

nature DIGEST

日本語編集版

OCTOBER 2007

VOL. 04, NO. 10

10

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

暗黒世界へ ようこそ



nature asia-pacific

Established 1987 as Nature Japan K.K.

私は、世界最高水準「科学技術創造立国」実現のサポーター

産学「官」イノベーションに貢献を

www.science-japan.com

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



WWW.
研究職派遣
.com



WWW.
オンライン校閲
.com



WWW.
広報制作
.com



WWW.
会議運営
.com



WWW.
研究秘書派遣
.com



WWW.
校閲依頼
.com



WWW.
布地ポスター
.com



WWW.
展示会ブース
.com



WWW.
研究補助依頼
.com



WWW.
翻訳依頼
.com



WWW.
研究機関
ホームページ
.com



WWW.
研究職紹介
.com



WWW.
通訳依頼
.com



WWW.
研究印刷物
.com



WWW.
通訳通訳仕事
.com



WWW.
科学イベント
.com



WWW.
英語司会
.com



研究開発サポート企業のネットワーク

国際会議運営

株式会社 アイキューブつくば
www.icube-t.com

海外招聘

ヨビックス
YOBIX
www.yobix.co.jp

映像メディア

映像館
EIZOHKAN INC.
www.eizohkan.co.jp

プレゼン制作

株式会社 アサヒ・シーアンドアイ
http://asahi-ci.kir.jp

テーブル起こし

ADDRESS
アドレス
www.adrs.co.jp



06



17

安友康博



24

nature DIGEST

10

volume 4 no.10
October
www.nature.com/naturedigest

© 2007 年 NPG Nature Asia-Pacific
掲載記事の無断転載を禁じます。

NEWS FEATURE

暗黒世界へようこそ

表紙 : NASA / M. MARKEVITCH ET AL. / D. CLOWE ET AL

HIGHLIGHTS

02 vol.448 no.7156, 7157, vol.449 no.7158, 7159

EDITORIAL

05 技術革新と科学研究の二者択一?

NEWS FEATURE

暗黒世界へようこそ

06 ダークマター粒子発見に迫る

Jenny Hogan

12 行き詰まるダークエネルギー研究

Geoff Brumfiel

NEWS@NATURE

16 マウスは温室効果ガスを嗅ぎつける

JAPAN NEWS FEATURE

17 理科好き高校生たちの熱い夏

— 平成19年度スーパーサイエンスハイスクール生徒研究発表会より
西村尚子

NEWS & VIEWS

22 肺がんの原因となる融合遺伝子

Matthew Meyerson

NATURE REPORT

24 日米に研究室をもつ幹細胞研究のエキスパート

Monya Baker

英語で NATURE

26 Grape genome unpicked

ブドウのゲノムが解読された

発行人:ディビッド・スウィンバンク
副発行人:中村康一
編集:北原逸美、中野美香、田中明美
デザイン/制作:村上武、中村創
広告:米山ケイト
マーケティング:吉原聖豪

2007年10月4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

北極は氷に覆われていなかった**No need for an icy north**

最近まで北半球氷床の成立は1100万年前から500万年前の間に始まったと考えられてきたが、全球の氷床量の推定値が4160万年前に南極の許容量を超過することなどの矛盾する証拠があるため、この説には疑問が投げかけられている。Edgarたちは、その時期に両半球に大きな氷床が存在していたという仮説を、赤道大西洋で得られた海底堆積物の記録を用いて検証した。彼らが求めた氷床量の推定値は、容易に南極におさまるものであり、北半球には大きな氷床が存在していなかったことを示している。この発見は、南極と北極では大陸と海洋の分布状況が異なっているために、北半球よりも南半球のほうが先に大陸氷河作用の閾値を超えたことを示唆する気候モデルシミュレーションを支持している。

23 August 2007 Vol.448 / Issue 7156

Letter p.908 参照

クロール・ミランコヴィッチ理論を検証する**Astronomical climate change**

気候変化に関するクロール・ミランコヴィッチ理論では、氷期・間氷期のサイクルは夏の北半球高緯度域が受ける日射量の変化によって駆動される、つまり、サイクルは地球の軌道要素の変化によって起こると考えられている。川村賢二たちは、この仮説を検証するために、夏期の局地的な日射量変化の代理指標データである、氷に閉じ込められた空気中の窒素分子と酸素分子の存在比を使って、南極の氷床コアの新たな年代情報を構築した。その結果、過去36万年間にわたって軌道要素変動の時間スケールでの南極大陸の気候変化は北半球の日射量変化よりも遅れていたことと、過去4回の氷期から間氷期への遷移期における南極大陸の温度上昇は北半球の夏期の日射量が増大する時期に起こったことが示された。したがって、これらの知見は、クロール・ミランコヴィッチの仮説を裏づけていることになる。

23 August 2007 Vol.448 / Issue 7156

Letter p.912 参照

ゴリラとたもとを分かったとき**Gorillas leave the line**

ゴリラ、チンパンジー、ヒトの各系統が分岐した年代は、化石の証拠から決めることはほとんどできず、分子系統学の研究領域とされてきた。諏訪元たちは今回、エチオピアで発見された歯の化石が、1000万年前のものでありながら現生ゴリラに極めてよく似てい

ることについて報告している。これらの歯は新種の化石類人猿のものとされたが、それがゴリラの系統に含まれる動物であるなら、チンパンジーとヒトの共通祖先とゴリラとの分岐はそれ以前に起こっていたはずであり、最新の遺伝子塩基配列の比較から得られた分岐年代に制限がつけられることになる。

23 August 2007 Vol.448 / Issue 7156

Letter p.921 参照

抗うつ薬の設計**Antidepressant design**

三環系抗うつ薬は、脳のナトリウム共役型神経伝達物質輸送体を阻害することによって薬効を示すが、これらの阻害薬の分子レベルでの作用機構はほとんどわかっていない。好熱性細菌 *Aquifex aeolicus* から単離した LeuT ロイシン輸送体は神経伝達物質輸送体の相合体で、今のところ構造解析に使えることが証明されている唯一の相合体である。今回 Singh たちは、クロミプラミン、デシプラミン、およびイミプラミンという3種類の抗うつ薬が LeuT に結合する機序を調べた。これらの薬物は細胞外に向けた窪みに非競合的に結合して、基質の放出を阻害する。ヒトの脳にあるノルエピネフリンやセロトニンの受容体は LeuT とは大きく異なっているが、治療効果が期待される新たな阻害薬の開発に活用できそうな新たな領域が、今回の研究によって示された。

23 August 2007 Vol.448 / Issue 7156

Letter p.952 参照

ニューロンの移動：ギャップ結合がする仕事**NEURAL MIGRATION: Gap junctions stick to their task**

ギャップ結合は、隣接する細胞どうしが小孔やチャネルを形成し、シグナル分子やイオンが細胞間を自由に行き来できるようにする構造であり、脊椎動物では成熟細胞や発生中の細胞の多くでみられる。その機能は主に、細胞間の分子輸送だと考えられてきた。だが、それ以外にも役割があることがわかった。Elias たちは今回、ニューロンの移動にギャップ結合がかかわっていることの証拠を示している。移動に重要なのは、ギャップ結合のチャネルの伝導性ではなく、ギャップ結合タンパク質の接着特性や細胞間接触部位の性質であることも明らかにされた。この発見



は、脳の発生にかかわるだけのものではない。腫瘍転移への関与など、ギャップ結合のほかの多くの機能も、小孔としての働きだけでなく、接着機能にも依存している可能性が出てきているため、ギャップ結合はこれまでに考えられたことのないような方法で調べられるかもしれない。

23 August 2007 Vol.448 / Issue 7156

Letter p.901 参照

酸素濃度の上昇が遅れた理由**Coming up for air**

地球上の生命にとって極めて重要な大気中の酸素レベル上昇は、約25億年前に起きた。しかし、その原因となったと考えられる、酸素を生産するシアノバクテリアの存在の証拠はさらに2億年古い岩石で見ついている。この細菌が本当に酸素を供給していたのなら、この遅れはなぜ生じたのだろうか。L Kump と M Barley は、地球のテクトニクス（地殻変動）の進化がかぎだと考えている。最初は、海底火山が酸素のシンクとして働き、酸素が大気中に放出されるのを妨げていたのかもしれない。その後、約25億年前の大陸安定化に伴う主な変動が終わると火山活動のパターンが変わり、海底火山が急激に減少し、還元力のより低い地表の火山のほうが多くなった。その結果、海底火山によって吸収される酸素が少なくなり、大気中に酸素が出現する準備が整ったというのである。

30 August 2007 Vol.448 / Issue 7157

Letter p.1033, N&V p.1005 参照

フェロモンで決まる愛の形**Love is in the air**

哺乳類で雄と雌の行動に大きな違いが生じる仕組みについて、これまでは性腺ホルモンが脳の発生初期に神経回路を誘導して、雄あるいは雌の特性を誘導あるいは抑制するとする説が有力だった。しかし新しい研究では、雄としての配偶行動をとるか雌としての配偶行動をとるかという性的指向は、発生の際にあらかじめ決まるわけではないことが示唆されている。雌の成体マウスで、フェロモンの感知によって性行動が変化することがわかったのである。この現象で重要なのは鋤鼻（じょび）器官だが、これは鼻と口の間の鋤骨にある補助嗅覚器官で、その機能はわかっていなかった。鋤鼻器官に異常のある雌は雄のような性行動をとることから、雄、雌どちらの脳にも雄性行動、雌性行動のエフェクター回路の両方が存在し、少なくとも雄では、性別に特異的な感

覚調節因子によってオン・オフが切り替えられていると考えられる。ヒト成体には機能をもった鋤鼻器官はないと考えられているが、今回の発見によって、ヒトの性特異的行動の研究に新しい道が開けるだろう。

30 August 2007 Vol.448 / Issue 7157

Article p.1009, N&V p.999 参照

星周エンベロープの中をのぞく

Think inside the envelope

原始惑星円盤が、その周囲を取り巻く母体のエンベロープから物質を降着させているのが、クラス0原始星NGC 1333-IRAS 4Bで初めて観測された。これは、あらゆる恒星や惑星系が、その形成の際に必ずたどるとされている非常に重要な初期段階だ。スピッツァー宇宙望遠鏡による観測で、水蒸気から放射される中間赤外領域の輝線スペクトルが多数見つかった。このスペクトルは、エンベロープから物質が落ち込んで生じる衝撃波によって加熱された、極端に高密度の円盤表面に由来することを示している。いったん原始惑星円盤ができると、塵粒子の衝突でできた天体がさらに大きくなって、微惑星が成長するとされている。しかし現行の理論では、メートルサイズの岩石の形成段階を説明できない。理論では、こうした天体はすぐに中心の原始星に落下してしまうため、キロメートルサイズの微惑星が形成されないのだ。新たに行われたコンピューターシミュレーションでは、ガス円盤と岩石の相互作用によって極端に密度の高い領域ができることが示唆される。この領域では岩石どうしが非常に接近しているので、それら相互の重力により引き寄せられて何キロメートルものサイズの固体の天体になり、微惑星が直接形成されて惑星の構成要素となる。

30 August 2007 Vol.448 / Issue 7157

Letters pp.1022,1026, N&V p.1003 参照

琥珀の中のハチ：送粉者の化石によって明らかにしたランの起源年代

CAUGHT IN AMBER: Fossilized pollinator reveals the age of orchids

ダーウィンの時代から、生物学者たちはランとその送粉者の間の親密な関係に魅せられてきたが、この関係がいかに古いものかが、今週号の表紙に掲げられているすばらしい化石により実証された。ドミニカ共和国で見つかったこの2000万～1500万年前の琥珀の中に保存されていたのは、ランの花粉塊を背中に付けたハリナシバチである。花粉塊は雄性の繁殖構造で、多量の花粉(粒)を備えており、これが送粉時に1つのユニッ

トとして運搬される。意外なことに、疑いなくラン科植物のものとされる化石として、これは初めて見つかったものだ。花粉塊の形態から、この植物はGoodyerinae亜連であることがわかった。このことと近縁種化石の年代を併せて考えることで、ラン科の分子系統の新しい時間目盛りが得られた。今回の解析により、ラン科の起源は比較的新しい(第三紀)とする一般的な説が棄却され、その起源は8000万年前の後期白亜紀であることが示唆される。

30 August 2007 Vol.448 / Issue 7157

Letter p.1042 参照



地球を襲ったバプティスティーナ族の火球

Baptistina of fire

キロメートル規模の天体が月や地球大気に衝突する長期的な平均衝突フラックスは、一連の証拠によると、過去1億年間で2倍かそれ以上に増加したようだ。Bottkeたちは、この急激な増加はおそらく、小惑星バプティスティーナの親天体がおよそ1億6000万年前に主小惑星帯の内側で破壊されたためであることを、数値シミュレーションを用いて示している。破片はその後、地球型惑星に衝突する可能性のある軌道をめぐりようになった。この小惑星のシャワーが、6500万年前の白亜紀/第三紀境界の大量絶滅を引き起こしたチクシュループ(Chicxulub)衝突天体の起源として、最も可能性が高い。

6 September 2007 Vol.449 / Issue 7158

Article p.48, N&V p.30 参照

飛び出す顎で獲物を押さえ込む

Up in the mouth

ほとんどの魚類は口を開けて獲物を捕まえ、吸い込み、喉の奥にある「咽頭顎」という鯉骨格に由来する第2の顎で咀嚼する。しかし、ウツボの場合、これではうまくいかない。貪欲な捕食者であるにもかかわらず、体があまりに細長いために通常の吸引機構がうまく働かないのだ。そこで、咽頭顎まで獲物を吸い込む代わりに、喉の奥にある咽頭顎が口腔内にまで飛び出てきて獲物をつかむ。この革新的特徴は、ウツボがサンゴ礁の捕食者として成功するのに役立っていると思われる。一見に値するこの光景は、www.nature.com/nature/videoarchive/jaws/index.htmlの動画で見ることができる。

6 September 2007 Vol.449 / Issue 7158

Letter p.79, N&V p.33 参照

振動を励起する

Exciting vibrations

固体の相変化を起こすには、例えば、光パルスや電流を用いて「ホットな」電荷を注入して系の電子状態を変化させるなど、巧妙な方法がいろいろ存在する。今回Riniたちは、これらとはまったく異なる、テラヘルツ放射の超高速パルスを用いて、磁気抵抗を示すマンガン酸化物の個々の振動モードを励起する方法について報告している。この系は強く関連した電子をもっており、結晶構造のちょっとした変化でさえ、電子的特性や磁気的特性に大きな影響を及ぼしうる。励起された振動は、その材料を安定絶縁相から準安定金属相へ変化させるのに十分である。選択された振動モード、特に金属-酸素フォノンのコヒーレント操作による相制御は、例えばCu-O振動が高温超伝導体の電子的特性にどのように影響を及ぼすかといった問題に取り組む場合など、ほかの複雑な固体への応用が可能かもしれない。

6 September 2007 Vol.449 / Issue 7158

Letter p.72 参照

ミャンマーの津波リスク

Myanmar's tsunami hazard

2004年に発生したスマトラ-アングマン地震とインド洋津波は、多くの地球科学者にとって予想外の出来事であった。現在では、2004年の地震のすぐ東に当たるスマトラ島中央部沖で、別の巨大地震の危険性が高まっていることは広く認められているが、さらに北の、ベンガル湾北部のミャンマー(かつてのビルマ)沿岸に沿った沈み込み帯にはあまり関心が払われていないようである。しかし、P Cumminsは、この地域で巨大地震が起きる可能性があり、多くの人たちが何の備えもなく地震と津波の危険にさらされていると指摘している。

6 September 2007 Vol.449 / Issue 7158

Letter p.75, N&V p.33 参照

視覚における精度

Precision in vision

哺乳類の視覚系では、視覚刺激によるスパイクの発火はミリ秒スケールのタイミングで起こるが、それに対応する視覚処理自体の時間スケールはそれよりかなり遅い。そこで、スパイク発火タイミングそのものが何らかの形で神経符号を担っているかどうか、ずっと以前から議論的となってきた。今

回、視覚情報の一次処理部位であるネコ外側膝状体での実験で、スパイク発火タイミングの精度はあらゆる種類の視覚刺激に関して、絶対的ではないことが示された。精度は刺激の時間スケールに比例して決まるため、刺激の正確な表現を作るには、発火のタイミングがかなり高い精度をもつことが必要となるのである。

6 September 2007 Vol.449 / Issue 7158
Letter p.92 参照

慣性という謎：地球の自転が時空を変形する仕組み

THE RIDDLE OF INERTIA: How Earth's rotation reshapes space and time

乗り物が加速・減速したり曲がったりするときに感ずる引力や遠心力は、「慣性」の物理的現れである。慣性は外力が働かないときに、物体を静止状態に保ったり、あるいは直線上を等速移動させたりする。一般にニュートンの運動の第一法則で定義される「古典的」慣性の性質や、アインシュタインの一般相対論によれば、自転する質量に伴うとされる慣性系の引きずりは、長い間物理学者を魅了してきた。今週号の Review Article で Ciufolini は、慣性系の引きずりの研究における、地球周回人工衛星が行った測定に基づく最近の進歩について考察している。表紙は、NASA の GRACE 計画で測定された精密な重力値を用いた、全地球重力ポテンシャルモデル EIGEN-GL04C から導かれた重力異常を示している。地球の自転は空間、そして時間までも引きずっており、壮大な尺度の慣性系の引きずりを示している。

6 September 2007 Vol.449 / Issue 7158
Review Article p.41 参照

赤色巨星にのみ込まなかった惑星 Planets in the red

太陽系外惑星は 200 個以上知られているが、その大部分は、太陽と同じような主系列星の周囲をまわっている。これらの恒星は、中心核の水素を使い果たすと膨張して赤色巨星になり、恒星の表面はたやすく内惑星に達してのみ込んでしまう。このようなことは、ほぼ 50 億年後には太陽でも起こるだろう。その後、地球の運命がどうなるかはよくわからないが、赤色巨星以降の段階にある中心星の周囲をまわる惑星が見つかった

ことにより、何らかの形で残る可能性もあるらしいことがわかった。この惑星は、中心星ベガサス座 V 391 から 1.7 天文単位 (AU、1 AU は地球と太陽の平均距離) 離れた軌道をまわっている。中心星は、赤色巨星の段階での最大半径が 0.7 AU で、主系列星の段階では惑星との距離が 1 AU だった。この結果は、2 AU (AU の定義からわかるように太陽の場合も含まれる) よりも内側の軌道をまわる惑星が、赤色巨星の膨張によるのみ込みを免れることがあるのを示している。

13 September 2007 Vol.449 / Issue 7159
Letter p.189, N&V p.147 参照

植物 vs 微生物

Plant versus microbe

多くの植物病原菌は、宿主植物の防御機構を無力化することによって病原性を高めるエフェクタータンパク質を進化させてきた。一方、植物の側は、非常に特異性の高い病害抵抗性タンパク質を発達させることで、これに対抗してきた。こういう抵抗性タンパク質はエフェクタータンパク質を認識して、多くの場合局所的な細胞死の誘導によって、感染を制限する。今回、トマト斑葉細菌病菌である *Pseudomonas syringae* のこのようなエフェクタータンパク質の 1 つである AvrPto の、Pto キナーゼと結合した状態での結晶構造が明らかにされた。Pto キナーゼは、斑葉細菌病に対する抵抗性をトマトに与える。AvrPto と Pto キナーゼの相互作用の性質から、感染の際の AvrPto の標的を擬態するように Pto が進化してきた可能性が考えられる。

13 September 2007 Vol.449 / Issue 7159
Letter p.243 参照

ポジトロニウム分子の生成

Positronium molecules

電子とその反粒子である陽電子が一緒になって、水素に似た準安定原子を作り出すことはずっと以前から知られており、この原子はポジトロニウム (Ps) とよばれている。2 つの Ps 原子が結合すればポジトロニウム分子 (Ps₂) ができる可能性があると考えられたが、この分子はこれまで明確に観測されたことはなかった。今回、陽電子の強いバーストを多孔質シリカ薄膜に注入することによって、Ps₂ が孔の内部の表面で生成された。一層強い陽電子源を用いれば、Ps₂ 分子のボーズ・アインシュタイン凝縮体を作れるかもしれない。これは、基礎科学の分野において非常に重要なだけでなく、対消滅 γ 線レーザーの実現に向けた重要な出来事になるだろう。

13 September 2007 Vol.449 / Issue 7159
Letter p.195, N&V p.153 参照

火星の氷床の歴史

Taking a tilt at Mars

火星は、軌道面に対する自転軸の傾きなどの天文学的要因が大きく変動するために、地球の場合よりも太陽光照射の変動がずっと大きい。したがって、火星の気候変動は地球よりも激しい。N Schorghofer は、火星の表面下にある氷床の後退と前進を、40 回の主要な氷河期を含む、500 万年にわたって説明できる気候モデルを開発した。このモデルは、火星表面下にある氷の現在の分布も説明できる。また、火星氷河期の、長いが比較的単純な層序学性質からわかったことは、地球上のより複雑な事象を解釈する際の助けになるだろう。

13 September 2007 Vol.449 / Issue 7159
Letter p.192 参照

兆しを読みとる：生態系の砂漠化を告げる植生からの警告

READING THE SIGNS: Clues in the vegetation warn of ecosystem desertification

地球の陸地の約 40% は乾燥生態系で、そこに住む人口は 20 億を超えるが、この生態系は気候変動や人間活動の影響を非常に受けやすい。Kéfi たちは、スペイン、モロッコ、ギリシャの地中海性生態系で調べたデータと数値シミュレーションを用いて、植生パッチのサイズ分布がべき乗則に従うことを明らかにした。放牧圧が高まると、砂漠状態への移行が近づくにつれ、パッチサイズがべき乗則から逸脱する。つまりパッチサイズ分布は、砂漠化の危険を早期に示す警告として役立つ可能性がある。表紙は、スペイン、ベルチッテ (Belchite) にある El Planerón 自然保護区の景観 (上段) と、その破壊の状況 (下段) を示している。もう 1 つの報告では、Scanlon たちが衛星画像を使って、カラハリ盆地の樹木クラスターのサイズ分布がやはりスケールフリーなべき乗則に従うことを明らかにしている。これは、現存の樹木を囲む望ましい環境がもたらす正のフィードバックによって説明できる。

13 September 2007 Vol.449 / Issue 7159
Letters pp.209, 213, N&V p.151 参照



技術革新と科学研究の二者択一？

Innovation versus science?

Nature Vol.448 (839) / 23 August 2007

論説

景気の悪化で各国政府は、科学研究予算に関して厳しい問いを投げかけざるを得なくなるだろう。

科学研究はここ20年ほどの間、存分な資金提供を受けて行われてきた。冷戦後の異例に長い好景気の下で各国政府は、どの政治的立場にあれ、「最高レベルの科学研究」の支援こそが国益につながるという姿勢をみせている。また、好奇心の赴くままに基礎研究を行うことの価値については、世界的コンセンサスのようなものが形成されてきた。この合意の背景には、卓越した科学研究はその分野のいかに問わず、技術革新を推し進める原動力となる可能性があり、さらには経済の成長をも促す、との考え方がある。

これと時を同じくして勢いを失っていったのが、技術開発に対する政府の直接的な支援だ。もちろん、多額の技術開発関連予算は依然として確保されているし、軍事関連を含めて考えれば、その支出は対基礎研究分を十分に上回る。しかし、医薬品や回路基板、民間用旅客機の開発に対する国家の明確な支援構想のほとんどは立ち消えとなった。その裏には、フランスや日本のような比較的中道の国家を含めて、政府にはうまく「勝ち馬」を選べないとの思いがあった。

だが今、このような科学技術政策の時代が終わろうとしているかのようだ。8月半ばに発生した株価の乱高下が引き金となり、米国、あるいは世界規模での不況の可能性が語られるようになってきているが、それより前から先進工業国の政策当局者は、多くの工業生産拠点が中国やインドへ移される状況に警戒感を強めていた。

特に米国では、「競争力」という言葉が再び議論の俎上に載っている。そして政治指導者が競争力の観点で研究予算を考え始めると、間接的にしか技術革新につながらない基礎研究ではなく、より直接的な結果を生む技術プログラムの支援を好むのが常の傾向である。その結果、「この研究による経済的波及効果は何か」、「研究助成により社会が将来的に得られる見返りは何か」という、科学者にとっては答えることが本質的に困難な問いが投げかけ始められるかもしれない。

現在、このような問いかけが最も直接的な形で現れているのが英国である。大学での科学研究のほとんどを支援する研究審議会が、その方向性を微妙に変え始めているようなのだ。なかには、研究審議会の運営グループが1月に発表した「Increasing the economic impact of the research councils (研究審議会の経済的影響を高める)」という論文に対し、すでに神経をとがらせている研究者グループもある。

現在の状況が進んでいけば、研究審議会の助成金審査において、「科学的メリット」よりも「目に見える経済的意義」が、かなりの程度で重要視される危険性がある。しかしそうなる前に、審議会の主な役割は科学的に重要な成果の増進であり、それこそが英国の経済的国益やその他の国益に最もつながっていくのだということを、研究審議会の首脳にはきちんと再確認してもらいたいものだ。

類似の傾向は、米国でも現れ始めている。上下両院で可決され、8月9日に成立した米国競争法は、数学、物理学、工学の基礎研究の支援に大きな重点を置いた、科学研究にとって追い風となるものである。ただし、こうした姿勢が年間予算の編成過程に反映されるかどうかは定かではない。上下両院の過半数を占めるようになった民主党は、伝統的に技術開発プログラムを支持する傾向があり、時には科学研究プログラムより優先させることもある。さらに国家の競争力に対する危機感が高まると、この傾向が復活することも考えられる。

また、「(研究の結果として)最近私たちに役立つようになったことは何か」を問う納税者に対し、「自らの価値を認めてもらう」ためのさまざまな科学研究プログラムが作られている。しかし、こうした環境下で科学者は、図太さを保つことも大切だろう。特に官僚は、少しでも機会があれば、もっともらしい数値指標を経済的影響の代理指標として定め、それをもとに科学者同士で競うことを必ず要求してくる。だが科学者は、そのような要求には抗すべきである。

経済の困窮はつまり、科学研究にとっても困難な時期であることを常に意味する。研究者たちも、そのこと自体は受容できるよう心の準備をしておくべきだ。また、分野によっては経済的利益を生むものとそうでないものがあるという根拠のない予測をもとに、今後、予算の切り分けや抱き合わせが行われることも十分に考えられる。そうしたなかで研究者は、少なくとも2つの武器の手入れを欠かさぬようにしておくことだ。まず1つは、いかなる分野においても、科学研究からどんな経済的、あるいはその他の利益が生じるかは予測不可能であると、説得ある経験談でもって示すこと。そしてもう1つは、十分な研究体制を確保できてこそ、科学研究をベースにした技術革新がなされ、またその結果として、科学思想に刺激を与えられるのだということを実証していくことである。 ■



D. PARKINS

Welcome to the dark side

ダークマター粒子発見に迫る

Nature Vol.448 (240-245) / 19 July 2007

物理学者によると、宇宙の96パーセントは光で見ることができないという。ダークマター（暗黒物質）とダークエネルギーは、この見えない質量とエネルギーを説明するために考え出された。この記事では、謎に包まれたダークマターの正体を探る研究が発見の前夜にあることを Jenny Hogan が報告する。

私たちは今、イタリア中部の都市ラクイラの近くにある山の地下1400メートルのところで、長さ10キロメートルの道路用トンネルから分岐した、ほら穴のようなホールを歩いている。グランサッソ国立研究所の地下実験施設の巨大な金属球や塔や足場の前で働く科学者たちの姿は、アリのように小さく見える。物理学者 Elena Aprile は、自分の研究グループをせき立てている。1つのプロジェクトに指示を与えていたかと思うと、次のプロジェクトに指示を与えている。その途中で、彼女は

1つの実験装置の前で立ち止まって写真を撮り、その大きさに驚きの声を上げた。やがて私たちは、小さな枝トンネルの奥におさまった XENON10 の実験装置のところにやってきた。XENON10 は Aprile がここ数年にわたって精力を注ぎ込んできたプロジェクトであり、ここを通過するダークマター粒子が姿を現すのを待っている。こうした実験装置は、同研究所のほか、世界にもいくつかある。

かつての新粒子の探索は、粒子が偶然姿を現すのを待つ方法が主流だった。

1940年代の科学者たちも山に向かったが、彼らがめざしたのは地下の洞窟ではなく頂上だった。彼らは、奇妙な新しい宇宙線を捕らえるために、乳剤を塗った乾板を抱えて山を登ったのである。しかし、粒子加速器が強力になり、物理学者たちが自力で新粒子を作り出せるようになると、偶然の発見を待つ方法は時代遅れになった。その点では、ダークマターの探索はやや時代に逆行した方法をとっているといえる。

ダークマターの探索は、別の点でも昔

を思い出させる。加速器が強力になれば、検出器も巨大化し、その出力を分析するのに必要な研究チームの人数も膨れ上がる。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）の大型ハドロンコライダー（ハドロン衝突型加速器、LHC）の建設には30億ユーロ（約5000億円）の費用がかかると見積もられており、数千人の科学者とエンジニアが働いている。これに対して、XENON10検出器はわずか30人の科学者で動かすことができ、それが魅力の1つになっている。「これは、昔ながらの方法で物理学研究を行う最後のチャンスなのです」とAprileは話す。

ダークマターの探索においては、小さな研究チームでも大きな成果を上げることができる。XENON10は、WIMP（ウィンプ、弱い相互作用しかしない質量をもった粒子）という種類のダークマターの検出器であるが、既存の共同研究プロジェクトの検出器の感度を短期間のうちに追い抜くことができた。ほかの共同研究プロジェクトも巻き返しをはかっているため、今後2～5年間は、感度の最高記録が何度も入れ替わることになりそうだ。サバティカル（研究休暇）でCERNに滞在している英国のシェフィールド大学の理論研究者Leszek Roszkowskiは、「数年前にダークマター検出器がWIMPを発見したと聞いたら、私はびっくりしただろう」と話す。「我々の理解が正しいならば、WIMPは数年後には見つかるはずだ。そうでなかったら、私はびっくりするだろう」。

暗黒の巨人

ダークマターの最初の手がかりが得られたのは1930年代のことだった。天文学者のフリッツ・ツビッキーが、かみのけ座銀河団の中の銀河が奇妙なふるまいをしていることを発見したのである。銀河の速度の観測結果は、この銀河団が目に見える物質の質量よりも大きな質量で結びつけられていることを示唆していた。ツビッキーは、「これが確かめられれば、光を発する物質よりもはるかに大きな密度をもつダークマターが存在するという驚くべき結論に達することになる」と書き記した。

宇宙論研究者たちは現在、ダークマターは、銀河、銀河団、超銀河団、さらにはその上の大規模構造まで、すべての宇宙の構造が形をなすための足場となっていると考えている。天文学者たちは、ダークマターの分布地図を作成できる大望遠鏡を建設中だ。しかし、ダークマターは星やガス雲や惑星を作っているありふれた物質ではありえない。ビッグバンの名残であるマイクロ波放射の詳細な観測は、そうした通常物質が宇宙のわずか4パーセントにしかならないことを示唆している。残りは、通常物質の5倍の量のダークマターと、ダークエネルギーとよばれる奇妙な反発力であると考えられている。

シカゴ大学（イリノイ州）の宇宙論研究者Michael Turnerは、「宇宙の歴史は、2つの暗黒の巨人の闘いだった」と説明する。「（宇宙は今から約137億年前に誕生したといわれているが、）最初の10億年はダークマターが優勢で、宇宙のすべての構造を形作った。その後、約50億年前にダークエネルギーが優勢になり、構造の形成を止め、宇宙の膨張を加速させた」。

1970年代になると、ダークマターは単に暗いだけでなく、ほかの物質とは基本的に異なっているのかもしれないという考えが支持されるようになった。1980年代には、Aprileの実験装置のような地下の検出器の建設計画が始まった。けれども、この研究分野が熱気を帯びてきたのはつい最近のことである。1つは、WIMPに対する検出器の感度が向上したため

あり、もう1つは、違った角度からこの問題に挑戦する実験が行われるようになったためである。

粒子を作り出す

理論研究者たちがWIMP候補として提案する粒子のほとんどは質量が大きく、少なくとも陽子の質量の100倍はある。これまでの粒子加速器にはここまで重い粒子を作ることはできなかったが、LHCはおそらくそうした状況を変えることができ、ダークマター検出器がまだ捕らえられずにいるものを実験室で作り出せるかもしれない。

LHCの研究者たちが新しい加速器を使ってこの問題に挑戦している一方で、天文学者たちは、これとは別のアプローチから同じ問題に取り組もうとしている。理論研究者たちが気に入っているWIMP粒子の中には、互いに相互作用するとき特徴的なガンマ線バーストやそのほかの奇妙な痕跡を残す可能性があるものもある。天文学者たちは今、人工衛星や望遠鏡を使ってそうしたシグナルを探しているのだ。

地下実験施設でダークマターを捕らえようとしている科学者たちは、それでも一番乗りをめざしている。「今ががんばりどきのなだ。さもないと、間に合わないような気がする」とAprileは話す。過去にCERNで働いたことのある科学者でさえ、直接探索に注いだ努力に対する報いを得たいと思っている。現在はカリフォルニア

J. HOGAN



グランサッソ国立研究所（イタリア）のElena Aprile（写真右）は、自分の地下検出器がダークマターを捕らえるだろうと期待している。



大学バークレー校でダークマター探索実験を行っているBernard Sadouletもその1人で、「私はダークマターの探索に人生の20年を費やしたんだ。最初の目撃者になりたいと願うのは当然だろう?」と話す。

こうした実験のいずれからも、ダークマター粒子の証拠が得られる可能性がある。今までのところ、ダークマター粒子を直接検出したとする研究結果は1つしかなく、その解釈をめぐる論争が起きている（コラム「ダークマターの検出をめぐる論争」を参照）。だから、宇宙の新しい構成要素を発見したと科学者たちが自信をもって主張するためには、複数の方法から得られた証拠が必要不可欠なのである。この粒子が物理法則の新しい枠組みを示すことになる可能性を考えれば、なおさらである。マサチューセッツ工科大学（同州ケンブリッジ）の物理学者Max Tegmarkは、「ダークマターの正体についてあれこれ思いをめぐらすときほど楽しいときはない。私たちは本当に発見の前夜にあると実感している。ダークマター粒子を発見する方法にはいくつかの種類があるが、それらのすべてが成功を目前にしているのだ」と話す。

ダークマターの正体が何であるかはまだ誰も知らないが、それが何でないかはわかっている。物理学の「標準模型」は、

通常の物質とその相互作用についてわかっていることのすべてを含んでいるが、ダークマターは標準模型には含まれない。標準模型は大成功を収めたが、いくつかの問題点もあり、それを解決しようとする理論研究者たちは多くの新しい基本粒子を予測してきた。当初は、こうした仮説的粒子は余計物扱いされていたが、現在は、そのうちのいくつかがダークマターの筆頭候補になっている。Roszkowskiは、「最近では、ダークマター候補をもたない理論は興味深い理論とは見なされない。ダークマター問題は、標準模型を超える物理現象が存在することを示唆する証拠の中で、最も説得力のあるものといえるかもしれない」と話す。

標準模型を超える今日の主要な物理理論の多くは、超対称性理論の仲間である。超対称性理論では、通常の粒子はそれぞれ重い超対称性パートナーをもつとされているが、これらのパートナーの一部がWIMP候補になっているのである。驚いたことに、ビッグバンから残存していると考えられるそうしたWIMPの数を計算したところ、ダークマターの宇宙論的観測値と一致していた。この一致は、ダークマターが新種の粒子であるという主張を裏づけるものである。ただし、残存するWIMPの数の推定値に面食らう人も多

い。典型的なWIMPが陽子の100倍の質量をもつとすると、銀河系内のダークマターのモデルからは、地球では1平方メートルあたり毎秒約100億個のWIMPが通過していることになる。これだけの数の粒子が気づかれずに通過していることから、通常の物質や光ではWIMPの存在をほとんど感知できないと考えられる。

このため、WIMPを見つけることは信じられないほどむずかしい。計算によると、AprileのXENON10検出器を通過するダークマター粒子は毎週ほぼ1000兆個に上るが、そのごく一部しか検出できないと考えられている。XENON10実験では、54個の陽子と54個の電子からなる大きなキセノン原子を標的としている。実験装置を通過するWIMPがごくたまにこの標的に衝突すると、少数の光子や電子としてエネルギーが放出され、感度の高い装置によって検出されることになる。

ダークマターを直接検出しようとするすべての実験と同様、XENON10検出器は地下に設置されている。これは、実験結果に影響を及ぼすおそれのある宇宙線などの粒子や放射線を途中の岩石に吸収させるためである。実験チームにとっての課題は、バックグラウンドをできるだけ小さくして、何が残るかを調べることにある。

Aprileは今年になって、XENON10の

ダークマターの検出をめぐる論争

ダークマターはすでに見ついているのだろうか? イタリアのDAMA共同研究プロジェクトは、自分たちの地下検出器が記録したイベント数の季節変動はダークマターのシグナルであると主張している。だが、ほかの研究者たちは懐疑的だ。彼らのライバルである米国のCDMSのBernard Sadouletは、「DAMAの観測結果を、この分野のほかの観測結果と調和させることはますますむずかしくなっている」と話す。

銀河系（および銀河系のダークマター）の静止座標に対する地球の速度は1年の間に変化するので、地球にぶつかるダークマター粒子の数も変化すると考えられる。すなわち、夏には太陽が銀河系の中心に対して運動するのと同方向に地球も運動するので速度は足し合わされるし、冬にはこの方向が逆になる。

1995年から2002年にかけてイタリアのラクイラの近くにあるグランサッソ国立研究所で

行われたDAMA実験は、この効果を探すためのものだった。この実験で、100キログラムのヨウ化ナトリウム標的から成る検出器は、確かに冬よりも夏に多くの粒子を検出したため、研究チームはDAMAがダークマターを記録したと結論づけた。

問題は、ダークマターを探索しているほかの検出器が、DAMAの結果から予想される性質の粒子を見いだせないことにある。この実験を批判する研究者たちは、季節変動の原因と

なりうるほかの因子（温度や地下の状態の変化など）の影響を十分に考慮できていないと指摘する。DAMAの科学者たちは、そうした問題は解決済みであるとし、ダークマター粒子は何かもっと風変わりなものに違いないと主張する。

2008年末までにDAMA/LIBRAとよばれる改良型検出器での観測結果が得られる予定になっており、この論争を前に進めると期待されている。

J.H.

WIMPの探索

WIMPとよばれるダークマター粒子を捕らえるための検出器は、今のところまだWIMPを見つけることができていない。しかし、悪い知らせばかりではない。

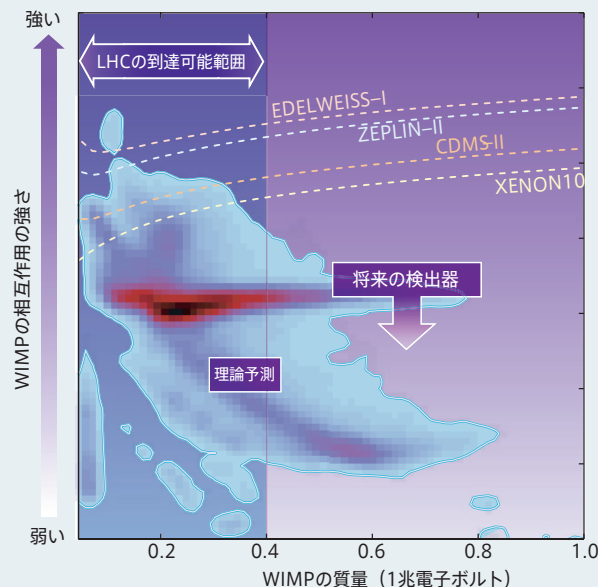
WIMPの存在を予言する物理理論を使って、WIMPがどのような性質をもっているかを計算することができる。このグラフ中の雲のような形は、WIMP候補として人気のあるニュートラリーノがもっているはずの性質を推測してみたものである²。

このグラフで、各検出器の感度限界（グラフを左右に横切る線）よりも上にある粒子は、これまでの実験結果から除外

される。それよりも下のすべての領域（つまり、理論から推定される雲状の領域のほとんど）にある粒子は、これから見つかる可能性がある。

検出器の感度は、これから数年以内に雲状の領域の中心部（赤で図示した部分）に到達するはずだ。理論計算は、この領域をニュートラリーノが最もありそうな領域と推定している。一方、大型ハドロンコライダー（LHC）でもニュートラリーノを作れるかもしれないが、それはニュートラリーノの質量が十分に軽いときに限られる。

J.H.



最初の観測結果が得られたと報告した¹。まだ論文は発表されていないが、その報告はライバルたちを驚かせた。XENON10は、これまでで最もよい観測結果を得ていた低温ダークマター探索実験（CDMS）という地下実験とはまったく異なる技術を使っていたからである。米国ミネソタ州で行われているCDMSは、極低温に冷却したゲルマニウムとケイ素の結晶の中で、粒子衝突によって生じる振動と電荷を探そうとするものである。これに対してXENON10検出器は、15キログラムの液体キセノンを満たした容器を使ってダークマター粒子を捕らえようとするものである。Aprileの結果が発表されたことで、希ガス液体を使った実験は、これまでの遅れを取り戻したのだ。

XENON10は最初の60日間の運転で、直ちに捨て去ることができない10個のイベントを記録した。「ここで飛び上がって『私たちは10個のWIMPを見つけた』と叫ぶ人もいるかもしれないが、もちろん私たちはそうはしなかった」と彼女は話す。Aprileの研究チームは、詳細な分析によりイベントの半数を除外し、残りは

分析をくり返したバックグラウンドシグナルであるとした。研究者たちがWIMPの一端を捕らえたと考えためには、ほかの方法では説明できないイベントが少なくとも15個は必要なのだ。そしてその場合も、「直接検出したと主張する前に、バックグラウンドの理解を深めることが必要なのだ」とAprileは話す。

獲物を追い詰める

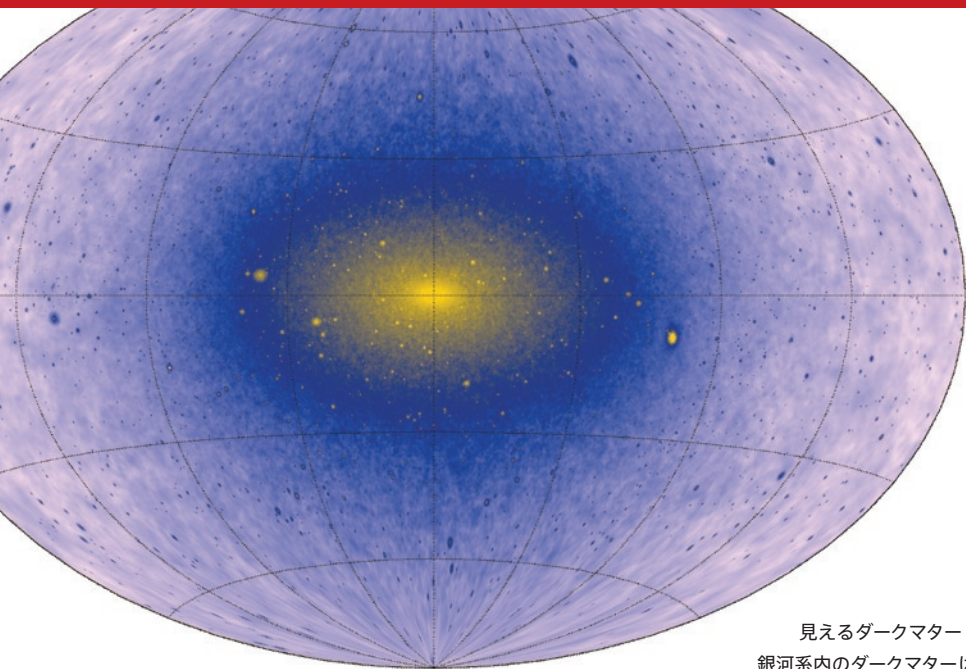
否定的な結果も重要だ。XENON10検出器の感度の高さは、仮説上の存在であるWIMPの性質（その質量や物質との相互作用の強さなど）を絞り込むことを可能にする。こうした情報は、ダークマター粒子のように謎に包まれたものを探している場合には極めて重要だ。XENON10は、これまでで最もよい観測結果よりもさらに厳しい絞り込みをかけることができる。すでにその実験結果は、超対称性理論がWIMPの存在を予測している領域に食い込み始めている（コラム「WIMPの探索」を参照）。

ほかの観測プロジェクトもXENON10のすぐ後ろに迫っていて、さらに弱い相互作用しかしない粒子を探している。そ

うした粒子を見つける可能性を高めるためには、ダークマター検出器の規模を大きくし、バックグラウンドを減らしていく必要がある。

キセノンを使った実験にはZeplin3というライバルがいる。Zeplin3の設計者らは、検出器にさまよい込んでくるシグナルを最小にするために細心の注意を払ってきた。この実験の結果は、今後1、2年で得られると期待されている。Zeplinは、1990年代の初めに始まった英国の共同研究プロジェクトであり、Aprileは単独で実験を行うことを決めるまでこのチームと連絡を取り合っていた。プロジェクトの代表者であるロンドン大学インペリアルカレッジのTim Sumnerは、「私たちがZeplinの設計をすでに終えていたときにXENON10が参入してきて、いいところをもって行ってしまった。これはいらだたしいことだ。しかし、前向きに考えるようにすべきだろう。Aprileらの装置は、この技術がうまくいくことを示したのだから」と話す。

12キログラムのキセノンを使った最新の検出器を英国北東部のノースハンプ



見えるダークマター：
銀河系内のダークマターは
ガンマ線の輝きを生じさせるかもしれない。

M. KUHLER, J. DIEMAND & P. MADAU

シャー州にあるカリ岩塩鉱山に設置した Sumner は、「Zeplin3 は XENON10 よりもすぐれていると自負している」と話す。Zeplin3 は、バックグラウンドノイズをより厳しく制限できるだけでなく、「WIMP 発見の栄誉も授けてくれるだろう」と自信をみせる。

XENON10 にはグランサッソ国立研究所内にもライバルがいる。Aprile が自分の実験装置のところに行く途中で写真を撮影した容器は、Carlo Rubbia が率いる WIMP アルゴン計画 (WARP) の中心となる予定の装置である。Rubbia は、CERN での W ボソンと Z ボソンという力を媒介する粒子の発見に貢献して、1984 年にノーベル物理学賞を共同受賞した研究者である。WARP は大きな容器に入った液体アルゴンを使ってダークマターを捕らえようとしている。「これは真剣な競争なのだ」と、Rubbia の元学生である Aprile はいう。

Aprile も、今後数か月の時間をかけてバックグラウンドを減らし、検出器の大きさを液体量で 60 キログラムに増やすことで、XENON10 を改良する予定である。容器を大きくすると WIMP 発見の可能性が高くなる。検出器の質量が増えれば、ダークマター粒子が相互作用する可能性が高くなるからだ。「その次になすべき

改良は 1 トンに増やすことだ。それ以外の小さな改良を重ねても意味はない」と Aprile はいう。

答えはどこに？

しかし、大きな検出器は多額の資金を必要とする。米国エネルギー省 (DOE) と全米科学財団 (NSF) が昨年設置したダークマター科学評価委員会は、7 月 13 日に発表した報告書の中で、米国のダークマター研究に提供する資金を、現在の年間 400 万ドル (約 5 億円) 未満から年間 1000 万ドル (約 12 億円) へと大きく増額するよう勧告した。委員長を務めた Hank Sobel は、「これは 1 トン規模の実験の資金には足りないが、さまざまな実験技術の検証を加速させることはできる」と話す。この委員会は、大規模検出器への移行のしかたを決めるために、2009 年に再検討を行うことも勧告した。

液体を使う XENON10 は、固体を使う CDMS にくらべて装置を大きくするのが容易である。一方で、バックグラウンドを同定し、これを除去するのは CDMS のほうが容易である。CDMS は 1 年前に改良を行い、ゲルマニウムを 1 キログラムから 4 キログラムに増量したため、この夏の終わりに得られる予定の新しい観測結果は、XENON10 の観測結果以上のものになる

ことが期待されている。CDMS の代表者である Sadoulet は、「来年には、私たちの測定限界は少なくとも 10 倍か 15 倍は向上し、何かを発見しているかもしれない」と話す。

研究者たちがどんなに熱心であっても、自然が協力してくれるとはかぎらない。実験の測定限界がどんなに向上しても、粒子が検出されないという可能性もある。英国のオックスフォード大学の理論物理学者 Roberto Trotta は、超対称性理論が予言する WIMP 候補の一部は「事実上、検出不可能である」という。粒子は LHC で作り出すには重すぎ、地下実験で検出するには相互作用が弱すぎるのかもしれない。「今後 10 年のうちに大きな発見があるだろう。そうでなければ、私たちは大きな困難に直面することになる」と Trotta は話す。

2008 年になって LHC が陽子衝突実験を始めると、複雑な生成物の中に WIMP が作られる可能性がある。こうした粒子は、加速器の検出器で直接記録することはできないだろうが、衝突時のエネルギーの収支を求めたときに「質量の不足分」として現れるだろう。このような間接的な証拠では、LHC で WIMP のサインを見つけても、それがダークマターであることの裏づけにはならない。「それでもまだ観察の機会はある」と Roszkowski は話す。例えば、粒子が 1 秒に満たない間だけでも安定であれば、検出器の外に飛び出して、どこかほかの場所で崩壊するかもしれない。これは、粒子を直接検出する第 2 のルートも必要であることを意味する。「ダークマター問題を解決するためには両方の検出法が必要なのだ」と彼は話す。

加速器は理論面でさらなる情報を与えてくれる。例えば、幸運にも粒子を同定できた場合には、LHC の結果から、超対称性理論のさまざまな粒子ファミリーの中のどれに相当するのかが明らかになるはずだ。

各種の超対称性理論は、さまざまな質量の超対称性パートナーを WIMP 候補として予言する。これにはアクシーノ、グラビティーノ、ニュートラリーノなどがある。ダークマター候補になるのは、最も軽

い超対称性パートナーである。なぜならこれは、崩壊して別のものになることができないからだ。単純なモデルの多くは、4種類の粒子の超対称性パートナーの混合粒子であるニュートラリーノが最も軽く、ビッグバンから現在まで生き残っているほど安定していると予言する。その結果、この奇妙な粒子（これは自分自身の反粒子でもある）は、素粒子物理学者の間で最も人気のあるWIMP候補になっている。

ニュートラリーノを検出する第3のルートは、それが崩壊した証拠を探すことである。ニュートラリーノはそれ自身の反粒子であるため、十分に接近すると衝突して対消滅するはずだ。このような対消滅の結果、ガンマ線、ニュートリノ、あるいは粒子と反粒子の対が生まれるかもしれない。

例えば、銀河系のダークマターのモデルは、銀河系のダークマターハロー（ダークマターが分布している領域）や銀河系の中心部に集中したニュートラリーノの対

消滅からガンマ線の輝きが生じる可能性を示唆している（左ページの図を参照）。2008年の初頭に打ち上げられる予定のガンマ線広域宇宙望遠鏡（GLAST）などの人工衛星は、これを見つけることができるかもしれない。さらに、ニュートリノ望遠鏡（南極に建設中のアイスキューブニュートリノ検出器など）を使った観測から、太陽の中心部に集まったニュートラリーノの対消滅が推測できるかもしれない。この場合には、ほかのプロセスよりも高エネルギーのニュートリノが生成すると考えられているからである。

しかし、ダークマターがニュートラリーノではなく、WIMPでさえなかった場合にはどうなるのだろうか？ ダークマターの正体については、超対称性理論やWIMPをまったく必要としない説明も提案されている。こうした仮説には、重力の法則を修正することでダークマターを不要とするもの（コラム「重力の法則を変える」を参照）

から、まったく異なる種類の粒子を提案するものまで、さまざまな種類がある。

ニュートラリーノの主なライバルはアクシオンだ。アクシオンは、標準模型の小さな問題点を解決するために1977年に素粒子物理学者によって提案された粒子である。多くの理論研究者たちは、アクシオンは、いつかは見つかるだろうと考えているが、宇宙論から期待されるとおりの質量と相互作用をもっているかどうかははっきりしない。アクシオンの質量はすでに、一方は理論から、他方は超新星の観測から限界を設定されており、典型的なニュートラリーノの10兆分の1未満であると予測されている。

米国カリフォルニア州のローレンスリバモア国立研究所で行われているアクシオンダークマター実験は、ダークマター問題におけるアクシオンの役割につき最終的な答えを出すことをめざしている。この実験の共同代表者であるLeslie Rosenberg

重力の法則を変える

1970年代の詳細な観測により、銀河の外側にある星の速度は、銀河内の「見える質量」の重力だけでは引き止めておけないほど速いことがわかった。ダークマターは、これを引き止めるのに必要な重力を補う方法の1つとして提案された。しかし、だれもが新しい種類の物質が必要であると考えているわけではない。一部の科学者は、観測結果を説明する1つの方法として修正ニュートン力学（MOND）を提案した。

MONDは1981年に初めて提案された理論であり、長距離で重力が弱くなるベースが、ニュートン力学から期待されるベースよりもゆっくりになるとするものである。MONDの現代版には少数の支持者がいるが、この理論では説明しにくい観測結果が多く、支持を広げるには至らなかった。

昨年夏に、2つの衝突する銀河団の観測から「ダークマターが存在する直接的な証拠」が得られたと米航空宇宙局（NASA）が発表したことで、MONDはさらなる打撃を受けたようだ。銀河団の周囲で光が曲げられる「重力レンズ」という現象に注目することで、ダークマターについて調べることができる。この重力レンズ効果から、銀河団の質量の分布が銀河団の高温のガスの分布とは異なっていることがわかったのである。

研究者たちは、「弾丸銀河団」（右写真）は、1つの銀河団がもう1つの銀河団を引き裂くように通過したことで形成されたと結論づけた。その際、銀河のガスは衝突に巻き込まれたが、ダークマター粒子はまっすぐに進んでいったとみられている。



銀河団1E 0657-56（別名弾丸銀河団）。ハッブル宇宙望遠鏡が撮影した可視光の画像にX線天文衛星チャンドラで観測された高温ガスの分布（ピンク）と重力レンズで検出されたダークマターも含めた質量の分布（青）が重ね合わされている。見える物質（ピンク）とダークマター（青）の分離が検出され、ダークマターが存在する有力な証拠となった。

MONDの研究者である英国セントアンドリュース大学のHongSheng Zhaoも、NASAの観測結果がある種の「暗い」粒子の存在を裏づけていることは認めている。しかし彼は、これによりMONDが否定されたとは考えておらず、観測結果

はMONDと通常のニュートリノの組み合わせにより説明できると主張する。「代替理論を追求することは研究として健全なことだ」とZhaoは話す。彼の解釈が正しいか否かは、将来のニュートリノ質量の測定により検証されることになる。 J.H.

によると、シアトルのワシントン大学に検出器を移設した後、2011年までに結果が得られる予定であるという。アクシオンの相互作用は非常に弱いので、粒子加速器ではめったに生じない。このため実験では、わずかな粒子エネルギーを検出できる無線受信機を使ってアクシオンの兆候を探すことになるという。

アクシオン探索計画の数は、WIMP探索計画に比べて非常に少ない。これには、アクシオンを見つけるのに必要な技術が素粒子物理学者にはあまりなじみがないものであることが関係しているとRosenbergは考えている。さらに彼は、「超対称性理論はとても人気が高く、WIMPはその人気に乗っている」と指摘する。今回紹介したダークマター探索チームはどれも、ダークマターの正体が自分たちの予想とはかけ離れたものであったとしても、自分たちの研究を続け、何らかの答えを出したいと決意している。Aprileは、「ダークマターが予想とはまったく違うものであったとしても、それは受け入れる」と話す。「私はイタリア人女性でせっかちな。検出器を改良しながら、次のステップをどんどん進めていくだけです」。

しかし、1つの実験が成功したからといって、ほかの実験が失敗したことにはならない。科学者たちは単純さを好むので、WIMPが見つかったらアクシオンはいらないし、アクシオンが見つかったらWIMPはいらないと考えるかもしれない。けれども、両方があってもいいのではないかな？ダークマター問題は、私たちが考えているよりも豊かな問題であることが分かるかもしれない。Tegmarkは、そうした結果を期待している。「それはすばらしい番狂わせだ。自分たちに見えないからといって、ダークマターが1種類しかないと考えるのは、人間の傲慢というものだ」。

Jenny Hogan はロンドンの *Nature* 記者。

1. Angle, J. et al. preprint at <http://arxiv.org/abs/0706.0039>(2007).

2. Roszkowski, L., Ruiz de Austri, R. & Trotta, R. preprint at <http://arxiv.org/abs/0705.2012> (2007).

A constant problem

行き詰まる ダークエネルギー研究

Nature Vol.448(245-248)/19 July 2007

10年前の発見時には大歓迎されたダークエネルギーの研究が、ここにきて研究者を失望させているのはなぜなのだろうか？ Geoff Brumfielが取材した。

1998年、2つの天文学者のチームが、宇宙は自分自身を引き伸ばしていると報告した。これは衝撃的な報告だった。宇宙が膨張していることは1920年代から知られていたが、この膨張は減速しており、遠い将来にはほぼ完全に止まるだろうと考えられていたからである。しかし、1990年代後半に行われた遠方の超新星の観測は、膨張はまったく減速しておらず、むしろ加速していることを示唆していた。ジョンズホプキンス大学(メリーランド州ボルティモア)の天文学者Charles Bennettは、「この発見は信じられないほど直観に反していた。私はそれを信じなかった」と振り返る。

しかし、数年のうちにBennettやこの分野の研究者のほぼ全員が、それまでの考えを改めざるを得なくなった。観測結果は確実なものになっていったし、宇宙の膨張が加速していることは理論の行き詰まりを救うとみられたからである。Bennettのチームを含むさまざまな研究グループがビッグバンの名残の電磁波を観測していたが、その結果は、宇宙の重力が宇宙を平坦にしていることを示していた(平坦な宇宙とは、宇宙の膨張速度とそれに含まれる質量が均衡しており、膨張速度を減しながら永遠に膨張を続けるが、ある一定の大きさ以上にはならず、またけっして収縮には転じないというもの)。しかし、ほかの観測結果は、それほど大きな重力効果を及ぼすには、宇宙にある物質の量が少なすぎることを示していた。この不足分は、

まだ見つかっていないダークマターを考慮に入れても埋めることはできなかった。

幸いにも、相対性理論では物質だけでなくエネルギーも重力効果をもつことになる。そして、宇宙の膨張を加速するのに必要なエネルギー量は、その重力により平坦性問題を解決するのに必要なエネルギー量にかなり近いことがわかった。このエネルギーはすぐに「ダークエネルギー」として知られるようになった。シカゴ大学(イリノイ州)の宇宙論研究者Michael Turnerは、「ダークエネルギーは、宇宙の起源と未来に関するすばらしい洞察を与えてくれるようにみえた。その正体さえ明らかになれば、すべてがうまくいくように思われたのだ」と話す。

それから約10年が過ぎた今、研究者たちは、1つの理論的な難問をより大きな難問に置き換えてしまっただけのようにみえる。その後の観測は、ダークエネルギーの正体についてほとんど何も明らかにしておらず、ダークエネルギーを説明する理論は前進するための手がかりを欠いている。天文学者たちは新しい観測装置を投入して、やっとのことで歩を進めているが、こうした観測により問題を解決できる保証はほとんどない。もちろん、今後の観測にどれだけ力を入れるべきかについても、研究者の意見は一致していない。ハーバード大学の宇宙物理学者Avi Loebは、「問題は、今後の観測からどれだけの情報を得られるのかという点にある」と話す。

見えない謎

大きな問題は、ダークエネルギー自体は目に見えないということだ。ダークマターと同じように、ダークエネルギーはその効果を通じてのみその存在を知ることができる。ダークエネルギーの場合は、宇宙の膨張に及ぼす効果がそれに当たる。ダークエネルギーと膨張の加速との関係は、「ダークエネルギーの状態方程式」に現れるある定数によって決まる。これは、ダークエネルギーが及ぼす圧力を単位体積当たりのダークエネルギー量で割ったものである。

膨張が加速しているなら、状態方程式の定数はマイナスでなければならない。そして、状態方程式の定数が -1 であれば、ダークエネルギーが宇宙の不変の性質、つまり宇宙定数(宇宙項)であることになる。宇宙定数はアインシュタインの一般相対性理論に現れる定数である。皮肉にも、彼は宇宙を同じ大きさにとどめるために宇宙定数を導入した。アインシュタインは、宇宙が実際には膨張しているという事実を受け入れたとき、宇宙定数を自分の「生涯、最大の過ち」とよんで方程式から取り除いた。しかし、状態方程式の定数が -1 であるなら、ダークエネルギーは宇宙定数としての条件を満たす。そして、最新の観測結果によると、状態方程式の定数が -1 である可能性はかなり高い。

スタンフォード大学(カリフォルニア州)の宇宙論研究者Leonard Susskindは、「ダークエネルギーの状態方程式の定数が本当に -1 であるなら、その正体についてはよく知られた説明が1つある」という。物理学者たちは数十年前から「真空のエネルギー」というものの存在を仮定してきた。これは、真空の中で生まれたり消えたりする量子的粒子からなる原始の泡である。この真空のエネルギーなら、観測されているような加速膨張の駆動力となるかもしれない。また、真空のエネルギーによる加速は休みなく続くだろう。真空のエネルギーは空間にもともと備わった性質であるため、「宇宙が膨張すると宇宙の真空のエネルギーも増え、圧力とエネルギー密度との比は変化せず、 -1 に固定されることになる」とSusskindは説明する。

この説明には1つだけ理論的矛盾があ



夜空の一部を連続して撮影した画像から、超新星爆発(右写真の赤い点)を見つけることができる。

る。天文学者が観測したダークエネルギーの効果は比較的弱いため、物理学者が計算した真空のエネルギーは、この効果を説明するのに必要な量の 10^{100} 倍以上の大きさになってしまうのである。ダークエネルギーがこんなに大きかったら、私たちの宇宙は一瞬にしてバラバラになってしまうだろう。「どのように計算しても、真空のエネルギーは莫大な量になってしまう。自然に小さな値をとらせる方法はない」とTurnerはいう。そのため物理学者の多くは、隠れた自然の対称性による未知の効果が真空のエネルギーを打ち消しているのだろうと考えた。このような「そのうち消えてくれるといいのだが」という考え方は、物理学では珍しいものではなく、場合によってはこれが唯一の前進方法になることもある。とはいえ、真空のエネルギーについてこのような考え方をするのは「まったく愚かなことだった」とSusskindは認めている。

「そして、私自身もそうした愚かな考え方をしていたことを白状しなければならない」と、彼はほとんど申し訳なさそうに話す。今のSusskindは、このような考え方はしておらず、この難問に対してある種の解答を提案している。「多くの素粒子物理学者に人気のある『ひも理論』では、私たちが観測できる宇宙は、より大きな『多元的宇宙』が含む 10^{500} 個の宇宙の1つにすぎないと考えることができ、そう考えることが望ましくさえある」と彼は語る。真空のエネルギーは宇宙ごとに異なる値を持ち、多くの宇宙、ひょっとするとほとんどの宇宙では、実際に莫大な値になっている

のだろう。しかし、私たちの宇宙では小さい値に違いない。なぜなら、私たちのような観測者が進化できるのは、真空のエネルギーが小さい宇宙だけであるからだ。

この種の「人間原理」の議論は多くの科学者をうんざりさせている。批判的な人々は、この種の推論は検証することがほとんど不可能であり、宇宙に関するより深い洞察を与えてくれるものではないと指摘する。プリンストン大学(ニュージャージー州)の理論研究者Paul Steinhardtは、「人間原理と無作為性は何も説明していない。大部分の理論研究者がこうした議論を受け入れていることに私は失望している」と話す。

問題は、これよりも有望そうにみえるほかの説明がないことだ。一部の人々は、問題はアインシュタインの重力理論にあると主張して、ダークエネルギーと合うようにこれを修正しようとしている。「ダークエネルギーが重力の一種であるとしたら、それはとても幸運なことだ。物理学の根本的な謎に挑むことができるのだから」とニューヨーク大学のGeorgi Dvaliは話す。しかし、彼らの修正にはほとんど意味がないと考える人もいる。宇宙全体はとにかく、「そうした重力理論が、太陽系で矛盾が生じないようにするのは容易なことではないからだ」とTurnerはいう。

ダークエネルギーは宇宙の時間の経過とともに変化する性質なのではないかと考える人もいる。ある人は、ダークエネルギーは宇宙規模の長距離で働く5番目の力(残りの4つは、電磁気力と2つの核力と重力)なのではないかと考えている。またある人

は、ビッグバン直後に起きたとされているインフレーションの余波ではないかと考えている。インフレーション期は、極端な膨張が起きていた期間であった。その後の宇宙の歴史を通じて、この現象が何らかの尾を引いている可能性はないのだろうか？

提案されているさまざまな仮説は、概念的には異なっているが、数学的には同等である。これらはいずれも、ダークエネルギーが時間とともに変化することと、状態方程式の定数が-1に固定されないことを要請する。「ダークエネルギーが変化すると考えれば、今日のダークエネルギーの小ささを説明しやすくなるだろう」とSteinhardtはいう。さらに、ダークエネルギーの変化は、この宇宙のほかの特徴にも影響を及ぼすかもしれない。例えば、基本定数と考えられている定数の一部に検出可能な影響を及ぼすなら、それはこの仮説にとってプラスになるだろう。しかし、批判的な人々は、よほどの事情がないかぎり、こうした考え方が受け入れられることはないとみている。

希望の光

全体としては、この問題の理論的側面はうまくいっていない。カリフォルニア工

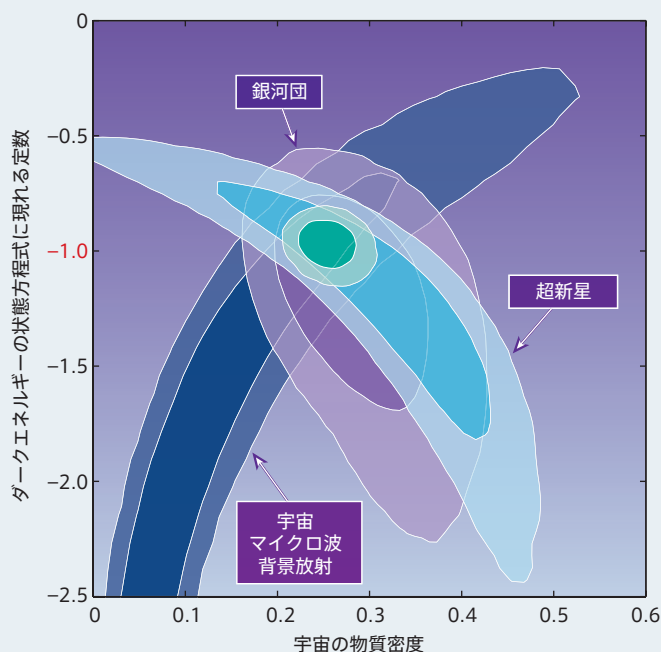
科大学（同州パサデナ）の理論物理学者Sean Carrollは、「私たちはあらゆることを試してみたが、うまくいったものはない」という。「今必要なのは、もう少しの手がかりだ」。

状態方程式の定数を精密に測定するため、天文学者たちは新世代のダークエネルギー探査機を計画している。彼らはすでに1a型超新星の詳細な観測を進めている。ローレンスバークレー国立研究所（カリフォルニア州）の天文学者Saul Perlmutterは、超新星を使って宇宙の膨張の加速を測定する方法の原理を次のように説明する。1a型超新星爆発は、連星系の大きな星から小さな星へと物質が流れ込んだ結果、小さな星の質量がしきい値を超え、大規模な熱核反応により爆発することで起こる。どの星も同じ質量しきい値で爆発するため、1a型超新星はみな同じ量のエネルギーを出すことになり、その絶対的な明るさ（等距離から見た明るさ）はどれも同じになるはずだ。ならば、1a型超新星を地球から見たときの相対的な明るさを比較することにより、超新星までの距離を正確に測定できることになる。この方法で超新星までの距離を測定し、光の赤方偏移

を使ってその速度を測定することにより、宇宙の膨張がどの程度加速されているかを知ることができる。Perlmutterらは今、超新星の仕組みを詳細に解明し、計算結果の精度を上げるために、観測数を増やそうと努力している（p.13写真参照）。

超新星は最もよく解明されている天体の1つだが、宇宙の膨張の加速を測定する唯一の方法ではなく、遠方の銀河団からのX線を調べるという方法もある。スタンフォード大学のX線天文学者Steve Allenによると、超新星の場合のように、銀河団の温度と明るさには標準的な関係があるため、地球から任意の距離にある銀河団が遠ざかる速度を測定することができるという。

ダークエネルギーの効果は、より複雑な方法によっても測定できる。銀河団や銀河群の重力場は、重力の井戸に落ち込む光の波長を青色方向に変化させ、井戸から出てくる光の波長を赤色方向に変化させる。ピッツバーグ大学（ペンシルベニア州）の天文学者Ryan Scrantonは、ビッグバンの名残である宇宙マイクロ波背景放射にこうした効果が現れるときにダークエネルギーが影響を及ぼしているはずだと考えている。



ダークエネルギーを追い詰める

さまざまな観測法を組み合わせることで、宇宙の物質密度とダークエネルギーの状態方程式の定数がとり得る値を絞り込むことができる。

宇宙マイクロ波背景放射の観測結果は宇宙が平坦であることを示しており、左下から右上に伸びる紺色のバナナ型の外側にある状態方程式の定数と物質密度の値を除外する。超新星の観測からは宇宙の膨張の加速の程度がわかるが、これにより右下から左上に伸びる薄い水色と濃い水

色のバナナ型の外側の値が除外される。銀河団の測定は加速を知るもう1つの方法であり、薄い紫色と濃い紫色の領域の外側の値が除外される。すべての観測結果を統計的に組み合わせると、緑色の小さい丸型の領域が得られる。

どの観測法についても、内側の線は68パーセントの確からしさで除外される領域との境界を、外側の線は95パーセントの確からしさで除外される領域との境界を示している。

進むべき道は？

状態方程式の定数を決めていくためには、単一の観測法に頼るよりも、各種の観測法を組み合わせるほうがよい(コラム「ダークエネルギーを追い詰める」を参照)。新しい研究法の中では、宇宙の大規模構造がダークエネルギーによってどのように形作られたり歪められたりしてきたかを調べる方法が最も有望視されている。銀河は宇宙に均等に分布しているわけではなく、寄り集まって3次元のクモの巣構造を作っている。このクモの巣はダークエネルギーの影響を受けやすい。さらに、独自の超新星観測チームを率いてPerlmutterらの観測チームと競争しているジョンズホプキンス大学の天文学者Adam Riessによると、大規模構造の観測で予想される誤差の種類は、超新星の観測に伴う誤差の種類とまったく異なっているため、この新しい観測法は古い観測法とうまく補い合うことになるという。現在、宇宙の大規模構造の地図作りを進めるために、いくつかの野心的な調査が計画されている。

しかし、こうした方法のどれをとっても、歯がゆいほど何も教えてくれない状態方程式の定数を限定していくことしかできない。ダークエネルギーが宇宙定数であることを証明するには、状態方程式の定数が本当に-1であることを示す必要がある。-1に近いことを示すだけでは不十分なのだ。ドイツのガルヒンクにあるマックスプランク宇宙物理学研究所のSimon White所長は、「天文学者たちは、ほかの仮説の可能性を除外することもできないまま、いつまでもダークエネルギーを測定し続けることになるかもしれない。それが定数であるなら、無限の正確さが必要となるからだ」と話す。

ケースウエスタンリザーブ大学（オハイオ州クリーブランド）の理論物理学者Lawrence Kraussはさらにこう指摘する。状態方程式の定数が本当に-1であり、ダークエネルギーが定数であるなら、膨張の加速に及ぼす効果を通じてしかそれを測定できないことになる。「状態方程式の定数が-1であるなら、ダークエネルギーの正体は解明できないだろう。これではまったく理論の指針にならないからだ」とKraussは話す。

英国のダラム大学の理論物理学者Carlos Frenkは、しっかりした理論的根拠なしに1つの数字を調べるのは正しいやり方ではないと主張する。「それは、すべての木の高さを測定して、生物学の本質を知ろうとするようなものだ」と彼はいう。「測定のための測定は無意味である」。Frenkはそのような測定に多額の研究資金を投じることに異議を唱えており、Loebもこれに同意している。「この目的にも資金は出さなければならないが、ほどほどの額にするべきだ」とLoebは話す。

一部の理論物理学者の懸念とは裏腹に、実際に観測を行っている天文学者たちは、状態方程式の定数の測定を続けることが最も賢明な道だと考えている。なんといっても、現在できるのはこの観測だけであるからだ。Bennettは、「測定は限界まで行うべきだ」と主張する。「驚くべき事実が明らかになるかもしれないし、そうしたことはしばしば起こる」。Perlmutterも、研究を御破算にするためではなく、收拾するために、いくつか結果を出す余地があると考えている。「『私たちは十分やった』とあきらめるにしても、いくつか退屈な結果を得てからにしたいというようなものだ」と彼は話す。

BennettとPerlmutterはさらなる観測に意欲を燃やしており、Bennettは人工衛星を使って銀河の構造を観測する計画を、Perlmutterは遠方の超新星を観測する計画を提案して、米航空宇宙局（NASA）と米国エネルギー省（DOE）がダークエネルギー観測衛星のために検討している予算を獲得しようと争っている。これによりダークエネルギーをめぐる議論をいくらか正確にする程度の知見しか得られなかったとしても、宇宙について多くのことが明らかになるはずである。例えば、宇宙から超新星を観測する衛星があれば、全天の赤外線天体につき正確な観測結果が得られるだろう。スタンフォード大学カブリ粒子宇宙物理学・宇宙論研究所（カリフォルニア州）のRoger Blandford所長は、「こうした装置は特定の目的にしか使えないものではない」という。「あらゆる分野に革命を起こし得るのだ」。

ダークエネルギーの解明につながる待望の新しい手がかりがほかの研究分野から

得られる可能性は常にある。2008年になって、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）のラージハドロンコライダー（ハドロン衝突型加速器）がデータを取り始めたら、時空の本質に関する発見があるかもしれない。これはダークエネルギー問題にもかかわってくる。「ひょっとすると、宇宙よりも加速器のほうが、多くのことを教えてくれるかもしれない」とKraussは話す。同様に、基本定数の測定や短距離での重力の測定が、ダークエネルギー問題と予想外の関係をもっている可能性がある。さらに、ある種のダークマター粒子の検出もダークエネルギー問題の解決に役立つかもしれない。

10年前にダークエネルギーの証拠が発見されたときに期待された革命は、いまだに実現していない。研究者たちは宇宙の膨張が加速していることへの確信を深めたものの、その物理的な意味については1998年当時と同じぐらいわかっていない。「今は2つの可能性がある。ダークエネルギーが真空のエネルギーである可能性と、ほかの何かである可能性だ」とCarrollは話す。観測を行っている天文学者たちはもう少し楽観的だ。「この研究は始まったばかりの段階にあるのだと私は思う」とPerlmutterはいう。とはいえ、状態方程式の定数が-1から外れる結果が得られなかった場合、何かが明らかになる可能性は低いだろうということはPerlmutterも認めている。「獲物の気配がなかったら、狩りをするのはむずかしい」。

今、この分野の多くの研究者が不安を感じている。彼らはかつて、あと少しですばらしい手がかりが得られると思っていたが、探求の過程で、いつしか腹立たしい謎に変わってしまった。Susskindは、「宇宙の4分の3を占めている可能性のあるものについて明確な説明ができないという状況で、自分たちの宇宙像には大きな欠落があると考えずにいることはむずかしい。私たちの宇宙像は、今後1000年にわたって間違っただけであるのかもしれない。大きく間違っただけで……」と話した。 ■

Geoff Brumfiel は *Nature* のワシントン DC 物理科学担当記者。

マウスは温室効果ガスを嗅ぎつける

Mice can smell greenhouse gas

二酸化炭素濃度が上昇すると、マウスは一種の悪臭として感じる。

doi:10.1038/news070813-9/16 August 2007

Katharine Sanderson

CORWIN/JIM / INDEXSTOCK IMAGERY / NEWS.COM

マウスは、鼻の中の特化したニューロンのおかげで、通常の大気中濃度を少し超える二酸化炭素 (CO₂) 濃度を感知できることが明らかになった。

北京生命科学研究所 (中国) の Minmin Luo たちは、マウスが CO₂ を感知する際に用いるニューロンを突き止めて、*Science* 誌に発表した¹。その報告によると、マウスが感知できる CO₂ 濃度の下限は、わずか 0.066% だった。この濃度は、大気中 CO₂ の平均濃度 (0.038%) の約 2 倍だが、吐き出した息の CO₂ 濃度 (約 4.5%) や人体に安全と考えられる CO₂ 濃度 (0.5%) と比べれば、かなり低い。

Luo の研究チームはマウスで、CO₂ を代謝分解する II 型炭酸脱水酵素 (CAII) を発現することが既に知られている鼻のニューロンにねらいを定めた。グアニリルシクラーゼ D⁺ニューロンとよばれるこれらの細胞は、CO₂ が存在すると活性化し、マウスが CO₂ の「匂い」をいつ感知したかを示してくれる。

ヒトは CO₂ を嗅ぎ取ることはできないが、ほかの動物では、比較的高濃度の CO₂ ガスを感知する能力が報告されている。昆虫も CO₂ を感知できるが、「鼻」からではなく、細胞膜受容体を介して感知している。

今回の研究で、哺乳類の場合はそのようなメカニズムでないことが明らかになり、Luo 自身も驚いた。マウスは、CO₂ ガスをまさしく「鼻で嗅ぎ取っている」のである。「まったくの予想外だった。CO₂ を匂い物質と考えている人はほとんどいない。CO₂ は刺激物質としては使われるが、嗅覚信号としては使われていないのだ」と彼はいう。

CO₂ 濃度とマウスの行動

さらされる CO₂ 濃度をだんだん高くして

いくと、マウスの行動には変化が生じた。CO₂ 濃度の高い区画と低い区画のどちらかを選ばせたところ、マウスは CO₂ 濃度が 0.2% を超える区画に進むことを避けたのである。

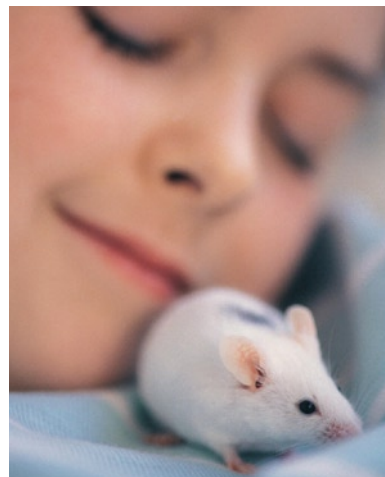
このことは、気候変動によって大気中 CO₂ 濃度が上昇すれば (2100 年には 0.05 ~ 0.1% になると予想されている)、マウスの行動に変化が現れるかもしれないことを意味している。「行動に何らかの影響が出るだろうが、それがどのようなものかはわかっていない」と Luo は語る。

Luo の同僚でロックフェラー大学 (米国ニューヨーク) の Peter Mombaerts は、CO₂ 濃度が徐々に上昇していけば、マウスはそれに適応できるかもしれない、と話す。「ヒトについても同じことがいえる」と彼はいい、ニューヨークのタクシーに乗り込んだときに悪臭を感じても、乗っている間に徐々に感じなくなっていく話に例えた。また、CO₂ 濃度の上昇につれて、マウスがもっと臆病になったり攻撃的になったりするという別のシナリオも考えられる、と彼は説明する。

米国農務省農業研究局 (アリゾナ州マリコパ) の Bruce Kimball は、人工的に CO₂ 濃度を大気中濃度の約 2 倍に上昇させて、植物に対する影響を調べている。この研究では、マウスが実験施設の研究者用避難所に入り込んで、「巣を作り、電線をかみ、回路基板に尿をかけた」という観察例は多々あるが、特に奇妙な行動がみられた例は、今のところないという。

研究は佳境へ

このように CO₂ 感知能力があっても、マウスは、CO₂ 濃度の上昇を知らせる「現代のカナリア」にはならないだろう。「カナリア」として使うには、マウスに



CO₂ の匂いを感じる：マウスは、いつだってあなたの吐息を嗅ぎつける。

遺伝子操作を行って、ほかの匂いには反応しないようにする必要がある、と Mombaerts はいう。特にセンサー機器が既にあることを考えれば、わざわざ遺伝子組み換えマウスを使うことは、あまり現実的ではない。

今回の研究成果をどのように応用できるかについて思いをめぐらせるのは時期尚早だ、と Luo は話す。大事なのは、今回特定された嗅覚サブシステムが哺乳類にとって明らかに重要だという点であり、ラットとネコでも同じサブシステムを見つけた、と彼は付け加えた。

現在、Luo の研究チームは、CO₂ 感知の細胞機構を正確に特定しようと研究を進めている。彼が重要だと予想しているのは、CAII 酵素を発現するグアニリルシクラーゼ D⁺ニューロンである。CO₂ を嗅ぎ取れないヒトの場合、CAII 酵素を産生する遺伝子は存在こそするものの不完全であり、Mombaerts はこの点が「興味深い」と感じている。 ■

1. Hu, J. et al. *Science* **317**, 953-957 (2007).



奈良女子大学附属中等教育学校メンバー



ポスターセッション



ポスター発表実演中



質疑応答



表彰



全体会

理科好き高校生たちの熱い夏

—— 平成19年度スーパーサイエンスハイスクール生徒研究発表会より

西村尚子 (サイエンスライター)

子どもたちの一層の理科離れが懸念されるなか、文部科学省は平成14年度より、未来の科学技術系の人材を育てるねらいで「スーパーサイエンスハイスクール (SSH)」の取り組みを行っている。8月2日～3日の2日間、今年度のSSH生徒研究発表会が横浜市で開催され、全国から集まった1300人を超える研究メンバーによる熱心な口頭発表とポスターセッションが行われた。

生徒研究発表会の1日目は「数学・物理」「物理」「生物」「化学・地学」の4分野に分かれて分科会が開かれ、平成17年度指定校計22校のメンバーが、用意したパソコン画面などを使って口頭発表した。その後、大学教授や高等学校長、文部科学省初等中等教育局、国立教育政策研究所、JST科学技術理解増進部などのスタッフからなる評価者たちによって各4分野から1校ずつ「代表校」が選抜された。一方で、1日目の夕方と2日目の午前中には84校によるポスターセッションも行われ、各校のメンバーが独自の研究と成果について、熱心に発表した。代表校は2日目の全体会で再び口頭発表を行い、その結果を受け、文部科学大臣奨励賞1校と独立行政法人科学技術振興機構理事長賞3校が決められた。

文部科学大臣奨励賞は「モーションキャプチャシステムの開発とその応用」について研究した第1分科会代表校の奈良女子大学附属中等教育学校に贈られた。メンバーの岡田真太郎さん、中嶋研人さん、西田惇

さん、樋口幸太郎さん、前澤俊哉さんらは、人や物体の動きをデジタル処理して記録できるモーションキャプチャシステムを搭載したアームつきロボットをほぼ自前で開発し、買い物客と一定の距離を保って追いかける買い物カート (右写真参照) を作り上げた。岡田さんらのモーションキャプチャは人や物体の正確な3次元座標をリアルタイムで表示することができ、将来は生体医学の分野でも応用が期待されているという。

そのほか、独立行政法人科学技術振興機構理事長賞が、群馬県立高崎高等学校、福岡県立小倉高等学校、鹿児島県立錦江湾高等学校 (p.18参照) の3校に贈られた。また、立命館高等学校などの5校には、ポスターセッション賞が贈られた (右表参照)。

発表会は盛会のうちに幕を閉じ、理科好きの高校生たちは、研究の続きや大学進学に夢を託して会場を後にした。

* 続く pp.18～21 では、参加校のうち各分科会の4分野とポスターセッションからそれぞれ1校ずつを独自に選び、計5校の研究内容について報告する。

平成19年度スーパーサイエンスハイスクール生徒研究発表会表彰結果

文部科学大臣奨励賞

奈良女子大学附属中等教育学校
「モーションキャプチャシステムの開発とその応用」



独立行政法人科学技術振興機構理事長賞

群馬県立高崎高等学校「風の流れの可視化」
福岡県立小倉高等学校
「送粉シンドローム～植物における生殖戦略の進化～」
鹿児島県立錦江湾高等学校「色素増感型太陽電池の研究」

ポスターセッション賞

立命館高等学校「線形合同法による乱数列の生成」
兵庫県立加古川東高等学校「西南日本内帯兵庫県南西部加古川市～高砂市に分布する岩石の形成過程」
筑波大学附属駒場高等学校
「パターン形成遺伝子 *slp1*、*slp2* の単離と発現解析」
岐阜県立恵那高等学校「ルビーをつくろう」
島根県立益田高等学校「ヒメスナホリムシの生息条件」

スーパーサイエンスハイスクール (SSH)

SSHは各学校が独自の研究テーマやカリキュラムを作成したうえで申し込み、文部科学省が指定校を選ぶ仕組みで、指定期間は5年間 (平成16年度指定校までは3年間。ただし、平成15年度と16年度指定校のうち計17校は、引き続き2年間の終了経過措置に入っている) である。平成19年度指定校は31校で、現在、平成15年度以降の合計101校の指定校が研究に取り組んでいる。

奈良女子大学附属中等教育学校

安友貴博

「色素増感型太陽電池の研究」

— 色素を利用してCO₂排出量の削減をめざす —

鹿児島県立錦江湾高等学校

第4分科会(化学・地学)より

この夏、日本は連日の猛暑日に見舞われ、熱中症による死者も多く出た。その原因が地球温暖化によるものであるかどうかは不明だが、少なくとも私たちに「暑い地球」を肌で感じさせるものとなった。「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」によると、近年の地球の平均気温は上昇の一途をたどっており、2100年には平均気温が6.4℃、海面水位が59センチ（ともに最大推計）も上がる可能性があるという。温暖化をもたらす要因としては、石油などの化石燃料の使用により、大気中の温室効果ガスである二酸化炭素が短期間のうちに急増したことが有力視されている。

鹿児島県立錦江湾高等学校の西田英樹さん、大野哲さん、川畑紀紀さんらのグループは、化石燃料にかわるエネルギー源として注目される太陽電池のうち、安価で大がかりな製造設備を必要としない「色素増感型太陽電池」に着目。実際に自分たちの手で色素増感型太陽電池を組み立てたうえで、さまざまな色素を用いて電池の性能を調べ、さらに、性能と色素の構造との相関についても検討した。

色素増感型太陽電池とは

現在開発が進められている色素増感型太陽電池は、1991年にスイスのグレッチェルらが高効率化に成功して以来、注目を集めている電池である。通常の太陽電池には

純度の高いシリコンが用いられているが、色素増感型太陽電池では太陽光を吸収できる色素を吸着させた二酸化チタン膜を用いる。製造コストが安く、電池の色や形を比較的自由に換えられ、出力もそこそこ出るのが特徴だが、シリコン型太陽電池と発電効率が低く、耐久性も劣ることから、本格的な実用化には至っていない。日本では、独立行政法人産業技術総合研究所などで研究開発が進められている。

発電原理は以下になる。まず、光が当たった色素がエネルギーの高い電子を放出する。この電子が酸化チタンを経由して導電性ガラスに移動する。その後、負荷で仕事をした電子は反対側の対極へ移動。対極まで来た電子は、電解水溶液中で電子を失った色素に再び供給される。この一連の反応が繰り返されることで、電気エネルギーを取り出せるようになるというわけである。

色素を用いる点を意外に思われるかもしれないが、植物は、葉緑体の色素（葉緑素）で太陽エネルギーを吸収し、そのエネルギーを用いることで養分を合成している。原理的には、色素増感型太陽電池も、植物の光合成に似ていて、一種の人工光合成ともいえる。

色素により電池の性能に違いが

西田さんらは、さまざまな資料を調べたり、大学の先生方に助言を受けたりしながら独自の色素増感型太陽電池を作り上げた。まず、色素を吸着させるための酸化チタン膜用のペースト（酸化チタン、ポリエチレングリコール、水、酢酸を混ぜたもの）を導電性ガラスに塗り、電気炉で焼成した後に、サフラニンやヤーマスグリーンなど、計8種の色素を吸着させた。次に、導電性ガラス上に電子の受け渡しを容易にする黒鉛を塗ったものや、白金を蒸着したものを対極として作製し、対極と酸化チタン膜を両面テープで接着した。このとき、両面テープの一部にチューブを挿入しておき、後にそこから電解質



左から西田さん、大野さん、川畑さん。独立行政法人科学技術振興機構理事長賞を受賞した。

溶液（ヨウ素溶液）を注ぎ入れた。

光源には、太陽ではなく、常に一定の光量を確保できるオーバーヘッドプロジェクターを用いた。光照射時間ごとの電流と電圧を測定し、そこから電力値を割り出し、その値がよかった色素については、鹿児島大学にてさらに詳細な測定を行った。

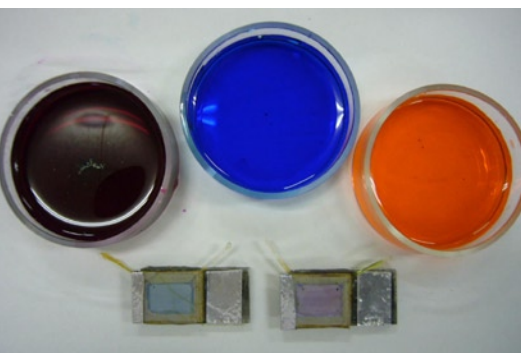
その結果、赤色をした「フクシン（一般的にはマゼンタとして知られる）」という色素を利用した電池の性能がよいことがわかった。「化学構造式から、フクシンが二酸化チタン膜に重ならないように配置し、そのために光の効果を受けやすく、電子の受け渡しがスムーズなのではないか」と西田さんらは推測する。ただし、電解質溶液を有機溶媒（アセトニトリル）にかえて同様の測定を行ったところ、別のエオシンという紫の色素の結果の方がよいこともわかったという。

生物の助けになる仕事をしたい

「酸化チタン膜は乾燥時にひびが入ったり、染色時に膜がはがれたりと苦労した」と西田さんらは声をそろえる。今後は、電池の性能を上げるために、酸化チタンと色素との結合状態、色素の電荷などを考慮してさらにいろいろな構造の色素で実験したいと考えており、太陽光での測定も行いたいという。

「将来は、多くの命を助ける仕事に関わりたい」。そう話す西田さんらが活躍するころには、化石燃料が太陽電池に置き換わり、温暖化に歯止めがかかっていることを期待したい。

安友康博



今回作製した色素増感型太陽電池（手前）と色素の三つ。色素は左からフクシン、メチレンブルー、エオシンY。

「狩バチにおける巣作り・子育て行動の進化」

—— 育児様式の観察で、真社会性への進化を考える

京都市立堀川高校

第3分科会(生物)より

スズメバチやコオロギ、カブトムシなどが市街地から姿を消しつつある一方、スズメバチやアシナガバチなどのハチはすっかり都市部に定着した感がある。やっかいもの扱いされることの多いハチだが、実はヒトを攻撃する危ないハチはごく一部。京都市立堀川高校自然科学部の菅原有真さん、川勝大河さん、大橋昂史さん、真砂全宏さん、藤田和樹さん、東大貴さん、志岐総太さんらのグループは、「ドロバチ」とよばれるハチの捕食や巣作り、子育てのようすを観察し、これらの行動とハチの社会構造とのかかわりを検討した。

営巣から羽化までを観察

世界には10万種を超えるハチがいてとされ、大きく、他の昆虫の組織に卵を生みつける「寄生バチ」、花の蜜を吸う「ハナバチ」、他の昆虫を捕獲して幼虫の餌にする「狩りバチ」に分けられる。菅原さんらが対象に

したドロバチ（ドロバチ科）は、狩りバチの一種でオオフトアオビドロバチなどが知られている。スズメバチのように集団で生活することはなく、単独で巣を作り（独居性という）、そこに狩りで捕らえた昆虫（ガやハムシ等）を蓄えて産卵するのが特徴だ。ヒトを攻撃するようなことはほとんどない。

菅原さんらが用いたドロバチは竹筒の中に泥の壁（しきり）を作ることで「個室の巣（育房）」とするもので、体長は15～20ミリほど。体は黒く、背中に黄色い斑点をもつ。菅原さんらは、まず、巣を作らせるための竹筒（竹筒トラップ）を1か月かけて200本作製。その後、竹筒トラップを京都市内の2つのフィールド（瓜生山、吉田山）に設置して営巣させた。営巣は2～3日で終了してしまうので、営巣されたものはすぐに回収し、室内で幼虫から羽化までを観察した。その結果、14本の竹筒トラップにオオフトアオビドロバチ17個体、ジガバチモドキ15個体の巣が作られ、サナギの時期にはオオフトアオビドロバチの生存率の方が低くなることがわかったという。その理由について菅原さんらは、「ジガバチモドキでは蛹の周囲に繭を張るのに対し、オオフトアオビドロバチでは繭を張らずじかに育房にいる。繭に蛹を保護する役割があるのではないかと考察する。

次に、菅原さんらは、竹筒中の育房で羽化したハチが巣の出口の方向をどのように判断しているのかを解明しようと考えた。自然の巣では、泥壁が奥の方向に湾曲しているが、菅原さんらは羽化したハチが脱出する際にその凸面をかじっているのではないかと考えた。そこでアクリルパイプ製の人工の巣を2本用意し、1本の泥壁には自然の巣にみられるような「湾曲」を施し、もう一方の壁は平面にして羽化のようすを観察してみた。それぞれの育房には、オオフトアオビドロバチのサナギ4個体とジガバチモドキのサナギ7個体を移し入れた。その結果、羽化後に、湾曲をつけた壁の巣から脱出できた個体数が、平面の壁の巣よりも有意



川勝さん（左）と菅原さん。

に多いことが明らかになったという。「私たちは泥壁の形状が、脱出時の手がかりになるのではないかと考えた」と菅原さんら。ただし、アクリルは竹筒と違って足場がつるつるしているので、脱出しにくそうな個体もみられたという。現在は、より竹筒に近い「紙筒トラップ」を作製して500本を観察フィールドに設置したところで、その観察が待たれている。

育児様式と真社会性への進化

スズメバチやアシナガバチなどの社会性をもつ狩りバチ（真社会性狩りバチ）の研究が進む一方で、独居性狩りバチの研究はあまり進んでおらず、両者の進化的つながりなどは未解明のままという。菅原さんらは、育児様式には真社会性狩りバチにも原始的な側面がみられることから、独居性狩りバチの育児様式とつながりがあるのではないかと推測している。「独居性狩りバチの幼虫にとって、寄生バチのような捕食寄生者の存在は大きな問題だが、この問題を克服するために育児様式を変え、新たな営巣方法を始めた集団が出てきてもおかしくないのではないか」と菅原さんら。

サンプルとなるハチの採集がむずかしいこと、竹筒に代わるよい素材が見つからないこと、たびたびハチに刺されることなど、観察と実験は困難の連続だ。それでも菅原さんは「研究の続きを大学でやりたい。熱帯地方にでかけて、一日中ハチのことしか考えない生き方をするのが夢だ」と話す。近い将来に「日本発、21世紀のファープル」が誕生することを期待したい。

京都市立堀川高校



ドロバチの標本写真。体長15～20ミリほどで、体は黒く、背中に黄色い斑点をもつ。



右の箱の中には脱出実験用に用いたアクリル製の人工巣を展示。箱の中の手前の筒が凹凸サンプルで、向こう側の筒が平面サンプルである。写真の左側は、最初に巣を作らせるために作製した竹筒トラップ。

安友康博

安友康博

「歩いて泳ぐヒューマノイドロボットの開発」

—— 静かに歩いて、平泳ぎのように泳ぐ

東京工業大学附属科学技術高等学校

第1分科会(数学・物理)より

工場や建設現場、医療現場などで多種多様なロボットが活躍しているが、ロボットの研究開発に携わる技術者の多くが「鉄腕アトム」のような人間型ロボット(ヒューマノイドロボット)の登場を夢見ている。実際、ホンダのASIMOやソニーのPINO、早稲田大学のWL-16RIIなど、二足歩行や階段昇降、ある程度のコミュニケーションを行えるヒューマノイドロボットが続々と開発されている。これらのロボットは、人体のデザインや動きを研究する材料となるほか、介護や家事支援にも応用できるとして期待を集めている。

東京工業大学附属科学技術高等学校シ

ステムデザイン・ロボット分野の松野孝博さん、大井健太郎さん、福井拓哉さん、三宅若さん、柳田隆一さんらのグループは、すでにさまざまな作業をこなせるとされるヒューマノイドロボットの行動範囲をさらに広げようと、前例のない「水がある場所や水中においても活動できるロボット」を作製した。

静歩行と平泳ぎを実現

試作機の作製は2006年12月から始まった。「まずは、人の足を模した機構で、どの程度の泳ぎが可能かを検証することを目的とした」と松野さんら。今年の3月に

ロボットが完成し、バタ足で毎秒10センチほど泳げることがわかった。4月以降は「地上で歩き、水中で泳ぐ」という目標の達成に向けて2号機の製作に取りかかった。具体的には、システムデザイン・ロボット分野の先輩たちが使っていたロボットをベースに、各自が学んだ静歩行・動歩行、逆運動学、流体抵抗、動力学の基礎を反映させた設計とプログラミングを行った。その結果、「静歩行による直進」と「平泳ぎのような泳ぎ」ができるようになった。

「歩かせるコツは、軽量化をはかったうえで、静歩行の『常に重心投影点が支持多角形内にあるようにする』という鉄則を守ることにあった。そうすれば、ロボットは歩行中のどのような姿勢でも静止して安定を保つことができる」と松野さんら。一方の泳がせるコツは、推進力となる力を大きくし、抗力となる力を減らすことにあったという。「今回採用し

「海外科学セミナー」アラスカオーロラ観測

長野県諏訪清陵高等学校

第2分科会(物理)より

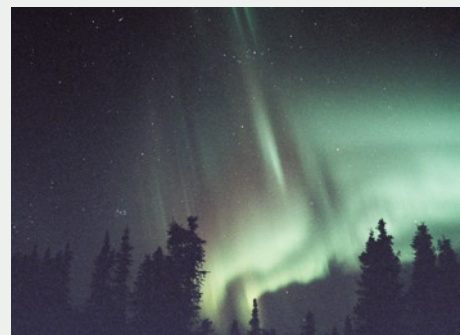
極地の夜空を美しく舞うオーロラ。光の芸術ともいべきその姿は、壮大で神秘的だ。オーロラは、太陽から飛んでくる荷電粒子(太陽風)が、地球磁場に捕らえられ、加速され、高層大気中の酸素や窒素の原子や分子に衝突することによって発光する現象である。

長野県諏訪清陵高等学校の坂本数貴さん、澤野友香さん、

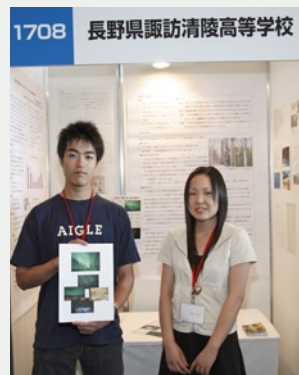
花岡知世さん、芳澤希さんらのグループは、SSH事業の一環として行われた米国アラスカ州フェアバンクスでのオーロラ観測の成果について発表した。今年2月11日～13日の深夜(現地)に行われた観測では、天候に恵まれて、3日間とも緑、黄、赤など色あざやかなオーロラが全天に広がった。全員が生まれて初めて間近に見るオーロラに魅了され、「感動しすぎて言葉も出なかった」と話すのは澤野さん。気温マイナス20℃にもなる極寒の中、彼女は肉眼では捕らえにくいオーロラの光の色の違いについて、それぞれ青・緑・赤の波長を通すフィルターをつけたデジタルカメラ3台で同時撮影することで比較・分析を試みた。スペクトル分析においては、オーロラの弱い光を集めるため、傘とアルミ箔を使った手作りのパラボラアンテナ型

観測機で、酸素原子の発光によると考えられる緑色の5577Åの線スペクトルを捕らえることに成功。一方、オーロラの特徴的な動きを細かく観察するため、高感度CCDカメラを用いてカーテン状になったり、渦を巻いたりして激しく動くようすを動画撮影した坂本さんは、「予想以上に動きが速く驚いた」と感想を語った。

このような海外研修は同校初の試みで、参加したのは2年生のSSHコース28人全員だ。オーロラのほかにも、極地の気象や植生など各自の研究テーマごとに観測・実験を計画・実施した。もともと同校天文気象部には、50年以上にわたる太陽の黒点観測の歴史があり、今回の計画はそれが原点となっている。生徒たちは、事前学習で科学と語学の両面から入念な準備を進め、現地では国際的高大



カーテン状に広がる見事な緑や赤のオーロラ。



坂本さん(左)と澤野さん。

連携(高校と大学の連携)により、アラスカ大学の赤祖父俊一元所長からの特別講義も受けた。帰国後は観測データをもとに分析や考察を行い、学会等で発表。中身の濃いサイエンスプログラムとして実を結んだ。「大学では素粒子物理学を勉強したい」と夢を語る坂本さん。この研修で身につけた国際的・科学的センスを生かし、大きく飛躍してほしいものだ。北原

長野県諏訪清陵高等学校生徒撮影

た平泳ぎは、上下方向に力が生じにくいので姿勢を安定させやすいという利点があるが、同時に、推進を妨げる方向に力がはたらきやすい欠点もあり、両者のバランスをうまく取ることが重要だった」とコメントする。

今も続く防水と泳ぎの挑戦

作製にあたっては、泳がせ方や歩かせ方の工夫がむずかしいのかと思いきや、意外にも、苦労したのは「いかに防水するか」という点だったという。「大学や企業の技術に頼ることができないので、身の回りにあるもので工夫するしかなかった」と松野さんら。試作機のフレームの防水には防水スプレーを、モーターなどの電子部品の防水には接着剤を使用し、2号機はロボット全体をビニールで覆うことで防水した。ただし、完璧な防水とはいいがたく、現在もよい方法を模索中だという。



左は、プールのスタート台の上で直立している2号機。右は、平泳ぎで蹴伸びをした直後の2号機。今のところ、飛び込みの能力はないが、将来的には飛び込みなどもさせたいとしている。



泳法に関しては、学校のプールを利用した実験と改良が重ねられている。「平泳ぎといってもまだ不安定な動作なので、今後はそのほかの泳法も試し、最終的には、人間の泳法のようにこだわらず、このロボットにあった泳ぎを見つけない」と話す。戦争に使うためのロボットまで登場する時代だが、将来は、研究者として誰かを幸せにできるロボット作りをしたいと意欲を燃やす。



左から松野さん、柳田さん、福井さん。

「パターン形成遺伝子 *slp1*、*slp2* の単離と発現解析」 筑波大学附属駒場高等学校

ポスターセッションより

ヒトを含む多細胞生物の発生は、受精卵というたった1つの細胞からはじまる。受精卵は盛んに細胞分裂することで同じような細胞の集まりとなるが、やがて特定の細胞が特徴的な形態と性質をもつものへと分化し、個体として完成されていく。こ

うした「生物の形づくり」は遺伝子によって厳密にプログラムされており、カエルの子は必ずカエルになり、魚になるようなことはない。

形づくりは、体の前後が決められ、その軸（体軸という）に沿った節が作られることから始まる。このことを「パターン形成」といい、例えば昆虫では、最終的に頭、胸、腹の3つの節ができあがり、胸には6本の足が作られる。

筑波大学附属駒場高等学校の江口智也さん、内田順也さん、亀井亮佑さん、仮屋園遼さん、作田隆義さん、杉原圭さん、高橋厚弥さん、西村貴皓さんらのグループは、卒業研究として、ショウジョウバエから *slp* というパターン形成遺伝子を取り出し、その遺伝子が発現するようすを解析した。

slp 遺伝子は *slp1* 遺伝子と

slp2 遺伝子から成り、その配列の一部はヒトにもみられる。江口さんはまず、ショウジョウバエの成虫からDNAを取り出し、プライマーを設計したうえで *slp1* と *slp2* の両遺伝子を出し、それらをPCRで増幅した後、業者に依頼してその配列を調べた。その後、データベースで照合し、確かに目的の遺伝子が単離できたことを確かめたうえで、ショウジョウバエの発生後0.5～3.5時間の胚において、両遺伝子がどのように発現しているかをみた。

「両遺伝子とも、発生段階ごとに、特徴的なよこ縞状（体軸に直行する縞）の発現を示した。発現パターンは大きく3つに分けられ、1番目のパターンによって『複数の大まかな区画分け』がなされ、2番目で『2擬体節分の区画分け』が、さらに3番目で『各擬体節分の区画分け』



slp1 遺伝子の発現のようす。紫色の部分に *slp1* 遺伝子の mRNA が存在する。胚の発生段階はステージ7で、2番目のパターン形成遺伝子（ベアールル遺伝子）としての発現がなされ、さらに3番目のパターン形成遺伝子（セグメントポラリティ遺伝子）としての発現も始まっていると考えられる。

がなされることがわかった」と内田さんら。発生の異なる段階で3度も使い回され、そのたびに発現パターンが異なることから、「*slp* 遺伝子は進化において、まだパターン形成遺伝子の種類が多くない時期に生じたのではないかと推測する。

「*slp* 遺伝子の機能については今後の課題としたい」と話す江口さん。将来は遺伝子を扱う研究に携わりたいという。 西村

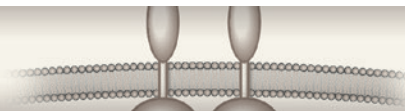


左から江口さん、仮屋園さん、高橋さん。奥で説明中なのは西村さん（後ろ向き）。ポスターセッション賞を受賞した。

Broken genes in solid tumours

肺がんの原因となる融合遺伝子

Matthew Meyerson



2つの遺伝子の一部が融合して雑種遺伝子を形成するような変異は、血液関連のがんで多くみられる。こうした融合遺伝子の1つが、最も広くみられる種類の肺がんにかかわっていることが、新しい知見から明らかになった。

Nature vol.448 (545-546) / 2 August 2007

肺がんは、世界中のがんによる死亡者数の第一位を占めており¹、肺がんによる年間の死亡者数は100万人を超える。非小細胞肺がん (NSCLC) は、肺がんの全症例のおよそ80%を占める。Nature 2007年8月2日号で曾田たち²は、ヒトのNSCLCに関係する遺伝子を発見して報告している。彼らは、第2染色体短腕 (2p) 上にある遺伝子の再配列による変異が、ALK チロシンキナーゼをコードする遺伝子 ALK の発現を活性化させることを見つけた。チロシンキナーゼは、ほかのタンパク質のチロシン・アミノ酸残基にリン酸基を付加することで、そのタンパク質の活性を調節する「分子スイッチ」である。これらの酵素は多くのがんに関係があるとみられており、そのため、染色体再配列をもつがん患者に対する治療法として、ALK キナーゼの活性の阻害が威力を発揮するのではないかと考えられる。

実際、活性化したがん遺伝子 (がん関連遺伝子) のタンパク質産物を阻害することは、がん治療における有効な戦略の1つとなっており³、研究初期には、酵素によるチロシンキナーゼの阻害による成功例が多い。例えば、ABL チロシンキナーゼを活性化する染色体再配列によって引き起こされる慢性骨髄性白血病⁴では、チロシンキナーゼ阻害剤であるイマチニブ (グリベック) により患者の生存期間を延長することができる⁵。

しかし、どんな種類のがんであっても、がんの成長と生存を支える複数のがん遺伝子のうち一部のものし

か特定されていないため、遺伝子を標的とする治療戦略の応用には限りがあった。そのうえ、遺伝子機能を破壊する治療戦略が、既知のがん遺伝子だからといって必ずしも使えるとは限らない。したがって、曾田たちが今回、ありふれたがんの原因となる新しいがん遺伝子を発見し、しかも、このがん遺伝子の産物の分子構造から酵素による阻害を受けやすいことも見つけたのは、画期的な成果である。

曾田たち²は、喫煙歴をもつ NSCLC 患者1名から肺の組織標本を採取し、全メッセンジャー RNA プールを抽出して、mRNA 転写産物に相補的な DNA 配列のライブラリーを作成し、増幅した。次に、従来の形質転換アッセイを使って、この相補的な DNA 配列のがん遺伝子活性を解析した。マウスの3T3 繊維芽細胞を形質転換させる可能性のある遺伝子、つまり、その遺伝子の発現によって3T3 繊維芽細胞が腫瘍細胞に特有の性質をもつようになる遺伝子を探したのである。それまで、いくつかの研究グループが同じようなスクリーニング法を試みていたが、今回ほどめざましい結果を得たグループはほとんどなかった。そのため、この方法の成功は技術上の偉業といえるものだった。

曾田たちは、3T3 細胞を形質転換させる塩基配列として、1つの融合 mRNA 転写産物に由来する相補的な DNA 配列を特定した。この塩基配列の最初の部分は、EML4 遺伝子の一部からなっており、それに続く部分は ALK 遺伝子の一部からなっていた。もともと ALK

遺伝子は、血液由来のがんの一種である未分化大細胞リンパ腫に関与する遺伝子として見つかったものである⁶。したがって、肺がんでこの遺伝子の活性化が見つかったことは驚きである²。

大部分の NSCLC、とりわけ組織標本検査で最もよくみられる肺腺がんは、EGFR や ErbB2 などの受容体チロシンキナーゼやそれらの下流の Ras や Raf が遺伝子が介在する分子シグナル伝達経路の活性化を必要とする⁷。そのため、活性化された ALK は EGFR/ ErbB2 と同じく、Ras-Raf シグナル伝達経路のスイッチを構成的にオンにする可能性があると考えてよさそうである (図 1)。

曾田たちは次に、日本人の NSCLC 患者で *EML4-ALK* 融合遺伝子の保有率を調べたところ、調査した 75 名の患者のうち 5 名が保有していた。ほかの患者集団における *ALK* 再配列の保有率はまだ不明だが、重要な問題である。というのは、同じく NSCLC につながる 2 つのほかの変異 (*EGFR* と *K-RAS* にある) の保有率は、民族間で差があるからだ。東アジアの NSCLC 患者のうち、およそ 40% が *EGFR* 変異を保有しており、10% が *K-RAS* 変異を保有している。ところが、欧州や北米では、*EGFR* 変異を保有しているのは NSCLC 患者のおよそ 10% にすぎず、患者の約 25% では *K-RAS* がん遺伝子に変異している。曾田たちが調べた小規模な症例群では、*ALK* の変異をもつ集団と *K-RAS* や *EGFR* の変異をもつ集団はまったく重ならなかった。

これまでのところ、肺がんに関連する有効な標的治療薬としては、チロシンキナーゼ阻害剤であるゲフィチニブ (イレッサ) やエルロチニブ (タルセバ) しかない。これらは多くの国で認可されており、*EGFR* 変異をもつ NSCLC 患者の治療用には最も有効だとみられている⁸⁻¹⁰。曾田たちは、*ALK* の阻害が生理学的に実現可能なことを示す証拠を提示し、*EML4-ALK* 融合遺伝子で形質転換したマウス BA/F3 細胞を、*ALK* 阻害剤で特異的に殺傷できることを示した。もし *EML4-ALK* 融合が喫煙歴のある NSCLC 患者において高頻度で見つかれば、こうした阻害剤の臨床使用の可能性に対して特に関心が集まることだろう。ゲフィチニブやエルロチニブが最も有効な対象は、ほぼ確実に *EGFR* 変異による腫瘍をもつ喫煙歴のない NSCLC 患者だからである。

最近まで、染色体再配列は主に血液関連のがんと関連づけられており、固形腫瘍との関連はほとんど考えられていなかった。しかし、前立腺がんでは *TMPRSS2-ERG* 融合遺伝子や *TMPRSS2-ETV1* 融合遺伝子が発見され^{11,12}、今回さらに *EML4-ALK* 融合遺伝子の肺がんへの関与が示唆された。これらのことより、

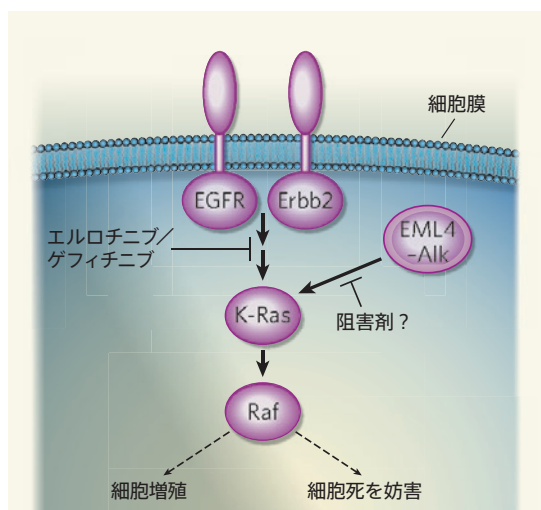
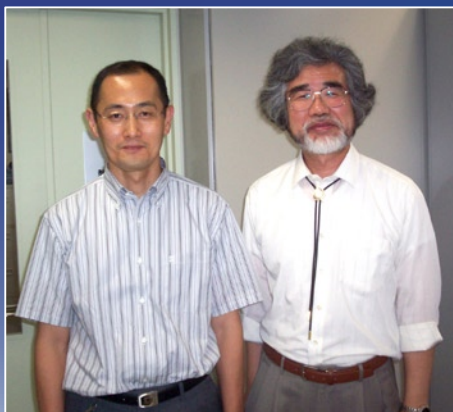


図 1 *EML4-ALK* 融合タンパク質と肺がん。*EGFR* と *ErbB2* という 2 種類のチロシンキナーゼの変異は、これらの受容体の下流にあるシグナル伝達分子 (*Ras* と *Raf*) の変異とともに、非小細胞肺がん (NSCLC) に関連することが既にわかっている。これらの変異タンパク質は、がん細胞の増殖を促進したり、がん細胞のプログラム細胞死を妨げたりすると考えられている。曾田たち²は、NSCLC の一部の症例では染色体再配列によって、*EML4-ALK* 融合タンパク質を作り出す融合遺伝子が生じていることを見いだした。この融合タンパク質も活性型チロシンキナーゼとして機能するので、*EGFR* 介在型のシグナル伝達経路を促進させる可能性がある。エルロチニブやゲフィチニブといったチロシンキナーゼ阻害剤は、NSCLC の有効な治療薬であることから、*EML4-ALK* の阻害剤もこのがんの治療薬として同じく有望だと考えられる。

染色体再配列で生じる活性型の融合遺伝子はおそらく、固形腫瘍において一般的かつ重要なものだと考えられる。こうした遺伝子融合をゲノム規模で系統的に見つけ出す方法や、それらの遺伝子融合情報を利用して診断する方法を開発することで、固形腫瘍の発生機構の解明に向けて一歩前進することができよう。 ■

Matthew Meyerson、ダナ・ファーマーがん研究所 (米)

1. Parkin, D. M., Bray, F., Ferlay, J. & Pisani P. *CA Cancer J. Clin.* **55**, 74-108 (2005).
2. Soda, M. et al. *Nature* **448**, 561-566 (2007).
3. Sawyers, C. *Nature* **432**, 294-297 (2004).
4. de Klein, A. et al. *Nature* **300**, 765-767 (1982).
5. Druker, B. J. et al. *N. Engl. J. Med.* **344**, 1031-1037 (2001).
6. Morris, S. W. et al. *Science* **263**, 1281-1284 (1994).
7. Sharma, S. V., Bell, D. W., Settleman, J. & Haber D. A. *Nature Rev. Cancer* **7**, 169-181 (2007).
8. Lynch, T. J. et al. *N. Engl. J. Med.* **350**, 2129-2139 (2004).
9. Paez, J. G. et al. *Science* **304**, 1497-1500 (2004).
10. Pao, W. et al. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **101**, 13306-13311 (2004).
11. Tomlins, S. A. et al. *Science* **310**, 644-648 (2005).
12. Tomlins, S. A. et al. *Nature* **448**, 595-599 (2007).



京都大学再生医科学研究所の中辻憲夫所長（右）と
同大学同研究所の山中伸弥教授。京都大学にて撮影。

Profile

Reprogramming expert makes a lab in two countries

日米に研究室をもつ 幹細胞研究のエキスパート

Monya Baker

Published online: 5 July 2007 | doi:10.1038/stemcells.2007.51

<http://www.nature.com/stemcells/2007/0707/070705/full/stemcells.2007.51.html>

多能性の謎を解くため、太平洋を越えて「通勤」する山中伸弥教授

この6月、山中伸弥の名は、ニューヨークタイムズ紙やUSAトゥデイ紙をはじめとする主要メディアで盛んに取り上げられた。マウスの培養皮膚細胞を、胚性幹（ES）細胞とそっくりの細胞に変換させる技術を開発したためだ¹。同時期に他の2つの研究グループも同様の方法の有効性を報告している^{2,3}。こうした方法がヒトでも有効ならば、簡単な皮膚生検を行うことで、ひとりひとりの患者に合わせたES細胞そっくりの細胞を、胚や卵細胞を使わずに作り出すことができるだろう。すでに現在、いくつもの研究室が、細胞療法の移植用や薬剤のスクリーニング用に適した同様のヒト細胞を作り出す「レシピ」を手に入れようと、しのぎを削っている。

この発見のおかげで、世界でも最長クラスの遠距離通勤が始まった。山中は今年の8月から、10時間にも及ぶフライトを月に2回することになる（記事は7月

5日オンライン掲載）。グラッドストーン研究所（米国カリフォルニア州、サンフランシスコ）と、京都大学再生医科学研究所の間を行き来するのだ。

この通勤のきっかけは、山中の左手首に残る長く細い傷跡の記憶とともに、30年近く前にさかのぼる。柔道とラグビーに明け暮れていた若かりしころの山中は、神戸大学医学部に入学する前も在学中も病院の世話になることが多かった。そうした体験が山中を整形外科医の道へと導いたのだが、骨を固定したりギブスを割ったりする日々山中は満足できなかった。整形外科医の仕事は孤独なところがあり、ほかの研究者ともっと交流したいという思いが募った。「行き詰まりを感じ、状況を変えたいと思いました」。私が6月に京都を訪れた際、山中は当時を回想してそう語った。

脱出した最初の行き先は古典的な薬理学の世界で、大阪市立大学で犬に薬剤

を投与する日々を送った。ところがある日、進路を再び変えることになる論文を目にした。その論文には、目的の遺伝子を欠失させたマウスを作り出す方法が報告されていた。「1つの遺伝子を『ノックアウト』するということです」と山中はいう。「当時の私にとって、それは奇跡のように思えました」。そして彼は進路を変えることを決断した。当時の日本には、こうしたノックアウトマウスの作製に取り組んでいた研究者がわずかながらいたが、山中はかねてから日本を出たいと考えており、「50通か60通の履歴書」をさまざまな研究所に送付した。そして最終的に、グラッドストーン研究所のTom Innerarityから1枚のファックスを受け取った。サンフランシスコへ来ればノックアウトマウスが作れると約束してくれたのだ。

1993年、グラッドストーン研究所に到着した山中は直ちに、肝臓に腫瘍を発生

しやすいトランスジェニックマウスの研究に取りかかった。そしてc-Mycとよばれる遺伝子が、細胞が多種多様な細胞種に分化する能力、つまり多能性のすぐれたマーカーとなることに気づいた。そこで山中は、研究対象をマウスの個体全体から細胞へと移した。その後、日本へ帰国した山中は、最初に奈良先端科学技術大学院大学に勤務し、後に京都大学へ移った。

適切なマーカー遺伝子系があれば、抗生物質を投与することで、多能性関連遺伝子を発現していない細胞を死滅させることができると、山中は気づいた。とすれば、分化した細胞を再プログラミングし、それが多能性をもつかどうかを、リポーター遺伝子系を利用して調べることができるのではないかと考えた。

当初の計画では、cDNAライブラリーを使ってゲノムの広範なスクリーニングを行う予定であったが、最終的に山中は、対象を絞り込んだ方法をとることに決めた。共同研究者の高橋和利の手元には、多能性に関連する遺伝子が組み込まれたレトロウイルスベクターが揃っており、準備は整っていた。彼らは、すべてのベクターを細胞に感染させ、胚性幹細胞によく似た細胞の出現を待った。

取材に際して山中は、この研究の成功は運のよさに負うところが大きいと語ったが、グラッドストーン研究所の所長であるDeepak Srivastavaにいわせれば、山中の試みは、多数の遺伝子の組み合わせを系統的に同定する必要のある、大胆で技術的にもむずかしい実験であった。「彼は発想を飛躍させました」とSrivastavaはいう。「多能性を維持するために一群の転写因子が必要ならば、多能性を誘導するためには、それらの転写因子のうち1個か少数の組み合わせで十分なのではないかと考えたのです」。

しかし、必要なタンパク質の数を知る術はなかった。また、レトロウイルスを感染させた細胞が1個か2個の遺伝子を取り込む可能性は高いが、3～4個の遺伝子を取り込む可能性は極めて低い。多

くの研究者は、たとえ可能だとしても、多能性を誘導するためには10個以上の遺伝子が必要であると考えていた。「そんな実験を実際に行う者はほとんどいません」と、京都大学再生医学研究所の所長を務める中辻憲夫はいう。「たいがい研究者はあきらめてしまうでしょう」。

「実のところ私たちも、うまくいくとは思っていませんでした」と山中は振り返る。そして実験が成功したとき、当初は結果を公表することを躊躇した。そのころ、韓国の研究者Woo-suk Hwang(黄禹錫)によるヒト胚性幹細胞のクローン化成功の報告が、ねつ造であるとして激しく批判されており、そのため、特にアジアの幹細胞研究者のコミュニティ全体が守勢に立たされていた。山中は、結果の再現性が確認されるまで公表を延期することにした。

2006年の半ばに山中が最初の研究結果を公表すると、大きな興奮が巻き起こると同時に疑念の目も向けられた。そうしたなかでSrivastavaは、山中をなんとかしてグラッドストーン研究所によび戻そうと決心した。そして彼は研究所の出資者たちに対して、山中のような研究者には、たとえ本人が月に1週間しか研究室に来ることができなくとも、専任の実験助手(テクニシャン)、ポストドク、研究スペースを提供すべきだと説得を始めたのである。

そうした招来の動きがあったのだが、山中が太平洋をはさむ遠距離通勤者の道を選ぶことになったのは、結局のところ、日米の法規制のためであった。山中の妻は日本で医師をしているが、米国で患者を診療することはできない。そのため彼女と10代の娘たちにとっては日本に留まるほうがよい。ところが日本では、ヒトES細胞研究に関する法規制のために山中の研究が制限されてしまう。グラッドストーン研究所で山中は、ヒトES細胞におけるリポーター遺伝子系を設計・操作し、ヒトES細胞を分化させて、次にその再プログラミングを試みる予定

でいる。また京都大学では、培養皮膚細胞の研究を続け、レトロウイルスを必要としない再プログラミング技術の確立をめざすつもりだ。ゲノムに組み込まれないウイルスを使用する技術の開発にはまだ成功していないと山中は語る。

山中とグラッドストーン研究所の「永遠の」同僚たちの間には懐かしい思い出がいくつもある。Srivastavaには、山中のポストドク時代の実験助手たちが、彼を新ポストに招くための面接が終わるのを、ドアの外で待ちかまえていたことが印象に残っている。「山中にひと言あいさつしてハグをするためだけに、およそ40分も待っていたのです」。グラッドストーン研究者に求められる条件の1つは、同僚たちと緊密に協力して仕事することである。そのためSrivastavaは、山中ならば、研究室に姿を見せる時間が短くともグラッドストーンのよきメンバーになれるはずだと強く思った。山中が数年前にともに研究した仲間と再び心を通わすようすを見てそれを確信したと、Srivastavaはいう。一方、山中自身は、ポストドク時代に体験したような研究者どうしの交流が待ち遠しいと話す。「ここだと、私は指示を出してばかりですから」と山中は京都の研究室を指している。「私は議論がしたいのです」。

中辻によれば、京都大学には外部に研究室をもつ教授が数人いる。中辻自身も15人のメンバーを擁する別の公的研究所を任されているが、その場所は京都南部で近い。海外の研究所と兼任の例は極めて少なく、移動にかかる時間は負担となるだろう。しかし山中はじっと立ち止まっているような人間ではない。中辻の話では、勤務時間後にキャンパス内をジョギングする山中の姿がしょっちゅう見られるそうだ。

Monya Baker は、*Nature Reports Stem Cells* のニュースエディター。

1. Okita, K. et al. *Nature* **448**, 313-317(2007)
2. Maherali, N. et al. *Cell Stem Cell* **1**, 55-70 (2007)
3. Wernig, M. et al. *Nature* **448**, 318-324(2007)

暑かった夏も過ぎ行き、いよいよ食欲の秋が到来しました。最近では、食事に合わせてワインやシャンパンを日常的に楽しむ人も多いようです。

そこで今回は、赤ワインなどの原料として知られるピノ・ノワール種のゲノムの塩基配列が解読された記事を読んで、まずは勉強にいそしんでみましょう。

NEWS news@nature.com

語数：623 words 分野：遺伝・進化・植物

Published online: 26 August 2007 | doi:10.1038/news070820-13

Grape genome unpicked

Vintage sequence could lead to improved pest resistance and new wine flavours.

<http://www.nature.com/news/2007/070820/full/070820-13.html>

Michael Hopkin



1. A French-led team of geneticists has **cemented** the country's reputation as the world's wine capital — by compiling the complete **genetic code** of a Pinot Noir grape. Perhaps unsurprisingly, they have discovered that the species has **a large repertoire** of genes that produce compounds known to give complex flavours to fruit.
2. Among the almost half-billion **DNA 'letters'** pieced together by the researchers are a host of genes that encode **terpenes** and **tannins** — which any **wine buff** will tell you are essential for a fine vintage.
3. The finished sequence is the work of a consortium of French and Italian researchers led by Patrick Wincker, a geneticist based at Genoscope — the French national genetic-sequencing facility in Evry. Full analysis of the more than 30,000 genes contained within the sequence could aid breeding **strains** with novel flavours or better pest resistance.
4. It is the first genome of any fruit crop to be sequenced, and only the fourth **flowering plant**. It also gives evolutionary geneticists a valuable insight into the crucial evolutionary event that divided flowering plants into the two main groups we see today.
5. **Full of flavour**
Wine-producing grapes (*Vitis vinifera*) show lots of **genetic variation**. So the researchers chose Pinot Noir grapes, which **lend** their flavour **to** both Burgundy and Champagne wines, and subjected the grapevines to several generations of **inbreeding** to get a strain (called PN 40024) with a less variable sequence.
6. They then chopped its DNA into millions of fragments, sequenced these, and **spliced** the code back together using a computer programme to create the full genome. The sequence is published online by *Nature*¹.
7. The finished sequence shows a huge expanse of terpene and tannin genes compared with other plant genomes studied so far, says team member Jean Weissenbach, who is based at Genoscope. The strain studied contains 70-80 terpene genes alone, he says. Studying these could lead to new styles to **tickle the palate**, Weissenbach suggests. "We may be able to find combinations of terpene genes which could provide new flavours," he says.
8. But genetically **tweaking** the taste of wine won't be **straightforward**, since flavour also depends upon the conditions under which the grapes are grown and the wine is produced. And there is a lot of genetic variation that the team doesn't yet know about. "There are probably a different number of [flavour] genes from vine to vine; more or less flavour genes may be expressed at a given time; there may be seasonal differences," says Weissenbach.
9. Helping farmers to beat pests could be more straightforward. Many grape varieties fall victim to pests such as **mildew**, and spotting the genes grapes use to defend themselves could help in breeding varieties more resistant to attack.
10. **Grain and grape**
In evolutionary **terms**, the grape genome also shows the **tell-tale** signs of a crucial event, roughly 250 million years ago, that divided the flowering plants into their two main groups — **dicotyledons**, such as trees, fruit and vegetables; and **monocotyledons**, which include grass-like crops such as wheat and rice, as well as flowers such as orchids.
11. **Drinking lore** warns against 'mixing the grain and the grape'. But comparing the grapevine sequence with that of rice reveals that grapes show the **hallmarks** of

a **wholesale triplication** of the entire genome, which dicotyledons underwent but monocotyledons did not. The pattern is consistent with the organization of the two other dicotyledons genomes so far sequenced, the **poplar tree** and the genetic model plant *Arabidopsis*.

12. But while evolutionary geneticists **ponder** this, and wine-producers **contemplate the prospect of** new flavours, the insights provided by genetics can't replace the knowledge gained through centuries of tradition, Weissenbach points out. "We may create an increase in variety in terms of flavours, but in terms of quality that might be a different story," he says.

References

1. French-Italian Public Consortium for Grapevine Genome Characterization.
Nature advance online publication, doi:10.1038/nature06148 (2007).

Topics 「ゲノム・プロジェクト」とは？

細菌からヒトまで、さまざまな生物の全遺伝子の塩基配列を解読しようとするプロジェクト。これまでに、大腸菌、酵母菌、イネ、シロイヌナズナ、マウス、ヒトなど、多くの種の全遺伝子が解読されており、現在進行中のプロジェクトも数多い。

ゲノム・プロジェクトにより、新薬を開発したり、進化の過程を解明したり、病虫害に強い農作物を品種改良したりすることが可能になる。例えば、ある病気の原因遺伝子が同定されれば、その機能を制御する薬品を開発することで、より効果的な治療ができるようになる。

Science key words

リード **sequence** : 塩基配列

「配列」「順番」「連続」の意味であるが、ここではDNAの塩基配列を意味する。生物学では、タンパク質のアミノ酸配列や糖鎖の配列にも用いられる。

1. **genetic code** : 遺伝子コード (遺伝暗号)

タンパク質のアミノ酸配列に対する遺伝情報を担う暗号。DNAの塩基配列によって示される。

2. **DNA 'letters'** : DNA 「文字」

DNAの塩基配列を記述するときに、4種類の塩基 (Adenine, Cytosine, Guanine, Thymine) の頭文字 (A, C, G, T) を用いるところから、ここではこのように表現している。

2. **terpene(s)** : テルペン

複数のイソプレネ ($\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{CH}=\text{CH}_2$) が結合してできた天然有機化合物の総称。イソプレノイドともよばれる。植物、菌類、昆虫などに存在し、ホルモンなどとして生理活性を有するものも多い。

2. **tannin(s)** : タンニン

$\text{C}_{14}\text{H}_{10}\text{O}_9$ 。赤ワインやお茶、柿などに含まれている、渋みや苦味の植物由来成分。タンニンは、赤ワインの風味に影響を与えるだけでなく、酸化を防止する役割をもつ。

4. **flowering plant** : 顕花植物

花を咲かせ、種子をつける植物の総称。厳密な花の区別があいまいで、現在では種子植物 (seed-plant) とよばれることが多いため、参考訳では文脈によって種子植物あるいは被子植物としている。

5. **genetic variation** : 遺伝的多様性

個体群内にさまざまな遺伝子が存在すること。genetic diversityともいう。遺伝的多様性が保たれていると、環境の激変などに耐えて種としての絶滅を免れたり、進化を促進したりする可能性があるといわれている。

Words and phrases

タイトル **unpicked** : 「解読された」

unpick(ed) には、「縫い目をほどく」や「(花や果実が) 摘みとられていない」という意味がある。

リード **vintage** : 「ビンテージワイン」「当たり年のワイン」という意味があるが、ここでは「ワイン用ブドウ」の意味。

リード **pest resistance** : 「病虫害抵抗性」

1. **cemented** : 「強固にした」

動詞cementは、もともとは「セメントでつなぐ」という意味。

1. **a large repertoire of...** : 「～の大レパートリー」

2. **wine buff** : 「ワイン愛好家」

buffは主に北米の口語表現で、「ファン」「マニア」「専門家」の意味。もともとは火事や消防士のマニアのことを意味していた。20世紀初頭のニューヨーク市ボランティア消防士の制服の色 (buff; くすんだ淡黄色) に由来している。

3. **strains** : 「系統」「菌株」「品種」

5. **lend A to B** : (AをBに) 「与える」「添える」「加える」

6. **spliced** : 「つなぎ合わせた」

7. **tickle the palate** : 「味覚を楽しませる」

8. **tweaking** : 「微調整する」

8. **straightforward** : 「単純明快で、問題がないこと」「一筋縄」

10. **In ... terms** : 「～に関して」「～の点から見ると」「～についていえば」

10. **tell-tale** : 「(証拠として) 物語っている」

11. **drinking lore** : 「酒飲みの教え」

11. **hallmarks** : 「顕著な特徴」

もともとは、金銀の品質を証明する公的な刻印のこと。

11. **wholesale** : 「大規模な」「大量の」

12. **ponder** : 「熟考する」「じっくり考える」

12. **contemplate** : ponderと同じ意味で用いられる場合もあるが、「予期する」「もくろむ」といった意味の場合もある。

12. **the prospect of ...** : (～の) 「見込み」「見通し」「可能性」

5. **inbreeding** : 同系交配

同じ系統に属する個体間での交配。品種改良の際、同系交配を繰り返すことで、必要な遺伝子の発現を安定化することができる。反面、劣勢の有害遺伝子の発現が表面に現れることも多い。

9. **mildew** : うどんこ病

ウドンコカビ科の純活動寄生菌による植物病害の総称。葉などがうどん粉をまぶしたように白くなり、徐々にその範囲が広がっていく。その結果、光合成が正常にできなくなったり、葉から栄養を吸収されたりするため、成長不良が起きて枯れてしまうこともある。

10. **dicotyledons** : 双子葉植物

被子植物のうち、2枚の子葉をもつ植物のこと。網状になった葉脈や、維管束が環状に並んでいることなどが特徴として挙げられる。

10. **monocotyledons** : 単子葉植物

被子植物のうち、1枚の子葉をもつ植物のこと。主に草本にみられる。根がひげ根ばかりであり、葉脈が平行脈であることなどの特徴をもつ。

11. **triplication** : DNAの三重複

一般的には「3倍」「三重」の意味であるが、ここでは、同じ塩基配列をもつDNA断片がゲノム上に3つ存在するようになった状態をいう。

11. **poplar tree** : ポプラ (の木)

ヤナギ科ヤナギ属 (*Populus*) の樹木の一般的な呼称。2006年9月に、ポプラの一種、ハコヤナギ (*Populus trichocarpa*) の全ゲノム配列解読が、樹木としては初めて終了した。

11. **Arabidopsis** : シロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*)

アブラナ科シロイヌナズナ属の雑草。2000年12月に、植物としては初めて全ゲノム配列解読が終了した。ゲノムサイズは1.3億塩基対、遺伝子数は約2万6000個で、被子植物では最小の部類に入る。分子生物学実験に適しているため、モデル生物として広く利用されている。

Published online: 26 August 2007 | doi:10.1038/news070820-13

ブドウのゲノムが解読された

ワイン用ブドウのゲノムの塩基配列解読は、病虫害抵抗性の改善や新たな風味をもつワインの開発につながるかもしれない。

<http://www.nature.com/news/2007/070820/full/070820-13.html>

マイケル・ホプキン



1. フランス主導の遺伝学者チームが、ピノ・ノワール種のブドウの全遺伝コードをまとめあげ、世界のワインの中心地としてのフランスの名声を確固たるものとした。当然のことかもしれないが、このブドウからは、果実に複雑な風味をもたらすことが知られている物質を作り出す遺伝子が多数見つかった。
2. 研究チームによってつなぎ合わされた約5億のDNA「文字」(すなわち塩基)の中には、テルペンとタンニンをコードする多数の遺伝子が含まれている。テルペンとタンニンが上質のビンテージワインにとって必須なことは、ワイン愛好家ならば誰でも教えてくれるだろう。
3. この塩基配列の解読完了は、ジェノスコープ(フランスのエブリーにある国立の塩基配列解読センター)に所属するPatrick Winckerをリーダーとする、フランスとイタリアの研究者による共同研究の成果である。この塩基配列に含まれる3万個以上の遺伝子が十分に解析されれば、新たな風味や高い病虫害抵抗性をもつ品種の育種に役立つかもしれない。
4. ブドウは、ゲノム配列が解読された初めての果樹作物で、種子植物としても、まだ4番目である。また、進化遺伝学者に対しては、種子植物が、今日みられる2つの主要な分類群に分岐した進化上の重大な出来事に関する貴重な知見をもたらしてくれる。

風味の豊かさ

5. ワインの原料となるブドウ (*Vitis vinifera*) は遺伝的多様性が著しく高い。そこで研究チームは、ブルゴーニュ・ワインやシャンパンに風味を加えるピノ・ノワール種のブドウを選び、同系交配を数世代繰り返して、配列多様性の少ない系統(PN 40024)を作り出した。
6. 次に、このPN 40024のDNAを数百万の断片にして配列解読してから、コンピュータープログラムを使って遺伝コードを元どおりにつなぎ合わせて、ゲノム全体の配列データを構築した。この配列データは、*Nature* 誌オンライン版で発表された¹。
7. 解読が完了した塩基配列からは、既にゲノム配列が解読されたほかの植物と比べて、大量のテルペンとタンニンの遺伝子が見つかった、と研究チームのメンバーであるジェノスコープのJean Weissenbachは語る。彼によれば、PN 40024にはテルペン遺伝子だけで70~80個あり、これらを研究することで、

味覚を楽しませる新しいスタイルにつながる可能性があるという。「新しい風味を作り出すテルペン遺伝子の組み合わせを見つけられるかもしれません」とWeissenbachは話す。

8. ただし、ワインの味を遺伝技術で微調整するのは一筋縄ではない。風味は、ブドウの栽培条件やワインの製造条件によっても左右されるからである。おまけに、ブドウの遺伝的多様性については、今回の配列解読では明らかになっていないことが多い。「おそらくブドウの木によって[風味] 遺伝子の数は異なっているでしょうし、発現する風味遺伝子の数は時期によって増減する可能性があります。季節差もあるかもしれません」とWeissenbachはいう。
9. それよりは、ブドウを病虫害に強くして栽培農家を助けるほうが簡単そうである。数多くのブドウの品種が、うどんこ病などの病虫害に見舞われているため、ブドウが病虫害から身を守るために使っている遺伝子を発見すれば、病虫害に強い品種の育種に役立つかもしれない。

穀物とブドウ

10. 進化という面からみると、ブドウのゲノムには、被子植物の2つの主要な分類群(双子葉植物と単子葉植物)への分岐という、今から約2億5000万年前の重大な出来事の痕跡が残っている。双子葉植物には、樹木、果物、野菜が含まれ、単子葉植物には、コムギ、イネなど草のような作物やランなどの花類が含まれる。
11. 「穀物酒とワインのチャンポン」はするな、という酒飲みの教えがあるが、今回は、イネとブドウの(「チャンポン」ならぬ)ゲノム比較解析が行われた。その結果、ブドウにはゲノム全体にわたって大規模なDNAの三重複の存在という顕著な特徴があることが判明した。双子葉植物は三重複を被ったが、単子葉植物は被っていない。このようなブドウゲノムのパターンは、これまでに塩基配列が解読された2種の双子葉植物(ポプラと遺伝学モデル植物のシロイヌナズナ)のゲノム構成とも整合性がある。
12. 進化遺伝学者はこの点を熟考し、ワイン醸造メーカーは新たな風味の可能性を検討しているが、遺伝学研究で得られる知見は、数世紀にもわたる伝統によって培われた知識に取って代わることはできない、とWeissenbachは指摘し、「風味の種類は増やせそうですが、質となると、話は別かもしれません」と語った。

ネイチャー・パブリッシング・グループ発行 Physical Science シリーズ

Nature 姉妹誌の中でも近年注目度の高い物理系専門ジャーナルが、2006 年度 インパクトファクター*で首位を独占。
物理系 Nature ブランドは、各分野におけるリーダー的地位を確立しています。

*ISI Journal Citation Reports, Thomson, 2006



nature

1869年11月 創刊

被引用件数 世界No.1
26.681*

**nature
materials**

材料科学

2002年9月 創刊



2006年 19.194*

2005 年 15.941*

2004 年 13.531*

材料科学、応用物理学、
物理化学の3つのカテゴリーで
No.1



**nature
physics**

物理学

2005年10月 創刊

2006年 12.040*

物理学の月刊ジャーナルで
No.1

**nature
nanotechnology**

ナノテクノロジー

2006年10月 創刊



**nature
photonics**

フォトンクス

2007年1月 創刊

**nature
geoscience**

地球科学

2008年1月 創刊



NPG ネイチャー アジア・パシフィック

サイトライセンス お問い合わせ:

Email: institutions@natureasia.com

Tel: 03-3267-8769

Fax: 03-3267-8746

Natureだからお届けできる「質の高い情報」

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

Natureならではの質の高い、面白い記事をお楽しみいただけます！

最近Natureに掲載されたニュース、論文を日本語に翻訳しました。分野も幅広く、宇宙・天文学、地球科学、物理から環境、医学、生命科学、バイオテクノロジー、コンピューター等の記事が1冊に集約されています。

日本オリジナル編集記事

Nature本誌にはないからこそ、是非Nature Digestで楽しみください。

日本人著者も世界的に偉大な研究発表を数多くしており、新聞等のメディアで、それらの記事を多くの方が目にしています。そのような研究や、論文を発表した研究者にNatureがインタビューを行い、日本の研究をお伝えしていきます。

News
科学ニュース

Special Report
特別レポート

Highlight
論文ハイライト

Business News
ビジネス・ニュース

News Feature
科学ニュース 読み物

news@nature.com
Natureオンラインニュース

Japanese Author

日本人科学者へのインタビュー記事

Natureに論文を発表した日本人研究者にインタビュー。研究者をめざす人への有意義なメッセージをお伝えします。



英語でNature

Natureの記事を、単語やフレーズの解説に加えて、どのように読んだらいいか、読解のポイントも紹介するセクション。毎回少しずつレベルアップしていくので、科学英語を学ぶ教材としても使用できます。



Japanese News Feature

日本の科学ニュース

鳥インフルエンザや地震、宇宙開発、幹細胞など、日本のさまざまな科学ニュースを独自取材し、わかりやすく紹介します。



News and Views

科学論説

Editorial
社説

Author

論文著者のプロフィール

Research Highlights

リサーチ・ハイライト

Nature Digest定期購読お申込みはこちらから

www.naturejpn.com/digest-f07