

nature DIGEST

日本語編集版
APRIL 2005
VOL.02, NO.4

4

<http://www.naturejpn.com/digest>

「火星に水」 の新発見

08

15

22

nature
DIGEST

04

volume 2 no.04
April
www.naturejpn.com/digest© 2005 年 ネイチャー・ジャパン
掲載記事の無断転載を禁じます。

news and views

「火星に水」の新発見 22

editorial

政治と現実 2

「ニセ薬」商人を野放しにするな 3

highlights

vol. 433 no. 7027, 7028, vol. 434 no. 7029, 7030, 7031 4

science news

拉致をめぐる日朝間の対立で燃え上がるDNA論争 7

母乳から検出された高レベルの過塩素酸塩 8

Vioxxの懸念がせきたてるユーザーフィードバックの必要性 9

心が傷つくと健康によくない 10

人間は川や風雨よりも地形を変えている 11

news feature

春は宇宙に帆を上げる
Tony Reichhardt 12ホエールフォールに群がる生き物たち
Amanda Haag 15壁を飛び越えるタンパク質
Alison Abbott 18

news and views

最近まで活動的だったことを示す火星の画像
Victor R. Baker 22設計通りに遺伝子交換
Stanton B. Gelvin 24

brief communications

人工エナメル質で迅速に歯を治療 26

研究者訪問

将来的な地震予知をめざす研究者 28

発行人: アントワーン・ブーケ
編集: 津田純子、セラ・ハリス
デザイン/制作: 村上武、佐藤恵
広告: 浅見りの子
マーケティング: 吉原聖豪ネイチャー・ジャパン株式会社
〒162-0841
東京都新宿区弘方町 19-1
エムジー市ヶ谷ビル 5 階
Tel. 03-3267-8751 Fax. 03-3267-8746

論説

政治と現実

Politics versus reality

Nature Vol.434(257)/17 March 2005

日本の政治家は、科学的不確実性を正面から受け止める必要がある。

北朝鮮との外交戦では、外交手段を駆使すべきであって、科学的公正を損なってはならない。

Nature のニュース記事に落胆した日本の小泉内閣が「頭を抱えている」と日本の大衆週刊誌が伝えた。

1977年に北朝鮮によって拉致された日本人女性、横田めぐみさん(当時13歳)が生存しているかどうかは現在、問題となっている。2002年、北朝鮮は13人の日本人を拉致した事実を認めた。その中にはデートで海岸にいたカップルも数組合まれていた。その後の北朝鮮による拉致被害者の安否確認作業は十分とは言えず、日朝関係は混沌としている(本号ダイジェスト p.7 参照)。

北朝鮮は、横田さんを含む拉致被害者のほとんどが死亡していると発表したが、説得力に欠けている。昨年、日本側に引き渡された遺骨について、北朝鮮は横田さんのものだとするが、日本での鑑定では遺骨から採取されたDNAが横田さんとは別人のものであるという結果が出た。そのため、北朝鮮の軍当局が横田さんをスパイ養成に利用し続けているかもしれないという不安が生じている。

北朝鮮の声明ひとつひとつに疑義をさしはさむ日本政府の姿勢は正しい。しかし日本政府は、DNA鑑定結果の解釈にあたって、政治は科学に干渉してはならないという一線を越えてしまっている。*Nature* はDNA鑑定を行った研究者にインタビューし、遺骨に異物が混入していてDNA鑑定結果が決定的なものとはならない可能性があることを伝えた。北朝鮮の欺瞞に疑いの余地がないことを示したい日本政府にとって、このような*Nature* の記事は愉快なものではない。

日本政府はこの記事に厳しく反応した。細田官房長官は記者会見の席で、*Nature* の記事には「不十分な表現」があり、研究者が言っていないことも書かれていると発言したと報じられている。当該記事に示されている当該研究者の意見は「一般的な知見」であり、今回の事例について語ったものではないという、研究者本人の確認もとってあるという。ところで、この研究者はその後、一切のインタビューに応じられなくなったようである。

遺骨に異物が混入していた可能性があることは、否定できない現実だ。この遺骨のたどった悲劇的な変遷は不明だ。

北朝鮮によれば、この遺骨は2年間埋葬されていた本人の遺体を1,200℃で火葬し、夫の家で保管していたもので、そのうちの少量をサンプルとして日本に引き渡したらしい。この点も北朝鮮の完全な捏造かもしれない。だが、日本が頼りにするDNA鑑定で、この点は解明できないのだ。

問題は科学にあるのではなく、政府が科学的な事柄に口をはさんでいるという事実にある。科学は、実験とそれに伴うすべての不確実性を自由に精査できるということを前提に行われる。一部の日本人研究者は、より大規模なチームで今回のDNA鑑定を行うべきだったと主張しており、これには説得力がある。なぜ日本政府は、たった一人の研究者、それもこの件について自由に語れなくなった研究者にDNA鑑定をまかせたのだろうか？

日本政府の対応は、これまでの外交上の失敗、より正確に言えば日米安保体制の機能不全を取り繕うための必死の努力のように思われる。日米安保体制下で、米国は批判の多い基地を日本国内に配置する権利を有している。それと引き換えに、「日本国の安全に寄与し、並びに極東における国際の平和及び安全の維持に寄与する」役割も負うという。

ならば日本政府は、米国の支持のもとで更なる対北朝鮮政策を取り得ただろうか。これに対する明確な答えはない。しかし、次のように問い直したらどうなるだろう。もし、どこかの海岸から米国市民が全体主義国家によって拉致され、その後25年間にわたって英語教育でスパイ養成に関わっていたら、ブッシュ大統領や歴代の大統領は、遺骨の入った袋を手にDNA鑑定結果についての論争をせずにすむだろうか。

実験を行って結論を導き出し、それについての合理的な疑いを示すという使命をまっとうに果たしている科学者にも、日本の政治的、外交的失敗のツケがまわされているのだ。しかし、日朝間の摩擦は、DNA鑑定によっては解決できない。同様に、DNA鑑定結果をどのように解釈するかは、両国の政府が判断すべき事柄ではない。北朝鮮との外交は楽ではないが、だからといって、政治と科学の分離原則を破ることが正当化されるものではない。

論説

「ニセ薬」商人を野放しにするな

Killers on the loose

Nature Vol.434(123)/10 March 2005

開発途上国全体に深刻な問題が存在する。市場に偽造薬品が出まわり、本物との区別ができないのだ。援助国、当事国の政府、製薬業界による対応が求められている。

東南アジアを訪れたことがあるならば、ニセモノ商品であふれた店が立ち並ぶ街角に行ったことはないだろうか。まさにそこでロレックス時計のニセモノや海賊版DVDを買った人もいるかもしれない。アジアではよくあることだが、これは確かに違法行為である。それでも多くの観光客は、ニセモノ商人をロビンフッドのような義賊ととらえている。つまり、裕福な欧米企業から利益をかすめとり、地元の現金経済を潤す存在だと考えられているのだ。

しかし、アジアのニセモノ文化にはもう1つの側面がある。それは普通、観光客の目に触れることはない。ラベルに書かれた有効成分の量が足りなかったり、全く含まれていなかったりする偽造薬品が薬局にあふれているのだ。このインチキ薬は、ほとんどが中国かインド製で、アフリカやその他の開発途上国にも輸出されている。この商売には善意のかけらも見られない。偽造薬品は慢性疾患を引き起こし、孤児や未亡人を生み出す。関係している連中は冷酷非情で、人間の命がどうなろうとあまり気にしていない。そしてこの商売は、こうした現状を見て見ぬふりする腐敗した役人がいるところで繁盛する。

だが幸いなことに、開発途上国での偽造医薬品の問題についての認識が高まってきている。一部の最貧国で医療水準の向上に努力している研究者や医師の助力によって、この話に注意が呼びかけられている (Nature 2005 年 3 月 10 日号 p.132 参照)。最近では、この問題点に取り組むための複数のプログラムが創設された。例えば、国際商業会議所は 2003 年に偽造医薬品イニシアチブを設立し、偽造薬品に関する情報収集や情報交換を行っている。

多国籍製薬会社も、この問題との関わりを持ち始めている。そのうちの数社が集まって医薬品セキュリティ協会が設立された。ここでは刑事訴追を行う可能性も念頭において、偽造医薬品の製造に関する情報を集めている。製薬会社がこのような動きに出た背景には、先進国の裕福な消費者をターゲットにしてインターネット上で取引される、偽造医薬品の売上の増加がある。これは会社の売上に影響し、大手

製薬会社の経営を左右するような問題となっている。

それでも製薬会社各社は、商売上の秘密情報を他社に開示することには慎重だ。この問題が報道されることによって自社製品に対する消費者の信頼が損なわれることを恐れ、社内データをなかなか公表しようとはしない。また、偽造薬品による人的被害の最も深刻な開発途上国での偽造薬品問題に対する取組みにも身が入っていない。これに対して、偽造薬品の脅威と戦う団体は、より積極的な展開をしたいのだがそのための資源が足りないとする。各国政府と製薬会社は必要とされる資源を提供し、偽造薬品の業者を野放しにしている国々に対する圧力を強め、悪徳業者に法の裁きを受けさせるべきである。

ある欧米系政府機関の職員は、カンボジア国内での偽造薬品問題や盛んな偽造薬品取引の背景となっている腐敗した環境に注目したために同国政府高官の怒りを買ひ、上司にこの問題から手を引くよう言われたという。援助プロジェクトは受入国側の理解がなければ実施できないので、この上司はプロジェクト全体が危うくなってしまうことを心配したのだと思われる。

しかし、このような姿勢は間違っており、許されるものではない。偽造医薬品商売の背後には、厳しい取り締まりと重い刑罰のために商売替えをした、かつての麻薬密輸業者が多く介在している。このような邪悪な組織的犯罪者は、事実上の殺人を犯しているにもかかわらず、処罰を免れている。このような状況を許すべきではない。

解決策は簡単には見つからない。偽造薬品の問題が最も深刻な国々では、誰が問題を解決しようとする側の人間で、誰が問題を起こしている側の人間なのかを区別できないこともある。だからといって何もしないでよいわけではない。哲学者エドマンド・バークが言ったように、「悪を栄えさせるための必要条件はただ1つ、善人が何もしないでいること」なのである。 ■

土星のオーロラ

Saturn's aurora

カバーは、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) が 2004 年 1 月 24、26、28 日に撮影した土星とその極地域のオーロラ放射の画像である。可視光域での波長での画像を、南極域の紫外光画像と合成してある。これらの画像は、土星にまで達する太陽風とキロメートル波長の土星の電波放射をカッシーニ探査機が観測した際に撮影された。この観測結果については、今週号に 3 つの論文が発表されている。1 月 28 日に観測された強く輝くオーロラは、太陽風の大規模な擾乱に対応していた。土星のオーロラはその形状や種類が地球や木星で見られるものとは違って、太陽風への応答も異なる。土星で最も強力な電波放射は、極地域のオーロラと密接に結びついているように見える。(画像は ZLevy と J Clarke による)



17 February 2005 Vol. 433/Issue7027
letters p. 717, 720, 722, N&V p. 695 参照

エチオピアにいた最古のホモ・サピエンス Ethiopian *Homo sapiens* are the oldest ever

エチオピアのキピシュで出土したホモ・サピエンスの 2 つの頭骨について新たな解析が行われ、知られるうちで最古の現生人類のものであることが確認された。これらの化石は、現生人類 (つまり現代人) が出現したころにあたる、約 19 万 5,000 年前のものと算定された。オモ 1 号とオモ 2 号と名づけられたこれらの化石は 1967 年に発見された (最初の記載報告は *Nature* に掲載された) が、1 号と 2 号が同じ年代のものかどうかは専門家の間でも意見が分かれていた。オモ 1 号の特徴は 2 号に比べると明らかに「現代人的」だったからだ。

ところが今回発表された McDougall たちの報告によると、これらの化石が見つかった岩の年代測定から、2 つが実際に同一年代のもので、しかも現生人類として最古の化石であることがわかった。化石があった岩のアルゴン元素の不安定同位体の崩壊率を McDougall たちが調べたところ、得られた平均測定年代はおよそ 19 万 5,000 年前だったのである。ただし、これらの化石がもっと現在に近い、10 万 4,000 年前のものである可能性も排除できないという。

17 February 2005 Vol. 433/Issue7027
letters 733 参照

シリコンレーザーが光る

Silicon laser lights up

シリコンから作られた、初めての連続波レーザーが発表された。シリコンが非常に短いレーザー光パルスを生み出せることを示した先の論文 (*Nature* 2005 年 1 月 20 日号) に続く、同じ研究グループからの報告である。インテル社の H Rong たちは、レーザー光がシリコンに吸収されないようにデバイスを改良し、その結果安定な連続ビームが供給された。連続波レーザーは、電気の代わりに光を使ってシリコンチップのあちこちにデータを運ぶ、次世代コンピューターに不可欠な構成要素である。

J Faist は今回の成果について、「実用的なシリコンレーザー開発に向けた重要な一歩だ」と *News and Views* で述べている。

17 February 2005 Vol. 433/Issue7027
letters p. 725, N&V p. 691 参照

健全な食餌とは

A healthy diet?

何を食べたらよいかなんて、一体誰が決めるというのだろう。それに、こういう食餌に関するアドバイスは、今日我々が直面している健康問題 (その主たるものは肥満だが) に実際に改善をもたらすものなのだろうか。我々が現在摂っている食餌は進化の産物なのか、あるいはそれよりもずっと不自然なものなのだろうか。また、世界中で「ベスト」の食餌を摂っているのはどういう人々なのか。これらは、今週の *News Feature* 特集「ダイエット相談の科学」で論じられている問題の一部である。答えは単純なものではない。しかし、実に啓発的である。



24 February 2005 Vol. 433/Issue7028
news feature p.794 参照

明かされた HIV の秘密

Secrets of HIV unbound

後天性免疫不全症候群 (エイズ) は、ヒトではヒト免疫不全ウイルス (HIV)、サルではサル免疫不全ウイルス (SIV) によって発症する。どちらのウイルスも gp120 とよばれるタンパク質を発現するが、この gp120 は、CD4 とよばれる別のタンパク質を表面に発現する免疫細胞に結合する。gp120 が CD4 に結合すると、ウイルスは細胞に感染する。CD4 に結合した gp120 の構造は 1998 年に明らかにされたが、治療薬やワクチンの設計に重要な、CD4 に結合していない gp120

の構造は、何十年も決定できずにいた。

今回 S Harrison たちの優れた技術によって、SIV 由来の非結合型 gp120 の構造が明らかになった。gp120 の構造は、CD4 結合型と非結合型とで劇的に異なることがわかった。*News and Views* では P Kwong が、「Harrison たちが詳しく解明した興味深い新たな知見は、HIV ウイルスが宿主細胞に感染しながら、同時に免疫監視の目を逃れることができる仕組みを説明するのに役立つ。これで新たな戦略によるワクチン開発に望みが出てきた」と述べている。

24 February 2005 Vol. 433/Issue7028
articles p.834, N&V p.815 参照

目は頼りになるか?

Can you trust your eyes?

視覚認識における明度、すなわち表面反射度の知覚については、論争が盛んに行われている。目に届く光の量は、対象物に当たった光、そこから反射される光 (反射度)、目と対象との間にある媒質の影響の組み合わせによって決まる。現在の争点は、脳が反射度を計算する際に、これらの多様な要素を一連の重複する層として明確に表現しているかどうかという問題である。表紙は、これまで作成された明るさに関する錯視イメージの中でも最大のものの変形であり、層状化された画像表現が明度の知覚に印象的な役割を果たすことを実証するものだ。信じがたいことだが、対をなす 2 つの図像の外見的特徴は同じである。

一方が黒く見え、もう一方が白く見えるのは背景の違いによる。この錯視のさらに強烈な表現を見たい方は、該当論文の supplementary information 中の動画を参照されたい。



3 March 2005 Vol. 434/Issue7029
letters p.79 参照

生物多様性減少を測る新しい指数

New index to measure biodiversity loss

持続可能な開発に関する世界首脳会議 (ヨハネスブルグ・サミット) では、2010 年までに生物多様性減少のペースを十分に減速させることを目標に掲げた。だが、その目標を達成しつつあるかどうかを判断する方法として、合意の得られたものは現在のところまだない。

今回、B Scholes と O Biggs が、生物多様性に人間活動が及ぼす影響を測るための方法を提案した。彼らによるとこの方法は、簡単で感度がよく、厳密だという。

この新手法は、絶滅ではなく、広範な分類群にまたがる生物種の個体群レベルでの変化に注目したものだ。Scholes と Biggs が提案したこの「生物多様性完全度指数」(bio-diversity intactness index; BII と略)では、広い保護区域で比較的攪乱を受けていない個体群の平均数度(平均個体数)が、調べたい特定地域の現代以前の状況を表していると想定し、その数度と問題とする特定地域内の種の平均数度とを比較する。

著者たちは BII をアフリカ南部の 400 万 km² の区域にあてはめ、この区域の植物種と脊椎動物種の個体群は平均して、現代以前に比べて 16% 減少したという結論を得た。特に哺乳類は状況が悪化しているようで、以前のおよそ 70% まで減っており、草原の多様性にも同じくらい気がかりな減少が見られる。

Scholes と Biggs が出した興味深い結論の 1 つは、多様性の大部分は正規の保護区の外で見られ、生物多様性の減少速度を低減させるという目標を達成するには、こうした生産力のある保護区周辺地域の生物多様性を先取りして保護管理することが重要だというものだ。News and Views では G Mace が、今回提案された指標が他の方法に比べて優れている点をいくつか取り上げている。例をあげると、空間や時間をまたぐ動向を容易にモニターできることや、各種の生態系の比較研究に有用なことなどである。

3 March 2005 Vol. 434/Issue7029

articles p. 45, N&V p. 32 参照

受精にかかわる重要な因子の発見

Vital fertilization factor found

受精の際の精子と卵子の融合に不可欠な、精子のタンパク質が初めて同定された。この分子をはじめ、融合にかかわる分子は、新たな避妊法開発の手がかりとなり、不妊治療の新しい標的になる可能性もある。

精子と卵子の細胞膜が融合するために必要な分子は、ようやく見つかり始めたばかりである。岡部勝たちはマウスの精子の融合を阻害するモノクローナル抗体を使って、この抗体に結合する精子のタンパク質を探しだし、縁結びで有名な神社にちなんで、このタンパク質を Izumo と名づけた。

遺伝子操作によって Izumo を欠失させたマウスは、健康だが不妊で、形態は正常なのに卵子と融合できない精子をつくる。ヒトの精子にも Izumo が含まれていることや、この抗体が凍結保存されていたヒト精子とハムスターの卵子の実験的融合を阻害することもわかった。

10 March 2005 Vol. 434/Issue7030

letters p.234 参照

カッシーニが撮影したタイタンの詳細画像

Cassini's Titan images in detail

土星最大の衛星タイタンは太陽系で唯一の相当量の気をもつ衛星で、カッシーニ探査機に搭載されている撮像機器の操作チームにとって、魅力的な撮影対象だった。土星系へ接近する途中、そして 2004 年 7 月、10 月、12 月のフライバイの際に撮影された画像では、一連のもやの層、風に吹かれる雲、大きな流路と思われる曲線も含む、1 km 程度の大きさまで識別できる地形、さらには衝突でできた構造と思われる環状の地形が明らかになった。

現在、地表に液体があるという直接的な証拠はないが、地表のアルベド(明るさ)のパターンは、風、テクトニクス、液体による改変が起こったと考えるのに矛盾しない。今週号には、カッシーニ探査機のイメージング・サイエンス・サブシステム(ISS)のチームによる成果の分析結果が発表されている。表紙の画像は、2004 年 12 月 16 日に撮影されたタイタンの夜側の縁部で、赤道のすぐ南側の上層大気に約 12 本の明瞭なもやの層が見られる。

10 March 2005 Vol. 434/Issue7030

articles p.159 参照



海底の鉄がマントル最下部に存在?

Ocean-floor iron in Earth's lowermost mantle?

岩石でできた地球のマントルと鉄の核との間の境界には、超低速度層という地震波が極めてゆっくり伝わる物質からできた領域がある。D Dobson と J Brodholt は、この領域が、何十億年も前に海底で形成された密集した縞状の鉄酸化物からできていると考えている。地球科学の分野では、この超低速度層は流体の核から上昇してきた堆積物か、あるいは密度の高い溶けたケイ酸塩物質でできている可能性があるとしてきた。しかし Dobson と Brodholt は、18 億年前から 28 億年前に縞状の鉄酸化物が、海洋底が沈み込み(海洋底が地球深部へ戻っていく過程)により地球内部へと循環する前に形成され、核-マントル境界へゆっくりと沈み込んでいったのだろうかと言っている。そのような「縞状鉄鉱層」は海洋底で形成されたと考えられているが、それは地球上に光合成バクテリアが現れ、光合成により大量の酸素が大気中に注入されて、海洋中に溶けていた鉄と反応して厚い酸

化物の層が形成された後のことだ。「地球内部最深部の最大の謎といえる特徴のひとつは、超低速度層の存在が最も初期の最も原始的な生命の存在によっていることだ」と著者らは論じている。

17 March 2005 Vol. 434/Issue7031

letters p.371 参照

ヒト X 染色体

The human X chromosome

ヒト染色体のなかでも最も興味深い 1 つである X 染色体の遺伝学的な秘密が明らかにされた。哺乳類の雌は 2 本の X 染色体をもつが、雄は X 染色体と Y 染色体を 1 本ずつもつ。

このことは、X 染色体上にある疾患原因遺伝子が、遺伝子のコピーを 1 つしか持っていない雄で主に問題を引き起こすことを意味する。こうした疾病には、血友病や X 連鎖筋ジストロフィー症などがある。雌では、X 染色体上の遺伝子が重複して発現されないように、個々の細胞内で X 染色体の一方がランダムに選ばれて不活性化されている。

M Ross たちは、ヒト X 染色体上の遺伝子を含む領域の 99% 以上の配列を決定した。その結果、X 染色体と Y 染色体が約 3 億年前に一对の常染色体から、どのように進化してきたのかがわかった。また彼らは、X 染色体上にある 1,098 個の遺伝子の約 10% が、精巣や一部の癌で発現が促進される一群の遺伝子の仲間であること、また特有の反復配列が X 染色体全体の 3 分の 1 を占め、これが X 染色体上の遺伝子の不活性化に関与している可能性があることなどを予測している。

X 染色体で不活性化される遺伝子群を詳細に調べた L Carrel と H Willard による論文では、遺伝子の約 75% が常に不活性化されており、約 15% は不活性化を逃れ、残りの 10% は一部の X 染色体だけで不活性化されることが報告されている。この結果からすると、女性では個人により遺伝子活性のパターンが大幅に異なると考えられる。これは以前にはまったく予想されていなかったことである。表紙写真は、不活性化シグナルが X 染色体の中央部分(最も赤が濃い)から両腕へと広がっていく様子を示している。

(写真: Alfred Pasiaka, Science Photo Library)

17 March 2005 Vol. 434/Issue7031

articles p.325, letters p.400,

news feature p.266, N&V p.279 参照



拉致をめぐる日朝間の対立で燃え上がる DNA 論争

DNA is burning issue as Japan and Korea clash over kidnaps

火葬された遺骨は、1977 年に拉致された日本人少女の運命を語らない。

David Cyranoski (東京) Nature Vol.433(445)/ 3 February 2005

火葬された遺骨が 1977 年に拉致された日本人のものがどうかを判定する際に用いられた DNA 鑑定をめぐる日本と北朝鮮の間に激しい論争が起こっている。

この論争は、両国の関係を何年にもわたってギクシャクさせてきた事件の最新の展開である。1970 年代から 1980 年代にかけて、北朝鮮は、少なくとも 13 人、ことによれば最大 100 人にのぼる日本人を拉致してスパイ養成プログラムに従事させていると考えられている。そして両国は今、拉致被害者の遺骨から採取された DNA からその身元を正しく特定できるのかどうかについて対立している。

2002 年秋、北朝鮮はそれまでの長年にわたる否認の姿勢を変え、軍部の関与によって 13 人の日本人を日本とヨーロッパから拉致したことを認めた。北朝鮮の金正日総書記は、一連の拉致行為は政府に無断で軍によって遂行されたと主張した。日本政府は、これとは別に 2 人の拉致被害者がいることを示す証拠があると発表しており、実際には、これよりも多数の拉致被害者がいると考えている。

生存者の帰国を北朝鮮に迫った結果、5 人の拉致被害者とその家族が日本に帰国した。残りの 8 人について北朝鮮政府は死亡したと発表したが、その安否情報はなかなか日本側にもたらされず、一部は今も生存しているのではないかと、という憶測を生んでいる。

2004 年 11 月 15 日、平壤での交渉を終えた日本政府高官が、北朝鮮が横田めぐみさんの火葬された遺骨だと称する骨片を持ち帰った。横田さんは 1977 年、13 歳の時に拉致された。北朝鮮の作成した報告書では、横田さんは北朝鮮の男性と結婚し、その後、精神病院に入院し

た後、自殺したとされている。

帝京大学で行われた 5 点の遺骨片の鑑定では、2 人の人間の DNA が検出されたが、いずれも横田さんのへその緒から採取された DNA とは一致しなかった。この鑑定結果は 12 月に北朝鮮に送付されたが、1 月 26 日に北朝鮮政府は、鑑定結果を「捏造」だとする声明を発表した。

日本外務省の高島肇久報道官によれば、北朝鮮は DNA 鑑定で用いられた方法に疑問を呈しており、1,200℃に加熱された遺骨に生きた DNA が含まれているはずがないと主張した。また北朝鮮政府の声明では、帝京大学の研究者が DNA を検出できて、同じく別の 5 点の遺骨片を鑑定した科学警察研究所では DNA を検出できなかった点も疑問だとしている。

DNA は生き続けられるのか

日本で有数の法医学研究者である帝京大学の吉井富夫講師は、5 点の遺骨片すべてから DNA を採取できた理由をいくつか挙げている。その 1 つは、ネステッド PCR (ポリメラーゼ連鎖反応) 法という感度の高い方法を用いたことだ。通常の PCR 法では DNA の増幅が 1 回しか行われないが、この方法では、DNA を 2 回増幅する。もう 1 つは、吉井講師に渡された遺骨片の方が別の 5 点よりも良い状態だった可能性があることだ。「(DNA 試料を扱うには) みんな独自の方法があります。統一化されていません」と吉井講師は語った。

火葬された骨片の法医学的検査が日本国内で行われたことはほとんどなく、吉井講師を始めとする専門家の多くが、1,200℃での火葬を経ても DNA が生存

する可能性は低いと考えていた。「とてもびっくりしました」と吉井講師は言った。ただし、加熱焼却時間そのものが短ければ、1,200℃の熱でも DNA は生存しうる可能性がある。信州大学で法医学を研究する福島弘文教授は、「温度だけでは何も言えません」と語る。

しかし、これまで火葬された骨片の鑑定経験のなかった吉井講師は、彼の方法による鑑定結果が決定的なものであるわけではなく、骨片に異物が混入していた可能性があることを認めた。「骨は硬いスポンジのようなもので、何でも吸収します。(この遺骨を) 取り扱った人の汗や脂が骨の中にしみ込んでいたら、どんなにうまく洗っても (汗や脂は) とれません」と彼は言った。

北朝鮮は、これまでもに拉致被害者の遺骨と称する骨片を日本側に引き渡した後に、それが別人の骨だったと認めたことがある、と高島報道官は語った。

日本政府は 1 月 26 日、北朝鮮政府の今回の対応を「遺憾」とし、「厳しい対応」を講ずる姿勢を明らかにした。高島報道官によれば、この「厳しい対応」には 12 万 5,000 トンの食糧援助の中止やその他の貿易制裁が含まれる可能性があると考えられる。

日本の政府は、問題となっている DNA の再鑑定を希望する旨の発言をしている。しかし吉井講師は、(最大でも 1.5 グラムしかなかった) 5 点の骨片は今回の鑑定で使い切ってしまった、と語っている。このため、論争が決着する見込みはほとんどない、というのが識者の見方である。 ■

母乳から検出された 高レベルの過塩素酸塩 Perchlorate found in breast milk



ロケット打上げによる環境汚染に関する議論が高まっている。

Helen Pearson news050221-13/24 February

過塩素酸塩とは、ロケット燃料に含まれている有毒の化学物質である。米国内で広範囲に行われた調査で、母乳や牛乳が人間の健康に有害なレベルの過塩素酸塩で汚染されていると分かった。同じ事態が全世界で起こっている可能性がある。研究者は語り、過塩素酸塩の影響を抑える方法として、1日に摂取するヨウ素の量を増やすことを推奨している。

1990年代後半に数多くの上水道から過塩素酸塩が検出され、その後米国では議論が活発になっている。低レベルの過塩素酸塩は通常、土壌中に自然発生するのだが、さらに高レベルの過塩素酸塩が宇宙ロケットやミサイルの発射に用いられる燃料から流出している。

特にリスクが懸念されるのが赤ちゃんだ。胎児や幼児が大量の過塩素酸塩を摂取すると、神経系の発達にとって極めて重要な甲状腺ホルモンの産生が抑制されて、精神発達遅滞を起こすことがある。

また最近の研究では、従来考えられていたよりも大量の過塩素酸塩が私たちの食事に混入していることが示唆されている。

安全摂取量の2倍

テキサス工科大学（米国ラボック）の化学者 Purnendu Dasgupta たちは、米国内の18州で女性から36点の母乳サンプルを採取し、それに加えて店頭販売されている牛乳47点をサンプルとして入手、検査した。

その結果、母乳サンプルすべてから過塩素酸塩が検出され、その量は1リットル当たり平均10.5マイクログラムだった。また47点中46点の牛乳サンプルからも、母乳に含まれる量の5分の1の過塩素酸塩が検出された。この

研究結果は、*Environmental Science and Technology* で報告された¹。

Dasgupta たちの計算では、母乳に含まれる過塩素酸塩の量は米国科学アカデミーの過塩素酸塩の安全摂取量に関するパネルが最近勧告した赤ちゃんにとっての安全摂取量を超えている可能性がある。

去る2月18日、米国環境保護庁はこの安全摂取量を採用し、過塩素酸塩の1日当たりの許容限界値を体重1kg当たり0.7マイクログラムに定めた。これに照らして考えると、体重4kgの赤ちゃんが、1リットル当たり10.5マイクログラムの過塩素酸塩を含むミルクを0.7リットル飲めば、体重1kg当たりの過塩素酸塩摂取量は1.8マイクログラムとなり、安全摂取量の2倍を超えることになるのだ。

汚染除去を求める動き

過塩素酸塩をめぐる論争は米国内に集中しているが、この汚染は全世界で起こっている可能性が非常に高い、とコロラド大学（米国デンバー）の Richard Johnston は言う。彼は前述のパネルの議長をつとめた。「ロケットを使用する軍事施設があるところでは、この問題が発生している可能性が高いと思われる」と言う。

米国では過塩素酸塩の基準摂取量が定められたものの、飲料水に含まれる過塩素酸塩の安全レベルについての定めはない。これに対して Dasgupta は、女性は飲料水以外の、例えば過塩素酸塩に汚染された水源を使って栽培された食物などから摂取している可能性が極めて高いことを指摘する。

環境保護団体は、防衛関連企業が汚染地域を浄化し、過塩素酸塩が燃料タ

ンクや廃燃料保管施設から漏出しないような手立てをとるよう求めている。これについて防衛関連企業の幹部は、そのような取組みには高いコストを伴うと指摘する。

ヨウ化物摂取で身を守る

また Dasgupta たちの研究は、過塩素酸塩の摂取によって影響を受ける危険が、必須栄養素であるヨウ化物の摂取不足により高まることも明らかにしている。過塩素酸塩とヨウ化物は分子の形が非常に似ており、甲状腺や母乳に取り込まれる分子として競合関係にある。そのため、過塩素酸塩の存在が体内のヨウ化物が不足を引き起こすことがある。

Dasgupta たちの研究では、1980年代に行われた測定結果と比べて、母乳中のヨウ化物のレベルが大きく低下していることがわかった。その原因としては、過塩素酸塩が母乳へのヨウ化物の取り込みを阻害している可能性が極めて高く、また女性が加工食品をより多く摂取するようになり、生鮮食品からのヨウ化物の摂取量が少なくなっているためだと考えられる。

ヨウ化物不足と過塩素酸塩による汚染の危険を解決する方法として、Dasgupta は赤ちゃんを母乳で育てる母親や妊婦が、ヨウ化物を含むサプリメントを飲むことを推奨している。また彼は、食事による1日のヨウ素摂取量の推奨レベルの引き上げも合わせて提案している。

参考文献：

1. Kirk A. B. et al. *Environ. Sci. & Technol.*, published online doi:10.1021/es048118t (2005).

Vioxx の懸念がせきたてるユーザーフィー評価の必要性

Vioxx fears prompt call for user fee evaluation

Simon Frantz | Nature Reviews Drug Discovery Vol.4(179)/March 2005

米国食品医薬品局 (FDA) はその資金源ゆえに揺るがされているが、事態は一般に考えられているのとは異なると専門家は話す。

メルク社のロフェコキシブ (rofecoxib ; 商品名 Vioxx) が多数の犠牲者を出して世界市場から撤退した今、FDA はさまざまな意味で大打撃を受けている。世間や学界の論調は、新薬承認プロセスに関する資金を製薬業界に依存しているがために業界の言いなりになっているのではないかと、改めて FDA を非難するものが多かった。

処方箋薬ユーザーフィー法 (PDUFA)* の施行によって FDA と業界との結びつきが強くなったことは間違いない。だが、FDA の客観性が変化したかどうかについては疑問の余地がある。

PDUFA 以降の新薬の承認率は 81% であり、PDUFA 以前の 76% と比べてわずかに上昇している。薬剤の安全性は、薬剤の販売中止例で大雑把に評価すると (この観点では市場にとどまっている薬剤の安全性やリスクが反映されないものの)、大きく上昇してはいない。

劇的な変化は、1 回の審査で承認された薬剤数の増加である。FDA の要員が増え、臨床開発プロセスでの FDA と製薬企業との連絡が密になったことに加え、6 ~ 12 カ月という承認期限と到達目標が導入されたことも要因となっている。

エール大学公衆衛生学部準教授 (衛生政策・行政) の Mary Olson は、このような時間制限を設けているという事は、本来、承認のための追加試験が求められるような場合は一旦申請が却下されなければならないと話している。だが「有効性が確認されている薬物については、たとえ安全性に不確実性が認められ、安全性関連の追加試験を行わせたい場合であっても、審査官は申請を却下したことがありません」と話す。



ます。PDUFA 施行後に市販後の安全性試験を求められる案件が増えたのはそのためなのです」と語っている。

アリゾナ大学クリティカルパス研究所長の Raymond Woosley は、PDUFA の最大の問題は、提供資金が概して審査期間の短縮ばかりに使われるようになってきていることだという。「新薬の審査ばかりに資金を限定していることが FDA を揺るがしています。だれもユーザーフィーが FDA を揺るがすことを意図しているわけではないのに、FDA はまさに動かされているのです」と話している。

メルク社に加えて米国保健社会福祉省にも籍を置いた経験をもつ Eve Slater は、「市販後の安全性確認のために連邦の資金拠出や間接使途向けのユーザーフィーを増やすことが強く求められています」と語る。この資金は IT システム改善とデータ処理要員のために使われるべきだとし、「IT システムに関しては 5,000 万米ドル (約 50 億円) 分程度の更新を行い、要員は 30 人ほど増やせばよいのです。それほど多額の資金が必要とは言っているわけではありません」と話す。

ハーバード大学教授 (政治学) の Daniel Carpenter は、FDA による市販

後臨床試験への資金拠出を増やしたり、疫学試験の比重を高めたりすれば、ユーザーフィー制度は一般からの信頼をある程度回復できると考えており、「当局による承認を余すことなく利用すればユーザーフィーの額面をはるかに上回る価値の益が得られます。たとえばユーザーフィーが 3 倍か 4 倍になったとしてもです」と話している。

タフツ医薬品開発研究センター理事の Kenneth Kaitin は、「安全性試験がユーザーフィーでまかなわれていると知ったら国民は安心するでしょうか」と疑問を示し、「理想的な世界であれば議会がプロセス全体をまかなうだけの財源を投じて利害の衝突を避けようとするでしょう。しかし、ここは理想世界ではありません。私は、FDA が現在の産業との関係によって揺らいでいることの証拠がきちんと示されない限り、別のやり方やさらに優れたシステムが現時点で実現可能だとは思いません」と語っている。

* 処方箋薬ユーザーフィー法 :

医薬品の承認審査がスムーズに短期間で行われることを目指し、製薬会社が新薬承認申請書を提出する際に FDA に対してユーザーフィーを支払うことを定めたもの。

心が傷つくと健康によくない

A broken heart harms your health

情緒的ストレスが特異なタイプの心臓病を引き起こしている。

Jessica Ebert news050207-11/9 February 2005

情緒的外傷によって「心が傷つく」という表現は、思った以上に的を射ているかもしれない。このほど米国の研究者は、突然の情緒的ストレスによって心臓を「気絶」させてしまうホルモンが分泌され、それによって典型的な心臓発作に似た症状が現れることを明らかにした。

ストレス心筋症（別名「傷心症候群」）に苦しむ人々はまるで心臓発作を起こしたかのようになる。具体的な症状は、胸が痛む、肺に体液がたまる、息切れ、心不全である。この時、心臓が血液を送り出す能力は大きく低下し、心筋は弱っている。ところが、典型的な心臓発作の場合のように心筋梗塞を起こしたわけではない。心臓は死んでいないのだ。

「心臓の組織は生きています。ただ、動いていないだけです」と語るのは、今回の研究のリーダーをつとめたジョーンズホプキンス病院（米国メリーランド州ボルチモア）の Hunter Champion だ。

1999 年に Champion と彼の同僚の心臓内科医 Ilan Wittstein は、一部の心臓発作患者に通常とは異なった点があることに気づいた。彼らが特に強い印象を受けたのは、心臓発作を起こす前に最愛の人を失ったり、裁判所に出庭するといった激しい情緒的な出来事を経験した、閉経後の女性患者の検査結果だった。これらの患者は、心電図と心エコーのパターンが独特で、冠動脈疾患がなく、回復も早かった。

1999 年 11 月から 2003 年 9 月

の間に、Champion と Wittstein は、19 人のストレス心筋症患者の生化学検査データと画像データを集め、7 例の典型的な心臓発作患者のデータと比較した。

その結果、ストレス心筋症患者のカテコールアミン類（特にアドレナリン）のホルモンの初期値が典型的な心臓発作患者の 2～3 倍、健康な人の 7～34 倍にも達していたことがわかった。

「カテコールアミン値の上昇とストレス心筋症の強い関連性が明らかになったのは、これが初めてです」と Champion は言う。

研究は日本の方が進んでいる

ストレス心筋症は日本では 10 年前から知られており、「たこつぼ型心筋症」と呼ばれている。気絶した心臓の形が丸底の蛸壺に似ていることが名前の由来だ。

これまでストレス心筋症の知名度は、欧米諸国で相対的に低かったが、Champion のような研究がこの疾患を表面化させる、とミネアポリス心臓研究財団（米国ミネソタ州）の心臓内科医 Barry Maron は言う。Maron は *Circulation* の 3 月号¹ でこの疾患を紹介しており、Champion の研究は *New England Journal of Medicine* 電子版² に掲載されている。

「今後は、医師が患者を検査する際にストレス心筋症と典型的な心臓病とを見分けることが重要になります。ストレス心筋症は、鑑別診断において独自の疾病単位として区別して取

り扱われる必要があります」と Maron は言う。

ストレス心筋症の患者を見分けられれば、「不必要な外科的処置を避けられるかもしれない」と Champion は言う。具体的には除細動器の埋め込み手術のことだ。これに加えて、医師がストレス心筋症の独自の特徴を認識できるようになれば、この疾患の症例記録が増えていく可能性が高い。「今回の研究報告は氷山の一角なのかもしれません。私たちが考えているよりもかなり頻繁に起こっている病気である可能性があるのです (Champion)」

ジョーンズホプキンス病院の研究チームにとって次の段階は、ストレスホルモンが心臓を気絶させるメカニズムを解明することだ。彼らはまた、ストレス心筋症の記録を保存していくシステムを作り、この疾患にかかった患者からの情報を集めることも目指している。これによって、ストレス心筋症に遺伝的素因があるのかどうか、高齢の女性の方がストレス心筋症にかかりやすいのはなぜか、といった点が解明されることを Champion は期待している。 ■

参考文献：

1. Sharkey S., et al. *Circulation* **111**, 472 - 479 (2005).
2. Wittstein I., et al. *N Engl J Med* **352**, (2005).

The earth moves most for humans

人間は川や風雨よりも地形を変えている

Philip Ball news050307-2/7 March 2005

人間が行う農業や掘削が地形におよぼす影響は、川や氷河がおよぼす影響よりもずっと大きい。

人間活動によって移動する土壌や岩石などの量は、川や風雨などの自然の地質学的作用で移動する量の10倍にのぼる。

これが米国のミシガン大学の地質学者 Bruce Wilkinson の結論だ。彼は、地質学的データを使って、過去5億年にわたって自然界の作用が移動させた土壌などの量を見積もり、その結果を *Geology* に発表した¹。

Wilkinson は、メイン大学（米国メイン州オロノ）の地形学者 Roger Hooke が5年前に発表した論文²を読み、人間活動が及ぼす影響を計るために、自然の浸食作用などによって移動する土壌や堆積物の「基準」量を計算するというアイデアを思いついた。

Hooke は人間を「地形学的エージェント（因子）」と呼び、その影響力を川、氷河、雨、風などの地形を形成する自然界の浸食作用と比較した。

そして Hooke は、掘削や採掘などの意図的な土壌移動や、耕作地が浸食されるといった故意ではない効果によって、人間が地形におよぼした影響の歴史を整理した。

この影響は、文明の発達につれて指数関数的に増大してきたことを Hooke は見出し、「地形の形成において、私たち人間は現在、おそらく最も強力な『原因因子』になっている」と主張した。

Wilkinson の計算は今回、それが間違いないことを示した。私たち人間が地形を変化させる量は、自然界

の作用で変化する量の10倍に達する。Hooke は Wilkinson の研究結果について「驚きはしなかった」と話す。Hooke はすでに、地形への人間の影響は深刻なレベルに達していると考えていた。「私たちは危機に向かっている」と彼は言う。

1 インチできるのに 500 年

人間活動が土壌におよぼす影響については議論が続いている。今回の新しい研究結果は、この議論を沈静化させるのに役立つはずだ。自然の植生を取り除き、作物を栽培するために土地を耕すと、一般的に土壌は風や雨で浸食されやすくなる。

しかし、少なくとも米国では、既存の土壌が浸食されるのと同程度の速さで新しい土壌が形成されていると主張する研究者もいるし、全体として土壌が失われているとしても、重大な問題につながるほど急速なものではないと主張する研究者もいる。

Wilkinson は今回、彼が行った自然の土壌変化速度との比較をふまえ、「そのような研究者の見解を立証することは難しい」と言う。Hooke も「農地は急速に失われている」と主張する。ある見積もりによると、自然の土壌形成プロセスでは1インチの厚さの土が形成されるのに500年かかる、と Hooke は指摘する。

1,000 年前から自然に匹敵

Wilkinson は、土壌や堆積物の自然作用による移動量を見積もるにあ

たって、過去5億年にわたる堆積岩の形成速度を根拠とした。堆積岩は構造プレートが別の構造プレートの下に潜り込む際に絶えず破壊されていることも考慮に入ると、大陸では、100万年あたり平均数十メートルの厚さの土壌や堆積物が自然の作用で浸食されたと彼は推定した。

一方、人間が行う土木工事や農業による土壌などの平均喪失速度は現在、100万年に約360メートルだった。「これは、失われる量の約50年分を積み上げるとグランドキャニオンができてしまうくらいの量だ」と Wilkinson は話す。

この速度は指数関数的に上昇しているが、人間活動が自然界の地質学的作用と肩を並べるようになったのは最近ではない。人間活動による浸食は約1,000年前には自然の作用に匹敵するようになった、と Wilkinson は推定している。

Hooke は「問題の大部分は人口増加にある」と指摘する。現代の農業技術は、人口1人あたりの移動土壌量を減少させたが、世界の人口はあまりに急速に増加していて、農業技術の進歩の効果を上回ってしまっているという。 ■

参考文献

1. Wilkinson B. H. *Geology* **33**, 161 - 164 (2005).
2. Hooke R. *Geology* **28**, 843 - 846 (2000).

春は宇宙に 帆を上げる

Setting sail for history

Nature Vol.433(678-679)/17 February 2005

Tony Reichhardt

大きな夢と低予算があいまって、向こう見ずだがわくわくするような計画が生まれた。太陽光を帆に受けて宇宙を帆走する「ソーラーセイル」を実現する計画だ。このソーラーセイルのパイオニアである Lou Friedman は間もなく、各国宇宙機関に先んじて宇宙機「コスモス 1」を打ち上げ、宇宙空間に大きな帆を広げようとしている。Tony Reichhardt が報告する。



ロシアの技術者たちは宇宙機に推進力を与える太陽帆をテストしている。

これは忍耐の物語だ。Lou Friedman はソーラーセイルを打ち上げるまで人生の半分を費やしたが、耐え忍んできたのは彼だけではない。先見の明のある人たちは 100 年近く前からソーラーセイルを夢見てきたが、実現することはなかった。だがこの 4 月、すべてが予定どおり運ばば、600 平方メートルのマイラー（強化ポリエステルフィルムの商品名）製の帆を持つ「コスモス 1」という名の宇宙機が（宇宙機というよりも風車に似ているが）宇宙の航海にこぎ出す。コスモス 1 は、太陽光だけで宇宙船を推進できることを証明するはずだ。

コスモス 1 は、バレンツ海のロシアの原子力潜水艦から、ミサイルを転換したロケットで軌道上へ打ち上げられる。コスモス 1 の資金は、Friedman が会長を務める米国の宇宙開発推進団体「惑星協会」（本部・カリフォルニア州パサデナ）が出し、その機体はモスクワにあ

る旧ソ連時代からの航空宇宙企業「NPO ラボーチキン」が製作した。

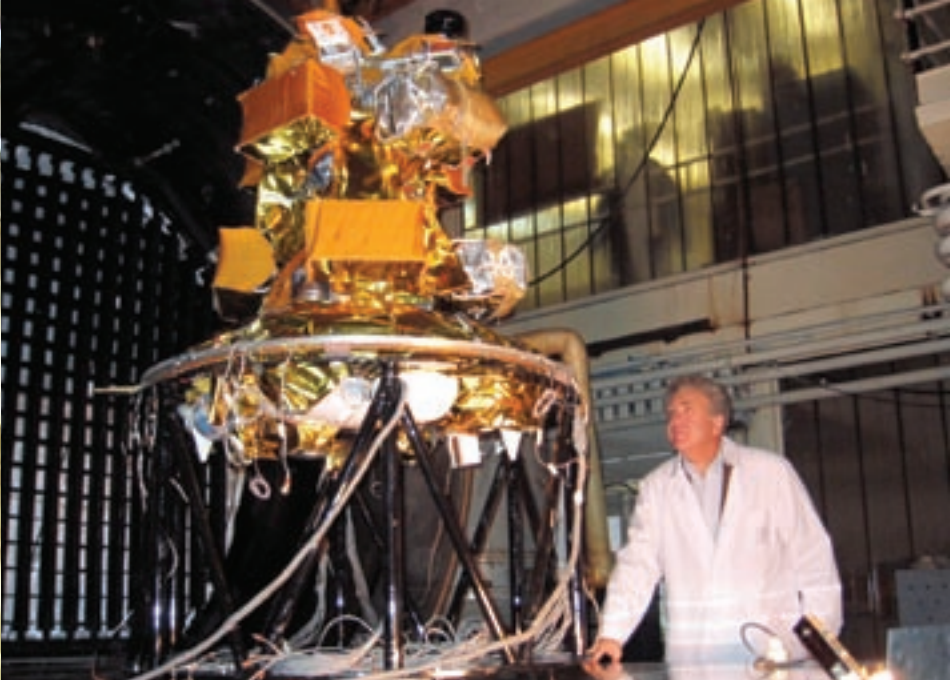
高度 800 キロの初期の軌道に達すると、コスモス 1 は 8 枚の三角形の羽根を広げる。そこで地上の管制官は、船乗りが風を手探りで探すように羽根を傾ける。コスモス 1 の軌道がわずかにでも押し上げられれば、この時点で光の圧力による推進を実証するには十分だ。そうなるには数日かかるかもしれないが、コスモス 1 の打ち上げチームは待つことをいとわないはずだ。

ソーラーセイルは急いでいる人には向かない。光子が巨大な反射する帆に当たって運動量を与えることにより、宇宙船は推進力を得る。最初のうち、その加速はほとんど気づかないほど小さい。しかし、従来のロケットと違ってソーラーセイルは絶え間なく加速され、太陽が輝いている限り、1 滴の燃料も使わずに加速し続ける。

構想から 84 年

1 日後、惑星間の帆走のための速度上昇は時速 160 キロにすぎないはずだ。しかし、100 日後には宇宙船は時速 16,000 キロで進んでいるだろう。3 年後には宇宙船の速度は時速 160,000 キロにも達するだろう。この速度は、現在太陽系を出て行こうとしている無人宇宙探査機「ボイジャー」の 3 倍で、5 年足らずで冥王星に着くほどだ。これは、米航空宇宙局（NASA）の冥王星探査機「ニューホライズン」が冥王星に到達するのにかかる時間の半分だ。

こういうわけで、SF 作家たちは、少なくとも推進原理としてはソーラーセイルを気に入っているし、航空宇宙エンジニアたちもそこは同じだ。1970 年代、Friedman は NASA のジェット推進研究所（JPL、カリフォルニア州パサデナ）のプロジェクトマネジャーだった。そこで彼は、ハレー彗星への米国の探査ミッ



現実か絵空事か：Gregory Benford（右下の写真）は、Lou Friedman（上の写真）が設計したソーラーセイルの推進力を、レーザー（左下）を使って上げることが計画している。

能性のあるすべてを未然に防ごうとしてきた。モスクワでのある技術再検討の後、あるロシア人コンサルタントがコスモス1の成功の可能性を70%としたことをFriedmanは覚えている。「成功の可能性は70%だって？ それならゴーだ！」とそのときFriedmanは叫んだ。

残念ながら、2001年に行った準軌道（地球を周回しない軌道）の打ち上げテストは失敗し、開発チームは帆の展開テストを行うことができなかった。宇宙船をロケットから分離することができず、宇宙船とロケットはともに海に消えた。Friedmanらはこの短い飛行試験をもう一度行うことはせず、次の打ち上げで宇宙船を地球周回軌道に入れることを決めた。

NASAのゴダード宇宙飛行センター（メリーランド州）のTim Van Santは「NASAはこのようなリスクの高い計画は行わないだろうが、コスモス1計画は陰ながら応援する」と話す。Van Santは、NASAの太陽地球関係研究プログラムのための技術開発を管理している。彼の部署は、従来のロケット推進方法では行えないミッションを実現させるため、ソーラーセイルを長い間検討してきた。たとえば、宇宙船を太陽近傍を回る極軌道に入れるには、太陽の重力に抗うための莫大な量のロケット燃料が必要となる。太陽帆推進は自然のブレーキとして働き、燃料が尽きてしまうこともない。

ソーラーセイルで先行した日本

しかし、夢見ることと、それを実際に実行することには大きな隔たりがある。ソーラーセイル計画のほとんどは、結局、実際に太陽の近くまで旅立つことはなかった。1992年、コロンブスのアメリカ大陸航海から500周年を祝うため、ソーラーセイルによる国際的な「ヨットレース」開催について話し合いが持たれ

ションの概念設計チームを率い、巨大な640,000平方メートルの帆を利用する計画をまとめた。このアイデアはNASAの首脳陣には「あまりにリスクが高い」として受け入れられなかった。「振り返ってみると、あの計画はあまりに無謀だったし、スケジュールも非現実的だった」とFriedmanは認める。

FriedmanはJPLを去った後、1980年にCarl Sagan、Bruce Murrayとともに惑星協会を設立した。そして、協会で宇宙開発の国際協力を進める間にロシアの宇宙科学者やエンジニアたちとともに親しくなった。当時、ロシアの技術者たちと親しくしていると疑いの眼差しで見られた。後にソーラーセイルの計画にあたって惑星協会がロシアに協力を求めたのは、経済的にも技術的にも賢明だった。ロシアのミサイル打ち上げ技術の利用は、「お得な買い物」だった。というのは、NPO ラボーチキン、膨ら

ませることができる宇宙船についてすでに研究を行っていたからだ（コスモス1の帆を支えるマストは、宇宙空間で膨らませなければならない）。ソーラーセイルに対するロシアの興味は、先見性のある物理学者Konstantin Tsiolkovskyにさかのぼる。Tsiolkovskyは早くも1921年にソーラーセイルについて書いているのだ。

Friedmanは今、ようやくここまで来た興奮の中で、現実的な可能性を冷静に見極めようとしている。この計画の予算はわずか400万米ドル（約4億2,000万円）で（NASAならこの額を机上の研究でほとんど使ってしまうだろう、とFriedmanは言う）、つまり一部の材料を節約したり、設計の再検討の回数を最小限に抑えたりせざるを得なかったことを意味している。しかし、開発チームには「有能で経験豊かな人々」が集まっており、失敗する可

L. FRIEDMAN/PLANETARY SOC.

M. CARROLL/PLANETARY SOC.

た。パサデナに本拠がある世界宇宙財団 (WSF) などが、プロとアマチュアの人たちが力を合わせて宇宙船を地上で建造してテストするところまで達したが、資金が底をついた。もっと最近では、「チームエンカウンター」というテキサス州のグループが、お金を出したお客のメッセージや絵、写真、DNA サンプルを宇宙船につけ、恒星間空間へ送り出すという計画を発表した。しかし、こうした計画で打ち上げに近づいたものはなかった。

ソーラーセイルの飛行経験という点では、コスモス 1 が打ち上げられるまでは日本が世界のトップを走っている。日本の宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は昨年 8 月に、気象観測ロケットを使って準軌道の短時間テストを行った。このテストでは、10 メートルの 2 枚の帆をマストから広げ、かざぐるまの形を作った。JAXA は今年 5 月には、35 キロの高度で 20 メートルの帆を科学観測用気球からつるしてテストする予定だ。

JAXA の最終目標は、太陽帆推進とイオン推進エンジンとを組み合わせたハイブリッド推進システムを開発することだ。提案されている JAXA のミッションのひとつでは、木星の極を回る軌道へ探査機を入れたりいくつかの小惑星の近くを通過したりするため、50 メートルの帆を使った太陽帆推進とイオン推進を組み合わせることが計画されている。

しかし、Friedman らの今回の計画ほど地球周回軌道に近づいた計画はなかった。とはいえ、コスモス 1 が予定通りに軌道に入り帆を広げたとしても、Friedman はいつ成功を祝うべきかわからないでいる。打ち上げチームは帆を制御して宇宙船をさらに高い軌道に押し上げようとするわけで、「どの時点で成功といえるかは、はっきりしない」と彼は話す。ソーラーセイルが直面するたくさんの技術的課題のうち、帆の

力学がもっとも難しいかもしれないと Friedman は考えている。帆は安定なのか、あるいは強風にあおられる軽くて薄い帆のように、ねじれ、丸まってしまうのか、だれにも正確には分らないのだ。

もしコスモス 1 が高い軌道に達し、ミッションのほかのすべての目標を達成したら、今までに行われたことのない実験が最後に行われる。カリフォルニア大学の物理学者で SF 作家の Gregory Benford とマイクロウェーブサイエンス社 (カリフォルニア州ラファイエット) の社長である James Benford の兄弟は協力して、モハーベ砂漠にあるパラボラアンテナから 450 キロワットのマイクロ波ビームをコスモス 1 に照射することになっている。このビームがコスモス 1 に追加の推進力を与えるはずだと Benford 兄弟は考えている。この方法は将来、薄い布地でできた帆を持つ宇宙船を、ほかの惑星や、もしかしたらほかの恒星へ、より早く到達させる方法として使われるかもしれない。

NASA や ESA も

コスモス 1 が成功すれば、NASA などの宇宙機関が抱えるソーラーセイル計画にもいくらか弾みがつくだろう。NASA がソーラーセイルを飛行させる可能性があるのは、もっとも早いもので 2009 年の「宇宙技術実証ミッション 9」(ST9) だ。もっとも、ほかの技術もこのミッションへの採用を競っているだろうが。

NASA が持つもっとも将来のソーラーセイル計画には、活発な太陽領域を連続して観測するために太陽の十分近くの軌道を回る「太陽粒子加速機構観測衛星」(Particle Acceleration Solar Orbiter、PASO) と、太陽のより高緯度を研究する「太陽極撮影衛星」(Solar Polar Imager、SPI) がある。NASA と米海洋気象局 (NOAA) は、太陽嵐の予報

をするため、地球・太陽間の安定軌道に「気象台」を置きたいとも考えている。これはコスモス 1 の 3 倍から 5 倍の大きさの帆を必要とするだろう。

欧州宇宙機関 (ESA) も、NASA と同じ理由でソーラーセイルに興味を持っている。すなわち、太陽の極を回る軌道に衛星を投入するためだ。ESA は、地球近傍小惑星を訪れる「アースガード」というミッションの構想も研究している。

承認されたソーラーセイルミッションはまだ存在しないが、Van Sant は、基礎技術の開発に年間約 1,000 万ドル (約 10 億 5,000 万円) を費やしている。ソーラーセイル開発のパイオニア企業である、ルガルド社 (カリフォルニア州タスティン) とエイブルエンジニアリング社 (カリフォルニア州ゴレタ) は、NASA のプラムブルック実験施設 (オハイオ州) の巨大な真空チャンバーで、20 メートルの帆を製作するためのいくつかの設計案をテストすることになっている。

エイブルエンジニアリング社の帆は CP-1 という厚さ 2.5 マイクロメートルの極度に薄い新しいポリマーでできている。これは、コスモス 1 で使われるアルミニウムコートしたマイラーの半分の厚さだ。「もしくしゃみをしたら、このフィルムはテーブルの向こう側に吹き飛んでしまうだろう」と Van Sant は話す。ソーラーセイル用の帆は薄く、軽いほどよいが、薄くて軽いフィルムは破れやすい。コスモス 1 の補強された帆でさえ永久には持たず、打ち上げから 1 カ月以内に強い日光により劣化し始める。しかし、太陽帆推進の原理を実証するには短期間の飛行で十分であり、もし成功すれば、太陽光で推進力を得るほかの宇宙船の計画にも実現のチャンスをもたらすだろう。 ■

Tony Reichhardt (ワシントン DC) がネイチャーに寄稿。

ホエールフォールに 群がる生き物たち

示唆に富むクジラの骨：
腐乱するクジラの死骸が
大量の生物の生存を支え
ている。

WHALE FALL

Nature Vol.433(566-567)/10 February 2005
Amanda Haag

MBARI

海底に横たわるクジラの死骸には、脂質を多く含んだ骨がある。これが、海底生物にとって濡れ手に粟なのだ。
ここに展開されるユニークな生態系を調べる研究者たちは、悪臭などの悪条件をものともせず、思い切った方法を使う。
そんな研究者たちを Amanda Haag が追った。

1987 年、有人潜水艇アルヴィン号は、泥のような深海底の定期探査を行っていた。その時、操縦士が何かを発見した。それは恐竜の化石のようにも見えた。しかし、実際には未知の水生恐竜の化石ではなく、体長 21 メートルのシロナガスクジラの骨だった。さらにこの骨の塊の上には、これまでに見たこともないようなものがあつた。まるで絨毯を敷きつめたかのように細菌や環形動物が繁殖していたのだった。それは、海底火山の側面で見られる光景に似ていた。

アルヴィン号の探査チームが見たのは、腐敗するクジラの死骸から発生する硫黄分を含んだ軟泥の中で繁殖する

生物群集で、その発見以来「ホエールフォール」と呼ばれるようになった。果樹園に風が吹くと、熟した果実が地上に落ちる。これをウィンドフォール (windfall) と言うのだが、「ホエールフォール (whale fall)」ではクジラの死骸が海底に沈み、その死骸から大量の栄養素が海底に行き渡ることになる。ただしホエールフォールは、極めて稀にしか起こらないため、その様子を追跡調査して研究することが難しい。それでも研究者は、時には思い切った方法を使って、クジラの死骸近くで発見される新種の生物についての研究を進めている。これまでに発見された 39 種あまりの生物は、この環境に特に適した

ものか、あるいはこの環境に特有の生物でさえあると考えられている。

外洋の荒れ果てた海底に横たわるクジラの死骸は大そうな馳走だ。オンデンザメ、メクラウナギやコマチコシオリエビといったスカベンジャー（腐肉を食べる生物）はクジラの軟組織を食べるのだが、1 頭のクジラがあれば、その大きさによっては数ヵ月から数年間生き延びることができる量なのである。また、クジラの組織のかけらが死骸の周りに広がって海底堆積物の栄養度が高まると、機を見るに敏な環形動物や甲殻類が集まってきて栄養源とする。そして嫌気性細菌によるクジラの腐敗が進むと、その周囲には硫化物が大量に含

まれるようになり、硫黄分を好む生物が集まってくる。環形動物、ハマグリ類、イガイ類を始めとする数多くの生物がそこに住みかを構え、脂質に富んだクジラの骨髄から得られる化学エネルギーによって代謝を可能にしてゆくのだ¹。

「他の海洋哺乳類の骨で、これほど複雑な生物群集が形成されたという報告はありません。おそらく、クジラの骨がかなり大きく、脂質も相当に多いことによるのだと思います」このように語るのは、ハワイ大学マノア校（米国）に所属するホエールフォールの専門家 Craig Smith だ。

ホエールフォールによって形成された生物群集は、クジラの骨から脂質と硫化物を吸収することで最長 100 年ほどは生き続けることができると研究者の間では推定されている。ホエールフォールに住みつく細菌は低温の海中で脂質を効率的に分解できることから、バイオテクノロジー企業の Diversa 社（米国カリフォルニア州サンディエゴ）は、この細菌が産生する酵素を冷水用洗剤に利用できないかどうか研究している。

Smith のようなホエールフォールの研究者には特有の課題がある。その最たるものは、研究対象となるクジラの死骸を探すことである。クジラが死ぬのは多くの場合、出産や誕生の過程でストレスがかかっていた雌のクジラや生まれたばかりのクジラが年 1 回の定期的な回遊に出る時だ。たとえば太平洋では、出産地であるメキシコのバハ半島沿岸から北方のアラスカへの長い移動の途中で命を失うクジラが多い。クジラの死骸はこの移動経路に多く集中するが、その分布に規則性はなく、死骸が非常に離れて点在していることもある。

死骸を求めて

「クジラの死骸は簡単には見つからない。熱水噴出孔を見つける時のように海底で特定の地質的特徴を追跡していくだけではだめだからだ」と Smith は言う。1990 年代の前半、米国海軍は

太平洋の海底 300 平方キロメートル以上にわたって未回収ミサイルの調査を行い、その調査の過程で 8 体のクジラの骨を発見した。海軍は Smith に連絡したが、クジラの骨の正確な位置を経緯度で記録していなかった。その後 Smith は現場に向かったが、1 体の骨しか見つからなかった。

これまでのところ、10 数人のホエールフォールの研究者が 10 カ所の天然のホエールフォールを調査している。これとは別に 20 カ所のホエールフォールの一部が、トロール漁船によって偶然に採取されている。ホエールフォールの研究

者は、より多くのホエールフォールを研究するため、浜辺に打ち上げられたクジラの死骸を海中に沈める作業も行う。しかし体重が 4 トンのコクジラの幼体や体重が 35 トンの成体を沈めるのは大変な作業だ、と Smith は言う。

クジラが浜辺に打ち上げられたという通報を受けると、研究者はチームを編成し、船を用意する。現場に到着する頃には、クジラの胴体は腐敗ガスによって膨れ上がっていることが多い。そんなクジラを海中に沈めるため、研究者は、鉄道車両用車輪からアンカーチェーンに至るさまざまな金属くずを



クジラの死骸を海中に沈める：骨を食う環形動物の新種 *Osedax*（写真上と右）や他の珍種の発見が関心呼び、研究者はクジラの死骸を深海底に沈めて研究している。

MBARI

G.ROUSE

C.R.SMITH

最大 3,000 キログラムも使って重しとし、クジラに巻きつける。浜辺のクジラを海底に沈めるまでに 2 日間を要することもある。それに、この作業に従事した人々は、とても不快な思いをすると異口同音に言う。「作業に使った衣服は捨ててしまうことが多いです。臭いがどうしても抜けないのです。この研究に伴う危険の 1 つと言えます (Smith)」

このようにして海中に沈められたクジラの死骸は約 20 体にのぼっている。研究者たちは、これらのホエールフォールを巡回し、クジラの死骸に繁殖する生物の様子を定期的にモニタリングする。Smith の研究グループは、1 体の死骸に経時撮影カメラを取り付け、8 ヶ月にわたってほぼ継続的に写真を撮影した。他の研究者は、潜水艇を現場に送り、肋骨や椎骨を採取して、そこに形成された生物群集を生きたまま、ほぼ完全な状態で地上に持ち帰っている。

Tjärnö 海洋生物学研究所 (スウェーデン・ストレームスタード) で集団遺伝学を研究する Thomas Dahlgren は、幸運にもクジラの死骸を研究室の近くに沈めることができた。それまで研究していたのはカリフォルニア沖の水深 1,200 ~ 3,000 メートルの地点にあるもので、一番近い研究所からでも少なくとも半日の航海を必要とした。Dahlgren のホエールフォールは水深 125 メートルで、彼の研究室から 30 分で行ける場所にあった。「太平洋上で長時間にわたって船に揺られた上に、持ち時間も限られてしまうというようなことはもうありません」と Dahlgren は言う。彼の研究チームは、いまや週 1 回の頻度でホエールフォールでの試料採取を行うことすらできるのだ。

また Dahlgren の研究室では、生きた生物標本のついたクジラの骨を海水タンクで保存している。熱水噴出孔で発見される生物は深海底の高圧条件下でなければ生存できないが、ホエールフォールで発見される生物の一部は、陸上での生活にも非常によく適応できる

ようだ。「私たちの低温室では、クジラの骨がぶら下げられ、その表面全体に付着した細菌が培養されているのです」と Dahlgren は言う。

深刻な脅威

このような研究によって数種類の奇妙な生物が発見されている。おそらく最も見事だったのが、環形動物の一種である *Osedax*² (「骨をむさぼる者」という意味のラテン語) の発見だろう。この環形動物は巧妙な代謝メカニズムをもっている。*Osedax* には、目や口、胃がないが、クジラの骨から脂質を「掘り出す」根系が発達している。*Osedax* は、緑色をした肉質の根で骨に穴を掘り、まるで「穴あきのスイスチーズ」のようにしてしまう、と Smith は言う。そして *Osedax* の組織内にある細菌が、クジラの骨髓に含まれる油脂を分解する。この細菌は、石油流出事故現場で石油に付着しているところが見つかった細菌に似ているが、この種の細菌が別の生物と共生関係にあることが発見されたのは今回が初めてだ。

これまでに *Osedax* 属の 5 種類の生物が発見された。そのうち 4 種類は太平洋で発見され、最近になって大西洋で 1 種類が見つかった。このことから、*Osedax* 属は全世界に分布しているものと考えられる。このうちの 2 種類は一種の母系社会を形成しており、すべての雌は体長が人差し指程度であるのに対して、雄は顕微鏡でなければ見えないような大きさで、雌の輸卵管の中で生息している。1 匹の雌の体内からは最高 111 匹の雄が見つかった。

もう 1 つの珍種としては、ホエールフォールに生息する環形動物で、「ピンキー」という愛称がついたものがある。この環形動物が発見された当初、研究者は種の同定ができなかった。アデレード大学 (オーストラリア) の Greg Rouse もそんな研究者の 1 人だった。研究者がさんざん頭を悩ませた後、ピンキーは、多毛類 (ゴカイなど) の一種で、浅海に

生息する他の多毛類の仲間よりも体長がかなり大きいだけなのではないだろうか、ということが明らかになった。「ピンキーは巨大で、体長は 1 センチメートルを超えています。近縁種は数ミリ程度です。それにピンキーはとても太っているのです」と Rouse は言う。ピンキーの胴体は幅 1 ~ 2 ミリはあるのだ。

ホエールフォールの生物群集については、数多くの謎が残っている。たとえば、海中に放出されたホエールフォール生物の幼生が別の骨を見つけるまで生き続ける過程を解明するための研究が進められている。「これは、本当に巧妙な過程なのですが、そこところが解明できないのです。でも現に生き続けるのです」こう語るのは、サウサンプトン海洋学センター (英国) で深海生態学を研究する Paul Tyler だ。

研究者は、ホエールフォールの生物群集は約 3,500 万年ほど前から存在していると推定する。しかし、ここ数世紀の間、この生物群集は深刻な脅威にさらされてきた。Smith は、1800 年代から 1900 年代の捕鯨活動によってホエールフォールの生物群集が最大 95 % 減少し、一部の海洋盆ではクジラの死骸に生息することに特化した生物種の最大 50 % が絶滅した可能性があると推測している³。1 頭のクジラが漁船に釣り上げられるたびにクジラの個体数が減るだけでなく、海底に沈むクジラの数も減る。保護が必要なのはクジラだけではない、と Smith は言う。もし捕鯨が急ピッチで続けられていたならば、クジラだけでなく、ピンキーの数も減っていたかもしれないのだ。 ■

Amanda Haag は、米国コロラド州ボルダーを拠点とするフリーのサイエンスライター。

1. Smith, C. R. & Baco, A. R. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* **41**, 311–354 (2003).
2. Rouse, G.W., Goffredi, S. K. & Vrijenhoek, R. C. *Science* **305**, 668–671 (2004).
3. Smith, C. R. in *Whales, Whaling and Ocean Ecosystems* (ed. Estes, J.) (Univ. California Press, Berkeley, in the press).

Hopping fences

あらゆる細胞を包む脂質膜のなかで動きまわるタンパク質の様子はどんな具合なのかは長く議論が絶えなかった。だがついに、ある日本人研究者が超高速度カメラを用いて、このタンパク質の「ダンス」をかつてないほど詳細に撮影することに成功した。それでも論争の決着がつくのはまだ先のような。Alison Abbott が報告する。

壁を 飛び越える タンパク質



Alison Abbott Nature Vol.433 (680-682)/17 February 2005

楠見明弘は、細胞膜中で動くタンパク質をカメラに収めた。

灰色の背景のなかで激しく震え動く1個の分子を撮影した、ざらついたモノクロフィルムを楠見明弘が上映すると、聴衆にざわめきが起った。この映像を初めて見た者は、驚きのあまり口をぽかんと開け、そして疑念の目を向けた。質問が矢継ぎ早に飛んできた。「いったい何を測定したのか」「どんな方法で行ったのか」「速い分子の動きを本当にカメラに収めたのか」

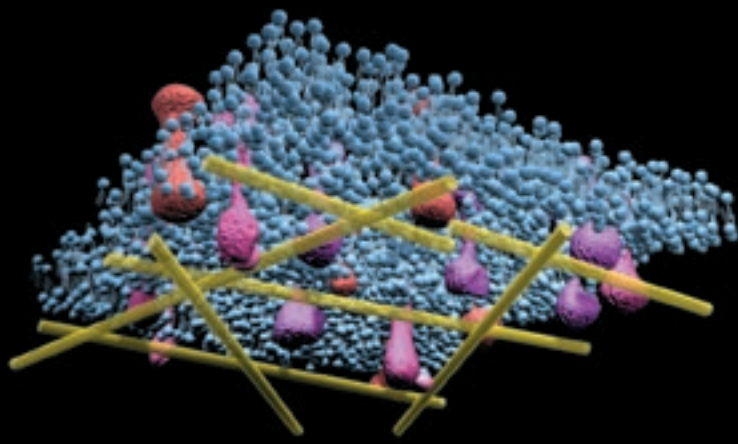
フィルムが上映されたのは、昨春秋にイタリアで開催された会議の席上だった。楠見は壇上から、哺乳動物の生細胞を包む脂質膜中のタンパク質の動きを、ミリ秒単位、ナノメートルのスケールで捕えたことを発表した。膜研究の分野では数十年来、これほど詳細にタンパク質の動きを観察した者は誰もいなかった。

楠見は解析結果を元に、細胞の膜動態を広い視野で説明する「ホップ拡散」仮説を提案した。分子は膜のなかを異常な速さで動いているが、細胞のアクチン細胞骨格（細胞の形状を保つ繊維の編み目）が作る「フェンス」によって狭い空間に閉じこめられていると楠見は言う。そして、閉じこめられていたタンパク質分子が時にフェンスの上を飛び越えて移動（ホップ）する。その結果、タンパク質分子が比較的緩やかな速度で長い距離を移動したように見えることになる（20ページの左上を参照）。

どちらかと言えば単純なこの仮説は、とても革新的な考えのように思われるかもしれない。けれども、膜の生物物理学の分野にはセンセーションを巻き起こした。楠見の仮説が正しければ、タンパク質が膜の内部でどのように動

いているのかという長年の謎が解かれることになる。そしておそらくさらに重要な点として、細胞外から飛び込んでくるシグナルが膜を介して細胞内へと伝達される仕組みに光が当てられることになるだろう。シグナル伝達の一連の過程は、健康時や病気の際の細胞の挙動に中心的な役割を果たす。シグナル伝達の詳細を明らかにすることは現在、大きな課題なのだ。細胞生物学者や分子生物学者は、細胞膜と結合してシグナルを運んでいるとみられるタンパク質の同定に長年取り組んできた。だが、細胞内でタンパク質どうしがタイミングよく遭遇して情報をやりとりする仕組みはまだ説明できていない。

楠見の得た成果は、この数年、膜の生物物理学の研究者たちの中で議論を呼んでいる。過去に楠見は、論文の発



細胞膜の構造：脂質二重層（青色）には、さまざまなタンパク質が浮かぶ。細胞膜を裏から支えるアクチン細胞骨格（黄色）は、タンパク質の動きを制限している可能性がある。

表にも手こずる経験をした。これはある面では、従来誰も考え得なかった新技術、特に爆発の研究分野で用いられてきた超高速撮影技術を持ち込んだ学際的アプローチを楠見が採用したためでもある。しかし、この数年間で彼の成果は広く受け入れられつつある。それでもなお、実験結果に対する彼の大胆な解釈には異論を唱える研究者も少なくはない。

撮影監督

楠見は現在、研究の場を京都大学へと移しつつある。性格は底抜けに明るく、自説に対する批判も冷静に受けとめているようだ。前向きに物ごとを考え、ユーモアを片時も忘れない。研究対象であるタンパク質分子のように、狭いところに閉じこめられるのは好まない。そして科学の狭い専門領域にも収まろうとはしない。「大学では物理学と生物学を学びました。博士号は生物物理学で取りました」と楠見は語る。「研究人生の大半を装置相手に過ごしていると思われることが多いのですが、実際は頭のなかは生物学のことで常に一杯です」こうした背景からか、生物物理学と細胞生物学という2つの学問領域の橋渡しをするようになった。

楠見が独立して自分の研究室をもったのは1980年代の初めのことだ。当時、膜動態の作業仮説は、「流動モザイクモデル」だった。1972年に提出されたこのモデルでは、膜をタンパク質分子

を保持する脂質二重層と見たてる（上の写真）。一部のタンパク質は細胞外から入り込み、「脂質二重層」を通過して細胞内へと侵入する。また別の一群のタンパク質は、脂質層の外側に留まり、分子の頭部を膜から突き出す。細胞内から膜の内層へともぐり込むタンパク質もある。流動モザイクモデルによれば、膜タンパク質は固定されてはならず、脂質だらけの環境内をブラウン運動で自由に拡散可能である。ブラウン運動とは、熱エネルギーによる原子および分子のランダムな動きのことだ。

構造に関するこのような解釈は、現在でもほぼ妥当であるとされており、生化学的および顕微鏡レベルの証拠でも支持されている¹。しかし、ブラウン運動だけで細胞膜中の分子が動くというこの仮説には大きな問題がある。

1980年代になると、生細胞中で膜のなかを動くタンパク質の速度は、実験室で調製可能な脂質を材料とする単純な人工膜中における移動速度と比べ、最大100倍も遅いことが生物物理学者たちの共通認識となった。このため、生きている細胞の膜のなかでは、何かがタンパク質の自由拡散を抑えているはずだと研究者たちは考えるようになった。

ラフト仮説

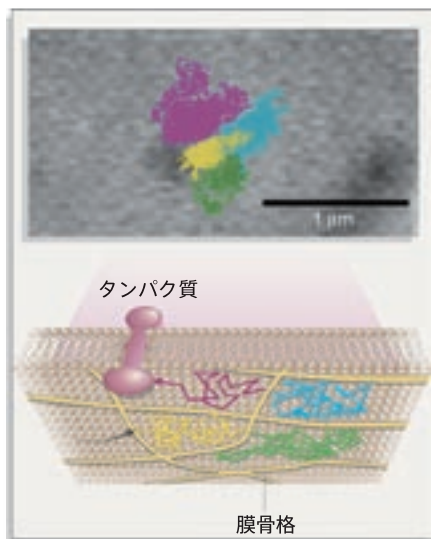
一方で細胞生物学者たちは、タンパク質が自由拡散で動くという考え方そのものにも疑問を抱くようになっていた。

自由拡散では、膜タンパク質の機能に関して当時続々と得られていた実験結果を説明できなかったのだ。多くの膜タンパク質は、細胞内シグナル伝達の複雑な過程に関与している。一般的なシグナルには、ホルモンや成長因子と、細胞から突き出した膜透過型受容体タンパク質の一部分との結合がある。両者の結合によって受容体はその形状を変え、脂質の海に浮かぶ他のタンパク質との一連の相互作用が誘導され、メッセージが細胞内にある適切な装置へと伝えられてゆく。

細胞生物学者と分子生物学者たちは、シグナル伝達経路に関与するタンパク質を多数見つけており、1990年代までには、一連のタンパク質が正しい時期に正しい場所に適切に集合して、確実に情報を交換する機構を説明するためには、自由拡散だけでは不十分だと考えるようになっていた。数多くのシグナル伝達分子を集合させるためには、膜のなかに高次の構造が存在する必要があるのは明らかだった。

そこで新しい仮説が登場する。タンパク質の動きが、さまざまな脂質混合物の物理化学的な特徴による制約を受けると考える、「脂質ラフト（いかに）仮説」がそれだ。この仮説では、細胞膜中のさまざまな脂質は、従来考えられていたようにランダムに分布しているのではなく、クラスターを形成可能であると想定する。そしてこのクラスターは、膜の他の部分と比べて粘性が高いとされる²。特定の脂質からなるこのような「浮遊するラフト」は、一部のタンパク質に好ましい環境をもたらし、限られた領域にタンパク質が効率よく閉じこめられることになる。シグナル伝達が始まる際には、複数の小さなラフトが集合することで、適切なタンパク質がすべて同じ部位に同時に揃うことになる。

ラフト仮説の登場は、細胞のシグナル伝達の動態を考える上で渡りに船であった。しかし疑問もあった。ラフトの存在は、顕微鏡下でこそ認められるが、その証拠の多くは間接的なものであり、



フェンスに注意

楠見の仮説では、細胞内部の骨格（黄色）が、細胞膜内においてフェンスの役割を果たすとされている。タンパク質は、フェンスで囲まれた1つの区画の内側を高速で動きまわり、フェンスにぶつかると別の区画へとホップする。上の写真は数万コマの写真を合成したもので、約1秒間におけるタンパク質の位置がわかる。フェンスで囲まれた各区画内で動きまわるタンパク質の進路を示す線を同じ色で示してある。

解析対象細胞の調製段階で生じた人為的な産物ではないかと考える研究者もいる。未確認飛行物体（UFO）ならぬ、「未確認浮遊物体」と表現した者までいた。

撮影快調

ラフトが懸案の疑問に対する答えでないのなら、タンパク質分子群を狭い空間に長期間閉じこめて適切な相互作用を可能としている実体は何だろうか。その答えを得るためには、1個の分子の動きを追うしかない。楠見は判断した。そして、直径20～40 nmの金コロイド粒子を膜タンパク質に結合させ、それをビデオで撮影する方法を確立した。ラットの腎細胞を用いた最初の観察では、標識タンパク質がホップしながら拡散する様子がはっきりと確認できた³。金粒子は、膜の狭い領域を激しく動きまわった後に、近くの別の領域に飛び込むように見えた。膜全体をほとぼりの速度でランダムに動くのではなく、ラフトに留まっているわけでもなかった。

楠見は、この区画が維持される理由

は、細胞内の細胞骨格であるアクチンフィラメントから成るフェンスが膜の下面を押しているからだと推測した。この考え方は、コロンビア大学（ニューヨーク）の生物物理学者 Michael Sheetz による理論研究を拡張するものだ。Sheetz は1983年に初めて、膜貫通型タンパク質が細胞骨格ネットワークによって拘束されている可能性を、赤血球を対象に提案した⁴。

しかし、赤血球を含む他の細胞を対象に、タンパク質がホップする様子を観察しようとしてもその現場を押さえることはできなかった。楠見が得たデータは、タンパク質はフェンスに囲まれていると考えられる領域に長く留まることがなく膜中を自由に動きまわっていることを示しているようだった。使用したカメラの空間分解能は、狭い領域において推定される小刻みな動きを捕えるのに十分であると楠見は思っていた。だがどうやらシャッタースピードが十分ではないのではないかと疑った。

この謎を明らかにするためには、さらに高速度の撮影が可能なカメラが必要だった。「爆発の研究者なら、シャッタースピードの非常に速いカメラを使っているのではないかと思います。マンハッタン計画で原爆開発に従事した研究者たちが爆発の瞬間を撮影していたことを思い出したのです」と楠見は語る。そこで、市販されている数台の最新モデルのカメラを調べてみたが、いずれも爆発研究用のものであり、微小な世界をのぞく仕様のものはなかった。

楠見は、とりあえず1秒間に4万コマの撮影が可能なカメラを1台手に入れた。この25マイクロ秒というシャッタースピードは、彼が従来使っていたカメラの1,000倍に相当する。「そのカメラを研究室にある顕微鏡に接続して、システムの条件を調整してゆくしか方法はありませんでした」と楠見は語る。一言に「調整する」とはいえ、やらなければならないことは数多くあった。コントラストを向上させ、カメラと顕微鏡と細胞のいずれにも適した光源を取

り付け、そして何よりも、データ解析速度を上げる必要があった。コンピューターの専門家から物理学者、生化学者に及ぶ20人からなる学際的な彼のチームでなければ、一見単純な映像を撮影するための複雑な装置の完成はおぼつかなかっただろうと楠見は振り返る。

シャッターチャンス

新たなシステムが完成し、研究チームはすぐに、さまざまな細胞におけるホップ拡散の観察を始めた。平均して1～1,000ミリ秒間に1回のホップを、幅が約30～200ナノメートルの膜区画で観察することにした。その結果、生体膜と人工膜との間にみられる拡散速度の差を説明することができた。タンパク質分子は、どちらの膜でも同程度の速い速度で動いていた。しかし生体膜の場合は、タンパク質の進路がフェンスで妨げられ、このため長距離に及ぶ拡散の速度は遅くなっていた。「ホップの瞬間は、解像度が30ミリ秒程度のビデオカメラでは確認できていなかったのです」と楠見は語る。「30ミリ秒以下の世界でさまざまな現象が起こっていることになります」

「実験の結果には満足でしたが、謎が残っていることは承知していました」と楠見は語る。つまり、タンパク質だけが膜の内部を動いているのではなく、脂質も動いているのではないかとという点だ。脂質も動くのであれば、たとえば脂質膜の外層と、膜を裏打ちする細胞骨格との間の距離が広くとも、通常の細胞では、拡散が人工膜の場合より遅く見えると考えられる。

脂質を標識して追跡することは、タンパク質の場合と比べてはるかに困難なことがわかっていった。しかし2年の歳月と数千本のフィルムを使用した結果、脂質もホップすることを示す統計的に信頼できる結果を得ることに成功した⁵。脂質は、1～100ミリ秒間に1回ホップしていた。この動きは、膜全体を動きまわる一部のタンパク質が細胞骨格から成るフェンスに固定されており、こ

のためフェンスのポスト（柱）またはピケット（杭）として作用するためであると楠見は考えた。この柱と杭が、膜脂質の動きを制限する囲いの境界となるというわけだ。

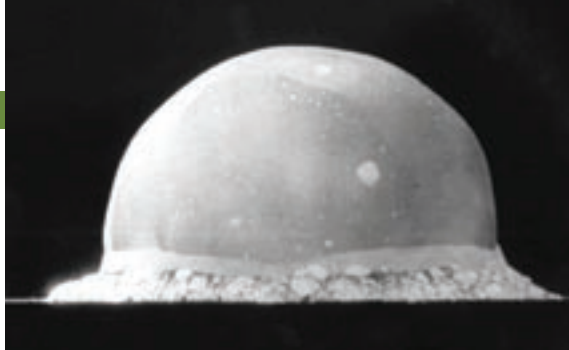
2001年から楠見は、それまで得られた結果と彼なりの解釈、そして膜がその秩序を保つ仕組みに関する一般的な見解を発表し始めた。同時に研究室では他方面からの実験を行い、仮説の正当性を固めていった⁶。電子顕微鏡とコンピューターによる細胞骨格の断層撮影、最新型の分光計による測定、そして分子ピンセットなどのハイテク技術による実験の結果⁷、フェンスで囲まれた区画の大きさが明らかになったと楠見は語る。また分子がフェンスを越えるのに必要な力が、仮説から推定される値と矛盾しないこともわかった。ただ、ラフトが細胞内シグナル伝達の開始に何らかの役割を果たしている現場を押さえることはできなかった。

自作のハイテク装置を用いて導かれた楠見の大胆な仮説は、同じ分野の研究者たちにインパクトを与えた。「楠見が膜の生物物理学の領域に大きな影響を与えたのは確かです」と、ノースカロライナ大学（チャペルヒル）の細胞生物学者 Ken Jacobson は語る。「彼は、この研究領域の限界をもっと先まで延ばしました」

自身も、楠見のチームが用いた機材ほど高速ではないビデオカメラで細胞膜中の1個の粒子を追跡している Jacobson は、「ホップ拡散モデル」は同業者から「ある程度」は受け入れられているとコメントしている。完全に賛意を得るまでに至っていない主な理由は、楠見の結果を別途独自に確認するための高速度カメラを、他の研究グループが持ち合わせていない点にあると Jacobson は指摘する。

金の話

別の問題は、追跡に使用される金粒子が比較的大きいことにある。金の粒子は、一部の区画より大きい場合もある。



1945年に撮影された核爆発から0.16秒後の写真。類似の撮影法が今日、細胞内分子の画像化に用いられている。

楠見は、金粒子をただ1個の分子と確実に結合させるために、時間をかけた大規模な対照実験を実施していると話した。彼をよく知る研究者たちによれば、楠見は実験に過剰なまでの厳密さを求めることで知られており、その技術的手腕には定評があると Jacobson も語る。「それでも40ナノメートル程度の粒子が実験の結果に何らかの影響を及ぼす可能性があることを否定できないのです」

楠見が観察した「フェンス-ピケット」モデルに異を唱える者たちもいると、インドの国立生物科学センター（バンガロール）の細胞生物学者 Jitu Mayor は語る。生細胞の膜のなかでタンパク質が単に集中することで、比較的低速度のタンパク質の動きを説明できるのではないかと考える研究者もいるというのだ。しかし、楠見ほどこの問題に真剣に挑み、広範囲に及ぶ相互に矛盾のない仮説を提示し、その妥当性の検証に取り組んでいる者はいないというのが Mayor の見方だ。「ライバルたちは、検証可能な予測さえ示していないのです」

楠見は、実験に明け暮れて自説を補強しているだけではない。ラフト仮説に関する疑問をめぐっては、自ら進んで中立を保とうともしている。必要なタンパク質の集合完了後に細胞がシグナル伝達過程を開始するのであれば、ラフト仮説の正しさを示す何らかの証拠が得られるはずだと楠見はみている。「分子がシグナルによる刺激を受けてクラスターを形成するところは捕えています。これがラフトであると見なせないことはありません」と、未発表の研究に言及して楠見は語る。「けれども、刺激を受

けていない細胞膜では、ラフトを見いだせません」

マックス・プランク細胞生物学会（独ドレスデン）の代表を務め、ラフト仮説の有力な擁護者の1人でもある Kai Simons は、この結果に満足げだ。楠見が細胞のシグナル伝達の開始前にラフトを見つけれられない

のであれば、おそらくその理由は、金粒子が実験系を大きく揺るがせているためであると Simons は語る。刺激を受けた細胞膜の挙動に関しては、自分と楠見の間には意見の相違はないと Simons は述べている。

楠見は、自説に向けられた批判を正面から受けとめている。その一方で、笑い飛ばす余裕も持ち合わせている。「新しいアイデアは理解されにくいものです。それに物理学者たちはブラウン運動が大好きですから」

楠見は前進を続けるつもりだ。研究対象は、細胞膜のタンパク質と、組織移植用のナノ材料との間の相互作用の観察にまで広がつつある。楠見はこの4月に、古巣の名古屋大学を後にして、境界領域を渡り歩く自らの傾向を反映するような名称の施設、「京都大学再生医科学研究所」へと移る予定だ。楠見が研究の場を変えるのは今回が初めてではない。これまでも約8年ごとに新たな環境に身を置いてきた。「私の人生は、ホップ拡散原理に従っているのです」と笑う。でも幸いなことに、楠見自身の姿をカメラに収めることには苦勞せずに助かった。 ■

Alison Abbott はネイチャーのヨーロッパ上級特派員。

1. Edidin, M. *Nature Rev. Mol. Cell Biol.* **4**, 414–418 (2003).
2. Simons, K. & Ikonen, E. *Nature* **387**, 569–572 (1997).
3. Kusumi, A., Sako, Y. & Yamamoto, M. *Biophys. J.* **65**, 2021–2040 (1993).
4. Sheetz, M. P. *Semin. Hematol.* **20**, 175–188 (1983).
5. Murase, K. *et al. Biophys. J.* **86**, 4075–4093 (2004).
6. Kawasaki, K., Yin, J. J., Subczynski, W. K., Hyde, J. S. & Kusumi, A. *Biophys. J.* **80**, 738–748 (2001).
7. Nakada, C. *et al. Nature Cell Biol.* **5**, 626–632 (2003).

最近まで活動的だったことを示す火星の画像

Picturing a recently active Mars

Victor R. Baker

火星探査機マーズ・エクスプレスに搭載された高解像度ステレオカメラによって撮影された画像から、火星の表面は水や溶岩や氷の流れによって、わずか数百万年前に形成されたことがわかった。

Nature Vol.434 (280-283)/17 March 2005

地表をとらえた壮大な画像と太古の堆積岩の化学分析から、太古の昔、火星に水が豊富であったことは疑う余地がない¹。NASA のマーズ・ローバー・ミッションによるこれらの発見は、ここ過去 30 億～40 億年と比べて隕石や彗星の衝突率をはるかに高かった、火星史における Noachian 期、つまり太陽系が誕生してから最初の数億年間の状況を示したものとされる²。これまで長い間、火星に関する科学的理解を大きく変えるには画像の解釈がその鍵を握っていた。3/17 号の 3 つ論文^{3~5}が新たに、今回の画像から火星が地質学的に近い過去に活動的だったことがわかったという解釈を示している（原著論文は、*Nature* 3/17 号を参照のこと）。

1960 年代のマリナー探査機のフライバイの際にビジュンカメラによって撮影された最初の画像と大気データからは、火星は定常的に寒冷で乾燥していると考えられた⁶。1970 年代、この見方は大きく変わることになる。マリナー 9 号とバイキング・オービターによる高解像度の全球画像によって、川や谷のネットワークと大洪水によって作られた巨大な溝の存在が明らかになったのだ⁷。にもかかわらず、この結果を受けて 1980 年代から 90 年代に行われた理論的な統合解析では、水文学的な循環は一般的に Noachian 期に限られるはずだとされた。より高解像度の新たな画像が得られなかったバイキング探査機以降の 20 年間は、この MIDDEN 仮説（「Noachian 期のぞいて、火星は定常的に活動を停止しておりかつ乾燥している」）が優勢であった。MIDDEN 仮説を支持する人々は、火星には水が乏しいとか、効率的に水を放出していないとか、ほとんどの水は宇宙空間に消え去ったとか、さまざまに主張していた。

1980 年代に NASA は火星科学気象観測オービターを計画したが、多くの科学者は搭載機器を非結像型の実験装置に限るよう望んだ。画像科学は撞着語法であり、画像は広報活動の役にしか立たないと公言する者さえいた。そういうわけで、最終的にマーズ・オブザーバーとなる

宇宙機への高解像度ステレオカメラの搭載は見送られた。結局、小型で、ステレオではない高解像度のマーズ・オブザーバー・カメラ (MOC) が搭載機器に加えられたが、マーズ・オブザーバーは 1993 年に消息をたち、1990 年代後半のマーズ・グローバル・サーベイヤー・ミッションまで MOC が火星に到着することはなかった。

ステレオカメラではないために撮影範囲が非常に限られてしまうにもかかわらず、解像度の高い MOC 画像は目覚ましい発見につながった。水によって作られた谷を伴う全球に散らばった極めて新しい山の斜面⁸や、随伴する溶岩流や大洪水によって作られた巨大な溝⁹が発見された。高解像度画像から見積もられた衝突クレーターの密度が示すところによると、これらすべては過去 1,000 万年以内のものである¹⁰。これらの特徴や他の多くの証拠¹¹は、広く流布していた MIDDEN 仮説と明らかに矛盾していた。

ヨーロッパ宇宙機関のマーズ・エクスプレス・ミッションによって火星に運ばれた高解像度ステレオカメラ (HRSC) は、マーズ・オブザーバーへの搭載が見送られたステレオカメラに直系の後継カメラである。HRSC は解像度の点では MOC より若干劣るが、地質学的な分析を十分効果的に行うのに必要な、広域のステレオ・カラー画像を撮影する (図 1)。このカメラが撮影した最初の画像¹²には、MIDDEN 仮説から大きく外れるものが 2 つ見つかった。第一に、5 つの大きな火山のカルデラにあるクレーターの数は、火星史のうち最近 5 分の 1 にあたる期間に、一時的に活発な火山活動があったことを示している。第二に、火星の赤道地域において、オリンパス山の急斜面の底部でほんの 400 万年前に氷河活動があったことがわかった。

3/17 号の 3 編の論文では、HRSC から得られたデータを用いて、火星で最近起こった地質学的な活動についてもはや新しい見方をせざるを得ないような事例を示している。Hauber たち (3/17 号 p.356) は、約 3 億 5,000

万年前に爆発的噴火によってヘカテス・トロス火山の側面にくぼみができた証拠を示している³。わずか500万年前、このくぼみの底を氷河堆積物が満たした。

Head たち (同 p.346) は HRSC のデータを用いて、バイキングがもたらしたデータから氷河である可能性が提示されて議論の的となっていた地形を、改めて分析した⁴。マーズ・グローバル・サーベイヤーによって得られたデータと組み合わせると、新しい画像 (図1) から、この地形は現在火星の熱帯あるいは中緯度地域にあたる場所に存在し、地質学的に最近氷河活動が繰り返されていたことを示す確かな証拠であることが分かった。この氷河作用は、火星の回転軸の傾きの変動によって最近起きた太陽光入射の変化に応答した可能性もある。氷河は雪が堆積し、地球のような水文学的サイクルの間に氷に

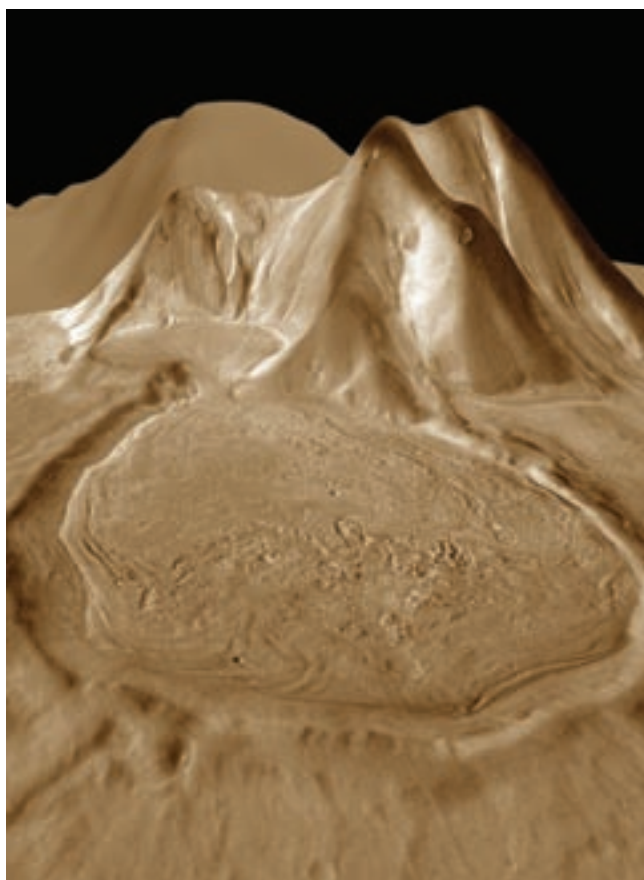


図1 より広域をとらえた火星の地質学的様子：マーズ・エクスプレスの高解像度ステレオカメラによって撮影された、火星の中緯度地域にある高さ3.5～4.5 kmの山塊の透視図。山塊から出た岩屑がまとまって、前面に幅16 kmにわたって広がる平行する畝のクレーターを満たす流れを作り出す。総体的にみると、この地形は、山麓氷河として知られる岩屑で覆われた地球の氷河と酷似している。浸食された穴とくぼみは、火星の地質学的な歴史の末期、数千万年前におそらく起こったであろう最大活動期移行は氷河の氷の大半が次第に消耗してきたことを示している。画像は垂直方向に30倍誇張しており、茶色がかった色は火星のほこりにまみれた表面に似せたものである (参考文献4を基に作成された)。

変質することで形成される。

バイキングのデータから得られた比較的若い火星の氷河作用についての初期の証拠¹⁴に、幼年期の流水活動¹⁵と「堰き止められた」水の活動¹⁶を示す他の証拠を合わせて考えられた結果、火星はNoachian期後の地質学的に短い期間、水門学的な意味で一時的に活発だったという仮説が1991年に生まれた¹⁷。当時、これは突拍子もない仮説だと思われた。1991年の仮説では、火星の気候変化は火山性のガスの大放出と大洪水が引き金となって起こり、水が溜まり、後に蒸発してしまう巨大な海になると考えられた。

Murray たち (同 p.352) は、まさにそのような事象の証拠となる、地球の北海とほぼ等しい大きさの凍った水塊を生むことになった証拠を示した⁵。ケルベロス・フォッサとして知られる、長くて幅の狭いくぼみに関連する亀裂系から発生した爆発的噴火に伴う大洪水によって、過去500万年以内に氾濫が起こった。おそらく、あふれ出た水はアサバスカ溪谷の水路系を通して海へ運ばれ、その流量は約1,000万m³/sに達したと思われる⁹。これは、火星史におけるNoachian期のすぐ後の時期に、火星の北部平原ですっと大きな水路が数億m³/sに達する量の水を解放して氾濫が起きた事象の小型版なのかもしれない。

かつて火星に期間の短い水門学的サイクルをもたらしただけの水にはいったい何が起きていたのだろうか。HRSCによって得られた最近の水成活動に関する証拠は、地表面の水と地下深くの水として、水がまだ存在していることを示している。マーズ・エクスプレスはこの5月の初め、地表下にある水と氷を地下数kmの深さまで探知する能力を持つ、Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (MARSIS)を展開する予定である。最新の画像からは、確かにそこには水があるという証拠が示されることだろう。 ■

アリゾナ大学 (米)、Victor R. Baker

1. Squyres, S. W. *et al. Science* **306**, 1709–1714 (2004).
2. Neukum, G., Ivanov, B. A. & Hartmann, W. K. *Space Sci. Rev.* **96**, 55–86 (2001).
3. Hauber, E. *et al. Nature* **434**, 356–361 (2005).
4. Head, J. W. *et al. Nature* **434**, 346–351 (2005).
5. Murray, J. B. *et al. Nature* **434**, 352–356 (2005).
6. Leighton, R. B. & Murray, B. C. *Science* **153**, 136–144 (1966).
7. Baker, V. R. *The Channels of Mars* (Univ. Texas Press, Austin, 1982).
8. Malin, M. C. & Edgett, K. S. *Science* **288**, 2330–2335 (2000).
9. Burr, D. M., Grier, J. A., McEwen, A. S. & Keszthelyi, L. P. *Icarus* **159**, 53–71 (2002).
10. Berman, D. C. & Hartmann, W. K. *Icarus* **159**, 1–17 (2002).
11. Baker, V. R. *Nature* **412**, 228–236 (2001).
12. Neukum, G. *et al. Nature* **432**, 971–979 (2004).
13. Head, J. W. *et al. Nature* **426**, 792–802 (2003).
14. Kargel, J. S. & Strom, R. S. *Geology* **20**, 3–7 (1992).
15. Gulick, V. C. & Baker, V. R. *Nature* **341**, 514–516 (1989).
16. Parker, T. J., Saunders, R. S. & Schneeberger, D. M. *Icarus* **82**, 111–145 (1989).
17. Kerr, R. A. *Science* **259**, 910–911 (1993).
18. Baker, V. R. *et al. Nature* **352**, 589–594 (1991).

設計通りに遺伝子交換

Gene exchange by design

Stanton B. Gelvin

細菌から植物への遺伝子導入が可能なのは、アグロバクテリウム属の細菌に限られると考えられてきた。ところが、アグロバクテリウム以外の細菌属にも界を越えた遺伝的交換が可能な種が存在するようだ。

Nature Vol.433(583-584)/10 February 2005

生き物はみな、親から子へ遺伝情報を伝えることができないとではない。この「垂直方向」の遺伝子の受け渡しがなければ、種は死に絶えるほかない。だが、生物が他の生物へと遺伝子を受け渡す仕組みはこれだけではない。「水平方向」の遺伝子導入が進化の主要な要因の1つだとみる考え方はだいぶ以前からあり、過去に遺伝子の水平移動が起こったと思われる例は多数ある。現在進行形のものとしては、細菌の接合（細菌どうしが直に接触して一方から他方へ遺伝子を受け渡すこと）が最もよく引き合いに出される。たとえば細菌から植物へというように、系統分類的に異なる界の生物種どうしでの遺伝物質の水平移動も起こりうるが、これまではアグロバクテリウム属の細菌についてしか報告されたものがなかった。今回 Broothaerts たちは、この属以外にも界を越えた「セックス」ができる細菌種が存在することを明らかにした¹（原著論文は *Nature* 2/10 号を参照のこと）。

Agrobacterium tumefaciens は病原細菌で、根頭癌腫病という広範な植物種がかかる腫瘍性疾患（図1）を引き起こす²。*A. tumefaciens* は近縁な *A. rhizogenes* や *A. vitis*、*A. rubi* とともに、大きな染色体外 DNA 要素（癌腫誘導プラスミド、略して Ti プラスミド）の一部を寄主植物に導入して癌腫を引き起こす。この導入された DNA（T-DNA）はいったん植物細胞の内部に入ると核を目指し、そこで最終的に宿主ゲノムに入り込む。T-DNA にコードされる癌腫遺伝子が発現すると、ホルモンの過剰生産がホルモン感受性の異常亢進が起こって細胞増殖に対する制

御がきかなくなり、癌腫ができる³。

アグロバクテリウムに備わるこのような植物への DNA 導入能は、遺伝子工学に携わる研究者たちに活用されてきた。細菌の T-DNA から癌腫遺伝子を削除して、導入したい遺伝子に置き換えられるからだ（図2）。こうした「導入遺伝子」を入れ込むことができれば、除草剤や病原体に対する抵抗性、改造した成長特性や栄養摂取特性、あるいは薬剤や食べるワクチン（植物に抗原を発現させ、それを食べたヒトや動物に病原体に対する免疫をもたせる）を作る能力といった、新たな特徴を備えた植物を作り出せる。アグロバクテリウムは実験室条件下で菌類や動物の細胞に遺伝的形質転換を起こすこともできる^{4,6}。

アグロバクテリウムを使った遺伝的形質転換は植物の基礎研究に欠かせないものとなっており、農業バイオ技術産業においても遺伝子導入植物を作るための基本手段となっている。だが少なくとも商業目的については、アグロバクテリウムを使った植物の形質転換技術には特許の問題がややこしくからんでくる。そのため（そして科学的関心というもっと根本的な理由からも）、他の細菌種がアグロバクテリウムと同じように「植物遺伝子のエンジニア」となれるかどうかを見極めたいとなつて然るべきだろう。他の細菌種を遺伝子操作して Ti プラスミドを運ぶようにすると植物に癌腫を起こせることは、すでにいくつかの論文で示されている⁷⁻⁹。しかし、これらの細菌から植物へ本当に DNA が導入されたことを分子レベルで実証した証拠はこれまでなかった。Broothaerts たちは今回、この証拠を示したわけである¹。

この研究では、細菌の2つの科の代表種である *Rhizobium* 種の NGR234、*Sinorhizobium meliloti*、*Mesorhizobium loti* が使われた。Broothaerts たちはまず、これらの細菌に T-DNA 領域を欠く無毒化した Ti プラスミドを導入した。この Ti プラスミドには毒性遺伝子が含まれている。そのタンパク質産物は T-DNA に働きかけ、T-DNA を植物に導入するのに必要となる（図2）。次に



図1 ニレの木にできた根頭癌腫病。大部分の根頭癌腫は地面か地下の部分にできるが、この写真のように地上部の癌腫もできる。（写真提供：Jer-Ming Hu、国立台湾大学）

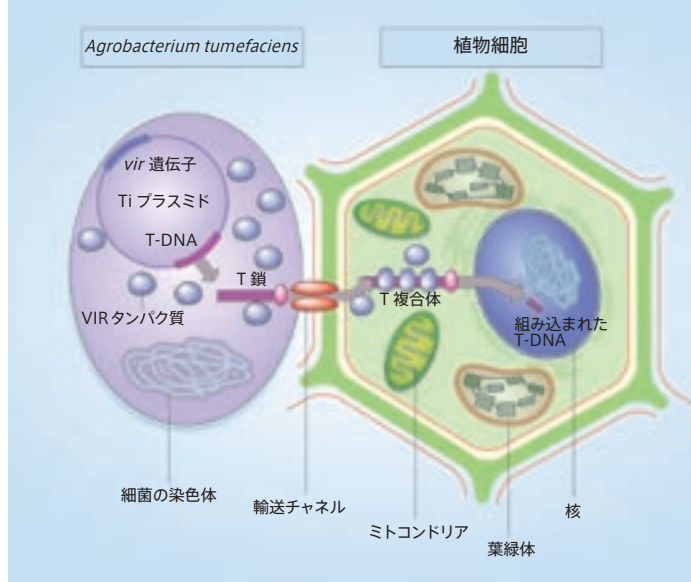


図 2 アグロバクテリウムが植物を遺伝的に形質転換させる仕組み。アグロバクテリウムには腫瘍を引き起こすプラスミド (Ti プラスミド) があり、そこには毒性 (*vir*) 遺伝子と導入された DNA (T-DNA) 領域が含まれる。この T-DNA に望む遺伝子を挿入できる。傷ついた植物細胞はフェノール類の防御物質を産生し、この物質がアグロバクテリウムの *vir* 遺伝子を発現させる。この遺伝子から作られた毒性 (Vir) タンパク質が Ti プラスミドから T-DNA 領域を切り出し、「T 鎖」を生じさせる。細菌が植物細胞に接着したあと、この T 鎖と数種類の Vir タンパク質が、輸送チャネルを通じて植物内に運び込まれる。植物細胞内に入ると Vir タンパク質が T 鎖と相互作用して T 複合体を形成する。この T 複合体は核を指し、T-DNA が植物ゲノムに入り込んで自分にコードされている遺伝子を発現させる。

彼らは、T-DNA 領域を含む第 2 のプラスミドを、アグロバクテリウム属でないこれらの細菌種と、無毒化したアグロバクテリウム菌株に導入した。この T-DNA には、抗生物質ハイグロマイシンに対する耐性遺伝子と、マーカー酵素である β -グルクロニダーゼを発現させる遺伝子を入れてある。菌株の混合によってデータ解釈を誤ることを防ぐため、アグロバクテリウムとそうでない細菌種には違う「分子タグ」を T-DNA につけておいた。

Broothaerts たちはこれらの細菌を、高等植物の主要 2 群の代表種にあたる何種類かの植物種に感染させた。使った植物種は、双子葉植物 (アグロバクテリウムによる形質転換を非常に受けやすい) のタバコとシロイヌナズナ、および単子葉植物 (アグロバクテリウムによる形質転換をあまり受けにくい) のコメである。 β -グルクロニダーゼを発現しハイグロマイシンに耐性をもつ植物ができたことから、実験したすべての細菌種で形質転換に成功したことが示された。形質転換の成功は、DNA プロット解析と、アグロバクテリウム属以外の細菌種によって形質転換された植物から回収した T-DNA と植物 DNA の連結部分の塩基配列解析によって確認された。さらに、これらの植物の T-DNA と植物 DNA の連結部分は、アグロバクテリウムによる形質転換でできる連結部分と特徴が似通っていた。つまり、異なる細菌種に由来する T-DNA のプロセッシング、導入、組み込みがおそらく同一の機構で起こったのだろう。

Broothaerts たちの研究結果からすると、アグロバクテリウム属以外の細菌種でも、アグロバクテリウムに見られ

る遺伝的形質転換の機構をまったく同様に果たせるとみられる。シロイヌナズナの形質転換には、雌性生殖細胞 (生殖系列細胞) を標的とするフラワー・ディップ法を要した¹⁰。しかしタバコとコメは体組織 (それぞれ、葉とカルス細胞) を介して形質転換させており、これにはおそらく違う機構がからんでいる¹¹。

今回さらにわかったのは、アグロバクテリウム属以外の細菌種を遺伝子操作すれば、数種の植物を遺伝的に形質転換させるようにできるものの、これらの形質転換効率はアグロバクテリウム法の 1% 未満から約 40% とかなり低く、その値は使用した種と形質転換評価法に左右されるということだ。ただし Broothaerts たちによれば、形質転換条件 (たとえば植え付けられた植物組織の年齢や型) を変えれば形質転換効率が上がる可能性はあるという。多くの植物種は元々アグロバクテリウム法に「不応性」で形質転換効率が低かったが、こうした操作によって効率は過去 20 年でかなり向上した。

Broothaerts たちの発見¹ は間違いなく、植物の基礎科学とバイオ技術に重大な意味をもって来る。いくつかの細菌種に植物への遺伝子導入能があるとわかったことで、こうした遺伝子の水平移動が植物の進化に関与した可能性が一段と濃厚になってきた。すでに知られているように、一部の植物種のゲノムには、*A. rhizogenes* が大昔に引き起こした形質転換の名残が含まれている^{12,13}。なかには、アグロバクテリウム由来の導入遺伝子が現在、寄主植物の制御を受ける形で発現されている例もあり¹⁴、こうした遺伝子が植物の遺伝的構成の重要部分となっていたことがうかがわれる。同じようにして他の細菌に由来する導入遺伝子が植物に組み込まれた例も見つかるかもしれない。こうした遺伝子の受け渡しの仕組みや、こうした出来事が起こりうる生物の範囲が解明されていけば、遺伝子の水平移動が高等生物の進化に大事だということが理解されていくに違いない。

パーデュー大学 (米)、Stanton B. Gelvin

1. Broothaerts, W. *et al.* *Nature* **433**, 629–633 (2005).
2. DeCleene, M. & DeLey, J. *Bot. Rev.* **42**, 389–466 (1976).
3. Gelvin, S. B. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* **67**, 16–37 (2003).
4. Bundock, P., den Dulk-Ras, A., Beijersbergen, A. & Hooykaas, P. J. J. *EMBO J.* **14**, 3206–3214 (1995).
5. de Groot, M. J. A., Bundock, P., Hooykaas, P. J. J. & Beijersbergen, A. G. M. *Nature Biotechnol.* **16**, 839–842 (1998).
6. Kunik, T. *et al.* *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **98**, 1871–1876 (2001).
7. Klein, D. T. & Klein, R. M. J. *Bacteriol.* **66**, 220–228 (1953).
8. Hooykaas, P. J. J., Klapwijk, P. M., Nuti, M. P., Schilperoort, R. A. & Rorsch, A. J. *Gen. Microbiol.* **98**, 477–484 (1977).
9. van Veen, R. J. M. *et al.* *Mol. Plant-Microbe Interact.* **1**, 231–234 (1988).
10. Desfeux, C., Clough, S. J. & Bent, A. F. *Plant Physiol. Biochem.* **123**, 895–904 (2000).
11. Mysore, K. S., Kumar, C. T. R. & Gelvin, S. B. *Plant J.* **21**, 9–16 (2000).
12. Furner, I. J. *et al.* *Nature* **319**, 422–427 (1986).
13. Suzuki, K., Yamashita, I. & Tannaka, N. *Plant J.* **32**, 775–787 (2002).
14. Meyer, A. D., Ichikawa, T. & Meins, F. *Mol. Gen. Genet.* **249**, 265–273 (1995).

A synthetic enamel for rapid tooth repair

人工エナメル質で迅速に歯を治療

Nature Vol.433(819)/24 February 2005

従来、歯のう蝕（虫歯）の治療は、罹患した部分を機械的に削除し、できた穴をレジンか合金で埋めるという方法がとられてきた¹⁻⁴。しかしこの方法は、小さい初期病変には理想的とはいえない^{5,6}。合金やレジンを歯質に接着させるために、健康な歯質も大きく削り取らなければならないからだ。ここでは、人工エナメル質の歯科用ペーストについて報告する。このペーストを使うことでナノ結晶成長が起こり、天然エナメル質の損失を最小限にとどめて、継ぎ目なく迅速に初期う蝕を修復できる。

ヒトの歯は厚さ 1～2 mm のエナメル質によって保護されている。このエナメル質の主成分は、ハイドロキシアパタイト ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) の結晶である。初期う蝕では、酸をつくる細菌がエナメル質にミクロレベルの損傷を与え、通常の修復材料をつめるだけでは治すことができない深さ 50 μm 以下のう窩が形成される。このような修復材料は化学組成や結晶構造がエナメル質と異なるため、エナメル質に完全に接着させることができないからだ。

今回我々は、化学的にも構造的にも天然のエナメル質にそっくりな改質ハイドロキシアパタイトの白い結晶のペーストをつくり、下顎小白歯の初期う蝕の治療に使った（方法は補足資料参照）。

う蝕部位は 15 分以内に塞がった。透過型電子顕微鏡 (TEM) で修復された部位の微小構造を調べたところ、再成長した層とエナメル質領域の境界部に明白な構造的間隙は見られなかった（図 1a）。再成長層には細長い結晶（長さ 100～400 nm、幅 20～80 nm）ができており、それらの結晶は境界部を横切って伸びていて、規則正しく歯の表面の方向を向いていた。これはペーストが歯のエナメル質と完全に一体化したことを示している。

成長した結晶を TEM により原子分解能で観察したところ（図 1b）、この結晶は 2 つの格子周期をもち、それ

ぞれがハイドロキシアパタイト結晶の *c* および *a* 方向の格子間距離と一致していることがわかった（それぞれ 0.688 nm と 0.817 nm）。これらの結果と、X 線光電子分光分析の結果（ここではデータは示されていない）とを合わせたところ、再成長した層のハイドロキシアパタイト結晶は、(0001) 面が歯の表面と平行になるように配列していると結論された⁷。再成長層にはフッ素イオンが約 1 原子%含まれており、カルシウム対リン酸のモル比は 1.58 ± 0.03 である。また、耐久性も高く、酸耐性である（補足資料参照）。

比較のために、我々は同様の罹患部をリン酸酸性フッ素溶液で修復し、修復部を TEM で観察した（図 1c）。この溶液も、健康な歯のエナメル質を削り取ることなく初期う蝕を治療できる材料だと考えられている。顕微鏡画像から、不均一な厚み（1 μm 未満）のフッ化カルシウム層^{8,9}がエナメル質を覆っており、境界部には明瞭な間隙が見られることがわかった。（図 1c、点線部分）。

タイムラプス原子間力顕微鏡による観察で、もとのエナメル質のハイドロキシアパタイト結晶（図 1d）は治療の初期段階でまず軽度溶解するが、ペーストが結晶の供給源となり、すぐに再成長が始まることが示された。この溶解と再成長は、母液とペーストが強酸性（ $\text{pH} < 2$ ）であるために起こる。この過程で、結晶のエピタキシャルな成長によりエナメル質から再成長層へと伸びる連続的なナノメートルスケールの構造ができあがる。

3 分後には、新しく成長したハイドロキシアパタイト結晶が緊密に配列した状態で全面を覆い（図 1e）、15 分後には 3 次元的に積み重なった（図 1f）。おそらく酸性の条件によってリン酸カルシウムクラスターがカルシウムイオンとリン酸イオンに解離するために、非常に結晶性の高いハイドロキシアパタイトの急速な成長が起こると考えられる^{10,11}。酸性条件でない場合、クラスターは

歯を削らなくても初期虫歯をなおすことができる？

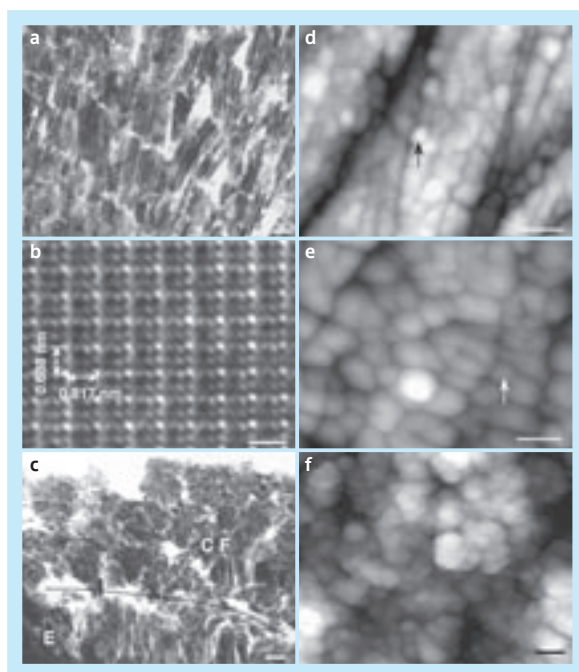


図 1 人工エナメル質ペーストを使った初期う蝕の治療。a～cは歯の修復部位の透過型電子顕微鏡画像で、d～fは原子分解能顕微鏡画像。a、再成長層（上部）とエナメル質（下部）の境界部。矢印は歯の表面の方向を示す。b、人工エナメル質の成長した結晶の原子画像。c、リン酸酸性フッ素で処置した歯。点線はフッ化カルシウム層（CF）とエナメル質（E）の境界を示す。d、もともとのエナメル質表面。矢印はハイドロキシアパタイト。e、修復して3分後の表面。矢印は新たに成長したハイドロキシアパタイト結晶。f、修復完了後（15分後）の表面。縮尺バーの長さは、a、c、fが100 nm、bが1 nm、d、eが50 nm。

その成長速度が遅くなり、結晶性を低くしてしまう。

本論文では、我々が開発した人工エナメル質によって、あらかじめ歯を削る必要なくエナメル質を再建できることを示した。この方法を使うと、初期う蝕を修復できるだけでなく、天然エナメル質を強化することでう蝕の再発も予防できる。（同様の有害な性質をもつ材料がすでに歯科治療に使われているものの¹²⁾ペーストは酸性で高濃度の過酸化水素を含むために歯肉の炎症を引き起こす場合があり、臨床現場ではペーストと歯肉が接触しないよう気をつけなければならない。

Kazue Yamagishi*, **Kazuo Onuma†**, **Takashi Suzuki‡**, **Fumio Okada‡**, **Junji Tagami§**, **Masayuki Otsuki§**, **Pisolsenawangse§**
*FAP Dental Institute, 3-2-1, Kakinokizaka, 502 Meguro-ku, Tokyo 152-0022, Japan; e-mail: FZT02705@nifty.com

† National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Institute for Human Science and Biomedical Engineering, Central 6, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8566, Japan

‡ Department of Applied Chemistry and Biotechnology, Faculty of Engineering, Yamanashi University, 43-11, Takeda, Kofu, Yamanashi 400-8511, Japan

§Department of Restorative Science, Graduate School, Tokyo Medical and Dental University, 5-45, Yushima 1-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8549, Japan

1. Raskin, A., Michotte-Theall, B., Vreven, J. & Wilson, N. H. F. *J. Dent.* **27**, 13–19 (1999).
2. Wilson, N. H. F. & Mjor, I. A. *J. Dent.* **28**, 15–21 (2000).
3. Carvalho, R. M., Pereira, J. C., Yoshiyama, M. & Pashley, D. H. *Oper. Dent.* **21**, 17–24 (1996).
4. Hilton, T. J. *Am. J. Dent.* **15**, 198–210 (2002).
5. Frank, R. M. & Brendel, A. *Archs Oral Biol.* **11**, 883–912 (1966).
6. Johnson, N. W. *Caries Res.* **1**, 356–369 (1967).
7. Elliot, J. C. (ed) *Structure and Chemistry of the Apatites and Other Calcium Orthophosphates* (Elsevier, Amsterdam, 1994).
8. Gerould, H. *J. Dent. Res.* **24**, 223–233 (1945).
9. Duschner, H., Gotz, H. & Ogaard, B. *Eur. J. Oral Sci.* **105**, 466–472 (1997).
10. Onuma, K. & Ito, A. *Chem. Mater.* **10**, 3346–3351 (1998).
11. Banfield, J. F., Welch, S. A., Zhang, H., Ebert, T. T. & Penn, R. L. *Science* **289**, 751–754 (2000).
12. Yamagishi, K. & Suzuki, T. *J. Esthetic Dent.* **7**, 78–80 (1995).

補足資料がネイチャーのウェブサイト内、本論文のページに掲載されています。

本論文への金銭的な利害関係：なしとの報告

月や太陽の引力が作り出す地球潮汐と地震の発生との関連を調べ、将来的な地震予知を目指す

田中佐千子

独立行政法人防災科学技術研究所固体地球研究部門

日本学術振興会特別研究員

「地震が新月のときに起こる」「潮が引いたときに地震が起こりやすい」……。昔から地震の発生と月との関係は語られてきたが、真実は明らかになってこなかった。今、科学の時代にその神秘の扉が少しずつ開き始めている。

月と太陽の引力は約 12 時間周期で海水の干満を引き起こすが、それだけでなく、地球そのものにも潮汐を起こしている。天体の引力によって地球もゆがむのだ。地球にかかる力は数 10 ～数 100 ヘクトパスカルで、高さに換算した場合、20 cm 程度の変位といわれているが、これはもちろん人間が体で感じたり、目で見えることはできない。

独立行政法人防災科学技術研究所固体地球研究部門に所属する日本学術振興会特別研究員、田中佐千子氏は、この地球潮汐が地震の引き金になる可能性が高いことを報告している。

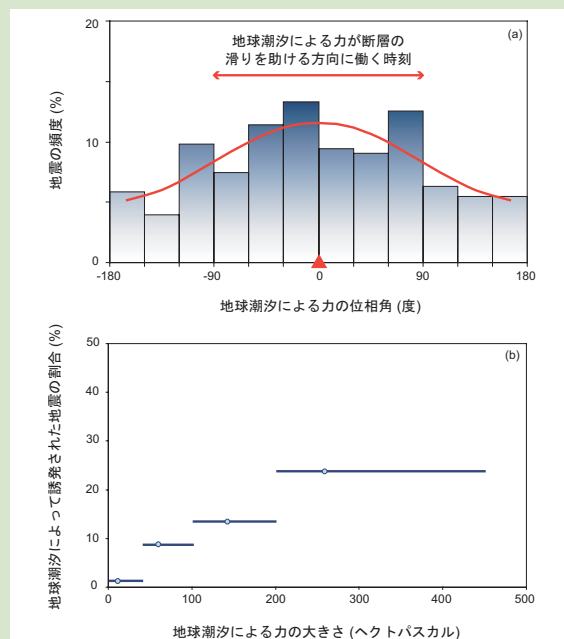
データ解析の対象は、1977 年から 2000 年までに深さ 40 km 以浅で起こった、マグニチュード 5.5 以上の逆断層型地震 2,027 個。逆断層型地震は、断層を両側から押す力によって断層の上の面がずり上がるタイプの地震で、主に海洋プレートが陸側のプレートの先端部を引きずりながら沈み込み、ゆがみによるエネルギーがたまって陸側のプレート先端部が跳ね上がる時に起こる。昨年 12 月 26 日に発生したスマトラ島沖を震源とするインド洋地震や将来発生が予想されている東海地震や南海地震もこのタイプだ。

これらの地震のうち、断層がすべった方向に 40 ヘクトパスカル（大気圧の約 25 分の 1）以上の地球潮汐の力がかかった 255 の地震について分析すると、約 7 割が地球潮汐のピーク（力の位相角 0 度）の前後 6 時間（力の位相角 -90 度～90 度）以内に起こっていた（図上）。

さらに、カリフォルニア大学ロサンゼルス校で田中氏のデータを断層にかかった地球潮汐の力の大きさ別に分析した結果、力が大きいかほど相関が高いことも明らかになった（図下）。

「地球潮汐はいつも断層をさまざまな方向に小さく揺り動かしている。40 ヘクトパスカルの力は地震を起こす力の 1,000 分の 1 程度にすぎないが、断層にたまっているひずみのエネルギーがある限界に達したときに地球潮汐が最後のひと押しをするようだ」と田中氏は言う。

田中氏は高知県出身で「子どものころから南海地震が起こるかもしれないと聞かされていて、興味を持った。とくに地震の始まりが知りたかった」と話す。そこで地球物理学が学べる東北大学に進学し、先輩らの研究を引き継ぐ形で地球潮汐の影響を調べてきた。



(a) 地球潮汐と地震発生時刻の関係。地球潮汐による力が断層の滑りを助ける方向に最も強く働く時刻（▲）前後に地震は多発する傾向が見られる（曲線は傾向をならしたものを）。(b) 地球潮汐による力の大きさと誘発された地震の割合の関係。力の大きさが大きいほど多くの地震が誘発されている。

「1970 年代から地震の発生は月や太陽の引力だけでは相関がなく、海水の干満による力も考慮すべきだといわれてきたが、それを計算することができなかった。今では人工衛星によって世界中の海の干満を正確に予測することができるため、そのデータを入力して、複雑な計算を行えるようになった」と田中氏。

厳密に評価すると、たしかに月の引力は地震と関係しているのだ。「月齢との関係についてよく質問を受けるが、月齢との対応関係は必ずしも明らかでない。そのうち月齢もデータに入れられればと思っている」と笑う。

現在は日本のデータを精査したり、相関関係の時間的な変化を見たりする研究を行っている。

「インド洋地震をはじめ、大地震が起こった場所では周囲でも地震が散発していることが多い。地球潮汐との相関を時間的・空間的に分析すると、大地震の前から周囲にも限界近くまでエネルギーがたまっていることを示唆するデータが出ている。ある地域で地球潮汐と地震の相関のデータを取り続け、相関が強くなったなら、大地震が起こると予測できるかもしれない」と田中氏。

今、地震学は予知よりも起こったときの被害を最小限にする研究にシフトしていると感じている。「地震予知の研究に対する認識は一般の人と研究者の間ではギャップが大きい。地震は長いスパンで見ることが必要があり、100 年 200 年と基礎的なデータを取って、分析を積み重ねていかなければならない」と話す。

中国にも地球潮汐をモニターして地震予知を研究しているグループがあり、また世界には地震を引き起こすひずみ場を研究しているグループもあるという。田中氏は「一見バラバラに起こっているような現象も、協力しながら系統的に分析するとある法則が見えるのではないかと考えている。地球潮汐を軸に新しいアプローチにもいづれ挑戦したい」と抱負を語っている。

小島あゆみ / サイエンスライター