

# nature DIGEST

日本語編集版  
OCTOBER 2006  
VOL. 03, NO. 10

# 10

[http:// www.nature.com/naturedigest](http://www.nature.com/naturedigest)



化学は  
終わったのか？

人材をお探しの  
「第3期科学技術基本計画」世代へ

# 研究職派遣 秘書職派遣



# 30%OFF

お選び下さい！  
優秀スタッフから

条件

適用：研究職派遣/秘書職派遣を30%OFFで行います。  
対象は、6ヶ月以上継続の派遣期間のうち最初の1ヶ月間のみです。  
2ヶ月目以降は弊社の通常料金です。  
交通費などの実費は除きます。  
確認：他社見積書（コピー要）金額より30%引きです。  
または、弊社の通常料金より30%引きです。

**独立行政法人、民間研究所で  
スタッフ活躍中です。**

優秀なスタッフのプロフィールファイルが  
ございますのでお気軽にお問合せ下さい。

発注・お問合せ

**R&D@icube-t.co.jp**



intercultural  
interactive  
information

つくば初のプライバシーマーク認定企業

R&D 研究支援サポート企業

株式会社 アイキューブつくば

サイエンス・アライアンス・ジャパン  
研究開発  
支援  
www.science-japan.com

お仕事をお探しの方

## 研究のお仕事 あります！

実績が示す信頼性

●産業技術総合研究所、情報通信研究機構、理化学研究所  
高エネルギー加速機構、物質・材料研究機構、国立環境研究所  
防災化学技術研究所、土木研究所、建築研究所、農業環境技術研究所  
農業・生物系特定産業技術研究機構、日本食品化学工学会  
国際科学振興財団、株式会社トクヤマ、興和株式会社  
株式会社クリタス など

【化 学】有機合成、触媒、材料／素材、ナノテク  
【バイオテック】バイオインフォマティクス、プロテオーム、  
創薬研究、薬物動態、遺伝子  
【理 工 学】半導体、電気／電子、ナノテク、物理  
【分 析】環境、医薬品、食品  
【S E】プログラミング、ネットワーク、  
シミュレーション

雇用形態：派遣、紹介予定派遣、正社員

- ◆ホームページよりオンライン登録可能
- ◆ホームページにて最新お仕事掲載

**www.icube-t.co.jp**

一般労働者派遣（股）08-04-0017

# 化学は終わったのか？

## HIGHLIGHTS

02 vol. 442 no. 7105, 7106, vol. 443 no. 7107, 7108

## EDITORIAL

04 惑星とは丸きもの

## NEWS@NATURE.COM

05 黒こげ海藻が蓄電器に

06 修道女の神聖な体験と脳スキャン

07 球状星団は2度「誕生」した

## SPECIAL REPORT

08 倫理学者と生物学者で卵子の値段を思案する

Erika Check, Helen Pearson

## NEWS FEATURE

11 化学は終わったのか？

Philip Ball

16 病める海洋

Jacqueline Ruttimann

## NEWS &amp; VIEWS

20 追悼 — 江橋節郎 氏

遠藤 實

## BUSINESS NEWS

22 RNA 干渉の臨床応用を競う沈黙のランナーたち

Erika Check

## JAPANESE AUTHOR

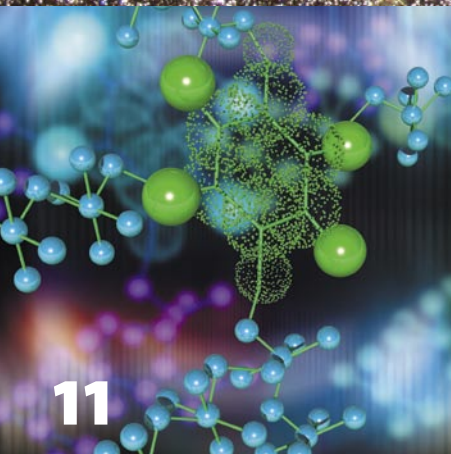
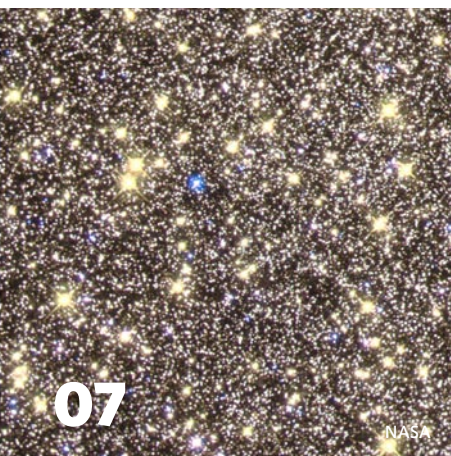
24 がんや神経疾患との関わりから、糖鎖の多彩な機能を探る — 古川鋼一

西村尚子

## 英語でNATURE

26 Cheap IVF needed

必要とされる安価な体外受精



nature  
DIGEST

10

volume 3 no.10  
October  
www.nature.com/naturedigest

© 2006 年 NPG Nature Asia-Pacific  
掲載記事の無断転載を禁じます。

発行人: デービッド・スウィンバンク  
編集: 北原逸美  
デザイン/制作: 村上武  
広告: 浅見りの子  
マーケティング: 吉原聖豪

NPG ネイチャー アジア・パシフィック  
〒162-0843  
東京都新宿区市谷田町 2-37  
千代田ビル  
Tel. 03-3267-8751 Fax. 03-3267-8754

©2006 NPG Nature Asia-Pacific



**認知症を引き起こす変異****Dementia-causing mutation**

増殖因子の1つをコードする progranulin 遺伝子の変異が前頭側頭型認知症 (FTD) を引き起こすことを、2つの神経科学者グループが発見した。この疾患は、65歳未満で発症する認知症では2番目に多いもので、記憶や人格が損なわれ、また運動性にも影響する場合がある。これまでに微小管結合タンパク質タウとよばれる近傍にある遺伝子の変異が、FTDの一部と関連があることがわかってきたが、すべての症例に関連するわけではなかった。今回の発見は、この疾患の原因をめぐろうとしたあいまいさを解消する一助となりそうだ。

24 August 2006 Vol. 442 / Issue 7105

Letters pp.916, 920 参照

**2個でも多過ぎ****Centrosomes: two's a crowd**

中心体は、細胞周期の最初には1個、有糸分裂の際には2個存在するように、1回の細胞周期につき1回だけ複製(倍加)される。この過程に異常があると、ゲノムの不安定性やがんの原因になることさえある。*in vitro*での研究で、細胞が中心体の複製を制御する仕組みと染色体分離を制御する仕組みとの間に、意外な類似性があることが明らかになった。有糸分裂の終了時には、中心体の2個の中心小体が離れるが、この過程には、有糸分裂での姉妹染色分体の分離にかかわるプロテアーゼであるセパラゼが必要となる。分離した中心小体は、次の細胞周期における複製の基材となる。新しく複製された中心小体は対となっているので、有糸分裂が終わるまではもう1度複製することはできない。そして、有糸分裂が終わって初めてセパラゼによって切り離され、複製が可能になる。この研究により、1回の細胞周期に正確に1回だけ複製が起こる2つの細胞過程について、共通する仕組みが明らかになった。

24 August 2006 Vol. 442 / Issue 7105

Letter p.947, N&V p.874 参照

**酸味の感知:****舌の酸味受容体もつ2つの役割****ACID TEST: A dual role for the tongue's sour taste receptor**

ここ数年で、哺乳類における5つの基本的な味覚のうち甘味、うま味(グルタミン酸ナトリウムの味)および苦味の3つについては分子機構が突き止められたが、残りの酸味と塩味についてはまだ解明されていなかった。今回、PKD2L1イオンチャネルが哺乳類

の酸味センサー分子の候補として特定された。PKD2L1(多発性嚢胞腎様イオンチャネルの1つ)は舌の甘味や苦味、うま味の受容細胞とは違う味受容細胞集団で発現している。PKD2L1は脊髄中心管を取り巻くニューロンにも存在しており、これらのニューロンは細胞外pHの低下に反応して活動電位を引き起こす。これらの細胞は、発見が待ち望まれてきた脳脊髄液化学感覚系の構成要素にあたる可能性がある。この研究から、大きく異なる生理的状況に共通する酸感知の基本機構の存在がうかがわれる。表紙は、味蕾のある舌の組織。甘味とうま味と苦味の受容細胞は緑色、酸味受容細胞は赤色に標識されている。

24 August 2006 Vol. 442 / Issue 7105

Letter p.934 参照

**超新星とX線フラッシュの関係****X-rated supernova**

継続時間の長いγ線バースト (GRB) と超新星との間に関係があることは立証されているが、もっと弱くエネルギーの低いX線フラッシュと超新星との間にも同様な関係があるかどうかははっきりしていない。今年2月18日にスウィフト衛星がとらえたGRB/XRF 060218は、この問題のミッシングリンクとなるかもしれない。この新発見のバースターに関する4編の論文のうち、まずCampanaたちは、衝撃波の突発的な発生の痕跡をX線で観測し、これがおそらく爆発中の超新星を示す証拠であると論じている。Pianたちは、GRB/XRF 060218に付随するIc型超新星SN 2006ajの可視光観測による発見について報告している。Soderbergたちは、電波とX線での観測結果から、XRF 060218が宇宙論的GRBに比べると100分の1のエネルギーしかもっていないが、10倍多く存在するタイプに属することを報告している。Mazzaliたちは、SN 2006ajのスペクトルと光度曲線のモデルを構築し、SN 2006ajがほかのGRBに付随した従来のよりもずっと小さい爆発エネルギーしかもたず、放出物質の量も大幅に少ないことを示し、SN 2006ajはおそらく太陽の20倍程度の質量しかない星から生じ、後にはブラックホールではなく中性子星が残ったのだらうと考えている。

31 August 2006 Vol. 442 / Issue 7106

Letters pp.1008, 1011, 1014, 1018, N&V p.992 参照

**映画はもう見た?****Seen the movie yet?**

ショウジョウバエの幼虫の唾液腺には巨大な多糸染色体が含まれており、この染色体の特徴的な縞模様は光学顕微鏡でも容易に見ることができる。通常こうした染色体は、核を破壊して染色体を平面上に「広げて」観察する。だが二光子レーザー走査顕微鏡を使えば、生きた唾液腺組織中の染色体の三次元画像をリアルタイムで調べることができる。この手法によって、DNAとモデル転写因子との相互作用の動的性質が明らかになった。また、Nalleyたちは、別の手法を用いて、転写因子Gal4の動態について同様の結論に達している。

31 August 2006 Vol. 442 / Issue 7106

Letters pp.1050, 1054 参照

**海色の測定:****栄養ストレスと太平洋熱帯海域の生産性****THE OCEANS IN COLOUR: Nutrient stress and tropical Pacific productivity**

植物プランクトンの増殖速度が、衛星による海色測定から推定できるようになった。しかし、こうした進歩には、増殖制限因子となる栄養素の解明が必要である。*in situ*鉄添加実験により、栄養制約条件の解明は飛躍的に進んだが、実験の規模は数十キロメートルにとどまっていた。太平洋の赤道領域のような場所では、硝酸塩濃度が高く鉄が極めて少ないことから、植物プランクトンは特殊な色素・タンパク質複合体を生合成するようになり、この複合体は独特の蛍光スペクトルをもつ。今回の新たな研究では、こうした鉄ストレスに対する生理学的応答の解明と、数千平方キロメートルにわたる野外測定データとを結びつけて、気候に大きな影響を及ぼすこの海域での植物プランクトンの増殖をより正確に推定している。この知見から、植物プランクトンの呈する「緑色」が必ずしも一次生産力を正確に反映していないことが明らかになった。

31 August 2006 Vol. 442 / Issue 7106

Letter p.1025 参照

**H5N1 ウイルスにタックル****Tackling the H5N1 virus**

H5N1 鳥インフルエンザウイルスの型名は、ウイルス外被のタンパク質であるヘマ

※「今週号」とは当該号を示します。

グルチニン (haemagglutinin) の H とノイラミニダーゼ (neuraminidase) の N をとって命名されている。どちらのタンパク質にも、いくつかの異なる型がある。ノイラミニダーゼは、ウイルスが感染した細胞から脱出して新たな細胞を攻撃するのを助けるタンパク質で、抗インフルエンザ薬タミフル (オセルタミビル) とリレンザ (ザナミビル) の標的である。これらの薬剤はノイラミニダーゼ N2 と N9 の結晶構造に基づいて設計されたが、その当時はこの2つしか構造が明らかになっていなかった。今回、N1、N4、N8 の構造が決定された。先の2つの型と比較すると、これらには活性部位の隅にくぼみがあり、標的分子を固定するためにこのくぼみが閉じるという重要な相違点がある。この構造を活用してこの部位を標的とする薬剤を設計すれば、一部のウイルス株がタミフルに対して獲得した薬剤耐性を回避できるかもしれない。

7 September 2006 Vol. 443 / Issue 7107

Article p.45, N&amp;V p.37 参照

## 容易になったキラル合成

### Chiral synthesis made easy

確実に選択性が高く、環境にやさしい化学反応は、天然物や医薬品の効率的な合成にしばしば必要になる。こうした合成には多数の触媒が利用可能だが、より収率が高くエナンチオ純度も高い有機分子合成ができる新たな触媒の探索も盛んに行われている。Zhao たちは今回、金属を含まないシンプルで触媒を開発した。この触媒を使うと、近くにある別のアルコールを変化させることなく、特定のアルコールをシリル保護基で保護できる。彼らは、多くの反応基質について高い収率とエナンチオ選択性を達成し、この触媒が重要な有機分子を作ることができる、環境にやさしい「グリーン」触媒の新たなファミリーになりうるのではと期待を寄せている。

7 September 2006 Vol. 443 / Issue 7107

Letter p.67, N&amp;V p.40 参照

## 受精因子：プロテオミクスにより見つかった雄性不妊の原因と避妊薬標的候補

### FERTILITY FACTORS: Proteomics identifies causes of male infertility and potential contraceptive targets

線虫 (*Caenorhabditis elegans*) でプロテオミクスの手法により、DNA 凝縮、染色体分離、受精能に必要なとされる精子形成特異的な因子が同定された。因子の多くは、雄のマウスの不妊の原因となる。今回

の知見から、男性の不妊の原因を解明したり、男性用避妊薬の標的が見つかったりする可能性が出てきた。表紙は、線虫の雄の生殖腺中で精子形成過程にある核を固定し、蛍光標識したもの。DNA は赤色、精子プロタミン SPCH-1、SPCH-2、SPCH-3 は緑色に見える。黄色の部分は、この両方が共存することを示している。

7 September 2006 Vol. 443 / Issue 7107

Letter p.101 参照

## ヒトをヒトたらしめる遺伝子

### The human factor

ヒトの独自性は何によって生み出されるのだろうか。この疑問に対する比較遺伝学的研究から、「ヒトらしさ」を備えるのかかわっていると思われる遺伝子の1つが見つかった。興味深いことに、この遺伝子は発生中の胚の新皮質、すなわち脳の最も高度な情報処理機能の多くを司る部位で発現している。進化の過程でチンパンジーとヒトの分岐点まではほとんど変化せず、その後ヒトにおいて加速進化したゲノム内非コード領域を拾い出したところ、この遺伝子が浮上してきた。ヒト系統で最も急速に進化しているゲノム領域の1つが、HAR1F と名づけられたまだ調べられていない RNA 遺伝子に対応していたのである。次に遺伝子発現について調べたところ、HAR1F は、新皮質の神経細胞の多くが脳内での機能を確立する妊娠中の重要な期間に、カハール・レチウスニューロンとよばれる細胞で活性化していることがわかった。

14 September 2006 Vol. 443 / Issue 7108

Article p.167, N&amp;V p.149 参照

## 見つけた中で最も古い銀河

### The oldest known galaxy

今週号 186 ページの論文で報告されている銀河は、現在知られているうちで最も遠方にあり、つまり今のところでは最も古い銀河である可能性がある。赤方偏移  $z$  がほぼ 6 のあたりでは多数の銀河が見つかったが、これより古い銀河の観測は確実性や信頼性が低かった。しかし、今回の新たに発見された古い銀河では  $z = 6.96$  という値が分光学的に得られており、この値はビッグバンから 7 億 5000 万年後の時代に対応する。そしてこの銀河のスペクト



ル中にはライマン  $\alpha$  輝線がみられ、宇宙が現在の年齢の約 6 パーセントでしかなかったこの時代に活発な星形成活動が起きていたことを示している。この銀河は、マウナケア山頂のすばる望遠鏡に搭載したカメラ Suprime-Cam による探査で見つかった。同じ探査で得られた銀河の個数密度は、銀河集団全体として見た場合、 $z$  がほぼ 7 のあたりでは、 $z = 6.6$  での個数密度の 18 ~ 36 パーセントしかないことがわかった。ハッブル宇宙望遠鏡を使った  $z$  が 7 ~ 8 の銀河の探査に関するもう 1 本の論文では、 $z$  がほぼ 7 ~ 8 のところにある銀河は控えめに見積もるとたった 1 個としている。ところが、 $z$  がほぼ 7 ~ 6 の時期に進化がなかったとしたら、この値は 10 個になると予想される。このような結果に対する最も簡単な説明は、 $z$  が 7 ~ 8 の時期にはまだ宇宙が若すぎて、小さな銀河の階層的な合体による多数の明るい銀河を形成するだけの時間があまりなかったというものだ。

14 September 2006 Vol. 443 / Issue 7108

Letters pp.186, 189, N&amp;V p.151, News p.128 参照

## 太陽の熱：太陽光度の変動と気候の関係

### THE WARMTH OF THE SUN:

#### Solar luminosity variations and climate

太陽のエネルギー放射、つまり光度の小さな変動は、気候変化と関連する可能性があることから関心を集め、議論を引き起こしている。この微変動は、11 年周期の太陽黒点サイクルの間に生じる太陽表面上の暗い領域 (黒点) や明るい領域 (白斑) が原因である。こうした現象は、1978 年以来衛星を用いて正確に追跡できるようになり、0.07 パーセントの変動が観測された。Foukal たちは、太陽光度の変化やそれが地球のエネルギーバランスに与える影響に関する研究の最近の進展を概説し、17 世紀以降、太陽放射の増大が気候変化に大きな影響を与えてきたとは考えにくいと結論している。さらに推測的となる太陽紫外線や磁気プラズマ放射に関連した気候変化については、起こった可能性は否定できないが、複雑な相互作用が働いているために定量化は困難である。表紙は、光度変動の原因となる構造を示している。



太陽のエネルギー放射、つまり光度の小さな変動は、気候変化と関連する可能性があることから関心を集め、議論を引き起こしている。この微変動は、11 年周期の太陽黒点サイクルの間に生じる太陽表面上の暗い領域 (黒点) や明るい領域 (白斑) が原因である。こうした現象は、1978 年以来衛星を用いて正確に追跡できるようになり、0.07 パーセントの変動が観測された。Foukal たちは、太陽光度の変化やそれが地球のエネルギーバランスに与える影響に関する研究の最近の進展を概説し、17 世紀以降、太陽放射の増大が気候変化に大きな影響を与えてきたとは考えにくいと結論している。さらに推測的となる太陽紫外線や磁気プラズマ放射に関連した気候変化については、起こった可能性は否定できないが、複雑な相互作用が働いているために定量化は困難である。表紙は、光度変動の原因となる構造を示している。

14 September 2006 Vol. 443 / Issue 7108

Review Article p.161 参照

# 惑星とは丸きもの

## Round objects

Nature Vol.442(719)/17 August 2006

論説

「惑星は球形をしている」。国際天文学連合がこの点を定義の一部に取り入れようとしていることには、メリットがある。

その昔、英国に1人の几帳面な役人がいた。あるとき、連絡メモの中に気に入らない一節を見つけた彼は、粗野なコメントを返す代わりに、『round objects (丸い物体)』と余白に書き込んだ。この極めて婉曲な表現は、彼が仕える勘の鈍い大臣には通じなかった。大臣はこう聞き返してきたという。この『Round』とは誰のことで、なぜそれほどまでに異論を唱える (objects) のか、と。

国際天文学連合 (IAU) の評議委員会が8月16日、惑星の新しい定義を提案したが、それを読んだ会員の中には、同じくらい粗野でより率直なコメントを余白に書き込み、さらには8月24日にチェコのプラハで開かれる総会で声高に反対の意を表明したいと考える人たちが数多くいるだろうと予想される (Nature 2006年8月17日号 p.724 参照)。

こうした気持ちを私たちは理解するし、共鳴できる部分もある。しかし、この新しい定義には同意することを提唱したい。そうすれば太陽系の惑星の数は12に増え、また、さらなる増加にも門戸を開く効果がある。新しい定義に同意する理由は2つだ。第1に、定義としての出来が悪くないこと、第2に、これで少なくとも、冥王星の地位に関する不満まじりの論争に終止符を打てることだ。

1990年代になって、氷に閉ざされた数多くの海王星以遠天体 (中には冥王星より大きい天体もある) の存在が明らかになると、最も新しく発見された惑星である冥王星は、海王星以遠天体の中でいちばん目につきやすい天体なのだということが明らかになった。これと似たような状況は、過去にも例がある。19世紀に小惑星が相次いで発見されたときのことだ。当時、小惑星が数十個もあることが判明すると、中でも最も大きく、すでに最初に発見されていたセレスが、正式な惑星の地位から格下げされた。セレスは今では、ほかのすべての小惑星と同じ「マイナーな惑星」となっている。これと同じアナロジーで、冥王星もまた、ほかの海王星以遠天体と同じマイナーな惑星とすべきだという主張がなされたのだ。

この主張は、一般市民の間で一定程度の議論を巻き起こしたわけだが、特定の天体を惑星とよぶかどうかという問題に科学的興味のない多くの天文学者は、そのことに苛立ちをみせた。それでもIAUはこの問題に取り組み、決着をつけることに決めた。惑星の問題は一般市民の想像の世界では重大な問題であり、新たに発見された天体 (さらにいえば古い友人)

が惑星かどうかを判断できるのは天文学者しかいないとするのが、唯一妥当なことに思われたからだ。

IAUの提案によれば、「惑星」という用語が適用されるべき天体は、十分に強い重力場があって球形を維持することができ、恒星の周りを回る軌道にあり、それ自体は恒星ではないものだとされている。この新しい定義によると、冥王星と、それよりやや大型の海王星以遠天体でIAU認定の名称がまだない、2003 UB<sub>313</sub>が惑星となる。また、セレスも再び惑星となる。そして、今回の定義変更が引き起こす最も奇妙な一面として、これまでは冥王星の衛星だとされていたカロンが、独立した惑星となる。さまざまな月も球形ではあるが、IAUの定義によれば、惑星とはならず衛星のまま。しかし、冥王星-カロン系の質量中心が冥王星本体の外側にあることから、カロン (例えば海王星の衛星トリトンよりはるかに小さい) については、惑星と認定される。

9つある海王星以遠天体と3つの小惑星も新たに惑星候補となるが、これらについては球形性に関してさらなる調査が行われることになっている。また、惑星となりうる新たな海王星以遠天体が今後発見される可能性もある。呼称を整理するため、マイナーな惑星は改称される予定だ。重力場の強さが不十分であるために正式な惑星になれない天体は、「太陽系小天体」とよばれることになる。

以上のような定義変更の提案によって、大騒ぎが起きるのは間違いない。しかし、これは少なくとも整合性のあるやり方であるし、物理的特性にかなり明確に基づいている。太陽系の惑星の数が少なく、覚えやすいことは便利だった。しかし、大切なのは便利さだけではない。惑星の世界の上限は、質量の影響によって (非公式に) 定められている。融解するほど大きなものは恒星となるからだ。同様に、惑星の下限についても質量によって定義するのが適当だろう。この点も、IAU会員が今回の提案を承認すべきかを検討する際のポイントになると私たちは考える。 ■

Natureでは、8月17日号にIAUの新提案に賛同するこの記事に掲載した。しかし結果的には、8月24日チェコのプラハで開催されたIAU総会で、冥王星は惑星から外されることが多数決によって決まった。その後、論争のきっかけとなった2003 UB<sub>313</sub>は、IAUによって「エリス」と命名された。エリスは、ギリシャ神話の不和と争いの女神である。



# 黒こげ海藻が蓄電器に

## Baked seaweed and chips

電気コンデンサの性能向上は、思いもよらない材料で実現できるかもしれない。

doi:10.1038/news060731-3/1 August 2006

Phillip Ball

先端エレクトロニクスに使われる新素材といえば、高価なハイテク物質と相場が決まっている。これに対してフランスの研究者たちが、極めて安価かつ地味な素材で、スーパーキャパシターというエネルギー蓄積部品を作れることを明らかにした。その素材とはなんと、焼いた海藻である。

CNRS Research Centre on Divided Matter（フランス、オルレアン）のFrancois Béguin たちによると、木炭のようになるまでしっかりと焼いた海藻は、最先端のスーパーキャパシターの電極にぴったりの素材で、市販のスーパーキャパシターに使われている炭素系素材と比べても遜色ない性能が得られるという。

「炭素系素材の研究者は、絶えず特性の向上を追いつめている」と炭素系素材の専門家 Mildred Dresselhaus（マサチューセッツ工科大学）はいう。例えば、水のろ過などの用途に使われる多孔質炭素材の原料として、ココナッツの殻が既に利用されている、と彼女は指摘する。「ローテク素材でも役に立つものであれば、広く利用されている」。

Béguin が発見した海藻由来のポリマーはアルジネート（アルギン酸塩）とよばれるもので、毒性がなく、食品や化粧品増粘剤として広く用いられている。この目的で海藻から抽出されるアルジネートの量は毎年2万トンにも上る。そのため、アルジネートは非常に安価な素材となっている。

### 予備電源として活用

スーパーキャパシターは、携帯型電子機器用に使われているバッテリーの代替品となるもので、電荷を蓄積した1組のプレート（電極）でできており、後から電荷を取り出して電流を作り出すことができる。

キャパシターを使うと電池よりも大きなパワー（より高い電圧または電流）が得られるが、一般に蓄積できる電気エネルギーの総量は少ない。

キャパシターの用途として想定されているのは、コンピュータの予備電源として、あるいは電気自動車の補助電源としての利用だ。例えば、電気自動車の場合には、ブレーキ時に発生するエネルギーを補助電源として蓄積できるかもしれない。

### 大量に充電できる素材

キャパシターに蓄積できるエネルギー量は、電極の構成素材を分解させることなく、どれだけの電荷を電極に蓄積できるかにかかっている。

現在入手可能な数多くのスーパーキャパシターに使われている電極は、活性炭で作られている。黒鉛にも似ている活性炭は、多孔質で安価、そして電荷の蓄積が可能である。しかし、この多孔質であることが欠点になっている。というのも、大量の電荷を低密度の物質に蓄積するには物質の体積を大きくする必要があるために、電源の小型化にとってマイナス材料になるからだ。

そこで Béguin たちは、比較的高密度で、電気を通し、大量の電荷を保持できるような炭素物質が必要だと考えた。まず思い当たったのは、植物の基礎物質であるセルロースだった。確かに炭水化物であるセルロースには電荷を保持できる酸素原子が大量に含まれているが、セルロースを加熱すると、ほとんどの酸素は失われてしまう。

次に Béguin たちが考えたのが、褐海藻類に大量に含まれているアルジネートだった。アルジネートは化学組成がセルロースと似ているが、加熱しても酸素は失われない。



海藻はコンピュータ部品に最適だ。

### 焼いて利用する

Béguin たちは、真空容器の中でアルジネートを加熱し、黒い粉状にした。そして、これにポリマーバインダーを混ぜて硬質の素材を作り出し、スーパーキャパシター用の電極に成形した。

海藻でできたこのスーパーキャパシターに蓄積できる電荷とエネルギーの量は、活性炭で作った市販のキャパシターに匹敵する。それに加え、海藻キャパシターは、（活性炭キャパシターの限界値の）2倍の電圧を蓄積しても分解を起こさず、素材自体の密度も2倍となっている。デバイスとしても長持ちで、充電放電サイクルを1万回繰り返してもなお、電荷蓄積容量はわずか15%しか減少しなかった。

では、焼いた海藻を使った電源でラップトップ・コンピュータを動かせる日はいつごろやってくるのだろうか。「この開発に興味をもっている会社と接触中」という Béguin によると、この炭素系素材の実用化は、極めて近い将来に実現する可能性があるとのことである。 ■

1. Raymundo-Pinero E., et al. *Adv. Mat.*, **18**, 1877-1882 (2006).

# 修道女の神聖な体験と脳スキャン

## Nuns go under the brain scanner

神聖な体験によって、ある脳内ネットワークが活性化することが明らかになった。

doi:10.1038/news060828-3/30 August 2006

Helen Pearson

修道女たちが神と一体になっていると感じているとき、脳の領域間におけるネットワークが活性化していることを、神経科学者たちが発見した。たとえ神の存在を信じていなくても、これらの脳の領域を人工的に刺激することで、神聖な体験を味わえるかもしれないと研究者たちはいう。

この論文を執筆したモントリオール大学（カナダ）の Mario Beauregard は、個人的な体験をきっかけに、霊的、神秘的、あるいは宗教的な体験をしている際、脳の内部でいったい何が起きているのかということに興味を覚えるようになった。人がそのような瞬間に感じているのは、神との一体感と同時に、安らぎや喜び、愛といった感情である。

Beauregard と共同研究者の Vincent Paquette は、被験者としてカルメル会修道院の 15 人の修道女たちの協力を得た。修道女たちには、これまでの人生で感じた最も神秘的な体験の記憶を克明によみがえらせてほしいと伝え、機能的核磁気共鳴画像法（fMRI）で脳画像を撮影した。ただし、いつでも思いのままに神と交信できるわけではないという修道女たちの訴えに配慮して、祈りの最中の脳スキャンは行わなかった。

さらに比較のため、修道女たちには、人との一体感を感じた体験についても、fMRI の中で思い起こすよう指示した。

### ポジティブな体験

研究の結果、人との一体感よりも、神と一体になった体験を思い出している際により活発に活動する一連の脳領域があることがわかり、*Neuroscience Letters* 誌で報告された<sup>1</sup>。例えば、喜びや至福といった、ポジティブな感情と関係のある尾状核は、神聖な体験の記憶により活発な反応を示した。

さらに、身体の各部位から送られる物理的な感覚を司る脳領域にも、際立った反応がみられることがわかった。これはおそ

く、修道女が心身ともに神と一体となったことを示しているものと考えられる。また、深い眠りや瞑想と関係することが知られている、ある特定の脳領域の電気活動が盛んになることも確認された。

初期の研究では、そうした神聖な体験には、脳のある特定の領域だけが関与しているのではないかと考えられていた。信仰心の強いてんかん患者を対象にした研究では、「ゴッド・スポット」または「ゴッド・モジュール」とよばれる側頭皮質が、宗教的な感情に大きく関連することが確認されている。しかし、側頭葉を刺激することで霊的経験を促しうるとする研究には議論がつきまとった。

今回の研究では、多くの領域との関連が確認される中で、あくまでその 1 つとして、側頭皮質内の活性化も確認されたことになる。これについて Beauregard は、複雑な感情的、認知的体験の表れなのではないかと考えている。

このような研究結果の食い違いは、初期の研究手法と現在の研究手法の違いに要因があるのかもしれない。例えば、今回の研究では、実際に神聖な体験をしている瞬間ではなく、その記憶をよみがえらせることで分析が行われたからだ。

### 神との一体感を味わえるスイッチ

Beauregard は、修道女が体験したような脳の活性化過程を機械的に再現できるかもしれないと考えており、さらなる研究でその可能性を探りたいと話す。「脳が神秘的な体験を受け入れることができるのであれば、あたかもそのような体験をしているかのように感じさせることもできると思う」。また、宗教と健康効果の関連性を示した研究もあるが、そういった健康効果の再現についても可能かもしれないと Beauregard はいう。

しかし、コロンビア大学医学部（ニューヨーク）の行動医学の教授で、宗教と医



神と一体となった記憶をよみがえらせると、修道女の脳にはどのような科学的反応がみられるのか。

学に関する専門家の Richard Sloan によると、これには多くの神学者や信仰心をもった人々が反発を覚えるだろうという。そのような考え方では、宗教が単なる一連の神経的事象に成り下がってしまうように思われるからだ。

「このような研究からこういった有益な情報が得られるというのか。高度な診断法があるからといって、思いついたことすべてに当てはめればいいというものではない」と Sloan は話す。

Beauregard は、神聖な体験はあらゆる文化の重要な要素であるがゆえに、神経科学者はそのような体験をしているときの脳の活動のようすを知りたいと考えるのだと話す。なお、Beauregard たちの研究にかかった 10 万ドル（約 1150 万円）は、John Templeton Foundation から資金が提供された。この財団では、科学と宗教の関係を探る研究に資金援助を行っている。

1. Beauregard M. & Paquette V. *Neuroscience Letters*, **405**, 186-190 (2006).



# 球状星団は2度「誕生」した

## Key stars have different birthdays

星はどのようにして生まれるか——教科書の記述は修正が必要になった。

doi:10.1038/news060821-13/25 August 2006

Jenny Hogan

ハッブル宇宙望遠鏡の観測結果によって、球状星団中の星は1回の爆発的形成ではなく、数回の爆発的形成で生まれるということが明らかになった。これは、これまで天文学者が考えていたほど球状星団が、単純ではないことを意味している。パドバ大学（イタリア）の Giampaolo Piotto は、「今回の観測結果は、私たちの考えを完全にええつつある。教科書を書き換える必要も出てくるだろう」という。

今回、こうした星が生まれる場所の性質がわかり、この一見単純な天体に関するこれまでのモデルは間違っていることが明らかになった。となれば、銀河などの複雑な天体のモデル化は、さらにむずかしいということになる。「球状星団における星形成の再現がむずかしければ、銀河でも同じことだ」と Piotto は話す。

### 球状星団中の星の色の謎

球状星団は、現存する星の集まりの中では最も単純なものだ、と長らく天文学者たちは考えてきた。それぞれの星団に含まれる数十万個の星は、宇宙の歴史の初期数十億年前に、宇宙塵雲が集まって一度に生まれたとされていた。球状星団はこうした星が集まってできた球で、銀河を回る軌道上で見つかった。

その一方で、天文学者たちは30年前には既に、球状星団中にみられるヘリウムが燃えて輝いている星の色が、ある範囲内でばらついていることに気づいていた。星の色は通常、星の年齢や化学的組成などの特性と関連がある。しかし、天文学者たちはそれでもなお、球状星団中の星は年齢や組成が一様であるはずで、星の色のばらつきは何か別のことに原因があると考えてきた。

そして2004年には、ケンタウルス座オメガ（NGC5139）という球状星団にある水素が燃えて輝いている星は、2つのグループに分かれるという報告が発表された<sup>1</sup>。片方のグループの星が、もう一方よ



星の色のばらつきが球状星団の誕生の秘密を解き明かした（写真はケンタウルス座オメガ）。

りもやや青かったのだ。これは、何かおかしいことが起きていることを強く示していたが、マクマスター大学（カナダ）の Alison Sills は当時を振り返って、『「ケンタウルス座オメガは変わった星団だから」といって片づけてしまっていた」と話す。

### 正常な星団を撮影

しかし、「今回はそうはいかない」と Sills はいう。8月23日、Piotto がプラハで開かれた国際天文学連合（IAU）の総会で、正常な球状星団の星も2つのグループに分かれることを示すデータを発表したのだ。ハッブル宇宙望遠鏡が8月9日に撮影した NGC2808（まったく正常と考えられている球状星団）の画像を分析したところ、水素が燃えている星は、2つのグループに分けられることが明らかになった。「2つの系列に分かれることがはっきりとわかる。この事実に疑いはない」と Piotto は話す。

### 意味するもの

では、星はどのようにして生まれたのか。ローマ天文台（イタリア）の Francesca D'Antona は、次のように考えた。まず、爆発的に生まれた星々は、わずか数百万年間で広範囲に膨らんだ状態へと成長する。そ

して、ブラックホールや中性子星へとつぶれる前に、ヘリウムなどのより重い元素に富む物質をまき散らす。こうした物質が集まり、2回目の星の爆発的形成が引き起される。

D'Antona のこのシナリオに対して、Sills は、これでは変な球状星団ができてしまうはずだと考えた。そして Sills は、このシナリオで得られる球状星団の星の分布は観測とは一致しないだろうと想定し、コンピューター・シミュレーションを行った。その結果、彼女には軍配が上がらず、2回の爆発的形成でできる星団は、ちょうど今日観測されているものと同じになることがわかった。

この結果が、宇宙に関する私たちの理解にどう影響するかはまだはっきりしていない。例えば、球状星団の星の年齢は、宇宙の年齢を見積もるのに使われてきた。球状星団の寿命は数十億年にも及ぶが、2回の爆発的星形成は時間的に極めて連続して、その最初の数百万年のうちに起こるのだ。つまり、今回の発見によって、宇宙年齢の推定値が大きく変わることはないと思われる。とはいえ、天文学者たちが今回の発見が意味するところのすべてを理解するには、まだ時間がかかりそうである。 ■

1. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0406076> (2006).

# Ethicists and biologists ponder the price of eggs

## 倫理学者と生物学者で卵子の値段を思案する

Nature Vol. 442(606-608)/10 August 2006

ヒトの卵子が足りないと幹細胞研究は進まない。卵子提供の対価を女性に支払うことで卵子の供給量は増えるだろうが、そうした方策の利点や長期的な健康への影響については専門家の間でも意見が分かれている。

研究のために卵子を提供した女性に、費やした時間や被った不快感、健康へのリスクなどに応じた対価を支払うべきだろうか。世界最大の幹細胞研究者団体がこの問題に取り組んでおり、現在、一般の人々に意見を求めている。

幹細胞研究者たちが卵子を欲しがるのは、体細胞核移植もしくは「治療用クローン作製」の研究を行うためである。患者の細胞核をヒトの卵子に移入して、その卵子を胚まで発生させ、そこから細胞を採ることで、その患者のもつ DNA に適合した胚性幹細胞を得ようとしているのだ。この技術が医療面にもたらす可能性は非常に大きい。しかし研究者たちはこれをほとんど実行できない状況に置かれており、その主な制約要因は使用できるヒト卵子の数に限りがあることだ。

これまで研究者たちは、不妊治療を受けた女性から余った卵子を研究用に提供してもらっていた。しかし、その供給量は微々たるものである。こうした女性たちへの説得を助けるため、いくつかの研究室ではしだいに、不妊治療費の割引といった金銭的な報酬を申し出るようになってきている。またほかに、健康な女性に卵子提供を依頼し始めている研究室もあり、こうした健康な女性にどういう形で報酬を支払うべきかという議論を引き起こしている。

倫理学者の中には、女性は卵子提供に伴う不快感や労力への報酬を受け取

るべきだと主張する学者もいれば、こうした報酬が特に貧しい女性に対して卵子提供を強要する不適切な誘因を作り出してしまうのではないかと懸念する学者もいる。卵子採取処置の長期的な健康リスクに関してはほとんどわかっていないことも、事態をいっそうややこしくさせている。

欧州やアジア、中東や北米など、多くの国々の研究者たちが研究用の卵子提供を女性に依頼しているが、そのやり方はみな異なっている。北東イングランド幹細胞研究所の研究者たちは7月27日に、研究用卵子を提供した女性に対して体外受精の費用の一部を肩代わりすることについて、英国ヒト受精・胚機構（HFEA）から承認を受けたと発表した（*Nature* **442**, 498; 2006）。

しかし、研究用卵子の提供を受けているスウェーデンなど他の欧州諸国では、直接経費以外の金銭の支払いを禁止している。日本は面倒な事態に陥るリスクを理由に卵子提供を一切禁止しているが、中国その他の数か国はこの問題にとりたてて取り組んではいない。

米国では昨年、米国科学アカデミーの識者会議が、女性には直接経費だけを支払うべきだとする勧告を出した。このやり方は、カリフォルニア再生医療研究所（CIRM）や、ハーバード幹細胞研究所のあるマサチューセッツ州ですでに導入されている（*Nature* doi:10.1038/

news060605-6; 2006 参照）。どちらの研究所でも現在、研究用の卵子提供を健康な女性に依頼しているが、両者の方針は異なっている。例えば、カリフォルニア州の法律では州外から卵子提供のためにやってきた女性の交通費支払いが認可されており、他方、ハーバードがどうやってこの問題に対処しているのかははっきりしない。「現在のところ、我々は提供者探しをこの地域に限定しています」と広報担当の B. D. Colen は話す。

研究者たちが望むのは、研究材料の出所について心配することなく材料を共有できるような世界共通のガイドラインである。そこで、国際幹細胞学会（ISSCR）の特別委員会は、ガイドライン作成に向けたいっそうの努力の一環として、金銭的補償の問題を検討中である。この特別委員会は、14 か国にわたる科学者、倫理学者、法律家からなり、昨年、韓国の幹細胞研究者 Woo Suk Hwang（黄禹錫）の科学的不正の発覚を受けて招集された。彼は、治療用クローン作製技術によって11のヒト胚性幹細胞株を得たとする証拠をねつ造しただけでなく、卵子を提供した数百人の女性たちへの金銭的支払いについても偽っており、自分の部下の女性たちから卵子を得ていた。

6月30日、ISSCRの特別委員会はトロントで開催された年次総会でガイドライン草案を公表した。このガイドラインには、米国科学アカデミーが昨年提案し



## 卵子提供にあたって受ける処置

1. 1 回あたりの典型的手順では、女性がゴナドトロピン放出ホルモン作動薬を 1～2 週間にわたって毎日服用し、下垂体による排卵刺激を抑える。
2. 続いて、卵子を含む卵胞をいくつか発達させるために、卵胞刺激ホルモンなどのゴナドトロピンを注射する。
3. 第 3 のホルモンで、卵子の最終的な成熟を促進する。
4. 針を膣壁経路で卵巣へ差し入れて、卵子を採取する。



次の世代：生殖補助医療はこの 25 年でしだいに一般的になってきた。

た原則の大部分を織り込んであるが、卵子提供の問題についてはそうではない。同委員会は、対価の支払いに関してもっと進歩的な方針を設ける余地を残しており、幹細胞研究の計画はその地域の監視団体によって再検討されるべきだと提言するにとどめている。こうした団体が、「ヒト生体材料の提供にあたって不適切な勧誘や他の不適切な影響がない」ことを保証してくれるはずである。何をもって「不適切」とするかは、各地域の監視団体に委ねられる。

ハーバード大学医学系大学院の生物学者で同委員会の議長を務める George Daley によれば、これが委員会が達することのできた最善のコンセンサスなのだという。というのも、委員会の科学者や倫理学者たちは、卵子提供者をどう扱うべきかについて、はっきりした意見の一致に至らなかったからだ。

とはいえ、今回のガイドラインは重要な第一歩とみなされ、現在、ISSCR は一般からの意見を 9 月 1 日まで受け付けており、その後文書にまとめる予定である。「これらのガイドラインは、完全に研究者たち自身の手による規則だとみなされようになるだろう」とハーバード幹細胞研究所の Kevin Eggan はいう。「研究者たちがこれらの問題についてちゃんと考えているということを世間に知らしめるのは、非常に有益なことなのです」。

Erika Check

## Health effects of egg donation may take decades to emerge

### 卵子提供の健康への影響が明らかになるのは数十年先のこともかもしれない

1989 年のこと、32 歳の健康な女性が不妊症の妹に自分の健康な卵子をいくつか提供し、赤ん坊を得るチャンスを受けた。ロンドンにあるクロムウエル IVF 不妊治療センターの医師たちは、この姉に、卵巣の一群の卵子を成熟させるホルモン類を投与し、受精用の卵子を 6 個採取した。妹には 3 個の胚が移植され、2 個は凍結保存された。女の赤ん坊が 1 人生まれた。

それから 5 年後、凍結保存した胚を廃棄するかどうか尋ねようと、医師たちは卵子を提供した姉に連絡をとった。すると、彼女は後期の結腸がんで、頭骨にも転移していると診断されていることがわかった。彼女は 39 歳の誕生日を目前にして亡くなった。

排卵誘発剤がこの女性のがんを引き起こしたのかどうか、あるいは加速させたのかどうかは、医師たちにもわからない。だが、その可能性はあることから、クロムウエルの不妊治療専門医である Kamal Ahuja はこの症例を報告し、卵子提供のリスクについてわかっていることがいか

に少ないかを知らしめようとした (K. E. Ahuja and E. G. Simons, *Hum. Reprod.* **13**, 227–231; 1998)。「これには我々全員が衝撃を受けました」と彼は語る。

生殖医療の専門医たちの話では、排卵誘発に使われる薬剤の長期的リスクについては不十分な情報しかないという。体外受精 (IVF) や生殖補助医療の急増に伴って、排卵誘発はこの 25 年の間にありふれた処置法となった。しかし一部の研究では、排卵誘発剤が特定のがんの発生につながる可能性が示唆されている。

この問題は現在、改めて綿密に調べられつつある。今や、研究者が健康な女性に幹細胞研究用の卵子を提供してもらうということは、赤ん坊を受けることなく彼女たちを排卵誘発の潜在的なリスクにさらすことになるからだ。この問題を議論するため、サンフランシスコにあるカリフォルニア再生医療研究所 (CIRM) は、9 月開催予定の会議に専門家たちを招集した。英国のヒト受精・胚機構 (HFEA) も、研究用の



卵子提供に関する次回の協議でこの問題を取り上げることになっている。

リスクが不確定なために、卵子提供女性に対価を支払うべきかどうか、そして支払うとした場合の金額設定についてコンセンサスに至るのがよりむずかしくなる。「この議論では、金銭問題ではなく、長期的リスクの評価を重点的に取り上げるべきです」と Ahuja はいう。

排卵は通常、毎月 1 個だが、IVF や卵子提供のための排卵誘発に際しては、卵巣で同時に数個の卵子を成熟させる薬剤を女性に投与する（前ページの「卵子提供にあたって受ける処置」参照）。この処置がイライラ感から感染症まで幅広い副作用をもたらす可能性があることは、医師たちも承知している。副作用の中でも最も深刻なのが卵巣過剰刺激症候群で、排卵誘発剤を投与された女性の約 6% に深刻な影響をもたらす。一度に 30 個以上の卵子が発生し始め、血管から水分が漏出して腹部にたまり、吐き気や膨満感、まれに腎不全を起こし、命にかかわることさえある。

頻繁な卵巣刺激が悲惨な副作用をもたらす仕組みについてはほとんど情報がないと、オランダのナイメーヘンにあるラドバウド大学医療センターの産科・婦人科教授の Didi Braat は話す。なぜなら、医師たちはこうした症例の報告をしたがらない場合が多く、報告の必要に迫られることもめったにないからだ。しかし、死亡することはごくまれだと考えられている。欧州ヒト生殖医療学会（ESHRE）の今年の年次総会で報告された Braat たちの調査によると、1984～2006 年に排卵誘発処置を受けたおよそ 10 万人の女性の医療記録から、IVF にはっきり関連づけられる死亡例はわずか 6 件だったという。

そこで一部の専門家が心配しているのは、排卵誘発剤の長期リスクについてである。例えば、排卵誘発剤と乳がんや卵巣がんとの関連性は 1990 年代に複数の研究で指摘されていたが、がんがどのようにして促進されるのかは今のところ明らかではない。ある研究

によると、クエン酸クロミフェンという排卵誘発剤を 1 年以上にわたって服用した女性群では、一般女性群と比較して卵巣腫瘍を発生させるリスクは 11 倍だった（M. A. Rossing *et al.* *N. Engl. J. Med.* **331**, 771–776; 1994）。

しかし、これらの研究には異論も多い。女性を疾患にかかりやすくさせているのは排卵誘発剤ではなく、不妊症のせいなのかもしれない。女性の生殖履歴の他の面も、卵巣がんや乳がんに影響する。例えば妊娠は腫瘍の予防要因になっていると考えられている。また、卵巣がんは非常にまれであり、何らかのつながりを見つけ出せるだけの大規模サンプルを得るのがむずかしい。

これらの要因について比較対照しようとして、メリーランド州ベセスダにある米国がん研究所の Louise Brinton たちは、これまでで最も包括的な調査の 1 つを実施した。彼らは、1965～1988 年に排卵誘発剤を服用した女性 1 万 2000 人以上の医療記録を集めた。乳がんや卵巣がんには統計的に有意な増加は見い出せなかったが、こうした女性たちが子宮がんを発生する傾向はおおよそ 1.8 倍だった（M. D. Althuis *et al.* *Am. J. Epidemiol.* **161**, 607–615; 2005）。

排卵誘発のリスクがわずかだということで、これらの研究は専門医たちを安心させた。しかし、この問題を調べている Brinton その他の研究者たちは、状況の把握はまだ不完全だと話す。Brinton の調査には、ゴナドトロピン系ホルモンではなく、1980 年代に IVF のために導入されたクエン酸クロミフェンを服用した女性が主に含まれていた。新しいほうのゴナドトロピン系製剤を服用した女性を相当数調べするには、わずか 10 年ほどの経過期間しかなく、こうした女性たちが 50 歳か 60 歳になるまで排卵誘発が遠因の余計ながんは現れないかもしれない。

また、不妊症の女性に関する研究を、通常は不妊女性より若くて健康な卵子提供者にも一般化できるかどうかともわかっていない。カリフォルニア大学サンフランシスコ校の疫学者である Mary

Croughan は、卵子提供者のがん発症リスクが低いことを示唆する未発表のデータを保有している。しかし、「これらの女性を将来にわたって追跡することが重要だ」と彼女はいう。

彼女やその他の専門家たちは、もっと大規模な調査で、IVF 治療や卵子提供した女性たちを追跡したいと考えている。オランダでは排卵誘発の長期的影響の大規模調査が少なくとも 1 つ進行中だ。しかし、特に民間の不妊治療クリニックが使用した誘発剤の潜在的リスクを知ることにほとんど興味がないような場合、どんな組織がこの作業を進めればよいのかははっきりしない。Ahuja によれば、英国の HFEA のような専門機関がこうした調査を取り仕切ればよいのではないかという。

卵子提供を女性に依頼する研究者たちは、採卵処置の健康リスクの解明に手を貸すべきだと主張する人々もいる。「そこには、ある種の倫理的責任が存在する」とカリフォルニア州のスタンフォード大学生物医学倫理センターの Mildred Cho はいう。CIRM の 9 月の総会ではこれらのリスクに焦点が当てられ、同研究所の研究の過程でどんな関連データが集まる可能性があるかを議論する予定である。

「これらのリスクがどんなものかについてまだ十分にわかっていないことを、同意を得る過程で人々に理解してもらうことが重要だ」と Cho は話す。例えばハーバード幹細胞研究所の Kevin Eggan によれば、彼の研究チームはリスクについて卵子提供者に告げており、もし女性が卵巣過剰刺激症候群の徴候をみせた場合には処置を止めているという。

こうしたリスクを前もって明らかにしておかないと、1 件の悲劇的事件が広く報道されるだけで、卵子提供者を見つめる努力が水の泡になってしまいかねないと、テキサス州ヒューストンにあるベイラー医科大学、産科・婦人科教授の John Buster はいい添える。「幹細胞研究用に卵子を提供中の女性が心停止状態になった場合、事がうまく収拾することはないでしょう」。

Helen Pearson

# WHAT CHEMISTS WANT TO KNOW

## 化学は終わったのか？

Nature Vol. 442(500-502)/3 August 2006

化学は、あらゆる科学の分野において重要な要素である。だが、それは化学が便利な道具にすぎないことを意味しているのだろうか。それとも、化学には解決すべき「大命題」がまだ残っているのだろうか。Philip Ball が取材した。

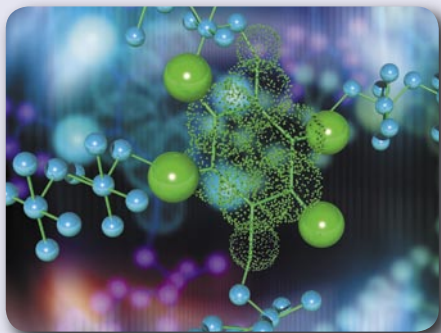
物理学者たちは、自分たちの研究の原動力となっている「大きな命題」をためらうことなく宣伝する。例えば、宇宙はどのように始まったのか。原子レベルから宇宙のスケールにわたって、空間、時間、物質の振る舞いを支配しているのは何か。生物学者たちもまた、エルヴィン・シュレーディンガーが抱いた「生命とは何か」という命題を喜々として引き合いに出す。生物学者たちはこの命題に答えるため、DNA を解読し、タンパク質の構造と相互作用の詳細を調べ上げようとしている。

しかし、カリキュラムの中で基礎科

学の三番手に控えている化学の場合はどうだろうか。現在、マスメディアの化学への注目度が低いことから判断すると、化学は最盛期が過ぎて、重要な難問はすべて解決された分野だと考えられてもしかたがない。果たして、化学にはまだ「大きな命題」が残っているのだろうか。

そのような最先端の問題を見つけ出すことは、大学の化学科の将来が不透明になってきているだけに、なおさら急ぐべきことのように思える。閉鎖の危機にある化学科は多く、フラーレンの共同発見者でノーベル賞受賞者の

Harold Kroto が長年在籍している英国のサセックス大学化学科も、新たにその候補に加わった。同学科を生命科学部の一部であるケミカルバイオロジー（化学生物学）学科として組織替える計画があるが、これまでのところ何とかもちこたえている。しかし、閉鎖を免れることができなかった化学科も英国にはいくつかある。米国でも同じような動きだとの懸念があり、米国化学会（ACS）発行の『化学工学ニュース』の2004年の論説では、学会の名称を変え、「分子科学工学会」としてイメージの刷新を図ることが提案された。



## Q1

特定の機能とダイナミクスをもつ分子をどうやって設計すればよいか？

大学の化学科が閉鎖し、学生数も減っている現在、化学者たちは今後も化学が科学の中心的分野とみなされ続けると確信できるのだろうか。化学の最重要問題の多くは、化学そのものの中心的命題とみなされず、むしろ他分野の「化学的」側面として取り込まれてしまっている、と不満を漏らす化学者もいる。そこで *Nature* は、学問としての化学の見通しを探ろうと、次の疑問を一流の化学者たちに投げかけてみた。すなわち、化学における「大きな命題」とは何か、そして、化学はむしろ分野としての首尾一貫性と同一性の意識を維持するために、「大きな命題」を必要としているのではないか。

化学は、「物質を合成する」という際立った特徴のために、物理学や生物学、天文学や地球科学といった「発見」の科学とは一線を画している。フランスの化学者マルセル・ベルトローは1860年に、「化学はその研究対象を作り出す」と記している。

多くの化学者たちは今でも、この「作り出す力」を化学の強みの1つとみなしている。「このおかげで化学者たちは、ほかのほとんどの研究分野ではやってみようともしないような目標を設定することができる」と、コロムビア大学（ニューヨーク州）の有機化学者で米国化学会の元会長である Ron Breslow は話す。「例えば『合成天文学』なるもの、すなわち、重力定数を変化させて宇宙

の性質にどんな影響を及ぼすかを調べ、ひいては宇宙を『改良する』といったような学問がいったいどこにあるのでしょうか」と彼はいう。

たとえ話ではなく本物の研究分野として現在、合成生物学がぼっ興しつつあるが、多くの化学者にとってみれば、合成生物学はDNA合成やタンパク質設計などの化学的技術に依存したものであって、応用化学の新しい研究分野にすぎない。カリフォルニア工科大学（同州パサデナ）の核酸化学者 Jacqueline Barton は、「それ以前にはなかった物を作り出せる唯一の科学分野が化学なのです」という。

物質を作り出すことを重視すると、化学者というのは常に物をいじくり回している人種だと思われるというマイナス面がある。好奇心を満たすため、時には面白半分に、ときには利益のために、分子の世界をいじくり回

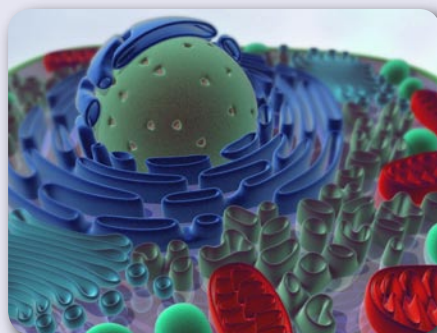
している輩だと思われるのだ。また、どこまでが工業的な化学研究で、どこからが学術的な化学研究なのかを見分けることもむずかしい。なぜなら、実用面での重要な課題は学術的な研究の動機づけともなるからである。

「化学は、産業を推し進める原動力となる科学的営みだ。その対象となる産業は石油化学だけでなく、製薬、バイオテクノロジー、コンピューターチップなども含まれる」と Barton は話す。彼は、現在の化学が取り組んでいるのは「大きな命題」ではなく、むしろ「実用化が求められる大きな課題」であることを認めている。つまり「太陽光から必要なエネルギーを引き出したり、大電流を流せる室温超伝導体を作ったり、環境を破壊せずに必要な製造を行ったりする実用的方法を考案する」といった課題である。

### 特定問題の科学

応用化学や工業化学の重要性を否定する者はいないだろう。しかし、もしも化学の命題が何を知ることができるかではなく、何ができるかというものであるなら、化学は一種の工学、すなわち特定の問題に対する特定の解決法の追究になってしまうのではないだろうか。

ロンドン王立研究所の無機化学者 John Meurig Thomas によると、「特定問題の科学」であることは化学の本質に含まれるという。例えば、化学結



## Q2

細胞の化学的基盤はどのようなものか？



合の一般原理を見つけることができて、肝心なのは、この原理が特定の分子でどこまで成立し、どのような修正が必要なのかという点だ。同様に、「すべての酵素、物質、表面などにあてはまる触媒の一般理論を探すことはばかっています」と Thomas は話す。

あまりに多くの化学者が現実的な目標に向かって喜々として専心し、ほかの分野が化学の境界領域に浸食している現状でも、学問としての化学の核心部分に「大きな命題」は残っているのだろうか。またもしあるとするなら、それらは物理学や生物学の最先端を行く人々にも知的興奮をもたらしてくれるのだろうか。

化学者のもつ道具や概念は確かに、物理学や生物学など他分野で提起された最先端の命題の一部に答えるのに役立つ。今回取材した化学者たちの間で、最もはっきりと意見が一致したのは、「化学がまず取り組むべき命題の多くは、生物学に関するものだ」ということだった。スタンフォード大学の物理化学者 Richard Zare は「私にとって、未解決の大きな命題は生命プロセスの化学に関係したものだ」という。Barton も同じ意見で、「生物学的プロセスを本当に理解しようとすれば、結局は必ずその化学を理解することになります」と話す。

### 生命の本質

ハーバード大学の化学者 George Whitesides はさらに踏み込んだ発言をした。「細胞の本質は明らかに分子の問題だ。実際のところ生物学とは何の関係もないのです」と彼は話す。Whitesides によれば、定量的な部分や分子的な側面など生物学の「本当に知的な部分」は、生物学者が生物全体を研究するときにはいつも見落とされているという。これは少々強引な主張であり、生物学者たちの反論を呼びそうだ。ソーク生物学研究所（カリフォルニア



## Q3

エネルギーや航空宇宙、医学の分野で、今後必要とされる材料をどうやって作るか？

州サンディエゴ) の分子生物学者でノーベル賞受賞者の Sydney Brenner は「細胞は生物学と何の関係もない、と主張できるかもしれません。しかし同様に、すべての化学は単なる量子力学だということもできるのです」と指摘する。

それでも、タンパク質の折り畳みや、生体分子機能の遺伝子へのコード化、選択性の高い分子認識といった分子生物学の基本プロセスを科学的に理解するうえで、未解明部分の多くは基本的に化学上の問題だ。そして、分子生物学者はこれらの問題がだいたい解明されたと思い込んでいるかもしれないが、化学的にみれば、詳細に検討すればするほど謎は深まる。生物医学や薬剤開発には分子レベルの介入操作が必要だが、そのための合理的かつ予測能のある基本原理が得られるほどには、科学的解明は進んでいない。

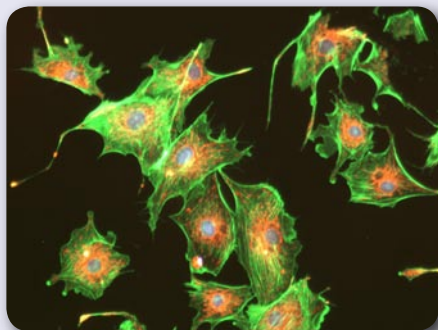
一方、カリフォルニア大学サンタバーバラ校の化学工学者 Matthew Tirrell は、シグナル伝達などの生体分子プロセスの化学的本質を重要な命題の1つだと考えている。こうした化学の本質は、化学を一種の情報科学として位置づける問題の1つである。ドイツの化学者エミール・フィッシャーは1894年、生体分子認識を説明するために「鍵と鍵穴」の概念を提案した。この概念がスタート地点になったとみられているのが、フランスのストラスブールにあるルイ・パスツール大学の超分子化

学者でノーベル賞受賞者の Jean-Marie Lehn が提唱する「情報をもった物質の科学（分子情報科学）」である。

化学者は、自己集合という概念のおかげで、分子を極めて特別なやり方で相互作用し集まるようにプログラムできるという考え方になじんでいる。また、人工的な自己複製する分子によって、化学的情報を伝達し増幅することのできる原理が実証されている。Lehn によれば、「私にとって化学とは、あらゆる命題の中で最大の命題に対して最も重要な貢献をする分野です。つまり、自己組織化がどのように起こり、それがどうやって、自分自身の起源について考えることができる存在を生み出すように宇宙を導くのか、という命題です」という。

次のステップは、単に自己集合するようにプログラムされているだけでなく、訓練することができる化学的な「学習システム」を設計することだと Lehn は考えている。事実、数人の化学者が提起したケミカルバイオロジーのもう1つの重要な命題は、記憶の化学的原理だった。

「記憶の化学的原理がわかれば、新しい思考や記憶を設計できるかもしれません。あるいは、古い記憶を維持する仕組みがわかるだけでもいいのです」と Barton はいう。Whitesides は、化学を使ってシリコン製電子工学装置と脳とを融合させる方法を知りたいと考えている。「コンピューターを自分の



## Q4

思考と記憶の化学的基盤はどのようなものか？

脳に接続するにはどうすればいいのか」と彼は問いかける。これは神経科学者や電子工学者のすべき研究のように思えるかもしれない。しかし、神経細胞間のシグナルは化学的に伝えられているので、この種のインターフェースには「化学的な言語」による指令が必要となる。

これらは、化学者が研究するには興味深いテーマだが、本当に化学の問題とみなせるのだろうか。Whitesidesにいわせれば、これほど化学的なテーマはないという。「科学において興味深いことのほとんどは、今や化学の問題だと私は考えています」と彼は話す。天文学のような一見、化学から遠い分野の重要な命題の一部でさえも基本的には分子の問題だ、とWhitesidesは主張する。例えば、「地球に似た惑星はどれくらいあるか」とか、「土星の衛星タイタンには何があるか」といった命題だ。

学際的な問題に取り組むとき、化学者と物理学者や生物学者とを区別する目安となるのは、化学者が分子スケールのメカニズムを無視したままですませられないということだ。化学者たちはこうした問題に取り組むとき、おそらく化学の中心的課題に当たるもの、すなわち分子の構造と機能の関係を理解し予測することに直面する。

分子の構造と性質の関係は、例えば化学の大事な仕事の1つである薬剤設計において極めて重要だ。「特定の細胞

や細胞小器官、組織の特異性を符号化して分子に組み込むにはどうすればいいのだろうか。分子を行ってほしいところへ行かせるには、どうすればいいのだろうか」とBartonは問いを投げかける。構造と性質の関係は、工業合成用の触媒を設計するためにも不可欠である。しかし現時点では、構造と機能の関係の完全解明は多くの場合、かなり単純な小分子でしか可能となっていない。またたとえ可能な場合でも、この問題について未解明の詳細部分がたくさん残っている。

### ダイナミクスが大事

例えば、ノーベル賞受賞者でカリフォルニア工科大学の物理化学者 Ahmed Zewail は、分子の動的振る舞いは、分子構造と同じくらい分子の反応性に大きく影響することがあると指摘する。生体分子間の相互作用は、鍵が鍵穴にぴったりはまる（つまり、結合場所とその標的が互いに幾何学的にぴったり合う）というような単純な問題ではなく、相互作用する分子と溶媒のダイナミクス（動力学）に依存しているらしいことが、今では明らかになっているのだ。

化学者たちは今、反応は複雑な多次元のエネルギー表面、すなわち、山脈のように起伏のある「エネルギーランドスケープ」上で起こると考えている。したがってタンパク質の折り畳みの解明とは、分子のペプチド鎖がこの

エネルギーランドスケープをどのように乗り越えて、正しく折りたたまれた立体配座にあたる「谷」にたどりつくのかを解くことである。「生物学では、構造と機能の関係を十分に考慮していない。エネルギーランドスケープ上での動きについて考える必要がある」とThomasは話す。つまり、ダイナミクスが重要なのである。

Zewailにとって大きな命題とは、ダイナミクスを通じて化学的機能を制御するにはどうすればよいかという問題である。分子構造の決定はかなりできるようになったが、それに比べて、どうすればエネルギーランドスケープ上での反応経路を制御できるかは、ようやく解明され始めたところだ。これは原理的には、レーザービームなどを使って特定の量子状態に分子を導くことで可能だろう。今のところ、こうした制御は単純な分子については実現しているものの、もっと大きくてフニャフニャした分子で行うことはかなりむずかしいようだ。

さらに進んで、化学者たちが分子設計の原理を解明したとしても、どのようにそれを応用するのか。Bartonは「実験室にちょっと行って、任意の分子を100%の収率で純粋に合成できるような段階に達するまでは、本当に合成をマスターできたとはいえません。それをやり遂げるのに大学院生が1年を費やすようではだめなのです。だから、この大命題には、予測可能かつ効率的な方法で原子を新しい分子に組み立てるプロセスを支配している化学の本質と法則がかかわってきます。それがわかれば、私たちは望む物質を何でも作ることができるようになるかもしれません」という。

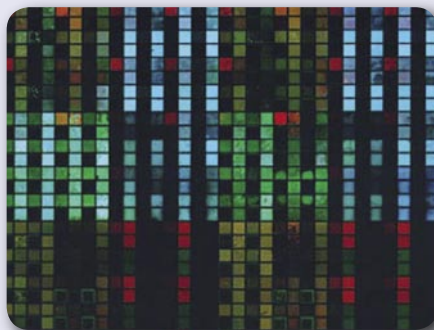
### 化学の創造力

原子や分子を操作することがどれほどむずかしいかを、本当に知っているのは化学者だ。ほかの多くの科学分野は

その技術の上に成り立っている。いつの日か室温超伝導体や人工細菌が作られるとしたら、それを成し遂げるのは物理学者や生物学者ではないだろう。そして、もしも化学という分野が切り刻まれ、ほかの分野へ振り分けられてしまえば、物質をそのように自在に操る人たちを育て上げる場がなくなってしまうだろう。

さらに、化学の核心部分である合理的合成には知的な面白さがないというのは間違っているだろう。化学者たちは既存の世界を理解しようとするよりも、存在しうるすべての世界を理解しようとしているのだという主張もある。Breslow は「化学には役に立つ側面があるが、そうした側面は基礎科学ではありません。これから創造され調べられようとしているすばらしい化学の世界を巨大なバケツとすれば、自然がこれまで垣間見せてくれた分子や反応の限定例は小さなひとすくにしすぎない。このことにいったん気づけば、化学に基礎科学としての側面があることは明らかです」と話す。

典型的な薬剤分子と同程度の大きさで、ありふれた元素から作ることができる分子は、 $10^{40}$  種類ほどあると見積もられている。「化学者が作り出した自然界にない分子を含めても、既知の分子から成る世界は実現可能な分子から成る世界の 1% にも遠く及びません」と Breslow は話す。



## Q6

全元素について可能な置換をすべて調べ上げるにはどうすればよいか？

化学研究を少数の目標に収束させるのを阻んでいるのは、ほかならぬこの化学の世界の豊かさである。「化学の宇宙は、少数の素粒子や 100 種ほどの元素まで還元することによってではなく、合成可能な分子の無限性に触れようとすることによってみえてくる。分子がみせる構造と機能に限りはない」と、理論化学者にしてノーベル賞受賞者であるコーネル大学（ニューヨーク州イサカ）の Roald Hoffmann は語る。

ほとんどの化学者は、自らを導いてくれる最先端の大命題などなくても満足して研究しているようだ。そのような命題は、研究分野の一体性や方向性を示すには役立つ可能性があるが、創造力を本質的に備えた分野のもつ種々の可能性を狭めてしまう危険がある。「万物の理論」やヒトゲノム解読への極端な集中（少なくとも世間の関心の集中）は、物理学や生物学にとって大し

てプラスにならなかったという見方もあるかもしれない。

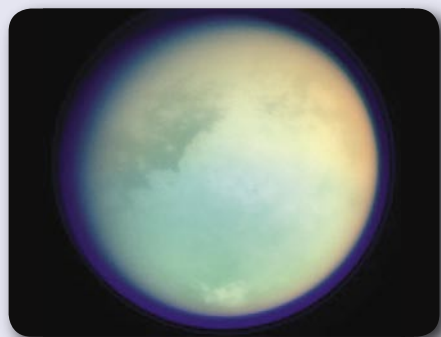
それに加えて、ほかの科学分野と同様に化学でも、最大級の画期的成果は予想外の方面からもたらされることが多い。ミュンヘン工科大学（ドイツ）の無機化学者 Hubert Schmidbaur は、「この半世紀で私が出くわした化学研究の大きな方向づけや重要な疑問は、どれも前もって気づいていたものではなかった。そして、今後 50 年間でもこの状況はあまり変わらないだろうと思う」と打ち明ける。

「化学には『聖杯』にあたる目標はない」と Hoffmann は楽しげに認める。「たまに、何かしらの目標が一般大衆向けに掲げられることはある。しかし、それは単に人目を引くために『聖杯』候補にあげられた研究目標にすぎない」。彼は、基本的に創造性のある分野では、充足感を得られるのは捕まえたときではなく追いかけているときだ、とつけ加える。「私の自然哲学上の好みとしては、大きな命題に取り組みたいとは思いません。私は、このすばらしい化学の庭の中で、多くの繊細で小さな問題に取り組むのが好きです。もちろん、それらの小さな問題どうしのつながりを見据えながらのことですが」と Hoffmann は述べた。 ■

Philip Ball は *Nature* の編集顧問。

## Q5

地球上の生命はどのように生まれたのか。またそれ以外の環境だと、どこでどのようにして生命が誕生する可能性があるのか？





# Sick seas

## 病める海洋

Nature Vol.442(978-980)/31 August 2006

か弱い命：酸性化した海は、サンゴを溶かし、ウニの棘を鈍らせる恐れがある。

大気中の二酸化炭素濃度の上昇によって、世界中の海の酸性度が高まってきている。海洋の酸性化は、海洋生物に破壊的な影響をもたらすかもしれない。Jacqueline Ruttimann が報告する。

1 トンの水を想像するのは、それほどむずかしいわけではない。普通の浴槽で1週間に使われるくらいの量だ。10億トンの水となると、思い浮かべるのは少しいへんだ。世界中のすべての男性、女性、そして子どもが入浴に使用する水の総量がだいたい10億トンで、ナイル川を流れる1週間分の水量に匹敵する。では、さらに増えて、10億×10億（ $10^{18}$ ）トンの水はどうだろうか。この量は、人類全員が、それぞれ入浴時にナイル川を流れる1日分の水を使ったと考えた場合の総量だ。宇宙には、この水量より軽い矮星（わいせい）だってある。しかし、地球上の海水量はこれよりさらに多いのだ。

これほど大量の海水を想像するのがむずかしいとすれば、その変化を思い浮かべよ、といわれても戸惑うだけだろ

う。しかし、人類は海洋を変えつつある。熱帯から北極まで、海洋には、人間活動によって排出された二酸化炭素が溶け込んでいる。それは、過去200年の間に化石燃料の燃焼、およびセメント工場から大気中に放出された二酸化炭素量の、およそ半分に相当する量だ<sup>1</sup>。二酸化炭素は水に溶けると炭酸となり、結果的に海洋の酸性度は高くなる。「これは化学の基本です」と、米国立大気研究センター（コロラド州ボルダー）の海洋生態学者 Joanie Kleypas はいう。「海洋の酸性度の上昇が進んでいることは、否定できない事実です」。

この数年間、研究者たちは、海の酸性度の上昇傾向によって、いかに数多くの生物の外殻が冒されつつあるかを報告してきた。例えば、ウニの棘の鋭

さが弱くなっていたり、サンゴの表面がもろくなってきたりしているという。人工的に酸性度を高めた水中では、イカなどの動物の泳ぎに異常が生じる。腐食性の水が、動物の呼吸速度を乱してしまうのだ。そのほかにも、特に、炭酸塩を主成分とする殻をもつ微小な生物が酸に冒され、保護性の外殻を失いつつある<sup>2</sup>。しかし、低 pH 海洋の研究はまだほとんど行われていないのが現状だ。「低 pH が海の生物に及ぼす影響を調べる研究については、我々も取り組み始めたばかりです」と、カリフォルニア州モスランディングにあるモントレー湾水族館研究所（MBARI）の海洋生物学者 Jim Barry は話す。

海洋の酸性化は、同じく二酸化炭素に起因する大気温上昇とは異なり、か

なりの程度、予測がつく。将来の動向も、学校で学んだ化学の知識があれば十分にグラフ化できる。気温上昇の予測に精密なモデルを必要とするのとは対照的だ。酸性化は、驚くほどの速さで進んでいる。産業革命以前は、大気中の二酸化炭素濃度の上昇は比較的緩やかだった。このため海洋には、酸性度の高くなった浅瀬の海水を取り込み、中和作用をもつ深海の炭酸塩堆積物と循環させるだけの時間的余裕があった。

しかし過去数十年の間に、二酸化炭素は非常に速いスピードで蓄積しつづあり、海洋の酸性化は、堆積物による中和作用の速度を上回る速さで進んできている。この間の変化のスピードは、過去数十万年の間に起きた変化の約100倍にも迫ることが、古代堆積物の同位体元素研究から示されている。今後100年も経てば、海洋生物は祖先が一度も経験したことのないような状況に置かれることになる。しかし、「海洋生物群はこれまで、低pHへの順応を迫られたことはありませんでした。海洋生物にとっては、進化の過程で一度も遭遇したことのない状況に直面することになります」と、ライブニッツ海洋科学研究所（ドイツ）の海洋生物地球化学者 Ulf Riebesell は話す。

### 酸の攻撃

酸性化した水は、多くの海洋生物を保護している炭酸塩を主成分とする骨格を冒す。石灰化の速度は、今世紀中に最大60%低下するだろうとの予想もある。そうなれば、海洋中の二酸化炭素は、生物圏に危機的に作用するかもしれない。大気中の二酸化炭素濃度上昇で危ぶまれているのと同様の話だ。

ロンドンの王立協会が2005年に作成した報告書では、危機的状況の数値化を進めるため、より多くの研究が行われるよう、よびかけられている。全米科学財団、米国海洋大気局、米国地質調査所の米国3機関が7月に発表した別の報告書では、海洋酸性化の問題

に取り組むための研究戦略が取り挙げられた。また、気候変動の影響の定量化に取り組む国際組織、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、2007年初めごろまでに発表を予定している次の報告書で初めて、海洋酸性化の問題を議題として提起する予定だ。

1800年、大気中の二酸化炭素濃度は280 ppm、海洋のpHは平均8.16だった。それが現在では、大気中の二酸化炭素濃度は380 ppm、海洋のpHは平均8.05だ。さらに推定では、今世紀の終わりまでにpHが7.9まで下がると予想されている。「8.16から7.9への低下は、それほど大きくないように思えるかもしれませんが、実際は大きな差だといえます」と Kleypas は語る。pHの1の変化は、酸性度が10倍変化することを意味する。

陸上環境を対象に研究を行っている生態学者が、高濃度の二酸化炭素条件で植物を成長させる実験を行うのと同じように、海洋生物学者は、低アルカリ性の海洋中における生物活動の調査を始めている。

Riebesell はノルウェー南西部のフィヨルドで、棧橋に巨大な容器を取り付けた野外実験施設を設置した。カーボネート樹脂で覆われた「メソコスム」という50リットルの容器には、光合成プランクトン（植物プランクトン）である円石藻が充填されている。そして、この円石藻と海水を充填したタンク内に、50年後および100年後に推定されるレベルの二酸化炭素を送り込む。Riebesell はこの装置を、「未来の海」とよぶ。

「円石（コッコリス）」とよばれる円石藻の外被は、小さなホイールキャップのような形をしていて、炭酸塩鉱物の方解石を主成分とする。Riebesell は、現在の大气中濃度の3倍の二酸化炭素にさらされた場合、円石藻の保護層の約半分が崩壊することを明らかにした<sup>3</sup>。

このような変化は、海洋中に大量に含まれるこの種の植物プランクトンにとってよい前兆ではない。また、植物プランクトンにとっての災難は、プ

ランクトンが支える食物網にも悪影響を及ぼす可能性がある。円石は、海洋上層に浮かぶ廃棄物（主に魚類の排泄物）の表面で凝集し、そうした廃棄物を海底堆積物へと沈める働きを担っている。こうして、栄養分は海洋中で再利用されているのだ。その円石の働きが弱まってしまうとなれば、海洋の栄養循環にドミノ効果を引き起こす恐れがある。

### 危険度上昇

Riebesell は現在、酸性度の上昇がプランクトンの卵と幼生に及ぼす影響を調べている。そのほかにも、ウニやマキガイなどの、より大きな動物が受ける影響を調べている研究者もいる。京都大学の海洋生物学者、白山義久の実験では、ウニとマキガイをそれぞれ、550 ppm の濃度の二酸化炭素を含む水で満たした30リットルのタンク内に置いた。すると3か月後、ウニもマキガイも、重量が約8%減ったという。方解石を主成分とする棘は鈍くなり、取り扱い中に簡単にはがれ落ちるほど弱くなった、と白山は話す。

タンク内の二酸化炭素濃度を急激に下げたところ、対象生物は最終的に回復した。だが、高濃度条件を長期間（例えば1年間）維持したところ、大半の個体は死んでしまった<sup>4</sup>。「二酸化炭素濃度の大きな変化に動物が適応できないのは明らかです」と白山はいう。

MBARI の研究者で、研究用ツールとして二酸化炭素を長年使用してきた Barry が行った実験からも、不安な結果が得られている。Barry はかつて、潮間帯に消火器を噴射していた。海水中に二酸化炭素を送り込んで動物を眠らせれば、それらを簡単に捕まえることができたからだ。しかし今では、二酸化炭素は危険な気体だと Barry は考えている。

Barry は現在、ポスドクの Eric Pane とともに、高濃度の二酸化炭素環境における2種類のカニの反応を調査中だ。予備的実験で、浅瀬に生息するアメリカイチョウガニ（*Cancer* 種）と、深海に生





保護層の崩壊：海水の酸性度が高まると（中央および右の写真）、食物網の基礎となる微小なプランクトン、円石藻の外殻が溶けてしまう。

息するズワイガニ（*Chionoecetes* 種）が高濃度の二酸化炭素環境から回復するのにどれだけの代謝作用を必要としたかを測定したところ、浅瀬のイチョウガニのほうが回復の早いことがわかった。この差には、酸性化が進む海に関する重要な事実が含まれている。「深海に生息する生物は、酸性度の変化に対する感受性が、浅瀬に生息する種に比べてかなり高いといえる」と Barry は語る。

Barry と Pace は、カニの研究で得られた結果を、7 月に英国のサザンプトンで開催された深海生物シンポジウムで発表した。また、関連研究の中で Barry は、海底堆積物中に生息する微小動物は、pH がわずかに 0.1 低下した海水に 1 か月間さらされただけで、その個体数が減少してしまうらしいことをつかんだ。しかし奇妙なことに、1～2 週間すると、微小動物の個体数は回復するようにみえる。この理由として Barry は、大型動物もまた死滅した可能性があり、それらに微小生物が捕食される機会が少なくなったこと、あるいは pH 変化によって死滅したほかの小型生物の死骸が海底へと沈んでくるのに伴い、微小生物の餌が増えたことを挙げる。

### 大量死の現場

深海では、非常にゆっくりと成長するサンゴなどの、冷水性サンゴも危機に瀕している。円石藻やウニの成分である方解石より溶解度の大きい炭酸塩、アラゴナイト（あられ石）を主成分とするサンゴは、酸性化に特に脆弱だ。「深

海のサンゴにはすぐに異常が現れる」と、フランスのジフ・シュール・イベットにある気候・環境科学研究所の海洋学者 James Orr はいう。今世紀の終わりごろには、水深の深い場所に生息するサンゴの 3 分の 2 が、アラゴナイトを冒しかねない海水にさらされる可能性がある（現在は、まだまったくといってよいほどそうした状況にはない）<sup>5</sup>。

炭酸塩は、高圧および低温で溶解度が高くなるので、酸性度上昇の影響は水深が深くなるにつれて大きくなる。しかし Orr の研究では、アラゴナイトは 2100 年までに、深海のみならず、南大洋全体のあらゆる水深で不安定になる可能性がある」と指摘する。サンゴが死滅してしまえば、サンゴ礁を安全なすみかとするほかの種にも影響が出てくるだろう。

こうした不吉なモデルが提案されているものの、海洋酸性化が大きな問題になるとすべての研究者が考えているわけではない。5 月に発表された *Geophysical Research Letters* 誌の論文では、二酸化炭素濃度の上昇は海洋における生物学的影響にはほとんど関係しない可能性がある」とされた<sup>6</sup>。カリフォルニア大学サンタバーバラ校の水文学者 Hugo Loaiciga は論文中で、堆積物に含まれる炭酸塩は、進行が予想される酸性化に対して緩衝作用を果たすのではないかとしている。

しかし、多くの専門家はこの説に同意できないようだ。海洋酸性化の研究を主導する研究者 25 人が連名で投稿した反論コメントでは、Loaiciga の主張に対し、1 つずつ反論が展開された。

専門家たちはまた、pH が 0.2 低下すると、多くの海洋生物がその影響を受ける可能性がある」と述べている。この pH 変化は、Loaiciga の論文では本質的に重要でないとされた変化である。

反論を取りまとめたワシントンカーネギー協会（カリフォルニア州スタンフォード）の地球システムモデル学者 Ken Caldeira は、海洋酸性化が問題であること、また、その規模がとてつもなく大きいことについて、一般の人々が知るべき時期にきていると語る。Caldeira は、ローレンス・リバモア国立研究所（カリフォルニア州）の Michael Wickett と共同で提案したモデルを用いて、2100 年ごろにピークを迎えるとされる、現在のところ無規制で行われている化石燃料の燃焼の影響について、シミュレーションを行っている。

大気中の二酸化炭素濃度は、燃焼の進行速度が最大となった少し後にピークを迎える。続いて大気中の二酸化炭素濃度は、炭素が海洋へ取り込まれるに伴って、緩やかに低下していく。そして海中では、水深が深くなるにつれて酸性度は緩やかに高くなる。海面付近では、pH の低下は 2750 年までに止まる可能性がある。しかし、水深 1 キロメートル付近では、次の千年紀の始まりごろにも、依然として pH の低下が続いている可能性がある<sup>7</sup>。「今後 10 年間の人間行動の影響が数千年にわたって続く可能性があることは、広く一般の人々に知られるべきです」と Caldeira は語る。



その間にも研究者たちには、最初の数十年間の変化の影響を解明するため、取り組むべき課題が数多くある。「行われている研究の数は多くありません」と、カリフォルニア州立大学サンマルコス校の海洋学者 Victoria Fabry はいう。「研究者は、ようやく問題の端緒に触れたような状況です」。一例として Fabry は、石灰化作用をもつプランクトンを対象とした実験室研究は非常に少なく、研究されているのはすべての種のうちわずか 2% にすぎないことを指摘する。

米国の研究機関が 7 月に発表した報告書では、今後の研究の進むべき方向性が示された。提示された道筋には、研究室実験と野外実験の統合や、酸性化がサンゴやプランクトンなどのキーストーン種（要となる種）に及ぼす作用の見極め、さらには、これらの種における変化が生態系全体に及ぼす作用を突き止めることなどが含まれる。報告書はまた、問題をあらゆる空間スケールで検討する必要性

についても触れている。現時点では多くの研究が、大規模な生物地球化学レベルか、または特定の生物に対する影響のいずれかに焦点を当てており、生態系を対象とした研究は少ない。

### 地球全体の問題

こうした状況を正すため、一部の研究者は、森林で数年間にわたって実施される二酸化炭素濃度上昇を調べる実験の海洋版のような、大規模な実験を実施する必要性を訴えている。Barry と MBARI の共同研究者たちは、公海上でのこうした実験系の開発を試みている。実験は、含有二酸化炭素濃度の高いブルームが噴出している深海部に、ケージを設置して行うことになる予定だ。

研究領域の統合も進みつつある。海洋学者は化学者と共同で酸性化反応の定量を始めており、また、エンジニアと組んで、研究用の深海生物を採取するためのロボット潜水艇の開発にも着

手している。社会学者たちも参加を始めている。2007 年 6 月に沖縄で開催予定の次の太平洋学術会議では、自然科学者と社会学者が一堂に集い、沿岸地域の住民に対する対応について討議を行うことになりそうだ。

海洋酸性化の問題に注目が集まる一方で、新たな問題が浮上している。ある説によると、海洋の酸性化は、地球温暖化と平行して進むのではなく、温暖化を増幅する可能性があるというのだ。石灰質の円石藻類は、繁殖時に海面を光らせる。つまり、より多くの太陽光が宇宙空間へと反射される。このような生物の数が減ると、あるいはほかの植物プランクトンが取って代わってその場を占めれば、海面の明るさは弱くなってしまふ。

また、円石藻類は、海洋上の雲の発生過程にも関与している。円石藻類は、大量の硫化ジメチルを産生する。つまり、海洋上の大気中で、硫酸塩の多くがエアロゾル化するのだ。硫酸塩粒子は、雲粒が成長する際の「種」として作用する<sup>8</sup>。もし、硫酸塩粒子が減少するとなると、地球上のかんりの量の雲が取り除かれることになり、地球温暖化がさらに進むかもしれない<sup>9</sup>。

人間の想像力は、海の広さを、そして海中で起こる変化の複雑さを、簡単にはとらえきることができない。しかし、今後数百年の間に、もはや避けることのできない変化が必ず起きることを考えれば、人間社会はそういうない訳をしている場合ではない。 ■

Jacqueline Ruttimann はメリーランド州を拠点とするフリーランスライター。追加取材は Alexandra Witze。

1. Tedesco, T., Feely, R. A., Sabine, C. L. & Cosca, C. E.; available at [www.research.noaa.gov/spotlite/archive/spot\\_gcc.html](http://www.research.noaa.gov/spotlite/archive/spot_gcc.html) (2005).
2. Orr, J. C. et al. *Nature* **437**, 681–686 (2005).
3. Riebesell, U. et al. *Nature* **407**, 364–367 (2000).
4. Shirayama, Y. & Thornton, H. J. *Geophys. Res.* **110**, C09S08 (2005).
5. Guinotte, J. M. et al. *Front. Ecol. Environ.* **4**, 141–146 (2006).
6. Loaiciga, H. A. *Geophys. Res. Lett.* **33**, L10605 (2006).
7. Caldeira, K. & Wickett, M. E. *Nature* **425**, 365 (2003).
8. Charlson, R. J. et al. *Nature* **326**, 655–661 (1987).
9. Gunson, J. R. et al. *Geophys. Res. Lett.* doi:10.1029/2005GL024982 (2006).



ノルウェー南西部のフィヨルドで酸性度を高めた海水を詰めたタンクを使って、低 pH が海洋生物に及ぼす作用が研究されている。

# Obituary

## 追悼

## 江橋節郎 氏

(1922-2006)

Nature Vol. 442 (996)/31 August 2006



D. E. PHILPOTT

### 細胞内カルシウムの調節的役割を明らかにした生理学者

動物が動けるのは筋肉収縮のおかげである。神経インパルスが筋細胞膜内外の電位変化を引き起こし、これが細胞の両端に速やかに広がることで筋肉を収縮させる。筋細胞表面で発生した電気的な興奮が、細胞内部に詰め込まれたタンパク質の収縮を引き起こす仕組みは、数十年間にわたって生理学における最大の謎の1つであった。この難問を実質的に解いたのが、2006年7月17日に83歳で亡くなった江橋節郎氏である。

筋細胞の中には、その長軸方向に沿って2種類のフィラメントが並んでいる。「太い」フィラメントを作るタンパク質ミオシンが、「細い」フィラメントを作るアクチンとよばれる別のタンパク質と相互作用して、両フィラメントを相互に滑らせることで筋細胞の両端が引き寄せられ、収縮が起こる。この過程には、ATPの分解で生成するエネルギーが使われる。収縮の生化学的な基盤の概要は、1940年代に Albert Szent-Györgyi 解明され、生理学および構造学的な基礎については1950年代に Jean Hanson と Hugh Huxley によって、および Andrew Huxley と R. Niedergerke によって明らかにされた。しかし、神経が筋収縮を引き起こす仕組みは依然として謎であった。

江橋は、カルシウムイオンの非存在下では、たとえATPをミオシン-アクチン系に添加しても収縮反応は起こらないが、微量のカルシウム（数 $\mu\text{M}$ ）を添加すると、ATPが顕著な収縮反応を引き起こすことを発見した。このカルシウム依存性がそれまで生化学者たちに見落とされていたのは、実験用ガラス器具や試薬中の不純物から微量のカルシウム混入があったからである。江橋は、使用するすべての溶液とタンパク質標品にカルシウムイオンが混入しないよう苦心を重ね、実験結果の信頼性を高めていった。彼の得た実験結果は、同じころに Annemarie Weber が得た実験結果と一致していた。彼女は、収縮反応に際したATP分解には微量のカルシウムが必要なことを、江橋とは独立に報告していたのだ。

筋収縮にはカルシウムが関与しているのではない。そんな考えが江橋の脳裏に浮かんできたのは、B. B. Marsh が1951年に報告した「弛緩因子」について研究している最中のことであった。弛緩因子は、筋細胞をすり潰して得られる懸濁液（ホモジェネート）の成分であり、これによってミオシン-アクチン系の弛緩を引き起こすことができた。江橋は、弛緩因子が、筋

小胞体とよばれる筋肉に特異的な細胞小器官の破片にすぎないことを証明した。そして、この因子の作用機序を調べる過程で、Emil Bozler が 1954 年に得ていた、カルシウムを隔離する「キレート」剤 EDTA が弛緩を引き起こすという結果に注目した。江橋は、さまざまなキレート剤のカルシウム結合能と弛緩活性を比較し、両者が密接に相関することを見いだした。また、筋小胞体の破片が、ATP の存在下でカルシウムイオンを速やかに蓄積して、十分な量のカルシウムを周囲の媒質から除去することで弛緩を引き起こせることも明らかにした。

弛緩過程は収縮の逆の現象である。そこで江橋は、「膜表面における興奮が何らかのシグナルを筋小胞体を送り、これが弛緩期および休止期に筋小胞体に蓄積したカルシウムイオンの放出を促し、この流出したカルシウムイオンが収縮反応を引き起こす」という、興奮と収縮の共役に関して今日受け入れられている説を提案した。

江橋はこの過程を詳細に調べることで、精製したミオシンおよびアクチンが、カルシウムイオンがまったく存在しない条件でも ATP と反応すること、また、カルシウムのもつ調節作用が、特定のタンパク質因子が存在する場合にのみ認められることを見つけた。この因子は、それまで機能が不明であったタンパク質のトロポミオシンと、江橋が新たに発見して「トロポニン」と命名したタンパク質との混合物であることが判明した。トロポミオシンとトロポニンは、細いフィラメント中にアクチンとともに存在する。カルシウムイオンの非存在下では、これら 2 つのタンパク質は共同でアクチンを阻害し、太いフィラメントを作るミオシンとの相互作用を妨げる。カルシウムがトロポニンと強く結合することを見いだした江橋は、この結合により生じるトロポニンの立体構造の変化が、トロポミオシンを介してアクチンへと伝えられ、アクチンの阻害状態を解除し、結果的に収縮反応が起こるのだと提案した。この仮説は後に立証されることとなる。

1960 年代初頭の当時、カルシウムのような単純な無機イオンが筋収縮を制御するという江橋の仮説は、ほとんどの生化学者にとって受け入れがたいものだった。当時の一般的な見方では、筋収縮のような重要な生物学的現象は、精巧な構造の有機分子が調節してい

るはずだとされていたからだ。このため江橋は、明らかな証拠を得ているにもかかわらず、自説を認めてもらうのに苦労した。彼がトロポニンを発見し、筋収縮機構を解明してようやく、カルシウムイオンの調節的役割は広く受け入れられるようになった。

カルシウムの調節的役割は、筋肉の収縮に留まらない。江橋の発見以降、神経伝達物質やホルモンの放出、代謝切り替え、遺伝子発現など、数多くの細胞過程がカルシウムによる制御を受けていることが明らかになった。したがって江橋は、カルシウムシグナル伝達という研究領域を切り開き、生命科学全体に大きな影響を与えたと言える。

江橋節郎は、幼少の頃から利発であった。小学校と中学校の両方で飛び級を許され、当時国内随一の名門校であった第一高等学校に進んだ。東京大学薬学部の教授には 36 歳の若さで就任した。しかし、江橋の科学上の業績は、彼の明晰な頭脳のみに帰せられるわけではない。研究室での彼の働きぶりは猛烈をきわめ、ほぼ連日、夜中の 12 時すぎまで研究を続けた。彼の妻の文子をはじめとして、共同研究者は多かったものの、主要な結果のすべては江橋自身が生み出したものであった。

世界の生理学および薬理学の分野で最も尊敬される科学者の 1 人として、江橋は、日本の文化勲章をはじめとする数多くの栄誉を受けた。また、日本学士院やロンドン王立協会のほか、米国、ドイツ、ベルギーなど数か国の科学アカデミーの会員でもあった。江橋はまた、国際純粋・応用生物物理学連合の代表 (1978～1981 年) や国際薬理学連合の代表 (1990～1994) として世界の科学界に貢献し、1981 年に東京で開催された国際薬理学会議では議長を務めた。

江橋は魅力的な人物であった。カリスマ性があり、同僚たちに対して思いやりがあり、助力を借し、信に厚く、また母国を愛する心が強かった。2000 年に脳梗塞に襲われてからは身体の自由が制限されたにもかかわらず、明晰な頭脳はそのままであった。そして体調はかなり安定していたため、突然の訃報は予期せぬものであった。故人の友人ならびに教え子たちは、心より哀悼の意を表するものである。 ■

東京大学名誉教授 遠藤 實



# Silent running: the race to the clinic

## RNA 干渉の臨床応用を競う沈黙のランナーたち

Nature Vol.442(614-615)/10 August 2006

遺伝子の発現を抑制する技術に対するバイオテック企業の投資がにわかに活発化している。Erika Check が調査した。

沈黙は金なり。少なくとも米国のバイオテック企業 2 社はそうあってほしいと考えている。これらの企業は、遺伝子の発現を抑制して「沈黙」させる方法を臨床現場へ導入することで、利益をあげようとしているのだ。この技術を使えば、ウイルス疾患からがんに至るあらゆる疾患の治療法を開発できると両社は主張している。

この技術とは RNA 干渉 (RNAi) のことで、安全かつ有効に遺伝子発現を抑制する方法の 1 つになると考えられている。まだ揺籃期の技術ではあるが、バイオテック業界に多大な利益をもたらす「打ち出の小槌」になる可能性が高いとみる関係者は多い。

「インパクトのある市場部門となるまでに少し時間がかかるが、とても大きな規模になる可能性を秘めています」。こう語るのは、Morgan Stanley 社 (米国ニューヨーク) のアナリスト Sapna Srivastava だ。

事業資金の潤沢な Alnylam Pharmaceuticals 社 (米国マサチューセッツ州ケンブリッジ) と Sirna Therapeutics 社 (米国コロラド州ボルダー) の 2 社が、今のところ、この分野でトップを走っている。両社は知的財産権をめぐる一騎打ちを演じており、また一方で RNAi の可能性を見込んで資本を投下しようと、それぞれが企業提携を積極的に進めてきている。

この勢力争いの成り行きを研究者たちは注意深く見守っている。RNAi は生

物にもともとある仕組みであり、一部の生物においてはウイルスと戦ったり遺伝子機能を破壊したりする役割を果たすと考えられている。RNAi は植物で初めて発見され、その後まもなく線虫やショウジョウバエといった生物でも見つかった。2000 年には、ノーベル賞受賞者の Phillip Sharp (マサチューセッツ工科大学、米国ケンブリッジ) を含む 4 人の科学者チームが、ショウジョウバエで RNAi の背後にある分子機構を解明した<sup>1</sup>。その翌年には、このうちの 1 人で、当時マックス・プランク生物物理化学研究所 (ドイツ・ゲッティンゲン) にいた Thomas Tuschl が、哺乳類に RNAi を使うための技術を開発した<sup>2</sup>。その結果、この 4 人の科学者は Alnylam 社を 2002 年に設立した。

Alnylam 社は RNAi の利用に関する Tuschl の重要な特許を利用することができ、なおかつ、創立にあたった研究チームの科学的信用は絶大であったため、同社は「ロケット発進」を果たした。Alnylam 社は創業以来 5000 万ドルをベンチャーキャピタルから調達し、1 億ドルを公募増資で調達した。1 株当たりの株価は当初の 6 ドルから 13 ドル近くまで上昇し、Merck、Medtronic、Novartis の各社との取引で約 1 億ドルを儲けた。

昨年 9 月に調印された Novartis 社との取引は、1 つの転換点になったと業界では受け止められた。もし Alnylam 社が汎発性インフルエンザのような疾患

の治療用リード化合物を開発できれば、最大 7 億ドルを手にするという内容で、当時この分野では間違いなく最大規模の取引だった。「バイオテックの歴史上で最も重要な新薬探索事業提携の 1 つでした」と Alnylam 社の最高経営責任者 John Maraganore はいう。

これに対して Alnylam 社のライバルである Sirna 社の台頭ぶりは、かなり地味だった。Sirna 社は当初、ノーベル賞受賞者である Thomas Cech によって Ribozyme Pharmaceuticals という名称で 1993 年に創立された。Cech は当時、コロラド大学ボルダー校 (米国) で生化学を研究していたが、現在はハーワード・ヒューズ医学研究所 (米国メリーランド州チェビーチェース) の所長を務めている。

Ribozyme Pharmaceuticals 社は、治療に用いるリボザイムという RNA 酵素の開発に力を注いだ。同社は 1996 年にナスダックに上場したが、2002 年には上場廃止寸前まで追い込まれた。当時、がんと C 型肝炎を治療するためのリボザイムの臨床試験で思わしい結果が得られず、株価が下落したのである。

会社の生き残りのため、同社の研究者たちは RNAi に目を向けて最後の望みを賭けた。その後まもなく同社は 4800 万ドルをベンチャーキャピタルから調達し、社名を Sirna に変更し、RNAi 企業に衣替えした。400 万ドルだった同社の時価総額は、3 億 7500 万ドルを超えるに至った。Alnylam 社の

成功を受けて、Sirna 社もこの 5 月に GlaxoSmithKline 社との取引を発表した。これにより同社が 4 種類の呼吸器系疾患の治療薬開発に成功すれば、最大 7 億ドルの利益を手にする可能性がある。

RNAi 技術への大手製薬会社の参画は、RNAi 技術をめぐる将来が楽観視されていることの証だ。「RNAi は低分子とタンパク質に続く第 3 の薬剤標的だ、と製薬会社は考えています」と Srivastava は話す。

RNAi 療法には将来性があるが、いまだに薬剤送達という重要なハードルを越えられないでいる。RNAi 法では、目的の遺伝子に干渉してその発現を抑制させる短い RNA 断片を、体内に送り込む。しかし RNA は免疫系によってすばやく破壊されてしまうため、RNA を細胞内の標的遺伝子まで確実に送り届けることはむずかしい。Sirna 社と Alnylam 社は競ってこの問題に取り組んでおり、対象とする標的細胞へ薬剤を送り届ける「全身送達」という難問を解決しようとしている。

Sirna 社は、自社製の薬剤分子に大幅な化学修飾を施して、脂質ナノ粒子を使った送達系を開発した。このナノ粒子は実質的に RNA を保護する脂質外被であり、RNA が細胞膜を通過するのを助ける。同社では、この送達系の臨床試験を早ければこの秋にでも実施する計画である。

一方 Alnylam 社も、さまざまな送達パッケージの試験を実施し、この 3 月には、その 1 つについて有望な結果が得られたことを発表した。同社の研究員たちは、脂肪球の中に RNA を封じ込めた送達系を開発し、この薬剤をサルに注射して、コレステロールを作り出す遺伝子の発現を抑制することに成功した。この結果を報告した論文<sup>3</sup>では、全身投与した RNAi が霊長類で有効に働く可能性が初めて示された。

このような薬剤送達上の問題があるため、RNAi の最初の臨床応用研究では眼疾患が対象となった。RNA 分子を、免疫細胞との接触で破壊されることなく眼に送達できるからだ。



ナスダックでの成功を祝う Sirna Therapeutics 社の最高経営責任者 Howard Robin (中央)。

臨床試験が最初に実施されたのは、Alnylam 社でも Sirna 社でもなく、Acuity Pharmaceuticals 社(米国ペンシルベニア州フィラデルフィア)が開発した治療薬だった。成人における失明の最大の原因の 1 つである黄斑変性症の治療法について同社の安全性試験が始まったのは、2004 年 10 月のことだった。その後、第 II 相有効性試験が完了し、同社はこの薬剤の有効性を主張しているが、全データの公表は行われていない。黄斑変性症の治療法研究では、Sirna 社もさほど遅れているわけではなく、今年末までに第 II 相試験に入ることにしている。

これに対して Alnylam 社は、Genentech 社(米国カリフォルニア州サウスサンフランシスコ)の抗体薬が新薬承認を得ると予想して黄斑変性症の治療法の開発を断念し、実際その予想は当たった(*Nature* **442**, 123; 2006 参照)。Alnylam 社の最先端の研究プログラムでは、吸入による肺への RNA の直接送達法が用いられている。この治療法については、呼吸器合胞体ウイルス感染症の治療目的で 2 件の第 I 相試験が完了しており、今年後半にはもう 1 件、汎発性インフルエンザの治療を目的とした肺の研究に取りかかることが計画されている。

その一方で Alnylam 社も Sirna 社も、知的財産に関する権利主張を新薬探索と同程度に重視している。両社そ

れぞれの前途は、どちらの会社の方法が遺伝子発現を抑制する方法として優れているか、そしてどちらがその方法に対する権利を最終的に保有するかにかかっている。Alnylam 社は、Tuschl の特許の 1 つに対する独占的ライセンスがあるから Sirna 社よりも有利だという。だが Sirna 社は、最近の技術革新によって Tuschl の特許の使用を完全に回避できたと主張している。

これまでのところ投資家たちは勢として Alnylam 社のほうが優位だとみている、と Srivastava は語り、「Novartis 社の関係者と話をしたところ、Alnylam 社との業務提携に踏み切った主な理由は知的財産にあると話してくれた」という。

Sirna 社も Alnylam 社ともに、さまざまな疾患の治療法に幅広い関心をもっており、カリフォルニア州のバイオテック大手の Genentech 社や Amgen 社(サウザンドオークス)と同じ道を歩むことを夢見ている。

「この技術があるので、バイオテクノロジーを基盤とした大手製薬会社に発展するチャンスは十分にあると思っています」と、Sirna 社の最高経営責任者 Howard Robin は語った。 ■

1. Zamore, P.D., Tuschl, T., Sharp, P.A. & Bartel, D.P. *Cell* **101**, 25-33 (2000).

2. Elbashir, S.M. et al. *Nature* **411**, 494-498 (2001).

3. Zimmermann, T.S. et al. *Nature* **441**, 111-114 (2006).

# がんや神経疾患との関わりから、糖鎖の多彩な機能を探る

古川 鋼一

「糖」と「糖鎖」は、似て非なるものである。糖は細胞活動のエネルギー源として働き、輸送や代謝経路などが詳細にわかっている。一方の糖鎖は、細胞の構成要素を分画することで「糖が長く連なった構造」が見いだされ、糖鎖として知られるようになったが、存在部位や構造、機能について未解明の部分が多かった。ところが、ゲノム科学の進展にともなって、糖鎖が果たす機能の重要性が明らかになり、その研究がポストゲノムの重要テーマに躍り出た。20 年以上にわたって、糖鎖と生命現象について研究を続ける、名古屋大学大学院の古川鋼一教授に話をうかがった。

## 糖鎖はあらゆる生命現象に関連している

**Nature Digest** — 最近、「糖鎖科学」という言葉をよく耳にしますが、それはなぜですか？

**古川** — 糖鎖は、その字の通り、グルコースなどの単糖が複数連なった分子です。2 個からなるごく短いものから、数百個も連なった長いものまであり、直鎖だけでなく、枝のように連結するものもあります。正確な数はわかりませんが、1000 種以上が存在するものと考えられています。ゲノム科学が急速に発展したことで、タンパク質の機能を調べるプロテオーム解析が進み、タンパク質や脂質に結合している糖鎖が、発生や分化、細胞の接着、移動、増殖、アポトーシス（細胞死）、免疫といった、あらゆる生命現象にかかわっていることがわかり、糖鎖科学として注目されるようになったためです。例えば約 3 万種あるといわれるタンパク質では、その半数に糖鎖が付加されていると考えられており、それらは、アミノ酸配列の特定部位にさまざまな長さや構造をもつ糖鎖が結合することで、初めて機能を発揮すると思われます。

**ND** — ご自身は、なぜ糖鎖に興味をもたれたのですか？

**古川** — かつて私は、血液内科医を目指して臨床に携わる一方で、腫瘍免疫学の研究をしていました。1984 年にアメリカに留学し、腫瘍特異抗原の本体を探っていたら「そこに糖鎖があった」というのが、糖鎖研究へ進んだきっかけです。その後も、メラノーマや神経芽細胞腫などを対象に、糖鎖ががん細胞内でどのような機能を果たしているかを検討してきました。

**ND** — がんには特有の糖鎖異常がみられるのですか？

**古川** — はい。細胞ががん化すると、正常細胞にはない糖鎖の異常が現れます。本来はきれいに伸びるはずの糖鎖がうまく伸びずに未熟な糖鎖が蓄積することあれば、まったく新しい種類の糖鎖ができる場合もあります。このとき重要なのは、こうした糖鎖異常が「がん化の原因なのか、それとも結果なのか」ということですが、詳細はまだ明らかにされていません。私は、遺伝子導入によって、正常細胞に「がんでよくみられる糖鎖」を作らせること（糖鎖リモデリング）に成功していますが、その結果は、糖鎖異常ががん化の原因に近いことを示唆しています<sup>1</sup>。

**ND** — がんと糖鎖には大きな関連があるのですね。糖鎖はほかの病気にもかかわっているのでしょうか？

**古川** — あらゆる生命現象に糖鎖が関係していることから、その異常によって、さまざまな病気が引き起こされると考えられます。私はがん以外に、神経系の細胞で発現する糖脂質<sup>\*1</sup>の機能についても調べています。糖脂質は、胎児期における脳神経系形成に重要な機能を発揮するといわれており、1996 年に、糖脂質の合成に関与すると思われるすべての酵素遺伝子（beta-1,4-GalNAc 転移酵素遺伝子）をノックアウトしたマウスを作ってみました<sup>2</sup>。結果は予想に反し、脳神経系がほぼ完全に形成されたマウスが生まれました。ただしまったく正常というわけではなく、成熟するにしたがって、変性性の神経疾患が進むこともわかってきました。おそらく、ある程度の代償機能が働いたためと考えられますが、詳細はまだ解明されていません。ヒトでは、糖脂質合成に関与する酵素遺伝子の異常は知られていませんでしたが、2004 年に、アメリカの一部の地域のある家系で、GM3 合成酵素遺伝子という遺伝子の変異により、てんかんや精神遅滞、発育不全などの神経疾患が引き起こされていることが報告されました<sup>3</sup>。

## グライコミックスの代表として研究を牽引

**ND** — 現在、大きなプロジェクトを進められていると聞いています。

**古川** — 文部科学省特定領域研究の「糖鎖によるタンパク質と分子複合体の機能調節（グライコミックス）」の代表を務めています。核酸やタンパク質を中心にした研究に加えて、遺伝子の直接的な産物ではない糖鎖についても解析を進めるべきだとの考えから、日本の主立った糖鎖生物学研究者の方々と班を作って応募し、平成 14 年度からのプロジェクト（予算約 2 億 9000 万円）として採択されたものです。無事、5 年目の最終年度を迎えることができました（詳細は <http://www.glycomix.ne.jp/> を参照）。

**ND** — プロジェクトでは、これまでにどのような成果がみられたのでしょうか？

**古川** — 私の研究テーマは「糖脂質糖鎖による膜ミクロドメイン異常」と題したもので、既にお話したように、がん細胞と糖鎖異常、糖鎖変異マウスにみられる神経変性などの分子機構について検討しています。プロジェクト全体では、遠藤玉夫先生（東京都老人総合研究所老化ゲノム機能研究チーム研究部長）が大きな成果をあげました。遠藤先生は筋肉と糖鎖の関連に着目し、それまでヒトの筋肉にはある特殊な糖タンパク質<sup>\*2</sup>の





古川 鋼一（ふるかわ こういち）/ 名古屋  
大学大学院医学系研究科生物化学講座教授

1975年3月、名古屋大学医学部卒業。医学博士。1949年、岐阜県生まれ。当初は血液内科医を目指す。1984年から、アメリカの Sloan-Kettering Cancer Center に留学、Kenneth O. Lloyd、Lloyd J. Old に学ぶ。1989年より長崎大学医学部腫瘍医学教室助手。講師、助教授を経て、1997年3月より名古屋大学医学部生化学第二講座を担当。2000年より名古屋大学大学院医学系研究科生物化学講座教授。

がん関連抗原として同定された糖脂質の糖鎖が、がん細胞の増殖、浸潤、転移などの悪性形質において重要な役割を担っていることを、糖鎖合成系酵素の遺伝子クローニングと、その遺伝子操作による糖鎖リモデリング細胞作製によって、明らかにしてきた。一方、脳神経系で発現する酸性糖脂質がその維持と再生に必須であることを、ノックアウトマウス樹立によって明らかにしている。

一群（DGC）が存在すること、そこには単糖が4つ連なった特殊な糖鎖（O-マンノース型糖鎖）が結合していることを突き止めていましたが、本プロジェクトにおいて、そのO-マンノース型糖鎖の合成にかかわる酵素（糖転移酵素）の遺伝子を同定しました<sup>3</sup>。さらに、この酵素遺伝子の異常が、あるタイプの筋ジストロフィーを引き起こすことも明らかにし<sup>4</sup>、現在では、発症に至るメカニズムの解明にも迫りつつあります。

ND — 研究を進めるうえで、ご苦労や失敗談はありますか？

古川 — 細胞膜上にある糖脂質は、さまざまなシグナルを制御したり、細胞死（アポトーシス）を誘導したりする機能をもつと考えられるのですが、そのメカニズムを、説得力のあるアプローチで証明するのがむずかしく、苦労を重ねています。失敗談は、たくさんあり過ぎて、覚えていられないほどですね。

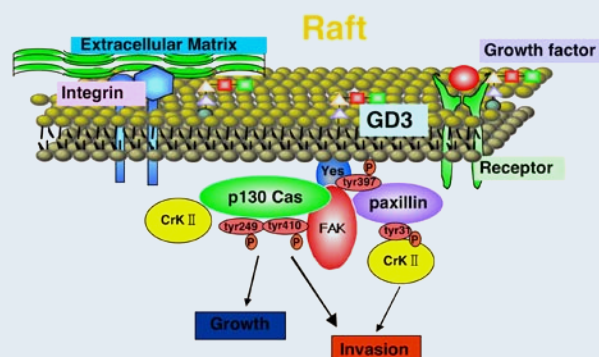
### 研究の国家基盤を整えることが急務

ND — 現在の日本の糖鎖研究のあり方については、どのようなお考えでしょうか？

古川 — 物質としての糖鎖研究（糖鎖化学）と、基礎生物学としての糖鎖研究（糖鎖生物学）に溝ができてるのが問題です。まずは両者をうまく融合するための対策や予算が必要でしょう。アメリカでは NIH（国立衛生研究所）主導の大きな糖鎖コンソーシアムを作ること、研究を総括的に進める基盤が整いつつありますが、日本にはそのような組織がありません。日本もアメリカのように研究を分業し、各組織が自分の得意分野を極め、国全体の糖鎖研究レベルを引き上げる必要があると思いますが、今のように、成果に重きを置いた競争資金の分配システムではむずかしいといわざるをえないでしょう。

ND — 若手研究者の育成については、どのような意見をおもちですか？

古川 — 最近では、糖鎖科学に興味を持つ学生が増えており、心強く感じています。ただし、学生を教育する側の体制が不十分なために、研究者の育成は順調に進んでいないと思います。現状では、大学教員に課せられる任務が重過ぎるため、満足に研究しつつ、さらに教育を進めるための条件が整わないのです。ポスドクなどの準教員的位置を確保する努力とともに、糖鎖科学コンソーシアムが中心になって、合理的な糖鎖研究拠点のネットワークを構築することが必須です。



糖鎖リモデリングによる、がんの悪性化。がんの一種「メラノーマ」でよくみられる糖鎖（GD3）を強制的に発現させると、細胞増殖因子や、細胞接着にかかわるインテグリン（細胞表面タンパク質の一種）のシグナルが大幅に強まる。その結果、細胞増殖の促進、浸潤性の増強などがみられ、がんの悪性度が高まることが示された。

ND — 糖鎖研究の推進も、若手研究者の育成も、国家としての基盤を早急に整えることが重要だということですね。最後に今後の目標についてお聞かせください。

古川 — 自分の研究としては、細胞膜上にある糖脂質がクラスターを形成するようすを明らかにし、さらに、細胞膜の内外で糖脂質や糖鎖とタンパク質が相互作用するメカニズムを解明することが目標です。研究者どうしの交流や情報交換の促進という点では、日本糖鎖科学コンソーシアムの活動に力を入れていきたいと考えています。

ND — ありがとうございます。

聞き手は西村尚子（サイエンスライター）。

\* 1 糖脂質  
脂質に糖鎖が結合したもの。そのほとんどは、脂質二重膜である細胞膜上に結合している。

\* 2 糖タンパク質  
タンパク質に糖鎖が結合したもので、この場合、主がタンパク質で従が糖鎖のものを指す。主が糖鎖で従がタンパク質のものもあり、それはプロテオグリカンとよばれる。

1. Hamamura K. et al. *Proc Natl Acad Sci U S A*. **102**(31), 11041-11046 (2005)
2. Takamiya K. et al. *Proc Natl Acad Sci U S A*. **93**(20), 10662-10667 (1996)
3. Simpson MA et al. *Nature Genetics*. **36**(11), 1225-1229 (2004)
4. Yoshida, A. et al. *Dev. Cell*, **1**, 717-724 (2001)

今月は、*Nature* の論説記事から、“Cheap IVF needed” というタイトルの記事を取り上げます。IVF とは *in vitro* fertilization の略で、「体外受精」のことです。体外受精などの不妊治療法は、一般に普及したとはいえ、非常に高額な費用がかかるのが現状です。とりわけ、アフリカの貧困地域においては、手の届かない技術といっても過言ではないでしょう。

アフリカの一部の地域では、子どもに恵まれない女性が悲惨な境遇に追いやられています。こうした女性たちを社会的に救うためにも、安価な不妊治療法の研究開発が求められています。が、「誤った認識 (false perceptions)」のためになかなか進まないようです。どのような「誤った認識」があるのかに着目して、記事を読んでみましょう。

## Editorial

語数：603 words 分野：医療技術・社会

*Nature* 442, 958 | doi:10.1038/442958a; Published online 30 August 2006

### Cheap IVF needed

<http://www.nature.com/nature/journal/v442/n7106/full/442958a.html>

False perceptions are hindering access to new research on *in vitro* fertilization.



1. In the nearly three decades since the arrival of the world's first test-tube baby in 1978, some two million children have been born using *in vitro* fertilization (IVF). Today, the technique is more popular than ever — but it remains out of reach for many who want it.
2. This is particularly the case in sub-Saharan Africa, where up to one-third of couples are infertile, causing untold misery for millions of women. Fertility treatments are available in private clinics in several countries in the region, but are far too expensive for most people. A number of scientists are now working to make IVF much cheaper and more accessible, and have already come up with some promising alternatives.
3. But ideas for such methods cannot change lives while they remain stuck on the drawing board, and these developments have yet to be validated in clinical trials. The lack of resources, money, awareness and political will combine to stop them getting off the ground. If this is to change, the issue of infertility needs to be pushed higher up the international agenda.
4. Perhaps the biggest obstacle is the widespread, but false, perception that infertility isn't a pressing problem in poor African countries. The region also faces daunting challenges of coping with HIV, tuberculosis and malaria. Many argue, understandably, that fighting these should take priority over infertility, which is not directly life-threatening.
5. But this argument underestimates the devastating social, economic and personal burden of being childless in many poor societies — a burden that mainly falls on women. They are usually blamed for infertility and can be ostracized and assaulted by their families, even driven to suicide or killed. By supporting the development of low-cost IVF, governments can help make such treatments more widely available.
6. Another frequently heard argument holds that it is inappropriate to prioritize treating infertility in countries that are already struggling to support their fast-growing populations. But the 1948 UN Universal Declaration of Human Rights states: "Men and women of full age, without any limitation due to race, nationality or religion, have the right to marry and to found a family." In cases where parents are unable to have children, this ought to imply the right to access to fertility treatments.
7. Too many women in Africa are deprived of the right to an education, freedom from abuse, and access to decent health care and contraception. As well as being desirable in its own right, the education and empowerment of women has

been shown to be a critically important factor in slowing the high birth rate that critics of fertility treatments in Africa say they are concerned about.

8. Raising the status of women and broadening access to contraception, particularly condoms, would also help to control the **sexually transmitted diseases** that are the main causes of infertility in sub-Saharan Africa. The crippling social taboos surrounding childlessness also need to be challenged. But changing age-old prejudices is going to take a great deal of time and **concerted effort** by governments and by pressure groups such as **Chipo Chedu**, a Harare-based trust established by Betty Chishava, a Zimbabwean woman **cast out of** her home for failing to bear children.
9. In the meantime, the scientific and medical community can play its part by creatively questioning whether exotic new equipment and **state-of-the-art** drug therapies are necessary for safe and effective fertility treatments. Some scientists argue that much of this is dispensable and is largely driven by **the affluent end** of the fertility market. Indeed, it would be a nice **twist** if low-cost fertility treatments designed to help **impoverished** African couples could one day make IVF affordable for less-well-off couples in rich countries too.

### Topics Chipo Chedu とは？

Chipo Chedu はジンバブエの言葉で our gift の意味。設立者である Betty Chishava は、子どもに恵まれなかったために家を追い出されて、家族や親戚からも差別や迫害を受けた経験がある。Chipo Chedu は、女性が経済的に自立できるよう講習会を開いたり、不妊に対する正しい知識を身につけるためのワークショップを開いたりして、女性の社会的地位の向上を目指した活動を行っている（詳しくは、Helen Pilcher, *Nature* **442**, 975-977 の News Feature 参照）。

### Science key words

- タイトル **IVF** : (*in vitro* fertilization の略) 「体外受精」  
 リード *in vitro* はラテン語で in glass、つまり「(試験) 管内で」の意味。対照的に、*in vivo* は in the living thing、つまり「生体内で」のこと。日本での体外受精による出産は 1983 年に初めて成功し、以来その数は増え続けている。日本産科婦人科学会の調査によると、2004 年には年間約 1 万 8000 人、1986 年の調査開始以来の累積出生児数は約 13 万 6000 人になっている。
2. **fertility treatments** : 「不妊治療」  
 この場合の fertility は、treatment とあわせて使われているので、infertility と同様に「不妊」と訳す。また、不妊治療を専門とするクリニックは、fertility clinic と同様に infertility clinic とよばれる。
  4. **HIV** : (human immunodeficiency virus の略) 「ヒト免疫不全ウイルス、エイズウイルス」
  4. **tuberculosis** : (略: TB) 「結核 (症)」
  7. **contraception** : 「避妊 (法)」
  9. **sexually transmitted diseases** : (略: STD) 「性行為感染症」 ヒトが性行為によって感染する病気の総称。梅毒、淋病、クラミジア感染症などがある。

### Words and phrases

- リード **false perceptions** : 「誤った認識、誤った理解」
2. **untold misery** : 「いうにいわれぬ苦しみ」  
 untold は「数や量が膨大で数え切れない」という意味だが、misery のような抽象名詞を修飾する場合は、「計り知れない」「際限のない」と訳される。
  3. **stuck on the drawing board** : 「計画段階で立ち往生している」  
 drawing board は「製図板」のことだが、比喩的に「設計段階」「計画段階」という意味で用いられることも多い。stuck は、何かに引っかって前に進めないこと。
  3. **getting off the ground** : 「(物事が) うまくスタートすること」
  4. **pressing problem** : 「差し迫った問題」「緊急の問題」
  4. **daunting challenges** : 「気後れするような難題」  
 daunt 「他人をひるませる、気力をくじく」に由来する daunting が、challenge を修飾している。
  5. **ostracized** : 「追放される」「排斥される」  
 もともとは古代ギリシャの陶片追放制度 (ostracism) における追放を説明する言葉。

6. **argument holds that**: 主語が人や組織ではなく、argument、consensus、opinion、theory といった場合には、「<主語>は～のような内容である」という訳にするとすっきりする。
7. **in its own right**: いろいろな意味があるが、ここでは「それ自体で」の意味。
8. **concerted effort** : 「協調的な取り組み」  
 名詞の concert は「一致」「協力、協調」という意味で、「コンサート、演奏会」もこの流れに沿っている。
8. **cast A out of B** : 「A (人) を B (場所) から追い出す」  
 名詞 outcast は、追い出された者のことで、「仲間外れ」の「け者」その他の訳語がある。
9. **state-of-the-art** : 「最先端の、最高技術水準の」
9. **the affluent end** : 「富裕層」  
 affluent は rich よりもフォーマルな表現。end を使った用例としては、high-end 「高性能品」「高級品」がある。
9. **twist** : 「予想外の展開」「意外な展開」
9. **impoverished** : 「貧困した」  
 poor の類語だが、「貧困な状態や弱い状態にさせられた」というニュアンスがある。



## Editorial

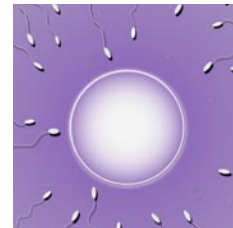
## 参考訳

Nature **442**, 958 | doi:10.1038/442958a; Published online 30 August 2006

### 必要とされる安価な体外受精

<http://www.nature.com/nature/journal/v442/n7106/full/442958a.html>

誤った認識が体外受精に関する新しい研究の活用を妨げている。



1. 世界初の試験管ベビーが誕生した 1978 年以来、ほぼ 30 年間に約 200 万人の子どもが体外受精 (IVF) で生まれている。今日、この技術は、かつてない普及をみせているが、それを必要としつつも利用できない人々も数多くいる。
2. 特にこの傾向が強いのがアフリカのサハラ以南で、夫婦全体の最大 3 分の 1 が不妊である。そのため、数百万人の女性がいうにいわれぬ苦しみを味わっている。不妊治療は、この地域の数か国の私立診療所で行われているが、ほとんどの人々にとっては高すぎて手が出ない。現在多くの研究者が、体外受精のコストを大幅に抑えて、利用しやすくするための研究に取り組んでおり、既にいくつかの有望な方法が考案されている。
3. ところが、そのような方法のアイデアがあっても、計画段階で立ち往生しては多くの人々の人生を変えることはできない。新たに開発された体外受精法は、これから、その有効性を臨床試験で評価しなければならないのだ。各種資源や資金の不足、人々の意識の低さ、そして政治的意志の欠如が積み重なると、安価な体外受精法は軌道には乗らない。この状況を変えるには、不妊問題を優先順位の高い国際的な課題に押し上げる必要がある。
4. もしかすると、アフリカの貧困国では不妊問題が緊急課題ではないという誤った認識が世間に広まっていることが最大の障害なのかもしれない。この地域は、HIV や結核、マラリアに対処するという困難な課題も抱えている。不妊は直接命にかかわる問題ではないため、前述の疾患と闘うことのほうが優先順位は高いはずだと主張する者も多く、その点は理解できる。
5. しかし、この主張は、多くの貧困社会にあって子どもに恵まれないことが圧倒的に大きな社会的、経済的、個人的な重荷となることを過小評価している。そして、この重荷を背負うのは主に女性なのである。通常、不妊は女性が悪いからだと思われ、家族や親戚から追放されたり、暴行を受けたりし、場合によっては自殺に追い込まれたり殺害されたりすることもある。各国政府は、安価な体外受精法の開発を支援することで、その普及をさらに促進できる。
6. 急増する国民の生活を支えることにすら苦しんでいる諸国で、不妊治療を優先させることは不適切だという主張も頻繁に耳にする。しかし、1948 年の国連世界人権宣言には、「成年の男女は、人種、国籍または宗教によるいかなる制限をも受けることなく、婚姻し、かつ家族をつくる権利を有する」と定められている。子どもに恵まれない夫婦の場合には、この条項から不妊治療を受ける権利を導き出せるはずである。
7. 教育を受ける権利や虐待からの自由、そして適正な医療を受け避妊する権利を奪われた女性が、アフリカには極めて多い。女性の教育と権利拡大は、それ自体が望ましいだけでなく、アフリカでの不妊治療に批判的な論者が懸念する高い出生率を抑制する、極めて重要な要素であることが明らかになっている。
8. 女性の地位を高め、避妊法、特にコンドームを利用しやすくすることは、アフリカのサハラ以南で不妊症の主な原因となっている性感染症を防止するうえでも役に立つ。子どもができないことをめぐって壊滅的なダメージを与えるような社会的タブーも問題にする必要がある。しかし、昔からの偏見を変えるには、長い時間、そして政府や「Chipo Chedu トラスト」といった圧力団体による協調的な取り組みが必要となるだろう。このトラストは、ジンバブエのハラレに本部があり、子どもができなかったことで家庭から追い出されたジンバブエの女性 Betty Chishava が創立した。
9. その一方で科学者や医師は、新型の風変わりな装置や最先端の薬物療法が、安全で効果的な不妊治療にとって必要なかどうかを独創的に見直すことで、その役割を果たすことができる。装置や薬剤の多くは、なくても困るわけではなく、主に不妊治療市場における富裕層のために開発されたと主張する科学者もいる。もしアフリカの貧困家庭の夫婦を救うために低コストの不妊治療法を開発することで、体外受精が富裕国の比較的低所得の人々にも利用しやすくなれば、それはすてきな想定外の展開といえるだろう。



## Call for papers

### 2007年1月創刊 Nature Photonicsでは 投稿論文を募集しています

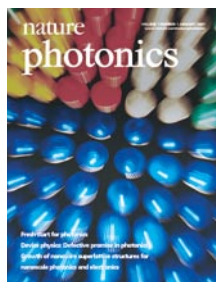
Nature Photonicsは、フォトンクスすべての研究分野を対象として、最高品質の査読研究論文を掲載していきます。

Nature Photonicsは、他のNPG系論文誌とは異なり、基礎研究から新たな応用例や技術の商品化までフォトンクスの全ての領域を対象としています。本誌では、選りすぐった一次研究論文のみを掲載し、詳細なニュース記事や分析記事がこれらの論文を補完します。これにより、学術研究機関と企業のいずれの研究者にとっても貴重な情報源となるユニークなジャーナルとなることでしょう。

下記のようなトピックスをお届けします

- レーザー、発光ダイオード、その他の光源
- 画像形成、検出体、センサー
- オプトエレクトロニックデバイスとコンポーネント
- 新規材料と工学的に作製された構造体
- 光の伝搬、相互作用、挙動の物理的性質
- 量子光学と暗号化技術
- 超高速フォトンクス
- バイオフォトンクス
- 光データ記憶
- 分光学
- 光ファイバーと光通信
- 太陽エネルギーと光起電
- ディスプレイ
- テラヘルツ技術

### Volume 1, Issue 1 January 2007



**Nature Photonics**  
創刊を記念いたしまして **30% OFF** にて  
定期購読をお申込みいただけます!

2007年  
1月31日  
まで

例えば、1年購読(個人)の場合 -28,350円 → **19,840円**

購読特典:

- ジャーナルを毎月お手元にお届け
- オンラインアクセス
- Nature Digest (日本語編集版月刊科学誌)

Nature Photonics 創刊記念価格購読お申込み、  
投稿論文についてはこちらから

**www.naturejpn.com/photo-f**

 nature asia-pacific

# Call for papers nature nanotechnology



New in  
October 2006

### 2006年10月創刊の Nature Nanotechnologyでは、 投稿論文を募集しています

Nature Nanotechnologyでは、ナノサイエンスとナノテクノロジーのすべての領域における最高品質の研究論文を掲載。本誌では、原子、分子、高分子スケールでの材料や現象の操作や制御に関与する構造体、デバイス、システムの設計、特性解明、作製に関する研究を対象とします。

本誌で取り扱われる研究分野には、物理学、化学、生物学の基礎研究(計算論的研究やシミュレーションを含む)から幅広い工業分野(例えば情報技術、触媒作用、医用)での応用を期待される新たな材料、デバイスや技術までが含まれます。

本誌の対象範囲:

- ナノ材料、ナノ粒子
- ナノチューブ、ナノワイヤー、量子ドットやその他のナノ構造体
- ナノエレクトロニクス、分子エレクトロニクス
- ナノ磁気工学、スピントロニクス
- ナノフォニック構造体・デバイス
- 分子の自己集合と自己組織化
- 分子装置、ナノ電気機械システム (NEMS)
- 表面の改質、パターン形成、画像形成
- ナノチップ、ナノセンサー、ナノ流体
- ナノバイオテクノロジー、ナノ医学
- 計算ナノテクノロジー
- ナノ測定学、器具

論文発表形式:

- |          |                 |               |
|----------|-----------------|---------------|
| ●Article | ●Correspondence | ●Book Reviews |
| ●Letter  | ●News and Views | ●Progress     |
|          |                 | ●Commentary   |

Nature Nanotechnology、論文投稿に関する情報

**www.naturejpn.com/nano-f**

 nature asia-pacific

# 日本語で読む nature

Nature Digest は、Nature に掲載された社説、ニュース、最新研究の論説を日本語で編集した月刊誌です。さらに、世界的にインパクトを与えた発表の特集記事や日本人科学者へのインタビュー、科学英語に親しむためのコーナーなど日本オリジナルの企画編集記事も充実しており、「仕事や勉強に役立つ。」と多くの方から支持を受けています。

**Nature Digest Online誕生！** 2006年7月号、8月号 コンテンツ無料公開中！

Nature Digest のコンテンツが、nature.com に新しく加わりました。すべてのコンテンツが PDF でダウンロードできます。



## ■ Nature Digest対象分野

数学、物理、天体・宇宙・天文学、化学、地球科学、環境、医学、生命科学、バイオテクノロジー、コンピューター、工学 など。

## ■ Nature Digest目次

|                    |                 |
|--------------------|-----------------|
| Highlight          | 論文ハイライト抜粋       |
| Editorial          | 社説              |
| news@nature.com    | Natureオンラインニュース |
| News               | 科学ニュース          |
| Special Report     | 特集              |
| News Feature       | 科学ニュース読み物       |
| Japan News Feature | 日本の科学ニュース*      |
| News and Views     | 科学論説            |
| Business News      | ビジネスニュース        |
| Japanese Author    | 日本人科学者へのインタビュー* |
| 英語でNature          | 科学英語トレーニング*     |
| Nature Gallery     | 自然の写真*          |

\*は日本オリジナルの企画編集記事です。

## 2006年7月 Nature Digest Online 誕生！

### ■ Nature Digest (プリント版+オンライン) 購読価格

口座引落 670円【月々】

郵便振込／クレジットカード 7,980円【1年】

### ■ Nature Digest Online購読価格

クレジットカード 550円【月々】、6,000円【1年】、10,800円【2年】

ご購入はこちらから

[www.naturejpn.com/digest-f2](http://www.naturejpn.com/digest-f2)