

# nature

月刊 ダイジェスト

[www.naturejpn.com](http://www.naturejpn.com)

日本語編集版

vol.01, no.06 | June 2004

## 宇宙探査に ロボットが大活躍

## 父親のいないマウス

「きれいな核兵器」は妄想にすぎない

性転換した学者の説く、多様な性のあり方

韓国クローラン研究者が直面する倫理問題



Sponsored by



Agilent Technologies

# nature

## 月刊ダイジェスト

vol. 1, no. 6

# 6

## 月号 目次

June 2004

www.naturejpn.com

### editorial

**2 炭素排出の影響を市民に広く知らせよう**

### news feature

**3 韓国クローン研究者の正念場**

David Cyranoski

**6 月と火星の探査はロボットとともに**

Tony Reichhardt

### commentary

**9 「きれいな核兵器」という妄想**

Michael A. Levi

### books and arts

**11 性転換した学者の説く、多様な性のあり方**

Reviewed by Sarah Blaffer Hrdy

### essay concepts

**12 見せ物の解剖死体はいらない**

Horst-Werner Korf and Helmut Wicht

### news and views

**14 父親のいないマウス**

David A. F. Loebel and Patrick P. L. Tam

Publisher: Antoine E. Bocquet

Editor: Keiko Kandachi

Production: Junko Tsuda/Takesh Murakami

Advertising Sales: Rinoko Asami

Marketing: Peter Yoshihara

### ネイチャー・ジャパン株式会社

〒 162-0841

東京都新宿区払方町 19-1

エム ジー 市ヶ谷ビル 5 階

Tel. 03-3267-8751

Fax. 03-3267-8746

© 2004年 ネイチャー・ジャパン  
掲載記事の無断転載を禁じます。

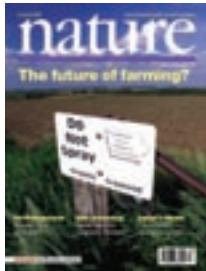
### cover stories

(ページ数は当該号の数です)



**15 April 2004 Vol.428/Issue no.6984**

非KAM力学と呼ぶ、まれなタイプのカオス運動が初めてNature誌で提案されて以来、多くの理論的な関心がもたれてきた。今回この現象がついに実験で観察されるに至った。非KAMカオスが半導体超格子における電子の量子性を利用して生成されたのである。カオスの発生はきれいなクモの巣パターンが突然形成されることに特徴がある。このクモの巣パターンがマイクロチップを流れる電流を増大させ、電子波動関数に強い影響を及ぼす。微弱な電気シグナルによってこのクモの巣を破壊し、電流が流れないようにできる。これは、量子エレクトロニクスやフォトニクスに応用するとき電気伝導率を制御する高感度のメカニズムになる。KAMは、コロモゴロフ-アーノルド-モーゼ定理のこと、非線形力学の分野で最も重要な定理である。[Letters, p. 726]



**22 April 2004 Vol.428/Issue no.6985**

表紙は、大豆を有機栽培しているアイオワ州の農場の写真である。このような有機農法は、農業の「来るべき事態」なのだろうか。徹底した有機農法というかたちを考えるなら、おそらく答えはノーである。市場において、有機食品はシェアは小さいものの収益性が見込める製品との位置づけにとどまっており、購買層は先進国の富裕な消費者の少数にすぎない。しかし有機農法の理念は、農業の主流部分に次第に取り入れられつつある。News Feature特集では、本誌スタッフがこの傾向を分析、世界での有機農法の広がりについて描き、また有機農法のさらなる拡大の鍵を握ると思われる問題を取り上げている。(表紙写真: Denny Eilers/Grant Heilman Photography.) [News Feature, p.792]



**29 April 2004 Vol.428/Issue no.6986**

内耳の有毛細胞(表紙)はさわめて感度の高い機械刺激センサーで、ごくわずかな動きや非常にかすかな音でも感じ取り、それを電気化学的シグナルに変換するが、その分子機構はよくわかっていない。カドヘリン23はこの変換過程にかかわっている可能性がある分子の1つで、マウスやヒトの「聴覚消失」遺伝子の産物として見つかった。またカドヘリン23は、聾盲の主な原因の1つであるアッシャー症候群にも関連がある。今回カドヘリン23が有毛細胞ティップリンクの主成分であることが明らかになった。ティップリンクは隣接する不動毛の先端をつなぐ微細な繊維で、音の知覚に必要なイオンチャネルの開閉を行うと考えられている。もう1つの研究では、カドヘリン23遺伝子の変異がゼブラフィッシュの感覚有毛細胞のティップリンクに影響を与えることが確かめられた。[Letters, pp.950, 955 : News and Views, p.901]



**6 May 2004 Vol.429/Issue no.6987**

ヒトの骨髄やその他の臓器で成体幹細胞が発見されたことで、幹細胞治療の可能性に関心が高まっている。幹細胞治療の有力候補の1つが、糖尿病における脾臓 $\beta$ 細胞の置換である。脾臓に幹細胞が存在することを示す間接的証拠は得られていたが、そういう細胞が見つかるという決定的な結果はこれまで得られていないかった。それにはちゃんとした理由があったらしい。組織学的方法よりももっと厳密な、遺伝的系統を詳細に調べる方法を使ったマウスでの研究で、成体の新しい $\beta$ 細胞は幹細胞からではなく、既存の $\beta$ 細胞が分裂して生じることがわかつた。この結果は、幹細胞治療の研究にとって一見すると逆風のように感じられるが、in situで分化のすんだ $\beta$ 細胞を自己複製させられる可能性が明らかになったともいえる。表紙は、脾管(緑色)と脾島(赤色)、核(青色)。[Articles, p.41 : News and Views, p.30]



**13 May 2004 Vol.429/Issue no.6988**

表紙は、銀河系で最も活発な星形成領域の一つ、いて座のオメガ星雲である。最新の観測結果から、大質量星の誕生を捉えたこれらの画像が得られた。画像には、回転する巨大な降着円盤から生まれ成長途中にある、20太陽質量の大質量星が見えている。この発見は、長く続いた論争に決着をつけるものだ。太陽のような小質量星は、分子雲の重力崩壊でできた中心核を取り巻く星間媒質から、物質が降着してきたと考えられてきたが、そうやって生まれた星は、理論的には10太陽質量の上限があるとも一部では考えられている。しかし、今回の観測では星形成の降着機構には上限がないように思われる。この新発見の例では少なくとも100太陽質量のガスの貯蔵庫が伴っていて、星をどんどん成長させている。[Letters, p. 155]

# 炭素排出の影響を市民に広く知らせよう

気候変動への取り組みは各國政府の足並みがそろっていないが、草の根レベルの活動は広がっている。研究者や業界の協力があれば、二酸化炭素排出量を削減するための方法について一般市民の理解はもっと深まるだろう。

原文：*Carbon impacts made visible*

*Nature* Vol.429 (1)/6 May 2004; www.naturejpn.com/digest

**欧**州の関係者は、異常気象への対応を改善する必要があることを十分に認識している。過去5年間に洪水、熱波や干ばつを数多く経験してきた欧洲では、多くの政府や地域が、各種予報を行う体制を拡充し、一般への啓蒙活動を強化している。なにしろ一般市民は、大災害の恐ろしさやその対処法について憂慮すべきほど認識不足なのだ。さらに欧洲では増加傾向にある豪雨や異常高温による影響の緩和を目指して、自然界を守るために多額の資金を投入している。

1998年から2001年にかけて空前の洪水を何度も起きた東ヨーロッパのティサ川の事例は、地域の対応がかなり進んでいることを如実に示している。2000年には、上流部での水位上昇が確認され、下流のハンガリーの住民に対して2週間後に大洪水が起こる危険が伝えられた。その結果、地元では1日当たり100万袋を超える土嚢を積み上げる作業を続けて、流域での洪水を防いだのだった。ハンガリー国内では、総額5億ユーロ(約700億円)の開発計画と啓蒙キャンペーンによって、貯水池の建設などが行われた。この事例は、4月28日から30日にダブリンで開かれたアイル

ランド環境保護庁の主催による気候変動の影響とその広報活動を評価する会議でも報告された。同じような開発計画はポーランド、英国その他の国々にもあるが、これを欧洲レベルで補完するのが、欧洲連合共同研究センターによって作成される気候に関する大規模モデルである。その目的は、大災害の脅威について長期的な予報することだ。

ここまで見事な対応といえる。だが、このような国内レベルでの取り組みの中で、10年スケールでの気候の傾向という枠組みに沿っているものは少ない。ただ、地域的な気候モデルには不確定要素が数多く含まれていることを考えれば、これは意外なことではないだろうが。それにしても長期的な取り組みがないことは、重大な課題を浮き彫りにするばかりだ。人類による二酸化炭素排出は想像を超えるスケールで進行中であり、一般市民がこれを低減させる努力をしてもらうにはどうすればよいのか——という課題である。

京都議定書が批准されているかどうかとは関係なく、少なくとも二つのボトムアップによる活動のチャンスがあることを把握しておかねばならない。その一つが排出権取引市場だ。これは京都議定書の影響を受けているが、必ずしも京都議定書に依存しているわけではない(*Phil. Trans. R. Soc. A*, August 2002 special issue 参照)。これまでに米国の自主的な国内市場、欧洲連合の各種取り組み、そして世界各国において全国レベルあるいは地域レベルの活動によって市場が生み出されている。この市場は、まだ情

けないほど規模が小さいが急成長しており、現在では年7,000万メートルトンの二酸化炭素の取引が行われている。京都議定書のような条約がない状態では、このような取り組みによってどれほどの二酸化炭素排出が抑制できるのかは明らかではない。しかし炭素排出に伴う代償に関する認識が、関係企業、組織、地域や投資家の間に浸透すれば、個人や企業の行動習慣に変化が生じる可能性がある。ここで重要なのは、この取引の枠組みに航空運輸、土地利用や炭素の隔離を組み込むことだ。こうすれば先進国と開発途上国との間の不公平が是正されるはずだ。特に取引制度上、開発途上国が国内の天然資源によって持続的に利益を得られるようにできれば、その効果はあるだろう。

責任ある行動を提唱する向きであれば、あらゆる機会を捕えて、その主張を一般市民に伝えなければならない。その一つのチャンスが5月28日に全世界で公開(日本は6月5日公開)の『デイ・アフター・トゥモロー(The Day After Tomorrow)』という氷河期を舞台とする超大作映画だ。この映画の公式サイトでは、気候学的に無頓着なライフスタイルによって生み出される炭素排出の影響を相殺するための方法が紹介されている。気候学の研究者は、この映画が依拠している科学的理論の欠陥について批判するだろうが、一般市民はこの映画を観ることで気候学や海洋学の現状について理解を深めることができ、さらには炭素に対する意識が高まるだろう。各地のマスコミは大災害の映画を使って一般市民の科学への関心を引き出そうとするだろうから、気候学の研究者はマスコミにコンタクトを取るべきである。その結果として、大気中の二酸化炭素量の増加をみれば、私たちに残された時間は少ないと認識されるようになれば、なおさら好都合である。



# 韓国クローン研究者の正念場

ソウル国立大学の研究チームが、人間の治療用クローンの作製を見据えた研究競争で先頭に躍り出た。研究者たちは喜びの渦中にあるが、倫理的な問題が指摘されており、研究の前途が懸念されている。David Cyranoskiが報告する。

原文：*Crunch time for Korea's cloners*

*Nature* Vol.429 (12-14)/6 May 2004; www.naturejpn.com/digest

ソウル国立大学の起伏の多いキャンパスにある Woo Suk Hwang の研究室は、まるでクローン工場だ。ある部屋では、青い実験服に身を包んだ一団の研究者たちが実験台を囲み、ウシの卵巣から卵子を抜き取っている。隣の部屋では、他の研究者たちが 12 台のマイクロマニピュレーターの間を忙しく行ったり来たりしている。ある装置の前では、ウシの卵子に穴を開けて核を除く作業が進行中だ。そして隣の機器を操る同僚が、除核後の卵子を回収し、成体ウシの細胞と融合させるといった具合である。

この一連の製造ラインこそ、狂牛病に耐性をもたせる遺伝子組換えウシを作る計画の中心にほかならない<sup>1</sup>。同時にこれは、Hwang が率いる研究者、学生、技師からなるチームが、多くて 1 日約 600 個ものブタ、ウシ、イヌの卵子を必要とする多くのクローン計画のほんの一部に過ぎない。

そもそも獣医学者である Hwang がクローン研究に転じたのは 1990 年代の後半であった。正確に決定された遺伝的性質をもつ家畜の有望性に可能性を見出したからだ。

だが、この 2 月に Hwang が名声を博すきっかけとなったのは、ヒトの卵子と細胞を対象としたクローン実験であった。Hwang の研究チームは、同じソウル国立大学の Shin Yong Moon のグループとともに、ヒトのクローン胚から胚性幹細胞を得たと発表した<sup>2</sup>。この結果は、免疫系による拒絶反応を回避するために、患者本人の細胞で損傷組織や疾患組織の修復を試みる治療目的のクローンングが有効であることの証拠となる。しかし、治療目的のクローンングは異論の多い技術でも



クローン工場：実験に用いる卵子をウシの卵巣から取り出すソウルの研究チーム。

ある。この手法は、数日齢のヒト胚を破壊する段階を含むことから、中絶反対派の批判的となっている。それに加えて、Hwang たちの研究には、別の倫理的な問題も指摘されている。卵子を提供する女性を募集する経緯と、提供者の権利の保護を目的としたガイドラインが適切に適用されたのかということだ。

## セレブの仲間入り

それにもかかわらず、本誌記者が研究室を訪れた際、Hwang の機嫌は上々であった。Hwang は、国内最初のクローンウシの作製を発表した 1999 年以降、韓国では既に有名人である。そして今年 2 月の論文発表後は、国内はもとより国外にもその名声は広がりつつあ

る。Hwang は 4 月 20 日に韓国政府から「最高科学者賞」を受賞し、賞金として約 26 万米ドル相当を獲得した。そして数日後には、Hwang と Moon は、*Time* 誌の「最も影響力のある世界の 100 人」にも選ばれた。

研究室でインタビューを行っている間、Hwang はソファの肘掛けに座り、多忙な日常のなかにも、注目を浴びることの喜びを感じているように見えた。その日は欧州連合の代表団を迎えたばかりで、続いてドイツからの客と会う予定が組まれていた。「実験を行った理由をよく尋ねられますし、共同研究の申し込みもあります」と Hwang は語った。講演の依頼は世界各国から舞い込んでいる。今年は英国、ドイツ、イタリア、スペインを訪れる予

▶ 定だ。

研究のスケジュールも同様に慌ただしい。Hwangは、農業分野におけるさまざまな応用を視野に入れ、動物のクローニングを行いたいと考えている。絶滅危惧種のアムールトラ(*Panthera tigris altaica*)のクローニング計画も進めている。韓国では野生種が姿を消して久しいこのトラを、動物園で飼育されている成体トラの細胞と、ウシ、ブタ、イヌの卵子を融合することで復活させようという試みだ。またHwangには、人間の移植用臓器を得ることを目的として、ブタのクローニングを行う計画もある。この計画では遺伝子に修飾を施すことで、ヒトの免疫系による拒絶反応の発生を極力抑えることができると考えられている。

ヒトの治療目的のクローニング計画も、成功するまでには多くの研究が必要だ。「研究は未だ黎明期にある。臨床応用をとやかく言う段階にはない」とMoonは語っている。治療目的のクローニングを実現させるためには、クローン化された胚性幹細胞をより効率的に作らなければならないし、得られた幹細胞を、パーキンソン病、糖尿病、脊髄損傷などの治療に用いる特定の細胞種に成長させる手法を確立しなければならない。

HwangとMoonはクローン胚を、核を除去した卵子を卵丘細胞と融合することで作製した。発生途上の卵細胞の周囲を取り囲み、栄養分を補給する卵丘細胞は、卵子提供者に由来する細胞が使用された。ある女性の卵丘細胞を、別の女性の卵子と融合することで胚をクローン化する試みは未だ成功していない。治療目的のクローニングを臨床現場で用いるためには、男女のさまざまな種類の細胞を用いて胚性幹細胞を得る必要がある。

### 魔法の手

研究者たちは、ウシの卵子を使用することで、クローニングにヒトの卵子が必要なくなる可能性を探りたいとも考えている。同様の研究を進めているグループは他にもある。例えば上海第二医科大学のHuizhen Shengは昨年、ヒトの細胞とウサギの卵細胞を融合して作製したクローン胚から胚性幹細胞を得たと報告した<sup>3</sup>。現在までに最も成功した実験では、9%のヒト・ウシハイブリッド胚を、胚性幹細胞を回収可能な段階まで進めることができたとHwangは述べている。しかし、幹細胞系列

を得るまでには至っていない。

韓国チームの成功は、研究者たちの「魔法の手」にあるとHwangはみている。ソウル国立大学を訪れた専門家は、クローニング施設の規模の大きさにも目を見張る。「こんな施設は見たことがない」とミシガン州立大学のJose Cibelliは語っている。Cibelliは、短期間Hwangの研究グループとともに今回の画期的なヒトクローニング論文の元となった研究を行った人物だ。Cibelliは、韓国人研究者の献身的な姿勢と勤勉さにも感心している。Hwangによれば、研究グループのメンバーは通常、朝6時から夜10時まで研究をしている。「しんどいと思いますが、拒否する者はいません」と、彼は言う。

Hwangは、ソウル国立大学の獣医学部で40人の研究者からなるチームを統括する立場にいる。政府からの寛大な補助金で購入された装置の数々は最新式のものだ。なおヒトのクローン研究は、民間の寄付で運営されている別の施設で実施されたと、Hwangは言う。一部の韓国人は、幹細胞を得るためにヒト胚の作製に倫理的見地から反対しているので、治療目的のクローン研究は、国の資金で行う動物クローニング計画とは分けて進めているのだと、とHwangは説明する。

医学部ではMoonが、幹細胞系列を樹立して性質を明らかにすることを目指して30人の研究者を率いている。また同じキャンパスの他の施設では、協力関係にあるグループが、損われた臓器や組織の修復に将来的に使用することを目的として、細胞を用いる治療法の各段階の研究に従事している。合計すると、ソウル国立大学全体で約180人の研究者が、クローン研究と再生医学領域の関連技術の研究にいそしんでいることになる。

しかし、HwangとMoonがヒトクローン実験に成功した最大の要因は、過剰排卵状態とするためにホルモン注射を受けることに同意した16人の女性の参加にあったと言える。この女性たちが242個の卵子を提供したこと、*Science*誌の論文に記載された一系列のクローン化されたヒト胚性幹細胞が得られたことになる。

結果として得られた培養細胞は極めて貴重なため、立ち入り禁止の3施設にそれぞれ厳重に保管されている。「我々の研究スタッフでさえ保管施設に入ることは許可されていない」とHwangは語る。

胚性幹細胞を厳重に保管することは理解できる。だが、本誌記者がソウルを訪れた時には、人権擁護運動家と生命倫理学者たちが卵子提供者の募集をめぐって透明性がないことを批判はじめていた。研究の実施に課せられた倫理ガイドラインに、Hwangたちがどれほど厳密に従っていたかについて、彼らは疑問を呈していたのだ。

### 卵子の収集方法に疑問

こうした懸念は、Hwangの研究グループに所属する博士過程の学生で、今回の論文の共著者の一人でもある女性に対して本誌が行ったインタビューで浮き彫りになった。インタビューの中で彼女は、自分と別のもう一人の研究スタッフが卵子を提供したと語った。ところが、この学生は後になって話の内容を変えた。卵子を提供した事実はなく、自分のつたない英語で誤解が生じたというのだ。

生命倫理学者たちは、こうした試料の提供は、適切な研究実施基準に抵触するのではないかと述べている。基準では、試料提供者と研究者は一定の距離をおくことで、実験責任者が提供者に直接影響を及ぼすことができないようにすべきとされている。また、研究結果から利益を得る可能性のある提供者は除外すべきであるという、今回の実験に適用されたガイドラインに違反している恐れもある。

今回の研究ほど多くの卵子提供者を動員できたクローン研究グループは、ほかにない。女性が今回のような処置を受けるのは通常、体外受精を受けるときか、あるいはまれに、他の女性に自分の卵子を提供するときである。米国では、卵子を提供する女性には、諸経費として、また侵襲的な医療処置を受ける際の苦痛の補償費として数千ドルが支払われることがある。Cibelliがアドバンスド・セル・テクノロジー社(マサチューセッツ州ウースター)に在職中の2001年にヒトクローン実験を行った際には、このような支払いを行った提供者から得た20個弱の卵子を使用した<sup>4</sup>。

これに対して、今回の韓国人の卵子提供者は金銭を受け取ることはなく、病気の人々を助けたいという動機、また国の威信のために協力したとHwangは語っている。韓国の研究グループが意欲的な協力者を動員するのに

成功した理由は、文化の違いかもしれない。アジアの社会では、社会全体の利益に貢献することが重く見られるからだ。

Hwangは韓国の国民に自分たちの研究を詳しく知つてもらおうと、毎週数回の公開講演などを熱心に行っている。自國の経済の発展を促したいと考えてのことだ。この背景には、少年時代の貧しさの記憶がある。「韓国を、特に科学技術の分野において進んだ国にしたいのです」とHwangは語る。

### 国威宣揚

当初、自らが卵子提供者の一人であると本誌記者に語った前述の博士課程の学生は、このような愛他主義と強い愛国心に動かされたと言える。最初のインタビューでこの学生は、病気の子どもたちを助けたいこと、また自分の国に対する愛について語っていた。

研究室に所属する博士課程学生が当初語った話の内容についてHwangに尋ねたところ、全16人の女性が署名した同意文書を調べた限り、この学生の名前は認められなかつたと語った。またHwangは、数人の学生から卵子の提供の申し出があったが「はっきりと断つた」とも述べている。

本誌によるインタビュー前に、HwangとMoonの研究における卵子細胞提供者の募集過程については既に疑問が寄せられていた。研究チームがこれほど多くの提供者を対価の支払いなく募集できたことに、驚きを隠さない専門家もいる。3月下旬に韓国生命倫理協会は、この問題を検討するための委員会を召集した。「現時点では推測の域を全く出ないが、若い女性研究者や利害関係のある女性など、立場的に弱い提供者が含まれていなかつたかどうかについて調査を実施したい」。こう語るのは、同協会の理事を務めるウルサン大学の医療倫理学者Young-Mo Kooだ。

同協会は国人権委員会に対し、HwangとMoonの研究における複数の点について調査を行うように働きかけている。疑問視されている内容としては、卵子提供者の募集の経緯や、今回の計画で倫理面の承認を与えた各施設内の倫理審査委員会が適切に手続きを踏んでいるか、といった点があげられる。国の予算で運営されている同委員会は、調査を実施するかどうかの判断を5月21日までに下す予定である。「この問題は扱いに注意を要す

る。Hwang博士の実験は、韓国社会で非常に大きく扱われているからだ」と、専門家の立場から同委員会に対して助言を行うYoung Jun Choiは述べている。

問題の扱いに慎重さが求められる背景には、今回の研究を取り巻く倫理的な問題点を憂慮する国内の一部の科学者の反応がある。「政府が今回の研究を礼賛している状況では、倫理面に敢えて異議を唱えようとする者はいないだろう」と、ソウル国立大学の地位の高いある生物学者は語っている。「多くの研究者は、科学分野の学生数が少ないとについても不安に考えているので、現在の熱狂的状況に水を差したくないと考えている。我々にはヒーローが必要なのだ」

### 圧力を受けて

現在のところ、ヒトクローンの作製に関するHwangの研究は一時中断している。昨年12月に承認された法律では、ヒトの卵細胞を使用して行われるすべての研究は、事前に政府の委員会による許可を求めるところではある。この法律が発効するのは2005年1月からだが、ライセンス供与機関が整備されるまでは実験の続行を見合せたいとHwangは語っている。「コンセンサスが得られれば、社会全体の支持を得て研究を続けられるだろう」と、彼は言う。

しかし彼を批判する人々は、*Science*誌の論文が既に国民のコンセンサスを得られるものではないと指摘している。「Hwangは社会的な承認を得ていなかった」と語るのは、韓国の有力な人権擁護団体の一つ「参与連帯」の科学部門の代表を務めるJae-kak Hanだ。

現在問題視されていることから、Hwangは自分たちの研究が適切な倫理ガイドラインに従っていたことを明らかにせよという圧力となっている。ガイドラインに従つていなかつたという何らかの証拠が明らかになれば、Hwangが進めようとしている治療目的のクローン研究が頓挫しかねないし、世界中のこの手法への反対派を勢いづかせることになるだろう。

### David Cyranoskiはネイチャーのアジアパシフィック特派員

- Cyranoski, D. *Nature* **426**, 743 (2003).
- Hwang, W. S. et al. *Science* **303**, 1669–1674 (2004).
- Chen, Y. et al. *Cell Res.* **13**, 251–263 (2003).
- Cibelli, J. B. et al. *J. Regen. Med.* **2**, 25–31 (2001).

Nature Publishing Group  
makes an IMPACT



インパクトがある雑誌は、

*Nature* です。

2002年度、*Nature* のインパクト・ファクターは30.432でした。

もちろんmulti-disciplinaryジャーナルのナンバー1です。



GETTY IMAGES

## 月と火星の探査はロボットとともに

ブッシュ米大統領は、月面基地を建設し、火星に人間を送るという大胆な将来構想を打ち出した。だが実現させるには、宇宙飛行士はさまざまな作業をロボットに助けてもらわなければならないだろう。米航空宇宙局(NASA)にはその技術があるのだろうか。Tony Reichhardtが報告する。

原文：*Planetary exploration: A job for the droids?*

Nature Vol.428(888-890)/29 April 2004; www.naturejpn.com/digest

1 960年1月、スイスの物理学者Jacques Piccardと米海軍大尉Donald Walshは、海の最深部に人類で初めて到達した。潜水艇「トリエステ」に乗った2人は、水深11キロのマリアナ海溝の泥質の海底で20分間を過ごした。トリエステは、海面よりも1,000倍大きい水圧から2人を守った。2人は帰還の際、歴史的な航海の記念に、米国旗を入れた重しきのプラスチック容器を海底に残した。

それから44年。海の最深部に再び潜ろうとした者はいなかった。その代わり、無人の潜水艇が使われてきた。有人潜水艇を強く擁護する研究者はいるが、深海調査のほとんどは

ロボットに任せられるようになった。同じような傾向はほかでも見られる。沖合の油田の試錐から軍事偵察にいたるまで、単調な仕事や汚い仕事、危険な仕事はロボットが引き受けることが多くなっている。

宇宙でも、同じような変化が起きるのだろうか。宇宙では有人探査のコストと危険性は海よりもはるかに大きい。ぱっと見には有人宇宙飛行は魅力的なイベントなので、宇宙と海とでは事情が違うように思えるかもしれない。ブッシュ大統領が示したNASAの将来構想は、1972年(アポロ17号の飛行時)以来初めて、地球近傍を回る軌道の外に人間を送る

計画を打ち出した。宇宙飛行士を送り出すことが、宇宙の探査で最善の方法かどうかについては、とりわけ科学者の間で懐疑的な人が多いにもかかわらずに、だ。しかし、「アポロ計画とは異なり、今回はロボットも主役になるだろう」とNASAの上級職員は言う。NASAの長期計画立案を担当する「スペースアーキテクト」であるGary Martinはこのほど、「実際に火星に行くときは、仕事のほとんどはロボットとともにすることになるだろう」と米国科学アカデミーの宇宙科学研究委員会で述べた。

## 予算削減の嵐

南カリフォルニア大学(同州ロサンゼルス)のロボット工学者Peter Willは、この意見を歓迎する。ロボット工学界のベテランであるWillは、IBMの最初の産業用ロボットを1980年代初めに作った人物で、人間の長期月面滞在用の居住室や関連インフラの建設は人間だけではできないと考えている。「すべての作業にロボットが必要だろう」とWillは話す。「結局、スポットライトを浴びるのは人間だけだろう」と彼は認めるが、そのおせん立てをするのはロボットということになりそうだ。

では、NASAは壮大な計画を実現するのに必要なロボット工学の経験と技術を持っていいだろうか。1990年代、NASAは一般的なロボット工学研究にそれほど多くはないものの安定した予算を配分し、ピーク時の1997年には年間2,400万ドルが投入された。この予算は、カーネギーメロン大学(ペンシルベニア州ピッツバーグ)が開発した「ダンテ2」や、NASAのジョンソン宇宙センター(テキサス州ヒューストン)が設計した「ロボノウト」などの計画に使われた。ダンテ2は、8本足の歩行ロボットでアラスカ州の活火山の噴火口内に降りた。ロボノウトは人間型で、宇宙遊泳する宇宙飛行士のロボット助手として設計された。

だがそれ以後、一般的なロボット工学研究へのNASAの支援はなえてしまった。1990年代後半、当時のDan Goldin長官はバイオテクノロジー・ナノテクノロジーのほうに熱心だった。スペースシャトルや国際宇宙ステーションなどの計画も財政上の問題を抱えはじめ、ロボットなど「余分なもの」に使う予算は残っていなかった。メリーランド大学宇宙システム研究所のDavid Akinは、こうした要因が重なって「NASAにおけるロボット工学研究を破壊した嵐」がいかに起きたのかを忘れられない。

これとともにNASAの宇宙科学部門は、重点課題を火星探査計画用の惑星ローバー(探査車)の開発にほぼ絞った。現在の火星ローバー、「スピリット」と「オポチュニティ」の成功はだれもが認めるところだ。だがそのミッションの目標は、今度の「月・火星計画」ほど野心的ではない。スピリットやオポチュニティは主に遠隔制御され、写真を撮影したり、岩に穴を開けたりなど、一度にひとつのかな

り単純な仕事をこなす。この最先端の「徒步旅行者」ロボットを見る限り、自律的な建設ロボットを使って決められた期限までに月面基地を作ることは不可能な任務に思える。

NASAが有人宇宙飛行という目標を達成するためには、ロボット工学研究の優先度をもっと上げる必要があるだろう。これまでの歴史を振り返ると、有人計画が財政面で厳しい局面に入ると、ロボット工学などの先端技術研究はまず最初に放棄されがちだった。「有人宇宙飛行にかかわる人たちは、常に次のミッションのことまでしか考えていない」とAkinは話す。要するにNASAは、宇宙飛行士の安全を確保し、スペースシャトルを飛ばし続けることくらべれば、技術開発は常に二の次とみなしてきた。

## 自律性が不可欠

例えば最近では、2001年にNASAは国際宇宙ステーションの予算が不足していたため、軌道上の修理作業用にAkinが設計したロボットのスペースシャトルでのテストを取りやめた。新しい月・火星計画に向けた人間系技術・ロボット技術プログラム(HRT)の責任者であるJohn Mankinsは「今回はこれまでとは事情が違う」と言う。Mankinsによると、NASAは来年度予算要求で「技術の成熟」のために1億1,500万ドルを計上したという。「技術の成熟」にはロボットシステムをテストし、宇宙空間で性能を実証することも含まれている。だがロボット工学者たちは、歴史は繰り返すかもしれないとまだ恐れている。

人間の手をほとんど借りずに、あるいは、まったく人間の手を借りずに月面基地を建設するというような野心的な目標を設定すれば、NASAの多様な関心をこの分野に集中させることになるだろう、と言うのはカリフォルニア大学バークレー校のロボット工学専門家であるKen Goldbergだ。その結果行われる研究は、「地上での生活に役立つ副産物がほとんどない」(Goldberg)スペースシャトルや軌道上のステーションよりも、日常生活への応用がずっと豊富な技術を育成することだろう。

NASAは、月面居住室の可能性についていくらか研究したものの、それを実際にどうやって建設するかについて詳細な検討はほとんどしなかった、とWillは言う。何トンもの原材料を地球から打ち上げるには、ばく大な費

用が必要だ。居住室の建設には月の土を使うのが最良の方法だろう。さらに、宇宙飛行士を肉体労働者として使うことは、財政面から判断して(また、ほかのいかなる観点からも)賢明ではない。月の原材料を採掘し、溶かし、粉にして、基地の自動組み立て用の部材にするには機械が必要だろう。「そのような機械を設計することは、自律性から機械どうしの協力にいたるまで、ロボット工学のあらゆる側面を推し進めることになるだろう」とWillは説明する。

次世代の宇宙ロボット開発は、米国、日本、欧州で進んでいる本流のロボット工学研究の成果を生かすことになる。NASAエームズ研究センター(カリフォルニア州モウフェットフィールド)のIllah Nourbakhshは「商業ロボット技術は日一日と進んでいる」と話す。たとえば、SONYのロボット犬「AIBO」の最新バージョンは、先進の視覚パターン認識アルゴリズムを使い、未知の環境でさえバッテリー充電器を探し出す。これは、ロボットの自律的動作を実現するための重要なステップだ。

人間の手助けなしにエラーから回復する能力など、ロボットの自律性を高めることはきわめて重要だろう。例えば、今年1月にスピリットが火星表面で停止してしまったとき、地球の操縦者は数日間スピリットの活動を止め、新しいソフトウェアをアップロードしなければならなかった。こうした処置は、月面基地を建設するロボットたちの大型チームでは不可能だろう。「もし、1,000台のロボットの面倒を見なければならぬとしたら、そのためには1,000人の宇宙飛行士を用意するだろうか」とWillは言う。「おそらく、そんなことはしないだろう」

遠隔操作(遠くにいる人間の操縦者がコントロール装置でロボットの動きを指示すること)という方法も考えられなくはない。しかし、地球から月へ電波で命令を送ると、反応が帰ってくるまでに数秒かかるため、この方法は難しい。この時間の遅れは地球-火星間ではさらに大きな問題になるため、専門家の多くは自律的動作しか選択肢がないと主張する。

産業用ロボットは、同じ仕事を同じ環境の中で繰り返すので、完全に自律的に動作する。変化する一定でない環境の中を動き回りながら、物理的で複雑な仕事を協力しながら行うことは、同じ環境よりもずっと難しい課題だ。

さらにその環境が月面(小さい重力、いたるところにあるちり、地球外環境のそのほかの物理的特徴がともなう)となると問題はもっと多くなる。

### 協調プログラムを開発

それでも、進歩はある。スタンフォード大学(カリフォルニア州)のOussama Khatibらは、予測できない「現実世界」の環境の中で、かさばる物を運ぶことのある仕事に対して、ロボットどうしが協力したり、ロボットと人間が協力したりするためのアルゴリズムを作ろうとしている。NASAジェット推進研究所(JPL、カリフォルニア州パサデナ)の研究チームは、長い横材を一緒につかんで運ぶロボットたちを作った。さらに、太陽電池パネル群を包みから取り出し、展開するといった単純な仕事でロボットたちが協力して働くためのコンピュータープログラムを開発した。しかし、こうした成果も月面基地を組み立てることに比較すればわずかな前進にすぎない。目標を実現しようと思えば、NASAのロボット研究開発予算を少なくとも1ケタ増やす必要があるだろう、とこの分野の専門家は話す。それは多額の研究資金ではあるが、計画中の月・火星計画で必要となりそうな数百億ドルの予算の一部にすぎない。

Goldbergらロボット工学者は、新しいロボット技術を実際に宇宙に送る前にテストすることができる地上の試験設備の整備などを含め、大学を拠点とする幅広い研究プロジェクトをNASAに展開してもらいたいと考えている。こうした着実なアプローチこそが、月面基地の建設といった大きな目標の実現につながる。「共通の目標に向かって研究者がそれぞれの研究成果を持ち寄ってテストできるような、壮大な挑戦を行うのはすばらしいことだろう」とGoldbergは話す。

NASAの計画は、早ければ2015年に月ミッションを行い、その約10年後に火星への有人飛行を目指すことを掲げている。それまでに火星基地建設と資源採取用のロボットチームは、人間の探検者のために準備をしておく必要があるだろう。この次世代の宇宙ロボットは多くの新しい技能を必要とするだろうが、決定的に重要な特徴の一つ(すなわち自律的な走行)について少し考えただけでも、まだどれほど多くの進歩が必要かがうかがえる。

火星探査では、NASAのもっとも優秀なローバーでさえ、火星表面を動き回る速度はまだ苦痛に感じるほど遅いことが分かった。NASAのSean O'Keefe長官はこのほど開かれた公開フォーラムで「将来の火星探査者は、スピリットとオポチュニティが2ヶ月で集めたのと同じだけの量の試料を、8時間の作業1回で集めることができるだろう」と述べた。それに向けての第一歩として、JPLのエンジニアたちは火星ローバーに新しいソフトウェアをアップロードし、ある範囲の地形が安全に横切ることがどうかを今までより独自に決定できるようにし、ローバーが1日に移動できる距離を数メートルから数十メートルに増やした。

### 砂漠を駆けるローバー

勇気づけられる話がある。地球上の火星に似た地形で、ずっと遠くまでもっと速く走行するロボットが開発されているのだ。オクラホマ大学のロボット工学者David Millerは、「SR2」という名称の太陽電池で動く自律的なローバーを、カリフォルニア州の砂漠でテストした。このローバーは、人間の操縦者が一つの命令を与えるだけで、人間の手助けなしに1キロを超える距離を走行できる。カーネギーメロン大学の「ヒュペリオン」というローバーも、チリのアタカマ砂漠で同程度の距離を自律的に走行した。「ゾーイ」という次世代ローバーは今春、アタカマ砂漠で生物学的調査を行うことになっている。人間の操縦者が火星で想定される状況に似せて、遠くのベイスキャンプにいることになっている。

その一方でNASAは、2009年打ち上げ予定の数十キロを動き回れる可能性のある長距離火星ローバーの計画を練っている。地球外文明探索計画(SETI)研究所(カリフォルニア州マウンテンビュー)の惑星科学者Nathalie Cabrolは、長距離惑星ローバーには斬新な探査戦略が必要だと言う。例えば、広い場所でサンプルを採取する場合、これまで以上に広い地域をカバーする必要があるので、現在の火星ローバーのように興味深い岩を見つけたらいつも停止するというわけにはいかないかもしれない。Cabrolは、ヒュペリオンとゾーイのアタカマ砂漠探査の科学者チームを率いており、現在の火星ローバー運用にもかかわっている。もっとも最近行われたヒュペリオン

のアタカマ砂漠での走行では、科学的データの収集に長距離ローバーがどれほど有効かが証明された。エームズ研究センターにいた科学者たちはローバーからのデータだけを使って、その場所の地質を「驚くほど高い」精度で知ることができたとCabrolは話す。

NASAの惑星ローバーが着実な進歩をとげる一方で、自律的ロボットによる宇宙探査の研究は米国防総省から歓迎され、支援されている。軍が自律的走行に关心を持つのは、人間が乗っていないなくても敵陣に入り込むことができる車両が必要だからだ。国防総省国防高等研究計画局(DARPA)主催のイベント「グランドチャレンジ」は、ロサンゼルス～ラスベガス間の228キロのレースで、完全に自律的な地上車両の開発奨励を目的としている。だが今年3月に行われた第1回レースは、始まるやいなや終わってしまった。スタートラインから12キロ以上進めた車両がなかったためだ。それでもロボット工学者たちは、レースによってロボット開発に关心が高まり、この分野の発展につながるだろう期待している。

ロボット工学者たちは、レースの結果に驚いたり、落胆したりはしなかった。もっとも遠くまで進んだカーネギーメロン大学の「サンドストーム」は、故障するまで毎時15マイルの目を見張る平均速度で進んだ。この研究チームは2005年10月の2回目のレースに備え、すでに航行アルゴリズムを改良中だ。

そうこうするうちにロボットたちは、これまで宇宙飛行士頼みだったハッブル宇宙望遠鏡の修理という晴れ舞台で、ロボットにもその能力があることを証明するチャンスを得るかもしれない。NASAは、昨年のスペースシャトルコロンビア号事故をふまえ、ハッブル宇宙望遠鏡の5回目の点検・修理のために宇宙飛行士を送ることは危険すぎると判断した。このためNASAは、次回の点検・修理ミッションをどうすればロボットで行うことができるかについてアイデアを募った(Nature 428, 353; 2004を参照)。

### 有人・無人の垣根を低く

メリーランド大学のAkinらの研究チームは、まさにその課題のためのロボットを長きにわたって開発してきた。NASAの研究予算でAkinが開発した「レンジャー」と「ヘラクレス」は、アームと交換可能なツールを備え、人

間によって遠隔操作されることも、自律的に動作することもできる。1980年代から行われている水中での大規模テストでハッブル宇宙望遠鏡修理のシミュレーションを行ったところ、ロボットは宇宙遊泳中の宇宙飛行士の手助けをすることができ、かなりの時間さえ節約できることを Akin は証明した。2002 年の修理ミッションの作業を Akin が分析してみると、宇宙飛行士は 1860 の個別の作業をしたが、うち 82% は単純なツールを使えばロボットにも可能だったことが分かった。さらに複雑なツールを使えば、すべての作業がロボットの能力の範囲内だった。

Akin が開発したシステムは、いずれも宇宙空間での動作が実証されていない。また、これまでの開発計画では、常に宇宙飛行士とともに働くという想定を優先してテストが行われた。修理作業すべてをロボットが行うとなると難易度がさらに高くなるが、それでも可能だ、と Akin は考えている。

ハッブル宇宙望遠鏡の点検・修理という注目を集めミッションで成功を収めれば、NASA のトップも、月・火星計画でロボットにもっと重要な任務を与える必要があると考えるようになるかもしれない。NASA は有人宇宙技術と無人宇宙技術の垣根を低くする必要性をよく理解していると、Mankins は言う。有人技術と無人技術の区別があるため、ロボット工学は軽視され、予算削減の際に犠牲となってきたのだ。

だが、今回は基礎研究への予算投入は不可欠だ。有人火星ミッションに必要と見積もられている 600 億ドルのほとんどがロケットと生命維持システムの開発に使われるにもかかわらず、ロボット技術開発にも数十億ドルを回すべきだ。

「将来、人間を宇宙に送るなら、彼らは相当に利口な機械に囲まれていなければならぬ」と Will は話している。 ■

**Tony Reichhardt**はワシントンDCを拠点として本誌に寄稿している。

Robonaut

robonaut.jsc.nasa.gov

Carnegie Mellon University Field Robotics Center

www.frc.rti.cmu.edu/project

DARPA grand challenge

www.darpa.mil/grandchallenge

Survey of space robotics

www.traclabs.com/~korten/publications/isairas\_space\_robots.pdf

# 「きれいな核兵器」という妄想

米国防総省は新型核爆弾開発計画を推進できるのか。

原文 : *Dreaming of clean nukes*

Nature Vol.428(892)/29 April 2004; www.nature.com/nature

Michael A. Levi

米国核兵力は、今日の安全保障問題に 対処するのに十分だろうか。米国防総省はそうでないと考えているようである。同省国防科学委員会(DSB)が今般作成した報告書<sup>1</sup>では、「従来型よりも周辺への被害がはるかに小さい核兵器が必要である」と主張し、地下施設攻撃用の新型核兵器の開発計画を支持している。

ある意味でこうした、地下施設を攻撃するための「バンカーバスター爆弾」は何ら新しいものではない。1960 年代に配備が始まった B-53 爆弾は、地下標的を破壊することができるが、数十万平方キロメートルにわたって死の灰をまき散らしてしまう。今回の計画が目指すのは、放射性降下物が少なく攻撃力がさらに高い兵器の開発である。しかし、DSB が示す見通しは楽観的過ぎるとともに、通常兵器の相対的な潜在能力が十分に検討されていない。

米国エネルギー省は新型兵器について、現在のところ研究は進めたいが開発を望むものではなく、開発能力を維持することが目的であると強調している。しかし、この説明には疑惑を抱かざるを得ない。2002 年 3 月に漏れたブッシュ政権の『核態勢見直し』(Nuclear Posture Review)<sup>2</sup>には核兵器への積極姿勢が記されており、新型核兵器の潜在的必要性が示唆されていることから、DSB は配備を公然と検討している。

現在のところ議会は懐疑的であり、核兵器予算は削減されているが<sup>3</sup>、DSB の研究によつてこの流れは変わる可能性がある。DSB の報告書の内容は、新型核兵器によって米国の軍事力がいかに強化されるかについて、気をそそるほど詳細につづられている。だが、よく考えればその主張は浅薄なものであり、政策立案者はこれに惑わされてはならない。

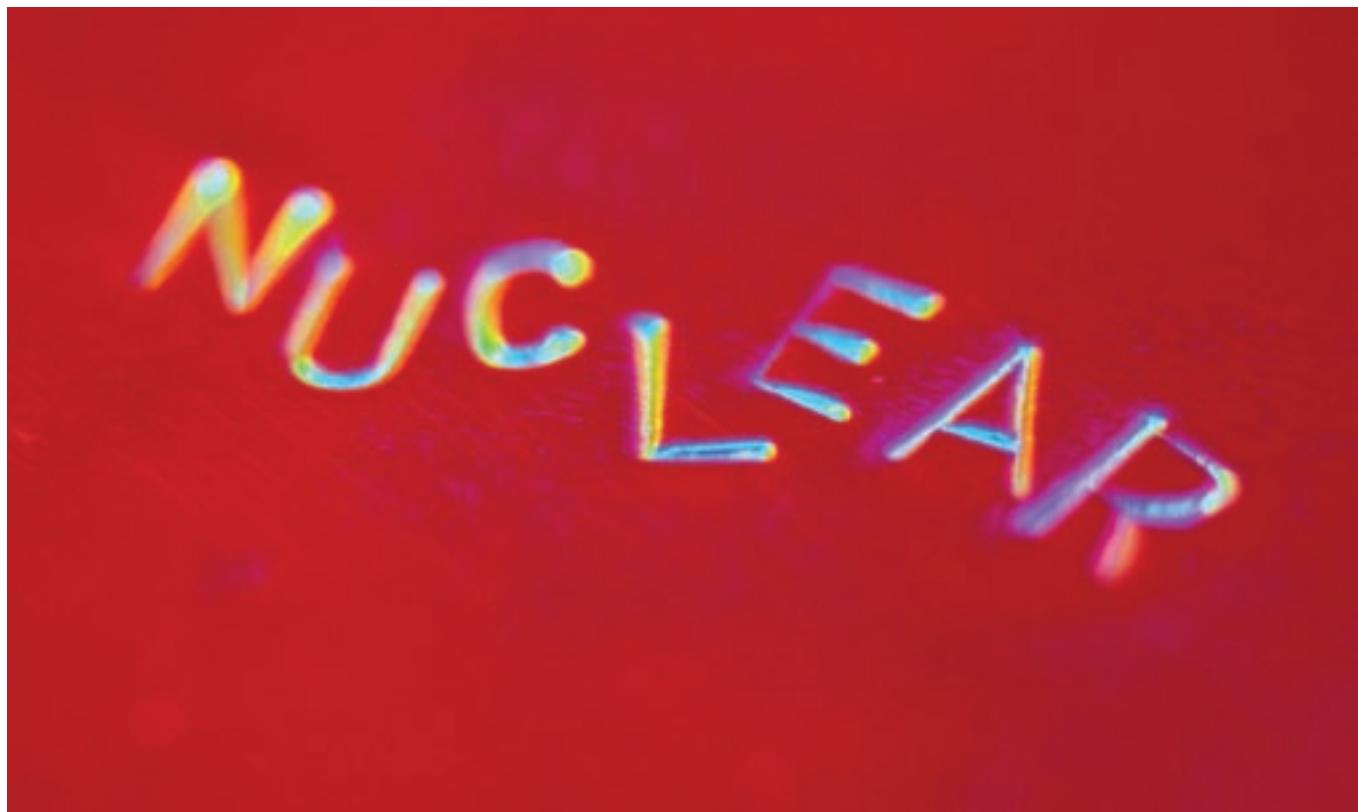
DSB の報告書は、冒頭で非核バンカーバスター兵器の改良について素晴らしい提言をし

ている。実際、核兵器にしかできないともいわれる攻撃について、DSB は同等の効果を上げる非核兵器を示している。その上で、新型核爆弾を使えば、近隣住民を多数殺傷することなく、いかに地下施設を破壊することができるかが例示されている。その説明は、かつてないほど長く詳細であるのはいいが、批判の余地もさらけ出している。

核兵器か通常兵器かによらず、現在のバンカーバスター爆弾は、弾頭の爆発前に地中を貫通するミサイルに依存している。核兵器の地中爆発は破壊力が大きいため、爆弾を小型化する必要がある。深度が十分で規模も十分に小さければ、爆発は地中に封じ込められる可能性があり、放射性降下物の発生を防止できるだろう。報告書では、100 トン核爆弾は、爆発前に地中 30 ~ 50 メートルまで到達させれば、爆発を完全に地中に封じ込めることが可能であろうと結論づけている。400 トン爆弾については地中 50 ~ 55 メートル、3,000 トン爆弾については地中 100 メートルとされている<sup>1</sup>。DSB の主張では、いずれの爆弾も、爆発前到達深度の約 2 倍の深さにある施設が破壊可能とされている。

このような結論は信用できない。この報告書の研究で使われたのは、冷戦時代にネバダ州で実施された核実験のデータ<sup>4</sup>である。だが、ネバダの実験では放射性降下物を防止するため、爆弾を埋めた穴が入念に塞がれていた。これに対して、地中を貫通した核兵器の上には大きな穴が開いており、爆発を封じ込めるのは困難ないし不可能と考えられる<sup>5</sup>。

また、爆発の封じ込めに関するいかなる議論も標的地域の地質によって違ってくるが、DSB は標的の選択に言及しておらず、その結論は現実に即したものというより、ただの総論という感じがする。例えば、到達必要深度をネバダの実験から決定する標準的方法 (DSB が採用していると考えられる方法) は、水分量の低い地質で有効なものであり、水分



GETTY IMAGES

量の高い地質での爆発で放射性降下物を防止するにはさらに高い深度が必要になるはずである。

この報告書が主張している破壊力にも疑念がある。DSBは、「硬式」化した地下施設の中身について、破壊は無理でも爆発で使用不能にすることを求めている。この種の標的には衝撃圧500バールが必要であるとされている。しかし、これでは敵の指導者や備蓄兵器に損傷を与えられないことも考えられる<sup>6</sup>。ここに矛盾がある。報告書の主張では、通常兵器の破壊力不足が核兵器の必要性の主たる根拠となっている。だが、同じ深度にある敵兵力を核兵器によって(使用不能化するだけではなく)破壊するためには、爆発力を5~15倍にする必要があると考えられるが、このとき爆発の地中封じ込めは不可能となる。放射性降下物の発生しない設計を追求すると、破壊半径を50パーセント以上縮小することが必要となる。しかし、地中封じ込め型核爆弾の破壊力をそのように小さなものとするのであれば、通常兵器の弾頭を高深度に到達させることを目指すべきではないか。

このことは、DSBがうたう到達深度が楽観的過ぎたり<sup>4</sup>、変に慎重であったりするという第三の問題を提起するものである。また標的

をはっきりと言わないことで、誤解を招きかねない。石灰岩であれば30メートル潜れる爆弾でも、硬度の高い花崗岩に30メートル潜れるわけではない。ほかにもこの報告書では、複数の爆弾を同一地点に投下して穴を深くする可能性を検討しているが、これによって封じ込めがさらに困難になる可能性は無視されている。

また、到達深度の増大についてもっともらしい方法を提言する場面では、疑問を投げかけたままそれに答えていない。これらの技術を利用すれば、通常兵器をさらに深くまで到達させることができ<sup>7</sup>、核弾頭が不要になるのではないかという疑問である。ある箇所では、50メートルを貫通する核兵器が地中100メートルの標的を破壊できることを説明しておりながら、そのあと同じページで、別のミサイルが地中100メートルまで到達可能と述べている。そうであれば、おそらく前者は無用の長物となるであろう。実際、キロトン級爆弾の封じ込めが可能な貫通方法を作り上げようとするあまり、通常兵器による代替の可能性が補強される結果となっている。

つまり、この論争をせんじつめれば、こういうことだ。長年にわたり核兵器科学者は、核兵器の威力を高めながら汚染を抑制しようと

いう地中貫通計画の実現を夢見て、大いに創造性を發揮してきた。発案の多くは結実することがないと考えられるが、それでも容認されている。一方、通常兵器の設計者は激しい競争と精密な審査を余儀なくされている。核兵器の可能性が無限に見えることがあるのも無理はない。しかし、非核兵器と同じ基準で審査すれば、核兵器優位の事例を作り上げるのははるかに困難なことである。■

筆者の Michael A. Levi は、ブルッキングス研究所 (Brookings Institution, 1775 Massachusetts Ave NW, Washington DC 20036, USA) に所属している。

1. Report of the Defense Science Board Task Force on Future Strategic Strike Forces (Department of Defense, Washington DC, 2004) online at [www.fas.org/irp/agency/dod/dsb/fssf.pdf](http://www.fas.org/irp/agency/dod/dsb/fssf.pdf)
2. Nuclear Posture Review (US Departments of Defense and Energy, Washington DC, 2001).
3. Kucia, C. *Arms Control Today* **33**, (No. 7) 37 (2003).
4. Nelson, R.W. *Sci. Global Secur.* **10**, 1–20 (2002).
5. Glasstone, S. & Dolan, P.J. (eds) *The Effects of Nuclear Weapons* 3rd edn, 261 (Departments of Defense and Energy, Washington DC, 1977).
6. May, M. M. & Haldeman, Z. *Effectiveness of Nuclear Weapons against Buried Biological Agents* 19 (Stanford University, Palo Alto, 2003).
7. Levi, M. A. *Fire in the Hole: Nuclear and Non-Nuclear Options for Counterproliferation* (Carnegie Endowment for International Peace, Washington DC, 2002).

# 性転換した学者の説く、多様な性のあり方

原文：*Sexual diversity and the gender agenda*

Nature Vol. 429 (19-21)/6 May 2004; www.naturejpn.com/digest

## **Evolution's Rainbow: Diversity, Gender and Sexuality in Nature and People**

Joan Roughgarden

University of California Press: 2004. 472 pp.

\$27.50, £18.95

**Sarah Blaffer Hrdy**

**本** 書は一つのテーマを理路整然と追求するのではなく、互いに絡み合った三つのテーマの間を行き来する語り口になっている。第一のテーマとして、自然界に存在する性の多様性をもっと理解してほしいと、著者は心の底から熱烈に訴える。ゲイ、レズビアン、バイセクシュアル、トランスジェンダーなど「男性か女性か」という二者択一の分類にうまく当たはまらない多くの人々にもっと寛容になってほしいと、心から願っているのだ。

著者のJoan Roughgardenはスタンフォード大学の著名な生物学者で、かつては「John」という名の男性だったが、今は女性として生きるトランスジェンダー。本書では、心に苦痛を感じてからジェンダーを変えて生きる決心をするまでのケーススタディがいくつも紹介されており、読者の心に強く訴えかけている。あるトランスジェンダーの女性は、こう語っている。「これまでの人生で築き上げてきた仕事、親交、家族、健康、そして将来をすべてさらけ出しました。それをこの先も持ち続けられるかは、運命が決めるのだと思いました。人生を最初からやり直すようなものです」

また本書には、自分がジェンダーを変えたことを上司に報告して、なおかつクビになら

ないための実用的なアドバイスという、なかなか得難い情報も記されている。ネイチャーの読者であれば、著者の解釈や政策提言の全てに同意できないとしても、本質的に人権問題といえるジェンダーをめぐる諸課題の主旨に異議のある向きはほとんどいないだろう。

第二のテーマは、人間社会全体と自然界にみられる性とジェンダーの多様性について書かれ、私にとっては非常に興味深い。本書にはこの点に関する情報が豊富に集められ、本の中にもう1冊の独立した本が存在している感じだ。

まずは、古代ギリシャの同性愛者、ローマ帝国の宦官、インドのヒジュラ、そしてアメリカ先住民の「二つの精神」(訳注:two-spirits=アメリカ先住民に由来する言葉で、自分には二つの性があると主張する人々のこと)に関する小エッセイである。続いて著者は、人間のジェンダー研究に相当する動物学上の研究について駆け足で解説を加えている。ここでは、雌から雄に変わる魚、乳腺を備えた腹袋とペニスを持つ半陰陽のカンガルー、個体群の最大16%が輸精管と輸卵管を両方備えているカンガルーネズミ、ペニスから仔を出産する半陰陽のクマ、雌雄同体のクジラ、ヘテロセクシュアルよりも子育ての上手なホモセクシュアルのコクチョウが紹介されている。

このようにジェンダーがあいまいになっている生物の事例は、性差に関する文献に詳しい読者にとっては旧聞に属するものもある

ば、まったく初耳のものもあると思われる。本書に、まばゆいほど斬新な部分は少ない。例えば著者が、自分が胚だった頃の発生過程を想像して語っている部分くらいだ。著者はできるだけの機会をとらえて、ジェンダーに幅があるのが自然であることを強調する。トランスジェンダーの人々は1,000人に1人の割合で存在すると、著者は推測している。そして著者は、従来の考え方に対する反対して、トランスセクシュアルが異常ではない可能性が高いと主張し、本書全体を通じて、適応によってジェンダーがあいまいになったと思われる事例(例えば雌のように見える雄の魚)を示そうと苦心している。

本書は、自然界における性とジェンダーの多様性に関する情報を集めた書物としては、内容が最も豊富で、信頼性も最も高い。このような書物を切実に求めている研究者や一般読者に応える著作といえる。トランスジェンダーの生き物に関する情報を切望する読者や、私のようにゲイ・プライド・パレードやそれが象徴する社会の変化に大きな感動を覚える読者は、本書によってきわめて大きなインパクトを受けるだろう。それだからこそ、第三のテーマは、もっと注意深く考察してほしかった。

著者自身も、この第三のテーマを読者に最も伝えたい部分と考えている。ここで著者は、「多様性を抑圧、否定してきた学界を告発する」根拠を提示するとともに、ダーウィンの性選択理論を否定する理由を示している。「自然



CHRISTIAN DARKIN

「事実」がダーウィン理論の誤りを証明している、と著者は主張する。著者は、性行動が基本的には協同作業であり、戦いではなく、受胎に至らないことが多い点を強調している。「私たちは、これまで自然に身につけてきたジェンダーとセクシュアリティの概念に、大きな欠陥があることに気づき始めた」と著者は記している。ダーウィンの性選択理論には大きな欠陥があるため、著者自身の理論を採用すべきだという主張だ。しかし著者の批判や理論よりも、そのタイミングのほうが私にとっては印象深かった。この進化生物学者の著者は女性として生きるようになったわけだが、そうなって初めてこれらの問題点に気づいたというのだろうか。

配偶子のサイズ(大きな卵子と小さな精子)に基づく二者択一のジェンダー体系から出発して、体サイズ、行動や配偶戦略の雌雄差を説明するのは適切ではない、と著者は主張する。雄を情熱的な性、雌を内気な性というステレオタイプに当てはめたり、雌による選択における社会的あるいは生態学的な制約を無視することは望ましくない。社会的または発生的状況を軽視して遺伝子を過度に強調したり、受胎しないという選択を犠牲にして「最良」とされる遺伝子の探求に重点を置くこともいかがなものか、と。私も著者には大賛成なのだが、いずれの点についてもかなり古いテーマという感じがする。

これらの問題に「気づき始めた」どころか、すでに1970～1980年代には女性の社会生物学者による議論が行われていた。進化論を拡大して、より多くのレベルでの選択圧を考察し、選択圧の考察対象を(例えば雌や若年個体に)広げることが提唱されていたのだ。本書の中では、このような議論については一部記述されているが、その知見によって既に現われている影響については検討されていない。

進化論の修正を求める動きは進化論の周辺部で始まってはいるが、(紆余曲折を経た)実際の変化は進化論者の間から生まれている。こうした過程は、科学がどう発展するのかを示す代表例といえる。長期的にみて研究者(特に若手の研究者)にとっては、性の多様性に関する情報を隠すよりも、積極的に研究して名声を築いたほうが得るもののが大きいのだ。

このような時代になるまでには、たしかに長い道のりだった。だが、これまで学界の主流

から遠ざけられていた研究者たち(Katherine Ralls, Mary Jane West-Eberhard, Patricia Adair Gowaty, Barbara Smuts、そして私を含めた数多くの研究者たち)が十分な影響力を持つようになり、その考え方に対する他の研究者が耳を傾け始めると、進化論のスケールは大きくなりはじめた。新しい世代の社会生物学の研究者たちは、私たちをさっさと追い越して、広がりつつあるフロンティアの開拓に突き進んだ。理論が誤っているというよりは理論が不完全な部分や拡大適用されていた部分については、既に修正が始まっている。同様に、本書も性の多様性という広大な連続体におけるトランスセクシュアルという分野の研究を活性化させることだろう。

ただ私は、本書が次の二つの点で読者を誤った方向に導くのではないか、と懸念している。第一に、「一方の性を持つ個体どうしが生殖目的での他方の性との結びつきを目指して競争する」という説明は、それすべてを説明できないにせよ、今でもしっかりとした説明の枠組みとして機能している。第二に、研究者の仕事の進め方は今でもかなり誤解されているが、著者の「告発」が火に油を注ぐのではないかと、私は懸念している。

たしかに多くの医療関係者は、トランスジェンダーであることの意味をなかなか理解できなかった。また独創的な外科的治療や精神科的治療によって命を落とした人々もいた。一部の絶望的なほど無分別な研究者は、いい加減な科学の普及者たちにそそのかされ、その支援を受けて、今でも「一流の科学文献にジェンダーのステレオタイプを忍び込ませて、

その客觀性を損なっている」。ダーウィン主義者たちが問題意識を共有するまでの時間も、期待したよりも長くかった。そして進化生物学の研究者も、社会による偏見の原因やそのような偏見が是正されたプロセスを、必ずしも常にオープンに認めてきたわけではなかった。進化生物学の世界にも意図地で独創的な人々がいるのだ。

だが本書がスポットライトを当てた偏見は、誤った学説や現実を隠蔽するための学説よりも、むしろ人間くさから来る職業的な原因によるものだ。私たちには、物事を自分たちの期待(時には欲望)にそった姿としてとらえる傾向があり、偏見に満ちた見方を議論の前提に組み込んでしまう。

生物科学や社会科学では、一般に認められている以上にエンパシー(誰の利害と共に感ずるのかということ)が大きな役割を演じている。偏見を学習することが人間の心理に組み込まれ、自分自身(自分のジェンダーを含む)の利益に反する事象に気づかないようになっているのかもしれない。だからと言って、そうした偏見は性選択理論を否定する理由にはならず、性選択理論を持つ研究者の間で多様性を促すための理由にしかならない。それは性やその他の自然の全体像を研究するために、よりよいことなのだ。本書が、この目標に向けたさらなる一步前進となればよいのだが。■

評者の Sarah Blaffer Hrdy は、カリフォルニア大学デービス校人類学科(the Department of Anthropology, University of California, Davis, California 95616, USA)の名誉教授。最新の著書に、*Mother Nature: A History of Mothers, Infants, and Natural Selection* がある。

## essay concepts

# 見せ物の解剖死体はいらない

もはや解剖死体を見せるだけでは、学生や一般人に対して、現代解剖学の意義を十分に説明することはできない。

原文 : *The public cadaver*

*Nature* Vol.428(805)/22 April 2004; www.naturejpn.com/digest

Horst-Werner Korf and Helmut Wicht

**解剖** 剖学の知識が現代医学を支えている。  
それは人間の構造的および生物学的

な性質を理解するのにも欠かせない。

解剖によって身体が分析され、その構造や機能や機能不全についての洞察が得られる。

解剖学者は、その結果を医者や医学生——ひいては自分の体に興味を抱いているあらゆる人々——に伝えなければならない。

解剖学者はいつでも、科学的な客観性と世間的な見せ物の間のきわどい綱渡りを強いられてきた。人体の初めての解剖は、紀元前300年にヘロフィロスによって行われたが、それは一般に公開されていた。中世には、ほとんど解剖が行なわれなかったが、やはり公開されていた。17世紀から18世紀にかけて、ヨーロッパの多くの都市で、劇場風の解剖階段講堂が設けられた。そのような講堂で行われた解剖は、開業医や医学生の教育に役立った反面、ほとんど教育的な価値のない見せ物になっていた。

19世紀になると、学生数の増加、データ量の増加、準備が複雑化して微妙な扱いを必要とするようになった。そしてついに精巧な組織学の装置を必要とする顕微鏡法の登場によって、解剖は、設備の行き届いた実習室や解剖室や大学の階段教室の中だけで行われるようになった。

現代の解剖は、身体を肉眼で検査し終えたら一件落着というわけではない。細胞や分子が、あらゆる生理学的、病理学的な過程の主役とみなされているからだ。解剖学は、もはや静的で記述的なレベルに留まらず、「生きた解剖」のレベルにまで達している。私たちの解剖学の知識は、驚くほどの拡張をみせ、今日では、死んだ体や細胞の空間的な次元をリバースするだけでなく、あらゆる生存プロセスの基盤になる時間的でダイナミックな次元にまで及んでいる。

例えば、概日リズム発生系についての研究は、視床下部の視神経交叉上核にある「体内時計」の場所を探り当て、内因性の生物リズムを昼夜リズムに同調させる神経経路を突き止め、その同調化の原因になる網膜中の光受容器を発見し、時計に時を刻ませる、周期的に発現する遺伝子の発見というレベルにまで達した。こうした進歩の好ましい副作用として、解剖学は、人間を全体論的に扱う数少ない医学分野の一つとして生き残っている。

解剖学は、お金を払ってくれる観衆に対して、階段教室で数時間だけ「見せてお話し」をしていた頃と比べると、格段の進歩をとげた。現在でも解剖は、人間の体を切開し、見える全ての部分を実際に示して、その名称を呼ぶこ

とから始まる。しかし、こうした肉眼による検分は、解剖のカリキュラムの最初の段階にすぎない。カリキュラム全体には「垂直」で全体論的なアプローチが用意されている。すなわち、肉眼で見えるレベル(生体をつかった自己診断と実物説明を含む)、分子レベル(分子生物学の実習コース)、そして、空間的な次元(局所解剖学)から、時間的な次元(発生学や老年医学や進化論的な解剖学)にいたるまで。こうした概念的な統合が、現代解剖学を理解し、教える上での柱になっている。

解剖学を教える立場の人は、他の科目的場合と同様、学生の注目を引き、関心を集めめる必要に迫られる。だが、聴衆がかかわるのは、純粋な目的のためでなくてはならない。すなわち、「知識を伝える」という目的である。これは医学生の場合でもかなり難しいことだが、一般人も自分の体について知ることを望み、情報を必要としている。

だが、安直に古き良き時代の見せ物風の解剖学をそのまま教えるべきではない。解剖学はスリルがあるべきだが、安っぽいスリルを売り込むのは禁物だ。もちろん、Gunther von Hagensが「人体の不思議展」でやっているように、肉眼で見える解剖死体を人前に陳列し、好奇の陳列室を設け、芸術と解剖の歴史を拡げてみせて破裂させて略奪するなど、もってのほかである。現代の科学的な解剖学を社会に示すには、最新の概念を死体と組み合わせることが必要なのだ。解剖死体を理解するには、最新の概念が要求される。これは困難な課題であり、それを達成するには、高度の教授法および、短時間の展示会への参加といったレベルを超えた教師と公衆の双方によるコミットメントが必要になる。

解剖はまた、厳格な倫理規約にのっとって行う必要がある。解剖は人がゆるやかに連續的に物質へと移り変わる領域にまたがっている。最初は自己決定の生きる主体だった肉体があり、最後には切り刻まれた解剖用の組織標本、すなわち解剖学の知識を得るために利用される一個の物体がある。だが、死後に肉体の完全な状態が失われるとしても、その人物の尊厳は残っている。だから、彼らの死体も望みも共に尊重すべきなのだ。科学的な目的のための解剖や臓器の切除は、ドナーの書面による同意を得た場合にのみ行われるべきである。不幸にも、このルールは過去現在を

通じて破られたことがある。最近の例では、カリフォルニア大学ロサンゼルス校・医学大学院に提供された死体の器官が売買されていた疑いがあげられる(*Nature* 428, 243; 2004 を参照)。

このような問題は、非営利的かつ専門的に管理され、高い透明性をもった「遺言による人体プログラム」が必要であることを示している。例えば、私たちが所属する解剖学校では、故人の事前の書類による承諾がなければ、いかなる死体も受け入れていない。お返しとして、私たちには払われるべき敬意をもって死体を運んでいる。私たちも科学的および教育的な目的の場合にのみ、解剖用死体を利用してはいる。そして、私たちも本人の希望があれば、ドナーの死体を丁重に葬っている。

私たちには解剖が必要だが、それは最新の概念、方法、教授法、倫理に基づかねばならない。医学は解剖を必要とする。社会も解剖を必要としている。解剖には観衆やドナーとしての社会が必要なのだ。最も必要なものは、科学的および教育的な価値のほとんどない見せ物まがいの公開死体なのである。 ■

筆者の Horst-Werner Korf と Helmut Wicht は、ヨハン・ウォルフガング・ゲーテ大学の医学部／解剖学教室(Senckenbergische Anatomie, Medical Faculty of the Johann Wolfgang Goethe-University, Frankfurt/Main, Theodor-Stern-Kai 7, Frankfurt D-60590, Germany)に所属している。

#### FURTHER READING

- Haeser, H. *Lehrbuch der Geschichte der Medizin* Vol. 1. (Friedrich Mauke, Jena, 1853).  
 Korf, H.-W. & Stehle, J. H. (eds.) *Cell Tissue Res.* 309, 1–199 (2002).  
 Stukenbrock, K. "Der zerstückte Körper". Zur Sozialgeschichte der anatomischen Sektionen in der frühen Neuzeit (1650–1800) (Steiner, Stuttgart, 2001).  
 Yamaguchi, S. et al. *Nature* 409, 684 (2001).

# 父親のいないマウス

David A. F. Loebel and Patrick P. L. Tam

哺乳動物では、生存可能な子孫を作るには、一般に両親双方からのゲノムが必要とされる。しかし、「インプリンティング」を受けた遺伝子の発現を変化させてやると、父親からのゲノムはなくても済むらしい。

原文：Genomic imprinting: Mice without a father

Nature Vol. 428(809)/22 April 2004; www.naturejpn.com/digest

**動**物の有性生殖では、それぞれの個体は両親からそれぞれひとそろいの遺伝子を受け継ぐのが普通である。だが、植物や大部分の動物では単為生殖によって、父親由来の遺伝子はいっさいなく母親由来の遺伝子だけをもち、なおかつ生存能のある子が生まれる。その例外が哺乳類で、父親が必要とされる。これはなぜなのか。本誌4月22日号p. 860で河野たち<sup>1</sup>は、ゲノム刷り込み(ゲノム・インプリンティング)という現象が父親なしの生殖を阻む障壁であることを示す動かぬ証拠を提示している。

哺乳類では父方と母方両方の遺伝子を併せ持つことが大事だというのは、母系染色体か父系染色体のどちらかだけをもつマウス胚の研究から明らかになった。母親由来の染色体のみをもつ胚では、胚の形成には関与しないが胚の成長を支えるのに必要な「胚体外組織」が十分に発達せず、胚は子宮内に着床してまもなく死んでしまう<sup>2,3</sup>。これに対して、父親由来の染色体のみをもつ胚では発生が進まないが、胚体外組織は比較的よく発達する<sup>2,3</sup>。このことからみて、一部の遺伝子の父方のコピーは胚体外組織の発達に重要であり、また、他の一部の遺伝子では母方のコピーが胎児の発達に不可欠だと考えられる。

この説明として最も説得力があるのは、母系ゲノムと父系ゲノムはまったく対等ではなく、異なる「刷り込み」を受けており、これが胚での遺伝子発現の違いにつながるとする説である。ゲノム刷り込み、あるいは「後成的修飾」により、各遺伝子の2個のコピーに、母親と父親のどちらから受け継がれたかを示す刻印がなされる。これはDNAまたは染色体タンパク質に施される化学的变化であり、細胞分裂をしても受け継がれるが、DNA塩基配列を変えてしまうことはない。

刷り込みを受けるゲノム領域は通常、100万塩基対かそれ以上の広い染色体領域にわたっており、数個の遺伝子の協調した制御にかかわっているらしい。例えば*Igf2*と*H19*はゲノム刷り込みを受ける遺伝子であり、マウスの7番染色体上に100キロ塩基離れて位置している。この2つの遺伝子は相反する刷り込みを受ける。つまり、発現するのは、*H19*では母方のコピー、*Igf2*では父方のコピーである(図1)。発現の調節には近くの数カ所のDNA領域が関与しており、これらの領域は遺伝子発現にかかわるエンハンサー、プロモーター、インスレーター(文字どおり「絶縁体」として働く)。

このインスレーター(境界要素ともいう)は*H19*の上流の*Igf2*までの間にあり、特有のメチル化を受けたドメイン(DMD)であることかが突き止められている。現行のモデルによると、この領域は*H19*の下流にあるエンハンサー要素と協同で働く。母方の染色体上では、エンハンサーを阻害するタンパク質(CCTC)というDNA塩基配列を認識するCTCF)がこのDMDに結合して、エンハンサーが*Igf2*のプロモーターと相互作用するのを妨げ、*H19*の発現に好都合に働く<sup>4,5</sup>。しかし父方の染色体上では、この境界要素のDNAがメチル化されていてCTCFが結合できないため、*Igf2*は発現されるが*H19*は発現されない。

母方ゲノムの後成的修飾は卵細胞成熟の過程で起こる。河野たちは以前の研究<sup>6</sup>で、マウス新生仔から得た未成長期の卵と、完全に成長し成熟した卵とから得た染色体全数を組み合わせた単為生殖胚は、普通の単為生殖胚よりも4日間長く生きられることを見つけていた。1組の染色体を卵形成初期の段階で採ったため、これには母方の刷り込みがまだなされておらず、そのため、正常な胚発生ならば

父系染色体でしか発現されないいくつかの遺伝子を発現させることができたと思われる。

これと同じ技術を用いて河野たち<sup>7</sup>は、ゲノム刷り込み状態をもっと変化させることで単為生殖胚の発生能に影響が出るかどうかを見るため、*H19*遺伝子領域<sup>8</sup>を欠如した未成長期卵の「刷り込みを受けていない」ゲノムが胚の生存能にどんな影響を与えるかを調べた。実際、*H19*のコピーを1個欠いた単為生殖胚は出産予定日近くまで生き延びたが、胎盤の形成不全で死亡した。これらの胚は明らかに、正常胚と同様に1組の染色体からの*H19*の発現がなかった。しかし、未成長期の卵に由来する染色体にはDMDがメチル化されないまま存在しているため、*Igf2*の発現が妨げられたのだろう。

そして河野たち<sup>1</sup>は今回、*H19*と*Igf2*の両方を削除したマウス<sup>9</sup>を使って、同様の実験を行った。彼らはこのマウスを*H19*<sup>A13</sup>マウスと名づけた(図1)。そして、この変異マウスから採取した未成長期卵細胞の染色体と、正常マウスの成熟した卵細胞から得た染色体とを組み合わせた。理論的には、未成長期卵細胞のゲノムから*H19*を削除することで、父親由来*H19*の不活性化と同じ効果が得られるはずである。そして、DMDも欠如しているため、阻害タンパク質CTCFはDMDに結合できない。その結果、通常の父親由来の*Igf2*と同じように、この場合の*Igf2*も発現できるはずである。ここまで予想はされていたものの、その結果はなんとも驚くべきものだった。見た目も正常な雌が無事に2匹生まれ、そのうち1匹は成体まで成長して、妊娠・出産までやってのけたのである。

さらなる驚きが、マイクロアレイ法で1万1,000個を超える遺伝子の発現を解析した結果からもたらされた。この生き残った*H19*<sup>A13</sup>

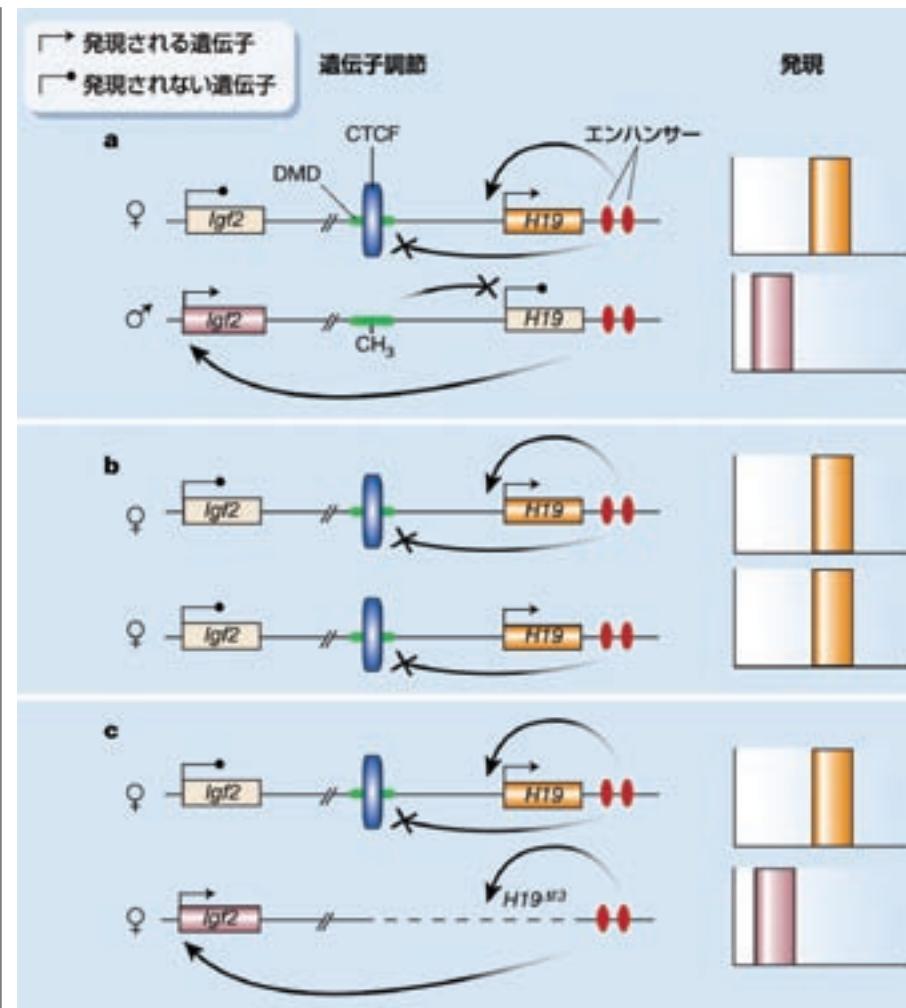


図1 もう雄はいらない?

a, *H19*と*Igf2*の2つの遺伝子はマウスの同じ染色体上にあり、相反する「刷り込み」を受ける。つまり、正常な胚では*H19*は母系染色体にあるコピーのみが発現し、*Igf2*は父系染色体にあるコピーのみが発現する。母系染色体上では、タンパク質であるCTCFが特異的メチル化ドメイン(DMD)に結合して、*Igf2*にエンハンサーが接近するのを妨げる。すると代わりに*H19*が発現される。父系染色体ではDMDがメチル化され(図中でCH<sup>3</sup>として表記)、そのためCTCFは結合できず、したがってエンハンサーが*Igf2*に近づいて*Igf2*が発現され、*H19*は発現されない。図は参考文献5から改変したもの。

b, 通常の母系ゲノムを2個もつ单為生殖マウスでは*Igf2*が発現されず、胚は死んでしまう。

c, 河野たち<sup>1</sup>は、完全に成長しきった卵(母方のゲノム刷り込みがすべて終わっている)からの染色体と、DMDと*H19*を取り除いた未成長期の卵(*H19*<sup>A13</sup>)の染色体とを組み合わせた。これらを削除することで、父系*H19*の不活性状態が擬似的に作り出され、*Igf2*の発現が可能となって、生存能のある成獣マウスが得られたわけである。

をもつ单為生殖マウスでは、1,000個を超える遺伝子の発現レベルが、*H19*の完全なコピーを2個もつ单為生殖マウスのものよりも、正常に受精した胚のものに近かったのである。遺伝子発現に現れたこの広範な作用は、*H19*のコピーが1個欠如したことの直接的な効果だとみなすことはできない。一つの可能性として考えられるのは、遺伝子発現に見られた変化が、*H19*<sup>A13</sup>をもつ单為生殖マウスの良好な生育がもたらした間接的な効果だというこ

とだ。しかし、わずか2個の刷り込み遺伝子の発現を変化させることでゲノムの残り部分に波及効果を及ぼしうるというのには、びっくりさせられる。

なかでも興味深いのは、刷り込みを受ける他の遺伝子の発現に及ぼす影響である。正常に発育する*H19*<sup>A13</sup>单為生殖マウスでは、*H19*と*Igf2*の発現に加えて、*Dlk1*と*Gtl2*の発現も、正常なマウスの場合に匹敵していた。*Dlk1*と*Gtl2*はやはり相反する刷り込みを受

ける遺伝子対で、*H19*と*Igf2*とは違う染色体上にある。しかし、発育の悪い*H19*<sup>A13</sup>单為生殖マウスでは、*Dlk1*と*Gtl2*が正常レベルで発現されていなかった。以上を総合すると、河野たちの研究成果<sup>1,6,7</sup>によって、哺乳類で自然の单為生殖が起こり得ない主な理由の一つは、刷り込みを受ける遺伝子が不適切に発現してしまうためであることが実証されたことになる。片親のみの生殖に対するこうした障壁がなぜ進化したのかについては、今後の解明が待たれる。

今回の研究<sup>1</sup>については、单為生殖胚のうちごく一部しか生存しなかったのはなぜか、また、遺伝子発現に現れる影響にこれほどばらつきがあるのはなぜかといった疑問も出てくる。こうした疑問の一部はおそらく、研究に使われたマウス系統の異系交配の特性によって説明できるだろう。特に肝要なのは、*H19*遺伝子の活性を変化させることで、これほど多くの遺伝子の発現、とりわけ一見互いに無関係に見える刷り込みを受ける遺伝子類の発現がどう変化するかを見きわめることだろう。ゲノム刷り込みを受ける遺伝子が発生において果たす役割やその調節機構が完全に解明されるまでは、生殖活動への父親の参画は必要とされ続けるはずだ。

筆者のDavid A. F. LoebelとPatrick P. L. Tamは、シドニー大学小児医療研究所発生学部門(the Embryology Unit, Children's Medical Research Institute, University of Sydney, Wentworthville, New South Wales 2145, Australia)に所属している。e-mail: dloebel@cmri.usyd.edu.au, ptam@cmri.usyd.edu.au

1. Kono, T. et al. *Nature* **428**, 860-864 (2004).
2. Surani, M. A., Baron, S. C. & Norris, M. L. *Nature* **308**, 548-550 (1984).
3. Barton, S. C., Surani, M. A. & Norris, M. L. *Nature* **311**, 374-376 (1984).
4. Thorvaldsen, J. L., Duran, K. L. & Bartolomei, M. S. *Genes Dev.* **12**, 3693-3702 (1998).
5. Arney, K. L. *Trends Genet.* **19**, 17-23 (2003).
6. Kono, T., Obata, Y., Yoshimizu, T., Nakahara, T. & Carroll, J. *Nature Genet.* **13**, 91-94 (1996).
7. Kono, T., Sotomaru, Y., Katsuzawa, Y. & Dandolo, L. *Dev. Biol.* **243**, 294-300 (2002).
8. Ripoche, M. A., Kress, C., Poirier, F. & Dandolo, L. *Genes Dev.* **11**, 1596-1604 (1997).
9. Leighton, P. A., Ingram, R. S., Eggenschwiler, J., Efstratiadis, A. & Tilghman, S. M. *Nature* **375**, 34-39 (1995).