

nature DIGEST

日本語編集版

MAY 2008

VOL. 05, NO. 5

5

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

マラリア
根絶を
めざして



WWW.

折たためる研究発表・学会ポスター

布地ポスター.com

www.cloth-poster.com

思案中



データは出来てるんだけどどうしよう…
荷物が多くなるのはいやだな…
紙だとやぶけるしシワにもなるしなあ…
写真もきれいにプリントできればなあ…

注文



メール送信!

たたんで運べる布地ポスター?
折りたたんでかばんに入れて持っていけるし
大判ポスターだから、貼るのも簡単なんだ!
よし! さっそく注文しよう!

出発!



納品

発注してから中3日で無事納品!
余計な荷物もなくて身軽に出発!

学会発表や展示会に最適!!

- 折りたたんでカバンに入れて運ぶことができます。
- 展示の際に、貼るのも剥がすのも簡単です。

●最近の主なお取引先

産業総合技術研究所／情報通信研究機構／物質・材料研究機構／東京大学／筑波大学／神戸大学／東京理科大学
神奈川歯科大学／九州大学大学院／久留米大学／帯広畜産大学／第一製薬株式会社／エーザイ株式会社
日本たばこ産業株式会社／積水化学工業株式会社／サントリー株式会社／NICTインキュベーションズ など

納品予定：完全データを受領後、4日間以内。

※イラストレーター又はパワーポイント仕様。

※国内発送のみ。

	仕上がりサイズ	出力料金
A1判	天地840ミリ × 左右594ミリ	11,760円
A0判	天地1188ミリ × 左右840ミリ	19,320円
B0判	天地1456ミリ × 左右1028ミリ	26,775円

※短辺最大1250mm、長辺最大20mまで出力可能です。

※基本出力料金は完全データをお預かりして、出力のみの場合の料金(税込)です。

※規格外のサイズの場合は、お見積書を作成いたします。

※デザイン・レイアウト・編集は別途料金にてご相談させていただきます。

※データ(テキスト、図、写真)をお預かりして、グラフや表が大きく目立つポスターにデザインします。

布地ポスター
見本
配布中

詳しくはホームページをご覧ください。



会場到着

貼るのも楽しシワも目立たない!



発表

大判でプリントも綺麗だから会場でも目立つ!
またポスター発表の機会があったら頼もう!

研究開発
支援
www.science-japan.com

お問合せ → request@cloth-poster.com

www.布地ポスター.com

検索

Click!

マラリア根絶をめざして

表紙: DAVID PARKINS

HIGHLIGHTS

02 vol. 452 no.7185, 7186, 7187, 7188

EDITORIAL

06 宇宙的楽観主義者を偲ぶ

NATURE NEWS

08 雑草が都会で生き抜くための進化

09 世界中で見つかった「雨をつくる」細菌

NEWS

10 太陽系が最初に呼吸したガス

Eric Hand

NEWS FEATURE

11 マラリアワクチン完成に向けて

Brendan Maher

18 永久飛行の夢

Vicki Cleave

JAPAN NEWS FEATURE

22 メダカに集まる熱い視線

西村 尚子

NEWS & VIEWS

28 光を浴びて恋の季節が始まる

岡村 均

30 画像を更新できるホログラフィック
3D ディスプレイ

Joseph W. Perry

JAPANESE AUTHOR

32 遺伝子の転写反応を区切る壁は
意外なタンパク質 — 白髭 克彦

藤川 良子

英語で NATURE

34 Powerful stellar blast sighted
恒星の大爆発が目撃された

www.nature.com/naturedigest

© 2008 年 NPG Nature Asia-Pacific
掲載記事の無断転載を禁じます。

11

J.-M. MAAS/DARBY
COMMUNICATIONS

18

SOLAR IMPULSE/EPFL
CLAUDIO LEONARDI

22

自然科学研究機構 基礎生物学研究所

34

NASA



世界の水：需要と供給をつり合わせるための努力

WATER UNDER PRESSURE: The struggle to match supply and demand

世界中で 10 億を超える人々が安全な飲み水を手に入れることができず、下水設備をほとんどもない人々は 20 億人を超える。激増する人口が生きていけるだけの水を供給する資源、またそれを行う意思を我々はもっているのだろうか。今週号では、世界的な水危機に関する科学的、経済的、また政治的な問題を扱った特集を組んでいる。気候学者たちは降雨量は不安定で、夏季の土壌の乾燥がより一般的になると述べており、Q Schiermeier は、乾燥が進んだ地球がとるべき水戦略について論じている。農家は、水の使用量を最少にして最大の収穫を上げなければならない。E Marris が報告しているように、育種家や作物学者、遺伝学者たちは協力してこの目的のために努力しているが、達成は容易なことではないようだ。D Fairless は、大規模な水路ネットワークで河川を連結することにより水供給を全国に再配分するというインドの壮大な計画について調査している。J Bartram は、世界的な目標を向上させ、あらゆる人々が水と適切な衛生設備を手に入れられるようにすべきときだと論じている。多くの国では、飲料水や家庭での消費よりも、農業用の灌漑用水が淡水使用量の大部分を占めており、エネルギー生産に使われる水量も急速に増大している。M Hightower と S Pierce は、エネルギー関連分野で水を効率よく利用するために開発されつつある方法を紹介している。新たな浄水法に関する研究の必要性は緊急のものとなっている。広範囲にわたる Review で M Shannon たちは、今後数十年間にわたって飲料水を供給することができる（と期待されている）開発中の技術について論じている。水はほぼどこにでもあるが、物理学者の間ではその構造を説明するための理論に関する応酬がまだ続いている、と P Ball は述べている。また、Books & Arts では、水の安全確保に関するドキュメンタリーと水が描く意外なパターンからインスピレーションを受けた 2 人の芸術家に注目している。

「水」特集：pp.269-281, Editorial p.253, News p.260, Commentary pp.283, 285, Books and Arts p.288, Essay p.291, Review p.301 参照

気中には、水、メタン、一酸化炭素が存在するだろうと予測されているが、惑星 HD 189733b が親星の前面を通過したときの赤外線観測結果の解析から、水の存在を示す間接的な証拠が昨年得られた。さらに今回は、近赤外透過分光法を用いて、惑星 HD 189733b に水と大量のメタンが存在することが確認された。存在が予想された一酸化炭素が見つからなかったのはおそらく、大気中のメタン生成が光化学的に高まったか、大気の化学組成に勾配が生じているためだろうと思われる。

Letter p.329, N&V p.296 参照

勝ち組は寛容

Victors don't punish

人間でみられる協力行動の進化を説明するために、多くの理論が考えられてきた。その 1 つとして、コストがかかる処罰は協力行動を促進するというものがある。この理論では、処罰をする側にコストがかかっても、平均すれば各人に利益があるとしている。しかし、我々の人間関係のほとんどは繰り返し起こるものであり、そのような場合には処罰が報復につながる可能性がある。囚人のジレンマゲームの変形版を使って、Dreber たちは、処罰は協力行動の頻度を増加させるが、平均的利益を増やすことがないのを明らかにした。つまり、コストがかかる処罰はグループ全体に利益をもたらすことはない。そして、最終的に最も高い利益を得た者（勝者）は処罰行動をとらない傾向にあるが、得点が最も低かった者（敗者）は最も頻繁に処罰を行う。コストがかかる処罰は協力行動を促進するために進化したのではないらしいが、何かほかの役割があるのかもしれない。

Letter p.348, N&V p.297 参照

心を読む

Reading the mind

近年の機能的磁気共鳴画像 (fMRI) 研究から、いろいろなカテゴリーの視覚画像によって誘発される脳活動のパターンに基づいて、見ている情景に含まれる単純な特徴や、それが属するカテゴリーを推論できることが明らかになっている。Kay たちは、この手法に興味深い進展をもたらした。彼らが新たに開発した解読法は、視覚刺激と低次視覚野の fMRI 活動との関係の特徴づける定量的受容野モデルに基づくもので、被験者が見た自然画像がどれなのかを、1000 枚の異なる画像の中からランダムに選んだものであっても高精度で特定できる。この成果によって、これまでは SF の世界だけの話だった、視覚心像や夢などの個人的な知覚体験の解読が、近いうちに可能になるのではないかと予想される。

Letter p.352, Author page 参照

すばやく動き出す春

Spring in their step

春には、多くの動物が生殖行動を開始する。一般的にこれは、一年のこの時期に日が長くなるのに応じて起こるといわれているが、この応答にかかわる分子経路は完全には解明されていない。光周性の研究に適したモデルとしてよく使われるウズラでの実験により、脳下垂体前葉の一部である隆起部での甲状腺刺激ホルモンの発現が、この光周性応答を引き起こすのに不可欠であることが明らかになった。これには遺伝子発現の大きな波が 2 つ含まれており、第 1 の波は「長日」になった最初の日の夜明けから約 14 時間後に生じ、第 2 の波はその数時間後にみられる。 Article p.317, N&V p.294 参照

反物質がなくなった理由

Eliminating antimatter

反物質は、ピックアップで物質と等量だけ生成されたと考えられているが、現在ではほぼ消滅している。反物質の消滅がなかったら、生命が存在することはなかっただろう。この反

物質の消滅を解明するための前提条件が、電荷・パリティ (CP) 対称性の非保存性である。Belle 国際共同実験グループは、高エネルギー物理学研究所 (KEK) の「B ファクトリー」電子・陽電子衝突型加速器による大規模実験で 5 億 3500 万個の B 中間子 / 反 B 中間子対を使って、CP を破る非対称性を測定し、この基礎物理学上の難問に取り組んでいる。これまでの研究から、荷電粒子と中性粒子の崩壊率に違いがあること、すなわち荷電 B 中間子が約 +7 パーセント、中性 B 中間子が -10 パーセントと崩壊率の非対称性が明らかになっている。今回の新しい研究によって、荷電粒子崩壊率の非対称性の不確定性が 1.7 分の 1 に小さくなり、荷電 B 中間子崩壊と中性 B 中間子崩壊では CP の直接的な破れに大きな差があることに對する、さらにはっきりした証拠が得られた。

Letter p.332, N&V p.293 参照

「ホットジュピター」に見つかったメタン

Methane in a 'hot Jupiter'

「ホットジュピター」型の太陽系外惑星の大



最初のヨーロッパ人? : スペインにおける人類の居住を 100 万年さかのぼらせることになった下顎骨

THE FIRST EUROPEAN?: The jaw that puts humans in Spain a million-plus years ago

ヨーロッパに初めて人類が居住した時期に関する問題は、石器時代考古学の中で最も議論が活発に行われているものの1つである。最古といわれる居住遺跡は年代の正確な特定がむずかしく、そうした遺跡では石器は見つかるが人骨化石が出土していないため、この問題はなかなか解決に至らずにいたが、今回、従来よりも信頼性の高い成果が得られた。スペイン北部のアタブエルカにある有名な化石人類出土遺跡群の一部、シマ・デル・エレファンテ洞窟の堆積層から、石器や動物の骨と共に、人類の下顎の骨が発見されたのである。今回の発見物は、各種の年代測定法によって110万～120万年前のものと特定された。もちろん、これらの人類が「最初の」ヨーロッパ人かどうかはわからない。しかし、この場所が西ヨーロッパでの人類の居住記録として最古で、かつ最も年代が正確に特定された遺跡であることは確実である。表紙は今回の重要な発見物である下顎骨片 ATE9-1 で、これは現在ブルゴスの国立進化人類学研究センターに所蔵されている。 [Letter p.465 参照](#)

気孔のイオンチャネル

A stomatal ion channel

葉の裏側にある気孔は、植物と大気との間で行われる二酸化炭素と水の交換を制御している。気孔の開口の度合いは、孔辺細胞の細胞膜を通過するイオンと代謝物の輸送によって調節されている。ちょっと意外ではあるが、これまでに植物細胞膜の陰イオンチャネルのサブユニットはクローン化されたことがなく、動物の陰イオンチャネルのホモログは植物で機能するイオンチャネルをコードしていないことが明らかにされている。今回、2つの研究グループが別々に、S型陰イオンチャネル機能の重要な要素であり、さまざまな生理的あるいはストレス刺激に対応して起こる気孔閉鎖に必要なタンパク質を同定した。SLAC1と名づけられたこのタンパク質は、真菌や細菌のジカルボン酸 / リンゴ酸輸送タンパク質の遠縁のホモログである。

[Letters pp.483, 487 参照](#)

幹細胞放出は概日リズムによって

Stem cells got rhythm

造血幹細胞 (HSC) は血液中を循環し、体中のあらゆる場所へと移動できる。HSCの血液中への放出が、概日リズムによって制御されていることが明らかになった。マウスでは、連続的な光照射や12時間の時間のずれ、つまり「時差ぼけ」が引き起こす概日振動に対応して、HSC数にはっきりした変動がみられる。幹細胞ニッチでのケモカイン CXCL12の発現のタイミングも、骨髄中の神経が局所的に送達するアドレナリン作動性シグナルに応じる形で概日振動に同調している。動物の睡眠中に幹細胞が血中に周期的に放出されることは、再生の一助となっているのかもしれない。 [Article p.442, N&V p.416 参照](#)

電子スピンを制御する

Spinning into control

炭素素材料は、それらの電子スピンの例外的に安定と考えられるため、スピントロニクスやスピンキュービットなどの応用に有望な候補材料とみなされている。特に、電子スピンと軌道運動との結合の効果は、スピンドコヒーレンスの源になるが、こういった材料では無視できると考えられていた。しかし Kuemmeth たちは今週号で、この考えが誤りであることを証明している。彼らは、高品質の清浄な単層カーボンナノチューブで行った一連の詳細な電子輸送測定の結果に基づき、電子スピン・軌道結合を直接示す特徴を観測した。この知見は、ナノチューブでキュービットを実現する新しい設計原理につながるかもしれない。また、観測されたスピン・軌道結合は、カーボンナノチューブでスピンを全電氣的に制御するメカニズムとして貴重な手段になるだろう。

[Letter p.448, N&V p.419 参照](#)

海洋における段階的酸素化

Oxygen steps in the ocean

地球大気の酸素化は、約25億年前から5億5000万年前にかけての原生代の始まりと終わりの近くという、2つの段階に分かれて進化したと考えられている。しかし、これら2つの段階の間における海洋の酸化状態と深海の酸素化が起こった時期は、まだよくわかっていない。Scott たちは、黒色頁岩から得られたモリブデンと全有機炭素のデータを用いて、この時期の海洋の酸化還元状態を調べた。モリブデンは栄養循環にかかわる重要な物質であり、その利用可能性は、地球の酸化還元状態に極めて敏感である。今回の結果は、地球の酸素化の歴史に新た

な説明を加え、また、地球上への動物出現の前触れとなった事象の研究に関係すると思われる。 [Letter p.456 参照](#)

匂いの感じ方の性差

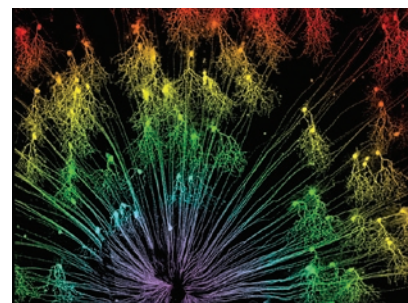
Scent's different directions

動物の行動には大きな性差があるにもかかわらず、どの動物種でも雌雄の脳にはわずかな解剖学的差異しかみられないのは意外である。今回、ショウジョウバエ (*Drosophila*) を使った研究で、昆虫フェロモンである cVA (cis-vaccenyl acetate) への応答に明確な性差が見いだされた。このフェロモンは雄から放出され、雌雄ともに触角にある、一見、まったく同じ神経回路を介して感知される。この匂いは、雌に対しては雄の受け入れを促すように働くが、競争相手となる雄に対しては求愛行動を抑制するように働く。この研究のために開発された単一ニューロン追跡技術は、マウスのような遺伝学的に追跡可能な動物種の神経系研究にも応用できそうだ。 [Letter p.473 参照](#)

上を見るためのニューロン

Specialization in the retina

目の網膜などにある神経回路は、どのようなものでもその機能は内部の神経結合状態に直接関連しており、いろいろな構成ニューロンの機能とその結合相手の選択によって決まっている。その特性は、個々のニューロンの遺伝子構成と分子間相互作用に支配されているが、遺伝子レベルから細胞の構造、回路の機能までの関連を一貫して明らかにすることはむずかしかった。I-J Kim たちは、この問題解決のために複数分野にまたがる新しい手法を開発し、網膜神経節細胞で実験を行った。そして、遺伝子マーカーを使って新しいタイプの網膜ニューロンを特定し、これが独自の細胞形態と変わった機能をもつことを見いだした。このタイプのニューロンは、すべて同じ向きに配置されており、また、その細胞構造から生物物理学的に予測される方向、すなわち視野の上方向に向かって動く物体に、最もよく応答するという特筆すべき性質をもつ。この発見からは、マウスはなぜ上向きの動きに対する感度の向上にこんなに力を注ぐのかという興味深い問題が浮かび上がってくる。 [Letter p.478 参照](#)





翻訳中の mRNA : 1 個のリボソームによるコドンごとの翻訳を追跡

FOUND IN TRANSLATION: Tracking a single ribosome codon-by-codon

最近の結晶学と低温電子顕微鏡法の進歩により、タンパク質合成、すなわちメッセンジャー RNA にコードされた遺伝情報をポリペプチド鎖へと翻訳する作業についての説明が一層進んだ。今回、J-D Wen たちは光ピンセットを巧みに使って、大腸菌のリボソームが 1 本の mRNA の翻訳を 1 回にコドン 1 個ずつ進めていくのを追跡した。1 本の mRNA (表紙画像では黄色) がほどけて翻訳されていくようすがとらえられている。翻訳は連続的に行われるのではなく、移動・停止のサイクルを繰り返す、断続的な過程であることがわかった。各サイクルは、0.1 秒足らずで行われるヌクレオチド 3 個分の移動と、それに続く数秒間の停止から成り立っている。翻訳の際に mRNA に沿ってリボソーム装置が物理的に動いていくようすが、今回初めてリアルタイムで観察された。今回の単一分子での観察によって、翻訳にかかわる問題の中で、まとまった量を扱う従来の方法では解決できなかった遺伝子翻訳の調節や忠実度といった問題に取り組めるようになるだろう。

Article p.598 参照

煙の立つところに...

Where there's smoke...

大規模なゲノム・データセットが参考になるようになって、行動に対する遺伝子の影響を新しい観点から調べることが可能になっている。今回、2 つの研究グループが肺がんに関するゲノム全領域を対象とした関連解析を行い、どちらのグループも、ニコチン性アセチルコリン受容体サブユニットの遺伝子クラスター領域の塩基配列が疾患感受性に関与していることを見いだした。ただし、この結果に至った経路はそれぞれのグループで異なっている。Hung たちは、この感受性は喫煙状態や喫煙頻度とは関連性がないことを示唆しており、特異的な 1 個のアミノ酸置換との関連を示している。また Thorgeirsson たちは、ニコチン性アセチルコリン受容体遺伝子クラスター領域に存在している対立遺伝子は、喫煙するかしないかには影響しないが、1 日当たりの喫煙本数に影響を与えており、したがって肺がんや末梢動脈疾患のリスクとも関連することを明らかにしている。いずれにせよ、ニコチン性アセチルコリン受容体が薬剤標的となる可能性ははっきりしたといえるだろう。

Letters pp.633, 638, N&V p.537 参照

真菌の薬剤耐性

Fungal drug resistance

免疫無防備状態の患者をしばしば苦しめる日和見真菌感染症の治療では、多剤耐性 (MDR) が深刻な問題である。MDR は、菌類がもつジグクスター転写因子ファミリー (Pdr1p オーソログなど) による薬物排出ポンプの発現増大が原因である場合が多い。このほど Thakur たちは、出芽酵母

(*Saccharomyces cerevisiae*) およびヒト病原性真菌である *Candida glabrata* の Pdr1p 型分子がさまざまな構造の薬物および毒物と直接結合し、薬物排出ポンプの発現を誘導して MDR を引き起こすことを示した。病原性真菌の MDR を制御する分子経路の解明が進めば、これらのやっかいな感染症に対処するための治療法の開発が促進されるだろう。

Article p.604, N&V p.541 参照

ちりと気候の関係

A dust with climate

東南極大陸のドーム C で掘削された EPICA 氷床コアからは、過去 8 回の気候サイクルの乱されていない記録が得られる。大気中の塵粒子は、太陽放射を吸収したり反射したりすることで気温に影響を及ぼしうる。そして、以前の研究で、ちりの生成、輸送、堆積は、氷期 - 間氷期のタイムスケールで気候変化に影響されることが示唆されていた。今回、EPICA コア中の塵堆積物の記録が新たに解析され、大気中のダスト量のフラックスは、氷期に気候が寒冷化するにつれて、南極の気温との相関がより高くなり、より低緯度域の気候と南極との連続的な結合を示していることが明らかになった。8 回すべての氷期にわたって氷期塵フラックスが約 25 倍増加していることがわかり、これは、氷期に南アメリカのちりの供給源が拡大したことと、水循環の低下によって上部対流圏の塵粒子の寿命が延びたことを反映している可能性がある。

Letter p.616 参照

奥行きを片方の眼だけで判断する仕組み

Two eyes are equal to one?

ヒトをはじめとする動物では、奥行きの判断

を両眼視に基づいて行う場合があり、その際は脳が個々の眼からの画像を比較処理している。我々はまた、奥行きを片方の眼だけで判断することもあるが、単眼視の奥行き知覚の場合には、得られる多くの異なった手がかりを脳がどのように処理しているかはわかっていない。このような手がかりの 1 つについて、今回、説明がつけられそうだ。脳の中側頭野のニューロンが、網膜上のイメージの動きを表すだけでなく、視覚情報と物理的運動とを総合して、運動視差から奥行き情報を獲得する動きをするらしい。運動視差とは、例えば動いている列車の窓から景色を見たときに経験する、地平線上の物体はゆっくり動くのに対し、列車に近い物体は飛び去るように速く動く状態で、これは強力な奥行き手がかりとなる。

Letter p.642 参照

超絶縁体の出現

Better than insulating

薄い超伝導膜に無秩序性を導入すると、小滴状の電子テクスチャーが発生する。これは常伝導マトリックス中に埋まった超伝導島構造である。この無秩序性を微調整すると、この系を超伝導体から絶縁体へと変換できる。これまで特性が評価されていなかった、物質の「超絶縁」状態がこの過程に関与することを示す実験証拠が報告された。物質の「超絶縁」状態とは、超伝導体の「鏡像」に相当する抵抗無限大の状態を指す。超伝導体から絶縁体へ転移する間に、熱活性化された伝導率をもつはっきりした伝導性状態、つまりクーパー対絶縁体が形成される。窒化チタン膜での実験により、特定の有限温度において、クーパー対絶縁体が超絶縁体になることが示された。この状態は十分強い臨界磁場によって破壊され、特定の臨界電圧で崩壊するという点で超伝導に似ている。

Letter p.613, N&V p.542 参照

siRNA による血管新生抑制

siRNA antiangiogenesis

ヒトで失明の原因となる加齢黄斑変性症の遅発性症状の 1 つである脈絡膜血管新生 (CNV) のマウスモデルでの研究から、意外な発見があった。低分子干渉 RNA (siRNA) はすべて、その標的とは関係なく、この疾患で起こる血管新生を抑制するというのである。Vegfa あるいは Vegfr1 を標的とする siRNA は、眼に直接注入した場合に CNV を抑制することが知られている。しかし、siRNA に一般的なこの抗血管新生作用は、siRNA の標的が何かには関係なく、また siRNA を眼内へ投与する必要もない。siRNA は、ウイルスの長い dsRNA に対する細胞表面受容体 TLR3 (toll 様受容体 3) と自然免疫を活性化しているのである。

Article p.591, N&V p. 543 参照



関係づけの向上：系統ゲノミクスによりさらに精細になった動物の系統樹

IMPROVED RELATIONS: Phylogenomics brings the animal tree of life into sharper focus

分子レベルのデータの蓄積によって、主要な動物群どうしの進化的関係に関する我々の理解は再構築されつつある。当初、この分野の研究は、少数の遺伝子からのデータに依存していたが、配列が完全に解読されたゲノムと発現配列タグ（EST；多数の相補DNAクローンから得られる短い部分的配列）が利用できるようになり、いまや動物界のかかなりの部分についてそのような解析が可能となった。21 門の動物に由来する約 4000 万塩基相当の EST が新たな研究で発表され、検討が行われている。この中には、今までゲノムあるいは EST のデータがなかった 11 門に属する動物が含まれている。今回の結論は、著しい多様性をもちながら祖先が共通の軟体動物の単系統性を含めて、ずっと以前に解剖学により確立された考え方を確認するものである。また、初期胚のらせん卵割の単一起源性のような、新たな興味深い進化的関係も見いだされた。

[Letter p.745 参照](#)

血液細胞の系譜を作り直す

Redrawing the blood lines

現在広く受け入れられている造血モデルでは、T 細胞はリンパ球系への分化に限定された共通のリンパ球前駆細胞から生じ、また、骨髄系細胞（骨髄や脊髄でみられる顆粒球やマクロファージなど）は骨髄系細胞系列へ分化するように拘束されている前駆細胞から生じると考えられている。しかし 2 つの論文が、このモデルと矛盾する証拠を報告している。成体の胸腺内に、T 細胞にも骨髄系細胞にも分化できる前駆細胞が見つかったのである。T 細胞は、胸腺の初期の細胞集団から作り出される。この細胞集団は、B 細胞を作り出す能力は失っているものの、T 細胞、NK（ナチュラルキラー）細胞、および樹状細胞への分化能に加えてマクロファージへの分化能も備えている。これらの結果は、T 細胞と B 細胞の系列分岐点にあたる前駆細胞はマクロファージへの分化能を保持しているとする成体造血モデルを支持している。

[Letters pp.764, 768, N&V p.702 参照](#)

学校閉鎖の効果

Schools out for influenza

インフルエンザの世界的大流行の予測に直面して公衆衛生当局がとることのできる選択肢の 1 つが、すべての学校の閉鎖である。実にドラマチックな対策だが、本当のところ効果はあるのだろうか。この問題に関して信頼のおけるデータは不足しているが、フランス全土で 1000 人以上の一般開業医が参加している定点観測ネットワークの「Sentinel ネットワーク」から、この問題に取り組むのを可能にするデータが得られた。21 年間にわたるインフルエンザ様疾患の日ごとの患者数の報告を、学校が休暇の年月日と比較

するのである。休暇の時期はフランス各地でばらつきがあるため、季節性要因の影響は最小限になる。今回行われた解析による答えは「効果あり」で、児童へのインフルエンザ伝播率は約 20 パーセント低下する。この結果から、世界的大流行の期間中に学校を閉鎖すれば、総患者数が約 15 パーセント減少すると予測される。この数字は、医療システムにかかる負荷の低減には十分であるが、この疾患の感染拡大を直ちに止めるには不十分である。

[Letter p.750, Author page 参照](#)

自助努力する熱帯雨林

Forest self-reliance

アマゾンの熱帯雨林の上空での航空機観測により、大気下層でのヒドロキシルラジカルの濃度が予想外に高いことが明らかになった。ヒドロキシルラジカルは大気中の主要な酸化物質だが、広大な森林が放出する炭化水素は大気の酸化能力を著しく減少するとこれまで考えられていた。今回の新しいデータは、実はそうでなく、原始林は大気の持続可能性を非常にうまく「管理」できていることを示唆している。この状況の説明として考えられている機構は、揮発性有機化合物、主にイソプレンの自然酸化によるヒドロキシルラジカルの効率よい再循環である。したがって、外部からの影響がない場合には、森林は穏和な大気環境を維持できると思われる。しかし、森林破壊と人為起源の一酸化窒素の放出が介在する場合は、光化学作用による大気汚染が起こる可能性が高い。

[Letter p.737, N&V p.701 参照](#)

ポリグルタミン病

Polyglutamine diseases

脊髄小脳性運動失調症 1 型（SCA1）は遺

伝性の神経変性疾患であり、ataxin1 タンパク質中にグルタミン鎖が誤って挿入されることが原因で起こる。SCA1 でも、またハンチントン病などのほかの 8 つの神経変性疾患でも、このような「ポリグルタミン伸長」によってタンパク質が神経毒性をもつようになる仕組みはわかっていない。Lim たちは、伸長ポリグルタミン領域が ataxin1 タンパク質の機能に影響を及ぼしており、そうした影響は ataxin1 タンパク質が結合する相手のタンパク質によって異なることを明らかにしている。機能欠失と、もっと意外なことだが機能獲得の両方が観察された。

[Article p.713, N&V p.707 参照](#)

異常な光

Extraordinary light

光の波長より小さい穴が並んだ金属膜を光が通過するとき起こる現象が「異常な光透過」と名づけられたのは、この現象を紹介した 1998 年の *Nature* に掲載された論文のタイトルによっている。特定の波長では、透過する光の量は、そのような小さい穴について予測されるよりずっと多くなる。この現象の説明は、いわゆる表面プラズモン、すなわち金属薄膜を光が透過するのを促進すると考えられている電子励起に主によるとしているが、これにかかわる物理機構については盛んな議論が続いている。H Liu と P Lalanne は今回、表面プラズモンモードやほかの電磁場を考慮して、さまざまな見解を満足させる理論を考案した。この新しいモデルは透過スペクトルの種々の特徴を正確に予測しており、ナノ光学デバイスを設計する基礎に使えると考えられる。

[Letter p.728 参照](#)

間接型強誘電性

'Improper' ferroelectricity

「酸化物エレクトロニクス」の分野では、複合酸化物薄膜を人工的に積層した構造体が設計され、工業技術的な関心を集める新規な電子的・磁気的特性が得られている。Bousquet たちは、強誘電体酸化物（ PbTiO_3 ）と常誘電体酸化物（ SrTiO_3 ）から作製した人工超格子について研究を行い、これらの材料薄膜界面でこれまで知られていなかったタイプの原子再配列が起こり、変わった「間接型」強誘電効果がもたらされることを見いだした。この系は、従来の強誘電性とは大きく異なり、温度にほとんど依存しない非常に高い誘電率を示す。今回の観察結果は、従来のマイクロエレクトロニクスで使われている高電率膜向けの改良型材料や、磁気電気応用における新たなニーズに応えるための改良型材料を設計する手法として、工業技術的にかなり興味深いものである。

[Letter p.732 参照](#)

宇宙的楽観主義者を偲ぶ

1917–2008: A Space Optimist

Nature Vol.452 (387) / 27 March 2008

作家アーサー・C・クラーク（1917-2008）が未来の技術を見通す目の確かさは、敬服すべきものだった。我々は、彼の偉大なる楽観主義を大切に受け継いでいかなければならない。

1944年にロンドン市街を爆撃するV2ロケットに希望を見いだすロンドン市民がいたとすれば、およそ尋常な感性の持ち主とはいえないだろう。しかし、デスモンド・バナール、J・B・S・ホールデン、オラフ・ステープルドンらが描き出した宇宙ビジョンの影響もあってか、当時の知的環境は、実際にそうした楽観主義者を生み出していた。V2ロケットとは反対の方向に北海を飛んでいく従来型爆撃の研究に従事していた才気あふれる数学者のフリーマン・ダイソンは、「敵が効率の悪いロケットの開発に投入した資源は、より効率の高い戦闘機の開発に投入されずにすんだのだ」という機会費用の考え方に希望を見いだしていた。また、その後まもなく新進SF作家となる若きレーダー技術者のアーサー・C・クラークは、V2ロケットがヨーロッパ大陸から英国まで飛んでくる途中で大気圏外に出ていたことに希望を見いだしていた。これは、人類がほかの惑星まで飛んでいくための技術が手の届くところまで来たことを意味していたからである。当時の彼については、英国惑星間協会の仲間たちとパブで酒を飲んでいたときに、V2ロケットが飛来する音を耳にすると、立ち上がって、近々始まる宇宙時代に乾杯したという逸話も残っている。

去る3月19日に90歳で死去したクラークのこうした楽観主義は、容易には見えないものを見通す能力に裏づけられていた。彼は、作家としても、予言者としても、この能力を大いに活用した。クラークの著作は厳密な科学に基づいていた。彼は、静止通信衛星技術

を予想したばかりでなく、広大な領域をカバーする通信技術には世界各地の隔たりを小さくする力があることまで予想していた。1964年には、インテルサットシステムの構築に関する協定に調印する各国の要人を前にして、「皆さんはまさに今、最初の『地球連邦規約』に調印されたのです」と、いつもの楽観主義で語った。しかしクラークは、物事の明るい面だけを見ていたわけではなかった。彼が1960年に*Playboy*誌上で発表した短編小説『思い出おこすバビロン（原題 *I Remember Babylon*）』では、頹廃思想とポルノの衛星放送が皮肉たっぷりに描かれている。

クラークはしばしば皮肉を用いた。しかし、彼が作家としてなによりも伝えたがっていたのは、驚異の念、特に、超越的なものへの驚異の念だった。『2001年宇宙の旅（2001: A Space Odyssey）1964年刊』では、宇宙に浮かぶのっぺりした巨大建造物を覗き込んだ宇宙飛行士が、「信じられない！—星がいっぱいだ！」と驚嘆の声を上げる。宇宙飛行士の言葉が地球の管制室に届く瞬間、彼が今まさに越えようとしている科学の境界や、足を踏み入れようとしている宇宙への驚異の念が、我々読者にも伝わってくる。そんな瞬間を、クラークはたくさん見せてくれた。けれどもそこには人間への愛があった。彼は我々にいった。無限の広がりをも前にしても、我々はとるに足りない存在などではないのだ。永遠に未来の岸辺に立ち続ける我々は、自分がちっぽけでな存在であることに屈辱を感じる必要などないのだ。

クラークの小説に描き出された月面都市や木星への有人飛行に関する技術的ビジョンは、スタンリー・キューブリックの手により壮大な映像として表現された（米国で1964年に初公開）。その両側には「岸边」の風景があった。1つは、「月を見るもの」と彼が名づけたヒトザルにおける人間意識の芽生えであり、もう1つは、宇宙時代のオデュッセウスが、星々のトンネルを通り抜けて、大きな変貌を遂げる直前の地球へと帰還する旅である。クラークはいった。我々は、「月を見るもの」として、あるいは「月面を歩くもの」として、常に歴史的一步を踏み出しながら、ある意味では、常に歴史以前のところにいる。一筋の太陽の光からまばゆい一日が始まるのを眺めることは、彼にとって大きな喜びだった。

1970年代、著名な数理論理学者となっていたダイソンは、最も遠い未来まで生き続ける生物の可能性を探求していた。これは、クラークの魂を揺さぶる着想だった。クラークは、次のように返信している。

宇宙の本当の歴史が始まるのは、今から数十億年後のことになるだろう。

その歴史は、ぼんやりと輝く恒星が発する赤い光と赤外線のみによって照らされることになる。その光は、我々人間の目にはほとんど見えない。

しかし、その環境に適応した奇妙な生物の目には、ほとんど永遠に続く薄暗がりも、色彩と美しさに満ちあふれて見えるのかもしれない。彼らは、自分たちの前に数兆年の未来が広がっていることを知るだろう。

彼らには、すべてを試み、すべてを知るための、無限の時間が与えられる。彼らは神のような存在となるだろう。彼らが獲得する力は、我々人間が想像するいかなる神をも凌ぐものとなるだろう。けれども彼らは、我々をうらやましく思うかもしれない。我々は、天地創造の輝かしい残光を浴び、若かりし日の宇宙の姿を知っているからである。

超越的なものを前にしたときに満ち足りた落ち着きを感じ、盲目的な信仰心ではなく知的な探究心に由来する驚異の念に希望を見いだせる資質は、科学者には多かれ少なかれ備わっているかもしれないが、一般にはめったにないものである。クラークは、その資質を広めることに生涯を捧げた。残された我々は、これを大切にしていかなければならない。

本記事の訳出には一部、『2001年宇宙の旅』伊藤典夫訳（早川書房刊）を参考にした。

著作権等の理由により画像を掲載することができません。

著作権等の理由により画像を掲載することができません。



上の写真は、映画『2001年宇宙の旅』より。

86歳のときのアーサー・C・クラーク。2003年スリランカの彼のオフィスで。

雑草が都会で生き抜くための進化

Weed's seeds evolve quickly in the city

都会の植物は、自分が育ったごく狭い地面に種子を落としやすいように進化した。

doi:10.1038/news.2008.639 / 3 March 2008

Katharine Sanderson

GILLES PRZETAK / ERIC IMBERT

植物は都市化によって急激な進化を強いられているが、そのような進化は絶滅の危機につながる危険性をはらんでいる。

タンポポに似た一年草の *Crepis sancta* は 2 種類の種子を作る。基本的にその場に落ちる重い種子と、風に乗って遠くまで飛んでいく軽い種子である。 *Proceedings of the National Academy of Sciences* 誌に論文を発表した¹ フランス国立科学研究所 (CNRS) の Pierre-Olivier Cheptou によれば、同国モンペリエ市で街路樹の根元のわずかな土に生える雑草は、わずか 12 年という短期間で、軽くて遠くまで飛ぶ種子ではなく重い種子を多く作るように進化したという。

Cheptou が最初にその傾向に気づいたのは、実際の都会環境という「フィールド」でのことであった。それが環境に起因するものではなく、遺伝子レベルの変化によるものであるのかどうかを確かめるため、Cheptou は田舎と都会の両方で種子を採取して温室で栽培した。それぞれ交雑しないように同じ仲間どうしでのみ受粉させ、花が終わると 2 種類の種子を集めて数を数えた。

実験の結果、重い種子の割合は、都会の種子から育った植物体が約 14 パーセント、田舎の種子から育った植物体が 10 パーセントであった。数学的モデルにより、この変化は約 10 世代の間に起こったものとはじき出された。これは植物にみられる進化として最速のものではないが、変化が起こる期間としては極めて短く、Cheptou は「あっという間です」と話す。

コンクリート・ジャングル

都会の植物は分断され、特定の孤立した場所の中だけで育つ。Cheptou は、



フランス・モンペリエ市内の道ばたに咲く *Crepis sancta* の花とその種子。種子には、落ちるように作られた重い種子 (上) と、飛ぶように冠毛のついた軽い種子 (下) の 2 種類がある。

種子がこうした都会の環境にばらまかれたときに、生育しにくい場所に落ちる確率を調べた。その結果、親の植物体が育った狭い地面にまっすぐ落ちる重い種子と比べ、小さな軽い種子が土に舞い降りて生育する可能性は 55 パーセント低いことがわかった。コンクリートに覆われずに生育可能な地面はモンペリエ市内にわずか 1 パーセントしかなく、軽い種子は狭い土の部分よりも駐車場などに着地しやすいのである。

そのため、重い種子を作ることは、都会の植物にとってすぐれた適応といえそうである。しかし、この戦略では遺伝的孤立のリスクが高まる。「分断された生育場所に定着すれば、当然ながら遺伝子流動 (交配などによって、異なる地域集団の間で遺伝子が交換されること) が妨げられます」と Cheptou は話す。遺伝子流動が妨げられた植物は、時の流れから取り残されるリスクを負うことになる。

コーネル大学 (米国ニューヨーク)

の植物学者である Karl Niklas は、「この進化のシナリオには潜在的な危険性があります」と語る。「環境が急速に変化した場合、局地的によく適応した集団は局地的絶滅への道を突き進み、やがて本当に消滅してしまう可能性があるのです」。

カリフォルニア大学ロサンゼルス校 (米国) の植物学者 Martin Cody も、「問題は、環境の変化に際し、局地的な植物集団が脆弱であるということです。遠くまで種子を飛ばす可能性を放棄してしまうと、もはや新しい豊かな地面には手が届かなくなってしまうでしょう」と口をそろえる。Cody は、海に浮かぶ離島で似たような結果を観察している。通常であれば風で運ばれるはずの種子が大きくなる方向に進化し、海の向こうに飛ばされる可能性が下がったのである。 ■

1. Cheptou P.-O. et al. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **105**, 3796-3799 (2008).

世界中で見つかった「雨をつくる」細菌

'Rain-making' bacteria found around the world

ある種の微生物はしばしば雲に乗って旅をしている。

doi:10.1038/news.2008.632 / 28 February 2008

Quirin Shiermeier

植物の霜害を引き起こす細菌は、雲の中で雨や雪が形成される過程を促進することもできる。空から降ってきたばかりの雪を調べる研究は、こうした「バイオ降水」が、これまで考えられていたよりもはるかに一般的に起きている可能性があることを明らかにした。

雨や雪が降るためには、雲の中で雨滴や氷の粒子が形成されなければならない。そのためには、凝結核となる微粒子（エアロゾル）が必要となる。こうした粒子のほとんどは鉱物に由来しているが、空中に漂っている細菌や菌類、小さな藻などの微生物も、同等の働きをすることができる。鉱物性のエアロゾルとは異なり、生物性のエアロゾルは0℃に近い比較的高い温度でも、雨や雪の形成を触媒することができる。

氷核活性をもつ微生物が降水に及ぼす影響は、これまで謎に包まれていた。雲の中でこうした微生物を発見できなかったことも、その大きな原因となっている。

雲の中の粒子を数える

今回、ルイジアナ州立大学（米国バトンルーージュ）の微生物学者 Brent Christner が率いるチームは、北米、ヨーロッパ、南極大陸で、中・高緯度のさまざまな地点で降ってきたばかりの雪を採集し、これらを調べて、雨をつくる微生物を分類した。

彼らはサンプルの雪をフィルターに通し、分離した粒子を容器の中の純水に混ぜてゆっくりと温度を下げていき、どの時点で水が凍ったかを詳細に観察した。サンプル中に含まれる核となる粒子の個数が多くなり、生物性の粒子の比率が高くなるほど、凝固点は高くなる。この2つの効果を分離するために、チームはサンプルを熱または化学薬品

で処理して水中の細菌を殺してから、再びサンプルの凝固点を調べた。

Christner らはこの方法で、溶けた雪 1 リットルにつき 4 ~ 120 個の氷核形成粒子を見つけた。これらの粒子のうち 69 ~ 100 パーセントがおそらく生物性である。この結果は、2 月 29 日に *Science* 誌にて発表された¹。

研究者たちは、すべてのサンプルに「雨をつくる」細菌が含まれていたことに驚いた。南極大陸の雪にさえ、フランスや米国モンタナ州の雪よりは少ないものの、いくつかの細菌が含まれていた。この結果は、微生物が雲に乗って長い距離を運ばれることができるという説に新たな証拠を追加した。また同時に、こうした微生物が、地球上のあらゆる地域で雨や雪の核となって降水を誘発している可能性を示唆している。

「我々は、雲の中にある最も活性の高い触媒の一部をほとんど無視していたという事実気づかされたのです」と Christner はいう。「実際、生物性の粒子は、降雪および降雨に関して非常に重要な役割を果たしているように思われます。その働きが特に重要になるのは、雲の温度が比較的高いときです」。

水の循環と微生物

雨をつくる細菌のほとんどは、病原体として生きている。こうした細菌は、比較的高い温度で凝固を促進する能力を利用して、餌とする植物の細胞壁を破壊している。一部の科学者は、細菌がもつこの凝固能は、雲に乗った細菌が速やかに地上に戻ることを可能にしており、微生物にとって有利に働いていると指摘する。

英国イーストアングリア大学の地球システム科学者である Tim Lenton は、「こうした生物が空中から地上に



空中に漂っている微生物は、水と一緒に雨として地上に降りてくる。

降りてくるために氷核活性を利用して可能性は極めて高いと考えられます」という。

雲に乗って長い距離を運ばれて降水と共に地上に戻ってくる能力が細菌にとって有利に働くという考え方は、Lenton が故 Bill Hamilton とともに 10 年前に提案したものであり、ガイア仮説の中で主要な役割を果たしている。ガイア仮説では、地球上の生物と無生物は複雑な相互作用により 1 つのシステムを形成しており、個々の生物はその中で調節機能を果たすことで、生物全般の繁栄をもたらしているとされている。

人間もまた、これらの制御プロセスに対して大きな影響を及ぼしている。単一栽培の拡大など、土地利用や林業、農業の変化は、空気中の微生物の構成を変えてしまう。生物性のエアロゾルが雨の形成に大きな役割を果たしている可能性が高まってきたことを考えると、そのような変化は、地球上の多くの地域の降水や気候に影響を及ぼす可能性がある。「大気科学者や気候学者は、そのことの意味について考えるべき時期に来ているのです」と Christner はいう。■

1. Christner, B. et al. *Science* **319**, 1214 (2008).
2. Hamilton, W. D. & Lenton, T. M. *Ethol. Ecol. Evol.* **10**, 1-16 (1998).

The Solar System's first breath

太陽系が最初に呼吸したガス

Nature Vol. 452 (259) / 20 March 2008

Eric Hand

科学者は、太陽系が誕生した当時の酸素同位体組成を測定することに成功した。この発見により、NASA の太陽探査機「ジェネシス」に与えられた最も重要な科学的使命が達成されたことになる。ちなみにこの探査機は、2004 年に宇宙から帰還した際に、減速用のパラシュートが開かずにユタ州の砂漠に激突した。

カリフォルニア大学ロサンゼルス校の宇宙化学者である Kevin MacKeegan は、「着陸はうまくいきませんでした、ジェネシス探査機の主要な科学的目標は、すべて達成されることになるでしょう」という。彼は 3 月 10 日に、テキサス州ヒューストンで開催された月惑星科学会議 (LPSC) において、今回の知見を発表した。

酸素の同位体の中で最も一般的なのは ^{16}O である。今回、太陽では地球に比べてこの ^{16}O の同位体比が高いことが明らかになったが、これは、地球と太陽の酸素同位体組成は同じであるという通説を覆す発見である。この発見は研究者に、太陽系が誕生した当時の

酸素同位体組成の基準点も与えてくれる。ジェネシス探査機は、太陽から噴き出す電離粒子の流れ（太陽風）を捕獲して持ち帰ってきた。太陽風は、太陽の中でも比較的变化の少ない外層から流出するため、その粒子の中には原始の酸素も含まれていると考えられる。

8 個の陽子と 8 個の中性子からなる ^{16}O は、地球上の酸素の 99.8 パーセントを占めている。 ^{17}O と ^{18}O の量はこれよりも少なく、その同位体比は太陽系の中の場所ごとに異なっている。科学者の測定によると、地球、火星、月、隕石では同位体比がわずかに異なっており、それぞれの場所に特有の酸素の指紋があるかのである。「我々は、酸素同位体の地図はもっていました」とマッキーガンは話す。「けれども、どちらが上かはわかっていなかったのです」。

研究者たちは、生まれたばかりの太陽における酸素同位体比を見いだすために骨を折ってきた。月には太陽風を遮蔽する大気がないため、その土壌には太陽から噴き出してきた酸素が埋められていると考えられていたが、ライバル関係にある 2 つのグループが月の土壌を分析したところ、互いに相いれない結果が出てしまった (*Nature* **440**, 751-752; 2006 参照)。この研究者の 1 人である Marc Chaussidon は、新しい知見により論争が解決されたことを喜んでいる。

フランスのナンシーにある石油化学・地質化学研究センターの宇宙化学者である Chaussidon は、「この点は、何年も前から問題になっていました」という。「誰もが、太陽の同位体組成は

地球や隕石と同じだろうと考えていました。しかし実際には、地球の同位体組成は太陽とは違っていたのです」。

この結果は、まさに大破した探査機から希ガスの同位体分析の結果などを回収したジェネシス探査機の科学者の勝利だった (A. Meshik *et al.* *Science* **318**, 433-435; 2007)。酸素は存在量が多く、反応性も高いため、その測定は困難である。MacKeegan らのグループは、太陽風からの酸素を含むシリコン・ウエハーの 3 ミリメートル四方の部分について質量分析を行った。

研究者たちは、まず、セシウムイオンビームを使ってサンプル表面の 20 ナノメートルを削り取り、地球の酸素による汚染を除去した。次に、真空中でイオンビームを使ってシリコントラップから原子を叩き出し、太陽の酸素同位体組成を測定した結果、 ^{16}O の同位体比が地球よりも大きいことを発見した。

今回の結果は、さらなる問題を提起すると Chaussidon はいう。今や、科学者たちは、地球と太陽の酸素同位体組成が異なっている理由と、その違いを生じさせた化学過程を解明しなければならないのだ。それがどのようなものであったにせよ、原始太陽系のガスが凝縮して固体粒子になり、さらにこれらが融合して惑星を形成する際に ^{16}O を吸い出したのが、この過程なのである。

この過程は、今や 45 億 6850 万歳になった太陽系で起きた最初の出来事の 1 つでもあった。Chaussidon によると、この謎めいた過程は、太陽系が誕生してから数百万年以内に ^{16}O をはぎ取ったはずであるという。 ■



ジェネシス探査機の収集装置は、太陽風に含まれる原子を捕獲した。

THE END OF THE BEGINNING

マラリアワクチン完成に向けて

Nature Vol.451 (1042-1046) / 28 February 2008

数十年の研究を経てようやく、先駆けとなるマラリアワクチンの臨床試験が最終段階に到達しそうである。マラリアとの闘いを取り上げたこの特集記事では、完璧にはほど遠いが、新しい方向性を示して何千人もの人命を救う可能性のあるワクチンについて、Brendan Maher が取材報告する。



マラリア原虫を媒介するハマダラカ。

1987年のこと、Rip Ballou はアイスクリームの紙製容器を自分の腕にテープで貼りつけた。それはまさにこの若い米国陸軍医が、医学の進歩に貢献しているところだった。容器の中では、腹をすかせた5匹の蚊が食事に取りかかろうとしている。あれは気持ちのいいものじゃなかったと、Ballou はしかめっ面をしつつ、「腕に襲いかかろうとする」蚊の一大団のことを思い出していった。これらの蚊には既にマラリア原虫が感染しており、自分もまもなくマラリアに感染することがわかっていたのだから、なおさら心は乱れた。

Ballou はウォルター・リード陸軍研究所 (WRAIR; 米国メリーランド州シルバースプリング) の同僚5人と、マラリアワクチンの候補の1つであるFSV-1の試験をしている最中だった。

彼ら6人は既に1年前にFSV-1を接種されており、今回は、接種の結果どのような免疫が生じているかを、実際に感染させて調べる段階だった。蚊の吸血から9日目に、ワクチンを打っていない1人の対照群被験者（被験者はいずれも志願者）は原虫検査で陽性反応が現れ、彼の全身から原虫を駆除するために薬剤が投与された。2人目の対照群被験者と3人のワクチン接種被験者も、マラリア原虫に対する抵抗性を示さず、すぐに同じ経過をたどり薬剤投与の処置を受けた。

11日目になって、6人の接種被験者のうちさらに1人の体調が悪くなった。海軍からWRAIRに出向していたStephen Hoffman が、サンディエゴでレクチャーを受けているときに体の震えに襲われたのである。12日目には、

Ballou がパーティーで不調を感じ始めた。その不調は、彼が飲んでいた自家醸造ビールのせいなのか、それとも彼の赤血球を破壊しているマラリア原虫のせいなのかははっきりしなかったが、彼は妻と車で帰宅した。まもなく悪寒と発熱を周期的に繰り返すようになり、経験したことのないような強い頭痛に襲われた。「それまでの人生であんなに体調が悪くなったことはなかった。この体験のおかげで、マラリアに対する強い畏怖の念がわいた」と彼はいう。ここまでで、接種被験者6人のうち5人が倒れたことになる。

しかし、6人目のワクチン接種者であるDaniel Gordonは、その後4週間以上たってもまだ大丈夫だった。単一のワクチンで初めてマラリアが予防できたのである¹。

P. COLLINS / WRAIR

この最初の希望の芽は、WRAIR と製薬会社である GlaxoSmithKline (GSK) 社の大規模な共同研究へと成長をとげた。この共同研究のおかげで、FSV-1 ワクチンから派生した RTS,S という奇妙な名前のワクチンが、世界で「最先端」のマラリアワクチンとなった。最先端というのは、薬の認可前に踏むべき段階の最後にあたる臨床試験の第 III 相 (フェーズ III) が、今年 9 月までに始まる可能性があるからである。これがうまくいけば、このワクチンは認可を受けて 2011 年までに使用できるだろう。

ここに至るために、Ballou たちは熱帯医学の道に進んだ多くの研究者と同様に、決断力、想像力、忍耐力の何たるかを身をもって示してくれた。また、この研究分野により特異なこと、つまり大金を要するというのだということもわかった。GSK 社と協力パートナーたちは次の臨床試験段階の完了までに、総計で 5 億ドル (約 500 億円) 以上を費やすことになるだろう。「マラリアワクチンを開発する場合、社会がその費用を負担せざるをえないだろうと我々は確信していた」と語るのは、ベルギーのリクセンサールにある研究施設でこのマラリアワクチンを研究している GSK

Biologicals 社の社長兼ゼネラルマネージャー、Jean Stéphenne である。

そして、この確信はここ数年で現実のものとなってきている。個人寄付者や各国政府は、発展途上諸国において予防接種の普及に努める GAVI アライアンス (ワクチン予防接種世界同盟) などのプロジェクトに、何億ドルも注ぎ込んでいるのだ。そして各国政府に対して、ワクチンが将来入手可能になった際の購入を誓約してあらかじめ一定金額を支払っておく、「事前買い取り制度 (advanced market commitment)」を約束すべきだという圧力がますます高まっている。

しかし、もし RTS,S がこうした制度で購入される最初のワクチンになるとしても、ワクチンとしての本来の目標にはほど遠いだろう。1987 年の最初の試行で予防できたのが 6 人のうちわずか 1 人という有効性が明らかになって以来、改善されてはきたものの、大幅に進歩したわけではない。感染に対する RTS,S の有効性はよくても部分的であり、おそらく 30% ぐらいかと思われる。なかには、このワクチンによって重症マラリアの程度が 50% 軽減できるのではないかと予測する向きもある。あるいは、最もマラリアにかかりやすい乳幼児がマラリア禍を生き残れる可能性を高めるには、それで十分かもしれない。しかし、有効性の高いワクチンというにはまだまだ十分ではないのである。

軍が起源

マラリア研究には、高温多湿地域で戦闘を行う陸海軍が以前から関心をもっていた。米軍がニューヨーク大学の放射線照射マラリア原虫に関する研究に資金提供を始めたのは、ベトナム戦争のさなかだった。その研究から、放射線照射したマラリア原虫は非感染性となり、なおかつ実験動物に免疫を付与できることがわかった。この研究成果は 1973 年の金字塔ともよべる論文²に発表された。その中で、放射線照射したスポロゾイトを接種したヒトにおいて、長期持続性の予防免疫が得られたことが報告

された。スポロゾイトはマラリア原虫の生活環の一時期にあたる虫体で、蚊の唾液腺に集まり、吸血時にヒト体内にもち込まれて肝臓まで移動する。

しかし、放射線照射したスポロゾイトはあまり実用的な手法として考えられていなかった。なぜなら、こうしたスポロゾイトを作製するには生きた蚊とヒトの血液が必要だったからである (Hoffman は現在、メリーランド州ロックビルに自身が設立した Sanaria 社でこの結論を再検討しているところである)。代わりに研究者たちは、放射線照射したスポロゾイトの何が免疫防御をもたらしたのか、また、どうやったら遺伝子操作の新技术で非感染性のスポロイドを大量生産できるかを探り出そうとした。

1980 年代初頭、米国立衛生研究所と WRAIR の研究グループがスポロゾイトに対する抗体を使用して、「スポロゾイト周囲」タンパク質 (CSP) を特定し、それに対応する遺伝子をクローン化した³。WRAIR との共同研究で、当時はペンシルベニア州フィラデルフィアにあった旧 SmithKline Beckman 社の研究所は、抗体の主要な標的とみられていたタンパク質がもつ反復パターンに照準を合わせていた。このタンパク質断片は、細菌にクローンとして導入した遺伝子から作り出され、FSV-1 の主要な成分となった。

その後の数年間で、フィラデルフィアにいる Ballou と SmithKline 社の研究者たちは、このテーマについて数通りの方法を試した。しかし SmithKline 社はワクチン開発事業の大部分をリクセンサールに移し、そこで最近、小規模だが機動力のある Recherche et Industrie Thérapeutiques という研究所を買収した。Ballou たちが自分の体で感染実験をしていたちょうど同じころ、Joe Cohen がリクセンサールで同プロジェクトを引き継ぎ、CSP に関する新たな計画を立てた。

Cohen は、CSP 由来の反復配列断片を実際のワクチンへ転用するにあたって、SmithKline 社が B 型肝炎の組み



1987 年に自らマラリアにかかろうとしている Rip Ballou。

換えワクチンである Engerix-B の開発成功から得た種々の知見を生かそうと考えた。Engerix-B の成分は、B 型肝炎ウイルスに由来し酵母で産生させたウイルス表面抗原タンパク質である。このタンパク質は十分な高濃度条件で自発的にウイルス様粒子を形成する。この粒子は、抗体のかかわる免疫系部分に対して、遊離型抗原タンパク質よりも大きい作用を及ぼす。Cohen は、CSP 由来の反復領域をこの肝炎ウイルス表面抗原タンパク質と融合させることで、CSP 断片が飾りのようについた同様の粒子を作製し、これでスプロゾイトを標的とする抗体の産生を引き起こすことができるのではないかと考えた。

ただし抗体だけでは免疫を誘発するのに十分でないという疑いが根強かったので、Cohen は、CSP の尾部末端に由来する断片も加えることにした。この部分は、免疫系のうち抗体とは別の防御機構、つまり T 細胞に感染細胞を攻撃させる仕組みに関与しているらしいと考えられていた。その結果できたのが Cohen いうところの「ダブルパンチ」で、抗体誘導反復配列 (R)、T 細胞白血球に認識される部分 (T)、そして B 型肝炎ウイルス表面抗原 (S) を含むタンパク質の遺伝子だった。

だが、これらすべてを添加しても、この表面抗原タンパク質には自己集合の能力が欠けていた。何度も細かい改良を重ね、Cohen はついに、自己集合能力を回復させる方法を探り当てた。RTS とただの S を 1:4 にするのである。こうして RTS,S は誕生した。

ワクチン製造工場

Cohen は、灰色のモジャモジャな髪をした、感じのいい礼儀正しい人である。彼は、RTS,S が開発されたリクセンサール研究施設周辺を来訪者に案内するときにはいつも、全員のためにドアを開けて押さえ、ぎこちないダンスのようなステップを踏んで、ふたたび列の先頭に立って歩いた。

Cohen が RTS,S の誕生に果たした

功績（実際、特許は彼の名前で登録されている）を、Ballou たちはいろいろ語ってくれたが、Cohen 自身はそうした賞賛にまったく関心を示さず、成功はチームの尽力によるものだとして強く主張している。しかし、彼が GSK 社のリクセンサール研究施設の平凡な建物の平凡なドアを開けて、訪問者たちをワクチン製造施設へ案内するときのようすは、間違いなく誇らしげである。長い廊下の片側にある膝までの高さの窓からは、発酵ルームが見渡せる。そこでは、クリーンルーム用の紙製スーツを着た技術者たちが、ディッシュ上の酵母のコロニーをピックアップし、1600 リットルのタンクいっぱいになるまで培養している。反対側に並んだ別の窓からは、さらに大勢の技術者たちが、たくさんのコンピュータを駆使して発酵をモニターしているのが見える。現在は試験稼働中だが、Cohen によると、この施設がもつ本来の処理能力でいったん稼働すれば、年間数千万本分の RTS,S ワクチンを製造できるだろうという。Cohen たちは、目前に差し迫っているフェーズ III 臨床試験では 1 万 6000 人の乳幼児を対象にしたいと考えており、そのために必要な人数分のワクチンを供給するのに十二分な製造能力がこの施設には既に備わっているのだ。この臨床試験は、アフリカ 7 か国の 10 か所の調査拠点で実施される予定である。

これは、このプロジェクトがいかに迅速に進行しているかを示す 1 つの指標となっている。研究施設から 20 キロメートル離れたブリュッセルでは、アフリカ各地からやってきた臨床試験参加の医師たちが、グランドパレスすぐ近くの、ほどよくしゃれたシェラトンホテルに到着している。その中に、タンザニアのバガモヨにある調査拠点のイファカラ保健研究開発センターを監督する Salim Abdulla がいた。彼は、調査拠点リーダーたちで構成される公的活動組織、臨床試験パートナーシップ委員会（年に 1 回会議が開催される）の現議長である。彼は甲高い笑い声を何度もあげ、



Joe Cohen は、RTS,S ワクチンに必要な遺伝子群を調整した。

30 時間の長旅を経て到着したことも、次の 2 日間が熾烈なものになることも気にしていないようだった。優先事項は、フェーズ III 臨床試験に加わることになるさまざまな調査拠点が、重症マラリアをどう定義するのかということである。その尺度はこれまでなかなか統一できなかった。「彼らは同じ医学校に通い、同じ講義を受けたはずなのに、意見が一致しないのです」と Abdulla はいう。ホテルのロビーでの話題は、ケニアにある 2 つの調査拠点の状況に集中した。ケニアでは、2007 年末に行われた選挙を巡って、武力衝突が続いている。

すぐれた設計のウイルス様粒子から国際政治や数千万ドル投入の臨床試験まで、委員会の議事は盛りだくさんであり、その日程は厳しいものであった。第一の要件は、RTS,S の費用に見合う最大級の免疫効果を得る方法を見いだすこと、すなわち適正なアジュバント（ワクチンの効果を増強する補助製剤）を選択することだった。エール大学の免疫学者である Charles Janeway がよく引き合いに出す言葉によれば、アジュバントは、ワクチン・メーカーの「表ざたにできない秘密」である。アジュバントは、水酸化アルミニウムなどの非生物性化学物質から細菌の細胞壁片まで多岐にわた

り、一緒に投与されるワクチンに対する免疫応答を増強させるが、その仕組みが解明され始めたのはごく最近である。1980年代に、Stéphenne はしばしば SmithKline 社に対して、リクセンサルに重点的に投資すべきだと意見した。その理由の1つは、アジュバント製剤をもっと改善すれば、開発がむずかしいワクチンの有効性を一段階引き上げることができるだろうというものだった。マラリア抑制では、感染したヒトの体内で複雑な生活環をもつ原虫に対する免疫という、これまでに類をみない機能をもつワクチンを目指しており、その中でアジュバントは忘れられた存在だった。

ところが、1990年に実施された RTS,S の第1回ヒト感染臨床試験によって、アジュバントが極めて重要なことが明らかになった。あるアジュバント製剤を使った場合には RTS,S の効果がな

かったが、別のアジュバント製剤を使ったところ、8人の被験者のうち2人で防御効果が現れ、T細胞応答の徴候がみられた。「関係者は色めき立った」と、当時 Ballou の部署で少佐だった Gray Heppner は語る。現在は WRAIR で大佐となっている Heppner は、軍のマラリア対策プログラムに関する広い知識をもち、そうした知識の共有に努めたいと考えている。

Heppner は、まずアカゲザルでの反応をみるための実験プロトコルを手早く作成した。この実験には、薄暗いサル飼育小屋で皮膚試験へのサルの反応を評価するという困難な作業を伴ったが、それを乗り越え、彼は勝利の報償を手にした。それは、チリ産樹木の *Quillaja saponaria* の抽出液である QS21 とホスホリル脂質 A (MPL) とを含む水中油型エマルジョンであった。この「AS02」

アジュバントを用いた第1回ヒト臨床試験は1996年に行われ、7人のうち6人という高率で免疫防御がみられた⁴。「あのときは、私たちにとって最高にうれしい瞬間だった」と Ballou はいう。

しかし、RTS,S について祝杯気分が大いに高まった一方で、気持ちを引き締めるような結果も出てきた。5人の被験者が RTS,S/AS02 の接種を受け、1回目の感染実験から6か月後に、もう一度アイスクリーム容器の実験を受けた。このときは、1人を除いて全員が体調を崩した⁵。このパターンは総じて、その後ずっと続いた。このワクチンの防御効果は、時間経過とともに急速に落ちたのである。

それにもかかわらず、得られた結果は現地調査へ移行するのに十分だとみなされた。1998年の夏、ガンビアの男性250人に RTS,S/AS02 が狂犬病

最近もしくは現在開発中のマラリアワクチンの一部

標的とする感染ステージ	ワクチン	抗原	フェーズ (相)	実施場所	開発者
赤外型原虫 (スポロゾイト細胞またはスポロゾイトの感染した肝細胞を標的とする)	RTS,S に AS01/AS02 を添加	スポロゾイト周囲タンパク質 (CSP)	Ib/Ilb	アフリカの複数拠点	GlaxoSmithKline 社
	鶏痘 (FP) 9/ 改変ワクシニアウイルス Ankara (MVA)、ME-TRAP	多エピトープトロンボスポンジン関連接着タンパク質 (ME-TRAP)	Ilb	ケニア	オックスフォード大学
	サルアデノウイルス /MVA	ME-TRAP	Ia/Ib	英国	オックスフォード大学
	肝臓感染ステージ抗原 (LSA) 1/AS02	LSA-1	Ia/Ila	米国	ウォルター・リード陸軍研究所 (WRAIR)
	ヒトアデノウイルス血清型 35 (AdHu35)	CSP	Ia	米国	Crucell 社
赤内型原虫 (ヒト赤血球に感染したメロゾイト細胞を標的とする)	熱帯熱マラリアタンパク質 (FMP) 1/AS02	MSP1 ₄₂	Ib/Ilb	ケニア/マリ	WRAIR
	頂端膜抗原 (AMA) 1/AS02	AMA1	Ia/Ila	米国	WRAIR
	両アレル型メロゾイト表面タンパク質 (MSP) 1 ₄₂ /Alum	MSP1	Ia	米国	米国衛生研究所 (NIH)
	AMA1 C1/Alum + CpG	AMA	Ia/Ib	米国/マリ	NIH
	pfAMA1-FVO _[25-545]	AMA1	Ia/Ib	オランダ/マリ	生物医学霊長類研究センター (オランダ)
	GMZ2	グルタミン酸に富むタンパク質 /MSP3	Ia	ドイツ	スタテンス血清研究所 (デンマーク)
	PfCP2.9	AMA1/MSP1 ₁₉	Ia	中国	Shanghai Wanxing 社
複数 (複数ステージの原虫を標的とする)	MSP3- 合成ペプチド長鎖	MSP3	Ib	タンザニア	パスツール研究所
	FP9/MVA ポリタンパク質	6 つの抗原	Ila	英国	オックスフォード大学
	PEV3a	AMA1/CSP	Ila	英国	Pevion 社
	アデノウイルス 5	AMA1/CSP	I/Ila	米国	米国海軍

ワクチンのどちらかを3回分接種し、15週間にわたって追跡調査した。盲検試験として行われたこの調査の、対照群と接種群の差異についての解析作業は、その翌年にリクセンサルで行われた。こうした解析は根気のいる作業である。このデータの意味を知っている統計学者たちは、調査における規則の順守率、対象の無作為化、有害事象、被験者の免疫原性など調査のあらゆる側面を踏まえて、実際に調査研究を行った研究者たちへ結果を報告した。彼らは、盲検試験のために、何の調査であるかこのときまでまったく知らなかったのである。聴衆に混じっていた Ballou は不安げだった。

解析の結果は解釈がむずかしいものだった。追跡調査中、RTS,S/AS02 ワクチンを接種された男性 131 人のうち 81 人で、血中に検出可能な数の原虫が認められた。対照群では、119 人のうち 80 人が検査で陽性だった⁶。前者が 62%、後者が 67% で、あまり差がなかったのである。Heppner はこう話す。「実感として、これは重要というにはあまりにも低い数字でした。ところが Ballou 博士が、『ちょっと待って。見てみる、臨床試験の最初のほうではワクチンの効果が出ている』といったのです」。実際、追跡調査の最初の 9 週間は、RTS,S/AS02 ワクチンは 70% もの有効性を示し、その後の 6 週間で徐々にゼロまで下がっていった。「何が起こったのかを知るため、追加のちょっとした調査と統計学者による解析が行われました」と Ballou は話す。彼らが被験者としたのは、さまざまな年齢層の成人であり、これらの成人の多くは過去に何度もマラリアにかかっていて自然免疫をある程度獲得していた。さらに事態を困惑させた要因として、感染者が出るにつれて、症例として数えられるはずの被験者プールが縮小していったことが挙げられる。

支援による恩恵

SmithKline 社、WRAIR、そしてガンビアの協力者たちはすぐさま、その

翌年の夏に、前回接種対象となった男性の一部に引き続き追加免疫を施すことを決定した。そして追跡調査から、RTS,S/AS02 ワクチンが 2 通りに働くことを示す強力な手がかりが得られた。感染を防御する場合と、感染はするが症状を弱める場合があるのだ。SmithKline 社は、このような防御と症状の緩和が可能なワクチンであれば、感染で最も被害を受けやすい人々の命を救えると判断した。最もマラリアにかかりやすいのは子どもたちである。アフリカでは、マラリアによる死亡数の 75% を 5 歳未満の乳幼児が占めていると考えられている。

そこで SmithKline 社は、今回の臨床試験の被験年齢層を下げて乳幼児を対象とすることに決めた。もしそうじゃなかったら、このプロジェクトは破綻していただろうと Ballou はいう。しかし同社はこの段階で、プロジェクトに支援の必要性を感じた。Ballou の記憶によれば、Stéphenne は彼と Cohen に、開発の推進にはもっと資金力のあるパートナーが必要だと話したという。Ballou はウイリアム・H・ゲイツ財団あてに、SmithKline 社のリスクのあるこのプロジェクトに対して 2500 万ドル（約 25 億円）の援助を依頼する提案書を書いた。最終的にゲイツ財団は、ワシントン州シアトルにある非営利組織の PATH を介し、5000 万ドル（約 50 億円）を投じてマラリアワクチン接種イニシアチブ（MVI）を設立した。Ballou は MVI を率いるよう依頼されたが固辞し、ほかのワクチンを研究するワシントン DC のバイオテック企業 MedImmune 社で仕事を待た。MVI の代表の座には、国立衛生研究所で各種ワクチン・イニシアチブのネットワークを取り仕切っていた Regina Rabinovitch が就任した。

そのころには Glaxo Wellcome 社と合併し GSK 社となっていた同社は、MVI を「乗せた」状態で、Pedro Alonso との共同研究を始めた。Pedro は、スペインのバルセロナ国際保健研究センターの研究者で、1996

年にモザンビークのマニサ保健所で現地調査拠点を発展させた人物だった。そうした拠点の準備を整えるには、保健所や研究施設を建築するだけでなく、現地のコミュニティに所属する何千人もの住人への支援活動やスタッフの研修、信頼できる物流の構築が必要である。物流には、輸送途中でワクチンの効果が失われないようにするのに必要な「冷蔵のリレー」などが含まれる。Alonso の調査拠点では、それまでで最大規模の RTS,S 臨床試験が行われた。マラリア 026 とよばれたこの調査では、RTS,S/AS02 の臨床試験のために 1～5 歳の幼児 2022 人という空前の規模の人数が最終的に登録された。Rabinovitch の後任として MVI を率いる Melinda Moree は、この調査が驚異的な規模になったのは、明確な結果を得るためだったと話す。この調査が RTS,S の運命を左右することになると考えられた。

MedImmune 社を退職してリクセンサールの GSK チームに加わっていた Ballou が、2003 年にこの調査活動に再び参加したとき、マラリア 026 はちょうど立ち上げの段階で、彼によれば、非常に前向きで明るい雰囲気包まれていたという。調査の解析はモザンビークの首都マプトで 8 月 9 日に行われ、Ballou や Cohen、その他の退役軍医たちにとって、その非常に長い「儀式」は満足のいくものだった。幼児 1600 人の大規模集団（コホート）で、ワクチン接種グループのほうが 37% も感染率が低かったのである。しかも、ワクチンによって重症マラリア感染率が 65% 低下したようだった（ただしこの数字はさらなる追跡データによって低くなると考えられる）⁷。このニュースを聞いたとき、「形容しがたい一瞬の静寂がその場を包み込みました。私はすぐに、これがマラリアに対抗できるワクチンになるとわかりました」と、Cohen は語った。

研究者たちは大喜びだったが、MVI の方針決定の担当者たちは手放して喜ぶわけにはいかなかった。「開発の継続

には、独自にゴーサインと中止の基準があったのです。その間にはグレーゾーンとよばれる領域があります。我々は、得られた結果がグレーゾーンに入らないよう願っていました」とMoreeはいう。しかし、結果はグレーゾーンに入ってしまった。「そのため、ちょっとした失望感が漂いました」。それでも、Moreeはさらなる臨床試験のために、ゲイツ財団の資金をMVIプロジェクトへと投入させた。「私はためらわずにその決断を再び下しました」と彼女はいう。

小規模なフェーズII臨床試験が数回続けて行われ、その中の1つマラリア038では、マニサにおいて生後10週目、14週目、18週目でワクチン接種を受けた乳児について安全性と有効性を調べた。結果は2007年10月に発表され、RTS,S/AS02ワクチンは安全であり、接種後3か月でおよそ65%、接種後6か月で35%の予防率になることが再度確認された⁸。この臨床試験「作戦」はアフリカ大陸全域に拡大して、さらに数か所の調査サイトが加わった。こうして1万6000人の幼児を登録したフェーズIII臨床試験という「ビッグショー」への準備がすべて整った。

MVIでシニアプログラムディレクターを務めるBarbara Savareseによれば、MVIはこのフェーズIII臨床試験のために1億700万ドル（約107億円）を確保しており、「そのすべてを使う」予定でいるという。この投資額は、実質的に現在のどのワクチン接種活動にもひけをとらないものだ。Ballouは語った（彼は現在、再び転職中で、今回はゲイツ財団へ入る）。

しかし、疑念はまだ残る。マラリア038の結果報告が掲載された*The Lancet*誌の同号コメントリーで、米軍マラリアワクチン・プログラムのJudith Epsteinは、RTS,S臨床試験が2つの試験グループの総数ではなく、時間事象解析として知られる手法にある程度依存していることを問題視している⁹。こうした解析は適切ではあるが、そのままでは、このワクチンを最終的に使うことになる人々に事態の全体像を伝えることはできないだろうと、彼女は話す。Hoffmanはもっと批判的である。「時間事象解析に基づいてワクチンを評価することが、不適切だとはいえません。しかし、重要なのは、その種の解析がどういう生物学的意味をもつのかということであり、その答えは、我々にはわからない、ということです」。つまり、ワクチン接種によって何が起きているのが正確にわからなければ、研究者は接種を受ける人々に対して、予想される事態を説明できるわけがないのである。

何もしないよりまし

ハーバード大学公衆衛生学部のDyann Wirthは、RTS,S臨床試験の研究者との共同研究を検討中であり、過去に行われた試験を引き合いに出し、このワクチン接種によって起きていることの可能性について説明している。「スポロゾイト・ワクチンの効果は、蚊帳の効果に似ています。感染を完全に防ぐことはできませんが、発症率を下げることはできます。おそらく、体内に侵入して感染を確立するスポロゾイトの数が少なくなるためだと解釈できます」。このように感

染するスポロゾイト数の減少は、ある意味、ワクチンの有効期間を延長する可能性がある。自然界ではたくさんの空腹の蚊が、1人の幼児に数十回もスポロゾイトを注入する可能性がある。もしワクチンが、マラリア発症につながるスポロゾイトの侵入回数を減少させるなら、たとえそれがほんの少しの期間でも、ワクチンの効果が消えるまでに子どもは自身の力で自然に多くの免疫を備えることができると考えられる。そうした子どもはこれからマラリアにかかるかもしれないが、衰弱するほどではないだろう。

この種の見解は、マラリア予防に楽観的ないくつかの根拠となる。1980年代と1990年代に殺虫剤処理した蚊帳の臨床試験が行われ、微妙な臨床マラリアの減少がみられたが、時としてそれと矛盾したどちらともつかない結果も観察された。プログラムの拡大した地域の中には、現在、幼児死亡率が50%、あるいはそれ以上減少しているという報告がある（*Nature* 2008年2月28日号 p.1047 参照）。マラリア制圧は既に、補助的な役割とみられがちな殺虫剤散布や薬剤、蚊帳など、多方面の産業がかかわる一大事業となっている。たとえ部分的な効果しかないワクチンでも、戦略上は役立つ要素となる可能性がある。ひょっとするとこれが、ゲイツ財団の長年の目標であるマラリア根絶の道へつながるかもしれない。

マラリアワクチン研究界出身の研究グループが2006年にまとめたマラリアワクチン技術ロードマップは、部分的に有効なワクチンが、現在マラリアについて考えるうえで役に立っているかを示している。このグループの2025年までの目標は、ワクチン利用者の80%で4年間発症を防ぐことだった。こうした目標は伝統的なワクチンが目指す目標であるが、さほど厳しい目標ではない。しかし、もっと早く達成できそうな目標として、グループは、重症マラリアを1年間で50%予防できるワクチンのほうが現実的に有利だと考えた。もし、重症マラリアに対するRTS,Sの有効性を示す結



果が続けば、かなりの成果が得られたことになるだろう。「重症マラリアに対して50%の有効性をもつワクチンを、アフリカで明日にでも計画できれば、我々は毎日1000～1500人の命を救う機会を得ることになるでしょう」と、MVIの現ディレクター、Christian Loucqは話す。

しかし、英国オックスフォード大学ジェンナー研究所のAdrian Hillはもう少し冷静な目で見ている。彼は、マラリア026臨床試験での第2コホートに関するAlonsoの研究グループの報告に対して懸念を抱いているのだ。感染率がかなり高い第2調査拠点の400人の被験者からなるコホートでは、6か月後時点の予防率はわずか11%とみられている。さらに、そのデータは臨床マラリアにおける差異をまるで示していなかった。調査にかかわった研究者たちは、この調査では臨床マラリアは（薬効評価の）主要評価項目に含まれておらず、初回感染までの時間を計測するよう計画されていたと主張している。しかしHillはまだ、フェーズIIIがどのように展開するのかを心配している。「第1コホートのようになるのか、それとも第2コホートのようにになってしまうのか、わからないのです」。

このワクチンに関するHillの疑念は、彼の目から見て「ワクチンを開発しているほかの12～15の研究グループとまったく交流していない」GSK社の独善的なやり方によって、さらなる不満となっている（表と同号p.1045参照）。彼を含めた人々は、フェーズII臨床試験でRTS,Sと組み合わせる別のワクチンが欲しいと考えており、それで有効性が大きく増強されるのではないかと考えている。例えばHeppnerによると、彼と同僚たちがマカクザルで行った研究の結果は、オランダのバイオテック企業CruCell社製のアデノウイルスを使ったワクチンとRTS,Sを併用することで、さらに高い効果が得られることを示唆しているという¹⁰。「私としては、過去にRTS,Sの改良で行われたのと同じように、この併用法を臨床的に評価する

道を開いてほしいのです」。Ballouは、このような併用法の研究の進展は「さまざまなビジネス上の理由」のために滞ってきたが、いくつかの共同研究は続いていると話す。

独力で進む

そのうちRTS,Sと別のワクチンを組み合わせた混合型のフェーズII臨床試験が可能になるかもしれないが、年内にもRTS,S単品でのフェーズIII臨床試験が発進する公算が大きい。GSK社は既に、フェーズIII臨床試験の先に控えるワクチン販売の段階まで見据えている。同社は、発展途上国のためにワクチンを購入する可能性のある公的機関や組織に大きく入り込んでおり、そうした機関や組織が、需要や接種1回分の価格の評価をしようとしているのである。（ここで興味深い付随効果がある。RTS,Sが分子的に見てB型肝炎ワクチンに非常によく似ていて、B型肝炎に対する免疫も得られるというのだ。ある保健機関職員の話によれば、これはさらに興味をそそられる話だった。）GSK社は巨大な利益を期待してはいない。しかし、投資の見返りが得られれば、この事業の持続が可能となり、よりすぐれたワクチンの製品化につなげることができるだろう。ビル・ゲイツは最近、「創造的資本主義」のモデル例として、GSK社のこれらの共同事業を挙げた。

一方、アフリカではこうした協力関係によってインフラや友好関係が築かれてきた。ブリュッセルで開催された調査拠点研究者の会議では、やがて行われる臨床試験を巡り、興奮で会場はどよめいた。RTS,Sプロジェクトは、Ballouが初めて腕に蚊のついたアイスクリーム容器を貼りつけてからおよそ25年後、ようやく完了する計画である。このプロジェクトの完了を見届けることになる多くのアフリカ人医師の1人に、Abdullaがいる。彼は快活だが、人生に疲れた様子の賢人といった風情を醸し出している。一部の地方官僚の腹立たしい態度を語るときにも、自分が何度マラリアに

かかったかを自問して少なくとも数十回はあることに気づいたときにも、彼は屈託なく笑っていた。彼は、フェーズIII臨床試験の結果について、まったく心配していない。また、Epsteinのコメンタリー⁹が示唆していたように、アフリカの母親たちがワクチン接種を受けた自分の子どもについて誤った安心感をもってしまふことも心配していない。母親たちは研究者や医師が考えているよりもずっと洞察力があり、さまざまな方法がどれも部分的にしか有効でないことや、有効性の向上のためには正しい組み合わせが大事であることを承知している。

うまくいけば、RTS,Sをそうした組み合わせの一要素にできることがフェーズIII臨床試験によって明らかになるだろう。しかし、Abdullaにとって最も重要なことは、たとえうまくいかなくとも研究のためのインフラは整備・維持され、たとえ困難な仕事をやったあげくにGSK社が手を引かざるを得なくなったとしても、将来の候補ワクチンを生み出せる臨床試験の「パイプライン」は残るということである。RTS,SのフェーズIII臨床試験がどんな結果になっても、蚊のついたアイスクリーム容器を腕に貼りつけて、世界で最も^{たち}質の悪い感染症の1つに短く鋭い一矢を報いようとするBallouのような有志はまた現れることだろう。そしてAbdullaのように、何度もマラリアに感染する生活を送りながら、こうした有志の献身的行動から得られた「果実」の恩恵にあずかろうとする研究者もまた現れてくるだろう。彼らの間に永続的な架け橋を築くことで、どんなワクチンにも負けないうくらい多くの永遠の恩恵がもたらされるはずである。 ■

Brendan MaherはNatureの特集記事編集長。

1. Ballou, W. R. et al. *Lancet* **8545**, 1277-1281 (1987).
2. Clyde, D. F., Most, H., McCarthy, V. C. & Vanderberg, J. P. *Am. J. Med. Sci.* **266**, 169-177 (1973).
3. Dame, J. B. et al. *Science* **225**, 593-599 (1984).
4. Stoute, J. A. et al. *N. Engl. J. Med.* **336**, 86-91 (1997).
5. Stoute, J. A. et al. *J. Infect. Dis.* **178**, 1139-1144 (1998).
6. Bojang, K. A. et al. *Lancet* **358**, 1927-1934 (2001).
7. Alonso, P. L. et al. *Lancet* **364**, 1411-1420 (2004).
8. Aponte, J. J. et al. *Lancet* **370**, 1543-1551 (2007).
9. Epstein, J. E. *Lancet* **370**, 1523-1524 (2007).
10. Stewart, V. A. et al. *Infect. Immun.* **75**, 2283-2290 (2007).



A flight to remember

永久飛行の夢

Nature Vol.451 (884-886) / 21 February 2008

燃料を使わずに永久に飛行する夢を抱いたパイロットは、太陽エネルギーを利用することを思いついた。太陽電池飛行機で夜通し飛行し続け、さらには世界を一周しようという計画について、Vicki Cleave 記者が取材した。

SOLAR IMPULSE/EPFL CLAUDIO LEONARDI

1903 年、ライト兄弟が製作したライトフライヤー号という 1 人乗り飛行機が、風の強い海岸で世界初の動力飛行に成功した。飛行距離は短かったが、動力飛行の歴史はここから始まった。それから 1 世紀あまりが過ぎた今、ソーラーインパルス号という新しい 1 人乗り飛行機が、地球を一周する記録破りの飛行に挑戦しようとしている。この飛行機の翼幅は長く、片方の翼の長さだけでオリバー・ライトの初回の飛行距離を上回っている。しかし、ソーラーインパルス号の最大の特徴は、80m の翼幅ではなく、その動力源と必要とする動力の少なさにある。この飛行機は太陽エネルギーのみを動力源としている。太陽電池の出力は合計 9kW 程度であり、ライトフライヤー号が搭載していた 1 基のエンジンの出力とほぼ同じである。

ライト兄弟の時代、飛行機は「空気よりも重い機械」とよばれていた。人々は

飛行機に不信感をもって、操縦するどころか、離陸することさえできないのではないかと考えていたからである。太陽電池による有人飛行の歴史も、同じような疑いを抱かせるものだった（コラム「太陽電池飛行機の歴史」を参照）。太陽電池飛行機のほとんどは現代の飛行機について私たちが抱いているイメージとかけ離れており、飛行速度は非常に遅く、不恰好な骨組みは天候に翻弄される。しかし、ソーラーインパルス号で世界を一周しようとしているパイロットたちは、一度に最大 5 日間、太陽の照らない夜も飛行し続けることを計画している。

9100 万米ドル（約 91 億円）にのぼるソーラーインパルス号計画を進めているのは、スイスの気球パイロットの Bertrand Piccard である。彼は、1999 年にブライトリングオービター 3 号という気球で初のノンストップ世界一周飛行に成功したパイロットの 1 人と

してすでに記録集に載っているが、ソーラーインパルス号の世界一周飛行にもパイロットの 1 人として参加する予定である。Piccard は冒険家の家系に生まれた。彼の祖父の Auguste は、1930 年代に気球で高度 23km まで上昇し、当時の記録を塗り替えた。彼の父の Jacques は、マリアナ海溝のチャレンジャー海淵に潜り、人類が到達した最も深い場所を訪れた 2 人のうちの 1 人となった。

Piccard は、ブライトリングオービター 3 号を降りた直後から、太陽電池飛行機による世界一周飛行を考え始めたという。「マスコミは、1999 年の私の世界一周気球飛行を、『あらゆる冒険が成し遂げられた今、最後に残った冒険』だと報道しました。私は当時まだ 41 歳で、すべての冒険が成し遂げられてしまったのなら、残念なことだと思っていました」。

彼は、世界一周気球飛行に極めて大量の燃料が必要だったことに失望していた。離陸時には4トン近くあった液体プロパンが、着陸時にはわずか40kgしか残っていなかったのである。「燃料や航続時間の制限は非常に厳しいものでした。大西洋での風がもっと弱かったら、私たちは途中で不時着水することになり、世界一周は果たせなかったでしょう。燃料を必要とせず、航続時間の制限もなく、昼も夜も飛び続けられる航空機があれば、どんなによいだろうと思ったのです」と彼は話す。

燃料を積まずに飛行したいと考えたのは、Piccardが最初ではない。25年以上前、米国カリフォルニア州モンロビアにあるエアロバイロメント社の航空エンジニアのPaul MacCreadyは、太陽電池が作り出す小さな電力で飛ぶことのできる、軽量で低速の飛行機を製作した。ゴッサマーペンギン号と名づけられたこの飛行機は、パイロットを含めない重量は31kgに満たず、地面に対する速度は自転車よりも遅かった。計画されているソーラーインパルス号は、パイロットを含めた最大重量が2000kgあり、夜間飛行のためにエネルギーを蓄える充電電池が、その約4分の1を占めている。すべてがうまくいけば、ソーラーインパルス号は時速50～100kmの速度で飛行し、世界一周の途中でパイロットの交代のために5回着陸することになる。

太陽電池飛行機での世界一周は、孤独なパイロットにとって、いわゆる「実質本位の空の旅」になる。パイロットは、80℃から－60℃までの極端な温度から自分を守ってくれるごんまりしたコックピットの中で、一度に最大5日間、窮屈な同じ姿勢に耐えることになる。パイロットの1人であり、このプロジェクトの最高責任者であるAndré Borschbergは「睡眠の取り方や、注意力を持続させる方法などの問題は、まだ解決していません」と話す。

パイロットたちは、この低速の飛行機で何時間も暗闇の中を飛行するときに、

最も警戒しなければならないだろう。無人太陽電池飛行機はすでに夜間飛行を行っているが、有人太陽電池飛行機で一度に6時間以上飛び続けた例はない。ソーラーインパルス号のチームは、低高度への滑空と、電池を動力源とすることを組み合わせて、夜をやり過ごそうと計画している。ソーラーインパルス号は、日中には最高で高度12kmまで上昇するが、日が暮れると高度1kmまで降下する。低高度では空気の密度が高いため、飛行機の速度は遅くなり、消費電力も少なくなるからである。

天候の予測がかぎ

しかし、最大の課題は天候だろう。軽量で低速のソーラーインパルス号は、強風や乱気流に対応することができない。「この飛行機は、最大級の旅客機に匹敵する大きさを持ちながら、どんな風にも反応してしまうのです」とBorschbergは話す。超大型旅客機のエアバスA380よりもわずかに長い翼幅をもつソーラーインパルス号の飛び方は、ライトフライヤー号よりもハンググライダーに近いと考えられている。

飛行機は、最も天気のよい時間帯を選んで離陸することができるが、夜間の降下の間は風と乱気流のなすがままになる。「夜間に向かい風が吹くと、夜の時間が長くなります。夜が長くなれば、それだけ電池の残量が足りなくなるおそれがあります」とBorschbergは話す。夜明けを迎えるたびに、そのありがたさが増していくだろう。パイロットも飛行機も、エネルギーに余裕がなくなっていくからだ。

太陽電池飛行の専門家の多くはパイロットであるが、彼らは、このプロジェクトは成功しようと考えている。Piccardは、プロジェクトを立ち上げる前にMacCreadyにこの計画を打ち明けて、「飛行機のできが非常によく、めったにないほど良好な気象条件に恵まれるなら、実現は可能」という意見をもらっていた。「私たちの初飛行が実現しないうちに、彼が亡くなってしまったことが、



André Borschberg（左）とBertrand Piccardは、ソーラーインパルス号のパイロットとして世界一周飛行に挑戦する。

悲しくなりません」とPiccardは話す。

英国の防衛関連技術企業であるキネティクス社が開発したゼフィール号の技術ディレクターで、無人太陽電池飛行の最長記録保持者であるChris Kelleherの見解も、MacCreadyと同様である。「これは実現可能な計画です」と彼はいう。「問題は、飛行の高度と速度、そして気象条件です」。ソーラーインパルス号よりもはるかに小さなゼフィール号を地上で操縦するKelleherは、高度が約18km以上になれば、操縦は容易になると説明する。「高高度の風は規模が大きいため、ゼフィール号は大きな定期線旅客機のように飛行することができ、気塊の中をごくゆっくりと進んでいきます」。

ソーラーインパルス号には人が乗っているのに、ゼフィール号ほど高く飛ぶことはできない。ゆえに、このプロジェクトを成功させるためには気象の予測が極めて重要になるとKelleherは考えている。「気象条件が安定していれば、天候を予測して低高度を飛行することは可能です」。

しかし、安定した気象条件を期待できる時期は、どのくらいあるのだろうか？ 計画では、飛行機ができるだけ多くの日光を受けつつ、熱帯の最悪の荒天をできるだけ避けられるように、北回帰線に沿った飛行経路をとることになっている。気象予測が計画立案の最も重要な部分の1つになるだろうという点につ

いては、Borschberg も同意している。「離陸時の計画を立てるのはむずかしくありません。いつ離陸するかは自分で決めればよいからです。着陸時の状況は不確実なので、計画を立てるのはむずかしくなります」。

ソーラーインパルス号のチームは、自分たちの天気予測システムを試すために、昨年5月から飛行シミュレーションを行っている。研究者たちは、ソーラーインパルス号の性能を模擬し、さまざまな気象条件での飛行を再現できるシミュレーターを使った。「シミュレーターを使えば、この飛行機をほぼ実際と同じ条件の中で飛ばすことができます」と Borschberg は話す。

シミュレーションからは、いくつかの

貴重な教訓が得られた。「私たちは、飛行が予想よりも長くなる可能性があることを知りました。また、『これから5日間は絶対に大丈夫だ』などという確信をもって離陸するのは、不可能であることもわかりました」と Piccard は話す。悪天候を避けるためには、臨機応変に飛行していかなければならない。「ハワイからフロリダ州マイアミに向かうシミュレーションをしたときには、メキシコ湾の大きな嵐のために、アリゾナ州フェニックスで着陸しなければなりませんでした。私たちは柔軟になることを学びました」と Piccard は話す。

試行錯誤

初期の太陽電池飛行機も悪天候と闘っ

てきた。その結果はいろいろだった。ゴッサマーペンギン号の後継機であるソーラーチャレンジャー号は、1981年、白いふわふわした雲の浮かんだ晴れた日に英仏海峡を横断する飛行を成し遂げた。しかし、1980年代からエアロバイロンメント社で働く Bob Curtin は、「実際にはかなり天候は荒れていて、空には雲が多かった」と振り返る。しかし、ソーラーチャレンジャー号は、巨大なソーラーインパルス号と比べれば、小さな軽量の飛行機のように飛行した。

エアロバイロンメント社と米航空宇宙局（NASA）が製作した超軽量無人飛行機のヘリオス号は、最後の飛行で乱気流にうまく対応することができなかつ

太陽電池飛行機の歴史

記録によると、太陽電池飛行機が初めて空を飛んだのは1974年11月4日のことだった。この飛行機はサンライズ1号という無人飛行機で、電動模型飛行機部品会社であるアストロフライト社（カリフォルニア州）の Robert Boucher が、遠隔操縦によりモハベ砂漠のカタパルトから離陸させた。

最初に有人飛行に成功した太陽電池航空機はゴッサマーペンギン号だった。これは、1979年に英仏海峡を横断した人力飛行機のゴッサマーア

ルバトロス号を小さくしたものであり、エアロバイロンメント社（カリフォルニア州モンロビア）の Paul MacCready が設計した。ゴッサマーペンギン号の翼幅は22mで、3km以上の距離を飛んだ。太陽電池パネルの発電力は、わずか541Wだった。

ゴッサマーペンギン号の後継機であるソーラーチャレンジャー号は、1981年に英仏海峡を横断し、262kmの距離を飛んだ。翼幅はわずか14mと小さかったが、太陽電池の発電力は約2600Wで、

高度4.4kmまで上昇することができた。

エアロバイロンメント社はNASAと協力して、人工衛星の代わりとなり、偵察用に使える無人太陽電池飛行機の設計に取り組んだ。彼らが協力して作り上げたのが、14個のモーターを備えた翼幅75mの超軽量全翼飛行機ヘリオス号だった。その試作機は、2001年にロケット以外の動力による航空機の公式世界記録高度である29.5kmまで上昇し、29km以上の高度を40分以上にわたり飛び続けた。ヘリオス号は2003年に太平洋上空で空中分解した。

民間の功績では、有人グ

ライダーと太陽電池飛行機を組み合わせたサンシーカー号もある。Eric Raymond は、1990年にサンシーカー号に乗り、ほぼ2か月にわたる21の行程により米国を横断した。Alan Cocconi の遠隔操縦太陽電池飛行機のソーロング号は、2005年に48時間にわたって飛び続けた。Raymond はソーラーインパルス号のチームの一員であり、Cocconi はその重要なアドバイザーである。

Cocconi の無人飛行の最長記録は、2007年にキネティック社が開発したゼフィール号によって破られた。ゼフィール号は54時間飛び続けた。

V.C.



ゴッサマーペンギン号



ソーラーチャレンジャー号



ヘリオス号

た。ヘリオス号の巨大な全翼構造（胴体や尾翼がほとんどなく、全体が翼のようにになっている構造）は、飛行中はカーブした形になるように設計されていて、ある程度の乱気流には対処することができた。ヘリオス号は、高高度を飛ぶ航続時間の長い飛行機の開発をめざす NASA のプロジェクトの一環として製作され、高度 29km 以上を飛ぶことができた。しかし、2003 年に長距離飛行記録を作ろうとしていたときに、カーブした翼が制御不能な振動を始め、ヘリオス号は太平洋上空でばらばらになってしまった。ヘリオス号とは異なり、ソーラーインパルス号には伝統的な固い翼が使われているため、翼の振動により空中分解する心配はないが、風に翻弄されることになるだろう。とはいえ Piccard は、「この設計を選んだいちばんの理由は、コックピットを組み込む必要があったからです」といっている。

ソーラーインパルス号の開発に携わっている多国籍チームは、天候の予測がむずかしいことを考慮して、最終設計には既存の技術だけを使うことになるだろう。それは賢明な選択である。2003 年にこの計画の可能性を検討したときには、3～4 年のうちに利用可能になりそうな技術進歩は考慮に入れたが、技術の大躍進は当てになかった。

例えば、このときの検討では、単結晶太陽電池の効率は 20% になるだろうと予測されたが、現在では約 22% になっている。太陽電池の厚さはわずか 130 μ m で、粉々になることなく翼の上面に組み込むだけの柔軟性がある。また、充電可能なリチウム電池のエネルギー貯蔵密度は 1kg あたり 200W 時になるだろうと予測されたが、この予測も的中した。

ソーラーインパルス号の設計は、これらの技術を使う方向で固定された。今後の挑戦は、科学的なものではなく、工学的なものになる。「技術はすでに決まっているので、あとはエネルギー消費量を減らすことを考えることになります」と Borschberg は話す。

困難を乗り越えて

現在、プロジェクトが必要とする 4 つの主要スポンサーのうちの 3 つが決まり、計画に必要な資金の 3 分の 2 が確保されている。チームは、翼幅 61m の小型の試作機の製作に着手した。試作機の試験飛行は今年中に行われる予定であり、夜を徹した飛行を可能にする方法について、さらによりアイデアが得られるはずである。チームは、試作機から得られる教訓を全体設計にフィードバックして、2009 年から 2010 年にかけてフルサイズの飛行機を製作する。順調にいけば、2011 年には世界一周飛行に挑戦することになる。

ソーラーインパルス号が離陸してから、その推移は注意深く見守られることになるだろう。自身が曲芸飛行パイロットであり、ソーラーインパルス号を操縦するチャンスがあれば大喜びすると思われる Kelleher は、「私たちは、ソーラーインパルス号にとっても興味をもっています」という。エネルギー効率と軽さを追求したソーラーインパルス号のことを、彼は「可能性の芸術作品」だと考えている。しかし、彼の会社は、通信衛星の代替となる可能性のある無人太陽電池飛行機のほうに、より一層の関心をもっている。人工衛星を使ったデータのやりとりには高いコストがかかるが、ゼフィール号などを使えば、安いコストで情報を中継できる可能性がある。「私たちは、無人太陽電池飛行機が人工衛星に取って代わるようになるとは思っていませんが、人工衛星が不得手な仕事の多くをこなしたり、ずっと安いコストで引き受けたりすることはできと思っています」と Kelleher は話す。

ヘリオス号の墜落以来、エアロバイロンメント社の太陽電池飛行機の研究は中断している。けれども現在、同社の事業開発担当副社長になっている Curtin は、太陽電池飛行機には将来性があるとみている。彼は、低動力での飛行から同社が学んだことのすべてが、通信の中継と観測のための無人高高度飛行機であるグローバルオブザー

バー号のプロジェクトに応用されていると指摘する。グローバルオブザーバー号は、液体水素を使った内燃機関から動力を得て、一度に 1 週間は飛び続けられるものになる予定である。

Curtin の説明によると、エアロエンバイロンメント社がこのプロジェクトに太陽電池ではなく水素を使うことにしたのは、グローバルオブザーバー号のペイロード（有効搭載量）が約 181kg と大きいからであるという。これは、ゼフィール号の 30kg に比べてはるかに大きい。現在の太陽電池で飛行機を飛ばすためには、昼が長く、夜が短い必要があるため、低緯度でしか使えないという事情もある。

けれども Curtin は、太陽電池と充電電池の技術の改良により、再び太陽エネルギーが使われるようになる可能性は残っているという。「本当に将来性があるのは、おそらく無人飛行機のほうでしょう。永久に飛び続ける飛行機を開発しようとしていて、それが現実のものになるのなら、人間を載せるのは賢明なことではないからです」と彼は話す。

Piccard は、MacCready の挑戦が自分に影響を及ぼしたように、燃料を使わずに飛行するという自分の夢が、エネルギー消費についての人々の考えを変えることを期待している。そうした夢を追いかけるのはなぜかと尋ねられたとき、Piccard も MacCready も、1927 年のチャールズ・リンドバークの単独大西洋横断飛行を理由に挙げた。「リンドバークが 1 人で飛行機に乗ったのは、残りのペイロードをガソリンにあてなければならなかったからです」と Piccard はいう。しかし、その 35 年後には、300 人の乗客を載せた旅客機が大西洋を横断するようになっていた。Piccard は、今回のプロジェクトでは 1 人で飛行機に乗ることになるが、近い将来、太陽電池飛行機のパイロットは孤独ではなくなるだろうと考えている。 ■

Vicki Cleave は *Nature Materials* のシニアエディター。

メダカに集まる熱い視線

日本が誇るバイオリソースで、
何が、どう研究されているのか

西村 尚子 (サイエンスライター)



メダカ（ニホンメダカ）。上から雄、雌、雌が性転換して雄になった個体。

古来より日本人に親しまれているメダカ。生物学の分野でも日本では伝統的にメダカが用いられ、これまでに発生や遺伝学などに関する多くの知見が蓄積されてきた。さらに最近、日本独自のチームが全ゲノムの完全解読を終えたことで、メダカがモデル生物として国際的に活躍する場が広がっている。

生物学は線虫、ショウジョウバエ、マウスなどの「モデル生物」を対象にして進められることが多い。これらの生物は、遺伝的にどのような特徴をもつか、体や行動に異常がみられるかといったことが詳細に調べられており、おのこの系統ごとに厳密に管理されたうえで、飼育や交配が行われている。

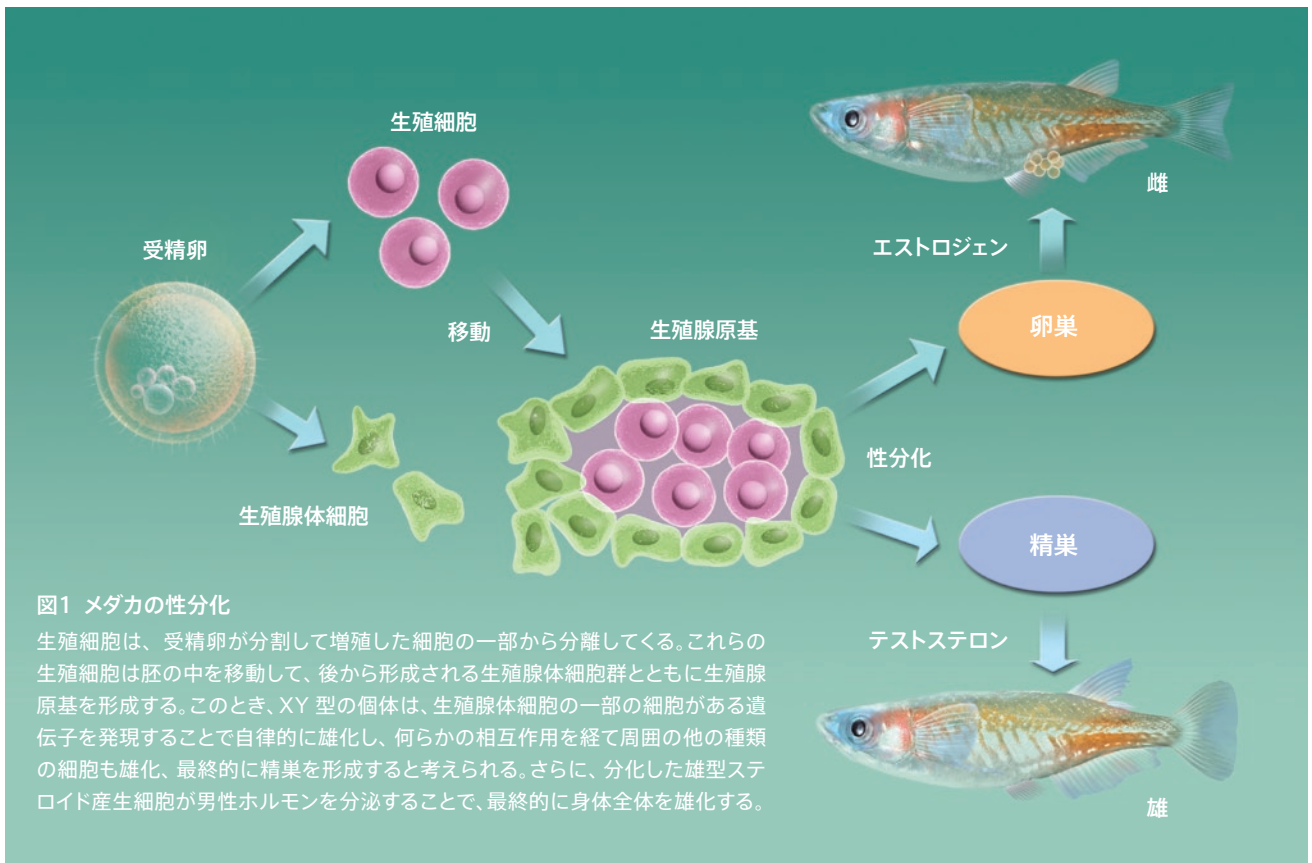
こうしたモデル生物は欧米で開発されたものが多く、そのゲノム解読も欧米を中心に進められたものが大半である。ヒトのゲノムプロジェクトがアメリカ主導のもとに完了したことはよく知られる

が、前述の線虫、ショウジョウバエ、マウスについても欧米を中心にして解読が終えられた。日本は「ゲノムの解読能」という点では世界トップのレベルを誇るが、ホヤなどの例外を除いて、いつも欧米チームに協力する形をとってきた。

ところが2007年、「ある生物」のゲノムを日本のチームだけで解読するという快挙がなされた。「ある生物」とは、日本人にとっては馴染みの小さな淡水魚、メダカである。実は日本では、生物学の研究材料として古くからメダカが使われてきた。例えば1920年代には、

体の色がどのように遺伝するかを調べる遺伝学に用いられ、1950年代以降は、さまざまな生理学的な実験、初期発生や生殖に関する研究などに用いられた。

日本発のメダカゲノムの解読完了は、2007年6月7日発行の *Nature* で報告され¹、世界中に大きなインパクトを与えた。「メダカという日本の淡水魚は、そんなにすぐれたモデル生物なのか」。海外の研究者たちの驚きと興味は相当なものだったらしい。というのは、伝統的な日本のメダカ研究は海外を意識せずに淡々と進められてきたもので、国内



での情報交換すら十分とはいえないほどだったからである。欧米では、淡水魚のモデル生物といえばゼブラフィッシュを使うのが当たり前の状況だった。

愛すべき小さな淡水魚

日本人なら「メダカの学校は川の中…」で始まる童謡を知らない人はいないであろう。この歌は、戦後まもない小田原市内の用水路のメダカをモデルに作られたようだが、メダカといえば北海道を除く列島各地の田や小川に分布し、日本人にとって最も身近な淡水魚だった。一方で、観賞魚としても古くから愛されてきた。小さな体の割に大きな頭や目をもつユーモラスな姿や、手軽に飼育できること、人目に触れる水面で群れることなどが好まれた理由である。

実際に飼ってみるとわかるが、メダカは熱帯魚などに比べて非常に扱いやす

い。餌や水温、水中の酸素濃度などの点で細かい神経を使う必要はなく、比較的狭い水槽でも元気に泳ぎ回る。餌はミジンコなどの動物性プランクトンを好むが、植物性プランクトンも食べる雑食性で、市販のドライフードでも十分育つ。体長は2～3センチほどしかなく、日本の淡水魚としては最小である。胸びれと腹びれはメスの方が大きく、背びれと尾びれはオスの方が大きいのが特徴で、素人でも簡単に見分けることができる。

繁殖も容易で、何匹か飼いつ続けると、いつの間にか子メダカが増えている感じである。ふ化後は約2～6か月で生殖可能となり、寿命は1～2年ほど。その間、雌は何度も産卵をくりかえして、直径1.3ミリほどの卵を水草からみつけていく。卵は約2週間でふ化し、卵黄を吸収しつつくと微生物を食べて成長する。

ゆらぐ性と性分化

では、メダカを使ってどのような研究が進められ、どのような成果がもたらされているのだろうか。ここでは、成果が上がりつつある代表的な研究をいくつか紹介したい。

基礎生物学研究所の田中実准教授は、メダカの細胞レベルの雌雄差を調べることで、脊椎動物の性分化の仕組みに迫ろうとしている。ヒトを含む多くの動物は、雌に生まれついたら雌のまま、雄に生まれついたら雄のまま成長し、途中で性が変わってしまうことはない。メダカはヒトと同様に、1セットの性染色体をもち、その組み合わせがXYだと雄に、XXだと雌になる。発生の初期段階においてXY型の「生殖腺のもと（生殖腺原基）」は雄型の細胞に分化し、そこから精巣が作られる。XX型の場合には、生殖腺原基が雌型の細胞に

分化した後に卵巣が作られる。このように生殖腺の性が決まった後、精巣や卵巣からはテストステロンやエストロゲンなどの性ステロイドホルモンが作られるようになり、それが全身に作用すると、胸びれ、背びれ、尾びれなどに身体全体の雌雄差がもたらされる（図1）。

田中准教授は、発生初期の細胞を数個だけ蛍光色素で標識する技術を独自に開発し、生殖腺と生殖細胞が胚のどこから出現するのか調べた。その結果、胚の特定の部位（側方後端部）に生殖腺を作るための領域があり、そこに「別の領域で作られた生殖細胞」が移動し、互いの細胞が相互作用することで完成された生殖腺になることを突き止めた。

次に、生殖細胞の生殖腺への移動を阻害した場合に、そのメダカの性がどうなるかを調べ、実に興味深い結果をも

たらした。「これらのメダカは卵も精子も作ることができなくなりますが、性染色体がXY型であろうがXX型であろうが、身体の性がいずれも雄型になってしまいました（P.22の写真参照）」と田中准教授。これらのメダカは一見したところ、行動も雄型を示しているようだという。つまり、性染色体がXX型であるにもかかわらず、生殖細胞がないと、身体の性、つまり「体細胞の性」が雄型に性転換してしまうことが明らかになったというのである²。

田中准教授は「ヒトやメダカは、たまたま性決定を染色体上の特定の遺伝子に依存しているが、本来の性は、その生物種の生存に都合のよいように決めればよいはず」と考えており、「細胞レベルでゆらぐ、あいまいな性を制御することこそが、性分化機構として重要な

のではないのでしょうか」とコメントする。今後は、メダカでみられたような「性のゆらぎ」がどのような原理でもたらされるのか、生殖細胞や生殖原基を作るための幹細胞にも性差があるのか、といった難題に取り組みたいとしている。

色覚の進化と行動への影響

東京大学大学院新領域創成科学科の河村正二准教授は、進化の道筋を遺伝子から行動に至るさまざまなレベルで解析するためにメダカを使っている。テーマは「色覚」である。ヒトは世界を3色型のカラー映像としてとらえているが、実は、ほ乳類の大半は2色型の色覚しかもたない。恐竜が繁栄していた時代に夜行性になり、それまでもっていた色覚のレパートリーを大幅に縮小させたためだとされている。ところが、その後、森林の樹上で生活することなどにより、霊長類だけが緑を背景に日の光でものがよく見える「解像度のよい3色型色覚」を手に入れた。「ただし、霊長類でも4色型色覚をもつ鳥類、爬虫類、魚類にはありません。なかでも魚の視覚ははずばぬけてすぐれています」と河村准教授。

具体的に調べているのは、光を情報として受け取るオプシンというタンパク質のはたらきである。オプシンは、網膜にある視細胞の細胞膜表面に局在する7回膜貫通型のタンパク質で、錐体視細胞のオプシンとしては受け取る光の波長が異なる4種（赤型、緑型、青型、UV型）が知られている。

河村准教授はまず、ゼブラフィッシュがどのような錐体オプシンをもつのかを、遺伝子の配列レベルで調べてみた。「その結果、赤型オプシン遺伝子が2種、緑型オプシン遺伝子が4種、青型オプシンが1種、UV型オプシンが1種と、合計8種もあることがわかり（ヒトでは合計3種）、同型のオプシンでも種類によって吸収する波長や遺伝子の発現パターンが異なることがわかりました^{3,4}」と話す。ただし、ゼブラフィッシュでは、こうした遺伝子が異なる環境に

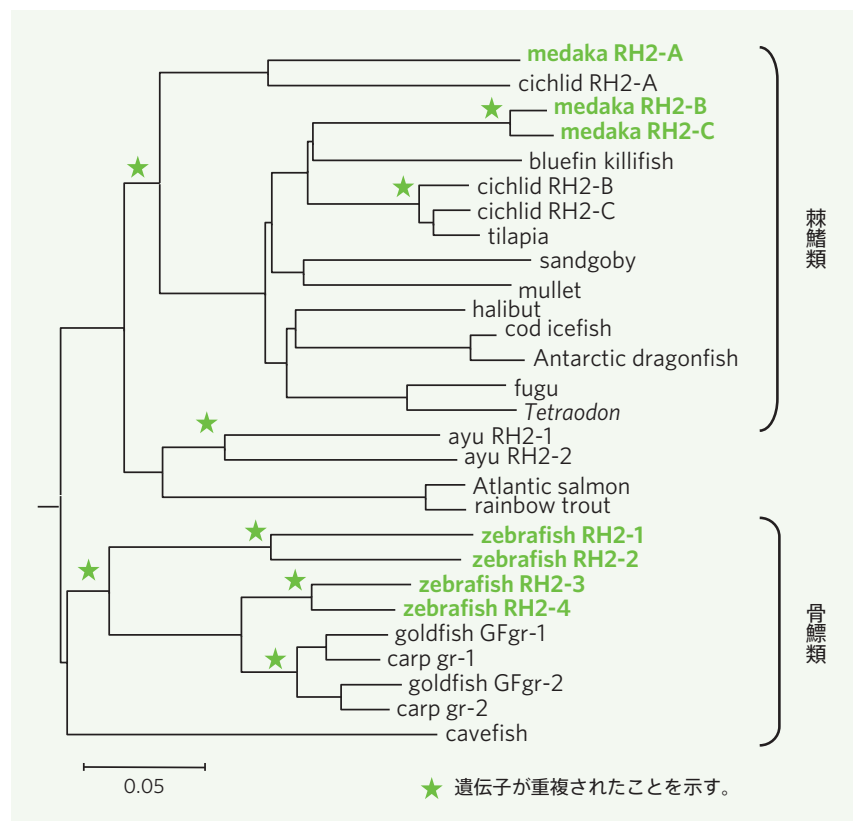


図2 光を情報として受け取る働きをするオプシン遺伝子の1つ、RH2-A遺伝子の進化を表す系統樹。左下のスケールバーは5%のアミノ酸置換、すなわち、「100アミノ酸あたり5個の置換」という意味である。

よってどのように変化し、それぞれの環境に適応していったのかを調べるのがむずしかったという。ゼブラフィッシュでは、メダカのように異なる環境に由来する系統があまり知られていないからである。

そこで河村准教授は、ゼブラフィッシュで得られた情報をもとにメダカのオブシン遺伝子も調べ上げ、例えば緑型オブシン遺伝子（メダカには3種あった）の1つであるRH2-A遺伝子が、進化のどのあたりで出現したのか、この配列にメダカの近縁種間で違いがみられるのか、配列の差によって吸収波長が異なるのか、といったことを検討したいと考えた。「これまでに、シクリッドなどもRH2-A遺伝子をもつが、ゼブラフィッシュはもたないこと、この遺伝子が進化のかなり古い時期に遺伝子重複を起こして、その後にさまざまな魚類の系統に分かれていったことなどを明らかにしてきました⁵⁾」と河村准教授（図2）。

今後は、オブシンタンパク質の遺伝子発現制御メカニズムについてゼブラフィッシュで突き止め、その仕組みがど

のように進化し、行動や生態にどう影響したのかをメダカで検討したいと考えている。河村准教授は、ほかにサルなども研究対象としており、それぞれの生物の特徴を生かして、脊椎動物の色覚の進化に迫るべく、研究を続けている。

海外の研究例

数はそう多くないものの、海外にもメダカによる生物学研究の例はある。水質毒性学を専門とするアメリカ、ジョージア大学ウォーネル校 森林・自然資源学部のリチャード・ウィン准教授は、塩素などの化学物質がゲノム中にどのくらいの頻度で突然変異を起こしうるのかを、メダカを用いて調べている。ごく少量の化学物質が長時間作用した場合の影響をみるには、マウスなどよりもメダカの方が低コストで済むし、何世代にもわたる影響を調べやすいからである。

「アメリカでは、明らかな発がん物質の規制については厳しいが、『突然変異を起こす可能性がある』という程度の化学物質については規制がありません。

私たちは、身近に存在する化学物質がメダカに突然変異を起こすかどうかを、正確な変異誘発頻度として求める手法を開発しました」とウィン准教授。

ウィン准教授の解析は、大腸菌に感染するλファージのDNA（λ DNA）をメダカの受精卵に針で注入して「λトランスジェニックメダカ」を作ることから始まる。このときλ DNAはメダカゲノム中にランダムに取り込まれる。次に、λトランスジェニックメダカが成長したところで細胞からλ DNAを回収し、ある操作を加える。すると、λ DNAが再びパッケージされて、λファージに戻る。この再パッケージされたλファージは、普通のλファージのように大腸菌に感染させることができる。ただし、メダカに与えた化学物質によってたまたま「λ DNA中の特定の領域」に突然変異が起きたものだけは、増殖数が極端に減る、ある温度でしか増殖できなくなる、といった異常が生じる。つまり、「普通のλファージの増殖数」と「再パッケージされたλファージの増殖数」の比を

生物学にとって利点の多いメダカ

日本の生物学研究でメダカが使われてきた理由も、飼育や繁殖が容易であることによる部分が大きいが、ほかにも、モデル生物としてとくにすぐれた点がたくさんある。

第1に、日本のどこにでもみられるものの、大きく「北日本集団由来の近交系」と「南日本集団由来の近交系」に分けられる点が挙げられる。両者には全ゲノム配列の3パーセント以上に差（多型）がみられるため、形や行動などにかかわる遺伝子の変化がそれぞれの系統に蓄積していると考えられる。これらの多型は

遺伝子の解析を行う際の目印（マーカー）として利用できる。

第2に、欧米で使われるゼブラフィッシュに比べてゲノムサイズが格段に小さい点。ゲノム解読の結果、メダカは約8億塩基対のゲノムをもち、遺伝子が約2万1000個あることがわかった。ゼブラフィッシュの遺伝子もメダカとほぼ同数だが、ゲノムサイズは約17億塩基対とメダカの倍もあり、その構造も複雑なために、いまだに解読が終了していない。遺伝子の位置や構造、機能を探るには、ゲノムサイズが小さいメダカの方が断然有利である。

第3の利点は、生育温度の許容範囲が広いことである。ゼブラフィッシュが熱帯性で22～30℃の水温を必要とするのに対し、メダカは温帯性で4～40℃の水温に対応できる（ただし、繁殖させるには25℃以上が必要）。そのため、メダカに「遺伝子のスイッチが温度の違いによって入ったり、切れたりするような操作」を施すことで、特定の遺伝子の発現を抑制した場合の影響（すなわち、その遺伝子の機能）を容易に調べることができる。

第4の利点はゼブラフィッシュにも共通する。体が透明に

近いために、発生初期から成熟後までに起きる変化を追いややすいことである。発生学で伝統的に用いられるカエルやウニの場合、初期の胚は透明だが、時間が経つにつれ不透明な体表や殻で覆われ、体内で何が起きているのかが観察できなくなってしまう。その点、メダカでは色素が形成されない透明メダカ系統が開発されている。これらのメダカでは、蛍光色素などを使って特定のタンパク質だけを光らせることで、遺伝子の発現部位を比較的容易に特定することができる。

N.N.

求めれば、その化学物質による突然変異頻度になるのである。「ヒトでは、遺伝子に変異が起きてからがんが発症するまでに 30 年もかかるといわれています。私たちの手法で化学物質の変異誘発率を求めれば、なんらかの手が打てるようになるかもしれません」。ウィン准教授はそうコメントする。

一方、海外ではゼブラフィッシュを用いた研究も依然として盛んである。アメリカ、オレゴン大学神経科学研究所のモンテ・ウェスターフィールド教授は、遺伝子疾患の 1 つであるアッシャー症候群の原因遺伝子を解析するためにゼブラフィッシュを使っている。「アッシャー症候群は、アメリカでは 7 万人に 1 人の割合で発症し、視覚と聴覚が障害される病気です」とウェスターフィールド教授。これまでに、この疾患の原因となる遺伝子を 11 種同定し、そのうちの 9 遺伝子についてはゼブラフィッシュにも同様の遺伝子があることを突き止めた。

「このような遺伝子に変異したゼブラフィッシュは、難聴で平衡感覚が異常になり、水槽の周りの模様の動きに合わせて泳げなくなるなどの病態がみられました。内耳や網膜などの細胞の機能が障害されるからだと思われます」。自らの研究成果についてそう話すウェスターフィールド教授は、臨床医との共同で患者のスニップ解析を行うことで未知の原因遺伝子を突き止め、その機能についてもゼブラフィッシュを用いて解析したいとしている。

変異体作製とバイオリソースプロジェクト

現在、日本は国家プロジェクトとして、マウスなどのモデル生物を一括して収集し、その維持と希望者への分配を目的としたバイオリソースプロジェクトを進めている。メダカ^注については基礎生物学研究所が中核機関（代表：成瀬准教授）として機能しており、放射線医学総合研究所、新潟大学、国立遺伝学研究所、東京大学などとともに、野生の系統およびすぐれた遺伝子変異系統の収集、精

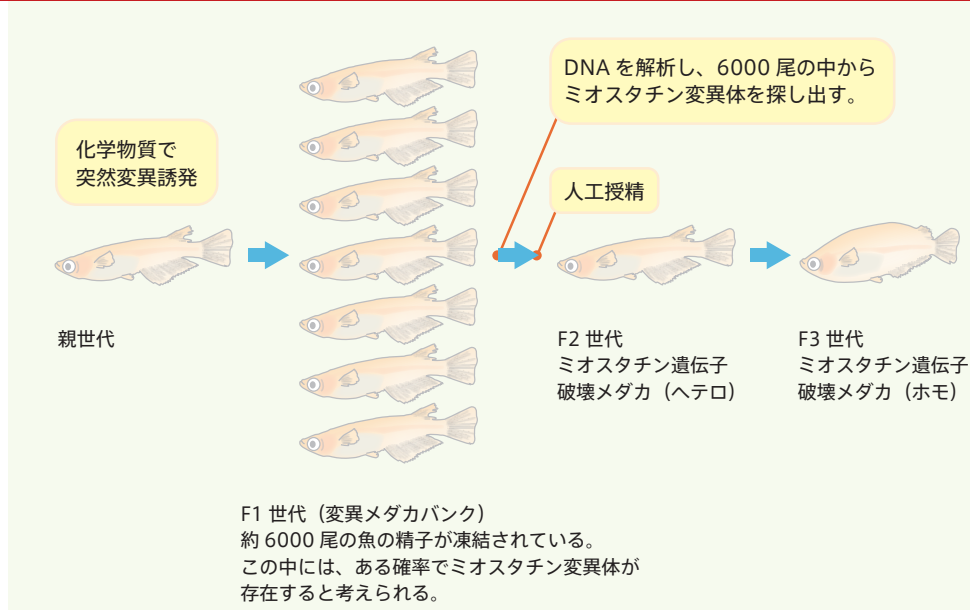


図3 ティリング法の仕組み

図は、筋肉の分化に関係するミオスタチン遺伝子の変異体作製を例にティリング法の仕組みを説明したもの。谷口助教らは、筋肉量が多い魚の開発を目指し、ミオスタチン遺伝子破壊メダカをすでに作り出している。

子の凍結、遺伝子配列情報などのデータベース化、分配などの業務を行っている。「すでに特定の遺伝子に多型や変異がみられる 400 系統ものメダカを収集しているが、国内外を問わず、新たな系統が開発された場合には、バイオリソースとしての寄託をよびかけています」と田中准教授。

こうしたなか、京都大学大学院医学研究科放射線遺伝学の谷口善仁助教は、「ティリング法」を用いた遺伝子変異系統の開発を進めている。ティリング法は、2002 年にオランダの R.H. Plasterk 博士のグループが発表した遺伝子を破壊するための手法で、谷口助教は同博士らとの共同研究によって、メダカでも同様の手法が行えるようにした⁶。「これまで、メダカの遺伝子機能を抑制するには、アンチセンスオリゴなどを使うしかなく、抑制できる時間が発生初期に限られていました。ティリング法では発生時から寿命が尽きるまで、一貫して遺伝子の機能を抑制できるので、発がんや老化などの研究にも使えます」と谷口助教。

ティリング法では、まず、成熟した約 100 個体の雄に、ある化学物質を投与してゲノム中にランダムに変異を起こさせる。その子孫（F1 世代）を 6000

個体作り出すと（各個体の精子を保管しておく）、一定の確率で目的とする遺伝子（ターゲット遺伝子）に点変異（1 つの塩基が別の塩基に置き換わる）が入っていることが期待できる。次に、ターゲット遺伝子の塩基配列を調べ、その機能を失うような変異が入った個体だけを選びだす。そのような個体の精子と野生型の雌の卵を交配して子（F2）を作り、さらに、F2 どうしをかけあわせると、その子（F3）にはターゲット遺伝子が 2 つとも変異した個体も出てくるはずで、それが目的の変異系統となる（図 3）。

「変異バンクをスクリーニングして人工授精により変異系統を得るまでに 4 ～ 5 か月かかりますが、1 件 30 万円ほどの実費を負担してもらって特定の遺伝子変異体作製の受注を行っています」と谷口助教。これまでに、細胞増殖やアポトーシス、がん化など、さまざまな現象に関与する p53 という遺伝子を変異させた系統を開発しており、すでに多くの研究者がこの変異体を自分の研究に利用している。現在は、ターゲット遺伝子内に、より高密度で変異が入るような工夫を試みており、「開発した系統は、近い将来、皆が使えるように基礎生物学研究所に寄託したい」とコメントする。

情報の共有と統合にむけて

このようにして、生物学研究の最先端で使われ出しているメダカであるが、この2月には、モデル動物としてのメダカをアピールし、メダカによる研究成果を共有すべく、基礎生物学研究所においてメダカ国際会議（第54回 NIBB International Conference）が開かれた。「日本の成果を発信し、世界から情報を集め、今後の研究の方向性のコンセンサスを得ようというのがねらいでした」。代表を務めた田中准教授はそうコメントする。

海外からの参加者を含め総勢90人ほどが、2泊3日にわたる会議で互いの情報を交換し、会議は盛会のうちに幕を閉じた。今回紹介した河村准教授、ウェスターフィールド教授、谷口助教も自身の研究成果について報告した。そのほかにも、東京大学理学系研究科の武田洋幸教授は、体の左右軸の異常を示すメダカの解析がヒトの織毛病に結びつい

た成果を、同大学大学院新領域創成科学研究科の森下真一教授は、バイオインフォマティクスを駆使して脊椎動物の祖先ゲノムを再構成した成果を発表するなど、発生、進化、行動、生物情報学と、多岐にわたる最新の研究成果が報告され、活発な質疑応答が行われた。

「バイオリソースとしてのメダカの利用、ゲノム情報、技術開発、具体的研究成果などが順調に統合されていく道筋がみえました。また、他の生物種では解析が難しい研究をメダカでしようと、非常にユニークな挑戦が始まっていることを概観できました」。田中准教授は、会議をそう振り返り、海外の研究者にメダカのさらなる利用をよびかけたとしている。私たちに生命の営みの基本情報をもたらす、進化、行動、疾患、治療、創薬、環境と、実に幅広い領域の発展に寄与するメダカの研究。日本を中心に、世界が連携する形でますます発展していくことが期待される。 ■



2月に基礎生物学研究所で開かれたメダカ国際会議のようす。活発な議論が続けられた。

注：正式名称は「ナショナルバイオリソースプロジェクト 中核的拠点整備プログラム メダカ」。現在は第2期（平成19年～23年度）が進められている。初年度配分の予算は、基礎生物学研究所が3270万5000円、新潟大学が2000万円、放射線医学総合研究所が400万円などとなっている。

1. Kasahara, M. *et al.* *Nature* **447**, 714-719 (2007)
2. Kurokawa, H. *et al.* *PNAS* **104**, 9691-9696 (2007)
3. Chinen, A. *et al.* *Genetics* **163**, 663-675 (2003)
4. Takechi, M. and Kawamura, S. *J. Exp. Biol.* **208**, 1337-1345 (2005)
5. Matsumoto, Y. *et al.* *Gene* **371**, 268-278 (2006)
6. Taniguchi, Y. *et al.* *Genome Biol.* **7**, R116 (2006)

図 自然系科生研究機構基礎生物学研究所

知ってることは載っていない

nature

www.naturejpn.com

 nature asia-pacific

Brain comes to light

光を浴びて恋の季節が始まる

岡村 均

動物は、体内の概日時計が刻む定常的周期と日長変化を比べることによって、季節を感知する。分子レベルでは、光シグナルがきっかけとなって、脳内で協同的に遺伝子発現が起こる。

Nature Vol.452 (294-295) / 20 March 2008

生物は生き残るために、絶えず変化する外界条件に適応しなければならない。例えば、温帯域に生息する動物の大部分は、温度や食物入手の可能性などの環境条件が、子どもたちの生存に最適となるような時期に繁殖を集中させる。多くの生物は、信頼できる季節の指標として日長（光周期）を利用しており、それは動物体内で約 24 時間を刻む概日時計に生理的にコードされるとみられている¹。中尾暢宏たちは *Nature* 2008 年 3 月 20 号 p. 317 に掲載の論文²で、ウズラ（*Coturnix japonica*）の脳内で長日条件に応答して起こる分子レベルの現象を明らかにしている。ウズラは通常、日が長くなる（長日条件に置かれる）と繁殖活動に入る。

光へのシグナル応答は脳内の視床下部に集約され、そこでゴナドトロピン（性腺刺激ホルモン）放出ホルモン（GnRH）の分泌を亢進させる。これによって、脳の基部にある下垂体から分泌される黄体形成ホルモンおよび卵胞刺激ホルモンの血中濃度が上昇し、続いて、生殖腺の活性が亢進する³。中尾たちは、こうした連続的な変化が引き起こされる脳領域が、視床下部と下垂体の間の接合部にあたることを見いだした（図 1）。具体的には、この接合部は視床下部の正中隆起とよばれる部分と脳下垂体の隆起部という部分からできている。また中尾たちは、これらの変化のきっかけとなる物質が、甲状腺刺激ホルモン（TSH；別称チロトロピン、またはサイロトロピン）であることも明らかにした。

中尾たちは、ウズラを長日条件下に置くと、遺伝子発現のピークが 2 つ現れることに気づいた。第 1

のピークは、長日条件の初日の夜明け後 14 時間で現れ、第 2 のピークは、第 1 ピークの 4 時間後に起こった。第 1 ピークの遺伝子発現によって、下垂体隆起部の細胞における甲状腺刺激ホルモンは増量した。これまで、ウズラの光周反応（日長に対する生体の反応）で最初にかかる現象は、視床下部正中隆起において甲状腺ホルモン活性化酵素（DIO2）をコードする遺伝子が発現することだと考えられてきた⁴。しかし中野たちは、この遺伝子が遺伝子発現の第 2 ピークにしか発現しないことを見つけた。

視床下部の正中隆起は、脳のニューロンが体のほかの部分に到達するために通過しなくてはならない「通路」である。例えば、GnRH などのホルモンを運ぶ視床下部ニューロンは、その神経繊維（軸索）を正中隆起の密な毛管血管網へ向かって伸ばし、その周辺で終わっている。正中隆起には、伸長上衣細胞（tanycyte；ギリシャ語の「伸長した」を意味する tanus に由来）とよばれる特殊化した上皮細胞が含まれており⁵、この細胞の長くて太い突起が毛細血管と神経終末を取り巻いて、両者の物理的な障壁となっている⁶。しかし、伸長上衣細胞と神経繊維や毛細血管とのこうした構造的結合は簡単に変えることができ、そのため、毛細血管へ放出される神経ホルモンの濃度調節が可能となる。次に毛細血管は門脈管へ注ぎ込み、神経ホルモン類は、下垂体前葉の主要部分にあたる末端部にある第 2 の毛細血管網へ運ばれる。神経ホルモン類はそこで下垂体ホルモンの分泌を促して、体内のさまざまな内分泌器官を制御する。こうした従来の視床下部一

垂体系説では、下垂体隆起部は何の役割も果たしていないことになる。

下垂体の隆起部は、末端部の内分泌細胞とは異なる特殊化した小型の腺細胞で構成されている⁷。重要なことに、大部分の動物種では下垂体隆起部が視床下部正中隆起の隣に位置している。この2つの構造は、互いに向き合っており、門脈管に連結している密な毛細血管網によって隔てられている。長日条件にตอบสนองして下垂体隆起部の細胞から放出された甲状腺刺激ホルモンは、この局所的な血管連絡によって視床下部正中隆起の毛管網に入り、毛細血管を取り巻く伸長上衣細胞表面の甲状腺刺激ホルモン受容体に結合する。中尾たち²は、伸長上衣細胞が活性化すると、さまざまな遺伝子転写因子や酵素を発現して細胞構造に変化をきたし、それによって毛細血管へのGnRH放出量の増加が可能になることを見いだした。これらの知見は、下垂体隆起部と視床下部正中隆起が機能的・構造的に1つの単位であることを強く物語っている。

中野たちの知見²は、哺乳類における光周反応の研究においてどのような意味があるのだろうか。鳥類と哺乳類とは、光周性シグナルが視床下部正中隆起—下垂体隆起部の機能的統合単位に至るまでにたどる経路は異なっているが、今回の中野たちによるウズラの観察結果は哺乳類にも当てはまりそうである。たとえ鳥類と哺乳類でまったく同じでないにしても、同様にハムスターでも、脳の視床下部正中隆起と下垂体隆起部で光周期に依存した遺伝子発現変化が報告されているからである⁸。中野たちの知見のもう1つの意味は、「視床下部正中隆起—下垂体隆起部」複合体が、ある光周期条件下に長く置かれた動物個体でみられる性腺活性の自発的復元、すなわち光不応反応 (photorefractoriness)⁹を担う重要な部位だということである。季節繁殖性の動物は、鳥類であろうと哺乳類であろうと、光不応反応を光周反応に組み込むことで、繁殖季の長さや時期をより柔軟に調整することが可能になる。

光シグナルを内分泌シグナルへ変換することは、概日リズムと光周性に共通する特徴の1つである。概日機構では、こうした変換が全身の概日時計を同調させるのに使われている。例えば、光によって副腎は糖質コルチコイドホルモンの分泌を促され体循環内へ放出する¹⁰。光周性では、こうした変換が視床下部と脳下垂体の接合部で起こる。光周シグナルの

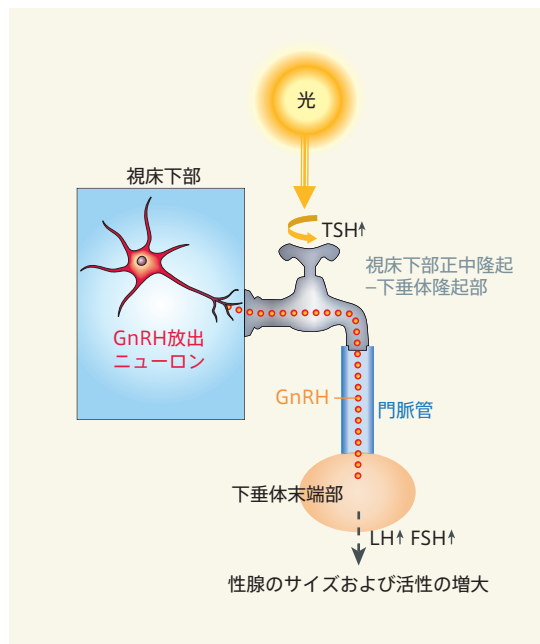


図1 光感受性のホルモン用「蛇口」。

光周性の光シグナルは、脳の基部にある視床下部正中隆起と脳下垂体隆起部からなる機能単位を活性化する。中尾たちは、下垂体隆起部で甲状腺刺激ホルモン (TSH) が放出され、それによって、この「蛇口」へ突起を伸ばしているニューロンから視床下部ホルモンであるGnRHが放出されることを明らかにした。GnRHは門脈管に入って、下垂体からの黄体形成ホルモン (LH) と卵胞刺激ホルモン (FSH) の体循環系への放出を促し、性腺活性の増大を引き起こす。

主な標的は、視床下部—下垂体—副腎のホルモン中枢系である。この系では、光シグナルは下垂体隆起部細胞からの甲状腺刺激ホルモンの放出を促し、これにより伸長上衣細胞が門脈管へGnRHを「引き入れる」ことが促される。このように、光周性では甲状腺刺激ホルモンが局所的に伸長上衣細胞刺激ホルモンとして働いている。

岡村均、京都大学大学院薬学研究科

- Pittendrigh, C. S. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **69**, 2734–2737 (1972).
- Nakao, N. *et al. Nature* **452**, 317–322 (2008).
- Dunlap, J. C., Loros, J. J. & DeCoursey, P. J. (eds) *Chronobiology: Biological Timekeeping* (Sinauer, Sunderland, MA, 2004).
- Yoshimura, T. *et al. Nature* **426**, 178–181 (2003).
- Horstmann, E. Z. *Zellforsch.* **39**, 588–617 (1954).
- Rodríguez, E. M. *et al. Int. Rev. Cytol.* **247**, 89–164 (2005).
- Stoeckel, M. E., Hindelang-Gertner, C. & Porte, A. *Cell Tiss. Res.* **198**, 465–476 (1979).
- Bockmann, J. *et al. Endocrinology* **138**, 1019–1028 (1997).
- Nicholls, T. J., Goldsmith, A. R. & Dawson, A. *Physiol. Rev.* **68**, 133–176 (1988).
- Ishida, A. *et al. Cell Metab.* **2**, 297–307 (2005).

Update on 3D displays

画像を更新できるホログラフィック 3D ディスプレイ

Joseph W. Perry

ホログラフィー技術を用いて静的な 3 次元画像を作るのは容易であるが、動画を作るのは非常に困難である。このほど、特別に設計されたポリマーを使った、手のひらサイズのホログラフィック 3D ディスプレイが開発された。このディスプレイでは画像を更新することができ、動画ホログラフィーへの突破口を開く可能性がある。

Nature Vol.451(636-637)/7 February 2008

臨場感を重視する映画ファンは、*Nature* 2008 年 2 月 7 日号 694 ページの Tay ら¹の報告を歓迎するだろう。著者らはここで、画像を更新できるホログラフィック 3 次元 (3D) ディスプレイという、映画ファンの夢を現実に一歩近づける展開について発表している。このディスプレイには、安価で、加工が容易な、フォトリフラクティブポリマー材料が使われている。この技術が完成するのはまだまだ先のことであるが、最終的に恩恵を受けるのは映画ファンだけではない。視野角が広く、リアルな 3 次元画像を映し出せるディスプレイは、戦況のシミュレーションや鍵穴手術のガイドなど、軍事分野や医療分野への応用が見込まれているからである。

3D 視覚化技術の歴史は長い²。2D ディスプレイと特殊な立体視眼鏡を使った初期のアプローチは、1950 年代初頭の 3D 映画の流行でお馴染みである。立体視眼鏡とは、偏光レンズか、左右別々の色のレンズを入れて、左右の目に別々の画像が見えるようにした眼鏡である。2 つの画像を高速で切り替えながら表示し、画像と同期して開閉するシャッターつきの眼鏡をかけてこれを見ることで、画像が連続的に表示されているように見せるタイプのシステムもある。

こうした立体視眼鏡はわずらわしく、特にカラーフィルターを長時間にわたって使っていると頭痛がすることがある。そのため、偏光立体視眼鏡を使った 3D ディスプレイは、科学への応用以上に広がることはなかった。けれども、この 10 年ほどの間に立体視眼鏡を必要としないディスプレイが開発されたことで、3D 画像技術が再び注目されるようになってきた。このシステムでは、レンズアレイつきの 2D ディスプレイを裸眼で見るだけで、左右の目に別々の画像が

見えて、奥行き錯覚が生じる³。しかし、このディスプレイで立体画像を見るためには、決まった位置から見なければならない。見る人の位置に応じて画像を修正するマルチビュー・ディスプレイ (ヘッドトラッキング・ディスプレイ) もあるが、画像の製作・処理・投影のコストが高くなってしまふ。

もう 1 つ、よく知られた 3D ディスプレイ技術としてホログラフィーがある。ホログラフィック 3D ディスプレイは、視野角が広く、解像度も高い⁴。このシステムでは、3D 画像は材料中に「貯蔵」されており、光を照射するだけでこれを見ることができる。このように、立体視眼鏡やレンズアレイなどの装置を用いる必要がない 3D ディスプレイは、「オートステレオスコピック・ディスプレイ」とよばれる。ホログラフィック・ディスプレイでは、画像にしたい物体から散乱されたレーザー光 (物体光) と平面波レーザー光 (参照光) の両方を記録して干渉パターンを作り出し、これをフォトポリマーなどに 3 次元的に貯蔵する。干渉パターンを作る光は、ポリマーの中で化学反応を引き起こし、材料の屈折率を局所的に変化させる。このプロセスでは、3D 画像を投影するために必要な光の振幅と位相の情報のすべてを貯蔵することができるが、こうした情報を書き換えることはできない。ゆえに、ディスプレイ上の画像は動かない。

今回 Tay らが開発したディスプレイのサイズは 10cm × 10cm で、それなりの大きさがある。そのベースになる媒体はフォトリフラクティブ材料とよばれるものである。フォトリフラクティブ材料も、画像の (振幅と位相の) 情報を 3 次元的に貯蔵することができる。しかし、フォトポリマーとは異なり、フォトリフラクティブ材料はダイナミックな記憶媒体であり、情報を記憶し、消去し、書き換えることができる (図 1)。

これまで、フォトリフラクティブ材料の研究は、ニオブ酸リチウム (LiNbO_3 ; 参考文献 5) のような無機酸化物の結晶について広く行われてきた。こうした材料がホログラフィーの干渉パターンを吸収すると、干渉パターンの明るい領域で可動性の電荷担体が生じる。外部から電場をかけると (極性結晶では自発分極により)、可動性の電荷が移動して、干渉パターンの暗い領域に蓄積する。その結果、電場の分布が変化し、これに比例して結晶の局所的な屈折率が変化する。これを電気光学効果という。無機結晶は感光性が非常に高いため、この方法により高分解能の画像を生成することができる。しかし、ディスプレイとして実用的なサイズの結晶を成長させるのは困難で、費用もかかる。

フォトリフラクティブポリマー⁶は、この点で興味深い材料である。フォトリフラクティブポリマーは、無機結晶のすべての能力を備えているが、低コストの溶解法 (溶融法) により加工して、大型ディスプレイを作れるからである。今回 Tay ら¹が開発したフォトリフラクティブポリマーは、正電荷を輸送する分子団と光に対して非線形的に分極が変化する色素を結びつけるコポリマーを含んでいる。外部から電場をかけると、色素が回転して整列し、材料の屈折率を変化させる。コポリマーは光増感剤としても働き、光を吸収して、532nm の「書き込み」波長の可動性の電荷を生じる。

このようにして開発された材料は、フォトリフラクティブ材料を使ったディスプレイに欠くことのできない重要な性質を驚くほど多くもっている。まず、コポリマーを使用して相分離 (材料を構成する各種の成分が分離した結果、光を散乱させる領域ができて、画質を劣化させてしまうこと) を最小化することにより、その光学的な品質と均質性が改良されている。また、非線形的な光学応答を示すフッ化物分子団と、分子の運動を促進するための可塑剤を少量ずつ加えることにより、高い感光性を確保し、書き込みと消去のために必要とされるレーザーパワーをそこそこに抑えることを可能にしている。さらに、90 パーセントに近い回折効率は、ディスプレイを明るくし、読み出しパワーを低く抑えることを可能にする。

このディスプレイに書き込みをする際には、電荷の輸送速度を上げるために 9kV の電圧をかける必要があるが、読み出しは 4kV でよい。著者らは、約 3 分でディスプレイの全域に書き込みを行うことができ、その画像は 3 時間にわたり保持することができた。完全に自動化された光学システムは、物体光を処理して細切れにし、ディスプレイの隣接する部分に

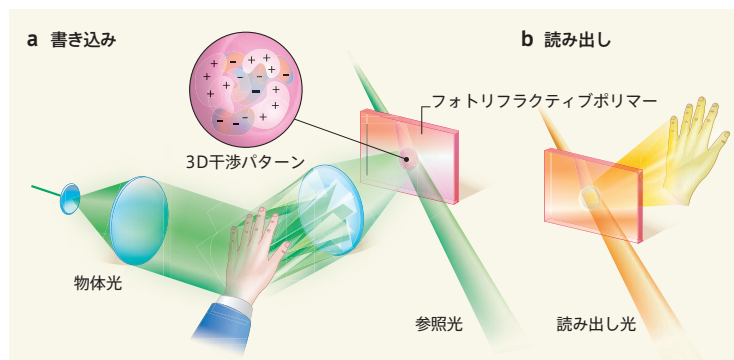


図1 便利なディスプレイ。a. 今回 Tay らが開発した、画像を更新できるホログラフィック 3D ディスプレイ¹のベースとなる媒体は、フォトリフラクティブポリマーである。物体から散乱された光と参照光との干渉パターンは、3 次元的に媒体に刻み込まれている。干渉パターンの明るい領域では、可動性の電荷担体である電子(-)と電子が移動した後に残る正孔(+)が生成し、より動きやすい正孔が暗い領域へと移動していく。媒質中の電場の分布と局所的な屈折率は、このようにして変換されて、物体からの光の振幅と位相の情報をマッピングする。b. 第2のレーザー光 (読み出し光) をポリマーに照射すると、もとの物体に散乱されたときと同じように散乱されて、3D 画像ができる。この書き込みの仕組みはポリマー中の電荷担体のダイナミクスのみに依存し、電荷担体のダイナミクスは (特定のポリマーと電位については) 媒体に入射する干渉パターンのみに依存するため、ディスプレイの画像は原則として更新可能である。

順次記録していく。ここで用いられるレーザーの強度は 1cm^2 あたり約 100mW あり、書き込み速度も良好である。一連の操作は、原理的にどのようなスケールでも実施可能である。よりパワーの高いレーザーを使ったり、より感度の高いフォトリフラクティブポリマーを使ったりすることで、より大きな領域に同時に書き込みをしたり、小さな領域に高速に書き込みをしたりすることができる。

今後、画像を更新できるホログラフィック 3D ディスプレイのサイズと更新速度が改良されれば、強力かつ高解像度の視覚化技術となるだろう。将来の巨大な軍事・医療・娯楽市場を見込んで、既に激しい開発競争が繰り広げられており、大画面フラットパネル式 3D ディスプレイや、その他の方式のリアルタイム 3D ディスプレイが次々と登場してきている。映画ファンやゲーマーが臨場感あふれるアクションを味わえる日も、そう遠くないかもしれない。■

Joseph W. Perry, ジョージア技術研究所・有機フォトニクス・エレクトロニクス研究所 (米)

1. Tay, S. et al. *Nature* **451**, 694-698 (2008).
2. Wheatstone, C. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **128**, 371-394 (1838).
3. Dodgson, N. A. *Computer* **38**, 31-36 (2005).
4. Hariharan, P. *Optical Holography: Principles, Techniques and Applications* (Cambridge Univ. Press, 1996).
5. Schirmer, O. F., Thiemann, O. & Wohlecke, M. *J. Phys. Chem. Solids* **52**, 185-200 (1991).
6. Moerner, W. E., Grunnet-Jepsen, A. & Thompson, C. L. *Annu. Rev. Mater. Sci.* **27**, 585-623 (1997).

遺伝子の転写反応を区切る壁は意外なタンパク質

白髭 克彦

ヒトゲノムに含まれる 2 ～ 3 万個もの遺伝子が秩序立てて転写されるために、染色体上にはインシュレーターとよばれる区切りが存在すると考えられている。この区切りの実体がコヒーシンというタンパク質であるらしいことが突き止められた。東京工業大学大学院の白髭克彦教授が、オーストリアの研究グループと共同で発見したもので、*Nature* 2 月 14 日号¹ に発表された。白髭教授に研究の経緯や意義などについて話を聞いた。

染色体を束ねるタンパク質は、染色体を区切る働きもしていた

Nature Digest — コヒーシンはどんなタンパク質ですか？

白髭 — コヒーシンは細胞分裂のときに染色体を束ねる働きをすることが、以前からよく知られていました。細胞分裂時、DNA が複製されて、1 本の染色体から 2 本の娘染色体が作られます。その際、娘染色体どうしがバラバラにならないよう、しばらくの間、コヒーシンが 2 本を束ねておくのです。接着剤のように 2 本をくっつけているという説もありますが、最近では、ループになって 2 本を束ねているという説が有力です。私達もループ説を支持しています（図 1）。

ND — そのコヒーシンに、予想外の働きがあることを見つめられたのですね。

白髭 — はい。今回の論文に先立ち、まず、酵母を使ってタンパク質と染色体の相互作用を調べていたときに、コヒーシンが遺伝子の転写反応と関連していることを発見しました²。染色体上でのコヒーシンの位置を調べたところ、転写のオン・オフに連動して、コヒーシンが染色体上で移動することがわかったのです。

ND — 今回の論文では、さらに、ヒトゲノムで転写反応の区切り壁としての働きを明らかにされたのですね。

白髭 — 染色体上には多数の遺伝子がひも状に並んでいます。コヒーシンはその染色体をブロックに分けることにより、遺伝子を「区切る壁」として働いているらしいことが見つ

けました。遺伝子の転写反応の区切りとなる壁（「インシュレーター」とよばれる）の存在は、以前から大勢の研究者により予測されていましたが、その実体が何なのかは、ほとんどわかっていませんでした。私たちは今回、ヒトの染色体に結合しているこのタンパク質の位置を網羅的に調べ、染色体上に沿ってコヒーシンがどのように分布しているかのデータを得ました。すると、コヒーシンが存在する位置は、インシュレーターの想定される位置と非常によく一致していたのです。コヒーシンとインシュレーターの関連性はとても意外だったので、最初は驚きました。しかし例えば、染色体をループに通すようなモデルを想像すると、理解できますね（図 2）。

ND — 今回の研究にはどのような意味がありますか？

白髭 — インシュレーターの実体が見えてきたことと、細胞分裂をしない細胞でのコヒーシンの役割がはっきりしてきたことが挙げられます。ネズミやハエなどのほかの生物種でも、私たちの結果を支持する同様のデータが相次いで報告されてきています。また、コヒーシンに欠損があると発症する重篤な発達障害があるのですが、細胞分裂には異常がみられないので、これまで不思議がられていました。そうした病気のメカニズムや治療法の解明にもつながる可能性があります。それから、人工的に遺伝子を細胞に導入して発現させ、さまざまな治療や研究に利用しようとしたときに、遺伝子の発現を安定して行える技術改良にもつなげられるでしょう。

図 1 娘染色体 (DNA)

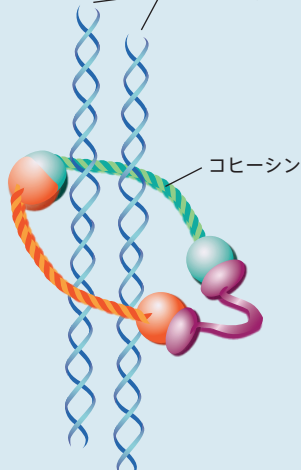


図 2

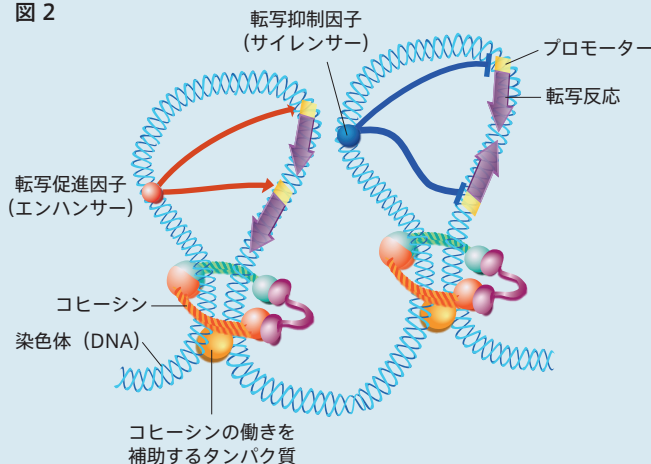


図 1 は、ループ状のタンパク質コヒーシンが 2 本の染色体を束ねているイメージ図。図 2 は、インシュレーターの働きをするコヒーシンのイメージ図。左のループは転写促進反応を、右のループは転写抑制反応を例に示した。紫の矢印は転写反応で、根元の黄色の部分は転写反応を開始させる部位（プロモーター）。それぞれ転写促進因子（エンハンサー）や転写抑制因子（サイレンサー）とプロモーターとの相互作用によって、転写反応が制御される。これらの因子の作用はコヒーシンで区切られた部分にのみ及び、コヒーシンの動きは、CTCF とよばれる因子（オレンジ色の球）で補助される。



白髭克彦（しらひげ・かつひこ）／東京工業大学大学院生命理工学研究科生体システム専攻教授。医科学博士。1965年、岡山県生まれ。1988年、東京大学教養学部基礎科学科卒業。1994年、大阪大学大学院医学研究科博士課程修了。1995年、奈良先端科学技術大学院大学助手。2001年理化学研究所ゲノム科学総合研究センター研究員。2004年、東京工業大学大学院生命理工学研究科助教授を経て、現職。

ゲノム規模の解析法で染色体の構築原理や動態を研究する。1996年、酵母染色体の複製開始点と複製チェックポイントの働きが連携していることを発見。2003年、ChIP-Chip法によりタンパク質-DNA相互作用を網羅的に解析する手法を開発して、複製チェックポイント機構を解明。2004年、コヒーシと転写との関連性を発見。2008年、ChIP-Chip法をヒト染色体用に改良し、コヒーシと転写のインシュレーターとの関係を発見。

ゲノム全体を解析できる ChIP-Chip 法がかぎ

ND — どのような方法を使えば、染色体にくっついているタンパク質の分布が調べられるのですか？

白髭 — ChIP-Chip（チップ・チップ）法^{*1}を使った精度の高い測定法を2003年に開発しました³。この測定法の開発は、私にとっての1つのブレイクスルー。そのときは酵母の第6染色体が測定対象でしたが、ヒトのゲノムでも基本原理は一緒です。抗原抗体反応を利用して染色体に付いているタンパク質を検出するChIP法と、大量のDNAを処理できるDNAチップとを組み合わせた測定法です。膨大な量の測定値から、意味のあるデータを引き出すためには、統計処理が必要です。バイオインフォマティストとよばれる情報学の専門家にも協力を仰いで、精度の高い方法に上げていきました。

ND — 今回、ヒトの全ゲノムを対象にして、特に苦労した点がありますか？

白髭 — 酵母と違って、ヒトゲノムには多数の「反復配列」や「類似配列」があります。つまり、同じ配列や似たような配列が膨大存在するため、こういった配列の測定値ばかりが高くなってしまいます。そこで、その影響をなくすために、特別なゲノムサンプル調製法と統計処理技法が必要でした。またゲノムも大きいので、測定結果のグラフを目でみて、感触をつかむというのもまったく無理。情報学に頼る部分がとても大きかったです。ヤン・マイケル・ピータースから、最初に今回の共同研究を申し込まれたのは、2004年のこと。彼はヒトのコヒーシ研究の専門家で、酵母で使った私たちの測定法をヒトゲノムでも使えないかと興味をもったわけです。しかし、実際にヒトゲノムで使えるように改良するまでに、3年ほどかかりました。

自分のデータをオープンにすることが新しい道を開く

ND — 研究するうえで大切に思っていることは何ですか？

白髭 — うまいいえないのですが、「科学者ならば、人としゃべらなくてはならない」と思います。特にゲノム研究においては、自分の実験結果について、ほかの研究者とどれだけオープンに議論できるか、それが大切なのです。そうすることで、新しいアイデアやチャンスが生まれると考えています。今回の研究のもとになった、酵母でのコヒーシの測定データも、最初、私だけでは見方が一面的でした。いろいろな人と話しているうちに、酵母コヒーシの研究家フランク・ウルマーが、イギリスからメールを送ってきたのです。「データを壁に貼って眺めているうちに気がついた。コヒーシの位置を転写が

決めているじゃないか」と。

ND — それが、今の研究へと発展する1つのきっかけとなったのですね。

白髭 — そうなんです。それから、もう1つ大切だと思うことがあります。それは、「すぐに試すこと」です。100個くらいのアイデアを思いつくことは、誰でも割と簡単にできるかもしれません。でも、それを片っ端から試さなければ、それは単なるアイデアで終わってしまう。そして、100個のアイデアがあったときに、90個試せる人のほうが、10個しか試せない人よりも、おもしろい研究成果をつかむ可能性が高い。すぐれた研究者の論文を読むと、「この人は寝る暇があったのだろうか」と思うものが多いです。よい研究は、アイデア以上に、肉体労働の占める部分も大きいと思います。

ND — 白髭先生は、もともとは染色体複製の研究からスタートされ、今は転写を扱われていますが、今後の研究の方向性は？

白髭 — 複製だとか転写だとか、カテゴリーを分けてしまわず、1つの染色体の上でどのようにいろいろなタンパク質が相互作用するのか、その動態を純粋に丸ごと追っていきます。パラパラ漫画でも見るように、その動きを示したいと思っています。大学4年生のとき、大学院で何を研究しようか考えていたときに、複製の研究で有名な吉川寛先生（当時、大阪大学医学部）の次の言葉にひかれ、ここに入ろうと決めました。「真核生物の染色体には複数の複製開始点がある。1個にだけ着目していてもだめで、これからは染色体全体についてみていかなくてはいけない」。吉川研究室の大学院生となり、酵母の第6染色体の複製開始点を全部見つけ出し、その性質を解明しました⁴。「全体像をとらえるべき」という最初に感銘した言葉が、今でも私の研究スタイルの原点になっていますね。複製や転写などと分けないで、染色体上で起こっていることを描き出したいと思っています。

ND — ありがとうございます。 ■

聞き手は藤川良子（サイエンスエディター）。

*1 ChIP-Chip 法

ChIPはクロマチン免疫沈降法(Chromatin Immunoprecipitation)の略で、DNAに結合するタンパク質を検出する手法。ChipはDNAチップあるいはマイクロアレイとよばれ、DNAの大量処理を可能にする手法。この2つの手法を融合して、ゲノム上のどの位置にどんなタンパク質が結合しているかを明らかにする技術。

1. Wendt K.S. et al. *Nature* **451**,790-801(2008)

2. Lengronne A. et al. *Nature* **430**, 573-578 (2004)

3. Katou Y. et al. *Nature* **424**,1078-1083 (2003)

4. Shirahige K. et al. *Nature* **395**, 618-621(1998)

今回は、75 億光年の彼方で起きた大爆発が観測されたことを報じた記事をご紹介します。この爆発の残光は桁外れに明るく、肉眼でも確認できたほどです。いかに天文学関係者を騒然とさせたのかを、読みとってみましょう。

NEWS nature news

語数：479 words 分野：宇宙

Published online 21 March 2008 | *Nature* | doi:10.1038/news.2008.687

Powerful stellar blast sighted

Light from cosmic explosion traversed half the universe.

<http://www.nature.com/news/2008/080321/full/news.2008.687.html>

Eric Hand



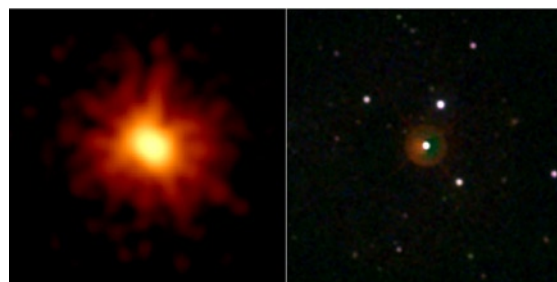
スウィフト衛星の打ち上げ。

1. Scientists have discovered a record **gamma-ray burst**, a massive explosion that occurred **halfway across the universe** but was so bright that its optical flash was briefly visible to the naked eye.
2. Gamma-ray bursts are high-energy explosions seen as shockwaves **jet out** from a massive dying star. They occur somewhere **in the sky** about once a day. This particular blast went off at 2:12 a.m. Eastern time on Wednesday, **triggering** automatic detectors on NASA's **Swift satellite**. Some 15 astronomers were already up on a conference call discussing an earlier burst when their **paggers started beeping** again.
3. "We at first thought something was wrong with the satellite," says Swift principal investigator Neil Gehrels, of the Goddard Space Flight Center in Greenbelt, Maryland. "Then we realized it was the most remarkable burst we've ever seen."
4. **Across the universe**
The blast, **dubbed** GRB 080319B, initially triggered one of Swift's three instruments, the gamma-ray detector. Then came a flash in **visible light**, so bright that it **saturated** Swift's **optical telescope**. Several hours later, **the Very Large Telescope** in Chile reported on the blast's **spectral lines**, which allowed astronomers to calculate its distance. The burst, it turned out, lay 7.5 billion light-years from Earth — more than halfway across the universe.
5. The team calculated that, had the explosion had gone off in the centre of the Milky Way, it would have appeared as bright as the noon-time Sun. In addition to Swift, some 60 **ground-based telescopes** observed the burst, and many will continue to watch it as its afterglow **lingers** for days.
6. **Insights expected**
Analysis of the gamma-ray burst should help in determining the metal content of galaxies over time, says Gehrels. Stars, which begin with hydrogen and helium, are the factories that make heavier elements, dispersed after the stars blow up as **supernovae**. The gamma-ray bursts travel through these **gas clouds**, which selectively absorb certain **wavelengths** of the burst depending on their chemical composition. This bright burst will thus provide a very clear data point for the chemical composition of a 7.5-billion-year-old galaxy.
7. And Peter Mészáros, who heads the Swift theory team at Penn State in University Park, Pennsylvania, will get an intriguing case to help him ponder the processes during star death that lead to the bursts. More than a decade ago, Mészáros published important theories about the shockwaves that excite gamma rays — followed by **X-rays** and optical light — that shoot out in narrow jets from poles of exploding stars.
8. He wants to understand what could have caused such a large optical flash during the 19 March burst, which he describes as "crazy". Mészáros also has to figure out why, in general, so few optical flashes have been detected compared to a higher number of gamma ray bursts.
9. He'll have some time to work on the problem without the distraction of a beeping pager. "They don't call the theorists at 2 a.m., thank God."

Topics gamma-ray burst (GRB ; ガンマ線バースト) とは？

1967年に発見され、1973年に天体現象として報告された、0.1～数百秒間に多量のガンマ(γ)線が放出される現象。GRB観測後には、エックス(X)線や可視光線の残光現象が続く。1日に約1回観測される、宇宙ではありふれた現象である。宇宙からのγ線は大気を通すことができないので、観測は天文衛星によって行われている。地上では、可視光線の放出を観察することができるが、その強さは急激に減衰していく。このため、観測には、衛星からの迅速な情報を地上に伝え、地球規模で協力して観測する態勢が必要である。

GRBは、宇宙の遠方(宇宙誕生初期の天体)で起こった現象とされているが、その場所や発生機構は解明されていない。質量が巨大な恒星は晩年、自身の重力で大きさが収縮することにより超新星爆発を起こし、中性子星またはブラックホールとなる。現在、ブラックホール形成時にその周辺で発生するものと、中性子星どうしの連星系が衝突・合体するときに発生するものというのが、GRB発生の有力な説となっている。



NASA/SWIFT/STEFAN IMMELER

2008年3月19日にスウィフト衛星が観測したGRB 080319BのX線の残光(左)と可視光線の残光(右)。

Science key words

- gamma ray:** ガンマ(γ)線
透過性の強い放射線の一種で、明確な波長領域の境界の基準はなく、おおむね 10^{-10} メートル以下の電磁波のこと。原子核などが励起状態(エネルギーが高く不安定な状態)からエネルギーが低い状態になる際に放出されるほか、素粒子(電子や中間子など物質を構成する根源的な粒子)の反応などによって発生する。
- Swift satellite:** スウィフト(γ線天文)衛星
2004年11月20日、GRBの解明のために打ち上げられた衛星。NASAゴダード宇宙飛行センターによる国際共同ミッションで、日本からもJAXA宇宙科学研究本部、埼玉大学、東京大学が参加している。γ線望遠鏡のほか、X線、可視光の望遠鏡も搭載しており、GRBの方向を瞬時に解読することができる。情報は即時に世界中に伝達されるため、地上で可視光の残光観測をスムーズに行うことができる。
- visible light:** 可視光線
7.のoptical lightも同じ。電磁波のうち、人間の目で見ることのできる光線。波長限界は、短いほうが360～400ナノメートル、長いほうが760～830ナノメートルである。
- optical telescope:** 光学望遠鏡
可視光を集光して、対象物を「目」で見る望遠鏡。複数のレンズを組み合わせた「屈折式」、凹面鏡などの反射鏡を組み合わせた「反射式」、に大きく分類される。反射式のほうが解像度が高く、「すばる」のような大型の地上望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡は反射式である。
- the Very Large Telescope:** ベリー・ラージ・テレスコープ(VLT)
チリにある、ヨーロッパ南天天文台が運営する望遠鏡。それぞれが口径直径8.2メートルの4つの反射式光学望遠鏡で構成され、4つが1つの望遠鏡のように稼働すると、肉眼の10億倍の解像度になる。
- spectral lines:** スペクトル線

電磁波を分光器によって、赤外線、可視光線、紫外線、X線、γ線のように波長によって分離したものをスペクトルといい、このとき、特定の波長の電磁波を強く(または弱く)放射していると、線状にスペクトルが検出される。これをスペクトル線という。原子は特定の波長の電磁波を強く吸収したり放射したりする性質があるため、スペクトル線の波長から、それを放射あるいは吸収している元素を同定でき、強度からその原子密度を測定できる。

- supernovae:** 超新星
恒星が突然、急激に太陽の10～100億倍の明るさに輝き、その後1～2年かけて減衰していくこと。これは、太陽の4倍以上の質量をもつ恒星の進化の最終段階で起こる大爆発によって起こる。恒星の質量が太陽の8倍以上になると、爆発後に中性子星やブラックホールになると考えられている。爆発の際には、巨大なエネルギーとガス、さらに星の内部で生成された酸素、炭素、ケイ素、鉄などが放出される。
- gas clouds:** ガス雲
水素やヘリウムなどの星間ガス、そのほかごく微量の炭素やケイ素、鉄などの宇宙塵が集まって、濃くなっている天体。ガス雲がさらに濃くなって、恒星が生まれると考えられる。
- wavelengths:** 波長
電磁波や音波など、空間を伝わる周期的な波の1回分の長さのこと。波長は波源の種類によって異なるので、波長から波源を特定することができる。
- X-rays:** エックス(X)線
紫外線より短くγ線より長い波長(10^{-7} ～ 10^{-12} メートルくらい)の電磁波。γ線と重複するが、一般には原子核外の現象で発生する電磁波をX線という。1905年ウィルヘルム・レントゲンが発見した。物質透過性が高いので、いわゆるレントゲンやCTとして医療に利用されているほか、工業的にも内部非破壊検査などに利用されている。科学分野においては結晶解析や、宇宙の解析など、幅広く利用されている。

Words and phrases

タイトル **stellar blast:** 「恒星の爆発」

リード **traverse(d):** 「横切る」「横断する」

- halfway across the universe:** 「宇宙の中間点で」
halfway across とは、横幅全体の中間点のこと。
- jet out:** 「噴出する」
- in the sky:** 「天球上で」
- trigger(ing):** 「始動させる」「スイッチを入れる」
「きっかけとなる」「引き金となる」と訳すほうが適切な場合もある。

- paggers started beeping:** 「ボケベルが鳴り始めた」
pagerはボケベルのことで、beeperやbleeperともいう。動詞のpageには「人をよび出す」という意味がある。beepやbleepは「ビー」という音を出すこと。
- (be) dubbed:** 「命名される」「名づけられる」
- saturated(d):** 「飽和する」
一般的に言えば、原因にあたるものをさらに増加させても、結果にそれ以上の影響が現れない状態のこと。
- ground-based telescope(s):** 「地上望遠鏡」
- linger(s):** 「残存する」「後に残る」「なかなか消えない」

Published online 21 March 2008 | Nature | doi:10.1038/news.2008.687

恒星の大爆発が目撃された

天の川銀河の外で起きた爆発の光が、宇宙の幅の半分に当たる距離を超えてやってきた。

<http://www.nature.com/news/2008/080321/full/news.2008.687.html>

エリック・ハンド

地上望遠鏡で観測したの
可視光線残光。

1. このほど、記録的なガンマ線バースト（GRB）が観測された。この大爆発は、地球から宇宙の幅の半分ほども離れたところで起きたが、非常に明るかったため、そのオプティカルフラッシュ（可視閃光）はわずかの間、肉眼でも確認することができた。

2. ガンマ線バーストは高エネルギー爆発現象であり、死につつある大質量星から衝撃波が噴出する際に観測される。この現象は、ほぼ1日に1回の頻度で、天球上のどこかで起きている。今回の爆発は、3月19日（水曜日）の午前2時12分（米国東部時間）に発生し、NASAの「スウィフト」衛星に搭載された自動検出器を作動させた。ちょうどそのとき、15人ほどの天文学者が、その前に観測されたガンマ線バーストに関する電話会議を行っていたが、その最中に手元のポケベルが再び鳴り始めたのである。

3. ゴダード宇宙飛行センター（米国メリーランド州グリーンベルト）に所属する「スウィフト」衛星の研究責任者 Neil Gehrels は、「最初は、衛星に不具合が生じたのかと思いました」という。「間もなく、これまで見たこともないようなバーストが起きたことに気づきました」。

宇宙を横切る光

4. 「GRB 080319B」と命名された今回の爆発は、最初に、「スウィフト」衛星に搭載されている3台の観測装置の1つであるガンマ線検出器のスイッチをオンにした。続いて、可視光の閃光がやってきた。この閃光は非常に明るかったため、「スウィフト」の光学望遠鏡（の検出器）が飽和してしまった。その数時間後には、チリに設置されたベリー・ラージ・テレスコープ（VLT）が、今回の爆発のスペクトル線データを報告してきた。このデータがあれば、天文学者は、爆発が起きたところまでの距離を計算することができる。計算の結果、今回の爆発は、地球から75億光年離れたところで起きていたことがわかった。これは、宇宙の幅の半分以上に相当する。

5. このチームの計算によると、今回の爆発が天の川銀河の中心で起きていたなら、正午の太陽ほどの明るさになっ

ていたという。今回の爆発は、「スウィフト」衛星のほかに、約60台の地上望遠鏡も観測しており、爆発の残光が数日間は続くため、多くの地上望遠鏡で観測が続行されることになる。

新たな知見への期待

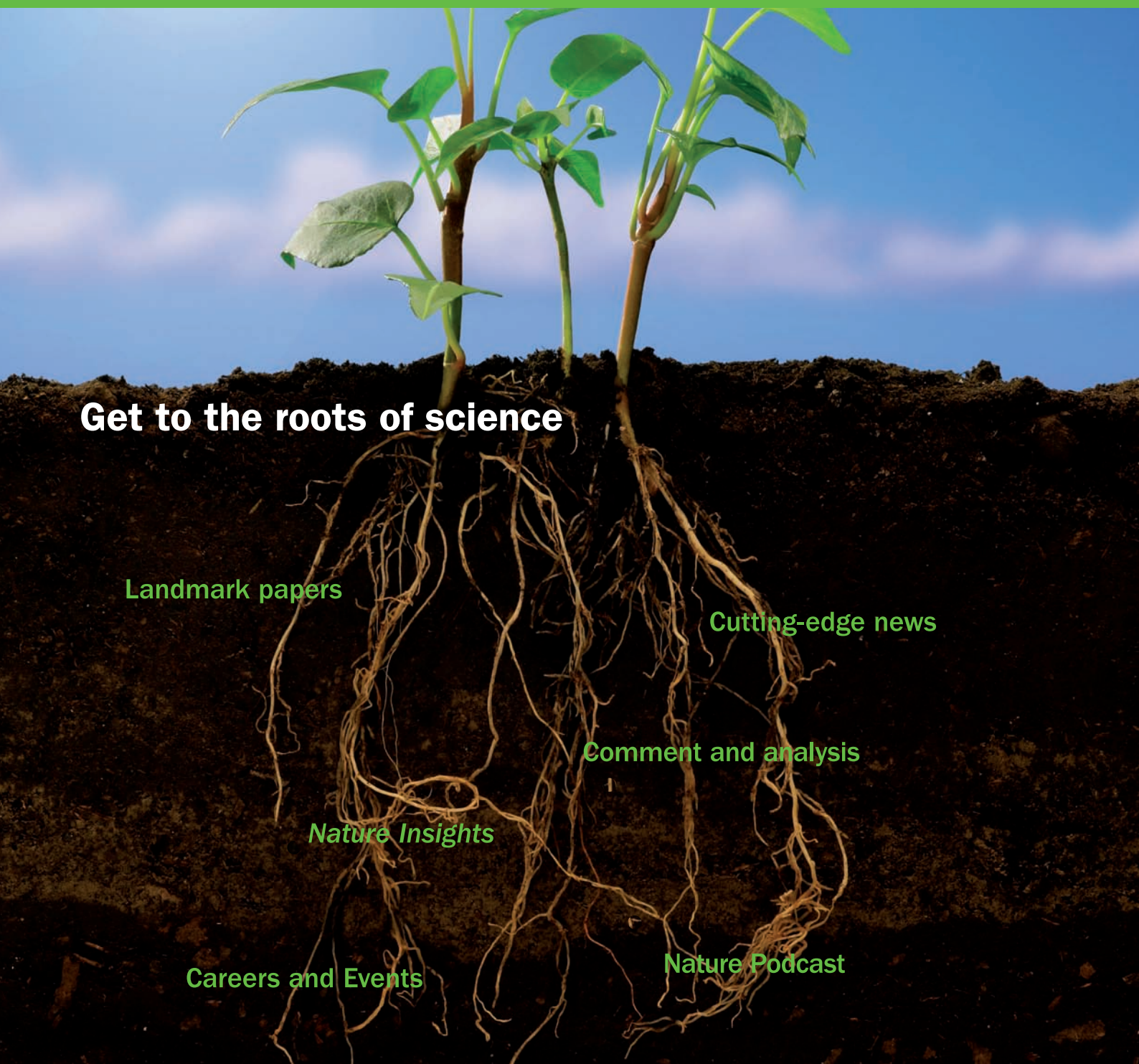
6. Gehrels は、ガンマ線バーストの解析は、銀河の金属含有量の経時変化を解明するうえで役に立つはずだと話す。恒星は、水素とヘリウムから始まって、より重い元素を生産していく「工場」である。恒星が超新星となって爆発した後、これらの重元素は周囲に飛び散っていく。ガンマ線バーストがこうしたガス雲の中を横切ってくるときには、ガス雲の化学組成に応じて、バーストの特定の波長部分が選択的に吸収される。したがって、この明るいバーストは、75億歳の銀河の化学組成に関する非常に明確なデータポイントになるのである。

7. 「スウィフト」衛星プロジェクトの理論チームのリーダーで、米国ペンシルベニア州立大学（同州ユニバーシティパーク）に所属する Peter Mészáros にとって、今回のガンマ線バーストは、恒星が死ぬ際にバーストを起こす過程をじっくりと考えるうえで役に立つ、興味深い事例となるだろう。Mészáros は、今から10年以上前に、爆発する恒星の両極から噴出するガンマ線の細いジェットを生じさせる（X線と可視光がこれに続く）衝撃波に関する重要な理論を発表している。

8. Mészáros は、3月19日のバーストの際に観察された大規模な（彼はこれを「クレイジーな」と表現する）可視閃光の原因を解明したいと考えている。彼はまた、ガンマ線バーストが数多く観測されているわりに、可視閃光の観測例が非常に少ない理由も解明したいと考えている。

9. Mészáros は、しばらくの間、ポケベルのよび出し音に邪魔されず、この問題に取り組むことになるだろう。「ありがたいことに、理論系の研究者は、午前2時によび出されることはないんですよ」。

nature



Get to the roots of science

Landmark papers

Cutting-edge news

Comment and analysis

Nature Insights

Careers and Events

Nature Podcast

www.naturejpn.com/nature-f

Subscribe today and get 51 issues print and online.

日本語で **nature** を読む

Nature Digest は、Nature を日本の皆様により身近に感じていただくために全ページ日本語で編集された科学情報誌です。英国本社で作成された Nature 本誌、Nature オンラインニュースに掲載されている最新の科学ニュースや科学論説などの記事はもとより、日本オリジナルの企画編集記事も加わり充実した1冊となっています。

Nature 翻訳・編集記事



日本オリジナル編集記事



2008年1月号より **8ページ**増量!!



Nature Digest 定期購読お申込みはこちらから

www.naturejpn.com/digest-f08