

ISSN 1348-8449

# 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.10 | October 2004

## 死と税金と、 熱力学の第二法則

論理的にも物理的にも逆にできるコンピューターの実現可能性とは？

宿がなくても生き延びる細胞

寝て起きて考える

ETとの交信

Sponsored by



Agilent Technologies

# nature

## 月刊ダイジェスト

vol. 1, no. 10

# 10

## 月号 目次

October 2004

www.naturejpn.com

### editorial

2 クリック博士の遺志を引き継ぐ

### news feature

3 目覚めてひらめく

Laura Nelson

### news feature

6 ある日、私は「スパイ」になった

David Cyranoski

### commentary

8 政治と道徳と胚

George J. Annas, Sherman Elias

### books and arts

10 生物多様性は育んでいくもの

Stuart Pimm

### essay concepts

11 死と税金と、熱力学の第二法則

Seth Lloyd

### news and views

13 アノイキス：癌と宿無し細胞

Lance A. Liotta and Elise Kohn

14 瓶の中に入った手紙

Woodruff T. Sullivan III

Publisher: Antoine E. Bocquet

Editor: Junko Tsuda, Sara Harris

Production: Takeshi 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)



19 August 2004 Vol.430/Issue no.7002

大麦の *mlo* 変異株は、人類史や作物栽培の発展において、また植物の菌類感染症に対する抵抗性の仕組みの解明など色々な分野できわめて重要である。この変異はウドンコ病に対する抵抗性をもたらしてくれるが、その天然供給源として知られているのはエチオピア高地産の分離株だけである。今回、大麦系統の遺伝解析から、この変異がエチオピアの土着種で大麦が栽培化された最もまたはそのすぐ後に生じたことが示唆された。意外なことに、*mlo* の正体はコード領域の欠損ではなく、正常な野生型 *Mlo* 遺伝子の「上流」に挿入された部分の重複のある反復配列である。栽培化された大麦では、栽培化前の大麦で免疫機構の主流を占めていた自然の遺伝的多様性が本質的に減少するので、これを補償する仕組みとして、ウドンコ病菌に対して幅広い抵抗性を発揮する *mlo* 変異が有利となったのかもしれない。表紙は栽培化されたヨーロッパ産大麦の優良品種とエチオピアの土着種の穂。前者は「のぎ」があり後者はない。[Letters, p. 887]



26 August 2004 Vol.430/Issue no.7003

炭化ケイ素(SiC)は次世代電子デバイスでシリコンに取って代わると予想されている。役に立つ電子特性と熱物理学的、機械的能力をもつため、高温・高出力での応用で見られるような、シリコンでは立ち入れない種々の環境でも作動できる。しかし、問題は実用的な大きさで欠陥のないSiC単結晶を作ることだった。「反復a面成長法」と名付けられた新工程がこれを解決しそうだ。この方法では、気相成長により、従来よりはるかに転位密度の低いセンチメートルサイズのSiC単結晶が得られる。この方法は、従来の方法では合成が難しい窒化ガリウムなど他の半導体材料の高品質結晶を成長させるのにも応用できそうだ。このプロジェクト研究は豊田中央研究所と株式会社デンソーで行われたもので、ハイブリッド自動車への応用が考えられている。表紙は成長途上の六方晶SiC単結晶の(0001)面内のらせん成長ステップを観察したもの。[Letters, p. 1009; News and Views, p. 974]



2 September 2004 Vol.431/Issue no.7004

地球外のはるか離れたところに文明があれば、我々に接触しようとする際に電波を使うだろうことは、ほとんど当然とされている。地球外知的生命を探査するというアイデアは、45年前に G. Cocconi と P. Morrison が初めて提唱したものだ(「星間交信の探査」'Searching for interstellar communications' *Nature* 184, 844-846; 1959)。それ以来、この論文の「成功の確率がどれほどかは判らないが、とにかくやってみなければうまくいくこともない」という精神のもとで、SETI@home プロジェクトで費やされた CPU 処理時間は 200 万年に達した。今週号では、CRose と G. Wright が地球外生命との接触について新しい見方を提案している。それによると、金のレコード盤に「地球の音」を録音してボイジャー 1 号と 2 号に乗せたのは、正解だったようだ(表紙参照)。この「ビンに詰めた手紙」の方法で宇宙の彼方に物体を送るのは、極めてエネルギー効率がいい。我々は今すぐにでも、太陽系で地球外文明の産物を探査し始めるべきなのかもしれない。[Letters, p. 47; News and Views, p. 27]



9 September 2004 Vol.431/Issue no.7005

スペインの神経解剖学者サンティアゴ・ラモン・イ・カハール(1853-1934)は神経系のさまざまな構造体を同定し、それらの構造体の機能に関する彼の説はその多くが正しかった。カハールが脊椎動物の末梢神経系にあるシュワーン細胞で見つけた細胞質のバンドは、ミエリン鞘の外表面とシュワーン細胞の細胞膜との間に形成された接着小領域から生じることが今回明らかにされた。この「カハール帯」がないと、細胞の伸長が過ぎてランヴィ工節の間が短くなり、神経インパルスの伝達が損なわれる。表紙は、カハールが描いた銀染色した有髓神経纖維。その両脇は、カハール帯が栄養の輸送チャネルとして働く仕組み(右)や、接着小領域(赤色)が細胞質を分離させてカハール帯(緑色)が生じる様子を示すように新たに描きなおした図。(描画: Cajal Institute, CSIC/inheritors of Santiago Ramón y Cajal) [Letters, p. 191]

## クリック博士の遺志を引き継ぐ

フランシス・クリックは、物事を極めて深く考える生物学者の一人だった。今、生物学の世界は、彼の死を悼んでいる。クリックが1970年に発表した未来学の小論文には、彼の先見の明が示されており、今日の理論研究者にとっての課題が示唆されている。

原文：*Passing the torch*

*Nature* Vol.430(815)/19 August 2004; www.naturejpn.com/digest

**1** 953年に発表されたDNAの二重らせん構造に関するフランシス・クリックとジェームズ・ワトソンの論文において、彼らの控え目な「決めゼリふ」は多くの読者を魅了した。「我々が想定したこの特定の塩基の対合からは、遺伝物質の複製をもたらすと考えられる1つのメカニズムが直ちに示唆されるが、このことを我々は見逃してはいない。」

実際、生物学の広大な研究領域でクリックが見逃したもののは、ほとんどなかった。彼の著述の中に *Molecular Biology in the Year 2000* (西暦2000年における分子生物学の姿)という比較的知られていない小論(1970年に *Nature* で発表、<http://www.nature.com/nature/focus/crick/pdf/crick228.pdf>)がある。 *Nature* 8/19号 p.845では彼の追悼記事を掲載、この小論文を再び取り上げる良い機会と言える。この小論は、これまでに発表された大部分の予言の書とは異なり、予言の成否を知り得る現代の批評家の評価にも十分に耐えうる内容となっている。

クリックは、この予言という課題にいささかの戦慄を覚えつつも、生物学上の諸論点を3つに分類した。すなわち、(1) 2000年までに解明される論点、(2) 解明に向けて相当な前進が見られているだろう論点、(3) 第一線の研究者たちを悩ませ続ける難問という3つの区分を設定したのだった。

いくつかの論点について、クリックは、研究が進展するペースを過大評価している。反復的に見られる「ジャンク」DNAの意義を全面的に理解するまでには、まだ相当の時間を要するだろう。遺伝子発現を調節する配列部

分についても同じことが言える。これに対して、DNAの複製や染色体の構造は十分に解明されており、彼の予想は当たっている。

クリックが第2区分とした諸問題についても彼の先見の明が示されている。彼の予想よりも簡単に解明が進んだ論点もあった。筋肉の収縮メカニズムは、細かい点を除けば、解説されたと言える。これよりも複雑な論点だったのが「発生段階での『勾配』の形成に寄与する因子の性質」であった。それでも彼が示した論点リストは、過去35年間に生物学で研究対象となってきた論点を極めて正確に概観している。1970年当時、これらがすべて論点として明らかだったわけではない。

第3区分である未解明論点としては、地球上での生命の起源、地球以外の天体にも生命が存在しているのかどうか、といったものがある。確かに我々は現在もこの問題を考えている。クリックが人生の後半に取り組んだ「意識の性質」も未だ謎に包まれている。

クリックは、*Nature* の将来についても、ある程度の言及をしている。「将来、*Nature*には、我々が分子生物学の古典的分野とみなしれている分野に関する詳細な論文があまりに多く掲載されるような事態にならないことを望む」と彼は記している。

当時「古典的」とされた分野については、クリックの希望通りの結果となった。しかし、最近の *Nature* に掲載される論文には、シグナル伝達や細胞周期といったテーマに関する分子レベルでの詳細な検討結果を示す論文が多くなっていることは否定できない。生命の起源や宇宙生物学に関する重要論文が相対的に少な

いことに、おそらくクリックは失望するだろう。原因の1つとしては、保守的な研究予算制度のために、生物学者が、クリックの好むハイリスクな想像の飛躍をしにくくなっていることが考えられる。しかし、論点自体の性質も原因に挙げることができる。この点は、クリックの小論でも示唆されている。「複雑な相互作用が関係する論点を避けて通ることはできない。生物学の最も重大な局面には、このような性質をもつものが含まれているからである。」

クリックは、全ゲノム配列解読、DNAマイクロアレイ解析、プロテオーム解析などの高速処理技術の台頭を予想できなかつたが、それは無理もないことだろう。周知の通り、このような技術によって生物学の詳細部分の真の淵さが確認されている。

ゲノミクスが進展し、新たに登場したシステム生物学という研究分野は、遺伝子やタンパク質をネットワークとして扱うことによって、このような詳細部分の意味を解明する力を秘めており、理論的解析の機は熟したと言える。一世代前の理論物理学者は、原子を構成する粒子の存在を予測したが、まもなく、理論系の研究者が、実験系生物学研究者に対して、論点解明へのヒントを示せるようになる予想するに十分な根拠は揃っているのだ。

分子生物学はレシピ集に過ぎないと軽視されることもある。それなのに、このような批判に反論しない分子生物学の研究者も、あまりにも多い。クリックは、このような状況を望んでいないだろう。大きな枠組みに関する研究を進めるという彼の遺志が、これからも引き継がれていくことを期待したい。 ■

# 目覚めてひらめく

朝起きたときに、前の晩には解けそうもなかった問題の答えが見つかったり、能力の限界だと思っていた仕事ができるようになったりしたことはないだろうか。この謎が明らかになる日は近いかもしない。

Laura Nelsonが報告する。

原文：While you were sleeping

Nature Vol. 430 (962-964)/26 August 2004; www.naturejpn.com/digest

**1** 1869年2月17日、ロシアの化学者メンデ

レーエフは、トランプの一人遊びをしながら、うとうとしていた。そして目が覚めたとき、化学元素をどのようにすれば妥当に分類できるかというかねてから懸案の答えが浮かんだ。化学者が日々世話になっている「周期律表」はこうして生まれた。

言い伝えでは、インスピレーションがメンデレーエフに訪れたのは夢の中と言われているが、これはおそらく本人が劇的効果をねらって脚色したものだろう。メンデレーエフほどの大発見ではないにせよ、寝て起きたら理解が進んでいたという経験は多くの人にあるのではないかだろうか。そして、楽器の演奏などの複雑な課題をこなす能力が、練習した翌朝には上達していることも少なくはない。

認知科学者たちは、論理的な問題を解く方法を思いついたり、音楽の能力を高めたりする現象を「手続き」学習と呼んでいる。手続き学習は、単に事実のリストを集めのではなく、ものごとのやり方を覚えることを意味する。研究者たちは長年、睡眠の重要な機能の1つは、この過程を強化することではないかと考えてきた。しかし、脳活動の特定のパターンが関与することが指摘されたのはごく最近である。「睡眠は細胞と関係があり、細胞間の連結に関連している」と、ウィスコンシン大学(マジソン)の精神科医 Giulio Tononi は語っている。

ある意味、これまでの研究の進展が遅かつた理由は、睡眠研究者の関心が長きにわたって、レム(急速眼球運動)睡眠に集中していたことにある。夢を見る期間と一致するレム睡眠中に、人間の脳では、覚醒時と極めてよく似た脳活動パターンがみられる。レム睡眠には、特有の眼球の揺れに加えて、性別にか

かわらず性的興奮の徴候がみられる。

したがって、この活発な睡眠相に研究者が夢中になったとしても無理はなかった。各レム睡眠の間に存在する、より深い眠りは軽視されることになった。この活動の静かな期間は「徐波睡眠」として知られる。この名称は、脳内に1秒間に4回以下程度の速度で現れる、脳波計(EEG)上の電気活動の同期波にちなんでいる。

ところが長年の研究にもかかわらず、レム睡眠と手続き学習が関連することを示す証拠

については矛盾点が多く、混乱もあった<sup>1</sup>。例えば、種が異なると、睡眠中にレム睡眠が占める割合と学習能力との間に強い相関はみられない。またレム睡眠の量を減らす抗うつ剤の使用者の手続き記憶に異常は認められない。レム睡眠が完全に失われてしまう稀な疾患の患者でも手続き学習は正常である。

この数年間に、手続き学習に心を寄せる研究者が徐波睡眠に目を向け始めた結果、研究が進みはじめた。徐波睡眠と手続き学習と

をつなぐ、おそらく最も説得力のある証拠は、前述の Tononi たちによって得られた。研究チームは最近、徐波活動の局所変化と、ある特定課題の学習が関連することを初めて示した研究を Nature に報告した<sup>2</sup>。

## 徐波睡眠に注目

Tononi の研究対象となった被験者の頭皮には256本の電極が取りつけられ、睡眠前、睡眠中、睡眠後における脳細胞ネットワークの電気活動が EEG で記録された。被験者は、眠気を催す直前まで、画面上でカーソルを指定の位置まで動かすコンピューターゲームをプレーした。ただし一部の

「ピアノ演奏や車の運転など違うタイプの手続き学習には、徐波睡眠のそれぞれ別の段階がかかわっているのかもしれない」

セッションでは、数人のプレイヤーに対してカーソルが密かに動くように設定された。この場合、被験者は、加えられたハンドルキャップを補うこ

とを無意識のうちに学習するようになる。

眠りに落ちる直前に、カーソルの動きを補正する必要のある課題を学習した被験者は、空間情報処理に関連することが知られている特定の脳領域に徐波活動の強化がみられた。これはおそらく、神経細胞間における新しい結合の形成と、これに続く強化のためにあると考えられた。

徐波睡眠中、徐波活動はしばらく続いた後で次第に小さくなっていた。Tononi は、徐波活動のこうした低下が、手続き学習の強化に重要な役割を果たしていると考えている。覚醒中の脳には、学習課程に干渉する他のシグナルが存在し、「雑音が多い」からだ。

夜間の睡眠後、移動する標的の動きを先回りすることを学習した被験者は、前日の夜と比べて、課題をうまくこなせるようになっていた。また被験者全体で、徐波活動の上昇の





自覚めたら高得点。睡眠は、コンピューターを用いた難しいテストのスコアをあげるようだ。

程度と、睡眠で誘導される成績上昇の程度との間に正の相関が認められた。

相関がみられたことで、この分野の他の研究者は勇気づけられることになった<sup>3</sup>。「これは、記憶と関連する脳波の存在を初めて示した確かな証拠なので、徐波活動が局所的に変化することは大いに注目されます」と、リューベック大学(独)の神経内分泌学者Jan Bornは語っている。Bornや他の研究者は現在、学習に関して自分たちが実施した実験の見直しを行っており、睡眠で誘導された学習の強化を、脳の特定領域における活動の変化に結びつけ

られないかと考えている。

この数年間、今日ではEEGなどによる研究の俎上に載る、睡眠および学習に関する多くの重要な知見が得られている。例えばBornは、元素の分類に関してメンデレーエフが得たインスピレーションの経験と同様の知見を対象に研究を進めている。Bornの実験では、被験者に簡単なルールを説明して7つの数列を作らせる。ただし隠れルールが存在し、2番目の数列は最後の数列と常に一致する。すると、課題を2回行う間に睡眠をとった被験者は、この隠れルールに早く気づいた<sup>4</sup>。この結果から、睡眠状態の脳は、学習済みの情報を処理しているものと考えられる。「元ある情報から睡眠が作り上げる記憶が存在するのは間違いない」とBornは語る。

### 難しい課題を優先

ハーバード大学医学系大学院(ボストン)の精神科医Robert Stickgoldのもとには、生理学的解析が待たれる非常に充実した一連の知見がある。訓練中に脳は、これは後の睡眠中ににおける強化対象となる課題だとして印(タグ)をつけておくのだとStickgoldは考えている。

さらに興味深いことに、Stickgoldの未発表データによれば、脳は多くのタグを「まとめて」課題につけることがあり、学習が非常に難しい課題に高い優先度を与えることが示されている。さまざまな数字の配列をキーボードからタイプするように指示された被験者にとって、睡眠による改善が最大であった課題は、睡眠前にはこなすのが一番難しかった配列で

あった。「脳は、より弱い結合をねらって強化する」とStickgoldは解釈している。

こうしたタグ付け戦略は、ピアノソナタの一節一節をひとまとめにするといった課題の統合にも役立つかもしれない。「課題を細切れに学習し、一眠りすることで滑らかにつなげるというわけです」とStickgoldは示唆している。

しかし、眠っている間に強化された記憶は、起床後の時間経過に伴って不安定になるようだ。つまり、被験者に、ある一節の指の動かし方を学習させ、翌朝に別の一節を学習させると、睡眠によって誘導された最初の課題の強化は失われてしまうようである<sup>5</sup>。

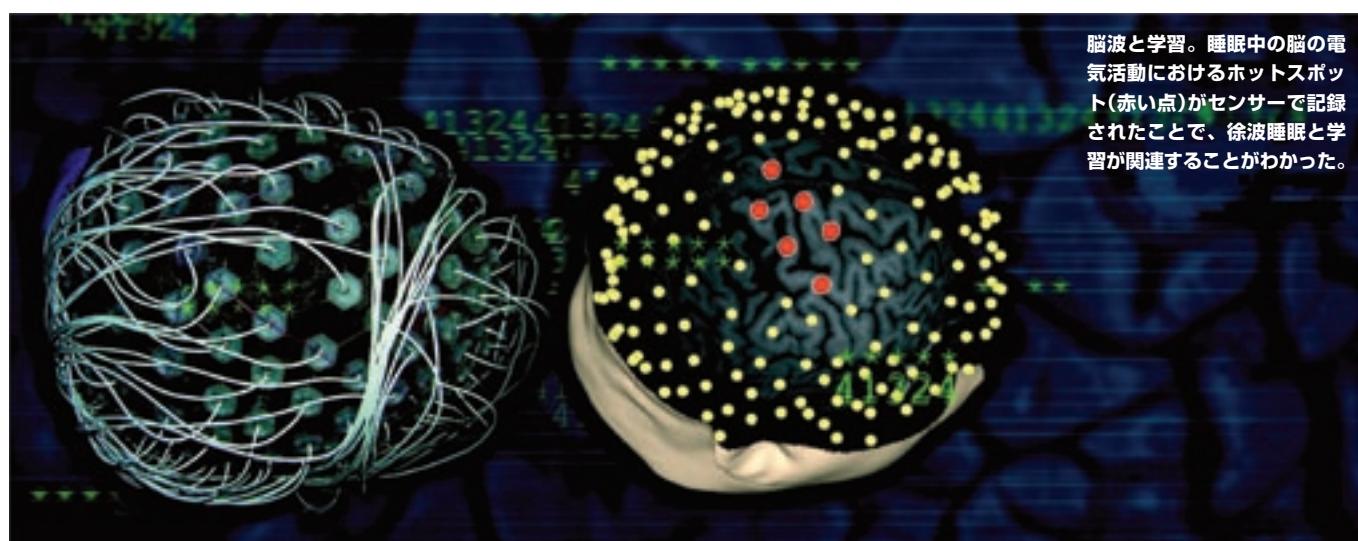
ある意味Tononiの研究に後押しされるかたちで、Stickgoldたちは現在、記憶が強化されて相互に統合される際に脳内で起こる現象についての解明に取り組んでいる。その第一歩として、Stickgoldのハーバード大学の同僚Matthew Walkerは、被験者が行う課題を睡眠の前後で変化させることで、個々の課題に必要とされる脳領域を、機能的磁気共鳴画像法(fMRI)で判定することを試みている。

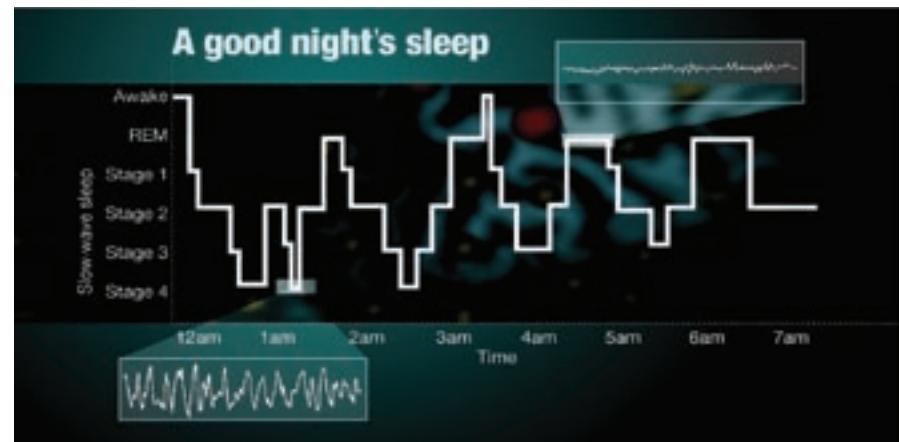
Walkerは、異なるタイプの学習には、異なる種類の徐波睡眠が関与しているのではないかという点にも注目している。徐波睡眠は4つの段階からなり、最初はうとうとした状態から、次第に眠りが深くなってゆく。Walkerは、徐波睡眠のそれぞれ異なる段階が、ピアノの演奏や車の運転といった異なるタイプの手続き学習に、より重要な役割を果たしているのではないかと考えている。「これらは、微妙に

▶

脳波と学習。睡眠中の脳の電気活動におけるホットスポット(赤い点)がセンサーで記録されたことで、徐波睡眠と学習が関連することがわかった。

G.TONONI





異なるタイプの学習と言えます」と Walker は語っている。

既に Walker と Stickgold は、睡眠によって誘導される、学習を要するタイピング課題の成績上昇が、特に夜明けに向かっての「第2段階」の徐波睡眠の量と相關することを示している<sup>6</sup>。

また彼らは、眠りに落ちてまもなく現れる「紡錘波」と呼ばれる特徴的な EEG 上の波形が果たす役割の調査も計画している。紡錘波の出現は、脳細胞ネットワークの長期変化を促すことが示唆されており、学習との関連が伺われている<sup>7</sup>。個々の紡錘波は 1 ~ 2 秒間持続し、7 ~ 14 Hz の周波数で増減を繰返す。

このような初期の活動に続いて、十分な夜の睡眠中には、複数の REM が徐波睡眠中に約 90 分間の周期で散発的に現れる(上記グラフ参照)。興味深いことに、少なくとも画面上に映し出される異なる視覚パターンを区別する学習の場合、睡眠のすべての相を含む約 90 分間の軽い睡眠は、8 時間の睡眠時と同等の成績上昇をもたらす<sup>8</sup>。

### 睡眠関連遺伝子の存在

睡眠中の記憶固定には、電気活動の変化に加えて、遺伝子発現の変化が関与する可能性がある。Tononi のグループはラットを対象に約 100 種類の遺伝子の発現レベルが、昼夜の時間帯を問わず、睡眠中に増加することを報告している<sup>9</sup>。こうした遺伝子の一部についてでは、脳細胞間を移動する化学物質である神経伝達物質の放出にかかわることが既にわかっている。

以上の知見は、睡眠が手続き記憶の固定に

関与するという説と矛盾しない。脳内における多様な神経伝達物質の量は、睡眠中の各相で変動する。また Stickgold は未発表の研究で、神経伝達物質系が損なわれているコカイン乱用者や統合失調症患者では、正常な睡眠依存性の手続き学習がみられないことを示すデータを得ている。

睡眠誘導性の手続き学習と、遺伝子発現、神経伝達物質機構、電気活動パターンを引き起こす変化との間の関係を詳細に明らかにするためには、人間と実験動物の双方を対象とした広範囲の研究が必要である。未解決の謎を取り組むことをあきらめて、ふて寝したいと考える者はいないだろう。でも、この分野の研究者が、複雑な実験結果の解釈に行き詰まつたら、メンデレーエフの例を思い出せばいい。とりあえず横になって目をつぶるのだ。 ■

**Laura Nelson**は、ネイチャーのインターンシップ修了生。

1. Siegel, J. M. *Science* **294**, 1058–1063 (2001).
2. Huber, R., Ghilardi, M. F., Massimini, M. & Tononi, G. *Nature* **430**, 78–81 (2004).
3. Hairston, I. S. & Knight, R. T. *Nature* **430**, 27–28 (2004).
4. Wagner, U., Gais, S., Haider, H., Verleger, R. & Born, J. *Nature* **427**, 352–355 (2004).
5. Walker, M. P., Brakefield, T., Hobson, J. A. & Stickgold, R. *Nature* **425**, 616–620 (2003).
6. Walker, M. P., Brakefield, T., Morgan, A., Hobson, J. A. & Stickgold, R. *Neuron* **35**, 205–211 (2002).
7. Sejnowski, T. J. & Destexhe, A. *Brain Res.* **886**, 208–223 (2000).
8. Mednick, S., Nakayama, K. & Stickgold, R. *Nature Neurosci.* **6**, 697–698 (2003).
9. Cirelli, C., Gutierrez, C. M. & Tononi, G. *Neuron* **41**, 35–43 (2004).
10. Rattenborg, N. C., Lima, S. L. & Amlaner, C. J. *Behav. Brain Res.* **105**, 163–172 (1999).
11. Aserinsky, E. & Kleitman, N. *Science* **118**, 273–274 (1953).

Nature Publishing Group  
makes an IMPACT



インパクトがある雑誌は、

*Nature* です。

2003年度、*Nature* のインパクト・

ファクターは 30.979 でした。

もちろん multi-disciplinary ジャーナル  
のナンバー1です。

# ある日、私は「スパイ」になった

芹沢宏明は米国に渡り、前途有望な生物学研究者として順調に実績を積んでいた。

しかし、彼の研究者人生はある日突然、めちゃくちゃになった。

親切心で友人に協力したことが、日本を利するための産業スパイ行為だったと米連邦捜査局(FBI)にみなされたのだ。事の顛末をのDavid Cyranoskiが聞いた。

原文 : *The accidental spy*

*Nature* Vol.430(960-961)/26 August 2004; www.naturejpn.com/digest

**1** 999年7月。当時カンザス大学のがん研究者だった芹沢宏明は、後から考えるときわめて重大な決定を下した。芹沢の研究室の冷凍庫に研究材料を保存させてほしいという昔からの友人の頼みにOKしたのだ。この友人はアルツハイマー病研究者の岡本卓である。このとき、芹沢は初めての子供が生まれて約1週間後だった。彼は、その依頼について深く考えなかった、という。しかし、この決定のおかげで、芹沢は後に米連邦裁判所で有罪判決を受け、大学での研究職も失うことになった。

この事件は、外国組織のために活動する産業スパイの取り締まりを目的に1996年に作られた米国法の、ある条項の最初の適用例となった。しかし、米連邦検察官は主犯とみなしていた岡本の有罪を立証できなかった。このため、法律専門家らは、この法律を修正する必要があるかもしれないと指摘している。一方、学術研究機関に所属する研究者たちにとって、芹沢の経験は警告的だ。研究者たちは、ビジネスや法的拘束力を伴う利害がどれほど自分たちの世界に入り込んで来ているかに、まだ気づいていない。

日本では、この事件はトップニュースとして報じられ、米国に渡ることを考えている研究者に恐怖を抱かせた。事件の余波は続いている。芹沢は今、損害賠償を求め、東京地裁で岡本と争っている。

事件は次のような経緯をたどった。カベオリンという、細胞膜上で働くタンパク質ファミリーがある。米国オハイオ州にあるクリーブランドクリニック財団の岡本らの研究グループは、このタンパク質ファミリーの一員であるカベオリン-3が、アルツハイマー病患者の脳を破壊すると考えられているブラー

ク(老人斑)の形成を促すことを発見した(K. Nishiyama et al. *J. Neurosci.* **19**, 6538-6548; 1999)。

岡本は1999年初め、新たな研究資金を得た。細胞系とDNAサンプルのライブラリーも増えつつあった。そこで岡本は、 $\alpha$ セクレターゼという(当時、まだ見つかっていないかった)酵素を探す研究に取りかかった。この酵素は、ブラークを形成するタンパク質を半分に減らし、脳内へのブラークの蓄積を防ぐことができる。

しかし、1999年7月、岡本は突然、自身の研究室から研究試料を持ち出す、という行動を起こす。岡本は「研究室の同僚が、研究グループにとって不名誉となりそうな再現不可能で無謀な実験を続けることを防ぐため、この行動に出たのだ」と主張している。

## 経済スパイ法違反に

クリニックは警察に捜査を依頼し、まもなく、米連邦捜査局(FBI)が乗り出した。FBIの捜査官は岡本の説明を信用しなかった。1999年8月27日付の宣誓供述書は、研究グループが開発した約1,000個のDNAサンプルと250の細胞系を盗み、破壊したとして岡本を訴えた。この宣誓供述書は「岡本は、クリニックから貴重な研究材料を持ち出すため、慎重かつ計画的に事を進めた」としている。

結局、2001年5月、岡本は4つの罪を犯したとして起訴された。このうちもっと重い罪は、外国組織を利するための活動を図った1996年制定の経済スパイ法1831条違反だった。知的財産権を専門とするニューヨークのPeter Toren弁護士は、同法の法案作成にかかわった。「この法律のもともとの意図は、営業秘密を不正に利用する外国企業、特に国家か

ら資金援助を受けている企業を標的にすることだった」とToren弁護士は説明する。岡本の事件では、岡本が日本の理化学研究所の職につくつもりだったために、この条項が適用された。

とはいっても、理化学研究所が共犯とされたわけではない。しかし、芹沢は、冷凍庫に入っていた研究材料のために、共謀して産業スパイを行ったとして訴えられた。芹沢は、東京のあるマンションのロビーのソファに座り、事態がどのように進んだのかを、静かな口調で語った。ここは、彼の弁護団に資金援助をしてくれている支援者のマンションである。

## 混乱と恐怖

芹沢と岡本は、1980年代後半に東京大学で知り合い、米国のマサチューセッツ州ケンブリッジで再会した。ポスドクとして研究をするため、岡本はハーバード大学、芹沢はマサチューセッツ工科大学(MIT)に来ていたのだ。「私たちは、研究補助金の申請書の書き方を教え合った。さらに彼は、私の家族に医療面のアドバイスをしてくれたこともあった」と芹沢は話す。

友人である岡本が研究材料の保存を依頼したとき、岡本の意図を問いただすことは考えなかった、と芹沢は言う。「私は、これが重大な問題であるとは分かっていなかった」と彼は振り返る。1999年9月2日、FBI捜査官が芹沢の研究室に現れ、7時間にわたって厳しい取り調べを行った。芹沢は激しく動揺したという。

芹沢は結局、岡本に不利な証言をすることに同意する司法取引を行った。この結果、芹沢が問われた罪は、最初の尋問で虚偽の証言をしたことだけとなった。虚偽として罪に問



GETTY IMAGE

われた供述は、彼が岡本から預かっていたバイアル(びん)の数を実際より少なく申告したこと、理化学研究所のポストを岡本が引き受けたことを知らないと言ったこと、研究材料を受け取った後には岡本に会っていないと言ったこと、だった。これらについてはいずれも、芹沢は、その取り調べの最中に後から訂正している。

芹沢は、虚偽の供述をしたのは混乱と恐怖のせいだったという。「捜査官は召喚状を持って現れた。日本にはそのような制度がないので、私はそれが何なのか分からなかった。本当に取り調べを受けていることを悟って、がく然とした」と彼は話す。

2003年5月28日、芹沢は、罰金500ドル(約5万5000円)、社会奉仕150時間、保護観察3年間という判決を受けた。「私はこのとき、これが私のキャリアにどう影響するのか分かっていなかった」と彼は言う。米がん学会は芹沢への研究補助金をうち切った。有罪とされた者は、判決から3年間、米国立衛生研究所(NIH)の研究資金を受けることはできない。カンザス大学には1997年1月から勤務していたが、それ以上の研究を芹沢にさせてはくれなかった。

結局、芹沢は、学術研究機関以外の職につかざるをえなくなった。2003年11月、彼は、カリフォルニア州パロアルトにあるコンサルタント会社「ライフサイエンス・カタリスト・パートナーズ」のチーフ・サイエンス・オフィサーの職についた。同社は、日本企業と米国企業の間のバイオテクノロジー面での協力関係構築を業務としている。産業スパイとされた者がそのような職につく皮肉を、芹沢も認めている。芹沢は、つらかった日々が今も頭から離れない。そして、「研究とアカデミズムの世界が忘れられない」と話す。

芹沢は、訴訟費用約50万ドル(うち約20万ドルは彼の支援者グループが負担した)などの損害賠償として77万ドル(約8400万円)を支払うよう、かつての友人である岡本を訴えている。何が起こったのかについて、両者の言い分は異なっている。裁判所はこの点を解決しなければならないだろう。たとえば、芹沢がバイアルの中身について知らなかつたと、岡本は公の場で証言するべきだった、と芹沢は言う。「彼の証言はきわめて重要な情報だった。本当は何が起こったのかは、彼以外

のだれも知らないからだ」と芹沢は話す。

芹沢によると、彼の妻は岡本に電話し、援助を求めたが、岡本は一方的に電話を切つたという。芹沢の支援者グループは、岡本の居場所を突き止めることができず、「公の場に現れて事件の真相を話してほしい」と岡本に懇願する3ページの手紙を、岡本の弁護士、元妻、両親に書留郵便で送った。しかし、岡本は、芹沢のために何かをするよう頼まれたことはなかったとしている。「芹沢の弁護をするように言われたことはなかった」と彼は主張する。

芹沢の弁護団が弁護の準備をしているころ、岡本は日本に戻っていて、米国は彼の身柄を引き渡すよう日本に求めた。結果、東京高裁は今年3月、岡本の行為は理化学研究所を利するために行ったものではないとの判断を下し、日本は初めて米国の身柄引き渡し請求を拒否した。

### 壊れた友情

岡本はこの決定が出るまでに、理化学研究所の辞職を強いられた。2001年9月、彼は北海道東部の端野町という小さな町にあるオホーツク海病院に勤務し始めた。彼は今でも無罪を主張していて、東京高検の身柄引き渡しに関する審査請求について東京高裁の決定を待つ間、拘置所に57日間拘束されたことに憤慨している。「私は自分の患者を診ることができず、人権をはぐ奪され、ひどい精神的苦痛を受けた」と彼は語った。

岡本はこのような不満を抱いているが、それが芹沢の支持者を動かすことはほとんどない。新井賢一・前東京大学医科学研究所長は「岡本は、科学者として、また人間として、芹沢に謝罪する責任がある」と話す。

芹沢の岡本に対する訴訟の判決は、早ければ9月にも出る。一方、法律専門家らは、この事件が経済スパイ法1831条にとってどういう意味があるかを議論している。ある者の行動が外国の組織を利用することを意図してい

たことを証明することは難しく、この条項は効果がないと考える専門家もいる。東京大学の知的財産権の専門家 Robert Knellerは「有罪を立証するのは難しいだろう」と見る。

しかし、だからといって研究者たちは安閑としているわけにはいかない。同じ経済スパイ法の1832条は、外国の組織などを利するという条件なしに、1831条とほぼ同じような行為を犯罪としている。この条項では最高刑は比較的軽いが、外国人を有罪とするのに実際に使われている。

米国のスパイ防止活動局の2003年報告書は、米政府の断固たる姿勢を強調している。この報告書では「2002年および2003年には、機密に属する米国の技術や企業秘密を、90カ国を超える国の人々が漏洩している」としている。この報告書では、背景の一部を「学術や科学の交流を通じた世界的な情報共有に米国が参加しているため」とした。

となると今後、学術研究機関に対する米政府の監視が強化される可能性もある。米国科学振興協会(AAAS、本部・ワシントンDC)の「科学の自由・責任・法律プログラム」の責任者であるMark Frankelは「経済スパイ法は、いくつかの事件で有名になったにもかかわらず、科学者の大部分はいまだに知らないままではないかと思う」と言う。この点についての芹沢の忠告ははっきりしている。「知らぬが福というわけにはいかないのだ」と。■

(敬称略。2004年8月26日の初出記事を翻訳。)

**David Cyranoski**はネイチャーのアジア・太平洋沿岸担当記者。

# 政治と道徳と胚

アメリカの生命倫理は政治を超えられるか。

原文：*Politics, morals and embryos*

*Nature* Vol.431(19-20)/2 September 2004; www.nature.com/nature

George J. Annas and Sherman Elias

**ア**メリカの生命倫理は自国の文化を反映しており、現実的、市場志向的、孤立的な傾向にある。胚に関する政治がこの混沌に加わったこの過去数年間で、事実上他国とは比較の参考にならないほどに狭量で身勝手な生命倫理が生じてきた。そのすべてがジョージ・W・ブッシュ大統領の大統領生命倫理評議会(発足から3年目)に沿った政策のせいと言えるわけではないが、その責任は大きい。評議会は、胚を中心とした狭量な政策を追求することで、公の生命倫理を政治の下に置いた。さらに際立っているのは、2001年9月11日の同時多発テロによってアメリカ政府のほとんどすべてが変化したにもかかわらず、なぜか生命倫理評議会には、そして生命倫理全般にも影響が及ばなかったことである。

大統領も評議会議長のレオン・カスも、評議会の仕事を正当化するものとして、オルダス・ハックスリーの『すばらしい新世界』(原題: *Brave New World*)を引用している。この小説で描写されている脅威、つまり、国の「養殖場」で人工的に生み出される人間や薬物による満足感といったものには現実味があるが、これを回避することは生命倫理の世界的課題として唯一のものでもなければ、最重要のものでもない。少なくとも、国内外からの保健医療利用の可能性、科学と医学の商業化、薬剤の価格、利害の衝突、遺伝子特許、それに国際的な研究ルールこそ、大いに注目に値するものである。

何千万人のアメリカ国民が無保険や過少保険で保健医療を利用する可能性について、新保守主義的生命倫理評議会が何も言おうとしないことは、黙認できないまでも理解することはできる。しかし9.11が起こるや、大統領と議会は、アメリカ愛國者法、バイオテロ法、バイオシールド法など、医学研究に関

して重大な倫理的意味をもつ新法の制定に着手した。極秘のバイオテクノロジー研究や、米国の医療従事者と子供50万人に天然痘ワクチンを投与する計画はおろか、人間を対象としたバイオテロ対策試験に至るまで、テロに関わるいかなる医学研究の問題にも評議会が異を唱えらしなかったのはほとんど理解できることである。

もちろん政府としては、テロとの全面戦争を唱えた以上、生命倫理評議会がこの種の議論に口出しすることを望まないであろう。間違いなくブッシュ政権は、永久戦争や玉虫色の表現、恐怖を利用した「頼りになる」政府像を描いたジョージ・オーウェルの『1984年(原題: 1984)』が『すばらしい新世界』と同じく現代の生命倫理に重要な意味をもつものであることを、アメリカ国民に対して伝えたがってはいない。対テロ戦争のなかで、いまじくも無党派の全米研究評議会は、テロや戦争のためのバイオテクノロジーを管理するには国際協調が必要になると推断した<sup>1</sup>。意義ある生命倫理にも国際協調が必要であろう。

テロと戦争を倫理に問わない「聖域」とすることが許されたのは、アメリカの生命倫理の焦点が地理的にも哲学的にも狭いことによるものにちがいない。倫理の国際語は人権、特に国際人権法の言葉であるが、アメリカの生命倫理は孤立主義的世界観を保ったままである。胚はいかなる人権関連文書に書かれた人間とも位置づけが異なるため、生命倫理評議会とすると、人権の国際語を使うことがかえって好ましくなかったのであろう。しかし、アブグレイブでのイラク人捕虜への虐待をアメリカ人医師が止められなかつたことであれ、人間の卵を得るために韓国のクローン研究者がとったと思われる倫理的便法であれ、人権を基本とする国際的生命倫理が必要をしているのは、人間のもつ尊厳と権利を尊重することである。何も胚に限定されるものでは

ない。こうした問題に対し、アメリカの生命倫理は目につくほどの沈黙を保ってきた<sup>2</sup>。

アメリカが生命倫理上の人権に関して国際的な視点を取り入れていれば、人間のクローンの作製を禁止して子供を守るための条約を起草しようと2001年8月、フランスとドイツが行った国連提案に加わることができたはずである。アメリカがこの提案に名を連ねていれば、世界で初めての生命倫理条約が成立した可能性があった。しかしこの提案は、胚を中心とした生命倫理をもつアメリカが、いかなるクローン作製条約でも研究目的の胚作製を禁止すべく主張して、事実上廃案に追い込んだ。

大統領生命倫理評議会を完全に理解するには、当初の政治課題にさかのぼる必要がある。評議会については、ブッシュ大統領が2001年8月9日に行った演説で発表された。この演説で大統領は、国による胚性幹細胞研究への資金拠出はその時点ですでに確立されていた「生死が決定済み」の幹細胞株を用いるものに限るとし、「少なくとも生命の可能性をもつ人間の胚をこれ以上破壊することを是認したり支援したりするような資金拠出」は行わない」と述べた。評議会の権限は、「幹細胞研究を監視すること、適切な指針と規制を勧告すること、および生物医学の革新がはらむ医学および倫理上のあらゆる問題を検討すること」であった。

生命倫理評議会は今までに報告書4本と叢書ひとつを出している。このうち政策の勧告が記されているのは報告書2本のみである。最も有名な *Human Cloning and Human Dignity* (2002)では、人間のクローンの作製禁止と治療目的でクローンを作製する研究の凍結を議会と大統領に求めている。後から出された2本の報告書は幹細胞そのものに焦点を当てている。*Monitoring Stem Cell Research* (2003)は、ブッシュ大統領が2001年

8月9日の演説で表明した幹細胞政策に関して大胆な倫理的正当化を試みている。ブッシュ大統領の姿勢の「倫理」は、人間の胚を国内でこれ以上破壊することに税金を使うべきではないという主張をもっぱらの基本としており、民間や他国は何をしてもよいというものである。公的資金の拠出がいかにきわめて重要であるかを主張しているのである。

評議会はこの姿勢について、「ある活動に資金を拠出するという決定は…国として正式に支援と承認を与えると宣言することであり、その活動が有意義で価値あるものであることを国全体が政府を介して認めるという積極的な意志表明である。公的資金で何かが行われるということは、そのことがいわば国の名のもとに承認と奨励を受けて行われることなのである」として不敵にも正当化しようとしている。この説き方は強力なものではあるが、政治と道徳が不恰に結びつけられている。国最低限の道徳を示すものは刑法であって資金拠出の決定ではない<sup>3</sup>。議会は、ごく一部の少數（「特別利益」団体とも呼ばれる）にしか関心のない無数の案件について、資金拠出の可否を決めている。こうした案件に国が資金を拠出することは、タバコ農家への補助金であれ新規の核兵器計画であれ、「有意義で価値あるものであることを国全体が…認める」ことではない。

州の資金拠出決定もやはり政治的なものである。来る11月、カリフォルニアの選挙民は、治療目的の胚性幹細胞研究を認めようという州憲法改正と、幹細胞研究への公的資金30億ドル拠出の是非を決める。この案は過大なものであるが、ブッシュ政権の幹細胞政策について住民投票に問おうとする姿勢は分からぬではない。ここではまた、基本的姿勢としてはカリフォルニアの発議を拒絶する一方、「民の意志」原則により、幹細胞研究の道徳を決める投票という考えは支持するという生命倫理評議会の混乱した倫理が示されている。

胚を中心据え、中絶に反対し、規制を嫌うという政治課題を宿命とする大統領生命倫理評議会は、たびたびその宿命を乗り越えられずにきた。最新の報告書

*Reproduction and Responsibility* (2004) で、評議会は生殖補助医療技術の倫理に本気で取り組もうとしているが、結局は胚の保護に回

帰している。アメリカでは生殖補助産業の公的監視に関してよく練られた国の報告書が待望されて久しい。しかしこの報告書では、はるか以前に出されたイギリスやカナダの報告書とは異なり、行政への勧告を行うのには利用可能な実際的情報が不足していると結論づけることによって、生殖補助に関する困難な倫理的政治的問題のほとんどすべてが避けられれている。

*Reproduction and Responsibility* (2004) では、クローリン作製の報告書以降で唯一となる立法的勧告も行われている。そのなかで最も重要な点は、「卵と精子の結合以外の方法によって受胎を図ることの禁止、所定の発生段階(受精後10～14日後)以降の人間の胚を研究に使用することの禁止、および人間の胚を売買することの禁止」である。こうした禁止事項はいかにも理にかなったものであるが、倫理的にも政治的にもさらに建設的な方策は、胚性幹細胞研究に対して議会が公的資金を拠出し、また行政に効果的な監視を行わせることであろう。

クリントン政権下では、男女のカップルから寄付された「余分な」体外受精胚を利用した胚性幹細胞研究を国の資金拠出の対象とするという国立衛生研究所の姿勢が支持されていた。しかしその当時、胚研究への公的資金拠出に対するこの制約の根拠が政治的なものであって倫理的なものではないことはわかっていた<sup>4</sup>（人間の胚がもつ道徳的重要性がその出自や存在理由とは無関係であるのは、子供の道徳的重要性と同じである。出自や存在理由は、問われるものではないのである）。政治家にとっては、「余分な」胚を用いる研究の方が、研究自体のために作製された胚よりも支持しやすい。しかし、研究のために胚を作ったり破壊したりするべきではないという信念があるのであれば、そうした活動は犯罪とみなすべきであって、規制対象外の民間に委ねてはならない。

「余分な胚」という妥協はそれでも、アメリカの上院議員58名（中絶に反対する者を含む）とナンシー・レーガン元大統領夫人の支持を得ており、政治的には可能であろうが、それも11月の大統領選挙後の話である。ブッシュ大統領の2001年8月の姿勢に関して生命倫理評議会が信頼に足る倫理

的説明をすることができないれば、ブッシュ大統領は11月の選挙で、特に患者の代弁者や家族たちから政治的代償を払わされることになるかもしれない。

アメリカの政治にとって生命倫理が重要であるのは立法にとって道徳が重要であるのと同じであるが、生命倫理が世界的な倫理の発展に寄与するためではなく主として観念的で国内的な政治課題に資する目的で利用されるとすれば、まず視野の狭い利益団体の役にしか立たない。もう、ブッシュ大統領の生命倫理評議会を改革するには遅すぎる。国の委員団というものが政治から完全に解放されることは不可能であるという現実を受け入れている主流派の生命倫理学者でも、この評議会の政治的活動は極端で孤立的であると考えている<sup>5</sup>。我々はアメリカの生命倫理委員会は今後、大統領寄りではなく独立したものになる必要があると考えている。医学、科学、社会のために、全米科学アカデミーのなかに恒久的な全米生命倫理研究所を設立するのがよいのではないか。その権限は大きなものとする。そして、国際的な倫理、特に世界人権宣言の倫理を採用して、アメリカの閉鎖的な視点ではなく世界的な視点から出発できるようにすべきである<sup>6</sup>。 ■

筆者の George J. Annas は、ボストン大学公衆衛生大学院衛生法規・生命倫理・人権学科 (Department of Health Law, Bioethics & Human Rights, Boston University School of Public Health, 715 Albany Street, Boston, Massachusetts 02118, USA) に所属している。

共同執筆者の Sherman Elias は、ノースウェスタン大学ファインバーグ医学大学院産婦人学科 (Department of Obstetrics and Gynecology, Feinberg School of Medicine, Northwestern University, 333 East Superior Street, Chicago, Illinois 60611, USA) に所属している。

1. *Biotechnology Research in an Age of Terrorism* (National Academies Press, Washington DC, 2004).
2. Annas, G. J. *American Bioethics: Crossing Human Rights and Health Law Boundaries* (Oxford Univ. Press, New York, in the press).
3. Fuller, L. *The Morality of Law* (Yale Univ. Press, New Haven, 1964).
4. Annas, G. J., Caplan, A. & Elias, S. *New Engl. J. Med.* 334, 1329–1332 (1996).
5. Charo, R. A. *J. Law, Med. & Ethics* 32, 307–314 (2004).
6. *The Medical Profession and Human Rights for a Changing Agenda Handbook* British Medical Association (Zed Books, London, 2001).

# 生物多様性は育んでいくもの

近所の食料品店をのぞいてみれば、多様な品種を確保しておくことが大切な理由がわかる。

原文：*Growing biodiversity*

*Nature* Vol.430(967-968)/26 August 2004; www.naturejpn.com/digest

## Farmers' Bounty: Locating Crop Diversity in the Contemporary World

by Stephen B. Brush

*Yale University Press: 2004. 320 pp. \$37.50, £25*

**Stuart Pimm**

**生** 物多様性の定義は、遺伝子の多様性、種の多様性、生態系の多様性という3つの部分から構成されている。この定義を最もよく理解できるのは、眼前に熱帯林、背後にサンゴ礁、そして遠くには山々が見えるような海辺に立った時だ。一方、そのような海辺から遠く離れた都会の町では、真冬の雨の日でも、地元の食料品店が必ず営業している。生物多様性は、ヤッピーたちが住む地域の高級食料品店でも見ることができる。貧しい国々の農村部で開かれる市場でも見られる。高級食料品店では、20カ国から輸入されたコーヒーが売られ、ブロッコリー、チリメンキャベツ、カブキャベツ、キャベツ、メキャベツが売られている。これらの野菜は、すべて *Brassica oleracea* の変種だ。また、中米の農村部にある市場に行けば、さまざまな色、大きさや種類のトウモロコシが売られている。アンデス渓谷地域では、100種類ものジャガイモに出会えるかもしれない。本書で称賛されているのが、このような生物多様性なのだ。そして本書では、生物多様性全般に関わる分布、価値そして存続の問題に関する考察が行われている。

遺伝子の多様性が見られる地域は、種の多様性の場合と同様に、わずかな地域に限られており、そのような地域はバビロフセンターと呼ばれている。その名の由来となっているバビロフは、1920～1930年代のソビエト連邦で活躍した植物育種学者で、その科学的見解が時の支配者スターリンにとって都合が悪かったために、投獄され、獄中で一生を終えた。本書では、著者が理論生態学の世界に既然と立ち入り、遺伝子多様性が維持されるプロセスを解明しようとしている。農業の現場

での経験は、理論研究者によって広く評価されているとは言えないが、その経験からは重要な知見が得られる。生態学者は、環境が不均一であれば多様性が促進されるという考え方方が普遍性を有するかどうかについて議論する。その一方で、世界中の農家は、種子を選別する際に、生産地や生産年のちがいで、この種類が良い、いや、あの種類の方が良いといった議論を繰り広げる。選別によって残った種子は、売り買いされ、交換され、混ぜ合わされ、翌年の種蒔きに使われるのだ。

これに対して、1845年のアイルランドのジャガイモ農家や1972年の米国のトウモロコシ農家にとっては、均一種を栽培することが当たり前だった。そのため、これらの農家は壊滅的な被害を受けたのだった。今、メキシコ・チアパス州のトウモロコシ農家は、夏の干ばつ、強風、さまざまな種類の土壌、そして草刈りや肥料散布に要する労働力の不確実性との戦いを強いられている。農家は、伝統種、改良種、その両者を数十年間にわたって混ぜて使ってきた結果生まれた混交種のそれぞれについての味、収量や保存性の良し悪しといった複雑な状況を理解して、作付けの割合を決めている。単純化して言うと、農作物の多様性とは、毎年全世界で行われている生態学的実験の成果なのだ。この実験は、何らの規制も受けずに行われる非公式なもので、実験の中身は、新たな品種の登場と從来種の消滅によって絶えず変わり、そこには伝統、言語や伝説が大きく関わっている。実験に参加する人々の生活は、この実験の結果を正確に解釈できるかどうかにかかっているのだ。

新しい品種は、収量が多く、肥料が良く効き、特定の疫病や干ばつといったストレスに強いため、過去50年間にわたって、多様性をもつ伝統種の有力な対抗勢力となってきた。今や、アンデス渓谷地域のほとんど地区では、「新種の」ジャガイモが栽培されている。政

府も新種の栽培を奨励しており、儲けを増やしたい農家も同じだ。当然のことだが、ジャガイモの多様性は失われてきているが、伝統種のジャガイモの栽培も続けられており、その傾向は特に高地で強い。伝統種の方が味が良く、特にゆでたり、焼いたりすると、その味が引き立つ。また贈り物としても喜ばれる。うちの近所の食料品店の得意客を見れば、このことは事実確かである。

それでも多様性の喪失は、地域によっては大きく進んでしまっている。チロ工島(チリ)では、1920年代後半に約200種類のジャガイモが栽培されていたが、それが10年後には半減し、1970年には40種類を割ってしまった。著者は、こうした一般的な傾向とそれによって種々の問題が発生していることを認めているが、それについて世界規模での証拠固めが行われていない点に失望感をにじませている。それはもっともなことだと言える。学説上は、遺伝子多様性の減少を示す特徴として、在来品種の地理的分布が限られていること、在来品種の分布に経年変化がほとんど見られないこと、新品種の数や肥料・農薬の使用量が増えるにつれて在来品種が減っていることが挙げられる。確かにこのような結果を示唆する研究が発表されているが、疑いの余地の残る研究が多いのも事実だ。環境、経済や文化が重なり合って作用して、多様性が守られているケースは多い。その理由を解明するには、今よりも幅広い考察と評価作業が必要とされている。

多様性を保持するための方法としてよく知られているのが、国際米研究所(IRRI、フィリピン)のような種子バンクの利用だ。著者は、このような種子バンクの必要性を認めるが、決して十分な規模を備えていないと考えている。映画「ジュラシック・パーク」では、今から6,500万年前に絶滅した樹木種を熱心に研究する植物学者がヒロインとなっており、彼女

は、この木を食べる竜脚類恐竜を見つけて、驚きに息をのんだ。この映画では、絶滅した動物種のDNAから、その動物種を作り出すというストーリーが展開されているが、どうやって恐竜に特定の樹木を食べることを教え込むのかという点は語られていない。これと同じことが種子バンクにも言えるのだ。確かにDNAは保存されているが、異なる種の間での複雑な関係、共生生物や病原体、そして種蒔き、手入れ、収穫、保存の方法を知っていた農民の伝統は失われている。本来の場所で生育しているそのままの状態で保存することが極めて重要で、それに伴う選別作業を保存することも同じように重要なのだ。ルワンダの女性による豆の品種の選別作業、そしてネパールでの米やヒヨコマメの品種の選別作業は、一般的の植物育種学者よりも優れた結果を生み出すのだ。

もし多様性に価値があるとすれば、その価値の所有権者は誰なのだろうか？本書中で最も良く書いていると思われる章において、

著者は、その答えが二極化し、それがますます顕著になってきていると記している。多くの熱帯諸国では、生物的海賊行為(biopiracy)への恐れが広く浸透している。これまで金持ちが貧乏人の財産を奪ってきたこと、そしてこれからも奪い続けていくという筋書きによって、ノートしか携帯していないような研究者による研究許可申請までが影響を受けている。また生物多様性保全条約の背景には、植物育種学者の権利の方が貧しい農民の権利より優先されているという強力な主張がある。しかし種子の交換によって利益を得るのが貧困国であるケースは多いのだ。例えば、ベトナムでは、IRRIを利用して作り出された品種に由来する米が収穫量のほとんどを占めている。これに対して米国の場合には、その割合は全体のわずか6分の1に過ぎない。

一部の諸国は完全保護を求めており、例えばエチオピアは、コーヒーの苗木の輸出を禁止している。コロンビアやコスタリカなどのコーヒー生産大国はコーヒーの保有遺伝子の

種類が少ないため、いったん病気が発生すれば、エチオピア産のコーヒーに席巻される可能性がある。もし両国間で報復措置を発動し合えば、その悪影響が広範囲に及ぶことは間違いないだろう。

生物資源調査(bioprospecting)に関する条約を締結している国々もあるが、こうした条約は功罪半ばしている。例えば、それぞれの品種について誰が知的財産権の所有者なのか、という点が必ずしも明確になっていない。所有権を幅広く認めるようになると、これまで長い間、人類共通の遺伝子資源の形成に関与してきたのに、現代の特許法令による保護対象から漏れてしまった人々の権利が損なわれる、というのが著者の結論で、説得力をもって示されている。■

評者のStuart Pimmは、デューク大学ニコラス環境・地球科学学科(Nicholas School of the Environment and Earth Sciences, Duke University, Durham, North Carolina 27708, USA)に所属している。

## essay concepts

# 死と税金と、熱力学の第二法則

## 可逆計算：論理的にも物理的にも逆にできるコンピューターの実現可能性とは？

原文：Going into reverse

Nature Vol.430(971)/26 August 2004; www.naturejpn.com/digest

### Seth Lloyd

この世で確実なのは、1. 死ぬこと、2. 税金を払わされること、3. 熱力学の第二法則がなりたつこと。この3つは、エネルギーやお金のように、役に立って手の届く形をしたものと(同量の)役に立たず手の届かない恰好に変換するプロセスだ。だが、この3つのプロセスにも付隨的な効用がない訳ではない。税金は道路や学校の建設に使われる。熱力学の第二法則は車やコンピューターを動かし、代謝を促進する。そして死は、少なくとも、終身在職権を持つ教授のポストを空席に

してくれる。

人生に幸福をもたらすほとんどの物は、生命そのものを含めて、有用なものから無用なものへ、すなわち秩序から無秩序へのゆるやかな劣化、つまり物理学用語でいうエントロピー増大によって生じている。それでも、時にこうした避けられない資源の散逸を遅らせたり、ちょっとの間だけ止められたりしたら、どんなに素晴らしいことだろう。

幸いなことに、熱力学の第二法則でも常にエントロピーが増大することは必要とされていない。エントロピーが一定のままである可

能性も残されているのだ。事実上可逆的な、ある種のプロセスが存在する。その場合、エネルギーは散逸せず、エントロピーも一定のままか、ほとんど変わらない。たとえば、化学反応は、非常にゆっくり起きれば可逆的である。その場合、段階ごとにごくごく少量のエネルギーが散逸される。トンネル効果や超伝導のようなコヒーレントな量子力学的なプロセスも、可逆的で、散逸せずに機能できる。そして原理的には、計算も可逆でありうる。

今から40年以上も前に、Rolf Landauerは、計算と熱力学の第二法則の間に基本的な関連

性があることに気づいた。物理プロセスと同様に、論理プロセスだって、可逆な場合もあれば不可逆な場合もある。論理演算は、出力から入力データを推論できる場合、可逆的だという。例えば、0を1に変える、あるいは1を0に変換するNOT演算は可逆的である。なぜならば、 $Y=NOT\ X$ の場合、出力 $Y$ が0だとわかれれば入力 $X$ が1だったと推論できるからだ。対照的に、ERASE(=消去)演算は、その入力に関係なく常に出力が0となるので不可逆である。出力から入力の情報が得られないからだ。

Landauerは、論理的な不可逆性と物理的な不可逆性の間の強い関連性を指摘した。第一に、NOTのような論理的に可逆な演算は、物理的に可逆な演算を使って実行できる。例えば、ある軸の周りを時計回りにスピンする陽子がYESと記憶(=レジスター)され、反時計回りにスピンする陽子がNOと記憶されるとすれば、磁場をかけることにより、散逸やエントロピーの増大なしに、陽子をYESからNOへ反転させたり、また元に戻したりすることができる。反転するスピンは、物理的に可逆な方法でNOT演算を行なう。

第二に、ERASEのような論理的に不可逆な演算は、物理的な不可逆性を必要とする。コンピューターのメモリーの1ビットは、極小のコンデンサーの電荷によって記憶される。コンデンサーを充電されていない状態に戻して、ビットを消去すれば、2回に1回は、コンデンサーの中のエネルギーが熱として散逸する勘定になる。

従来の計算法は、可逆と不可逆の両方の論理演算から成り立っている。したがって当初、論理的な不可逆性は物理的な不可逆性を必要とするという考え方(Landauerの原理)は、計算には散逸がつきものだということを意味していると思われていた。ところが、Charles BennettとEd Fredkinが、それぞれ別々に、論理的に不可逆な演算のほとんどは、それよりもう少し複雑な可逆演算に組み込める気に気づいた。その結果、計算は、原理的には、ゆっくりした化学反応やコーヒーレントな量子プロセスのような可逆な物理プロセスを使っ

て実行することができる。より複雑な可逆プロセスに組み込めないような、論理的に不可逆なプロセスの1つが「消去」である。コンピューターから、あるビットの最後のコピーを消去したとき、他のどこかでエントロピーが増大せざるをえない。

コンピューターの場合、落とし穴は、詩人John Donneの言葉を借りるのであれば、キュービットは独立自足の孤島ではないということだ。1キュービットの、残りの宇宙との相互作用がどれほど弱かろうとも、遅かれ早かれ、相互作用の1つがそのキュービットを反転させ、計算にエラーを生じさせるだろう。

エントロピーの積み重ねのように、エラーは望まれない情報から成っている。コンピューターは、エラーを検出し訂正する誤り訂正コードにより、誤った情報を消去して整理することもできる。だが、Landauerの原理によって、コンピューターの中の1ビットを消去することは、他のどこかでのエントロピーの増大を必要とする。コンピューターにとって、エラーはエントロピーの究極の発生源なのだ。

もちろん、エラーだらけでゆっくりした計算なら、いくらでも散逸を抑えて実行できる。しかし、熱力学の第二法則によれば、速く正確に計算しようとすれば散逸は避けられない。

では、「最期」はあるのだろうか? 計算も、あらゆる物理プロセスのように、ゆっくりと終わっていくのだろうか? いや、実際には、宇宙の膨張が自由エネルギーを供給し続け、エラーを棄てる環境を用意し続けるかぎり、既知の物理学法則によれば、どうやらコンピューターは永久に計算を続けられそうだ。永遠のコンピューターは、いったいぜんたい何を計算するのだろうか? その答えは、待つか方法はないだろう。 ■



過去10年にわたって、論理的および物理的な可逆計算は、論理的に可逆なCMOS(=相補型金属酸化膜半導体)回路を利用してつくられてきた。おそらく、さらに印象的なのは、試作段階にある量子コンピューターが、非常に小さく単純とはいえ、微視的レベルにおいて、ほとんど無視できるほどのエントロピーしか生じさせないことだろう。量子コンピューターは、論理的および物理的に可逆な方法で計算を実行するデバイスに、今のところ最も近いものだ。(もちろん、量子コンピューターを動かすために必要な、レーザーや超伝導磁石や希釈冷却装置は多くの熱を発生する。しかし、量子コンピューターの「心臓部」で行なわれる量子論理演算それ自体は、基本的には可逆で、ほとんどエネルギーを散逸しない。)

ではどんな落とし穴があるのか? Bennettの当初の構想と可逆的なCMOSコンピューターにおいて、問題は、速度がゼロの極限においてのみ散逸がゼロになることだ。量子コ

筆者のSeth Lloydは、マサチューセッツ工科大学の機械工学部(the Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology 3-160, Cambridge, Massachusetts 02139, USA)に所属している。

## FURTHER READING

See articles by R. Landauer, C. H. Bennett and S. Lloyd in Leff, H. S. & Rex, A. F. (eds) *Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information, Computing*, 2nd edition (Institute of Physics, Bristol, 2003).

# アノイキス：癌と宿無し細胞

Lance A. Liotta and Elise Kohn

細胞が基質から離れても生き延び、体内の別の場所に移動できるようにするタンパク質が見つかった。  
このような組みは癌細胞にとってとりわけ有利だと考えられる。

原文：*Cancer and the homeless cell*

Nature Vol. 430 (973-974) / 26 August 2004; www.naturejpn.com/digest

**臓** 器を作る細胞は生まれた場所の近くに留まるのが普通であり、それどころか生まれたその場所に依存して生きている。こうした細胞は自分を取り囲む周囲の細胞と連絡し合って相互利益をはかり、また細胞の下にある基質から「本拠地」にいることを知らせるシグナルを受け取っている<sup>1</sup>。基質と接触しなくなった細胞は死んでしまう。この過程は、「宿無し」を意味するギリシャ語から、「アノイキス」(anoikis)と呼ばれる<sup>2</sup>。これに対して癌細胞は、「本拠地の芝生」から離れてもホームシックにかかって死んだりはせず、正常細胞とまったく対照的である。癌細胞が浸潤や転移をするには、本来の居場所を離れて他所の組織に移っても生存・増殖する能力が不可欠である。この戦略は癌細胞集団の拡大や播種を促すため、残念ながら往々にして患者に死をもたらす。今回 Douma たち<sup>3</sup>は、アノイキスに耐えられる細胞を選び出して、転移にかかわるタンパク質を新たに見つけた (Nature 8/26 号 p.1034 参照)。

Douma たち<sup>3</sup>が調べたのは、ラットの腸管内壁を覆う上皮細胞である。上皮細胞の悪性化では典型的に足場非依存性増殖が進むことが報告されている<sup>4</sup>。Douma たちは、足場となる基質に付着していくなくても細胞が増殖できるようにする遺伝子、言い換えるとアノイキスの脅威に耐えて生き延びられるようにする遺伝子を突き止めるため、ゲノム全域で一律の遺伝子スクリーニングを行った。さまざまな遺伝子を含むDNA分子をラット培養細胞に導入したのち、接着できる培養皿から接着できない環境へと細胞を移し替えたのである。

対照用の(無操作の)細胞は、この手順で基質から離されると死んでしまった。しかし、操作した細胞のうち 1 つの集団は生き残った。

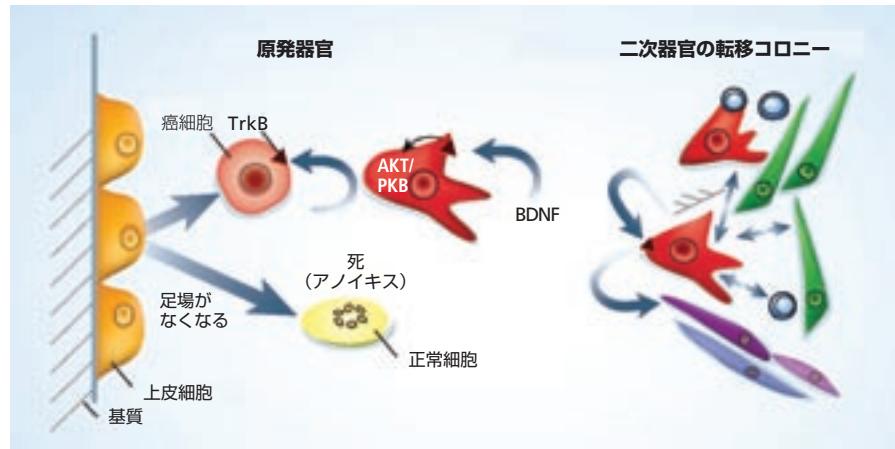


図1 生き延びて広く散るべし。上皮細胞は通常、互いに接着し合い、また基質とも接着している。こうした上皮細胞が本来の居場所から離れるとプログラム細胞死を起こす。この過程をアノイキスという。これに対して癌細胞は、自己分泌もしくは傍分泌の機構を使ってプログラム細胞死を抑え、組織浸潤を引き起こし、酸素供給用に新生血管の成長を促して、生き延びることができる。Douma たち<sup>3</sup>の報告にあるように、自己分泌型(自己刺激型)の機構には TrkB タンパク質の産生が含まれる。TrkB 産生は脳由来神経栄養因子(BDNF)に活性化され、続いて TrkB が AKT/PKB タンパク質を活性化する。傍分泌型の機構には、外部の成分(免疫細胞、他の基質類、血管の細胞など)との相互作用が含まれる。図では簡略化のため、傍分泌型の機構は転移部位のみで作動するように描いてあるが、実際には原発腫瘍でも作動しうる。

Douma たちが調べたところ、これらの細胞には TrkB というタンパク質をコードする DNA 分子が導入されていた。TrkB は神経系に関与することでよく知られており、主要なリガンドである脳由来神経栄養因子(BDNF)と協同で働いて、網膜細胞やグリア細胞といった正常な神経構成細胞の増殖や分化、生存を促進する<sup>5</sup>。Douma たちが見つけた生き残りの上皮細胞は、この仕組みを流用し、宿無しになつても死なずにすんだものなのだ。

ところが Douma たちは、基質から離れた TrkB 発現細胞が長球形の細胞凝集体となつて生き延び、増殖し続けることも見つけた。では、これらの細胞が生き延びられたのは、単に接着の相手を基質から離り合う細胞へと切

り替えたためなのだろうか。そうは思われない。Douma たちのさらなる実験によれば、どうやら TrkB の産生で細胞内回路が連結しなおされ、アノイキスに耐性をもてるようになったらしい。具体的にいうと、TrkB がホスファチジルイノシトール-3-OH キナーゼ(PI(3)K)の活性化を引き起こしたのだ。PI(3)K はタンパク質キナーゼAKT/PKB という別の酵素を活性化することがわかつており<sup>6</sup>、この酵素も TrkB 産生細胞で活性があった。この結果、アノイキスやこれに似た細胞死に関与するカスパーゼという DNA 切断酵素が阻害されたのである。

PI(3)K 酵素は、転移に伴って見られる他の多くの細胞機能も助長する<sup>6-8</sup>。たとえば、

PI(3)K 経路のおかげで細胞は「骨格」を変形したり「足」を突き出したりすることができ、それにより移動可能となる。これは組織への浸潤にあたって重要である。この経路は、低酸素状態になった腫瘍内で新生血管形成が促されることにも関係する。当然のことながら、上皮癌の主要な種類すべてで PI(3)K 経路が制御されなくなっていることが報告されている。その原因となりうるのは、経路上流の抑制因子タンパク質の減少や、PI(3)K の構成的活性化、もしくは経路下流成分の活性化だが、今回の成果から、どうやら経路上流の活性化因子 TrkB の産生も原因になるらしい。この PI(3)K 経路を考慮に入れることで、TrkB が単独でどうやってラット腸管上皮細胞にアノイキス耐性を起こすのか、またDoumaたちが示したように、なぜTrkB をマウスに注入しただけで細胞に転移能を持たせるのに十分なのかを説明できるかもしれない。*in vivo* では、癌細胞に固有の遺伝的不安定性のせいで、TrkB の発現が増大したり経路下流の出来事が活性化されたりする可能性も考えられる。

転移に必要な特徴すべてを引き起こすのに必要(もしくは必要十分)な分子の例は、実験モデルでいくつか見つかっている。最近見つかった例としてTwistがあり、この分子は遺伝子転写因子で、発生中の体型変化を制御する<sup>9</sup>ことがわかっている。転移に必要な分子的プログラムはさまざまな開始点から引き起こされると推測できる。だがDoumaたちの研究成果を踏まえると、基質や他の細胞との接着がなくても細胞を生存可能にする成分は、転移誘導のどの過程にも含まれているという見方もできるかもしれない。この見方と符号するように、Twist を強制的に発現させると細胞浸潤が促進され、E-カドヘリンタンパク質に介在される細胞間接着が消失する原因となる<sup>9</sup>。おそらくTwist もまたPI(3)K 経路やAKT/PKB を流用できるのだろう。PI(3)K 経路もAKT/PKB も、E-カドヘリンが関与する細胞間認識に関係することがわかっている<sup>10</sup>。

TrkB は宿無しになった細胞を生き延びさせ、ひいては転移を可能にする。とすれば、このタンパク質の阻害は有効な抗癌策となりはしないだろうか。ことによるとそうかもしれないが、この憶測については現実的になるべきだろう。腫瘍細胞は、TrkB やBDNFに介在されるような自己刺激型(自己分泌型、つまり

細胞が自身の分泌した因子類に作用を受ける仕組み)のシグナル伝達ループによってか、もしくは傍分泌型(細胞が分泌した因子類が隣接細胞に直接作用する仕組み)の環境との相互連絡によって生き延びることができる(図1)。こうした相互連絡機構は同一の分子を使っている可能性がある。たとえば、BDNFは血管内壁をおおう細胞によって作られ、低酸素状態で増産される<sup>11</sup>。こうした出来事が、原発腫瘍や転移部位で腫瘍細胞と新生血管の両方の生存を促進するのかもしれない。ただし、傍分泌型シグナル伝達に関与する分子は他にもあり、TrkB を標的とする治療戦略がこうした他のチャネルにより裏をかかれて阻まれる可能性を想定しておくべきだろう。

宿無し状態は、細胞に降りかかるさまざま環境ストレスの1つにすぎない。こうしたストレス問題を克服する1つの方法は、細胞にとって健康的な新しい場所を探すことだ。したがって細胞が生存のために移住を迫られるることは頻繁にある。たとえば栄養分が不足した酵母は移動用の菌糸様構造を伸ばして、もっとよい条件を探す。同じように、栄養分に恵まれない粘菌コロニーは「偵察隊」を派遣する。そして癌細胞は、酸素やホルモン、栄養分が欠乏したり過密状態になったりすると、転移して(つまり局所の組織に浸潤し、リンパ

や血流中に入り、離れた場所で循環系を出て最終的に二次的コロニーを確立することで)生き延びようとするらしい。

過酷あるいは異質な環境に置かれても死を回避することは、どんな放浪行動の場合にも基本となる必要条件だろう。Doumaたち<sup>3</sup>が報告したような生存と移住の両方を促進させる仕組みは、腫瘍細胞(と新生血管)に好都合に働くと思われる。それどころか、この仕組みは腫瘍細胞が転移の「適性テスト」に合格するための必須条件なのかもしれない。 ■

著者の Lance A. Liotta と Elise Kohn は米国立衛生研究所の国立癌研究所(the National Cancer Institute, National Institutes of Health, Bethesda, Maryland 20892-1500, USA)に所属している。

e-mail: lance@helix.nih.gov

- Liotta, L. A. & Kohn, E. *Nature* **411**, 375–379 (2001).
- Frisch, S. M. & Ruoslahti, E. *Curr. Opin. Cell Biol.* **9**, 701–706 (1997).
- Douma, S. et al. *Nature* **430**, 1034–1040 (2004).
- Lawlor, E. R., Scheel, C., Irving, J. & Sorensen, P. H. *Oncogene* **21**, 307–318 (2002).
- Huang, E. J. & Reichardt, L. F. *Annu. Rev. Biochem.* **72**, 609–642 (2003).
- Wendel, H. G. et al. *Nature* **428**, 332–337 (2004).
- Brader, S. & Eccles, S. *Tumor* **90**, 2–8 (2004).
- Davies, M. A. et al. *Cancer Res.* **58**, 5285–5290 (1998).
- Yang, J. et al. *Cell* **117**, 927–939 (2004).
- Pece, S. et al. *J. Biol. Chem.* **274**, 19347–19351 (1999).
- Kim, H., Li, Q., Hempstead, B. L. & Madri, J. A. *J. Biol. Chem.* **279**, 33538–33546 (2004).

## 瓶の中に入った手紙

Woodruff T. Sullivan III

地球外文明は、具体的な物質をはるかな星間を越えて送る方が、電磁波を使うよりも交信を行う際の効率がずっとよいことをすでに知っているかもしれない。

原文 : *Message in a bottle*

*Nature* Vol.431(27-28)/2 September 2004; <http://www.naturejpn.com/digest>

私

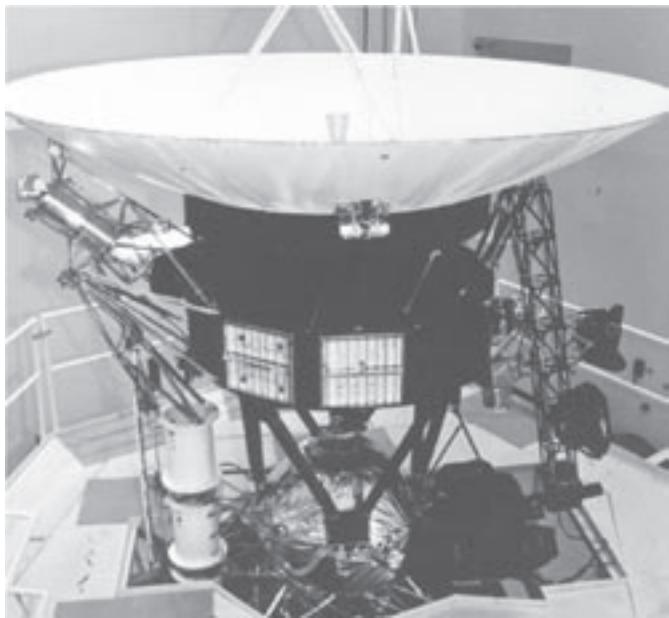
たちは孤独なのだろうか。地球外知的生命探査(SEI)はまだ信号を探知していないが、これまでのところ宇宙全体のほんの少しあなた探索されていないことから、その努力が続いている。このような計画のほと

んどすべては地球外生命を捜すために電波望遠鏡を使うという Cocconi と Morrison が45年前に *Nature* に発表した<sup>1</sup>有力な方法論を踏襲している。星間交信の手段として、その効率についてさまざまな議論を重ねた上で、電

磁波(当初は無線に使われる波長、しかし光の波長も使われた)が重要視された。ところが、*Nature* 9/2号 p. 47で Rose と Wright<sup>2</sup>は、すぐに届かなくともよいのなら、長い通信文は物体の形、実質的には瓶の中に入った手紙として送られた方が実はより効率が高いと主張している。このような提案そのものは新しいものではないが<sup>3,4</sup>、これまで定量的な解析で裏付けられていなかった。

私たちと交信しようとしているかもしれない地球外知的生命の用いる通信装置の構成を推測することは、地球外知的生命探査における重要な問題である。彼らの送信機はどちらの方向を捜せば見つかるのだろうか。どの周波数を捜せばよいのか。通信文はどのように暗号化されている可能性があるのか。放送はどのくらいの頻度で行われているか。(この論考を行うにあたって、信号は計画的に送られていると仮定し、彼らの普段の活動から漏れてきたにすぎない信号が最初に見つかることもある可能性も同じ程度にあると思われていることは脇に置く。) 地球外知的生命は、例えばプエルトリコにある口径 305m のアレシボ電波望遠鏡の地球上最も強力な無線送信機やハワイにある口径 10m のケック光学望遠鏡が備えるパルスレーザーを使って私たちが行えたのと全く同じように、電磁波のビームを調整するであろうこれまで考えられてきた。ところが、Rose と Wright は情報を織り込んだパッケージを送る方がより良い選択だと結論を下している。

通信文が短いか地球外知的生命がそばにいないかぎり、この「書く」戦略は「放射する」戦略よりも送信情報1ビットあたりのエネルギーが少なくて済む。円錐形をした電磁波のビームは外へ行くにしたがって必然的に広がり、その一部分が意図した目標に的中したとしても、エネルギーの大部分は無駄になる。これにひきかえ、パッケージは宇宙を移動することで「薄まる」ことはなく(図1)、望みの目的



**図1** あっちの方に誰かがいるのだろうか。1977年に打ち上げられ、現在太陽系の縁にいるボイジャー宇宙機(ここではプロトタイプの写真を示す)は地球からの音と映像を記録したレコードを携えていて、それには数学的および生物学的情報が含まれている。Rose と Wright<sup>2</sup>はこのような情報のパッケージを宇宙へ送ることが長い通信文を私たちに送ろうとしている地球外知的生命にとって最も効率のよい方法であり、それ故私たちは地球に近い別の文明から送られた同じような物体が見つかる可能性に気を配るべきだと示唆している。

地を正確に目指すと考えられる。とはいっても、短い通信文の場合は、どんなにパッケージが小さくても打ち上げ、遮蔽、到着時の減速に関わる諸経費のために、電磁波の方が有利だ(FedExは1μgのものを送る時にも100gのときと同じ代金を請求することを思えばよい)。地球外知的生命と双方向の会話をを行う際には、電磁波のもつ光の速さは特に優れている。

長い通信文の例として、現在地球上に存在するすべての文字情報と電子情報を考えてみよう。これは合計で約1エクサバイト( $10^{18}$  バイト、あるいは  $10^{19}$  ビット)になると推定される<sup>5</sup>。Rose と Wright は、走査型トンネル顕微鏡法を用いれば、なんと(平方ナノメートルサイズで)1gの物質にこれらの全ビットを刻み込むと計算した。しかし、この貴重なパッケージを地球から光速の0.1%の速度に加速し、10,000光年の航路中に受ける放射線による損傷から守り、そして到着時に減速するためには10,000kgの繭が必要であろう。

Rose と Wright の主張にはまださまざまなかじりの余地があるだろう。私たちは地球外知的生命はおろかこの惑星で経済性がどれくらいい有効か理解しておらず、そのためには著者ら

が仮定しているように通信文の媒体を選ぶ際の重要な基準が1ビットあたりに費やされるエネルギーであることは明らかではない。そのうえ、たとえ効率よく送られたとしても、実際にこのようなパッケージが見つけられて開かれることがあるかどうか分からない。もちろん、電磁波が私たちの方を向いていて実際に地球が今その中にいるかもしれないとしても、その信号を見つけることがあるかどうかも分からない。いずれにしても、多様な通信媒体を繰り返し送ることは地球外知的生命と私たちが成功する機会を増やすことになると思われる。

それでは、この結果は今日のSETI戦略にどのような影響を与えるのだろうか。「私たちはここにいる」という短い通信文

はやはり電磁波で送るのが最も効率がよいと思われ、同じものを探し続けるべきだ。しかし、一方の通信にのみ関心がある極めて進歩した地球外文明から送られてくる、情報に満ちた作られた物体が、いつの日か私たちの太陽系で見つかる可能性にも注意が払われるべきであるようだ。この侵入物体は太陽か惑星を周回していたり、惑星、月、あるいは小惑星上に眠っているかもしれない。このようなシナリオは Arthur C. Clarke の『2001年宇宙の旅』を思い起こさせる。このなかで、月面で見つかったモノリスは地球外知的生命が残していくものだった。天文考古学者がたとえこのような物体を見つけたとしても、それはSF小説が科学的事実となる、けっしてはじめての例ではないのである。

著者の Woodruff T. Sullivan III はワシントン大学天文学部(the Department of Astronomy, University of Washington, Seattle, Washington 98195, USA)に所属している。

e-mail: woody@astro.washington.edu

- Cocconi, G. & Morrison, P. *Nature* **184**, 844–846 (1959).
- Rose, C. & Wright, G. *Nature* **431**, 47–49 (2004).
- Bracewell, R. *Nature* **187**, 670–671 (1960).
- Papagiannis, M. Q. J. R. Astron. Soc. **19**, 277–281 (1978).
- Murphy, C. *Atlantic* **277**, No. 5, 20–22 (1996).