

nature DIGEST

日本語編集版
NOVEMBER 2008
VOL. 05, NO. 11

11

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

米大統領候補に聞く

nature chemistry



Nature Chemistry Lab Coatを当てよう!

2008年12月31日まで*にNature Chemistryの定期購読を申込みと
Nature ChemistryオリジナルLab Coatが、抽選で5名様に当たる!

Nature Chemistry【創刊前 特別割引価格表】

個人1年 ¥19,840 ⇒ ¥14,880 (約25%OFF)

個人2年 ¥29,760 ⇒ ¥19,930 (約33%OFF)

*抽選の対象者は2008年12月31日までにお支払いが完了している
Nature Chemistry定期購読者となります。Nature Chemistryは2009年4月
に創刊される、全ページ英語の月刊誌です。

定期購読申込みはこちらから:
www.naturejpn.com/chemlab

 nature asia-pacific

米大統領候補に聞く

表紙: JEFF SWENSEN/GETTY IMAGES / NEWS.COM, ERIC THAYER / RAPPORT / NEWS.COM, ISTOCKPHOTO

HIGHLIGHTS

02 vol. 455 no.7211, 7212, 7213, 7214, 7215

NATURE NEWS

- 07 まばゆいクラゲ! これがノーベル化学賞
- 08 ウイルスの発見にノーベル医学生理学賞
- 10 「対称性の破れ」にノーベル物理学賞

US ELECTION SPECIAL

- 12 米大統領候補に *Nature* が問う
Alexandra Witze

NEWS FEATURE

- 18 「標準模型」を打倒せよ
Geoff Brumfiel
- 24 二酸化炭素排出ゼロの発電所 —PART2
Quirin Schiermeier, Jeff Tollefson, Tony Scully,
Alexandra Witze and Oliver Morton.

SNAPSHOT

- 29 アリえない形態の祖先
Amber Dance

NEWS & VIEWS

- 30 シート状の対流が作る地球ダイナモ
Ulrich R. Christensen

JAPANESE AUTHOR

- 32 日本の米、起源は中国ではなく東南アジア
にあった! — 井澤 毅
西村 尚子

英語で NATURE

- 34 Spacesuits optional for 'water bears'
クマムシは宇宙服を着なくても大丈夫

www.nature.com/naturedigest

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



07 鶴岡市立加茂水族館提供
写真集『山形加茂海岸のクラゲ』
監修: 久保田信、
写真と文: 村上龍男
(鶴岡市立加茂水族館館長)より



10 高エネルギー加速器研究機構



FUNCRYPTA



生態系による CO₂ 取り込み：異常に高温の年の影響は長引く ECOSYSTEM CO₂ UPTAKE: Prolonged after-effects of an extremely warm year

地球の陸上生態系は、正味の植物生産力（CO₂ 吸収量）および土壌微生物の呼吸（CO₂ 放出量）の季節的变化により、大気中の CO₂ 量に強力な影響を与える。こうした過程が、気候の季節的推移、特に気温変化に対応して変化し、その結果として地球の CO₂ 曲線がジグザグ型になることは、数十年前から知られているが、1 つの気候変数の影響を年次の時間スケールで定量するために必要なデータはこれまで存在しなかった。今回、大型の管理環境チャンバー中で手を加えない状態の長草型草原における生態系を用いた 4 年間の研究によって、このようなデータの一端が得られた。研究の結果、異常に高温の 1 年により、その年と翌年の 2 年間にわたって正味の生態系 CO₂ 交換量が低下することが明らかになった。1 年間にわたり高温下におかれた生態系の炭素隔離量は、対照系の 3 分の 1 に低下した。この知見は、人為起源の CO₂ 量増大が原因と考えられる異常高温年の頻度上昇により、陸上生態系による CO₂ 取り込み量が持続的に低下する可能性を示唆している。

Letter p.383 参照

生態：炭素が増えると、炭素が減る

More carbon is less

北極水域の水塊に分解性有機炭素を加える実験が行われ、特定の条件下では炭素添加によって生態系内の全有機炭素量が実質的に減少するという、直観に反する知見が得られた。この結果は、食物網内の種間相互作用と、こうした相互作用が栄養供給の変化によってどのような影響を受けるかに依存している。無機栄養が制限要因の場合には系内に有機炭素が蓄積するが、有機炭素によって制限される系においては、海洋細菌が植物プランクトンに打ち勝つことが可能で、正味の結果は全有機炭素量の減少となる。この結果から、海洋炭素循環の現在および将来の状態の記述が、海の食物網内における炭素と増殖を制限する無機栄養との間の化学量論的な関係の理解にどのように依存しているかが明らかになる。

Letters p.387, Author page 参照

材料：不可視性を垣間見る

A glimpse of invisibility

メタマテリアルは、例えば負の屈折率のような、天然材料では実現不可能な特性をもつように人工的に設計された構造体である。負の屈折率をもつメタマテリアル（NIM）が最初に実証されたのは、マイクロ波周波数に対してである。しかし、可視光の NIM が得られれば、画像化や指向性光源など、幅広い用途が開かれるだろう。これまでのところ、可視光向けのメタマテリアルは、事実上、2 次元に相当する薄いものしか実証されていないので、デバイスへの応用は限られている。今回 Valentine たちは、3 次元の可視光向けメタマテリアルである多層のカスケード「網目」構造体（cascaded 'fishnet' structure）について報告している。この構造体は、幅広いスペクトル領域にわたって負屈折率をはっきりと示している。この材料で作製されたプリズムは、可視光で負の屈折を示しており、自由空間から容易に調べられるため、実用的な光学デバイス応用への道を開くものである。この論文の電子版発表時にメディアでもはやされた「透明マント」でさえ、いつか実現されるかもしれない。

Letter p.376, N&V p.299 参照

進化：緑の香りとオキシリピン経路

Oxylipin pathways

オキシリピンは、脂肪酸から作られる生理活性をもつ脂質である。植物では、オキシリピン経路により、ジャスモン酸として知られる、プロスタグランジン類似の植物ホルモン群や、さまざまなストレスを和らげたり、果物や野菜に特徴的な芳香を与えたりする「緑

の香り」（緑の葉の揮発成分）が作られる。今回、オキシリピン経路の酵素であるアレノオキシドシンターゼ（AOS）の基質と結合していない場合と、結合した場合の結晶構造が決定された。これらの構造により、酵素が重要な中間体の反応性を制御する仕組みが明らかになった。また、ジャスモン酸の合成にかかわる AOS の活性部位の重要なアミノ酸に変異が起これば、「緑の香り」を合成する酵素であるヒドロペルオキシドリアーゼに変わることが示された。さらに比較研究から、オキシリピン生合成にかかわる遺伝子は植物と動物の最終の共通祖先には存在したが、進化の過程で一部を除くすべての後生動物の系統から失われたことが示唆された。

Article p.363, N&V p.300 参照

宇宙：規則的にふるまう活動銀河核

A black hole delivers

活動銀河核（AGN）はクエーサーと同様に、ブラックホール連星が大規模になったものだと考えられているが、AGN に見つかった超大質量ブラックホールでは、準周期的振動をとらえるのはむずかしいことがわかっていく。これは不思議なことだ。なぜならブラックホールでは、こうした振動は一般に非常に明確になっているからである。今回、明るい活動銀河 RE J1034+396 に約 1 時間の周期をもつ X 線放射が観測されたことで、AGN でのこうした異例の事態が解決された。X 線の変動は、ブラックホールのすぐ近くで発生している。この現象やこれと類似の現象を研究すれば、ブラックホール周囲の降着流についてもっと多くのことが明らかになるだろう。

Letter p.369, N&V p.294 参照

ナノテクノロジー：キラルなコロイドクラスター

Chiral colloidal clusters

ナノテクノロジー向けの大規模な複雑構造体を作製するための構成要素としてのコロイドの利用を促進するには、化学的機能性と可変性をコロイドに付与することが望ましい。今回、迅速に自己集合してさまざまな異性体を形成できる磁性コロイドが開発され、この方向へ向かって一歩進んだといえそう。これらのコロイドは、自発磁化方向に対して決まるコロイド塊の形状に依存して自己集合し、らせん性が制御された構造体形成する。集合体中のコロイド球の寸法比が十分大きければ、左右どちらかの単一らせん性が選択される。この研究は、コロイド科学と化学との新しい関係を開くものであり、多様なナノ粒子やメソポリマーの集合体作成につながる可能性がある。

Letter p.380 参照

発生：脳になる能力

Getting a head start

大脳皮質は哺乳類の脳の中で最も複雑な構造であり、そこにはさまざまな種類のニューロンが含まれている。マウスの培養胚性幹細胞を用いた研究から、*in vitro* でも皮質ニューロンの多様なレパートリーが生じることが明らかになった。マウス胚性幹細胞には、モルフォゲンが存在せずソニックヘッジホッグ阻害物質が存在する条件下で大脳皮質を形成できる特性が、本来備わっているのである。この知見は、ニューロンの細胞運命が指定される機序を明らかにし、脳疾患のモデル化と治療のための新たな手段を示すものである。

Article p.351 参照



未来を選ぶ：なぜ科学が重大な問題となるのか

CHOOSING A FUTURE: Why science matters

今週号の米国大統領選挙特集ではまず、今回の選挙運動からそれ以後にわたる、科学にかかわる諸問題に注目する。両候補が科学に対する姿勢をこれまでどのように展開してきたのか、誰が彼らに助言しているのか、そして、彼らは米国をどこに向かわせる可能性があるのかを問う。科学技術問題に対する共和・民主両党の姿勢を総括し、マケインもしくはオバマ政権下における NASA や環境保護庁 (EPA)、NIH などの重要な科学関連機関の今後についてじっくりと考察する。D Goldston は、ワシントン D.C. から個人的見解を寄せている。

米国大統領選挙特集 pp.431, 442, 446, 451, 453, 464 参照

関連ウェブページ: www.nature.com/uselection

工学：電場で磁化を操る

Playing the field

従来の半導体デバイスでは、電場によって導電率が制御される。データ処理能力と不揮発性メモリ機能を兼ね備えたデバイスを可能にするような機能性を付与するために、磁化と同様に電場で磁化を制御する方法の発見に強い関心が寄せられている。このような制御は、磁気ひずみ（機械的なひずみによって誘発される磁化の変化）を用いることで間接的には実現されている。しかし、この方法は実用化には適していない。今回、千葉大地（科学技術振興機構、東北大学）たちは、直接的な制御方法を実証した。彼らは、強磁性半導体 (Ga,Mn)As の磁気異性が電荷キャリア密度に依存し、電場を用いてこのパラメーターを変化させられることを見いだしたのである。つまり、印加電場を変化させることによって、磁化の安定方向を切り替えることが可能なのだ。

Letter p.515, N&V p.474 参照

細胞：有毛細胞を作り出す

Hair-cell triggers

蝸牛の有毛細胞は、脊椎動物の音感知装置の一部であり、この細胞が失われたり傷ついたりすると聴力障害が起こる。哺乳類はこの細胞を再生できないが、これまでに行われた研究によって、転写因子 Atonal homologue 1 (Atoh1) を異所性発現させると、通常は蝸牛有毛細胞には分化しないはずの細胞を、有毛細胞に似た細胞へと誘導できることが明らかになっている。今回 Gubbel たちは、子宮内でマウス蝸牛に Atoh1 遺伝子を導入すると、有毛細胞が異所的に生じることを明らかにした。重要なのは、この余分な有毛細胞が機能でき、ニューロンとの接続がみられることである。この結果は、ヒト聴力障害のマウスモデルでの難聴に対する遺伝子治療が有効かどうかの検証に向けた大きな進展である。

Letter p.537, N&V p.475,

Author page 参照

宇宙：マグネターから発生するフレア

A flare for magnetars

SWIFT J195509.6+261406 で発生する可視光のフレアを観測したことについて、2つの研究グループが報告している。この天体は我々の銀河系にある興味深い X 線源で、周回中のスウィフト衛星が、当初は γ 線バーストとして発見したものだ。Stefanescu たちは、この天体で極めて明るい可視光のフレアが急激に発生し、その可視光の光度曲線が、極めて強い磁場をもつ中性子星とされる軟 γ 線リピーターや特異な X 線パルサーの高エネルギー領域での光度曲線に類似していることを見いだした。Castro-Tirado たちは多波長での測定を行い、3 日間にわたり 40 回以上のフレアの発生を可視光波長領域で検出した。これらの現象は、SWIFT J195509+261406 が、可視光のバースト活動が確認された、孤立したマグネターであることを示唆している。

Letters pp.503, 506, N&V p. 477 参照

考古：酪農の起源

Dairy made

家畜を殺さずに得られる乳、毛、牽引力などの「2 次的」な産物の利用は、農業の発達において重要な進歩の 1 つであった。しかし、そうした産物が利用されるようになったのは、動物を食用とするために飼育するようになって間もなくだったのか、それとも一部の専門家が考えるように、食用目的の飼育開始からさらに数千年後のことだったのかは、はっきりわかっていない。ウシ、ヒツジ、およびヤギは、紀元前 8 千年紀には飼育されていた。これまで、乳の利用を明確に示す最古の証拠は紀元前 5 千年紀後半のものであった。今回、近東からパルカン半島にかけての遺跡から出土した 2200 点を超える陶器の有機物残渣の分析により、最初の乳利用は紀元前 7 千年紀にさかのぼることになった。乳利用が特に重要であったのは現在の北西トルコで、この地域の環境条件はウシに特に適していたと考えられる。Letter p.528, Author page 参照

免疫：生涯動き続けるインフルエンザ抗体

A lifetime fighting flu

1918 年の H1N1 型インフルエンザの世界的大流行を生き延びた人たちの血液から、このインフルエンザウイルスのタンパク質に対する中和抗体が単離され、免疫応答の持続性についての新しい基準が得られた。血液標品は、1918 年当時 2 歳から 12 歳だった、現在 91 歳から 101 歳の生存者 32 人から集められた。すべての血液標品が最近再構築された 1918 年ウイルスに対して血清反応性を示し、また一部の標品からは、記憶 B 細胞を単離して、培養・増殖させることができた。この B 細胞は 1918 年ウイルスのタンパク質の 1 つに対する抗体を産生し、この抗体は 1918 年ウイルスの致死性感染からマウスを防御した。このことは、1918 年のウイルスに似た新興ウイルスの治療にこのような抗体が有用である可能性を示唆している。Letter p.532 参照

気候：北大西洋の流れは安定している

Steady as she goes

ノルディック海を起源とし、グリーンランド・スコットランド海嶺を越えて大西洋に流れ込む、「越流」とよばれる冷たく密度の高い海水の連続的な流れは、大西洋子午面循環の底部の枝流に流れ込む北大西洋「深層水」の形成に重要な役割を果たしている。越流の 2 つの主な枝流は、デンマーク海峡とフェロー堆の水路を通過している。S Olsen たちは、1995 ~ 2005 年のフェロー堆の水路の流れを直接測定した結果を、海洋大循環モデルを用いたシミュレーションと組み合わせ報告している。越流が過去 50 年間にわたり弱まったとする以前の報告とは異なり、フェロー堆水路の越流量、および総流量は、実際は安定していることがわかった。その一方で、モデルの結果から、大西洋子午面循環は全体的に、グリーンランド・スコットランド海嶺の南側での変化のために弱くなってきていることを示している。Letter p.519 参照

発生：力を合わせて RNAi を制御

Joining forces

外来性二本鎖 RNA (dsRNA) に対する応答が増強するような変異を探して線虫 (*C. elegans*) のスクリーニングが行われ、予想外の発見があった。2 つの転写産物がトランススプライシングによって、dsRNA 中間体を介して 1 つの RNA 干渉遺伝子に組み立てられることがわかったのである。こうして生じた中間体の産物は ERI-6/7 というヘリカーゼで、外来性と内在性の RNAi に対する負の制御因子として機能する。これは後生動物におけるトランススプライシングの極めてまれな例の 1 つであり、RNAi 因子のこうした制御を示す最初の例として興味もたれる。Article p.491 参照



体色における種分化：進行中の進化の典型例

SPECIATION IN COLOUR: A textbook example of evolution in action

アフリカの湖に生息するカワスズメ科の魚類（シクリッド）は急速な種分化を示す典型例であるが、種分化の機構は明らかにされていない。今回、ヴィクトリア湖のシクリッドの観察から、視覚系の分岐進化の生態学的および分子基盤（視覚関連遺伝子の分岐、雄の体色、および雌の選好性として現れる）が確認された。これは、自然および性的選択の相互作用を介して、感覚が引き起こす種分化につながるものである。感覚が種分化を推し進めるという仮説は、異なる環境に対する感覚系および信号伝達系の発散適応が、集団間で交配前隔離を生じること予測している。今回の研究結果は、感覚が引き起こす種分化が地理的隔離を伴わずに生じる場合があることの明らかな証拠であり、また、ヴィクトリア湖の人為的富栄養化によるシクリッドの種多様性の崩壊を機能的に説明している。

Article p.620, N&V p.601 参照

工学：ダイヤモンドでスピントロニクス Diamond spintronics

ダイヤモンド結晶中に存在する窒素-空孔中心とよばれる一種の天然不純物は、光学的に制御・検出が可能で独特な長寿命単一電子スピン状態をもつ。これは、「スピントロニクス」デバイスの創出に使えるし、量子情報処理への応用も可能である。2つの研究グループが、この技術のナノスケール磁気共鳴画像化法への応用について報告している。Maze たちは、ダイヤモンドのスピンをコヒーレントに制御して磁気センシングが可能となることを実証している。彼らは、ナノメートル離れたプロトン1個の磁場に相当する。Balasubramanian たちは、高感度高分解能画像化に向けた第一歩を、ダイヤモンドのスピンを使って実証している。彼らは、5ナノメートルの分解能で単一窒素-空孔スピンの位置を測定できることを見いだした。どちらの実験も室温で行われているので、これらの方法は生物学的応用が期待できる。

Letters pp.644, 648, N&V p.606,
Author page 参照

医学：HIV およびエイズの昔と今 HIV/AIDS then and now

キンシャサ大学所蔵の組織標本を使って、エイズ出現前の時代にさかのぼる HIV 遺伝子の塩基配列が得られた。1960年にベルギー領コンゴのレオポルドヴィル（現在のコンゴ民主共和国の首都キンシャサ）で成人女性から採取されたリンパ節生検検体「DRC60」によって、エイズ出現前の「化石 HIV-1」の塩基配列に関する進化解析が初めて可能になった。これを同時代、すなわち1959年に同じキンシャサで採取された血漿検体由来の別の HIV-1 塩基配列と比較したの

である。この解析で、西・中央アフリカで HIV-1 の多様化が起こったのは、エイズの大流行が認められるずっと以前であるという考えが裏づけられた。この試料採取の時期からほぼ50年が経った現在、HIV に関して疫学的に非常に懸念されているのは中国である。HIV-1 感染は主に高リスク集団に限定されていたが、現在では一般集団に広がりがつつある。L Lu たちは、HIV の性感染が急激に増えている雲南省での流行封じ込め作戦について報告している。

Letter p.661, N&V p.605, Feature p.609,
Editorial p.566 参照

細胞：うまくもちかけてインスリンを作らせる

Coaxed to make insulin

完全に分化した成体細胞は豊富に使えるため、これらをインスリンを分泌するβ細胞に変えることができれば、糖尿病治療の見通しは変わるだろう。こうしたやり方でβ細胞を作り出した例はいくつか報告されているものの、変換過程はこれまで制御可能ではなかった。しかし、今回 Q Zhou たちは、生きた糖尿病マウスの成熟した膵外分泌細胞を再プログラム化して、β細胞に非常によく似た、内分泌性のインスリン分泌細胞に分化できることを明らかにした。彼らは、分化した状態の細胞を別の分化状態へと、途中で幹細胞に転換することなく変化させている。この方法は、膵臓の発生に関与する転写因子についてのこれまでの研究に基づいており、かぎとして使われたのは *Ngn3*, *Pdx1*, *Mafa* という3つの因子である。

Article p.627, N&V p.604 参照

宇宙：銀河の星形成の矛盾を解く

Two lines of evidence

H α 輝線の強度は、短寿命の大質量星の

存在と関係していて、銀河内での星形成率の物差しとして一般に使われている。銀河中心から一定の距離でみられる H α 放射の強いカットオフ（急激な減少）は、円盤銀河の外側の領域では星形成がほとんど起きていないことを示していると考えられてきたが、これは紫外領域での最近の観測結果とは矛盾している。J Pflamm-Altenburg と P Kroupa は、集団的星形成という考え方の局所的定式化でこの矛盾を解決できることを示した。そして彼らは、局所的に観測された H α 線の輝度から局所的な星形成率への換算は直線関係ではなく、銀河半径が大きくなるにつれ星形成活動が徐々に減少するという連続的な傾向がみられる、と結論している。

Letter p.641 参照

認知科学：どちらが多いか一目でわかる

Safety in numbers

「数量概算システム（ANS）」とは、数をすばやく大ざっぱに把握する感覚の一種であり、言葉による計数システムをもたない社会や、乳幼児、果てはサルにまで認められている。進化的に古い起源をもつこの能力には、もっと高度な数学的才能も関係している可能性があることが、新たな研究で明らかになった。14歳ごろの数学の得意な子どもでは、数学の不得手な子どもよりも ANS 課題の正答率が高くなり、これには知能指数や視空間推理力は関係していないことがわかったのである。こうした子どもでは数学の基礎ができていないために ANS 課題で好成绩をおさめたのか、それとも、早くから ANS の訓練をすれば数学的能力を伸ばすことができるのか、という疑問が今回の結果から浮上してくる。

Letter p.665 参照

医学：なかなか成功しないエイズワクチン開発

The elusive HIV vaccine

今週号には、今日の科学における最優先課題の1つである、臨床的に有効なエイズワクチンの探索についての論文2つが掲載されている。D Barouch の総説では、これまでいづれも不成功に終わったワクチン候補に関する研究の苦勞の跡をたどっている。HIV-1 ワクチン研究はまだ揺らん期にあり、この分野を進展させるには基礎研究にもっと力を注ぐ必要がある、と Barouch は論じている。また R Medzhitov と D Littman も、主に免疫学における基礎研究の必要性を強調している。免疫学の既に確立されたモデルや仮説の中には、レトロウイルス感染にはまるで当てはまらないようにみえるものがある。

Review Article p.613, Commentary p.591 参照



マラリア原虫：プラスモディウム属原虫の新しいゲノム塩基配列 解読から始まる比較ゲノミクス

MALARIA PARASITES: New *Plasmodium* sequences kick-start comparative genomics

原生動物であるプラスモディウム属 (*Plasmodium*) でヒトに感染することが知られているのは、熱帯熱マラリア原虫 (*Plasmodium falciparum*)、三日熱マラリア原虫 (*P. vivax*)、四日熱マラリア原虫 (*P. malariae*)、および卵形マラリア原虫 (*P. ovale*) の4種である。ヒトで最も重症のマラリアを引き起こす熱帯熱マラリア原虫のゲノムは2002年に、これを媒介するハマダラカ (*Anopheles gambiae*) のゲノムと同時に、全塩基配列が解読された。マラリア原虫の特集である今週号には、これに続く2種の原虫のゲノム配列が発表されている。三日熱マラリア原虫は、熱帯熱マラリア原虫とは異なって致命的な病気を引き起こすことは通常少ないものの、ヒト感染者数の大きな部分を占めている。これまであまり注目されたことのないこの原虫のゲノムは、ほかのプラスモディウム属原虫のゲノムとの比較解析結果とともに報告されている。もう1つの *Plasmodium knowlesi* は長い間、サルに感染するマラリア原虫とみなされていたが、ヒトに感染する5番目のプラスモディウム属原虫と認められるようになってきている。特に東南アジアではこの感染が多いが、ヒトに感染する別種の四日熱マラリア原虫と誤診されることが多かった。*P. knowlesi* は、霊長類系であるためにワクチン作製に有用であるばかりではなく、*in vitro* で培養して遺伝子導入やノックアウトを効率よく行えるという点でモデル生物として抜きん出て重要である。

Article p.757, Letter p.799, Review Article p.751 参照

とができず、また胚中心へも動員されないことを明らかにしている。この研究により、SAPを欠損している患者が抗体を作ることが困難である理由が説明され、また、T細胞とB細胞の細胞間のコミュニケーションに関する知見が得られる。

Article p.764, N&V p.745 参照

地球：チベット高原が生き残っている理由 Tibetan plateau survival

チベット高原がいつどのようにして形成されたかについては、多くの研究が行われているが、高原への河川の浸食を何が制限しているかについての研究はずっと少ない。O KorupとD Montgomeryはこの問題に取り組んだが、これは、チベット高原がなぜ現在でもそこに存在しているのかという疑問にも関連している。チベット高原には地球上で最も深い峡谷が存在するにもかかわらず、高原の端は極めてはっきりしている。だが、広く受け入れられている浸食力理論によれば、アジアで最も流れが激しい河川であるヤルツァンポ川により、細かく分断されるはずなのだ。KorupとMontgomeryは、高原の南東端が保存された一因は、完新世に十分な大きさの氷河があったために、激しい川の流れが高原の縁に沿って下方浸食を起こすのが止められたことだと考えている。

Letter p.786, N&V p.748, Author page 参照

物性：熱の入ったスピントロニクス

The heat is on spintronics

1821年、T J Seebeckは、熱から電気が発生しうることを見出した。この熱電効果、すなわちゼーベック効果は、発電に使われたり、熱電対で温度検知に使われたりしている。熱電対では、ゼーベック係数、すなわち温度差に対する発生電圧の比で定義される値が異なる2つの金属が接合されている。理論的には、熱電対の「スピントロニクス」版が存在すると考えられるが、今回、実際にそれが見いだされた。内田健一（慶応義塾大学）たちは、最近開発されたスピン・ホール効果に基づくスピン検出技術を用いて、スピン・ゼーベック効果を初めて実証し、またこの効果を使って、数ミリメートルの距離にわたって純粋なスピン流、つまり電荷の流れを伴わないスピンの流れを得た。スピン・ゼーベック効果は、「スピン電力 (spin power)」を発生してスピントロニクス・デバイスを駆動できる。これは、サーモスピントロニクスへの道を開くものである。

Letter p.778, N&V p.741 参照

免疫：細菌由来のATPはT_H17細胞を援助する

Bacterial ATP helps T_H17 cells

粘膜の一部を形成している細胞層である腸管粘膜固有層は、いろいろな細胞集団が複雑に混在していることが特徴で、その中に

ヘルパーT細胞のサブセットで、インターロイキン-17を産生する17型TヘルパーT (T_H17) 細胞も含まれ、選択的にここに存在している。今回、マウスでの研究から、常在細菌が腸管樹状細胞の特別のサブセットを活性化して、インターロイキン-6産生やTGF-βの活性化を誘導し、それによって局所的なT_H17細胞の分化を促進することが示された。この促進効果は、常在細菌の産生するATPによるものだとわかった。これらの知見は、免疫疾患における常在細菌とATPの重要性をはっきりと示しており、また、異常なT_H17細胞応答が炎症性腸疾患などの免疫疾患を引き起こす機序の解明に役立ちそうだ。

Letter p.808 参照

免疫：SAPが減ると抗体産生がへたばる

Falling SAP hits antibodies

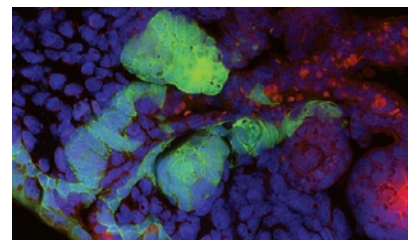
X連鎖リンパ球増殖症は、SAP (signalling lymphocyte activation molecule-associated protein) の欠陥によって引き起こされる致死的な免疫不全である。SAPをもたない個体やそれに対応する遺伝子欠損マウスでは、リンパ節中で抗体の親和性が成熟する場である胚中心が形成されない。H Qiたちは、標識した細胞を組織中で追跡する蛍光顕微鏡の一種である生体内二光子イメージング技術を使って、SAP欠損T細胞が抗原特異的B細胞と相互作用して、こうしたB細胞の分化を補助するこ

発生：歯の進化についての新口上

Word of mouth

脊椎動物の歯の進化に関する古典的な説は、口腔と口歯は陥入によって外胚葉から生じるとする「外から内へ (outside-in)」モデルである。だが、遺伝子導入アホロートル (イモリ亜目の両生類) を用いた研究によって、実際はもっと複雑であることが示唆された。胚の細胞運命地図作製により、口歯が外胚葉と内胚葉の両方から生じ、中には発生起源が外胚葉と内胚葉の混合であるものさえることが明らかになったのである。この結果は、歯の形成においては、上皮よりも神経堤間充織の関与のほうが優勢であることを意味している。進化の点からみると、歯の進化には神経堤細胞の歯形成能が必須の要因であって、上皮が「外から内へ」移動しようと「内から外へ」移動しようとは関係ないことにある。

Letter p.795, N&V p.747 参照





チャンネルを通り抜ける：タンパク質の SecA-SecY 複合体を介した膜透過

CHANNEL HOPPING: Protein translocation through the SecA-SecY complex

新しく合成されたタンパク質は、真核生物では小胞体膜、原核生物では細胞膜を通して移動するが、その際に真核生物では Sec61、原核生物では SecY として知られている、トランスロコンという進化的に保存されたタンパク質透過チャンネルを通過する。細菌では、ATP アーゼ SecA が SecY チャンネルの透過用モーターとして働くと考えられている。T Rapoport たちによる 2 本の論文では、細菌由来の SecA と SecY の複合体の、長い間待たれていた構造が報告されている。表紙に示された構造は、SecA と SecY 複合体の間の主な構造変化を示しており、SecA はそのツーヘリックスフィンガーを用いて、透過するタンパク質を SecY の細胞質側に開口したじょうご状の構造の中に押し込んでいることが示唆される。架橋研究により、この機構のさらなる裏づけが得られている。また、瀧木理（東京大学）たちは抗 SecY の Fab フラグメントと結合した SecY の結晶構造を報告しており、チャンネルの開く前 (pre-open) の状態が明らかになった。これらの論文から、膜を透過するタンパク質の経路に関する新たな知見が得られた。

Article p.936, Letters pp.984, 988, N&V p.879 参照

医学：ALK が神経芽細胞腫を引き起こす

ALK in neuroblastoma

神経芽細胞腫は、最もよくみられる小児がんである。この疾患は家族歴と強く関連するため、発症には遺伝的要因が関与することが 30 年以上前から予測されていた。今週号では、神経芽細胞腫患者では受容体型チロシンキナーゼ ALK (anaplastic lymphoma kinase) に変異が生じていることを、4 つのグループが報告している。ALK は神経芽細胞腫の素因遺伝子の役割を果たしており、散発性の神経芽細胞腫では体細胞に点突然変異が生じている。この変異は、*in vivo* で ALK のキナーゼ活性を促進し、細胞を形質転換させ、腫瘍化活性がみられるようになる。ALK 阻害剤は神経芽細胞腫の細胞増殖を抑制するため、抗がん剤となる可能性がある。

Article p.930, Letters pp.967, 971, 975, N&V p.883 参照

地球：始生代のマントルは高温だったらしい

Archean mantle was hot

コマチアイトは、主に始生代にマントルの岩石が大々的に溶融したことにより形成された火山岩で、その起源については盛んな論争が行われている。コマチアイトは、異常に高温のマントルが無水状態で溶けたか、現在の温度よりやや高い温度で水のある状態で溶けたかのどちらかだと考えられている。Berry たちは今回、ジンバブエのベリングウェで得られた、27 億年前のコマチアイトマグマの初期状態を保った試料中の鉄の酸化状態を決定した。彼らの得た知見は、現在の海洋底玄武岩に似た酸化状態をもつ生成源が、ほぼ無水状態で溶融したことと一

致する。この結果は、ベリングウェメルトが含水条件下での溶融ではなく、約 1700°C の高温マントルからの生成物であることを示唆しており、始生代には異常な高温のマントルが存在したことを確認している。

Letter p.960, N&V p.881 参照

進化：1 人よりペアで協力したほうが得

Two heads better than one

血縁関係にない個体間の協力行動がなぜ進化したのかは、社会科学においても自然科学においても謎とされている。この現象の解明を進めるうえで障害になっていると思われることの 1 つは、理論研究者と実証研究者が別々に仕事をする傾向がみられることである。Bshary たちは、こうしたそりを避けるために、ゲーム理論モデリング、野外観察および実験的検証を組み合わせ、掃除魚であるホンソメワケベラ (*Labroides dimidiatus*) の相手を変えることがない安定な雌雄ペアと、その依頼者となる魚との間の掃除を介した相利共生という、協力についてのこれまで調査されていなかった問題を研究した。理論からは、2 匹のサービス提供者が互いに協力しているかぎり、単独のときよりも依頼者に質の高いサービスを提供するはずだと予測される。野外観察と実験により、モデルのこの予測が正しいことが確認された。ペアの掃除魚の成功に重要なポイントは、1 匹が依頼者の外部寄生虫を食べる間にもう 1 匹は依頼者の粘液を食べるという、掃除魚側に得になる欺き行動をとりながら、同時に依頼者の満足も保証されるということにある。

Letter p.964, Author page 参照

細胞：スプライシングで大違い

Splicing the difference

酵母のゲノム全域にわたる解析によって、有糸分裂から配偶子を形成する減数分裂への切り替えに伴って、遺伝子発現プロファイルが大幅に変化することが明らかになった。サイクリン Rem1 は、減数分裂の際だけに発現されるタンパク質の 1 つで、減数分裂に先立つ遺伝子内組み換えを促進し、減数分裂を確実に進行させる働きをする。Moldón たちは、分裂酵母 *Schizosaccharomyces pombe* での *rem1* の発現が転写段階で制御されているだけでなく、スプライシングによっても制御されていることを明らかにした。有糸分裂中の細胞では、*rem1* プロモーターに転写因子 Fkh2 が結合するとイントロンを保持した転写産物が生じ、そのため短いタンパク質だけが生産される。このタンパク質は組み換えのレベルを左右する。減数分裂中の細胞では、減数分裂特異的転写因子 Mei4 が *rem1* プロモーターに結合し、その結果 *rem1* 転写産物がスプライシングを受け、活性をもったサイクリンが作られる。つまり、2 種類の転写因子のどちらが使われるかによって、同一遺伝子のスプライシングの仕方が異なるのである。

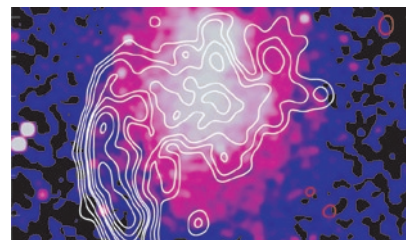
Letter p.997, N&V p.885 参照

宇宙：観測され始めた遠方の電波ハロー

Distant haloes in prospect

次世代電波望遠鏡は、従来にない分解能と感度をもって電波の低周波数帯の宇宙を観測し、事実上未知の研究領域を開拓することになるだろう。低周波数帯で新しい種類の銀河団が発見され、こうした望遠鏡を使って見つかりそうな現象の一端を垣間見ることができるようになった。インドのブネーのすぐ北に設置されている巨大メートル波電波望遠鏡 (GMRT) を使った詳細な観測で、合体しつつある銀河団アベル 521 に付随する低周波数帯の電波ハローが明らかになった。このハローは、極めて急峻な電波スペクトルをもっているため、他の既知のハローすべての観測に使われてきた周波数である 1.4 ギガヘルツでは検出がむずかしい。このスペクトルは、乱流による加速機構の裏づけとなるもので、このことからすると、宇宙の多くの電波ハローは主に低周波数帯で放射をしていると考えられる。

Letter p.944 参照



Great glowing jellyfish! It's the Nobel Prize in Chemistry

まばゆいクラゲ！これがノーベル化学賞

doi:10.1038/news.2008.1159/8 October 2008

Katharine Sanderson

緑色蛍光タンパク質が科学界最高の勲章を獲得した。

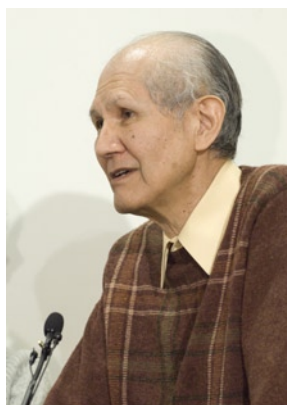
クラゲの蛍光のもとになっている分子が、その発見者と開発者に今年のノーベル化学賞をもたらした。緑色蛍光タンパク質 (GFP) は、生きている細胞内部にあるひとつひとつのタンパク質の活性を追跡する方法をもたらし、それによって遺伝子が発現するようすを監視することができるようになったことから、医学と生物科学に大変革が起こった。

今回のノーベル化学賞は、ウッズホール海洋生物学研究所およびボストン大学（米国マサチューセッツ州）の下村脩名譽教授、コロンビア大学（米国ニューヨーク州）のマーティン・チャルフィー教授、それにカリフォルニア大学サンディエゴ校（米国カリフォルニア州）のロジャー・チェン教授の各氏に3等分で贈られる。

この研究は、下村がオワンクラゲ *Aequorea victoria* の発光のもとになる物質を調べた1960年代前半に端を発している。下村はこの生物を何千匹も捕まえ、「緑色タンパク質」と命名した蛍光タンパク質の単離を成し遂げた¹。



緑色蛍光タンパク質 (GFP) を体内にもつオワンクラゲ *Aequorea victoria*。



左から、ウッズホール海洋生物学研究所およびボストン大学（米）の下村脩名譽教授（80歳）、コロンビア大学（米）のマーティン・チャルフィー教授（61歳）、カリフォルニア大学サンディエゴ校（米）のロジャー・チェン教授（56歳）。

遺伝子の天才

時は流れて1992年、マーティン・チャルフィーは、ウッズホール海洋生物学研究所のDouglas PrasherがGFPを発現する遺伝子の単離に成功したことを知った。チャルフィーは、Ghia Euskirchenという大学院生（現エール大学研究員）が短期プロジェクトで彼の研究室に入ったとき、Prasherの研究を発展させた。幸いEuskirchenには蛍光顕微鏡の経験があり、まさに「GFPの遺伝子を大腸菌に発現させることは可能か」というチャルフィーのテーマを研究するのに必要なノウハウをもっていたのだ。

思ったとおり、大腸菌はGFP遺伝子を発現させた²が、大腸菌の蛍光は見過ごされるところだった。Euskirchenは「チャルフィーの研究室では確認できなかったのです」とNatureに語った。しかし、Euskirchenが出身のコロンビア大学化学工学科の研究室にその細胞をもち

帰ると、高性能の顕微鏡が明らかな蛍光を拾い上げた。

既存の遺伝子がGFPをコードする遺伝子に置き換えれば、元の遺伝子のスイッチを入れる細胞メカニズムが実際にはGFPを作ることになり、青色光や紫外光の下でそれが見えるのだ、ということにチャルフィーらはすぐに気づいた。

もう1つ、目的のタンパク質を発現する遺伝子のすぐ隣にGFP遺伝子を挿入する方法もある。タンパク質が作られると、それは自動的にGFPとつながったものになり、細胞内、場合によっては生物体全体の中で、その動きを追跡することが可能になる。

チャルフィーはさらに、GFPがあらゆる生物のほぼすべてのタンパク質で標識として利用可能であることを明らかにした。これは、ヒト細胞に侵入するHIVウイルスのリアルタイムな監視にも利用されている。

TOM KLEINDINST / MBL
EILEEN BARROSO / UNIVERSITY OF COLUMBIA
ZHANG WEI / COLORCHINA PHOTO / NEWS.COM

クラゲの急展開

第3の研究者ロジャー・チェンのおかげで、この技術は大きな飛躍を遂げた。チェンは GFP 分子を細部まで検討し³、このタンパク質を微調整して色の異なる類似タンパク質を作り出した。その研究の最大の成果は、タンパク質をひとつひとつ違う色で標識することによってタンパク質どうしの相互作用を見ることができるようにしたことだ。

チャルフィーは、ストックホルムのノーベル賞委員会が電話で授賞の連絡をしようとしてもつかまらなかった。「Eメールを送ったのです。そうすればパソコンを立ち上げたときにわかるでしょう」と、ノーベル賞委員会の代表者は語る。

チェンは授賞の報を受けたとき、受賞者のリストから Prasher が漏れていると話した。しかし、この賞は3人までしか受賞できない。「委員会は悩んだことでしょう」とチェンはいう。

多くの前例と同様、今回の化学賞のテーマは生物学がらみのものだ。しかし、

そのことについて、コネティカット大学（米国コネティカット州）の計算機化学者として GFP の改良と輝度向上に取り組んでいる Marc Zimmer は、化学者を落胆させるものではないと話す。「チェンは筋金入りの化学者ですし、このタンパク質の構造に興味をもった下村も間違いなく化学者です。GFP は生物学に応用されていますが、その成果はすべて化学がもたらしたのです」。

GFP は、生化学および生物学のさまざまな分野で広く利用されている。米国立衛生研究所（メリーランド州ベセスダ）の一機関である国立総合医科学研究所で所長を務める Jeremy Berg は「多くの場合、もはや（論文で）GFP については引用文献が示されることさえありません」と話す。また、単純に「緑色蛍光タンパク質」という言葉を含む論文を検索すると3万件を超えるヒットがあるのだという。

今や、GFP のおかげで光り輝くペットを買ってくることもできる。遺伝子工学で



遺伝子組み換えマウス「ブレインボウ」の運動ニューロンの軸索は、シアン、黄色、それに赤色の蛍光タンパク質の組み合わせで彩られている。

GFP が組み込まれたゼブラフィッシュが広く市販されているのだ。「私もオフィスで飼っていますよ」と語る Zimmer は、訪問先の学校で自分の研究を説明するときにそれを利用している。 ■

1. Shimomura, O., Johnson, F. H. and Saiga, Y. J. *Cell. Comp. Physiol.* **59**, 223-239 (1962).
2. Chalfie, M. et al. *Science* **263**, 802-805 (1994).
3. Ormö, M. et al. *Science* **273**, 1392-1395 (1996).

Virus discoveries secure Nobel prize in medicine

ウイルスの発見にノーベル医学生理学賞

doi: 10.1038/news.2008.1154/6 October 2008
Alison Abbott

HIV とヒトパピローマウイルスの研究は、医療にすでに恩恵をもたらしている。

今年のノーベル医学生理学賞は、命にかかわる疾患の原因ウイルスを発見し、医学の進歩に大きく貢献した3名のヨーロッパ人研究者に贈られる。

ハラルド・ツアハウゼンは、ドイツがん研究センター（ハイデルベルク、略称 DKFZ）の元理事であり、子宮頸がんを引き起こすヒトパピローマウイルス（HPV）の研究により受賞した。このウ

イルスの予防ワクチンはすでに開発されており、現在広く使用されている。今回は、エイズの原因となるヒト免疫不全ウイルス（HIV-1）を発見したフランソワーズ・バレスヌシ、およびリュック・モンタニエとの共同受賞となる。

ストックホルムから賞の授与を知らせる電話があったとき、自宅にいたのは3氏のうちツアハウゼンのみだった。その

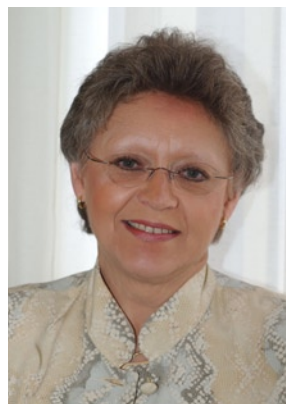
とき、世界エイズ研究予防財団（仏・パリ）の現理事長であるモンタニエはコートジボワールで仕事であり、また、パスツール研究所（仏・パリ）に籍を置くバレスヌシはカンボジアにいたからである。ノーベル賞委員会は、受賞者を発表する前にモンタニエにもバレスヌシにも連絡を取ることができなかった。

エイズウイルスの探索

バレシヌシは携帯電話でしか連絡がつかず、騒ぎになって自分がその渦中にあることを知った。彼女は、部門を問わずノーベル賞を受賞した女性としては36人目となり、これに対して男性の受賞者は計745人となる。バレシヌシは、エイズの原因ウイルスの探索が始まった1980年代初頭から、パスツール研究所でモンタニエとともに研究を行っていた。2人はこのウイルスを1983年に見つけたが、最初はこのウイルスをリンパ節関連ウイルス（LAV）と名づけていた。

まもなく、発見者が誰であるかをめぐり論争が勃発した。米国立衛生研究所（メリーランド州ベセスダ）のRobert Galloが、真の発見者は自分だと主張したのである。しかし1987年にフランスと米国の両政府首脳の間により、ウイルス発見の利益を分かち合うとする合意に至り、1990年まで表向きには和解したようにみえた。そして、この分野の研究は確かに重要ではあるが、論争の記憶が生々しいうちは、ノーベル賞を授与するわけにはいかないだろうと多くの者が考えていた。

ノーベル賞委員会は今回、誰が何をいつ発見したかの一覧をはじめとする発表資料の中で、HIV発見者についての見解を明確にした。その資料には、バレシヌシとモンタニエの発見は、「研究界に受け入れられ、大きな科学的躍進につながった」とある。そして次に、Galloの「新規ウイルスの検出は、1984年にエイズもしくはエイズの前段階にある多数の患



左から、ドイツがんセンターのハラルド・ツアハウゼン元理事（72歳）、パスツール研究所（仏）のフランソワーズ・バレシヌシ博士（61歳）、世界エイズ研究予防財団（仏）のリュック・モンタニエ理事長（76歳）。

者からなされたものであり・・・[そのウイルスは] LAV-1 とかなりの類似性を示した」と言及している。

フランスの受賞者2氏の研究は、エイズの診断ツールや血液スクリーニング剤の開発につながり、これらは特に欧米においてエイズの拡大と闘う助けとなった。また、さまざまな方法でこのウイルスと闘うための薬剤の開発を可能にした。これらを用いた多剤併用療法によって、患者の生存期間は大幅に延びたのである。

みごとな実験

ツアハウゼンは、科学部門ノーベル賞のドイツ人受賞者としては79人目である。彼が温厚な紳士であることは広く知られており、1983年から2003年まで所属していたDKFZで研究の水準を向上させた。

1970年代初めにはすでに、子宮頸がんは主に性行為で感染すると考えられており、当時の定説では、子宮頸がんの原因は単純ヘルペスウイルスだとされていた。しかし、当時若かったツアハウゼンは、自分の目を信じる道を選んだ。彼は、子宮頸がん細胞の中に単純ヘルペスウイルスを見つけ出すことができなかった。その代わりに、パピローマウイルスに目を付け、このウイルスは皮膚にイボを作るだけだと考えていた多くの研究者らの冷笑を気にもとめなかった。

「当時、ウイルス学者やほぼすべての婦人科医たちは、彼のパピローマウイルス原因説は突拍子もないものだと考えていました」と、ツアハウゼンのかつての

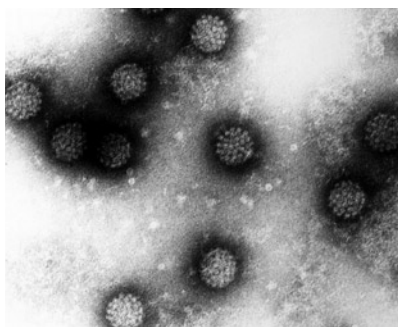
同僚で、現在はケルン大学にいるウイルス学者のHerbert Pfisterはいう。「しかし彼は、確固たる理論的姿勢で自説を貫き通し、自分が巻き起こした論争など気にかけませんでした」。

その後の10年にわたる一連のみごとな実験で、ツアハウゼンはさまざまな型のHPVを見つけ出し、各種の疾患との関連づけを行った。その間、彼はドイツ国内のいくつかの大学を転々とし、1977年にフライブルク大学に腰を落着けた。1983年に彼が発見したHPV-16は、ヒトのすべての子宮頸がんの半数以上にみられ、他の種類の肛門性器がんにも関与している。さらにその1年後に発見したHPV-18は、子宮頸がんの25%に関与している。

「彼の研究は、我々の日常生活に直接影響を及ぼしています。もう何年も前から、子宮頸がんの発生リスクが高い女性を見つけ出すことが可能になっています」と、ミュンヘン工科大学の婦人科医長でありフライブルクのツアハウゼンの下で研究に勤しんだことのあるMarion Kiechle-Bahatは話す。「そして現在、彼の研究の直接の成果として、性行為を行う前の若い女性に接種するワクチンができています」。

現在では、世界で毎年およそ50万人の女性がこのワクチン接種を受けている。子宮頸がんによって患者のおよそ3人に1人が命を奪われているが、このワクチンによって死亡率が大きく削減できるものと期待される。

RONLAD WITTEK / NEWS.COM
INSTITUTE PASTEUR
DAVID SILPA / UPI PHOTO / NEWS.COM



ドイツがん研究センター元理事のハラルド・ツアハウゼン博士が発見した、子宮頸がんの原因ウイルスであるヒトパピローマウイルス（HPV）。

Nobel Prize in Physics for symmetry breakdown

「対称性の破れ」にノーベル物理学賞

doi: 10.1038/news.2008.1155/7 October 2008 増補版

Geoff Brumfiel

素粒子物理学の理論研究により、日本生まれの科学者 3 人が共同受賞。

2008 年のノーベル物理学賞は、日本生まれの 3 人の研究者に贈られることになった（南部氏は米国籍）。これは、日本にとっては初めてのことであるが、今後の物理学研究においてこの国の存在感が増してくることの前触れであるのかもしれない。

日本の高エネルギー加速器研究機構（KEK、茨城県つくば市）名誉教授である小林誠と、元京都大学基礎物理学研究所長で同大学名誉教授の益川敏英には、この宇宙の物質が反物質よりも多いことの原因になったとみられる「対称性の破れ」が起こる仕組みを見いだした業績により、それぞれ賞金の 4 分の 1 が贈られる。

賞金の残りの半分は、米国のシカゴ大学（イリノイ州）名誉教授である南部陽一郎に贈られる。「自発的対称性の破れ」の概念により量子の世界のさまざまな粒子や力を説明できることを示した南部との共同受賞について、小林は「とても光栄です」と話す。

理論物理学の輝かしい伝統

3 人の共同受賞は、日本の理論物理学の長い伝統を反映しているが、世界の物理学者たちは、素粒子物理学における日本の影響力が増してきていることも反映していると指摘する。各国がこの分野への予算を削減している中で、日本の素粒子物理学は活況を保っており、少なくともあと数個はノーベル賞を獲得しそうな勢いである。「日本の素粒子物理学コミュニティは活気に満ちています」と、メリーランド大学（米国メリーランド州）の素粒子物理学者 Hassan Jawahery はい



左から、高エネルギー加速器研究機構の小林誠名誉教授（64 歳）、京都大学の益川敏英名誉教授（68 歳）、シカゴ大学（米）の南部陽一郎名誉教授（87 歳）。

う。「日本は素粒子物理学に巨額の投資をしてきました」。

日本には、第二次世界大戦前から活気に満ちた理論物理学コミュニティがあった。1949 年には、中間子の存在を予言した湯川秀樹が、日本人として初のノーベル賞を受賞した。1965 年には朝永振一郎がこれに続き、その受賞理由となった量子電磁力学の理論は、現在でも素粒子の相互作用を記述するために使われている。

南部氏の新しいアイデア

シカゴ大学の Peter Freund 名誉教授は、南部は日本生まれの物理学者の中で歴史上、最も影響力ある人物の 1 人であるという。「彼の頭の働きは、ほかの人とはかなり違って」と Freund は話す。南部はよく、黒板にいくつかの標準的な方程式を書き、物理学のよく知られた概念について話していたかと思うと、突然、その方程式を使ってエレガントで

思いがけない結論を引き出してみせるといふ。「それが実にみごとなのです。彼がどうやってそうした結論に到達するのか、私にはけっして理解できないでしょう」と彼は話す。

南部は米国に渡って 8 年後の 1960 年に、そのユニークな思考力で対称性の問題に取り組んだ。対称性とは、ある系の一部が別の部分の鏡像になっているというような性質のことである。物理学者たちは、エレガントに記述できる自然界の対称性を愛する。しかし、自然界には対称性が破れている部分もあり、これを説明するのははるかにむずかしい。「対称性とその破れについては、きれいに磨かれた金属球をイメージするとよい」と Freund は話す。金属球は、どの角度から見ても同じに見えるだろう。つまり対称性がある。次に、金属球のどこかにへこみがあるとしよう。すると、金属球をある角度から見るのと別の角度から見るのとでは違って見える。

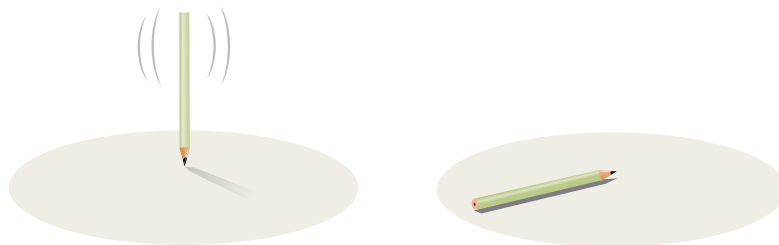
写真提供：京都大学、シカゴ大学、高エネルギー加速器研究機構、UPI/PHOTO / BRIAN KERSEY / NEWS.COM

1950年代から1960年代にかけて、物理学者たちは方程式を扱うなかで、こうしたへこんだ球にあたるものに何度も遭遇した。彼らが記述した系は、ほとんど対称であったが、完全には対称でなかった。物理学者たちにはその理由はわからなかった。

南部は、この「へこみ」を説明するために対称性に関する新しいアイデアを導入した。簡単にいうと、彼は対称性を、鉛筆がその先端を下にして直立しているような状態としてイメージしたのである。鉛筆が直立しているかぎり、鉛筆は水平面上の特別の方向を向いてはならず、系は水平回転に関して対称になっている。しかし、わずかなバランスの乱れで鉛筆が倒れ始めると、鉛筆はある特定の方向を指すようになり、対称性は失われる。「自発的対称性の破れ」とよばれるこの考え方は、自然界の対称性の多くがわずかに不完全である理由を説明できただけでなく、以前は見つけることができなかった隠れた対称性を探すのにも役立った。「現代の物理学は、南部のアイデアなしにはありえなかったでしょう」とFreudは話す。

第3世代のクォークを予言

小林と益川は、別の対称性の破れから、宇宙に反物質よりも多くの物質ができる仕組みを説明した。宇宙に反物質よりも多くの物質が存在していることは、素粒子物理学の重大問題である。2人は計算



自発的対称性の破れの概念図。左のように鉛筆が直立しているかぎり、鉛筆は水平面上の特別の方向を向いてはならず、系は水平回転に関して対称になっている。しかし、わずかなバランスの乱れで鉛筆が倒れると、鉛筆はある特定の方向を指すようになり、対称性は失われる。

の末、クォークどうしが弱い力（自然界の4つの基本的な力の1つ）により相互作用することが、電荷とパリティの対称性（CP対称性）の破れにつながることを見だして、1973年の論文で発表した。CP対称性の破れは、粒子が常にその反粒子の正確な鏡像としてふるまうわけではないことを示唆している。その結果、反物質よりも多くの物質が存在することになる。

英国のオックスフォード大学の物理学者Ken Peachは、「小林と益川が書き下したこのすばらしい数学的表現を物理的に解釈したものが、物質と反物質の間の対称性の破れなのです」と話す。その方程式は第3世代のクォークの存在を予言していたが、実際にクォークが見つかるまでは、その予言は信じがたく思われた。

日本は、理論物理学だけでなく、莫大な費用のかかる加速器物理学にも力を入れている。数十年前に湯川が予言した中間子の仲間を利用して小林と益川の理論を検証する実験も、その1つである。1990年代半ばから進められているKEKのBelle実験では、B中間子（ボトムクォークを含む中間子）の崩壊を観察することでCP対称性の破れを測定している。

Belle実験のライバルにあたる米国のSLAC国立加速器研究所（カリフォルニア州メンローパーク）のBaBar実験で研究を行ってきたJawaheryは、「Belle実験はすばらしい成功を収めました」という。この2つのプロジェクトはしばしば数日から数週間違いで結果を出し、BaBar実験がリードすることもあるが、Belle実験がリードすることもあった。「私

たちは非常に友好的、かつ健全に競争していたのです」とJawaheryは話す。

日本は、今後しばらくは、ニュートリノ（質量がゼロに近い微小な粒子）の物理学だけでなく、B中間子の研究においても、世界のリーダーにとどまりそうである。BaBar実験はすでに新しい実験データを取ることをやめており、予算削減のため、まもなく永久に閉鎖されることになっている。対照的に、Belle実験の物理学者たちはさらに強力な実験計画案を提出している。

別種のCP対称性の破れの可能性

しかし、日本が進める、より強力な実験によっても、破れた対称性に関する疑問に完全に答えることはできないだろう。B中間子におけるCP対称性の破れは、宇宙の物質と反物質の間の不均衡のごく一部しか説明できない。小林は、「別の種類のCP対称性の破れがあるのだろう」と話す。

そのようなCP対称性の破れが存在するなら、それはスイスで見つけることになるのかもしれない。スイスで来年運転再開予定の大型ハドロン衝突型加速器（LHC）という新しい粒子加速器は、超対称性とよばれる新しい種類の対称性の証拠を見いだす可能性がある。超対称性が存在しているなら、現在の物質と反物質の間に不均衡が生じている理由がさらによく理解できるようになるだろう。日本はLHCのかなりの部分の材料を提供しており、10を超える日本の大学がLHCの検出器の建設に協力している。この実験からどんな結果が得られるのか、小林にさえ確かなところはわからないという。■



高エネルギー加速器研究機構のBelle測定器。2001年、B中間子の崩壊における大きなCP対称性の破れの観測に成功し、小林・益川理論の正しさを実験的に証明した。

Questioning the candidates

米大統領候補にNatureが問う

Nature Vol.455 (446-449) / 25 September 2008

Nature が先ごろ、2 人の米大統領候補に 18 の科学関連の質問に対して書面での回答を求めたところ、バラック・オバマ氏からの快諾を得た。しかし、ジョン・マケイン氏の陣営からは拒否された。ここでは、10 の質問に対するオバマ氏の回答を掲載する。残りの質問（バイオセキュリティ、核兵器研究施設、国際プロジェクトに対する米国の参加などをテーマとする）についての回答は、www.nature.com/uselection で公開されている。なお、この記事では、各質問のテーマに関するマケイン氏の別の機会での発言を、できるかぎり付記した。



1. あなたにとって科学技術の分野での最優先課題は何ですか？

オバマ氏：科学や技術、イノベーションにおける米国のリーダーシップの強化に力を尽くす。それが、私の政権にとっての中心的な優先課題となります。イノベーションに取り組む我が国の人材は、今でも世界の羨望的ですが、我が国は、今までに例のない諸問題に直面しており、その解決には新しいアプローチが必要となっています。例えば、米国の

先端技術製品の貿易収支は、530 億ドル（約 5 兆 3000 億円：1 ドル = 100 円で換算）の輸入超過状態にあります。今や、中国が世界最大のハイテク輸出国です。こうした競争状態は、米国内で技術系キャリアを志向する学生が減少傾向にあることから、時間が経過するにつれて、さらに悪化の一途をたどる可能性があります。理工系の学位を取得する大学生の割合をみると、米国は先進国中で 17 位です。30 年前は、3 位でした。

連邦政府の助成を受けた基礎研究は、大きさでいえば宇宙から原子より小さな粒子まで、そして、生きている細胞をサポートする化学反応から生態系を持続させる相互作用に至るまで、数多くの自然の特徴を解明することをめざしており、これが、過去 50 年以上、米国社会の本質的な特徴の 1 つとなってきました。こうした個別プロジェクトがもたらすものは必ずしも予測可能ではありませんが、基礎研究は、信頼性の高い

JOHN SLEEZER / KANSAS CITY STAR / MCT / NEWS.COM
JOE KOSHOLLEK / MILWAUKEE JOURNAL-SENTINEL / RAPPORT PRESS / NEWS.COM
ISTOCKPHOTO

新知識の源であり、電気通信から医学に至る各種分野での重要な発展を促進し、著しく高い経済収益率を生み出し、産業や軍事、高等教育における米国のリーダーシップを確固たるものとしてきました。私は、基礎研究に対する投資を継続すれば、その結果として、将来の我が国において国民の健康な生活、エネルギー源の改善、軍事力の優位化、そして高収入の仕事がもたらされると考えています。

ところが、今日、我が国の理工系の全領域で、研究投資が明らかに不足しています。物理学や工学研究に対する連邦政府の助成金が国内総生産に占める割合は、ここ数十年間、減少の一途にあり、また、生命科学に関しては一時的な増加があったものの、国立衛生研究所（NIH）の予算が許す購買力は、過去6年間、減り続けています。結果として、米国政府の科学系機関は、10件の研究提案中、わずか1件しか支援できないようなことが多くなり、若手科学者のキャリアを阻み、最近の数多くの特筆すべき科学の新展開についても研究機会を奪う事態となっています。さらには、このような環境下で科学者たちは、最も重要なブレークスルーに結びつくかもしれないけれどリスクも高い、といった研究には取り組まない傾向にあります。

もう1つ指摘したいのは、他国が科学研究への支援を増強しているときに我が国が科学に対する支援を減らしているという点です。すでに、科学の数多くの重要な領域において、我が国のリーダーシップは脅かされ始めています。

この状況を受け入れることはできません。私が大統領になれば、物理学と生命科学、数学、工学の基礎研究に対する予算を今後10年間で倍増させ、我が国の科学者を支援し、科学における米国のリーダーシップを再構築します。

マケイン氏も同様に、米国の一部の主要な科学系機関の予算を増額させるために闘うことを約束しているが、具体的な金額や時期の目標は示していな

い。「マケイン政権では、科学と研究には非常に高い優先順位がつくことになります。マケインは、我が国がリーダー、とりわけイノベーションの分野でのリーダーであり続けるために全力を尽くします」とマケイン陣営の保健政策問題アドバイザーである Jay Khosla 氏は語る。ただしマケイン氏は、当選後の1年間は研究助成金を含む国内の裁量支出を凍結し、全体の予算規模の抑制につなげようとしており、この点は、研究予算の増額を期待する人々にとっての大きな障害となる可能性がある。

マケイン氏は、例えば先端電池技術研究に3億ドル（約300億円）の賞金を提供するなど、政府の規制緩和およびビジネスや技術への指向性の高い研究によるイノベーションの促進を一般的に重視している。マケイン氏は、選挙遊説中、科学者やエンジニアをめざす米国人学生を増やすニーズを認識している点など、オバマ氏と同じ話題に数多く触れている。例えば、数学や科学といった教科で高い実績を上げる教師にボーナスを与え、国立科学財団やエネルギー省などの科学系機関における教育プログラムの支援を表明している。

2. 生物医学のイノベーションには多額の資金を要し、結果が得られるまでに長い時間がかかります。例えば、新薬の開発には10億ドル（約1000億円）の資金とほぼ10年の年月が必要となります。政権を獲得した場合、研究から容易に治療法を得られるようにするために、どのような施策をとりますか？

オバマ氏：米国の医学が過去100年間に国内だけでなく全世界で、病気と闘うために果たしてきた極めて重要な役割は、十分に誇りに思うだけの価値があります。NIH やその他の政府機関、それに、国内の製薬、バイオテクノロジー業界が後援する研究によって、数多くのワクチンや医薬品、ホルモンが開発され、クオリティー・オブ・ライフの改善や寿命の延び、多くの重篤な病



気や障害による深刻な影響の軽減がなされてきました。

「研究から治療法を得ること」は決して容易にはならないかもしれませんが、生物医学の研究者は、その科学研究を健康増進に利用するチャンスが増えたと考えていると、私は理解しています。私は、個人に見合う治療法を簡便に探ることができる可能性をもつ、病気の生物学的マーカーの開発や、新たな治療法の恩恵を受ける可能性が最も高いであろう患者を選ぶための遺伝的情報の利用、また、数多くの研究センターで実施可能となりつつある分野横断的な研究をさらに奨励します。また、病気の予防、早期発見と管理の向上に焦点を当てた研究を重視する立場も支持します。

さらに、私は、新たな治療法が確実に開発され、より効率的に一般公開できるようにするために、努力を重ねる余地があると考えます。私は、NIH の予算を増額することで、近年の研究コストの高騰にもかかわらず、我が国の科学者の研究資源を減らしてしまった現在の予算傾向を逆転させなければならないと思っています。また、食品医薬品局や疾病対策予防センター、その他の連邦政府機関に対する予算資源の提供も改善し、いざ、医学研究における進展から画期的な新治療法が得られようとしている際には、そうした治療法を確実なものにし、また、幅広く用いることを迅速、かつ安全に検討できるようにする体勢を整えておかねばなりません。さらには、連邦政府機関相互間や、公共、民間、非営利組織の間の障壁を取り除くことを最優先にして、新

たなイノベーションに対する協力関係の質と効率を確実に高められるようにしなければなりません。

マケイン氏も、NIH への予算支出を強力に支持したいと語っている。「マケインは、今日の若手研究者に必要な資源を提供して、研究から治療法を生み出せるように、できるかぎり力を尽くすことを熱望しています」と Khosla 氏は話す。両候補の医療構想の骨格では、米国人にとって費用負担が可能で、利用しやすい健康保険制度を創設する方法が重点的に語られる傾向にあり、マケイン氏は、遠隔医療など、公衆衛生に役立ち、最新の医学知識をさらに多くの患者にもたらすことにつながる技術についても発言している。

3 連邦政府機関で科学に関する意思決定に対して政治的干渉が何年も続いたことを、多くの科学者は苦々しく思っています。政府内での偏りのない科学的な助言を復活させるために何をしますか？

オバマ氏：さまざまな論点において、科学技術情報の重要性が増しています。そのような情報は、専門性が高く、イデオロギーにゆがめられてはならないと考えます。私は、政府の決定は利用可能なものの中で最善かつ科学的に妥当な証拠に基づいて行い、政府機関の幹部や政治任用職のイデオロギー傾向に基づかない、という基本原則を復活させます。より広範な観点からいうと、私は、

透明で国民とつながる民主主義の創造に全力を尽くし、そのために最先端技術を使って、米国国民に対する新たなレベルの透明性、説明責任、参加性を実現します。政策決定は、新たな情報や対立した見解を提示できる人々によるレビューを含め、なによりも科学の発展を特徴づけてきたオープンな議論という長年の伝統のうえに築かれた過程を経てなされる必要があります。私は、数人のノーベル賞受賞者を含む輝かしい科学顧問チームをすでに組織しており、彼らは私の政権において、確固たる科学的課題を形作るのに尽力します。

これに加えて、私は、以下の各施策を実施します。

- 意思決定の際に科学技術面の助言を織り込む必要のある上級管理職の数が増えており、ここに科学技術分野での経験が豊富で、高潔性と客観性の点で定評のある人々を登用します。こうしたポジションには、倫理性と資質の高い人材を、党派にかかわらず、速やかに任命します。
- 米国史上初の最高技術責任者（CTO）の職を設定し、我が国の政府と全関係機関に、21 世紀において適正なインフラ、政策、サービスが備わるように全力を尽くします。この CTO は、クラス最高レベルの技術創出、ベストプラクティス（最良とされる事例）の共有、そして我が国のネットワークの安全保護に関わる、複数機関にまたがる事業を主導します。
- 科学技術に関する極めて重要な問題点について独立した助言を行うことを職務とする専門家を委員に任命して、大統領科学技術諮問委員会（PCAST）の役割を強化します。PCAST は、大統領に対する諮問機能を回復します。
- 結果をタイムリーに発表し、政治任用職のイデオロギー上のバイアスにゆがめられないようにすることをめざした、政府刊行物の審査と発行に関する明確なガイドラインを制定する大統領命令を発して、政府の科学的・高潔性を回復し、意思決定の透明性を回

復させます。私は、こうしたプロセスにおける不正を報告する「ホイッスル・ブロー（内部告発者）」の保護を強化します。

マケイン氏も同様に、自らの政権における重要な技術職に有能な科学者やエンジニアを配置することを約束しており、大統領と直接作業を進める科学アドバイザーも含むとしている。「マケインは、（連邦政府内での）科学研究の信用性を回復させたいと考えています」と選挙顧問の Floyd DesChamps 氏は話す。また、マケイン氏は、国民の税金がつぎ込まれる科学研究への投資は、研究成果をゆがめることなく、国民に還元すべきだと主張している。

4 あなたが描く米国のエネルギー供給ビジョンにおいて、原子力はどのような役割を果たし、また、核廃棄物の問題にはどのように取り組みますか？

オバマ氏：原子力は、我が国の現在のエネルギー構成において重要な部分を占めています。また、我が国の非炭素系発電の 70% が原子力発電です。もし私たちが原子力という手段を放棄してしまえば、気候変動に対処するための野心的な目標を達成できなくなる可能性が高くなります。しかし、原子力利用のこれ以上の拡大を考慮する前に、私たちは、核燃料と核廃棄物の安全確保、廃棄物の貯蔵、そして核拡散といった極めて重要な問題に取り組まなければなりません。[ネバダ州の] ユッカマウンテンでの核廃棄物処分作業の失敗は高い代償であり、中止すべきだと考えます。業界や州知事とともに核廃棄物を安全に貯蔵する方法の開発を進めつつ、長期的解決策を模索していくつもりです。

マケイン氏は、2030 年までに新たに 45 基の原子力発電所の建設を提案しており、最終的には、合計 100 基の建設を目標としている。同氏は、新設される原子力発電所や既存の原子力発電所から生じる核廃棄物をどうするかに



原子力発電所

については触れておらず、過去にはユッカマウンテンの核廃棄物貯蔵プロジェクトに賛成している。

5. あなたは、温室効果ガスの排出規制に関して、キャップ・アンド・トレード制度に賛成していますが、ヨーロッパでの排出権取引制度からの教訓はどのように生かされるのでしょうか？

オバマ氏: 私は、市場ベースのキャップ・アンド・トレード（排出枠の自由売買取引）制度を実施して、二酸化炭素排出量を科学者が必要だとするレベル、すなわち 1990 年レベルからの 80 % 削減を 2050 年までに実現させます。ヨーロッパでは、排出権取引制度によって重要な成功を収めていますが、同時に誤りも犯しており、私たちはそこから学ぶべきだと思います。私の計画では、ヨーロッパの制度とは異なり、ほとんどすべての温室効果ガスの排出が適用対象となり、また、排出権を無償で割り当てるのではなくオークションにかけるため、排出枠とその価格については市場での安定性が確保されることとなります。また、オークションの収益金は未来のクリーンエネルギー計画や動植物の生息環境の保護に向けた投資、また、一般家庭向けの税還付やその他の一時的救済金などへ振り向けます。

マケイン氏も独自のキャップ・アンド・トレード制度によるビジョンを提唱



しているが、目標が異なっている。同氏の計画では、2050 年までに排出量を 1990 年レベルの 60 % 減にすることを目標としている。また、当初は排出枠をオークションにかけるのではなく、無償で割り当てることにしている。さらに同氏は、さまざまな期間、排出枠を「取り置き」や「借り」の状態にできるようにし、さらには不況期に排出枠を放出することができるよう、国立の「戦略的二酸化炭素貯蔵機関」を設立することになっている。同氏はまた、国内外の関係者間での相殺を無制限に認めて、新設されるキャップ・アンド・トレード制度へ徐々に移行させる計画である。

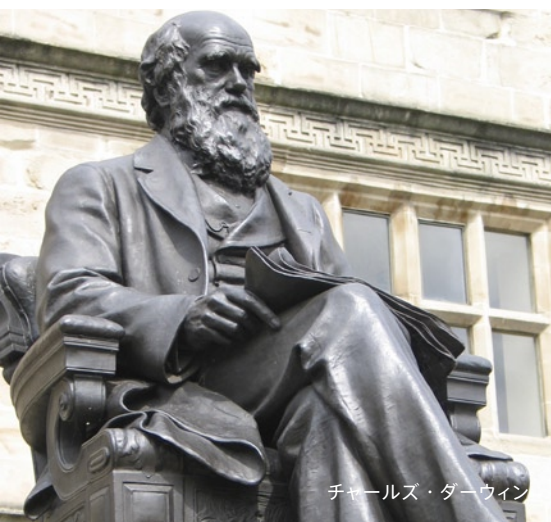
6. 国内の原油備蓄の放出に関するあなたの立場は、国内の二酸化炭素排出量の削減と気候変動との闘いという目標と一致しないように思われます。両者のバランスをどのようにとっていきますか？

オバマ氏: 米国の石油埋蔵量は世界の 3 % であり、エネルギー安全保障のためにそれを掘り尽くすことはできません。しかし、米国の石油およびガス生産は国内経済にとって重要な役割を果たしており、世界のエネルギー価格がこれ以上高騰するのを防ぐためにも極めて重要であることに変わりありません。現行の開発禁止地区を開放せずに、国内で

の石油とガスの増産を可能にする主要な手段はいくつかあります。

私の提案どおりに国内の石油およびガス生産を増やしても、現代における大きな課題の 1 つである気候変動との闘いに対する私のコミットメントは揺るぎません。私は、市場ベースのキャップ・アンド・トレード制度を実施して、2050 年までに二酸化炭素排出量を 1990 年レベルから 80 % 削減し、また、強力な年間削減目標を立てて、二酸化炭素排出量の削減に直ちに取りかかります。そして、2020 年までに二酸化炭素排出量を 1990 年のレベルに削減することを中間目標とします。

マケイン氏は、現在、オバマ氏よりも積極的な海洋掘削政策を支持している。両候補とも、民主党優位の議会と同じように、石油価格の高騰とその対策を求める世論の圧力を受けるなかで、海洋掘削に反対する姿勢を方針転換させてきた。しかしマケイン氏は、気候変動を国家安全保障問題の 1 つととらえ、自らにとって優先順位の高い課題だと考えている。そして同氏は、最小コストで二酸化炭素排出量を削減する技術を開発して、国内経済に対する打撃を和らげたいと強調する。また、同氏も 2020 年までに 1990 年レベルまで削減することを二酸化炭素排出量削減の中期目標としている。



チャールズ・ダーウィン

7. 自然選択による進化で、地球上の生物の多様性と複雑性を十分に説明できると考えていますか？ インテリジェント・デザインやそこから派生する理論を公立学校の科学の授業で教えるべきでしょうか？

オバマ氏：私は進化論が正しいと考えており、その科学的妥当性が実証されているという科学界の強いコンセンサスを支持しています。実験的精査のなされていないインテリジェント・デザインといった非科学的な理論によって科学的議論を不透明なものにすることは、我が国の学生のためにならないと考えます。

マケイン氏は昨年、共和党予備選挙の討論会で、「私は進化論が正しいと思います。しかし、グランドキャニオンを歩いて、その夕暮れの姿を見たときには、この世には神の手も働いていると思いました」と発言した。また、2005年には *Arizona Daily Star* 紙に対し、人類の起源を勉強する学生に対しては「すべての考え方」を学べるようにすべきだと思う、と語っている。しかし翌年には、コロラド州の新聞が、そのような考え方は科学の授業で教えるべきではない、という同氏の発言を報道した。

8. ブッシュ大統領が行った、2001年8月9日以降に樹立されたヒト胚性幹細胞株の研究に対する連邦助成金の支出禁止措置を解除しますか？ どのような条件下であれば、ヒト胚性幹細胞株の作製を認めますか？

オバマ氏：幹細胞研究は、少なくとも3つの方法で、私たちの生活を改善することが期待されています。第1に、損傷した細胞を正常な細胞に置き換えて、糖尿病、パーキンソン病、脊髄損傷、心不全やその他の病気を治療すること。第2に、科学者に対し、新薬開発研究に使用できる、安全で便利な疾患モデルを提供すること。第3に、正常な発生と細胞の機能不全の基礎的側面の解明に役立つことです。

私は、こうした理由から、幹細胞研究の拡大を強く支持します。私は、ブッシュ大統領がヒト胚性幹細胞研究に対する助成を制限したことで、国内の科学者の手を縛り、我が国がほかの国々と競争する力を損なってしまったと考えます。大統領に当選した暁には、現政権が大統領命令によって2001年8月9日以降に作製されたヒト胚性幹細胞株の研究に対する連邦政府の助成を禁止した措置を解除します。そして、すべての幹細胞研究が必ず倫理的に行われるようにし、厳重な監視を行うこととします。

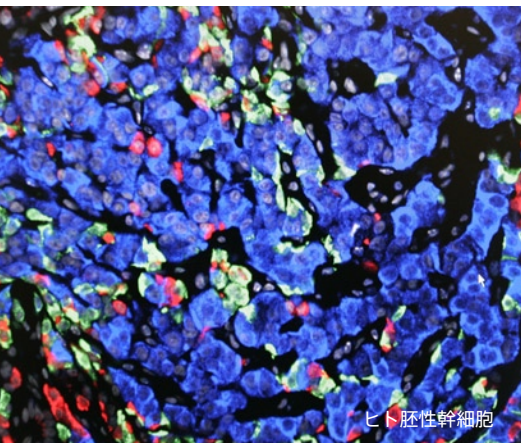
私は、一部の人が、ヒト胚から採取された細胞を必要とする研究に対する政府の助成に反対していることを認識しています。しかし、米国の体外受精専門クリニックに保管されている数十万点にのぼるヒト胚は生殖目的には用いられず、最終的には破壊される運命にあります。私は、こうした余った胚を、人命を救うための研究に利用することに関し、その目的を明示し、自由意思によって提供された場合に容認することは、倫理にかなうと考えています。

また、胚以外の材料から樹立されるさまざまなタイプのヒト幹細胞があるのだから胚性幹細胞を使う必要はない、とする考え方があることも認識していますが、この考え方には同意できません。例えば血液や骨髄から採取された成体幹細胞は、一部の病気の治療にすでに利用されていますが、胚性幹細胞のような多能性はなく、その代わりにはありません。最近の発見では、成体の皮膚細胞を再プログラミングして幹細胞のよ

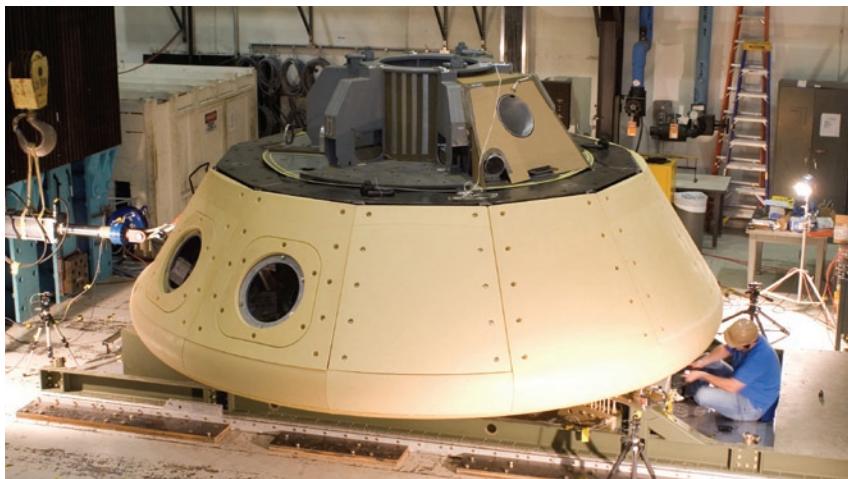
うな挙動をさせることが可能なことがわかりました。これらは画期的な知見であり、将来的には非常に多能な幹細胞を作製するための代替的な材料となる可能性があります。それでもなお、胚性幹細胞が「ゴールドスタンダード」なのであり、ここ当分の間は、すべてのタイプの幹細胞の研究を並行して続けるべきだと思います。

私としては、こうした研究に対する助成金支出を制限するのではなく、学術研究会議（NRC）の最近の報告書に従って、責任ある監視を実施することに賛同します。個人や団体からのさまざまな助成金によってヒト胚性幹細胞研究を実施している研究機関は、すでにNRC報告書の勧告に従っています。従来よりも規模を拡大させた、連邦政府が支援する幹細胞プログラムがあれば、才能ある米国の科学者がこの重要な新分野へ取り組むのを促進し、また、より効果的な監視機能も望めます。我が国が、この医学研究のエキサイティングな領域での競争力にコミットする用意があることを、他国に示すことができるのです。

マケイン氏の胚性幹細胞研究に関する姿勢については、研究者の間でかなりの憶測をよんでいる。同氏は過去に2度、ブッシュ大統領が行った助成金支出禁止措置の解除に賛成の投票をしてきた。これに対して、共和党副大統領候補のサラ・ペイリン氏は、研究自体に反対している。マケイン氏の公式な立場が最も的確にまとめられているのは、権利擁護団体であるResearch!Americaの2007年の質問書やScienceDebate2008の今年の質問書に対する同氏の次のような回答であるかもしれない。「私は、胚性幹細胞研究に対する連邦政府の助成を支持する一方で、科学の進歩のために倫理的価値観と倫理原則を犠牲にすることはしないという考え方を反映した、明確な線引きをすべきだと考えます。しかし、最近の重要な研究の進展によって、この論争自体が将来的には



ヒト胚性幹細胞



アカデミックな研究対象になるのでは、との期待もあります。また私は、羊水の研究や、胚を使用しない科学的に有望な成体幹細胞の研究など、他の研究プログラムに対する助成も支持します。私は、研究に使用する目的でヒト胚を意図的に作製することには反対であり、『胎児農場』の運営を禁じ、研究目的で作製された胚に由来する細胞や胎児組織を研究者が使用することは連邦法上の犯罪と定める法案に賛成票を投じました」。

9. 宇宙飛行士を月に送り込むことは、我が国にとって切実な目標だと思いますか？

オバマ氏：米国には、宇宙だけでなく、ここ地球上での教育、科学、技術、環境、国家安全保障の各分野での優位性の維持に役立つ、強力な宇宙計画が必要だと考えます。宇宙飛行のために開発された技術は、これまで、コンピュータから医療技術、乳児用粉ミルク、自動車に至る幅広い分野に応用されてきました。

大統領当選後は、力強くバランスのとれた民生用宇宙計画を樹立します。このビジョンを実現するうえで、私は、世界のパートナーとの共同作業を実施し、同時に民間からの人材登用によってNASAの能力を増強します。NASAの活性化は、米国の技術革新の先端性維持と、国内の経済成長への寄与という

点で役立つと考えます。

私は、米国航空宇宙会議を再結成し、民生用、軍用、産業用、国家安全保障用のそれぞれの宇宙活動を調整して、大統領に報告する任務に当たります。この会議では、NASA、国防総省、国家偵察局、商務省、運輸省、その他の連邦機関などが管理している政府の宇宙関連プログラムの全側面を取り上げて、包括的かつ統合的な戦略と政策を監督します。また、一般市民の参加を勧め、国際社会の関与を促進し、我が国の宇宙での活動範囲を広げ、地球上での生活の改善をめざすバランスのとれた国家ポートフォリオを追求しつつ、より新しい技術を求める21世紀の宇宙ビジョン達成に力を尽くします。

有人宇宙飛行は、政治、経済、技術、科学における米国のリーダーシップにとって重要です。私は、地球の低軌道を離れた有人宇宙探査の再開を後押しします。また、火星をはじめとする、より遠隔の地への宇宙飛行に関する計画的発展の前段階として、2020年までに月への有人宇宙飛行を実現する目標も支持します。

マケイン氏は、すでに詳細な宇宙計画を発表しており、宇宙探査を国家の「最優先事項」に位置づけ、有人宇宙飛行を「国家の力とプライドの反映」としている。マケイン氏は、オバマ氏とは異なり、スペースシャトル打ち上げに代わる「Constellation」プログラムへの助

成にかかわっていく姿勢を明確に示している（ただし、その実現方法の詳細には触れていない）。また、マケイン氏は、国内の宇宙インフラを関連人員を含めて維持し、国際宇宙ステーションの研究機能を最大限活用することに重点を置くとする。同氏は、航空学研究に対する投資を続けるとともに、地球監視衛星のためのインフラを維持していく考えも示している。

10. 米国の大学でPhDを取得した後、そのまま米国内に居住して、米国の研究拠点や富の蓄積に寄与する外国人留学生を増やすという構想は妥当なものだと思いますか？ どのような移民制度改革を支持しますか？

オバマ氏：私は、移民制度の総合的な改革を実施して、我が国の経済力を回復させ、非効率な連邦移民制度を原因とする地方政府の不当な負担を取り除き、我が国および国境線上の安全を確保し、一時的な罰金支払いと納税、英語学習の意思をもつ1200万人の不法移民に対して市民権獲得への道を開かなければならないと考えています。移民制度の総合的な改革における非常に重要な点は、2001年9月11日の同時多発テロ事件以後、世界の最も優秀な人材を米国から遠ざけてしまった誤った政策からの転換を図ることです。私が大統領に選出されれば、我が国の永住ビザと一時滞在ビザの法制度を改善して、世界の最も優秀な人材を米国によび寄せたいと考えています。

マケイン氏は、アリゾナ州選出の上院議員として、主に陸上の国境検問所での連邦政府の警備強化を通じて、移民問題に長く関わってきた。同氏は、大学等の卒業後に高度熟練労働者として米国内に居住し続けることを可能にする移民制度改革を支持している。 ■

報告は、米国駐在のNatureチーフ記者であるAlexandra Witzeによる。なお、その後、Natureは10月30日号のEditorial (1149ページ)で、「Natureは、米大統領選でオバマ候補を支持する」と発表した。



The race to break the standard model

「標準模型」を打倒せよ

Nature Vol.455 (156-159) / 11 September 2008

素粒子物理学の「標準模型」は、腹立たしいほどの成功を収めている。大型ハドロン衝突型加速器（LHC）は、この標準模型を打倒するきっかけとなる現象を見つけ出そうとする最新の試みであるが、唯一の試みではない。LHCがフルパワーで運転し始める前に、こうした現象を発見しようとしのぎを削るライバルたちの挑戦を Geoff Brumfiel 記者が報告する。



ILLUSTRATIONS BY J. RIORDAN

それは強力で、おそらく厄介な存在だが、いつかは倒される運命にある。物理学者たちはそれを「標準模型」とよんでいる。それは信じられないほど成功した方程式の集合体であり、1個の原子からはるか彼方の銀河まで、我々が知るすべての物質を記述し、自然界の4つの基本的な力のうちの3つ（強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用）を記述し、あらゆる実験結果を比類なき正確さで予言する。こんなにも強力であるにもかかわらず、それは完全にはほど遠い存在である。根拠が不明な定数があちこちにある。おそらく最も気がかりなのは、最後の基本的な力である重力を組み込もうとするあらゆる挑戦を退けていることである。

1970年代に標準模型が組み立てられた当初からずっと、物理学者たちはこれを超越する理論を打ち立てようと努力

してきた。標準模型を超えるためには、この完璧に近い方程式に矛盾する実験データをつかんで、標準模型を打ち碎かなければならない。そして、標準模型の破片から、より新しく、よりすぐれた理論を組み立てるのだ。このほど、スイスのジュネーブ近郊にある欧州原子核共同研究機関（CERN）で稼働し始めた大型ハドロン衝突型加速器（LHC）は、標準模型を超えるデータを手に入れるための最新の試みである。多くの研究者は、LHCが成功することはほぼ確実であるとみている。LHCが作り出す桁外れのエネルギーは、標準模型がカバーできない領域に達するはずであるからだ。マサチューセッツ工科大学（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）の理論研究者であり、標準模型の構築への貢献により2004年のノーベル物理学賞を受賞したFrank Wilczekも、「本命はLHCです」という。

しかし、標準模型の打倒をねらっているのはLHCだけではない。物理学者たちは何十年前前から、加速器を使ったり、非常にまれな現象の精密測定を行ったり、宇宙観測を行ったりして、標準模型を超える現象をとらえようと試みてきた。稼働し始めたLHCが最高エネルギーに達するまでには時間がかかり、最初の実験結果が得られるのは早くても来年夏とみられているため（コラム「動き出した巨大加速器」参照）、ライバルの実験グループの一部は、自分たちが一番乗りをするチャンスはまだあると考えている。もちろんそれは容易なことではない。標準模型はおそらく手強く、安易な攻撃では歯が立たないからである。標準模型を打ち破るためには、これまでにない高感度の実験と、多くのデータと、少なからぬ幸運が必要である。以下では、LHCの向こうを張る強者たちを簡単に紹介していこう。

テバトロン

LHCが陽子のスピードを徐々に上げている間に、その前をゆく古参の巨大粒子加速器は、標準模型を超える現象を

最初にとらえようとひたすら走り続けている。米国イリノイ州バタビアにあるフェルミ国立加速器研究所の加速器テバトロンは、2001年以来、陽子と反陽子を約1テラ電子ボルト（1兆電子ボルト）に加速してきた。

このエネルギーはLHCの最終的なエネルギーの7分の1にすぎないが、新しい物理現象の探索の成否はエネルギーだけで決まるわけではない。標準模型におさまらない新粒子が生成するような衝突はごくまれにしか起こらないため、加速器を長く運転するほど、より多くのデータが蓄積し、発見のチャンスが大きくなるからである。ゆえにテバトロンは、しばらくの間、データ量の面ではLHCに対するリードを保ち続けることになる。おそらく2009年夏までは、テバトロンが新参のライバルの数倍のデータを持っているという状況は変わらないだろう。

テバトロンのデータはすでに、標準模型を超える現象を暗示する、不確かではあるが気になる徴候を示している。標準模型からの逸脱とみられる現象の1つは、 B_s 中間子という粒子の測定で見つかった。 B_s 中間子は、ストレンジクォークと反ボトムクォークから成り、最も重い中間子の1つである。標準模型は、CP対称性という法則により、 B_s 中間子はその反粒子である反 B_s 中間子（反ストレンジクォークとボトムクォーク



クから成る)と同じように崩壊すると予言する。しかし、両者の測定は、その崩壊に違いがあることを示唆している。テバトロンの D ゼロ実験グループのスポークスマンである Dmitri Denisov は、この違いは重要な手がかりとなる可能性がある」と指摘する。これは、風変わりな性質をもつ新しい粒子の存在や、これまで知られていなかった法則の存在を示しているのかもしれない。「いずれにせよ、非常におもしろい測定結果です」と彼は話す。

テバトロンのもう 1 つの主要な実験グループである CDF 実験のスポークスマンの Robert Roser は、「テバトロンでは、ほかにも異常が見つかっています」と指摘する。彼が興味をもっているのは、トップクォークと反トップクォークの対の崩壊でみられた異常な特徴である。彼は、この現象も確実とはほど遠いものであることを認めながらも、「テバトロンが見つけたこれらの徴候の一部が、今後、重要性を認められるよう

になるかもしれません」という。「データを蓄積していけば、どれかが現実になるかもしれないのです」。

当然かもしれないが、CERN の理論研究者である John Ellis は、こうした見方には懐疑的である。「たしかにテバトロンは気になる徴候をつかんだかもしれませんが、けれども、LHC が本格的に始動する前にテバトロンが決定的な発見をする可能性はほとんどないでしょう」と彼はいう。「素粒子物理学の世界では、平均値 $\pm 5\sigma$ (σ は標準偏差) の範囲内に 99.99994267 パーセントのデータが入るレベルに達しない精度の実験でみられた現象など、発見とはよばないからです」。これだけ厳しい基準を満たすためには、テバトロンが今日まで蓄積してきたよりもはるかに大量のデータを蓄積する必要があるが、テバトロンが新参のライバルに追いつかれる前にデータ量をそこまで増やすことはできそうにない。「テバトロンは、極めて不利な状況に置かれています。

LHC が本格的に始動する前にテバトロンが成功を収めるとは思えません」と Ellis は話す。

宇宙

高エネルギー物理学者たちが加速器の制御室に集まっているとき、別のグループの物理学者たちは空を見上げている。彼らは、宇宙が協力的であるならば、標準模型を打ち砕くものが見つかるはずだと考えているのだ。

彼らは人工衛星を打ち上げて、主としてダークマター（暗黒物質）の存在を示す証拠を探している。ダークマターは、この宇宙の物質の 85 パーセントを占めている可能性のある、幽霊のような物質である。天文学者たちは今のところ、ダークマターの重力が銀河に及ぼす引力重力と、宇宙の形状への影響を通してしか、その存在を知ることができずにいる。ダークマターは、恒星や惑星や人間を構成する通常の物質を素通りしてしまうらしい。おそらく、通常の物質とはほと

動き出した巨大加速器

この記事に掲載した *Nature* が印刷に回ころ、ジュネーブ近郊の欧州原子核共同研究機関 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) は、陽子を初めて加速させる間際だった。しかし、LHC が発表できる成果をあげるまでには、やるべきことが山ほどある。これから数か月間は、オペレーターらが加速器そのものを微調整していく一方で、ほかの物理学者たちは、リングに沿って配置されている検出器を始動させていくことになる (注: LHC は 9 月 10 日に運転を開始したものの、19 日にヘリウム流出事故が起きたため、現在は運転を停止している。CERN は 9 月 23 日のプレスリリースで、運転再開

は 2009 年の春以降になる見通しとの見解を発表した)。

ビルほどの大きさの検出器を始動させるのは容易ではない。個々の検出器は、数十万個のより小さな検出器から構成されており、衝突で生まれる粒子を追跡するためにはそれらを同調させなければならない。ATLAS 実験グループのスポークスマンである Peter Jenni は、「今は、宇宙線を使って検出器を調整しているところです」と話す。しかし、実際の陽子衝突で生成する粒子をとらえることは、宇宙線をとらえるのとはまったく違った作業である。陽子ビームが衝突すると、毎秒数億の「イベント」が発生し、1 つのイベントで数十万個の

破片粒子が衝突ポイントから広がっていく。検出器はこれらの粒子のほとんどすべてを個別に追跡するように設計されているため、その結果は、実験家が扱い切れないほどのデータ量になる。幸い、大部分の衝突ではありふれた粒子しか生成しないため、実験家たちは、興味深い衝突とそうでない衝突を識別する電子的な「トリガー」を検出器に備えつけている。例えば、ある簡単なトリガーは、ミュー粒子 (もっと重い粒子の崩壊によって生成することがある粒子) ができた衝突に目印をつけるようになっている。Jenni は、「特定の興味深いイベントのデータを保存するようにそれぞれのトリガーを設計し、





んど反応しない粒子の「もや」のようなものなのだ。こうした粒子の正体は、標準模型では説明されていないということ以外は、まだよくわかっていない。

1つの候補は「超対称性理論」が予言している。この理論によれば、標準模型のあらゆる粒子は、標準模型に含まれない重い粒子をパートナーにもっている。そして、超対称性パートナーのうち最も軽いニュートラリーノという粒子

が、ダークマター候補として都合のよい性質をもつと予言されているのである。

地上の望遠鏡や宇宙望遠鏡を使ってニュートラリーノを直接見ることはできない。しかし、2個のニュートラリーノが衝突して対消滅するときには、ありふれた粒子のシャワーが生じ、人工衛星の検出器でとらえられる可能性がある。これに関してはすでに興味深い手がかりが得られており、ロシア、イタリア、ドイツ、スウェーデンが共同して2006年に打ち上げたPAMELA衛星に搭載された観測装置が、ダークマターの対消滅によって生成した可能性のある陽電子の過剰を検出したことが非公式に報告されている(*Nature* **454**, 808; 2008を参照)。PAMELAのデータを見たカリフォルニア大学ロサンゼルス校の物理学者 Graciela Gelmini は、「きれいな結果です」という。「ただし、この測定は複雑なので、注意を要します」。

また、最近打ち上げられた観測衛星も、ニュートラリーノの時ならぬ消滅を

発見できるかもしれない。米国などが6億9000万ドル(約690億円)を投じて今年6月に打ち上げたフェルミガンマ線宇宙望遠鏡は、超高エネルギーの光子を探して全天を走査することができる。ニュートラリーノが衝突して超高エネルギーのガンマ線が生成すると、この衛星に搭載された検出器が描く天球図の至るところに「もや」として現れる可能性がある。この宇宙望遠鏡のプロジェクトサイエンティストである米航空宇宙局(NASA)ゴダード宇宙飛行センター(メリーランド州グリーンベルト)のSteven Ritzは、「それが見えたら、とてつもなくすばらしいサインになります」と話す。

シカゴ大学(イリノイ州)の宇宙論研究者であるMichael Turnerは、「そのようなサインを見つけて確認することができれば、LHCに先んじて標準模型を超える現象を発見できたことになります」といい切る。けれどもRitzは、「厳密に言えば、宇宙物理学の分野で最初



大型ハドロン衝突型加速器(LHC)の2つの超伝導磁石を溶接工が初めて接続させた。

注意深く調整する必要があるのです」と話す。

ふるいにかけられて残ったデータは分析しなければならない。実験データは、数ペタバイト(1ペタ=1000兆)のデータをやりとりできる巨大な計算機ネットワークを通じて、世界各地の大学研究室に所属する数千人の物理学者のもとに送られる。CERNのもう1つの主要な実験グループであるCMSのスークスマンのJim Virdeeは、「最初のテストはうまくいきました」と話す。ATLAS実験グループとCMS実験グループは、現在、コンピューターで作った粒子データで分析の練習を繰り返している。

JenniもVirdeeも、「順調

にいけば、2009年夏にも結果が出るでしょう」と話す。ただしそのためには、LHCはフルパワーの7テラ電子ボルトで数か月間運転している必要があり、技術的な問題を解決するための時間も必要である。

LHCは、この最初の運転で新しい物理現象を見つけることができるだろうか? その可能性はある。LHCは、これまで世界最強だったフェルミ国立加速器研究所(米国イリノイ州バタビア)の加速器テバトロン(約7倍のエネルギーで粒子を衝突させる予定である。「これは大きな飛躍であり、原理的にはすぐにも新しい粒子が見つかる可能性があります」とVirdeeは話す。「フェルミ研究所の業

績を超えるのに、それほど多くのデータを調べる必要はないでしょう」。

もちろん、フェルミ研究所の物理学者たちはこの予想には懐疑的だ。同研究所のCDF実験グループのスークスマンであるRobert Roserは、「テバトロンでは、この加速器の特性を完全に把握するのに丸2年かかりました」と話す。同研究所のDゼロ実験グループのスークスマンであるDmitri Denisovは、「より高いエネルギーを使っても、新しいものを見つけるためにはかなりの数の衝突が必要で」と付け加える。「検出器の真ん中で1個の陽子を1個の陽子とぶつけただけでは十分ではないのです」。

に発見することはできても、それ以上のことはできないでしょう」と指摘する。陽電子やガンマ線などのサインは、新しい粒子のおおよその質量は教えてくれるかもしれないが、超対称性がどのように成り立っているかについては何も教えてくれないだろう。こうした理由から Ritz は、宇宙観測だけでは本質的な問題がたくさん残り、その問題は LHC でなければ解決できないだろうと考えている。

暗闇

ほかの物理学者たちは、光よりも暗闇を選んだ。彼らは、使われなくなった鉱山やトンネルの中で多数の高感度検出器を見つめて、超対称性パートナーのニュートラリーノを含むダークマターの直接的なサインを検出しようとしている (*Nature* **448**, 240; 2007 を参照)。

このような検出器は 5 種類以上に分類できるが、基本的な発想は同じである。すなわち、ダークマターに反応しそうな物質を選び、宇宙線などの邪魔者の影響を受けない地下深くに設置して、何かが起こるのを待つのである。「草が伸びるのを見守るような作業です」と Wilczek はいう。

この方法は、LHC のライバルとしては派手に欠けているものの、検出器は著しい進歩を遂げている。現在、米国ミネソタ州のスーダン鉱山の地下深くでデータを蓄積している CDMS2 実験に従事する研究者たちは、今年末までに検出器の感度を現在の 3 倍にしようとしている。また、イタリアのグランサッソ山の地下トンネルで行われている XENON100 実験は、LHC がその検出器の実験結果を分析し終える前に最初の観測結果を出せる可能性がある。XENON100 実験の研究責任者であるコロンビア大学 (米国ニューヨーク州) の Elena Aprile は、「現在、この分野は猛スピードで進んでいて、非常に激しい競争があります。並大抵のことでは勝ち残りません。本当にすごい時期なのです」と話す。

さらに、ある研究グループはすでにダークマターを検出したと主張している。今年、これもイタリアのグランサッソ国立研究所で実験を行っている DAMA/LIBRA 実験グループが、最新型の検出器によりダークマターのシグナルを検出したと発表した (*Nature* **452**, 918; 2008 を参照)。しかし、DAMA/LIBRA 実験グループの隣の地下室で実験をしている Aprile は、「彼らの発見は、ほかの研究グループを困惑させました」と話す。「彼らが発見したと主張するシグナルを、ほかのどの研究チームも確認できていないのです。それどころか、矛盾した結果さえ出ているようです。その点で、我々は明らかに一枚岩ではないのです」。

検出器は長足の進歩を遂げているようだが、アキレス腱もある。これらは、まだ見ぬダークマターが、少なくともときどきは通常の物質と相互作用しないかぎり役に立たないのである。「ところが、こうした反応が起こる保証はないのです」と Ellis は話す。「その意味で、この実験は暗闇で銃を撃つようなものであるともいえます」。

とはいえ Ellis は、彼らがこの秘教めいた探索方法で LHC よりも早く何かを見つけるチャンスはあると認めている。「ダークマター探索グループは、このレースのダークホースかもしれません」と彼は話す。



ニュートリノ

LHC に先んじようと奮闘する科学者の多くは、これから数か月間は、カフェインに頼りながら昼夜を分かたず仕事をしなければならないだろう。しかし、ニュートリノ物理学者たちは泰然と構えていることができる。彼らは、もう 10 年も前に新しい領域を切り開いているからである。

ニュートリノは、電子を含むレプトンとよばれるグループに属する、電氣的に中性の粒子である。標準模型のもとでのバージョンは、ニュートリノの質量は完全にゼロだと予言していたが、実験家たちはそうは考えなかった。太陽からやってくるニュートリノの数が理論研究者の予測よりも少ないことを、実験家たちはかなり前から知っていたからである。1 つの説明は、太陽ニュートリノの種類が変化すると考えることである。ただし、そうした変化は、ニュートリノに質量がある場合にしか起こらない。1998 年、日本の物理学者たちが岐阜県神岡鉱山の観測装置スーパーカミオカンデでニュートリノの変化をとらえて、標準模型に挑戦する最初の (そして今日でも唯一の) 確実な発見であると主張した。

残念ながら、ニュートリノの質量は、方程式に少数の簡単な修正をするだけで標準模型に組み込むことができる。「何かを追加することは比較的簡単にできるのです」と Ellis はいう。そのため、ニュートリノ物理学者たちが標準模型を超える発見をしたと主張することはできないのだが、彼らの発見は、物理学の新しいモデルを模索する理論研究者の助けにはなっていないのである。

しかし、ニュートリノの役目はまだ終わっていないのかもしれない。米国、欧州、日本の実験家たちは、現在、ニュートリノのビームを検出器に打ち込んで、ニュートリノの種類が変化する仕組みを解明しようとしている。ハーバード大学 (米国マサチューセッツ州ケンブリッジ) の理論研究者である Lisa Randall は、「ニュートリノが変化する

現象の詳細が明らかになれば、新しい理論モデルの絞り込みに役立つ可能性があります」という。

さらに、2基の新しい検出器が新たな成果を上げるかもしれない。欧州の共同研究プロジェクトとして、フランスのトゥーロン沖の地中海の海中で「ANTARES」というニュートリノ望遠鏡が稼働し始めた。一方、米国の研究チームは、南極大陸の氷の下にニュートリノ望遠鏡「IceCube」を設置している。いずれの計画も、宇宙線に含まれる高エネルギーニュートリノが水や氷に衝突する現象を検出するために、多数の検出器が並べられている。ANTARESは今年5月に完成したが、IceCubeは計70列になる予定の検出器の約半分を設置したところである。しかし、IceCubeの研究責任者であるウィスコンシン大学マディソン校のFrancis Halzenによれば、IceCubeの感度はすでにスーパーカミオカンデの5倍に達している。「私たちが何かを発見することも、ありえなくはないのです」。

その「何か」が何であるかについては議論がある。1つの可能性は、太陽のコアにとらえられたダークマター粒子が作り出したニュートリノである。しか

し、ここでもまた、「ニュートリノ実験で得られた結果は、ほぼ間違いなく、LHCによる追跡調査を必要とするでしょう」とHalzenは話す。「私は、これらの実験は互いに補い合うものだと思います。けれども、選択の機会があるならば、私は最初に発見するほうを選びます」。

勝算

では、これらのプロジェクトのどれかが標準模型を超えることはできるのだろうか？ Wilczekは懐疑的だ。「私はあまり期待していません」。過去の実績を見れば、標準模型は「連戦連勝」であるようだ。彼は、既存のパラダイムを超える可能性を本当にもっているのはLHCだけだと考えている。

そして、この巨大加速器でさえ、新しい発見ができる保証はない。「超対称性は2009年半ば以降に現れてくる可能性があります、いつまでたっても現れてこない可能性もあります」とEllisは話す。「もし現れてこなかったら、物理学者たちは『最悪のシナリオ』に直面することになります。これは恐ろしいことです。そうなったら、我々は次に何をすればよいのでしょうか？」。



しかし、Turnerの意見は異なっている。つまるところ、これらの実験とLHCは同じ敵と闘っているのだ。彼らのデータをLHCのデータと結びつけることにより、標準模型を打倒し、新しい物理学を発見することができるとTurnerは確信している。「今は大きな革命の前夜なのです」と彼は語った。■

Geoff Brumfielはロンドン駐在のNatureのシニア記者。

LHCの始動についてもっと読みたい読者は、Nature News special (<http://tinyurl.com/5usrfl>)にどうぞ。なお、LHCは9月10日に運転を開始したものの、19日にヘリウム流出事故が起きたため、現在は運転を停止しています。CERNは9月23日のプレスリリースで、運転再開は2009年の春以降になる見通しとの見解を発表しました。



現在、全世界では発電により、毎年 10 ギガトン以上の二酸化炭素を排出している。既に我々は、二酸化炭素を排出しない発電技術を手にしている。こうした発電を広く安価に利用できるようにするためには、発電規模の拡大、送電システムや送電網の開発・改良など、多くの課題がある。しかし、年々深刻化する気候変動を阻止するには、こうした課題を乗り越え、二酸化炭素を排出しない発電へシフトしなければならない。Nature のニュースチームは、最も現実的な二酸化炭素排出ゼロのエネルギー源について、さまざまな側面から検証をした。今月号では、前月号（水力、バイオマス、風力、地熱）に続き、原子力、太陽エネルギー、海洋エネルギーについて述べる。

ELECTRICITY WITHOUT CARBON

二酸化炭素排出ゼロの発電所 — PART 2

Nature Vol.454 (816-823) / 14 August 2008

原子力（核分裂発電）

1986 年 4 月 26 日に旧ソ連（現ウクライナ）のチェルノブイリ原子力発電所の 4 号炉が炉心熔融を起こして、ヨーロッパの多くの地域が放射性降下物により汚染された。この事故と、その前に起きた米国ペンシルバニア州スリーマイル島の原子力発電所事故のため、欧米の原子力産業は 1 世代にわたって停滞した。しかし、世界的にみれば、情勢はこれほど劇的には変わっていない。

2007 年には、アジアのほぼ全域で、35 基の原子力発電所が建設中だった。世界の原子力利用を監視している国際原子力機関（IAEA）の最新の数字によると、現在運転中の 439 基の原子炉の出力は合計 370 ギガワットに達しており、全世界で発電される電気の約 15% を占めているという。

💰 コスト：世界の原子力発電所の出力の大半を担っている軽水炉の発電コストは、原子炉の設計、必要とする用地および減価償却に応じて、1 キロワット時当たり 0.025 ～ 0.07 ドル（約 2.7 ～ 7.6 円）である。この技術は、政府からの助成金を受けて数十年かけて行われる費用のかかる研究、開発および買い

付けの上に成り立っている。政府からの支援がなかったら、原子力が今日のように利用されることはなかっただろう。

⚡ 発電能力：原子力発電には燃料（ウラン）が必要であるため、その埋蔵量による制約を受ける。原子力発電を採算ラインに乗せるためには、1 キログラム当たり 130 ドル（約 1 万 4000 円）のコストでウランを抽出する必要がある。IAEA と経済協力開発機構（OECD）がウラン資源を評価した『レッドブック』の最新版では、このコストで抽出可能とされているウランは約 550 万トンあるという。年間 6 万 6500 トンのウランを消費する現在のペースで行けば、これは約 80 年分の燃料に相当する。しかし、ウランの時価は 130 ドルのラインを超えている。

地質学的にはウラン鉱床によく似ているが、現時点ではまだ立証されていない鉱床の大きさ（いわゆる「未発見埋蔵量」）は、確定埋蔵量の約 2 倍はあると考えられており、これよりも等級の低い鉱石ははるかに多く存在していると考えられている。ウランはとりたてて珍しい元素ではなく、地殻中に亜鉛と同程度の割合で存在している。最終的に

回収可能なウラン資源の見積もりには大きなばらつきがあるものの、3500 万トンはあると考えられている。また、核燃料になりうる天然放射性元素はウランだけではない。まだ開発はされていないが、トリウムを燃料とする原子炉も可能である。トリウムを利用できるようになれば、燃料の埋蔵量は 2 倍になる。

さらに、現在の原子炉の設計では燃料を一度しか利用することができないが、この点を変えることもできる。原子力発電に利用できない種類のウラン同位体からプルトニウムを作り出す増殖炉は、使用するウランよりも多くのプルトニウム燃料を効率よく作り出すことができる。このような原子炉に基づいて構築されるシステムは、投入した 1 キログラムの天然ウランから 60 倍ものエネルギーを生み出せるとされているが、現実にはこれほどではないかもしれない。

増殖炉は、まだ商業ベースでは実証されていないものの、理論的には、全世界で必要とされる電力のすべてを原子力発電でまかなうこともできる。増殖炉を実現することができなくても、原子力発電所の発電能力を 2 ～ 3 倍に高めて、1 世紀以上にわたり、同じレベルで運転できる可能性も高い。

夢の発電技術

核融合発電が可能になれば、地球上の電力需要のすべてをまかなうことができる。核融合発電に必要なのは、水素の2種類の同位体（重水素と三重水素）と、これらを利用するための技術だけである。核融合炉からは低レベルの放射性廃棄物が出るが、核分裂発電に比べれば微々たる量である。問題は技術であり、2040年よりも早く、商業炉が実現する可能性は低い。

もう1つの夢は、宇宙太陽光発電である。軌道上の太陽電池パネルなら常時太陽光を浴びることができ、作られた電力は、マイクロ波のビームの形で地球に送ればよい。けれどもそのためには、重さ数千トンの太陽電池を、格安のコストで宇宙に運ぶ必要がある。残念ながら、現在の宇宙旅行の料金は非常に高い。

長所：原子力発電は、燃料コストが比較的安く、ほとんど休むことなくフル稼働することができる。米国の原子力発電所は、定格出力の90%で稼働している。そのため、送電線網に常時ベースロードの電力（点検時以外、24時間一定の出力で供給される電力）を提供するのに適している。また、ウランは地球上の広い範囲に分布しており、世界の核燃料供給が政治的要因によって脅かされる心配はない。

短所：原子力発電所から出る核廃棄物の処理については50年前から問題になっているが、いまだに合意は得られていない。これは、技術的というよりは政治的に困難な問題であり、長期的な解決策がないまま原子力発電を普及させようとするのは、どう考えても無理がある。さらに大きな問題は、原子力発電の普及が核兵器の拡散と切り離せないことである。リサイクルを含む核燃料サイクルでは、必然的にプルトニウムが生成されるため、特に不安視されている。仮に核兵器の拡散への懸念がないとしても、原子力発電所は、テロリストや敵対勢力の格好の標的となりうる（この懸念は、水力発電所にも当てはまる）。

また、原子力の利用を長期的に大幅に増やしていくためには、既存の技術のみならず、トリウムや増殖炉などの新

しい技術についても、市民の理解を得る必要がある。これらの技術は、投資家や監督機関も味方につけていかなければならない。

原子力発電は、極めて資本集約的な発電方法である。原子力発電所の耐用年数に対する発電コストが比較的低いのは、原子炉の耐用年数が長いからにすぎない。原子力は、短期的には高くつく発電方法なのである。もう1つの制約は、熟練労働者が不足する可能性である。原子力発電所を建設し、運転するためには、高度な技術をもつ専門家が大量必要となる。こうした専門家を増やして、新しい原子力発電所を稼働させるペースを2倍にするのは、極めてむずかしいだろう。また、重要な部品を製造する工場の生産能力も高めていかなければならない。

これらの問題を考慮すると、原子力発電の未来の予測にはばらつきが出る。欧州委員会の『2050年の世界エネルギー技術展望』では、原子力発電に市民の理解が得られるようになり、新しい原子炉技術が開発されれば、2050年には約1.7テラワットの電力を供給できるようになるという強気のシナリオが展開されている。IAEAの分析者は、もっと慎重だ。IAEAの計画および経済研究部門の長である Hans-Holger Roger は、2050年の発電能



力は1200ギガワット程度にしかならないだろうと予測している。マサチューセッツ工科大学が2003年に実施した学際的な研究では、発電能力を2050年までに現在の3倍である1000ギガワットに増やすための具体的なシナリオが作成された。このシナリオは、米国がリーダーシップをとり、日本が努力を続け、ヨーロッパが研究開発を再開することを前提としている。また、今日の原子炉とはまったく異なる設計や劇的な改良は期待せず、今日の技術の延長線上で議論をしている。

総合評価：今後数十年のうちにテラワットレベルの出力を実現することは、技術的には可能であるが、政治的にむずかしい可能性がある。原子力を受け入れようとする風潮は、チェルノブイリのような事故やテロ攻撃が1回起こるだけで揺らいでしまうおそれがある。

太陽エネルギー

光合成の奇跡をおとしめるつもりはさらさらないが、植物は、理想的な条件下でさえ、その表面で受け止める太陽光のわずか1%程度しか、誰にでも利用できるエネルギーに変換することができない。これに対して、市販の標準的な太陽電池パネルは、太陽光のエネルギーの12~18%を人間が利用できる

ARTWORK BY J. TAYLOR

電気へと変換することができる。高級モデルの効率は20%台に達している。この5年間に太陽電池の製造能力が向上し、コストが低下したことで、この業界は急成長した。2002年に全世界で出荷された太陽電池は550メガワット分であったが、2007年にはその6倍になった。設置された太陽電池の発電能力は、9ギガワット前後になると見積もられている。しかし、発電できるのは日中だけであり、曇りの日もあるため、実際の発電量はこれよりもかなり少ない。現在、太陽光発電の設備利用率は約14%であり、あらゆる種類の再生可能エネルギー源の中で最低である。

太陽光を電気に変換する技術は太陽電池だけではない。集光型太陽熱発電システムでは、鏡を使って太陽光を集め、典型的にはその熱で液体を加熱してタービン^{とい}を回す。集光の方法には、鏡を樋のように並べるトラフ式、太陽の動きを追跡するパラボラ型の鏡を用いるディッシュ式、中央部のタワーに太陽光を集中させるタワー式などがある。現時点では、設備容量は極めて小さい。将来的にも、この技術は晴天の日が多い地域でしか利用できないだろう。太陽電池は拡散した光でも発電できるが、集光型太陽熱発電システムは太陽光が直接照射することを必要とするからである。

💰 コスト：現在の太陽電池の製造コストは1ワット当たり1.50～2.50ドル(約160～270円)であり、その価格は1ワット当たり2.50～3.50ドル(約270～380円)と幅がある。設置コストは別料金である。全システムの価格は、通常、太陽電池の価格の約2倍である。その結果、太陽電池の耐用年数内の1キロワット時当たりの発電コストは、場所によって異なるものの、0.25～0.40ドル(約27～43円)程度になる。しかし太陽電池の製造コストは低下してきており、独立型の太陽電池パネルに代わって、住宅用建材に組み込まれた太陽電池が普及するようになれば、設置コストも低下するだろう。現在の技術があれば、数年以内に1ワット当たり1ドル(約108円)未満のコストで製造できるようになるはずである(*Nature* 2008年8月14日号558ページ参照)。

米国再生可能エネルギー研究所(NREL、米国コロラド州ゴールデン)の見積もりによれば、集光型太陽熱発電システムの1キロワット時当たりの発電コストは約0.17ドル(18円)である。

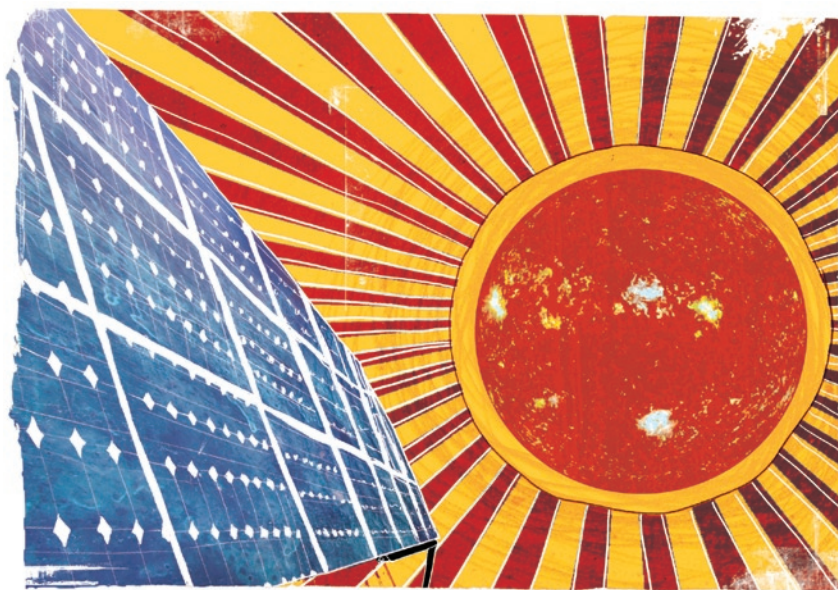
📈 発電能力：地球の表面には、約10万テラワットの太陽エネルギーが降り注いでいる。これは、1時間で全人類の1年分のエネルギー需要を満たせる

量である。今日の太陽電池でも、サハラ砂漠、中央アジアのゴビ砂漠、チリのアタカマ砂漠、米国のグレートベースンなどに7～8キロメートル四方にわたって設置すれば、1ギガワットの電力を作り出すことができる。理論的には、サハラ砂漠の10分の1程度を確保できれば、全世界の基本的なエネルギー需要をまかなえるはずである。

太陽光発電の推進派は、太陽光発電に利用できる住宅や商業施設の屋根のすべてに太陽電池パネルを設置すれば、米国が2004年に使用したのと同じ量の電力を供給できるというNRELの計算を引き合いに出している。ただし、日射量がもっと少ない国では、太陽光発電にはあまり期待できない。英国では、緯度を考慮した傾斜をつけた南向きの太陽電池パネルを設置すれば、1平方メートル当たり約1000キロワット時に相当する日射が期待できるが、その効率を10%として英国の現在の電力消費量を考えると、1人当たり60平方メートル以上の太陽電池パネルが必要であると計算される。

👍 長所：太陽エネルギーは無料で、広い範囲に分布し、事実上無制限に供給されており、発電に伴って廃棄物が出ることもない。太陽光発電技術は人々に受け入れられており、ほとんどの地域で支持されている。原子力、風力、水力発電に比べて地政学的問題が少なく、環境や美観を損なうおそれも小さい。とはいえ、砂漠に巨大な発電所を建設したら、抗議の声が上がるかもしれない。

現在、太陽電池は、住宅ごとや事業所ごとにばらばらに設置されることが多い。こうした条件下での太陽光発電のコストは、ほかの方法での発電コストではなく電力小売価格と競争しなければならぬため、太陽光発電技術を大幅に進歩させた。太陽光発電は、送電網外で独立に行う発電に適しており、ゆえに、インフラが整備されていない地域に適している。

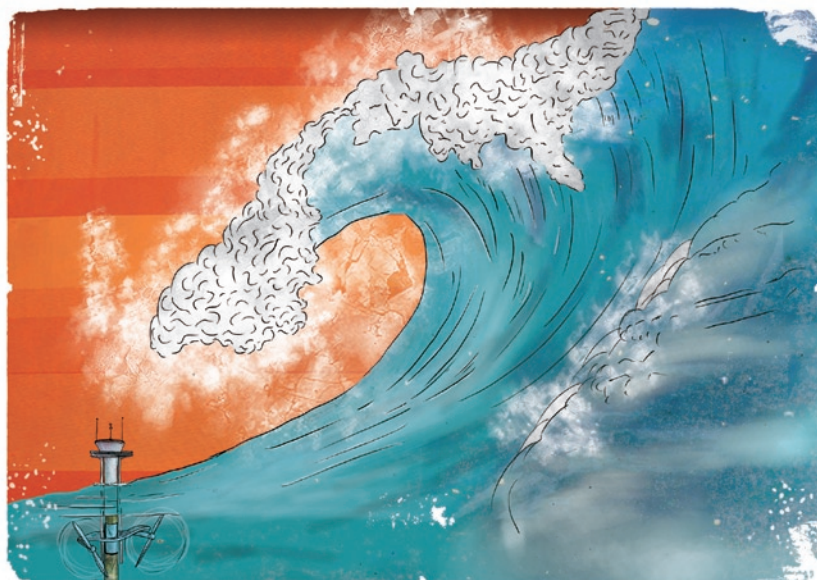


太陽電池にも集光型太陽熱発電システムにも、まだ改良の余地はある。10年か20年後に新しい技術が開発されて太陽電池の1ワット当たりのコストが10分の1になり、二酸化炭素を排出しない発電方法としては想像もできないような水準に達する可能性さえある。

短所：太陽光発電の最大の敵は「暗闇」である。太陽電池は夜間には発電することができず、曇りがちの場所や、厚い雲がかかりやすい場所では、発電量は日中でも予測がつかない変動を示す。一部の集光型太陽熱発電システムでは、日中に集めた熱を蓄えて夜間に使用することにより、こうした短所を克服している（蓄熱媒体には融解塩などがある）。大規模な施設には、太陽電池よりも集光型太陽熱発電システムのほうが適しているとされているが、その理由の1つはこの点にある。もう1つの方法は分散型蓄電であり、電気自動車やハイブリッドカーのバッテリーなどに利用できる（Nature 2008年8月14日号810ページ参照）。

また、大規模な太陽光発電所の多くは砂漠に建設されることになるため、発電された電力をどのように分配するかが問題となる。ドイツ航空宇宙センターが2006年に行った研究では、2050年までにヨーロッパは、中東と北アフリカの全域に建設された太陽光発電所と太陽熱発電所から100ギガワットの電力を輸入することになるだろうと提示されている。ただし、そのためには新しい直流高電圧送電システムを整備する必要があることも強調されている。

一部の進んだ太陽電池は希少金属を使用しているため、コストが上昇し、供給が制限される心配もある。しかしながら、こうした金属が本当に希少なのかどうかは不明であり、需要が高まれば、現在は経済的理由から採掘されていない鉱山も採算が合うようになるかもしれないし、さらには、別の物質で代用できるようになる可能性もある。



総合評価：太陽エネルギー資源の量と今後の技術開発の可能性を考えると、中長期的には、二酸化炭素を排出しない発電方法の中で最も有望であると評価しないわけにはいかないだろう。しかし、蓄電技術を大幅に強化しないかぎり、問題を完全に解決することはできない。

海洋エネルギー

海は、人間が利用できる2種類の運動エネルギーを与えてくれる。それは、潮力と波力である。現時点では、どちらもそれほど大きな電力を作り出していないが、その推進派たちは、海洋エネルギーを利用する計画を次から次へと提案している。確かに地球上には、潮力が強力な資源になるような地理学的特徴を備えた場所がある。いくつかの場所では、河口堰を作って貯水池に水をためて発電する方式が適している。こうした貯水池は水力発電所のダムに似ていなくもないが、流れ込んでくる雨水が徐々にたまっていくのではなく、月と太陽の引力により定期的に海水が補充されるという点で異なっている。今日、世界各地で潮力発電所の建設が検討されている。代表的なものは、英国のイングランドとウェールズの間を流れるセヴァーン川河口に潮力発電所を建設し

ようとする計画であり、推進派によると、8ギガワットもの電力を提供できるはずであるという。しかし、現時点で世界最大の潮力発電所は、40年以上も昔にフランス・ブルターニュ地方のランス川河口に建設された、定格出力240メガワットのランス潮力発電所である。

干満差ではなく潮流を利用した発電に適している土地もある。これは、空中の風車のように水流の中でタービンを回すシステムである。この夏、北アイルランドのストラングフォード湖に設置された出力1.2メガワットのタービンは、これまでで最大のものである。

一方、波力を利用する技術の大半はまだテスト段階にとどまっており、それぞれの企業が一連のデザインを検証している。これらは、波の上でヘビのように身をくねらせる装置や、水をかぶりながら上下に動く装置、海岸に横たえられた装置の上を、波が規則的に乗り越えていき、水が引く際にタービンを回す仕組みになっている。研究の中心地となっている欧州海洋エネルギーセンターは、英国のオークニー諸島沖に試験場をもっており、企業はそこで自社の試作機を海を送電網に接続し、打ち寄せる波に試作機がどれだけ耐えられるかを検証することができる。英国エンジンバラのPelamis Wave Power社は、ここ

でのテストを終えて、既にポルトガル沖に3台の発電装置を設置した。将来的には、この3台で合計2.25メガワットの電力を作り出すことになる。

コスト：河口堰の建設コストは場所ごとにかなり違いがあるものの、だいたい水力発電所の建設コストと同程度である。セヴァーン川河口の潮力発電所の資本コストは150億ポンド以上と見積もられており、1メガワット当たり約400万ドル（約4億3000万円）という計算になる。二酸化炭素を排出しないエネルギーへの投資を促進する英国の政府系企業、カーボントラストが2006年に

発表した報告書によれば、潮流発電のコストが1キロワット時当たり0.20～0.40ドル（約22～43円）、波力発電のコストは0.90ドル（約97円）近くになるという。これらのコストを大幅に下げるためには発電量の規模を大きくする必要があるが、どちらの技術も、それが可能になる気配はまったくない。

発電能力：地球の質量と、月と太陽の重力場との相互作用からは、約3テラワットの潮力エネルギーが発生すると見積もられているが、天体エネルギー源にしては、これはかなり小さい数字である（しかし、海水の混ぜ合わせに

主要な役割を果たすには、これで十分である。Nature 2007年5月31日号522ページ参照）。このうち、おそらく1テラワットは容易に利用できる深さにあるものの、現実に利用できるのはさらにその一部だけだと考えられている。ブルターニュ沖で潮力発電所の開発に従事しているフランスの電力会社EDFによれば、フランス沖の潮力エネルギーはヨーロッパ全体で利用できる潮力エネルギーの80%を占めているが、それでも1ギガワット強にしかならないという。

一方、波力エネルギーは100テラワット以上になると推定されている。欧州海洋エネルギー協会は、全世界で利

二酸化炭素の回収と貯留

化石燃料の利用をやめるわけにはいかないのなら、その利用に伴って発生するCO₂を空气中に排出しないようにするという手もある。二酸化炭素回収・貯留（CCS）技術は、排ガスからCO₂を除去して、それを地下に貯留する技術である。この技術を用いれば、発電所から排出される二酸化炭素の量を80～90%も削減できるはずであるが、寿命要因を考慮に入れると、最終的には67%まで低下する。CCS技術の導入に伴う追加コストの見積もりは、技術と場所によって大きなばらつきがあるものの、1キロワット時当たりの発電コストは0.01～0.05ドル（約1.1～5.4円）高くなるとされている。CO₂の価格が1トン当たり50ドル（約5400円）程度になるなら、石炭火力発電所にこの技術を導入しても、ほかの技術と競争することができる。

CCS技術の導入に伴う追加コストは、新しい発電所に投

資される資本や、二酸化炭素を除去するためのエネルギーコストによる効率の低下に起因している。従来式の石炭火力発電所なら、その効率の低下は40%にもなりうる。資本コストの高い新式の石炭ガス化複合（IGCC）発電所では、気化の過程で、より扱いやすいCO₂流を発生させる。CCS技術はIGCC発電所の効率を20%近く低下させるが、もとの効率が高いので、さほど問題にはならない。現時点では、IGCC発電所は極めて少ない。しかし、炭素税導入の可能性や石炭価格の高騰を考えると、市場が向かうべき道は明らかだろう。

おそらく、初期に導入されるCCS技術は、もっぱら廃油田に高圧のCO₂を注入するものになるだろうが（この技術は既に、老朽化した油田に残っている原油の回収率を高めるために利用されている）、最終的には、CO₂貯留容量が格段に大きい、塩分を含ん

だ帯水層に注入することになるだろう。帯水層は地球上に均一には分布していないものの、全世界には2000～1万1000ギガトンのCO₂を貯留できるだけの帯水層があると見積もられている。メリーランド大学カレッジパーク校（米国メリーランド州）の研究者たちが率いる世界エネルギー技術戦略プログラムでは、CCS技術導入の候補となる全世界の8100か所の大規模な発電所は、毎年約15ギガトンのCO₂を排出していると見積もっている。ゆえに、帯水層は現在の排出レベルのCO₂を数世紀にわたって貯留だけでなく、よりクリーンなベースロード技術が実現するまでの間、石炭を使い続けることを可能にするといえる。

これは巨大プロジェクトであり、産業界によるCCS技術の実現可能性の検討はようやく始まったばかりである。もっと積極的にCCS技術を推進していかないと、10年後、あ



るいは20年後になっても、この技術が普及している可能性は極めて低い。最大の問題は規模である。マサチューセッツ工科大学の2007年の研究によると、米国の石炭火力発電所から排出されるCO₂の60%を回収することは、石油産業が動かしている2000万バレルの石油に相当する量のCO₂を毎日処理することを意味する。そのためのインフラを整備するのは不可能ではないが、10年や20年でというのは無理な注文である。

用可能な波力エネルギー資源は1～10テラワットに上るが、現在の技術ではかなり少ない量しか回収できないとみている。MRS Bulletin 2008年4月号で発表された分析によると、効率40%の波力発電装置で技術的に約500ギガワットの発電が可能とされているエネルギー密度は1メートル当たり30キロワットであるが、世界の海岸線のうち、これだけのエネルギー密度の波がある場所は約2%しかないという。そのため、今後、どんなに開発に力を入れても、波力発電の発電能力は現在の水力発電には遠く及ばないと考えられる。

👉 **長所**：潮の干満は正確に予測することができる。一部の場所では、河口堰を利用して大規模に潮力発電を行い、国内電力需要のかなりの部分をまかなえる可能性がある。河口堰では、ある

程度の貯水も可能である。また、波力は一定ではないものの、風力よりは当てになる。

👉 **短所**：利用できる海洋エネルギー資源の量は、各国の地理学的特徴によって大幅に異なる。すべての国に海岸線があるわけではないし、すべての海岸線で大きな干満差や潮流がみられるわけでもすばらしく大きな波が打ち寄せるわけでもないからである。高い波が生じるのは、オーストラリアの西海岸、南アフリカ、北米の西海岸および西ヨーロッパの海岸である。また、海上の厳しい条件にさらされながら何十年も稼働できるタービンを製造するのはむずかしい。河口堰は、典型的には潮間帯の湿地を浸水させるなど、環境に影響を及ぼす。長く美しい海岸線の側面に波力発電装置を設置することは、人々に受け入れら

れないかもしれない。さらに、潮力エネルギーも波力エネルギーも、本質的に送電網の末端にあるため、これを送電網に乗せるという手間もかかる。サーファーチも反対している。

👁 **総合評価**：地球規模では、たいした貢献をすることはできない。 ■

報告および執筆は、Quirin Schiermeier, Jeff Tollefson, Tony Scully, Alexandra Witzke および Oliver Morton による。なお、本文中の円換算レートは、PART1 に合わせて1ドル=108円としている。

1. Key World Energy Statistics 2007 (International Energy Agency, 2007).
2. Hohmeyer, O. & Trittin, T. (eds) Proc. IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources 20-25 January 2008, Lubeck, Germany (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008).
3. Smil, V. Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems (MIT Press, 2008).
4. Metz, B., Davidson, O., Bosch, P., Dave, R. & Meyer, L. (eds) Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change (Cambridge Univ. Press, 2007).

SNAPSHOT

Long-lost antcestor

アリえない形態の祖先

Nature Vol.455 (275) / 18 September 2008

この淡黄色の目のない奇怪な生物は、生物学者 E. O. Wilson をして「火星からきたアリ」といわしめた。ブラジルのアマゾン川流域に生息する *Martialis heureka* は、アリの進化の初期にその系統樹から分岐した新しい亜科の創始者である。

その発見者であり、テキサス大学(米国テキサス州オースティン) 統合生物学部の大学院生である Christian Rabeling は、「このアリは、祖先の形態学的特徴の一部を保持する残存種である可能性があります」と話す。

アリはスズメバチから進化してきたため、現存する祖先種はどれもス



ズメバチに似ており、1960年代に Wilson らが発見した白亜紀のアリの化石と同様の形態をしていると長らく信じられてきた。そのため、これらとは似ても似つかない形態をした *Martialis* は、昆虫学者らに衝撃を与えた。遺伝分析の結果も、これがアリの既知の分類に当てはまらないことを裏づけていた (C. Rabeling et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA doi:10.1073/pnas.0806187105; 2008)。このアリは、長く精巧な口器をもってい

る。おそらく、柔らかい無脊椎動物をムシャムシャと食べているのだろう。また、そのたくましい前足と比較すると、後ろの2対の足は細く弱々しい(写真の標本では、ほかの3本の足はDNA分析のために切り取られている)。アリの専門家であり、カリフォルニア科学アカデミー(サンフランシスコ)の昆虫担当の学芸員である Brian Fisher は、「歩くことさえできないように見えます」という。 ■

Amber Dance

A sheet-metal geodynamo

地球科学

シート状の対流が作る地球ダイナモ

Ulrich R. Christensen

地球のコアをコンピュータ上でモデル化しようとする取り組みが始まってから 10 年になる。研究者たちは、地球磁場が生成する仕組みはわかっていると思っていたが、より現実に近いシミュレーションが可能になった今、その自信をぐらつかせる結果が報告されている。

Nature Vol.454 (1058-1059) / 28 August 2008

地球磁場は、惑星の中に巨大な棒磁石が入っているような形で表現されることが多い。実際にこの磁場を作り出しているのは、ダイナモ（発電機）過程で発生する強い電流である。電流は、外核とよばれる地球のコアの外側部分で液体鉄が流れることにより生じてくる。この液体鉄は、地球の自転軸に平行に並んだ長い円柱の中を、らせんを描きながら流れているとされている。従来のコンピュータ・シミュレーションでは、計算を単純化するために多くの仮定がなされていたにもかかわらず、地球のコアのこうした流れと磁場の特性の両方を非常によく再現することができていた。Nature 2008 年 8 月 28 日号 1106 ページでは、陰山聡ら¹が、地球のコアをより忠実にモデル化できるシミュレーションについて報告している。このモデルでは、液体鉄の流れは円柱状ではなく薄いシート状になるとされ、地球ダイナモの仕組みに関する今日の理解に疑問を投げかけている。

自転車のライトに電力を供給するような単純なダイナモでは、磁場の中をワイヤが動くことによって、ワイヤ中に電流を発生させている。自動車や発電所で使われているような高性能ダイナモの磁場は、外部から加えられるのではなく、ダイナモ自体の電流によって作り出されている。こうしたダイナモで発電できるのは、コイル状に巻かれたワイヤが電流を誘導するからである。しかし、地球のコアは構造化されていない鉄の球であり、その外側の部分は流体である。これが単純に回転するだけでは、磁場を生じさせることはできないだろう。この液体金属は、高性能ダイナモのコイルに似た複雑な経路に従って運動しているはずである。

流体の外核における物質の流れは、対流によって

生じる。対流は主として、固体の内核から上昇してくる熱と軽い元素（ケイ素やイオウなど）の流れによって駆動されている。この対流は、地球の自転による力の影響を強く受ける。北半球の低気圧を反時計回りに、南半球の低気圧を時計回りに回転させるコリオリの力は、こうした力の一例である。対流が弱ければ、この流れは南北方向に並んだ円柱状となり、流体粒子はこの中を、らせん軌道を描きながら動いていく（図 1）。この状況下で双極子（棒磁石のような）構造をもつ磁場が発生することは、理論研究により示されている²。地球ダイナモについての過去のコンピュータ・シミュレーションでは、回転する球体中での流体の流れと磁場の誘導についての方程式を解き、こうした円柱の存在と、磁場の発生におけるその役割を裏づけることができた^{3,4}。シミュレーションでは、地球のコアの上部から出た磁力線が主として「ロープ」とよばれる形になり、北緯 60°と南緯 60°付近の同じ子午線上に対を成して現れることも示された。ロープの位置は、個々の対流の円柱がコアの外側の境界に触れるところであると考えられている⁵。

地球ダイナモのすべてのコンピュータ・モデルには、コアの実際の状態をシミュレーションすることができないという欠点がある。このようなシミュレーションには、今日のコンピュータよりもはるかに強力なコンピュータが必要になるからである。例えば、現在のコンピュータの解像度では流れの中の小規模な渦を表現することができないため、こうした渦を生じさせないようにするために、液体コアの粘性率を非現実的なほど大きくしなければならぬのである。この粘性率はエクマン数（粘性摩擦力のコリオリの力に対する

比)によって表すのが便利である。地球のコアのエクマン数は小さく、 10^{-15} 程度であるが、従来の地球ダイナモのシミュレーションではエクマン数を 10^{-6} までしか下げられず、ほとんどの場合は、より大きな値が使われていた。陰山ら¹は、日本の地球シミュレータの 4096 個のプロセッサを使い、 10^{-7} に近いエクマン数で、活発に対流するダイナモモデルを走らせた。

まだ 8 桁の隔たりがあることを考えると、これは小さな前進にすぎないように思われるかもしれない。けれども、高エクマン数でのシミュレーションが、より現実的な条件でのシミュレーションと定性的に同じ結果を生じうのかどうか、あるいは、エクマン数を下げることで大きな違いが生じるのかどうかを明らかにするためには、こうした努力が重要なのである。これまで低エクマン数では、渦の円柱が細くなり、数が増える予想されていた。けれども陰山らは¹、流れの幅が薄くなり、キノコの軸から広がる傘のひだのように、地球の自転軸から放射状に広がる薄いシート状になるという結果を得た。同様のパターンは、実験室の対流実験でも観測されている⁶。地球のコアの流れが円柱状ではなく長いシート状になっているなら、コアの上部から出ている磁束のロープについての解釈を考えなおさなければならない。

陰山らのシミュレーション¹は、薄くなった流れのパターンが、まだ効率的なダイナモとして機能することを示唆している。地球ダイナモのシミュレーションを可視化する従来の方法では、得られた磁力線をマッピングしていた。複雑なダイナモでは、これはしばしばボウルに入ったスパゲッティのようになってしまい、解釈するのは困難である。陰山らは今回、電流の流れをマッピングすることにより、よりわかりやすい画像を作り出した。この画像からは、電気工学で用いられるコイルに似た構造が多数生じていることが明らかになった。しかし、このモデルが作り出す磁場は、地球が作り出しているような双極子磁場ではなかった。

極端に単純化された変数から成る地球ダイナモのモデルが地球の磁場をよく再現し、条件をより現実近づけると食い違いが生じてくるというのは、なんとも気分が悪いことである。この食い違いについて提案されている説明は、今日のコンピュータの限界に近いところでシミュレーションを行うことに伴う問題を際立たせる。このシミュレーションを走らせるには何か月もの時間を要したが、それでもモデル化された 2000 年という時間をカバーできたにすぎない。地球のコアの流れが突然停止したとしたら、双極子磁場が減衰するまでに 2 万年はかかるだろう。同じ

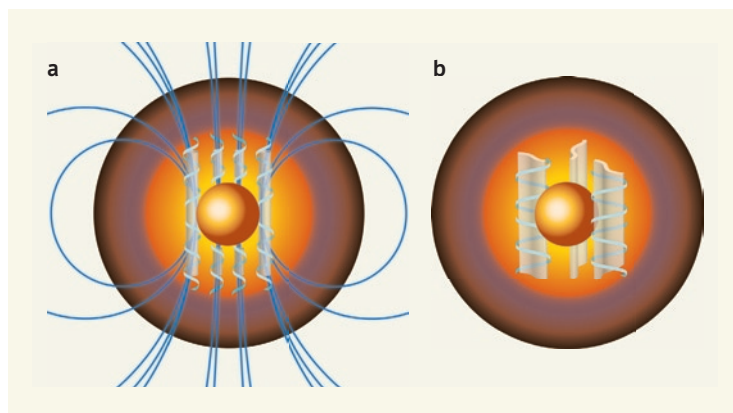


図 1 2 種類の地球ダイナモ。地球の磁場は流体の外核で発生する。a, 従来は、外核の液体鉄は南北方向に並んだ円柱状の経路の中を、らせんを描いて循環し、これにより発生する電流が双極子磁場を作り出すと考えられていた。コアの上部の地球磁場にみられる強い磁気ロープは、磁力線が高気圧性渦（高気圧領域の周囲の空気と同じ向きに回転する渦）へと集中することにより説明できると考えられていた。b, 陰山ら¹のコンピュータ・シミュレーションは、コア中の流れのパターンが薄いシート状になっていることを示唆して、従来の概念に疑問を投げかけた。シート状の流れは効率よく磁場を発生させることができるが、これがどのようにして地球の双極子磁場につながっていくのかは、まだわかっていない。

磁場をゼロから作り出すためには、これと同程度の時間が必要になるだろう。この過程を再現しようと思ったら、コンピュータを数か月どころか数年間も走らせる必要がある。その上、地球ダイナモのモデルにおいて非現実的な値を設定しなければならない変数はエクマン数だけではない。例えば、磁気プラントル数（粘性率と電気抵抗の比）はシミュレーションでは 1 と設定されているが、実際のコアでは約 10^{-6} である。

実際のコアの条件を使って地球ダイナモをモデル化するのは、当分の間は不可能だろう。地球のような磁場をもつモデルを作成するための秘訣は、「適当な割合で間違っている」変数を用いることにあるのかもしれない。そうだとすると、変数を現実の値に近づけていく過程で、変数どうしの関係の中のどれを維持していくかが問題になる。陰山ら¹は、従来のシミュレーションでは近づけなかった領域に分け入った。次のステップは、さらに過酷なものになるだろう。それは、この新しい領域を偵察し、変数空間を通り抜けて理解にたどり着くための正しい道筋を見極めることである。 ■

Ulrich R. Christensen、マックス・プランク太陽系研究所（独）

1. Kageyama, A., Miyagoshi, T. & Sato, T. *Nature* **454**, 1106-1109 (2008).
2. Busse, F. H. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* **42**, 437-459 (1975).
3. Kageyama, A. & Sato, T. *Phys. Rev. E* **55**, 4617-4626 (1997).
4. Olson, P., Christensen, U. & Glatzmaier, G. A. *J. Geophys. Res.* **104**, 10383-10404 (1999).
5. Gubbins, D. & Bloxham, J. *Nature* **325**, 509-511 (1985).
6. Sumita, I. & Olson, P. *Phys. Earth Planet. Inter.* **117**, 153-170 (2000).

日本の米、起源は中国ではなく東南アジアにあった！

井澤 毅

日本人の主食として欠かせない米。私たちはふっくらと丸みを帯び、モチモチした食感のジャポニカ米を好むが、その起源は約 1 万年前の中国の長江流域にあるとされてきた。ところが今回、(独) 農業生物資源研究所の井澤毅主任研究員らのグループが、ある遺伝子の解析を行うことで、ジャポニカ米の起源が中国ではなく、実は東南アジアにあったことを示唆する結果を *Nature Genetics* 8 月号に発表した。

米の太さを左右する遺伝子に着目

Nature Digest — 稲作の起源と拡散について、これまでの定説を教えてください。

井澤 — 米は、さまざまな国で主食とされている重要な穀物です。約 1 万年前に、自生した野生イネを栽培化したのが稲作の始まりだとされています。米は大きく「インディカ米」と「ジャポニカ米」に分けられ、インディカ米は細くてパサパサしたものが多く、ジャポニカ米は丸みを帯びていてモチモチした食感が特長です。コシヒカリなど、日本でなじみの米は後者のジャポニカ米です。最新のゲノム研究によると、これらの 2 種は 20 万年前にはすでに分かれていたようです。日本には、ジャポニカ米が約 3000 年前にもたらされたと考えられています。

ND — ジャポニカ米の起源はどこにあるのでしょうか？

井澤 — これまでは、考古学的な検討により、中国の長江流域が起源だと考えるのが定説でした。というのは、長江中流域の約 1 万年前の遺跡から、丸みを帯びた短粒の籾が大量に発掘されたという報告があるほか、考古学的な推定によって、約 7000 年前の長江下流域で水稻が栽培化されていたことがわかっていたからです。ところが今回、私たちは、*qSW5* という遺伝子の発見と一連の解析によって、この定説

を修正する必要があることを示す結果を得ました。ジャポニカ米の起源は中国ではなく、インドネシアやフィリピンを中心とする東南アジアである可能性が出てきたのです。

ND — どのような解析をされたのですか？

井澤 — 農業生物資源研究所では、かなり前から、米の太さ（幅）を左右する遺伝子に着目し、その遺伝子のありかと機能を突き止めようと努力してきました。まず、幅の広いジャポニカ米の「日本晴」と幅の狭いインディカ米の「カサラス」を交配させて子世代 (F1) を作り、さらに F1 どうしを交配させて孫世代 (F2) を作ったところ、F2 には幅の狭い米から広い米までいろいろできました (図 1)。このことは、幅を左右する遺伝子が 1 つではなく、本命から脇役まで、複数存在することを示唆していました。そこで次に、特殊な解析 (QTL 解析) によって、幅を左右する遺伝子が染色体のどのあたりに存在するのかを特定したところ、全部で 4 つの遺伝子候補を見つけることができました。

ここまでわかったところで、私は約 6 年前に研究を引き継ぐことになりました。当時は、本命の遺伝子変異が「5 番染色体の中心より少し上の、数千塩基対中にある」というところまではわかっていたのですが、遺伝子の両端を特定できていませんでした。そこで「カサラス由来の遺伝子候補領域のどこからどこまでを日本晴に導入すると、米の幅が狭くなるのか」を調べてみることにしました。それぞれ 10 キロ塩基対ほどの、少しずつずれた 4 領域を日本晴のゲノムに入れて米を実らせたのです。その結果、4 領域のうちの 1 つを導入したときにだけ細い米ができることがわかり、原因遺伝子の範囲を特定することに成功しました¹。

ND — そこにはどんな遺伝子があったのですか？

井澤 — 機能解析によって 11.2 キロ塩基対の大きさの遺伝子を正確に特定し、*qSW5* 遺伝子と名づけました¹。既知の遺伝子の中に似た配列のものがあるかどうかをデータベース等で検索したのですが、該当するものはなく、まったく新規の遺伝子であることが判明しました。そこで、さまざまな部位の組織切片で *qSW5* の発現の有無を調べようとしたのですが、これもうまくいかず、感度のよい方法を使うことで *qSW5* が「成長している穂」で発現していることを突き止めることができました。ただし、どういうタイミングで、穂のどの細胞に発現するのかまでは特定できず、この遺伝

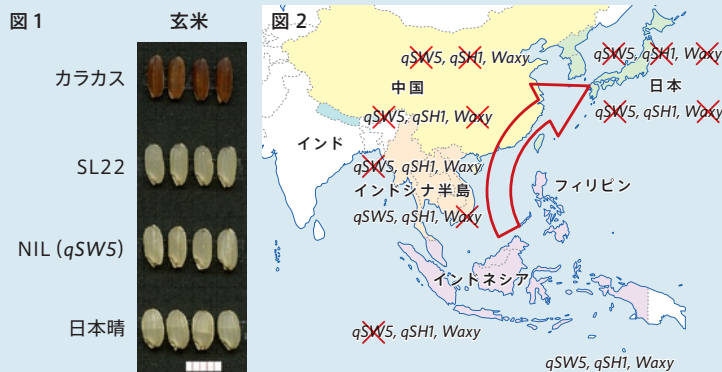


図 1 は、*qSW5* 遺伝子機能の有無と米の幅。インディカ米のカサラス、SL22 系統、NIL 系統では、*qSW5* が機能しており、米の幅が狭いのに対して、ジャポニカ米の日本晴では *qSW5* の機能が失われているため、幅が広い。図 2 は、遺伝子変異の有無からみえてくる、イネ栽培化の流れを示す。アジア各地の在来種について、*qSW5*、*qSH1*、*Waxy* の 3 つの遺伝子の変異の有無を表した (変異した遺伝子は×で示す)。インドネシア周辺を起源とするジャポニカ米が、1 つずつ遺伝子の機能を失いながらインドシナ半島、中国、日本へと広がり、最終的に 3 つとも変異した栽培種ができていったようすがわかる。



井澤 毅 (いざわ・たけし) / (独) 農業生物資源研究所基盤研究領域植物ゲノム研究ユニット主任研究員。理学博士。1964年、富山県生まれ。1986年、東京大学理学部物理学科卒。1988年、同大学院理学系研究科修士課程修了。1988～1994年、(株)植物工学研究所研究員。1990～1992年、ロックフェラー大学客員研究員。1994～2001年、奈良先端科学技術大学院大学助手。2001年10月より、(独) 農業生物資源研究所主任研究員。2005年4月より同チーム長を経て、2006年4月より現職。

1988年に(株)植物工学研究所に入社し、イネの形質転換系の確立の仕事に従事。留学中の植物bZIP転写因子の研究にて、1994年に博士号を取得。帰国後、トウモロコシのトランスポゾンイネを導入し、遺伝子単離のタギング系を作製。奈良先端科学技術大学院大学にて、短日植物イネの光周性花芽形成の研究を開始。これが現在のメインテーマとなる。現職に異動後、矢野昌裕博士との共同研究でイネの自然変異の研究に従事し、脱粒性やコメサイズといった栽培化形質に関するDNA変異を利用したイネ栽培化研究を進めている。また、最近になって、比較ゲノムデータベース開発などバイオインフォマティクス研究も始めている。

子がどんなタンパク質を作り、それがどのように働くのかについても明らかにできませんでした。

ND — どのようにして苦しい状況を打破したのでしょうか？

井澤 — この研究と並行して、私たちは「脱粒性」の遺伝子についての解析も行ってきました。脱粒性とは、実が植物体から脱落してしまう性質のことです。野生のイネは脱粒性があるために、米が熟さないうちにこぼれ落ちてしまいますが、栽培種は熟しても脱落しない「非脱粒性」を獲得しています。私たちは*qSH1*という遺伝子を特定し、この遺伝子が働くと脱粒性を、働かないと非脱粒性を発揮することを突き止めていました²。また、少し古い仕事になりますが、*Waxy*というデンプンを作る酵素の遺伝子の解析もしており、この遺伝子が働くと米がパサパサになり、弱く働くとモチモチになることと、その原因のDNA変異も明らかにしていました³。ジャポニカ米は*qSH1*と*Waxy*の機能をともに失っており、栽培化の過程で、これらの遺伝子の変異体が選択的に使われてきたことがうかがえます。ある日、私は、*qSW5*もまた、栽培化の過程で機能を失ってきたのではないかと思いつきました。実は、*qSW5*の変異はコメの収量を増やすことがわかっており、それを実験的に示すこともできていたので、古代人が収量を多く得るために、この変異を好んで利用した可能性があると思ったのです。総括すると、私は、これらの3つの遺伝子がいずれも、変異することによって「ジャポニカ米らしさ」を作り出す遺伝子だと思い至りました。そして、さまざまな古い品種（在来種）において、これらの変異がどのような順番で入っていったのかを推測すれば、*qSW5*に関する新たな知見が得られるのではないかと考えるようになりました。

インドネシア、フィリピンからインドシナ半島、中国経由で日本へ

ND — 結果はどうだったのでしょうか？

井澤 — ジャポニカ米110種、インディカ米30種、中間種2種の、合わせて142種の在来種を対象に、3つの遺伝子が非変異型（野生型）か変異型かを調べ、さらにこれまでに得られている遺伝子マーカーを使って、その在来種のゲノムが日本晴に近いのか、カサラスに近いのかを調べてみました¹。すると、3つの遺伝子がすべて野生型であるにもかかわらず、ゲノムの構造は明らかに日本晴に近いジャポニカ米の在来種が10種見つかりました。これらの多くはインドネシアやフィリピンの在来種で、米の幅は狭くパサパサしているのですが、

ゲノムの構造はまぎれもなくジャポニカ米のものでした。また、インドネシアとインドシナ半島には3遺伝子のうち*qSW5*だけが変異した在来種が、インドシナ半島だけに*Waxy*だけが変異した在来種がありました。一方、*qSW5*と*Waxy*がともに変異した在来種が、インドシナ半島、中国、日本などに広く分布していました。加えて*qSH1*にも変異が入った在来種が中国産のものから見つかり、中国と日本には3つの遺伝子すべてに変異が入った在来種が多くあることがわかりました。

ND — ジャポニカ米の起源と拡散についての結論は？

井澤 — 一連の結果から、インドネシアやフィリピンで見つかった3遺伝子とも野生型の在来種こそがジャポニカ米の起源に近いものであると結論づけました。これらの在来種の祖先の中から、*qSW5*だけが変異して米の幅が広がったイネと、*Waxy*だけが変異してモチモチの米になったイネが独立して現れ、それらが選択的に栽培に用いられるとともに、インドネシアやインドシナ半島へと広まっていったのでしょう。その過程で、両者のイネは交配され、両遺伝子とも変異した種、つまり米の幅が広く、かつモチモチしたイネが誕生し、それが中国や日本にももたらされたのだと思います。中国では、さらに*qSH1*に変異の入ったイネが使われ、それが栽培化されることで、私たちが食べている「熟すまで実が落ちず、幅が広く、たくさん収穫でき、モチモチした米」が誕生したのだと考えられます。こうして、ジャポニカ米の原産は、中国の長江流域ではなく東南アジアで、そこから中国に広まったことが強く示唆されたのです（図2）。

ND — 今後の目標や課題はなんでしょう？

井澤 — 例えば、インディカ米に*qSW5*を導入して、収量を最大2割増やすことができるのではないかと考えています。世界的にはインディカ米の生産量のほうが多いので、食糧問題の解決に貢献できるかもしれません。研究としては、現在、*qSW5*、*qSH1*などの野生型遺伝子を導入することで、原種に近いイネを作り出そうとしています。雑草化したイネになると予想されますが、栽培化過程においてトレードオフで失った優良形質がみえてくるのではないかと期待しています。

ND — ありがとうございます。

聞き手は西村尚子（サイエンスライター）。

1. Shomura, A. et al. *Nature Genetics* **40**, 1023-1028 (2008)
2. Konishi, S. et al. *Science* **312**, 1392-1396 (2006)
3. Isshiki, M. et al. *Plant J.* **15**, 133-138 (1998)

もぞもぞ、のっそりと歩く小さな生物クマムシ。その姿からは想像できないほど高いサバイバル能力をもち、これまでもメディアを通じて、過酷な環境に耐えるようすが紹介されてきました。今回は、クマムシが宇宙空間にさらされても耐え抜いたというニュースを読んでみましょう。

NEWS nature news

語数: 496 words 分野: 環境生態学

Published online 8 September 2008 | *Nature* | doi:10.1038/news.2008.1087

Spacesuits optional for 'water bears'

Tiny invertebrates are the first animals to withstand the vacuum and radiation of space.

<http://www.nature.com/news/2008/080908/full/news.2008.1087.html>

Heidi Ledford



Milnesium tardigradum

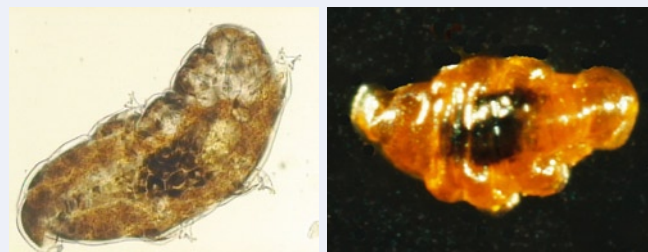
1. **It's one small step for water bears, one giant leap for animal-kind.** Tiny animals called tardigrades — better known as water bears — have become the first animals to survive the cruel vacuum, intense cold and radiation of space without a spacesuit.
2. Water bears were already known to be among the toughest **critters** alive. When not flying **in a low Earth orbit**, they prefer to spend their days in water, perhaps on a beach or **a dewy patch of moss**. But when the water dries up, the millimetre-long 'bears' can **contract into a dried-out state** and survive like that for years. They are also one of the few animals that survive year-round on continental Antarctica, and are among the most radiation-resistant animals known.
3. **So if any animal on Earth could survive the rigours of space**, Ingemar Jönsson, of Kristianstad University in Sweden, and her colleagues **figured it would be the water bears**. They loaded two species of tardigrade — *Richtersius coronifer* and *Milnesium tardigradum*, both already **in their desiccated form** — onto the European Space Agency's Biopan-6 experimental platform. The experiment was launched into orbit during the unmanned Russian Foton-M3 mission in September 2007.
4. For ten days, the tardigrades were exposed to the radiation, vacuum and low temperature of space. *R. coronifer* did not **fare** terribly **well** — none survived when exposed to the full spectrum of **ultraviolet radiation**, which can be extremely damaging to DNA. But three specimens of *M. tardigradum* did.
5. And when some wavelengths of ultraviolet light **were filtered out** (those shorter than 280 nanometres or longer than 400 nanometres), eggs laid by **space-faring** *Milnesium tardigradum* hatched just as well as controls that had not been exposed to space vacuum or ultraviolet radiation. The results are published this week by *Current Biology*¹.
6. The results demonstrate just how resilient life on Earth can be, says Catharine Conley, NASA's acting Planetary Protection Officer. Before now, only **lichens** and bacteria had demonstrated their ability to survive both space vacuum and **cosmic radiation**.
7. And although tardigrades were clearly resistant to **desiccation** on Earth, the conditions in space are much more challenging. At sea level on Earth, air pressure is about 100,000 pascals; in low Earth orbit, it is more than a billion times lower. "Such low pressure imposes an extreme **dehydration** on cells," says Jönsson. "Not many water molecules can remain in the body under those conditions."
8. Some researchers want to understand how various Earth organisms might survive **interplanetary flight**, as a way of **gauging** whether life could have spread from one planet to another. As Planetary Protection Officer, Conley's mission is to understand **which organisms might hitch-hike a ride on a spacecraft and contaminate other planets**.
9. But she isn't too worried about the likelihood that tardigrades might catch a ride to Mars and **set up shop**. "Tardigrades, unfortunately, need stuff to eat," says Conley. "If you had to pick a single type of organism that would be likely to colonize Mars, it'd be a lichen, or maybe a **photosynthesizing bacteria**."

References

1. Jönsson, K. I. *et al. Curr. Biol.* **18**, R1–R3 (2008).

Topics water bears (クマムシ) とは?

クマムシは、緩歩動物 (tardigrade) 門 (tardigrada) に属する、クマに似た形態の、体長 1 ミリメートル以下の小動物類。750 種以上が報告されている。4 つの節からなる胴部にずんぐりした 4 対の短い足をもち、ゆっくり歩く。体の表面をクチクラで被われ、口・胃・腸からなる消化器系をもつが、循環器、呼吸器はない。口には錐状の歯針があって、動植物の体液を吸う。脱皮によって成長し、老廃物も脱皮の際に捨てられる。熱帯から極地方、高山、温泉、海中まで、地球上のあらゆる場所に広く生息しているが、水中やコケの中など湿った環境を好む。クマムシは、ゆっくりと乾燥させると、樽状に収縮し、代謝を止めて、乾眠 (anhydrobiosis) とよばれるクリプトビオシスの状態の一種である休眠状態になる。クリプトビオシス状態では、乾燥、高温 (~151℃)、低温 (-273℃)、高圧 (~6000 気圧、7 万 5000 気圧でも耐えるという報告もある)、真空、有機溶媒 (エーテル、無水アルコールなど)、高放射線 (人の致死量の 1000 倍) などの極限環境に耐え



Richtersius coronifer。通常の水和状態 (左) と乾眠状態 (右)。

られる。実証はされていないが、ある博物館で、120 年保存していたコケに水を与えたところ、クマムシが活動を始めたという話もある。ここで取り上げられている *Richtersius coronifer* (チョウメイムシの一種) と *Milnesium tardigradum* (オニクマムシ) は、同じ真クマムシ綱に属している。

Science key words

リード **invertebrates:** 無脊椎動物

2. **in a low Earth orbit:** 低周回軌道

地球を周回する衛星の軌道のうち、高度が 250 ~ 500 キロメートルくらいのものをいう。一般に天体観測衛星や地球観測衛星、宇宙ステーションは低周回軌道を回っている。

4. **ultraviolet:** 紫外線

軟 X 線と可視光線の間にある波長 10 ~ 400 ナノメートルくらいの電磁波。波長によって、UV-A (315 ~ 400 ナノメートル)、UV-B (280 ~ 315 ナノメートル)、UV-C (220 ~ 280 ナノメートル)、真空紫外線 (280 ナノメートル未満) に分けられる。このうち、真空紫外線や UV-C はオゾン層よりも上層の大気で吸収され、地表にはほとんど届かない。紫外線の全波長は、光化学反応を生じさせるため、殺菌作用、ビタミン D 合成、DNA 損傷などの生物学的作用を引き起こす。特に波長が短いものほど、生物への影響が大きい。

6. **lichen(s):** 地衣類

地衣類とは菌類 (カビやキノコ、酵母など) と藻類 (酸素発生型光合成をする微生物や海藻類) の共生体。外見がコケに似ているが、地衣類は菌類の仲間であって、植物ではない。地面、岩やコンクリー

トの上、樹皮など、安定したものの上ならどこでも生える。世界に広く分布しているが、大気汚染に弱いので、都市部からは姿を消しつつある。乾燥、低温、高温に強く、極地や高山、種類によっては砂漠ですら生息可能である。

6. **cosmic radiation:** 宇宙線放射

宇宙線 (cosmic rays) とは、宇宙空間で検出される高エネルギー放射線のこと。宇宙線のほとんどは銀河系内が起源と考えられ、超新星の爆発エネルギーがその加速に使用されたとする説が有力である。宇宙線が伝播する際には、星間ガスなどとの衝突により、銀河系内元素組成としてはほとんど存在しない Li、Be、B などを生じると考えられるため、宇宙線の元素比や同位元素の存在比を測定することで、地球に到達するまでの通過物質量を推測できる。有名なスーパーカミオカンデは、宇宙線中のニュートリノの検出器である。

9. **photosynthesizing bacteria:** 光合成細菌

(phototrophic bacteria)

光のエネルギーを利用して、有機化合物の合成を行う細菌。緑色植物などとは異なり、嫌気的条件下で光が照射されたときに合成を行い、その過程で酸素を発生しない。田んぼ・沼・河川・海などに分布。特に湛水状態で有機物が豊富なところを好む。

Words and phrases

リード **withstand:** 「耐える」

1. **It's one small step for water bears, one giant leap for animal-kind.:** ここでは、"That's one small step for [a] man, one giant leap for mankind." (ひとりの人間にとっては小さな一歩だが、人類にとっては大きな飛躍だ) というアポロ 11 号のニール・アームストロング船長の有名な言葉にかけている。

2. **critter(s):** 「生き物」「動物」

16 ~ 17 世紀の creature の発音がつづりに反映した単語。

2. **a dewy patch of moss:** 「露にぬれた一帯のコケ」

2. **contract into a dried-out state:** 「体が縮んで乾燥状態になる」

contract は「縮む」「収縮する」という意味の自動詞。

3. **So if any ~, ... it would be the water bears.:** 起こる可能性が低いことを仮定するための仮定法過去の構文で、「もし~であれば、~だろう」という意味。

3. **in their desiccated form:** 「乾燥状態の」

7. の **desiccation** は名詞形で、環境的要因や人為的要因で一地域の水分が永久的に減少、消失することを意味している。また、7. の **dehydration** も「脱水」という意味。

4. **fare ~ well:** 「(事が) うまく運ぶ」「順調に進む」

ここは、did not fare terribly well なので、「相当にうまく運ばなかった」という意味。5. の **space-faring** の fare は、「旅する」「行く」という意味。

見出し **resilient:** 「回復力に富む」「立ち直りが早い」

8. **interplanetary flight:** 「惑星間飛行」

8. **gauging [gauge]:** 「評価する」

8. **which organisms might hitch-hike a ride on a spacecraft and contaminate other planets:**

「宇宙船をヒッチハイクして、ほかの惑星を汚染した可能性のある生物はどれか」

9. **set up shop:** 「店を開く」とか「商売を始める」ことだが、ここではユーモアを込めて、比喩的に用いられている。

Published online 8 September 2008 | Nature | doi:10.1038/news.2008.1087

クマムシは宇宙服を着なくても大丈夫

クマムシという微小な無脊椎動物が、動物として初めて宇宙空間の真空と放射線に耐え抜いた。

<http://www.nature.com/news/2008/080908/full/news.2008.1087.html>

ハイジ・レッドフォード



クマムシが搭載された科学実験衛星 Foton-M3。

- これはクマムシには小さな一歩だが、動物にとっては大きな飛躍である。緩歩動物（クマムシという名のほうがよく知られている）という微小な動物が、動物として初めて、宇宙服なしで宇宙空間の過酷な真空と極寒と放射線に耐えたのである。
- クマムシが現存する動物の中で最も丈夫なものの部類に入ることは、以前から知られていた。クマムシは、地球の低周回軌道上を飛行していないときには、水中や、海岸や、露にぬれたコケの中で暮らすことを好む。しかし、この体長 1 ミリメートルの「クマ」は、環境が乾燥してくると、体が収縮して乾燥状態になり、その状態で何年も生き延びるのである。クマムシは、南極大陸で一年中生存できる数少ない動物の 1 つでもあり、放射線に対する抵抗力が最も強い動物の 1 つとしても知られている。
- クリスチャンスタード大学（スウェーデン）の Ingemar Jönsson の研究チームが、「過酷な宇宙環境で生き残れる地球上の動物がいるとすれば、それはクマムシだろう」と考えたのは、そのような理由からだった。彼らは、既に乾燥状態になっている 2 種の緩歩動物 *Richtersius coronifer* と *Milnesium tardigradum* を、欧州宇宙機関 (ESA) の「Biopan-6」実験プラットフォームに搭載した。Biopan-6 は、ロシアの無人実験衛星「Foton-M3」のミッションの 1 つとして、2007 年 9 月に地球周回軌道に打ち上げられた。
- 2 種の緩歩動物は、10 日間にわたって、宇宙空間の放射線と真空と低温にさらされた。*R. coronifer* の成績は、かんばしくなく、DNA を激しく損傷しうる全波長の紫外線放射にさらされた場合の生存率はゼロだった。これに対して、*M. tardigradum* は 3 匹が生き残った。
- フィルターをかけて、一部の波長（280 ナノメートル未満と 400 ナノメートル超）の紫外光を除去した実験では、宇宙飛行中の *M. tardigradum* が産んだ卵は、宇宙空間の真空や紫外線放射にさらされない対照群の卵と同じように孵化した。今回の研究結果は、今週 *Current Biology* に掲載される¹。

回復力に富んだ生物

- 米航空宇宙局 (NASA) の惑星保護官代理の Catharine Conley は、今回の結果は、地球上の生物に備わった回復力の高さを実証していると指摘する。これまでは、宇宙空間の真空と宇宙線に耐えられる能力が実証された生物は、地衣類と細菌しかいなかった。
- 緩歩動物が地球上での乾燥に耐えられることは明白だったが、宇宙での条件は、これよりも格段に厳しい。地球の海面での大気圧は約 10 万パスカルだが、地球の低軌道での気圧は、その 10 億分の 1 以下である。「気圧がここまで低くなると、細胞は極度の脱水状態になります。こうした条件下で体内にとどまっていられる水分子の数は、そう多くはありません」と Jönsson はいう。
- 一部の研究者は、生物が 1 つの惑星から別の惑星へと広がった可能性を評価する方法の 1 つとして、地球上のさまざまな生物が惑星間飛行に耐える仕組みを解明しようとしている。地球から打ち上げられる宇宙船に便乗してほかの惑星を汚染する可能性のある生物を見つけ出すことは、惑星保護官としての Conley の使命である。
- しかし Conley は、宇宙船に便乗して火星にたどり着いた緩歩動物が、そこに棲み着いてしまう可能性については、さほど心配していない。「残念ながら、緩歩動物には食料が必要なのです。火星に移住できる可能性のある生物を 1 種類選ぶとすれば、それは地衣類か、もしかすると光合成細菌になるでしょう」と Conley は話している。

2008年11月8日(土)、NPG ネイチャー アジア・パシフィック主催による第2回サイエンスカフェ
「Nature Cafe 科学の夕べ」を開催いたします。

第1回「Climate Change」に引き続き、第2回も環境問題を取り上げます。地球温暖化と非常に関係深い
「水問題」を日本と世界を比較しながら、カジュアルな雰囲気の中、参加者の方と一緒にパネルディスカッション
を行います。ぜひ奮って、お申込みください。

第2回 Nature Café

「グローバルな水循環と世界の水資源 ～ 科学と技術と社会 ～」

2008年11月8日(土) 14:00～16:30

ブリティッシュ・カウンシル(東京都新宿区)

参加費無料

パネリスト

- ・沖 大幹氏/東京大学 生産技術研究所 人間社会系部門 教授
 - ・佐藤 年緒氏/科学・環境ジャーナリスト、科学技術振興機構
『Science Window』編集長
 - ・マイケル・ホワイト氏/Nature エディター(気象科学)
- ※ 同時通訳がつきます。

Nature Cafe 詳細と参加お申込みについて

www.naturejpn.com/naturecafe02

スポンサー

協力:

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

「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)

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

Highlights 論文ハイライト

Editorial 社説

News 科学ニュース

News Feature 科学ニュース読み物
興味あるテーマを親しみやすく解説

News & Views 科学論説

オリジナル編集記事

Japan News Feature
日本の科学ニュース

Japanese Author
日本人科学者へのインタビュー記事

High School Scientist
スーパーサイエンスハイスクールへの取材記事

英語でNature
Natureに掲載の記事から生きた英語を学ぶ



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