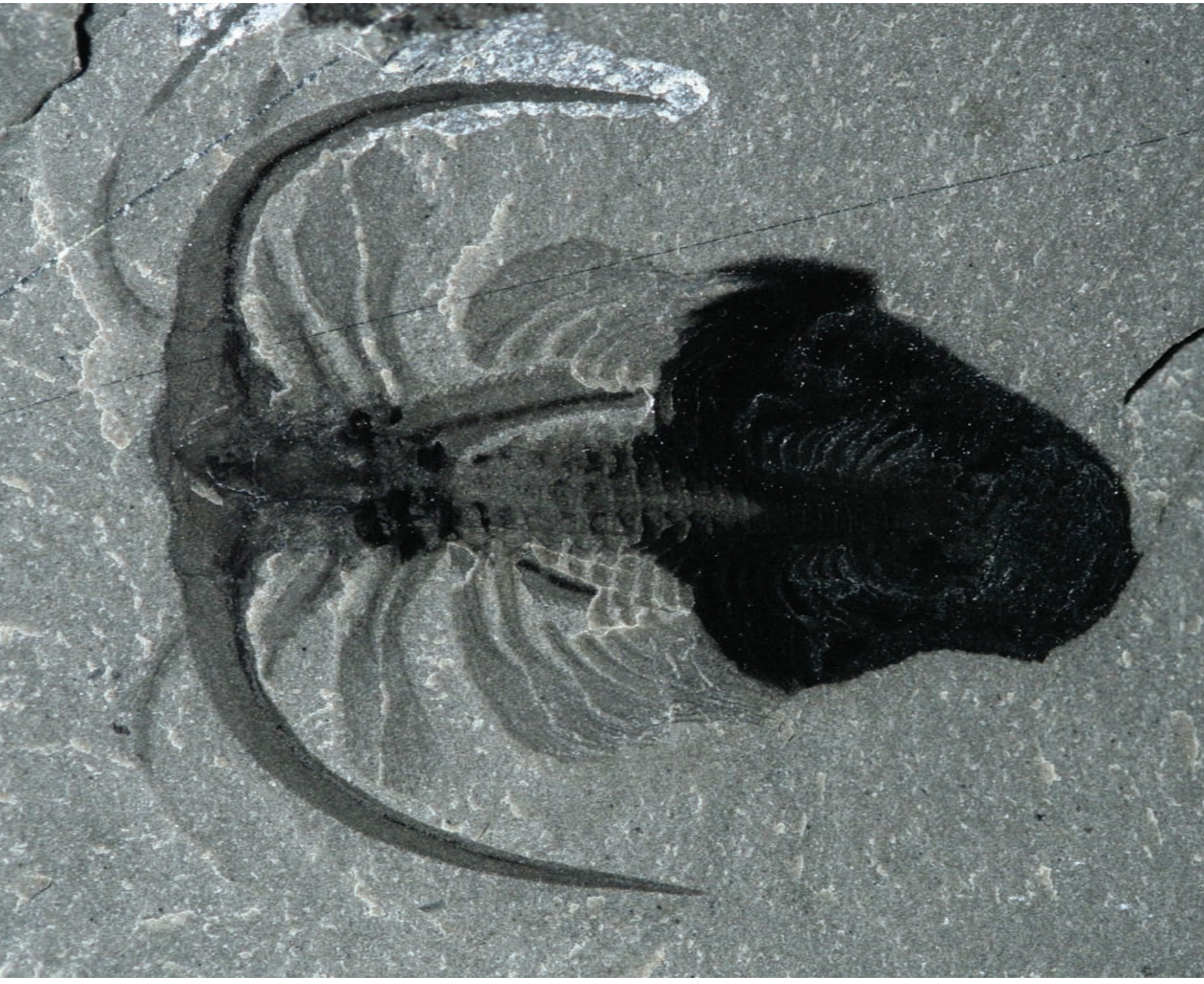
ISSN 1880-0556

nature DIGEST

日本語編集版
NOVEMBER 2009
VOL. 06, NO. 11
11



バージェス頁岩100周年

www.nature.com/naturedigest

npg nature asia-pacific

nature café 科学の夕べ

@ブリティッシュ・カウンシル

参加費無料

第 4 回 Nature Café

「世界の太陽エネルギー開発（2）～ 世界が注目する太陽光発電 ～」

2009年11月16日（月） 18：15 ～ 20：40（受付 18：00）

化石燃料による地球温暖化問題を解決するうえで、再生可能エネルギーとして関心が急速に高まっている「**太陽エネルギー**」。いかに化石燃料依存の実態を、CO_2を排出しない再生可能エネルギーにシフトしていくか、そして、再生可能エネルギーの中において太陽エネルギーは、どのくらいのポテンシャルをもっているのかという問題意識からサイエンスカフェを開催します。

場所：東京都千代田区一番町（最寄駅：半蔵門）

※ 会場側の規定により、会場詳細につきましては、参加者の方のみにご連絡いたします。

パネリスト

- 小長井 誠 氏 ／ 東京工業大学 電子物理工学専攻 太陽光発電研究センター長、教授
- 桑野 幸徳 氏 ／ 太陽光発電技術研究組合理事長（元三洋電機社長）
- Oliver Graydon ／ *Nature Photonics* チーフエディター　※ 同時通訳がつきます。

モデレーター

- 元村 有希子 さん ／ 毎日新聞科学環境部記・科学コミュニケーター

Nature Café 詳細と参加お申し込みについて

www.naturejpn.com/naturecafe04

Nature Café に関するお問い合わせは、弊社マーケティング部宛てにメールをお送りください。
marketing@natureasia.com

協力：SOS サイエンス映像学会 Science Visualization Society of Japan

npg nature asia-pacific

BRITISH COUNCIL

nature DIGEST

volume 6 no.11 November

OPINION

バージェス頁岩100周年

COVER IMAGE: ROYAL ONTARIO MUSEUM/J. B. CARON

HIGHLIGHTS

02 vol. 461 no.7262, 7263, 7264, 7265

NEWS

06 ノーベル医学生理学賞は、染色体の保護機構テロメアの解明に
Alison Abbott

07 ノーベル物理学賞は光技術のパイオニアたちへ
Geoff Brumfiel

08 ノーベル化学賞はリボソームの構造生物学に
Rochard Van Noorden

NEWS FEATURE

10 照明、スタンバイ！ カメラ、スタンバイ！感染開始、アクション！
Jeanne Erdmann

RESEARCH HIGHLIGHTS

14 真珠の輝きがつくられる秘密

NEWS FEATURE

15 マウスの検査入院
Alison Abbott

NEWS & VIEWS Q&A

18 水素自動車の意義と研究課題
Louis Schlapbach

OPINION

22 バージェス頁岩発見の歴史
Desmond Collins

NEWS

25 ワット天秤が英国からカナダへ
Nicola Jones

26 「地球を冷やすジオ・エンジニアリング」の検討が始まった
Geoff Brumfiel

NEWS & VIEWS

28 浮イネの洪水回避遺伝子
Laurentius A. C. J. Voesenek and Julia Bailey-Serres

30 アンドロメダ銀河に残された25億年前の記憶
Nickolay Y. Gnedin

JAPANESE AUTHOR

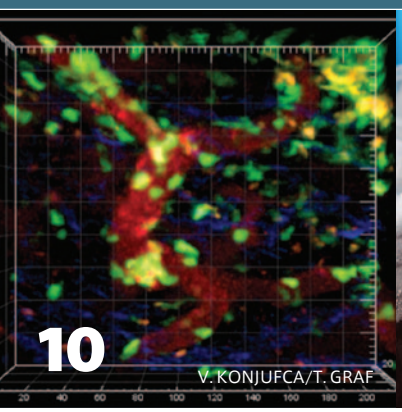
32 病原菌が感染初期の生体防御機構を回避する仕組みを解明! ── 笹川 千尋
西村 尚子

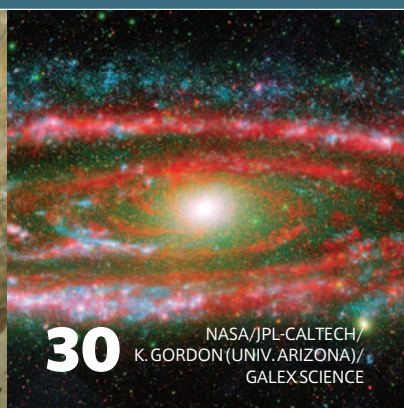
英語で NATURE

34 High window on the past
太古の地球環境に光を当てる高窓

www.nature.com/naturedigest

© 2009 年 NPG Nature Asia-Pacific
掲載記事の無断転載を禁じます。





2009年11月5日
毎月第1木曜日発行
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

編集・発行人：ディビッド・スウィンバンクス
副発行人：中村康一
編集：田中明美、中野美香

デザイン／制作：村上武、中村創
広告／マーケティング：米山ケイト、池田恵子
編集協力：白日社

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Vol. 461 No. 7262
17 September 2009

収穫を台無しにする疫病菌のゲノム：ゲノム解読によって明らかになったジャガイモ疫病菌の適応性の基盤

BLIGHTED HARVEST: Genome sequence unearths roots of potato pathogen's adaptability

19 世紀にアイルランドでジャガイモ飢饉（ききん）を引き起こした、ジャガイモ疫病菌 *Phytophthora infestans* のゲノム配列が解読された。主に葉を枯らすが、表紙にみられるようにイモのほうにも被害を及ぼすこの菌は、現在もなお莫大な被害をもたらしており、ジャガイモ疫病による作物損害は年間数千億円に上る。この病気の蔓延防止が難しいのは、菌が遺伝的に抵抗性をもつジャガイモ系統に極めて迅速に適応することが一因である。*Phytophthora* 属の別の菌 2 種とのゲノム比較により、分泌性病害エフェクタータンパク質の特定ファミリーの急速な入れかわりと大規模な拡張が明らかにされた。このファミリーには、宿主の生理学的性質を変化させると考えられる活性をもつ遺伝子で、感染時に発現が誘導されるものが多数含まれている。急速に進化するこのエフェクタータンパク質遺伝子群は、ゲノムの高度に動的な拡張された領域に認められ、これは宿主植物への迅速な適応性に寄与する要因の 1 つであると考えられる。*P. infestans* のゲノムは、現時点で解読されているクロムアルベオラータ類のゲノム中で最大の約 2 億 4000 万塩基であり、75% 近くという極めて高い反復含量をもつ。この菌は、褐藻類や珪藻類などの生物と近縁の菌類様真核生物の独立した系統である卵菌類のモデル生物となっている。

Letter p.393 参照

医学：C 型肝炎の治療効果予測マーカー

Responses to hepatitis C

およそ 1 億 7000 万人ともいわれる C 型肝炎患者の多くは、深刻な症状がみられずに生活を続けているが、患者のほぼ 4 人に 1 人は肝硬変を発症する。今回、C 型肝炎治療に対する個々の患者の応答性を予想するバイオマーカーが発見され、患者にとって負担の大きいインターフェロンを使う治療計画が遵守される率が上がって臨床成績が改善される可能性が出てきた。この新しいバイオマーカーは「1 文字」、つまり 1 つの塩基の遺伝的変異であり、インターロイキン 28B（インターフェロン - λ 3）をコードする *IL28B* 遺伝子近傍の DNA 領域で T（チミジン）が C（シトシン）に置き換わっている。この知見により、ヨーロッパ系（*IL28B* 周辺の変異が高頻度でみられる）、アフリカ系、そしてアジア系の患者の間での治療成績の違いがある程度説明される。そして重要なのは、このマーカーが臨床にすぐに役立つことだ。

Letter p.399, N&V p.357 参照

細胞：欠陥ミトコンドリア DNA の交換修理

A fix for defective mtDNA

ミトコンドリア DNA（mtDNA）は母親から子へと受け継がれ、精子のミトコンドリアは胚の DNA に全く寄与しない。mtDNA の変異は、2 型糖尿病、ミトコンドリア性筋障害や神経障害をはじめとするさまざまな疾患と関連している。8 月 26 日に本誌オンライン版に先行発表され、今週号に掲載されている論文では、非ヒト霊長類モデルを用い、核を取り除いた卵にほかの卵から紡錘体 - 染色体複合体を移植することで、欠陥のあるミトコンドリアゲノムを交換できることを実証している。この実験では、2 匹の雌アカゲザルから得た未受精卵が、「核」および「細胞質」のドナーとして使われた。こうして作製した卵を受精させて胚まで発生させ、それを代理母に移植した結果、健康な双生仔が生まれた。この 2 匹は、ミトコンドリアの可視化に用いられるプローブにちなんで、Mito および Tracker と名付けられた。この結果は、mtDNA 疾患の家系で疾患の遺伝を防ぐ見込みのある方法を示唆している。

Article p.367, N&V p.354 参照

気候：森林が放出するイソプレンはエアロゾルを減らす

Forest isoprene clears the air

陸上の植生は大気中に大量の揮発性有機化合物（VOC）を放出し、その主なものはイソプレンとその誘導体であるモノテルペンやセスキテルペンなどで、それらの中には松の木の香りとしておなじみのものもある。これらの化合物は、有機エアロゾルの形成にかかわっていると考えられてきた。そして、エアロゾルは雲生成の「種」として働くため、放射強制力に対する影響を介して冷却効果を発揮することが示唆されている。今回、植物育成室を使って森林の条件をシミュレートした実験によって、イソプレンはヒドロキシルラジカルとの反応性が高いため、新たな粒子形成を大きく阻害する可能性があることが示された。この意外な結果から、観測される核形成頻度の季節変化を説明できるかもしれない。夏には秋や春よりもエアロゾルの核形成が少ないのだが、テルペンの放出量は夏に最高となるからだ。この結果から、気候変化や土地利用の変化に応答して起こる VOC のイソプレン含有量増加によって、新たに形成されうるエアロゾル粒子が減少すると考えられ、これまで認識されていなかった気候温暖化の要因が 1 つ増えることになる。

Letter p.381, N&V p.353
Making the paper p.313 参照

進化：絶滅した海生爬虫類の性決定

Reptiles, sea and sex

陸生脊椎動物は、出現してからも幾度となく海に回帰してきた。哺乳類である現生アザラシ類やクジラ類は胎生であり、性が遺伝子型によって決定される。しかし、モササウルス類や魚竜類、首長竜類など、かつて海で栄えた多くの爬虫類はどうだったのだろうか。性決定は環境か遺伝子型のどちらかで、出生様式は胎生か卵生のいずれかだったと考えられる。Organ たちは系統発生解析に基づき、過去に海生に戻った爬虫類は胎生であったばかりでなく（これは化石記録から明らかである）、遺伝子型による性決定機構をもっていたと考えている。これによって、産卵のために陸地に戻る必要性（有羊膜卵は水中では死滅する）から解放され、高度に進化した魚類様の身体への形態変化が可能となったのだろう。

Letter p.389, Abstractions p.313 参照

DAN VARNER

絶滅したモササウルス（*Plioplatecarpus*）の親子（想像図）。

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Vol. 461 No. 7263
24 September 2009

祖先探し：遺伝子スクリーニングから明らかになったインド人集団の歴史

MEET THE ANCESTORS: Indian population history from gene screening

インド人の異なる集団 25 組からの 132 人についての遺伝的変異の分析により、遺伝的に異なる古代の 2 集団が現在のインド人ほとんどの祖先であることが明らかにされた。そのうちの 1 系統、原北インド人（Ancestral North Indian）という集団は、中東人、中央アジア人、およびヨーロッパ人と遺伝的に近縁である。もう一方の系統である原南インド人（Ancestral South Indian）は、インド亜大陸外に近縁の集団が存在しない。この研究により、長年にわたって謎だったいくつかの問題に対する答えがみえてきた。有名な「カースト制度」が現在もつ力は英国の植民地主義によるものだと主張する人類学者もいたが、この制度は、何千年にもわたってインドの婚姻形態を決定付ける強い力になっていたと考えられる。また、アンダマン諸島に住む少数民族である謎めいた「ネグリト」は、原南インド人集団から古代に隔離された人々であることが突き止められた。内婚の習慣も一因となって集団間の対立遺伝子頻度の差が大きいことから、インドにはさまざまな劣性疾患がほかよりも多く存在し、それは遺伝学的にスクリーニングおよびマッピング可能だと考えられる。

Article p.489, N&V p.487 参照

気候：変わりつつあるエルニーニョ

El Niño changes its tune

最近の数十年間に、明らかに従来とは異なる種類のエルニーニョが出現するようになった。「通常の」エルニーニョは東太平洋の異常な水温上昇を伴う気候事象で、洪水から干ばつに至るまで、さまざまな影響をほかの地域の気候に及ぼす。時には「エルニーニョもどき」とよばれることもある、これとは別の型のエルニーニョでは、暖水域が西へ移動し、その東側と西側により冷たい海水が存在する。S-W Yeh たちは、温室効果ガスの人為起源の変化を取り入れた一連の気候モデルを用いて、この新種のエルニーニョの発生比率は、21 世紀後半までに、最大で現在の 5 倍に増加すると予測されることを示している。

Letter p.511, N&V p.481 参照

宇宙：恒星は運動量を失う

Stars lose their momentum

ほとんどの恒星は、白色矮星としてその一生を終える。白色矮星はコンパクトなので、もしすべての恒星が進化の間ずっと角運動量を保存しているならば、数秒という周期で非常に高速で回転するようになるはずだ。しかし白色矮星の観測から、その表層はもっと低速で回転し、典型的な周期は数時間から数十年であることが示されている。これまで、白色矮星の光球の表層面より内側の部分がもっと高速で回転しているかどうかを確かめる手段はなかった。しかし今回、星震学という手法によって、脈動している白色矮星 PG 1159−035 が約 33 ～ 34 時間という比較的長い周期で、剛体回転していることが明らかになった。これは、この星が角運動量の実質的にすべてを、おそらく白色矮星の段階になる前に失ったことを意味している。

Letter p.501, N&V p.485 参照

発生：活性酸素の有用な働き

Reactive oxygen's good side

活性酸素種（ROS）については、主に DNA 損傷、タンパク質や脂質の酸化やアポトーシスでの有害な影響が調べられてきたが、組織によっては ROS にも有益な効果があることがしだいに認められつつある。哺乳類の造血系では、造血幹細胞の ROS 濃度は低いが、骨髄系共通前駆細胞（CMP）では、ROS レベルが意外にもかなり上昇している。E Owusu-Ansah と U Banerjee は、ショウジョウバエ（*Drosophila*）の 2 種類の前駆細胞で、ROS レベルの差が機能にとって重要であるらしいことを見いだした。彼らの研究は、前駆細胞集団で発生的に制御されて中程度の濃度となった ROS は、前駆細胞を刺激して分化しやすい状態にすること、またこれにより、造血系細胞運命の調節において ROS がシグナル伝達因子としての役割を果たせるようになることを明らかにしている。

Letter p.537, N&V p.486 参照

細胞：発がん性をもつ前立腺細胞

Oncogenicity in the prostate

マウス前立腺で、CARN 細胞とよばれる稀少な管腔幹細胞集団が見つかった。CARN 細胞は、アンドロゲン除去によって引き起こされる前立腺組織再生過程で、管腔細胞と基底細胞の両方を生じる。これらの細胞は、自己複製能を備えているだけでなく発がん性形質転換の標的でもあり、CARN 細胞で腫瘍抑制遺伝子 *Pten* を欠失させると、再生中の前立腺で腫瘍の発生が引き起こされる。これらの細胞はアンドロゲンがない条件下で生存する能力をもつことから、アンドロゲン非依存性がんがこの細胞集団から生じる可能性が浮上してきた。また、CARN 細胞を足がかりに、侵襲性前立腺がんの悪性特性に寄与する細胞を標的とする治療への道が開けるかもしれない。

Article p.495 参照

医学：プリオン病の伝播

Prion disease transmission

慢性消耗病（CWD）は、シカ科のアカシカやヘラジカなどのいくつかの種に神経変性を引き起こす、接触感染性が非常に高いプリオン病である。自然界における CWD の伝播機序の詳細は、いまだに明らかにされていない。この疾患の徴候が現れた動物の排泄物には、感染性をもつプリオンが含まれる場合があることが知られている。S Prusiner たちは、CWD に感染したミュールジカは、症状が現れるかなり前から、伝染性のプリオンを糞便中に排泄し始めることを明らかにしている。このことは、CWD がシカの間で高い発生率と強い水平感染力をもたらす自然的機序と思われるものを示唆しているばかりでなく、同じく接触感染するヒツジのスクレイピーにも関係があると考えられる。

Letter p.529 参照

発生：単純なやり方で作られるモルフォゲン勾配

Morphogens keep it simple

「モルフォゲン」とよばれる分子の濃度勾配は、胚形成の際に組織の発生を制御することが知られている。Yu たちは、これまでにほとんどわかっていなかった勾配が形成される仕組みの解明に取り組んできた。彼らは、生きたゼブラフィッシュ胚で *in vivo* 分子画像化に先端的で非常に精密な技術である蛍光相関分光法を用い、自由拡散する Fgf8 モルフォゲン勾配が、シンプルなソース（供給）- シンク（受容）機構から生じることを示した。

Letter p.533, N&V p.480 参照

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Vol. 461 No. 7264
1 October 2009

ベルリンの壁の向こう側：壁崩壊以後 20 年間の東欧の科学事情

BEYOND THE BERLIN WALL: Eastern European science twenty years on

20 年前のベルリンの壁崩壊はさまざまな影響をもたらしたが、その 1 つに、東欧の研究者と科学が世界と交流できるようになったことがある。今週号では、あの騒然とした秋に起こった壁崩壊の「遺産」を検証している。Q Schiermier は、東欧の 2 人の研究者が語る、まだ始まったばかりだった彼らの研究者としてのキャリアが、1989 年の一連の事件をきっかけにどう作り上げられていったかという話に耳を傾け、論文の被引用度などを目安にして、東欧諸国の科学研究の状況についてまとめている。Opinion では K Macrakis が、当時の東ドイツの対外スパイ組織の最大の関心事が科学技術であったことを、最近公開された CIA の資料の調査から明らかにしている。C Ainsworth は、東欧の故国に戻った研究者たちに、何に心を惹かれて帰国を決めたのかを尋ねている。

News Features pp.586, 590, Opinion p.594
Editorial p.569, Naturejobs p.682 参照

オンライン特集　www.nature.com/news/specials/easterneurope

化学：化学反応を X 線で調べる

Chemical reactions X-rayed

安定な結晶性化合物の構造解析に最も適した方法は、X 線結晶構造解析である。しかし、不安定な反応中間体をこの方法で調べることは、その現在の能力を超えている。今回、川道起英（かわみちたかひで）たちは、丈夫な多孔質ネットワーク材料を設計することで、この問題を解決した。このネットワーク材料は「反応媒体」として機能し、細孔内で化学変換が起こる。そこで、X 線解析を使って、反応のさまざまな段階の「スナップショット」を撮ることができる。原理検証実験では、芳香族アミンが埋め込まれた多孔質ネットワークの構造がまず決定され、次いで、アルデヒド基質を多孔質材料内に拡散させて形成されたヘミアミナール中間体の構造、そして最後に、イミン生成物の構造が決定された。

Letter p.633, N&V p.602
Making the paper p.567 参照

地球：遠地地震が断層に与える影響

Earthquakes find fault

サンアンドレアス断層のパークフィールド地域で得られた 20 年間の地震記録を用いて、遠隔地で起きた巨大地震、すなわち 2004 年のスマトラ・アンダマン地震と 1992 年のランダース地震によって、断層強度の長期変化が生じた可能性がある 2 つの事例が突き止められた。これらでは、断層強度の変化と一致する 2 つの変化、つまり地震波散乱体の特性の時間変化（応力により流体移動が起きたことを示している）と、繰り返し地震の発生シーケンス特性の系統的な時間変化が起きた。この知見は、巨大地震が地球上の断層系の強度に全球的な影響を及ぼしうることを示唆している。この仮説は、2004 年のスマトラ・アンダマン地震後、3 年間に起きた $M > 8$ の地震の数が異常に多いことからも裏付けられる。

Letter p.636 参照

細胞：Wnt 阻害剤の標的

Target for Wnt inhibitors

Wnt 経路は胚発生などの生細胞での多くの過程に関与するシグナル伝達系で、ここの調節異常はさまざまながんに関連するとされており、そのため、抗がん療法の格好の標的といえる。しかし、Notch 経路や Hedgehog 経路の阻害剤が臨床試験の段階に達している一方で、Wnt 阻害剤については「創薬につながる」標的は見つけにくいとされていた。今回、化学遺伝学的手法を用いて Wnt 経路の低分子阻害剤が同定され、その直接の標的と作用機序が明らかにされた。この XAV939 は、β-カテニン分解複合体の濃度制限因子であるアキシンの安定化を介して、Wnt シグナル伝達を阻害する。この研究結果は、新しい薬剤標的を示唆するだけでなく、Wnt 経路が生理学的にどのように調節されているかを探る手がかりも与えてくれる。

Article p.614, N&V p.599 参照

医学：新しい抗結核治療法

New anti-TB approach

プロテアソームは、余分な、あるいは損傷を受けたタンパク質を分解するタンパク質複合体で、その構造は古細菌から真核生物まで保存されている。プロテアソーム阻害剤はがんの治療に使われており、プラスモジウムやトリパノソーマのような病原性真核生物感染の治療にも使えると考えられている。しかしながら、プロテアソーム阻害剤が本来的にもつ毒性により、治療可能な感染症への使用は妨げられている。マイコバクテリウムは、プロテアソームをもつことが知られている唯一の細菌性病原体である。その一種である結核菌（*Mycobacterium tuberculosis*）のプロテアソームを選択的に阻害する新種の小型分子が発見され、抗プロテアソーム薬が非常に選択性の高い結核治療薬になるのではないかと期待されている。新しい阻害剤はオキサチアゾール -2- オン化合物で、結核菌のプロテアソームに不可逆的に結合するが、ヒトのプロテアソームにはほとんど影響しない。

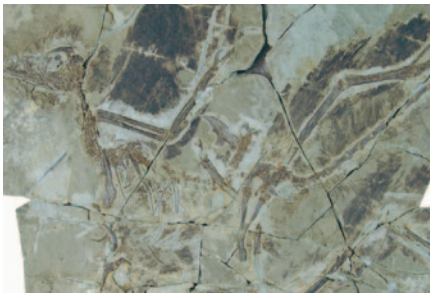
Article p.621, Abstractions p.567 参照

進化：羽毛のあるトロオドン類

Strictly for the troodontids

トロオドン類およびドロマエオサウルス類は、鳥類と最も近縁の恐竜分類群である。中国のジュラ紀層で出土した *Anchiornis huxleyi* は、鳥類様の形質を複数集積しながら祖先の重要な特徴も保持しており、鳥類の側系統群に当たると考えられていた。しかし、保存状態のすばらしい化石標本が新たに見つかったことで、*A. huxleyi* はトロオドン類であることが明らかになった。つまり、*A. huxleyi* はトロオドン類の中でもごく初期の種（始祖鳥よりも時代が古い）であり、しかも豊かな羽毛が特に脚部と足部に認められる。原鳥類（トロオドン類、ドロマエオサウルス類、および鳥類）の初期の歴史が進化の実験に富むものであったことは間違いなく、新たな化石の発見により、ようやくその様相が明らかになりつつある。

Letter p.640, N&V p.601 参照



中国のジュラ紀後期の地層で見つかった *Anchiornis huxleyi* の化石。左上が頭部で、前後の脚には羽毛が確認できる。

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Vol. 461 No. 7265
8 October 2009

進化するがん：乳房腫瘍中の不均質性と進化

A CANCER EVOLVES: Heterogeneity and evolution in a breast tumour

原発腫瘍の診断から転移巣の出現まで 9 年が経過している患者について、細胞株や異種移植腫瘍ではなく、エストロゲン受容体 α 陽性の転移性小葉乳がんのゲノムとトランスクリプトームの検討が、最新の「次世代」配列決定法を使って行われた。同一患者での転移巣と原発腫瘍の体細胞性非同義変異の比較、およびゲノムとトランスクリプトームのデータの統合解析から、腫瘍の進行に伴って起こることがある変異の進化について、手がかりが得られた。表紙には、この研究に使用された腫瘍由来の組織を背景として、この組織中で見つかった変異遺伝子の 1 つ、*HAUS3* 遺伝子座の塩基配列の一部が示されている。

Letter p.809 参照

遺伝：疾患の遺伝学

Genetics of complex diseases

全ゲノム関連解析（GWAS）により、ヒトの複合疾患に関連する何百もの遺伝的変異が同定されてきたが、その多くは発症リスクをわずかしか増加させない。疾患のような量的形質にかかわる遺伝要因の強さの指標である遺伝率のかなりの構成成分が、どういうわけか検出されていないらしいのだ。この「見つからない遺伝率」を説明するものとして、作用の小さい多数の未発見変異、現在の技術では検出されない希少な構造的またはエピジェネティックな変異、検出が困難な遺伝子間および遺伝子 – 環境間の相互作用などが考えられている。Review では T Manolio たちが、これらをはじめとする、可能と思われる説明を最もよく判定できそうな研究戦略を検証している。また News Feature では、GWAS の結果から生物学的意味を汲み取ることの困難さをよく示している 3 つの「ヒット」の話を、K R Chi が紹介している。

Review p.747, News Feature p.712 参照

生化学：Argonaute はどのようにして mRNA を切断するか

How Argonaute slices mRNA

RNA サイレンシングによる遺伝子発現抑制方法の 1 つに、低分子 RNA を介する相補的 mRNA の切断がある。Argonaute ファミリーのタンパク質は、植物や動物での遺伝子発現に必須の調節因子である。これらのタンパク質群は、ガイドとして働く一本鎖 RNA に結合して RISC 複合体を形成し、この複合体が、Argonaute に結合した一本鎖 RNA と相補的な配列の mRNA の切断を触媒する。今回、切断活性を阻害するように変異を導入した好熱菌（*Thermus thermophilus*）由来のいくつかの Argonaute タンパク質について、ガイド RNA 鎖およびさまざまな長さの標的 RNA 鎖と複合体を形成した場合の結晶構造が決定された。いろいろな構造の比較により、ガイド RNA 鎖と標的 RNA 鎖が塩基対を形成する際のコンホメーション変化が明らかにされ、3 つのアスパラギン酸と 2 つの Mg^{2+} イオンがかかわる切断機構が示唆された。

Article p.754, N&V p.743 参照

量子力学：コマで行う量子カオス研究

Quantum chaology is tops

カオスは、簡単なものから複雑なものまでさまざまな系でみられ、原子のエネルギー準位、電子輸送、化学反応、神経回路網、人口動態、気象系や惑星の運動で見いだされている。カオスは、実際にはほとんどどこにでもあるといえるが、量子力学とは基本的に相いれないようにみえ、古典カオスの量子的な特徴が長い間探されてきた。今回、そのような特徴の実験的検証が、「キックされた（力を頻繁に受けてその回転が変化していく）コマ」で実現された。これにより、対応する古典カオスをもつ量子相空間動力学の観測に使える原子系が得られたことになる。この系は、過冷却セシウム原子を中心に構成されており、これらの原子は電子スピンと核スピンを乱す磁場による「キック」を受けているため、摂動に敏感であり、動力学的量子もつれを示すなどカオスの量子的特徴をみせる。

Letter p.768, N&V p.736 参照

地球：監視が必要な流紋岩質火山

Volcanoes to watch

チリのチャイテン火山は 2008 年 5 月 1 日に、突然爆発的な噴火を起こし、現在も噴火が続いている。この噴火により 5000 人以上の住民が避難し、チリでは何百万ドルもの歳入が失われることになった。また、この噴火によって、地球の最大級の火山噴火のいくつかの原因となった流紋岩質マグマが原動力の噴火を直接観測する、まれな機会が得られた。J Castro と D Dingwell は、観察と実験から得た証拠を示して、チャイテン火山では水を含む流紋岩質マグマが、毎秒 1 メートルという速度で急上昇したことを示した。このような速い上昇は、ほとんどの珪長質マグマの振る舞いとは大きく異なっている。5 キロメートル以上の深さのところから地表近くまでの移動時間はわずか 4 時間と考えられ、このような噴火の場合は警報を発する時間がほとんどない。この研究は、過去ほぼ 1 万年間にわたって活動してきた流紋岩質火山、特に人口密稠密地域の近くにあるものは、注意深く監視する必要があることを示唆している。

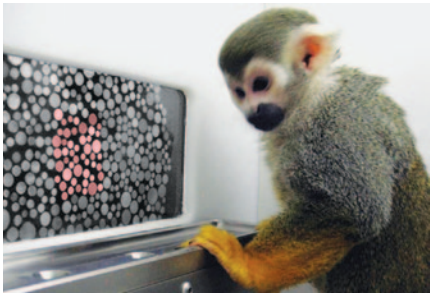
Letter p.780, Abstractions p.695 参照

視覚：色覚異常の遺伝子治療

Gene therapy in colour

視覚などの神経機能の発達には決定的に重要な時期があり、それは青年期に入る前に終了すると広く考えられている。そのため、例えば先天性視覚障害をもつ成人の遺伝子治療は不可能だと思われることが多い。しかし、二色型色覚をもち、赤緑色覚がヒトとは異なるリスザル成獣を用いた実験で、遺伝子治療によって網膜細胞の一部に第三の光色素（ヒトオプシン）を導入できることがわかった。導入の結果、リスザルは新しい次元の色覚をもつようになった。この成果は、ヒトに広くみられる先天性視覚障害の治療法につながる可能性がある（現在、臨床試験中）だけでなく、視覚処理を行う神経に著しい可塑性があることを実証しており、三色型色覚の進化の道筋も示している。

Letter p.784, N&V p.737
Making the paper p.695 参照



遺伝子治療後、色覚検査を受けるリスザル。

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Chromosome protection scoops Nobel

ノーベル医学生理学賞は、染色体の保護機構テロメアの解明に

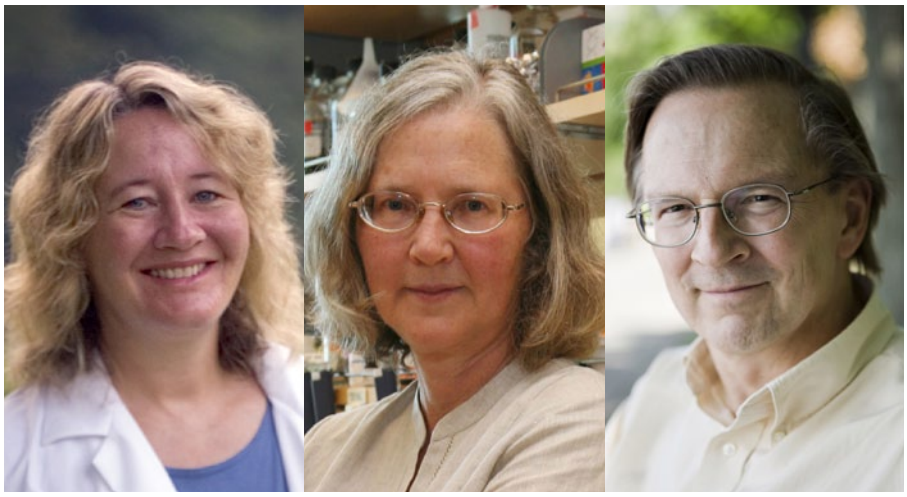
Alison Abbott Nature Vol. 461(706-707)/ 8 October 2009

2009 年度の医学生理学賞は、染色体の末端にあるテロメアの役割を明らかにした研究者 3 氏に決定した。

2009 年度のノーベル医学生理学賞は、染色体末端にあるテロメアとよばれるキャップ構造を発見し、この構造によって染色体が分解から保護される仕組みを解明した、3 人の米国の研究者に贈られる。1980 年代から 1990 年代にかけて細胞生物学の分野でなされたこの発見によって、老化やがんの研究に新たな道が開かれ、いまなお、この分野では活発な研究が展開されている。

10 月 5 日に発表された受賞者は、カリフォルニア大学サンフランシスコ校の Elizabeth Blackburn、メリーランド州バルチモアにあるジョンズホプキンス大学医学系大学院の Carol Greider、マサチューセッツ州ボストンにあるハーバード大学医学系大学院の Jack Szostak の 3 人で、賞金は等分される。既に 3 人はこの業績に対してさまざまな賞を受賞しており、ノーベル賞の先取り賞とも見なされることの多いラスカー賞を、2006 年度に共同受賞している。

彼らの研究によって、染色体内に格納されている DNA が、細胞分裂中に DNA ポリメラーゼ酵素によって、欠けることなくすべて複製されるための根本的な仕組みの 1 つが明らかになった。染色体の末端部にはテロメアとよばれるキャップ構造があり、以前からこの構造は保護的な機能をもつとみられていた（次ページの図を参照）。テロメアがないと、染色体は細胞分裂のたびに短くなってしまうと考えられた。というのは、DNA ポリメラーゼはその性質上、複製対象とする DNA の最末端の部分を複製できないからである。



共同受賞の 3 氏。左から Carol Greider、Elizabeth Blackburn、Jack Szostak。

UPI/HO/NEWSCOM;UPI/ELISABETH FALL/HO /NEWSCOM;UPI/SUSAN MERRELL/HO/NEWSCOM

種を越えた作用

Blackburn と Szostak は 1980 年に開催されたゴードン研究会議で偶然出会い、その後共同研究を始めた。そして 1980 年代初め、テロメアに特定の DNA 配列が含まれていることを見つけた。2 人はお互いの研究の目新しさに触発されて実験をいくつか考え出したが、それらは当時かなり奇抜な実験と見なされ、彼ら自身もまたそう思っていたようである。Szostak は、Blackburn が原生動物のテトラヒメナ *Tetrahymena thermophila* で見つけたテロメア配列に着目し、これをミニ染色体に連結させて、彼のお気に入りのモデル生物だった酵母に入れてみた。

すると、テロメア配列のおかげで、異種細胞内に入れたこれらの染色体は保護されたのである[1]。やがて、テロメアによるこの保護作用は、ほぼすべての動植物に存在する基本的な生体機構の 1 つであることが明らかになった。さらに Szostak と Blackburn は、この機構には未知の酵素が関与しているに違いないとにらんだ。1984 年のクリスマスの日、当時大学院で Blackburn の下にいた Greider は、Blackburn と 2 人で「テロメラーゼ」と名付けたこの酵素が、実際にテロメアの DNA 修復を担っていることを示す証拠を初めて見つけたのだった[2]。

彼女たちは、DNA ポリメラーゼが染色体の末端部を失うことなく全長を複製するうえで、テロメラーゼが基盤機構の重要な一端を担っていることを明らかにした。

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

2 人はさらに、テロメラーゼにはテロメア DNA の鋳型になる重要な RNA 配列が含まれていることも示した[3]。こうしてできあがったテロメア DNA にタンパク質が集まって結合し、DNA 鎖の末端部に保護用のキャップ構造が形成されるわけだ。

テロメア自体は細胞分裂を繰り返すうちに短くなっていくため、細胞の老化機構の重要な要因となっている。テロメラーゼの活性低下やテロメアの短縮によって老化はスピードアップする。一方、際限なく分裂するがん細胞ではテロメラーゼ活性が高く、テロメアの長さが維持されている場合が多い。現在、テロメラーゼを標的とするがん治療法の臨床試験が複数進行中だ。

ただし、今後解明すべき生物学上の基本的問題もまだ多数残っている。例えば、テロメラーゼ活性は個々のテロメアでどのように制御されているのだろうか。また、DNA 修復酵素は DNA のほころびを探し回って見つけ出し、切れた DNA の両端をつなぎ合わせるが、テロメアはどうやってこうした酵素を引き寄せずにすんでいるのだろうか。

女性科学者の独壇場

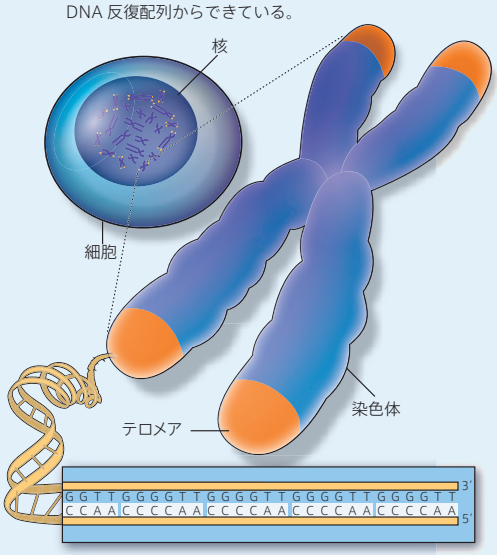
Blackburn と Greider は、1901 年に創設されたノーベル医学生理学賞の女性受賞者としてはまだ 9 人目と 10 人目であり、1 つの賞で女性 2 人が共同受賞したのは今回が初めてである。実際のところ、テロメア研究者には不思議なほど女性が多い。「男性を見つけるのが難しいくらいですね。その主な 2 つの原因は Liz（Greider）と Carol（Blackburn）にあります。何といっても、この分野を作り上げたのは彼女たちですし、研究者のお手本にもなっているのですから」と、ジュネーブ大学（スイス）の細胞生物学者 David Shore は指摘する。

Blackburn は米国の科学政策にもかかわったことがあり、2002 年に大統領諮問機関である生命倫理委員会の委員となったが、当時のジョージ・W・ブッシュ大統領がヒト胚性幹細胞（ES 細胞）研究を規制したことを批判して、2004 年に解任された。

Greider が指導した最初の大学院生で、現在はエディンバラ大学ウェルカムトラスト細胞生物学センター（英国）にいる Lea Harrington は、彼女自身がニューヨークのコールド・スプリング・ハーバー研究所の Greider 研究室で過ごしたころを振り返り、こう語ってくれた。「あの 4 年間は本当に刺激的でした。活気に満ちた時代のさなかにいることを、そこにいる全員が実感していました。テロメラーゼの構成や働く仕組みやヒトの生物学との関連性について、疑問が次々とあふれ出てきた時でしたから」。（船田晶子 訳） ■

染色体のキャップ構造

テロメアは染色体の末端部を保護するキャップ構造を形成しており、酵素テロメラーゼが作る DNA 反復配列からできている。



図示した DNA 塩基配列はテトラヒメナのテロメアのもの。

Nobel Prize in Physics awarded to light pioneers

ノーベル物理学賞は光技術のパイオニアたちへ

Geoff Brumfiel Nature Vol. 461(707)/ 8 October 2009

光ファイバー技術とデジタル画像処理技術を飛躍的に進歩させた業績が評価された

科学、コンピューティング、通信の分野に革命を起こした 2 つの光関連技術の開発者に、2009 年のノーベル物理学賞が贈られる。

賞金の半分は、光ファイバーケーブルの開発に貢献した香港中文大学の Charles Kao が受ける。残りの半分を、光をデジタル電気信号に変換する電子チップ CCD（電荷結合素子）を開発した米国ニュージャージー州マレーヒルにあるベル研究所の Willlard Boyle と George Smith が等分する。

光から電気に変換する画像素子 CCD

Boyle と Smith は、1969 年に、光を電気信号に変換するチップを開発した。このチップには、当時発見されたばかりの MOS（金属 - 酸化物 - 半導体）構造の素子が使われており、光子を電子の流れに変換し、チップの端部でこれを読み出し、画像を再現することができた。

光をデジタル電気信号としてとらえる CCD は、ほとんどすべての科学分野で応用されてきた。特に大きな恩恵を受けたのが天文学だ。ドイツのガルヒンクにある欧州南天文台（ESO）の計測部長 Mark Casali は、「CCD は光学天文学に革命を

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

ALCATEL-LUCENT/BELL LABS

CCD を開発した Willlard Boyle と George Smith。

NEWSCOM

光ファイバー技術の進歩に貢献した Charles Kao

起こしたといえます」と説明する。CCD が登場するまでは、天文学者たちは写真乾板を使って星の画像を撮影していた。デジタル化された CCD と比べて、写真乾板は感度も精度も低かったと Casali はいう。CCD カメラを用いることで、天文学者は遠方の銀河の微弱な光をとらえたり、惑星が周囲を公転することによる恒星の光の変化を観測したりすることが可能になった。

ハッブル宇宙望遠鏡を用いた研究を支える宇宙望遠鏡科学研究所（米国メリーランド州ボルチモア）の Matt Mountain 所長は、宇宙をベースにした天文学を現実のものにしたのも CCD 検出器だったと指摘する。「今や、大型の検出器を宇宙に打ち上げて、人類がこれまで見たことのない、極めて遠くの天体のデジタル画像データを送信させることができるわけです」。

大容量伝送路としての光ファイバー

光ファイバーが科学に及ぼした影響もまた、CCD に匹敵するほど大きい。Kao が光ファイバーケーブルの研究に着手した頃は、数千キロメートルの距離を隔てたデータ伝送など夢のまた夢だと思われていた。当時のファイバーは全反射により光を数メートル伝送できるだけで、信号はすぐに減衰してしまったからである。英国ハーローにある STL（Standard Telecommunication Laboratories）に所属していた Kao らは、伝送損失の原因が主に鉄イオンなどの不純物にあることを突き止め、これに代わる材料（石英ガラス）を用いることで、非常に小さな損失で、はるかに長い距離にわたって光を伝送できることを明らかにした。現在、地球全体に張りめぐらされている全長 10 億キロメートルの光ファイバー網の基礎には Kao のこの研究がある。

光ファイバーは、世界最大の科学実験でも重要な役割を果たすことになっている。それは、スイスのジュネーブ郊外にある欧州原子核研究機構（CERN）の大型ハドロン衝突型加速器（LHC）で行われる実験だ。LHC の検出器の中で最大のものは毎秒約 100 万ギガバイトもの生データを生成する。このデータを近くのサーバーに送り込み、さらに超高速グリッド・コンピューティング・システムを介して世界 33 か国に散らばる数千人の科学者にデータを送り届けるのが、光ケーブルだ。プロジェクトリーダーである Ian Bird は、「光ファイバーなしでは、この実験のデータ速度を支えることはできなかったでしょう」と話している。（三枝小夜子 訳） ■

Structual biology bags chemistry prize

ノーベル化学賞はリボソームの構造生物学に

Rochard Van Noorden
Nature Vol. 461(860)/15 October 2009

細胞のタンパク質合成装置の仕組みを解明した 3 人の研究者が共同受賞。

リボソームは、細胞内で遺伝暗号に従ってタンパク質を合成する重要な装置だ。今年のノーベル化学賞は、このリボソームの構造と内部の機構を突き止めた 3 人の構造生物学者に贈られる。

受賞者は、ケンブリッジにある英国医学研究会議（MRC）分子生物学研究所の Venkatraman Ramakrishnan、イスラエル・レホヴォトにあるワイツマン研究所の Ada Yonath、米国コネティカット州ニューヘイヴンにあるエール大学の Thomas Steitz で、賞金は三等分される。

受賞が決まった直後、Ramakrishnan は *Nature* に、「少々、驚いています」と語った。「リボソームは非常に重要な構造体で、数多くの研究者がその解明に貢献してきました。今はただ、3 人の受賞者の 1 人に選ばれたことを本当に嬉しく思います」。

リボソームの構造を解明することは、それがどのように DNA をタンパク質に翻訳するかを理解するうえで、カギとなるステップだった。「原子がどのように配列しているかを見ないかぎり、生化学的な知識を全体の枠組みの中に位置づけて統合化する

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

2009 年ノーベル化学賞を共同受賞する Thomas Steitz（左）、Venkatraman Ramakrishnan（中）、Ada Yonath（右）。

のは難しいからです」と Ramakrishnan はいう。「高解像度の画像がこの研究分野の性格を変え、さまざまな生化学実験の方向性を与えました。そうした意味でも、高解像度画像はとてつもなく大きなインパクトを与えたのです」。

Ramakrishnan のグループと Steitz のグループは、X線結晶学の手法を用いて、細菌などの単純な生物のさまざまなリボソームの構造を明らかにし、その解像度を高めていった。1980 年代にリボソームの結晶化に初めて成功して彼らの研究への道を開いたのが Yonath だった。研究者たちは、こうして解明された構造をもとにして、「リボソームがメッセンジャー RNA（DNA の一部を転写したもの）を捕まえ、その情報に従ってアミノ酸を順番につなぎ合わせてタンパク質を作りあげる仕組み」を明らかにしたのである。

巨大分子の結晶化

小さな細菌などの中にあっても、リボソームは、巨大で複雑な構造をした分子である。大小 2 つのサブユニットからなり、50 種類以上のタンパク質からできている。1970 年代後半にはヘモグロビンやミオグロビンなどの生体分子が結晶化されていたが、リボソームのサイズはこれらより一桁大きかった。

「リボソームを結晶化させることなど、当時は全く考えられないことでした。けれども Ada には、自分が挑戦していることへの、深くて強い確信があったのです」と、ワイツマン研究所の化学部門長 Yehiam Prior はいう。

死海に生息する好塩性生物など、回復力の強い生物は、特に安定なリボソームをもっている。Yonath はこうした生物のリボソームを用いることで、この分子の三次元結晶を作ることに成功した。そして、この結晶に X 線を照射することで、ぼんやりとではあるが、リボソーム分子の像を初めてとらえることに成功したのだ。

その途端、多くのチームがこの分野に参入してきた。そして、解像度の向上に取り組むようになった。めざすは原子レベルでの構造決定だ。Steitz のチームはリボソームの 50S サブユニットの構造決定に専念した。これは、大きいほうのサブユニットで、アミノ酸をつなぎ合わせてタンパク質を作っていく部分である。彼らがこのサブユニットの構造を原子レベルの解像度で最初に発表できたのは 2000 年のことだった（N. Ban *et al. Science* **289**, 905-920, 2000）。

当時、Steitz の研究室でポスドクとして研究に従事し、現在はスイス連邦工科大学チューリッヒ校に所属している Nenad Ban は、「とても刺激的な時期でした」と回想する。「私たちは同じ分野のほかのグループと激しい競争をくり広げていて、毎日、絶え間なく議論していました」。

一方、Ramakrishnan のグループは、小さいほうの 30S サブユニットの構造決定に取り組んでいた。このサブユニットは mRNA を捕まえる部分であり、その詳細な構造は同じく 2000 年に発表された（B.T. Wimberley *et al. Nature* **407**, 327-339, 2000）。

医療への応用

リボソームの構造の解明は、特別な副産物を生み出すかもしれない。それは新しい抗生物質の開発だ。「リボソームが医学的に重要であることは、既に明らかになっています」と Ramakrishnan は指摘する。3 人の研究者はそれぞれ、抗生物質が細菌のリボソームを破壊し、タンパク質を合成できなくすることによって、抗菌作用を及ぼす仕組みを分析した論文を発表している。

抗生物質のクロラムフェニコールは、細菌リボソームの 50S サブユニットの活性部位に結合し、これがアミノ酸をつなぎ合わせてタンパク質を合成するのを阻害する。また、リボソームでつなぎ合わされたアミノ酸の鎖は細胞質中に出て折りたたまれる必要があるが、エリスロマイシンは、そのための通路をふさぎ、リボソームを詰まらせることでタンパク質合成を阻害する。

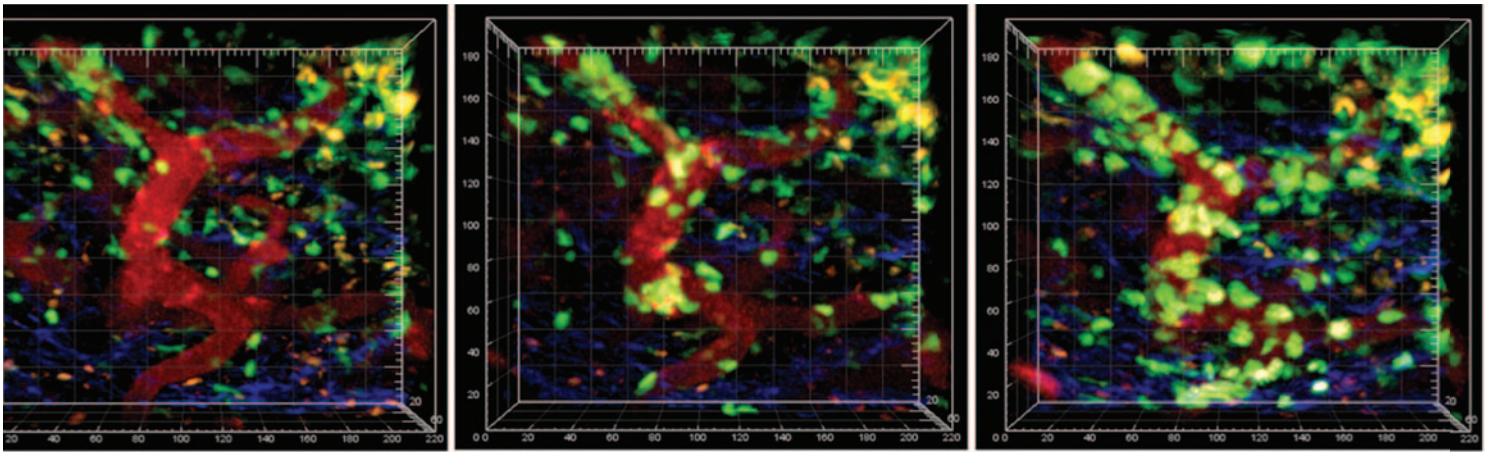
近年、細菌がこうした抗生物質への耐性を獲得してきたことが問題となっている。Steitz のチームからスピンアウトした Rib-X 製薬（米国コネティカット州ニューヘイヴン）などの新興企業は、リボソームの構造に関する知識を活用して新しい種類の抗生物質を開発しており、現在、臨床試験が進められている。

複雑な生体分子の構造と機能を解明した結晶学者にノーベル化学賞が授与されたのは、この 7 年で実に 3 回目である。米国化学会の会長 Thomas Lane は、「またかという気がしなくもありません」という。

けれどもケンブリッジ大学（英国）の物理科学部長 Jeremy Sanders は、構造生物学は「基本的には化学」なのだと説明する。「たとえ多くの化学者が、3 人の受賞者の名前を全然聞いたことがなかったとしても」と。（三枝小夜子 訳） ■

UPI/YALE UNIVERSITY/NEWSCOM;UPI/LABORATORY OF MOLECULAR BIOLOGY OF THE MEDICAL RESEARCH COUNCIL/NEWSCOM;RAFAEL BEN-ARI/CHAMELEONS EYE/NEWSCOM

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved



Lights, camera, infection

照明、スタンバイ！　カメラ、スタンバイ！　感染開始、アクション！

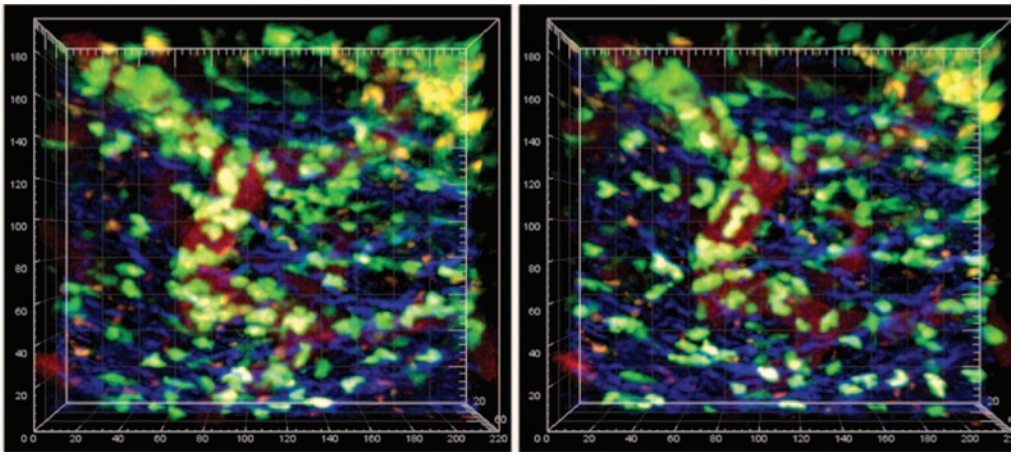
Nature Vol. 460(568-570)/ 30 July 2009

多光子顕微鏡法の登場により、免疫学者は、細胞レベルでリアルタイムの感染プロセスを観察し、記録できるようになった。Jeanne Erdmann がその「撮影現場」を取材した。

ワシントン大学医学系大学院（米国ミズーリ州セントルイス）の Mark Miller は、免疫学者である。彼の研究室には、黒く厚いカーテンで覆われた顕微鏡室がある。これからその中で、ある「アクション映画」の撮影が始まろうとしていた。Miller は研究チームの主幹の 1 人である Vjollca Konjufca とともに、多光子顕微鏡のいろいろな設定をざっと点検し、温めた試料台の上に載っている鎮静処理済みのマウスを入念にチェックした。準備が整い、Miller がスキャナーのスイッチを入れると、コンピューターのモニター画面には、赤、青、緑色の点滅画像が現れた。「ちょうどそこです」、と彼が示した先には、青色に光るサルモネラが、マウスの小腸内壁にある赤色に標識された指状の絨毛（じゅうもう）の先端近くに集まっていた。サルモネラはまるで、山すれすれに飛び回るヘリコプターのようである。時刻は昼を少し過ぎたくらいだっただろうか。我々はその後 1 時間、「観客席」につき、これらの細菌を見つめ続けた。Miller の実験もよく似たほかの実験も、カーテンの陰で見つめる、限られた「観客」だけでなく、免疫学者というもっと広い層の「観客」の心を魅了してやまない。

10 年足らず前までは、Miller をはじめとする免疫学者は、試験管内で感染プロセスを研究していた。培養ディッシュ上で、病原体と細胞を混ぜて相互作用させていたのである。しかし、こうしたシミュレーションには限界があった。なぜなら、そうした条件下の細胞は、動物園で飼育されている動物のようなもので、その挙動に影響を及ぼす本来の環境から切り離されていて、生体での挙動はわからないからである。そこへ登場したのが、多光子顕微鏡である。これによって、生きている組織の深部を観察したり、「野生状態」の細胞のようすを「ライブ」で観察したりすることが可能になった。多光子顕微鏡は、特に、免疫系の研究に役立つ。免疫系を構成する免疫細胞は、体内のいろいろな環境を動き回り、病原体や周囲の細胞と相互作用するからである。

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved



V. KONJUFCA/T. GRAF

マウスの腸内で、好中球（緑色）はおよそ 1 時間にわたって血管（赤色）からあふれ出てサルモネラ（青色）と戦う。

Miller は、多光子顕微鏡法を例えてこういう。「我々免疫学者は、望遠レンズを使ってサバンナのガゼルの群れを研究する動物学者のようなものです。実際に目で観察した行動から、対象物の機能を推測するわけです」。さらに、「多光子顕微鏡の長所は、自分の探すものが前もってわからなくても構わないことです。それ自身が光って、ありかを示してくれるのですから。予想もしなかったものが見つかることもしょっちゅうです」と語る。その意外なものの 1 つが、感染後の数分もしくは数時間という、症状が現れるずっと前の段階で起こる劇的な変化だった。その「ドラマ」は研究者をスクリーンに釘付けにした。「目を見張るような現実が、そこにありました」と、この技術を用いて研究している米国立衛生研究所（メリーランド州ベセスダ）の免疫学者、Ronald Germain は話す。

現在、Miller の研究室は、多光子顕微鏡を利用し、生きている動物での感染をリアルタイムで観察する研究において、世界をリードする研究室の 1 つとなっている。

衣装とメイク

午前 11 時、撮影に先立ち、いつものように Konjufca は自分の実験を開始した。用意したのは、免疫系の数種類の細胞（好中球、リンパ球、樹状細胞、マクロファージなど）が蛍光顕微鏡で発光するように遺伝子操作した 1 匹のマウス、そしてやはり蛍光で標識したおよそ 1 万個のサルモネラ。彼女はサルモネラを注射器で吸引し、マウスの腸内に注入した。また、赤色の蛍光標識も腸内に注入し、腸の絨毛表層の上皮細胞に取り込まれて発光するようにした。サルモネラが体内に侵入して食中毒を起こす仕組みを調べるプロジェクトの一環として、彼女はこうした実験を週に 2 回ほど行っている。

Konjufca は、この研究が家畜用経口ワクチンの製造に役立って食料の安定供給につながればと考えており、感染プロセスで起こるさまざまな事象はどんな順序で起こっているのか、正確に解明したいと思っている。サルモネラはどうやって腸の内壁を破壊しているのだろうか。さまざまな免疫細胞はどのようにして感染現場に駆けつけるのだろうか。腸絨毛の樹状細胞はどうやってサルモネラの一部を飲み込んで処理しているのだろうか。そして、こうやって分解されて抗原の形になったサルモネラの一部を、どの細胞がリンパ球や脾臓へ運ぶのだろうか。「どの細胞が、いつ、どこへ行くのかは、必ずしもわかっていないのです」と Konjufca はいう。

Konjufca は経験から、野生型の菌株と、変異によりさまざまな毒性遺伝子をもっている菌株の両方を研究に用いている。彼女によれば、ワクチン用の無毒な株を作るためにサルモネラに変異を導入すると、菌が腸内に侵入して免疫系を刺激する能力が、かなりの確率で低下するのだという。めざしているのは、毒性はないが、長続きする強い免疫応答を引き起こせるサルモネラの菌株の作製だ。Konjufca は、いろいろと変異させた菌株に対するマウスの応答を観察して、この問題を解明しようとしているのだ。

この研究については、まだ何も発表されていない。Konjufca は現在、注入すべき菌体数など、技術的な細かい点をさらに詰めているところである。数が少なすぎると、感染に最初に応答する好中球などの白血球が十分動員されない可能性があり、また逆に多すぎても、生理的応答をそっくり模倣できないと考えられる。さらに、サルモネラの注入から観察開始までの適切な待機時間を探り出す必要もある。3 ～ 5 時間待った場合、小腸は既に刺激を受け終わっている可能性があり、そこで起こった「事件」を見逃しかねない。現在のところ、2 時間あれば十分だと彼女は考えている。作業の半分以上は、こうした細かい技術的な問題を解決することで占められている。しかし、これをやらないと何も得られないのだ。

特殊効果

Konjufca は現在、多光子顕微鏡法を日常的に使っているが、この技術がデビューした 1990 年当時、それは画期的なことだった [1]。標準的な共焦点顕微鏡では、レーザー光の光子 1 個が蛍光色素分子（フルオロフォア）とよばれる蛍光標識内の電子を 1 個励起し、その電子が基底状態に戻るときに光を発する。しかし、蛍光色素分子を励起させるのに必要な高エネルギーの光が色素分子をすぐに分解して、細胞にダメージを与える。そこで、もっと波長

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

の長い光の光子を 2 個以上、蛍光色素分子に同時に到達させて励起させるという革新的方法を編み出したのが、現在マックス・プランク医学研究所（ドイツ・ハイデルベルク）で研究する Winfried Denk だった。長い波長なら細胞に与えるダメージは少なく、しかも免疫学者にとって非常に重要なことに、光子は組織内の 200 マイクロメートル以上の深さまで普通に到達できるのだ。

生きた状態の脳をもっと奥深くまで見たがっていた神経生物学者は、すぐさまこの技術に飛びついた。もちろん、免疫学者も遅れをとってはいない。Miller は 2000 年代初め、この技術を使い始めた。当時彼は、カリフォルニア大学アーバイン校の Michael Cahalan の研究室でポスドクとして研究しており、同校にいた神経生物学者の Ian Parker と共同研究をしていた。Miller はリンパ節内の区画を観察していた。そこは、リンパ球の一種であるナイーブ T 細胞（未感作の T 細胞）が抗原を認識して活性化される、その後の感染に備えるうえで必須の段階が起こる場所である。彼は、マウスから切り取ったリンパ節で Parker の多光子システムを試したとき、とにかくびっくりした。それまで彼は、T 細胞はサイトカインという化学物質の濃度勾配に沿って、足並みをそろえて移動するものだとばかり思っていた。ところが彼が実際に見た T 細胞は、非常にすばやく目の前を通り抜けていった。「T 細胞がこれほど速く、しかもランダムに移動するなんて、にわかには信じられませんでした。そのうえ細胞は、しっかりした目的をもっているように見え、活発に動いていました」と彼はいう。

Miller はこれらの画像を用いて T 細胞の移動速度を計算し、分速 25 マイクロメートル以上の速度にまで達する場合があることを示した。彼はまた、このランダムな動きには目的があると考えた。つまり、1 個の T 細胞が広いテリトリー内を歩き回って、自分の認識する正しい抗原をもつ「抗原提示細胞」を見つけ出すのに、こうしたランダムな動きが役立つというのだ。この研究成果は、2002 年、*Science* に発表された [2]。この号には、Miller の研究を含めた 3 本が、T 細胞の動態を最新の顕微鏡法で調べた論文として連報で掲載された [3,4]。

Miller の推測によれば、当時、免疫学系の研究室で多光子顕微鏡を使っていたのは、せいぜい数か所程度だったろうという。研究者らが感激したのは、観察するだけで、宿主の防御機構を作り上げる細胞の動態をとらえられる点だ。「多光子顕微鏡は、免疫応答の発生経緯について免疫学者が抱いていた従来の考えに、大変革をもたらしました」と、ハーバード大学医学系大学院（米国マサチューセッツ州ボストン）の免疫学者 Ulrich von Andrian はいう。

ライブ映像

今日では、どの大学の免疫学部や学科も多光子顕微鏡を既に導入したか、あるいは導入を強く希望しているようだ、と Miller は話す。「私はひっきりなしにアドバイスを求められていますよ」。また、免疫学研究の多くは、免疫細胞そのものを調べる段階から、感染プロセスの全体像を調べる段階に移ってきている。そうなると実験は一段と複雑になる。心臓のポンプ機能や腸の収縮作用など、生体の機能から切り離されても組織はそのまま保たれていなくてはならず、病原体は周囲の組織を乱すことなく注入されなくてはならないからだ。

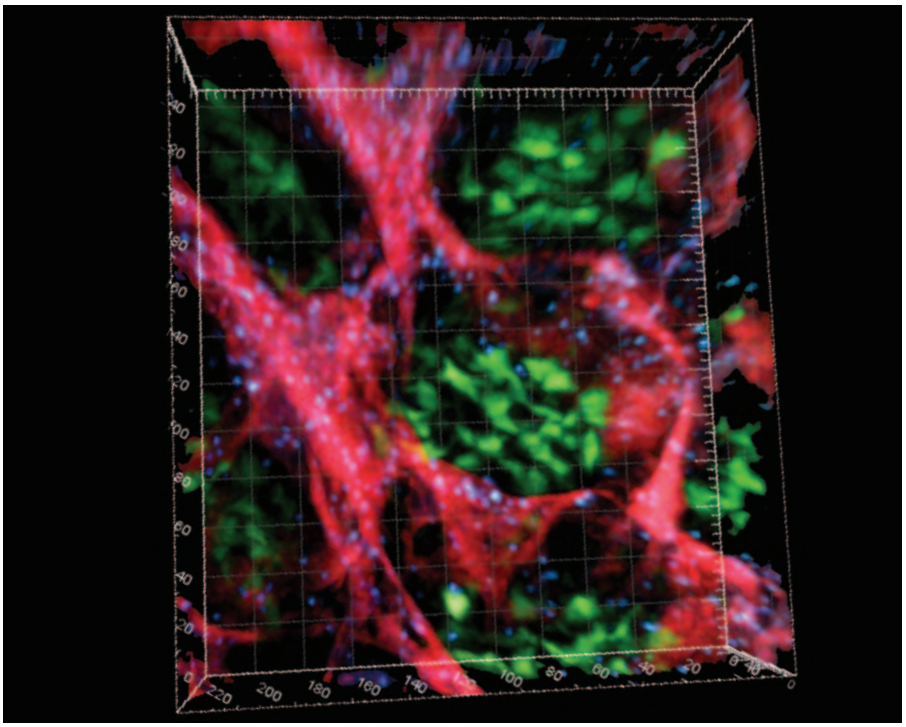
カロリンスカ研究所（スウェーデン・ストックホルム）の微生物学者 Agneta Richter-Dahlfors は、腎臓感染の最初の数時間を観察する手法を習得する際、ラット腎臓のネフロン 1 個（腎臓の機能単位で、ヒトのまつ毛 1 本ほどの大きさ）に細菌を注入するため、外科医を加えて実験を行った。このとき得られた映像は、初めて感染をリアルタイムで示した映像のうちのいくつかであり、この映像によって、細菌が粘膜に付着してコロニーを築くにはわずか 2 ～ 3 個の菌体で十分なことが明らかになった [5]。そして、感染後 3 時間以内に、ネフロン内の酸素圧はゼロまで下がり、この部位への血流が停止する。「こうした解析をするには、生きている動物個体を使うほかありません」と Richter-Dahlfors はいう。しかし最近では、さまざまな細菌感染の観察が行われている。マウスの足の裏におけるリステリア（*Listeria monocytogenes*）感染も、その 1 つだ。リステリア感染モデル系は、Miller がポスドクの Bernd Zinselmeyer とともに、免疫細胞が感染の初期段階にどのように動員されるかを見るために開発したものである [6]。

話を本日の「撮影」に戻そう。サルモネラを注入してから 2 時間半後、Konjufca はケージに近づいて、鎮静処理したマウスをそっと取り出した。そして、顕微鏡の試料台に載せ、できるだけ居心地のよい状態で安定した体温を維持できるように、マウスの体に合わせたサイズのビロードのようなシートで包んだ。Miller がサルモネラを使った研究を始めたのは、2 年前のことである。彼が好んで腸内の細菌感染を研究するのは、これがよくある感染ルートだからだ。また、腸内には病原性のない細菌も棲み着いており、免疫細胞がどうやって敵と味方（病原細菌とそうでない細菌）の区別をつけているかを調べることができるのだ。

Miller は、標準型の蛍光顕微鏡をカスタマイズし、およそ 50 万ドル（約 4500 万円；1 ドル＝ 90 円で換算）という費用で、自分自身の多光子顕微鏡システムを構築した。このシステムは、組織を数百マイクロメートルの深さまで調べることができ、ビデオ並みの速度で映像を記録できる。今日、彼は、顕微鏡の試料台をいろいろ動かして、未消化の食物がほとんどない小腸領域を見つけようとしている。画面には四角い上皮細胞が、絨毛の円弧に

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

沿って、きれいにそろった歯のように並んでいる。細菌のうち一部は、既に上皮の防護壁を通過し、固有層へ向かう道を見つけていた。固有層は絨毛の底部にあり、樹状細胞やその他の抗原提示細胞が豊富に存在している場所である。



V. KONJUFCA/M. NUSSENZWEIG

マウスの小腸の絨毛（赤色）で対決する樹状細胞（緑色）とサルモネラ（青色）。

トーキー映画をめざして

感染に際して、上皮で何が起こるのかははっきりわかっていない。考えられる可能性の 1 つは、サルモネラが上皮細胞に感染してそれを殺傷すると菌が放出され、次に樹状細胞がその菌を飲み込むというものだ。樹状細胞はサルモネラの成分を分解して自身の表面に抗原として突き出し、それによって免疫応答が引き起こされる。もう 1 つの考え方は、Germain の研究で提案されたもので、樹状細胞は小腸管腔を横切るように突起を伸ばして細菌を探し出すのだという[7]。

Miller は、複数の絨毛について 20 ～ 30 秒間隔の画像をたくさん集めた。そのデータはコンピューターで三次元の微速度映像にまとめられる。午後 2 時 30 分、サルモネラの大部分が絨毛の根元部分にある樹状細胞へ達しているのを観察すると、Miller は顕微鏡のスイッチを切り、明かりをつけ、カーテンを開けた。研究チームは、得られたデータを隣室にあるコンピューターに移した。

顕微鏡で、研究者が求めるような完璧な感染プロセスの画像を得ることはできない。また Miller は、「研究生活の間ずっと、分子生物学的手法で問題を考えて解明しようとする研究者も大勢います。そういう人たちは画像化が定量的なものだとは思っておらず、そのため、画像化が有用な情報を与えてくれるとする考え方に抵抗感をもっています」という。しかし、彼をはじめとする多光子顕微鏡法の支持者は、そうは思っていない。彼らによれば、細胞の動く速度や方向、ほかの細胞に接着するかどうか、するならどのくらいの頻度かを測定することで、定量化できるという。ただ、多光子顕微鏡法に足りないのは、なぜ細胞が感染プロセスにおいて特定の挙動を示すのか、という疑問について、さらなる情報を与えてくれる「質的な面」だという。細胞を感染部位まで見届けることに、もちろん価値はある。しかし、感染部位にたどり着いた後、いったい何が起こるのだろうか。細胞はシグナルを伝達するのだろうか。もしそうなら、どうやって伝達するのだろうか。

パスツール研究所（フランス・パリ）の免疫学者 Phillipe Bousso は、多光子顕微鏡の映像をサイレント映画に例えている。つまり、細胞がどうやって動き、相互作用するのかは見ればわかるが、どう生化学的なコミュニケーションをとっているのかを知ることはできないというのだ[8]。この映像に「音」を入れるには、生化学もしくは遺伝学による解析を多光子顕微鏡法と併用することだろう、と彼はいう。同じくパスツール研究所の生化学者 Jost Enninga は、そうした解析法の開発と特許取得を行っており、その中には、上皮細胞が病原体に出会ったときに蛍光を発するよう設計された解析法もある。もう 1 つのアイデアは、多光子顕微鏡に細菌の遺伝子発現のリアルタイム観察を組み合わせる、というものである。この方法では、さまざまな時点で組織をばらばらにして解析する。

多光子顕微鏡のもう 1 つの弱みは、「場面状況」が不完全なことだ。蛍光を発するよう遺伝子操作されていない細胞は、いずれも、黒い背景の中にまぎれて姿が見えなくなってしまう。しかし、von Andrian はこういう。「確かにそこに細胞があることはわかっています。ただ、それらを見られないことが必ずしも不都合だとは思いません。もしすべてのものが見えてしまったら、混乱が生じるでしょうから」。

撮影終了

Miller と Konjufca は、その日の午後遅くから翌週にわたって実験のビデオを見直

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

し、以前に撮ったものと比較した。そして、最も絨毛が明瞭なのは最新の映像で、上皮の両側にサルモネラが見られることがわかり、大いに喜んだ。つまり、彼らの設定が正しかったこと、そして細菌注入から撮像までのタイミングがぴったりだったことが証明されたのである。また以前の実験映像から、局所の血管内にある好中球の中には毎秒数百マイクロメートルという速度で突進するものがいる一方で、炎症シグナルに応答して速度を下げるものもいることが明らかになった。速度を落としたこれらの好中球は、血管内をのろのろと進んで 1 か所にたどり着き、ハチの群れがフェンスの割れ目を通り抜けるときのように、そこで血管壁を無理やり通り抜けていくように見える。

次の実験では Konjufca は、もっと長い時間待ってから撮影する予定である。免疫細胞が腸上皮を通り抜ける仕組みや、どの免疫細胞がサルモネラ抗原を腸から運び出すのかをもっと詳しく調査したいからである。そして彼女は、肝臓や脾臓まで追跡し、そこでサルモネラ抗原と T 細胞や樹状細胞がどのように相互作用するかを調べる予定である。Konjufca は、こうした現象のすべてが、弱毒ワクチン株ではどう違っているのかを解明したいと考えている。また Miller は現在、コンピューター研究者とともに、視野外の細胞を追跡するソフトウエアを開発しているところである。多光子顕微鏡の視野は小さく、細胞はうろうろして視野を出たり入ったりするからだ。さらに、細胞が移動している時の挙動を解析したいとも考えている。

しかし、こうした「特殊効果」を抜きにしても、ひとつひとつの映像には、いつも驚きと発見が潜んでいる。それだからこそ、研究を続けられるのだと Miller はいう。「研究の原動力は、研究室で得られるぞくぞくするような高揚感です。それがモチベーションになっているのです。今日は何が見られるだろうか。こうじゃないかな、とある程度考えていても、予想が外れて本当に驚くことがあるんですよ」。（船田晶子 訳）■

Jeanne Erdmann は、米国ミズーリ州ウェンツビルを拠点に活動するフリーランスのライター

1. Denk, W., Strickler, J. H. & Webb, W. W. *Science* **248**, 73–76 (1990).
2. Miller, M. J., Wei, S. H., Parker, I. & Cahalan, M. D. *Science* **296**, 1869–1873 (2002).
3. Stoll, S., Delon, J., Brotz, T. M. & Germain, R. N. *Science* **296**, 1873–1876 (2002).
4. Bousso, P., Bhakta, N. R., Lewis, R. S. & Robey, E. *Science* **296**, 1876–1880 (2002).
5. Månsson, L. E. *et. al. Cell. Microbiol.* **9**, 413–424 (2007).
6. Zinselmeyer, B. H. *et al. Inflamm. Res.* **57**, 93–96 (2008).
7. Chieppa, M., Rescigno, M., Huang, A. Y. & Germain, R. N. *J. Exp. Med.* **203**, 2841–2852 (2006).
8. Bousso, P. *Nature Rev. Immunol.* **8**, 675–684 (2008).

多光子顕微鏡による映像は http://tinyurl.com/n35ufp および http://tinyurl.com/mb6l45 で見ることができる。

RESEARCH HIGHLIGHTS

Pearly pedigree

真珠の輝きがつくられる秘密

Science. doi:10.1126/science.1173793 (2009)

宝石として愛される真珠は、軟体動物である貝類の体内でつくられる。こうした貝殻の内側もまた虹色の光沢を放っており、いずれも、微細な層状構造をした「真珠層」が光を散乱することによって、私たちの目を楽しませている。この構造は、有機物の層の中で、炭酸カルシウムからなる「あられ石（アラゴナイト）」の結晶が整列してできたものである。このほど、東京大学の長澤寛道とその同僚たちは、真珠層形成のカギとなる 2 種類のタンパク質を発見した。

日本のアコヤガイ *Pinctada fucata* の貝殻を調べた研究者たちは、Pif 80 というタンパク質が、あられ石の結晶と特異的に結合することを発見した。Pif 80 と、もう 1 つのタンパク質 Pif 97 を含まない有機物を使って炭酸カルシウムを結晶化させると、あられ石の結晶はランダムに成長し、真珠光沢は生じなかった。

研究チームは、この 2 つのタンパク質が形成する複合体があられ石の結晶化を誘導し、こうしてできた結晶がシート状の有機物の中で組み立てられていくと考えている。（三枝小夜子 訳）■

D. FINNIN/AMNH/MASTOLONI PEARL COLLECTION

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

THE CHECK-UP

マウスの検査入院

Nature Vol. 460(947-948)/20 August 2009

ドイツ・マウスクリニックに入院する「患者」は、世界一高度な医学的検査を受けられる。ところが最近、順番待ちのリストが長くなり始め、問題となっている。Alison Abbott が、現状を取材した。

ドイツのミュンヘン・ヘルムホルツセンターでは、毎週木曜日になると同じ光景が繰り返される。午前 10 時、会議室は、ミュンヘン、ボン、ハイデルベルクの大学病院から集まった一流の顧問医師と臨床研究者でいっぱいになる。テーブルの上には数百例の患者の臨床データが、ミュンヘン市内の電話帳よりも高く山積みにされている。データは、血液分析、肺機能、代謝など多岐にわたっており、時には、脳スキャンデータや全身スキャンデータが含まれていることもある。そして、2 ～ 3 時間かけて症例についての発表とさまざまな専門分野にまたがった討議が行われた後、最も可能性の高い診断が下される。

こうした光景は、一流の病院なら世界中どこでもごく普通に見られるであろう。しかし、この病院の患者は人間ではない。ここ、ドイツ・マウスクリニックの患者は、遺伝子操作された「マウス」なのだ。クリニックでの大量の検査は、改変されたマウス遺伝子が引き起こす可能性のある結果を、すべて洗い出すことを目的としている。そして臨床研究者たちは、こうした検査結果が、細胞過程やヒトの疾患における個々の遺伝子の機能解析に役立つことを期待している。

ドイツ・マウスクリニックで最も有名な患者は、おそらく、遺伝子操作で *Foxp2* 遺伝子の「ヒト型」をもたせた Foxp2 マウスだろう。*Foxp2* 遺伝子は、ヒトの発話と言語の発達に関与すると考えられている遺伝子である。Foxp2 マウスは、マウスの *Foxp2* 遺伝子を改変して、通常はヒトのみにみられる 2 つのアミノ酸置換をもつ Foxp2 を発現するようにしたものである。Foxp2 マウスでは、超音波の鳴き声に変化が生じ、探索的行動の傾向が弱まるが、脳以外の器官への影響は認められない（W. Enard *et al. Cell* **137**, 961-971; 2009）。「たとえ否定的な結果が出ても、肯定的な結果と同じくらい興奮します」。こう話すのは、マックス・プランク進化人類学研究所（ドイツ・ライプチヒ）に所属する計算生物学者で、「ヒト型」*Foxp2* をもつマウスを作製した Wolfgang Enard だ。彼は、ドイツ・マウスクリニックからの要請で、Foxp2 マウスを新たに作製して提出した。ドイツ・マウスクリニックのスタッフは、ヒト型 *Foxp2* 遺伝子の脳特異的機能が信じられなかったのである。ヒト型 Foxp2 がマウスの脳と発声に特異的に影響するというこの発見は、2 つのアミノ酸置換がヒトの発話の進化にとって重要だったとする学説を裏付けることになった。

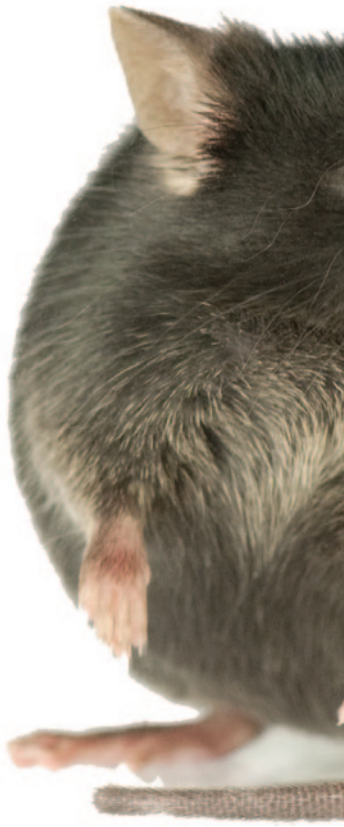
2001 年に開設されたドイツ・マウスクリニックは、世界中から変異マウスを受け入れており、数多くの研究者が変異マウスを「検査入院」させたいと思っている。「検査申請は増加傾向にあり、ウェイティング・リストが長くなり始めています」と話すのは、ドイツ・マウスクリニックの構想を打ち出し、現在はクリニックの院長を務める遺伝学者の Martin Hrabé de Angelis である。

精密検査：マウスは、握力（1 番上）、平衡感覚（上から 3 番目）や協調運動性の検査を受ける。骨格奇形の有無を調べるために、マイクロコンピューター断層撮影（1 番下）も行われる。

FROM BOTTOM TO TOP: B. MÜLLER; L. HOERTERER; L. HOERTERER; B. MÜLLER; L. HOERTERER

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

S. TÜPKE, MPI-EVA



遺伝学者の推定によれば、約 2 万のマウス遺伝子のうち、ほぼ半数が、さまざまな方法によって改変されており、マウスの変異系統が作り出されている。多くは、疾患の動物モデルとして、あるいは特定の生物学的機構を突き止めるために特別に作製されたものである。その一方、米国立衛生研究所（メリーランド州ベセスダ）に本部を置く「ノックアウトマウス・プロジェクト」のような体系的な遺伝子ノックアウトプログラムの一環として作製されたものもある。こうしたマウスの多くは、もちろん、それを作製した研究者の研究室で検査される。しかし、なかには明らかな異常がみられないマウスもいる。こうしたマウスでも、ドイツ・マウスクリニックで厳密な「表現型」解析を行えば、ほぼすべてで、なんらかの有益性の高いデータが得られている。

新たな関連の同定をめざして

ドイツ・マウスクリニックに入院したマウスは、2 か月にわたって心地よい入院生活を送る。広々とした「病室」は、快適な気温で無菌状態に保たれており、毎日、高級食が与えられる。入院中は、神経学、視覚から免疫学に至る 14 の臨床分野、320 種の検査を受ける。

変異マウスの持ち主は、ドイツ・マウスクリニックとの共同研究に同意し、ドイツ連邦教育研究省の助成により無料で検査サービスを受けることができる。研究者は、同クリニックに 80 匹のマウスを提供し、それを受けて検査が始まる。検査といっても、ただ単に観察するだけのものもある。「何もない野原」にマウスを放し、その頭上にカメラを取り付けた平らな板が設置される。クリニックのスタッフは、マウスの呼吸のようす、マウスが野原をどれだけ探索し、どれほど熱心だったか、などを観察するのだ。

マウスがたいへんな思いをして受ける検査もある。血圧測定の場合、マウスは、尾だけを外に出した抑制箱に入れられる。しっぽには、ヒトの外科手術時に腕に巻く血圧測定バンドに似たものが巻かれる。血圧測定は、1 日に数回行われ、血圧の日内変動が調査される。またクリニックには、高度な検査機器、例えば、さまざま方法で全身スキャン検査を行う機器や、超音波を使って心臓の構造と機能を評価する機器が備わっている。ただし、いずれもマウス用に小型化している。

マウスは、入院中に神経科クリニックの検査も受ける。マウスがじゃれあうように棒につかまっていると、研究者が尾を軽く引っ張って、前肢の握力を測定する。また、マウスに「ロータロッド」という回転棒の上でバランスを取らせておいて、落下するまでロッドの回転数を上げ、協調運動性を測定する。さらに、密封されたパースペックスという透明プラスチック製の立方体である代謝チャンバーの中にマウスを入れ、吸い込む酸素の量や吐き出す二酸化炭素の量、発する熱量を測定し、マウスの基礎代謝量を算定する。マウスが摂取するものはすべて計量され、糞便はくまなく調べられて、食物から吸収したエネルギー量が測定される。

そして特に選ばれた不運なマウスは、病理学的検査、組織学的検査、さらにはドイツ・マウスクリニックのホームページで「死体の化学分析」と婉曲表現されている検査を受けることになる。

こうした検査結果はすべて、ほかのデータとともに、毎週木曜日の「臨床医」によるディスカッションの素材となる。この会議にはマウスの持ち主も招かれる。ここで下された診断をもとに臨床チームは、さらに二次、三次のスクリーニング検査を行えば特定の表現型をより詳しく調べることができる、と持ち主に進言する。例えば、抗体測定結果に何らかの異常があれば、より複雑なアレルギー検査が必要になるかもしれない。また、何もない野原で気後れする態度が見られる場合やロータロッド上でふらついた場合には、脳電図のほか、記憶、うつ状態、不安、感覚機能、運動機能を調べる高度な検査など、脳の検査を勧められることもある。こうした高次のスクリーニング検査は、一次スクリーニング検査と比べて、必然的に所要時間とコスト、複雑度が増す。

著名な患者たち

これほど幅広く表現型検査を実施できるマウス検査施設は、世界でも数少ない。つまり、ドイツ・マウスクリニックに入院するマウスほど綿密な検査を受けるマウスは、地球上でほとんどいないということだ。また、データ解析のレベルと検証可能な仮説数に関しても、同クリニックは傑出している。ジャクソン研究所（米国メイン州バーハーバー）のマウスクリニックを運営する Karen Svenson は、「近い将来、全世界で（ドイツ・マウスクリニックで行われているような）検査を実施できる国際的な活動」が実現することを期待している。

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

ドイツ・マウスクリニックでは、開業以来、200 系統以上の変異マウスが検査を受けているが、多くは、ミュンヘン・ヘルムホルツセンターの変異マウス作製プログラムによるマウスである。このうち Aga2 マウスは、同クリニックに入院したマウスの中でも、医療現場に影響を与える可能性が最も高いものの 1 つといえる。Aga2 マウスは、骨粗しょう症や骨形成不全症のモデル動物で、コラーゲンの産生に不可欠な *Col1a1* 遺伝子に変異がある。実際、骨粗しょう症や骨形成不全症患者の大多数は、*Col1a1* 遺伝子が変異している。かつては、骨形成不全症における早期死亡の通常の原因は、胸郭の硬化だとされていた。深呼吸のできなくなった患者が、多発性肺炎で命を落とすと考えられていたのだ。

ところがマウスの一次スクリーニング検査の臨床的指標では、異なる方向性が示され、Hrabé de Angelis は驚いた。「血圧の測定値に異常がみられ、呼吸もどこか普通ではありませんでした」と彼はいう。二次スクリーニング検査を行うと、*Aga2* 遺伝子の変異により、肺と心臓に生命にかかわる直接的な障害が実際に発生していることがわかった。NIH に所属する骨形成不全症の専門家である Joan Marini は、この検査で「とてつもない」知見が得られたと話し、こう続けた。「これによって臨床医は、肺の弾性を長期間維持するうえで役立つと考えられる、肺の運動や気管支拡張剤といった早期予防策に、これまで以上に気を配るようになると思います」。

ドイツ・マウスクリニックでのウェイティング・リストは、今後も確実に長くなっていくだろう。ほとんどの生物医学研究者は、1 個の遺伝子に 2 つ以上の変異があるマウスを作製して、複数の生物学的影響を調べたいと考えているのだ。これに加えて、強くはないが、ヒトの疾患との関連性がある、より複雑なタイプの遺伝的変異をマウスで再現する実験も始まっている。例えば、精神衛生中央研究所（ドイツ・マンハイム）に所属する分子生物学者 Dusan Bartsch は、マウスの遺伝子を操作して、統合失調症のような精神疾患の患者に多くみられる特異的な遺伝的構造、すなわち遺伝子や染色体のごく一部が欠落した「微小欠失」や、特定の遺伝子領域の反復回数が通常とは異なるコピー数変異を作り出している。Bartsch は、「こうしたマウスをドイツ・マウスクリニックに送るのは、このように複雑な遺伝子改変を行った場合、その影響を受けるさまざまな要素を予測する方法が全くないからなのです」と話す。

Hrabé de Angelis は、さらに検査の範囲を広げていきたいと考えている。どんな生物でも、発現する表現型は、その生息環境に影響をうける。そこでドイツ・マウスクリニックでは、マウスを 5 つの異なるタイプの環境（これを Hrabé de Angelis は“envirotype”とよんでいる）で検査を行うという、新たな段階を試行している。この検査では、マウスをストレスにさらし、運動させ、感染症に罹患させ、高カロリーの「カフェテリア」食を与え、ディーゼルエンジンの排気ガスで汚染された「都市の汚れた空気」に放すといったことが行われる。

しかし、個々のマウスをこうした 5 つの envirotype で検査するにはより多くの時間が必要であり、ウェイティング・リストがさらに長くなってしまう。増え続ける変異マウス系統に対応していくうえで、Hrabé de Angelis は、「インフラフロンティア」コンソーシアムが長期的な助成金を獲得することに期待している。このコンソーシアムは、マウスの機能ゲノミクスを推進し、ヨーロッパの、特に小規模なマウスクリニックを整備して、少なくとも一次スクリーニング検査は実施できるようにすることを目的とした、欧州連合のプロジェクトである。こうしたマウスクリニックとしては、マウス臨床研究所（フランス・ストラスブール）、英国医学研究会議（MRC）のハーウェルユニット（オックスフォード）、ウェルカムトラスト・サンガー研究所（英国ヒンクストン）があり、スペイン、イタリア、チェコ共和国でも計画中だ。また、中国と日本でもマウスクリニックが既に開設されているか、あるいは計画段階にある。

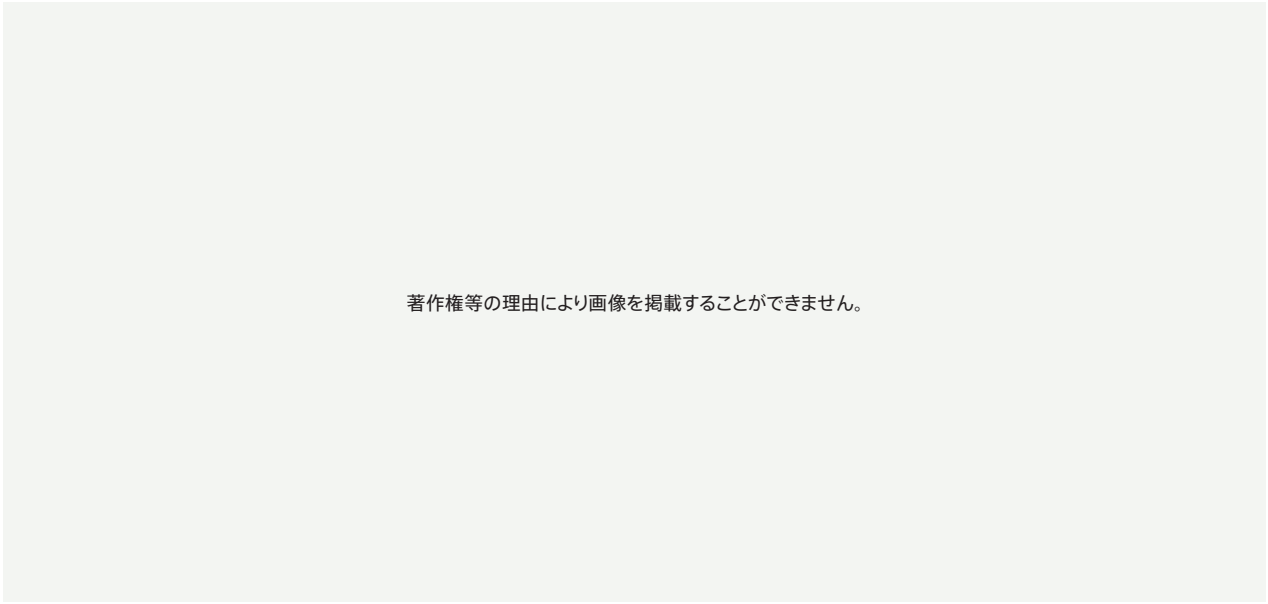
ペンシルベニア大学（米国フィラデルフィア）の概日生物学者 John Hogenesch は、こうしたクリニックで行われる体系的な表現型解析がもっと早く実現していたら、とつくづく考えている。概日時計に異常のある変異マウスが初めて作製されたのが 1997 年（D. P. King *et al. Cell* **89**, 641-653; 1997）。その後、個々の研究室で他の変異マウスが次々と発見された。「もしマウスクリニックがもっと早く開設されていれば、概日生物学は 10 年早く進んだでしょうね」と彼は語っている。（菊川要 訳）

Alison Abbott は、*Nature* のヨーロッパの上席特派員である。

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Q&A

PANA



技術

Hydrogen-fuelled vehicles

水素自動車の意義と研究課題

Louis Schlapbach

Nature Vol. 460(809-811)/13 August

水素は、石油に代わる無公害の合成燃料として、特に輸送分野での利用が期待されている。その実用化には、特に、水素貯蔵材料を開発する必要があるが、いよいよ数年後には最初の水素自動車が市販されるかもしれない。

水素はなぜ輸送用燃料として優れているのか？

水素は周期表の中で最も軽い元素だ。それゆえ、水素分子の質量当たりのエネルギー密度はすべての化学物質の中で最大となる。燃料の重量を最小限に抑える必要があるロケットに、水素燃料が使われるのはそのためだ。水素は炭素を含まず、毒性がなく、酸素とともに熱的または電気化学的に燃焼すれば、エネルギーと水だけしか生じない。空気中で燃焼すると大気汚染物質である一酸化窒素 NO を生成することがあるが、それは制御可能な量にとどまる。もう 1 つ、水素の主要な供給源が水であり、水は基本的に無制限に存在する資源だという利点がある。

水素燃料の欠点は何か？

主な問題点は、水素が室温では気体の形で存在しているため、非常に大きなスペースを占めてしまうこと。これが輸送用燃料として実用化する際の問題点で、何らかの方法で気体を圧縮して、十分にコンパクトにしなければならない。これほど明白ではないが、もう 1 つ重要な問題は、水素はエネルギー担体であり、エネルギー源ではないことだ。太陽光、化石燃料、水力、原子力などの真のエネルギー源とは違い、自然界から十分な量を入手することはできない。そこで、水を水素と酸素に分解する方法で発生させなければならず、そのためには、電気、光、熱、化学物質などの形のエネルギーが必要

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

になる。とはいえ、そのエネルギーの大半は、水素の燃焼によって回収される。

水素は爆発しやすく、危険なのではないか？

実際には、ガソリンと同程度。水素と聞くと、1937 年に起きた飛行船ヒンデンブルク号の爆発炎上事故を思い浮かべて、燃えやすく危険なのではないかと心配する。しかし、あの事故の本当の原因は、浮揚ガスに水素を使っていたからではなく、外皮が非常に燃えやすい材料でできていたからだった。もちろん、水素と空気の混合物がかなり広い組成幅で燃焼するのは確かで、水素の体積比が 4 ～ 75%だと燃える（ガソリンと空気の場合、ガソリンの体積比が 1 ～ 8% のときに燃える）。さらに、水素はガソリンよりも揮発性が高く、空気中を拡散するのも速い。燃料漏れが起きたときの安全性を比較するマイアミ大学の研究から、水素自動車はガソリン自動車に比べて明らかに火災のリスクが低いことが示されている。

水素燃料を普及させるためには何が必要か？

3 つの重要なステップがある。第一に、大量の水素を経済的に生産する方法を開発しなければならない。ここで、再生可能なエネルギー源を利用することができれば理想的だ。電気と若干の熱をエネルギー源として利用する最先端の水分解技術は、エネルギー効率が非常に高く、将来的には採算が合うようになるだろう。第二に、水素の供給・貯蔵システムが必要である。都市や産業用地にある既存のガス供給網を利用して大量の水素を供給することは可能だが、水素を輸送用燃料として利用するためには、移動式の水素貯蔵車と供給ステーションが必要であることは明らかだ。既に名古屋の中部国際空港やベルリンでは試験的に水素ステーションが建設されて、水素バスに燃料を供給しているが、全国的な水素供給網はまだ建設されていない。なお、ドイツでは水素供給網を設計するためのツール（H2invest）が開発されている。第三のステップは、水素中に蓄えられた化学エネルギーを使いやすい形のエネルギーへと変換する技術と装置を開発することである。現時点では、水素内燃機関で熱エネルギーを生成するか、水素燃料電池（図 1）で電気エネルギーを生成することができる。

既存のエンジンを改造して水素燃料で動かせないのか？

少々の改造でできるが、長期的にみると、持続可能な解決法とはいえない。なぜなら、内燃機関で、化学エネルギーを熱エネルギーを経て機械的エネルギーへと変換する効率は低いからである。一般的な交通状況で、典型的なガソリン自動車のエネルギー変換効率は 10% をわずかに上回る程度でしかない。水素燃料電池と電動モーターを組み合わせた伝動装置の効率は、これよりはるかに高くなると考えられている。しかし、経済的な伝動装置の開発は、予想よりはるかに難しいこともわかってきている。

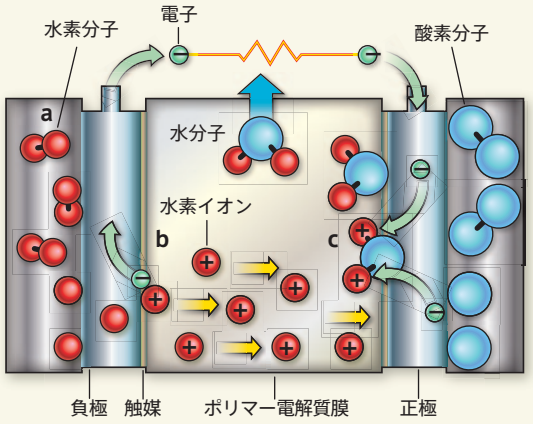


図 1　水素燃料電池。燃料電池の中では、水素を電気化学的に燃焼させてエネルギーを発生させる。(a) 電池の負極に水素を供給し、その水素分子が水素原子へと分解される。(b) 負極を裏打ちしている触媒は、この水素原子を水素イオン（H^+）と電子に分解する。水素イオンは負極と正極の間のポリマー電解質膜を通過するが、電子は外部の回路を通って正極に到達しなければならないので、電流が流れる。(c) 正極には酸素が供給されて電子や水素イオンと反応し、唯一の副産物である水を作る。水は電池から流れ出る。

その伝動装置の開発に関して、何が問題になっているのか？

おもな問題は 3 つある。第 1 はコストで、一般的な燃料電池が必要とする触媒には、希少で高価な元素が含まれていることだ。第 2 の問題は燃料電池の寿命の短さである。しかし、いくつかの企業は、こうした問題を克服し、輸送に使える可能性のある水素燃料電池の開発に成功している。それゆえ、現時点で残っている大きな問題は、室温に近い温度と大気圧より少し高い程度の圧力で水素ガスを燃料電池に送り込むことのできる、軽量でコンパクトな水素貯蔵システムを開発することだけである。米国エネルギー省が設定している現在の研究開発目標値は、2015 年までに水素重量貯蔵密度を 5.5% にすることだ。

水素自動車はどのくらいの水素を貯蔵する必要があるか？

現代の技術で 5 人乗り自動車を製作すると、重量は 1.2 ～ 1.5 トンになる。ここに 30 ～ 35 リットルのガソリンまたは軽油を入れると、燃料とタンクを合わせた重量は 80 キログラムになり、500 キロメートルは走行できる。同じ車体に水素燃料電池と電動モーターを組み合わせた伝動装置を取り付けた場合、同じ距離を走るには約 5 キログラムの水素

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

が必要になる（水素内燃機関の場合なら 10 キログラム以上必要）。問題は、5 キログラムの水素が、室温・室圧では約 5 万 6000 リットルものスペースを占めることだ。これは、直径 4.8 メートルの風船に相当する。ゆえに、この体積を 1000 分の 1 にする技術開発が不可欠となる。

圧縮あるいは液化して体積を減らせないのか？

できなくはないが、自動車の水素貯蔵システムとしては実用的でない。まず、水素が理想気体のように振る舞うなら、体積を 1000 分の 1 に圧縮するには、大気圧の 1000 倍にあたる 100 メガパスカル（100MPa）の圧力をかけなければならない。しかし、水素が理想気体のように振る舞うのは約 10MPa までである。極めて高圧のガスを貯蔵するとなると、安全面の懸念も大きくなる。ゆえに、水素ガスを 100MPa 以上に圧縮するのは名案とはいいがたい。一方、宇宙工学分野で用いられている液体水素は、エネルギー密度は非常に高いものの、温度を－250℃以下にする必要がある。一般のガソリンスタンドにこうした低温貯蔵施設を整備するのは、不可能ではないが非常に困難だ。また、水素ガスの化学エネルギーの約 30%が、液化の過程で失われてしまうという問題もある。

では、どんな方法で水素の体積を減らせばよいのか？

ある種の固体材料に水素を可逆的に吸収させたり、その表面に吸着させたりすることで、水素の体積を大幅に低減することができる。水素を吸着した固体材料を加熱したり、水素ガス分圧を低下させたりすることで、水素ガスを放出させることができる。水素貯蔵材料は、吸着の機構により、主に 2 種類に分けられる。1 つは物理吸着であり、水素分子は材料によってわずかに吸着されるが、化学的に反応することはない。もう 1 つは化学吸着であり、水素分子は材料の表面と反応して水素原子へと分かれ、これが物質内部に吸収されて、材料との間で金属結合、共有結合あるいはイオン結合を形成する（図 2）。

水素を物理吸着する材料にはどのようなものがあるか？

一部の黒鉛系材料や多孔性化合物など、単位質量当たりの表面積が大きい材料がある。水素重量貯蔵密度は最大で約 8% に達する。問題は、平坦な表面では物理吸着が弱いことである。そのため、実用的な量の水素を吸着させるためには、液体窒素の温度に近い－200℃よりも低い温度にする必要があることが多い。強い物理吸着がみられるのは、小さくて曲線的な孔をもち、その表面が水素を引きつけるような原子で修飾されている材料である。ゼオライト（アルミノケイ酸塩）や金属 - 有機構造体（金属イオンと剛直な有機分子からなる錯体）は、これらの特徴をもちうる可能性があり、いつの日か室温での水素の物理吸着を可能にすることが期待されている。

水素を化学吸着する材料にはどのようなものがあるか？

水素は多くの材料（金属や合金が多いが、それ以外の化合物のこともある）と化学反応して水素化物をつくり、これらは水素貯蔵媒体として利用できる。しばしば 20 ～ 100℃という現実的な温度で高速かつ可逆的な反応を起こし、大量の水素を吸収したり、放出したりすることができる。水素貯蔵のために広範に研究されている材料には、元素状金属（マグネシウム、パラジウム、トリウム）の水素化物、AB_5（通常は A も B も金属元素）の形で表される化合物の水素化物（ランタン - ニッケル水素化物 $LaNi_5H_6$ など）のほか、いわゆる「複合水素化物」（マグネシウム - ニッケル水素化物 Mg_2NiH_4 やバリウム - ロジウム水素化物 $BaRhH_9$ など）がある。

水素化物を利用した水素貯蔵システムの性能は？

水素化物における水素体積貯蔵密度は液体水素よりもはるかに高く、数万回も再充電することができる。しかし、ホスト材料が軽いとはいいがたいため、水素重量貯蔵密度は 4% 以上にはなっていない。現時点では、これらの化合物の大半は、水素重量貯蔵密度が低すぎるか、貯蔵した水素を放出させるのに必要な温度が高すぎるため、移動式水素貯蔵システムに応用できるとは考えられない。しかし、その水素体積貯蔵密度の高さと安全性は魅力的である。

これまでの水素化物研究が実を結んでいないということか？

そんなことはない。この分野からは多くの有用な発見があった。金属水素化物は現在、市販のハイブリッドカーなどのバッテリーの電極として利用されている。これらのバッテリーは安全で、コンパクトで、急速再充電が可能である。金属水素化物は航空機のある種の温度センサーの基礎にもなり、将来的には、窓の透明度を制御するインテリジェント・コーティングにも利用されるようになるかもしれない。さらに、金属水素化物研究の過程で発見された水素粉砕技術は、現在、永久磁石の製造に用いられている。

最新の水素貯蔵材料にはどのようなものがあるか？

近年の研究では、軽い元素の複合水素化物を利用した固体貯蔵か、このような材料を満たした高圧（35MPa）のタンクに注目が集まっている。こうした複合水素化物には、AlH_4^- イオンを含むアルミニウム水素化物、BH_4^- イオンを含むホウ素水素化物、リチウムと窒素と水素を含むアミド - 水素化物、あるいはこれらの組み合わせがある。その魅力は水素重量貯蔵密度が 8 ～ 20% と高いことにある。これらの材料の水素化物の生成と分解は、複数の段階を経て、中間化合物を形成しながら進んでいく。研究者たちは、実験とモデル化を通じて、これらの反応を微調整し、水素の放出速度を上げる触媒の発見をめざしている。この取り組みから、20 ～

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

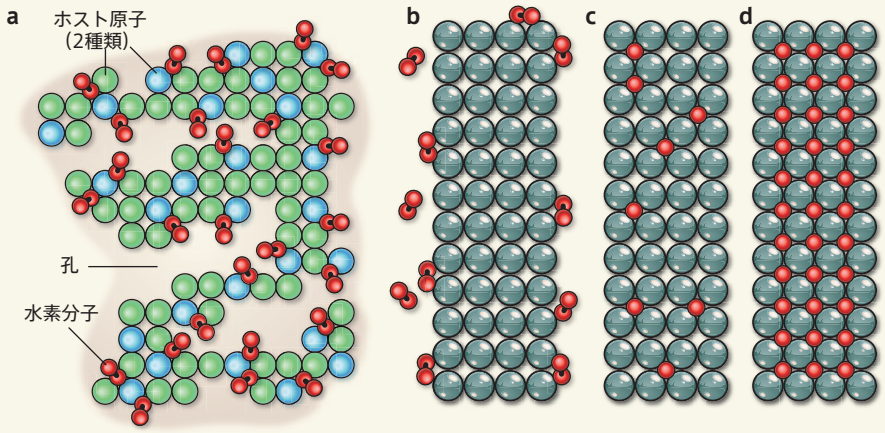


図2　水素貯蔵材料における吸着の機構。a. 多孔性の材料は物理吸着によって水素を貯蔵する。ここで、気体分子は材料の表面に蓄積するが、化学的に反応することはない。b-d. ある種の金属、合金およびその他の化合物は、化学吸着により水素を貯蔵する。ここで、水素分子は材料の表面と反応し（b）、ばらばらの原子に分かれる。その水素原子は、当初はホスト材料中のランダムな場所に入る（c）。これらはしだいに金属原子との間で金属結合、共有結合あるいはイオン結合を形成し、水素原子が規則的に配列した水素化物を形成する（d）。

100℃の温度で水素を吸着・放出する材料が開発されるはずである（ちなみに、現時点では300℃以上の温度が必要）。しかし、これらの材料が実用化されるまでには、かなりの時間がかかるだろう。注目の水素貯蔵法はもう1つある。それは、液化炭化水素を水素ガスの供給源とする方法であり、以前にも研究されていたが、性能の低さから、いちどは断念された方法である。この過程では副産物として脱水素された炭化水素が生じるため、リサイクルセンターで再び水素化して、さらなる燃料をつくりだすことができる。

水素自動車はいつ頃市販されるのだろうか？

ドイツと日本の水素燃料バスは既に成功している。また、これまでに約50台の水素自動車（内燃機関式のものと燃料電池式のものの両方）が試作され、良好な結果を出している。したがって、5年後くらいに水素燃料電池と電動モーターを組み合わせた水素自動車が市販されるようになっても不思議ではない。

自動車の燃料には、ほかにどのような選択肢があるか？

今日のガソリン自動車の普及ぶりを考えれば、今後もしばらくは石油系燃料が主流であり続けることは明らかである。ただし、石油系燃料は供給に不確実性があるため、将来的には使われなくなるだろう。安全性の高いリチウム電池やリチウム-空気電池、容量の大きい金属水素化物電池など、新しいタイプの充電可能なバッテリーは、市街地走行向けの純電気自動車やハイブリッドカーの市場を生み出す可能性がある。とはいえ、ガソリン自動車の所有者の大半が純電気自動車に乗るようになったら、多くの国では発電量を2倍にする必要があることに注意しなければならない。水素を生産するためにも電気などのエネルギーが必要になることも忘れてはならない。

今後、ほかの燃料との競争はどのように展開していくか？

これは、自動車デザインの流行と水素技術の費用対効果によって変わってくる。水素自動車は既に技術的には可能になっているが、これが普及するためには、ほかの燃料を使用するタイプの自動車と張り合えるだけの経済性を備えていなければならない。重量1トン程度の比較的小型の自動車については、数年以内にそれが実現するかもしれない。比較的軽量の自動車が好まれるようになれば、新しい市場にはずみがつくことになるだろう。この10年間、自動車メーカーは軽量で高強度の材料を使用するようになっているが、その一方で、車体を大型化して、馬力や快適さや安全性を高めようともしているため、自動車の平均総重量は増加傾向にあるのだ。

水素燃料は、今後、どうなっていくのか？

自動車の購入者が小型車を好む傾向は、弱いながらも確実に存在している。今後、自動車の価格や燃費が重視されるようになるにつれ、この傾向は強まっていくだろう。運転者に警告を発するだけでなく、自動車本体に直接作用する新しい安全装置は、事故が発生する確率を低下させ、車両を厳重に保護する必要性を軽減するだろう。これにより、車両の軽量化と、水素自動車の普及への道が切り開かれるだろう。ゆえに、長期的な輸送戦略において水素が一定の役割を果たすことは明らかだ。しかし、これを確実に成功させるためには、適切な目標を設定し、最高の科学者と技術者を長期的に支援していくことが必要である。（三枝小夜子 訳）■

Louis Schlapbach、スイス連邦材料科学技術研究所と日本の物質・材料研究機構（つくば）

1. Leon, A. (ed.) *Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications* (Springer, 2008).
2. Zuttel, A., Borgschulte, A. & Schlapbach, L. (eds) *Hydrogen as a Future Energy Carrier* (Wiley-VCH, 2008).
3. Crabtree, G. W. & Dresselhaus, M. S. The hydrogen fuel alternative. *Mater.Res.Soc. Bull.*33, 421-428 (2008).
4. Oumellal, Y., Rougier, A., Nazri, G. A., Tarascon, J.-M. & Aymard, L. Metal hydrides for lithium-ion batteries. *Nature Mater.*7, 916-921 (2008).
5. Harris, I. R., Book, D., Anderson, P. A. & Edwards, P. P. Hydrogen storage:the grand challenge. *Fuel Cell Rev.* 1, 17-23 (2004).
6. Hydrogen and fuel cells. http://www.netinform.de/h2

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Misadventures in the Burgess Shale

バージェス頁岩発見の歴史

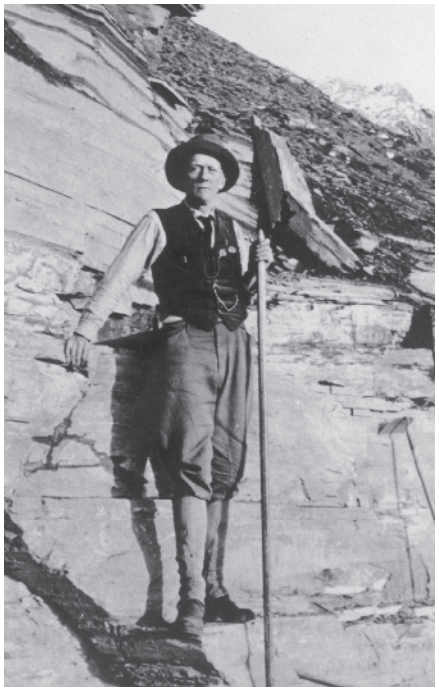
Nature Vol. 460(952-953)/20 August 2009

Charles Doolittle Walcott がカナダ・ブリティッシュコロンビア州のロッキー山脈で大量のカンブリア化石を発見してから、今年で 100 年。その化石が分類されるまでの多難な道のりを、Desmond Collins が振り返る。

今年 8 月、Charles Doolittle Walcott によるバージェス頁岩（けつがん）の発見からちょうど 100 年の節目を迎えた。バージェス頁岩はカナディアンロッキーの化石層だ。これによって人類は、5 億 500 万年前のカンブリア紀の海に生息していたさまざまな動物を、初めて目にしたのだ。この化石層自体、非常に有名なものであり、「バージェス頁岩の生命」は数十年にわたって「カンブリア紀の生命」と同義だった。しかしながら、1909 年の Walcott の発見に至るまでの詳しい話はあまり知られていない。

1880 年代、カナダ太平洋鉄道がスティーブン山とフィールド山の間にキッキングホースバレー経由で敷設された。これにより、必然的に、ヨーホー国立公園（カナダ・ブリティッシュコロンビア州）でバージェス頁岩化石は発見された。最初の化石を発見したのは、鉄道ホテルの建設に携わっていた大工だった。スティーブン山で発見されたその化石は、カナダ地質調査所（GSC）の Richard McConnell の目にとまった。これがきっかけとなり、McConnell は 1886 年 9 月、Walcott による有名な発見よりも 23 年早く、スティーブン山の三葉虫層を探り当てた。こうしてスティーブン山は、最初のバージェス頁岩化石の発掘現場となった。

McConnell はそこで、無数の三葉虫を採集した。三葉虫は既に絶滅した海生節足動物で、カンブリア紀の代表的な生物である。また、奇妙な標本も 2 点発見した。GSC の主任古生物学者だった Joseph Whiteaves は 1892 年、それをエビの仲間の頭がない体と表現し、体節があるのに付属肢がないことに注目して、「節足動物でない」節足動物の 1 種とした。そして、その異様さにちなんで、「奇妙なエビ」―アノマロカリス（*Anomalocaris*）と名付けた。しかし Whiteaves は、バージェス頁岩化石の研究の中で、図らずもこの標本に関する認識と分類を大きく誤った。その化石の正体は、その後 90 年間も明らかにされなかった。



Charles Dolittle Walcott は、最初の化石発見者ではなかったが、最も重要なバージェス頁岩の化石層を発見した。

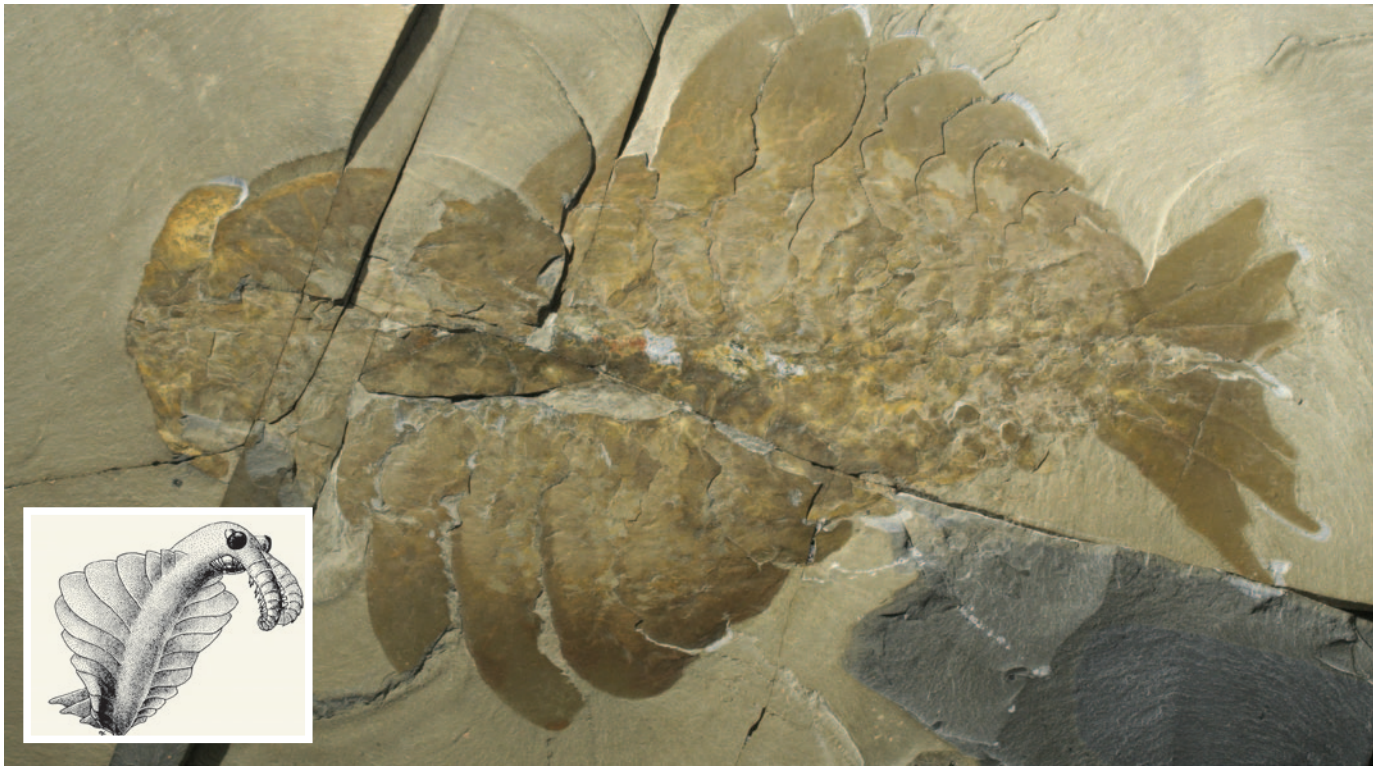
SMITHSONIAN INSTITUTION ARCHIVES

ダーウィンの導き

Walcott は、スミソニアン協会（米国ワシントン DC）の事務局長に任命された 1907 年、初めてスティーブン山を訪れ、現地のカンブリア層序を調べた。そして 2 年後のダーウィンの生誕 100 周年は、Walcott に思いもよらない刺激を与え、バージェス頁岩の発見につながったようだ。1909 年を祝賀する一環として、Walcott は 6 月、ケンブリッジ大学（英国）で名誉博士号を授けられた。その後、ロンドンの大英博物館（自然史）を訪れ、学芸員（地質学）だった Henry Woodward と会っている。Woodward は、フィールド山がスティーブン山と同じ山塊に属していて「同じカンブリア紀の化石が出るに違いない」という 1902 年の論文に注目していた。おそらく、彼は Walcott の訪問中、繰り返しこのことに触れたのだろう。というのも、9 週間後、ロッキーに戻るやいなや Walcott は、フィールド山に直行しているからだ。

Walcott の日記によれば、1909 年 8 月 28 日土曜日、フィールド山の隣のバージェス峠を登って写真を撮り、「スティーブン累層の三葉虫層を発見」している。8 月 30 日には、Walcott の家族が現地で合流した。よく語られているのは、重要な「発見の岩」を夫人の馬が見つけたという話だ。しかし本当は、道に滑り落ちてきていた岩を先頭の荷馬が越えたときに、夫人の馬がつまずかないかと心配した Walcott がその岩をどけたということのようだ。あくる日、この忌まわしい岩を Walcott 夫

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved



J. B. CARON/PARKS CANADA ROYAL ONTARIO MUSEUM

かつて「エビ」に分類されたアノマロカリスは、1991 年に Desmond Collins が発見したバージェス頁岩化石（写真）により、その本当の正体は「恐ろしいカニ」（挿入画）だということが明らかにされた。

妻が割ると、「葉脚類に属する甲殻類動物の鮮やかな群れ」が現れた。Walcott はそのうちの 3 点を日記にスケッチした。

Walcott は、自分の発見の重大さがすぐにはわからなかった。そのとき現地で採集に費やしたのは、たった 5 日間だった。しかし、1910 年に再びその場所を訪れ、「発見の岩」の出所を探し当てた。そして、おおもとの岩の層を発掘して大量の化石を採集した。

1911 年、Walcott は発見した化石に関する論文を書き始めた。それはかつてない困難な作業だった。比較対象が知られていない化石動物をどうやって分類するのか。しかし、そのことで Walcott が頭を悩ませることはなかったようだ。長年にわたって三葉虫を取り扱ってきた Walcott は、まず節足動物から着手した。そのうちの 1 つは、最初の標本を発見した息子、Sidney の名を借りて、シドネイア（*Sidneyia inexpectans*）と名付けた。Walcott は、1911 年の *National Geographic* にその論文を発表し、さらにそばで発見された大きな爪も一緒に紹介した。そのキャプションは「カンブリア紀の世界の王者」だった。ただ Walcott は、そのような爪がシドネイアに付いた状態のものは見つけられなかった。明らかに節足動物のものであるその大きな爪を、単に最大の現生節足動物に結びつけて考えたようだ。こうして、Whiteaves と同じく、Walcott も正解にたどりつけなかった。

暗闇を突く

Walcott が続いて執筆した 2 本の論文は、同じく 1911 年に発表された。それは、4 体のナマコ、1 体のクラゲ、そして数体の環形動物（ミミズの仲間）に関するものだった。その描写は、バージェス頁岩化石の保存状態のよさを表している。描かれたのはすべて軟体動物であり、体に硬い部分がない。こうした生物が化石として保存されることは極めて珍しく、カンブリア紀に関しては発見例のないことだった。

しかしながら、Walcott の同定は間違っていた。ナマコとされたものの中で今もナマコと考えられているのは 1 点だけで、クラゲとされたものは風変わりな節足動物の一部であることがわかっている。環形動物とされた 12 点のうち、今も環形動物と認められているものは 1 点だけだ。節足動物に関する 1912 年の論文は Walcott が得意とする分野だが、その分野でも、紹介した 18 属の多くは誤って分類されていた。

最後となった 1917 年の発掘が終わるまでに、Walcott は約 6 万 5000 点の化石を採集し、「あらゆる国のあらゆる地層から発見されたカンブリア紀中期化石の中で、最も大規模で最もすばらしい化石群を産出した発掘場所は、これでほぼ掘り

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

つくされた」と述べている。Walcott は、明らかに、このように優れた化石群を手に入れたことを誇りに思っていたが、彼の第一の目標は、引き続きカナディアンロッキーの古生代前期の層序を研究することだった。現地での 18 シーズンのうち、Walcott は 15 シーズンをその研究に費やした一方、バージェス頁岩化石についてはわずか 3 シーズン（5 年にわたる）しか費やさなかった。

1927 年に Walcott が死去すると、バージェス頁岩化石は、スミソニアン協会の収蔵物としてお蔵入りしてしまった。Walcott の 3 番目の妻だった Mary Vaux は、第三者がバージェス頁岩化石を見ることを快く思わなかったのだ。この「断絶期間」が終わったのは 1960 年代後半である。ケンブリッジ大学の Harry Whittington らが、主に Walcott の収集化石に基づいて、バージェス頁岩の動物を再研究し始めたのだ。

前頭部にノズルをもつ 5 つ目の奇妙な動物、オパビニア（*Opabinia*）を Whittington が描き直したとき、カンブリア紀の生命に関する世界の認識は変わった。Walcott はこれを節足動物に分類していたが、Whittington は、付属肢がついているにしろいないにしろ、その生物の付属肢を見つけることができなかったので、これを「類縁関係不明」とした。こうして、カンブリア紀の動物が現生動物群に属するとした Walcott の盲目的仮定に対して、初めて異が唱えられた。

奇妙な生物

Whiteaves が初めて発表したアノマロカリスという「エビ」に関しては、1979 年、Whittington のもとで研究していた学生 Derek Briggs が、何らかのもっと大きな生物の付属肢とする方が自然だと考えた。それから間もなく、Whittington は、未知の生物のそうした付属肢の一部と思われる化石を、岩の中から掘り出し始めた。驚いたことに、その岩の標本から、アノマロカリス前頭部の付属肢と思われる爪の化石が 2 点、見つかった。さらに、Walcott が 1911 年にクラゲとよんだものは、アノマロカリスの前方にある環状の口の放射状の顎であることが明らかになった。このような動物はそれまで発見されたことがなく、Whiteaves は「ほかのエビと似ていない」と控えめに表現した。

Whittington の研究では、アノマロカリス、オパビニア、そしてほかの 6 種の生物が、既知の動物群に分類されないまま残された。これらの多くは、もう 1 人の学生、Simon Conway Morris によって描写された。Stephen Jay Gould は、1989 年の著書『ワンダフル・ライフ：バージェス頁岩と生物進化の物語』の中で、さらに論理を進め、仮説を提示した。未分類の「奇妙な生物」8 種を絶滅してしまった動物群のものと考えたのだ。

Gould は、バージェス頁岩の動物を既知の群に「詰め込んだ」ために真の理解に時間がかかることになったとして、Walcott を批判している。彼は、それを Walcott の保守主義と長老主義的教育によるものとした。しかし私にいわせれば、それは無意味だ。Walcott と同じ時代の人も、それどころかその後の科学者たちも、Whittington の登場までは、バージェス頁岩の動物が現生動物群に属するという Walcott の仮定に誰も異を唱えなかったのだ。確かに、Walcott の動物学的分類の多くは誤りだったが、それは別の者がそれを正そうとする試みにつながった。結果として、Walcott の誤りは後世の新発見の誘因となったのだ。

1975 年以来、18 シーズンにわたり、私は王立オンタリオ博物館の研究グループによるバージェス頁岩の実地調査と発掘を率いてきた。我々は既存の採掘場を大幅に拡張し、3 つの新たな動物相を発見・発掘した。いずれも動物種の構成が互いに異なっている。1991 年には、完全なアノマロカリスが初めて発見された。このとき初めて、我々はそれがどのような生物なのかを知ることができた。それは、長さ 1 メートル、大きな爪と放射状の顎をもつ獰猛（どうもう）な捕食者だった。2 通りの姿が描かれ、新種の節足動物ディノカリダ —「恐ろしいカニ」— という群に分類された。恐竜は中生代の陸生動物を捕食していたが、ディノカリダ群の動物はカンブリア紀の海生動物を捕食していた。それは、カンブリア紀の生物の生き方に関する見方を劇的に変化させた。

1983 年から 2000 年にかけて行われた 12 シーズンの発掘により無数の新標本が得られ、新しい姿が描かれ、古い姿は描き直されている。今日我々は、バージェス頁岩動物を現生動物群の中に分類した Walcott の仕事にほぼ回帰しているが、動物群の中身は異なる。ディノカリダのように絶滅した種はあるが、門の絶滅は極めて少ない。Gould の奇妙な生物のうち 5 点は分類が済み、新たな門に分類されたのは 1 点だけだ。今年、Walcott の時代からの謎の 1 つが解けた。「カンブリア紀の世界の王者」の爪が、「恐ろしいカニ」、フルディアのものとわかったのだ。

現在、カンブリア紀の研究材料は、中国の澄江動物群（特に、ヒトへとつながる新しい脊索動物）、およびグリーンランドのシリウス・パセット動物群からも発掘されている。両者は、バージェス頁岩動物とともに、ほぼすべての現生動物群がカンブリア紀の海に存在していたことを示している。

Walcott の 1909 年の発見は、最初ではなかったが、最高のバージェス頁岩のありかを教えてくれた。その収集化石と著作物により Walcott は、これまでの誰よりも、我々がカンブリア紀の世界の生物を見るための障害を取り除くことに貢献した。このことだけで、Walcott は 8 月の百周年祝賀の栄誉に値するのだ。（小林盛方 訳）

■

Desmond Collins は、1968 年から 2004 年まで、王立オンタリオ博物館で古無脊椎動物学の学芸員および純古生物学の責任者として活動した。
詳細は http://tinyurl.com/oxgo9k。

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Canada assumes weighty mantle

ワット天秤が英国からカナダへ

Nicola Jones Nature Vol. 460(1070)/27 August 2009

1 キログラムという量をキログラム原器に頼らずに定義する研究に、「ワット天秤」という実験装置が使われている。実際にその研究に役立つほど高い精度を実現しているワット天秤は、現時点では世界で 2 台だけだ。そのうちの 1 台がこのほど、ワット天秤の生まれ故郷である英国からカナダに売却されることになり、ばらばらに分解され、輸送された。

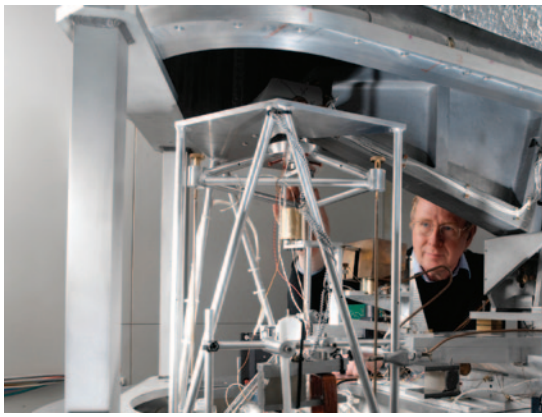
一部の英国の科学者たちはワット天秤を自国から失うことを悲しみ、一方、カナダの研究者たちは興奮している。また、世界中の計測学者たちも固唾をのんでその成り行きを見守った。米国の国立標準技術研究所（NIST；メリーランド州ゲイサーズバーク）で、世界トップクラスの精度をもつもう 1 台のワット天秤を使って研究している Richard Steiner は、「輸送のためには、ワット天秤を完全にばらばらにし、再び組み立てることになります。何かが壊れないか心配です。ワット天秤はとても壊れやすく、その大部分はかなり古いからです」と話す。カナダ側の研究所は天秤を 8 月末までに受け取る予定だ。

1 キログラムは、いまだに人工物（白金とイリジウムの塊でパリ近郊の貯蔵室に保管されている国際キログラム原器）で定義されている唯一の物理単位。時間の経過とともにこのキログラム原器に原子が付着したり、はがれ落ちたりするため、その質量は変化する。このため計測学者たちは、光のエネルギーと振動数の関係を決めるプランク定数のような、もっと安定した量に基づいて 1 キログラムを再定義しようと試みてきた。プランク定数は、量子物理学と電磁気学の方程式を通じて質量に関連付けることができるのだ。

プランク定数を高精度に決める最良の方法が、正確なワット天秤を使う方法だ。カナダに送られた装置はミニバンほどの大きさがあり、天秤棒の長さは 1 メートルある。現在のキログラム原器による質量の定義に基づいてプランク定数を求めるには、天秤の一方に正確に質量がわかっている試料を乗せる。もう一方には磁場中に置かれた直径 30 センチメートルの金属コイルがある。コイルに電流を流すと電磁気力が発生し、もう一方の側の重力とつり合う。さらにワット天秤で別の測定を行い、高精度な測定が難しい物理量を算出式から消去し、プランク定数を求める。プランク定数が十分に高精度に求まれば、原器を使わずに逆にプランク定数とワット天秤で 1 キログラムを定義することが可能になる。

ワット天秤は、英国のテッディントンにある英国立物理学研究所（NPL）で 1975 年に考案された。Ian Robinson は最初のワット天秤の開発に加わり、その後継機などを使って 30 年以上、研究を続けてきた。彼はこの夏、彼のライフワークであるワット天秤を輸送するため、分解した。1 トンの磁石など、500 個を超える部品を約 50 個の木箱に詰めた。精密コイルは Robinson が自分自身で梱包した。「だれかがこのワット天秤を壊してしまうようなことがもしもあるとしたら、それは私自身でなければなりません」と彼は話す。

英国立物理学研究所の研究部門長である Kamal Hossain は、「私たちはこのワット天秤を使って既にすばらしい研究成果を上げることができました。今後はナノ計測学のようなより実用的な分野に研究の重点を移したいので、ワット天秤の研究はやめることに決めたのです」と話す。



Ian Robinson はカナダに移設するワット天秤を調整し、その精度をさらに上げることができるかもしれない。

NPL

カナダの国立計測標準研究所（オンタリオ州オタワ）の計測学の責任者である Alan Steele は、「英国立物理学研究所がワット天秤の研究をやめるという決定を聞いたとき、かなり驚きました」と話す。ワット天秤がカナダに到着すれば、Steele の研究室がこれまで行ってきた計測学の研究をさらに押し広げるとともに、カナダも 1 キログラムを再定義する研究に参入することになるだろう。

真の値を求めて

1 キログラムを再定義するもう 1 つの方法が、アボガドロ数（1 モルの物質中の原子あるいは分子の数）をもっと正確に決める方法だ。実際には、ケイ素のほぼ完全な球に含まれる原子の数を決定する方法がとられている。もしも将来、質量の再定義としてプランク定数とワット天秤を使う方法が認められることになれば、ワット天秤を

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

もつ国立研究所は質量を正確に測定したり、質量の標準を維持したりする重要な役割を担うことになる。ワット天秤は、スイスとフランスでも作られ、試験されているが、それらが十分な精度を実現したことを証明するデータはまだ公表されていない。

今のところ、米国立標準技術研究所のワット天秤で得られたプランク定数と、英国立物理学研究所のワット天秤で得られたプランク定数は完全には一致していない。それぞれの測定の不確かさはともに 10 億分の数十（1×10^{-8} のオーダー）であるが、最近発表された最も新しい両研究所のプランク定数測定値には、測定の不確かさよりも 10 倍大きな違いがあった。一方、ケイ素の球の方法で研究しているチームは、米国立標準技術研究所で得られたプランク定数の値とかなりよく一致するデータが得られていると話しているが、データはまだ発表されていない。2011 年に開かれる国際度量衡総会で 1 キログラムを再定義できるよう、それまでに不一致を解決することが目標だ。

Steele らの研究チームは、Robinson に協力してもらって 10 月にワット天秤を組み立て始める計画だという。振動がなく、磁場の影響も遮蔽されているオタワの研究所は、敏感な装置を使う研究に理想的な場所であることがわかるはずだと Steele らは考えている。「ワット天秤をカナダに移動させることは、プランク定数を精密に決めるための、3 番目の独立したデータセットを作ることになるはずです。この装置はあまりに複雑なので、いったんばらばらに分解して組み立てることは新しい実験をするのと同じだからです」と Steele は話す。一方、Robinson は「私はワット天秤を使った自分の実験に小さな欠陥を見つけたかもしれない」という。ワット天秤をもう一度組み立てたときに、彼はそれを修正するつもりだ。その結果、もしも米国立標準技術研究所の値と一致したら、正しいプランク定数はいくらなのか、合意は容易なはずだ。

Robinson は、英国立物理学研究所の近くを走る電車の線からの磁場の影響に悩まされていた。カナダの研究所へ移設すれば精度は向上するだろうと彼も考えている。「英国で研究を続けることができないのは悲しいことです。しかし、重要なことは誰かがワット天秤を動かし続けることです。それは誰でもかまいません。最も大事なことは、それが捨て去られてしまわないようにすることです」と彼は話している。（新庄直樹 訳） ■

Climate-control plans scrutinized

「地球を冷やすジオ・エンジニアリング」の検討が始まった

Geoff Brumfiel Nature Vol. 461(19)/3 September 2009

温暖化から地球を守るために提案されている数々の地球工学的手法を、英国学士院が初めて検討した。

大気中の二酸化炭素濃度が上昇し、その排出制御の政治的取り組みがなかなか進まない今、著名な科学アカデミーが、大胆な介入を考えるべきときが来たと声を上げた。

9 月 1 日、英国を代表する科学組織である英国学士院（王立協会）は、地球の気候を意図的に変化させる手法としてこれまでに提案され、議論をよんできたさまざまな手法に関する最初の検討結果を発表した。こうしたアプローチは地球工学（ジオ・エンジニアリング）と総称され、地表を暖める太陽光の入射量を制限するか、大気中の二酸化炭素濃度を低下させることにより、気候の変化を遅らせたり止めたりすることができるとされている。

しかし、地球工学は破滅的な副作用をもたらす可能性もあり、アジアのモンスーンを消してしまったり、海水の溶存酸素量や pH を変えてしまったりするおそれがある。これらの理由から、英国学士院は予備的な研究プロジェクトまでチェックする国際的な管理体制が必要であるとよびかける。また、地球工学的手法を用いる時期と方法に関するルールづくりについての研究も必要であると指摘している。

この報告書をとりまとめた英国サウザンプトン大学の地球科学者 John Shepherd は、地球工学を取り巻く科学と政策は非常に複雑であるため、提案されているどの計画も実現までに数十年はかかると説明する。

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

「これらの手法は、人類が今世紀末に苦境から脱するのを助けてくれるかもしれません」と彼はいう。「けれどもそのためには、今、研究をしなければならないのです」。

地球工学的手法によって地球の気候を変えることは何十年も前から提案されているが、その大半は、あまりにも変わっていたり、費用がかかったり、どうみても危険そうであったりして、即座に却下されてしまった。一部の研究者は、英国学士院が報告書を作成したこと自体が、地球工学がまじめに受け取られるようになったことを示唆する最初の徴候であるとみる。カルガリー大学（カナダ・アルバータ州）の環境工学者で、この報告書の 12 人の執筆陣の 1 人である David Keith は、「実際、これは一大事です」という。なぜならこの報告書は、「主要な科学アカデミーが地球工学のみを取り上げた最初のもの」であるからだ。

Shepherd は、英国学士院がさまざまな地球工学的アプローチに優劣をつけようとしたわけではないことを強調するが、実際には、彼らがこれから研究していく価値があると考えているものが挙げられている（コラム『夢は大きく』参照）。

人気のあるアプローチの中には低い点数をつけられたものもある。建物の屋根を白く塗ることで市街地の温度を下げるというアイディアは、英国機械技師学会が 8 月 27 日に発表した地球工学に関する報告書の中でも提案されているが、英国学士院は、この手法では地球全体の気温にはほとんど影響を及ぼせないだろうと指摘している。海に鉄分を散布して藻類を爆発的に増殖させ、これらに炭素を吸収させるという手法の評価も低かった。最近の研究によると、大発生した藻類は比較的小量の炭素しか吸収せず、膨大な量の酸素を消費して「死の海域」をつくりだすおそれがあると警告されている。

好意的な評価を得たアイディアもあった。執筆陣によると、地質学的な炭素吸収過程を加速させる人為的風化は、空気中の炭素を捕獲する最も有望な手法の 1 つである。これは、農地に炭酸塩とケイ酸塩を撒いて炭素を吸収するスポンジにし、空気中の二酸化炭素を大量に吸収させようというものである。また、成層圏に硫酸塩のエアロゾルを散布すると、大気による太陽光の反射率が高くなり、大規模な火山噴火のあとに起こる急速な冷却効果を模倣することができる。この手法には地球を急速に冷やせるという長所があると Shepherd はいう。しかし、地球を低温に保つためには、「この操作を数十年間、ひょっとすると数百年間も続けなければならない」という。「地球温暖化に対する特効薬はないのです」。

夢は大きく
地球工学の 5 つの提案

成層圏にエアロゾルを散布
大気中に硫酸塩を散布することは危険であるが、急速に地球を冷やすことができるだろう。

二酸化炭素の捕獲
大気中の二酸化炭素を直接除去する空気浄化装置はうまくいきそうだが、莫大な費用がかかるだろう。

白い雲
海水中の塩分を大気中に散布し、より白くなった雲に太陽光を反射させる手法では、雲の真下の領域しか冷やすことができない。

風化の促進
土壌にケイ酸塩または炭酸塩を散布して二酸化炭素を吸収させる手法はうまくいきそうだが、さらなる研究が必要である。

宇宙の反射鏡
宇宙に反射鏡を設置して地球を冷却する手法には数兆ドル（数百兆円）の費用がかかるだろう。報告書の執筆陣は、現段階では宇宙ベースの研究は机の上にとどめることを勧める。

本質から目をそらしてはならない

高く評価された戦略のほとんどに、潜在的に破滅的な副作用がある。いくつかのモデル研究は、成層圏に投入された硫酸塩がオゾン層を破壊したりモンスーンを変化させたりして、数億人の生活に影響を及ぼす可能性があることを示唆している。また、土壌にケイ酸塩または炭酸塩を撒く方法は、これらの物質をどのように処分するかによって、土壌の pH や海の生態系を変えてしまう可能性がある。こうした理由から、地球工学実験は厳しい倫理的検討を受け、広く議論される必要があると、プリンストン大学（米国ニュージャージー州）の地球科学者で政策研究者でもある Michael Oppenheimer はいう。「問題が解決するまで、科学者は野外試験に入ってはならないのです」。

執筆陣は、地球工学がもたらす最大の危険は、気候の変化を止める方法として誰もが認めている方法、すなわち、大気中に排出される温室効果ガスの量を減らすことから人々の目をそらしてしまう可能性だと考えている。英国の環境保護団体グリーンピースの主席科学者 Doug Parr は、「地球工学は既に簡単な解決法だと考えられるようになっています」と警告する。地球工学が、化石燃料の使用を抑制し、代替エネルギー源を開発することの代わりにならないことは、Shepherd も認めている。「（執筆陣は）これまでどおり二酸化炭素の排出量を削減することが温暖化対策の基本になると考えています」。

Shepherd は今、年間 1000 万ポンド（約 14 億円）程度の資金があれば、どの計画が最も将来性があるかを見極められるはずだと考えている。「5 年後か 10 年後には、この研究に莫大な研究費を支給する価値があるかどうかがわかるでしょう」。（三枝小夜子 訳） ■

この報告書は http://royalsociety.org/displaypagedoc.asp?id=35217 で見られる。

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

植物生物学

Genetics of high-rise rice

浮イネの洪水回避遺伝子

Laurentius A. C. J. Voesenek and Julia Bailey-Serres

Nature Vol. 460(959-960)/20 August 2009

浮イネは、水田が冠水すると、茎を上に伸ばして生き残る。冠水に対するイネの応答の遺伝的背景を知ることは、稲作の生産性の向上に役立つだろう。

浮イネは、その名にたがわず、深さ 4 メートルものゆっくりした水位上昇に応じて生長する品種のイネだ。このほど名古屋大学の服部洋子ら[1]が、*Nature* 2009 年 8 月 20 日号の 1026 ページで、この脅威の伸長応答に寄与している 2 つの遺伝子、*SNORKEL1* と *SNORKEL2* を同定したと発表した。

コメ、つまりイネ（*Oryza sativa*）の種子は、全世界で数十億人もの食糧となっている。1 ヘクタール当たりの収量は 1960 年代から 2 倍以上に伸びているが、2050 年までに予測される必要量を満たすには、さらに倍増させなければならないと考えられている[2,3]。アジアの稲作地の 30% 以上、アフリカの稲作地の 40% 以上では、低地水田（水深 15 ～ 50 センチメートル）または深水水田（水深 50 センチメートル超）で耕作が行われている。しかし、天水田では水深を制御できないことが深刻な問題となる場合がある。水田耕作地は、イネの生長期に水位がどんどん上昇して数メートルに達するような地域もあれば、突発的な洪水により数日から数週間にわたってイネが完全に冠水する地域もある。そして高収量のイネ品種は、そのどちらの環境でも生育することができない。そのため、洪水の多い地域の中には古来の土着品種を栽培しているところがあり、そうした品種には、冠水の誘発で 1 日当たり 25 センチメートルも伸長するという驚くべき能力をもっていたり、15 日間の冠水に耐えることができたりするものがある。しかし、一般に、こうした冠水に強いイネの収量は、高収量品種の 5 分の 1 程度しかない。

服部ら[1]は、染色体上で浮イネの冠水誘導性の茎の伸長を調節している部分を 3 か所特定した。そして、交配により高収量のイネ（ジャポニカ種）にその領域を導入すると、部分的な冠水に応答して伸長する能力を獲得した。服部らは、深水応答の 30% に関与する 12 番染色体の 1 区画に着目し、水面下で茎の伸長を刺激する 2 つの遺伝子、*SNORKEL1* と *SNORKEL2* を同定した。どちらの遺伝子もエチレン応答性転写因子（ERF）ファミリーに属しており、冠水した茎で大量に発現する。この 2 つの *SNORKEL* 遺伝子は、ジャポニカ種や、栽培種の 2 つある祖先の 1 つである野生種 *Oryza nivara* など、深水伸長応答を示さないイネには存在しないか、あるいは存在しても機能していない。ところが、もう一方の祖先である野生種 *Oryza rufipogon* には、機能性の *SNORKEL* 遺伝子をもった深水伸長を示す集団が存在する。このことから、*SNORKEL* 遺伝子座は *Oryza rufipogon* に由来すると考えられる。

冠水は、細胞の揮発性ホルモン「エチレン」の増加を促進することによって茎と葉の伸長を引き起こす。エチレンは、アブシジン酸という植物ホルモンを抑制し、それに続いてジベレリン酸の合成とそれに対する応答を促進する[4,5]（図 1）。ジベレリン酸とタンパク質受容体との相互作用は、一般に細胞の伸長を制限する DELLA 転写因子の分解を誘導する。服部ら[1]は、主として空気中よりも水中でガスの拡散が遅いことにより、冠水した器官でエチレン[4]が蓄積し、*SNORKEL1* と *SNORKEL2* を活性化させていることを発見した。この 2 つの *SNORKEL* 遺伝子の作用は、エチレンの下流、ジベレリン酸の上流で機能していると考えられる（図 1a）。ただし、服部ら[1]が浮イネの冠水組織で観察したような生物活性をもつジベレリン酸の大幅な増加が、*SNORKEL* によるものなのかどうかを確認するには、さらに研究を進める必要がある。

SNORKEL 遺伝子座は、ERF をコードした、水面下の生長を調節するイネの多重遺伝子領域としては、2 番目に同定されたものだ。最初に見つかったのは第 9 染色体上にある *SUBMERGENCE-1*（*SUB1*）遺伝子領域で、完全な冠水への応答を規定する ERF を 2 ～ 3 個コードしている（SUB1A、SUB1B、SUB1C）[6]。*SUB1* は、2 週間を超える冠水にも耐

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

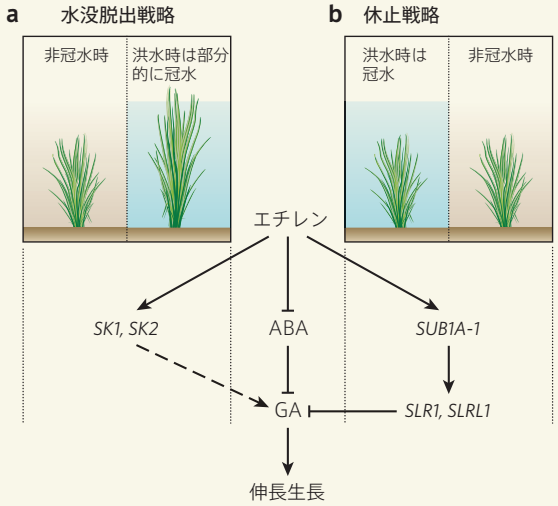


図1 エチレンとイネの冠水耐性戦略
茎と葉の細胞の伸長は、ジベレリン酸（GA）というホルモンによる正の調節を受けている。通常の状態では、アブシジン酸（ABA）という別のホルモンがGAの活性を阻害している。植物体が冠水すると、エチレンというガス状の植物ホルモンの拡散速度が、水中では低いために蓄積する。これがABAの分解を促進し、GAの産生やGAへの応答性を増大させ、最終的に細胞の伸長を刺激する。**(a)** 浮イネ品種の水没脱出戦略では、水面の上まで茎が高速で伸長する。この場合、2つのエチレン調節性遺伝子*SNORKEL1*と*SNORKEL2*（*SK1*、*SK2*）がコードする転写因子によって、伸長生長と、おそらくはGAの蓄積または作用が刺激される（破線矢印）[1]。**(b)** 冠水耐性品種の休止戦略では、一過性の冠水の条件下で茎の伸長を抑制し、炭水化物を節約・温存することによって生存率を高める。この場合、生長阻害遺伝子*SLENDER RICE-1*（*SLR1*）および*SLR LIKE-1*（*SLRL1*）に対する*SUBMERGENCE*遺伝子（*SUB1A-1*）のエチレン誘導性作用によって、GAのシグナル伝達、ひいては伸長が阻害される。

えられる在来種から発見された。冠水した浮イネにみられる茎の急速な伸長とは異なり、*SUB1A-1*遺伝子をもつ系統は、エチレンが活性化する伸長生長を抑制することによって冠水のストレスを乗り切る（図1b）。そうすることで、水が引いた後の再生長に必要な貴重な炭水化物を温存できるのだ[6,7]。これは、冠水した茎の中で、DELLAタンパク質（SLENDER RICE-1；SLR1）とそれに近縁の非DELLAタンパク質（SLR LIKE-1；SLRL1）の減少を最小化することによって行われている[8]。こうしてエチレンは、驚いたことに、水面下の伸長の促進（SNORKEL）と抑制（SUB1）という正反対の結果を引き起こすことができるのだ。

冠水が誘導する急速な茎の伸長は、洪水の多い生態系で生長する一部の野生植物の特徴でもある。通気組織（迅速なガス拡散のためのスノーケルに似た管）の存在[9]など、ほかの形質とあいまって、冠水時の水面下の伸長は、河川の氾濫地域やそれと類似した環境における植物種の分布や種類を規定している。野生植物でも、水面下の急速な生長は、エチレンとジベレリン酸との相互作用による調節を受けており、細胞壁を弛緩させるエクスパンシンのような下流の標的タンパク質も一翼を担っている[4]。このような冠水が誘導する伸長は、長期にわたって浅く水没する場所で生育する植物にみられる。一方、一時的に深く水没する場所にみられる種は、休止戦略を採ったイネのように、冠水時の茎の伸長を制限する[4]。

こうした冠水時に茎の生長を休止する湿地の種でも、冠水した組織ではエチレンを蓄積し、非冠水条件ではジベレリン酸に応答することができる[4]。このことは、エチレンが促進する茎の伸長と、その結果生じた多くの湿地植物の生態学的分布とが、エチレン依存的にジベレリン酸の産生と応答を制御する因子によって調節されていることを示唆している。我々は、あらゆる種の植物が、SNORKELやSUB1といったERFに近縁の転写因子によって冠水応答を調節し、洪水の多い環境で生き延びているのではないかと推測している。ERFの発現とそのタイミング、機能、そして組織特異性は、自然選択のターゲットとなっている可能性があり、また、さまざまな種でさまざまな量のエチレンが媒介する極めて多様な生長応答を規定しているのかもしれない[10]。

服部らによる深水条件での伸長を制御する遺伝子の同定[1]には、実用的に大きな意義がある。高収量品種に高速伸長形質を導入することにより、深く冠水しやすい地域のイネの収穫量を増大させる手段が得られるのだ。これは、一過性の洪水に見舞われる地域において強い冠水耐性をもつ*SUB1*イネの品種開発の成功に一役買うだろう[6]。イネを深水条件で栽培した場合、通常、イネは高速で伸長する水面下の器官に炭素を振り分けなければならず、また、水が引けば背が高すぎるために実の重みで倒れてしまうので、水深が浅い水田ほどの収量が得られない。しかし、先進的な育種戦略によって高収量品種に*SNORKEL*と*SUB1*が導入されれば、河川に近い水田で生産されるコメの品質と収量は向上するだろう。
（小林盛方 訳）■

Laurentius A. C. J. Voesenek、ユトレヒト大学環境生物学研究所（オランダ）
Julia Bailey-Serres、カリフォルニア大学リバーサイド校植物細胞生物学センター（米国）

1. Hattori, Y. *et al. Nature* **460**, 1026–1030 (2009).
2. Khush, G. S. *Nature Rev. Genet.* **2**, 815–822 (2001).
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The State of Food and Agriculture 2008. Biofuels: Prospects, Risks and Opportunities* (FAO, 2008).
4. Bailey-Serres, J. & Voesenek, L. A. C. *J. Annu. Rev. Plant Biol.* **59**, 313–339 (2008).
5. Kende, H., van der Knaap, E. & Cho, H.-T. *Plant Physiol.* **118**, 1105–1110 (1998).
6. Xu, K. *et al. Nature* **442**, 705–708 (2006).
7. Fukao, T. *et al. Plant Cell* **18**, 2021–2034 (2006).
8. Fukao, T. & Bailey-Serres, J. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **105**, 16814–16819 (2008).
9. Colmer, T. D. *Plant Cell Environ.* **26**, 17–36 (2003).
10. Pierik, R. *et al. Trends Plant Sci.* **11**, 176–183 (2006).

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

アンドロメダ銀河

NASA/JPL-CALTECH/K. GORDON (UNIV. ARIZONA)/GALEX SCIENCE

宇宙物理学

Hidden chaos in cosmic order

アンドロメダ銀河に残された25億年前の記憶

Nickolay Y. Gnedin

Nature Vol. 461(43)/3 September 2009

1986年のある論文で「ゾウのように銀河は長期にわたって記憶を保ち続ける」と記載された。このまさに「銀河の記憶」から、私たちのお隣のアンドロメダ銀河の歴史について、意外な事実が明らかになった。

一般向けの文学作品や学部学生向けの教科書では、銀河は宇宙の基本的な構成要素だと説明されることが多い。その場合、銀河は完全で分割できない一枚岩の塊であり、宇宙のほかのすべての構造を作り上げるものであるとされている。天文学者の多くも、長い間この見方をとってきた。確かに、私たちが本やインターネットで見る銀河の大部分は、完全な対称形をしている。米国シカゴのオヘア国際空港は通路を宇宙の画像で飾って「世界天文年2009」を祝ったが、その画像の銀河も完全に対称なものばかりだった。銀河の形の厳密な美しさが重視されているのは、かなりの程度は米国の天文学者エドウィン・ハッブルのせいである。ハッブルは銀河を形と構造の特徴に基づいて分類し、その分類は今日でも広く使われている[1]。しかし、それに完全にあてはまることは決してなく、ハッブルが考えた完全な回転楕円体（楕円銀河）と渦巻状の円盤（渦巻銀河）という2つの主要なグループに合わなかった例外の銀河は、すべて「不規則銀河」のグループに入れるしかなかった。不規則銀河は、ほかの銀河と衝突、つまり合体過程にあるものが多い。銀河は大きく、複雑なシステムで、それが衝突するとすべてがめちゃくちゃになってしまう。

建築家は新しい建築物の厳密な美しさを称賛し、荒廃した醜さを嫌う。20世紀の多くの天文学者もまた、実際にはそれほど小さくないグループである不規則銀河を、「いくつもの病気もち」とよんで軽んじてきた。しかし、望遠鏡が大き

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

くなり、天文学で使われるカメラがより敏感になるとともに、一部の天文学者は、自分たちが建築家というよりも考古学者の仕事をしていることに気づいた。そして、自分たちの研究に「考古学」という言葉を使うまでになった。カナダのヘルツベルグ宇宙物理学研究所の Alan McConnachie らは、「全アンドロメダ考古学サーベイ」（PAndAS）という研究の成果を発表し、*Nature* 2009 年 9 月 3 日号 66 ページに掲載された。これは銀河考古学の非常に優れた例だ。この研究を進めたのはたくさんの天文学者たちで作る研究グループで、ハワイのマウナケア山頂にある口径 3.6 メートルのカナダ・フランス・ハワイ望遠鏡を用いて、私たちの天の川銀河の隣の姉妹銀河であるアンドロメダ銀河周辺の広い領域を、前例のない感度（天文学者が好むいい方では“深さ”）で、注意深く綿密に観測した。

天の川銀河とアンドロメダ銀河は、宇宙のかなり目立たない場所にあるが、ともに約 1000 億個の星を含み、その周辺では 2 人しかいない「ファーストレディ」だ。20 億個の星からなる小さい銀河から、たった 1000 個の星でできている非常に小さい銀河にいたるまで、約 50 個の衛星銀河を従えている。両銀河が互いを重力で大きく乱すことがないためには、本当のレディーのようにひじを自由に動かせるだけのゆとり（距離）が必要だが、実際、両銀河は十分に離れている。

あらためてアンドロメダ銀河をよく見てみよう。私は毎朝、オフィスに来るとき、スローンデジタルスカイサーベイが撮影した、壁いっぱいの大きさのアンドロメダ銀河の美しい画像の前を歩いて通り過ぎる[3]。アンドロメダ銀河の壮大さと対称性は、しばしば私にゴシック様式の大聖堂を思い起こさせる。考古学者が探し求めるようなものがそこにあるのだろうか。「あらゆるものがある」と PAndAS チームは主張している[2]。ゴシック様式の大聖堂が通常、考古学的に貴重な試料を含む地層の上に立っているように、宇宙の大聖堂もまた、その下に考古学的に貴重なものを隠しもっていた。PAndAS チームは、アンドロメダ銀河とその周辺のウルトラディープ（超大深度）画像から、アンドロメダ銀河が経験した過去のすさまじい出来事と、その最も有名な衛星銀河であるさんかく座銀河との関係について多くの情報を得たのである[2]。

彼らはどうやってその情報を得たのだろうか。そこから、銀河考古学が実際にどのように行われるかを知ることができる。まず超大深度画像から、星が密に集まった小さなさんかく座銀河を、星でできた巨大な雲が取り囲んでいることが明らかになった。この星の雲はとてもまばらで、したがって、かすかに見える程度のものだった。この星の雲は明らかにさんかく座銀河に伴うものだが、では、これら数百万個の星をさんかく座銀河の外へ放り出した力は、いったい何だったのか。答えは明らかだ。近くで強い影響力を及ぼしているのはアンドロメダ銀河だけ。その重力はあまりに強く、さんかく座銀河のように 20 億個の星からなる銀河さえもそれに耐えることはできない。

さんかく座銀河が広がった星のハローをもっていることは、過去にこの銀河が巨大な隣人に近づきすぎてしまったことを示す有力な証拠だ。PAndAS チームは、スーパーコンピュータによるシミュレーション結果をさんかく座銀河とアンドロメダ銀河の超大深度画像に調和させることにより、最も可能性の高いさんかく座銀河の過去の軌跡を再現することができた[2]。この計算によると、両銀河の接近は約 25 億年前に起こり、そのとき、さんかく座銀河はアンドロメダ銀河からわずか 4 万パーセク（13 万光年）以内を通過した。アンドロメダ銀河の強い重力は、さんかく座銀河に強い潮汐力を及ぼし、数百万個の星がさんかく座銀河の外へ放り出された。

しかし、20 億個の星からなるさんかく座銀河が近距離を通過したのだから、アンドロメダ銀河にもその痕跡が残ったはずだ。実際、PAndAS チームの超大深度観測から、アンドロメダ銀河の星でできた円盤の中に軽いゆがみと小さな擾乱があり、その位置は、さんかく座銀河の通過が起こしたならばあるであろう、まさにその場所であることが明らかになった[2]。これらの証拠はどんな裁判でも勝てるほど強力なものだ。

悲しいことに、宇宙の大聖堂の美しさが完璧に見えるのは近視眼的に見た場合だけなのだ。より深く見れば、つまりより高い解像度で観測すれば、完全に見えるベールの下に、過去のすさまじい事件の複雑で混乱した痕跡が見える。すべての銀河は十分に深く見れば不規則なのだ。天文学者たちは、こうした痕跡からどのように情報を読み取ればよいかを学びつつある。英国オックスフォード大学の宇宙物理学者 James Binney と Andrew May が 1986 年の論文に書いた「ゾウのように銀河は長い記憶をもつ」ことを、さらに深く理解しようとしているわけだ[4]。（新庄直樹 訳）

■

Nickolay Y. Gnedin、フェルミ国立加速器研究所（米国イリノイ州バタビア）理論宇宙物理学グループ

1. United Nations Population Division. *Replacement Migration: Is it a Solution to Declining and Ageing Populations?* (United Nations, 2002).
2. Lesthaeghe, R. & Willems, P. *Pop. Dev. Rev.* **25**, 211–228 (1999).
3. Myrskylä, M., Kohler, H.-P. & Billari, F. C. *Nature* **460**, 741–743 (2009).
4. United Nations Development Programme. *Statistics of the Human Development Report* http://hdr.undp.org/en/ statistics/indices (2008).

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

病原菌が感染初期の生体防御機構を回避する仕組みを解明!

笹川 千尋

私たちの免疫系は病原性微生物による感染を防いでいるが、一部の細菌やウイルスは、この防御系を巧みにかわす戦術を用意している。東京大学医科学研究所細菌感染分野の笹川千尋教授らは、病原菌のリステリアが、オートファジーという感染初期に発動される生体防御機構を巧みに回避している仕組みを突き止めた。

Nature Digest ── オートファジーとはどんな機構でしょうか?

笹川 ── オートファジーは「自食」ともよばれ、不要なタンパク質や細胞小器官を分解する仕組みです。酵母からヒトにいたる真核生物のすべての細胞が、この仕組みをもっています。よく知られるのは、細胞内の異常なタンパク質を分解して蓄積を防ぐ、栄養環境が悪化した場合に自らのタンパク質を分解して再利用する、といった機能です。また、細胞質に侵入してくる細菌に対して、菌体を丸ごと取り囲み、リソソームと融合して消化・分解します。つまり細胞の恒常性の維持に重要な仕組みといえます。最近では、アルツハイマー病やハンチントン舞踏病などの変性性疾患、あるいはがんとオートファジー異常との関連がクローズアップされてきました。

オートファジーによるタンパク質の分解は、細胞質内に作られる二重膜構造体（オートファゴソーム）が加水分解酵素をもつリソソームと融合し、その内部に取り込まれることで行われます。その仕組みは、東京工業大学の大隅良典教授（現在）が 1990 年代に酵母で解明し、日本ではオートファジーの先駆的研究が数多くなされています。

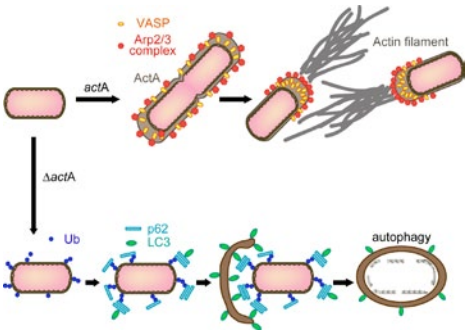


図 1　野生型のリステリア（上）と ActA 遺伝子を欠損した変異型のリステリア（下）。野生型では ActA が Arp2/3 および VASP と結合して作る複合体を菌体表面につける一方、菌体の一端に、凝縮した ActA-Arp2/3-VASP 複合体によるアクチン重合が誘導される。Arp2/3 および VASP の宿主タンパク質で覆われた野生型は、オートファジーによる認識を回避する。一方の変異型では複合体が作られず、オートファジーにより異物として認識され最終的に分解される。

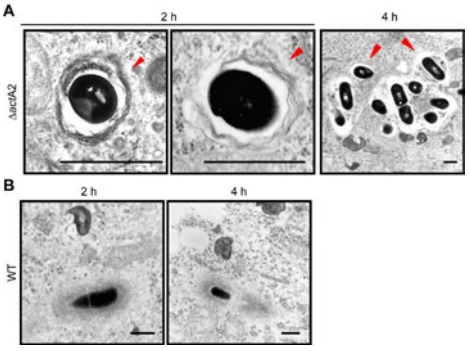


図 2　ActA 遺伝子を欠損した変異型のリステリア（A）と、野生型のリステリア（B）。これらの電子顕微鏡像からわかるように、変異型では細胞内へ侵入後 2 時間および 4 時間後は、いずれもオートファゴソームに特有な多重膜に菌が取り囲まれている。一方、同時期の分裂直後の野生型は、菌体周囲に重合化したアクチンが見える。

ND ── 先生はそのオートファジーとどんなかたちで出会われたのでしょうか?

笹川 ── 私は、胃や腸の粘膜に感染する病原菌について、感染のメカニズムとヒトなど宿主側の免疫や細胞応答についての研究を進めてきました。その一環として、病原菌が病原性を発揮するために宿主細胞に注入する一群のタンパク質の同定と機能解析を始めました。これらのタンパク質は「エフェクター」と総称され、宿主細胞の細胞骨格の再構成、細胞周期の調節、細胞接着の強化などに関わるものなどを明らかにしてきました[1,2,3]。そして 2005 年に、ある特定のエフェクターを欠損した赤痢菌が、宿主の細胞質内で増殖できなくなる理由を探るうちに、そのエフェクターがオートファジーを回避するために機能していることを突き止めたのです[4]。これがオートファジーとの出会いとなり、今回の成果につながりました。

リステアが細胞に侵入する仕組み

ND ── 今回はリステリアという病原菌を使われていますが、どのような細菌でしょうか?

笹川 ── グラム陽性菌の 1 つで、リステリア属として 8 種が知られています。その 1 つであるリステリア・モノサイトゲネス（*L. monocytogenes*）は、動物や環境中にも広く存在し、乳製品、食肉を介して、日常的にヒトの口に入っています。毒素を出すのではなく、炎症を引き起こすことで病原性を発揮します。人獣共通の病原菌ですが、病原性は低く、免疫系が正常ならば感染が成立する前にマクロファージで処理されるので問題になりません。ところが、免疫力が落ちている場合には、腸管粘膜の上皮細胞やマクロファージへ侵入した菌が、リンパ節から肝臓、脾臓、髄膜へと感染を拡大します。初期段階で適切な治療をしないと菌が全身にまわり、敗血症や髄膜炎などによるショックで死亡することも珍しくありません。

リステリアは宿主のさまざまな細胞へ侵入し、ActA というタンパク質を菌表面に発現させて、細胞質内で増殖します。この ActA は、細胞質内に多く存在する別のタンパク質

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

笹川千尋（ささかわ・ちひろ）／東京大学医科学研究所 感染・免疫部門 細菌感染分野教授、同感染症国際研究センター教授。専門は細菌学。1972 年に千葉大学理学部を卒業。同大学薬学部大学院修士課程を経て、1974 年に東京大学大学院基礎医学系博士課程へ入学、1978 年に医学博士取得。東京大学医科学研究所細菌感染研究部助手。1980 ～ 1983 年、ポスドクとしてワシントン大学医学部免疫・微生物部門（Tn5 の発見者 Douglas Berg 博士）に留学。大腸菌のトランスポゾン Tn5 の転移分子機構の研究を進め、Tn5 の転移にかかわる大腸菌とトランスポゾンの機能を解明した。1983 年に東京大学医科学研究所へ戻り、赤痢菌、O157、腸管病原性大腸菌、炭疽菌等の病原性の研究を開始。O157 のゲノム解読プロジェクトに参加するとともに、細菌の病原性研究に細胞生物学、免疫学、感染病理学等を取り入れ、赤痢菌の腸粘膜感染における基本的な感染システム（細胞侵入、細胞内運動、生体防御回避等）を解明した。助教授を経て 1995 年より教授。1998 年～ 2001 年は大阪大学微生物病研究所教授を兼任。2000 年からピロリ菌の研究も開始し、胃粘膜上皮へ分泌する CagA が、菌の胃粘膜持続感染、胃炎・胃がん誘導に重要な役割を果たしていることを示した。

（Arp2/3 および VASP）と結合し、複合体を作ります。その後、ActA は菌体の一端に集積し、ActA と複合体を形成した Arp2/3 がアクチンの重合を行います。この仕組みにより、菌は細胞質内を自由に移動できるようになります。移動する菌は、さらに突起を形成して隣の細胞へと拡散します（図 1）。

オートファジーを回避する秘密を解明

ND ── 今回、どのような実験をされたのでしょうか？

笹川 ── イヌの腎臓上皮細胞、ヒトの腸管上皮細胞、マウスのマクロファージなどの培養細胞に、野生型のリステリアと ActA 変異体のリステリアを感染させ、オートファジーの回避の有無、Arp2/3 や VASP との結合、菌の細胞内運動などについて調べました [5]。その結果、まず、ActA をもたない変異体は、細胞へ侵入開始 4 時間後にはオートファジーによって速やかに分解されることがわかりました（図 2）。

これまでは、ActA がないとアクチン重合が行われず、移動できないのでオートファジーに捕捉されてしまうと考えられてきました。つまり、菌の運動こそがオートファジー回避のカギと思われていたのですが、私たちはそうではないことを明らかにしました。Act-A は菌表面全体でも Arp2/3 や VASP と結合し、この仕組みの方がオートファジー回避に重要だったのです。

実験では、ActA がないために Arp2/3 と VASP に結合できない変異体は、異常なタンパク質が処理される場合と同様にユビキチンという標識タンパク質のタグが付けられ、それをオートファジーが認識してすみやかに分解・消化していました。ところが、遺伝子操作によって、ActA は作られるものの、Arp2/3 か VASP のいずれか片方のタンパク質しか結合できない変異体を作って調べたところ、このような変異体はオートファジーの認識システムを回避することがわかりました。こうした結果から、私たちは、リステリアが宿主のタンパク質で表面を覆い隠して巧みに変装し、あたかも宿主細胞の一部であるかのように擬態することで、オートファジーを回避していると結論づけました。

ND ── 今回の成果から、細菌と宿主についてのどのようなことが言えるのでしょうか？

笹川 ── まず、病原菌は私たち以上に、私たちの免疫システムをよく知っているといえるでしょう。長い進化を経て、さまざまな病原菌が生き残っているということは、宿主と病原菌との戦いにおいて、常に病原菌の力の方がわずかに勝っていたことを示唆しています。なかでもリステリアは非常に高度に進化した病原菌であるといえます。

応用への可能性について

ND ── オートファジー回避の仕組みは、予防や治療に応用可能でしょうか？

笹川 ── ActA のような「オートファジーの回避に関わるエフェクター」を作るための共通の仕組みを解明し、そこをターゲットにする方法が有望でしょう。アルツハイマー病やハンチントン舞踏病などの治療を考える際にも、ActA によるオートファジー回避の仕組みがヒントになる可能性があります。これらの変性性疾患は、変性タンパク質が凝集体化することが一因となると考えられています。今回、私たちは、ハンチントン舞踏病などの原因になるポリ Q タンパク質と ActA との融合タンパク質を作る実験も行いましたが、このような融合タンパク質は、ActA により細胞内で凝集体が形成されませんでした [5]。

ND ── 最後に、今後の目標についてお願いします。

笹川 ── 日本では、抗生物質の普及に伴って細菌の研究が下火になりましたが、1996 年の O157 の大規模食中毒事件以来、再び注目されるようになっています。現在、世界的に問題なのは、ピロリ菌と多剤耐性菌（黄色ブドウ球菌、結核菌など）だと思います。いずれも免疫系を回避する高度な仕組みを備えています。これらも含め、病原菌の感染の戦略全体を理解し、それを創薬やワクチン開発に応用するのが私の願いです。

ND ── ありがとうございました。 ■

聞き手は、西村尚子（サイエンスライター）

1. Handa Y. *et al. Nat Cell Biol.*, **9**, 121-128 (2007)
2. Iwai H. *et al. Cell*, **130,** 611-623 (2007)
3. Kim M. *Nature*, **459**, 578-582 (2009)
4. Ogawa M. *et al. Science*, **307**, 727-731 (2005)
5. Yoshikawa Y. *et al. Nat Cell Biol.*, **11**, 1223-1240 (2009)

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

原始地球では、大気中には酸素はほとんどなかったと考えられています。では、現在の大気中の酸素は、どのようにしてできたのでしょうか。今回取り上げたストロマトライトを形成するシアノバクテリアは、約 30 億年前から酸素を作り続け、地球に酸素を供給しています。こうした生物のおかげでオゾン層が形成され、有害な紫外線が地上に届かなくなり、陸上生物の繁栄がもたらされたのです。オゾンホールの形成が問題になっている今、この恩恵を無にしないよう、考えたいものです。

ISTOCKPHOTO

シャーク湾ハメリンプール（オーストラリア）にはたくさんの現生ストロマトライトがある。

NEWS　nature news
語数：**444 words**　分野：古生物学・進化学・古環境学・地球
Published online 17 September 2009 | Nature | doi:10.1038/news.2009.924
http://www.nature.com/news/2009/090917/full/news.2009.924.html

High window on the past

Microbiologists find living stromatolites in the Andes.

Ana Belluscio

1. For billions of years life on Earth was dominated by stromatolites, collections of photosynthetic microorganisms and calcareous concretions that formed dome-like lumps in shallow waters. Now, in a rare find, Argentinian scientists have discovered stromatolites forming today in super-salty lakes high in the Andes.

2. The extreme conditions in which these stromatolites live might resemble early Earth and help shed light on the geochemical cycles that marked early life on the planet, researchers say. Fossil stromatolites are common, but living stromatolites occur in only a few areas, mostly in shallow seas, as at Shark Bay in western Australia. The Argentinian find is unusual because it is in a closed lake and at such a high altitude.

3. A team led by María Eugenia Farías, a microbiologist at the National Scientific and Technical Research Council (CONICET-PROIMI) in Tucumán, Argentina, found the stromatolites on field expeditions in February and August this year. The lakes, known as the Socompa and Tolar Grande lagoons, are located in the arid plateau of the central Andes in the province of Salta, more than 3,600 metres above sea level.

Extreme environments

4. In the lakes, where salt levels are more than 135 parts per million and nitrate levels are high, the stromatolites have no competition for nutrients and can thrive. The high elevation means that there is relatively little oxygen in the atmosphere, and levels of ultraviolet radiation can be 165% that of sea level1. "This environment is similar to the one in which stromatolites originally developed," says Farías.

5. Her preliminary results show that the Socompa lagoon has a pH of 8.5, and its stromatolites contain diatoms and cyanobacteria. Tolar Grande is more acidic, at pH 5, and its stromatolites contain a narrower range of diatom species, along with archaea and gamma-proteobacteria.

6. Stromatolites are not only an important window onto the past; they can also provide clues as to how organisms might cope today, the researchers say. Ancient DNA-repair mechanisms reflect how microbes dealt with ultraviolet exposure, says Valeria Souza, a researcher at the National Autonomous University of Mexico in Mexico City, who in 2000 discovered living stromatolites in springs in the Chihuahuan desert in northern Mexico. The Andean stromatolites, she says, "have maintained their archaic repair mechanism".

7. Farías's group is continuing to analyse the species composition of the Andean stromatolites, and has asked the national and local government to help prevent further contamination of the area.

8. One of the ponds at Tolar Grande is already contaminated, possibly from sewage from local villages, and stromatolites have died. Water from the Socompa lagoon is being diverted over the border to Chile for mining. Authorities are in the process of closing the area to the public.

References
1.Cabrol, N. A. *et al. J. Geophys. Res.* doi:10.1029/2008JG000818 (in the press).

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

TOPICS

ストロマトライト（Stromatolite）とは？

ストロマトライトは、シアノバクテリア（光合成を行って酸素を産生する細菌）が水中で作り上げた、層状の葉理構造をもつドーム状または柱状の堆積構造物。次のようにして形成される。まず、シアノバクテリアが砂などの表面に付着して、日中、光合成を行う。夜になると、光合成を停止して、粘液により堆積物を海中の炭酸カルシウムとともに固定する。これが毎日繰り返され、薄い層状構造が形成され、やがてドーム状となる。ドームの成長は1年に0.4mm程度である。現在、最古といわれるストロマトライトの化石は約27億年前のもので、このころから約5億5000万年前まで太古の海に広く生息し、さかんに酸素を放出していたと考えられている。生成された酸素は、海水中の鉄分と結合して酸化鉄となり、現在の鉄鉱床が形成された。やがて、飽和状態になった酸素が大気中に放出され、大気に酸素が蓄積していった。ただし、その濃度は2%程度で、その後の植物の大繁栄によって、オゾン層が形成され、現在の大気中の酸素組成になったと推測される。

© JANE GOULD/ALAMY

現生ストロマトライトは、オーストラリア西海岸シャーク湾のハメリンプール（写真）のものが有名である。このほか、メキシコのクアトロシエネガスの泉にもあるが、どれも砂漠に囲まれた閉鎖された水域で、塩分濃度が非常に高い。こうした環境が太古の海と似ているため、現在まで生き残ったと考えられている。今回、新たにアンデス山中の塩湖でも発見された。

SCIENCE KEY WORDS

1. **photosynthetic microorganism(s): 光合成微生物**
ここでは広義の光合成細菌と同義で使用されている。広義ではシアノバクテリアも含むが、通常、それを除いた酸素非発生型の光合成を行う細菌をさす。

1. **calcareous: 石灰質の**
石灰とは酸化カルシウムのことで、広義には、炭酸カルシウムや水酸化カルシウムを含む。

1. **concretion(s): 凝固物、結石**
結石は、腎臓や膀胱、胆嚢などの臓器にできる石のこと。ここでは、単に塊の意。

2. **extreme condition(s): 極限条件**
活火山の火口、南極や北極、深海、宇宙空間など、高温、極低温、高圧力、低酸素、高塩濃度、強酸性、強アルカリ性などの環境条件。

2. **geochemical cycle(s): 地球化学的循環**
地球内部や大気を含む地球表面において、元素や化学物質が変化・循環すること。鉱物などの分離生成作用、炭素循環や水循環など。生物活動も含める場合、特に生物地球化学的循環とよぶこともある。

2. **closed lake: 閉塞湖**
河川や海といった、水の流出口をもたない湖。

4. **parts per million: ppm（ピーピーエム）**
100万分の1という単位。主に濃度を表す。

4. **nitrate: 硝酸塩**
硝酸イオン（NO_3^-）の化合物。この化合物のほとんどは水溶性。硝酸アンモニウムや硝酸カリウムは肥料として用いられる。これらが土壌から流出して、周辺水域の富栄養化の一因となる。

5. **pH: 水素イオン指数、ピーエイチ**
水溶液の酸性、アルカリ性を規定する数値。$pH = -\log_{10} a_{H^+}$で算出される（a_{H^+}は水素イオン活量。希薄水溶液では、水素イオン濃度にほぼ等しい。）pH7（水素イオン活量は10^{-7}）は中性で、それより小さい pH 値は酸性、大きい pH 値はアルカリ性。

5. **diatom(s): 珪藻類**
単細胞で、細胞内に葉緑体をもつ植物（藻類）。単体のほか、群体を形成するものもいる。細胞壁が高度にケイ酸化されて被殻となっており、その表面には細かい孔が模様のようにたくさんある。強アルカリ性、強酸性、高塩濃度、極地環境で生息できるものもいる。

5. **cyanobacteria: シアノバクテリア**
かつては藍藻とよばれていた、酸素発生型の光合成を行う細菌（真正細菌）。単細胞単体のもの、群体を形成したもの、糸状になって細胞連鎖体を形成したものがある。海や河川に広く生息し、70℃を超える温泉や極地、高塩濃度で生息できるものもいる。

5. **acidic: 酸性の**
H^+を与える（電子を受け取る）化学物質を酸といい、酸としての性質を酸性という。一般に、水溶液の液性をさすことが多い。

5. **archaea: 古細菌**
細胞膜がエーテル脂質（真正細菌や真核生物はエステル脂質）で構成されている生物群。真正細菌（いわゆる細菌）より、我々ヒトの属する真核生物に進化的に近いといわれる。好熱菌、高度好塩菌、好酸菌、メタン生成菌などがある。これらの中には、100℃以上の熱水や飽和食塩水、pH0などでも生息できるものがいる。

5. **gamma-proteobacteria: ガンマプロテオバクテリア**
真正細菌の分類群プロテオバクテリア門の下にある、分類綱の1つ。サルモネラ、ビブリオ、レジオネラ、緑膿菌など、非常に多くの病原菌がこの綱に含まれている。

6. **DNA-repair mechanism(s): DNA修復機構**
DNAは紫外線や化学物質によって、絶えず損傷を受けている。そのままにしておくと、複製・転写の際に間違った情報がコピーされてしまい、不都合である（ヒトではがんなどの疾患につながる）。それを防ぐために、生物には障害を受けたDNAを修復する機構が存在している。

WORDS AND PHRASES

1. **dominate(d):「を支配する」、「の大半を占める」**
1. **lump(s):「塊」**
1. **shallow water(s):「浅瀬」、「浅水域」、「浅海域」**
1. **rare find:「掘り出し物」、「非常に珍しい発見」**
2. **help shed light on(upon) ～ :「～の解明に役立つ」、「光明を投じる」**
2. **marked ～ :「～を特徴づける」**
2. **altitude:「高度」**
3. **lagoon(s):「潟湖」、「礁湖」、「小さな湖」**
3. **arid:「乾燥した」**
3. **plateau:「高原」**
3. **province:「州」、「地域」**
4. **nutrient(s):「栄養素」**
4. **thrive:「繁殖する」**
4. **elevation:「高度」**
5. **preliminary results:「速報結果」、「予備研究（実験）の結果」**
6. **provide clues as to ～ :「～に関する手がかりを与える」**
6. **cope:「対処する」、「生き延びる」**
6. **archaic:「古い起源をもつ」、「進化的に古い」**
8. **contaminate(d):「汚染する」**
8. **sewage:「下水」**
8. **divert(ed):「（方向）転換する」、「流用する」、「かわす」**
8. **mining:「採鉱」**

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

参考訳

太古の地球環境に光を当てる高窓

アルゼンチンの微生物学者チームが、アンデス地方で現生ストロマトライトを発見した。

アナ・ベルッシオ

© PETER BARRITT/ALAMY

ストロマトライトの化石は、世界各地で見られる。写真は、英国ドーセットで撮影。

1. かつて地球上では、ストロマトライトという生物が優勢だった時代が数十億年も続いていた。ストロマトライトは浅海域に形成されるドームのような塊で、光合成微生物と石灰質団塊が集合したものである。今回、アルゼンチンの科学者が貴重な発見をした。アンデス地方の高地にある塩濃度の極めて高い湖で、現在も形成されつつあるストロマトライトを見つけたのだ。

2. 研究者らは、こうしたストロマトライトが生息する極限条件は初期の地球に似ている可能性があり、地球上の初期生物を特徴づけた地球化学的循環の解明に役立つかもしれないという。化石ストロマトライトは広く見られるが、現生ストロマトライトが形成されている地域はわずかで、そのほとんどがオーストラリア西部のシャーク湾のような浅海域だ。今回のアルゼンチンでの発見は、その場所が閉塞湖で、高度も非常に高い点で異例である。

3. 国家科学技術研究会議（CONICET-PROIMI、アルゼンチン・トゥクマン州）の微生物学者 María Eugenia Farías をリーダーとする研究チームは、今年の 2 月と 8 月に実施した野外調査でストロマトライトを発見した。（発見場所となった）ソコンパとトラルグランデにある小さな湖は、アンデス中央部のサルタ州の乾燥した高原にあり、海抜は 3600 メートルを超えている。

極限環境

4. これらの湖の塩濃度は 135ppm 以上で、硝酸塩濃度も高いため、ストロマトライトは栄養素をめぐる競争をせずに繁殖できる。また、高度が高いため、大気中の酸素濃度は比較的低く、紫外線放射量は海水面の 165％に達しうる。「この環境は、ストロマトライトが進化してきた時代の環境に似ています」と Farías はいう。

5. Farías たちの予備研究の結果では、ソコンパ湖の pH 値は 8.5 で、そのストロマトライトにはケイ藻類とシアノバクテリアが含まれていることが示されている。トラルグランデの湖は、pH 値が 5 で酸性度が高く、そのストロマトライトには、ソコンパ湖よりも少ない種類のケイ藻類のほか、古細菌とガンマプロテオバクテリアが含まれている。

6. 研究者らは、ストロマトライトは太古の時代に光を当てる重要な窓となるだけでなく、生物が現代を生き延びるしくみを解明する手がかりにもなると指摘する。メキシコ国立自治大学（メキシコ市）の研究者で、2000 年にメキシコ北部のチワワ砂漠の複数の泉でストロマトライトを発見した Valeria Souza は、古い DNA 修復機構には、当時の微生物の紫外線暴露への対処法が反映されていると説明する。つまり、アンデス地方のストロマトライトには「太古の修復機構が保存されている」のだ。

7. Farías の研究グループは、アンデス地方のストロマトライトの種構成の解析を続けており、国と地方自治体に対しては、この地域のさらなる汚染を食い止めるための協力を要請した。

8. 既に、トラルグランデにある小さな湖の 1 つでは、地元の村からの下水が原因と考えられる汚染により、ストロマトライトが死滅している。また、ソコンパ湖の水は、採鉱のために隣国のチリに流されている。当局は現在、この地域を一般者立ち入り禁止にするための措置を進めている。

（菊川要 訳）

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

今日お昼にお弁当を作ってきた。そうしたらNature Chemistryが買えた。

研究のアイデアに行き詰まっていた。そこで、久し振りに（私にとっては）豪華なランチを食べに行こうと思い、大学の外に。有名なファミリーレストランの前でメニューを見ていたら、ステーキランチがおいしそう。これを食べればよいアイデアがきっと浮ぶ…気がする。入ろうと思ったら、ばったり研究室の尊敬している（大）先輩に会った。しかし今日の先輩はお弁当。一緒に食べたかったけど残念。研究室に帰って先輩と話したら「月に1回はお弁当」だそうだ。健康にいいですね、だからいつも良いアイデアでいっぱいなのですか？と言ったらそれだけではないといわれた。*Nature Chemistry*に定期購読をしているらしい。どうも研究のアイデアが行き詰ったら*Nature Chemistry*をパラパラめくるそうだ。先輩はお金持ちでいいなぁ、だって私なんて*Nature*を購読するほどお金ないですよ。といったら怒られた。先輩は月に1回お弁当にして、お昼代で定期購読を買っている？？？ よく話を聞いたら*Nature Chemistry*の2年間購読は29,760円。月に1240円。え！さっきの私のお昼の方が高かった… *Nature*って高い雑誌だと思っていたのに。研究のアイデアに（私にとって）豪華なお昼を食べるより、*Nature Chemistry*を1冊買った方がよかったかも？ショック… 今度から先輩を見習い私も「月に1回はお弁当」を実行。健康になれて、*Nature Chemistry*の定期購読も出来て、お昼も先輩と食べられて、よいこと尽くし！ちょっと憧れの先輩に近づけた気がした。

nature chemistry

2009年4月に創刊された*Nature Chemistry*は、化学の全領域における最も重要な最先端の研究について報告する月刊ジャーナルです。*Nature Chemistry*ではバランスの取れた化学観を提示するとともに、さまざまな化学関連学界間でのアイデア交換を促進することによって、主要な情報源としての役割を果たすことを目的とします。

www.naturejpn.com/chem

npg nature asia-pacific

「ネイチャー・ダイジェスト」へのご意見やご感想、ご要望をメールでお寄せください。

メールをお送りいただく際には、お名前・ご職業・「ネイチャー・ダイジェスト」購読年数のご記入をお願いいたします。掲載内容についてのご意見・ご感想は、掲載号や記事のタイトルを明記してください。お寄せいただいた内容は、今後の本誌の編集に活用させていただきます。皆様のメールをお待ちしております。

宛先：naturedigest@natureasia.com（「ネイチャー・ダイジェスト」ご意見係）

nature グローバルな視点から「科学」を読む

*Nature*定期購読なら、世界の最先端の科学関連ニュースを英文オリジナルコンテンツと、日本語翻訳でお楽しみいただけます。

国際ジャーナルを読む

グローバルな視点から、幅広い分野の情報と「世界の動き」をタイムリーに把握できます！

Nature定期購読なら...

- ***Nature Digest*無料定期購読**
  (*Nature Digest Online*無料アクセス含む)
- ***Nature*オンライン版**
  (PDF、HTML)
  フルテキストへの無料アクセス

日本語編集版を読む

*Nature*定期購読者には、*Nature Digest*を毎月無料送付します。*Nature*の中から、日本の読者に興味をもっていただける記事を吟選して、日本語に翻訳した科学月刊誌です。

nature 翻訳・編集記事

- **HIGHLIGHTS** / 論文ハイライト
- **EDITORIAL** / 社説
- **NATURE NEWS** / 科学ニュース
- **NEWS & VIEWS** / 研究成果解説
- **NEWS FEATURE** / 読み物・注目の分野をあらゆる側面から親しみやすく解説
- **COMMENTARY** / 論評
- **ESSAY**

オリジナル編集記事

- **JAPANESE AUTHOR** / 日本人研究者へのインタビュー記事
- **英語でNATURE** / *NATURE*(印刷版およびオンライン版)に掲載の記事から生きた英語を学ぶ

(本文36頁)

Nature・*Nature Digest*定期購読お申し込みはこちらから **www.naturejpn.com/subscribe**

Printed in Japan
ISSN 1880-0556

定価 680円
本体648円

npg nature asia-pacific