

nature DIGEST

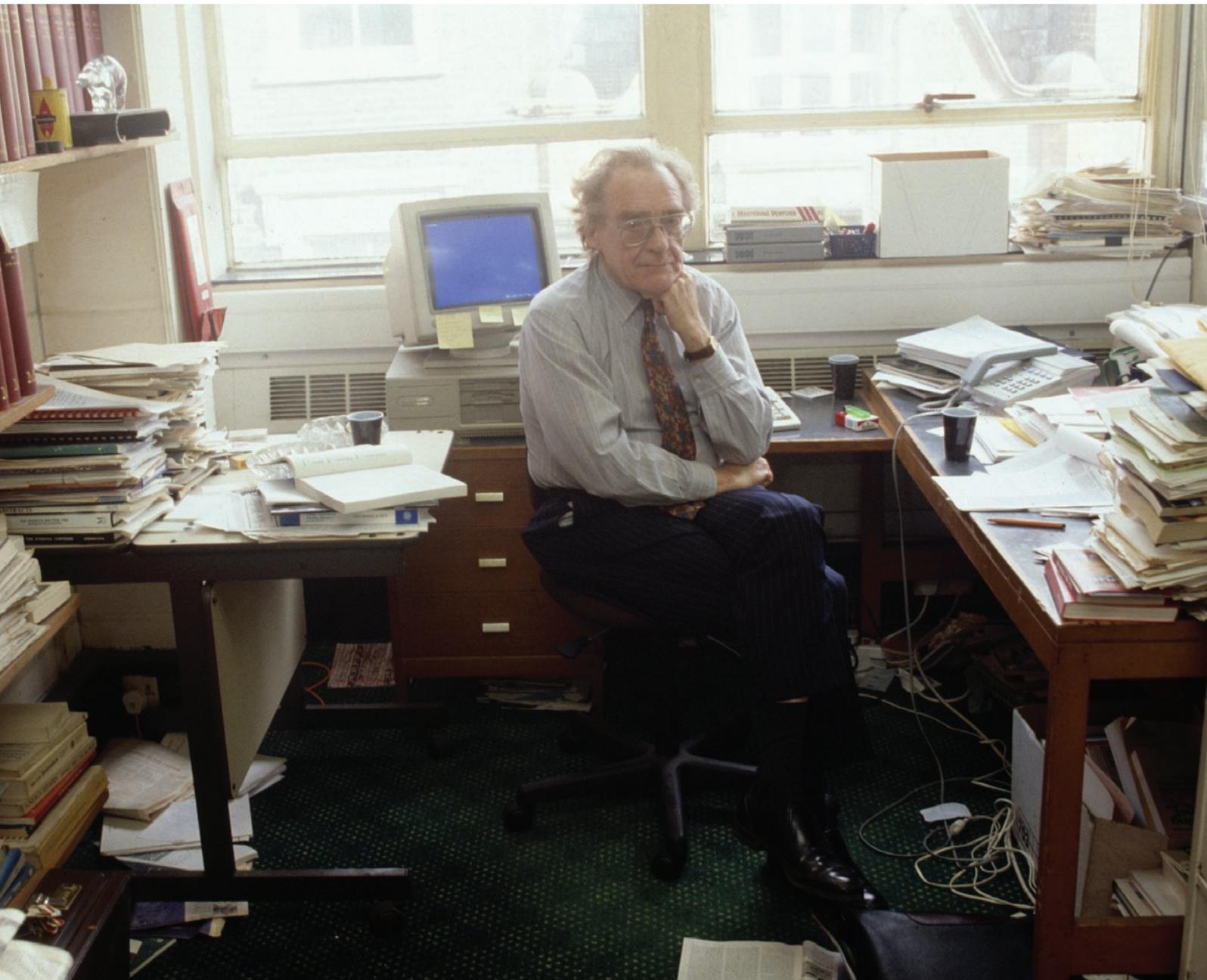
ISSN 1880-0556

日本語編集版

JUNE 2009

VOL. 06, NO. 6

6



ジョン・マドックス 元編集長を偲ぶ

www.nature.com/naturedigest

未来は明るい 光を学ぼう！

nature
photonics



nature
photonics

Nature Photonics は、光の生成、操作、検出に関する全領域について、
トップクラスの査読研究成果を収録しています。

www.naturejpn.com/photon

 nature asia-pacific

volume 6 no.6 June

HIGHLIGHTS

- 02 vol. 458 no.7241, 7242
vol. 459 no.7243, 7244

EDITORIAL

- 06 ジョン・マドックス元編集長を偲んで
追悼 ジョン・マドックスとの思い出

NEWS & VIEWS

- 08 ジョン・マドックス (1925～2009)
Walter Gratzer

- 10 経営者がみたマドックス
Nicholas Byam Shaw

- 11 後継者がみたマドックス
Philip Campbell

JAPAN NEWS FEATURE

- 15 ジョン・マドックス元編集長と日本
冬野 いち子

NEWS FEATURE

- 18 小惑星が地球に落ちてきた日
Roberta Kwok

- 22 2人ずつ—双子の生物学
David Cyranoski

NEWS & VIEWS Q&A

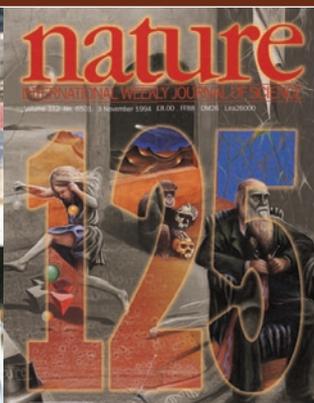
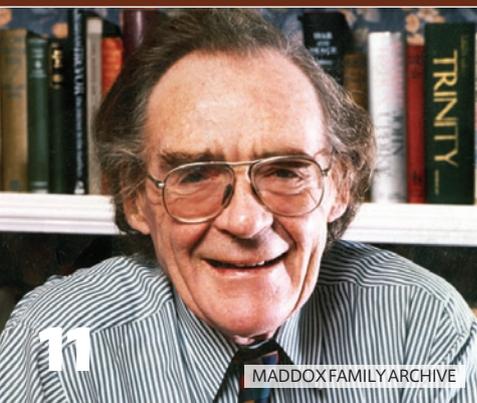
- 28 ダークマターとダークエネルギー
Robert Caldwell & Marc Kamionkowski

JAPANESE AUTHOR

- 32 140年も謎だった、
花粉管を導くシグナルの発見! — 東山 哲也
藤川 良子

英語で NATURE

- 34 Nanotubes cut to ribbons
ナノチューブを切り開いてリボンにする

www.nature.com/naturedigest© 2009 年 NPG Nature Asia-Pacific
掲載記事の無断転載を禁じます。



Vol. 458 No. 7241
23 April 2009

追悼: Sir John Maddox (1925-2009)

SIR JOHN MADDOX(1925-2009)

本誌の編集長を2度にわたって務めた Sir John Maddox が先週死去された。今週号には、Nature の編集方針に大きな影響を与えた同氏の功績についての記事が掲載されている。表紙は、本社オフィスでいつもの、彼独特のポーズをとる Maddox 氏である。1966 ~ 1973 年と 1980 ~ 1995 年の編集長在職中に、彼は査読制度の確立や強力なジャーナリズムの伝統の導入など、今日の Nature の基盤を築き上げた。今週号では、W Gratzer、N B Shaw と P Campbell が故人の経歴について述べ、知人や同僚に彼が及ぼした影響について回顧し、追悼している。オンライン版では、本誌での 40 年間にわたるジャーナリズム活動の中から選んだ特集を掲載しており、今週号の追悼記事の中でも引用されているような、大きな議論をよび起こしたさまざまな論争や、1966 年に書かれたサッカーの得点方式改正についてのよびかけなどが掲載されている。

Obituary p.983, www.nature.com/news/specials/johnmaddox 参照

発生: Notch 経路を個別に調べる

A Notch signalling case study

Notch 経路は多細胞生物の大半に広く存在する細胞シグナル伝達系であり、胚で重要な制御因子として働き、成体でも多くの組織で機能している。今回、ショウジョウバエ (*Drosophila*) の発生で最も解明の進んでいる形態形成過程の1つである外感覚器官形成について調べるため、ショウジョウバエゲノム中のほぼすべての遺伝子について RNA 干渉 (RNAi) 配列を発現する遺伝子導入ショウジョウバエシステムライブラリーを用いて、ゲノム規模での解析が行われた。RNAi スクリーニングを用いることで、Notch の相互作用にかかわると考えられる遺伝子を組織特異的に不活性化できる。こうして得られたデータから、タンパク質をコードするショウジョウバエ遺伝子のうち約 20 パーセントについて機能を推定でき、非対称細胞分裂にかかわる 6 個の新たな遺伝子と、Notch シグナル伝達を制御する 23 個の新規遺伝子が同定された。別の論文では、Coumilleau たちが、ショウジョウバエの感覚器官前駆細胞の非対称分裂後で、Notch シグナルが伝達される際のエンドサイトーシスの役割について報告している。

Article p.987, Letter p.1051 参照

化学: 大きなリュードベリ分子

Rydberg molecules at length

リュードベリ原子では、1 個以上の電子が非常に大きい主量子数をもつ軌道に励起され、原子の電子エンベロープが原子核のはるかかなたまで広がっている。1934 年に E フェ

ルミによって導入された考えに基づいて、基底状態にあるもう 1 つの原子によってそのような電子が散乱されると、引力相互作用が生じる可能性があることが、最近の理論研究で予測された。これによって、核間距離が数千ボーア半径に達する巨大分子ができると考えられる。そのような超長距離「リュードベリ分子」の分光学的特性が、今回報告された。このリュードベリ分子は極低温のルビジウム二量体であり、そのスペクトルはモデルによる予測とよく一致する。今回の成果から、いわゆる「三葉虫分子」のような風変わりな分子種が、近い将来に実現する見込みが高まってきた。 Letter p.1005, N&V p.975 参照

環境: 中国の炭素収支

China's carbon balance

中国の陸上の炭素収支に関する包括的な評価が公表され、炭素収支データを地理的に広げる際に生じていた大きな空白が埋められるとともに、北半球の炭素収支の不確実性をさらに減らすのに役立っている。1980 年代から 1990 年代にかけての中国の炭素収支とその駆動機構が、衛星を用いた植生観測から推定されるバイオマスと土壌の炭素保有量、生態系モデル、および大気の大気逆転という 3 種類の指標を用いて調べられた。この 3 種類の方法からは、毎年 0.19 ~ 0.26 ペタグラム (10^{15} g) の正味の炭素シンクという同じような推定値が得られた。ちなみに、地球の陸上生態系は 1980 年代から 1990 年代にかけて毎年 1 ~ 4 ペタグラムの速度で炭素を吸収し、化石燃料からの放出量の 10 ~ 60 パーセントを相殺した。中国北東部は、森林

の過剰な伐採と破壊により、大気に対する正味の CO₂ 供給源となっている。逆に、中国南部は炭素シンクの 65 パーセント以上を占めているが、これは地域的な気候変動、植林、および低木の回復によるものと考えられる。

Letter p.1009, N&V p.977 参照

生態: 競争と生物多様性

Competition and biodiversity

生態学における未解決の謎の 1 つは、生物種どうしは資源をめぐる互いに競争しているのにもかかわらず、なぜか多くの種が共存できるのか、というものだ。生物多様性の理論では概して、種どうしがランダムに相互作用すると仮定したり、種間の相互作用を無視したりしてきた。しかしながら近年の研究で、種間の相互作用は規制のないものではなく、高度に複雑な構造もしくは入れ子構造になっていることが示されている。Bastolla たちは、植物と動物の相利共生ネットワークに着目し、相利共生的な相互作用の「入れ子構造」が競争を最小化し、生物多様性を高めるように働いていることを明らかにした。入れ子構造をもつネットワークは生物や社会のさまざまな状況で生じると思われるので、この結果は生物学から銀行業務まで、幅広い分野に関係があると考えられる。

Letter p.1018, N&V p.979 参照

医学: 抗菌剤による HIV/AIDS の予防

HIV/AIDS prevention

HIV-1 の女性への伝播を防ぐ手段として、殺微生物剤を使った臨床試験は期待外れに終わった。しかし今回、HIV 感染について、サル免疫不全ウイルス (SIV) のアカゲザル腔感染モデルを使った研究から、予防薬にはまだ追及する価値があると思わせる結果が得られた。広く使われている抗微生物薬であるモノラウリン酸グリセロール (GML) が、ウイルス暴露を繰り返した後でも SIV 感染を抑制することが明らかになったのである。だが、その作用機序は意外なものだった。ウイルスに対する宿主の炎症応答は、予防の助けとなるのではなく、ウイルスの標的である CD4⁺ T 細胞を集合させることで感染を助長しているとわかった。GML の予防効果は、ウイルスに対する直接の効果ではなく、この宿主応答の阻害から生じているらしい。これは、粘膜細胞での細胞のシグナル伝達と宿主の自然免疫応答が、HIV 感染予防を目的とした薬やワクチンの標的となる可能性を示しており、これは HIV だけでなく、似たような感染手段を使っている病原体についても同じだといえよう。

Letter p.1034, Abstracts p.944 参照



Vol. 458 No. 7242
30 April 2009

近づく気候危機

THE COMING CLIMATE CRUNCH

気候の状況は考えられているより悪いのかもしれない。今週号の3つのNews Featureは、実際そうであるか、もしくはそうなる可能性があるとしている。最初に、二酸化炭素の排出量削減が予想よりむずかしいことを示す証拠が挙げられている。このことは、我々が大気中から物理的に二酸化炭素を抽出するような事態に陥るかもしれないことを意味しているのだろうか。では、どのようにしたらそれができるのか、検討してみよう。そして、最後の頼みの綱は地球を人為的に冷却するという方法だ。これはうまく行くかもしれないが、あくまで「可能性がある」にすぎない。研究の最前線での重大な疑問の1つは、危険な気候変動を避けようとするなら、温室効果ガスの排出量をどのくらい急いで削減する必要があるかというものだ。今週号では、2本の論文が異なる見地からこの問題に取り組み、おおむね似通った結論に達している。Meinshausenたちは、2050年までの温室効果ガスの累積排出量が、産業革命以前の気温を2°C上回る地球温暖化の確率と結びつくとしている。2°C上昇という数字は、危険な気候変動の閾値として広く採用されている。Meinshausenたちは、2°Cを超える温暖化を2100年まで回避しようとするなら、経済的に採掘可能な石油、ガス、石炭埋蔵量のおよそ3分の1しか燃焼できないことを明らかにしている。この化石燃料の量は、現在の消費ペースでは、2029年までに燃やし尽くされてしまう値である。Allenたちは、気候と炭素循環の結合モデルを用いて、既に観察されている変動と一致するさまざまな気候の将来像をシミュレートしている。1750年以降大気中に放出された人為起源炭素は最近5000億トンに達し、Allenたちは、全体で1兆トンとなる炭素放出によって、「安全範囲」の2°C上昇を上回る急激な温暖化が引き起こされる可能性が高いことを明らかにした。それ以降に排出される炭素1トンごとに、温暖化の極大値が予測可能な形で増大し、これは排出の時期には関係がない。したがって、有効な気候変動緩和戦略は、二酸化炭素の累積排出量の上限値を達成できるものでなければならない。

News Features pp.1091, 1094, 1097, Letters pp.1158, 1163 ほか参照

細胞：脂肪滴とオートファジー

Lipid energy on tap

脂肪滴は、トリグリセリドやコレステロールなどの脂質を貯蔵する細胞小器官である。栄養欠乏状態では、脂肪滴内のトリグリセリドが加水分解されて遊離脂肪酸となり、酸化されてエネルギーを供給する。飢餓に対するもう1つの細胞応答は、細胞が自身の構成成分を分解して栄養分を供給するオートファジーである。Singhたちは、脂質代謝の調節にオートファジーがもつ新たな機能を明らかにし、それを「マクロリポファジー」と名づけている。この過程では、脂肪滴とオートファジーにかかわる成分が飢餓時に会合し、オートファジーを阻害すると、脂肪滴での脂質貯蔵が増加する。オートファジーは、脂肪滴の内容物をリソソームへ放出さ

せて分解することにより、脂質の加水分解と遊離脂肪酸の生成を促進する。今回の研究は、脂質代謝の調節でオートファジーが極めて重要な役割を果たすことを明らかにしており、これは脂肪が蓄積される疾患を予防する新たな方法となるかもしれない。

Article p.1131, N&V p.1118 参照

生態：すみかが変われば

Changing places

適応放散の進化的過程は、多くの生態学的要因に左右される。しかし逆に、適応放散は生態系に何らかの影響を及ぼすのだろうか。意外なことに、進化的多様化が生態系に与える影響に関する研究は、まだ少ない。Harmonたちは今回、そうした影響が存在することを実験により明らかにした。最近起

こった適応放散により生じ、現在は異なるニッチに定着したイトヨ2種と、それらの共通祖先種に似たジェネラリストである近縁種1種が、生態系に与える影響を調べたのである。実験は、カナダのプリティッシュ・コロンビア州テクサダ島の複数の湖沼に由来する個体を、湖沼の水を蓄えたメソコスム（疑似環境実験水槽）内に入れて行った。種の多様化は、餌生物の群集構造や生態系の総生産量を変化させ、溶存有機物質に対する間接的影響を介して系内の光透過のスペクトル特性を変化させることが示された。実験は10週間という短期間ではあったが、最近多様化した種が生態系に対して非常に多様な影響を及ぼす可能性があることがわかった。

Letter p.1167, N&V p.1122,
Making the paper p.1075 参照

工学：超高速カメラ

An ultrarapid camera

超高速の実時間光学撮像は、生物学での画像化から衝撃波の研究まで多くの科学分野で使われている。しかし、非常に速い時間スケールで変化が起こる系では、CCD（電荷結合素子）カメラのような従来型の技術は妥協が必要となる。特殊な冷却を行うか、極めて明るい光を使わなければ、撮像速度か感度のいずれかが犠牲にならざるを得ない。これは、センサーアレイからのデータ読み出しに時間がかかり、また高いフレームレート（画像表示速度）では数個の光子しか集められないことがその理由である。今回、UCLAの研究チームが、このような限界を打破する撮像法を開発した。この方法では、従来型CCDの場合より少なくとも1000倍速いフレームレートが得られ、シャッター速度が440ピコ秒という、世界で最も速く連続的動作するカメラができる。この技術、すなわち連続時間符号化振幅顕微鏡法（serial time-encoded amplified microscopy; STEAM）では、2次元画像を連続的な時間ドメインのデータストリームへ写し、同時に光ドメインで画像を増幅する。それから単一ピクセルの光検出器により画像全体をとらえるのである。

Letter p.1145, Abstractions p.1075 参照



T.SATO



Vol. 459 No. 7243
7 May 2009

フローレス原人の骨：原始的な人類が小型なのは停留か、それとも島嶼矮化か

THE FLORES BONES: Primitive hominid retentions or insular dwarfing?

2004年に本誌に初めて報告された小型の人類、*Homo floresiensis* は、インドネシアのフローレス島に約1万4000年前まで生息していた。表紙は、その基準標本LB1の部分骨格である。LB1では、足（くるぶし以下の部分）を部分的に復元するのに十分な材料が残っており、今回それについての論文が発表された。LB1の足は、大きな母趾がヒトのように完全に内転しているが、現生人類に比べると、下肢の残り部分に比して相対的に長く、一部の類人猿に近い。*H. floresiensis* を小型の人類とする考え方には疑いを挟む向きもあり、特に、その脳の小ささは疾患によるものとする意見もあった。新たな研究により、マダガスカルにかつて生息していた現在は絶滅した小型のカバガ、大陸種よりも極端に小さな脳をもっていたことが明らかにされている。このことは、哺乳動物の体が小型化しても脳はそれほど小型化しないという、島嶼矮化の「法則」が正しくないという考えを裏づけるものだ。News & ViewsではD Liebermanが、この2つの論文および*The Journal of Human Evolution*の特別号について論じ、*H. floresiensis*はおそらく本物の人類であり、極めて興味深いヒト種なのだろうと結論している。

Letters pp.81, 85, N&V p.41 参照

宇宙：宇宙時計の針を巻き戻す

Turn back the cosmic clock

世界天文年2009を記念して連載されている天文に関する総説で、今週号では、観測天文学における最後の未開拓分野、すなわち最初に出現した星や銀河、大質量ブラックホールの形成を取り上げている。現在、これらの天体はシミュレーションを通してのみ研究できる。地上設置や人工衛星搭載の現在の望遠鏡は、宇宙の年齢や大きさが今の10分の1以下だったときまでさかのぼって宇宙の歴史を探ってきた。しかし次世代望遠鏡は、最新の理論を基準としながら、宇宙で最初の光を放った天体の解明を妨げている高赤方偏移の壁を乗り越えるだろう。

Review p.49 参照

地球：風変わりな火山

An exotic volcano

タンザニア北部にあるオルドイニョ・レンガイ火山は、カーボナタイト溶岩を産出する世界で唯一の活火山である。この奇妙な溶岩は、50パーセント以上が炭酸塩鉱物で、ほとんどケイ酸塩を含まない点で極めて珍しいものである。Fischerたちは、オルドイニョ・レンガイ火山噴火の際に採取された火山ガスは、このカーボナタイトが大洋拡大中心から遠く離れた位置で産出されているにもかかわらず、大洋中央海嶺に沿って

噴出されるガスと、意外にもほとんど区別がつかないことを示した。このことは、異例なほど炭素を多く含むマントルがオルドイニョ・レンガイ火山のカーボナタイトマグマの源であるという説とは反対の結論となる。このカーボナタイトは、ケイ酸塩マグマと混合しないことにより浅部地殻で形成され、ナトリウム含有量が多いため、噴火条件下でも安定になっていると考えられる。

Letter p.77 参照

材料：力に応答するポリマー

Force-responsive polymers

生物の世界は、機械的刺激に対して能動的・機能的に応答する材料系であふれており、それらによって、触覚、聴覚、組織や骨の成長といった生理学的過程が実現する。これに対して、ポリマーの場合は、大きな応力をかけると共有結合が切れて、損傷や破壊が生じることが多い。Davisたちは今回、合理的に設計を行った合成材料ならば、機械的応力によって材料特性を役に立つように変えられることを実証した。これは、機械的応力に応じて開環反応が起こると赤く変色する化学基を組み入れることによって実現され、塑性変形の蓄積を直接測定できた。この研究の基礎となる原理により、ほかの力応答性化学基の開発も可能になると考えられ、損傷検知から完全再生型自己修復に至るまで、

目的とする機能を合成材料にもたせることができそうだ。 Letter p.68, N&V p.45 参照

細胞：第3の伸長因子

A third elongation factor

リボソームにはさまざまな因子が結合して、翻訳開始、伸長や終結を助けている。タンパク質合成ではこれまで、普遍的に保存されている翻訳伸長因子はEF-Tu/eEF1AとEF-G/eEF2の2種類だけとされてきた。今回、出芽酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) でのタンパク質合成について新たな研究が行われ、これまで翻訳開始段階にかかわると考えられていた因子 eIF5A の役割が一転し、伸長段階で中心的な働きをしていることがわかった。eIF5Aは珍しいアミノ酸ハイプシンを含む点が特殊で、このハイプシンが伸長促進作用に必要とされる。eIF5Aがない場合にみられる異常から考えて、この因子はeEF2とともにリボソームの転位段階で作用していると考えられる。

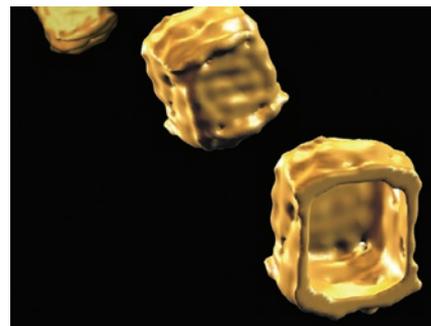
Letter p.118, N&V p.44 参照

工学：ナノ材料の小さな箱

Nanomaterials: little boxes

ナノ構造体の自己集合へのDNAの使用は、化学や分子計算、またナノテクノロジーなどの新興分野での応用が期待されている。特に有望であることが示された方法の1つが、「DNA折り紙」として知られているものだ。P Rothemundにより開発されたこの方法では、長い一本鎖ウイルスDNA配列を、短い合成オリゴヌクレオチドの助けで折り畳んで、任意の形の平面ナノ構造体を作る。今回Andersonたちは、DNA折り紙法を3次元に拡張し、外部から与えられる「かぎ」によって開くことができる、 $42 \times 36 \times 36 \text{ nm}^3$ のアドレス指定可能なDNAの箱を構築した。このDNAナノ容器の内部区画への制御されたアクセスにより、例えば、多重配列信号の論理センサーや、ナノ荷物の制御された放出など、いくつかの興味深い応用が可能となりそうだ。

Letter p.73, Abstractions p.7 参照





Vol. 459 No. 7244
14 May 2009

損傷の制御: アカパンカビの DNA 修復にかかわる低分子 RNA 群 DAMAGE CONTROL: Small RNAs involved in DNA repair in *Neurospora*

RNA 干渉 (RNAi) は、菌類からヒトまで広く保存されている遺伝子サイレンシング機構である。ハイスルーブット塩基配列解読によって、動植物には大量の低分子非コード RNA が存在することが明らかになっているが、その多くはまだ機能が判明していない。原始的な真核生物では、RNAi 経路は保存されているものの、同種の低分子 RNA が存在するかどうかについては、ほとんど研究されていない。今回、糸状菌の一種アカパンカビ (*Neurospora*) で、新種の低分子 RNA が同定された。Argonaute タンパク質 QDE-2 と結合することから qiRNA と名づけられたこの RNA は、QDE-2 と同様に、DNA 損傷に応じて出現する。長さは約 20 ヌクレオチドと、アカパンカビ siRNA よりはやや短い。アカパンカビ RNAi 変異体は DNA 損傷に対する感受性が高いことから、qiRNA がタンパク質の翻訳の阻害因子として DNA 修復にかかわっていることが示唆される。

Letter p.274 参照

ワット当たりほぼ 70 ルーメンの明るさをもつ蛍光灯などの既存技術と同等の効率が必要されるだろう。今回、内部量子効率の高い新発光層構造と、取り出し効率を向上させるために高屈折率ガラス基板とを用いた OLED で、実際にワット当たり 90 ルーメンという値が達成された。

Letter p.234, Abstracts p.138 参照

医学: 世界の見方が違っている

A different view of the world

ヒトの乳児は誕生の数日以内に、非生物学的な動きよりも生き物のような動きのほうを選んで目を向けるようになるが、この能力はほかの多くの動物種にも共通している。今回、自閉症の 2 歳児に関する研究で、こうした子どもは生き物のような動きをする光点表示 (「いないいないばあ」のような単純なゲームをしている人のように活発に動く光点の集まり) には目を向けないが、自閉症の徴候を示さない子どもが無視するような別の特徴のほうに興味を示すことがわかった。この行動上の違いは、自閉症の脳の機能的変化を反映している可能性があり、自閉症者にみられる社会的相互作用の問題につながっているかもしれない。

Letter p.257, Making the paper p.138 参照

考古: 最古の女性像

An early view of womanhood

「ホーレフェルスビーナス」は、性的特徴が異様なまでに誇張された高さ 5 センチメートルの女性小立像で、3 万 5000 年以上前にマンモスの牙を彫って作られた。このビーナス像は、2008 年 9 月に、ドイツ南西部のホーレフェルス洞窟で、層序のはっきりした厚いオーリニャック堆積層の底部から、6 つの断片に分かれた形で発見された。今回のビーナスは、グラベット文化に属する有名な「ビーナス像群」よりも 5000 年古く、知られているかぎりでは最古の造形芸術品と考えられる。

Letter p.248, N&V p.176 参照



医学: トリパノソーマの分化

Trypanosome differentiation

睡眠病の病原体であるトリパノソーマ・ブルセイ (*Trypanosoma brucei*) は、ほかの多くの寄生物と同様に、昆虫と哺乳類宿主がかかわる複雑な生活環をもっている。ヒトの血液中で生活する段階からツェツェバエ中で生活する段階への分化には、低温とクエン酸 (あるいは *cis*-アコニット酸) という 2 つのシグナルが必要であることはずっと以前から知られていたが、これらのシグナルが受容される機構は明らかではなかった。今回、トリパノソーマの分化に必要な環境シグナルを伝達する細胞表面分子が、トリパノソーマのカルボン酸輸送体ファミリーの PAD であることが明らかとなった。血流型のトリパノソーマのうち伝播可能な「stumpy (ずんぐり)」型はほっそりした型より頑丈で分化能をもつが、PAD タンパク質をもっているのがこの stumpy 型であることは重要である。

Article p.213, N&V p.175 参照

宇宙: 惑星形成一ちりからできた結晶

Crystals from the dust

原始惑星系円盤は、太陽系の前駆天体であると考えられており、星間ガスと星間塵の雲で、主に非晶質のケイ酸塩粒子からなる。にもかかわらず、初期太陽系由来の彗星や隕石中に見つかる粒子や、若い恒星のスペクトルから存在が示される粒子の多くは、1000 ケルビン以上の温度でアニールや凝縮を経たにちがいない大きな結晶質粒子である。だが、これらの粒子は、このような加熱を一度も受けたことがない物質によ

り取り囲まれている。この一見矛盾した現象については、何度も理論化が試みられてきた。Ábrahám たちは、若い太陽類似星であるおおかみ座 EX 星 (EX Lupi) のアウトバースト (突然の増光) 時のスペクトル中の中赤外波長域の構造を報告し、これを結晶質フォルステライトに帰属している。これらの構造は、EX Lupi の最近起こったアウトバースト以前にはみられなかったものだ。つまりこれは、天体での結晶形成を直接的に観測した初めての例である可能性がある。恒星のアウトバーストからの熱によるアニールは、原始惑星系円盤について今まで考えられたことのない結晶化過程である。一方、D Vinković は、結晶が生じる可能性のある別の新しい機構を提案している。原始惑星系円盤から生じる赤外光は理論上、1 マイクロメートルよりも大きい粒子を円盤内側から打ち上げることが可能で、このような粒子は円盤上を滑っていく間に恒星の輻射圧によって外向きに押し出される。粒子は、一定の粒子サイズと固体密度を支えるのに十分な赤外線輻射圧を作り出すことのできない低温の円盤領域に至ると再び円盤内に戻るというのだ。

Letters pp.224, 227, N&V p.173 参照

工学: 高効率白色発光ダイオード

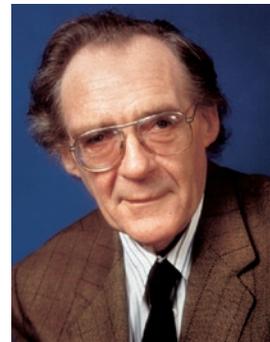
The white light of technology

有機材料を利用した発光ダイオードは OLED とよばれ、照明やディスプレイに向けた技術として浮上しつつある。白色 OLED の性能が向上すれば、例えば大面積照明光源などに使える可能性がある。それには、

社説

John Maddox (1925-2009)

ジョン・マドックス元編集長を偲んで



Nature Vol.458(807)/16 April 2009

Nature に変革をもたらした編集長を追悼する。

4月12日の日曜日に飛び込んできた Sir John Maddox (サー・ジョン・マドックス) の訃報を、私は *Nature* の同僚とともに深い悲しみをもって聞いた。我々は彼を「JM」とよんでいた。

当惑もあった。最近はずがに体力の衰えが目についたものの、彼は常に行動していて、あらがいがたく、誰にも止めることができなかつたからである。JM は、そういう男だった。ある人は、彼の編集会議をイラク戦争における米軍の『衝撃と畏怖』作戦にたとえた。またある人は、彼を「鉄の意志」ならぬ「鉄の気まぐれ」の男とよんだ。彼は数え切れないほどのタバコを吸い、赤ワインのグラスを重ねて生きてきた。その多くは、深夜、これ以上遅れたらその週には掲載できないというぎりぎりの時間に Editorial (社説) を書くときに消費された。

Nature がジョンに公式に捧げる感謝の言葉は4月23日号で発表する予定であるが (www.nature.com/jm を参照されたい)、彼が *Nature* の編集長を務めていた時代に起きた、おもだった出来事のいくつかを、一足先にこの場で振り返っておいてもかまわないだろう (JM は絶対に分離不定詞を使わなかつた)。ジョンが最初に *Nature* の編集長に就任したのは1966年のことだった。彼は4代目の編集長だった。*Nature* の創刊は1869年だが、歴代の編集長の在任期間は非常に長く、初代のノーマン・ロッキアーは50年も編集長を務めている。ジョンは1973年に一度、任を退いてデビッド・デイビスに譲ったが、1980年に復帰した。私が彼の後任になったのは、1995年12月のことである。

ジョンが今日の *Nature* の基礎を築いたのは、1期目の編集長時代のことだった。重要なのは (JM は文を副詞で始めるのが好きだった)、いささか身びいきなところもあったそれまでの密室的な論文選定システムを捨て、査読のシステムを確立したことである。ジョンが最後に携わっ

た号の退任の挨拶のエッセイには、このあたりの経緯が彼一流の読みやすい文章で綴られている (*Nature* 378,521-523;1995)。

彼は、自ら断行したこの変革に対して複雑な態度をとっていた。彼はよく、「1953年に査読のシステムがあったら、DNAの二重らせん構造についてのワトソンとクリックの論文は絶対に採用されなかつただろう」といつていた。彼はまた、査読のシステムは真にオリジナルな研究が世に出るのを妨げるのではないかという不信感を常にもっていて、1期目の編集長時代には論文を査読にまわさないこともあった。

Nature に確固たるジャーナリズムの伝統を築いたのもジョンだった。彼は多くの才能に恵まれていたが、何よりもまずジャーナリストであり、その肩書きにも腕前にも誇りをもっていた。彼は物理学者として教育を受け、研究に従事していた。彼は圧倒的な知性を持ち、論文を読んだとたんに、その研究内容を吸収することができた。彼は腕利きのサイエンスライターであり、新聞の科学欄記者としてかなりの経験を積んでから *Nature* に乗り込んできた。今日の科学メディアを代表するライターや編集者の多くが、彼の時代に *Nature* で仕事をしている。彼らはしばしば独自の方向性を見いだしていったが、編集者として論説を書く機会を見極める方法などはジョンから学んだ。ジョンは、署名なしの Editorial において「*Nature* の声」を確立した (とはいえ、それはしばしばまぎれもなくジョン自身の声だった)。数ページにわたる広範な補足記事をつけ、科学の現状や各国の指導者についての鋭い洞察を説得力ある語り口で報告し、意見を述べるようにしたのも彼である。

人々はもうもうたるタバコの煙のほかに、ジョンについてどんな想い出をもっているのだろうか？ 私が読者からよく聞くのは、「彼は、この分野の専門家の多くがその重要性に気づく前から、この研究計画を擁護してくれた」と

いう声である。またある人は、彼の決定や意見にはしばしば矛盾があったと語る。こうした矛盾を不快に思う人々もいたものの、論争から距離を置いていた人々は、そのにぎやかさを好意的に評価していた。彼を個人的に知っていた人の多くは、辛辣で鋭いウィットと、時おり垣間見せる人間的な温かみを思い出すだろう。

JMは唯一無二の存在だった。彼がいなくなった今、彼を知り、彼から学んできた我々は、世界の一部が欠けてしまったような寂しさを感じている。けれども、JMの強靱な精神は、今後も*Nature*の繁栄を支え続けてくれるだろう。

Nature 編集長 Philip Campbell (フィリップ・キャンベル)

ジョン・マドックスとの思い出

私は、東京特派員として*Nature*に入社した1986年から、1995年12月にサー・ジョン・マドックスが引退するまでの間、彼と一緒に多くのプロジェクトを手がけるという幸運に恵まれた。

ジョンと私は、1992年10月15日号の日本特集(*Nature* 359, 573-582;1992)と1995年12月7日号の中国特集(*Nature* 378, 537-552;1995)を共同で執筆した。なかでも後者は、ジョンが引退する前に*Nature*に書いた最後の大きな特集となった。この中国特集を書き上げた直後の1995年11月には、私はジョンのふりをしてオーストラリアのシンポジウムに出席するという光栄な役割も演じた。直前になってジョンの都合がつかなくなったからである。私はジョンの言葉をそのまましゃべったのだが、本物には遠く及ばなかった。

私たちは、しばしば日本のヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラムを取り上げた。このプロジェクトは欧米ではひどく誤解されていたからである。日本はこのプロジェクトを通じてすばらしい科学的貢献をしてきたが、その業績は今日もなお(特に日本国内で)過小評価されている。けれども私たちは、このプロジェクトへの理解が深まるように全力を注いできたと自負している。

ジョンについて何よりも印象深いのは、ありとあらゆるテーマについて、洞察に満ちた記事を大量に執筆していたことである。彼は、日本の科学政策についても、高エネルギー物理学やビッグバン宇宙論や分子生物学の最新の動向についても、非常に短い時間で、質の高い文章を書くことができた。

私は1986年12月のある月曜日のことを覚えている(月曜日は、その週の*Nature*に掲載するニュースの締め切り日である)。ジョンと私は、東京、岡崎、京都で開催する会議の関係で、朝から夕方まで過密スケジュールをこなしていた。その夜、夕食後に京都大学の教授と一緒に飲酒后、ジョンはボトルに半分残った赤ワインをもってホテ

ルの部屋に引きあげた。*Nature*の論説を書くためである。ジョンは毎週、2つか3つの記事とともに2ページの社説を書き、最近発表された論文を取り上げる1ページのNews & Viewsについても中心的な役割を果たしていた。翌朝、私は早朝の東京行きの新幹線に乗るために、ホテルのスタッフに頼んで彼の部屋のドアを開けてもらわなければならなかった。それでも、彼の論説は締め切りに間に合ったのである…2、3時間ほど遅れていたかもしれない!

ジョンが考えることは、時代の先を行っていた。彼は1970年代の初頭には、*Nature*の姉妹紙として*Nature New Biology*と*Nature Physical Sciences*を創刊し、本誌と合わせて1週間に3冊のペースで科学誌を発行することに挑戦している。彼の*Nature*編集長としての最初の任期が終わったとき、この試みも打ち切りになってしまったが(このあたりの経緯については、今号p.8のWalter Gratzerの追悼文を参照されたい)、*Nature Publishing Group*は今、*Nature*の名を冠した自然科学系の学術誌を30種類以上も発行しているのだ。

1980年代の後半には、ジョンは私たち同僚に対して、論文の全文を「データベース」に入れ、印刷版にはアブストラクトのみを掲載するという構想を語っていた。そうすれば、*Nature*が毎週掲載する論文の本数を増やせるだけでなく、彼が愛してやまない前半のニュース部分に割り当てられるページ数も増やすことができる(ジョンがこの構想を語っていたのは、インターネット時代が到来する前のことであることに注意されたい)。彼のこの先見の明あるアプローチが実現するのはいつのことになるだろう?

ジョンはユニークな人物だった(もちろん、すべての人がユニークな存在だ。しかし、なかには際立ってユニークな人がいる)。彼の思い出と影響は、肉体の死を越えてはるかに生き続けるだろう。

Nature Publishing Group (NPG)

パブリッシング・ディレクター

NPG ネイチャー アジア・パシフィック 代表取締役社長、CEO

David Swinbanks (ディビッド・スウィンバンク)

追悼

John Maddox (1925-2009)

ジョン・マドックス (1925～2009)

Walter Gratzer

Nature Vol.458(983-986)/23 April 2009

2009年4月12日に死去したジョン・マドックスは、1966～73年と1980～95年に *Nature* の編集長を務めた。それまで科学研究の評価の点でもジャーナリスティックな報道活動の点でも、仲間意識や素人くさがりが抜けなかった *Nature* は、彼が編集長に就任したことをきっかけにして、挑発的で専門的な学術誌へと大きく変貌した。

John Royden Maddox (ジョン・ロイデン・マドックス) は、科学と科学政策に多大な影響を及ぼした。近年のジャーナリストや編集者を見わたしても、彼ほどの影響力をもつ者は皆無である。科学者として大学で研究に従事した経歴をもち、生涯にわたって科学への情熱を燃やし続けたマドックスは、理解の深さと権威の点で稀有の科学ジャーナリストだった。多くの研究領域、特に理論物理学と宇宙論の分野で、彼は専門家と同じレベルで技術的な問題を論じ合うことができた。 *Nature* の編集長として、彼はどのような論文も鵜呑みにすることはなく、著者や査読者と議論になると、自ら方程式を解いて論争を解決することで知られていた。

マドックスの知性は飽くことを知らなかった。あらゆる知識を吸収する能力をもち、驚くべき記憶力に恵まれていた彼は、ほとんどどんな話題についても洞察に満ちた発言をし、文章を書くことができた。それは、いとまたやすいことのようにみえた。 *Nature* の編集長として2回の長い任期を務める間、彼はよく秘書のメアリー・シーハンに論説を口述筆記させていたが、後で手を加える必要があることはめったになかった。

マドックスは、1925年にウェールズ南部のスウォンジ近郊に生まれた。地元の学校に進んだ彼は、16歳で化学を学ぶためにオックスフォード大学のクライストチャーチ学寮の奨学金を得た。彼はラグビーに熱中したりしてにぎやかな大学生活を送りながら、しだいに理論物理化学への興味を深めていき、分子軌道論の第一人者であるチャールズ・クールソンとともにロンドン大学のキングズカレッジでの研究プロジェクトに乗り出した。

マドックスはけっして博士論文を書こうとしなかった。彼は1949年にクールソンのもとから理論物理学の助講師とし

てマンチェスター大学に赴いた。当時、マンチェスター大学では最高水準の自然科学研究が行われており、アラン・チューリングやF. C. ウィリアムズが最初の高度なコンピュータの開発に取り組んでいた。マドックスはしばらくの間、チューリングとともにプログラマーとして仕事をした。

数年にわたり理論物理学の研究と教育に従事したマドックスは、稀有な才能をもつ理論家とみなされていたが、講師の給料で家族を養うことの厳しさを感じていた。そのため、1955年にマンチェスター・ガーディアン紙(今日のガーディアン紙)から大学の2倍の給料で科学記者として働かないかと打診されたとき、彼はそれを拒絶することができなかった。自分の研究成果を発表することを常に躊躇していた彼が、毎日コラムを発表するという挑戦を受けて立ったのである。彼は、ひとたびテーマを指定されると短時間で非常におもしろい2000語のコラムを書きあげることができたので、当初より新聞社から重宝がられた。

1962～63年にかけて、マドックスはガーディアン紙の仕事で1年休んで米国に渡り、ニューヨークのロックフェラー医学研究所(今日のロックフェラー大学)で教鞭をとった。彼は少しだけ講義をし、科学について多くのことを語り、本人の言葉を借りるなら「くだらない論文を書いた多くの人々を説得して、その発表を阻止」した。研究所の所長であったDetlev Bronkは、マドックスを改めて終身教授として迎えたいと申し入れたが、彼はすでに新しい挑戦に打って出ようと決意していた。それは、英国に戻ってNuffield財団に参画し、野心的な科学教育計画を率いることだった。

そんな中、*Nature* からマドックスに声がかかった。1965年に編集長のジャック・プリンブルが死去したため、当時 *Nature* を所有していたマクミラン社の創業者一族であり、

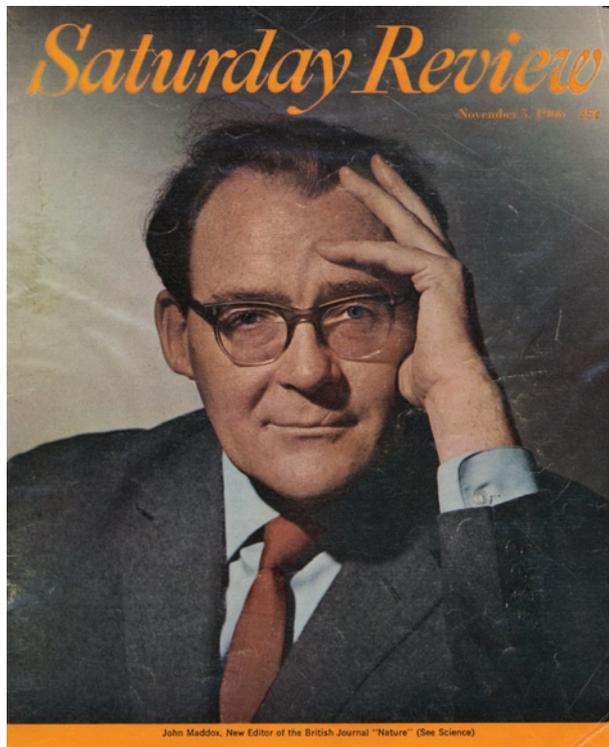
社長であったモーリス・マクミランが、マドックスに編集長への就任を打診したのである。その頃の *Nature* は嘆かわしい状態にあった。発行部数はわずか1万1000部で（そのうちの3000部は海外で販売されていた）、報道内容は貧弱で精彩を欠いており、スタッフの中に科学者は1人しかいなかった。さすがのマドックスも、瀕死の学術誌の編集長になることには躊躇した。彼はマクミランに、掲載待ちの論文はどのくらい残っているのかと尋ねた。マクミランが *Nature* 編集部の人にやって論文を数えさせると、その数は2300本もあった。自ら編集部を訪れたマドックスは、掲載待ちの論文が投稿された月ごとに床の上に積み上げられて、ガウス分布のヒストグラムを作っているのを見た。彼は、この仕事を引き受ける条件の1つとして、掲載待ちの論文をなくすために18か月間ページ数を増やすことを承諾させた。彼は毎日、論文がぎっしり詰まったスーツケースをもち帰り、帰宅後や週末の時間を使って1本残らず綿密に吟味した。

わずか数か月で、*Nature* は停滞から回復した。マドックスのペンからは科学政策に関する痛烈な論説が繰り出され、活気を取り戻した *News & Views* では科学の現状が論評され、査読のシステムが導入された。マドックスは有能なスタッフを補充し、自分のもつエネルギーと情熱を吹き込んでいった。彼はタイムズ紙の科学ニュースコラムも執筆し、1970年には米国ワシントンD.C.に *Nature* 初の海外オフィスを設立した。

1973年に出版方針をめぐって経営陣と対立したマドックスは *Nature* 編集長を辞任し、デイビッド・デイビスがその後任となった。マドックスはその頃、*Nature* の姉妹誌として *Nature New Biology* と *Nature Physical Sciences* の出版を開始しており、事実上、毎週3冊の雑誌を発行していた。この先見の明ある試みが自分の退陣により放棄されてしまったことを、彼はひどく残念がった。マドックスはフリーのライター兼編集者として2年間活動した後、Nuffield財団の理事に選任された。けれどもやがて、事業を展開する機会の少なさに苛立ち始め、1979年にマクミラン社から *Nature* の編集長への復帰を打診されると、それを受け入れた。

マドックスが不在の間も、*Nature* はまずまずの業績を上げていたが、その発行部数はわずかに減少していた。マドックスは理想の *Nature* 像を実現するために、新たな情熱をもって活動を再開した。彼はスタッフを増やし、フランスのル・モンド紙で科学に関する記事を連載するよう手配した。*Nature* は科学・技術の最重要分野の会議も後援し、英国ケンブリッジ、ボストン、パリ、東京などで開催された会議には多くの聴衆が詰めかけた。

米国に続いて、フランス、ドイツ、日本にも編集部が設



米国の評論誌 *Saturday Review* は、1966年にマドックスが *Nature* の編集長（1期目）に就任したことをカバーストーリーとして報じた。

置され、*Nature* は真に国際的な雑誌になった。発行部数は5万7000部まで伸び、その評価もうなぎのぼりだった。「すべての科学者（およびその他の多くの人々）にとって、*Nature* を欠かすことのできない雑誌にし、毎週の配達を待ち焦がれさせるようにしたい」というマドックスの夢はほとんど実現していた。

マドックスは停滞を毛嫌いした。彼は無数のアイデアをもっていて、その多くは文句なしにすばらしいものだったが、なかにはスタッフをうろたえさせるようなものもあった（彼はしばしば、スタッフに気を緩めさせないためだけにこうしたアイデアを強行した）。科学のおよびジャーナリスティックな成功を常に追い求める彼のやり方は、しばしば自らを苦境に追い込んだ。時に彼は周囲の猛反対を押し切って、論争の種になりそうな論文を掲載させた。そんなときには、編集部の悲鳴に近い反対も、査読者の強い意見も彼を止めることはできなかった。一度か二度、そのような論文が査読者の反対意見とともに掲載されたことがある。

こうした逸話の中で最も悪名高いのは、1988年にパリのジャック・バンヴェニストの研究室から投稿された論文をめぐる論争である。論文は、分析混合物中に分子が1つも含まれていないほど高度に希釈された物質が、なおも生物学的影響を及ぼすと主張するものだった。マドックスはこの論文

を *Nature* に掲載し、その少し後に、彼自身とアメリカ人査読者、有名なマジシャンのジェームズ・ランディによるバンヴェニスト研究室への訪問に基づく反駁記事を掲載した。ある記者は、「*Nature* が掲載する論文を選択するシステムが十分に明らかになった。編集長と奇術師とウサギが選んでいたのだ」と書いている。マドックスはその後の一連の騒動を楽しみ、悪びれるようすもなかった。

科学の進歩が続くと、新しい雑誌の創刊を求める声が高まってきた。*Nature* も、他の有名な学術誌も、掲載を求める質の高い論文のごく一部しか取り上げることができなくなっていた。そこで、*Nature* の月刊姉妹誌を創刊して、ページの不足や、専門的すぎる (*Nature* は昔も今も、幅広い層の読者が興味をもてる論文を取り上げることをめざしている) などの理由で本誌では取り上げられなかった論文を掲載することになった。1992年に最初に創刊された *Nature Genetics* は、たちまち大成功を取めた。これらの姉妹誌は *Nature* の名を冠しているが独自に編集されており、現在、15のリサーチ誌と15のレビュー誌が刊行されている。

ジョン・マドックスは、1996年に科学への貢献によりナイト爵に叙された。2000年には王立協会の名誉会員に選出された。彼がその著書や *Nature* の論説、新聞や雑誌の記事、公開講義、テレビやラジオの番組において科学と国内外の科学者の声を代弁していることは広く認知されていた。明らかに彼の発言がきっかけになって政府機関の科学政策が再検討されることもあった。マドックスは、無責任な報道をする者を敵に回すことを恐れなかった。英国のサンデー・タイムズ紙が AIDS の原因について社会的に危険な、間違った仮説を

支持したときには、これを徹底的にやり込めた。マドックスは、*Nature* の編集長として22年の充実した年月を重ねた後、1995年に引退した。

マドックスには『What Remains to be Discovered (邦題: 未解決のサイエンス)』(Free Press 刊, 1997)をはじめとする数冊の著書があるが、これらはいずれも刺激的な内容で、広く注目を集めた。彼は根っからの旅人であり、講演の依頼や会議への参加要請があると、それがどんな場所であっても断ることはめつたになかった。彼はロシアで配布するために *Nature* の月刊ダイジェスト版を創刊し (残念ながら現在はなくなってしまった)、ウェールズにもっていた別荘に近いハイオンワイで開催される有名な文学フェスティバルに科学の要素を付け加え、良心的な評議員となった。

ジョン・マドックスとともに過ごす時間は魅力的で刺激的だった。彼の交友範囲は科学分野を越えて広がっており、*Nature* 編集部やその他の場所で彼に世話になった人々の多くは、彼が引退した後も頻りに連絡を取り合っていた。彼はわずかに口ごもり、常に礼儀を忘れなかったが、怠け者やうぬぼれ屋には手厳しく、同じ情熱をもつ人々のことは無条件に支援した。優秀なジャーナリストであり伝記作者でもある妻ブレンダとの間には、一男一女がいる。2人とも、両親に続いてジャーナリズムの世界に入り、すばらしい成功を取っている。前妻の間にも息子と娘がいる。 ■

Walter Gratzer (ウォルター・グラッツァー) は、ジョン・マドックスが最初に任用した News & Views のレギュラー編集者。ロンドン大学キングズカレッジの Randall 細胞・分子生物物理学部門に所属。

経営者がみたマドックス

Nicholas Byam Shaw

ジョン・マドックスが本誌の編集長を務めた1期目(1966~73年)の後半には、後のマクミラン出版社 (Macmillan Publishers Ltd) の一部門である Macmillan Journals の社長も兼務していた。

その結果、マドックスの影響力は *Nature* 一誌にとどまることなく社内に広く及んでいき、さらには、Macmillan Journals が発行するほかの学術誌をもはるかに越えて広がっていった。当時の同社は、歴史ある出版社として、1869年に創刊された *Nature* のほか、ヘンリー・ジェイムズ、トマス・

ハーディ、ラドヤード・キップリング、W. B. イエイツ およびジョン・メイナード・ケインズなどの著作も扱っていた。しかし、同社の書籍や雑誌のリストは古色蒼然としており、入れ替えが行われることもなかったため、より新しい、より主張のはっきりした出版社に追い抜かれるばかりだった。



1960年代初頭のマドックスとその妻ブレンダ。

マドックスは、熱意と優秀な頭脳をもつ新人には、最小限の訓練を受けさせたら（それは必ず職場での実際の作業を通じて行われなければならない）、責任ある仕事をさせてよいと信じていた。この姿勢は、聡明な大学生や大学院生には非常に魅力的だった。実際、マドックスが要求する厳しい水準をクリアした新人たちは大いに活躍した。こうしてマドックスは、若く有能な編集者と科学者を Macmillan Journals によび込んだのである。

この方針は、1960年代末から1970年代初頭にかけて老化した組織を劇的に若返らせ、急成長に転じさせた。マドックスの魅力と Macmillan Journals の成長ぶりをもってしても、才能あふれる人材の野心を常に満たすことはできなかった。一部のスタッフは数年後に退社し、その多くが別の出版社で大成功を取めた。しかし、大半のスタッフはとどまったので、Macmillan Journals は年々豊かになり、ますます活性化していった。

マドックスはまた、*Education and Training*、*Drugs and Society*、*Science Studies* などの新しい学術誌についても責任を負っていた。彼を必要としていたのは科学だけではなかった。彼は、ほかの業務拡張計画にも深く参画した。なかでも重要なのは、あらゆる学問分野（その大半は科学以外の分野だった）の参考図書への関与である。マドックスの社長在任中には、生物学と物理学の論文をより多く掲載するために *Nature New Biology* と *Nature Physical Sciences* という2冊の週刊学術誌を創刊するという実験的な試みも行われた。このアイデアは（少なくとも商業的には）時期尚早であり、姉

妹誌はすぐに廃刊になった。しかし、マドックスが1990年代初頭に再挑戦したときには見事に成功し、彼が1995年に引退したときには、*Nature* の名を冠した月刊学術誌が3冊創刊されていた（現在では、その数はもっと多い）。

マドックスは1975年に Nuffield 財団の理事に任命されたが、それ以前からさまざまな公職についていた。1974年には現在の BBC ラジオ3にあたるラジオ局で *Scientifically Speaking* という隔週の番組を開始して好評を博している。しかし、マドックスの最大の願いは、*Nature* と読者の距離を近づけ、より多くの読者を獲得することにあった。1980年に編集長に復帰してからの彼は、この願いを実現するために力を注いだ。マドックスは相変わらずの鋭い眼力で才能ある原石を発掘していった。彼の励ましは聡明で献身的なスタッフを奮い立たせ、*Nature* はこれまで以上の成功を取めた。

エネルギーあふれるマドックスは、年若い同僚を挑発し、疲弊させることが（時には憤慨させることも）あった。高速道路での彼の運転は、年長の同僚を恐怖に陥れた。彼の情熱は周囲の人々を巻き込んだ。引退するその日まで、彼は人々から尊敬され、それと同じだけ大目に見てもらっていた。彼は退屈に耐えられず、ほかの人を退屈させることができなかった。彼は情が深く、すばらしく頭が切れた。多くの人が彼との友情を大切に、誇りに思っていた。 ■

Nicholas Byam Shaw (ニコラス・バイアム・ショー) は、1964年にマクミラン出版社 (Macmillan Publishers Ltd) に入社し、1969～1990年まで社長を務めた。

後継者がみたマドックス

Philip Campbell

1980年の初頭に飛び込んできた「ジョン・マドックスが *Nature* の編集長として戻ってくる」という知らせは私たちを驚かせた。

その意外性をわかっていただくためには、マドックスを否定するように聞こえる事実を皆さんのお耳に入れる必要がある。人によっては、「そんなことは追悼文に書くべきではない」と思われるかもしれない。けれどもマドックスは、ジャーナリズムとは、そして編集長としての自分の使命とは、何をにおいても真実を明らかにすることであると考えていた。たとえそれがどんなに厄介なものであったとしても。

その頃、*Nature* の編集長を7年間務めていたダイことデイビッド・デイビスは、活動の場を移すことを決意していた。当時、物理系の編集アシスタントだった私は、同僚たちと同様、誰が後任の編集長になるのか心配していた。選挙手続きの一環として、私たちは編集長候補者のリストを見せられたが、そこにピンとくるような名前はなかった。次に起きたことから判断すると、マクミラン出版社の当時の社長であったニコラス・バイアム・ショー（私の前の追悼文を書いた人物）も、このリストの候補者にはあまり興味はなかったようである。

マドックスは、ディビッド・デイビスの前任の *Nature* 編集長だった。彼は、1973年までの7年にわたり絶大な力をもって *Nature* を支配していたため、その退任の背景には穏やかならぬ事情があったと噂されていた。実際、私が1979年に *Nature* に移ってきた当初は、同誌の主要な課題の1つはマドックス色を排し、彼の過大な関与（と当時はいわれていた）のせいで立った「*Nature* の意思決定は気まぐれで、科学論文の掲載も遅い」という悪評を払拭することであると教えられていた。

これで、その後わずか1年あまりでバイアム・ショーが編集長候補者リストも選考手続きも一蹴し、ジョン・マドックスを新編集長に据えろと告げたときに私が感じた驚きと上級スタッフの驚愕（少なくとも1人は、これを理由に退職した）は、容易に想像していただけるはずである。当時のディビッド・デイビスの心中をあれこれ推測すべきではないだろう。ただ、彼が良識とプロ意識をもって引き継ぎを行ったことは確信している。

こうしてマドックスは *Nature* の編集長に返り咲き、前回と同じ影響を及ぼした。つまり、*Nature* を成功に導いたのである。

私が *Nature* の物理系の編集者として仕事をしていた時代を思い出すと（私は1988年に *Physics World* を創刊するために *Nature* 編集部を去っている）、マドックスは科学論文の選択にはあまり関与していなかった。とはいえ、彼自身が引退時に回想しているように（*Nature* 378,521-523;1995を参照されたい）、1966年に最初に *Nature* の編集長に就任したときに、それまで口コミに基づいて行われていた論文評価に査読のシステムを導入したのは彼だった。デイビスの時代を経てマドックスが2度目に編集長に着任した頃には、この過程における編集長の役割は小さくなっており、その分、各分野の研究コミュニティに近い専門編集者が大きな役割を果たすようになっていた。この点は今日も同じである。

マドックスは、*Nature* に査読プロセスを導入した張本人であるにもかかわらず、査読のせいで本誌が保守主義に陥ることを常に心配していた。この心配は、「DNAの構造についてのワトソンとクリックの論文は今日の査読システムでは、要件を満たさなかつただろう」という彼の発言に最もよく表れている。この論文は、ワトソンとクリックが所属していた研究室の上司であるローレンス・ブラッグとジョン・ランドールからの推薦を受けて掲載されたのである（いうまでもないことだが、著者の研究室の上司の推薦を受けて *Nature* が論文掲載を決定するなどという情けない話は、今日では笑い話である）。

しかし、マドックスの助手として欠くことのできない役割を果たしてきた、尊敬すべきメアリー・シーハンは、彼の仕事の流儀をよく知っていた。*Nature* のスタッフに掲載を却下された論文の著者がこの決定を覆すようマドックスに訴えてきた場合など、マドックスが直にタッチすることになると、わずか数本の論文の処理に限りなく時間がかかった。私は実際、彼の車の後部座席から、まだ返事を書いていない訴えの手紙の山が見つかったと聞いても少しも意外に思わないだろう。その一方で、彼はときどき本当に重要な論文を見つけて歓喜し、記録破りのスピードでその処理と掲載ができるよう手配することもあった。

マドックスは、2度目の任期では投稿されてきた論文の評価を人に任せられるようになっていたものの、査読者の場合と同様、*Nature* のスタッフが保守的になりすぎ、（特に生物学の注目領域で）高いインパクトファクターを獲得しようとするあまり、大胆なアイデアが認められなくなることを心配していた。私は、新しい偉大なアイデアを見落とすのではないかという不安をもたない編集者などどこにもいないと思う。私たちは皆、さまざまな方法でこの問題に取り組んでいるので、読者諸氏には安心して論文を投稿していただきたい。マドックスは時に、査読にまわしても論文の発表が遅れるだけだと確信したときには、査読のシステムを無視したり、完全に放棄したりした。彼にはその意欲だけでなく、権限もあったからである。マドックスは、査読システムを無視してフレッド・ホイールの宇宙論の論文を掲載した（彼は、ホイールのような型破りの科学者を最も尊敬していた）。また、リチャード・リーキーがオールドバイ渓谷で発見して論争を引き起こした最古のヒト科動物の化石についての論文は、査読システムを完全に放棄して掲載された。

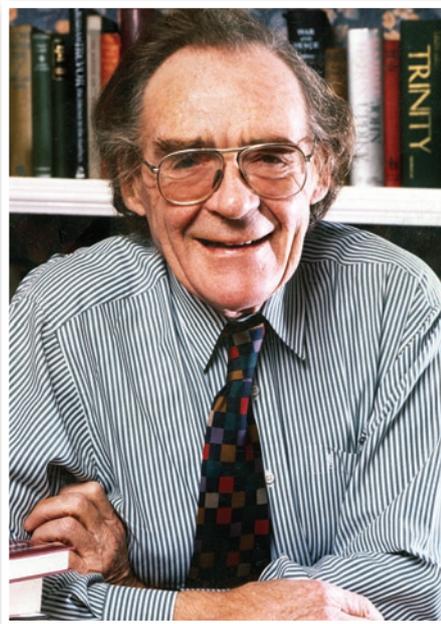
けれども、マドックスが *Nature* の編集長として君臨した2回の任期の中で最も大きな影響を及ぼしたのは、ジャーナリストとしての側面だった。彼の2度目の任期である1980年代から1990年代にかけて全世界での発行部数が大幅に増加したのは、綿密なマーケティングだけでなく、彼のジャーナリスティックな本能にも従ったことが吉と出たからである。本能に従ってすることは「仕事」ではなく「遊び」である。*Nature* のどの編集長（そして多くの同僚）もそうだが、マドックスはあきれるほどよく仕事をした。けれども彼は、競争の激しい業界を生き残るためには、何よりもまず仕事を楽しまなければならないということをよく知っていた。騒動を引き起こしそうな行動に出ようとするとき、彼はいつも「そのほうが楽しいからだ」といつていた。いかにもマドックスらしいこの言葉が出る時、同僚はいつも痛快さと不吉な予感がせめぎ合う、何ともいえない気持ちになった。

編集者としてのキャリアを通じて、彼は膨大な量の文章を執筆し、科学への興味はとどまることを知らなかった。恐ろしく記憶力がよかった彼は、普通の人なら正確さを期するために資料にあたるまで記憶に頼って書くことが多かったので、少なくとも後年の著作には事実関係の間違いが散見され、そのことが玉にきずとなっている。けれども私やほかの多くの読者にとって、そのような間違いのために、彼がいわんとすることの刺激的な質の高さが損なわれることはめったになかった。

マドックスは多くの論争を引き起こし、そのいくつかは強い印象を残した。彼は、環境問題における「政治的正しさ」を嫌悪していた。また、科学的直観から、地球環境の変化の危険性が誇張されすぎていると感じていた。この2つの感情からマドックスが仕掛けた論争に彼自身は夢中になっていたが、世間にはほとんど影響を及ぼすことができなかった。彼は、『Doomsday Syndrome (邦題; 人類に明日はあるかー反終末論)』(McGraw-Hill刊, 1972) という著書でレイチェル・カーソンの『Silent Spring (邦題; 沈黙の春)』を攻撃しているが、その核心には危険が誇張されすぎているという科学的直観があった。彼はその後も、カール・セーガンらが擁護した「核の冬」のシナリオや、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の統一見解にも反対したが、これには科学的直観だけでなく感情的なものも混ざっていた (と私は思う)。

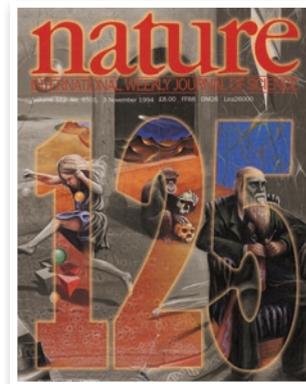
ほかのいくつかの論争は、私がみるかぎり、より興味深いものであり、編集者仲間も関心を寄せていた。マドックスは、HIVはAIDSの原因ではないとする Peter Duesburg の主張、「低温核融合」、水が「記憶」をもつというジャック・バンヴェニストの主張を真っ向から攻撃した。彼は常々、自分が重大な関与をしたこの3つの悪名高い論争についての本を書きたいと願っていた。その願いが叶わなかったことを、私は極めて遺憾に思う。マドックスがこれらの論争を楽しんでいたことは明らかだが、私は彼がこのような動きに出た理由は、いたずらにセンセーションをねらったからではなく、知的に糾弾する義務があると感じたからだと確信している。彼は本当に、HIVとAIDSとの関連に疑いを投げかける人々が科学的に悪質であると考え、その信念に従って運動を展開したのである。彼はまた、低温核融合の主張とそれに対する反証が科学的に健全な方法で行われることを希望したからこそ、当初の主張の1つを却下し、実験による反証の1つを掲載した自分の判断が十分な根拠に基づいていることを明らかにするという手順を踏んだのだ。

バンヴェニストの論文をめぐるエピソードは、権威ある研究室から科学的に不合理な結果を報告する論文が投稿さ



引退し、ナイト爵に叙された頃のマドックス (1996年)。

1969年のNature創刊100周年記念号(上)と1994年の125周年記念号の表紙(下)。どちらも編集長はマドックスだった。



れ、査読者が明らかな不備を指摘することができない場合の編集長の対応についての極端な一例として、科学出版の記録に残る出来事である。マドックスは、論文を掲載してから奇術師ジェームズ・ランディを含む調査チームを研究室に送り込んだ。バンヴェニストは彼らの前で同じ実験を行ったが、論文の結果を再現することはできなかった。事のしだいは、フィリップ・ボールの著書『H₂O: A Biology of Water (邦題; H₂O—水の伝記)』(Phoenix刊, 2000)で詳しく述べられている (フィリップは、この論争が起きたときにNatureで仕事をしていた)。私はときどき、「あなたが当時の編集長だったら、同じようなことをしましたか？」と尋ねられる。後知恵ならいくらでもいえるが、私なら、掲載の後ではなく前に奇術師に来てもらっただろう。

マドックスは、あらゆる分野の有力者と知り合いだった。もちろん、英国の名士の知り合いも少なくなかった。彼は非凡なネットワークであり、少なくとも関係、できれば首相と知り合いになることが自分の仕事だと思っていた。けれども、英国の名士と同席しているときの彼は、いつも警戒しているようにみえた。こうした人々とくつろいで会えるようになったのは、彼が引退してからのことだった。これはおそら

く妥当な判断だった。彼が辛辣な論説を書くたびに、どこかの有力者を敵に回していたからである。1980年代の中頃には、マドックスのこうした立場を象徴的に物語る出来事が起きた。彼はそのとき英国医療審議会の会合に招待されて出席していたのだが、早々に退席してしまった。彼自身の言葉によると、英国医療審議会が自分を会合に招待したのは、この団体とその会長であるジェームズ・ゴワズを公的に批判していたことについて、申し開きをさせる魂胆があったからだ気づいたからであるという。

このような姿勢にもかかわらず、あるいはこのような姿勢ゆえに、そしてもちろん科学ジャーナリストおよび編集者としての業績をたたえて、マドックスは引退後すぐに王立協会から特別に新設された名誉職を受けたほか、ナイト爵にも叙された。

論争によりマドックスは多くの敵を作ったが、彼を慕う人も多かった。こうした人々は彼のことを、ほかの人々が価値を認めてくれなかった頃から自分の研究を擁護してくれた編集長として好意的に記憶している。とはいえ、マドックスが編集長として自由に行動することができたのは、ニコラス・バイアム・ショーと、当時の *Nature* の所有者であったマクミラン一族の支えがあったからである。彼らは、マドックスについて寄せられる苦情をそのまま彼に伝えていた。

マドックスは、特定の研究だけでなく地域のためにも戦った。彼は一連の地域特集を開始し、歴史的、地理的、政治的、科学的にその土地に切り込んでいき、彼一流の文体で20～30ページにわたってさまざまな角度から考察を繰り広げた。

傲慢？ ジャーナリストの不遜？ そうかもしれない。けれども *Nature* が組む一連の地域特集は、特に、逆境の中で粘り強く研究を続けるインドやロシアの科学者の姿がマドックスに感銘を与えたときには、大きな実を結んだ。もともと、こうした特集には犠牲も付いてまわった。私の同僚である製作編集者のチャールズ・ウェンツは、「なにしろ、特集で何を主張すべきかがみえてくると、マドックスの頭の中では完成したことになってしまうのだから」と回想する。そのため、彼の頭の中にある文章を実際にしたための作業は後回しにされた。多くの場合、締め切りの期日を過ぎてから。

ニーチェは、偉大な人間は「より冷淡で、より冷酷で、より一本気で、『世論』をなんら怖れることがない」といった。マドックスが偉大な人間であつたにしろなかつたにしろ、私にはこの言葉が彼のことをよくいい当てているように思われる。ニーチェはまた、偉大な人間は「仮面を付けて」いて、「彼の心の内には、とうていほめたり咎めたりすることのできない孤独」が潜んでいるともいっている。マドックスは人付き合いを楽しむことができ、必要とあれば、ポーカフェイス

で交渉にあたることもできた。彼は仲間を大切にしたが、本質的な部分で個人的な事情に左右されることはなかった。彼には人をみる目があり、しばしば人々の支えとなり、（私を知るかぎり）ほかのスタッフの利益を裏切ることは一度もなかった。プロとしての彼は、時として無情な決断をし、常に冷静沉着で公平だった。こうした特質とジャーナリスティックな名人芸を併せもつマドックスは、何かと物議の種にはなったが、やはり偉大な編集長だった。

私はこの追悼文を執筆するにあたり、できるだけ客観的な事実のみを語るように心がけた。マドックスは多くの優秀な人材を登用した。なかにはまだ *Nature* で仕事をしているスタッフもいて、彼について好意的な思い出をもっている。マドックスはまた、一部の優秀な人材を解雇した。そうした人々は、彼について私よりも批判的な見方をするかもしれない。私はここで彼を評価しようとはしなかった。評価をするべきだったかもしれないが、私にはそれができなかった。上述の「個人的な事情に左右されない」という意味で、私は彼のジャーナリスティックなアプローチに影響されているからである。彼は、指導することではなく模範を示すことにより、私たちがなすべきことを教えてくれた。彼はまた、私たちの判断力を尊重してくれていた。彼が *Nature* を去ってから、出版物にも *Nature* 編集部にも、さまざまな点で大きな変化が起きた。その変化がよいものであるか悪いものであるかは、私が判断すべきことではない。けれども、彼が確立した基準と手順の多くは、今日もまだ大切に守られている。

1980年にジョン・マドックスが *Nature* の編集長に返り咲くという知らせを聞いたとき、私は彼についてほとんど何も知らなかった。私は彼を、ラジオの科学番組（私も知人の若い研究者たちも、彼の番組を熱心に聴いていた）と、当時の *Nature* 編集部で彼の名が口にのぼるときの奇妙な雰囲気を通してしか知らなかった。そこで私は、ジョンについてディビッド・デイビスと話をした。もちろん、ディビッドの微妙な立場は十分理解していたが、彼の公平さもよく知っていたので、ジョンのことを教えてもらいたかったのだ。ディビッドはジョンの親しい知人ではなかったし、立場上、慎重にならざるをえないところもあったのだろう。私は、彼から多くを聞き出すことはできなかった。けれども彼は1つのことを教えてくれた。その言葉は、当時は何でもないことのように思われたが、私はやがて、ジョンの本質を見事にいい当てていることを実感した。 *Nature* に掲載する碑銘として、これほどふさわしいものはない。「ジョンは科学を愛した」。

Philip Campbell (フィリップ・キャンベル) は、1995年にジョン・マドックスの後任として *Nature* の編集長に就任し、今日に至る。

ジョン・マドックス元編集長と日本

冬野いち子（NPG ネイチャー アジア・パシフィック・サイエンスライター）

Nature の名物編集長だった故ジョン・マドックス氏は、飽くなき好奇心と大きな愛情をもって日本の科学界を鋭く観察し、インパクトのある記事や社説を書き続けた。彼の言動は日本の科学技術政策に影響を与えただけでなく、日本の科学者が国際舞台で活躍するための大きな励みとなった。20世紀後半、さまざまな苦難を乗り越えながら科学を育てた日本とマドックス氏率いる *Nature* とのかかわりを、当時の関係者に聞いた。

ジョン・マドックス氏が初めて日本を訪れたのは1972年、日本特集第1弾の取材のためだった。時は高度経済成長の真ただ中、同年の国民所得は前年比で11.1%増加、研究費も12.6%増えている¹。マドックス氏は、日本が科学技術投資をうまく経済成長に還元しているのには「何か特別な秘訣があるのではないか」という問いを立て、科学技術に先進的な考えをもっていた中曽根康弘科学技術庁長官（当時）をはじめ、当時の日本の科学界を代表する計17名から寄稿文を受け、『日本の科学の概説（Survey of Japanese Science）』として特集をまとめた²。

以降、マドックス氏は日本に高い関心をもつようになる。「ジョンは日本が抱える問題、例えば、行政に対する研究者の不満などにたいへん興味をそそられていました」と、NPG ネイチャー アジア・パシフィック代表取締役社長のディビッド・スウィンバックス氏は語る。

1980年～1995年の第2期編集長時代には、マドックス氏は年に2回は日本を訪れ、寸暇を惜しんで省庁や大学、研究機関に足しげく通った。滞在中は、ブレックファースト・ミーティングから夜までびっしり取材の予定が入っていないと満足しなかった。そして日本の最先端の研究だけでなく、科学政策や研究体制についても数多くの記事を世界に発信していった。日本特集は1983年と1992年にも組まれている^{3,4}。さらに、日本で何度も国際会議を開き、ナノテクノロジー（当時はこのような言葉はまだなかった）や分子生物



1985年に来日したジョン・マドックス編集長（当時）と和田昭允博士。

学の第一線の研究者を国内外から招いて熱い議論を重ねた。「私がジョンについていちばん印象に残っているのは、会議の開会挨拶の締めで、“Please enjoy.”といていたことです」と、NPG ネイチャー アジア・パシフィック専務取締役の中村康一氏はいう。「彼が主催する国際会議は学会のような堅苦しい雰囲気はなく、いつもリラックスしてカジュアルでした。ノーベル賞受賞者でも、Tシャツで講演していたほ

どです。ジョン自身はいつもネクタイをしていましたが」。

先をみる目

科学を楽しみ、研究を阻む問題点を深く追及し、さらなる発展への尽力を惜しまない。このようなマドックス氏のスタイルは、「日本が成長するための大きなエールであり、勇気になった」と、彼を知る当時の関係者は口をそろえる。日本人の中で

最もかわりのあった東京大学名誉教授の和田昭允博士は、1972年に初めて会ったとき、「とにかくこの人は、世の中に先んじていろんなことをやる人だ」と、強い感銘を受けたという。

1970年代初頭は、マドックス氏が *Nature* に加え *Nature New Biology* と *Nature Physical Sciences* という2種類の姉妹誌を週刊で発行するという、ユニークな試みに挑戦していた頃だ。和田博士自身も40歳代前半で、脂の乗った新進気鋭の研究者として名を馳せており、保守的な科学者たちとぶつかりつつも、生物学と物理学を融合させる新しい学問の草分けとして奮闘していた。その数年後には、20世紀末のヒトゲノム計画に欠かせないツールとなるDNA高速自動解読機器（シーケンサー）の構想を早くも思いついている。パイオニア精神をもつ同世代どうし、お互い通じるものがあつたのだろう。マドックス氏は来日するたびに、和田博士に声をかけるようになった。ネイチャー・ジャパン株式会社（当時）のオフィスに近い東京・神楽坂のイタリアンレストランで、ワイングラスを片手に「独特のユーモアとウィットに富んだ会話を楽しんだ」と和田博士は振り返る。

和田博士はマドックス氏を「思想家」と評する。サイエンスの世界では、自分の研究にことごとく没頭する職人的科学者が大半を占めるなか、「マドックスさんは、全体としてサイエンスがどのような方向に向かうのか、世の中の常識にとらわれないでサイエンスにとって何が大事なかが、よくわかっていた少数の人々のうちの1人でした」と話す。マドックス氏は、一流の科学者には物事を俯瞰する目や対人力や交渉力、上手な喧嘩のしかたも必要だということを、それを苦手とする日本人研究者たちに身をもって教えたかったのかもしれない。

ヒューマン・フロンティア抗争

その好例となったのが、ヒューマン・フロンティア・サイエンス・プログラム (HFSP)

をめぐる論争である⁵。1987年のベネチア・サミットで中曽根元首相（当時）が提唱したHFSPは、日本が初めてイニシアティブをとった国際科学プログラムだ。当時は、自動車・ハイテクなどの日米貿易摩擦が技術・研究摩擦にまで波及しており、それを和らげるための手段として、科学技術の国際貢献が政策の緊急課題であった。日本が提案したのは、生体機能の解明に向けた「分子機構」と「脳の思考過程」を2大研究テーマとし、異分野かつ国際共同研究を対象とするという先進的なピア・レビューの研究助成金プログラム。日本からは和田博士のほか、脳科学者の伊藤正男博士（現・理化学研究所脳科学総合研究センター特別顧問）らがHFSP科学者会議メンバーとして参加し、行政は科学技術庁（当時）と通商産業省（当時）が異例のタッグを組んだ。本部をフランスのストラスブル市に置き、日本は初期予算のほとんどを拠出、現在は6240万ドル（2009年度、約62億4000万円）の年間予算のうち、およそ5割を出している。

立ち上げ当初は、基礎研究への国際貢献という日本の思いは理解されず、「アメリカから、日本は金で海外トップのブレインまで買うのかという危機感が出てきました」と、科学技術庁の科学技術政策局企画官としてHFSPを担当した有本建男氏（現・科学技術振興機構社会技術研究開発センター長、元文部科学省科学技術・学術政策局長）はいう。幸い、欧州のHFSP科学者会議メンバーのたちの支持もあってHFSPは1990年に始動したが、しばらく経った頃、日本はHFSP内の大きな政治問題に直面する。

元英国医学研究評議会の事務局長でHFSP初代事務局長のジェームス・ゴワズ卿や、元米国国立衛生研究所副所長のエドワード・ロール博士などのHFSP科学者会議メンバーから、研究テーマを古典的な生物学に絞り込もうとする動きが出てきたのだ。これらの大物科学者たちは、学際



的な要素を生物学に組み込むことをはじめから快く思っていなかった。しかし、彼らの意向が通ってしまうと「日本は、資金は出しても理念は出さない国」になると懸念した和田博士は1992年2月、ストラスブル市での会議でゴワズ卿らと論戦を交えた2日後にロンドンのネイチャー本社を訪ね、昼食をごちそうになりながらマドックス氏に詳しく事情を説明した。「彼ならわかってくれるだろうと思って相談したら、どんぴしゃりでした」と和田博士はいう。

その後、和田博士は同年6月4日号の *Nature* に『ヒューマン・フロンティアは何がフロンティアか？ (What frontiers for Frontier?)』というコメンタリーを寄稿し、「これからの生命科学は、物理学や化学、情報科学、電子工学などと相互に影響し合って発展するものであり、従来の月並みな生物学プロジェクトに堕しないように望む」と書いた⁶。ゴワズ卿とロール博士はこれに激怒、ロール博士はこの論文を非難する回状をHFSP科学者会議メンバー宛てに出している。

当時の *Nature* は、HFSPについて頻繁



1988年1月に開かれた『Nature 東京国際会議 (Horizons in Molecular Biology)』後の歓迎パーティのようす。左写真の右側がディビッド・スウィンバンクス氏、右写真がジョン・マドックス編集長(当時)。

に報道していた。「ジョンは、日本が HFSP の本部を国外に置き、日本の利益に縛られない真の国際プログラムに資金を投じていることを、斬新なコンセプトであると十分認識していました」とスウィンバンクス氏はいふ。和田博士の論文が出た2か月後、マドックス氏は『重大な危機に陥ったヒューマン・フロンティア (Human Frontiers in rough water)』という社説を書き、「日本側の主張はまったく正しい」として、ローレル博士に対し、このような回状を出したことを批判している⁷。ゴワンス卿についても、「科学者として一流であるが、外交的スキルは彼の友人でさえもあまり高く評価しないだろう」と書いている。この効果はてきめんで、HFSP 科学者会議メンバー2人が和田博士を支持する内容の投書を *Nature* に寄せた。同会議でも日本の意向は認められ、ゴワンス卿は事務局長を降ろされた。日本国内でも、「HFSP に資金をまわすくらいなら国内の基礎研究に投資を、という後ろ向き意見を説得するのにも役立ちました」と有本氏はいふ。

しかし、マドックス氏はただ日本を擁護

するだけでなはなかつた。上記の社説の締めくくりに「日本はもっと積極的になるべきだ」と書いている。HFSP の次期事務局長の候補者選に日本が消極的なのを見兼ねて、「自分たちが作り上げた斬新でユニークな研究ファンドの運営に手を貸さず、新事務局長ともウマが合わず、物事が停滞してしまつては、何がそのファンドの恩恵になるだろうか」と指摘したのだ。「20年経った今、HFSP が世界的な評価を確立できた大きな要因は、マドックスさんの批判的だが温かいサポートがあったからだ」と有本氏は話す。

改革への道筋

HFSP は「日本の基礎研究に対しても、一石を投じる意味がありました」と、当時通産省の課長補佐として HFSP を担当した梅原克彦氏(現・仙台市長)はいふ。「日本の閉鎖されがちであったサイエンスをオープンにして、日本の基礎研究そのもののレベルを上げていく、という陰なる意味合いもありました」。このような梅原氏の考えを共有していたかのように、マドックス氏は HFSP についての社説を出した1か月後に日本を訪れ、10日間で65人以上の研究者・政府関係者に会って、日本の政策や制度の問題点を洗い出した。そして、10ページに及ぶ日本特集で「日本が研究に対する根強い障害を取り除き、高い質と特色を兼ね備えた国際的な研究拠点になるための改革」への8つの助言を提供した⁴。

当時、東京大学総長であった有馬朗人博士(現・日本科学技術振興財団会長)は、国立大学で初めての外部評価の導入と大学院改革を進めており、この日本特集の取材を受けている。「私がマドックスさんと話をしたときは、日本はまさに変革期でした」と有馬博士はいふ。有馬博士が取材で述べた意見は、「大学に組織運営と研究体制について自主性をもたせるべきだ」という *Nature* の助言として日本特集の中に反映され、後の大学や研究機関の独立

行政法人化につながつた。

実際、1990年代は日本で改革が大幅に進んだ時期だ。東京大学は1993年に理学部で外部評価を導入し、同時期に大学院理学系研究科を学部から独立させ、学部と大学院を対等にするために2つの部局に改編した。国レベルでは、1995年に科学技術基本法が施行され、翌年には、5年間というこれまでにない長い視野で科学技術政策を実行するための第1期科学技術基本計画がスタートした。21世紀に入ってからこの流れは続き、2001年には省庁の枠を越えた立場で科学技術政策の評価・調整を行う「総合科学技術会議」が内閣府に設置された。科学技術関連予算は経済不況の中でも聖域として増加が許されてきたが、研究資金の割り当てには「集中と選択」が進んだ。近年では若手研究者の育成や科学外交などにも、大きな予算が割り当てられている。

しかし、マドックス氏の知己たちは、現在では内向き傾向が進んでいる日本の未来を楽観視できないようだ。彼らは、日本に来る外国人研究者の数は増えず、若手研究者が海外に行かなくなったことを懸念し、日本の科学者が総じて目先のことにとられすぎて大きな視野をもたなくなつたと嘆く。有本氏は「今こそ日本は、危機に陥っていた1980年代を検証してみることが重要」だといふ。「あの頃、日本は沈没しそうだということで、死に物狂いでがんばっていましたが、今は生ぬるい。マドックスさんは、最期に今の日本に対して何かいいかつたのではないのでしょうか。現役の方々が、*Nature* の目からみて現状を評価し、再び日本特集を作ってほしい。それが、マドックスさんへの最大のはなむけにもなると思います。」

1. 昭和48年版科学技術白書
2. *Nature* 240, 185-220 (1972)
3. *Nature* 305, 355-382 (1983)
4. *Nature* 359, 573-582 (1992)
5. 『物理学は越境する ―ゲノムへの道―』和田昭允著(岩波書店2005刊)
6. *Nature* 357, 356 (1992)
7. *Nature* 358, 525 (1992)

THE ROCK THAT FELL TO EARTH

小惑星が地球に落ちてきた日

Nature Vol.458(401-403)/26 March 2009

昨年10月、地球に衝突する直前の小惑星が発見された。研究者たちは迅速に観測を開始し、初めて、宇宙からやってきた天体が地球に衝突するまでの一部始終をつぶさに記録することに成功した。Roberta Kwok がそのてん末を報告する。

2008年10月6日の真夜中近くのことだった。米国アリゾナ州のレモン山頂にある天文台で、Richard Kowalskiのコンピュータのスクリーンを白い点が横切った。彼の仕事は、望遠鏡画像を調べて、地球に衝突したり接近したりする可能性のある小惑星を探し出すことである。彼がこの仕事を始めてから3年半になるが、その間、同じような点をもう数百個も見つけてきた。Kowalskiはこの天体の追跡を開始し、いつものように小惑星センターに座標を送った。同センターはマサチューセッツ州ケンブリッジにあり、小惑星などの小天体を監視している。空が明るくなり始める頃、彼は追跡をやめて望遠鏡を止め、山の麓にある宿舎に戻り、眠りについた。

Kowalskiにとって、その夜の観測に特別なことは何もなかった。ただ1つ「おや?」と思ったのは、彼の報告に対する小惑星センターの反応だった。小惑星セン

ターのウェブサイトは、彼の最初の報告を直ちにウェブ上に掲示したが、彼がさらにデータを付け加えようとしたときには、システムは沈黙したままだったのである。

コンピュータの沈黙の理由は、翌朝、小惑星センターのセンター長であるTim Spahrにより明らかにされた。センターのソフトウェアは軌道を自動的に計算するが、この小惑星は異常に地球に近かったのである。「コンピュータは私に助けを求めたのです」とSpahrは話す。彼はKowalskiのデータを使い、小惑星の軌道をざっと計算してみると、小惑星が地球に衝突することは明らかでした」とSpahrは話す。その小惑星は2008 TC₃と名づけられた。

2008 TC₃の明るさは、その直径が数メートルしかないことを示していた。この小惑星が普通の岩石からできているなら、おそらく大気圏に突入した直後にばらばら

に砕けてしまうだろう。危険はないように思われたが、Spahrは決められた手続きに従って行動した。彼はブラックベリー(スマートフォンの一種)を取り出し、非常事態用の番号を使ってLindley Johnsonに電話をかけた。JohnsonはワシントンDCの米航空宇宙局(NASA)地球近傍天体観測計画のトップである。

「やあ、Lindley。Timだ。どうして電話していると思う?」とSpahr。

「地球に衝突するのかい?」とJohnson。

SpahrはSteve Chesleyにも電話をかけた。Chesleyはカリフォルニア州パサデナにあるジェット推進研究所(JPL)の天文学者だ。彼はそのとき自宅で子どもたちをせきたてて学校へ行かせようとしているところだったが、電話を受けるとオフィスに急行し、小惑星の軌道を計算するプログラムを走らせた。その結果、「衝突確率100%という数字が出て、仰天しま

した。この数字を見たのは初めてでした」。Chesley の計算によると、小惑星はそれから 13 時間弱後、翌日の 2:46UT (世界時) に地球の大気圏に突入するはずだった。場所はスーダン北部で、現地時間では午前 5 時 46 分になる。彼は NASA 本部と小惑星センターに計算結果を送信し、センターは世界中の天文学者のネットワークに電子速報を配信した。イタリアのピサで地球近傍天体データベースを運営している NEODyS というグループも、衝突はほぼ間違いないことを確認した。

2008 TC₃ のような小天体は毎年いくつか地球に衝突しているが、衝突前に発見されたことはこれまでに一度もなかった。Kowalski の発見は、小惑星とその消滅をリアルタイムで研究する初めての機会を提供したのである。その成功は、天文学者たちが世界中の観測装置をどれだけ早く動員できるかにかかっていた!

科学者たちは慌しく小惑星の観測を準備に取りかかった。無数の電子メールと電話が地球上を飛び交った。「今夜衝突!!!」。ニューメキシコ州アルバカーキのサンディア国立研究所の物理学者 Mark Boslough は、米国政府の衛星データをモニターしているエンジニアも含めて、その同僚にメールを送った。

衝突へのカウントダウン

ジェット推進研究所から知らせを聞いたカナダのウエスタンオンタリオ大学の天文学者 Peter Brown は、地元の天文台に駆け込んで望遠鏡を起動させ、小惑星の追跡を始めた。「それはとても小さく、かすかな、高速で動く線でした」と彼は話す。北アイルランドのベルファストにあるクイーンズ大学の Alan Fitzsimmons は、アフリカ北西岸沖のカナリア諸島のラ・パルマにあるウィリアム・ハーシェル望遠鏡に到着したばかりの同僚 2 人に電話をかけた。あいにく、2 人に割り当てられていた観測時間は翌日からだった。

Fitzsimmons は 2 人を説得した。「い

いかい。これは今起きていることなんだ。今夜なんだ」。2 人は別の天文学者に頼み込み、その夜の観測時間を 1 時間借りることができた。

小惑星センターにはひっきりなしに観測結果が寄せられ、新しいデータと軌道計算結果を 1 時間に数回ずつ発表した。NASA は国務省と国防総省などに通知したほか、午後には報道機関に向けて発表を行い、「すばらしい自然の花火が見られるかもしれない」という声明を出した。小惑星は衝突の約 1 時間前に地球の影に入り、光学望遠鏡では見えなくなった。それまでに世界の 26 か所の天文台の天文学者たちが約 570 の観測を行って結果を報告し、ジェット推進研究所が改めて計算した衝突予測時刻は 2:45:28 ± 15 秒 UT になった。

衝突予想時刻が近づくにつれ、オランダのデビルトにある王立オランダ気象研究所の航空気象学者 Jacob Kuiper の苛立ち募っていった。夜間勤務についていた彼は、小惑星が地球に接近していることを電子メールで知らされたが、人がほとんど住んでいないヌビア砂漠に落下するのでは爆発の目撃者が誰もいないのではなにかと気を揉んでいたのである。

残り時間は 45 分を切ったとき、Kuiper は、彼がいつも気象レポートを送っているエールフランス-KLM に知らせることを思いついた。会社にはおそらく、アフリカ上空を飛ぶ航空便があるはずだ。約 10 分後、ヨハネスバーグからアムステルダムに向けて北上中の KLM592 便のコックピットで、操縦士の Ron de Poorter がプリントアウトされたメッセージを受け取った。メッセージには小惑星の衝突予想地点の緯度と経度が書かれていた。de Poorter は、飛行機から衝突予想地点までは 1400 キロメートルも離れているとは思ったが、指定された時刻に計器の明かりを薄暗くして、副操縦士とともに北東の方向に目を凝らした。

そのとき、飛行機のはるか上空で、小惑星 2008 TC₃ が秒速 1 万 2400 メー

ルの猛スピードで大気圏の最上層に衝突した。小惑星の外側は熱せられて気化し、表面の物質がはぎ取られた。小惑星の原子が空気の分子と衝突して閃光を発生し、下に広がる砂漠を明るく照らした。計算によると、2008 TC₃ が大気圏に突入して 20 秒もしないうちに圧力により一連の爆発が起こり、小惑星は粉々に砕け散って高温のダストの尾を残したとみられている。

de Poorter は、地平線の向こうで砲火のような黄色がかった赤い光が明滅するのを見た。スーダンの辺境にある鉄道駅の駅長は、この閃光で目が覚めた。研究者が後で集めた目撃談によると、エジプトとの国境の近くの村では、朝の礼拝から戻る人々が明るく輝く火球を見たという。

電子の目も見ていた。米国政府の衛星は、小惑星が地上 65 キロメートルの高さを通過しているところを捕らえた。そのすぐ後には欧州の気象衛星も小惑星を発見し、ダストの雲を 2 つと火球からの光を捕らえた。ケニアでは、通常は核爆発の監視に使われている微気圧計が、爆発による低周波の音波を検出した。Brown は後に、この爆発は約 1 ~ 2 キロトンの TNT 火薬の爆発に相当し、広島型原爆の約 10 分の 1 にあたると計算した。

米国の衛星が火球の軌道を追跡した結果から、ジェット推進研究所が天体の位置を距離にして数キロメートル、時間にして数秒の誤差で正確に予測したことがわかった。「衝突予測のすべてのシステムがきちんと機能することが、これまでにないほど具体的に立証されたのです」と Chesley は振り返る。

しかし、カリフォルニア州マウンテンビューの地球外文明探索計画 (SETI) 研究所の天文学者 Peter Jenniskens は、壮麗な光のショーが目撃されたというだけでは満足できなかった。流星雨を研究している彼は、それから数週間、落ちてきた隕石を誰かが見つけたという知らせが聞こえてくるのを待っていた。しかし、そのような知らせはいつまでたっても入ってこ

なかった。「だれかが行動に出る必要がありました」と彼は話す。

Jenniskens は 12 月の初めにスーダンに飛び、ハルツーム大学の天文学者 Muawia Hamid Shaddad に会った。Shaddad は、すでに地元の人から火球の通った跡の写真を入手していた。2 人はハルツームから車で北へ向かい、国境の村ワディハルファで人々に声をかけに、火球が爆発したのは空のどのへんであったのかを尋ねてまわった。目撃者の話から、小惑星は大気圏の高いところではばらばらになったと考えられ（これは米国の衛星データともよく一致した）、破片が見つかる可能性が高いのはヌビア砂漠の鉄道第 6 駅という小さな駅の南西であろうと Jenniskens は確信した。

砂漠の搜索

2008 年 12 月 6 日、Jenniskens と Shaddad は、ハルツーム大学の学生と職員ら 45 人とともに小惑星の破片探しに出発した。目的の地域に来ると、搜索チームのメンバーは約 20 メートルずつ間隔をあけ、全体で 1 キロメートルの長さに整列した。彼らの目の前には砂と小石の海が広がっていた。ところどころに丘や岩が露出した部分があり、干上がった川床がうねうねと伸びていた。チームの側面には車が 2 台ずつつき、テレビニュースネットワークのアルジャジーラの撮影チームがあとを追った。搜索チームは、砂漠をすく巨大な櫛の歯のように東に向かってゆっくりと進み始めた。

その日の搜索が終わりに近づいた頃、1 台の車が Jenniskens のもとに来て、1 人の学生が隕石を見つけたかもしれないと伝えた。「そのとき自分が『またか、勘弁してくれ』と思ったことを覚えています」と Jenniskens は話す。彼は、すでに何度かぬか喜びをさせられていたからである。それでも彼は車に飛び乗り、石を見つけた学生のところに向かった。学生が彼に見せたのは、差し渡し 1.5 センチメー

トル程度の小さな四角形の黒い石で、外層は薄いガラス質だった。石の表面は、隕石が溶融し、再び凝固するときに形成される溶融殻によく似ていた。また、石の色の深さは、それが地球に落ちてきたばかりであることを示していた。これが、搜索チームが見つけた最初の隕石となった。この石はまた、宇宙で発見された小惑星に由来し、その衝突地点で科学者が回収した最初の隕石でもあった（Nature 2009 年 3 月 26 日号 485 ページ参照）。

翌日、チームは 8 キロメートルの搜索により 5 個の隕石を発見した。いずれも非常に暗い色で、丸みがあった。3 日目は 18 キロメートルの行軍で、これまでよりも大きい、差し渡し約 10 センチメートル近い隕石を見つかることができた。数週間後、学生と職員 72 人からなるチームが、さらに 32 個の隕石を発見した。3 月末の時点で、一連の搜索で見つかった破片の個数は約 280 個、重さは数キログラムに達している。

Jenniskens は、テキサス州ヒューストンにある NASA のジョンソン宇宙センターの宇宙鉱物学者 Mike Zolensky のもとにサンプルを送った。Zolensky は隕石を調べ、炭素の大きな固まりと、砂糖の結晶に似たガラス質の鉱物の粒が含まれていることを発見した。ほかの研究室での検査から、そのサンプルはユレイライトという種類の隕石であることが確かめられた。ユレイライトは、宇宙空間で溶融したことのある小惑星に由来する隕石だと考えられている。ユレイライトの破片を生じるのは、地球に衝突する天体の 0.5% だけである。しかし、2008 TC₃ の破片はユレイライトとしても奇妙なものだった。Zolensky によると、異常に多くの穴が開いているのだという。「これだけ多くの穴が開いているものが、ひとかたまりの物体として存在していたことは驚きです」と話す。

このことから Zolensky は、2008 TC₃ はより大きな小惑星の表面から割れてきたのだらうとみている。中心付近に

あったなら、穴は押しつぶされていたと考えられるからである。彼は、この隕石の化学的性質に関する今後の研究から、その「親」の小惑星の歴史が解明されるかもしれないと指摘する。さらに、そこでの新しい発見は、惑星が形成される過程を解明する手がかりになるかもしれないという。この小惑星は過去に溶融したことがわかっているが、それは若い惑星が経験する過程であるからだ。

2008 TC₃ は天文学者に、夜空に輝く小さな点を手の中の小さな石と結びつけるという稀有な機会を与えてくれた。ジェット推進研究所内にある NASA 地球近傍天体計画部の部長である Don Yeomans は、「地上には多数の隕石があり、宇宙には無数の小惑星があります。しかし、両者を結びつけることは容易ではないのです」と話す。

Jenniskens らの研究チームは、この小惑星は F 型小惑星とよばれるグループに属していると結論づけた。このグループの小惑星はほとんど光を反射せず、その組成は長らく不明であった。ワシントン DC にあるスミソニアン研究所の隕石担当学芸員の Glenn MacPherson は、2008 TC₃ の研究にはかかわっていないが、「今回の新しい証拠は巨大な窓を開くものです」と期待を寄せている。「すべての F 型小惑星が同じというわけではないかもしれませんが、けれども今回、少なくともその一部はユレイライトと同じ炭素や鉄などを含んでいることが示されたのです」。

コロラド州ボールダーにあるサウスウエスト研究所の惑星科学者 Clark Chapman は、「実のところ、F 型小惑星とユレイライトとの関連は意外なものではありません。けれども、今回のように関連が証明されることはめったにないことなのです」と話す。

科学者たちはこれまで、小惑星が光のさまざまな波長をどのように反射するかを調べ、その特徴が合う研究室の隕石サンプルを見つけるという方法で、小惑星の組

2008TC₃ 宇宙の旅

小さな岩 2008 TC₃ は、科学者の注目を集めた短い間に何度かよび名が変わった。宇宙にある間は小惑星あるいは流星体とよばれていた。地球の大気圏に突入したときには、摩擦による加熱で輝き、流星とよばれた。地上に落ちたその破片は、隕石とよばれている。これは、2008 TC₃ が発見された瞬間から消滅するまでの記録である。

6 OCT 2008
06:39 UT

米国アリゾナ州のレモン山のカタリナ・スカイ・サーベイが、地球に近いところを高速で運動する流星体を発見した。軌道計算の結果、20 時間後に地球に衝突することがわかった。

6 OCT 2008
22:22-22:28 UT

アフリカのカナリア諸島の望遠鏡が、地球から 12 万 1100 キロメートル離れている流星体がさまざまな波長の光をどれだけ反射しているかを測定した。

7 OCT 2008
02:45:46 UT

気象衛星メテosat-8 が、流星体がばらばらに砕けて高温のダストの雲を残したところを観測した。

7 OCT 2008
03:27 UT

火球が消えた後に残った雲を 1 枚の写真が捕らえた。

7 OCT 2008
02:45:40 UT

チャドの上空 1 万 700 メートルの高さを飛行中の KLM のパイロット Ron de Poorter が、地平線の向こうの空を輝きながら通過する流星体が 3 回か 4 回明滅するのを観察した。

DECEMBER TO MARCH

捜索チームが砂漠を何度も徹底的に探し、約 280 個の隕石を回収した。

成を知ろうとしてきた。しかし、反射の特徴がかなり独特なものでないかぎり、そうして求めた関連は微妙なものになることが多い。もっとも確実な例は小惑星ベスタで、火成隕石の 1 グループと関連づけられている。小惑星の破片を地球にもち帰った宇宙探査計画はまだないが、NASA の宇宙機は小惑星エロスの周りを 1 年間回り、2001 年に着陸した。また、日本の探査機「はやぶさ」は、小惑星イトカワのサンプルの採取を試みた。この探査機は来年地球に戻る予定で、そのとき、採取計画が成功したかどうかはわかるだろう。

「いつの日か、小惑星の軌道をそらす必要が生じたときに、小惑星の組成を知ることが極めて重要になるでしょう」と Yeomans は話す。NASA は、人類を危機に陥れるおそれのある小惑星が地球に向かってるのが発見された場合には、衝突の回避に向けた対策を講じられるよう、衝突予想日の数十年前から警報を出

すことをめざしている。具体的な回避方法は小惑星の種類によって違ってくるだろう。Yeomans によれば、小惑星には「彗星のなれの果てのもろく崩れやすい玉」から、固い岩石や、ニッケルと鉄の厚板まで、さまざまなものがあるからである。

新しい観測計画が始動すれば、地球に衝突しようとする天体ももっと頻繁に発見されるようになるかもしれない。Yeomans によると、従来の観測でも直径 1 キロメートル以上の地球近傍天体のほぼ 90% が発見されているが、小さな小惑星は気づかれないままになりやすいという。Kowalski は、「2008 TC₃ の発見は、地球から月までの距離の 1.5 倍のところにいる、ダークグレーの背広を着た人を見つけるようなものだったのです」と話す。彼が所属しているカタリナ・スカイ・サーベイは、毎年発見される地球近傍天体の 70% を発見している。カリフォルニア州ラカニヤダで研究に従事している宇宙科学

研究所の惑星天文学者 Alan Harris は、「次世代の観測計画が始まれば、発見のペースはもっと上がるでしょう。地球に衝突する小惑星を毎年数個ずつ見つけられるようになるかもしれません」と話す。ハワイでの全天観測計画 Pan-STARRS は今年、その原型となるシステムでの観測を公式に開始する。チリの大型シノプティックサーベイ望遠鏡は、2016 年に完全運用を開始する予定だ。

その間も Kowalski らの仕事は続く。Kowalski は、小惑星 2008 TC₃ を発見した次の夜もレモン山頂に戻り、夕食を温め、望遠鏡の制御室で作業を始めた。彼が発見した小惑星が地球の反対側の砂漠に突っ込んだとき、Kowalski は次の白い点が現れるのを待って夜空の別の部分を調べていた。 ■

Roberta Kwok は、Nature ワシントン DC オフィスの記者実習生。



TWO BY TWO

2人ずつ——双子の生物学

Nature Vol.458(826-829)/16 April 2009

地球上には、一卵性双生児が驚くほど高率で生まれる辺境の村がある。これは遺伝子で説明できるのだろうか。古くから好奇の対象となっている双子の生物学について、David Cyranoskiが取材報告する。

2008年12月、Bruno Reversadeは、唾液を採取するためにインドへ旅立った。まず、アラハバードの市街北東部を訪れ、それから、さらに10キロメートル離れたモハンマドプルウムリという土壁で囲まれた、約人口2000人の農村まで足を伸ばした。そこで彼は、村人に研究用の特製カップを渡し、試料用の唾液を入れてくれるよう頼んだ。55人がそれに応じた。

この村の住人が体液を科学研究用に提供するの、今回が初めてではない。モハンマドプルウムリ村が少しばかり有名になったのは、主要産物の牛乳やマスタード

のおかげではなく、一卵性双生児が非常に多いためである。一卵性双生児の生まれる確率は、世界全体で250～300回の出産につき1回にすぎない。ところがウムリ村では、およそ10回に1回の割合で一卵性双生児が誕生する。ここでは村人たちは、双子の誕生を「神様からの贈り物」とよんでいる。

Reversadeは、この「贈り物」を授ける遺伝子を探している。「自然のクローンである双子は50秒に1組の割合で生まれています。発生頻度が非常に高いいくつかの遺伝病よりも高頻度です。ランダ

ムではありえません」と、シンガポール医学生物学研究所の発生生物学者であるReversadeはいう。しかし、多くの研究者はこれに異議を唱えており、すべての一卵性双生児の発生率も、双子が集中的に発生する事例も、確率で完全に説明できるだろうと主張している。1個の受精卵から一卵性双生児が生まれる原因については、遺伝子や確率に基づく理論のほかにもたくさん説があるが、どれも広く受け入れられていない。また、一卵性双生児は遺伝的に同一だと思われるのに、性格や病気のなりやすさに違いがあり、どういう経



Bruno Reversade (子どもを抱く男性)は、各地の「双子の町」からDNAを採集している。

緯でそうなるのかも解明されていない。環境要因で説明がつくのは、こうした差異の一部であって、すべてではないのである。

こうした疑問に対して、20～30年ほど前から、新しい遺伝学技術や細胞生物学技術を用いて研究が行われてきた。現在 Reversade は、3つの「双子の町」から試料を採取しているところであり、ゲノム解析法を用いれば、双子形成に関与する共通の分子レベルの経路が見つけられるかもしれない。一方、発生学者や産科医は、生殖補助医療から手がかりを見いだそうとしている (P.26 のコラム「双

子を作る」を参照)。生殖補助医療では、複数の胚を子宮内に移植するので二卵性双生児が高率で生まれるが、一卵性双生児も多くなることが知られているからだ。また、一卵性双生児で個人差が生じる仕組みに関する理論についても、現在再検討が行われており、一卵性双生児は、たとえ発生の最初期に分かれたとしても、遺伝的にまったく同一ではないことを示唆する研究結果がいくつか報告されている。「双子の研究に対するこうしたアプローチは、今まで考えつかないようなものでした」と、ブリティッシュ・コロンビア大学 (カナ

ダ、バンクーバー) に所属する双子研究で有名な Judith Hall はいう。

Reversade が一卵性双生児の形成に関心をもつようになったきっかけは、半分に切ったカエルの胚がまったく同じ胚として発生していくようすを顕微鏡で観察したことだった。「純粹に畏敬の念をもちました」と彼は振り返る。彼がめざすのは、なぜ、共同で1個の胚を形成するはずの複数の細胞が、分かれて完全に新しい個体を形成し始めるのか、また、胚発生の初期段階 (構成する細胞は少数で大きい) で起こるものなのか、それとも、胚発生に入ってから2週間後でも起こりうるものなのかを解明することである。胚の分割が遅すぎたり不完全だったりすると、体の一部がつながっている結合双生児になる可能性がある。Reversade は、双子形成が「調節的発生 (初期胚の割球は、分裂してもそれぞれの胚が完全な個体に発生できること)」を研究する最良の方法になると考えている。彼は、双子形成の原因遺伝子を見つけることの重要性と実現性に関する研究テーマで、シンガポール政府の初めてのA*STAR Investigatorship (ハワード・ヒューズ医学研究所が授与する賞に倣った、科学技術研究庁による年間50万ドル<5000万円; 1ドル=100円換算>の研究助成金) を獲得し、2008年2月にシンガポールに移住した。

双子形成は家系によるものだと、しばしば考えられる。研究者たちの間では、二卵性双生児は2個の卵が排卵され受精してできるというのが、ほぼ一致した見解である。ただし今でも、二卵性双生児の形成に弱い相関を示す複数の遺伝子が見つかっているだけであり、一卵性双生児が生まれる仕組みについては、それ以上にはっきりしていない。複数の大規模な調査により、一卵性双生児の母親の家系に、一卵性双生児を子どもにもつ親戚が多いわけではないという結果が出ている¹。しかし実際には、この解釈に反して、一卵性双生児が多い家系や集団が存在している。

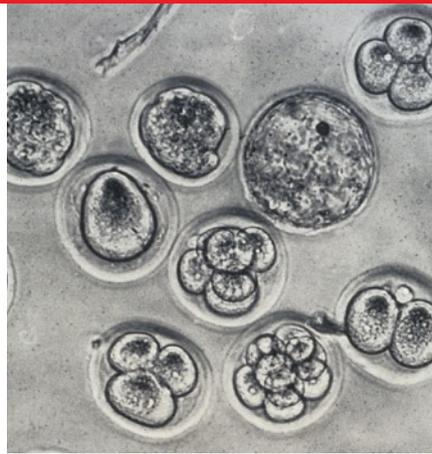
Reversade は、そうした家系や集団を 1 つ 1 つ訪れて調査しているところだ。

2 年前、彼はヨルダンを訪問し、15 組の一卵性双生児がいる家系で試料用の唾液を採取した。その家系図からは、1 個の優性遺伝子（コピーが 1 個だけあれば一卵性双生児が生まれる）が 22 対ある常染色体の 1 本に存在している遺伝パターンが読み取れる。しかし、実際の遺伝パターンの形成には、この遺伝子を 1 コピー保有していても一卵性双生児を産まない女性がいるように、この遺伝子の「浸透度が変動性」である必要がある（浸透度とは、ある遺伝子をもつ個体でその効果が現れる頻度）。「当然のことながら、浸透度の変動性は现阶段ではブラックボックスです。もっと多くの双子がいてもいいはずなのですが」と Reversade はいう。彼によると、その理由の 1 つは、双子が胎内で「消えて」しまう、つまり 2 人のうち一方、最悪であれば両方が死亡してしまうからだという。

広く引用されている、イーストカロライナ大学（米国、ノースカロライナ州グリーンビル）の Charles Boklage（行動生物学および発生生物学を研究している）が計算した見積もりによれば、自然妊娠の少なくとも 12% は双子の胚だという。そのうち、双子が両方とも無事に出産までこぎつけるのは、わずか 2% である。1 人だけ生まれる確率はおよそ 12% で、大多数の双子はどちらの胚も死亡し、妊娠がまったく気づかれないこともよくある^{2,3}。こうした双子の妊娠を持続できるのは、2 個の胚の着床と妊娠を支える機構が本来母体に備わっているためであることが、いくつかの説から示唆されている。

創始者効果

ヨルダンで Reversade は、遺伝子検査を用いて、双子形成の原因と思われる遺伝子の一塩基変異パターンが双子のゲノムに共通してあるかどうかを探した。そして、第 4 染色体上に候補領域を 1 つ



ヒトの胚は、胚発生の初期もしくは後期に分裂して双子（一卵性双生児）を形成することがある。

見つけた。この領域に存在する複数の遺伝子の 1 つに、やや期待できる特徴がいくつかみられたのだ。この遺伝子は、マウス胚の胚盤胞期に発現するタンパク質をコードしており、脊椎動物の進化を通じて保存されている。しかも、細胞が分化してしまうと活性が低下するのである。Reversade は、この遺伝子もしくはこれと同一のシグナル伝達経路で働くほかの遺伝子の変異が、それぞれの「双子の町」の創始者（集団の起源となった少数の人々）に存在していて、それがやがて集団内に広がったのではないかと考えている。しかし、「この全容、つまり目当ての遺伝子とその作用する仕組みを解明するまでは」、この研究を発表するつもりはないと彼はいう。

このストーリーは Reversade のインド滞在中に、予想外の展開となった。モハンマドブルウムリ村から帰った Reversade は、筆者に Eメールで「事態はますます複雑になってしまいました」といつてきた。「村では 3 週間前に、いちばん新しい一卵性双生児が生まれました。全員が生き残っているわけではありませんが、この 30 年間に生まれた双子は 55 組ほどになります。ある母親には一卵性双生児の子どもが 2 組いました。これはまったく驚くべきことです」。彼は村人たちから、水源である池をとともに使っている水牛が、3 組の双子を生んだことを聞いたという。Reversade はその水を採取して、生殖に影響しそうなあらゆる物質について調べた。村で双子が生まれ始めたのは、

近くに空軍基地ができたおよそ 40 年前であるが、彼は明白な環境汚染物質を示す証拠を何も見つけられなかった。それでも、一部の村人は、土壌中に双子形成の原因になる何かがあると信じている。

少なくとも 1 つの関連遺伝子探索プロジェクトは失敗に終わった。2004 年、ハイデラバードにある細胞分子生物学センターの研究者たちは、双子形成と関連する遺伝子を探すために、ウムリ村から血液検体を集め、また、食習慣や社会的慣習を調べるために 1 人の社会学者を迎えた。「しかし、何 1 つ意義のある結果は得られませんでした」と、同センターのディレクターである Lalji Singh は話し、研究チームがこの結果をわざわざ発表するようなこともなかった。

Reversade は、もっと新しい技術を利用すれば、遺伝子の発見に必要な感度が得られるだろうと期待している。実際、研究対象となるすべての候補領域に次世代の遺伝子配列決定装置を適用する計画だが、同じ分野の研究者たちを納得させるまでの道のりは長い。シンガポールのゲ



ココノオビアルマジロはいつも一卵性の四つ子を出産する。

ノム研究所のディレクターである Edison Liu によれば、それぞれの「双子の村」については近親婚の疑いがもたれており（ウムリ村の住人たちは否定しているが）、これが双子形成に遺伝子が関与しているという仮説を証明することになるという。しかし、「双子形成という稀少な現象が地理的集中しているのは、統計的には偶然の産物であり、今回の観察結果についてはいくらか疑念をもつべきでしょうね」とも話している。

Reversade は、おそらく今年の夏に、ブラジルのリーニャ・サンペドロというドイツ人入植地を訪れるつもりである。ここでは、金髪碧眼の人が多い。1990年代には、この集落での出産の10%が双子で、そのほぼ半数は一卵性だった。アルゼンチンのジャーナリスト Jorge Camarasa は、昨年出版した『Mengele: the Angel of Death in South America (メンゲレ：南アメリカの死の天使)』という本の中で、この集落の双子発生率の高さは、ナチの「死の天使」と恐れられた医師、ヨーゼフ・メンゲレに原因の一端があると述べ



初期胚の細胞は互いに接着する能力を失ってしまう可能性がある。

ている。彼が、「支配者民族」を増産するために双子の遺伝子を研究し、その実験を行ったというのである。メンゲレの考えは当時の科学者にはあまり受け入れられなかったし、Reversade は、この集落の双子がメンゲレによるものだという考えは間違っていることを今回明らかにできるものと期待している。「この集落で双子が多い本当の理由を説明できれば、謎を解く完全な道筋がみえてきます」と彼はいう。

ヒトは、一卵性の多胎妊娠・出産の点で、哺乳類の中で最も抜きん出た種の1つであるが、アルマジロはさらにその上をいく。ココノオビアルマジロ (*Dasyprocta novemcinctus*) は、1回の出産で、2回分割した胚に由来する一卵性の四つ子を産む。Reversade にとって重要なのは、アルマジロの例からみて、哺乳類には一卵性の多胎妊娠・出産の遺伝的基盤が存在する可能性があることだ。どうやら進化は、アルマジロの繁殖戦略にかかわる遺伝子に味方してきたようである。アルマジロでは、1個の卵から複数の胚を作り出すことで、子宮の形による物理的な制約をうまく回避しているのかもしれない。

ヒトとアルマジロの多胎が同じ遺伝子（1個もしくは複数）によるものなのか、または同じ進化上の理由によるものなのかは明らかでない。研究者の大半は、ヒトの双子は進化上有利なものではないと考えている。女性の身体機能は、通常、1回の妊娠につき1人の胎児だけを育てるように進化しており、そこにほころびが

生じて双子ができるというのだ。一卵性双生児として生まれる赤ん坊では、先天異常のリスクが2～3倍になる⁴ことを踏まえ、リスク要因の観点から双子形成を一種の疾患であるかのようにみなす研究者もいる。「大半の人は、双子は望ましい結果ではなく、失敗の結果だと考えている」と、発生学者でミオ・ファティリティ・クリニック（鳥取県米子市）の客員研究員を務める Dianna Payne は話す。

1回に1人だけ妊娠するシステムがエラーを起こす理由は不明である。双子形成に関する説の1つによれば、わずかの違いが初期胚の細胞を互いに反発させて、2つの細胞塊に分かれさせるという。Reversade は、ためらいつつも、自分が候補だろうと考える変異遺伝子によって、胚の細胞間の接着能力が失われて分割してしまうのではないかと予測している。

Hall が支持しているのは、ヒトの双子発生がこれほど高頻度な理由を、受精の時期から説明する説である。ほとんどの哺乳類は、排卵したばかりの「まさに受精すべき最適な時期」に交尾できるよう、発情周期を認識しているのだと彼女は話す。「ヒトはいつでも性交渉をもってしまい、まさにその最適期をあっさり逃してしまうのです」。彼女によれば、排卵後時間が経過してから受精した卵は、その周囲にある透明帯とよばれる外膜を破って着床する際に、胚盤胞期にある胚に裂け目が入って2個に分割する可能性が高いのだという⁴。このシナリオでは、双子形成は、受精卵の着床の確立を高めるために生まれた、ヒトの繁殖戦略の副次的影響だと考えられる。

正常な遺伝学

ハダッサ・ヘブライ大学医学系大学院（イスラエル、エルサレム）の Isaac Blickstein とノースウエスタン大学（米国、イリノイ州シカゴ）の Louis Keith は、一卵性双生児の形成には遺伝的要素がからんでいるが、変異や異常と考えら



れるものではないだろうとみている。2人の主張によれば、ヒトの双子形成は、「まだ特定されていない、先天的に胚分割しやすい一次卵母細胞集団」が存在するせいだという⁵。

双子形成について、すべての研究者が認めていることが1つだけある。それは、生殖補助医療では、一卵性双生児が通常よりも高率で生まれることだ。昨年発表された総説論文によると、通常の2～12倍もあるという⁶。薬品による卵巣への刺激や、体外で培養した後に子宮内へ胚を移植することは、双子の形成と密接に関係している。この培養条件が、直接的に作用して胚の分割を促すか、もしくは透明帯を硬くするために胚がそこから出て着床するときに、2つにちぎれるのかもしれない。

ヒトの双子形成を最も生体に近い状態で観察できるのは、おそらく、体外受精の際に余ったものとして冷凍保存された胚

を解凍し、その発生を2分ごとに低速度で撮影した画像だろう。ミオ・ファティリティ・クリニックのPayneの研究チームは、26個の胚のうち25個で、胞胚腔が少なくとも一度はつぶれることを見つけ驚いた。胞胚腔とは、液体で充たされた胞胚内の腔所で、胎児になる予定の凝集した細胞塊を支援する。胞胚腔の崩壊が高頻度で劇的なほど、胚が生き残る確率は少なかった。しかし最も驚いたのは、つぶれた2つの胞胚腔の中で細胞塊が分割され、できた2つの断片が、まるで卵の中の別々の部分に2つの胚を作るかのように発生したことだ。「この時期の細胞は非常に接着性が高く、胞胚腔がもう一度膨らもうとすると、一部の細胞は反対側の内壁にぴったりくっついてしまいます」とPayneはいう。この培養システムは子宮内環境を完璧に再現したものではないため、一部の細胞が死んでしまったり、細

胞膜の細胞間接着が弱くなったりして、胞胚腔の崩壊が引き起こされるのではないかと、彼女は考えている。こうしたメカニズムが遺伝子異常によって引き起こされたものなら、自然妊娠の胚でも同じように起こっている可能性がある、Payneは話す。「でも、それをカメラで見ることはまずできないでしょうけど」。

しかし、特殊なカメラがなくても、一卵性双生児に関するもう1つの問題を明らかにすることはできる。それは、一卵性双生児でも、見た目や性格、疾患の発生傾向に個人差があるということだ。「疫学研究が行われるようになって50年になりますが、多発性硬化症や統合失調症、1型糖尿病の発症について、双子の間で個人差がある理由はまだわかっていません」と、トロント大学（カナダ、オンタリオ州）で双生児研究に携わるArturas Petronisは話す。

双子を作る

クローン技術を使ったヒトの双子作製は、SF小説のように思えるだろうが、もう既に、ある種の不妊治療のために試験が行われている。

発生・不妊治療センター（ギリシャ、パトラス）の医師であるKarl Illmenseeは、冷凍保存してあったヒト胚を解凍し、手作業で発生のおさまる段階で分割し、できた各細胞集団を体外で培養した。すると、6～8細胞期（写真）にある高品質の胚を2分割するのが、生存能力のある一卵性双生児胚の作製に最も有望な方法であることがわかった。彼は体外受精後この段階まで発生した12個の胚を2分割し、できた24個の胚のうち

16個が健康で成熟した胚（桑実胚か胚盤胞）へ発生することを見つけた¹⁰。

これらの胚は、子宮内へ移植できる発生段階にあった。しかし、Illmenseeが実験を行ったのは「3倍体」、つまり染色体セットが2つではなく3つの胚だった。この種の胚は普通、出産まで生き延びることはなく、体外受精（IVF）の処置過程で廃棄される。

Illmenseeは、この技術によって、体外受精で得られた胚が少ないカップルの妊娠のチャンスをもっと高められるだろうと説明している。しかし、そこから生まれる子どもは健康なのだろうか。マウスやヒツジ、ウシ、ヤギ、ブタ、ウマ

など各種の動物で、胚分割法によって双子が生まれている。ただし、この技術を使って疾患モデル用に霊長類の一卵性双生児を作ろうという試みは、複数の妊娠例はあるものの、誕生に至ったのは1例だけで、それも双子ではなかった^{11,12}。Illmenseeは、研究室でヒトの双子を作り出そうという試みが1例だけあったと話す。その試みでは、分割した胚はわずか2、3回の卵割後に発生を停止してしまった¹³。

Illmenseeが研究界の本流を外れることになったのは、1980年代初頭に彼の実験研究の一部に対して疑問の声が上がったからだ。そうした彼の研究報告の中には、マウスのクローンを作ったとする報告もあった。現在は、倫理的反対を受けないように、慎重に



なっていると話す。彼は、双子の作製に関する米国生殖医学会の倫理委員会報告を引き合いに出し、こう述べている。「1個の胚を2個以上の胚に分割することで、不妊カップルの要求に応える道がいくつか生まれるでしょう。こうした方法のリスクについて十分なインフォームド・コンセントがなされるのなら、倫理面での大きな反対はないと思われます」。

D.C.

昨年、アラバマ大学（米国、バーミングハム）の Jan Dumanski は、意外だが可能性のある 1 つの説を発表した。それは、一卵性双生児は突きつめると遺伝学的にそれほど同一ではないというものだ。彼女の研究チームは、19 組の一卵性双生児を比較し、双子の個人それぞれで重複もしくは欠失した DNA 領域があることを見つけた⁷。これらの領域は、双子の 2 人の間でいくつかの疾患の発症傾向に違いがある理由の解明に役立つと考えられる。

双子に個人差が生じる理由は、DNA 配列以外にも存在するかもしれない。ベルピッチェ生物医学研究所（スペイン、バルセロナ）の Manel Esteller は、3 歳から 74 歳までの一卵性双生児を対象に、ヒストンのアセチル化とメチル化のパターンの違いを調べた。これらのパターンは、一般に遺伝子の活動を制御する「エピジェネティック」な印で、DNA の塩基配列に変化はない。その結果、若い双子ほどエピジェネティックな印が似通っていたが、年を取るにつれ、あるいは環境要因が異なるにつれ、パターンの差が大きくなった⁸。「双子の一方が喫煙や薬物摂取を始めたり、大気汚染のひどい場所へ引っ越ししたりすると、たとえそれが 1 年間であっても、エピジェネティックなパターンにはっきりと差が現れます。この種のパ

ターンはとても動的なものなのです」と、Esteller はいう。しかし、Petronis は、自然発生的でランダムに起こるエピジェネティックな変化のほうが、環境に引き起こされる変化よりも大きく関与しているのではないかと考えている。

エピジェネティックな個人差は、発生の 1 日目から既に始まっているのかもしれない。実際、ケンブリッジ大学（英国）の研究チームが、マウス胚で最初の 4 つの細胞期に既にヒストンのメチル化の違いがみられる場合があると報告している⁹。Petronis は、エピジェネティックなパターンに違いが生まれることで、まず細胞塊が分割して双子形成が進むのではないかと考えている。一卵性双生児に関する彼の研究から、ゲノム上でエピジェネティック・パターンが最も異なる遺伝子座は、細胞分裂過程に関与する複数の座位であることが明らかになった。これは「双子形成の仮説で考えられている理由の 1 つである、初期発生段階での（遺伝的な）不一致を反映している可能性があります」と彼は語る。

そうだとすれば、Reversade は双子形成の原因遺伝子を決して見つけることはできないだろう。しかし、そんなことで、ブラジルの双子の町の訪問をキャンセルする彼ではない。アルマジロから、双子形成

の遺伝子が見つかるはずだと確信しているからだ。また、ゼブラフィッシュには結合双生児のように頭が 2 つある個体を生み出す変異があり、これも同じく彼の確信の根拠になっている。さらに、ヨルダンの家系も、「エピジェネティックな現象では説明つきませんが、伝統的な遺伝学では説明できるのです」という。

この研究で双子形成に関与する遺伝子が見つからない場合、彼は次に何をするつもりなのだろうか。「とりあえず研究結果を発表するまでですよ」と、彼はいうばかりである。 ■

David Cyranoski は、Nature のアジア・パシフィック地域の特派員。

1. Lewis, C. M., Healey, S. C. & Martin, N. G. *Am. J. Med. Genet.* **61**, 237-246 (1996).
2. Boklage, C. E. *Int. J. Fertil.* **35**, 75-94 (1990).
3. Boklage, C. E. The frequency and survival probability of natural twin conceptions. In *Multiple Pregnancy: Epidemiology, Gestation, and Perinatal Outcome* (1995).
4. Hall, J. G. *Lancet* **362**, 735-743 (2003).
5. Blickstein, I. & Keith, L. *Twin Res. Hum. Genet.* **10**, 394-399 (2007).
6. Aston, K. I., Peterson, C. M. & Carrell, D. T. *Reproduction* **136**, 377-386 (2008).
7. Bruder, C. E. et al. *Am. J. Hum. Genet.* **82**, 763-771 (2008).
8. Fraga, M. F. et al. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **102**, 10604-10609 (2005).
9. Torres-Padilla, M.-E., Parfitt, D.-E., Kouzarides, T. & Zernicka-Goetz, M. *Nature* **445**, 214-218 (2007).
10. Illmensee, K., Levanduski, M., Vidall, A., Husami, N. & Goudas, V. T. *Fert. Steril.* doi:10.1016/j.fertnstert.2008.12.098 (in the press).
11. Chan, A. W. S. et al. *Science* **287**, 317-319 (2000).
12. Mitalipov, S. M., Yeoman, R. R., Kuo, H. C. & Wolf, D. P. *Biol. Reprod.* **66**, 1449-1455 (2002).
13. Hall, J. L. et al. *Fertil. Steril.* **61**, S1 (1993).



新しい研究は nature から始まる

Gateway to New World of Science

Nature は、これまで、数多くの衝撃的な論文を発表してまいりました。しかし、そうした研究成果は、いつも同じところにとどまってはいません。伝統や文化が世代を越えて受け継がれるように、その研究成果によって、別の研究者が刺激を受け、さらに革新的な成果が得られ、それが Nature に掲載されることもあるのです。Nature は、こうして発展する科学への貢献と研究者のサポートをこれからもしてまいります。

Q&A

宇宙論

Dark matter and dark energy

ダークマターとダークエネルギー

Robert Caldwell & Marc Kamionkowski

Nature Vol.458(587-589)/2 April 2009

宇宙の大部分が私たちの目に見えないダークマターとダークエネルギーによって占められていることを、さまざまな観測結果が示唆し続けている。この宇宙の闇を解明することは、天文学者と物理学者にとって重要な課題である。

宇宙はどのような成分から成り立っているのか？

平均エネルギー密度への寄与という観点からみると、宇宙は約75%のダークエネルギー、約20%のダークマター、約5%の通常の（原子を作っている）物質、そしてほんのわずかの光子とニュートリノからできている。この値は、ビッグバンモデル、一般相対論、および、宇宙は最も大きなスケールでは一様であるという「宇宙原理」が正しいという仮定のもとに得られたものである。これらの仮定の裏づけとなる実験と観測の広範さと緻密さは、この宇宙モデルが確固たる基礎の上に成り立っているという自信を与えてくれる。

ダークマターが存在するという証拠は何か？

私たちはダークマターを見ることはできないが、間接的な方法でその存在を推測することができる（図1）。ニュートンの法則によると、天体の質量はその衛星の運動によって求めることができる。計算の結果、銀河団の質量はその銀河団を構成する銀河の質量よりもずっと大きく、銀河の質量は銀河を構成する星と星間ガスの質量を合わせたものよりもずっと大きいと推定された。このことを裏づける証拠はほかにもたくさんある。その上、この余分な「もの」が通常の物質ではないと信じるに足る理由があるのだ。通常の物質がそれほどたくさんあったとしたら、ダークマター探しにやっきになっている天文学者たちの目から逃れ続けることはむずかしいだろう。また、ダークマターが通常の物質であったとしたら、ビッグバンの名残の宇宙マイクロ波背景放射や、銀河や銀河団の性質の中にはっきりした痕跡を残すはずだが、そのようなものも見つかっていない。

銀河や銀河団といった大きなスケールではニュートンの法則は破綻する、と結論することはできないのか？

数十年前なら悪くない仮説だったかもしれない。しかし、観測されている銀河や銀河団の運動を説明するためにニュートンの法則に代わって構築される新しい重力理論は、重力レンズ効果（遠方の光源からくる光が屈曲する現象）、宇宙マイクロ波背景放射、および宇宙の大規模構造に関する膨大な量のデータも説明できなければならない。その理論はまた、太陽系内で得られた精密な観測結果によって課せられる制限も満たしていなければならない。

地球の近くにはどのくらいの量のダークマターがあるのか？

私たちの天の川銀河の星の軌道速度から、地球の近くのダークマターの平均質量密度は、1立方センチメートルあたり陽子1個の3分の1程度の質量であることが示唆される。この数字は宇宙の平均密度の 10^6 倍の大きさであるが、水の平均密度と比べると24桁も小さい。ダークマターが何からできているにしても、銀河の重力ポテンシャルの井戸の中を星と同様に運動しているため、その速度は毎秒200キロメートル程度であることがわかる。また、地球は太陽の周りを回っているため、地球に入射するダークマターの量には夏と冬とで約10%の差があるはずだ（図1）。さらに、銀河のダークマターの分布は滑らかではないかもしれない。銀河の形成は現在も進行中であり、計算機を使った研究からは、ダークマターの固まりや潮汐力による流れといった下部構造がかなりあるかもしれないことが示唆されている。

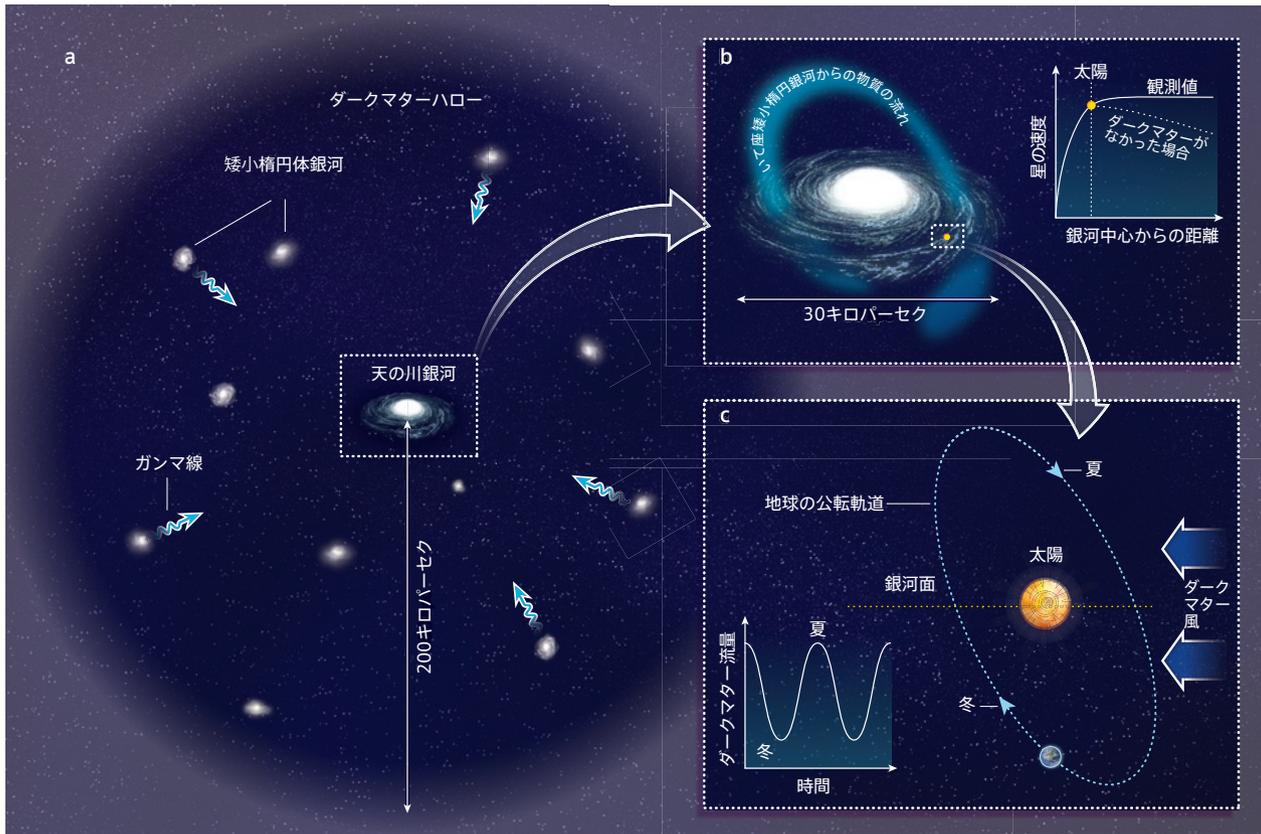


図1 ダークマターとその検出方法。a、b、私たちの天の川銀河を構成する星とガスの回転速度から、この銀河が半径約200キロパーセク(1パーセクは約3.26光年)のダークマターハローに包まれていることがわかる。近隣の矮小楕円体銀河や、ダークマター密度が高いと予想される銀河中心近くでのダークマター粒子の対消滅によって、高エネルギーのガンマ線が生まれている可能性がある。いて座矮小楕円体銀河から引きずられ、天の川銀河にからまっている物質の流れの中でも、ダー

クマター密度は高くなっているかもしれない。c、地球は銀河のダークマターハローの中を通過している。ダークマターを直接検出しようとする実験で検出されるダークマター流は、地球が太陽の周りを公転しているために季節によって変化する可能性がある。ダークマター流は、地球が銀河ハローからのダークマター風と同じ方向に運動するとき(冬)のほうが、ダークマター風と逆向きに運動するとき(夏)よりも小さい(約10%減)と予想される。

ダークマターの正体に関する最も有望な仮説は何か？

ダークマターの正体については無数の仮説が出されているが、最も有望なのは新しい素粒子を考えるものである。長年にわたる理論的検討に耐えてきた候補としては、WIMP(弱い相互作用しかしない質量のある粒子)とアクシオンがある。WIMPは、ニュートリノのように通常の物質とは弱くしか相互作用しない素粒子であり、素粒子物理学の標準模型への拡張(例えば、超対称性理論や余剰次元モデル)の中で自然に現れてくる。WIMPの検出は、スイスのジュネーブ近郊にある欧州原子核共同研究機関(CERN)に建設された大型ハドロン衝突型加速器(LHC)の最重要目標の1つである。もう1つのダークマター候補であるアクシオンは、陽子や中性子の中のクォークを結びつける強い相互作用の対称性の一部を説明するために仮定された素粒子である。ダークマターの正体についてはほかの可能性もあり、偏見のない心

を保つことが必要である。しかし、ダークマター粒子と通常の物質との相互作用の強さ、ダークマター粒子の崩壊に対する安定性、その「冷たさ」(今日のダークマター粒子は、光速よりも遅い速度で運動しているはずである)などの制限によって、可能性を絞り込むことができる。

ダークマターの正体を知るには、どういった実験や観測が有効か？

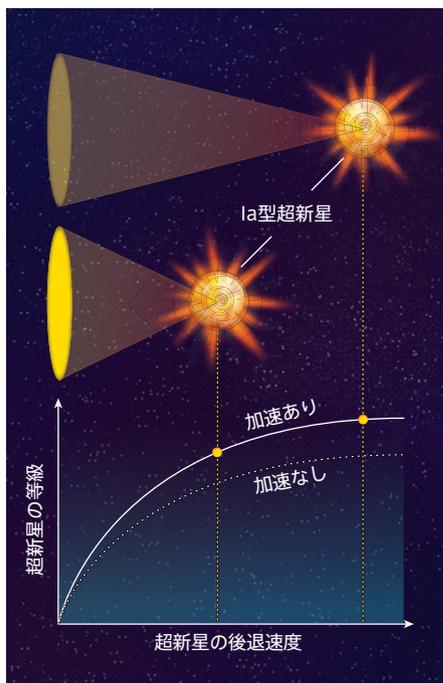
ダークマター問題に対する最も説得力ある答えが、ダークマター粒子の直接検出であることは明らかだ。銀河の周りにはダークマターが薄く広がったハローがあるが、このハローを構成するWIMPが地球に飛んできて検出器内に入り、これに衝突された原子核が反跳すると、検出器内に10~100キロ電子ボルトのエネルギーが残ることになる。現在、こうした反跳原子核の観測によりWIMPを検出しようという実験計画が約20ある。一部の検出実験では金属結晶中に標的

原子核があり、原子核の反跳は検出器内で集められた反跳エネルギーを通じて検出されるようになっている。このようなダークマター検出実験では、地球上の自然放射線のバックグラウンドからダークマターのサインを見つけ出すことが課題となる。しかし、今日の実験装置の感度は十分に高くなってきており、まもなく、ダークマターの主要な素粒子物理学モデルのいくつかにつき、その当否を調べるのが可能になる予定である。LHCで未知の粒子が発見されればダークマター候補の範囲を大きく絞り込むことができ、私たちは正しい道筋にいることを確信できるようになるだろう。しかし、だからといって宇宙物理学的なダークマター検出の必要性が否定されるわけではない。

ダークマターを検出したという報告はすでにあっただけ？

確かに検出したという報告はあった。イタリアのグランサッソ国立研究所の地下深くで行われている DAMA 実験は、地球がその公転軌道によって銀河のダークマターハローの中を運動していることに起因するとみられる、ダークマター流の年間変動を検出したと報告した。このシグナルは、まだほかの実験によって裏づけられていない。ほかの実験は異なる標的原子核を使っているため、さまざまな実験結果は特定のダークマター理論の文脈でしか比較できない。DAMA 実験の結果を説明するために、最も単純な超対称理論に現れる WIMP の質量および通常の物質との結合が提案されたが、これらはほかの実験によって否定されている。

図2 宇宙の膨張の加速とダークエネルギー。白色矮星の爆発により生じる Ia 型超新星は、標準光源（明るさがわかっている天体）であると考えられている。この性質のため、地上から超新星を観測したときの見かけの明るさから、その距離を決めることができる。天体が暗く見えるほど、その等級は高く、遠くにある。ある後退速度をもつ超新星が予想よりも暗いという観測から、宇宙の膨張は約 50 億年前までは減速していたが、それ以降、加速に転じて今日に至っていると結論された。このように宇宙の膨張が加速する原因はダークエネルギーにあると広く考えられている。



ほかの方法でダークマターを検出できないのか？

個々の WIMP は理論的には安定だが、WIMP の対は「対消滅」することがあり、高エネルギーの光子と、陽電子（反電子）、反陽子、ニュートリノの形の宇宙線が生成する。そうした粒子を検出できればダークマターの存在の間接的な証拠になるかもしれない。対消滅生成物が地球の近くから来ているならば、対消滅が起きている場所は、ダークマター密度が高い銀河中心か、天の川銀河を取り囲み、主としてダークマターからなる、いくつかの矮小銀河の中心である可能性が高い（図1）。1つの手がかりは単一エネルギーのガンマ線である。これらの手がかりを探すために、多数の地上実験、気球実験、衛星実験が行われている。

宇宙線実験の現状は？

2008年、観測衛星 PAMELA を使った宇宙線実験と気球を使った ATIC（高度薄型電離カロリメーター）実験から、高エネルギー宇宙線陽電子の流量の超過が報告された。この観測結果は WIMP 対消滅が原因である可能性があるが、観測された流量は単純な WIMP モデルが予測するよりも数桁大きい。1つの解釈は、WIMP ダークマターはこれまで考えられていたよりも複雑であるというものだ。しかし、この異常の原因がダークマターにあるとみなす前に、もっと平凡な宇宙物理学的説明（地球近傍のパルサーによる粒子加速など）の可能性を除外しなければならない。

ダークマターの今後の研究計画は？

ダークマターを直接検出する実験は、WIMP の「風」を利用して（図1）、地球起源のバックグラウンドシグナルから WIMP 流の特徴的な年間変動を分離することをめざしている。一方、近い将来に打ち上げられる欧州宇宙機関（ESA）の天文衛星ガイアは、地球近傍の 10^9 個の星の位置と運動状態の地図を作成することになっている。この地図を使って天の川銀河の重力場を描けば、ダークマターハロー内のダークマター分布を推測することができるだろう。また、WIMP 対消滅から生成したガンマ線を探す実験もいくつか計画されており、最近打ち上げられたフェルミガンマ線宇宙望遠鏡を使う実験もその1つである。南極のアイスキューブ・ニュートリノ天文台などの高エネルギーニュートリノ望遠鏡は、太陽や地球に蓄積した WIMP の対消滅から生成したニュートリノを探すことになる。

ダークエネルギーとは何か？

通常の物質どうしは重力によって引き合うため、宇宙の膨張は減速するように思われる。けれども、観測によると宇宙の膨張は加速しており（図2）、私たちの宇宙の理解がまだまだ不足していることを示唆している。この観測結果の解釈と

して有力なのは、宇宙は「反重力」効果を及ぼす何かによって満たされているとする説であり、この「何か」はダークエネルギーとよばれている。ニュートンの重力理論では重力が反発作用を及ぼす可能性はないが、一般相対論ではその可能性がある。物質とエネルギーの等価性から、分子の熱運動によるガス圧が重力場の源となりうるのである。十分な負の圧力をもつ流体の重力場は反発作用を及ぼす。分子運動が負の圧力をどうやって引き起こすのかイメージすることはむずかしいかもしれないが、素粒子理論に現れる量子場の一部は、負の圧力をもつ流体の存在を可能にすることがわかっている。つまり、ダークエネルギーとは単に、宇宙の膨張の加速を説明するために仮定された、負の圧力の流体のことなのだ。

ダークエネルギーの候補として最も有望なものは何か？

ダークエネルギーの候補として最も単純なものは、アインシュタインの宇宙定数である。宇宙定数は、負の圧力をもつ完全に一様な流体を表しており、宇宙の最低エネルギー状態（真空状態）と関連づけられている。しかし、観測から要請される宇宙定数の値は、理論的な予想値の 10^{120} 分の 1 にしかならない。ダークエネルギーのもう 1 つの有力候補は、アクシオンに似ているが質量はもっと小さい、未知の粒子の流体である。量子理論は、そうした粒子は宇宙の膨張の加速に必要な負の圧力を供給できると予測している。

既知の重力の法則は宇宙スケールではどれほど信頼できるのか？

一般相対論はうまくいっている。一般相対論の正しさは太陽系内の事象で詳細に試された。さらに、膨大な量の天体物理学および宇宙論的観測結果が、この理論に基づいて理解されている。しかし、一般相対論がこれだけうまくいっていても、宇宙的な長さのスケールにおける重力理論に変種が存在する可能性は否定されない。宇宙膨張の加速を説明するために、重力理論というバンドラの箱が開かれ、多数の理論が提案されてきた。しかし、太陽系内の観測結果から課せられる精密な制約に反することなく重力理論に手を加えることは、驚くほどむずかしいことがわかりつつある。そして、今のところ説得力のある代替理論はでていない。

ダークマターとダークエネルギーが関連している可能性はあるか？

素粒子物理学の標準模型を超えて、ダークマター粒子とダークエネルギー場を含めた「暗黒部門」が存在する可能性を考えてもおかしくないように思える。いずれも未知の重力場源の存在を要請しているようだが（1 つは引力、もう 1 つは斥力作用を及ぼす）、今のところ、2 つの現象を統一的にうまく説明する提案はなされていない。

宇宙の加速がほかの現象に起因している可能性は？

新種の重力（通常の物質がダークエネルギーと同じ反重力効果を生み出すような重力）や新しい電磁気効果（遠方の超新星を暗く見せるような効果。図 2 参照）が存在すると考える人や、私たちの基礎的な仮定（最大の長さのスケールでの宇宙の統計的な一様性や等方性）に何らかの欠陥があると考える人もいるかもしれない。現在までの観測結果は、こうした提案のどれかを特に支持しているわけではないが、私たちは偏見のない心を保たなければならない。

最近の観測でダークエネルギー問題の精密化に役立ったものは？

「バリオン音響振動」の観測は、宇宙の加速を裏づけ、精密化するのに使われた。バリオン音響振動は宇宙初期の音波によって作られたさざ波であり、宇宙マイクロ波背景放射と銀河分布に刻み込まれている。このさざ波の波長が地球からの距離とともにどう変化するかを測定することにより、宇宙の膨張の歴史を図で表すことができる。

ダークエネルギーの正体を知るためにはどんな実験が役立つか？

今日、宇宙の加速膨張という現象を説明できる説得力のある理論が明らかに欠けている。だから、これまでの研究では、何らかの手がかりがひょっこり現れるかもしれないと期待しつつ、同じようなデータが集められてきた。現在、超新星やバリオン音響振動を使う方法のほかに、加速膨張する宇宙において通常の物質とダークマターが重力の影響下で集まる速度を測定するという方法での研究も進められている。1 つの有望な方法として、弱い重力レンズ効果を使ってダークエネルギーへの制限を設けるといふものがある。強い重力レンズ効果では、遠方の光源からの光が前景の物質（レンズ）によって強く曲げられ、光源の像が強くゆがみ、弧の形に引き伸ばされる。一方、弱い重力レンズ効果では、光源の像はわずかに伸び、拡大されるだけである。もう 1 つの方法は、銀河団の高温ガスの X 線放射を使い、その重力ポテンシャルの井戸の深さを決定するというものである。こうした方法は有望視されているものの、宇宙の加速膨張の基礎にある物理を決定することはむずかしいかもしれない。一方で、このように困難で基礎的な問題に取り組むためには、ほかに方法がないようにも思える。

Robert Caldwell, ダートマス大学 (米)

Marc Kamionkowski, カリフォルニア工科大学 (米)

さらに深く読みたい方へ

- Caldwell, R. & Kamionkowski, M. the physics of cosmic acceleration. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* (in the press); preprint available at <http://arxiv.org/abs/0903.0866> (2009).
- Frieman, J. a., turner, M. s. & Huterer, D. Dark energy and the accelerating Universe. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **46**, 385-432 (2008).
- Hooper, D. & Baltz, e. a. strategies for determining the nature of dark matter. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **58**, 293-314 (2008).
- Hogan, J. & Brumfiel, G. Unseen Universe. *Nature* **448**, 240-248 (2007).

140年も謎だった、花粉管を導くシグナルの発見!

東山 哲也

花は、子孫を残すための重要な生殖器官。ところが、その目立つ姿とは裏腹に、受精はめしべの奥深くで行われ、そのプロセスには未解明なことが多かった。謎の1つは、複雑な構造をかいくぐって卵細胞の元へと正確に伸びていく花粉管の動き。何に導かれているのか? 名古屋大学大学院理学研究科の東山哲也教授らのグループがその答えとなる物質を突き止め、Nature 3月19号¹に発表した。花粉管が誘引物質に向かって伸びていくようすの写真が、その表紙を飾った。



2009年3月19日号

シグナルはどこから出ているのか?

Nature Digest — 140年間続いた謎とはどんなことですか?

東山 — おしべの花粉がめしべの先に付くと、花粉から管がスルスルと伸びていき、めしべの根元内部に隠れた卵細胞へ到達します。そして、この花粉管の先端から精細胞が放出され、それが卵細胞と合体して、受精が起こるのです。植物の精細胞は、動物の精細胞と異なり泳げないため、このように花粉管が、精細胞を送る「ホース」にならないといけません。ですから、「ホース」が伸びていく方向を間違えるとたいへんです。受精できなくなってしまう。しかし、花粉管は卵細胞のほうへきちんと伸びていくので、それはどうしてだろうということから、140年前の研究で花粉管を導く誘引物質の存在が推測されていたのです。

ND — これまで発見がむずかったのはなぜですか?

東山 — 実は、卵細胞を観察すること自体が容易ではないのです。卵細胞は1個ずつ、胚珠という丸々とした組織に埋め込まれており、さらにその胚珠は、めしべの根元の子房という組織に包まれているからです。胚珠は、将来種子になる組織です。受精は胚珠内部で起こり、受精のようすを観察するのも簡単ではありません。

ND — しかし、培地上では受精のようすが観察できたのですね?

東山 — はい。大学院時代の研究ですが、卵細胞の観察がしやすいトレニアという植物(図1)を使って体外受精を行わせることに成功し、それをビデオ映像におさめました²。トレニアから胚珠と花粉管を取り出して、シャーレの培地上で受精をさせるというものです。胚珠に向かって花粉管が伸びていき、管の先端が胚珠に侵入して、そこから精細胞が放出される受精の瞬間を、世界で初めて捕らえることができました。これは反響も大きく、励みになりましたね。

ND — その後、どのように誘引物質の探究を進めたのですか?

東山 — 培地上に置いた胚珠の位置を動かすと、花粉管もそれに従って伸びていく方向を変えます。胚珠から何か物質が出て、花粉管を誘引しているように見えるのです。そこで、次の2段階に分けて研究していくことにしました。まず、「胚珠のどこから物質が出ているのか」、次に「その物質は何なのか」です。前者ですが、胚珠の内部には卵細胞だけでなく、数種類の細胞が含まれています。レーザーを当てて、それらの細胞を1個ずつ壊してみました。すると、卵細胞の両脇に位置する2つの助細胞を壊したときに、花粉管は胚珠に向かわなくなりました。これで、最初の疑問の答えが助細胞だろうとわかりました³。

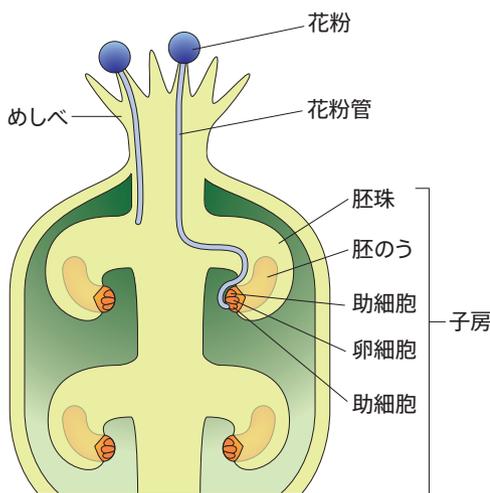


図1 トレニアの花で、花粉管が伸びていくようす。子房の中の胚珠に卵細胞と助細胞が含まれる。トレニアの場合、胚珠の中身(胚のう)が部分的に露出しており、観察しやすい。花粉管が子房の内部をどのような経路を通って進むかは、正確にはまだわかっていない。胚珠は、図では4個しか示していないが、実際には1つの子房に500個ほど付く。

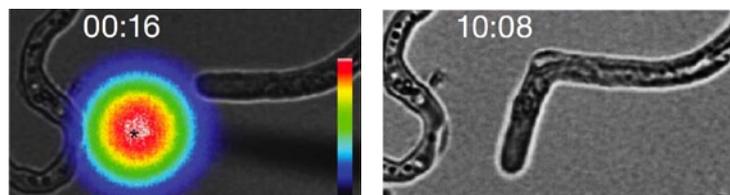


図2 誘引物質(色は濃度勾配を表し、中心部が濃い)の置かれた方向に向かって、花粉管が曲がっていくようす。

花粉管を引き寄せるタンパク質が見つかった

ND — 2番目の疑問にはどのように対処したのですか?

東山 — 誘引物質の正体を突き止めようと細胞から抽出を試みたのですが、微量のせいがかまくいきませんでした。そこで、トレニアとその近縁種の植物の間で、花粉管の誘引現象を比較してみたのです。すると、種ごとに誘引物質が異なる



東山哲也（ひがしやま・てつや）／名古屋大学大学院理学研究科生命理学専攻教授。理学博士。1971年、山形県生まれ。1994年、東京大学理学部生物学科卒業、1999年、同大学院理学系研究科博士課程修了、同研究科助手。2007年より、現職。2007年、日本植物学会特別賞（技術）などを受賞。

植物の受精の仕組みを研究。自分で技術を開発して、研究を進めていく。「何かを明らかにしたいけれども方法がないというときには、自分でその方法を作り出すよう心がけています。工夫が好きな

です」。体外受精を行うおうとした際には、培地作りから着手。植物細胞に薬剤を微量注入するための装置は、レーザー光による熱膨張を利用したもので、特許を取得。花粉管から2つの精細胞が放出され、受精するようすをビデオ撮影する技術は、世界中で東山研究室だけのもの。「可視化することは重要。実際のようなすを見ながら調べていける」という。左の写真は、トレニアの改良種を背景に研究室で撮影。「植物の受精は、穀物生産にも直結する重要なテーマなのです」と、付け加えることを忘れなかった。

ことがわかりました。ごく近縁種でも異なっているので、この物質は変化（進化）しやすい分子、つまりタンパク質かもしれないと思いました⁴。古くから、カルシウムイオンではないかという説があったのですが、これは違うと思いました。

ND — 遺伝子を使ったタンパク質の解析に移ったのですか？

東山 — そうです。助細胞で生合成されるタンパク質を探そうと思いました。私の実験技術も上達し、わずか30 μmほどの助細胞を取り出せるようになっていたので、助細胞を25個ほど集めて、遺伝子の発現を調べたのです。その結果、システインというアミノ酸を多く含む分泌性の小タンパク質（後にLUREと命名）が候補に挙がってきました。細胞の外に分泌されてシグナルとして働く性質をもつタンパク質です。そこで、遺伝子配列をもとに候補のタンパク質を大腸菌に作らせ、伸長中の花粉管の前に置いてみました。すると、花粉管はそのタンパク質に向かって伸びていったのです（図2）。うれしかったですね。最初は半信半疑だったのですが、植物体内におけるこのタンパク質の生合成を人工的に抑制すると、花粉管が誘引されないことがわかり、確信することができました。今回表紙に採用された写真（上）では、このタンパク質を使って花粉管を屈曲させ、*Nature*の頭文字の「N」の文字を描くように伸長させているのですよ（笑）。

自分で工夫しながら一歩ずつ進めていく

ND — 実験材料のトレニアとは長いお付き合いですね。

東山 — 大学院時代から現在まで、ずっとですね。大学院に入ってすぐ、指導教官の黒岩常祥教授から、「自分が興味をもった現象にいちばん適した動植物を使うことが大切」とアドバイスされました。植物の受精の研究をしたいと思っていたので、何か適したものはないかとさまざまな植物を手当たりしだいに試したのですが、よい材料がなかなか見つかりません。そんなとき、「トレニアは、胚珠の中身（胚のう）が部分的に飛び出している」という文献の一文が目にとまりました。生きたままの卵細胞や助細胞も観察できそうです。「これだっ!」と思いましたね。これまでの研究成果は、トレニアと出会えたからこそのもので、感謝しています。ほかにもトレニアに着目した研究者はいましたが、彼らは体外受精を行うには至らなかったため、受精のプロセスが観察できなかったのです。

ND — 大学院時代から大きな成果を上げられ、極めて順調に進んでこられたのではないですか？

東山 — 楽観的な性格もあって、研究は常に楽しかったです。でも、ここに至るまでの道が決して平坦だったわけではありません。手探りでひとつひとつの方法を工夫し、道を切り開いてきたつもりです。体外受精を行うにあたって、細胞が育つ培地を作るだけで、大学院時代に1年間以上を費やしました。遺伝子を薬剤で抑制するときには、注入する装置の工夫だけで3～4年もかかりました。誘引物質の候補タンパク質を合成したときも、最初は、花粉管の前に置いてもまったく誘引が起きませんでした。「あと1回だけ実験しよう」と、決めて臨んだときに、はっきりと花粉管が曲がったのです。実はこのとき、クリスマス休暇にぶつかり、タンパク質を精製途中の溶液中に2～3日放置しました。その間に、タンパク質の折り畳みが偶然うまく進んだようです。諦めないでほんとうによかったと思いました。まあこのように、諦めが悪いというか（笑）、いろいろ工夫を繰り返して、粘り強く継続できることが、自分の長所かと思っています。

ND — 研究室の若手の指導で心がけていることは？

東山 — 各自、自分の興味のある目標をきちっと定めることが大切です。たとえそれが遠くにあってもかまわない。それが、サイエンスとしてオリジナリティの高い発見につながるのだと思います。私は、学生たちが間違った方向に進まないように、見守っています。私自身は、一見、静的にみえる植物で起こっているダイナミックな受精という現象がおもしろく、自分で研究を進めてきたつもりです。でも、今思うと、指導教授にうまく誘導されたのかもかもしれませんね。

ND — 次なる研究は？

東山 — 誘引物質を受け取る相手である花粉管の受容体を研究します。また、種が違っても受精が起きませんが、それが誘引物質の進化や種の形成とどのようにかかわっているかなども興味深いテーマです。

ND — ありがとうございます。

聞き手は、藤川良子（サイエンスエディター）。

1. Okuda S. et al. *Nature* **458**,357-361 (2009).
2. Higashiyama T. et al. *Plant Cell* **10**, 2019-2032 (1998).
3. Higashiyama T. et al. *Science* **293**,1480-1483 (2001).
4. Higashiyama T. et al. *Plant Physiol.* **142**, 481-491 (2006).

筒状のものを切り開いてリボン状にする——簡単そうに聞こえるかもしれませんが、カーボンナノチューブを切り開いてリボン状のグラフェンを思いどおりに作製するとなると、話は別です。

今回は、2つの研究グループがカーボンナノチューブからグラフェンリボンを作製した技術を報じたニュース記事を取り上げます。それぞれのグループの手法の違いに注目して、読んでみましょう。

NEWS nature news

語数：489 words 分野：材料・ナノテクノロジー

Published online 15 April 2009 | Nature | doi:10.1038/news.2009.367

<http://www.nature.com/news/2009/090415/full/news.2009.367.html>

Nanotubes cut to ribbons

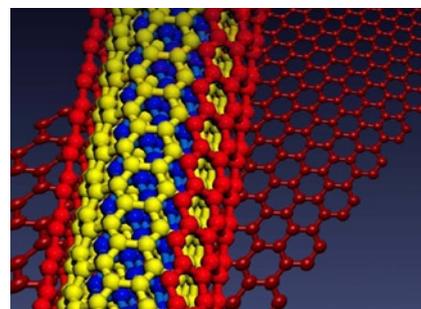
New techniques open up carbon tubes to create ribbons.

Geoff Brumfiel

- Two groups have unzipped tiny cylindrical structures called carbon nanotubes to make graphene ribbons tens of nanometres wide. Such ribbons have been touted as a promising material for everything from solar cells to computers, but have so far proved harder to produce than the tubes.
 - Graphene, an atom-thick sheet of honeycombed carbon, is one of the hottest materials around. It conducts electrons well, but is thin, transparent and strong, making it potentially useful in displays and solar panels. Ribbons of graphene could be more useful still. At widths of around 10 nanometres or less, electrons are forced to move lengthwise, and make the graphene behave as a semiconductor. Semiconducting graphene could be a boon to the electronics industry.
 - "Ribbon structures are very important structures and they're not easy to make," says James Tour, a chemist at Rice University in Houston, Texas. Early techniques used chemicals or ultrasound to chop graphene sheets into ribbons, but could not make ribbons in large amounts or with controlled widths.
 - As a solution, Tour and his co-workers, and a separate group led by Hongjie Dai of Stanford University in California, decided to try to generate ribbons from carbon nanotubes. Nanotubes are essentially rolled up sheets of graphene, sometimes nested inside each other. Researchers can already synthesize them in large quantities. The trick, says Dai, was figuring out how to open up the tubes to make one or more layers of graphene. "These things don't really have a zipper on them," he says. Both groups report their work today in *Nature*^{1,2}.
- Making the cut**
- Dai and his colleagues opted to slice the tubes using an etching technique borrowed from the semiconductor industry. They stuck nanotubes onto a polymer film and then used ionized argon gas to etch away a strip of each tube. Once cleaned, the remaining ribbons were just 10-20 nanometres wide.
 - Tour's group, by contrast, used a combination of potassium permanganate and sulphuric acid to rip the tubes open along a single axis. The resulting ribbons are wider — around 100-500 nanometres — and not semiconducting, but easier to make in large amounts.
 - "The techniques complement each other," says Mauricio Terrones, a physicist at the Institute for Science and Technology Research of San Luis Potosi in Mexico, who was not involved in the work.
 - Both techniques are likely to be useful to researchers, and both have a variety of potential applications. Tour believes that his larger ribbons could be used in solar panels and flexible touch displays, where cheap, transparent materials are in demand. They could even be spun into lightweight, conducting fibres that might replace bulky copper wiring on aircraft and spacecraft. Dai's narrower ribbons, meanwhile, might find uses in electronics because of their semiconducting properties.
 - Dai says that his group has already used the ribbons to make basic transistors, but, he adds, it's too early to tell whether they will be commercially competitive. "It's very early in the game," he says.

References

- Kosynkin, D. V. et al. *Nature* **458**, 872-876 (2009).
- Jiao, L., Zhang, L., Wang, X., Diankov, G. & Dai, H. *Nature* **458**, 877-880 (2009).



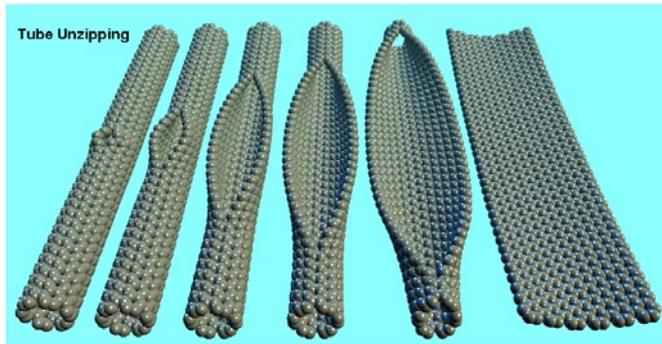
ポリマーフィルムに部分的に埋め込まれたカーボンナノチューブを、プラズマエッチングで縦方向に切り開く。

TOPICS

グラフェンとグラフェンナノリボン

グラフェンは、六角形構造の炭素原子が1層に平らに並んだシートのことである。主な特徴は次のようなものである。

- 1. 電荷キャリア(電子や正孔)の移動速度が、光速の1/300と驚くほど速い。
- 2. 炭素原子1個分の厚さにもかかわらず、不透明度が高い。
- 3. ナノデバイスに特有の1/f雑音^{*1}を抑制できる。
- 4. グラフェン上の電子は、質量のない相対論的粒子のようにふるまう。
- 5. 通常と異なる量子ホール効果^{*2}を示し、系の乱れや熱ゆらぎにもほとんど影響されず、室温でもプラトーが観測される。

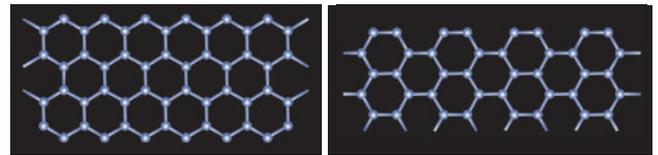


カーボンナノチューブを切り開いて、グラフェンナノリボンを作製する過程。

6. 電子のスピンと運動量の相互作用が小さく、炭素原子核の核磁気モーメントを無視できる。

グラフェンナノリボンは、グラフェンが細長いリボン状になったものである。グラフェンナノリボンでは、端の存在(幅が制限されていること)と端の形状により電子状態が大きな影響を受ける。グラフェンは通常、端がジグザグ端とアームチェア端になっているが、グラフェンナノリボンにジグザグ端が存在すると、局在スピンをもつ磁気状態(エッジ状態)となる。このためグラフェンナノリボンは、強いスピン磁性を有し、カーボンナノチューブ(下記参照)やグラフェンとは異なる電子的特性を示す。また、幅に応じて電子的特性が変化するため、大量生産できれば、カーボンナノチューブやグラフェン以上に魅力的な、コンピュータチップやデバイスの素材となる。

*1 周波数が大きくなるにつれ小さくなる雑音。
 *2 半導体や金属で電流が2次元平面でのみ流れている(電子の運動が二次元に制限されている)場合、垂直方向に強磁場をかけると電流と磁場に垂直な方向に起電力が起こる。この現象をホール抵抗といい、ホール抵抗がプラトーになり同時に磁気抵抗がゼロになることを量子ホール効果という。



ジグザグ端(左)とアームチェア端(右)のグラフェンナノリボン。

DMITRY V. KOSYNNIKIN

SCIENCE KEY WORDS

- 1. **carbon nanotube(s): カーボンナノチューブ**
 グラフェンやグラファイト(複数のグラフェンが層状になったもの)が筒状になったもの。チューブの両端はキャップのように閉じている。軽くて柔軟性をもつのに強度が高いという性質のほかに、シートのねじり方によって金属的になったり半導体的になったりするので、今後の電子デバイスとして有望である。また、フラーレンや有機分子などさまざまな分子を内包でき、デバイス以外への応用も期待されている。
- 5. **etching technique: エッチング技術**
 エッチングは、物質の表面を削って加工することであるが、特に半導体産業では、酸などの化学薬品やハロゲン化ガスやイオン化したガスを使用して基板の表面を削る技術のこと。
- 5. **polymer film: ポリマーフィルム**
 ポリマーとは、モノマーとよばれる基本構造が重合して高分子化合物(一般的に有機化合物)となったもの。ポリマーからできたフィルムのことをポリマーフィルムという。包装用から液晶やタッチパネルまで、用途に応じた素材・厚さのフィルムがさまざまな分野で利用されている。

- 5. **ionized argon gas: イオン化したアルゴンガス**
 アルゴン(Ar)は希ガスの1つ。無色無臭の気体。希ガスは化学的に安定で反応性に乏しいため、自然にイオン化したり、化合物を作ったりすることはほとんどない。ここでは、人工的にアルゴンをイオン化して、高いエネルギー状態(高反応性状態)にして利用している。
- 6. **potassium permanganate: 過マンガン酸カリウム (KMnO4)**
 濃い赤紫色の固体で、水やメタノールによく溶ける。強力な酸化剤として知られる。
- 6. **sulphuric acid: 硫酸 (H2SO4)**
 不揮発性で無色、酸性の液体。やや粘性がある。濃硫酸(重量パーセント濃度90%以上)は強い酸化作用と脱水作用があり、熱を加えるとさらに酸化力が高まる。希硫酸は、強酸性であるが酸化作用や脱水作用はない。
- 9. **transistor(s): トランジスタ**
 増幅作用やスイッチング作用をもつ半導体素子。n型半導体(negative; 電子が過剰状態)とp型半導体(positive; 電子が不足状態<正孔>)が、pnpまたはnpnのようにサンドイッチ状態になっている。

WORDS AND PHRASES

タイトル **cut to ribbons: 「切り開いてリボンにする」**
 cut to ribbonsは「(相手方、敵を)壊滅させる、完敗させる」という意味だが、ここでの用例は、むしろcut to piecesに由来している。つまり、cut to piecesには「(相手方、敵を)壊滅させる、完敗させる」という意味のほかに「~を切り刻む、寸断する」という意味があり、piecesの代わりに、この記事のテーマであるribbonsを使ったのである。

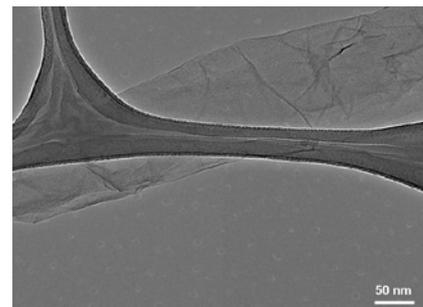
- 1. **(have) unzip(ped): 「切り開く」**
 「zipper(ファスナー)を開く」という意味だが、ここでは、ナノチューブの分子構造をファスナーのかみ合わせ構造になぞらえている。
- 1. **cylindrical structure(s): 「円筒状構造体」**
- 1. **(have been) touted as ~: 「~ともてはやされる」**
- 2. **boon: 「朗報」**
 このほかに、「恩恵」「利益」「好材料」といった意味もある。
- 4. **nested inside each other: 「入れ子になっている」**
 この記事では、直径が異なる同形のナノチューブが順に組み入れられた状態のこと。

- 5. **opt(ed) to ~: 「~することに決める」**
- 5. **etch away: 「エッチングによって切り開く」**
 etch(エッチングする)とaway(切り離す)が組み合わさっている。
- 6. **rip the tubes open along a single axis: 「単一軸に沿ってナノチューブを切り開いた」**
 rip ~ openは、「~を破って開く」「~を裂いて開く」という意味。
- 7. **complement each other: 「相互補完する」**
- 8. **have a variety of potential applications: 「さまざまな用途が考えられている」**
- 8. **in demand: 「需要がある」「求められる」**
- 8. **be spun into lightweight, conducting fibres: 「軽量の導電ファイバーに紡ぐ」**
- 8. **bulky copper wiring: 「かさ高い銅線」**
 bulkyとは、重量や容積が大きいこと。
- 8. **find uses in ~: 「~において利用される」**
- 8. **properties: 「特性」**

参考訳

ナノチューブを切り開いて リボンにする

カーボンナノチューブをリボン状に切り開く新技術が開発された。
ジョフ・ブラムフィール



還元されたナノリボンの顕微鏡画像。

- 2つの研究グループが、カーボンナノチューブという微小な円筒状の構造体を切り開いて、幅が数十ナノメートルのリボン状のグラフェンを作製した。グラフェンリボンは、太陽電池からコンピュータまで、あらゆる用途で有望な材料としてもはやされているものの、その作製はナノチューブよりもむずかしいとされていた。
- グラフェンは、原子1個分の厚みしかない炭素シートで、炭素原子がハチの巣のように結合した構造になっている。グラフェンは、現在最も注目されている材料の1つである。電子伝導性が高い一方で、薄く、透明で、強度があるため、ディスプレイやソーラーパネル（太陽電池板）に利用できる可能性がある。グラフェンがリボン状であればもっと便利である。グラフェンの幅が約10ナノメートル以下になると、電子は縦方向に移動するようになり、グラフェンは半導体としてふるまうようになる。半導体グラフェンは、エレクトロニクス産業への朗報となるかもしれない。
- ライス大学（米国テキサス州ヒューストン）の化学者 James Tour は、「リボン構造体は非常に重要な構造体ですが、簡単には作れません」と話す。これまでも、化学物質や超音波を用いてグラフェンシートをリボン状にする技術はあったが、リボンを大量に作製したり、その幅を制御したりすることはできなかった。
- こうした問題点を解決するため、Tour の研究グループとスタンフォード大学（米国カリフォルニア州）の Hongjie Dai をリーダーとする研究グループは、カーボンナノチューブからリボンを作製することに挑戦しようと決めた。ナノチューブは、基本的にはグラフェンシートが巻き上がったものであり、複数のシートが巻き上がって入れ子になっていることもある。ナノチューブの大量合成は既に可能となっている。残る課題は、このナノチューブを切り開いて、1層または数層のグラフェンシートにする方法を考案することだった、と Dai は話す。「実際、ナノチューブにはファスナーなどついていませんからね」と彼はいう。両グループは本日、*Nature* 誌上でそれぞれの研究成果を報告する^{1,2}。
- 切れ目を入れる**
Dai の研究グループは、半導体産業のエッチング技術を借りてナノチューブを切り開くことにした。彼らは複数のナノチューブを1枚のポリマーフィルムに貼り付け、イオン化したアルゴンガスを使ったエッチングにより、それぞれのナノチューブの一部を細く切り取っていった。それを洗浄すると、幅10～20ナノメートルほどのリボンが得られた。
- これに対して Tour の研究グループは、過マンガン酸カリウムと硫酸を組み合わせ使い、単一の軸に沿ってナノチューブを切り開いた。こうして作製されたリボンは Dai らのリボンよりも幅が広く（約100～500ナノメートル）、半導体ではないが、大量に作製するにはこちらのほうが容易である。
- メキシコのサンルイスポトシ州にある科学技術研究所の物理学者 Mauricio Terrones は、これらの研究には関与していないが、「2つの技術は、お互いの短所を補い合う関係にあります」と話す。
- いずれの技術も研究者の役に立つ可能性が高く、さまざまな用途が考えられている。Tour は、自分たちが作製した幅広リボンは、低コストで透明な材料が求められるソーラーパネルやフレキシブルなタッチディスプレイに使える可能性がある、と考えている。また、このリボンを紡いで軽量の導電ファイバーにすれば、航空機や宇宙船内のかさ高い銅線の代わりに利用できるかもしれない。一方、Dai の細いリボンは、半導体としての性質をもつことから、エレクトロニクスの分野で利用されるようになるかもしれない。
- Dai の研究グループは、既にこの細いリボンを使って簡単なトランジスタを作製したが、商業的競争力の有無を判断するのは時期尚早だと話す。「勝負はまだ始まったばかりなのです」と彼はいう。

nature

Broadening your horizons with the latest
scientific news and research

Landmark Papers ▪ Fresh Insights ▪ Streaming Videos ▪ Weekly Podcasts
Access www.nature.com/nature

nature publishing group 

「ネイチャー・ダイジェスト」へのご意見やご感想、ご要望をメールでお寄せください。

メールをお送りいただく際には、お名前・ご職業・「ネイチャー・ダイジェスト」購読年数のご記入をお願いいたします。掲載内容についてのご意見・ご感想は、掲載号や記事のタイトルを明記してください。お寄せいただいた内容は、今後の本誌の編集に活用させていただきます。皆様のメールをお待ちしております。

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

nature

 グローバルな視点から「科学」を読む

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



国際ジャーナルを読む

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

Nature 定期購読なら...

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



日本語編集版を読む

Nature 定期購読者には、Nature Digest を毎月無料送付します。

nature 翻訳・編集記事

- **HIGHLIGHTS** / 論文ハイライト
- **EDITORIAL** / 社説
- **NATURE NEWS** / 科学ニュース
- **NEWS & VIEWS** / 科学論説
- **NEWS FEATURE** / 科学ニュース読み物・興味あるテーマを親しみやすく解説
- **COMMENTARY** / 論評
- **ESSAY**

オリジナル編集記事

- **JAPANESE AUTHOR** / 日本人科学者へのインタビュー記事
- **英語で NATURE** / NATURE に掲載の記事から生きた英語を学ぶ



(本文 36 頁)

Nature・Nature Digest 定期購読お申し込みはこちらから

www.naturejpn.com/subscribe