日本語で読む世界の最新科学ニュース

nature ダイジェスト

06
2011

試験管で精子作製

ES細胞から網膜

地震対策の再考が必要

やっぱり恐竜は鳥の祖先

チェルノブイリから25年

海洋生物に忍び寄る放射能汚染

英国での65年に及ぶコホート研究

タンパク質――不規則の秩序

日本の科学を救え!

質感を科学する

社会科学の課題

定価680円

nature COMMUNICATIONS

1st year anniversary

Over 250 papers published & growing
47% published open access to date

Now publishing weekly. Stay up to date with the latest content — sign up to receive free Nature Communications alerts!
Submit your original research. Papers published represent important advances of significance to specialists within each field.

www.naturejpn.com/ncomms

npg nature asia-pacific

nature ダイジェスト
06
2011

2011 年 5 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

ENZO SIGNORELLI/GETTY IMAGES

チェルノブイリの遺産 26

COVER IMAGE: 爆発直後のチェルノブイリ原発。（AP/ アフロ）

チェルノブイリ原子力発電所の事故から 25 年。現地では今もなお除染作業が続いている。

NATURE NEWS
03　2 番目に長い氷床コアを掘削
18　地震対策の再考が必要
20　社会科学の 10 の未解決問題
22　緊縮予算のしわ寄せを受ける米国の物理学研究
23　ゲノム組み立てプログラムの比較

NEWS IN JAPAN
05　「質感」の認知能力に迫る

NATURE FEATURE
14　タンパク質のドグマが崩れていく

NEWS & VIEWS
34　赤色巨星の内なる鼓動

EDITORIAL
36　日本の科学、再興への道のり
37　電磁気の統一から 150 年

JAPANESE AUTHOR
24　鳥は恐竜から進化した ── 論争についに終止符（田村 宏治）

HIGHLIGHTS
38　2011 年 4/7 ～ 4/28 号

英語で Nature
42　博物館の標本が証言する水銀濃度の上昇

02 海洋生物に忍び寄る放射能汚染

福島第一原発から海に流出している放射能汚染水。放射性物質が生物濃縮される懸念があり、監視の強化が必要である。

ABACA/ABACA/NEWSCOM

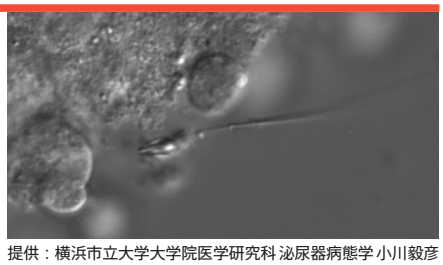
08 揺りかごから墓場まで ──英国コホート研究

1946 年 3 月のある 1 週間に英国で生まれた赤ちゃんを対象にしたコホート研究。この研究はまだ継続中である。

ISTOCKPHOTO

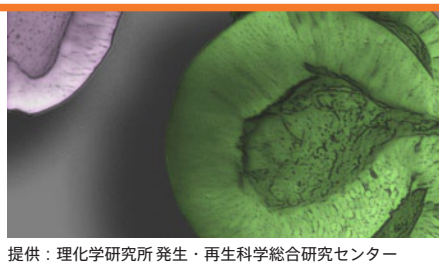
04 培養下で哺乳類の精子形成に成功

培養下で機能的な精子を成熟させることに成功し、男性不妊治療への応用が期待される。


提供：横浜市立大学大学院医学研究科 泌尿器病態学 小川毅彦

32 Do-It-Yourself で眼を作ろう

ES 細胞を三次元培養して自己組織化を誘導し、眼杯の立体構築に成功した。これは、再生医療に向けた大きな一歩である。


提供：理化学研究所 発生・再生科学総合研究センター 笹井芳樹

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

日本の沿岸で収穫される褐藻類は放射性ヨウ素を取り込む。

JIJI PRESS/AFP/GETTY IMAGES

海洋生物に忍び寄る放射能汚染

Radiation release will hit marine life

Quirin Schiermeier 2011年4月14日号 Vol. 471 (145–146)
www.nature.com/news/2011/110412/full/472145a.html

損傷した福島第一原子力発電所から海への放射性物質の流出が続いている。生態系への影響を見極めるには、できるだけ早い時期に広い範囲で海洋調査を実施する必要があるだろう。

「太平洋は広い」――これは、福島第一原子力発電所から放射性物質が海に流出していることが明らかになって以来、何度も繰り返されている言葉だ。

海に流出した放射性物質が高度に希釈されることについて、異論はない。それでも研究者たちは、福島周辺の海域の生態系が受ける被害を評価するために、できるだけ早い時期に海洋調査を開始する必要があると考えている。今回の放射能汚染が、海洋生物に直ちに悪影響を及ぼすとは考えにくい。だが、半減期の長い放射性物質は食物連鎖を通して生体内に蓄積していくと考えられ、魚類や海洋哺乳類の死亡率の上昇などの問題を引き起こす可能性があるのだ。

ウッズホール海洋研究所（米国マサチューセッツ州）の海洋地球化学者 Ken Buesseler は、こう語る。「ある海域で放射性物質が検出されたからといって、そこが危険であるというわけではありません。とはいえ、今回のケースは、最大規模の人為的な放射性物質の海洋流出になります。われわれは、何が起きているのか評価できるだけのデータをまだ見ておらず、さらなるモニタリングが行われるなら、どんなものでも歓迎します」。

3月下旬から4月上旬にかけての調査では、福島第一原子力発電所周辺の海域だけでなく、30km 沖合で採取した海水からも、極めて高濃度の放射性ヨウ素131（半減期8日）とセシウム137（半減期30年）が検出され、3月末時点での濃度は、事故前の数万倍の高さになっていた（次ページグラフ参照）。このほかにも、半減期が長いものから短いものまで、多くの種類の放射性物質が海に流出していると考えられる。

これまでに流出した放射能の総量は不明である。（4月21日の東京電力の発表によると、少なくとも2号機取水口付近から流出した高レベル汚染水の放射性物質の総量は、4月1日に流出が始まったとして4月6日の止水まで4700兆ベクレル、やむを得ない対策として放出された低レベル汚染水中の放射性物質の総量は、1500億ベクレルという。）今後、原発でさらなる問題が発生すれば、かなりの量になる可能性もある。

このようにまだ不透明であるが、放射線医学総合研究所（NIRS；千葉市）では、海洋生物の筋肉、器官、卵、骨に蓄積される放射性核種のモニタリング調査、さらには、海洋環境における放射性物質の長期的な挙動のモデルや海洋生物の総被曝線量のモデル作りを計画している。NIRS の海洋放射線生態学の専門家、青野辰雄（あおのたつお）は、「放射性ヨウ素と放射性セシウムが海洋生物に及ぼす影響を評価するには、それぞれの濃度が具体的にわかっている必要があります」と言う。

フランス放射線防護原子力安全研究所（IRSN；シェルブール）の Dominique Boust 所長が率いる研究チームは、現在、原発から流出した放射性同位体の量の見積もりと、発表されている海水の測定値から算出したこれらの放射性同位体の比率を用いて、海洋生物と海底堆積物の汚染レベルの予測を行っている。

それによると、原発から300m の海域の放射能濃度は、全体では1L 当たり約1万ベクレルで、約50種類の放射性同位体が関与しているという。事故前のこの海域の放射能濃度は、セシウム137が

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

1L 当たり 0.003 ベクレル、ヨウ素 131 は未検出だった。IRSN によると、これらの測定値を基に、現時点で、同海域の海底堆積物の放射能濃度は 1kg 当たり 1 万～ 1000 万ベクレル、魚類では 1kg 当たり 1 万～ 10 万ベクレル、海藻類では 1kg 当たり最大 1 億ベクレルに達している可能性があるという。政府が規定している食品衛生法の暫定基準値では、食用とする魚類に含まれる放射能濃度の上限値は、セシウム 137 については 1kg 当たり 500 ベクレル、ヨウ素 131 については 1kg 当たり 2000 ベクレルである。

IRSN の放射線生態学・生態毒性学・環境モデリング研究所（フランス・カダラッシュ）の Thoman Hinton 副所長は、「これ以上の放射能漏れが起こらなければ、放射線量は時間の経過とともに、そして、原発から遠くなるほど、速やかに低下していくでしょう。けれども、福島周辺の海域では、ある種の核種による低線量放射線が長期にわたって検出され続ける可能性があります」と言う。「その影響を正確に見極めるには、国際的な長期評価が必要です」。

コロラド州立大学（米国フォートコリンズ）で環境衛生学と放射線衛生学を研究している Ward Whicker も、こうした評価の価値を認めている。「流出ポイントの近くだけでなく、もっと離れた場所でも、非常に多くのサンプリングが必要になります。海水、海底堆積物、プランクトン、軟体動物、甲殻類、海藻、魚類に含まれる放射性核種の濃度を測定し、生態系の健全性をモニタリングしなければならないのです」。

しかしながら Whicker は、魚介類や海藻に含まれる放射性物質の濃度は、今後数週間は食用としての上限値を超える可能性があるものの、海洋生物への遺伝的影響を特定することは不可能だろうと考えている。影響を受けた生物は、広い太平洋に拡散していったり、健常な個体よりも早く死んだりするだろうというのだ。さらに、それ以外のストレスの影響（従来の水質汚染や津波による損傷など）と放射線の影響を区別することは、非常に難しいだろう。

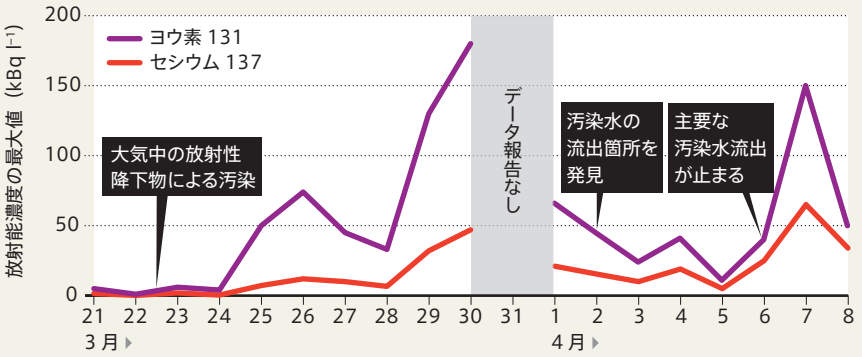
もう 1 つのアプローチとして、代表となる生物種を 1 つ選んで、集中的に調査を行うことが考えられる。IRNS の Bruno Fievet は、「個人的には、褐藻類の調査を最優先するべきだと考えています」と言う。なかでもコンブ科の *Laminaria digitata* は日本の太平洋沿岸に広く分布し、海洋汚染などの環境ストレスから身を守るためにヨウ素を取り込む性質があり、その濃度は、周囲の海水の約 1 万倍にもなることがある。「この種の褐藻はヨウ素の取り込みにかけては世界一であり、海洋生物の放射能汚染の良い指標となるはずです」と Fievet は言う。

しかし、福島第一原子力発電所の危機はまだ去っておらず、これがサンプル採取を妨げている。ライプニッツ海洋科学研究所（ドイツ・キール）の海洋生物学者 Ulf Riebesell は、こう話す。「どんな調査でも大歓迎です。けれども私は、この危機的状況の中、フィールドワークを目的に自分の学生を日本に行かせることは絶対にできません」。 ■

（翻訳：三枝小夜子）

放射性同位体による海洋汚染

福島第一原子力発電所の周辺海域のセシウム 137 とヨウ素 131 は、法定基準値（ヨウ素 131；1L 当たり 40 ベクレル、セシウム 137；1L 当たり 90 ベクレル）を突破した。



SOURCE: IAEA/TEPCO/IRSN

RESEARCH HIGHLIGHT

2 番目に長い氷床コアを掘削

Record ice core drilled

2011 年 2 月 10 日号
Vol. 470 (144)

H. ROOP

米国の複数の研究グループが参加している南極での氷床コア掘削計画「西南極氷床分水嶺氷床コアプロジェクト」が、全長 3330m の氷床コアを掘り出した。最後の部分は今年 1 月 28 日に取り出された。氷床コアは極地や氷河の氷床から掘削・採取された氷の柱で、この中に泡として含まれている気体から、過去 10 万年間の地球の気候の記録が得られるはずだ。今回の氷床コアは、これまでに掘削された氷床コアの中でも 2 番目の長さ。最長記録は、ロシア、米国、フランスの科学者からなる共同研究チームが 1998 年に掘削したもので、全長は 3623m だった。詳しい情報については go.nature.com/ffgeg7 を参照。

（翻訳：新庄直樹）

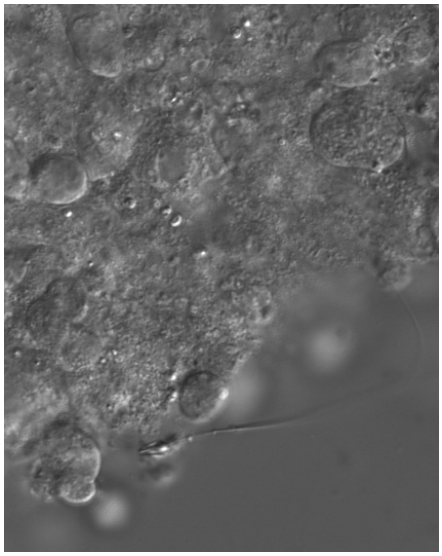
©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

培養下で哺乳類の精子形成に成功

Sperm grown in a test tube

Janelle Weaver　2011年3月24日　オンライン掲載
www.nature.com/news/2011/110323/full/news.2011.179.html

未成熟なマウスの精巣組織を培養して、成熟精子の形成に成功した。



生物学の分野では数十年も前から、細胞培養で成熟精子を形成させようと努力が続けられてきた。

提供：横浜市立大学大学院医学研究科 泌尿器病態学 小川毅彦

長い間、実現が不可能だと考えられていた、培養下での生殖能力のある哺乳類の精子の形成に、横浜市立大学の小川毅彦（おがわたけひこ）たちの研究チームが成功した。*Nature* 2011年3月24日号に報告された[1]その手法は、精子形成の過程について分子レベルでの解明に役立つと考えられ、男性不妊症の治療にもつながるであろう。

体外で精子形成を再現しようとする試みは1世紀近く前からあった。だが、哺乳類では、減数分裂がうまくいかず、成功例がなかった。減数分裂は、配偶子（卵や精子）の形成時に起こる細胞分裂の様式で、その最中に、対になった染色体同士でDNAの相互交換（乗り換え）が起こり、最終的には細胞当たりの染色体の数が半減する。この過程を完了することで、精子や卵に受精に向けた準備が整うのである。

小川たちは今回、減数分裂を完了させて精子を成熟させるには、従来の培養法に単純な変更を加えればよいことを見いだした。

「今回の成果には大いに胸が躍ります。大勢の生殖生物学者たちが長年目指してきた目標が達成されたのですから」と、生殖遺伝学を専門とするジャクソン研究所（米国メーン州バーハーバー）のMary Ann Handelは話す。

まさに「カルチャー」ショック

小川たちのチームは試行錯誤を重ね、新生児マウスの精巣組織片から精子を成熟させるためにどのような培養法が良いかを探った。また、精子形成の進み具合を見るために、蛍光タンパク質を使って、減数分裂を行っている（もしくはすでに行った）細胞を検出できるようにした。

研究チームは当初、精巣組織片を寒天ゲル上に置き、典型的な細胞培養液であるウシ胎児血清に浸した。しかし、この培養液にどんな成分を加えても効果はなく、精子の成熟を促すことが知られる因子類でもだめだった。

ところが、ウシ胎児血清の代わりに、胚性幹細胞の増殖によく使われる「KnockOut Serum Replacement」という血清を含まない培養液を使ったところ、精子形成がうまく進んだのである。

この培養液に浸して数週間後、ほぼすべての精巣組織サンプルには、精子と同数の染色体を持つ細胞がいくつか含まれていた。また、サンプルのほぼ半数には、精子が遊泳に使う鞭毛を備えた細胞が見られた。精子形成は培養から1か月前後がピークだったが、2か月を超えても続いた。

研究チームは最終的に、この方法でできた精子を卵細胞へ注入した。そして数週間後、複数の代理母マウスから計12匹のマウスが生まれたのである。どの子マウスも健康で生殖能も保持していた。

さらに、この培養法を使って、数日もしくは数週間冷凍保存した後の新生仔精巣組織でも精子を形成することができた。

実用化は時間の問題

サスカチュワン大学（カナダ・サスカトゥーン）の生殖生物学者Ali Honaramoozは、がん治療により生殖能力を失ってしまう思春期前の少年たちにとって、小川たちの手法がある種の救済手段になるだろうと話す。また、性的に成熟する前に死んでしまうおそれのある絶滅危惧動物で、生殖の可能性を守るためにも役立つだろうとも語る。

今回の手法は、精子形成の基盤にある分子レベルの現象を探る上でも有用だろうと、ジョージタウン大学（米国ワシントンD.C.）の細胞生物学者Martin Dymは言う。ただし、この手法を男性不妊症の治療に適用するには、数百万もの精子を産生したり、ヒトでも機能するように調整したりする必要があるだろうと、付け加えた。

Honaramoozは、臨床への応用は時間の問題だと思っている。「このやり方にさまざまな微調整を加えて、ほかの動物種にも当てはめることができれば、言うことなしですね」と彼は話す。「もしうまくいかなければ、また途方もない研究をする羽目になるでしょうが、今のところ、この方法でうまくいくだろうと思っています」。■

（翻訳：船田晶子）

1. Sato, T. *et al. Nature* **471**, 504-507 (2011).

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

「質感」の認知能力に迫る

長谷川聖治（読売新聞科学部記者）

ものを見た瞬間、私たち人間は、温かさ、冷たさ、滑らかさ、新しさ、感触といった素材が醸し出す「質感」を感じ取り、ほかと識別する。このような質感は、芸術分野などでは古くから表現されてきたが、科学の光を当て、質感を認識する人間の情報処理の仕組みを解明し、新たな素材開発などにつなげようという試みが始まっている。

同じ形、色のものを見ても、素材が異なれば質感も違ってくる。この違いを生んでいるものは何なのか。実は、反射・干渉など物質と光の相互作用だけでなく、光を受け取る網膜や脳内の情報処理系、さらに心理状態や文化なども関係していると考えられる。質感の研究は米国、ドイツなどが先行していたが、日本でも昨年から本格的な研究が始まった。工学、心理物理学、脳神経科学の学際的な取り組みを進める文部科学省の新学術領域研究「質感脳情報学」がそれだ。

この分野を牽引する一人が、視覚科学技術を専門とする豊橋技術科学大学の中内茂樹（なかうちしげき）教授。質感研究の重要性について、「コンピューター・グラフィックス（CG）などで本物を忠実に再現しようとする際の重要な知見を与えてくれるはずです。またこの研究は、リアリティーとは何か、豊かさや憩いなどを現実世界に与えてくれる質感とはそもそも何なのか、といった根源的な問題にかかわっています。衣食住のあらゆる側面で生かされる可能性があるのです」と強調する。

研究は大きく３つのテーマに分けられる。①質感を工学的に定量化し、それを再現する技術の開発、②質感認知のための感覚情報の特徴とその処理法の解明、③質感認知の脳情報処理の仕組みの解明。

中内教授は、②のテーマの１つとして「質感認知における環境・学習依存性の解明」という研究を担う。ものづくりの現場で、製品の良し悪しを瞬時に見分けるエキスパートの質感識別能力がどこから来ているのか、実験で確認しようというのだ。製品の最終チェックは、産業用ロボットが普及しても、大半は人の目に頼らざるを得ないのが現実。これはまた、人間の本質に迫る研究でもある。

中内教授が注目するのは、真珠を鑑定する熟練者だ。真珠の大きさ、形状、キズの有無に加え、質感に関係する色調、表面の光沢、「巻き」（干渉色）を瞬時に識別していく。しかもばらつきが少ない。

鑑定士の実験の前に、真珠の構造と質感の光学的な関係解明に取り組んだ。真珠は、アコヤガイの中に入れた核（貝の一部など）の周りに、有機物でくっついた炭酸カルシウムの結晶が重なってできた多層構造をしている。各層の厚さは 0.3 ～ 0.4μm である。この真珠層の色調は、含有する有機質、たんぱく質などによってピンク、ホワイト、クリーム色になる。一方、光沢は、表面の滑らかさだけでなく、整然と並ぶ真珠層と厚さが関係する。また「巻き」は、真珠層の多層構造による光の干渉などで、薄い層なら青緑色、厚い層なら赤色などが発現する。

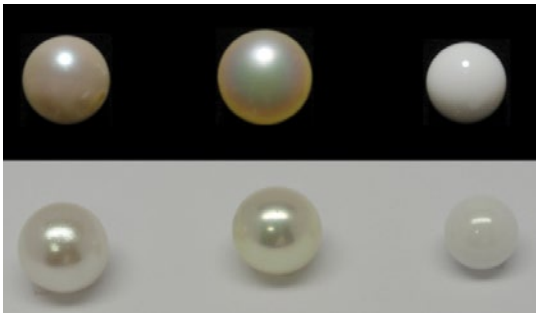
鑑定士によってランク付けされた真珠に対し、透過光、反射光のスペクトル、輝度、色分布などを解析することで、質感にかかわる感覚情報と品質との相関が次第にわかってきた。

「鑑定士は、これらの質感情報を瞬時に見分けます。ただ、この見極めも観察する環境によって異なり、例えば、暗室の、点光源で、黒背景だと真珠の質感はわかりません」と言う。興味深いことに、目視評価の最適な環境は、北窓の自然光の下で、しかも９時から 15 時までの時間帯なのだ。真珠のハイライト（最も明るいところ）、光沢、干渉色などの映り込みが生じ、判定に都合が良いという。

「この条件が何を意味するのか、まだわからないことは多いのです。まずは環境依存性を解明したい」と意気込む。

もう１つの焦点は、例えば高校生でも学習すれば、鑑定士のような質感を見分けられるのか、という問題だ。熟練者と非熟練者の認知にどんな違いがあるのか。その解明のため中内教授が開発したのが実験室を搭載した車「モバイル・ラボ」。①真珠の品質をどの程度正確に見分けているのか、②観察環境は質感にどう影響するのか、③実物でなければできないのか、写真ではどこが難しいのか、④物体の動きは質感に影響するのか、といった課題を真珠養殖・加工の現場に行って調べる計画を温めている。

「これまで、感性と括られていた分野に科学のメスが入ることに意味があるのです。本物に限りなく近い質感を持った人工製品の開発にも役立つでしょう。さらに、天然のものを好む人間の感覚、心理の深層に触れることになるかもしれません」と話している。■



真珠質感と観察環境
上：暗室、点光源、黒背景の場合
下：室内、北窓光、白背景の場合
中央はＡランク、左はＣランク、右はジルコニアでできたボールベアリング

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

技術から科学へ、科学から技術へ
――豊橋技術科学大学を語る――

榊（さかき） 佳之（よしゆき） 学長
東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、理学博士。カリフォルニア大学、三菱化成生命科学研究所、九州大学教授、東京大学教授、理研ゲノム科学総合研究センター長を経て 2008 年より現職。専門はヒトゲノム解析。国際ヒトゲノム計画の日本代表をつとめ、2002 年より 3 年間ヒトゲノム研究国際組織 HUGO の会長。

澤田（さわだ） 和明（かずあき） 電気・電子情報工学系 教授
豊橋技術科学大学大学院工学研究科システム情報工学専攻修了 工学博士。静岡大学電子工学研究所助手、豊橋技術科学大学助教授、ミュンヘン工科大学客員教授を経て 2008 年より現職。専門は半導体材料、デバイス、センサ、集積回路。LSI とセンサ技術を融合した集積化バイオセンサの研究に従事。

中内（なかうち） 茂樹（しげき） 情報・知能工学系教授 / 学長補佐
豊橋技術科学大学大学院工学研究科システム情報工学専攻修了 博士（工学）。同大学助手、助教授を経て 2007 年より現職。専門は視覚認知情報学。ヒトの視知覚メカニズムに関する研究のほか、カラーユニバーサルデザインや分光画像法等の応用研究にも携わる。平成 23 年度文部科学大臣表彰科学技術賞（開発部門）受賞。

榊（佳之） テクノロジーによってサイエンス自体が質的に変わっていくことがよくあります。私は豊橋技術科学大学（以下、本学）に学長として来る前は、ヒトゲノム解析に携わってきました。ヒトゲノムの解読においては、DNA シーケンス決定法の開発が大きな転換点となったのですが、更に大きな転換をもたらしたのは、それを自動化した DNA 自動シーケンサーの開発という技術革新でした。その威力は絶大で、技術が科学を飛躍的に発展させることを、まざまざと見せつけられました。本学に来てみて、それが様々な分野で起こっていることを実感しています。特に今日来てもらった二人、澤田和明先生、中内茂樹先生のテクノロジーは生命科学者から見ると非常に魅力的です。まず澤田先生の方からお話を伺いましょうか。

澤田（和明） 今の研究を始めた時には、まさか生命科学の方に興味を持っていただくとはまったく思いませんでした。もともと私は工学者で、CCD（電荷転送技術）を利用したイメージセンサを作っているのですが、それは光の分布や光の動きを見るものです。何となくイオンが見えたらいいなあ、くらいの感じで始めたのですが、やっているうちに、生命科学の方々が「それを使うとこんなのが見えるのでは」といった様々なアドバイスをくださるようになりました。今実際に取り組んでいるのは、細胞からイオンや生理活性物質が出ているのをそのまま画像化し、二次元でテレビと同じように見えるようにすることです。

榊 動いているものが、ラベルなしにそのままリアルタイムで見えるのです。

澤田 もともとは水素イオンだけだったのですが、生命科学の先生方のニーズ

を聞きながらカリウムイオンなども見えるものをつくっています。

榊　アセチルコリンなど多様な物質に使える汎用性がある。そして、感度も素晴らしい。

澤田　十分に使える感度だと言っていただいています。不思議なことに、同じようなアプローチを考えた人は、10年くらい前に私が始めるまでは、他にいませんでした。生命科学などのサイエンスと、イメージセンサというデジカメなどの産業技術の間をつなぐような興味を持つ人が、それまでいなかったのだと思います。

榊　中内先生も、きわめて独創的な研究をされています。我々は視覚から「きれいだ」と感じたり、「これは金属製だ」という判断をしていますが、それが脳の中でどういう情報処理をされて出てくるのか。それを中内先生は、科学の世界に下ろしてきて脳情報学という新しい分野を切り拓いていますね。

中内（茂樹）　私がやってきたのは知覚の研究なのですが、最近は質感の研究に取り組みはじめています。人間はどのように質感を知覚し、材質をどのように見分けるのかという問題は、実はまったく解けていないのです。

榊　どのような方法論で研究しているのですか。

中内　私の場合は、真珠を例にして視覚による質感認知を調べるために、人間を対象にした実験と、光学的な計測の両方を行っています。真珠には半透明の多層膜があって、そこで起きている物理的な現象は何となくはわかっています。一方、ある光パターンを人間が見た時に、脳では何が起きているのか。熟練の鑑定士は、何を学習してそんなに速く選別ができるようになっているのか。それを脳と行動の両面から分析しています。面白いのは、なぜ自分が見分けられるのか、本人は自覚していない場合がほとんどなのです。そこに脳科学的なメスを入れたいというのがもともとの発想です。

澤田　中内先生も私も、高等専門学校（高専）を卒業して本学に入りました。高専というのは、15歳から「自分は技術で生きていくぞ」と決めている人ばかりで、高専卒業生の多いこの大学には、「まずはやってみる」という源流があります。

中内　理論と実験があった場合に、理論設計してから実験に向かうというのがオーソドックスな方法なのですが、技術の分野では、それが同時並行的に進行する場合も多々あるのです。そして、技術はサイエンスの結果を利用する側というイメージにとらわれがちなのですが、本学では、まさしく技術と科学は表裏一体であるということが体現されていると思います。昨年10月には、エレクトロニクス先端融合研究所も開設されました。

榊　この研究所では、先端を走る技術開発の研究者と、脳科学など最先端の生命科学や情報科学などの研究者とが同じ場で仕事をしています。その融合によって、新しい発想も生まれ、相互のフィードバックが起こりやすくなります。既に分野の垣根を越えて非常に活発な雰囲気が生まれています。

中内　科学から技術へというパス、技術から科学へというパスがぐるぐる回るには、研究者が物理的に同じ場所で同じ時間を過ごすことが重要だと私も実感しています。

榊　そして本学には、澤田先生の技術の元にもなっている高機能センサチップを作るLSI工場があります。高機能半導体の設計、製作、評価を一貫してできる施設を持っているのは世界でも本学とベルギーのIMEC（アイメック）だけではないでしょうか。最後に、お二人に研究者としての夢をお聞きしたいと思います。

中内　サイエンスと芸術の関係を深く追求してみたいですね。人間が何か物を見た時に「美しい」と感じる所作や色やパターンは、通常「人それぞれ」と言われることが多いですが、実は何となく共通の形式があったりする。それを科学的に理解できるようにしたいです。

澤田　私はもともとセンサ屋ですが、本当に優れたセンサは生き物がもっていると思っています。嗅覚は犬が優れ、聴覚はコウモリがすごいと言われます。それは、長い年月をかけて進化してきたからだと思います。その生物のセンシング技術とエレクトロニクス技術を一緒にしたようなものを、いつか作ってみたいと思っています。

榊　お二人が若いセンスで新しい世界を拓いてくれることを期待しています。

豊橋技術科学大学　総務課広報係
電話：0532-44-6506　Eメール：kouho@office.tut.ac.jp　URL：http://www.tut.ac.jp/

揺りかごから墓場まで――英国コホート研究

Study of a LIFETIME

Helen Pearson 2011年3月3日号 Vol. 471 (20-24)

1946年3月。まだ寒さの残る英国で、ある1週間に生まれた赤ちゃん数千人の追跡調査が開始された。
そして2011年、赤ちゃんたちは65歳の誕生日を迎えた。
これほど大規模なコホート調査（同一集団統計調査）は類を見ず、その科学的価値は計り知れない。

1946年3月5日火曜日、Patricia Malvernは、英国チェルトナムの狭いアパートの一室で生まれた。出生時の体重は4kg。部屋の近くのボイラー室では、父親がアパートの建物全体を暖めるために燃料をくべていた。

その翌日、David Wardは、ロンドン近郊のハンプトン・コート宮殿の向かい側にある「ユダヤ系病院で、少数のカトリック教徒の1人」として生まれた。Wardは自分の出生体重を正確に知らない。父親によると、彼の誕生のようすは「丸裸のウサギみたいだった」という。

第二次世界大戦の終結から間もないこの1週間に、イングランド、スコットランド、ウェールズで1万6695人の赤ちゃんが生まれた。保健師たちは、その赤ちゃんのほとんどについて、4ページもある質問表に、体重をはじめさまざまな詳細事項を記録した。父親の職業、家の部屋の数、同居人数（家政婦なども含む）、嫡出子か非嫡出子か、などである。このうち5000人余りに関しては、調査が続き、数年後にはファイルは厚く膨れ上がった。やがて、この子たちが学校に通い、成人し、中年になっても、身体測定が行われ、さらには、身体だけでなく精神面でも、思いつくほぼすべての方法で検査が行われた。

今年3月第1週、彼らは65歳の誕生日を迎えた。65歳という年齢は、英国では定年を迎える年であり、人生の節目に当たる。そのうえ、彼らは世界最長の出生コホート（同時期に生まれた統計集団）調査の対象でもあるのだ。このありふれた人々は今や、ある意味、地球上で最もよく研究された人々であり、科学的に最も価値ある集団となっている。なぜなら、健康状態と経済状態が一生涯にわたって追跡されており、生まれてから死ぬまでの人生に個人差が生まれる要因を調べることができるからである。

同世代集団の調査

現在、この調査は、National Survey of Health and Development（NSHD；全国健康発育調査）と名称を変え、英国医学研究会議（MRC）によって実施・運営されている。これまでの成果は、8冊の本と約600本の論文に報告されている。調査によって明らかになったのは、何よりも、幼少時の生活環境が非常に重要だということだ。「極論すれば、成人期の初期にどんな社会的地位にいるかは、どんな環境で生まれ育ったかに強く影響を受けるのです」と、Michael Wadsworthは話す。彼は、2007年まで30年近くにわたってこの調査を率いてきた。

社会経済的に恵まれた環境に生まれた子どもは、学業成績がよく、スリムな体形や健康を維持し、心疾患になりにくい。精神的にも健全で、少なくとも現在まで生存している傾向が強く見られた。（大学に進学してジャーナリズム界で成功をおさめたWardの父親は、ウォルサムストーを拠点とするドライクリーニング業で地位を築いていた。一方、Malvernは、5歳のときに父親が家を出ており、洋服はいつも着古しで、16歳で学校を中退してしまった。そして、教師になるための学費を母親が払えなかったことをひどく悔しがっている。）

こうした教訓は、1946年当時よりも現在のほうが一層切実だろう。当時は戦後の楽観主義が国中を覆い、英国政府は健全な学校教育や医療を全国民に行き渡らせるために、大がかりな教育改革や国民健康保険制度（NHS）の導入を進めた。だが1946年当時とは対照的に、昨冬は非常に荒涼とした雰囲気が漂った。学生たちは、大学の年間授業料を9000ポンド（約120万円）に引き上げる政府の計画に抗議して、デモを展開。また、政府はNHSの大幅な改革を計画し、予算削減によりさまざまな公的サービスが脅かされている。その中には、1946年コホートのデータが設立の推進力にもなった小児支援センターも含まれている。「こうした変化は強く憂慮すべきものです」と、現在NSHDを指揮するDiana Kuhは言い、自分は今、大学に行く自分の孫のために学資を貯めているところだと付け加えた。

「この調査は、疫学史の中でも特異で画期的なものです。対象者全員の人生を追い続けている唯一の調査であり、しかもまだ完了していないのです」と、コロンビア大学（米国ニューヨーク）でコホート研究を行っている疫学者Ezra Susserは話す。彼によると、人生で起こった出来事の積み重ねの結果として疾患が生じるという考え方を裏付ける

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Diana Kuh は、NSHD の責任者である。NSHD では、1946 年に生まれた5000 人以上の出生以降のデータを分厚いいくつものファイルに保管している。

M. DUNHAM/*NATURE*

には、コホート研究が不可欠なのだという。「誰かの一生をずっと追跡することで、疾患の発症機序に関する理解が大きく進むのです」。

現在、対象者は老齢期に入り、調査は、生涯の経験が老化をいかに加速もしくは減速させうるかを解明する貴重な手がかりとなる。これは、英国や米国など、急速に高齢化し疾病罹患率が増えつつある国々にとっては、切迫した問題である。2006 年から 2010 年に 270 万ポンド(約 3 億 6000 万円）を投じて実施された最新のデータ収集では、調査対象者が現代可能なほぼすべての生物医学的検査を受けた。心エコー、血管機能測定、全身の骨・筋肉・脂肪のスキャン、血液検査はもとより、記憶力測定、さらには椅子からどのくらい素早く立ち上がれるかのテストまで行われた。これらのデータは、対象者が今後必ずたどる老化の経過を詳しく解析するための出発点となるものだ。

また、研究協力のネットワークも大きく膨らみつつある。ある研究チームは、遺伝子が生涯の経験とどのように相互作用して肥満や疾患を招くかを調べている。また別のチームは、対象者のゲノムにあるエピジェネティックな刻印を解析しようとしている。これは、DNA 情報は変化させないが遺伝子の発現状態を変化させる分子レベルのゲノム修飾である。おそらく早産児の低体重や生活の格差によっても修飾を受けると考えられ、そうした差異が中年以降の人生に及ぼす影響を分子レベルで説明できるかもしれない。また、カリフォルニア大学アーバイン校（米国）の経済学者で、子どもの貧困の影響を研究している Greg Duncan は、この追跡調査によって、「社会階級の活性成分とは何か」という疑問を解くヒントが得られるだろうと期待している。

1946 年コホート調査がこれほど希有な存在なのは、血圧から遺伝子まであらゆる生物学データ間の関連性を引き出すことができ、しかも、調査対象者の人生が現在進行形であるからだと、研究のリーダーたちは言う。「彼らはまさに生きている、普通のヒトなのです」と Kuh は話す。

母親の保護とよりよい教育のために

英国では、20 世紀に入り、出生率低下と乳児死亡率の停滞を強く懸念する声が上がった。（Kuh の話によれば、当時のとらえ方は「どうやって大英帝国を維持するのか？」だった。）人口調査委員会は、出産・育児調査を行って、出産にかかる社会的・経済的コストのためにこれから親になろうとする人々が躊躇（ちゅうちょ）していないかを調べるよう提言した。その調査の責任者に任命されたのが、医師であり、第二次世界大戦中には空襲の犠牲者に関する大規模調査を指揮していた、James Douglas だった。

彼が新しく取りかかった調査は、現在の基準では倫理的に難しいものであり、計画の実施は悪夢のように大変で、非常にお金のかかるものだった。彼は、1946 年 3 月のある 1 週間に出産した母親のもとに保健師を派遣してアンケートを取り、最終的には 1 万 3687 人の母親から回答を得ることができた。「それは常軌を逸した壮大なものでした」と、調査開始から 30 年以上経って Douglas から責任者の役を引き継いだ Wadsworth は話す。

この調査結果を報告する Douglas の著書が世に出た 1948 年には、ベビーブームが本格化しており、出生率低下の心配はほとんど消えていた。しかし、その『Maternity in Great Britain（英国の出産・育児）』という本により、富裕層と貧困層で乳児生存率や産婦のケアに非常に大きな格差があることが明らかに

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

なり、センセーションが巻き起こった。その1つが、自宅で出産した女性のうち陣痛緩和法を受けたのはわずか20%で、貧困層が最もこの処置を受けていなかったことだ。このことが広く報道されると、助産師による陣痛緩和用のガスや空気の吸入処置を可能にする法案の国会提出に拍車がかかった。

Douglasは、この調査を、社会的不平等を明らかにしたり、新たに作られたNHSなどの福祉制度改革の効果を評価したりするためのツールに発展させようと考えた。なかでも、「1944年教育法」の成果を検証できる最高の武器が自分の手の中にあることを、Douglasは心得ていた。1944年法により英国では、生い立ちに関係なく成績優秀者をエリート校であるグラマー・スクールに入れるために、11歳を対象とする全国選抜試験（11+）が導入された。Douglasはこのコホート調査で、地理的にも社会階級的にも幅広い子どもたち（当初は1万3687人、最終的には5362人）をサンプルとして手にしていた。すでに、子どもたちの健康状態や成長その他のデータは定期的に記録されていたが、Douglasはさらに、子どもたちが8、11、15歳になった時点で認知能力をテストし、成績や学歴を追跡した。

貴重な才能の浪費

Douglasの調査の結果、中産階級の優秀な子どもたちは、同程度に優秀な労働者階級の子どもたちよりも、11+に合格したり学校での成績がよかったりする傾向が見られた。しかしながら、親の支援や教師に恵まれることで成績が向上する場合もあった。頭はよいが貧しい少年（当時、女子はあまり考慮されていない）が社会に埋もれてしまうことが、「才能の浪費」として知られるようになったのだ。当時の社会保障制度の設計者たちは、この調査結果に愕然（がくぜん）とした。Douglasがこれらの結果を元に出版した2冊の本、『The Home and the School（家庭と学校;1964年）』と『All Our Future（我々すべての未来；1968年）』は教育学の必読書となり、1960年代の非選別式（試験で子どもを振り分けない）コンプリヘンシブ・スクールの導入に寄与した。

上は1947年のDavid Ward。赤ん坊の彼は母親に抱かれ、そばに姉が立っている。下は1976年、息子と娘とともに。

COURTESY OF D. WARD

Douglasが調査対象の進路について調べている最中にも、子どもたちはそれぞれの道を歩んでいった。無料で学校給食を受けることに引け目を感じていたMalvernは、11+の試験に受からなかった。彼女は、担任の教師が暴力的であったと非難し、風邪を引いて学校を休めるように寝具なしで眠るようにしていたと言った。また、教師が試験当日に「自分の頭を強打した」とも主張した。学校を中退した後、彼女はタイピングを学ぼうとチェルトナムにある政府通信本部（GCHQ）に行った。一方、Wardの父親は家の購入を計画し、母親はアイロンがけをしながらラテン語の語彙について彼をテストした。Wardは、学校の最上級2クラスの66人のうち11+に合格した4人の1人となり、彼と妹は親族内で初めて大学に行った。

1970年代に入って調査対象者たちが30代になると、Douglasは熱意を失っていった。対象者の教育や職業、社会的地位に関するDouglasの疑問の大半は解決し、引退を考えるようになっていた。疫学研究者たちは、病気や死亡の事例が出始めてまた関心を持てる時期まで、調査を休止すべきだと考えた。1962年以来プロジェクトに予算を割いてきたMRCも、このコホートを使って何をすべきか迷っていた。Douglasでさえ、プロジェクトはもう終わったと思っていたのだ。

三つ子の魂、百まで

だが、Douglasのチームに1968年に加わった社会疫学者Wadsworthにとって、プロジェクトはまだ終わっていなかった。「この人たちの一生の健康変化パターンに興味を覚えたのです」と、彼は言う。

Wadsworthは、1979年に調査の指揮を引き継ぎ、対象者が36、43、53歳になった際のデータ収集のための資金を提供するようMRCを説得した。そして、対象者全員の血圧、心肺機能、食事や運動などの身体能力や健康状態を評価することに着手した。幼少時の生活が、これらの指標にどう影響を与えたかを明らかにして、その結果から将来図を描きたいと考えたのだ。

実際、この調査データからいくつかの相関関係が浮かび上がった。1985年、Wadsworthらは、低体重で生まれた対象者は成人後の血圧が高くなっていることを報告した[1]。それは、胎児期および幼児期の成長が成人後の健康状態に影響

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

を及ぼすという、後の疾病リスクを早期に予想するものだった。この関連性は、英国サウサンプトン大学の疫学者 David Barker による、別のコホートの出生体重と健康に関する解析結果[2]から、「バーカー説」として知られている。Barker は、低出生体重児は成人後に心疾患になるリスクが非常に高いことを見いだした人物である。

疾患との関連性は、1946 年コホートを対象とした相次ぐ研究によって裏付けられ、乳幼児期の成長や発達状態と、認知能力や病弱さ、糖尿病、肥満、がんや統合失調症になるリスクといった成人の形質との間に、複雑に絡み合った結びつきがあることが明らかになった。「常にすべてが同じわけではありませんが、非常に“ノイズの多い”データの中に脈々と流れる長期的な関連性が見えてくるのです」と Kuh は言う。「巨大児は乳がんになる傾向が高く、低体重児は握力が低くなる傾向がありました。また、生後の成長が速い赤ちゃんは、心血管疾患になるリスクが高いことがわかりました」。

今後の大きな課題は、これらの結びつきをどう説明できるかである。どの生体システムが幼児で重要なのか、また、彼らに記された「爪痕」がどのようにして消えずにいるのだろうか。考えられる答えの 1 つは、エピジェネティクスである。上述のように、エピジェネティクな変化は、人生の初期の出来事によって DNA に生じるメチル基などの化学的な修飾で、そのために遺伝子発現パターンが変化し、後々の疾患発生に関与すると考えられている。ロンドン大学ユニバーシティー・カレッジのがん研究者 Martin Widschwendter は、1946 年コホートの DNA に数万か所あると思われるメチル化部位を解析して、出生体重と乳がんリスクの関連性を説明できるような変化を探し出したいと考えている。DNA 情報と組み合わせることができる一生分の詳しい情報は、「こうしたコホートでしか実際に入手できませんから」と Widschwendter は話す。

上は 16 歳のころの Patricia Malvern。下は 51 歳のころ、孫を抱いて。

COURTESY OF P. MALVERN

大人になっての食生活と運動

ただし Kuh らは、人の運命が幼少時代の生活によって固定されることはないと強調している。「私はこれらの知見を純粋な決定論として解釈すべきだとは思っていません」と彼女は言い、もっと楽観的な見解を取っている。つまり、疾患のリスクとは生涯で経験したことの積み重ねの結果であり、教育や食事その他の要因によって人生を上向きにできるというのだ。1946 年コホートを対象とした認知研究を率いている疫学者の Marcus Richards は、この集団から得られた結果が、ほかの多くの研究で裏付けられていると指摘している。それは、30 代および 40 代に定期的に運動を行うと、加齢に伴う認知能力の衰えが鈍化するというものだ。「つまり、年を取って認知能力が衰えないようにできることや、それをどう行うべきかが、明確に示されているのです」と、Richards は話す。

1980 年代になると生活環境の持つ影響力が如実に現れた。戦後の配給時代に育った 1946 年コホートでは、現在の子どもたちと異なり、幼少時に太っていた者はほとんどおらず、成人してしばらくの間も健康な体重を維持していた。しかしその後、収入が増え、手頃な価格で外食できるようになり、車が移動手段になった。対象者が 30 代になったころ、肥満人口のグラフはじわじわと上向きになり、30 代後半には急増した[3]。肥満化のペースは、社会経済的に低い階層ほどより速い傾向を示したが、肥満化を免れた社会階級はなかった。

Malvern も、こうした体重変化をたどった。彼女は 1992 年にルクセンブルクに転居し、学校の会計係を退職したころ、体重が徐々に増えた。転居時の体重は 73kg だった。「2000 年に帰国したとき、95kg もあってゾッとしたわ。パテやバゲット、チーズ、それにお客を料理でもてなしたせいね」と彼女は言う。当時、Malvern は更年期だったが、その後体重を減らした。一方、Ward は、ピーク・ディストリクト国立公園で暮らしているおかげで体形が保たれたと話す。「ここでは、どこへ行くにも坂を上り下りしないとならないんだよ」。

熟年期の調査

1946 年コホートの女性たちが 50 代になったとき、さらに不思議なパターンが現れた。子ども時代の知能検査で成績のよかった女性は、悪かった女性に比べて、閉経の時期が数年遅くなる傾向が見られたのだ[4]。「われわれは、社会的・行動的なあらゆる側面をしらみつぶしに検討し、当時できるほぼすべての手段を

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

講じて、その関連性を否定する材料を探しましたが、見つかりませんでした」とRichardsは話す。しかし、研究チームがもう一度よく検討してみたところ、意味がわかり始めた。幼少期の認知能力は、脳の発達具合を読み取る材料であり、ホルモンに反応したりホルモン産生を担ったりする一部脳領域の情報も含まれているというのだ。つまり、IQが高ければ、脳全体がよく発達していることになり、そのため、生殖がより長期にわたって維持されることになる。Kuhは、これに遺伝子が関与しているのかどうかを調べているが、「今のところ成果は出ていません」と話す。

やがて対象者の年齢が60歳に近づき、Wadsworthも研究職の定年に近づいた2005年、プロジェクトは再び危機に陥った。MRCは、資金提供を続けるかどうか、もし続けるとしても、プロジェクトの指揮を誰に委ねるべきかを思案していた。

結局、プロジェクトは継続し、Kuhが指揮を引き継いだ。彼女は経済学が専攻だったが、Wadsworthが収集した生物医学データを強化・発展させたいと考えた。それまでは、対象者の家ですべての試験や検査を行っており、看護師たちがたくさんの重い装置を持って訪問していた。そこでKuhは、対象者の生理状態や生物学的状態を本当に理解するためには、本人に医院に来てもらう必要があると主張した。「無料で骨のスキャンを受けられれば、誰でもラッキーと思うでしょう」と彼女は言う。Kuhは2008年までに、国内各地の協力医院に出向く対象者全員に、MRCが訪問にかかる諸経費を支払うように手配した。また、専用の研究ユニットも設立した。

そうした経緯で、Wardは検査のためにマンチェスターの医院に出かけ、脊椎に骨粗鬆症の兆候があることや、両目を閉じて片足で長く立っていられないことを知った。「普通なら体が揺れるところだが、私はその場で片足跳びして終わったんだ」。彼は、「重大な課題」として用意しておくべきだった「食事日記」のことを思い出す。「ワインをもう一杯飲んでしまったとか、ケーキを余分に一切れ食べたとか、自分では認めたくないものだよ。でも先生たちから、ちょっと待って、これは科学ですよと言われ、真実を話してしまうんだ」。

この調査には現在、25人前後の常勤研究者および支援スタッフと、100人の共同研究者がかかわっており、今もまだ、数千人の対象者に関してデータをまとめる作業をしている。「現在、このコホートは世界で最も遺伝子型の解読された集団の1つです」とKuhは言う。Kuhは、最近、論文を発表したところであり[5]、共同研究を希望して待機している疫学者や遺伝学者などの数がまた増えることが予想される。

今後、このコホートは高齢化し病気がちになっていくと考えられる。Kuhらは、対象者の健康状態を観察し続け、幼少時の環境や経験の影響を探り続けるだろう。「今後の大きな1つの疑問は、老齢期に入ると、中年期に見られた幼少時環境の人生への影響が薄れていくのだろうか、ということです」とKuhは言う。反対に、一部の疫学者が予想するように、そうした影響は年を取るにつれてより色濃く出ることも考えられる。

Kuhはまた、ゲノム解析やその他の生物医学的解析をいかにうまく利用するかも思案中である。少なくともある調査から、このコホートの生涯データを遺伝学と組み合わせることの威力が示されている。昨年、統計学者Rebecca Hardyは、*FTO*および*MC4R*という今話題の2つの遺伝子の多型（バリアント）が、肥満のリスク因子であることを明らかにした[6]。1999年にコホートから採集したDNAを解析したところ、これらの遺伝子に多型があると肥満度指数（BMI）が成人前期の段階で増大し、その後、高齢になるにつれてBMIが低下するという関連性が見られたのである。おそらく、これまで、この2つの遺伝子が食欲や脂肪蓄積に及ぼす影響は、1980年代の肥満を促す種々の影響に埋もれてしまっていたのだろうと、Hardyは考えている。この可能性は、さらなる肥満関連遺伝子群を検査すれば、よりはっきりするだろう。

Kuhはこれまで、対象者の保護や入手しているDNAサンプルに限りがあったことから、最新の分子生物学の手法について細心の注意を払ってきたと話す。「特にデータ配布に関しては、非常に大きな責任を負っていると感じています」と彼女は言う。「外部の研究者たちは、自分たちにコホートのデータをすべて渡してもらえれば、さっさと作業を終わらせて、何百万もの関連性を見つけ出してみせますよ、という態度をよく示します。そんなとき私は、なるほど、それはとても面白そうだけど、仮説を持って出直していただけるかしら？　と申し上げるのです」。とはいえ、Kuhは、この調査に関する5年ぶりのMRCの総説論文を2012年に出す計画を取りまとめており、どうやって新しい手法を組み込むかが「重要になること」は承知している。DNA塩基配列解読のコストが下がり、対象者のゲノム全域の解析も当然行うことになるだろうと、彼女は認識している。「問題は、最もよい実施時期はいつなのか、また、これで何がわかるのかということです」。

人の「一生」に寄り添う調査

現在、Kuhにはもっと差し迫った心配事がある。それは、65歳の誕生パーティーが5つ開催されることだ。そこで互いに初めて出会う対象者もおり、彼女のちょっとした不安の種になっている。Wadsworthも、50歳および60歳の誕生日イベントの開催を検討したが、そうした懇親会によって対象者の人生が何らかの影響を受けてはまずいと考え、見送った。「われわれは、参加者が妻や夫の元を去って、この集団の誰かと一緒になる可能性まで考えたんですよ」と彼は話す。しかしKuhは、対象者を知り、ねぎらうことは、そうしたリスクを冒すだけの価値があると判断した。（彼女は

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

「カード＆電話」作戦――長期間、対象者をつなぎ止めるには

H. PEARSON/M. DUNHAM/*NATURE*

英国では、1958、1970、2000年にも出生コホート調査が開始され、暫定的にもう1つ計画されている。米国でも、全国子ども調査（National Children's Study）により、約10万人の子どもを出生前から21歳まで追跡しようとしている。しかし、ほかのコホート調査は、官僚間の対立や莫大なコスト、持続的な資金提供の不足によって頓挫してしまった。Kuhによれば、1946年コホート調査が生き残っているのは、組織の自立性が高く、リーダーたちが献身的で、予算も比較的少ないおかげだという。

1946年コホート調査は、対象者との強い人間関係の構築が非常に重要なことも示している。研究チームは毎年対象者に、自分たちの署名と最新の調査結果に関する情報を記したバースデーカードを送っている。Malvernは、そのカードが自分にとってすごく大事なものだと話す。「何年か経つうちに私は、研究チームのことを知っているような気がし始めたの。でも、一度も誰にも会ったことはないのよ」。ある年のカードには夕日が描かれていたため、自分たちが人生の黄昏に入ったことを暗に言いたいのかと文句をつけた対象者がいた。Kuhたちは、そうした不満の声にも個人的な手紙や電話で対応している。Kuhは、集団の人数を当初の80％に維持するには、こうした人間関係が非常に重要であると話す。

しかし、成功の要因の中には、現在では再現不可能なものもある。1946年当時は、参加者の募集や同意は現在よりずっと簡単だった。「もし誰かが進んで来れば、それは参加に対する同意を意味していましたし、人々には不参加という選択は念頭になかったでしょう」とKuhは話す。一方で、時代的な制約もあった。最初の何年かは、金銭やセックスに関する質問は御法度で、非嫡出子は調査対象から外され、妊娠中の喫煙の有無を質問することもできなかった。「厚生大臣が兵士に喫煙を勧めていた」くらいだったからだ。「しかし、それもまた科学の歴史の一部なのです」。

H.P.

バッキンガム宮殿宛てに、対象者たちを王室の園遊会に招いていただくようお願いする書簡も出した。）

WardとMalvernは、自分がコホート調査に参加していることをうれしく思っている。「この調査は私にとって、ちょっとした誇りになっています。おねしょだって情報になるんですよ。おねしょに関する国の情報保管庫に、私がどれほど貢献したことか」とWardは話す。2人はどちらも、自分たちが死ぬまで研究者たちに監視されても構わないと思っている。「この調査は、人が死ぬ運命にあり、永遠には生きられないことを受け入れる助けになると思います」とWardは言う。

これまでに対象者のおよそ13％が死亡しており、調査はすでに余生の段階に入っている。Kuhは、生存率のグラフをいくつか見せてくれた。グラフからは、60歳まで生きた対象者の割合が、父親の社会階級によって異なることがわかる。また、別の興味深い相関関係もグラフに現れていた。裕福な家庭出身の女性たちの死亡率は、ほかの小集団すべてのおよそ半分なのだ[7]。これについては、低い喫煙率などの明白な要因とはまだ関係付けられていないが、Kuhは、彼女たちは戦後の英国に生まれた教育や健康の機会を生かして自身を向上させたのだろうと推測している。「女性たちは、ちゃんと教育を受ければ、生活を向上させられるのです」。

さらに言えば、1946年出生コホート調査は、対象者が女性であれ男性であれ、また、恵まれた家庭に生まれても貧しい家庭に生まれても、全員に永遠の名声を与えてくれた。彼らの生きた証は、液体窒素で冷凍した細胞系列内に保存されたDNAとして、また、パンチカードからコンピューターデータへと媒体を変えて残っていく。「人の思い出がいずれ消えてしまうことはよくご存じでしょう。でも、この記録保管庫には、自分の分身が存在し続けるのです」とWardはいう。「私はこれを、なんとしても手に入れたいと思うくらいの、“もう1つの自分史”と呼んでいます。」と彼は言い添えた。■

（翻訳：船田晶子）

Helen Pearson は *Nature* の特集記事編集長。

1. Wadsworth, M. E. J., Cripps, H. A., Midwinter, R. E. & Colley, J. R. T. *Br. Med. J.* **291**, 1534–1538 (1985).
2. Barker, D. J. P., Osmond, C., Winter, P. D., Margetts, B. & Simmonds, S. J. *Lancet* **334**, 577–580 (1989).
3. Li, L., Hardy, R., Kuh, D., Lo Conte, R. & Power, C. *Am. J. Epidemiol.* **168**, 1008–1015 (2008).
4. Kuh, D. *et al. Menopause* **12**, 475–482 (2005).
5. Kuh, D. *et al. Int. J. Epidemiol.* **40**, e1–9 (2011).
6. Hardy, R. *et al. Hum. Mol. Genet.* **19**, 545–552 (2010).
7. Kuh, D. *et al. Soc. Sci. Med.* **68**, 1565–1573 (2009).

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

タンパク質のドグマが崩れていく

Breaking the protein rules

Tanguy Chouard　2011年3月10日号　Vol. 470 (151–153)

タンパク質が機能するには構造が必要だ、というのが現代生物学の1つのドグマである。
しかし、構造を持たない不規則な状態で存在するタンパク質が、これほどまで多いのはなぜなのか。

Keith Dunkerの机の周りはひどい。本や古いチョコレート、直しかけの原稿、ペン、ダイエットコークのボトル、それに、もう片方はどこへ行ってしまったのか、片方だけの靴下などであふれかえり、論文は探すのではなくコピーし直さなければならないありさまだ。「整理整頓が全然だめなんです。『ドクター無秩序』なんて呼ばれたりすることもあるんですよ」とDunkerは開き直る。しかし、その無秩序・不規則性が自らの科学者生活に入り込んできた瞬間は、鮮明に記憶している。

それは1995年11月15日の午後12時40分、生化学者として在籍していたワシントン州立大学（米国プルマン）で、結晶学者Chuck Kissingerのセミナーが開かれている最中のことだった。Dunkerは、カルシニューリン（免疫抑制剤が標的とする酵素の1種）の原子構造を示すスライドを見つめていた。Dunkerが注目したのは、その複雑な構造ではなく、そこで欠けている所だった。X線結晶解析でほとんどの部分は明らかにされているのに、その1か所は、位置が変わりすぎてアミノ酸鎖の構造が決められないという。だから点線で示されていた。Kissingerは、カルシニューリンがヒトの免疫系で重要な機能を果たすためには、このループ部分の柔軟性が保たれていることが必要なのだ、と力説していた。

「それは衝撃的でした」とDunkerは語る。この気まぐれなタンパク質が、100年以上も君臨してきたドグマをあざ笑っていたからだ。分子生物学の中心的な教義では、タンパク質の機能は、その固定された三次元構造に決定的に依存するとされている。例えば酵素が特定の基質と結びつくのは、両者の形がぴったり合うからであり、それは、1894年にはすでに化学者Emil Fischerが発表していた「カギとカギ穴」モデルで不動のものとなっている。しかし、カルシニューリンのこの部分は、構造がなくても機能を生み出しており、その規則に従っていないように思われた。そこでDunkerは、規則から外れたこうしたタンパク質がほかにどれだけあるのか、と考えるようになった。

それを明らかにするため、Dunkerの研究チームは、タンパク質のどの部分が「もともと不規則」なのか、すなわち特有の三次元的な形に自動的に折りたたまれないのか、を予測するバイオインフォマティクス・プログラムを作成した。現在、この種のプログラムの予測によれば、ヒトの全タンパク質の40%程度は30アミノ酸またはそれ以上のもともと不規則な部分を1か所以上持っており、また約25%は端から端まで不規則だという[1]。タンパク質の不規則な部分は、結晶の形成（構造を解明するために広く行われているX線回折法の必要条件）の妨げとなり、構造生物学者は可能な限りそれを排除してきた。そのため、タンパク質の世界では、この不規則な部分に目が向けられることがほとんどなかったのだ。

しかし「今や、不規則性への認識はますます高まっている」。スクリプス研究所（米国カリフォルニア州ラホヤ）のタンパク質生物物理学者であるPeter Wrightは、2010年4月、米国ワシントンD.C.で開かれた米国科学振興協会（AAAS）の会議でこう指摘した。このような認識の大部分は、核磁気共鳴分光法（NMR）を用いた研究からきている。NMRでは、小さなタンパク質が溶液中でねじれたり回転したりしていても、その構造を明らかにすることができる。そこからわかったことは、不規則性が機能にとって不可欠な場合が現実にある、ということだった。不規則性を持つシグナル伝達タンパク質が相手のタンパク質を認識して反応するのを助けたり、不規則性を持つ調節タンパク質が複数の標的と相互作用するのを促したりするのだ。「こうした話はこれまで教科書には書かれてきませんでした」とWrightは言う。

ドグマの方も生き残りをかける

しかし、構造生物学者の多くは、改訂は必要ないと考えている。エール大学（米国コネティカット州ニューヘイヴン）の結晶学者であるTom Steitzは、「機能には構造が必要だ、というのが今も私の持論です」と言い切る。「いくらかの柔軟性が必要な場合もあり、組み立て工程でそれが重要となる場面もあるかもしれませんが、タンパク質が働くようになる前の話はどうでもいいんです」。

高いレベルの不規則性を予測するコンピューター・プログラムが根本的な問題を抱えている、という批判もある。それらは、適切な相手分子と結合したときに完璧に構造が決まって結晶化することが知られているようなタンパク質も選び出してしまうからだ。また、折りた

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

たまれていないタンパク質の鎖は生物の細胞内で長時間存在することができないと主張し、不規則なタンパク質という概念そのものを葬り去ってしまおうと考える人もいる。

しかしそうはいかないだろう。生物物理学、バイオインフォマティクス、細胞生物学など、各方面から不規則性を支持するデータが続々と集まっているからだ。不規則性の信奉者は「構造－機能パラダイム」の完全な再評価を求めている。「生物は、不規則性を利用してさまざまな機能を生み出しているのです」とWright は語る。

1950 年代後半以来、生成してくるタンパク質は、すぐさま自動的に特有の三次元的形状に折りたたまれると考えられてきた[2]。エネルギー的に最も安定で、機能を果たすことができる唯一の立体配座に、である。したがって、折りたたまれないことが知られている一握りのタンパク質は、「おかしなものとされていたのです」と Wright は話す。しかし、こうした見方は 1999 年に変わり始めた。Wright は、やはりスクリプス研究所に所属していた NMR 特別研究員の Jane Dyson とともに総説論文[3]を発表し、状態が不規則なのに機能を持つと考えられるタンパク質が次々に発見されていることを示した。「今でもとても重要な論文です」と現在はインディアナ大学医学系大学院（米国インディアナポリス）に所属している Dunker は語る。

当時もまた今も、ホットな問題は、一定の形がないのにタンパク質がどうやって機能することができるのか、ということだ。CNRS 酵素学構造生化学研究所（フランス・ジフ - シュール - イヴェット）の構造生物学者である Joël Janin は、「柔軟性についてはみんな受け入れています」と話す。「問題は、どうしたら柔軟性で認識を得ることができるのか、ということなのです」。不規則性という概念そのものが、カギとカギ穴のモデルと相いれないように思われるのだ。ゆでたスパゲティでカギを開けることができるのか。

不規則が機能を発揮する仕組み

2007 年、Wright の研究室に所属していた博士研究員の菅瀬謙治（すがせけんじ）が答えを見つけた。スパゲティは、あらかじめカギの形をしているのではなく、カギ穴を利用してカギの形になるのだ。菅瀬が注目した CREB は、学習や記憶など、数多くのプロセスに関与する遺伝子調節タンパク質だ。CREB は、DNA と結合すると、CBP というタンパク質を認識して結合する必要があり、そうして初めて遺伝子のスイッチを入れることができる。しかし、CREB 上の CBP とかかわる部分は、不規則な状態からスタートする。どうしたらそんなことができるのだろうか。

それを明らかにするため、菅瀬は、超高速 NMR カメラに相当する装置を開発し、CREB の分子内の接点、および CBP との接点を調べるなかで、のたうちまわる CREB の鎖を原子レベルの分解能で連写した。そこでわかったのは、複合体全体が決まった形になるためには、CREB の内部および CBP との間で複数の結合が協調的に形成される必要がある、ということだった[4]。それはまさに、平均的な「球状」タンパク質が折りたたまれる仕組みと同じものだ。全体をいっぺんに引っ張って作り上げるために、分子内で互いに広範な化学結合を形成する必要がある[2]。

CREB の場合は、CBP と結合することによって、そうした相互作用をしているのだ。この結合がほんのわずかでも弱ければ、カギは形成されず、カギ穴と結合することは決してない。CREB は不規則であるがゆえに、固いタンパク質よりも排他的に CBP と結合することができ、有効に機能している、と Wright らは考えている。そして Wright は、このようなプロセスのおかげで、多くのシグナル伝達タンパク質は、変化が急激なのに選択的な相互作用を行うことができるのではないか、と考えている。

全く折りたたまれないで機能を発揮

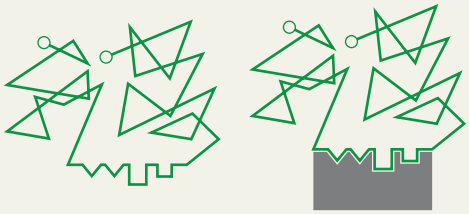
最近、構造－機能論は、さらに大きな打撃を受けた。それは、折りたたまれる部分を全く持たないタンパク質の研究から出てきた。Sic1 というシグナル伝達タンパク質は、細胞周期の重要な調節因子で、細胞分裂の準備ができるまで DNA の複製にブレーキをかけている。2001 年、トロント大学（カナダ）で酵母の細胞周期を研究していた Mike Tyers のチームは、そのスイッチのメカニズムを調べ始めた。研究の結果、Sic1 上の 6 か所にリン酸基が付加すると、Cdc4 という別のタンパク質と結びつくことがで

不規則の秩序

分子生物学の中心的な教義では、タンパク質の機能は完全に折りたたまれた三次元構造に依存するとされている。しかし新しい考え方では、一時的または持続的に不規則でも、タンパク質の部分は機能することができる。

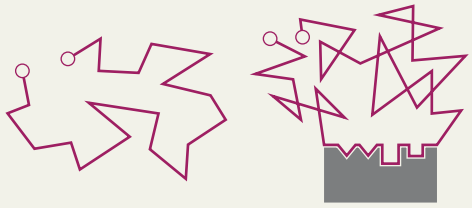
カギとカギ穴

従来の考え方では、酵素は速やかに折りたたまれて特有の安定した三次元的構造（＝カギ）となる（左）。その形は完全に一致しており、基質（＝カギ穴）と結合することができる（右）。



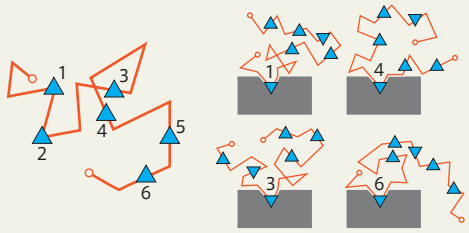
結合すると折りたたまれる

遺伝子調節タンパク質 CREB の不規則な部分（左）は、あらかじめ折りたたまれているわけではなく、カギ穴と出会うと、それを利用してカギの形になって固まる（右）。



形の変化

シグナル伝達タンパク質 Sic1 は、結合した状態でも不規則であり、6 個のリン酸基のそれぞれが、かわるがわる結合部位を占める。このタンパク質は、一定の動的平衡の中で変化するさまざまな立体配座の混合体となっている。



©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

き、Sic1 はそれによって細胞のタンパク質処理経路に送られることがわかった[5]。そして Sic1 が分解されると、ブレーキが外れて DNA の複製が開始される。ところが、その分解が正確なタイミングで行われないと、DNA の複製は混乱し、細胞は最終的に死ぬこともある。

細胞は、4 つや 5 つではなく、正確に 6 つのリン酸を受け取って確実にスイッチを入れることで、そのような正確性を実現している。しかし、問題がある。Cdc4 がリン酸基のために持っている高親和性の結合ポケットは、たった 1 つだけなのだ。指が 1 本しかないのに、どうやって 6 まで数えられるのだろうか。

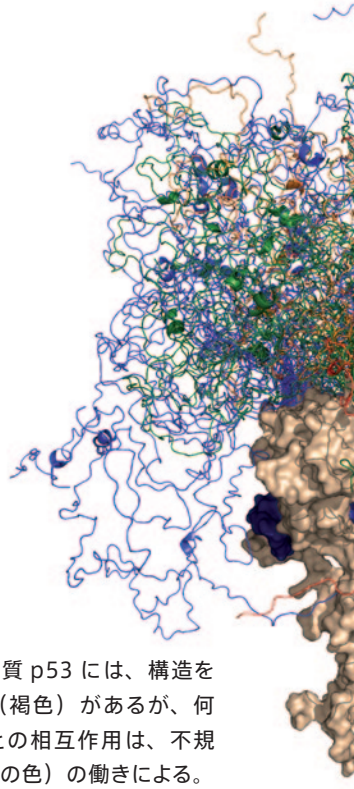
Sic1 の結晶を得るためのありとあらゆる試みに失敗した Tyers のチームは、学内の NMR 専門家である Julie Forman-Kay に声をかけた。2008 年、Forman-Kay の研究室の博士研究員だった Tanja Mittag は、Sic1 が不規則であることを明らかにした[6]。それは、遊離した状態だけでなく、驚くべきことに、Cdc4 と結合していても折りたたまれていなかったのだ。その複合体は、一定の動的平衡状態の中で変化する、さまざまな立体配座の混合体のように見えた。そして、一番の驚きは、Sic1 上の 6 つのリン酸基のそれぞれが、次々に 1 つの Cdc4 ポケットに入っているのがわかったことだ。それはまるで、キャンプファイヤーの火の周りでみんなが踊り回っているようなイメージだ（15 ページ図参照）。

次に、研究チームはコンピューターモデルを開発し、このタンパク質の構造に関する実験データを集めて、そこに片っ端から投入してみた[7]。その結果、Sic1 は、結合した状態では不規則だが、ややコンパクトな構造を維持しており、それゆえに、すべてのリン酸基が平均的な静電場を形成するのに十分なだけ近接していて、それによって Sic1 が Cdc4 に張り付いている、という結論に至った。リン酸基が 6 個あって初めて、Cdc4 と Sic1 とが張り付くのに十分な接着強度が得られ、Sic1 は細胞の処理分解装置に運ばれる、というわけだ。この全過程で Sic1 が不規則でなければならないのは、やや硬い処理装置の手を Sic1 全体に届かせて、分解するための化学標識で Sic1 を埋め尽くすためだろう、と研究チームは考えている。ちなみに、すべての標識をいっぺんにつなごうとすれば、とてつもなく巧妙なタンパク質が必要になってしまう。

ハーバード大学医学系大学院（米国ボストン）の構造生物学者である Stephen Harrison は、「この結果は興味深いです」と語る。「というのも、相互作用モチーフ（分子配列）は非構造化部分に沿って多かれ少なかれ反復的に認められることが多く、この研究は、そうした多重性がどうやって機能するのかを示しているからです」。

Forman-Kay は、「多構造」状態の採用によって、多くの相手からのシグナルを同時に安定的に探査して感知できるようなタンパク質は、ほかにもあるのではないかと考えている。これは、ハブの機能を果たすタンパク質、つまり、急激に変化する分子相互作用の巨大ネットワークにおいて、いわば中心的な役割を果たしているタンパク質にとって、特に重要な性質だ。「これまで語られてこなかった複雑さがあるのです」と Forman-Kay は言う。「そうしたハブタンパク質は、複雑な細胞環境をたちどころにキャッチしなければならないわけです」。

極端な例が、腫瘍抑制因子 p53 だ。これは、複数のシグナル伝達ネットワークに見事に接続されたハブタンパク質であり、ヒトのがんにかかわることが最も多い。p53 の接続先の多さは、その多機能的な変幻自在の構造に求めることができそうだ。きちんと構造のあるものから不規則なものまで、ありとあらゆる立体配座を取りうるのだ。コアドメインは球状で、DNA や数種類のタンパク質とだけ結合する。ところが横に伸びた 2 本の翼はほとんど不規則で、何百種類ものシグナル伝達分子と結合することができる。しかも、一方の翼の内部のある部分は、まるでカメレオンのように、結合相手によって 4 種類の構造化状態のどれかに切り替わるのだ[8]。ケンブリッジ大学（英国）の生物物理学者で NMR を専門とする Alan Fersht は、「p53 の長い部分が細胞内でほぼ不規則状態であることは、間違いありません。疑いの余地は全くないと思います」と語る。



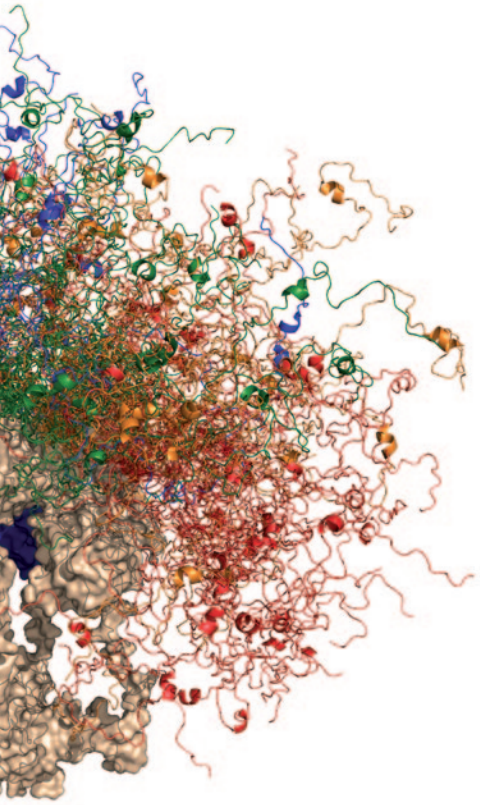
腫瘍抑制タンパク質 p53 には、構造を持つ球状の領域（褐色）があるが、何百もの結合相手との相互作用は、不規則な部分（その他の色）の働きによる。

予測の問題

しかしなお、不規則なタンパク質が広い範囲で見られるのかどうか、疑問を持つ研究者は多い。生化学者はこれまで 100 年以上もの間、組織抽出物を調製するとき、タンパク質がほどけたりもつれあったりして不溶性のかたまりにならないように、またプロテアーゼと呼ばれる酵素に消化されないように、苦労してきたのだ。だから「不規則なタンパク質がクズ以外の何かを生み出すとは、なかなか信じられないのです」と Janin は指摘する。

しかし、不規則性を追いかける研究者は、そうした懸念はだいたいが見当違いだと話す。例えば、マックス・プランク研究所（ドイツ・マーティンスリート）でタンパク質の品質管理を専門とする

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved



M. BLACKLEDGE/IBS GRENOBLE

Ulrich Hartl は、ヒトの細胞では、非特異的なプロテアーゼがリソソームと呼ばれる区画に閉じ込められており、その外でなら不規則なタンパク質は存在し続けることができる、と説明する。また不規則なタンパク質は、凝集してしまうこともないと考えられる。球状タンパク質とは異なり、互いに結びつきやすい疎水性アミノ酸が少なく、代わりに極性アミノ酸が多いので、自由に水中を動き回れるからだ。

おそらく、不規則なタンパク質は、凝集に対抗する自然選択によって、その特別なアミノ酸組成を獲得したのだろう、と Hartl は考える。言い換えれば、アミノ酸組成自体は不規則性の特徴ではない、ということだ。このことは、不規則性の予測プログラムが一見して首尾一貫していないことを説明してくれる。タンパク質から切り出されると自分で折りたたまれることがないのに、プログラムは、そうした球状タンパク質の内側部分を拾い上げることをしないのだ[2]。理由は、その部分が疎水性アミノ酸に富んでいて、予測プログラムが検出する特徴的な配列を示さないからだ。それはまた、一部のきちんと構造を持っているタンパク質を予測プログラムが選んでしまう理由をも説明してくれる。この話は、この種のプログラムをめぐる議論のもう1つのポイントだ。タンパク質に疎水性アミノ酸がないのは、なにも不規則性だけでなく、さまざまな理由があるわけだ。「これは実に理にかなっています」と Dunker は認める。

全体として、タンパク質内の任意のアミノ酸が規則的構造の中にあるか不規則の中にあるかを予測する成功率が 80% だと主張するプログラムは多い[1]。予測が偶然当たる確率は 50% だ。そして、結晶学者は、結晶化できないと思われるタンパク質を排除するのにそれを利用する。「不規則性の予測プログラムはかなり単純化されすぎていますが、とても役に立ちます」と話すのは、バーナム研究所（米国カリフォルニア州ラホヤ）の Adam Godzik だ。Godzik は、数多くのタンパク質構造の解明を目指す「タンパク質構造イニシアチブ」という大規模共同研究で、バイオインフォマティクス・グループを率いている。

不規則性の広がりと重要性についての議論は、おそらくこの分野の進歩を遅らせているはずだ。不規則性が実験的に確認されているタンパク質のデータベース「DisProt」には、タンパク質が 500 個余りしか含まれていない。三次元構造データベースの「Protein Data Bank」[1] の 6 万個以上と比べるとごくわずかだ。「DisProt がこれほど小さいのは、資金を得るのに時間を浪費してしまったことによるところが大きいのです」と Dunker は説明する。しかしこの数年で、もともと不規則なタンパク質の研究を目的とする大きなコンソーシアムが、いくつかの国で立ち上げられている。医薬品の標的としての不規則タンパク質への関心も高まっている。p53 のように、その多くが疾患に深く関与しているためだ。

新しいタンパク質のパラダイム

タンパク質の配列、構造、機能の関係について、根本的に新しい構図が少しずつ描かれ始めている。最も固い「カギとカギ穴」という一極から、Sic1 のように常に構造を持たないスパゲティというもう一極までの間に、あらゆる構造的不定性が見られるようになってきたのだ。しかし、Sic1 を基にして考えれば、このような不規則なタンパク質がどうやって実際に機能しているのかをすべて解明するには、長い時間がかかるはずだ。Sic1 の作用機序の解明には、いくつかの生物物理学的技術、新しいコンピューターツール、統計物理学理論が必要だったし、その多くはあまり知られていないものだった。加えて、6 つの研究所で 10 年以上も研究が行われた結果なのだ。多構造生物学は、単純なものにはならないだろう。

それでも、Dunker と Wright をはじめとする不規則性の研究者は楽観的だ。構造生物学研究所（フランス・グルノーブル）の NMR 分光法の専門家である Martin Blackledge も同様で、現在の熱狂を、1950 年代の最初の結晶タンパク質構造を取り巻く雰囲気と重ね合わせる。「どんなものでも、新しいうちは非常に興味を引かれるものです」と Blackledge は言う。Blackledge が待ち望んでいるのは、あるタンパク質の部分が構造の連続のどこに該当するのかを予測して、不規則性の暗号をすべて解読できるようになる時代だ。「それこそが私の目指すところ、夢なのです」と Blackledge は語っている。

おそらく、不規則性が広く受け入れられるには、不規則性の規則が必要なのかもしれない。 ■

（翻訳：小林盛方）

Tanguy Chouard は、ロンドンを拠点とする *Nature* のエディター。

1. Uversky, V. N. & Dunker, A. K. *Biochim. Biophys. Acta* **1804**, 1231–1264 (2010).
2. Anfinsen, C. B. *Science* **181**, 223–230 (1973).
3. Wright, P. E. & Dyson, H. J. *J. Mol. Biol.* **293**, 321–331 (1999).
4. Sugase, K., Dyson, H. J. & Wright, P. E. *Nature* **447**, 1021–1025 (2007).
5. Nash, P. *et al. Nature* **414**, 514–521 (2001).
6. Mittag, T. *et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA* **105**, 17772–17777 (2008).
7. Mittag, T. *et al. Structure* **18**, 494–506 (2010).
8. Oldfield, C. J. *et al. BMC Genomics* **9** (Suppl. 1), S1 (2008).

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

地震対策の再考が必要

Japan faces up to failure of its earthquake preparations

DAVID CYRANOSKI　2011年3月31日号　Vol. 471 (556-557)
www.nature.com/news/2011/110329/full/471556a.html

日本が世界に誇る、地震予知システム、緊急地震速報、津波防波堤。
だが、いずれも3月11日の東日本大震災には対応できなかった。

日本は、世界で最も密な地震観測網が整備され、世界最大の津波防波堤があり、最も行き届いた緊急地震速報システムがある。そして日本人は、地震や津波の際にどのように行動するべきか、どこの国の国民よりも徹底した訓練を受けている。

それにもかかわらず、3月11日のマグニチュード9.0の巨大地震は、日本の地震予知専門家たちの不意をついて発生した。また、想定をはるかに超えた大津波は、世界最深の津波防波堤を破壊し、人々に大きな衝撃を与えた。そのうえ、緊急地震速報システムもうまく機能しなかった。いったい、何がいけなかったのだろう？

第一の問題は地震予知にある。2009年3月に発表された最新の全国地震動予測地図は、東北地方の沖合を5つの地震帯に分割し、7種類の地震シナリオを想定していた。それぞれのシナリオには、歴史的地震記録に基づいて確率が割り当てられている。それによると、今回の地震の震源を含む三陸沖南部領域は、今後10年以内に海溝型地震が発生する確率が30～40%、今後20年以内では60～70%とされていた。

地震予知の分野では、これは非常に高い確率といえる。予測地図を作成した文部科学省研究開発局地震・防災研究課の鈴木良典（すずき よしのり）は、「基本的に、いつ発生してもおかしくないという意味です」と言う。しかし、三陸沖の断層で想定される地震の規模は、地元の歴史記録に残っていたのと同じ、マグニチュード7.7前後と予測されていた（*Nature* 2011年3月17日号274ページ、Natureダイジェスト2011年5月号3ページ参照）。

2009年3月の予測地図では、福島第一原子力発電所の沖合にある別の断層についてもマグニチュード7.4の地震しか想定しておらず、今後10年以内に発生する確率は2%未満、今後50年以内でも10%未満と見積もっていた。そのため、福島県庁はウェブサイトでこれを引き合いに出し、「地盤が堅固で大地震も少ない福島は、安全かつ安心にビジネスを展開できる場所です」と宣伝していたほどだった。この予測地図では、複数の地震帯の連動により約500kmにわたって断層が破壊され、マグニチュード9.0の地震を引き起こす可能性は想定されていなかったのである（次ページ図を参照）。

日本の地震予知は、的中したこともある。2003年に発生したマグニチュード8.3の十勝沖地震は、予想されたホットスポットのちょうど真ん中で発生した。しかし、1980年代から1990年代にかけて本格的に始まった日本の地震予知は、基本的には当たることもあれば外れることもあるというレベルにとどまり、想定された地震帯以外で多くの大地震が発生し、壊滅的な被害をもたらしてきた。「もっと的中させたいとは思っているのですが……」。こう語るのは、京都大学防災研究所のJames Moriだ。

3月11日の地震の規模は驚くほど大きかったが、日本の耐震建築は、揺れそのものにはよく耐えたようである。Moriは、「揺れによる損傷はありましたが、地震の強さを考えれば、たいした被害ではありませんでした」と言う。被害の大半をもたらしたのは津波だった。津波は、防波堤も、人々の長年にわたる備えも打ち砕いた。

三陸海岸の釜石湾の湾口にある全長約2kmの防波堤は、世界最大の水深を誇り、30年の歳月と1200億円以上の費用をかけて2008年に完成したものだった。基礎部分は水深63mの海底にあり、海上に出ている部分の高さは8m、厚さは20mもある。1896年の三陸地震は場所によっては40m近い津波を引き起こしたが、釜石湾口防波堤は、同レベルの津波の衝撃にも耐えられるように設計されていた。

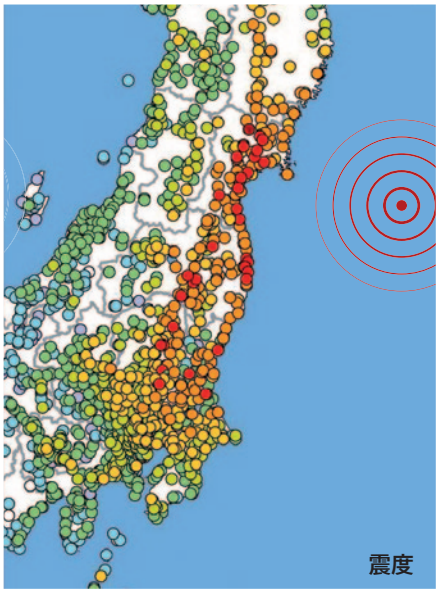
津波伝播の専門家である防衛大学校（神奈川県横須賀市）の藤間功司（ふじま こうじ）は、津波対策として沿岸部に建設されたこうした構造物が、かえって人々を油断させてしまったのではないかと指摘する。「この地域にはおそらく10年に一度か二度は高さ2、3mの津波が来ており、人々は、津波防波堤が自分たちを守ってくれることを知っていたのです」と藤間。地震動予測地図でマグニチュード7.5クラスの地震発生が予想されている地域では、最大4～5mの津波が来ると考えられていた。

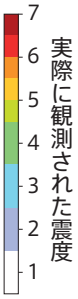
過小評価された津波の危険

防波堤への信頼が高まるにつれ、語り継がれてきた大津波に備えた避難訓練に対して、人々の真剣さは徐々に損なわれていったようだ。日本のほかの地域と同様、東北地方でも毎年、大学教授や研究機関、非政府組織や地元の市民団体などが避難訓練を実施し、人々に避難方法と避難場所を教えていた。これに関して藤間は、「われわれは真剣に避難訓練に取り組んできました」と主張する。

だが、津波の危険性につき、人々の気が緩んできていたのは明らかだったと、関西大学の災害管理の専門家、河田惠昭（かわた よしあき）は指摘する。2010年のチリ地震の際には、東北地方の168万人を対象とする津波警報が発表されたが、避難所に集まっ

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved





SOURCE: M. YAMADA & JAPAN MET. AGENCY

想定外の揺れ

最初に検出された地震波に基づいて緊急地震速報を発するシステムでは、強く揺れる地域は狭いと予測してしまった。ところが実際の揺れははるかに強く、広い範囲で生じた。

たのはわずか6万2000人だったのだ。

藤間は、「人々は、防波堤があるから大丈夫だと思っていたのでしょう」と言う。だが、3月11日に襲ってきたような大津波に対しては、この防波堤は、波をいくらか減衰させることはできても、「人々を完全に守ることは無理でした」と藤間。ある見積もりでは、海上での津波の高さは15～20m、海岸に押し寄せてからの高さは、いくつかの地点で50mにも達していた。これは、1896年の津波より高い。津波は、釜石をはじめ、多くの地域の防波堤を破壊し、安全な高台を見つけられなかった約2万人をのみ込んだと見積もられている。そのうえ、福島第一原子力発電所の非常用発電機を水浸しにし、冷却システムを停止させてしまった。1960年代に建設されたこの原子力発電所は、津波に耐えられるように設計されてはいたものの、想定されていた高さはわずか5.7mだった。

また、日本には、気象庁が発表する緊急地震速報があり、震度5（地震の揺れの大きさを表すために日本で用いられているスケールで、壁にひびが入るレベル）以上の揺れが予想される場合に、人々に注意を呼びかけるようになっている。これは、地震発生直後に震源に近い地震計がとらえたデータに基づいて各地の揺れを予測し、大きな揺れが到達する数十秒前に警報を出すことができるというものだ。だが、このシステムがうまく機能しなかった。3月11日の地震では、震源に近い地域には正確な警報を出すことができたのだが、多くの地点で震度6の揺れを計測した関東地方には警報を出せなかった。一方、独自の警報システムを備えた新幹線や原子炉は、設計どおり、直ちに運転を停止した。

京都大学防災研究所の山田真澄（やまだ ますみ）によると、このシステムの問題は、震源を「点」と仮定していることにあるという。3月11日の地震の震源を点として計算すると、マグニチュードは7.2だった。ところが、三陸沖の海底の断層が長さ数百kmにわたって次々に破壊され、放出されるエネルギーがどんどん大きくなり、東京に近い地域で20m以上のすべりが生じた。このため、震源「点」から計算するこのシステムは、予測を修正することができなかった。さらに、頻繁な余震はシステムを混乱させ、何度も誤報を出す一方で、大きな余震の警報を出せないという事態に陥ってしまった。

「このシステムは、マグニチュード8クラスの地震で破綻するようです」と山田は言う。山田と気象庁は、震源を点と仮定する緊急地震速報システムを二次元で機能するダイナミックなシステムに変更するため、この4月から3年間の共同プロジェクトを開始する。

日本の防災には確かに改善の余地がある、と藤間は言う。しかしながら、「1000年に一度、あるいは2000年に一度の地震」に対してできることには限度があることも認めざるをえないと考えている。確かに、津波の被害が特に大きかった地域には、もっと頑丈な防波堤を建造することはできるかもしれない。だがそれには莫大な費用がかかるうえ、それでも最大級の津波から人々を完全には守りきれない。「単純に、大津波の襲来が予想される地域には、家を建てないようにするべきかもしれませんね」と藤間は語る。

一方、河田は工学の進歩を信じている。河田自身も、津波による被害を回避するには、人々を津波が届かないところに住まわせるのが最も効果的であることには同意している。けれども河田は、高さ10mのコンクリート製の柱で支えられた人工の海岸線に、住宅（や原子力発電所）が立っている未来図を思い描いているのだ。「早急に取り組まなければならないことは山ほどあります。でも、皆が1つのビジョンを持ち、力を結集すれば、きっと成し遂げられます」。■

（翻訳：三枝小夜子）

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

社会科学の 10 の未解決問題

Social science lines up its biggest challenges

Jim Giles　2011 年 2 月 3 日号　Vol. 470 (18–19)
www.nature.com/news/2011/110202/full/470018a.html

社会科学者が優先的に取り組むべき 10 大問題のリストが提案された。

人々に自分の健康に留意させるには、どう説得すればよいのだろうか？　社会の中で特定の気分（ムード）が伝染病のように広がっていくのはなぜなのか？　人類が集合知を増やしていくにはどうすればよいか？

これらは、「社会科学の 10 大問題のリスト」を作成した著名な社会学者たちのグループが、早急に取り組むべき問題として挙げたものの一部である。彼らはこのリストを作成することで、研究者と資金提供機関に今後数十年間の判断の指針を与えたいと考えている。

これとは別に、全米科学財団（NSF）もかねてから社会学者に「社会の基礎に関係し、その在り方を大きく変える可能性のある重大な問題」のリストアップを依頼しており、2011 年 1 月下旬にその結果を公表した。

2 つのグループがリストを作成した意図は、社会科学者に現在取り組んでいる手近な問題から目をあげさせ、本当に重大な問題が何であるかを意識させることにあるという。出来上がったリストには、平等、賃金、戦争、健康など、さまざまな難問に定量的に取り組んでいきたいという社会科学者の野心が表れている。

10 大問題というアプローチは、1900 年に数学者ダフィット・ヒルベルトが作成した 23 の重大な未解決問題のリストがヒントになっている。この有名な「ヒルベルト問題」は、以後 100 年間、数学者の意識を集中させるのに役立った。投資会社 General Atlantic 社（米国コネティカット州グリニッチ）の副社長 Nick Nash は、「ヒルベルトは、20 世紀の数学のロードマップを示したのです」と言う。「それなら、ほかの分野でも同じようなロードマップを作成したらどうかと考えたわけです」。

2008 年、スタンフォード大学（米国カリフォルニア州）で MBA 取得のための研究をしていた Nash は、当時の同大学社会科学部長だった Stephen Kosslyn に、ロードマップの作成を提案した。彼らは 2010 年 4 月、ハーバード大学（米国マサチューセッツ州）で「大物思想家」を集めたシンポジウムを開催し、彼らに未解決の問題を挙げてもらい、その中でどれが最も重要であるかを投票で決定した。その結果は 2011 年 2 月上旬にハーバード大学のウェブサイトで発表された（go.nature.com/wa1hwf 参照。『社会科学の 10 大問題』も参照）。ウェブサイトには市民が提出した問題も紹介されている。

このシンポジウムに参加したシカゴ大学（米国イリノイ州）の経済学者 Emily Oster は、公衆衛生の専門家にとっての永遠の課題である「人々により健康的な行動を取らせるにはどうすればよいか？」という問題に注目した。例えば、上昇する一方の肥満率を下げるため、食事の量を減らして運動量を増やすよう人々を説得することは、理論的には簡単そうだが実際には非常に困難である。

行動を変えることへの報酬が明らかになるのは何年も先になることが少なくないため、Oster は、成功のカギは、報酬がすぐに与えられるようなプログラムの策定にあると考えた。例えば、目標体重までの減量に成功したら現金で報酬を支払うというプログラムが有効であることが、予備的な研究により示されている[1]。ダイエットに取り組む人に毎月数百ドルの報酬を支払い、リバウンドを防ぐために、適正体重になってからも支払いを続けるという戦略であっても、将来の医療

社会科学の 10 大問題

1. 人々に自分の健康に注意するようにさせるには、どうすればよいか？
2. 社会はどのようにして支配力と回復力を備えた組織（例えば政府）をつくり出すのか？
3. 人類の集合知を増やすにはどうすればよいか？
4. アメリカの黒人と白人の間の「スキルの差」を小さくするにはどうすればよいか？
5. 個人が持つ情報をまとめ上げて、集団として最善の決定をするには、どうすればよいか？
6. ヒトが知識を創造し、表現する能力を、どうすれば理解できるか？
7. 女性労働者の多くが、いまだに男性労働者よりも低い賃金しか得られないのはなぜか？
8. 「社会的因子」は、どのようにして「生物学的因子」になるのか？　それはなぜか？　つまり、金持ちか貧乏か、友達が多いか少ないかといった社会的因子は、どのような仕組みで、個人および種としてのわれわれの体に影響を及ぼすのか？
9. まれにしか発生しないが重大な影響を及ぼすさまざまな出来事について、その衝撃に耐えられるシステムを構築するにはどうすればよいか？
10. 社会過程、特に内戦が、長期にわたって持続したり、突如として変化したりするのはなぜか？

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

費を縮小させて、社会全体の経費を節約することにつながるかもしれない。

しかし、このアプローチは絶対確実というわけではない。例えば近年、ニューヨーク市の低所得家庭を対象にして、子どもを学校に通わせ、定期的に健康診断を受けた場合、現金で報酬を支払うという大規模な社会実験が行われたが、改善効果が小さいとして2010年に中止されてしまった（go.nature.com/eunolm参照）。これに関してOsterは、特定の問題を解決するのに最適なシステムを選択する方法がまだ明らかになっていないため、さまざまな報酬システムで実験を行う必要があると言う。

同じくハーバード大学のリスト作成に参加したオックスフォード大学（英国）の哲学者Nick Bostromは、社会科学により、社会が「重要事項に関する判断をほぼ正確に行う能力」を高めたいと考えている。彼は、専門家による判断が一般人による判断とほとんど変わらない場合が多いことを指摘し[2]、社会は個人に頼るのをやめ、人々の知識をまとめ上げる新しい方法を開発し、それを活用するべきだと主張する。

例えば金融市場の参加者は、自分が予想する市場の動きに基づいて株式の売買をしている。十分な人数が金融市場に参加すれば、株価はトレーダー集団が予想する未来を反映したものになる。そこで、特定の出来事（ある政治家が選挙に勝つなど）に連動する「模擬市場」をつくり、ここでトレーダーに株式を売買させることは可能だ。こうした市場は、トレーダーがものごとのなりゆきをどう予想しているかを反映するものとして、良い予測ツールになりうる[3]。Bostromによると、こうした「予測市場」は会社の判断（最高責任者を交代させるべきかなど）にも役立つはずで、もっと広く試してみるべきであるという。

ハーバード大学の社会科学者Nicholas Christakisは、肥満などの生理的特性や孤独感などの心理的特性が、社会的ネットワークを通じて伝染病のように広がる仕組みを解明したいと願っている。彼はこの現象を、カリフォルニア大学サンディエゴ校のJames Fowlerと共同で研究した[4]。例えば、あなたの友人の1人が肥満体になると、あなた自身の体重も増加する可能性が高くなる。Christakisは、たった1つの理論で社会的因子を生物学的因子に結びつけられると考えているわけではない。肥満については、太り過ぎの友人がいると、体重の増加を当たり前のこととしてとらえるようになってしまうのかもしれない。また、シカゴの貧困地区の住民を対象とした予備的な研究からは、孤独感や犯罪への恐怖はストレスホルモンのレベルを変化させ、これが発がんリスクに影響を及ぼす可能性があることが示唆されている。

社会の中に孤独感が伝染病のように広まる理由は、社会科学者にとって重大な謎である。

E. MARCH/CORBIS

Nashと Kosslynは、ヒルベルト問題が若い数学者を惹きつけたように、社会科学の重要な難問に注目を集めることで、若い社会科学者たちがそれに取り組むよう促したいと考えている。「近い将来、研究助成金の申請書に『ハーバード問題』の文字を見ることほど幸福なことはないでしょう」とNashは言う。NSFの社会・行動・経済科学部門（米国バージニア州アーリントン）のMyron Gutmann理事は、ハーバード大学とNSFのリストが似ているのは悪いことではない、と付け加える。「私はハーバード大学がリストを作成したことを喜んでいます」と言う。「重なっているテーマを探せるからです」。

NSFが将来を考えた研究のアイデアを募集したところ、240件以上の応募があった。Gutmannは、これらについて諮問委員会と検討する予定である。「2年後には、特に重要と考えられるいくつかのアイデアを選び出し、パイロットプロジェクトや計画策定助成金の形で投資を行うことになるでしょう。その投資により、今後5～10年間にさらに大きな投資をする準備ができるでしょう」。

英国社会科学アカデミー（ロンドン）の会長でランカスター大学（英国）の心理学者であるCary Cooperは、ハーバード大学のリストを強く支持する。ここにリストアップされた研究が助成金を獲得できるようになれば、若手研究者たちは、やさしい問題を選ばなくても大丈夫だと考えるようになるはずだ、と言う。そして、イギリスの経済社会研究委員会にも同様のリストを作成するよう依頼したいと付け加えた。■

（翻訳：三枝小夜子）

1. Volpp, K. G. *et al. J. Am.Med.Assoc.* **300**, 2631-2637 (2008).
2. Tetlock, P. E. Expert Political Judgment: How Good Is It? How Can We Know? (Princeton Univ. Press, 2006).
3. Berg, J. E., Nelson, F. D. & Rietz, T. A. *Int. J. Forecasting* **24**, 285-300 (2008).
4. Christakis, N. A.& Fowler, J. H. Connected: The Surprising Power of Our Social Networks and How They Shape Our Lives (Little, Brown, 2009).

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

緊縮予算のしわ寄せを受ける米国の物理学研究

US physics feels the squeeze

Eugenie Samuel Reich 2011年3月17日号 Vol. 471 (278)
www.nature.com/news/2011/110315/full/471278a.html

米国オバマ政権の2012年度予算案は科学研究の推進をうたっているのだが、物理学者にとって苦い薬がいくつか隠されている。

ウィスコンシン大学マディソン校シンクロトロン放射センター（米国）のJoseph Bisognano所長の声がぎごちない。40名のスタッフのうち13名を解雇しなければならないからだ。

同センターでは、赤外や紫外の放射光を利用して、毎年およそ300人の科学者が、半導体や高温超伝導体などの材料の構造を調べている。Bisognanoの話では、「専門家による最新の評価で、この施設を閉鎖することが大変な過ちだと判定された」にもかかわらず、国立科学財団（NSF）は、2012年度予算で機器設備関連予算の15%削減を求められ、このセンターの運営費を減らすことを決めたのだという。解雇者の数は今後も増える可能性が高い。

この例から垣間見えるのは、緊縮予算のしわ寄せを受け始めた米国の物理学研究の現場の姿だ。3月中旬の時点で、米国議会とオバマ大統領との間で2011年度予算についての最終合意がなされておらず、予算関連のつなぎ法案が可決されている状況にある。そのため、NSFやその他の政府機関は、研究プログラムの削減に取りかからざるを得なくなっている。しかも、大統領の2012年度予算案にも引き続き削減圧力がかかっている。この来年度予算案では、重要な政府機関の予算の確実な増額とエネルギー研究予算の大幅な増額が確かに請求されているが、この増額部分は議会によって縮小させられる可能性が高い。現在の案においても、政府機関は、成熟した科学事業を終了させ、新しい科学事業に道を譲るよう迫られている。

これでは物理学の複数分野における米国の優位性が損なわれてしまう、と研究者は警告する。

2012年度予算案で犠牲になる施設として最も有名なのが、米国イリノイ州バタビアにあるフェルミ国立加速器研究所の粒子加速器「テバトロン」だ。ヨーロッパの大型ハドロン衝突型加速器（LHC）の運用が拡大されるため、エネルギー省は、今年中にテバトロンを廃止する計画を立てた。これに対して、米国の研究者は、テバトロンが優れた成果を挙げていることを理由として、その存続を求めた。しかし、エネルギー省は存続の申し立てを却下した。

エネルギー省がテバトロンの廃止に踏み切った理由の1つは、ほかの実験、例えば、未知の粒子である暗黒物質の捕獲を目指すプロジェクトやニュートリノの特性を調べる研究に重点を移すためだ。ところが、最近になって、予算上の懸念が、これらの計画にも打撃を与えている。エネルギー省とNSFは、こうした実験の多くが行われることになるサウスダコタ州ホームステークに建設される大深度地下科学工学研究所（DUSEL）への資金提供方法について合意に達していない。このプロジェクトの費用は、8億～9億ドル（約680億～770億円）と予想されている。

日本の「すざく」にも影響

宇宙科学も厳しい時代を迎えている。3月7日、審査委員会は、NASAによる火星へのサンプル回収ミッションを惑星科学研究の最優先事項とするよう勧告した。ただし、審査委員会は、NASAが受け取ることになっている額よりも相当に高額な予算を前提としており、NASAの担当者は、このミッションの費用を負担しきれない可能性があると話している。

また、ハッブル宇宙望遠鏡の代わりとなるジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡によって、NASAの予算はますます圧迫されている。その費用は65億ドル（約5500億円）に膨れ上がって、NASAの天体物理学研究予算のほぼ半分に達し、そのほかの優れたミッションにしわ寄せが及んでいる。例えば、2012年予算案では、NASAと日本の宇宙航空研究開発機構（JAXA）が共同で運用しているX線天文衛星「すざく」に対する米国政府からの財政支援250万ドル（2億1000万円）がカットされる。この天文衛星は、X線スペクトルの高いエネルギー領域における観測で最高の分解能を達成している。JAXAが米国からの支援なしに「すざく」の運用を続けるかどうかはわからない。

「すざく」のユーザーグループの会長を務めるミシガン大学（米国アナーバー）の天体物理学者Jon Millerは、米国の天体物理学研究の将来を悲観し、こう語っている。「高エネルギー天体物理学は、投資に対する見返りの大きな分野なのですが、今、苦しみを味わっています」。しかし、NASAの天体物理学部門長のJon Morseは、NASAは、将来のミッションの打上げ率の増加という目標を達成するために、既存のミッションに関する資金収支を均衡させたいのだと説明する。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

フェルミ国立加速器研究所のコライダー検出器のスポークスマンであるRob Roserは、「よき時代が戻ってくるはずだ、と自分に言い聞かせようとしています」と打ち明ける。「そうなることが私の夢ですが、今の私の想像力がどれだけ確かなものか自信がありません」。■

（翻訳：菊川 要）

ゲノム組み立てプログラムの比較

Genome builders face the competition

ERIKA CHECK HAYDEN 2011年3月24日号 Vol. 471 (425)
www.nature.com/news/2011/110323/full/471425a.html

遺伝データが日常的に解析される時代に備えて、
どのゲノム組み立てプログラムが優れているか、比較コンテストが始まった。

DNA配列を工業的に解読することは、もはや難しい話ではなくなっている。課題は、第二世代のシーケンサーから吐き出される無数の短い重複断片データから、ゲノム全体を組み立てることだ。その作業用のコンピューター・プログラム（アセンブラー）は20種類以上あるが、いずれも弱点を抱えている。そうした中で、どれを選べばよいのか、生命科学の研究者は知りたがっている。

その答えが、3件のゲノム組み立て法評価プロジェクトから得られるかもしれない。いずれも、配列の生データに対して異なるアルゴリズムを試し、結果を比較しようとするものだ。

「ひとり勝ち」は決してないだろう、と研究者は予想する。絶対的な品質保証ができるような統一的方法はなく、ゲノムデータの種類ごとに最適なアセンブラーがあるのかもしれない。

評価プロジェクトの1つ目は「アセンブラソン」。設立に加わったカリフォルニア大学デービス校（米国）のIan Korfは、「私の夢は、今から数年で、ゲノムプロジェクトに取り組もうとする人が、『私たちの予算はこれだけで、これが調べたいゲノムの特徴です。この条件にいちばん合った配列解読法とゲノム組み立てプログラムはどれですか』と聞けるようになることです」と語る。

2010年12月、アセンブラソンは、コンピューターでヒトゲノムのシミュレーションデータを作り、公開した。そして、このデータから任意のアセンブラーを使ってゲノムをつなぎ合わせるという作業を行う研究チームを募集した。応募したのは、7か国17組。Korfのチームは、ゲノムの組み立て結果（DNAの大きな塊に組み立てられたゲノムの部分〈コンティグ〉など）の質に関して、それぞれの組み立て法を評価した。使ったのは、一般的な評価基準と、どれだけの遺伝子をとらえることができたかといった特別な評価基準などである。

2011年3月中旬、カリフォルニア大学サンタクルーズ校（米国）で開かれた会議で発表された勝者は、ブロード研究所（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）が開発したALLPATHS-LG、ブリティッシュコロンビア州がん庁ゲノム科学センター（カナダ・バンクーバー）が開発したABySS、それに北京ゲノミクス研究所が開発したSOAPdenovoだった。しかし、それぞれの組み立て結果の質を決めるのは「ソフトウェアそのものではなく、人間がそれをどう動かしているかです」とKorfは指摘する。

2つ目の評価プロジェクトは、国立ゲノム分析センター（スペイン・バルセロナ）で進められているdnGASP。その結果は、4月4日から7日にかけて開かれるワークショップで発表されることになっている。

3つ目はメリーランド大学（米国カレッジパーク）のSteven Salzbergを中心とするプロジェクトで、評価しているアセンブラーはわずか5種類だが、その中にはALLPATHS-LGとSOAPdenovoも含まれている。Salzbergのグループは、すべての組み立てを実行させて評価する予定だ。また、アルゼンチンアリやマルハナバチの1種など、4種類の実際の生物ゲノムデータも利用する。「シミュレーションデータだと各アセンブラーが実際にどう働くのか、本当の姿がわからないからです」とSalzbergは話す。

アセンブラソンも今年末までには再度評価を開始し、オウムとシクリッド（魚類の1種）というこれまでに公開されていない2組のゲノムの組み立て作業を比較することにしている。

以上3件の比較コンテストは、一般的なイルミナ社のシーケンサーで得られたデータに焦点を絞っている。しかし、新しい配列解読法が来年にも実用化される予定で、その一例が、パシフィック・バイオサイエンシーズ社（米国カリフォルニア州メンローパーク）による一分子リアルタイム（SMRT）法だ。得られる個々の読み取り結果は長いものの、エラー率が高いとされている。

これが新たな挑戦課題を生み出している、とイリノイ大学アーバナ・シャンペーン校（米国）の昆虫学者で、ハチの配列データをメリーランド大学のプロジェクトに提供しているGene Robinsonは語る。「生物学者が本当に欲しがっている組み立てアルゴリズムとは、複数の形式による読み取り結果を利用して、最善の組み立てを実行できるものだからです」と言う。コンテストは始まったばかりだ。■

（翻訳：小林盛方）

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

鳥は恐竜から進化した ── 論争についに終止符

鳥類が恐竜の子孫、と言い切るには、解決しなくてはならない問題が横たわっていた。生き物の形が、どのように作られていくのかを探っている発生学者、田村宏治教授（東北大学）が、その難問を解いた。ニワトリの指の発生を調べていくうちに、大昔に生きた恐竜と現在の鳥類とのつながりが、はっきりと見えてきたのだ。

田村 宏治

── Nature ダイジェスト：鳥と恐竜の進化をめぐる論争に終止符を打ったと、今回の研究は大変な話題ですね。

田村：反響の大きさに驚いています。

150 年前に始祖鳥の化石が発見されて以来、「鳥類の祖先は恐竜」という仮説が提唱されてきました。反論はあったものの、現在では証拠が揃い、恐竜（獣脚類）から鳥類が進化してきたことは、99% 確からしいといわれています。

しかし、100% ではない。なぜか。それは、鳥類と恐竜では「指の番号」が違う、という指摘があったからです。最後に残されたこの問題点を、今回、解くことができたわけです[1]。

── 指の番号とは？

指は、親指から小指に向かって、5 本の各指を、1 ～ 5 の番号で呼びます。鳥類、恐竜、あるいはカエルやヒトなど、動物の指の本数は多様ですが、進化の過程で、もともと 5 本だった本数が変化したと考えられています。

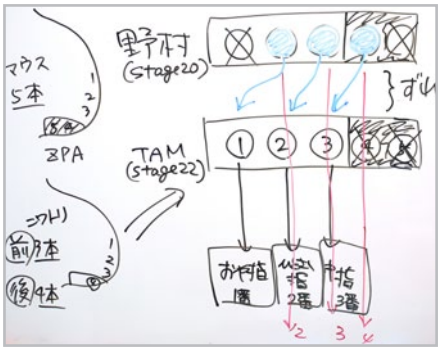


図 1. 田村教授と野村さんの実験結果をホワイトボードに描いて比較し、研究室で討論した。

恐竜と鳥類の前肢には、指が 3 本ありますが、どの番号の指が残っているかが、問題になっていたのです。

鳥類の前肢とは、翼のこと。羽毛の下には、3 本の指のついた腕があります。

── 指の番号が、どのように一致しなかったのですか？

恐竜（獣脚類）の場合、前肢の指は、1-2-3 指というのが一貫した定説です。ところが鳥類の前肢の場合は、恐竜と同じ 1-2-3 指という説がある一方で、恐竜とは異なる 2-3-4 指という説もあり、対立していたのです。前者は、化石を研究する古生物学者から、後者は、生物の体がどのように作られていくかを研究する発生学者から提示されていました。発生学者たちは、一番外側の指に着目して、そう結論しました。そして、この結論をもとに、鳥類の祖先が恐竜であるとする仮説に反論する人がいたわけです。

新たな基準で問い直したら

── 田村先生も発生学者として、そのようにお考えでしたか？

私は、生物の形がどのようにしてできるかを研究してきました。特に、ニワトリの四肢形成を、20 年以上研究してきています。

その中で、いつごろからか、「鳥類の前肢は 2-3-4 指」説が間違っているのではないかと、少しずつ思い始めるようになりました。実は、ほかの発生学者の中にも、この説に反対する人は何人もいたのですが、完全に論破できる証拠を提出することはできていなかったのです。

── ついに、それを実証されたのですね。どんな方法で？

2004 年、ある論文を読んだときに、その方法を思いつきました。

それは、マウスの指の形成についての論文です。発生の初期、ZPA と呼ばれる細胞群を基準にして、指を作る細胞の位置関係が調べられていました。ZPA は、ほかの細胞に指の形成を誘導する「形態形成因子」を作り出す細胞群です。

この論文の方法に照らし合わせると、鳥類の前肢は 2-3-4 指ではないはずだと、気がついたのです。さっそく、ニワトリの前肢の指の位置を、この基準で詳しく調べてみようと実験を開始しました。

── 思った通りの実験結果でしたか？

はい。恐竜と同じ、1-2-3 指であることが、きれいに証明できました。

さらに、ここで、もう 1 つの幸運な出来事がありました。大学院生の野村（のむら）直生（なおき）君が、「先生の実験結果は間違っています。やはり、2-3-4 指です」と、言い出したのです。

野村君は別なテーマで実験を行っており、私のより、少し若いニワトリ胚の前肢を観察していました。各指を作る細胞の位置を、ZPA 細胞を基準に見ると、2-3-4 指の位置を示していたというのです。

── それが、なぜ、幸運なのですか？

より深い探求へと私たちを導いてくれたからです。

驚いた私たちは、2 人の手法の違い、

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

あるいは、主観的な解釈が入り込む可能性を可能なかぎり排除し、それぞれで実験をやり直しました。そして結果は、それぞれの実験結果が正しいという確信でした。

さらなるカラクリが見えた！

——どちらの結論も正しいのですね？

研究室のメンバー全員で、この実験結果の意味を話し合いました。当事者だけで検討すると行き詰まることが多いので、いつもそうしています。

この話し合いで、私たちが出した結論は、指の番号の違いは、2人が観察した胚の日齢の違いに由来しており、それは発生のある段階で、ZPAと、指を作る細胞の相対的な位置が見かけ上ずれたためではないか、というものです。

そこで、細胞を染めて色を付け、発生段階を追って時間的に追跡観察し、指番号に見かけ上のずれが生じることを確認したのです。

——指を作る細胞の位置がずれるとは、指の細胞が移動するということですか？

私たちは、そうではないと思っています。基準となるZPA細胞の方に変化が起こったと考えています。しかし、それはまだ証明できていないので、これから立証していきます。

——では、ZPA細胞の変化とは？

この場合、形態形成因子を作り出していたZPA細胞群のうちの端の部分の細胞で、ある時期にこの因子の発現（転写・合成）が停止したのだと思います。

指が作られていく際には、ZPA細胞からの距離、すなわち形態形成因子の濃度の高低が重要です。それによって、指の細胞は自らの位置情報を認識します。別な言い方をすれば、この因子が、何番の指になるかの命令を細胞に下すわけです。

発生の時期（日齢）によって、命令する側とそれを受ける側の相対的な位置関係に変化が起こることが見逃されていたので、前述の2-3-4指説を導いた可能性も想像されますね。

——この因子を作る細胞の減少と、指の本数の進化とは関係はありますか？

これも証明できていませんが、あるかもしれません。恐竜や鳥類の前肢の細胞では、発生過程のごく初期に、この因子の発現が停止するので、5本指ではなく、3本指になったのかもしれません。

今回の研究から、実験して調べたいことが、さらにふくらみました。ニワトリの卵を調べることで、恐竜の体の仕組みや進化の過程まで推論できるのですから。

地震を乗り越えて

——震災が起こり、しばらくは実験に着手できませんでしたね？

3月11日、5階にある私たちの実験室では、さまざまなものが落下し、破壊されました。4月7日の大きな余震では、整理しかけていたものが再度落下。さすがに、力が抜けました。

試薬は、全貌が把握できないほど失われてしまいました。私たちの研究では、1回の実験で30種類くらいの試薬を使うものもあります。そのうちで1種類抜けても、実験はできません。

——一日も早い復旧をお祈りします。

当初は、いったい何から手をつけていいのか、わからなくなっていましたが、今は、大丈夫です。少し時間をかければやり直せると思えるようになりました。

もちろん、焦る気持ちはあります。ライバルたちは研究を進めているのに、自分たちだけが取り残されてしまっているように感じて……。

でも、1か月半たった今は、先の予測が立つようになってきました。修理・改修も行いながら、5月いっぱいかけて、元の状態に戻していければいい。海岸沿いで被害に遭われた方々のことを思えば、本当にたいしたことではないです。私は、学生やラボのメンバーたちが、元通りの力を発揮できるようにするには何をしてやればいいのか、それを考え、実行していきたいと思っています。

——ありがとうございました。 ■

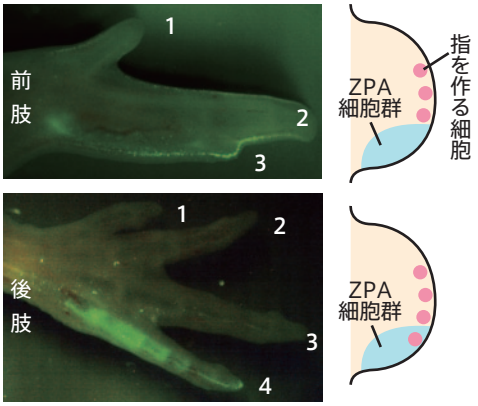


図2. 1-2-3指の証明は、ニワトリの3本指の前肢と4本指の後肢とを比較することで行った。胚のZPA細胞群（蛍光標識）は、前肢では指にならないが、後肢では第4指になる。右図は、胚における細胞の位置の模式図。

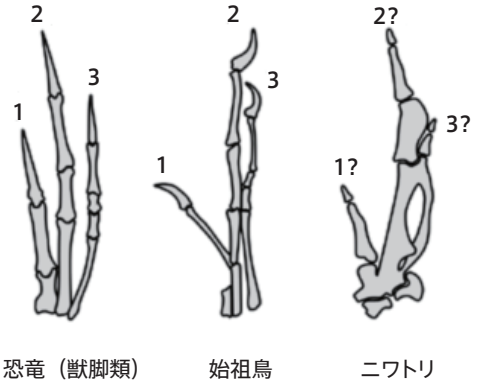


図3. 前肢の指の比較。

聞き手は藤川良子（サイエンスライター）。

1. Tamura K., Nomura N., Seki R., Yonei-Tamura S., Yokoyama H. *Science*. **331**: 753-757 (2011)

AUTHOR PROFILE

田村　宏治（たむら　こうじ）
東北大学大学院生命科学研究科器官形成分野教授。1988年、東北大学理学部卒業、93年、同大学博士課程、94年、助手。97年、米国・ソーク生物学研究所博士研究員を経て、99年、東北大学大学院理学研究科助教授、2007年より現職。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

ENZO SIGNORELLI/GETTY IMAGES

チェルノブイリの遺産

Chernobyl's legacy

Mark Peplow 2011年3月31日号 Vol. 471 (562-565)

チェルノブイリ原子力発電所の事故から25年。現地では今もなお除染作業が続いているが、健康被害の研究は十分とは言いがたい状況にある。日本はチェルノブイリから何を学ぶことができるだろう？

スラブティチ発の朝の電車は、トランプをしたり、電子書籍を読んだり、車窓から単調な氾濫原を眺めたりする通勤客で満員になっている。それは、ありふれた通勤風景に見える。しかし、40分の電車通勤を終えた彼らを迎えるのは、地下鉄の回転式ゲートではなく、ずらりと並んだ全身用放射線量モニターだ。こうして、世界最悪の原発事故現場となったチェルノブイリの一日が始まる。

作業員を乗せた電車がウクライナの荒廃した田舎を走り抜けている今この瞬間に、地球の反対側で、もう1つの危機的な原発事故が進行している。日本の福島第一原子力発電所で部分的な炉心溶融（メルトダウン）が発生してからまだ数日。車内ではときどき福島の事故が話題にのぼる。「深刻な事態になっているようだ」と、1人の通勤者が言う。「でもチェルノブイリほどではないさ」。その口調には、断固たる誇りのような響きさえ感じられる。

1986年4月26日の未明、チェルノブイリ原子力発電所の4号炉が爆発し、それに続いて発生した火災により6.7トンの放射性物質が炉心から大気中に吐き出された。放射性物質は空高く舞い上がり、ヨーロッパ全域の20万 km^2 にわたって拡散した（28ページ図参照）。数十人の緊急作業員が被曝から数か月以内に死亡し、その後、周辺地域の数千人の子どもたちが甲状腺がんになった。原発の周囲は汚染がひどく、当局は、ウクライナとベラルーシの国境にまたがる半径30km圏内を立入禁止区域とした。現在は、約3500人のスタッフが毎日この中

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

過去からの亡霊：チェルノブイリ原子力発電所4号炉は、内部の放射性物質ごとコンクリート製の「石棺」に封じ込められたが、今日もなお広い範囲に影響を及ぼしつづけている。

に入り、事故現場の監視や除染や警備を行っている。除染作業は最低でもあと50年間は続けられることになっている（右コラム「チェルノブイリ原発事故の経過」参照）。

現時点では、福島の原発事故は、ここまで深刻ではない。原発の付近で測定された放射線レベルは、チェルノブイリの爆発事故後に比べればはるかに低い（31ページ表参照）。福島から漏れた放射性物質の量も、チェルノブイリの周辺地域に降り注いだ量には及ばない。

このような違いはあるものの、チェルノブイリの原発事故から四半世紀にわたって続けられてきた作業は、福島の原発事故が人々の健康や環境に及ぼす影響の評価に着手することになる日本にとって、重要な教訓を与えるはずだ。チェルノブイリの事故に続いて発生した問題の数々は、正確な情報がどんなに重要であるかを痛感させる。当局は直ちに、最も危険な最初の被曝を避ける方法を国民に教えなければならない。けれども長期的には、科学者と政府は、低線量被曝に対する不必要な不安と戦わなければならない。そうした不安は、しばしば放射線そのものよりも多くの悪影響を及ぼすからだ。

再び注目されるチェルノブイリ

いくつかの意味で、2つの事故の関連は、チェルノブイリに大きな利益をもたらす可能性がある。ほんの短い時間かもしれないが、これまでほとんど顧みられることのなかったチェルノブイリの現状に、世界の目が向けられたからである。新たに関心が集まったことで、事故現場の除染作業を完了させ、調整不足と資金不足により長らく棚上げされてきた健康被害の調査に必要な資金が、世界の国々から提供されるかもしれない。ポーツマス大学（英国）の放射線生態学者で、チェルノブイリの事故の影響を20年にわたって調査してきたJim Smithは、「チェルノブイリは、近年、資金提供機関から無視されていただけでなく、科学コミュニティーからも無視されているようなところがありました」と言う。「けれども、原子力発電所の解体や放射線の影響について、チェルノブイリから学べることはまだまだたくさんあるのです」。

彼は今、ほかの研究者たちと一緒に原発事故の現場視察をしているところだ。セキュリティーチェックを受けた研究者たちは、バスに乗り込み、打ち捨てられた建物の横を通り過ぎて、老朽化した原発の心臓部へと向かった。バスは穴だらけの道路をガタガタと進み、アーチ型のパイプの下をくぐっていく。ここのパイプが空中に架設されているのは、事故で汚染された土を動かさないためだ。

バスは、チェルノブイリ原発事故の象徴ともいえる所で停まった。爆発でめちゃめちゃに破壊された原子炉を覆うコンクリート製の「石棺」だ。放射性物質を封じ込めるために1986年11月にあわただしく建設された「石棺」は、今は崩れつつあり、腐食して外に縞模様ができている。Smithはリュックサックからすばやく線量計を取り出し、石棺の前

チェルノブイリ原発事故の経過

1986年4月26日 安全性試験のミスにより4号炉が爆発し、炉心の破片が広い範囲に飛び散る。

AKG/PPS

4月27日 事故翌日、原発から3kmしか離れていないプリピャチ市の約4万4000人の住民が退避。

5月5日 原子炉内の火災がようやくおさまるが、その間に6.7トンの放射性物質が20万km^2にわたってまき散らされる。

5月6日 原発の周囲30kmが立入禁止区域とされ、住民と家畜が退避。

8月 事故から4か月の間に、28人の緊急作業員が大量被曝による急性放射線障害で死亡。

I. KOSTIN/SYGMA/CORBIS

11月 放射性物質がこれ以上まき散らされるのを防ぐため、大きく損傷した原子炉の周囲にコンクリート製の「石棺」を建設する作業が完了。

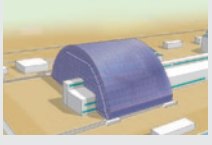
1991年 地元の小児の甲状腺がんの発生率が事故前の10倍に上昇。

K. DIORDIEV/REUTERS/CORBIS

2000年 チェルノブイリ原子力発電所の最後の原子炉が運転を停止。

2005年 国連チェルノブイリフォーラムにて、原子炉からのフォールアウト（死の灰）が原因となって死亡する人は多くても4000人と報告される。

2011年 25周年記念会議で、除染と健康被害の研究のためのさらなる資金提供を求める働きかけが行われる（予定）。



IDÉ/VINCI

2015年 新しい安全な封じ込めシェルターが完成（予定）。

M. PEPLOW

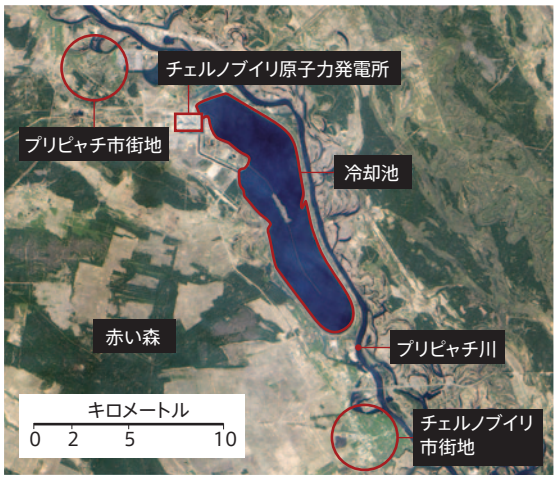
2020年 冷却池の処理が完了（予定）。

2065年 チェルノブイリの除染作業が完了（予定）。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

放射性物質の広がり

チェルノブイリ原子力発電所の爆発事故により放出された放射性物質は、風向きの変化により、ヨーロッパのほとんどの地域に運ばれた（右）。現在、チェルノブイリのオペレーターたちは、放射能を帯びた水や堆積物でいっぱいになっている巨大な冷却池（下）の水位を下げようと努力している。



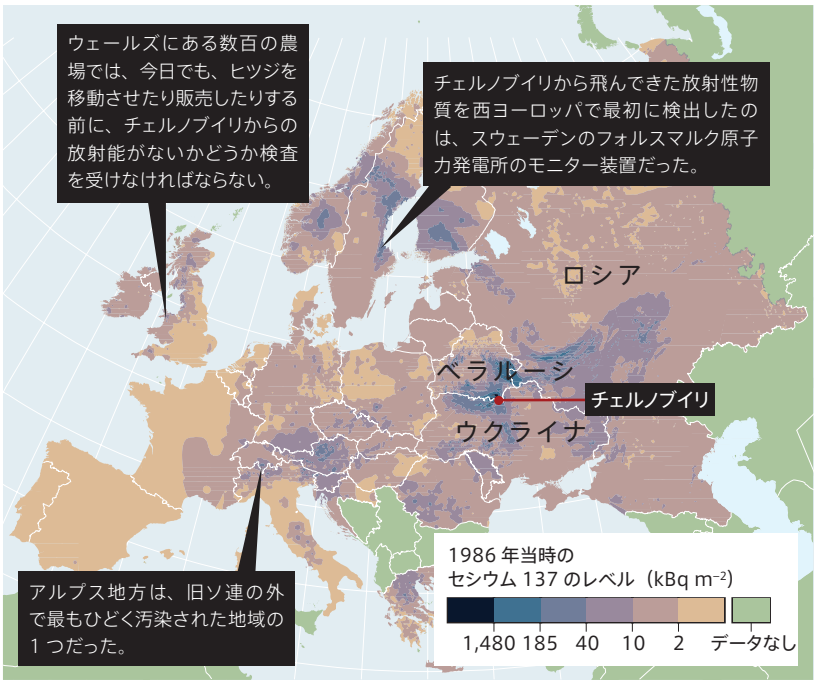


IMAGE CREATED BY J. ALLEN USING EO-1; SOURCE: NASA EO-1 TEAM

でポーズして写真を撮った。線量計は5μSvh^{-1}を示していた。このレベルの放射線に10分間さらされると、腕1本のX線写真を撮影したときと同じ被曝線量になる。

原発の明るいメインオフィスは、「石棺」と際立った対照をなしている。窓のステンドグラスには、原子力を利用する人間の姿が輝かしい社会主義リアリズム様式で描かれている。しかし、この原発は、最後の原子炉が運転を停止した2000年以降、発電はしていない（訳注：チェルノブイリ原発は4号炉が事故を起こした後も運転を続け、2号炉は1991年に、1号炉は1996年に、3号炉は2000年に運転を停止した）。チェルノブイリ原子力発電所のValeriy Seyda副所長によると、現在の最優先課題は、「石棺」が不安定になる前に4号炉を封じ込める新しいシェルターを建設することだという。新しい覆いが完成する前に「石棺」が崩壊すると、塵が舞い上がり放射性粒子が外部に放出してしまうおそれがある。

課題はシェルター建設と貯水池の後処理

計画では、4号炉の隣接地で巨大なかまぼこ形の構造物を建造し、走路（溝）をスライドさせて、「石棺」を外から覆うことになっている。この構造物は鋼鉄製で、高さ105m、幅257mもあり、設計者によれば、世界最大の可動性構造物になる。シェルターは2015年までに完成し、100年間はもつはずだという。シェルターの内部でロボットクレーンを使って、「石棺」と原子炉本体を解体することになる。長期計画では、2065年までにチェルノブイリ原発の除染作業を終えることになっている。

コンクリート製の溝の一部はすでにできている。しかし、総額14億ドル（約1200億円）のこの事業を支援する国際チェルノブイリシェルター基金には、必要な金額の約半分しか集まっていない。そして、2001年にシェルター計画が基本合意に達してから今日までの間に、完成予定時期は10年近く延期されている。4月20日から22日までキエフで開催される会議「チェルノブイリ事故から25年：安全な未来のために」の主要目的の1つは、各国からいっそうの寄付を集めることにある。チェルノブイリでは、4号炉から出る大量の廃材を長期にわたって貯蔵できる施設の建設も計画している。また、その他の原子炉内にある2万個以上の使用済み燃料容器を収容する施設を建設するには、さらに約3億ユーロ（約360億円）が必要だ。

チェルノブイリの原子炉はすべて運転を停止しているものの、発電所からはいまだに大量の放射性廃棄物が出ている。例えば、一部の廃棄物貯蔵庫と4号炉のタービン建屋ホールで浸水が続いているのだ。放射能を帯びた水を、少なくとも毎月300トン汲み出して、構内に貯蔵しなければならない。

浸水の主因は、チェルノブイリの冷却池がいっぱいになって、この地域の地下水の水位が上がってしまっていることにある。冷却池の処理を担当しているAlexander Antropovは、アイスブルーの瞳と、それによく合うクールな雰囲気をもつ人物で、チェルノブイリで長年働いている。「冷却池」という言葉は、通常、使用済み燃料棒の放射能が十分に減衰し、長期貯蔵施設に収められるようになるまで置いておく容器（冷却プール）を意味する。けれども、チェルノブイリの冷却池は本物の貯水池で、その面積は22km^{2}もあり、原子炉冷却装置から出た水が捨てられている。

この冷却池には、爆発事故後に降り注

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

いだセシウム 137 やストロンチウム 90 などの半減期の長い放射性物質も含まれている。冷却池の水位が高くなると、原発への浸水を引き起こすだけでなく、その東側に沿って築かれた弱い堤防が決壊して、汚染された水がプリピャチ川に入ってしまうおそれが高まる。汚染された水は川に入ると急速に薄まるため、下流の人々の被曝線量を大幅に増やすようなことはないが、地域住民の間でパニックが起こる可能性がある。

しかし、Antropov は、冷却池の水位を単純に下げるわけにはいかないと言う。冷却池の水位が下がり、堆積していた微小な放射性粒子が露出したときに、どのような影響が出るかわからないからだ。処理チームは今、年間数十万ユーロ（数千万円）の費用をかけてプリピャチ川の水をポンプで汲み上げ、これを冷却池に足すことにより、現状の水位を維持している。しかし、長期的には、冷却池の水位を 7m 下げて 10 ～ 20 個の小さい池に分割し、そこに危険な堆積物を封じ込める計画になっている。Antropov によると、このプロジェクトには 300 万～ 400 万ユーロ（約 3 億 6000 万～ 4 億 8000 万円）の費用が必要だという。彼はすでに規制当局との話し合いを終えており、プロジェクトの実行可能性の調査と環境に及ぼす影響の評価もやり遂げられるだろうと考えている。

ただ、このプロジェクトが動き出すまでには長い時間がかかっている。冷却池の処理計画は 10 年以上前に策定されたもので、2005 年に Smith が率いる欧州委員会の調査により支持された。ここでもまた、作業を遅延させたのが費用だった。チェルノブイリ廃炉計画の主要な部分は国際基金が費用を負担することになっているが、冷却池の処理プロジェクトはそこに入っていないからである。当然、規制当局の承認を得るために必要な調査費用も対象外だ。「われわれの活動費用の大半はウクライナの国家予算から出ていますが、ウクライナは裕福な国ではないのです」と Seyda は言う。

冷却池を後にした研究者たち一行は、次に、プリピャチ市に立ち寄った。原発からわずか 3km のところにあるこの街は、現在は廃墟となっている。事故当時ここで暮らしていた約 4 万 4000 人の住民は、事故の翌日にあわただしく退避させられたため、崩れかけた建物には、家財道具の多くが散乱したまま残されている。Antropov も、かつてはここに住んでいた。原発事故が発生したとき、彼の娘は生後数か月の乳児だった。プリピャチ共産党支部の副支部長だった彼は、街から住民を退避させる責任者だった。彼は原発の上級技師として働いていたため、事故の影響が今後数十年は続くことを知っていた。「自分がプリピャチで暮らせる日が二度とこないことはわかっていました」と、彼は弱々しい声で語った。「私は、まだ喪失感を抱いています」。

事故の短期的影響

プリピャチから脱出した人々は、原発事故の発生から避難までの間の被曝について、今も恐怖を感じている。周辺地域に住む数百万の人々と同様、彼らは、健康に問題が生じると、すべて事故のせいにすることが多い。しかし、チェルノブイリ原発事故が公衆衛生に及ぼした本当の影響を特定するのは、非常に難しいことが判明している。

損傷した原子炉を制御下に置くための作業に携わった人々がたどった悲惨な運命については、専門家の見方はほぼ一致している。急性放射線障害と診断された 134 人の緊急作業員のうち、28 人が被曝から 4 か月以内に死亡した。さらに 19 人がさまざまな原因ですでに死亡しており、生存している作業員の多くに白内障と皮膚損傷が見られる。

事故当時にまだ子どもで、旧ソ連の汚染地域に居住していた人々のうち、5000 人以上が甲状腺がんになっている（成人はほとんど甲状腺がんにならなかった）。これは、甲状腺がんの発生率が通常の 10 倍以上になったことを意味する。その大半が、放射性ヨウ素で汚染された牛乳を飲んだことが原因だった。甲状腺がんになった 5000 人のうち、死亡したのは 20 人足らずだが、患者数が非常に多く、事故から 5 年以内に急激に発病したことは、多くの疫学者を驚かせた。

これをきっかけに、山のような甲状腺研究が行われるようになった。なかでも有名なのは、1986 年当時子どもだったウクライナとベラルーシの 2 万 5000 人を対象とした長期にわたるコホート研究、つまり共有因子を持った集団の比較統計研究で、米国立衛生研究所（NIH）の国立がん研究所（NCI；メリーランド州ベセズダ）が実施したものである。この比較統計の最新の結果によれば、ウクライナ地域では、甲状腺がんの発生率が被曝線量に比例しており、若年者と、食生活の貧しさのためにヨウ素の摂取量が不足していた人々のリスクが特に高い、という従来の知見を裏付けるものとなった [1]。この研究は日本に直接的な影響を及ぼしており、今回、被曝のおそれがある人々には、甲状腺への放射性ヨウ素の取り込みを予防するためにヨウ化カリウムの錠剤が配布されている。

NCI は、原発の事故処理作業員を対象とした第二の比較統計調査も行っている。彼らは、原発事故の当初の緊急事態がひと段落した後に、立入禁止区域に入って除染や監視などの作業をした人々で、人数は 50 万人以上に上る。事故処理作業員は、白内障になるリスクがわずかに高く、ひょっとすると白血病のリスクもわずかに高いかもしれない [2]。

低線量被曝の長期的影響

事故現場からもっと遠い地域に住む人々は、どんな影響を受けたのだろうか？チェルノブイリの原発事故が最終的にヨーロッパ全域でどれだけの死者を出すのか推定するためにさまざまな研究が行われてきたが、その推定には数千人から数十万人まで幅がある [3]。現在、ヨーロッパ全体では、がんは死因の約 4 分の 1 を占めているため、疫学者たちは、チェ

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

ルノブイリ原発事故の広範にわたる影響を見つけ出すのはおそらく不可能だろうとみている。

そのうえ、そうしたつかみにくい数字にばかり注目していると、この事故が社会に与えたはるかに幅広い影響を見落としてしまうおそれがある。1991年のソ連崩壊で大きな打撃を受けたウクライナとベラルーシでは、被曝への恐怖が長らく後を引いていることが、人々に絶望感を抱かせる一因となっていると考えられている。絶望感は、アルコール依存症の発症率や喫煙率の高さと関連しており、これらは低線量被曝よりはるかに大きな健康被害をもたらす。

環境疫学研究センター（スペイン・バルセロナ）の放射線疫学者Elisabeth Cardisは、「こうした人々が受ける影響については、驚くほどわかっていないのです」と言う。「被曝のせいで死の宣告を受けていると思っている人もいます」。今後の研究で、チェルノブイリからの放射性物質が、比較的遠い地域に住む人々にはあまり影響を及ぼさなかったことを示す説得力ある証拠が得られるかもしれない。しかし、「調べてみないとわかりません」と、ストレンジウェイズ研究所（英国ケンブリッジ）のがん研究者Dillwyn Williamsは言う。

チェルノブイリ事故による健康被害調査はいくつか行われていて、乳がんと心血管疾患の発生率がわずかに上昇していることがわかっている。しかし、これらの調査では、栄養、アルコール摂取、喫煙習慣などの交絡因子が適切に考慮されていない。また、チェルノブイリ事故後に被曝した両親から生まれた子どもに突然変異が増えていると主張する研究者もいるが[4]、平均するとはるかに被曝線量が多い日本の原爆被爆者の子どもたちでさえ、そのような遺伝的影響の存在を裏付ける証拠はない。

つまり、チェルノブイリ事故が健康に及ぼす影響の全貌を理解するには、まだ大きな隔たりがある、とWilliamsは言う。これまでの研究が断片的であったことは、問題を悪化させている。「研究について、ヨーロッパレベルの調整ができていないのです」と彼は言う。

Williamsは、今こそ、チェルノブイリ健康被害研究所を設立する機会だと考えている。それには、原爆が引き起こす長期的な健康被害をモニターして大きな成果をあげている日本の放射線影響研究所（広島市、長崎市）が模範となるだろう。この2つの取り組みを合わせることで、原爆による1回だけの短期間の外部被曝と、チェルノブイリの事故後の長期にわたる低線量被曝との違いを明らかにすることができるだろう。かつては、長期にわたる低線量被曝による危険は、近距離での被曝による危険に比べてはるかに小さいと考えられていた。しかし、両者の危険にあまり差がない可能性を示唆する証拠が集まり始めている[5]。このことが裏付けられれば、日常的に低線量放射線にさらされている人々は、これまで考えられていた以上に、健康に問題を生じる可能性が高いことになる。

チェルノブイリ健康研究計画

欧州委員会は、Williams、Cardis、およびその他の科学者からなるコアグループに資金を提供して、チェルノブイリ健康研究アジェンダ（ARCH）というプロジェクトを立ち上げた。ARCHの目的は、既存の比較統計調査を利用して、乳がんや心血管疾患などの広範な疾患について研究し、長期にわたる低線量被曝の影響に関する問題に取り組むための研究計画を立てることにある。例えば、事故処理作業員の統計対象者は、日本の原爆被爆生存者のケースの6倍もいて、被曝線量の幅もはるかに広い。したがって、被曝線量によってリスクがどのように変わってくるかを示したり、低線量被曝でまれに発生する問題を明らかにしたりすることができるかもしれない。原発労働者に白内障などの健康問題が生じるのを防ぐため、被曝線量の上限を再評価するのにも役立つだろう。

ARCHはまた、事故処理作業員の子孫や被曝線量の多い避難民など新しい調査対象集団をつくることや、組織バンクを設立することについて、それぞれ実行可能かどうか検証することも提案している。組織バンクは、人々の遺伝子構成が放射線への感受性に影響するかどうかを明らかにできるかもしれない。これは、X線スキャンや放射線治療などの医療行為による被曝に対して、個々の患者がどのように反応する可能性があるかを見極めるカギとなる情報だ。

とはいえ、ARCHを始動させるには、いくつかの障害を乗り越えなければならない。プロジェクトにはNCIからの支援が必要だが、予算上の制約のため、NCIは2008年に甲状腺研究対象集団に対する能動的臨床モニタリングのための資金提供を停止している。また、ARCHの提案を実現するためには、ウクライナの人々の医療記録をもっと利用しやすくしたり、参加者の生活習慣因子についてより詳細な情報を得たりする必要があるが、どちらも一筋縄ではいかないかもしれない。

ARCHの計画は4月の25周年記念会議で発表されることになっている。Cardisは、ここで好意的に受け入れられれば欧州委員会は支援を拡大するだろうと考えているが、その関心を長期にわたって引きつけるのは困難かもしれない。ARCHの準備には約300万ユーロ（約3億6000万円）の資金が必要だが、今後チェルノブイリの除染に数十億ユーロ（数千億円）が費やされることを考えれば、たいした金額ではないとWilliamsは言う。

ARCHの研究者らは、必要な資金を確保するだけでなく、対象者に比較統計研究に協力してもらわねばならないが、これも難しいかもしれない。ウクライナ水文気象学研究所（キエフ）の水文学者Gennady Laptevは、事故処理作業員として3年間チェルノブイリで働いたことがあるが、10年ほど前からメディカルチェックの受診をやめてしまった。「大きな健康問題が見つかることなど一度も

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

SOURCE: UNSCEAR/ WORLD NUCLEAR ASSOC.

さまざまな場面での被曝線量

チェルノブイリの事故直後に現場に駆けつけた緊急作業員の多くが致死量の被曝をした。しかし、それ以外の人々は、汚染地域の住民でさえ、医療行為による被曝と同程度の被曝しかしていない。

被曝線量（mSv）	放射線源 / 影響
～ 5,000	爆発直後のチェルノブイリの炉心への 1 分間の曝露
1,000	吐き気や白血球の減少などの一時的な放射線障害（放射線宿酔（しゅくすい））を引き起こす
250	福島で活動する緊急作業員の年間被曝線量の上限
120	チェルノブイリの事故処理作業員の総被曝線量の平均値(1986～90年)
30	チェルノブイリ原発と周辺地域から退避した人々の外部被曝線量の総量の平均値
20	原子力産業に従事する労働者の年間被曝線量の上限の平均値
9	旧ソ連の汚染地域（> 37 kBq m^{-2}）に住む 600 万人の住民の総被曝線量
9	1 回の CT スキャンでの被曝線量
9	ニューヨーク－東京間フライトに定期的に従事する航空機乗務員の年間被曝線量
3	1 回のマンモグラフィーでの被曝線量
2.4	世界の年間自然被曝線量の平均値
0.3	チェルノブイリ原発事故から 20 年間のヨーロッパ人の総被曝線量

なかったのに」時間がかかりすぎるから、というのがその理由だ。

Laptev の当時の仕事は、1 週間に 2 回ヘリコプターでキエフからチェルノブイリに飛び、放射線量の測定値を記録し、分析用の土壌と水のサンプルを採取してくることだった。「私はこの仕事を強制されたわけではありません。興味があったからやったのです。実際、楽しい仕事でした」と彼は言う。しかし、仕事を始めてから 3 年後に、原発の近くで働くことの危険性が心配になったので、地元の水系に放射性同位体がどのように広がっているかを調べる仕事に移ったという。

この地域の住民は、被曝への不安に怯（おび）え続けている。ARCH の研究は、彼らが本当に必要としている答え、すなわち、チェルノブイリの事故が彼らの健康に及ぼしている影響を明らかにすることができるはずだ。「私は、スラブティチに近い汚染地域の村に家を持っています」と Antropov は言う。「近所に住んでいる人のうち、2 人ががんで死にました。おそらく被曝のせいでしょう」。

チェルノブイリの教訓

チェルノブイリの健康被害の研究が、福島の原発事故の影響を受けている人々にどのように役に立つかを語るには、今は時期尚早だ。けれどもチェルノブイリは世界に 1 つの永久不変の教訓を与えている。それは、原発事故が進行している間はもちろん、その後もずっと、明確な言葉で情報を伝え続けることの重要性だ。

チェルノブイリの周辺地域に住む人々には、予防のためのヨウ化カリウムの組織的配布は行われなかった。そして、プリピャチの子どもたちは、事故の翌日、原子炉が燃え続けている間も、屋外で遊ぶことを制限されていなかった。「チェルノブイリでは、被曝の危険を人々に迅速に伝えなかったことにより、必要以上に多くの人々を被曝させてしまったのです」と Smith は言う。

日本政府は、原発事故について市民に十分な情報を提供していないと激しく非難されている。しかし、彼らの行動はソビエト当局より早く、原発事故の発生を知ってから数時間以内に周辺住民に避難指示を出し、その翌日には避難指示区域を半径 20km 圏内まで拡大した。さらに、住民にヨウ化カリウムを配布するとともに、損傷した原発の周辺地域で生産された食品と牛乳の出荷停止を指示した。マンチェスター大学（英国）ドルトン原子核研究所の Andrew Sherry 所長は、「日本人は極めて的確に対応しました」と言う。

最後に、チェルノブイリが福島に教える最も重要な教訓は、原子炉の冷却に成功した後も原発事故はずっとその地域を苦しめ続けるということだ、と Smith は言う。福島第一原子力発電所の周辺地域が、半減期 30 年の放射性セシウム 137 でひどく汚染された場合には、日本政府は数十年にわたって立入禁止区域にしなければならないかもしれない。原子炉を廃炉にするにも、炉心の損傷の程度によっては数十年かかる可能性がある。さらに、健康にどのような危険があるのか予想できないという現実は、放射線による物理的被害よりはるかに大きな心理的被害を与えるおそれがある、と Smith は言う。

一日の仕事を終え、無頓着な様子でスラブティチ行きの電車に乗り込むチェルノブイリの作業員の多くは、こうした教訓について、あまりにもよく理解している。彼らは明日も発電所の後始末をするために戻ってくる。あさっても、これから何十年も先までずっと。 ■

（翻訳：三枝小夜子）

Mark Peplow は、*Nature* のニュース編集者。

1. Brenner, A. V. *et al. Environ. Health Perspect.* doi:10.1289/ehp.1002674 (2011).
2. Cardis, E. & Hatch, M. *Clin. Oncol.* doi:10.1016/j.clon.2011.01.510 (2011).
3. Peplow, M. *Nature* **440**, 982-983 (2006).
4. Dubrova, Y. E. *et al. Nature* **380**, 683-686 (1996).
5. *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2* (NRC, 2006); available at http://go.nature.com/r7jeca.

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

再生医学

Do-It-Yourself で眼を作ろう

DIY eye

Robin R. Ali & Jane C. Sowden 2011 年 4 月 7 日号 Vol. 472 (42–43)

試験管内で複雑な器官を作り出すことは、再生医療に課せられた大きな難題の 1 つである。これは今や不可能なことではない。ES 細胞から全く人工的に網膜を形成できたのだ。

Nature 2011 年 4 月 7 日号には、マウス ES 細胞（胚性幹細胞）から眼が形成されるようすを記録した一連の素晴らしい動画が公開されている（本記事最後に URL）[1]。これは、世界で初めて、哺乳類の眼の発生初期に起こる美しく精緻な出来事を、時間を追って観察したものだ。しかも、動物生体内での記録ではなく、ES 細胞の三次元（3D）培養で、細胞が自発的に複雑な構造を構築する「自己組織化」によって形成されたものであり、非常に注目を集める研究だ。

ヒトの胚発生では、眼は神経板前方の眼領域とそれを覆う表層外胚葉から形成され、6 週目までに眼杯と呼ばれる原基が観察できるようになる。眼杯は、内外 2 つの細胞層からなる杯状の構造で、水晶体胞（将来の水晶体）を部分的に包み込む形をしている（図 1）。その後、眼杯の内層から、神経網膜の複雑な多層構造が発達し、それとともに、光を感知する光受容細胞（視細胞）が介在ニューロンを介して網膜神経節細胞へ接続する。神経節細胞の軸索突起は、脳の高次視覚中枢へ投射される。

胚期の眼の発生機構に関する研究は 100 年以上前に始まった。発生生物学の創始者の 1 人であるハンス・シュペーマンは、眼胞（その後の発生過程で眼杯になる構造）を破壊すると水晶体（レンズ）が形成されないことを示した。これは、最も重要な実験の 1 つである。水晶体が形成される表層外胚葉と、その内側にある眼胞との相互作用は、胚誘導の典型例だと考えられている。胚誘導とは、胚内のある細胞集団が、隣接する別の細胞集団にシグナルを送って、その集団の発生に影響を及ぼすプロセスである。すでに、眼杯の形成に不可欠な一群の遺伝子が見つかっており、その多くは転写因子や成長因子をコードしている。

こうした眼のような複雑な器官を培養ディッシュで形成させることは、実現にはほど遠いと考えられていた。ところが、はるか遠くにあると思われたこの再生医

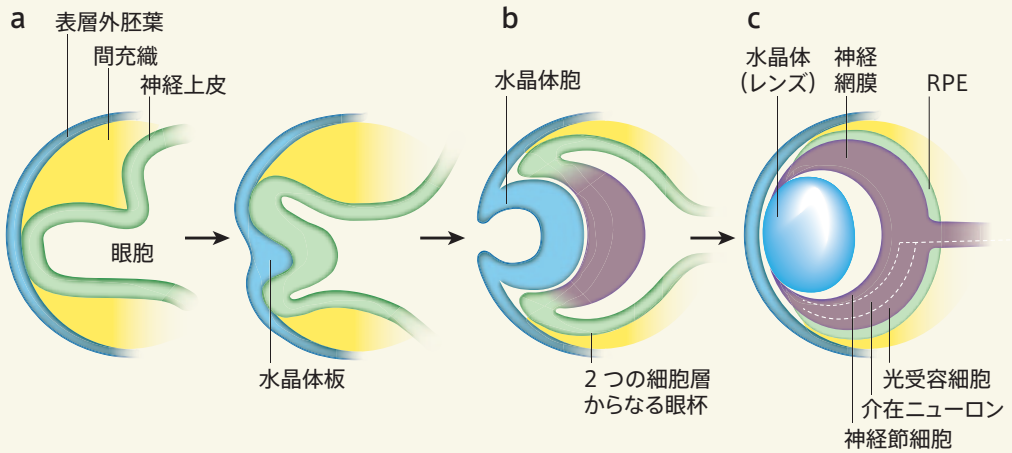


図 1　眼の発生

眼の発生の初期段階では、表層外胚葉が厚くなり、その内側にある眼胞の神経上皮とともに陥没する（a）。陥入で 2 つの細胞層が重なった眼杯の内層は神経網膜になり（b）、外層は網膜色素上皮（RPE）になる（c）。成熟した神経網膜（c）は、光受容細胞、介在ニューロン（水平細胞、アマクリン細胞、双極細胞）、網膜神経節細胞の 3 つの細胞層からなる。永樂たち[1]は、試験管内で ES 細胞から眼杯を作り出した。

療のチェックポイントは、今や着実に近づきつつある。過去10年には、アフリカツメガエルで眼形成にかかわる転写因子を発現させると、体に沿った異常な場所に眼が形成されるという、刺激的な研究発表があった[2]。また、ヒトES細胞を網膜細胞系列へと分化させ、網膜色素上皮（RPE）と網膜ニューロンの両方を作り出せること[3,4]も明らかになった(図1)。そして、特定の細胞種を最大限に増殖させ、治療のために移植するという目的の下に、細胞培養法の開発が行われている。

これまでの研究で、ES細胞由来のRPE細胞は、試験管内で自己組織化して、特徴的な単層の細胞シートを形成することがわかっている。だが、神経網膜はもっと複雑な多層構造をしており、組織化を正確に再現することはかなりやっかいな問題である。しかし最近、ES細胞培養での水晶体様構造の生成[5]や、網膜前駆的なロゼット状構造の形成[6]を報告する論文が出され、試験管内での眼組織の組織化をある程度実現できる可能性が示唆された。

そして今回、理化学研究所 発生・再生総合科学研究センターの永樂元次(えいらくもとつぐ)ら[1]は、どの細胞種にも分化が可能な多能性細胞からなる均一集団を培養して、眼胞が表層側に突出する複雑なプロセスと、その後の陥入による二層構造の眼杯の形成が自律的に起こりうることを、美妙かつ明確に示した[1]。

永樂たちの成功のカギは、彼らが以前考案したES細胞の分化培養法[7]を改良して簡略化したこと、さらに、細胞外マトリックス成分を含む「Matrigel」を加えたことである。こうした条件下で、眼領域および網膜で発現するように構築した緑色蛍光タンパク質(GFP)レポーター遺伝子を使用し、神経上皮様のGFP発現細胞層が、ES細胞でできた中空ボールの側面から袋状に突出していくことを見つけた。この過程は、胚での眼胞形成とそっくりである。そして時間が経つにつれて、この眼胞は自発的にダイナミックな形態形成を行って陥入し、2つの細胞層からなる杯状構造を作った。この杯状構造では、神経網膜とRPEの両方の特異的分子マーカーが適正に発現されており、間違いなくこれらの細胞であることが確認された。また、RPEでは、その特徴である色素形成も観察された。

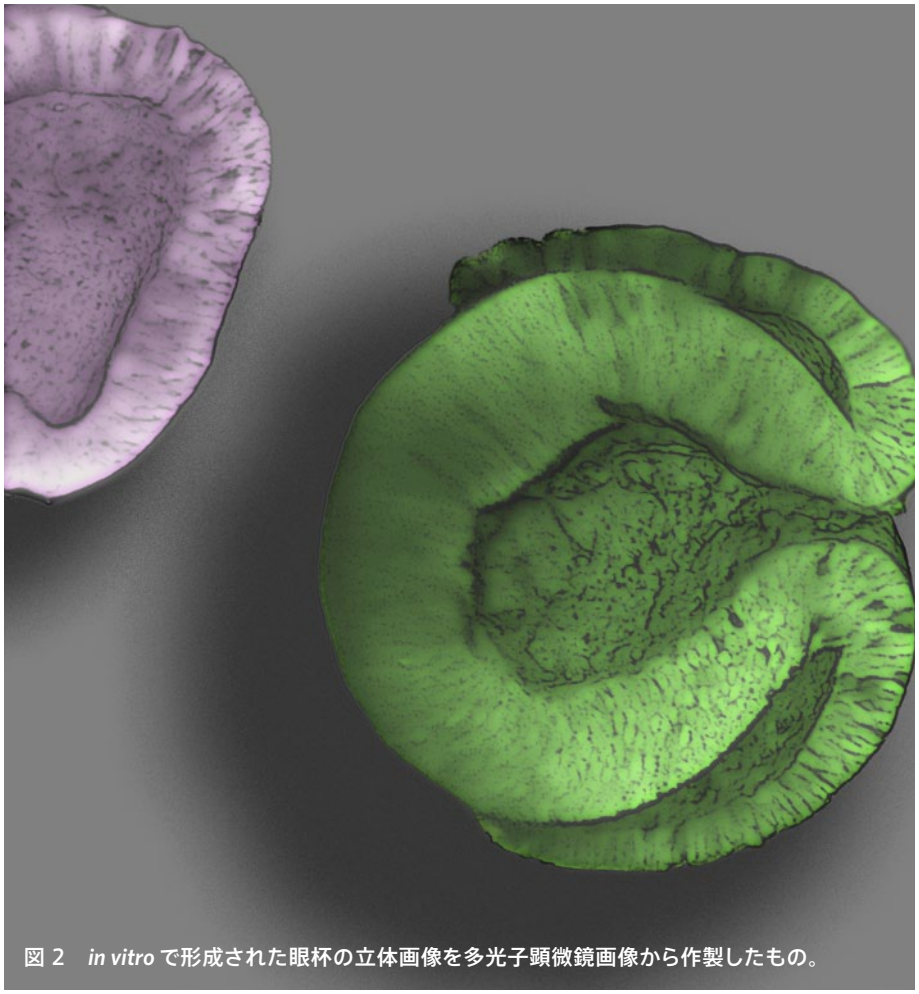


図2　*in vitro*で形成された眼杯の立体画像を多光子顕微鏡画像から作製したもの。

提供：理化学研究所 発生・再生科学総合研究センター　笹井芳樹

これらが本物の網膜であることをさらに決定付けたのは、この人工眼杯を培養し続けることで起きた細胞分化である。確かに、網膜前駆細胞（神経網膜の多分化能細胞）が、光受容細胞を含む主要な網膜ニューロン細胞種のすべてに分裂・分化したのだ。こうした現象は見たところ、正常な網膜組織形成の時系列に従っているようであり、また、その結果生じた細胞は、適切な細胞層内で正しく組織化されていた。

だが、培養下でES細胞から眼杯を生成できたからといって、根底にある発生原理を完全に解明できたわけではない。例えば、意外なことに眼杯は、神経上皮細胞と表層外胚葉もしくは間充織（通常は発生中の胚内で神経上皮細胞を取り巻いている）とのいかなる相互作用にも依存せずに形成される。永樂たち[1]の考えによれば、ES細胞由来の網膜細胞にはもともと内在的秩序が潜在的に備わっており、細胞が集合すると、上皮内の「局所ルール」や内的な力の連続的組み合わせに従って、自己組織化パターン形成をしてダイナミックな形態形成を行えるのだという。

永樂たちが今回開発した優れた培養系は、眼の発生に不可欠な分子的相互作用を操作することができ、今後の研究に大いに役立つ可能性がある。また、この3D培養系で、もっと長期の培養により機能的な桿体細胞の外節（光情報伝達を担う

タンパク質複合体がある場所）を作り出すことができれば、網膜の光への反応を調べる機能研究の助けにもなるだろう。

さらに、ヒトでも同様の 3D 培養系を開発できれば、患者の組織から作製した人工多能性幹細胞（iPS 細胞）を使って、疾患モデルを作製したり薬剤を試験したりするという展望も開けてくる。治療手段のない視力障害の多くは光受容細胞の喪失が原因であり、ほかの網膜ニューロンはそのまま残っている。またマウスでは、発生期の網膜から単離した光受容前駆細胞を移植することで、成体の網膜が修復されることがわかっている[8]。今後の大きな課題の 1 つは、再生可能な細胞供給源から、十分な数の適切な発生期の光受容前駆細胞を入手することだ。この課題は、今回のような ES 細胞 3D 培養系を使って、限定された発生段階で人工網膜を生成し、そこから移植用の前駆細胞を容易に単離することで、解決できるだろう。 ■

（翻訳：船田晶子）

Robin R. Ali、ロンドン大学ユニバーシティー・カレッジ眼科学研究所（英国）
Jane C. Sowden、同カレッジ小児保健研究所（英国）

参考動画
http://nature.asia/nd06-nv-video1
http://nature.asia/nd06-nv-video2
http://nature.asia/nd06-nv-video3
http://nature.asia/nd06-nv-video4
http://nature.asia/nd06-nv-video5
http://nature.asia/nd06-nv-video6
http://nature.asia/nd06-nv-video7
http://nature.asia/nd06-nv-video8

1. Eiraku, M. *et al. Nature* **472**, 51–56 (2011).
2. Zuber, M. E., Gestri, G., Viczian, A. S., Barsacchi, G. & Harris, W. A. *Development* **130**, 5155–5167 (2003).
3. Lamba, D. A., Karl, M. O., Ware, C. B. & Reh, T. A. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **103**, 12769–12774 (2006).
4. Osakada, F. *et al. Nature Biotechnol.* **26**, 215–224 (2008).
5. Yang, C. *et al. FASEB J.* **24**, 3274–3283 (2010).
6. Meyer, J. S. *et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA* **106**, 16698–16703 (2009).
7. Ikeda, H. *et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA* **102**, 11331–11336 (2005).
8. MacLaren, R. E. *et al. Nature* **444**, 203–207 (2006).

天体物理学

赤色巨星の内なる鼓動

The inner lives of red giants

Travis S. Metcalfe　2011 年 3 月 31 日号　Vol. 471 (580–581)

赤色巨星を輝かせているエネルギー源は何なのか。
その重要な手がかりは赤色巨星の明るさの脈動から得ることができる。
米航空宇宙局（NASA）が打ち上げたケプラー宇宙望遠鏡による赤色巨星の明るさの観測で、
星の進化を記述する理論の予測が正しいのかを調べることが可能になってきた。

ハリウッドスターと同様、星の年齢もその表面を見ているだけではよくわからない。恒星の大きさと明るさは、その一生のある段階では極めて一定している。しかし、内部の奥深くでは変化が進行している。恒星は、その一生の大半の期間、水素をヘリウムに変える核融合反応が出すエネルギーで輝いている。しかし、やがて中心核のヘリウムを燃やして炭素や酸素などのより重い元素を合成し始める。オーストラリアのシドニー大学シドニー天文学研究所の Timothy Bedding をはじめとする国際共同研究チームは、変化が最も顕著に起こっている恒星の最深部を、連続した「星震」（星で起こっている振動）を使って探り、恒星がその生涯のどの段階にあるかを知る新たな方法が実際に実行可能であることを示した。彼らはこの研究成果を *Nature* 2011 年 3 月 31 日号 608 ページに発表した[1]。

Bedding らが調べた天体は赤色巨星と呼ばれる。私たちの太陽など、星の主要なエネルギー源は、中心近くの水素の核融合だ。こうした星が中心近くの水素を使い果たして膨張したのが、赤色巨星だ。水素の核融合の結果できるヘリウムは中心核に蓄積し、水素はヘリウムを取り囲む殻に押しやられる。水素はそこで前よりももっと激しく燃焼する。こうしたプロセスにより、今から約 50 億年後、私たちの太陽は徐々に現在の大きさの 100 倍以上に拡大して赤色巨星になり、太陽系の内側の惑星の一部を飲み込む[2]。太陽よりも前に生まれた星や、太陽よりも重く、より速く進化する星はすでに進化のこの段階に達している。

赤色巨星では、太陽と同じように対流によって内部から熱が運び上げられ、宇宙空間に放射されるので、その表面は沸き立っていると考えられている。

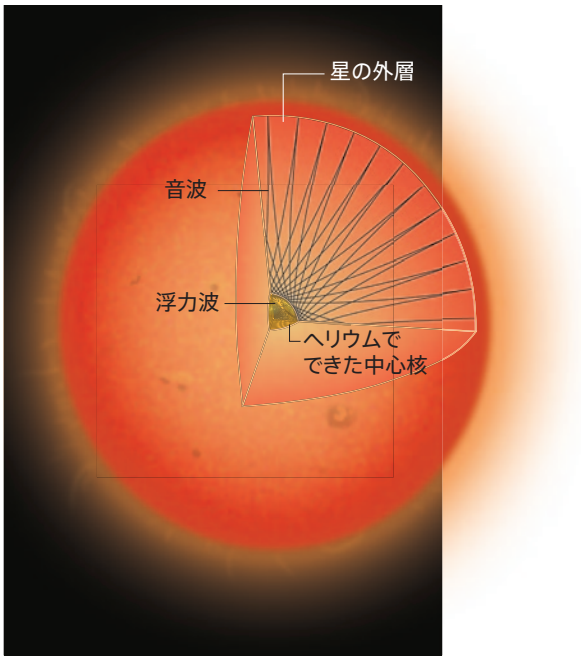


図 1　赤色巨星の振動
赤色巨星内部の乱流運動は連続した星震として作用し、音波を作り出す。音波は内部へ伝播（でんぱ）し、再び表面に戻って来る。こうした音波は、ある条件下ではヘリウムでできた中心核内部に閉じ込められた浮力波と結合することがある。Beddingらはケプラー宇宙望遠鏡で観測された数百個の赤色巨星でこの「混合振動モード」を見いだし、星の進化の理論をこれまでにない方法で検証する道を開いた[1]。

こうした乱流運動は連続した星震として作用し、音波を作り出す。この音波は星の内部へ伝わり、再び表面に戻ってくる。音波の一部は、星全体の明るさを星の大きさに応じた数時間から数日の周期で変える定在波（太陽類似振動と呼ばれる）を起こすのにちょうどよい周波数（人間の耳に聞こえる音の周波数の 100 万分の 1）を持っている。この周期的な明るさの変化から星の性質を推測するのが、星震学と呼ばれる研究分野だ[3]。

赤色巨星の表面近くで作られた音波は、ヘリウムでできた中心核の中に閉じ込められている浮力波（海の波と似た波）と相互作用することがある。ある条件のもとでは、この 2 種類の波は互いに結合（相互作用）することが可能で、表面の明るさの変化の周期を変える。この「混合振動モード」は、星の外層のみを通過する結合していない音波よりも、中心核の構造に大きく依存する（図 1）。

Bedding らが進化の異なる段階にある赤色巨星を見分けることができたのは、2009 年 3 月に打ち上げられたケプラー宇宙望遠鏡の正確な観測のおかげだ[1]。ケプラー宇宙望遠鏡の目標の 1 つは、地球に似た惑星の発見だ。ケプラーは、はくちょう座の近くの空の大きな区画を見つめ、15 万 6000 個を超える星の明るさを監視している。ケプラーは、宇宙人が住んでいるかもしれない世界を見つけるという任務に関しては大きな成功をおさめてきたが[4]、数千個の星の明るさの何か月も連続したデータが得られるため、星の振動の研究にも革命を起こしている[5,6]。これまでの研究では地上の望遠鏡で赤色巨星を調べていたが、昼間は太陽の光が邪魔になること、連続して観測できる時間は限られていることが障害になっていた。

冒頭でも述べたように、赤色巨星のやっかいな点はその質量や年齢に関係なく、外側からはほとんど同じように見えるということだ。Bedding らは、ある質量の星が殻の水素を燃やす段階から中心核のヘリウムを燃やす段階へいつ移るのかを正確に測定するため、ケプラー宇宙望遠鏡が観測した数百個の赤色巨星の特性を決定しようと試みた[1]。定在波の規則的なパターンだけでは、特定の赤色巨星がどのエネルギー源で輝いているかを正確に知るには不十分だが、混合振動モードは星のエネルギー源に応じて特有のパターンを示す[7]。Bedding らは、星震学でこのパターンを解読することにより、赤色巨星の進化の 2 つの段階を見分けることができることを示した[1]。

赤色巨星の状態や一生は、理論的にはその年齢だけではなく質量にも依存する。太陽の質量の約 2 倍よりも小さな星では、ヘリウムフラッシュと呼ばれる突然の点火現象が起こる。ヘリウムの核融合を起こすのに必要な温度は、水素の核融合に必要な温度よりも著しく高い。質量の小さな星では、中心核のヘリウムは非常に高い密度になるまで蓄積し続け、臨界質量に達すると、ほとんど瞬間的に点火する。一方、大きな星では中心核でのヘリウム燃焼への移行はゆるやかで、星の中心核の大きさのばらつきは大きく、ヘリウムフラッシュは起こらない。Bedding らは、それぞれの振動モードを観測で調べて、これら 2 つのタイプの星を区別する方法を明らかにするとともに、これまで検証できなかった、星の進化に関する理論の予測の正しさを確かめることができる新たなデータをもたらした。

Bedding らは赤色巨星の内部で起こっている現象を特殊な方法でのぞき見たわけだが、この研究はケプラー計画の最初の年の観測結果だけで可能だった。ケプラー宇宙望遠鏡は少なくとも 3 年半は運用される計画で、NASA は計画をさらに 2 年半延長するかもしれない。観測の継続とともに星震学でわかることは着実に増えていくだろう。Bedding らが調べた星のより詳しい結果や[1]、近い将来にはほかの赤色巨星に関する同様の測定結果も得られるだろう。 ■

（翻訳：新庄直樹）

Travis S. Metcalfe、米国コロラド州ボールダーの米国立大気研究センター（NCAR）高高度天文台（HAO）

1. Bedding, T. R. *et al. Nature* **471**, 608–611 (2011).
2. Silvotti, R. *et al. Nature* **449**, 189–191 (2007).
3. Aerts, C., Christensen-Dalsgaard, J., Cunha, M. & Kurtz, D. W. *Sol. Phys.* **251**, 3–20 (2008).
4. Borucki, W. J. *et al. Astrophys. J.* **728**, 117–137 (2011).
5. Gilliland, R. *et al. Publ. Astron. Soc. Pacif.* **122**, 131–143 (2010).
6. Chaplin, W. J. *et al. Science* (in the press).
7. Beck, P. G. *et al. Science* doi:10.1126/science.1201939 (2011).

日本の科学、再興への道のり

The long road back

2011年3月24日号　Vol. 471 (409)

今のところ、日本の科学者には、研究基盤の再建よりも優先させるべき課題がある。
しかし、実際に再建が始まるときには、海外の研究コミュニティーからの支援が必要となる。

日本の菅直人首相は、3月11日に発生した大震災について、「戦後最大の危機」と評した。日本の科学も大きな打撃を受けた。複数の研究施設が破壊され、国内トップクラスの東北大学（仙台市）は、少なくとも4月末までの閉鎖が決まった。多くの建物が立入禁止となり、入れるビルの中も、壊れた機器や試料であふれかえった。大震災の影響は、国内研究者の40％が活動拠点とする筑波研究学園都市にも及んだ。東京周辺では、ほとんどの施設が物理的被害を免れたが、かなりの研究が中断した。

今、世界数十か国から人道的援助が寄せられている。それに加えて、世界の科学者が、日本人研究者に対する援助を申し出ている。知人のつてによるものもあれば、公式な申し出もある。

米国立衛生研究所（NIH）は、日本国内で研究施設を失った研究者に対して、臨時の研究拠点を提供する計画を立てている。また、Nature Networkが支援する「日本科学サポートネットワーク」は、ドイツからの科学的救済活動の調整に助力している。3月22日現在、同ネットワークには18件の申し出があり、その多くは、財源も全額確保されている。研究分野も数学から分子薬理学、プラズマ宇宙物理学、天体物理学に及んでいる。

小規模な支援を集めている国際的な草の根団体もある。Leopoldina（ドイツ国立科学アカデミー；ハレ）、ドイツ科学技術アカデミー（ベルリン）とベルリン－ブランデンブルク学術アカデミーは、日本の科学を支援するために500万ユーロ（約6億円）を提供した。また、中国科学院ナノ科学技術センター（北京）の部門からは、科学者の招聘（しょうへい）があった。日本国内の研究機関も、研究機器の貸与や寄付を検討している。

このように寛大な支援を申し出たのに日本からの応答がないとしても驚くことはない。数多くの被災した科学者は、インターネットへの安定したアクセスを確保できておらず、また海外への移動より前に、被災した国内の研究室の復旧に取り組んでいるからだ。研究という意味では、水や電気が支障なく入手できる場所へ拠点を移動させるのが最善なのかもしれないが、多くの研究者、特に年長の研究者は、国内で職務上の義務や家族への義務を果たさなければならないのだ。

こうした状況も、やがて変化していくだろう。科学コミュニティーが取れる最善の策は、支援の申し出を続けることだ。特に日本の若手研究者は、こうした支援を利用すべきであり、日本の科学にとって起爆剤となるかもしれない。この10年間で、海外留学する若手研究者の数は激減し、内向きになっていたが、海外との結びつきを再度強めることで、恩恵が得られるかもしれない。

新たな機会が生まれているのも事実だ。今回の大災害では、津波と地震の猛威とエネルギー不足の深刻さを見せつけられた。最近の日本では理科や理系科目の授業時間が大きく削られ、科学に関心を持たない児童や生徒が増えていたが、今回の大災害に伴って生じた医療問題などによって、科学の重要性に気付くかもしれない。生物学者の松田良一（まつだりょういち）（東京大学）は、この悲劇が、「生き残るための科学教育」を再び推進するきっかけになると考えている。

再建にも長所がある。老朽化した原子炉を廃棄することで、地熱エネルギーの導入など新たな方策を議論できるからだ。東北大学の管理部門では、学内の研究基盤の改善を議論しており、時代遅れの施設の改修が促進されるかもしれない。

震災直後は、科学研究基盤が日本の最優先課題でないのは当然であり、全国の科学者が、東北地方の復興のための科学予算の削減を覚悟している。しかし、日本は、科学と技術なしでは生き残れない。

日本政府は、間違いなく、科学を再興するための政策強化に動くと思われるが、強固な基盤を築き上げるまでには紆余曲折が予想され、その間に多くの研究者の人生が放置される恐れもある。支援を必要とする日本の科学者にチャンスを提供しようとする人々に対しては、その扉を開き続けることを求めたい。それが、扉を開こうと考える人を増やすことにもつながるはずだ。■

（翻訳：菊川要）

電磁気の統一から150年

A bold unifying leap

2011年3月17日号　Vol. 471 (265)

150年前、スコットランドの物理学者ジェームズ・クラーク・マクスウェルは物理学の世界を塗り替えた。異なる力の統一という偉業とコンセプトは、今も生き続けている。

1つの偉大な発見から生まれるさまざまな成果が多くの人々に共有されていく姿は、科学のどの分野にも見られる。しかし、マクスウェルの方程式がいかにも物理らしいのは、それまで無関係なものと考えられていた複数の法則を統合し、学問と産業界の広範な分野に適用される確固たる枠組みを提供した点だ。

Nature 2011年3月17日号では、マクスウェルが *Philosophical Magazine* に一連の方程式を初めて発表してから150年を迎えたことを記念し、特集を組んだ。マクスウェルは、これらの方程式により、自然界の基本的様相である電気、磁気、光について、またそれらの物質中での振る舞い方について、説明を1つにまとめ上げた。マクスウェルの研究は「非常に大胆な飛躍」であったため、後世の物理学者がその意義を十分に理解するまでに数十年かかった、とアインシュタインは評した。マクスウェル方程式は、最も純粋な形の科学表現であったが、当時の識者たちの徹底した実用主義の中で着実に鍛えられていった。

マクスウェルが研究を始めたころ、電場のパターンが電荷分布に関係していることが知られていた。また、単一の磁荷は存在しないこと、電荷が動くと磁場が生じること、磁場が時間的に変動すると電場が生じることも知られていた。マクスウェルの業績の1つは、電場の変化や電荷の移動によって、磁場が電気的に発生しうるという知見だ。彼は、この知見とすでに確立されていた法則を一連の方程式に表現して、電磁気学の理論的枠組みを構築した。この知識革命は、天文学から生物学、電気通信に至るまで、幅広い分野において電磁気の理解と応用を一変させた。

材料中におけるマクスウェル方程式の応用は、各材料が電場と磁場の伝搬（伝播）に及ぼす影響を解明することにかかっている。例えば、一部の結晶や地球大気において、電磁波は、さまざまな方向へさまざまな仕方で伝搬し、時には、媒質に入射する際に異なる伝搬様式の成分に分離することもある。それでも、これらの現象はすべてマクスウェル方程式で説明できる。メタマテリアルへのマクスウェル方程式の応用は、現代の興味深い応用例の1つだ。メタマテリアルの場合、電磁波の伝搬特性を人工的に作り出せるので、倍率の極めて高いレンズなどの開発が可能となる。

マクスウェル方程式は、何もない空間に対する理解も深めた。マクスウェルは、電場の変化による磁場の発生という自らの知見と、磁場の変化による電場の発生という既知の考え方とを組み合わせて、電磁波が自立的に伝搬するという洞察に至った。そして、その後の研究によって、光もそうした波動の1つだと結論付け、すべての電磁放射の真空中における伝搬速度が一定であることを明らかにした。これは、当時、「光速度」と呼ばれたが、今では、電波、赤外線、紫外線、X線、ガンマ線にも適用できることがわかっている。

マクスウェル方程式では、この伝搬速度は、波動が伝搬する媒質の誘電率と透磁率によって決まる。この2つの特性は、真空中で特定の値をとるため、空間自体に、光の伝搬に必要な「エーテル」が充満しているのではないか、という疑問が生じた（これはマクスウェル以前の研究者によってすでに提起されていた）。このエーテルなるものは存在せず、光の伝搬にとって必要でもないことは、後の物理学者によって明らかになった。その後、アインシュタインにより、空間中の光速度は、伝搬方向にかかわらず一定であるのみならず、観測者の位置や移動速度にかかわらず一定であることが明らかになった。

今日、マクスウェル方程式について、統一理論の側面が重視されるのは、後の研究者が、そうした方向に沿って新たな発見を重ねてきたからである。仮説が次々と発表され、しばしば論争を巻き起こしてきた。マクスウェルには、ほかにも大きな科学的業績がある。世界初の真のカラー写真の撮影もその1つで、この点でも今年は150周年に当たる。しかし、すべての分野の科学者が感謝し、また物理学者が最も誇りに思う成果は、間違いなく、電磁気に関して統一的理解を達成したことだ。■

（翻訳：菊川要）

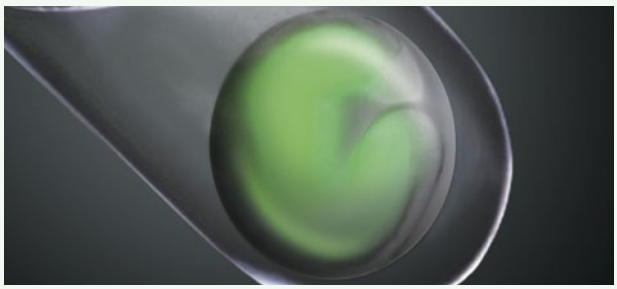
Volume 472
Number 7341
2011 年 4 月 7 日号

Podcast

眼を作り出す：マウス幹細胞から自律的に作り出された眼に似た構造と層状の網膜組織

MAKING EYES: Mouse stem cells self-generate eye-like structures and layered retinal tissue

器官形成の基盤となっているのは多数の細胞相互作用の協調で、こうした協調によって発生中の組織を形作るのに必要な細胞の集団的な挙動が生み出される。笹井芳樹（理化学研究所）たちは、三次元細胞培養系を開発し、これを使ってマウス胚性幹細胞塊を浮遊状態で培養したところ、うまく自己組織化して、眼杯に似た形の層構造が形成された。眼杯は袋状の構造で、胚発生の間に網膜の内層と外層を形成する。さらに 3D 培養を続けると、この眼杯から、新生マウスの眼に見られるような完全な層を持つ網膜組織が形成された。この方法は、網膜を修復する幹細胞治療に重要なかかわりを持つと考えられる。



M. EIRAKU AND Y. SASAI AT RIKEN CENTER FOR DEVELOPMENTAL BIOLOGY

医学：心疾患に肝心なのは腸内細菌叢

Heart disease is a gut issue

腸内細菌叢が食餌中のリン脂質の代謝を介して心血管疾患に影響を与える場合があることが明らかになった。心臓検査を受ける患者で、標的を絞ったメタボロミクスという手法を用い、どういう血漿中代謝産物の濃度によって、将来起こる非致死的な心臓発作、脳卒中あるいは死亡のリスクを予測できるのかが突き止められた。食餌中のホスファチジルコリンの 3 つの代謝産物、コリン、ベタイン、およびトリメチルアミン *N*- オキシド（TMAO）の血漿中濃度は、心血管疾患のリスクの上昇と関連している。一方、腸内細菌叢は、コリンからの TMAO 形成にかかわっていることがすでに知られている。また、アテローム性動脈硬化を発症しやすいマウスでの実験で、食餌中のコリンはマクロファージの泡沫細胞形成と動脈硬化病変形成を増強するが、抗生物質で腸内細菌叢を激減させると増強が見られなくなることが示された。この研究は、動脈硬化性心疾患に対する新たな診断法と治療法を示唆している。

フォトニクス：光を遅らせるシリコンフィルム

Silicon film as basis for light-slowing device

電磁誘導透過として知られる現象が原子系で盛んに研究されているが、それはこの現象によって光を減速させたり停止させたりすることができるからである。今回、電磁誘導透過と調節可能な光遅延が、シリコン薄膜にエッチングで単に孔をあけることによって作製されたナノスケール・オプトメカニカル・デバイスで実証された。これは、集積量子オプトメカニカル・メモリーを作製するという目標に向けた重要な一歩である。また、この成果は古典的信号処理への応用としても意味があり、室温で光波にのせたマイクロ波（microwave-over-optical）信号の光バッファリング、増幅、フィルタリングに利用できる。

工学：ダイヤモンドに裏打ちされたグラフェントランジスター

Diamond standard for graphene transistor

グラフェンは、原子 1 個の厚さのシート状炭素で、高周波マイクロエレクトロニクス素子での利用が期待されている。今回、IBM トーマス・J・ワトソン研究センター（米国）のチームが、グラフェン半導体素子用の基板としてダイヤモンド状炭素が特に適していることを見いだした。ダイヤモンド状炭素は、半導体産業ではすでによく知られている。グラフェンを、化学蒸着（CVD）により銅膜基板上に成長させ、次にこのダイヤモンド状炭素ウエハーへ転写し、これを使ってゲート長 40nm のとき遮断周波数が 155GHz の高性能グラフェントランジスターが作製された。このゲート長は、これまで報告された中で最も短い。この系は CVD グラフェントランジスターとして、これまでで最高の動作速度を達成したばかりでなく、今までグラフェン材料上で実証された正常に動作するトランジスターとして最小である。

生態：多様な生態系がニッチを埋める

Diverse ecosystems fill a niche

生物多様性の保全によって、生態系が栄養を保持して生産性を維持する能力が向上することが、近年の複数の研究によって示されているが、これに対しては異論も多い。その理由の 1 つは、この現象を説明する機構について直接的な証拠がまだ得られていないというものだ。今回、モデル河川系で藻類の種数を操作する実験で、そうした機構の 1 つが示された。窒素栄養の取り込み量は、流水環境や撹乱状態の変化に応じて種の豊かさが増すのに伴って、直線的に増加した。しかし、ニッチ構造を実験的に排除すると、その関係は消失した。このことは、種数の多い環境では、種数の少ない環境と比較して環境中のニッチ機会が多く利用されており、多様性の高い系ほど窒素などの生物活性資源をより多く捕捉できることを示唆している。

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 472
Number 7342
2011 年 4 月 14 日号

Podcast

問題を抱えた海：ディープウォーター・ホライズンの原油流出事故から 1 年を経て、その被害を評価する

TROUBLED WATERS: Assessing the damage a year on from the Deepwater Horizon oil spill

2010 年 4 月 20 日に海洋石油掘削施設ディープウォーター・ホライズンの最初の爆発が起こってから約 1 年が経つ。この大事故では、数百万バレルもの原油およびメタンがメキシコ湾内へ流出している。本号では、この海域の生態系の現状について報告している。事故の影響は、海面よりずっと下の海中や、流出源からかなり距離が離れた場所に及んでおり、被害状況を把握するのは非常に難しい。

進化：顎から耳への道のり

The road from jaw to ear

爬虫類の下顎は、複数の異なる骨で構成されている。一方、哺乳類では、下顎はたった 1 つの骨、すなわち、歯が生えている「歯骨」からなり、それ以外のほとんどの骨は、中耳内に音を伝える耳小骨となっている。この変形は進化的な変化を象徴する一例だが、この移行を直接示す化石証拠はなかなか見つからなかった。そのため、今回 Jin らが発表した、中国の白亜紀層から出土した三錐歯類（絶滅した哺乳類の一種）の化石は極めて重要である。その下顎を構成する骨は、中耳の耳小骨の形に似てきているが、骨化した軟骨片によって下顎とまだ連結していた。この軟骨片はメッケル軟骨と呼ばれるもので、下顎内面の重要な部分である。今回の新しい化石は、メッケル軟骨が、哺乳類の中耳が形成されるまでの進化のジグソーパズルの重要なピースであることを示している。

生理：痛みも匂いも感じなくなる変異

No pain — no smell

電位依存性ナトリウムイオンチャネル $Na_v1.7$ をコードする遺伝子に変異のあるヒトやマウスは、痛みを感じなくなることが知られているが、匂いも感知できないことが、今回新たに明らかになった。このナトリウムチャネルを欠く嗅覚ニューロンは、活動電位を発生することはできるが、そのシナプスは下流の神経回路に信号を伝達できない。$Na_v1.7$ を欠損するマウスの表現型は、$Na_v1.7$ の機能喪失変異を持つヒト患者の表現型に似ており、このイオンチャネルの欠損により一般的な先天性無嗅覚症のマウスモデルを作製できることを示している。

脳：匂い情報の処理過程をたどる

Scent tracking

マウスでは、脳の嗅球糸球体は単一クラスの嗅覚ニューロンからの投射を受けており、これによって「匂いの地図」ができている。糸球体からの情報は次に皮質に送られるが、個々の糸球体からの投射パターンはわかっていない。今回、3 つの研究チームがこの投射について詳しく調べている。Luo たちは、遺伝学の手法と、狂犬病ウイルスを使ってシナプスを 1 つ越えてその前のニューロンにさかのぼる逆行性標識法とを組み合わせた。この方法により、個々の皮質ニューロンのシナプス前細胞への連結状態を追跡すると、皮質では画一的な匂い地図の存在を裏付けるような連結の証拠は見られなかったが、扁桃体での連結には系統立った地理的差異が見られた。皮質に画一的な投射がないことは、個々の糸球体からの投射を順行的に調べた Axel ら、および Baldwin らの研究により、軸索集団のパターン生成の程度を見た場合と、標識した個々のニューロンの投射を調べた場合の両方で確認された。これらの知見を総合すると、皮質ニューロンがさまざまな糸球体からの情報を組み合わせて処理していることを示す解剖学的な証拠が得られる。また、この結果は、生得的もしくは学習された匂いの好悪を仲介する際、各皮質領域がそれぞれ異なる機能を持つことを表しているのかもしれない。

細胞：早老の *in vitro* モデル

An *in vitro* model of premature ageing

ハッチンソン・ギルフォード早老症候群（HGPS）はまれな遺伝性疾患で、動脈硬化や血管の平滑筋細胞の変性など、正常な老化に伴う特徴が早期に始まることが特徴である。Liu らは、HGPS 患者の繊維芽細胞から樹立した体細胞株を再プログラム化して人工多能性幹細胞（iPS 細胞）にすると、生理的な老化過程や特定の疾患で蓄積する核膜構造の変化やエピジェネティックな修飾を正常状態に戻せることを報告している。この HGPS 由来 iPS 細胞を血管平滑筋細胞に分化させると、血管の老化に関連する早期老化表現型が出現するようになる。この HGPS 由来 iPS 細胞モデルは、早期老化および正常な老化を調節する機構を *in vitro* で研究する方法の 1 つとなるだろう。

地球：地球マントル深部で進行している酸化還元融解

Redox melting runs deep in the Earth's mantle

地球マントルの最深部にあるメルトの一部がどのように生成されたかを明らかにする実験的研究の結果が、Rohrbach と Schmidt によって報告され、カーボナタイトメルトは約 250km よりも深部で再循環されると、還元されて流動性の低いダイヤモンドになることが示された。このような炭素に富んだマントル不均質部分が上昇マントルの一部となると、ダイヤモンドが必然的に Fe^{3+} と反応して、深さ約 660km から 250km でカーボナタイトの「酸化還元融解」が起こり、地球マントルの深部に存在するメルトが形成されると、彼らは推測している。

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

Volume 472
Number 7343
2011 年 4 月 21 日号

Podcast

PhD の未来：批判を受ける従来の PhD 教育――どう修正したらよいのだろう？

The future of the PhD: The traditional PhD is under fire — we ask how it can be fixed

PhD を持つ研究者は、世界中でかつてないほど多く生み出されている。しかし、現代社会の厳しい現実に対応できるだけの能力が、従来の PhD 教育によって研究者に備わるのだろうか。*Nature* は、この「PhD 生産ライン」を中断し見直すべき時期なのかどうかを探ってみることにした。News Feature では、PhD に代わる資格、もしくは応急的な措置として提案されている複数の代替案について報告している。また Comment では、かつては博士課程の学生だった人たちから個人的な思い出を聞き集め、1950 年代の「形式の時代」から、「無垢の時代」（いつだと思います？）を経て、「コミュニケーションの時代」（つまり現在）に至る、大きな対照を成す PhD の 70 年間を振り返っている。

生理：発生初期のセロトニン供給源

Early sources of serotonin

神経の発生では、妊娠中の胎児のセロトニン（5- ヒドロキシトリプタミン；5-HT）濃度に対する母体の寄与が重要であると広く考えられているが、この推測を直接裏付ける実験的証拠はほとんどない。Bonnin らは新しい手法を用い、妊娠初期には胎盤が 5-HT の重要な供給源となり、母体のトリプトファン前駆体から 5-HT が合成されることを、マウスとヒトの両方で明らかにした。妊娠後期になると、その役目は胎仔に内在する 5-HT 供給源に引き継がれる。

物理：スピンに量子磁性を与える

Giving quantum magnetism a spin

極低温原子を使った凝縮物質系の量子シミュレーションは、古典コンピューターの計算では扱えない問題を研究する手段になる。Simon らは、光格子中に閉じ込めたルビジウム原子の極低温気体を使ってスピン鎖における量子磁性をシミュレートし、常磁性相から反強磁性相への量子相転移を観測した。この研究から、磁気量子相転移を研究するための調節可能な基盤が得られる。この相転移が実現されている物質は、これまでごく少数である。

神経：次に移るべき時を知る仕組み

Knowing when to move on

食べ尽くしつつある餌場をいつ離れて次の餌場探しを再開するかは、進化の歴史を通して、動物にとっての生死にかかわる選択であった。しかし、自然選択がゲノムにどのように働いて、このような行動変化を制御する神経回路を細かく調整してきたのかは、ほとんどわかっていない。今回 Bendesky らは、線虫（*Caenorhabditis elegans*）が食物パッチからどの程度早く離れるのかを、いくつかの遺伝子に自然に生じる多型が決定していることを明らかにした。このような遺伝子の 1 つは、食物を感知するニューロンの膜で発現されるシグナル伝達タンパク質をコードしており、これが体内カテコールアミン濃度に応じて、ニューロンの活性を微調整している。この研究は、このような神経調節物質とその受容体が、動物の行動決定に古くから役割を果たしてきたことを示唆している。

医学：カスパーゼと神経毒性

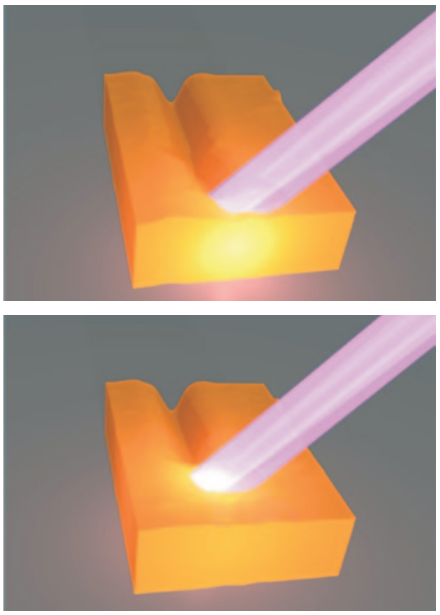
Caspases and neurotoxicity

脳の炎症は、神経変性疾患や急性型脳損傷の典型的な特徴の 1 つである。ミクログリアは、神経毒性のあるサイトカイン類を分泌することでこうした疾患の発生にかかわっていると考えられている。今回、炎症の細胞モデルと動物モデルでの実験で、ミクログリアの活性化には、細胞死への関与がよく知られているカスパーゼ 8 とカスパーゼ 3/7 の順序正しい活性化が必要なことがわかった。このカスパーゼカスケードを阻害するとミクログリアの活性化が防止され、神経毒性が生じなくなる。カスパーゼ活性化は、パーキンソン病患者やアルツハイマー病患者の脳のミクログリアでも起こっているので、カスパーゼ阻害剤がこのような疾患の治療に使える可能性が考えられる。

材料：光で修復

Healed by the light

通常の摩滅による損傷を修復する能力を備えている「スマート材料」は、幅広い用途に役立ちそうだ。これまでに開発されたほとんどの修復性ポリマー系材料は、損傷部の加熱が必要だった。しかし、今回 Burnworth らは、光照射で修復可能な材料を作製した。この材料は、高分子鎖が金属錯体を通してつながったものである。材料中の金属錯体が紫外光を吸収すると、吸収された紫外光が熱に変換され、熱によって一時的にポリマー鎖が外れ、迅速かつ効率的に欠陥が修復される。原理的には、修復は *in situ* でも起こり、荷重がかかった状態でも修復が可能である。



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

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 472
Number 7344
2011 年 4 月 28 日号

雑音を無視する：自然免疫系が菌類の破片の中の菌類病原体を見分ける仕組み

TUNING OUT the NOISE: How the innate immune system spots fungal pathogens amid fungal debris

侵入してくる微生物は、食細胞と呼ばれる白血球が見つけて取り込む。食細胞がこれを実行するためには、細胞壁断片のような可溶性の微生物由来成分と微粒子状の微生物そのものを見分けなければならない。菌類病原体の侵入を探知する自然免疫受容体であるデクチン 1 の作用の研究から、デクチン 1 は可溶性と微粒子状の細胞壁 β - グルカンの両方に結合するが、その活性化は、「貪食シナプス」の形成によって菌類の細胞壁と接触した部位に限られることが明らかになった。貪食シナプスは、離れたところの微生物から放出されるリガンドの場合とは全く違うやり方で、微生物表面に結合しているリガンドを特異的に探知する機構のモデルとなる。

医学：自閉症にかかわるタンパク質

Protein link to autism

ゲノム解析研究からは、自閉症スペクトラム障害に関与すると思われる遺伝子候補が多数同定されており、その多くはシナプスタンパク質をコードしている。最も有望な候補遺伝子の 1 つである *Shank3* は、グルタミン酸作動性シナプスで重要な役割を果たすシナプス後膜肥厚タンパク質をコードしている。今回、*Shank3* 欠失マウスは、自閉症の複数の徴候を示すだけでなく、線条体シナプスおよび皮質線条体回路に異常が生じていることが明らかになった。この知見は、*Shank3* がニューロンの結合性に極めて重要な役割を果たしていること、また自閉症様の行動にこのタンパク質が果たすと思われる役割を説明する作用機序を示している。

脳：ニューロン新生と抗うつ薬

Neurogenesis and antidepressants

成体で新たに形成される海馬ニューロンは、出生時にすでに存在しているニューロンとは対照的で、学習や記憶、また抗うつ薬のある種の影響にかかわっていることが、機能喪失実験によってこれまでに示されている。今回、マウス成体の新生ニューロンの生存率を上げるという誘導型の遺伝的機能獲得実験により、成体海馬ニューロン新生の増加と特定の認知機能の向上の間に因果関係が見られることが実証された。この結果から、不安障害や記憶障害が成体海馬ニューロン新生の刺激によって治療できる可能性が出てきた。

気候：アガラスリーケージを通る流れを調べる

Checking the flow through the Agulhas leakage

南アフリカを取り囲むように流れるアガラス海流は、全球の海洋熱塩循環の重要な要素である。アガラスリーケージとして知られている事象を通して、暖かく塩分に富むインド洋の海水が大西洋へ流れ込んでいる。北大西洋における諸過程とは異なり、アガラスリーケージには研究者の関心があまり寄せられていなかった。本号では、古気候と現在の気候の研究結果を組み合わせ、アガラス海流が海洋循環と気候に大きな役割を担っているだけでなく、大西洋の南北方向鉛直循環を安定化させている可能性もあることを示している。

生理：仕事中の脳の居眠り

Sleeping on the job

神経活動は、寝ているときと起きているときで全く異なる。しかし、これらの状態間の移行に神経活動がどのように関係しているのか、また起きている時間の長さに応じて神経活動が変化するのかは、よくわかっていない。今回、行動上は起きているように見えるラットでも、大脳皮質ニューロンが一時的に睡眠時と似た「オフライン」状態に入ることがあり、特に起きている状態が長時間続いている場合にそれが生じやすく、オフライン状態は局所的かつ断片的に起こることを示す証拠が提示された。報酬となる砂糖粒に手を伸ばす訓練をしたラットでの実験では、この睡眠類似状態の間には成績の低下が見られた。

構造生物学：ISW1a とヌクレオソームの相互作用

ISW1a and nucleosome interaction

ISW1 ファミリーなどのクロマチンリモデリング因子群は、クロマチンでのヌクレオソームの配置を決めたり、ヌクレオソームの位置を変更したりして遺伝子活性に影響を及ぼす。今回、ATP アーゼドメインを欠いた酵母 ISW1a の単独状態と DNA 結合状態の結晶構造が明らかになった。これらの構造と、リモデリング複合体の低温電子顕微鏡像、位置指定光架橋解析および生化学分析を組み合わせた結果から、ISW1a が 2 つのヌクレオソームに同時に結合するという ISW1a 作用モデルが提案された。このモデルにより、ISW1a が 2 つの隣り合ったヌクレオソームの間隔を決める仕組みが説明される。

ネイチャーからのご案内

nature video

Web: www.youtube.com/NatureVideoChannel
モバイル：
携帯電話で Nature Video チャンネルの科学関連動画を見ることができます。（一部の機種を除く）

nature podcast

Web: www.nature.com/nature/podcast
モバイル：
Nature に掲載された研究成果をポッドキャストでチェックできます。（英語；iPhone™のみ対応）

©2011 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

レイチェル・カーソンが『沈黙の春』を出版したのは、1962年。それから50年近くが経った今でも、地球環境の汚染は大きな問題です。先進国では、それなりに厳しい環境基準が設けられていますが、発展途上国では、産業振興のためにおざなりにされているケースが多く、闇に隠れた公害病患者がたくさんいます。今回は、アホウドリにメチル水銀が蓄積しているという記事です。これは、私たち人間への警鐘なのかもしれません。

ISTOCKPHOTO

環境汚染は、食物連鎖を通じて、私たちに返ってくる。

nature news

語数：**553 words**　分野：環境学・生態学

Published online 18 April 2011 | Nature | doi:10.1038/news.2011.243

http://www.nature.com/news/2011/110314/full/news.2011.159.html

Mercury rising

Museum specimens reveal build-up of heavy metal in the Albatross.

Nadia Drake

1. Feathers from museum collections have helped scientists to prove that mercury levels have risen in Albatrosses during the past century.

2. To trace toxin levels over time, the researchers measured the amount of methylmercury in breast feathers plucked from specimens of the endangered black-footed albatross (*Phoebastria nigripes*) collected between 1880 and 2002, from sites spanning the northern Pacific Ocean. The results are published today in the *Proceedings of the National Academy of Sciences*[1].

3. Methylmercury is the organic form of the heavy metal that builds up in tissues, and it is stably incorporated into feathers. Human activities, such as the burning of fossil fuels, introduce mercury to ecosystems, where it can taint the food sources of many species, including humans.

4. Anh-Thu Vo, who designed the study while an undergraduate at Harvard University in Cambridge, Massachusetts, says that growing up near the Gulf of Mexico spurred an early interest in the toxic effects of environmental pollutants.

5. "I'd always heard warnings about mercury bioaccumulation in fish, but I really wanted to focus on seabirds because they are among the top predators in the marine food web," says Vo, now a graduate student at the University of California, Berkeley.

6. Apex predators such as the albatross are especially vulnerable to mercury biomagnification, whereby the toxin becomes more concentrated as it travels up through the food chain.

Going up

7. Vo and her collaborators found that methylmercury levels roughly doubled over the 120-year study period, with an increasing number of feathers from later years showing levels near the upper limit of the sublethal threshold for the common loon[2]. It is not known whether that same level adversely affects the albatross.

8. Collin Eagles-Smith, an ecologist for the US Geological Survey in Corvallis, Oregon, who studies mercury bioaccumulation, says that the study "finally provides some strong evidence for a phenomenon that had been widely speculated but never supported with data".

9. But he says the lack of information on the physical effects of mercury in the albatross is a concern. "We need to try and understand whether or not these birds actually experience a deleterious effect," he says. "Sensitivity to mercury can vary dramatically among seabird species."

10. Study author Michael Bank, an ecotoxicologist at Harvard School of Public Health in Boston, Massachusetts, agrees. "This is an important data set, although it is difficult to make strong inferences about the toxicological effects in this species," he says. "However, the methylmercury concentrations are high enough that they likely warrant concern, especially since mercury has no benefit for animal life."

Tenuous link

11. Daniel Jaffe, an atmospheric chemist at the University of Washington in Bothell cautions against drawing conclusions about global emission rates or sources from the study. "They really focused on a large-scale change," Jaffe says, pointing to small sample sizes from broadly distributed collection sites. "We certainly know the emission pattern for mercury has changed dramatically over the last century, but there are still things we don't understand."

12. Vo agrees that interpretive caution is necessary, explaining that increasing methylmercury in the albatross only loosely corresponds to estimates of increased anthropogenic mercury output. Still, using preserved specimens is valuable for understanding historical trends in exposure levels, Vo adds. "These analyses can be expanded to different species, different time frames, different regions, different contaminants," she says.

Reference

1. Vo, A.-T. E., Bank, M. S., Shine, J. P. & Edwards, S. V. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 10.1073/pnas.1013865108 (2011).
2. Evers, D. C. *et al. Ecotoxicology* **17**, 69-81 (2008).

TOPICS

食物連鎖（food chain）と生物濃縮（biomagnification, biological concentration）

食物連鎖は、生物の「食う」と「食われる」の関係で、生食連鎖と腐食連鎖に大別される。生食連鎖では、緑色植物（生産者）→草食動物（一次消費者）→小型肉食動物（二次消費者）→大型肉食動物（三次消費者）という関係がある。腐食連鎖では、細菌や昆虫などが死骸や排泄物を分解する。通常、動物は複数の餌を食べ、また、腐食連鎖を担う細菌や昆虫も自らは餌として生食連鎖に組み込まれ、複雑に絡み合っている。このため近年では、食物網（food web）という言葉が使われてきている。

環境中の物質は、食物連鎖を通じて生物体内に蓄積し、上位捕食者になるほど濃縮されていく。これを生物濃縮という。物質によって、蓄積しやすい器官、動物種があるが、脂溶性のものは濃縮されやすい。なかでもよく知られているのが、ダイオキシンとメチル水銀である。ダイオキシンは、分解速度も遅く、代謝障害、神経障害、催奇形性など、さまざまな障害をもたらす。メチル水銀は水俣病の原因であり、汚染された魚を食べたヒトやネコに、主に中枢神経系の障害が生じた。現在、福島第一原発から流れ出た放射性物質が、生物濃縮される懸念があり、今後のモニタリングが重要になっている。

草（生産者）はシマウマ（一次消費者）に食べられ、シマウマはライオン（二次消費者）に食べられる。

WILL JENNINGS/ALAMY

SCIENCE KEY WORDS

タイトル **mercury: 水銀　（大文字で始まる場合、水星）**
常温で液体の唯一の金属元素。毒性が強いが、その特異な性質ゆえに、体温計や血圧計、蛍光灯などに使用されている。

リード **heavy metal: 重金属**
比重が 4 以上の金属のこと。ただし、金やプラチナなどの貴金属や、ウランやプルトニウムなどの放射性金属元素は別に扱われることが多い。最近では、ゲルマニウムやインジウムなどがレアメタルと呼ばれ、現代技術に欠かせないものになっている。一般に毒性が高いので、環境濃度が厳しく規制されているものが多いが、亜鉛やマンガンなど、微量元素として生物に必須なものもある。

リード **Albatross: アホウドリ**
日本語でアホウドリといえば、鳥島に生息する *Phoebastria albatrus* のことだが、ここではアホウドリ科の鳥のことを指している。国際鳥類会議の分類によると、現在 21 種類いる。

2. **methylmercury: メチル水銀**
水銀原子にメチル基が付いている化合物の総称。毒性が非常に強い。動物種間で毒性に差があるが、ヒトでは中枢神経系障害を引き起こす。また、脂溶性のため生物濃縮を受けやすく、マグロやメカジキなどの大型魚は蓄積しやすい。

2. **black-footed albatross: クロアシアホウドリ**
学名 *Phoebastria nigripes*。全長約 70cm、翼を広げると約 2m にもなる。目の下とくちばしの付け根が白いが、全身、黒褐色。イカや甲殻類、魚類を食し、特にトビウオが好物。ハワイ諸島、ミッドウェー環礁、マーシャル群島、鳥島、聟島列島などが繁殖地である。東日本大震災による津波で、ミッドウェー環礁では営巣中の親鳥とヒナが多数死亡した。

3. **tissue: 組織**
同じような形質や機能を持った細胞が秩序立って集まったもの。

3. **ecosystem: 生態系**
ある地域について、生息する生物同士や気候・地勢・化学物質などの環境との相互関係をひとまとめにとらえたシステム。

5. **bioaccumulation: 生物蓄積**
環境物質が生物体内に蓄積していくこと。生物濃縮とほぼ同義。

6. **apex predator: 最上位捕食者**
食物連鎖の最上位に位置する生物。

7. **sublethal threshold: 亜致死量**

7. **common loon: ハシグロアビ（英国では Great Northern Diver）**
学名 *Gavia immer*。全長約 80cm、体の上面は黒く白い斑点があり、くちばしが黒い。北米大陸北部、グリーンランドなどで繁殖し、北米とヨーロッパ北西部沿岸で越冬する。

10. **ecotoxicologist: （環境）生態毒性学者**
（環境）生態毒性学とは、物質の物理的・化学的性質による環境内での分布や動態、野生生物に与える影響を研究する学問のこと。

WORDS AND PHRASES

リード **specimen:「標本」、「試料」**
sample とほぼ同義だが、そのグループの代表の意味合いが強い。

2. **pluck:「むしり取る」**

2. **span:「～全体にわたる」**

3. **build up:「蓄積する」**

3. **taint:「汚染する」**

4. **spur:「～を刺激する」、「～をかき立てる」**

4. **environmental pollutant:「環境汚染物質」**

6. **vulnerable to:　「～になりやすい」**

6. **whereby: （その直前の単語または文節を受けて）「それによって」**

6. **travel up:「（上方・上位に向かって）進む」**

7. **adversely affect:「悪影響を与える」**

8. **speculate:「予想する」、「推測する」**

9. **physical effect:「体に及ぼす影響」**

9. **deleterious:「有害な」**

10. **inference:「推論」**

10. **warrant:「～に値する」、「～を必要とする」、「～が当然である」**

小見出し **tenuous:「薄い」、「希薄な」**

11. **draw a conclusion:「結論を出す」、「結論を下す」**

12. **interpretive caution:「解釈的な注意」、「解釈に関する注意」**
ここでは、訳文のように意訳している。

12. **anthropogenic:「人為起源の」**

12. **contaminant:「汚染物質」**

参考訳

博物館の標本が証言する水銀濃度の上昇

博物館に収蔵されているアホウドリの標本から、重金属の蓄積の歴史的傾向が明らかになった。

ナディア・ドレイク

クロアシアホウドリのつがい。

DARRELL GULIN / DANITADELIMONT.COM "DANITA DELIMONT PHOTOGRAPHY"/NEWSCOM

1. 博物館に収蔵されているアホウドリの標本の羽毛を利用して、その体内に蓄積した水銀の濃度が 20 世紀中に上昇したことが証明された。

2. 毒素の量を長期的に追跡するため、研究者らは、1880 年から 2002 年にかけて北太平洋の全域で採集された絶滅危惧種のクロアシアホウドリ（*Phoebastria nigripes*）の標本の胸から羽毛を抜き、そこに含まれるメチル水銀の量を測定した。その結果が、本日発行の *Proceedings of the National Academy of Sciences* で発表される [1]。

3. メチル水銀は有機態の重金属で、組織中に蓄積し、羽毛に安定的に取り込まれる。人間による化石燃料の燃焼などの活動は、水銀を生態系に広め、人間自身を含む多くの生物種の食料源を汚染する可能性がある。

4. Anh-Thu Vo 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）の学部生だったころに今回の研究を計画した。彼女は、メキシコ湾のそばで育ったことが、早くから環境汚染物質の毒性作用に強い関心を寄せることにつながったと言う。

5. 現在、カリフォルニア大学バークレー校（米国）の大学院生である Vo は、「魚類における水銀の生物蓄積については、常に警告されてきました。けれども私は、海鳥について研究してみたかったのです。海鳥は、海洋食物網の頂点に立つ捕食者の 1 つだからです」と説明する。

6. 食物連鎖を経て上位の生物に毒素が濃縮されていく現象は生物濃縮と呼ばれ、アホウドリのような最上位捕食者では特に水銀の生物濃縮が起こりやすい。

水銀濃度の上昇

7. この研究の対象となった約 120 年の間に、アホウドリの羽毛に含まれるメチル水銀の濃度はほぼ倍増し、比較的新しい時代では、ハシグロアビの亜致死量 [2] の上限に近い濃度のメチル水銀が検出される羽毛の本数が増加した。ただし、この濃度でアホウドリに悪影響が出るかどうかはわかっていない。

8. 米国地質調査所（オレゴン州コーバリス）で水銀の生物蓄積を研究する生態学者 Collin Eagles-Smith は、今回の研究により、「これまで広く予想されていたにもかかわらずデータの裏付けが全くなかった現象につき、強力な証拠がとうとう得られました」と語る。

9. けれども Eagles-Smith は、水銀がアホウドリの体に及ぼす影響についての情報が不足していることを問題視している。「アホウドリが実際に有害な影響を受けるのかどうかを知るための努力が必要です」と彼は言う。「水銀に対する感受性は、海鳥の種類によってかなり大きく変わってくる可能性があるからです」。

10. この研究論文の著者の 1 人で、ハーバード大学公衆衛生大学院（米国マサチューセッツ州ボストン）の生態毒性学者である Michael Bank も同じ考えで、「これは重要なデータセットですが、アホウドリに対する水銀の毒性作用について説得力ある推論をすることは困難です」と言う。「とはいえ、動物が生きていく上で水銀は何の役にも立たないため、メチル水銀の濃度がこれほど高くなれば、憂慮すべき事態となる可能性が高いと思います」。

不明瞭な関連性

11. ワシントン大学ボセル校（米国）の大気化学者 Daniel Jaffe は、この研究結果に基づいて地球全体での水銀の排出速度や排出源に関する結論を導き出してはならないと言う。Jaffe は、標本を採集した地点の分布が広く、サンプルサイズが小さいことを指摘して、「彼らの研究は、大きなスケールの変化に注目しているのです」と言う。「水銀の排出パターンが 20 世紀に大きく変化したことは確かですが、わからない点がまだあるのです」。

12. Vo は、アホウドリの羽毛のメチル水銀濃度の上昇と人間の活動による水銀排出量の増加が緩やかにしか対応していないことを示し、この研究結果を解釈する際には注意が必要であることを認めている。それでも、保存されている標本が、水銀被曝レベルの歴史的傾向を理解する上で有用なことは示されたと考えている。「今回用いた解析方法は、別の生物種、時代、地域、汚染物質にも拡大適用できると思います」。

（翻訳：菊川要）

「Natureダイジェスト」新規定期購読キャンペーン　2011年5月31日まで

NHKスペシャル
「宇宙飛行士はこうして生まれた ～密着・最終選抜試験～」DVDプレゼント！

2011年5月31日までの期間に、下記専用サイトから
Natureダイジェスト新規定期購読お申し込みの方の中から
抽選で3名様に、プレゼントいたします！

宇宙飛行士になるという夢を抱き続け、選抜試験に全力で挑んだ人々を追った密着ルポ！

(2011年5月27日発売)

2009年2月25日、10年ぶりに2人の日本人宇宙飛行士の候補者が誕生した。宇宙航空研究開発機構が実施した選抜試験に挑戦したのは過去最多の963人。8か月かけて、パイロット、技術者、医師など、各界で活躍する10人が勝ち残った。ここから2人を選び抜く最終試験の過程をNHKは初めて撮影することができた。

定価　¥3,800(税込¥3,990) ／ 発売元：NHKエンタープライズ

※ 当選者の発表は、商品の発送をもってかえさせていただきます。発送は、6月上旬の予定です。

「NHKスペシャル 宇宙飛行士はこうして生まれた ～密着・最終選抜試験～」DVD抽選プレゼント
Natureダイジェスト新規定期購読お申し込みについて　【2011年5月31日まで】

www.naturejpn.com/dvd

EDITOR'S NOTE

東日本大震災から2か月余りが過ぎました。東北新幹線が全線再開し、被災地域で教育研究活動が再始動するなど、復興・再生への道を歩み始めたことが報じられています。こうしたニュースからは、多くの方がそれぞれの持ち場で奮闘し続けていることが伝わってきます。36ページの社説で述べられているように再興への道のりは厳しいものかもしれませんが、日本の科学を支える方々が持ち場に戻って仕事に専念できる日が来ることを強く願っております（m）。

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

npg nature asia-pacific

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

© 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

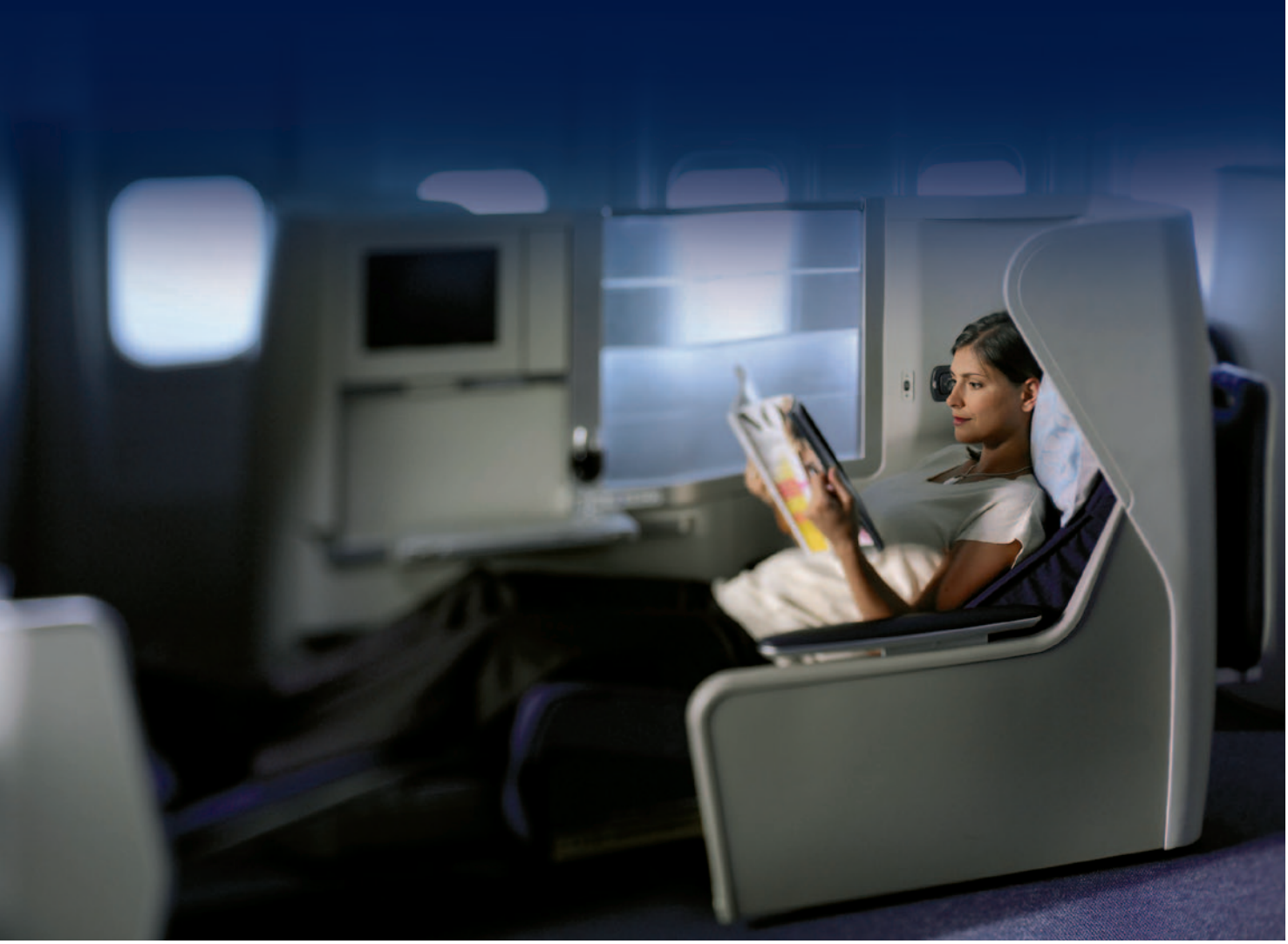
「Natureダイジェスト」へのご意見やご感想、ご要望をメールでお寄せください。
宛先：naturedigest@natureasia.com
（「Natureダイジェスト」ご意見係）
掲載内容についてのご意見・ご感想は、掲載号や記事のタイトルを明記してください。今後の編集に活用させていただきます。皆様のメールをお待ちしております。

BRITISH AIRWAYS
自分だけの時間

oneworld

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

今すぐ、ba.comでご予約ください。



ネイチャー・ダイジェスト
6月号

平成23年5月25日発行 第8巻 第6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

定価 680 円

本体 648 円
Printed in Japan

雑誌 07271-06

4910072710614
00648