ISSN 1880-0556

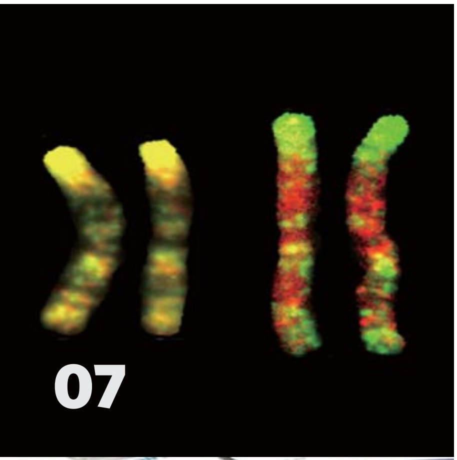
nature DIGEST

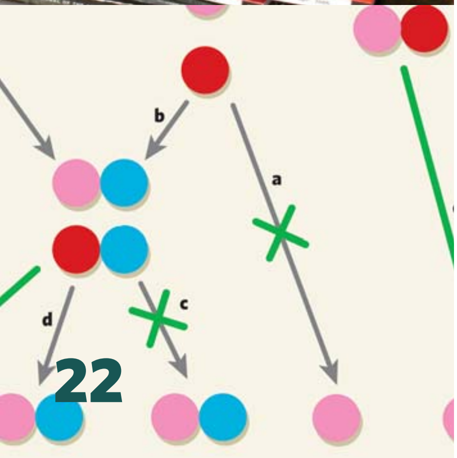
日本語編集版
AUGUST 2005
VOL.02, NO.8
8

http://www.naturejpn.com/digest

中国の燃える野望

nature publishing group npg





nature
DIGEST

08 volume 2 no.08
August
www.naturejpn.com/digest

© 2005 年　ネイチャー・ジャパン
掲載記事の無断転載を禁じます。

NEWS FEATURE

中国の燃える野望

EDITORIAL

02 捕鯨三昧に歯ぎしり
03 消費者の心をつかむトヨタ

HIGHLIGHTS

04 vol. 435 no. 7045, 7046,　vol. 436 no. 7047, 7048

NEWS@NATUREJPN.COM

06 NASA の探査機が彗星の射撃に成功!
07 双子は年齢とともに差が拡がっていく

NEWS FEATURE

08 RNAの翻訳エラーが脳をとかす
Claire Ainsworth

12 中国の燃える野望が地球環境を脅かす
Peter Aldous

BUSINESS NEWS

16 トヨタの研究はビジネスを見すえている
冬野いち子

COMMENTARY

18 不心得な科学者たち
Brian C. Martinson, Melissa S. Anderson and Raymond de Vries

NEWS & VIEWS

22 捕まえにくい魔法数
Robert V. F. Janssens

24 やっぱり男は「火星人」?
David Queller

OBITUARY

27 安芸敬一氏
Paul G. Richards

発行人 : アントワーン・ブーケ
編集 : 北原逸美、セラ・ハリス
デザイン／制作 : 村上武
広告 : 浅見りの子
マーケティング : 吉原聖豪

ネイチャー・ジャパン株式会社
〒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

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

捕鯨三昧に歯ぎしり

Much whaling and gnashing of teeth

Nature Vol.435(856)/16 June 2005

論説

国際捕鯨委員会は混乱状態にあるかもしれないが、ここでしか問題状況を打開できないのである。

6月に蔚山(韓国)で開かれる国際捕鯨委員会(IWC)の年次総会で、海洋生物学者は、かなりの忍耐と不屈の精神を求められることになる。「成功の見込みのない仕事をやっているようなものだ」と科学委員会の予備会議に出席した科学者が不満げに語る。

今年の総会で対立の焦点となっているのは、日本が提案している「調査捕鯨」プログラムにおける捕獲枠の倍増である(*Nature*2005年6月2日号p.550参照)。このプログラムは、1986年にIWCで決定された商業捕鯨の一時停止以降も捕鯨を続けようとする目的がみえみえの制度である。蔚山での総会では、捕鯨賛成派が、IWC史上初めて多数を占めると考えられていることから、この日本の提案は、好意的に受け止められるかもしれない(*Nature*2005年6月16日号p.861参照)。そうなったのは、過去5年間に23か国(生きているクジラにも死んでいるクジラにも、利害関係があるのかどうか疑わしい国々も含まれている)がIWCに新規加盟し、加盟国の総数が62に増えたからだ。反捕鯨国の間では、日本が、南太平洋のキリバスやツバルなどの貧困な小国を「漁って」(反捕鯨国関係者の発言)、援助と引きかえにIWC加盟を勧めたという話がささやかれている。

しかし、IWC加盟国の新たな構成によっても、捕鯨に関する重大決定をくつがえすためには4分の3の多数が必要で、それが実現する可能性は低い。そもそも日本の調査捕鯨プログラムは、IWCの承認を受けていない。これまでに日本は、この問題に関するIWCの拘束力のない決議を無視することもあった。「日本の調査捕鯨プログラムに対するIWCの反対決議は、政治声明であり、非科学的なものだ」と日本側スポークスマン森下丈二(水産庁)は、会議の席で鼻であしらうように発言した。

反捕鯨国は、日本の調査捕鯨プログラムを自然保護活動に対する侮辱とみなし続けており、日本は、その主張を裏づけるような説得力のある査読を経た研究論文を提出できずに苦しんできた。そして今、日本は、IWCの科学委員会の要求に応えるためには、これまで以上に大規模な調査捕鯨プログラムが必要だと主張しているのである。より高度な解析を行うには、より大量のサンプルが必要だといわれて、だれが反論できようか。

これだけの詭弁を聞かされれば、韓国でのIWC総会で研究者が日夜議論を重ねることに果たしてどれほどの意味があるのか知りたくなるかもしれない。

IWCは、非難の嵐にさらされているかもしれないが、無秩序な捕鯨の前に立ちふさがり、きわめて可能性の高い数種類のクジラの絶滅を回避するための国際的な制度を運用している。捕鯨が一時停止される以前は、日本に割り当てられた南半球でのミンククジラの捕獲枠は1,941頭だった。現在提案されている調査捕鯨プログラムでの捕獲枠は935頭なのである。

日本は、不平をいいつつも、国際社会の良き一員とみられることを望んでいる。そのため、荷物をまとめて会議から出て行く可能性は低い。討論の場に残り、時には反対派を激怒させることもあるが、基本的には1つの不完全な国際的プロセスにしたがうのである。保全生物学の研究者も同じように友好国を次々と丸め込んで、IWCに加盟させればよい。そして独特の複雑な過程を経て、クジラを守るための唯一の道を断固突き進むべきである。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

消費者の心をつかむトヨタ

Toyota on a roll

論説

Nature Vol.435(1004)/23 June 2005

日本の工業技術革新への取り組み方は流行遅れかもしれないが、成果はきちんとあがっている。

日本の自動車メーカーであるトヨタ自動車にとって、2005年は当たり年となった。同社の世界的収益が高水準に達したことから、この4月に、奥田碩会長は、肥大化した米国のライバル会社、フォードとゼネラルモーターズが「若干息をつけるように」販売価格を引き上げる可能性を示した。

自動車産業は、数十年前のように景気のけん引役を果たしていないが、自動車は今でも個人消費のきわめて大きな部分を占めている。この産業は伝統的に保守的なのだが、電子や材料、環境工学その他の分野での技術革新が盛んになった。

自動車産業では、科学の基礎研究が、技術革新の数歩先で行われるのが通常である。しかしトヨタは、名古屋市近郊にある豊田中央研究所で、興味深いことを行っている (*Nature*2005年6月23日号 p.1026 参照)。他の分野と同じように、科学的知識が工業的に応用されるまでの移行期間は短くなってきている。

これまでのトヨタの成功は、技術革新というよりもつねに工業的効率の改善であった。それでもトヨタの技術は、過去10年で着実に進歩したのに対し、ライバルの米国メーカーは過去の成功に満足してしまった。保守的に設計された大型スポーツユーティリティー車 (SUV) の販売ブームが過ぎ去った今、米国の自動車メーカーは、突然厳しい現実に直面している。

今年の初め、米国自動車産業の将来的な事業見通しが暗転したために、信用調査機関は、フォードとゼネラルモーターズの一部の社債の格付けをジャンク (投資不適格) 級に引き下げるという、両社にとって屈辱的な決定をした。これが奥田会長の発言に結びついたようだ。同会長は米国自動車産業が新たな危機に見舞われると、保護貿易主義が台頭してトヨタが損害をこうむる可能性があると思ったのである。そして6月に入って、ゼネラルモーターズは、北米の工場労働力の約4分の1に当たる2万5000人の人員削減計画を発表した。

おそらくトヨタと米国のライバル会社との最も際立ったちがいは、環境技術の発展に取り組む姿勢だったといえよう。米国の大手自動車メーカーの幹部は、まるでパロディーを演じているかのようだった。彼らは、クリントン大統領がおおいに吹聴した新世代自動車共同開発計画 (Partnership for a New Generation of Vehicles) によって、多額の補助金を受け取る見返りに規制緩和を求め、開発計画への参加があたかも納税者の利益になるかのように振舞ったのだった。この計画は実施されたが、すぐに消滅した。そして昨年、原油価格が青天井で高騰したときに、準備ができていたのは、超低燃費の「ハイブリッド」車を発売した日本のトヨタ、ホンダであり、ゼネラルモーターズやフォードではなかった。

科学技術や技術革新に対するトヨタの取り組みは、けっして奇抜なものとはいえない。奇抜なことはできないのだ。消費者の手元に届いたとき、製品がきちんと動かなければならないことを同社はわかっているのである。トヨタの研究者やエンジニアは、カリフォルニアのシリコンバレーがモデルとなるような現代の華やかな技術革新パラダイムには当てはまらない。むしろ、彼らは細心の注意を払い、会社に非常に忠実で、共同作業に基づいた考え方をもち、目立たないようにすることに熱心だ。これによって立派な成果があがっており、技術革新の成功には、さまざまな形があることを示している。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

vol.435 | no. 7045, 7046 vol.436 | no.7047, 7048

粉粒体の謎
Go with the flow

砂は我々がその上を歩くとき固体のようにふるまうが、砂時計では流体のように流れるのはなぜか。今週号の 2 本の論文で、隣り合う粉体粒子間に働く力のネットワークを研究することによって、この古くからある謎の解決が試みられた。

H Jaeger たちはゆっくり回転するプランジャーを使って、シリンダーに充填したガラスビーズにせん断力をかけた。シリンダーの底では、壁付近のビーズはゆっくり流れ、中心付近のビーズはぎゅうぎゅうに詰められて、固体ブロックのように回転する。流れる状態からぎゅうぎゅう詰めの状態への遷移に伴って、ビーズ間の力のネットワークは大きく変化する。言い換えると、ぎゅうぎゅう詰めにされた状態が持つ明瞭な構造上の特徴が見いだされたのである。

R Behringer と T Majmudar は、プラスチック製の円板状の粒子を使い、円偏光子を通して粒子が示す応力パターンを観察した。高密度に詰められた系と低密度に詰められた系を比較したところ、低密度の系は 1 つの方向では圧縮されるが、もう一方の方向では膨張することがわかった。これら 2 つの系は力のネットワークが大きく異なるが、意外なことに、高密度に詰められた系の力分布は Jaeger たちの流れるビーズと似ている。「この 2 つの実験は力のネットワークの少し異なる性質を調べたものだが、それにしても、双方の結果を両立させるような説明を導き出すのはむずかしい」と M van Hecke が News and Views で述べている。

23 June 2005 Vol.435/Issue 7045

letters p.1075, 1079, N&V p.1041 参照

マラリアへの抵抗力：ヘモグロビン C の防御効果
RESISTING MALARIA: The protective effect of haemoglobin C

ずっと以前から、ヘモグロビン C と呼ばれる変異は、進化の過程でマラリアによる選択を受けてきたと考えられてきたが、西アフリカで実際に子供たちをマラリアから守っていることが実地調査で明らかになったのは、ごく最近である。今回、この防御の仕組みが解明された。正常なヘモグロビン A をもつ赤血球では、マラリア原虫が細胞表面に接着タンパク質 (PfEMP-1) の突起をむらなくつくるため、感染赤血球は血管壁に接着できて、脾臓による破壊を免れる。ヘモグロビン C は、この突起の分布に異常を起こさせて PfEMP-1 の細胞表面での呈示を少なくさせるため、血管壁への接着が妨げられる。表紙は、両面が凹んだ非感染赤血球、マラリアに感染した赤血球で見られる典型的な突起分布、ヘモグロビン C をもつ感染赤血球で見られる異常な突起分布を示す。(Graciela R. Ostera と Elizabeth Fischer による SEM)

23 June 2005 Vol.435/Issue 7045

letters p.1117 参照

エアロゾル削減が招く将来の気候温暖化
Present-day 'protection' from aerosols implies a hot future

今週号掲載の論文によれば、地球温暖化の影響は、結局は気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の最悪の予測よりも深刻なものになるかもしれない。大気中のエアロゾルは、量的にはっきりしないものの地球温暖化をうち消すように働いてきた。そしてこの温暖化を「防ぐ」働きは、エアロゾルの量を減らし空気をきれいにしようとする取り組みのせいで、将来、弱まってしまうかもしれない。これは、増大しつつある温室効果ガス排出量に対する気候の感度についての我々の理解に極めて不確かな要素を持ち込むことになる。

IPCC の報告書の予測では、気候感度、つまり大気中の二酸化炭素の倍増による地球全体の気温の平均的上昇は 1.5℃から 4.5℃程度と広がっていて、真の気候感度の範囲をこれ以上しぼりこむことは困難である。その理由として特にあげられるのが、エアロゾルが及ぼす気候強制力についての理解がまだ不完全だという点である。

M Andreae らはこの重要な問題を、慎重に単純化した手法を用いてできるだけ定量的に追求し、気候感度が現在最も妥当と考えられている範囲内に収まるのはエアロゾルの強制力、つまり影響が現在の気候モデルで予測されているよりもかなり小さい場合のみであることを見出している。また、エアロゾルの強制力について現在の予測幅の中央となる値を使った際に算出される気候感度を用いた場合、最も楽観的な排出シナリオ以外では全て、2100 年までに気温上昇が 6℃を上回ることもわかった。

彼らの解析は、21 世紀中の気候変化が IPCC の現在の見積もりの上限値に沿って推移し、ことによるとそれを上回る可能性さえあることを示唆している。気候がここまで変化するというのは我々の経験や科学的な知識の範囲をはるかに超えたものなので、その結果地球が将来どうなるのかは予測することもできないと、著者たちはつけ加えている。

30 June 2005 Vol.435/Issue 7046

progress p.1187 参照

血管を巡る磁石
Magnets coursing through my veins

無害な磁性液体を患者に注入することで、患者の体内を高い精度で観察できるようになる。磁気共鳴画像法 (MRI) ではこのような液体を使って、生体組織から生じる弱い磁気信号のコントラストを高めている。今週号に発表された新しい技術では MRI 装置と同じような外部磁場が使われているが、磁性液体の分布を直接画像化するところが MRI とは違っている。

B Gleich と J Weizenecker は、注射した液体中の粒子が作る磁場を直接検出することで、体内の幅 1 ミリメートル以下の微細構造が観察可能だと報告している。また、この磁気粒子画像法 (MPI) は、亀裂の検出など材料科学への応用も期待できそうだと彼らは考えている。

「磁気粒子画像法は感度をもっと高くできるので、この能力がフルに発揮されれば、高速でパワフルな技術となると期待され、しかも比較的安価なモバイル・スキャナーとなるだろう」と A Trabesinger が News and Views で述べている。

30 June 2005 Vol.435/Issue 7046

progress p.1214, N&V p.1173 参照

中国が世界で占める位置：巨大な国が環境に及ぼすインパクト
CHINA'S PLASE IN THE WORLD: Environmental impact of a giant

中国の環境問題は、世界の中でも群を抜いている。それは中国が世界の人口の 5 分の 1 にあたる人間を抱えているという理由だけではない。中国の大規模で急速に拡大しつつある経済もその一因である。国際化の拡大は、これが中国にとってだけではなく、世界にとっての問題であるということを意味している。今週号の Feature では、J Liu と J Diamond が、ばらばらに発表されたために中国人読者でも全貌を把握しにくく、まして や西欧社会の読者にはほとんど入手できない

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

※「今週号」とは当該号を示します。

ような文献を詳細に調べ、まとめあげて、中国における広範ですさまじい環境変化と社会経済学的な問題の及ぼす影響を考察している。表紙は、上海の有名なショッピング街、南京路の人ごみ。国際化の影響がはっきり見られる (写真提供 :Mark Henley/Panos)。今週号ではまた、P Aldhous が、エネルギーの爆発的需要増加に対処しようとする中国の計画について報告している。

30 June 2005 Vol.435/Issue 7046

News feature p.1152, feature p.1179 参照

タバコの脳への活性化刺激と嗜癖は結びついている

Cigarette brain boost inseparable from addiction

ニコチンは脳に活性化刺激を与えるが、ニコチン嗜癖により今世紀中に 1 億人もの人が命を落とすと言われている。マウスでの新たな研究で、脳の活性化とニコチン嗜癖に、脳の同じ系がかかわっていることが明らかにされた。つまり、活性化と嗜癖は切り離せそうもないことになる。

J-P Changeux たちの報告によれば、脳の腹側被蓋野 (VTA) という領域にある、ニコチン性アセチルコリン受容体と呼ばれる細胞表面タンパク質のサブユニットの 1 つが、両方の作用を仲介するという。彼らはこの分子をもたないマウスを作出し、脳の VTA 領域特異的にこの分子を再発現させて、この事実を発見した。

行動試験では、VTA で受容体機能が回復したマウスは、受容体を欠失したマウスに比べて、ニコチンを探し求める率が高かった。また、これらのマウスの活動を観察したところ、受容体機能回復マウスでは探索行動が多くみられた。

7 July 2005 Vol.436/Issue 7047

Letters p.103, N&V p.31 参照

火星の眺望 : 火星探査車があげた成果

MARTIAN VISTAS: Results form the Mars Exploration Rover mission

表紙は、火星探査車 (MER) スピリットがハズバンドヒルを登る探査を行ったときに、搭載されたパノラマカメラが撮影した写真から作った「ラリーの見晴らし台」のパノラマの一部である。この頂上は火星探査車からおよそ 200 メートル離れている。今週号の 6 本の論文は MER のミッションに関する詳細な報告である。冒頭の論文では、着陸地点の選択に用いた予測と実際に現地で遭遇した条件を比較している。この「地上探査」の結果は、将来的にリモートセンシングで得られるデータの解釈にきわめて貴重となる。表面の化学的特性からは、土壌の上層が 1% の隕石物質を含む可能性を示している。MER は、火星の月フォボスとデイモスによる太陽面通過を他の惑星表面から観測するという珍しい機会を与えてくれた。火星探査車オポチュニティは風のかかわる過程を調査し、分光分析からは大気中の塵が玄武岩起源であることが示されている。グセフクレーター内の特徴は、火星の過去において流体の水が果たした役割についてさらなる情報をもたらした。関連する News and Views では MER のデータとそれに関連する状況が論じられている。

7 July 2005 Vol.436/Issue 7047

analysis p. 44, articles p. 49, letters p. 55, 58, 62, 66, N & V p. 42 参照

眠り姫が生み出す変異体

Mutants arise from Sleeping Beauty

動物でランダム変異誘発を可能にする新しい系が開発された。この系は、腫瘍形成への影響といった遺伝子機能の重要性を解明するための新しい強力な手段となる。今週号では 2 つの研究グループが、ゲノム内でジャンプする DNA 断片であるトランスポゾンの 1 種 *Sleeping Beauty* の改造版について報告している。この名前は、このトランスポゾンが通常は不活性 DNA として休眠状態にあることに由来する。しかし今回、マウスでこのトランスポゾンの転位能を呼び覚ますことに成功した。この成果は、哺乳類でランダム変異を効率的に作り出すために役立つと考えられる。

D Largaespada たちが設計した *Sleeping Beauty* トランスポゾンは、ゲノム内でジャンプして DNA 配列のさまざまな場所に自己を挿入することで遺伝子の発現を促進したり抑制したりする。一方、N Jenkins の研究グループは、遺伝子工学的手法で *Sleeping Beauty* を小型化し、その転位に関与するタンパク質を多量に発現するマウスを作り出した。

「この技術は非常に強力な手段となるだろう。なぜなら転位を触媒する酵素トランスポザーゼは特定の細胞あるいは特定の発生段階で選択的に発現するように設計できるので、その細胞または決まった時期にのみ転位を引き起こすことができるからだ」と K Weiser と M Justice は News and Views で述べている。

14 July 2005 Vol.436/Issue 7048

articles p.221, letters p.272, N&V p.184 参照

アセチレンを巧みに分離する

Acetylene achieves splendid isolation

アセチレンを極めて選択性高く吸着する多孔性物質で、この気体の精製に使えそうなものが見つかった。アセチレンは、高温の炎を作るための燃料としてよく使われるが、化学工業やエレクトロニクス産業でも広範囲に利用されている。しかし、アセチレンは圧縮しすぎると爆発するため、大量に貯蔵するのがむずかしい。

北川進たちは、多孔性の有機金属化合物を使って、アセチレンをよく似た分子である二酸化炭素から効率よく分離できる可能性があることを発見した。この化合物は、自由アセチレンを室温で安全に圧縮できる限界値の 200 倍の密度で貯蔵することもできる。「彼らの方法を他の産業上重要なガスに拡張できれば、この研究分野に大きく貢献するものとなるだろう」と G Férey は News and Views で述べている。

14 July 2005 Vol.436/Issue 7048

letters p.238, N&V p.187 参照

生殖細胞の発生 :*Blimp1* の予想外の役割

GERM-CELL DEVELOPMENT: An unexpected role for *Blimp1*

ヒト BLIMP1 とマウスの Blimp1 は、網膜芽細胞腫タンパク結合ジンクフィンガータンパク (RIZ) などを含むヒストンメチルトランスフェラーゼファミリーに属している。Blimp1 は、成体の免疫系に欠かせない形質 B 細胞分化の「マスター調節因子」である。今回、Blimp1 はマウスの発生のごく初期に行われる始原生殖細胞の指定に非常に重要な役割を持つという予想外の結果が明らかにされた。始原生殖細胞のもとになる創始細胞は、体の他の部分を作る細胞になるべく運命づけられた周辺の細胞から分かれて、最終的には発生中の胚の生殖腺へと到達する。Blimp1 は、このような始原生殖細胞の創始細胞集団の確立と維持に不可欠で、その理由の 1 つは、Hox 遺伝子の発現を抑制するためらしい。表紙は、初期原条期胚 (上段) と初期尿膜芽期胚の Blimp1 陽性細胞。

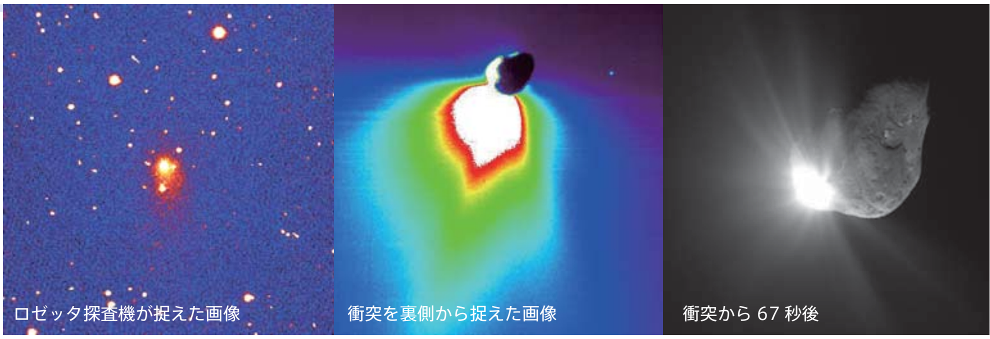
14 July 2005 Vol.436/Issue 7048

articles p.207 参照

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

NASA の探査機が彗星の射撃に成功！

Smashing success for Deep Impact probe



ロゼッタ探査機が捉えた画像　衝突を裏側から捉えた画像　衝突から 67 秒後

左より：ESA, NSA/JPL-Caltech/UMD, NSA/JPL-Caltech/UMD

テンペル第 1 彗星への衝突で多量の物質が放出された。

doi 10.1038/news050704-2/4 July 2005

Mark Peplow

米航空宇宙局 (NASA) が打ち上げた彗星探査機「ディープインパクト」から打ちだされた衝撃弾 (インパクター) は 7 月 4 日、見事にテンペル第 1 彗星に命中し、彗星の核から初期太陽系の手がかりを秘めた破片が飛び散った。

ディープインパクトが衝撃弾を打ちだしたのは 7 月 3 日だった。衝撃弾は洗濯機ほどの大きさで、おもに銅でできており、重さは 3 分の 1 トン。時速 3 万 7000 キロで 7 月 4 日 5 時 52 分 (グリニッジ標準時) に衝突した。ディープインパクトは、安全な距離から衝突のようすを観察した。

ジェット推進研究所 (カリフォルニア州パサデナ) のミッション責任者、Rick Grammier は「衝撃弾は正確に目標に命中し、完全に蒸発した」と話す。

クレーターの形状からは彗星の地殻の強度がわかり、放出された破片からは初期太陽系の特徴についての手がかりが得られるだろうと科学者たちは期待する。

彗星は「汚れた雪玉」のようなもので、約 46 億年前、太陽系の惑星が形成された当時から存在している。彗星は原始の地球に水と、炭素を含んだ単純な分子を運び、それがやがては地球上の生命につながる化学反応を方向づけたとみられている。しかし、彗星内部の組成と構造はほとんどわかっていなかった。

ロンドン大学ユニバーシティカレッジのムラード宇宙科学研究所の Andrew Coates は、ロンドンでの記者会見に届いた最初の映像を見た。「テンペル第 1 彗星の内部から放出された物質を分析することは、時をさかのぼるようなものだ。今回の探査は、これまででもっとも大胆で独創的な実験のひとつだ」と Coates は話す。

予想より大きかった雲

ディープインパクトは、飛んでくる破片を避けるためにハッチを閉めるまで、衝突のようすを約 13 分間観察した。ディープインパクトはその後 24 時間、立ちのぼる破片の雲の化学組成を分析し、地球に送る。放出された物質がつくる円すい形の形状と輝きはすでに、幅約 4 キロ、長さ約 14 キロのテンペル第 1 彗星の核の構造に関する手がかりを科学者たちに与えている。

英国・カーディフにあるウェールズ大学の天文学者、Paul Roche は「大量の物質が放出された。皆が予想していたよりもずっと多い」と話す。Roche はハワイのフォークス望遠鏡で研究しており、この望遠鏡も衝突の映像をとらえた。「立ちのぼった破片の雲が大きかったことは、彗星の地殻が予想よりも弱かったことを示しており、彗星の形成時からその内部にあった物質を調べることができる可能性が高まった」と Coates は説明する。

今回の計画の主任研究者 (PI) であるメリーランド大学カレッジパーク校の Michael A'Hearn も「できたクレーターはとても大きいようだ」とみている。A'Hearn は、できた穴はサッカー競技場ほどの大きさかもしれないと見積もった。

今回の探査を天文学史上最大の計画という人もいる。世界中の天文台と宇宙天文台から続々とデータが届いている。

火薬 5 トンに相当

ディープインパクト計画には 3 億 3000 万ドル (約 370 億円) の費用が投じられ、探査機は 2005 年 1 月 12 日に打ち上げられた。彗星は 7 月 4 日現在、地球から約 1 億 3400 万キロ離れた位置にある。衝撃弾は彗星を視野にとらえると、自動誘導メカニズムで彗星のもっとも明るい場所をねらった。衝撃弾に搭載されたカメラは、衝突の 3 秒前まで衝突の様子を記録した。カメラはクローズアップで彗星の表面をとらえ、これまでのいん石衝突が残したクレーターを撮影した。

「衝突の爆発力は TNT 火薬 5 トンに相当する。しかし、彗星が破壊されたり、地球へ向かうような軌道変更をする恐れはまったくなかった」と Roche は話す。彗星は衝突によってわずかに押され、本来の軌道から 20 年間で 300 メートルだけずれる。

これまでの宇宙探査計画で、ハレー彗星、ボレリー彗星、ワイルド 2 彗星の表面が調査された。また、欧州宇宙機関 (ESA) が打ち上げた彗星探査機「ロゼッタ」は、2014 年 5 月にチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星の表面に着陸船を下ろす計画だ。■

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

双子は年齢とともに差が拡がっていく
Twins grow apart as they age

DNA が環境によってどう変化するかが、遺伝子レベルの試験で解明される。

doi:10.1038/news050704-3/4 July 2005
Roxanne Khamsi

一卵性双生児は自分たちが考えるほど似ていないのかもしれない。一卵性双生児間の遺伝子発現の差が加齢にともなって拡大することを示す研究が行われた。双子の片方が糖尿病などの遺伝性疾患にかかる一方で、もう片方がごく健康に過ごす例がある理由は、この知見によって説明できると考えられる。

一卵性双生児は 1 つの胚が発生のごく初期に分離して生まれてくるため、同一の遺伝子をもっている。このような双子は外見上区別がつかないが、時とともに健康状態がまったく異なってくる場合がある。こうした差は環境や生活習慣のちがいによるものと、多くの研究者は考えている。環境や生活習慣などの要因は、DNA やヒストン (DNA 結合タンパク質) を化学変化させるきっかけとなる。この種の化学変化の 1 つであるメチル化は遺伝子の発現に影響をおよぼし、これによって健康が損なわれることがある。

スペイン国立がんセンター (マドリード) の Mario Fraga は「DNA メチル化の変化が環境の影響を受けていると考える人はこれまで大勢いましたが、今回、それが初めて裏づけられました」と話す。この研究結果は『米国科学アカデミー紀要』に掲載された [1]。

メチル化で病気の遺伝子が活性化される

一卵性双生児間に生ずる遺伝子発現の差を評価するため、Fraga たちは 3 ～ 74 歳の双子 40 組から集めた遺伝学的材料で試験を行い、DNA メチル化の程度を推定した。上図に示すように、コンピューターで作成して得られた画像には、メチル化に大きな差のある領域がはっきりと表示されている。

DNA とヒストンにおける化学修飾の程度が大きく異なっていた例は、双子全体の 3 分の 1 におよんだ。ただし、その差は双子が高齢であるほど大きく、28 歳以上では、全体の 60% をこえる双子に有意な差が認められた。

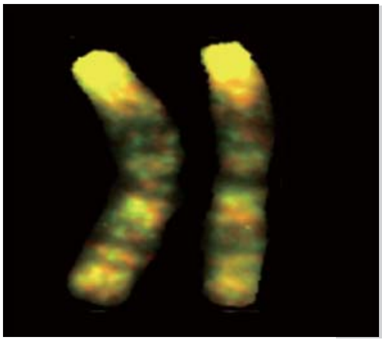
このような化学修飾は疾患の罹病性に容易に影響すると思われる。Fraga らは、双子の兄弟で、片方が化学修飾によって活性化された糖尿病遺伝子をもつ糖尿病患者で、もう片方は当該遺伝子が活性化されておらず健康体である例を発見した。

さらにこの研究では、ふたごが離れて過ごす期間が長いほど遺伝子活性化パターンのちがいが大きくなることも明らかにされた。このことも、環境因子が遺伝子発現に強く影響するという考え方を支持している。

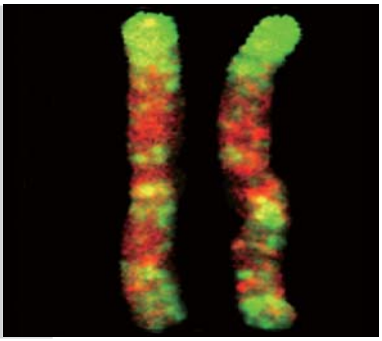
Fraga たちは、遺伝子に対する化学的作用のどれだけが疾患のリスク因子に影響しているのかを調べるためには、このような研究が有効だろうと話す。同じくスペイン国立がんセンターの研究メンバーである Manel Esteller は「これが遺伝子のメチル化の役割を突きとめるための方法になるかもしれません」と語る。■

参考文献

1. Fraga M. F., *et al. PNAS*, published online, doi:10.1073/pnas.0500398102 (2005).



左側の 3 歳の双子の染色体はほとんど同一だが、右側の 50 歳の双子では、赤色と緑色の遺伝子の発現に差が認められる。



PNAS

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

Lost in translation RNA の翻訳エラーが脳をとかす

Nature Vol. 435 (556-558)/2 June 2005

小児の脳をとかしてしまう謎の病気の原因は、RNA の翻訳段階におけるエラーにあった。研究者たちは、この恐ろしい病気が一般的な病気の解明にも役立つだろうと考えている。Claire Ainsworth が報告する。

2000 年 7 月、米国カリフォルニア州サンタバーバラのある病院の診察室で、Michael Salsbury は目の前でむせび泣く医師をなだめていた。Michael は妻の Gabriella とともに、てんかんの症状があらわれ、意識がなく、食事もとれない状態となった、生後間もない愛娘 Gracie を連れて、その病院を訪れていた。Gracie の検査を行った医師は、夫妻が最も恐れていた結果を伝えた。それは、Gracie の脳は消失しつつあり、その原因はわからないというものであった。

医師の涙は、何もできない悔しさと絶望感によるものであった。夫妻にとって Gracie は、この不可解な病気の犠牲となった最初の子ではなかった。すでに別の 2 人の娘が、運動能力が奪われ脳の一部がとけてなくなるこの奇妙な不治の病によって、1 歳の誕生日を迎えることなく命を落としていた。対応した医師たちの中に、そのような症状に過去に遭遇したことのある者はおらず、夫妻は何年にもわたって十分な診断結果さえ得られないでいたのである。

しかし今日、死亡した娘たちの臓器を研究用に提供したことによって、夫妻はようやくその答えを得ることができた。そして Gracie と 2 人の姉の命を奪ったこの遺伝性の病気が、まれな神経疾患の枠に収まらない存在であることもわかった。というのも欠陥遺伝子は、RNA からタンパク質への「翻訳」という、生物の生存に不可欠な段階の制御にかかわる遺伝子であったからだ。研究者たちは、翻訳の制御に異常が生じる機構を明らかにすることができれば、がんやアルツハイマー病などの一般的な病気に関する理解も進み、究極的には新たな治療法の開発につながるだろうと考えはじめている。

Salsbury 夫妻は、亡くした子どもたちに対する適切な診断がついに下されたことで安堵している。「私たちは、家族として最悪な出来事をすでに 3 回も経験しました」と夫の Michael は語る。「娘たちの命を奪った原因がようやく明らかになったのです」。

夫妻にとって最初の不幸は、1993 年第二子 Stephanie の誕生後に訪れた。生後 3 か月ごろ、Stephanie に軽いてんかん発作があらわれはじめた。症状はすぐに悪化し、医師たちはあらゆる検査を実施し、さまざまな組み合わせの薬剤を投与した。「治療は昼夜を問わず行われました」と、自身は新生児集中治療室で看護士として働く妻の Gabriella は振り返る。「しかし、どんな治療も役に立ちませんでした」。Stephanie は 8 か月の短い命を閉じた。

病気の原因がわからない

1995 年に Gabriella は、娘の Jennifer を出産した。はじめ Jennifer は元気な赤ちゃんだった。ところが生後 3 か月ごろ、姉のときと同じ不吉な症状があらわれはじめた。そして、なす術のないことがわかっていた夫妻は、Jennifer にほとんどの医学的検査を受けさせないことにした。「姉の Stephanie にはつらい思いをさせましたから」とマイケルは語る。「Jennifer は我が家でおだやかに、最大限の愛情に包まれて過ごさせたいと思いました」。

その後まもなく、銀行に勤める Michael はスイスに転勤となった。そ

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

こで夫妻は健康な娘を 1 人もうけ、その後に Gracie が生まれた。このとき Gabriella には、いやな予感があった。スイスの医師たちは Gabriella の不安に取りあわず、家族は Gracie に洗礼を受けさせるためにサンタバーバラへ戻ることにした。しかし彼らの乗った飛行機が着陸した直後、Gabriella は Gracie にかすかなてんかんの症状があらわれたのを見逃さなかった。「洗礼式は葬式になってしまいました」と Michael は話す。

Gracie の死後、夫妻は大家族をつくるという計画をあきらめた。死んだ娘たちがこの病気の唯一の症例と思った夫妻は、彼女たちの臓器を研究用に提供し、だれかが何らかの答えをみつけてくれることを願った。

しかし実際には、Salsbury 夫妻は孤独ではなかった。1990 年代の初めから世界中の何人もの医師が、異常をきたしたり昏睡状態に陥ったりした、脳スキャン結果に問題のある小児の不思議な症例について報告していた[1]。米国立神経疾患・脳卒中研究所 (メリーランド州ベセスダ) の小児神経科医 Raphael Schiffmann は、この症例について最初の報告を行い、CACH(中枢ミエリン形成不全をともなう小児失調の略) という病名をつけた[2]。

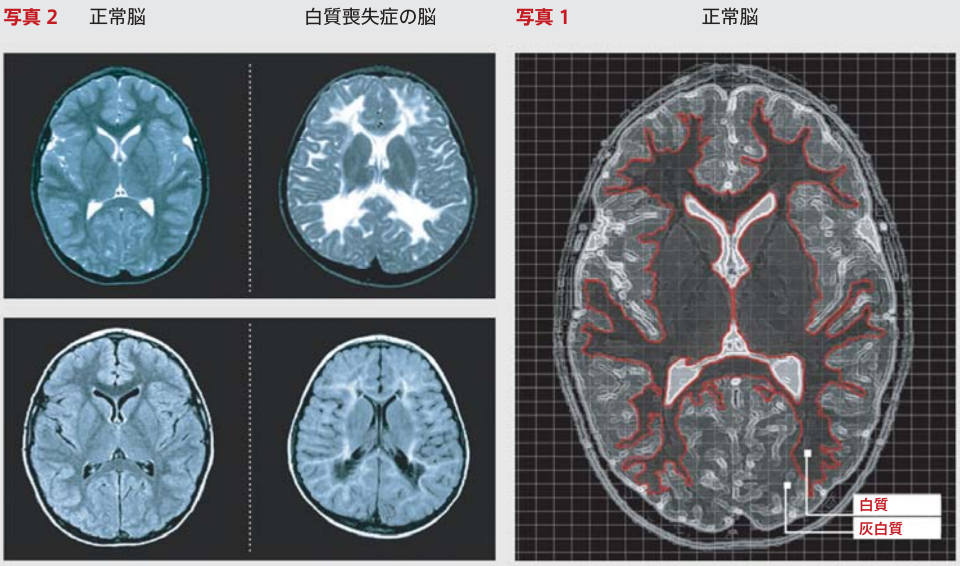
オランダ・アムステルダム自由大学の医療センターでも、神経科医 Marjo van der Knaap が同様の症例に対峙していた。この病気の発症年齢は 5 歳未満であることが多く、生後しばらくは異常は認められない。その後、頭部への衝撃や発熱、驚きによるショックに続いて、筋肉の協調運動が失われはじめる。症例によっては、症状の悪化は数年かけて進行する。しかし進行が非常に速い場合もある。「たとえば木曜日に小児の健康状態に異常がみられ、発熱やかぜのような症状が確認されるとします」と van der Knaap は説明する。「金曜日には刺激反応性が亢進しはじめ、足元がおぼつかなくなり、ソファに横になって動きが鈍くなります。そして日曜日には昏睡状態に陥るのです」。

磁気共鳴画像法 (MRI) スキャンの結果、患者の脳の白質に異常があることが判明した。白質は、脳の灰白質から身体の他の部分に命令を送るための主要な通信リンクとして機能している。白質の大部分を占めるのは、神経系の多様な部位とリンクを形成する、軸索とよばれる神経細胞の長い突起である。軸索は、電線を包む樹脂製絶縁物のような役目をする「ミエリン」とよばれるタンパク性物質で包まれている。白質が失われると、身体各所への命令が伝わらなくなる。この事実は、患者の認知機能はほとんど影響を受けないが、運動能力は大きく損なわれるという症状と矛盾しない。

MRI スキャンの結果ははっきりしていた。白質がとけてなくなった部分は、かわりに脳と脊髄を浸す脳脊髄液で満たされていた[3]。スキャンの結果をもとに van der Knaap は、この病気を「脳白質喪失症」、略称 VWM(vanishing white matter) 症と命名した。今日では、この病気は VWM/CACH 症の名前で知られている。Schiffmann は、この病気の進行過程に関する理論を提案している。「神経繊維の絶縁部が最初に異常をきたし、ある時点で繊維の崩壊がはじまります」と Schiffmann は説明する。最終的には白質が完全になくなることになる。

1990 年代の後半に VWM/CACH 症の遺伝的要因の探索がはじまった。今日 VWM/CACH 症は、別々の染色体上に位置する 5 種類の遺伝子の変異に起因することがわかっている[4,5]。このように変異が数本の染色体上に散らばる性質は、一般的に原因遺伝子の追跡がほとんど不可能である。ところが、オランダで実施された系統学的研究が突破口を開いた。

謎の消失



2 通りの磁気共鳴画像法で得られた写真から、脳の白質 (写真 1 の正常脳で濃くあらわされた部分) を消失させる遺伝病の破壊的作用が認められる。写真 2 の上の 2 枚を比べると、正常脳の白質 (濃い灰色で表示) の部分が、患者の脳では脳脊髄液 (白い部分) で満たされている。下の 2 枚の写真でも、白質 (灰色) が脳脊髄液 (濃い灰色) で置き換えられているのがわかる。

M.S. VAN DER KNAPP/VU UNIV. MED. CENTER

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

原因遺伝子を追いかけて

オランダ東部では小さな村に住む人々が多く、定住傾向が強い。このため欠陥遺伝子を突きとめることが容易である。調査の結果、ズウォレ地方で 252 人の祖先集団が確認された。数値は、個々の村に在住する祖先の占める割合 (%) を示す。

M.S. VAN DER KNAPP/VU UNIV. MED. CENTER

ローカルな知識

van der Knaap の研究チームは当時、4 万人に 1 人という頻度で患者があらわれるオランダ国内の家族から試料とデータを収集していた。対象家族の大半は、オランダ東部の地方出身者であった。この地域では人々の定住傾向が強く、また同じ地域の人々と血族結婚する割合が高いことが知られていた (上図)。結果的に比較的均一な遺伝的背景が生じ、このような集団では病気の原因遺伝子の同定が容易となる。また、患者のあらわれる複数の家系を 1 人の共通の祖先に遡ることができるという思いがけない幸運が重なった。こうした「大家系」を対象に研究者は、発症者と非発症者のゲノムを比較し、VWM/CACH 症に関与する遺伝子を同定することができた。

eIF2B とよばれるタンパク質の一部を構成する遺伝子が犯人であるという報告は、意外なこととして受けとめられた[6]。このタンパク質は脳に特異的というわけではまったくなく、体内のほぼすべての細胞に存在するからである。eIF2B は、RNA に書き込まれた命令文にしたがってアミノ酸をつなぎ合わせてタンパク質をつくりあげる、「翻訳」とよばれる段階に重要な役割を果たすタンパク質である。5 種類の断片 (サブユニット) からなる eIF2B タンパク質は 5 つの異なる遺伝子にコードされている。eIF2B は他の 10 種類のタンパク質と結合して、翻訳段階の「制御装置」を形成する。ほかの VWM/CACH 症患者を調べた van der Knaap たちは、他のサブユニットをコードする遺伝子に変異が存在することも確認している[4,5]。

翻訳制御の異常がこんなに劇的な変化を示す病気の原因になるという発見は、健康と病気における翻訳過程の重要性に新たな光を当てることになった[7]。「この発見は多方面へ衝撃をあたえました」と、eIF2B と関連翻訳因子に関する研究を約 15 年間続けている、Christopher Proud(現在はカナダのブリティッシュ・コロンビア大学に所属) は語る。

遺伝子からタンパク質への産生過程の制御に関してはこれまで、その初期段階である「転写」に主に関心が寄せられてきた。転写段階で DNA が「読み取られ」、メッセンジャー RNA(mRNA) がつくられる。「転写因子」として知られるさまざまなタンパク質がこの段階の制御に関与しており、細胞生物学者やがんなどの病気に関心を寄せる研究者たちによって詳細な研究が進められてきた。

mRNA は入念な編集を受けた後に、リボソームとよばれる複雑な分子「ロボット」のもとへ送られ、そこで遺伝暗号が読み取られてアミノ酸が順序よくつながれてゆく。eIF2B はパートナー分子群と協力して、mRNA に沿ってスキャンするリボソームを正しい出発点に位置づける段階に関与する。

VWM/CACH 症の興味深い側面の 1 つに、病気の重症度が eIF2B タンパク質上の変異の位置によってかわるということがある。Proud たちはこの理由を、変異の位置がかわることによって eIF2B がうまく機能できるかどうか、また調節する他のタンパク質との相互作用もかわることだと考えている[8]。mRNA が異なれば、eIF2B の量に対する感受性も異なると考えられる。この考え方は、脳が、とくにミエリンをつくる細胞がなぜ VWM/CACH 症において最も大きな影響を受けるのかということを説明しやすい。ミエリンをつくる細胞が重要なタンパク質をつくる際に、とくに eIF2B に大きく依存しているならば、活性レベルの低下に対する感受性は大きくなると考えられる。

コミュニケーションの断絶

VWM/CACH 症の解明が進むにつれて、翻訳の制御が従来考えられていたよりも微妙なものであるという認識が有力になってきた。「こうした認識にいたるまでには長い年月がかかりましたが、風向きは変わってきています」と、ルイジアナ州立大学 (シュリーブポート) で翻訳を研究している分子生物学者 Arrigo De Benedetti は語る。「がんなどの多くの病気で、タンパク質合成が重要な役割を果たしていることが広く認識されつつあります」

翻訳段階の異常ががんの原因となりうるという考え方は、15 年ほど前からささやかれていた。1990 年にはマギル大学 (カナダ・モントリオール) の Nahum Sonenberg の研究チームが、eIF4E とよばれる別の翻訳因子が異常に多く存在する場合に細胞ががん化することを報告していた[9]。一部の患者では、多量の eIF4E タンパク質が、抗がん療法に対する耐性と、身体各所へのがんの転移に関係する。一方で、一部のタンパク質がその mRNA 量には問題がみられないにもかかわらず、がん細胞に異常な量で存在することに注目する研究者もいる。この知見は、転写ではなく翻訳段階に問題があることを示している。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

一部のmRNAは、他のタンパク質よりeIF4Eの活性変化に強く反応する。生物学者たちによる現在の認識では、この原因は、個々のmRNAの開始点付近におけるRNAの塩基配列、またはその3次元構造に依存して、多様な翻訳因子に対する反応に影響をおよぼす長い非翻訳領域の存在にあるとされている[10]。

これだけでも十分複雑な話であるが、mRNAが翻訳因子に反応する段階にも影響する別の非翻訳領域も存在する。同領域はmRNA全体の最大3分の1を占めるほど長い。この非翻訳領域は、内部リボソーム進入部位(IRES)とよばれる複雑な構造に折りたたまれ、制御タンパク質とともにリボソームを召集してmRNAを読み取らせる段階に関与する[11]。IRES上の変異は、一部の病気との関連が指摘されている。またIRESの変異はがん患者で、たとえば細胞分裂を制御する遺伝子上に認められている。

ほかの翻訳制御機構も解明が待たれる状況にあるといえる。「新たな知見がまだ多くあるはずです」と、IRESおよびがんにIRESが果たす役割を研究している英国ノッティンガム大学の分子生物学者Anne Willisは話す。「単にこれまで目が向けられていなかったに過ぎません」。

複雑な翻訳段階制御の解明は骨の折れる仕事かもしれない。しかし、こうした細かな研究の積み重ねこそが臨床医の助けとなる可能性がある。さまざまな副作用を生じることなく、対象となる病気に関与する特定のタンパク質の産生を選択的に標的とすることは、理論上は可能であると考えられる。「翻訳段階を阻害可能な、現時点でまだ調べられていない化合物の数は、数百とはいわないまでも数十が存在するはずです」とDe Benedettiは語る。

ねらいを定めて

実際に、このような薬剤の1つががんの治療用に臨床試験で検討中である。免疫抑制剤として当初開発された「ラパマイシン」とよばれる薬剤は、翻訳制御系の1つを標的とする[12]。栄養状態などの細胞周囲の環境の変化を感知して、状況に問題がなければ細胞の成長を促して分裂へと導くmTORとよばれるタンパク質の働きをラパマイシンは遮断する。こうした経路の1つは、翻訳因子の活性を制御することで達成される。また多くのがんでは、正常なmTOR情報伝達系が損なわれているようである。

特定の翻訳因子を直接標的とすることも可能だろう。また長期的視野からSchiffmannたちは、eIF2Bや異常のあるmRNAを標的とすることでVWM/CACH症患者の命を救える日がくると期待している。「問題は、どのアプローチが有効かということを断言できる段階にはまだない点にあります」とProudはいう。「翻訳に関する知見を今後、大幅に増やしていく必要があるでしょう」。

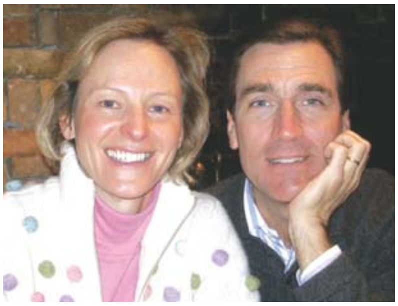
VWM/CACH症の研究者たちは現在、この病気のマウスモデルの開発に力を注いでおり、また異常をきたした脳細胞の生物学的側面の調査を進めている。また、eIF2Bのさまざまな変異を原因とする他のタイプのVWM/CACH症の同定も進行中である[13-15]。たとえばvan der Knaapは、複数の臓器に影響をおよぼし、誕生前の胎児や生後数か月以内での乳児死亡の原因となる、重度で早期発症型の病気を引き起こす変異をすでにいくつか同定している[16]。van der Knaapが、診断未確定の白質疾患によって3人の娘を失った家族から提供された臓器試料とMRIデータを入手したのは、このようなプロジェクトに参加していたときのことであった。

Salsbury夫妻が待ちに待った連絡を受け取ったのは、2003年のことだった。電話をかけてきたのはvan der Knaapで、eIF2Bの変異が娘たちの脳組織中に認められたという知らせであった。この報告は夫妻の喪失感を癒す一助となっただけでなく、発症せずに成長した子どもたちに、対象変異の有無を調べるための検査を受ける機会を与えることにもなった。子どもたちが成長して自分の子をもうける際に、父母が感じたつらい体験を味わうことはなくなるだろう。

夫妻はその後、「Three Little Angels Foundation」という慈善団体を設立し、研究資金の調達を行っており、まれな神経疾患の存在を多くの人々に知ってもらおうと働きかけている。夫妻は、研究目的の臓器提供を熱心に訴えている。「私たちは、科学と医学こそが前進のための原動力と考えています」とMichaelは語る。「娘のひとりひとりが、ささやかながら科学にも新しい知見をもたらしたのです」。■

Claire Ainsworthは、*Nature*のニュースと特集記事担当チーフエディター。

1. Hanefeld, F. *et al. Neuropediatrics* **24**, 244-248 (1993).
2. Schiffmann, R. *et al. Ann. Neurol.* **35**, 331-340 (1994).
3. van der Knaap, M. S. *et al. Neurology* **48**, 845-855 (1997).
4. Leegwater, P. A., Pronk, J. C. & van der Knaap, M. S. *J. Child Neurol.* **18**, 639-645 (2003).
5. van der Knaap, M. S. *et al. Ann. Neurol.* **51**, 264-270 (2002).
6. Leegwater, P. A. J. *et al. Nature Genet.* **29**, 383-388 (2001).
7. Abbott, C. M. & Proud, C. G. *Trends Biochem. Sci.* **29**, 25-31 (2004).
8. Li, W., Wang, X., van der Knaap, M. S. & Proud, C. G. *Mol. Cell. Biol.* **24**, 3295-3306 (2004).
9. Lazaris-Karatzas, A., Montine, K. S. & Sonenberg, N. *Nature* **345**, 544-547 (1990).
10. De Benedetti, A. & Graff, J. R. *Oncogene* **23**, 3189-3199 (2004).
11. Stoneley, M. & Willis, A. E. *Oncogene* **23**, 3200-3207 (2004).
12. Bjornsti, M.-A. & Houghton, P. J. *Nature Rev. Cancer* **4**, 335-348 (2004).
13. Fogli, A. *et al. Am. J. Hum. Genet.* **72**, 1544-1550 (2003).
14. Fogli, A. *et al. BMC Women's Health* **4**, doi:10.1186/1472-6874-4-8 (2004).
15. Fogli, A. *et al. Ann. Neurol.* **52**, 506-510 (2002).
16. van der Knaap, M. S. *et al. Am. J. Hum. Genet.* **73**, 1199-1207 (2003).



Salsbury夫妻は、まれな脳疾患で生後まもない3人の娘を失った。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

Nature Vol.435(1152-1154)/30 June 2005

スモッグ都市：中国のエネルギー危機で、
石炭液化などの新技術への関心が高まっている。

China Photos/Getty/newscom

中国の燃える野望が地球環境を脅かす
China's burning ambition

中国の経済発展は、世界最多の人口を抱えるこの国を変ぼうさせている。しかし、エネルギー不足と環境汚染の激化が、奇跡の発展をはばむ課題として浮上してきた。とくに環境への影響は、地球全体の気候を大混乱に追い込む危険性もはらんでいる。Peter Aldhous が報告する。

中国経済は今、急成長しており、エネルギーはいくらでも欲しい。しかし、中国のほとんどの場所で大気はひどく汚染されており、このことは中国がエネルギー源を石炭などの「汚い」燃料に頼っていることをいやでも思い出させる。私が中国のエネルギー政策を担当している技術官僚に会うために北京を訪れたとき、北京は刺激性のスモッグで覆われていた。風のない天候がわずか数日間続いただけで、視界が数十メートルに落ちた地区もあった。航空便は遅れ、北京市環境保護局は人々に屋内にいるように忠告した。空気に硫黄の味を感じることさえできそうだった。

エネルギー供給の問題とエネルギー消費が環境や健康におよぼす影響の問題は、中国の重要な政治的課題だ。しかし、中国の指導者たちの対処法は現実的で、私たちはとまどうことになるだろう。中国のエネルギー政策は、石炭をその基盤にし続けるだろうが、石炭は、よく知られているように環境によくない燃料だ。これを、クリーンなものにすることができるか否かが、中国の今後の発展と地球全体の気候の長期的な安定性を左右するかぎとなる。

中国にとって目前の問題は、経済成長がすでにエネルギー供給を上回っていることだ。広東省の深圳 (シェンチェン) や四川省の成都 (チョントゥー) などの新興都市では今、電力供給が不安定になっている。昨年、中国の 31 の省、地方自治体、自治区のうち 24 が、電力が不足していることを認めた。夏になると、降水量の減少で水力発電量が減り、またエアコンが急速に普及しているために、停電は日常的な出来事となっている。

中国の炭鉱は、需要を満たすために懸命に努力しているが、同時に多数の人命を犠牲にしている。控えめな公的な推計によると、昨年中国の鉱山で死亡した労働者は 6000 人をこえる。中国の鉱山は世界で最も危険な鉱山になっている。2005 年上期も死亡率は下がっていない。

しかし、石炭からの大気汚染による犠牲者についてのほとんどは、ニュースで大きく扱われない。中国の都市の多くは、大気の質の国際基準を (あるいは国内基準も) 満たしておらず、年間数十万人が若くして死亡している。石炭の使用量の増加は二酸化炭素の放出量を急増させており、地球規模の気候変動の危険性をもたらしている。北京にある国家発展改革委員会能源研究所 (エネルギー研究所) の Zhou Dadi(周大地) 所長は「石炭はエネル

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

ギー源であるだけでなく、長期的には社会や環境に影響することを私たちも理解している」という。Dadi は、エネルギー戦略について中国の指導者に助言する指導的アドバイザーのひとりだ。

Dadi ら上級のエネルギー計画立案者は、こうした問題を認識してはいるが、今後も石炭を使い続けようという意思は固い。中国の指導者たちは 2020 年までに経済の規模を 4 倍にすることを目指しており、そのためにはエネルギー供給を少なくとも現在の 2 倍にすることが必要だ。そのほとんどを石炭が担うことになるだろう。能源研究所のエネルギーシステム分析の専門家である Guo Yuan は「私たちは、石炭の消費を増やさなければならない。それはよい状況とはいえないが、そうせざるをえない」と話す。

輸送部門のエネルギー需要は急速に増大しているが、最も多くのエネルギーを使っているのは発電だ。中国の電力の 75 ～ 80% は石炭を燃やしてつくられている。20% は大規模水力発電で、残りのほとんどは原子力発電所だ。今のところ、石油や天然ガス、風力などの再生可能エネルギーが発電量に占める割合はほんのわずかだ。しかし、公式な見積もりによると、2020 年までには中国の電力需要の 15% をガス発電がまかない、原子力発電も約 5% に増える可能性がある。また、今年 2 月に再生可能エネルギー利用を促進する法律が成立したため、風力などの再生可能エネルギーも 10% を占めるようになるかもしれない。しかし、同じ期間に電力需要は少なくとも 2 倍になるのだから、石炭消費量の大幅な増加が避けられないことは明らかだ。

ベテランの中国問題専門家によると、経済成長を維持することは中国指導層の優先事項だが、彼らはそれをエネルギー安全保障を危うくすることなく達成したいのだという。中国の石油と天然ガスの埋蔵量は豊富ではなく、中国政府はこれらを輸入に大きく依存しないことを決めている。中国には石炭は豊富にある。中国がロシアの石油と天然ガスに依存することは、将来、この 2 大国を戦争の瀬戸際に追い込む可能性もある。だから、これを避けるために中国は石炭を今以上に使うだろう。

しかし、環境を汚染することなく、また、数百万人の人々が粒子状物質や硫黄酸化物、窒素酸化物を吸入することなしに、エネルギー需要を満たすことができるのだろうか。酸性雨の影響は広がっており、すでに「すす」によって、この地域の気候が変化しているという指摘もある (別項の「褐色雲の暗い影」を参照)。

地球規模の気候変動はまだ、中国の指導者たちにとって大きな懸念にはなっていない。しかし、二酸化炭素の放出という点では石炭は最悪のエネルギー源だと、国際的に活躍している専門家たちは警告している。新華 BP 清潔能源研究与教育中心 (新華 BP クリーンエネルギー研究教育センター) を指揮している Li Zheng は、「地球規模での問題は気候変動だ。しかし、中国にとっての主要な問題は従来型の環境汚染だ」と説明する。同センターは北京の一流理工系大学と英国のエネルギー企業の協力で設立された。

石炭は万能

エネルギーの利用効率を向上させることは、環境汚染を抑制しながら経済成長を促進する、最も容易な方法だということを中国のエネルギー計画立案者たちは理解している。「中国は、まずエネルギー利用効率の改善に取り組むべきだ」と Dadi は話す。「産業活動がこれまでどおり」と仮定した予測によると、全エネルギー需要は 2020 年までに石炭換算で年間 35 億トン相当に増加するだろうという。しかし、「エネルギー利用効率を改善する手段をひととおり導入すれば、これを 30 億トン未満に抑えることができる。技術的には可能だ」と Dadi はいう。

このようにエネルギー効率の向上を目指そうとする新しい動きが中国に出てきた背景には、ひとつには、米国サンフランシスコにある「エネルギー基金」が地味だが影響力のある活動を行ってきたことが挙げられる。同基金の「中国持続可能エネルギープログラム」は、ヒューレットパッカード財団から 1999 年以来計 4000 万ドル (約 45 億円) の資金提供を受け、中国のエネルギー研究者とともにエネルギー効率を改善し、環境汚染を減らす活動を行っている。優先的に取り組む課題は、建築物、電気器具類、乗り物のエネルギー効率の新しい基準づくりや、再生可能エネルギー源の利用促進などだ。エネルギー基金の北京事務所長である Yang Fuqiang(楊富強) は最近の活動成果として、再生可能エネルギー法や、中央政府や地方自治体に採用された燃料効率基準、エネルギー効率向上のための建築規則などを挙げる。

エネルギー利用効率の向上は立派な目標だが、中国はさらなる成長を求めているのに、政府の指導者たちは石油の輸入を制限したいと考えている以上、それだけでは不十分だ。だから、西側諸国ではあまり重視されていない技術を中国は進んで採用している。北京石炭化学研究所長の Du Minghua は、石炭は万能のエネルギー源であり、中国が必要とする電力、液体燃料、ガスの需要をすべて満たすことができると考えている。Minghua は、同研究所での石炭ガス化と石炭液化の研究について発表を始める前に「石炭は 3 つの需要全部に対する答えとなる」と声を大にして強調した。

石油への依存を減らす方法を探すことは、輸送部門ではきわめて重要なことであり、Minghua の研究所の最優先課題だ。褐炭などののように生成年代の新しい石炭は、水素と適当な触媒を用いて 450 度 C に熱すると直接、液体燃料に変えることができる、と Minghua は説明する。無煙炭などの生成年代の古い石炭は、まず熱して合成ガスとよばれる水素と一酸化炭素の混合物をつくる必要がある。この合成ガスは液体燃料に変えることができる。できた液体燃料には、ディーゼル

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

燃料と混ぜれば従来のエンジンに直接注入できるものもある。

石炭から直接液体燃料をつくる技術に対して西側諸国の専門家は懐疑的だが[1]、中国国営の「神華集団公司」は、世界初の商業的石炭直接液化工場を内モンゴル自治区に建設中で、完成は2008年までと予定されている。さらに中国は、南アフリカの企業「サソール」と、2つの大型間接液化工場建設の可能性について協議中だ。

SHANXI COAL CHEMISTRY INSTITUTE

石炭液化などの研究をしている石炭化学研究所

合成ガス都市

しかし、直接液化、間接液化のいずれのプロセスもエネルギー効率の面では模範となるものではない。直接液化のエネルギー効率は約60%であり、間接液化の場合は約45%だ。しかし、中国は代替液体燃料を強く求めており、液化技術によって2020年までに年間5000万トンをこえる量の液体燃料が供給されるようになる可能性があるとMinghuaは見積もる。「これは、個人的な見積もりだ」と彼は強調する。しかし、この見積もりは中国の指導者たちにとっては喜ばしい話だろう。もしMinghuaの予測が正しければ、石炭液化は中国の原油需要を年間1億トン分減らすかもしれない。これは、2020年までに予想される輸入量の約3分の1に相当する。

石炭問題は、新華BP清潔能源研究与教育中心の研究者たちにとっても中心的なテーマだ。Zhengは、ひとつの工場で石炭を合成ガスに変え、それをガスタービンに利用して発電し、しかも合成ガスを液体燃料に変えるという「ポリジェネレーション」という技術を重点的に研究している[2]。硫黄は、ガス化に必須なプロセスで取り除かれるので環境汚染も減る。この技術の可能性を立証するため、Zhengらは、中国東部にある山東省の棗荘(チァオチョアン)をモデルに「合成ガス都市」のシミュレーションを行った。中国の多くの産業の中心地と同じように、棗荘は大きな問題に直面している。たやすく利用できる燃料が硫黄分の多い石炭だけの場合、どうすれば成長を続けることができるか、という問題だ。

「合成ガス都市」のシミュレーションでは、棗荘市当局は、ポリジェネレーションを促進するための補助を与える。ポリジェネレーションでは、発電するだけでなく、乗り物の燃料となるメタノールと家庭の料理と暖房用のジメチルエーテルがつくられる。このシミュレーションは、ポリジェネレーションは2020年までに棗荘の電力需要の4分の1をこえる電力を供給できるかもしれないことを示した。また、二酸化硫黄の放出を劇的に減らす一方、従来の発電所での高コストな排煙脱硫技術に投資する必要性も小さくなる[3]。メタノールとジメチルエーテルの利用が広がれば、オゾン前駆体物質などの大気中の汚染物質の削減にもつながる。

このようなシミュレーションは、世界中のエネルギー問題研究者がつねに行っている。しかし、中国では、当局がその意図するところを国民に強制する権力が他国よりも強い。このため、シミュレーションしたことが実際に実行される可能性は高いかもしれない。2008年に開かれる北京オリンピックに向けた準備は、その好例だ。北京市は今、ひどい大気汚染が選手たちの健康を損なうかもしれない(そして、世界に中国の悪い印象を与える)ことを悟り、大急ぎで大気の浄化に取り組んでいる。環境汚染のひどい約200の工場を閉鎖し、天然ガスのパイプラインをひき、クリーンな高度基幹バスシステム(BRT)を導入しているところだ。北京にある環境保護団体「北京地球縦観環境科普研究中心」(北京アースビュー環境教育研究センター)の代表、Li Haoは「オリンピックは、(環境改善の)きわめて大きなチャンスだ」と話す。

Zhengらは、政府も環境の健康に与える影響について懸念を強めていることは、約50億元(約680億円)を必要とするポリジェネレーション実証工場の建設という自分たちの提案にとって追い風となるだろうと期待している。この実証工場は、最大40万キロワットの電力と年間40万トンもの液体燃料を作り出すはずだ。「私たちは、政府からとてもよい返事を得ている」とZhengはいう。

中国を仲間に

ポリジェネレーションやそのほかのクリーンな石炭技術は、中国の汚れた空気の浄化に役立つかもしれないが、中国の増加している温室効果ガス放出を抑制するためには、短期的にはあまり

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

褐色雲の暗い影

6月に入って、中国では各地でひどい洪水が起こり、洪水の季節が正式に始まった。過去20年間で南部では夏期の洪水が、北部では干ばつが増加してきた。原因として考えられるのは大気汚染だ。汚染は中国の工業生産の急速な拡大で悪化しており、この地域の気候を変化させるかもしれない。

中国の気候変化の主犯は、アジアを覆っているエアロゾル(煙霧質)だ。汚染の原因は中国だけではない。インドは、褐色雲とよばれるスモッグの形成に大きく関与している。スモッグの主成分は、黒色炭素(元素状炭素)、有機炭素(有機物に含まれる炭素)と、その他硫酸塩や硝酸塩などのエアロゾルであり、野火や化石燃料、生物燃料の燃焼で発生する。

黒色炭素はすす状の炭素燃焼の副産物で、太陽光を吸収して大気の温度を上げ、地面の温度を下げる効果がある。すす状の粒子は水滴ができる際の種となるために、小さな水滴の形成は促進するが、大きな水滴の形成を妨げる。その結果、降雨にも影響する。この効果は雲の形成を促すが、降水量は減少させる。

ニューヨーク市にある米航空宇宙局(NASA)ゴダード宇宙科学研究所のSurabi Menonが率いる研究チームは、ここ数十年間に中国で観測された降雨パターンの変化をシミュレーションで再現するために、黒色炭素放出を考慮した全球気候モデルを用いた[4]。気候学者たちはエアロゾル汚染が中国の降雨パターンを変えたことにはおおむね同意しているが、汚染が地域におよぼしうる影響については慎重だ。

アイオワ大学のGeorge Carmichaelは「私たちが利用できる測定結果は不十分で、モデルもまだ不完全だ」と話す。エアロゾル放出量の信頼できる測定は不足しており、黒色炭素についてはとくにそうだ。また、気候モデルに関しても、たとえばエアロゾルはどのように雲を変化させるのかなど、はっきりしないことが多い。

2000年のインド・ラジャスタン州における干ばつの被害

AMIT BHARGAVA/Getty/newscom

とはいえ、別の研究でも同じような結果が示されている。米国カリフォルニア州ラホーヤにあるスクリプス海洋学研究所のVeerabhadran Ramanathanらは、エアロゾル汚染がインド洋北部に変化を起こしたために、インドではモンスーンによる降雨が減り、干ばつが増大したことを示した[5]。「同じように、中国の大気汚染が周囲の海洋に影響し、この地域のモンスーンによる降雨を変化させている可能性がある」とRamanathanはいう。

次のステップは不確実性を減らすことだ。国連環境計画(UNEP)が行っている「褐色雲国際研究(ABC)プロジェクト」は今年、アジアのスモッグの監視を始めた。人工衛星によるエアロゾル測定の進歩と、放出モニタリングを強化する中国の計画も、中国の大気汚染の程度と影響の把握に役立つだろう。

Carina Dennis

役立たないだろう。Zhengのシミュレーションによると、発電所から出る二酸化炭素の総量は、棗荘が従来の技術を使い続けている場合よりも、「合成ガス都市」となった場合の方が多くなるだろうという[3]。

しかし、長期的にみれば、ポリジェネレーションは持続可能な未来への道となるかもしれない。合成ガスから水素を抽出して燃料電池に供給する一方、二酸化炭素を捕獲し、隔離するのだ。「しかし、そこにいたるまでにはばく大な投資が必要だろう」とZhengは楽観してはいない。

炭素隔離に対する中国の関心は、それに必要なコストを考えれば、欧州、北米、日本がどれだけお金を出す意思があるかに大きく左右されるだろうと専門家たちはみている。中国政府は有利に交渉をまとめたい考えだが、エネルギー産業の現場で働く人たちはそのような政府の意図には無頓着だ。もし、必要な金が用意されていないなら、炭素隔離に関するすべての取引は取りやめだ、ということになってしまう。

中国は、温室効果ガスの放出量を抑制しようとするほかのすべての国の努力を帳消しにするのに十分な量の二酸化炭素を一国で放出する可能性がある。だから、中国の指導者たちは、交渉の上で強い立場に立てるかもしれない。米国メイン州ガーディナーにあるNPO「規制援助計画」の理事であるDavid Moskowitzは「もし中国の産業活動がこれまでどおりなら地球はおしまいだ」と話す。彼は、中国の当局者に発電部門の改善についてアドバイスしている。

このことは、今年7月に地球温暖化を議題にスコットランドに集まった主要8か国(G8)の首脳たちに考える材料を与えたはずだ。中国は、気候変動に関する京都議定書の署名国だが、発展途上国とされ、放出量の削減目標をまだ課せられていない。世界の指導者たちが地球を救うためにいかなる戦略を編みだすにせよ、遅かれ早かれ、中国を巻き込む必要がある。そして、それには相当の費用もかかるはずだ。■

Peter Aldhousは、*Nature*のニュースと特集記事欄のチーフエディター。

1. Williams, R. H. *et al. Energy Sustain. Dev.* **7**, 103-129 (2003).
2. Zheng, L. *et al. Energy Sustain. Dev.* **7**, 57-62 (2003).
3. Hongtao, Z. *et al. Energy Sustain. Dev.* **7**, 63-78 (2003).
4. Menon, S. *et al. Science* **297**, 2250-2253 (2002).
5. Ramanathan, V. *et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA* **102**, 5326-5333 (2005).

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

Toyota Motor

未来をにらんで : プリウスの開発は 1994 年に始まり、今では世界のトップを走るハイブリッドカーとなった。

Toyota's production line leads from lab to road

トヨタの研究はビジネスを見すえている

Nature Vol.435(1026-1027)/23 June 2005

豊田中央研究所の原動力は、研究者のひらめきとグループ企業との緊密な関係だ。冬野いち子が報告する。

TCRDL

豊田中央研究所の外見は、その研究成果に反して目立たない。

豊田中央研究所の外見は、世界で最も成功している自動車メーカー、トヨタ自動車を先端技術面で支えている存在にはみえない。自動車専用道路とリニアモーターカーの路線にはさまれた、目立たない、背の低い研究棟群の中におさまっている。研究所内は人影がまばらで照明は薄暗い。研究所の管理部門が、電力の節約のために電灯の半分を消しているのだ。

しかし、同研究所は世界で最も高く評価されている企業研究所の 1 つであり、東京から西へ 370 キロ、名古屋市に近いこの建物のドアの向こうでは研究が静かに進んでいる。

約 700 人の化学者や物理学者、材料科学者、エンジニアが所属するこの研究所は、研究結果を隠し立てせず、*Nature* などの専門誌に発表している。これは、一部のほかの企業の研究所とは対照的だ。そして、材料科学、電子工学を含めたさまざま分野の技術革新はすぐに製品である車に応用される。

自動車業界の専門家たちは、トヨタは科学面での高い能力を車の開発に応用する方法を会得している、と話す。三菱総合研究所 (本社・東京) の産業・市場戦略研究部主席研究員、奥田章順は、「トヨタは、ビジネス全体のなかで基礎研究がどうつながっているかがよくわかっている」と分析する。

実際には、トヨタのグループ企業 9 社が株式会社豊田中央研究所の株主会社となっている。これらのグループ企業は、乗用車からフォークリフト車まであらゆるものを生産している。研究の多くは、これらの企業のエンジニアからの要請で行われる。

54 歳の冶金学研究者で、2003 年から同研究所の取締役を務める斎藤卓は「基礎研究だけで終わり、はまずない。いつも、最終製品を意識してやっている」という。

この研究所は日本の企業モデルにならい、社員の忠誠心とひきかえに終身雇用を保障している。上級のスタッフでさえも、週に一度は実験室の掃除をすることになっている。一年間に採用

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

される研究者は20人から30人だ。その約半分は大学の新卒者で、残りは大学や他の企業からきた研究者である。上層部は、研究者の平均年齢が上昇していることが気がかりなことを認めている。女性は研究スタッフの10%未満で、日本人以外の研究スタッフは十数人にとどまっている。

研究者たちはグループ企業とほぼ毎日話し合い、アイデアに磨きをかけている。無機材料研究室長の鷹取一雅は、ライバル企業の先を行き続けるためには、調査機関の予測や学会よりもこうした議論が最も大切だ、と話す。

プリウスにも貢献

研究所の予算はばく大というわけではない。トヨタの7700億円の年間研究開発予算のたった1%余りだ。多くの研究成果は社外には公表されない。研究結果が発表されるのは、研究所の上層部とグループ企業とが協議したうえでの場合だけだ。また、研究所のうち訪問者に公開されるエリアはわずかだ。

研究スタッフのやる気は明らかに高く、研究成果は優れている、と外部のアナリストはいう。みずほ証券(本社・東京)の自動車産業アナリスト、渡辺嘉郎は「研究開発部門などは、トヨタの中核部分を担っているという誇りがあり、実をあげているのだと思います」と話す。

たとえば、豊田中央研究所はハイブリッドカー「プリウス」の電気モーターを制御するトランジスターを開発した。プリウスは、内部の燃焼エンジンと電気モーターの両方から駆動力を得る。同研究所は振動を減らし、プリウスの乗り心地をさらに快適にする技術も開発した。

研究所の上層部は、彼らのプリウスへの貢献については控えめにしか話さない。しかし、トヨタは新技術を粛々と、しかし着実に市場へ送りだし続けており、プリウスの成功はそのよい例なのだ。トヨタはハイブリッド技術の開発を1994年に始めた。当時、燃料価格は低く、また、ハイブリッド技術を製品化できる可能性は少なかった。ほかの自動車メーカーで、ハイブリッド技術を真剣に検討した会社はほとんどなかった。開発開始から3年で、トヨタは世界初のハイブリッドカーを公表した。プリウスは当初は赤字だったが、環境にやさしい乗り物に対する需要が増すにつれ、米国を含めた多くの市場で成功した。現在、米国でプリウスを購入しようとすれば数か月待たなければならない。

一方、米国の自動車メーカーは、燃料電池車の可能性を探ることを優先し、ハイブリッド技術には目もくれなかった。燃料電池車はより革新的な技術を要し、商業化が可能な段階にまだ達していない。トヨタとゼネラルモーターズ(GM)は5月14日、環境技術の開発においてより緊密に連携することで合意した。

この研究所の研究者たちは、コストダウンを続ける必要性をけっして忘れることはない、という。「基礎研究をやる人は、ビジネス感覚を持たなければいけない」と斎藤は話す。斎藤は、彼と同僚がある合金を1998年に発見したときのことにふれた。この合金はチタンが主成分で、ほかのどんな合金よりも弾性変形能が高かった(T. Saito *et al. Science* **300**, 464-467; 2003)。この合金は、メガネのフレームとして製品化された。

合金は「ゴムメタル」と名づけられた。斎藤は、さらに多くの潜在的用途があることをわかっていた。しかし、この合金はあまりに高かった。1トンが1億円もした。彼はコストを下げるために、安価なニオブやタンタルを求めて中国へ10回も足を運び、モンゴルにまで行ったこともあった。この新合金は今、ゴルフクラブのシャフトにも使われており、車への応用も検討中だ。「あれはたいへんだった」と彼は振り返る。

研究所への開発要求は、きわめて単刀直入に飛びこんでくることが多い。鷹取は2000年の夏の日のことを思い出すと、今でも身ぶるいする。車の部品をつくっているトヨタグループ企業の社長が、鉛を使わない圧電セラミックスを2年以内に開発するよう彼の研究グループに要求したのだ。

「100年かかってもできないと思った」と、51歳の主席研究員である鷹取は話す。圧電セラミックスは、電気エネルギーを機械的な運動に変えたり、その逆を行うもので、アクチュエーターなどの車の部品に使われている。しかし、圧電セラミックスは有害な鉛を含んでいる。性能を犠牲にせずに鉛を取り除こうと、世界中の科学者たちが奮闘していた。

「かんばん方式」だったセラミックス開発

しかし、齋藤康善率いる鷹取らの研究チームは、研究を依頼したグループ企業の助けも借り、すでに性能が実証されている材料と同程度の性能をもつ、鉛を含まないセラミックスの開発に成功した。危機一髪だった。締切りの2か月前まで、成果が得られていなかったからだ。締切りの2か月前になって研究チームのひとりが、ある実験材料の結晶が通常よりも輝きが強いことに気づいた。この結晶は、それまで試した材料の10倍の圧電効果を示した。この材料はナトリウムとタンタル、そのほかの物質を混ぜたもので、その詳細は特許を取得した後すぐに発表された(Y. Saito *et al. Nature* **432**, 84-87, 2004)。

こうした技術革新は、トヨタのすぐれた生産技術とあいまって、トヨタが自動車市場で優位を占める原動力となってきた。2004年度のトヨタの連結純利益は空前の1兆2000億円に達した。これはGM、フォード、ダイムラークライスラーの利益をあわせたよりも多く、GMの2005年第一四半期決算が赤字だったことと対照的だった。トヨタは5年以内にGMに取って代わり、世界最大の自動車メーカーとなるだろうと予想するアナリストもいる。

豊田中央研究所はこれまで黒子のような存在だったが、トヨタがさらに革新的な企業となるのにあわせ、研究所に期待されるものも大きくなるだろう、と斎藤卓は話す。「私たちは、ゼロからクリエイティブなものを提供していかないといけないだろう」と彼は語った。 ■

冬野いち子は *Nature* のアジア・パシフィック担当記者。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

不心得な科学者たち

Scientists behaving badly

Brian C. Martinson, Melissa S. Anderson and Raymond de Vries

Nature Vol.435(737-738)/9 June 2005

科学的公正を守るためには、改ざん、捏造、盗用にとどまらず、
問題のある研究のやり方に幅広くメスを入れていく必要がある。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

研究における重大な不正行為が重要視されるのは、数多くの理由による。なかでも大きな理由の1つは、科学の信用が傷つき、一般市民の科学への支持が弱まることである。これまで専門家や一般市民は、新聞の一面を飾るような科学者の不正行為だけに目を向けていた。しかし、このほかの科学的公正を危うくするさまざまな問題行動について、研究者が目をつぶっていられる時代は過ぎ去ったと私たちは考える。

今回、私たちは、米国を拠点として活動し、米国立衛生研究所 (NIH) から研究助成金を受け取っている若手、中堅の科学者、数千人を対象として、自分たちの行動に関するアンケート調査を実施した。その結果、問題のある研究のやり方が、著しい多様性と拡がりを見せている実態が明らかになった (表1)。このような行為を定量的に解析したのは今回が初めてであるため、この現状が、これまでずっと続いていたものなのか、それとも、現代の研究環境が新たなストレスを生みだしているのか、という点についての判断がつかない。それでも、今回の調査結果は、日常的な不正行為の「反復」が、詐欺のような派手な不正行為よりも科学研究にとって大きな脅威となっていることを示している。

米国科学技術政策局 (OSTP) が、研究上の不正行為を「研究の提案、実施もしくは審査または研究結果の報告における改ざん、捏造もしくは盗用 (FFP)」と定義したのは、つい最近 (2000年12月) のことだった[1]。2002年には、米国研究公正局 (ORI) が、この米国科学技術政策局の狭い「不正行為」の定義には当てはまらないが、研究の公正を損なう可能性のある行動に関する実証的証拠を集めるための調査の実施を提案したが、米国実験生物学会連合と米国医科大学協会は、これに反対した[2,3]。そのために、貴重なチャンスが失われたと私たちは考える。

不正行為を正しく理解するうえで必要なのが、研究環境のマイナス面に注目することである。現代の科学者は、熾烈な競争にさらされており、さらには法律や社会、組織内の管理部門によって課された厳しい要件[4]を満たす義務を負っている。この要件には、ときどき不合理なものも含まれている。このようなさまざまなプレッシャーによって、科学の公正を損なう危険が数多く生まれており、その形態は、到底 FFP だけにとどまらない。

ところで、この問題点を指摘するのは、私たちが初めてではない。1992年に発表された米国科学アカデミーの報告書[5]で、問題のある研究のやり方と科学的公正の関連性が指摘されて以来、この点をめぐる論争は続いている。今回、私たちが初めて指摘するのは、米国の科学者の大型代表標本から得た、多種多彩な不正行為の発生が記された自己評価に基づく実証的証拠なのである。

これまでに科学者の不正行為を調べた実証的研究の数は少なく、確認された不正行為の事例に基づいたもの[6]、科学者が同僚の行動について感じていることをもとにしたもの[7-9]、回答者の代表標本とはいえない少量のデータに用いたもの[8,9]があった。決定的とはいえないが、過去に発表された FFP の推定発生率は1～2% の範囲内にある。私たちの2002年の調査は、NIH 外部研究局が管理する2つのデータベースから得た大量の無作為標本に基づいている。中堅科学者の標本に含まれた3,600人の科学者は、1999～2001年に最初の研究プロジェクト (RO1) 助成金を受けていた。若手科学者の標本に含まれた4,160人の科学者は、NIH の助成を受けるポスドク研修生で、2000年または2001年に個人 (F32) または組織 (T32) でのポスドク研修を受けていた。

データ集め

匿名性を確保するため、調査回答書は、回答者の氏名を完全に切り離して管理された。3,600人の中堅科学者に対して質問票が郵送され、そのうち3,409人に実際に配達でき、1,768人の科学者から利用可能なデータが得られた (回答率 :52%)。4,160人の若手科学者に送られた質問票は、実際には3,475人に配達され、1,479人から利用可能なデータが得られた (回答率 :43%)。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

表1 | 過去3年間に下記の行為に関与したと回答した科学者の割合(%)(回答総数3,247人)

上位10種の行為	全体	中堅クラス	若手クラス
1. 研究データの改ざんまたは捏造を行った	0.3	0.2	0.5
2. 被験者に関する重要な要件を無視した	0.3	0.3	0.4
3. 自分自身の研究の基礎に用いた製品のメーカーとの関係を適切に開示しなかった	0.3	0.4	0.3
4. 学生、研究被験者または顧客との間に問題ありと解されるような関係があった	1.4	1.3	1.4
5. 論文著者の考え方を利用したが、その際に著者の許可を得なかった、または適切な引用をしなかった	1.4	1.7	1.0
6. 自分自身の研究と関係する秘密情報を許可なく利用した	1.7	2.4	0.8***
7. 自分自身の過去の研究と矛盾するデータがあるのに提示しなかった	6.0	6.5	5.3
8. 被験者に関する重要性の低い要件を巧みに逃れた	7.6	9.0	6.0**
9. 他の研究者が欠陥データを使用したり、問題のあるデータ解釈をしているのを見逃した	12.5	12.2	12.8
10. 資金提供組織から圧力を受けて、研究計画、研究方法または研究結果を変更、改ざんした	15.5	20.6	9.5***
その他の行為			
11. 同じ研究データまたは研究結果を2種類以上の出版物に発表した	4.7	5.9	3.4**
12. 論文著者の明示に不適切な点があった	10.0	12.3	7.4***
13. 研究論文または提案書に研究方法または研究結果の詳細を公表しなかった	10.8	12.4	8.9**
14. 不十分または不適切な研究計画を用いた	13.5	14.6	12.2
15. 特定の観測値またはデータポイントが、何となく不正確だと感じて、解析結果から削除した	15.3	14.3	16.5
16. 研究プロジェクトに関する記録管理が不十分だった	27.5	27.7	27.3

注：カイ二乗検定で判明した中堅科学者と若手科学者の間の有意差は、**(P<0.01)、***(P<0.001)で示されている

この回答率は、専門家を対象とした他の質問票郵送方式の調査における回答率と同等である(たとえば医師からの平均回答率は54%だった[10])。ただし、私たちの方法では、不回答バイアスを生じる可能性が確かにある。不正行為を行う科学者は、おそらく不正行為の露見や処分を恐れて、他の科学者よりも質問票に回答する可能性が低くなっていると考えられるからである。この点に加え、回答時には、不正行為を実際よりも控え目に報告するケースが一部生じる可能性が非常に高いことを考え合わせると、今回の調査における不正行為の推定が控え目なものとなることが示唆されている。

私たちの調査は、米国研究公正局の提案とは無関係に実施されたが、時期的にはほぼ重なっている。調査対象とする不正行為は、いくつかの一流の研究大学に所属する51人の科学者によって構成される6つのフォーカスグループでの討議を参考にして選定された。この討議において、これらの科学者は、何が最大の懸念事項となっている不正行為であるのかを指摘した。彼らは、研究の公正に影響を与え、懲戒対象となりうる広範な具体的行為について心配していた。

今回調査対象とした行動の重大性を確認し、懲戒対象となりうる犯罪行為とそれほど深刻ではない行為とを区別するため、米国内の5つの主要研究大学と1つの独立系研究機関に所属する6人のコンプライアンス(法令遵守)担当者と協議した。そして、それぞれの行為が発覚した場合、にその行為に関与した科学者が所属組織の規則や連邦法に抵触する可能性がどの程度高いかの評価を依頼した。表1に列挙された1～10の行為が最も深刻なものと判断され、6人全員が懲戒対象となる可能性があるとし、そのうちの4人以上が懲戒対象となる可能性が非常に高いと評価した。このほかにも、不注意と評価することが最も適切とされる行為(14～16)も含まれている。

不正行為を認める回答

調査回答者は、各項目について、過去3年間に自分自身が行ったかどうかを「はい」、「いいえ」で答えた。表1には、それぞれの行為に関与したと答えた回答者の割合(%)が列挙されている。改ざん(1)、盗用(5)など6つの行為は関与率が2%未満だった。この調査結果は、不正行為に関するロバスト性(頑健性)の低い証拠をベースとしてなされた過去の推定結果とも一貫性がみられる。これに対して、残りの行為については関与率が5%以上で、そのほとんどは関与率が10%をこえている。全体でみると、過去3年間に上位10種の行為の1つ以上に関与したと答えた回答者は、全体の33%を占めている。この割合は、中堅の科学者では38%、若手の科学者では28%だった。この差には有意性が認められる(χ^2 = 36.34、d.f. = 1、P<0.001)。中堅と若手の科学者で関与率に有意差がみられるすべての項目で、中堅科学者の関与率のほうが高かった。

関与率に差が生じる理由については推測しかできないが、適切と思われる説明がいくつかある。たとえば、不正

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

行為をする機会の有無や発覚する可能性、発覚したことによる影響の認識は、科学者がキャリアを積む過程で変化する可能性がある。それとも中堅と若手では、教育、研修、就業の時期における行為基準が異なっていることが理由かもしれない。中堅科学者と若手科学者の平均年齢は、それぞれ 44 歳と 35 歳で、9 歳の開きがあり、博士号取得後の年数にも 9 年の差があった。

関与率の差については、若手科学者は、地位が比較的不安定なために不正行為を控え目に報告していると説明することもできる。中堅科学者の半数以上 (51%) は准教授以上の地位にあるのに対して、若手科学者の 58% がポスドクフェローなのである。

問題への対応

今回の調査は、米国の科学者が、FFP にとどまらず、科学の公正性を損なう可能性のあるさまざまな行為に関与していることを示している。このため、FFP のみを眼中において科学的公正を育てようとするのでは、大きな見落としを犯すことになる。私たちは、行動についての自己評価に依存すると、匿名性を確保しても、過小報告につながり、したがって推測内容が控え目なものとなる可能性が高いと考えている。調査結果によれば、回答者の 33% までが、上位 10 種類の問題行動の 1 つ以上に該当することを認めており、もはや科学界は、このような不正行為に無関心ではいられない。

科学者の不正行為が発覚し始めたころの対応は、「腐ったリンゴ」だけに集中していた。そのため不正行為の解析では、最も可能性の高い原因要素として個人の性格や事件現場 (研究所や部署) の事情についての検討に限定されていた。1992 年の米国科学アカデミーの報告書[5]は、議論の焦点を「悪い性格の」個人から一般的な科学の公正や「責任ある研究活動」に移すことに寄与した。

この 10 年の間、科学の公正を増進させることに関心をもつ政府機関や専門家の協会は、研究における責任ある行動に重点を置いてきた[5,11,12]。しかし、そのような活動においても、いまだに科学者の研究に直接関係する研究所や部署の事情が重視されており、個人の行動を「矯正」することで終わっているのが通例である。

科学の公正性に関する現代の解析作業で欠落しているのは、組織や制度の構造といった広義の研究環境の検討である。2002 年の米国医学研究所の報告書では、科学者の働く環境に着目し、(主に大学レベルでの) 組織的な方法によって責任ある研究を促進することを推奨している[13]。なお、この報告書では、広義の研究環境、たとえば規制官庁、研究資金提供機関、査読制度などが科学的公正を助長あるいは阻害するうえで重要な役割を果たす可能性についても指摘しているが、証拠不足のため、ほとんど論じられていない。

私たちは、研究作業が行われる環境に備わっている特徴のいくつかが、科学者の研究における倫理的側面に予想外の悪影響を与えている可能性があると考えている。とくに心配しているのは、資源配分過程の機能について科学者がどのように考えているのかという点である。資源配分過程は、査読制度やその他の資金提供と出版の数々の特徴や科学者や大学院生向け求人市場、ジャーナル誌の誌面や助成金のための市場を通じて、専門家の社会に具現化されている。私たちが現在実施中の解析作業 (未発表) では、科学者の不正行為と科学の世界での資源配分過程に不平等が存在しているという科学者の意識の間に有意な関連性が認められている。そのような意識が現実にあることを認め、それが科学者の行動にマイナスの影響を与えることを認識することが、科学の公正性を推進する新たな方法をみつけるうえで役立つだろう。

上述したような広義の研究環境が科学的公正を損なう役割を果たす点については、これまでのところ、ほとんど関心が寄せられていない。今こそ、科学者たちは、研究環境において、研究の公正性にとって最も重要な側面、最も変化しやすい側面、そのような変化のなかでも科学の公正性を確保するうえで最も有意義な変化の内容、といった点を検討すべきなのである。 ■

筆者の Brian C. Martinson はヘルスパートナーズ研究財団 (ミネソタ州ミネアポリス)、Melissa S. Anderson はミネソタ大学教育政策・教育行政学科に所属し、Raymond de Vries はミネソタ大学生命倫理センターにそれぞれ所属している。

1. OSTP *Federal Policy on Research Misconduct* http://www.ostp.gov/html/001207_3.html (2005).
2. Teitelbaum, S. L. *Nature* **420**, 739-740 (2002).
3. Korn, D. *Nature* **420**, 739 (2002).
4. Freeman, R., Weinstein, E., Marincola, E., Rosenbaum, J. & Solomon, F. *Science* **294**, 2293-2294 (2001).
5. *Panel on Scientific Responsibility and the Conduct of Research* (Natl Acad., Washington DC, 1992).
6. Steneck, N. H. *ORI Introduction to the Responsible Conduct of Research* (US Government Printing Office, Washington DC, 2004).
7. Swazey, J. M., Anderson, M. S. & Louis, K. S. *Am. Sci.* **81**, 542-553 (1993).
8. Ranstam, J. *et al. Control Clin. Trials* 21, 415-427 (2000).
9. Geggie, D. J. *Med. Ethics* **27**, 344-346 (2001).
10. Asch, D. A., Jedrziewski, M. K. & Christakis, N. A. *J. Clin Epidemiol.* **50**, 1129-1136 (1997).
11. *Committee on Science Engineering and Public Policy On Being a Scientist: Responsible Conduct in Research* (Natl Acad., Washington DC, 1995).
12. *Panel on Scientific Responsibility and the Conduct of Research* (Natl Acad., Washington DC, 1993).
13. Institute of Medicine and National Research Council Committee on Assessing Integrity in Research Environments *Integrity in Scientific Research: Creating an Environment that Promotes Responsible Conduct* (Natl Acad., Washington DC, 2002).

謝辞 : 本研究は、ORI と NIH が共同で推進する「研究の公正性に関する研究プログラム」による支援を受け、国立看護研究所 (米国) による財政支援と Raymond de Vries に対する NIH Mentored Research Scientist Award による財政支援を受けている。また 3 人の査読者 (匿名)、そして鋭い助言や初稿に対する意見を賜った Nick N. Steneck と M. Sheetz に感謝の意を表する。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

Elusive magic number

捕まえにくい魔法数

Robert V. F. Janssens

核準位のギャップは、陽子あるいは中性子の数が「魔法数」となる原子核をとくに安定化させるが、中性子を過剰にもつ核に対してはちがうようだ。しかし、そのようなエキゾチックな核種では、すべての魔法数が普通と異なるのだろうか。

Nature VOL 435(897-898)/16 June 2005

殻構造の考え方は、原子核を理解するうえで欠くことのできない補助手段としてしばしば使われる。しかし、特定の核の殻を満たすのに必要な陽子と中性子の正確な数は、まだはっきりとはわかっていない。中性子を過剰にもつケイ素 ^{42}Si の核の研究で、Fridmann たちはこの議論に大きく貢献した[1]。

殻構造の概念は原子論でよく知られている。最も外側の電子を原子から取り去るのに必要なエネルギーは、原子番号によって異なる。電子の外殻が満たされている特定の原子は、それ以外の原子よりも強固に束縛されており、それゆえ化学的にとくに安定で、たやすく他の原子と結合したり分子をつくったりしない。このような元素が希ガスである。ヘリウムやネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドンがそうだが、それぞれ合計で、2 個、10 個、18 個、36 個、54 個、86 個の電子をもつ。

最も外側の陽子か中性子を原子核から取り去るのに必要なエネルギーは、核内の陽子数 Z および中性子数 N の関数として似たような不連続性を示す。陽子数か中性子数が 2、8、20、28、50、82 の天然に存在する核はより安定している。中性子では 126 もこのような魔法数であり、その 1 つの例として鉛の同位体 ^{208}Pb (陽子数 82、中性子数 126) がある。1963 年にノーベル物理学賞を受けた原子核の殻モデル[2] は、陽子と中性子が核ポテンシャルの明確な準位を占めると説明しているが、これら 2 つの殻の間のエネルギーに大きなギャップが生じると魔法数があらわれる。

ここ 10 年くらいの間に行われた研究によって、魔法数がこれまで考えられていたほど不変ではないことがわかってきた。これまでは、安定な原子核から大きく異なる陽子数と中性子数をもつ軽い核に研究の主眼がおかれてきたが、それ以外の核が対象とされなかったわけではない[3]。魔法核であると予想されていたいくつかの核が、著しく強固には束縛されていないことが判明している (図 1)。 これに対して、陽子数よりも中性子数がずっと多い「エキゾチック」核に、新しい魔法数があるという徴候がある (図 1)。このような実験報告から、魔法数を生みだす一連の核準位に存在するギャップは、陽子と中性子の間のバランスに左右されることがわかるが、その機構についてはさらに深い研究が必要である。しかし、エキゾチックな核種では、すべての魔法数が普通と異なるのだろうか。Fridmann たちの ^{42}Si に関する研究[1] は、そうではないことを示している。

自然界では、ケイ素 (Z=14) にはそれぞれ 14、15、16 個の中性子をもつ安定同位体が存在する。^{42}Si は、最も重い安定同位体より 12 個も多い 28 個の中性子をもつ。このような極端にアンバランスな核の生成とその研究は、近年になって初めて可能になった。Fridmann たちは中性子の過剰なカルシウム ^{48}Ca のイオンを加速してベリリウムの標的に当て、破砕片分離装置[4] を用いて生じた破砕片からイオウ ^{44}S を選別。それを別のベリリウム標的に向けた。2 番目のステップでは「2 陽子ノックアウト」反応を起こすことができ、^{42}Si が生成する。それは磁気分析器[5] で同定できる。この反応で最低エネルギー (基底) 状態のケイ素が生成するが、よりエネルギーの高い状態のケイ素も生成し、高エネルギー状態のケイ素は γ 線を放出して、ほとんど瞬間的に基底状態に遷移する。標的をとりまく γ 線検出器 18 台からなるアレー型検出器によって、この過程は検出される。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

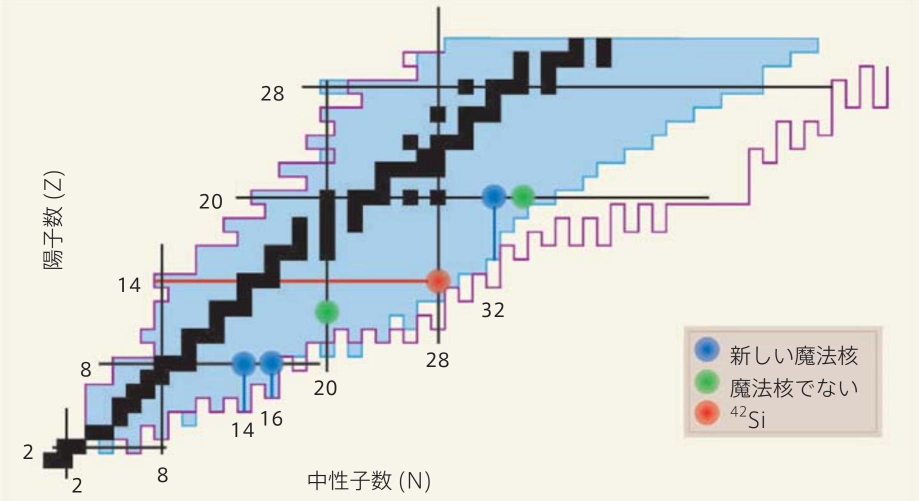


図 1　核の図表

水素 (陽子数 Z=1) から亜鉛 (Z=30) までの安定元素を黒いマスで示す。他のすべての束縛された核は、薄い青色の領域に含まれる。「ドリップライン」(紫色の線) では、中性子と陽子の間の力はもはや核を 1 つにまとめておくのに十分な強さがない。黒の垂直線と水平線は、安定核に当てはまる魔法数 2、8、20、28 を示す。いくつかの予想された「魔法」核は、実際には魔法核ではない (緑の点)。ベリリウム同位体 ^{12}Be(Z=4、中性子数 N=8) とマグネシウムのエキゾチック核 ^{32}Mg(Z=12、N=20) は、その例である。二重に魔法数をもつ普通の酸素同位体 ^{16}O(Z=N=8) 以外に、中性子を 20 個もつ酸素同位体 ^{28}O もとくに安定であるはずだが、実験によって束縛すらされていないことが示されている。逆に、中性子が過剰な核の N=14、16、32 のところに新しい魔法数が存在する徴候がある (濃い青色の点)。Fridmann たち [1] の研究の主たる対象であるケイ素同位体 ^{42}Si を赤い点で示す。

2 陽子ノックアウトは実験中に起こる多くの反応の 1 つに過ぎず、別の反応ではイオウの原子核から陽子が 1 個取り除かれてリンの原子核 ^{43}P が生成した。Fridmann たち [1] は ^{43}P の励起について研究し、役に立つ補足情報を得ることができた。

^{44}S から 2 陽子ノックアウトが起こる確率は、実はきわめて低い。実験データを「アイコナール」理論 [6] を用いた計算と比較することで、Fridmann たちは ^{42}Si が実際に魔法核の特徴をもっている場合でしか、このことを説明できないことを示した。アイコナール理論は質量数 40 以上の入射角については詳細に検証されていないため、Fridmann たちは実験の対照標準として、^{46}Ar(最初の ^{48}Ca ビームの別の破砕片) から構造のよくわかっている ^{44}S への 2 陽子ノックアウトも計測した。

^{42}Si の研究は、この核では中性子がきわめて過剰であるにもかかわらず、魔法数 N=28 が有効なままであることを示している。しかし、実験観測結果を十分に説明するには、陽子数 Z=14 も同様に魔法数である必要がある (これまでは、N=14 だけがエキゾチック核の魔法数であることが示されていた)。したがって、このケイ素同位体は魔法数を二重にもち、核はほぼ球形であることになる。

このような結果から、核の殻構造をになう相互作用の特徴の一部は、安定核の性質からは容易には明らかにならないといえる。むしろ、このような特徴は安定な系から遠く離れて存在するエキゾチックな系で拡大する。あらゆる核をうまく説明するには、陽子数と中性子数の変化にともなう核の殻構造の変化の原因となる機構を解明することが課題として残る。

核を束縛する力のこのような特徴が安定核ではさほど重要でないならば、どうして気にするのだろうか。その理由は、自然は安定核だけを扱っているわけではないからだ。つまり、恒星内部での核反応のような過程、とくに炭素や酸素よりも重い核を生成する星の爆発での核種合成過程には、しばしば安定からはほど遠いエキゾチック核が含まれているのだ。恒星内の条件下では反応の時間スケールは非常に短い場合が多く、そのためにいったん不安定核が生成すると、崩壊する前に核反応に巻き込まれる。宇宙で元素がつくられ続ける機構の解明には、元素生成の反応速度を計算する能力が必要である。このような反応速度はエキゾチック核の殻構造に決定的に左右される。だからこそ、ある魔法数が存在するかしないかは殻構造に大きな影響を及ぼすのである。■

アルゴンヌ国立研究所（米)、Robert V. F. Janssens

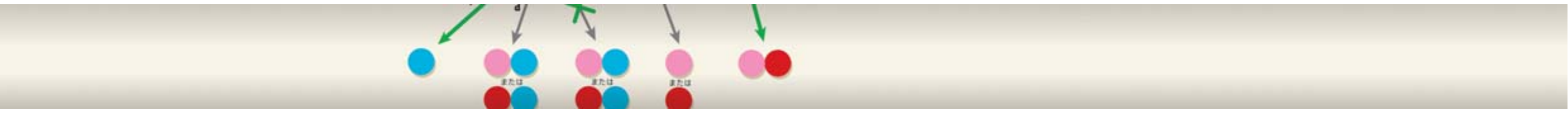
1. Fridmann, J. *et al. Nature* **435**, 922–924 (2005).
2. Mayer, M. G. & Jensen, J. H. D. *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure*(Wiley, New York, 1955).
3. Warner, D. *Nature* **430**, 517–518 (2004).
4. Morrissey, D. J. *et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **204**, 90–96 (2003).
5. Bazin, D. *et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **204**, 629–633 (2003).
6. Hansen, P. G. & Tostevin, *J. A. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **53**, 219–261 (2003).

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

Males from Mars

やっぱり「男は火星人」?

David Queller



ある種のアリ、というかこの場合は2種のアリというべきなのかもしれないが、とにかくこのアリでは雌は雌だけから、雄は雄だけからつくられる。この驚異的な事実を説明するには、ほかとは明らかにちがう自然選択のパターンを考えねばならない。

Nature 435 (1167-1168)/30 June 2005

「男と女は、ときとしてまったく別の生物種のようだ」というのが、大衆受けする心理学者や恋愛問題の教祖たちの決まり文句である。なかには「男は火星から、女は金星からやってきた」(ジョン・グレイ著の米国ベストセラー本の題名でもある。邦題は『ベスト・パートナーになるために』)とまでいう者もある。だが実際には、ヒトの男女のちがいはむしろ小さいほうだ。火星や金星から地球にやってきたばかりの博物学者でも、ヒトの男とチンパンジーの雌やゴリラの雌を対にしないで、迷わずヒトの男女をいっしょに標本ケースに入れることだろう。地球上には、本物の人間の博物研究者の目をごまかしてしまうほど雌雄の差が大きい生物種が現実に存在している。しかし集団遺伝学者の目はごまかせない。雄と雌は子をつくる際にそれぞれの遺伝子を混ぜ合わせるため、雌雄の遺伝子はよく混ざり合った共通の遺伝子プールを形成するからだ。こうした常識を打ち破る例外を、*Nature*2005年6月30日号でFournierたちが報告している[1]。雌雄それぞれがクローンとして生まれ、まるで別種のように枝分かれして、進化の道を歩んでいるというのだ。

この驚きの生物は、コカミアリ(*Wasmannia auropunctata*)というけっこう名の知れたアリの仲間である。この昆虫は熱帯環境にすむ侵略的害虫の1つで、世界外来侵入種ワースト100のリストにも入っている[2]。その祖先種では、半倍数性である他の社会性昆虫と同様に、雌雄どちらでもない「型」が現在生息するもののほかに2種類あったはずで、この2つがいっしょに今回の話のお膳立てをしたことになる。半倍数性の生物種は未受精卵から無性的に雄をつくりだす(図1a)ため、雄は一倍体(半数体)となって各遺伝子を1コピーずつしかもたない。受精卵は、各遺伝子を2コピーずつもつ二倍体の雌となる(図1b)。社会性の半倍数性生物では普通、生育環境のちがいで雌が2つのカースト(社会的階級)のどちらかへ分化する(図2)。雌アリは交配して繁殖する女王になる(図1c)が、ワーカーつまり働きアリ(図1d)は雌雄どちらともいえず、生殖能力ももたない。働きアリが自分の遺伝子を後代に残すには、自分のすむコロニー内で血のつながった個体の養育を助けるしかない。こういったしくみを「血縁選択」という。

コカミアリの場合、遺伝的マーカーからみると、1つのコロニーで生まれた新しい雌アリ(将来の女王)とそれを産んだ女王アリとがまったく同じである(図1e)。ところが、働きアリはずっと有性生殖で生まれ続ける。この戦略はすでに別のアリでも報告されており、女王アリはこの戦略をとることで、自分の遺伝子のコピーを次世代により多く受け渡すことができ、一方で、自身の抱える働きアリの戦力には遺伝的多様性を確保できるのだろう[3]。この戦略だと、雄は進化の舞台から役を降ろされてしまう。生殖能力のない働きアリの父親にしかなれないからだ。だが、コカミアリの雄はクローンとしてほかの雄をつくりだすことで反撃に出た。Fournierたち[1]が女王の精子貯蔵器官にある精子の遺伝子型を調べたところ、それらの精子の遺伝子型が生まれてきた雄の遺伝子型とぴったり合うことがわかったのだ。そこでFournierたちは、これはおそらく、受精後に母方ゲノムを父方ゲノムが排除して、二倍体の子を一倍体に変えてしまい、これが雄アリとして発生するためだと考えた(図1f)。コカミア

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

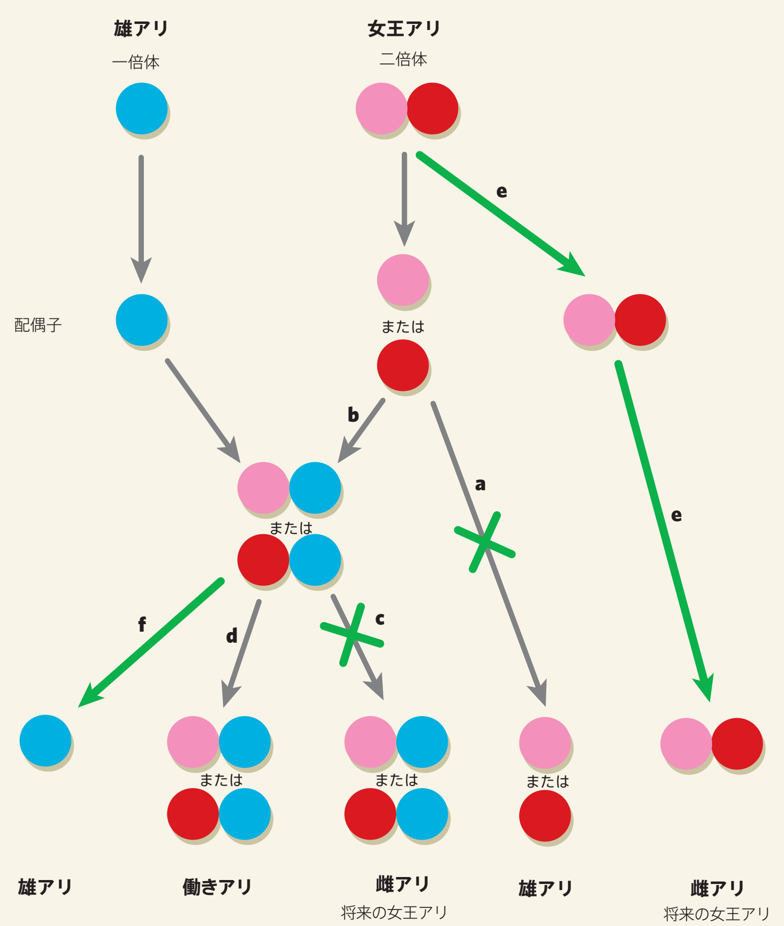


図 1　コカミアリの生殖
通常のアリは灰色の矢印で示す方式で生殖する。それぞれの丸は 1 つの遺伝子を表す (雄は青色、雌は赤色かピンク色)。a : 雄は未受精卵から生じ、したがって各遺伝子を 1 コピーもつ。b : 雌は受精卵から生じ、受精卵は生殖能力のある雌アリ (c) か生殖能力のない働きアリ (d) のどちらかに発生できる。一方、Fournier たち[1] の結論によると、コカミアリは 2 つの方式をなくして (緑色の×印)、クローン生殖の方式を 2 つ加えた (緑色の矢印) のだという。e : 雌アリは遺伝的に女王アリと同一だが、雄 (f) はおそらく母方ゲノムを排除することによって、ほかの雄から効率よくつくりだされる。従来から残る唯一の方式は、有性生殖による生殖能力のない働きアリの産生である。

リの雌にとっては、雄は十分に「火星からやってきた」ような存在なのだ。

この結果、雌の系統と雄の系統は別々に分かれていき、双方の遺伝子群は働きアリでいっしょになるものの、互いの遺伝子を交換することはけっしてない。これと一致するように、コカミアリの雌雄の遺伝子系統樹は分かれて別々の枝になる。両者の関係をつなぎとめているものは、遺伝子の交換ではなく、雄による雌への一方的な寄生利用と働きアリの相利共生的な産生である。

この奇想天外な分離現象がコロニー進化の法則をどうか書きかえることになるのか、それを考えると興味は尽きない。働きアリは通常、自分の養育する雌アリや雄アリとの予想上の血縁度をもとに、血縁選択を介して進化していく[4,5]。コカミアリでは、働きアリの母方由来の遺伝子 (matrigene、母方遺伝子とよぼう。図 1 で赤色またはピンク色) は、雌アリとつながりがあるが雄とはない。逆に、働きアリの父親由来の遺伝子 (patrigene、父方遺伝子。図 1 で青色) は雄とつながりがあるが雌とはない。普通、こうした非対称性は血縁選択でならされて平均化される。なぜなら、働きアリの遺伝子は自身が母方遺伝子であるとも父方遺伝子であるとも告げることができないからだ (例外として、ゲノム刷り込みを受けた遺伝子の可能性はある。これは親が標識をつけるしくみで、たとえば目印としてメチル基を遺伝子につける[6,7])。

しかし、コカミアリでは母方遺伝子がずっと母方遺伝子のままであるため、これらの遺伝子にはつねに、

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

CHRISTIAN KÖNIG

図 2　雌のカースト
コカミアリの 2 匹の女王アリと、血縁個体の世話をする働きアリ。女王アリと雄アリはクローンとして生まれ、生殖能力のない働きアリは有性生殖によって生まれる。

つながりのない雄を犠牲にして、雌にとって有利に運ぶような選択が働くはずである。同じように父方遺伝子も父方遺伝子のままであり、これらの遺伝子にかかる選択は、つながりのない雌よりもつながりのある雄に有利な方向に働くはずである。この結果、働きアリのゲノム内では熾烈な闘いが起こっている可能性がある。雌が自分のコロニー内の雄としか交配できない場合には、こうした闘いが低減されるかもしれない。1 つのコロニー内の雄に何かあれば雌もただでは済まず、その逆もまた然りだからだ。

2 つの従来型の生殖様式が閉鎖されてしまった理由も、不可思議な自然選択パターンから説明できるかもしれない。第一に、なぜ女王アリは通常の経路で雄を産むことをやめてしまったのだろうか (図 1a)。現行のシステムでは、女王に雄を産ませるような方向に働く選択は存在しない。女王は雄を産んでも自身の (雌の) 遺伝子プールに何の利益も得られない。自分の遺伝子を別の種に投入するようなものだからだ。推察するに、雌と雄の遺伝子プールが一部だけ分かれたときに、力は弱いものの同様の原理が働いたのではないだろうか。雄の遺伝子プールへ遺伝子を送り込むことの価値が低くなれば、そんなことをする雌を排除するような選択が働くだろう。

有性生殖で生まれた雌が女王アリになる道筋を閉鎖してしまったわけは、前述の 2 つの意見を組み合わせることで理解できそうである。まず、性生殖で生まれた雌が生殖能力を保った場合、父方遺伝子と母方遺伝子を分けて考える必要がある。働きアリの母方遺伝子は、その遺伝子のコピーを 1 つだけもつ雌アリに置き換わっても利得を得られない。働きアリの父方遺伝子は一見すると利得を得られるが、あくまで雌の遺伝子プールの中だけである。繰り返すが、これでは自分の遺伝子を別の種に投入するようなものだ。

今後の研究で、雄と雌がけっして遺伝子を交換せず、完全にちがう進化の道のりを歩んでいることが証明された暁には、このアリの雌雄を実際に別種として分類すべきだろう。もし雌のほうを *Wasmannia auropunctata* のままにするなら、他の惑星からやってきたといえるほど奇妙な、この初の「雄だけの種」には、新たな学名が必要だろう。火星 (Mars) にちなみ、*Wasmannia mar* なんていいのではないだろうか。■

ライス大学 (米)、David Queller

1. Fournier, D. *et al. Nature* **435**, 1230–1234 (2005).
2. Lowe, S., Browne, M., Boudjelas, S. & De Poorter, M. *100 of the World's Worst Invasive Alien Species: A Selection from the Global Invasive Species Database* (Invasive Species Specialist Group/IUCN, 2004); www.issg.org/booklet.pdf
3. Pearcy, M., Aron, S., Doums, C. & Keller, L. *Science* **306**, 1780–1783 (2004).
4. Bourke, A. F. G. & Franks, N. R. *Social Evolution in Ants* (Princeton Univ. Press, 1995).
5. Queller, D. C. & Strassmann, *J. E. Bioscience* **48**, 165–175 (1998).
6. Haig, D. J. *Theor. Biol.* **156**, 401–403 (1992).
7. Queller, D. C. *BMC Evol. Biol.* **3**, 15 (2003).

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

追悼

安芸敬一氏 (1930-2005)

Paul G. Richards

傑出した地震学者

Nature Vol. 435(1176)/30 June 2005

皆が Kei と呼び、40 年にわたって地球内部の動的な過程をより定量的に解明する方法を工夫し続けた知的指導者の安芸敬一氏が、5 月 17 日にレユニオン島で亡くなった。レユニオン島は、学究生活を引退して以来住んでいたインド洋に浮かぶ火山性「ホットスポット」である。地震学における多くの研究業績とともに、地震災害の確率評価を発展させるうえでの指導力で、彼は私たちの記憶に残ることになるだろう。

安芸は日本で生まれ、「19 歳の時、私は東京大学地球物理学科を受験した。入学試験科目が英語、数学、物理だけと少なかったせいもある」と記している。その後、地震学の研究者となり、1966 年に Frank Press によってマサチューセッツ工科大学の教授陣として招かれ、米国での研究生活が始まった。

安芸の最も初期の研究業績に、地震表面波を用いて震源での断層の方位とずれの方向を推定する研究がある。1966 年に、彼は震動図から「地震モーメント」を推定する方法を明らかにした。地震モーメントは破壊された断層の面積、断層のずれの平均値、剛性率の積に等しく、震源の大きさと周期の長い地震波の強さを表す最良の方法であると認められるようになった。地震にともなって起こる 2 つの構造プレート間の運動の統合的な評価は、地震モーメントの数多い用途の中の 1 つである。それを地球電磁気的、地質学的、測地学的方法によって得られるプレート全体の運動と比べると、地震によって突然生じる特定のプレート境界における部分的な動きを知ることができ、長期にわたる地震災害の評価が可能になる。

1960 年代に、安芸は放射された地震時の変位は「コーナー周波数」をもつことを明らかにした。この周波数より低いスペクトル領域は平坦で地震モーメントに比例し、高い領域は周波数の 2 乗に反比例して減衰する。そして、地震波のコーダ (始めの信号に続く波) は発生源のスペクトルの計測を安定させるのに使えることを示した。

次の 10 年間で、安芸は観測点ネットワークに地震波が到着した時刻から、観測点の下の地球の構造の 3 次元的な不均質性を決定した。彼の「逆解析法」は、計測器を分散して配置することで全大陸に適用され、地殻とマントル上部内の不均質性が定量的に計測されている。さらに、いくつかのバリアーやアスペリティの存在によって、あるいは破壊が応力の集中している領域をこえて進行することによって起こる、地震の核形成や自発的な破壊、断層表面での破壊過程の最終的な停止を制御する物理的性質を調べる断層モデルの定量的な研究を始めた。

観察科学として、地震学は極めて広い範囲のスケールを取り扱う。波長の範囲は 10^8 倍以上におよび、データを解析する時間窓は 10^9 倍以上、地表の変位は 10^{11} 倍以上、そして地震源の大きさは約 10^{25} 倍にもなる。その結果、地震学はさまざまな専門分野の集合体として展開される。ある地震学者は信号を解釈して油田の商業価値のある残存埋蔵量の地図をつくり、別の地震学者は強い地表の振動を定量化し、伝達距離とともに振動が減衰するようすを測定する。さらに別の地震学者は、内核からマントルを経由して地殻の最浅部の構造にいたる地球の内部構造について研究する。彼らは遺跡発掘の対象を識別し、埋設された配管をみつけ、大陸の変形速度を計測し、核実験禁止条約の遵守を監視し、そして地震災害を評価する。安芸とその教え子たちはこのような専門分野の多くで研究を行った。安芸自身は全分野の中でもおそらく最も重要な地震予測に、楽天的で強い興味をもち続けた。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

1975年3月に、私は「理論地震学の教科書を共同で執筆していただけないだろうか」で始まる手紙を受け取った。その時すでに安芸敬一は古参の研究者であったから、それは思いもかけないことだった。私はいかにも若手だったし、それまで個人的な面識はなかった。だが、私はその申し出を受けた。そして、最初の打ち合わせのことをけっして忘れることはできないだろう。話し合いのバックグラウンドとして、安芸敬一は明らかに任意の説明的語句をいくつか大きな1枚の紙の上に書きとめた。この紙はすぐに埋まって、『地震学：定量的アプローチ』として生まれることになる教科書の作業計画と目次となった。この教科書は、今では(6000以上の方程式とともに)ロシア語、中国語、日本語に翻訳されている。彼の目標は、多種類の地震学者にとって実際的な価値のある基本的なアイデアを統一的に概説することだった。1984年に安芸敬一は南カリフォルニア大学に移り、そこで地震現象をより直接的に体験することができた。彼は南カリフォルニア地震センターの初代科学部長となった。そこでは地震地質学者が集まって、定量的地震学の断層モデルを用いて地震災害の確率評価を行った。さらに、火山地震学にも夢中になり、引退後はレユニオン島で現地の地震計ネットワークを使って研究を続けた。火山性震動の研究を行い、マグマだまりの場所を推定し、マグマの上昇を監視し、物理的な原因を探し求めた。

安芸敬一は卓越した洞察力で、地表を振動させる現象について他のだれよりも深く調べた。地震の核形成が起こる機構や地震が実際の大きさに達する機構、地震波が地球のいたるところに拡散して震源と震源の移動についての情報を伝える機構などについてのわれわれの理解を進歩させた。震源と地球の構造に関する科学的な情報を引き出す方法を私たちに示した。そして、地表の大きな動きについての情報を地震工学界や地震災害に対する指針を必要とする為政者に伝えるというむずかしい仕事を成し遂げた。

安芸は50人以上のPhDを取得した教え子や多数のポスドクと共著論文を書いている。安芸は彼らの素質をのばし、今では教え子の多くがそれぞれの分野での指導者となっている。彼自身は形式にこだわらない親しみやすい物静かな指導者で、研究生活で得た数々の名誉をうれしく思いはしたが必要とはしなかったし、逆境にあってもおだやかで、データ的裏付けのある新しいアイデアを発見することに常に熱心だった。地震モーメントに関する先駆的な研究を行い、スペクトルのスケーリングとコーダの安定性についての成果をあげ、データを逆解析して3次元的に地球の構造を推測する方法が好結果を得ることを実証し、安芸は現在世界中にいる数千人の地球科学者の研究の指針となっている方法をもたらした。 ■

コロンビア大学（米）、Paul G. Richards

USC/SOUTHERN CALFORNIA EARTHQUAKE CENTER

©2006 NPG Nature Asia-Pacific