

日本語で読む世界の最新科学ニュース

# nature ダイジェスト

## 04 ゲノム編集が未来を開く 2014

古代人遺伝子がもたらした恩恵

水蒸気を噴き出す準惑星ケレス

「アンペア」の再定義

シャコは驚異の色覚を持つ?

結晶構造学の  
100年の歩み

「脅威評価」で  
犯罪を未然に防げ

地球温暖化と、  
迫り来る水の危機

造血幹細胞にも  
性差がある!

リンネのゾウ標本を  
めぐる物語(下)

FROM 日経サイエンス

想像すると瞳が変化  
脳の修理にエクソソーム

本体価格 648 円+税

Nature Publishing Group の  
メールマガジンは  
発行日\* に最新の情報を  
日本語でお届けします！



**nature**

毎週木曜日配信

今週のハイライト、今週号の目次を日本語で紹介します。同日メディアで見たニュースや気になる記事をすばやく見つけ、サイトにすぐにアクセスできます。その他、お得な情報、Nature 以外のジャーナルの最新コンテンツ（日本語翻訳）もお届けします。役立つ情報満載のメールマガジンです。

**nature**  
ダイジェスト

毎月 25 日配信

最新号の目次、その号の Hot topic、無料公開記事（全文）、おすすめの記事などを紹介します。その他、Nature ダイジェストはもちろん Nature ダイジェスト以外のジャーナルの最新情報、お得な購読キャンペーン、Meet the editor などのイベント情報もお届けします。

ご登録はたった 1 分、無料です。ぜひ、この機会にメールマガジンにご登録ください。

**SCIENTIFIC  
REPORTS**

毎週火曜日配信

最新の論文、注目のハイライト、注目の論文を紹介。最新の論文は、「生物」、「化学」、「物理」、「地球、環境科学」、「医療」の分野にまとめられており、研究領域の論文に素早くアクセス可能です。毎日新しい論文が掲載される *Scientific Reports*、メールマガジンなら週 1 回まとめてチェックできます。

  
nature  
COMMUNICATIONS

毎週水曜日配信

最新の論文、注目のハイライト、注目の論文を毎週お届けします。最新の論文は、1 週間に掲載された全論文を日本語に翻訳、注目のハイライトでは、国内外問わず注目の研究をピックアップしタイトルと概要を日本語で紹介しています。また、注目の論文は、日本からの論文を取り上げています。

\*Scientific Reports, Nature Communications はオンラインジャーナルのため、この通りではありません。

メールマガジン登録

<http://nature.asia/jpn-register>

nature publishing group 



TAKAHITO WATANABE

ゲノム編集技術

## CRISPR 法が世界を変える! 18

表紙画像: IKON IMAGES/GETTY IMAGES

注目を集めるゲノム編集。その利用について、徳島大学の野地澄晴副学長を中心とする研究チームと、京都大学の真下知士氏に伺った。

### NATURE NEWS

- 02 我々の内なる  
ネアンデルタール人
- 04 シャコの「驚異の色覚」は  
幻想だった?
- 05 ナルコレプシーは  
自己免疫疾患であることが確定
- 06 レーザー核融合で投入エネルギーを  
上回るエネルギーを生成
- 09 アンペアの再定義に向けて
- 10 需要が高まる生物資源リポジトリ
- 30 リンネのゾウ標本をめぐる物語(下)

### NEWS FEATURE

- 12 大学内での凶悪犯罪を未然に防げ!

### NEWS SCAN

- 07 想像すると瞳が変化
- 07 脳の修理にエクソソーム

### EDITORIAL

- 33 フォン・ラウエと  
ディラックの業績

### HIGHLIGHTS

- 34 2014年2/6 ~ 2/27号

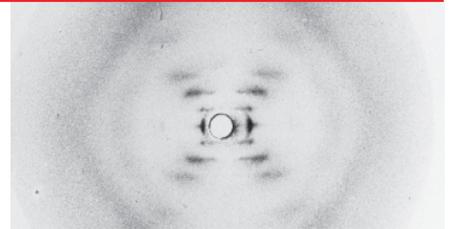
### RESEARCH ROUND-UP

- 38 Nature Genetics / Nature Medicine /  
Nature Chemistry より

## 16 微小世界の謎を解く

### 結晶構造解析 100年の歩み

ラウエによるX線の回折現象の発見から現在に至るまで、結晶構造解析100年の歩みを振り返る。



KING'S COLLEGE LONDON

## 08 明確になった 地球温暖化と水の危機

気候変動が地球全体に及ぼす影響を検証する初の包括的かつ国際的なプロジェクト「ISI-MIP」の最初の成果が報告された。



THINKSTOCK

## 28 水蒸気を噴き出す 準惑星ケレス

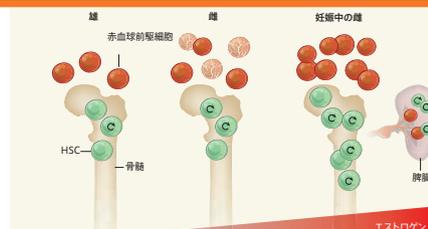
欧州宇宙機関 (ESA) のハーシェル宇宙望遠鏡による観測で、ケレスの表面から水蒸気が噴き出していることが確かめられた。



IMCCE-OBSERVATOIRE DE PARIS/CNRS/Y.GOMINET, B. CARRY

## 26 造血幹細胞にも 性差がある

血球を作り出す造血幹細胞は、雌のマウスの方が頻りに分裂することが分かった。妊娠時に備える仕組みなのかもしれない。





ネアンデルタール人は、多くの現生人類のゲノムに有益な影響を残したようだ。

## 我々の内なるネアンデルタール人

### Modern human genomes reveal our inner Neanderthal

EWEN CALLAWAY 2014年1月29日 オンライン掲載 (doi:10.1038/nature.2014.14615)

現生人類はネアンデルタール人との交雑によって  
寒冷気候への対処能力を高めたことが、今回ゲノム解析から明らかになった。  
ただ、この交雑でできた雑種はどうやら生殖能力が低かったようだ。

化石人類であるネアンデルタール人 (*Homo neanderthalensis*) は、がっちりした体型の狩猟採集民であり、約3万年前に絶滅した。またゲノム解析によって、ネアンデルタール人と現生人類 (*Homo sapiens*) が交雑していたことは、すでに明らかになっている。今回、*Science*<sup>1</sup>と*Nature*<sup>2</sup>に発表された2つの論文で両者のゲノムの詳細な比較がこれまでにない精度で行われ、この交雑には生存に有利に働いた面と不利に働いた面の両方があったことが明らかになった。

交雑は現生人類に、アフリカよりも寒冷な気候に対応するのに有用な遺伝子群をもたらした。一方で、交雑でできた子

孫は生殖能力に少々問題を抱えていたらしい。どちらの研究チームも、現代人のゲノムの中に存在するネアンデルタール人由来の領域を解析して、これらの結論を導き出した。

現生人類とネアンデルタール人の共通祖先は、おそらく50万年以上前のアフリカに住んでいたと考えられている。ネアンデルタール人の祖先は早い時期に欧州やアジアへ移動したが、現生人類の系統はしばらくアフリカにとどまったままだった。その後、現生人類は10万年前頃からアフリカの外へと移動を始め、やがて、西欧州からシベリアまですでに広範囲に分布していたネアンデルタール人

と交雑をした。

「両者は別々の道を歩み始めた後、約50万年もの間、出会わずにいたのです。これは、現代人の生活からすると考えられないことです」と、ハーバード大学医学系大学院 (米国マサチューセッツ州ボストン) の集団遺伝学者 David Reich は話す。Reich は、同僚の Sriram Sankararaman と共に *Nature* の論文を主導した。

#### マジックナンバー

現生人類とネアンデルタール人が交雑したこと、そして現代のアフリカ系以外の人々、つまり欧州系やアジア系の人では全ゲノムの約2%がネアンデルタール人由来であることが、ネアンデルタール人の骨から得たゲノムの塩基配列解読によって確認されている<sup>3,4</sup>。ネアンデルタール人由来のゲノム領域は現生人類のゲノム中のあちこちに散らばっている。また、現生人類の集団により、受け継がれているネアンデルタール人由来の遺伝子は異なる。

またこれまでの研究から、ネアンデルタール人由来の遺伝子の一部が、現生人類の感染防御<sup>5,6</sup>や紫外線防護<sup>7</sup>などの機能に関わっていることも示唆されてい

る。しかし、ネアンデルタール人から受け継いだゲノム領域をこれほど広範囲に明らかにしたのは、今回の2つの研究が初めてだ。

2つの研究チームはそれぞれ独自の計算手法を開発し、それを使って、「生じたのは数十万年前だがヒト遺伝子プールに加わったのはかなり最近」である可能性が高いヒトゲノム領域を洗い出した。続いて、これらのゲノム領域がネアンデルタール人の既存のゲノム塩基配列データ内に本当に存在するかどうかを調べ、ヒトゲノム内にあるネアンデルタール人由来の遺伝子のカタログを作成したのである。

ワシントン大学(米国シアトル)の集団遺伝学者で、同僚のBenjamin Vernotとともに*Science*の論文を執筆したJoshua Akeyは、ネアンデルタール人のゲノムの約5分の1が、公開されている現代の欧州人と東アジア人の合計665人のゲノムの全域にわたって散在していることが分かったと話す。一方、Reichのチームは、調べた現代人1004人のゲノム塩基配列から、ネアンデルタール人ゲノムの約40%を組み立てることができたと見積もっている。

2つのチームはさらに、現代人に特に広く存在するネアンデルタール人由来の遺伝子も探した。広く存在するということは、その遺伝子が現生人類にとって有用だったことを意味するからだ。探索の結果、「角化細胞」と呼ばれる細胞の内部構造に関わる遺伝子群が見つかった。角化細胞は、ヒトの皮膚表層の大部分を構成しており、毛髪の形成にも関わる細胞だ。

「ネアンデルタール人は当時すでに、ユーラシアの寒冷な環境に対して適応していたと考えられます。従って、アフリカからユーラシアへやってきた現生人類が寒冷な環境に対処するのに、寒冷地に適応したネアンデルタール人の遺伝子が役立つのだと推測できるでしょう」とReich。またAkeyは、皮膚は水分損失の調整や病原体からの防御に役立っており、欧州やアジアでの生活にすでに適応

していたネアンデルタール人の遺伝子は、寒冷な新しい環境で暮らし始めたばかりの現生人類にとって有用だったのだろうと指摘する。ただし2人とも、これらの見解はあくまで推測だとしており、ネアンデルタール人の角化細胞遺伝子群が現生人類にどのように恩恵をもたらしたかを、今後の研究で明らかにする必要があるという点で意見が一致している。

一方で、2つの研究チームはどちらも、現代人ゲノムには存在しないネアンデルタール人遺伝子の数も膨大であることを見つけた。「現代人のゲノム内には、ネアンデルタール人由来の遺伝子がまるで見られない大きな空白領域があるので」とAkey。つまり、これらの遺伝子は、現生人類とネアンデルタール人との雑種やその子孫にとって有害であったため、子孫が交配を続ける過程で排除された可能性が高い。「こうした遺伝的な差異の大部分は、数十世代で除かれてしまったのです」とReichは話す。

さらにAkeyのチームは、現代人のゲノム内でネアンデルタール人の寄与が一切ない大きな領域の1つに、ヒトの発話に関与する遺伝子FOXP2が存在していることを見つけた。

### 混じり合ったメッセージ

一方、Reichのチームが現代人のゲノムに見いだした、ネアンデルタール人遺伝子がほとんど存在しない領域には、精巣で活性化される遺伝子や、X染色体上にある遺伝子が含まれていた。こうしたパターンは、ショウジョウバエなどの動物の雑種不稔性に見られる特徴であり、2つの個体群が系統的に離れ過ぎてしまっているために交雑によって繁殖できないことを意味する。現生人類とネアンデルタール人は「交雑で適合可能なボーダーラインぎりぎりだった」とReichは考えており、おそらく両者の雑種は高率で生殖能力を持たなかっただろうと話す。

ロチェスター大学(米国ニューヨーク州)の進化生物学者Daven Presgravesは、「ネアンデルタール人は絶滅してい

るので交配実験はできません」と率直に語る。それでも、Reichのチームが見つけた不稔性に関わるゲノムパターンから見て、両者の雑種は生殖能力が低下していたと考えていいだろうと彼は言う。

しかし、Presgravesが意外に思ったのは、現生人類とネアンデルタール人が分かれてからせいぜい数万世代しか経ていないにもかかわらず、交雑の不適合性の兆候が表れていることだ。ショウジョウバエなどの動物が自然界で別々の種へと進化する際には、もっと多くの世代数を要するものなのだが、と彼は不思議がる。

ペンシルベニア大学(米国フィラデルフィア)の集団遺伝学者Sarah Tishkoffは、今回の2つの研究が、「今まで読んで中で最も興奮を覚えた論文の1つ」と話す。彼女はさらに、これらの研究は、化石人骨からではなく現代ヒト集団のDNAから化石人類ゲノムを拾い集めて研究することについて、その可能性を物語っていると付け加えた。

今回発表された研究方法は、特に、保存状態の良い古代DNAサンプルが乏しいアフリカで人類進化を研究するのに役立つと考えられる(*Nature*ダイジェスト 2013年11月号 19ページ参照)。大昔のアフリカに住んでいた人々は、ネアンデルタール人とは交流していなかったが、他の絶滅した人類集団と交雑していた可能性があることが、現在アフリカ大陸に住む人々のゲノム解析<sup>8</sup>から示唆されている。「ぜひ、今回のような手法を使ってアフリカのヒト集団を調べてみたいですね。その結果どんなことが分かるか、想像するだけでワクワクします」とTishkoffは語る。

(翻訳: 船田晶子)

1. Vernot, B. & Akey, J. M. *Science* <http://dx.doi.org/10.1126/science.1245938> (2014).
2. Sankararaman, S. et al. *Nature* <http://dx.doi.org/10.1038/nature12961> (2014).
3. Green, R. E. et al. *Science* **328**, 710-722 (2010).
4. Prüfer, K. et al. *Nature* **505**, 43-49 (2014).
5. Abi-Rached, L. et al. *Science* **334**, 89-94 (2011).
6. Mendez, F. L., Watkins, J. C. & Hammer, M. F. *Am. J. Hum. Genet.* **91**, 265-274 (2012).
7. Ding, Q., Hu, Y., Xu, S., Wang, J. & Jin, L. *Mol. Biol. Evol.* <http://dx.doi.org/10.1093/molbev/mst260> (2013).
8. Lachance, J. et al. *Cell* **150**, 457-469 (2012).



シャコは、単純だが素早く色を感知できるシステムを使っているらしい。

## シャコの「驚異の色覚」は幻想だった？

### Mantis shrimp's super colour vision debunked

JESSICA MORRISON 2014年1月23日 オンライン掲載 (doi:10.1038/nature.2014.14578)

動物界で最も複雑とされるシャコの眼が、実は色を感知するシステムとしては非常に単純であることが分かった。

甲殻類であるシャコは、どうやら我々ヒトと同じような仕組みでは色を見ていないようだ。シャコ類の眼には、ヒトよりもはるかに多くの種類の光受容細胞が存在するが、色を識別する能力は限られているとする報告が、*Science* 2014年1月24日号に掲載された<sup>1</sup>。

色を感じ取る光受容細胞の種類は、ヒトの眼には通常、赤、緑、青の光にそれぞれ反応する3種類しかないが、シャコの眼には12種類もある。そのためシャコは、ヒトが識別できない色でも見分けられるのではないかと考えられてきた。しかし今回の研究によって、シャコの色覚は、12種類の光受容細胞からの情報を組み合わせるのではなく、個々の光受容細胞からの情報を単独で処理する単純かつ効率的な機構に頼っていることが判明したのである。この機構はこれまで知られていなかったもので、この発見によ

り、シャコが驚異的な色覚を持つという予想は完全に覆されたと、論文の共著者であるクイーンズランド大学（オーストラリア・ブリスベン）の海生動物神経学者Justin Marshallは話す。

3色型色覚のヒトが黄色の葉を見たとき、眼にある光受容細胞は、光刺激の相対的なレベルを知らせるシグナルを脳へ送る。つまり、赤色光に反応する細胞と緑色光に反応する細胞は共に強く活性化しているが、青色光に反応する細胞はほとんど活性化していない、という情報が脳に伝わるのだ。すると脳は、これらの光受容細胞から送られてきた情報を比較して、黄色だと判断する。このシステムによって、ヒトの眼は非常に多数の色を識別することができる。

#### 虹色の幻

Marshallのチームは、12種類の光受容細

胞を備えたシャコがヒトより多くの色を識別できるかどうかを、小型のシャコである *Haptosquilla trispinosa* を用いて調べた。彼らはまず、このシャコに2つの色を見せて、正しい方を選べば餌（冷凍のエビカイガイ）を与えるという方法で訓練し、波長が400～650nmの範囲にある10種類の色のうちの1色を覚えさせた。この訓練をしたシャコで実験したところ、訓練を受けた波長の色と、それより50～100nm波長が短い、もしくは波長が長い色とを区別することができた。ところが、訓練した色と試験用の色との波長の差が12～25nmに狭まると、シャコはそれらを区別することができなかった。

もしシャコの眼が、ヒトの眼と同じように波長の近い色を相対方式のシステムで見分けているのであれば、波長の差が1～5nm程度でも区別できるはずだ、とMarshallらは指摘する。しかし今回の結果は、シャコが実際にはそこまで多くの色を見分けられないことを示しており、シャコの眼にある12種類の光受容細胞は、それぞれが対応する特定の1色のみを感じ取っていると考えられる。また、その感知の仕組みは、ヒトの眼よりも感度が低い代わりに、脳に負荷がかかる厳重な比較作業を必要としないようだ。これはおそらく、生きた動物を捕食するシャコがさまざまな色彩の獲物を素早く見分けるのに都合が良いのだろうと、カリフォルニア大学バークレー校（米国）の行動生態学者Roy Caldwellは説明する。

視覚の研究を行っているルンド大学（スウェーデン）の生物学者Michael Bokは、シャコの眼の驚くべき複雑さを解明する上で、この研究成果は重要な一歩になると話す。「次に取り組むべきは、これらの視覚シグナルが脳に何を伝えていのか、また脳がこれらのシグナルをどのように使っているのか、解き明かすことです」。

（翻訳：船田晶子）

1. Thoen, H. H., How, M. J., Chiou, T.-H. & Marshall, J. *Science* **343**, 411-413(2014).

# ナルコレプシーは 自己免疫疾患であることが確定

## Narcolepsy confirmed as autoimmune disease

Ed Yong 2013年12月18日 オンライン掲載 (doi:10.1038/nature.2013.14413)

2009年の新型インフルエンザ大流行とそれに対するワクチンの接種に付随して、ナルコレプシーという睡眠障害が多発した。この原因を解析した結果、ナルコレプシーが自己免疫疾患だとする決定的な証拠が示された。

2009年に新型インフルエンザ(A型H1N1亜型、ブタ由来インフルエンザとも呼ばれる)が世界的に大流行した際、中国ではナルコレプシーが多発した。この病気は、日中に時と場所を選ばず猛烈な眠気の発作に襲われる睡眠障害で、発症すると長年にわたって症状が表れるが、その原因についてはいまだ解明されていない部分も多い。一方欧州では、この新型インフルエンザウイルスの断片を含む「Pandemrix」というワクチン(現在は使われていない)を接種した子ども1万5000人におよそ1人が、やはりナルコレプシーを発症した。

これらの奇妙な現象について、スタンフォード大学医学系大学院(米国カリフォルニア州)の免疫学者Elizabeth Mellinsとナルコレプシー研究者Emmanuel Mignotの研究チームが、その謎の一部を解き明かし、*Science Translational Medicine*で発表した<sup>1</sup>。この報告は同時に、ナルコレプシーが自己免疫疾患であること、つまり免疫系が自身の体の健康な細胞を攻撃する疾患だとする以前からの仮説を証明することにもなった。

ナルコレプシーは主に、覚醒状態を維持するヒポクレチン(別名オレキシン)と呼ばれるホルモンを産生するニューロン(神経細胞)が次第に減少することによって引き起こされる。ヒポクレチン産生ニューロンの減少には免疫系が関わっているに違いないと多くの研究者が疑っ

ていたが、その直接的な証拠が見つかったのは今回が初めてだ。スタンフォード大学の研究チームは、免疫を担う細胞の一種であるCD4<sup>+</sup>T細胞を調べ、ナルコレプシー患者にのみヒポクレチンを標的とする特定のT細胞群が見られることを発見したのだ。

「ヒポクレチンを標的とする特定のT細胞群は、ナルコレプシーが自己免疫疾患であることの決定的な証拠になると考えています」とMellinsは話す。

ハーバード大学医学系大学院(マサチューセッツ州ボストン)の神経科医Thomas Scammellは、「今回の朗報に至るまで何年もの間、小さな失望を何度となく味わってきました。今回の研究は、近年のナルコレプシー研究の中で最も大きな成果の1つです」と話す。これまで、体内で作られたヒポクレチンに対する自己抗体を見つけようとする試みは、次々と失敗に終わっていたからだ。

### 未解決の問題

ヒポクレチンを標的とするT細胞群が一部の人々でのみ作られる理由はまだ明らかでないが、これには遺伝学的な問題が関わっている可能性がある。Mignotは以前の研究<sup>2</sup>で、一般集団では25%にしか見られない型のHLA(ヒト白血球抗原)遺伝子が、ナルコレプシー患者の98%に見られることを発見している。

また、感染症などの外的要因も関わっ

ている可能性がある。Mellinsが考えているメカニズムは、遺伝的素因(ナルコレプシーに関連する変異型遺伝子をいくつか保有することなど)を持つ人々が、ヒポクレチンにそっくりで免疫系の応答を引き起こすような外的要因に遭遇した場合に、ナルコレプシーを発症するというものだ。今回、ヒポクレチンを認識する特殊なCD4<sup>+</sup>T細胞群がH1N1ウイルスに由来するタンパク質も認識することが明らかになったことで、2009年のH1N1インフルエンザウイルスもそうした免疫応答を引き起こす外的因子の1つであることが確かめられたわけである。

もちろん、ナルコレプシーを発症する患者は2009年のH1N1インフルエンザ大流行のずっと前から存在していた。また、この疾患は、冬の直後、つまりインフルエンザの季節的なピークの後に新しい患者が出る傾向があるため、他のインフルエンザウイルス株もしくはインフルエンザ以外のウイルスが関与している可能性もある。

なお、ワクチン「Pandemrix」に関する謎は今回の結果からは完全に説明できない。というのも、他のインフルエンザワクチンにも同じタンパク質が含まれているが、ナルコレプシーが多発しているわけではないからだ。

未解決の問題は他にもある。「今回の研究では、問題のT細胞群がヒポクレチン産生ニューロンを死滅させる仕組みが明らかにされていません。殺人事件の推理小説を読んでいるのと同じで、本当の殺人者が誰なのかまだ分かっていないのです」とScammellは話す。彼は、問題のT細胞群が真犯人である可能性は低く、これらのT細胞は、中間物質を介して働いているか、もしくは何か他の破壊的な出来事の結果生じたのではないかと考えている。

(翻訳: 船田晶子、要約: 編集部)

1. De la Herrán-Arita, A. K. et al. *Sci. Trans. Med.* **5**, 216ra176 (2013).  
2. Mignot, E. et al. *Am. J. Hum. Genet.* **68**, 686-699 (2001).

# レーザー核融合で投入エネルギーを上回るエネルギーを生成

## Laser fusion experiment extracts net energy from fuel

PHILIP BALL 2014年2月12日 オンライン掲載 (doi:10.1038/nature.2014.14710)

米国の国立点火施設で行われた実験で、核融合炉の実現に向けて重要で画期的な段階が達成された。

米国カリフォルニア州にあるローレンスリバモア国立研究所の国立点火施設(NIF)は、実験室での制御された核融合反応で、反応を引き起こすために燃料に投入したよりも多くのエネルギーを反応で得ることに世界で初めて成功したと発表した。この成果は2014年2月12日にNatureオンライン速報版に掲載された<sup>1</sup>。

核融合は、実現すれば、事実上、無限ともいえるエネルギー源となる技術だ。NIFの研究者らは今回、世界で最も高出力のレーザー集合体を使い、燃料エネルギー利得(核融合反応で得られたエネルギーを外から燃料に与えたエネルギーで割った値)が1を超える核融合反応を達成した。この段階は重要で象徴的であるものの、核融合による発電を実現するまでの道のりは長い。炉としてエネルギーを取り出すためには、「点火」を達成する必要があるからだ。

核融合反応を起こすためには、重水素などの核融合燃料を高温のプラズマ(電離気体)にする必要がある。そして、核融合反応で生じるエネルギーがプラズマから逃げるエネルギーを上回るとき、反応が持続し、これを「点火」と呼ぶ。核融合は長年にわたって研究されているものの、点火は今回の達成よりもはるかに難しく、その実現にはまだ遠い。

とはいえ、サンディア国立研究所(米国ニューメキシコ州アルバカーキ)のMark Herrmannは、「今回達成されたことは、点火に至る道のりにお

いて決定的に重要な段階です」と話す。Herrmannは、同研究所の高エネルギーX線パルス进行研究プロジェクトのリーダーで、NIFでの研究には加わっていない。

核分裂では、ウランなどの非常に重い原子核の分裂の際に放出されるエネルギーを利用する。一方、核融合は、恒星や熱核爆弾(水素爆弾)のエネルギー源であり、水素原子核などの軽い原子核が合体する際、合体前の水素原子核の質量のごく一部がエネルギーに変わる。

核融合を制御して実現することは非常に難しい。その理由の1つは、核融合を起こすために数千万°Cの高温にしたプラズマを閉じ込めるのが難しいことだ。世界各地で行われている核融合研究プロジェクトでは、プラズマのさまざまな閉じ込め方法が研究されている。例えばフランス南部に建設中の国際熱核融合実験炉ITERは、ドーナツ型の炉の中で磁場でプラズマを閉じ込める方法を研究している。

### レーザーパルスの形を工夫

原子核を電磁気力による反発に打ち勝って互いに近づくためには、大量のエネルギーを注入しなければならない。NIFでは、192本の高出力レーザーによってこのエネルギーを供給している。NIFが用いる燃料は重水素と三重水素で、「ホーラム(hohlraum)」と呼ばれる円筒形の金の容器(長さ約9.4mm、直径

約6mm)の中のプラスチック球殻(直径約2.3mm)に封入されている。レーザービームは、このホーラムに注入される。

レーザーのエネルギーはホーラムに吸収され、ホーラムは吸収したエネルギーをX線として再放射し、その一部がプラスチック球殻に吸収される。プラスチック球殻は爆発し、内部の燃料を爆縮して核融合を引き起こすほどの高密度にする。

NIFチームは、2013年9月から同年11月にかけて行われた実験で今回の結果を得た。研究チームはレーザーパルスの形を工夫し、パルスの初期段階により多くのエネルギーを含むようにした。この改良によって、一連のプロセスの初期段階でホーラム内の温度が比較的高くなり、プラスチック球殻を膨らませる効果を生んだ。この結果、核融合反応の妨げになる、爆発時の流体力学的な不安定性が減少した。ローレンスリバモア国立研究所(米国カリフォルニア州リバモア)の物理学者で、研究チームのリーダーであるOmar Hurricaneは、「プラスチック球殻が膨らむことで、不安定性の成長が大きく遅れるのです」と説明する。

その結果、燃料エネルギー利得を1.2~1.9にすることができた。「これは、実験室での核融合実験でこれまでに実現されたことがない値です」とHerrmannは話す。さらに彼は、「得られたエネルギーの多くは、核融合反応で放出された $\alpha$ 粒子による燃料の自己加熱によるものです。これは、核融合反応を持続させるために重要な必要条件です」と付け加えた。

しかし、核融合による発電はまだ遠い目標のまま。Hurricaneは、「核融合発電の実現まであとどれだけの期間を要するのか、現時点で見積もることはできません。私たちの実験での総計の利得、つまり、核融合反応で得られたエネルギーを、ホーラムに投入した全レーザーエネルギーで割った値は約1%にすぎないのです」と話す。

(翻訳:新庄直樹)

1. Hurricane, O. A. et al. Nature <http://dx.doi.org/10.1038/nature13008> (2014).

## 想像すると瞳が変化

頭の中に光景を思い描くと、それを実際に見ているような肉体的変化が起こる

たいていの人は自分の瞳孔の大きさについてじっくり考えたりはしない。実際、瞳孔の大きさを自分でコントロールするのは実質的に不可能だ。虹彩の中央部にある瞳孔開口部の大きさを変えるには、眼科医が検査の際に用いる散瞳薬（患者の瞳孔を開くために使う目薬）などの化学物質を除くと、光の量を変えるしかない。瞳孔は、明かりを消すとより多くの光を取り込もうとして広がり、日の当たる場所に出れば縮む。

この動きは機械的に思えるが、それを調べることで想像力と知覚の類似点を探求できる。オスロ大学（ノルウェー）の認知神経科学者 Bruno Laeng と Unni Sulutvedt は最近、コンピューター画面にさまざまな明るさの三角形を表示して被験者に見せ、その瞳孔の変化を観察する実験を行った。被験者の瞳孔は予想どおり、暗い三角形を見たときに広がり、明るい三角形では縮んだ。次に、それらと同じ三角形を頭の中で想像するように被験者に指示した。すると驚いたことに、実際の三角形を見つめているかのように瞳孔が開いたり縮んだりしたのだ。晴れた空や暗い部屋など、より複雑なシーンを想像するよう指示した場合も、同じパターンが見られた。

### 思い描くことと知覚するプロセス

通常、頭の中で想像することは「個人的・主観的な経験であり、目に見える生理学的変化を伴わず、本人もそうした変化を強くは感じない」と考えられていると Laeng は言う。だが、*Psychological Sciences* に報告された今回の発見はこの考え方に疑問を呈し、想像と知覚が同様の神経プロセスに基づいている可能性を示唆している。照明を落としたレストランを想像すると、少なくともある程度は、まるで自分がそのレストランにいるかのように脳と体が反応するのだ。

今回の新しい実験方法によって、意識を調べる一般的な方法が補完される。意識を、被験者が気付かない視覚的刺激を与えることで調べるのだ。これに対し、心的イメージの研究は逆向きのアプローチをとっており、被験者に刺激を与えずに心的イメージを意識的に認識させていると、ニューサウスウェールズ大学（オーストラリア）の認知神経科学者 Joel Pearson は説明する。この2つのアプローチを組み合わせれば、おそらく意識の働きをもっとよく理解できるだろう。■

（翻訳協力：栗木瑞穂）

## 脳の修理にエクソソーム

細胞内にある小胞が神経損傷の修復に関与

活動的な生活は脳を健康にすると考えられてきた。数々の研究がそれを裏付けており、身体的・知的・社会的な活動（専門用語で「環境エンリッチメント」と呼ばれるもの）は学習と記憶を強化し、老化と神経疾患を防ぐことが分かっている。

最近の研究で、刺激豊かな環境が細胞レベルで利点をもたらすことが示された。脳細胞のミエリン鞘が修復されるのだ。ミエリン鞘は軸索（神経線維）を保護している絶縁膜で、加齢や損傷、多発性硬化症などの疾患によって失われる。

環境エンリッチメントによるミエリン修復には、細胞に自然に存在する「エクソソーム」という小胞が関与しているようだ。エクソソームは内部にタンパク質と遺伝物質を取めた小さな袋である。シグナル伝達分子が詰まったエクソソームが「手紙入りの小瓶」となって全身に拡散するのだと、米国立衛生研究所（NIH）の神経生物学者 R. Douglas Fields。

エクソソームは特定の細胞を標的として、その細胞のふるまいを変える。刺激豊かな環境下で免疫細胞から分泌されたエクソソームにより、脳細胞のミエリン修復が引き起こされることが動物実験で示された。病気診断用のバイオマーカーや抗がん剤などを輸送する媒体として使える可能性もある。

刺激豊かな環境下で生じたエクソソームは「マイクロRNA」を運んでおり、このマイクロRNAが脳内の未成熟な細胞の、ミエリンを作り出すオリゴデンドロサイトという細胞への分化を促すらしい。シカゴ大学（米国）の研究チームは、ラットの血液からエクソソームを抽出し、これを高齢のラットに投与したところ、ミエリンのレベルが62%上昇した。この成果は、2014年2月の *Glia* に報告された。

研究チームは将来の治療に向けて、エクソソームを体外で作り出す方法も開発した。骨髄から取り出した免疫細胞を刺激することで「自然の環境エンリッチメントをシャーレ内で模擬できた」と、シカゴ大学の神経学者 Richard Kraig。

Kraigらは現在、エクソソームを多発性硬化症の治療薬にする方法を探っている。彼らは、実験室で育てたエクソソームは多発性硬化症による損傷を模擬したラットの脳組織でミエリン産生を刺激し、ミエリンのレベルを正常値の77%まで回復させたと、*Journal of Neuroimmunology* に報告。

次のステップは免疫細胞から採取したエクソソームが実際に病気の動物で効果的に働くかどうかを調べることだと、同研究チームの Aya Pusic は言う。Pusic は、うまくいけば5年以内に人間での臨床試験まで進むだろうとみている。■

（翻訳協力：栗木瑞穂）

# 明確になった地球温暖化と水の危機

## Water risk as world warms

QUIRIN SCHIERMEIER 2014年1月2日号 Vol. 505 (10-11)

気候変動が地球全体に及ぼす影響を検証する初の包括的かつ国際的なプロジェクト「ISI-MIP」が始動し、最初の結果が報告された。  
そこから、主要な懸念は水の危機であることがはっきり見えてきた。

気候変動ポツダム研究所（ドイツ）の所長である Hans Joachim Schellnhuber は、気候変動の影響を研究する最善の方法は何かとを考えをめぐらせているとき、しばしばヒンズー教の古い寓話を思い出す。探究心に富む6人の盲目の男たちが、ゾウがどのような動物であるかを知ろうとする話で、1人はゾウのどっしりした脇腹を手で探り、他の5人はそれぞれ牙、鼻、膝、耳、尾に触れてみるが、結局、6人全員がゾウのことを完全に誤解してしまうのだ。

この寓話は、気候変動研究の現状をうまく言い表している。これまで多くの研究者が地球温暖化という「ゾウ」のさまざまな側面を取り上げてモデルを作ってきたが、地球温暖化が人間社会や生存に不可欠な天然資源にどのような影響を及ぼすかを包括的に評価する研究は行われてこなかった。けれどもそんな状況は、Schellnhuberをはじめとするこの分野の主だった研究者が2013年に気候変動影響評価モデルの相互比較を行う国際的なプロジェクト Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP；イージーミップ) を立ち上げたことで変わりつつある。

このプロジェクトは、気候変動がもたらす地球全体への影響を共通の想定に基づいて分野横断的に評価し、報告書を作成することを目標としており、モデル同士を直接比較するための初めての取り組みである。日本からは国立環境研究所、東京大学が参加している。2013年12月、

ISI-MIPは最初の成果として *Proceedings of the National Academy of Sciences* に4本の論文を公表した<sup>1-4</sup>。これらの報告から、ほんの小さな気候変動でさえ、数十億人の生活状況に水や食料の不足、異常気象に起因する甚大な影響を及ぼす恐れがあることが示唆された。

研究グループによれば、最も心配なのは「水」だという。世界の気温は2100年までに現在のレベルより2°C上昇することは避けられないと現時点では考えられており、その場合、世界人口の5分の1が深刻な水不足に苦しむことになると思われる。

「気候変動にはさまざまな側面がありますが、中でも、水と、水に依存する全てのものに関する問題は、気候変動の象徴とも言えるものです。後者は食料生産から公衆衛生まで広範にわたっていますから、これらがどんなに切迫した問題であるか理解は容易でしょう」と Schellnhuber は説明する。

温暖化した地球が人類にどのような影響を及ぼすかを評価するため、世界12カ国の30の研究グループが、温室効果ガスの放出に関する共通のシナリオを用いて数千回のシミュレーションを行った。彼らは、地球全体の水文モデルのセットと5つの最新の気候モデルから、将来の水利用を推定した<sup>1</sup>。ここで用いた気候モデルは、気温と降水量の変化に関する推定を、各地の水循環や河川の流出量や人口などの変数に関するデータと結びつけたものである。

複数のモデルを用いた評価から、将来特に大きな影響を受けると予想される地域では、すでに人口の増加によって水の危機が進行しており、気候変動によってこの問題が大幅に悪化することが示唆された。気候モデル研究者らのシミュレーション結果では、気候変動により引き起こされる水の蒸発量、降水量、河川の流出量の変化に伴い、年間500m<sup>3</sup>未満の水で暮らさなければならない人数が全世界で40%増加することが示された。年間500m<sup>3</sup>という量は、「絶対的な水不足」状態かどうかの境界の値とされている（ちなみに、年間1000m<sup>3</sup>を下回ると「慢性的な水不足」とされる）。

モデル間の差は大きく、世界の水不足の地域は倍増すると予測するモデルもあれば、変化は小さいだろうと予測するモデルもあった。それにもかかわらず、地球の気候が今日のレベルから何°C高くなったときのシミュレーションを行うと、どのモデルでも、2°Cだけ温暖化したときの影響が最も大きいという結果になった。

ストックホルム大学（スウェーデン）の水資源の専門家で、ストックホルム大学レジリアンスセンターの所長である Johan Rockström は、今回の比較プロジェクトには曖昧なところもあるものの、気候リスクの分析は格段に強固なものになるだろうと話す。ちなみに、彼はこのプロジェクトに関与していない。

また Rockström は、気候変動の影響に関するモデルから、都市や海岸線を環境の変化に耐えられるようにするための具体的な指針を与えられるほどの詳細な情報を得ることは不可能と言いつつも、「変化への備えが不十分な地域や国が直面する深刻な問題の一次近似にはなるはずです」と説明する。

水不足の危険が最も大きい地域は、米国南部、地中海沿岸地域、中東である。これに対して、インド、熱帯アフリカ、北半球の高緯度地域は、地球温暖化により降水量が増えると予想されている。

水利用の変化は、水に依存する他の領

域に波及効果を及ぼす。気候変動に対する作物の応答をモデル化したグループは、多くの農業地域において、主要な作物の収穫量に負の影響が出ることを見いだした<sup>2</sup>。

また、干ばつリスクを検討したチームの報告によると、南米、西欧、中欧、中央アフリカ、オーストラリアの一部の地域では、干ばつの回数が増え、より深刻なものになることが示された<sup>3</sup>。一方、洪水リスクの予測はこれほど明確ではないものの、地球全体の水文モデルと地表モデルに基づく川の流れのシミュレーションから、世界の半分以上の地域で洪水リスクが上昇することが示された<sup>4</sup>。

シミュレーションから得られた知見には不確実なところもあるが、わずかな温暖化であっても、自然、社会、経済に深刻な混乱を引き起こす恐れがあることを「はっきりと警告している」とRockströmは言う。彼は、我々が直面している問題は、国内の不安定化や移住につながるものと指摘し、最も貧しい国々が世界の食糧市場にアクセスしやすくなるよう国際貿易のあり方を再考する必要があると主張する。

Schellnhuberもまた、シミュレーションに不確実な要素があることは、この状況を傍観する理由にはならないと指摘する。「行く手に待ち受ける危険がどんなものか明らかになってから引き返せばいいと言う人もいますが、気候変動は見た目以上に危険なギャンブルであることを思い出すべきです。厳密なオッズはまだ分かりませんが、私たちが大負けする可能性は、多くの人が考えるよりはるかに高い可能性があるのです」とSchellnhuberは話す。■

(翻訳：三枝小夜子)

- Schewe, J. et al. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*  
<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1222460110>(2013).
- Rosenzweig, C. et al. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*  
<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1222463110>(2013).
- Prudhomme, C. et al. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*  
<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1222473110>(2013).
- Dankers, R. et al. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*  
<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1302078110>(2013).

## アンペアの再定義に向けて

### Ampere to get rational redefinition

EUGENIE SAMUEL REICH 2014年1月16日号 Vol. 505 (273-274)

国際単位系 (SI) の再定義を視野に入れ、  
アンペアを物理定数 (値が変化しない物理量) と結びつけるために、  
電子 1 個の流れの測定が行われた。

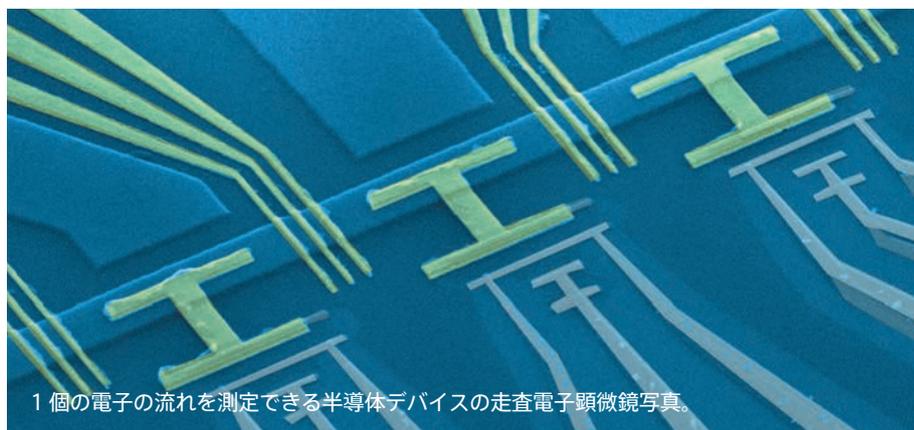
このほど、電子が半導体チップを1個ずつ通り抜ける様子を追跡する実験が行われた。これは、電流の単位である「アンペア (A)」の合理的な再定義をついに可能にする実験である。

現在の定義によれば、1m離して平行に置いた無限に長い2本のワイヤーに電流を流し、ワイヤーが1m当たり $2 \times 10^{-7}$ ニュートンの力を及ぼし合うとき、この電流が1アンペアになる。1948年に採用されたこの定義は思考実験に基づくもので、実験室ではせいぜい近似することしかできないため、何かと具合が悪い。具合が悪いのは、質量の単位である「キログラム (kg)」も同じである。キログラムは、国際度量衡局 (BIPM; フランス・パリ) に保管されている円柱形をしたプラチナとイリジウムの合金の質量として125年前に定義されたが、キログラム原器の質量は時間の経過とともに変動するため正確な値とは言い難い。

2013年12月19日にarXivサーバー

に投稿された論文<sup>1</sup>で報告された新しいアプローチによって、電子1個の電荷を表す物理定数 $e$ に基づいてアンペアを再定義することが可能になると考えられる。それはまさに、計量学者が長年にわたって探し求めてきた合理的な定義である。「これは非常に困難な試みで、極めて重要な論文です」と、英国国立物理学研究所 (テディントン) の物理学者Stephen Giblinは言う。この結果は、2014年11月に開催されるBIPMの活動を承認する国際度量衡総会で支持が得られることだろう。総会では、計量学者が、アンペアとキログラムのほか、同じくSI基本単位である「モル (mol)」と「ケルビン (K)」を、電気素量 ( $e$ )、プランク定数、アボガドロ数、ボルツマン定数などの物理定数を用いて再定義する提案について議論することになっている。

長さの単位である「メートル (m)」と時間の単位である「秒 (s)」もSI基本単位であるが、すでに前者は光速を用い



1個の電子の流れを測定できる半導体デバイスの走査電子顕微鏡写真。

て再定義されており、後者もセシウム原子の基底状態の2つの超微細準位の間の遷移に対応する放射の周期という定数を用いて再定義されている。

アンペアを再定義するための実験<sup>1</sup>において、ドイツ連邦物理学技術研究所 (PTB; ブラウンシュバイク) の物理学者 Hans Schumacher らは、「単電子ポンプ」を利用した。単電子ポンプとは、電子に電圧パルスをかけて、量子力学的トンネル効果によって電子を1個ずつ障壁の向こう側に転送する装置である。研究者らは、障壁の間のポイントに蓄積した電荷の変化を検出することで、個々の電子の経路を追跡した。原始的な電子ポンプは1990年代から作られているが、1個の電子が飛び移るたびに電荷の変化を検出することができたのは今回が初めてである。

Schumacher らのポンプは、1秒間にわずか数十個という遅さで電子を転送することができる。これは、精密な測定を行い、アンペアの再定義の原理検証実験となるのに十分な遅さである。しかし、彼らの実験は第一歩にすぎない。電流を測定する電流計を較正するにはもっと大きな電流を流す必要があり、今回の設定

は実用的ではないからだ。最終的な目標は、「現示の方法 (mise en pratique)」、すなわち、電流の測定値を正確に較正するためにどんな研究室でも再現可能な標準的な設定の実験を作り出すことである。そのため現在は、Schumacher の確認方法を高電流ポンプと組み合わせるための競争が繰り広げられている。

Giblin は2012年に、1秒間に10億個近い電子を転送できる半導体単電子ポンプを世界で初めて製作したが<sup>2</sup>、電子を1個ずつ追跡することはできなかった。他のタイプのポンプには、電子が超伝導ワイヤーの間をトンネル効果で通り抜ける「ターンスタイル」や、酸化物絶縁層で隔てられたアルミニウムの島の間を電子がトンネル効果で通り抜ける「トンネル接合」がある。けれどもこれらも、1個の電子を追跡するには比較的低い電流で動作しなければならない。アールト大学 (フィンランド・エスポー) の物理学者で、2013年にアンペアの再定義のためのアプローチに関するレビュー論文を発表した Jukka Pekola は、「どのコンセプトが生き残るかは分かりません」と言う<sup>3</sup>。

それでも、アンペアもケルビンも、11

月の総会を迎える準備はできている。フランス国立計量試験研究所 (パリ) の物理学者 François Piquemal は、電子の電荷もボルツマン定数も正確に測定されているため、どちらの単位も今日にでも再定義される準備ができていると説明する。

しかし、再定義のプロセスは2018年の総会までずれ込むかもしれない。アンペア、キログラム、モル、ケルビンの4つの単位はどれも絡まり合っており一度に再定義してしまいたいのだが、キログラムの問題が解決していないからだ。キログラムの再定義のアプローチには2つの候補がある。1つは、地球の重力に引かれる試験質量の重さと釣り合う電力を測定するワットバランス (電流天秤) 法である。もう1つは、シリコン球の原子の個数を正確に数える方法である。2つのアプローチは、わずかに異なる答えを与える。Piquemal は、単位を再定義する前に、2つの異なるアプローチの間で折り合いをつける必要があると指摘する。 ■

(翻訳: 三枝小夜子)

1. Fricke, L. et al. Preprint at <http://arxiv.org/abs/1312.5669> (2013).
2. Giblin, S. P. et al. *Nature Commun.* **3**, 930 (2012).
3. Pekola, J.P. et al. *Rev. Mod. Phys.* **85**, 1421-1472 (2013).

## 需要が高まる生物資源リポジトリ

### Repositories share key research tools

MONYA BAKER 2014年1月16日号 Vol. 505 (272)

研究ツールや資源を提供してくれる生物資源リポジトリは、  
生命科学研究に欠かせない存在である。だが、その維持管理は容易ではない。

論文を仕上げようとする大学院生のもどかしさから生まれたいリポジトリ (資源を保管し、必要に応じて提供する仕組み) がある。2002年、当時ハーバード大学医学系大学院 (米国マサチューセッツ州ボストン) に在籍していた Melina Fan は、取り組んでいた代謝研究に必要な遺

伝子が他の研究者の冷凍庫に存在することを知った。そこで、10カ所を超える実験室に連絡し、その遺伝子が入ったプラスミドの提供を求めた。しかし、提供するという返事をくれたのは半分ほどで、中には到着に数カ月かかったものもあった。また、せっかく届いても、欲し

い遺伝子とは違うこともあった。「先方が提供を渋ったわけではありません。単なる物流上の問題だったのです」と Fan は振り返る。

そこで2004年1月、Fan は夫と兄弟を巻き込み、アドジーンという名のリポジトリを設立した。アドジーン社 (Addgene; 米国マサチューセッツ州ケンブリッジ) へのプラスミドの寄託は無料で、発注は1個につき65ドル (約6500円)。註: 日本では住商ファーマインターナショナルを介して入手可能。ただし、価格は数量により1個当たり1万2600~2万6000円) だ。

設立1年目に出荷したのは、Fan が大学院生のときに研究していた遺伝子を組み込んだプラスミドただ1種類であった。2013年には、9万個を超えるプラ

スミドを出荷した。現在アドジーン社が保管するプラスミドは、タンパク質標識ツールに始まり特定の遺伝子を詰め込むことができる空の環状DNAまで3万種類以上に及ぶ。これらは1700もの研究室から寄託されたものだ。

この10年間におけるアドジーン社の成長からは、生物資源施設(BRC)の存在が、研究者が提供したくてもうまくいかないことが多い「ツールの頒布」を可能にする仲介者として、重要性を増していることが分かる。かつて、モデル動物の細胞株や遺伝系統の提供が、当てにならない場当たり的なネットワークによって行われていた世界が、BRCの登場によって、オンラインで簡単に生物学ツールの調達ができるようになったのだ。

細胞株や微生物系統などをBRCに寄託することで、その材料に関連する論文の被引用率は57～135%上がる、と2011年に論じたボストン大学(米国マサチューセッツ州)の経済学者Jeffrey Furmanは、「BRCは公共物のサプライヤーであり、科学の急速な進歩を支えるのにとっても重要なものです」と話す。その一方で、存続に必要な資金の確保に苦勞しているBRCもある。

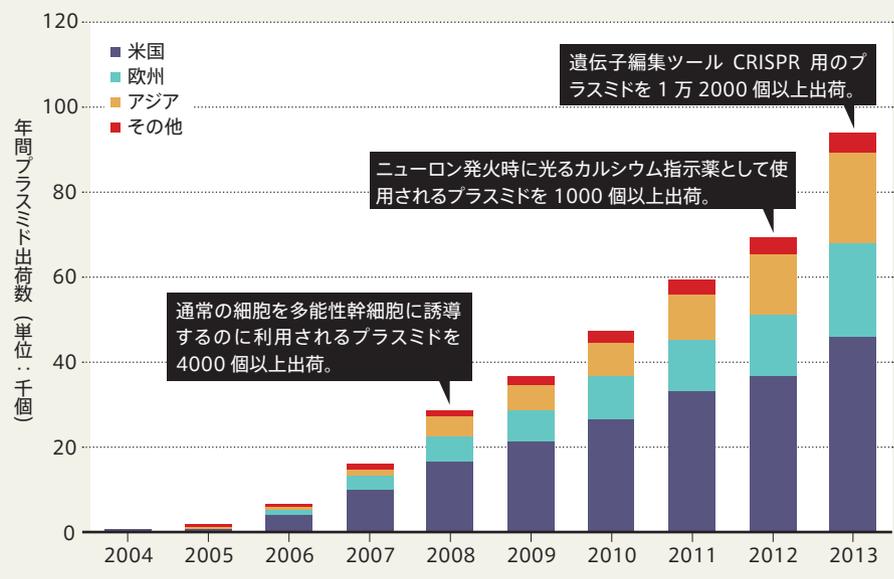
最初のBRCには、長く素晴らしい歴史がある。1925年に設立されたATCC(American Type Culture Collection; 米国バージニア州マナサス)は、遺伝子構築物や微生物、細胞株を100万点以上保有している。また、1929年設立のジャクソン研究所(米国メイン州バーハーバー)は、7000系統もの近交系および遺伝子組換えマウスを維持管理している。

アドジーン社はBRCとしては比較的新しいが、分子生物学者はそのサービスに殺到している。アドジーン社の発送品からは、最新科学のトレンドが読み取れる。2013年、アドジーン社は、遺伝子編集ツールCRISPRが組み込まれたプラスミドを1万2000個以上出荷した(「受注、梱包、そして配送」を参照)。

しかし、ミズーリ大学カンザスシティ校(米国)が運営する真菌遺伝学

## 受注、梱包、そして配送

2013年、生物リポジトリのアドジーン社は、細胞への遺伝子導入で遺伝子の入れ物として利用される環状のDNA「プラスミド」を、9万4000個近く出荷した。



系統センター(FGSC; Fungal Genetics Stock Center)の管理人であるKevin McCluskeyは、リポジトリは重宝されるがその維持管理は容易ではなく、ほとんど研究されていない高コストの材料を抱えているならなお厳しいと考えている。FGSCが収集した2万5000株を超える真菌は、米国立科学財団の助成金に支えられているが、それらは更新されていない。

「財団は我々に自立を求めています、そのためには価格を大幅に上げねばならず、ユーザーは資源を利用しづらくなります」とMcCluskeyは漏らす。McCluskeyによれば、FGSCでの売価が学術研究用なら1株当たりわずか30ドル(約3000円)なのに対し、ATCCではその10倍するものもある(ATCCの広報担当はその価格差について、収集品の品ぞろえと品質を考えれば妥当という)。

技術の変化でもくろみが崩れる場合もある。オークランド小児病院研究所(米国カリフォルニア州)のBACPAC資源センター所長であるPieter de Jongは、外部の配列解読プロジェクト用に、大量の高品質DNAを保存・複製する目的で、多様な人工染色体のコレクションを作り上げた。ひところ、そのコレクションは「ヒト

ゲノムプロジェクト」で利用されていた。

しかし、高速で低コストの配列解読機が出現したことで、人工染色体の需要が減少し、料金収入だけでは維持費を賄えなくなってきたという。de Jongは2013年に予備の材料を廃棄して貯蔵用冷凍庫を半分に減らしたが、現在もコストの削減を続けている。次は、カモノハシDNAのコレクションなどのほとんど注文が来ない特殊な材料を切り捨てなければならないかもしれない。

しかし、今日はほとんど注文が来ないものが、明日には大きな価値を持つこともあり得る。例えば、ポリメラーゼ連鎖反応(PCR)と呼ばれる重要なDNA複製法の開発で1980年代に利用された耐熱性酵素は、1960年代にATCCに寄託された細菌によってもたらされた。寄託されたときはまだ、この細菌に具体的な用途などなかった。

Fanによれば、アドジーン社が所有するプラスミドの約3分の1には注文が入ったことがなく、他の注文で得た料金でその維持管理コストを賄っているという。「未来の科学者が利用できるように保存しているのです」とFanは語る。■

(翻訳: 小林盛方)

# 大学内での凶悪犯罪を未然に防げ!

## Caught on campus

BRENDAN MAHER 2014年1月9日号 Vol. 505 (150-152)

近年、大学キャンパス内での暴力事件が増加している。米国の大学は学内の安全を守るための正式な手続きとして「脅威評価」を定めるようになったが、その有効性は未知数だ。

Kayla Bourqueは、ネット上の画像で見るとかぎり、どこにでもいる大学生である。自分撮り写真に写る彼女は、海辺での休日を楽しんだり、髪を奇抜な色に染めてにやりと笑ってみせたりしている。サイモン・フレイザー大学(カナダ・ブリティッシュコロンビア州)で犯罪学を学んでいた彼女は、2012年、同級生に思ってもよらない告白をした。「自分にはホームレスを殺害するという夢があり、それをうまくやってのけるために犯罪学の勉強をしている」と打ち明けたのだ。彼女はさらに、家で飼っていたペットや近所の猫を惨殺したときのことも語った。

話を聞いた同級生は、Bourqueの話を大学のティーチングアシスタントに報告した。それを受けた学部長は、大学の警備部門に通報した。この出来事をきっかけに、サイモン・フレイザー大学では「脅威評価」と呼ばれる正式な手続きが定められた。大学はそれに則り、大学の警備部門と事務職員、それに学外のコンサルタントを加えたチームを組織し、

Bourqueの最近の言動に関する証拠を集め、脅威の評価を行った。

この事例についてチームに助言をしたサイモン・フレイザー大学の司法心理学者Stephen Hartによると、チームはBourqueに関する告発を真剣に受け止めたという。「あのような打ち明け話は、助けを求める叫びであることが多いからです」と彼は言う。けれども、いくつかの場面で見られたBourqueの行動は、彼女が他の学生に危害を加える恐れがあることを示していたため、大学のメンタルヘルスサービスを利用するように指導するだけでは不十分だと考えられた。チームは地元の警察に通報し、Bourque本人にも、徹底的な心理評価を受けるまでは復学を許可できないと通告した。

その後、Bourqueが住んでいた寮の部屋で荷物を片付けていた大学職員は、包丁、カミソリの刃、ゴム手袋、注射器、人を拘束するのに用いる結束バンドが入ったバッグを発見した。これらは、後に裁判所の文書で「殺害用具一式」

と説明されたものだ。「彼女の異常な言動が『助けを求める叫び』ではなかったことが分かったのです」とHartは言う。この発見を受けて、警察は家宅捜索令状をとった。家宅捜索の結果、彼女のコンピューターからは、暴力的なポルノや胸が悪くなるような画像、そして腹を裂かれた飼犬のモリーの横に全裸で立つ彼女の自分撮り写真などが見つかった。

Bourqueは2012年に、モリーと彼女の飼猫スノーフレイクの殺害、そして武器所持の罪により、9カ月間拘留された。彼女はその後、監督者なしでインターネットを使用しない、人と交流するときには必ず自分の犯罪について知らせる、ペットを飼わない、サイモン・フレイザー大学に近づかないなど、数多くの条件付きで仮釈放された。この件はざっとする事例であったが、脅威評価という成長途上の学問分野にとっては大きな勝利となった、とHartは考えている。

大学内での暴力事件は極めてまれではあるが、その件数は増加している(14

ページ図)。ここ数年を見ても、大学を舞台とする事件がいくつか大きく報道され、その中には科学者が起こした事件もあった。2010年には、アラバマ大学ハンツビル校(米国)の生物学教授Amy Bishopが、終身在職権を拒否された後、3人の同僚を射殺した(*Nature* 2010年5月13日号、150～155ページ参照)。さらに2012年には、コロラド大学(米国デンバー)の博士課程で神経科学を学んでいた大学院生James Holmesが、大学院を中退した1カ月後に、同州オーロラの映画館で銃を乱射して12人を殺害し、58人を負傷させた。

多くの場合において、そうした事件を起こす前の犯人には、脅迫行為が激しくなったり、常軌を逸した行動が見られたりした。Bishopの場合は、行動に脅威を感じた同大学の学部長と学長が事件の数カ月前に警察に警護を要請しており、Holmesの場合は、彼自身が大学の精神科医に「人を殺したい」と打ち明けていた。どちらの事件も不法死亡訴訟(不法行為による死亡について、遺族が加害者に損害賠償を請求する訴訟)が起こされており、現在、係争中だ。しかし、こうした襲撃を防ぐことはできたのだろうか？

脅威評価の目標は、暴力行為を未然に防ぐことである。組織が脅威評価を行う際には、危険な状況を察知し、暴力行為が発生する前にそれを解決するための正式な手続きを定めなければならない。今日では、米国のどの大学にも脅威評価チームとその計画があり、バージニア州、コネチカット州、イリノイ州などでは設置が義務化されている。他の国々も米国に続いている。米国シークレットサービス(大統領やその他の要人の警護に当たる機関)での勤務経験を持ち、現在は脅威評価コンサルティング会社と提携している社会心理学者のMarisa Randazzoは、「これまで見てきた中では、脅威評価の導入に最も積極的に取り組んだのは高等教育機関でした」と言う。

脅威評価の有効性を立証するのは困難で、市民的自由を踏みにじる恐れもあ

る。それでも多くの人は、非常事態への備えとして必要だと考えている。カリフォルニア大学サンディエゴ校(米国)の司法心理学者Reid Meloyは、「大学も最も暴力的な社会の1つであり、我々はそこで生活しています。危険を軽減するためにできることはどんなことでも有益であり、こうした問題について考えることは大切なのです」と話す。

### 脅威評価の歴史

大学内での脅威評価に携わる人々に話を聴くと、必ず出てくるのがGene Deisingerの名前である。アイオワ州立大学(米国エイムズ)が脅威評価チームの設置を決めたとき、Deisingerは同大学のカウンセリングセンターの臨床部長であった。その決定には、地域の大学で起きたいくつかの事件が影響していた。1986年には、過去に同大学でコンピューターサイエンスを学んだ元学生が、当時の指導教官の1人の家に放火して、教授の2人の子どもを死亡させた。1991年には、アイオワ大学(米国アイオワシティ)の若手物理学者が5人を殺害して自殺する事件が起きた。報道によれば、論文賞を逃したことが犯行の引き金になったという。当時アイオワ州立大学の警備部門長だったLoras Jaegerは、こうした事件に対処するために脅威管理チームを設置することを決め、Deisingerにその創設を手伝ってほしいと頼んだ。「それがどのようなものか分からなかったのですが、まずは研究を始めました」とDeisinger。

脅威評価法の開発において長い歴史を持っているのは、米国シークレットサービスである。だが、当時その内容は公表されていなかった。そこでDeisingerは、危険な行動、職場での暴力、危機に陥った学生への対応などの研究に目を向けた。彼はそこからキャンパスでの問題行動を特定し、介入を行うためのアプローチを考案し、1994年にはチームを始動させることができた。だがDeisingerの仕事がみるみるうちに増えたので、JaegerはDeisingerがこの職務に専念で

きるようにと大学の警備部門に専任職を設けた。さらにJaegerは、チームが発足して1カ月も経たないうちに、「今度は州の警察学校で訓練を受けてほしい」とDeisingerに言った。33歳の心理学者にとって、警察官になることは、キャリアのその段階でやりたい仕事ではなかった。けれども今は、その仕事を引き受けてよかったと考えている。「警察バッジと銃を持つ心理学者は、あらゆる場所に入り込めますからね」と彼は言う。

キャンパスの脅威評価チームはさまざまな分野の専門家で構成されていて、警察官、心理学者、大学の管理事務職員、学生支援室や人事管理部門の代表者、弁護士などが含まれている。学生による脅迫など、疑わしい行動の通報があれば、チームはしばしばその行動をとった本人に直接問い合わせることから始める。同僚、アドバイザー、教師と話することもある。

研究者たちは、心理学のレンズを通して過去の暴力事件を検討することによって、暴力行為の前兆となる行動や、その引き金となり得る環境要因を特定した。キャンパスで暴力行為を起こす人は、事件の前に、極端な行動をとったり、それまでとは違った行動を突然とるようになったりする。他人から遠ざかったり、他人を遠ざけたりすることもある。武器や暴力行為に対して不健康な関心を抱くこともある。環境要因としては、職場でのいじめ、解決できない対立、派閥や序列の存在などがある。そしてしばしば、事件の引き金となる出来事がある。それは、個人的ないさかひや、仕事と生活の両方に関わるプレッシャー(例えば、終身在職権や主要な交付金を獲得できないこと)などの問題が生じて、それにうまく対処できない状況が続くことである。

実際に発生した暴力事件で得られたデータからは、「暴力への道」があることが示唆される。まずは何らかの形の不満があり、誰かに危害を加えようという意思が芽生え、犯行の下調べ・計画・準備に至る。例えばBourqueは、心理学者に「将来の襲撃の対象を確認するためにパス

で町に出ていた」と語っているし、「殺害用具一式」は、彼女が犯行の準備の段階まで来ていたことを示唆している。しかし、大学キャンパスでの暴力行為は非常にまれであるため、データから言えるのはそこまでだ。簡単に判別できるチェックリストなどはなく、単純な犯人像もない。

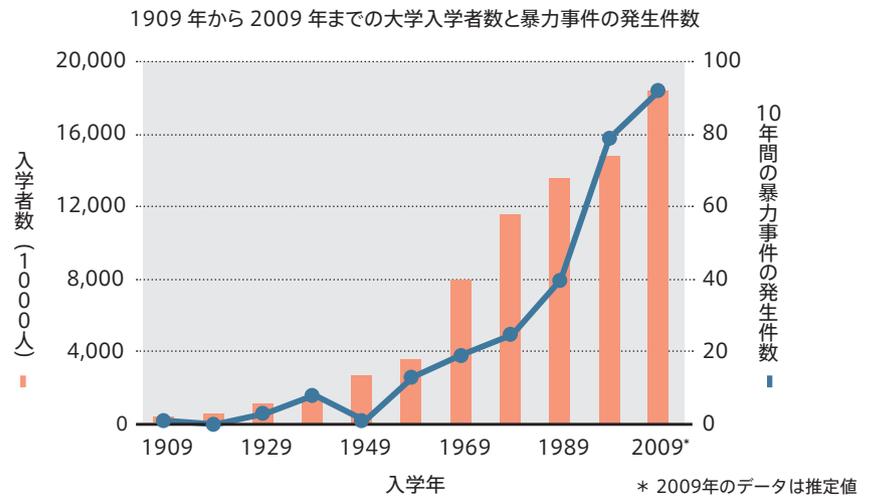
対象者への懸念が正当なものであり、「暴力への道」を歩んでいる可能性がある」と判断されれば、脅威評価チームは脅威の管理に着手する。多くの場合、チームは、対象者を支援者やメンタルヘルスサービスと接触させたり、その状況を作り出した環境要因を解決するために動いたりする。チームのメンバーが対象者を定期的に訪問して、「お茶をする」と Deisinger が呼ぶところの接触を持つこともある。これらの働きかけは対象者の監視のために行われるが、対象者が法律や大学の規則に違反しないかぎり、対象者がそれを受け入れるかどうかは任意であると考えられている。ほとんどの場合、チームと対象者との関係は友好的だ。「対象者とは、少なくとも正面玄関から室内に招き入れられる関係を築くようになっています。これにより、対象者の生活状況を見ることができると Deisinger は言う。「室内に入ったら、精神疾患が疑われる異常がないか、部屋の隅に武器が積み上げられていないか、身の回りのことはできているか、食料はあるか、衛生状態に問題はないか、つぶさに観察します」。

まるで非行少年指導員のような介入の仕方だが、Deisinger はそのことを否定しない。「対象者は、私が脅威評価を行っていることを知っていますから、ほとんどの場合、私たちは駆け引きなどしないのです」と Deisinger は説明する。それでも、対象者のオープンさに驚かされるのがしばしばあると彼は言う。Hart によると、Bourque は自分の評価を行った脅威評価チームに何でも打ち明け、「殺害用具一式」の発見につながった寮の部屋の荷物の片付けについても、許可を与えたのは彼女自身であったという。

脅威評価対象となるのは、誰かに危

## 危険な傾向

1900 年以降に米国の大学キャンパスで報告された暴力行為に関する調査から、学生数の増加とともにそうした事件の発生頻度が増加する傾向があるものの、それだけでは事件の増加を説明しきれないことが明らかになった。



害を加える意思を表示した人物のみである。幸い、このような事前の意思表示はよく見られる。1990年代には、米国シークレットサービスが、要人や有名人を実際に襲撃した、または未遂に終わったがもう少しで襲撃するところだった83人について調査を行った。その結果、襲撃の前から危害を加えようとしていた人間に直接意思表示していた者はほとんどいなかったが、63%が何らかの方法で意思表示を行っていたことが明らかになった<sup>1</sup>。「このタイプの事件を起こす人は、自分の計画について事前に誰かに打ち明けることが多いのです。ソーシャル・メディアは、多くの事例で、そうした意思表示の場になっています」と Randazzo は説明する。

## 暴力事件の内訳

2005年11月、バージニア州立理工科大学(米国ブラックスバーグ)の警備部門は、韓国生まれの学生 Seung-Hui Cho が女子学生にストーカー行為をしているという告発を受けた。Cho のルームメイトからは、彼が自殺をほのめかしたことがあるという証言も得られた。3回にわたって脅威評価を受けた Cho は、自殺をほのめかしたのは冗談であると言った。だが、短期間の入院措置となった。

Cho はその後、2007年2月と3月に2丁の銃を購入し、同年4月に同大学のキャンパスで銃を乱射し、32人を殺害した。大学内で起きた銃乱射事件としては史上最悪のものであった。

この事件をきっかけに、米国シークレットサービス、FBI、米国教育省が、キャンパスでの暴力事件に関する全国調査に乗り出した。調査では、1900年から2008年にかけて米国内で発生した272件の暴力事件に関する情報が集められた。その結果、こうした事件はまれであるが、頻度は増加していることが分かった<sup>2</sup>。例えば、報告書に列挙された事件は1970～1979年の期間には25件しか起きていないが、2000～2008年の期間には83件も起きている(「危険な傾向」参照)。確かに、学生数が増加したことが暴力事件増加の背景にあり、また、昔よりも今のほうが事件を報告しやすくなっていることもある。しかし、この報告書の追跡調査を行っているFBIの行動科学者 Andre Simons は、そうした変化だけではこの増加を完全には説明できないかもしれないと指摘する。

この調査は、大学での暴力事件のさまざまな性質も明らかにした。加害者の60%が、犯行の舞台となった大学の学生か元学生であり、11%が同大学の職

員であった。しかし、残りの29%は大学の正式なメンバーではなかった。

加害者が犯行前に明確な脅迫をしていたかどうかを見極めるのは困難だ。30%近い加害者は、被害者に対するストーカー行為、いやがらせ、口頭または文書での脅し、物理的な攻撃などの脅迫行為をしていた。また、20%の加害者が、友人、家族、職場の同僚、警察官に対して、何らかの問題行動を示していた。しかし、そのような行動の意味は曖昧で、いかようにも解釈可能であり、全てが報告されているわけではない。

Choの事例では、常軌を逸した行動の徴候はあったが、彼を徹底的に追跡するような措置は講じられなかった、とDeisingerは言う。銃撃事件後、バージニア州立理工科大学は脅威評価チームを設置した。Deisingerはその創設に協力し、後に同大学の警備部門長に就任した。バージニア州立理工科大学での銃撃事件をきっかけに、同様の脅威評価チームを設置する大学が増えたとMeloyは言うが、その数は不明である。2012年からの自己報告調査によって、米国の大学とコミュニティーカレッジの92%に何らかのチームが設置されていることが分かっているが<sup>3</sup>、この数字には、警察との直接的な協力関係のない、別のタイプの行動介入チームも含まれている。この傾向は、米国内に限定されたものではない。心理学・脅威管理研究所(ドイツ・ダルムシュタット)の心理学者で、Meloyとともに*International Handbook of Threat Assessment* (Oxford Univ. Press, 2014)の共同編集者となったJens Hoffmannによると、オーストラリアの大学が脅威評価の手順と手法に関心を強めているし、ドイツ語圏でも、10ほどの大学が脅威評価チームを設置したり、導入計画を持っていたりするようである。

### 本当に有効なのか？

脅威を管理するためのこうした体制や方策は、暴力事件の全てを防げるわけではない。バージニア州立理工科大学では脅

威評価チームが設置されていたにもかかわらず、2009年、同大学で農業経済学を専攻する大学院生が、交際を拒否した女性の首を切断する事件が発生した。当時、Deisingerはまだ着任していなかった。また、コロラド大学の場合も、Holmesが同大学の精神科医に人殺しをしたいと打ち明けたときにはすでに脅威評価チームが設置されていたのだが、Holmesがその後すぐに大学を去ってしまったため、追跡することができなかった。

サインの見落としは必ずあるとDeisingerは言う。そして、脅威評価は市民の通報に頼る部分が大きいため、市民がよく警戒していなければ、脅威評価で十分な成果を挙げることはできない。けれども近年、銃乱射事件がマスコミで大きく取り上げられるようになったことで市民の警戒心が高まり、「不審な行動をする人を見かけた市民が、迷わず通報するようになっていきます」とRandazzoは話す。多くの人が、2001年9月11日の米国同時多発テロ以降ニューヨークで展開されている「See something, say something (怪しいものを見たら通報しよう)」キャンペーンの影響が大きいと考えている。とはいえ、脅威評価チームの存在が市民に知られていなければ、情報は入ってこない。そこでDeisingerらは、ウェブサイトやちらしを作って周知を徹底したり、不適切な行動に対処するための訓練セッションを開催したりしている。

一方、米国の大学における市民的自由の擁護団体Foundation for Individual Rights in Education (米国ペンシルベニア州フィラデルフィア)の法律・政策担当理事のJoe Cohnは、警戒が強化されることで犠牲にされるものがあると指摘する。「大学が、安全の名の下に言論の自由を後退させる行動に出るのは、珍しいことではありません」。彼は最近の例として、駐車場の建設に異議を申し立てた学生が退学処分になった事例と、オフィスの外に攻撃的なメッセージを掲げるポスターを貼った教授が脅威評価チームに通報された事例を挙げた。彼は、大学が

人権を侵害することがないように、市民的自由を擁護する立場の人々も脅威評価チームに含めるように主張している。

それに、脅威評価チームの設置によってキャンパスがより安全になったことを立証するのも難しい。成功例を報告するための標準的な方法が確立されていない上、プライバシーの問題もあるためデータの共有も困難だ。Deisingerによると、彼らのチームは現在、これまでに扱ってきた事例を追跡して、自分たちの介入により、対象者とその周囲の人々が置かれている状況が改善したかどうかを調べようとしているという。「ほとんどの場合、対象者の常軌を逸した行動を、よくある不適切な行動にまで軽減することはできています」とDeisinger。もちろんそれは理想的な解決ではないが、「ある程度の目標には達している」と彼は言う。

脅威評価に従事する人々は、介入の有効性について基準を定め、データを収集しようとしている。FBIでは、大学キャンパスでの暴力事件に関する研究の第2段階として、1985年から2010年までの事件を検討する予定であり、脅威評価の有効性についても新しいデータが得られるかもしれない。

脅威評価の有効性については、Deisinger自身も深刻に捉えている。しかし、彼が最も心配しているのは、誰かがどこかで、誰にも予期できないような犯罪を計画していることであるという。「私たちが扱っている事例に関して、私はよく、『夜は眠れるのですか?』と尋ねられます。私を眠れなくするのは、自分が知らない事例です」と言う彼は、自分たちのチームが特定した人々については、あまり心配していない。 ■

(翻訳：三枝小夜子)

Brendan Maher は、ニューヨーク在住のNature 特集記事担当編集者

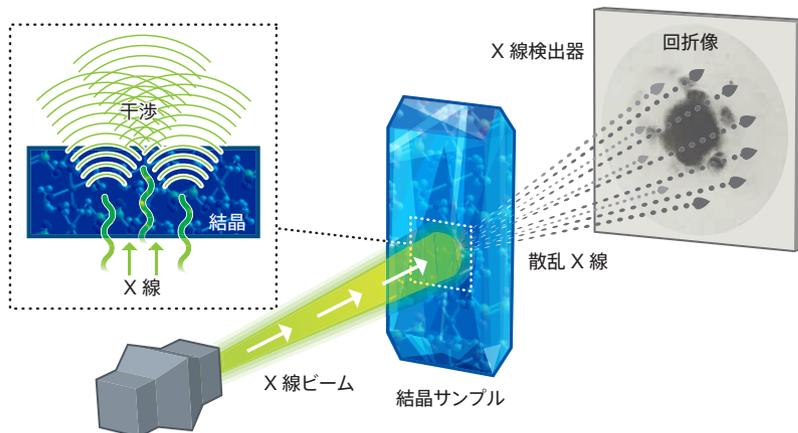
1. Fein, R. A. & Vossekuil, B. J. *Forens. Sci.* **44**, 321-333 (1999).
2. Drysdale, D. A., Modzeleski, W. & Simons, A. B. *Campus Attacks: Targeted Violence Affecting Institutions of Higher Education*. <http://go.nature.com/cbxfhfy> (2010)より入手可能。
3. Van Brunt, B., Sokolow, B., Lewis, W. & Schuster, S. NaBITA Team Survey. [www.nabita.org](http://www.nabita.org) (2012)より入手可能。

# 微小世界の謎を解く — 結晶構造解析 100 年の歩み —

## Atomic secrets: 100 years of crystallography

NICOLA JONES 2014年1月30日号 Vol. 505 (602-603)

ドイツの科学者マックス・フォン・ラウエは、結晶によるX線の回折現象を発見し、1914年にノーベル物理学賞を受賞した。現在では、X線回折を利用して、単純な鉱物からグラフェンなどのハイテク材料、ウイルスなどの複雑な生物構造体に至るまで、さまざまな物質の構造が解明されている。技術は進歩し、1990年代には分解能がタンパク質結晶構造の画像中の原子1個1個を区別できるレベルに達した上、近年では新たな構造体が年間何万ものペースで画像化されるようになった。さらに最近、新しいX線源が開発され、大型結晶が得られにくいタンパク質の構造の画像化が期待されている。



### アイデアの誕生

X線の正体が謎に包まれていた当時、ラウエは「X線が電磁波であるなら、原子が規則正しく並んだ結晶を通る際に散乱され、岸壁の割れ目を通る波のように干渉し合うのではないかと考えていた。同時に、できた回折パターンから原子の位置を逆算できるかもしれないというアイデアが浮かんだ。1912年、ラウエは共同研究者らとともに、硫酸銅を用いてこの仮説を証明した。

1914

1913

#### ダイヤモンド

結晶内で炭素原子が正四面体構造をとることが、回折像から確認された。

1925

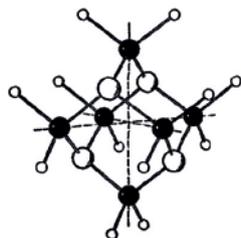
#### 石英

ケイ酸塩鉱物の構造決定は、鉱物学の基礎となった。

1923

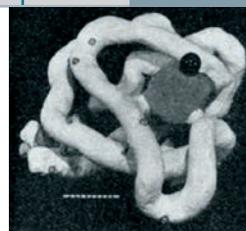
#### ヘキサメチレンテトラミン

有機分子の構造決定に初めて成功。この分子は単純な立方対称性を持つため、解析対象として選ばれた。原子だけでなく分子も、結晶の繰り返し要素になることが判明した。



#### ミオグロビン

タンパク質の構造の画像化に初めて成功。不規則な折りたたみ構造が初めて観察され、これまでの分子構造の概念が覆された。



1958

#### シンクロトロン

ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY) で、昆虫の筋肉の研究に、シンクロトロンで発生させたX線が初めて用いられた。結晶構造解析ブームをもたらした。

1965

#### リゾチーム

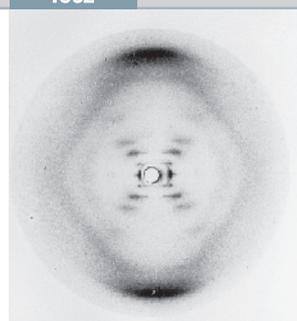
酵素の構造の画像化に初めて成功。解析されたのはニワトリ卵白リゾチーム。



1952

#### DNA

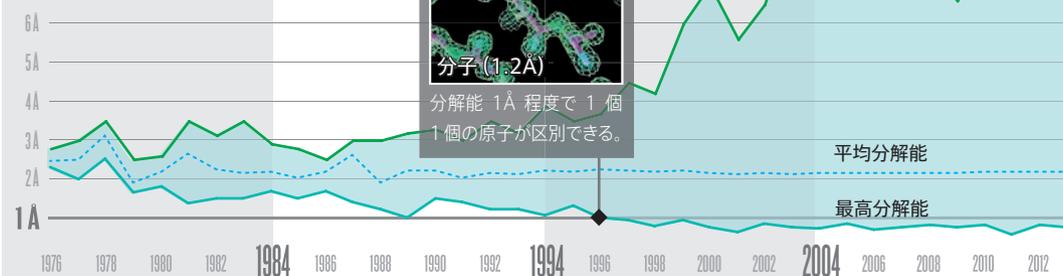
ロザリンド・フランクリンが DNA の X 線回折像 (フォト 51 として知られる) を撮影。この画像は、ジェームズ・ワトソンとフランシス・クリックによる二重らせんモデルの構築に重要な役割を果たした。二重らせんモデルは 1953 年に提唱されたが、この構造の原子分解能画像が得られたのは 1980 年のことだ。



(翻訳：藤野正美)

ますますクリアに

画像化やデータ解釈の技術が向上した期間。構造の細部を詳しく見ることが可能になり、複雑な分子の解析が行われ始める。

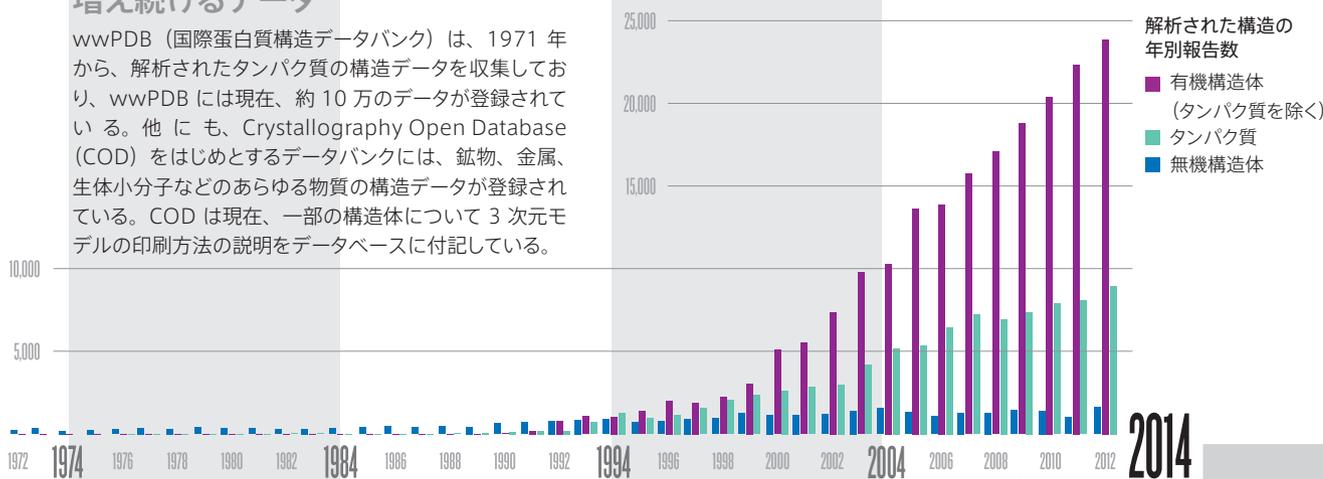


複雑な構造体の場合、結晶内での変化や動きが大きいため、高分解能画像が得られないことが多い。

結晶構造解析法で得たタンパク質画像の平均分解能はあまり変わっていない。最高分解能は向上しているが、扱う構造体がどんどん複雑になっており、相殺されるようだ。

増え続けるデータ

wwPDB (国際蛋白質構造データバンク) は、1971 年から、解析されたタンパク質の構造データを収集しており、wwPDB には現在、約 10 万のデータが登録されている。他にも、Crystallography Open Database (COD) をはじめとするデータバンクには、鉱物、金属、生体小分子などのあらゆる物質の構造データが登録されている。COD は現在、一部の構造体について 3 次元モデルの印刷方法の説明をデータベースに付記している。



IMAGES: BERNHARD RUPP/GARLAND SCIENCE/TAYLOR & FRANCIS  
GRAPH: H. M. BERMAN PROTEIN SCI. 21, 1587-1596 (2012),  
WITH UPDATES FROM WORLDWIDE PROTEIN DATA BANK

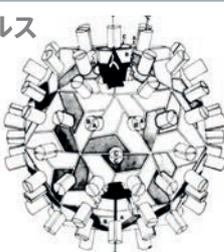
QUASICRYSTALS: US DEPT OF ENERGY/AFP/GETTY; RIBOSOME: V. RAMAKRISHNAN & D. E. BRODERSEN/MEDICAL RESEARCH COUNCIL; HIV: AAAS

SOURCE: WORLDWIDE PROTEIN DATA BANK/CRYSTALLOGRAPHY OPEN DATABASE

**1978**

**トマト矮化病ウイルス**

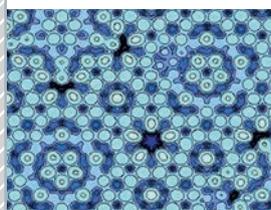
完全ウイルスの構造の原子スケールでの画像化に初めて成功。このとき明らかになった基本構造がヒト病原体ウイルスにも当てはまること、数年後に判明した。



**1984**

**準結晶**

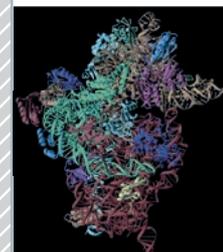
周期性 (並進対称性) のない原子配列をとる準結晶が初めて確認され、結晶学の常識が覆された。



**2000**

**リボソーム**

DNA 情報をもとにタンパク質を組み立てる分子機械の構造の画像化に成功。



**2009**

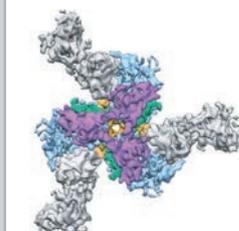
**X線自由電子レーザー**

SLAC 国立加速器研究所 (カリフォルニア州メンロパーク) の線形加速器コヒーレント光源 (LCLS) が稼働開始。画像化技術の新時代の幕開け。

**2013**

**HIV 三量体**

HIV がヒト細胞と結合する際に重要な部分の四次構造が高分解能で画像化され、フックとして機能する三量体の詳細な構造がようやく明らかになった。



今後の展望

高分解能での構造解析が求められているタンパク質として、スプライソソーム (メッセンジャー RNA の編成・編集を担う) と、核膜孔複合体 (核の門番として機能する) が挙げられる。

これらの巨大な構造体は数百ものタンパク質を含んでいるため、結晶化が難しく、また画像化の際、静止させることが困難である。

考えられる策は、構造体の一部を結晶化させ、それをジグソーパズルのようにつなぎ合わせる方法だ。X線自由電子レーザーの利用も有効であろう。

# CRISPR 法が世界を変える!

標的とする遺伝子の DNA 配列を改変できるゲノム編集技術が開発され、注目を浴びている。この技術によって、さまざまな生物種で遺伝子ノックアウトなどが可能になるのだ。また、2014年3月14～16日に徳島大学で国際的なゲノム編集シンポジウムが開催されるに当たり、シンポジウム直前の徳島大学の研究者たちに、この技術の持つ意味と可能性について解説していただいた。また、ラットにおけるゲノム編集技術について、京都大学の真下知士准教授にお話を伺った。

—— Nature ダイジェスト：ゲノム編集技術は、どのようなことに使えますか。

**野地：**大いに期待されるのは、例えば遺伝子のノックアウト実験でしょう。特定の遺伝子を破壊して、その影響を調べるもので、遺伝子研究で必須の重要な実験法です。

これまでの方法は複雑で、マウスなどの限られた生物でしか行えませんでした。それが、ゲノム編集技術を使えば、手順が簡単なので、さまざまな生物種でノックアウトが行えるようになるのです。

—— 霊長類や昆虫など、さまざまな生物の研究分野が活気づいていると聞きますが、そういうわけなのですね。

**野地：**そうです。そればかりか、マウスの研究者たちも、ゲノム編集技術を採用しようとしています。

—— 遺伝子の機能を抑える RNAi 法との違いは？

**刑部：**全く異なる技術です。RNAi法は、遺伝子が発現しないように抑制しているだけ。一方、ゲノム編集は、遺伝子の配列そのものを変化させますから、より確実に遺伝子の機能を調べることができるのです。

—— ゲノム編集技術は、ノックアウト以外にも使えますか？

**野地：**はい。遺伝子に機能を追加するノックインも可能です。他にも工夫次第で大胆な研究が行えるはずです。今、世界中の研究者が競って実験している最中でしょう。論文がどんどん報告されると思います。私たちも急がないと（一同を見渡す）。

—— この技術の基本的な原理は？

**刑部：**原理はシンプルです。まず、目指す標的 DNA 配列を見つけるガイド分子を設計し、そのガイド分子とともに働く切断酵素を細胞内で発現させます(下図)。すると、ガイド分子に導かれた酵素が、標的 DNA を切断します。DNA 切断に対して細胞は修復・再結合の仕組みを働かせますが、その過程で配列が改変されることがあります。この人為的な変異を利用するのです。

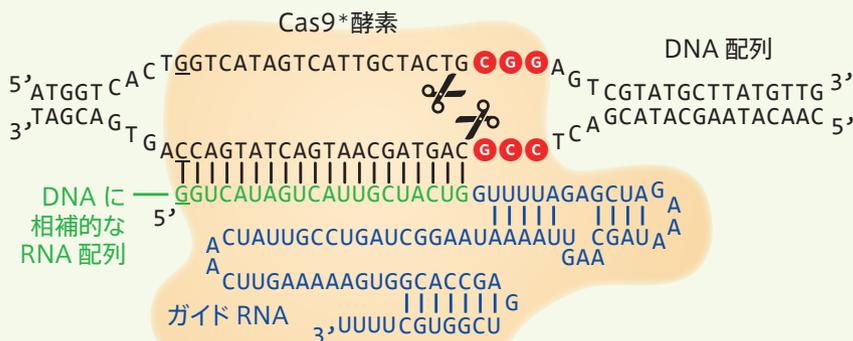
## CRISPR 法が人気を呼ぶ理由

—— CRISPR 法<sup>1,2</sup>が登場する前に、先行する ZFN 法、TALEN 法がありますが。

**刑部：**これら3つの方法は、DNA 配列に結合するガイドの分子が異なります。最初の ZFN 法と次に開発された TALEN 法は、タンパク質分子。CRISPR 法(厳密には、CRISPR/Cas システムを用いる方法)では、RNA 分子です。

ガイド分子は、目的に合わせて実験者が設計しますが、RNA 分子の設計はタンパク質の設計に比べてはるかに簡単です。ですから、CRISPR 法への関心は、先行した2つの方法とは比べものにならないくらい大きいと実感しています。

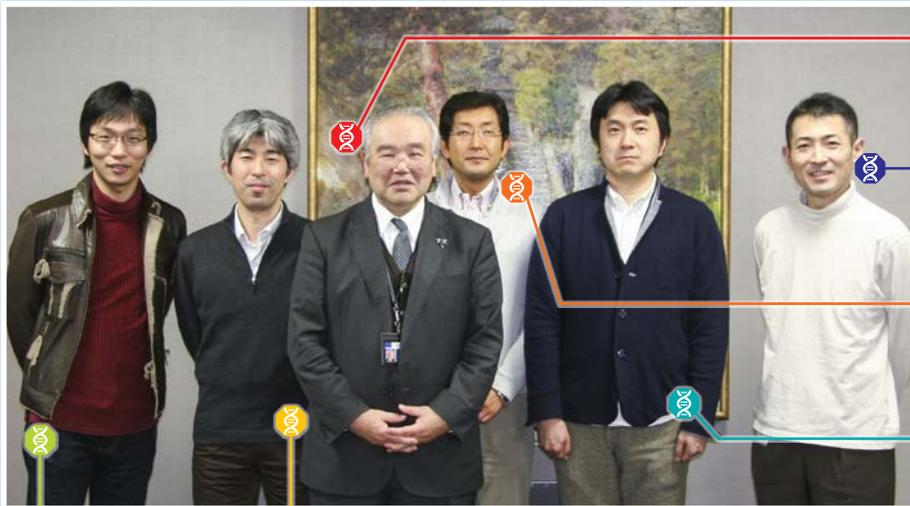
**野地：**先行する方法が手の込んだ料理だとしたら、CRISPR 法はインスタントラーメンの調理くらい簡単。誰でもできます(笑)。



\* Cas 酵素は何種類か存在するが、Cas9 が最もよく使用されている。

コオロギで用いた CRISPR 法の原理：

- ① 標的 DNA 配列を認識するガイド RNA を設計<sup>3</sup>。Cas9 酵素の mRNA 配列とともに、細胞に注入。
- ② DNA の二重らせんが開き、ガイド RNA が対形成(緑色)。
- ③ 発現した Cas9 タンパク質(オレンジの部分)がガイド RNA に呼び込まれ、塩基 CGG(赤色)の上流を切断。
- ④ 切断された部位は、次のどちらかの過程で修復される。NHEJ(非相同末端結合)による修復の場合は高い確率でエラーが起こり、塩基の挿入や欠失(ノックアウト)が生じる。HDR(相同組換え)の場合は、あらかじめ部分的に相補的な DNA 断片を加えておくことで、その断片を挿入(ノックイン)できる。



わたなべ たかひと  
渡辺 崇人

徳島大学 農工商連携センター 一次産業部門  
生物育種生産学分野 特任助教 博士 (工学)

おさかべ けいし  
刑部 敬史

徳島大学 農工商連携センター 一次産業部門  
生物育種生産学分野 特任教授 博士 (農学)

のじ すみはれ  
野地 澄晴

徳島大学理事・副学長  
農工商連携センター長 博士 (理学)

やすえ あきひろ  
泰江 章博

徳島大学大学院 ヘルスパイオサイエンス研究部  
口腔顎顔面矯正学分野 助教 博士 (歯学)

みと たろう  
三戸 太郎

徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部  
工学科生物反応工学 助教 博士 (理学)

みやわき かつゆき  
宮脇 克行

徳島大学 農工商連携センター  
植物工場分野 特任准教授 博士 (工学)

—— ZFN 法や TALEN 法で実験されている最中に CRISPR 法が登場してきたわけですね。

**刑部**：私は、農業生物資源研究所の土岐精一先生とぎせいいちの下で初期のゲノム編集技術を学び、技術の開発に取り組んできました。ZFN 法は、ゲノム編集技術の原理を最初に具体化した方法として意義深いと思っています。また、私は先行して研究を進めていた分<sup>4</sup>、CRISPR 法に移行するのも楽でした。

CRISPR 法がきっかけで、ゲノム編集技術がさらに普及することをうれしく思っています。以前と異なり、今はどこの講演でも大勢の人が興味を持って参加してくれます。

—— RNA 分子が目的の DNA 配列を認識できるのは、なぜ？

**刑部**：細菌や古細菌が持つ免疫機構で、侵入してきたウイルスなどの DNA 配列を認識することのできる特殊な RNA 配列 (CRISPR 配列と呼ばれる) を利用しています。また、DNA 切断酵素 Cas9 を呼び込むことのできる RNA 配列も、ガイド分子に加えておくのです。

### いろいろな生物での課題

—— 生物種によって CRISPR 法の効率に違いがあると聞きますが、それぞれの生物種を扱っている研究者の方にお話を伺いましょう。まず、コオロギではどのように利用を？

**三戸**：コオロギの魅力にとりつかれて、コオロギを用いた昆虫の発生・再生の研究に携わってきました。昆虫ではハエがよく研究されていますが、ハエが昆虫の代表というわけではありません。昆虫の発生は多様です。例えば、脚の再生の研究では、幼虫に脚があるコオロギの方が適しています。また、コオロギは体が大きいので研究しやすいのも利点です。

2 年前に徳島大学の支援により、第 2 回国際コオロギ学会を徳島大学で開くことができました。モデル動物としてのコオロギの存在が世界的に認知されるようになり、さらに研究が進むと期待しています。

発生や再生の研究では、遺伝子発現がどのように調節されているかを調べることが極めて重要です。ゲノム編集技術が使えると、画期的に研究が進展します。コオロギを使ったゲノム編集技術は、渡辺先生と開発を進めています<sup>5</sup>。

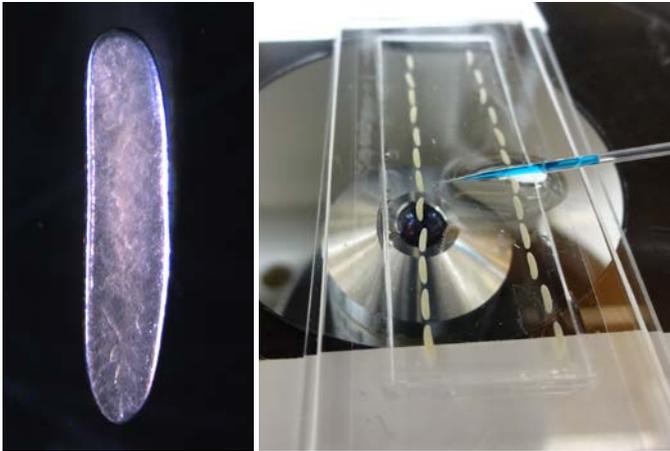
**渡辺**：コオロギの雌は、一度に約 1000 個の受精卵らんを生みます。その卵 1 個 1 個に、あらかじめ設計しておいた RNA 分子の試薬を注入します。すると、卵の中で遺伝子改変が進みます。

試薬の注入は 1 時間以内に終わるようにしていますが、注入する前に卵の発生が少し進行してしまうので、全身の細胞で遺伝子改変された個体を得られるのは孫世代になります。なお現在、CRISPR 法の効率を上げたりして、いろいろな応用法を工夫しているところです。

—— 植物ではどのように？

**宮脇**：植物では動物と異なり、細胞は細胞壁に囲まれています。ですから試薬を注入することは容易ではありません。通常、アグロバクテリウムという細菌の感染を利用した古典的な方法で、細胞に DNA 分子を導入します。刑部先生が用いているシロイヌナズナでは、このやり方で CRISPR 法が使えます。

私が研究しているイチゴの場合、この手法の効率が極めて悪いのです。そこで、効率が良くしかも安全な導入法を研究しています。まずは、そうした手法の開発が重要だと思っています。



ココロギ受精卵に CRISPR 法の試薬を注入する。卵は約 3 mm。



徳島大学農工商連携センターの植物工場でイチゴを栽培。

——新しく農工商連携センターを立ち上げられたのですね。

**野地：** 刑部先生や宮脇先生を中心に、植物のゲノム編集の中心地にしようと思っています。基礎研究だけでなく、イチゴ、トマト、キノコなどの品種改良の研究も行っていますよ。センターに「商」の文字を入れているのは、売るところまで面倒をみるため。消費者とのつながりが大切だと思うのです。

ゲノム編集は産業界にも大きなインパクトを与えるでしょう。農業や畜産業の品種改良などに与える影響は極めて大きいと想像されるからです。なお、CRISPR法で使うRNA分子や酵素タンパク質は、ゲノムに組み込まずに使用することが可能で（動物ではすでに実現）、やがて分解され、体内から消失してしまいます。つまり、遺伝子組換えに当たらない実験方法を開発できる可能性が高いと考えられます。

——最後になりましたが、マウスでのCRISPR法は？

**泰江：** 私は歯科医で、研究から少し離れ臨床をしていたのですが、2年半前、ゲノム編集技術のおもしろさに惹かれて研究を再開しました。マウスでは、雌雄の核が融合する前の受精卵の細胞質にRNA分子を注入することで遺伝子ノックアウトが行えます。ES細胞（胚性幹

細胞）を用いた従来法では、遺伝子改変マウスを得るのに半年～1年かかっていたのですが、CRISPR法では1カ月もあれば作製可能になります。

マウスでは、他の研究者によるノックインなどの先行研究例がすでにあるので、まずはそれらを習得・実現して、光る遺伝子を組み込むなど工夫していければと思っています。CRISPR法による遺伝子改変は簡単で、かつ多彩な操作も行いやすいので、マウスを用いたヒト疾患研究も急速に進むことが期待できます。

——CRISPR法は、医学分野でも応用が期待されるのですね。

**野地：** 人工多能性幹（iPS）細胞の遺伝子改変でも成功しており、医療分野での利用も極めて盛んになるでしょう。

**刑部：** ゲノム編集技術の開発は、海外ではもともと、医学関連の研究者の間で盛り上がっていたのです。

——研究上の問題点は？

**野地：** 目的のDNA配列以外に影響を与えてしまう「オフターゲット効果」については、現在検討中です。倫理的な問題に注意を払わなければならないのは、当然のことです。

——今後、論文を発表していく人たちのアドバイス。

**野地：** 今後は、ただCRISPR法を使用したというだけでは、インパクトファクターの高い雑誌に掲載されないでしょう。それを使って何をしたかが重要になってきます。

**刑部：** ゲノム編集技術はもともと、より精緻に遺伝子を改変する技術として開発されてきました。テーマを決める際には、最先端の分野で障害になっているものを乗り越えるためのものがよいでしょう。今はゲノム編集技術を使った研究のバブル期で、何をやっても新しい。例えばココロギでは何をやっても一番乗りになれるますが、マウスの研究者が、「こんなこともできるのか!」と驚くようなテーマを選ぶことも必要ではないでしょうか。

——3月の国際会議への意気込みを聞かせてください。

**野地：** 世界ではどの程度応用が進んでいるか、垣間見ることができるはずです。私たちにもいろいろなアイデアがあり、早く試してみたいと思っています。

——ありがとうございました。 ■

聞き手は藤川良子（サイエンスライター）。

1. Cong, L. et al. *Science* **339** 819-823 (2013).
2. Cho, S.W. et al. *Nat Biotechnol.* **31** 230-232 (2013).
3. Mali, P. et al., *Science*, **339**, 823-826 (2013).
4. Osakabe, K. et al. *PNAS*, **106**, 12037-12039 (2010).
5. Watanabe, T. et al. *Nat Commun.* **3** 1017 (2012).

## ラットのゲノム編集技術を開拓

——実験動物のネズミというと、ラットよりもマウスがよく用いられますね。真下：そうなんです。しかし30年前は、ラットの方がマウスの約2倍も使用されていたのです。論文検索で調べたグラフを見てください（下図）。それが、今は逆転している。理由は明らかです。マウスでは、1990年頃に、ES細胞を用いた遺伝子ノックアウト技術が開発されたからです。

——ラットが適しているのはどんな研究？

ヒトの病気の中でも特に、代謝や神経の研究に適し、例えば高血圧、糖尿病、てんかんなどの動物モデルとして、昔から使われていました。ラットの体のサイズ（頭胴長約25cm）は、マウス（同約7cm）に比べてずっと大きいですから、実験操作で扱いやすいのも大きなメリットです。

——遺伝子改変技術の開発はどのように進められたのでしょうか。

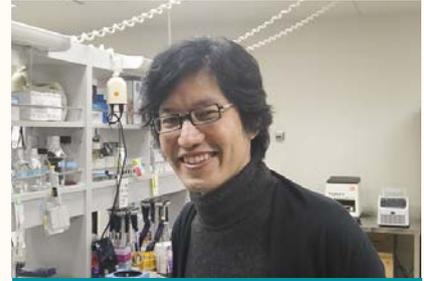
多くの人たちの努力がありました。私も2002年より取り組んできました。

私自身はまず、ENU突然変異作製法という古典的な技術を改良し、2008年、標的的遺伝子をノックアウトする技術の開発に成功しました<sup>1</sup>。2010年になると、南カリフォルニア大学のグループにより、ラットのES細胞を使った遺伝子ノックアウト技術が開発され、*Nature*に掲載されましたが、実はこのときすでに、別のグループによりゲノム編集技術の開発が始まっていたのです。

——ゲノム編集技術はどのように進められましたか。

ゼブラフィッシュにおいて、ZFN法によるゲノム編集技術の成功が報告されたのが、2008年のことでした。これは、とんでもなく優れた画期的な方法と気付き、私はすぐにラットで試しました。報告としては、2009年末のウィスコンシン医科大学のグループに後れを取って2番目でしたが、疾患モデルの作製の論文としては一番乗りでした<sup>2</sup>。

私は、これで、ラットの世界が変えられると思えました。マウスに負けていた状況を一変できると。



ましもともし  
真下 知士

京都大学大学院医学研究科附属動物実験施設  
准教授 博士（人間・環境学）

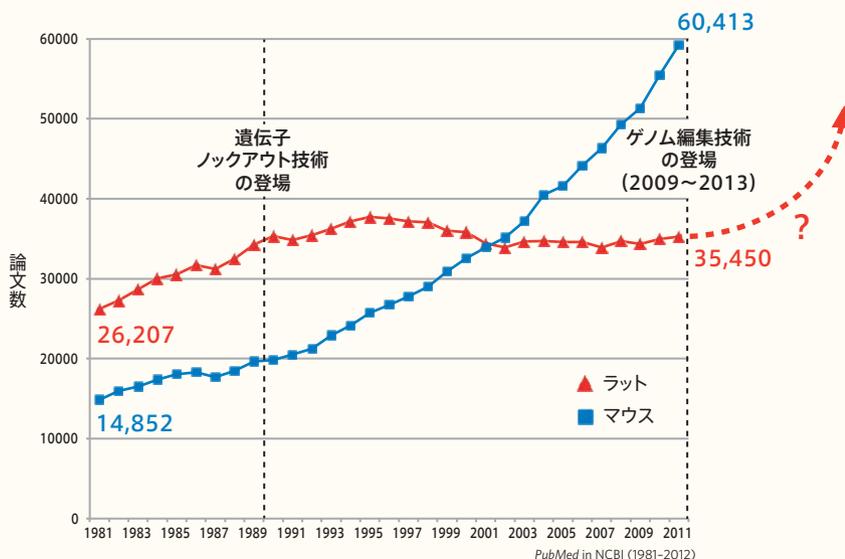
けれど喜んだのも束の間、ZFN法は暗礁に乗り上げました。タンパク質合成法の特許を企業が押さえていたため、自由に広めることができなかったのです。でも、その悩みはすぐに解消されました。ZFN法に代わる、TALEN法、CRISPR法という優れた方法が、次々に開発されたからです。

特に、CRISPR法はガイド分子としてタンパク質ではなくRNAを使うので、操作が格段に簡単でした。「これこそ決定的な方法」と確信しました。

——ラットでCRISPR法を使うと、どのような遺伝子改変が可能でしょうか。遺伝子ノックアウトが、2～4カ月という短期間でできます。ES細胞の場合と異なり、どんな動物の系統も使用可能。複数の遺伝子のノックアウトも可能。遺伝子のノックインも、1塩基から長い配列まで可能。さらに、工夫次第で遺伝子のより精緻な改変も可能。私も今、論文を投稿中です。

CRISPR法のメリットは、マウスにおいても有効です。今後は、研究目的とする病気の種類に従って、ラットとマウスを使い分けられればよいでしょう。両方のデータを比較できることも、大変貴重です。

聞き手は藤川良子（サイエンスライター）。



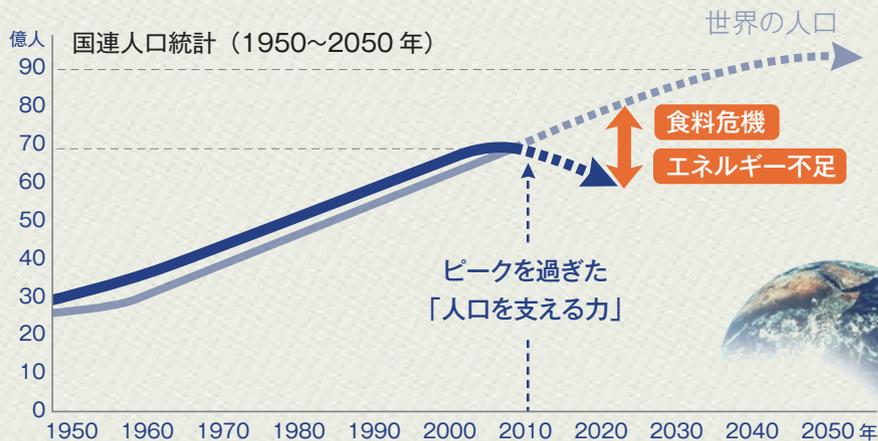
1. Mashimo, T. et al. *Nature Genetics* **40**, 514 - 515 (2008).  
2. Mashimo, T. et al. *PLoS ONE* **5**, 8870 (2010).

# 世界の食料問題の解決に向け、 イノベーションと リーダー人材を生み出す

世界人口が70億人を突破した現在、地球規模の食料生産問題が、ますます深刻化しています。「飽食によって4億人の肥満者がいる一方で、8億人以上が栄養不足に陥っている」「食料の8割が石油を利用して作られ、食料全体の半分が廃棄されている」「農業肥料の半分が地下水に流れ出ている」といった問題です。

農学と工学に特化した研究教育を行ってきた本学では、これらの諸問題を解決に導くべく、2012年に「実践科学リーディング大学院」を開始しました。目指しているのは、広い視野と高い専門性、強力なリーダーシップを兼ね備えた人材の育成です。エントリーの対象は、本学および内外の大学学部の卒業生で、本学の大学院修士課程に合格した方々。卒業学部のジャンルは特定しておらず、農学や工学などの理系学部だけでなく、デザインや芸術系学部卒の方々も歓迎します。女性の入学者も多く、現時点で4割弱を占めています。

実践科学リーディング大学院の試験に合格し、入学を果たした方には、修士および博士課程の5年一貫教育を受けていただきます。本学では、生命科学、工学、情報学、語学、経済学、社会科学、芸術などの幅広い分野のカリキュラムを組んで



おり、教授、准教授など32名が運営に当たっています。入学した方には、次ページにあるような多様な科目の履修が義務付けられており、既存の概念やシステムにとらわれない新しい価値の創造、そのための研究や技術開発を展開していただけます。一方で、「専門的な情報を分かりやすく伝える」「社会において仲間を作り集団を率いる」「消費者のニーズに応える」といったスキルを身につけるための研修も充実しています。

さらに、多くの民間企業に協力していたくことで、社会や産業に直結した研究や技術開発を進める環境も整えられています。

例えば、世界中で稲わらを原料とするバイオエタノール生産研究が行われていますが、蒸留や輸送のコストなどの面で本当に産業応用できるものがほとんどありません。本プログラムでは、単なる研究開発ではなく、産業化への確実な橋渡しまで行います。

開設3年目を迎える今年は、1期生8名がようやく博士課程に進学するところですが、合成研究を進める傍らで、海外に植物工場のための会社を作ろうとしている学生もおり、すでに大きな手応えを感じています。卒業後は、世界レベルのイノベーションを実践し、産業の発展に寄与することが、大いに期待されます。

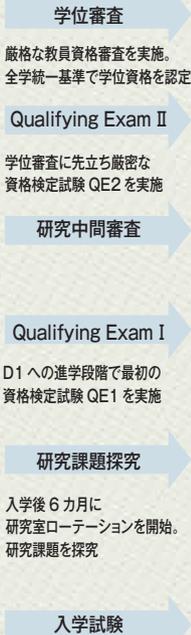
# グローバルで多様な視点と専門性を兼ね備えたカリキュラム

リーディングプログラムでは、入学後の6か月間、全員が「キャリア開発プログラム」に参加します。ここで、自分の目標を設定し、その実現に向けた方法論を学びます。その後、基盤科目で広い視野を得つつ、社会交流科目、イノベーション科目、国際科目（インターンシップ、海外研修、海外留学）を履修。異文化への理解を高めた上で、科学的思考や議論する能力、実践力を備えます。さらに、専門分野において、最先端の研究に取り組みます。このような教育により、博士号取得後に、産学官が連携した分野で自分の研究を生かし、世界レベルで貢献できるようにします。

## 幅の広い、段階的な科目設定

基盤科目は、日本語表現力、説得力、創造力、交渉力などを育成するためにあります。基礎専門科目は、農学と工学の基礎となる専門科目に加え、農学系の学生は工学系の、工学系の学生は農学系の科目を学ぶためのものです。イノベーション科目は、イノベーションの実践力、ニーズを把握し価値を生み出す力、チーム形成力、組織間連携力を育成するものです。国際科目は、英語によるプレゼンテーションや論文の執筆、英語環境による定期的なコロキウム、国際交流ワークショップを経験することで、グローバルな専門研究を行うものです。社会交流科目は、国内や海外の企業において実践型のインターンシップを体験できるというものです。

## 教育プログラム



入学後の6か月間は、学生全員が「キャリア開発プログラム」を履修



## 農学と工学の融合推進

カリキュラムの特色の1つに、「農学と工学の枠を超えたコースワークと履修体系」があります。修士課程の2年間に異なる研究室を回るというもので、専門外の指導を受けることにより、より広い視野で博士課程以降の研究に取り組むことを目的としています。また、人間力を養うために、倫理、芸術、経済、歴史、文化などに触れ、討論などを行う機会も準備しています。

本プログラムでは、学生によるプロジェ

クトの立案を重要視し、研究計画、研究資金計画、研究活動の実施、成果発表についても、学生自身の発想を尊重します。こうした体験が、将来、リーダーとしてグローバルに活躍することにつながると考えています。

なお、「教育の質」を保証する目的で、2年次の後半に、書面および口頭審査によるQualifying Exam(QE)を実施します。この結果を受け、博士課程への進学の可否を決定します。

Voice of  
FAO



In its efforts to eradicate hunger and achieve food security for all, FAO emphasizes, as part of its Strategic Framework, the need to make agriculture, forestry and fisheries not only more productive, but also sustainable. In this context, the activities of the Leading Graduate School Program of TUAT on the "Green and Clean Food Production" offer opportunities for synergy. Accordingly, FAO intends to strengthen its collaboration with TUAT to bring up global leaders who can provide innovative and sustainable solutions to global food issues.

FAO Liaison Office in Japan  
Director Mbuli Charles Boliko

## 2013年度の活動トピックス

リーディング大学院のプログラムでは、海外機関との連携を生かした教育プログラムが充実しています。

また、リーディング履修学生以外にも、博士課程後期の学生を対象とし、書類審査と面接で選抜されます。選抜の際に最重要視されるのは、「研究をイノベーションに結びつけるにはどうしたらよいのか」「そのために、自分はそのような視点で何をすべきなのか」といったことを十分理解しているかどうかという点です。

### アメリカ・コーネル大学研修



2013年10月には、米国で研修を行いました。2日間にわたってコーネル大学とのワークショップを開催し、グローバルな視点、解決を必要とする課題への取り組みなどについて、英語でプレゼンテーションを行いました。また、老舗実験機器メーカー「コーニング」のガラス博物館を見学し、スチューベン郡の小ガラス工房がイノベーションを起こした過程や世界トップを維持し続けることの重みを理解しました。さらにミュージカルの観賞を通じて表現方法や文化的背景の違いを肌で感じました。急遽、マサチューセッツ工科大学（MIT）利根川進博士の研究室の見学もできました。こうした体験について、研修参加者同士でプレゼンテーションし合うことで、互いの考えや思いを共有しました。

コーネル大学は「世界の農業研究大学トップ3」の1つとされ、農業分野の学術研究と教育を牽引するだけでなく、世界の主だった研究機関との学術交流、農業・畜産・食品工業などの幅広い分野におけるイノベーションの実践、産業やビジネスへのグローバルな展開を実現しています。

### トルコ・アンカラ大学研修

アンカラ大学での研修では、合同ワークショップを行いました。また、イスタンブール旧日本領事館にてシンポジウムを開催し、現地のビジネス企業、それを支援する公的機関等の方々に参加いただきました。シンポジウムでは、異なる文化間でビジネスを展開するにあたっての課題、国際的な企業や公的支援機関で求められるリーダー像について、直に話を伺える貴重な場となりました。

トルコ共和国は食糧自給率100%の農業立国であるとともに、産業振興や経済成長においても著しい発展を遂げ、食料生産の主要拠点、ヨーロッパとアジアを結ぶ重要なビジネス拠点

となっています。近年は、日本企業のトルコへの進出も盛んで、さらなる交流発展が期待されています。

### ドイツ・ボン大学研修

ボン大学での研修では、大学内の広大な圃場と、充実した農業施設の数々を見学。同じく学内の研究所 LIMES にて合同シンポジウムを開催し、ライフサイエンス領域の研究成果を伺った上で、双方の学生が互いの研究内容を報告しあいました。日常では得がたい実践的英語発表の場となりました。また、ヨーロッパ農業の規模の大きさ、先進性、可能性に触れる経験となりました。

ボン大学は農業・工学分野で高い実績を持つ、ヨーロッパ有数の大学で、国内外から多様な人材を迎え入れています。

### Leading Forum 2013

2014年1月10、11日に大阪で開催された「Leading Forum 2013」の「学生フォーラム Next visionary」にて、全国44大学からエントリーされた48チームの中で、本学リーディング大学院の学生が提案した「Sustainable Food Production - Plant Factory -」が「最優秀賞」として選ばれました。



### 履修学生の声

リーディングプログラムは、学生の海外活動支援に力を入れていることが特徴で、私は現在、連携先のローマ大学サビエンツァ校に留学し、イオン伝導性高分子やイオン液体を用いた新しい電解質材料の開発に挑戦しています。

近年みられる電池の高エネルギー密度化は、同時に引火や爆発の危険と隣り合わせであることを意味しており、電気自動車などさらなる信頼性向上を必要とする分野への応用は発展途上です。このため、新しい電解質材料の開発は、身近な電池の安全性向上だけでなく、より高性能な新電池の創成につ



ながる可能性も秘めた夢のある研究課題です。この分野で画期的な成果を挙げている海外の活気あふれる研究室の雰囲気、強い刺激を受けながら学んでいます。

## 東京農工大学が誇る研究施設

地球規模のさまざまな問題が深刻化する中、農学と工学が連携して果たすべき役割を実現するために設置されたのが、先進植物工場研究施設です。経済産業省の植物工場基盤技術拠点事業に位置づけられており、当面はブルーベリー果樹を対象に研究が進められています。

ブルーベリーは北米原産の果樹ですが、都市部での栽培も容易です。最近では、単にフルーツとしてだけでなく、豊富に含まれるアントシアニンやルテインが健康維持に役立つとして注目されています。本学では以前よりブルーベリーの栽培研究に取り組んでおり、すでに100以上の品種を収集してきています。

先進植物工場には、春夏秋冬の気温、日照、湿度などを1年中再現できる高度環境制御室があり、環境条件がコンピューターで管理されています。中でも、デモ用個体については、光合成量、土壌水分量、土壌pHなどがICチップでモニターされており、データが無線LAN経由で端末に送られ、個体管理の研究に活かされています。

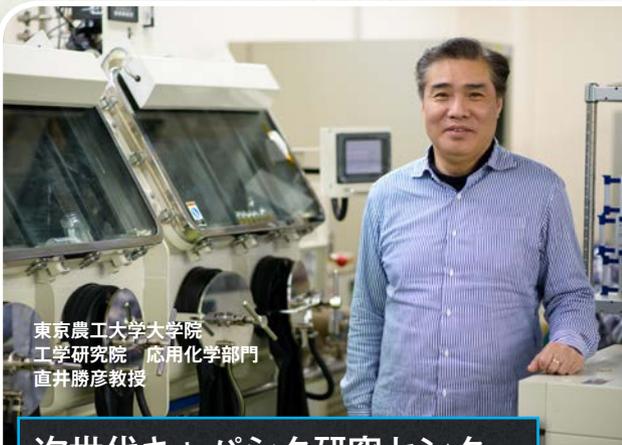
こうした環境制御技術を駆使し、「休眠をスキップさせた場合の開花と結実」「光などを利用した病害虫に対する抵抗性の誘導」「微生物を用いた病害虫制御の最適化」といった新規の



先進植物工場研究施設

研究が進み、すでに「自然界ではあり得ない、実と花が同時に付く環境条件の発見」といった研究成果につながっています。

食料問題を解決するには、栽培技術の革新も必須です。私たちは、省エネ、低コストで環境付加の少ない高収量農業モデルを開発し、イノベーションや産業応用を担う人材の育成に力を入れています。



東京農工大学大学院  
工学研究院 応用化学部門  
直井勝彦教授

## 次世代キャパシタ研究センター

「キャパシタ」とよばれる次世代の蓄電デバイスとナノ電極材料の研究開発を進め、地球規模のエネルギー問題解決のための技術革新と人材育成を実現するための研究施設です。本学部卒業の大学院生の他、社会人大学院生、企業の共同研究員なども受け入れています。キャパシタとは、瞬間的に大容量の電力を出し入れできるデバイスの総称で、自動車、クレー

ン、エレベーターなどでの実用化が期待されています。キャパシタは、すでに一部の自動車に搭載されており、優れた加速を実現しています。ただし、これらのキャパシタは、ヤシの実由来の活性炭を用いたもので、充電と放電に最低でも1時間を要していました。

本学では、充電と放電が12秒という極めて短時間で済み、従来の3倍ものエネルギー密度を可能にするナノハイブリッドキャパシタを開発しています。成功の鍵は、大きな重力場を与えた環境下で、カーボンナノチューブ表面にチタン酸リチウムを平面状に結晶化させることに成功し、それを活性炭の代わりに用いた点にあります。このナノハイブリッドキャパシタを自動車やオートバイなどに用いると、ごく短時間のブレーキ操作時に発電した電力を蓄えることもでき、省エネや二酸化炭素削減にもつながります。しかも、200万回もの充電が可能のため、搭載後のメンテナンスが不要というメリットも併せ持ちます。

現在、ナノハイブリッドキャパシタ、発電、蓄電、センサーの各システムを搭載した数センチ角のシートの開発も進めており、完成すれば、植物工場の環境制御など、農業への応用も可能になると期待できます。



国立大学法人

東京農工大学

国立大学法人 東京農工大学

〒183-8538

東京都府中市晴見町3-8-1

www.tuat.ac.jp

入試について 教育企画課

TEL : 042-367-5545 FAX : 042-367-5557

お問い合わせ 学生総合支援課リーディング大学院係

TEL : 042-367-5536 FAX : 042-367-5557

## 幹細胞

## 造血幹細胞にも性差がある

## Sex specificity in the blood

DENA S. LEEMAN &amp; ANNE BRUNET 2014年1月23日号 Vol. 505 (488-490)

血球を作り出す造血幹細胞は、エストロゲンにตอบสนองして、雄より雌のマウスでより頻繁に分裂することが分かった。これはおそらく、雌が妊娠時により多くの血液を必要とするようになることに備えているためだろう。

雄と雌では、生殖器官だけでなく、性的二型性を示す組織（乳腺や脳や筋肉など）にも違いが見られる。そのような組織では、自己複製能を持ち、分化した細胞を作り出して組織の維持と修復を行う「幹細胞」の活動も、雄と雌とで異なることが分かっている<sup>1,4</sup>。一方で、血液や腸など目立った性差のない組織の幹細胞の機能にも性的二型性が見られるかどうかについては、基本的な疑問であるにもかかわらず、答えはまだ出ていない。今回、ペイラー医科大学（米国テキサス州ヒューストンの中田大介<sup>なかだ だいすけ</sup><sup>5</sup>は、血液系と免疫系の細胞を作り出す造血系の幹細胞の挙動が雄と雌では確かに異なることを見だし、2014年1月23号の*Nature*に報告した。著者らは、雌の造血幹細胞（HSC）がホルモンであるエストロゲンのシグナルに反応することを明らかにした。このおかげで、母親マウスは妊娠中の造血要求に応えられるようになるらしい。

HSCは骨髄に存在し、全ての血液細胞を産生する。産生された血液細胞は、免疫から凝固系、酸素運搬にまで及ぶさまざまな過程を仲介する。中田らは、基本条件下（妊娠しておらず、かつ感染症や腫瘍がない状態）では、雌のHSCとその直近の子孫である多能性前駆細胞（MPP）は、雄のHSCより頻繁に分裂して、より多くの赤芽球前駆細胞（赤血球となる細胞）を生み出すことを突き止めた。

基本条件下では、HSCの数は雌雄で同じであり、骨髄と脾臓（骨髄と同じく造

血細胞が集まっている器官）での細胞の構成も類似している。中田らが示したように、雌ではHSCの分裂頻度が高いのであれば、雌のHSCの数はどのように制御されているのだろうか。著者らはそれについて、雌のHSCの分裂はより非対称的で、娘細胞の片方が幹細胞のまま残り、もう一方は赤血球系列になるものの、新生された赤芽球前駆細胞は高率で細胞死に至ると示唆している（図1）。HSCの性的二型性がこれまで観察されなかったのは、こうした違いによるのかもしれない。

また著者らは、妊娠中にはHSCの増殖がさらに亢進して骨髄と脾臓のHSC数が増加し、脾臓では赤血球系列細胞が増加していることを観察した。つまり、雌のHSCは妊娠中の血液需要の増加に「備えて」いるように思われる。

中田らはまた、HSCに性的二型性をもたらす物質がエストロゲンであることを特定した（図1）。著者らは、雌では、卵巣摘出またはアロマトラーゼ（エストロゲン生成に必要な酵素）の薬理的阻害によってHSCとMPPの増殖の割合は低下するが、正常な雌、卵巣を摘出した雌では、エストラジオール（雌の主要なエストロゲン）を注射投与することでHSC増殖が亢進して造血が促進することを発見した（雄でもエストラジオールの注射により、造血は促進した）。最近、エストラジオール注射が骨髄細胞の一部で細胞増殖を引き起こすことが報告された<sup>6</sup>。中田らのチームの結果はこの研究をさ

らに進めるものであり、エストロゲンがHSC特異的に作用するためには生理的濃度で十分なことを示したのである。また著者らは、HSCではエストロゲン受容体 $\alpha$ （ER $\alpha$ ）をコードする遺伝子*Esr1*がHSCで高度に発現しており、雌のHSC増殖の亢進には基本条件下でも妊娠中でも*Esr1*の発現が必要であることも明らかにした。さらに彼らは、エストラジオールによって野生型のHSCは増殖が亢進するが、*Esr1*が欠失したHSCはエストラジオールによっても増殖が亢進しないことを見出した。この結果からHSCのエストロゲンへの応答は、ER $\alpha$ を介していることが強く示唆される。

こうした発見から、妊娠などの生物学的機能の調整のためには、性的二型性を示さない器官による性ホルモンの感知が必要だという興味深い可能性が浮かび上がる。よって、今後解明すべき重要な疑問は、エストロゲンで誘発される造血細胞の増殖亢進が、妊娠の成功、そして母親または胎児の健康に必要なかどうかであろう。また、HSCのER $\alpha$ の作用機序や標的遺伝子も分かっていないため、これらの疑問が解明されれば、エストロゲンで誘発されるHSC増殖についての理解が進み、他の幹細胞でのエストロゲン誘発性応答とどのように違うのかが明らかになってくるだろう。

HSCの増殖が亢進している多くの遺伝子組換えマウス系統や突然変異のマウス系統では、HSCプールが早期に枯渇

することが分かっている<sup>7</sup>。ということは、雌では、雄に比べてHSCがより枯渇した状態が長期にわたるのだろうか？ HSCは静止状態にあることが多く、静止状態を保つことで細胞呼吸とDNA複製エラーによる損傷から自身を保護していると考えられている。しかし、細胞分裂周期にあるHSCの方が、静止状態のHSCよりもDNA修復が効率的に行われることが以前から示唆されている<sup>8,9</sup>。従って、雌のHSCには、増殖の亢進によって引き起こされるHSCの枯渇を防ぐ性特異的なメカニズムが備わっているかどうかを検討すべきだろう。そこから、HSCが早期の枯渇や形質転換を起こさずに増殖の亢進を維持し続けられるメカニズムが明らかになるかもしれない。

組織特異的な幹細胞は、体の全体的要求に応じて発せられる長距離シグナルを受け、組織内にて、もしくは、組織外へ移動するなどの調整を受ける。では、それはいつ、どのように起こるのだろうか？ こうした疑問の解明に取り組む研究も始まっている。幹細胞機能は、食餌、概日リズム、運動、交配、および妊娠などの全身性シグナルによって影響を受ける<sup>2</sup>。例えば妊娠中には、エストロゲンとプロゲステロンのレベルが上昇し、これによって乳腺再構築に必要とされる乳腺幹細胞の増殖が亢進する<sup>3</sup>。また、プロラクチンというホルモンの増加は膵β細胞の産生<sup>10</sup>と神経幹細胞の増殖を誘発する<sup>4</sup>。前者は、妊娠中に増大する雌の代謝負荷に対する応答に、後者は、産後に雌が産仔を我が子だと認識することに関係するのかもしれない。中田らは今回、長距離シグナルは特定の全体的要求に反応して作用するだけでなく、基本条件下においては幹細胞を準備状態、すなわち妊娠が起こったときにすぐに反応できるように状態にしているという新たな概念を提起している。

幹細胞の性的二型性に関する研究はまだ少なく、幹細胞研究の多くは、片方の性だけで行われているか、その分析において性差が考慮されていない。中田らの

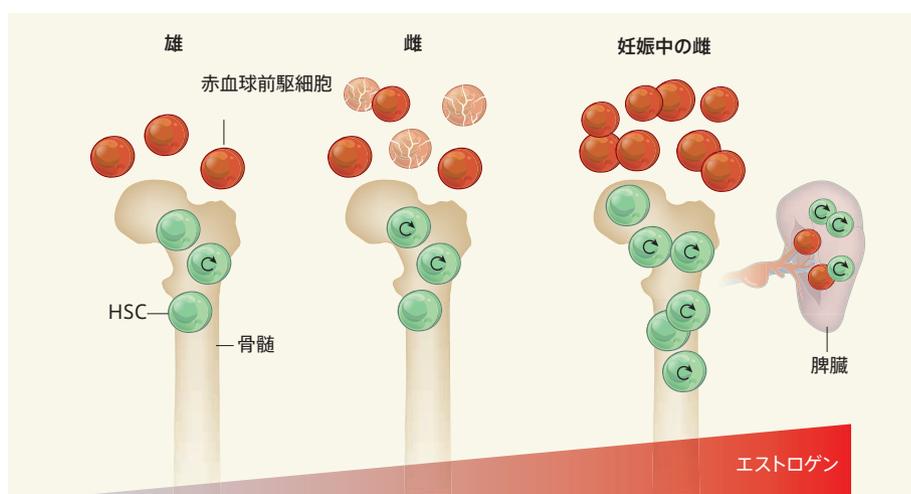


図1 エストロゲンによる幹細胞周期の調節

中田ら<sup>5</sup>は、造血幹細胞 (HSC) がエストロゲンシグナルに反応すること、そしてこの応答によって雌の HSC は雄の HSC よりも頻りに分裂 (円形の矢印) して、赤血球に分化する赤芽球前駆細胞をより多く産生することを報告した。エストロゲンシグナルに対する応答はこうした性差があるにもかかわらず、基本条件下では雄と雌とで骨髄と脾臓における細胞構成は同じに保たれている。雌では赤芽球前駆細胞が細胞死に至る確率が高いからだ。しかし、妊娠中にはエストロゲンレベルが上昇するため、骨髄と脾臓の HSC 数は増加し、脾臓でより多くの赤血球が作られるようになる。この応答は、妊娠中の雌の造血要求に応えるために重要な役割を果たしていると考えられる。

研究は、基本的な幹細胞生物学、幹細胞に関連する疾患、および再生医療についての理解を深めるためには性差に注意を向けることが不可欠であることを示唆している。また今回の研究結果は、十分に解明が進んでいないさまざまな性差の説明となる可能性もある。例えば、マウスにヒト HSC を移植した場合、雄のマウスに比べて雌のマウスの方が生着しやすい<sup>11</sup>が、これはエストロゲンに起因している可能性がある。また、ヒトの骨髄移植では女性のドナーから移植された場合の方がテロメア (染色体末端部の特定の塩基配列で、細胞分裂のたびに短くなっていく) の短縮速度が遅いという観察結果<sup>12</sup>もあり、これは HSC の枯渇を防ぐ機構が、雌の HSC の方がより整っていることを反映しているのかもしれない。

ヒトの疾患には性的な偏りが見られるものもあるが、幹細胞の性的二型性の調節についての研究がさらに進めば、その理由についてのヒントも得られる可能性がある。例えば、成熟血液細胞 (赤血球の場合が多い) の産生の低下を特徴とす

る骨髄異形成症候群や血球減少症<sup>13</sup>は、男性の方が発症率が高い。こうした偏りは、中田らの結果に照らして考えると興味深い。中田らは、雄のマウスでは HSC 増殖と造血の基礎的レベルが低いことを見いだしているからだ。従って今回の研究成果は、一見すると性的二型性を示さない器官の病気であっても、疾病の原因と治療を研究する上では性差を考慮することが重要になる可能性があるという、これまでにない考え方を示している。■

(翻訳: 古川奈々子)

Dena S. Leeman と Anne Brunet は、スタンフォード大学遺伝学部に所属。

- Nakada, D., Levi, B. P. & Morrison, S. J. *Neuron* **70**, 703-718 (2011).
- Shingo, T. et al. *Science* **299**, 117-120 (2003).
- Ray, R. et al. *Mol. Med.* **14**, 493-501 (2008).
- Deasy, B. M. et al. *J. Cell Biol.* **177**, 73-86 (2007).
- Nakada, D. et al. *Nature* **505**, 555-558 (2014).
- Illing, A. et al. *Haematologica* **97**, 1131-1135 (2012).
- Orford, K. W. & Scadden, D. T. *Nature Rev. Genet.* **9**, 115-128 (2008).
- Mandal, P. K., Blanpain, C. & Rossi, D. J. *Nature Rev. Mol. Cell Biol.* **12**, 198-202 (2011).
- Mohrin, M. et al. *Cell Stem Cell* **7**, 174-185 (2010).
- Nielsen, J. H., Svensson, C., Galsgaard, E. D., Meldrup, A. & Billestrup, N. *J. Mol. Med.* **77**, 62-66 (1999).
- Notta, F., Doulatov, S. & Dick, J. E. *Blood* **115**, 3704-3707 (2010).
- Baerlocher, G. M. et al. *Blood* **114**, 219-222 (2009).
- Jain, A. & Naniwadekar, M. *BMC Hematol.* **13**, 10 (2013).

## 太陽系

## 水蒸気を噴き出す準惑星ケレス

## Evaporating asteroid

HUMBERTO CAMPINS &amp; CHRISTINE M. COMFORT 2014年1月23日号 Vol. 505 (487-488)

準惑星ケレスには水が大量にあると考えられてきたが、欧州宇宙機関（ESA）のハーシェル宇宙望遠鏡による観測で、ケレスの表面から水蒸気が噴き出していることが分かった。

ケレスは太陽系の小惑星帯最大の天体で、直径は約950kmある。1801年に最初の小惑星として発見され、2006年の国際天文学連合による惑星の再定義に基づいて新たに「準惑星」に分類された。このたび、欧州宇宙機関（ESA）欧州宇宙天文学センター（スペイン・マドリード近郊）のMichael Küppersらは、ESAが2009年に打ち上げた赤外線宇宙望遠鏡、ハーシェル宇宙望遠鏡を使って、ケレスの表面から毎秒約 $2 \times 10^{26}$ 個の水分子（質量にして6kg）が水蒸気として噴き出していることを見だし、*Nature* 2014年1月23日号525ページに報告した<sup>1</sup>。

小惑星における水の存在およびその存在度は<sup>2,3</sup>、地球上の水や生命の起源から、木星などの巨大惑星の大規模移動に

至るまで、太陽系についての多くの研究分野に関係する重要な情報である。ケレスに関しても、水が重要な成分であることは30年以上前から推測されていたが<sup>4</sup>、今回の観測で初めて、ケレス表面の2つの領域から水分子が放出されていることが直接的に検出された。この結果は、ケレス内部に水があることを示唆したこれまでの間接的な観測結果を裏付けるものだ<sup>5,6</sup>。また、米航空宇宙局（NASA）が2007年に打ち上げた探査機ドーンが、もう1つの興味深い太陽系天体である小惑星ベスタ（直径約500km）の探査を無事に終え、間もなくケレスを訪れることを考えると、タイムリーな発見といえる<sup>7</sup>。

小惑星の起源と進化に関する最も不可

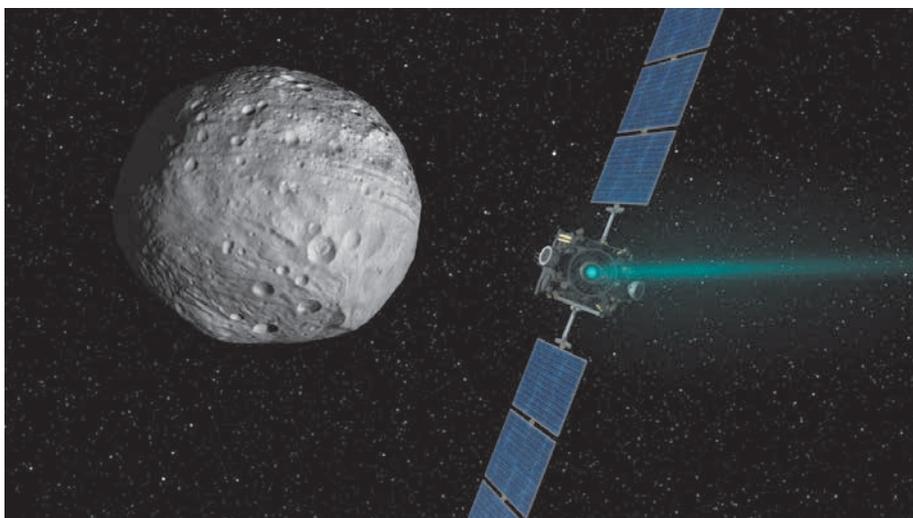
解な問題の1つは、ベスタとケレスがなぜこれほど異なっているか、である。両者は、いずれも火星と木星の軌道の間の小惑星帯にあり、その軌道は互いに非常に近く、太陽からの距離はベスタが約2.4天文単位（AU；1AUは太陽・地球間の平均距離）、ケレスが約2.8AUとさして変わらない。しかし、両者の組成と外見は正反対だ。ベスタは小惑星全体にわたる加熱や火山噴火を経験しているのに対し、ケレスは表面も内部も、岩石が溶けるほどの高温に達したことはない。

興味深いのは、2つの天体の現在の姿が全く異なったものになったのは、ケレスにはベスタよりもはるかに多くの水があったためかもしれない、ということだ<sup>8</sup>。Küppersらが今回観測した水蒸気の源が、ケレスでの岩石の融解を妨げた熱散逸プロセスに関係している可能性があるのだ。水蒸気の発生メカニズムの1つとして、地中の氷が融解し、それが表面に流れ出て宇宙空間に蒸発するというモデルが提案されている。水蒸気は大量の熱を運ぶことができるため、約46億年前にケレスが形成したとき、水でできた氷が昇華するのに伴い、内部の熱が宇宙空間へと効率的に散逸したと考えられる。この熱散逸によって、ケレスの表面はベスタのように火成岩に覆われるのを免れたのかもしれない。

もしも実際に、ケレスとベスタの形成時にこうしたことが起きていたとすれば、形成時のケレスにはなぜベスタより



地表面の2領域から水蒸気を放出する準惑星ケレス（想像図）。



小惑星ベスタとNASAの探査機ドーン(想像図)。ドーンは、2011年7月から1年余りにわたってベスタを間近で観測し、その表面が予想以上に複雑で起伏の激しい地形に覆われていること、それらが大規模な天体衝突によるとみられること、ベスタ史上最大級の天体衝突がわずか10億年ほど前に起きていたこと、などを明らかにした。ドーンは続いて2015年に準惑星ケレスの探査を開始する。

も多くの水があったのか、またケレスにはなぜ今でも水があるのか、という疑問が生じるだろう。最も可能性の高い答えは、ケレスはベスタとは異なり、初期の太陽系において水のスノーライン(太陽から離れるにつれて温度が下がり、水が凍り始める境界線)の外側の低温領域で形成したから、というものだ。しかしこの仮説はさらに、なぜケレスとベスタは今、互いにこれほど近くにあるのか、という次の疑問を生む。これに対しては、小惑星や惑星の形成後間もない時期に、太陽系の内側と外側の領域の物質が混合したためではないかという説が提案されている。この混合は、木星のような巨大惑星の軌道の移動によって引き起こされたと考えられており<sup>9</sup>、これが、ケレスとベスタを遠く離れた形成場所から現在の位置へと移動させた可能性がある。

太陽系の巨大惑星が大きく移動したとする仮説の基になった最初の手掛かりは、太陽系外の巨大惑星の中には、親星との距離が、太陽系における水星・太陽間の距離よりも近いものがあるという1995年の発見だった<sup>10</sup>。木星サイズで高温環境にあることから「ホットジュピ

ター」と呼ばれるこれらの惑星は、巨大惑星が形成するはずのない距離の軌道を回っている。ホットジュピターの成因については、親星から遠く離れた領域で形成した後に、現在の軌道まで大規模移動して親星に近づいた、と考えるのが現在のところ最も合理的だ。

以来、太陽系に関するいくつかの理解の難しい事柄が、惑星の移動で説明されるようになった。例えば、小惑星帯で組成の異なる複数の小惑星グループの存在が観測されていることや、約40億年前に太陽系の惑星に激しい天体衝突が起こった時期(後期重爆撃期と呼ばれる)があったことは、木星の移動が原因だった可能性がある<sup>9,11-13</sup>。このシナリオでは、木星などの巨大惑星の移動によって、岩石や水でできた太陽系小天体(小惑星や彗星)集団の軌道が乱れ、そうした小天体が初期の地球や月に衝突したと考えられている。このとき、小天体は地球に有機分子や水を届けたはずであり、だとすれば、太陽系初期の小惑星や彗星の衝突が、地球における生命の起源と進化にかなり重要な役割を果たした可能性がある。

近年、巨大惑星移動とその関連プロセ



太陽系天体の大きさの比較。準惑星ケレスや小惑星ベスタは、地球の衛星である月よりもはるかに小さい。

スが太陽系の初期の歴史を形作ったとする、複数の説が登場している。これらの説は、今回Küppersらがケレスの周囲で水蒸気を検出したことや、ケレスとベスタに関してすでに分かっていることと矛盾しない。だが、太陽系の形成というパズルのピースは、まだ全てぴったりと合っているわけではない。我々が小惑星と呼ぶ、この小さな世界をさらに調べることで、今後より多くの発見があることだろう。

(翻訳: 新庄直樹)

Humberto Campins と Christine M. Comfort はセントラルフロリダ大学(米国オーランド)に所属。

1. Küppers, M. et al. *Nature* **505**, 525-527 (2014).
2. Campins, H. et al. *Nature* **464**, 1320-1321 (2010).
3. Rivkin, A. S. & Emery, J. P. *Nature* **464**, 1322-1323 (2010).
4. Lebofsky, L. A. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **182**, 17-21 (1978).
5. A'Hearn, M. F. & Feldman, P. D. *Icarus* **98**, 54-60 (1992).
6. Rivkin, A. S., Howell, E. S., Vilas, F. & Lebofsky, L. A. in *Asteroids III* (eds Bottke, W. F. Jr, Cellino, A., Paolicchi, P. & Binzel, R. P.) 235-253 (Univ. Arizona Press, 2002).
7. Russell, C. T. & Raymond, C. A. *Space Sci. Rev.* **163**, 3-23 (2011).
8. McCord, T. B. & Sotin, C. *J. Geophys. Res.* **110**, E05009 (2005).
9. Walsh, K., Morbidelli, A., Raymond, S., O'Brien, D. & Mandell, A. *Meteorit. Planet. Sci.* **47**, 1941-1947 (2012).
10. Mayor, M. & Queloz, D. *Nature* **378**, 355-359 (1995).
11. Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A. & Levison, H. F. *Nature* **435**, 459-461 (2005).
12. Morbidelli, A., Levison, H. F., Tsiganis, K. & Gomes, R. *Nature* **435**, 462-465 (2005).
13. Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K. & Morbidelli, A. *Nature* **435**, 466-469 (2005).

# リンネのゾウ標本をめぐる物語 (下)

## Linnaeus's Asian elephant was wrong species

EWEN CALLAWAY 2013年11月4日 オンライン掲載 (doi:10.1038/nature.2013.14063)

前回のあらすじ：スウェーデン自然史博物館（ストックホルム）にあるアルコール漬けのゾウの胎児は、リンネが「アジアゾウ」の分類の基準とした標本である。本当にアジアゾウなのかと長年疑問が持たれていたが、コペンハーゲン大学（デンマーク）の Gilbert らが最新のプロテオミクスを駆使して解析した結果、標本はアフリカゾウであることが判明した<sup>1</sup>。それと同時に、アジアゾウの基準となる標本がなくなってしまった。Gilbert は、ゾウの分類に大混乱が生じるのではないかと心配した。

### 2009年、コペンハーゲンにて

リンネのゾウ標本の正体を明らかにした Tom Gilbert は、「タイプ標本が違う動物のものだったと分かれば、系統分類学者たちは混乱状態に陥るのではないかと……」と心配になった。解決策として、*Elephas maximus*（アジアゾウ）をアフリカゾウの学名とし、アジアゾウには別の学名を考えてもらうのがよいのではないかと。それとも、別のアジアゾウ個体を新しいタイプ標本として指定できるのだろうかなどと、彼はいろいろ考えた。

「余計な心配でした。分類学はそんなにヤワなものではなく、何重にも回避策が用意されていたのです」と Gilbert。つまり、タイプ標本に誤りがあった場合、新たにタイプ標本を指定するためのルールがきちんとあったのだ。全ての動物種を決定する動物命名法国際審議会 (ICZN) による規約では、新しいタイプ標本は第一に、リンネの著書『自然の体系 (Systema Naturae)』に掲載もしくはリンネによって確認された、他のどれかの例から選ばれるべき、と記されていた。

となると候補は、リンネがゾウの記載の際に言及した、博物学者ジョン・レイ (John Ray) の記録にある1体の骨格と1

カール・リンネ (Carl Linnaeus)	分類学の父と称されるスウェーデンの博物学者。
Tom Gilbert (下写真左)	コペンハーゲン大学の教授で古代 DNA 研究を専門とする。
Enrico Cappellini (下写真右)	2009年に Gilbert の研究室に加わった博士研究員。彼の取り組みにより、問題の標本がアフリカゾウと判明した。
Per Ericson	スウェーデン自然史博物館の科学ディレクター。
Anthea Gentry	ロンドン自然史博物館（英国）の哺乳類担当の学芸員。リンネのゾウの胎児標本がアフリカゾウではないかと疑問を持ち、その解析を Gilbert に依頼した。



Tom Gilbert (左) と Enrico Cappellini は、リンネのゾウ胎児標本がアジアゾウではなくアフリカゾウであることを確定した。

個の歯の一部である (*Nature* ダイジェスト 2014年3月号21ページ参照)。どちらも不適格な場合には、審議会で指定された別のアジアゾウ個体を *E. maximus* の基準の標本と見なすことになる。

アジアゾウと一目瞭然な候補は、ウブサラにある博物館に現在保管されている歯の方だった。「この標本は、半分欠けた臼歯で、タイプ標本としてはいくらか不十分でした」と Gilbert は言う。

この歯をタイプ標本にするという考え方が浸透しそうになったちょうどその頃、Gilbert の研究室の博士研究員 Enrico Cappellini の元に、ゾウ類の専門家であるロンドン自然史博物館の古生物学者から1通のメールが届いた。その短いメールには、ジョン・レイの調査旅行の記録文書のことを書かれていた。Cappellini は、この記録文書から、リンネが標本の一部としたゾウの骨格の手掛かりを得られるかもしれないと考えた。

### 1663 ~ 67 年、欧州にて

1663年の春、当時35歳だったレイは、4年にわたる欧州旅行に出かけた。彼は、ケンブリッジ大学トリニティ・カレッジ (英国) でギリシャ語と数学を教え、時折説教もし、博物学への興味を追求していたが、旅行の前にはその職を辞していた。北欧を経由した後、レイは1664年の夏にイタリア・フィレンツェに到着し、そこにあったフェルディナンド2世の王宮で1頭のゾウの遺骸を目にした。「我々が見たのは (中略) 1頭のゾウの皮膚と骨格で、8年か10年ほど前にフィレンツェで見せ物にされ、そこで死んだゾウだった」とレイは書き残している。

レイは英国の哲学者フランシスコ・ベーコンの流れを汲む思想家で、ベーコンは直接観察した結果を重んじた。それもあって、レイはゾウの骨格の解剖学的構造を細部に至るまで観察した。その骨格は一部の骨が失われており、木製のレプリカで置き換えられていた。「その標本には偽物と本物の骨が合計で40個あるが、私には偽物が何個で本物が何個あ



レンブラントが描いた「ハンスケン」のスケッチ。

るか分からなかった。フィレンツェで見た骨格から胸骨と肋骨が失われていたためだ」とレイは書き記している。

### 2012 年、コペンハーゲンにて

レイの旅行記は、17世紀の欧州の科学者が学問で使っていたラテン語で書かれており、Cappellini はこの文を読むために、中等学校時代に習った古典的なラテン語の知識を懸命に引っ張り出した (それと、Google の助けも少し借りた)。Cappellini は約10年前にフィレンツェで Ph.D. を取得していたため、レイのゾウの話を読んでピンときた。「この骨格がまだフィレンツェにあるなら、きっとフィレンツェ大学の自然史博物館の動物セクションだと思いました。それと偶然、私はそこにゾウの骨格があるのを知っていたんです。私の担当分野でしたから」と Cappellini は思い返す。

手掛かりを得た Cappellini は、大学院時代に目にしていたその標本骨格がレイの書いた記録内容に当てはまるかどうかをまず確かめることにした。もしそうであれば、リンネが例の胎児とともに参照した標本かどうかを見極める作業に取り組むことができる。

Cappellini は、デジタル文書化されたレイの報告をさらに追跡した。そして、レイが見た骨格標本のゾウが「ハンスケン (Hansken)」と名付けられていたことを知った。

ハンスケンは、オランダ東インド会社によって輸入された後 (このことから、おそらくアジア起源だと推察される)、1630年代にオランダ王室に献上され、その後、オランダの画家レンブラントがそのスケッチを描いている (上図)。しかし、このゾウはやがて邪魔もの扱いされるようになった。その後、興行師に売られ、鞘から剣を引き抜くなどの芸を教え込まれて、金を取る見せ物にされた。オランダ、ドイツ、イタリアを巡業した後、ハンスケンは1655年11月9日にフィレンツェで死んだ。1664年にレイが目にしたときには、死後何年も経っていたことになる。

Cappellini はフィレンツェ大学の自然史博物館に連絡を取り、自分の直観について話した。彼の記憶にある骨格標本は、確かに、まだそこにあった。それは紛れもなくアジアゾウで、そのプロポーションは、ジョン・レイや他の博物学者が記載したハンスケンのものとほぼ同じだった。しかし、一番の決め手になった



フィレンツェ大学の自然史博物館にあるアジアゾウの骨格標本は、ハンスケンであることが突き止められた。

のは骨格の木製の骨だった。レイの350年前の記述に残されていた、あの偽物の骨と一致していたのだ。

「フィレンツェ大学の自然史博物館の標本はきれいに保存されています。胸骨はなく、木製レプリカで置き換えられているのがはっきり分かります。このゾウ標本を、アジアゾウ (*Elephas maximus*) のレクトタイプ、つまり新しいタイプ標本として選んでいい状況になった、と私は思っています」と Cappellini は話した。

そのレクトタイプの指定が2013年12月14日に発表され、それとともに、研究チームの成果が *Zoological Journal of the Linnean Society* で発表された<sup>2</sup>。

## エピソード

「何はともあれ、これはとても面白い科学特搜物語です」と、スミソニアン研究所 (米国ワシントンD.C.) の哺乳類担当学芸員である Kris Helgen は話す。現時点ではアジアゾウとアフリカゾウの識別に困ることはないが、「この研究成果は、

今から200年後でも、一切混乱せずにこれらの学名を正しく付けられるようにする、という点からも重要なのです」と彼は言う。また Gilbert は、この研究が古生物学や生物保全など他の分野にも関係してくるだろうと考えている。現生もしくは絶滅したアジアゾウの新種や亜種は、タイプ標本を参照して判定される。だが、そうした比較の際には、誤りのないよう確実かつ正確な参照の枠組みを使って行われるべきだと彼は言う。

スウェーデン自然史博物館の科学部門責任者を務める Per Ericson は、謎が解けたことをとても喜んでいる。彼は「疑惑のある標本には、そうしたことがつきものですから」と、博物館の有名な所蔵物が「格下げ」に近い形になったことを気にしていない。

Gilbert と Cappellini は、各地の自然史博物館に所蔵されている他の種の記録についても、タンパク質解析で鑑定できるだろうと考えている。例えば彼らは現在、カバに似た南アメリカ産の絶滅哺乳

類であるトクソドン (*Toxodon*) が、他の哺乳類とどのような類縁関係にあるかを明らかにしようとしている。また、ロンドン自然史博物館にある別の標本で種が明確でないものについても、タンパク質の抽出に取り組んでいる。

リンネの記録はそのうち、さらに訂正されることになるかもしれない。Gilbert にアルコール漬け標本の解析を依頼したロンドン自然史博物館の Anthea Gentry は、もうじきリンネの鳥類と哺乳類のカタログを出版する予定でいる。彼女はその作業を進める中で、今回のゾウの他にもコウモリや齧歯類のタイプ標本に、同定が明らかに誤りであるものをいくつか見つけた。「これらの標本を取り除かねばならないのは残念ですが、それが今の我々のなすべきことなのです」と彼女はきっぱりと言った。

(翻訳：船田晶子)

1. Cappellini, E. et al. *J. Proteome Res.* **11**, 917-926 (2011).  
2. Cappellini, E. et al. *Zool. J. Linn. Soc.* <http://dx.doi.org/10.1111/zooj.12084> (2013).

# フォン・ラウエとディラックの業績

## Crystal clear

2014年1月30日号 Vol. 505 (586)

2014年は、結晶学の数々の功績を祝い、再確認するために制定された「世界結晶年」である。

starnostar.comというウェブサイトは、科学の魅力を伝える活動の中でも風変わりな事例の1つだ。ここでは、20世紀に活躍した2人の物理学者、マックス・フォン・ラウエとポール・ディラックの人気投票に誰でも参加できる(go.nature.com/fw1omn参照)。今のところ、ディラックが69%の票を獲得してリードしているが、ラウエのファンも締め切りまでに大量に投票すれば、形勢を逆転できる可能性が残っている(編集部註:2014年3月中旬時点では、ほぼ拮抗している)。

ただし、ウェブサイトに示されているのは、略歴、出生地、生まれた星座などの簡単な情報のみで、評判の良し悪しを問わず、研究成果の記述はない。専門家でない者にとって、投票したくとも手掛かりがないことだろう。それから、2人の名前は知っていても2人の業績の理解に自信がなく、この人気投票の参加希望者に役立つ情報を提供できないと感じる人もいることだろう。両者とも、ぜひこのまま読み進めてほしい。

てんびん座生まれのラウエは、マックス・プランクに師事し、アルバート・アインシュタインの友人でもあった。ラウエは、たくましいアウトドアタイプで、スキーをしているときに、X線が結晶を通過する際に結晶中の原子や分子によってX線の回折が起こり、結晶ごとに特有のパターンが生じるという考えについて議論していた。これが1914年のノーベル賞受賞につながった。勇敢な男でもあり、母国ドイツでナチスに立ち向かい、同僚のユダヤ人研究者の国外亡命を助けた。ノーベル賞の金メダルは、戦時中、

同僚の手で溶かされ、溶液の状態で隠された。その後、この溶液から金メダルが鑄造し直され、ラウエに再贈呈された。

一方のディラックは、英国出身の不器用で繊細な男で、無駄なおしゃべりをほとんどせず、仕事以外の事柄には関心を示さなかったようだ。ただ、その仕事がすごかった。彼は優れた数学的才能の持ち主で、量子力学と量子電気力学に関する数多くの謎を解明したのだ。ディラックもノーベル賞受賞者であり、1933年、弱冠31歳での受賞であった。また彼は、爵位を授与されたがそれを拒否した(ファーストネームを知られることすら望んでいなかった)。

これでもまだ投票先が決められなければ、*Nature* 2014年1月30日号の特集記事と657ページの論文を読んでほしい。

2014年は世界結晶年であり、ラウエがスキーをしながらX線回折のひらめきを得たときから1世紀以上が経ち、ノーベル賞受賞からちょうど1世紀に当たる。何かしらの記念年が立て続けにやってくる近年、世界結晶年の主催者と同じく*Nature*も、結晶学者も注目し値するものであることを多くの人に理解してもらうため、X線結晶学の成果と寄与について積極的に取り上げる考えである。科学に発展をもたらした業績にスポットライトを当ててみると、その背後には結晶学者とその成果である回折像が存在することが多い。ゆえに、結晶学者の個々の成功をつなぎ合わせて一貫性のある全体像を構築することには価値があるといえる。

こうした記念年や記念式典では、目も心も過去のことに向いてしまうことが避

けられない。しかし、結晶学は今でも最先端分野であり、その力を科学的に正しく利用できれば、これまでの100年と同様に、これからの100年も大きな成果が期待できる。例えば、近年開発された技術にX線自由電子レーザーがある。これは不朽の技術といえる成果であり、1914年よりも、2014年よりも、100年後の2114年の世界にこそふさわしい先進的な技術である。

ディラックの研究も生き続けている。先に触れた*Nature* 657ページの論文では、1931年に予測された磁気単極子(N極かS極の一方しか持たない磁石)、すなわち「ディラック単極子」が初めて生成されたことが報告された。この成果は、量子シミュレーションと呼ばれる成長段階の研究分野からもたらされた。量子シミュレーションとは、現実の量子系を利用して、実現の難しい他の量子系を実験的に作り出しその性質を調べることをいう。相反するN極とS極の両方を持つ必要のない磁石が存在する可能性が示されたことを足掛かりに、物理学者は磁気単極子の探求を続けている。ディラックも言ったように「この現象が自然界で利用されていても不思議はない」のだ。

話をstarnostarに戻そう。ディラックとラウエのいずれかを選ぶことは、磁石のN極とS極のいずれかを選ぶことと似てはいないだろうか。両者は、それぞれ単独に存在する場合もあるが、かなり多くの事柄は両者に基づいており、それはこの2人とそれ以後の物理学者が明らかにしてきた。無理に選ぶ必要はないのだ。■

(翻訳:菊川要)



Volume 506  
Number 7486  
2014年2月6日号

## シンクなのか放出源なのか? : アマゾン多雨林の炭素貯蔵容量という重大な問題の鍵を握るのは干ばつ

**SINK OR SOURCE?: Drought holds key to crucial carbon-sink capacity of Amazon rainforest**

表紙は、ブラジル連邦共和国の Senador Guiomard で撮影されたブラジルナツの木である。アマゾン多雨林に蓄えられる炭素は膨大であるが、アマゾンが将来も炭素シンクであり続けるのか、それとも炭素放出源となつて、さらには気候変動を駆動するようになるのかは、はっきりしていない。今回、異例に乾燥した年（2010年）と異例に湿潤だった年（2011年）の二酸化炭素と一酸化炭素の測定結果に基づいて、季節ごとおよび年間の、アマゾン盆地の炭素収支の解析が行われた。その結果、炭素収支には利用できる水分量が大きく影響することが示唆された。2010年は、干ばつによって作物生産が減少し、植生に蓄積され得る炭素量は制限され、同時に火災によって大量の炭素が放出された。降水量の多かった2011年は、火災による炭素損失が減少した一方で、植生による炭素吸収は増加し、炭素収支は中立であった。

## がん : がん免疫療法の新たな標的

### New targets for cancer immunotherapy

最近の臨床研究から、T細胞上の抑制性受容体を標的とする「がん免疫療法」が進行がん患者の治療に有効である可能性が示されているが、この方法には大きな問題点がある。治療標的候補の発見が難しいのだ。今回、短鎖ヘアピンRNA (shRNA) スクリーニング法を使って *in vivo* で治療標的を見いだす方法が開発され、その方法を使って、実際に担がんマウスの腫瘍浸潤性 CD8<sup>+</sup> T細胞の働きを修飾する遺伝子群が明らかにされた。今回同定された遺伝子の1つであるホスファターゼの調節サブユニット Ppp2r2d を、T細胞において遺伝子レベルでノックダウンすると、T細胞が腫瘍中に集積できるようになり、腫瘍の増殖が著しく遅くなった。

## 心理学 : ピア・レビューに対するピア・プレッシャー

### Peer pressure a component of peer review

科学は通常、ピア・レビュー（同業者による査読）という形によって進展していく。今回、ピア・レビューの決定が客観

的に行われた場合と主観的に行われた場合をモデルを用いて比較した結果が報告された。その結果、科学者の行動は、同業者の行動から集められた情報によって影響を受ける可能性があり、場合によってはそれに支配されることすらあることが分かった。例えば、論文を投稿するかどうかの判断は、それまでにどんな論文が発表されたかで決まり、それは著者の個人的な考え方とは関係がない。この現象は「群れ行動」と呼ばれ、場合によっては正しくない答えに収束してしまうという固有の危険をはらんでいる。一方で、逆説的ではあるが、査読者の判断におけるある程度の主観性は、入手できる情報を検討して真実性をより正確に評価する上では有益となることもある。

## 量子物理学 : 多原子時計の基準を高める

### Raising the standard for many-atom clocks

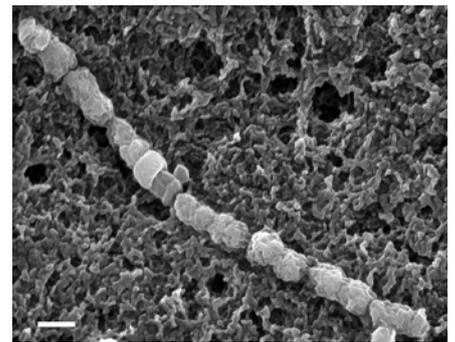
SI単位系の定義や物理法則の検証のためにも、いまだ実現されていない応用のためにも、原子時計の安定性と正確度の向上が望まれている。今回、米国立標準・技術研究所のグループによって発表された「光格子」時計と呼ばれる多原子

系の時計は、単一イオン時計よりも優れた正確度を持ち、かつ必要な測定時間を2桁短くした。この光格子時計は、レーザービームに捕捉された数千個の中性ストロンチウム原子を用いており、安定性・再現性・正確度を併せ持つため、一次標準として検討すべき第一の候補となる。

## 微生物学 : 海洋微生物の化学的多様性

### Chemical diversity in marine microbes

細菌由来の薬剤や薬剤候補物質のほとんどは、ごく少数の細菌分類群の代謝産物である。しかし大多数の微生物は、培養不可能もしくは未培養であるため、ほとんどの微生物が資源としては利用されていないといえる。今回 J. Piel らは、単一細胞解析とメタゲノム解析を使って、「天然工場」となり得る2種類の細菌系統を発見した。この2種の細菌は共に、化学物質の豊富に有する海生海綿の一種 *Theonella swinhoei* に共生していた。これら2種類の細菌系統のゲノムには、それぞれ特有の生合成遺伝子クラスターが多数存在していた。これまで、生理活性ポリケチド類やペプチド類の大半は、宿主である海綿が生産しているものと考えられてきたが、こうした生理活性物質は、実は細菌系統に由来することが分かった。また、この発見によって、新たに提案された Tectomicrobia 門のメンバーである *Entotheonella* 属などの細菌が、放線菌類と同レベルの「生化学的に有能な」分類群であることが明らかになった。



海綿の一種 *Theonella swinhoei*。日本に生息するこの海綿は、非常に多くの活性天然物質を供給する資源である。こうした活性物質は、海綿に共生する微生物が生産している。



Volume 506  
Number 7487  
2014年2月13日号



## アトムトロンクス再考：極低温量子気体中で観察されたエレクトロニクス型のヒステリシス現象

ATOMTRONICS REVISITED: Electronics-style hysteresis in an ultracold quantum gas

表紙は、捕捉されたリング状のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) の画像に基づいて、量子化された超流動体アトムトロンクス回路におけるヒステリシスを表している。ヒステリシスは、系の物理特性がどのような摂動を被ってきたかという履歴に強く依存するという現象で、電子回路や高周波超伝導量子干渉素子の機能に欠かせない。ヒステリシスは BEC のような超流動原子気体でも生じると予測されており、今回、回転する弱リンクが障害物となっている超流動 BEC のリングから形成された回路で、量子化された循環状態の間のヒステリシスが初めて直接検出された。アトムトロンクスは、現在発展中の新しい学際的分野の1つで、極低温原子がエレクトロニクスの電子の場合と似た役割を果たすデバイスや回路を生み出して、新しい機能的な方法を開発しようとするものである。アトムトロンクス回路の制御されたヒステリシスは、実用デバイスを開発する上で極めて重要な特徴となることが立証される可能性がある。

## 細胞：迅速かつ効率的な iPS 細胞産生

### Rapid and efficient iPS cell production

転写因子である CCAAT/エンハンサー結合タンパク質  $\alpha$  (C/EBP $\alpha$ ) の一過性発現の後に、再プログラム化因子である山中因子「OSKM」を過剰発現させることで、B 細胞前駆細胞が誘導多能性幹 (iPS) 細胞に迅速、かつ非常に効率よく再プログラム化される仕組みが示された。C/EBP $\alpha$ によって、クロマチンへの接近が容易となり、Tet2 酵素の活性化が関わる機構を介した多能性遺伝子の発現が加速されることが見いだされたのだ。

## 材料科学：ソフトマターにおける準結晶形成

### Quasicrystal formation in soft matter

準結晶は、周期性 (並進対称性) のない独特な秩序構造を持つことが特徴で、これまで多種多様な物質系で独特な秩序の構造が見いだされてきた。しかし、その起源についてはよく分かっていない。今回、堂寺知成 (近畿大学) らは、デンドリマー (樹状) ミセルなどのいわゆる「ソフトマター」系に注目し、一連の二次元

モデル系のシミュレーションを通して、こうした系での準結晶形成の原因と思われる局所的な相互作用を特定した。

## 古代ゲノム学：古代ゲノムからアメリカ先住民の祖先が明らかに

### Ancient genome maps Native American ancestry

クローヴィス文化は約 1 万 3000 年前の北米に広く分布した、独特の石器で知られる古代の文化である。今回、古代の北米にいたアメリカ先住民個体のゲノム塩基配列が初めて解読された。このゲノムは米国のクローヴィス文化のアンジック遺跡で発掘された若い男児 (Anzick-1) の部分骨格から得たものである。この男児が埋葬されたのは約 1 万 2600 年前で、黄土を塗った多数の石器と一緒に出土した。この男児のゲノムは、現代のアメリカ先住民の祖先に当たる 1 つの集団に属することが分かり、また、他大陸のどの集団よりも、南北アメリカのさまざまな先住民集団と近いことが明らかになった。これらの知見は、クローヴィス人は欧州から移動してき

たという仮説を否定するものである。さらに、アメリカ大陸にはクローヴィス人よりも数千年前にヒトが居住していたという仮説と一致する。つまり、現代のアメリカ先住民は、アメリカ大陸に最初にくまなく定住した人々の子孫であることが示された。

## 生態学：「緑深い」アマゾンに光のいたずらだった

### 'Greener' Amazon was a trick of the light

アマゾンに関する近年のリモートセンシングデータから、乾季に植生の「緑色度の増加」が起こることが示されている。これは、水ではなく光が森林の生産性の主要な制限要因であることを意味している。しかし今回、D. Morton らが、緑色度増加の証拠を分析し直した結果、6 月の至点から 9 月の分点までの間に衛星観測の相対的方位角が変化した結果現れた光学上の人為的産物であることが分かった。観測結果を補正すると、緑色度の増加という現象は存在しないことが示されたのだ。この結果は、アマゾン森林の植物の生産性の主要な駆動要因は光ではなく水の利用可能性だとする他の研究結果を裏付けるものだ。

## 量子物理学：実用的な量子エラー訂正

### Practical quantum error correction

量子情報処理は、古典計算では対応できない問題を解決できる可能性を秘めているが、擾乱を受けやすい「量子重ね合わせ」と「量子もつれ」に依存しているという欠点がある。これを解消するためにさまざまな量子エラー訂正法が提案されているが、実証例は数えるほどしかない。今回 G. Waldherr らは、ダイヤモンド結晶中に存在する電子スピンと核スピンからなる系に対する量子エラー訂正過程の実証に成功した。3 個の隣接する核スピンの量子エラー訂正プロトコルに必要な 3 個のもつれた量子ビット (キュービット) を形成し、電子スピンとの相互作用によって読み出しが可能となった。この方法は、シリコン中のドーパントに基づく系などの他の固体ハイブリッド量子スピン系にも応用できる。



Volume 506  
Number 7488  
2014年2月20日号



## 2種類はトラブルのもと：野生の花粉媒介昆虫を脅かすミツバチの新興感染症

**TWO'S A CROWD: Emerging honeybee diseases threaten wild pollinators**

表紙は、ヒマワリの蜜を集めているマルハナバチとミツバチである。近年、一部の重要な花粉媒介昆虫集団の減少に、新興感染症が関わっていることを示唆する証拠が得られている。今回、実験室での感染実験と野外研究とを組み合わせ、ミツバチに感染する2種類の重要な病原体（チチレバネウイルスと寄生性のノゼマ微胞子虫の *Nosema ceranae*）が、野生の花粉媒介者であるマルハナバチにも感染し得ることが確認された。この2種類の昆虫の生息地が重複している場合、それぞれに共通して2種類の病原体が見られたのだ。野生の花粉媒介者集団は、飼育下にあるミツバチ集団とは異なり養蜂家による介入によって保護されることがないため、野生の花粉媒介者集団が危険に曝<sup>さら</sup>されている可能性がある。

変異の蓄積と治療抵抗性のリザーバーとして作用している可能性が考えられる。この研究は、前白血病 HSC を生み出す *DNMT3A* などの遺伝子の変異が薬剤標的候補であることを示しており、また前白血病クローンの検証と治療が治療抵抗性と戦いの助けとなる可能性を示唆している。

## 宇宙：非対称な爆発の残骸であるカシオペア座 A

**Cassiopeia A — remnant of an asymmetric explosion**

重力崩壊型超新星爆発のシミュレーションモデルの多くは、爆発が非対称であることを示すものの、その結果として生じる形態はモデルにより異なる。今回 B. Grefenstette らは、非対称な爆発の指標として、重力崩壊型超新星爆発の若い残骸であるカシオペア座 A (Cas A) における放射性チタン 44 (<sup>44</sup>Ti) の分布を分析した。その結果、衝撃を受けていない Cas A の内部における不均一な分布の程度は、球状爆発から予測されるよりも大きい。高度に双極的な爆発の後に起こると考えられているほどには著しくないことが示された。Cas A の重力崩壊型超新星爆発における爆発の型は、球状爆発でもなく、高度に双極的な爆発でもなく、その中間であったと著者らは結論している。

## 創薬：関節リウマチ薬の標的を探す

**Rheumatoid arthritis drug targets**

欧州系およびアジア系の 10 万人以上についての全ゲノム関連解析のメタ解析における仮想スクリーニングによって、関節リウマチ (RA) の今まで知られていなかったリスク遺伝子座が 42 個見つかった。著者らはさらに、新たな *in silico* パイプラインを開発し、既知の RA リスク遺伝子座にある 98 個の生物学的候補遺伝子を明らかにした。著者らは、RA に対して認可された治療薬の標的がこれらの遺伝子であることを示し、他の適応症に対して認可された薬剤を RA 治療にも転用できる可能性があると考えている。

## 幹細胞：筋肉が老いるとき

**When muscles grow old**

骨格筋の量と機能の低下は、高齢者に見られる特徴で、衛星細胞として知られる骨格筋幹細胞の再生能力の低下と関連している。今回、老化した衛星細胞が、静止状態から前老化状態へ不可逆的に移行することが示された。この前老化状態は、老化マーカーであることが確認されている腫瘍抑制タンパク質の p16<sup>INK4a</sup> の発現上昇と関連する。成体期に p16<sup>INK4a</sup> を抑制すると、衛星細胞は可逆的静止状態を維持し、筋再生が可能になることが示された。ヒトの老化衛星細胞では、p16<sup>INK4a</sup> の調節が異常になることで、筋再生能力が失われるのではないかと考えられる。

## 幹細胞：乳腺で二分化能を持つ幹細胞が果たす役割

**Active bipotent stem cells in the mammary gland**

哺乳類乳腺中の二分化能を持つ幹細胞と単分化能を持つ幹細胞がそれぞれ果たす役割についての研究が盛んに行われている。J. Visvader らは今回、乳管全体のクローンレベルでの細胞系譜追跡と *in vivo* 細胞追跡とを可能にする、新規な三次元画像化技術を開発した。この方法

を使って、二分化能を持つ乳腺幹細胞が、春機発動期の乳腺の形態形成と長期の乳腺維持に中心的役割を担っていることが明らかになった。また、乳管の伸長に大きな役割を担っている長期生存型の管腔前駆細胞も *in situ* で確認された。

## がん：白血病の前がん過程

**Pre-cancer processes in leukaemia**

がんは、ほぼ全てがクローン性、つまり単一の変異細胞の子孫であると考えられているが、最初の変異細胞から多数の異なる形態のがんに至る進化経路についてはよく分かっていない。J. Dick らは、急性骨髄性白血病 (AML) 患者由来の末梢血と骨髄の試料を調べ、大部分の患者に *DNMT3A<sup>mut</sup>* および *NPM1c* の両方の変異を持つ白血病芽球が存在することを突き止めた。また *DNMT3A<sup>mut</sup>* 変異はあるが *NPM1c* 変異は見られない前白血病造血幹細胞 (HSC) も、多くの患者に存在していることが分かった。白血病芽球と前白血病 HSC は共に、異なる細胞種を生み出す能力を保持しているため、正常な造血を維持するが、造血再構築について野生型 HSC と競合した場合には優位で、化学療法による寛解の後にも生存し続ける。つまり白血病芽球や前白血病 HSC といった細胞は、さらなる



Volume 506  
Number 7489  
2014年2月27日号

## ドロプルトン：光によって作られた量子液滴 — 新しい準粒子の登場

**DROPLETONS: Quantum droplets created by light — meet the new quasiparticle**

準粒子はいくつかの点で通常の粒子のようにふるまうエキゾチックな存在で、励起子、プラズモンやフォノンなどが比較的良好に知られている。今回新しい種類の準粒子が報告された。この準粒子は、全く新規の多体粒子で、「ドロプルトン (dropletion)」と命名された。M. Kira らが見つけたこの新しい量子実体は、ガリウムヒ素などの直接ギャップ半導体において4個以上の電子と正孔（電子の空孔）がクーロン引力を介して微小な相関泡（バブル）を形成する際に生じる量子液滴である。表紙は、量子液滴の対相関関数  $g(r)$  を描いたもので、相関関数の中央のピークは電子と正孔が多くの場合共局在している可能性を示し、リップルは共局在していない場合に規則的な間隔を持つ殻を形成することを示している。

## がん：小児上衣腫のゲノム解析

**Genomic analyses of childhoodependymomas**

上衣腫は神経系全域に生じる腫瘍で、小児の後脳に最も多く生じる。今回、2つのグループが独立に上衣腫のゲノム解析を報告した。S. Mack らは、47例の後脳上衣腫で、ゲノム全体の変異率は低く、有意差のある頻発性変異も存在しないことを見いだした。しかし、主に乳児に見られ、予後不良である後頭蓋高上衣腫 A 群というサブグループでは、CpG アイランドメチル化表現型が見られることが分かった。このサブグループは、エピジェネティックな修飾を標的とするさまざまな化合物に感受性を示した。また M. Parker らは、テント上上衣腫の約 70% に *C11orf95-RELA* 融合遺伝子が見られるが、他の上衣腫サブグループにはこの融合遺伝子が見られないことを見いだした。この遺伝子融合は染色体粉砕 (chromothripsis) によって生じ、これによって NF- $\kappa$ B シグナル伝達を構成的に活性化する融合タンパク質が発現する。マウスモデルでは、神経幹細胞での *C11orf95-RELA* の発現が脳腫瘍の形成を引き起こした。これらの知見から、NF- $\kappa$ B シグナル伝達が、テント上上衣腫の患者の治療標的となる可能性がある。

## 宇宙：鉄を含まない星

**A non-iron star**

スカイマップー南天サーベイ (SkyMapper Southern Sky Survey) により、SMSS 0313-6708 と呼ばれる興味深い星が見つかった。可視光スペクトルから、この星には観測可能な量の鉄が存在せず、その鉄の量は、既知の中で鉄の最も欠乏した星の 30 分の 1 以下であると推定された。著者らは、この星の化学的性質を分析した結果、太陽の 60 倍の初期質量を持つ単一の超新星が爆発した痕跡が残されていると結論した。SMSS 0313-6708 を、これまでに発見された金属（ヘリウムよりも重い元素）量の少ない 4 つの星と比較したところ、低エネルギー超新星は初期宇宙では一般的で、そうした超新星では、軽い元素が濃縮されており、鉄はわずかであった可能性がある。

## 素粒子物理学：かつてない精度で求められた電子質量

**Electron mass to unprecedented precision**

電子の原子質量は基礎物理学の重要なパラメーターである。その質量は非常に小さいため、正確な決定は非常に難しい。S. Sturm らは、基準となるイオン（炭

素 12 の裸の原子核）に束縛された単一電子の磁気モーメントを測定することで、原子単位で電子の質量を新しく決定した。最新の量子電気力学理論を使って分析した結果、現在までに報告されている値を 1 桁以上上回る精度で電子質量の値が得られた。

## 古生物学：太古の海生爬虫類の本当の体色

**Ancient marine reptiles in their true colours**

通常は化石として残らない組織が有機炭素薄膜として保存された化石が見つかった場合、意外な事実が明らかになることがある。今回、3種の海生爬虫類の化石（5500 万年前のオサガメ類、8600 万年前のモササウルス類、および 1 億 9600 万～1 億 9000 万年前の魚竜類）に、保存された分子状メラニンを含む皮膚の痕跡が残っており、メラニンに付随して壊れたメラノソームも見られることが明らかになった。メラニンは多くの動物に見られる色素で、体色から体温調節まで多くの役割を担っている。系統的に離れていて見た目も大きく異なるこれら 3 種の海生爬虫類にメラニンが存在していたことから、これらの爬虫類が寒冷な海域で生存していた可能性など、生態解明に関わる疑問も浮かび上がった。今回の結果は、化石から得られた色素沈着に関する新たな情報というだけでなく、さまざまな絶滅生物の体色の復元にも役立つ。

## ||||||| ネイチャーからのご案内 |||||

naturevideo

Web: [www.youtube.com/NatureVideoChannel](http://www.youtube.com/NatureVideoChannel)

モバイル:



携帯電話で Nature Video チャンネルの科学関連動画を見ることができます。(一部の機種を除く)

naturepodcast

Web: [www.nature.com/nature/podcast](http://www.nature.com/nature/podcast)

モバイル:



Nature に掲載された研究成果をポッドキャストでチェックできます。(英語; iPhone™のみ対応)

 HIGHLIGHT

**熱を帯びるトウガラシ属のゲノム配列解読**  
トウガラシ (*Capsicum annuum*) のゲノム概要配列が解読された。トウガラシは、世界で最も広範に栽培されている香辛料作物の1つで、栄養価が高いことで知られている。今回、塩基配列解読が行われたトウガラシは、メキシコの在来種で、植物病原体に対する抵抗性の高いことが明らかになっており、研究や育種で広く用いられている。D. Choiらは、トウガラシの全ゲノム塩基配列決定、そして、トウガラシ属の栽培品種2種と野生種のシネンセ種 (*Capsicum chinense*) のリシーケンシングについて報告している。今回の研究では、トウガラシのゲノムが近縁種のトマトの約4倍の大きさであることが判明した。また、Choiらは、トウガラシの辛味、成熟過程と病害抵抗性の根底にあると考えられる遺伝的影響も明らかにした。

 NEWS & VIEWS**腎がんにおける腫瘍内の異質性**

淡明細胞型腎細胞がん (ccRCC) は VHL 遺伝子の変異と3番染色体の一部の喪失を特徴とする。複数領域のエキソーム配列解読による新しい研究から、腫瘍サイズの大きい原発性 ccRCC では、腫瘍内に大きな異質性があることが明らかになった。これは、腫瘍進展の理解や有効な治療の開発に大きな意味を持つ。

C. J. Ricketts &amp; W. M. Linehan

**カレイ目魚類における性別と遺伝子量補償のエピジェネティックな制御**

哺乳類、鳥類、爬虫類および魚類における性染色体は、多くの独立した進化事象を表しているが、高度の収斂を示し、驚くほどの類似点がある。新しい研究から、カレイ目魚類〔カラアカシタビラメ (*Cynoglossus semilaevis*)〕におけるZW分化の初期段階や性別決定、およびDNA

メチル化を含む、エピジェネティックな機構による遺伝子量補償と性転換の確立が詳しく説明された。

J. A. M. Graves

**モータータンパク質であるダイニンの制御因子 Lis1 による幹細胞の運命の調節**

細胞の運命の調節は、組織の恒常性維持の中心的な要素であるが、組織特異的幹細胞の細胞分裂の多様性を指示する機構はよく分かっていない。新しい研究から、造血幹細胞の運命決定および白血病発生における、微小管モーターを調節するタンパク質 Lis1 の中心的役割が明らかになった。

B. Will &amp; U. Steidl

 BETWEEN BEDSIDE AND BENCH**微生物相を使って病原体を殺す**

さまざまな抗生物質が存在するにもかかわらず、一部の感染症は再発する。この問題の根源は、抗生物質が腸内共生微生物叢の働きや構成に対して悪影響を及ぼすことにある。現在、*Clostridium difficile* の治療抵抗性や感染再発に対処するために、健全な微生物相がこの病原体を食い止める仕組みの解明や、防御に寄与する微生物種の特異性、プロバイオティクスを使い標的を絞った治療法の開発などが試みられている。今回、BEDSIDE TO BENCH では糞便微生物移植 (FMT) の可能性について論じ、その有効性を説明する機構を検討している。また一方のBENCH TO BEDSIDE では、抗生物質投与後に腸内共生微生物によって放出されるシアル酸が、*C. difficile* の増殖亢進に大きく関与する可能性を示唆した最近の研究を検討している。*C. difficile* 感染症を治療もしくは予防するには、FMTを用いて腸内の *C. difficile* がシアル酸を摂取できなくする方法や、シアル酸を迅速に取り除いて *C. difficile* が使えないようにする改変型プロバイオティクスが有効と考えられる。

 NEWS & VIEWS**老いた筋幹細胞を若返らせる**

加齢の間起こる筋幹細胞の機能低下が環境信号の変化に依存していることは以前から知られていたが、内因性の機構の関与についてはよく分かっていなかった。今回2つの研究によって、p38 マイトジェン活性化プロテインキナーゼ経路の細胞自律的な変化が、老化した筋幹細胞が持つ表現型の主要な決定要因であることが明らかになった。

C. F. Bentzinger &amp; M. A. Rudnicki

**毛色の違う Fox : FoxA1 は新規な制御性 T 細胞群の分化プログラムに関わっている**

インターフェロン  $\beta$  (IFN- $\beta$ ) は多発性硬化症 (MS) の治療に広く使われているが、これが MS の進行を防止する仕組みははっきり分かっていない。今回、IFN- $\beta$  が FoxA1<sup>+</sup> 制御性 T 細胞という新しい制御性 T 細胞群を誘導し、この細胞群が PD-L1 を介して従来型の T 細胞を抑制することが示された。この T 細胞群は MS のマウスモデルで疾患進行を抑え、IFN- $\beta$  療法に対して反応した MS 患者に存在することが明らかになった。

G. M. Delgoffe &amp; D. A. A. Vignali

**自然免疫をドーパミンと電気鍼療法で調節する**

神経回路は炎症メディエーターを検知して免疫系へシグナルを送り返すことで免疫応答を調整できる。敗血症のマウスモデルでは電気鍼療法によって免疫応答を調整可能なことが新たに明らかになった。電気鍼療法は神経回路を刺激してドーパミンを放出させる。inflammatory reflex (免疫臓器への神経伝達物質の放出による免疫細胞抑制) と呼ばれる反応系に似たこの仕組みは、交感神経性でも副交感神経性でもない。この結果から、ドーパミンアゴニストによる敗血症治療法が開発される可能性が出てきた。

S. S. Chavan &amp; K. J. Tracey

## 掲載論文一覧

## ANALYSIS

- 変異と人口動態：有害変異による荷重は近年の人口推移の影響を受けない



## ARTICLES

- 淡明細胞型腎細胞がん：淡明細胞型腎細胞がんの多領域の塩基配列決定によるゲノムの構造とがんの進展の解明
- 複数祖先集団での 2 型糖尿病：複数祖先集団のゲノムワイドメタ解析から得られた 2 型糖尿病の感受性に関する遺伝的構造の手がかり
- 非対称分裂：Lis1 は造血幹細胞および白血病において非対称分裂を調節する
- カレイのゲノム進化：カレイ目の魚の全ゲノム配列から、ZW 型性染色体の進化と底生への適応についての手がかりが得られる
- アメリカ鉤虫のゲノム解読：アメリカ鉤虫 *Necator americanus* のゲノム
- トウガラシのゲノム解読：トウガラシのゲノム配列はトウガラシ属植物の辛味の進化に対する洞察を与える
- 薬剤耐性結核：ロシア人集団における薬剤耐性結核の進化および伝播

## LETTERS

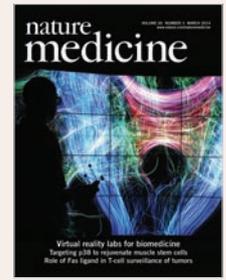
- 白血病：ヒトの急性白血病における *SETD2* の機能的協調変異の同定
- 2 型糖尿病：2 型糖尿病のリスク増減に関連する低頻度および希少配列バリエーション
- ネフローゼ症候群：変異に依存した劣性遺伝形式をとる *NPHS2* 関連ステロイド耐性のネフローゼ症候群
- 肺炎球菌：高密度でのゲノム試料抽出により肺炎球菌の組換えの主経路が同定される

## TECHNICAL REPORTS

- バイオインフォマティクス：ヒトの遺伝的バリエーションの相対的な病原性を見積もるための一般的なフレームワーク

## COVER

- 大規模データ視覚化システムによって、研究者たちは自分たちが得たデータセットの中を歩き回れるようになった。今月号の News Feature では、このような没入型環境が生物学をどのように前進させているかが調べられている。表紙は、本来の伝達方向によって色分けされた脳白質神経繊維束を見る研究者。  
(写真提供：Dyani Lewis)



## BRIEF COMMUNICATION

- がん：ARID1B は *ARID1A* 変異体を持つがんにおける特異的脆弱性である

## ARTICLES

- 幹細胞：筋幹細胞集団の若返りは老化し損傷を受けた筋肉の強さを回復させる
- 幹細胞：p38 MAPK シグナル伝達は老齢マウス骨格筋で幹細胞自己複製の細胞自律的低下の基盤となっている
- 自己免疫疾患：FoxA1 は EAE と MS で新規な制御性 T 細胞集団に分化系列を指示し免疫抑制性を付与する
- リンパ腫：T 細胞による Fas リガンドを介した免疫監視は自然発生 B 細胞リンパ腫の制御に必須である

## LETTERS

- 鍼灸と免疫系：ドーパミンは電気鍼療法による迷走神経を介した免疫系調節を仲介する
- エイズ：ベクター介在免疫予防法はヒト化マウスを HIV 粘膜感染から防御する

## TECHNICAL REPORTS

- 画像化法：ヌクレアーゼで活性化されるプローブを用いた、黄色ブドウ球菌感染の非侵襲的画像化
- マラリア：初代肝細胞長期培養でのマラリア原虫ヒプロゾイトの存続と活性化
- クローン病：腫瘍壊死因子に対する蛍光抗体を用いた *in vivo* 画像化によるクローン病治療反応性の予測

## 塩素年代記

17番元素である塩素は、良くも悪くも日常生活に深く浸透している。生命から環境問題まで、塩素のさまざまな側面についてカリフォルニア大学の Barbara Finlayson-Pitts が解説する。

塩素 (Cl) は至る所に存在しており、地殻や海水中に豊富に存在するだけでなく、人間の体内にも広く存在する。また、塩素化合物は洗剤や殺虫剤にも用いられている。

分子状塩素 (Cl<sub>2</sub>) が観察されたのは1774年で、スウェーデンの薬学者カール・ヴィルヘルム・シェーレが二酸化マンガンと塩酸を反応させて黄緑色の気体を発生させたのが最初である。このとき、発生した気体に殺虫力や漂白力があることが確認されたものの、当時この気体は酸素と塩酸の化合物と考えられていた(元素単体とは認識されていなかった)。その後、1810年によややく、英国の化学者ハンフリー・デービーが、この気体が化合物ではなく、元の物質から分離された元素単体であると主張した。翌年、この元素は黄緑色を意味するギリシャ語 *chloros* から「chlorine (塩素)」と命名された。

塩素ガスは当初、漂白剤として利用されたが、実用的ではなかった。そのため、間もなく次亜塩素酸塩溶液が使われるようになった。次亜塩素酸塩溶液は現在でも、紙・パルプの漂白や、飲料水やプールの水の消毒に使われている。また、塩素化合物は他にも、溶剤やプラスチック(ポリ塩化ビニルなど)から医薬品に至るまで広く利用されている。

ところが残念なことに、有害な塩素化合物も登場してしまう。破壊的・攪乱かくらん的な化学兵器として使われた塩素ガス

やホスゲン (COCl<sub>2</sub>)、マスタードガス ((ClCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>S)、また、環境問題となっている殺虫剤 DDT (ジクロロ・ジフェニル・トリクロロエタン) がそうだ。DDT の影響については、レイチェル・カーソンが著書『沈黙の春 (Silent Spring)』で取り上げている。

塩素はまた、クロロフルオロカーボン (CFC) すなわちフロン(日本以外では一般的にフレオンと呼ばれる)の形で、大気環境に多大な影響を与えている。CFC は1930年代に開発され、冷媒やエアゾル噴射剤、発泡剤として普及した。CFC は対流圏(高度約15 kmまでの下層大気)では無毒で反応性がなく、当初はそうした特性が好都合に思われた。だが、1974年、マリオ・モリーナとフランク・シャーウッド・ローランドは、CFC が地球規模で実際に重大な影響を及ぼすことを発見した。CFC は、下層大気に大きな吸収源がないため上層大気へと輸送される。上空で波長240 nm 未満の光が当たると、CFC は光分解し、塩素原子が発生する。この塩素原子が、成層圏(高度約15~50 km)で紫外線をブロックしているオゾン(O<sub>3</sub>)の連鎖的破壊を引き起こすため、地表に届く紫外光が増加するのだ。彼らはこの功績が認められ、1995年にノーベル化学賞を受賞(パウル・クルツェンと共同受賞)している。

さらに興味深い例として、塩素が対流圏の化学過程にも影響を及ぼすことが、

数十年前から分かってきた。塩素は、波の作用によって空中に舞うマイクロメートル未満の大きさの塩粒子(海水由来の NaCl が主成分)や、アルカリ性の乾燥湖から生じる塵ちりにも含まれている(ハロゲン族の元素である塩素は、アルカリ金属類と反応して塩を生成しやすい)。こうした粒子の表面の塩化物イオンが、HNO<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、OH ラジカルなどの微量大気ガスと反応すると、さまざまな塩化物(HCl、ClNO、ClNO<sub>2</sub>、Cl<sub>2</sub>、HOCl)を生成する。

最近の観測で、ClNO<sub>2</sub> が内陸部の広い範囲にも存在することが分かった。対流圏での塩素化学反応は海や湖以外の所でも起こっているようなのだ。ニトロクロリド(ClNO<sub>2</sub>)の発生源は不明だが、ハロゲン化合物の表面に結合した窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)との不均一反応が関与している可能性がある。これらの塩化物のほとんどは急速に塩素原子へと変換されるが、塩素原子は有機化合物と非常に反応しやすい傾向にあり、通常こうした反応によって有害な対流圏オゾンの生成が促進されるのである。対流圏オゾンとは、成層圏オゾンとは異なる有害な大気汚染物質で、高い温室効果能を持つ。対流圏オゾンの生成はまさに、人為放出と自然放出の相乗作用の典型的な例であり、その潜在的な重要性は徐々に認識されつつある。

大気中で起きているこうした現象は、非常に複雑で研究が難しい。しかしながら、大気反応過程を定量的に予測するために、ひいては望ましくない影響を軽減・克服するためには、これらの現象を化学的に解明することが極めて重要だ。

良くも悪くも、我々は日常生活で塩素を避けることができない。問題は、いかにして良い影響を最大限に活用し、悪い影響を最小限に抑えていくか、なのである。■

(翻訳: 藤野正美)



# 「Nature ダイジェスト」は、オンライン版のみの購読が可能です！

**Fujisan.co.jp**  
雑誌のオンライン書店

雑誌・定期購読専門オンライン書店で、  
Nature ダイジェスト・デジタル版の取り扱いを始めました。



年間購読 5,500円

(4月1日以降は、5,660円)

コンテンツはストリーミング形式です。

- ・パソコン、iPad/iPhone、Android スマートフォン・タブレットで読めます\*！
- ・購入したデジタル雑誌はずっと読めます！
- ・テキスト検索、インデックス・サムネイルによるページ移動ができます。

Fujisan のデジタル雑誌の詳細については下記をご覧ください。

<http://www.fujisan.co.jp/info/readdigital/>

1号のみの購入もできます。510円 (4月1日以降は、525円)

\*プリントアウトはできません。

\*定期購読の場合、アクセスできる号は、購読期間の号(12号)のみです。

\*アプリのインストールが必要です。



Nature ダイジェスト・デジタル版 お申し込み  
<http://fujisan.co.jp/pc/ND>

nature publishing group 

## EDITOR'S NOTE

日本では食材でおなじみのシャコ。少し地味なイメージがありますが、400種を超すシャコの仲間の中には、モンハナシャコなどのように色鮮やかな種類もたくさんいます。そして何より圧巻なのがシャコの強烈な高速パンチ。英語名 Mantis Shrimp の由来でもある、カマキリの前脚に似た捕脚から繰り出すパンチは、脚や肢の動きとしては動物界最速で、キャビテーションに起因する猛烈な破壊力を備えています。その一撃で、餌となる貝や甲殻類の殻はもちろん、飼育水槽のガラスまで叩き割ることもあるそうです。今回、色覚のシステムは予想外に単純なことが判明したシャコですが(4ページ)、その生態はまだまだ驚異に満ちていると、私は思います。(あ)

\*翻訳記事は、原則として原文に沿っております。一部、編集部でより分かりやすいように編集しております。



nature publishing group 

ネイチャー・パブリッシング・グループ  
〒162-0843  
東京都新宿区市谷田町 2-37 千代田ビル  
Tel. 03-3267-8751 (代表)  
Fax. 03-3267-8754  
[www.naturejpn.com](http://www.naturejpn.com)

©2014 Nature Japan K.K., trading as Nature Publishing Group.  
All rights reserved. 掲載記事の無断転載を禁じます。

広告のお問い合わせ  
Tel. 03-3267-8765 (広告部)  
Email: [advertising@natureasia.com](mailto:advertising@natureasia.com)

編集発行人: Antoine Bocquet  
副発行人: 峯村宏  
編集: 宇津木光代、松田栄治、苅蒲さやか、石田みか  
デザイン/制作: 中村創  
広告: 米山ケイト、藤原由紀  
マーケティング: 池田三智世、池田恵子

「Nature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。

宛先: [naturedigest@natureasia.com](mailto:naturedigest@natureasia.com)  
(「Nature ダイジェスト」ご意見係)

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。今後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。

受賞歴のあるビジネスクラス「クラブワールド」では、自分だけの時間をお楽しみいただけます。静かなラウンジ、そして機内では自分だけの快適な空間。お客様のスペース、プライバシーを大切にしたキャビンでは、お好きな時間に、お仕事、ご就寝、おくつろぎいただくことができます。

今すぐ、[ba.com](http://ba.com)でご予約ください。



平成26年3月25日発行 第11巻 第4号  
編集発行人: Antoine Bocquet

発行所: ネイチャー・ダイジェスト株式会社  
東京都新宿区市谷田町2-37 千代田ビル

発売所: 日本出版貿易株式会社  
ISSN: 1880-0556

