ISSN 1880-0556

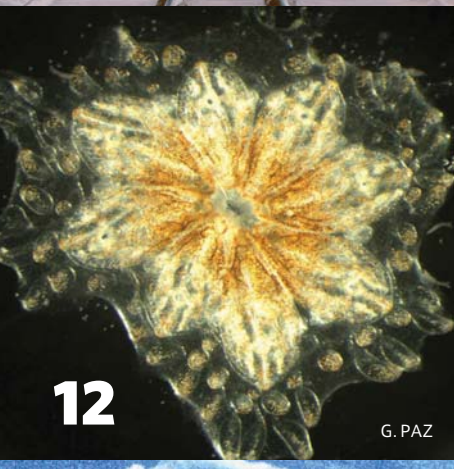
nature DIGEST

日本語編集版
JUNE 2006
VOL. 03, NO. 6
6

http://www.natureasia.com/digest

チェルノブイリと未来

npg nature asia-pacific



nature DIGEST

06 volume 3 no.06
June
www.naturejpn.com/digest

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

NEWS FEATURE

チェルノブイリと未来

表紙：NOVOSTI/PPS

HIGHLIGHTS

02 vol. 440 no. 7087, 7088, vol. 441 no. 7089, 7090

EDITORIAL

04 チェルノブイリに学ぶ

NEWS@NATURE.COM

06 ハリケーンが引き起こす津波の脅威

07 手強い値切り魔もランジェリーでイチコロ

NEWS FEATURE

08 核のゴミ捨て場の作り方
Geoff Brumfiel

12 ホヤと「わたし」と免疫学の物語
Claire Ainsworth

16 地球深部の謎を解く
David Cyranoski

BUSINESS NEWS

20 新薬開発の促進策が生んだ第 0 相試験の是非
Meredith Wadman

NEWS & VIEWS

22 脳の成長と IQ の意外な関係
Richard Passingham

JAPANESE AUTHOR

24 遺伝子ネットワークを手がかりに体内時計のシステムを探る――上田泰己
小島あゆみ

英語でNATURE

26 Drugs tests on trial
試される医薬品臨床試験

NATURE GALLERY

28 木星の 2 つ目の赤斑をハッブル宇宙望遠鏡が撮影

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：浅見りの子
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

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

Vol.440 | no.7087, 7088 Vol.441 | no.7089, 7090

明らかになった南極域の配管システム
Antarctic plumbing revealed

南極氷床の表面下にある湖は、氷の下にはりめぐらされた配管網によって相互につながっているらしい。

東南極の氷床下の湖を衛星により調査していた M Siegert たちは、氷底湖上の氷表面が 3 メートルほど下がり、一方、そこから約 290 キロメートル離れた別の 2 つの氷底湖では表面が隆起していることに気づいた。このような氷面の隆起は、厚さ 3 キロメートルの氷床の下を約 1.8 立方キロメートルの水が 16 か月かけて流れたとすると説明できるのではないかと彼らは考えている。この流れは、最も流量の多いときでロンドンのテムズ川の流量の約 4 分の 3 に相当する。

これまで、南極域のこのような氷底湖は比較的孤立して古くから存在していたと考えられていた。しかし Siegert たちは、これらの湖では水圧の上昇に応じて水がどっと流れる現象が定期的に起こっていたのかもしれないと論じている。場合によっては、こうした流れが湖の水をはるばる南極大陸沿岸まで運び、湖の水は海に排出されているのかもしれない。氷底湖の間でこのような水の急速な移動が起こっているとすれば、個々の湖に孤立した生態系が存在する見込みは小さくなり、掘削によって 1 つの湖が汚染されるとそれが周囲に拡大してしまう可能性がある。

20 April 2006 Vol. 440/Issue 7087
Letter p.1033, N&V p.1000 参照

その 20 年後…：チェルノブイリ事故と原子力発電の将来
TWENTY YEARS ON: Chernobyl and the future of nuclear power

ソビエト連邦がウクライナのチェルノブイリ原子力発電所でその 2 日前に事故があったことを知ったのは、1986 年 4 月 28 日のことだった。表紙は、この年の夏、崩壊した 4 号原子炉上方の放射能をヘリコプターから測定している乗員たちの写真である。今週号では、「平時の出来事としては史上最悪の原子力関連事故」となったチェルノブイリ原発事故に関する特集を掲載する。News では失われた人命と生態系の受けた被害を図表化して示し、News Features では、この 20 年間を概観するとともに、今こそ 21 世紀の核エネルギーについての展望を評価するべき時であることを述べる。Commentary では、国連機関が発表予定のチェルノブイリ報告書を見越して、D Williams と K Baverstock が、ベラルーシ、ウクライナおよびロシアの最も深刻な影響を受けた地域の住民の健康について、包括的な監視を続けることの重要性を強調している。こうしたことをやらなければ、原子力産業が「チェルノブイリの遺産」として今なお残る世間一般の疑念を払拭することは不可能だろう。

20 April 2006 Vol. 440/Issue 7087
News p.982, News Feature pp.984, 987, Commentary p.993 参照

ムクドリはヒト言語の「文法」がわかる？
Starlings question our grammar

鳴禽類は、これまでヒトに特有の能力だと思われていた方法で、自分たちの歌の「文法」を認識できるようだと T Gentner たちが報告している。

彼らが調べたのは「再帰」として知られる現象で、これは単純な原則を何度も適用して単語や成句を別の語句の中に次々と組み込んでいくという、言語がもつ大きな特徴の 1 つである。ノーム・チョムスキーを初めとする言語学者たちは、「再帰」の使用とその認識はヒト固有の能力だと提唱してきた。

今回、ホシムクドリにおける一連の研究で、単語の代わりに「さえずり」や「ガラガラ鳴き」を使って、ホシムクドリがより単純な文法から再帰型文法の認識を学習できることが明らかになった。これとは対照的に、タマリン属のサルはこの区別をできないことが過去の研究で報告されている。

「再帰を認識する能力が鳴禽類やヒト、そしておそらく一部のクジラ目動物といった、新しい発声パターンを獲得できる動物種にしかみられないとしたら、それは興味深いことだ」と G F Marcus は News and Views で語っている。

27 April 2006 Vol. 440/Issue 7088
Letter p.1204, N&V p.1117 参照

胚性幹細胞に似た精巣細胞
Testicular cells mimic embryonic stem cells

成体マウスの精巣から胚性幹（ES）細胞と同様な性質を示す幹細胞が単離された。このような細胞は簡単な睾丸生検でヒト男性からも得られると考えられるので、患者に遺伝的に適合する治療用細胞を増殖させる際の、ES 細胞に代わる幹細胞供給源になるかもしれない。この方法ならば、ヒト胚からの幹細胞作成に伴う技術的・倫理的問題を回避できる可能性がある。

新生マウスの精巣に ES 細胞と同じようにさまざまな種類の組織へ分化する能力をもつ細胞が存在することは既にわかっていたが、このような細胞が成体になっても維持されているかどうかは不明だった。

G Hasenfuss たちは、マウス成体の精巣から精子を作る幹細胞を単離して、特定の培養条件下ではこれらの細胞の一部が ES 細胞に非常によく似たコロニーを作ることを明らかにし、これを多能性成体生殖系列幹細胞（maGSC）と名づけた。胚へ注入された maGSC は ES 細胞と同じく自発的に胚の 3 種類の基本的な組織層へと分化し、複数の臓器へと発生していく。

27 April 2006 Vol. 440/Issue 7088
Letter p.1199 参照

心臓を目指す：心臓保護薬の標的となる C 反応性タンパク質
AIMING FOR THE HEART: C-reactive protein as a target for cardioprotective drugs

C 反応性タンパク質（CRP）は炎症性の疾患や感染の臨床的マーカーであるが、損傷を受けた細胞にも結合し、血清タンパク質の宿主防御機構や炎症誘発機構にかかわる補体を活性化する。補体を介する炎症は心臓発作では組織傷害を悪化させ、また、急性心筋梗塞ラットモデルではヒト CRP が補体依存的な機構により損傷を増大させる。これらの観察は、CRP が心臓保護を目的とした薬剤の標的となる可能性を示している。そこで、M B Pepys たちは CRP 特異的に働く低分子阻害剤を設計した。表紙の X 線結晶構造のように、パリンドローム構造をもつこの化合物 5 分子は、向かい合わせに並んだ 2 つの五量体 CRP 分子に結合する。この阻害剤は急性心筋梗塞を起こさせたラットにおいてヒト CRP のマイナスの影響を抑えることから、心臓発作を起こした患者には CRP を阻害する初期治療が有効となるかもしれない。

27 April 2006 Vol. 440/Issue 7088
Letter p.1217, www.nature.com/podcast 参照

線虫は新薬の産みの親
Worms prove fertile drug testing ground

実験によく使われる線虫（*Caenorhabditis elegans*）が、有用となりそうな新薬の発見と、それが体内で働く仕組みを解明するのに非常に役立つことがわかった。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

※「今週号」とは当該号を示します。

P Roy たちは、線虫に 1 万 4100 種類の小型分子を与え、線虫を死なせたり、成長、運動、あるいは形態に異常を引き起こしたりする 308 の小型分子を見つけだした。そしてそのうちの 1 つをネマジピン -A と命名して、研究を行った。このネマジピン -A は広く処方されている降圧剤の 1,4- ジヒドロピリジン（DHP）に似ており、DHP は一部のカルシウムチャネルのサブユニットの 1 つに結合することが知られている。

ネマジピン -A の標的タンパク質を *in vivo* で調べるために、Roy たちは 18 万匹の線虫変異体を調べて、この薬の影響を抑制する遺伝子を探した。その結果、ネマジピン -A は *egl-19* とよばれる遺伝子を介して作用することが明らかになった。*egl-19* はカルシウムチャネルサブユニットの遺伝子でもある。Roy たちは、線虫を使ってさらに遺伝子スクリーニングを行えば、臨床的に重要な薬剤である DHP と *in vivo* のカルシウムチャネルとの相互作用の仕組みを明らかにできそうだと考えている。今回の「原理証明」実験で、新しい小型分子の迅速な同定とその生理的標的タンパク質の発見に線虫が使えることが実証された。

4 May 2006 Vol. 441/Issue 7089

Letter p.91 参照

本物の金属になりうるプラスチック

Plastics can be real metals

金属と同じように電気を通すプラスチックがある。しかし、金属のように見える一部の伝導性プラスチックでも、それらを「金属的」とよぶのは厳密には正しくない。金属は、冷却するにつれて導電性が増加するという性質をもつため、半導体のようなほかの導電性材料と区別されるのである。

多くのプラスチックは電気を通すため、広い意味で「金属的」と称されることが多く、現在、帯電防止コーティングから安価で丈夫かつフレキシブルな回路を用いたプラスチック・エレクトロニクスに至る、さまざまな用途に向けた研究が進められている。

K Lee たちは、本物の金属の古典的特徴を示す初の導電性プラスチックで、ポリアニリンとよばれる物質について報告している。導電性ポリアニリンは数十年前から知られているが、Lee たちは新しい方法でポリアニリンを合成した。この方法は、サラダのドレッシングのように油滴を水中に懸濁させ、その油滴の中で長鎖ポリマー分子を作製するというものである。この方法で作製した後で少量の酸を加えることで導電性をもたせたポリアニリン膜は、非常に良好な電気伝導性を示すだけでなく、室温から 5 ケルビン以内にまで冷却すると導電性がさらによくなることもわかった。この真の「プラスチック金属」は、導電性ポリマーの応用の幅を広げそうである。

4 May 2006 Vol. 441/Issue 7089

Letter p.65, N&V p.37 参照

問題点は雲隠れ：モントリオール議定書後のオゾン層の回復について調べる

CLOUDING THE ISSUE: The search for post-Montreal recovery of the ozone layer

1987 年に採択されたモントリオール議定書は、汚染に関する国際協力のための最も重要な協定としてしばしば引き合いに出される。この協定により、南極の「オゾンホール」の原因であることが突き止められたクロロフルオロカーボン（CFC、フロンガス）などの化学物質の段階的な削減が開始された。近年、オゾンは少なくとも減少はしておらず、一部の地域では増加してきた。しかし、短い時間スケールでは、オゾンの濃度に影響する可能性のある要因は多く、こうした要因がオゾン層破壊物質の減少に起因する変化を覆い隠しているかもしれない。表紙写真に示すような極域成層圏雲はオゾンの減少を促進することがあり、そしてこのような雲を作り出す一因である気温変動はオゾン濃度を大きく変動させる可能性がある。オゾン層回復の兆候を探るために、E Weatherhead と S B Andersen は、オゾン観測にみられる最近の変化傾向を検証し、最近のオゾン濃度の改善が主に大気中の塩素濃度の低下によることを示す証拠が増えていると結論している。

4 May 2006 Vol. 441/Issue 7089

Review Article p.39 参照

超伝導体をオン・オフする

Turning superconductors on and off

高橋圭たちは、超伝導を「オン・オフ」する巧妙で簡単な方法を報告し、超伝導体を使った新しい電子デバイス創出の道を示している。

研究チームが考案した系では、一部の金属酸化物材料の超伝導が、電流を運ぶ電子の正確な濃度に依存することを利用している。高橋たちは、ニオブドープチタン酸ストロンチウム（Nb - STO）とよばれる超伝導体に、それと同類のジルコン酸チタン酸鉛 (PZT) という金属酸化物材料を使って電子を注入・流出させる方法を見いだした。この「スイッチ可能な」超伝導体は、Nb - STO 薄膜とその上に成長させた PZT 層からなっている。

PZT はいわゆる強誘電体材料で、鉄のような強磁性体が特別な方向の磁場をもっているのと同じく、特定の方向を向いた内部電場をもっている。高橋たちは、極めて細い金属針を使って、針の先端が軽くなでた領域でのみ PZT の電場方向を変化させることに成功した。これにより、次にはその下層の Nb - STO 膜の電子濃度が変化する。この変化によって、任意の（極めて低い）温度で、この膜を超伝導体から非超伝導体、あるいはその逆へと転換できる。その結果、この材料の電気抵抗が大きく変化する。金属針の先端を極細ペンとして使えば、Nb - STO の平坦な層に超伝導領域を「描く」ことによって、超伝導回路やデバイス構造を設計できる。

11 May 2006 Vol. 441/Issue 7090

Letter p.195 参照

トリトンの捕獲：海王星が通りがかりの連星系から衛星を得たしくみ

TRITON'S CAPTURE: How Neptune gained a moon from a passing binary

海王星の衛星であるトリトンは、太陽系の大きな衛星のうちでは唯一、惑星の自転と逆方向に海王星の周囲を軌道運動している。トリトンの円軌道はまた、海王星の赤道からかなり傾いている。これらのことから、トリトンは海王星に捕獲される前に、太陽の周りを軌道運動していたことが考えられるが、トリトンの捕獲に関する従来のモデルでは起こりそうもない事象を想定しなくてはならない。今 回、C Agnor と D Hamilton はもっと無理のない説明を案出した。このモデルでは、トリトンはかつて、冥王星とその最大の衛星であるカロンのペアに似た連星系に属していたと考えられている。この連星系は海王星に接近し過ぎたために軌道からそれてばらばらになってしまい、連星の一方は逃げ去ったが、トリトンはそのままとり残されたというものだ。表紙はその接近遭遇のようすを描いたものである。海王星の周囲を軌道運動している原始衛星の連星系は、トリトンの捕獲後、長くはもちこたえられなかったと思われる。

11 May 2006 Vol. 441/Issue 7090

Letter p.192, N&V p.162 参照

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

チェルノブイリに学ぶ

Learning from Chernobyl

Nature Vol.440(969-970)/20 April 2006

論説

原子力発電の名を傷つけたチェルノブイリ原発事故の記憶が薄らぎつつある中で、原子力発電技術に対する世間の支持を再び取り戻す時期がやってきた。

あの時の映像は何度もよみがえり、心にぬぐいがたく刻み込まれている。休みなく煙を吐き出す発電所。その一方で、ソビエト連邦の能力不足の官僚制度はいたるところで崩壊を起こし、大混乱に陥った。1986年4月26日にチェルノブイリ原子力発電所の4号原子炉から噴き出た放射能雲が原因で死亡する人々の数が今後どこまで上るかは、誰にも予想できていない。これをめぐる論争が今も続いているという事実こそが、事態を十分に物語っている（*Nature* 440, 982,993; 2006参照）。

あれから20年。原子力発電は、人々の期待をじわじわと取り戻している。原子力発電が支持を失ったのは、もちろんチェルノブイリだけのせいではなかった。1979年に米国ペンシルベニア州で発生したスリーマイル島事故、いくつかの国々における景気の後退や技術的失敗の数々、そして化石燃料が安価で入手可能なエネルギー源としての地位を驚きの粘り腰で死守したことなどから、原子力発電に対する不信感はチェルノブイリ事故が起きる頃にはすでに決定的なものとなっていた。

だが、こうした事故の記憶が薄れる中で、原子力発電の意義を復活させる要因がまたいくつか生まれてきている。エネルギー価格が再び高騰していること、各国政府が化石燃料排出量を規制して気候変動に取り組もうとしていることなどである。カリフォルニアからカルカッタに至る世界各地のエコノミストは、将来のエネルギー供給に関する円グラフを見つめながら、今後は原子力発電が一定の役割を果たす必要があるという。だが、果たしてほんとうにそうだろうか。

その答えは、条件付きのイエスとしたい。各国政府がチェルノブイリの本当の教訓を学ぶことが、その条件である。原子力発電が安全でないといっているわけではない。市民の安全を守るための合理的な措置もとれないような、腐敗した、無責任で放漫な姿勢の政治体制の手にある原子力発電は危険だといっているのである。核エネルギーの未来は、安全な原子炉の開発や地質学的に信頼性の高い核廃棄物処理施設の建設にまずあるのではなく、原子力発電技術を安全に運用し、管理する能力があると各国が世間の信頼を築き上げることができるかどうかにかかっている。

信頼の構築

信頼を獲得するための方法はさまざまだ。フランスでは、高速鉄道やコンコルド、それに独自の核抑止力をもたらした中央集権的テクノクラシーが国民の高い評価を得ており、国内随所に立地する原子力発電所も広く受け入れられている。スカンジナビア諸国にはまた異なった政治的伝統があり、国民の包括的な意思決定によって、世界初の核廃棄物永久貯蔵施設の建設につながる道が開かれるのもまもなくかもしれない。しかし、そのほかの国々における核エネルギーの未来は、不透明な状態のままだ。原子力発電が世間に確実に受け入れられるようにするための道すじが未整備なのである。

この方程式における重要な要素は、全世界で共通している。具体的には、原子力発電と核兵器の現実的なつながりについての認識、利用可能な発電技術、その安全性と経済性、そして核廃棄物の再利用と処理の問題である。

最近のイランの動きからは、原子力発電と核兵器との相互作用に関して改めて苦く思い起こされた。1950年代に起きた「原子力の平和利用」運動の頃から、原子力発電推進派は原子力発電と核兵器の2つを切り離して考えようとしてきたが、両者のつながりは密接で分けられるようなものではない。核兵器の拡散を抑止する信頼性の高い枠組みがあれば、ヨーロッパ、日本、米国において原子力発電に対する国民の支持を高めるのに役立つだろう。だが、原子力発電の拡大のかげ

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

に核兵器の拡散があるのだとしたら、それは悲惨な結果をもたらす可能性がある。

原子力発電所の技術は改良が重ねられている（*Nature* 429, 238-240; 2004 参照）。チェルノブイリで使われていた原子炉は非常に旧式のもので、安全システム、制御方法、管理方法とも許容できる基準を大幅に下回っていた。今日稼動している原子炉はチェルノブイリのような事故を起こしにくく、現在検討中の新システムによれば安全性がさらに向上する可能性もある。

しかし残念なことに、原子炉の安全設計が高まっても、原子力発電所はテロ攻撃を受けやすいのではないかという懸念を静める効果はほとんどない。英国下院の委員会が4月中旬に発表した原子力発電に懐疑的な報告書でも、このような懸念が表明された。

コスト計算

原子力発電所の経済性については激論が交わされている（*Nature* 440, 984; 2006 参照）。規制緩和によって開放の進んだ発電市場が過去20年の間に形成されてきたが、ランニングコストは低いものの建設コストが高く、また将来的なマイナス要因が不透明という特徴をもつ原子力発電は、ほとんど関心を集めてこなかった。かつては、電力の生産にかかるコストをベースとした論争が行われたが、今ではその「コスト」という名のバケツには何が含まれるのかという、より主観的な議論が繰り広げられている。発電所の敷地を元の状態に戻すには莫大なコストがかかり、核廃棄物や使用済燃料の最終処分も高コストとなる可能性がある。発電所の新規建設には、国からの財政的な保証（英国や米国の場合）や、政府の直接関与（インドや中国の場合）が必要となる。

そして核廃棄物の処理問題が、今でもこの業界のアキレス腱となっている。原子力発電を推進する政府がこれに対する答えをもたず、使用済燃料やその他の廃棄物を地上に放置し、その扱いを将来の世代にゆだねるなどといったことは、責任の放棄にほかならない。原子力発電所に対するテロ攻撃の脅威、そして使用済燃料が盗まれてテロ攻撃に利用されるかもしれないというリスクのもと、複数の施設で核廃棄物を長期的かつ局所的に保管するという考え方は以前にも増して支持を受けづらくなっている。

核廃棄物処理をめぐる管理には、いろいろな方法が用いられている。米国ネバダ州のユッカマウンテンは、その失敗を示す高価な記念碑と化す重大な危機に直面している（*Nature* 440, 987; 2006、ダイジェスト本号 p.8 参照）。この土地が選ばれたのは、ネバダ州には廃棄物処理施設の選定過程から逃れられるほどの人口密度も政治力もなかったからだった。この絶望的で非科学的な手法が蒔いた種は今、自らの手で刈り取る必要があるのかもしれない。その点ではスカンジナビア諸国の対応のほうがややすぐれている。フィンランドでは、継続的な核エネルギープログラムが根底にあることから、核廃棄物処理施設に対する支持が得られている。スウェーデンでの支持も、核エネルギーの問題全体について考えることができるという期待に基づくものである。フランスは処理施設の用地選定でやや進んでおり、いつものように決然と問題に取り組んでいくだろうという信頼がもたれている。計画を白紙に戻さざるをえなくなった英国では、放射性廃棄物管理委員会を使って、完全に納得のいくものではないにしろ、興味深い市民聴聞の試みに取り組んでいる。

今後20年間に原子力発電所を最も多く建設することが予想されるインドと中国は、これまでのところ核廃棄物処理についてほとんど言及していない。両国が環境的に責任をもった方法で問題に対処できるかどうかについては、時の判断を待つほかないだろう。しかし、原子力技術は国家の威信をかけた重大な問題だと位置づけられれば、フランスの例が示唆するように、アジアにおける原子力発電には核廃棄物処理施設のあるなしにかかわらず確固たる未来があるだろう。

しかしながら欧米では、原子力発電がもつ将来的な選択肢の幅は、現在の白熱した論争から示唆されるよりもかなり狭くなると考えられる。ドイツの前政権が一時的に採用した、原子力発電の放棄という選択肢は実現しないだろう。また、スリーマイル島やチェルノブイリでの事故以前に構想されていた大規模な建設計画のようなもの（*Nature* 244, 392; 1973, *Nature* 257, 346; 1975 参照）も実現されないだろう。

むしろ各国とも、既存の原子力発電の一部を代替施設に置き換えるか、原子力発電を緩やかなペースで拡大させるかという選択肢の間で推移する可能性が高い。地球温暖化、エネルギーコストの高騰、石油の供給量の信頼性に対する疑念といった事情を勘案すれば、原子力発電の緩やかな増強のほうが推奨される。ただし、そのために再生可能エネルギーの研究や利用が抑制されてはならない。

核エネルギーの技術的な見事さは常に科学者や技術者の心に訴えかけ、この半世紀の間、核エネルギーを支持する人々のなかでも科学者や技術者の存在は極立っていた。核エネルギーの開発を支持する人たちは、クリーンで完結した核燃料サイクルの実現を一貫して約束してきた。今こそ、その約束が守られ、実現されたいものである。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

ハリケーンが引き起こす津波の脅威

Hurricanes could cause tsunami threat

ハリケーンによる海底堆積物の移動を引き金に、海底地すべりが起こりうる。

doi:10.1038/news060417-6/20 April 2006

Philip Ball

ハリケーンは海上でうなりを上げる巨大な高波を生み出すばかりでなく、さらに危険な脅威となる津波を岸壁に打ちつけることもあるようだ。

ステニス宇宙センター（米国ミシシッピ州）に本拠地を置く米海軍研究所所属の研究者たちによると、ハリケーンの影響で海底の堆積物が集積される可能性があり、それが地すべりを起こした場合に津波を引き起こす原因になりうるという。研究チームはその地質学的証拠として、数千年前にメキシコ湾で起こった原因不明の複数の海底地すべりを取り上げ、テキサス州沿岸を直撃した高さ15メートルを超える津波は、そうした地すべりの1つが原因で起きたとしている。

ハリケーンによる高波を長年にわたって研究しているWilliam Teagueたちは昨年、2004年にグレナダやジャマイカ、さらにはフロリダ州やアラバマ州で甚大な被害を及ぼしたハリケーン「アイバン」は、高さ40メートルを超える高波を引き起こしていたと発表した。

これは、そうした規模のハリケーンが起こしうると考えられている津波の高さよりもかなり高かったことになる。しかし、陸地に及ぼす被害についていえば、ハリケーンによる高波よりも津波のほうが大きい。2004年に起きたインド洋大津波の場合、震源に最も近い陸地に到達した際の津波の高さは約18メートルだった。

通常は地震や海底地すべりといった、海底で起こる突然の衝撃で津波が引き起こされる。「海底地すべりが津波を起こしたことを立証する事例は、複数存在する」とTeagueは話す。そしてTeagueたちは、ハリケーン「アイバン」の研究からさらに、ハリケーンが海底堆積物の大規模な地すべりを引き起こす可能性についても確信したという。

砂嵐

研究者たちは、アイバンが通ると予想された進路沿いの海底6か所に、水位、圧力、潮流の計測器をそれぞれしっかりと備えつけた。そしてそのうちの2か所で、ハリケーンが厚さ約30センチメートル分の海底堆積物を押し流したという計測結果がでた。「係留したすべての計測器が、ハリケーンの通過したすぐ後には深く埋もれていた」とTeagueは話す。

研究チームは、このハリケーンは海中で砂嵐を起こしていたと*Geophysical Research Letters*誌で報告している[1]。計測器は金属ケースに入れられていたが、そのうちの1つはケースの中にまで砂や沈泥が入り込んで故障していた。

それぞれの係留位置から押し流された堆積物の量から考えると、ハリケーンによって1億立方メートル以上もの砂や沈泥などが巻き上げられたと研究チームは推定している。その一部はミシシッピ・デルタ近くの大陸棚の上、つまり陸地近くにまで押し流されて滞留しているという。

もし、こうして積み重なった堆積物が大きくなりすぎて崩壊するようなことがあれば、それは津波を引き起こす原因となりかねない。

だからといってあわてる必要はない。「我々が示唆しているのは、あくまでもハリケーンが津波発生の原因になりうるということだ。幸いにも、このようなことは、あったとしてもめったには起こっていない」とTeagueは語る。

だとしても、これが考慮に値する問題であることにはちがいなく、「津波は、いったん押し寄せればハリケーン・カトリーナをはるかに超える甚大な被害を及ぼすだろう」とTeagueは警告する。「そのうえ、一度の海底地すべりが海洋油田やガス田の施設に大きな被害を与える可能性もある」。

J. SCHMALTZ / MODIS / NASA GSFC

太古の津波

研究チームは、5000～1万年前にメキシコ湾沖で起きた海底地すべりが高さ7.6メートルの津波を引き起こしたという地質学的証拠を示している。さらにそれ以前には、ミシシッピ・デルタ付近で起こった海底地すべりが原因で、最低でもその2倍の高さの津波が陸地に押し寄せている。

だが、これらの海底地すべりそのものが何によって起こったかは明らかになっていない。一般的にまず考えられるのは地震であるが、メキシコ湾は地震活動のない地域だ。そこでTeagueたちは、古代ハリケーンがその原因だったのではないかと考えている。そしてもしそれが事実であれば、同じことが再び起こってもおかしくはないと話している。■

1. Teague W. A., *et al. Geophys. Res. Lett.*, **33**. L07607(2006).

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

手強い値切り魔もランジェリーでイチコロ

Lingerie makes hagglers happy-go-lucky

セクシーな写真やレースの下着を見ると、男は利益に執着しなくなる。

doi:10.1038/news060417-1/19 April 2006

Michael Hopkin

男はマッチョであればあるほど ― 少なくともホルモンからすれば、だが ― 魅力的な女性を見たときに判断力が鈍るようだ。

ルーヴァン大学（ベルギー）の研究者の依頼で、男性たちが最後通牒ゲームをした。これは、一定の金額を参加者どうしで分け合うゲームだ。最も要求の厳しい交渉をしたのは高テストステロンの男性だったが、ゲーム前にビキニモデルの写真を見せると事態は一変し、こうした男性は不利な取引を受け入れるようになりやすかった。一方、低テストステロンの男性は女性の姿を見ても、交渉戦術にそれほどの変化はみられなかった。

この研究で研究者が注目したのは、参加者が出生前に胎内で接した男性ホルモン、テストステロンの量だ。これは人差し指と薬指の長さを比較することで測定できる。薬指が比較的長いのが高テストステロンのしるしだ。

こうした高テストステロンの男性はブラジャーを手にしただけで軟化する、という論文を、経済学者の Bram Van den Bergh と Siegfried Dewitte が *Proceedings of the Royal Society B* 誌に発表した[1]。風景や年配女性の写真を見せたりTシャツを触らせたりしても、高テストステロン男性のタフな交渉に変化はなかった。

SuperStock / Jari Kivelä / NEWSCOM

高テストステロンの男性は、セクシーな写真を見ると利益追求の意欲を失うことが多い。

魅惑的な広告

この発見によって、なぜ広告主はセクシーな女性に商品の宣伝販売を頼るのか、説明できるかもしれない、と研究者たちは考えている。「宣伝や広告はセクシーな女性でいっぱいだが、男性の認知プロセスとの因果関係はあまり研究されていなかった」と Van den Bergh は話す。

美女が男性の行動に与える影響についての研究は、これが初めてではない。たとえば、美しい女性を目にした男性は、多額の現金を後でもらうより少額でもその場で受け取るほうを選ぶ傾向にあるが、これは経済力をすぐに見せたいがためとされている。

しかし、コンピューターからカービングナイフまで、官能的な美女によって何でも売れるのはなぜか、これでは説明できない。魅力的な女性を前にすると男性はあまり利益にこだわらなくなるというだけのことなのだろう、と Van den Bergh は考えている。

公平性への戦い

ゲームの中で、一方の参加者（提案者）は 10 ユーロを与えられ、もう一方の参加者（回答者）に分け前をオファーする。回答者は前もってひそかに最少希望額を第 3 者に申告しておく。オファーがその希望額に満たなければ、2 人とも 1 ユーロたりともらうことができない。

少しでも分け前があるに越したことはないため、回答者は目標を低くし、提案者がけちなオファーをしても、分け前をもらいはぐれないようにするのが普通だろう。しかし、回答者のプライドと公平性への強い意識のため、両者とも取り分のない例が続出した。

実験の結果、最も大きな分け前をねらったのは高テストステロンの男性だった。しかし同時に、テストステロンに強く支配された男性は、セクシーな女性を見た後に金銭的要求を最もゆるめやすかった。おそらく、気がゆるみ、金銭にあまりこだわらなくなったのだろう。あるいは、この研究者が示唆するように、気を引く相手ができたことで、たとえわずかでも何らかの富を得ようとしたのかもしれない。

獲得すべき女性の姿を目にすることで、男性はこのように実際に分別が増すのではないか、と Van den Bergh は語る。「少しでも金銭はあったほうがいいので、セクシーな女性やランジェリーを見ると、男性は経済的により合理的になるといえる」。 ■

1. Van den Bergh B. & Dewitte S. *Proc. R. Soc. Lond. B*, doi:10.1098/rspb.2006.3550 (2006).

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

Chernobyl and the future: Forward planning

核のゴミ捨て場の作り方

Nature Vol.440(987-989)/20 April 2006

放射性廃棄物をここで安全に処分することができるか。それがネバダ州ユッカマウンテン核実験場の地下道で行われている実験の目的だ。

DOE

世界の原子力発電の将来は、各地域の政治状況に左右されることになるのかもしれない。Geoff Brumfiel が報告する。

ネバダ州の実に 83 パーセントの土地を、米国の連邦政府が所有している。ラスベガスからリノに向かうこの道の右側にある土地も連邦政府所有の土地で、無人航空機用の軍用滑走路と核兵器実験場がはるかかなたまで広がっているのがわかる。かつて MX ミサイル（大陸間弾道ミサイルの開発名）を保管していた巨大なコンクリート製チューブが、日差しに焼かれて横たわる。一般市民の生活を示すものといえば、州の刑務所と売春宿、それにエアコンつきのトレーラーハウスの小さな集団だけだ。

米国エネルギー省は、ここネバダ州ナイ郡に 7 万トンを超える高レベル放射性廃棄物を埋設したいと考えている。ナイ郡の 4 万 7000 平方キロメートルの土地に住むのは 3 万 8000 人。使用済み核燃料が無害になるまでの数十万年間、それを保管するのに米国内で最も安全な場所の 1 つとして、連邦政府はラスベガスの北西約 100 キロメートル、核実験場の西端にある低い山、ユッカマウンテンを挙げている。

地元住民は仕事が欲しいので、放射性廃棄物処分場（貯蔵所）計画に完全に反対しているわけではない。しかしネバダ州の中でもほかの地域では、1950 年代や 1960 年代の地上核実験がもたらした結果を覚えている住民の多くが、計画に極めて懐疑的な目を向けている。地元選出の国会議員らも同じ姿勢だ。州政府原子力計画局の技術政策責任者で地質学者の Steve Frishman は、「ネバダ州ではあらゆる可能な法的手段を使って、この計画を中止させようとしている」と話す。

「高レベル」放射性廃棄物の処分場計画を始めようとしたほぼすべての民主主義国もまた、同様の問題にぶつかっていて、計画を進める道筋を見いだした国はほとんどない。ドイツ、カナダ、英国では、計画に不安を感じた市民による激しい反対運動が起こり、計画は頓挫した。スイスやカナダ、日本の処分場計画にかかわった経験をもつ放射性廃棄物コンサルタントの Charles McCombie は「今や世界のすべての処分場計画の関係者たちが、（計画の実現にあたっては）技術的な問題よりも技術的ではない問題のほうが大きいことを実感している」と話す。

放射性廃棄物を貯蔵している世界中の国（貯蔵量が急速に増えると予想される国を含む。コラム「原子力に力を入れる急成長国」を参照）は、その処分のためには地元の地域社会の信頼関係を築く必要があること、そして原子力の将来の大部分はそうした努力にかかっていることを理解しつつある。ローレンスリバモア米国立研究所（カリフォルニア州）の政策・企画・特別研究部の Tom Isaacs 部長は「廃棄物問題を解決できなければ、原子力の復興を進めていくうえで大きな障害となるだろう」と話す。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

負の遺産

核燃料棒に含まれるウランの同位体、ウラン 235 が崩壊すると、さまざまな放射能と化学特性をもつ原子核が生まれる。その一部には、ネプツニウム 237 などのように微量ではあるが数百万年も放射性であり続けるものがある。また、セシウム 137 やストロンチウム 90 など、数十年から数百年にわたって人体に危険を与え続ける廃棄物を生み出し、また廃棄物の温度を 500℃以上に上げるものもある。中でもいちばん問題なのはウラン 238 から生まれるプルトニウム 239 で、精製すると核兵器を作ることができる。

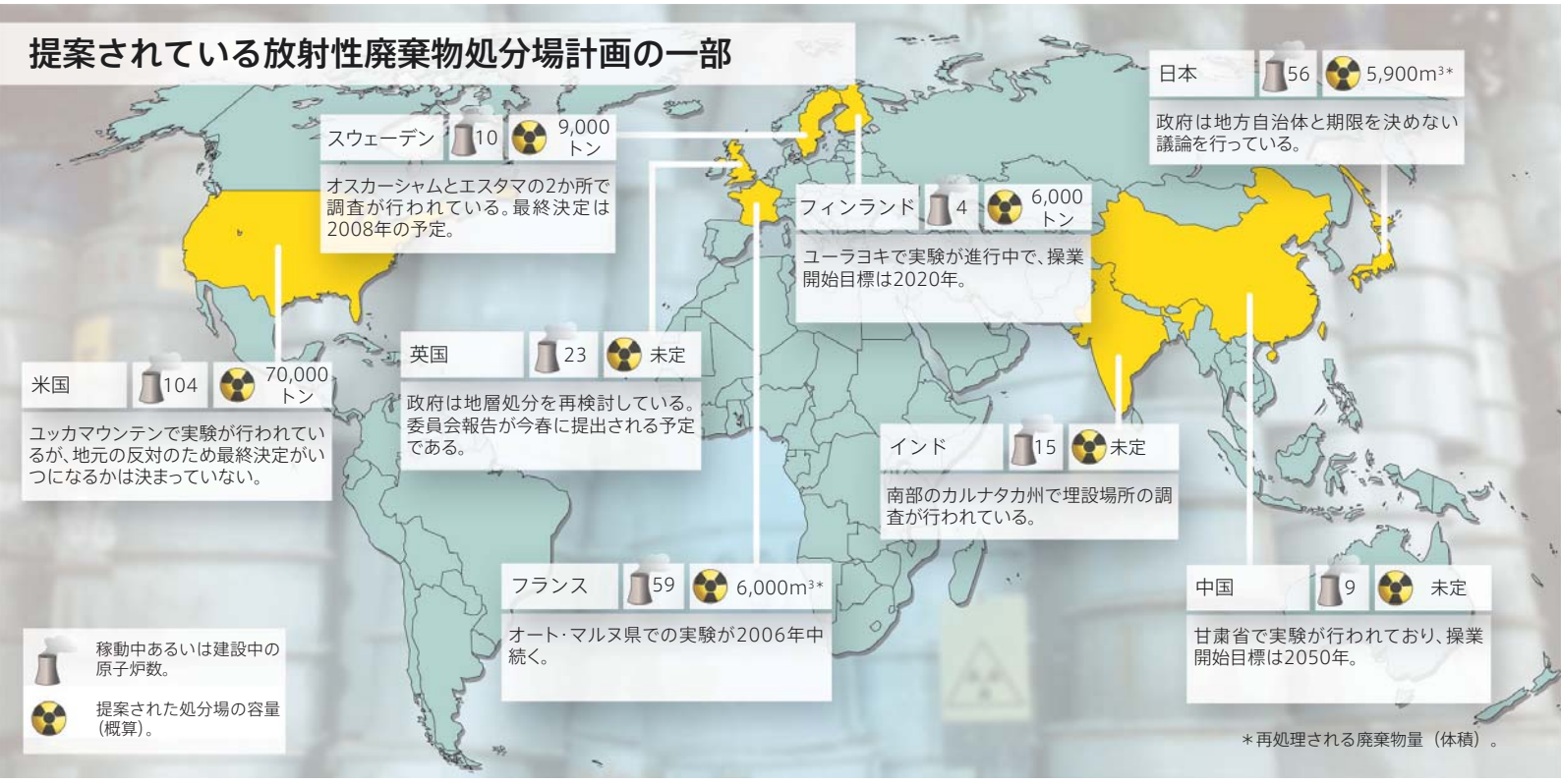
燃料棒中のプルトニウム 239 と未利用のウラン 235 を燃料や兵器の製造用に再利用する「再処理」を行えば、最終的な高レベル放射性廃棄物の量が減る。しかし今のところ、この再処理法は核燃料を作るための経済的な方法というにはほど遠い。また、再処理の経済性が劇的に改善したり、あるいは原子炉や粒子ビームを使って同位体の一部を害の少ないものに変える技術が現実的になったとしても、核分裂からエネルギーを取り出し続ければ、結局は今後何千年も危険なままの廃棄物を作ることになる。そして、その廃棄物はどこかに保管しなければならない。

オーストリアのウィーンに本部がある国際原子力機関（IAEA）の廃棄物技術部門の原子力技術者 Malcolm Gray は、「1950 年代後半以降、放射性廃棄物の取り扱いにおけるいちばんの方法は、それを地下深くに埋設することだということで科学界の意見はほぼ一致している」と話す。原子力発電所にある使用済み燃料貯蔵プールのような地上施設の安全性を保つには、特にそれが長期にわたる場合、多額の費用がかかる。一方で、適切に選ばれて設計・建設される地下処分場ならば数千年にわたって安定であるはずで、放射性廃棄物処分に関する国際条約を修正する必要もないだろう。「地層処分は唯一の現実的な解決策だ」と Gray はいう。地下処分場の候補地については世界各地で検討が進む（図を参照）。

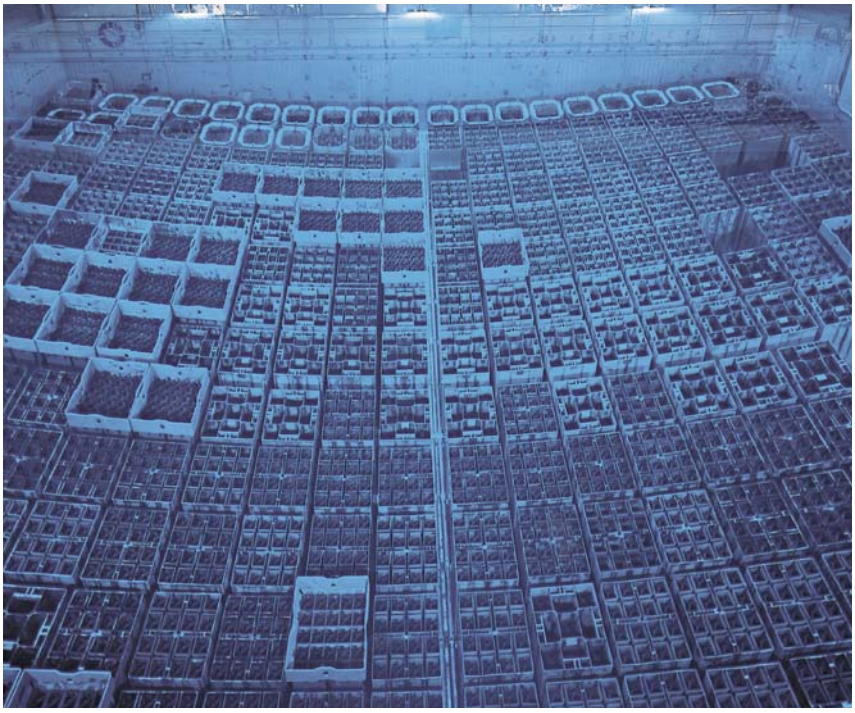
そうした取り組みにとって、ユッカマウンテン計画は 2 つの点で教訓となるはずだ。その 1 つとして、何年にもわたる研究にもかかわらず、米国科学アカデミーが求める厳しい規制にユッカマウンテンがどれほど適合するか、まだはっきりしていない点が挙げられる。米国科学アカデミーは、今後 2 回の氷河時代をまたぐくらいの数十万年という長期にわたって安全に廃棄物を保管できることが望ましいとしている。そしてもう 1 つ、かつて地元の人々が計画の反対においてこれほど団結したことはなかった。

ユッカマウンテンは、放射性廃棄物処分場の候補地として 1978 年から研究されてきた。山の側面に作られた長さ 8 キロメートルの地下道の中で多数の実験が行われ、水や熱やもれ出した放射性物質がどのように岩の中を移動

IMAGE: B. HOFF/GREENPEACE



©2006 NPG Nature Asia-Pacific



SKB

立ち入り禁止：使用済み燃料貯蔵プールのような地上施設に放射性廃棄物を貯蔵するには、多額の費用がかかり、危険も伴う。

する可能性があるか調査された。データは、数百年後や数千年後に偶然この場所に出くわした人間の被曝量を見積もるために使われている。

近年こうした実験の一部から、廃棄物は予想されていたよりも速く地下水面へ移動する可能性があるのがわかった。また、ユッカマウンテン周辺の若い火山の研究から、この場所に割れ目が発生する懸念も生じている（*Nature* **412**, 850-852; 2001 を参照）。大きな問題は、そのようなきわめて長期間にわたる被曝量を正確に予測できるモデルがないことだ。ユッカマウンテン周辺での研究経験が 25 年を超える地質エンジニアの Michael Voegele は「シカゴが氷の下 5000 フィート（約 1500 メートル）に埋もれる時代に、地下水がどのように山中を移動するかを正確に知ることは不可能だ」と話す。

ユッカマウンテンでの処分場建設計画を阻止しようとしている環境保護団体「Citizen Alert」のPeggy Maze Johnson 事務局長は、「ラスベガスの住民は、これらの不確定要素に疑いの気持ちを強めています」と話す。ネバダ州は人口が少なく、週選出の国会議員数もわずかだ。このため、ユッカマウンテンが選ばれたと地元の人々は考えている。「私は専門家ではありませんが」と前置きをした Johnson はいう。「その私にわかることは、政治力が働いてなにか決まるとき、それが科学的な決定にはとてもみえないということです」。

先駆者

フィンランドのヘルシンキにある、原子力研究センターであり規制当局でもあるフィンランド放射線・原子力安全センター（STUK）の放射性廃棄物・物質規制部門長 Tero Varjoranta は、「これは政治と科学が入り混じった問題なのだと意識して取り組まなければ、処分場を建設することはできない」と指摘する。政府の担当省庁は公平で信頼できると人々にみなされること、また実際にそうであることが重要だと Varjoranta はいう。「STUK は処分場を売っているわけではありません。もしも処分場が建設されても、それは安全だと人々に確信してもらえるよう、私たちは努力しています」と彼は話す。

また、隣国のスウェーデンでは地方自治体の権限が大きく、そうした公平さが特に不可欠だったとスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）の理事会メンバー Saida Engstörm が語る。ストックホルムに本社のある SKB はスウェーデン政府が作った企業で、スウェーデンの放射性廃棄物処分場の建設をまかされている。Engstörm によると、ティエルプ村に建設が検討されていた処分場の環境影響を評価した際、村民の 67 パーセントが彼女の仕事を支持していたという。しかし、地元議会は 1 回の決議で計画を拒否した。

「決議結果に動揺しなかったといえばうそになります。事実、私は困りました。しかし、計画を信用してもらうためには検討プロセスに地元の人々を巻き込むことが不可欠です」と彼女は話す。結局、ティエルプ村での建設計画が決定されなかったことは SKB が地元の意向を誠実に尊重していることを示す結果となり、国内のほかの地域では逆に建設計画に対する評価が上がったと彼女はいう。SKB はオスカーシャムとエスタマで調査を続けていて、そこでは計画に対する地元住民の支持は今も強いという。

地元住民の信頼を得る努力をおこたらずに行っているフィンランドとスウェーデンでは処分場建設の取り組みがかなり進んでおり、他国もこの 2 国を見習いたいとしている。英国では、放射性廃棄物管理に関する政府委員会が 2003 年に設置された。この委員会には、物理学者とエンジニアだけでなく環境保護論者や社会科学者も加わり、はたして放射性廃棄物を地下深くに埋設する処分方法が最もよい方法なのかを決定することになっている。カンブリア州セラフィールドに処分場を作る計画は 1997 年、公聴会の結果を受けて英政府の環境大臣によって却下された。この経

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

緯は教訓を残した。政府委員会の委員長を務めるサセックス大学の経済学者Gordon MacKerronは「セラフィールドの失敗で、科学者、企業、政府が閉ざされた扉の向こうで正しい選択肢と正しい場所を考え出し、それを発表するという古いやり方はもはや通用しないことが明らかになった」と話す。

しかし、振り子が世論重視の方向へ振れすぎるのを心配している人たちもいる。ロンドンのミドルセックス大学で危険管理を教えるDavid Ballは、「要するに科学はもはや信頼できないという見方が世の中にある」と話す。Ballは昨年の春、世論を過度に重視する態度に抗議して、放射性廃棄物管理に関する英国の委員会を辞任した。「彼らは科学をいずれ客観的な真実をもつものとみなさず、その代わりにふつうの人の古きよき常識を採用した」とBallは批判している。

科学と信頼

クオピオ大学（フィンランド）の放射線医学の専門家Keith Baverstockは、フィンランドとスウェーデンの成功は、決して処分場計画が国民に受け入れられたためにあるのではないという。「フィンランドでは、この処分方法が正しいとする国民の同意が40パーセントを超えることはなかった」と彼は指摘する。そして、成功のかぎは計画を進んで受け入れてくれる地元自治体を見つけることだ、とBaverstockはいう。

地元の人々の見方は、雇用問題や汚染の心配などの地域問題によってのみ決まるわけではない。ユッカマウンテン計画に反対するグループ「ネバダ核廃棄物タスクフォース」のJudy Treichel事務局長は「多くのグループがユッカマウンテン計画に反対し始めたが、それは彼らが新しい原子力発電所を望まず、また、ユッカマウンテン計画が新しい原子力発電所の建設を可能にする解決策とみなされるのを望まないためだった」と話す。スウェーデンでも、もし政府が原子力発電を徐々に削減していくことをその時点ですでに約束していなければ、処分場計画に対する地元の抵抗はもっと強かったかもしれない。少なくとも、政府の資金援助を受けて処分場計画を監視している環境保護グループ「放射性廃棄物レビュー(Nuclear Waste Review)」のスウェーデン事務所長Johan Swahnはそう考えている。「放射性廃棄物の問題は決して際限のない問題なのではないとわかれば、人々はもっと進んで計画の検討に参加するだろう」とSwahnはいう。

「科学者やエンジニアは、技術的になにが可能かという問題とは別に、こうした文化的な懸念にも取り組む覚悟をしなければならない」と放射性廃棄物コンサルタントのMcCombieは話す。簡単にいえば、放射性廃棄物処分場を建設したいと考える政府は、市民の信頼を勝ち取る努力をもっとしなければならないということだ。処分場の建設は容易ではない事業であり、時間をかけ、透明性を保たなければ達成できない、とMcCombieは指摘する。McCombieがいうように、「処分場はガソリンスタンドを作るようには作れない。計画を実現させるためには、人々が積極的に関与し、さらに各段階でどんでん返しの可能性もあるような長いプロセスを経なければならない」のである。■

Geoff Brumfielは、*Nature*の物理科学担当記者（ワシントン）。

原子力に力を入れる急成長国

インドと中国には現在、高レベル放射性廃棄物はほとんどない。しかし両国とも、今後見込まれるばく大なエネルギー需要をまかなうため、原子力エネルギーへの依存が急速に増えるものと予想される。

中国では、原子炉の数が15年以内に9基から40基に増えると予想されている。同国の地質学者たちは、モンゴルとの国境近くにある辺境の甘粛省の8つの土地を処分場建設候補地として思い描く。現在のところ初期の研究は順調に進んでいるが、核工業北京地質研究院（BRIUG）のJu Wangによると、処分場が建設されるまでにはしばらく時間がかかるだろうという。最初の調査は2015年に終了し、2030年までに候補地を選び、最終処分場の建設は2050年までに始める予定だという。

一方、インドの原子力エンジニアたちは、使用済み核燃料の再処理やいわゆる増殖炉を含めた壮大な核燃料サイクルを計画している。この計画では、より多くのウラン燃料を作るために天然のトリウム資源を使い、核燃料を再処理する。こうした増殖炉を含むシステムの構築は技術的には複雑だが、インドの核燃料サイクルから出る廃棄物を劇的に少なくする効果がある。

しかし、ムンバイにあるバーバー原子力研究センター（BARC）のSrikumar Banerjeeセンター長によると、インドは廃棄物処分場の建設についても引き続き計画している。インド南部にあるカルナタカ州の深い鉱山の中で実験が行われ、それに続く研究が操業中のウラン鉱石鉱山で行われているところだとBanerjeeはいう。

ウィーンの国際原子力機関（IAEA）の原子力エンジニアMalcolm Grayは「インドも中国も技術的には順調に進んでいるが、廃棄物処理を取り巻く社会的問題を解決するためには、まだやるべきことがある」と指摘する。「インドは社会的な問題を注意深く研究している。しかし中国はまだ今のところ、社会的問題は取り組まなくても回避できるものと考えているようだ」とGrayは話す。 **G.B.**

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

The story of i

ホヤと「わたし」と免疫学の物語

Nature Vol.440(730-73)/6 April 2006

多細胞生物は、互いに競争する細胞集団の戦いの場である。「個」について考える視線が、免疫学やがんの生物学の知見をいかに充実させてきたか。Claire Ainsworth が報告する。

「手袋の指に似た形をとる遊泳性のホヤの群体がある。群体の中の個々の構成員は一匹の動物なのだが、その群体そのものも別の生き物であって、単なる個体の集まりではない。（中略） そこで個体にこだわる人が「群体と個体と、どっちが動物なんだい？」と自問しなければならないなら、そのような問い自体を投げ捨ててこう答えなければならない。『もちろん二つの動物さ。わたしの身体の個々の細胞はわたしと違うように、二つは似ていないんだ。わたしは細胞全部を合わせただけの存在じゃないし、たぶん、細胞にしてもただわたしの部分であるだけがすべてじゃない』」[1]

「コルテスの海」ジョン・スタインベック著、吉村・西田 訳

奇妙で謎めいた生物であふれた潮だまりに目をやれば、そこには子どもにとっても文壇の巨匠にとっても、心ときめく何かがある。1940 年に友人の海洋生物学者 Edward Ricketts とともにカリフォルニア沖へ航海に出た小説家ジョン・スタインベックの心をとりこにしたホヤは、とりわけ不思議な生き物だ。今日ホヤ類は、一見すると異なる 2 つの学問分野で、個体とは何かという問いに答える科学的知見を提供している。自己と非自己とを区別するしくみに関心を寄せる免疫学者たち、そして自然淘汰が作用する生物体の階層を見極めたいと考えている進化生物学者たちが、それぞれの答えをウスイタボヤ（*Botryllus schlosseri*）に求めているのだ。

姿の美しいウスイタボヤは、普遍種にして謎の多い生物である。その生活環は、脊索とよばれる棒状の弾性組織をもつオタマジャクシ幼生から始まる。脊索は、進化的に背骨の前駆組織にあたる。オタマジャクシ幼生は、岩や海草の適切な断片を選んで足場を固め、奇妙で一見すると先祖返り的な変態を経て、ポリプ状の個体へと姿を変える。成体になると出芽を始め、個虫とよばれる遺伝的に同一な子孫を生じる。個虫は成熟すると、自身の芽体を形成する。秩序だった 1 週間ごとの大量死と大量再生を経て、老いた個虫は縮んで消滅し、新しい個虫に取ってかわられる。

個虫の集合体である群体は、血管系によって相互につながっており、ゼラチン状の被嚢に覆われている。この覆いの内側では濾過摂食する個虫が、水を排出する共同の出水孔の周りに花びら状のクラスターをきっちりと形成している。この生き物の個体性はいったいどこにあるのか。その問いに答えるのは容易ではない。

スタンフォード大学（米国カリフォルニア州）の Irving Weissman は、ウスイタボヤの群体の研究を、モンテレー湾の近くでかれこれ 30 年間も続けている。現在では幹細胞生物学者として有名な Weissman は、免疫学に対する強い関心からその研究者人生を歩み始めた。そして、やがてウスイタボヤの群体が相互の境界を侵す際にみられる奇妙な相互作用にひきつけられていった。

2 つの群体の血管が接触すると、次の 2 つの現象のいずれかが起きる。第 1 の現象では 2 つの系が癒合し、2 種類の異なる遺伝的構成をもつ細胞を抱え込む新しい群体、すなわち「キメラ」が生じる。もう 1 つの現象では炎症反応が起き、相互に接触した血管が破壊され、癒合を

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

妨げる瘢痕が形成される。群体どうしが癒合するか、もしくは互いを拒絶するかは、個々の群体の遺伝子構成によって決まる。この一連の過程は、免疫学者の目にはヒトの身体が移植臓器を受け入れるか、または拒絶するかのしくみに不思議なほど似ているように映る。

1980 年代に Weissman の研究チームは、この癒合 - 拒絶の決定には、ヒトの主要組織適合複合体（MHC）にきわめて似た挙動を示す、遺伝子にコードされたシステムが関与することを明らかにした[2]。細胞表面で特定のタンパク質断片を提示する MHC は、ID カードに似たような働きをし、臓器ドナーの組織がレシピエントに受け入れられるか拒絶されるかを決定する。しかし、群体が癒合しようとする理由は、そもそもどこにあるのだろうか。

スキルの共有

1 つの可能性として、2 つ（あるいはそれ以上）のホヤの組み合わせは、1 つの個体で生きるより有利なのだと考えられる。たとえば研究室における観察では、15℃の温度で最適に生存する群体が、25℃を適温とする群体と合わさって 1 つになると、癒合後の群体は両方の温度で良好に生存できるようになる。「キメラの順応性は非常に高いといえます」とイスラエルのハイファにある国立海洋学研究所の生物学者 Baruch Rinkevich は語る。このようにすぐれた才能を集めることで、群体は環境変化に対応しやすくなる。さらには、癒合によって群体自身の大きさがより大きく広がり、腹をすかせた魚にひとかじりされても少々は大丈夫となる。しかし、群体はどうやってすぐれた特徴を集めるのだろう。

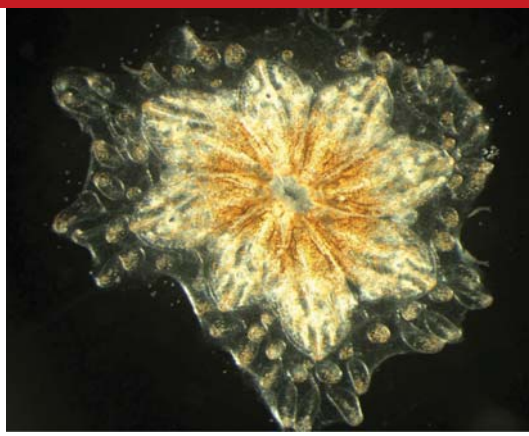
その答えは、ホヤの非常にすぐれた再生能力にある。ホヤの群体は、特別な幹細胞のおかげで 7 日間ごとに再成長することができる。脊椎動物の成体の場合、幹細胞は分裂して、さらに多くの幹細胞や、各組織に特異的なさまざまな細胞を作り出す。たとえば皮膚の幹細胞は、さまざまな種類の皮膚細胞の元となる。しかし、このようなホヤの 1 つから血管の一部を取り出すと、それは個体全体へと再生する。いいかえると、ホヤの成体幹細胞の一部はヒトの胚性幹細胞と同じような働きをする。つまり、ホヤの「体」のどの種類の細胞でも作ることができる。

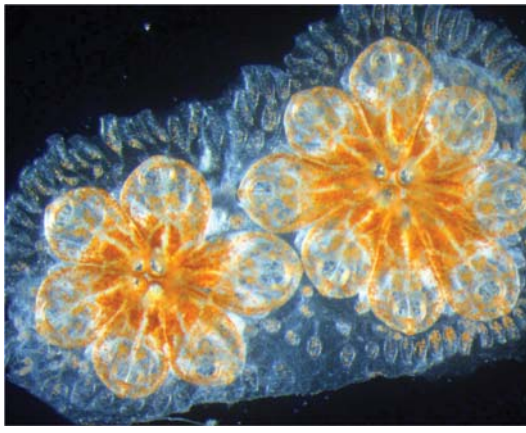
ヒトをはじめ成長過程が生涯に 1 回のみの生物の場合、そうした強力な幹細胞は発生の初期においてのみ必要とされる。ところが週単位で再生する生物の場合、幹細胞は常備されていなければならない。「まさに先祖返りそのものです」と Weissman 研究室のかつてのポスドクで、現在はスタンフォード大学でホヤ研究室を率いる Anthony De Tomaso は語る。「ホヤは、常に発生を開始可能な態勢にあるのです」

2 つの群体が癒合すると、それぞれの群体の幹細胞は、かつては別の群体にあった組織も構築できるようになる。こうして多様な細胞が混ざり合い、「新しい」ホヤは有性生殖に伴うさまざまな問題にわずらわされることなく、幅広い遺伝子変異の利点をいろいろと得ることになる。しかし、この癒合はまた、生物体のどの階層で自然淘汰が作用するのかという疑問を投げかける。遺伝的に異なる細胞系列は 2 つの群体のそれぞれに由来するものなのか、それとも癒合後の群体全体を起源とするのだろうか。

ここで、名前のつづりが少し異なるもう 1 人の Weismann が登場する。この人物は約 100 年前に、自然淘汰は体内では働かないと述べた。19 世紀のドイツ人生物学者 August Weismann は、多細胞生物の細胞を 2 つのタイプに分けた。身体のほぼすべての部分を構成する「体細胞」と、卵や精子の元となる少数の「生殖細胞」である。

重要なのは、Weismann が体細胞と生殖細胞の間には壁があると述べた点だ（「ワイスマン障壁」として知られる）。この障壁の存在により、体細胞が次世代に影響することは決してなく、生物体のいかなる獲得形質も子孫に伝達されることはないとされた。Weismann の研究は、メンデル遺伝学の再発見、ひいては 20 世紀におけるダーウィン進化論の理解の基礎となった。こうして自然淘汰は個々の生物体に対して働くものとみなされるようになり、個体の生殖系列の質は、遺伝学的に同一な体





Baruch Rinkevich（中央の写真）は、近縁種の組織内で勢力を増すウスイタボヤ *Botryllus schlosseri*（上と下の写真）の幹細胞の挙動とがんとの間には類似点があると考えている。

G. PAZ

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

D. KRAFT

Irving Weissman（左）と Tony De Tomaso（右）は、ヒトの組織適合系に似たしくみがホヤで働いていることを明らかにした。

細胞の適応度によって決まると考えられるようになった。

淘汰を受ける唯一の単位は個体であるという考えに対しては後に、生物体の高い階層または低い階層が果たす役割を重視する生物学者たちから疑問が寄せられた。たとえば群淘汰論を唱える研究者は、群全体あるいは種全体に利益をもたらすような性質は、進化によって淘汰されうると考えている。一方、遺伝子淘汰を重視する研究者たちは、自らの複製をめぐって競争する「利己的な」遺伝子間の選択に注目することで、進化は最も適切に理解できると考えている。さらにホヤ研究の成果は、細胞系列に直接働きかけるという、別の階層で起きる淘汰についても示唆する。

この学説を熱心に支持するのは、エール大学（コネチカット州ニューヘブン）の生物学者 Leo Buss である。数十年にわたって Buss が研究してきた問題は、最近になってようやく分子生物学の見地から説明がつき始めている。Buss は、原生生物、真菌類、植物、そして現在 33 門ある動物の 19 門に関して、ワイスマン障壁にもれがあると述べている[3]。これらの生物では体細胞が生殖細胞に変わることがあり、このため発生途上で体細胞が獲得した遺伝子変化が次世代へと受け継がれる可能性があるという。したがって自然淘汰は、体内で競争する細胞系列に働きかけることが可能となり、一部は生殖細胞となる。

群体をのっとる

この競争は、単細胞生物の一群が多細胞生物へと大規模に姿を変え始めた 5 億年以上前に始まった。細胞間どうしの、また細胞と個々の個体との間の競争で生じる衝突を自然淘汰が解決するしくみを明らかにすることは、多細胞生物が現在我々の目にする生物へと進化してきた経緯を知るうえで重要だと Buss はいう。

Buss の研究をふまえ、スタンフォード大学の Weissman の研究チームは、癒合したホヤ群体中の細胞の運命を追跡した。そして場合によっては、1 つの群体に由来する細胞が、別群体の組織と完全に置き換わっているようにみえることを確認した[4]。また別の研究では、1 つの群体に由来する細胞が別の群体の生殖腺に侵入し、その群体の生殖細胞を置き換えてしまうことがわかった[5,6]。こうした異様な運命により、ホヤは自身の遺伝子系譜の増殖を停止させられるのみならず、競争相手の子孫の量産を効率的に推し進めることになる。

このおそろしいような状況が、やがてホヤの拒絶反応の発生を促す。寄生されるのを避けるため、イタボヤの群体は、FuHC 系とよばれる遺伝子にコードされた組織適合系による、高度の「自己の感覚」を発達させてきた。このしくみは、1980 年代に Weissman の研究チームが発見した。群体は、ほかの群体の FuHC 組織適合遺伝子群が互いに十分似ている場合に初めて癒合可能となる。FuHC 遺伝子の種類は、MHC 遺伝子群と同様に数千にのぼる。2 つの群体は、FuHC 遺伝子が近縁な場合にのみ、適合する可能性が極めて高くなる。こうすれば生殖系列がのっとられるコストは非常に小さくなる。たとえ侵入幹細胞が生殖系列をハイジャックするとしても、ことを荒立てる必要のないほど十分に近縁であるし、元の群体の遺伝子の大半に実質的な影響はないからだ。

De Tomaso の研究グループは、FuHC がナチュラルキラー細胞におけるヒトの MHC とほぼ同じように作用すると考えている。MHC と結合した外来タンパク質を活発に検出する白血球 T 細胞とは異なり、ナチュラルキラー細胞は、「非自己（missing self）」、つまり正常な MHC を失った細胞を監視する。関与する分子群はヒトとホヤでは異なるかもしれないが、ある群体が別の群体と統合する際に働く論理は似たようなものだと考えられる。

真菌類や顕花植物、そしてカイメンなどの原始動物といった、キメラとして生存可能なあらゆる生物は、外来細胞を認識するある種の能力をもっている。ホヤとは別の群体性の海洋生物である、ウミヒドラ（*Hydractinia*）とよばれるヒドロ虫を研究しているニューメキシコ大学（アルバカーキ）の生物学者 Luis Cadavid は、この生物もまた、「自己であること」を示す一連のマーカーを備えていることを明らかにした。しかし、こうした形質が広く存在するからといって、それらの起源が共通しているとは限らない。FuHC は MHC のように機能する可能性があるが、De

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

Tomaso の研究チームが得た配列データの比較からは、2 つの系に相関は認められていない[7]。

「自己と非自己の見極めには共通項が認められますが、その機構の起源は 1 つではないと個人的には思います」と Cadavid は語る。バーゼル大学（スイス）の生物学者で、適応免疫の進化を研究している Louis Du Pasquier も同じ意見だ。得られた証拠からは、淘汰圧には共通点がみられるという。それは、細菌やウイルスによる侵略ではなく、同じ種による侵略を受けた際に自己の全体性を維持しようとしたことだと Du Pasquier は語る。

自己の認識

この知見はヒトにもあてはまると De Tomaso と Weissman は考えている。ヒトはさまざまな状況下で、競争する細胞系列の宿主となる可能性がある。たとえば臓器移植や輸血時に、ドナー由来の血液幹細胞はレシピエントの体内で速やかにコロニーを形成し、いつまでもとどまることがある。人為的な状況下以外でも似たようなことが起きている。キメラ現象の例ではないが、がんは、自らが周囲の身体とは異なる個性をもつことを示す特定系列の体細胞とかかわりをもつ。異常な状況に対する適応免疫系の変化を避けるため、一部のがん細胞は、MHC 遺伝子群の発現を停止する。

Rinkevich の研究チームは、これに似た過程として、*Botrylloides* とよばれる近縁ホヤの体内で勢力を増す別のイタボヤ *Botryllus* の細胞を研究している。「これはまるで、がんそのものです」と Rinkevich は語る。「がんに匹敵する関係があることは疑いありません。がんは体細胞の寄生現象であり、体内における異物に対する淘汰なのです」と De Tomaso も同意見を語る。

Weissman によれば、イタボヤから学ぶことは多い。現在のところがんの研究者は、ヒトの幹細胞ががん性腫瘍の起源と発生の双方に重要な役割を果たしていると考えている[8]。Weissman は、ヒトの幹細胞とイタボヤの「勝者」幹細胞との間の興味深い類似点について認めている。さらに Weissman は、このような細胞にすぐれた捕食能をもたらす遺伝子の解明にも取り組んでいる。「仮にそうした遺伝子が最終的に単離され、関連遺伝子群ががん細胞の発生経路中に存在することがわかったとしても、特には驚かないと思います」と Weissman は語る。

がんは一般に、真の不死に至る経路ではない。というのもがんが発生するのは通常、一定寿命をもつ 1 個体に限られるからである。その個体の寿命を超えて存在するためには、幹細胞は体細胞から離れて生殖系列中（どの生殖系列でもよい）に侵入する必要がある。理論上、その最も容易な経路は妊娠だ。研究者の間では以前から、一部の哺乳類については多胎妊娠時に幹細胞が複数の胎児間を移動できることが知られていた。幹細胞はまた、胎児からもれ出て母体の血液中に放出されることもある。その大半は母体の免疫系に捉えられて破壊されるが、一部はそのまま残ることになる。だがこれがなぜ、そしてどのように起こるかは不明だ。したがって数人の子をもうけた女性は、多様な細胞系列が混合した状態にあるといえる。

このような胚性幹細胞は原理的に、後続の胎児の生殖系列で、さらにはおそらく母体の生殖系列でコロニーを形成する可能性がある。しかし、生殖系列のキメラ現象は起こらないようだ。これらの事実は Weissman にとってみれば、MHC を基礎としたヒトの自己認識系がホヤの系と同じく、こうしたのっとりを止めるしくみを備えていることを意味するという。「ヒトが生殖系列のキメラではないという事実は、何らかの抑止機構が働いていることを意味しています」と Weissman は語る。

De Tomaso は、このような細胞ののっとりを防ぐ必要性について知れば、免疫学における長年の謎を説明できるのではないかと考えている。MHC 遺伝子群にみられる多様性は、適応免疫系の必要性によって説明可能な多様性よりもかなり幅広い。その根底には幹細胞の寄生に対する危機感があるのだろうか。De Tomaso も認めるように、現時点ではこのアイデアはあくまで想像の域を出ず、MHC の多様性の説明を試みる理論はほかにも数多くある。しかし De Tomaso は、自己を区別することの必要性が個体段階における自然淘汰の重要な推進因子となっており、これが 1 人ひとりの人間を個性的にしているというアイデアを今でももっている。「私がみるところのすべてが、1 人ひとりの人間を可能な限り個性的にするという淘汰の存在を示唆しています」と De Tomaso はいう。

加えて、いくぶん強調されるきらいはあるものの、人間の個性や、ほかの生物でより大きな群に屈服するという状況が維持されていることには共通の機構が関与している可能性がある。自己、細胞、そして遺伝子の各階層はすべて、5 億年前に確立された規則の下で相互に作用しており、今も絶え間なく監視されているといえる。自己、細胞、遺伝子の存在意図を理解すること、そして細胞は単なる不活性な構成単位なのではなく、少なくとも自己であることを主張する能力を備えた存在だと認めることは、スタインベックがホヤを見て記したように、「われわれ自身とそれを取り巻く世界とをより深く理解するための足がかり」となる。 ■

Claire Ainsworth は *Nature* のシニアレポーター。

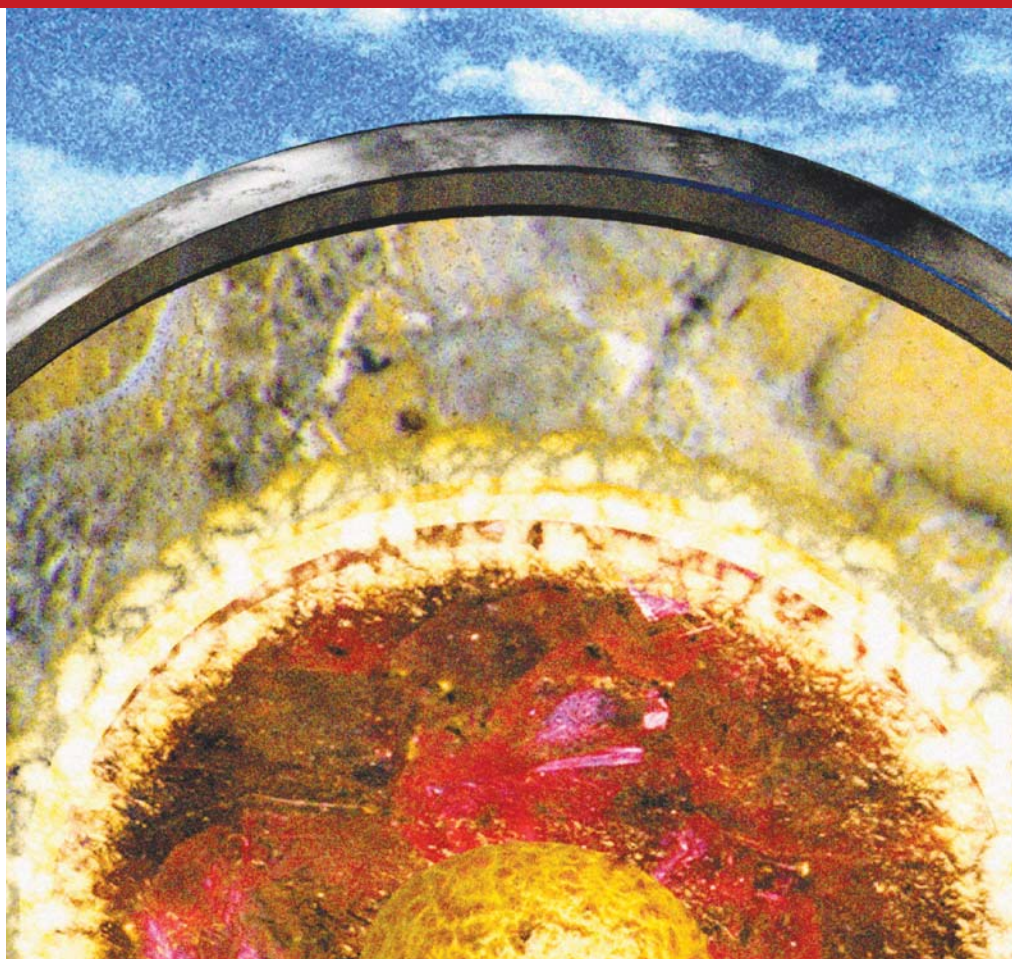
1. Steinbeck, J. *The Log from the Sea of Cortez* (Penguin, 2000).
ジョン・スタインベック『コルテスの海』、（吉村則子・西田未緒子 訳）工作舎（1992）
2. Scofield, V. L., Schlumpberger, J. M., West, L. A. & Weissman, I. L. *Nature* **295**, 499–502 (1982).
3. Buss L. W. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **80**, 1387–1391 (1983).
4. Stoner, D. S. & Weissman, I. L. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **93**, 15254–15259 (1996).
5. Stoner, D. S., Rinkevich. B, Weissman , I. L. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **96**, 9148–9153 (1999).
6. Laird, D. J., De Tomaso, A. W. & Weissman, I. L. *Cell 123*, 1351–1360 (2005).
7. De Tomaso, A. W. et al. Nature 438, 454–459 (2005).
8. Reya, T., Morrison, S. J., Clarke, M. F. & Weissman, I. L. *Nature* **414**, 105–111 (2001).

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

Magical mantle tour

地球深部の謎を解く

Nature Vol.440(1108-1110)/27 April 2006



C. DARKIN

日本人研究者が最近発見した結晶構造は、地球の奥深くで起こっているさまざまな現象を説明するとみられる。地球物理学者たちは、この結晶構造をさらによく理解しようと必死だ。David Cyranoski が取材した。

そこは、あらゆることがおかしくなる不思議な場所だ。地下約 2700 キロメートルの地球内部。固体マントルと液体である外核（地球の核のうちの外側部分）の境界のすぐ上にあるその層では、地震波が奇妙なふるまいをする。一部の地震波は一定速度で進み続けるのではなく、その領域へ入る際に加速し、いったん内部へ入ると今度は進行方向によって速度を変える。一部の小さな領域では、地震波の速度が 30 パーセントも遅くなることもある。

こうした地震波は、科学者たちが地球の深部を探るための主たる手段だ。地球内部で反射する地震波に関する研究からは、地球が地殻、マントル、外核、内核の層になっていることがわかった。そして「D"（ディーダブルプライム）層」とよばれるのが上述の問題の層である。だが、この層で地震波がみせる奇妙なふるまいの原因はいったいどこにあるのだろうか。

最近まで、この疑問にどう答えればよいのか誰もわからなかった。リバプール大学（英国）の地震学者 Christine Thomas は「2、3 年前は地球深部の地震学は停滞しているように思えた」と話す。そうしたなかで、東京工業大学大学院の廣瀬敬が率いる研究グループは 2004 年、マントル最深部の圧力と温度を実験室で再現したことを報告した（コラム「2 つの発見物語」参照）。そして廣瀬たちは、マントル最深部に豊富にあるとみられる鉱物、ケイ酸マグネシウム（$MgSiO_3$）が、これまで知られていなかった結晶構造をとることを発見した[1]。

この構造は $MgSiO_3$ の「ポストペロフスカイト相」といい、ありふれたペロフスカイト構造と同じ化学組成をもつが、原子の並び方が異なっている。「ポストペロフスカイトはより密で、3 次元の結合構造をもつペロフスカイトと比べると、2 次元のシートを重ねたような構造になっている」と廣瀬は説明する（右ページ図を参照）。こうした原子配列の変化は相転移の一種だが、これが地球の下部マントルでの地震波の異常なふるまいを説明づける可能性がある。

さまざまな物質に見つかる

相転移は地質学ではありふれたことで、廣瀬が見いだした真相も聞く人によってはがっかりするかもしれない。ロンドン大学ユニバーシティカレッジの鉱物物理学者 John Brodholt は、「我々がここ何年も探してきたものが、相転移にすぎなかったとは」と話す。しかし、ポストペ

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

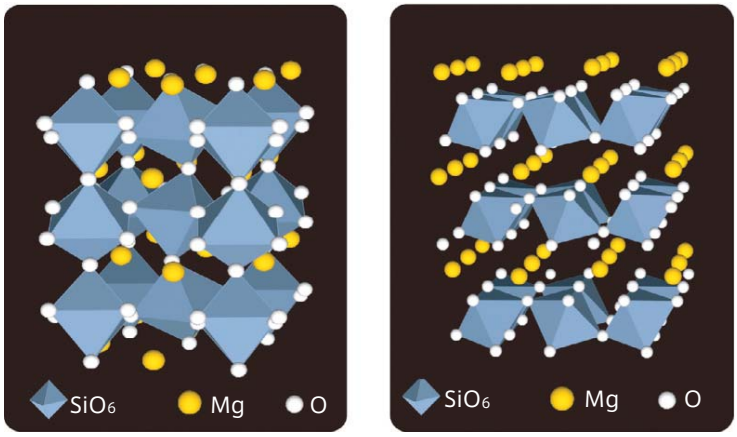
ロフスカイト相の発見は地震学や地球力学、鉱物物理学の分野を活気づけた。

廣瀬の論文が巻き起こした興奮の中で、研究者たちはポストペロフスカイト構造の特性や、この構造によって解明される可能性があるその他の地震学的謎、また、マントル内の熱の流れにおけるこの構造の意味について議論した。惑星科学の専門家たちは、ポストペロフスカイト構造の発見をふまえ、地球の自転速度の変動原因を再検討しているほか、地球以外の惑星の特徴についてもこの構造で説明できないかと考えている。スイス連邦工科大学チューリッヒ校の結晶学者 Artem Oganov は「理論家として私たちは、実験から得られる手がかりを待っていた。この構造の発見は大きな刺激となった」と話す。

廣瀬のグループによる最初の発表後、鉱物物理学者たちは実験と理論の両面からポストペロフスカイト構造の $MgSiO_3$ の存在および構造を確かめた[2,3,4]。そして研究者たちは、ケイ素の場所にゲルマニウムがあるゲルマニウム酸塩など、ほかの鉱物についても調べた。すると、そこにもポストペロフスカイト構造が見つかった。プリンストン大学（米国ニュージャージー州）の地球物理学者 Thomas Duffy は「これまで誰もこの構造を見つけていなかったことが驚きだ」という。

ポストペロフスカイトによって、長年の謎の多くが明らかになるようだ。たとえば、Brodholt たちはシミュレーションを使い、S 波とよばれる地震波が、D" 領域中のある場所でなぜ突然加速するのかという疑問に取り組んだ。また、S 波の D" 領域中でのふるまいは、別種の地震波である粗密波（P 波）とも異なっている。もし、その領域がペロフスカイトではなくポストペロフスカイトを含むなら、両方の観測結果はポストペロフスカイトの特性によるものといえるだろう[5]。

同様にポストペロフスカイトは、D" 領域中を進む S 波が方向によって速度を変える理由も説明できる。これは地震波の「異方性」とよばれる現象だ。ポストペロフスカイトの原子の並び方の向きにより、S 波はある決まった軸に沿って結晶中をより速く進む。D" 領域での地震波観測結果の異方性パターンは、これで説明される[6,7]。



K. HIROSE

ペロフスカイト（左）とポストペロフスカイトの構造（右）。

深まる謎

「こうした原子レベルでの研究は、地球科学におけるさらに大きな疑問を解明する。たとえば、熱や岩が地球深部から地球表面へ向かってどのように流れるかといった問題だ」と廣瀬は話す。ペロフスカイトがポストペロフスカイトに変わるときに結晶格子構造がどう変化するかを理解すれば、下部マントル中の流れの速度と方向を知ることができる。

ポストペロフスカイトはさらに、マントルを対流させる巨大なエンジンを動かしている、もうひとつの動力源なのかもしれない。マントルの比較的低温の領域では、相転移は圧力が低い、つまり深さが浅いところで起こる。周囲の高温領域と比べると、新たにできるポストペロフスカイトは温度が低いだけでなく、密度も高くなり、これがポストペロフスカイトの沈み込みのもう 1 つの理由となる。カリフォルニア大学サンタクルーズ校の地震学者 Thorne Lay は「相転移は、対流を後押ししている追加ポンプのようなものだ」と話す。

もし、ポストペロフスカイトが地球内部の力学において本当にそれほど重要なら、この新しく発見された構造は大きな成功といえるだろう。しかし今のところ、ポストペロフスカイトによって解明された謎よりも多くの疑問が新たに生まれているようだ。

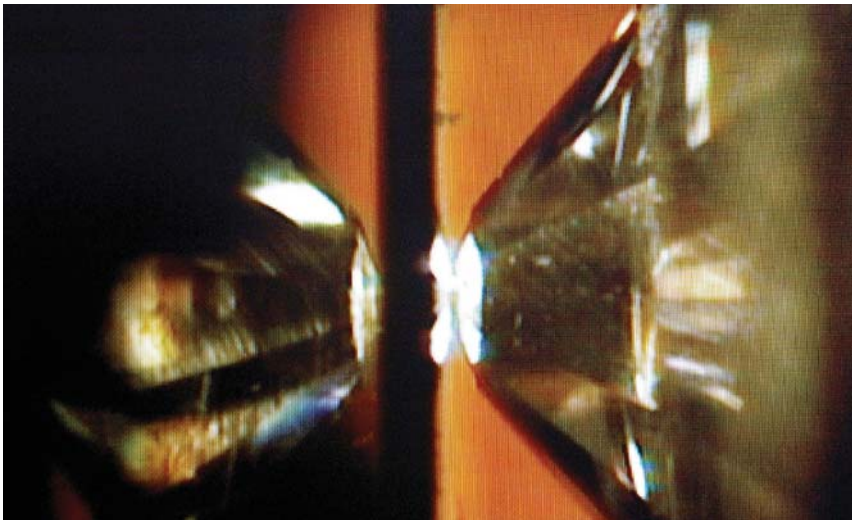
たとえば、地震波の異方性にポストペロフスカイトが果たす役割に関する研究のすべてで、結晶構造がどう変形するかの予測が食い違っている。研究者たちは、正しい変形パターンと自身のモデルが合わなければならないことを理解しているが、そもそもどの変形パターンが正しいのかがまだわかっていないのだ。

相転移が起こる圧力と温度の関係も正確には解明されていない。相転移は特定範囲の圧力と温度で起こり、より高温では高圧力が必要だとわかっている。しかし、圧力のデータは実験に使われた装置によって 15 ギガパスカルもの違いがある。これは深さに換算して 350 キロメートルの違いに相当する。廣瀬は昨年 10 月、東京で開かれたポストペロフスカイトのワークショップで「不確かさの最大の要因は、装置による圧力の食い違いだ」と話した。

地球の自転速度にも影響？

スイス連邦工科大学チューリッヒ校の理論モデル作成者 Paul Tackley は「D" 領域では温度が大きく変化することを考えると、ポストペロフスカイトがどこに現れるかを知るのはむずかしい」と話す。彼が行ったシミュレーションによると、約 3200℃の比較的熱い領域にはポストペロフスカイト相はないだろうという[8]。この

©2006 NPG Nature Asia-Pacific



K. HIROSE

プレッシャーのもとで：ダイアモンドアンビルは地球深部の高圧を再現する。

温度は、マントルと同程度の深さのほかの領域よりも1000℃ほど高い。そしてこの比較的熱い領域では、マントルプルームが生じると考えられている。マントルプルームは地球の深部から上昇する上昇流で、熱と岩の巨大な道筋となり、地球表面では火山のホットスポットとして現れていると多くの研究者が考えている。

地球の力学に関係する、ある重要な問題についても大きな疑問が残っている。地球の核を構成する液体の鉄は、マントルとどの程度相互作用しているのかという問題だ。鉄原子は、$MgSiO_3$のマグネシウムの一部と置き換わることができる。シカゴ大学（米国イリノイ州）のWendy Maoは、まさにどれだけの鉄をポストペロフスカイトが取り込むかを測定した。

その結果Maoは、ポストペロフスカイトがこれまで知られていたどの下部マントル材料よりもずっと多くの鉄を取り込むことを発見した[9]。「鉄はポストペロフスカイトにおいて支配的で、きわめて複雑な役割を果たしているのかもしれない」と彼女は話す。鉄吸収は、マントル底部の特定の小領域における地震波の劇的な減速に関しても説明できるかもしれない。しかし、鉄が含まれる場合はペロフスカイトがポストペロフスカイトへと変わる圧力の範囲も広がり、相転移が起こる境界を正確に定めるのはさらにむずかしくなる。

こうした問題は、ポストペロフスカイトのふるまいに関する単純なモデルで複雑な領域を理解しようとしているために生じるのかもしれないとLayは指摘する。彼は、「ポストペロフスカイトの性質に関する見積もりのすべてが数値モデルに基づいていることが大きな問題だ」という。そして、さまざまな要素が複雑に関与する領域について、「数値モデルが本当に妥当であるかは明らかではない」と話す。

D" 層の詳細は明解になるというより、さらに複雑になってしまいそうだ。「当初はポストペロフスカイトがすべてを説明するかもしれないという興奮があった。

2つの発見物語

ポストペロフスカイト構造の$MgSiO_3$は、長く待ち望まれた発見だった。その発見はどのように行われたか。答えはだれに尋ねるかによって変わってくる。

廣瀬敬と小野重明は、かつては協力して研究していた。しかし、今は廊下での丁寧なあいさつを除いて言葉を交わすことはない。

2人はともに東京工業大学の1階離れた階で研究している。廣瀬は同大学の教授であり、小野は海洋研究開発機構の研究員で、別の科学者と協力している。廣瀬と小野は同じような研究に取り組んでいる。ダイアモンドアンビルとよばれる装置を使って2つのダイアモンドの間で材料を締めつけ、レーザーで加熱する。2人とも、地球の内部を模した極端な高圧下で材料の性質がどのように変化するかを測定している。

廣瀬も小野も、鉱物$MgSiO_3$のポストペロフスカイト相の発見に重要な貢献をした。しかし、廣瀬が昨年10月、ポストペロフスカイトに関する会議を東京で組織したとき、小野は講演者として招待されなかった。

廣瀬は社交的で話好きの快活な性格だ。昨年10月には、米国・ワシントンDCのカーネギー研究所でポスドク特別研究員だったときに覚えた自信に満ちた英語でワークショップを指揮した。対して小野は日本語での取材を望み、内気で生まじめ、控え目な性格だ。

しかし彼らの不信は、単なる個性の不一致から生まれたのではない。2人はそれぞれの「ポストペロフスカイト発見物語」をもっている。

2人とも、技術の進歩が道を開いたという点では同じ意見だ。1987年に発表された論文を基に、$MgSiO_3$のペロフスカイト相はマントルの底近くの圧力下でも安定だとほとんどの研究者が信じたと廣瀬はいう[11]。だから、ポストペロフスカイトを探す価値はほとんどないように思えた。「実験を試みた者は多くなかった。

廣瀬敬教授：廣瀬は「小野はいつも内容を隠して研究を進めていた」と話す。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

しかし、研究者たちは今、その性質を冷静に見つめ直している」と Mao は話す。

不確かなことは残っているが、研究者たちは新しい研究領域へと突き進んでいる。海洋研究開発機構（本部・神奈川県横須賀市）の小野重明は、$MgSiO_3$ が地球のある謎を解く可能性について調べている。「地球の自転は 10 年の期間でみて数ミリ秒、加速・減速している」と小野は話す。核とマントルの電磁的な結合がこれを引き起こしているという仮説があるが、もしそうであれば、下部マントルの電気伝導率は高くなければならない。ペロフスカイトの伝導率は高くないので、下部マントルが（多くの科学者が考えていたように）主にペロフスカイトでできているならばこの仮説は成り立たない。

しかし小野は、ポストペロフスカイト構造の Al_2O_3（ポストペロフスカイト構造の $MgSiO_3$ よりも性質がよくわかっている酸化アルミニウム）の電気伝導率が高いことを発見した。彼は、ポストペロフスカイト構造の $MgSiO_3$ もおそらく Al_2O_3 と同じ特性の多くを備え、地球の自転速度の変動を説明するのに十分なほどに高い電気伝導率をもつと主張する。「これはポストペロフスカイトが新たに説明する、地球の謎の 1 つだ」と小野はいう。

ほかの惑星にも

研究者の中には、ポストペロフスカイト構造の $MgSiO_3$ がほかの惑星でどのような役割を果たしているかを考えている者もいる。ミネソタ大学ミネアポリスキャンパスの Renata Wentzcovitch たちは、ガス巨星や、ほかの太陽系にある岩でできた惑星の内部におけるポストペロフスカイトのふるまいをシミュレーションした。そしてそうした高圧・高温の場所では、$MgSiO_3$ はほとんど金属のようにふるまい始めることがわかった[10]。

地球ではポストペロフスカイト層の下の一部領域にペロフスカイトがあるかもしれないという可能性があり、多くの科学者たちが期待をふくらませている。これは、S 波が最初は加速、次に減速と 2 段階で速度を変えることを示す地震波データの説明となるだろう。さらには、深さによる温度変化についても明らかになるかもしれない。「これは下部マントルと核の一種の温度計となるだろう」と Thomas は話す。

廣瀬自身は今回の有用な発見について、もしかしたら研究者たちを困惑させているかもしれないとはいえ、よかったと思っている。ポストペロフスカイトは D" 層の大部分については説明できないかもしれないが、その存在自体が重要である。「ポストペロフスカイトの割合はすごく大きくはないかもしれない。しかしそれは、核とマントルの間の温度的な境界であり、化学的な境界でもある場所にある。地球に関するきわめて重要な問題を理解するのにポストペロフスカイト構造はきっと役立つはずだ」と廣瀬は話している。 ■

David Cyranoski は、*Nature* のアジア・パシフィック担当記者。。

1. Murakami, M. *et al. Science* **304**, 855–858 (2004).
2. Oganov, A. R. & Ono, S. *Nature* **430**, 445–448 (2004).
3. Tsuchiya, T. *et al. Earth Planet. Sci. Lett.* **224**, 241–248 (2004).
4. Shim, S. -H. *et al. Geophys. Res. Lett.* **31**, L10603 (2004).
5. Wookey, J. *et al. Nature* **438**, 1004–1007 (2005).
6. Oganov, A. R. *et al. Nature* **438**, 1142–1144 (2005).
7. Merkel, S. *et al. Science* **311**, 644–646 (2006).
8. Hernlund, J. W. *et al. Nature* **434**, 882–886 (2005).
9. Mao, W. L. *et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA* **101**, 15867–15869 (2004).
10. Umemoto, K. *et al. Science* **311**, 983–986 (2006).
11. Knittle, E. *et al. Science* **235**, 668 (1987).
12. Ono, S. *et al. J. Phys. Chem. Solids* **65**, 1527–1530 (2004).

実験もきわめてむずかしいものだった」と廣瀬は話す。

しかし、廣瀬は 2002 年までに、5 年以上も前から心に描いていた実験を行うことに成功した。ペロフスカイト構造の $MgSiO_3$ 試料を核 - マントル境界に近い圧力と温度におく実験である。彼は、大型放射光施設 SPring-8（兵庫県佐用町）で試料を分析した。そして、データの中に異常な回折パターンを見つけた。

データの分析を手伝ってくれる化学者を見つけるのに、何か月もかかったという。「化学が専門の教授たちは、データが間違っているか、あるいは私が間違っているに違いないといった」と廣瀬は振り返る。ようやく、東京工業大学の同僚で化学者である村上元彦が、新年の休暇にデータを分析する時間をとってくれた。そして村上は、試料の中にポストペロフスカイト構造を発見した。

しかし小野は、ポストペロフスカイト発見への重要な段階がその 6 か月以上前にあったと主張する。彼は鉱物の赤鉄鉱（ヘマタイト）に、廣瀬が $MgSiO_3$ に見つけたのと同じ構造ができる、高圧での相転移があることを発見し、それをポストペロフスカイトだと考えた[12]。「私の目標は常に $MgSiO_3$ だった」と彼は話す。

SPring-8 を使っている研究者たちは、共同使用のコンピューターと公式のビームラインノートにデータを掲示することが求められている。だから、廣瀬は自分の赤鉄鉱の研究を追いかけることができたのだと小野はいう。「これは完全に間違ったことではないがフェアではない。だから私は彼に協力するのをやめた」と小野は話す。廣瀬は小野について、「いつも内容を隠して研究を進める」という。2 人の同僚は彼らの不和についてコメントするのを断っている。

小野重明研究員：小野は、廣瀬が自分をフェアに扱わなかったと感じている。

2 人の不和は、多くの研究者がかかわり、長く待ち望まれていた発見がなされるような場合にはつきものの出来事だったのかもしれない。理論家たちは 1999 年までに、地球内部の D" 領域での異常なふるまいを説明する特性をもつ相転移をすでに明確に予測していた。ロンドン大学ユニバーシティカレッジの John Brodholt は「それはきわめて正確な予測だった。つまり、その予測にとって必要なのは実験的な証拠だけだった」と話している。 **D.C.**

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

Drive for drugs leads to baby clinical trials

新薬開発の促進策が生んだ第 0 相試験の是非

Nature Vol.440(406-407)/23 March 2006
Meredith Wadman

米国は、新薬開発の初期段階における規制を緩和する方向に動いている。だがそこには安全性に関する懸念がある。

アラバマ大学バーミンガム校の遺伝子治療センターでは、治療用遺伝子を患者の体内に送り込むための分子を製造する最先端施設を、4 年の工期と総工費 400 万米ドル（約 4 億 4000 万円）をかけて完成させたところだった。

ところが、この施設はもはや無用の長物となるかもしれない。今年はじめ、米国食品医薬品局（FDA）は新しい規則を発表し、本格的な臨床試験を始める前に実験薬を人間にごく少量投与するという試験が行えることになった。同時に FDA は、初期薬剤候補の製造要件を緩和した。これによって治療用遺伝子を送達する分子は、より安価で、しかもより手軽な施設で自由に製造できるようになったのだ。

遺伝子治療センターのセンター長 David Curiel は「我々は宮殿を建ててしまいました。もし新しいガイドラインが 5 年前に制定されていたなら、時間と労力をずいぶん節約できたと思います」と話す。

それでも Curiel は、ほかの医学研究者と同様に新ルールを喜んで歓迎している。新ルールの下では、わざわざバーミンガム校の敷地内を 8 ブロックも移動しなくても、廊下をひと歩きするだけで 1 バッチ分のベクター分子を取りにいくことができるようになる。また、同センターの運営費を獲得するために奔走する必要もなくなる。FDA からは、センターの運営には 5 人の専従スタッフが必要だといわれていた。「そのための予算のめどはまったくたっていませんでした」と Curiel はいう。

しかし、誰もがルールの変更に乗り気というわけではない。3 月 13 日、英国ロンドンで 6 人の健康な男性が生物学的製剤候補の第 I 相臨床試験に参加した後、多臓器不全を起こして病院に運ばれた（*Nature*2006 年 3 月 23 日号 p.388 参照）。この点をふまえて、なぜいま規制緩和にふみきるのか疑問視する声もある。

バランスをとる

このロンドンでの事故には「本当にぞっとした」とヘースティングスセンター（米国ニューヨーク州ギャリソン）の所長で生命倫理学者の Thomas Murray はいう。そして、「事故の再発を防止し、FDA の政策転換がスピードとリスクを重視したものに偏らないようにすることが大切だ」と話す。

今回の新ルールの制定には、従来のボトルネックを解消し、新薬開発の合理化を図ろうとする FDA の動きがある。その背景として、先発医薬品を流通させるまでにかかるコストが 1 点あたり推定で 10 億ドル（約 1100 億円）を超えるという現状がある。

「問題は、新薬開発研究の最初期の段階でも、広範に流通させる製品を大量生産する企業と同じ製造手順をふまなければならなかった点にある」と FDA のオペレーション担当副コミッショナー Janet Woodcock は説明する。

今回のルール変更によって恩恵を受けるのは大学の研究者だろうと Woodcock は指摘する。実験薬を小ロット生産し、人間に投与する初期試験を行えるようになることで、めぼしい新薬開発研究の続行に向けて企業パートナーの提携を得やすくなると考えられる。

新しく制定された製造ガイドラインでは、開発初期段階の薬物製造に関する従来の厳しい要件が緩和されている。たとえば同じ施設内で 2 種類以上の薬物を製造することが許され、小規模オペレーションでは製造と品質管理の責任者を兼務できることが規定されている。今年 1 月までは、換気からスタッフ配置レベルに至るまで厳しい要件が課せられており、ほとんどの大学の研究者は新薬の製造に手を出せなかった。

ヒトの被験者を使う試験に関する新ルールではさらに、「第 0 相試験」（あるいは探索的治験）ができるようになるため、主として大手製薬会社が恩恵を受けることになる。第 0 相試験とは、標準的な *in vitro* 試験と動物実験が完了する前に実施される短期（7 日間以下）の治験で、非常に少量の実験薬が被験者に投与される。

第 0 相試験は安全性や有効性を調

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

べるものではない。その代わりに、実験薬の体内での標的選択性、作用、代謝に関するデータが集められる。それには 2 つの目的がある。第 1 の目的は、有効性の認められない新薬候補を早い段階で見つけ出して排除することで、第 2 の目的は、有望な化合物を対象とした第 I 相試験をできるだけうまく計画するために役立つデータを得ることである。

この点は製薬会社の喝采を受けた。製薬会社では従来、新薬候補リストから第 I 相試験を行う新薬候補を選ぶのに動物実験データのみに依存せざるを得ない事態が頻繁に起こっている。

「我々はこの治験の実施に非常に関心をもっています」。こう語るのは、スイスの製薬会社 Novartis 社の探索臨床開発部副部長 Tim Wright だ。限られた実験室実験や動物実験と組み合わせることで「複数の化合物を短期間で探索できる大きなチャンス」だととらえる同社では、今後 1 年以内にいくつかの初期治験を始めたいと考えていると Wright はいう。

Pfizer 社は既に 2 つの第 0 相試験を実施しており、このほかにも計画中のものがある、と同社の臨床研究開発部門のグローバルチーフ Liam Ratcliffe は語る。そのうち昨年 9 月に実施された 8 人のボランティアを被験者とした第 0 相試験では、抗凝血薬の開発期間が 5 か月短縮されたと推定している。「このようなルール変更は歓迎です」と Ratcliffe は話す。

時間か金か

ただし第 0 相試験を行えば第 I 相試験の開始は後ろにずれこみ、その分だけ時間がかかる。それが理由で、小規模なバイオテクノロジー企業は第 0 相試験から離れてしまいかねない。抗がん剤の開発会社 Infinity Pharmaceuticals 社（米国マサチューセッツ州）の最高科学責任者で有機化学者の Julian Adams は、これまでに第 0 相試験を行うチャンスが 2 回あったと語る。しかし、いずれの試験も行われなかった。「会社にとって実施するだけの価値がなかった。当面のある程度の資金の節約にはなるかもしれないが、時間の節約にはならない」と Adams はいう。

これに対して米国の国立がん研究所では、今回の 2 つのルール変更を両方とも利用する計画だ、とがん治療部副部長の Joe Tomaszewski はいう。Tomaszewski によると、典型的な抗がん剤の場合、現在の製造コストと前臨床毒性試験のコストは 100 ～ 150 万ドル（約 1 億 1000 ～ 1 億 6500 万円）である。「第 0 相試験を実施すれば、このコストが半減する可能性がある。そうなれば本格的な臨床試験を実施できる化合物を倍増できる」。

一部のがん専門医は、第 0 相試験で投与されるようなごく少量の薬物では、試験参加者にとってのメリットはまったくないだろう指摘する。健康なボランティアの場合には、これは必ずしも問題とはならない。しかしがんの場合、「相手は死を目前にした患者」なのだと、アルバート·アインシュタイン医科大学（米国ニューヨーク州）の腫瘍学者 Cy Stein はいう。「第 I 相試験ならば、少なくとも患者に対して『これは効くかもしれないと本当に思っています』といえる」。だが第 0 相試験では「提供できるメリットが何もない。そんなものには同意できない。大手製薬会社にとって時間の節約なるなど、まったく同意できる話ではない」と Stein は語る。

このほかにも、米国ワシントン DC を本拠地とする Public Citizen という権利擁護団体の保健研究部門ディレクターである Sidney Wolfe たちは、第 0 相試験には倫理的な問題があると主張する。実験薬が人間に投与される前に実施される前臨床試験の要件を緩和することで FDA は、「被験者に対するリスクを高めている」と Wolfe はいう。

Chuck Grassley 上院議員（アイオワ州選出、共和党）は、今回の新規則が公布された際、よりストレートな声明を発表した。「FDA は、製薬会社に対する手綱を緩めている。私は、実験薬を投与される人々の身を案じます」。

これに対して Woodcock は、今回のルール変更は患者を守るものだという。「新薬開発過程の初期段階で人間を対象とした試験を行えば、最終的には新薬開発の断念に追い込まれるような化合物が人間に投与される機会が減ることになる。現在のところ、そういった化合物が大多数を占めている」と Woodcock は話す。

Curiel は規則改正による製造要件の変更をフルに利用したいと考えており、施設内で無用の長物となった一級品の機械設備や機器を取り外し、現在の研究室の片隅へと移動させているところだ。昔のルールに従うのは「複雑でむずかしく、時間のかかることだった。新しいガイドラインによって、こうしたすべてが劇的にやりやすいものに変化すると思います」と Curiel は話している。 ■

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

Brain development and IQ

脳の成長と IQ の意外な関係

Richard Passingham

ヒトの知能が遺伝子によってある程度決まるならば、脳の成長と IQ の間にはどんな関係があるのだろうか。この疑問に答えるべく、脳の外層である皮質のサイズ測定が行われ、思いがけない結果が得られた。

Nature Vol.440(619-620)/30 March 2006

Shaw たちは今回、知能と脳の物理的寸法との間に関連性があるかどうかを調べた[1]。具体的にいうと、彼らが調べたのは脳の皮質の厚さである。脳が行う複雑な演算処理は、この皮質にある神経細胞の発火（電気的に興奮して信号を送り出すこと）に依存している。Shaw たちが得た研究結果から、知能は成長期における皮質の変化のしかたと関連している可能性が示された。

Shaw たちは、脳構造の寸法を死体で測定するのではなく、生きている人間を対象に核磁気共鳴画像法（MRI）を用いて調べた。こうすることで、画像と IQ の両方を調べ、それらの測定値を比較することができた。加えて、個人の知能と相関する解剖学的特徴を見つけ出すには、大勢の被験者を確保する必要がある。サンプル集団の規模が適正でないと、該当する効果が小さい場合などに、それらを見逃してしまう可能性があるからだ。死後に寸法を測るのではなく画像技術を用いることで、十分な数の人々からのデータ収集も可能になる。

Shaw たちは、307 人の子どもを対象に 6 歳から青年期までの追跡調査を行い、スキャン画像を撮り続けた。また、最も普通に用いられる IQ テストであるウェクスラー知能検査の下位テスト（積み木デザインなど）を用いて、それぞれの子どもの知能を算定した。これに代わる方法として、さまざまな年齢の児童や青年から 1 人につき 1 度だけスキャン画像を撮り、その代表的なサンプルを調べるというやり方もあり得たが、Shaw たちが述べているように、そのような方法にはさまざまな反論の余地がある。たとえば、教育方法は時代とともに変化するかもしれず、それが各年代の IQ の値に影響を及している可能性も否定できない。

今回の研究で児童期前半の子どもたちから得られたデータでは、皮質の厚さと知能の間に有意な相関はみられなかった。Shaw たちは、成人で知能と脳の全容量の間に 0.3 というゆるやかな相関がみられるとの報告をした McDanie の研究[2]を引き合いに出している。その研究で今回と異なる結果が出た理由は、関連要因が皮質の厚さではなく皮質の全領域だったことにあると考えられるかもしれない。しかし、おそらくそれが理由ではないことがはっきりした。というのも、子どもたちを追跡調査するにつれて、相関性の本質が変化したのである。皮質の厚さと知能の間の相関性は、児童期前半では負になる傾向があったが、10 歳前後の児童期後半では正となった。

この点について Shaw たちは、IQ テストの得点に基づいて知能が「特に高い」「高い」「平均」という 3 つのグループに被験者を分け、7 ～ 19 歳までの皮質の厚さの変化を連続曲線で表すことで明らかにしている。IQ の測定尺度はその年齢集団に対して標準化し、理論上は子どもの年齢によって変動しないようにしてある。図 1 は、各脳領域の皮質の厚さを表す曲線であるが、知能レベルごとに成長パターンが異なることが見て取れる。知能が特に高いグループに属する子どもたちはほかのグループに比べて、児童期前半にはこれらの脳領域の皮質が薄いが、11 歳までに皮質の厚さが急速に増大し、その後は青年期を通じて減少していく。Shaw たちによると、知能が特に高いグループでは前頭前皮質の獲得にかける期間が長く、変化の度合いも最も急激だという。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

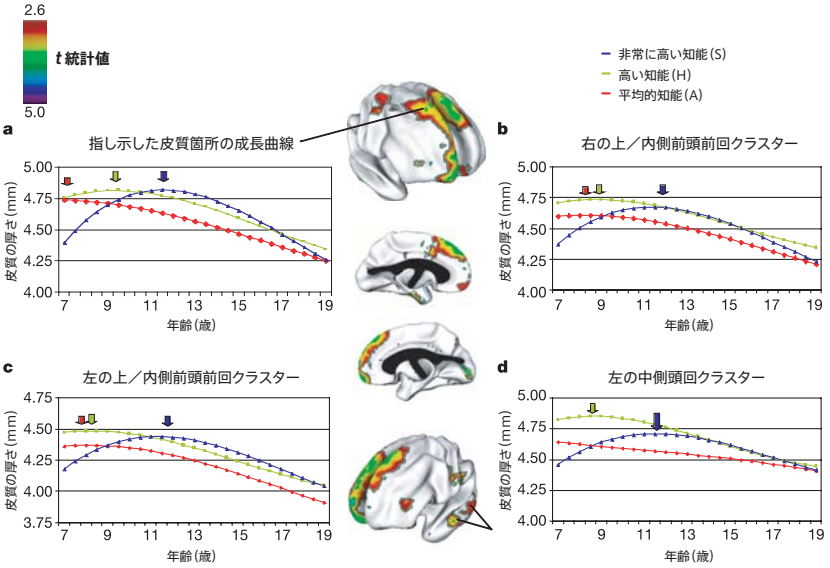


図 1　皮質変動曲線。
中央の脳マップは、知能の非常に高いグループと平均的グループで、皮質の成長曲線に著しく違いのある箇所が特に集中しているクラスター部分を示す。a のグラフは、右の上前頭回で曲線の差異が最大の皮質箇所（上段の脳マップで指し示した箇所）における皮質成長曲線を示す。b ～ d は、その他のクラスター部分における全皮質箇所の厚さの平均の曲線を示す。d は、下段の脳マップで指し示した領域と関連する。矢印は、皮質の厚さがピークになる年齢を示す。

変化のこうした差は、すべての皮質領域で生じるわけではない。児童期後半に IQ と最もはっきりした正の相関を示すのは、前頭前皮質である。この領域は情報処理の階層構造の頂点に位置し、五感のすべてから高度に処理された情報を受け取る[3]。また、知能が特に高いグループとほかのグループとの間で成長曲線の形が最も大きく違う脳領域は、外側および内側前頭回である。では、被験者たちが IQ テストを受けている際に最も活発になるのは、これらの領域なのだろうか。これに関しては機能的 MRI で判断できる。機能的 MRI を使うと、細胞活動が増大している領域に向かう動脈血流量の増加を間接的に測定できるのだ。すでに、IQ 測定用の非言語（つまり言葉を使用しない）テストを受けている最中に被験者の脳画像を調べた以前の研究から、外側および内側前頭前皮質で活動が増大することがわかっている[4,5]。まさに Shaw たちの成長測定で浮かび上がってきた領域である。さらに、IQ の個人差は、外側前頭前皮質における機能的 MRI 信号の振幅と相関することも示されている[6]。

一般的知能（*g*）の個人差は、遺伝的差異に大きく依存することがわかっている[7]。そこで、もし *g* が強く遺伝し、しかも前頭前皮質の厚さの増大が *g* と関連しているとしたら、この脳構造の成長変化は個人の遺伝子によって決定されるものなのだろうかと推測したくなる。しかし、そうした結論を持ち出すことにはくれぐれも慎重でありたい。身体の成長は、環境との相互作用と密接に関連している。たとえば、古典的な実験で Rosenzweig と Bennett は、ラット成体の皮質の厚さは、その個体が幼少期にどれくらい豊かな活動環境にあったかによって影響を受けることを示した[8]。ヒト成人の場合でも、訓練の結果、皮質の灰白質に構造の変化がみられることがある[9]。このことから、知能が特に高い人々もまた、社会的にも言語的にもより豊かな環境で暮らしており、そのおかげで児童期後半に彼らの前頭前皮質の厚さが急速に増大するのだという説明も可能かもしれない。一方で Thompson たちは以前、一卵性双生児と二卵性双生児の皮質の厚さを比較することで脳構造への遺伝的影響を探り、前頭皮質を含むいくつかの領域は、彼らのいうところの「厳重な遺伝的支配」下にあることを見いだしている[10]。

Shaw たちは、皮質の厚さの成長曲線にみられる形状の違いには、さまざまな要因が影響を及ぼしているのではないかと推測している。たとえば、胎児の発育後期に皮質直下のサブプレートという層に集まるニューロンの数や、ニューロンの繊維（軸索）を絶縁するミエリン鞘の発達、思春期に起こる不要な神経結合の選択的除去などが考えられる。これらの仮説の検証には、成長を細胞レベルで測定する動物実験が必要となる。動物研究では、遺伝的素因と経験の両方がからみ合って及ぼす複雑な影響を解きほぐせるという利点があるため、皮質の成長を支える諸要因が知的能力に対しいかに影響するのかが、より鮮明に描き出されるはずである。 ■

オックスフォード大学（英）、Richard Passingham

1. Shaw, P. *et al. Nature* **440**, 676-679 (2006).
2. McDaniel, M. *Intelligence* **33**, 337-346 (2005).
3. Passingham, R. E., Rowe, J. B. & Sakai, K. in *Attention in Action* (eds Humphreys, G. W. & Riddoch, M. J.) 263-286 (Psychology Press, Hove, 2005).
4. Duncan, J. *et al. Science* **289**, 457-460 (2000).
5. Christoff, K. *et al. NeuroImage* **14**, 1136-1149 (2001).
6. Gray, J. R., Chabris, C. F. & Braver, T. S. *Nature Neurosci.* **6**, 316-322 (2003).
7. Plomin, R. & Spinath, F. M. *Trends Cogn. Sci.* **6**, 169-176 (2002).
8. Rosenzweig, M. R. & Bennett, E. L. *Behav. Brain Res.* **78**, 57-65 (1996).
9. Draganski, B. *et al. Nature* **427**, 311-312 (2004).
10. Thompson, P. M. *et al. Nature Neurosci.* **4**, 1253-1258 (2001).

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

遺伝子ネットワークを手がかりに体内時計のシステムを探る

上田泰己

理化学研究所の上田泰己博士は、体温や血圧、睡眠、ホルモン分泌のリズム、精神状態などに大きく影響を与える体内時計を研究している。今回、世界で初めて哺乳類の時計遺伝子 16 個のネットワークの構造を明らかにし、朝方に働く遺伝子のオン･オフがマウスに正常に作動しないと、体内時計の周期リズムが崩れてしまうことを突き止めた。

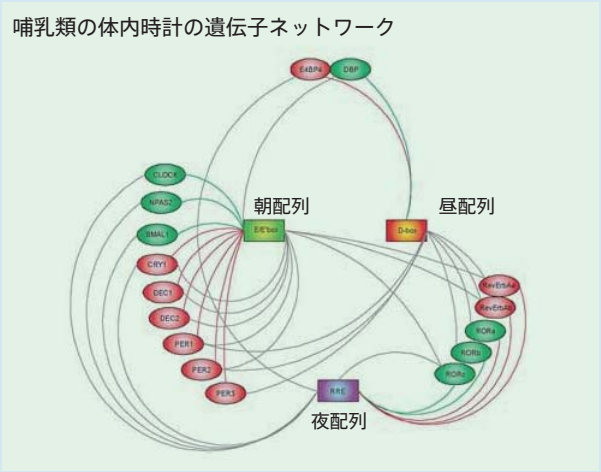
システムの解明には効率的な実験系が不可欠

Nature Digest ― なぜ体内時計を研究対象にされたのですか？

上田 ― 大学 3 年のときに生命科学における時間と空間の問題を研究したいと思い、具体的な対象として「体内時計」と「発生」を考えました。時間がテーマとなる体内時計については、当時、時計をつかさどる遺伝子が 24 時間周期の振動をもち、体内時計を調節するという理論モデルがありましたが、実際の生命現象はブラックボックスでした。一方、発生を通じて生命体という空間を知りたいのですが、発生には空間と時間の両方がかかわるため、解明するのは大変です。そこで、まず体内時計から手をつけることにしました。

ND ― 新分野として注目されていたシステム生物学の手法を選ばれましたね。

上田 ― システム生物学は分子生物学、遺伝子工学、バイオインフォマティックス、非線形物理学などを融合し、生命現象をシステムとして理解する学問です。研究にはシステムの同定、解析、制御、設計の 4 つの流れがあります。私はまず体内時計に関する遺伝子を捕まえる「システム同定」を始めました。マウスを 12 時間ずつ明暗が変わる条件で飼育した後、脳の視床下部にある視交叉上核[*1]と肝臓の細胞を、12 時間ずつ明暗にする条件と恒暗条件の 2 つで 2 日間 4 時間ごとにサンプリングし、DNA チップで遺伝子を調べました。そして、視交叉上核から 101 個、肝臓から 397 個の有意に発現振動する遺伝子を発見しました[1]。次にその遺伝子のプロモーター領域[*2]を解析して、体内時計として振動する遺伝子配列を見つけました。



時計遺伝子の発現を制御する遺伝子プロモーターの朝配列（E-box/E'-box）と昼配列（D-box）夜配列（PRE）は、16 個の時計遺伝子とネットワークを組み、体内時計の機能をつかさどる。ネットワーク上の朝配列は、3 個の遺伝子によって活性化され（オン、緑色）、6 個の遺伝子によって不活性化される（オフ、赤色）。この朝方に働く時計遺伝子のオン・オフが正常に切り替わらないと、体内時計の周期リズムが崩れてしまう。

ND ― その遺伝子の機能はどんな方法で解明されたのですか？

上田 ― 試験管内でリアルタイムに周期リズムがみられる状況を作ることに挑戦しました。それまでの研究では、完全な実験系はなかったからです。体内時計のように複雑でダイナミックなシステムを解くには、効率的な実験系が不可欠です。分解されやすいように加工したホタルの発光酵素を振動する遺伝子に標識して、ラットの線維芽細胞に入れ、それをステロイドホルモンで刺激してリズム振動を起こさせ、発光の状態で振動のようすをみるのです。この方法では、どの遺伝子のどの配列が、いつどのようなリズムを作るのかをハイスループットスクリーニング[*3]で簡便にみることができます。

このような経緯で 16 個の時計遺伝子のほとんどが 1 日の決まった時間（朝・昼・夜）に発現することを確認しました。さらに朝・昼・夜の発現を制御する各プロモーター配列が、それぞれ 9 個、7 個、6 個の遺伝子上に保存されていることを見つけ、それらが織りなす体内時計の遺伝子のネットワークを明らかにしました[2]（図参照）。

ND ― ネットワークの中で朝・昼・夜のプロモーター配列の重要度に差はあるのでしょうか？

上田 ― 朝配列を機能改変した遺伝子をマウスの皮膚の線維芽細胞に入れて不活性化すると、昼と夜の配列が活性化しません。一方、夜配列の活性化を抑えると夜配列の一部が影響を受け、朝と昼の配列は影響を受けません。しかし、昼配列の活性化の抑制は朝と夜にはまったく影響がない。つまり朝配列の活性化が最も大切で、夜配列は部分的に大事なことがわかりました。

次に、不活性化を抑える、つまりいつも活性化させて切り替えをなくすとどうなるかをみました[3]。改変した 6000 個の遺伝子の中から朝配列の活性化は正常だが不活性化が起きない変異遺伝子を探し出し、それを線維芽細胞に入れると、やはり体内時計全体が壊れます。朝配列の活性化（オン）と不活性化（オフ）の切り替えが体内時計の鍵を握るのです。

理化学研究所　上田泰己

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

小島あゆみ

上田泰己 (うえだ・ひろき)
理化学研究所発生・再生科学総合研究センター　システムバイオロジー研究チーム
チームリーダー。医学博士。1975 年、福岡県生まれ。2000 年、東京大学医学部卒業、2004 年、同大学院医学系研究科博士課程終了。1999 ～ 2004 年、山之内製薬 (株) で体内時計の発振機構や同調機構のモデル化、ショウジョウバエ体内時計の発現解析、哺乳類体内時計のシステム生物学を研究する。2003 年から現職、2005 年から理化学研究所機能ゲノミクスサブユニットのユニットリーダーを兼任。2006 年からは東北大学加齢医学研究所と徳島大学ゲノム機能研究センターの客員教授、大阪大学理学研究科連携大学院の招聘教授としても活躍。日本イノベーター大賞優秀賞 (2004 年)、東京テクノフォーラム 21 ゴールドメダル (2005 年) など授賞多数。

体内時計のしくみがもっとわかれば、薬の使い方も変わる

ND ― 研究の次のターゲットは何でしょうか？

上田 ― 現在は、朝・昼・夜の 3 遺伝子配列がなぜ連続的に発現するかなど、システムを制御する因子の同定に入っています。体内時計には、24 時間周期で振動する、光刺激など環境に同調する、普通の化学反応と異なり温度による変化がない（温度補償機能）といった特徴があります。24 時間周期はなぜ作られるのか、視交叉上核がどのように光を受け止めて体内時計をリセットするのかなどを解明したいですね。

ND ― 体内時計と睡眠や発生などの関係はわかってきたのでしょうか？

上田 ― 睡眠や発生に体内時計がどう影響するかを調べるには個体での研究が必要で、まだまったく不明です。2004 年に時計遺伝子の発現状態から、マウスの体内時刻や概日リズム障害[*4]を、DNA チップを使って診断する方法を開発しましたが[4]、今は体内時計にかかわるホルモンであるメラトニンやほかの代謝産物の血中濃度を手がかりに、体内時刻を知る方法を作ろうとしています。体内時計を修正して概日リズム障害を治す薬のスクリーニングも研究したいですね。抗がん剤などでは投与される時刻によって薬の効果が上がったり、副作用が少なくなったりすることが知られています。体内時計のしくみがもっとわかれば、薬の使い方も変わると考えています。

さまざまな専門家の融合が成功の鍵

ND ― 遺伝子の解析やバイオインフォマティックスを組み合わせる実験系の作成と、広い範囲で取り組むのは大変ではありませんか？

上田 ― 私の学生時代は IT 分野と分子生物学の融合がテーマで、現在ではそれに加えて DNA チップなどの測定系ハードウェアの技術を融合させるのがテーマになっています。私たちの研究でもシステムの制御因子を調べるために、ハードの測定系を強化したいと考えています。必要なときにすぐ測定系を作れる体制にするために、今、敷地内に半導体に微細加工をする MEMS（micro electro mechanical system）分野の研究室を建設中です。

すでに、分子、細胞、組織、個体の各階層で、包括的かつ体系的なスクリーニングができる体制を整えていて、いずれも世界一、あるいは世界有数のスペックです。標識をつけて遺伝子やタンパク質の発現プロセスをモニターし、大規模解析するこの手法は体内時計に限らず、さまざまな分野で使えると考えています。

ND ― 研究が成功する鍵は何でしょうか？

上田 ― 私たちのチームには、遺伝子や原子レベルの構造をシミュレーションする理論家、生化学や分子生物学の専門家、動物の行動リズムの専門家が体内時計というテーマでつながっています。測定など水を使う実験をするウェットの専門家と、情報を扱うソフトの専門家、機械を扱うハードの専門家が集まっています。これまでの経験では、ウェットとソフトとハードが揃ったときにプロジェクトがうまくいくと思います。バックグラウンドの異なる人たちが融合できる場が大切です。また、他分野の専門家や一般の人との会話は、研究のいいヒントになります。サイエンス・カフェなどで話す機会が増えていますが、時間の許す限り参加したいと思っています。

ND ― ありがとうございました。 ■

＊1　視交叉上核
脳の視床下部にある左右一対の神経核。網膜や大脳の扁桃体などから情報が入り、体内時計の中枢として働くほか、性ホルモンの分泌も調節している。

＊2　プロモーター領域
遺伝情報のメッセンジャー RNA への転写を制御する配列の部分。

＊3　ハイスループットスクリーニング
コンピューターとロボット技術を組み合わせ、膨大な数の化学物質を分析する技術。新薬候補物質のスクリーニングのスピードアップに欠かせない。

＊4　概日リズム障害
時差ぼけや不眠など、体内時計のずれによって起こる症状の総称。うつの原因にもなるほか、引きこもりにも関連すると考えられている。

聞き手は小島あゆみ（サイエンスライター）。

1. Ueda, H., R., *et al*, *Nature*, **418**, 534-539(2002)
2. Ueda, H., R., *et al*, *Nature Genetics*, **37**, 187-192, (2005)
3. Sato, T., K., Ueda, H., R., *et al*, *Nature* Genetics, **38**, 312-319(2006)
4. Ueda, H., R., *et al*, *PNAS*, **101**, 11227-11232(2004)

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

今回は、Nature の顔というべき論説記事をとりあげました。社説的雰囲気はうすいながらも、社会性の高い文章になっていますので、これまでの科学記事とのギャップを味わってみてください。

Editorial

Nature **440**, 970 (20 April 2006) | doi:10.1038/440970a

Drugs tests on trial

http://www.nature.com/nature/journal/v440/n7087/full/440970a.html

Britain's clinical-trial regulator has no good options.

1. Following an alarming episode in London last month, in which six drug-trial participants needed emergency treatment, the UK Medicines and Healthcare Products Regulatory Agency (MHRA) says it will change the way it regulates clinical trials, at least temporarily. But this may prove more easily said than done.

2. In the trial on 13 March, six healthy subjects suffered violent reactions within minutes of ingesting an antibody drug candidate, TGN1412, which was being developed to treat autoimmune diseases such as rheumatoid arthritis. Initial investigations suggest that the antibody itself was responsible for the side effects (see *Nature* 440, 855–856; 2006). On 5 April, the MHRA said it will seek advice from outside experts in determining whether drug candidates with novel modes of action should be allowed to enter clinical trials.

3. The incident at London's Northwick Park Hospital has drawn attention to the limitations of preclinical animal trials in determining the safety of drugs in humans, especially for 'humanized' antibody drugs that are targeted at mimicking human biological processes. It has also sparked some debate about whether the participants were sufficiently aware of the dangers they faced.

4. For the regulator, the immediate question is whether the existing rules strike the right balance between safeguarding trial participants and promoting the study of potentially valuable cures. Previously, the MHRA allowed initial, small-scale human safety trials to go ahead on the basis of successful animal trials and a description of how the compound works.

5. Now the agency says it will allow such trials to proceed only after review by a panel of outside experts. However, companies that have drug candidates up their sleeves don't want information on them to be shared, and any outside panel worth its salt is bound to contain people who work with rival companies. So such a provision could lead drug developers to turn their backs on Britain as a location for early-stage clinical trials.

6. The best approach is probably that practised by the US Food and Drug Administration (FDA), the only drug regulator in the world with the in-house expertise to conduct such reviews by itself in strict confidence. The FDA, which is partly supported by fees levied on drug-makers eager to enter the lucrative US market, has 9,000 staff compared with the MHRA's 800 (although the FDA does handle food as well as drug safety).

7. One theoretical option would be a Europe-wide body set up to regulate and approve clinical trials, but the practical problems of constructing and operating such an agency would be daunting. In the interim, the MHRA may struggle to perform additional screening while satisfying confidentiality requirements.

How to read?

この文章では、事実関係が小出しになっている点に注意したい。臨床試験事故についての説明が第3パラグラフまで続いているのだ。英文記事ではよくあることだが、この記事では特にその傾向が顕著である。これは、この記事が事実関係を主眼に置くニュースではなく、意見を述べることを目的とした論説であることに関係する。第1パラグラフに書かれるべき文章の論点は、事故そのものではなく、あくまでも事態の今後の展望なのだ。また、この話題が既にかなり多くの注目を集めていることから、読者にある程度の予備知識を期待しているということもある。もし一度読んでむずかしいと感じたら、同事件を扱った *Nature Digest* 5月号のニュース（p.18-20）や、今月号のビジネス・ニュース (p.20-21) を読んでから、再チャレンジしてほしい。内容に関する予備知識の有無で、英文のむずかしさはずい分と違ってくるものだ。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

Editorial

参考訳

Nature **440**, 970 (20 April 2006) | doi:10.1038/440970a

試される医薬品臨床試験

http://www.nature.com/nature/journal/v440/n7083/full/440429a.html

英国の臨床試験の規制当局には打つべきよい手がない。

1. 先月、6 人の臨床試験（治験）参加者が救急治療を受けるに至ったロンドンでの憂慮すべき出来事を受けて、英国医薬品医療製品規制庁（MHRA）は、臨床試験の規制方法を少なくとも暫定的に変更すると発表した。しかしこれは、いうのはやさしくても、実行するのはむずかしいかもしれない。

2. 3 月 13 日に行われた臨床試験で、6 人の健康な被験者が抗体医薬品候補 TGN1412 を服用して数分後に激しい副作用に襲われた。TGN1412 は、関節リウマチのような自己免疫疾患の開発中の治療薬だった。当初の調査では、この抗体自体が副作用の原因であることが示唆されている（*Nature* 440, 855–856; 2006 参照）。4 月 5 日、MHRA は、新しい作用様式をもつ医薬品候補について臨床試験の実施を決定する際には、外部の専門家の助言を求めることを発表した。

3. ロンドンのノースウィックパーク病院で起きた今回の事故は、特に人間の生物学的過程を模倣することを目標とした「ヒト化」抗体医薬品の場合、前臨床動物実験で人間にとっての薬物の安全性を調べることに限界があるという点で注目を集めた。また、臨床試験参加者が試験の危険性を十分に認識していたかどうかをめぐっての論争も起こった。

4. 規制当局にとっては、現行の規則で臨床試験参加者の安全確保と有望な治療薬候補の研究促進の適正なバランスがとれるかどうかが当面の問題となる。MHRA はこれまでに、動物実験の成功と薬剤化合物の作用過程の説明を受けて、初期段階の小規模なヒト安全性試験の実施を許可したことがある。

5. このような試験の実施は、外部の専門家パネルによる審査を経てから許可することにする、と MHRA は発表している。しかし薬剤候補をひそかに用意している企業にとっては、その情報の公開は望ましいことではなく、まともな外部専門家パネルにライバル会社の関係者が含まれるのは必至だ。そのため、このような規定によって、製薬会社が英国での初期臨床試験の実施に見切りをつけることになりかねない。

6. おそらく最善の方法は、米国食品医薬品局（FDA）が実践しているものだろう。FDA は、このような審査を内部の専門スタッフによって秘密裏に実施できる世界で唯一の医薬品規制当局である。その運営資金の一部は、もうけの多い米国市場への参入に熱心な製薬会社から徴収された手数料で賄われている。FDA は 9,000 人のスタッフを擁しているが、これに対して MHRA のスタッフは 800 人に過ぎない（ただし FDA は、医薬品のほかに食品の安全性も担当している）。

7. 理論的には、ヨーロッパ全体を統轄する組織を設立して、臨床試験の規制と承認を行うという案もあるが、これにはそのような機関の創設、運営という非常にむずかしい実際問題をともなう。当面の間 MHRA は、機密保持という必要条件を守りつつ審査を強化するのに苦労することになるだろう。

Words and phrases

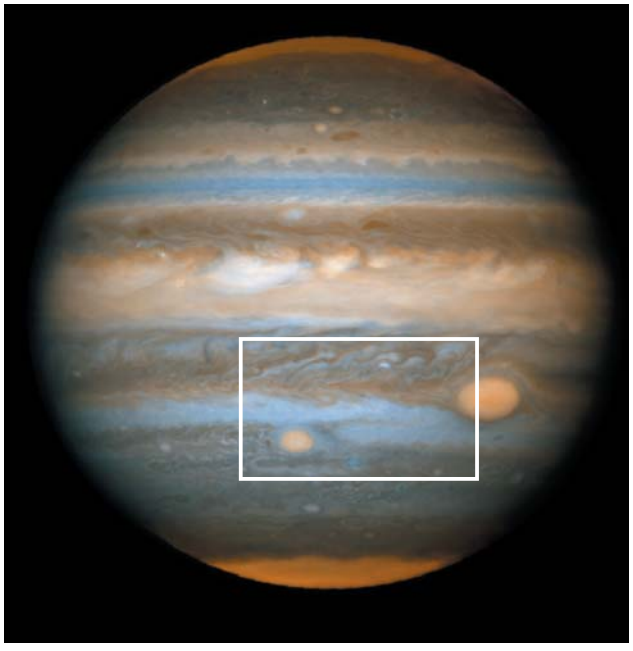
1. **more easily said than done :**「いうはやすし、行うはかたし」ということわざ「(it/that is) easier said than done」のバリエーション。
2. **ingest:**「経口摂取する」こと。ここは医薬品なので、「服用」の意味。
3. **spark debate :** spark には、「〜の引き金になる」「〜を引き起こす」という意味があり、「論争を巻き起こす」という意味になる。
4. **strike the right balance between A and B :**「A と B の正しいバランスをとる」という意味の慣用句。この「strike」という動詞には、「(姿勢や態度を）とる」という意味がある。
5. **have ... up their sleeves :**「奥の手や妙案などをひそかに用意しておく」という意味。「up one's sleeves」とは袖の上のほうのことで、そこに何かを隠しもっているというのがもともとの意味。トランプゲームでのとっておきのカードや、手品の種をしまっておいたことが語源とされる。
5. **worth one's salt:**「給与に見合う働きがある、有能である」という意味の成句。ラテン語の「塩」が給料を意味したことに由来する。
5. **provision:** 法律、規則や契約上の「規定」のことで、ここでは MHRA による臨床試験規制の根拠となる規定を指す。
5. **turn one's backs on:** 文字通りの「〜に背を向ける」という意味から、転じて「無視する」「見捨てる」といった意味で使われる。
6. **in confidence:**「内緒で」「秘密で」という意味。この場合の「confidence」は、「秘密」の意味である。
6. **levy on ... :** 税金、罰金、手数料などを「(人や組織）に課す」「…から徴収する」こと。
6. **lucrative :**「もうかる」「収益性の高い」ことを意味する。
7. **daunting :**「ひるませる」「気力をくじく」という意味の「daunt」の形容詞形。仕事などが「非常に困難で、気力をくじく」こと。
7. **in the interim :**「その間」「それまでは」という意味の慣用句。「interim」は「合間」「しばらくの間」を意味する。「in the meantime」「in the meanwhile」「meanwhile」と同義。

Science key words

2. **autoimmune diseases:** 自己免疫疾患
本来、外来物質のみに対して働くべき免疫系が自己の体の正常な細胞や組織に反応し、自己組織を破壊する病気の総称。関節リウマチ、1 型糖尿病などが含まれる。
2. **rheumatoid arthritis:** 関節リウマチ
関節に炎症を生じる自己免疫疾患。関節が破壊されるにともない、関節痛や関節の変性・変形を生じる。鎮痛剤・免疫抑制剤を使った対症療法のみで、根本的な治療法はまだない。
2. **antibody:** 抗体
生体内に進入した非自己物質（抗原）が免疫系に認識されることにより産生・分泌される、免疫グロブリンとよばれるタンパク質。抗原と特異的に結合し、抗原を生体内から除去するように働く。
2. **modes of action:** 作用様式（機序）
薬剤などが投与されてから、その成分が細胞・組織などに到達・作用し、目的の効果を生むまでのしくみ。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

2006 年 4 月にハッブル宇宙望遠鏡の掃天観測用高性能カメラで撮影された 2 つ目の赤斑（小赤斑）とその近辺の拡大写真。小赤斑の中心に色の薄い雲が少量あることがわかる。右側の大赤斑へと続く雲の乱流の中に、強い対流現象が小赤斑の北側の明るい白い雲として見えている。激しい雷雨とみられる。小赤斑は東へ（右へ）と漂い続け、一方、大赤斑は西へ（左へ）移動するため、両者は 2006 年 7 月初めにすれ違うはずだ。



NASA, ESA, and A. Simon-Miller (NASA/GSFC)
NASA, ESA, I. de Pater and M. Wong (University of California, Berkeley)

上の写真と同じ頃に撮影された木星の全体像。小赤斑は木星の中心より下の南半球にあり、その大きさは地球と同じくらいだ。

木星の 2 つ目の赤斑をハッブル宇宙望遠鏡が撮影

木星に出現している 2 つ目の赤斑のこれまでで最も詳細な画像が、米航空宇宙局（NASA）のハッブル宇宙望遠鏡を使って撮影された。新しい赤斑の直径は、以前からあった大赤斑のおよそ半分で、一部の天文学者は「小赤斑」とよぶ。小赤斑の出現は、木星の大気に大きな気候変動が起こっている可能性のあることと関係しているのかもしれない。

小赤斑は、大赤斑と同じ赤色に変化する前は「白斑 BA」とよばれていた。白斑 BA は 1998 年から 2000 年の間に、3 つの白いだ円形の嵐が合流してできた。そのもととなった白斑のうち、少なくとも 1 つかは 2 つは 90 年前から存在していたことがわかっており、3 つめの白斑は 1939 年に出現した。一方、大赤斑は、人類が望遠鏡を手にした 400 年前から、ずっと木星に存在している。

近赤外線波長で観測すると、小赤斑は大赤斑と同じくらい目立つ。大赤斑は、木星の主たる雲頂から数マイル盛り上がっていると考えられており、小赤斑が目立つのは小赤斑も盛り上がっているからかもしれない。また色が赤いのは、赤斑が木星の大気から物質を吸い上げ、その物質が太陽の紫外線光で化学変化するためだと考える天文学者もいる。

©2006 NPG Nature Asia-Pacific

キャリアパスを支援します
ポスドク研究員募集

■待遇：社会保険完備、有給休暇
■休日：土曜、日曜、祝祭日および年末年始（派遣先により異なる）
■お問合せ：R&D@icube-t.co.jp 0120-617-355

つくば

2006年6月1日現在

ライフサイエンス

職種	研究開発
場所	茨城県つくば市（公的機関研究所）
期間	即日～長期
時間	9:00～18:00（実働8時間）
内容	タンパク質の大量発現系の構築・精製。 タンパク質の結晶化・結晶構造解析の経験者。 バキュロ発現系の経験者（ご相談ください）。
月給	30万円～

ライフサイエンス

職種	研究開発
場所	茨城県つくば市（民間企業・研究所）
期間	即日～長期
時間	9:00～17:45（実働7時間45分）
内容	イオン系有機合成における研究開発。 何らかの機器分析経験者（クロマト等）。 合成経験者（類似業務あり/ご相談ください）。
月給	28万円～

ライフサイエンス ☆紹介予定派遣☆

職種	研究開発
場所	茨城県つくば市（民間企業・研究所／公益法人）
期間	即日～長期
時間	9:00～17:30（実働7時間30分）
内容	分析機器を使用した創薬・研究。 LC-MSMSまたはHPLC等類似機器経験者。 分析機器を十分に扱える方（指導できる方歓迎）。
月給	27万円～

環 境 ☆紹介予定派遣☆

職種	研究開発
場所	茨城県つくば市（民間企業・研究所）
期間	即日～長期
時間	9:00～17:30（実働7時間30分）
内容	水質分析業務（環境水・工場排水等）。 水質分析経験者（環境計量士優遇）。 転勤できる方。
月給	27万円～

ナノテク

職種	研究開発
場所	茨城県つくば市（公的機関研究所）
期間	即日～長期
時間	9:00～18:00（実働8時間）
内容	有機エレクトロニクス素子技術の 開発合成の経験者。 結晶・薄膜取扱い/物性評価経験者
月給	30万円～

情報通信 ☆紹介予定派遣☆

職種	セールスエンジニア
場所	東京都新宿区（民間企業）
期間	即日～長期
時間	9:00～17:30（実働7時間30分）
内容	顧客へのバイオ系製品のシステム説明。 Win／Mac／UNIX並びにネットワークの 知識がある方。 英文マニュアル読解できる方。
月給	28万円～

関 西

2006年6月1日現在

ライフサイエンス

職種	研究開発
場所	大阪府吹田市（公的機関研究所）
期間	即日～長期
時間	9:00～18:00（実働8時間）
内容	循環器疾患の病因・病態修飾に関係する 遺伝子機能の解明、遺伝子相互間作用の解明。 生化学系博士課程修了の方。
月給	30万円～

ナノテク

職種	研究開発
場所	大阪府池田市（民間企業・研究所）
期間	即日～長期
時間	9:00～18:00（実働8時間）
内容	貴金属/無機ナノヘテロ界面の特異機能に 関する研究。 界面の構造や性質の観点から触媒機能の メカニズムの解明。
月給	30万円～

環 境

職種	研究開発
場所	大阪府茨木市（公的機関研究所）
期間	9:00～18:00（実働8時間）
時間	即日～長期
内容	シリコン薄膜太陽電池の研究。 SEM・EMPA・EDS使用経験者。 無機化学・材料工学博士課程修了の方。
月給	30万円～

材 料 ☆職業紹介☆

職種	研究開発
場所	大阪府箕面市（民間企業・研究所）
期間	即日
時間	9:00～17:40（実働7時間40分）
内容	化粧品樹脂の研究開発。 化粧品処方開発経験者・ 化学系博士課程修了の方。
月給	32万円～

材 料 ☆職業紹介☆

職種	研究開発
場所	大阪府箕面市（民間企業・研究所）
期間	即日
時間	9:00～17:40（実働7時間40分）
内容	建材用シーラント材の研究・新商品開発。 化学系博士課程修了の方。
月給	28万円～

材 料 ☆職業紹介☆

職種	研究開発
場所	大阪府大阪市（民間企業・研究所）
期間	即日
時間	10:00～18:30（実働7時間30分）
内容	アナログデジタル回路開発。 プリント基板設計・システムLSI設計経験者。 理学系博士課程修了の方。
月給	32万円～

お問合せ番号：ND-0606

つくば初のプライバシーマーク認定企業
R&D 研究支援サポート企業
intercultural interactive information 株式会社 アイキューブつくば

サイエンス・アライアンス・ジャパン 研究開発支援 www.science-japan.com

www.icube-t.co.jp

一般労働者派遣業（般）08-04-0017