日本語で読む世界の最新科学ニュース

nature ダイジェスト

07
2011

電力を見つめ直す

居眠りする脳

日本の地震学、再建へ

光でポリマーを修復

PhDたちの憂鬱

電流刺激で頭が良くなる!?

エール大学で実験中に死亡事故

がん転移の定説にもの申す

オープンイノベーションで創薬

各国で iPS 細胞バンク設立の動き

文化が言語を形作るのか?

定価 680 円

そんな皆様に、耳寄りなニュースです。

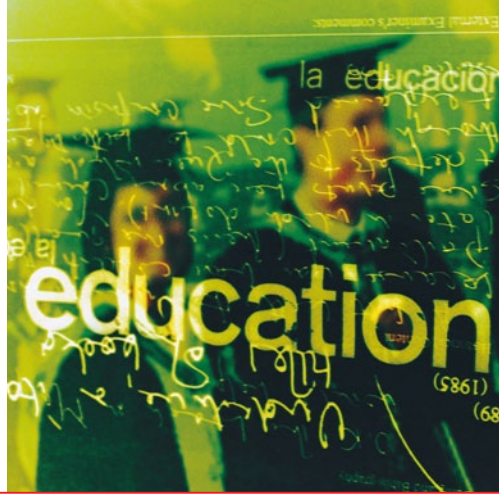
「**Nature Research Journals – HIGHLIGHTS**」では、
*Nature*姉妹誌からの注目記事を日本語に訳し、
短くまとめ、毎週月曜日に更新しています。
ご覧になるには無料登録が必要です。

- 懐中時計を穴に落とすぐらい忙しいあなたは、
  タイトルに目を通すだけでもよし
- ティーパーティーで紅茶を飲む余裕があるあなたは、
  興味のある記事をサクッと読むのもよし
- 海の学校に通う時間があるあなたは、
  ハイライトを読んだ後、
  オリジナル論文を読まれてはいかがでしょう

注目記事が無料で読める「Nature Research Journals – HIGHLIGHTS」はこちらから：
www.naturejpn.com/highlights/

nature asia-pacific

nature ダイジェスト
07
2011
2011年6月25日発行
© 2011年 NPG Nature Asia-Pacific
掲載記事の無断転載を禁じます。
www.nature.com/naturedigest



PhD大量生産時代 06

今、世界では、博士号取得者が激増している。だが国によって、質の低い研究者の増加、見合ったポストの不足など、問題が山積している。

NATURE NEWS
03 言語を形作るのは文化か？認知能力か？
20 オープンイノベーションに突き進む製薬業界
21 エール大学の実験室で学生死亡事故
28 疑惑のがん転移理論
29 2つの宇宙観測計画が統合？
30 小枝にまぎれて身を守る
31 iPS細胞バンクへ向けた世界の動き

COMMENT
16 地震学、再建への道

NATURE FEATURE
11 PhD改革へ5つの挑戦

NEWS & VIEWS
34 陸上最大の動物で観察された高度な協力行動

JAPANESE AUTHOR
32 細胞中心子のマジックナンバー「9」に迫る！ ── 廣野 雅文

HIGHLIGHTS
38 2011年5/5～5/26号

英語で Nature
42 消えない「分解性」プラスチックの謎

04 エネルギー政策を見直す日本

福島第一原発事故は、エネルギー政策の転換をもたらした。肝要なのは、節電と自然エネルギーを利用した安定供給である。

JACK YOUNG - PLACES/ALAMY

24 脳を電撃！

脳を直流電流でちょっと刺激してやると、学習能力が上がるらしい。この電撃療法は、うつ病や依存症の治療に効果があるかもしれない。

ISTOCKPHOTO

02 脳の居眠り

起きているように見えても、実は、脳の一部は居眠りをしている。寝不足時の認知力の低下はこのためだろうか。

ISTOCKPHOTO

36 紫外線で傷を修復できるポリマー

光で傷を修復できる弾性ポリマーが作られた。普及すれば、材料の寿命が延び、省資源化に大いに役立つ。

SCHEMATIC COURTESY MARC PAUCHARD FOR ADOLPHE MERKLE INSTITUTE, CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY, US ARMY RESEARCH LABORATORY.

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

脳の居眠り

Surreptitious sleep states uncovered

Virginia Gewin　2011年4月27日　オンライン掲載
www.nature.com/news/2011/110427/full/news.2011.259.html

**睡眠不足のラットの研究から、
睡眠は脳全体の現象というわけではないことがわかってきた。**

起きているように見えても、脳は部分的に居眠りをしている。

ISTOCKPHOTO

目を閉じる、反応がない、よだれを垂らすなど、眠っていることを示す状態はたくさんあり、眠っているかどうかは簡単に判別できると思われる。しかし、眠っている状態(睡眠状態)と起きている状態(覚醒状態）との区別は、思ったよりも明確ではないのかもしれない。起きているように見えるラットで、大脳皮質のある領域のニューロンが一時的に「オフライン」の状態になることが、*Nature* 2011年4月28日号に報告されたのだ[1]。このような一時的にオフライン状態のニューロンでは、ノンレム睡眠時に現れる神経活動と類似したパターンが観察される。ウィスコンシン大学マディソン校（米国）の神経科学者で、この研究を率いたGiulio Tononiは、「ラットは起きていましたが、大脳皮質では局所的な睡眠状態が随所で一時的に見られたのです」と話す。

研究チームは、ラットの神経活動を調べるため、脳の局所電場電位と脳全体の電場電位を、それぞれ異なる手法で測定した。局所での神経活動は、前頭皮質と頭頂皮質の深部にマイクロワイヤーアレイを設置して測定し、一方、脳全体の神経活動は、脳波検査法（EEG）で測定した。EEGでは、ノンレム睡眠時に見られるような徐波（α波より周波数が低い)を検出できる。徐波が見られる間は、ニューロンはオン状態とオフ状態の間を行き来しているが、一般的にこの状態はオフ状態（睡眠状態）とされている。

測定の結果、多くの小さなニューロン集団で活動が見られ、ラットが長時間起きている場合には、大脳皮質全体にランダムにオフ状態が生じることがわかった。「脳全体を見渡したとすれば、沸騰しているお湯を見ているような感じでしょう。起きているときは、ちょうど沸騰前の状態で、すべてのニューロンがオン状態になっています。疲れてくると、お湯が沸いてきてあちこちから泡が出てくるように、オフ状態が現れるのです。この泡がどこに現れるかは予測できません」とTononiは説明する。

これまで徐波は、通常、起きて行動している間には見られないと考えられてきた。しかし、今回の研究では、起きている間でも徐波が非常に局所的に出現する可能性を強調している。エール大学（米国コネチカット州ニューヘイヴン）の神経生物学者であるDavid McCormickは、「点滅する大脳皮質といえるでしょう。このような大脳皮質の局所の一時的なオフ状態によって、ニューロンの情報処理が途切れてしまうかもしれません」と話す。

ニューロンの居眠り

ニューロンの居眠りは行動に影響を与える可能性がある。ラットが起きている時間が長くなるほどオフ状態のニューロンの数が増え、アクリルガラスのケージの隙間から砂糖粒を取るという難しい課題を与えると、認知能力の低下がみられたのだ。

Tononiは、眠っていると認識されている現象全体と比較し、局所的にオフ状態のニューロンが存在していても、「自分では、今、ニューロンがオフになっていると認識できないので、より注意を払う必要があります」と述べている。睡眠不足の人の判断力が鈍る原因も、こうした現象により説明できるかもしれない。

*Nature*での発表に先立ち、Tononiたちは、脳が「全体として」眠っている間でさえも、徐波が局所的に、特定の脳領域に生じていることを報告している[2]。さまざまな脳領域に深部電極を設置している脳外科手術を受ける人の協力を得て、EEGと局所の神経活動を記録したところ、徐波は前頭前皮質から側頭葉や海馬までの領域に広がっていることを発見したのだ。Tononiは、「眠っているときでさえ、徐波は予想よりも限定された領域にしかみられませんでした」と述べている。

これらの知見から考えると、研究者は起きている状態と眠っている状態について、単純化しすぎていたのではないだろうか。チューリッヒ大学（スイス）の睡眠研究者Peter Achermannは、「睡眠と覚醒が同時に起こっているなら、つまり、起きているときに脳の一部が眠っていたり、眠っているときに脳の一部が起きていたりするのなら、睡眠状態という概念について再考すべきかもしれませんね」と話す。

睡眠と覚醒という正反対の現象の新しい定義

ミネソタ地域睡眠障害センター（米国ミ

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

ネアポリス）の理事長 Mark Mahowald は、こう語る。「今回の論文により、脳には起きている部分もあれば、眠っている部分もあるのではないかという疑惑が見事に解明されました。すでに臨床の現場では、こうした現象を示唆する症状が認められていました。その代表例が夢遊病です。夢遊病では、睡眠状態と覚醒状態が脳に混在することで、複雑な行動が引き起こされると考えられるのです」。

Tononi も同様の意見を持っており、「われわれの研究は、睡眠状態を新しく定義するものではありません。行動という観点から、より良い定義を提案しているのです。しかし、脳の状態から行動を説明するには、まだ十分ではないとも思っています」と話す。

この研究は、睡眠の機能のより深い理解に役立つかもしれない。Tononi はこう語る。「睡眠はシナプスと何らかの関係があると思っています。なぜなら、睡眠中に実質的なシナプス強度が増強されるネットワークがあることがわかったからです」。睡眠は脳のシナプス活性を再調整する時間であると考えられる。Tononi たちは今後、起きている脳で居眠りしているニューロンが、脳を保護する役割を担っているのか、脳を回復させる役割を担っているのか、あるいは、脳に悪影響を与えているだけなのかを明らかにしようとしている。■

（翻訳：三谷祐貴子）

1. Vyazovskiy, V. *et al. Nature* **472**, 443-447 (2011).
2. Nir, Y. *et al. Neuron* **70**, 153-169 (2011).

言語の構造に関する新しい研究により、「言語は人間の基本的な思考方法に根ざしている」とする理論に疑問が投げかけられた。

ISTOCKPHOTO

言語を形作るのは文化か？認知能力か？

Are languages shaped by culture or cognition?

PHILIP BALL 2011 年 4 月 13 日号 オンライン掲載
www.nature.com/news/2011/110413/full/news.2011.231.html

あらゆる言語に共通する普遍的な文法的特徴の存在を巡って、議論が繰り広げられている。

言語は、人間の脳のパターンとして規定された普遍的な規則には支配されず、系統特異的に進化する。―― このほど、4 つの語族に属する言語の文法的特徴（動詞や名詞の順序など）の関係に、言語の構造を制約する永続的で普遍的な指導原理は見られないという結論が、オークランド大学（ニュージーランド）の心理学者 Russell Gray たちによって報告された[1]。

普遍的な制約

今日、世界にはおよそ 7000 種類の言語があるとされ、その構造には極めて大きな多様性がみられる。フィンランド語のように、複雑な規則に従って単語に接辞を付け加えて文法的関係を表す言語もあれば、標準中国語のように、単語の語形変化がなく、語順により文法的関係を表す言語もある。また、動詞を文頭に置く言語もあれば、文中や文末に置く言語もある。

しかし、多くの言語学者は、このような多様性の背景には何らかの普遍的論理があり、共通の認知要因が文法構造を支えているのではないかと考えてきた。なかでも、Noam Chomsky の理論と Joseph Greenberg の理論は有名である。

Chomsky は、人間は生来、言語機能を持っていると仮定し、この機能はおそらく言語に特化した脳機能モジュールに備わっていると考えた。そして、子どもが言語を獲得するとき、その思考方法に組み込まれている少数の「生成規則」のパラメーターセットから母国語の文法規則を導き出せるようになっているとした。だから、子どもは複雑で繊細な文法規則を驚くべき速さで身につけることができると説明している。また、1 つの文化全体にわたってこの規則のパラメーターがリセットされると、言語は変化し、進化するとも仮定した。その場合、ある言語の 1 つのパラメーターに変化が起これば、そのパラメーターによって決まる複数の特徴が同時に変化するはずだ。

一方、Greenberg は、より経験的なアプローチをとり、言語間で共有されているように見える特徴をリストアップした。その多くは語順に関するものだった。例えば、ほとんどの言語では、「もし彼

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

が正しいなら、彼は有名になるだろう」のように、条件節が結論の前にくるのが普通である。Greenberg は、こうした普遍的特徴は、基礎にある言語的傾向を反映しており、さらには人間の認知の基本原理を反映していると考えた。

マックス・プランク心理言語学研究所（オランダ・ナイメーヘン）の進化言語学者で、論文の共著者である Michael Dunn は、「Greenberg が注目した語順の普遍性は、言語の普遍性に関する理論の経験的妥当性を強力に裏付けています」と言う。

枝分かれする言語

しかし、これら２つの理論から予測される言語の系統樹については違いがある。Chomsky の理論では、言語が進化するときには、同じパラメーターによって決まる複数の特徴が一斉に変化することになる。これに対して、Greenberg の理論では、１つの言語が持つ文法的特徴の間には、相互に依存関係があるものとないものがあることになる。例えば、動詞と主語の語順は、目的語と動詞の語順には依存しないはずであるという。

この違いについて検証するため、Gray らは、進化生物学の分野で開発された系統解析の手法を用いて、オーストロネシア語族、インド・ヨーロッパ語族、バンツー語族、ユート・アステカ語族の 2000 以上の言語を調べ、４つの系統樹を作成した。彼らはそれぞれの語族について、８つの語順に関する特徴に注目し、統計的手法を用いて、それぞれの語順が別個に進化してきた確率と、相関して進化してきた確率を計算したのだ。そして、それぞれの特徴の間にある相互依存関係を推定し、Chomsky や Greenberg の理論による予測と比較した。結果は、いずれとも一致しなかった。そればかりでなく、今回発見された相互依存関係は、語族ごとに異なっていた。つまり、各語族の根本的な文法構造は、ほかの語族のものとは異なっていたのである。各語族は独自の規則を進化させてきたのであり、これらが普遍的な認知要因に支配されていると仮定する理由はないのだ。

さらに、２つの語族の間で、何らかの特徴の相互依存関係に共通性がみられた場合でも、単なる偶然の一致である可能性があり、それぞれの語族で異なる進化経路をたどってきたとするのが妥当だと考えられた。こうして Gray たちは、言語は（少なくとも語順に関する文法は）、普遍的な制約に従って形作られたのではなく、文化特異的に形作られたのだと結論付けた。

系統解析への疑問

マックス・プランク進化人類学研究所（ドイツ・ライプチヒ）の言語学者 Martin Haspelmath は、Gray たちに同意しているが、「専門家にとっては、新しい発見ではありません。文法的性質と相互依存関係が系統特異的であることは、以前から知られていました」と話す。

一方、ニューヨーク州立大学バッファロー校（米国）の Dryer は、Gray たちの結論に納得しておらず、「今回考慮されていない語族で、彼らが反対している理論を裏付けるものが、100 以上もあります」と言う。さらに、言語が普遍的な制約により形作られているか否かにかかわらず、語族内の語順の関係に一貫したパターンを期待する理由はないとも付け加える。

Haspelmath は、言語の違いを測定するよりも共通するものを探す方が、より有効であるかもしれないと考える。「たとえ、文化の進化が言語を形作る主要な要因であったとしても、認知の傾向が何の役割も果たしていないと言うことはできないでしょう。比較言語学者が言語の普遍的特徴に注目し、認知により説明しようとしたのは、その言語が形成された理由を求めたからです」と、Haspelmath は語る。「文化の進化が言語形成に何らかの役割を担っていることで、言語が今日のような形になった理由を根本から説明することはできません。確かにおおむね真実ですが、真実のすべてではないのです」。■

（翻訳：三枝小夜子）

1. Dunn, M., Greenhill, S. J., Levinson, S. C. & Gray, R. D. *Nature* **473**, 79-82 (2011).

エネルギー政策を見直す日本

Japan rethinks its energy policy

David Cyranoski 2011 年 5 月 19 日号 Vol. 473 (263)
www.nature.com/news/2011/110518/full/473263a.html

福島第一原子力発電所事故により、
日本では節電と再生可能エネルギーへの関心が高まっている。

日本は、世界で最もエネルギー効率の高い国の１つである。しかし、今年３月に発生した福島第一原子力発電所の事故以来、電力不足が続き、節電を余儀なくされている。そんな中、菅直人（かんなおと）首相は、５月６日、中部電力に浜岡原子力発電所の全面停止を要請し、５月 10 日には、2010 年に策定されたエネルギー基本計画を白紙に戻して見直すことを表明した。これにより、今後 20 年間に 14 基の原子炉を新増設する計画も見直しの対象となるため、一層の節電に取り組まざ

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

るを得なくなるかもしれない。

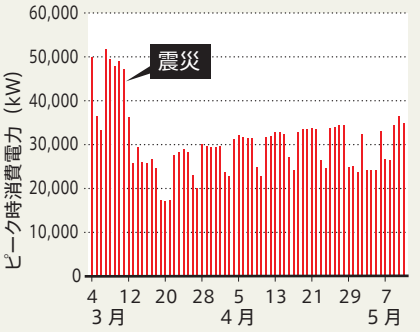
日本のエネルギー政策が瓦解した今、再生可能エネルギーの普及と省エネの徹底を掲げてきた人々にとって、自分たちの主張をアピールする絶好の機会となった。だが、新しいエネルギー政策は、深刻な電力不足に対処できるものでなければならない。2010年のエネルギー基本計画では、原子力発電による発電量を2倍にして、国内の電力需要の半分を賄うことになっていたからだ（*Nature* 2011年4月14日号参照）。

3月11日の巨大地震と津波により福島第一原子力発電所で事故が発生してしまった以上、菅首相には、エネルギー基本計画を見直す以外の選択肢はほとんどなかった。事故以来、国内にある全54基の原子炉の一部またはすべての廃止を求めるデモが続いている。菅首相は、新しいプラントの建造計画を撤回するだけでなく、やや立ち後れていた省エネの徹底と再生可能エネルギーの導入に、これまで以上に力を入れることを約束した。政府に再生可能エネルギーに関する助言をしている環境エネルギー政策研究所（ISEP；東京都中野区）の飯田哲也（いいだてつなり）所長は、「3月11日以前は、産業界と経済産業省により、日本のエネルギー政策は暗雲に覆われていました。今ようやく、雲の切れ間が見えてきたのです」と言う。

ISEPは4月に、日本のエネルギーミックス（複数のエネルギー源をバランスよく利用すること）に関して、大胆なビジョンを発表した。東北地方については、エネルギー需要を小さくすることで、2020年までに、そのすべてを再生可能エネルギー源で賄えるようになるという。東北地方では、風力発電を利用できる可能性が高く、再生可能エネルギーの導入が速やかに進むと考えられるのだ。そのうえ、導入に伴う雇用の創出により、震災により大きなダメージを受けた地域経済の再生も可能だという。また、日本全体については、現在約8～9%しかない再生可能エネルギーの割合を、2020年には30%、2050年には100%にしなければならないという。ただし、それには、エネルギー需要を現在の半分に抑える必要がある。「これは、政治的には難しいでしょうが、技術的には可能です」と飯田は話す。（編集部註：菅首相は、5月25日、サルコジ仏大統領との会談で、2020年代の早い時期に自然エネルギーの割合を20%にすると表明した。）飯田は、再生可能エネルギーの導入を促進するため、再生可能エネルギーで発電された電気を電気事業者が固定価格で買い取ることを義務付ける法案の策定に協力した。この法案は、偶然にも震災が発生した3月11日に完成し、今国会に提出されて、6月にも成立する見込みである。

東京大学の節電

東京大学の一日のピーク時消費電力は、3月11日の東日本大震災の直前に比べて30%以上減少している。



SOURCE: UNIV. TOKYO

政策研究大学院大学（東京都港区）の特別教授で、電力設備投資計画モデルの専門家である大山達雄（おおやまたつお）は、東北地方ではこの目標を達成できるかもしれないと言う。けれども彼は、安定供給が確実でないエネルギー源に依存するようになってはならないと考えている。また、現在、原子力発電を支持する声は弱まっているが、福島第一原子力発電所の事故処理がうまくいった場合には、再び強まる可能性があるとも指摘する。

東京にある各大学は、すでに、日本にはまだ省エネの余地があることを証明している。例えば東京大学は、照明とエアコンを切り、余分なエレベーターを停止し、多くのエネルギーを消費する実験は夜間に行うようにすることで、最大消費電力を30～40%も削減した（左図参照）。東大の研究者たちは、省エネ生活は不便だが、なんとかやっていけると言う。その1人、神経化学者の尾藤晴彦（びとうはるひこ）は、電力需要がピークになる時間帯に一部の施設の使用を制限することは、「現実的で、可能」であると言う。しかし、エネルギー使用のスケジュールを作成するには時間がかかり、こうした制約を研究者たちに課すのは気が重いと言う。一方、化学者の中村栄一（なかむらえいいち）は、節電による実験装置とコンピューターシステムの停止で、研究に遅れが出たと言う。中村は、今回の電力不足で10%の節電は容易であることがわかったが、30%の節電になると、長期的には生産性を低下させるだろうと考えている。節電のため、若手研究者が夜間に仕事せざるをえなくなり、研究意欲が低下するのではないかと心配する人もいる。

猛暑の夏が訪れれば、さらに難儀になるだろう。貴重な冷房は、実験動物施設や精密機器に対して優先されるため、教授陣や学生は、最小限の冷房しか効いていない部屋で汗をかかなければならないだろう。そのため、勤務時間や休日をずらすことも考えられている。

日本のエネルギー戦略が流動化している今、予測される未来のために、これらの省エネの取り組みは適切であると言ってよいだろう。東京大学で海洋モデルの研究をしている山形俊男（やまがたとしお）は、スーパーコンピュータの稼働時間を30%も減らさなければならなくなった。だが山形はこう語る。「状況は過酷ですが、良い面もあります。今回の経験は、資源が無限ではないことを実感する、良い機会になりました」。山形は、エネルギーの貴重さを実感することは、よりエレガントな実験につながると考えている。「われわれ研究者は、これまでより慎重に実験計画を立てるでしょう。膨大な量のデータを生成する代わりに、得られた結果を、より深く読みこなすようになるでしょう」。■

（翻訳：三枝小夜子）

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

PhD大量生産時代

The PhD factory

David Cyranoski, Natasha Gilbert, Heidi Ledford
Anjali Nayar, Mohammed Yahia

2011年4月21日号　Vol. 472 (276-279)

世界では、これまでにないハイペースで博士号（PhD）が生み出されている。この勢いに歯止めをかけるべきなのだろうか。

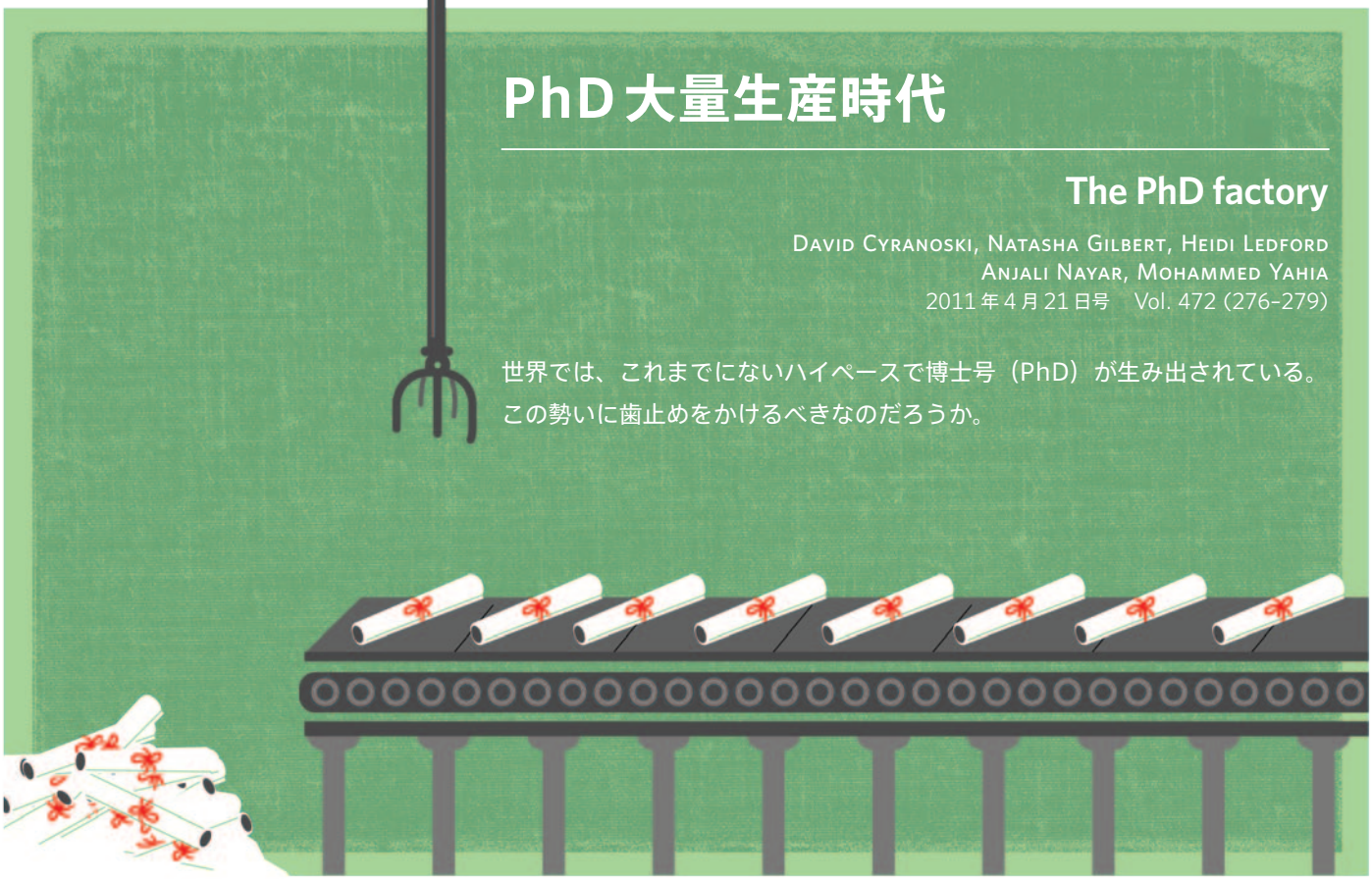


ILLUSTRATION BY: OLIVER MUNDAY

博士号を手にした科学者が誇りに思うのは当然だ。今もそれは学界エリートへの立派な入場券であるが、かつてほどの輝きはない。経済協力開発機構（OECD）加盟国では、科学分野の博士号授与数の年間総数は、1998年から2008年までに40％近く増えて約3万4000件に達した。この増加傾向に弱まる兆しは見られない。ほとんどの国々で、高度な教育を受けた労働者が経済成長のカギを握ると考えられており、高等教育制度の拡充が進められているからだ（右ページ下図「博士号の増産傾向」参照）。その一方で、世界のかなりの国と地域では、理系博士号取得者が、その資格を十分に活用する機会に恵まれずに終わるおそれが生じている。

米国、日本を含む一部の国々では、長い年月と多額の費用をかけて研究者になるための教育を受けながらも、博士号取得者が供給過剰状態になっている。大学職員の求人数は先細り傾向にあり、産業界もその不足分を補えていない。仕事を持たない博士号取得者の数はさすがに少ないが、例えば高校教師といった仕事に就くために、何年もかけて博士号という高レベルの資格を獲得する必要があるのかどうか、わからなくなっている。ところが中国やインドなどでは急速な経済発展が続いており、国内で量産される博士号取得者をすべて活用しても、なお人材は不足気味だ。ただし、博士号取得者の質についてバラつきが問題になっている。一方で、ドイツなど少数の国々では、博士課程教育を再定義して、問題にうまく取り組んでいる。つまり研究者育成教育の枠を超えて、政府組織や民間企業において高い職位に就くための教育課程に変えようとしているわけだ。ここでは、さまざまな状況に直面している各国の大学院博士課程教育の動向について報告する。

日本：制度の危機

理系大学院の博士号取得者の進路を比べた場合、日本が最悪国の1つであることはほぼ間違いない。1990年代に、日本政府は、それまでの3倍もの規模である「ポスドク1万人計画」を立て、大学院博士課程の定数を大幅に増やした。目的は、日本の科学力を欧米諸国並みに高めることだった。目標の人数はすばやく達成されたが、彼らポスドクの就職先は今もなお満たされておらず、考えなしの政策だったと厳しく批判されている。

そもそも日本の学界はポスドクなど欲しがっていない。高等教育に進む18歳人口は減少傾向にあり、大学は新たな教員を必要としていないからだ。産業界も同様で、伝統的に、実地で仕事を

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

覚えさせることのできる若くてフレッシュな学部卒業生を求めてきた。ポスドク就職浪人1万8000人を救済・解消する取り組みの1つとして、文部科学省は2009年に、国内で就職浪人中のポスドクを採用した企業に、1人当たり約400万円の補助金を交付する制度を実施した。それでも、思わしい結果は得られていない。

ポスドクと企業の「縁結びはとにかく難しい」と科学技術振興機構の北澤宏一理事長は話す。要するに、新卒の博士に対する求人数が少ないのだ。2010年に自然科学系博士号を取得した1350人のうち、卒業時までに常勤職への就職が決まったのは、全体の半数をやや超える程度（746人）にとどまった。その中で大学の科学・技術関連業務に就いたのは162人に過ぎず、残りの250人は産業界、256人が教育分野に就職し、38人が公務員になった。

こうした暗い見通しもあって、日本では博士課程への進学者数が減少している（右図「博士号授与数の推移」参照）。「日本の労働市場における博士の将来については、全員が悲観論者です」と筑波大学の大学研究センターで科学技術労働力問題を専門とする小林信一教授は話す。

中国：質より量？

中国では、博士号取得者の数が急増している。2009年には、博士号取得者数が全分野合わせて約5万人となり、一部の統計では世界一になったとされる。ここでの主たる問題は、質の低い卒業生が多いことだ。

華東師範大学（上海）の認知神経科学者Yongdi Zhouは、4つの要因を挙げる。①博士課程が3年と短すぎる点、②博士課程の指導教官の資質が不十分な点、③制度に品質管理が欠けている点、④成績不良の学生を退学させる明確な仕組みがない点、である。

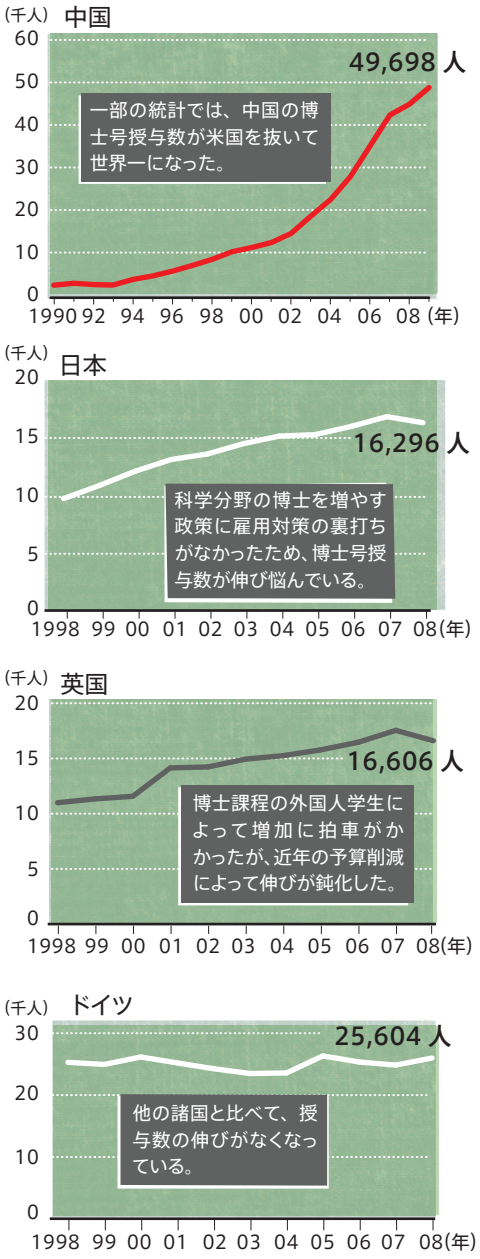
たとえ質が悪くても、中国の博士号取得者の大部分は、故郷で就職できる。好景気と関連施設の拡充によって、レベルは低くても雇用されるのだ。「大学への就職は、中国の場合、米国などよりかなり容易です」と清華大学（北京）の構造生物学者Yigong Shiは話す。同じことは、産業界についてもいえる。

一方で、国際競争力のある大学に就職を希望する博士号取得者は、さまざまな問題に直面している。一流の大学や研究機関で人気の高い職に就くには、海外での博士研究員など、さらなる研鑽が必要になる。そしてそうした研究者の多くは中国には戻らず、最も優秀な人材の海外流出につながっているのだ。

中国では、各大学で海外の学者の採用を増やす方針が打ち出されており、これによって質の問題は解決できると思われる。また、論文審査委員会や学生のローテーション制度を導入する大学が増えており、これによって、学生が階層組織の中で1人の指導教官に縛られる問題を回避できる、とShiは説明する。そして「現在、中国全土では、さまざまな大学

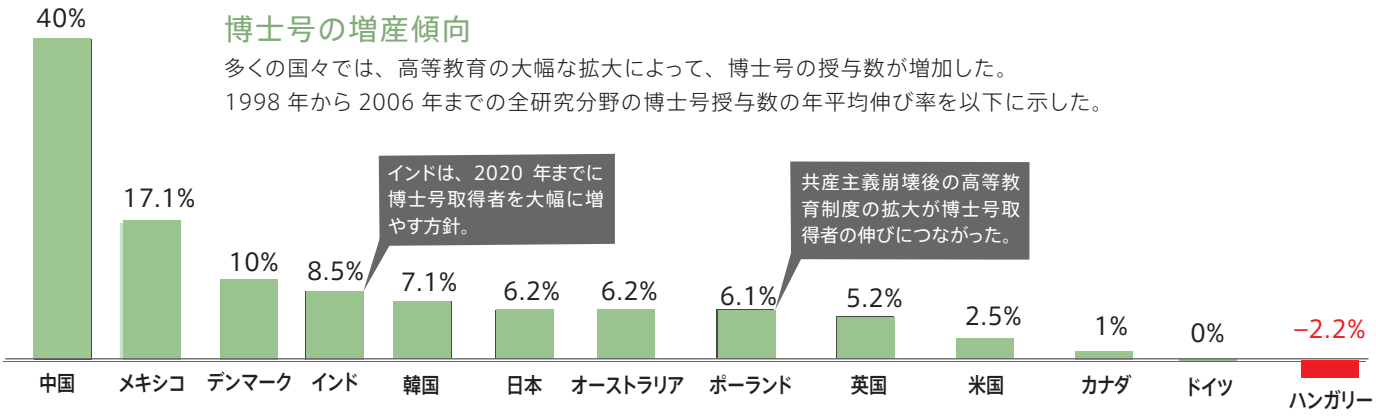
博士号授与数の推移

全研究分野の博士号授与数の年次推移



博士号の増産傾向

多くの国々では、高等教育の大幅な拡大によって、博士号の授与数が増加した。
1998年から2006年までの全研究分野の博士号授与数の年平均伸び率を以下に示した。



SOURCE: OECD/CHINESE MINISTRY OF EDUCATION

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

院課程で重要な取り組みが実施されています。中国は、常に変化を続けているのです」と付言した。

シンガポール：全方向での発展

シンガポールの方が、状況はもっと明るい。この数年間に大学制度と科学・技術インフラに多額の投資がなされ、国立大学2校の新設を含めて大きな発展が見られた。その結果、国内外から学生が集まり、博士課程に進学したシンガポール国民の数は、全分野を合わせて、この5年で60％増えて789人となった。同時に、中国、インド、イラン、トルコ、東欧やさらに遠方の国々からも大学院生を積極的に呼び込んだ。

これまでシンガポールの大学制度は発展途上にあったため、ほとんどの博士号取得者は、大学以外で就職していたが、大学が拡大を続けることで、より多くの就業機会が生み出される可能性がある。「卒業生全員が、大学教育で身につけたことで生計を立てているわけではありません。例えば教師や銀行員など全く異なった仕事に就く者もいますが、みんな良い仕事を得ています」。こう話すのは、シンガポール国立大学で生物多様性を研究するPeter Ngだ。博士号が高給に結びつくこともある、とNgは話す。良い成績で学士号を得た学生が就職して得られる月収が3000シンガポールドル（約21万円）であるのに対し、博士号取得者の月給は、少なくとも4000シンガポールドル（約28万円）となっている。

「博士号は、1つの研究分野に精通していることの証しにとどまらず、頭脳の訓練を受けたことの証しでもあると私は思います。もし大学で習得したことをその後の人生で実践できれば素晴らしいことですし、たとえ別の道に進んだとしても、自らの技能を新たな分野に持ち込んで、付加価値を生み出せると思います」とNgは話している。

米国：需給バランスの調整

博士号に関するトレンドを研究するジョージア州立大学（アトランタ）の経済学者Paula Stephanは、いまだに博士が不足していると語る米国の政治家にあきれ果てている。米国は、科学分野の博士号授与数が中国に次いで多く、2009年には生命科学と物理科学の博士号授与数の合計が1万9733件（推定）に達し、その数はなお増加傾向にある。しかしStephanは、「議会が、博士の雇用を生み出すための予算を増額しない限り」、もはやこのトレンドを認めるべきではないと話す。

理系博士号を持ち、大学で科学分野の終身雇用職を得る人の数が、じりじりと減ってきており、産業界もこの減少分を吸収しきれていないからだ。問題が最も深刻なのが生命科学の分野で、博士号授与数の伸びは最大なのに、製薬産業やバイオテクノロジー産業の規模が近年大幅に縮小されてしまった。1973年には、米国の生物科学の博士号取得者の55％が、博士課程修了後6年以内にテニュア（終身）の職に就き、終身在職権のない職に就いていたのはわずか2％だった。ところが2006年になると、博士号取得から6年以内にテニュア職に就いた人は全体の15％に減り、終身在職権のない職に就いた人が18％となった（右ページ図「大量に生まれる博士号取得者とその前途」参照）。博士号のいらない仕事をする博士号取得者の数が増えていることが、統計から示唆されている。「これは資源の無駄遣いです。学生の教育に多額の費用をかけているのに、卒業後、これに見合った仕事が得られないのですから」とStephanは指摘する。

このような求人需要の低迷から理系博士課程への進学を断念した学生もいる、と話すのはラトガース大学（ニュージャージー州ニューブランズウィック）のHal Salzman教授（公共政策）だ。それでも米国での博士号の授与は急増を続けており、外国人学生の流入がこれに拍車をかけている。2010年に科学・工学分野の博士課程の学生とポスドク3万人を対象に行われた調査においても、大学での研究職が希望就職先として一番多かった、とジョージア工科大学（アトランタ）で戦略的経営を研究するHenry Sauermannは言う。実際、この目標に絞って学生を教育している博士課程は多い。なお、2007年に卒業した科学・工学分野の博士号取得者の半数は、取得に7年以上を要しており、博士課程進学者の3分の1以上が中退している。

現在、一部の大学の博士課程では、大学研究職以外の就職も可能となるような教育の実験を試みている（*Nature* 2011年4月21日号280ページ参照）。ブロード研究所（マサチューセッツ州ケンブリッジ）の細胞生物学者Anne Carpenterは、現役の博士号取得者の雇用を生み出すとともに、博士課程進学者を減らすよう努力している。Carpenterが自らの研究室を開設した4年前には、臨時雇いのポスドクと大学院生という通常の組み合わせではなく、経験豊かなスタッフ科学者を永久契約で雇用した。Carpenterは、こう説明する。「ピラミッド式の科学研究自体にさほどの合理性を見いだせませんでした。100人もの大学院生やポスドクを粗製濫造することは、私の良心が許しませんでした」。

しかしCarpenterは、研究スタッフの高額な人件費について、助成金審査委員会を説得するのに苦労し続けている。彼女は「科学者を8万ドル（約640万円）で雇っているわれわれは、4万ドル（約320万円）でポスドクを雇っている研究室といかに競争したらよいのでしょうか」と問いかける。彼女は理想を掲げ続けるつもりだが、将来的には、ポスドクの採用も柔軟に考えていくと語っている。

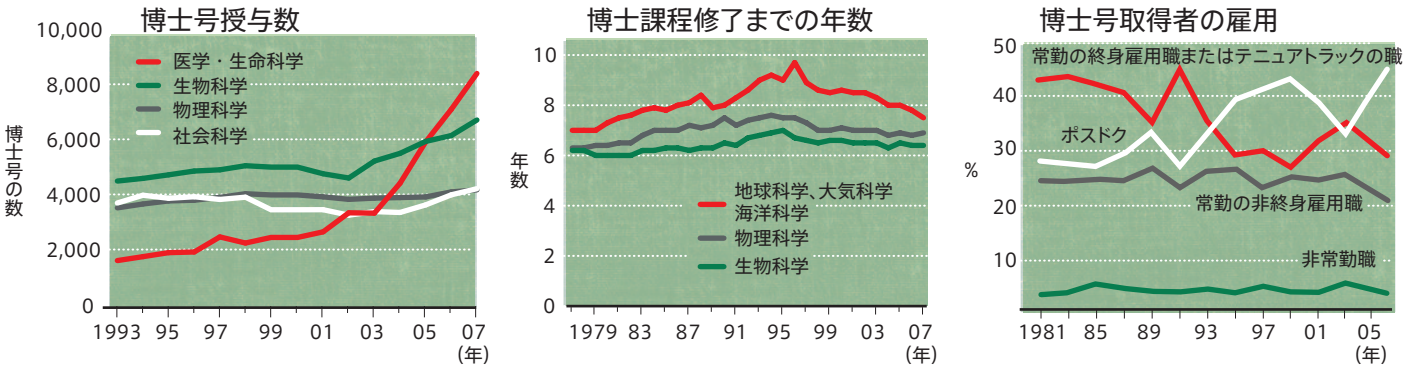
ドイツ：「進歩的」博士号

ドイツは、年間の博士号取得者数がヨーロッパで最も多く、2005年には科学分野の博士号取得者が約7000人となった。また、過去20年間にわたる博士教

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

米国：大量に生まれる博士号取得者とその前途

米国の大学で博士号を取得した卒業生の年間総数の伸びが最も顕著なのが、医学・生命科学の分野である（左図）。科学・工学分野の博士課程を修了するために 7.2 年（中央値）を要し（中央の図）、卒業後 1 ～ 3 年で大学での常勤職に就いた者の割合は減少傾向にある（右図）。



SOURCE: SCIENCE AND ECONOMIC INDICATORS 2010

育課程の大改革により、供給過剰問題の解決も順調に進んでいる。

ただ、ドイツの大学でもほかのヨーロッパ諸国と同様に、研究職の募集数は減少ないしは横ばい状態にある。その結果、トップクラスの学生が追い求める大学の研究職だけでは就職先が足りず、高度な訓練を受けた人材として、大学は博士号取得者を幅広い分野に売り込んでいる。

これまでドイツでは、指導教官が博士課程の学生を非公式に集めて、自らの研究方針に合わせて教育するのが通例で、大学や研究機関からほとんど監督を受けてこなかった。しかし今では、大学が、学生の招致や養成に正式に関わるようになっており、多くの学生が、実験室での研究以外に、プレゼンテーション、報告書の作成やそのほかのスキルを教える講義を受けている。

理系博士課程修了者の中で最終的に大学での常勤職に就く者は 6％に満たず、産業界で研究職に就く者が大部分だ、とドイツ学術審議会（ケルン）で博士教育を研究する Thorsten Wilhelmy は説明する。「ドイツでは教授に就任するまでの道のりが長く、また大学教員の収入は比較的少ないため、博士号を取得して大学を離れることが賢明な選択肢の 1 つになっているのです」。

ブリュッセルに本部を置く欧州大学協会で、博士教育の支援・開発プログラムを主導する Thomas Jørgensen は、ドイツの大学が改革を進め過ぎて、学生が講義に費やす時間が長くなり、博士論文のための研究や批判的に物事を考える能力習得のための時間が不足することを懸念している。中国、インドやその他経済力をつけている国々で博士号授与数が増えている今、ここ 20 年間、ドイツでの博士号授与数が伸び悩んでいることについても、Jørgensen は心配している。

ポーランド：博士号量産のツケ

ヨーロッパの伝統的科学大国では、博士号授与数は伸び悩んでいるようだが、ポーランドなど旧東欧共産圏の一部では、博士号が急激に増えている。1990 年度にポーランドの大学では 2695 人の学生が博士課程に進学したが、2008 年度には、3 万 2000 人を超えた。これは、ポーランド政府が、共産主義の崩壊後に高等教育制度の拡大に力を注ぎ、博士課程の学生を受け入れた大学に報奨を与える政策を導入したことによっている。

博士号授与数が伸びた半面、複数の問題も発生している。ワルシャワ工科大学の研究者で、ポーランドの大学を代表するポーランド大学学長協議会の Andrzej Krasniewski 事務総長は、「博士研究のための予算が不足しているために中途退学率が上昇しています」と話す。工学の分野では、博士課程学生の半数以上が中退している、と彼は言う。ポーランドの経済成長は博士号授与数の伸びについていけず、修得した専門知識のレベル以下の仕事に就かざるを得ない人も出ている。国内の大学の博士号取得者の質にバラつきがなく、また彼らの能力はほかのヨーロッパ諸国と同等であることを示すデータを集める必要がある、と Krasniewski は指摘する。

それでも、ポーランドの博士号取得者の失業率は、ほかの大部分の国々と同様、3％未満にとどまっている。「博士号取得者の雇用見通しの方が、ほかの高等教育課程の卒業者より高いのです」。こう話すのは、1990 ～ 2006 年の博士号取得者に関する OECD 報告書の著者で、現在は 2010 年までの博士課程学生のデータを解析している Laudeline Auriol だ。

にもかかわらず、*Nature* が 2010 年に実施したアンケート調査では、博士号取得者は、非取得者と比べて仕事の満足度が必ずしも高いとはいえず、収入もそれほど高くないことが明らかになっている（次ページ図「博士号の値打ち」参照）。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

エジプト：生き残りに四苦八苦

中東で博士研究が盛んに行われているのがエジプトだ。博士課程進学者数は、1998 年に 1 万 7663 人だったものが、2009 年には約 3 万 5000 人に達した。しかし、研究資金が需要に追いついていない。研究資金の大部分は大学予算から支出されるが、学部と修士課程の教育に多額の費用がかかり、博士課程の予算は逼迫（ひっぱく）している。各大学は、海外からの資金提供や民間部門との提携に目を向け始めたが、ごく限られた額にとどまっている。

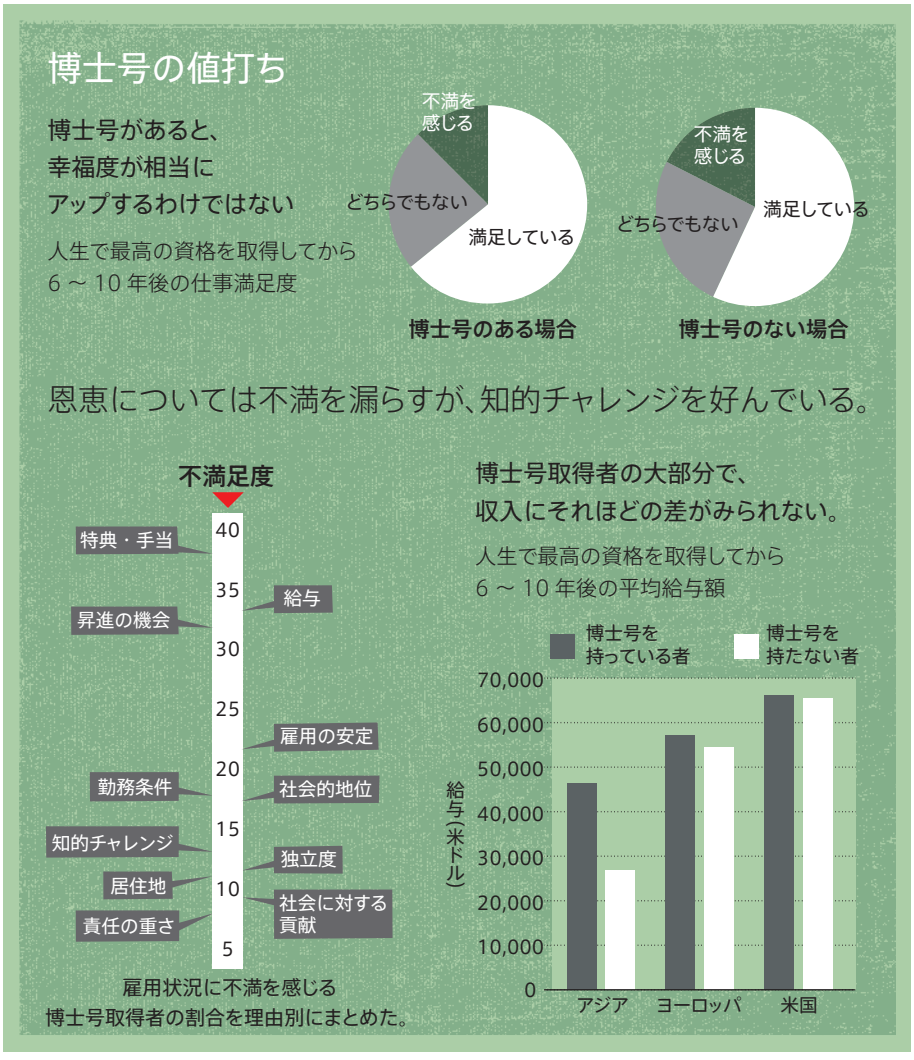
こうした資金不足は、設備や教材の不足、有能な教職員の不在、研究者の低給与につながっている。その結果、より大きな負担が学生にかかっている。資金の切迫によって研究の質が大きく損なわれ、学生と指導教官の間に緊張が生じているのだ。ミニア大学で食品科学を研究し、博士課程の指導教官を務める Mounir Hana は「エジプトの博士課程の学生は、数多くの問題を抱えています」と言う。自らも問題解決に努力していることを語った後、次のように続けた。「残念ながら、多くの指導教官は、こうした問題を気にしておらず、学生にとっての新たな障害を生み出す結果ともなっているのです」。

博士課程の卒業生は、長くつらい歩みを強いられている。ほかの国々と同様、エジプトでも博士号取得者の数は、大学が研究者や教官として雇用できる人数を超えている。博士号は、階層的な公務員組織をのぼりつめる手段として利用されることが多いが、民間部門からは、「博士卒業者は、提案書の作成やプロジェクト管理といった必須の実用的技能の訓練ができていない」という不満が出ている。また、エジプトの博士号取得者は、国際的な研究職への就職にも四苦八苦している。Hana は、こうした博士号取得者の研究論文の全体的な質を「平凡」と評し、すでに大学に勤務しているのでないかぎり、博士号を得るための勉強は「無駄なこと」だと話す。しかし、今年になって起こった政変が変化をもたらすかもしれない。これまでエジプトを離れていた多くの大学教官が帰国して、教育と研究の再構築と整備に貢献したいと希望しているからだ。

そのほかの中東諸国では、博士課程で学ぶ者は少なく、例えば、レバノンでは年間 50 人にも満たない。しかし、近年、ペルシア湾岸の産油国で国際的レベルの大学がいくつか新設され、博士号取得者に対する需要が高まっている。これまでのところは、欧米の大学で学位を取得した研究者を「輸入」している場合がほとんどだが、特にサウジアラビアとカタールでは、国内のインフラ整備を進めており、自前の博士課程を増やそうとしている。今後、その影響は、中東全体に及ぶことになる、とアル＝アズハル大学（カイロ）で内分泌学を研究し、博士課程の指導教官を務める Fatma Hammad は言う。「現在、多くの学部卒業生が博士研究を始めていますが、その理由は、湾岸産油国での博士号取得者に対する需要が高まっているからです。学生にとっては、博士課程に進むことが、こうした国々で就職し、収入を増やす手段の 1 つなのです」。

インド：求む、博士号取得者

インドで授与された科学・技術・工学分野の博士号取得者数は、2004 年に約 5900 件だったが、現在では約 8900 件にまで増えている。中国や米国と比べればわずかだが、インド政府は、それをかなり増やして、同国の経済と人口の爆発的成長に見合った数にしたいと考えて



SOURCE: OECD, NATURE SALARY & CAREER SURVEY 2010

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

いる。政府は、2011 年度高等教育予算の 33％増額を含めて、研究と高等教育に多額の投資を行っており、海外の大学からの投資を集めようと努力している。政府の目標は、年間の博士卒業者数を 2020 年までに 2 万人に増やすことだ、と Thirumalachari Ramasami 科学技術省科学技術部長は話す。

こうした目標は、簡単に達成されるはずだ。インド人の博士号取得平均年齢は若く、学部教育も成長著しい（*Nature* 2011 年 4 月 7 日号 24～26 ページ参照）からだ。しかし、長期間の博士課程に進学する動機は乏しく、現在のところ、学部卒業生の約 1％のみが博士課程に進んでいる。大部分の学部卒業生は、産業界への就職に熱心だ。そのために必要なのは学士号だけであり、収入も大学院教育を必要とする国公立大学の教官や研究者よりかなり高い。学生は「今のところ、博士号はおろか、修士号についても考えていません。就職するなら、学士号で十分なのです」。こう話すのは、インド工科大学（カラグプル）の工学者 Amit Patra だ。

たとえ博士号を取得しても、インド国内の大学の求人数は少なく、給与の高い産業界での仕事の方がより魅力的なのだ。「現在、博士号取得者が不足しており、この希少な人材をめぐって産業界と争奪戦をしなければなりません。でも、大学には、ほとんど勝ち目がありません」と Patra は話す。大学院への進学に熱心な若者の多くは、欧米への留学を目標としている。Manu Prakash もそうした道を選び、マサチューセッツ工科大学（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）に留学して博士号を取得し、現在は、スタンフォード大学（米国カリフォルニア州）で実験生物物理学研究室を主宰している。「インドの大学で学んでいた頃は、長期的研究を行うための基盤に対して十分な支援がないと感じていました」と彼は話している。■

（翻訳：菊川 要）

PhD 改革へ 5 つの挑戦

Rethinking PhDs

Alison Mccook 2011 年 4 月 21 日号　Vol. 472 (280–282)

ILLUSTRATION BY: OLIVER MUNDAY

現行の博士課程教育には問題が山積している。部分的に手直しするか、徹底的に見直すか、それとも完全に無視して時が過ぎるのに任せるのか。いずれにせよ、大学も個人もすでに、自然科学系大学院教育の改革に走り出している。

「彼らの大半は間違いなく失敗する」。この厳然たる事実が Animesh Ray の心の中をよぎったのは 15 年前、博士課程の優秀な学生たちを眺めている時だった。彼らは、自身が訓練を受けた唯一の職種である大学教員になろうと必死になっていた。学生の中には、Ray が所属するロチェスター大学（米国ニューヨーク州）の学生も含まれていた。彼らの何人かは、いつまでたってもポスドクのままだろう。そして何人かは、科学の世界から完全に離れることになるだろう。

それから数年後、Ray は准教授と

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

して、この状況に対処することになった。カリフォルニアの新設企業で働く経験を積んだ彼は、博士課程の学生の多くが、チームの中で働くことや、頻繁に変更される目標に対応するのが苦手であると感じた。ところが産業界の雇用主が求めているのは、まさにそうしたスキルなのだ。彼はケック大学院大学（KGI；米国カリフォルニア州クレアモント）で、学生たちにこうしたスキルを身につけさせるためのプログラム作りに取りかかった。「科学者たちは、自ら職業訓練を受けた分野でのみ、職を探すのに悪戦苦闘しています。このような姿を見なくて済むようにしたいと私は決心したのです」。

Ray のほかにも、多くの研究者や管理職が、大学院教育を立て直そうと努力している。彼らは、若手科学者たちがいつまでたってもポスドクの身分から抜け出せなかったり、せっかく取得した学位が無駄になるような職業に就いたりするのを食い止めたいと考えている。

Nature は今回、PhD 改革へのアプローチを 5 つ紹介する。そこには、若手科学者をもっと突き放して自主性を育てる試みから、学際的な PhD プログラムの新設、あるいは PhD へのこだわりを捨て去ることまで、いろいろある。いずれにしても、これまで、ともすれば神聖視されてきた大学アカデミアという基盤を、根底から揺るがすものである。

1 自主性を育てる

米国立衛生研究所（NIH；メリーランド州ベセズダ）の分子免疫学者 Michael Lenardo は、次のように考えた。大学研究職は非常に少なく、非常に多くの科学者がそのポストを狙っている。したがって、PhD プログラムには最も成功しそうな学生だけを受け入れて、彼らに将来必要になるすべてのスキルを身につけさせなければならない。その意味では、米国と英国の PhD 教育は、どちらにも一長一短があると彼は見た。

英国では、博士課程の学生は早い時期から自主的に研究することを許され、ほとんどの学生が 4 年以内に修了する。しかし、すべての大学が学生に筆頭著者論文の発表を義務づけているわけではなく、Lenardo はそれを欠点と見なした。一方、米国の多くの大学では、PhD を取得するには筆頭著者論文を発表する必要があり、修了までに 7 年以上かかってしまう。

2001 年に、Lenardo は「NIH オックスフォード－ケンブリッジ・スカラーズ・プログラム」という新しい博士課程を創設した。これは、真のエリート学生のためのプログラムで、米英両国の PhD 教育制度のいいとこ取りを狙ったものだ。このプログラムには毎年 250 ～ 300 人の申し込みがくるが、わずか 12 人しか受け入れない。ここで重視されるのは自主性だ。学生は自分でプロジェクト計画を考えて書類を作成し、直ちに学位論文研究に取りかかる。画一的なコース学習はないが、論文執筆などの必要条件を満たさなければならない。

学生たちは米英両国で過ごし、それぞれの国に 1 人以上の論文指導教授を持つ。指導教授の専門分野は異なっていることが多い。Lenardo によると、1 人の教授が責任を持って指導にあたるというシステムではないので、結果として、学生たちは自主的に活動する方法を身につけるという。また、外国に行くことで学生の自主性が育ち、その分野で最高の研究者と研究できるようになるという。

このプログラムが始まって 10 年間で、60 人以上の学生が博士課程を修了した。学生の在学期間の平均は 4 年強であり、PhD 研究を進めるなかで平均 2.4 本の筆頭著者論文を発表した。修了者の 80％は現在も学術研究機関に所属し、うち 6 人はすでに主任研究員として仕事をしている。

Ambika Bumb は現在、米国立がん研究所（メリーランド州ベセズダ）のポスドクだ。PhD 研究では、腫瘍の画像化や標的治療に利用できる磁気的・光学的・核医学的性質を持つナノ粒子の開発を進めた。彼女は丸 3 年で博士課程を修了した。2 か国に 4 人の指導教授を持ち、工学、免疫学、放射化学、放射線学の訓練を受けた。この PhD 研究で少なくとも 4 本の原著論文と 1 本のレビュー論文を発表し、現在は大学での職に応募している。

ニューカッスル大学（英国）の大学院スキル開発コーディネーターである Richard Hetherlington は、一人前の研究者になるためには、自主性を養うことが重要なステップになると指摘する。「自主性が身についている人は、何かに行き詰まったときにもしっかりとしていられます」と言う。一方で、ケンタッキー大学（米国レキシントン）で助成金・原稿作成部局の運営にあたり、科学におけるキャリア問題に関する著書もある Nathan Vanderford は、「博士課程にも確固たる体系と核になるコース学習がないと、一部の学生は科学者としてやっていくために必要な準備ができずに終わるおそれがあります」と指摘する。「学生が研究室に閉じこもって 1 人だけで研究していたら、科学の歴史や、その中核にある原理を深く学ぶことはできないでしょう」。だとすれば、一部の学生は、こうした点で苦労するに違いない。

2 産業界での成功を目指す

Ray は自分の経験から、博士課程学生のための学問以外の訓練について、いろいろと考えるようになった。KGI を含めた多くの大学が、MBA の理系版ともいえる PSM（Professional Science Master、専門科学修士）プログラムを開設している。産業界に送り込む人材を育て、科学者の訓練を続けるためだ。しかし Ray は、学生が PSM を取得することで、逆

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

にその機会を狭めてしまう場合があることに気がついた。

Ray は、KGI で生物科学の PSM を取得した学生たちが、しばしばコンサルタントの補佐役や中位のマネージャーとして職に就き、そこから昇進していく姿を見てきた。彼らはよくやっていたが、科学から離れて経営サイドにいることが多かった。そこで Ray は、KGI の共同設立者である David Galas や同大学の学長である Sheldon Schuster と協力し、PSM プログラムを拡張して、産業界のノウハウと技術研究訓練の両方を学生に提供する PhD プログラムを開設した。

KGI で応用生命科学の PhD を取得するには、学生はまず修士課程を修了し、それからさらに 3 ～ 4 年間、産業界から 1 人以上の指導者を得て、オリジナルの研究をしなければならない。このプログラムを最初に修了した Eric Tan は、KGI での博士課程で、診断法や生物兵器の評価への応用が考えられる DNA チップを開発した。彼はここで科学的手法を学んだだけでなく、事業計画書の書き方や、ベンチャーキャピタルにその計画をプレゼンテーションする方法、市場調査の方法や、特許法の詳細についても学んだ。

Vanderford によると、マーケティングとコミュニケーションのコースは、どんな科学者にも役立つという。大学にとどまる科学者にとっても例外ではない。「博士課程の学生がどのようなキャリアパスを選ぶかに関係なく、こうしたコースは助けになるでしょう」。

それが本当に役立つかどうかは、時間が証明するだろう。KGI の PSM プログラムの成功は Ray を鼓舞している。2000 年の開設以来、このプログラムを修了した 300 人のほぼ全員が、就職できた。2006 年に始まった博士課程では、現在、3 人の学生が学位を取得し、いずれも PSM を取得した学生の平均的な初任給（7 万 3000 ドル）より高い賃金の職を見つけることができた。Ray はこれを「目覚ましい成果」と見る。

Ray は、KGI で総合的な訓練を受けた学生たちが、科学者を管理し、実業家とやり取りする能力を身につけることを期待している。「彼らは全体像を見て、適切に判断することができます。それと同時に、技術的な詳細も熟知していて、それゆえ、高く評価されるのです」。

けれども、広く学んだ学生は切れ味が鈍くなるおそれがある。Ray はまた、KGI が物理化学や細胞生物学などの特定領域の課程を提供できていないことを認める。Vanderford は、このシステムは、「どの程度の科学教育が必要なのか、プロとしてどの程度完成している必要があるのか、その両者が最適なバランスをとるような点を探している途上にあるのでしょう」と言う。

3 学際的な PhD プログラムの新設

Marc Jacofsky は、アリゾナ州立大学（ASU；米国テンピ）で自然（形質）人類学の PhD 研究をしていたときに、整形外科医の兄から、運動や人工関節について研究してみたい問題がいろいろあると打ち明けられた。彼は兄の説明を聞いていたが、途中で何度かさえぎって、その場で思いついたことを提案した。「すると彼は私の顔をまじまじと見て、『お前はサルの研究をしていると思っていたが』と言ったのです」。

確かに Jacofsky はサルの研究をしていたが、そのほかに、工学、数学、コンピューターサイエンス、運動生理学、神経生理学の研究もしていた。彼が履修していた博士課程プログラムは、ASU の多くの学科の教授陣がいわゆる学際研究さえも飛び越えて、全く新しい学問分野を打ち立てるために開設したものだったのだ。

ASU 大学院の Maria Allison 学長によると、「科学技術の人間的・社会的側面」「生物学的デザイン」「都市生態学」など、ASU の新しい PhD プログラムのほとんどすべてが、分野横断・融合的（transdisciplinary）なものであるという。学位のなかには、関係するトピックが広く、80 人以上の教授が関与しているものもある。

「形態と機能における神経・筋骨格の適応」という Jacofsky のプログラムや、その他の ASU の学位の一部は、当初は、全米科学財団の IGERT（Integrative Graduate Education and Research Traineeship；統合的大学院教育研究研修）プロジェクトから資金提供を受けていた。IGERT は、学生にキャリアスキルを身につけさせ、現実世界の問題への取り組みを促すプログラムを開発している米国の大学に、5 年間で 300 万ドルの助成金を提供している。

1998 年から今日まで、IGERT プログラムは 5000 人近い大学院生に助成金を提供してきた。独立の調査により、IGERT プログラムを履修した学生は、履修しなかった学生に比べて、自分が選んだ分野の専門知識を犠牲にすることなく、多分野出身者のチームで働いたり、専門家でない人々とコミュニケーションしたりするのが上手であることが明らかになった。IGERT の修了生は、就職先を見つける際の苦労も少なかったようである。

米国以外の国々も、IGERT に似た学際的な博士課程プログラムを開設している。カナダ政府には Collaborative Research and Training Experience（CREATE；共同研究訓練経験）プログラムというイニシアチブがあるし、インドのバンガロールの新しい PhD 課程では、工学者、化学者、コンピューター科学者、物理学者に学際的な生命科学の訓練を行い、物理学のツールを用いて生物学の問題に取り組む方法を身につけさせている。このプログラムは、約 5 年前にインド国立生物科学センターの物理学者によって開設されたもので、現時点で 8 人の学生が修了している。そのうちの 2 人は、すでに大学で常勤職に就いている。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

学生をさまざまな分野に触れさせるのはよいことだが、専門知識は今日もなお重要であるとHetheringtonは言う。PhD課程の本来の目的は、「特定の領域について深い理解を持つ人材を育てること」にあるからだ。学際的な研究でさえ、科学者たちがそれぞれの専門分野に固有の技術を持ち寄ることで成立している、と彼は言う。

しかし、視野を広げるのは大切だし有用だ。Jacofskyが博士課程に進むことにしたのは、将来、大学レベルの人類学を教えたいと思ったからだ。しかし彼はいま、兄と共同で所有する整形外科研究教育センター（米国アリゾナ州フェニックス）の研究開発副社長であり、生体力学と整形外科手術の前後の歩行について研究している。「伝統的な人類学の学位を取得していたら、今、産業界で働いている可能性はほとんどなかったと思います」。

4 オンライン博士課程

大学院で学位を取得したがっている人の中には、時間の都合がつかず、フルタイムで研究をしたり、研究室に来たりすることができない人もいる。オンライン課程は、このギャップを埋めて、より多くの人々が適切な訓練を受けられるようにするものだ。PhDレベルの訓練も例外ではない。

Rana Khanがオンライン課程を教えるようになったきっかけは好奇心だった。それがどういう仕組みなのか、よくわからなかったのだ。「非常におもしろいアイディアだと思い、そのシステムに興味を持ったのです」と彼女は言う。

Khanは当時、米国農務省のポスドクとして、ダイズの病原体への耐性を高める方法を研究していた。教える機会を求めていた彼女は、そのとき、メリーランド大学ユニバーシティーカレッジ（UMUC；米国アデルファイ）の求人リストを見ていた。

仕事の内容は、バイオテクノロジーのオンライン修士課程の一部を教えることだった。UMUCはオンライン教室を用意していて、Khanはそこに毎週講義を投稿する。学生たちは1週間かけてその課題を完成させ、議論にも参加しなければならない。Kahnは少なくとも1日に1度ログインして学生からの質問に答える。プログラムの最後には、オンライン研修もある。学生たちは本物の企業のためのグループ・プロジェクト（例えば新しい技術を持つ潜在的なライバルの調査）に取り組み、100～200ページのレポートを提出する（KhanはPSMを持っている）。実際の研究室を利用する場合もあるそうで、学生は住んでいるところに近い研究室で研究をして、データをオンラインで提出するわけだ。

UMUCのプログラムは2001年頃からあり、現在まで毎年約50人の学生が修了している。そのうちのざっと10%が米国外で暮らしている。これはオンライン学位の大きな長所だとKahnは言う。彼女が今教えている学生の中には、アフガニスタンやイラクに派遣されている軍人もいるという。

修士課程の修了生の1人であるKyle Retterer は、もとは物理学のPhD取得を目指していた。しかし、半導体研究の狭い領域に何年間も束縛されたくないという気持ちが強くなり、大学を去った。その後、研究が恋しくなった彼は、最先端の問題に取り組むことができ、自分が以前から好きだったこと、すなわち、膨大な量のデータの解析をさせてくれるようなプログラムを探しはじめた。

Retterer の母親は情報技術の分野で2つのオンライン学位を取得し、現在はナスダックの副社長になっていることもあって、彼自身も通信教育の可能性をよく理解していた。2年でオンライン修士課程を修了し、その2か月後にはGeneDx社（メリーランド州ゲイサーズバーグ）という臨床遺伝子検査会社に職を得た。現在、複数遺伝子検査のデータを解析しており、大学院生時代の3～4倍の収入がある。「今は、非常に調子よくやっていると思います」。

PhDも通信教育で取得できる。英国ミルトン・ケインズに本部を置くオープン・ユニバーシティーには、現在、約40人の博士課程の学生がパートタイムで研究に従事している。彼らは地元の天文学研究室などで研究を行い、2週間に1度、大学のメイン・キャンパスにいる指導教授とスカイプで連絡を取り合う。ときには、じかに会うこともある。大学のPhD学生を指導しているJames Bruceは、このシステムは、指導教授がいるキャンパスで研究をするのと「同じくらい有益だ」と言う。

オンラインでPhDを取得する人は、まだまだ少ない。けれどもHetheringtonは、状況は変わるだろうと考えている。科学は1人でできるものではなく、学生が指導教授とたまに連絡をとりながら1人で研究を進める現在のオンライン課程では、学位は取れても、指導教授や同僚との関係を良好に保つコツを学ぶことはできない。しかし、未来のツールは、学生が遠隔地にいる人々と交流することをもっと容易にし、よき共同研究者になるための準備をさせるだろう。「そうしたことは、徐々に可能になっていくでしょう」とHetheringtonは言う。

5 PhDへのこだわりを捨てる

PhDを取得しないという道を選ぶ人もいる。Deanna Pickettは、以前は、工学か環境化学のPhDを取得したいと考えていた。それが変わったのは、ウースター大学（米国オハイオ州）で化学を学んでいた去年のことだ。学部の最終学年になっていた彼女は、化学のPaul Edmiston教授から、飲料水中の汚染物質を吸着する新しい材料の特性評価を手伝ってほしいと頼まれたのだ。それは現実の仕事で、直ちに強い社会的影響力を持つものだった。彼女はこの仕事が気に入った。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

その後、Pickett は進学を考えていた大学院を訪問してみたが、心を動かされなかった。現場で仕事をする楽しさを知った彼女にとって、これから何年間も理論の研究をすることは魅力的には思えなかったのだ。Edmiston と共同で ABS マテリアルズ社(オハイオ州ウースター)を設立した最高経営責任者の Stephen Spoonamore から、卒業後もこの仕事を続けてほしいと依頼され、彼女はキャリアプランを変更した。「私の人生の次の一歩を考えたとき、これから 5 年間も 1 つの研究テーマにかかりきりになるよりも、少しは充実した日々を送れると思ったのです」。

とはいえ、Pickett がつかんだ機会は例外的なものだ。今日では、PhD を持たない人が科学者として職に就けることは、かつてないほどまれである。大学も産業界も、求人広告を出せば PhD を持つ人がいくらでも応募してくるので、PhD を持たない人は応募するだけ無駄という状況になっているのだ。米国化学会（ワシントン D.C.）のキャリア管理・開発部の David Harwell 副部長は、「現在の研究者市場では、高度なスキルをもつ人材が、あり余っているのです」と言う。

バイオインフォマティクスのように、職場で実作業指導を受ければ PhD を持つ人々と同等の仕事ができる分野もあるが、その場合でも、科学者として昇進するためには PhD を持っている必要があることが多い。ワシントン大学(シアトル)のゲノミクス研究者 Maynard Olson は、「バイオインフォマティクス研究者なら、PhD なしで非常に大きな貢献をした研究者の名をいくつも挙げることができるでしょう。けれども、こうした人々が、PhD を持つ研究者に典型的に約束されている責任ある地位に就くことは、ほとんどないのです」。

ABS マテリアルズ社は、数少ない例外の 1 つである。なぜなら Spoonamore は、PhD を持つ人々は「間違った訓練を受けている」と考えているからだ。彼はしばしば、学部生に PhD を持つ従業員と「ほぼ同額」の給与を支払い、同じように昇進させるという。彼自身は、学士課程さえ終えることなく、13 もの技術会社を設立した。彼が芝刈りビジネスで貯めた資金で最初の会社を設立したのは 18 歳のときだった。「私が好きなのは、信じられないくらい頭がよくて、クラスで一番優秀な化学科の学部生です。大学院生ではありません。本当に気に入る学生は、いつもそうなんです」。

仕事について 2 日目には、Pickett は起業家グループの前でプレゼンテーションを行っていた。そして 1 週間後には、トリクロロエチレンで汚染されたオハイオ州の土壌を除染するためのパイロットプランを作成することになった。自分はすでに、PhD 課程を修了した人々がするような仕事をしているのではないか、と彼女は言う。「途中の段階を 1 つ飛び越してしまった感じがします」。

けれども Pickett は、自分が転職した場合、今ほど責任ある仕事には就けないかもしれないことを知っている。彼女の同僚の Laura Underwood は、同じことを考えた結果、3 年間 ABS マテリアルズ社で働いた後、博士課程に進むことにした。Pickett と同じような背景を持つ Underwood は、この会社の最初の従業員であり、製造施設の運営、会議計画の監督、研究室の管理など、非常に大きな責任を担ってきた。けれども彼女は、PhD を持っていないと、ほかの会社で同じような機会を見つけるのは難しいかもしれないと考えたわけだ。それでも彼女は、大学院に進む前にしばらく仕事をしたことは有益だったと考えている。「まっすぐ PhD 課程に進んでいたら、研究室の中では素晴らしいと思っていたものが、現場ではつまらないもののように見えてしまったかもしれませんから」。 ■

（翻訳：三枝小夜子）

Alison McCook は、米国ペンシルベニア州フィラデルフィアのフリーライター。

NEW FROM NATURE PUBLISHING GROUP :

2011 年 6 月創刊！

オープンアクセスジャーナル

SCIENTIFIC REPORTS

皆様からの論文を募集しています。

創刊記念 掲載料特別価格

Article Processing Charge

20%OFF!

2011 年 12 月 31 日まで

www.naturejpn.com/srep

npg nature asia-pacific

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

震災前の仙台市荒浜地区。のどかな田園風景が広がる地域だった。

写真：Google/DigitalGlobe/dapd/AP/アフロ

地震学、再建への道

Rebuilding Seismology

2011年5月12日号　Vol. 473 (146-148)

東日本大震災から約3か月半。5人の日本人地震学者が、今回の地震と津波から得た教訓について考察する。

すべてのデータを考え合わせる

鷺谷 威（さぎや たけし）
名古屋大学

残念ながら日本政府は、このようなマグニチュード9クラスの地震が東北地方を襲う危険を予知することができなかった。だが、もし歴史的記録がもっとよくそろっていたなら、また、データ間の矛盾を見逃さなかったなら、大震災の危険性を十分警戒することができたかもしれない。

政府の地震調査研究推進本部が2002年に発表した、東北地方で沈み込み帯地震が発生する可能性に関する長期評価によれば、東北地方で30年以内にマグニチュード7.7～8.2の大地震が発生する確率は80～90%と推定されていた。しかし、400～500kmの範囲に影響を及ぼすマグニチュード9クラスの巨大地震が発生する可能性については、特に言及はなかった。長期評価部会のメンバーとして、私自身、このことを非常に遺憾に思っている。そこで今回、こうした危険性を見落としてしまった原因を考察したいと思う。

2002年の長期評価は、過去400年分のすべての歴史的地震記録の統計解析に基づいて行われた。しかし、3月に東北地方を襲った地震は、地震活動の適切な評価には400年という期間は短すぎることを露呈した。実は、日本の地質調査所の地質学者たちは、5年前から、西暦869年（貞観（じょうがん）11年）に仙台の沿岸部を水浸しにした津波についての研究報告を行ってきた。それは、今回の津波に匹敵する規模のものだったと思われる。しかし、こうした研究は最近のもので、まだ、予想される津波の規模を評価して対策を検討しようかという段階にあり、今回の震災には間に合わなかった。

われわれは、今回の経験から1つの重要な教訓を得た。それは、経験的手法により自然災害を評価したり予測したりする際には、かなり不確実な記録も含めて、利用可能な情報のすべてを考慮すべきであり、また確率に関係なく、あらゆる可能性を考慮しなければならないということである。

2002年の長期評価のもう1つの問題点は、検討対象のさまざまな観測データの間に明白な矛盾があることだった。過去10年間に行われたGPS（全地球測位

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

震災後の荒浜地区。津波に家々が流され、泥をかぶった茶色の土地になってしまった。

システム）調査は、日本海溝に沿ったプレート境界がほぼ完全に固着して、すべっていないことを示唆していた[1,2]。しかし、何年も前から日本海溝では、プレート運動に占める大地震の際の累積的なすべり量の割合（サイスミック・カップリング係数）が約30%にしかならないことがわかっていた。つまり、プレート運動の残りの70%がどうなっているのかについては、説明がつかなかったのだ。

われわれ日本の地震学者たちはこの矛盾に気付いていたが、これほど破滅的な意味を持つとは深刻に考えてはいなかった。2001年、京都大学の川崎一朗（かわさきいちろう）は、日本海溝の北部については、プレート運動のかなりの部分が「余効すべり」、すなわち、大地震が終わってから発生するすべりや、その他の非地震性の断層運動により説明できると発表した[3]。しかしながら、今回のマグニチュード9.0の地震の主な震源となった南部における矛盾は残った。

今回、得られた第二の教訓は、こうした矛盾するデータを見過ごしてはならず、観測データからの情報を、異なる時間・空間スケールに結びつけて検討するよう努めなければならないということだ。

地球科学は多くの分野にわたっている。日本の地震学コミュニティーは、地震学、測地学、地形学、地質学データのすべてを再検討して、現在の評価に欠けている情報を見つけ出し、矛盾があれば解消する必要があるのだ。

想定外の事態に備える

金森博雄（かなもりひろお）
カリフォルニア工科大学パサデナ校

3月に東北地方で発生した巨大地震には、世界中のほとんどの地震学者が驚いた。われわれが知るかぎり、この領域でマグニチュード8.5以上の地震が発生したことはなかったからだ。地震発生以来、地震データ、GPSデータ、津波データの解析が広範囲にわたって進められ、日本海溝から150km以内の比較的狭い領域内で異常に大きなひずみと応力が解放されたことが明らかになっている（18ページ図参照）。解放されたひずみの量は、これまでにわかっているほかの巨大地震に比べて1桁近くも大きい。この領域では、1年につき約9cmの速度でプレート収束が起きており、ひずみは1000年近く蓄積していたと考えられている。そしてついに応力が岩盤の強度を局所的に上回り、岩盤が破壊されて、マグニチュード9.0の地震を引き起こしたのだ。

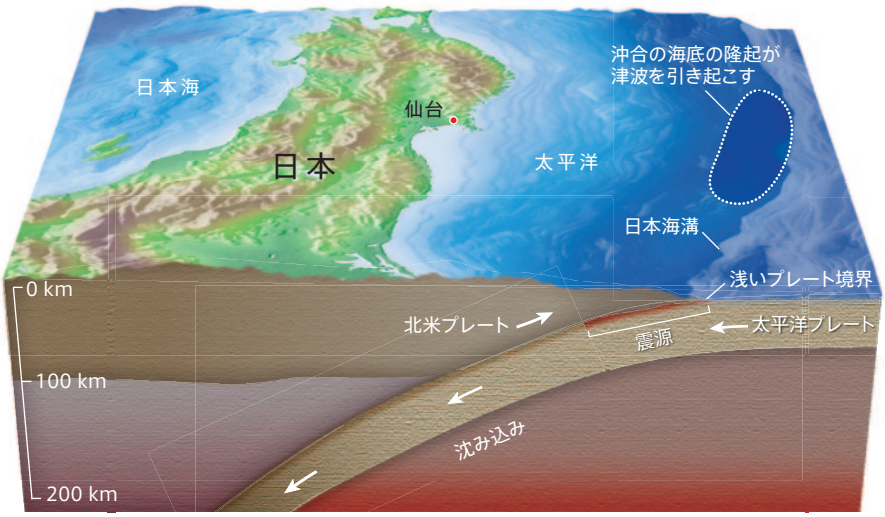
日本列島にはGPS観測網が張り巡らされている。にもかかわらず、この領域に蓄積していた巨大なひずみが検出されることはなかった。それは、この領域が沖合200kmのところにあったからである。われわれはこれまで、浅いプレート境界に蓄積できるひずみの量を過小評価していた。だが実際には、その5～10倍のひずみが蓄積していたのであり、浅いプレート境界にもこれだけ大きなひずみが蓄積できるという重要な事実を認識させられた（18ページ図参照）。

マグニチュード9クラスの地震を引き起こすほど大きなひずみの蓄積をモニターするためには、究極的には、海底GPS技術の開発を促進し、巨大なひずみを蓄積して地震を引き起こす異常な構造（例えば、なめらかでないプレート境界面）を検出するなどの研究に力を入れることが重要である。

だが、たとえ巨大地震が発生する仕組みを理解できたとしても、さまざまなデータを考え合わせて正確に解析しなければならない過程を考慮すると、いつ、どの程度の規模の地震が発生するかを確実に予知することは不可能だろう。巨大

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

日本海溝に蓄積するひずみ



日本海溝は、太平洋プレートが北米プレートに衝突してその下に沈み込む場所であり、ここにひずみが蓄積する。

地震は非常にまれにしか発生しないかもしれないが、ひとたび発生すれば、極めて重大な結果を引き起こす。ゆえに、われわれは想定外の事態に備えるために最善を尽くさなければならない。最も重要なのは、強固なインフラ作りだ。とはいえ、今ある技術でできることには限りがあり、利便性と危険性の妥協点をしっかりと探る必要がある。

海底観察を強化

八木勇治（やぎゆうじ）
筑波大学

太平洋プレートが日本列島の下に沈み込むプロセスは、なめらかに起こるわけではない。沈み込む海洋プレートの一部の場所では、その上にある大陸プレートに固着してすべりが止まっている。こうした箇所ではひずみが蓄積し、やがてひずみは大きなプレート間地震によって解放されて、再びプレートがすべり始める。3月に東北地方で発生した地震は、巨大な「すべり欠損」を解放した。この「すべり欠損」については、1996年に東京大学の池田安隆（いけだやすたか）が地殻変形の地質学的速度と測地学的速度の矛盾から予想しており[4]、少なくとも2004年[1]には、もしかすると2000年という早い時期[5]に、GPS観測網により明らかになっていた。

プレートどうしが固着している領域（アスペリティー）の分布は、通常、地震イベントのデータの分析から推測される。この「固有地震モデル」に基づいて、地震調査研究推進本部をはじめとする政府関係機関は、将来、地震が発生しそうな地域を予測している。日本の地震学者の大半は、アスペリティー以外の領域では非地震性のすべりによってひずみが解放されるため、長い間地震が発生しないと考えてきた。しかしながら今回の地震で、この仮定を再検討する必要が出てきた。

巨大地震の発生は、アスペリティーがあると思われる複数の場所でひずみが同時に解放されたことだけが原因ではない。これまで、地殻の変形やGPS観測から示唆されるひずみの蓄積は、データの分解能が低いため、政府の震災評価では適切に検討されてこなかった。これを考慮しない場合、推定される「すべり欠損」の合計は小さくなる。多くの地震学者が、東北地方で巨大地震が発生する危険性を認識できなかったのは、そのためだ。

ただし、巨大地震のサイクルは長く、地震発生の時空間パターンに関する正確な情報を得ることは不可能である。そのため、近年の地震活動のデータだけで、将来、巨大地震が発生する確率を見積もることはできない。巨大地震は、沈み込み帯で非常に長い年月をかけて進行する変形プロセスを反映した、例外的な事象なのだ。したがって、巨大地震の発生を総合的に理解するためには、地殻の変形に関する測地学的、地質学的、地形学的情報も考慮しなければならない。

一般に、長期的な地震活動を予知するためには、観測されたデータから弾性的および非弾性的なひずみに関する情報を取り出す方法の開発が必要である。取り急ぎすべきことは、海底の観察を強化して、プレート境界に沿った「すべり欠損」の分布を高い分解能で見積もれるようにすることであろう。

警報システムのさらなる改良

山田真澄（やまだますみ）
京都大学防災研究所

気象庁は、リアルタイムで地震と津波の警報を出すための、世界でも最先端のシステムを持っている。2007年に導入された緊急地震速報は、地震発生後、数秒以内に強い揺れを警告するシステムで、携帯電話、テレビ、ラジオ、市町村の防災無線を通じて、これまでに10回以上、強い地震の警報を出してきた。しかし、このシステムにはまだ改良の余地があり、今回の地震でその問題点が明らかになった。

2011年3月11日、警報システムは東北地方の太平洋沖で地震を検知し、震源に最も近い観測点に最初のP波が到達した8秒後に、震央に近い地域の住民に警報を発した。警報を受けて、当時、この地域を走っていた27本の新幹線は緊急停止し、脱線せずに済んだ。3分後には、岩手県、宮城県、福島県に大

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

津波警報が発せられ、15～20分後には、最も近い沿岸部に津波が到達した。

だが、警報システムは全体として十分に機能したとはいえない。今回の地震では、システムは地面の揺れと津波の高さを過小評価し（編集部註：当初、マグニチュードは7.9、津波の高さは岩手県と福島県で3m、宮城県で6mと予想）、関東地方には警報を出さなかった。ところが、関東でも強い揺れに見舞われ、大きな被害を受けた。なぜ、予想できなかったのか？　原因は主に、岩盤の破壊プロセスが複雑で、最初の振幅が比較的小さかったことによる。ただし、震災後、より多くの情報が利用可能になるにつれ、システムは改良されつつある。

余震に関しては、強い揺れに対する緊急地震速報が70回以上発表されている。警報システムは、こうした小規模な地震についてはよく機能しているが、同時に発生した地震によって混乱し、揺れを感じる地点の特定において何度かエラーを起こした。

今回は、地震発生時の地震データに予想外の特性があり、緊急地震速報システムのアルゴリズムが欺かれてしまった。しかし、技術の改良により大きな地震を速やかに認識できるようになれば、次に大地震が起こったときには（例えば、西日本の広い範囲で被害が予想されている南海地震の際には）、システムは適切に機能できるかもしれない。日本の緊急地震速報システムは、こうした情報を受け止め、正しく解釈できる社会においては、被害を軽減する真に効果的な手段になるはずだ。

写真：AP/アフロ

東京駅で足止めを食らい、テレビのニュースを見る大勢の人々
3月11日の地震は、関東地方でも大きな揺れを観測し、交通機関が長時間にわたりマヒした。

より大きな揺れに耐えられるビルの設計

Jim Mori
京都大学防災研究所

日本の地震学者たちは、東日本大震災の不意打ちを食らい、驚愕（きょうがく）し、そして落胆した。日本の沈み込み帯に沿ったプレート境界地震の発生箇所と規模を大まかに予知できると考えていたからだ。今回の地震により、過去約400年分の歴史的地震記録は、地震活動が非常にさかんな地域でも、巨大地震の発生時期の指針とするには短すぎることが判明した。われわれは、地質学データを再検討して、今回の地震に匹敵するマグニチュードの地震を見つけ出さなければならない。

地震学では一般に、将来地震が発生する確率は、主として断層で繰り返し発生する地震イベントの統計に基づいて予測する。

けれども今回の地震は、まれにしか発生しない巨大地震が、小規模な地震イベントと同じ断層帯で起こりうることを示しており、過去の地震イベントの統計から得られる情報だけでは不十分なことを語っている。巨大地震についてより深く理解するには、まず、断層付近の局所的な応力の蓄積を測定し、地震が発生するときの絶対応力と絶対ひずみのレベルを見積もることである。

例えば、応力はボーリング孔の中で直接測定することができるし、摩擦の強さは大地震後の温度測定から推測できる。さらに、広域応力場の向きは、GPSアレイが記録する地面の変位のパターンから決定することができる。

こうした技術を用いれば、断層がどの程度破壊に近づいているかを特定し、地震の危険をより直接的に見極められるようになるかもしれない。間近に迫った地震の規模を特定するのは困難だろうが、最大でどの程度の規模になるかは、応力の測定値から推測できるかもしれない。現在、3月の地震の前に東日本がどのような圧力を受け、ひずみを生じていたのかを明らかにしようと、この地域の広域変形の調査が進められている。

さらに、巨大地震による強い揺れの評価は、地震に対する世界の安全基準の確立にも非常に重要な問題である。過去の地震による揺れの正確な長期記録は存在しないが、この数十年間の測定技術の向上により、予測される揺れの激しさはだんだん大きくなってきている。われわれがすでに最悪の事態を経験したとは考えにくい。防災計画においては、より大きな揺れ、特に、数秒周期の長周期震動の可能性を考慮しなければならない。現代の都市で高層建築を安全に設計するためには、こうした情報が必要である。■

（翻訳：三枝小夜子）

1. Nishimura, T. *et al.* Geophys. *J. Int.* **157**, 901-916 (2004).
2. Hashimoto, C., Noda, A., Sagiya, T. & Matsu'ura, M. *Nature Geosci.* **2**, 141-144 (2009).
3. Kawasaki, I., Asai, Y. & Tamura, Y. *Tectonophysics* **330**, 267-283 (2001).
4. Ikeda, Y. Active *Fault Res.* **15**, 93-99 (1996).
5. Nishimura, T. *Spatiotemporal Change of Interplate Coupling in Northeastern Japan Inferred from GPS Data* [in Japanese]. PhD thesis, Tohoku Univ. (2000); available at http://go.nature.com/7ikqir

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

オープンイノベーションに突き進む製薬業界

Traditional drug-discovery model ripe for reform

Daniel Cressey 2011年3月3日号 Vol. 471 (17-18)
www.nature.com/news/2011/110302/full/471017a.html

研究開発をすべて自前で進める旧来モデルを捨て、
製薬業界はオープンイノベーションへと舵を切り始めた。
これによって学術研究機関の重要性が格段に大きくなろうとしている。

医薬品パイプラインが涸渇(こかつ)し、多くの大型薬が特許の期限切れを迎えようとしている中で、旧来の開発プロセスは高コスト・低効率すぎるという声が日増しに強まっている。

社内で何千人もの科学者を雇用して医薬品の候補をゼロから開発するのは、1000億円規模のギャンブルである。しかし、十分に利益の上がる製品がそこから市場に送り出されていない。製薬政策研究グループ「イノシンク」(米国インディアナ州インディアナポリス)を創設したBernard Munosをはじめ、多くの人々は、今後3年間で医薬品探索の旧式モデルは急激に崩壊するだろう、と予想する。

では、次に何が現れるのだろうか。それが「縮小」であることはほぼ間違いない。ファイザー社は2011年2月初め、「英国サンドウィッチの研究施設を早急に閉鎖して、2012年の研究開発予算を約15億ドル(1200億円)削減する」と衝撃的な発表を行った(*Nature* 2011年2月10日号154ページを参照)。それにとどまらず、従来の労働力の配分も見直す必要に迫られるだろう。

コストに敏感な製薬企業は、第I相安全性(フェーズ1)試験といった初期段階については、学術研究機関や専門化した小企業への外注化を進めるべきだ、という声に耳を傾けている。それにより、製薬企業は、大規模な臨床試験を実施して医薬品を売り出す、という自らの強みに特化できるはずだからだ。

業界、学界、資金拠出機関の有力者が40人ほど参加してカナダのトロントで2月16日に開かれた会議では、そうしたモデルの1つがテーマとなった。この会議の主催者の1人であり、オックスフォード大学(英国)の構造ゲノミクスコンソーシアムを率いるChas Bountraは、現在のシステムの大きな問題として、企業が同時並行的に類似または同一の標的分子に取り組む傾向があり、その物質は他社がすでに試験して見限ったものであることを知らずにいることが多い、と説く。「われわれがしようとしているのは、その重複を減らすことなのです」とBountraは語る。

その枠組みには、希少疾患の治療に携わる人が編み出した極めて協調的な方法を採り入れている。すなわち、そこでは知的財産(IP)の制約が棚上げされているのだ。初期臨床試験で薬剤の安全性と潜在的有効性が示されて初めて、企業が競争を開始することになっている。つまり、その時点までは、薬剤の候補物質に関するすべてのデータは広く公開される。Bountraによれば、こうすると標的物質の検証がはるかに迅速に進められ、コストも大幅に削減される可能性があるという。また、すでに無効であることがわかっている分子を患者に投与することも避けられる理屈だ。

このようなモデルは、学術研究者に大きく依存することになる。費用は毎年約3億2500万ドル(260億円)かかるが、そこは世界的なイニシアチブが支援する。その半分は製薬産業が負担し、残りは公的資金と寄付金だ。医薬品候補物質にゴーサインが出れば、イニシアチブの企業スポンサーが買い取って、市場に投入できるようになる。

非営利研究法人セージ・バイオネットワークス(米国ワシントン州シアトル)の代表でこの会議の幹事を務めたStephen Friendによれば、すでに医薬品業界は、希少疾患のような商業的関心の低いテーマであれば、これが有効な解決法になると確信しているらしい。トロントでの提案の重要なポイントは、それが「商業的に重要な領域であっても、投資に対するリターンを改善する有効な方法になるかもしれない」というところなのだ。

Bountraは約2か月かけて交渉を完了させ、業界のパートナー2者、公的資金のパートナー2者、それに学術研究のパートナー2者との合意を得たいと考えている。巨大な製薬企業すべてが代表者を送り込んだトロント会議の反応は、出席者によれば、すべての方面で極めて前向きなものだったという。「議論すればするほど、これが前進のための唯一の方法だという確信が深まりました」とBountraは語る。4月中旬にサンフランシスコで第2回の会議が開かれ、計画の具体化が話し合われる予定だ。

一方で、政府の研究資金拠出機関も類似のイニシアチブを試みている。英国医学研究会議(MRC)は、基礎科学から薬剤や医療装置を開発することを支援する「開発パス助成計画」を設立した。また米国立衛生研究所(NIH;メリーランド州ベセズダ)の所長Francis Collinsは、基礎科学をより医療市場へと押し出すべく、「国立トランスレーショナル(臨床橋渡し科学)推進センター」を提唱している。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

生物医学研究への資金提供機関である英国のウェルカム・トラスト財団で技術移転の責任者を務めるTed Biancoは、医薬品探索の初期段階を学術研究機関へ移転することにより、製薬企業の抱える問題の一部が解決されることを認める。同トラストの医薬品探索育成イニシアチブは、すでに、薬剤候補物質の最適化やその臨床試験開始を手がける研究者に対して資金を提供している。一方でBiancoは、Bountraのイニシアチブに参加している製薬企業は金銭的なリターンを期待していると指摘する。「大きな投資が必要で、誰かのお金でそれをしなければならないことが、悩ましいのです」。

バイオ企業のシンタクシン社（英国オックスフォード）の最高経営責任者でトロントの会議に出席したMelanie Leeによれば、BountraのIPフリーモデルでは、協力する大学がスピンアウト企業から収益を得る機会を奪う可能性もあるという。それについてBountraは、医薬品探索に参入して医薬品を開発しようとする学術研究機関が知的財産権（IP）を得ようとする意思をくじくものではないと考えている。

しかし、製薬企業のグラクソ・スミスクライン社（英国ロンドン）で医薬品の開発と探索を担当する上級副社長Patrick Vallanceは、IPがBountraのモデルで最も議論のある部分だと考えている。「臨床での実験が済むまでは、軌道に乗っているかどうかは本当のところはわからないので、早期に発表すべきだという考え方は全くそのとおりだと思います」が、「その流れの中のどこでIPを確保しなければならないのかを見定めるのは極めて複雑で、それは分子によって違うと思います」とVallanceは語る。

しかし、同社はオープンイノベーションの実験を進めており、昨年は1万3000を超える潜在的な抗マラリア薬の構造を公開し、学術研究機関による有望なリード化合物の同定を促した。「このモデルを強く推進したいと思うのは、もしマラリアでうまくいけば、ほかのケースでも進められるからです」とVallanceは語る。

Vallanceは、学術研究機関と新たな協力体制を構築中だと明かす。同社は2011年3月、ロンドン大学ユニバーシティカレッジ医学系大学院で医学部長を務めるMark Pepysと共同で、タンパク質障害の一種、アミロイドーシスの医薬品候補を開発すると発表した。Vallanceによれば、この発想は、単に有望な分子を買い上げるだけでなく、医薬品開発の全過程にわたる長期的な提携関係を構築することなのだという。

こうしたモデルはいずれも、学術研究機関を医薬品探索の中心に据えるものである。しかし、インペリアル・カレッジ・ロンドンの医薬品探索研究ユニットを率いるCathy Tralau-Stewartは、政府、慈善団体、産業界からさらに多くの資金が学術研究機関の研究施設に流入しなければ、それは破綻する、と話す。「学術研究機関による医薬品探索は広がりつつあり、その重要性も非常に大きくなっています。しかし、資金の問題を解決しなければ、製薬企業が革新的医薬品のパイプラインを10年で得ることはできないでしょう」とTralau-Stewartは語った。■

（翻訳：小林盛方）

エール大学の実験室で学生死亡事故

A death in the lab

Richard Van Noorden 2011年4月21日号 Vol. 472 (271)
www.nature.com/news/2011/110418/full/472270a.html

名門エール大学の機械工作室で、痛ましい学生の死亡事故が起こった。これを契機に、安全対策を強化するよう大学への圧力が増しているが、反応はかんばしくない。

4月13日未明、エール大学（米国コネチカット州ニューヘイヴン）のスターリング化学研究所に所属する学部生数人が、機械工作室でショッキングな光景を目撃した。同じ学部生Michele Dufault（22歳）の髪が旋盤に絡みつき、そこに横たわっていたのだ。死因は窒息死とされ、Richard Levin学長は「正真正銘の悲劇」と述べた。

事故の数日後、連邦政府の安全衛生担当官が調査を始めた。細かな情報が不足しているものの、Dufaultが旋盤の取り扱いに不慣れだったという事情はなかったことが判明している。物理学を専攻する学友のJoe O'Rourkeによれば、彼女は研修を受けており、何度も安全に旋盤を操作していた。しかし、当日の彼女は、夜遅くまで実習を行っており、おそらく1人で作業していたと思われる（エール大学側は、この推論を積極的には確認していない）。機械工作室ではこうした状況は珍しくない、とO'Rourkeは話す。

事故の報を受けて、米国全土の研究所長や安全管理者は、直ちに、機械工作室での作業手順に関する方針の再点検に着手した。その過程で、今まで表立ってこなかった重要な懸念が浮かび上がった。それは、研究の自由と安全な作業環境との間に絶えず存在する緊張関係だ。2年半ほど前も、別の大学の実験室で死亡事故が起こり、注目を集めた。今回と似た反省が行われたのだが、改革は遅々として進んでおらず、その裏側にも、今回と同じ緊張関係が存在している。

2008年も押し詰まった12月29日、研究助手Sheharbano Sangji（23歳）

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

は、カリフォルニア大学ロサンゼルス校（UCLA；米国）の実験室で発火事故に遭った。ひどいやけどを負い、それがもとで18日後に死亡した。Sangjiの死は、Dufaultの場合と事情が大きく異なっていたが、同大学には連邦法に基づいて罰金が科せられ、学内での安全対策が大幅に強化された。UCLAは、2011年3月30日に安全に関する新しい取り組みを発表し、「実験室安全センター」も新設した。この機関は、米国で初めて安全対策の有効性を測定し、安全への取り組み方を改善するものと呼び声が高い。このように、Sangjiの事故は、米国全土で安全基準の向上を求める動きの象徴となった。

しかし安全衛生の専門家によれば、これほどの注目を集めたにもかかわらず、実験科学者やラボヘッドの行動や姿勢には、さほどの変化は見られないという。彼らこそ、安全風土を向上させる上で最も良い位置にいるはずなのに、である。UCLAのJames Gibson環境衛生安全部長は、研究代表者の態度を変えさせるのは非常に難しい、と打ち明ける。米国には、単独で作業を行い、適切な監督を受けず、適切な保護具も用いない研究者が非常に多いのだ。「安全よりも学問の自由を優先させる場合の方が多いのです」とLaboratory Safety Institute（米国マサチューセッツ州ナティック）のJim Kaufman所長は話している。

化学実験室に集まる注目

以上の懸念はすべての学問分野にいえる話だが、化学実験室での事故については、近年、非常に厳しく精査されている。Sangjiの死から1年後、テキサス工科大学（米国テキサス州ラボック）で化学専攻の大学院生Preston Brownが、危険度の高い実験で左手の3本の指を失った。推奨量の100倍のニッケルヒドラジン過塩素酸塩の塊を粉砕していたところ、突然爆発したのだった。

この事故では、通常は精油所の爆発など大規模な産業事故を調査している化学物質安全性調査委員会（CSB）が乗り出すという異例の展開となった。CSBは、史上初めて、大学実験室の安全性審査を行うことを表明したのだ。CSBのRafael Moure-Eraso委員長は、2010年8月にマサチューセッツ州ボストンで開催された米国化学会の会議で、CSBが、2001年以降の約120大学の化学実験室における事故に関するマスコミ報道を収集し、「米国の大学における安全対策には、大いに改善の余地がある」という結論に達したと発表した。

懸念が特に化学実験室に集まっている理由は、ほかの科学分野であれば、危険な実験手順にはもっと詳細な安全プロトコルが定められているからだ、とエール大学のPeter Reinhardt環境衛生安全部長は説明する。「放射性物質や生体材料を用いる実験は、もっと厳しく規制されています。そうした規制が大きく欠落しているのが実験室内の有害化学物質なのです」。Dufaultの事故が起こる前のインタビューで、Reinhardtは、このように*Nature*に語った。

マサチューセッツ工科大学（米国ケンブリッジ）の化学科で安全衛生委員会の委員長を務める有機化学者Rick Danheiserも同じ考えで、一部の実験室における安全基準は緩すぎると指摘する。しかし、「その一方で、非常に強力な安全管理計画を定めた化学科もあり、その両極端の間に、さまざまな程度の安全基準を定めた研究室が存在しているのです」と話している。

コンサルタント会社Advanced Chemical Safety（米国カリフォルニア州サンディエゴ）のNeal Langerman社長は、この問題をもっと深刻にとらえている。彼は、2009年に*Journal of Chemical Health and Safety*に掲載された意見記事の中で、「ほとんどの大学の実験室は、実習や研究の場としては安全でない、という結論に達した」と述べている。今、彼は、最近の複数の事故にもかかわらず、安全に対する化学者の姿勢に有意な変化が見られないと話す。

米国では1970年代に多くの労働衛生関連法規が定められ、また連邦政府の新しい監視機関「職業安全衛生管理局（OSHA）」が設置されて、研究者はそれまでより格段に安全な環境で研究が進められるようになった。1991年には、OSHAが各化学実験室における「化学衛生計画」の策定、すなわち安全プロトコルと緊急時対応手順を詳しく定めたハ

THE YALE DAILY NEWS

エール大学の学部生Michele Dufaultの通夜に集まった学友たち

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

ンドブックの作成を推奨する規則を定めたことで、安全度はさらにアップした。ただし、こうした規則の遵守を強制する検査は、まれにしか行われていない。

労働統計局によると、科学研究開発業務における記録可能な事故発生率は、2003年には常勤従業員100人当たり2.1人だったのが、2009年には1.2人に減った。しかし、政府は、大学実験室に絞って、重大事故やヒヤリハット事例の追跡調査を行っていない。「特に裏付けはないのですが、大学実験室の方が産業界よりも事故の発生頻度が高く、重大事故の発生頻度も高いとほとんどの人が考えています」。こう説明するのは、全米アカデミー化学技術委員会のDorothy Zolandz部長だ。

産業界には権力の階層が明確に存在し、経験不足の学生は少なく、経営部門に対する説明責任を負っているため、産業界の方が、学界よりも高い安全基準を維持しやすい立場にある。このことは多くの研究者によって指摘されている。学界と産業界で最も異なっているのは、単独で作業するかどうかだ。昨年、米国化学会が実施したアンケート調査によれば、実験室で単独で作業することが多い、あるいは時々単独で作業すると回答した割合は、教員で70.5%、大学院生で52.1%だった。産業界ではこうした単独作業は禁じられている。

実験室の安全性は、定期的な検査以外の要素にはるかに大きく依存していることが、安全管理者と経験豊富な化学者によって指摘されている。重要なのは、グループの研究リーダーが実験室内で科学研究を行う者全員に対して、その安全に明確な責任を負うことであり、研究者が本能的に安全を第一と考える風土を築きあげることだ、とインペリアル・カレッジ・ロンドンのTom Weltonは語る。

2010年11月には、実験室の安全性に関する米国学術研究会議が開催されたが、そこで示された証拠は、Weltonの指摘を裏付けている。世界有数の化学品メーカーArkema社（本社フランス・コロンブ）の労働安全部のマネジャーRon Zanoniは、2004年の調査によって、同社の米国内の事業所でのけがの発生率が年間0.8～7.8件の範囲内にあったことを明らかにした。この発生率の差は、それぞれの事業所における作業上の関係とトップダウンによる経営者の関与とよく相関していた、とZanoniは説明した。また、成績不良の実験室で安全確保のためのリーダーシップを改善したところ、2007年までにけがの発生率が減った。

大学自らが安全への見方を変えるべき

UCLAでの事故で明らかになったように、キャンパス内では死者が出ても、研究者の物の見方を変えるのは難しい。この2年間にUCLAでは、実験室の安全に関する規則が強化され、研修と検査を充実させた。しかし、新設された実験室安全センターの理事会メンバーの1人であるNancy Wayne教授（生理学）は、「UCLAの研究者は、管理体制の強化を必ずしも評価しているわけではありません。環境検査担当者のことを安全水準の向上を目指すパートナーではなく、『警察』ととらえていることがあるのです」と説明する。また、Gibsonは「風土を変えるのは、本当に長期的な課題になると思います」と話している。難燃性の実験用白衣の必要性に疑問を挟む教授さえいる、とGibsonは嘆く。Sangjiの事故における状況を考えれば、実に皮肉なことだ。

事故当時、Sangjiは、反応しやすいt-ブチルリチウムをボトルから注射器で吸い出そうとしており、t-ブチルリチウムが突然発火して、Sangjiの衣服に引火した。その時、彼女は実験用白衣を着ていなかったのだ。その後、労働安全衛生局のカリフォルニア支部は、UCLAに安全基準違反があったとして、約7万ドル（約560万円）の罰金を科した。Sangjiの上司だったPatrick Harranは、*Nature*のインタビュー要請に応じていない。ロサンゼルスの地方検事は、現在もSangjiの事案を検討中で、HarranやUCLAを起訴するかどうかは決まっていない。もし起訴されて有罪判決が下れば、「直ちに規則が塗り替わります。誰かに大けがを負わせれば、重罪で起訴される可能性が生じるのです」とLangermanは話す。

英国では、起訴される可能性が、変化をもたらす強力な誘因となった。今から約25年前にサセックス大学（英国ブライトン）の化学実験室で爆発が起こり、金属片が学生の腹部に命中した。この学生は、のちに回復したが、英国政府の安全衛生局が、サセックス大学に過失があったとして、同大学を告訴した。この事故が、英国での安全基準に大きな影響を与えた、とWeltonは説明する。今日では、英国の研究者は、それぞれの実験を行う前にリスク評価書を作成しなければならない。これは、米国では義務づけられていない。

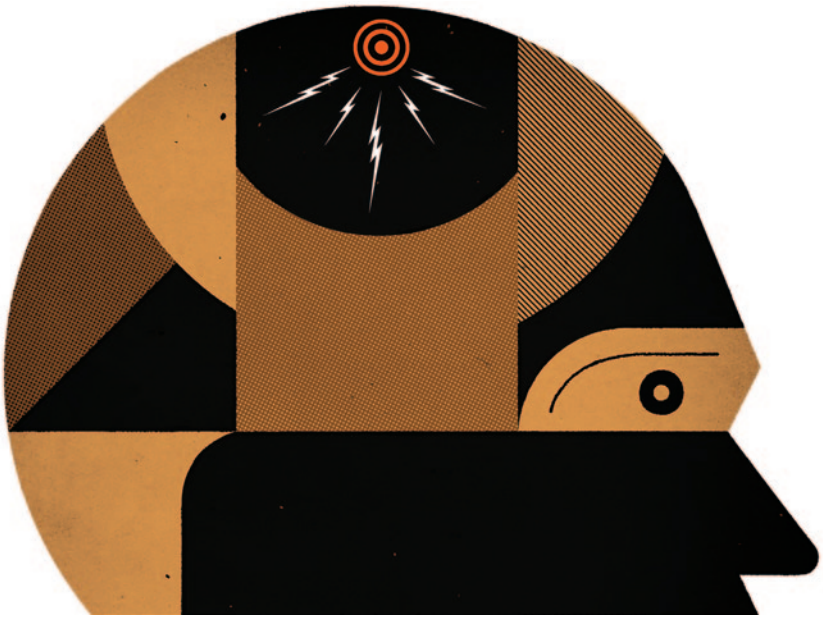
「やや公正さに欠けると思われても、教授を1人処罰すれば、本当に学界全体を変えることができると私は思います」。こう語るのは、米国の産業界の合成有機化学者で、化学物質の安全性に関するブログを主宰するChemjobberという名のブロガーだ。これに対しては、研究助成機関も何らかの役割を果たしうる。例えば、CSBは、研究助成金交付申請において、特定の安全研修の受講を要件とするような勧告を検討している。

「長期的にみれば、こうしたCSBの勧告、OSHAが新たに制定する可能性のある実験室基準や米国化学会からの情報提供が、規制環境を変えていくと考えられます」とLangermanは言う。しかし、科学者は、こうした変化を待たずに、自ら安全に関する取り組みを行うべきだと彼は付け加える。

「学術機関の研究者には、企業の研究者に認められていない独自の自由があります。学術機関の研究者は、この独自の自由を維持するために行動する『独自の責任』を負っているのです」。■

（翻訳：菊川 要）

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved



脳を電撃！

Brain Buzz

Douglas Fox 2011年4月14日号 Vol. 472 (156–158)

数十年前に開発された脳を電気刺激する手法で、学習能力を向上させられることが明らかになった。
果たして、数本の配線コードと9Vの電池でできるこの手法に、どんな可能性があるのだろうか？

2010年、米国ニューメキシコ州アルバカーキの研究室で、ある実験が行われた。被験者たちに、イラク配属の米軍兵士を訓練するために設計された『DARWARS Ambush!』というテレビゲームをプレイしてもらう実験である。『DARWARS Ambush!』は、廃屋や乗り捨てられた車が散在する仮想の景色の中から、屋上の狙撃手の人影やゴミ箱の裏の爆発物といった危険を察知するゲームだ。被験者は右こめかみに、弱い電気刺激を与えるための湿ったスポンジを貼られる。しかし、そんなことを気にしている余裕はない。爆発音や銃声がするまでのわずか数秒間に反応しなくてはならないのだ。こめかみに流れる電流は最大でも数mA、装置は9Vの電池を電源にした単純なものである。

一見、自宅ガレージで行う怪しい実験とそう変わらないように思える。だが、実験を行ったニューメキシコ大学の神経科学者Vincent Clarkは、この経頭蓋直流電気刺激（tDCS）と呼ばれる手法で、学習能力を向上させることが可能だと言う。米国防総省高等研究計画局は、戦場にいる兵士の思考を鋭敏にするのに使えるのではないかという期待から、tDCS研究に資金を提供した。どうやら、この手法は単純だが効果があるようだ。

実験では、頭皮に2mAの電流を流された被験者と0.1mAの電流を流された被験者に、少し練習をした後にゲームをプレイしてもらった。すると、2mAの刺激を受けた被験者の成績が、0.1mA刺激の被験者の2倍も高くなった[1]。「2mAのグループは習得が速いのです。でも、本人たちはその原因を直観的に感じたり自覚したりはしていません」とClarkは話す。

tDCSは、2世紀以上も前に行われた研究が起源だが、現在ちょっとしたリバイバルブームになっている。Clarkたちは、tDCSは、学習と認知、それぞれの仕組みを分けて調べる手段の1つになるとみている。現在の手法は改良が重ねられ、スイッチを切り替えることで脳のさまざまな領域の活動を高めたり弱めたりでき、行動面で何が起こるかを観察で

ILLUSTRATIONS BY JESSE LEFKOWITZ

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

きるようになっている。「この研究領域はじきに爆発的に広がり、ありとあらゆる情報がもたらされ、新たな疑問がわいてくるでしょう」と Clark は言う。

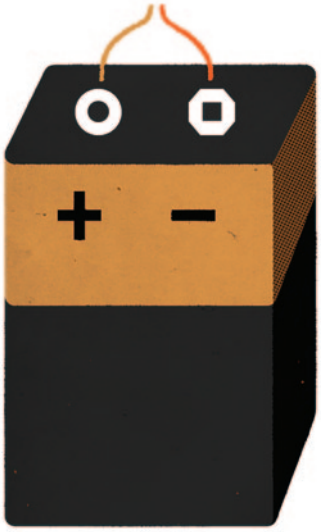
さらに、うつ病や脳卒中など神経疾患の治療でも、強力な磁気や外科的に埋め込んだ電極などで脳活動を刺激する療法に加えて、tDCS も使われようとしている。しかし、tDCS の装置は簡単に作製できるので、例えば学習や認知能力を向上させるために、素人でも健全な頭脳をいじくり回せてしまい、倫理的に非常に重要な問題になるだろう。「実験で見られる効果は、現実世界に間違いなく影響を及ぼすだろうと思えるくらい絶大なのです」と、ペンシルベニア大学（米国フィラデルフィア）の脳神経倫理学者 Martha Farah は話す。

ここまでたどりつくのは容易ではなかった。直流電気による脳刺激は、とっぴな思いつきや絶対に再現不可能な古くからの「怪しい研究」の歴史の中から生まれてきた。そして、まだ実証すべき問題が多いというのが大方の見方である。

1800 年頃に初めて、イタリアの科学者 Jean Aldini が直流電気による刺激を試みた。当初は、死刑執行後まもない重大犯罪被告人の遺体を電気刺激し、動かすなどしていた。その後 Aldini は論文で、当時「メランコリー」として知られていた気分障害を持つ 2 人の知人を治したと主張した。1940 年代までに、多くのうつ病患者に対してこめかみへの電気ショック療法が施されたが、これはけいれん発作を起こすほど強いもので、「電気けいれん療法」と呼ばれた。しかし、数十年前から、電気けいれん療法の 1000 分の 1 という、もっと軽い電気ショック法で精神疾患を治療しようという考え方が漠然と生まれてきた。

弱電流による刺激法の原点

1964 年、英国チチェスターのグレイリン



グウェル病院の精神科医 Joe Redfearn は、ラットで得た有望ないくつかの結果をヒトに直接適用し、被験者の頭皮に 50 ～ 250 μA の弱い電流を流した。彼の報告によれば、電流をある向きに流すと被験者はおしゃべりになって、くすくす笑うことさえあったが、別の向きに流すと寡黙で自分の殻に閉じこもるようになってしまったという[2]。Redfearn はまた、うつ病患者 29 人にこの「くすくす笑い」療法を施し、半数の患者で症状が改善されたとも報告している[3]。しかしながら、誰も彼の実験結果を再現することができず、この手法は見捨てられてしまった。

今にして思えば、Redfearn の研究結果にケチがついたのにはいくつかの要因があったと考えられる。その 1 つは、彼が使用した電流は、現在の tDCS で使われている量の 10 分の 1 だったことだ。おそらく、患者の脳に実際にどれくらいの電流が届いているかを測る方法がなかったためだろう。しかし、それから 20 ～ 30 年のうちに、研究に必要な測定手法が編み出された。これは特に、経頭蓋磁気刺激法（TMS）で脳の活動を引き起こす研究が始まったおかげである。TMS は、頭のすぐ近くに置いた磁気コイルに数千 V の電流を流して脳内に電気的な変化を起こし、外部電極を用いてそれを高精度で測定することができる。

現在はミラノ大学（イタリア）にいる神経科学者 Alberto Priori は、1990 年代に、tDCS によって TMS の実効性が高まることを示した。Priori は、被験者の大脳運動皮質を 0.5mA の直流で 7 秒間刺激し、その後、TMS の短いバーストで同じ脳領域を刺激した。もし tDCS によってニューロンの反応性が高まるなら、TMS 刺激に反応するニューロンの数が、tDCS で刺激しない場合よりも多くなるだろうと考えたのである。実際、そのとおりだった。短い直流パルスを 1 回受けた被験者では、TMS に対する反応が大きくなったのである。しかし、1993 年に Priori がこの結果を発表したとき、ほかの研究者たちは、電気が頭蓋を通り抜けているためではないかと疑った。彼の研究結果が真実だと論文審査員が納得するのは、1998 年になってからのことである[4]。

一方で、ゲッティンゲン大学（ドイツ）の臨床神経科医 Michael Nitsche は、Priori の発表した知見に大いに興味をそそられた。彼は当時、TMS を使ってててんかんを治療する実験を行っていたが、装置は大きすぎて扱いにくいうえに高価で、しかも、脳活動に対する治療効果が短すぎた。その頃学部を卒業したばかりの Nitsche は、指導教官の Walter Paulus とともに、1 年もかけて tDCS をあれこれいじくり回していた。同僚たちは、そんな彼らの様子を見て心配した。「そいつはかなり危険だよ。さっさとやめた方がいいよ」と言われたことを Nitsche は思い出す。Nitsche の研究は、大学倫理委員会から辛うじて承認を得られたが、脳の電気ショック療法を受けてくれる被験者が足りず、自分の父親や姉妹、果ては自分自身まで実験の対象にせざるを得ないこともしばしばだった。

2000 年、Nitsche と Paulus は 1 本の論文を発表し[5]、ヒトの頭皮上に約 1mA の弱い電流を最大で 5 分間流すと、その電気刺激が切れた後の数分間、シグナルに対する運動皮質の反応性が高まる

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

ことを報告した。Priori と同様に、2 人も TMS を使ってその効果を測定した。

さらに、tDCS の作用機序の解明にも乗り出した。生理学的研究から、直流電流は脳組織内に電場を作り出し、それがニューロンの細胞膜内外の電位差を変化させることが示唆されている。彼らは、頭の電極に電子が流れ込む「陽極」刺激と、頭の電極から電子が流れ出る「陰極」刺激で実験を行った。その結果、陽極刺激では、ニューロンが数 mV 脱分極し、ほかの細胞からの信号が到着したときに発火（興奮）しやすくなるが、陰極刺激では逆にニューロンは過分極し、ほかの細胞からの信号に反応しにくくなった。

また、電流を止めた後に見られる効果は、1 時間ほど持続することもあり、第二のメカニズムで起こっていると推察された。薬理学的証拠からは、電流によって、ニューロンどうしの接続部であるシナプスで、NMDA 受容体というタンパク質の発現量が増加することが示唆されている。これによって脳組織の可塑性が高まって、一時的に湿った粘土のような状態になり、ビデオゲーム習得などの刺激に応答してシナプス接続が形成し直されやすくなるのだ。

現在、この「湿った粘土状態」を利用する方法が模索されている。2009 年には、米国立神経疾患・脳卒中研究所（メリーランド州ベセズダ）の Leonardo Cohen が、ヒトに tDCS を行うと、単純な協調運動訓練を習得する能力が向上し、実験終了後 3 か月経っても効果が見られたことを報告した [6]。そうした結果から、脳卒中のリハビリでも関心が持たれている。実際、Cohen や Nitsche をはじめ、さまざまな研究チームが小規模な臨床試験で脳卒中のリハビリに tDCS を使ったところ、手の機能が改善されたという（次ページ図参照）。

このほかにも、ベレンソン＝アレン非侵襲的脳刺激センター（米国マサチューセッツ州ボストン）の Felipe Fregni とマッケンジー大学（ブラジル・サンパウロ）の Paulo Boggio らの研究チームなどが、tDCS をうつ病治療の手段として実験中である。彼らをはじめ、いくつかの研究チームが行った小規模な臨床試験から、背外側前頭前皮質と呼ばれる脳領域に tDCS の数回の刺激を与えると、数週間にわたって気分が改善されることが示唆されている。

リスクを回避

2007 年に Boggio と Fregni は、背外側前頭前皮質に tDCS を行うと、被験者がリスクを冒さなくなる場合があることを報告した [7]。研究チームは、健康な大学生たちに、コンピューターのキーを押して画面上の風船に空気を入れるゲームをプレイしてもらった。このゲームでは、空気をたくさん入れるほど仮想の金がたくさん手に入るが、もし風船が破裂すれば、獲得した金をすべて失ってしまう。すると、tDCS を受けた被験者は、受けなかった被験者に比べてあまり欲張ろうとしなかった。この実験結果から、依存症にも適用できる可能性が考えられる。Boggio は、依存症では「抑制制御」が効かなくなっているのだと話す。Boggio は、Fregni らとともに、2008 年に 3 つの研究 [8–10] を発表し、背外側前頭前皮質を刺激した後では、酒やタバコ、甘い菓子を飲み食いしているビデオを被験者に見せても、それらを欲しがる気持ちがあまり起きないことを示した。研究チームは、最終的には禁煙の臨床試験で同じ方法を試してみたいと考えている。

tDCS は評価が定まらない手法だが、こうした研究結果から大きな期待が持てる。「はっきり言ってインチキ話もたくさんあるので、tDCS 研究はこの分野全体の信憑性（しんぴょうせい）にもかかわってきます」と、ニューヨーク市立大学（米国）の生物医学工学者 Marom Bikson は話す。このため、tDCS を最適化しようと現在行われているメカニズムの研究では、以前よりも慎重になっているという。

だが、失意の時代は過ぎ去ったと、すべての人が確信しているわけではない。エモリー大学（米国ジョージア州アトランタ）の臨床精神科医 Helen Mayberg は、電極を脳の奥深くに入れる脳深部刺激療法（DBS）を用いて、うつ病治療の実験をしたことがある。彼女は tDCS の非侵襲性については大いに歓迎しているが、これまで行われた試験が短期間のものだったことを指摘している。現実問題として、「tDCS を長期的にどのように用いるのか、またその場合、どのような反動的影響や症状のぶり返しがあるのかが問題になります」と彼女は話す。Boggio のチームはこの問題に取り組むため、最大 6 か月にわたって、うつ病患者を tDCS で治療しつつ観察するという臨床試験に着手した。

特定の脳領域を刺激

今のところ、tDCS による刺激は、TMS や DBS による刺激に比べて焦点をあまり絞り込めていない。ニューロンに対する作用も、頭皮の数 cm 下で急激に減ってしまい、医学的に重要ないくつかの標的部位までは届かない。

Bikson はこうした欠点を解消しようと考え、tDCS の改良版を設計した。これは 5 個の電極を頭に X 型の配置に置くもので、中央の 1 個は任意の方向へ電流を流し、周囲にある 4 個は、電流が脳内に広がって予定より広い範囲を活性化させないように、余分な電流を吸収する。彼によれば、この配置によって、より狭い範囲でより深い場所に、ほんの少し強い電流を流すことができるのだという。こうした技術革新は、企業からの臨床試験への資金提供を促進するかもしれない。Cohen によれば、今のところ、わずか 1000 ドル（約 8 万円）の既製の装置でできるこの治療法は、誰のものにもなっていないという。

tDCS に対しては、治療のほかに、健康な人の能力を高める効果についても関心が集まっている。前述の Clark の研究では、tDCS により隠れた危険性を見抜く能力が高められることが示されているが、このほかにも、複数の研究によって、作業記憶 [11] や言語連想 [12]、複雑な問題

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

を解くといった課題[13]の成績が、それぞれ向上することが明らかになっている。

こうした研究の大半は、科学的見地から疑問を解明しようとしたものである。ところが、ある1人の科学者は堂々と、健康な人の脳の働きを高めようとしている。シドニー大学心理研究センター(オーストラリア)の所長、Allan Snyderだ。Snyderは、「思考キャップ(thinking cap)」の開発を目指している。これはtDCS装置の一種で、企業の重役や広告コピーライターが、意見交換の会合に出向く前に使用して、自分の創造力を高めておくというものだ。Snyderは製品開発の進捗についてあまり話したがらないが、2011年2月に発表された最新の論文[14]は、かなりの注目を集めた。Snyderは、前側頭葉を刺激することで、ひらめきの能力が高まるのだと主張している。この実験は、制限時間内に、マッチ棒で表された数式の誤りをマッチ棒1本だけ動かして直すという、ひらめきを要する問題に解答してもらうもので、正解者のうち、tDCSを受けた被験者は、偽の刺激を受けた被験者の2～3倍になった。

これらの研究結果が現実世界の利益に結びつくかどうか、まだ判断は下されていない。Nitscheによれば、若く健康な人は、理論上は頭脳がすでに最適化されているので、認知機能の向上を実証することは、高齢者や依存症患者などの場合よりも難しいだろうという。「不可能だとまでは言いませんが、事はもうちょっと複雑だと思います」と話す。

だが、この実験を自宅で試してみようという人は後を絶たず、インターネット上ではすでに議論が巻き起こっている。とにかく、9Vの電池1個と数本の配線コード、抵抗器1個を購入すれば、理論上、装置を作製できるのだ。集中力を高めたいと思ってやってみた人は、体験した閃光に驚いていた。これはよく報告される副作用の1つで、電極部位の強烈な熱さやかゆみを伴う。彼はインターネット上に投稿したメッセージの中で、「たぶんもうやることはない」と書いている。また別の人は、インターネットの患者フォーラムに、自分の妻にtDCS療法を行い、慢性的な痛みを軽減できたと書き込んでいた。安全性は重要な問題の1つだ。「配線コードと電池があり、頭に電気を流してみようと考える実験オタクの暇人がいれば、そのうち誰かが痛い目をみるでしょうね」とFarahは言う。

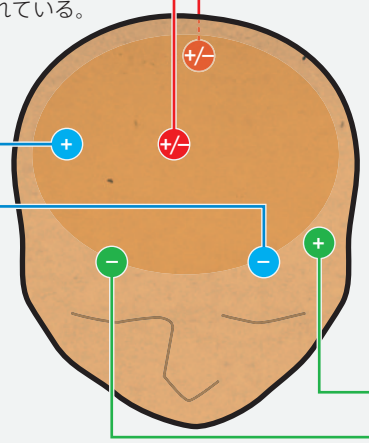
また、用途のさらなる拡大から、一部の学生が成績向上のために摂取しているアデラールやモダフィニルなど中枢刺激作用のある薬剤の問題同様、倫理面での懸念が生じている。学生たちが大学入試の成績を上げようと、入試前にtDCSでこっそり「電気的ドーピング」をする可能性があるのだ。倫理学者たちは、tDCSによって一部の人間が不当な利益を得たり、そうした装置を使わねばならないような風潮が社会に生まれたりするのではないかと危惧している。Farahによれば、これまで発表された研究の中に、試験の助けになるような「頭をさえさせる」種類のものはないが、単に適正な脳領域を標的にするかどうかの問題なのかもしれないという。もしそうした効果が実際に起こせるとしても「驚かないですね」と彼女は話す。

しかし総じて言えば、tDCSの効果を信じる人々の楽観的姿勢はまだまだ強い。期待外れの結果もあったが、現在のこの活況は当然のことだ、と多くの人が考えている。Prioriはこう語る。「医学史の流れを振り返り、1世紀ほど前の実験や研究にもう一度取り組んでみるべきでしょう。昔はなかった新しい技術や装置を使うことで、かつて誰かが失敗した実験を成功させることもできるのですから」。■

(翻訳：船田晶子)

配線のつなぎ方とその効果

経頭蓋直流電気刺激では、頭皮に付けた電極から弱い電流を流し、それが頭蓋を通り抜けて脳組織に作用する。陽極(＋)と陰極(－)の位置によって、異なる作用が表れることが報告されている。



視覚
後頭葉では陰極と陽極どちらの刺激でも、視覚の変化が見られた。最大2mAを15分間通電。

運動の制御
卒中を起こした脳の片側にある運動皮質の上を陽極で電気刺激すると、腕や手の動きに改善が見られた。最大4mAを20分間通電。

作業記憶
背外側前頭前皮質を陽極で刺激すると、作業記憶や言葉の流暢さに向上が見られた。最大2mAを20分間通電。

SOURCE: M. A. NITSCHE *ET AL. BRAIN STIM.* **1**, 206–223 (2008)

Douglas Foxは、米国カリフォルニア州北部在住のフリーランスのライター。

1. Clark, V. P. *et al. NeuroImage* advance online publication doi:10.1016/j. neuroimage.2010.11.036 (2010).
2. Lippold, O. C. J. & Redfearn, J. W. T. *Br. J. Psychiatr.* **110,** 768–772 (1964).
3. Redfearn, J. W., Lippold, O. C. & Costain, R. *Br. J. Psychiatr.* **110,** 773–785 (1964).
4. Priori, A., Berardelli, A., Rona, S., Accornero, N. & Manfredi, M. *Neuroreport* **9,** 2257–2260 (1998).
5. Nitsche, M. A. & Paulus, W. *J. Physiol.* **527,** 633–639 (2000).
6. Reis, J. *et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA* **106,** 1590–1595 (2009).
7. Fecteau, S. *et al. J. Neurosci.* **27,** 6212–6218 (2007).
8. Fregni, F. *et al. Appetite* **51,** 34–41 (2008).
9. Boggio, P. S. *et al. Drug Alcohol Depend.* **92,** 55–60 (2008).
10. Fregni, F. *et al. J. Clin. Psychiatr.* **69,** 32–40 (2008).
11. Ohn, S. H. *et al. Neuroreport* **19,** 43–47 (2008).
12. Cerruti, C & Schlaug, G. *J. Cogn. Neurosci.* **21,** 1980–1987 (2009).
13. Dockery, C. A., Hueckel-Weng, R., Birbaumer, N. & Plewnia, C. *J. Neurosci.* **29,** 7271–7277 (2009).
14. Chi, R. P. & Snyder, A. W. *PLoS One* **6,** e16655 (2011).

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

疑惑のがん転移理論

Cancer theory faces doubts

HEIDI LEDFORD 2011年4月21日号 Vol. 472 (273)
www.nature.com/news/2011/110419/full/472273a.html

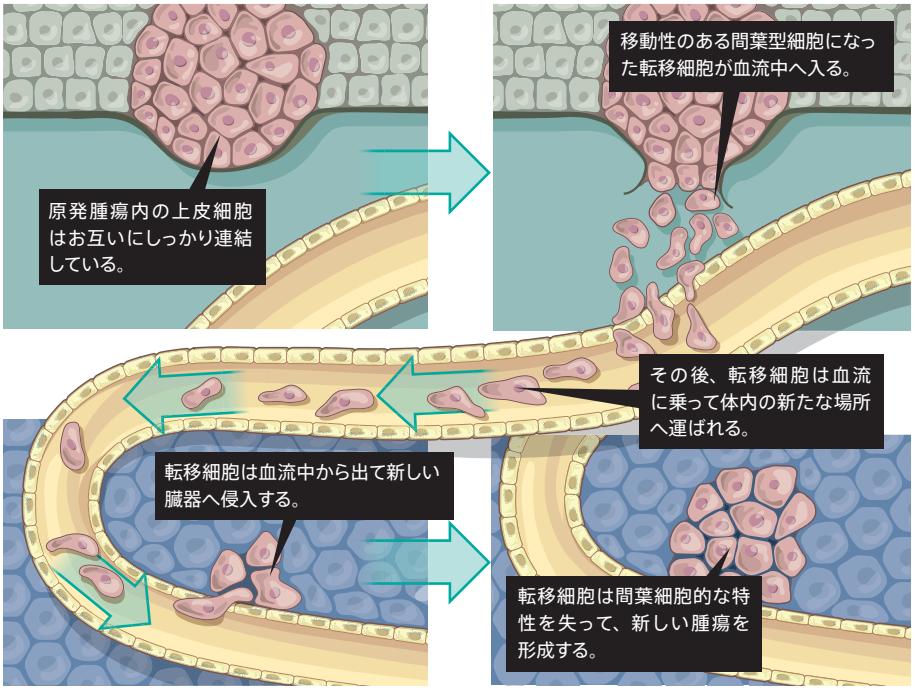
がん転移の仕組みについて主流となっている仮説には、
臨床上の証拠が不十分との指摘が。

眼前の数百人もの研究者に向かい、研究界が数十年にわたって間違った方向に進んできたと述べるのは、容易にできることではない。だが、2011年4月上旬に開催された米国がん学会の年次総会で、それは起こった。カリフォルニア大学サンディエゴ校（米国）の病理学者David Tarinが、がんが転移する仕組みを説明する主要な仮説の1つに異議を唱えたのである。

転移は死亡したがん患者の90%に見られる。つまり、転移がんが最終的に命を奪っているといえ、その機構の解明は重要である。現在主流となっている説では、がん細胞が、発生中の胚の移動可能な細胞と似た状態に戻ることで自由になって、体内の新たな部位へ移動するとされている。この仮説は基礎実験で示された証拠によって支持されており、これに基づいた治療法により、いずれは転移を阻止できるだろうという期待がある。だが、Tarinはこの説に疑問を抱いた。ほかの数名のがん生物学者とともに、ヒトのがんでこうした過程が進んでいるのを実際に観察した例はまだないと主張しているのだ。

批判を浴びるEMT仮説

腫瘍細胞が遠く離れた組織へ侵入する仕組みを、重要な発生過程の再活性化によって説明できると考える。



大半のがんは、臓器の内壁などを覆う上皮細胞層で生じる。上皮細胞は、正常時は移動性がないが、胚発生の最中には、一部の上皮細胞が細胞移動に関係するタンパク質群を産生し始め、さらに細胞どうしを接着させるタンパク質群の産生を停止させる。これによって上皮細胞は、より移動能のある間葉細胞へ転換して、胚内の適切な位置へと移動する。この「上皮間葉転換（EMT）」と呼ばれる現象ががんでも起こっていると考えれば、腫瘍細胞が隣接する細胞群から離脱して血流中へ入り、新しい腫瘍の「タネ」となる仕組みを説明できる（図参照）。

「これは優れた仮説の1つです」と話すのは、モンペリエがん研究所（フランス）のがん研究者Pierre Savagnerである。「EMT仮説で、転移についてシンプルに理解できます」。

最初は異論もあった。だが、マウスでの実験からEMTの活性化ががん転移につながることが示され、EMT仮説は広く支持されている。学術研究機関はもとより、OSIファーマシューティカルズ社（米国ニューヨーク州メルビル）もすでに、がん治療薬として使えるEMT阻害剤を探している。

「EMTは実際、人気のある研究テーマの1つになっています」と、ブリティッシュ・コロンビアがん研究センター（カナダ・バンクーバー）のがん研究者で、EMT仮説への転向者を自認するShoukat Dedharは話す。「EMTのがん転移への関与を示すデータは、次々と出てきていますよ」。

しかし、懐疑派も依然として存在する。なかでもTarinは、この仮説の根拠は培養細胞や動物モデルでの実験結果であり、ヒトでのがん転移にEMTが大きく関与していることを示す説得力のある証拠がないことを懸念している。病理学者たちが腫瘍から切り出した数百万枚もの組織切片を徹底的に探しているが、EMT細胞は観察されていないのだ、と彼は話す。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

対立する意見

ホワイトヘッド生物医学研究所（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）の著名ながん生物学者 Robert Weinberg など、EMT –がん転移仮説の擁護派は、EMT が観察されないのは、これがごく一時的なものだからだろうと言っている。つまり、がん転移細胞が新しい組織に侵入すると、その間葉細胞的な特徴は消えてしまうというのだ。「患者由来の組織片を調べても、その時の“ワンシーン”しかとらえられません」と、バーリ大学医学系大学院（イタリア）のがん研究者 Gianluigi Giannelli は擁護派に賛同する。「最初から最後まで完全な“映画”として見ることはできないのです」。

しかし Tarin はこれを否定している。彼は米国がん学会総会でこう訴えた。「この理論は、『この会場にエイリアンが座っていますが、適切なツールを持っていないので、皆さんには見えません』と言うのと同じことです」。

Tarin の考えに同調する研究者もいる。Savagner は、EMT の活性化を示す可能性のあるタンパク質が、プログラム細胞死など、がん転移とは関連性のない過程の最中にも存在していることを指摘する。「がん転移細胞が EMT を行っていてほしいと強く願う人々が、EMT 仮説をゴリ押しするような形になっています」。

Dedhar でさえ、主張の行き過ぎを心配している。例えば、多くの論文は培養細胞での実験結果の報告であり、動物生体内でそれらの細胞が転移性を持つことを確認したものはない、という。

Tarin は、実際のがん転移には細胞種の転換はかかわっていないのではないかと話す。転移が起こるのは、がん細胞が変異によって細胞間接着に支障をきたしたときだと、Tarin をはじめ、懐疑派の研究者たちは考えている。また、腫瘍から細胞が塊状に離脱して移動していくのだと考える研究者もいる。

この議論に決着をつけるには、実験によって、個々のがん細胞が腫瘍から離れる時点から新しい臓器に定着する時点までを追跡することが重要だろうと Weinberg は話す。だが、そうした実験は、ヒトでは技術的にかなりハードルが高いだろうとも言う。「原発腫瘍やそこから血流中へ送り出される腫瘍細胞を調べることは可能ですが、血流中を循環してどこかにとどまった後、これらの腫瘍細胞に何が起こるのかを見つけることは容易ではありません」。

MD アンダーソンがんセンター（米国テキサス州ヒューストン）のがん生物学者 Isaiah Fidler は、「転移が起こるために、EMT 過程が不可欠なのかどうかはまだはっきりしません。しかし、EMT を否定すべきではありません。がん研究の現状では、いかなるものも否定できないのです」と語っている。 ■

（翻訳：船田昌子）

2 つの宇宙観測計画が統合？

Astronomers mull merger of missions

Eugenie Samuel Reich 2011 年 4 月 28 日号 Vol. 472 (402)
www.nature.com/news/2011/110427/full/472402a.html

宇宙起源を探る研究者と太陽系外惑星を探索する研究者が、宇宙観測ミッションについて話し合いを進めている。

米国航空宇宙局（NASA）の緊縮予算のため、創造的な共同研究化が奨励されている。それを踏まえ、生物が生存可能な太陽系外惑星を探索している科学者グループが、星や銀河の起源を調べるために計画されている宇宙望遠鏡を利用できるかどうか検討を始めた。

ここ数か月の間、NASA の COPAG（Cosmic Origins Program Analysis Group）は、銀河の構造と詳細な形成過程を調べるために計画されている大型宇宙望遠鏡（2020 年以降に打ち上げ予定で、紫外線と可視光線の波長域で観測）の見通しを検討してきた。これを聞きつけたのが ExoPAG（Exoplanet Exploration Program Analysis Group）で、両グループ合同の会議が 4 月 26 日に開催されたのだ。共同司会者の一人で、宇宙望遠鏡科学研究所（米国メリーランド州ボルティモア）の天文学者 Kenneth Sembach は、当初は少人数の会議を想定していた。ところが実際には 49 人の天文学者が、直接あるいはテレビ会議、電話会議の形で集まった。「会議が独り歩きを始めてしまいました」と彼は言う。

系外惑星の研究者は、新たな機器や装置を積極的に求めている。NASA は、太陽系外で地球型惑星を発見するための宇宙望遠鏡「ケプラー」を打ち上げ、現在、太陽を周回するケプラーからは大量のデータが送られてきている。ケプラーが検出できるのは、地球から約 184 ～ 920 パーセクの範囲内にあって、母星の前面を通過する惑星だ。原則として、それら惑星の質量や組成は測定できない。研究者は追加ミッションを実施したいと考えている。目的は、地球に最も近い 100 個の太陽類似星の周囲にある地球型惑星の画像を十分な分解能で求め、その大気中に含まれる微量の酸素や水分を検出することだ。

NASA の「地球型惑星探査機」は、そのためのプロジェクトだったが、2007 年に無期延期されてしまった。しかし、NASA は、その後も年間 600 万ドル（約

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

4億8000万円）の予算を支出して、系外惑星探索のための技術開発を継続している。現在、系外惑星の研究者は、COPAGと協働することが成功戦略だと考えている。ペンシルベニア州立大学（米国ユニバーシティ・パーク）の惑星科学者で、ExoPAGのグループ長を務めるJim Kastingは、COPAGとExoPAGは双方とも50億ドル（約4000億円）以上もする口径4～8mの宇宙望遠鏡を欲しがっているわけで、「両者の関心は基本的に一致しています」と話す。

これらのミッションは、全米科学アカデミーが2020年に実施予定の次なる「天文分野10年研究計画」で、主役の座を競うことになるだろう。同じ技術を用いて2つの異なる研究を実施できるのかどうか、という大問題が今後の会議で検討されることになる。

宇宙起源探査ミッションでは、できるだけ大量の紫外光と可視光を集めて、近傍銀河における銀河間ガス、星の形成、太陽類似星の画像を得る必要がある。一方、系外惑星を探索する宇宙望遠鏡では、コロナグラフを用いて親星からの直接光を遮断する必要があり、地球型惑星が主に放出する可視波長と近赤外波長に対して高い感度を有する必要がある。2014年に打ち上げ予定の口径6.5m赤外望遠鏡であるジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）は、大型惑星なら検出できるが、地球サイズの惑星を検出するには感度が低過ぎる。

共同研究を前に進めるカギは、宇宙望遠鏡の鏡面用の反射コーティングが開発できるかどうかだとみられている。これがうまく実現すれば、紫外域から赤外域までの光を受けることができ、また、太陽系外の「地球」の画像を得る上で障害となる入射光波の歪（ゆが）みを防止できるからだ。

ただし、マサチューセッツ工科大学（米国ケンブリッジ）で系外惑星探索研究を行うSara Seagerは、こうした戦略に賛成していない。「欲張りに聞こえるかもしれませんが、誰もが共同利用できるようなミッションにするのは自己欺瞞です」と彼女は言う。今後10年間に打ち上げ予定の小規模な系外惑星探索ミッションは、地球型惑星を新たに検出できるほどの感度はない。しかし、最終的に検出できるような専用宇宙望遠鏡に向かって、多くの知識や経験が蓄積されるはずだ、と彼女は付言する。

これに対してサンノゼ州立大学（米国カリフォルニア州）でケプラープロジェクトの副チームリーダーを務めるNatalie Batalhaは、合同ミッションにすることは、JWSTのコスト高騰によって悪化したNASAの資金難への対応策としては理にかなっていると思う、と話す。「いずれも非常に多額の費用がかかり、内容も野心的なため、ほかのプログラムも上手に活用する方法を見つけるべきです」と彼女は話している。■

（翻訳：菊川 要）

RESEARCH HIGHLIGHT

小枝にまぎれて身を守る

Hidden in plain sight

2011年4月14日号　Vol. 472 (138)

A. DARRINGTON/ALAMY

一部の動物種は、餌にならないような物になりすまし、捕食者に見つからないようにしている。こうしたカムフラージュは受動的なものではなく、そこには被食者と捕食者の間の特異な行動の変化がかかわっている、とエクセター大学（英国）のJohn Skelhornらは指摘している。

シャクガ科エダシャク類（*Selenia dentaria*）の幼虫は、木の小枝そっくりの姿をしている（写真）。Skelhornらの実験では、本物の小枝の間にいるエダシャク類の幼虫を、ニワトリの幼鳥に捕獲するよう覚えさせた。すると、幼鳥が獲物を見つけるまでの時間は、小枝が密集している方が長くかかり、一方で、エダシャク幼虫の方も小枝がより多く付いている枝に好んで居着いた。昼間だと、幼虫は餌になる葉の入手可能性よりも小枝の密度の方を優先したが、捕食者が獲物を探し回らない夜間になると、食べられる葉がたくさんある枝の方に多く見られた。

小枝になりすましたエダシャク幼虫が高密度の小枝の間にいると、捕食者であるニワトリ幼鳥のやる気がくじかれて、幼虫の身はさらに守られることになる。小枝が多くて幼虫のいない枝環境を何度も経験した幼鳥は、獲物を探す意欲が低下するのだ。

（翻訳：船田晶子）

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

iPS 細胞バンクへ向けた世界の動き

California ponders cell-banking venture

Erika Check Hayden　2011 年 4 月 28 日号　Vol. 472 (403)
www.nature.com/news/2011/110427/full/472403a.html

iPS 細胞バンクに向けた動きが各地で見られる。
課題は、iPS 細胞の作られ方のばらつきをきちんと取り扱うことと、
多様な「多能性」を絶えず監視・追跡する体制を整えることだ。

成人由来の幹細胞株を多数作製している研究者のために、まもなくその細胞株を保存するための新しいバンクが作られるかもしれない。ヒトの胚から作製される幹細胞（ES 細胞）とは異なり、人工多能性幹細胞（iPS 細胞）は、成人の組織から作製することができるため、政治的、倫理的な障害がほとんどない。そのため、極めて多様な遺伝的変異を持つ iPS 細胞株が次々に作製されてきた。

現在、幹細胞研究に対して最大級の資金を拠出しているカリフォルニア再生医学研究所（CIRM；米国サンフランシスコ）は、こうした作業の成果物を整理する方法を考えている。CIRM は 2011 年 5 月初めまでに、iPS 細胞バンク計画への資金拠出を検討するため、3 つの会議を開催する。これは、新薬に対する反応を試験するため、また究極的には、変性疾患を治療する目的で置換用の組織を培養するために、その細胞株を使用したいと考えている科学者にとって、喜ぶべき展開だ。

スクリプス研究所（米国カリフォルニア州ラホヤ）で iPS 細胞を研究する Jeanne Loring は、「そうした細胞株を作製していますが、それを配布する手だてが全くありませんし、それを使いたい人がいるかどうかも全然わかっていません。だいたいにおいて、iPS 細胞を保存する仕事はばらばらに行われているのです」と語る。

その状況を変えようとしている組織は、CIRM だけではない。4 月 20 日、官民共同の「革新的医薬品イニシアチブ」（ベルギー・ブリュッセル）は、iPS 細胞バンクへの資金拠出を検討していることを発表した。そして日本では、2006 年にマウスからの iPS 細胞の作製という画期的な研究でこの分野を切り開いた京都大学の山中伸弥（やまなかしんや）が、慎重に選抜したドナー 50 例から採取した細胞が 90% の日本人と免疫学的に適合するという前提に基づいて、バンクを立ち上げようとしている。

米国では、マサチューセッツ州が資金を拠出するものなど、バンクを設立する計画がすでに複数進行中で、ハーバード幹細胞研究所（ケンブリッジ）のように、内部の研究者が作製した細胞株の配布を行っている研究所もある。CIRM は、米国立神経疾患・脳卒中研究所（NINDS；メリーランド州ベセズダ）による既存の取り組みを下敷きにしているのかもしれない。そこでは、コーリール医学研究所（米国ニュージャージー州カムデン）で 3 種類の神経変性疾患の患者から作製した iPS 細胞が保存されている。

しかし、CIRM やほかの保存施設が成功するためには、重要な問題を解決する必要がある。まず、研究者が iPS 細胞を作製するときに、さまざまな方法が利用されている。したがって、未来の細胞バンクは、そうしたばらつきにいかに対応するか、取り扱い方を決める必要がある。これは細胞株の利用法にも影響するため、特に重要な点だ。

細胞株自体も実に多様で、特に、各種の組織を作り出す能力である「多能性」はさまざまだ。また、iPS 細胞は、初期化処理および培養の最中に変異を獲得する場合があることが研究で明らかにされているため、iPS 細胞バンクは、絶えず遺伝子検査を行って監視し続けなければならない。

NINDS は、バンク計画を通してこうした問題の一部を解決済みで、コーリール研究所の小さなリポジトリーに 25 株の iPS 細胞を預けている。コーリール研究所は、バンクに提出された細胞株に関して、変異の潜在的な蓄積を監視する染色体判定など、一連の検査を実施している。また、細胞株ごとに、多能性に関するゲノム検査とエピゲノム検査をセットで実施している。これは、ハーバード大学（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）で幹細胞を研究する Kevin Eggan が開発したものだ。CIRM は、検査の「スコアカード」を利用してバンクの各細胞株の特徴を明確化することにより、このやり方に追随しようとしているようだ。

おそらく、科学的な問題以上に複雑なのが、細胞の提供者にどの程度の同意を求めるべきなのか、といった政治的な問題の方だ。ケンブリッジ大学（英国）の幹細胞研究者である Roger Pedersen は、「そうした問題はヒト胚性幹細胞（ES 細胞）の作製と使用を取り巻く問題と同じくらい複雑です」と語る。iPS 細胞は胚の破壊を必要としないが、iPS 細胞を利用して行われる作業は、個人の遺伝情報が関与するし、大きな商業的利益を生むこともあり得る。そのいずれもが、細胞株のもとになった生きている成人にとって、潜在的な心配事・関心事になるわけだ。

CIRM はこうした倫理問題のための会議も用意している。この問題は大きく、CIRM の取り組みがほかの細胞バンクの地ならしをしてくれることを願いながら、関係者は成り行きを注視している。■

（翻訳：小林盛方）

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

細胞中心子のマジックナンバー「9」に迫る！

真核細胞に共通して見られる細胞小器官の１つに、中心子がある。興味深いことに、どの生物の中心子も厳密な９回対称形をしており、その理由と作られ方が謎とされてきた。今回、東京大学大学院理学系研究科の廣野雅文准教授らは、中心子の前駆体中央部を構成するタンパク質の構造を詳細に解析し、普遍的な９回対称形ができる仕組みの一端を解明することに成功した。

廣野 雅文

―― Nature ダイジェスト：中心子とは、どのような細胞小器官なのでしょう？

廣野：中心子は、ほとんどの真核細胞にみられる細胞小器官で、光学顕微鏡では小さな顆粒（かりゅう）として観察されます。被子植物や菌類など、一部に中心子を持たない生物がいますが、これらの生物も、もともと持っていた中心子を進化の過程で捨てたのだろうと考えられています。

主な機能は２つあり、１つは細胞質の微小管を形成するために必要な「中心体」を作ること、もう１つは鞭毛（べんもう）や繊毛の構築に必要な基底小体になることです。前者の中心体とは、２つの中心子のまわりを雲状のタンパク質（Pericentriolar Material；PCM）が取り囲んだ構造を指します。中心体は、細胞分裂サイクルの間期に微小管繊維を放射状に伸ばし、分裂期には、それが２つに分かれることで紡錘体（ぼうすいたい）が形成されます。後者の基底小体とは、鞭毛や繊毛が作り出されて細胞の外に突出する際の土台となる構造です。このときには、中心子の９本の微小管が、繊毛内部の微小管の形成核として働きます。このように、中心子は「微小管構造を形成するための司令塔」として、極めて重要な役割を担っています。

とても興味深いのは、その構造です。電子顕微鏡で見ると、中心子の顆粒は９本の微小管が並んでできる円筒形の９回対称性構造をしており、この構造はあらゆる生物で共通しています。なぜ９回対称性構造なのか、どのようにして９回対称性構造が作られるのか、といったことに古くから注目が集まり、多くの研究者が「マジックナンバー９の謎」に取り組みましたが、解明には至っていませんでした。

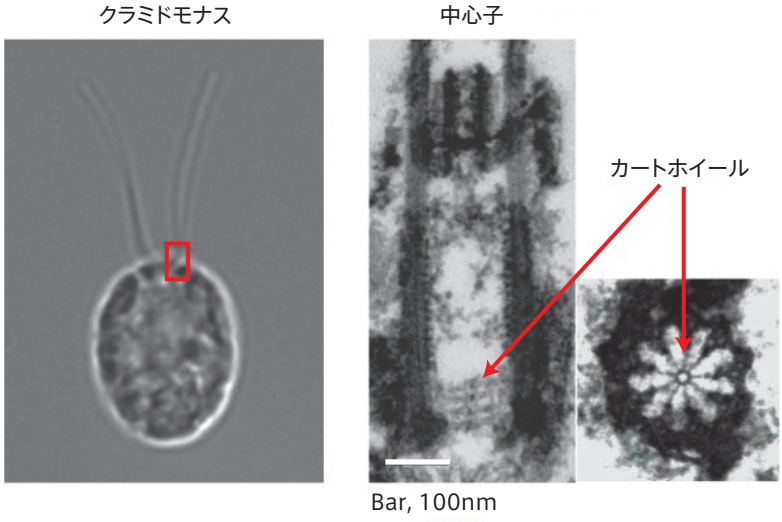


図１．クラミドモナスと中心子。クラミドモナスは体長約 10μm の単細胞生物。細胞内の中心子から、２本の鞭毛（約 11μm）を伸ばし、この鞭毛を使って水中を泳ぎ回る。鞭毛の根もとにある中心子（四角の部分）を電子顕微鏡写真で示したが、縦断面（左）と横断面（右）。底部にあるカートホイールは重層構造で、横断面では９放射相称の形をしている。

―― これまで、どんな研究をされてこられたのですか？

鞭毛を持つ「クラミドモナス」というモデル生物を使って、中心子の形成に関する研究をしてきました。クラミドモナスは池などに生息する単細胞の緑藻で、体長は 10μm ほどです。細胞体から約 11μm の鞭毛が２本出ており、これが平泳ぎのような波打ち運動をすることで、水中を泳ぎ回ります。クラミドモナスは生殖行動の際にも鞭毛を使うので、中心子変異体のように鞭毛ができない変異体は次世代を残せません。ところが米国のチームが鞭毛を持たないクラミドモナスを接合させることに成功し、1997 年以降、私もその技術を使って、変異体解析による遺伝学的な中心子形成機構の研究を続けています。

中心子形成機構の中でも「どのようにして９回対称形が作られるのか」というのが、これまで特に注目してきたテーマです。正常なクラミドモナスの中心子ができるときには、傘の骨のような放射状構造「カートホイール（車輪の意味）」がまず現れ、その後にそれぞれの骨の先端に微小管ができることがわかっています。しかしカートホイールの機能的な意

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

味はわかっていませんでした。私たちは、中心子が全くできないクラミドモナス変異体（*bld10* 変異体）の解析から、カートホイールの 9 本の骨（スポーク）に局在する Bld10 というタンパク質を同定しました[1]。おもしろいことに、末端を削って短くした Bld10 タンパク質を *bld10* 変異体に発現させると、スポークが、本数は 9 本のまま短くなってカートホイールの円周が小さくなると同時に、8 本の微小管からなる中心子ができることも突き止めました[2]。

さらに、もう 1 つの変異体（*bld12* 変異体）の解析から、カートホイールの中央部分（ハブ）がなくなると、中心子の微小管が 7 ～ 11 本にばらつく、つまり 9 回対称性が失われることを明らかにしました[3]。*bld12* 変異体が欠失するタンパク質は、線虫で同定されていた SAS-6 と同じものでした。当時、SAS-6 は中心子の形成に必須なタンパク質だと考えられていましたが、私たちは、「必須なのではなく、カートホイールの 9 本の骨が放射状に配置されるのに必要であり、中心子の 9 回対称性構造の構築に重要である」と証明したことになります。

―― 今回はどのようなことをされたのでしょう？

一連の成果により、SAS-6 タンパク質の重要性は明らかになりましたが、それがどのような分子構造で、どのようにカートホイールに組み込まれているかはわかっていませんでした。今回、英国のグループとチームを組んで、SAS-6 タンパク質の X 線結晶解析を行い、その詳細な構造を明らかにしました。私たちはこの成果を *Science* に発表しましたが、ほぼ同じ内容についての論文が、同時に、スイスの Gönczy 博士のチームによって *Cell* に発表されました。

結晶解析によって明らかになったのは、「SAS-6 が二量体を形成し、2 つの頭と 1 つの尾部からなる形をしていること」と、「二量体同士が頭部で結合する形を持っているので、おそらく 9 セットの二量体が 9 回対称の形に会合するらしい」ということでした[4]。つまり、カートホイールのハブとそこから伸びるスポークの一部は、SAS-6 の二量体が環状に会合してできたものだと予想されます。そこで、実際のカートホイールがこの分子モデルのとおりに形成されているかどうかを検証するため、SAS-6 のアミノ酸配列を二量体形成や頭部間の結合ができないように改変して *bld12* 変異体に発現させてみました。結果は予想どおりでした。改変 SAS-6 は機能せず、*bld12* 変異体のカートホイールの中央部分と、中心子の 9 回対称性は回復しませんでした[5]。こうして私たちは、モデルが正しいこと、つまり、カートホイールは SAS-6 分子が相互作用して会合して作られることも証明できました。

―― 医療への応用なども考えられるでしょうか？

直接の応用は難しいと思いますが、疾患の原因解明には役立つかもしれません。鞭毛や繊毛の異常による疾患はいろいろ知られており、「繊毛病」と総称されています。例えば先天性水頭症は、脳質内に存在するニューロンの繊毛の動きが異常なために、脳脊髄液の流れがおかしくなって起きます。多発性腎嚢胞症（たはつせいじんのうほうしょう）は、腎臓の細胞に「センサーとして機能するはずの繊毛」がないために、腎臓が肥大することで起きます。実は、多発性腎嚢胞症の病態メカニズムは、クラミドモナスで鞭毛を伸ばす仕組みがわかったことで、明らかにされた経緯があります。クラミドモナスは先端的なモデル生物なのです。繊毛病とは異なりますが、がん細胞では中心体の数が異常になっていることなどもわかっています。

―― 最後に、今後の課題や目標は？

私たちは、カートホイールの重要性を世界に先駆けて明らかにして、中心子形成機構の一端を明らかにしたと自負しています。ただし、中心子の 9 回対称性構造がこれだけ厳密に、かつ広く保存されているということから、カートホイールの形だけで「9」というマジックナンバーが決められているわけではないとも考えています。おそらく「おおまかに 9 前後に決める何らかの機構」があり、その上でカートホイールが「きっちり 9 に決める機構」を担っているのでしょう。今後は、「おおまかに 9 前後に決める仕組み」を解明し、試験管内で中心子を再構成させてみたいと考えています。その上で、「なぜ 9 なのか」という最大の謎に迫っていきたいですね。

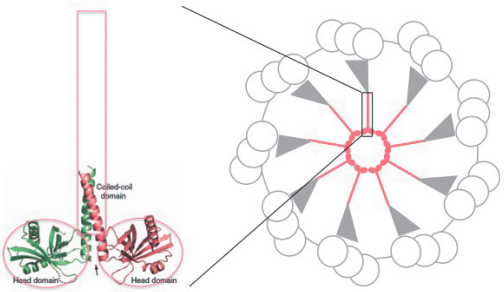


図 2．SAS-6 タンパク質の分子構造。SAS-6 は二量体を形成し、その二量体どうしが結合することで、カートホイール構造を作り出している。

―― ありがとうございました。 ■

聞き手は西村尚子（サイエンスライター）

1 Matsuura, K. *et al. J. Cell Biol.* **165**:663-671 (2004).
2 Hiraki, M. *et al. Curr. Biol.* **17**:1778-1783 (2007).
3 Nakazawa, Y. *et al. Curr. Biol.* **17**:2169-2174 (2007).
4 van Breugel, M. *et al. Science* **331**:1196-1199 (2011); Kitagawa, D. *et al. Cell* **144**:364-375 (2011).
5 van Breugel, M. *et al. Science* **331**:1196-1199 (2011).

AUTHOR PROFILE

廣野雅文（ひろの　まさふみ）
東京大学大学院理学系研究科生物科学専攻准教授。1987 年、筑波大学大学院博士課程生物科学研究科修了。理学博士。日本学術振興会特別研究員ののち、1990 年 4 月より理化学研究所基礎科学特別研究員。1993 年 4 月より東京大学大学院理学系研究科助手、1998 年 4 月より助教授、現在に至る。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

動物行動

陸上最大の動物で観察された高度な協力行動

Large-scale cooperation

Amanda M. Seed & Keith Jensen 2011年4月28日号 Vol. 472 (424–425)

ヒトは高度な認知機能に基づいて協力行動をとることができる。
こうした協力行動の進化の過程を解明するには、
動物が共同作業をするときにどんなことを理解しているかを調べる必要がある。
今回、大型動物の共同作業について、アジアゾウを用いた実験が行われ、興味深い成果が得られた。

この論評を読んでいるあなたとこれを書いたわれわれは、今まさに認知機能に基づいた協力行動をとっている。まずわれわれ2人が原稿を1つにまとめ上げた後で、編集者や制作・出版チームの手が加えられて最終形が作り出された。つまり、さまざまなコミュニケーション作業を経て作り出されたのがこの作品であり、読者であるあなたも、それを分かち合っているのである。このような行動は非常に難易度が高く、複雑な認知機能の進化の結果、もたらされたものである。お互いの関係を理解して行動に反映させるというこうした社会的な認知機能は、これまでは、ヒト固有のものと考えられてきた。

しかし最近、認知機能が大きくかかわる「協力行動」の進化的ルーツが、ヒトにごく近縁な類人猿（チンパンジーやボノボなど）にも見られる可能性を示す証拠が増えている。また、Plotnikらは今回、ゾウが、系統分類的にはヒトからかなり離れているにもかかわらず、大型類人猿と同じくらい賢く協力し合えるという研究成果[1]を報告した。このような個別の進化例は、「知性ある心」を形作る進化的圧力の解明に役立つのではないだろうか。

Plotnikらは、ゾウが2頭1組で共同作業しなければならないような状況を作り出すため、霊長類学者が開発した実験装置[2]を、ゾウの体格に合うよう大型化した。この装置では、餌を置いた平らな台を取り囲むように1本のロープが「コ」の字形に渡されている。また台の手前にはネットが張られており、ゾウは台に直接近づくことができない。そしてロープの両端のみが、ゾウの鼻が届くようわずかにネットから出ている。ゾウが1頭だけでロープの片端を引っ張ると、台からロープが抜けてしまう。台をたぐり寄せるには、2頭が共同でロープのそれぞれの端を引っ張らねばならないわけだ。驚くべきことに、ゾウたちはこの高度な共同作業を実際にできるようになったという。

彼らの実験はこれだけでは終わらず、またゾウの行動もこのレベルにとどまらなかった。ゾウたちは、2頭が実験の場に出ていない場合には、もう1頭が出てくるのを待つことを覚えたのである。また、相棒がロープに接近しないときは、ロープを全く引っ張らなかった。さらに、実験したゾウのうちの2頭は、研究チームが与えたこの課題に対して独自の解決法を見つけた。1頭は雌で、自分の持ち分のロープ端を足で踏んで押さえ、あとは相手のゾウがもう一端を引っ張るだけという状態を作った。もう1頭は雄で、餌の台に近づくよりも前に、まずゲートの所で相手が出て来るのを待つことにしたのだ。

Plotnikらの結論によれば、ゾウは協力的活動におけるパートナーの役割を理解していると考えられ、その程度はチンパンジー[2,3]と同じくらいらしい。また鳥類[4]とは差があるという。ゾウ（と大部分のチンパンジー）は、課題を始めから完璧にこなしたわけではなく、最初は、相手の登場が遅かろうと構わずに自分の目の前のロープ端を引っ張った。ミヤマガラス（カラス科の仲間）の場合、この装置で自発的にペアを組んでロープを引っ張ることは同様であったが、相手の登場を待つことはなかった。しかし、チンパンジーもゾウも、相手の登場を徐々に遅れさせていく（この手順はミヤマガラスでは行われていない）と、ペアの相手が出て来るまでは引っ張らない方がよいことを、すぐに学習した。しかも、ゾウの場合には、相手がロープの端のところに来た場合にしか引っ張らなかったのだ。

このように、実験では明白な協力行動をとることが観察されたわけだが、この協力行動自体に、必ずしも何らかの特別な社会的認知能力が必要となっているわけではない。もしかするとゾウは、お互いの協力が必要なことを理解して行動していたわけではなく、引っ張ることに価値があることを意味するような周囲の「合図」を学習していただけなのかもしれない。例えば、もう1頭のゾウがロープを鼻に持った姿を見たり、もしくはロープの張った感触を感じたりしたときに引っ張ると餌が手に入る、と学習したとも考えられる。つまり、われわれが信号が変わるのを待ち、信号に行動を合わせる方が利益になると考えるのと同じである。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

ゾウが驚くほど間違いをしなかったのは確かだが、彼らは自然保護センターの中で暮らしており、観光客相手に、材木を運んだり、絵を描いたり、音楽を演奏したりする芸をするよう訓練されている。つまり、彼らは訓練を受け入れるように訓練されているわけだ。そのため今後は、Plotnik らの言う「相手ありきの手の込んだ協力行動に向かって十分に発達した性向」と、「もっと一般的なすばやい学習の性向」とを区別する必要があるだろう。例えば、青信号のような非社会的な合図を待つという行動を、ゾウがどのくらい容易に学習できるかを見るようなテストである。

研究成果からは、ゾウが協力行動に果たす相手の役割を理解しているように見える。

DAVID NOTON PHOTOGRAPHY/ALAMY

そうは言うものの、ゾウとチンパンジーは同じくらい容易に「待つ」ことを学習した。では、両者の協力行動スキルに優劣はないとする Plotnik らの主張は正しいのだろうか。チンパンジーでは、有利な状況の認知を学習するだけでなく、自分の相手を確保することで協力行動の機会を作り出すという重要な知見が得られている。しかし、ゾウではまだ調べられていない。

1930 年代に報告された Crawford の論文[5]では、バナナを与え過ぎたために実験課題に無関心になってしまった 1 頭の雌チンパンジーに対して、相手のチンパンジーはその手を引っ張るなどして、彼女を課題に参加させようとしたという。さらに最近のある研究[2]では、1 頭のチンパンジーが、ほかのチンパンジーではなく実験を行っている人間を誘って、装置の所まで連れていこうとしたことが報告された。また別の研究[3]では、待つことを教え込んだチンパンジーに、協力者が必要な場合には別の 1 頭が入っている檻(おり)の「かんぬき」を外すという課題を行わせたところ、これをちゃんとやってのけたという。チンパンジーは、仲間がロープの近くに来るまで待つことを学習していただけでなく、その相手の因果的役割（causal role）を把握していたのだ。すなわち、目的を達成するためにはパートナーが必要であると理解していたということである。このように、1 つの状況で学習した知識を新しい行動にすぐに反映させて実行できるかどうかを見ることは、認知能力の柔軟性を評価するのに有効なテストの 1 つといえそうだ。

チンパンジーは、集団においてお互いを社会的道具として利用できることを十分に理解しているようである。しかし、ゾウが同様の理解を持っていることを示す証拠は今のところない。ただしこれは、ゾウのコミュニケーションが、観察者であるヒトにとってかなり異質なものであることが原因かもしれない。Plotnik らは、ゾウの低音域の鳴き声や位置を示す微妙な合図を解読するには時間がかかることを強調しているからだ。別の新しい研究[6]では、雄ライオンのうなり声が聞こえると、成熟した雌ゾウたちは仲間のゾウたちを先導して仔ゾウを取り囲む行動をとるが、若い雌ゾウたちではそうした行動が見られないことを報告している。残念ながらこの研究チームは、ゾウたちがどうやって仲間どうしで防御の姿勢を協調させているのかを見抜くところまではいかなかった。

今回の Plotnik らの研究成果[1]によって、さまざまな動物の協力行動に関するわれわれの認識は広がったといえる。世界最大の陸上動物を対象にした実験は、文字どおり「マンモスな研究」だったが、研究チームは、ほかの動物種、特に霊長類で使われる実験手法を流用することで、動物間の直接的な比較を可能にしたわけだ。協力行動のための知能が、進化によってどのように形作られるのかを解明するためには、今後、異なる社会システムを持つ近縁な動物種について比較研究する必要があるだろう。「他者の行動に合わせる性向」は、もっと広くとらえれば、社会的生活への適応の一種だともいえるし、これには大きな脳は必要ないのかもしれない。脳が小さい魚類であっても、中には、協力して餌を捕獲するものもいるからだ[7]。大小さまざまな動物について研究を進めていけば、ヒトを含めた動物が、どうやってお互いに理解し協力し合っているのかを知る手がかりが得られることだろう。■

（翻訳：船田晶子）

Amanda M. Seed、セントアンドリュース大学心理学部（英国）。
Keith Jensen、ロンドン大学クイーンメアリー校心理学研究センター（英国）。

1. Plotnik, J. M., Lair, R., Suphachoksahakun, W. & de Waal, F. B. M. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **108**, 5116–5121 (2011).
2. Hirata, S. & Fuwa, K. *Primates* **48**, 13–21 (2007).
3. Melis, A. P., Hare, B. & Tomasello, M. *Science* **311**, 1297–1300 (2006).
4. Seed, A. M., Clayton, N. S. & Emery, N. J. *Proc. R. Soc. B* **275**, 1421–1429 (2008).
5. Crawford, M. P. *Comp. Psychol. Monogr.* **14**, 1–88 (1937).
6. McComb, K. *et al. Proc. R. Soc. B* doi:10.1098/ rspb.2011.0168 (2011).
7. Bshary, R., Hohner, A., Ait-el-Djoudi, K. & Fricke, H. *PLoS Biol.* **4**, e431 (2006).

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

材料化学

紫外線で傷を修復できるポリマー

Spot-on healing

Nancy R. Sottos & Jeffrey S. Moore 2011年4月21日号 Vol. 472 (299–300)

光で傷を修復できるゴム状ポリマーが作られた。
これを使えば、修復する必要のあるとき、必要な部分だけに光を照射すれば作業が終わるので、
さまざまな分野で材料の長寿命化に貢献するはずだ。

紫外線は人体に悪影響を及ぼすが、その紫外光を利用すると、弾性ポリマーにできたひっかき傷が修復できるという。Burnworth ら[1]は *Nature* 2011 年 4 月 21 日号の 334 ページで、特別設計の弾性ポリマーの傷が紫外光で修復可能であることを報告している。今回の「光で修復可能な材料」は、超分子金属錯体を含有するポリマーで作られている。超分子金属錯体が紫外光を吸収して熱に変換し、そこから修復過程が始まるわけだ。光は損傷部のみに正確に照射することができるので、この方法を使えば、荷重のかかったポリマーであっても限られた場所だけを修復できる可能性がある。

靭性の高いゴム状プラスチックは、消費者製品の分野にまさに大革命をもたらしている。スーパーのレジ袋やプラスチック製保存容器から、タイヤのチューブ、保護用シートに至るまで、さまざまな用途に幅広く使われている。ところがこうした材料は、引っかき傷や突き刺し損傷に弱く、穴が空いたり、中身が漏れ出したり、いろいろな問題が生じてしまう。そして損傷したプラスチックは、通常は埋め立て処分される。もちろん、場合によってはパッチを貼り付けて修理されるが、手作業によらねばならない。こうした状況を考えれば、もし修復可能なポリマーができれば、破損しても直ちに廃棄する必要がなくなり、リサイクルできるようになる。さらに、長寿命ポリマーへの第一歩ともなる。

すべてのポリマーは、基本的に、修復可能にできると思われている。実際、さまざまなポリマーやポリマー複合材料について、修復機能を記憶・誘発させる方法が開発されてきた[2]。多くの場合、材料をガラス転移温度以上に加熱した後で、圧力をかけて、ポリマー鎖が接触・湿潤・拡散・絡み合いを増やすようにしてやれば、亀裂や引っかき傷は修復できる[3]。しかし、このような力ずくの方法は、修復に時間がかかり実用化は難しい。

ポリマー自体に修復機能を担わせるという方法もある。ポリマー構造を分子レベルで改良し、可逆的または動的に結合する化学基を導入するのである。これにより、材料損傷時に切れた結合が、容易に再形成される。このように修復機構を自己保有させるには、外部からのエネルギー付与(ほとんどの場合は加熱)によって、モノマー状態から架橋ポリマー状態へと可逆的に変換する成分でポリマーを合成すればよい[4]。ゲル状態にも粘性液体状態にもなる可逆的ゲルは、このような仕組みに基づいた材料であり、数十年にわたって開発が続けられてきた[5]。また、可逆的ディールス・アルダー反応（2つの炭素－炭素結合が形成される）を利用した修復性ポリマー[6]が発見され、構造ポリマーは大きな進歩を遂げている。熱（120 ～ 150℃）と適度の圧力をかけると、この種のポリマーに入った亀裂は何度でも修復できるのだ。

別の修復機構保有方式としては、超分子集合体を利用したものが有望だ。従来のポリマーはモノマーが共有結合的に結びついているが、超分子ポリマーは、非共有結合で結びついた繰り返し単位から構成されている。このような結合は可逆的であるため、材料損傷時に結合が切れても短時間で再形成される[7,8]。その一例が、水素結合でつながった超分子ネットワークからなる自己修復性ゴム状材料[9]である。切断された材料の端と端を室温でくっつけるだけで、それぞれの末端部の分子どうしの間で水素結合が再形成され、材料が修復される。他にも修復性超分子エラストマー[10]が報告されているが、それらは損傷部の修復に多量の熱を必要とする。

こうした流れの中で、Burnworth ら[1]は今回、超分子ポリマーの熱修復を光照射によって誘発できることを報告したわけだ。「光で修復可能な材料」を作るために、金属イオンと結合可能な配位子を両端に持つ炭化水素オリゴマー（短いポリマー鎖）を用いた。炭化水素オリゴマーの溶液に亜鉛イオン（Zn^{2+}）またはランタンイオン（La^{3+}）を加えると、各イオンが 2 本（Zn^{2+} の場合）または 3 本（La^{3+} の場合）のオリゴマーと結合した金属－配位子錯体が形成され、オリゴマーがつながることによって長鎖超分子ポリマーが生成した。これらのポリマーの構造は、疎水セグメント（炭化水素セクション）と極性セグメント（金

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

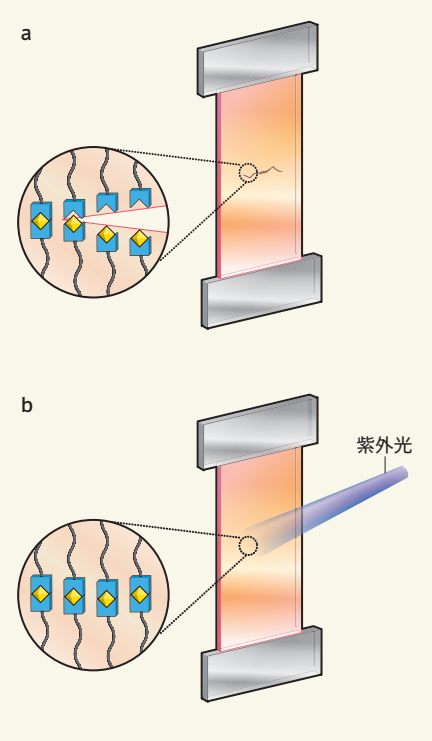


図 1　必要に応じて修復
Burnworth らは、紫外光を照射すると引っかき傷が修復されるポリマー材料を作製した。
a　この図は、荷重のかかった材料に引っかき傷がついている様子を示している。拡大図はこの材料の分子構造を表す。末端に金属イオン（黄色）と結合した配位子（青色）を持つ炭化水素鎖（黒色）から構成されていて、引っかかれると金属－配位子錯体が切断される。
b　引っかき傷に紫外光を照射すると、金属－配位子錯体が励起された後、基底状態に緩和されて熱が発生する。この熱で周囲の材料が柔らかくなるため、切断部で錯体が再形成され、引っかき傷が修復される。

属－配位子錯体）が何度も繰り返す周期構造であった。

固体状態では、ポリマー鎖の相分離が起こった。これは、ポリマー鎖が折りたたまれて、炭化水素セグメントが多いドメインと金属－配位子錯体が多いドメインに分かれるためである。このように長鎖ポリマーと相分離を利用することによって、物理的に架橋したネットワークが生成し、材料の靭性を高めるような分子構造が得られた。

Burnworth らのポリマーは、紫外光照射による局所修復にまさにぴったりの分子的特徴を備えている。第一に、彼らのポリマーは熱誘起脱重合を起こす。これはおそらく、重合材料と非重合材料の間の平衡が、高温では非重合材料に有利に働くからである。第二に、金属－配位子錯体は紫外光を吸収して励起され、励起された錯体が基底状態に戻るとき、光エネルギーが効率よく熱に変換される。したがって、損傷したポリマー膜に紫外光を照射すると、光が熱に変換された後、材料の脱重合・液化が起こって膜の傷がふさがり、光熱修復が起こった（図 1）。

超分子を用いた修復機構内部保有方式は非常に有望であるが、残された重要課題は、自律的に修復する高強度高剛性ポリマーを合成することである。最先端の超分子ポリマーでも、修復が自動的に起こるわけではなく、金属－配位子結合がまだ再形成可能であるうちに、光や熱のエネルギーを供給しなければならない。Burnworth らの研究はこれらの問題に踏み込んでいるわけではないが、新しい刺激的な機会を提供したことは間違いない。異なる金属－配位子錯体は異なる波長の光を吸収するので、修復波長を調節するには単に錯体を変えるだけでよいはずである。そこから、損傷すると変色する「力に敏感なスマートポリマー」が得られる可能性がある。損傷部の色は、修復のきっかけとなる光の波長に対応するため、そのような光を照射すれば、損傷部だけを局所的に修復できることになるわけだ。■

（翻訳：藤野正美）

Nancy R. Sottos、イリノイ大学材料科学工学科（米国）。
Jeffrey S. Moore、イリノイ大学化学科（米国）。

1. Burnworth, M. *et al. Nature* **472**, 334–337 (2011).
2. Blaiszik, B. J. *et al. Annu. Rev. Mater. Res.* **40**, 179–211 (2010).
3. Kim, Y. H. & Wool, R. P. *Macromolecules* **16**, 1115–1120 (1983).
4. Bergman, S. D. & Wudl, F. *J. Mater. Chem.* **18**, 41–62 (2008).
5. Schultz, R. K. & Myers, R. R. *Macromolecules* **2**, 281–285 (1969).
6. Chen, X. *et al. Science* **295**, 1698–1702 (2002).
7. Brunsveld, L., Folmer, B. J. B. & Meijer, E. W. *MRS Bull.* **25**, 49–53 (2000).
8. Serpe, M. J. & Craig, S. L. *Langmuir* **23**, 1626–1634 (2007).
9. Cordier, P., Tournilhac, F., Soulié-Ziakovic, C. & Leibler, L. *Nature* **451**, 977–980 (2008).
10. Burattini, S. *et al. J. Am. Chem. Soc.* **132**, 12051–12058 (2010).

nature geoscience

地球に優しい
Nature Geoscience

- 表紙に使用している紙の75％は再生紙、25％は植林と伐採が管理されていることを国際機関に認証されたパルプからできています。
- 中面ページに使用している紙は、100％再生紙です。
- 印刷には、植物原料のインクを使用しています。

www.naturejpn.com/ngeo

nature asia-pacific

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Volume 473
Number 7345
2011 年 5 月 5 日号

Podcast

翅(はね)が翅でなくなるとき：昆虫のボディープランの教科書を書き変えたツノゼミ

BODY TALK: When is a wing not a wing?

翅が翅でなくなるのはどういうときか。それはヘルメットになるときである。昆虫の翅は大きさも形も極めて多様だが、すべてに共通していることが 1 つある。それは、翅が胸部の 3 体節のうち 2 番目と 3 番目の体節から生えているということだ。だが、本当にそうなのだろうか。ツノゼミは、翅のない 1 番目の胸部体節から生えた「ヘルメット」と呼ばれる奇妙で多様な構造を持っている。ヘルメットは従来、胸部第一体節のクチクラの広がったものとされてきた。しかし詳細な研究から、これは進化的には、3 対目の翅に相当することが明らかになった。ボディープランの際立った特徴の 1 つは、長い進化の期間にわたって比較的安定であることだ。昆虫の設計図に関するこれまで知られていなかったこの「変化」の発見は、本来の役割から解放された構造が、自由に新しい機能と形態を進化させる仕組みを示している。

NICOLAS GOMPEL

材料：熱電材料のホットな話題

Hot source

廃熱を電気に変換する熱電デバイスは、多くの応用が期待されているが、ほとんどの熱電材料は効率が悪い。この状況を改善する試みがなされており、その多くが、ナノ構造を使って熱的特性と電気的特性を組み合わせ、目的とするデバイスを作製することに集中している。今回、バルク合金でも組成と化学ドーピングを慎重に制御することによって、そのような特性設計が可能であり、高性能熱電材料を作製できることが示された。

遺伝：クロマチン・プロファイルを用いたゲノム注釈

Genome annotation using chromatin profiles

今回、複数のヒト細胞型に存在するさまざまなヒストンマークを記したクロマチン概要地図が報告された。このデータを使えば、抑制または活性化されたプロモーター、エンハンサーおよびインスレーターなど、各種の調節エレメントに対応するさまざまなクロマチン状態の特定が可能となる。結果、疾患と関連のあるいくつかの一塩基多型は、調節エレメントと重なり合っていることが明らかになった。今回の研究は、特にヒト全ゲノム関連解析研究の解釈に影響するものである。

構造生物学：光合成の中心

At the core of photosynthesis

光合成植物や藻類、シアノバクテリアに見られる光化学系 II（PSII）は、光エネルギーを利用して一連の電子伝達反応を駆動し、水を分解して分子状酸素を生成する、大型の多サブユニット酵素である。PSII の分解能が中程度の構造はいくつか報告されているが、Mn_4CaO_5 クラスターからなる触媒中心の解析は、データ収集中に X 線によって生じる構造の歪みが原因で難しいことがわかっていた。今回この障害が克服され、梅名泰史(うめなやすふみ)たちにより分解能 1.9 Å での PSII の X 線構造が明らかにされた。これは、タンパク質サブユニットの割り振りや、Mn_4CaO_5 クラスターの幾何学的配置を解明するのに十分な分解能である。

言語：言語進化に関する第三の理論

A third way with words

言語の進化の仕方についての二大理論はどちらも、特定の文法構造が広く保存されることを示唆しているが、その理由は異なっている。チョムスキー理論では、そうした文法構造が脳の働き方を反映するためだとし、もう一方のグリーンバーグ理論では、文法構造がほかの構造と論理的につながっているためだとしている。しかしこれまで、言語どうしの類縁関係に関する確かな情報がなく、そうした理論を決定的に検証することは困難だった。今回、世界に現存する 7000 の言語の 3 分の 1 以上に関して系統発生解析の手法を用い、語順に着目することにより、外観上最も普遍的な構造は同一語族内の言語間でのみ共有されていることが明らかになった。このことは、上述の 2 つの理論のいずれでもなく、文化的進化によって言語構造の大部分を説明できることを示唆している。

発生：発生スイッチとしての DISC1 タンパク質

DISC1 protein as a developmental switch

統合失調症の感受性因子である DISC1 は、発生中の大脳皮質に非常に多く存在しているため、この時期に重要な役割を担っていると考えられている。澤明(さわあきら)たちは今回、分裂を続けている神経前駆細胞を、分裂が終了した遊走するニューロンへと移行させる「分子スイッチ」として働く、DISC1 中の特異的なリン酸化部位を見いだした。DISC1 は、リン酸化状態に応じて、それぞれ別々のシグナル伝達経路と主に相互作用する。つまり、DISC1 は大脳皮質形成でリン酸化状態に応じて 2 通りの役割を果たしていると考えられる。

関連したポッドキャスト（英語）を上記 QR コードから無料配信中です（iPhone™のみ対応）。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Volume 473
Number 7346
2011 年 5 月 12 日号

複雑性を手なずける：ネットワーク制御のための数学 ― 細胞生物学から携帯電話まで

IN CONTROL: Taming complexity

制御理論は人工系や自然系を目的とする状態へと向かわせるのに使えるが、複雑な自己組織化した系を制御するための枠組みはまだない。このようなネットワークは制御可能なのだろうか。今回の研究で、「ある程度まではイエス」となる明確な数学的解答が得られた。生物の調節や神経、代謝にかかわる経路から食物網、携帯電話の動き、社会的相互作用などについて、モデル系と実際の系との両方を使い、任意の複雑な有向ネットワークの制御性を調べる解析手段を開発し、時間に依存した制御を行うと系全体の動態を制御できる最小のドライバーノード群を見いだしたのだ。意外なことに、これらは通常ネットワークハブには位置していない。表紙は実際に存在するネットワークの制御に重要な役割を担うノード群のカクタス様構造。ノードは青で、ドライバーノードは赤で示してある。

医学：ヒト腸内微生物の秩序を探る

Seeking order among our gut microbes

ヒト腸内微生物叢は膨大な種数の微生物で構成されており、個人差が非常に大きい。今回、6 か国 39 人の腸内マイクロバイオームの比較メタゲノム解析によって、このような多様性にもかかわらず、微生物叢の構成が少なくとも 3 つの別々のグループ（エンテロタイプと呼ぶ）に分類できることがわかった。エンテロタイプからは、年齢や BMI といった個人的特性と関連する機能マーカーが同定された。こうした特徴は、大腸がんや糖尿病といったヒトのさまざまな病気の診断に役立つ可能性がある。

宇宙：逆行するホットジュピターの形成

The formation of retrograde hot Jupiters

ホットジュピター型の太陽系外惑星の約 4 分の 1 は「間違った方向」、つまり親星の自転とは逆方向に軌道運動している。この現象を説明しようとする試みは、今のところ成功していない。三重連星系では、このタイプの逆行軌道は、星の長期の摂動を受けて生じる場合が知られている。今回、八重極子の次数効果と潮汐摩擦を含めた惑星の運動の解析から、ホットジュピターでも同様なメカニズムが作用する可能性が示唆されたが、この場合は星ではなく、惑星が関与しているらしい。この新しいモデルで提案されたメカニズムは古在捕獲と名付けられており、もっと遠方の惑星との長期の相互作用によって、逆行軌道を持つ、親星に近接した惑星が自然に生じることが示されている。これを引き起こす力は、古在メカニズムではよく知られたものであり、太陽系外惑星の軌道に見られる高い離心率を生じる原因になると考えられている。

地球：マントル深部にある密度の高いメルト

Dense melt in the deep mantle

マントル深部のメルトと固体の相対密度は、地球の化学的進化に大きく関与している。最近の理論的計算では、最深部マントルで密度が交差している可能性が示唆されているが、鉄のメルト－固体間の分配に対する重要な効果は比較的低い圧力（25GPa 以下）でしか検証されていなかった。野村龍一（のむらりゅういち）たちは、$(Mg,Fe)SiO_3$ ペロブスカイトとメルトの間での鉄の分配係数をマントルの圧力条件全体にわたって測定し、約 76GPa 以上の圧力で分配係数の急激な変化が生じ、高圧下ではメルトが大きく鉄に富むようになることを見いだした。この結果は、マントルの深さ約 1800km 以深では、$(Mg,Fe)SiO_3$ 液体の密度が共存する固体より大きくなることを意味している。

医学：代謝物の「助っ人」を使って永続伝播（でんぱ）型病原菌を殺す仕組み

How metabolic 'helpers' kill persistent pathogens

細菌は、抗生物質などによるストレスがかかった条件下では、潜伏した「永続伝播」状態に入って、ストレス条件に対してより高い耐性を示すことがある。臨床では、永続伝播型微生物が生じると、病原菌の根絶が不完全となり、治療の失敗につながりかねない。今回、グルコースやピルビン酸などの特定の代謝的刺激によって、ゲンタマイシンなどのアミノグリコシド系抗生物質による永続伝播型細菌の殺菌を促進しうることが明らかになった。このことは、慢性細菌感染の治療において、代謝物質をアミノグリコシド系抗生物質の補助剤として投与することで、治療効果が上がる可能性を示している。

生理：脂質シグナルと寿命の延長

Lipid signals and lifespan extension

線虫（*Caenorhabditis elegans*）などのモデル生物では、食餌制限によって寿命を延ばすことができる。寿命延長にかかわる重要な要素はいくつか見つかっているが、線虫の代謝応答を協調させるシグナルについてはほとんど解明されていない。内在性カンナビノイド（EC）系は、哺乳類での栄養素の取り込みとエネルギーバランスを調節することが知られており、代謝応答協調因子の候補の 1 つとなっている。老化研究の重要なモデル動物である線虫には EC 系とその受容体は存在しないが、今回、代用されている可能性のある系が同定された。線虫では、食餌制限によって、脂質由来のシグナル伝達分子群の 1 つである *N*- アシルエタノールアミン（NAE）の量が減少し、NAE の減少だけで寿命が延長される。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Volume 473
Number 7347
2011 年 5 月 19 日号

Podcast

水という圧力：カナダ北部の氷に覆われた島々は海水準上昇の重大要因

Water pressure: Canada's icy northern islands revealed as significant contributors to rising sea levels

カナダ北極諸島は、氷床以外の陸氷の全球体積の 3 分の 1 を保有するが、海水準の変化にどの程度かかわっているのかはほとんどわかっていない。Gardner たちは、別々の 3 つの手法を用いて、カナダ北極諸島からの陸氷の質量損失が、2007 ～ 2009 年では 1 年につき 92±12Gt で、この値は 2004 ～ 2006 年のおよそ 3 倍の大きさに相当し、夏がより高温であったことと合致するのを明らかにしている。この記録は短過ぎて長期傾向について確実な結論を出すことはできないが、カナダ北極諸島が海水準上昇の大きな要因であることは明らかである。

進化：無肢化への 2 つの道筋

Two ways to get legless

ミミズトカゲ類は、地中生活に適応した肢のないトカゲの一群だが、その進化的起源については意見が分かれている。分子上の証拠によれば、ミミズトカゲ類はカナヘビ類の中におさまるが、形態上の証拠からは、肢のない長い体を共通祖先から受け継いだものとして、ヘビ類とひとまとめにされることが多い。しかし今回、化石産出で有名なドイツの始新世メッセル頁岩から肢のあるトカゲの化石が発見されたことで、この問題が決着しそうだ。この新しい化石トカゲは、カナヘビ類とミミズトカゲ類のそれぞれの特徴を併せ持っているようで、カナヘビ類説の方が裏付けられ、ミミズトカゲ類の無肢化がヘビ類のものとは無関係に進化したことが示唆される。

ROBERT REISZ

遺伝：Tet タンパク質による DNA メチル化の微調整

Fine-tuning DNA methylation by Tet proteins

哺乳類ゲノムには、修飾された DNA 塩基である 5- ヒドロキシメチルシトシン（5hmC）が存在する。5- メチルシトシン（5mC）が「第五の塩基」であるのに対して、5mC が Tet ファミリーの酵素によって酸化されて生じる 5hmC は「第六の塩基」と呼ばれることもある。Helin、Zhang、Rao、そして Reik が率いる 4 つの研究チームがそれぞれ、ChIP-seq 技術を用いてマウス胚性幹（ES）細胞における Tet1 や 5hmC のゲノム全体にわたる分布を調べた結果について報告し、Tet1 と転写調節（活性化と抑制の両方）の間に関連があることを明らかにした。Rao の研究チームはまた、単一の 5hmC 塩基をマッピングするための、より高感度な 2 つの手法についても述べている。

脳：不安の原因

Cause for anxiety

多数の人々が心的トラウマとなるような体験をするが、それによって、一見したところあまり影響を受けない人もいれば、心的外傷後ストレス障害（PTSD）を発症する人もいる。こうした個人差の原因と思われるものが、マウスを使った研究で見つかった。ストレス下では、セリンプロテアーゼのニューロプシンは EphB2 と NMDA 受容体の相互作用を調節することにより扁桃体（へんとうたい）での可塑性を誘導して、恐怖関連遺伝子である *Fkbp5v* の発現を引き起こす。ニューロプシンを欠損したマウスは、ストレスに対してこのような動的可塑性を示さない。この結果は、不安のような複雑な行動の現れに分子経路が重要であることを強調し、Eph と NMDA の受容体が不安障害の治療標的となる可能性を示している。

宇宙：孤独な惑星が生まれた理由

Lonely planets guide

大阪大学、名古屋大学などの国際研究チームはニュージーランドのマウントジョン天文台の望遠鏡を用いて、天の川銀河系バルジ方向の重力マイクロレンズ現象を観測し、主星に束縛されていない未知の 10 個の太陽系外惑星を発見した。野放し状態に見えるこうした木星質量の天体は、主星から大きく離れた軌道上を周回しているのかもしれないが、これらの自由に浮遊する惑星から 10 天文単位以内の距離には主星が見つからなかった。したがって惑星の散乱は、惑星形成過程では普通に起こっていると考えられる。

地球：地球内核の融解

Melting of the Earth's inner core

核マントル境界における熱流量の変動が内核境界へ伝達されることを示す地球ダイナモシミュレーションが報告された。この変動は内核内部への熱の流れを生じさせるのに十分な大きさで、これが実際に地球で起きているならば局所的な融解を生じさせうることがわかった。このような融解が起これば重い液体が放出され、組成が不均一な層が形成されると考えられるので、内核境界直上で見られる地震波速度異常に対する簡単な説明が得られる。局所的な融解と凝固によって、内核自体に地震波速度異常を生じさせる機構も得られるかもしれない。

関連したポッドキャスト（英語）を上記 QR コードから無料配信中です（iPhone™のみ対応）。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Volume 473
Number 7348
2011 年 5 月 26 日号

Podcast

ワクチン：懐疑派に立ち向かう

VACCINES: Standing up to the sceptics

本号では、ワクチンと予防接種について特集している。Perspective では、R. Rappuoli と A. Aderem が 2020 年の状況を予想し、この年までには、合理的に設計されたワクチンで HIV/AIDS、マラリア、結核という 3 つの病気に対処できるようになると予測している。Comment では、J. Leask が先進諸国でワクチン接種がもっと広く受け入れられるようにするにはどうしたらいいかを問い、また H. Larson と I. Ghinai は発展途上国で長く続くポリオとの闘いから学ぶべき教訓を要約している。News Features では、R. Kwok が最近問題になっているワクチンの安全性について調べており、C. Lok は免疫学研究者である B. Walker 氏の人物像を紹介し、彼が試みている HIV ワクチン分野の徹底的見直しについて論じている。

物理：電子はどのくらい丸いのか

How round is the electron?

電子は球形、まあほぼ球形といえるだろう。素粒子物理学の標準モデルでは、電子はやや非球形と予測され、その歪みは電気双極子モーメント（EDM）によって表されるが、あまりに小さ過ぎて現在の実験手法の感度では検出できない。しかし、標準モデルのいくつかの拡張版では、ずっと大きい EDM 値が予測されており、これは検出可能と考えられる。球形のタリウムではなく双極性分子のフッ化イッテルビウムを使った新しい実験により、現在までで最高精度の EDM 測定が達成された。この新しい精度レベルで EDM はゼロであることと矛盾せず、電子はまさしく球形ということになる。この発見は、標準モデルを超えた素粒子物理学と宇宙論の理論を絞り込むのに役立つだろう。

細胞：ショウジョウバエの女王

A queen among fruitflies

ミツバチの集団における女王バチと働きバチの違いは、遺伝的要因ではなく栄養によるもので、ローヤルゼリーを食べた幼虫が女王バチへと分化する。ローヤルゼリー中の活性成分はこれまでずっと明らかになっていなかったが、ロイヤラクチンであることを鎌倉昌樹（かまくらまさき）（富山県立大学）が突き止めた。ロイヤラクチンは以前から知られているタンパク質で、ラット肝細胞に上皮増殖因子（EGFR）に似た作用を及ぼす。意外なことに、ロイヤラクチンはキイロショウジョウバエ（*Drosophila melanogaster*）でも女王バチに似た表現型を誘導し、EGFR がかかわるシグナル伝達経路を介して体のサイズを大きくし、卵巣の発生を促した。

ロイヤラクチンを投与したキイロショウジョウバエ（右）。

MASAKI KAMAKURA

疫学：ブタでのブタインフルエンザの監視

Swine flu surveillance in pigs

ブタは、インフルエンザウイルス遺伝子の混ぜ合わせを起こす可能性のある、重要な「混合容器」だと考えられている。しかし、このことがヒトの健康にとって脅威となるにもかかわらず、一般的にブタ集団では十分なウイルス監視が行われていない。今回 M. Peiris たちは、中国南部での 12 年にわたる体系的な調査によって集められた、数百のブタインフルエンザ単離株およびブタ血清と、それを補完する 34 年前までさかのぼった試料からなる、大規模なデータセットを提示している。このデータセットから、この地域でのブタインフルエンザの進化動態について詳しい様相が明らかになる。

生理：肥満における脂質代謝

Lipid metabolism in obesity

小胞体の機能は肥満時に変化する。肝臓では小胞体関連タンパク質の合成速度が遅くなり、脂質代謝に関連する遺伝子のスイッチがオンとなる。小胞体ストレスは、肥満やインスリン抵抗性、2 型糖尿病の重要な要因の 1 つである。この関連を説明できると思われる機序が、今回明らかになった。小胞体での脂肪酸と脂質の代謝の変動は、小胞体の主なカルシウム取り込み輸送体である SERCA の活性を阻害する。小胞体中の脂質成分の変化あるいは SERCA 量の増加は、*in vivo* で小胞体ストレスを軽減し、グルコース恒常性を改善することが示された。

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）

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

皆さんのお住まいの地域では、ゴミの分別はどうなっていますか？　ガラスや金属以外何でも可燃になるところ、細目にわたって分別が必要なところなど、自治体によってさまざまでしょう。今回は、生分解性プラスチックの問題を取り上げました。純粋にデンプンから作られるものは別として、添加物によって分解性を高めたものは、生分解速度がかなり遅いようです。ゴミ問題は、環境負荷をしっかり見極めることが必要ですね。

ISTOCKPHOTO

オキソ分解性プラスチックの生分解は、非常にゆっくりである。

nature news

語数：**529 words**　分野：材料科学・環境学

Published online 21 April 2011 | Nature | doi:10.1038/news.2011.255

http://www.nature.com/news/2011/110421/full/news.2011.255.html

Puzzle persists for 'degradable' plastics

Eco-friendly plastics disintegrate, but might just linger in the environment.

Daniel Cressey

1. The environmentally friendly version of polythene might not be so friendly after all.

2. Polyethylene is one of the most widely used materials in the world, and the discarded plastic bag has become one of the most potent symbols of human impact on the environment. As worries over the vast scale of waste from this plastic has grown, so has the use of purportedly 'degradable' forms of it.

3. Adding transition metals such as iron and cobalt can promote the oxidation of the ethylene polymers and claims for the degradability or biodegradability of these materials are widespread on food packaging and plastic bags. But a review published last week in *Environmental Science & Technology*[1], notes that there is no evidence that 'degradable polyethylenes' are actually all they suggest.

4. Although it is clear that 'degradable' plastic bags, for example, will fall apart in the environment, the resulting fragments can persist for a long time, and there are no long-term studies on these pieces. A key issue is that products can be described as biodegradable without reference to the timescale it takes them to fully biodegrade.

5. "There are a tremendous number of papers about degradable polyethylene but no one has really shown a high degradation," says Ann-Christine Albertsson, a polymer researcher at the Swedish Royal Institute of Technology (KTH) in Stockholm and lead author on the critical review. "Of course they degrade in one way – they are losing part of their properties. But if you mean it as a positive for nature, that has not been proved."

6. Developing-world countries such as China are also starting to use 'degradable' polyethylene, says Albertsson. Indian authorities have taken an interest in the subject, and recently sent a postdoc to work with her. Although some countries are already trying to move to genuinely degradable products based on starch-based polylactide, this is still expensive. And paper-based products may not be a suitable replacement because of the requirement to cut down trees.

Burn it up

7. Noreen Thomas, a materials researcher at Loughborough University, UK, was one of the authors of a 2010 report for the UK Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) on oxo-degradable plastics[2]. These are mainly polyethylene but also include some types of polypropylene.

8. How quickly the plastic will break down into fragments is heavily dependent on heat and light exposure – and hence on the environment the plastic ends up in. The Defra report suggests that oxo-degradable fragments left outside in the United Kingdom would become small fragments over two to five years. The biodegradation of these small fragments then proceeds "very slowly", it notes.

9. "Our conclusion was there is no benefit to the environment of oxo-degradable plastics," Thomas told Nature.

10. These plastics should not be composted, as their breakdown fragments will ruin the resulting compost. But neither can such materials be incorporated into traditional plastics recycling as the same additives that encourage the break-up of the original material will degrade the recycled material produced.

11. The report recommended that these plastics should be kept out of conventional plastics recycling in favour of incineration or landfill.

12. The Defra-authored summary of the report points out, "Both of these options make the 'degradable' property of oxo-degradable plastics irrelevant."

Reference

1. Roy, P. K., Hakkarainen, M., Varma, I. K. & Albertsson, A.-C. *Environ. Sci. Technol.* advance online publication doi:10.1021/es104042f (2011).
2. Thomas, N., Clarke, J., McLauchlin, A. & Patrick, S. *Assessing the Environmental Impacts of Oxo-degradable Plastics Across Their Life Cycle* (DEFRA, 2010).

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

TOPICS

プラスチックのリサイクル

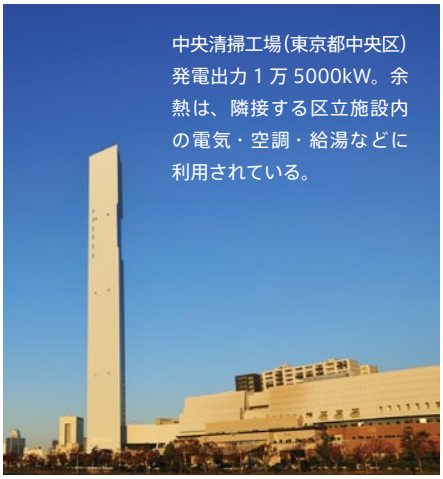
年々増え続けるゴミの処理は、世界的な問題である。日本でも、「容器包装リサイクル法」や「資源有効利用促進法」などの法律が整備され、リサイクル意識が高まっている。一般廃棄物に占めるプラスチックは、重量的には 10% であるが容量的には 20% にもなり、省資源だけでなく、不足する処理用地の面でも、リサイクルは重要になっている。プラスチックのリサイクルには、以下の 3 つがある。

・マテリアルリサイクル
再生利用（そのまま原料にして製品化）。
植木鉢や洗面器、コンテナ、塩ビパイプなどになる。
汚れや異物の少ないことが必要。

・ケミカルリサイクル
溶かしたり、化学的に分解したりして利用。
モノマー化・油化・ガス化・高炉還元剤・コークス炉化学原料など。

・サーマルリサイクル
焼却時の熱や灰などを利用。
発電・熱利用焼却・セメント原料燃化・固形燃料化など。
ダイオキシンが出ないように高温で高度な焼却施設が必要。

日本の廃プラスチック有効利用率は 76% であり、発電（35%）、再生利用（21%）、熱利用焼却（12%）が上位を占める（2008 年）。



中央清掃工場（東京都中央区）発電出力 1 万 5000kW。余熱は、隣接する区立施設内の電気・空調・給湯などに利用されている。

写真：アフロ

SCIENCE KEY WORDS

1. **polythene: ポリエチレン（下記参照）**
2. **polyethylene: ポリエチレン**
エチレンを重合させた高分子化合物。酸やアルカリに強く、絶縁性、耐水性、耐油性、耐寒性が良い。また、原料費が安く、加工しやすいこともあり、プラスチックの中で最も生産量が多い。ラップやレジ袋、ポリ容器などに利用されている。
3. **transition metal: 遷移金属**
周期表の 3 ～ 11 族に属する、電子軌道の d 殻または f 殻が不完全に満たされた元素を遷移元素といい、このうち d 殻が不完全なものを遷移金属という。融点が高く、多くで強磁性や反強磁性などの磁性秩序が見られる。触媒作用を持ち、錯体を形成する。
3. **iron: 鉄**
原子番号 26 の遷移元素。天然には、^{56}Fe が最も多く、ほかに ^{54}Fe、^{57}Fe、^{58}Fe がある（すべて安定同位体）。
3. **cobalt: コバルト**
原子番号 27 の遷移元素。天然には ^{59}Co しかないが、放射性の人工核種 ^{60}Co は、医療や工業に利用されている。
3. **oxidation: 酸化**
物質が電子を失う化学反応。物質が、酸素と結合したり、水素を失ったりする反応。
3. **ethylene: エチレン**
CH_2= CH_2。最も単純なアルケン。かすかに甘いにおいのする無色の引火性気体。
3. **polymer: ポリマー（重合体）**
単位化合物となるモノマー（単量体）が共有結合によっていくつも結合（重合）した高分子化合物。ナイロンやポリエチレン、アクリルなどさまざまなポリマーが、繊維、接着剤、薄膜などに利用されている。
3. **biodegradability: 生分解性**
生分解（biodegradation）とは、化学物質が微生物により分解されて無機化すること。
6. **starch-based polylactide: デンプンを原料とするポリラクチド**
ポリラクチドは、ポリ乳酸エステルのことで、植物から作られるプラスチック。カーボンニュートラルな点で注目されているが、石油由来のプラスチックに比べて高価、柔軟性に乏しい、耐衝撃性や耐熱性が低い、などの欠点がある。
7. **oxo-degradable plastic: オキソ分解性プラスチック**
原材料に添加剤などを加えて作る、光や酸素などで酸化されて断片化された後、微生物により生分解できるとされるプラスチック。
7. **polypropylene: ポリプロピレン**
プロピレンを重合させた高分子化合物。絶縁性が高く、耐水性、耐薬品性、耐摩耗性に優れている。ポリエチレンよりも耐熱性があり、硬質で軽量。自動車のバンパーから家電、ポリ容器などの日用品まで広く利用されている。

WORDS AND PHRASES

タイトル **degradable:「分解性の」、「分解可能な」**
degradability（3 段落目）:「分解性」
degradation（5 段落目）:「分解（性）」
リード **disintegrate:「分解する」**
リード **linger:「残存する」**
1. **after all:「結局」**
2. **discard:「捨てる」、「廃棄する」**
2. **purportedly:「～と称する」、「～といわれる」**
4. **fall apart:「ボロボロになる」**
4. **persist for a long time:「長い間残留する」**
4. **without reference to:「～とは無関係に」、「～を全く考慮せずに」**
5. **in one way:「ある意味では」**
5. **property:「特性」**
6. **genuinely:「正真正銘」**
8. **end up in:「最後は～に行き着く」**
10. **compost:「コンポスト化する」**
10. **incorporate into:「～に組み入れる」**
11. **keep out of:「～の外に置く」**
11. **in favour of:「～を優先させる」**
11. **incineration:「焼却」**
11. **landfill:「埋め立て」**
12. **irrelevant:「無意味」**

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

参考訳

消えない「分解性」プラスチックの謎

環境に優しいプラスチックは環境中で元の形を失うが、その状態でいつまでも残存するのかもしれない。

ダニエル・クレッシー

ISTOCKPHOTO

環境負荷を考えれば、マイバッグを持参するのが最もよい方策だろう。

1. 環境に優しいといわれるタイプのポリエチレンも、結局のところ、それほど環境に優しくないのかもしれない。

2. ポリエチレンは世界で最も広く用いられている材料の 1 つであり、捨てられたポリ袋は、人間が環境に及ぼす影響を端的に象徴するものの 1 つになっている。廃棄されるポリエチレンの量は膨大で、これに対する懸念が高まるにつれ、「分解性」と称するポリエチレンの使用量が増えてきた。

3. エチレンポリマーに鉄やコバルトのような遷移金属を添加すると、酸化が促進される。このため、こうした材料を使用する食品包装やポリ袋で、分解性あるいは生分解性があると謳(うた)うものは少なくない。ところが先週、*Environmental Science & Technology*[1] に掲載された総説論文によれば、「分解性ポリエチレン」に看板どおりの効果があることを示す証拠は存在しないという。

4. 例えば、「分解性」ポリ袋が環境中でボロボロになるのは明らかだが、ボロボロになった断片は長期にわたって残留することがあるのだ。それにもかかわらず、この断片に関する長期的研究は行われていない。ここで問題なのは、その製品が完全に生分解するまでにどのくらいの時間を要するかを考慮することなく、「生分解性」があると謳っている点である。

5. 「分解性ポリエチレンに関する論文はおそろしく多いのですが、高い分解性を本当に実証した論文はなかったのです」。こう話すのは、スウェーデン王立工科大学（KTH；ストックホルム）のポリマー研究者で、上記の批判的な総説論文の主著者である Ann-Christine Albertsson だ。「もちろん、ある意味では、分解しているといえます。特性の一部が失われていますからね。けれども、自然にとって好ましい形で分解されるかどうかは、実証されていないのです」。

6. Albertsson によると、中国などの開発途上国でも「分解性」ポリエチレンの使用が始まっているという。インドの当局者もこのテーマに関心を持っており、最近、彼女と研究するためのポスドクを派遣してきた。すでに一部の国々は、デンプンを原料とするポリラクチド（ポリ乳酸エステル）を用いた正真正銘の分解性製品に切り替えようとしているが、こうした製品はまだ高価である。また、紙を原料とする製品も適切な代替品ではないかもしれない。木を伐採する必要があるからだ。

分解性プラスチックは焼却せよ

7. ラフバラ大学（英国）の材料科学者 Noreen Thomas は、英国環境・食糧・農林地域省（DEFRA）の委嘱に基づくオキソ分解性プラスチックに関する報告書（2010 年）[2] の著者の 1 人だった。オキソ分解性プラスチックの多くはポリエチレンだが、数種類のポリプロピレンもこれに当たる。

8. プラスチックが断片化する速さは、熱と光へのさらされ方、つまり、そのプラスチックが行き着く先の環境に大きく依存している。DEFRA の報告書によると、英国では、屋外に放置されたオキソ分解性プラスチックの断片は 2 ～ 5 年で小断片化し、その後、小断片の生分解が「非常にゆっくりと」進むという。

9. Thomas は *Nature* に、「オキソ分解性プラスチックは環境に利益をもたらさないというのが、この報告書の結論でした」と語った。

10. オキソ分解性プラスチックはコンポスト化すべきではない。その分解片が、出来上がったコンポストの質を台無しにするからだ。かといって、従来のプラスチックのリサイクルに組み入れることもできない。プラスチックの分解を促進するための添加剤が、再生材料の質も低下させるからだ。

11. この報告書は、オキソ分解性プラスチックを従来のプラスチックリサイクルに出さずに、焼却または埋め立てによって処理することを勧告している。

12. DEFRA が作成した報告書の要約の中では、「どちらの処理法を選ぶにしても、オキソ分解性プラスチックの『分解性』は無意味になる」と指摘されている。

（翻訳：菊川 要）

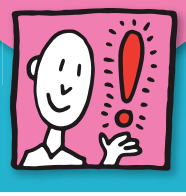
©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

nature ダイジェスト

Nature ダイジェ
全国の書店、A

NPG ネイチャー アジア・パシフィックのウェブサイトはもちろん

新規購読
キャンペーン
実施中！
3か月無料購読
プレゼント
8月31日まで



帰りに
買いたい！

いつも
利用している
Amazonで！

nature asia-pacific & 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も可能です。

全国の書店・生協

全国の書店、生協で
扱っています*。

amazon.co.jp

最新号の予約

*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。

新規購読キャンペーンお申し込みはこちらから
www.naturejpn.com/3mnt

nature asia-pacific

EDITOR'S NOTE

昨今の国会の様子は、復興に向けて与党・野党が力を合わせるべきであるところ、与党内ですら分裂騒ぎ。被災地への対応より政局ばかりで、国民の代表者としてあるまじき姿に失望感を持たれた方も多いことと思います。ヒトは協力し合える高度な認知能力をもった動物です。ゾウですら餌を得るために力を合わせるのに！　どうしてこの未曾有の事態に代表者たちが協力できないのでしょうか。個人的には、彼らが被災者の立場で問題を認識していないと思えてなりません。課題がわからなければ共通のゴールも見えないことでしょう。今こそ人類の持つ強さと賢さを発揮すべき時と思います。（う）

*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。

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

© 2011 年　NPG Nature Asia-Pacific
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：中村康一
編集：田中明美、中野美香、宇津木光代
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、池田恵子
藤原由紀
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。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

ネイチャー・ダイジェスト
7月号
平成23年6月25日発行 第8巻 第7号
編集発行人：David Swinbanks
発行所：ネイチャー・ジャパン株式会社
東京都新宿区市谷田町2-37 千代田ビル
発売所：日本出版貿易株式会社
ISSN：1880-0556

お得に泊まって、そのぶん息抜き。

ホテル代をかしこくセーブし、仕事の合間に、充実のひと時。

Hotels.com

www.hotels.com
ホテルズドットコム 検索

13万軒以上の海外ホテル情報！

ハッピーになれるホテルを探そう。

さらに10%OFF
割引コード［NPGMM10］入力で当サイト合計室料*から
割引コードは、他のキャンペーンや単体のホテル予約でも10%OFF。ホームページで予約の際、上記割引コードを入力してください。割引コードは電話予約でも割引が適用されます。一部割引対象外のホテルがあります。コードの利用期限2011年6月25日~2011年9月30日まで（宿泊期限は2011年6月25日~2011年10月31日まで）＊税金とサービスを除く料金。

ご予約24時間受付中！ 通話無料／携帯可
年中無休 0120-998-705
電話予約の手数料は必要ありません。

他のホテル予約サイトとの差額を返金！※
価格保証プログラム

お得な情報をタイムリーに GET! twitter
Hotels.com 公式アカウント「@Hotels_com_jp」

facebook でスペシャル情報を GET!
Hotels.com Japan ページで"いいね！"をクリック

※元のリクエストと同じホテル、同じ日程、宿泊日数、部屋の種類である必要があります。※特別価格でご提供しているホテルについては対象外とさせていただきます。※ホテル予約は、予約時に金額が支払われている必要があります。※お客様が見つけられた、より安い料金は、日本での消費者向けの他社ウェブサイトを通じて利用可能である必要があります。※元のご予約の際にクーポンや割引券を使用された場合は、お客様が支払った割引後の合計金額を使い、見つけられた、より安い料金との差額を返金額として計算します。※詳細は、ウェブサイト（www.hotels.com）をご覧ください。●ホテルの価格・キャンペーン情報についての詳細はホームページをご覧ください。サービス提供：米国法人 Hotels.com,L.P. マーケティング・企画：エクスペディアホールディングス株式会社 〒106-0032 東京都港区六本木1-9-9 六本木ファーストビル 登録番号：東京都知事登録旅行業務 第3種5818号加入旅行業会：（社）日本旅行業協会協力会員

定価 680 円
本体 648 円
Printed in Japan
雑誌 07271-07
4910072710713
00648