.ac.uk/Departments/Darwin/index.html)
3. [www.alberteinstein.info](http://www.alberteinstein.info)
4. Ridley, M. *Francis Crick: Discoverer of the Genetic Code* (HarperPress, 2006).
5. Oliveira, J. G. & Barabási, A.-L. *Nature* **437**, 1251 (2005).

## その他の代表的な科学者アーカイブ

ダーウィン、アインシュタイン、ニュートンといった大科学者のオンライン・アーカイブのほかにも、有名な科学者の著作物を公開しようというプロジェクトは存在する。

ロバート・ボイル・プロジェクト (Robert Boyle Project ; [www.bbk.ac.uk/boyle](http://www.bbk.ac.uk/boyle)) はボイルの著作物の 5 分の 1 程度を提供しているが、ボイルの『研究日誌』は [www.livesandletters.ac.uk/wd](http://www.livesandletters.ac.uk/wd) で、注釈テキストとともにパッチャルなページめくり方式で

見ることができる。

ジャン＝バティスト・ラマルクのアーカイブ ([www.lamarck.cnrs.fr](http://www.lamarck.cnrs.fr)) には、手書き原稿のスキャン画像や多数の発表成果のテキストとともに、総数にして 1 万 9000 点もの植物標本集のデジタル写真が含まれている。

ラヴォアジエ・パノプティコン (Panopticon Lavoisier ; <http://moro.imss.fi.it/lavoisier>) が提供するものは、アントワーヌ＝ローラン・ラヴォアジエの化学研究の発表

済みと未発表の成果多数、ラヴォアジエの実験器具と鉱物コレクションの写真数百枚、それに自身の蔵書目録である。

トーマス・A・エジソン論文プロジェクト (Thomas A. Edison Papers Project ; <http://edison.rutgers.edu>) は、エジソン・アーカイブに 500 万ページからのデジタル画像 18 万枚を収めている。

エヴァ・ヘレンとライナス・ポーリングの論文集 (<http://osulibrary.oregonstate.edu/specialcollections/>

[coll/pauling/index.html](http://coll/pauling/index.html)) は約 50 万点を収載し、うち約 10 万点がデジタル化されている。すべてがオンラインで利用可能なわけではない。

米国立医学図書館 (<http://profiles.nlm.nih.gov>) は、フランシス・クリック、オズワルド・エイヴリー、ジョシュア・レーダーバーグ、バーバラ・マクリントックなど、20 世紀の生物医学研究と公衆衛生のリーダーたちが挙げた研究成果の精選レポジトリを備えている。

# How to make a social insect

## 社会性昆虫の「設計図」が手に入った

Edward O. Wilson



このたびミツバチのゲノム塩基配列が解読された。そこには、高度の社会構造をもつようにミツバチを進化させた重大な生物学的変化が表れている。これでミツバチについては、分子からコロニーまであらゆるレベルの研究が可能となった。

Nature Vol.443 (919-920)/26 October 2006

昆虫種が単独性の生活スタイルからコロニーを作る高度な生活スタイルへと変容を遂げるには、体のあらゆる仕組みを変化させる必要がある、しかも、成虫のカースト（社会的階級）の間に大きな違いを生じる遺伝子によって規定される形質に、十分な可塑性もたせなければならない。この大革新のようすをゲノムレベルでとらえた成果が *Nature* 10月26日号に報告されている<sup>1</sup>。

もし地球上にいる社会性をもつ生き物を採点して、コミュニケーションの複雑さや分業、集団の団結度で点数をつけるとしたら、進化の最高峰は3つになる。それは、人類、クラゲの仲間のクダクラゲ類、そして、一部の限られた社会性昆虫である<sup>2,3</sup>。セイヨウミツバチ (*Apis mellifera*) はこの3つ目に入り、こうした高度な社会性昆虫の中には、面白い生態をもつハキリアリ類や軍隊アリ類、キノコシロアリ亜科のアリ塚を作るシロアリ類も含まれる。セイヨウミツバチがこのランクづけのトップクラスに入ることには、誰も異論がないだろう<sup>4</sup>。

この論文著者たちの指摘<sup>1</sup>によると、セイヨウミツバチに関してずっと不思議がられてきたことは、働きバチのように小さくて、脳には我々ヒトの100万分の1の数のニューロンしかない生き物がいったいどうやって、これほどたくさんの仕事をこなすことができ、しかも全員が協調して一致団結できるのかということだ。近代で最初にミツバチを取り上げた Charles

Butler の『Feminine Monarchie』（ミツバチのコロニーを治めるのは王バチではなく女王バチだという説を述べた著書。1609年刊）が刊行されて以来、個体レベルやコロニーレベルの発見が次々と研究界にもたらされた。発見が続々ともたらされるそのありさまは、まさしく Karl von Frisch の言葉の通りだった。「ミツバチの生活はまるで魔法の井戸だ。汲み出しても汲み出しても、汲み出すべきものがまた満ちてくる。」

蜂蜜を集めたり受粉を助けたりする役目を別にすれば、セイヨウミツバチで最も有名な特徴はもちろん、「尻振りダンス」（8の字ダンス）である。採餌役の働きバチは、蜜源や新しい巣作りに適した場所を見つけると、巣箱に戻ってきて、巣箱の中に垂直に並ぶハチの巣の壁の表面で「8の字」を描いて歩き、胴体部分で飛行経路を抽象的に表現する。この「8の字ダンス」には、太陽の方向を参照した蜜源の方向に関する情報が含まれており、それに加えて、巣からの距離の情報も入れ込まれている。このメッセージは、時間を限ったブンブンという音と匂い物質の分泌で増強される。目的地が巣に近いことを仲間に知らせるときは、完全な8の字ダンスではなく、円を描いてぐるぐる回る「円形ダンス」を踊る。

ここ数年の研究で、ミツバチのダンスには他にも種類があることが明らかになってきた。帰還した採餌バチが荷下ろしする、つまり蜜や花粉を巣の仲間に受け渡す際に、餌運び役の働きバチが多数あぶれて



いるのを見つけた場合、「揺さぶりダンス」(shaking dance; 体を背腹方向に振動させつつ、両方の前脚で他の仲間を抱く)を踊って、そのダンスフロアにより多くの働きバチをよび寄せ、そこから野外へと飛び立たせる。その逆が起こった場合、つまり、帰還した採餌バチが蜜や花粉を巣の仲間になかなか受け取ってもらえない場合、「身震いダンス」(tremble dance; 体を前後方向に揺すりつつ、体軸を中心に体を少し回転させる)を踊って、もっと多くの働きバチを餌運び役として働くようにさせる。

ミツバチは、こうしたダンスの演目に加えてフェロモンも使っている。これらのフェロモン物質は全身に分布する腺から分泌され、これを使ってさまざまな警告を発したり、仲間を動員したり、外来者と巣の仲間を区別したり、また、性別やカースト、日齢によって仲間を区別したりする<sup>4,5</sup>。働きバチが成虫になってから過ごす時間は、自然環境下でおよそ40日間であり、その間、彼らの分泌腺は社会的活動をみせ、担う仕事の内容とうまく調和するように、プログラムされた時間的順序で成長したり退縮したりする<sup>6,7</sup>。この過程の進行は、コロニーの需要に応じてスピードアップしたり巻き戻したりできる<sup>8</sup>。また、働きバチの仕事内容が変化していくにつれて、特定のシグナルに対する感受能力が上昇したり低下したりする。

最後になるが、働きバチには驚異的な記憶力が備わっている。彼らは、自分の属するコロニーの匂いを覚えている。餌探しの飛行では、仲間のダンスでもらっ

た指示だけでなく、目印も使っている。また、最大で5か所の花畑など餌場のありかを覚えることができ、しかも、1日の中でその餌場の蜜がいちばん多い時間帯も覚えていられる<sup>8,9</sup>。

ミツバチのゲノムに隠された暗号の解読にあたって研究者たちは、社会性にかかわるこれらの驚くような形質に、分子遺伝学のレベルで取り組み始めている(コラム「ミツバチのゲノムと社会性のある生活スタイル」参照)。過去数世代の研究者たちによる研究から、研究者たちはすでに、事実上すべての生体機構がある程度まで変化してきたことに気づいていた。そのゲノムが今回初めて解読され、当然のことながら、一部の遺伝子が大昔の前駆遺伝子から変更されてきたことが明らかになった。例えば1つの遺伝子クラスターは、yellow タンパク質ファミリーの1つをコードした単一の祖先遺伝子に由来するものであり、ミツバチでは、カーストの決定や女王を育てるのに使われるロイヤルゼリーを指定している。その他の化学受容や食糧管理をプログラムする遺伝子などには、他の昆虫系統からのハナバチ類系統の分岐以降に進化した革新部分が含まれているらしい。

今回得られたDNA塩基配列は、社会性の進化という根本的問題の解明に向けた大きな一歩となる。ゲノムレベルでみて、高度なコロニーを作る昆虫の出現には何が必要なのだろうか。この研究が発展すれば、最初の問題と同じくらい重要な第二の問題にすぐに取り組むことになるだろう。つまり、真社会性の動物種が

生まれるには、まず初めの段階でいったい何が必要なのだろうか。(真社会性のコロニーでは、構成個体が重複する世代からなっており、これらの世代は、繁殖カーストと、子を養育するワーカー・カーストに分けられる。) 現在では幸いなことに、この問題を解くために豊富な情報を集約させることが可能である。16,000 ほどの既知の現生ハナバチ種の中には、単独生活性だが真社会性との境界に近いものもあれば、この境界をやっとどうにか越えたものもあり、また、単独生活状態に舞い戻ったごくわずかの種もあれば、さらにはミツバチを最上位とする社会構造のさまざまな中間段階で安定しているものもある。こうした社会構造の系譜の進化史は、ほとんどが生体構造の情報を基盤として決められたものであり<sup>10</sup>、分子レベルの証拠を一部なりとも役立てた例はわずかしかない。ミツバチに最も近縁な仲間は、単独生活性の Euglossini 類 (orchid bee とよばれる玉虫色のハナバチ)、マルハ

ナバチ類、ハリナシミツバチ類で、最後にあげた仲間はどうやら、社会構造の複雑さから言えばミツバチと肩を並べるほどらしい。

この大きなジグソーパズルに、比較ゲノム解析の助けを借りていくつかのピースがはめられたとき、驚くような進化史がみえてきて、発展的進化や社会生物学に関してさまざまな展望をもたらしてくれるはずである。■

Edward O. Wilson、ハーバード大学比較動物学博物館 (米)

1. The Honeybee Genome Sequencing Consortium *Nature* **443**, 931-949 (2006).
2. Wilson, E. O. *Sociobiology: The New Synthesis* (Harvard Univ. Press, 1975).
3. Choe, J. C. & Crespi, B. J. (eds) *The Evolution of Social Behavior in Insects and Arachnids* (Cambridge Univ. Press, 1997).
4. Seeley, T. D. *The Wisdom of the Hive* (Harvard Univ. Press, 1995).
5. Michener, C. D. *The Social Behavior of the Bees: A Comparative Study* (Harvard Univ. Press, 1974).
6. Sekiguchi, F. & Sakagami, S. *F. Rep. Hokkaido Natl. Agric. Exp. Sta.* **69**, 1-65 (1966).
7. Lindauer, M. *Communication Among Social Bees* (Harvard Univ. Press, 1961).
8. Rösch, G. A. Z. *Vergl. Physiol.* **12**, 1-71 (1930).
9. von Frisch, K. *The Dance Language and Orientation of Bees* (Harvard Univ. Press, 1967).
10. Michener, C. D. *The Bees of the World* (Johns Hopkins Univ. Press, 2000).

## ミツバチのゲノムと社会性のある生活スタイル

ミツバチはゲノム塩基配列が解読された昆虫としては、ショウジョウバエ (*Drosophila*)、カ (*Anopheles*) に続いて 3 番目である。したがって、ミツバチの遺伝子の数や中身を、コロニーを作らないこれら 2 種の昆虫のものと比較することができ、ミツバチの社会性のある生活スタイルがどのように進化してきたのか、またそれがゲノムをどう形作ってきたのかを、幾分なりと推測することができる。

ミツバチには、ロイヤルゼリーの産生にかかわる遺伝子の数が他の 2 種に比べて多い。ミツバチはロイヤルゼリーを幼虫に与えるが他の 2 種ではそれがないので、このことは理にかなっている。また、ミツバチは匂い物質の受容体をコードする遺伝子をかなり多くもっている。これは、さまざまなミツバチダンスの最中に感覚を使っ

たコミュニケーションをとるときや、カーストの違いやコロニーにとって余所者のハチを識別するのに、フェロモンが重要なことの表れである。

共同体の生活スタイルをとることで、単独生活をする昆虫の場合にふりかかる災難が一部軽減される。例えば、巣という整った環境のおかげで、ミツバチは他の昆虫に比べてより簡単な外皮クチクラをもつだけですんでおり、そのため、クチクラタンパク質をコードする遺伝子は他の 2 種に比べてかなり少ない。味覚受容体も少なく、これはおそらく、大部分のハチは別のハチがすでに餌を食べている場所で餌にありつくため、有毒な餌を食べる見込みが低いせいだろう。

ただし、3 種のゲノム間の違いがすべて、これほど簡単に説明できるわけではない。奇妙に思えることだが、ミ

ツバチがもっている免疫関連の遺伝子は他の 2 種より少ない。ミツバチは混雑した部屋で暮らしており、狭い空間では病気が容易に感染してしまう。おそらく、まだ知られていない仕組みのおかげで病気になりにくいのだろう。あるいは、身づくろい行動などの社会的行動によって、病気から十分に守られているのかもしれない。

今回のミツバチゲノムの論文では、ミツバチの一生の間に遺伝子発現がどう変化するかも初めて調べられている。働きバチは羽化後 2~3 週目に巣外で働き始めるが、重要なことに、こうした成長段階の移行には脳で発現する遺伝子の活性変化が伴っている。加えて、代謝にかかわる遺伝子の発現から見ると、カースト間には著しい違いが存在している。

Chris Gunter

# うつと脳

## 相次ぐ分子異常の発見で くつがえる仮説

西村 尚子 (サイエンスライター)

日本人の20人に1人がかかるといわれるうつ病。患者の脳ではいったい何が起きているのか、最新脳科学で検証する。

日本産科

年間2万人程度で推移していた自殺者が、1998年に3万人に急増し、増加したまま元に戻らない。「自殺者の約半数は、うつ病に冒されている」とする報告もあり、現在、うつ病が社会的な問題としてにわかにクローズアップされている。「何をするのもおっくう」「理由もなく、ただ不安」「自分は生きている価値がないと思う」といった症状が現れるうつ病は、一昔前は「性格的なもの、怠けているだけだ」などと誤解されることが多かったが、単なる気分の問題ではなく、脳機能の異常によって引き起こされることが明らかになってきた。

### 薬理学に始まった分子メカニズムの解明

ある生命保険会社の調査によると、日本のうつ病患者は人口の5%にあたる約600万人にのぼるといわれる。この数は、まん延している糖尿病の患者数とほぼ同じ。つまり、うつ病もまた、まん延しているといわざるを得ない状況に陥っている。「会社や学校、育児などのストレスが原因だろう」とされがちだが、そう片づけてしまうのは短絡的であることが、脳科学の研究から明らかになっている。「遺伝的な素因と幼少期における養育環境などが複雑に絡み合い、さらに、そこに加わったストレスが引き金になって発症することが多

い」。理化学研究所脳科学総合研究センターの加藤忠史博士は、そう指摘する。

うつ病は、躁うつ病（双極性障害）や統合失調症と並ぶ精神疾患の1つで、ギリシャ時代の医学者ヒポクラテスが黒胆汁の蓄積によってうつ病になる、と考えたとの逸話もあるほど歴史が古い。一方、躁うつ病は、うつ状態と、「異常なほど気分が高まる」「しゃべり出すと止まらない」「眠らなくても元気」といった躁の状態が、交互に繰り返されるのが特徴である。また、統合失調症は、幻聴、幻覚、妄想といった症状（陽性症状）と、無関心、無気力といった症状（陰性症状）の両方がみられ、社会生活が送れないほ

どの重症患者も多い。いずれの疾患も、ストレスに弱い(ストレス脆弱性という)という共通の病態をもつ。

うつ病の分子メカニズム研究は1950年代から始まり、1960年代には、うつ病患者の脳でモノアミンと称される神経伝達物質が少ないとする「モノアミン欠乏仮説」が提唱された。神経伝達物質とは、神経細胞どうしがシナプスにおいて情報をやりとりする際に使われる化学物質の総称で、アセチルコリン類、ノルアドレナリン類、モノアミン類、アミノ酸類、ペプチド類など、多種類が知られている。いずれも、神経細胞の軸索の末端にある神経終末から放出され、近接する神経細胞のシナプスにある受容体に結合することで、情報が伝達される仕組みになっている。その後、「放出されたセロトニン(モノアミン類の一種)が神経終末に再度取り込まれるのを阻害する物質(SSRI)に、抗うつ作用がある」ということが明らかになり、セロトニン濃度が低下することでうつ病に至るとする「セロトニン仮説」が有力となった(図1参照)。

一方、統合失調症の分子メカニズム研究は、1950年代にクロルプロマジンという薬物が幻覚や妄想を抑えるのに効果的だとわかったことで始まった。1970年代には、ドーパミンが受容体(D2受容体)に結合するのを妨げる抗精神病薬に陽性症状を抑える効果があったことから、ドーパミン神経の過剰伝達を原因とする「ドーパミン仮説」が提唱された。その後1987年には、グルタミン酸受容体(NMDA受容体)に結合するフェニサイクリジン(麻酔薬として開発され、後に使用禁止となった)が統合失調症様の症状を引き起こすことから、グルタミン酸神経の伝達異常に発症の鍵があるとする「グルタミン酸仮説」も登場した。

「このような伝達物質の亢進あるいは低下といった説は、病態の分子メカニズムの一部ではあると思うが、神経伝達機能の調節や可塑性がどうなっているかといった視点が、より重要だろう」と、放射線医学総合研究所分子イメー

ジング研究センターの須原哲也博士は指摘する。加藤博士も「それぞれの精神疾患に、最終共通経路があるはずだ」とし、解明の手がかりを追っている。

### 躁うつ病で明らかになった分子の異常

精神科医でもある加藤博士は、長い間、躁うつ病を対象に研究を続けている。躁うつ病も何らかのストレスが発症の引き金となることが多く、モノアミン類の受容体と情報伝達系の異常が報告されてきた。およそ100人に1人の割合で発症するといわれるが、大半が一過性で治まるうつ病と異なり、再発率が極めて高い。再発時には、これといったストレスが見あたらなことが多く、再発から再発までのサイクルが年を経るごとに短くなるという。一卵性双生児では、片方が躁うつ病だと、約70%の確率で他方も発症するため、遺伝子の深いかかわりが示唆されている。

加藤博士は1990年代前半に、躁うつ病患者の脳をNMR(磁気共鳴装置)で調べる過程で、患者の脳内では、エネルギー物質として働くクレアチン酸が減っていることに気がついた。「文献を調べると、ある種のミトコンドリア病でも、同様な状況のあることがわかった。もしかしたら、躁うつ病もミトコンドリアの機能異常と関係しているのではないかと考えた」と加藤博士。

ミトコンドリアは、エネルギー物質を作り出したり、情報伝達にかかわるカルシウムの濃度を調節したりする細胞内小器官だ。約1万6000塩基対から成る独自のDNAをもつのが特徴で、約37個の遺伝子が機能していると考えられている。加藤博士はアメリカにおいて、躁うつ病患者の死後脳を調べ、一部の患者では1万6000塩基対のうちの約5000塩基対が欠失していることを突き止めた。その後2001年に現職に移り、脳内においてのみミトコンドリアDNAを欠失した遺伝子改変マウスを作製。以来、そのマウスの解析を続けてきた<sup>1</sup>。

「このマウスは朝になっても動き続け、主に雌では、動きの多い日とあまり動か

ない日が周期的に繰り返された。これらの行動異常は、躁うつ病の治療薬であるリチウムを投与すると改善された」と加藤博士。このマウスは、世界で初めての躁うつ病モデルマウスとして認められる可能性もあるという(写真1参照)。

一方で加藤博士は、片方だけが躁うつ病を発症している一卵性双生児2組を対象に、約1万2000個の遺伝子が、双生児のそれぞれでどのように発現しているかを網羅的に検討した。すると、一卵性双生児であるにもかかわらず2組ともXBP1という遺伝子の発現量に差があることがわかった<sup>2</sup>。XBP1遺伝子は転写因子として知られるもので、発生などに関与するほか、立体構造に異常をきたしたタンパク質が小胞体に蓄積する事態(つまり小胞体にストレスがかかった状態)が発生すると、異常なタンパク質を修復するシャペロン

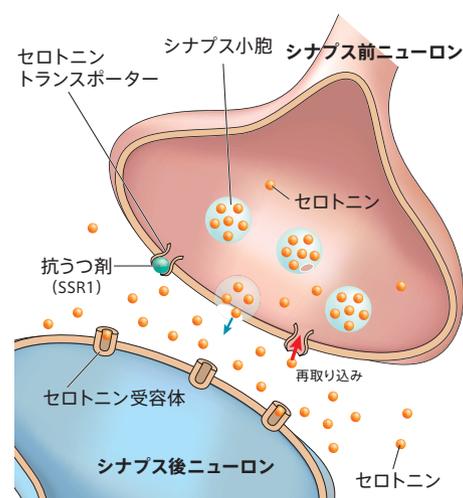


図1 抗うつ剤(SSRI)の作用機序。脳内のシナプス前ニューロンから放出されたセロトニン(神経伝達物質)は、シナプス後ニューロンにあるセロトニン受容体に結合することで作用する。シナプス間隙に貯まったセロトニンは、セロトニントランスポーターから再度取り込まれ、再利用される。うつ状態にある人はシナプスにおけるセロトニンの濃度が低く、セロトニン受容体にセロトニンが作用しにくい状態となっていることが多い。SSRIはセロトニンを放出するシナプスのセロトニントランスポーターに選択的に作用し、セロトニンの再取り込みを阻害する。これによってセロトニン濃度がある程度高く維持され、うつ状態が改善すると考えられる。

タンパク質を増やす機能をもつ。「一卵性双生児の間で、XBP1 遺伝子の配列には差はなかった。おそらく、染色体レベルで遺伝子の発現を制御する DNA メチル化の差が発現量の差に結びついたのであろう。現在、さらなる解析を進めている」と加藤博士。

さらに加藤博士は、XBP1 遺伝子に多型があり、あるタイプの遺伝子をもつ人はもたない人に比べて躁うつ病にかかりやすいことを示した<sup>3</sup>。加藤博士は、XBP1 タンパク質には、自らの存在が自らの遺伝子発現を増やすフィードバック機構があり、この機構がシャペロンタンパク質を増やすだけでなく、神経細胞の機能にも関与していると考えている。躁うつ病患者の細胞は小胞体ストレスに対する反応が弱く、患者に有効なバルプロ酸にはシャペロンタンパク質を増やす作用があることもわかってきており、神経細胞における小胞体ストレスと躁うつ病の関連に注目が集まっている。

### うつ病と DAT1 の繰り返し配列

東京大学大学院総合文化研究科の石浦章一教授もまた、遺伝子多型と精神疾患のかかわりを調べている。石浦博士が対象にするのは、ドーパミントランスポーター 1 (DAT1) 遺伝子の最後尾に位置する、40~45 塩基から成る繰り返し配列。DAT1 は、ある特定の神

経細胞 (ドーパミンニューロン) に発現し、シナプス間に放出したドーパミンを再吸収する機能をもつ。また、アンフェタミンやコカインなどの覚醒剤の標的分子としても知られている。最後尾の繰り返し配列は、DAT1 遺伝子の発現を調節する機能をもち、繰り返し数は 3~14 回 (日本人では 6~11 回) までみられる。

一方で DAT1 は、発達障害の 1 つである注意欠陥・多動性障害 (ADHD) の治療薬であるメチルフェニデートの標的分子としても知られている。そのため、1996 年ごろから、世界中で繰り返し数と精神疾患との関連が調べられた。その結果、繰り返し数が 10 回の多型に ADHD との相関があるとする報告や、9 回の多型にニコチン中毒、心的外傷後ストレス障害 (PTSD) との相関があるとする報告が相次いだ。ところが、同時期には、これらの疾患と多型に相関がないとする報告も相次いだ。

「ヒトの生体で検討するのはむずかしいと考えた我々は、DAT1 遺伝子の繰り返し配列を削り取る実験をしてみた。すると、そのような遺伝子を導入した細胞では DAT1 が発現しなくなった」と石浦博士はいう。さらに調べたところ、繰り返し配列に特定のタンパク質 (Hesr1) が結合すると DAT1 遺伝子の発現が抑制される仕組みが明らかに

なった。そこで、Hesr1 遺伝子をノックアウトしたマウスの行動を調べてみると、ヒトのうつ病でみられるような、暗いところを好み情緒不安定なマウスになったという<sup>4</sup>。

「私たちの研究から DAT1 の発現量は、繰り返し配列の繰り返し数に依存し、しかも Hesr1 によっても制御されていることがわかった」と石浦博士。繰り返し数と精神疾患との相関はいまだに決着がついていないが、DAT1 の機能も、発症メカニズムの一端を担うものとして、各国で研究が進められている。

### 評価のむずかしい遺伝子多型による差

遺伝子多型と精神疾患の相関についての研究は、ゲノム科学によってもたらされたもので、その歴史はまだ浅い。すでに述べたように、研究成果について統一されたものもまだない。精神科医として患者と接する機会の多い須原博士は、「遺伝子改変マウスは、精神疾患の複雑な臨床症状のすべてを再現するには至っていない。私は、分子イメージングの解析手法を用いることで、生きた人間の脳内における分子の発現や機能と遺伝子多型との相関を評価できないかと考えている」と話す。分子イメージングとは、放射性同位元素で標識した薬剤と PET (陽電子放射断層撮影法) などの装置により、生体内の特定の分子の局在や機能を画像化する技術だ。

例えば須原博士は、うつ病との関連が深いとされるセロトニントランスポーター (5-HTT) 遺伝子の多型と、脳内の 5-HTT 密度との関係について、九州大学大学院医学研究科の神庭重信教授らと検討した。5-HTT 遺伝子にも、DAT1 遺伝子と同じような繰り返し配列の多型があり、長い型は l 型、短い型は s 型とよばれている。1996 年に、「s 型をもっている人は、もっていない人よりも気分障害を発症しやすい」との報告がされた<sup>5</sup>。「さっそく、抗うつ薬の結合部位である 5-HTT 密度と遺伝子多型の関係を検討してみたが、統計上有意な差は見いだせなかった<sup>6</sup>」と須原



写真1 脳内のミトコンドリア DNA を欠失した遺伝子改変マウス(雌)の輪回し行動。野生型マウスでは、夜間に輪回しをして、朝から昼間は寝ているのに対して、遺伝子改変マウスは朝になっても動き続け、動きの多い日とあまり動かない日が周期的に繰り返された。こうした行動の異常は、躁うつ病の治療薬(リチウム)を投与すると改善された。

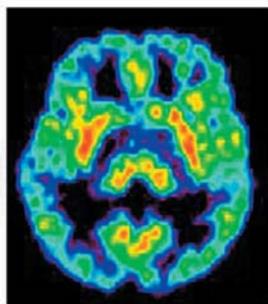


図2 セロトニントランスポーター(5-HTT)と特異的に結合する薬剤を用いて、健常者の脳をイメージングしたPET画像。赤色の部位はトランスポーターの密度が高く、青色は低いことを示す。画像から得られる数値をモデルに当てはめて計算すると、脳の部位ごとのトランスポーターの密度が算出できる。

理化学研究所 加藤忠史  
放射線医学総合研究所 須原哲也

博士。もともとヒトは個体差が大きく、5-HTTの密度が同じ値でも、ある人はうつ病を発症し、ある人は発症しない。須原博士は「5-HTTの密度には多くの因子が関係していると考えられ、さらなる検討が必要だが、将来的には、分子イメージングの手法によって受容体やトランスポーターの密度を測ることで、精神疾患のリスクをある程度判定できるようになるかもしれない」と話す(図2参照)。分子イメージングは、これまで得られなかった新たな情報を提供するものとして有力視されてきている。

**必要とされる多角的な研究**

精神疾患の研究は、進めば進むほど混沌としてきているようにも思えるが、精神疾患が単に受容体やトランスポーターの異常によるものではないとのコンセンサスは得られてきている。最近、放射線で神経幹細胞の増殖を阻害すると、抗うつ薬が効かなくなるとの報告もなされ<sup>7</sup>、神経細胞の新生や可塑性の障害と精神疾患とのかわりにも注目が集まっている。須原博士は「精神疾患は、神経回路の特定部分が異常になるのではなく、緻密で複雑な回路全体をうまく機能させる機構が崩れることで発症するのだろう(図3参照)」とし、加藤博士も「ミトコンドリアやXBP1遺伝子の異常は、ともに、回路全体をうまく機能させる役割をもった特定の神経回路の障害に結びつくのかもしれない」と話す。

こうした状況のもと、ストレスに対する反応機構が、生まれもった遺伝子だけでなく、幼少期における養育環境にも大きく左右されることが明らかになりつつある。例えば、虐待などによる心的外傷を受け、その後にうつ病患者を発症した患者では、心的外傷を受けていない患者に比べて、脳の海馬が萎縮していることがわかっている。健康人では、心身にストレスがかかると、視床下部からCRFホルモンが、副腎からコルチゾールが分泌される。コルチゾールが分泌されると、その情報がフィードバックされ、CRFホルモン

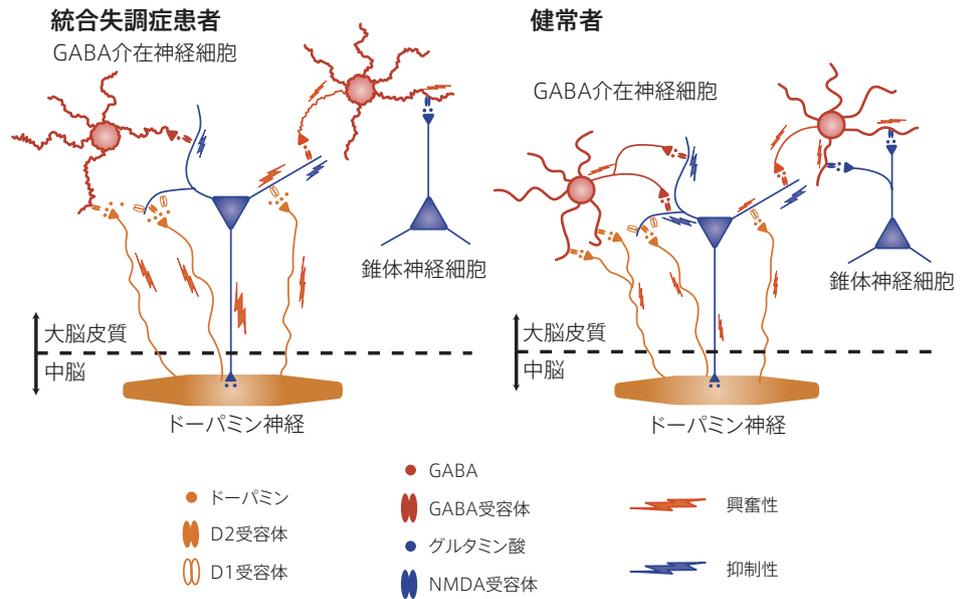


図3 統合失調症において予想される神経回路の調節異常モデル。脳内で放出されたドーパミンは、本来の信号伝達に加えて、ドーパミン信号伝達を抑制的に調節する介在神経上のドーパミン D2 受容体にも作用すると考えられている。この介在神経からは抑制性の神経伝達物質である GABA (γ-アミノ酪酸) が放出され、ドーパミンの放出にネガティブフィードバックをかけている。統合失調症においては、こうした GABA 介在神経に異常のあることが、いくつかの研究で報告されている。統合失調症でみられるドーパミン D2 受容体の減少は、GABA 介在神経の機能異常を反映している可能性があり、その背景には、ドーパミン神経伝達の調節機能障害があると考えられる。

は分泌されなくなる。ところが、うつ病患者ではこのフィードバックがうまく機能せず、血中のコルチゾール濃度が高いままであることが多い。うつ病患者は、生体が異常なストレス状態にさらされ続けているともいえるのだ。

2004年、適切に養育されなかったラットでは、グルコルチコイド受容体遺伝子がメチル化されてしまい、生涯にわたってグルコルチコイド受容体の数が少なくなるとの報告がなされた<sup>8</sup>。この説はまだ確定的なものではないが、同様のことがヒトにも起きるとすると、うつ病の一部に「幼少期の養育環境→グルコルチコイド受容体の減少→ストレス脆弱性→精神疾患発症」というルートが存在する可能性がある。

ただし、加藤博士が「うつ病は、ストレスをきっかけにして発症することが多いが、遺伝的な素因が強ければストレスがなくても発症する」と指摘するように、発症ルートは、単純な図式では成り立たない。

研究が一筋縄で進まない一方で、うつ病が社会に与える負担は年々大きくなっている。事態を憂慮する政府は、研究予算を確実に増やしてきているが、加藤博士は「日本には精神疾患の生物学的研究に取り組める場が少なく、うつ病患者の絶対数も足りていない状況が深刻化している」とし、日本はがん研究についての論文発表数は世界第2位だが、うつ病については第8位と大きく出遅れていることを危惧している。精神疾患の原因となる根本的な分子メカニズムは何なのか。その解明のために、臨床および基礎系の精神科医、脳科学者、神経科学者、行動学者などが結集して、多角的に研究を進めるべきだろう。 ■

1. Kasahara T et al, *Mol Psychiatry*. **11**(6):577-593(2006)
2. Kakiuchi C et al, *Nature Genetics* **35**,171-175(2003)
3. Cichon S et al, *Nature Genetics* **36**,783-784(2004)
4. *J. Neurosci. Res.* **84**,1555-1563(2006)
5. Collier et al, *Mol Psychiatry*. Dec;1:453-460(1996)
6. Shioe K et al, *Synapse* **48**,184-188(2003)
7. Santarelli L et al, *Science* **301**,805-809(2003)
8. Weaver IC et al, *Nat Neurosci*. **7**,847-854(2004)

# Drilling for nanotech gold

## ナノテクと電気ドリルの「良縁」

Nature Vol.444 (16-17)/2 November 2006

米国の新興ナノテクノロジー企業が大きな成功を収めた。しかし、ナノテク分野でこの会社のように一夜のうちに成功するのは容易なことではないようだ。Colin Macilwain が報告する。



米国のDIYチェーン「ホーム・デポ」の店内。800ドル（約9万4000円）もする「デウォルト」ブランドのコードレス電動工具セットが並んでいる。通路にいる男たちは、本当はクリスマスにこれが欲しいと思っているようすが、なかなかそれをいい出す勇気は出ないようだ。ところでこの工具、*Nature Materials* 誌に論文が発表されてからわずか4年で実用化されたすごい技術が使われているのだが、おそらく男たちはそのことを知らない。

その技術とは、マサチューセッツ工科大学（MIT、同州ケンブリッジ）で開発された、リン酸塩ナノ結晶を使った電池陰極だ。資金調達、設計、開発、東アジアでの製造を経て、デウォルトの36ボルト電動工具を動かす電池に使われるまでに、4年の年月がかかったことになる。デウォルトはプロ向け電動工具ブランドで、ブラックアンドデッカー社（以下B&D社）が所有している。

B&D社の北米担当・部品調達本部長Jamie Mannは「コードレス工具は、コードつきのものよりもすぐれている。そして、2000回もの充電が可能だ。これは大きい。コードレス工具の登場は工具の使い方を変えたと私たちは考えている」と話す。

このリン酸塩ナノ結晶電池を製造しているのは、マサチューセッツ州ウォータータウンのA123システムズ社（以下、A123社）だ。2002年に設立されたばかりの同社は現在、1億ドル（約120億円）の注文を抱えている。そのあつという間の成功物語は、10月下旬に同州ケンブリッジで開かれた「ラックスリサーチ・エグゼクティブサミット」に出席した投資家たちを感心させた。この会議は、未成熟のナノテクノロジー分野における有力者、あるいは有力者候補向けに開かれた。

しかし、出席者たちはこう忠告された。「MIT生まれのこの電池技術は商業的に成功したが、ナノテク分野の約1500社といわれる新規設立会社のほとんどは、そううまくはいかないだろう」。オクラホマ州の健康関連製品メーカー、ナノバイオマグネティクス社のCharles Seeney社長は「新しい産業ではいつも、最初は誇大宣伝が横行し、そして淘汰が起こる。同じことがナノテクでもあるだろう」と話す。

企業の生き残りにとっておそらくかぎとなるのが、大企業との協力（A123社とB&D社のように）である。A123社を設立したのは、材料科学者のYet-Ming ChiangとBart Riley、

そしてMITの起業家でビジネス仲間のRic Fulopだ。彼らは、どうすれば今のように大々的に成功できるのか、最初から名案をもっていただけではなかった。しかし、彼らはこの会社の可能性を強く信じていた。そして、実務の専門家であり、先端技術で幅広い経験をもつ機械エンジニア、David Vieauを誘い、経営に参加してもらった。しかし、電動工具という用途が開けることになるとは、予想もしていなかったという。「何かしらモーターがついているものを考えていた。ハイブリッド車への応用についてはずいぶん考えた。しかし、私たちの製品の性能を最大に生かす用途がどこにあるかはわからなかった」とVieauは話す。

*Nature Materials* 誌に掲載された論文は基本的なアイデアを説明したもので、微小なリン酸鉄リチウム結晶をどのようにドーピング（不純物を加えること）すれば電気伝導性がよくなるかを示し、この結晶を使って電池の電極を作ることが提案された（S.-Y. Chung, J.T. Bloking & Y.-M. Chiang *Nature Mater.* **1**, 123-128; 2002）。従来のリチウムイオン電池は、直径約1マイクロメートルのコバルト酸リチウムの粒子を使う。粒子がもつ

と小さければ電気伝導性はよくなるが、熱伝導性もよくなってしまい、安全性にかかわる問題を起こす可能性がある。Chiangらの新しい材料は化学的により安定で、直径わずか数ナノメートルの結晶を使うことで最大の性能を発揮できる。この研究結果は、その背後にあるメカニズムをめぐって激しい議論を引き起こした(*Nature Mater.* **2**, 702-703; 2003)。

Chiangによると、ベンチャー企業を起こすというアイデアは、FulopがChiangのオフィスにやって来て、「電池会社を作るというのはどうだい?」といったことが発端だったという。

会社が回転し始めるのに長くはかからなかった。Chiangは、電池ならば自らが以前に起こしたアメリカンスーパーコンダクター社で作っていた高温超伝導電線よりもずっと売りやすいだろうと思った。以前の会社では「開発されて25年もたつような古臭い技術で操業している公益事業に主に売り込んでいた」とChiangは話す。一方、今回の新しい事業の場合、「もっといい電池がどうしても必要かを説明することは、世界で最もやさしいことの1つ」だと彼はいう。新しい会社は、論文の発表前に態勢が整いつつあった。2002年3月にVieauを雇い、すぐにノースブリッジ・ベンチャーパートナーズ(マサチューセッツ州ボストン)、セコイアキャピタル(カリフォルニア州メンローパーク)、のちにA123社の会長になる投資家Desh Dshpandeら、誠実な投資家グループからの支援を得た。

B&D社は当時、急速に拡大するコードレス電動工具市場で、大きく飛躍できるような技術革新を探していた。「とにかく全世界を探し回っていた」とMannは話す。A123社との商談後は、「興奮はしたが、極めて慎重だった。私たちは年間売り上げ50億ドル(約5900億円)の企業で、相手はボ

ストンの10人の男たち——。うまくいきそうに思えたが、リスクもたくさんあった」と彼は思い出す。

交渉実現の前に立ちばだかったのは、リチウムイオン電池業界の現状だった。この業界は、豊富な資金を持ち、自社内で大規模な研究を行っているソニーなどの日本の大企業に支配されている。特許弁護士は、日本企業がリン酸塩技術の進展に気づいているかを調べるために徹底的に情報を集めた。しかし、気づいてはいなかった。

MannはVieauに、粉末製品を大量に作ることに成功したら、契約の可能性があると告げた。A123社は2004年初めまでに、1か月に1キロの化合物を生産できるようになった。これには台湾のメーカーが協力したが、この会社はまもなく倒産した。A123社では事業を続けるためにさらに2000万ドル(約24億円)の資金を調達し、最初のプロトタイプ of 電池を作った。そして2005年5月、B&D社との契約書にサインした。

この契約は、同社がこの技術をB&D社のライバル会社に売ることを禁じる一方で、その電池の大量購入を保証するものだ。このような協定は、ナノテクの新興企業が成功するためにはますます重要になっている。B&D社はさらに、株式を保有して資本参加することを提案したが、A123社はそれには同意しなかった(電子機器メーカーのモトローラ社がすでに株式を保有していた)。株式の公開は検討されているが、少なくとも12か月は先だとVieauはいう。

控えめにいっても、A123社のような順調な成功はナノテクの新興企業としては異例だ。ケンブリッジでの会議を準備したニューヨークのコンサルタント会社、ラックスリサーチ社は、ベンチャーキャピタルの援助を受けている136社について、提携企業としての魅力の格付けを試み

た。A123社は、マサチューセッツ州ノースポロにある断熱材メーカー、アスペン・エアロジェルスと同点で2位だった。1位とされたのは、ニュージャージー州サマセットの光学機器メーカー、ナノオプトだ。

時代の最先端をいく「ナノテク」という看板は、常に投資家にいい印象を与えるのに役立つというわけではない。マサチューセッツ州ウェバーンのメモリーチップ会社、ナンテロのGreg Schmergel社長は「その言葉は、どういうたくいの技術革新を抱えているかを示す、すばらしい看板ではある」と話す。「大事な話にとりかかると、ナノテク企業であることは大いに役立つことをいつも感じた。ただし、投資家との会話の最初の1分だけだが」と、彼は皮肉っぽくいう。

しかし、ナノテクの支持者たちは、ナノテク分野は成熟しつつあると主張する。ラックスリサーチ社のMatthew Nordan社長は「ナノテクの時代は今だ」という。彼は、この分野は「変曲点」にあり、今後も技術的発見は続くものの、技術の商品化のほうが主体となる、と話す。

より大きなパートナー企業との契約で起こる化学反応は、実験室内での化学反応と同じく重要だ。MannとVieauが、互いの提携の、短いけれど生き生きした歴史を話すようすを見ていると、両社が互いに敬意と理解をもっていることがよくわかる。

しかし、成功への本当のかぎは、それが健康管理商品であれ、電気ドリルであれ、実際に存在するニーズへの解決策であることだ。MITの起業家活動センターのKen Morseセンター長によると、「(成功の仕方をいちばんよくわかっている連中は)ナノテク業界にはいない。そうした人間がいるのは、ソリューションビジネス(顧客の抱える経営課題に対する解決策を提供するビジネス)業界だ」と話している。■

Nature 2006年10月26日号のNews Feature (The Christmas Invasion) では、クリスマスに目を楽しませてくれる赤い葉をしたポインセチアに、やっかいな害虫であるコナジラミが繁殖していることがあると報告されています。コナジラミが媒介する植物の病気は、農作物に多大な被害を与えます。

ここでは、その記事のコラムに書かれたコナジラミによる被害を受けたメキシコのトマト農家が科学者と手を組んで、DNA解析技術を使って被害を食い止めようとする試みについて取り上げます。

## News Feature (box)

語数：655 words 分野：植物・農業・バイオテクノロジー

Nature 443, 900 | doi: 10.1038/443898a; Published online 25 October 2006

### Whitefly infestations: The Christmas Invasion At the sharp end

Rex Dalton

[http://www.nature.com/nature/journal/v443/n7114/box/443898a\\_BX1.html](http://www.nature.com/nature/journal/v443/n7114/box/443898a_BX1.html)



1. Like a parent with a sick child, the **rancher** brought the **stunted** tomato plant to Jesús Méndez Lozano for help. "Why are my plants dying?" he asked.
2. With the equipment in his small lab, Méndez, who works for the National Polytechnic Institute in Guasave, Mexico, found that there was **foreign DNA** in the sick plant. This DNA had the same **molecular weight** as that of the dreaded **tomato yellow leaf curl virus (TYLCV)** — **indigenous to** Egypt and first found in the Western Hemisphere in 1994 in the Dominican Republic. Méndez sent the DNA to a larger lab for sequencing. Two weeks later, his fears were confirmed.
3. Thanks to the whitefly, a **pest** farmers on Mexico's Pacific coast have been struggling with for 15 years, TYLCV had been provided with a route up from Central America. Now it had invaded the largest winter tomato producing region in North America.
4. "I will never forget that day last November," says Méndez. Neither will the ranchers of Sinaloa, the state in which Méndez is based and where the tomato is so important that its picture appears on vehicle number-plates.
5. Agricultural authorities estimate that last winter about 75% of the state's tomato crop was **wiped out** by the virus, with the effects getting worse as the season went on. Ranchers who had started off losing 30% of the first planting were losing 100% by the third. They didn't even try a fourth.
6. There is no cure for the virus, and the cost of **pesticides** to kill the whitefly — the **B-biotype**, in this case — is too much for many small farmers. Last winter's economic damage was so severe, a drive through the state shows ranchers often can't afford to **plough** over old plants or weeds, a failing that allows the virus and its whitefly host to **get better established**. In 2006, as part of an integrated management plan, the summer planting season for soya beans in Sinaloa was largely **halted**, thereby denying the whiteflies **sustenance**. In 2005, federal **subsidies** for soya beans — provided despite the objections from tomato ranchers — is thought to have worsened the effects of the tomato virus.
7. To know how to treat this sort of **viral infection**, a farmer has to distinguish between different types of **geminivirus** — the family to which TYLCV belongs. Méndez's lab at Guasave, a prosperous community on Mexico's main north-south highway, is an example of how the necessary **expertise** can be provided. In the five years since he and his researcher wife Norma Leyva Lopez arrived, they have upgraded the facility to offer the most advanced analysis, such as **DNA amplification while-you-wait**.
8. Realizing the importance of such knowledge, nearly 500 ranchers and businessmen came to a scientific conference on the **control** of whitefly and viruses that was held in late August in the nearby city of Mazatlan.

9. "Ranchers will come in with a scientific article and ask: 'Can you do this?'" says Méndez, who did postdoctoral studies at the Scripps Research Institute in La Jolla, California. "I say, 'Yes. But we need more facilities'." To this end, Méndez is building support for a new agricultural biotechnology lab.
10. South America, Africa and Asia all face similar challenges as they seek to offer on a worldwide basis **niche crops** that will bring high prices when they are not available from traditional growing regions. Stations such as Méndez's are the **outposts** with which scientists from developed regions must work to defeat **invasive pests**.
11. One reason for such collaboration is that the pests, while limited by available food and climate, do not respect national borders. TYLCV has recently been identified in tomatoes in southern Texas, says Robert Gilbertson, a **plant pathologist** at the University of California, Davis. "I don't mean to be **Chicken Little** and say the sky is falling, but we are getting worried," he says. "There are no US controls on plant movements. It takes only one tomato **transplant** to get the virus started."



コナジラミが恐ろしいトマト黄化葉巻ウイルスをメキシコの農場に広げる。

### Science key words

- タイトル **whitefly**: 「コナジラミ」  
半翅目昆虫の一科。植物の害虫として重大な被害を与える。
2. **tomato yellow leaf curl virus (TYLCV)**: 「トマト黄化葉巻ウイルス」  
トマト黄化葉巻病の病原ウイルスで、コナジラミが媒介する。トマト黄化葉巻病に感染すると、植物の葉の色が黄色く変色したり葉が巻かれたりして、実がならず収穫が減るなどの大きな被害をもたらす。日本国内でも1996年に初めて確認されて以来、全国に被害が拡大している。
6. **B-biotype**: 「バイオタイプ B」  
外見上は同じように見える生物を、遺伝子型、寄主生物への影響など生物学的性質の違いによって異なる系統に分類する際の名称である。コナジラミには世界中に約40種類のバイオタイプが存在するとされ、そのうち日本国内にはバイオタイプ B (シルバーリーフコナジラミともよばれる)、バイオタイプ Q などが確認されている。
7. **geminivirus**: 「ジェミニウイルス (科)」  
直径約20nmの正二十面体粒子2個がくっつき合った構造(双球状粒子)のウイルスで、そのゲノムは環状1本鎖DNAによって構成されている。geminivirusは「双子」のこと。

### Words and phrases

タイトル **infestations**: 「はびこること」「(体内に) 侵入すること」  
害虫や寄生虫などの大群が動植物の表面に付着し、あるいは内部に入り込むこと。

1. **rancher**: 「(主に米語) 農場や牧場の経営者あるいは労働者」
1. **stunted**: 「発育不良の」
2. **foreign DNA**: 「本来は存在しない、外来の DNA」
2. **molecular weight**: 「分子量」  
一定の基準によって定めた化学物質の分子の相対的質量。
2. **indigenous to ...**: 「～に元からある、～特産の、～原産の」
3. **pest**: この文脈なら「害虫」のこと。
5. **wiped out**: 「絶滅させる、壊滅させる」
6. **pesticides**: 「(病虫害を駆除する) 農薬」
6. **plough**: 「(土地を) すきで耕すこと」米語では plow。
6. **get better established**: 「よりよく定着する」「ますます足場を固める」
6. **halted**: 「中止された」
6. **sustenance**: 「栄養源」「食糧」  
生命を維持する手段のこと。
6. **subsidies**: 「補助金、助成金」
7. **viral infection**: 「ウイルス感染」
7. **expertise**: 「専門知識」

7. **DNA amplification while-you-wait**:  
DNA amplification とは、微量の DNA サンプルをもとに、検査や実験に必要な DNA 領域だけを大量に増殖させること。ここでは DNA amplification を修飾する語句として while-you-wait が用いられ、「人が待てるような短時間で終了する DNA 増幅」となる。
8. **control**: 「(害虫などの) 駆除」
10. **niche crops**: 「ニッチ作物」  
冬物トマトのように、市場のすき間を埋める作物のこと。niche は「すき間」「特殊分野」。
10. **outposts**: 「前哨基地」「出先機関」  
メキシコの都市部や米国にある研究機関を本部、中央と見立てて、Méndez の研究室を位置づける言葉。
10. **invasive pests**: 「侵入害虫」  
外国あるいは本来の生息地から入ってきて棲み着いてしまった害虫。
11. **plant pathologist**: 「植物病理学 (plant pathology) の研究者」
11. **Chicken Little**: 「悲観主義に凝り固まった人」  
もともとは寓話の登場人物の名前。落ちてきたドングリが頭に当たっただけで「空が落ちてくる」と騒ぎ立てたことから、声高な悲観論者や臆病者のことを指すようになった。
11. **transplant**: 「移植」

## News Feature (box)

## 参考記

Nature 443, 900 | doi: 10.1038/443898a; Published online 25 October 2006

コナジラミの来襲：クリスマス侵攻作戦

### 最前線にて

レックス・ダルトン

[http://www.nature.com/nature/journal/v443/n7114/box/443898a\\_BX1.html](http://www.nature.com/nature/journal/v443/n7114/box/443898a_BX1.html)



- その農場主は、病気の子どもを抱きかかえた親のように、成長の止まったトマトの木を Jesús Méndez Lozano のもとにもち込んで、助けを求めた。「どうして私のところのトマトは枯れてきているのですか」と彼は尋ねた。
- メキシコ国立工科大学 (グアサベ) に所属する Méndez が、その小さな研究室の設備を使って調べたところ、この病気のトマトに外来の DNA があることを発見した。この DNA は、恐ろしいトマト黄化葉巻ウイルス (TYLCV) と同じ分子量だった。このウイルスはエジプト原産で、西半球では 1994 年にドミニカ共和国で初めて発見された。Méndez は、より大きな研究施設に DNA 配列解読を依頼した。その 2 週間後、彼の恐れたとおりだったことが確認された。
- TYLCV は、メキシコの太平洋沿岸地方の農家が 15 年間にわたって苦しんできたコナジラミという害虫によって、中米から北上することができ、北米最大の冬物トマト生産地に侵入したのだ。
- 「昨年 11 月のあの日のことは決して忘れません」と Méndez は話す。この農場主も同じことだろう。彼は、Méndez が本拠とするシナロア州の出身で、この州ではトマトが重要な作物であることから、車のナンバープレートにまでトマトが描かれている。
- 農業当局は、去年の冬に同州内でのトマト収穫量が TYLCV によって約 75% 減少し、収穫期の後半に入って被害は拡大したと推定している。最初の作づけで収穫量が 30% 減となった農場主は、3 回目の作づけで 100% 減となり、もはや 4 回目を試みることはなかった。
- このウイルスを駆除する方法はなく、コナジラミ (この場合はバイオタイプ B) を駆除するための農業は、多くの小規模農家にとって高価すぎる。昨年冬の経済的損害が非常に深刻だったため、多くの農場主が今年のトマトや雑草を掘り返す金がなく、放置された土地ではウイルスや宿主のコナジラミが定着しやすい状態になっていることが州内の巡回で判明した。2006 年には、統合管理計画の一環としてシナロア州内の多くの地域で夏の大豆の作づけが中止され、コナジラミの食糧源を断ち切った。メキシコ政府が、2005 年にトマト農家の反対にもかかわらず大豆の補助金を支出したことで、TYLCV の被害を拡大させてしまったと考えられている。
- この種のウイルス感染を治すため、農家は、TYLCV が属するジェミニウイルスの複数のタイプを見分けなければならない。メキシコを南北に貫く幹線道路に面したグアサベという繁栄したコミュニティにある Méndez の研究室は、必要な専門知識がどのように提供されるのかを示した一例である。彼とその妻でやはり研究者である Norma Leyva Lopez がこの町に移り住んでから 5 年間に設備の性能が高められ、短時間の DNA 増幅といった最先端の解析ができるようになった。
- そのような知識の重要性に気づいた約 500 人の農家やビジネスマンが、近くの町マサトランで 8 月後半に開かれたコナジラミとウイルスの駆除に関する科学会議に出席した。
- スクリプス研究所 (米国カリフォルニア州ラホーヤ) でポストドク研究を行った Méndez は、次のように語った。「農場主が科学論文を片手に訪ねてきて、『これができるか』と聞いてくるのです。私は『できるけれど、設備を増やす必要がある』と答えます」。このために Méndez は、新たな農業バイオテクノロジー研究室創設への支持を固めているところだ。
- 南米、アフリカ、アジアの諸国は、全世界に向けて、通常の生産地での収穫のない季節にニッチ作物を供給し、高い収益を上げようとしているが、いずれも似たような課題に直面している。Méndez の研究室のような拠点では、先進工業国出身の科学者が侵入害虫を駆除するための研究を行わなければならない。
- そのような共同研究をすべき理由の 1 つは、これらの害虫が、限られた食糧と気候による制約があっても、国境線を意に介さずに移動するからである。TYLCV は、最近になって米国テキサス州南部のトマトから見つかった、とカリフォルニア大学デイビス校で植物病理学を研究する Robert Gilbertson はいう。「『空が降ってくる』といった悲観論を声高に唱えるつもりはありませんが、心配になっています。植物の移動に対して米国政府は何の管理もしていません。トマトの移植がたった 1 回行われただけで、ウイルスは活動を始めるのです」と彼はいった。

Nature Photonicsでは、編集本部を日本に設置し、日本の研究を広く世界に発信していきます。研究論文を、Nature Photonicsに投稿してください。



**Nature Photonics 編集長**  
オリバー・グレイドンより、研究者の皆様にお答えします。

**Q** なぜ光学界向けに新たなジャーナル誌が必要なのですか。

**A** フォトニクス研究に関する論文を掲載するジャーナル誌は数多くありますが、光学界全体にとって重大な意味をもつ極めて重要な研究成果が全て集められているジャーナル誌はありません。多くのジャーナル誌が、質より量を重視する一方で、電気通信やディスプレイ技術といった単一の研究分野に焦点を合わせているジャーナル誌もあります。Nature Photonicsは、光学界向けのジャーナル誌で、フォトニクス関連の情報と厳選された最高レベルの論文のみを掲載します。さらにNature Photonicsでは、これらの論文を補完するレビュー論文やNews and Views記事、市場分析、業界展望、技術の商品化に関する記事も掲載されます。本誌の狙いは、フォトニクスの各分野で活躍する専門家を結集し、産業界と学界の垣根を取り払うことにあるのです。

**Q** なぜNature Photonicsの編集本部が日本にあるのですか。

**A** 日本はフォトニクス研究にとって極めて重要な国で、大学で行われる学術研究もNTT、東芝、富士通、日立、三菱その他の企業の研究開発拠点での応用指向の強い研究も同じように重要です。ところが、この研究の多くは世界の読者に伝わることはなく、研究論文は日本語のみで発表されることが多くなっています。私たちは、編集拠点を日本に設置することで、日本やアジア太平洋地区全体から発信される重要な研究成果を全世界に広める上で重要な役割を果たせるものと考えています。ただしNature Photonicsの発行がグローバルな事業であることに留意する必要もあり、英国や米国にも編集者が配置されています。

**Q** Nature、Nature Physics、Nature Materialsでは、今後もフォトニクスの研究論文を掲載し続けるのですか。そうであれば、どこに論文を投稿すればよいのでしょうか。

**A** 答えはイエスです。これらのジャーナル誌では、今後もフォトニクスの研究論文を掲載し続けますが、それぞれの読者層にとって重要と判断される論文に限定されます。Natureでは、物理

学、生物学、地球科学などさまざまな分野の研究者に幅広く訴求するフォトニクスの研究論文のみが掲載されます。Nature Physicsでは光の基礎物理に関係する研究論文を掲載し、Nature Materialsでは材料の光学特性や光電子工学的特性に関する論文を掲載します。論文の投稿先を決めるのは、あなた自身です。そして、その判断は、どの読者層に研究成果を伝えたいのか、という観点でなされるべきです。もし光学界に向けて発表し、光学の研究者に読んで欲しいと思い、光学に関する研究論文だけが掲載される雑誌での発表を望むのであれば、Nature Photonicsを選ぶべきでしょう。

**Q** 査読制度について説明してください。投稿した論文原稿はどのような扱いを受けるのですか。

**A** あなたの論文については、フォトニクス研究の経験と実績のある編集者の一人が担当となり、この編集者が論文を直接取り扱います。

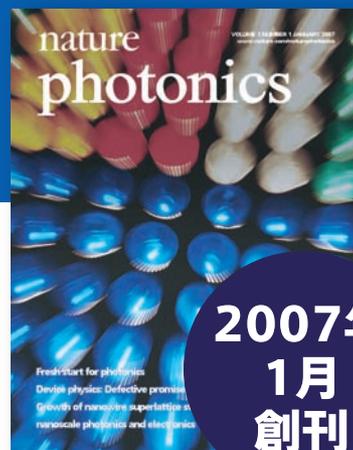
あなたの論文は以下の判定基準によって評価されます。

- 光学界全体に訴求し、インパクトを与えられること
- 関連する過去の文献と比較して、新規性と技術革新性のレベルが高いこと
- 本誌の刊行目的と対象範囲に照らして、論文の掲載が適切であること

論文原稿を受け取ってから7日以内に論文原稿の査読が行われることになったのか、Nature Photonicsには不適切と判断されたか、が著者に通知されます。Nature Photonicsで不採用となった場合、著者は論文原稿を他のNPG系論文誌を含む他のジャーナル誌に自由に投稿できます。

論文原稿の査読が行われる場合、編集者は、対象分野の専門家3人を査読者に選ぶ作業を注意深く行います。この専門家たちは、社内の膨大なデータベースの中から選ばれ、著者との協力関係がなく（独立性があり、バイアスがかかっていないこと）、該当するテーマに関する豊富な知識があり、信頼性が高いことを確認した上で、慎重に選定されます。

査読者の報告書は、研究成果の重要性、論文原稿の改善の余地、科学的論理性の点で、編集者にとっての指針となります。



2007年  
1月  
創刊

# 日本語で読む nature

Nature Digest は、Nature に掲載された社説、ニュース、最新研究の論説を日本語で編集した月刊誌です。さらに、世界的にインパクトを与えた発表の特集記事や日本人科学者へのインタビュー、科学英語に親しむためのコーナーなど日本オリジナルの企画編集記事も充実しており、「仕事や勉強に役立つ。」と多くの方から支持を受けています。

**Nature Digest Online誕生!** ※ 2006年7月号、8月号 **コンテンツ無料公開中!**

Nature Digest のコンテンツが、nature.com に新しく加わりました。すべてのコンテンツが PDF でダウンロードできます。



## ■ Nature Digest対象分野

数学、物理、天体・宇宙・天文学、化学、地球科学、環境、医学、生命科学、バイオテクノロジー、コンピューター、工学 など。

## ■ Nature Digest目次

- Highlight ————— [論文ハイライト抜粋]
- Editorial ————— [社説]
- news@nature.com — [Natureオンラインニュース]
- News ————— [科学ニュース]
- Special Report ——— [特集]
- News Feature ——— [科学ニュース読み物]
- Japan News Feature — [日本の科学ニュース]\*
- News and Views ——— [科学論説]
- Business News ——— [ビジネスニュース]
- Japanese Author ——— [日本人科学者へのインタビュー]\*
- 英語でNature ——— [科学英語トレーニング]\*
- Nature Gallery ——— [自然の写真]\*

\*は日本オリジナルの企画編集記事です。

## 2006年7月 ※ Nature Digest Online 誕生!

### ■ Nature Digest (プリント版+オンライン) 購読価格

口座引落 670円【月々】  
郵便振込/クレジットカード 7,980円【1年】

### ■ Nature Digest Online購読価格

クレジットカード 550円【月々】、6,000円【1年】、10,800円【2年】

ご購入はこちらから

[www.naturejpn.com/digest-f2](http://www.naturejpn.com/digest-f2)