

nature

月刊 **ダイジェスト**

www.naturejpn.com

日本語編集版
vol.01 | January 2004

ゼラチン質プランクトンとの遭遇

未探査領域に突入したボイジャー1号

対テロ戦争で置き去りにされた
旧ソ連・核兵器拡散の危機

知的財産権 大論争
タンパク質は誰のもの？

Sponsored by



Agilent Technologies

nature

月刊ダイジェスト

vol. 1, no. 1

1

月号 目次

January 2004
www.naturejpn.com

editorial

- 2 核の危険に直面して
- 2 オンラインでの名誉毀損

news feature

- 3 タンパク質の所有権
David Cyranoski
- 5 ゼラチン質プラントとの遭遇
Carina Dennis
- 8 ライバルを出し抜け—熾烈な研究競争
Helen Pearson

books and arts

- 10 21世紀のファジーな未来ビジョン
Reviewed by Melvin Konner

concepts

- 11 癌の治療戦略
Hiroaki Kitano

news

- 12 大人のためのサイエンス博物館
Jim Giles

news and views

- 13 果てを越えたか?
Len A. Fisk
- 14 あの手この手の卵争奪戦
Matthew J. G. Gage

brief communications

- 16 油膜を利用したラボチップ
Orlin D. Velev, Brian G. Prevorsek, Ketan H. Bhatt

表紙写真 © 2002 MBALI

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
東京都新宿区弘方町 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。

Nature 読者の皆様へ

記念すべき日本語による刊行物、「Nature 月刊ダイジェスト」創刊号へようこそ。最近の Nature に掲載された Editorial、News、News Features、Commentary、Books and Arts、News and Views、Brief Communications の中から厳選し日本語へ翻訳する、新しい刊行物が誕生しました。これにより初めて日本語で、Nature の前半部分が日本の科学界へそして一般科学に興味のある方へ向けて提供されることになります。「Nature 月刊ダイジェスト」は、1990 年からのハイライトと論文要約日本語ページに続き、ネイチャー・パブリッシング・グループのサービス拡大が更に大きく一歩前進することを象徴しています。

私どもは皆様がこの新しいダイジェストを楽しみに読み、また役立てて下さることを期待しております。欧米の科学者達はしばしば、Nature をリサーチジャーナルとしてだけでなく、最新のニュースや特集を楽しむことのできる雑誌として利用しています。日本でも「Nature 月刊ダイジェスト」がこのような待ち望まれる刊行物になればと願います。

最後になりましたが、Agilent Technologies の協力により、「Nature 月刊ダイジェスト」をより多くの方にお届け出来るようになったことを付け加えさせて頂きます。

ネイチャー・パブリッシング・グループ
アジアパシフィック・パブリッシャー
Antoine E. Bocquet PhD

cover stories

(ページ数は当該号の数です)



20 November 2003 Vol. 426/Issue no. 6964

植物では、光合成を始めとする多くの生命維持に必要な活動が昼夜周期の影響を受けている。植物は、このような過程を適切に制御するために、重要な調節遺伝子群の発現を周期的に調整する概日時計を備えている。概日時計は、毎日の計時に加えて、日長測定により開花などの季節変化に応じた過程も調節している。開花パターンが変化した多様な変異体の性質を調べることで、季節の進み方の複雑な測定にかかわる個々の段階が明らかにされつつある。今回、新しく見つかった青色光受容体 FKF1 が、シロイヌナズナでの日長測定に不可欠なことがわかった。FKF1 が午後の遅い時間に発現することが、開花に重要な調節因子群の誘導に重要である。表紙は、青色光中におかれたシロイヌナズナ (T Imaizumi/S Kay, スクリプス研究所) [Letters, p. 302]



27 November 2003 Vol. 426/Issue no. 6965

ゼオライト類の開骨格構造を持ち、骨格の分極率が高く、しかも豊富な可動陽イオンを持つ新種の結晶性材料、これらの構造的性質はバッテリー、燃料電池、電気化学センサー、光触媒などの材料に求められてきたものである。天然ゼオライトの組成を模倣し、反応速度論的に制御された合成方法を使用することによって、かご状の骨格外に電荷均衡陽イオンとして高移動度のアルカリ金属およびアルカリ土類金属イオン (リチウム、ナトリウム、カルシウム) を含む一連の硫化物およびセレン化合物が合成された。この化合物では、骨格自体が高速の陽イオン移動の必要条件である高度な分極性を持ち、これが室温で良好なイオン伝導性の実現を容易にしている。ゼオライトに類似した開口チャネルは、基質が触媒変換またはその他の変換作用を受ける空間を提供している。[Letters, p. 428]



4 December 2003 Vol. 426/Issue no. 6966

Delta と Notch 遺伝子は、細胞運命指定に働く細胞表面タンパク質をコードしている。その例の 1 つが、キイロショウジョウバエ *Drosophila melanogaster* で見られる上皮細胞群からの前神経性細胞の選出であり、選ばれた細胞は胸部の機械刺激感覚毛を形成し、残りは上皮細胞になる。この Delta による抑制作用は細胞数個分離れた細胞でも感知される。これは、Delta が細胞表面に結合していることとうまく一致しなかった。しかし、この現象に関わる感覚器官前駆細胞が指のように伸びる糸状仮足を形成し、隣接していない細胞と複数の細胞を越えて接触することが近年発見されて、問題が解決された。このような糸状仮足は剛毛前駆細胞を間隔を開けて配置するのに必要とされ、Delta が仮足の伸長を促進することが今回の研究で明らかになった。[Letters, p. 555; News and Views, p. 503]



11 December 2003 Vol. 426/Issue no. 6967

オオツノヒツジは大物ねらいのハンターたちに人気の高い獲物だ。その個体群は狩猟を考慮して維持管理され、ハンターは狩猟の記念となる大きな角をもつ雄を銃でしとめるために高額の許可料を支払う。カナダのアルバータ州にすむオオツノヒツジの野生個体群の長期にわたる研究から、こうした角めあての狩猟が大型哺乳類の個体群に有害な影響を及ぼしていることを初めて明確に示す証拠が得られた。ハンターがねらうのは最大級の角をもつ雄で、こうした雄の子は平均よりも大きくなる見込みが大きい。捕獲されて記念になっているものは繁殖成功 (次世代に残す成体の数) がピークに達する前の若い時期に撃たれており、その結果、30 年の研究期間中に集団の平均体重も平均の角サイズも 25% 減少した。野生生物の保護管理者は、遺伝子プールのさらなる劣化を防ぐため、ハンターが撃つてよいのは角が完全に成長して大きく巻くまで生き残った雄のみとするなど、戦略を考えたほうがよいだろう。[Letters, p. 655]

核の危険に直面して

テロとの戦いの陰に隠れて、旧ソ連の核物質の安全管理という兵器拡散の最も重大な問題が目立たなくなってしまう恐れがある。

原文: *Facing the nuclear danger* Nature Vol.426(213)/20 November 2003; www.naturejpn.com/digest

ササダム・フセイン、ウサマ・ビン・ラディン、金正日は大量破壊兵器との関連が広く疑われているが、では Alexander Tyulyakov の名を聞いたことがあるだろうか。Tyulyakov は、ロシアの原子力砕氷船を管理する国営企業 アトムフロート社の副社長である。Tyulyakov は8月に、核物質の密輸業者に1kgを超えるウランとラジウムを売ろうとした疑いでロシア連邦保安局に逮捕され、告訴された。

トニー・ブレア英首相とジョージ・W・ブッシュ米大統領が11月にロンドンで会談したが、大量破壊兵器拡散の脅威についての議論をイラクや北朝鮮、イランの兵器計画に限定しないよう望みたい。

兵器拡散問題の専門家は何年も前から、Tyulyakov が関与したとされるような核拡散につながる行動は、重大な危機を生じさせると論じている。この危険性はソ連の崩壊直後からすでに認識されており、1991年には米上院でサム・ナン議員(民主党、ジョージア州選出)とリチャード・ルーガー議員(共和党、インディアナ州選出)の共同によって、ロシアの核物質の適切な管理を援助する法案が成立した。しかし、米国がナン・ルーガー計画による支援を堅持することは難しく、欧州各国政府は支援にそれほど熱意を示さなかった。残念なことに欧州各国の中には、未だにこの緊急課題を米国とロシアが取り組むべき他人事ととらえる向きもある(2003年11月20日号219ページ参照)。

しかしこれは人類全てに関わる問題であり、消えてなくなるものではない。問題の範囲は、旧ソ連の核兵器関連施設や原子力潜水艦の燃料サイクルにはとどまらず、はるかに広範にわたっているからだ。

例えば、ロシア全土に何百とある気象観測点やナビゲーション信号発生装置などはきわめて放射性の高いストロンチウムを動力源としているが、このストロンチウムは、核分裂反応が全く起こらなくても核物質を周辺に飛び散らせる、いわゆる「汚れた(ダーティー)」兵器への利用が可能である。また造船所や工場にも、船舶や発電所などから出た核燃料が何トンも

保管されている。もとのワルシャワ条約加盟諸国にある研究用原子炉も、また別の危険要因である。これとは別に、ロシアの軍事基地には大量の生物兵器が存在するとされ、また国内には何千もの核兵器がもとのまま手つかずで配備、保管されている。

ナン・ルーガー法やその他のめばしい対策は、これらの物質の安全管理を助けるために西側諸国が一致団結して長期にわたって支援してくれるものと期待していた。しかし、核不拡散をめざす21の団体が共同で今週発表する報

告によれば、西側諸国からの支援は行き詰まりの危機にあるという。

その報告書(www.sgpproject.org 参照)は、2002年6月に策定された「大量破壊兵器及び物質の拡散に対するG8グローバル・パートナーシップ」の進展ぶりを述べている。これは、核関連施設、設備の処分、核物質の管理を行い、兵器科学者の旧ソ連内部での雇用を進めるため、各国政府が10年以上にわたって200億米ドルの資金を拠出することを定めた合意だ。だが初年度に14の参加国が提供したのは、目標達成に必要な20億米ドルの半分程度だったという。

各国政府が核拡散の抑止を真剣に考えるなら、この不足を埋め合わせるのが何よりも最優先である。それは、旧ソ連が残した大量破壊兵器を封じ込めるために必要な、何十年もかかる取り組みの出発点に過ぎないのである。 ■

オンラインでの名誉毀損

プレプリントアーカイブや科学関連ウェブサイトの管理者は、メディア関連の法律をよく把握しておく方が賢明だろう。

原文: *Defamation, online* Nature Vol.426(1)/6 November 2003; www.naturejpn.com/digest

ArXiv 物理学プレプリントサーバをよく使う人なら、通常の科学論文の無味乾燥な書き方とはひと味違った文章が時折登場することはご存知だろう。最近の例には、宇宙物理学と売春の類似を描いたエッセイ(M. Lopez-Corredoira, <http://arxiv.org/astro-ph/0310368>; 2003のプレプリント)がある。このような投稿にちょっといらだちを覚えるか、あるいは面白い気晴らしと感じるかは読む人の考え方によって違おうだろう。

だが、10月27日付の投稿(A De Rujula, <http://arxiv.org/physics/0310134>; 2003)から生じる懸念はもう少し深刻だ。このプレプリントは、英王立天文台長が他の研究者のアイデアを自分の功績と主張していると糾弾している。本誌が法律の専門家に尋ねたところ、このプレプリントの文言は、名誉毀損にあたる可能性があるという(2003年11月6日号7ページ参照)。

雑誌や新聞、一部の科学論文誌は、名誉毀損になりかねない記事を掲載する前に、メディア関連の法律の専門家に助言を仰いでいる。また、名誉毀損の訴訟に敗訴した万一の場合に備えて保険にも加入している。しかしプレプリ

トアーカイブの管理者はこれまで、このような予防策をとる必要性は感じていなかった。ArXivを運営するコーネル大学のPaul Ginspargは、プレプリントサーバを新聞と同じ基準で判断できないとしている。

ある面では彼の言うことは正しい。法的には、ウェブサイトの管理者が必ず全ての投稿、書き込みを読んで承認しているものとは見なされない場合が多い。しかしクレームがついた場合には、話はややこしくなる。インターネットには世界中からアクセスできるということは、理論的には、ウェブサイトの管理者はアクセスが行われたあらゆる国の法律が絡んでくる可能性があるということだ。つまり、名誉毀損になる可能性のある書き込みがあり、それが削除されない場合には、英国の厳格な名誉毀損法とともに、米国憲法修正第一条に掲げられた著者の言論の自由も考慮される、ということになる。

科学者の多くは特に訴訟好きではない。だが、1回の敗訴でも巨額な金銭的損失を被ることもある。De Rujulaの投稿がこうした風潮の始まりだとすれば、プレプリントサーバの管理者は頼れる弁護士を探す必要があるだろう。 ■

タンパク質の所有権

初期のゲノミクスは、遺伝子特許が広がることで研究と医薬品開発が制約されることが懸念され、注目を集めていた。現在のところ、プロテオミクスにはそうした制約はないが、そう安心はできないとDavid Cyranoskiは報告している。

原文：This protein belongs to... Nature Vol.426(10)/6 November 2003 ; www.naturejpn.com/digest

なにかの所有権を主張しただけで、パニッックが広がるということはめったにない。だが1991年、米国立衛生研究所(NIH)が遺伝子約3,500個に関してDNA小断片の配列を決定したことで知的所有権を申し立てたときは、そうした事態になった。このニュースによって、DNA配列を決定した当時のNIHの研究者Craig Venterは注目的となり、それ以来ゲノミクス先駆者としての地位を確保している。そして、特許申請が幅広く行われることによって、ヒトゲノム配列による科学と医療の進歩が制約されるだろう、という危惧が世界的に広がった。

このため、2001年12月、英国のバイオテクノロジー会社Oxford GlycoSciences(OGS)が、4,000を超える疾患関連タンパク質の特許を申請中であると発表したときには、さらに大きな怒りの声がかかることを予想した向きもあっただろう。当時はさほどニュースにならなかったが、これはおそらく、タンパク質特許が約1世紀にわたって存在してきたに

もかわらず、大きな不利益を被った人がいなかったからだろう。マギル大学(カナダ、モントリオール)知的所有権対策センター幹部のRichard Goldは、「べつに目新しいことではない」と言う。実際、特許は一般に、タンパク質の有用な応用法の開発者に対して適切な金銭の見返りを与えるものと考えられている一方で、次世代の研究を促進している。

だが、こうしたよいバランスもそうは続かないだろう、と警告する専門家もいる。大規模プロジェクトによって、何千ものタンパク質の構造が記録的速さで解明されることが予想されている。米国の裁判所は知的所有権問題の方向性に影響を与えているが、最近の米国では、プロテオミクスの時代にタンパク質特許がこれまでよりも障害となるような判決が出てきている。米医科大学協会(ワシントンDC)上席副会長(生物医学・健康科学研究担当)のDavid Kornは、「この傾向は生物医学研究に暗い影を落とすものだ」と話す。

NIHが1991年に申請した遺伝子特許は最

終的に却下されたとはいえ、潜在的な適用範囲が広がったことで警戒されていた。ある遺伝子の研究によって薬物などの役立つ製品を開発した場合には、その遺伝子DNAの小断片の配列を最初に決定した研究者に対する特許使用料の支払義務が発生していたかもしれないのである。これはきわめて研究開発の投資意欲をそぐものであり、特許システムが本来とは正反対の効果を生むことになる、と多くの専門家が主張した。

特許申請にブレーキ

それ以来、米特許局は遺伝子特許の敷居を高くした。1999年12月の指針で「有用性」の条件を厳格化したのである。現在、分子プローブとしての利用やタンパク質合成のためにDNA配列の特許申請をする場合には、「いったい何のためのプローブなのか」、「何をするタンパク質なのか」という詳細を説明しなければならない。アルバータ大学(カナダ、エドモントン)で保健医療法規を専門とするTim Caulfieldは、「何の役に立つかわからないが遺伝子を発見した、と言うことはできない」と話す。

タンパク質特許に関しては数十年の経緯から、研究と技術革新への影響はそれほど大きくないと考えられている。また、少なくとも現在のところ、OGSがたどった末路をみれば、同社の攻撃的な特許に関する発表はなんら心配するものではなかったとみられている。病変組織と健常組織との比較で同定したタンパク質4,000種の特許申請から1年と経たずして、OGSは従業員の5分の1を削減。2003年春、資金繰りが苦しくなった同社は、英国ロンドン西方の町スラウのCelltechに買収された。CelltechはOGSの癌事業のみを取り込み、ほかのプロテオミクス事業については売却を模索している。

実際のところ、タンパク質探査はビジネスとして非常に難しいことが明らかになってきた。Large Scale Biology(米カリフォルニア州ヴァカヴィル)も、医学的に重要なタンパク質を多数同定し、特許を取得して利益を上げようともくろんでいた。しかし、現在は遺伝子組換え植物で動物タンパク質を生産するという限定的な目標にしばっている。同社で知的所有権を担当する専務Tom Gallegosは、「採算としては、まるで合わない」と述べている。



生産ライン：日本のゲノム科学総合研究センター(横浜)では、今後数年間で3,000ものタンパク質構造の確認を目指している。

あるものについて世界で特許を取得するには約20万ドルがかかる。東京医科大学に新設された臨床プロテオームセンター・センター長の藤田芳司は、「タンパク質を多数発見して特許を取得するのは簡単だが、費用がそれだけかかるため、そのタンパク質に商業的価値があることをよく確認する必要がある」と話す。

そうした価値を手に入れるのは容易ではない。タンパク質の多くでは、まず、特定疾患の患者や薬物副作用を発現した患者を確認するための診断マーカーとしての特許を取得する。「しかし、診断マーカーでは特許取得費用の回収さえできない場合が多く、大きな売り上げは期待できない」と Gallegos は言う。

だがタンパク質そのものが薬物として使用できる場合や薬物の標的となる場合は、経済的状況は変わってくる。たとえば、タンパク質エリスロポエチン(EPO)は貧血治療薬として市販され、年間数十億ドルという利益の特許権者のAmgen(米カリフォルニア州サウザンドオークス)にもたらしている。ただし、あるタンパク質に治療的価値があるかどうかを確認するには、大規模な生体外実験と動物実験が必要となるのが普通である。Gallegosは、「マウスに注射するにも、よく働いてくれる作業者がたくさん要る」と説明する。

相次ぐタンパク質同定

現在進展中の大規模プロジェクトによって、治療上重要なタンパク質がはるかに容易に同定されるようになる可能性がある。工場のような作業工程の日本の計画「タンパク 3000」プロジェクトと米国の「タンパク質構造計画」(Protein Structure Initiative)では、何千ものタンパク質構造が短期間で確認されるだろう。理論上、これによって構造データが大量に提供されれば、研究者は薬物開発の候補物質に集中することができるようになるはずだ。2003年8月には、理化学研究所ゲノム科学総合研究センター(横浜)を拠点とするタンパク 3000 プロジェクトが、発足から18カ月でタンパク質613個の構造を確認したことを発表した。

だが、日本、EUおよび米国の特許当局代表者が2002年11月に取り交わした合意によって、構造データだけでは特許申請に不十分とされている。タンパク質の特許申請が広がりすぎるという懸念については、この合意によ

って緩和された。しかし、タンパク 3000 のようなプロジェクトはなお、知的所有権地図を塗り換える可能性がある。たとえば、タンパク 3000 プロジェクトのデータは、海外に公開される前に日本の協力企業に開示されることになっているのである。

デューク大学(米ノースカロライナ州ダラム)で知的所有権を専門とするArti Raiは、「有望な治療法の研究に、きわめて重要なタンパク質の特許が取得されてしまうことが心配だ。さらに企業側は、そのタンパク質のあらゆるロックアウト法に関して所有権を主張してくるだろう」と話す。

最近の裁判所の判決に対しては、タンパク質特許の解釈が広がり過ぎていることを懸念する声が出始めている。2003年1月、Transkaryotic Therapies(米マサチューセッツ州ケンブリッジ)は、同社のEPO競合品がAmgenの特許を侵害したとする連邦巡回控訴裁判所の裁定を受け、EPOに関するAmgenの権益に屈した。Amgenの特許は、ハムスター卵巣細胞でのヒトEPOの生産に関するもの。Transkaryoticが生産するEPOはヒトEPOとわずかに異なっており、使用細胞は遺伝子組換えヒト細胞である。現在のところ裁判所は、EPO生産に関するいかなる哺乳類細胞の使用もAmgenの特許の対象である、とするAmgenの主張を大筋で支持している。

この事例に懸念を感じる向きもある。「裁判所は、意味を深く考えずに『研究開発投資保護』戦略を構築している。このような判例があると、企業はタンパク質を基盤とする薬物の改良に二の足を踏みかねない」と、デューク大学ゲノム倫理・法規・政策センター幹部のRobert Cook-Deeganは言う。

学者の多くは、特許が広義に解釈されても、不安を覚えることはほとんどなかった。「娯楽、単なる好奇心の充足、または純粋な学術的探究のための」に特許対象物を使用する活動には、米国特許法によって「研究免除」が認められている。従来、これはいかなる学術研究をも包含するものと解釈されており、イリノイ大学(米シカゴ)のJohn Walshが最近行った調査でも、米国の大学に所属する研究者が恒常的に研究免除に依存しており、特許使用料請求を心配していないことが確認された(J. P. Walsh, A. Arora and W. M. Cohen *Science* **299**, 1021; 2003)。

もはや免除はない

しかし、最近の米最高裁判所の判決を見ると、この「紳士協定」が存続可能であるかどうかは不透明である、とCook-Deeganは述べている。2003年6月27日、米最高裁はデューク大学とMadedyの間の事例に判断を下した。この研究免除に関する最高裁の解釈は、学術研究の大半が何らかの関連特許の侵害とされる可能性を示すものである、と多くの知的所有権専門家は考えている。

この事例は、1998年にデューク大学からハワイ大学(米マノア)に転出したJohn Madedyが開発したレーザー技術の使用をめぐる論争に関するものだ。Madedyは、自身の特許技術でデューク大学が継続使用することに抗議した。デューク大学が研究免除を引き合いに出すと、大学はその技術を単なる好奇心の充足ではなく教育ビジネスに利用し、研究助成金を獲得している、とMadedyは反論し、最高裁がこれを認めた。

この判決は、特許対象タンパク質の研究者ばかりか、一般に学術研究をしようとする者すべてにとって問題となる可能性がある。「この事例は、大学であろうとなかろうと、研究が道楽ではないことを示している。もともと研究は、いつの間にか権利を侵害してしまうものなのだ」と、理化学研究所構造生物物理研究室(播磨)主任研究員の宮野雅司は話す。いずれにせよ、特許対象タンパク質の研究が進められるようにするには、法律関連の大規模な準備作業が必要かもしれない、とCook-Deeganは述べている。

タンパク質などの生物学的分子に関して特許が広義に解釈されることの意味については、NIHも懸念している。NIHは2003年9月、この問題に関する18カ月間の研究に対して、米国科学アカデミー(ワシントンDC)のSteve Merrillに120万ドルの助成金を提供した。

Merrillらは、使用者の希望通りに特許対象分子が使用できるようにするための穏便な使用許可契約の奨励や、強力な研究免除など、政策立案者へのさまざまな勧告を検討することになっている。「政策はすぐに決める必要があらう。時間がかかるほど手が打てなくなる」とMerrillは話している。

David Cyranoskiはネイチャーのアジアパシフィック特派員。



海洋生物学:ゼラチン質プランクトンとの遭遇

深海まで行ける潜水艇の登場によって、クラゲなど、ゼラチン質のプランクトン(浮遊生物)の世界をのぞく新たな窓が開かれた。生物学者たちは、こうした深海の住人たちには驚くべき生態があることを発見しつつある。Carina Dennisが報告する。

原文: *Close encounters of the jelly kind*

Nature Vol.426(12)/6 November 2003 ; www.naturejpn.com/digest

湿っぽく、寒く、窮屈な空間で、小さな窓から濁った暗闇の中を何時間ものぞきこむ。これが仕事で満足感を得る秘けつだとは、とうてい思えない。しかし、海洋科学技術センター(神奈川県横須賀市)の生物学者 Dhugal Lindsay にとっては、これが彼の仕事における最上の時間なのだ。

Lindsay がそのような状況、つまり、海面下数千メートルの3人乗り潜水艇の中で過ごすのは、それが、クラゲやその他のゼラチン質の生物(あわせてゼラチン質プランクトンと呼ぶ)の世界を探る、もっともよい方法だからだ。よく知られたクラゲ(正確には刺胞動物という)から、繊毛を波打たせて進む有櫛動物(クシクラゲ)や、ゼラチン質の巻貝、線虫、オタマボヤ(粘液の網を出して食物をとらえる、小さなオタマジャクシのような過摂食動物)まで、海は半透明な生物であふれている。しかし、研究者たちは、潜水艇が使えるようになるまで、海のこうした変わった動物たちのことも、そうした動物たちが濁った深海

で何をしているのかも知らなかった。

ようやく、Lindsay のような研究者たちが潜水艇を使えるようになり、研究の空白を埋め始めている。そして、彼らは自らが発見したものに驚いた。ゼラチン質プランクトンは海の生態系の中で私たちが考えていたよりもずっと大きな役割を担い、炭素が海の上層から海底へ、どのように循環しているかという長年の難問を解決するカギでさえあるかもしれないらしい。モントレイ湾水族館研究所(米国カリフォルニア州モスランディング)に所属し、同研究所近くの海でゼラチン質プランクトンを求めて潜水を行っている Bruce Robison は、「私たちはゼラチン質プランクトンの生態学的な重要性をひどく過小評価していた」と話す。

最後の秘境

私たちの多くにとっては、クラゲは、水族館で見ただけのもの珍しい生き物か、海水浴でできなくさせる迷惑な生き物といったところ

だ。だが、クラゲによって大きな問題を引き起こされる人たちもいる。漁師や沿岸住民は春や夏の繁殖期に起こる大量発生に毎年悩まされている。またクラゲは、稚魚や、魚がエサにしている小エビやプランクトンを食べてしまい、漁場を壊滅させる。船のバラスト水に潜んで移動し、遠く離れた海の生態系を乗っ取ることもある。冷却水を海から取り入れるパイプを詰まらせ、海岸近くの原子力発電所を停止させることさえある。

ゼラチン質プランクトンは、このように人間生活とのかかわりは深い、海洋学者の研究対象からははずれがちだった。というのは、海洋学者たちが海洋生物学の対象として知りうるものは、おもに網の中に見つかる生物に限られるからだ。ゼラチン質プランクトンを網を使って採集すると寒天状の断片にちぎれてしまうので、網に残るものは少ない。採集する簡単な方法がないために、ゼラチン質プランクトンはまさに海洋学研究のはざまに落ちてしまっていたのだ。

1980年代に研究用潜水艇が世界各国で導入されて初めて、研究者たちはゼラチン質プランクトンの世界を探り始めた。科学者たちはまだ、なぞに包まれたゼラチン質プランクトンの世界の表面をようやくひっかいた程度にすぎない。研究用潜水艇の多くが潜れるのは水深1000メートルまでで、それ以上の深さの広大な世界は未調査のまま。海の平均水深は約4000メートルあり、太平洋のマリアナ海溝の水深は1万1000メートルに達する。水深1000メートルより浅いところに生息するゼラチン質プランクトンでさえ、潜水艇から観察されることはまれだった。ワシントン州立大学の海洋学研究所(同州フライデーハーバー)のゼラチン質プランクトン生物学者 Claudia Mills は「研究者たちは通常、バッテリーを消耗させないように、ライトをつけずにできる限り急いで、海底まで潜水艇を潜航させる。だから、そこで展開されている『ショー』を見逃してしまう」と話す。Mills はゼラチン質プランクトンのことなら熟知している。彼女はクロクラゲの仲間の深海の新種、*Crossota millsae* を見つけ、彼女の名前がつけられたばかりだ¹。

Lindsay は、有人潜水調査船「しんかい6500」を利用できる、少数の幸運な生物学者の1人だ。しんかい6500は、世界でもっとも深くまで潜航できる潜水艇の1つで、6500メートルまで潜れる。だが幸運といっても、ちょっと変わっている。Lindsay がしんかい6500の中で味わう状況を望む人は、ほとんどいないだろう。1回の潜水は約8時間続き、その間、科学者、操縦士、副操縦士は、わずか4.5立方メートルの空間に詰め込まれる。「潜水艇の中は寒く、湿っていて、凍えるような気温だ。足を伸ばすことさえできない」と Lindsay は話す。温度は水深2000メートルを超えると2℃未満に下がり、乗組員は低体温症を防ぐために特別服を着なければならない。船体は、バッテリーの消耗を防ぎ、可燃性のガスタンクの温度が上がる危険を避けるため、温められていない。窓から外を見ることが容易ではない。舷窓が3つあるが、グレープフルーツよりも小さい。それより大きいと水圧で壊れてしまうからだ。

深海の曲芸

Lindsay は、それでもまだ足りないかのように、潜水中に使える時間をできるだけ多くするた

め、かなり極端な方法を採用している。彼は、しんかい6500の年間60回の潜航に2回以上乗れば幸運だと考えている。調査船の稼働時間は科学者間の取り合いなのだ。Lindsay は、乗船中は用便をしなくてすむようにして時間を節約している。「だれでも自分独自の方法を持っているもの。私は、体が脱水状態になるよう、前夜にウォツカを飲むことにしている」と Lindsay は話す。コーヒーは、操縦士が注意力を維持するための最小限の量にとどめる。昼食をきちんと食べることは、Lindsay には時間の浪費に思える。だから、彼は血糖値を保つためにアメをなめることにしている。彼は、脱水状態ですわった姿勢のまま、額を窓におしあて、操縦士に方向を指示し、標本を集めるロボットアームを操作し、最高に興味深い生物をビデオで撮影しようとして何時間も過ごす。「これは曲芸みたいなものだ」と彼は話す。

壊れやすいゼラチン質プランクトンのそばで2万6000キログラムの船を操縦することは簡単ではない。調査船が推進エンジンを使うと、ゼラチン質プランクトンは船の側面に当たって飛び散るか、彼方へ飛び去ってしまう。「いつだって本当に欲しいものは、決して手に入らないものだ」と Lindsay は残念そうに言う。

ゼラチン質プランクトンをつかまえた後も、それを深海から海上の昼の光の中へ運ぶという難問が残っている。ウッズホール海洋研究所(マサチューセッツ州)でゼラチン質プランクトンを研究している Richard Harbison はこう言う。「なんとかやつらを深海で容器の中に閉じ込めても、無傷のまま海面に持って帰れることはめったにない。完全にばらばらになってしまうことがよくある」。かよいゼラチン質プランクトンが海面へ移動する間の温度変化と物理的な揺さぶりに耐えて生き延びることは、めったにないのだ。

ほかにも問題はある。発光する獲物を食べるゼラチン質プランクトンは多い。発光する食物が捕食動物の目印になってしまうことを避けるため、ゼラチン質プランクトンは自分の消化器官を赤や黒の色素でカムフラージュしている。こうした色素は、光にさらされると致死的な毒に変わることがあると Lindsay は考えている。もちろん、潜水艇のヘッドライトも禁物だ。

Lindsay は痛恨の失敗を思い出す。「私はあ

た。そしてとうとう私はそれを捕まえた。保護容器に入れて海面に持ち帰り、ビデオカメラで撮影を始めようとしたとき、うっかり、カメラのライトを最強にしてつけてしまった。クラゲは消化器官を吐き出し、私の目の前で数分ではばらばらになった」

こうした苦痛やフラストレーションには、大きな見返りがなければならない。Lindsay の場合、それは発見の喜びだ。「潜航のたびに、ほとんどいつも新種を発見する」と彼は言う。発見は、潜航の後でもある。乗組員は、Lindsay に説得されて降下中もライトをつけるようになった。Lindsay とこの乗組員が撮影したビデオは、深海のたくさんの生物を明らかにした。今のところ、ゼラチン質プランクトンの種類は約2000種とされる。深海には間違いなく、さらに多くの未発見の生物が潜んでいる。

新種だけでなく、ゼラチン質プランクトンの数も研究者たちを驚かせた。「中深層のバイオマス(生物量)のうち、どれだけゼラチン質生物なのかは発表された記録がない。網を使った研究では1%から2%とみられていたが、潜水艇での調査では50%を超えるように思える」と Lindsay は話す。

クラゲだらけ

米海洋漁業局のオレゴン州ニューポートの支所に所属する Richard Brodeur は、最初は魚の研究に興味を持っていた。だが魚の研究はあきらめ、クラゲの研究をすることになった。「私たちは、魚の調査をやり終えることができなかった。海中にあまりに多くのクラゲがいたからだ。私たちが探している魚をつかまえるまでに、網はクラゲでいっぱいになってしまったものだ」と彼は話す。Brodeur は、ボスドクの Cynthia Suchman とともに、オレゴン州沖合いの海中の総バイオマスのうち、巨大なクラゲ、シーネットル(*Chrysaora fuscescens*)が占める割合を推定した。その結果、それはカイアシ類に匹敵することが分かった。カイアシ類はどこにでもいる海の甲殻類で、海中の炭素のうち相当量を占めていると考えられている。「ゼラチン質プランクトンは、海の炭素バイオマスの主たる担い手といえる」と Robison は結論づけた。

ゼラチン質プランクトンの行動の理解は、潜水艇による調査で飛躍的に進んだ。ゼラチン質プランクトンは海水の流れにまかせて漂

い、偶然見つかった獲物をつかまえるだけの肉食動物だと考えられてきた。しかし、ゼラチン質プランクトンの中には、海面近くのプランクトンやオキアミを食べるため、夜の闇にまぎれて深みから上昇し、食べた物の消化は深いところで行うため、ふたたび潜航するものがあることが分かっている。

同類のゼラチン質プランクトンを食べるために、独特の特徴を進化させたものもある。例えば、ウリクラゲ (*Beroe*) という科のゼラチン質プランクトンは、歯のような繊毛のついた口みたいな袋だけでできていて、この口でもっぱらほかのゼラチン質プランクトンを食べる。「海のバイオマスのかかなりの割合は、お互いを食べ物としているゼラチン質プランクトンの体が占めている」と Robison は言う。彼はこの複雑な状況の中で、何が何を食べているかを解明しようとしている。「ゼラチン質プランクトンどうしの共食いが、食物網の本流とどう結びついているのかはまだ分かっていない」と彼は言う。

もっと根本的に複雑な問題は、ゼラチン質プランクトンが食物連鎖の底辺の栄養分を直接摂取しているらしいことだ。ゼラチン質プランクトンは、水中に漂う栄養分を軽い食事としてその「皮膚」から吸収できることを示す研究結果がある^{2,3}。Lindsay とポスドクの三宅裕志は現在、こうした炭素源がさまざまなゼラチン質プランクトンの成長にどう影響するかを調べている。

ゼラチン質プランクトンは食物網の中で多様な役割を持ち、その数は膨大だ。このため、ゼラチン質プランクトンを調べることで、海の生態系の中で炭素がどう循環しているのかという未解決の問題を解くことができるかもしれない。海洋学者たちは長い間、海底に生息する生物が、その成長を支えるだけの有機物をどうやって得るのかを解明しようと苦労してきた。もっとも明らかな有機物源はマリンスノーだ。マリンスノーは、微小なプランクトン、魚の排せつ物、脱皮した外骨格、死んだ生物などで、漂いながら絶え間なく海底に降り注ぐ。しかし、それらをすべて足し合わせても足りない。海底に生息する生物すべてを養うには、マリンスノーだけでは足りないのだ。いくつかの研究では、数値が大きく変化する余地はあると考えられるものの、この不足分は約 55% と見積もられた⁴。

炭素供給源

モントレー湾水族館研究所の海洋学者 Steve Haddock は「ゼラチン質プランクトンは、今まで見落とされていた方程式の一部なのかもしれない」と話す。ゼラチン質プランクトンの本当の量と、その炭素吸収能力を考えると、死んだゼラチン質プランクトンが大量の炭素を海底に供給しているとみられる。また、生きているゼラチン質プランクトンは、人間が死んだ皮膚を落とすように、ときどき、その表面から粘液の小滴を出す。オタマボヤは、食物をつかまえるときに使う粘液の網をじゃまになると捨てるので、これもゼラチン質プランクトンの粘液放出の一部をなす。こうした小滴が水柱の中を沈んでいくと、増加する水圧によって圧縮され、下方向へ加速される。「こうした小滴はとて大きく、炭素に富んだ高速の粒になり、その大きさは握りこぶしくらいになって深海の海底に達する。こうした粒が含んでいる炭素は、海底に届く炭素の大きな割合を占めている」と Robison は話す。

ゼラチン質プランクトンが見せてくれた最後の驚きは、それらとほかの生物との近い結びつきだった。網にかかる漁獲物から、互いに近くに存在しているところを見つかることが多い甲殻類がいることが知られていた。しかし、彼らがどうやってうまく一緒にいることができるのかはなぞだった。潜水艇での観察で、彼らはゼラチン質プランクトンの上に一緒に乗っていることが分かった。

それはもっともだ。ゼラチン質プランクトンは、多くの甲殻類にとって隠れ家と食料になりうる。甲殻類はゼラチン質プランクトンのひだに隠れたり、かじって食べたりするからだ。Haddock と、その同僚で、メキシコ・チェトゥマルにある海洋学研究を行っている南部フロンテア大学 (ECOSUR) の Rebeca Gasca は、カリフォルニア湾での最近の調査で、オオトガリズキンウミノミ (*Oxycephalus*) とよばれる甲殻類が、その子供をクシクラゲの上で育てるのを発見した。また、中深層でもっとも大きなクラゲの 1 つで透明な寒天の薄い袋のように見える *Deepstaria enigmatica* が、ほぼいつも *Anuropus* とよばれる甲殻類を 1 匹か 2 匹併い、一緒に生活していることを、深海を調べた多数の研究者が観察している。「彼らがどうしてこうした関係を持つのかや、彼らが広い海の中でどうやって互いを見

つけるのかは分かっていない。深海にはたくさん不思議なことが起こっている。私たちは、まだそれを理解し始めたばかりだ」と Haddock は言う。

ゼラチン質プランクトン研究者たちが残っているなぞを解くには、中間的な深さでの研究に最適化された潜水艇がもっと必要だろう。「ほとんどの潜水艇は海底での作業にあわせて設計されている」と Lindsay は話す。のぞき窓は下に向いていることが多いし、潜水艇の多くは浮力を相殺することができないため、ある動物を追うには推進エンジンを使わなければならない。

ワシントン DC の米国科学アカデミーは現在、今後の深海科学に必要なものと、将来の海洋調査における調査船の役割について検討している⁵。報告書はまもなく発表されるとみられている。委員会のメンバーは報告書の内容についてのコメントを避けたが、報告書には、中深層に適した新しい潜水艇、あるいは古い潜水艇の改良の勧告が盛り込まれることになりそうだ。「ゼラチン質動物研究の黄金時代を迎える用意はできている。さまざまな技術が結集されつつあり、ゼラチン質プランクトンたちは注目を浴びようになるだろう。彼らにはその価値がある」と Haddock は熱っぽく語る。

将来、ゼラチン質プランクトン研究の大部分は、ロボット潜水艇に取りつけられたビデオカメラを使って行われるだろう。ロボット潜水艇は低コストで作れ、シンプルで小さく、長時間潜水できるので、有人潜水艇よりも多くのデータを集めることができる⁶。しかし、研究者たちは有人潜水艇の使用をやめるつもりはない。「人間の目に勝るものはない」と Lindsay は言う。カメラは現場の奥行きを常に伝えることはできないし、複数の対象に同時に焦点を合わせることできない、と彼は指摘する。窮屈な足元、深夜のウォツカ、凍えるような寒さにもかかわらず、Lindsay は今後も自分自身で深海へ降りて行き続けることを望んでいる。 ■

Carina Dennis はネイチャーのオーストラレーシア特派員。

1. Thuesen, E.V. *Zootaxa* 309, 1–12 (2003).
2. Shick, J.M. *Biol. Bull.* 148, 117–140 (1975).
3. Haddock, S.H.D., Rivers, T.J. & Robison, B.H. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98, 11148–11151 (2001).
4. Smith, K.L. & Kaufmann, R.S. *Science* 248, 1174–1177 (1999).
5. <http://dels.nas.edu/deepsubmergence>
6. Clarke, T. *Nature* 421, 468–470 (2003).

ライバルを出し抜け — 熾烈な研究競争

細胞生物学や分子生物学などの競争の激しい分野では、第2位でゴールインした者に与えられる栄誉はない。しかし「ホット」な結果を一番に発表することに対する圧力は、科学の進歩をゆがめてはいないだろうか。激化する競争の現状をHelen Pearsonが報告する。

原文: *It's a scoop!*

Nature Vol.426(222)/20 November 2003; www.naturejpn.com/digest

1998年のことだ。Robert Insallは自身の研究室を閉鎖し、妻であり細胞生物学者であるLaura Macheskyの研究室にこもることとした。それから3か月間、夫妻はロンドン大学の研究室で夜遅くまで身を粉にして実験を続けた。彼らの目的は、細胞に入る生化学的シグナルと細胞の運動および分裂を指令するタンパク質との関連性を明らかにすることであった。夫妻には急ぐ理由があった。共通のテーマを追う2つのグループの1つが、同じ結論に行きついて自分たちを「出し抜く」ことを恐れていたのだ。

そして最終的に夫妻の努力は報われた。同じ年にサンフランシスコで開催された米国細胞生物学会(ASCB)でMacheskyが結果を発表したとき、ライバルのグループは心底悔しがることとなった。Macheskyの口頭発表をまとめたポスターの近くでは、ポケットから携帯電話を取り出して、研究室に残してきた同僚に向かって、実験方法の記述を読み始める者の姿があった。結果的に夫妻は最初に結果¹を発表することになったが、その後、数か月以内に同様の結果について述べた他の4つの論文が発表された²⁻⁵。

一番乗りをめざすという、InsallとMacheskyの決断は極端な例と思われるかもしれない。だが似たような執着を示す細胞生物学者や分子生物学者は珍しくない。見返りは大きい。同僚研究者に認められるか、研究助成金の申請が通るか、さらには希望のポストの確保が成功するか失敗するか、それが画期的な論文の発表にかかっているのだ。そして、データの収集に数年間を要するような他の分野とは異なり、実験を手早く行って論文を書き上げ、学術誌に投稿するまでの過程を数日から数週間うちに終わられる場合が往々にしてある。今日では、出来合の実験用キットの入手が容易であり、ゲノムデータには直ちにアクセス

可能なので、多くの実験はたやすく真似されてしまう。このため、デッドヒートを繰り広げる生物学者たちが、手持ちのカードを相手に見せないようにしてゲームを進める傾向があることは意外ではない。

激化する競争

論文発表の一番乗りをめざす競争は昔から存在した。そして、競争は科学の進歩を後押ししてきたと考えられてきた。しかし多くの細胞生物学者および分子生物学者は、状況は手に負えない段階に至っており、あちこちに歪みが生じているのではないかと憂慮している。例えば一部の学会では、相互の不信感が高じて、アイデアの自由な交換がなくなりつつある。さらには、行き過ぎた競争が「早いけれどいいかげんな」実験の発表を促しているのではないかと不安視する研究者もいる。この傾向は今日、コンピュータを利用した投稿とオンライン出版によって論文が速やかに処理されることによって拍車がかかっている。「丁寧に実験を行っている時間はない」と、スクリプス研究所(米カリフォルニア州ラホヤ)で細胞周期の研究に従事しているSteven Reedは語る。

激しい競争を引き起こしているのは野心に燃えた研究者かもしれない。しかし、学術誌の側にも非はあると指摘する声もある。主要学術誌が、研究者たちに新しい知見を発表するように仕向けて競争をあおっているというわけだ。一部の生物学者に言わせると、特にホットな知見を掲載するために、学術誌が掲載可否基準を下げる場合があるという。「真に優れた成果を発表することよりも新しさが重要視されてきている」と、ラホヤアレルギー免疫研究所のStephen Schoenbergerは不満気だ。

科学の世界に競争が存在することは今に始まったことではない。しかし、あるデータは、競争がさらに激化しつつあるという印象を裏

づけられているようだ。ある調査⁶によれば、自分の研究内容についてオープンに話すことに抵抗を感じる科学者の数は、1966年には50%であったが1998年には74%に増えている。また1998年の調査では、対象となった生物学者の4分の3以上が、競争相手に出し抜かれることを恐れると回答している。「根拠のない恐怖感におびえる傾向がある」と、MITの癌研究者Tyler Jacksは調査結果と同じ意見だ。

おそらく、最もあからさまな被害は、学会で新たに発表された結果がすぐに伝わってしまうことだ。パワーポイントで発表した成果を、ほんの数週間後にライバルの論文上で同様の結果として記載されていることを経験した研究者は少なくない。会議で、同じテーマを追う者がそのことを隠して情報を根ほり葉ほり聞き出してゆくことは、ごく普通に行われていると、コールドスプリングハーバー研究所(米ニューヨーク州ロングアイランド)の神経学者Karel Svobodaは語る。

出し抜かれることを恐れるあまり、無事に発表にこぎつけていない結果や、印刷中の結果を敢えて公表しない口の堅い生物学者もいる。新しい成果は非常に微妙なところに存在するようになっているので、フラストレーションのたまった一部の研究者は、ASCBの年会などの大きな会議で主要な結果を話さないようになってきた。むしろ小規模の会合や、酒の席でアイデアを交換するか、または全く意見を交わさない状況になっている。「嘆かわしい状況だ。競争が学会を時代遅れの存在にしている」と、ハーバード大学の分子生物学者Thomas Maniatisは落胆を隠さない。

競争が学会での意見交換を妨げていると気をもむ研究者がいる一方で、学術誌に掲載される研究に及ぼす影響も頭痛の種となっている。出し抜くことを念頭にいた絶え間ない競争が、十分な実験を行わずにライバルに先

▶ 駆けて学術誌に発表することを後押ししており、論文の質を損ないつつあると危惧する生物学者もいる。

時間との闘い

研究者と学術誌が競争を繰り広げることもある。例を挙げよう。米国立ヒトゲノム研究所(メリーランド州ベセスダ)の所長でもある Francis Collins が率いる研究チームは2003年1月に、ハッチンソン・ギルフォード早老症候群と呼ばれる、まれな疾患の原因遺伝子を突きとめたとする内容の論文をネイチャーに投稿した。この遺伝子は *lamin A* と呼ばれ、細胞核の構成タンパク質をコードする。

早老症のマウスモデルに関する、他の研究者による論文⁷が翌2月にネイチャー編集部に着いたために自分たちの研究の発表が遅れたと Collins は語っている。ネイチャーでは、このように関連性の高い論文は同じ号に掲載するという方針をとっている。投稿後に Collins は、*lamin A* 遺伝子の変異を2人の早老症患者で同定したことを報告した論文が、サイエンス誌で掲載準備段階にあることを耳にした。「これはちょっとした衝撃だった」と Collins は語っている。

サイエンスに掲載された研究のチームリーダーで、マルセイユに本拠を置く生物医学研究機関(INSERM)の Nicolas Levy は当時、重複する内容の論文が別の雑誌で印刷中であることにうすうす気づいていた。このため論文を数日間書き上げることになったが、実験に追い込みをかけることは決してなかったと Levy は語っている。

出し抜かれることを避けようと考えた Collins は Levy に電話をかけ、お互いの結果を同時に発表したい旨を提案し、ネイチャー編集部に対しては、自分の論文の発表を前倒しするように依頼した。サイエンスは Levy の論文⁸を3月4日に受領し、4月1日にアクセプトし、4月17日にオンライン版として発表した。Collins のネイチャーの論文⁹は、その8日後にオンライン版として発表された。しかしネイチャーは通常の方針を変更し、Collins の結果を Levy と同日に発表することを認めた。

競争に振り回される愚かな状況は理想からほど遠いと思う研究者もいる。場合によっては、不完全でいかげんな結果が発表される恐れがあるというわけだ。「最良の科学を実践

するための賢いやり方とは言えない」と、ジョンズ・ホプキンス大学(メリーランド州ボルチモア)の細胞生物学者 Susan Michaelis は語る。

コンピュータ時代の到来は、競争に緊急性という新たな意味を加えた。かつて論文の著者たちは、投稿から出版に至る数週間から数カ月間は比較的安心できると考えていた。しかし、コンピュータを利用した投稿、電子メールによる査読システム、オンライン出版の導入により、競争関係にある論文が数日のうちに査読され、改訂され、掲載されることが可能となった。「状況はやや悪い方向に傾いている」と、コロンビア大学(ニューヨーク)で嗅覚受容体を研究している Stuart Firestein は語る。

競争の激化と迅速なオンライン出版が相まって論文の水準が落ちているかどうかについては、意見が分かれる。しかし一部の生物学者は、実験を少しでも切りつめて早く発表にこぎつけようという誘惑が常に存在することを認めている。「ある種の賭けだ。インパクトのある論文をものにするのか、それともラボを後にするのか」と、デューク大学(米ノースカロライナ州ダラム)の神経科学者 Larry Katz は語る。

一等賞以外は無意味?

ネイチャー、サイエンス、セルといった有力学術誌が、独占的な結果に対する要求を緩めることで、行き過ぎた競争を和らげられないかと考える研究者は多い。例えばネイチャーとサイエンスでは、結論が大きく重複する同様の論文は、最初の論文が掲載されてから数週間後に到着した場合には、たとえ質が同等であったとしても掲載は見送られる。一部の生物学者は、この方針を厳しすぎると考えている。第2、第3の論文の方が、より周到でかつ研究領域に影響を及ぼす場合が実際にあるというわけだ。「接戦ではない論文を掲載する道は開けるはずだ」と Reed は語っている。

サイエンスおよびネイチャーの生物学部門の編集者は、大量の原稿が両誌に送付されてくる状況を考えれば、新規性に対する厳格な基準は必要だと主張する。ネイチャーの生物学部門の主任編集者 Ritu Dhand は、ネイチャーが特ダネを求めて質を犠牲にしていることはないかと否定している。「結論に重要な影響があると思われる場合でも、再調査や修正の過程を省略することはない」と、サイエンス



昼も夜も研究。一部の細胞生物学者や分子生物学者は、競争に勝つために必要なデータを得るには、深夜早朝の実験もやむを得ないと感じている。

の生命科学部門の副編集長 Katrina Kelner も同じ意見だ(セル誌の編集者からはコメントを得られなかった)。

しかし最終的には、過剰な競争のサイクルに巻き込まれないようにするのは個々の研究者次第だと考える生物学者もいる。杜撰な論文を発表することによって、共同研究者、尊敬、名声を結局失うことになる。どれも、まさに競争を勝ち抜くことで手に入れたいものばかりだ。「数日から数週間の差には意味がない」と、カリフォルニア大学サンフランシスコ校の Keith Yamamoto は語る。「内容がどれだけ優れているかが重要なのだ」。

Helen Pearson はネイチャーオンラインのニュースチーム(ニューヨーク)の記者。

1. Machesky, L. M. & Insall, R. H. *Curr. Biol.* **8**, 1347–1356 (1998).
2. Madania, A. et al. *Mol. Biol. Cell* **10**, 3521–3538 (1999).
3. Winter, D., Lechler, T. & Li, R. *Curr. Biol.* **9**, 501–504 (1999).
4. Yarrar, D., To, W., Abo, A. & Welch, M. D. *Curr. Biol.* **9**, 555–558 (1999).
5. Rohatgi, R. et al. *Cell* **97**, 221–231 (1999).
6. Walsh, J. P. & Hong, W. *Nature* **422**, 801–802 (2003).
7. Mounkes, L. C., Kozlov, S., Hernandez, L., Sullivan, T. & Stewart, C. L. *Nature* **423**, 298–301 (2003).
8. De Sandre-Giovannoli, A. et al. *Science* **300**, 2055 (2003).
9. Eriksson, M. et al. *Nature* **423**, 293–298 (2003).

21世紀のファジーな未来ビジョン

自我の輪郭が不明瞭になるという暗い未来観

原文：Fuzzy vision

Nature Vol.426(385)/27 November 2003 ; www.naturejpn.com/digest

Tomorrow's People: How 21st Century Technology is Changing the Way We Think and Feel

by Susan Greenfield

Allen Lane: 2003. 304 pp. £20

Melvin Konner

正直に言ってしまう。ニューヨーク・ブルックリン出身の若輩者(つまりこの私)が、女男爵さまの書物を批評することになり、若干おびえているのだ。それに加えて、この女男爵さまがオックスフォード大学出身の著名な神経科学者で、英国王立研究所の所長となれば、私の自信はますます揺らいでいる。さらに、私は男性であるために「血気盛ん」(著者の指摘)だという疑う余地のない事実もある。このように今回の書評には数々の重大な障害があるが、私としては、評者の任務を果たさなければならない。

*The Private Life of the Brain*の著者でもあるSusan Greenfieldは、本書において、その絶妙な着眼力、頭脳と文学的才能を未来社会に向けた。かつてスター野球選手Yogi Berraは、予測、特に未来予測がとても難しいと考えていた。それでも未来予測を専門に行う大学や企業の大規模なネットワークは世界中に張りめぐらされている。未来予測には数兆ユーロという金が絡み、そこから得られる利益と人間に固有の好奇心によって、今から20年、50年、さらには100年先までの生活様式に関するもっともらしいビジョンの探求が支えられている。

まず本書では、賢明かつ経験豊かな科学者である著者が、数ある未来ビジョンの中から最も信頼性が高いと判断するものを選び出して検討を加えている。未来の住宅、仕事、通勤や通信の形態や健康チェックの方法などが知りたければ、答えは本書に示されている。それぞれの予測は、旺盛な想像力の賜物と言えるが、同時に最先端技術と最先端の研究および、それを行う研究者の幅広い知識で裏打ちされている。本書の語り口は、幸いなことに数多くの未来予測の書に見られるような熱狂や興奮があまりなく、無分別な熱意や技術嫌

いによる技術に対する恐怖感を慎重に避けている。

本書に示されているシナリオの中には、読者の心を引きつけると同時に不安をかきたてるようなものが含まれている。ナノロボットの大軍団が私たちの命令に従って仕事をしてくれる一方で、ニューロンとシリコンチップを接続させる技術により人間の自我の外縁が不明瞭になる。コンピュータチップの利用により、私たちが取り扱う物体のすべてが高性能化し、用途適応性が高まり、個性と自律性を備えるようになる。仕事は在宅でパートタイムでできるようになる。数百種類の病気についての検査が、私たちの身体と大小の排泄物について毎日自動的に行われ、病気の徴候、症状、診断と治療についての明晰な説明が部屋の壁に表示される。そして夜にもなれば、立体映像によるバーチャルな実物大ホームコメディが周囲で繰り広げられ、それを見てリラックスするようになると予想されているのだ。

セックスは各種技術に支援された一人の行為となり、そのバリエーションの多さによってどんな願望でもかなえられ、満足度も信じられないくらい高くなる。遺伝子は、もちろん受精前に個別的な設計ができるようになる。また精神増強薬によって私たちの精神状態は均質化し、1,000種類もの用途に使える汎用人工細菌が開発され、ボタン1つ、というよりも単語を言うだけで、その具体的な用途を決められるようになる。本書の前半部分は、こういった予測に関する記述にほとんど費やされている。なかには意外な予測やどこかで聞いたような予測も含まれているが、いずれも考えられる内容となっている。

本書は、後半部分の方が重要な反面、問題点が多い。ここで著者は、前述のように予測された技術革新が人間にどのような影響を与えるかを論じている。教育に関する章は理にかなった記述だが、かなり平凡な内容となっている。この章では、経験が脳に与える影響が論じられており、脳の機能を発達させる上

で経験が最も効果的であり続けるという考え方が示されている。また意識と脳についての明確な考察があり、読者は知識の最先端に触れることができる。ただし、そこでの疑問点を明らかにすることは賢く回避されている。意識自体が変化するプロセスがシリコンチップと何らかの関係があることがほめかされているだけなのだ。

残りの数章はテロリズムと人間性に関する論述であり、最終章は私たちがとりうる行動に関する短いエッセイとなっている。ここで読者は、著者の立場がわからなくなって困惑するかもしれない。著者は、技術に対する恐怖心がないことをあらかじめ宣言しているが、本書が進行するにつれて、むしろ恐怖を感じているのではないかと思わせる兆候を見せる。そして最後には技術に対する警鐘を打ち鳴らすのだ。著者は、Bertrand Russellの次の言葉を引用している。「科学によって、人間は自制心も親切心も高められず、その情熱を抑える力もつけられなかった<中略>人間の情熱が集積することは、たいてい害悪である。なかでも最悪なのが自分たち以外の集団に対する憎悪と競争意識だ」

Freeman Dysonの次の言葉も引用されている。「長い目で見れば、知能の高い種にとっての中心的課題は、正気を保てるかどうかなのだ」。著者は、未来の科学によって人間性が変わるとは考えていないようだ。そして人間性についての著者の見方は、Russellほどでないにせよ、決して楽観的ではない。

科学を手に入れたテロリストは、これまでになく強大な力を得ることになる、と著者は指摘する。地球の裏側から食品メーカーのコンピュータを操作するといったサイバーテロによって加工食品に毒を仕込むことも可能となる。人工細菌を設計して特定の人種の遺伝的弱点を狙い撃ちすることだってできる。ハッカーが国全体を機能麻痺に陥れることも可能だ。人間性(そして人間の7つの大罪)は、今後とも変化しない可能性が非常に高いため、未来

の技術がもたらす素晴らしい新世界は、現在よりもはるかに危険な世界となる可能性が非常に高い。

最後の章では、この新世界から取り残される可能性の高い大多数の人々について論じられている。ここで著者は、何らかの手段を通じて、この新世界とその数々のメリットを世界中の人々が享受できるようにする科学版「平和部隊」を取り上げている。しかし著者と並び未来技術の権威と評される Bill Gates でさえ、これには懐疑的だ。開発途上国に科学技術をもたらすことを目指した会議の席上、彼はコンピュータが導入されたアフリカの村落を想定して次のように語った。「子供が死にかけている時、その母親がコンピュータに向かって、こう言います。『私の子供が死にそうです。どうにかしてください』。コンピュータを導入しなければ、こんな時の処置ができないとでも言うのですか？」Gates は、ワクチン接種やその他の基本的な公衆衛生政策のために大量の慈善寄付金を投じている。決してアフリカの「コンピュータ化」のためではないのだ。

本書の結論部分で、著者は次のように記している。「本書を通じて一番伝えなかったのは、私たち一人一人が持っている最も大切なものは自我なのであり、今ほど、自我が脅威にさらされている時はない、という点である。(究極的に優先されるべきことは)個性を守るだけでなく、個性をほめたたえることなのである」。そして本書は次のような警告で終わっている。私たちがこのような行動を起こすための「時間はもう残っていないかもしれない」のであり、「私たちは、このような行動を起こす能力と意欲があり、その成果を享受できる最後の世代の個性ある人間なのかもしれない」。

著者は本書を書き進むうちに、技術に対する恐怖心を抱くようになったのではないかとすら評者には思える。いずれにせよ、本書を読み終わった読者は、技術革新を急激、執拗、かつ多くの場合不用意に推進することが賢明なのかどうかという点について、賛否いずれの立場にも共感するアンビバレントな思いを持つことになるだろう。 ■

評者の Melvin Konner は、エモリー大学人類学科 (Department of Anthropology, Emory University, Atlanta, Georgia 30322, USA) に所属しており、The Tangled Wing: Biological Constraints on the Human Spirit, revised edition の著者でもある。

癌の治療戦略

原文: *Tumor tactics*

Nature Vol.426(125)/13 November 2003; www.naturejpn.com/digest

北野宏明

癌は、きわめて複雑で多様性を有する疾患で、さまざまな治療法に対して高い頑健性(=ロバストネス)を示す。頑健性によって、外部および内部から来るさまざまな摂動に直面しても、システムの機能が維持できる。

頑健性は偶然の産物ではなく、一定の原理にしたがうシステム固有の特徴である。頑健性は、いくつかの方法で、腫瘍が成長し生存するのを助けている。たとえば、癌細胞どうしの多様性は、高レベルの「冗長性」をもたらし、そのために生存と成長の機会が増える。さらに、このような(癌細胞にとっての)利点は、細胞レベルのフィードバック制御によってさらに高まる。癌を頑健なシステムとみなすことにより、新しい薬剤と治療法の開発のヒントがえられるだろう。

一般的に、悪性腫瘍は、多様で冗長性のある細胞の集団で、一つひとつの遺伝子のさまざまな突然変異や有糸分裂組換えや染色体数の増減(異数性)などの形質転換によって生じる。この多様性から生じる冗長性が腫瘍を頑健なものにしている。なぜならば、増殖可能な腫瘍細胞が少しでも残っていれば、癌は再発するからだ。残念なことに、抗癌剤の多くは突然変異誘発物質なので、生き残った細胞において、突然変異などによる遺伝的多様性が高まる恐れがある。この頑健性を制御するために、有効な治療法には、多様性を減らすか、少なくとも、避けることが求められる。

この原理からいくつかの結論が導かれる。腫瘍細胞の多様性を起こしう原因がわかり始めてきた今、当然のことながら、突然変異や異数性を引き起こして多様性をさらに高めてしまうような薬剤の使用は避けるべきだろう。適切な戦略は、多様性のレベルと使える薬剤によって左右される。初期段階の非固形癌のように、多様性の度合いが低い場合には、多様性を高める危険のある広スペクトルな細胞毒性の薬剤を避けて、代わりに特定の分子(慢性

骨髄白血病の ABL タンパク質のような)を標的にするような薬剤を探すのが最善の策だろう。

多様性のレベルが高い場合には二つの戦略のどちらかを選ぶことになる。第一の戦略は、特定の突然変異や細胞状態を有する細胞のみが生き残るような方法で、腫瘍細胞群の遺伝的多様性を積極的に減らす手法をみつけ、それから、その特性をもつ細胞だけを標的にした薬剤を使用するものだ。

第二の戦略は、癌細胞に進化的選択圧力を加えるような、急性で劇的な縮小を狙うのではなく、悪性の細胞を休眠や緩慢な退行へ導いて、多様性を高めないようにするものだ。しかしながら、休眠状態を誘発するのに使う薬剤は慎重に選ぶ必要がある。細胞毒性をもつ薬剤は、さらなる突然変異を引き起こす原因となり、休眠状態にもかかわらず多様性が高まってしまい、耐性が避けがなくなる恐れがあるからだ。

細胞レベルでのフィードバック制御も、いろいろな治療法に対して、頑健性を高めるように働いている。フィードバック制御は、通常の細胞を摂動に対して頑健にして保護するはたらきをもつが、腫瘍の治療上の障害にもなる。腫瘍細胞は、細胞から毒性化学物質を汲み出す MDR 1 のようなタンパク質を過剰発現させて、化学療法に対抗しようとする。この単純なフィードバック調節によって多剤耐性が生じる。同様に、DNA 損傷時に、細胞をアポトーシスに誘導するか、DNA 修復のために細胞周期停止状態にさせる、p53 タンパク質の役割は、p53 タンパク質を分解する mdm2 の過剰発現によって抑えられてしまう。したがって、フィードバック制御をうまく調整することが、システムレベルの癌治療における自然な戦略だと考えられる。

このような戦略を実行に移すには、細胞周期、増殖決定、さらにはアポトーシスといった細胞活動を系統的に制御する方法を見つける必要がある。コンピュータ・シミュレーションによれば、ある種の摂動に対しては頑

癌の頑健性

癌を、潜在的脆弱性をもった、頑健なシステムだとみなせば、薬剤と治療の進歩のための新しい戦略がひらける。

▶ 健全な細胞周期が、特定のフィードバック・ループをなくしたり弱めたりすると、きわめて脆くなることがわかっている。すなわち、最小限の摂動で細胞周期を停止させることが可能なのだ。この結果は理論的なものであり、まだ実験的には検証されてはいないものの、注意深く調節ターゲットを選び、複合的な薬剤を系統的に使用することによって、頑健性が制御できることを示唆している。この「システム・ドラッグ・ディスカバリー」のアプローチは、特定のタンパク質のみをターゲットにするのではなく、細胞のダイナミクスを制御することを意図したもので、現在は憶測の域を出ないが、新しい癌治療法の開発に不可欠なものになるかもしれない。

細胞の状態を予測し制御することができるようになれば、頑健性と脆弱性のトレードオフを治療に使うことも可能になるだろう。カールソンとドイルは、彼らの高度最適化耐性(HOT)理論において、頑健な複雑系は、通常の摂動に対しては頑健性を示すが、異常な摂動に対しては極端に脆くなると主張している。

統計物理学を基盤にした概念に、設計や進化の観点を加えたHOTは、もともとインターネットのような技術的に複雑なシステムの研究に応用されていたのだが、近年、森林火災や抽象的な格子の進化モデルで実証されたように、生体系や生態系にもっと広く応用できるかもしれない。もし、この理論が腫瘍に対しても有効ならば、極端な頑健性があるところには、同時に(きわめて稀だろうが)脆弱な部分もあることを意味する。それを見つければ、論理的に考えて、治療の際の当然の標的となるだろう。このような脆弱性を見つければ、腫瘍の調節ネットワークのダイナミクスについての深い理解が必要となるだろうが、システムレベルの新しい治療につながる可能性がある。理想的には、このバランスをうまく利用して特定の摂動に対する頑健性を高めることにより、腫瘍の脆弱性が、有効な

治療薬がすぐに手に入るようなターゲットで現れるようにもってゆくことが可能だろう。

癌を頑健なシステムとみなせば、これからの研究戦略の枠組みが見えてくる。腫瘍細胞の遺伝的多様性は、臨床上の治療対策に役立つ情報を与えてくれる、頑健性の一つの側面を表しているのかもしれない。細胞レベルでの頑健性に関するダイナミクスの理解が深まれば、それを制御する方法も発見できるだろう。その方法は、複合的な薬剤を系統的に少

量ずつ使用するものになりそうだ。未来の癌治療は、腫瘍の頑健性を制御できるかどうか、によって判断されることになるだろう。 ■

Hiroaki Kitano is at Sony Computer Science Laboratories Inc., 3-14-13 Higashi-gotanda, Shinagawa, Tokyo 141-0022.

FURTHER READING

Kitano, H. *Nature* **420**, 206–210 (2002).
Morohashi, M. et al. *J. Theor. Biol.* **216**, 19–30 (2002).
Carlson, J. M. & Doyle, J. *Phys. Rev. Lett.* **84**, 2529–2532 (2000).

news 大人のためのサイエンス博物館

原文: *Museum breaks mould in attempts to lure reluctant visitors*

Nature Vol.426(6)/6 November 2003 ; www.naturejpn.com/digest

Jim Giles, London

博物館の学芸員は、よくこういう話をする。人は生まれてから死ぬまでに博物館を3度だけ訪れる。子供の時に1回、自分の子供を連れて、もう1回、そして自分の孫を連れて、さらに1回というわけだ。このような情けない状況に、今や科学博物館(英国)は真正面から取り組み、1,000万ポンド(約19億円)をかけて大人を直接の対象とした別館をオープンした。

11月19日にオープンしたデーナセンター(ロンドン・サウスケンジントン)は、その対象を18～45歳の成人にしばっている。ここでは、マイノリティー人種のコミュニティにおけるエイズ問題に関する夜間討論会、新作映画の封切り上映、心臓外科手術の生中継と執刀医との質疑応答など多彩なイベントが予定されている。

また同センターでは、通常、成人向け施設で多く見られるような、きわどいものも置いてある。売店ではビクトリア朝の大人のおもちゃが売られており、子供の立ち入りが禁止されている区域では、そのようなものをテーマとした催しもできるようになっている、と同センターのスタッフは言う。

「もしこれが成功すれば、すごいことだ」と語るのは、ライフサイエンスセンター(英国ニューカッスルアポンタイン)・サイエンス開発課長のSteve Crossだ。「18歳から45歳の成人は、それぞれ決まった関心領域をもつ傾向があり、別の角度から科学を見直させよう

としても難しい。科学広報に関係する誰もが、この年齢層にはおびえている。もしデーナセンターが成功すれば、従来の法則が通用しなくなるわけだ」と、Crossは言う。

デーナセンターは夜間来場者の増員という目標の達成にも苦勞するだろう、と今回の取り組みに懐疑的な見方をする者もいる。サウスケンジントン地区は確かに、歓楽街としてではなく、博物館や大使館の街として知られているからだ。

しかし同センターのスタッフは、綿密に計画を練った催し物を行うことで、そのような問題は解決できると反論する。例えば去る2月に、科学博物館はMotherlandというドキュメンタリー番組がBBCテレビで放映されたことにタイミングを合わせて講演会を行い、多数のアフリカ・カリブ系住民の来場を得た。Motherlandは、アフリカ・カリブ系英国人がDNA解析を利用して、自分の祖先はアフリカの特定の地域に住んでいたことを突きとめるという内容のドキュメンタリーだった。

デーナセンターは、コメディの舞台や現代舞踊をベースとした科学の催し物を行う。またヨーロッパや米国各地ではカフェ・サイエンティフィック(Cafe Scientifique)といって、バーやカフェでゲスト研究者が科学の話題を披露する催し物が成功を収めており、同センターではこのアイディアを発展させたいと考えている。 ■

デーナセンターのホームページ
<http://www.danacentre.org.uk>

果てを越えたか?

Len A. Fisk

2機のボイジャー探査機は太陽系の境界の外側に向かって飛び続けている。そして、今回ボイジャー1号が太陽風の「端」、つまり末端衝撃波面(termination shock)に遭遇した可能性がある。しかしこれには異論がないわけではない。

原文: Over the edge?

Nature Vol.426(21)/6 November 2003 ; www.naturejpn.com/digest

論争を巻き起こしつつ冒険が続いている。2機のボイジャー探査機はNASAによって1977年に打ち上げられ、外惑星を探索し、現在太陽系の外に向かう軌道にのっている。ボイジャー1号は地球から130億km以上、地球と太陽の距離の85倍以上のかなたにいる。Krimigisら¹はその距離で、探査機は太陽風のいわゆる末端衝撃波面、つまり太陽風が星間物質と混じり合い始めるところに遭遇したと主張している。しかし、McDonaldら²は末端衝撃波面はまだ先にあると、同じくらい説得力のある主張をしている。いずれにしても、ボイジャー1号は太陽系の未だ探索されていない領域に入った。

太陽の外圏大気は太陽風として知られる超音速荷電粒子のプラズマ流として宇宙空間に絶え間なく広がっている。太陽風の速度はだいたい秒速450kmから750kmである。これに対して、地球近傍の音速は秒速30kmから50kmだ。二つのプラズマは容易には混じり合わないの、太陽風の超音速プラズマは星

間物質のプラズマの内側にヘリオスフィア(太陽圏)という塊を作っている。

しかし外部太陽圏のどこかで太陽風プラズマは星間物質のプラズマと混じり合い始めるだろう。あらゆる超音速流と同様、この混合は超音速から亜音速へ速度が急激に低下する衝撃波遷移に端を発する。超音速飛行機に先行しソニックブームの原因となる衝撃波遷移と同様である。これが太陽風の末端衝撃波面である(図1)。末端衝撃波面は太陽圏全体を囲んでおり、太陽系における群を抜いて大きな衝撃波面である。太陽から末端衝撃波面までの距離は85AUから120AUと推定されている³。(1AUあるいは1天文単位は地球と太陽の平均距離で、約1.5億kmである。)

末端衝撃波面は天体物理学の対象として魅力的で、高エネルギー粒子の巨大な加速機構であると予想されている。太陽圏内に侵入した中性の星間ガスはイオン化され、太陽風に乗せられて外部太陽圏に運ばれる。その後これらの粒子は加速され、そのエネルギーは1

万倍以上も増大し、宇宙線異常成分として知られる高エネルギー粒子の集団を構成する。この加速は末端衝撃波面で起こっているらしい。そして今度は、この加速された粒子は圧力をかけて末端衝撃波面の構造を変えることができる。その意味では、末端衝撃波面は星間物質中の超新星から生まれた衝撃波面と類似しているはずであり、星間物質中の衝撃波面も高エネルギー粒子の強力な加速機構であると予想されている。

ボイジャー1号が末端衝撃波面に遭遇したとすれば、探査機によって収集されたデータに明確な形跡があるはずである。(ボイジャー2号はボイジャー1号の後方約20AUにあり、まだ末端衝撃波面の推定位置に到達していない。)最もはっきりした形跡は太陽風速度の減少とそれとともなう密度と磁場強度の増大であろう。また、多量の加速された粒子、特に宇宙線異常成分もあると思われる。

これらの2つの形跡がKrimigisら¹とMcDonaldら²の論争の論拠になっている。ボ

▶

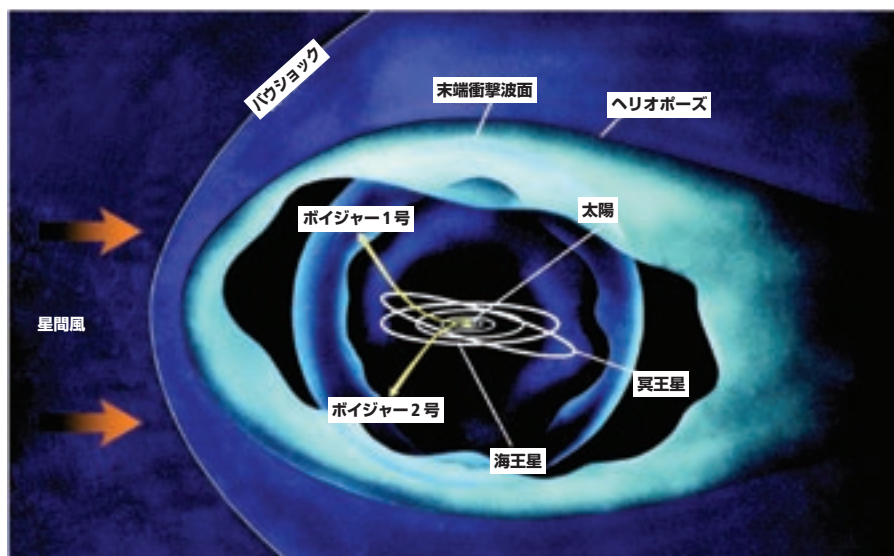


図1 途方もない旅。ボイジャー1号と2号は太陽系の外惑星を過ぎ去り、異なる軌道上を飛行している。そして、ボイジャー1号は太陽から85AUの距離にある末端衝撃波面に到達したかもしれない¹、到達しなかったかもしれない²。末端衝撃波面は太陽風の超音速プラズマが太陽系境界で星間物質と遭遇して減速し始めるところで形成される。太陽風と星間ガスは容易には混じり合わず、さらに外側の末端衝撃波面を越えたところに、太陽風と星間ガスの真の境界、ヘリオポーズがある。さらに遠くに、太陽系自身が星間ガスに対して超音速で移動しているなら、巨大なパウショックがあるかもしれない。

イジャー 1 号に搭載されているプラズマ検出器は太陽風の速度を直接計測できるが、数年間作動していなかった。Krimigis らは低エネルギー粒子について巧みな解析をおこない、必要に応じてデータを補正した結果、太陽風の速度が低下していると結論を出した。また、末端衝撃波面付近で予想されているように、低エネルギー粒子数と軽イオン粒子の増加も確認された。これとは反対に、McDonald らによる高エネルギー領域の宇宙線異常成分の計測では、ボイジャー 1 号の現在位置から少し遠方で粒子が加速されていることが示唆される。McDonald らは 85Au 付近でイオンと電子の強度が大きく増大していることを確認したが、まだ前方に存在する末端衝撃波面の前兆にすぎないと主張する。

実は、末端衝撃波面は静止しているとは予想されていない。末端衝撃波面の位置は太陽の状態の変化に回答して変わる太陽圏の状態によって変化していると思われる。実際、Krimigis らはボイジャー 1 号は約 200 日間末端衝撃波面を越えていただけでなく、衝撃波面が再び外側に移動した後、探査機は超音速の太陽風の中に取り残されたと主張する。太陽系で最大の衝撃波面に遭遇しこれを研究するための追跡が再び始まっている場合、おそらく末端衝撃波面は今後数年間は外側に移動するだろう。

問題はもちろんどちらが正しいかだ。ボイジャー 1 号はすでに末端衝撃波面に遭遇したのだろうか。個人的には、末端衝撃波面を横断しているとすればデータをより容易に説明できる Krimigis¹ らに同意したい。したがって、McDonald² らのデータは末端衝撃波面の形状が予想よりも複雑であるか、ボイジャー 1 号の位置よりも遠いところに高エネルギー粒子を加速する何か別の方法があることが示唆しているのではなかろうか。どちらの説明も確実ではなく、ボイジャー 1 号がさらに遠くへ飛行していく過程で、近いうちにこの興味深い領域に再び遭遇することを期待しよう。いったん末端衝撃波面を通過すれば、冒険は新しい段階にはいる。末端衝撃波面の向こう側にある超音速の太陽風の領域は、乱流と粒子の加速、そして珍しいプラズマ現象を特徴とする魅力的なものだろう。ボイジャー探査機は 1 年に 3AU から 4AU の速度で移動してお

り、やがては太陽風プラズマと星間プラズマを隔てる境界であるヘリオポーズ(太陽から約 150AU の距離にあると推定されている)に遭遇する(図 1)。そして我々は本当に星間物質の中に入り込むことになる。ボイジャーはやがて太陽圏自体が星間物質中を超音速で移動しているために起こる「バウショック」に到達するかもしれない。しかし両探査機ともそのはるか前 2020 年頃には電源が枯渇する。40 年間のミッションの後、ボイジャーは汚れ

のない恒星間空間のかなたへ静かに漂っていくだろう。

Len A. Fisk is in the Department of Atmospheric, Oceanic, and Space Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109-2143, USA.

e-mail: lafisk@umich.edu

1. Krimigis, S. M. *et al. Nature* **426**, 45–48 (2003).
2. McDonald, F. B. *et al. Nature* **426**, 48–50 (2003).
3. Stone, E. C. *Science* **293**, 55–56 (2001).

進化生物学

あの手この手の卵争奪戦

Matthew J. G. Gage

雄鶏は、交尾の際に射精液の量を複数の要因によって手加減しているようだ。つまり、雄同士の競争の程度、前にも雌と交尾をしたかどうか、そして、雌の生殖的な「価値」が要因となるらしい。

原文: *Scramble for the eggs*

Nature Vo.426(22)/6 November 2003; www.naturejpn.com/digest

精子競争(sperm competition)とは、複数の雄に由来する精子が 1 匹の雌の卵を受精させるために競争することである¹。雄は自分の遺伝子を後世に残すために長く奮闘するが、その最終戦には往々にしてこの精子競争が待ち受けている。そのため当然のことながら、雄には生殖にかかわる特徴的な形質がいくつか備わることとなった²。よく見られる適応の 1 つが、天文学的な数の微小な精子をつくることで、これは精子競争の基本原則が一種の「富くじ」だからだ。つまり、最も多くの精子を射精した雄ほど受精に成功する見込みが高い³。しかし産生できる精子の数が有限なため、雄は数のうえで常に優位に立つことはできない。そこで、他の策をとらねばならない。たとえば 2003 年 11 月 6 日号 p. 70 の Pizzari たちの報告⁴によると、若い雄鶏は精子数で精子競争の優位に立つ必要性をはかりにかけ、限られた供給量の範囲内で精子数をやりくりするという、「前例のない高度な技」をやっている。雄鶏は 1 回の交尾ごとに、集団内の社会的手がかりや性的手がかりに敏感に反応している。つまり雄は、精子競

争の程度や雌の繁殖価に対して最適で、自身の精子の蓄えとも帳尻が合うような量の射精をする。

雄はおびただしい数の精子をつくるが、その過程は多くの場合、コストがかかる。たとえば 1 個 1 個の精子細胞は、進化の過程で特殊化し競争する DNA 保持単位となるべく強力な圧力を受けている。こうした特殊化のため、精子完成までの時間が長くなっているのかもしれない。哺乳類では、雄の生殖細胞系列から成熟した精子細胞ができるまでに 5～11 週間かかる⁵。さらに、精子形成には無視できないほどのエネルギーが必要なことがわかっていて。たとえばヨーロッパサリヘビ(*Vipera berus*)では、精子形成期(雄は身体の動きが鈍くなる)の体重減少は、その後の探索行動や求愛行動、競争や交尾をする活発な時期と同じくらい大きい⁶。

進化生物学者たちは以上のような制限事項を考慮して、雄は射精 1 回ごとに細心の注意を払っており、1 回ごとの交尾の特異的かつ局所的な必要性に応じて射精量を調節しているはずだと推測してきた^{7,8}。実際に実験で、雄

▶ が適応的にみえるやり方で精子数を操作できることを示す証拠が得られている⁹⁻¹²。ところが Pizzari たちの研究⁴で、ニワトリ (*Gallus gallus*) がこれまで報告されたものよりずっと精度の高い「はかり」と信号をもとに精子数を調節できることが明らかになった。

セキショクヤケイとその家畜化された子孫であるニワトリは、雌が妊娠可能な時期に数羽の雄と交尾する乱婚型の配偶様式を進化させてきた。雄は序列が優位(交尾のために雌にいつでも近づける)か、劣位(あまり近づけない)のどちらかをとりうる。こうした乱婚型の配偶様式は動物界全体を通じて広く見られ、純粋な単婚(一夫一婦制)を進化させた種は少数派である²。雄にとって雌の乱婚は、交尾の成功イコール受精の成功とならないことを意味する。

では、雄鶏はライバルの雄たちと競争する際にどうやって卵を受精させるチャンスを高めるのだろうか。解明するため Pizzari たちは、野生化したニワトリやセキショクヤケイの放し飼い集団を研究した。鳥を人間に慣れさせ、雌には、自然状態で出された射精液を採集して干渉が最小限の状態で分析できるような装置をつけた。

1 回目の精子競争の程度の影響を見る実験では、雄鶏はライバルの雄がゼロか1羽か3羽いる状態で交尾でき、雄の数が多くなるほど競争の程度は高くなる。Pizzari たちは、雄の社会的な地位によって射精反応が違ふことを観察した。予想通り、優位の雄は競争のリスクが高まるとより多くの精子を射精した。これはおそらくライバルよりも数の上で優位に立とうとしたためである。しかし劣位の雄は、もっと複雑な反応を見せた。精子競争の激しさが低程度から中程度に上がるときには精子数は上昇したが、競争の激しさが最大級になると精子数は下降した。

これらの反応は、雄の射精反応に関する2つの説とかなり符合する。一方の「競争のリスク」モデル(risk model)⁷によれば、優位の雄はリスクが高まれば受精競争を勝ち抜くために精子の投資を増やすよう振る舞う。しかし劣位の雄はもっと精妙な「競争の激しさ」モデル(intensity model)⁸をとらねばならない。社会的地位が低いということは雌を支配する力が弱いということであり、そのためライバル

の雄の数が多ければ精子競争は激しくなる可能性が非常に高くなる。この筋書きでは、劣位の雄は自身の精子投資を減らしてその後の交尾のために精子をとっておくと予想される。なぜなら、こうした精子競争で優位のライバルの雄に精子数のうえで勝つのは、コストがあまりに高くつくからである。「富くじ」を引き合いに出すと、賞品をめぐる競争相手がいない場合には、券を1枚買えば賞品がもらえる。もし競争相手が少数なら、券をたくさん買えば当たる確率を最大限にできる。だが、競争がすごい場合には、当たる確率ももっと高い次回以降の富くじにお金をとっておいて券を買うほうが得策である。

Pizzari たちは、雄鶏が雌鶏の「とさか」の大きさに敏感なことも明らかにしている。雌の「とさか」が卵の平均サイズの予測指標となり、したがって繁殖上の「価値」の指標となることを見つけたのだ。つまり、雄は「とさか」の大きい雌ほど、多くの精子を投資したのである。同じように、雄は新顔の雌にも反応した。同じ雌との交尾を何度もしていると、精子の蓄えが減るかのように、雄の精液量がしだいに減っていく。ところがその雄が新顔の雌に出会うと、熱意も新たに交尾を再開し、射精液は以前のように精子数が多くなった。この生殖上の反応は、米国の元大統領カールビン・クーリッジにちなんで「クーリッジ効果」¹³として最初に報告されたものである。同大統領は政府の農場を訪れた際に、1羽の雄鶏が交尾する回数の多さに驚きの言葉を発し、そのあと雄鶏が次々と新しい雌を相手に交尾することを知らされて納得した。このクーリッジ効果はこれまで、性的行動を再開させることしか報告されていなかった¹⁴。ところが今回 Pizzari たちは、新しい雌が交尾行動と射精量の両方を回復させることを示したのだ。

Pizzari たちの成果⁴は、雄が精子競争を勝ち抜くためにとる戦略が進化するのを押し進める選択の力を例証したものだ。しかし、この「消費と貯蓄」戦略が本当に適応したものかどうかを知るには、競争する雄たちの実際の受精率や繁殖率を定量化し、長期または生涯の繁殖成功度に換算することも重要である。また、精子形成にかかるエネルギーコストや繁殖コストについて、もっと情報が必要である。

将来的に交尾を受け入れる雌に出会う可能性があれば、必然的に精子の投資戦略は慎重なものになる。これを考えると、雄は交尾を受け入れてくれる雌の個体数を知るために局所的な手がかりを感じとっているのかどうか、という(予想されるような)疑問がまた1つ出てくる。

最終的には、今後の研究で射精量の操作を裏で支えている仕組みが調べられるかもしれない。乱婚性の齧歯類シカシロアシネズミ(*Peromyscus maniculatus*)に関する生理学研究では、精管の筋収縮性がオピオイドホルモンに直接反応することが明らかになっている¹⁵。精管は精子を射精部位まで運び、オピオイドホルモンは雄どうしの相互作用に際して精子競争の直接的な合図として分泌される。推論するに、ニワトリでもこれと似た仕組みが働いている可能性がある。 ■

Matthew J. G. Gage is in the School of Biological Sciences, University of East Anglia, Norwich NR4 7TJ, UK.

e-mail: m.gage@uea.ac.uk

1. Parker, G. A. *Biol. Rev.* **45**, 525–567 (1970).
2. Birkhead, T. R. & Møller, A. P. *Sperm Competition and Sexual Selection* (Academic, London, 1998).
3. Gage, M. J. G. & Morrow, E. H. *Curr. Biol.* **13**, 754–757 (2003).
4. Pizzari, T., Cornwallis, C. K., Løvlie, H., Jakobsson, S. & Birkhead, T. R. *Nature* **426**, 70–74 (2003).
5. Setchell, B. P. in *Reproduction in Mammals* Vol. 1, *Germ Cells and Fertilization* (eds Austin, C. R. & Short, R. V.) 63–101 (Cambridge Univ. Press, 1982).
6. Olsson, M., Madsen, T. & Shine, R. *Proc. R. Soc. Lond. B* **264**, 455–459 (1997).
7. Parker, G. A., Ball, M. A., Stockley, P. & Gage, M. J. G. *Proc. R. Soc. Lond. B* **264**, 1793–1802 (1997).
8. Parker, G. A., Ball, M. A., Stockley, P. & Gage, M. J. G. *Proc. R. Soc. Lond. B* **263**, 1291–1297 (1996).
9. Gage, M. J. G. *Anim. Behav.* **42**, 1036–1037 (1991).
10. Wedell, N., Gage, M. J. G. & Parker, G. A. *Trends Ecol. Evol.* **17**, 313–320 (2002).
11. Martin, O. Y. & Hosken, D. J. *Anim. Behav.* **63**, 541–546 (2002).
12. Pilastro, A., Scaggiante, M. & Rasotto, M. B. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **99**, 9913–9915 (2002).
13. Wilson, J. R., Kuehn, R. E. & Beach, F. A. J. *Comp. Physiol. Psychol.* **56**, 636–644 (1963).
14. Dewsbury, D. A. *Psychol. Bull.* **89**, 464–482 (1981).
15. Pound, N. *Proc. R. Soc. Lond. B* **266**, 1755–1758 (1999).

油膜を利用したラボチップ

原文: On-chip manipulation of free droplets

NATURE 426 (515)/4 December 2003; www.naturejpn.com/digest

「ラボ・オン・チップ」のシステム(実験室での分析や反応をガラス基板上等で行うシステム)は、パイプを装備した工場のようなものである。だが、チップ上のマイクロチャンネルを流動する粒子、細胞、タンパク質が壁にくっついてチャンネルを詰まらせてしまうことがあり、物質を運ぶうえで問題が生じる可能性があった。より適応性の高い微小流体システムでは、固体表面上で液体を液滴として運ぶことができるが¹⁻¹⁰、液体が固体壁に接触しているため、同じような問題が残る。今回の研究では、液体の中に液体を流す微小流体システムによって、水や炭化水素のマイクロリットルやナノリットル単位の浮遊液滴を自由に流動させてみた。このシステムでは、濃度の高いフッ素化した油の上を液滴が浮き、油の下に設置した電極によって生じる交流または直流の電場によって動く。このような微小流体チップは、微小スケールでの運搬や混合、化学物質や材料の合成のための用途の広いツールとして応用できるだろう。

私たちが開発した、液体中に液体を流す微小流体装置(図1)では、フッ素処理した油(F-油)の表面を、水やドデカンの微小液滴が自由に浮かんでおり、油膜下の電極から交流(a.c.)または直流(d.c.)電場を発生させる。空間的に不均一な交流電場が誘電泳動力を発生し¹¹、分極性物質を電場強度の高い領域へと引き寄せる。

液滴は電圧を加えられた電極へと移動し、その上で浮かび、電場に捕らえられる(図2a)。異なる電極の電圧を変えるスイッチをプログ

ラムングすることで、液滴を容易に移動できる(図2a,bおよび補足資料を参照)。今回の実験で使った電圧(200~600V)はほかの誘電泳動実験で使われているのと同程度である。交流モードにおける液滴の速さは、電場強度の2乗に対応しており、誘電泳動の理論に一致している¹¹。液滴は粘性抵抗しか受けないので、著しく低い消費電力で動く。ただし、固体壁の電極に接触したときはより動きが遅くなる⁸⁻¹⁰。

水滴は直流電場に強く引き寄せられるかはねつけられ、 2.0mm s^{-1} の速度で動く。つまり、液滴には著しい電荷または双極子モーメントがあり、クーロン斥力や引力によって動いている、ということを示唆している。液滴の帯電や再帯電は、F-油を通じたイオン移動によって起きると考えられ、この現象は常に観察された。このほか、予想以上に強い内部分極が液滴に生じている証拠も得られた(この件は別稿で紹介する)。こうした強い帯電効果によって、炭化水素の油の液滴を操作することもできる。だが、こうした液滴では分極率が低いために、対称な交流電場には反応しない。

いろいろなものが混じった液滴の内部に無機固形物が沈殿して、透き通った貝のような球ができた^{9,12}。また、マイクロ粒子やナノ粒子を含む液滴が乾いて、非対称の微小な集合体ができた(図2c, 補足資料を参照)。実験で使ったチップは、こうして残された浮遊粒子を操作するために使うこともできる。私たちの研究グループは、界面活性剤を使ってドデカンと水の液滴を混ぜ合わせることで、炭化水素を外皮として対称な水のカプセルを作ることでもできた(図2d, 補足資料を参照)。

本稿で紹介した適応性の高い微小流体装置は、幅広い応用が可能だろう。例えば、いろい

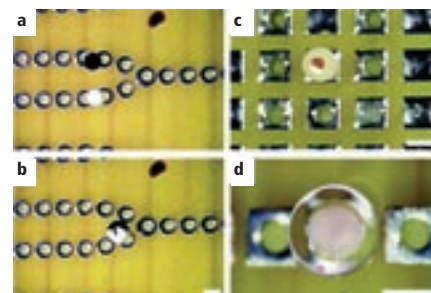


図2 液体の中に液体を流す微小流体チップの上を自由に流れる液滴の様子(動画は補足資料を参照)。

a ラテックスの微小球を含む液滴(白)と金のナノ粒子を含む液滴(紫)(それぞれ750ナノリットル)を運んだ。

b 経路の合流部で接触した瞬間、液滴が混ざる。混合した液滴はその後、1本の経路を流れていく。

c ポリスチレンラテックス(白)と磁性ラテックス(茶色)を含む2つの液滴が、混じるときに非等方的な粒子の集合体を一時的に形成する。

d ラテックスと界面活性剤(Sodium Dodecyl Sulphate)2 mMを含む液滴が、液体のドデカン外皮の内側でカプセル状になっている。

縮尺:1mm。詳しくは<http://crystal.che.ncsu.edu>。

ろな物質の合成や生物学的な微量分析など。より複雑な応用分野としては、生きた細胞や遺伝子材料を個別の液滴に閉じこめる、生化学反応の実験、沈殿物の分析、類似薬物や毒物のスクリーニングなどが考えられる。■

Orlin D. Velev, Brian G. Prevo, Ketan H. Bhatt

Department of Chemical Engineering, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina 27695-7905, USA

e-mail: odvelev@unity.ncsu.edu

1. Chaudhury, M. K. & Whitesides, G. W. *Science* **256**, 1539–1541 (1992).
2. Lee, S. W. & Laibinis, P. E. *J. Am. Chem. Soc.* **122**, 5395–5396 (2000).
3. Daniel, S., Chaudhury, M. K. & Chen, J. C. *Science* **291**, 633–636 (2001).
4. Ichimura, K., Oh, S. K. & Nakagawa, M. *Science* **288**, 1624–1626 (2000).
5. Daniel, S. & Chaudhury, M. K. *Langmuir* **18**, 3404–3407 (2002).
6. Washizu, M. *IEEE T. Ind. Appl.* **34**, 732–737 (1998).
7. Rosslee, C. & Abbott, N. L. *Curr. Opin. Coll. Interface Sci.* **5**, 81–87 (2000).
8. Pollack, M. G., Fair, R. B. & Shenderov, A. D. *Appl. Phys. Lett.* **77**, 1725–1726 (2000).
9. Jones, T. B., Gunji, M., Washizu, M. & Feldman, M. *J. Appl. Phys.* **89**, 1441–1448 (2001).
10. Cho, S. K., Moon, H. J. & Kim, C. J. *J. Microelectromech. S* **12**, 70–80 (2003).
11. Fuhr, G. *et al. Naturwissenschaften* **81**, 528–535 (1994).
12. Dinsmore, A. D. *et al. Science* **298**, 1006–1009 (2002).
13. Velev, O. D., Lenhoff, A. M. & Kaler, E. W. *Science* **287**, 2240–2243 (2000).

補足資料がネイチャーのウェブサイトにあります。

この論文への金銭的な利害関係: なしとの報告

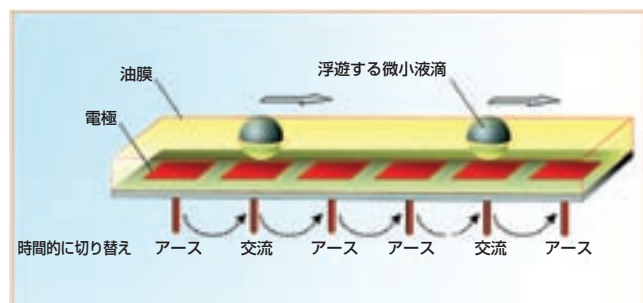


図1 液体の中に液体を流す微小流体チップに使った誘電泳動装置の概要図。