

nature DIGEST

日本語編集版
JANUARY 2008
VOL. 05, NO. 1

1

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

波力発電に 挑む



研究者と技術者の転職／派遣情報

WWW.
研究職派遣.com



研究職お仕事情報および転居に関する情報の提供のほか、
スタッフ登録をいただくことで、キャリアプラン設計・実現のサポートをいたします。

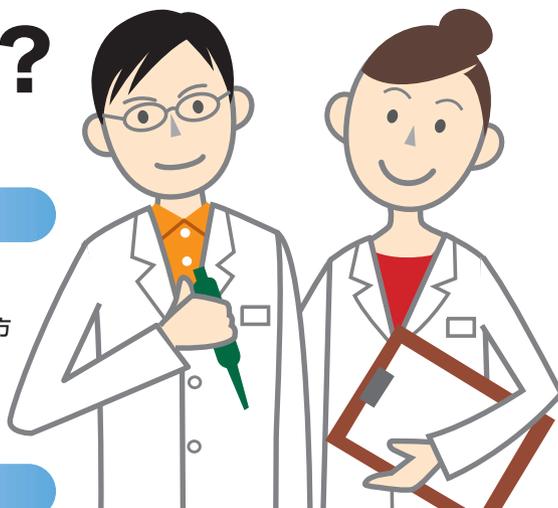
研究職派遣.comとは？

研究職をお探しのみなさまにお仕事情報を提供し、
キャリアパスの支援をさせていただくサイトです。

このような方を支援します

- 研究者としてのキャリアアップを図りたい方
- 研究職派遣を通じて、留学等・キャリアアップのチャンスを掴みたい方
- 以前、研究職として働いていて、ブランクはあるが、再度研究職にチャレンジしたい方
- 理系知識があり、これからそれを活かしたいと考えている方

研究職お仕事情報および転居に関する情報の提供のほか、
スタッフ登録をいただくことで、キャリアプラン設計・実現のサポートをいたします。



給与について

給与(参考例)

[時間給制] 研究開発/1,600円程度
研究補助/1,400円程度

※ 給与はスキルや仕事内容により異なります。

■ 主な取引先

- ・産業技術総合研究所(つくば/大阪)
- ・高エネルギー加速器研究機構
- ・農業・食品産業技術総合研究機構
- ・物質・材料研究機構
- ・防災科学技術研究機構
- ・気象研究所
- ・建築研究所
- ・国土地理院
- ・情報通信研究機構(東京/神戸)
- ・土木研究所
- ・日本原子力研究開発機構
- ・日本産業技術振興協会
- ・日本食品科学工学会
- ・農業環境技術研究所
- ・農業生物資源研究所
- ・放射線医学総合研究所
- ・東京大学
- ・京都大学
- ・大阪大学
- ・筑波大学
- ・神戸大学 など

“4月から働く!”
予約登録受付中

予約特典あり

詳しくはホームページをご覧ください。

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

お問合せ → request@posdoc.jp

www.研究職派遣.com

検索

Click!



波力発電に挑む

表紙：K. E. JENSEN / WSE

HIGHLIGHTS

02 vol. 450 no.7169, 7170, 7171, 7172

EDITORIAL

06 2007年の「話題の人」

NATURE NEWS

07 コンピューターゲームで
チンパンジーの子が大学生に勝利
Ewen Callaway

NEWS FEATURE

- 08 2007年、とっておき画像集
Emma Marris
- 12 波力発電は波に乗れるか？
Ewen Callaway
- 18 自然免疫研究をリードする静かなる日本人
David Cyranoski
- 22 核査察官研修体験記
Geoff Brumfiel
- BUSINESS NEWS
- 24 ジェネリック医薬品企業の合併戦略
Meredith Wadman

NEWS & VIEWS

26 ゲノミクスの使徒となったショウジョウバエ
Ewan Birney

JAPANESE AUTHOR

30 南極の氷の解析から氷期サイクルの
仮説を検証 — 川村賢二
財部恵子

HIGH SCHOOL SCIENTISTS

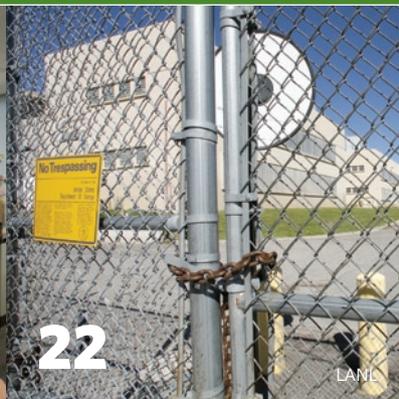
32 一定距離を保ちつつ、後ろから追いかける
買い物カートを作製 (奈良女子大学附属中等教育学校)
西村尚子

英語で NATURE

34 Plant-disease controls sap outbreak
responses
国家安全保障上の規制が植物病害発生時の対応
の足かせとなる

www.nature.com/naturedigest

© 2008 年 NPG Nature Asia-Pacific
掲載記事の無断転載を禁じます。





胚性幹細胞：霊長類皮膚細胞の再プログラミングに成功

EMBRYONIC STEM CELLS:
Proven reprogramming of primate skin cells

患者の細胞と遺伝学的に一致する細胞を作るために、成体細胞を再プログラミングする技術の研究が盛んに行われている。そのような胚性幹細胞であれば、免疫拒絶反応を起こさず、治療に使える可能性がある。再プログラミングの方法の1つに体細胞核移植があり、この方法では核を除去した卵母細胞に成体細胞核を挿入する。次いで、初期段階の胚（胚盤胞）を誘導・作製し、そこから胚性幹細胞を得て培養するのである。これまでこの方法はマウスでのみ可能だったが、今回 Byrne たちは、霊長類成体の繊維芽細胞を出発点として使って成功した。彼らは、14匹のアカゲザルから得た304個の卵母細胞から、2つの胚性幹細胞株を作製した。この成功は、この手法が患者由来の胚性幹細胞作製に適する可能性があることを示している。この報告を検証する論文 (doi:10.1038/nature 06456) がNatureのウェブサイトに掲載されている。表紙（カラー化した映像）は、核抽出直前の卵で、保持ピペットで固定され、右側にある核抽出用の鋭いピペット先端が核に向けられている。 [Article p.497](#), [News p.462](#), [N&V p.485](#) 参照

フェルミ面にできたポケット

Pocket change

最近の論文 (*Nature* **447**, 565-568; 2007) で、常伝導金属状態にある正孔ドーブ高温銅酸化物超伝導体の電子構造の詳細が明らかになった。アンダードーブ材料で観察されたフェルミ面は、小さなポケットから構成されていて、オーバードープのものとは異なっており、従来型金属ともまったく違うものであることが見いだされた。今回 D LeBoeuf たちは、ホール効果の測定結果を用いて、フェルミ面のこうした構造が、予想されたような「ホール（正孔）」ポケットではなく、電子ポケットであることを示している。このポケット形成は、一部の電子ドーブ銅酸化物にみられるものに類似した、対称性の破れた不可解な相に起因する可能性がある。問題の相は、銅酸化物に一般的な性質らしいので、高温超伝導体の特性を作り出すのに中心的役割を果たしている可能性がある。

[Letter p.533](#), [N&V p.492](#) 参照

抗うつ薬で寿命が延びる

A long life but a happy one?

線虫 (*Caenorhabditis elegans*) の寿命を延長させる化学物質を探索する大規模なスクリーニングから、意外な結果が得られた。ヒトで抗うつ薬として用いられている化合物ミアンセリンが、3週間という線虫の寿命をほぼ3分の1延長させるのである。ヒトの場合には、この薬物は神経伝達物質セロトニンによる神経シグナル伝達を遮断するが、線虫に対する寿命延長効果にも、セロトニン受容体が関与しており、食事制限による寿命延長の基盤と似た機序がかかわっていることが明らかになった。1つの可能性として、ミアンセリンが、実際の飢餓ではないが、飢餓と感じられる状態を誘導することが考えられる。食欲刺激は

ヒトでのミアンセリンの副作用であることから、食欲と寿命の間に関連がある可能性が高くなってきた。 [Letter p.553](#) 参照

赤ちゃんにも人を見る目がある

Morality starts young

社会的関係をうまく結ぶには、味方であれ敵であれ、他者の意図を判断する能力が鍵となる。生後6か月と10か月の乳児を対象とした新たな研究によって、ヒトはこれまで考えられていたよりも早くから、つまり、言葉を使えるようになる前から社会的評価を行っていることが明らかになった。乳児は、個人の社会的行動を基準にその人物を評価しているらしい。すなわち、まったく関係ない第三者が目的を達成しようとするのを手伝う人物には好感を寄せ、第三者が目的を達成するのを妨害する人物は避けようとする。この知見は、乳児にも大人に似た社会的評価の原型のようなものが備わっているという説を裏付けている。この能力は生物学的適応の1つである可能性があり、また、その後の人生における道徳的思考や行動の基盤になっているのかもしれない。 [Letter p.557](#) 参照

海の二酸化炭素

Ocean carbon dioxide

産業革命前の時代以降に化石燃料から放出された二酸化炭素 (CO₂) のほぼ半分は海によって吸収され、その結果、海をかなり酸性化し、炭酸塩の飽和を引き起こしてきた。最近の一連の報告では、人間によるCO₂放出が野放しにされ続けると、将来は海水の酸性化が深刻な状況になるとする怖い見通しが立てられている。これまでの研究は、海洋の個々の生物種に対する酸性化の影響を主として扱ってきた。今回、ノルウェーのラウネ・フィヨルドにおける環境スケールのメソコスム実験系を用

いた研究で、自然群集生態系でのCO₂吸収の影響が概算された。その結果が示すところによると、CO₂の分圧が増大するにつれて海生植物プランクトンによるCO₂消費量は著しく増加するのに、栄養分の取り込み量は変わらない。海洋全体にあてはめることが可能であれば、このフィードバックは、大気中のCO₂濃度に対する重大な制約要因の1つとなるかもしれない。 [Letter p.545](#), [N&V p.491](#) 参照

茶色の水

Brown waters

北米と北欧の氷河作用を受けた辺鄙な地域の多くで、表面水の色が溶存有機炭素濃度の上昇につれて、より茶色くなっているという報告が増えてきている。こうした影響を説明するため、最近の気候変化を含めていくつかの仮説が提案されているが、この問題についてはまだ議論が続いている。500か所以上の人里離れた湖と川から得た時系列データを使った新しい調査を簡単なモデルと組み合わせると、溶存有機炭素濃度の増加が、実際に大気降下物の硫黄含有量と海塩含有量の減少と密接に関係していることが今回示された。それゆえ、溶存有機炭素濃度は、19世紀中の酸性雨が始まる前に典型的であったと思われるレベルに戻りつつあるのかもしれない。

[Letter p.537](#) 参照

におわなければ怖くない

Smell no evil, fear no evil

怖いもの知らずのマウスが作り出された。もう少し正確にいうと、嫌なにおいに対する忌避行動という、本来なら腐敗した食べ物や天敵から身を守るための先天的行動反応を示さないマウスである。このマウスでは、嗅上皮という鼻孔内にあるにおいを感知する上皮組織の一部の嗅覚ニューロンが、ジフテリア毒素遺伝子をそこだけで発現させることによって破壊されている。このマウスは、先天的な忌避行動は示さないものの、嫌なにおいを検知する能力はもっており、忌避するように学習させることもできる。これらの結果は、免疫系同様にマウスの嗅覚系にも遺伝的にプログラムされた「生まれつき組み込まれた」神経回路があって、これとは別に適応的な回路が後に獲得され、先天的な回路に接続されることを示している。

[Article p.503](#) 参照





核の門番：核膜孔複合体の構造

GATEKEEPER FOR THE NUCLEUS:
Architecture of the nuclear pore complex

核膜孔複合体は、細胞質と核内部をつなぐ物質輸送路の門番として、細胞内で重要な役割を果たしている。核膜孔複合体は、約30種のタンパク質がそれぞれ複数個集まった、456個のタンパク質分子からなる大きな超分子複合体である。細胞生物学では、個々の分子がどのように配置されているのかに関心が集まっているが、通常の構造研究ではこれまで解明できなかった。しかし今回、プロテオミクスに基づく新手法により、酵母の核膜孔複合体の詳細な構造が明らかになった。複合体の半分はコアとなる足場からなり、複合体が埋め込まれている核膜孔の表面を覆うネットワークを形成している。選択輸送障壁は、足場の内面を覆う多数のタンパク質で形成されている。その大きさにもかかわらず、複合体はほんの数個の構造モジュールからなる。基をなすこの単純さは、「始原的な」核膜孔複合体からの進化起源を示している可能性がある。表紙は、核膜（灰色）にみられる直径100ナノメートルの核膜孔を示す模式図。

Articles pp.683, 695, N&V p.621 参照

エクスプレスはデータを配送中

Still delivering

欧州宇宙機関 (ESA) のビーナス・エクスプレスは、2006年4月から金星の軌道を周回している。今週は特集として、金星の大気や極地域の特徴、太陽風との関係、議論をよんでいる雷放電の謎など、この計画で新たに得られた探査結果についての8本の論文を掲載する。特集のトップはH Svedhamたちによる総説で、「双子」とよばれる金星と地球との類似点と相違点（こちらが主）について述べている。News & Viewsでは、A Ingersollがこれら最新の知見について考察し、ビーナス・エクスプレスの残り6年の寿命を最大限に活用するための研究チームの計画についても論じている。

Venus Express 特集 pp.629-662
N&V p.617 参照

原子の種類を見分ける電子顕微鏡

Atom-level microscopy

微細構造の評価は、複雑な材料を研究する上で重要である。例えば、半導体デバイスはナノメートルサイズの構成要素からなり、それらの性能は原子レベルの微細構造に依存している。電子顕微鏡で個々の原子を解像することは可能だが、化学種まで識別することはできない。走査型透過電子顕微鏡法 (STEM) と電子エネルギー損失分光法 (EELS) を組み合わせることによって、個々の原子列の化学組成分析が可能になるはずだが、実際上の問題は完全な二次元解析が不可能だったことだ。今回、問題の一部が克服されたため、STEM/EELSイメージングを用いて層状マンガ化合物 $\text{La}_{1.2}\text{Sr}_{1.8}\text{Mn}_2\text{O}_7$ 中のランタン、マンガ、および酸素の原子列が二次元画像として視覚化された。

Letter p.702, N&V p.622 参照

頭が2つ

Double header

広くみられるモータータンパク質のキネシンは詳しく研究されてきたが、基本的な機構に関する1つの疑問が未解明のままであった。それは、キネシンが8ナノメートルのステップとステップの間で待つとき、微小管に両方の頭部で結合しているのか、1個の頭部だけで結合しているのかという問題である。森徹平たちは今回、1分子蛍光共鳴エネルギー移動 (smFRET) センサーを開発し、微小管に沿って歩行するキネシンモーターを追跡した。生理的濃度のATPの下では、キネシンはステップとステップの間で2個の頭部が結合した状態で待つのに対し、それより低いATP濃度では、1個の頭部だけが結合した状態が優勢であることが見いだされた。 Letter p.750, N&V p.625 参照

糖尿病でSIRT1を活性化する物質

SIRT1 activators in diabetes

SIRT1は、細胞制御にかかわるタンパク質に作用する NAD^+ 依存性デアセチラーゼで長命とのかかわりが示されており、カロリー制限の有益な影響のメディエーターであるとされてきた。新たなスクリーニングプログラムにより、赤ワインで見つかったSIRT1活性化物質としてよく知られているレスベラトロールとは構造的には似ていないが、その1000倍の効力をもつ小分子のSIRT1活性化物質群が同定された。これらの新規化合物は、糖尿病と肥満の動物モデルで代謝機能を改善することから、2型糖尿病やインスリン抵抗性への治療に役立つ可能性がある。 Letter p.712 参照

p53のほかの役割を探す

In search of p53's other roles

転写因子p53は、腫瘍抑制因子としては詳しく研究されてきたが、本来の生理的役割に

ついては、ほとんど明らかにされていない。今回マウスを用いた研究から、p53の正常な機能が生殖および妊性と関連づけられた。p53を欠損する雌マウスでは、胚が着床しにくく、妊娠率が低く、同腹仔数が少ない。p53は、胚盤胞着床に関与するサイトカインLIF（白血球抑制因子）の制御を介して、こうした役割を果たす。この研究は、着床成功のためにp53の正常な機能が、特に体外受精または胚移植を受ける女性で重要である可能性を示しており、着床不全を繰り返す女性の着床成功率を向上させる治療戦略につながるかもしれない。 Letter p.721, N&V p.619 参照

ミトコンドリアのセンサー

Mitochondrial sensor

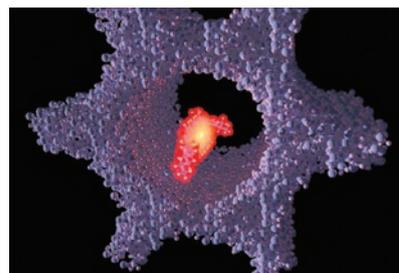
栄養素を感知するセンサー分子mTOR (mammalian target of rapamycin) は、細胞の成長と増殖の調節にかかわるキナーゼである。mTORは細胞のエネルギー状態と密接にかかわっていることから、ミトコンドリアと相互作用している可能性が考えられるが、コンピューターゲノミクス研究によってこれが確かめられた。mTORは、転写調節因子PGC-1 α とYY1を仲介役としてミトコンドリアの遺伝子発現と酸化機能を転写制御することにより、エネルギー代謝の均衡を保つ働きをしている。この経路の解明で、ミトコンドリアの働きがおかしくなる代謝疾患の治療に新たな道が開けるだろう。 Letter p.736 参照

細孔とゲスト分子の関係

Guest appearance

メソスケール、すなわち直径が数百ナノメートルの細孔をもつメソ多孔質材料には、貯蔵、分離、触媒変換など多くの用途が考えられるが、そのほとんどは「ゲスト」分子の細孔を通る拡散に依存している。しかし、ゲストの動きと材料の構造とを関連づける方法が存在しなかった。だが、電子顕微鏡法と光学的な単一分子追跡法とを組み合わせて、メソ多孔質材料中の分子拡散を視覚化する技術が開発され、この状況が変化しそうだ。ゲスト分子（今回は色素）がホストの構造的特徴に合わせてナノメートルスケールで速度や方向を変えるのを、初めて「見る」ことができるようになったのである。これによって、メソ多孔質固体の特性の解明が進むと考えられる。

Letter p.705 参照





地球の監視:

世界のようすを継ぎ合わせる/キーリングCO₂カーブの50年EARTH MONITORING: Patching together a worldview / Half a century of the Keeling CO₂ curve

今からおよそ50年前にあたる1958年3月、Charles Keelingたちはハワイのマウナロア山で大気中CO₂濃度の連続測定装置の稼働を開始した。その結果は、今週号の表紙を横切っているぎざぎざの「キーリング・カーブ」となり、最終的に世界中の注目を集めることとなった。このマウナロアの連続測定は、大気中CO₂濃度の連続記録として世界最長である。そこにはCO₂濃度の着実な上昇が記録されており、これは今や、気候科学や経済的・政治的な意思決定に常に組み込まれる背景となっている。マウナロアの測定記録は、それ自体が重要な情報源となるだけでなく、地球監視プログラムが極めて重要なことをはっきり示している。今週号では、この観測の開始50周年記念として、現在行われている地球監視活動やマウナロア山の観測データに関する歴史的エピソードなどを一連のNews Featuresを含めて取り上げている。

Editorial p.761, News Features pp.778-787

Commentary pp.789, 791, Books & Arts p.795, Essay p.797参照

月の初期の火山活動

Once on a new Moon

月の起源と進化についてはいまだに論争が続いている。注目すべき論点の1つは、月の海、すなわち平原での玄武岩火山活動の開始および終了の時期がいつかということである。過去30年間の月の研究からは、月の海の火山活動が起こった主な時期は、39億年前に終わった後期重爆撃期、つまり極めて激しい隕石の落下時期の後だったと考えられているが、それは、月の海の玄武岩として知られているもののほとんど(月由来の隕石とアポロとルナが持ち帰った試料)やりモートセンシングのデータが、結晶化年代が39億年よりも若いことを示しているからである。しかし今回、月由来の隕石Kalahari 009の鉱物に対してU-Pb年代が新たに測定され、月の玄武岩に対しておよそ43.5億年という年代が与えられた。このことは、月が形成されて分化した後の比較的早い時期にあたる43.5億年前に火山活動が始まっていたこと、そして、Kalahari 009は月の「隠れた海(cryptomare)」から得られた最初の試料であることを示唆している。

Letter p.849 参照

血管新生を抑制する抗体

Antiangiogenic antibodies

骨髄由来の細胞は、腫瘍内の血管新生を促進することがわかっている。今回、血管新生ペプチドであるBv8(別名プロキネチン-2)のこの過程への関与が示唆された。免疫不全マウスに移植した腫瘍は、顆粒球コロニー刺激因子(G-CSF)を分泌する。G-CSFは、本来は血液細胞の増殖分化に関与する因子だが、ここで分泌されたG-CSFは骨髄でのBv8の産生を増大する。そしてBv8は、「好中球」

系列の白血球を腫瘍へと動員する。Bv8に対する抗体は血管新生を抑制し、一部の腫瘍の増殖を阻害するので、特に細胞傷害性の薬剤を用いた化学療法と併用した場合に、有効な抗がん剤となると考えられる。

Article p.825 参照

メタンを食べる好酸性細菌

Passing the acid test

温室効果ガスであるメタンを酸化する細菌は大気中のメタン収支を左右する重要な因子となると考えられ、大気中に蓄積されるはずのメタンを地殻から吸い取ることができる。メタンを利用する新たな細菌2種がそれぞれ別の研究グループにより単離されたが、どちらも新たな性質を備えている。これまでに単離されてきたメタン酸化細菌はプロテオバクテリアであるが、今回の2種は共に、ヴェルコミクロビウムという分布域の広い別の門に属し、pH 0.8 ~ 2.5という極端な酸性状態が増殖およびメタン酸化の至適条件である。Acidimethylosilex fumarolicum SolVはイタリア・ナポリ近郊のソルファタラ火山の噴気孔から、Methylokorus inferorumはニュージーランドのヘルズゲート(ティキテレ)地熱地帯の高温土壌から、それぞれ単離された。

Letters pp.874, 879 参照

コレラ菌の武装解除

Cholera pathogen disarmed

ある種の細菌はクオラムセンシング(菌密度感知機構)とよばれる仕組みをもち、シグナル伝達分子を使って情報交換を行い、遺伝子の発現を同調させることによって、あたかも多細胞生物であるかのような挙動をとることができる。コレラ菌(*Vibrio cholerae*)はクオラムセンシングによって毒性を制御し、バ

イオフィルムを形成するが、このバイオフィルムが感染治療をむずかしくする一因となっている。今回、コレラ菌のクオラムセンシングにおける主要なシグナル伝達分子(オートインデューサーとよばれる)のCAI-1が、(S)-3-ヒドロキシトリデカン-4-オンであることが明らかになった。これはまったく新しい生体分子である。これらをコレラ菌に与えると病原性に必要な因子の生産が終了するため、CAI-1投与はこの重要な病原菌に対処する新しい方法となるかもしれない。

Letter p.883, N&V p.805 参照

宿主と寄生者の膠着状態

Host-parasite stalemate

ルイス・キャロルの『鏡の国のアリス』に登場する赤の女王は、同じ場所にとどまるためには力の限り走らなければならないといった。L Van Valenは、宿主-寄生者および捕食者-被食者間の相互作用にこの概念を適用し、それぞれが相手を追い越すためにできるだけ速く進化すると考えた。しかし、どうすれば、これらのいわゆる「赤の女王」動態を経時的に追跡することができるのだろうか。今回、池の底の泥をかき混ぜることで、その方法が浮かび上がってきた。ミジンコ属(*Daphnia*)とその寄生微生物はどちらも、湖底の泥の中で休眠することで何年も生存できる。ベルギーのHeverleeにある湖の湖底堆積物から休眠期の宿主と寄生者をよみがえらせ、現在の子孫と比較した研究で、寄生者の有毒性が時間経過とともに着実に増加していることがわかった。しかし、それが系全体に与えた影響はほとんどなかった。現在の宿主と寄生者の間の感染率は、昔のそれとほとんど変わっていない。多くの「軍拡競争」と同じく、互いにエスカレートした結果は膠着状態なのである。

Letter p.870 参照

溶けたところもあったスノーボールアース

Snowball Earth avoided

「スノーボールアース」仮説では、新元生代に地球が氷で完全に覆われた時期が数回あったと考えている。もう一つの仮説では、赤道域には開水面があったがその他の場所は全面的に凍結していた、つまり氷が溶けたところもある「スラッシュボール」であったと考えているが、この問題はいまだに決着がつかない。Peltierたちは、新元生代における炭素循環と気候システムの結合進化モデルの研究結果を報告している。表面気温が低下するにつれて、大気中の酸素が海に取り込まれ、溶存有機炭素の大規模なプールが再び無機化する速度が増加することがわかった。この結果、大気中の二酸化炭素濃度が増加し、温室効果によって気温が上昇し、完全な全球凍結状態が妨げられるのである。

Article p.813, N&V p.807 参照



イオンポンプ: 膜を挟んだ濃度勾配を作り出す

PUMPING IONS:
Beating the transmembrane concentration gradient

P型ATPアーゼは、すべての真核生物と多くの原核生物にとって基本的に重要なカチオンポンプである。今週号には、このスーパーファミリーの重要メンバーの構造と機能についての3つの研究が掲載されている。表紙は、Morthたちが報告したNa⁺,K⁺ポンプの分解能3.5 Åでの構造である。一緒に掲載されているのは、J C Skouが50年前にこのポンプがNa⁺とK⁺に依存するATPアーゼ活性を示すことを発見したときの実験ノートである。Morthたちの論文はカリウム結合状態を明らかにしており、Skouと似た速度論的実験の結果も踏まえて、調節が電圧依存的に行われていることを示唆している。Olesenたちは、筋小胞体Ca²⁺-ATPアーゼ、すなわちカルシウムポンプの結晶学的スナップショットを得て、これを補完する機能研究と共に報告している。これにより、カルシウム輸送の完全な機構が示された。植物と菌類では、細胞のイオン恒常性と膜電位が、細胞膜H⁺-ATPアーゼという別のP型ATPアーゼによって駆動されている。Pedersenたちは、このポンプのX線構造を示し、このポンプが急な電気化学勾配に逆らってプロトンをくみ上げる仕組みについて考察している。

Articles pp.1036, 1043, Letter p.1111, N&V p.957 参照

ハローにハロー!

Halo, halo

我々の銀河系円盤の外側を取り巻く領域はハローとして知られ、老いた星でできた均一な構造だとずっと考えられてきた。しかし最近、ハロー内の少数の天体の解析結果から、単一の星集団でできているのではないらしいと考えられるようになってきた。今回、2万個以上の星の分光学的観測データに基づいて、ハローは2種類の構成成分が広範囲に重なり合っていることがわかった。内側のハローは、銀河と一体となって同じ方向にゆっくりと回転しているのに対し、外側のハローは逆向きに回転していて、ヘリウムより重い元素の存在量は比較的低い。これらのハローは、原始銀河の塊の潮汐力による分裂と、内側のハローでは散逸を伴う合体の繰り返し、外側のハローでは散逸のない合体過程により形成された可能性がある。

Article p.1020 参照

母の負担

The mother load

腰痛は欠勤の主な理由の1つであり、ヒトやその祖先にあたる人類の特徴である直立歩行のむずかしさのあかしでもある。しかし、人類の有史以前およびその後の期間の大半にわたって、成人女性が妊娠や育児に一生のうちの多くの時間を費やしてきたと考えれば、女性は進化上の問題をもう1つ余計に抱えていることになる。妊娠すると体の重心が徐々に移動していくので、直立歩行の不安定性はさらに悪化する。Whitcomeたちは、女性の脊柱に特有な、胎児の荷重を相殺する解剖学的適応を詳しく調べ、二足歩行をするアウストラロピテクス類には同様の適応がみられる

が、二足歩行をしないチンパンジーにはこうした適応がみられないことを見いだした。

Letter p.1075 参照

超伝導をつくる糊

Superconductivity's glue

高温超伝導の分野で現在最も激しい議論が交わされている問題は、電子を結合して超伝導電子対をつくる超伝導の「糊」の微視的な起源に関するものである。その主な候補は、格子振動(フォノン)とスピン励起であり、また、媒介するものがない対形成という可能性もある。Niestemskiたちは、PLCCOとして知られている電子ドープ超伝導体に関する、高い空間分解能と再現性を実現した分光学的研究の結果を報告し、10.5 ± 2.5 meVに、この物質の電子の集団励起モードがあることを明らかにした。この結果は、このモードが電子を起源とし、おそらく超伝導の「糊」であるということと矛盾せず、フォノンよりもスピン励起が関係していることと一致する。

Letter p.1058 参照

マラリア原虫が宿主体内で示す3つの状態

Triple identity for malaria

マラリアの解明における大きな難問の1つは、感染した小児に認められる臨床症状が、軽いインフルエンザ様症状から昏睡や死亡に至るものまで、幅が広いことである。ヒトの患者から単離したマラリア原虫について大規模な転写解析が行われ、臨床症状のこうした違いを説明できそうな手がかりが見つかった。熱帯熱マラリア原虫(*Plasmodium falciparum*)は、宿主であるヒトの体内では3つの異なる生理的状态、すなわち、活発な増殖状態、飢餓に対する応答状態、および環境ストレス応

答状態をとっている。今回の知見は、現在使われている薬物による治療と、将来の薬物およびワクチン開発の双方にとって重要な手がかりがある。 Letter p.1091, N&V p.955 参照

はぐれ波を捕まえる

Catch a freak wave

海では異常な巨大波が突然現れることがあるのを、船乗りたちは何百年も前から知っている。このような「はぐれ波」と出会う確率は、通常の波の振幅統計から予測されるよりずっと高いことが最近わかった。このような現象の物理学的性質を解明するため、Solliたちは光学系におけるはぐれ波の原理を調べた。新しい実時間検出法を使って、微細構造光ファイバーから作った系について研究を行ったところ、ほぼ同一な光パルスの集団を注入すると、この系ではまれに極めて急峻で大きい光波が現れることがわかった。光ははぐれ波は、ランダムノイズが最初は滑らかなパルスを特定の周波数シフトで、はっきり決められた時間枠の範囲内で擾乱するときに発生する。

Letter p.1054, N&V p.953 参照

マイクロRNAのそっくりさん

RNA copied

ウイルスのマイクロRNAの中には、宿主細胞のmRNAに結合して翻訳を阻害したり、分解を引き起こしたりするものがあることがわかっている。今回、カポジ肉腫関連ヘルペスウイルスに由来するマイクロRNAが、広く存在する細胞性マイクロRNAであるmiR-155とそっくりの働きをすることがわかった。このmiR-155のウイルス版は、細胞に存在する本物の低分子RNAと著しい相同性を示すので、宿主のB細胞に存在している遺伝子調節経路を利用するために進化したものかもしれない。 Letter p.1096 参照

土星に見つかったもう1つの環

Saturn's other ring

地球のはるか上層を環状にめぐる捕捉された粒子の流れ、つまり環状電流が存在するという考えが初めて出てきたのは、20世紀の早い時期である。この考えの正しいことは証明されていて、電流の範囲と組成は1957年に測定された。その後、これとは性質の異なる環状電流が木星で観測され、土星にも存在すると推測されていた。カッシーニ探査機に搭載された磁気圏撮像装置が今回、土星の環電流の画像をとらえた。この電流は変動が激しく、土星とほとんど一体となって回転する、経度方向の強い非対称性をもっている。これは地球の環電流とは対照的で、地球の場合には回転による変動がなく、最初に生じた非対称性は局所的な効果によって決まっている。

Letter p.1050 参照

2007年の「話題の人」

Newsmaker of the Year

Nature Vol. 450 (1127) / 20/27 December 2007

Nature は、インドの工学者にして経済学者、そして気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の議長であるラジェンドラ・パチャウリを第1回『今年のお題の人 (Newsmaker of the Year)』に選出した。



IPCCのラジェンドラ・パチャウリ議長

MARLENE AWAD / MAXPPP / NEWS.COM

科学はおそらく、人間の主要な営みの中で「人格」に依拠する要素が最も少ない領域である。最初の発見者が誰であっても、誰によって記載されても、誰によって予想されても、科学的な事実は同じである。

同時に、ある科学者がどのような研究を行うかは、その科学者がどのような人物で、どのようにして協力し合い、どんな人を好み、どんな人を嫌い、どのような世界観をもち、どの程度の根拠があり、どのような欠点があるかによって決まってくる。歴史と同様、科学を作るのは個人である。とはいえどちらも、名を残す人物の陰には忘れられていく人々がいるのだが。

科学が人々の目に触れるときにも、その顔となる人物がいる。科学は、人間の活動を通してニュースになる。*Nature* がこれから毎年、科学における役割により全世界に多大な影響を与えた人物を「話題の人」として年末に選出しようと考えたのも、そのためである。

「話題の人」は、褒め称えるべき人物であるとは限らない。もっと前から始まっていたら、論文のねつ造が問題になった幹細胞研究者の黄禹錫^{フンウツク}など、不名誉なニュースになった人物が選出されていたかもしれない。また将来は、クローン人間、道を誤った政治家、バイオテロリストなどが「話題の人」に選出される可能性もある。こうした人々も、ニュースや科学そのものに重大な影響を及ぼす可能性があり、独自の分析に値するからである。

しかし、2007年の「話題の人」が科学に成した貢献は、無条件に称賛することができる。ラジェンドラ・パチャウリの強みは、自分の得意分野 (工学と経済学という、開発にかかわる分野) の研究所を設立し、組織を作った点にある。この分野で彼が取めた成功は、冷静でありながら極めて精神的な性格がもたらしたものである。パチャウリはこの20年間で、デリーに本拠地を置くエネルギー資源研究所 (TERI) を設立し、これを世界中にオフィスがあり、数百人のスタッフを擁する組織へと成長させた。5年前からは、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) という大規模な共同機関の議長も務めている。

とはいえ、「話題の人」を選出する趣旨は、スターへの心酔を表明することにあるのではない。科学研究の核にあるの

は、人格ではなく発見である。*Nature* の姉妹誌である *Nature Methods* が「今年の手法」の発表を始めたのはそのためである。ちなみに、第1回の「今年の手法」として選ばれたのは次世代超高速DNAシーケンシングである。

パチャウリにとっての2007年は、IPCCがノーベル平和賞を共同受賞したことで、記念すべき年になった。その締めくくりとして、12月初旬に開催された国連気候変動バリ会議でも、まずまずの成功を取めることができた。各国はここで、2012年に期限切れとなる京都議定書に代わる協定の枠組み設定に向けて前進することができた。

気候変動の脅威から弱者を保護するためには、我々全員の行動を変えていかなければならない。そのためには、個人の行動を変えるだけでなく、政治的な取り組みも必要である。炭素を地中に埋めて、原子力発電や潮力発電により寝室の照明を灯すためには、政府による直接のおよび間接的な「お膳立て」が必要である。炭素を排出する過程に経済的コストをかけることは前者の例であり、基礎研究や技術開発を促進することは後者の例である。バリ会議では、我々の前途にある政治的議論を先取りして味わってみるにすぎない。その先には、気候変動を緩和するために個人が引き受けなければならない厳しい現実が待っている。その負担は、喜んで引き受けようとする人にも、しぶしぶ引き受ける人にも、同じようにのしかかる。

けれども、集団での取り組みには、前向きで、精神を高揚させる面もある。IPCCは、その好例である。IPCCのメンバーは、新しい研究ができたはずの時間を世界全体のために犠牲にしてきた。彼らの果てしない会合と議論、知的衝突、暖かい相互理解からは、一般の人々が最大の関心を寄せている科学的問題に関して、他に類例を見ないほど信頼度の高い知識のカatalog (および、残された謎についての権威ある査定) が得られた。数百人の著者が誇りに思い、世界中の国々がある程度の信頼を寄せるようなものを作り上げるのは、並大抵のことではない。IPCCの総力をあげた努力は数十年にわたるものである。しかし、IPCCがこれまでで最大の成果を上げたときに議長地位にあった人物はラジェンドラ・パチャウリである。ゆえに我々は彼に敬意を表するのだ。 ■

nature

コンピューターゲームでチンパンジーの子が大学生に勝利

Chimp beats students at computer game

若いチンパンジーの瞬間的な記憶能力は、ヒトよりすぐれている。

doi:10.1038/news.2007.317 / 3 December 2007

Ewen Callaway

特別に賢いアユムという名前の7歳のチンパンジーが、記憶ゲームで大学生を打ち負かした。アユムとほかの2頭の若いチンパンジーは、コンピューター画面上に一瞬だけ映し出されたいくつかの数字の配置を、ヒトより速く正確に記憶することができた。

「これは純然たる事実であって、この課題については我々よりもチンパンジーのほうがすぐれているのです」と、この研究を率いる京都大学の霊長類学者、松沢哲郎は話す。

この研究成果は、チンパンジーがヒトより「賢い」ことを意味しているわけではない。むしろチンパンジーは、対象が画面上の数字であれ、木からぶら下がっている熟したイチジクであれ、目に入った周囲の情景を一瞬で記憶することにすぐれているのだと考えられる。ヒトはこの能力を、言語や複雑な記号を理解する知力を得ることと引き換えに失ったのだろう、と松沢は話す。

ほんの一瞬で

松沢の研究チームが雌のチンパンジーのアイを訓練して、初めてアラビア数字の認識と順序づけができるようにしたのは、今から20年のことだった¹。その後、松沢は川合伸幸と、コンピューター画面上に一瞬だけ映し出されたいくつかの数字の位置を記憶するように、アイを訓練した。画面上に出た数字がすばやく白い四角形で隠されても、アイは四角形を、その下に隠された数字の順番どおりに触れることができた²。十分に訓練すれば、チンパンジーはこの課題をとて上手にできるようになる。

次に松沢は井上紗奈と、チンパンジー

の3組の母子に、アイがやったような数字の認識と記憶の訓練を行った。ほとんどの場合、母親よりも子どものほうが優秀で、中でもアイの息子のアユムは成績がいちばんよかった。この結果は、最近の*Current Biology*誌に報告された³。

アユムは同じゲームで大学生たちとも対決したが、アユムと比べると大学生たちはまるで劣等生だった。その差が歴然となったのは、画面上の数字の表示時間をわずか0.2秒に設定したときだった。これは、ヒトが一瞬で見て記憶するには短すぎる時間である。この場合、アユムが数字の順序を正しく当てることができた正答率は80パーセントだったが、大学生の正答率は平均してわずか40パーセントに過ぎなかった。

アユムが、画面上に一瞬だけ表示された数字を見た後、数字の配置についての記憶をどれくらい長く保っているのかははっきりしない。アユムは、ゲームの途中で部屋の外から聞こえてきた音に気をとられて10秒間中断しても、正しく答えることができた。松沢は、チンパンジーたちがどれくらい長く数字を記憶できるかをテストすることにしている。

知的能力のトレードオフ

チンパンジーたちの成績がよかったのは、単により多くの練習をしたことによるのだろうか。アユムは生まれてから7年間このゲームをしてきた。そして、ゲームを1回やるごとにご褒美をもらっていた。しかし研究チームは、アユムの強みは、この訓練を受けたことだけではないと考えている。「大学生たちを6か月間訓練しても、正答率はチンパンジーのレベルには達しなかったのです」と松沢はいう。



いくつかの数字が一瞬だけ映し出されても、アユムはどこにどの数字があるかを記憶することができる。

人類は500万～600万年前にチンパンジーと共通の祖先から分岐したときに、知的能力のトレードオフをしたのではないかと松沢は考えている。人類は、言語その他の複雑な記号を処理できる屈強な脳を獲得すると引き換えに、一瞬で情景をスナップ写真のように記憶する能力を鈍化させたのかもしれない。

いくつかの特定の課題でヒトよりチンパンジーのほうが成績がよいとわかっていても驚くことはない、とジョージア州立大学（米国アトランタ）の心理学者Michael Beranはいう。彼によれば、チンパンジーとヒトはいろいろな点で極めて似ており、チンパンジーの内なるアインシュタイン、つまり隠れた知力能力を見出すために重要なのは、彼らに適切なテストを課することだという。

しかし、限界もある。「何頭かのとても賢いチンパンジーを相手に研究をしますが、彼らが微積分の宿題をやることはないでしょう」とBeranは語った。■

1. Matsuzawa, T. *Nature* **315**, 57-59 (1985)

2. Kawai, N. & Matsuzawa, T. *Nature* **403**, 39-40 (2000)

3. Inoue, S. & Matsuzawa, T. *Curr. Biol.* **17**, R1004-R1005 (2007)

2007 GALLERY: IMAGES OF THE YEAR

2007年、とっておき画像集

Nature Vol.450 (1144-1149) / 27 December 2007

科学的手法の記述は多くが観察から始まる。そして、この特集で紹介する画像も実にわくわくするような観察結果である。地球や宇宙の新しい画像は、巨大科学の出発点となるものだろう。しかし、見る者を強く引きつける科学的画像は、多くの

場合、研究過程の最後に解答の1つの形として得られたものである。このような画像は、何か月もかけた精力的な研究の集大成であり、極めて高い質を漂わせつつ静かに語りかけてくる。題材は、タンパク質や材料の構造から、顕微鏡レベルの造形を

見せる高解像度の画像、データをエレガントに可視化したものまで幅広い。研究の開始段階や最終段階、もしくはどこか途中の段階で得られたこれらの画像は、2007年の最も印象深い画像の一部である。

(取材構成: Emma Marris)

NASA/JPL/SPACESCI.INST.

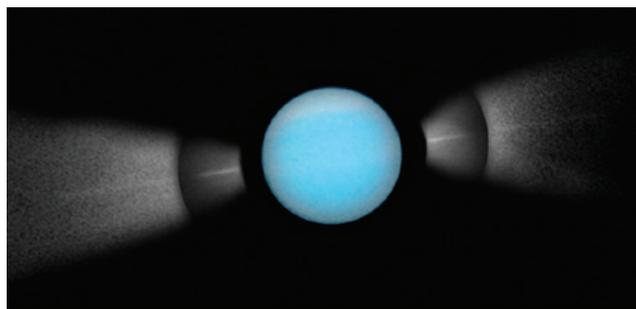


◀ イアペトゥスの裏側

この着色モザイク像は、土星の衛星イアペトゥスの明暗2つの面のうち明るく見える面を初めて高解像度でとらえた画像である。イアペトゥスは公転周期と自転周期が同期しているため、暗く見えるほうの半球（画像の右側にちょうど少し見えている）を常に土星に向けて公転している。土星探査機カッシーニが2007年9月10日に撮影。

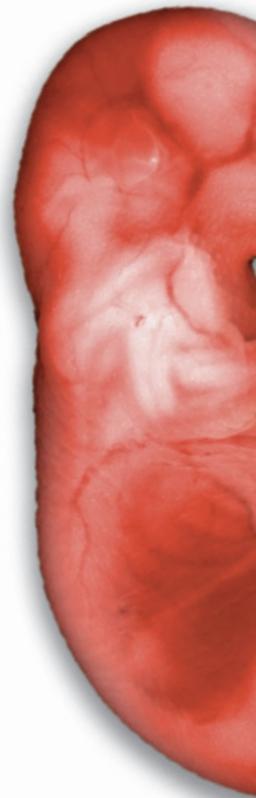
G. KWON, MEMORIAL SLOAN KETTERING INST./NIKON INSTRUMENTS

NASA, ESA AND M. SHOWALTER/SETI INST.



◀ リングサイドの席

天王星の輪は42年に1回、地球から見て真横の位置にくる。42年前はこの惑星に輪があることは誰も知らなかった。そのため2007年は、地球や観測衛星から天王星の輪をとらえる初めてのチャンスが訪れた年となった。ハッブル宇宙望遠鏡は2007年8月14日にその機会をとらえた。加工処理して見やすくしたこの画像では、輪が天王星の両側に白いスパイク状に見えている。



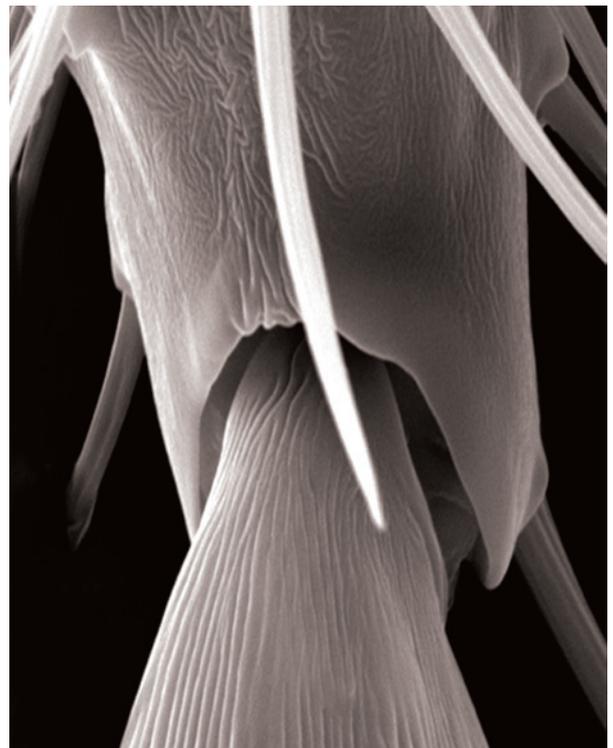
彗星の編み上げたレース ▶

2007年1月の夜空を繊細な美しい尾で飾ったマクノート彗星。過去30年余りの間で地球から観察できた最も明るい彗星だった。



彫刻を施された脚 ▼

ショウジョウバエの脚の関節をとらえたこの写真は、ハエの脚が形作られる仕組みを調べる研究の一環として撮影されたもの。関節の内側の深い裂け目は、デカベンタプレジックとよばれる分子の化学勾配と関係するアポトーシス（プログラム細胞死）によって彫り込まれたもの。



◀ 胎内で2色に光る

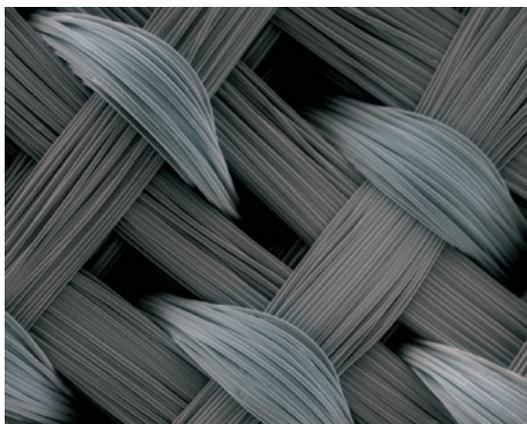
この卵黄嚢（胎児の栄養袋）のついたトランスジェニックマウス胎児の写真は、2007年のニコン顕微鏡写真コンテスト「Small World」で第1位に輝いた作品である。それぞれ異なる標識用タンパク質を発現させているので、卵黄嚢は緑色、マウスは赤色の蛍光を放っている。





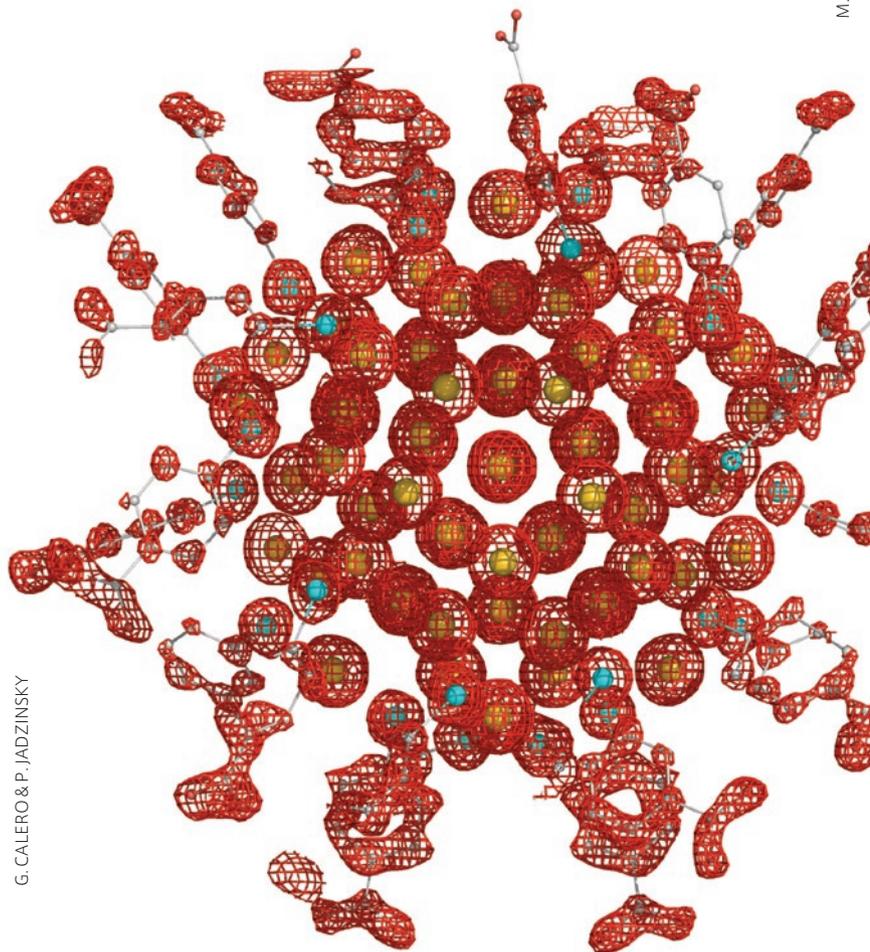
◀ おしゃれをしたニューロン

運動ニューロンが今シーズンの流行色を身にまとった。4種類の蛍光タンパク質のどれかを混ぜ合わせて細胞に発現させる標識技術のおかげである（ただし、この画像で使われているのは3種類のタンパク質のみ）。



▲ 小さな織り機

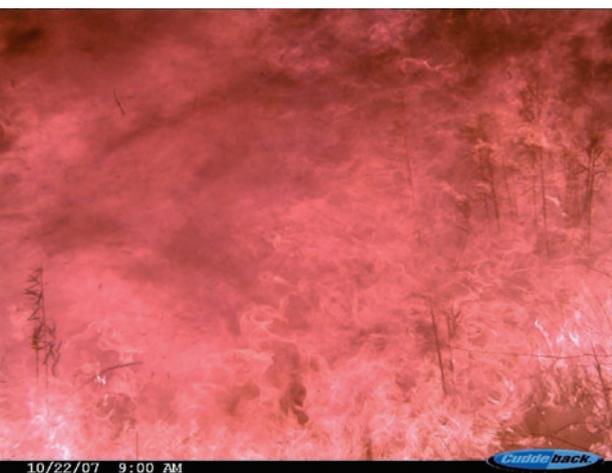
軟骨に似た動きや働きをして外傷後の組織再生を助けるような足場構造の作製技術が、この小さくて立体的な織物に盛り込まれている。仕上がった「布地」は厚さがおよそ1mmで、ポリグリコール酸の糸で織られている。



G. CALERO & P. JADZINSKY

M. THRASHER, H. SWINNEY ET AL.

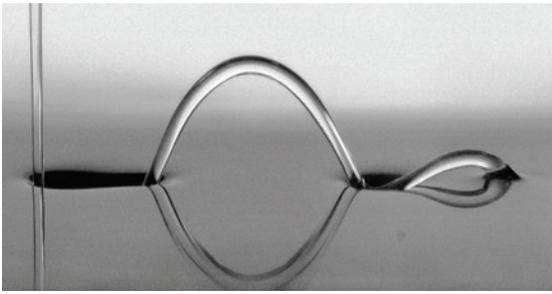
USGS



10/22/07 4:50 AM

10/22/07 9:00 AM

10/22/07 9:01 AM



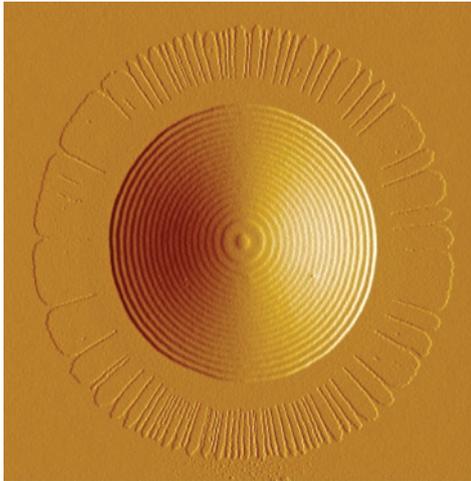
着水の妙

垂らしたシリコンオイルが、オイルバスに溶け込む前に2回弾んでとどろく。オイルバスは写真の左から右へ動いているため、この液体ジェットは空気の薄層が潤滑役となってジャンプしてしまうのである。

幻惑を起こす滴

液体を不浸透性の表面に一滴落としたとき、必ずしも単純な半球形ができるわけではない。このジブロック共重合体からなる複合液体は、シリコン表面に格調高い模様を描き出す。

AM. PHYS. SOC.



色鮮やかな前進

粘菌は、細胞の「前面」付近に「仮足」を突き出し、いちばん後ろにあたる部分を少し引っ込めることで移動する。この画像は、粘菌の一種であるキイロタマホコリカビがのんびりと歩を進めているところで、踏み出した新しい一歩ごとに色を変えてある。粘菌は、化学勾配に従う場合に正しい方向を初めから察知するのではなく、仮足をランダムに出し、正しい方向に向いた仮足を維持させていることが、画像からわかる。

黄金の花飾り

結晶データから、102個の金の原子でできたナノスケールの粒子が再構築された。金原子の多くは中央の十二面体に集まっているが、粒子の外層に配置した金原子には「予想外の幾何学構造」がいくつか見られる。



フィルムに残された山火事

2007年に米国南カリフォルニア州で多数発生した森林火災のうち、オレンジ郡サンティアゴの森林火災が、野生動物の撮影用に設置されたカメラによってとらえられていた。カメラは、10月22日午前4時50分、山火事から逃げようとしているらしいコヨーテの姿を写していた。その後、午前9時00分に炎が押し寄せた。連続写真のうち最後の2枚は午前9時01分と午前9時10分のもの。

TO CATCH A WAVE

波力発電は波に乗れるか？

Nature Vol. 450 (156-159) / 8 November 2007



デンマークのニスムブレドニング沖で波力発電を行う「ウーブスター」プロジェクト。奥の地平線上には、3基の風力タービンが見える。

波力エネルギーで再生可能エネルギー市場に参入しようという動きがみられるが、未解決の課題が多く残っている。Ewen Callawayが報告する。

K.E. JENSEN / WSE

北海は波の荒さで知られている。コペンハーゲン（デンマーク）の北西300キロメートルに位置するニスムブレドニングという入り江でも、波の穏やかな日はほとんどない。たいていの日の午後には、灰色がかかった青い海の上をウィンドサーファーたちが滑走し、その上空では鳥たちがまるで静止しているかのように浮か

んでいる。地平線上には巨大な白い風車が何台も連なり、その長い羽根が強風の中でぐるぐると回っている。

「今日はとても快調に動いています」と、Per Steenstrupが強い風の中で叫んだ。顔には海水と雨が一緒になって打ちつけている。彼はコペンハーゲンからやってきたエンジニアである。ここは、

海岸から200メートル沖合に建設された鋼鉄製のプラットフォームの上である。プラットフォームの両側には、大型の浮体が20台ずつ、バイキング船のオールのように取り付けられている。プラットフォームの根元の部分は膝の高さほどの波に洗われていて、浮体は10センチほどの幅で小刻みに上下している。

Steenstrupがプラットフォーム上のプレハブ小屋のドアを開けた途端、機械の轟音が大きくなり、風や波の音をかき消した。「波の力で40ピストンのエンジンを動かしているのです」と彼は叫んだ。Steenstrupは、タービンに隣接した制御室のコンピューターを覗き込み、この瞬間の「ウェーブスター (Wavestar)」の出力を確認した。ウェーブスターとは、このプラットフォームの名前である。「現在の発電出力は約800ワットです」と彼はいった。これは、大画面プラズマテレビを見られる程度の電力である。

一方、地平線に見える風力タービンは、出力4万1000キロワットの風力発電システムを構成している。このシステムは十分に確立しており、日によっては、農業地域の全電力を供給できる。

それでもSteenstrupをはじめとする数十人の研究者は、波力発電が将来、風力、太陽光、水力といった物理的環境からエネルギーを抽出する既存の発電方法に匹敵するものになると考えている。世界中を見ても波力エネルギーを利用できる地域は少なく、発電のための技術もほとんど実証されていない。しかし、世界が直面するエネルギー問題の深刻さを考えれば、波力エネルギーはグリーンエネルギーの1つとして必要不可欠なものになるはずだと、推進派は主張している。現在、地球上の各種のエネルギー源を利用した総発電量は約130億キロワットであるが、ベルギーのブリュッセルにある欧州海洋エネルギー協会は、地球上の波力エネルギー資源は10億～100億キロワットになると推定している。より現実的に、2億キロワット以下と見積もっている論者もいるが、それでも、現在世界中に設置されている風力発電施設の設備容量の3倍に相当する発電量である。

波力発電が経済的に成り立つかどうかは、ポルトガル、英国ウェールズ、米国オレゴン州で進められている新たな外洋試験の結果にかかっている。エンジニアや起業家は、これまで水槽内の縮尺模型にすぎなかった機械を現地で試験しようとしている。利益を出すことを期待して

いるものはほとんどいない。波力発電の技術によって海から一定量の電力を安定的に得られるのかどうかを確かめることが目的なのだ。試験が成功すれば、投資家、産業界、電力会社から研究資金を得られる可能性があるが、失敗すれば、この分野の研究は数年にわたり停滞することになるかもしれない。

「最初の大型装置がどの程度うまくいくかに、多くのことがかかっています」と、Oxford Oceanics社（英国グループ）のTom Thorpeは話す。Oxford Oceanicsは、波力エネルギーに関心を寄せる投資家やデベロッパーにアドバイスをするコンサルタント会社である。「彼らは成功するか、仮に失敗したとしても、その原因を十分に解明できなければならないのです」。

波力発電への追い風

波力エネルギーによく似ていて、おそらくよきライバルになると考えられるのが、風力エネルギーである。「波力エネルギーの現状は、25年前の風力エネルギーと同じなのです」。こう話すのは、カナダのFinavera Renewables社（バンクーバー）の海洋エネルギー担当ディレクターのAlla Weinsteinである。米国オレゴン沖に設置されていた同社の試作品「アクア・ブイ (Aqua Buoy)」は、今月末に陸に引き揚げられる予定だったが、先月、2か月稼働した後、海底に沈んでしまった。今から25年前には、全世界の風力発電能力は約9万キロワットだったが、そのわずか2年前の9倍にも増えていた。今日、風力発電量は全世界の発電量の1パーセントを占めているにすぎないが、デンマークやドイツなどの国々では、その割合は10パーセント以上に達している。

ほとんどの波力発電プロジェクトがいまだに試験段階にあるため、現時点での全世界の波力発電量を把握するのはむずかしい。ただ、業界大手のPelamis社（英国スコットランド・エディンバラ）が数週間以内にポルトガルで新しいプロジェクトに着手するため、3台の発電装置による2250キロワットの電力が加わること

はわかっている。波力エネルギー推進派は、その後の発電量は飛躍的に増えるだろうと考えている。

波力発電は風力発電よりも技術的に困難であるが、波力エネルギーはいくつかの点で風力エネルギーよりもすぐれている。風は、当てにならないものの代名詞である。風の勢いが弱くなったら、電力会社は別のエネルギー源を使って発電した電力を顧客に供給しなければならない。「波も変化しやすいですが、その予測は相対的に容易です」とバージニア工科大学先端研究所（米国アーリントン）のエンジニアGeorge Hagermanはいう。彼は、気象衛星を使って、波力エネルギーを利用できる日を予報している。「波が高くなる時期と波の高さがあらかじめわかっていたら、電力会社は予備電力量を減らしてコストを削減することができます」と彼は説明する。

水は、風よりも当てになるだけでなく、空気の800倍の密度がある。「ウェーブスター」の上に立っていると、そのことを実感できる。高さが1メートル近くになる大きな波がやってくるのを見たSteenstrupは、まるでサーファーのように「いい波がくるぞ」といった。その波が到達し、海の泡が浮体の表面を激しく洗うと、コンクリートの杭が海底に固定されている鋼鉄製のプラットフォームの全体が身震いするように振動した。

ほかの再生可能エネルギーと同様、波力エネルギーには利用しやすい場所と利用しにくい場所がある。海岸ならどこでも波力発電ができるというわけではないのである。地球上には卓越風があるため、北半球なら中緯度地方の大陸の西海岸、南半球なら東海岸が適している。波力エネルギーの試験場のほとんどが北大西洋や北太平洋の上記の地域に建設されているのは、単なる偶然ではない。

スコットランドのオークニー諸島は、強い波が押し寄せることで有名である。欧州海洋エネルギーセンターは、このオークニー諸島沖2キロメートルのところに波力エネルギー試験場を設置した。同センターは、政府から研究資金を得る一方

で、民間からの資金提供も受けている。この試験場は、発電装置の現地試験を行うおうとするデベロッパーのために、安定した波と、簡単につながる送電網を提供している。Pelamis社は、2004年にここで750キロワットの波力発電装置の試験を始めたが、この発電装置は、現在は使用されていない。ほかにも、今後2年間に4つのメーカーがこの試験場を利用することになっている。南半球では、オーストラリアのOceanlinx社が2005年からニューサウスウェールズ州ポートケンブラ沖で600キロワットの発電装置の試験を行っており、より大型の2000キロワットモデルの開発も進めている。

通常、予備エネルギーとなる再生可能エネルギー源は風力エネルギーや太陽光エネルギーである。けれども波が強い場所では、波力エネルギーがこれらに代わる再生可能エネルギー源となる可能性がある。近年、各国政府は電力会社に再生可能エネルギー源からの発電量を増やすことを要請しているため、波力エネルギーも有力な選択肢の1つになることが期待されている。欧州連合は2020年までに再生可能エネルギー源からの発電量を全体の20パーセントとすることを目標に掲げており、米国カリフォルニア州はこの割合を33パーセントとしている。「これだけ高い数値目標が設定されていると、すべての選択肢が必要になるかもしれません」と、カリフォルニア大学バークレー校再生可能エネルギー研究所の所長Dan Kammenは話す。

一部の電力会社と産業界の大口需要家は、すでに波力に着目し始めている。この9月にポルト（ポルトガル）で開催された会議は、通常は科学的側面に主眼を置くものであるにもかかわらず、フランス、デンマーク、ポルトガルの国営電力会社の代表が参加していた。米国カリフォルニア州では、巨大電力・ガス会社であるPacific Gas and Electric社が、同州北部の沖合に波力エネルギー試験場を建設するための許可を申請している。2005年には、ドイツの水力発電会社Voith Siemens（ハイデンハイム）が

英国スコットランドのデベロッパーであるWavegen社を買収している。

特許と期待

波力エネルギー研究には200年の歴史がある。その間、あふれるほどのアイデアが寄せられたが、成果はほとんど得られなかった。1799年、フランスのエンジニアPierre Girardとその息子が、波のエネルギーを利用する方法に関する最初の特許を申請した。この装置は、厚板とてこ台を使って、沖に係留された船の上下運動を重機に伝えるというものであったが、実際に組み立てられることはなかった。その後19～20世紀を通じて、発明家の作業場から特許が少しずつ生まれてきたが、広く利用されるほど高い出力が得られるような発電装置はできなかった。

1970年代に入ると、波力エネルギーの推進派は、作業場から政府省庁へと移動し始めた。石油輸出国機構（OPEC）による石油の供給制限の結果、1970年には1バレルあたり7米ドルだった原油価格が1974年には38米ドルまで高騰した。中東産の石油への依存から脱却しようと

する多くの国々が再生可能エネルギーに注目し、風力エネルギーや太陽光エネルギーの研究に力を入れるようになった。海からエネルギーを得る技術として、米国は深層水と表層水の温度差を利用して熱エネルギーを得る技術の研究を進めていたが、失敗に終わった（コラム「海からのエネルギー」参照）。一方、英国は波力エネルギーの研究で主導権を握った。

1974年、英国政府は学界や産業界に対して、同国が波力発電を主流にしているための計画を作成するよう依頼した。初期の波力発電装置の試作品は、「救いようのないほど不経済なしろものでした」とThorpeは語る。この計画は、それぞれ1億米ドル以上もする巨大な波力発電装置を使って、原子力発電と石油火力発電による発電量にほぼ等しい200万キロワットの発電を行い、これらに取って代わらせるというものだった。「ただし、そうした大幅な技術的進歩が可能になると考える根拠が示されていませんでした」と、Thorpeはいう。計画書で提案されたプラントは、いずれも建設されなかった。

1983年には技術開発の進捗状況につ



ウミヘビ：Pelamis社は、英国スコットランドのオークニー諸島で750キロワットの波力発電装置を試験してきた。

いての報告書が作成され、波力発電技術はいまだに実証されておらず、過大なコストを要すると指摘されたことで、英国の波力エネルギー開発は暗礁に乗り上げた。この報告書の批判的な記述に裏切られたと感じたデベロッパーたちは、Thorpeに再評価させるように政府に働きかけた。しかし、Thorpeが1992年に提出した報告書でも、同じように懐疑的な結論が示された。

風力発電が軌道に乗った1980年代、波力発電は、そのルーツである大学の研究室や発明家の作業場へと帰っていった。そして、初期の失敗と海底石油掘削装置から得られた教訓が、新世代の発電装置の設計に指針を与えることになった。

現在のところ、50以上の波力エネルギープロジェクトが進行中であり、毎年新たなプロジェクトが登場している。アナリストは波力発電装置を6種類以上に分類しており（右図参照）、それぞれが独自の技術によって波から電気を生み出している。Pelamis社の発電装置は、前後に激しく揺れる3つの体節をもつ大蛇に似ている。Oceanlinx社の発電装置は、水柱の水位の上下によって演奏される鋼鉄製の巨大なバグパイプのようなものである。Finavera社の発電装置は、波を利用して油圧ポンプを駆動する大型パイプである。

開発の初期段階で多様な方式が提案されるのは、ごく当たり前のことである。「10年もすれば、実用性のあるものもないものが明らかになるでしょう」と、米国カリフォルニア州パロアルトのシンクタンク Electric Power Research Instituteのアナリスト Roger Bedard はいう。「レースはまだ混沌としています」。

Thorpeは、より懐疑的な見方をしている。「アイデアや特許ならごまんとあります。けれども、そのいくつかは物理法則に反しており、多くは技術的に不可能であり、もっと多くは経済性の点で魅力がありません。今後10～15年のタイムスケールで経済性の問題をクリアする見込みのあるものはごく少数である、といわざるをえません」。

現に、極めて有望そうな設計ですら、

ごく小さな技術的トラブルによって水の泡となる可能性がある。Steenstrupの「ウェーブスター」が設置されている場所から車で少し行ったところに、ライバルの実験施設がある。これは、真っ赤に塗られた鋼鉄とコンクリートでできた重さ237トンの構造物であり、あちこちにフジツボが付着している。「ウェーブ・ドラゴン (Wave Dragon)」と名づけられたこの装置が海岸に引き揚げられている姿は、遊園地にある巨大な遊具のようである。その曲線状の壁面は急斜面になっており、中央部分にはコンクリート製の貯水槽があり、貯水槽の真ん中には穴が空いている。「ウェーブ・ドラゴン」を外洋で浮遊させ、押し寄せる波が壁を越えると、貯水槽に水がたまり、その水が穴に流れ込んでタービンを回すという仕組みである。

多くの人々は、これを業界で最も有望な機械の1つだと考えている。「この20キロワットの発電装置は、2003年にニスムブレディングに設置されて以来、2万時間にわたり稼動していました」と、Wave Dragon社コペンハーゲン事務所の開発担当者である Lars Christensen は話す。けれどもこの機械は、今年の初めにねじの腐食のため使用不能になって以来、海岸に引き揚げられている。このねじはステンレス鋼製と指定されていたが、実際にはそのようにはなっていないのだ。また、Finavera社の「アクア・パイプ」が沈没してしまったのは、水漏れにより溜まった水を除去するためのポンプが故障したためであったようである。

試行錯誤の時期

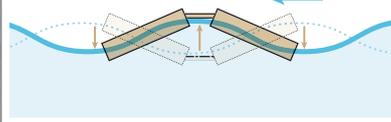
こうした小さな欠陥による失敗は、外洋での使用に耐える装置を設計することのむずかしさを浮き彫りにする。波の形や大きさはさまざまであり、ほとんどの波力発電装置は、平均的な波によって稼動するように設計されている。ところが、波力発電装置が定期的なメンテナンスを受けることなく長期の使用に耐えるためには、平均の20倍の強さの波に耐えられる必要があるのである。海が荒れたと

各種の波力発電装置

これまでに開発された波動発電装置は少なくとも6種類に分類できる。現在行われている現地試験により、最終的に実用化が可能なタイプが判明するはずである。

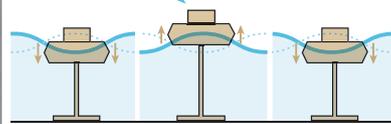
減衰型

浮動装置が波に合わせて屈曲することで、効果的に「波に乗る」。



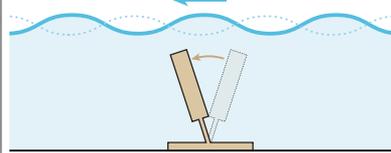
点吸収型

浮体が上下運動をするたびに、全方向から波力エネルギーを吸収する。



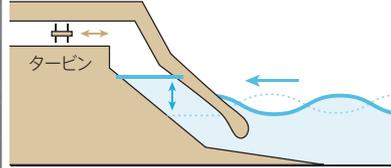
振り子式波力変換型

係留されたアームが、波のうねりに応答して振り子のように揺動する。



振動水柱型

空気室内の水位が上下すると、空気が加圧されたり減圧されたりしてタービンを回す。



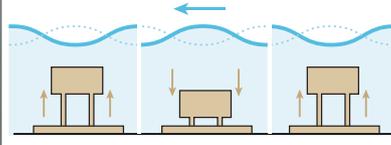
越波型

波に運ばれてきた水を貯水槽に集め、この水を下に流すことでタービンを回す。



没水圧力差型

装置が波に反応するときに内部に生じる圧力差を利用して揚水し、発電を行う。



きに備えて、新しい発電装置の多くは海底に緩く固定され、波の衝撃を吸収しやすいようになっている。「海は、これらの構造物に本当に大きなダメージを与えます」とHagermanはいう。「外洋の波力発電施設は、数年間は放置して、時化(しけ)に耐えられることを示さなければならないのです」。

1988年には、ノルウェーのKvaerner Brug社が建設した600キロワットのパイロットプラントが暴風雨にあって破壊された。この海岸設置型波力発電装置は、1980年代に建設された数少ない波力発電装置であったが、3年しか稼働することができなかった。同社は後に、波力発電から撤退した。Wave Dragon社は、今回の失敗にくじけることなく、来年は、波の荒さではデンマークをはるかに凌ぐ英国ウェールズで、これよりも大型の装置を建設することを計画している。

「技術的問題により個々の装置が沈没することはあっても、波力発電そのものが頓挫する可能性は低いでしょう」とThorpeはいう。彼はむしろ、伝統的なエネルギー源やその他の再生可能エネルギー源と競争しながら波力発電装置を開発し、電力を供給していくコストの方が大きな問題となると考えている。「技術的には成功するでしょう。問題はコストダウンです。コストダウンに成功するものもあるでしょうが、その数は多くないと思います」とThorpeは説明する。

英国のCarbon Trust社は、波力発電のコストをキロワット時あたり25～91米セント(約28～100円)と見積もっている。さらに約22億英ポンド(約5100億円)を投資すれば、キロワット時あたり12セント(約13円)までのコストダウンが可能であるとも見積もっているが、そのためには波力発電の行く末

を左右するような画期的なコストダウン技術が開発されなければならない。一方、風力発電のコストはキロワット時当たりわずか4セント(約4円)である。太陽光発電のコストは場所によって異なるが、発電施設での平均発電コストはキロワット時当たり約19セント(約21円)である。

欧州各国の政府は、エネルギー源を多様化し、波力発電のコストとその他のエネルギー源を利用した発電のコストの差を縮めることに必死に取り組んでおり、補助金や助成金の支給を開始している。ポルトガル政府は、デベロッパーが送電網に供給する電力1キロワット時あたり32.5セント(約36円)の補助金を出している。同政府は、他の再生可能エネルギー源を利用する発電にも同様の支援を行っている。英国では、波力発電装置の現地試験や商業化を推進するために、海洋再生可能エネルギー開発基金が最大

海からのエネルギー

波力発電は、海から電力を生み出す方法の1つにすぎない。海から電力を生み出す技術は、このほかに少なくとも3種類ある。

英国のコンサルタント会社AEAの報告によると、潮の干満によって生じる潮力は9100万キロワットのエネルギー源に相当すると見積もられている。

米国の潮力エネルギー源のほとんどは、人口密集地域やエネルギーインフラから遠く離れたアラスカにある。その他の場所、例えばカリフォルニア州のサンフランシスコ湾は、大洋航路と競合するため、理想的な発電場所とはいえない。カリフォルニア州パロアルトのRoger Bedardは、「ゴールドデン・ブリッジの真下で発電はできません」という。それでも、少なくとも1つの企業が人口密集地域での潮力発電を成功さ

せている。Verdant Power社は、2006年以来、米国ニューヨーク市のイーストリバーで潮汐流から1日あたり約1000キロワット時の発電をしてきた。もっとも現在は、タービンの修理中であるが(写真)。

ヨーロッパでは、より多くのプロジェクトが実施されている。フランスでは、1960年代からランス潮汐エネルギープラント(出力24万キロワット)が操業している。新しい潮力発電技術では、潮の満ち干に応じて回転する改良型のプロペラを使ってタービンを回している。これに対してランスのプラントは、満潮時に堰を開いて湾内に海水を流入させ、せき止めた海水を干潮時に湾外に放出することにより発電を行っている。この方式は、環境に悪影響を及ぼすおそれがあるなどの理由から、普及

には至らなかった。

海のエネルギーの中で最も貯蔵量が多いのは熱エネルギーであり、11億キロワットと見積もられている。熱帯海域では、表層水と水深約1000メートルから汲み出された水には約20℃の温度差がある。この温度差を利用して発電を行うおうという構想がある。米国は1970年代にこのような熱エネルギーに大規模な投資を行った。最大50キロワットの発電能力のある小型発電プラントがハワイ州の数か所に建設されたが、1990年代中期に資金が底をついてしまった。現在は、Lockheed Martin社が、米国海軍と共同で、新たなプラント建設の可能性を模索している。

最後に、淡水と海水の化学的違いは、水圧を生じてタービンを回す塩分勾配という形



K. UNGER/VERDANT POWER

のエネルギーとなる。世界の塩水資源は2億2000万キロワットと推定されているが、その発電技術は他のエネルギー源に比べて遅れている。このほどノルウェーのStatkraft社は、塩水発電について研究するための施設をトロンハイムに開設した。AEAの報告によると、塩水と淡水の間で塩分濃度を維持するための膜が最大の技術的障壁であるようである。

E.C.

5000万英ポンド（約115億円）の支援を行う予定である。米国には、現時点では波力エネルギー開発に特化した支援制度はないが、Darlene Hooley下院議員（民主党、オレゴン州選出）は、5年間にわたって年間5000万米ドル（約55億円）の資金援助を行うための法案を議会に提出されている。

当然、多くのデベロッパーは、波力発電への政府の支援は不十分であるという不満を抱いている。英国のコンサルタント会社AEAの報告によれば、国際エネルギー機関の加盟国（波力発電に投資する国のほとんどがこれに含まれている）の1974～2004年の再生可能エネルギー予算のうち、海洋エネルギー開発のために支出された金額はわずか8億米ドル（約880億円、インフレ調整後）であり、全体の0.3パーセントにすぎないという。

そのため、デベロッパーは個人投資家からも資金提供を受けている。例えば、「ウェーブスター」の最近の研究資金の約4分の3は、デンマークの巨大企業Danfoss社の最高経営責任者などの個人投資家から出たものである。また、新興の波力エネルギー企業のいくつかは株式を公開している。けれどもThorpeは、早いうちに利益を出せなければ投資家は逃げてしまうだろうと考えている。これだけ多くの企業が投資家の関心を引こうと競い合う一方で、客観的な比較がほとんどできないという現状では、投資家が成功の見込みのないプロジェクトに資金をつぎ込んでしまう危険もある。「多くの人が、波力発電の経済性を十分に検討することなく、これに投資しているのです」とThorpeは話す。

昔ながらの送電網を保有する電力会社もまた、波力エネルギー支援者の希望を打ち砕く可能性がある。電力会社は、集中的に配置された大規模な発電所で発生させた電力を供給する体制をとっているため、その送電網の多くは、再生可能エネルギー源を利用する分散的な発電方式に対応することができない。「再生可能エネルギーの開発において電力会社が果たしてきた役割は、『我々の目の黒い

ちはそんなことはさせない』とって通せんぼをすることでした。彼らは、波力発電装置を送電網に組み込むことに猛反対してきたのです」とThorpeはいう。英国などでは、波力発電に適した高い波がある遠隔地の沿岸地域には、電力インフラが十分に整備されていない。ポルトガルの方が条件はよく、沿岸にも送電網が張り巡らされているため、理論的には、波力エネルギーのデベロッパーが電線をつなげる環境にある。

時代の波に乗って

ほとんどの環境保護論者は、波力エネルギーは化石燃料に代わる環境にやさしい貴重なエネルギー源の1つであると捉えているが、海の利用をめぐる競合関係にあるグループからは波力エネルギー開発への反対運動が起きている。米国オレゴン州では当初、数十年にわたり漁業を営んできた海域から締め出されることを警戒した地元の漁民たちが、Finavera社やその他のデベロッパーが提案するテストプロジェクトに反対する姿勢を示していた。カニ漁師を引退してオレゴン州ニューポートの郡政委員に転身したTerry Thompsonは、「再生可能エネルギーは再生可能な食糧に優先するという法はありません」という。なにより、漁業は地元の1億ドル（約110億円）産業である。Thompsonの橋渡しにより、Finavera社と地元の漁業関係者の話し合いが実現し、同社の「アクア・ブイ」は漁業水域を避けて設置されることになった。それでもThompsonは、波力発電企業が試験操業を終えて本格的な操業を開始する際にどのような事態になるかと心配している。

サーファーたちも、波乗りをするための波が奪われることに懸念を表明している。オレゴン沖ではOceanlinx社が波力発電施設の建設を計画していたが、サーファーの権利を擁護することを目的とする非営利団体Surfrider Foundationが米国政府に申立てを行った。英国コーンウォール州でも、沖合での建設が検討されている波力発電施設について、サーファーが申立てを行った。しかし、漁民との関係と



上下に動くブイ：米国オレゴン沖での波力発電に使用されたFinavera社の「アクア・ブイ」。

様、適切な計画を立案すれば、サーファーとの関係においても波風を立てることなく開発を進められるはずである。ハワイのような人気スポットでは、そうした配慮が特に重要になる。「私なら、オアフ島のノースショア（北海岸一帯）には建設しません。それは自殺行為ですよ」とChristensenは冗談めかしていった。

話をデンマークのニスブレドニングに戻そう。ここではウインドサーファーもカモメもまったく影響を受けていない。エンジニアのSteenstrupにとっての最も差し迫った関心事は資金調達である。商業化に打って出るためには、Steenstrupの希望を託した現在のプラットフォームの5倍の規模の「ウェーブスター」を建設する必要がある。「試作機第1号には1100万ドル（約12億円）が必要ですよ」と彼は話す。

ニスブレドニング、オレゴン、ポルトガルで新しく始まった試験の結果の如何にかかわらず、波は海岸に打ち寄せ続けるだろう。波力エネルギー開発の存続にかかわる技術の成否が、まもなく明らかになるはずである。 ■

Ewen Callaway は、Nature の米国ワシントンDC事務所所属するインターン。



Innate ability

自然免疫研究をリードする 静かなる日本人

Nature Vol.450 (475-477) / 22 November 2007

ノックアウトマウスの「生産工場」を擁する^{あきら}審良静男は、鋭い洞察力と静かな物腰で、世界の免疫学研究をリードしている。日本における最高レベルの研究センターを構築中であり、今、世界で最も論文が引用されている研究者を、David Cyranoskiが訪ねた。

2000年春、竹内理と辺見弘明は、黄色い液体で満たされた小さなプラスチックウェルの列を延々とスキャンしていた。そしてついに、無色のものを発見した。ウェルの中の液体は、ある特定の受容体を欠失したマウスの免疫細胞に、細菌の細胞壁やDNAのかけらなどの感染性病原因子を与えて培養し、採取したものである。黄色であれば、マウスの細胞が感染性病原因子と反応したことを、無色ならば反応しなかったことを意味している。つまり、無色の液体は、欠失している受容体が感染性病原因子に対する免疫応答において果たす役割を示唆している。2人は、免疫学研究に大変革をもたらしたタンパク質の1つである、Toll様受容体9 (Toll-like receptor; TLR-9) の機能を発見したのである。「世界中の誰も知らなかった真実を突き止めたのだとわかりました」と竹内は振り返る。「これはすごい論文になると思いました」。

トムソンサイエンティフィック（米ペンシルベニア州フィラデルフィア）のWeb of Scienceによれば、2000年に発表されたこの研究の論文¹は、その後約2000報の論文に引用されることになった。この発見で興奮していた竹内だったが、指導教官である大阪大学の審良静男の言葉で冷静になった。「先生はすぐ有頂天になるような人ではありません」と竹内は話す。「ただ一言、『それで?』とだけ、おっしゃったのです」。

K. MAYAMA

間違いを犯すな — 審良は研究に対して熱い人である。しかし、「結果に喜ぶ前に、慎重でなければいけません。最も恐ろしいのは誤った論文です」と審良は語る。

審良は寡黙でありながら、多くの論文を発表している。トムソンサイエンティフィックの被引用数に基づくランキングでは、2年連続で「世界一注目されている研究者」になった。審良が得たこの栄誉は、自然免疫系に関して多くの成果を生み出した研究に対するものであり、その研究によりノックアウトマウスが数多く作製され、TLRの役割に関する推論が進められるようになった。この研究領域の進歩には、多くの研究者が携わっているが、審良の貢献度の大きさは卓越している。システム生物学研究所（米ワシントン州シアトル）の免疫学者である Alan Aderem は、「この自然免疫の領域は審良のものです」と話す。

審良の保守的な性格と物静かなふるまいは、進歩と競争の激しい領域で先頭に立つ研究者のイメージとはかけ離れてみえる。彼の研究室のメンバーは20～25人程度である。メンバーによれば、審良からプレッシャーを受けたりトップダウンで実験が進められたりすることはないという。遅くまで仕事をすることもなく、きっかり夕方5時に家路につく。発表前でも自分のマウスや情報を惜しみなく外部に提供する。

では、この穏やかな人物がトップランナーであり続けられるのはなぜだろう。同僚たちは、研究熱心な人材を選ぶ能力と、「ノックアウトマウス工場」実現に必要な研究資金の獲得能力にすぐれているためと考えている。もちろんいうまでもなく、審良の直観力と洞察力も認めている。審良研究室で現在准教授を務める竹内は、「先生は石油を掘ろうとするときに、どこを掘ればよいかわかる人なのです」と話す。

日本政府も審良の研究に期待している。2007年9月、審良は大阪大学に新しい免疫学研究センターを設立するプロジェクトで、今後10年間の研究助成金

を獲得した。これは文部科学省が支援する「世界トップレベル国際研究拠点形成促進プログラム（世界トップレベル研究拠点プログラム）」に選ばれた5件のプロジェクトの1つであり、同センターは国際的リーダーシップの役目を担うことが期待されている²。このプロジェクトは大胆なものであるが、審良がそれに値することは実績が示している。

臨床から基礎へ

審良は医師として2年間働いた後、1980年、大阪大学の高名な免疫学者である岸本忠三の研究室に入った。T細胞とB細胞の相互作用を研究するつもりだった。だが研究室に入ったその当日、岸本はこの28歳の研究者をほんじよたすく本庶佑の研究室に託した。本庶の研究室は、岸本の臨床研究棟と連絡橋でつながった隣接の基礎研究棟にあった。「（岸本先生は）私には分子生物学を学ぶ必要があるとおっしゃったのです」と審良は語る。「カルチャーショックでした。プラスミドやキロ塩基対が何であるのかも知らなかったのです」。しかし審良は岸本の命を受け入れた。2年間毎日、岸本研究室に通い、名札を「出席」に裏返してから橋の向こう側へ渡った。

分子生物学、特に遺伝学の基礎が審良の役に立った、と岸本はいう。「コンピューターのデータベースを使わずに、審良は机に向かって重要な配列を発見しました。私にはただの文字の集まりにしか見えませんでしたかね」。審良はこの仕事のコツを心得ていたようである。「超能力をもつ子供の映画を見ているようでした」と岸本は振り返る。審良はカリフォルニア大学パークレー校での2年間を除いて1996年まで岸本研究室で働き、2年ごとに主要論文に名前を載せた。この成功が、時として退屈な研究にメリハリをつけていた。「憂鬱になることはまったくありませんでした」と審良は語る。しかし同僚は、審良の一匹狼的な性格にはっきり気づいていた。岸本は、かつての隣の研究室の教授 — 人好きのする多

弁な谷口ただつぐ維紹 — から「審良は私が嫌いなのか。挨拶もしない」と尋ねられた日を思い出して笑う。

むしろ谷口は、審良の研究に目を見張っていた。免疫シグナル伝達タンパク質STAT3に関する1994年の研究³のために、審良は6か月間でマウスを6000匹も使った。プロジェクト完了時にはマウスの納入業者から「もう日本にはマウスの在庫がありません」といわれた、と岸本は語る。STATファミリーのタンパク質は、インターフェロンやインターロイキン、上皮成長因子（EGF）などの細胞外免疫調節因子からのシグナルを細胞核に伝え、特定の応答遺伝子を作動させる。STAT3は各シグナルが特定の応答を生ずる機序を理解するうえで重要であり、急速に研究が進展していた。審良の論文が発表されたのは、ロックフェラー大学（米ニューヨーク州）のJames Darnell研究室が出した論文⁴の1週間後だった。「岸本先生が会議でその研究のことを聞いてこられるまでは、競争があることすら知りませんでした」と審良は話す。多くの論文を発表して業績を積んだ審良は独立し、1996年より兵庫医科大学で研究活動に従事した後、1999年に大阪大学に戻った。自然免疫の研究がまさに始まるうとしているときだった。

数十年来、研究者の注目が集まっていたのは獲得免疫、つまり侵入者をねらって破壊するためにDNAを再配列させるT細胞とB細胞の領域であった。脊椎動物で感染を記憶して免疫系が機能する能力は、獲得免疫によるものである。一方、



J. NICHOLS / WELLCOME IMAGES

自然免疫は、防御の第一線で機能する。かつて自然免疫は、侵入した微生物を無差別に飲み込んで消化し、全身性で時として強力な炎症反応を生じ、侵入してきた細菌やウイルスの情報を次元の高い獲得免疫応答に伝達するという大雑把な、進化の遺物とみなされていた。

Tollゲート

しかし、自然免疫は見かけよりもはるかにすぐれており、その能力はTLRの機能がキーポイントになっている。TLR (Toll-like receptor) の名前の由来となったTollは、もともとショウジョウバエの胚発生に関与する遺伝子として同定された。分子細胞生物学研究所（仏ストラスブール）のJules Hoffmannが1996年に行った実験で、Toll遺伝子にはショウジョウバエを真菌感染から守る役割もあることがわかり⁵、1997年にはヒトのホモログであるTLRが免疫機能をもつことが見

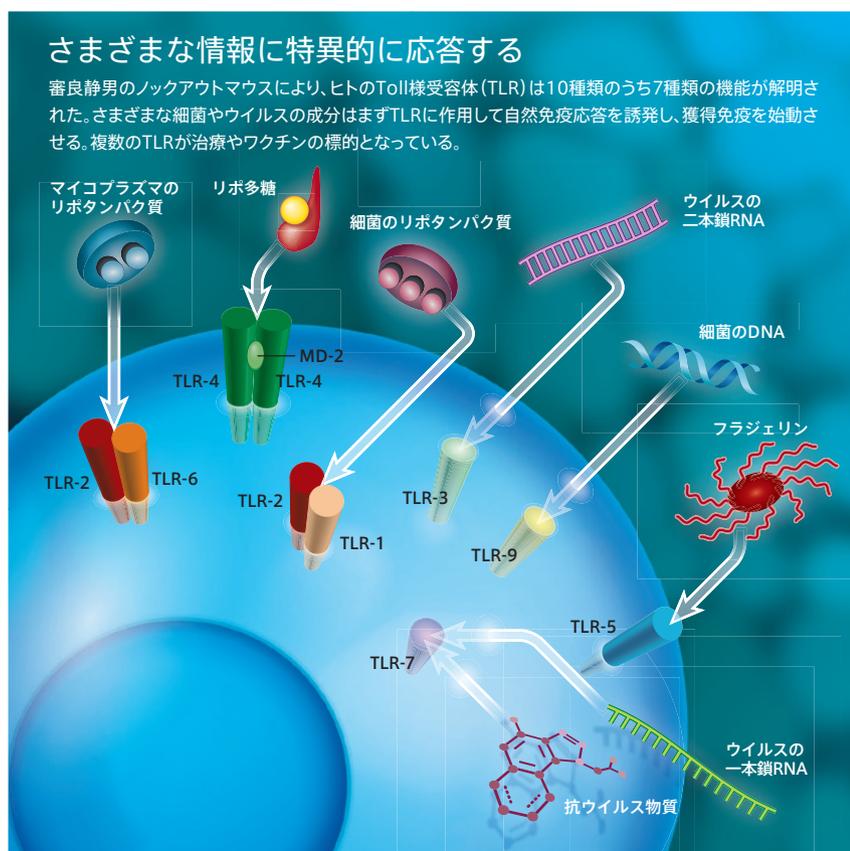
いだされた⁶。さらに1998年には、スクリプス研究所（米カリフォルニア州ラホヤ）の遺伝学者であるBruce Beutlerが、ある系統のマウスがグラム陰性細菌に感染したときに、しばしば致命的な毒性ショック反応を生じる原因がTlr-4遺伝子の変異であることを、遺伝子マッピング技術を利用して突き止めた⁷。このタンパク質が細菌の存在を認識して応答することがなければ、マウスが自身の命を絶つほどの強力な免疫反応を示すことはなかった。Beutlerの論文が発表されたとき、偶然にも審良は、Tlr-4をノックアウトするとBeutlerのものに似た表現型のマウスが得られるという論文を作成していた⁸。

遺伝子のデータから、マウスにはTLRをコードする遺伝子が12個あり、そのうち9個はヒトのTLRに極めて近いものであることがわかった。この領域の研究のノウハウをもち、別のノックアウトマウス

で他に一步先んじていた審良は、すぐさまTLRのうち7個について機能の究明に取りかかり、どのような侵入者を認識するのか、一部についてはどのように作用を發揮するのかを明らかにした。TLRの能力は予想外のもので、さまざまな抗原成分に特異的なパターンを認識していた。TLR-4は、リポ多糖（グラム陰性細菌の表面に存在する脂質と炭水化物残基からなる巨大な物質）で活性化されるが、ほかのTLRは、リポタンパク質、特異的なDNAパターン、二本鎖RNA、または細菌のフラジェリン（鞭毛を構成する粒状タンパク質）に、それぞれ応答する（図を参照）。「TLRはみな同じような役割をもっていると考えていたのですが、実際にはすべて異なっていたのです」と審良は話す。なかでも、竹内、辺見らと行ったTLR-9の機能の発見が自身の最も重要な研究であると考えている。A、T、C、GからなるDNAの長い鎖には、CとGが多い部分がある。哺乳類のゲノムでは通常この部分がメチル化されているが、細菌ではメチル化されていない。TLR-9は非メチル化DNAを認識する。一見原始的な自然免疫応答に、このように微妙な特異性が存在することは予想されていなかった。「誰も信じませんでした」と審良は話す。この成果により、審良の名は約600報の論文に掲載されることになった。しかしその多く、本人いわく、だいたい半分は、主にマウス提供者として協力した共同研究であった。審良が最も注目される研究者となった理由の1つは、このいきさつによるものであることは確かである。しかし、共同研究者は喜んで審良の名を加えている。Aderemによれば、著者にマウスを供与した研究者の名は、そのマウスを用いた研究に関する1～2報の論文に掲載されるのが慣例であるという。「審良の名前は、ずっと掲載され続けているのです」とAderemは語る。

成果の共有

審良が引用され続けていることには、理由があると考えられる。Aderemは、リ



ポカリン2が細菌感染に対する免疫応答の主要な因子であることを明らかにしたが⁹、実験に際し審良にリポカリン2欠損マウスの供与をお願いしたとき、その気前のよさに驚いた。「ただで提供してくれたのです」。自分たちの研究室で利用し尽くしていない研究材料を他者に供与するのは極めてまれなことであると、Aderemは付け加える。「審良のマウスがなければ、この領域の研究は進んでいなかったろう」。

審良の「工場」にはノックアウトマウスが100～200種類あると、竹内は推測する。大学院生が1人あたり5～10種類を作製しているのであるが、これは驚くべき数字である。2007年のノーベル医学生理学賞授賞の対象にもなったノックアウトマウス作製では、試行錯誤を繰り返すことが必要であり、1系統の完成に1年半かかることもある。そのうえ、作製したノックアウトマウスが明確な表現型を示さない場合もある。「表現型が示されなければ、その遺伝子の機能の解明には役立ちません」と大学院在籍4年目のHimanshu Kumarはいう。それでおもしろいのかと問うと、「いいえ全然。でもよい結果が出るとゾクゾクしますよ」と返ってきた。

研究室のメンバーは審良のアドバイスに感謝しているが、審良がメンバーをけしかけることはない。「その必要がないのです。この研究領域自体、競争が激しいのです」と語るCoban Cevayirは、博士号をもつトルコ人学生で、審良のもとで4年間研究を行っている。

審良は現在TLRの研究を離れ、自然免疫のシグナル伝達メカニズムを広く取り扱っている。着眼点を広げたことで、2007年8月にBeutlerおよびHoffmannと開始した共同研究の舞台が整った。この研究チームは、ウイルス感染に対する宿主の防御に関する研究で、米国国立衛生研究所から5年間の助成金を受けている。「審良の研究は、免疫学にルネッサンスをもたらしているのです」とBeutlerはいう。



同僚の熊谷勇太郎（中央）、竹内理（奥）と談笑する審良静男（左）。

また、文部科学省からは「世界トップレベル研究拠点プログラム」の助成金を受けている²。この助成金は研究所の新設に数十億円を拠出するもので、まず7億円をかけて審良研究室の近くに10階建ての免疫フロンティア研究センターを建設する。同センターの目標は遠大である。「さまざまな画像化技術を用いて生体内の免疫細胞を可視化することにより、動的な免疫系の全貌を明らかにすることをめざします」。審良によれば、さまざまな分子がどのように免疫応答に機能するのかはこれまでの研究で明らかにされたが、細菌やウイルスが実際に細胞に侵入したときの応答の重要性に関しては研究が進んでいないという。画像化技術によって「時空間的な関係」が明らかにされると考えられ、「さまざまな細胞がどの程度免疫応答に寄与しているのかわかります」と審良は話す。「免疫系の全貌を明らかにしたいのです」。

同センターの主任研究員には、岸本を含む大阪大学の免疫学者9名、制御性T細胞の研究を推進してきた京都大学の坂口志文など国内の研究者3名、さらに

マックスプランク感染生物学研究所（独ベルリン）のFritz Melchersの就任が予定されている。1分子イメージングの先駆者である大阪大学の柳田敏雄¹⁰と、米国の6共同研究機関を含む大きな画像化部門も創設される。

この国際的で有能なプロジェクトをまとめることは、物静かな免疫学界の第一人者、審良の腕の見せどころである。ここ2年ほどの名声とメディアの注目で、審良はずいぶんオープンで外向的になった、と岸本はみている。しかしこれからも、やはりコメントは最小限にとどまり、多くを語るのはその研究成果であろう。 ■

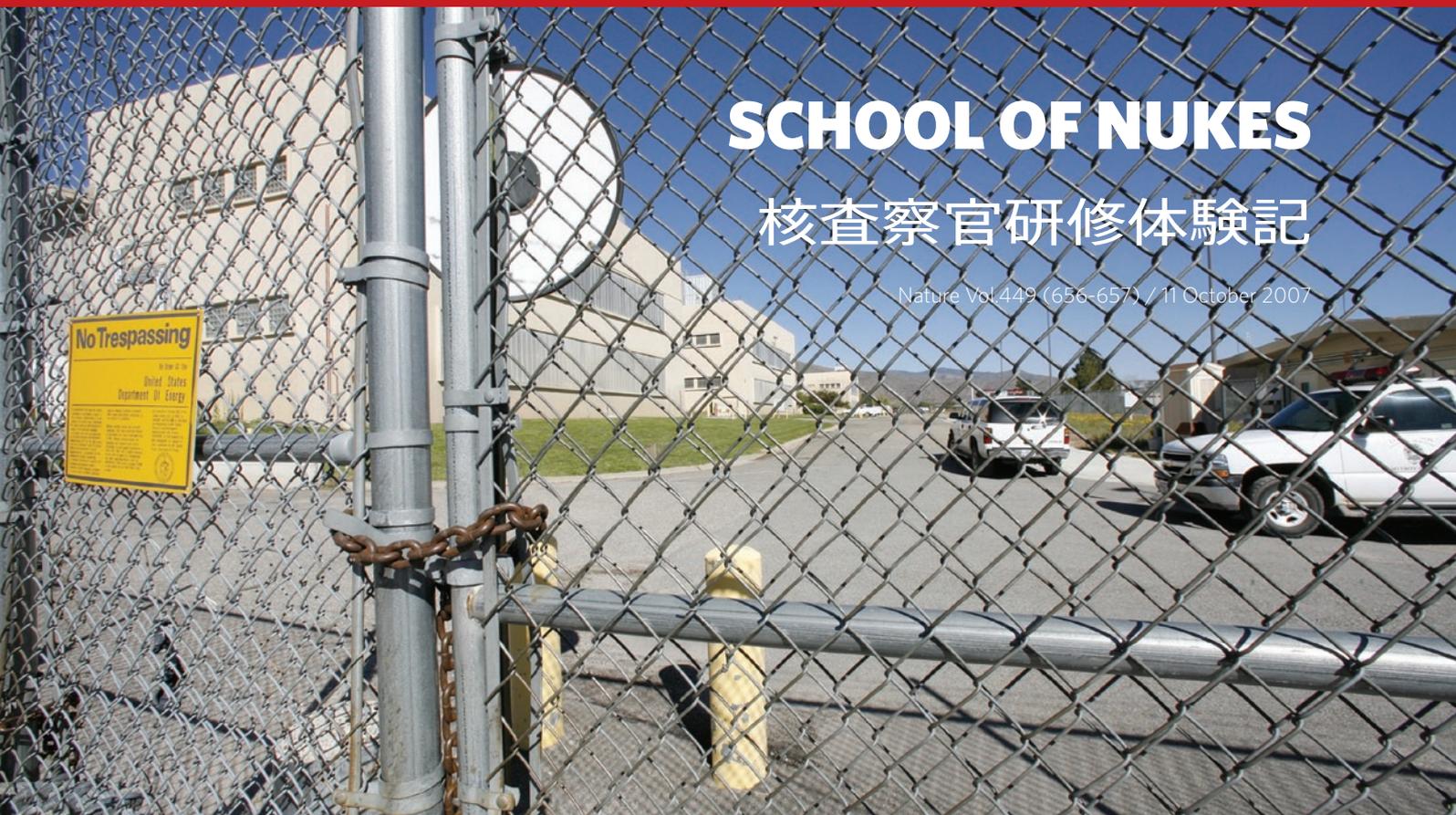
David Cyranoski は *Nature* のアジア・パシフィック特派員。

1. Hemmi, H. *et al. Nature* **408**, 740-745 (2000).
2. *Nature* **447**, 362-363 (2007).
3. Akira, S. *et al. Cell* **77**, 63-71 (1994).
4. Zhong, Z., Wen, Z. & Darnell, J. E. Jr *Science* **264**, 95-98 (1994).
5. Lemaître, B., Nicolas, E., Michaut, L., Reichhart, J. M. & Hoffmann, J. A. *Cell* **86**, 973-983 (1996).
6. Medzhitov, R., Preston-Hurlburt, P. & Janeway, C. A. *Nature* **388**, 394-397 (1997).
7. Poltorak, A. *et al. Science* **282**, 2085-2088 (1998).
8. Hoshino, K. *et al. J. Immunol.* **162**, 3749-3752 (1999).
9. Flo, T. H. *et al. Nature* **432**, 917-921 (2004).
10. *Nature* **408**, 764-766 (2000).

SCHOOL OF NUKES

核査察官研修体験記

Nature Vol.449 (656-657) / 11 October 2007



国際原子力機関（IAEA）の核査察官の役割は、「非核兵器国」（米ロ英仏中以外の国）に赴き、核物質が平和目的のみに利用されているかどうかを確認することにある。すべてが申告どおりというわけではないとき、査察官はどのようにやってそれを見破るのだろうか。米国のロスアラモス国立研究所で行われた核査察官の研修に Geoff Brumfiel 記者が参加した。

LANL

午前8時半。ニューメキシコ州の日光が首筋にじりじりと照りつけてくる。私たちは、重警備刑務所の入り口のようなところの外に集まっている。守衛所とフェンスを通り過ぎると、窓のない黄褐色のビルがある。ビルは、街の1ブロックほどの大きさである。その側面の通気口がエラのような形をしているので、ビル全体は、超自然的な力が働いて高地の砂漠にうち上げられてしまったレビヤタン（旧約聖書に出てくる巨大な海獣）のように見える。

これが、ロスアラモス国立研究所の化学・冶金学研究棟である。米国で最も古い核兵器研究所であり、広さは5万1000平方メートルで、今日もなお兵器用核物質研究の中心地として機能している。

けれども今後2週間は、このビルは別の目的に使用されることになる。国際原子力機関（IAEA）に所属する新任核査察官のための訓練拠点になるのである。

IAEAは、世界の非軍事核施設が平和目的に利用されていることを確認するための国連機関である。その任務の要となる部分を担っているのが、高度な訓練を受けた約250人の査察官である。門のところで待っている17人の査察官は、核兵器拡散を阻止するのに必要な技能に磨きをかけるために、IAEAの訓練プログラムの一環としてこの地にやってきた。現場に赴く査察官は「IAEAの目となり耳となる」と、ワシントンDCの民間シンクタンクである科学国際安全保障研究所（ISIS）のDavid Albright所長は語る。「彼らは極めて有能だ」。

私も昔、核査察官になってみたいと思ったことがあった。外交旅券をもって世界を旅し、秘密施設を不意打ちにして、その国の独裁者と知的バトルを繰り広げる自分を空想していたのだ。だから今回、IAEAが8月の訓練コースに最初の

数日間だけ参加させてくれるという話を聞いて、私はすぐに飛びついた。

そこで生徒として過ごした2日間は、私のイアン・フレミング（007シリーズの作者）ばりの空想とは裏腹に、現実の仕事は退屈で、はるかに大変であることを教えてくれた。オーストリアのウィーンにあるIAEA本部で訓練プログラムの責任者を務めるJean Maurice Andre Creteは「査察官は科学者であり、刑事であり、外交官でもある」という。査察官はまた、原子炉の運転状況、廃棄物プールの在庫、研究材料の備蓄などに関する詳細な記録をチェックする会計士でもある。そして、現地の発電所長の信頼を勝ち取るだけの人間的な魅力も備えていなければならない。つまり、あらゆる仕事に通じていなければならないのだ。

このため、査察官は3か月間の厳しい入門研修を受けた後も、実務をこなさな

がら、国際法、心理学、衛星写真分析、環境サンプリングなど、多岐にわたる教育を受け続けることになる。とはいえ、なによりも重要なのは、目の前にある容器に管理者がいうとおりの放射性物質が入っていることを確認する技術である。査察官らがロスアラモスで訓練を受けるのはそのためである。彼らは、冶金学のベヘモット（旧約聖書に出てくる巨獣）の腹の中で、核兵器レベルまで濃縮されたウランやプルトニウムについて学ぶのである。

11か国から来た17人

世界で最も厳重に警備された科学研究所の1つの前にたむろしているのだければ、私たちはなんら人目を引くような集団ではなかった。その出身地はアルゼンチンからインドネシアまで、世界11か国にわたっていた。男性がほとんどで女性は2人。大部分が中年で、ポロシャツとカーキ色のズボンに身を包み、テニスシューズをはいている。

査察官の多くは原子力エンジニアだが、科学者も数人いる。若い査察官の1人はGiuseppeという名前のイタリア人で、昨年IAEAに入るまでは、ミラノの近くの国立研究所で放射化学者として働いていた。Valeriyという男性は、素粒子物理学の博士号をもっていたが、最初はソビエト連邦、のちにはロシア連邦で、数十年にわたってウラン濃縮関連の研究に従事していたという。



核査察官の仕事は、ジェームズ・ボンドの世界とはかけ離れている。

警備は厳重で、私たちは常に付き添い人から見える範囲内にいなければならなかった。私たちは前庭を横切った。前庭の芝生はきれいに整えられていたが、レーザーワイヤーと威圧的な壁の間にあっては、違和感を与えるばかりだった。ピクニックテーブルの上にアイスボックスが1つ置かれていた。教官の1人のPeter Santiは「フェンスの中で働いていると、いいこともある。私たちの昼食を盗むものはだれもない」と冗談をいった。

私たちは地下の実験室へと曲がった階段を降りていった。廊下には、ビルが強襲されたときに重装備の警備隊を保護するための爆発防護壁が並んでいる。しかし、威圧的な外観とは対照的に、査察官たちがこれから2週間を過ごす内部の部屋は、厳重に警備された核施設というよりは大学の物理実験室に近かった。おもに使われる部屋にはきれいに整頓された実験台が8つあり、それぞれに器具と作業予定票が準備されていた。教官は気さくで、コーヒーを飲みながら形式ばらない話し方をした。危険なものが扱われていることをほめめかすものは2つだけだった。高純度のウラン235とプルトニウム239の容器が入っている壁面埋め込み式貯蔵庫の列と、臨界量に気をつけるよう簡潔な言葉で使用者によびかける張り紙である。臨界量とは、連鎖反応を引き起こすことなく、一緒にすることができる核物質の最大量のことである。

間接的な比較

ロスアラモスでの訓練の責任者であるDavid Brackenは、前置きの後、これからの2週間の予定を簡単に説明した。査察官は、この業界でいうところの「非破壊分析」について学習する。これは、試料を直接採取することなく一連の測定を行い、物質の量と組成の両方を決めることである。適切に分析を実施すれば、ある国が保有する核物質の量を、短時間のうちに低コストで確かめることができる。「非破壊分析は保障措置の基礎となるものだ」とBrackenは私たちに説明した。

非破壊分析は、基本的にはガンマ線と

中性子の2種類の放射線を測定することにより行われる。ガンマ線は核分裂の際に放出される高エネルギーの光子であり、そのエネルギースペクトルは物質の元素構成の「指紋」となる。中性子からは物質の量がわかる。

私は10年近く物理学の勉強から遠ざかっていたが、この日の午前中に行われた中性子の測定に関する講義は容易に理解することができた。実際、それはかなり単純な技術である。ドーナツ型のポリエチレン発泡体の中心に試料を置き、試料から飛び出す中性子をポリエチレンで減速させた後、発泡体の周囲に置いた18個ほどの円筒形の検出器に通す。この中性子が検出器の中のヘリウム3原子に衝突すると、荷電粒子のカスケードが生じ、各検出器の中心にある高電圧線によって検出されるという仕組みである。

これは中性子を計数する方法としてはローテクであり、安価で、耐久性もある。熟練は必要なく、複雑すぎることもない。信頼性があり、もち運び容易である。「この技術はそれほど新しくもないし、むずかしくもない。むずかしいのは、これを現実の世界で実施する方法を理解することだ」とSantiは話した。

Santiがいったことの意味が本当にわかってきたのは、その日の午後のことだった。実際に測定しようとする、多数の因子が影響してくるのである。線源から検出器までの距離、発泡体の厚さ、試料の形状、現場での較正の質などのすべてが、物質の量や種類について誤解を生じさせる可能性がある。

ガンマ線の測定もかなり単純だ。私たちは、大学の学部生のときに実験で使ったものとよく似た検出器を与えられた。しかし、現実の世界で測定しようすると、物質のスペクトルの重要な特徴が遮へいにより見えなくなることがあるし、セシウムやコバルトなどのありふれた不純物に目をくらまされて、最も簡単な検出さえうまくできないこともある。「査察官をロスアラモスに集めるのはそのためだ」とBrackenは私に説明した。冶金学研究センターのような施設にない

かぎり、核兵器レベルの大量の核物質を直接扱う機会を得られないのである。「私たちがここで教えているのは単なる手順ではない。物理学そのもの、つまり、ものの考え方のなだ」とBrackenは話す。

私はGiuseppeと昼食をとりながら、こうした測定を現場で行うことはさらに大変であることを知った。ほとんどの場合、誰も助けてくれないからである。テレビで見る査察官はチームで行動しているが、それは、イランや北朝鮮のように対決的な姿勢をみせている国に行くときだけだ。ドイツやメキシコなどへは査察官は1人で訪れる。

査察の現場

原子力発電所では、査察官は特にすばやく仕事をしなければならない。通常、商業用原子炉は燃料を補給する停止期間にチェックを行うが、その間の損失を抑えるため、会社はできるだけ早くこれを済ませようと

するからである。「査察官に与えられた時間はわずか数分しかない。背後には10人も人間が立っていて、自分には理解できない言葉で話している」とGiuseppeは現場のようすを教えてくれた。

施設の職員が査察官の接近を阻もうとすることも。何かを隠すためであるとは限らず、さっさと査察を終えてほしいと思っているだけのこともある。「査察官が十分に心の準備をしていないと、施設の職員に妨害されて仕事ができないこともある。査察官は自分の権限に自信をもっていなければならない」と彼は話す。

Creteは「核査察官の権限はこの十年間で大きく変わった」と話す。以前は、査察官は質問をしたり、申告されていない備蓄を探索したりする権限をもっていなかった。しかし、IAEAの活動の根拠となる核拡散防止条約（NPT）が1997年に改正されたことで、状況は大きく変わった。「現在、私たちは質問をすることが認

められている」とCreteは話す。査察官は隠れた備蓄を調べる権限も持っている。

2日間の研修の後、私はロスアラモス国立研究所があるメサ（米国南西部などにみられる台地地形）から降りた。私の「クラスメートたち」が学んでいる世界の魅力を私は理解した。37歳のGiuseppeは「査察官としての毎日は変化に富んでいる」という。1年間の3か月間は旅をしていて、不意の出張のためにいつも鞆に必要なものを詰めておく生活だが、彼は自身の転職に満足している。「何が起こるか予測できない毎日だ」と彼は話す。それに対して、私はおっちょこちょいだし、細かなことに気がつくタイプの人間でもない。つまり、査察官に向けた人間ではないのである。自分自身のためにも核の拡散を防ぐためにも、私は空想をやめて自分の仕事に戻ることにした。 ■

Geoff Brumfiel はロンドンから *Nature* に寄稿。

BUSINESS NEWS

Copycat consolidation

ジェネリック医薬品企業の合併戦略

Nature Vol. 449 (393) / 27 September 2007

大型薬の特許が次々と失効する中で、ジェネリック医薬品メーカーは状況の変化に直面している。Meredith Wadman が、その生き残り戦略に切り込む。

今から1年前、ペンシルベニア州に本社のあるMylan Laboratories社は、世界第9位のジェネリック医薬品メーカーで、顧客層も事業活動も米国内に限られた純粋な米国企業だった。

しかし現在、Mylan社は、2件の大型企業買収によって、世界の3大ジェネリック医薬品企業の一角を占めるまでに躍進した。今年の1月、同社は、膨大な種類のジェネリック医薬品の有効成分を製造するMatrix Laboratories社（インド）の発行済株式の過半数を取得し、5月には、世界90か国以上でジェネリック医薬品を販売するMerck KGaA社（ドイツ）のジェネリック医薬品部門を67億ドル（約7700億円）という高額で買収することに合意した。Mylan社は、買収が完了する10月1日に、売上高でTeva Pharmaceutical Industries社（イスラエル）、大手医薬品メーカーNovartis社（スイス）傘下のジェネリック医薬品会社Sandoz社に次ぐ、世界第3位のジェネリック医薬品メーカーとなる。

Mylan社は、この過程を経て「現時点で最もグローバルな事業基盤を構築するようになると予想される。ジェネリック医薬品業界が、このような構造を指向しているのだ」。こう説明するのは、UBS Investment Bank社（英国 ロンドン）の国際医療グループ専務理事のTommy Erdeiである。

ジェネリック医薬品メーカーは、特許切れ医薬品と同一成分、同一効能の医薬品を製造し、低価格で販売しているが、この業界では過去2年間で7件もの大型合併があり、大きな業界再編の波が押し寄せている。その熾烈な闘いの場に上がるのは、ひと握りの新興の「巨人ゴリアテ」すなわち巨大企業と、多数の「少年ダビデ」すなわち小規模企業、そして両者の間に挟まれた無数の中規模企業である。

進む国際化

Teva社は、昨年のIvax社（米国フロリダ州）買収によって、押しも押されぬ世界第1位の企業となり、今では米国のジェネリック医薬品業界の20パーセントを独占している。昨年10月、Barr Pharmaceuticals社（米国ニューヨーク州）は、ジェネリック医薬品メーカーPliva社（クロアチア、ザグレブ）を25億ドル（約2900億円）で買収し、30か国での販売ルートと同社の低コスト製造施設（クロアチアとポーランド）を一瞬にして手に入れた。一方、10年前は無名だったActavis社（アイスランド）は、7年間で25社以上を買収し、その過程でアメーバのように40か国に進出し、昨年、世界第6位のジェネリック医薬品企業となった。

企業合併の波は、Barr社やMylan社による買収以前から米国に明白な影響を及ぼしていた。IMS Health社（米国コネチカット州）の産業情報によれば、ジェネリック医薬品企業トップ4社の市場シェアの合計は、10年前には35パーセントだったものが、昨年12月には56パーセントに達した。市場規模自体も10年前より大きくなっている。特許

切れ医薬品が増えていることで、米国での処方箋に占めるジェネリック医薬品の割合は、2000年の47パーセントから今では63パーセントに拡大している。

このような企業合併の原動力となっているのは、すさまじい競争が繰り広げられるようになったジェネリック医薬品業界で国際的なプレゼンスを得たいという大手企業の欲求である。米国では、医薬品の特許が切れると、そのジェネリック版を15～20社が一斉に発売することが珍しくない。こういった会社の多くは中小企業で、Teva社など巨大企業に支配されている市場の切れ端をかすめ取ろうとしている。ところが、これらの中小企業は、小さいがゆえに、投資を回収するために薄利多売で勝負しようとするものが多く、大手企業だけの市場参入では起こり得ないような下げ幅と速さで価格の下落を招いてしまうのだ。

「このような価格の下落を補って成長を維持するには、2～3か国で〔新製品を〕発売するだけでは不十分である。世界のすべての基幹市場で発売しなければならないことは明らかだ」。Actavis社の最高経営責任者であるRobert Wessmanは、米国ワシントンDCで2007年9月に開かれたジェネリック医薬品協会の会議で、このように語った。そして、イタリアやスペイン、フランスなど一部の国々では基幹市場への浸透が米国ほどではないため、企業の巨大化と国際化の動きの中では企業合併が当然とるべき戦略の1つとなる。

しかしWessmanなど一部の関係者は、この過熱した合併合戦のために企業は過大な買収コストを背負わされていると主張する。そしてWessmanは、Mylan社のMerck社買収とBarr社のPliva社買収での買収額が高すぎたことを指摘している。ただしWessmanが、Pliva社買収でBarr社に競り負けたのも事実である。Barr社の最高経営責任者であるBruce Downeyは、まったく後悔していないといい、「得た資産を考えれば、この買収には大きな価値があった。またやりたいと思っている」と語った。



世界第3位のジェネリック医薬品企業になろうとしている米国のMylan Laboratories社。

加速する業界再編

もう1つ触れておかなければならないのは、一部のインド企業が、逆に米国のジェネリック医薬品メーカーを買収している点である。「インドの企業は、米国でのプレゼンスを確実に高めてきている」とIMS Health社の産業連関担当副社長のDoug Longは語る。例えば、既に欧州で最大のインド系ジェネリック医薬品企業となっているWockhardt社（インドのムンバイに本社）が、Par Pharmaceutical社（米国ニュージャージー州に本社）の買収に名乗りをあげていることが先週報道された。このほかに国際化を進める企業は多く、例えば昨年初頭にはインドのRanbaxy Laboratories社が、1週間でイタリア、ルーマニア、ベルギーのジェネリック医薬品会社を次々と買収した。

そうすると今から10～15年後には、産業界の自然選択によって、数社の巨大ジェネリック医薬品企業だけが残ることになるのだろうか。「多くの人々は、そのように考えている」とLongは述べる。

Erdeiは、腫瘍科や皮膚科といったように対象を絞り込んだニッチ市場で事業展開する小規模企業は生き残れる、と考えており、「中規模企業の先行きがいちばん心配だ」と話す。このような企業は、ニッチ戦略を生かすには規模が大きすぎ、Teva社やMylan社などと対等に競争するには規模が小さすぎるからである。これらの中規模企業は、巨人ゴリアテに変身する方法を考える必要がある、とErdeiはいう。「なぜなら、自ら合併・買収を積極的に進めなければ、他社に買収を仕掛けられてしまうからだ」。

Come fly with us

ゲノミクスの使徒となったショウジョウバエ

Ewan Birney



ショウジョウバエ 12 種のゲノム比較解析が行われたことは、我々にとっても意味がある。ハエからヒトまでの進化の間に選択圧に耐えて残ってきた塩基配列は、機能的に重要であるに違いないと考えられるからである。

Nature Vol.450 (184-185) / 8 November 2007

キイロショウジョウバエ (*Drosophila melanogaster*) は、遺伝学や分子生物学の分野では常に人気者である。ありふれた生き物でありながら、多細胞生物の生物学を解明する手がかりを提供し続けてくれるからである。しかし、1990 年代には線虫 (*Caenorhabditis elegans*) がゲノミクスの主役となり、我々ヒトとともに「主賓」扱いだったショウジョウバエは、「主賓リスト」から外されてしまいそうになった。

こうした状況が変化し始めたきっかけは、Celera Genomics 社¹ が、大型生物種のゲノム解読に取り組む前にキイロショウジョウバエのゲノム塩基配列を解読したことだった。進化ゲノミクスの時代に入り、今回、ショウジョウバエ属の 10 種の塩基配列解読と 12 種のゲノム比較解析について、*Nature* 2007 年 11 月 8 日号^{2,3} とほかのジャーナルで 40 以上の関連論文が報告された。これで、ショウジョウバエは研究対象としてほかの生物種に追いつき、ゲノミクスの分野でも人気者の地位を得た。

1 つの生物のいかなる側面も、進化の過程で出現して維持され続けてきたものである。したがって、ゲノムを読み解くため、なかでも生物種間で保存されているタンパク質をコードする遺伝子を見つけ出すために、進化解析が常に用いられてきた。しかし、進化の

過程は、1 つのゲノムに含まれる遺伝子を分類整理することだけによらず、効率的に研究できる。具体的にいうと、研究者は進化の相補的な 2 つの側面、すなわち負の選択と正の選択を研究することができるのである。Stark たち² は、負の選択、すなわちゲノム内の機能要素の存在を調べた。負の選択では、ランダムな変異を多数こらむっても機能が変化しない (図 1a)。これに対して、*Drosophila* 12 ゲノムコンソーシアム (Clark たち)³ は、正の選択、すなわち異なる種で新たに獲得された機能を調べた (図 1b)。

ショウジョウバエ属は種間に著しい多様性がみられ、こうした比較解析にうってつけの研究素材である。結果的に今回の解析では、*D. simulans* (右の写真) と *D. sechellia* のように非常に近縁な種の組み合わせ (ヒトと、ヒトに非常に近い霊長類との遺伝学的な距離に相当) に加えて、*D. grimshawi* のように類縁関係の離れたショウジョウバエも調べられた。*D. grimshawi* は多数あるハワイ産外来種の 1 つで、実験用の普通のショウジョウバエに比べて体の大きさが 100 倍もあり、両者の遺伝学的な距離はヒトとトカゲの距離に相当する。

Stark たち² は、機能要素を新たに見つけ出したり既知の要素について解明を進めたりするために、機能要素に関する現在活用できるほとんどの知識を駆使

し、なおかつ自然に存在する範囲での変異や選択を利用した。Stark たちは、よく解明されているタンパク質コード遺伝子から、遺伝子発現を調節するあまり解明されていないモチーフまで、知られているすべての種類の機能要素について検討している。これらの解析によって、キイロショウジョウバエの特異的なゲノム配列のために不正確だった生物学的情報を特定することができた。

Stark たちは、タンパク質をコードする DNA の連続した塩基配列内に埋もれている、進化的に保存された要素をいくつか発見した。それらの中には、終止コドン（1つのタンパク質の配列終了を知らせる塩基3個の配列）や、フレームシフト変異（タンパク質コード配列の読み取り枠がずれる）などがある。例えばメッセンジャー RNA へ転写された終止コドンがタンパク質翻訳の段階で無視されるような、こうした遺伝子構造は、正常な翻訳ルールと両立できるとはちょっと考えにくい。そのため、これらの知見からは、翻訳の前段階に何か未知の mRNA プロセッシング機構が存在しているか、もしくは、別の翻訳様式が存在していることがうかがわれる。

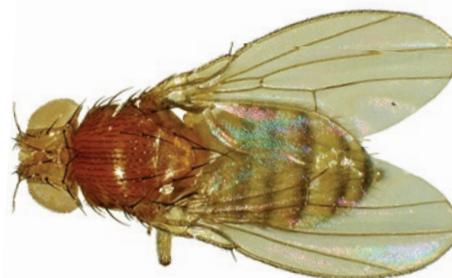
マイクロ RNA は、自然に存在する短い一本鎖 RNA で、遺伝子発現を調節する。Stark たちは次に、マイクロ RNA などの非コード（タンパク質をコードしない）RNA 配列の遺伝子を調べ、新しいマイクロ RNA 配列を発見した。これによりキイロショウジョウバエのマイクロ RNA のリストは、74個から101個へと拡大した。

Stark たちは、調節モチーフという、もう1種類の機能要素も調べた。そして、調節モチーフの非常に詳しい「辞典」を作成し、この種のモチーフが機能を果たしていると思われる一群の例（1つの生物のゲノム規模では初めて）も示した。ゲノミクスを用いて調節モチーフの活性例を見いだすというのは、実に画期的な新手法である。Stark たちは「branch length score (分枝の長さ指数)」とよばれる方法を用いた。この方法は、実際のデータでよくあるアラインメント（塩基配列の整列化）や配列決定の際の誤りに配慮したもので、1つの系統樹全体に適用できる。Stark たちは、自分たちの手法をさまざまな統計学的側面から慎重に査定し、ショウジョウバエを研究する分子生物学者や遺伝子調節に取り組む研究グループが安心して使える「機能要素の金山」を提供してくれたのである。

正の選択の側面に関する Clark たちの知見³は、Stark たちの研究ほど、キイロショウジョウバエの分子

生物学研究への直接利用ができない。しかし Clark たちの成果は、進化の最中に生物がどのように生じてくるかをゲノム規模で知るための包括的な手がかりを、初めてもたらしてくれた。Clark たちの解析は、統計学的な意味では Stark たちのものほど威力はないが、それは当然である。Clark たちの目的は、正の選択を解明することにあるからだ。正の選択は、ショウジョウバエのさまざまな系統を越えて非連続的に起こるが、Stark たちの調べた負の選択は、それに比べて一定しており、全データ群にわたって容易に集計できる（図1）。

それでも、Clark たちの成果はショウジョウバエの種の進化を解明する糸口となる。例えば、ショウジョウ



D. simulans



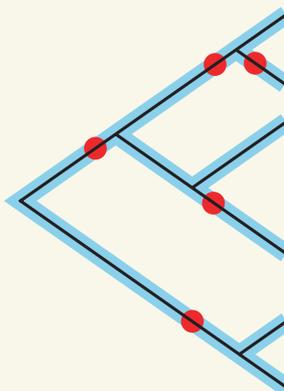
今回新たにゲノムが解読された10種と、既に解読済みの2種を合わせた12種のショウジョウバエ（麻酔をかけた状態）。

a 負の選択

1 ATGGGGTTG---GTTTCC 種A
 ATGGGTTTTGTGGTTTCC 種B
 ATGGGATTAGTGGTCTCC 種C

2 ATAGAGTTGG--GTCTAC
 ACATTTTT--GTGGAATAC
 AGGCAATTAG--GTGCC

3 ATGAGGTTG---GTTTCC
 AGGT--TGGTGGTTCTCC
 ATGGGATTAGGTTGCTCC



b 正の選択

4 ATGGGGTTG---GTTTCC
 ATTTGTTTTGTGGTTTCC
 ATAGCAATTAGTGGTCTCC

5 ATCGAGTTGG--GTCTGC
 ACATTTTT--GTGGAATTC
 AGGCAATTAG--GTGCC



図1 進化上の2種類の選択。a, 進化の解析として、Stark たち²は負の選択(青色)を研究した。負の選択では、特異的な塩基(A、T、C、Gの4種類)が全系統のゲノムを通じてほぼ一定に維持され、ゲノムの機能要素の保存を確実なものにしている。このような解析では大きく3つの方法を用いる。タンパク質をコードする保存された塩基配列を見つけ出すこと(1)、タンパク質をコードしない非コードRNA 遺伝子で、保存された対合塩基を見つけ出すこと(2)、アラインメントで、保存された特異的モチーフを見つけ出すこと(3)である。b, それに対して Clark たち³は、正の選択(赤色)の例を探した。正の選択では、異なる種において特異的な塩基の修飾が起こり、新しい機能の獲得につながる。正の選択を調べるには主に2つの手法が使われる。負の選択を受けるコドン群に埋もれた急速進化するコドンの特定(4)と、非コードRNA 構造の背景の中で急速に進化する塩基対合の探索(5)である。図の中央にある系統樹は種の系統発生を示しており(すべての枝を図示してはいない)、負の選択は相対的に持続的だが、正の選択は断続的であることがよくわかる。2と5にある黒色の線は、二次構造での塩基対合を表している。そのため、線をつないだ塩基の配列上の位置関係は青色の各カラム上では(一次元では)保存されていないかもしれないが、線をつないだ位置の塩基対合は、二次構造において適切な位置で塩基対合を保持している。

ウバエ属の12種のゲノム(そのうちの10種は今回配列解読がなされて報告されたもの)を比較すると、ゲノム再編成が大規模スケールでも小規模スケールでも著しく高頻度で見られることが明らかになった。また、遺伝子のうち約3分の1が、少なくとも1個のアミノ酸の位置に影響する変異を通じて正の選択を受けたこともわかった。これは、1つのゲノムにおいて多数の遺伝子で正の選択が起こったことを意味している。

1つの生物種において、1種類のアミノ酸を指定する全コドンのうち特定のコドンが選択的に使われることを、コドン使用頻度の偏り(codon-usage bias)といい、生物が異なれば、この偏りも異なっている。Clark たちは、ショウジョウバエ属の *D. willistoni* 種をほかの複数の種と比較し、この種ではコドン使用頻度の偏りがかなり小さいことを発見した。

Clark たちは、さらに、嗅覚や免疫にかかわるタンパク質類をコードする遺伝子(タンパク質コード遺伝子の中でも正の選択が働くと考えられている)が、ゲノムのほかの部分より速く進化してきたことも明らかにした。殺虫剤耐性といった、ショウジョウバエの生理の特異的な部分を制御する遺伝子にも、高速進化がみられた。ショウジョウバエは人類との長いつきあいの中で、殺虫剤の導入から人類移住に伴う種の移動まで、さまざまな環境の激変に耐えてきた。したがって、ショウジョウバエの進化史に起こったこうした出来事とゲノムの変化とを相関づけるような、さまざまな興味深い研究がおそらく期待できるだろう。

今回の2つの研究^{2,3}の知見は、特にヒトゲノムのさらなる研究に、どのような広い意味をもつのだろうか。負の選択の場合、Stark たちが使った進化ゲノミクス

の手法によって、1つのクレード（近縁な生物からなるひとまとまりの系統分類群）全体で保存されている機能要素について、目覚ましい洞察がはっきりと得られる。現時点でかなり進行している哺乳類ゲノムプロジェクト案⁴は、Starkたちのデータセットとほぼ同じくらい統計学的に威力があるようである。これによって、哺乳類の大規模スケールのゲノム解析に適用可能で、実験的手法を補完するような一連の非常に有効な探索手法が手に入ることになるだろう。これらの手法を使って研究成果を出すには、理論上、ショウジョウバエ系統でも哺乳類系統でも質的に違いはないはずである。とはいえ、哺乳類ではゲノムのサイズがショウジョウバエよりも大きく、また、1種のゲノム全体でも異種のゲノム間でも中立進化の速度の揺らぎがショウジョウバエの場合より大きい可能性があり、いくつかの興味深い問題を乗り越えねばならないかもしれない。

研究者が懸念しているのは、進化ゲノミクスの手法を使って得られたデータが、ChIP-chip法やChIPseq法などの実験的手法で得られたデータと完全に重ならないのではないかということだ。ChIP-chip法やChIPseq法は、転写因子結合部位やその他の機能的なDNA要素を、*in vivo*で包括的にマッピングする手法である。特に、これらの実験的手法では、進化ゲノミクスの標準感度では進化的に保存されたものと判定されていない要素群を定義づけることが多い。以前の研究報告⁵やStarkたちによって論じられているように、このミスマッチはどうやら、種を越えて、またさまざまな研究室で行われた解析を越えて一貫してみられるようである。そのため、これはおそらく、系統特異的な要素が大量に存在するせいでも、あるいは使われた手法に欠陥があるせいでもなく、選択が働く前に、一見すると中立の進化過程がどうやって生化学活性をもつ新規の要素を生じるのかについて、我々の理解が不足していることを反映しているのだろう。

Clarkたち³による正の選択の解析は、多細胞生物のクレードで行われたものとして、間違いなく最も広範で最も詳細な研究である。彼らの研究により、種間の差異、つまり進化がどのように適応的变化につながるのかを解明するには、用いる手法を向上させねばならず、より大規模なデータやより広範な種を考察しなければならないことがよくわかる。こうした論拠は、もっと多くの種のゲノム塩基配列解読を行う（現在は経費の安い塩基配列解読技術が登場したおかげで実現

可能である）ことや、各クレードのほかの構成種について実験研究を行うことを後押しする理由づけとなる。こうした研究は、塩基配列の変化と機能要素の変化とを相関づけたり、開発された新しい手法を検証したりするために不可欠である。

ショウジョウバエ属についていえば、次の段階では、さらに多くのショウジョウバエ種や双翅目のほかの種のゲノム塩基配列解読を行い、それらを、今回論じているショウジョウバエ属や遠縁にあたるカの仲間の配列解読済みゲノム^{6,7}に加えるべきである。さらに、個体群レベルでもっと多数のゲノム塩基配列を調べるべきである。つまり、同一種の数個体の塩基配列を解読して、進化解析データとの比較用に使えるような古典的な集団遺伝学解析の材料を集めるべきである。こうした解析用リソースを作り出そうとする試みは、ショウジョウバエ属のいくつかの種で順調に進んでいる。最後に、進化解析によって得られたデータと比較するには、実験に大きく貢献してきたキイロショウジョウバエを超えるようなほかの種で、新しい実験結果を得ようとする協調的な努力が必要である。

Clarkたちの知見からすると、ヒトに固有のものも含めた霊長類間の興味深い適応的变化を解明するには、個体群レベルのデータと高精度のゲノム塩基配列の双方を得るのに最適な塩基配列解読戦略を用いて、あらゆる現生霊長類（そして可能な場合には、DNA復元の可能な絶滅霊長類も）のゲノムの塩基配列解読を行う必要がおそらくあるだろう。機能要素の変化と塩基配列の変化とを相関づけるには、厳選した霊長類種から樹立した細胞株を用いた基礎的な分子生物学研究も必要になるだろう。

今回の成果に話を戻そう。Starkたち²とClarkたち³が提示し解析したデータは、進化ゲノミクスの威力を示した特筆すべき初めての例である。この分野は、今後10年間の中心的な研究テーマの1つとなるだろう。これで、ゲノムミクス研究者は、ショウジョウバエのファンクラブで、同僚の遺伝学者や分子生物学者とようやく肩を組めるようになったわけである。 ■

Ewan Birney、欧州バイオインフォマティクス研究所（英）

1. Adam, M. D. *et al. Science* **287**, 2185–2195 (2000).
2. Stark, A. *et al. Nature* **450**, 219–232 (2007).
3. *Drosophila* 12 Genomes Consortium *Nature* **450**, 203–218 (2007).
4. www.broad.mit.edu/mammals
5. The ENCODE Project Consortium *Nature* **447**, 799–816 (2007).
6. Holt, R. A. *et al. Science* **298**, 129–149 (2002).
7. Nene, V. *et al. Science* **316**, 1718–1723 (2007).

南極の氷の解析から氷期サイクルの仮説を検証

川村賢二

10万年周期で繰り返される氷期と間氷期。このサイクルは、北半球に降り注ぐ夏の日射量の増減が原因とされてきたが、それを裏づける証拠はこれまでなかった。国立極地研究所の川村賢二助教らは、南極の氷に閉じ込められた過去36万年分の大気を分析。この仮説を強く支持する結果が得られたとして、*Nature* 8月23日号に発表した¹。南極の氷の分析結果について川村助教に話を聞いた。

南極の氷に閉じ込められた数十万年の地球環境

Nature Digest — 氷期サイクルの仮説とはどんな説ですか？

川村 — 氷床が拡大する寒冷な氷期と、比較的暖かい間氷期とが、なぜ10万年周期で繰り返されるのか？ それを説明するのが「ミランコビッチ理論^{*1}」とよばれる仮説です。北半球に降り注ぐ夏の日射量が周期的に変化し、それがきっかけとなって氷期と間氷期が訪れるのではないかというものです。地球の公転軌道は、約10万年の周期で円から楕円形に変化します。また、約4万年周期で地軸の傾きが変わったり、約2万年周期で歳差運動^{*2}による地軸のぶれが起こります。地球が太陽から受ける日射量の地理的な分布は、この3つの要因によって周期的に変動します。

ND — 仮説を裏づける証拠はこれまでなかったのですか？

川村 — 発表当時は支持されなかったのですが、1970年代に海底堆積物から得られたデータに、ミランコビッチ理論が示す変動周期が反映されていることがわかって、一気に脚光を浴びることになったんです。ただ、そこで新たな謎が出てきた。それが10万年周期です。日射量の変動は、2万年周期のシグナルがいちばん強く、10万年周期はごくわずかなんです。それなのに、実際の氷床の量の変動は、10万年周期がはるかに強く支配的です。単純に日射量の変化が氷床の量を増減させると考えると、説明ができないんですね。

ND — それを検証するために、南極の氷床コアを分析されています。氷床コアから何がわかるのでしょうか？

川村 — 氷床というのは、南極とグリーンランドを覆う厚い氷のことで、降り積もった雪が圧縮され、氷に変化しながら堆積したものです。氷に変化する際、雪と雪のすき間にあった空気も気泡として氷の中に取り込まれます。氷床をボーリングして採られた氷床コアには、過去の空気そのものが閉じ込められているわけです。この氷や空気を分析することで、当時の気温や大気の循環、二酸化炭素やメタンのような温室効果ガスの濃度を知ることができます^{2,3}。氷床コアは、過去の地球環境を記録した「タイムカプセル」といえるんですね。今回用いたのは、第1期ドームふじ氷床深層掘削計画^{*3}で掘削された深さ2503メートルの氷床コアです。そこには約34万年間の地球環境が記録されています。

ND — どのような分析をしたのでしょうか？

川村 — 氷の中に閉じ込められた空気から、酸素と窒素の濃度比^{*4}を調べました。要するに酸素濃度です。分析の結果、氷床コア中の酸素濃度の変動が、南極における夏の日射量の変動パターンと一致することがわかったんです。日射量の変動の年代は、地球の軌道運動から正確に計算で求められるので、その年代と酸素濃度のデータを対比して、氷床コアの年代を精密に出すことができます。今回は、1000キロメートルほど離れたポストーク基地で掘削された氷床コアのデータも用いて、約36万年間の年代を出すことに成功しました。これまでは年代の誤差が大きく、ミランコビッチ理論の検証ができなかったのですが、今回、正確な年代がわかったことで初めて、地球規模の気候変動と日射量の関係を調べられるようになったわけです。今後、この年代を用いて気候モデルを検証することで、将来の気候変動の予測も精度が上がるといいますし、メカニズムを解明する際の土台にもなるでしょう。そういう年代が出せたことは、大きな意義があると思っています。

10万年周期で起こる気候変動のシナリオ

ND — 氷期—間氷期と日射量はどんな関係にありましたか？

川村 — 氷床コアの氷(H₂O)を構成する酸素の同位体の量を調べることで、過去の気温がわかります。重い酸素同位体の比率が小さいほど、その氷ができたときの気温が低いと推定できるんです。また、空気の分析からは過去の二酸化炭素濃度がわかります。こうして復元した南極の気温や大気中の二酸化炭素濃度と、北半球の夏の日射量を比較したところ、日射量が変わるタイミングに数千年遅れて、気温や二酸化炭素濃度が変化しているという結果が得られました(図1)。要するに、日射量の

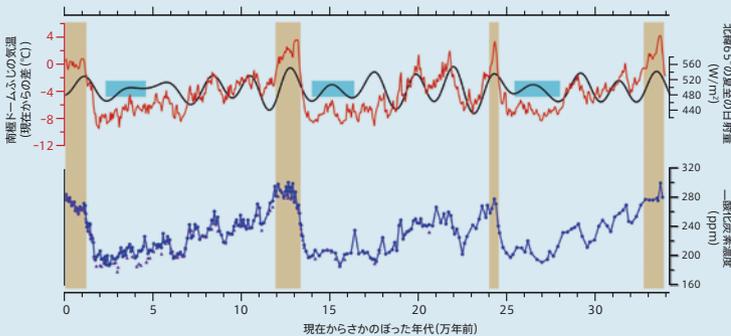


図1 ドームふじにおける気温(上段赤線)、北緯65度の夏至の日射量(上段黒線)、大気中の二酸化炭素濃度(下段)の比較。北半球の日射量ピークが小さい時期(水色の期間)に、氷床が極端に拡大。日射量が増大し始めると、それをきっかけとして氷床が崩壊し、間氷期(オレンジ色の期間)に移行する。二酸化炭素濃度は南極の気温変動と調和的に変化していることから、気候変動を増幅する役割をしていたことがわかる。



川村賢二（かわむら・けんじ）／国立極地研究所
研究教育系気水圏研究グループ助教。理学博士。
1970年、東京都生まれ。1994年、東北大学理学
部天文・地球物理学科第二卒業。2001年、同大学
大学院地球物理学科博士課程修了。2002年スイス・
ベルン大学研究員、2004年アメリカ・スクリッ
ス海洋学研究所研究員、2006年東北大学助手を
経て、2007年4月より現職。

専門は古気候学。極域の氷床コアに含まれる気体
の分析によって、過去の気候変動や温室効果ガス
などの大気組成の変動を復元、気候変動や温室効
果ガスの循環のメカニズム解明をめざしている。博
士課程の研究で、第1期ドームふじ氷床コアの気体
成分を分析。2002年にはスイスへ、2004年には
アメリカへ渡り、欧米が掘削したさまざまな氷床
コアの気体分析や分析技術の開発を行った。2006
年に帰国し、極地研究所と東北大学の共同研究と
して、第2期ドームふじ氷床コアの気体分析に取り
組む。現在、同研究を継続して行っている。

変化が即座に気候変動を引き起こすわけではなく、北半球の氷床が拡大したり融けたりするのに少し時間がかかり、その影響が地球全体に伝わるということだと思います。

ND — なぜ「北半球」なのでしょう？

川村 — 北極圏は南極とは違って、海が中心にあって、周辺に陸地があります。氷や雪は真っ白で太陽光線をほとんど跳ね返してしまうため、氷床ができ始めると余計に寒くなって、氷床はどんどん大きくなっていきます。氷期の最盛期には、カナダ全土とアメリカ北部、ヨーロッパや西シベリアの北部を氷床が埋め尽くしていました。しかし、日射が強くなって氷床が融け始めると、地面が露出してきます。地面は日射を吸収しますから、気温が上がり、余計に氷床が融けていく。このように、北半球の方が氷床や温度の変化の幅がはるかに大きいんですね。まず、北半球でものすごく大きな変化が起こって、それが地球全体に影響すると考えられるわけです。

ND — 10万年周期の変動は、結局どのようにして起こるのでしょうか？

川村 — 氷期から間氷期への移行を「ターミネーション」といいます。過去4回のターミネーションのタイミングを調べてみると、すべてが北半球の日射量が増加していく時期に起きていました。また、ターミネーション直前に、日射量があまり変動しない時期がみられます（図1）。この時期は、地球の公転軌道が円に近いときです。地球が常に太陽から同じような距離にあるため、楕円軌道のときに比べて日射量があまり変わらないのです。夏に日射量がある程度増えないと、前の年に積もった氷床が融けきらず、氷床は拡大していきます。ところが、極端に氷床が発達してしまうと、氷床の重みで地殻が沈んで標高が下がったり、地熱の影響で氷の温度が上がったりして、今度は氷が融けやすくなっていくんですね。このときに、何かのきっかけさえあれば、一気に氷床の崩壊が起こるはずなんです。

ND — 氷床が崩壊してなくなり、急激に間氷期に突入するということですね。

川村 — はい。そのきっかけが、公転軌道が楕円に移るときの夏の日射量の増加ではないかと推測できます。公転軌道は10万年周期で変動しますから、間氷期もまた10万年に1度の周期で訪れるのではないかと思います。このように、南極の気候変動は、北半球の夏の日射量の変動が引き金となって起こっていると考えられ、ミランコビッチ理論を支持する結果になったということです。

さらに古い時代の解明へ

ND — なぜ、このような研究に携わるようになったのですか？

川村 — もともとは気象学をやってみたくて、東北大学の地球物理学科に入ったのですが、地球規模の温室効果ガスの循環などを研究している研究室があるのを知って、とても魅力的に思えたんですね。グローバルに研究を展開する研究室でしたので、自分のテーマの氷床コア以外のことも、かなりいろいろやりました。というより、やらされてきました（笑）。ところが、この下積み時代の経験が、海外で研究員をするようになって非常に役立ってきましたね。1人でなんでも分析し、考えてきたおかげで、いろいろな専門の研究者と議論ができ、技術的な面でも不可欠な貢献をたくさんすることができたんです。

ND — 今後、めざしていることは何ですか？

川村 — ドームふじコアは、現在3035メートルまで掘られていますので、さらに過去にさかのぼって分析し、まずは年代軸を確定するという仕事が先にきますね。また、今は全体をざっと見るといった段階なので、今後はもっと精度をあげて細かく見ていく作業をしたいと思います。まだまだ膨大な作業があります。早く極地研究所にも分析設備を整えて、スピードを上げていきたいですね。

ND — ありがとうございます。 ■

聞き手は財部恵子（サイエンスエディター）。

* 1 ミランコビッチ理論

旧ユーゴスラビアの地球物理学者 M. ミランコビッチ（1879～1958）が、1930年代に提唱した氷期の原因についての仮説。他の惑星の引力による地球の公転軌道の離心率（円からのずれ）、自転軸の歳差運動や傾きの変化によって日射量が変化し、氷期と間氷期が訪れるというもの。

* 2 歳差運動

回転するコマの軸が円を描くような首振り運動をするのと同様に、地球の自転軸が周期約2万年で首振り運動をしていることをいう。

* 3 第1期ドームふじ氷床深層掘削計画

南緯77度にあるドームふじ基地は、日本の氷床コア掘削拠点。1994年から1997年にかけて第1期の掘削計画が行われ、深さ2503メートルの氷床コアが掘削された。現在は第2期掘削計画が進行中。2007年1月の時点で3035メートル（約72万年）のコアを掘削。

* 4 酸素と窒素の濃度比

酸素分子は窒素分子より小さいため、大気が氷床に閉じ込められるときに、酸素がわずかに外へ逃げるが、その度合いは雪粒の大きさや形によって変化する。雪粒の性質は、夏の日射量によってどれだけ加熱されるかで決まるため、過去の日射量がコア中の酸素濃度として記録されていることになる。

1. K. Kawamura *et al.* *Nature*, **448**, 912-916(2007)
2. O. Watanabe *et al.* *Nature*, **422**, 509-512(2003)
3. K. Kawamura *et al.* *Tellus*, **55B**, 126-137(2003)



左から樋口さん、中嶋さん、西田さん、前澤さん、岡田さん。

安友康博

「視覚センサーやミリ波レーダーで障害物を回避」「車体全体がぐるぐる回る」、「ほぼ180度の視野角をもつカメラ4台で全方向を映し出す」。これらは、10月下旬に開催された「第40回東京モーターショー」で紹介された車の新機能の一部。もはや車は、単なる「乗り物」ではなくなりつつある。人間の機能の一部を肩代わりしたり、支援したりする技術は、工場や建設現場、病院などですでに広く普及しているが、私たちの日常にも及び始めているようだ。

こうした状況のなか、奈良女子大学附属中等教育学校のサイエンス研究会物理班（西田惇さん、中嶋研人さん、岡田真太郎さん、樋口幸太郎さん、前澤俊哉さん）は、「距離を保って特定の人物を追いかける買い物カート」を独自に作製し、平成19年度スーパーサイエンスハイス

一定距離を保ちつつ、後ろから追いかける買い物カートを作製

奈良女子大学附属中等教育学校（平成17年度SSH指定校）

過去に経験したことのない高齢化と少子化を迎えた日本。介護や日常生活の支援が急務だが、人手はまったく足りていない。不足部分をロボット技術で補えないかとの模索が続くなか、高校生たちが「モーションキャプチャシステム」を開発・応用し、特定の人物を後ろから追いかける買い物カートの作製に成功した。

クール（SSH）生徒研究発表会において「文部科学大臣奨励賞」を受賞した。

C++ 言語でモーションキャプチャを作る

サイエンス研究会物理班（以下、物理班）が作ったカートには、人の動きをデジタル処理して記録できるモーションキャプチャシステムが搭載されている。モーションキャプチャは、人や物体の動きを正確な2次元、あるいは3次元の座標としてリアルタイムに表示する技術。例えば、ヒトの動きをとらえて、ビデオゲーム画面上の人物の動きを作ることなどができる。

物理班が開発したモーションキャプチャは、「カメラが受信した画像を取り込む」「取り込んだ画像から、特定の形をもった物体だけを切り抜く」「切り出した物体の形から、その3次元座標を計算する」という3つのステップをリアル

タイムで処理できる。「開発のための言語にはC++*というものを使ったのですが、学習するのに苦労しました」と中嶋さんは話す。3ステップの中では、特定の物体を切り抜き、その座標を求めるためのアルゴリズムの開発が特にむずかしく、1年に及ぶ試行錯誤を繰り返したという。「正確な3次元座標を得るには、目標とする物体以外のノイズを削除することが重要です。苦労の末、私たちは、相当大きいノイズが混ざった場合でも、目的の物体のみを正確に認識させられるようになりました」と中嶋さん。

さらに物理班では、モーションキャプチャを搭載するモータ制御基板と、モーションキャプチャとモータ制御基板をつなぐ通信技術も独自に開発した。基板には、人の指の動きに同調するロボットアームを取り付けた。指を広げるとロボットアームも開き、指を閉じるとロボットアームも閉じるため、直感的に操作することができる（写真1）。「モーションキャプチャで指の3次元座標を捕らえると、その座標データをパソコンのネットワーク経由で制御基板に送り、続いて基板に搭載されたマイコンでアームロボットのモータを制御できます。理論上は、地球の裏側からでもアームロボットを操作できるんですよ」と西田さん。マイコンのハードウェア技術も独自に勉強し、制御基板、ロボットアームの製作には2か月を要したという。

奈良女子大学附属中等教育学校の中高一貫理科教育

男女共学の奈良女子大学附属中等教育学校には、中高（1～6年生）あわせて740人あまりが在籍している。中高一貫の理科教育に熱心で、SSHプログラムもその一環に位置づけられている。1～4年次は、数学的リテラシー、科学リテラシー、問題解決能力の養成を目的とした授業が必須で、5、6年次には課題研究を行う。一方で、サイエンス研究会が設けられており、希望した生徒が物理班、生物班、数学班に分かれて、独自の研究、連携する大学や研究機関における見学・実習・実験

などを行っている。顧問である末谷健志教諭は、生徒たちの日々の取り組みについて「まだ課題はありますが、互いに議論し、知的に遊ぶ生徒集団に成長したことをたいへんうれしく思います。生徒に負けないくらい、顧問の私も楽しんで指導しています」と話す。

ほぼ全員が大学へ進学し、理系・文系を問わず、幅広い進路選択を行っている。国公立大学への進学者が多く、2006年度は6年生115人のうち、36人が現役で国公立大学に進んだ。

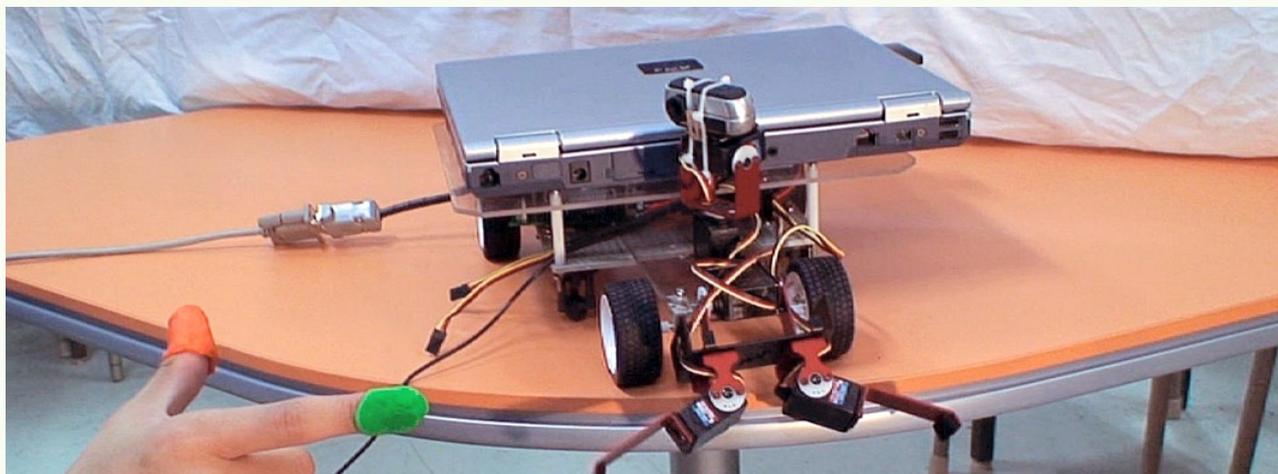


写真1 指を使って直感的に操作できるロボットアーム。指を広げるとロボットアームも開き、指を閉じるとロボットアームも閉じる。

ゼロからの開発にこだわる

結果的に買い物カートを作ることになったが、物理班では、初めからモーションキャプチャの開発を目的にしていたわけではないらしい。「当初は、市販のロボットを動かしたり、自分たちでロボットを設計したりしていました。しだいに、これらには『操作がしにくい』という共通の欠点があることに気づきました。そこで私たちは、指の動きそのものをコントローラにして、直感的にロボットを操作できないかと考えました。そのためにはモーションキャプチャが必要なので、その開発に取り組み始めたのです」と西田さんは話す。

物理班のメンバーはそれぞれが自分の得意分野を生かして、「モーションキャプチャ開発」「モータ制御基板開発」「両者をつなぐための通信技術開発」の3チームに分かれ、すべての研究開発を同時並行で進めた。「ハードもソフトも、訳のわからない部分を残してしまうと気持ちが悪いうえに、応用がきかなくなると考え、ゼロから作ることに徹底的にこだわりました」とメンバーは口を揃える。このポリシーは、それまでのSSH活動の中で、大学の研究者たちが誇りをもって独自の研究に打ち込んでいるのを目の当たりにして生まれたものだという。

毎日、放課後ぎりぎりまで残り、土日もなく作業を続けた結果、6か月後に、特定の人と一定の距離を保ちつつ、その人を自動で追いかける買い物カートが完成した(写真2)。いちいちカートを押

す必要がないので、買い物中は常に両手が使ええる状態になる。「スーパーなどで、お年寄りや車椅子を使っている方に利用してもらうことを想定しています」と樋口さん。手術シミュレーションや遠隔診断などの生体医工学分野での応用も期待できそうだという。

世界を相手に挑戦し続けたい

「自分たちが考えたアルゴリズムがうまく動作しなかったり、モータの制御がうまくいかなかったりと、とても苦労しました」と話す西田さんだが、「ゼロから作る」ことが研究を進展させていくうえでいかに重要かを痛感したという。さらに、「限られた機材と人材、時間をうまくやりくりして進めるために、開発の進展状況や研究方針について議論を重ね、互いの情報交換が円滑なチーム運営に欠かせないことも学びました」ともコメントする。

8月に行われた生徒研究発表会では、西田さんと中嶋さんが、動画を用いたプレゼンテーションを行い、話の順序やスライドのデザインにも工夫を凝らした。研究と発表は高く評価され、冒頭のとおり、平成19年度の文部科学大臣奨励受賞を授与された。ほかにも物理班は、「日本物理学会2007年春季大会ジュニアセッション最優秀賞」や「第46回日本生体医工学大会高校生科学コンテスト最優秀賞」を受賞している。

「これまでの努力は報われましたが、今回の受賞はあくまでも通過点。今後も



写真2 完成した買い物カート。

続けて研究開発を行い、日本国内のみならず、世界を相手に挑戦していきたい」と意気込む西田さんら。超高齢化と少子化時代を迎えた日本では、「人間にやさしいロボット研究」がますます重要になる。ただし、この分野は基礎研究とは異なり、いかにして実用化に結びつけるかがかぎとなる。今後、物理班のメンバーは、大学や研究機関、民間企業とそれぞれの道へ進むことになるが、ぜひとも自らの手でかぎを手にしてほしい。 ■

執筆：西村尚子(サイエンスライター)

* C++言語とは、広く普及しているプログラミング言語であるC言語に、オブジェクト(目標物)指向的な拡張を施したプログラミング言語。1992年に米国最大の通信会社であるAT&T社によって仕様が策定された。

新しい年が始まり、今年もさまざまな分野で科学技術のさらなる発展が期待されます。私たちの生活はその恩恵にあずかり、さらに豊かになるかもしれません。しかし一方で、研究が進めば進むほど、悪用されたときの危険性も高まることでしょう。

米国政府は、植物病原体が生物兵器に使われることを懸念して、その分野の研究を事実上規制する提案をしています。今回は、その動きに対する研究現場の反応について、読んでみましょう。

NEWS

語数：484 words 分野：微生物・植物

Published online 28 November 2007 | *Nature* **450**, 596 (2007) | doi:10.1038/450596b

Plant-disease controls sap outbreak responses

'Bioweapons' restrictions threaten to hamper research.

<http://www.nature.com/news/2007/071128/full/450596b.html>

Ewen Callaway



1. Microbiologists in the United States are expressing concern about a government proposal to limit research on several plant pathogens because of their potential to be used as bioweapons. The researchers say that the plan to subject rice and citrus disease agents to the same restrictions as Ebola virus and anthrax are ill-conceived and will limit the response to a natural outbreak.
2. The US Department of Agriculture (USDA) plans to add four plant pathogens to the government's list of 'select agents'. Created to keep infectious diseases out of the hands of would-be terrorists, the current list includes 81 human, animal and plant pathogens and toxins. Researchers studying substances included on the list must confine their work to high security labs, file mountains of paperwork and submit to background checks.
3. The latest draft includes pathogens of rice, citrus, rye and deciduous trees that have wreaked havoc elsewhere, but have not crossed US borders. The USDA is accepting public comment on the proposal until 3 December.
4. Many scientists think that plant diseases should not be lumped with deadly human pathogens such as smallpox. Most plant-disease research is already subject to strict regulation and quarantine, they point out. Adding more plant diseases to the select-agent list could have a chilling effect on research, says Jan Leach, a microbiologist at Colorado State University in Fort Collins, who studies *Xanthomonas oryzae*, a bacterium that causes leaf blight of rice. "Some of us will just drop out. We won't work on those pathogens anymore," she says.
5. Her lab halted research on one strain after it was added to the list. But if the proposed changes go forward, all strains would be subject to the extra regulations. The disease — endemic in Asia and Africa — poses minimal threat to the United States because of different climate and farming techniques, she says.
6. In Florida, the select-agent law stymied the state's response to a 2005 outbreak of citrus greening, says Wayne Dixon, a senior plant pathologist at Florida's agriculture department in Gainesville. Now, the USDA plans to remove from the list one strain that is widespread in Florida, while adding another that is currently hitting orange trees in Brazil. Dixon worries that if the Brazilian strain hits Florida, research and epidemiology will again be handcuffed by the disease's select-agent status. For example, researchers who perform lab tests on potentially infected tree samples must destroy them if the sample reveals a positive result.
7. Michael Firko, a USDA official who was involved in drawing up the new select-agent list, says the agency attempts to balance national security with scientific freedom by updating the list biennially and seeking input from researchers. He cites the delisting of plum and soya bean diseases in 2005 and the current proposal to remove one strain of citrus greening. Yet for many plant pathologists, these changes don't happen often enough or fast enough. "We had our hands tied for two years," says Dixon.



カンキツグリーンング病にやられると、果実の収穫は見込めない。

Topics 植物病理学 (Plant pathology) とは？

植物の病気についての学問。植物の病気は、主にカビやウイルス、細菌などによって引き起こされ、植物の種類によってかかりやすさに差がある。また個体によっては、抵抗性を示すものもある。こうした病原体の感染経路や病態発現の経過を、解剖学的、生化学的、生理学的、遺伝学的手法を用いて解明したり、効果的な防除方法を研究したりするのである。特に農産物における防除は、農業の生産性にかかわり、私たちの食生活に直接影響を及ぼす重要な研究テーマの1つである。

Science key words

- 1. pathogen(s): 病原体、病原菌**
感染して病気の原因となる細菌やウイルス、真菌類、寄生虫などのこと。ここでは、1.の **disease agents** (病因物質) もほぼ同義。
- 1. Ebola virus: エボラウイルス**
致死率が50～90%と非常に高い急性ウイルス性感染症の1つ、エボラ出血熱の原因となるウイルス。ウイルスを含む血液、排泄物、汚染注射器、唾液などを介して、ヒトからヒトへ感染する。アフリカ中央部で発生しているが、自然界の宿主はわかっていない。2～21日の潜伏期間の後、発熱や嘔吐などのインフルエンザ様症状が現れ、重篤化する。病気が進行すると血液が凝固しにくくなり、皮膚や消化管などから出血がみられる。有効な薬剤や治療法は見つかっていない。
- 1. anthrax: 炭疽 (菌)**
土壌中に常在する炭疽菌 (*Bacillus anthracis*) やその芽胞が、家畜やヒトの体内に侵入して発症する人獣共通感染症。抗生物質による治療が有効である。皮膚炭疽 (未治療の致死率10～20%)、腸炭疽 (同25～50%)、肺炭疽 (同90%以上) があるが、自然感染の95%以上は皮膚に黒色の腫れ物ができる皮膚炭疽である。1993年にオウム真理教によって空中に散布され、2001年には粉末化した炭疽菌芽胞が米国で郵便物として送付されるなど、生物テロに利用される危険性が懸念されている。
- 2. toxin(s): 毒素、トキシン**
生物に由来する高分子物質で、何らかの毒作用をもつもの。
- 4. smallpox: 天然痘**
天然痘ウイルス (*Poxvirus variolae*) が原因の感染症。飛沫や接触によ

- て感染し、10日前後の潜伏期間の後、高熱や発疹、呼吸困難などの症状が現れる。強毒性ウイルスの感染で致死率は20～50%と非常に高く、古くから世界的に恐れられてきた。1796年にジェンナーが種痘 (天然痘ワクチンの接種) を開発してからは急激に減少し、1980年WHOにより根絶宣言が出された。現在、天然痘ウイルスは厳重に管理されているが、種痘を行っている国はなく、免疫をもつ人が少ないため、生物兵器への利用が懸念されている。
- 4. Xanthomonas oryzae: イネ白葉枯病菌**
世界的に広く分布しているイネ白葉枯病の原因となる、イネの水媒伝染性病原菌。病態は、葉の縁が波状に灰白色になり、葉先のほうから枯れる。台風や大雨直後の冠水により発病することが多く、イネの品種によっては被害が拡大する場合もある。
- 5. strain: 株**
カビ、細菌、細胞などから1つの細胞を分離し、純粋培養して得られた遺伝子型の等しい個体群。同じ遺伝子セットをもつ系統として保存する。
- 6. citrus greening: カンキツグリーンング病**
篩部 (養分を通す管〈篩管〉) の集まっているところに局在する菌によるカンキツ類の病気。ミカンキジラミによって媒介される。感染すると、葉が黄色く変色して枯れ、果実は緑色のままで成長しなくなる。アフリカやアジアで発生しており、日本でも南西諸島で発生が確認されている。
- 6. epidemiology: 疫学**
人間の集団の中で、ある病気の罹患率や、罹患の要因、罹患に至る経路などを調べ、その予防と健康増進を進めようとする学問。例えば、近年日本で増えている糖尿病は、食生活の欧米化とともに遺伝学的な要因も挙げられているが、これも疫学研究の成果である。

Words and phrases

- リード **bioweapon(s):** 「生物兵器」「細菌兵器」
- 1. subject A to B:** 「AにBを適用する」
 - 1. ill-conceived:** 「構想の間違った」「お粗末な構想の」
 - 2. would-be terrorist(s):** 「将来のテロリスト」
would-beは「～の志願者」「～予備軍」「将来の～」のように、将来実現する (可能性のある) 状態を事前に説明するケースが多い。ただし、「自称～」「みせかけの～」と訳すのが適切な場合もある。
 - 2. confine:** 「限定する」「制限する」
 - 2. background check(s):** 「身元調査」「素行調査」
 - 3. deciduous tree(s):** 「落葉樹」
 - 3. wreak(ed) havoc:** 「大損害を与える」「猛威を振るう」
 - 4. be lumped with:** 「～と一緒に扱われる」「～とひとまとめにする」
名詞lumpは「かたまり」「こぶ」のこと。
 - 4. quarantine:** 「検疫」
 - 4. chilling effect:** 「萎縮的效果」
もともとは、米国憲法との関連で、正当な言論を制限することを明示していないが、「萎縮」させる効果のある法律や行為という文脈で用いられた。
 - 4. bacterium:** 「細菌」 (bacteriaの単数形)
 - 4. leaf blight:** 「(植物の) 葉枯れ病」
 - 5. endemic:** (特定の地域に) 「特有の」「固有の」
 - 6. stymie(d):** 「邪魔する」「妨害する」
stymieはもともとゴルフ用語で、打者の球とグリーンのホールを結ぶ直線上に障害物がある状態のこと。
 - 6. reveals a positive result:** 「陽性という判定結果が明らかになる」
 - 7. biennially:** 「2年に1回」
 - 7. delisting:** 「リストから削除する」
de-は「反対」「逆」という意味の接頭辞。
 - 7. have[had] our hands tied:** 「動きがとれない」

NEWS

参考記

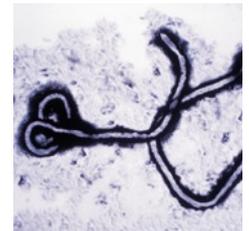
Published online 28 November 2007 | *Nature* **450**, 596 (2007) | doi:10.1038/450596b

国家安全保障上の規制が植物病害発生時の対応の足かせとなる

「生物兵器」規制が植物病害研究を阻害するおそれが生じている。

<http://www.nature.com/news/2007/071128/full/450596b.html>

ユーエン・キャラウェイ



エボラウイルス

1. 米国では、生物兵器として利用される可能性のある数種類の植物病原体の研究を規制しようとする政府案に対して、微生物学者たちが懸念を表明している。研究者たちは、イネや柑橘類の病原体をエボラウイルスや炭疽菌と同じ規制の対象としようとする今回の計画は、構想そのものが間違っており、植物病害が自然発生したときに十分な対応ができなくなるおそれがあると述べている。
2. 米国農務省 (USDA) は、米国政府の特定病原体リストに4種類の植物病原体を追加することを計画している。このリストは、テロリスト志願者が感染症を取り扱えないようにするために策定されたものであり、現在は、ヒト、動物、植物の病原体と毒素81種が記載されている。このリストに記載された物質は、高度安全実験室でしか研究することができず、研究者は大量の書類を提出し、身元調査を受けなければならない。
3. このリストの最新草案には、まだ米国内には入り込んでいないものの、他国で大きな被害をもたらしたイネ、柑橘類、ライムギ、落葉樹の病原体が含まれている。USDAでは、今回の提案に対する国民からの意見を12月3日まで受け付けている。
4. 多くの科学者は、植物病害を天然痘などの致死的なヒト病原体と一緒に扱うべきではないと考えており、既にほとんどの植物病害研究に対して厳しい規制と検疫が実施されていると指摘する。さらに多くの植物病害を特定病原体リストに加えれば、研究を萎縮させるおそれがあるとJan Leachはいう。彼女はコロラド州立大学 (米国コロラド州フォートコリンズ) の微生物学者で、イネ白葉枯病菌 *Xanthomonas oryzae* を研究している。「研究を断念する研究者も出ると思います。私たちも、これらの病原体の研究からは手を引きます」。
5. Leachの研究室は、かつて、研究していた細菌の1つの菌株が特定病原体リストに追加されたときに、その菌株の研究を中止したことがある。しかし、今回提案されている改定が実施されると、すべての菌株に対する規制が強化されることになる。イネ白葉枯病はアジアとアフリカに特有の病害であるため、気候も農業技術も異なる米国ではほとんど脅威にならない、とLeachはいう。
6. フロリダ州農業省 (ゲインズビル) の植物病理学の上席研究員Wayne Dixonは、2005年に米国フロリダ州でカンキツグリーン病が大流行したときには、この特定病原体法が同州の対応の妨げとなったという。USDAは現在、フロリダ州で蔓延している1つの細菌株をリストから削除し、ブラジルのオレンジの木に打撃を与えている別の1つの菌株をリストに追加しようとしている。Dixonは、ブラジルのカンキツグリーン病菌株が特定病原体とされるようなことがあれば、これがフロリダを襲ったときに、その研究と疫学調査が再び阻害されてしまうことを心配している。例えば、細菌感染している可能性のある樹木のサンプルの検査を行う研究者は、陽性の判定が出た場合には、そのサンプルを廃棄しなければならないのである。
7. 最新の特定病原体リスト策定に関与したUSDA職員のMichael Firkoは、同省がこのリストを2年に1度改定し、研究者から意見や情報を求めることで、国家安全保障と科学研究の自由とのバランスをとっていると説明し、2005年にプラムと大豆の病害をリストから外し、今回の提案でもカンキツグリーン病菌の細菌株の1つをリストから外そうとしていることを引き合いに出す。しかし多くの植物病理学者は、当局の改定は、頻度においても迅速さにおいても不十分であると感じている。「おかげで2年間も動きがとれなかったのです」とDixonは話す。



26.681*

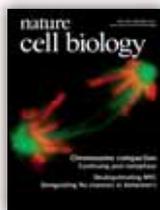
より深く、より鋭く…

Life Science分野を網羅した **nature** シリーズ

Nature's primary research journals



Nature
Biotechnology
22.672*



Nature
Cell Biology
18.485*



Nature
Genetics
24.176*



Nature
Immunology
27.596*



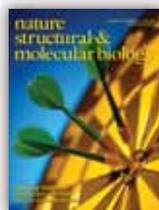
Nature
Medicine
28.588*



Nature
Methods
14.959*



Nature
Neuroscience
14.805*



Nature
Structural & Molecular Biology
11.502*

Nature Reviews publishes Reviews of the highest quality.



Nature Reviews
Cancer
31.583*



Nature Reviews
Drug Discovery
20.970*



Nature Reviews
Genetics
22.947*



Nature Reviews
Immunology
28.697*



Nature Reviews
Microbiology
15.845*



Nature Reviews
Molecular Cell Biology
31.354*



Nature Reviews
Neuroscience
23.054*

* ISI Journal Citation Reports, Thomson, 2007

日本語で **nature** を読む

Nature Digest は、Nature を日本の皆様により身近に感じていただくために全ページ日本語で編集された科学情報誌です。英国本社で作成された Nature 本誌、Nature オンラインニュースに掲載されている最新の科学ニュースや科学論説などの記事はもとより、日本オリジナルの企画編集記事も加わり充実した1冊となっています。

Nature 翻訳・編集記事



日本オリジナル編集記事



2008年1月号より **8ページ** 増量!!



Nature Digest 定期購読お申込みはこちらから

www.naturejpn.com/digest-f08

Printed in Japan
ISSN 1880-0556

定価 680円
本体648円

 nature asia-pacific