

nature

月刊 ダイジェスト

www.naturejpn.com

日本語編集版

vol.01, no.09 | September 2004

消えゆく生物を記録する
各国科学の影響度を測る
部族文化と遺伝学研究



始祖鳥は
飛ぶことを
知っていたか

Sponsored by



Agilent Technologies

nature

月刊ダイジェスト

vol. 1, no. 9

9

月号 目次
September 2004
www.naturejpn.com

editorial

2 部族文化と対峙する遺伝学研究

news feature

3 熱帯の隠れた生物宝庫が危ない

Carina Dennis, Peter Aldhous

essay concepts

6 なぜ惑星は恒星の「そっくりさん」になれないのか?

Stuart Ross Taylor

books and arts

7 消えゆくゾウが物語る中国の自然環境悪化

Reviewed by Crispin Tickell

news and views

9 最古の鳥類の脳は語る

Lawrence M. Witmer

10 もっと深いところまで理解する

Thomas S. Duffy

feature

12 科学に関する国別の影響度

David A. King

表紙写真 © K. A. VON ZITTEL

Publisher: Antoine E. Bocquet
Editor: Junko Tsuda, Sara Harris
Production: Takesh Murakami
Advertising Sales: Rinoko Asami
Marketing: Peter Yoshihara

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)



15 July 2004 Vol. 430/Issue no. 6997

収束的伸長は胚における形態変化の重要な機構の 1 つである。それには細胞の協調した運動が関わっており、細胞の空間的再配置と正中線に沿った組織全体の伸長が引き起こされる。今回新たな研究により、脊椎動物での収束的伸長の方向性が体軸に揃えられる仕組みが明らかにされた。アクチビン様シグナル因子の濃度勾配に基づく、これまで知られていなかった内在性の前後軸が収束的伸長と中胚葉のパターン形成を結びつけている。表紙は実験的に誘導した中胚葉外植片中でのカエル胚細胞再配置の様子を示している。胚だけでなく創傷治癒のような医学に関連した過程にも、細胞再配置によって起こる形態形成が関わっており、収束的伸長はこうした現象についてもよく用いられるモデル系である。[Letters, p. 364; News and Views, p. 305]



22 July 2004 Vol. 430/Issue no. 6998

動物の認知能力に対する社会性の影響は、進化生物学における最先端の話題の 1 つである。霊長類では、「社会的知能仮説」、つまり他の個体間の社会的関係を推し量るといった能力の選択が社会的な状況によって押し進められるとする説を裏づける証拠が得られている。社会的知性が進化において重要である可能性はあるものの、これについては霊長類でしか調べられていない。今回、非常に詳細に調べられている鳴鳥のキンカチョウを使った研究で、この鳥でも群れの配偶者間の社会的関係を推し量れることが示唆された。1羽の雄の目の前に、つがい相手のいない仲間を置くと、自分のつがい相手の鳴き声にも他の雌の鳴き声にも等しく反応する。雌雄のつがい 1 組を置いた場合には、雄は自分のつがい相手の声のほうに強く反応する。表紙は、雄のキンカチョウ (右上) とそのつがい相手、および「その他大勢」の仲間たち。[Letters, p. 448; News and Views, p. 414]



29 July 2004 Vol. 430/Issue no. 6999

スピキュールは、太陽大気つまりコロナを時速約 90,000 km/h で突き抜けるプラズマジェットである。この現象は、1877 年に A. Secchi によって発見されたが、5 分程度の短寿命で比較的小さい対象の観測が難しいこともあって、ほとんど解明されていなかった。今回、NASA の TRACE 衛星や、パルマ天文台の 1 m スウェーデン太陽望遠鏡による高分解能観測と数値モデルを組み合わせ、スピキュールの起源が太陽表面の音波が減衰帯を通過して太陽大気に漏れ出す際に発生する衝撃波であるということが分かった。起源が明らかになったことで、スピキュールによってコロナに運ばれる質量が太陽風にいかに寄与しているのかを研究できるようになるだろう。表紙の画像にはスピキュールが、短かく暗い像で示されていて、それぞれ約 3,000 km の長さである。[Letters, p. 536]



5 August 2004 Vol. 430/Issue no. 7000

8 月 13 日から始まる今回のオリンピック大会は、オリンピックがアテネに戻ったという歴史的に重要な大会である。これを記念して今週号には、エリート運動選手たちの生理的極限に関する一連の特集記事が掲載されている。A. Abbott はオリンピック選手を研究対象とするスポーツサイエンス研究者たちが、選手を自分たちとは異なる種類の生物のようにみなしていると述べている。J. Giles は、自分の肉体を極限まで使った結果、極度の疲労が絶え間なく続く状態に陥った選手たちがどのようなことになるかを調べている。L. Spinney は、致命的になりかねない心臓病のために競技できなくなったが、それでもなお競技会への参加を望んでいる一人の選手にインタビューしている。また、M. Leeb は、紀元前 776 年に開催された最初のオリンピック以来、アテネの環境がどのように変化したかを概観し、今年の参加選手が被る環境汚染について問題を提起している。オリンピックに関するその他の記事は、news@nature.com からオンラインで読むことができる。表紙写真: Aflo Foto Agency/Alamy. [News Features, p. 602]



12 August 2004 Vol. 430/Issue no. 7001

表紙の頭骨は、世界最大かつ最高齢 (これは今回の研究でわかった) の *Tyrannosaurus rex* (フィールド博物館所蔵の FMNH PR2081) のものである。この *T. rex* は老年期の成体で、最大成長速度は 1 日あたりほぼ 2.1 kg だったが、成長は 20 歳前後で頭打ちになって 29 歳前後で死んだ。*T. rex* とその近縁の仲間 3 種の成長速度を直接測定した値を使って、これらの恐竜の年齢/体重の成長曲線が割り出された。*T. rex* の成長状態変化のタイミングは祖先のものとはあまり変わらないことから、*T. rex* の巨大な体躯の秘密は成長速度の加速にあったと考えられる。表紙の背景はこの恐竜の脛骨の微細構造をとらえた偏光顕微鏡写真。年齢の目安となる成長線が見える (写真: J. Weinstein/フィールド博物館、グラフィクス: Ken Womble/フロリダ州立大学)。[Letters, p. 772]

nature

部族文化と対峙する遺伝学研究

研究者とアメリカ先住民の小規模部族との紛争は、遺伝学研究に無用に大きな影を落としている。
部族出身の研究者の支援を受けて、両者間で緊密な対話を行えば、両者とも得るところは大きいのではないだろうか。

原文：Tribal culture versus genetics

Nature Vol.430(489)/29 July 2004; www.naturejpn.com/digest

米 国南西部に居住するアメリカ先住民が、ある遺伝学研究をめぐる、研究者と対立している。具体的には、ある糖尿病の研究プロジェクトをめぐる、ハバスパイ族が研究者と大学を相手取って訴訟を起こしているのだ。この訴訟において、ハバスパイ族側は、アリゾナ州立大学やその他の研究機関に所属する研究者が、部族民からDNAサンプルを採取しておいて、当事者の同意を適切に得ることなく、研究目的に使用したと主張している。この研究プロジェクトのリーダーは、これを断固否定している。それと同時に、研究者たちは、善意の(つもりだった)研究作業について上述の申し立てがなされたことに当惑している。

この紛争に関しては、政治色を帯びた解釈がアメリカ先住民社会を駆け巡り、研究者に対する各部族民の不信感を煽っている。ゲノム研究の進展にとって絶好のタイミングである今、部族民にとっても研究者にとっても最も避けたいのは、根拠のないうさである。

この種の研究は数年をかけて実施される。そして今回の紛争は、研究者が、研究が終了するまでアメリカ先住民の被験者とのコミュニケーションを絶やさないことの重要性を浮き彫りにしている(Nature Vol.430, 500, 6999; 2004 参照)。これまでの経験から、裁判所が、倫理をめぐる紛争を解決する場として適切でないことは明らかになっている。しかし、厳密な科学研究を進める際に、部族文化に理解をもって接する必要性とどのように折り合いをつけていけばよいだろうか？

一部の部族では、研究被験者に関する委員会を独自に組織し、その承認なくしてはいかなる研究プロジェクトも行えないようになっ

ている。研究プロジェクトが複雑で、研究者以外には理解が難しい場合には、諮問委員会が組織され、そのようなプロジェクトのモニタリングを担当するグループを支援している。また、部族自体によって管理され、モニタリングされるアメリカ先住民の遺伝子バンクの設立についても提案されている。この構想が実現すれば、これらの遺伝子から派生する製品の所有権を各部族に帰属させられるかもしれない。

これらの構想は、いずれも望みあるチャンスだといえるが、その一方で研究者と被験者の双方が責任を負うことを必要としている。もし研究によって何が実現されるかについて被験者が知りたいと思い、その点に関する情報を絶えず得ることができれば、文化と科学の衝突は避けられるかもしれない。また、言葉と文化の障壁によって研究プロジェクトの進展が難しくなると考えられる場合に、特別なコミュニティ出身の研究被験者に対して、同意書の提出が繰り返し求められる事例が増えてきている。このように同意書の提出を繰り返し求めるというコンセプトは実施すべき価値のあるものではあるが、多くの時間を要し、経費を増やす恐れもある。もし研究者と被験者との間で情報が定期的に双方向に流れていれば、このようなコンセプトは不要のものとなるだろう。

一部の倫理学者は、研究被験者が同意書の細かい点にこだわり過ぎるあまり、研究に参加することが自分の出身部族のみならず人類全体の役に立つ好機であることを忘れてしまうとする見方を示している。しかしアメリカ先住民としては、このような見方を容易に受け入れることはできない。これまで何世紀に

もわたって自分たちの仲間や文化が虐待され、蹂躪されてきた彼らが過敏な態度をとることは無理もないことである。しかし、アメリカ先住民の文化が病気の治療に役立つと実感することがあれば、彼らにとって新たな形態の権利拡張となるかもしれない。

現在、数多くのアメリカ先住民の部族は、これまでに想像したこともないような経済的機会、例えば教育の機会や奨学金取得の機会などに恵まれている。ギャンブル施設からの収入によって、地域社会での各種サービスは充実し、アメリカ先住民の特別保留地に何世代にもわたって蔓延していた貧困に起因する病気を撲滅するチャンスが到来している。ところが、このようにして得られた経済力を利用して、部族の政治的目的による訴訟を迫るケースが頻繁に見られるようになった。アリゾナ州では、感受性が強く、思いやりのあるタイプの研究者が、ハバスパイ族のケースに関連した最近の出来事を見聞きして、特別保留地には近寄りたくない、と非公式に発言している。研究によって幅広い層に利益がもたらされる可能性があることを考えると、いずれの部族も、このような雰囲気になることを望んではいないだろう。

研究者と被験者を代表する人々は、お互いに手を差し伸べて、それぞれの文化のちがいを埋める努力をする必要がある。米国立ヒトゲノム研究所では、まさにそのことを目的とした活動に助成金を提供している。この活動を支援する独特な立場にあるのがアメリカ先住民の研究者だ。彼らもまた研究者・被験者間の対話を支援し、現代の遺伝学研究にとっての絶好の機会にふさわしい研究環境を作り出すことができるのだ。



熱帯の隠れた生物宝庫が危ない

シンガポール国立大学の分類学者で保全生物学者のPeter Ngには使命がある。長い間、多くはいないとみなされてきた場所に住む、多様な生物たちのカタログを作成することだ。この作業は時間との闘いだという。Carina DennisとPeter Aldhousが報告する。

原文：A tragedy with many players

Nature Vol.430(396-398)/22 July 2004; www.naturejpn.com/digest

熱帯の泥炭湿地は、人間の来訪を歓迎する場所ではない。水は酸性で、体のごく小さな傷もひりひりと刺激される。水にはタンニンが多く含まれ、水面のすぐ下にある手も見えない。唯一ありがたいのは、ヒルはこの暗さを好まないことだ。しかし、Peter Ngは、このぬかるみに脇までつかるのが好きだという。

東南アジアの泥炭湿地は、魚と甲殻類の珍しい種であふれていることをNgは発見した。その多くは、科学的に報告されるのは初めてだ。「泥炭湿地は、あまりにも見過ごされてきた」とNgは話す。彼は、こうした人間を拒絶している湿地に入るたびに、新たな標本を見つけている。また彼の研究チームは、泥炭湿地だけでなく、多くの生物がいるとは考えられていなかったほかの場所でも生物多様性の宝庫を見つけた。たとえば、死んだサンゴ礁が壊れてできた破片が積もった場所がそう。これは、熱帯の浜辺の沖で見つかった。

Ngは今、アジアの絶え間のない経済発展によってこうした生物の宝庫の多くが失われる前に、見過ごされてきた動物相のカタログを作る作業に没頭している。特に泥炭湿地は、Ngがそこで標本を集めるスピードに匹敵する速度で、水が排出され、乾燥させられている。これは都市開発や農地開発のためであることも多いが、時には(なんと肉皮だが)「環境改善」という名のもとに行われることもある。

地球の生物多様性について、保全生物学者

たちは実はほとんどよく分かっていなかったということが明らかになりつつある。泥炭湿地のような見過ごされてきた生息地で豊かな動物相が見つかったという事実も、このことをさらに印象づけた。しかし、Ngの研究の動機は学術的な興味だけではない。「科学者と環境保全担当者は、こうした生息地が存在し、保護に値することを知る必要がある。もしも、無知や誤った情報のためにこうした生息地が失われたら、ひどい悲劇としか言いようがない」とNgは話す。

Ngが泥炭湿地に強い興味を持ったのは1990年代初めだった。当時、彼はマレーシアの北セランゴール湿地を調査し、いくつかの思いがけない発見をした。彼の研究チームは、泥水の中を歩いていて、*Encheloclarias*属という、めったに捕まえることができない属のナマズ数種を発見したのだ¹。この属のナマズの発見が最後に報告されたのは1930年代だった。

そのような湿地の水のpHは、ほぼ酢と同じ3にもなることがある。「泥炭湿地は最近まで、酸性で生息に適さない、生物多様性の低い場所だとみなされていた。しかし、それは、だれも実際に入って調べてみなかったからだ」とNgは説明する。Ngの研究チームは、マレー半島、ボルネオ島、スマトラ島の多数の湿地に入り、報告されていなかった約80種の新種の魚を発見した。この結果、湿地に生息する種の総数の見積もりは200～300種にも

増えた。「私が指導する学生たちは、あまりにも研究すべきものが多いとこぼすくらいだ」と彼は言う。そうした種の多くは、泥炭湿地環境にしか生息していない²。

ダンスでおびき出す

こうした生物を泥の中から見つけるのは簡単なことではない。魚と甲殻類の多くは、湿地を走る水路を泳いでいるよりも、泥炭の中の狭い裂け目に隠れている。Ngは網を持って濁った水の中を歩き、同時にNgの同僚で体の大きなMaurice Kottelatは岸で何度もジャンプする。「Mauriceは、『雨ごいのダンス』をするんだ」とNgは言う。すると、生物たちはびっくりして泥炭から出て来る。両生類を含め、湿地に生息するすべての種の標本を欲しいなら、夜にも捕獲作業をしなければならない。▶



サンゴ礁の破片の堆積の中に巣を作るカニの1つ。

▶ 真っ暗闇の中で湿地を歩く作業は、怖がりの研究者には向いていない、と彼は言う。

Kottelatは欧州魚類学会長で、スイスのコルノルを拠点にしている。彼は「私は人が行ったことのない場所にいる魚に興味がある」と話す。湿地で彼らが見つけた魚の一部は、とても興味深いなぞを生み出した。たとえば、観賞魚として取引されているベタという闘魚のカラフルな種がそうだ³。「どうしてベタは、あんなに濁った水の中でこれほどカラフルである必要があるのか。これは非常に不思議な問題だ」とNgは話す。

悪臭のする湿地に胸までつかって歩くことが、Ngのフィールドワークのすべてではない。時にはフィリピンの東、約2,000キロにある米国領グアム島ののどかな浜辺といった、もっと気持ちのいい場所に行くこともある。そこで彼は、別の見過ごされてきた生息地の研究を行っている。それは、岸からわずか数十メートルにある、壊れたサンゴ礁の破片が堆積した場所だ。

熱帯の浜辺から海岸を縁取るサンゴ礁の方へと泳ぐと、このサンゴ礁の破片の上をまず通過することになる。これは、嵐や時の経過でサンゴ礁が壊れてできたものだ。たくさんの博物学者が、美しい魚の列や、サンゴ礁そのもののものに住む動物に誘われて、このサンゴ礁の破片の上を通過する。しかし、立ち止まってこの場所を調べてみようとする者はほとんどいない。「ほとんど砂漠のように見えるからだ」とNgは話す。

並はずれた好奇心を持つHarry Conleyがいなければ、このサンゴ礁の破片の堆積は、今なお砂漠として見過ごされていたかもしれない。Conleyは米空軍を退役した後、1980年代初めにグアム島の浜辺の沖合でダイビングを始めた。Conleyの最初の興味は貝殻を集めることだった。やがて彼は、このサンゴ礁の破片の堆積の中に大量の貝殻があることを知り、手で掘り始めた。「Conleyが掘った穴は爆弾でできたクレーターのようなだった」とNgは話す。

残がいの中の宝物

Conleyの興味は1990年代までに、彼の掘り出しで平穏を乱されたカニやほかの生物にまで広がった。Conleyは、グアム島周辺の海の生物多様性の調査を行っていた、Gustav



この水面下に住むもの。酸性で悪臭のする近づきたい東南アジアの泥炭湿地(上)は生命の豊かな多様性を育てている。ベタという魚のユニークで驚くほどカラフルな種(前ページ)もいる。

Paulayらグアム大学の研究者たち⁴と協力するようになった。Ngは、サンゴ礁の破片の堆積の中から見つかったカニの同定を手伝うよう頼まれ、この研究チームに2000年から加わった。

残念なことに、Conleyの研究は2002年、不意に終わった。頭に受けた銃弾で死亡したのだ。おそらく、自ら撃ったものとみられた。彼と口論となった男が撃たれて負傷した後だった。友人たちはConleyを、気前がいいが問題の多い人と評する。標本収集旅行でConleyと同行した経験の多いBruce Henkeは、「Harryはいつも孤独だった」と振り返る。「彼はとても負けず嫌いだ。もし、だれかが何かを見つけたら、Harryはもっとよいものを見つけなければ気がすまなかった」とHenkeは話した。

グアム島で航空管制官として働くHenkeは、サンゴ礁の破片の堆積から生物の標本を集め続けている。現在50歳の彼は、10代のときに潜水を趣味として始め、今では熟練した水中写真家だ。水深の浅いところでは、タンク数個分の空気を使って2時間も潜水し続けることもある。サンゴ礁の大きな破片は、バールでこじあげなければならない。「こうした作業は危険なこともある。だれにでも勧められることではない」とHenkeは話す。

泥炭湿地のものと同じように、サンゴ礁の

破片の堆積に生息する種の多くは、ほかの環境では見つかっていなかった。だから、この生息地はNgをひきつけた。カニだけで、それまで報告されていなかったおよそ6つの属と、数十の種が生息していた⁵。破片の奥深くに住むカニたちは、色素がなく、目が小さくなっていて、洞窟の中で見つかるカニと似ている⁶。「それは、まったく新しい世界だ」とNgは言う。

現在はフロリダ大学(同州ゲインズビル)に所属するPaulayは、サンゴ礁の破片の堆積には、サンゴ礁そのものの奥深くの裂け目の中に住む生物と同じような生物が住んでいると考えている。「この『隠れた動物相』は、サンゴ礁の生物多様性の大部分を映し出している」とPaulayは主張する。仮にこの破片の堆積がなかったら、そうした生物たちはサンゴ礁を壊さない限り見つけれられなかっただろう。Paulayは、サンゴ礁の破片の堆積を、そうした生物たちを研究するための「窓」とみなしている。

時間との闘い

サンゴ礁の破片の堆積の中には、これまでに見つかったよりも多くの生命がいるかもしれない。たとえば、掘り出し始めると捕まる前にあっという間に逃げてしまう、速く移動で

きる生物たちだ。「あらゆる種類のエビ、ハゼや線虫が見つかると思う」とNgは話す。しかし、この場所でもっと徹底的に標本を集めることは相当難しい課題だ。ひとつの方法は、海洋考古学者が人工遺物の破片を探して砂泥をふるいにかけるために使う真空ポンプの、もっと頑丈なやつを使うことだろう。しかし、そんな装置は今のところ存在しない。

海のほかの場所の生態系、たとえばサンゴ礁からさらに深みへ落ち込んでいる、海中の急なげけなどでの調査はもっと難しい。スキューバダイビングで潜れるのは水深100メートルまでだ。このようなげけは、傾斜が急なため、浅瀬でもできない。潜水艇を使えない限り、そうした場所の生物の標本を得る唯一の手段は、その深さにやみくもに網を投げ入れ、幸運を祈ることだけだ。

グアム島のサンゴ礁の破片堆積地の動物相は、差し迫った脅威にさらされているわけではないので、標本採取方法をどう改善すればよいか考える時間はある。しかし、Ngが野外調査を進めている場所の多くで時間はなくなりつつある。そうした場所には、たとえば、東南アジアのあちこちで見つかった、石灰岩の丘や洞窟からなる大規模な地形がある。密集した森から染み出る水は、石灰岩に溝や割れ目を作り、湿り気の多いそれらの場所でさまざまな植物と動物が暮らしている。

こうしたカルスト地形は、まったく見落とされていたわけではない。ボルネオ島のマレーシア領にあるグヌン・ムル国立公園は、その生物多様性と地質学的特徴から世界遺産に登録された。しかし、その動物相の研究は不十分だ⁷。世界銀行(米国・ワシントンDC)の生物多様性の専門家 Tony Whitten は「石灰岩の丘は特に多様な生物が生息する場所だが、このことが本当に理解されたのは最近だ」と話す。

石灰岩の上に成長する森は急速に消失していて、このため、石灰岩が乾燥し、その地下の生態系が破壊されている。洞窟を研究している生態学者たちは、開発業者や原料を求めて採鉱しているセメント会社と隣り合わせになることが少なくない。Ngの共同研究者でカタツムリの分類学を専門としている、シンガポール植物園の Jaap Vermeulen は「私たちは、生息地を壊すことのないようにと、注意深く標本を集める。なのに、数百メートル先では、チェーンソーを持って仕事に忙

しい男がいるわけだ」と嘆く。

42%の種が消失

Ngはシンガポールのコンクリートジャングルに暮らしており、際限のない開発のもたらすものを分かりすぎるほど分かっている。彼は昨年ネイチャーに論文を発表し、英国植民地時代の博物学者が作

成した詳細な記録を使って、シンガポールの森のほとんどが切り倒されてからこれまでに起こった絶滅について報告した⁸。Ngらは、これらのデータから外挿し、生息地の破壊が今の速度で続けば、東南アジアの森に現在生息している種の最大42%が今後100年の間に消えるだろうと結論した。この約半分は、ほかの場所では見つからない種なので、地球上から絶滅することになる。

生息地の消失の前にそこに住む多様な生物のカタログを作る作業は時間との競争であり、この競争は、ぞっとするような速度で消えつつある泥炭湿地で特に激しい。湿地から水を抜くと、近隣の森にも影響する。乾燥した泥炭湿地は、かなりの地域を壊滅させた大火災の原因となった。

泥炭湿地の生態系への脅威について語っていると、Ngは生来の熱意を現し、そして深い憂うつを隠せない。彼は気が進まないながら、交通事故があれば姿を見せる示談屋のようなことをしている。つまり、開発のために選ばれた場所へ急いで行って標本を集めるのだ。Ngのチームがそのような場合に使う採集方法は容赦なく、破壊的だ。「私たちは、それを『救出作業』と呼んでいる。私たちは、その場所に明日はないことがよく分かっている。だから、科学的に価値のあるものはすべて捕まえる。しかし、それはとてもやりきれない作業だ」と彼は話した。

こうした生息地が無関心に破壊されるのは、そこに多様な生物がいることが知られていないことが背景にある、とNgは考えている。彼の研究の結果、人々が少しでも多様な生物たちのことを知ってくれば、開発の抑制につながるのではないかと、Ngは期待す



サンゴ礁の破片の堆積地はこれまで見過ごされてきた。しかし、生きたサンゴ礁の奥深くに住む生物を調べる方法を研究者に与えてくれる。

る。「湿地を保存するメリットはない。そこには『何もない』からだ」。役人や開発業者は、こう主張することが多い。「確かにこうした場所には、大型で魅力的な動物はいない」とNgは認める。「しかし、彼らがある場所を指して、ここで暮らす生物種はわずかだと言うなら、ほぼすべての場合、彼らは間違っている」と彼は話す。

彼は、開発の波から残りの湿地を守ることができる可能性については悲観的なままだ。しかし、少なくとも、現在進んでいる破壊の真の深刻さを、将来の世代のためにはっきりさせておかなければならない、とNgは決意している。「これは悲劇だ。そして、その登場人物を知ってしまうと、悲劇はずっと重くなる」と彼は話した。

Carina Dennis は、ネイチャーのオーストラレーシア担当記者。

Peter Aldhous は、ネイチャーのニュースと特集記事担当チーフエディター。

1. Ng, P. K. L. & Lim, K. K. P. *Ichthyol. Explor. Freshwaters* **4**, 21–37 (1993).
2. Ng, P. K. L. *Wallacea* **73**, 1–5 (1994).
3. Kottelat, M. & Ng, P. K. L. *Ichthyol. Explor. Freshwaters* **5**, 65–78 (1994).
4. Paulay, G. *Micronesia* **35–36**, 3–25 (2003).
5. Paulay, G., Kropp, R., Ng, P. K. L. & Eldredge, L. G. *Micronesia* **35–36**, 458–517 (2003).
6. Ng, P. K. L. & Takeda, M. *Micronesia* **35–36**, 419–432 (2003).
7. Vermeulen, J. & Whitten, T. *Biodiversity and Cultural Property in the Management of Limestone Resources — Lessons From East Asia* (World Bank, Washington DC, 1999).
8. Brook, B. W., Sodhi, N. S. & Ng, P. K. L. *Nature* **424**, 420–423 (2003).
9. Boucher, G. & Lamshead, P. J. D. *Conserv. Biol.* **9**, 1594–1604 (1995).
10. Lamshead, P. J. D. et al. *BMC Ecol.* **3**, 1 (2003).
11. Lamshead, P. J. D. & Boucher, G. J. *Biogeogr.* **30**, 475–485 (2003).
12. Gray, J. S. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **112**, 205–209 (1994).

なぜ惑星は恒星の「そっくりさん」になれないのか？

惑星学：惑星の研究には、地質学者の推論的な技術と天体物理学者の数学的なアプローチの両方が必要だ。

原文：Why can't planets be like stars?

Nature Vol.430(509)/29July 2004; www.naturejpn.com/digest

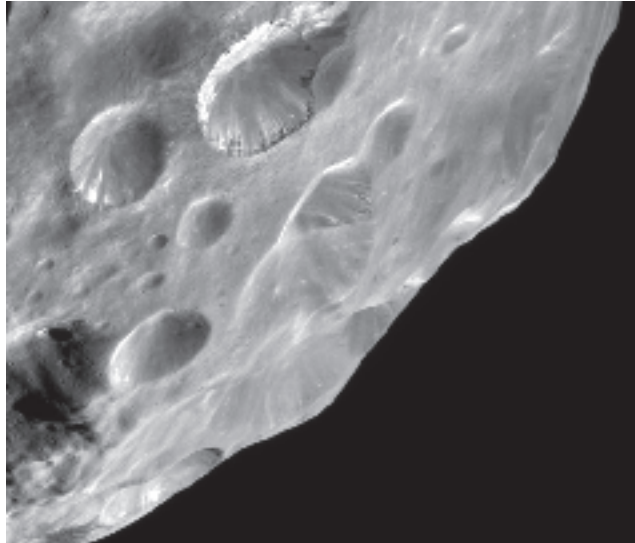
Stuart Ross Taylor

惑星は、確率過程によって生まれた、バラバラで多様性をもつ天体だ。私たちの太陽系には8つの惑星があるが、そのすべてが、異なった質量、密度、組成、自転速度、軌道傾斜角度をもっている。8つの惑星に共通する特性といえば、円に近い軌道と地球-太陽面に対する小さい傾斜角だけなのである。この特性から、Pierre-Simon Laplaceは1796年に、惑星が回転円盤（太陽星雲）から生じた、という結論を下すにいったたのであるが。

わが太陽系にはまた、120個以上の月と多数の天体があるが、その大部分に特有の組成と動きが見られる。惑星や衛星が、原始星雲のガスや氷や岩の組成から形成される過程には、統一性がみられない。惑星はまた、もとの位置から移動することもあるので、星雲の化学的性質の初期の（半径の位置による）変動を事実上かきまぜてしまう。

私たちの太陽以外の恒星の周囲を巡る惑星が100個以上も発見され、惑星の起源と進化の問題がにわかに注目を浴びるようになった。このような太陽系外の惑星は、限られたサンプリングにすぎないが、それでも、惑星の質量と間隔に大きな差があることが明らかになった。こうした新しく発見された惑星の多くは、著しい楕円軌道をもっており、問題はさらに複雑になってしまった。結局のところ、若い恒星の周りを回る円盤から生まれる惑星は、宇宙化学的な元素の存在比と、物理学や化学の法則によって制限される範囲内で、あらゆる、存在可能な状態になりうるということが判明するのではあるまいか。

惑星と違って、恒星は相対的に均一な組成をもっており、おもに質量に差がみられる。恒星進化の基本特性はすいぶんと昔から理解さ



月の話題：フェーベの映像が惑星形成に光明を投じた。

れており、ヘルツシュプリング・ラッセル図によって記述される。この図は、表面温度と光度の関係をあらわしたもので、本質的には、恒星の内部で起きている核反応を反映している。

これと対照的に、惑星は、バラバラで、系統的關係性をほとんど示さず、分類や定義への試みにさえ逆らってきた。このことは、冥王星の状態についての大論争にもみられる。冥王星は惑星とみなすには、あまりに「風変わりな小人」（＝軌道が楕円形でサイズも小さい）といわざるをえず、むしろ、カイパーベルトの多くの氷の天体の中の王様と言ったほうが合っている。これまでのところ、惑星については、ヘルツシュプリング・ラッセル図に相当するものは見当たらない。たとえ、私たちの太陽系の惑星の形成と進化について満足のいく説明に達したとしても、それが他のどこにでも適用されるという保証はない。おそらくこれが、Stephen Brushが述べたように、私たちの太陽系の起源が、科学における最も古い未解決問題の1つとされる理由だろう。

惑星を研究する際に立ちはだかる問題については、地球を理解する試みの歴史を振り返ってみればよい。地質学は科学の中でも新参

者だ。1788年にJames Huttonは地質学的時間について深い洞察を示したが、プレートテクトニクスが地球表面の構造を支えるメカニズムだと理解されるに至るまで、さらに150年もの歳月を要した。プレートテクトニクスには、大陸を造るだけでなく、進んだ文明に役立つ鉱床を形成するという有益な特性がある。プレートテクトニクスのおかげで、今、私たちはこのような議論ができる訳なのだ。しかし、このプロセスは太陽系の惑星の中でも地球だけに存在するものであり、かなり後になってから、偶然、わずか数百ppmという

分量の水が含まれるようになって、初めて可能となった。月の進化を理解しようとする上での問題点の多くは、汗水垂らして、湿気の多い地球岩石から手に入れた経験を、あまり深く考えもせずに、干からびた衛星の岩石にも適用しようとして生じたものだ。

自然が、ようやくのことで似た惑星を造ってみたら、せいぜい、地球と金星が生まれただけである。この双子の質量、密度、全体の組成、熱発性元素（カリウム、ウラン、トリウム）の存在比はよく似ている。しかし、金星は、月を持たない一枚プレートの惑星で、おそらく10億年に1度程度、玄武岩による惑星全域の「表面改装」が行なわれるらしい。この双子の地質学的歴史の違いの原因は何だろう？ 端的に言えば水であるが、かなりの部分は、初期の歴史における惑星降着の際の衝突のちがいに起因していると思われる。似ているからといって同じというわけではない。地球は、なるほど金星に似ているが、ジキル博士だってハイド氏に似ているのだ。太陽系以外の地球型惑星を捜し求める際には、こうしたちがいの原因と、そもそも、何がこうした多様な天体の形成を許したのか、その条件をみつけない

くてはならない。

ちょうど19世紀に地質学がそうだったように、惑星の研究は、科学的な探究の新しい分野の代表だ。直観的には、岩質の惑星は地質学者の手にゆだね、ガス質の巨大惑星は天文学者の手に任せればよいように思われるが、どちらのグループも単独では総合的な結論にたどりつぐのに充分とはいえないだろう。地質学者は、主に表面の観察を行なっているが、惑星の地殻はその内部とは大きく異なっている。対照的に、天文学者は、ずっと星の内部的な進化に

係わってきた。惑星系の多様性と、恒星、地球、種々の太陽系および太陽系外惑星を扱う上で、の哲学的な問題を処理するには、単一の専門家グループだけでは対応しきれないように思われる。「群盲象をなでる」のジレンマを避けるには、統一されたアプローチが必要なのだ。ちょうど、天体物理学、地化学、生化学、地球物理学が古典的な科学の狭間から生まれたように、惑星学も今や新しいタイプの研究者を必要としている。そうした研究者たちには、惑星を恒星と同じように数学的に扱いたがる天

文学者と、地球で育まれた探偵のごとき経験をあてはめたがる地質学者の中庸をゆく、独自の思考様式が必要なのだ。

筆者の **Stuart Ross Taylor** は、オーストラリア国立大学の地球海洋科学部 (the Department of Earth and Marine Sciences, Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia.) に所属している。

FURTHER READING

Brush, S. G. *A History of Modern Planetary Physics* Vol. 3 (Cambridge Univ. Press, 1996).

Stevenson, D. J. *Phys. Today* **57**, 43–48 (2004).

Taylor, S. R. *Destiny or Chance: Our Solar System and its Place in the Cosmos* (Cambridge Univ. Press, 2000).

books and arts

消えゆくゾウが物語る中国の自然環境悪化

森林破壊と都市の発達は農業の拡大によりもたらされたのだった。

原文: *The decline of China's environment*

Nature Vol.430(505-506)/29 July 2004; www.naturejpn.com/digest

The Retreat of the Elephants: An Environmental History of China

by Mark Elvin

Yale University Press: 2004. 547 pp. \$39.95, £25

Crispin Tickell

かわいそうな中国のゾウたちには同情の念を禁じ得ない。かつてゾウは中国全土に生息していた。しかし、今から4,000年以上前から徐々に住みかを追われ、今ではビルマとの国境に近い数ヶ所の保護区でしか見ることができない。そうなった主な理由は、人間が森林を切り倒して、農業を始めるようになり、ゾウの生息環境が破壊されたからだ。数が減り始めていたゾウの群れでさえ農民にとっては厄介な存在だった。農作物を踏みつけ、奪い取っていくのはゾウの仕業だったからだ。また一方で、ゾウの利用に価値を認める人々もいた。軍事、輸送や儀式に役立ったからだ。象牙は珍重され、鼻の肉は美食家の舌を楽しませた。中国のゾウは減り続け、ほとんどの中国人にとって、思い出程度の存在となってしまっている。著者のMark Elvinは、中国のゾウの個体数減少をたとえ話

に使い、工業化を迎えるまでの中国国内での自然環境の変貌を説明している。その一部は、現代のアフリカにも見られる話である。

本書は、中国の自然環境史というよりも、むしろ歴史の断片の寄せ集めといえる。著者は、さまざまな中国語文献からの豊富な引用を駆使して、各地で起こった事象とその原因を示している。これと似た事象が中国以外でも起こったことは考古学研究によって判明しているが、文書による記録が残っているのは中国だけで、それぞれの時代を生き抜いた人々が感じていたことを伝えるユニークな記録となっている。ただしそれは、心地よい、教訓が得られるといった類のものだけではなく。そして常として、自然環境破壊の影響を最も大きく受けたものたちの声を聞くことは決してできない。

中国における自然環境の変容は、地域によってペースが異なっていたが、大きく見ると、いくつかの特徴があった。すなわち、森林破壊によって農業が拡大していったこと。そして開発ラッシュで資源が搾取され、多くの種が

絶滅した結果、人口が増大。これによって町、都市や省が発達し、それに伴って社会的階層の分化が始まり、都市や省の間の競争が激化し、戦争がそれに拍車をかけ、その際には、環境が武器として利用されることもあったこと。すぐれた技術もあったが、資源の不適切な管理のために、効果は減殺されたこと。人々は、身の回りで起こる局所的な状況にとらわれ、変化の影響を受けやすくなったこと。そして、社会全体に影響を与える社会や経済の崩壊の危険が高まったことだ。著者は、中国の3つの地域を例にとり、地域による明らかなきがいを示した。その3つの地域とは、揚子江の南側に位置する嘉興、漢族が苗族を徐々に駆逐していった華南地方の貴州、そして東北地方の山岳地帯にある遵化だ。

いずれの地域でも、治水は極めて重要だった。「hydraulic despotism (水利権の掌握による専制政治)」という言葉では、すべてを説明し尽くせないかもしれないが、それでも、時には気まぐれを起こしもあるが貴重なこの水資源を管理する必要性が一因となって、地元

のコミュニティだけでなく省さえもが発生したのだった。灌漑を整備し、海水の浸入を抑え、堤防や土手を維持管理し、浚渫工事をやり、洪水や暴風雨に対処し、絶えず変化する気象状況に対応することは、今も昔も困難を伴う。また、特定の制度に莫大な数の人々が依存していると、変化への対応は、ますます難しくなった。

人間が環境に与える影響を管理することを目的とした中国人の試みは複雑で、特筆すべきものがある。それ以上に特別なのが、過去数千年間にわたって中国人が堅持してきた自然環境に関する信念と自然環境に対する姿勢だ。一般化して論じると必ず誤解を招いてしまうのだが、あえて著者の言葉を借りて一般化して述べてみると、中国人は、合理性を備えた世界の支配者になりたいという望みに突き動かされていたのだといえる。彼らは、森林を伐採すること、河川の付け替えを行ったり、河川の水質汚染を引き起こすこと、自然景観を破壊すること、そして政治的要請や軍事的要請を絶対的に優先させることに、ほとんど躊躇しなかった。彼らは卓越した組織力を持ち、当時の欧州各国よりもはるかにすぐれたプロジェクト遂行能力を有していた。ところが、その際に、中国人は自然環境にほとんど配慮せず、知らず知らずに数多くの長期的な問題を引き起こしていったのだった。

その反面、中国人は、自然や自然美のさまざまな形態に対して、特に細やかな尊敬の念を示した。森林破壊が進んでいた一方で、木々を選んでは、それら1本1本を愛でた。天と地は密接に関連していると考えられ、自然と超自然との境界線はあいまいなものととらえられていた。そこでは、生命を生み出すエネルギーとエネルギーを生み出す物質が会い、それぞれが陰と陽によって作り出されていると考えられた。竜と雲は空中で発生する雷鳴や稲妻として現われることもあれば、地中で地震として現われることもあるとされた。これらは、生物界の一員として、人間の行いを支持したり、罰したりした。このように気象の動きまでもが人間の行動と関連づけられ、気象学も道徳性をもって考えられた。

このような世界では、目に見えない力が何を感じ、何を引き起こしたかを占うことが非

常に重要だった。占いでは、動物や人間を生け贄にしたり、哺乳動物の肩甲骨や亀の甲羅の裏側を焼くことによって生じる亀裂を鑑定することが行われた。商王朝時代は、支配者が、目に見える世界と目に見えない世界との仲介者の役割を担っていたことから、占いには政治的意義があった。権威機構にほぼ神に近い属性が与えられた他の時代も同様だった。

科学以前の時代の私たちの祖先の宇宙観に立ち入ることが難しいように、このような中国人の宇宙観に立ち入ることは難しい。著者は、観察可能で、検証可能な自然界の事実を探し求め、思考プログラムの中で活用するというやり方自体が中国人にとっては、ほとんど異質のものだったことを示している。その結果、変化がもたらした衝撃は、既に科学革命が起こっていたヨーロッパよりも中国の方が急激なものとなった。毛沢東時代を経た今でも、この旧来の考え方は残っているようで、今日の基本的な方針にも貫かれているかもしれない。

本書は、すらすらと読めるような書物ではない。引用文の中には、本論とほとんど関連性がないと思われるようなものもあり、全体をもう少し簡潔にすれば読みやすくなったのではないだろうか。また、本書の終わり近くでは、あまり明快とは言えない数式を使った説明がある。それは、あたかも自然環境の持続可能性を1つのアルゴリズムによって説明できると言っているかのようだ。とはいえ、本書を全体的に見れば、地球上で最も長い文明の歴史から得られた寓話、詩と思想を寄せ集めた魅力的で学問的な書物といえる。中国文明とその人々による破壊を受けることが多かった脆弱な自然環境との関係を学ぶことで、いくつかの教訓を得ることができる。特に中国の産業界が、他の国々の場合と同じように、自然環境に対して、これまでにない大きな負担を強いている現代にあつては、なおさらである。本書は、ゾウの話も含めて、これからの世代の人々にとっての史料集となるだろう。■

評者の **Crispin Tickell** は、環境と開発に関する中国国際協力委員会(CCICED)のメンバーである。

Nature Publishing Group makes an IMPACT



インパクトがある雑誌は、
Nature です。

2003年度、*Nature* のインパクト・ファクターは30.979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**

最古の鳥類の脳が語る

Lawrence M. Witmer

知られているうちで最古の鳥類である始祖鳥は、飛ぶための「正しい資質」を備えていたのだろうか。
現代の進歩した技術でその頭蓋構造を調べたところ、恐竜から鳥類への移行と飛翔の進化について手がかりが得られた。

原文: Inside the oldest bird brain

Nature Vol.430 (619-620)/ 5 August 2004; www.naturejpn.com/digest

始 祖鳥(Archaeopteryx)は、たとえば恐竜ティラノサウルス・レックスほどの人気スターではないかもしれないが、象徴的な立場にあることには間違いない。始祖鳥は、鳥類のように羽毛のある翼と叉骨をもち、なおかつ、爬虫類のように歯のある顎と骨からなる長い尾もっており(図1)、ほぼ完璧な移行途中の形態である。化石が見つかったのは1859年にダーウィンが『種の起源』を出版してまもなくのことで、それ以降、始祖鳥は進化の強力な例証とされてきた。

鳥類とその飛翔能力の起源に関する議論でも、始祖鳥は主役となってきた。羽毛のある恐竜や太古の化石鳥類が中国で発見されて鳥類への移行について説明が進んだものの^{1,2}、ドイツ南部のジュラ紀石灰岩から掘り出された始祖鳥の骨格化石(1億4,700万年前のもの)は、今もって最古の鳥類化石そして最も原始的な鳥類化石であることに変わりはない³。始祖鳥化石は過去140年の間に実に多くの研究者によって精査されており、新たな知見はもう出てこないように思える。しかし、Nature 8/5号 p. 666でP Domínguez Alonsoたちが報告した記念碑的な研究成果⁴は、最初に発見された骨格標本を材料に、始祖鳥の脳と感覚器官について興奮を呼ぶようなデータを示している。この成果は、始祖鳥の、生物学にとっても進化における鳥類への移行問題にとっても大きな意味合いをもつ。

ロンドンにある自然史博物館の研究者たちは、始祖鳥が生きていたころに脳を納めていた頭蓋の部分を外に持ち出した(図1)。この頭蓋はヒトの小指の先端分節よりも小さいので、研究チームのリーダーであるA Milner女史は、これを入れた箱を安全のためブラウスのポケットにしまい、ロンドンから、高解像度のX線CTで解析できるテキサス大学オースチン校まで運んだ。そして研究チームは、脳の入っている頭蓋腔や内耳(平衡感覚や聴覚を担う器官)の薄い骨の内部をのぞき見た



図1 始祖鳥の「聖像」。これは1877年に発見された「ベルリン標本」で、現在はベルリンのフンボルト博物館に所蔵されている。Domínguez Alonsoたち⁴が今回調べた「ロンドン標本」はそれより前(1861年)に発見され、頭部が胴体と分かれているが、脳を包む頭蓋部分が細かいところまで非常によく保存されている。



図2 鳥並みの頭脳? Domínguez AlonsoたちがCTスキャンを使って作成した始祖鳥の脳頭蓋と脳の三次元復元像。脳と内耳の解析から、始祖鳥には飛ぶための装備が整っていた可能性が高いという結論に至った。この復元像は長さ約20 mmで、赤い部分は化石化する間に沈澱した二酸化マンガンの結晶。

め、X線で脳頭蓋を薄く「スライス」し(1枚の切片は印刷版ネイチャー誌の紙1枚の半分未満という薄さ)、次に頭蓋腔や内耳をデジタル画像で復元した。

脳や感覚器官に関する情報収集は古生物学研究の最優先事項の1つである。こうした知識から、骨格そのものからでは分からない絶滅した生物の行動を知る手がかりが得られるからだ。始祖鳥の場合、発見当初から「知られるうちで最古のこの鳥類は本当に飛べたのか」という疑問がもたれていた。これまで、その答え探しは空力学の面から行われ、当然のことながら翼や羽毛の構造に焦点が当てられてきた^{3,5}。しかし、たとえば飛行機が飛ぶのに関係するのは翼や方向舵やフラップだけではなく、操縦士や搭載コンピューターもかわっている。今回の研究⁴では、始祖鳥について今まで欠けていたこの種の頭脳情報が報告されている。

始祖鳥の脳は、原始的ではあるが現在の鳥類の脳によく似ている。体サイズが同じくらいで平均的な爬虫類の脳よりも大きい、同じくらいの体サイズの現生鳥類の脳と比べ

るとおしなべて小さい。脳のつくりも基本的には鳥類のもので、運動にかかわる領域が大きい。しかも、視覚中枢が大きくなっていることから、始祖鳥は視覚偏重型の動物だったと考えられる。特に重要なのが、繊細なつくりの内耳蝸牛管について得られた新たな知見である。というのも、最近の研究によって行動や生活様式と蝸牛管の構造が関係づけられたからである^{6,7}。始祖鳥の蝸牛管もやはり、現在の爬虫類より鳥類のものに似てお

K.A. VON ZITTEL

P.D. DOMÍNGUEZ ALONSO

り、これからみて俊敏な動きや頭部と目の間の協調性は相当高かったとみられる。

では、これは飛翔能力のある動物の脳や耳なのだろうか。翼竜ではまったく別個に飛翔能力が進化しており、ここからある程度の手がかりが得られる。翼竜は、2億3,000万～6,500万年前の空を飛び回っていた飛翔能力のある絶滅爬虫類群である。同僚たちと私が行ったCTスキャン研究⁶で、翼竜の脳や内耳蝸牛管の拡大や構造の様子が、始祖鳥で見られるものと酷似していることがわかってい。しかも、脳/体のサイズ比は両者ほぼ同じである。互いに独立に進化してもこうした類似性が見られることから、飛ぶためには神経の面で何らかの基本的必要条件があるのかもしれない。実際 Domínguez Alonso たち⁴の主張によると、神経学上の見地からみて、始祖鳥には飛ぶための「正しい資質」が本質的に備わっていたという。しかしその一方で、捕食型の(獣脚類)恐竜の一部(始祖鳥と他のすべての鳥類を含む分類群)は鳥類と似た脳の特徴をいくつかもっていたとも述べている。Domínguez Alonso たちの考えでは、始祖鳥は「現生鳥類のパターンにさらに近い段階」だという。この仮説はおそらく、この研究の最も興味をそそる成果だ。我々はいよいよ、知られるうちで最も原始的な鳥類の脳と内耳について信頼できるデータを手に入れたのであり、これで鳥類への神経上の移行を証明できる。

こうなれば研究者たちは先を争って、始祖鳥で特定された特徴を他の初期鳥類や鳥類様獣脚類の化石で探し出そうとするだろう。鳥類への移行の詳しい状況はどんなふうだったのだろうか。「鳥類」の神経の構成部分は足並みそろえて進化したのか、それとも、てんでばらばらに進化したのだろうか。まだ飛べなかった鳥類の先祖たちが、こうした神経構成部分の多くを発達させていたことが明らかになる可能性もある。もしそうだとすれば、翼竜が明らかにゼロから神経の飛翔制御系を作り上げた⁶のに対して、鳥類は遺伝的に受け継いだ高度の神経装置を進化の過程で飛翔のために流用し、それが結果的に飛翔の向上につれて磨き上げられたのかもしれない。一番の議論をよぶ種はおそらく、最も鳥類に似た白亜紀獣脚類(ペロキラプトルなど)の一部が実は始祖鳥様の初期鳥類の二次的に飛べなくなった子孫だった、とする異端の説⁸だが、「飛ぶための脳」や「飛ぶための耳」の特徴が把握できれば、こうした説を検証する手だてにも

なりうるのではないだろうか。

始祖鳥の論文は多々あるが、今回の最新の論文によって始祖鳥化石の象徴としての存在の大きさが保たれた。改めてよくわかったのは、始祖鳥で始まった議論は始祖鳥で終わるということだ。

著者の Lawrence M. Witmer はオハイオ大学整骨療法医学校の生物医科学科に所属している。
e-mail: witmerL@ohio.edu

1. Xu, X. *et al. Nature* **421**, 335–340 (2003).
2. Zhou, Z., Barrett, P. M. & Hilton, J. *Nature* **421**, 807–814 (2003).

3. Elzanowski, A. in *Mesozoic Birds* (eds Chiappe, L. M. & Witmer, L. M.) 129–159 (Univ. California Press, Berkeley, 2002).
4. Domínguez Alonso, P., Milner, A. C., Ketcham, R. A., Cookson, M. J. & Rowe, T. B. *Nature* **430**, 666–669 (2004).
5. Rayner, J. M. V. in *Biomechanics in Evolution* (eds Rayner, J. M. V. & Wootton, R. J.) 183–212 (Cambridge Univ. Press, 1991).
6. Witmer, L. M., Chatterjee, S., Franzosa, J. & Rowe, T. *Nature* **425**, 950–953 (2003).
7. Spoor, F. *et al. Nature* **417**, 163–166 (2002).
8. Paul, G. S. *Dinosaurs of the Air: The Evolution and Loss of Flight in Dinosaurs and Birds* (Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, 2002).

もっと深いところまで理解する

Thomas S. Duffy

地球内部の核とマントルの境界は、もっとも謎に満ちた領域である。

新たに発見された結晶相の研究で、この領域の解明がさらに進むだろう。

原文: Deeper understanding Nature Vol.430 (409–410)/22 July 2004; www.naturejpn.com/digest

地球のマントル最深部の厚さ 250km 程度の領域は、歴史的な理由から D⁺ 層として知られていて、体積は比較的小さい。しかし、多くの地球物理学的現象、なかでもマントル中でのブリュームの形成、核とマントルの相互作用、また、テクトニックな力によって地球内部に引き込まれ沈み込んでゆく地殻スラブは最終的にどうなるかといったことを理解する鍵を握っている可能性がある。この領域の研究は地震波のふるまいを解釈することで行われるが、極めて複雑であることが分かっている。しかしながら、この領域の鉱物の高温高圧下での特性についての研究ではこのような複雑さのほとんどはうまく説明されなかった。問題の1つとして、D⁺ 層の極限条件、つまり 135 ギガパスカルにおよぶ圧力とおそらく 2,000K から 4,000K の範囲にある温度を実験室で実現することの困難さがある。しかし、結局は室内実験と理論とが一体となることで、この領域のことがよりはっきりと分かるようになった。

Nature 7/22 号 p.442 から始まる、飯高ら¹ および Oganov と小野² の論文で、最近発見された³ 高圧下の結晶構造に関する物理特性の計算結果と下部マントル深部の地震観測とを結びつける知見が報告されている。地球のマントルの主成分はマグネシウム、鉄、カルシウム、アルミニウムを含む密度の高い珪酸塩鉱物である。深度 660km から深度約

2,900km のマントルの底まで広がる下部マントル(図 1)は主にペロブスカイトとして知られる結晶構造の(Mg,Fe)SiO₃ から成っていることが実験によって明らかになっている。この物質の性質は下部マントルに対するほとんどの観測結果と矛盾しないが、マントル底部近辺における特性の急激な変化はペロブスカイトの挙動からは説明できない。

それゆえ、村上らによって D⁺ 領域と同等の条件下での MgSiO₃ の「ポスト・ペロブスカイト相」が実験で発見されたこと³ は、新しい相の物理特性に関する少なからぬ関心を引き起こした。このような条件下で直接実験を行うのは困難なため、飯高ら¹ および Oganov と小野² が行ったこの相についての第一原理による量子力学的な計算は、地球深部を研究する上でとりわけ有効である。ペロブスカイト構造が多くの化合物に広く見られるのとは異なり、ポスト・ペロブスカイト相はかなり珍しいもののようだ。この構造では、陽イオンのシリコンはそれぞれ陰イオンの酸素 6 個に囲まれたまま、下部マントルの特性である 8 面体配位を作る。しかし、ペロブスカイトでは角の部分で結合した 3 次元の網状組織を形成しているのに対して、ポスト・ペロブスカイト相ではシリコンの 8 面体が縁と角を共有してマグネシウム層とシリコン層が交互に重なったシートのような構造を作る(飯高らの論文、Nature 7/22 号 p.442 の図 1 を参照)。

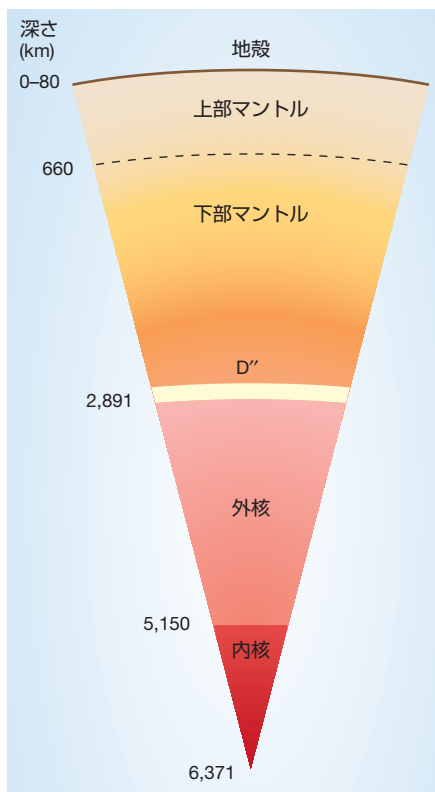


図1 地球内部の主たる領域。下部マントルの最新の解釈、D''層については図2に示す。

このことは室内実験で十分実証されているかもしれない³。しかし、理論計算によってポスト・ペロブスカイト相の他の特性のいくつかが今回明らかにされた。まず第一に、熱力学的な問題を考慮に入れて、飯高ら¹およびOganovと小野²は0Kで約100Gpa以上の圧力ではポスト・ペロブスカイト相は安定であると期待できることを示した。さらにOganovと小野²は118Gpa近辺で加熱した後の新しい相の実験観察結果を付け加えている。このような極限条件下での実験では、構造変化の報告は検証されないことがあまりにも多い。そこで、ポスト・ペロブスカイト相についての複数の実験観察結果²⁻⁴と安定性に関する理論的な予測とを併せて、新しい相の意味合いについては真剣に考えることが重要である。確かに、この2つの理論的な研究報告^{1,2}は他の研究^{5,6}の結果ともおおむね一致しているのだ。

実験結果と併せて、0Kでの理論計算の結果はこの転移が正の圧力-温度勾配をもつことを示している。マントルの温度では、相転移はマントル底部から約200~300km上(図2)で起こると予測され、その深さで^{7,8}おそらくは全球にわたって^{9,10}起こっている地震波速度の急激な変化あるいは不連続に対する証拠と一致している。相境界の正の勾配は、D''不

連続面が地震波の速い(おそらく温度の低い)領域では押し上げられ、地震波の遅い(温度の高い)領域では押し下げられているという地震波の証拠¹⁰とも矛盾しない。この新しい相はD''層の条件ではペロブスカイトよりも約1~2%密度が高いことも分かった。

弾性特性の計算から、ポスト・ペロブスカイト相は異方性で、層に平行な方向よりも垂直な方向の方が圧縮性が高いことが確認された。また、地震波の速度にかなり異方性があり、特に横波として知られる種類の波に対して大きいことが明らかになっている。この構造の性質を考えると、ポスト・ペロブスカイト結晶は格子選択配向を示すようになり、層に垂直な方向が鉛直方向を向く傾向にあるというのはもっともらしい。層状構造が不完全な場合、他の層の存在を考慮に入れると、マントル深部の観測⁷⁻¹⁰と矛盾しない2~3%の地震学的不連続はこの相転移に起因するようだ。この転移は地震波のもう1つの主要な種類の波である縦波よりも横波により大きな不連続をもたらすと予測される。

このような形の微細構造によって、垂直方向に偏向した横波(速度 v_{SV})よりも水平方向に偏向した横波(速度 v_{SH})が速く伝搬するようになる。D''層の地震学的異方性は複雑だが、この意味での異方性はある領域については詳

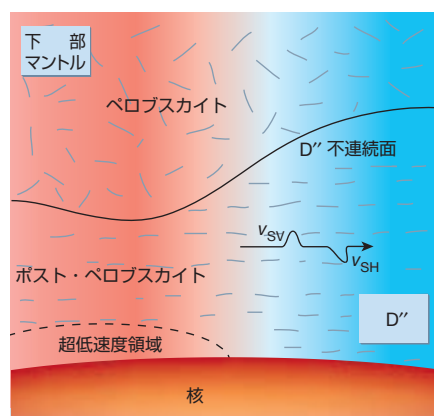


図2 マントル底部の新しいモデル。現在では、D''不連続面はマントル底部から約200~300km上で(Mg,Fe)SiO₃がペロブスカイト構造からポスト・ペロブスカイト構造へ転移するためにできると考えられている。相境界は局所的に温度の低い領域(青)で上昇し、局所的に温度の高い領域(赤)で下降する。ポスト・ペロブスカイト相の層状構造が地球の核に平行に配列する傾向があることは、垂直方向に偏向した横波(v_{SV})よりも水平方向に偏向した横波(v_{SH})が速く伝搬することの説明に役立てられる。超低速度領域は薄い(厚さ5~40kmの)領域で、核のすぐ上にあり、横波の速度は非常に遅くなっている。

しく記録されている¹¹。以前は、このようなふるまいと下部マントルを構成するペロブスカイトその他の鉱物の弾性特性や変形挙動とを一致させることは困難であった。その代わり、異方性は配列した含有物や異なる地震波速度を持つ鉱物の層状構造に起因すると提案されていた。ポスト・ペロブスカイト相の発見はより簡潔な説明を与えるかもしれない。

提案されているペロブスカイトとポスト・ペロブスカイト間の転移はD''領域についてのすべての問題を解くには十分ではない。しかし、この領域を研究する新しい足がかりとなり、地球物理観測、室内実験、コンピュータを用いた計算がさらに促進されることは確実である。鉱物物理の観点からは、微細構造の発達についての研究は、より化学的に複雑な系のふるまいについての制約の研究と同様に、明らかに必要なものである。また、弾性的な異方性は0Kで計算されているだけであり、場合によっては温度により異方性の大きさや方向すら大きく変わる可能性がある。理論的な研究^{1,2,5,6}は極めてよく一致している。しかし、ある程度の近似を含む類似した手法がすべてに用いられており、さらに進んだ考察も必要となるだろう。

とはいえ、地球マントル最深部の研究の新しい時代が始まった。D''不連続面とこの領域の地震学的異方性の徴候の双方に関する説明は、ついに手の届くところにまできたのかもしれない。

Thomas S. Duffy はプリンストン大学地球科学部に所属している。

e-mail: duffy@princeton.edu

1. Iitaka, T., Hirose, K., Kawamura, K. & Murakami, M. *Nature* **430**, 442–445 (2004).
2. Oganov, A. R. & Ono, S. *Nature* **430**, 445–448 (2004).
3. Murakami, M., Hirose, K., Kawamura, K., Sata, N. & Ohishi, Y. *Science* **304**, 855–858 (2004).
4. Shim, S.-H., Duffy, T. S., Jeanloz, R. & Shen, G. *Geophys. Res. Lett.* **31**, L10603 (2004).
5. Tsuchiya, T., Tsuchiya, J., Umemoto, K. & Wentzcovitch, R. M. *Earth Planet. Sci. Lett.* **224**, 241–248 (2004).
6. Tsuchiya, T., Tsuchiya, J., Umemoto, K. & Wentzcovitch, R. M. *Geophys. Res. Lett.* **31**, doi:10.1029/2004GL020278 (2004).
7. Lay, T. & Helmberger, D. V. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* **75**, 799–837 (1983).
8. Wyssession, M. E. et al. in *The Core–Mantle Boundary Region* (eds Gurnis, M. et al.) 273–297 (Am. Geophys. Un., Washington DC, 1998).
9. Nataf, H.-C. & Hough, S. *Geophys. Res. Lett.* **20**, 2371–2374 (1993).
10. Sidorin, I., Gurnis, M. & Helmberger, D. V. *Science* **286**, 1326–1331 (1999).
11. Kendall, J.-M. & Silver, P. G. *Nature* **381**, 409–412 (1996).

科学に関する国別の影響度

各国が研究支出から得る収穫をデータから分析する。

原文: *The scientific impact of nations*

Nature Vol.430(311-316)/15 July 2004; www.nature.com/nature

David A. King

各国政府や企業、財団などは科学に関する優先事項や資金拠出を決定しなければならず、ある国が科学界で占める順位を判断する能力が重要となってくる。本稿では、過去10年を対象に研究投資で得られた研究業績とその価値(the output and outcomes; 以下、研究成果)を分析し、研究の質を国家単位で評価するとともに、世界的視野で検討する。科学研究の質を評価する方法は数多くあるが、十分とされているものはほとんどない。今回の分析は、1981～94年を対象としたMayの画期的業績¹を更新、拡張するものであり、イギリス科学技術庁(OST)が委託した1993～2002年の研究²を利用している。OST研究の目的は、表向きイギリスの科学技術研究の成績評価という限定的なものであるが、本稿は成果の判断基準の提供や、他国の研究成果の分析も行っており、より幅広い関心が持たれるはずのものである。

国別の科学の量と質を評価するために分析したのは、発表された研究論文および総説の数とその被引用数である。データはすべてトムソンISI(旧称、科学情報研究所)から提供を受けた。トムソンISIが索引を作成している科学誌は8,000誌、36言語にわたり、科学技術界で重要な資料のほとんどすべてを対象に評価している。

この種の計量書誌学的分析で考えられる問題のひとつは、結果を歪曲している論文がありうるということである。たとえば、内容が疑わしいために被引用頻度が高くなっている論文もあるであろうし、自らの論文を必要以上に引用する著者があるかもしれない。しかし、今回の分析で対象とした論文の数は膨大で、そのためそのような歪み現象は問題にならないと考えられる。大規模な研究所の所長は、論文への寄与がおおよそ間接的なものであっても著者として名を連ねている場合がある。しかし、今回の分析で考慮したのは著者が拠点とする国である。それは著者が働いて

いる場所であって個人の氏名ではない。さらに、引用に関する分析は分野間の比較に利用してはならない。たとえば、医学研究論文は数学と比較して被引用回数が多い。このため、分野間にまたがって被引用数を合計してしまうと、被引用頻度の高い分野が低い分野を目隠してしまうことになる。この問題に関しては後で考察する。

比較した31カ国(比較群)には、G8各国や2004年の拡大前のEU15カ国が含まれる。具体的には、イギリス、イタリア、カナダ、ドイツ、日本、フランス、米国、ロシア(以上G8各国)、アイルランド、イスラエル、イラン、インド、オーストラリア、オーストリア、オランダ、韓国、ギリシャ、シンガポール、スイス、スウェーデン、スペイン、台湾、中国、デンマーク、ベルギー、フィンランド、ブラジル、ポーランド、ポルトガル、南アフリカ、ルクセンブルクである。世界の高被引用論文は98%以上がこの比較群の国々から発表されている。ここでいう高被引用論文とは、分野別、発表年別の被引用頻度上位1%というトムソンISIの定義によるものである。これ以外に全162カ国による高被引用論文は合計しても2%に満たない。

上位グループ

表1に示すのは比較群に関する被引用数の分析と総論文数であり、これは科学技術の全分野を対象としている。各被引用論文は著者が拠点を置く国すべてに1回ずつ割り振られている。このため論文によっては2回以上数えられるものがある。国別論文数の合計が全世界合計を上回っているのは、国際共同研究のためである。国別占有率の合計も同じく100%を超えている。グループ論文数の集計(EU15カ国、世界)ではこの点を考慮し、著者が複数国にまたがる論文の重複分を除外して正味の合計を正確に算出した。

表1の順位は項目ごとの順位の違いがわずかであり、1981～94年のものに近い¹。いず

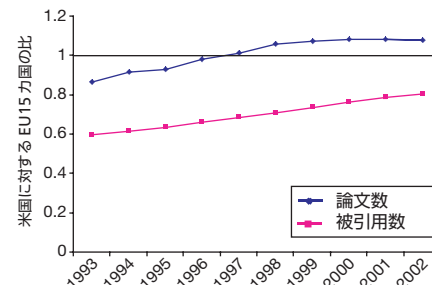


図1 ヨーロッパと米国の比較。米国を1としたときの比較群内EU15カ国の論文数と被引用数。1993～2002年のISIデータベースによる。著者がEU内の複数国にまたがる論文があるため、EU15カ国の合計には重複がある。米国、EU15カ国とも、論文数と被引用数は当該年の合計値。

れらの被引用数分析値を用いるかによる影響はほとんどない。世界の被引用数の占有率(被引用数占有率指標)は全分野の被引用数の国別占有率であり、医学など被引用頻度の高い分野の被引用数が強く反映されている。米国は論文数、被引用数、上位1%被引用論文占有率で大きく他を引き離しているが、今やEU15カ国を合わせれば米国を上回る数の論文が発表されており(図1)、被引用数も接近してきている。イギリスはいずれの被引用数でも第2位であるが、論文数では日本がほぼ肩を並べており、被引用数ではドイツとの差がわずかとなってきている。

1993年から2002年の間に米国の被引用数占有率が約3%低下している一方、イギリスとドイツは上昇している。データ補正後のイギリスの占有率は1993～97年には10.87%、1997～2001年には11.39%、2001年には11.6%であった。被引用頻度の最も高い国々を残りの国々を大きく引き離している。G8各国はおおむねこの最上位区分に属しているが、ロシアはソ連の崩壊以来科学への投資が激減して遅れをとっている。上位7カ国の背後には北欧の国々が迫っており、北欧としてまとめてみればこの最上位区分に加わることになる。

世界の科学界に対する各国の寄与は間違いなく重要な指標であるが、人口や国内総生産(GDP)に照らして研究成果を比較するのにも有

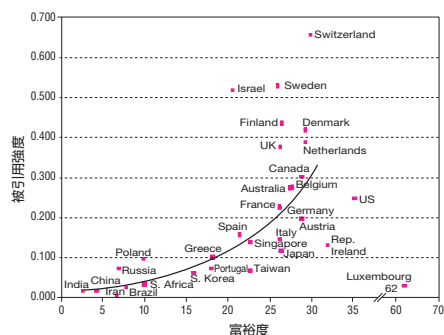


図2 経済的および科学的豊かさの比較。比較群内31カ国に関して、国別の科学被引用強度(全論文への被引用数と各国GDPとの比として算出)を国別の富裕度(1人当たりGDP)の関数として表示。GDPと富裕度は1995年の購買力平価を利用して単位1,000米ドルに換算。情報源: トムソンISI、OECD、世界銀行。

意義である。図2は「富裕度」(1人当たりGDP)と「被引用強度」(単位GDP当たりの被引用数)の関係を表している。スカンジナビア諸国やイスラエル、オランダ、スイスは群内では小国であるが、いずれもこの指標では上位となり、スイスの優位性が際立っている。富裕度が1人当たり20,600米ドル(スペイン)から35,800米ドル(米国)までの国々に関しては被引用強度の広がり10倍近くにわたり、この範囲では相関がほとんど認められない。G8のなかで外れた値を示しているのは、比較群全体の平均被引用強度を下回っている米国と日本、それに平均を上回っているイギリスである。座標のもう一端の方に目を転ずると、GDPが世界第2位の中国、第4位のインドが、いずれも富裕度、被引用強度とも低くなっている。

論文当たりの被引用数はある国の研究業績がもつ影響度の指標として有用である。分野ごとに被引用率が異なることによる歪みを是正するため、各分野の平均に対して規準化し発表年を考慮に入れることによって、データを再計算することもできる。こうして作成されたのが再計算影響度(RBI)の数値である。表2が示すのは全分野にわたる31カ国のRBIで、1993～2002年の平均値とともに、傾向を表すため2002年の値も示す。G8各国の中では米国が首位であるが、やはりイギリスとドイツがこの期間で急激に差を縮めている。米国のRBIはこの期間に小幅

な上昇を示していることから、被引用数占有率が低下している(表1)のは、論文の発表数が相対的に減少する一方、平均的に質が高いことによるものである。

現在一般に質の高い論文はすべて英語で発表されると考えられており、この表の結果は英語使用による偏りを反映するものではないと考えられる。しかし、確かな証拠があるわけではないが、米国の寄与全体の大きさを考えると、米国では自国の論文が引用される傾向が強いために分析結果が歪曲されている可能性も考えられる。日本とロシアは、科学の面でほかの主要国と隔離されていることから、特にこのことで伸び悩んだ可能性がある。

分野別の検討

各国政府にとって、国際比較に基づく分野ごとの強さと弱さに関する示唆も必要である。ひとつの分野についての国家間の比較をすることは、ある国のなかで2分野を比較するよりも容易であろう。

分野の分け方は何通りもある。経済協力開発機構(OECD)のデータベースでは、医学、自

然科学、農学、工学技術、それに社会科学の5種類に大分類されている。イギリスでは、公的研究支出を決定するための評価が68の分野単位に基づいて実施されている。イギリスではなくイングランドを含む7カ国に関するAdamsの計量書誌学的分析³はこの単位に基づいて1988～96年を対象に行われ、68分野単位が数ブロックに類別されている。さらに、OSTがイギリス大蔵省から受ける助成金は主として7研究会議に分配され、それぞれが政府と一定の距離を置いて運営されている。

こうした分類法を考慮し、イギリスの68分野単位の研究者による科学誌利用の類似性を踏まえて、OSTの委託先による分析²では臨床医学、前臨床医学および衛生、生命科学、環境、数学、生命科学を除く自然科学、それに工学という7分類が利用された。

国別、分野別に分解すると大きなデータベースがで上がるが²、これはレーダーチャートで簡潔に表すことが可能である。各分野の被引用数占有率は研究への影響の尺度となるものである。比較のため各国の被引用数全体の占有率を示した。多角形が大きいほど、その

表1 高被引用論文上位1%の占有率(1997～2001年)に基づく国別順位

国	論文数			被引用数			高被引用論文上位 1%					
	合 計	1993-97 世界 百分率	合 計	1997-2001 世界 百分率	合 計	1993-97 世界 百分率	合 計	1997-2001 世界 百分率	合 計	1993-1997 比較群 百分率	合 計	1997-2001 比較群 百分率
United States	1,248,733	37.46	1,265,808	34.86	21,664,121	52.3	10,850,549	49.43	22,710	65.6	23,723	62.76
EU15 (正味合計)	1,180,730	35.42	1,347,985	37.12	15,147,205	36.57	8,628,152	39.3	11,372	32.85	14,099	37.3
United Kingdom	309,683	9.29	342,535	9.43	4,502,052	10.87	2,500,035	11.39	3,853	11.13	4,831	12.78
Germany	268,393	8.05	318,286	8.76	3,575,143	8.63	2,199,617	10.02	2,974	8.59	3,932	10.4
Japan	289,751	8.69	336,858	9.28	3,123,966	7.54	1,852,271	8.44	2,086	6.03	2,609	6.9
France	203,814	6.11	232,058	6.39	2,638,563	6.37	1,513,090	6.89	2,096	6.05	2,591	6.85
Canada	168,331	5.05	166,216	4.58	2,315,140	5.59	1,164,450	5.3	2,002	5.78	2,195	5.81
Italy	122,398	3.67	147,023	4.05	1,535,208	3.71	964,164	4.39	1,151	3.32	1,630	4.31
Switzerland	57,664	1.73	66,761	1.84	1,113,886	2.69	647,013	2.95	1,196	3.45	1,557	4.12
Netherlands	83,600	2.51	92,526	2.55	1,335,748	3.22	759,027	3.46	1,111	3.21	1,435	3.8
Australia	89,557	2.69	103,300	2.84	1,078,746	2.6	623,636	2.84	852	2.46	1,049	2.78
Sweden	63,757	1.91	72,927	2.01	1,007,418	2.43	548,112	2.5	748	2.16	930	2.46
Spain	79,121	2.37	103,454	2.85	813,722	1.96	559,875	2.55	467	1.35	785	2.08
Belgium	40,147	1.2	48,010	1.32	574,095	1.39	339,895	1.55	482	1.39	639	1.69
Denmark	31,808	0.95	37,198	1.02	508,183	1.23	295,004	1.34	445	1.29	570	1.51
Israel	41,804	1.25	45,944	1.27	517,027	1.25	293,039	1.33	449	1.3	568	1.5
Russia	121,505	3.65	123,629	3.4	509,105	1.23	315,016	1.43	366	1.06	501	1.33
Finland	28,727	0.86	34,690	0.96	427,873	1.03	250,456	1.14	308	0.89	416	1.1
Austria	26,100	0.78	33,598	0.93	332,145	0.8	218,493	1	250	0.72	383	1.01
China	68,661	2.06	115,339	3.18	392,055	0.95	341,519	1.56	153	0.44	375	0.99
South Korea	26,838	0.81	55,739	1.53	183,122	0.44	192,346	0.88	97	0.28	294	0.78
Poland	34,680	1.04	42,852	1.18	237,622	0.57	155,310	0.71	170	0.49	231	0.61
India	72,877	2.19	77,201	2.13	316,461	0.76	188,481	0.86	112	0.32	205	0.54
Brazil	27,874	0.84	43,971	1.21	211,460	0.51	155,357	0.71	100	0.29	188	0.5
Taiwan	32,620	0.98	45,325	1.25	216,852	0.52	150,743	0.69	91	0.26	151	0.4
Rep. Ireland	9,880	0.3	12,779	0.35	104,442	0.25	75,893	0.35	86	0.25	196	0.36
Greece	16,463	0.49	22,333	0.62	128,646	0.31	89,822	0.41	76	0.22	113	0.3
Singapore	9,030	0.27	15,306	0.42	63,288	0.15	55,929	0.25	39	0.11	97	0.26
Portugal	8,102	0.24	13,583	0.37	74,196	0.18	62,814	0.29	43	0.12	96	0.25
South Africa	1,7461	0.52	18,123	0.5	121,598	0.29	67,916	0.31	51	0.15	81	0.21
Iran	2,152	0.06	4,813	0.13	10,706	0.03	12,325	0.06	5	0.01	14	0.04
Luxembourg	300	0.01	430	0.01	2,736	0.01	1,979	0.01	2	0.01	2	0.01
World (正味合計)	3,333,464	106.23	3,631,368	108.94	41,425,399	118.27	21,953,043	122.97	34,982	127.43	38,263	136.5

ここでの分析には全学問分野の5年間の論文数を用いている。1993～97年の発表論文に関して、合計被引用数は2002年までの累計値である。1997～2001年の発表論文も合計被引用数は2002年までの累計値であるが、発表後の経過時間が短い被引用数が少ないと考えられる。研究支出、要員および教育訓練に関する国際比較を行うためのデータは主としてOECDのものである(<http://www.sourceoecd.org/content/html/index.htm>の'statistics'を参照)。『主要科学技術指標(Main Science)』とBasic Science and Technology Statisticsの2002年版データも利用した。正確さと信頼性については参考文献2で検討されている。Frascati Manualのデータ定義とそのOECDデータ解釈には可能な限り忠実を期した。

国が世界の科学界に及ぼす影響度は大きい。**図3**は米国を除くG8各国のレーダーチャートである。米国の被引用数占有率はイギリスの約3倍であるため、別途目盛を変えた分野別レーダーチャートでEU15カ国およびイギリスと比較した(**図4**)。

図3から顕著な偏りがいくつか見て取れる。ロシアは生命科学を除く自然科学と工学が比較的強く、生命科学が弱い。日本は生命科学を除く自然科学と工学に強さを示している。フランスは数学が強く、ドイツは生命科学を除く自然科学の影響度が最も強い。イギリスはこの7カ国のなかでは医学、生命科学、環境の影響度が最高であり、数学も上位であるが、生命科学を除く自然科学と工学はそれほど強くない。米国とEU15カ国の比較(**図4**)では、

表2 論文1本あたり被引用数を規準化して算出した再計算影響度(RBI)

Country	2002	1993-2002
Switzerland	1.70	1.59
United States	1.48	1.41
Denmark	1.48	1.33
United Kingdom	1.39	1.21
Netherlands	1.39	1.33
Germany	1.33	1.15
Austria	1.24	1.09
Belgium	1.21	1.17
Sweden	1.21	1.25
Canada	1.18	1.13
Finland	1.18	1.20
France	1.12	1.07
Italy	1.12	1.07
Australia	1.09	1.01
Israel	1.09	1.05
Rep. Ireland	1.03	0.93
Spain	0.97	0.89
Luxembourg	0.94	0.82
Japan	0.91	0.90
Portugal	0.82	0.80
Poland	0.76	0.61
South Africa	0.76	0.61
Greece	0.70	0.67
South Korea	0.64	0.61
Singapore	0.61	0.61
Brazil	0.58	0.62
Russia	0.55	0.40
China	0.55	0.51
Taiwan	0.55	0.56
India	0.48	0.40
Iran	0.42	0.44

1993～2002年の平均RBI。世界のRBIを1とした。ある年のある分野の論文への被引用数 c は発表後の経過時間 t とともに増加して漸近線 $c \bullet$ に近づき、ほぼ指数関数 $(1 - c/c \bullet) = \exp(-t/t_{1/2})$ に従う。ここで $t_{1/2}$ はこの関数の半減期を表す定数であり、被引用数が $c \bullet(1 - 1/e)$ となったときの値である。生命科学の半減期は生命科学以外の自然科学と比較して短い。1981～2002年に地質学分野の30誌に発表された論文の分析²では、被引用半減期が5年とされている。

EU15カ国を合わせてもなお分野別レーダーチャートは米国の方が大きい。これは生命科学関係の強さによるところが大きい。EU15カ国のレーダーチャートは正八角形に近く、米国と比較して生命科学を除く自然科学と工学がわずかに強いが、生命科学と医学が弱い。

支出の見返り

Mayによる1997年の分析¹では、科学面の研究業績が政府の研究開発向け支出(国防を除く)との比較で評価されているが、これは大いに意見や議論を巻き起こすものであった⁴⁻⁶。

この分析で主たる要因とされたのは、高等教育研究開発(定量的には、その業績とは学位を取得した研究者の数や論文の本数)、政府による研究開発(一般に高等教育と比べて国家予算が多く割り振られる)、公的支出による研究開発(政府と高等教育との和)、高等教育研究開発の企業支出、それに研究開発向け国内総支出である。

研究支出と研究業績(論文数)、研究業績とその影響との間にはそれぞれ時間差があり、生産性の理解には多変量モデルが必要となる可能性があることを認識するのは重要である。また国際的な飛び火現象というものがあり、ある国の支出が増加すると別の国、特に直接的な共同研究を行っている国の研究業績も増加する場合がある。

図5はロシアを除くG8各国のデータを重ね合わせたレーダーチャートである。相対的な強さと弱さが非対称性となって表れている。フランスとドイツの六角形は対称的であり、7カ国の平均に近い。それ以外の六角形は顕著な非対称性を示している。資金投入量側では頂点同士が密に重なり合っている。イギリスは公的研究開発支出が第4位で米国と近く、高等教育の項目は第6位となっているが、研究成果の規準化全3項目で首位である。逆に、日本は公的支出項目が第3位、高等教育が首位であるが、研究成果の指標はすべて最下位である。

上記の評価では公共部門と企業の研究業績が明らかに区別されていない。これにはたとえば上記投入量が生成する豊かさの評価が必要になると考えられるため次項で検討する。G7のなかで、高等教育研究開発向けの相対的企業支出は日本と米国が最も高く、イタリアが低い。投入量と成果に関してこのように重大な不備があることを踏まえてもなお、こ

のレーダーチャートは各国の研究業績の国際的影響度で評価される支出の対価について示唆を与えるものである。イギリスは上記各項目の好成績が際立っており、以下にカナダと米国が続いている。その理由については改めて検討する。

図6のレーダーチャートで比較するのは、強さを見せる小国を含むEU15カ国と米国、それにイギリスである。研究成果の評価ではEUの影響度が大きさが示されたが、研究開発向け公的支出当たりの被引用数がほぼ等しいことに注目していただきたい。

経済成長の刺激

企業の研究開発活動の指標を考察するのも有意義である。**表3**では、企業による研究開発支出のGDP比に基づいてG8各国を順位付けしている。この順位は、研究の影響度順に並べた**表1**とはさまざまな点で異なっている。特に、この数値では日本が際立った強さを示しており、米国がEU15カ国をはるかに上回っている。この重要な指標でイギリスは第5位に沈んでいる。

国家の知識基盤と経済力は高度な教育を受けた人材を輩出することで維持され発達していく。これは持続可能な経済発展の必要条件であるが十分条件ではなく、インフラ投資を含む政治的要因とマクロ経済学的要因がともに整っていることも必要である。国家の知識基盤を表す指標のひとつに博士号取得者輩出数がある(**表3**)。国家人口で規準化すると、ドイツとイギリス、フランスがこの指標で米国を上回り、日本は相対的に下位となる。この順位を研究者としての常勤被雇用者労働力比率と比較すると、文化的習慣の大きな違いが見えてくる(**表3**)。この指標では日本と米国の強大な経済力が顕著であり、データが入手可能なG8各国の中で首位と第2位となってフランス、ドイツ、カナダ、イギリスを大きく引き離している。日本の産業界は、定年まで企業内で働くことを期待して大卒の研究開発要員を採用し、実務のなかで訓練を積ませる傾向がある。欧米では、特に工学以外の多くの産業では、博士号をもつ研究開発要員を雇用するほうが一般的である。特に経済下降期には、博士レベルまでの一般的教育訓練を受けた研究開発労働力の流動性が高いほうがおそらく有利であろう。

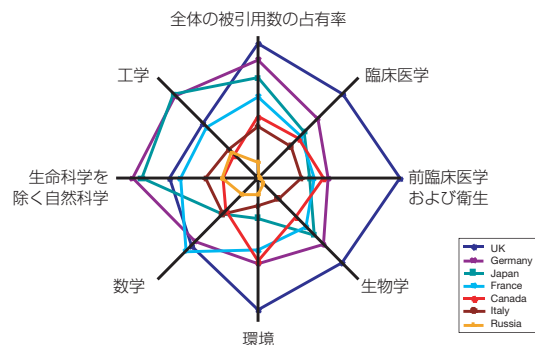


図3 分野別の各国の強さ。7研究分野および全体の被引用数の占有率に基づき、米国を除くG8各国の研究の特徴をレーダーチャートで示す。原点から各頂点までの距離が被引用数占有率に比例。医学・生命科学が右側、それ以外の自然科学と数学が左側である。

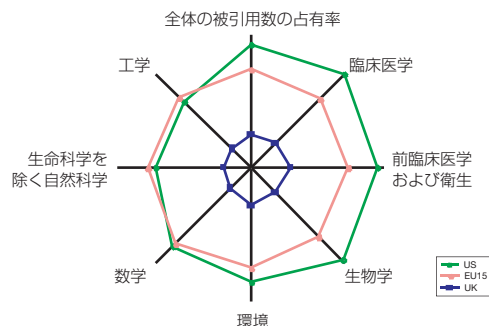


図4 米国、比較群内EU15カ国、イギリスに関する分野別の強さ。原点から各頂点までの距離が被引用数占有率に比例。

位の中国や第22位のインドのような国々はこの数年で科学の基盤が急速かつ効果的に発達している。インドの主要な科学大学は特筆すべき強さをもっており、レベルの高い卒業生を輩出して国の持続的な経済成長に大いに貢献

かわらず、イランが第30位に入っているのみである。

こうした結果をみて言いたい

は、競争性の強い世界市場での持続可能な経済発展には知識の創出への直接的な取り組みが必要であるということである。健康管理や水質浄化、公衆衛生、食品、輸送に関して工学、技術、医学、経営、経済学、社会科学の資質が必要であるが、これをもたない国が多い。新興国の研究技術能力に関して国連事務総長が最近書いた記事⁸ではこうしたことに力点が置かれている。金や石油などの天然資源の輸出国は技術や知識を輸入することができるが、それも天然資源が続く限りのことである。そうした国々にとって、持続可能性とは技術基盤の向上を通じて代替となる農業力や技術力に投資することを意味するものであろう。

貧困と依存の連鎖を断ち切るのは、「北」と「南」と捉えられることが多い、科学力の高い国と低い国の間での能力構築のみであろう。しかし、被引用数順位(図2、表1、表2)だけでは重要な動きが見えなくなってしまうことには注意しなければならない。特に今回第19

国では未だこうした発展に科学の研究業績が追いつく時期ではない。バンガロールのソフトウェア産業にみられるものがその好例である。中国の大学も高いレベルを維持している。研究基盤への投資と財政支出が増えたことによって、外国、特に米国で教育を受けた科学者、ときには研究を行っていた科学者が祖国に惹き戻され、世界最高の経済成長率を維持している。両国では未だこうした発展に科学の研究業績が追いつく時期ではない。

研究活動に関しては近年このほかにもいくつか比較が行われている。四大国際科学賞¹や14科学分野ごとの高被引用研究者上位100人⁹に基づいて種々行われた研究業績評価の結果はさまざまである。高被引用研究者評価では上位1,222科学者のうち815人(66%)が米国からであり、イギリス(100人)、ドイツ(62人)、フランス(29人)、スイス(26人)、スウェーデン(17人)、イタリア(17人)の6カ国を合わせてもわずか251人である。この結果は研究業績や影響度と対立するものであるが、高被引用論文については一致している。世界の一流科学者を引き寄せるために米国の一部の大学や研究所が支払うきわめて高い報酬が、この格差を存続させている大きな要因で

偏った世界

1993～2001年の高被引用論文上位1%にあたるもののうち、約84.5%が科学論文被引用数順位(表1)で第8位までの国々から発表されている。これに続く9カ国によるものは13%あり、それ以外の国の占有率は2.5%である。第1グループと第2グループの間には、科学に対する国別の影響度に明らかな差がある。さらに、今回の分析対象は世界193カ国のうちわずか31カ国にすぎないが、これが世界の高被引用論文の97.5%を発表している。

この対比がもつ政治的意味合いは厳然としたものである。今回第29位となった南アフリカはアフリカから唯一リストに載った国である。イスラム教圏にはGDPの高い国が多く、ノーベル賞受賞者のAbdus Salam(物理学賞、1979年)やAhmed Zewail(化学賞、1999年)⁷をはじめ有能な科学者を輩出しているにもか

表3 民間部門研究開発費と博士号保持者数および研究者数*との比較

国	BERD†	BERDの対GDP比	博士数	人口1人当たりの博士数	常勤研究者数	被雇用者1,000人当たりの常勤研究者数
Japan	65,726	2.12	10,962	0.08	644,208	9.59
US	169,228	1.97	44,955	0.17	1,148,271	8.17
Germany	31,013	1.66	24,940	0.30	238,944	5.93
France	18,186	1.38	10,056	0.17	156,004	5.99
UK	15,048	1.22	11,253	0.19	147,035	5.02
EU	95,733	1.19	6,323	0.18	784,066	5.6
Canada	8,343	1.06	3,871	0.13	90,245	5.88
Russia	6,577	0.72	-	-	-	-
Italy	6,569	0.53	3,494	0.06	69,621	3.09

1997～2001年の平均値で示す。ただし、博士数に関しては1998～2000年のデータのみ。

* 研究者の定義は、OECD/Frascatiに従い、新たな情報や製品、工程、方法、システムの考案や創造に従事する者およびそれに関連する事業の管理者とした。

† BERDは企業の研究開発費を指す。購買力で調整し、1995年の金額(単位100万米ドル)として算出。

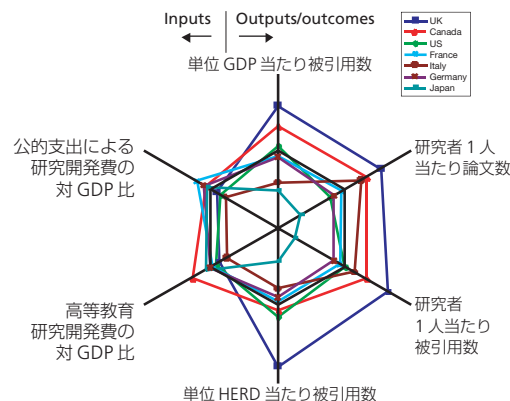


図5 投入資金と科学における研究成果との比較。G8各国の研究の特徴をレーダーチャートで示す(ただし、相当する経済学的データの入手できないロシアは除く)。データは正六角形で示す7カ国の平均値で規準化した。HERDは研究開発用高等教育向け支出を指す。

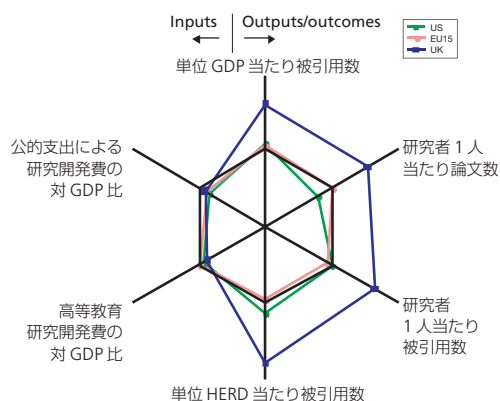


図6 EU15 カ国、米国、イギリスについて図5と同じ方法で規準化。HERD は研究開発用高等教育向け支出を指す。

あろう。ロシアの若き数学者 G Perelman を招聘しようという米国の大学群の最近の試みはこのことを例証している¹⁰。欧州各国は、特に超一流に関しては市場が世界的であり、創造性のある最高の頭脳を獲得するためには報酬と条件を引き上げる必要があることを認識しなければならない。

科学の基盤

上海教育学院は最近、世界の上位 500 大学のリストを発表した¹¹。その順位は、1911～2002 年のノーベル賞受賞者数、高被引用研究者数、*Science*、*Nature* 両誌への掲載論文数、発表論文数、それに以上 4 項目の平均を常勤教員数と比較して決められている。しかし、いずれの項目にも被引用数と同等の信頼性がないと思われる。上記5項目の比重を同じとすると、上位 20 大学のうち 15 大学(75%)が米国、4 大学がイギリス、1 大学が日本である。上位 40 大学に広げても米国が 75% を占めている。上位 100 大学では、58 大学が米国、31 大学がヨーロッパである。イギリスの研究評価活動(Research Assessment Exercise)は、イギリスの研究リストの上位を走り他を引き離している4大学(ケンブリッジ、インペリアル・カレッジ、オックスフォード、ユニバーシティ・カレッジ・ロンドン)と、米国と同じく一流研究者を集中化させる方向性を作り上げてきた。

対照的に、米国とEU15カ国の被引用数を比較すると(表1、図1)、1993年までの数値による May の分析¹以来両者の差が目に見えて

縮まっていることがわかる。生命科学では依然差があるが、EUは今や生命科学を除く自然科学、工学、数学で米国と肩を並べている(図4)。科学論文被引用数占有率でイギリスは米国に及ばないものの第2位であり、被引用強度は主要国最高である(図2)。イギリスの現在の強さに関する逆説的理由のひとつは、1980～95年に科学への公的支出が大幅に削減されたことである。この削減は科学者多数の反対運動を招いたが、研究者のなかではある種の創造性がはぐくまれ、このとき進められた産業界やEUへの働きかけが現在結実している。たとえば、イギリスの公的研究への企業投資は、公的支出による研究開発との比では世界最高である。また、現在のイギリス政府は財政支援とインフラ再構築に積極的であり、イギリス科学という剪定された植物は再び旺盛な成長を見せている。OSTの科学予算は1997年から2005年の間に倍増し、2004年7月の時点で、さらに大蔵省はこの予算について、2008年3月までの3カ年に実質年率平均5.6%で増加させると発表している。これは、2014年には公的研究開発と企業研究開発の合計をGDPの2.5%にするという科学技術革新10カ年戦略¹²の一環である。

EU主要国ではこのほかドイツの寄与が過去20年で最も急激に伸び、今や被引用数、高被引用数とも占有率がイギリスまであと数パーセントに迫っている。分野別レーダーチャート(図3)はドイツとイギリスの科学被引用数が相補的であることを示している。ドイツは生命科学を除く自然科学と工学が強く、医学、生命科学、環境科学に強いイギリスと住み分けている。

また北欧各国は被引用強度が高く(図2)、ヨーロッパの科学界で果たしている役割を認めることが重要である。たとえば、ベルギー、デンマーク、フィンランド、オランダ、スウェーデン、それにスイスを合わせると総人口は5300万人であるが、1997～2001年にはこの国々から高被引用論文の12.7%が出されて

おり、イギリス(12.8%)やドイツ(10.4%)に匹敵する。GDPの合計はイギリスをわずかに(6%)下回っており、6カ国をひとまとめでみた被引用強度はイギリスをしのごう。

科学の強力な基盤は豊かさの形成に必ずしも直接つながるわけではない。たとえば、イギリス科学の基盤の強さはよく知られているが、それをもとに高等教育―産業界間の知識移転を伴うハイテク集積地が発達したのはごく最近のことである。しかし、科学の力はそれぞれの国にとっても世界全体にとっても付加的な利益をもたらすものである。世界的なテロリズムや病気の流行から地球温暖化の危機まで、各国政府が科学者に頼らざるを得ないような脅威は次々と出現している。

筆者の David A King は、イギリス科学技術庁(Office of Science and Technology, 1 Victoria Street, London SW1H 0ET, UK)に所属している。

1. May, R. M. *Science* **275**, 793–796 (1997).
2. *PSA target metrics for the UK Research Base* (UK Office of Science and Technology, October 2003); www.ost.gov.uk/policy/psa_target_metrics.htm. The original analysis provided by Evidence Ltd has been fully checked and updated for the work presented here. Publications and citation data are from Thomson Scientific.
3. Adams, J. *Nature* **396**, 615–618 (1998).
4. Grant, J. & Lewison, G. *Science* **278**, 878–879 (1997).
5. May, R. M. *Science* **278**, 879–880 (1998).
6. Margolis, R. M. & Kammen, D. M. *Science* **285**, 690–692 (1999).
7. Zewail, A. *Voyage Through Time* (American Univ. in Cairo Press, Cairo-New York, 2002).
8. Annan, K. *Science* **303**, 925 (2004).
9. Batty, M. *Env. Planning A* **35**, 761–765 (2003).
10. Singer, E. *Nature* **427**, 388–389 (2004).
11. <http://ed.sjtu.edu.cn/ranking.htm>
12. *Science and Innovation Investment Framework* (HM Treasury, London, 2004).

謝辞

図表を精査するとともに意見をくれた OST の R Thornes と J Kirk、それにデータマイニングを支援してくれた Z King に感謝する。