

日本語で読む世界の最新科学ニュース

nature ダイジェスト

06
2012

カフェインレスを求めて

成人卵巣から幹細胞

失恋雄バエは酒に走る

泥遊びのススメ

若手研究者が減っている

脳梁離断からわかったこと

無毛マウスに毛が生えた
— 再生医療で全身治療!?

安くても高性能な
宇宙望遠鏡

科学者よ、
政治に無関心たるなかれ

実験用霊長類の必要性

FROM 日経サイエンス

男ならヨーグルトを

ゴールドバッハの素数

定価 680 円

nature climate change

これからの地球へ

Nature Climate Change では
研究論文だけでなく、Opinion や
Analysis、Review を通して
未来を考えます。



FOTOSEARCH/GETTY IMAGES

カフェインレスコーヒーを求めて 10

表紙画像：FOTOSEARCH/GETTY IMAGES

病気など何らかの理由でカフェインを摂取できない人は、非常に多い。それでも飲みたくなるのが、コーヒーだ。カフェインレスコーヒーの確立は、大きな市場を生む。

NATURE NEWS

- 03 振られた雄バエは
やけ酒をあおる
- 04 小児期の細菌暴露は大事
- 08 並行臨床試験で薬効が明確に
- 15 銀河中心を探る
硬X線宇宙望遠鏡
- 21 RESEARCH HIGHLIGHT | ベネチアの沈下は続き、
東に傾く

NEWS SCAN

- 06 男ならヨーグルトを
- 06 ゴールドバッハの素数

NEWS & VIEWS

- 24 変装させて反応させる
- 26 なぜ、いいかげんに擬態するのか

JAPANESE AUTHOR

- 22 ピンボケ度で距離を知る
ハエトリグモの目
— 小柳 光正

EDITORIAL

- 28 実験用霊長類の確保に向けて、
立ち上げられ
- 29 科学と政治の関係を直視せよ

HIGHLIGHTS

- 30 2012年4/5～4/26号

英語で Nature

- 34 金星で磁気嵐が見つかる

02 再生医療で マウスの全身を治療!?

マウスで、心臓、目、そして毛髪機能回復に成功した。心疾患や眼疾患の治療はもちろん、脱毛症に悩む男性にも朗報だ。



写真提供：辻孝 / 東京理科大学

05 国立大学で 若手研究者が減少傾向

日本の国立大学では若手の教員が減りつつある。原因は何か。対応策はあるのか。このままでは科学競争力の低下が危ぶまれる。



PRISMA BILDAGENTUR AG/ALAMY

07 成人女性の卵巣から 幹細胞

女性は未成熟卵母細胞を持って生まれ、生後、卵母細胞の数は増えないと言われてきた。この定説を揺るがす発見だ。

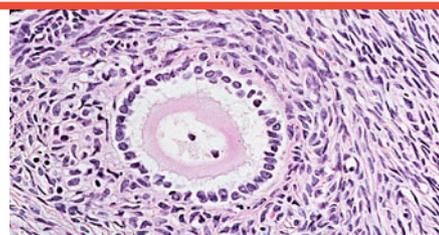
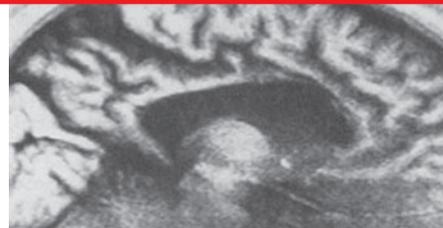


IMAGE SOURCE/ALAMY

16 「分離脳」が 教えてくれたこと

重度のてんかん治療、脳梁離断。この手術を受けた患者の協力で、左右の脳の機能的な違いについて多くの知見がもたらされた。



M. GAZZANIGA



生体工学で作製された再生毛包原基をヌードマウスに移植すると、発毛した。この技術は男性型脱毛症の救世主となるか。

再生医療でマウスの全身を治療!?

Regenerative medicine repairs mice from top to toe

LEILA HAGHGHAT 2012年4月18日 オンライン掲載 (doi:10.1038/nature.2012.10472)

マウスでの3つの独立した研究から、
毛髪、目および心臓細胞に正常機能を回復できることが示された。

4月に発表された3つの研究によると、新しい細胞をマウスに導入すれば、毛髪であろうと目であろうと心臓であろうと、異常細胞と置き換えることができ、正常機能の回復に役立つことが示された。研究者たちは、現在、この手法がヒトでも機能するかどうかを確認するために、臨床試験をめざしている。

毛髪を生やす

1つ目は、成体マウスおよび脱毛症のヒトの、上皮性幹細胞と毛乳頭細胞から作製した毛包原基をヌードマウスに移植して正常な毛包を再形成させ、発毛させたという研究だ¹。研究を率いた東京理科大学(千葉県野田市)の辻孝は、この技術により男性型脱毛症の治療が期待できると言う。

毛は生える部位や機能によって種類が異なるが、今回、体毛由来の幹細胞から

は軟毛が、髭由来の幹細胞からは硬毛が生えることが確認できた。また、発毛に要した期間(3週間)も正常な発毛期間と同じだった。さらに、生えた毛は、正常な毛周期を示し、皮膚下で筋肉や神経との結合も確立。毛を逆立たせる神経伝達物質のアセチルコリンに応答して、立ち毛することもわかった。

ニューヨーク大学(米国)の皮膚科医、伊藤真由美は、今回の研究はヒト細胞を用いて毛包を再構築した最初の報告であると言う。しかし、この技術の有効性が認められるには、成長できる毛包の数を増やせることも示す必要がある。

夜に見える

2つ目は、網膜の遺伝性疾患、先天性夜盲症のマウスの視力が一部回復したというものだ²。ロンドン大学ユニバーシティカレッジ(英国)の遺伝学

者 Robin Ali らは、夜間視力に機能する桿体前駆細胞を、薄暗がりでの視力に必要なタンパク質 α -トランスデュージン を欠損するマウスの網膜に移植した。網膜に統合されたのは、移植した約2万6000個の桿体細胞(通常、1つの眼には600万個の桿体細胞がある)のうち10~15%だったが、視力は改善した。

さらに Ali らは、回転回折格子の前にマウスを置き、暗線と明線のコントラストの変化、および線の太さの変化に対する感受性を検討した。すると、移植マウスは、移植を受けなかったマウスよりも感受性が高まっていた。また、移植マウスは、視覚的な合図で脱出ルートを示した水迷路からもより早く脱出できた。

現在、Ali らは、ES細胞を使い、黄斑変性(もう1つの視細胞である錐体細胞に損傷がある)での効果を検討している。

拍動する心臓

3つ目は、カリフォルニア大学サンフランシスコ校(米国)グラッドストーン心血管疾患研究所の Deepak Srivastava らが、心臓の繊維芽細胞を直接心筋細胞に再プログラム化したという研究だ³。Srivastava らは、成体マウスにレトロウイルスを用いて3つの転写因子を導入して再プログラム化を誘導し、心機能の改善に成功したのだ。

アドバンスド・セル・テクノロジー社(米国カリフォルニア州サンタモニカ)の再生医療専門家 Robert Lanza は、再生医療は大きな発展を遂げており、きわめて有望であると将来を楽観している。「この3つの論文は氷山の一角です。私たちが老いるまでには、医師が『脱毛症になったり、失明したり、血管系の疾患のため脚を切断さえしたりしていたことが信じられますか?』と回想しながら、細胞を注射し、治療しているでしょう」。

(翻訳：三谷祐貴子、編集：編集部)

1. Toyoshima, K. et al. *Nature Commun.* **3**, 784 (2012).
2. Pearson, R. A. et al. *Nature* <http://dx.doi.org/10.1038/nature10997> (2012).
3. Qian, L. et al. *Nature* <http://dx.doi.org/10.1038/nature11044> (2012).

振られた雄バエはやけ酒をあおる

Rejected flies turn to booze

Ed YONG 2012年3月15日 オンライン掲載 (doi:10.1038/nature.2012.10227)

セックスとアルコールによる報酬系の基盤には、
たった1つの神経伝達物質が関与している。

キイロショウジョウバエ (*Drosophila melanogaster*) の雄は、雌の生殖器にすり寄り、腹部を軽くたたき、翅で歌を歌って、雌に求愛する。だが、その甲斐なく振られてしまうと、悲しみを酒で紛らわせるらしい。このほど、求愛に失敗したショウジョウバエの雄がアルコールを含む餌を好んで摂取することを、カリフォルニア大学サンフランシスコ校 (米国) の Ulrike Heberlein とハワード・ヒューズ医学研究所ジャネリア・ファーム (米国バージニア州アシュバーン近郊) の Galit Shohat-Ophir らを中心とする研究チームが発見した¹。

研究チームは、ハエの脳内にある神経ペプチド F (NPF) というシグナル伝達物質がこの行動の基盤となっていることを明らかにした。交尾を拒絶された雄は NPF のレベルが低く、そのためにアルコールに報酬を求めているようなのだ。しかし、人為的に NPF を投与すると、交尾できていない雄でもアルコールに背を向けるようになる。Heberlein は、「この研究は、セックスのような本能的報酬とアルコールのような薬物的報酬との分子的なつながりを示しています」と語る。

ノースカロライナ大学チャペルヒル校 (米国) でアルコール中毒を研究している Todd Thiele によれば、セックスとアルコールの双方で同じ物質が報酬系の基盤になっている可能性が発見されたのは重要なことだという。今回の結果は、本能的報酬を支配する神経経路をアルコールが強奪して乗っ取るという考え方にぴったり合う、と Thiele は説き、「ア

ルコール依存症につながる可能性がある成果」とたたえる。

ヒトの脳では、NPF と似たシグナル伝達物質の神経ペプチド Y (NPY) が働いており、NPY レベルとアルコールや習慣性薬物の嗜癖との関係を調べる研究がすでに始まっている。

セックスと薬物と NPF

Shohat-Ophir は、雄を交尾の済んだ雌とめあわせ、4 日間にわたって繰り返し交尾が拒絶されるようにした。すると、拒絶された雄は通常の餌よりもアルコールが添加された餌を好むようになった。一方、交尾に成功した雄にはそうした嗜好は認められなかった。また、拒絶された挙句にようやく交尾することができた雄からは、アルコール嗜癖が消えた。

次に、ハエの脳内で NPF の産生と受容を行っている部分を操作して、NPF を減らすとハエがアルコール入りの餌に向かうようになり、NPF を増加させるとその嗜好性は見られなくなることがわかった。さらに、特定の匂いと NPF の放出が関連するようにハエの条件付けを行ったところ、ハエはその匂いに引き寄せられ、交尾やアルコールがなくても NPF は満足を与えていると考えられた。

同様に、哺乳類では NPY が報酬系の通貨として働いている可能性がある。ストレスの多い事象はマウスやラットの NPY レベルを低下させ²、NPY レベルが低下したマウスやラットはアルコールの摂取量が増加するのだ³。

NPY は、ネガティブな経験と薬物で



IMAGEBROKER/ALAMY

報酬系を満足させようとする行為を結びつけている可能性がある。そうだとすると、ハエに NPF を与えてアルコールに向かわないようにさせるように、人も NPY のレベルを高めることによってそのつながりを断ち切ることができるかもしれない、と Heberlein は推測する。Heberlein によれば、自殺した人⁴や心的外傷後ストレス障害 (PTSD) にかかった人⁵の脳で NPY レベルが低い傾向があるというが、どちらが原因でどちらが結果なのかは判然としない。

「受容体の機能に影響を与える NPY と薬物は、すでに、不安、PTSD、気分障害、肥満に対して臨床試験が行われており、アルコール中毒の治療にも使える可能性が示唆されています」と Shohat-Ophir は説明する。

つながりのすべてが明らかにされたわけではない。例えば、アルコールを摂取したハエが求愛行動をしなくなるわけではない。Shohat-Ophir は、広く報酬と関連付けられているドーパミンを分泌するニューロンを NPF が活性化させるのではないかと考えており、NPF が脳内で何をしているのか、その分子機構を解明したいと思っている。

(翻訳：小林盛方)

1. Shohat-Ophir, G., Kaun, K. R., Azanchi, R. & Heberlein, U. *Science* **335**, 1351-1355 (2012).
2. Thorsell, A., Carlsson, K., Ekman, R. & Heilig, M. *Neuroreport* **10**, 3003-3007 (1999).
3. Thiele, T. E., Marsh, D. J., Ste Marie, L., Bernstein, I. L. & Palmiter, R. D. *Nature* **396**, 366-369 (1998).
4. Widdowson, P. S., Ordway, G. A. & Halaris, A. E. J. *Neurochem.* **59**, 73-80 (1992).
5. Rasmussen, A. M., et al. *Biol. Psychiatry* **47**, 526-539 (2000).

小児期の細菌暴露は大事

Early exposure to germs has lasting benefits

HELEN THOMPSON 2012年3月22日 オンライン掲載 (doi:10.1038/nature.2012.10294)

小児期に細菌にさらされることで
発生・成熟中の免疫系が調整される機構の解明に、一歩近づいた。

小児期の細菌暴露は、免疫系強化に役立つ、アレルギーや喘息の発症を防止すると考えられているが、その経路は解明されていない。このほど、マウスで、喘息や潰瘍性大腸炎(一般的な炎症性腸疾患)の発症における細菌暴露の役割の解明に役立つ機構が明らかになり、*Science* に発表された¹。その論文では、若齢マウスを細菌に暴露すると、体内に存在するインバリアントナチュラルキラーT(iNKT)細胞(NK受容体とともに単一のT細胞受容体 α 鎖<インバリアント鎖>を発現するNKT細胞)が減少することが示されている。iNKT細胞は、感染防御機能を持つが、自己細胞を刺激し、喘息や炎症性腸疾患などのさまざまな疾患の原因にもなる。

この研究はいわゆる「衛生仮説」を裏付けている。「衛生仮説」によると、先進国では抗生物質や抗菌物質の普及により、子どもが細菌に暴露されにくくなっていることが原因で、自己免疫疾患が発展途上国より普通に見られるというのだ。

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)の微生物学者で、論文共著者のDennis Kasperは、「種としての私たちは、過去に暴露された細菌と同じ細菌に、現在も暴露されているのではないのです」と語る。

研究チームは、無菌環境で飼育された(germ-free: GF)マウス群、および特定の病原体が存在しない通常の実験室条件下で飼育されたマウス群に、喘息あるいは潰瘍性大腸炎の発症を誘導した。GFマウスでは、肺により多くのiNKT

細胞が見られ、より重度の症状を示した。このため、細菌暴露が、iNKT細胞数に何らかの影響を与えること、また、GFマウスの炎症性疾患に対する感受性の増強に関与することが示唆された。

さらに、成体GFマウスをより広範囲の細菌に暴露しても、若齢期に細菌に暴露された場合の効果を得ることはできないこともわかった。

次に研究チームは、細菌暴露の効果の作用機序を探ろうと、CXCL16(炎症とiNKT細胞に関連するシグナル伝達タンパク質)に注目した。CXCL16の発現は、正常マウスよりもGFマウスの結腸および肺の組織で高かった。また、CXCL16の発現を遮断すると、結腸および肺の組織でのiNKT細胞数や炎症が低下した。

細菌と遺伝子

CXCL16をコードする遺伝子の解析から、CXCL16のDNAメチル化によって、CXCL16がGFマウスで過剰発現していることが示された。DNAのメチル化は、特定のタンパク質の産生を変化させることがわかっている。

Kasperによれば、若齢期にある特定の細菌への暴露がないと、メチル化によってCXCL16の発現が上昇し、そのため最終的にiNKT細胞数と炎症が増加するという経路が考えられるという。「おそらく、特定の細菌やそうした細菌によって産生される分子がこの経路に影響を与えるのでしょう。非常に若い年齢の時期には、細菌に暴露されることで免疫系を調節する何かがあるようですが、そ



ISTOCKPHOTO

思う存分、どろんこ遊びしなさい。きっと、アレルギーになりにくくなるでしょう。

れが何であるかは不明です」。

ミュンヘン大学小児病院(ドイツ)の喘息およびアレルギー部局長のErika Von Mutiusは、同様の経路がヒトで機能しているかどうかはわからないとしながらも、「この結果は疫学で観察されている現象を裏付けています」と言う。「ヒトの体内に存在する微生物集団マイクロビオームが非常に重要であり、マイクロビオームは細菌に暴露された年齢によって決定されるという考えが立証されたのです」。

ジョンズ・ホプキンス医療研究所(米国メリーランド州ボルティモア)の免疫学者Daniel Petersonは、ヒトは、どんなに清潔にしている、この研究で用いられたマウスほど無菌状態にはなりえないので、研究には限界があると言う。それでも、Petersonは、この論文が革新的な論文であると認識している。「このように長期間、iNKT細胞数の上昇が持続し、さらに細胞数の上昇は後に通常の細菌に暴露されても変わらないというのは、特筆すべき知見です」とPetersonは言う。「このような効果がどのくらい持続するのか、また、どんな細菌が関与しているのかなど、本当に疑問は尽きません」。

(翻訳: 三谷祐貴子)

1. Olszak, T. et al. *Science* <http://dx.doi.org/10.1126/science.1219328> (2012).

国立大学で若手研究者が減少傾向

Numbers of young scientists declining in Japan

冬野いち子 2012年3月21日 オンライン掲載 (doi:10.1038/nature.2012.10254)

日本の科学技術研究の根幹を担っている国立大学で、若手研究者の減少が止まらない。
このままでは、科学技術競争力の低下につながるおそれがある。

内閣府の総合科学技術会議事務局によると、国立大学全体の常勤教員数（終身・任期制）は1983年の5万人から2010年には6万2000人に増加。一方、35歳未満の若手教員数は、2000年まで1万人超で推移していたが、その後の10年間で約6700人にまで減少した。つまり、2001年以降約30%も低下したことになる（図参照）。

若手研究者が減少している原因の1つには、定年を65歳に延長する大学が相次いだことが挙げられる。少子化の影響が始まるのは「2000年代半ばに大学院に入った人が就職市場に出てくるこれから」であり、「最近までは、若年人口の減少以外の要因が大きい可能性が高い」と筑波大学・大学研究センター（東京都文京区）の教授、小林信一は話す。

上述の事務局で、「国立大学法人等の科学技術関係活動に関する調査結果」の作成に携わっている内閣府参事官の廣田英樹は、この20年間における国の政策に大きな問題があると指摘する。1990年代に政府は大学院重点化政策の名の下に博士課程の定員を拡大し、同時に教員の採用も増加したが、2000年に入って「研究振興とは全く関係ない」コスト削減計画に国立大学が巻き込まれ、政策の方向が真逆に変化したという。2001年からの第10次の国家公務員削減計画に始まり、法人化以降は公務員の総人件費改革の一環として、国立大学は昨年度まで毎年1%の人件費削減を要請されてきた。さらに、本国会で成立した国家公務員給与削減法案に基づき、国立大学は新たに今

後2年間、給与削減を求められる予定だ。

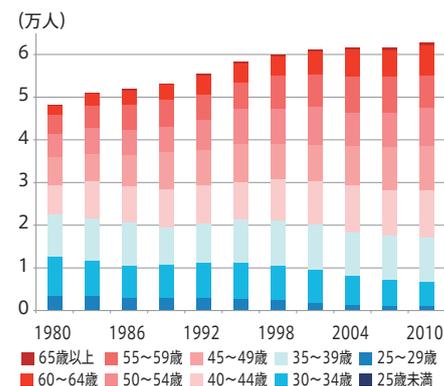
「拡大期に多数採用した若手教員が高齢化し滞留する一方で、2001年以降は教員の新規採用の余地が縮小し、そこに同時期以降増加したポスト研究者層が正規教員への採用待機群として高年齢化しつつ累積するという、構造的かつ複合的な状況になっています」と廣田は言う。「こうした事態を生んだ根本原因は、大学が自らの長期的な視点に基づいて人事管理を行うことを制約されてきたからにほかならないと思っています」。

人件費削減のプレッシャーの中、大学によっては退職者の補充をしない、諸手当を廃止するなどの措置をとっているものの、中堅研究者の雇用人数が増えたために、若手までポストが回らない。廣田のレポートによると、1980年代半ばには教員の採用者全体の8割以上を35歳未満の者が占めていたが、2010年には全体の半数を割るまでに低下したという。

一連のコスト削減政策のほかにも、運営費交付金の毎年の減額も要因として指摘する専門家は多い。政府は運営費交付金を減らす代わりに競争的資金を増額し、若手のキャリア育成を促してきたが、「競争的資金は期限付きのプロジェクトにかかわることが多いことから恒久的なポストにつながらず、若手教員の継続的な雇用とはなりづらいのです」と、東京大学の理事・副学長の前田正史は言う。

小林によれば、研究費配分の見直しが必要な時期に来ているという。「予算配分が集中化しているため、限られた大学分野でしかポストが見つからない構造に

国立大学の年齢階層別教員数の推移（全分野）



なっています。そこで固定的に人員増を行えばいいのですが、人件費削減のためポストを増やすことで対処しているのが現状です。基盤的経費配分をしていた従来のほうが若者に広くチャンスが与えられていました」と小林は話す。「このままでは、あと10年もすれば人口減少の影響が出てきて、研究を支える人がいなくなるという事態に直面するでしょう」。

小林は、研究生産性への悪影響はすでに始めているという。エルゼビア社のSciVerse Scopus データベースによると、2010年の日本の論文数は2006年比で4.3%減の11万2000本であるのに対し、英国は12.7%増の12万4000本、ドイツは15%増の11万8000本と着実に数字を伸ばしている。

文部科学省も若手研究者減少の問題を認識しており、優秀な若手研究者を対象とした「テニュアトラック普及・定着事業」などを通じて雇用改善に努めている。また、今後数年間で人口が多い団塊世代が次々と退職を迎えるため、教員の年齢構成が改善することを期待する向きも多い。

しかし、安定したポストの数が増えない現在の構造では、「団塊世代の退職で事態が好転するかどうかは不透明」と廣田は言う。「一時期に人が抜けることを好機として安易に大量採用をしたのは、また近い将来に滞留を再生産することになります。そういう意味で、この問題は長期的に辛抱強く改善していくしかないと思います」。

（執筆者本人により一部加筆、再構成しております。）

男ならヨーグルトを

善玉菌のおかげで“強精マウス”に？

昨年夏、マサチューセッツ工科大学のチームがヨーグルトの肥満に対する効果を詳しく調べる研究を始めた。加齢に伴う体重増加を防ぐには、食べ物のうちヨーグルトが最も有効らしいことがハーバード大学公衆衛生学部による過去の長期研究で示されており、マサチューセッツ工科大学のがん生物学者 Susan Erdman と進化遺伝学者 Eric Alm が率いるチームはそれをマウスで再現したいと考えた。

オス 40 匹とメス 40 匹を 1 グループとし、ジャンクフードに似せた高脂肪、低食物繊維、低栄養の餌を与えるグループと、標準的なマウスの餌を与えるグループを設けた。そして各グループの半数のマウスにバニラ風味のヨーグルトを追加して与えた。

肥満や、がんなど肥満関連合併症の発生率がプロバイオティック食によってどう変わるかを調べるのが目的だったが、「最も興味深い結果は私たちが予想していなかったものだった」と Erdman は言う。

まず気付いたのは、ヨーグルトを食べたマウスは驚くほど毛のツヤがよくなったことだ。研究チームは標準的な組織学的方法と美容評価尺度を用いて、これらのマウスは活動中の毛包の密度がほかのマウスの 10 倍もあり、つややかでふさふさの毛を生んでいることを示した。

次に、オスに特有なある事柄に気付いた。睾丸が外に向かって突き出ており、ある種「堂々とした感じ」なのだと Erdman は言う。実際に測った結果、ヨーグルトを食べたオスの睾丸は通常の餌だけを食べたオスよりも約 5% 重く、ジャンクフードを食べたオスに比べると 15% 前後も重かった。

より重要なのは、この“男らしさ”が伊達ではなく、きちんと役立ったことだ。メスと交配させる実験をしたところ、ヨーグルトを食べたオスは精液をより素早く注入し、対照群と比べて多くの子をなした。また、ヨーグルトを食べたメスはより大きな子を産み、順調に乳離れさせた。これらの結果はまだ論文発表されていないが、Erdman と Alm はヨーグルト中の善玉菌のおかげでマウスがスリムで健康になり、それが間接的に性的なたくましさを含めたのだろうと考えている。

人間の生殖能力についても同様のことが考えられるかもしれない。ハーバード大学の栄養疫学者 Jorge Chavarro は、ヨーグルト摂取と男性の精子の質の関連を調べている。「これまでのところ、マウスで見られた事柄と整合する結果が出ている」という。

(翻訳協力：栗木瑞穂)

ゴールドバッハの素数

「弱い予想」の証明に一步

数学における未解決問題の 1 つが、「任意の奇数はたかだか 3 つの素数の和で表せる」という「弱いゴールドバッハ予想」だ。素数はそれ自身と 1 を除くどんな数でも割り切れない数で、例えば $35 = 19 + 13 + 3$ や $77 = 53 + 13 + 11$ などとなる。カリフォルニア大学ロサンゼルス校の数学者 Terence Tao は、奇数を 5 つの素数の和として表せることを示し、証明に一步近づいた。彼はこれを 3 つに減らせるだろうと予想している。

「弱いゴールドバッハ予想」は 18 世紀のドイツ数学者 Christian Goldbach が提唱した。これは、偶数に関する「強いゴールドバッハ予想」という別の命題の兄弟分にあたる。こちらのほうを実際に提唱したのは有名な Leonhard Euler で、「2 よりも大きいあらゆる偶数は 2 つの素数の和として表せる」というものだ。その名が示すように、強い予想が真であれば、弱い予想も真となる。奇数を 3 つの素数の和として表すには、3 を引いて、残った偶数に強い予想を適用すれば十分だ。

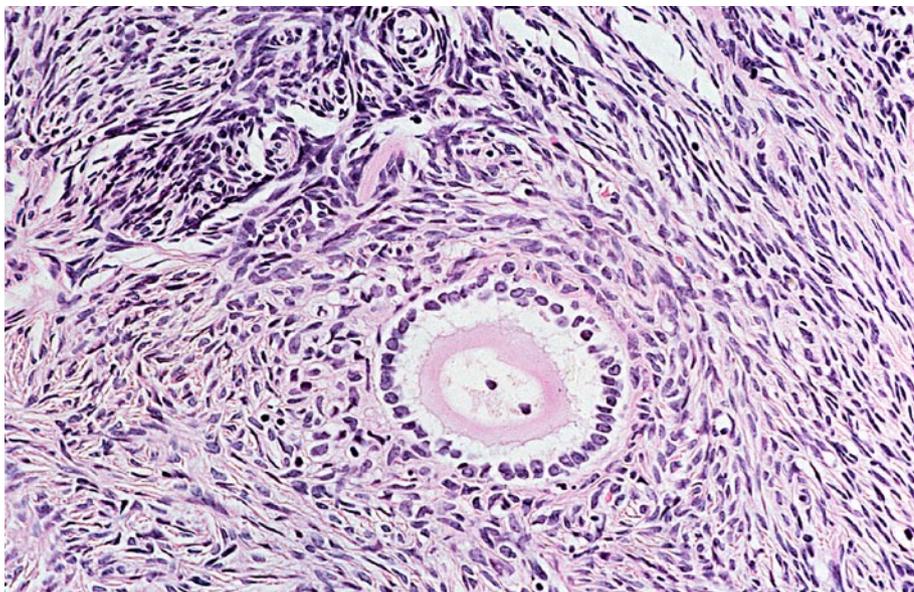
これまで 19 桁までのすべての数について、コンピューターを使って両方の命題が成立することが確かめられた。さらに、数が大きいほど、それを 2 つの数に分割する方法の数も増える (3 つに分割する方法も)。したがって、対象が大きな数であるほど、これらの命題が真である見込みは大きくなる。実際、強い予想が成り立たない例外が存在するとしても、対象とする数が無限大に近づくにつれて、そうした例外はほとんどまれになることが数学的に証明されている。

また弱い予想については、例外があるとしてもその数はたかだか有限個であることを示した 1930 年代の有名な定理がある。言い換えると、“十分大きな数”については「弱いゴールドバッハ予想」は真であるということだ。

Tao は十分小さな数についてコンピューターで確かめた結果と、十分大きな数について当てはまる結果を組み合わせた。以前の計算に「多くの小さな手直し」を加えて改善することにより、予想が成立する 2 つの範囲が重なるところまで持ってきた——5 つの素数を使う限りにおいて。

Tao はこの手法を拡張して、どのケースでも 3 つの素数で十分であることを示したいと望んでいる。だが、それでも強い予想の証明には役立ちそうにない。弱い予想は強い予想とは比較にならないほど容易だと Tao はいう。数を 3 つに分ける場合、2 つに分けるのに比べて「分け方がずっとたくさんあり、幸運にもすべてが素数になる可能性も高くなる」からだ。ゴールドバッハの死から 250 年も過ぎた今も、この難問の解法については誰も解決戦略を描けていない。

(翻訳協力：鐘田和彦)



胎児期に形成される卵母細胞は、生後が増えることはないと言われてきた。しかし、成人女性から卵母細胞に分化する幹細胞が発見され、その説は覆ろうとしている。

成人女性の卵巣から幹細胞

Egg-making stem cells found in adult ovaries

KENDALL POWELL 2012年3月1日号 Vol. 483 (16-17)

成人女性の卵巣から卵を形成する幹細胞が見つかった。

これにより、不妊の新しい治療法や生殖可能年齢の延長への道が開けるだろう。

教科書を書き換えるべきときがきたようだ。この60年もの間、高校の生物学教師から不妊治療の専門医まで誰もが、1つの通説をよりどころにしてきた。それは、ヒト女性は卵巣内にすべての卵（実際は第一減数分裂前期で停止した卵母細胞）を持って生まれ、生後に新たに卵が増えることはないという説だ。しかし今回、マサチューセッツ総合病院（米国ボストン）のJonathan Tillyらにより、22～33歳の女性6人の卵巣から、卵を作り出せる幹細胞が同定され¹、この通説は根底から大きく揺らぐこととなった。

Tillyらは以前、若いマウスや成体マウスの卵巣に増殖して卵を提供する細

胞があることを発見している²。また、2009年には上海の研究チームが、マウスから同様の幹細胞を単離したことを報告している³。しかし、それでも、多くの専門家はこの種の幹細胞の存在に懐疑的なままで、議論に決着はつかなかった。

「今回の結果は、マウスでの研究結果が正しかっただけでなく、我々が8年前に提唱した『ヒトでも若い成人の組織に幹細胞集団が存在する』という説も正しかつたことを明白に示す証拠です」とTillyは話す。

専門家たちが抱いていた疑念を払拭するため、Tillyの研究チームはまず、マウス卵巣内の幹細胞を高精度で特定して採取できる手法を開発した。これ

は、蛍光標識した細胞を選別するFACSをベースにしている。利用したのは、Ddx4というタンパク質だ。Ddx4は、幹細胞の外表面に存在するが、分化の進んだ卵母細胞では表面に存在しない。このDdx4に蛍光標識した抗体を付着させ、FACS装置にかけると、細胞は縦一列に並んで1個ずつ選別され、表面に蛍光標識のあるものとないものに分けられる。さらにこの方法では、死んだり損傷したりしたために内部のDdx4に抗体が結合した細胞も、卵母細胞と同様に取り除くことができ、従来よりも高精度に細胞を単離できる。

研究チームは、この手法でマウス卵巣内の幹細胞を単離できることを確認した後、研究の照準を生殖年齢のヒト女性の卵巣に定めた。かつてTillyの下で研究員として過ごし、現在は埼玉医科大学産婦人科准教授の生殖生物学者、高井泰が、性同一性障害患者の性別適合手術時に摘出した卵巣（冷凍保存状態）を提供した。「ヒト卵巣を対象にFACSを最初に行ったとき、分化前の細胞を分離できたことがすぐわかりました。そのときの興奮は言葉で表現できないほどでした。でも、同時に少しホッとしたのを覚えています」とTillyは話す。

研究チームが採取した細胞は、「卵原幹細胞 (oogonial stem cell : OSC)」と呼ばれるもので、培養すると、見たところ正常な未成熟卵母細胞を自発的に生じる。これらのヒトOSCと思われる細胞の発生をもっと自然な条件下で観察するため、研究チームは追跡用の緑色蛍光タンパク質で細胞を標識し、成人女性由来の卵巣組織片の中へ注入した。そして、この組織片をマウスの皮下に移植したところ、1～2週間の増殖の後、OSCから緑色蛍光を放つ細胞群が作られた。それらは、見た目は卵母細胞に似ていて、卵母細胞に特徴的な2つの遺伝学的性質も見られた。

「これらの細胞から赤ちゃんまで育つ卵が得られるかどうかは確認できません。でも、ほかのあらゆる手がかりから

みて、これらの細胞は本物の卵母細胞前駆細胞だと思われます」と Tilly は言う。次のステップは、ヒト OSC 由来の卵母細胞が受精して初期胚を形成できるかどうかを調べることだが、これには特別の配慮が必要だ。例えば、米国では、この種の研究への資金提供は民間からのものに限られ（法律によって、連邦政府からの研究補助金は、胚の由来が何であれ、ヒト胚の破壊を伴ういかなる研究にも利用できない）、また、この種の研究に英国の研究者が加わる場合には、英国のヒト受精・胚機構（HFEA）からの認可が必要となるのだ。

エディンバラ大学（英国）の生殖生物学者 Evelyn Telfer は、マウスを使った Tilly たちの研究に対してかつては懐疑的だったが、今では支持する側に回っている。彼女はこう話す。「私は Tilly の研究室を訪れ、これらの細胞やその振る

舞いを実際にこの目で見ました。それは十分納得のいくものであり、感動的でしたらありました」。現在、Telfer は体外でヒト卵を成熟させる研究をしており、今後は Tilly とともに、OSC 由来の卵をいつでも受精できる段階まで成長させる研究に取り組む予定である。

Telfer も言っていることだが、OSC が体内で自発的に新しい卵を形成するという証拠はまだ得られていない。しかし、「もし」OSC を試験管内でうまく誘導して卵を作らせ、その体外受精に成功すれば、生殖補助医療のあり方は大きく変わるはずである。

「この『もし』のハードルが非常に高い」ことは Tilly も認めている。しかし実現すれば、OSC を含む卵巣組織を持った女性ならば卵を無尽蔵に得られることになる、と彼は話す。OSC 利用の対象として考えられるのは、化学療法を受け

ている女性がん患者や、早発閉経を起した女性などだが、健康な中高年女性も対象となりうる。Tilly によれば、40代の女性の卵巣にも OSC が存在していることが、その後の調査で確認されているという。

今後、研究室で扱える OSC の数が増えれば、OSC を再活性化させて生体内での卵の産生を維持させ、女性の生殖可能期間を延ばせるような、ホルモンや薬剤のスクリーニングが可能になるかもしれない。「卵巣の機能をたとえ5年でも延長できれば、妊娠のためには体外受精が必要な年齢の女性の多くに対応できるようになるでしょう」と Tilly は語っている。

（翻訳：船田晶子）

1. White, Y. A. R. et al. *Nature Med.* **18**, 413-421 (2012).
2. Johnson, J., Canning, J., Kaneko, T., Pru, J. K. & Tilly, J. L. *Nature* **428**, 145-150 (2004).
3. Zou, K. et al. *Nature Cell Biol.* **11**, 631-636 (2009).

並行臨床試験で薬効が明確に

Mice guide human drug trial

HEIDI LEDFORD 2012年3月22日号 Vol. 483 (389)

ヒトの臨床試験と同様の試験を動物で並行して行う「並行臨床試験」により、
薬剤の効果に違いをもたらす遺伝学的な手がかりが得られる。

ダナ・ファーマーがん研究所（米国マサチューセッツ州ボストン）には「マウス病院」がある。そこには、最新の医療用イメージング機器から、24時間体制の看護スタッフ、最先端の抗がん剤まで、ヒトのがん患者に提供されるのと同じものがそろっている。もちろん、目的はマウスを治療することではない。同じ抗がん剤をヒトで試験する際の手がかりを得ることだ。

ダナ・ファーマーに入院している約5000匹のマウスたちは、「並行臨床試

験 (co-clinical trial)」という研究手法の先鋒隊である。この手法では、ヒトの臨床試験と並行して、治療に反応する患者と反応しない患者が生じる原因を解明できるように設計した動物実験を行う。今年3月、この並行臨床試験プロジェクトによる最初の論文が *Nature* に発表された (Z. Chen et al. *Nature* **483**, 613-617; 2012)。それによると、標準的な化学療法薬に試験薬であるセルメチニブを組み合わせることで、KRAS という遺伝子に変異を持つ肺がんの退縮が期

待できるが、マウスの並行臨床試験から、KRAS だけでなく LKBI という腫瘍抑制遺伝子にも変異がある患者では、セルメチニブの効き目がないというのだ。

「通常、がんのヒト臨床試験を実施している最中に、科学的見地から問題検討を行うことはほとんどありません」。こう話すのは、今回の研究には参加しなかった、ケンブリッジ大学（英国）のがん研究者 David Tuveson である。「並行臨床試験の導入は、論理にかなない、強く望まれていたプロセスなのです」。

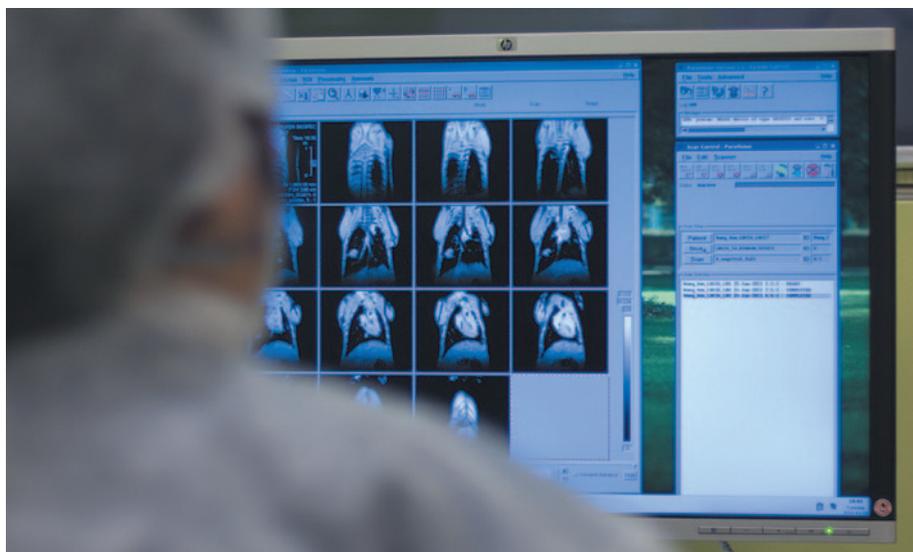
新薬は普通、動物試験を行った後に、ヒトでの臨床試験に持ち込まれる。しかし動物を用いる試験の初期段階では、ヒト臨床試験の諸条件を完全に模倣できないことが多く、誤った結果に至る場合があるのだと、ダナ・ファーマーのがん研究者で今回の論文著者の1人でもある Andrew Kung は言う。それに対して並行臨床試験は、ヒト被験者で並行して行われている試験によく適合するように設計できる。

今回試験したセルメチニブは、アレイ・バイオフィーマ社（米国コロラド州ボルダー）とアストラゼネカ社（英国ロンドン）が開発した抗がん剤である。腫瘍細胞の増殖や生存を促す重要な生化学的段階を阻害する作用があり、この種の抗がん剤は現在、多くの企業で精力的に研究開発されている。セルメチニブのヒト臨床試験には、*KRAS* 遺伝子に変異のある患者 87 人が参加したが、そのすべての結果はまだ公表されていない。アレイ・バイオフィーマ社は 2011 年に、セルメチニブを標準的な化学療法薬とともに投与した場合、がんの進行が遅くなったと発表している。一方、患者全体の生存率に対する影響に統計的な有意性は見られなかった。

今回の並行臨床試験で使われた数百匹のマウスは、ヒト被験者と同じく変異型の *Kras* を持っていたが、一部のマウスは、腫瘍抑制因子遺伝子である *p53* や *Lkb1* も変異していた。セルメチニブと標準的な化学療法薬を併用した場合、*Kras* 変異に加えて *p53* 変異があるだけなら効果が現れた。しかし、*Kras* 変異に加えて *Lkb1* 変異があると、薬剤併用による効果は現れなかった。今回のマウス臨床試験の結果は、ヒト被験者で行う臨床試験と同様の手法で計測されている。つまり、動物実験でよくあるようにマウスを殺して腫瘍の容積を測るのではなく、非侵襲的なイメージング技術を使って測っているのだ。

今回のマウスの並行臨床試験の結果を踏まえると、セルメチニブの今後の臨床試験では、*LKB1* 変異の有無について患者にスクリーニング検査を施すべきだろうと Kung は言う。これにより、セルメチニブに抵抗性を持っていて遺伝学的に共通点のある患者群が、試験の結果に影響を与えているかどうかを判断できるようになると考えられる。

さらに、マウスの並行臨床試験からは、セルメチニブに対する腫瘍の短期応答を、FDG-PET というイメージング技術で測定できることもわかった。患者に何



遺伝子改変で作出した肺がんマウスモデルは、ヒトの肺がんを解明するためのヒントを与えてくれる。

度も腫瘍生検をするわけにはいかないので、この技術はヒトでの研究にも役立つしてくれるだろう。

現在の腫瘍治療では、多剤カクテル法や、特定の遺伝子型の患者に合わせた処方など、しだいに複雑な投薬計画が採用されるようになってきている。そこで、並行臨床試験を導入すれば、そうしたニーズにあった薬剤開発のスピードアップが可能になるだろうと、パリ・ディドロ大学（フランス）のがん研究者 Hugues de Thé は言う。彼は同様の方法を、特定の白血病の治療薬の臨床試験ですでに使っているが、今回の研究は、調べた腫瘍が遺伝学的に複雑であり、「技術的にみてたいへんな偉業だ」と話す。

ほかにも多くの研究機関が、並行臨床試験のための装置を開発中だ。だが、この試験は湯水のように金を使う。また、抗がん剤はたいがい毎日投与しなければならず、動物を扱う多くの人手が必要になり、さらに、生きていた動物で腫瘍を画像化する技術にも費用がかかる。並行臨床試験の手法を用いて膵臓がんを研究している Tuveson は、「マウス病院」ではおそらく、臨床試験用のがんマウスモデルを作り出すのに相当な費用を注

ぎ込まなければならなくなるだろうと忠告する。「マウスを飼育したり、ヒトの病院と同じように病態の経過観察をしたりするためのインフラが必要ですが、大半の研究室にはそんなものはありませんからね」。

しかし、資金提供機関はこの手法の有望性を認識している。2009 年に米国立がん研究所（メリーランド州ベセスダ）は、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）のがん研究者である Pier Paolo Pandolfi に対し、肺がんと前立腺がんの並行臨床試験プロジェクトを確立させるために 420 万ドル（約 3 億 4000 万円）の助成金を供与した。Pandolfi は今回の *Nature* 掲載論文の共著者でもある。また、慈善団体のエンターテインメント・インダストリー基金（米国カリフォルニア州ロサンゼルス）のプロジェクトである「Stand Up To Cancer」からも、乳がんと卵巣がんの並行臨床試験に対して助成金が提供されている。これは新たに進むべき道の 1 つだと、Tuveson は話す。「マウスを、ヒトについて知るための『映し鏡』として使うのです」。

（翻訳：船田晶子）



カフェインレスコーヒーを求めて

Make it a decaf

BRENDAN BORRELL 2012年3月15日号 Vol. 483 (264-266)

風味がよく、商業的に成り立つ、カフェインを含まないコーヒーを作るために、1世紀以上にわたってチャレンジが続いている。

その日もカンピナス大学（ブラジル）の植物生理学者 Paulo Mazzafera は、コーヒーノキの緑色のつやつやした葉をリーフパンチで打ち抜いて豆粒大の葉を採取すると、クロロホルムとメタノールの混合物と一緒に小びんに入れた。葉に含まれる成分を抽出するためだ。そうして得られた 96 種類のサンプルは高速液体クロマトグラフにかけられ、成分を分離される。翌朝、研究室に出勤してきた Mazzafera は、ノートパソコンの前に座り、分析結果の確認を始めた。クロマトグラムを 1 つずつスクロールしてカフェインのピークを調べていくのだ。突然、あるサンプルで、そこにあるべきピー

クが見当たらないことに気づいた。

Mazzafera は、このサンプルをさらに 2 回クロマトグラフにかけ、確信した。すでに、時計の針は正午に差ししかかろうとしていた。彼は、近くの農業試験場に所属する共同研究者の Bernadete Silvarolla に電話をかけた。Silvarolla は耳を疑った。「確かなの?」「間違いない」と Mazzafera。実際、彼は興奮のあまり身震いしていた。カフェインを含まない天然のコーヒーノキを見つけようとする彼のプロジェクトが、20 年にわたる数千種類のサンプルのスクリーニングを経て、ついに実を結ぼうとしていたのだ。それは、2003 年の末のことだった。

コーヒーには約 2000 種類の化学物質が含まれており、豊かな香りと風味を与えている。カフェインもその 1 つだ。カフェインは、興奮剤であるだけでなく、天然の殺虫剤でもある。コーヒーからカフェインだけを除去して、それ以外の成分をすべて残すことは、非常に難しい。これまで多くのコーヒー製造会社が、化学的手法でカフェイン除去に挑んできた。1905 年、ドイツ・ブレーメンの Ludwig Roselius は、最初の工業的脱カフェイン法の特許を取得した。しかし、Kaffee HAG として市販されたそのコーヒーは、抽出過程でベンゼンを使用していた。このため後に、ベンゼンに代わり、

さまざまな脱カフェイン法の長所と短所

1 世紀以上にわたり、コーヒー製造会社と栽培者は、カフェインを含まない、おいしいコーヒーを作る方法を探している。



化学的手法

△ コーヒー豆からカフェインを除去する化学的手法には数種類ある。取り出したカフェインは薬品や化粧品用の材料として販売できる。

▽ 抽出コストが非常に高くなる場合がある。また、コーヒー愛好家は、この処理は風味を台無しにすると言う。



種間交配

△ アラビカ種以外のカフェインを含まないコーヒーノキを、風味のよいアラビカ種と交配する。

▽ 好ましい形質をすべて残すことは困難である。3 種の交配により、カフェイン含有量が低い (~ 0.37%) と考えられる変種が開発されている。



種内交配

△ アラビカ種のコーヒーノキを、同じアラビカ種のカフェインを含まない系統と交配すれば、コーヒーの好ましい形質を維持することは容易かもしれない。

▽ カフェインを含まない系統を見つけるのは難しい。さらに、交配を通じて好ましくない形質を除去することは、もっと難しいかもしれない。



遺伝子工学

△ カフェイン生合成遺伝子を直接標的にすることができる。

▽ コーヒーノキは、遺伝子組み換えが非常に難しいことで知られている。また、遺伝子組み換え食品は社会に受け入れられにくい。



突然変異の誘発

△ 作物の形質を変化させる方法として、広く受け入れられている。

▽ 突然変異により生成した標本をスクリーニングする必要がある。これは長い時間を要する、骨の折れる作業である。そのうえ、変化させるつもりがなかった形質が影響を受けてしまう可能性がある。

より毒性の弱い溶剤が用いられるようになった。今日では、緑色の生豆を高圧の液体二酸化炭素に漬けたり、熱湯に数時間浸したりしてカフェインを除去してから焙煎する方法も用いられている。コーヒー愛好家たちは、こうした手法はどれも風味を台無しにするとするが、それでもカフェインレスコーヒー市場は年間 20 億ドル (約 1600 億円) 規模にもなる。

研究者たちは長年にわたって、カフェインを含まないコーヒーノキから直接収穫できる、おいしいコーヒー豆を探し求めてきた。最初からカフェインを含まない豆なら、コーヒーの複雑な風味を損なう処理をしないですみ、栽培農家は「高級カフェインレスコーヒー」という新しい市場を開拓できることになる。しかし、カフェインを含まないコーヒー豆の開発は、伝統的な品種改良法はもちろん、遺伝子組換え技術をもってしても、非常に困難であることが明らかになった (上図参照)。実際、ここまで難しいとは、

誰も予想していなかった。コーヒーノキは、実をつけるようになるまで何年もかかり、実をつけるようになってからも、収穫量は年によってまちまちなのだ。そのうえ、コーヒー栽培を商業的に成り立たせるには、コーヒーノキが多くの実をつけ、その実はいっせいに熟して、手や機械で容易に収穫できるような大きさと形状をしていなければならない。これらの形質のどれか 1 つが欠けているだけで、コーヒーノキは全く役に立たないものになってしまう。カフェインレスコーヒー豆を見つけたとか作製したというような注目すべき論文が何本も発表されているが、そうした豆から入れたコーヒーはまだ 1 滴も市場に出していない。

引退した植物細胞生物学者の Rod Sharp は、基礎研究を工業的農業に応用していくのは難しいことが多いと語る。Sharp は 1980 年代に、DNA プラントテクノロジー社 (米国ニュージャージー州シナミンソン) でカフェインを合

まないコーヒーノキの開発に取り組んでいた。「研究室で基礎研究に従事する人間は、いつだって少々単純です。我々は大きな発見があるたびに小躍りしますが、商品を生産できるようになることは、これとは全く別の問題なのです」。それでも Sharp は、コーヒーノキの秘密は、いつか必ず明らかになると確信している。「長い時間がかかるかもしれませんが、でもその日は必ず来ます」。確かに、Mazzafera のコーヒーノキには、長く待たされている。発見からすでに 8 年以上が経過しているが、彼の同僚はまだ、これを作物化するのに苦戦している。

ブラジル、コロンビア、ベトナムなどによるコーヒーの輸出額は年間 150 億 ~ 200 億ドル (約 1 兆 2000 億 ~ 1 兆 6000 億円) にもなる。お茶やワインに比べるとコーヒーの歴史は浅いが、それでも 15 世紀頃までさかのぼることができる。その頃のイエメンの神秘主義者の記録に、エチオピアでは豆を煎って煮出すことに

より強壯剤を作っていると記されているのだ。現在、アラビカコーヒーノキ（アラビカ種）*Coffea arabica* とロブスタコーヒーノキ（ロブスタ種）*Coffea canephora* の2種類のコーヒーノキが、コーヒー市場の大部分を占めている。アラビカ種は涼しい気候で育ち、味がよい。一方、ロブスタ種は、主にインスタントコーヒーや低品質のブレンドに使われている。市販のアラビカ種は1.2%、ロブスタ種は2～3%のカフェインを含んでおり、世界中の人々をコーヒー中毒にしている。

しかし、多くの人々が愛してやまないこの興奮成分は、その作用に敏感すぎる人々や、宗教上の理由により摂取を禁じられている人々、眠れなくなるのが嫌な人々にとっては、敬遠すべき存在である。パスツール研究所（フランス・パリ）のGabriel Bertrandは、1901年に、マダガスカル近くのグランデコモル島で、カフェインを含まない種類のコーヒーノキを発見した。実のところ、*Coffea* 属の植物は100種前後知られているが、その多くが、カフェインを全く含んでいないか、含有量が低いのだ。すでに、カフェインの含有量があまり多くない(0.6～1%)種類の天然コーヒーが、イタリアのコーヒー製造メーカーのイリー社などにより商品化されている。だが残念なことに、カフェインの含有量が特に少ない種類のコーヒーノキの大半は、ほとんど実をつけないか、苦味のある化合物の含有量が多すぎるという欠点を持つ。それでも、このような変種が自然界に存在しているのだから、勤勉な育種家が、いつかきつと商業的に成り立つカフェインレスコーヒーノキの品種を作出する可能性はあるのだ。

夢のコーヒー

Mazzaferaがカンピナス農業研究所(IAC)でこの研究を始めたのは1983年のことだった。IACは、サンパウロ(ブラジル)の北西に広がる丘陵地帯に位置する、100年の歴史を持つ農業試験場である。彼は、Alcides Carvalhoの下で、

カフェイン生合成の遺伝学と生理学の研究に取りかかった。Carvalhoは先駆的な植物育種家で、彼が基礎を築いたIACのコーヒーノキのコレクションは、現在、7万点にも上り、世界中から1000種類以上の野生系統、種内交配種、種間交配種、突然変異体および栽培変種が集められている。

Mazzaferaは当初、昔ながらの分光光度計を使って、サンプルのカフェイン含有量をひとつひとつ測定していた。1987年にカンピナス大学に職を得ると、自分の研究室に高速液体クロマトグラフを設置し、効率よくサンプルを分析できるようになった。当時すでに、研究者たちは、アラビカ種のコーヒーノキがカフェインを合成する4段階の基本的な経路の概要をつかんでいた。Mazzaferaは7種のコーヒーノキについて、カフェインの産生と分解の経路を詳細に調べた。この経路に欠陥があり、カフェインの含有量が低下しているものを見つけられるのではないかと期待したのである。それと並行して、Carvalhoとともに、アラビカ種の栽培変種と、アラビカ種以外のカフェイン含有量の少ない野生系統との交配も進めた(Carvalhoは1993年に死去)。しかし、アラビカ種の好ましい性質を維持しながらカフェインを除去するのは不可能であることがわかった。「時間の浪費以外の何物でもありませんでした」とMazzaferaは振り返る。

2000年に、MazzaferaはIACのコーヒー育種家であるSilvarollaとチームを組んだ。彼らが新たに目をつけたのは、1964年に国連が行ったエリトリアとエチオピアの遠征調査で収集された、アラビカ種に由来する系統だ。調査で得られた種子のサンプルは全部で620個あり、コスタリカを含む数か国に分配され、栽培された。後に、コスタリカでこのうちの308系統が集められ、ブラジルに送られた。Mazzaferaは、種間交配をするより、エチオピア産のアラビカ種から出発したほうが、市場に出せるカフェインレスコーヒーを作出するのははるかに

容易かもしれないと考えたのだ。

Mazzaferaが2003年に有望そうな系統を発見し、さらにもっと有望そうな系統も2つ発見したのは、このコレクションからだ。Mazzaferaはまず、この植物が葉だけでなく豆にもカフェインを含んでいないことを確認した。続いて、これらの種では、テオプロミン(穏やかな興奮剤で、利尿作用もある)をカフェインに変換する経路の最終段階に欠陥があることを突き止めた¹。ブラジル政府は、この貴重な植物のありかを秘密にするように命じるとともに、研究グループに120万ドル(約9800万円)の研究資金を提供した。Mazzaferaは、ほかの人々に先を越されでもしないかぎり、5年後には、コーヒー栽培者が自分たちの新しい変種を植えているだろうと確信していた。

遺伝子組み換えコーヒー

遺伝子工学の時代になると、多くの研究者が、正常な遺伝子をスプライシングによって改変して通常のコーヒー豆に導入して、カフェインを含まないコーヒーノキを作り出そうとした。しかし、コーヒーはこの種の操作に抵抗性を持つことがわかった。1992年には、ハワイ大学(米国ホノルル)の遺伝学者John Stilesが、アンチセンス法を利用してカフェインレスコーヒーノキを作出しようと試みた。アンチセンス法は、標的タンパク質のmRNAと相補的な塩基配列を持つオリゴヌクレオチドを細胞に導入して標的タンパク質の産生を減らす技術で、人間の食用として最初に承認された遺伝子組み換え生物として知られる「フレーバーセーバー」トマトの作出にも用いられた。Stilesは、カフェイン産生経路のタンパク質を、この操作の標的にしようと考えたのだ。

けれどもすぐに問題が発生した。遺伝子組み換え植物を作るには、栄養分に富む寒天培地上で植物細胞の小塊を培養し、目的の遺伝物質をこの細胞に導入して、これを植物体へと育てていかなければならない。ところが、アラビカ種のコー



B. BORRELL

ブラジル・サンパウロ郊外にあるカンピナス農業研究所（IAC）では、害虫に強い、あるいはさまざまな気候に耐えるコーヒーノキの品種改良を行っている。だが、それだけではない。カフェインを含まない品種を作るという重要な目的もある。

ヒーノキでは、このプロセスが不思議なほどうまくいかなかったのだ。

それからの7年間、Stilesは2人のポスドク Kabi Neupane、Stefan Moisyadi とともに、この生物学的障害を乗り越えるための努力を続けた。そしてついにカフェイン含有量が少ないと考えられるコーヒーノキ^{さくしゅつ}を作出し、Stilesは高らかに宣言した。1999年8月には、*The Wall Street Journal* に対して、同月中にハワイで野外試験を始め、その後メキシコでも試験を開始し、3年後には市販に向けた栽培に着手したいと語っている。

だが、Stilesの期待に反して、彼らが作出した植物は、成長するにつれてカフェイン含有量が上がっていった。MoisyadiとNeupaneは大学に職を得て研究室を去り、Stiles自身は2000年に大学を辞め、ハワイ・オアフ島のワイアレアに民間の研究所を設立した。しかし、その会社も、2008年、遺伝子組み換えコーヒーの野外試験を行う権利をめぐる地元住民や州議会と衝突し、つぶれてしまった。Stilesは現在、自分がカフェインレスコーヒーノキを作出するこ

とができたのかどうか、100%の確信を持たなかったこと一度もなかったと言う。多くのコーヒー研究者も、Stilesは成功していなかったと考えている。「我々は常に、わずかな資金で研究を続けてきました」とStilesは言う。「モンサント社の研究者とは違うのです」。(モンサント社は、米国ミズーリ州クレブクールに本社のある、農業ビジネスの巨大多国籍企業。)

奈良先端科学技術大学院大学（奈良県生駒市）の佐野浩^{さの ひろし}の研究室のポスドクだった荻田信二郎^{おぎた しんじろう}も、同じような状況だった。2001年に、彼はお茶で同定されたばかりのカフェイン生合成経路のある酵素を標的とする研究プログラムを開始した。荻田らの研究チームは、RNA干渉という効率のよい遺伝子サイレンシング技術を用いた。また、アラビカ種よりロブスタ種のほうが容易に細胞培養できるかもしれないと考えて、こちらを用いることにした。しかし、期待どおりにはいかなかった。荻田らが改変したDNAを取り込んだ細胞はほとんどなかった。それでもなんとか、トランスジェニックコーヒーの苗木を35本作製できた。

荻田がそのいくつかの葉を調べたところ、カフェイン含有量が対照群より70%も少ないことがわかった。「ちょっと信じられませんでした」と荻田は言う。彼は、自分の論文が*Nature*に受理された日²、ドンペリニオンを開けて祝ったと話してくれた。荻田はそれ以来、同様の手法でアラビカ種の改変に取り組んでいる。だが、まだ豆を得るには至っていない。現在、富山県立大学(富山県射水市)で約40種類のトランスジェニックコーヒーを育てているが、彼によると、毎年、花が咲いてめしべが成熟するものの、おしべの花粉ができる1週間前にだめになってしまうという。

たとえ荻田がこの繁殖の問題を解決できたとしても、カフェインを含まない遺伝子組み換えコーヒーが近いうちにスーパーマーケットの棚に陳列されるとは想像しがたい。根本的な問題の1つは、カフェイン生合成経路にはいくつかの「脇道」があり、そこでカフェインが作られてしまうので、トランスジェニックコーヒーが完全にカフェインを含まなくなることはないことだ、とグラスゴー大

学（英国）の生化学者 Alan Crozier は言う。遺伝子組み換えコーヒーが社会に受け入れられるかどうか問題だろう。また、モンサント社をはじめとする巨大農業企業は、基本的に、病害虫抵抗性や除草剤抵抗性など、栽培農家にとって魅力的な性質を持つ商品を開発してきた。つまりこうした企業は、カフェイン含有量が少ないとか、抗酸化物質を多く含むといった、消費者に対して訴求力のある商品の開発は考えてこなかったのだ。そのため、カフェインレスコーヒーの研究が農業関連企業から資金援助を受けることは難しい可能性がある。



収穫するだけでも、物流管理が非常に困難であるからだ。

しかし、現在 51 歳の Mazzafera でさえ、全くあきらめていない。昨年 11 月のある曇った日、彼はカンピナス大学生物学部の裏にある 2 棟のネットハウスを歩き、数百本のコーヒーノキを見せてくれた。木は、腰ほどの高さまで成長していた。すでに、緑色の実を枝にびっしりつけているものもあった。彼によると、カフェインをほとんど含まないものも多いという。

エチオピア産のコーヒーノキを使った研究を続けられなくなったことに憤慨した Mazzafera は、2006 年に新しい計画に着手した。彼は、収穫量の多いアラビカ種の種をピックアップし、突然変異を引き起こす化学物質に浸して発芽させ、2 万 8000 本の苗のカフェイン含有量を測定した。「完全に当てずっぽうでした」と Mazzafera は言うが、一般的なコーヒーノキの 2% しかカフェインを含まない苗を 7 本得ることができた⁴。彼はすでに、この苗の名前「Decaffito」を商標登録している。

解決すべき問題はまだ残っている。この系統は他家受粉しやすいため、カフェインを含むコーヒー豆ができてしまうことがあるのだ。それでも、商業的に成り立つカフェインレスコーヒーを作出しようという Mazzafera の決心は固い。研究への資金援助について、ある企業と話し合いもしている。しかし、研究にはまだ大きなハードルがあることは百も承知しており、以前ほどの資金は望んでいない。「自分で農場を持っていれば、自分でこのコーヒーを育てたいところなのですが」と Mazzafera は語った。■

（翻訳：三枝小夜子）

Brendan Borrell は、米国ニューヨーク在住のフリーランスジャーナリスト。

1. Silvarolla, M. B., Mazzafera, P. & Fazuoli, L. C. *Nature* **429**, 826 (2004).
2. Ogita, S., Uefuji, H., Yamaguchi, Y., Koizumi, N. & Sano, H. *Nature* **423**, 823 (2003).
3. Nagai, C., Rakotomalala, J. J. & Katahira, R. *Euphytica* **164**, 133-142 (2008).
4. Mazzafera, P., Baumann, T. W., Shimizu, M. M. & Silvarolla, M. B. *Trop. Plant Biol.* **2**, 63-76 (2009).

昔ながらの交配法への期待

遺伝子組み換え食品に対する社会の抵抗感は根強く、カフェインを含まないエチオピア産の天然のコーヒーノキに対して期待が高まった。しかし、コーヒーの形質を残しつつ、商売として成り立つ栽培変種を作出する作業は、Mazzafera や Silvarolla が考えていたよりも時間を要している。開花期には、Silvarolla は一日中野外で過ごし、花粉を作るおしべを花から摘みとり、めしべに袋をかける作業に追われる。後で、手で受粉させるためだ。こうして Silvarolla は、毎年、800 本の新しいコーヒーノキを作り出している。

IAC にはコーヒーのテイスティングをする委員会があり、その評価では、Silvarolla が作出したコーヒー豆の味はよいという。しかし、このコーヒーノキは成長するとやぶのようにぼさぼさになり、開花時期にはばらつきがある。研究チームは現在、カフェインの含有量は低い、生産性は低い種¹の作出に取り組んでいる。このプロジェクトに従事する IAC の遺伝学者 Miriam Maluf は、「我々は当初、そんなことは簡単だろうと思っていました」と言う。しかし、カフェインを含む植物からカフェインを取り除くことは、非常に難しい可能性がある。カフェインの存在には、理由があるからだ。カフェインは、天然の殺虫剤なのだ。カフェインを含まない野生のコー

ヒーノキが、ほかの苦味のある化合物を含んでいることが多いのは、そのためだ。コーヒーノキは、病害虫から我が身を守ろうとしているのである。

Mazzafera は、こうした問題に取り組む研究者たちに、ほとんど手を貸すことができない。エチオピア産のカフェインレスコーヒーノキの発見が 2004 年に発表されると間もなく、IAC がこのプログラムの管理を強化するようになり、大学に籍を置く Mazzafera は限られた関与しかできなくなってしまったからである。「非常に残念です」と彼は言う。

これだけ長い間うまくいっていないにもかかわらず、カフェインを含まないコーヒーの研究が下火になる気配は一向にない。フランス農業研究開発センター（モンペリエ）の植物遺伝学者 Benoit Bertrand は、同センターのコーヒーノキのコレクションの中からカフェインを含まないものを探し出そうとしている。また、ハワイ農業研究センター（米国オアフ島ワイパフ）の長井千文²は、日本のコーヒー製造会社 UCC 上島珈琲（株）とマダガスカルで共同研究を行っており、3 種の交配から、味がよく、そこそこの収穫量があり、カフェインを 0.37% しか含んでいない変種³を作出することに成功した³。だが、これが商業的にうまくいくかどうかはわからない。マダガスカルは、ごく普通のアラビカ種を栽培し、

銀河中心を探る硬 X 線宇宙望遠鏡

Spacecraft aims to expose violent hearts of galaxies

ERIC HAND 2012年3月15日号 Vol. 483 (255)

新しい宇宙望遠鏡 NuSTAR は、未開拓の X 線領域の観測を、低コストで実現する。

宇宙で最も激しいイベントを、これほど安く観望できる時代が来ると誰が予想しただろうか。米航空宇宙局 (NASA) が打ち上げる X 線観測衛星「NuSTAR」は、超大質量ブラックホールの周辺で生まれる高エネルギー X 線光子を観測する。費用は 1 億 6500 万ドル (約 133 億円) で、宇宙望遠鏡の相場からすれば非常に安上がりだ。打ち上げは今年 3 月に予定されていたが、ロケットのソフトウェアの問題で延期され、現在は 6 月の予定。NuSTAR は、ジェット機に搭載されて空中で発射されるペガサスロケットで、地球周回軌道へと打ち上げられる。

NuSTAR は未開拓のスペクトルの領域を観測する。1999 年に打ち上げられたチャンドラ X 線観測衛星などは、低エネルギーの軟 X 線を観測している。一方で、2008 年に打ち上げられたフェルミガンマ線宇宙望遠鏡などは、ガンマ線を観測している。NuSTAR は、これらの中にあたる 5～80 キロ電子ボルトの硬 X 線を観測する。NuSTAR は多くの革新的な装置を備えており、カリフォルニア工科大学 (米国バサデナ) の天文学者で、計画の研究責任者である Fiona Harrison は「この領域の高エネルギー X 線を解像できる最初の機会となるでしょう」と期待する。

硬 X 線はよく知られているように、焦点に集光することが難しい。金やイリジウムなど高密度の金属でコーティングした鏡でさえ、硬 X 線は反射せずに透過してしまうからだ。Harrison らは新しい材料を開発した。それは数百層の薄い金属膜をサンドイッチにしたものだ。ハーバー

ド・スミソニアン宇宙物理学センター (米国マサチューセッツ州ケンブリッジ) の天文学者で、チャンドラ X 線観測衛星の責任者である Harvey Tananbaum は「これは重要な技術的ブレークスルーです。このエネルギー領域でこれほど高い感度を実現したのは初めてです」と話す。

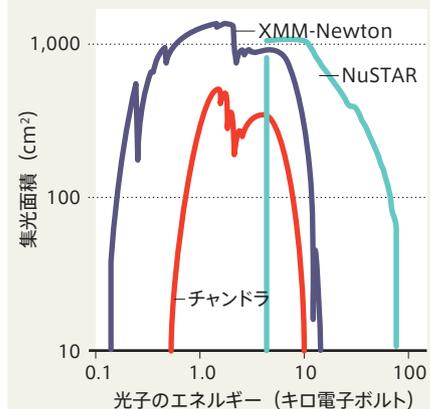
それでも、X 線は透過力が強く、浅い角度でしか反射させることができない。このため、円錐形の鏡を、入れ子になったマトリョーシカ人形のように幾重にも重ねて配置した。こうして端にある検出器に光子を集める。光学系は 2 つのユニットからなり、1 つのユニットは 133 枚の円錐形の鏡からなる。この結果、NuSTAR の感度 (集光面積) はチャンドラを上回ることになった (図参照)。

NuSTAR の光学系は、光を浅い角度で鏡に入射させるため、焦点距離が長くなる。このため、通常なら衛星が大きくなって費用もかさむ。チャンドラはスペースシャトルの貨物室にかるうじて入る大きさで、費用は 20 億ドル (約 1600 億円) だった。一方、NuSTAR は約 10m と小さめだが、シャトルよりずっと小さなペガサスロケットに載せなければならない。その解決法はこうだ。NuSTAR は、折りたたみ可能なトラス構造のマストを備え、低地球軌道に入ってから、それを本来の長さの約 10m に伸ばすのだ。この作業には 26 分間かかり、天文学者たちにとって最も気がかりな時間となるだろう。

NuSTAR は、活動銀河核を重点的に調べる予定だ。活動銀河核は銀河の明るく輝く中心部分で、超大質量ブラッ

X 線観測衛星の集光面積

NuSTAR はほかの X 線観測衛星と比べ、高エネルギーの光子に対して大きな集光面積を持っている。



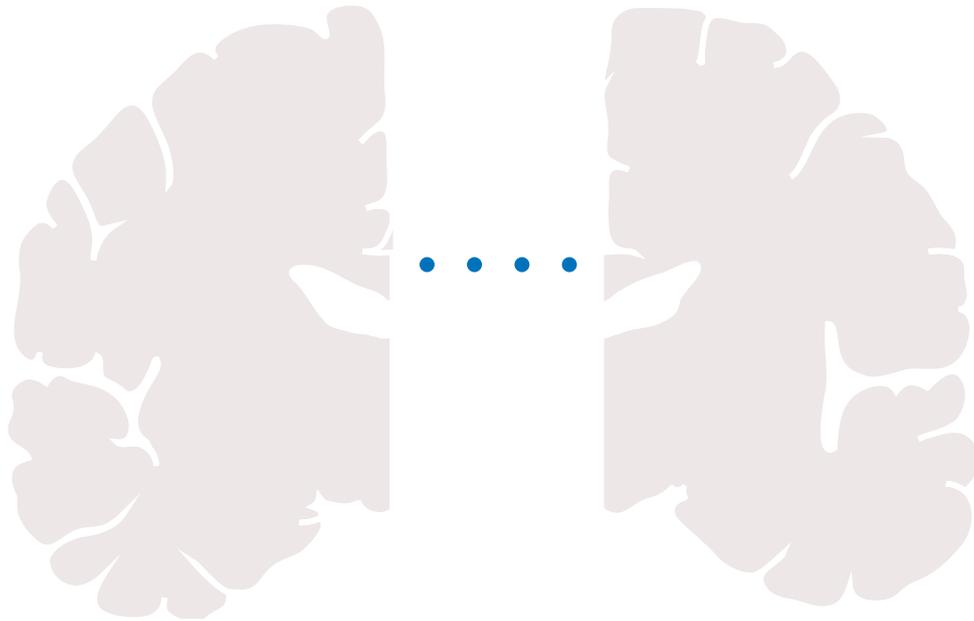
クホールの周囲を回る高エネルギー粒子が、X 線を放っている。NuSTAR は、最も透過性の高い波長域の X 線で観測するので、これまで塵や高温ガスのために見えなかった新たな活動銀河核を見つけることができるはずだ。その数は数百個と見積もられている。

欧州宇宙機関 (ESA) の X 線観測衛星「XMM-Newton」は、1999 年に打ち上げられた。この大型 X 線望遠鏡が、NuSTAR と協力して活動銀河核を調べることになっている。2 つの宇宙望遠鏡は、銀河中心のブラックホールの自転のために生じる X 線スペクトルの歪みを探し出す予定で、そこから「一部の活動銀河核のブラックホールは、どうやって太陽の数十億倍の質量に成長したのか」という問題を解く手がかりが得られるかもしれない。つまり、銀河の合体でほかの活動銀河核を飲み込むことで成長したのか、それとも、活動銀河核を擁する銀河から少しずつ物質を取り込んで成長したのか。

XMM-Newton は、その観測可能時間の 10% を NuSTAR との共同観測にあてる。

「このことは、この共同観測が X 線天文学者にとってどれだけ重要かを示しています」と、XMM-Newton の計画責任者である、欧州宇宙天文学センター (スペイン・マドリッド) の Norbert Scharrel は話している。

(翻訳: 新庄直樹、要約: 編集部)



「分離脳」が教えてくれたこと

A tale of two halves

DAVID WOLMAN 2012年3月15日号 Vol. 483 (260-263)

重度のてんかん治療のために、^{のうりょう}脳梁離断という過激な脳外科手術を受けた一群の患者がいる。

彼らの協力による心理実験や調査が1960年代から行われ、左右脳の機能や神経科学に関して、多くの知識がもたらされた。

てんかん治療としての脳梁離断

Vicki は、脳外科手術を受けた後の数か月間、食料品の買い出しに行くたびに腹立たしい思いをした。スーパーマーケット内の通路に立ち、陳列棚にある商品に目をやり、それをショッピングカートに入れたいと思っても、それができないのだ。「欲しい物に右手を伸ばそうとすると、そこに左手が割り込んできて両手が争う形になりました。まるで反発し合う磁石のようにね」と彼女は話す。その週は、食品を買い込むのに2時間、時には3時間もかかり、ひどく難儀した。着替えるのも同様で、自分が着たいと思う服を、両手が実際に着せてくれなかったのである。時には、一度に3着

の服を身につけてしまうこともあった。「服を全部ベッドの上に脱ぎ捨て、気を取り直して、もう一度始めねばならなかったわ」。

しかし、手術前よりも確実によくなっていたこともある。それはもう、てんかん発作に苦しむことがないことだった。彼女の発作は、人生を投げ出したくなるほど重く深刻だった。火のついた旧式オーブンに倒れ込み、背中に跡が残るほど火傷を負ったこともある。「実際、まともに生活ができませんでした」と回想する。1978年に神経科の主治医は彼女に、少々過激で危険も伴うが、治療に役立つ見込みのある外科手術を持ちかけた。それを聞いて彼女はほとんどためら

わなかった。もし最悪のことが起これば、幼い娘の世話は彼女の両親がしてくれるはずだった。「でも、もちろん心配でしたよ。いったん左右の脳を切り離せば、もう元通りにはならないんですから」。

1979年6月に行われた手術は10時間近くかかり、医師たちはVickiの脳梁を切断して、発作を抑えるための「防火帯」を作り出した。脳梁は、左右の大脑半球をつなぐ神経繊維の束である。この大胆な手法は「脳梁離断術」と呼ばれ、言語、意識的思考、運動制御を担う大脳新皮質の左右半球を分断する。Vickiがスーパーマーケットで陥った窮状は、言ってみれば、脳が2つの心を持っているかのように振る舞った結果だった。

しかし、手術後約1年で問題は軽減した。「動作を1つにまとめられるようになりました」と Vicki は言う。ほとんどのことを自分一人でできるようになった。野菜を切ったり、靴ひもを結んだり、トランプをしたり、水上スキーさえできるようになった。

しかし、手術のせいで自分が神経科学研究のスーパースターになることまでは、予想できなかった。Vicki は、10人余りしかいない「分離脳患者」の1人になったのである。こうした患者の脳や行動は、何時間もの実験や何百本もの科学論文の研究対象となり、古い世代の心理学のほぼすべての教科書で取り上げられてきた。しかし今、こうした分離脳患者の数は減りつつある。

分離脳患者が教えた左右脳の機能

分離脳患者の研究によって、健全な脳は、2つの別々の装置（つまり左右の大脳半球）が互いにケーブルで接続し、さまざまなデータを逐次やり取りしている状態であることが明らかになった。この主要ケーブルが切断されると、一方の大脳半球だけに情報（言葉、物体、絵など）を提示しても、他方の半球はそれに気がつかなくなる。

カリフォルニア大学サンタバーバラ校（米国）の認知神経科学者で、現在の分離脳研究の第一人者でもある Michael Gazzaniga によれば、これらの患者を

50年にわたって研究してきても、脳梁切断の影響をじかに観察するのは、いまだにスリリングだという。「分離脳患者の状態がどういふものかを知りたいければ、1枚の絵を見てもらうといいでしょう。患者はその絵が何なのかを言うことはできませんが、いろいろな物の入った袋から絵と同じものを取り出すことができます」と Gazzaniga は話す。「思わず胸がドキドキしますよ！」

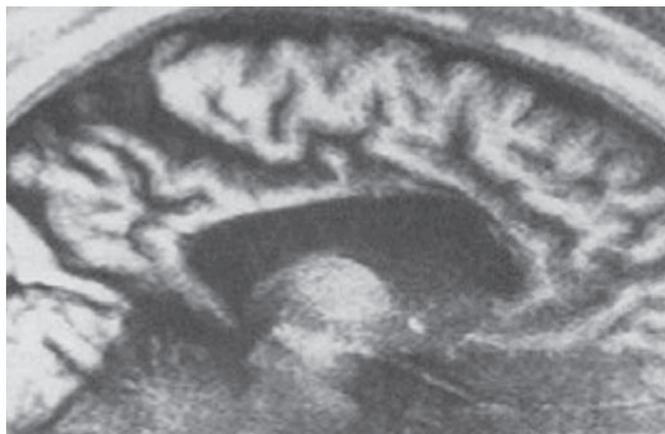
こうした患者を対象にした研究で、左右の大脳半球の違いが、少しずつ明らかにされてきた。例えば、左半球は通常、発話や言語の情報処理にかかわり、右半球は視覚-空間情報処理や顔の認識に特化していることが明らかになった。「実際に分離脳の研究から、左右半球はどちらも、たいがいのことはできるが、同時に、この世界をそれぞれ別の像としてとらえていることがわかりました」と、カリフォルニア大学パークレー校（米国）認知脳科学研究所の所長である Richard Ivry は言う。この「2つに分かれた意識（dichotomous consciousness）」という概念は一般社会の注目を集め、「創造性は右脳にある」という極端な言い方が広まってしまった。

しかし、さらに分離脳患者で試験を行った結果、もっと繊細な全体像が得られた。我々の脳は、特定の仕事を特定のハードウェア区画が担うコンピューターのようにはなっておらず、むしろ、非常

に太くて送受信量の多い広帯域ケーブルで複数のコンピューターがつながったネットワークのようなものに近い。つまり、活動領域どうしの接続性の良し悪しのほうが、それぞれの脳領域の働きよりも重要なのだ。「分離脳患者では、脳の特定部分に損傷を与えることなく、ネットワークの分断による影響を見ることができると、カリフォルニア大学サンタバーバラ校の心理学者 Michael Miller は説明する。

ダートマス大学ヒッチコック医療センター（米国ニューハンプシャー州レバノン）で神経外科医長を務める David Roberts は、分離脳研究から重要な教訓を手に入れている。彼は分離脳患者集団の何人かの手術を担当し、Gazzaniga と密に連携して研究している。「医学でも一般的な科学でも、被験者の多さ、研究室、診断法、統計的有意性などが重要視されます」と Roberts は話す。例えば新薬を評価する際には、こうした要素が重要になる。しかし彼は、分離脳の患者たちのおかげで、1つの症例からいかに多くのことが学べるかを思い知った。「1人の患者を慎重に詳しく調べることで、人類全体に適用できる結論が引き出せると実感したのです」と彼は話す。

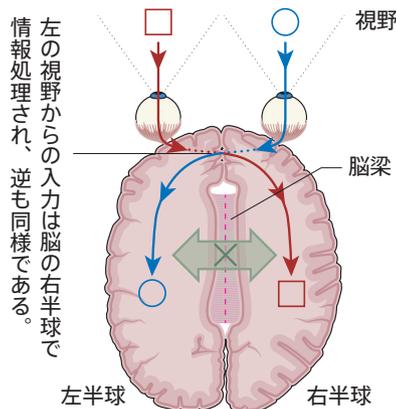
現在、分離脳患者たちは高齢化している。数人が死亡し、1人は脳卒中になった。年齢が上がり、じっと座ったり注視したり集中したりするといった負担の大



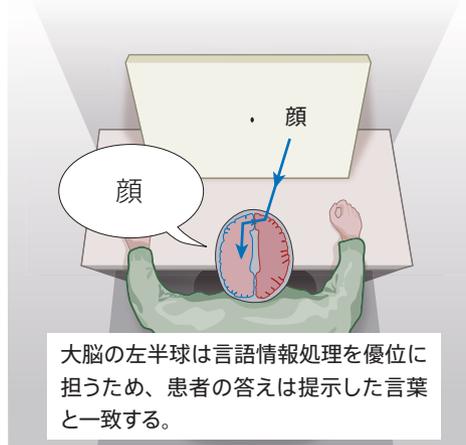
健康な脳に見られる脳梁の組織（上の画像の白く明るい部分）は、脳梁離断術の後には退縮して空洞（黒色部分）が残される。

2つの心 分離脳患者を対象にした実験は、脳機能の側性化という特性を解明する助けになる。

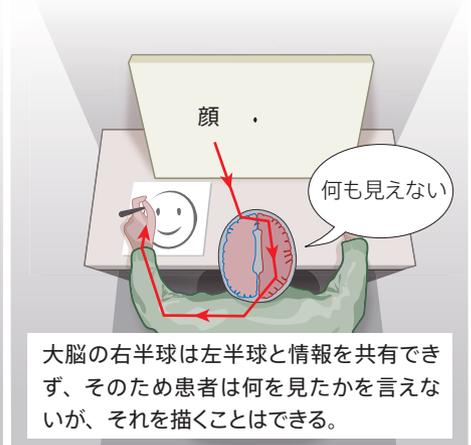
分離脳患者は脳梁を切断する手術を受けている。脳梁は、大脳の左右半球をつなぐ神経繊維の太い束である。



1つの言葉が右の視野に短時間提示され、患者は何が見えたかを答える。



1つの言葉が左の視野に短時間提示され、患者は何が見えたかを答える。



きい作業課題には適さなくなってきた。脳梁離断術は近年ではほとんど行われず、薬剤療法やもっと穏便な外科処置に置き換わっている。また、脳機能を見る手法としては、画像化（イメージング）技術が主役になっている。これなら、作業課題中にどの脳領域が活動しているかを観察するだけでいいからだ。

しかし、Miller や Ivry や Gazzaniga たちに言わせれば、分離脳患者は今なおきわめて貴重な情報源であるという。例えば、画像化技術で確認できるのは、言語処理をしているときに右の大脳半球よりも左の半球のほうが活動している、ということだけだ。しかし分離脳患者では、これが劇的な形で現れる。患者は「パン」という言葉が右半球に投射されたとき、この言葉を声に出して言えなくても、パンの絵を指し示すことができるのだ。「このような事実を見て、右半球は、脳内の運動系にアクセスして発話させることはできなくても、読み取る能力はあるとわかるのです」と Ivry は話す。「画像化技術は、何かが起こっている場所を探すのには非常に優れていますが、患者が参加する実験だと、それがどのように起こっているかを知ることができるのです」と彼は付け加えた。

脳内のケーブル切断

脳梁の切断が重度のてんかんの治療法として初めて使われたのは1940年代のことで、米国ニューヨーク州ロチェスターで26人の患者に実施された。その目的は、てんかん発作の「電気的な嵐」を、片側の大脳半球のみに限定させることだった。最初、この処置は効果が上がらないように見えたが、1962年に、1人の患者でかなりの改善が見られた。この手術は、侵襲的で危険が伴うし、薬剤で症状が軽減できる患者も多かったため、登場してから数十年経過する中で、一度も好ましい治療法として扱われたことはない。しかしそれでも、難治性てんかんの治療法としては最後の手段となっている。

当時、カリフォルニア工科大学（米国パサデナ）には神経生物学者で神経心理学者の Roger Sperry がおり、Gazzaniga はその研究室に大学院生として在籍していた。彼らは分離脳患者たちから、ヒトの脳に見られる「側性化」、つまり、左右の脳半球が別の機能を担うことについて、新たな知識が得られると考えた。そのころ、この問題に関する意見は2つに分かれていた。

1940年代に最初の分離脳患者を調べ

た研究者たちは、脳梁切断は思考や行動にさほど影響を及ぼさないという結論に達した（Gazzaniga たちは、これらの初期の手術では切断が不完全だったと推測しており、手術で発作が改善されなかった理由もそれで説明できると考えている）。しかし、1950年代に Sperry たちが行った研究からは、脳梁離断術を施した動物では、脳機能が大きく変化することが明らかになった。Sperry と Gazzaniga は、この矛盾をどうしても解明したいと考え、答えを見つける道を分離脳患者に求めたのである。

2人の最初の患者は、W.J. という名の男性だった。彼は第二次世界大戦中にパラシュート部隊にいた兵士で、ドイツ兵にライフル銃の台尻で頭を殴られてから発作を起こすようになった。1962年に Gazzaniga は、脳梁切断手術を受けた後の W.J. に、画像が見えたらボタンを押してもらって視覚心理実験を行った。W.J. の右または左の視野に、文字画像や明るい光などの視覚刺激をパッと一瞬見せた。左の視野の情報は右の大脳半球で、右の視野の情報は左半球で処理されるので、片側の視野に画像を一瞬見せると、逆側の脳半球だけに画像の情報が送られることになる（上図参照）。

左半球だけに刺激を送った場合、W.J. は悩むようすを見せなかった。ボタンを押して、自分が何を見たかを研究者に伝えた。しかし右半球に刺激を送った場合、W.J. は何も見えないと言いながらも、左手はボタンを押していたのである。「左脳と右脳は、お互いが何をしているのかわかっていなかったのです」と Gazzaniga は言う。これは、左右の脳半球が誰も予想していなかったほど機能をきっちり分担していることを明らかにした。まさに、通説を打ち破る発見だった¹。

情勢は急転し、研究レースは脳機能の「側性化」の探究へと向かうこととなった。しかし、研究対象となる患者をさらに見つけるのは難しいことがわかった。Gazzaniga は、少なくとも 100 人以上の患者が脳梁離断術を受けていると見積もった。ただし、この手術を受ける患者は、ほかにも発達や認知の重大な問題を抱えている傾向が見られる。脳梁がきれいに切断されていて、なおかつ研究に役立つほど神経学的に健全な症例は、ほんの少数なのだ。W.J. のような患者がほかにも現れるかどうか、Sperry や Gazzaniga たちはしばらくの間は確信が持てなかったのである。

しかし、神経外科医との交流やてんかん治療センターとの連携、多くの潜在的患者の評価をすることで、カリフォルニア州で研究に適した少数の人々が見つかり、その後、米国東部で Vicki をはじめとする患者集団が見つかった。分離脳研究は 1970 年代から 1980 年代初めにかけて発展し、神経科学では特に右の大脳半球の持つ能力に関心が集まった。「右脳」とも呼ばれる右半球には、言語の情報処理や発話の能力がないと一般に考えられた。

Gazzaniga は私の前で、自慢の孫を紹介する祖父のような面持ちで、彼の「果てなく辛抱強い患者たち」の名前を順に、W.J.、A.A.、R.Y.、L.B.、N.G. と呼び上げていった。医療の守秘義務のため、患者の名前はイニシャルでしか明らかにすることができないのだ。(Vicki

は、姓と現在住んでいる町を公表しない条件で、この記事に名前を出すことを了承してくれた。)

2011 年 5 月にオレゴン州ポートランドで開催された米国神経外科学会の年次総会で、Gazzaniga は基調演説を行い、P.S. という名の患者を対象とした 1976 年の実験の際の、画質の粗い映像を 2、3 本紹介した(当時、患者はわずか 13 か 14 歳だった)。研究者たちは、患者の脳の右半球だけに見えるように書き文字を提示した場合の反応を見たがった。

Gazzaniga のビデオでは、その少年の右半球だけに「ガールフレンド」という言葉を一瞬見せて、「あなたの好きなのは誰ですか」と尋ねた。この場合、予想どおり、少年は言葉では返答することができなかった。彼は肩をすくめ、頭を振って、W.J. の場合と同じように、何の言葉も見えていないと言った。しかしそれからクスクスと笑った。それは、十代の若者がよくやる照れ隠しで、声が漏れて顔が赤らんだ。彼の脳の右半球はメッセージを見ていたが、言語野のある左半球はそれに気がつかなかったのだ。

その後、少年は左手でゆっくりと、前に置かれた「スクラブル」(アルファベットの文字の書かれた駒を並べて単語を作るゲーム)の駒の中から 3 つの駒を選び、「L-I-Z」と並べた。彼のクラスにいる可愛い女の子が「Liz」なのだろう。「この実験によって、彼が右脳で言語を理解できたことがわかりました」と Gazzaniga は講演の後に私に話してくれた。「この少年は、ヒトの大脳の左右半球のどちらでも言語が理解できることを初めて実証した例の 1 つです。彼は、左右どちらの大脳半球に課題を提示した場合でも、言語を使って一連の質問に答えることができました」。

こうした初期の観察結果のもつ意味合いは「絶大だった」と Miller は言う。「右半球は、左視野を通して世界を見ているが、ジェスチャーや左手の動作を介してしか、それを表現できない」ことが明らかになったのだ。その 2、3 年後、研究チー

ムは Vicki でも、右半球に発話能力があることを見つけた²。こうして、完全な脳梁切断による左右半球の連絡遮断は、ある程度普遍的な結果となったが、個人差がかなりあることも判明した。

1981 年、Sperry は分離脳研究の業績でノーベル医学生理学賞を共同受賞した。「受賞は当然でした」と Gazzaniga は言っている。Sperry は 1994 年に死去したが、そのころには Gazzaniga が分離脳研究の第一人者になっていた。20 世紀末になると、彼をはじめとする分離脳研究者の関心は新しい謎に向けられた。それは、脳梁離断術が劇的な影響を及ぼすにもかかわらず、W.J. やそれ以降の患者は、不完全な感じがするとは一言も報告しなかったことだ。Gazzaniga が何度も述べているように、左右の大脳半球は互いに相手を恋しがることはないのだ。

Gazzaniga は、分離脳患者も含めた人々が自己や精神生活の統一感を持つ理由を説明するために、「解釈者理論(interpreter theory)」という理論を編み出した³。この理論が生まれたのは、分離脳患者の脳の右半球にのみ提示し、右半球によってのみ遂行される動作を、言葉(こちらは脳の左半球を使う)で説明してもらった課題からだった。「左半球は、実行の状況に合わせて事後の答えを作り出したのです」。

Gazzaniga のお気に入りこんな事例がある。患者の右半球に「微笑む」という単語を提示し、左半球に「顔」という言葉を提示して、患者に見たものを描いてもらった。すると、「彼の右手は、微笑んでいる顔を描きました。『なぜそれを描いたんですか』と尋ねると、彼はこう答えたんです。『あなたが描いて欲しかったのは悲しい顔なんですか。悲しい顔を描いて欲しい人などいませんよ』とね」。左脳の「解釈者」は、実際に起こったことの説明を考え出したり、次々と入ってくる情報を選別したり、外界を理解する助けになる物語を組み立てたりするために、誰もが利用しているものだ、と Gazzaniga は言う。

コロラド大学病院（米国オーロラ）の神経外科医 Robert Breeze は、今年の Gazzaniga の講演を聴いた後、分離脳研究は現在、「研究の非常に重要な柱の1つ」になっていると語った。しかし Breeze は、ほかの多くの神経科学者と同様に、分離脳研究は時代遅れだと思っている。「現在では、こうした脳内の出来事を可視化して観察できる技術がありますからね」。機能的磁気共鳴画像法（fMRI）などのツールで、脳機能のありかをきわめて詳細に調べることができるのだ。

しかし Miller はこの意見に与しない。「この種の患者は、fMRI では絶対に知ることのできないことを教えてくれるのです」と彼は言う。

興味の対象

Vicki は小さい楕円形のダイニングテーブルに座り、ラップトップパソコンと、いくつかの大きい赤と緑のボタンのある操作盤に向かった。アバディーン大学（英国）の心理学者 David Turk が、1 週間の滞在で一連の実験を行っているところだった。

Vicki の白髪は後ろでポニーテールにまとめられている。秋の冷え込みにもかかわらず、彼女はシンプルな白いスニーカーとショートパンツを身につけていた。彼女はあまり暖かい格好をしなくなかった。暖かくすると、眠くなって集中力がなくなり、丸 1 日かかる実験が台無しになりかねないからだ。

休憩中に Vicki は古い写真アルバムを持ってきた。脳の手術後すぐに撮った 1 枚の写真では、彼女が病院のベッドに座っている。手術のために剃った髪は再び黒く生え始めており、娘と 2 人でっこりと笑っている。アルバムの別のページには、*The Journal of Neuroscience* の 1981 年の論文がやや色あせて挟まっていた。この論文は、Vicki のデータが入った初めての研究論文で、そこには、P.S. と同様に彼女の右半球もある程度の言語能力を持っていることが報告されている⁴。



Michael Gazzaniga は 50 年間にわたって分離脳患者を対象とする研究を進めてきた。

科学研究が生活に入り込むことで何がいちばん困ったかと聞くと、常に陽気な Vicki は、デュアル・プルキンエ・アイトラッカーという装置をつけなければならぬことだと答えた。この古風な装置では、被験者の視野の左右どちらかに正しく画像を提示できるよう頭を静止させるため、装着した被験者にバーを口でくわえてもらう。Vicki は、地球上の誰よりも長く、このバーをくわえて時間を過ごしたと思われる。

ほどなく、また実験の時間がきた。Turk は、両面粘着テープを少し使って、Vicki の細い金縁の遠近両用眼鏡の前面に 3D 眼鏡を貼り付けた。この実験の目的は、視覚情報処理に果たす脳梁の役割を、もっと深部にあつて脳梁離断術による影響を受けない「皮質下の」神経接続の役割から切り離すことである。Vicki はスクリーンの中央に注目して、写真が 1 つの家からさまざまな顔へ、またその逆へとゆっくり切り替わるさまを見つめ、画像の変化に気づいたらボタンを押すよう指示された。彼女は椅子の高さを調節し、自分の鼻梁を見下ろすようにスクリーンを見つめ、準備ができたと言った。

深い結びつき

このほか、両手の協調した動きに大脳皮質下の連絡がどう関与しているかを調べている研究者もいる。分離脳患者は、「両手で行う」課題はほぼ難なくこなすことができ、Vicki と少なくともほかの 1 人の患者は車の運転もできる。2000 年に、オタゴ大学（ニュージーランド）の Liz Franz の研究チームは、分離脳患者に、両手を使う慣れた課題と新規の課題の両方をやってもらった。漁師の経験がある患者は、釣り糸を結ぶジェスチャーをすることができたが、針に糸を通すという慣れないしぐさはできなかった。ここから Franz は、よく訓練された両手を使う技能は皮質下レベルで調整されており、そのため、分離脳患者でも両手を滑らかに統制して動かせるのだと結論した⁵。

Miller と Gazzaniga は、道徳的な理由付けに、右半球が果たす役割の研究にも着手している。これは高次の脳機能で、左半球が仕切っていると以前は考えられていた。ところが、ここ数年の画像化技術を用いた研究から、他者の情動・意図・信念を読み取る情報処理に、右半球が非常に大きくかかわっていることが明らかになった。こうした情報処理は「心の理論」として多くの学者に理解されている⁶。Miller によれば、問診を使った研究分野によって、分離脳研究の価値が十分に明らかになるという。なぜなら、画像化技術だけでは答えは見いだせないからだ。

Miller と Gazzaniga たちは 2009 年に始めた研究で、2 人の分離脳患者に一連のストーリーを提示した。それぞれのストーリーには、予期せぬ危害もしくは意図的な危害が盛り込まれている。つまり、上司を毒殺しようとするが、砂糖を殺鼠剤と勘違いしたために失敗する人物と、殺鼠剤を砂糖と間違えて上司をうっかり死亡させてしまう人物とが、道徳的に同程度だと感じるかどうかを調べたのである⁷。大半の人は、前者のほうが道徳的に非難されるべきだと考える。研究

チームはこの話を患者に読み聞かせ、その音声入力は左半球に向かう。そして、「解釈者」のメカニズムに誘導された左半球が回答を作成するよう、患者に言葉で回答してもらった。さて、分離脳患者は左の脳だけを使って一般的な道徳的判断を下せたのだろうか。

結果はノーだった。分離脳患者たちは、どちらのシナリオも道徳的に等しいと判断したのである。この実験結果からみて、こうした論理的判断のかかわる課題には、左右両方の大脳皮質が必要だと考えられるのだ。

しかし、この知見から新しい謎も生まれた。それは、分離脳患者の血縁者や友人たちが、患者の異常な判断や「心の理論」の破綻に気付かずに過ごしている点だ。実験では左右半球の連絡分断の影響が表に現れるが、日々の生活では、ほかの理論的判断機構がこの影響を補っているのではないかと、Millerのチームは推測している。彼は今後、この仮説を検証するつもりである。

分離脳を研究する機会が減りつつあるため、Gazzanigaは、過去の実験記録のデジタル化に精力的に取り組んでいる。なかには50年以上も前の記録もある。「1つ1つの場面がついこの間のように思い出され、感無量です」と彼は言う。「我々は、驚くようなことを実にくさん見てきました。ほかの人にも、これらのビデオを通じて同じ体験をしてもらいたいですね」。きっと、ほかの研究者がさらに何か新しいことを見つけ出ししてくれるだろうと彼は話す。

研究対象になりそうな分離脳患者はほかにもいるだろうし、例えば実際にイタリアにも少数の患者がいる。しかし、画像化技術による研究と競合することや、分離脳に関する最大の発見の多くが自身の業績である点などから、Gazzanigaは、すでに分離脳研究の栄光の日々は過ぎ去ったことを認めている。「実験対象になる患者という面から見れば、この研究分野は終わりに近づきつつあります。でも、何もかもが終わったという気持ちには、まだなれません」。

は、まだなれません」。

確かに、まだ終わりはしないかもしれない。左右に分かれた脳の機能や接続性や連絡に関する新しい疑問に取り組もうとする研究者がいるかぎり、そして、Vickiや彼女の仲間たちが健在で、実験にまだ参加する意思を持っているかぎりには、長年にわたる実験や研究への協力は、決して自分のためだけではなくたとVickiは言う。「私は常に情報を提供する側でしたが、それらはきっとほかの人々に役立ってくれるでしょう」。

(翻訳：船田晶子)

David Wolmanは、米国オレゴン州ポートランド在住のフリーランスライターで、最近刊行の*The End of Money*の著者でもある。

1. Gazzaniga, M. S., Bogen, J. E. & Sperry, R. W. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **48**, 1765-1769 (1962).
2. Gazzaniga, M. S. *Brain* **123**, 1293-1326 (2000).
3. Gazzaniga, M. S. *Science* **245**, 947-952 (1989).
4. Sidtis, J. J., Volpe, B. T., Wilson, D. H., Rayport, M. & Gazzaniga, M. S. *J. Neurosci.* **1**, 323-331 (1981).
5. Franz, E. A., Waldie, K. E. & Smith, M. J. *Psychol. Sci.* **11**, 82-85 (2000).
6. Young, L. & Saxe, R. *NeuroImage* **40**, 1912-1920 (2008).
7. Miller, M. B. et al. *Neuropsychologia* **48**, 2215-2220 (2010).

RESEARCH HIGHLIGHT

ベネチアの沈下は続き、東に傾く

Venice: sliding down, tilting east

2012年3月29日号 Vol. 483 (512)

これまでの調査でベネチアの地盤沈下は食い止められたと思われていたが、最新の研究から、この街の沈下は続いており、そのうえ、わずかに東に傾いていることがわかった。

カリフォルニア大学サンディエゴ校(米国)のYehuda Bockらは、2001年から2011年までのベネチアとその潟の5か所の観測点のGPSデータと、宇宙に設置したレーダー観測装置による4年分のデータとを組み合わせ分



M. SECCHI/CORBIS

析した。その結果、ベネチアは現在も毎年1~2mmずつ沈下し続けていて、全体に東に傾いていることが明らかになった。彼らは、プレートの移動と堆積物の圧密がその原因であるかもしれないと述べている。

今回の知見は、海面上昇や潮汐の季節変化による洪水への備えを固める上でも役立つだろう。

Geochern. Geophys. Geosyst.

<http://dx.doi.org/10.1029/2011GC003976> (2012)

(翻訳：三枝小夜子)

ピンボケ度で距離を知る ハエトリグモの目

ハエトリグモは、クモの巣を張らない。獲物めがけてジャンプし、捕まえるのだ。その目の構造が変わっていることを知った小柳光正・大阪市立大学准教授たちは詳しく調べてみた。すると、これまでに知られていない珍しい視覚の持ち主であることが発見された¹。網膜に結ぶ像のボケ具合で、ハエトリグモは獲物までの距離を測っていたのである。

—— Nature ダイジェスト：「ハエトリグモ」とは、おもしろい名前ですね？

小柳：英語名をジャンピング・スパイダーと言い、その名のとおり、ジャンプして、ハエなどの虫を捕まえて食べます。クモの巣を張らないクモなのです。体長は5～8mmくらい。家の内外で普通に見ることができますよ。

—— なぜハエトリグモの研究を？

もともとクモの目に興味があったのです。クモは、トンボなどの昆虫と同じ節足動物。ほとんどの節足動物の目は、複眼といって、小さな目がたくさん集まってできています。それなのに、クモの目は私たちと同じような目（カメラ眼と呼ぶ）。どうしてだろうと不思議だったのです。

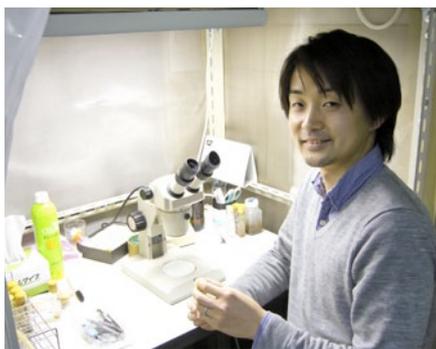


図1 ハエトリグモの目を顕微鏡で観察する永田崇さん。「厚みのある対象物の画像のボケを数学的に除去する、擬似共焦点顕微鏡を操作しているときに、ピンボケ度が距離情報に結びつくことを思いつきました」と振り返る。このピンボケ度から距離を算出する仕組みは、コンピューター・ビジョンの分野で注目されている。

そこで、クモの目を研究しようと思って文献を調べてみると、クモの中でもハエトリグモは、さらに変わっているとわかりました。目の奥には、光を受ける網膜がありますが、それが4層にもなっているのです。一般的には、動物の網膜は1層です。

—— 網膜に着目したのですね。

巣を張るクモは、獲物を捕まえるときに、視覚に頼る必要がありません。しかし、ハエトリグモは獲物を見つけて飛びかかるので、視覚はとても重要なはずなんです。ですから、その網膜が4層であることは、ハエトリグモの捕食行動と密接な関係があるのではないかと思い、研究することにしました。

クモの目の研究は、2004年に大阪大学の助手になったときに始めました。そのときの最初の受け持ちの学生である^{ながたかし}永田崇君が、実験に携わってくれました。その後、大阪市立大学に移り、生化学・生理学が専門の寺北明久教授の指導の下で研究を続けることができ、永田君も私と行動を共にしてくれました。

実験結果の矛盾が、発見のきっかけ

—— 具体的にはどう研究されたのですか？

私たちが最初に仮定したのは、4層の網膜が、それぞれ波長の違う光を受け取っているのではないかということでした。

ヒトの目の場合は、レンズ特性のおかげで、1層の網膜にさまざまな波長の光が像を結びます。しかし本来は、光は波長によって屈折率が異なるため、レンズ



小柳 光正

を通過して結ばれる像の位置は、波長により異なるはずなのです。例えば、青色の光は近くに、緑色の光は遠くに像を結ぶというように。そこで、4層の網膜の奥の層が長波長、手前の層が短波長を受け取れば、どの波長も鮮明な像を各網膜で結べると考えたのです。

—— なるほど。その仮説の確認法は？

光は、網膜に存在する光受容タンパク質（オプシン）がキャッチします。ですから、網膜のタンパク質を調べれば、何色の光を受け取っているのかわかります。

—— 調べた結果は、どうでしたか？

予想どおりではありませんでした。奥のほうから第1層、第2層と呼びますが、まず第1層に緑色の光に対する受容体があることがわかりました。そこで、第2層には、より波長の短い青色光の受容体が予測されたのですが、結果は、第2層にも緑色受容体のみだったのです。第2層には緑色光はピントの合った像を結びません。これでは第2層には常にボケた像ができてしまうはずなんです。

実験の間違いではないかと、何度も、しかも慎重に実験を繰り返したのですが、やはり同じ結果でした。

—— ピンボケ像を作るということは？

解釈に行き詰まりました。生物は、鮮明な像を効率よく得る仕組みを視覚として発達させてきたと考えていたので、説明がつかなかったのです。この矛盾した結果が真実なのであれば、もうしかたない

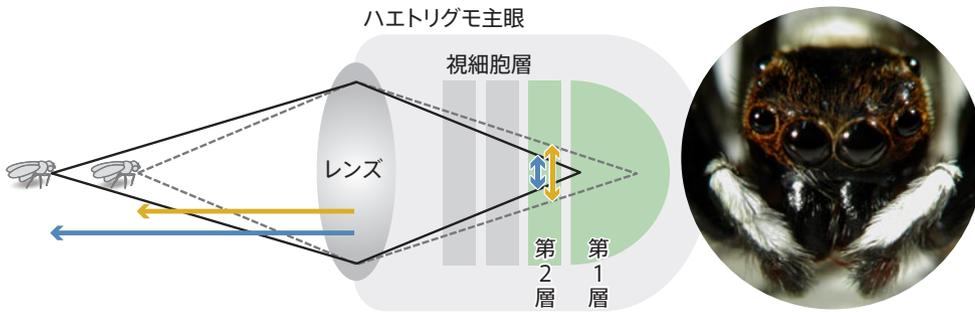


図2 網膜（視細胞の層）の第2層には、ピンボケ像ができる。遠くの対象物のピンボケ度は小さく、近くのもの大きい。赤色光のみを与えた実験では、赤色光は緑色光より遠くに像を結ぶので、ピンボケ度は大きくなり、対象物が近くにあると錯覚される。写真はハエトリグモの目。2つの主眼と6つの副眼からなる。

とほとんど解釈を諦めかけていました。

——新たな解釈をどのように思いついたのですか？

今でも忘れません。ある日、永田君が1つのアイデアを持ってきました。ピンボケの度合いは、対象物までの距離情報に換算できるので、それで距離を測っているのではないかと。

実は、最初にそれを聞いたとき、私は懐疑的でした。原理的には可能ですが、そのような方法で距離を、すなわち奥行きを知覚している生物は、これまで発見されていなかったからです。

そこで、奥行き情報を得ることが可能な別な仕組みをハエトリグモが持っているかどうか、永田君に文献などで調べてもらいました。すぐに、両眼視、レンズのピント調節、運動視差などといった一般的な仕組みを、ハエトリグモは持っていないことがわかりました。さらに、このアイデアを支持する証拠が次々と確認されて、私も確信しました。その夜、永田君と2人でとても興奮したことを覚えています。

——ピンボケ度を奥行きの測定に利用しているとは、大発見でしたね。

そうです。まさに私たちは発見した気持ちになっていました。しかし寺北教授に、行動実験で実際に証明しなければ、発見したことにならないと諭されました。

そこで、証明するための実験に取りかかったのです。実験は、赤い光のみを与えると、ハエトリグモが、ジャンプする距離を見誤るだろうという仮説を立てて

行いました。長波長の赤色光だと、緑色光のときよりも像が遠くに結ばれるので、第2層でのピンボケ度が大きくなり、対象物が実際より手前があると勘違いする。その結果、標的に届かない短いジャンプをすると考えられます。

ハエトリグモがハエに向かってジャンプするようすをビデオで観察し、跳んだ距離のデータを定量的に処理して、この仮説を証明することができました。いつどのくらいジャンプするかわからないため、最初は、ハエトリグモの動作に一喜一憂しましたけどね。

——クモにジャンプする距離を間違えさせるとは、エレガントな証明方法ですね。

一言でいうと簡単ですが、実は行動実験に1年以上かかりました。実験装置の組み立てから長時間にわたる観察まで、永田君はたいへんがんばってくれました。解析方法を考えることはもちろん、ハエトリグモの目のレンズの焦点距離を測定したり、獲物までの距離の誤認量の理論値を算出したり。そういうことは、彼は物理学科出身で、お手の物でしたが。

節目節目で正しい方向に導いて下さった寺北教授にもとても感謝しています。

分子進化学がルーツ

——自然の奥深さにふれる発見でしたね。

私たちが研究しなかったら、おそらく誰もこの事実を発見することはなくて、それでも私たちの生活には何の支障もないかもしれない。けれども、生物の世界にはこんなにおもしろいことがあるんだって、人が思ってくれればうれしいです。

——研究で大切にしていることは？

私の研究のルーツは、大学院で学んだ分子進化学です。生物の系統関係を下敷きとして、生物の機能や進化に迫る解析や発見ができるよう心がけています。

研究のスタートは、今回のように、素朴な進化的興味から始めるとうまくいくことが多いです。今回は、分子進化的には特段の発見には至りませんでした、別の新しい発見に結びつきました。

——これからはどんな研究を？

私は、視覚を中心に研究してきました。動物にとって目は重要な感覚器で、進化の研究上も興味深いものですから。今後はそれに加え、ほかの光感覚についても考えていきたいです。生化学、生理学、物理学、遺伝学など、必要なものは何でもあり、で研究を続けていくつもりです。

——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. Nagata T, Koyanagi M, Tsukamoto H, Saeki S, Isono K, Shichida Y, Tokunaga F, Kinoshita M, Arikawa K, Terakita A, Science. 335: 469-71 (2012)

AUTHOR PROFILE

小柳 光正（こやなぎ みつまさ）

大阪市立大学大学院理学研究科准教授。2001年 京都大学大学院理学研究科生物学専攻博士課程修了。日本学術振興会特別研究員、大阪大学助手、大阪市立大学講師を経て、2010年より現職。2006年 日本比較生理生化学会吉田奨励賞受賞。分子進化学を基礎に、動物の光受容システムの進化と多様性を研究。

触媒反応

変装させて反応させる

Disguise gets a reaction

DANIELLE M. SCHULTZ & JOHN P. WOLFE 2012年3月1日号 Vol. 483 (42)

すべての有機分子は多くの炭素-水素 (C-H) 結合を持っているため、その中から1つだけ探し出して、反応させるようなことは難しい。しかし、ありふれた化学基を「変装」させて、これをおとりとして利用すれば、この問題が解決できる。

医薬品、材料、日用品などに含まれる有機小分子の有用な特性は、分子内の化学基、特に水酸基 (-OH) やアミノ基 (-NH₂) などの“官能”基の位置と種類に左右される。目的の官能基を分子内に導入するためには、既存の反応基を、相互変換反応によって別の基と交換する方法が一般的である。しかし、このような合成方法は反応ステップが多くなり、時間とコストがかかる。

Simmons と Hartwig は *Nature* 3月1日号¹で、イリジウム (Ir) 触媒を用いて、分子内の特定位置の C-H (炭素-水素) 結合を C-OH (炭素-水酸基) 結合に直接変換し、官能基相互変換反応ステップを何段階も少なくできることを報告している。彼らは、アルコール (OH を1つ持つ) を 1,3-ジオール (3個の C 原子で隔てられた2つの OH、つまり HO-C-C-OH を持つ) に変換するきわめて有効な方法を見いだした。1,3-ジオールは、複雑な構造を持つ多くの天然化合物の「骨格」となるばかりでなく、ポリマー材料や医薬品中にも見られる重要な化学モチーフである。

Simmons と Hartwig が報告した反応は、遷移金属触媒による C-H 結合官能基化反応²の例であり、反応性に乏しい C-H 結合の水素原子を、直接官能基に置き換える合成手法である。このような反応は、複雑分子の合成効率を向上させる強力な手段となるが、実際に実現する

のは難しい。一般的に、有機分子はさまざまな C-H 結合を持つため³、数ある C-H 結合の中から1つだけを選んで反応させるのは非常にやっかいである。さらに、分子内の各 C-H 結合は、それぞれ反応性の程度が異なっている。触媒を用いることで、最も反応性の高い C-H 結合を反応性の低い C-H 結合よりも先に官能基化することはできるが⁴、反応性の低い結合を選択的に官能基化することは容易ではない。

この問題を解決する方法の1つは、分子内の官能基を配向基として利用する方法である⁵。配向基とは、金属触媒と結合することによって特定の C-H 結合を反応させるよう舵取りをする基のことである。ただし、この方法にも欠点がある。このような特殊な配向基は合成経路の対象生成物中に存在しない場合が多く、したがって、外から配向基を導入し、さらにそれを除去するための追加の合成ステップが必要になるのだ。

そのため、有機分子内でよく見られるありふれた官能基 (水酸基、アミド基、カルボン酸基など) を配向基として利用することに、大きな関心が寄せられた^{6,7}。そして、ベンゼン環上にある比較的反応性の高い C-H 結合の官能基化反応については、ありふれた官能基を配向基としてうまく使えることが判明した^{7,8}。しかし、飽和炭化水素鎖 (アルキル鎖) にある反応性の低い C-H 結合

を選択的に官能基化することは、非常に難しく、これまで単純な分子でしか成功したことがなかった⁶。

今回 Simmons と Hartwig¹が開発したのは、アルキル鎖上の水酸基を用いて高選択的に C-H 結合を官能基化する反応である (図1)。水酸基は、イリジウムなどの遷移金属と弱い結合しか作らず、また金属触媒が多く存在すると不要な副反応を起こす傾向があるため、この方法は注目すべき成果だと言える。

成功のカギは、反応物の水酸基を「変装」させることであった。つまり水酸基を、金属触媒と結合するシリルエーテル (ケイ素 Si を含む基) に変換したのだ (図1)。シリルエーテルはイリジウム触媒と強く結合し、反応物内の別の場所にある特定の C-H 結合と C-Si 結合を形成する。つまり、シリルエーテルが配向基としての機能を果たしている。そして、同じ反応容器内で行う次のステップで、C-Si 結合を C-OH 結合に酸化してシリルエーテルを除去すると同時に、1,3-ジオールユニットを有する目的の生成物が得られる。

Simmons と Hartwig は、単純な構造のものから複雑な構造のものまで、さまざまなアルコールを 1,3-ジオールに変換することによって、この方法の有効性を実証した。反応性の高い C-H 結合が分子内に存在する場合であっても、常に配向基から炭素原子3個隔てた C-H 部

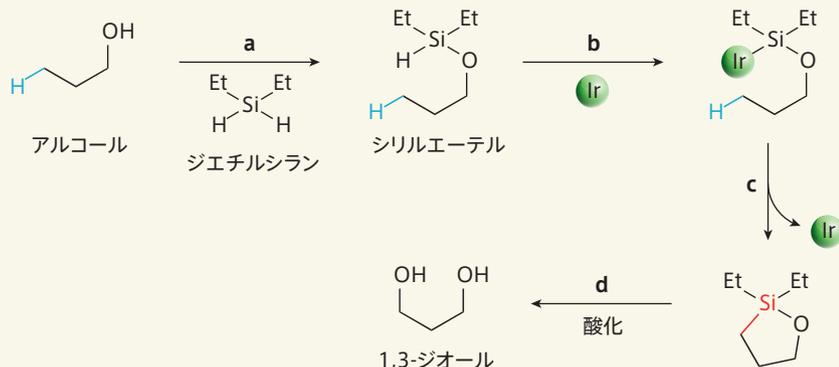


図1 イリジウム触媒を用いた C-H 官能基化反応。

Simmons と Hartwig¹ は、特定の C-H 結合を C-OH 結合で置き換えることによって、アルコールを有用な 1,3- ジオールに変換する反応を報告している。

a 出発物質のアルコールは、まず、ジエチルシランとの反応によってシリルエーテルに変換される (Et はエチル基)。

b, c シリルエーテルはイリジウム (Ir) 触媒 (緑色の球) と強く結合し、特定の C-H 結合 (青色) と C-Si 結合 (赤色) の置換を導く。C-Si 結合が形成されるとイリジウム触媒は切り離される。

d ステップ a ~ c と同じフラスコ内で反応生成物を精製せずに次の酸化反応が行われ、目的の 1,3- ジオールが得られる。

位でのみ官能基化が起こった。印象的なのは、複雑な構造を持つ天然物を反応させても、高い部位選択性を維持していたことである。したがって、彼らは入手が容易な水酸基を有する天然物を、入手しにくい別の天然物に変換させることができたし、新しい天然物類似体を作り出すこともできた。

なかでも、ヘデラゲン酸メチル (抗炎症性、抗真菌性、抗腫瘍性を持つ天然物ヘデラゲニンの前駆体⁹) の合成はみごとである。出発物質は 49 個の C-H 結合を持つ市販のオレアニン酸メチルだが、これらの C-H 結合のうち 1 つの C-H 結合のみが、3 段階の反応で選択的に官能基化されている。これまで最も効率のよかったヘデラゲン酸合成¹⁰ でも、オレアニン酸メチルと近縁の出発物質から 10 段階の反応が必要であった。

Simmons と Hartwig の方法は、水酸基を 1 つだけ含む基質の官能基化に非

常に有効だが、水酸基を複数持つ分子に利用できればもっと応用が広がるであろう (そのような系で選択性が得られるかどうかは、現時点で不明である)。彼らの革新的変換法によって、ありふれた化学基を C-H 結合官能基化反応に利用できることが明らかになった。すなわち、複雑な有機分子の中に 1,3- ジオールユニットを作る新しい、かつ効率のよい方法がもたらされたのである。

(翻訳: 藤野正美)

Danielle M. Schultz と John P. Wolfe、
ミシガン大学 (米国) 化学科。

1. Simmons, E. M. et al. *Nature* **483**, 70-73 (2012).
2. Wencel-Delord, J. et al. *Chem. Soc. Rev.* **40**, 4740-4761 (2011).
3. Newhouse, T. et al. *Chem. Int. Edn.* **50**, 3362-3374 (2011).
4. Chen, M. S. et al. *Science* **318**, 783-787 (2007).
5. Lyons, T. W. et al. *Chem. Rev.* **110**, 1147-1169 (2010).
6. Engle, K. M. et al. *Acc. Chem. Res.* <http://dx.doi.org/10.1021/ar200185g> (2011).
7. Huang, C. et al. *J. Am. Chem. Soc.* **133**, 17630-17633 (2011).
8. Simmons, E. M. et al. *J. Am. Chem. Soc.* **132**, 17092-17095 (2010).
9. Plé, K. et al. *Eur. J. Org. Chem.* **2004**, 1588-1603 (2004).
10. García-Granados, A. et al. *J. Org. Chem.* **72**, 3500-3509 (2007).

nature.com/scientificreports



Keep your
research moving

Scientific Reports は、自然科学
(生物学、化学、物理学、地球科学) の
あらゆる領域を対象とした
一次研究論文を扱う
オープンアクセスの電子ジャーナルです。

Submit today!

www.naturejpn.com/srep

npg nature asia-pacific

進化生物学

なぜ、いいかげんに擬態するのか

Life imperfectly imitates life

DAVID W. PFENNIG & DAVID W. KIKUCHI 2012年3月22日号 Vol. 483 (410-411)

自分の姿を別種の生物に似せて、捕食者から身を守るようになった生物種がいる。

ところがその中に、擬態が不正確なものがある。

自然選択に直面しながら、なぜ不完全な擬態はなくなるのか。

ハナアブの分析結果から、その謎に迫るヒントが得られた。

150年前、英国の博物学者 Henry Walter Bates¹ はある現象を発見し、それが「自然選択理論のきわめて強力な証拠」だと考えた。そのわずか数年前に自然選択が進化の推進力であることを提唱していた Charles Darwin と Alfred Russel Wallace は、Bates のこの考えに賛同した。さらに Darwin² は、Bates の論文について、「こんなにすばらしい論文はめったにない」と評価している。

Bates が発見した衝撃的な適応は、ベーツ型擬態³ と呼ばれている。それは、捕食者から見た可食種（擬態者）が、捕食者の避ける派手な不可食種（モデル）に似るように進化する、というものだ。そうしたそっくりな生物は、捕食者が不可食種と勘違いして手を出さないために選択的に生き残る、と Bates は主張した¹。この考え方は強い説得力を持っており、ベーツ型擬態は、適応を生み出す自然選択の威力を説明する際に、今でも広く使われている^{3,4}。しかし、擬態種がモデルにあまり似ていない場合も多く、その不正確な擬態という事実は、進化理論に多くの課題を突きつけている³。Nature 3月22日号の461ページでは、Penney ら⁵ が、擬態に不正確なものが多い理由について、考えられる説明を考察している。

Penney らも列挙しているように、不完全な擬態を説明するために、いくつか

の仮説が提唱されている（それらは互いに排他的ではない）。不完全な擬態は人間の目の錯覚だと主張する「あばたもえくぼ」的な感覚限界仮説、複数のモデルに似ることを求める選択圧が理由で不完全な擬態が存続していると考え「何でも屋」的な多重モデル仮説、遺伝的に近縁の個体に有利になるようにするために不完全な擬態が維持されていると主張する「血縁選択」仮説がその例だ。血縁選択仮説は、擬態が不完全だと捕食者の識別性は増すが、場合によってはモデルと取り違えることによって擬態者が見過ごされることもあり、それによって同じ不完全な形質を共有する近縁個体も見過ごしてもらえる、という考え方だ。

不完全な擬態を説明する別の理論として、「選択緩和」仮説がある。これは、ある点を越えると擬態の類似度を極めることが選択上のメリットをほとんど失う、とするものである。要するに、それ以上細かく似せても意味がないという考え方で、モデルが一般的だったり、特に有毒なものだったりする場合はその例になる。そして最後が「制約」仮説である。これは、精緻な擬態を作り出す遺伝子を持っていないとか、あるいは、正確な擬態をすることにプラス・マイナスの両面がある場合だ。例えば、うまく擬態すれば捕食者に食べられる可能性は減るが、異性から選ばれる可能性も減って交尾の

機会が減るようなケースである。

これまで、こうした複数の仮説を1つの系の中で徹底的に評価する研究は行われたことがなかった。Penney ら⁵ は、それを正確に行うために、数十種のハナアブで擬態の度合いを比較した。無害な双翅目であるこの大きな科にとって、擬態は主要な特徴だ（図1）。約5600種が知られているが、その4分の1以上は、毒針を持つ膜翅目（スズメバチやミツバチの仲間）に姿が似ている⁶。一部のハナアブはきわめて精巧な擬態を行っており、形態も行動も膜翅目のモデルに近いものになっているが、その他の多くは、あまり似ていないように見える⁶。この擬態忠実度のばらつきゆえに、ハナアブ類は、不完全な擬態を調べるうえで理想的な研究対象となっている。

研究チームは、ハナアブ類と膜翅目の姿が似ていることについて、鳥類（ハナアブの捕食者）と人間の見方が一致しているらしいことを明らかにした。したがってこの場合、「あばたもえくぼ」の仮説は成り立たない。さらに、統計解析により、この擬態者の特徴が、決して異なるモデルの特徴の中間を取ったものではないことが明らかにされ、「何でも屋」の仮説も支持されなかった。血縁選択仮説による予測では、擬態者の数が多いほど擬態の正確さが低下することになるが、研究チームが観察した傾向は逆だった。



図1 スズメバチの柄を身にまとったアブ

この無毒のホソヒラタアブ (*Episyrphus balteatus*) は、毒針を持つスズメバチと姿がよく似ている。ハナアブの中にはスズメバチやミツバチと姿がきわめてよく似た種もあるが、あまりよく似ていないものも多い。Penneyら⁵は、数が少なく体も小さければ選択圧が高くなることから、不正確な擬態がなくなる理由が低い選択圧で説明できる可能性を示した。

結局のところ、知見とつじつまが合うのは、制約仮説と選択緩和仮説だけだった。この2つの仮説は、擬態者が多いほど擬態の正確さが高まることを予測するほか、擬態の正確さが擬態者の体の大きさに伴って高まることを予測している。そしてそれこそが、研究チームの発見した事実であった。

擬態者の数が増えて体も大きくなる場合、選択緩和仮説がどのように当てはまるのかを理解するために、捕食者の観点から、味のよい擬態者とまずいモデルとを識別する問題を考えてみよう。すべての擬態者の姿が同じように紛らわしいものでないとすれば、捕食者は被食者を攻撃するときにリスクを負わなければならない。擬態者を攻撃すれば、得られる報酬は後悔よりも大きい。擬態者が多ければ、誤ってモデルを攻撃する確率は低下する。そうした条件では、捕食者はほとんど最も優れた擬態者を試食しようとするにちがいない。このことは、擬態をさらに精巧なものにする方向に選択圧をかけることになる。

同じように、擬態者の体が大きければ、

捕食者にとっての潜在的なメリットが大きくなり（一般に大型の被食者ほど捕食者にとって実入りが大きい）、擬態を改良するための選択圧は、小型の擬態者と比べて大型のものの方が大きくなる。擬態者が多い場合に擬態の正確さが増すことは別の研究で発見されているが⁷、擬態者が大きくなる時にもこのパターンが当てはまることを裏付けた Pennyらの証明は、旧来の考え方をみごとに肯定するものとなった。

ハナアブの擬態は、「十分満足」なものになった時点で、精緻化に向けた選択が働かなくなるために不正確なのかどうか（選択緩和仮説）、それとも、擬態を改良するコストゆえに、これ以上の精緻化に抗する能動的な選択圧が働いているのかどうか（制約仮説）。そのどちらであるのか、まだ決着はついていない。例えば後者の場合、擬態者とモデルとの間の、共通の資源⁸または生殖の機会⁹をめぐる競争によって、制約が課せられている可能性がある。その場合、両者が別々になること、すなわち不正確な擬態のほうがよいと考えられる¹⁰。いずれにせよ、

この2つの仮説を解きほぐすには、さらなる研究の進展が必要だ。

擬態に関する Bates の発見¹から150年たってもなお、この話題は世間と科学界を魅了し続けている^{3,4}。Pennyらの知見は、選択が正確な擬態を生み出す場合もある一方で、逆にそれを生み出さない場合も多い理由を解明する助けとなる。この謎を解き明かすことで、進化の過程について、さらなる洞察が得られることだろう。

（翻訳：小林盛方）

David W. Pfennig と David W. Kikuchi、ノースカロライナ大学チャペルヒル校（米国）生物学科。

1. Bates, H. W. *Trans. Linn. Soc.* **23**, 495–556 (1862).
2. Burkhardt, F., Evans, S. & Pearn, A. M. (eds) *Evolution: Selected Letters of Charles Darwin 1860–1870* (Cambridge Univ. Press, 2008).
3. Ruxton, G. D., Sherratt, T. N. & Speed, M. P. *Avoiding Attack: The Evolutionary Ecology of Crypsis, Warning Signals & Mimicry* (Oxford Univ. Press, 2004).
4. Forbes, P. *Dazzled and Deceived: Mimicry and Camouflage* (Yale Univ. Press, 2009).
5. Penney, H. D., Hassall, C., Skevington, J. H., Abbott, K. R. & Sherratt, T. N. *Nature* **483**, 461–464 (2012).
6. Gilbert, F. in *Insect Evolutionary Ecology* (eds Fellowes, M. D. E., Holloway, G. J. & Rolff, J.) 231–288 (CABI, 2005).
7. Harper, G. R. Jr & Pfennig, D. W. *Proc. R. Soc. Lond. B* **274**, 1955–1961 (2007).
8. Alexandrou, M. A. et al. *Nature* **469**, 84–88 (2011).
9. Estrada, C. & Jiggins, C. D. *J. Evol. Biol.* **21**, 749–760 (2008).
10. Pfennig, D. W. & Kikuchi, D. W. *Curr. Zool.* (in the press).

実験用霊長類の確保に向けて、立ち上げられ

Flight risk

2012年3月22日号 Vol. 483 (373-374)

動物実験反対運動が激化しており、

このままでは、最もきちんとした環境と規則に基づいて進められている動物実験が、不可能になってしまう。

今こそ科学者は立ち上がるときだ。

英国航空、ルフトハンザ航空、デルタ航空の本社前で、脳卒中やパーキンソン病患者の写真を貼ったプラカードを振り上げ、科学者がデモをするのが近づいている。生物医学研究に対する航空会社の妨害を、止めなければならないからだ。正常ならこんな行動は必要ないのだが、今後も動物を研究モデルとして使いたいのであれば、もはや科学者が最前線に出ていくしかない。動物の権利擁護運動の活動家と同じくらい目立つよう、強い決意と組織力、粘り強さで行動しなければならない。

動物実験反対派は、運輸会社を標的とする新たなキャンペーンを展開し、国民感情のツボをうまく押さえることに成功した。その結果、研究室宛の実験用霊長類の輸送を引き受ける主要航空会社は、数社にまで減ってしまった (*Nature* 2012年3月22日号 381 ページ参照)。反対運動の標的は、霊長類の輸送にとどまらない。2012年に入って、英国向け実験用齧歯類の輸送を担っていた最後の海運会社が、その取扱いを中止した。この中止で、動物実験が規制の緩い国々へと移る可能性がある、と科学者は警告する。

この問題の主役は、活動家ではなく「声なき多数派」だ。そこには、大部分の科学者、一般市民、そして病気やけがをした数百万人の患者とその家族が含まれる。今後の霊長類実験、そして究極的にはすべての動物実験による進歩を確実に享受するために、「声なき多数派」は今、

人間の健康を守るために結集しなければならない。

もちろん、科学者とその支援者は、研究における動物の犠牲について、隠し立てしない姿勢を今後も堅持しなければならない。自らが管理する動物の世話に問題があれば、それをオープンに認め、直ちに修正し、最大限の再発防止策をとらねばならない。また、すでに規則に定められているように、できるかぎり下等動物や非動物のモデルを使う努力を進めなければならない。と同時に、科学者は、動物実験によって人命が救われ、人生が好転した事例を具体的かつ説得力をもって力説しなければならない。

脳卒中は、米国で毎年約 79.5 万人が発症し、医療費は 400 億ドル (約 3.4 兆円) 以上に達する。急性脳卒中から脳細胞を守ることをめざした実験的治療法が、これまでに 1000 種以上開発されたが、ヒトに有効なものはない。しかし、2012年2月に発表されたマカクザルを用いた研究論文 (D. J. Cook *et al.* *Nature* 483, 213-217; 2012) で、治療法は大きく進歩した。マカクザルは齧歯類よりも神経構造、遺伝的特性と行動がヒトに近い。この研究では、PSD-95 阻害剤の投与によって、脳卒中で死滅する脳組織の容積が減り、神経機能も著しく保持されることが明らかになった。ヒトでの臨床試験が行われ、これまでのところ有望な結果が得られている。

霊長類実験からは、ほかにも多くの成

果が得られている。四肢麻痺の患者が、その意思で人工四肢を制御するためのブレイン・マシン・インターフェースもその一例だ。血友病 B の遺伝子治療、進行期パーキンソン病の症状を緩和する深部脳刺激の試験などもある。また、HIV の母子感染を予防するための抗ウイルス治療法、非ホジキンリンパ腫の重要な治療薬であるリツキサシ (リツキシマブ)、50 年ぶりの新しいエリテマトーデス治療薬ベリムスタ (ベリムマブ) などの開発にも役立った。さらに、エボラウイルスに対するワクチンの研究が進展し、糖尿病治療薬ピオグリタゾンが早期パーキンソン病の進行を抑えることも確認された。

こうした研究を止めることは許されない。科学コミュニティとそれを支援する患者団体や研究支援団体は、主要航空会社に対して強く働きかけるべきだ。一方、今でも実験用霊長類の空輸を続けるエールフランスには、明確な支援を表明すべきだ。その一方で、動物権利擁護運動の支持者に対しては、運動の結果が人間の犠牲を伴うという厳しい現実を突きつけるべきだ。

緊急かつ劇的な行動が、今必要だ。研究コミュニティが沈黙し、受け身の姿勢をとれば、悲惨な状況になるのは明らかだ。思いやりと責任をもって、最も理にかなった方法と環境で実験動物と接している国々で、動物実験ができなくなってしまうからだ。

(翻訳: 菊川 要)

科学と政治の関係を直視せよ

Political science

2012年3月8日号 Vol. 483 (123-124)

科学の実践において、政治に全くの無関心ということはありません。

今日のような危機の中、科学者は社会が直面する課題に、知的かつ専門的に対応すべきだ。

英国王立協会会長 Paul Nurse は、科学者は「象牙の塔」を抜け出して果たすべき義務と戦いがあると明言しており、科学を濫用・歪曲する政治家のたわごとを白日の下にさらすのもその1つだと語っている。2月28日に行われた権威ある講演会では、国民健康保険制度を支持するとともに、英国の優先課題として、海外の科学者が魅力を感じる移民政策と、生徒に感動を与える初等科学教育を挙げた。

Nurse は、私たちが第一に必要なのは科学であり、政治はその次で、科学と政治の分離を断固主張している。しかし、彼の真の意図を誤解してはならない。彼が警告したのは、旧ソ連でレイセンコ生物学(メンデル遺伝学を否定した生物学)を支持したような、科学に対するイデオロギーの介入である。

その意味では警告は正しいのだが、この「方程式」が極度に単純化されやすい点には、特に注意が必要だ。例えば Nurse は、ヒトラーが、アインシュタインの相対論的物理学を「ユダヤ物理学」として拒否した例を挙げた。しかし、実際に起こったことは、やや違っていた。「ユダヤ物理学」は、反ユダヤ主義でナチス寄りだった物理学者ヨハネス・シュタルクとフィリップ・レーナルトによる嫉妬の産物で、最終的には、ナチスのリーダーからも愛想を尽かされたのだ。

よく「科学は自由社会でのみ繁栄する」という言葉を耳にする。今回の講演で

Nurse も強調していたが、この主張には疑わしいところがある。歴史学者が指摘するように、これは単に望みさえすれば手に入るような単純な話ではないのだ。ナチス・ドイツを見るまでもなく、独裁主義政権がいとも簡単に実用主義をイデオロギーに優先させることは、歴史が証明している。

例えば現代中国においては、科学研究の過程自体は、国家管理による妨害を受けておらず、イノベーションと大胆さが欠けているという流言など全くのナンセンスであることも明々白々だ。冷戦下の旧ソ連の科学研究にも、活気に満ち大胆なものが多くあった。科学への弾圧として悪名高いガリレオ裁判も、関係者の性格や状況の衝突という面が強いのであって、信仰と理性の対立は単純化し過ぎだ(もちろんガリレオに対する迫害は言語道断だ)。

ナチス・ドイツには、もう1つ説得力ある教訓がある。政治や宗教のイデオロギーは科学の問題解決に何の役割も果たさないが、科学の実践は、本来的に政治性を帯びるということだ。その意味では、科学が政治に優先することは絶対でない。世界中の科学者は、社会と契約を結んでおり、特に現在のような危機に瀕したとき、科学者は、社会が直面する課題に知的かつ専門的に対応しなければならない。それが義務であり、研究資金を確保すれば事足りると考えてはならない。

科学が政治から超然とした存在でいられると考えた結末が、1933年のドイツで明確に現れた。当時、政治は見苦しいマネービジネス(ハイゼンベルクの言葉)とされ、大部分の科学者は、ユダヤ人科学者の追放が道徳的な事柄ではなく、政治的な事柄だとして、それに協調して抵抗する理由はないと考えた。今考えれば、こうした「政治に無関心な」姿勢は、ナチス体制下での従順につながり、ドイツ人科学者を容易に操縦するための便利な神話となった。このような状況が生まれるのは全体主義だけ、と思うようでは認識が甘すぎる。

政治的に無関心ではなかった数少ない科学者の中で、傑出していたのがアインシュタインだった。彼の歯に衣着せぬ発言は、「高潔な」友人であったドイツ人物理学者マックス・プランクやマックス・フォン・ラウエをも狼狽させた。アインシュタインは、こうした友人に語った。「科学者が政治的事項に沈黙を守るべきだというあなたの考えには賛成できません。そうした自己抑制は責任のなさの表れではないでしょうか。」

今回の Nurse の講演でも、科学者としての責任が意識されている。しかし、それ以上に私たちは注意を払う必要がある。科学的推論が政治から解き放たれていて自由であることと、私たちが科学研究を行う義務とを、注意深く分けて考えなければいけない。

(翻訳: 菊川 要)



Volume 484
Number 7392
2012年4月5日号

なんたる無駄遣い：緊縮財政下の今、研究計画の効率をより一層アップする

WHAT A WASTE: Boosting efficiency of the research enterprise in tight times

国家や企業の予算は世界的に緊縮の一途をたどっており、その結果として研究費予算も縮小されている。今週号の3つのComment記事は、研究費をやりくりしていく方法について論じている。T. Marty は、大学で最も広く見られる3つの効率の悪さ、つまり研究者の自由に関する誤った認識、不適切な管理体制、弱いリーダーシップを強調している。P. Stephan は、研究機関による報奨金は逆効果を生むことがありうるとして、その理由を説明している。また、P. Azoulay は、研究財政支援モデルの研究に科学的手法をどのように適用できるのか、論じている。

進化：トゲウオの種分化のゲノミクス

The genomics of stickleback speciation

トゲウオ科魚類のイトヨは、適応進化の分子基盤を研究するための強力なモデルとなっている。今回、イトヨの高精度参照ゲノム塩基配列が構築され、それと同時に、世界中の海洋性および淡水性のイトヨ個体群に由来する20個体のゲノム塩基配列も解読された。その結果、世界中に分布する共通の遺伝的変異を再利用することで、個別のイトヨ群の進化がもたらされ、また生殖隔離（互いに交雑しないこと）の初期段階へと分岐した生態型が維持されていることが明らかになった。得られたデータは、海洋性イトヨと淡水性イトヨの並行進化によって、調節配列の変化が重要だという考え方と一致する。



物理：「光子がほとんどない」レーザー

The 'no-photon' laser

原子の非常に狭い光学遷移に基づいた「超放射」レーザーでは、従来型の光

レーザーより数桁も純粋なスペクトルが得られるという説が提案されていたが、それが実証された。今回の装置では、100万個程度のルビジウム87原子双極子が、光共振器の中で自発的に同期している。共振器内部の原子相関は、平均0.2個以下の光子によって保たれており、光子数がこのように少ないと、レーザー発振に参与する原子双極子集団が、孤立状態となって周囲から切り離される。そのため、熱雑音や技術的な雑音を大きく下げることが可能になる。実験結果からは、超放射レーザーに関する重要な予測も実証され、原子時計の安定性向上や、基礎物理学の新しい検証に使える可能性が見えてきた。

生態：人口移動の正確な予測

Accurate prediction of population movement

1940年代以降、人口移動や輸送網使用量、さらには感染症流行などを予測する必要があるときには、万有引力の法則に基づく「重力モデル」が使われてきた。このモデルでは、2地点間を移動する個体の数は、出発地点と目的地点の人口に比例し、地点間の距離が離れるほど減少すると仮定する。この方法は、特定の2地点間の流量だけに着目するため、限界がある。今回、A.-L. Barabási たちは、すべての中間地点の

人口密度を考慮する別のモデルを示している。このパラメーターフリーな「放射モデル」では、通勤や移動から電話の通話量まで、さまざまな現象を重力モデルよりもずっと正確に予測できる。しかも、測定が容易な人口密度のデータしか必要でないため、系統立てたデータ収集のできない地域でも、通勤や輸送のパターンの予測に使用できる。

細胞：VEGFR3 と血管新生の制御

VEGFR3 and angiogenesis control

DLL4-Notch シグナル伝達は VEGF 経路とのクロストークを介して内皮細胞の出芽および新生血管の増殖を抑制する。このクロストークが影響を及ぼす仕組みに関する現在のモデルでは、VEGFR2 が非常に重要な役割を果たすとされている。つまり、VEGF-A の VEGFR2 に対する作用によって血管先端細胞での DLL4 発現が引き起こされ、次に、血管茎細胞での Notch シグナル伝達が VEGFR2 と VEGFR3 の転写を抑制し、それによって血管茎細胞が血管先端細胞として振る舞うのが防止されると考えられている。今回、R. Benedito たちは、このモデルに修正が必要なることを明らかにした。血管先端細胞での DLL4 タンパク質の発現は VEGFR2 シグナル伝達によって弱く調節されるだけで、Notch 阻害は VEGFR2 が存在しない場合でも内皮細胞の出芽を誘導できることがわかった。さらに、Notch 阻害は、VEGFR2 の転写にはほとんど影響を与えないが、VEGFC の主要な受容体である VEGFR3 のほうは強く調節すること、また VEGFR3 のキナーゼ活性の阻害は、Notch シグナル伝達の活性が低い内皮細胞の出芽を抑制するが、VEGFR3 リガンドに結合する抗体は出芽を抑制しないことがわかった。これらの知見は、VEGF-A 阻害剤を投与されたがんや加齢性黄斑変性症の患者の一部がこの治療法に反応しない理由を説明してくれるかもしれない。さらに、血管の Notch あるいは VEGFR3 の活性化状態を調べれば、より有効性の高い治療法につながる可能性がある。



Volume 484
Number 7393
2012年4月12日号



真菌という脅威：自然生態系と食糧確保を脅かす新興病原体

FEAR OF FUNGI: Emerging pathogens threaten natural ecosystems and food security

表紙は、キングズキャニオン国立公園（米国カリフォルニア州）で生き残っている数少ないヤマキアシガエル（*Rana muscosa*）の一匹である。この公園では、ツボカビ症でカエルが絶滅寸前となっている。真菌（カビやキノコの仲間）による感染症は、農作物に広く被害をもたらすとともに、両生類やコウモリ種の個体群で数を激減させている。サンゴやハチ、また多くの植物でも、新たな病原性真菌の出現が報告されている。今週号の Review 欄で M. Fisher たちは、人類の活動が、自然の生態系を改変して進化の新たな機会を作り出し、それが真菌による疾患の拡散を後押ししていると警告している。Fisher たちは、世界的に広がるリスクへの対策がとられないかぎり、真菌感染症は生物多様性の縮小を引き起こし、人類と生態系の健全性を脅かすと考えている。そして、新たに発生した疾患のよりの確な監視、国際貿易に対するバイオセキュリティ管理の厳格化、宿主、病原体と環境の間の相互作用に関する研究の強化などを提唱している。

宇宙：赤色巨星最後のあえぎ

Last gasp of a red giant

中間質量の星は、その一生の終わりに近づくと、質量の多くをガスと塵の形で、低速で高密度の星風に放出することにより失っていく。このようなアウトフローを駆動する基本過程は、そうした放物物質の観測が困難なこともあって、ほとんど解明されていない。B. R. M. Norris たちは、干渉画像法と高精度微分偏光計測法を組み合わせた革新的な手法を使って、3つの赤色巨星を観測した。それらの画像から、星の周囲には塵の殻があり、その半径は、星の半径の2倍未満と著しく小さいこと、またこれらの殻は、半径ほぼ300nmの予想外に大きな塵粒子からできていることが明らか

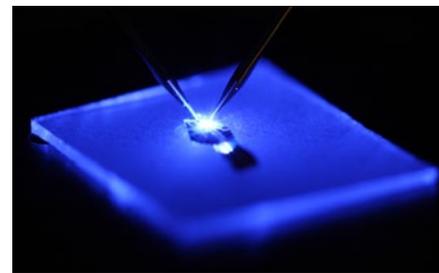
になった。これらの観測結果は、星の光の吸収ではなく、散乱による塵粒子の加速に基づく星風駆動モデルを裏付けていると、Norris たちは考えている。

材料：窒化物半導体のリフトオフ法に向けた第一歩

Lift-off for nitride semiconductors

窒化物半導体は、優れた電子的・光学的性質に特徴があり、ブルーレイプレイヤーをはじめとする多くの光学デバイスに最適な材料である。しかし、窒化物半導体には実用上重大な短所がある。窒化物半導体を成長させることのできる基板の種類（一般的にはサファイアが使われる）が非常に限られているのだ。このため、窒化物半導体材料をある基板から別の基板へと転写する新しい方法の探索が盛んに行われてきた。今回、小林康之（NTT 物性科学基礎研究所）たちは、窒化ガリウム系デバイスを用い、初期成長表面にきわめて薄い六方晶窒化ホウ素層を形成することによって窒化物構造の直接の機械的剥離が容易にな

り、さらに剥離後には、金属、ガラス、透明プラスチックなどの目的にあった基板へと転写できることを実証した。



構造生物学：細胞分裂で染色体を折半する仕組み

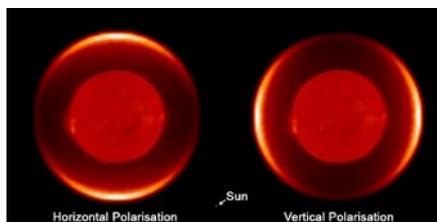
Dividing the spoils in cell division

複製によって倍加した染色体は、有糸分裂によって生じた2つの娘細胞に均等に分配されるが、この分配は紡錘体形成チェックポイント（SAC）という機構の活性に依存する。SACは、すべての姉妹染色分体が双極性紡錘体に接着するまで細胞周期を停止させる。SACの機能を実行するのは、有糸分裂チェックポイント複合体（MCC）である。今回、分裂酵母から得られたMCCの結晶構造が決定され、染色体分離を開始させるユビキチンリガーゼである後期促進複合体との相互作用の分子基盤が明らかになった。

細胞：テロメラーゼ合成の初期段階

Early steps in telomerase synthesis

テロメラーゼは、タンパク質とRNAを構成要素として含む複合体であり、染色体末端の保護キャップである反復配列からなるテロメアを伸長させる。テロメラーゼ活性は、がんやいくつの変性疾患では変化している。テロメラーゼの成熟型RNA成分の生成に必要なプロセシング段階については、まだよく解明されていない。P. Baumann たちは今回、分裂酵母において、テロメラーゼRNAのポリアデニル化された前駆体が、スプライソソームタンパク質のSmとLsm、およびメチラーゼのTgs1の作用によって、活性のある成熟型RNAになるまでの順序立った一連の事象を明らかにした。





Volume 484
Number 7394
2012年4月19日号



生命の力：大不整合の形成はカンブリア爆発を引き起こしたのか



LIFE FORCE: Did the formation of the Great Unconformity trigger the Cambrian explosion?

「大不整合」は世界中で見られる層序学的特徴で、大陸の結晶性基盤岩とそれより新しい浅海堆積物とを隔ている。表紙は、Toroweap Overlook から撮影したグランドキャニオンだが、ここで見られるように大不整合は地上に露出して非常に強い印象を与える。大不整合という用語は 1869 年に作られたが、それ以来、地質学ではこの現象の起源と全球に対する影響について議論が続いてきた。今回、S. Peters と R. Gaines は北アメリカの 830 の地点から得られた層序学的データおよび岩質データを新たに解析し、岩石学および地球化学的データとともに結果を報告している。それによると、大不整合の形成は大陸の風化作用を強化し、広がりつつある浅い海域において、海水のアルカリ度とイオン強度を高め、それによって生物による鉱化作用が促されて、カンブリア紀海洋生物爆発が起こったことを示す証拠が見つかったという。

について、解剖学的特徴を総合的に解析し、これらの細胞が実際はマクロファージであって磁気感受性ニューロンではないことを明らかにしたのである。鉄を多く含むマクロファージは鳥の嘴に特有なものではない。したがって、鳥類の磁気感知の神経基盤は依然としてはっきりしないままである。磁気感知部位の候補の 1 つとして考えられるのは嗅上皮で、この感覚構造はニジマスで磁気感知にかかわっている。

生理：自然条件下での生体リズム

Clocking off naturally

生物学的リズムに関する現在の理解は、大部分が、実験室で動物を明暗の周期下に置いて行われた研究に基づいている。今回 C. Kyriacou たちは、屋外の半閉鎖環境に置かれたショウジョウバエの周期的行動を観察し、概日リズムを制御すると考えられている遺伝子に変異したハエで野生型の表現型が見られるなど、実験室と大きく違う結果を多数発見した。また、温度や月光などのリズム同調要因との間に、これまで知られていなかったバランスも見いだされた。これらの知見によって、現在広く受け入れられている「体内時計」や「昼夜の予期」などの概念、およびそれらが自然界で持つ実際の適応上の価値について、全面的な再検討が必要になった。

脳：記憶の神経表現

Neural representation of a memory

脳の特定のニューロン集団が記憶の表現に必要なことを実証する研究では、ニューロンを破壊するという方法が使われているものがある。しかし、ニューロンの組み合わせの 1 つが、特定の記憶から行動の結果を引き出すのに十分かどうかを調べた研究はまだない。今回、利根川進 (RIKEN-MIT 神経回路遺伝学センター) たちは、光遺伝学的手法を用いて、「記憶痕跡 (エングラム)」、つまり恐怖学習の間に活性化した一群の細胞は、その後再活性化した際に、それだけでマウスにすくみ行動を起こせることを明らかにした。

構造生物学：ダイニンの駆動力

The motive power for dynein

ダイニンとして知られる細胞骨格モータータンパク質は、繊毛運動、細胞分裂、細胞内輸送などのさまざまな生物学的過程を駆動する。ダイニンの機能障害は、原発性繊毛運動障害や神経変性疾患などのいくつかのヒトの疾患と関係付けられている。昆隆英 (大阪大学) たちは、細胞質ダイニンのモータードメイン全体について、今までで最も高分解能の結晶構造を報告している。その構造からは、このモータータンパク質の異なるサブドメイン間での情報伝達や、ダイニンが微小管フィラメント上を歩く際に固有の構造を利用して力と運動を発生する仕組みなどについての手がかりが得られる。

物理：実験で明らかになったコヒーレント量子位相スリップ

Experiment reveals coherent quantum phase slip

コヒーレント量子位相スリップ (CQPS) は、ジョセフソン効果と厳密に共役な現象だが、これまで実験で観測されたこと

がなかった。ジョセフソン効果は超伝導接合における電荷のコヒーレント移動であり、一方、CQPS は超伝導細線を横切る渦糸、あるいは磁束のコヒーレント移動である。今回、強く乱れた酸化インジウム超伝導ワイヤーをループ中に挿入し、CQPS を直接観測したことが報告された。その効果は、磁束の数が異なる量子状態の重ね合わせとして現れる。CQPS は、ジョセフソン効果と同じように、超伝導エレクトロニクスや量子標準などに応用されそうだ。

生理：鳥が進路を決める仕組みを再考すべきとき

Time for a rethink on bird navigation

渡り鳥はどのようにして磁場を感知するのだろうか。これまでの研究では、上嘴にマグネタイト (磁鉄鉱) を含むニューロン樹状突起からなる磁気感知系があり、鳥が磁場を使って航路決定する能力はこれによっていると考えられてきた。しかし今回、広く受け入れられてきたこのモデルに疑問が投げかけられた。D. Keays たちが、カワラバト (*Columba livia*) の嘴にある鉄を豊富に含む細胞



Volume 484
Number 7395
2012年4月26日号

保険のコスト：アレルギーは環境内の毒物に対する防御対策の「裏面」なのか

INSURANCE COSTS: Is allergy the flipside of protection against environmental toxins?

アレルギーについて、我々は解釈を誤っていたのだろうか。アレルギー反応はこれまで、侵入してくる寄生体を撃退するために進化した免疫系が、うまく働かずに失敗した結果だと見なされることが多かった。今週号の Perspective で、N. Palm と R. Rosenstein と R. Medzhitov は、これとは違う見方を明らかにしている。彼らは、 T_H2 サイトカインに依存するアレルギー性免疫応答の起源と潜在的な有益性について、従来とは異なる仮説を提案している。つまり、アレルギー反応とは、必要な働きをする系の過剰な、あるいは過大な応答であって、有害物質、毒、生体異物といった環境有害物質から体を防御している側面を特に強調している。著者たちは 2 型免疫応答が刺激によって不均一になるというモデルを提案しており、さまざまな進化圧によってこの種の免疫応答が選択されたのではないかと推測する。News and Views の Forum では、F. D. Finkelman、D. Artis と R. M. Maizels が、そのようなモデルの長所について議論を展開している。

発生：心筋細胞が心臓の発生を推進する

Heart development driven by cardiomyocytes

ゼブラフィッシュの心臓が複雑な形に発生・成長していく過程で、個々の心筋細胞がどのように寄与しているかが、多色蛍光による条件的な細胞追跡法で明らかになった。初期発生期の心臓は多数の細胞クローンから成り立っており、始原層 (primordial layer) と呼ぶ細胞層を形成している。この始原層からの剥離によって、心臓肉柱層 (trabeculated layer) の筋細胞が生じ、その後、稚魚が成魚へと成熟していく間に表層 (cortical layer) が出現する。成魚の心臓の表層筋は、ほんの少しの心筋細胞から作り出され、それらは幹細胞集団とよく似たクローン優位性を示す。

宇宙：星形成への銀河の影響

Galactic influence on star formation

星の初期質量関数 (IMF) は、星形成時の質量分布を記述するもので、その星が形成された銀河のタイプには依存

しないと考えられてきた。しかし、最近発表された証拠は、IMF が銀河のタイプによって変動することを示している。今回、質量によって選り出された 260 個の初期銀河の探査によって、IMF に系統的な変動が見られることが明らかになった。つまり、個々の星は、自分が含まれる銀河がどんな種類の銀河に形成されていくのか、認識しているように見えるのだ。

地球：海洋鉄鉱層の地質年代学

Geochronology of marine iron formations

海水に含まれる酸素が少ない場合、海底に鉄鉱層ができる。そのため、約 23 億 2000 万年前の大気中酸素の増加は鉄鉱層の形成を低下させたと考えられる。しかし、その 5 億年後、奇妙なことに、大気は酸素化したのに突然鉄鉱層が再出現した。この 18 億 8000 万年前の謎の鉄鉱層は、大部分が北米で見つかっているが、今回、ほぼ同時期にオーストラリアでも形成されていたこ

とが明らかになった。つまり、この鉄鉱層の形成は、地球規模で起こった海洋の化学的変化や酸化還元状態の変化の反映らしい。活発化した火山活動や熱水活動が大量の鉄を放出し、それによって海洋の化学的性質が変わり、大規模な鉄鉱層が作られたと考えられる。火成活動が低下すると、鉄鉱層は消失していったらしい。

生態：性は種の分離を維持する

Sex keeps species apart

種の共存は、互いの生息域の重なりを低減するような仕組みによって促進される。性選択 (による多様化) はそうした仕組みの 1 つだが、通説では、生態的に同じ広がり方をする複数の種を別々にしておくには、性選択だけでは十分ではないと考えられている。こうした考え方に対して、今回新たな理論的研究から疑問が投げかけられた。2 つの条件が満たされれば、生態的に差がなく生息域が重複していても、性選択によって種が別々のまま長期間共存できることが実証されたのである。その 2 つの条件とは、空間内で環境収容力が一様でないこと、および配偶者の探索にコストがかかることで、いずれも自然の生態系では一般的な条件である。このモデルは、マラウイ湖やビクトリア湖のシクリッド魚類のように、主として性的特徴に差異が見られる非常に近縁な種群が、長期的共存を維持する仕組みを説明できる。

||||||| ネイチャーからのご案内 |||

nature video

Web: 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)

nature podcast

Web: 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)

金星は、宵の明星、明けの明星として有名です。今回は、磁場のない金星で磁気再結合という現象が見つかったというお話です。折しも、6月6日は金星の太陽面通過の日。前は8年前でしたが、今回は2117年12月11日、なんと105年後です。今回の記事を思いながら、この世紀の天体ショーを観測してみたいかが？



太陽の前を横切る金星と国際宇宙ステーション。
2004年6月8日。

TOMAS MARUSKA 2004/NASA

nature news

語数：545 words 分野：天文学・惑星科学・宇宙物理学

Published online 05 April 2012 | Nature | doi:10.1038/nature.2012.10397

Magnetic storms spotted on Venus

Planet emits bursts of energy despite having no magnetized field of its own.

Ron Cowen

- When magnetic fields of opposite polarity collide and merge, they unleash a torrent of energy. The process, known as magnetic reconnection, can cause flares on the Sun and magnetic storms and shimmering auroras on magnetized planets with substantial atmospheres, such as Earth, Jupiter and Saturn.
 - Now scientists have discovered that magnetic reconnection also happens on Venus, a planet with no intrinsic magnetic field. The finding, reported today in *Science*¹, suggests that magnetic reconnection may generate auroras on Venus, and could have contributed to the loss of a thick, water-rich atmosphere that scientists believe surrounded the planet during its early history, some 4 billion years ago.
 - The discovery suggests that explosive magnetic activity is likely to be a common feature of planets everywhere, says study author Tielong Zhang, a planetary scientist at the Space Research Institute of the Austrian Academy of Sciences in Graz. Magnetic storms on planets outside our Solar System, known as exoplanets, might occasionally generate radio signals that are strong enough to be detected from Earth, other researchers suggest.
 - Zhang and his colleagues analysed data from the European Space Agency's Venus Express spacecraft, which has been in orbit around the planet since 2006. Their aim was to find the signal of magnetic reconnection in Venus's magnetotail, the comet-like tail that forms on the side of the planet facing away from the Sun when the magnetic field carried by charged particles in the solar wind passes around the planet.
 - The data revealed a looped, magnetic structure called a plasmoid in Venus's magnetotail, similar to an eddy created by a rock in a stream. This "is a strong indication of magnetic reconnection", Zhang says, because it is known to be a sign of the phenomenon on other planets.
- Storm anchor**
- On a planet such as Earth, the tension between the opposing poles of the magnetic field aids reconnection. The discovery that Venus has magnetic storms too shows that, even without such a field, a planet can act as an anchor that helps the solar wind to reconnect with itself, says astronomer Jonathan Nichols of the University of Leicester, UK.
 - The study indicates that magnetic reconnection "is an active process around more cosmic bodies than previously thought", whether or not they have their own field, Nichols says.
 - A similar kind of reconnection, governed by the solar wind's magnetic field, is thought to occur in the tails of comets. Reconnection sometimes causes the tails to snap off and fly into space, as seen in 2007 with Comet Encke².
 - In that respect, "Venus behaves like a big comet", with reconnection lofting charged particles from the planet's atmosphere into space, says astronomer Philippe Zarka of the Paris Observatory in Meudon, France. Just as the solar wind erodes a comet's tail, it may have also gradually detached molecules, such as water, from Venus's atmosphere.
 - Zarka suspects that for planets outside the Solar System, only those with their own magnetic fields might produce energy bursts strong enough to be detected across interstellar distances of tens to hundreds of light years. New radio telescopes, such as the Low Frequency Array (LOFAR) in the Netherlands, might be able to pick up the strongest exoplanet radio emissions, says Nichols. If such detections were successful, it would provide a new way to search for exoplanets.
- Reference
- Zhang, T. L. et al. *Science* <http://dx.doi.org/10.1126/science.1217013> (2012).
 - Vourlidas, A. et al. *Astrophys. J.* **668**, L79–L82 (2007).

TOPICS

金星 (Venus)

太陽に2番目に近い惑星。地球よりやや小振り、密度も地球に近い。ケイ酸塩が主成分の地殻とマントル、鉄・ニッケルからなる核を持つと考えられ、地球とよく似ている。だが、自転の向きがほかの惑星と反対であり、その周期も約243日と非常に遅い。一方、公転周期は約225日と自転よりも速い。

二酸化炭素が主成分の厚い大気に覆われているため、表面温度は500℃近く、にまで達し、地表面では90気圧にもなる。さらに、大気中には二酸化硫黄の雲が存在し、硫酸の雨を降らせているが、高温のために地表に到達する前に蒸発すると考えられる。大気

の上層部では、4日間で金星を一周してしまう、スーパーローテーションと呼ばれる謎の強風が吹いている。

金星には磁場がなく、太陽風の影響を直接受けている。ただ、大気上層部に電離層があり太陽風を押し止めていると考えられている。しかし、これでは不十分で、太陽風が強くなると大気層に侵入したり、大気上層部を剥ぎ取ったりする。磁場がなくても、金星自体が太陽風を乱して、尾部のある磁気圏のようなものが周囲に見られる。今回、さらにこの尾部に磁気再結合が見つかり、磁場の有無に関係ない現象であることがわかった。



MAGELLAN PROJECT/PL/NASA

SCIENCE KEY WORDS

タイトル **magnetic storm:** 磁気嵐

太陽でフレアやコロナ質量放出などが起こると引き起こされる、惑星の持つ磁場の強さや方向が急激に不規則に変化する現象。オーロラ活動が活発になり、電子機器や無線に影響を及ぼす。

リード **magnetize:** 磁場を発生する1. **magnetic field:** 磁場

磁界とも呼ばれ、電場の変化や電荷の運動によって生じる。

1. **polarity:** 極性 ここでは磁場の極性の意

1. **magnetic reconnection:** 磁気再結合、磁気リコネクション
隣り合っている逆向きの磁場の境界（磁気中性面）では、磁場の強さがゼロになっている。このとき磁気中性面には電流が発生し、磁場の変化が打ち消されている。しかし、面のどこかで電気抵抗が生じると、磁場が変化し、それを打ち消そうと磁場のエネルギーが熱として消費される。すると、今度は周囲の磁場がその領域に向かって拡散していき、逆向きの磁場が接触して打ち消し合うと、磁力線の繋ぎ替えが起こる。

1. **flare:** フレア

太陽表面で起こる大爆発。大きさは数万 km にも及び、15メガトン級水素爆弾1万～100億個分のエネルギーが放出される。太陽活動が活発な時期には、黒点の近くで頻繁に見られる。太陽表面に鉛直方向の異なる磁力線が磁気再結合を起こして、磁場のエネルギーが放出されると考えられている。

3. **Solar System:** 太陽系3. **exoplanet:** 太陽系外惑星3. **radio signal:** 電波信号4. **magnetotail:** 磁気圏尾部

磁場を持つ惑星では、昼側は太陽風の動圧と惑星磁場の磁気

圧が釣り合う地点に境界が作られる。この惑星側を磁気圏という。夜側では、磁気圏は太陽風に吹き流されて彗星の尾のようになっている。これを磁気圏尾部といい、長さは100万 km 以上になる。フレアなどにより太陽風の磁場の南向き成分が増えると、昼側の磁気境界面と夜側の磁気圏尾部赤道面で磁気再結合が起こり、大量のエネルギーが解放されて、磁気圏の大規模なプラズマ対流を駆動すると考えられている。

4. **comet:** 彗星

岩石と氷からなる直径数 km の塊が、太陽に近づいて熱せられ、ガスと塵でできた尾を引くようになったもの。

4. **charged particle:** 荷電粒子

電荷を持った原子や素粒子。

4. **solar wind:** 太陽風

太陽から吹き出している高温の荷電粒子、プラズマのこと。平均450 km/s、1 cm³ 当たり2～5個の粒子密度。フレアが起こると、高速・高密度の太陽風が発生する。

5. **plasmoid:** プラズモイド

磁気圏尾部に現れる高温・高速のプラズマの塊。磁気再結合によって作られる。

7. **cosmic body:** 宇宙物体 ここでは天体の意8. **Comet Encke:** エンケ彗星

公転周期3.3年の彗星。牡牛座流星群の母天体。

10. **interstellar:** 星間の10. **light year:** 光年10. **radio telescope:** 電波望遠鏡

電波により観測する望遠鏡。可視光では見えない天体の観察ができる。

WORDS AND PHRASES

タイトル **spot:** 「～に気付く」、「～を見つける」

リード **emit:** 「放射する」、「放出する」

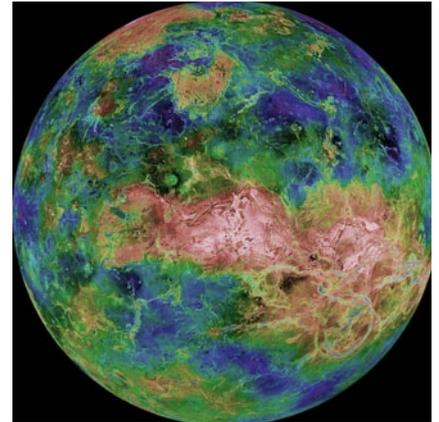
1. **collide:** 「衝突する」1. **merge:** 「結合する」1. **unleash:** 「解放する」、「発散する」1. **a torrent of ~:** 「～のほとばしり」1. **shimmer:** 「ちらちら光る」1. **substantial:** 「相当量の」、「かなりの量の」2. **intrinsic:** 「固有の」3. **explosive:** 「爆発的な」3. **occasionally:** 「時々」4. **face away from ~:** 「～の反対側に向く」5. **eddy:** 「渦」8. **govern:** 「支配する」8. **snap off:** 「ポキッと折る」9. **loft:** 「打ち上げる」9. **erode:** 「浸食する」9. **detach A from B:** 「AをBから引き離す」

参考訳

金星で磁気嵐が見つかる

固有の磁場がない金星で、磁気再結合というエネルギーの爆発的な放出が起きていることがわかった。

ロン・コーウェン



探査機マゼランによる金星表面画像。金星でもオーロラが見られるかもしれない。

1. 逆の極性を持つ磁場が衝突して結合すると、エネルギー流の解放が起こる。「磁気再結合（磁気リコネクション）」と呼ばれるこの過程に伴い、太陽ではフレアが発生し、磁場と相当量の大气を持つ惑星（例えば、地球、木星、土星）では磁気嵐が起きて、ちらちら光るオーロラが現れることがある。
2. このほど、固有の磁場を持たない金星でも磁気再結合が起きていることがわかった。本日、*Science* に掲載される論文では¹、これにより金星でもオーロラが発生する可能性があること、そして、金星の歴史の初期にあたる約 40 億年前にこの惑星を取り巻いていたとされている水分に富む厚い大気層が消滅した原因の 1 つが磁気再結合であった可能性があることが示唆されている。
3. 論文の著者で、オーストリア科学アカデミー宇宙科学研究所（グラーツ）の惑星科学者 Tielong Zhang によると、今回の発見は、爆発的な磁気活動が、どの惑星にも共通する特徴である可能性が高いことを示唆しているという。我々の太陽系の外にある惑星（太陽系外惑星）における磁気嵐では、時々、地球で検出できるほど強い電波信号が発生する場合があると考える研究者もいる。
4. Zhang たちは、2006 年から金星を周回している欧州宇宙機関（ESA）のビーナス・エクスプレス探査機からのデータを解析して、金星の磁気圏尾部における磁気再結合の信号を探した。磁気圏尾部とは、太陽風の荷電粒子が運ぶ磁場が金星の周りを通過することで、金星の磁気圏が彗星の尾部のように太陽の反対側に伸びたものである。
5. 解析の結果、金星の磁気圏尾部に、水流の中の岩が作る渦に似た環状の磁気構造、プラズモイドが存在していることがわかった。これは「金星で磁気再結合が起きていることを強く示唆しています」と Zhang は言う。ほかの惑星では、プラズモイドが磁気再結合の徴候であることが知られているからだ。
6. **嵐のときの錨のように**
地球のように磁場のある惑星では、磁場の両極間に生じる「張力」が、磁気再結合を助けている。金星にも磁気嵐があるという今回の発見は、たとえ磁場がなくても、惑星自体が錨として作用して、太陽風の再結合が起こりうることを明らかにした、とレスター大学（英国）の天文学者 Jonathan Nichols は話す。
7. 磁気再結合は、固有の磁場の有無にかかわらず、「これまで考えられていたよりも多くの天体の周囲で活発に起こる過程である」ことが今回の研究で示された、と Nichols は話している。
8. 太陽風の磁場の影響を受ける同様の磁気再結合現象は、彗星の尾部でも起こると考えられている。時には、磁気再結合によって彗星の尾部がちぎれて宇宙空間に飛んで行ってしまふこともあり、実際、2007 年にエンケ彗星でこのような現象が観測されている²。
9. この点で「金星は巨大な彗星のように振る舞い」、磁気再結合によって大気層から宇宙空間に向かって荷電粒子を放り出している、とパリ天文台（フランス・ムードン）の天文学者 Philippe Zarka は話す。太陽風は、彗星の尾部を浸食するように、金星の大気から水などの分子を徐々に剥ぎ取っていった可能性がある。
10. 太陽系外惑星の場合、固有の磁場があれば、数十から数百光年の星間距離を隔てた場所で検出できるほど強烈なエネルギーの爆発的な放出が起こるかもしれない、と Zarka は推測している。Nichols は、オランダの Low Frequency Array (LOFAR) などの新型電波望遠鏡なら、太陽系外惑星の特に強い電波放射を検出できるかもしれないと話す。そうした信号を検出することができれば、太陽系外惑星の新たな探索方法になるかもしれない。

（翻訳：菊川 要）

定期購読を
始めたいな!



Fujisan.co.jp
雑誌のオンライン書店

当社サイト、Fujisanなら
バックナンバーの購入、
定期購読も可能です。

帰りに
買いたい!



全国の書店・生協

全国の書店、生協で
扱っています。

いつも
利用している
Amazonで!



amazon.co.jp

Amazonで
最新号の予約購読も

*詳しくは、www.naturejpn.com/bookstores をご覧ください。 AmazonおよびAmazonのロゴは、Amazon.com, Inc. またはその関連会社の商標です。

弊社のサイトからのお申し込みはこちらから

www.naturejpn.com/nd-sub

npg nature asia-pacific

EDITOR'S NOTE

5月21日の金環食。観測用に日食眼鏡を購入した方も多いのでは? 6月6日、是非、これで金星の日面通過観測をしましょう。金星の公転軌道は地球の軌道に対して3.4度傾いているため、次回は105.5年後です。さて、今号の「英語でnature」は、金星の磁気再結合についての記事です。まさにこの記事の執筆中に、電子線ホログラフィーで磁力線を直接見ることに成功した外村彰さんの訃報が届きました。アハラノフ・ポーム効果(電子が、磁場や電場がなくてもベクトルポテンシャルの影響を受ける)の存在を実証し、ノーベル賞候補にもなりました。ダイジェスト関係者にも親しくしていた者がおり、非常に残念です。ご冥福をお祈りいたします。(ふる)

*翻訳記事は、原則として原文に沿っております。一部、Nature ダイジェスト編集部でよりわかりやすいように編集しております。



npg nature asia-pacific

NPG ネイチャー アジア・パシフィック
〒162-0843
東京都新宿区市谷田町 2-37 千代田ビル
Tel. 03-3267-8751 (代表)
Fax. 03-3267-8754
www.naturejpn.com

©2012 Nature Japan K.K., trading as NPG Nature Asia-Pacific.
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

編集発行人: David Swinbanks
副発行人: 峯村宏
編集: 松田栄治
デザイン/制作: 村上武、中村創
広告/マーケティング: 米山ケイト、藤原由紀
池田三知世

編集協力: 白日社

「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
(「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でご予約ください。

