ISSN 1348-8449

nature

www.naturejpn.com

月刊ダイジェスト

日本語編集版
vol.01, no.02 | February 2004

音楽と化学：パイプオルガンの音色が消える

古代エジプトの墓で
ライオンのミイラを発見

米国ビザ審査の高すぎるカベ

医学研究は人類を滅ぼす？

赤い惑星の壮大な展望

Sponsored by
Agilent Technologies

nature
月刊ダイジェスト
vol. 1, no. 2
2 月号 目次
February 2004
www.naturejpn.com

editorial
2 赤い惑星の壮大な展望

news feature
3 音楽と化学：パイプオルガンの音色が消える
Tom Clarke
5 米国ビザ審査の高すぎる壁
Geoff Brumfiel, David Cyranoski, Carina Dennis, Jim Giles, Hannah Hoag, Quirin Schiermeier

books and arts
9 医学研究は人類を滅ぼすのか
Reviewed by Arthur Caplan

concepts
10 生きている地球
James Lovelock

news and views
13 どちらを向いても水ばかり?
Philip Ball
14 出番をうかがう流行病予備軍
Jim Bull and Dan Dykhuizen

brief communications
16 ライオンのミイラを発見
Cécile Callou, Anaïck Samzun, Alain Zivie

表紙写真 © Carl Johan Bergsten

Publisher: Antoine E. Bocquet
Editor: Keiko Kandachi
Production: Junko Tsuda/Takesh Murakami
Advertising Sales: Rinoko Asami
Marketing: Martin Paine

ネイチャー・ジャパン株式会社
〒 162-0841
東京都新宿区払方町 19-1
エムジー市ヶ谷ビル 5 階
Tel. 03-3267-8751
Fax. 03-3267-8746

© 2004年 ネイチャー・ジャパン
掲載記事の無断転載を禁じます。

cover stories

（ページ数は当該号の数です）

18/25 December 2003 Vol. 426/Issue no.6968
このところ火星が話題になっている。ESA（ヨーロッパ宇宙機関）のマーズ・エクスプレスは間もなく火星の周回軌道に乗り、クリスマスイブ（米国時間）には着陸機ビーグル2を放出。2004年1月にはNASAの探査機スピリットとオポチュニティーがその後に続いた。太陽系のあらゆる惑星のうちで、火星の気候は地球に最もよく似ており、どちらの気候も軌道パラメーターの小さな変化に敏感である。そのため、最近形成された峡谷、地下の氷および雪原らしきものが火星で発見されたことは、地球や惑星を対象とする地質学研究者の興味をそそってきた。探査機オデッセイやマーズ・グローバル・サーベイヤーから得られた新しいデータから、火星が過去に氷で覆われていた証拠が増えてきている。210万年から40万年前の氷河期に形成された堆積物は、地球でいうなら米国南部やサウジアラビアにあたる緯度の地域が氷に覆われていたことを示している。表紙の画像は、ブラウン大学のP Neivertにより提供されたもので、氷河期さなかの火星の様子を示す想像図。［Article, p. 797; News and Views, p. 779］

1 January 2004 Vol.427/Issue no.6969
分泌タンパク質の細菌細胞膜を通過する輸送、あるいは真核生物の小胞体膜を通過する輸送には、SecY 複合体（細菌および古細菌の場合）またはSec61複合体（真核生物の場合）から作られているタンパク質透過チャネルが関与している。今回、メタン生成好熱古細菌である*Methanococcus jannaschii*のSecY複合体の結晶構造が分解能3.2Åで決定された。その構造（表紙）からすると、複合体の1つだけが移行用チャネルとして機能していると考えられる。チャネルは短いヘリックスによって栓をされているが、開口時は「砂時計」のような形となり、狭まった部分を疎水性残基が環状に取り囲んでいる。この環は、移行中のタンパク質の周りをしっかり取り囲んで、他の分子が膜を透過するのを防いでいるのかもしれない。［Article, p.36, News and Views, p.24］

8 January 2004 Vol.427/Issue no.6970
動植物種の多くはどうやら気候変動を生き抜いていけそうもない。新しい解析研究によると、2050年までに予想される気候変動の結果、調査対象とした陸生動植物1,103種のうち15～37%が最終的には絶滅してしまうだろうという。これらの生物種の一部にとっては生きるのに適した場所がどこにもなくなり、また生物種によっては生息に適した気候の地域にどうやっても到達できそうもない。温室効果ガスを産生しない技術へと迅速に移行し、かつ炭素隔離策をとることで、15～20%の種を絶滅から救うことができるかもしれない。表紙は絶滅しかかっているトカゲの一種Boyd's forest dragon（*Hypsilurus boydii*）で、オーストラリアのクィーンズランドで見られる。気候温暖化が最大となるシナリオに従えば、その分布域のおよそ90%は2050年までに生息に適さない気候になる（写真：Stephen E Williams）。［letters, p. 145; news and views, p.107］

15 January 2004 Vol.427/Issue no.6971
素早く動くテニスボールを打つのは複雑な課題である。ボールを追いかけることは難しく、視覚はボールが跳ね返ってくる場所についての完全な情報はもたらしてくれない。視覚入力に基づいて、跳ね返ってくる確率の高い場所がどこかを推定することはできるだろう（表紙赤色の領域）。理論的には、より長い時間スケールにおける情報、つまり全ての場所についてボールが返ってくる確率が先験的に等しいわけではないという情報を使って、この推定をさらに改善することができる。試合進行の間には、ボールが返ってきそうな場所に関しての事前確率分布ができてくると考えられる（緑の領域）。ベイズ理論によると、もっとも確率が高いと推定される場所（等高線で表した領域）は、この事前分布と視覚による推定とを組み合わせることによって得られる。このテニスの課題を抽象化したものを用いて、KördingとWolpertは、被験者が事前確率分布を習得し、ベイズ予測と同じ方法で視覚情報と統合できることを示している。［Letters, p. 244］

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

赤い惑星の壮大な展望

NASAの火星探査車スピリットからの写真に有頂天になったり、沈黙したままの英国のビーグル2号に絶望したりするのはやめよう。それぞれの計画の成功した点、失敗した点を丹念に検討し、それを踏まえて計画を立てることが火星探査の最善の道である。

原文：*The red planet's big picture*
Nature Vol.427(87)/8 January 2004; www.naturejpn.com/digest

2機の探査機は無事に火星に到着。もう1つは火星へ向けて航行中で（訳注：本稿の原文発表後にすでに到着した）、明らかに失敗したのは1つしかない。宇宙科学者はラッキーといっていいだろう。宇宙船の難破で悪名高い火星が、今回は今までよりも愛想良く迎えてくれているのだから。

火星に降り立ったNASAのスピリットから送信された写真は、すっかりおなじみになった。それが実は珍しい代物などとはウソのようだ。なにしろ、今まで火星の表面に無事に到達できた着陸機はわずか3台に過ぎない。1976年のバイキングの2台と1997年のマーズ・パスファインダーの小型探査車で、この探査車は技術の実験台の域を出なかった。

スピリットおよび同型の探査機でまもなく到着予定のオポチュニティーによって、探査のレベルは一段上がるだろう（本誌2004年1月8日号p.89参照）。カメラも測定計器類も、バイキングの着陸機のものより数世代進歩している。地質学者の野外調査のように、おもしろい岩の周辺を動き回ることもできる。さらには、欧州のマーズ・エクスプレスが火星周回軌道のNASAのマーズ・グローバル・サーベイヤーとマーズ・オデッセイに加わり、火星探査は新たにより高度な段階に入ろうとしている。

スピリットの着陸後、今回の探査車を製作したジェット推進研究所所長（カリフォルニア州パサデナ）のCharles Elachiは、数年前に今回の探査計画に大きな力添えをしたカリフォルニア州選出の有力な下院議員と、ホワイトハウスの予算担当だった人物に強く感謝の意を表した。それも当然で、大幅な予算増がなければ、2機の探査機を失った1999年の失敗を繰り返すことになったかもしれない。

今回の新しい探査車にかかった費用は総額8億2000万ドルで、1999年の探査計画の2倍以上である。今回の探査車は、性能の優れた科学計器を搭載しているだけでなく、ほかにも信頼性の向上につながる技術を備えている。少なくとも何らかの失敗が起こったときに、より多くの情報が得られるようになっている。スピリットは火星への着地の際にも無線連絡をとり、そのため地球の管制センターから、パラシュートの放出といった重要な動作を観察することができた。

本誌も報じたとおり、今回の火星探査機軍団の中で唯一行方不明となったビーグル2号は、母船であるマーズ・エクスプレスを離れてから火星表面に着地する間に、交信ができなくなった。わずか6000万ドルという乏しい予算の中で打ち上げにまでこぎつけただけでも、高い評価に値する。だが、英国のビーグル担当の責任者たちは、予算を節約しすぎたのでなければよいがと思っているだろう。マーズ・エクスプレスがビーグルからの信号を今後もとらえられないとすると、何がまずかったのか、確かなところは決してわからないかもしれない。ビーグルのパラシュートかエアバッグに深刻な不具合があったのか。あるいは、まずい位置にクレーターの縁があったために、順調に作動するビーグルからの信号がさえぎられたのか。こういったことがわからなければ、危険なビーグル3号計画への資金投下を正当化することは難しい。

これとは逆に、NASAでは探査計画は常に向上を続け、火星探査計画の全体として成果が出てきている。NASAの2機の軌道周回機は、スピリットの着陸地点の偵察に、また着陸時の地球との交信にも重要な役割を果たした。またNASAは、生命の探索にすぐさま取りかかるのではなく、過去の水の痕跡を探すことによって地質学的基礎を固めるという、入念で気の長い科学計画を立てている。

ESA（ヨーロッパ宇宙機関）も長期的な視点に立っているようだ。マーズ・エクスプレスは、非常に貴重な2種類のデータを収集するはずである。一つは火星全体の中解像度の画像データ、もう一つは地下の水と氷の状況を示すデータだ。これらは、今後より詳しい研究のために役に立つだろう。ビーグル2号の方にメディアの関心は集まっているが、マーズ・エクスプレスは欧州の惑星科学にとってまさに一里塚と言える。

惑星探査に費やす適正額はどのくらいだろうか。これは相変わらずの難問だが、今回の成功を踏まえて、ESAやNASAはより確信をもってその答えを出せるようになっている。ほかの惑星に信頼性のある探査をするためにかかる費用についても、より正確な見積もりができつつある。

とにかく、大西洋の両側の科学者と管制チームにお祝いを言いたい。火星に再び到達できたことは素晴らしい。■

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

音楽と化学：パイプオルガンの音色が消える

ヨーロッパ大陸のあちこちで、長い歴史を持つ楽器が音色を失いつつある。新種のなぞめいた腐食現象がその原因だ。音楽的文化遺産を守るために奮闘している、化学の世界の探偵たちにTom Clarkeが話を聞いた。

原文：*Organ failure*
Nature Vol.427(8)/1 January 2004; www.naturejpn.com/digest

「シュテルヴァーゲン」（Stellwagen）と呼ばれるパイプオルガンの澄んだ音は、1467年以来、ドイツの古都リューベックにある聖ヤコブ教会に響きわたっている。このパイプオルガンは、17世紀にそれを修理した偉大なパイプオルガン製作者 Friedrich Stellwagenにちなんで名づけられた。パイプオルガン・マニアの間では、シュテルヴァーゲンはルネサンス期とバロック初期の音楽を演奏するには世界で最高レベルにあると考えられている。しかし、1992年、このオルガンのもっとも大きなパイプから音が出なくなり始めた。詳細な調査を行ったところ、原因が判明した。金属パイプにできた小さな穴から空気が漏れていたのだ。

この有名なパイプオルガンが大変な状況にあるということは、ヨーロッパのパイプオルガン製作者、演奏家、マニアという狭い世界であっという間に広がった。そして、これはシュテルヴァーゲンだけではないことが明らかになった。15世紀から17世紀にかけて作られた、ベルギー、フランス、イタリア、オランダ、ポルトガルの教会の多くのオルガンのパイプも、同じように腐食している。フランスのボルドーにある大聖堂のオルガンのパイプは、それ自体の重みで崩壊する危険さえある。

綿密な実験：パイプオルガンから採取された鉛の試料はさまざまな大気状態のもとで腐食の度合いをテストされている。

古いパイプオルガンのパイプは鉛でできており、鉛は腐食することが知られている。しかし、リューベックのシュテルヴァーゲンや、同じように腐食が見つかったオルガンにみられた症状（パイプの内側に白いチョークの粉のような残留物が突然現れ、やがては外側まで穴が貫通する）は、これまでにはなかった。スウェーデンのイェーテボリ大学オルガンアートセンターの研究技師 Carl Johan Bergstenは「これまでにない、新しい現象だと考えざるをえない」と話す。Bergstenは、パイプオルガンは音楽と科学技術の両方の世界の象徴のようなものだと考えている。「パイプオルガンは、その時代の技術の粋を集めたもの。17世紀でいうパイプオルガンは、現在のパソコンのようなものだ」と彼は言う。

鉛を追って

Bergstenは昨年、この問題の原因と程度を確かめるために、冶金学者、化学者、パイプオルガン製作者、音楽史家からなる調査チームを作った。チームはまだできて間もないが、実験室と現場での実験から腐食の原因についての手がかりをつかみはじめた。しかも、その原因とは、貴重な楽器を修復するために、よかれと思ってしたことの副作用かもしれないことが分かってきたのである。

Bergstenが率いる「ヨーロッパにおけるオルガンパイプの鉛および鉛・スズ合金腐食プロジェクト」（頭文字はCOLLAPSE。EUが資金を出している）は、パイプオルガン製作者、修復専門家、奏者らに、腐食したオルガンについての詳細を知らせるよう依頼している。おか »

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

PARISH OF ST JAKOBI

パイプに穴が！　ドイツのリューベックにある聖ヤコブ教会のパイプオルガン「シュテルヴァーゲン」は腐食のために音が出なくなりつつある。

空気にさらされて：上記のパイプオルガンのパイプ。ヨーロッパのパイプオルガンの鉛製パイプの多くは腐食しつつある。

げで2003年12月には、ブリュッセルの王立音楽学校のオルガンに鉛腐食が発生したことが分かり、学校側がBergstenに連絡してきた。

腐食がどの地域に広がっているかがわかれば、原因の究明に役立つだろう。だがプロジェクトを突き動かしている中心的な活動は、現場と実験室での一連の実験である。Bergstenのチームはすでに、イタリア、ドイツ、オランダから腐食したパイプオルガンを7つ選び、これらと同じ地域の同じような教会にある、似たタイプだが腐食のないパイプオルガンとそれぞれ一組にした。そして、これらの教会に温度と湿度の記録装置を取り付けた。また、オルガンのパイプから腐食した金属と腐食していない金属の試料を採取し、スウェーデン・イェーテボリにあるチャーマーズ工科大学の環境無機化学者Jan-Erik Svenssonの実験室で分析を行った。

腐食の原因と考えられることは、山ほどあった。最も大きな原因の一つと思われたのは、セントラルヒーティングだった。セントラルヒーティングは、温度と湿度を上げるだけでなく、金属を腐食させることがある一酸化炭素も出す。しかし、Svenssonが分析したところ、別の原因も浮かび上がってきた。「私たちは、すぐに高濃度の有機酸を見つけた」と彼は説明する。白い粉末状の残留物は、有機酸腐食が起こっていることを示す、ヒドロキシ炭酸鉛とヒドロキシ酢酸鉛であることが分かった。腐食したパイプの内側から試料を取って分析すると、すぐに有機酸腐食の原因が見つかった。パイプを吹き抜ける空気に含まれる高濃度の酢酸だった。

実験室ではさらに分析を行い、関連が考えられる別の腐食性物質も調べた。二酸化硫黄、酸化窒素、オゾンなどのよくある大気汚染物質は、パイプのサンプルにほとんど損傷を与えていなかった。だが酢酸は、オルガンのパイプを通る空気中に含まれるのと同程度の濃度で強い腐食性を示した。「現場での分析結果と実験室で得られた分析結果が、これほどよく一致したのは初めてだ」とSvenssonは話す。

さらなる調査によって、酸の放出源の候補が分かった。新しいナラ材は高濃度の酢酸を放出するのだ。パイプオルガンを修復するときは、送風機と風箱（パイプへ高圧の空気を送る箱）の中のナラ材の部品を作り直すことが多い。腐食が起こっているパイプオルガンの多くは、近年になって修復されたものだった。例えば、リューベックのシュテルヴァーゲンが分解修理されたのは1970年代である。

だが、木製部品を数回取り換えているのに腐食が起きていない古いオルガンもたくさんある。なぜ、近年になって初めてこの問題が発生してきたのだろうか。これについては、セントラルヒーティングがあやしいと感じている、熱心なファンの勘が当たっているかもしれない。Svenssonは、湿度と温度の測定結果を待ちかまえている。教会の気温が高いと新しい木材から多量の酢酸が出るのかもしれない、と彼はみている。

COLLAPSEの研究で得られたもうひとつ

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

の手がかりは、腐食が起こったパイプオルガンはすべて「北ドイツ風」に作られており、鉛パイプに含まれるスズの割合が小さい、ということだ。鉛はまず、砂の上で薄板状に鋳造される。その際、パイプを硬くして光沢を増すためにスズが加えられる。しかし、現在腐食が起きているパイプオルガンの多くが作られたとき、スズは不足していて高価だった。このため、合金に加えられるスズの量は少なかった。

イタリアのボローニャ大学の冶金学者Carla Martiniらは、腐食が起こったパイプの組成を原子吸光分析と蛍光X線分光で調べている。この結果、1.5%から2%のスズを含むパイプでのみ腐食が起こるらしいことが分かった。「こうした微量のスズは腐食に大きく影響するらしい」とMartiniはみる。

スズがカギ

英国のほとんどのパイプオルガンは腐食する恐れがないようだ。スズの含有量が少ないパイプにのみ腐食が起こるという研究結果は、英国で腐食が起こらないことの説明となるかもしれない。「専門家としての立場から、この30年で2例しか見たことがない」と言うのは、ロンドンを拠点とするコンサルタントのJohn Norman。パイプオルガンの保存について、英国国教会の関係団体「教会保存トラスト」に助言している人物だ。腐食したパイプが作られたとき、ヨーロッパのスズの主たる供給源は英国のコーンウォールだった。このため、スズは英国ではヨーロッパ大陸よりもずっと安かった。英国のパイプオルガンのパイプは最大20%のスズを含んでいる。

なぜ、スズが少ないパイプでだけ腐食が起こるのかはナゾのままだ。スズそのものが原因ではない、とMartiniは言う。スズ含有量が少ないパイプは、銅、アンチモン、ビスマスなどの不純物も多く含むことが、光学顕微鏡と電子顕微鏡を使ったMartiniの分析で明らかになってきた。こうした不純物は、パイプの微細構造(空気の入った空間と不純物で隔てられた、結晶様の金属断片の大きさと配置)に影響する。不純物がどのように腐食を促進するのかを理解することは、このナゾへの手がかりになりそうだとMartiniは考えている。だが何百年もたってしまった後に、パイプの組成が時間とともにどう変化したのかを知るのは難しい。「私たちが決して理解できないであろうことはたくさんある。どうしたって、時間の経過にはかなわない」とMartiniは話す。

パイプオルガン音楽の愛好家としては、あまりに遅くなりすぎる前に、COLLAPSEプロジェクトが腐食への対処方法を発見してくれるよう願うのみだ。Bergstenらは、パイプを化学的に処理して腐食反応を防ぐ方法の開発を目指している。もっと長期的な目標としては、パイプの組成と製造法が、そのすばらしい音色とどのように関係しているのかを解明したいと考えている。それが達成できれば、パイプオルガン特有の音色を損なわずに、ひどく腐食したパイプを新しいパイプに交換できるかもしれない。

パイプオルガンのマニアは、プロジェクトの速い進展を期待するしかない。聖ヤコブ教会のLutz Jedeck牧師によると、リューベックのシュテルヴァーゲンはまだ演奏可能だという。「パイプオルガンの荘厳で独特の音色のおかげで、礼拝は常に新鮮な雰囲気を醸し出している。だが、穴はどんどん大きくなっているのだ」とJedeck牧師は嘆いている。■

Tom Clarkeは最近までネイチャーのオンラインニュースチームに所属していた。彼は現在、ロンドンでチャンネル4ニュースの科学リポーターを務めている。

米国ビザ審査の高すぎる壁

「テロとの戦い」で強化された入国管理は、米国への外国人研究者の流入を制限しつつある。一方、他の国々は、才能豊かな人材を確保すべく動き出している。これは科学力のバランスを崩すことにつながるのだろうか。

原文：*As one door closes...* *Nature* Vol.427(190)/15 January 2004; www.naturejpn.com/digest

Zhang(仮名)は、ウィスコンシン大学マジソン校化学科・大学院5年目の学生。勤勉で仲間から人気があり、卒業後に科学者として羽ばたく矢先のことだった。2002年に故郷の中国に一時帰国したことで、将来に暗雲が立ちこめてきた。Zhangは事態の悪化を非常に恐れて、本稿に実名を出さないという条件でインタビューに応じてくれた。

本誌では中国人科学者に取材する際に、微妙な問題についてのコメントは匿名にしてほしい頼まれるのは、よくあることだ。だがZhangが心配しているのは中国政府の動向ではなく、領事館員やFBI捜査官など米国の政府関係者。自分が米国の科学分野を支える貴重な人材としてではなく、潜在的なテロリストとみなされることを恐れているのだ。

Zhangの悪夢は、マジソンを発って旧正月を家族や友人たちと過ごすために一時帰国した2002年の1月に始まった。前年の9月に起きた同時多発テロのあおりを受けて、入国管理が厳しくなっていることは承知していた。そこでZhangは、米国に戻ってくる際に遭遇しそうな問題を回避するために大学事務局に助言を求めた。そして在学証明書、履修科目の詳細を記載した書類、学部長のレター、在留資格を確認する政府発行の文書を携えて帰郷。いずれも学生ビザの更新に役立つと思われたからだ。「よかれと思ったことは、すべてやった」とZhangは語っている。

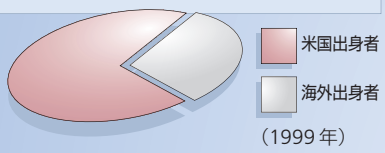
ところが、帰国前に近くの米国領事館へ面接を受けに行ったところ、待機を命じられた。Zhangの研究テーマが、領事館に配布されていたテロリストが関心を寄せる可能性のある技術の「警戒リスト」の項目に掲載されていたからだ。つまり、Zhangの申請書類はFBIや国務省を始めとする複数の政府機関のセキュリティ審査を受けなければならなかったのだ。

待機期間は数日から数週間に延び、そして数カ月たっても申請処理に関する進展の知ら

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

外交問題―外国人と米国の科学

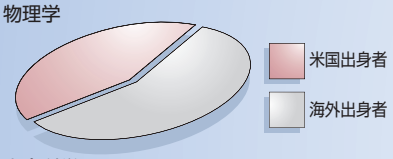
米国で職をもつ博士号研究者



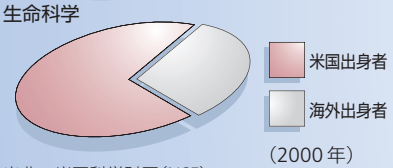
（1999年）

米国で新規に博士号を得た者

物理学



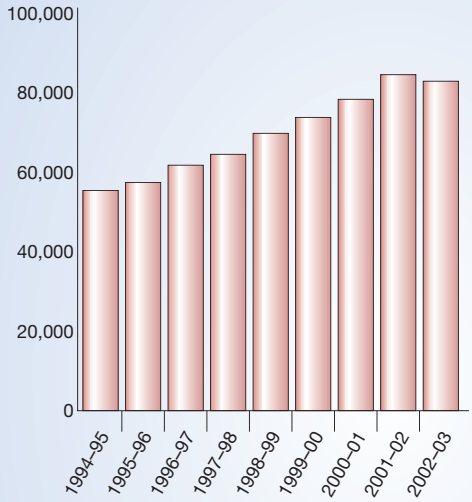
生命科学



（2000年）

出典：米国科学財団（NSF）

米国を1年間に訪れる客員研究員の総数



出典：米国国際教育協会（IIE）

科学または工学分野の博士号をもつ海外出身の米国在住者

出身国	人数
中国	37,900
インド	30,100
英国	13,100
台湾	10,900
カナダ	8,400
ドイツ	7,200
イラン	4,800
旧ソ連	4,600
韓国	4,500
フィリピン	3,400
ポーランド	3,200
日本	2,800
アルゼンチン	2,700
その他外国人	58,400

出典：米国科学財団（NSF）

せはなかった。生活費を稼がなければならなかったZhangは、船会社の事務所で働きはじめた。その同僚た帰を待た進めるこいつ米国からなかっソンにある家賃も払いになった。

「米国に大学院留学を考えていた学生は二の足を踏んでいる」
（中国人学生）

の間、研究室ちは彼の復ずに研究をとになった。に戻れるかわたので、マジアパートの続けるハメ結局ビザが取得できたのは2002年9月。博士課程の研究には完全に後れをとってしまっていた。「大学院を卒業する計画はすべて延期になった」とZhangは言う。

こんな目に遭ったのは、彼だけではない。「大問題がいくつも起きている」と語るのは、ウィスコンシン大学の化学科を統括するJohn Wright。米国への入国審査で尋問を受けた学生やポスドク（訳注：博士課程修了後の若手研究者）の大部分は最終的に入国を許可されている。だがWrightは、新しい入国管理規則が将来の応募者に二の足を踏ませることになり、現在世界一と評されている自分の学科の弱体化につながるといらだちを隠さない。「このままでは研究の質が低下してしまう」とWrightは言う。

Wrightと同じ意見をもつ米国の研究者や大学関係者は多い。米国は移民の国であり、国内の研究施設ほどそれを如実に物語る場所はない。外国からの多くの博士課程の学生、ポスドク、終身教員がいなくなれば、米国科学界の巨大さは、かなり見劣りするものとなるだろう（囲み記事の数値を参照）。さらに近年では、世界中の若くて優秀な研究者たちを引きつけるのが重要であることに他の国々が気づき、この市場で効率的に勝ち抜くべく態勢を整えつつある。

このため、テロリストの脅威に対峙する米国政府の過剰ともいえる反応は、国境を越える研究者の移動に根本的な変化を招いている。これは、科学力の世界的なバランスを変えることにつながるのだろうか。この問いに答えることは難しい。このような傾向を示す正確な数字を把握することはほとんど不可能だからだ。研究者たちは滞在の目的と期間に応じて、さまざまな種類のビザを携えて米国にやってくる。だが研究者は1年間に入国する全外国人のほんの一部なので、大きな減少があったとしても、ビザに関する全体的な統計には現れてこないと考えられる。諸外国のデータと比較することも困難だ。多くの国では、海外に赴く科学者を人文系や他の領域の研究者と分けていなかったり、学部学生をポスドク研究者と分けている国もあれば、まとめて扱う国もあるからだ。

「ビザ発給の遅れに取り組む上で大きな問題の一つは、報告された事例は多いが、データをとるのが難しいことだ」。こう語るのは、昨年9月まで3年間にわたりColin Powell国務長官の科学顧問を務めたNorman Neureiter。本誌の調査結果は、事例報告が多いというNeureiterの見解を裏づけている。私たち取材班はさまざまな立場の科学者から、米国への入国で問題を経験したという例を何十も聞いた。米国の入国審査を嫌ってオーストラリア、英国、カナダなどの国々で職を探している研究者にも出会った。

逆風に耐えて

私たちが入手した大まかなデータから、入国審査にまつわる問題はかなり広がっていることがわかる。さらに、この問題はとりわけ「ハードな」科学および工学のポスドク研究者にとって深刻なのだ。

昨年11月、学術交流を世界的に推進する国際教育者協会（本部ワシントンDC）は、米国の300以上の大学を調査した結果を発表した。ビザの問題で到着日が遅れた学生の数は、2003年には前年比48%増になっていた。若手のポスドク研究者が大半を占める「学者」という広いカテゴリーでは76%増。到着日が遅れた学生の75%以上が物理系、生物系、工学系の分野の学生だった。学者の場合では、大

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

幅な遅れを経験した人のうち、物理系、生物系、工学系の分野が占める割合は93%にものぼった。

他の調査でも、同じような嘆かわしい状況が明らかにされている。昨年7月の米国物理学会(ACP)の調査によれば、米国で2002年に物理学分野の博士号取得を目的とした研究をするために応募した外国人学生の約25%が、ビザの発給を当初拒否されていた。メリーランド州ベセスダにある米国立衛生研究所の5大研究所で働く外国人研究者数は、2003年に統計を取り始めてから9年間で初めて減少した。特に2002～2003年度における米国内の客員研究員の総数は、約10年間で初めて減少に転じた。

「ビザを取るのは至難の業だし米国はいやな国だと思われている」

—Victor Johnson

(国際教育者協会)

こうした統計上の変化は、米国の科学の将来における健全性に警鐘を鳴らすのに十分であると考える向きもある。「私たちは重大な岐路に立たされている。誰もがそう思っているのではないか」と米国物理学会(APS、メリーランド州カレッジパーク)の国際部長を務めるIrving Lerchは語っている。ビザ発給の遅れによって起きるであろう結果については議論の余地があるが、遅延の主な原因ははっきりしている。それは2001年9月11日の同時多発テロの後に導入された新しいセキュリティ対策にほかならない。

テロ直後に国務省は、悪用される恐れのある技術がテロリストや敵性国家に渡るのを防ぐために定めた「技術注意リスト(Technology Alert List)」の拡充に着手した。このリストは現在機密扱いだが、2002年8月に作成された版には約150の項目が列記されていた。この中には「微生物学」といった広いくくりの項目や、低エネルギーレーザーなどの一般的な実験装置が含まれている。このため、例えば感染症の研究に従事する者や、同リストに記載されている比較的害のない装置を使用する研究者でも、米国への入国申請書をFBIなど連邦政府の諸機関に回され、安全上の調査を行われる確率が高い。

冷たい仕打ち

中国人研究者は、米国を標的としたテロに関与していないにもかかわらず、新しい政策の影響をまともに受けている。例えば国際教育者協会の調査によれば、米国への入国が遅れた全留学生の30%以上が中国からの学生であった。この理由の一つは、そもそも米国で就労や教育を希望する外国人のうち中国人が最も多いからである。しかし米国の現政権は2001年のテロ攻撃以前から、中国に対して厳しい政策を進めていたと指摘する中国人研究者もいる。自分たちは標的にされ、ひどい扱いを受けていると、彼らは憤慨する。

「ビザのことが気がかりでは大規模な国際学会にも行けない。米国政府に対して抗議活動が起きると思う」

—Wendy White

(米国科学アカデミー)

一方、イランを始めとする中東の一部の国々の研究者にとっては、セキュリティ審査はほとんど乗り越えられない障壁となっている。米国政府はイランを「テロ支援国家」とみなしているので、イラン人研究者は複数の政府機関による審査を受けない限り入国できない。米国の科学界と長く関係を維持しているイランの政府高官でさえ、大きな会議には参加できない。「たくさん招待状をもらっているのに、不参加と返答しなければならない」と語るのは、物理学者でイラン科学研究技術省の副代表を務めるReza Mansouriだ。

他の国の科学者であれば、専門分野が国務省の警戒リストに記載されていても、徹底したセキュリティ審査を受ける必要はない。だが同リストの改訂版とともに2002年8月に書かれた覚え書きは、入国審査を難なく通過できると踏んでいた多くの研究者を立ち往生させてしまった。このメモには、「疑わしい場合」に領事館員は、申請書類を国務省の本部に送付せよと記載されている。審査に関与する領事館スタッフの多くは経験不足なので、疑わしい場合と処理してしまうことがあまりにも多い。この結果、未処理の書類の山が築かれ、対応の遅れは1年にも及ぶことになる。

このメモの問題はそれだけではない。国務省は、ワシントンに回送されてきた80%以上の事例が30日以内に処理されているという見解を示している。だが米国科学アカデミーの国際科学機関委員会の座長を務めるWendy Whiteは、この数字に異を唱える。「私たちが回答を得た科学者に関しては、平均待機期間は5カ月をはるかに超えている」

処理の遅れは、ほぼ全てのビザ申請者に対して領事館員による面接を受けることを求める新規則によって、昨年7月に悪化した。既に多くの研究者が米国大使館前で面接のために列をなしていたが、さらに長い列の中に自分がいることに突如として気づくことになった。ウィスコンシン大学化学科の助教授Thomas Brunoldが、昨年6月にスイスに一時帰国した際には、ビザ更新のための面接を受けるまでに3カ月間待たなければならなかった。「面接官には、自分が9人の研究者からなるグループを率いているのだと説明した」とBrunoldは言う。だが早期渡米の願いは聞き入れられず、結果として生じた遅れによって1カ月分の給与を棒に振ってしまった。

新たな入国審査基準にあたって多くの研究者が最も腹を立てているのは、その一貫性のなさだ。手続きが円滑に進む申請者もいれば、3カ月間待たされる者もいる。しかも、そうした事態について通常は何の説明もない。「入国審査の処理にはまったく透明性がない」と語るのは、ウクライナ人物理学者のOlexei Motrunich。彼は1994年から米国で研究をしているが、昨年7月に一時帰国したときに足止めを食らい、カリフォルニア大学サンタバーバラ校でのポスドクのポジションを得られずにいる。

「私はこれまで、家族や友人たちにアメリカがいかに優れた国であるか、そしてこの国では疎外感を感じないで済むのだと、繰り返し話してきた」とMotrunichは語る。「それが今では同じ相手に、米国で8年以上も研究を行ってきたのに、研究続行のためのビザ入手に手こずっている理由を説明しなければならない」

ナンバーワンからの転落?

一部の客員研究員には、入国審査の終了後も問題は残されている。デューク大学(ノースカロライナ州)の留学生課長を務めるCatheryn Cottenは、外国人にとって社会保障番号や運転免許証を始めとした、生活に不可欠な文書を取得するのがかつてなく困難になっていると言う。またMansouriによれば、米国の大学

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

でイラン人学生が襲われているという報道から、留学先を英国やオーストラリアにしようかと考えるイラン人学生は多い。

国際的な学術交換を促進する機関は、こうした動向に気をもんでいる。「ビザを取るのは至難の業だし、米国はいやな国だと思われている」と、国際教育者協会の公共政策部門の常務理事補佐 Victor Johnson は語る。

一方で当然ながら、米国入国に問題を抱える科学者集団を受け入れている他の国の研究者や大学関係者は、多くを語らないが状況の変化には満足している。オーストラリア、英国、カナダなどの国々では既に、米国のビザ発給制限が課される前から外国人学生の受け入れ数を増やしつつあったが、最近ではこの傾向に弾みがついている。

最も注目すべきなのは、米国以外の行き先を検討している学生と研究者の幅広さや質の高さだろう。「イラン人学生の質が飛び抜けてすばらしいということを複数の教授から聞いている」と、ウォータールー大学（カナダ）の大学院教育採用担当者 Amy Aldous は語る。シンガポール国立大学の理論物理学者 Baowen Li は、中国の一流大学からの応募者がかなり増えていると語る。「この変化は量にあるのではなく、質にある。私たちは米国の政策の恩恵を大きく受けている」と Li は言う。

こうした状況は、科学界における米国の指導的地位を最終的に低下させることにつながるのだろうか。パリに本部を置く経済協力開発機構（OECD）の教育指標分析課長の Andreas Schleicher は、米国の優位性は圧倒的なのでそうした事態にはならないだろうという意見だ。「海外で学ぶ学生全体の 25% 以上が米国を目ざす状況に変わりはない」と、彼は言う。だが米国政府でこの問題に取り組む Neureiter は、それほど楽天的ではない。「悲観的な見方に与したい」（Neureiter）

今後の展開はどうなるのか。それは外国人研究者に対するビザ発給の遅れが、新しいシステム導入直後の産みの苦しみなのか、あるいは長期化する障害になるのかという点にある。国務省関係者は、状況改善のために対策を講じていると話している。新しい規則では、学生を面接を待つ列の先頭にジャンプさせて、就学日に遅れないようにすることをうたっている。3月までには、新しいコンピュータシステムが在外大使館と国内の安全保障局を直接結ぶことにもなっている。これにより機関どうしのセキュリティ審査が迅速に進み、Motrunich らが立ち往生したような状況を防ぐことになる。

それでも、安全確保に主眼が置かれる状況が続く限りは、2001年以前のレベルほど速やかに申請を処理することは不可能だ。「最善の策は、全ての申請を30日以内に処理するという目標を守り続けることだと思う」と、国務省査証発給担当次官補 Janice Jacobs は語る。

一部の米国の大学は、混乱は収束しつつあると報告している。例えばデューク大学では、科学を学ぶ外国人学生の数は、2 年間伸びが止まっていたのが 2003 年には再び増加に転じた。だがNeureiterは、全てのビザ申請者に指紋押捺を求める今年 1 月に導入された規則と、学生および客員研究員が 100 ドルの手数料を支払うことを求めた別の規則による影響を不安視している。「誰しもビザのことが気がかりでは、大規模な国際学会にも行けない」とWhite も同意見だ。「米国政府に対して、集団的な抗議活動が起きると思う」

Zhang は現在マジソンに戻り、博士論文を執筆しながらポスドクのポジションを求めている。いやな経験をしたが、それでも研究環境に親しんだ米国に留まりたいと考えている。「だが米国に大学院留学を考えていた学生は、二の足を踏んでいる」とZhangは警告している。帰郷中に船会社で働いていたときに Zhang は社長の家族と親しくなった。その 2 人の娘たちは医学を学ぶことを考えていた。昨年彼女たちの出した結論は、英国への留学だった。 ■

取材・執筆は、Geoff Brumfiel および David Cyranoski、Carina Dennis、Jim Giles、Hannah Hoag、Quirin Schiermeierが担当した。

Nature Publishing Group
makes an IMPACT

インパクトがある雑誌は、

Nature です。

2002年度、*Nature* のインパクト・ファクターは30.432でした。
もちろんmulti-disciplinaryジャーナルのナンバー1です。

nature publishing group npg

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

医学研究は人類を滅ぼすのか

「研究上の急務」という道義には知られざる代償もある。

原文：*The hidden cost of health care*

Nature Vol.427(15)/1 January 2004; www.naturejpn.com/digest

What Price Better Health? Hazards of the Research Imperative
by Daniel Callahan
University of California Press: 2003. 335 pp. $29.99, £19.95

Arthur Caplan

本書は広く一般読者向けに書かれているが、生物医学を研究する方にも一読をお勧めする。哲学者である著者のDaniel Callahanが、かつてないほど強い論調で生物医学の研究者を失業させるような議論を展開しているからだ。

著者は生命倫理学を研究するヘイスティングスセンター(米国ニューヨーク州)の創立者で、同センター長を30年間務めた。在任中、彼は生物医学研究の価値にかなり疑問を抱いていた。本書には、生物医学界に対する彼の不満が頂点に達した感がある。

生物医学研究は、道義で固めた難攻不落の要塞に閉じこもってしまった、と著者は主張する。生物医学研究の主たる道義的な武装のことを彼は「研究上の急務(research imperative)」と呼ぶ。「研究上の急務」とは、どんなコストやリスクがあっても研究を続けなければならない、とする考え方のことだ。いかなるマイナス面があっても「研究上の急務」は否定できない。なぜなら病気の治療薬や死を食い止める可能性のある薬の開発は、次回の研究補助金申請の対象となり、次の新たなバイオテクノロジー会社の事業内容となり、あるいは今後新たに紹介され、広くもてはやされるアイディア(これまでの例としては、胎児組織研究、遺伝子治療、胚研究、異種移植、人工臓器、幹細胞研究、ゲノミクス)になりそうだからだ。生物医学研究のやり方に異議を唱えたいと考え、必然的に「研究上の急務」、つまり進歩への邪魔者になってしまう者には希望はない。

著者は主に二つの主張によって、「研究上の急務」という怪獣を退治しようと試みる。一つめは「研究上の急務」によって生物医学が完全に腐敗した、という主張である。二つめは、「研究上の急務」とは言いいながらも、まったく「急務」とは言えない、という主張だ。

各章にわたって著者は、生物医学において全ての病気に治療法を発見しようとすることが高い代償や、腐敗につながると主張する。誠実、オープンで協力的という意味での科学の高潔さは完全に失われてしまった、と彼は言う。研究活動において人権は常にねじ曲げられ、無視されているし、利害の衝突もはびこっている。権利擁護団体、規制当局や政府の委員会は、巨大研究機関の公約の前に従順な犬のように腹を見せて転がり、死んだふりをしている。そして、このような見苦しい混乱状態を前にして大きな顔をしているのが、傲慢で欲深い製薬会社だ。おかげで人々は効き目のない薬、本当は必要のない薬にますます依存するようになっている、と著者は言う。

このように「研究上の急務」に従ったために支払った代償が大きすぎるだけでなく、「急務」自体も幻である。生物医学研究を行う道義的義務など存在しないと、著者は主張する。そもそも子孫のために現状を改善しようと努力する義務はない、と。さらに健康は重要な目標の一つではあるが、私たちが実現すべき唯一の美徳が健康であるとはまったく言えないと、彼は言う。

この主張は正しいのだろうか。私たち人間は殺される前に、米国の国立衛生研究所(NIH)、フランスの国立保健医学研究所(INSERM)や英国の医学研究会議、そして製薬会社各社を解散させるべきなのか。私たちは元気に末長く生き続ける方途の探求をあきらめ、生命の有限性や弱点に正面から冷静に取り組むべきなのだろうか。著者は、本書の中で政策論と歴史に真に精通した知識を披露している。だがそうした努力もむなしく、「研究上の急務」は彼の言葉の剣にびくともしない。

「研究上の急務」という甘い響きには、人を操る効果が本当にあるのだろうか。実は、そんなことはまったくない。全世界の生物医学関連の研究開発は、かなりの部分が米国政府からの補助金でまかなわれているが、そんな米国でさえも、生物医学研究に対する予算は、過去10年間で伸びてはいるものの、米経済全体からすれば取るに足らないほど少額なのだ。

昨年、米国政府の予算は総額で2兆ドル(約220兆円)を超え、研究開発費は1,070億ドル(約12兆円)だったが、その半分以上は軍事研究や防衛関連研究に支出された。NIHの予算は約270億ドル(約3兆円)だが、かなりの部分は生物テロや国家安全保障に関係した研究に費やされた。米国では、永遠の命という自己中心的な欲望のために多額の資金が投入されている、と著者は主張するが、実際の支出状況を見ると、他にも数多くの支出先があることは知られているし、実際にそのように使われている。

それでは子孫の世代のために状況を改善すべき義務についてはどうだろうか。確かに道義論には、まだ生まれてもいない人々のために境遇を改善する義務を認める考え方はない。だが自分たちの子供のために、現状を改善する努力をする義務は確かに存在する。そして生物医学研究は、その義務が果たす過程における重要な要素なのだ。

より端的に言うと、私たちは過去の研究成果の恩恵を被っているのだから、生物医学研究を支援する義務を負っているとも言える。もし私が補聴器を使い、糖尿病の治療でインスリン投与を受け、人工股関節を使って歩き、ペースメーカーを体内に埋め込み、レーザー »

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

手術を受けた目でものを見て、病気を予防するためのワクチン接種を受けているとすれば、生物医学研究に対する過去の投資から利益を得ていると言える。そんな私が「ただ乗り」をしたくないのであれば、研究投資をした私の祖先に恩義があるということになり、生物医学研究を支援し続けることで恩を返していかねばならない。得た利益には対価を支払うというのがフェアプレーのルールというものだ。

もし私たちに研究を行う義務があるのであれば、著者のもう一つの主張を検討する必要がある。「生物医学研究上の急務」という考え方によって重要な価値観や基本的な道義が破壊されてしまったのかどうか、ということだ。この点で、著者の主張は部分的に正しい。生物医学内部の価値観という意味では、本来の姿を逸脱している。確かに修復が必要だ。

意外なのは、科学の高潔さや価値観に対する最も重大な脅威の一つに著者が言及していないことだ。つまり政府が後援する軍事研究や反テロ研究によって、科学の高潔さが失われる危険性があるという点である。これは目新しい問題ではないが、最近の一連の出来事によって、注目が高まっている。米国やヨーロッパ各国の政府は、自らが後援した研究の成果を国家安全保障の名の下で秘密にしたいと考えており、これが重要な科学的な価値観に対する重大な脅威となっている。

そうは言ってみたものの、生物医学研究を擁護する人々は、本当に著者が言うように「研究上の急務」という武器を振り回しているのだろうか。生物医学の研究者の多くは、実験に参加する人間や実験動物を尊重し、きちんと取り扱う義務を敏感に感じている。彼らは、民間資金が研究方針に及ぼす圧力を理解し、生物医学技術によってどんな影響があるのかと将来を懸念する人々の声にも耳を傾け、真剣に受け止める。それは自然な流れだ。巨大な生物医学研究機関の権力について著者は大げさに主張するものの、現状に批判的な人々もそれなりに勝利を収めているからだ。植物や動物の遺伝子組換え実験の進展は、推進派が望むよりもかなりペースダウンし、幹細胞、胚やクローン作製研究は厳しく精査されている。そして異種移植や人工心臓の開発を推進する動きは、さまざまな倫理的、社会的理由によって、ほぼ無理やり中断させられてしまっているのだ。

本書は重要な一作と言える。「研究上の急務」は、著者が考えるほど難攻不落ではないかもしれないが、本書が問題視するように「研究上の急務」を注意深くウオッチすることは確かに急務である。■

評者の **Arthur Caplan** は、ペンシルバニア大学医学系大学院医療倫理学科（Department of Medical Ethics, University of Pennsylvania School of Medicine, Philadelphia, Pennsylvania 19104-3308, USA）に所属している。

concepts

生きている地球

原文：*The living Earth*　*Nature* Vol.426(769)/18/25 December 2003; www.naturejpn.com/digest

James Lovelock

銀河系のはるか彼方（かなた）に科学文明があって、私たちの大気の化学組成を分析できるほどの解像力をもつ干渉計を完成させていたとしよう。この分析だけで、彼らは、太陽系の惑星の中で唯一地球だけに、炭素を基盤とした生命と産業の発達した文明があるという結論を確信をもってくだすだろう。彼らは、超高層大気中にメタンと酸素が共存しているのを発見するだろうし、化学者たちは、そうしたガスが間断なく消費され、入れ替えられているのに気づくだろう。このようなことが、偶然の無機化学現象によって起きるには、とてつもなく長い時間がかかる。このように永続的な、根深い大気の不均衡は、低いエントロピーの特徴をもつ生命の存在を示すものだ。彼らは、私たちの地球が生きている惑星だという結論に達するだろう。そして、大気中にフロンがあるのは、工業水準が低すぎてその漏出を防げないからだと考えるだろう。

1965年にNASAの惑星探査チームに参加したとき、このような考えに基づいて、私は、火星上の生命の存在を確かめるために火星大気を分析することを提案した。私はまた、地球の化学的に不安定な大気を一定にして、生命に都合のいい状態に保っているものは何なのか、そして、地球誕生以来、太陽の光度が30%も上昇したにもかかわらず、気候を許容範囲に保ってきたものが何なのか、不思議に思った。いろいろ考えを巡らせた末に、私は、

ガイア

有機体とその環境は一つの自己制御システムとして進化する。

「生命有機体が、自分たちの都合のよいように大気を制御しているのだ」という仮説に達した。すると、小説家のWilliam Goldingが、この仮説をガイアと名づけたらどうかと提案してくれた。生きている地球という概念は古くからあったが、ニュートンこそ、地球を動物や野菜になぞらえた最初の科学者だった。ハットンやハクスリーやフェルナドスキーも、同じような意見をもっていた。だが、定量的な証拠がなかったので、こういった初期のアイディアは、逸話の域を脱しなかった。1925年に、Alfred Lotkaが、有機体の進化とその物理環境をバラバラに扱うよりは、一つのまとまった存在としてモデル化したほうが簡単なのではないかと思いついた。ガイアの概念は、こうした初期の考えに端を発したものだが、生物地球化学者のAlfred RedfieldやEvelyn Hutchinsonが収集した証拠や、NASA

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

の頭が痛くなるような「初めに結論ありき」式の見解とも無関係ではない。

ガイアの概念は大気科学者からは歓迎されたが、地球科学者たちは慎重な態度を崩そうとしなかった。また、Ford DoolittleやRichard Dawkinsのような生物学者は、選択の単位が有機体であって生物圏ではない以上、地球全体の自己制御が進化できたはずなどない、と声高に主張した。そのうち、私にも、彼らが正しいことがわかった。だが、それでも、私は、地球を住める環境にしている何かがあるにちがいないと考え続けていた。1981年に、私は、徐々に強くなる日光にさらされながら惑星上での成長を競い合う、暗い色と明るい色の植物のモデルを構築した。私の意図は、地球の青写真を作ることではなく、ガイアが自然選択に矛盾しないことを示すモデルを作ることだった。この「デイジー・ワールド」(=ヒナギク世界)は、植物の成長にほぼ最適になるように温度を調整し、(結合した微分方程式から作られた進化モデルでは非常に珍しいことだが、)安定的で、初期条件に左右されず、攪動にも強いものだった。デイジー・ワールドはダーウィン的だが、有機体の進化と温度の進化がまとまった一つのプロセスとして進化する。このモデルは、多くの批判にさらされたが、これまでのところ、反証されずに生き残っている。デイジー・ワールドが「ずる」を許すことを示すのはたやすい。(例えば、成長するだけで、自己制御とは何の関係もないデイジーの存在とか。)他の批判者は、デイジーは変化する温度に順応するだけで、つまりは単に温度の変化をたどるだけで、制御しているのではないと主張した。だが、成長と温度を結びつける制限関数の存在がこの批判を封じてくれる。生物学ではなく、化学的な現象が、その定数を決めているのだから。

この段階では、ガイア理論には、もっともらしい制御メカニズムがなかった。初めに発見されたのは、栄養価の高い元素である硫黄とヨウ素の不均衡を是正する生物学的プロセスだった。この2つの元素は、海洋には満ちあふれているが、地上では不足しがちだ。誰もが、硫化水素と海塩のエーロゾルが、海洋から地上に運ぶのだろうと考えていた。1971年に、私は、大西洋の表層水のいたるところにヨウ化メチルと硫化ジメチルがあることを発見し、私の測定値から、Peter Lissが1974年にその流量を算出した。彼は、この有機物から生じたガスが、硫黄とヨウ素の自然な元素サイクルの主な運び手になっていると主張した。

その後、1982年に、地球化学者のJames WalkerとP.B.HayesならびにJim Kastingは、珪酸カルシウムの岩石の風化が、二酸化炭素と気候を制御しているかもしれないと発表した。暖かくなると雨が多くなり、岩の風化を通じて、大気からの二酸化炭素の除去が促進され、それが温度に負のフィードバックをかけるのだ。もっともらしいメカニズムだが、これだけでは、観測された風化率を説明しきれない。岩石の上と土壌の中にいる有機体が、ガイアのメカニズムとして、このもっともらしいメカニズムに命を吹き込むのだ。有機体の成長は温度によって変化し、有機体の存在は風化率を高めるのである。

1986年には、Robert Charlson、James Lovelock、Meinrat Andreae、そしてSteven Warrenによるアッと驚くような発見があった。有機物より生じた硫化ジメチル・ガス(海洋の藻の産物)と、それが大気中で酸化して雲の凝縮核を形成することと、その結果つくられた雲が気候に与える影響とが、すべて関連していることがわかったのだ。これは、気候変化と藻類の成長の間のフィードバックとして働くガイアの制御メカニズムではないかと私たちは考えた。

1980年代の終わりになると、暫定的なガイア理論を正当化するのに充分な証拠とモデルとメカニズムがそろった。ガイア理論は、一言で言うならば、「有機体とそれをとりまく物理環境が、一つの結合系として進化し、そこから、今現在の生物相に応じて、棲息可能な気候と化学の持続的な自己制御が(創発的に)生まれる」というものだ。

生命と同じように、ガイアは創発的現象であり、直観的には理解できるが、還元によって分析するのは難しく、むしろ不可能に近い。だから、しばしば誤解を招いたとしても驚くにはあたらない。サーモスタットで制御されるオーブンのような、単純な自動メカニズムには、オーブン内温度と設定温度の差を測定するセンサーと、その差を拡大し、好ましくない変化を防ぐ負のフィードバックをかけてくれる増幅器があればよい。生命系は、このような単純な方法で機能することはほとんどない。生命系では、ホメオタシスのために負だけではなく正のフィードバックも必要だし、単純な手動の設定値の代わりに制限関数がある。この関数によって、固定された設定値に代わって、生理学的に受け入れられる範囲内での調整ができるようになる。ガイアに批判的なアンドリュー・ワトソンのような人々は、ガイアであるためには、惑星は、ほぼ完璧に制御されねばならないという前提から出発している。だが、生理学のシステムは、必要とされる以上には働かないことがある。人類が熱平衡状態にあるのを疑う者はいないが、私たちの体温は、通常35°Cから40°Cのあいだにあるし、耐えうる極限の温度は、5°Cから45°Cの範囲内である。なんとも不正確に見えるかもしれないが、私たちにはこれで充分なのである。過去1千万年のあいだ、地球の平均表面温度は、人間の体温幅と同じような11°Cから16°Cの範囲内にあった。だからといって、調整機能が役立たずだという証拠にはならない。地球のシステムを保持するには、これで充分なのだ。ときおり、地球が、(現在の間氷期のように)効率よい調整に失敗することもある。しかし、それは、正のフィードバックが支配的になるために発熱する、生理学的な状態に似ている。

ガイア理論は、ダーウイン主義と矛盾しない。むしろ、ダーウィン主義を拡張して、進化論的生物学と進化論的地質学を一つの科学として包括するものになっている。ガイア理論では、有機体は、物理環境を変えつつ順応もするのだと考える。選択は、改良する者を好み、好ましい形質の拡大は、局所的な改善をもたらし、やがては地球規模になる。絶滅したり敗ける者もでてくるし、勝ち組は束(つか)の間の利益を享受するだろう。しかし、長期的に恩恵をこうむるのは、生命そのものなのだ。数知れぬ外的および内的な大災害や大破局にもかかわらず、30億年にもわたって生命が持続していることが、何よりもガイア理論を裏づけている。「生きている地球」というたとえは強力だが、私は、この言葉を「利己的な遺伝子」というたとえ以上に深刻に振りかざすつもりはなかった。私が、(やはり自分の造語である)「地球生理学」とともに「生きている地球」という言葉を使ったのは、ガイアと生理学的な調整の類似に注目してもらいたかったからだ。

Stephen Schneiderが、権威ある全米地球

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

物理学連合の1988年のチャップマン会議のテーマをガイアにするように勧めたのを、私は喜んだが、あまりにも多くの出席者が、1970年代の古いガイア仮説について論じていたのには失望した。まるで誰もガイア仮説の改訂版がでていることを知らないかのようだった。だから、私は、著名な科学者たちが、ガイア仮説を公に認めるまでは、誰もガイアを真剣に取り上げないだろうと思った。私は1995年にJohn Maynard SmithとWilliam Hamiltonとの対話を始めた。二人は、科学的な論題としてガイアについて語る準備ができていた。しかし、二人とも、惑星の自己制御が、どうやって自然選択によって進化できたのか、理解できないようだった。それでも、Maynard Smithは、私の同僚のTim Lentonが、ネイチャー誌に将来性のある論文を寄せたとき、惜しみない支援を寄せてくれた。また、Hamiltonは、Lentonと共著の論文の中で、有機体が分散して拡がる必要性こそが、海藻と気候をつないでいるのではないかと推測した。1999年のテレビ番組の中で、Hamiltonは次のように語っている。「ちょうど、コペルニクスの考えが、ニュートンのような人物による説明を必要としたように、私たちは、ダーウインの進化論が、いかにして棲息可能な惑星をもたらしたかを説明してくれる、もう一人のニュートンを必要としている」

やがて雪解けが始まった。2001年のアムステルダムでの会議では、地球の変化についての4大調査計画が提示されたが、なんと、千人以上の代表者たちが、次のような表現で始まる宣言に署名したのだ。「地球システムは、物理学的、化学的、生物学的、そして人間の構成要素からなる、一つの自己調節メカニズムとしてふるまう」

ガイア理論は、実を結び、成功裏に有益な予測をしてくれる(表1を参照)。それだけでなく、ガイア理論は、地球システムの科学と環境についての私たちの見方をガラリと変えた。さらに重要なのは、Lynn Margulisが強調したように、この理論によって、私たちが、地球の生物学的な基礎構造である微生物に目を向けるようになったことだ。微生物は、生命の歴史のほとんどにわたり、生物圏の大部分を満たしていたし、今なお、効果的な惑星調整には欠かせない。

表1　ガイア理論が予測することがら

予測(年)	*テストと結果*
大気の証拠から火星に生命は存在しない(1968)	バイキング探査計画(1977)がはっきりと確認
元素は生物起源のガスによって海から陸へ運ばれる(1971)	硫化ジメチル、ジメチルセレニドとヨウ化メチル発見(1973,2000)
生物学的に促進された岩の風化による気候調整(1981)	微生物が岩の風化を著しく促進することが判明
ガイアは老齢である(1982)	一般に認められている
雲のアルベド制御による気候調整は藻のガス放出と関連する(1987)	未だテスト中
始生代大気の主な化学組成はメタンだった(1988)	未だテスト中だが認められる傾向にある
過去2億年間、酸素は21±5%と変わらず(1989)	未だテスト中
北方針葉樹林の地域的な気候調整はデイジー・ワールド式(1988)	いまや地球の気候モデルの一部に
生物の多様性は惑星の自己制御に不可欠(1992)	実地テストはまだだが、モデルではテスト済
現在の間氷期は生理学的にはシステム故障にあたる(1996)	未だ論争中

ガイアの主な業績は、地球システムのモデルのスタイルを変えたことだろう。気候学者たち、とりわけピーター・コックス、リチャード・ベッツ、ジョン・シェルンヒューバーらは、未来の気候についての彼らのモデルに、生物相が反応する要素を加えてくれた。彼らの貢献は、2001年の気候変動に関する政府間パネルの第三次査定報告の予測に現実味を添えた。

地球の老化にともない、太陽の熱は、いやおうなく強まる。これから10億年もたてば、地球は、気候の安定度の限界を越え、不可逆的に無機化学の世界に戻る。さらに歳を取るにしたがい、地球システムは弱まり、ほどなく、大きな微惑星体の衝突によって、私たちの惑星は、はやばやと熱く干上がった最終状態へ追い込まれるかもしれない。オアシス生態系のわずかな高温菌は生き延びるかもしれないが、私たちは、いま楽しんでいるような豊かな生命と青々とした環境を取り戻すことは、決してないだろう。地球システムは、かなりの歳になっている。私たちは、敬意と配慮をもって、それを遇さねばならない。

ガイア理論は、進化論的生物学と進化論的地質学の考えを両立させたものだ。ちょうど相対性理論が、ニュートンの物理学を否定せず、むしろ、その内容を高めているように、ガイア理論も、ダーウインの予見と矛盾することなくそれを敷衍(ふえん)している。ガイア理論は、暫定的なものだが、地球についての理解を進め、高めるような、知的な環境を与えてくれる。おそらく、その最も大きな価値は、「生きている地球」という比喩にあるだろう。私たちも生きている地球の一部であり、人間の権利も、私たちの惑星の仲間たちの要望によって制約されることを、この喩えは、私たちに思い出させてくれる。■

ジェームズ・ラヴロックはオックスフォード大学グリーン・カレッジ(Green College, Woodstock Road, Oxford OX2 6HG, UK.)に所属している。

FURTHER READING

Kump, L. R., Kasting, J. F. & Crane, R. G. *The Earth System* 2nd edn (Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2004).
Hamilton,W. D. & Lenton, T.M. *Ethol. Ecol. Evol.* **10,** 1–16 (1998).
Lenton, T. M. *Nature* **394,** 439–447 (1998).
Lovelock, J. E. *The Ages of Gaia* (Oxford Univ. Press, Oxford, 2000).
Margulis, L. *The Symbiotic Planet* (Phoenix, London, 1999).
Schellnhuber, H.-J. & Wenzel, V. (eds) *Earth System Analysis* (Springer, New York, 1998).
Turney, J. *Lovelock and Gaia* (Icon, Cambridge, 2003).
The Amsterdam Declaration on Global Change online at http://www.sciconf.igbp.kva.se/AMS_DECLARATION.pdf

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

どちらを向いても水ばかり?

Philip Ball

地球上では、どんな生き物も水なしでは機能できない。Albert Szent-Györgyiは、このことを「水は生命の基盤だ」と表現している。だが、この原理が地球外の世界でも通用すると考えるのは妥当なのだろうか。

原文：*Water, water, everywhere?*
Nature Vol.427(19)/1 January 2004; www.naturejpn.com/digest

生命は水なしで存在できるのか？ NASAは、地球外生命を探索する戦略は「水を追う」ことだとはっきり述べている。しかし、その結果としてNASAはもしかすると肥沃かもしれない別の環境を見のがしているのではないか。先頃、物理学者、化学者、生化学者、微生物学者が集まり、水を必要としない生物が可能か否かという問題に取り組んだ*。誰もはっきりと否定的な答えを出せず、多数決で決められるような問題でもない。むしろ、単なる推測を越えた議論ができるような枠組みが現れることを期待して、基本的な問題をより小さく扱いやすいものに限定していくように作業するべきである。

素朴に考えると、ばかばかしいくらい地球中心主義であると思われるかもしれない。ある種の液体が単に生体システムにおける効率的な物質の輸送のために必要であることを出発点と認め、弱みがないわけではないが妥当であると考えるなら、宇宙には代わりになるものがたくさんある。アンモニア、硫酸、液体二酸化炭素、そして土星の衛星タイタンには炭化水素の湖すらあると推測されている。

しかし水にはもっと多くの要素がある。水は他の液体と隔てる様々な特性を持つ極めて異常な液体であると古くから認識されてきた。大きな熱容量、凍結時の膨張、摂氏4度で密度が最大になること、高い誘電率、これらが異常といわれてきたものだが、そのほかのものを含めて生物学的に重要な役割をもっていると思われる。これらの異常は水の水素結合に原因があると比較的容易に説明され、この水素結合はH_2O分子を揺動する3次元の網状につなぎ合わせている(J. Finney, ロンドン大学)。「単純な」液体と異なり、水の分子構造は分子間に働く堅い芯の斥力ではなく、水素結合の方向性をもった引力相互作用に支配されている。

この普通とは異なる特徴は、水の生命を生み出す働きに不可欠な要素なのか、それとも単なる副次的な要素なのか？この会議の目的は、地球上の生命における水の役割の分子的側面を明らかにし、先に述べた特性が不可欠であると考える理由があるのか、副次的であると考える理由があるのかを問うことだった。そして、前者であるなら、水でない液体では、水の特質を再現することはできないのか？

水の明白な「特殊性」は1913年にアメリカの生化学者Lawrence Hendersonによって指摘された。Hendersonは、宇宙は生命を育むのに極めて「適している」ように思われる、と主張した。彼は人間原理の先駆者といえよう。しかしここには堂々めぐりの危険が内在する。生命には順応性があるのだから、水が提供するものを開発する方法を見つけていないと誰がいえるのか？例えば、ある種のタンパク質は水素結合分子の鎖に沿ったボンド・フリッピングの結果として水中で起こる早いプロトン伝導を利用する。(しかしながら、この詳細は古典的なグロッタス機構で示されるより複雑である。N. Agmon *Chem. Phys. Lett.* **244**, 456–462; 1995を参照のこと。)タンパク質の中には水分子の1次元鎖を利用して内部の活性部位へプロトンを迅速に運ぶものがある。水素結合による網状組織によって、水はこのような「プロトン・ワイヤ」を用意するのに特によく適したものになっている。しかし、このようなうまいやり方が使えない場合、生命が妨害されると考える根拠はあるのだろうか？

どのような種類の生命でも、化学情報を伝達するために分子間相互作用における酵素のような選択性を必要とすると仮定できる。水は酵素の機能において多くの重要な役割を演じていると思われるが、取り替えのきかないものなのだろうか？溶媒和殻はタンパク質の機能の活性部位であると思われる(J. Smith, ハイデルベルク大学; M.Nakasako, 慶応大学; P. Rand, ブロック大学)。しかし原理的には、他の低分子溶媒が代用とならないとはっきりしているわけではない。

実際、水の少ない環境における酵素の研究では、水が必要な範囲について、どちらかといえば相反する情報が得られている。バクテリオロドプシンというタンパク質は、自然のままの「紫色の細胞膜」に埋め込まれていると、タンパク質の露出した表面を水和する少なくとも1層の水が存在する時にのみ機能するようであるが(G. Zaccai, Inst. Biologie Structurale, Grenoble)、酵素には水和物の層が全くなくてもガス相中で機能するものがある(R. Daniel, ワイカト大学)。非水溶媒の経験から、全く水がなくても酵素が効率的に機能することが最終的にはわかるだろうとの自信が深まっているが(D. Clark, カリフォルニア大学バークレー校)、ここでの重要な問題点は「水がない」とは別の人々にとっては別の意味になることだ。今のところ、機能性酵素はすべてそのタンパク質の構造内に強く結びついた「内部の」水を(タンパク質1モルあたりH_2O分子1から10個程度の濃度で)保持している。この水も取り除けるのだろうか。水和殻の水は主としてタンパク質の柔軟性を高めているように思われるが(そして他の溶媒で完全に置き換えられる可能性があるが)、内部の水はタンパク質の構造を保っているようである。おそらく、水を系から「設計によって取り除く」ことは可能だが、簡単ではない。

とはいっても、水中で進化した分子から、水なしでどのようなものがあり得るのかなど分 »

*「生命の分子基盤：生命は水なしで存在できるのか？」イギリス王立協会、2003年12月3日–4日

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

かるのだろうか？少なくとも問題を狭めるのに手を貸してくれるかもしれない。完全に水のない酵素が見つかったとしたら、少なくとも分子的な生命活動という側面では水の特異性に依存する必要がないはずだ。同様の議論はタンパク質の折り畳み、つまり一から触媒を作ることにも当てはまる。この場合の水の役割を調べると多くのことがわかる。例えば、よい溶媒はもともとの折り畳み、つまりタンパク質がもともともっている構造の安定性を実際に促進させることはない。むしろ、重要でない安定性だけを増すために、強い相反する力の間に著しく微妙なバランスがあることが分かる。安定性がありすぎると、構造が「凍り」、不活性になってしまう。アミロイド病に現れるもう一つのタンパク質構造は、このために私たちが支払っている避けがたい代価である。

水の有用な生物学的機能のすべてを模倣できる単純な分子はありそうもない。ある学派は、それゆえ、水の「徳目」のどれか一つ、あるいは同時にいくつかを代用するものを探すことは無駄だと主張する。つまり、水の生物学的な重要性は単一の分子システムにおける同期動作にあるというのである。しかし、私たちに本当に必要なのは、もしあるとすれば、それらの機能のうちどれが生命にとって一般的なのかを問う方法である。例えば、高温時の分子励起状態によって導かれる複雑さのために、シリカのような別の４面体液体が除外される温度限界があるのか。低温時には、より低い拡散率が熱力学的平衡の有効な利用を妨げるのか。言い換えれば、物理的な空間だけでなく、化学的な空間や熱力学的な空間にもハビタブル・ゾーンがあるのだろうか。■

Philip Ball は *Nature* のコンサルタントエディター。

出番をうかがう流行病予備軍

Jim Bull and Dan Dykhuizen

SARSのようなウイルスで次に出現するものは、大流行の域に達する伝染力を持つだろうか。新興病原体のもたらす脅威がどれほどのものになるか、その規模の推定は容易ではない。人間に寄生するこうした病原体にとって、有利な方向に情勢が変化するかどうかに、進化は大きくかかわっている。

原文：*Epidemics-in-waiting* *Nature* Vol.426(609)/11 December 2003; www.naturejpn.com/digest

進化生物学で最古参級の「教義」に、大きい変化よりも小さい変化のほうがずっと容易に起こるというものがある。また、小規模な集団より大規模な集団のほうが進化上の変化が起きやすいこともわかっている。2003年12月11日号p. 658でAntiaたち[1]はこれらの事実を総合して、新興感染症に関して重要性がこれまで認識されていなかったような結論に至っている。つまり、ヒト集団に攻め寄る感染寄生生物のうち一部の種類のものは、たとえ最初は大流行を起こせなくても重大な脅威となる可能性があるというのだ。なぜなら常に何種類かの寄生生物が、進化して感染大流行を起こせる態勢を整えているからである。

疫学モデルでは感染病原体の特性を基本増殖率R_0で表すことができる。これは、集団内で1名の感染者から次に感染した平均感染者数である。感染流行の閾値は$R_0 = 1$であり、この値を上回ると感染症が広まり（ランダム効果は無視する）、この値を下回れば感染症は最終的に消滅する。しかしR_0は、病原体の毒力（ビルレンス）や宿主に感染が及ぼす害悪を測る物差しにはならない。たとえばヒトの場合、狂犬病やハンタウイルスによる呼吸器感染症のように致死率が高い疾患でも、R_0は実質的にゼロである。しかし同じように致死率が高い（栄養不良集団での麻疹やエイズ、天然痘といった）その他の疾患では、R_0は1より大きい。

Antiaたち[1]は、進化のせいで、R_0値が1のすぐ下あたりにある寄生生物があともう一歩で感染流行を起こせる待機状態にあることを示した。一見してわかる理由は、当初のR_0が1よりわずかに小さい値であれば、わずかな変化でR_0を1より大きい値にできるからだ。そして一見しただけではわからない理由（そしてAntiaたちの注目点）は、ある寄生生物がヒト集団内に消滅するまで居続ける時間の長さはR_0値とともに増大するという点にある。つまり、R_0値が1よりわずかに小さい寄生生物は時としてかなり長い時間、ヒト集団内に居続けることができる。寄生生物が長く居続けるほど、そのR_0値が大きくなるよう進化する機会は増えるはずである。これは単なる集団サイズ効果である。つまり、寄生生物が集団内から消え去るまでに感染した宿主の各個体は、R_0値が感染流行の閾値を超えるような変異がその寄生生物に起こる場を提供することになる。

このモデルはパラメーターがR_0だけなので扱いやすいが、その裏側にある生理的機構はおそらく込み入っているだろう。R_0という値の裏には、寄生生物の最初の接触、侵入、感染した最初の組織内での増殖、第2の組織への感染などから、他の宿主と接触すべく散布・拡散する最終段階まで、寄生生物と宿主のかかわり合いに関係する数々の出来事が秘められているのだから。この一連の出来事のいずれかの段階にR_0を増大させるような変異が起こるかもしれず、それが最終的に感染者数を増大させることになると考えられる。例えば、寄生生物が表面分子に新しい宿主に直接感染できるような変化を起こすことで、R_0が増大するかもしれないし、あるいは寄生生物が宿主内での増殖能を向上させて（おそらく毒力を高めて）、宿主からより多くの子孫が散布されて次の感染者数を増すことで、R_0が増大するかもしれない。

前述した狂犬病やハンタウイルスは、宿主内での寄生生物の増殖という点では優れているが、新しい宿主への散布という点では劣っているのが特徴である。1976年にスーダン南部で猛威を振るったエボラウイルス（綿花工場で働く作業員が最初に感染し、次にその田舎のジャズクラブのオーナー、そしてクラブの他の人々へと広がり、その連鎖は少なくとも8次感染まで達した[2]）は、宿主内の増殖

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

に優れ、しかも散布－感染の段階のおかげで感染流行の閾値に切迫した一例である。しかし、まずまずの感染力を備えて人類への侵攻を開始したものの我々の免疫系の攻撃には弱い寄生生物もある（この例にあたると見られるのが、1989年にバージニア州レストンでフィリピンから輸入されたサルのコロニーを壊滅させたエボラウイルス[3]）。その後すぐにR_0を高める変異でヒト体内での増殖能が向上する可能性がある。この種の新興病原体は一番見逃しやすく、おそらく最も危険な存在だ。寄生生物の宿主への適応、毒力、伝播の3者間の関係を解明しようとする研究は、進化生物学の中のちょっとした流れになっている。3者の関係は、集団に対する個体選択、集団のボトルネック効果やトレードオフ関係が含まれるために非常に込み入っている[4,5]。

Antiaたちの得た成果[1]は、新しい疾患出現の下地となる進化上の要因や生態上の要因をもっと把握するのに役立つものだ。我々がすでに警告してきたことだが、文化的な慣習の変化に呼応して毒力そのものが進化したり[6]、免疫不全の患者が踏み台となって健全な免疫系を備えた人々を攻撃できる新病原体の進化を助長したり[7]する可能性がある。ヒトに異種の組織片を移植することを考えたとき、ヒトゲノム内や移植片内で（そっとしておけば）休眠状態のレトロウイルスが活性化したり遺伝的組み換えを起こしたりする可能性があることも承知しておく必要がある。

しかしAntiaたちは疾患出現における文化的要因を強調することはせず、それよりも、最も注意を向けるべき病原体、つまり感染流行の閾値に最も近い病原体を見つけ出す手だてを示している。Antiaたちは一例としてサル痘をあげている。サル痘に近縁な天然痘のワクチン接種もウイルスとの接触もなく抵抗性がほとんどない世界では、サル痘が脅威となるというのだ。加えて今回の研究結果では、流行前の段階の寄生生物の動態についてこれまで軽視されていた問題に注目を促している。これを端的に示す例が重症急性呼吸器症候群（SARS）で、今年（2003年）初頭に起こった最初の感染拡大ルートは、社会集団内の患者第1号（初発症例）の社会的つながりに大きく依存していたことが確認されている。こうした研究結果を踏まえ、現実を把握することで、感染症を抑え込む道は治療よりむしろ早期予防にあることがよくわかる。いずれは、感染を阻止して流行を防ぐ努力をいつどこに注げばよいかがわかるようになるだろう。

現在のところ、一つの感染症に振り向けられる医療資源や社会の関心は、その疾患に特有の社会的、生物学的、経済的、政治的な各要因がどう絡み合っているかによって決まる。こうした考慮問題には疾患の悪性度や感染力、疾患発生率も含まれる。HIVや生物テロが出現する以前の慢心の時代は過ぎ、環境内の病原体に加えて病原体予備軍までをも監視する必要性が徐々に認識されるようになってきた。新興病原体となりうる生物を監視するための手法（おそらくはR_0値の違いにより系統を識別する手法）は、既存の科学技術を使っても開発できると考えてさしつかえないだろう。Antiaたち[1]が今回報告した病原体予備軍を探し出す方法は、新興病原体を封じ込めるための世界防疫戦略において有効な武器になってくれそうである。■

共同執筆者の**Jim Bull**は、テキサス大学オースチン校の統合生物部門および細胞・分子生物研究所（the Section of Integrative Biology and the Institute of Cellular and Molecular Biology, University of Texas, Austin, Texas 78712, USA.）に所属している。
e-mail: bull@bull.biosci.utexas.edu

共同執筆者の**Dan Dykhuizen**はニューヨーク州立大学ストーニーブルーク校の生態進化学科（the Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook, Stony Brook, New York 11794, USA.）に所属している。
e-mail: dandyk@life.bio.sunysb.edu

1. Antia, R., Regoes, R. R., Koella, J. C. & Bergstrom, C. T. *Nature* **426**, 658–661 (2003).
2. Garrett, L. *The Coming Plague* (Farrar, Straus & Giroux, New York, 1994).
3. Preston, R. *The Hot Zone* (Anchor Books, New York, 1994).
4. Frank, S. A. *Q. Rev. Biol.* **71**, 37–78 (1996).
5. Frank, S. A. *Immunology and Evolution of Infectious Disease* (Princeton Univ. Press, 2002).
6. Ewald, P.W. *Evolution of Infectious Disease* (Oxford Univ. Press, 1994).
7. Wallace, B. *Am. Nat.* **133**, 578–579 (1989).

Nature Publishing Group
makes an IMPACT

インパクトがある雑誌は、

Nature です。

2002年度、*Nature* のインパクト・ファクターは30.432でした。
もちろんmulti-disciplinaryジャーナルのナンバー1です。

nature publishing group npg

©2004 NPG Nature Asia-Pacific

ライオンのミイラを発見

原文：*A lion found in the Egyptian tomb of Maïa*
Nature Vol.427(211)/15 January 2004; www.naturejpn.com/digest

ライオンはナイルの谷で成長し、死んでいった聖なる動物の一つであると、古典学者たちは述べているし、ファラオの碑文にも書かれている。だがこれまでエジプトでは、その証拠は見つかっていなかった――サッカラのブバステイオン古墳を発掘するまでは。

本稿では同古墳で発見され、ミイラ化したオスのライオン(*Panthera leo*)の完全な骨格を紹介する。このミイラは紀元前数世紀中につくられたネコの共同墓地[1]に埋葬されており、同墓地にはもっと古い時代でツタンカーメン王(紀元前14世紀、新王国時代)の乳母であったMaïaの墓もあった。ネコの女神バステト(ブバスティスとしても知られる)に捧げられた墓でこの重大な発見があったことから、末期王朝およびギリシャ時代にライオンが聖なる動物という地位を占めていたことが確認できた。

第18王朝および第19王朝の大岩窟墓が、メンフィス古墳のサッカラ遺跡でフランス・ブバステイオン考古学調査団(MAFB)によって発掘されている。新王国時代の墓地は、その一部がネコの共同墓地として再利用されており、紀元前数世紀中にネコ(かつてはライオンのメス)の女神バステトに捧げられたブバステイオン地区内に位置している(補足資料を参照)。

Maïaの墓は1996年にMAFBによって発見された。この墓は少なくとも2階に分かれていて、一つは礼拝堂でもう一つは埋葬室となっている。埋葬室には当初の墓地の形跡はなく、人間、そして動物(主にネコ)の遺体で一杯になっていた。中心となる埋葬階は3つの部屋に分かれ、それぞれ廊下でつながっていた。1番目の部屋はおおよそL字型をしていて岩窟柱で支えられている。これに対して、2番目の部屋は小さめのほぼ長方形で、重要度の低い下の階に向かって柱が伸びている。3番目の部屋(4.5m × 4m)は入念に作られ整えられていた。これら3つの部屋の床は木棺や石棺、人間や動物の死骸で埋め尽くされ、おびただしい数の骨も落ちていた。最も多いのはミイラ化したネコだったが、層位学的な特徴から、おそらく墓地ができる数世紀前から人間の死体はここに存在していたとわかった。

2001年11月に墓地階の主室で発掘作業をしていたところ、私たちは驚くべき発見をした。ほぼ完全な形で乱されていないネコの骨格が見つかったのだ。それは以前に発見されたネコよりはるかに大きいものだった。ライオンだった。岩に横たわり、頭を北向きにして、体は東向きになっていた。このライオンの周囲を数多くの動物の骨や棺が取り囲んでいた。この棺は中に入っている死体よりもかなり年月が経ってから部分的に壊され、地中に埋められていた(補足資料を参照)。

このライオンの保存状態は素晴らしかった。ただし、頭蓋骨は部分的に壊れ、肩甲骨と大腿骨は損傷していた。死体をミイラ化したことを示すような包帯はなかったが、ミイラ化していたことがわかる証拠は見つかった。それは骨格の位置、犬歯の穴の内部にある組織の小さく劣化した断片、この遺跡で発見されたネコのミイラのものに似た骨の付着物や着色である。

最初に見たときは、その骨格の大まかな位置関係からネコのミイラを思わせた。しかし、後肢の配置は違っていた。ライオンの場合には、前肢と後肢は身体の前部に沿って伸びており、尻尾が脚の間から跳ね返っている。だがネコのミイラでは、後肢は骨盤に向かって押し込まれ、尻尾は足の間に曲線を描いている。ライオンの骨どうしはきちんとつながっているが、脳頭蓋だけはわずかに離れている。おそらく包帯をほどいたときに、脱落したのだろう。

骨の大きさを計測したところ、オスのライオンとしては最も大きい部類で、メスの範疇は超えていた(C. Grossの私信)ため、この骨格はオスのものであることは明らかだ(補足資料を参照)。多くのネコのミイラのX線写真と比べると[1,2]、このライオンはミイラにして埋葬することを目的に若いときに殺されたという証拠はみられず、自然死した可能性が高い。

この骨格は完全に骨端が融合し、歯の髄室が非常に狭いことから、おとなのライオンだったことがわかる。また歯の磨耗状態と病変から、年老いてから捕獲されたと思われる。胸の同じ側にある7本の肋骨は真ん中で骨折し、その上には皮膚硬結が起きていた。転んだか、ひどく殴られたために、骨折したのかもしれない。

ファラオの時代にライオンが存在したことは数多く語られているが[3]、現在わかっている知識では、エジプトで完全な骨格が発見されたのは、今回が初めてである(アビュドスでも骨がいくつか見つかっているが[4])。今回の発見から、このライオンとその生活について(年齢、病変、事故などの)貴重な情報が得られるはずだ。このライオンが埋葬されていた場所は第18王朝(紀元前約1430年)の女性の墓だったが、エジプト後期とヘレニズム時代のエジプトにおいて非常に重要であった動物礼拝と関係がある、後のブバステイオン古墳に入っていた(補足資料を参照)。

このミイラ化したライオンはオスだったため、女神セメクトかバステトの息子である神マヘス(ミシス)[5]の化身と考えられていたのかもしれない。1頭のライオンの墓があったからといって、そこがライオンの共同墓地だったとはいえないが、今回のメンフィスの実例によって紀元前数世紀のエジプトにライオンが存在したことは確認できた。ライオンは寺院の境内で育てられ、メンフィス古墳を含む聖なる動物の共同墓地に埋葬されたと考えられている(民衆文学やギリシャの碑文[6]、ミイラ化の証拠となる爪など[7]から、それがうかがえる)。■

著者と連絡先
Cécile Callou*§, Anaïck Samzun†§, Alain Zivie‡§
*MNHN et CNRS (UMR 5197), Paris, France
†INRAP, Paris, et UMR 7041, Nanterre, France
‡CNRS (UMR 8567), Paris, France
§Mission Archéologique Française du Bubasteion, Saqqara, Egypt
e-mail: az.hypogees@wanadoo.fr

1. Zivie, A. & Lichtenberg, R in *Proc. VIIIth Int. Congress Egyptologists* Vol. 2, 605–611 (American University in Cairo Press, New York, 2003).
2. Armitage, P. & Clutton-Brock, J. *MASCA J.* **1**, 185–188 (1980).
3. Houlihan, P. F. *The Animal World of the Pharaohs* (Thames & Hudson, London, 1996).
4. Boessneck, J. & von den Driesch, A. *Mitt. Deutschen Archäologischen Inst., Abteilung Kairo* **46**, 86-87 (1990).
5. Zabkar, L.V. *Miysis (Miôs, Mahes). Lexikon der Aegyptologie* (Wiesbaden) IV, 163–165 (1980).
6. Thompson, D. *Memphis under the Ptolemies* 29 n. 115 (Princeton Univ. Press, 1988).
7. Charron, A. *Bull. Soc. d'Egyptologie Genève* **21**, 5–10 (1997).

本稿の補足資料がネイチャーのウエブサイト内にあります。この論文への金銭的な利害関係：なしとの報告

©2004 NPG Nature Asia-Pacific