

特集 東日本大震災

福島第1原発事故 レベル7

思考停止が生んだ惨事

東北・関東を襲った巨大津波

鳴らされていた警鐘

緊急地震速報の実力

災害から立ち直る力

余震はいつ止むのか?

ストーンヘンジの物語

iPS 細胞が変える
難病研究

ダチョウ恐竜
集団死の謎

もうひとつの温暖化危機
北上する
赤道降雨帯

新連載

グラフィック・サイエンス

40th
Anniversary

超電導の有効利用に欠かせない 人工ピンの導入と内部構造の評価

今年は、1911年に超電導が発見されてから100周年の節目にあたる。医療用MRIやリニアモーターカーのように超電導技術に応用した機器もすでに登場しているが、さらに幅広い分野で超電導を利用していくには依然として多くの課題が残されている。このため、現在でも世界中で超電導の研究が積極的に進められており、電力中央研究所の一瀬氏もその一員として超電導技術の発展に大きく貢献している。

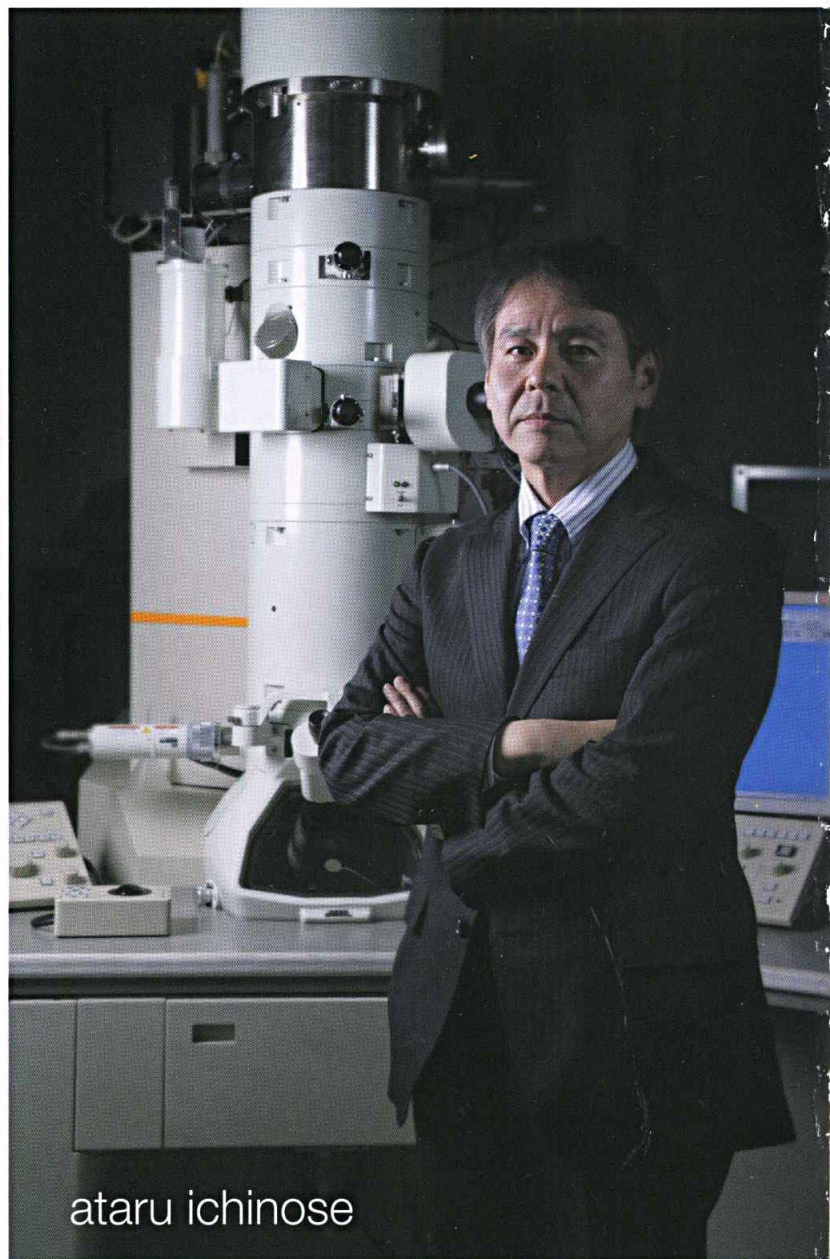
臨界電流密度を増加させる 人工ピンの研究

電気抵抗ゼロで電流を流すことができる超電導は、極低温の環境でないと利用できないことが実用化への大きな課題となっている。しかし、それ以外にも克服すべき課題は多い。そのひとつが臨界電流密度の向上である。より大きな電流を超電導状態で流せるようになれば、小型の機器でも強力な磁場を発生することが可能となり、それだけ超電導の応用範囲が広がる。

この課題を解決する手法として、いま注目を集めているのが人工ピンの導入である。超電導状態では基本的に電気抵抗がゼロになるが、超電導内部の磁束が動いてしまうとエネルギー損失が発生してしまうため、磁束が動かないように止めておくピン（ピンニングセンター）が必要となる。通常、ピンは欠陥の一種として超電導材料に自然に含まれているものであるが、ナノテクノロジー技術を駆使してピンの形状や密度を人工的に制御できれば、より理想的な超電導材料を作製できる。人工ピンを導入することで流せる電流が10倍以上になる場合もあるというから、その有効性は想像するに難くないであろう。

人工ピンの研究が難しい点は、思い通りにピンを作り出せないこと。理想的なピン配列を発見できたとしても、それを容易に作製できなければ意味がない。理論を追及すると同時に、その作製方法も視野に入れながら研究を進めていく必要がある。また、超電導材料ごとに人工ピンの特性が変わることも研究を困難にしている要因のひとつとなる。

一瀬氏は、超電導材料の内部構造を評価することに重点を置いて研究を進めている。具体的には、人工ピンを導入した超電導材料の超電導特性がどのよう



ataru ichinose

- 出身学部・学科
筑波大学大学院 理工学研究科
- 修士論文のテーマ
並列流路单相自然循環の熱流動特性
- 電力中央研究所を選んだ理由
学生時代に参加した研究会で、電力中央研究所が周囲から高く評価されているのを実感できたから。

- 趣味
園芸、絵画
- 将来の夢
エネルギーのさらなる有効利用を実現すること。
- 学生に向けて
若い時は自分に関係のないと思うことも進んで試してみてください。
自分のためになる“何か”を見つけられると思います。

知の探求者たち

な原因で向上(または低下)するかを透過型電子顕微鏡を使って分析し、より臨界電流密度が高い材料を作製するための基礎を築いている。

幅広い視野と高い柔軟性を兼ね備えたクレバーな研究者

電力中央研究所の同僚は、一瀬氏のことを「クレバーな研究者」と評している。ここでいうクレバーとは、知識が豊富で、守備範囲が広く、高い柔軟性を兼ね備えていることを意味している。

一瀬氏が電力中央研究所に入所したのは1987年。当時は超電導ブームの時期と重なり、新人の一瀬氏にも超電導の研究者として白羽の矢が立てられた。もともと「エネルギー関連の研究をしたい」と考えていた一瀬氏にとって超電導の研究は好適な研究テーマと言えるが、大学時代から超電導を研究していた訳ではない。幅広い視野を持つ一瀬氏だからこそ、異なる分野の研究にもスムーズに取り組めたのであろう。

一瀬氏は、最初の10年くらい超電導の結晶境界に関する研究を行い、その後、現在も引き継がれている人工ピンの研究に取り組むようになる。現在では20年以上も超電導の研究を続けてきたエキスパートとして数々の実績を残している。平成20年には「第12回超伝導科学技術賞」を受賞。電子顕微鏡の高いスキルも有しているため、超電導以外の研究分野でも即戦力になると周囲から期待されている。

チームワークの利点を最大限に引き出す研究姿勢

現在、一瀬氏は日本各地の大学と連携しながら人工ピンの研究を進めている。このように、他の研究機関

と連携しながら研究を進められるのも一瀬氏の強みと言える。一人で黙々と研究することを好む研究者もいるが、一人で出来ることには限界があるのも事実。とはいえ、共同研究というスタイルが誰にでも向くとは限らない。距離の壁を越えて緻密に連携をとり、作業を分担しながら研究を進めていくには、それ相応のスキルが必要とされる。特に人工ピンの研究は世界中が注目している分野だけにスピードが要求される。「物事を自然体で頼める人」と研究所の同僚が語るように、一瀬氏の人柄も共同研究を成功させる要因であると言えるだろう。

電力中央研究所は、電気事業を通じて社会に貢献できる技術を創出することを目的の一つに設立された研究機関である。このため、研究パートナーの選択にあたっては、目的に沿っていれば比較的自由度が確保されている。一瀬氏も、共同研究に至るまでの経緯を「国際会議などで出会った研究者と自然に…」と語っている。これも、先見性と創造性を持って研究を進めている電力中央研究所ならではの特徴と言えるだろう。

超電導材料

特定の温度より低い環境下で電気抵抗がゼロになる材料。YBa₂CuO₇やBi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₇といった化学式で表わされる酸化物系超電導材料、NbTi、Nb₃Sn、Nb₃Alといった化学式で表わされる金属系超電導材料、FeSeで表わされるFe系超電導材料などがある。

臨界電流密度(J_c)

超電導材料に流すことができる直流電流の最大値を断面積で割った値。臨界電流密度が高くなれば、同じ断面積でも大きな電流を流せるようになり、小さなコイルで強力な磁場を発生させることも可能となる。なお、臨界電流密度は、超電導材料そのものの特性だけでなく、外部磁場や温度によっても変化する。

図1 高温超電導体(Bi2223、Y123)と金属系超電導体(NbTi、Nb₃Sn)の磁場中J_c特性の比較。人工ピンによって到達した現在の値も同時に示している。約一桁のJ_cの向上が実現された。

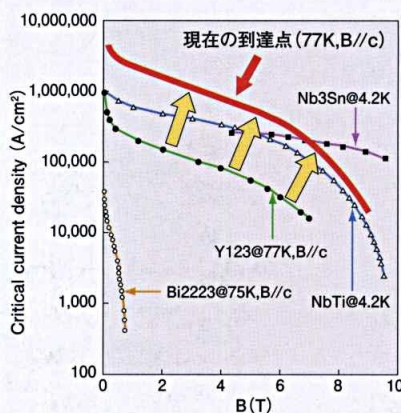
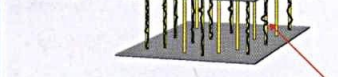


図2 次元性を考慮した各種の人工ピン構造(1次元、2次元、および3次元人工ピン)

1-dimensional APC

dislocation, nanodots



2-dimensional APC

grain boundary, planar defect



3-dimensional APC

fine precipitate, second phase



特集

マグニチュード 9.0の衝撃

東日本大震災
鳴らされていた警鐘……24 ページ

中島林彦 (編集部)

国史が語る千年前の大地動乱……36 ページ

中島林彦 (編集部)

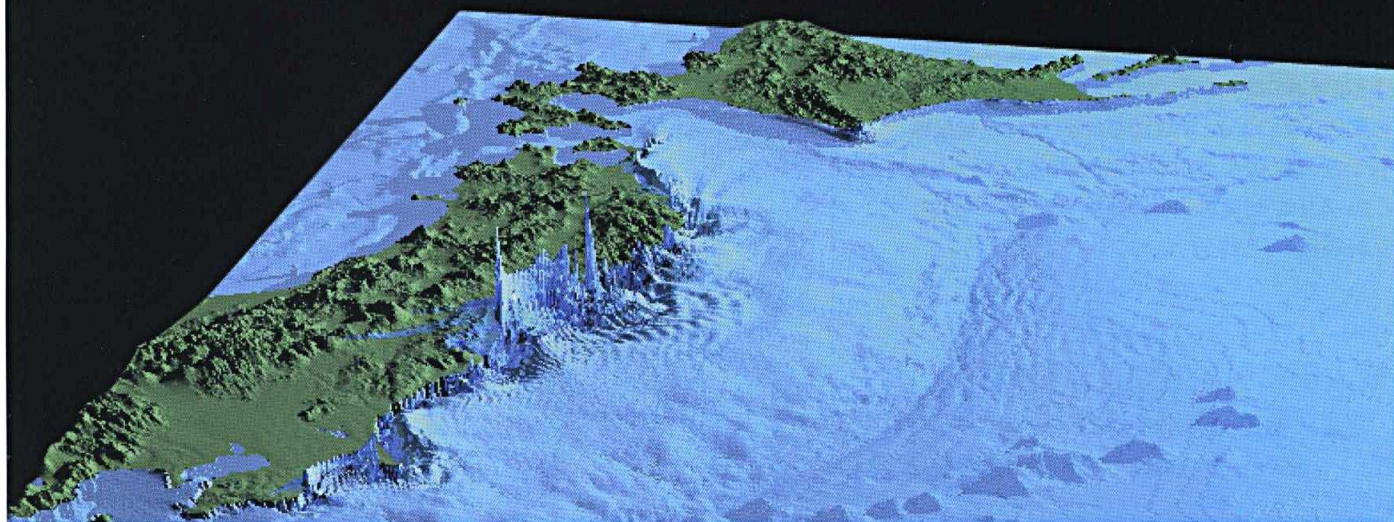
余震はいつ止むのか?……44 ページ

語り: T. ヒートン (カリフォルニア工科大学)

3月11日、三陸沖でマグニチュード9.0の超巨大地震が発生した。死者・行方不明者は約3万人、6万戸以上の建物が失われ、地震から1カ月が過ぎても避難者は10万人を大きく上回る。津波に洗われた福島第1原子力発電所では世界最大規模の事故が起きた。日本は先進国の中でもとりわけ地震災害が多く、地震研究や耐震対策が進んでいた。それでも今回の大地震は多くの地震学者にとって想定外だった。

だが、警鐘は鳴らされていた。約1000年前の平安時代、三陸沖で巨大地震が起き、岩手県の三陸沿岸から福島県沿岸まで大津波が押し寄せたことが広域の地質調査でわかっていたからだ。同様の津波が500～1000年間で襲来していることも判明、近い将来の津波再来が懸念されていた。しかしそうした研究成果が広く認識されないうちに「3.11」がやって来た。

巨大地震によって日本列島の地下の応力バランスが変わった結果、4月に入っても依然として各地で地震が起きている。こうした状態はいつまで続くのか、他の巨大地震や火山噴火が誘発される可能性はないか。地震研究者による見通しのほか、現在の日本に近い約1000年前の巨大地震前後の日本の状況を国史『日本三代実録』を踏まえて紹介する。



なぜ起きた「レベル7」

科学者の思考停止が惨事を生んだ……40ページ

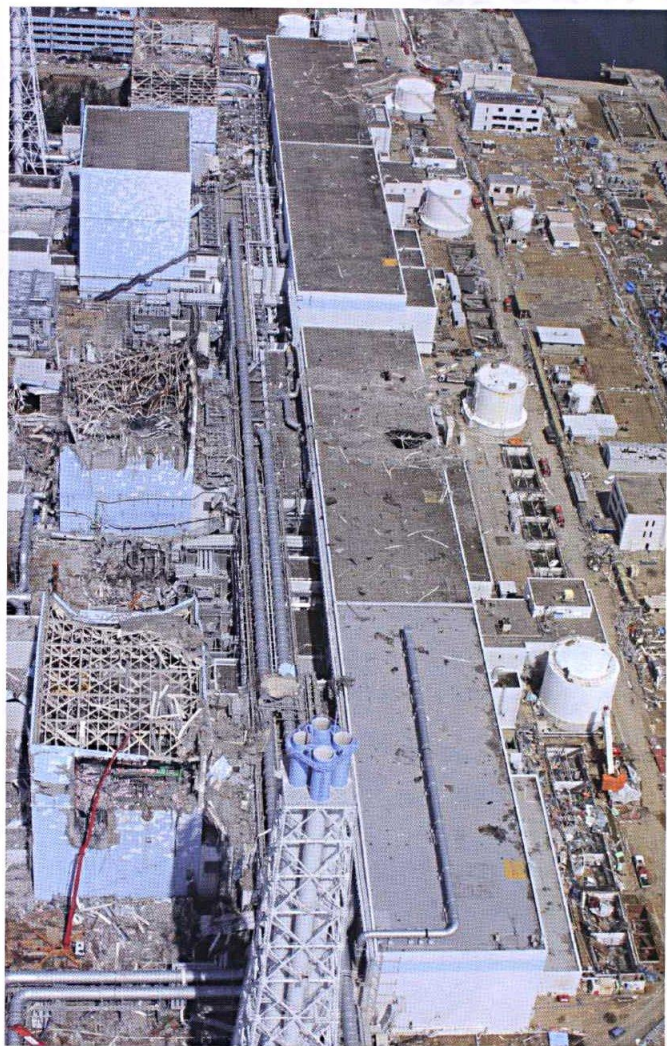
滝 順一（日本経済新聞）

予測できない放射線リスク……43ページ

G. D. ザカイブ（サイエンスライター）

福島第1原子力発電所の事故は原発事故の深刻度を表す国際評価で、旧ソ連のチェルノブイリ原発事故と同じレベル7となった。4つの原子炉施設が同時に深刻なトラブルに陥り大量の放射性物質を大気や海中に放出し続けた。放射性物質は偏西風に乗って太平洋を渡り、米国各地でも検出されている。今回の原発事故が人体に与える影響について、専門家でもまだよくわかっていない。

なぜこのような事態に陥ったのか？ 大地震が起きる前の段階における、原発の耐震対策にかかわる政府や東京電力の発言や対応を振り返ると、「危機への想像力の乏しさ」があったことが浮かび上がる。地震学者の多くには「この地域では大地震は起こりえない」との思い込みがあった。東京電力が対策を練り直す機会があった。約2年前、福島第1原発の耐震性が再検討されたとき、大津波が近い将来、やってくる恐れが指摘された。だが、特段の対策はとられなかった。



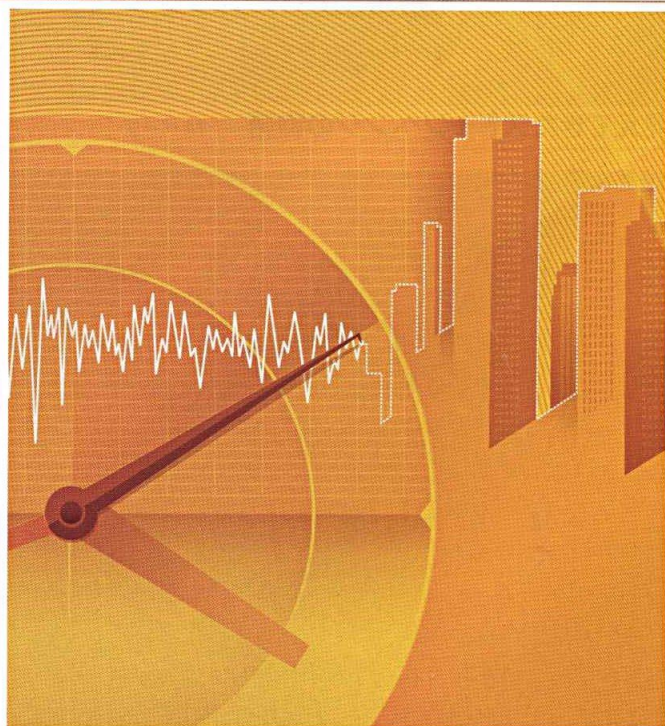
エフ・フォート・サレス

実行可能な最善の対策

揺れる前に警報 緊急地震速報システム……48ページ

R. アレン（カリフォルニア大学バークレー校）

テレビ画面に緊急地震速報のウインドウが開き、身構えているとやがて本当に揺れ始める——東日本大震災の余震が続くなか、毎日のようにそんな経験をするようになった。強い揺れが到達するまでに数秒から数十秒（震央との距離関係による）の猶予が得られるので、机の下に身を隠したり、電車を止めたり、必要最小限の手を打つ貴重な時間となる。この種の緊急地震速報システムを導入している国は世界に5カ国・地域あるが、日本のシステムが最も先進的で、今回の震災でも概ねうまく機能した。大地震が予想される米国カリフォルニア州でも同種システムの整備計画が進んでいる。直前予知が不可能な以上、これは実行可能な最善の策といえる。



TOM WHALEN

特集：マグニチュード9.0の衝撃 心理学

また笑える日が来る

立ち直る力のメカニズム……56 ページ

G. スティックス (SCIENTIFIC AMERICAN 編集部)

回復力だけには頼れない……64 ページ

飛鳥井 望 (東京都医学総合研究所)

家族を失い、家を失い、職を失って失意の底に沈んでも、多くの人はいつまでも落ち込んではいない。数カ月も経てば、また笑うことができるようになる。大災害や事件・事故がもたらすトラウマによって強いストレスを受けた時、そこからの回復を促す仕組みが、人間の脳には生来備わっているのだ。特にトラウマを受けた直後は特別な心理療法より、心の自然な回復をうながすサポートの方が有効だ。だがすべての人が自然に回復できるわけではない。辛さが長引くようなら専門家に相談すれば、心の回復に有効な治療法はある。



MARKO GEORGIEV Getty Images

考古学

古代イングランドの謎

見えてきたストーンヘンジの物語……74 ページ

W. アンダーヒル (ジャーナリスト)

ストーンヘンジはロンドンから西に約200km、英国の南部に位置する環状列石だ。アングロ・サクソン人が移住してきた5世紀にはすでに存在していたこの遺跡、紀元前3000年ころに造られたとみられているが、誰が何のために建造したのかははっきりしていない。ところが、磁気計などを使った近年のハイテク調査で1kmほど離れたところに環状木柱列の跡が見つかった。3kmほど離れたところには「ダーリントン・ウォールズ」「ブルーヘンジ」といった同種の遺跡も。さらに、近くの墓に埋葬されていた遺体の化学分析から新事実が浮上、一帯が死者を送り出すとともに生者が癒しを求めて集まる大きな祭儀の場であった可能性が浮上してきた。



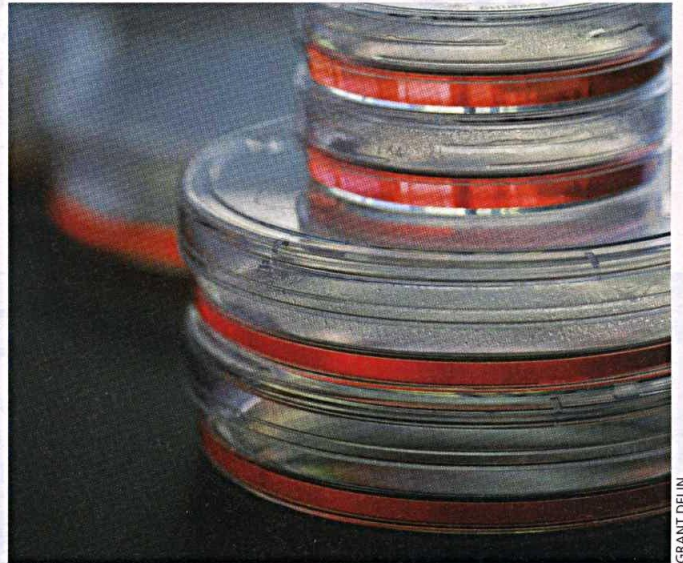
TOM NAGY Gallery Stock

病気をシャーレに再現

iPS 細胞が変える難病研究……66 ページ

S. S. ホール (サイエンスライター)

身体あらゆる細胞になり得る幹細胞が登場した時、病気の治療に役立つ細胞を作って患者に移植する再生医療の実現が期待された。だがその研究は足踏みし、いま、まったく新しい利用法が注目されている。iPS細胞技術を用いて患者と同じ遺伝子異常を持つ細胞を作り、病気をシャーレで再現する。細胞の中で起きている現象を見極め、新薬候補の効き目を調べることが可能になった。



GRANT DELIN

9000万年前の悲劇

ダチョウ恐竜集団死の謎……82 ページ

P. C. セレノ (シカゴ大学)

ゴビ砂漠は化石の宝庫だ。著者らは2000年代に入ってダチョウ恐竜シノオルニトミムスの化石13体が集団で埋まっているのを発見した。以前には日中蒙3カ国共同調査隊が14体を発掘している。一斉に死んだのか、数千年かけて集まったのか。同時に死んだのなら、何が起きたのか？ 真相がついに浮かび上がった。群れで行動していた若い恐竜たちが泥沼に足を取られ、脱出できずにそのまま死んだらしい。



JAMES GURNEY

“恵みの雨”に異変

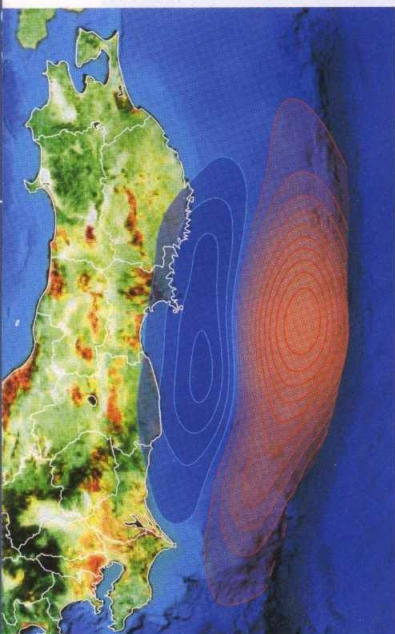
もうひとつの温暖化危機 北上する赤道降雨帯……90 ページ

J. P. サックス (ワシントン大学) / C. L. ミアボルド (プリンストン大学)

赤道の北側で地球をぐるりと取り巻いている雲、それが「赤道降雨帯」だ。この降雨帯は赤道付近の農業地域に恵みの雨をもたらすだけでなく、全世界の降雨パターンに影響を及ぼしている。著者らの研究によって、気温が上がれば降雨帯も北上し、気温が下がると南下することがわかった。降雨帯の位置は気温の変化に敏感に反応するのだ。今後予測される温暖化で、人々の暮らしが脅かされる事態が懸念されている。



COURTESY OF NOAA-NASA GOES PROJECT



024



066



074

表紙

平安時代の東日本を襲った大津波の再現画像 (24ページ「特集: マグニチュード9.0の衝撃」, 表紙イメージ; 産業技術総合研究所提供)。

特集

マグニチュード9.0の衝撃

三陸沖でマグニチュード9.0の超巨大地震が起き、大津波が東北から関東沿岸を襲った。世界最大級の原発事故をも招いた東日本大震災に様々な角度から迫る。



地震学
024

東日本大震災 鳴らされていた警鐘

中島林彦

古地震
036

国史が語る千年前の大地動乱

中島林彦

原発事故
040

科学者の思考停止が惨事を生んだ

滝 順一

原発事故
043

予測できない放射線リスク

G. D. ザカイブ

Q&A
044

余震はいつ止むのか?

語り: T. ヒートン

地震学
048

揺れる前に警報 緊急地震速報システム

R. アレン

心理学
056

立ち直る力のメカニズム

G. スティックス

心理学
064

回復力だけには頼れない

飛鳥井 望

医学
066

iPS細胞が変える難病研究

S. S. ホール

入手困難な疾患細胞を作り出す新たな技術に、いま大きな期待が寄せられている。

考古学
074

見えてきたストーンヘンジの物語

W. アンダーヒル

死者を送り、けが人が治癒を求めて集まる大きな祭儀施設の一部だったらしい。

今号の特集のうち、「東日本震災 鳴らされていた警鐘」「科学者の思考停止が惨事を生んだ」の2本は日経サイエンスのホームページ www.nikkei-science.com から無料でダウンロードできます。どうぞご利用下さい。

太田次郎 お茶の水女子大学名誉教授
佐藤勝彦 自然科学研究機構機構長
塚田裕三 慶応義塾大学名誉教授
中村桂子 JT生命誌研究館館長
西沢潤一 東北大学名誉教授

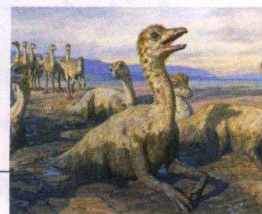
古生物学

ダチョウ恐竜集団死の謎

082

P. C. セレノ

ゴビ砂漠の同じ場所で10数体の恐竜化石が見つかった。いったい何が起きたのか？



082

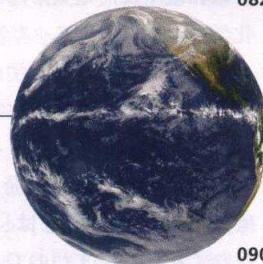
気候変動

もうひとつの温暖化危機 北上する赤道降雨帯

090

J. P. サックス／C. L. ミアボルド

温暖化の進行によって、全世界の降雨パターンが大きく変わることがわかった。



090

天文学

サイエンス・
イン・ピクチャー

宇宙ステーションの至宝 アルファ磁気分光器

098

G. マッサー

暗黒物質や反物質などの謎解きへ、国際宇宙ステーションに新装備。

NEWS
SCAN

012

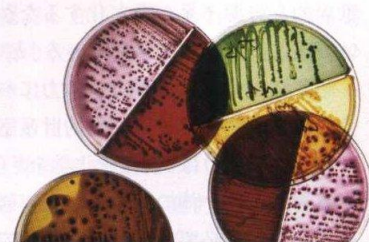
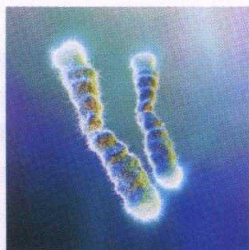
国内ウォッチ 012

- 研究の復旧これから
- 産業に役立つ数学を推進

海外ウォッチ 016

- 次の大地震に立ち向かえ
- 許容できる原発リスクとは
- 25年目の新しい墓
- デング熱の裏をかく
- ついに解けた100年の謎
- 君のテロメアは長いね！
- 細菌の遺伝子交換、ずっと頻繁

- メガバンクの感染力
- 恐竜の骨の芸術作品
- 11歳の少女、もうすぐ2500歳
- 母さん、トラみたいには吠えないで
- 母親の血液で出生前診断
- 科学アプリいろいろ登場



ANTI GRAVITY

081 私がおすすめするテレビドラマ
S. マースキー

新連載

グラフィック・
サイエンス

101 危ない？小惑星

パズルの国のアリス

102 スペードのエースの忘れ物
坂井 公

BOOK REVIEW

104 『かぜの科学』
山崎幹夫
『脳からみた学習』
青野 透
連載 森山和道の読書日記 ほか

ダイジェスト

002

サイエンス考古学

011

Information

108

次号予告

113

SEMICOLON

115

今月の科学英語

116

お断り 「挑む」と「砂漠の駝鳥」は休みました。



日本ABC協会加盟誌
(新聞雑誌部数公表機構)

高機能の科学情報データベースが三位一体の知財戦略を支える

昭和電工株式会社

個性派化学を育てる知財戦略

昭和電工は、電気炉用黒鉛電極やセラミックを中心とした無機化学から、ハードディスクや高輝度LED（発光ダイオード）などのエレクトロニクス、化学品、アルミニウム、石油化学など幅広い事業領域を持つ総合的化学メーカーである。その技術戦略の一つのキーワードで表現するとすれば「個性派化学」だ。

研究開発本部研究開発センターの三浦恒正リーダー（技術戦略室兼務、写真後列左）は「汎用品ビジネスで高いシェアを得るのではなく、他社にまねのできない独自技術を開発し、大きなビジネスとして育てていく戦略。昭和電工では2000年以降、技術立社を推進していく上で個性派化学の育成と事業化をR&D戦略・経営戦略としてきた」と話す。例えば、高出力青色チップLED事業への参入、世界初の垂直磁気記録方式ハードディスクの量産などの事業成果のみならず、照明用有機ELやパワーデバイス用SiCエビタキシャルウエハーなど研究開発テーマも加速している。また、三浦リーダーは「長い歴史を持つ電気製鋼炉用人造黒鉛電極事業も、世界的な資源不足が顕在化するなか鉄鋼のリサイクルに欠かせない製品として成長を続けている」という。

昭和電工の技術戦略を、強力にバックアップするのが知的財産室である。研究開発本部知的財産情報グループの蔭澤朗リーダー（写真後列右）は「個性派化学をさらに大きく育成するため掲げているのは三位一体の知財戦略だ。研究開発と知的財産室のメンバー間の連携が必要なことはいうまでもないが、現在では製造や営業を担う事業部においても知財を戦略的に用いることが不可欠。これら三つの組織に属するメンバーが知のループで結ばれることで、独創的技術をビジネスチャンスに結びつけることができる」と話す。



昭和電工株式会社（本社：東京都港区）

1926年に創業以来、石油化学事業から無機事業、エレクトロニクス事業まで幅広い領域を手がける総合化学企業として発展してきた。1934年に日本で初めてアルミニウム精錬の工業化に成功するなど、常に新たな領域に挑戦してきた。1989年にハードディスク事業に参入。最新技術の開発による記録密度の持続的向上を成し遂げ、外販メーカーとして世界トップ企業へと成長した。

質の高い情報を共有する

蔭澤リーダーは「三位一体の知財戦略を実現するためにまず大切なことは、各組織のメンバー間で質の高い情報を共有すること」だと話す。そして、昭和電工が知的財産室、研究開発センターおよび一部の事業所で共通の情報サービスとして使用しているのが、科学技術分野のデータベースサービスである「STN」だ。

研究開発センターで技術調査を担当する高仁子氏は「STNではさまざまなデータベースが利用できますが、化学企業での調査活動においては、やはり質の高いCAS（Chemical Abstracts Service）のデータベースが欠かせない」と話す。

例えば、「STN」で化学物質データベースの世界標準となっている「CAS REGISTRYファイル」と幅広い研究領域の論文・特



情報は知のループの潤滑剤の役割を担っています

知的財産・研究開発・事業分野の三本柱の「知のループ」を構築する上で、情報を共有することは非常に大事です。同じ情報を共有し、意見を出し合うことによって部門間の意識が一つになります。検索した情報を提供する立場として、三本柱の潤滑剤の役割を担えればいいと思っています。（田辺千夏氏）

STN®

STNはCAS, FIZ Karlsruhe, JAICIが共同で運営する科学情報データベースサービスです。

いま企業の成長にはグローバルな知財戦略の構築が不可欠だが
そのためには「知財部門」「研究開発部門」「事業部門」の連携が求められる。
昭和電工では科学情報データベースが調査活動のみならず
情報共有のプラットフォームとして知財戦略をサポートしている。

CAS®

A division of the American Chemical Society

FIZ Karlsruhe

※会社名、製品名は、各社の商標もしくは登録商標です。

許情報を収録している「CAplusファイル」を活用することで、研究者が求める情報を高精度かつ効率よく探しだすことができるという。

知的財産室情報グループで知財調査を担当する田辺千夏氏は「CAS系のデータベースは、知財戦略を構築するための調査でも、もっとも重要なデータベースの一つとなっている。特許情報だけを見ていては、各社の持つ知財の全体像が見えてこない。科学論文や企業の情報を調査に組み合わせていくことが求められる」と話す。

例えば、A社がある領域で100件の特許を取得していることが分かれば、そこに企業の戦略の軸があると分かる。将来の特許技術に育つ可能性のある「芽」となる科学論文や報道資料などを組み合わせることで、技術戦略のダイナミクスまで読み取ることも可能だ。

ストレスなくデータベースを使いこなす

共通の情報検索ツールとして重要な役割を担う「STN」は、その検索機能を最大限に引き出すためには多少のスキルを必要とする。そのため、昭和電工ではCAS系のデータベースの利用を必要とする大半の研究者が高い検索スキルがなくても使える「SciFinder」を使い、一方「STN」は一部の研究者や知財担当者が利用している。検索ツールを使い分けている理由について高氏は「どんなデータベースツールでも、入力に対して一定のアウトプットが得られる。しかし、依頼調査が中心の我々は、一定の条件で調査した場合に得られる可能性のある情報を網羅することが求められる」と話す。

そして、調査の質をより高めるために、昭和電工は2008年からSTNの定額契約を導入している。田辺氏は「現場スタッフにとっ

ては、従量制による調査中のストレスが軽減されたことがありがたい。調査においては、最初から完全な検索式が頭にあるわけではない。アウトプットを見ながら試行錯誤をし、自分で納得のできる結果を出すことが大切だ。途中でコストを意識することは、スタッフのストレス要因のひとつとなってきた。定額契約を導入したことにより情報検索におけるコストパフォーマンスが良くなったのではないかと話す。

高氏は「定額契約を導入したことによってSTN AnaVistが利用しやすくなった」と話す。「STN AnaVist」は「STN」の検索で得られた特許と論文の情報をビジュアル的に判りやすく表示するソフトウェアで、これにより技術情報をさまざまな角度で俯瞰することが可能になり、技術戦略を立てるための一つのツールとして使っている。

全社における「知のループ」が広がる

知的財産室と研究開発センターが同じ条件で同じデータベースを共有することで、お互いが協力し合って調査を行うケースも増えてきたという。例えば、企業的意思決定に必用な重要な調査の場合、共同で徹底的に調査。そして調査内容を多角的に検討するというも行われるようになった。

田辺氏は「知財・研究開発・事業部の知のループを回すことにおいて、情報は潤滑剤の役割を担っている」と話す。さらに落澤グループリーダーは「皆が情報を共有して議論するなかで、新たに覚えてくる視点もある。情報の海の中から宝物を発見できる機会も増えてくるはずだ」と話す。

「技術立社」を掲げる昭和電工にとって「三位一体の知財戦略」が重要な鍵となっているようだ。



データベースの有効利用が 研究の質を高めます

より質の高い情報検索は、研究の効率アップにも重要です。情報検索の初心者にはアドバイスしたいことは、最初に無理だとあきらめないこと。一つのデータベースだけではできることが限られているのは当たり前。複数のデータベースを組み合わせるアプローチするなど、経験を積むことで新たな打開策も見えてきます。(高仁子氏)

JAICI

化学情報協会

STNについてのお問い合わせはこちら
TEL : 0120-151-462
www.jaici.or.jp

こころと脳のサイエンス

●A4変型判
●112ページ
●1575円(税込)

03号

Scientific American Mind の記事から脳科学と心理学の最新の研究成果を紹介。災害時の集団心理と行動を分析する「くつがえされたパニック神話」をはじめ、「社会のつながりが健康をもたらす」「ノスタルジーの効用」など、記憶や感情、行動の背景をブレインサイエンスで解き明かす。

おもな内容

くつがえされたパニック神話

考えすぎは逆効果

ここ一番で失敗しない方法

拒食症はなぜ危険なのか

子どもの癇癪

どう向き合えばいいの？

自己意識の脳科学

ノスタルジーの効用

良い親になるには？

社会のつながりが健康をもたらす ほか

5月18日
発売予定

掲載記事は変更になる場合があります

お近くの書店、またはネット書店でお求めください。

好評発売中

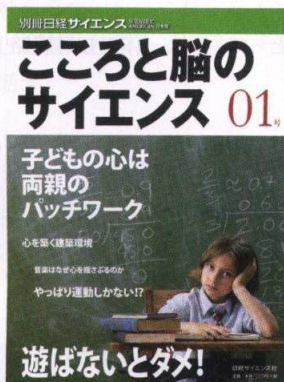
別冊日経サイエンス170

特集

心を育む

子どもの発達と成長

01号



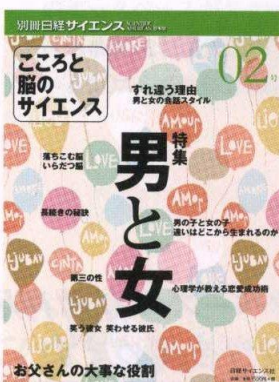
子どもの心は
両親のバッチワーク
親よりも友達が重要
遊ばないとダメ！
完璧な完全主義は「不完全」
プラセボ効果が生じる理由
あなたが生き延びられる可能性は？
やっぱり運動しかない！？
脳を元気にする食物
音楽はなぜ心を揺さぶるのか
心を気づく建築環境
父親の高齢「出産」リスク
笑いで脳を活性化

別冊日経サイエンス173

特集

男と女

02号



すれ違う理由
——男と女の会話スタイル
笑う彼女 笑わせる彼氏
男の子と女の子
違いはどこから生まれるのか
落ちこぼれ いらだつ脳
女性がうつ病になりやすい理由
やっぱり違う男と女の脳
お父さんの大事な役割
からだの性 こころの性
第三の性
お見合いパーティの心理学
心理学が教える恋愛成功術
長続きの秘訣 ほか

サイエンス 考古学



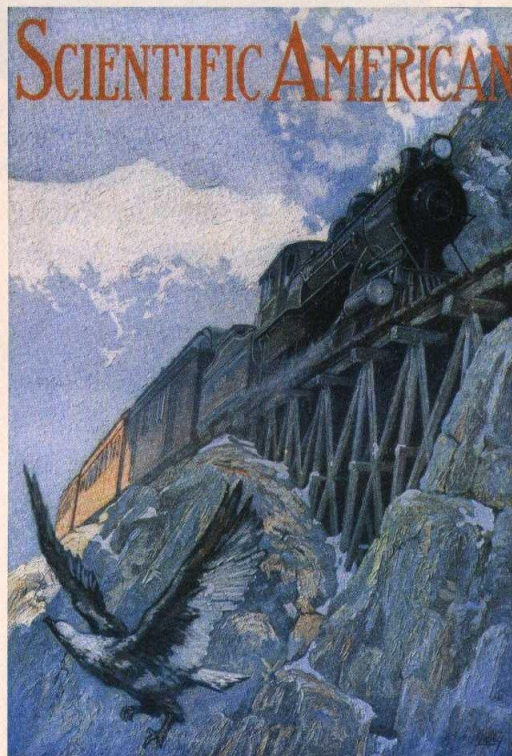
50年前 1961

光メーザー

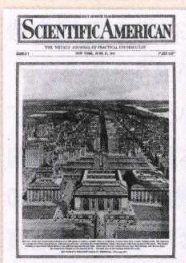
これまでに使われてきたあらゆる光源は本質的にノイズ発生器のようなもので、ごく単純な信号送信以外の目的には適さない。光波の発生器をようやく精密に制御できるようになったのは、光メーザー（訳注：後にレーザーと呼ばれるようになった）が登場した昨年のことだ。光メーザーは誕生したばかりだが、強度が極めて高く、狙った方向をピンポイントで狙うことができる。またほかの光源から出る光よりもずっと均一で、波長がそろっている。現在最もよい光メーザーならば、単一周波数の発振器として、高性能の電気発振器に引けを取らないだろう。開発は急速に進んでおり、近くさまざまな機器に応用されるようになると思われる。——ショーロー（Arthur Leonard Schawlow）〔編集部注：ショーローはレーザー分光学への貢献を認められて、1981年に、ブルームバーク（Nicolaas Bloembergen）とノーベル物理学賞を共同受賞した〕

ウイルスの遺伝学

ウイルスの遺伝学と細胞の遺伝学が別々の研究分野であることを誰も疑わなかった時代からまだ10年も経っていないが、今ではウイルス遺伝学と非ウイルス遺伝学を区別するのは極めて難しく、そうした区別に意味があるかどうかははっきりしない。実際のところ、細菌の「正常」な遺伝構造と、典型的な細菌ウイルスの遺伝構造の間には、さまざまな中間的な状態があるようだ。私たちの研究室では最近、かつては無関係と思われていた現象が本質的な部分でつながっているらしいことを見いだした。——ジャコブ（François Jacob）、ルヴォフ（André Michel Lwoff）、モノー（Jacques Monod）〔編集部注：ジャコブ、ルヴォフ、モノーの3人は酵素およびウイルス合成の遺伝的制御に関する発見で1965年にノーベル生理学・医学賞を共同受賞した〕



鉄道：物資と人の自由な流れをつくる技術——1911年



100年前 1911

不適応者の科学

故ゴールトン卿（Sir Francis Galton）が優生学（英語のeugenicsは「生まれのよい」の意）を創始して以来、世界中の人類学の学生や、精神病院の院長、犯罪学者が作り上げてきた統計データによれば、犯罪者、精神異常者、肉体的不適応者に結婚を許すことは、危険であるだけでなく、人類に影響を及ぼす。幸い米国と諸外国の優生学会の尽力で、この事実を広めるための教育において直面するであろう一般大衆の偏見が取り除かれ、法的措置への道が開かれた。

鉄道

西部の砂漠と山々を貫く初の大横断鉄道が建設されたのは、軍事および政治的な理

由が大きく、直ちに資金を回収して巨額な投資に回し、鉄道事業から収益を上げようとの動機からきたものではない。資本家は慈善事業をするつもりはなく、政府は土地購入への助成や7つの幹線道路の貸与によって、投資を誘致しなくてはならなかった。今日、この7つの道路は、貨物と旅客を激しく奪い合っている。

地球の毛布

アレニウス（Svante Arrhenius）が、過去に何度か起きた氷河期を説明する独創的な説を提唱した。ラングレー（Samuel Pierpont Langley）の実験によると、大気に含まれる二酸化炭素と水蒸気は、太陽が放射するさまざまな波長の電磁波よりも地球の放射する長波長の熱線をよく吸収する。したがって大気中の二酸化炭素と水蒸気の量が少しでも増加すると、地球の冷却が妨げられて保温効果が増し、結果として地表の温度が上昇する。この理論では、地球大気中の二酸化炭素と水蒸気の量は氷河期には少なく、非氷河期には多かったと仮定している。



150年前 1861

南部の利益とは

今回の戦いが長引けば、綿花の供給における南部7州の優位は保てなくなる。弊誌がそう主張する記事を發表したため、7州の読者数人から、南部の敵だと非難された。だが、現在始まっている動きがいずれすべて完結してみれば、この国のあちこちに見られる声高な奴隷制廃止論者よりも、南部を革命に引きずり込んだ者たちのほうが、南部の社会機構をひっくり返すのに、より大きな貢献をなしたことが明らかになるだろう。長期的に見れば、南部の利益は連邦に残ることによってのみ確保されると、弊誌は確信している。

震災問題

研究の復旧これから

東日本大震災は研究にも大きな爪痕を残し、復旧に向けた取り組みが続く

3月11日に起きた東日本大地震で、東北地方と関東地方にある研究機関や大学は大きな被害を受けた。研究施設の中には、再稼働に数カ月以上を要するところもかなりある。国際競争が激しい先端研究において数カ月の実験中断は痛手だ。生命科学分野では、長時間の停電や断水で冷蔵施設や培養施設などが機能を停止、貴重な試料が失われ、研究活動の継続すら危ぶまれるケースも出ている。

大地震発生時、仙台市は震度6の激しい揺れに襲われた。市内に広大なキャンパスを持つ東北大学は建物に大きな被害が発生、電気ガス水道はすべてストップし、研究者や学生が建物に入れない状況になった。仙台市内では多数の死傷者が発生、大学側は学生に帰省を呼びかけ、研究・教育活動は全面的に止まった。

4月上旬時点で、理工系の学部や大学院が集まる青葉山キャンパスはかなり復旧した。ただ、工学部では電気系など3つの研究棟は被害が大きく、使

えない状態が続いている。地震研究の拠点である地震・噴火予知研究観測センターでは地割れの影響で一部建物が傾き、立ち入り禁止。ガスはほぼ全域で止まったままだ。

大きな余震も続く。4月7日深夜、仙台は再び震度6の揺れを受け、片付けたばかりの研究室の床がまた資料で埋まる状況が起きた。完全復旧はまだ先だが、5月の連休明けから新学期が始まる予定だ。

直撃された TSUKUBA

茨城県のかんりの地域も震度6の揺れで、つくば市にある高エネルギー加速器研究機構(KEK)や宇宙航空研究開発機構(JAXA)、産業技術総合研究所など世界的に知られる研究機関や筑波大学に被害が出た。

JAXA 筑波宇宙センターでは国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の運用管制を行う建物が被災、約10日間管制業務ができなくなった。地震発生時、宇宙ステーションには、日本

が打ち上げた無人輸送機「こうのとり」2号機がドッキング中で、この管制も行われ多忙を極めていたが、全業務が中断、回線も切れた。即座に米ヒューストンが業務を代行、管制は継続された。「こうのとり」は3月30日、任務を終え大気圏に突入して燃え尽きた。

基礎研究や技術開発に用いる世界的な加速器施設も被害を受けた。東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC と、つくば市にある KEK のフォトンファクトリーなどだ。

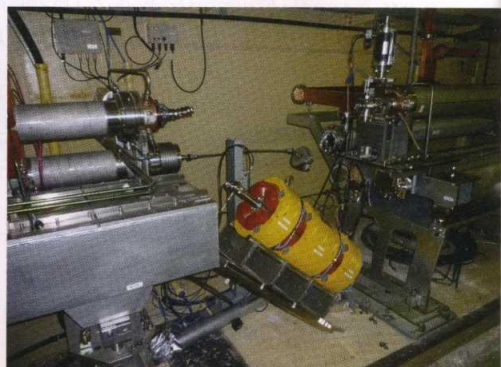
J-PARC の方は海岸に近い立地が災いして液状化現象が起き、加速器本体に接続する地上の電源施設などにかなりの被害が出た。KEK の加速器では荷電粒子が走る真空パイプが破れて外部から空気が侵入、大型電磁石の落下なども確認された。被災調査がこれから本格化するが、加速器は巨大で超精密なシステムなので全体の被災状況を確認、完全復旧には少なくとも数カ月はかかるとみられている。

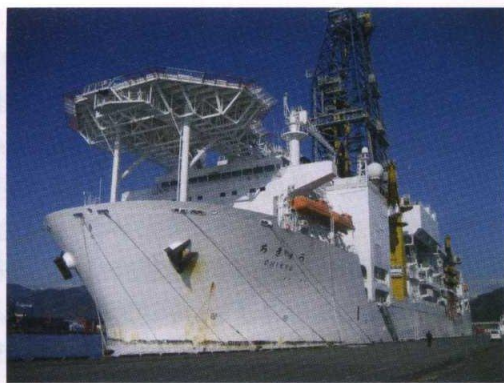
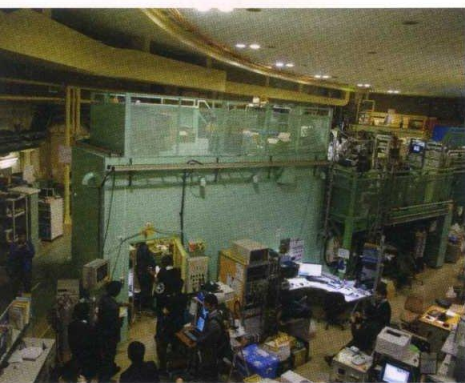
J-PARC では強力な中性子ビームを生み出し、それを用いて先端材料やタンパク質などの分析が行われている。中性子を利用してニュートリノビームを作り、これを岐阜県神岡の地下にある観測施設スーパーカミオカンデで受けて、ニュートリノの種類の変化を探る国際共同の T2K 実験も進んでいる。一方、フォトンファクトリーは加速器を用いて強力な X 線を生み出し、材料分析などに用いる放射光施設で、小惑星イトカワ由来の微粒子の分析も実施されている。

こうした研究はすべてストップすることになるが、兵庫県西播磨にある大

日本の研究集積地を襲った大地震

JAXA 筑波宇宙センターでは国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の管制施設が被災した(左)。東海村の J-PARC では液状化のため、地上部の電源施設などのダメージが大きかった(中央)。つくば市の KEK では加速器に使われている大型電磁石が落下(右)、荷電粒子が超高速で走る真空パイプが破れるなどの被害が確認された。





日経サイエンス

ストップした研究プロジェクト KEKのフォトンファクトリー(左)では、小惑星イトカワ由来の微粒子の分析など、様々な物質の分析が24時間体制で行われていたが、全面ストップした。世界最大の科学掘削船「ちきゅう」(右)は八戸港で津波の襲来を受け、推進機関の一部が損壊した。

型放射光施設 SPring-8 やオーストラリアの放射光施設などが支援を表明しており、一部の実験はこれら施設で行われる予定だ。

電力抑制のため、KEK などではスーパーコンピューターなど大型コンピューターの稼働が4月上旬時点で停止している。また東京や神奈川などの都県では計画停電が行われたため、多数の研究機関や大学の研究活動がストップした。東京電力管内では、今夏、大規模な電力制限が行われることになり、スーパーコンピューターや大電力を要する大型実験施設は大きな影響が出る可能性がある。

大回転した「ちきゅう」

津波による被害を受けたのは世界最大の科学掘削船「ちきゅう」。大地震が起きた当日は青森県八戸港に接岸、下北半島東方沖での掘削調査の準備を進めていた。大津波警報を受け急きょ離岸した。万一、大津波で内陸に流されたりすれば、船そのものが大ダメージとなるほか、多くの建物を破壊してしまう事態になるからだ。

津波は「ちきゅう」が港内から出る前にやって来た。ブリッジでは操船に全力が注がれたが、全長約200m、総トン数約6万トンの巨大な船体が狭い港内で大きく回転、船尾の推進装置一基が岸壁にぶつかり、脱落した。

ただ、この程度の被害で済んだのは不幸中の幸いだったと「ちきゅう」を運用する海洋研究開発機構の関係者は話す。室蘭港で破損状況の調査と応急修理を行った後、4月5日に横浜港に入港、より本格的な調査と修理を進めている。

5月21日まで予定していた下北沖の掘削調査は地下生命圏の探査が目的で世界的な注目を集めていたが、取りやめとなった。以降のスケジュールについては、完全復旧への見通しが得られ次第、調整する予定だ。

実験動物の維持に奔走

大地震の被害を受けた大学や研究機関の生物系の研究室では、機器の損壊に加えて、マウスなどの実験動物や、細胞・組織など生体材料をどうやって維持するかという難題が降りかかった。

東北大学大学院で神経内分泌学の基礎研究に取り組む井樋慶一教授は3月24日、実験用のマウス6匹を入れたケージを膝にのせ、復旧したばかりの高速バスと新幹線を乗り継いで、愛知県岡崎市に向かった。同市にある自然科学研究機構生理学研究所にマウスを託すためだ。

8階にある井樋教授の研究室は、地震で壊滅した。実験台は倒れ、機器は損傷し、本とガラス器具が床に散乱した。組織や細胞などの生体試料を保存

◆手なずけるも、振り回されるも、あなた次第

変えてみよう！ 記憶とのつきあいかた

高橋雅延



©べつやく れい

記憶研究30年の著者が贈る、不確かで身勝手な「記憶」に振り回されることなく、うまくつきあうためのヒント。

四六判・並製カバー・184頁 定価1785円

新装版 地球惑星科学 全14巻

第11回・第12巻

比較惑星学

松井孝典・永原裕子・藤原 顕・渡邊誠一郎
井田 茂・阿部 豊・中村正人・小松吉郎・山本哲生
地球の科学から惑星・太陽系の科学へ。地球はなぜ(地球)となったのか。惑星という視点が明らかにする、新たな地球理解の方法。

A5判・並製カバー・504頁 定価4725円

関数を考える

遠山 啓 解説・安野光雅

関数とは何か。二人の中学生の疑問に風変わりな数学者が答える対話のかたちで、ていねいに説明します。

【岩波現代文庫】定価1008円

行動の機構(上)

—脳メカニズムから心理学へ—

D.O.ヘップ/鹿取廣人、金城辰夫、鈴木光太郎、鳥居修晃、渡邊正孝 訳

心の働きにおける脳神経シナプスの重要な役割をはじめ明らかにしたヘップのもっとも影響力のある一冊。

【全2冊】【岩波文庫】定価987円

脳科学の教科書 神経編

理化学研究所脳科学総合研究センター 編
脳で人間のすべてがわかるって本当なの？ 確かな入門書で、いまの脳科学のスタンダードを知ろう。

【岩波ジュニア新書】定価1029円

【岩波科学ライブラリー179】

量子力学の反常識と 素粒子の自由意志

筒井 泉

量子力学の成功の陰で過去の遺物と思われていたアインシュタインの論文がいまや時代の寵児だ。なぜか。

B6判・並製カバー・128頁 定価1260円



岩波書店

東京都千代田区一ツ橋2-5-5
【いづれも税込】

<http://www.iwanami.co.jp/>

<資料請求番号13>

する冷凍庫はバックアップの発電機で何とか動かし続けたが、燃料のガソリンが入手できず、2日後に停止した。様々な遺伝子操作をしたマウスを作っていたが、飼育用の無菌設備も壊れた。もしマウスがすべて死んでしまったら、これまで積み上げてきた研究が途絶える。生理研が被災地の研究資源を受け入れていることを知り、「今まさに実験を進めていたマウスだけは何とか運んだ」(井樋教授)という。

自然科学研究機構では、生理学研究所のほか基礎生物学研究所、分子科学研究所が地震の6日後、いち早く被災した研究者や研究資源の受け入れを表明した。大学共同利用機関としての仕組みを生かし、研究者や学生を受け入れる。宿泊費と旅費のサポートもしており、マウスや魚など実験動物の飼育設備とスタッフも提供する。井樋教授のマウスを預かった生理研の南部篤教授は「東海地方も大地震が予想されている地域。こちらが先に被災していても不思議はなく、他人事ではない」と話す。3研究所はすでに7大学から10数人を受け入れた。

被災した研究者や学生の受け入れの動きは、全国の大学や研究機関に広がっている。京都大学、大阪大学、愛媛大学、高知大学、長崎大学などは、研究スペースだけでなく、場合によっては宿泊先も提供している。日本学術会議は被災研究者の受け入れ研究機関をまとめ、ホームページで公開し始めた。

被災した研究室の多くは、教授が大学に残って研究室の建て直しに当たり、若手教員や学生が「疎開」して研究を続けている。井樋教授の研究室は5月からしばらくの間、助教以下が高知大学に移動して実験を続ける予定だ。

震災の影響は直接の被災地だけでなく、関東にも及んでいる。岡崎の3研究所には東京大学や慶應義塾大学、群馬大学からも研究者が来ている。群馬大学大学院から来た柴崎貢志講師は

「計画停電のため1日に数時間冷凍庫が止まる。3～4年かけて取った生体標本が駄目になるのではと懸念した」と話す。東京電力が計画停電の中止を表明したため、4月後半には大学に戻る予定だが、大口需要先となる大学は、夏に向けて節電を求められる。今後、どのくらい電力が確保できるかは予断を許さない。

原発事故の影響は、電力不足だけにはとどまらない。福島県立医科大学では基礎研究者らも、病院を訪れる患者の放射線量の計測に当たった。大学の

空間放射線量は毎時2マイクロシーベルト前後で推移しており、仮にこのまま続けば、年間の被曝線量は、政府が4月11日に計画的避難区域の対象と定めた20ミリシーベルトをうかがう。「常に原発の状態を警戒しながら研究している。今より下がってくれるといいのだが」と、同大学の小林和人教授は話している (編集部)

日本学術会議がまとめている被災研究者の受け入れ研究機関のリストは

<http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/wakatecademy/index.html>

応用数学

産業に役立つ数学を推進

数学を中心に据えた日本で3番目の研究拠点が九州大学にできた

九州大学の産業数学の研究拠点、マス・フォア・インダストリ研究所(IMI)が4月初めに発足した。京都大学の数理解析研究所、大学共同利用機関法人である情報・システム研究機構傘下の統計数理研究所に次ぐ、日本で第3の数学研究拠点だ(下は開所式の模様)。

名前の通り、産業界との連携を設立の目的に掲げたのが特色。産学連携だ

けでなく、数学と他分野の科学との連携を進めることも重視し、学術的な数学と役に立つ数学の両方の研究人材を育てることを目指している。

近代科学が育った欧州では、数学と他の諸科学や産業が一体となって発展してきたが、明治期に近代科学を導入した日本では、ともすれば「科学技術の発展と数学が切り離されてきた」(九



大の有川節夫総長)。これを「元に戻す」ことを研究所の目標に掲げた。開かれた研究所を設立の理念としている。

研究所は、福岡市西区の伊都キャンパス内にあり、数学テクノロジー先端研究部門、応用数理研究部門、基礎理論研究部門の3部門を備える。若山正人所長（九大教授）を含め25人の所員が所属する。このうち、数学テクノロジー先端研究部門が主として産学連携を担い、企業が抱える数理的な課題を共同・委託研究で解決するという。同部門には、富士通研究所から招へい教授として穴井宏和氏（計算機代数）を迎えた。

「忘れられた科学」からの脱却

IMI 発足の背景には、日本の数学研究の活性化・深化の必要性を切実に感じた文部科学省や数学界、産業界の連携した動きがある。

大きなきっかけになったのは2005年に文科省科学技術政策研究所が発表した報告書「忘れられた科学～数学」だ。日本の数学は国際的に優れた業績をあげてきてはいるが、科学技術政策の中で取り残され、海外からは「深みがないとみられている」など、数学界が抱える問題点を報告書は指摘し、関係者に数学研究の実情を直視するよう促した。

続いて九大が東京大学や日本数学会、新日本製鉄と協力して現状を調査、産業界には数学や数理科学の人材や研究協力へのニーズが潜在していることを示した。

中国など新興国や韓国との競争が厳しさを増しつつあり、日本の製造業は、製品の付加価値を高め、国際競争力を一段と磨く切実な必要性に迫られている。ものづくりの現場が抱える様々な問題を解決に導く一つの手段として、産業数学への期待は意外に高い。

一例をあげれば、新日鉄は製鉄高炉内の状況を外部の温度センサーのデー

タから推測する手法を編み出した。出力から入力を求める「逆問題」と呼ばれる応用数学の応用例だ。「数学はデータの背後に内在する法則を見つけ出す。ものづくりの現場で数学が役に立つのは疑いがない」と、同社先端技術研究所の橋本操所長は話す。新日鉄は研究所内に数理科学の研究部門を設けている。

九大大学院では、こうした産業界の期待に応えるとともに、数学専攻の学生のキャリア多様化を求めて、学生を企業の研究所などに3カ月以上の長期にわたってインターンシップで派遣する試みを始めた。人数は少ないものの、学生が産業の現場の活動に関心を持ち、企業も数理思考が現場の問題解決に役立つという実例を体験した。

IMI 発足と並行する形で、文科省研究振興局にこのほど、数学イノベーションユニット（ユニット長は内丸幸喜基礎研究振興課長）が発足した。正式な「課」でないところが興味深い。産学官が数学振興に取り組む形がとりあえずはでき、一連の動きが大きく結実する形で、数学と他の様々な科学、産業との連携拠点としてIMIが誕生したといえる。

大きな使命を負った研究所であり、同時に課題も大きい。4月5日に開いた開所式であいさつした日本応用数理学会の薩摩順吉会長（青山学院大学教授）は「時間がかかる試みだ。時間をかけて、いい研究所にしてみたい」と述べた。数学と他の科学では研究の進む速さが違うし、同じように成果を求めては拙速になるとの指摘だ。

京大数理解析研の森重文所長も「長い期間にわたって果実を得るには、まず樹木を大きく育てなければならない」と強調した。研究所の成果をこれからどう評価し、どんな方向に伸ばしていくか。いわゆる科学技術の評価の枠組みとは異なる視点が要るかもしれない。（日本経済新聞論説委員・滝順一）

最新グリーンケミストリー 持続的社会的のための化学

御園生 誠 / 村橋 俊一・編

A5・262 頁

定価 4,410 円（税込）

「環境調和型」化学・技術の新しいパラダイムを多くの具体例から提案。

ISBN978-4-06-154371-3



最新バイオ用語辞典

廣川 秀夫 / 丸野内 棟・著

A5・214 頁

定価 3,360 円（税込）

生命科学領域の急速な発展に対応。明解で信頼できる解説。図版や資料、索引も充実。

ISBN978-4-06-153878-8



トコトン追究 食品・料理・味覚の科学

都甲 潔 / 飯山 悟・著

A5・142 頁

定価 2,310 円（税込）

科学からみた食の話題が満載！

ISBN 978-4-06-153140-6



生命科学者のための 電子スピン共鳴入門

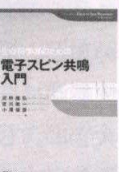
河野 雅弘 / 吉川 敏一 /
小澤 俊彦・著

A5・173 頁

定価 3,570 円（税込）

Q&A でとっつきやすく
入りやすい入門書

ISBN978-4-06-154316-4



理科大好き物理実験

実験から始める

力学編

3段階ステップアップ学習

川村 康文・編

A5・158 頁

定価 2,310 円（税込）

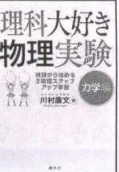
見て、試して、学ぶ。

Let's enjoy Physics!

授業で使える手軽で面白い

実験を 60 個超掲載！物理の楽しさ・おもしろさがきちんと「伝わる」！実験と授業（解説）を融合させた大好評の実験教室の書籍化

ISBN978-4-06-153274-8



主な内容

1. 力 / 力の合成・分解
2. 速度・加速度
3. 慣性の法則
4. 運動の法則
5. 摩擦
6. 落体の運動
7. 水平投射
8. 斜方投射
9. 円運動
10. 慣性力
11. 万有引力
12. 圧力・浮力
13. 単振動
14. 仕事
15. 力学的エネルギー
16. 万有引力による位置エネルギー
17. 運動量
18. 剛体・モーメント

講談社

東京都文京区音羽 2-12-21
http://www.kspub.co.jp/

編集部 03(3235)3701
販売部 03(5395)3622

< 資料請求番号 15 >

地球科学

次の大地震に立ち向かえ

東日本大震災を含め過去1年半に太平洋で大地震が相次いだ次は米国西海岸だろうか？

ここ1年余りの間に、太平洋の下でいくつかの大地震が起こった。2010年2月にマグニチュード8.8の揺れがチリ中央部を襲い、9月にM7.0に強打されたニュージーランドのクライストチャーチは今年の2月、その余震としてM6.3の揺れに見舞われた。そして3月、M9.0の巨大地震が日本に甚大な被害を及ぼした。この巨大地震は、過去110年間で4番目に匹敵する規模だ。

これらの事象に何らかの関連があるのではないかと、多くの人が心配している。しかし科学者たちによると、これらの地震がほぼ同時期に起こったのは単なる偶然である可能性が大きい。しかし、それは警戒を解いても安全だという意味ではない。地震リスクを測る最良の物差しは地質記録だ。そして最新の地質記録データは不穏な物語を示唆している。特に太平洋北東部が心配される。

カスカディア沈み込み帯で

ほとんどの人は南カリフォルニアが最も危険と考えているだろうが、米国最大の地震の巣はむしろカスカディア沈み

込み帯だといってよいだろう。この沈み込み帯は米国の西海岸線とほぼ平行に走っており、カナダのブリティッシュ・コロンビア州バンクーバー、米国ワシントン州シアトル、オレゴン州ポートランドといった諸都市を地震の危険にさらしている。

カスカディア沈み込み帯では「ファンデフカプレート」という比較的小さなプレートが東側の北米プレートの下へ年間3～4cmのスピードで滑り込んでいるが、境界面そのものは過去数百年にわたって固着しているようだ。「この沈み込み帯はすぐそこに隠れている巨大な危機として突出した存在だ」とオレゴン州立大学の海洋地質学者ゴールドフィンガー(Chris Goldfinger)はいう。「何百年も息を潜めていて、それがいきなり炸裂する」。

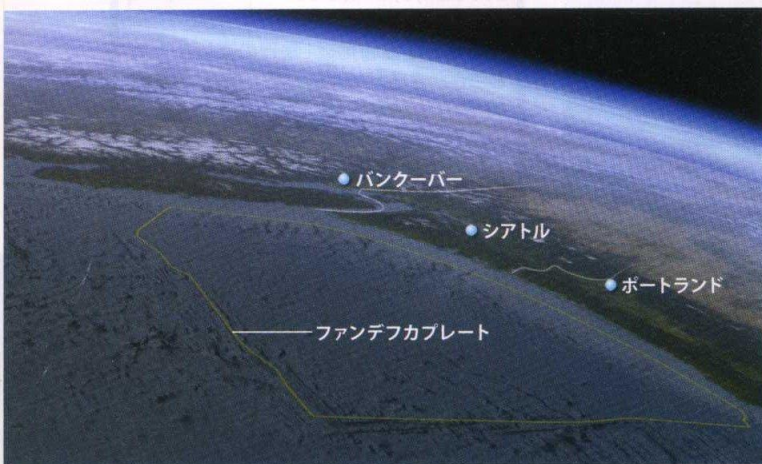
新データによると、この沈み込み帯の北部、バンクーバー島中部からワシントン・オレゴン州境にかけての部分は、今後50年間にM8.0以上の大地震に見舞われる確率が10～15%だ。沈み込み帯の南部、ワシントン・オレゴン州境か

プレート移動速度の計測法

2つのプレートがどれほどの速度でぶつかっているかを測る最善の方法はGPS(全地球測位システム)を利用することだ。2つのプレート上に特定の観測点を定め、それらの間の距離を繰り返しチェックすることで、プレートの長期的な移動速度のほか、3月11日の東日本大地震で生じた東向き2.4mの大きな動きなど、突然の変動をつかむことができる。

GPSがなかったころは、海洋底の岩石に頼っていた。海底にわき出した溶岩が冷えて固化する際に、地磁気の向きがこれらの岩石に記録されて残っている。これをもとに、過去にいつ、どれだけの頻度で地磁気の反転が起こったかを知ること、中央海嶺で新たな海洋地殻が生じていたスピードを計算できる。もう1つの方法は、プレート境界の両サイドで岩石を採取して岩石地層の分布図を作ることだ。特有の組成をした岩石層や化石が異様に集積している地層を手がかりにする。

59



らカリフォルニア州のメンドシーノ岬にかけては、同じく37%の確率だと予想される。ゴールドフィンガーらはこのデータを米国地質調査所の報告書に発表する予定だ。「次の大地震が近づいている。あとは時間の問題だ」。

SA

エネルギー

許容できる原発リスクとは

「受動的安全性」という新設計に注目

米国ではほぼ30年ぶりとなる新設原子力発電所がジョージア州オーガスタ郊外に姿を現し始めた。大手電力会社サザンカンパニーの施設で、基礎工事のために赤粘土の表層をくりぬいて岩盤に達する杭を打った。導入されるのは最新鋭原子炉「AP1000」で、原子炉への電力供給が絶たれても機能し続ける「受動的安全性」を備えている。

サザン社は今後6年間にこうしたAP1000炉を2つ建設する計画だ。他の電力会社は合計で12基以上を計画、AP1000以外の炉も6基建設するが、いずれも受動安全性を備えた原子炉になる。

東京電力の福島第1原子力発電所は1970年代に建設されたもので、電力供給や人間の助力なしに安全機構が機能する受動的安全性には欠けていた。3月の大地震で同原発と電力を供給する送電網との接続が破壊されたほか、続く津波によってバックアップ発電機と電気設備が壊れ、冷却系が働かなくなると炉心の温度が上昇した。

AP1000はこれと対照的に、炉心の上部に巨大な水タンクが備わっている。メルtdown（炉心溶融）につながるような異常が起これば、温度上昇を受けて弁が開き、タンクの水が原子炉に流れ込むようになっている。

また、AP1000は“開放設計”になっていて、緊急の際には原子炉の冷却に空気を使う。標準的な設計には反するが、コンクリートと鉄でできた原子炉格納容器の外側を覆っているコンクリート製の建物（原子炉建屋）の屋根付近に通気孔がある。メルtdownになった場合、自然に対流が起これば外気が建屋内に引き入れられる。

ただ、この対流は屋根の通気孔を通して放射性物質の粒子を外部に広げることにもなる、と批判派は指摘する。これに対し技術者は、すべてのリスクをゼロにするのは不可能であり、なしうる最善のことは安全性とコストををらんで許容可能な妥協点を決めることだとみる。

「こと地震に関しては、できうることに限りがある」とマサチューセッツ工科大学にいる原子力工学研究者ゴーレイ（Michael Golay）はいう。「どのリスクなら、あなたは許せるのかね？」

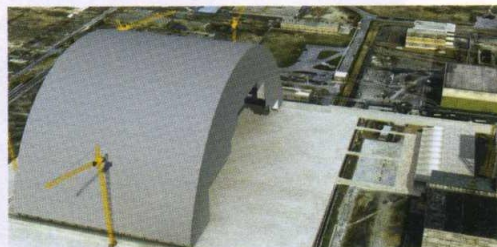
SA

環境工学

25年目の新しい墓

チェルノブイリ原発事故から四半世紀
「石棺」に代わる新シェルターが建設される

頂上が自由の女神像（高さ93m）よりも高いアーチを想像してほしい。そして、その巨大なカマボコ状の構造物が地上をサッカー競技場3つ分ほどスライドすると考えてほしい。史上最大の可動建



事故原発を封印 チェルノブイリ原発の石棺に代わる新シェルター NSC。

築物だ。この鉄製の巨大カマボコ屋根によって、史上最悪の原発事故現場を閉じ込める計画が進んでいる。そう、ウクライナにあるチェルノブイリ原子力発電所の跡だ。自動機械によってこの廃墟を解体し、残骸を永久に封印する。

1986年4月26日に4号炉が爆発し、飛散した放射性物質が遠く日本や米国でも検出された。その後、ソ連（当時）は放射性物質を閉じ込めるため、原子炉を鉄筋コンクリートの構造物で覆った。一般に「石棺」と呼ばれているものだ。「実に大変な大仕事だったが、それから25年がたち、石棺が壊れる心配が出てきた」とバテル記念研究所の土木・環境工学技術者シュミーマン（Eric Schmieman）は説明する。

石棺は建設作業員の被曝を最小限に抑えるべく大急ぎで造られたので、永久にもつようにはできていない。それどころか鉄材を互いに立てかけて留めてあるだけで、「トランプ札で作った家みたいな設計だ」とシュミーマンはいう。「溶接したところもボルトを締めてつないだところもない。ちょっとした地震で簡単に崩れてしまうだろう」。

フランスの建設会社ノバルカが石棺を覆う新しいシェルター（NSC）を建設することになり、シュミーマンはその設計に協力している。原子炉がいまだに放射能を持っているため、新シェルターは建設作業員の安全に配慮した設計になっている。アーチは石棺の上で建造するのではなく、プレハブ方式によって近くで組み立てる。油圧ジャッキによってこれを持ち上げ、フッ素樹脂製のベアリングに載せて300mほどスライドさせて、石棺を覆う。こうして原子炉を密封したら、シェルター内に設けた3台の自動クレーンを遠隔操作して石棺と原子炉を解体し、残された放射性の塵を処理する。

ノバルカは新シェルターを2014年夏までに建造する計画で、総コスト21億ドルは29カ国で分担する。新シェルターは少なくとも100年はもつと期待されている。

SA

COURTESY OF NOVARKA

感染症

デング熱の裏をかく

人間ではなく蚊に免疫をつける作戦が進行中

1月初めの早朝、オーストラリアのクイーンズランド州郊外の通りを1台の配送車がガタガタと走っていた。車が運んでいたのは、デング熱を媒介する蚊が入った多数の容器だ。デング熱はインフルエンザに似た病気で、世界で毎年5000万～1億人が感染する。車は4軒ごとに家の前に止まり、作業員が中華料理テイクアウト用のような容器を取り出して40匹の蚊を放った。1週間に放たれた蚊は6000匹となり、3月初めまでには7万2000匹に達した。

バイオテロかと思わせるこの行為、実は新たな形の昆虫駆除だ。デング熱の広がりを抑えるため、クイーンズランド大学のオニール (Scott O'Neill) らが試している。デング熱は熱帯地方で勢いを増しており、最近では米国でも確認された。命にかかわることはまずないものの、弱った入院患者が感染する恐れがあり、治療法もワクチンもない。

オニールの方法は、患者ではなく蚊に免疫をつける。彼の研究室では、作業員が顕微鏡を見ながら、人間には無害で昆虫にはふつうに見られる細菌ボルバキア・ピピエンティス (*Wolbachia pipientis*) をネッタイシマカ (*Aedes aegypti*) の卵に注入している。ネッタイシマカはデングウイルスを媒介する蚊だが、ボルバキア菌を加えるとデング熱に対する免疫が生じ、したがって媒介もできなくなることをオニールは発見した。さらに、それらの蚊の子孫すべてに、この免疫が受け継がれる。

オス蚊を不妊にする方法も

オニールの方法は遺伝子操作をまったく行わない。その点で、この冬に大きく報じられた遺伝子組み換え蚊を使う方法とは対照的だ。昨年12月、英国のバイオ企業オキシテックは、遺伝子を組み換えたオスの蚊6000匹をマレーシアで放ち、これに対して一部の団体は遺伝子組み換え昆虫が人間や生態系に影響を与えるのではないかと懸念を表明した。

マレーシアでの成果はまだまとまっていないが、オキシテックの主任科学者で創設者のアルフィー (Luke Alphey) は、西インド諸島のグランドケイマン島で330万匹の蚊を放った以前の実験ではネッタイシマカが80%

減ったという。多数のメス蚊が、野生のオスではなく生殖不能な遺伝子組み換えオス蚊と交配したためだと考えられる。

オニールの試験の成果も有望だ。初期の試験で、野生のボウフラの約25%がボルバキア菌に感染し、デング熱に免疫を持つようになっていたことが示された。オニールは5月末までに今回の試験の結果を出し、ボルバキア菌が野生のネッタイシマカのデング熱耐性を高めることを実証したいと考えている。その暁には、同様の試験をベトナムで初夏に行う計画だ。

59

数学入門

ついに解けた
100年の謎

天才数学者が残した
整数分割に関する予想
それにまつわる謎がようやく解けた

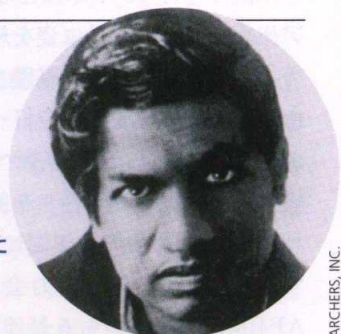


PHOTO RESEARCHERS, INC.

ほぼ独学のインド人数学者ラマヌジャン (Srinivasa Ramanujan) はわずか32歳で生涯を閉じた伝説的人

伝説の数学者ラマヌジャン

謎の予想が解けてインド人もびっくり?

物だ。最近、数論研究者たちは彼の謎めいた予想をやっと解明した。ラマヌジャンが死(1920年)の前年に記したものだ。

それは一見単純な「分割」という概念に関するもの。分割とは整数をより小さな整数に分ける(和として表す)ことで、例えば5という数には以下の7つの分け方がある。

「5」・「1+1+1+1+1」・「1+1+1+2」

「1+1+3」・「1+2+2」・「1+4」・「2+3」

数学者はこれを $p(5) = 7$ と表現する。数6は11通りの分割があるので $p(6) = 11$ だ。 n が大きくなると、分割数 $p(n)$ は急激に増える。例えば $p(100) = 190569292$ だし、 $p(1000)$ は32桁の数になる。

ラマヌジャンの予想

数学者たちは何世紀にもわたって分割を解明しようとしてきた。その一環として、いろいろな数の分割を関連づけるパターンが探された。ラマヌジャンは、数9から始めて5ずつ増やしていった数の分割が、すべて5で割り切れるらしいと気づいた。 $p(9)=30$, $p(9+5)=135$, $p(9+10)=490$, $p(9+15)=1575$ という具合だ。彼はこれがおそらくどこまでも続くこと、そして5を7や11に置き換えた場合にも同様のパターンが生じると予想した。7と11は5に続く2つの素数だ(素数はそれ自身と1によってのみ割り切れる数)。

さらに、5や7、11の累乗に置き換えても同様なパター



ンが生じると予想した。したがって、例えば 5^3 の間隔で並んだ無限個の整数 n について、対応する $p(n)$ すべてが 125 で割り切れるものが存在するはずだ。そしてラマヌジャンは予言者のように、より大きな素数で置き換えた場合には、分割に「単純な性質」が現れることはないだろうと書き記した。言い換えると、その分割数 $p(n)$ すべてが 13, 17, 19 など で割り切れるような n の数列は存在しないという予想だ。それ以来、これら 13 以上の素数にかかわる分割数パターンが探されてきたが、見つからなかった。

予想を超える新発見

1 月、エモリー大学の数学者オノ (Ken Ono) らが、ついに 1 つの答えを発見した。13 の累乗 ($13, 13^2, 13^3 \dots$) の間隔で並ぶ数 n に対する分割数 $p(n)$ を関連づける公式を初めて導き出したのだ。13 よりも大きな素数の累乗を公差とする数列 n についても同様の公式を見いだした。

これらの公式は「 $p(n)$ が 13 の累乗で割り切れる」といった明らかなパターンの存在を述べているのではないので、その意味ではラマヌジャンが予言したように「単純」ではない。割り切れるかどうかではなく、 $p(n)$ をそうした素数のさまざまな累乗で割った際の剰余どうしの関係を示すものだ。それぞれの素数について、累乗の次数を大きくするにつれ、まるでフラクタルを思わせるような形で剰余のパターンが繰り返す。フラクタルはさまざまに異なるスケールで見たときにパターンや図形が等しく繰り返す構造のことだ。

オノと別の共同研究者は同じく 1 月に発表した研究結果のなかで、任意の数 n に対して分割数 $p(n)$ を計算する公式を初めて導き出した。これは数論研究者が何世紀もの間なしえなかった偉業だ。

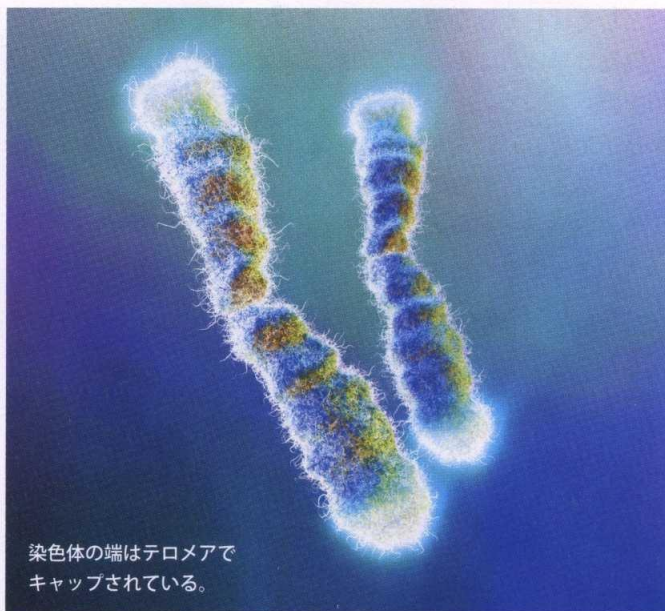
新発見は何かに役立つだろうか？ それを予測するのは難しいとペンシルベニア州立大学のアンドルーズ (George E. Andrews) はいう。「純粋数学の根底にあるものを深く理解して応用につなげるには、少々時間がかかるだろう」。

健康

君のテロメアは長いね！

加齢と健康状態の指標とされるテロメアの長さ
それを簡単に調べるテストが近く実用化する

医師が禁煙と定期的な運動を薦めるのはお決まりだ。だが、喫煙者や運動不足のカウチポテト族に、その生活スタイルのせいで実際に染色体が弱っている様子を血液検査で見せることができたかどうか？ さすがに生活を改めるかもしれない。著名研究者からなる 2 つのグループが、まさにそん



な検査を提供する会社を立ち上げた。その人の染色体の「テロメア」の長さを測る。

テロメアは染色体の末端についているキャップで、靴ひもの端がバラけないように付いているプラスチックの止め具のように、染色体を守っている。遺伝子の保存庫である染色体が細胞分裂の前に複製されるたびに、テロメアは短くなる。このため、テロメアの長さは生物学的な加齢の程度を示す指標であり、細胞の寿命を刻む「分子時計」であり、全体的な健康状態のバロメーターでもあると考えられている。

白血球のテロメアの長さを比較した複数の研究で、テロメアの長さ和生活スタイルに明らかな相関が認められている。定期的に運動している人たちは運動していない人に比べてテロメアが長く、強いストレスを感じている人たちはストレスが低いと感じている人たちよりもテロメアが短い。心血管障害や肥満、アルツハイマー病などいくつかの病気も、テロメアの短さと相関している。

2 社が測定テストを提供へ

「自分の実年齢に照らしてテロメアの長さが正常かどうか がわかれば、病気が発症する前でも、健康状態と“生理学的年齢”を知ることができるだろう」と、スペイン国立がん研究センターのテロメア・テロメラーゼグループ長で、昨年 9 月にライフレンクス社を共同設立した brasco (María A. Brasco) はいう。

2009 年のノーベル生理学・医学賞受賞者ブラックバーン (Elizabeth H. Blackburn) とともにテロームヘルス社を昨年春に設立したテロメア研究の先駆者ハーレイ (Calvin B. Harley) は、テロメアの長さは「個人の総合的遺伝子状態と過去の生活スタイル、環境暴露の影響を評価する単一の指

標としてはおそらく最良だ」と考えている。

両社は早ければ春にも、加齢と病気におけるテロメアの役割を調べている研究機関や企業にテロメア測定テストを提供する予定だ。一般人も今年の秋までに、医師や研究機関を通して、あるいは直接に利用できるようになるかもしれない。

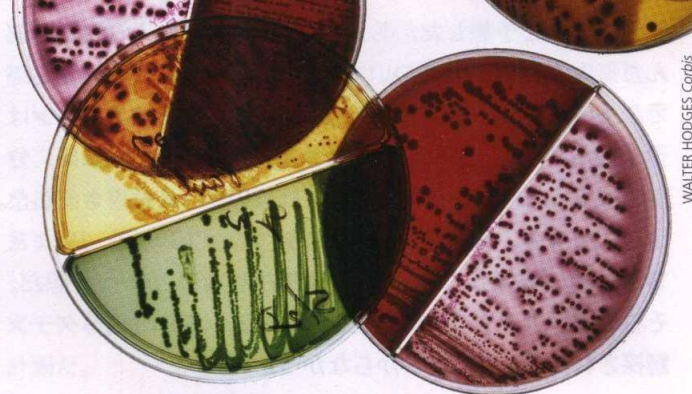
この研究サービスへの期待は高いが、専門家のなかには、個人にとってこの検査が現時点で価値があるか疑問視する人もいる。「テロメアがどれだけ長ければ正常で、どれだけ短いと異常とするのか、まだ定義できていない」と、英レスター大学の心血管科長サマニ (Nilesh J. Samani) はいう。これに対しハーレイはテロメアの長さは診断でも予後診断でもないという。食事や運動、ストレスなど「個人が生活スタイルを決定する」際の助けには現在でも十分だと主張する。SA

微生物学

細菌の遺伝子交換、ずっと頻繁

「水平伝播」という現象が進化を促している

細菌と古細菌（原核生物と総称される）は至るところで生きていて、胃酸から深海の熱水噴出孔まで多様な環境中で分裂・増殖している。これほど多くのさまざまな場所で生きていけるのは、ゲノムが驚くほど柔軟だからだ。原核生物はほ



とんど自在に遺伝子を変えたり、失ったり、複製したりできる。また近くの仲間から遺伝子を獲得できること（抗生物質耐性が広がる一因だ）も以前から知られてきた。ただ、「遺伝子の水平伝播」と呼ばれるこの新 DNA 獲得法が使われるのは比較的まれで、強力な抗生物質にさらされるなど、環境から強い圧力を受けたときに限られると考えられてきた。

ところが、*PLoS Genetics* 誌に掲載された最近の研究によると、原核生物は近くの微生物からかなり頻繁に遺伝子を獲得しているという。水平伝播は何らかの中継役やウイルスを介して微生物が別の微生物から遺伝情報を得れば成立し、異種の間でも起こりうる。

新遺伝子の大半は水平伝播で獲得

パリにあるパスツール研究所のトランジェン (Todd J.

経済学

メガバンクの感染力

銀行家が感染症研究から学びうる事柄

2008 年の経済危機について、感染症研究から学べることはあるか？ たくさんある、と英オックスフォード大学の生態学者メイ (Robert M. May) と英国の中央銀行であるイングランド銀行の金融安定化担当理事ホールデン (Andrew G. Haldane) は主張する。2 人は最近の論文で、リーマンブラザーズなどの巨大投資銀行と疫学でいう「スーパースプレッダー」を比較した。スーパースプレッダーとは、他者とのつながりが多く、集団全体に感染を広げてしまうような感染者のことだ。

次の金融危機を避けるため、金融規制当局は個別の銀行だけでなくネットワーク全体の健全性に注目する必要があるとメイは指摘する。金融機関の相互関係を考えるうえで、銀行家はパソコンや電力系統の設計者のやり方を参考にできるだろう。これらのシステムはモジュールに分かれ、それらにフ

アイアウォールを設けることで、ネットワーク内の 1 つの要素（感染源）の影響がネットワーク全体に広がる（感染する）のを防いでいる。

セントルイスにあるワシントン大学の経済学者ディヴィグ (Philip H.

Dybvig) は「2 人が提案しているのは一種のグラス・スティーガル法だ」という。グラス・スティーガル法は投資銀行と商業銀行を分離した法律 (1933 年制定) で、1999 年に廃止された。

銀行家たちは注目しているだろうか？ メイは米国が最近提案した「ボルカー・ルール」を例に挙げる。これは高リスクのヘッジファンドやプライベート・エクイティ・ファンド（非公開企業を対象にした投資ファンドの一種）と、その他の銀行業務を隔離しようという提案であり、当局が疫学的な考え方を取り入れ始めた兆候といえる。SA



これなーんだ？

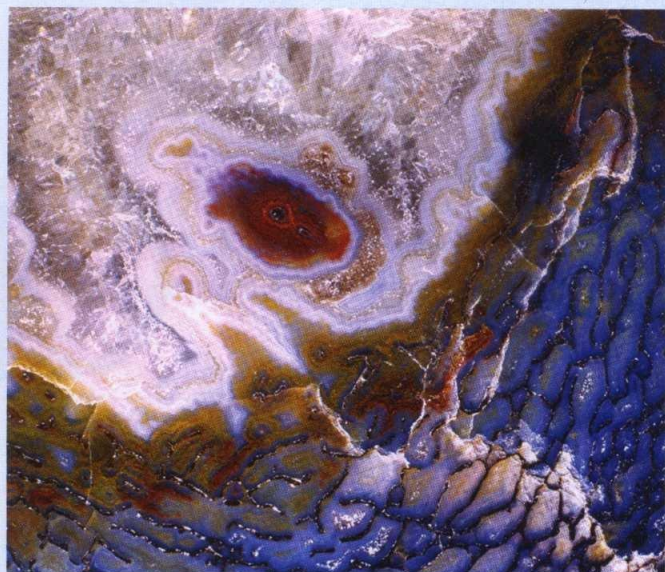
恐竜の骨の芸術作品

これはアートか、それとも科学か？ バーカー（Norman Barker）は両方の専門家だ。ジョンズ・ホプキンス大学で病理学と芸術療法の准教授を務めるバーカーが撮影したこの写真は、恐竜の骨の断面だ（倍率は15倍）。

恐竜の種は不明だが、化石がよく見つかるコロラド高原のモリソン層で発見されたもので、化石の大きさは配管工事に使う粘着テープの1巻ほど。骨の部分は青っぽく写っている。石英（白色）で満たされた部分のなかに酸化鉄（赤色）があり、この部分は骨髄の一部か海綿骨と考えられるが、「化石化する前に入り込んだ木の根が、何百万年もかかって分解した名残である可能性もある」とバーカーはいう。

SA

NORMAN BARKER



Treangen）とロシャ（Eduardo P. C. Rocha）は、110種の原核生物のゲノムのデータベースをもとに、水平伝播によって獲得された遺伝子の数を計算した。

原核生物の固有ゲノムのなかで進化した遺伝子は同様の遺伝子の近くに位置していることが多く、既存の遺伝子と似た機能を持つ。これに対し水平伝播で獲得された遺伝子はゲノム中の位置がまちまちで、機能も固有遺伝子とは非常に異なっている場合が多い。これら2つの主要な特徴を追跡することで、トランジェンとロシャは、調査対象の原核生物が持つ新しい遺伝子の88～98%が水平伝播によって獲得されたと計算した。

エール大学の微生物学者オフマン（Howard Ochman）は「彼らの研究は細菌が持つ新遺伝子のほとんどが外部に由来することを示している」という。「ゲノム配列全体を調べているうえ、データの選択方法も適切なので、この結論は十分に信頼できるものだと思う」。

有益な形質、いただきます

水平伝播遺伝子は新たなすみかに着いた後、同じゲノム内で進化してきた他の遺伝子とは異なる進化の道をたどる。新参遺伝子はより速く進化し、ゲノム内に長くとどまるのだ。これは当の遺伝子が非常に新しく有益な機能を提供するからだろうとトランジェンは考えている。

原核生物は遺伝子の水平伝播によって「他の微生物がすでに獲得していた適応形質」を得ることが可能になっているとトランジェンはいう。このため原核生物は新しい環境に素早く適応できるのだ。今回の研究結果は水平伝播が原核生物の進化を促す大きな原動力であることを示しており、細菌が抗生物質耐性を短期間で発達させる理由の説明にも役立つ。

SA

考古学

11歳の少女、 もうすぐ2500歳

古代ギリシャの一般人の姿が再現された

1990年代半ばに古代の集団墓地がギリシャのアテネで見つかり、埋葬者のDNAを調べた結果、紀元前5世紀にアテネの人口の1/4が犠牲になった疫病の原因が腸チフスだったことが判明した。この発見を2006年に発表したアテネ大学の歯科矯正医パパグリゴラキス（Manolis Papagrigorakis）は最近、同じ集団墓地で見つかった11歳の少女の頭蓋の復元に協力した。

「ミルティス」と呼ばれるこの少女は古代ギリシャの一般人の姿を再現した初の例だ。詳細は *Angle Orthodontist* 誌1月号に報告され、復元像はテッサロニキ考古学博物館に特別展示された。

パパグリゴラキスはニルソン（Oscar Nilsson）と共同で作業した。ニルソンは顔を再現する専門家で、法医学分野で使われているように筋肉を1つずつ再現していく技法を適用した。頭蓋骨は顔の多くの造作を再現する足がかりとなり、歯が完全にそろっていたため口元もうまく再現できた。

アレキサンダー大王の父フィリッポス2世を再現したニーブ（Richard Neave）は、古代人はどのような外見だったのかと質問されることがよくあるが、ミルティスの容貌は「人々が変わっていない」ことを示しているという。

SA



YORGOS KARAKHALIS Reuters

児童心理学

母さん、トラみたいに 吠えないで

管理下で育った子は学業成績はよいが
不安や鬱の傾向が強まる

どこの親も、子育てでわが子を優しく励ますか厳しく叱る
か、両者の適切なバランスに苦心している。この冬、エール
大学の法律学教授チュア (Amy Chua) は「Battle Hymn
of the Tiger Mother (タイガー・マザー賛歌)」という本を
出版した。そのなかで、子どもをうまく育てるには生活のほ
とんどを親が管理するのがよく、遊びや外泊を禁じ、学校で
A よりも低い成績がついたら子どもを怒鳴りつけばよいと
主張したが、これに対し反論の嵐が巻き起こった。中国系米
国人のチュアは「中国式パルタ教育」の優位を説いたのだ
が、実のところはどうなのだろう？

「中国を含め、私たちが調査したどの文化圏でも、親が出
しゃばって介入するのが適切であることを裏づける証拠はない」というのは、テネシー大学ノックスビル校の心理学者バ
ーバー (Brian K. Barber) だ。親の心理的支配が世界各国
でどれだけ異なるかを調べるため、バーバーらはコスタリカ、
タイ、南アフリカ共和国など5つの文化圏の思春期の若者
120 人に面接し、さらに2100 人を調査した。

その結果、チュアが著書に述べている行為の一部、子ども
を侮辱したり (チュアはかつて娘を「クズ」と呼んで叱った)、
子どもの感情を否定したり、プライバシーを侵害したりする
行為は、子どもの鬱 (うつ) や反社会的行動と相関している
ことがわかった。これは以前の研究結果とも一致する。

バーバーは過度に威圧的な「権威主義的家庭」と、厳しい
けれども温かくて自主独立を奨励する「権威を重んずる家
庭」は別だという。テンプル大学のスタインバーグ (Laurence
Steinberg) らは2万人以上の米国の高校生を対象に実施し
た以前の調査で、「権威を重んずる家庭」で育った子どもは
だいたい心理的に健全だが、「権威主義的家庭」で育った子

どもは不安感や鬱の傾向が強いこ
とを明らかにした。注目すべ
きことに、どちらの家庭で
育った子も学業成績は比較
的優秀だった。結局のと
ころ、優秀な子を育てる
には、ガミガミと口うる
さいタイガー・マザーは必
要なさそうだ。 

THOMAS FUCHS



遺伝学

母親の血液で出生前診断

画期的な進歩だが、社会の受け入れ態勢は不十分

現在のところ、母親のお腹にいる子ど
もが病気を抱えていないか心配でも、親
が選択できる手立ては少ない。両親が血
液検査を受ければ、嚢胞性線維症やテイ・
サックス病 (致命的な先天性代謝異常)
などの遺伝疾患の原因となる変異の有無は
わかるが、赤ん坊がその変異を受け継いでいるかどうかはわ
からない。また、羊水穿刺や絨毛生検によってダウン症など
胎児の染色体異常を検査できるものの、こうした検査の約
1% が流産を引き起こすので、多くの母親は見合わせている。

だが最近の飛躍的な進歩のおかげで、身体への負担が小さ
い非侵襲的な出生前検査が近く可能になりそう。母親の血
液を調べれば、出生前に遺伝病を診断できる。これ自体は素
晴らしいが、そうした検査をどう規制・管理すべきか難しい
問題も生じる。

妊婦の血液に胎児の遺伝子

非侵襲的な検査が可能なのは、香港中文大学の化学病理学
者である盧 (Dennis Lo) が1997 年に発見したように、妊
婦の血液に胎児の遺伝子のコピーが含まれているからだ。

盧は昨年12月、母親の血液中にある胎児の遺伝子配列を
解析するとともに染色体数を計数して、胎児が病気の原因と
なる変異や染色体異常を持っているかどうかを確定する方法
を *Science Translational Medicine* 誌に報告した。胎児が母
親から受け継いだ遺伝子は、母親の血液中に通常よりも高濃
度で存在するので識別可能だ。一方、母親にはない変異遺伝
子が見つかった場合は、父親から受け継いだと考えられる。

盧はその後、この方法を753 人の妊婦に試した結果を
British Medical Journal 誌に報告した。母親の血液に見
つかった21 番染色体 (通常は2 本だがダウン症患者には3
本ある) 由来のDNA 分子の割合を調べることで、ダウン症
を抱えている胎児を100% 正確に診断できた。この検査に
よって「羊水穿刺などの侵襲的な方法を98% 回避できる」
と盧はいう。しかし偽陽性の結果が3 件生じたため、この
検査で陽性となった場合には侵襲的な検査で確認する必要が
あるだろう。

シーケノム社 (サンディエゴ) は2 年以内の実用化を目
指して盧の方法に基づく検査法を開発中だ。嚢胞性線維症や
テイ・サックス病、血友病、鎌状赤血球障害など他の病気につ
いての検査法は4~5 年先になりそう。



THOMAS FUCHS

だが、大きな問題が残る。こうした検査が親の意思決定にどう影響するか。もし胎児が病気だとわかったら、その夫婦は中絶を選ぶだろうか？ この検査によって希少疾患を抱えて生まれてくる人が減った場合、結果として治療法研究に対する資金提供が影響を受けないか？ 目の色や毛髪の色など外見上の形質に基づいて親が胎児を選べるような検査が出現するだろうか？ スタンフォード大学の法律学教授グリーリー (Henry T. Greely) は、こうした問題に対して米国政

府はまったく何も対処していないという。

また、検査を受ける人に適切な助言ができるよう、医師向けのガイドラインも必要になるだろう。さもないと、「情報を受け止める準備ができていない家族に情報を知らせてしまうことになる」とモンテフィオーレ医療センター (ニューヨーク) の産科医ドーラン (Siobhan Dolan) はいう。数年後、現在とは逆に、私たちは多すぎる選択肢を前にして悩むことになるのかもしれない。

SA

技術

科学アプリいろいろ登場

科学者が開発したiPhone向けアプリは専門家だけでなく一般の科学ファンにもお役立ち

① BirdsEye

コーネル大学の鳥類学研究所が開発した BirdsEye (バーズアイ) は、北米でよく見られる数百種の鳥の名前と画像、鳴き声などを確認できる。コーネル大学と自然環境保護団体のオードボーン協会が運営するウェブサイト eBird.org に投稿された観察例をもとに、どこでどんな鳥が見られるかを手引きしてくれるので、熱心なバードウォッチャーには大助かり。専門家は鳥の分布域や移動などを明らかにするために eBird.org の観察例を利用している。

② Molecules

Molecules (モレキュールズ) というこのアプリでは分子の3次元モデルをタッチスクリーン上に表示、指で画面に触れて操ることができる。立体モデル画像は単なるきれいな絵ではない。立体構造は分子の機能に深く関係している場合が多いので、研究者も科学ファンも分子がどのように働くかを理解しやすくなる。「いつでもどこでも、タンパク質分子の立体構造を同僚に見せることができる。お昼に食堂で一緒になったときにも」というのは、コロンビア大学のウイルス学者ラカニエロ (Vincent Racaniello) だ。

③ Geology

インテグリティロジック社から出ている Geology (ジオロジー) は地質図を見るアプリだ。米国の26州をカバーし、岩石のタイプや年齢、断層の位置、過去に起きた地震の例など、50種類に上る情報を別々に地図表示する。一般人にも役立つ。インテグリティロジックの創業者ターディボー (Max Tardiveau) によると、キノコ狩りに行く人が山火事のデータを利用している。一部のキノコは山火事後によく育つからだ。

④ TimeTree

ヒトとチンパンジーが共通の祖先から分かれたのはいつだったか？ アプリ TimeTree (タイムツリー) を使って生物の系統樹を調べるとよい。アリゾナ州立大学とペンシルベニア州立大学の科学者が開発したこのアプリは、16万種を超える生物に関する情報を蓄積した米国立生物工学情報センターの巨大データベースを検索する。分岐時期がいつだったか、出典論文の一覧とともに、数秒で答えが返ってくる。

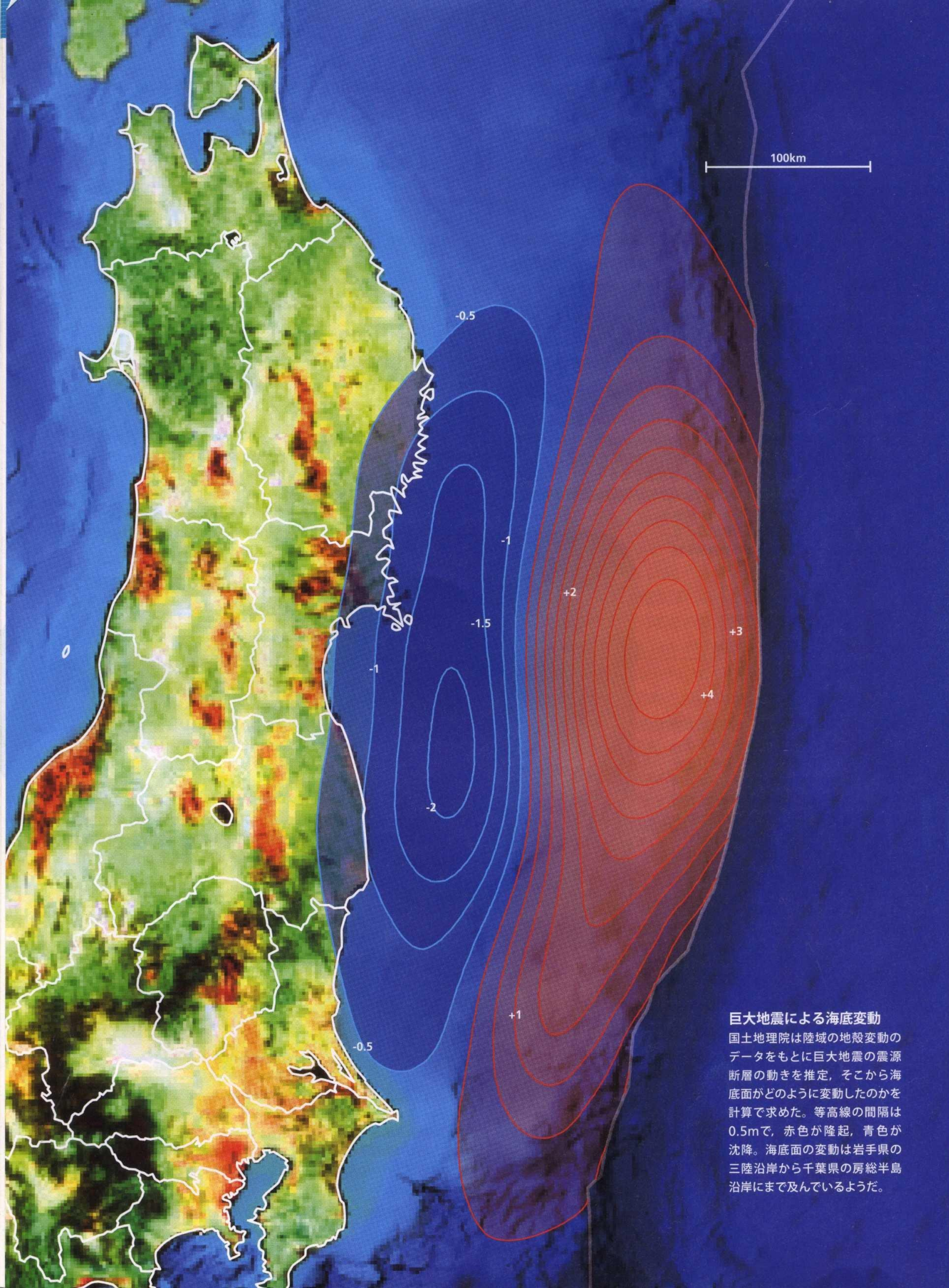
⑤ IveGot1

外来生物種を見分けるには？ 米国ではビルマニシキヘビやナイルオオトカゲといった生物が海外からフロリダ州に侵入し、生態系を破壊している。専門家もボランティアも、これらの爬虫類を特定するにはこのアプリ IveGot1 (アイブゴットワン) がお役立ちだ。さまざまな爬虫類の写真、特徴・外見に関するデータ、生息場所、在来種か外来種かの別がわかる。

⑥ ChemJuice

自分用の分子データベースをさくっと作りたい？ ChemJuice (ケムジュース) というこのアプリなら、タッチスクリーンに指を滑ら

せて化学結合を描き、軽くつついて原子や化学結合を削除したり種類を変えたりして、簡単に実行できる。分子量や化学式、元素の構成比を計算することも可能で、電子メールによって分子構造をどこにでも送信できる。学生や専門家にとっても便利だ。



巨大地震による海底変動

国土地理院は陸域の地殻変動のデータをもとに巨大地震の震源断層の動きを推定、そこから海底面がどのように変動したのかを計算で求めた。等高線の間隔は0.5mで、赤色が隆起、青色が沈降。海底面の変動は岩手県の三陸沿岸から千葉県の房総半島沿岸にまで及んでいるようだ。

東日本大震災 鳴らされていた 警鐘

多くの人命を奪い、深刻な原子力発電所事故を招いた東日本大地震「想定外」との声が多いが、東北地方太平洋岸の広域調査などから大津波をもたらす地震の発生が迫っていることが指摘されていた

中島林彦（編集部）

3月11日、東日本大地震が発生し、仙台平野の田園地帯を突き進む大津波の映像が伝えられたとき、地震学者の多くは予想外の事態に絶句した。その一方、「とうとう来てしまったか」と苦い思いを噛みしめながら見ていた研究者もいた。

1100年以上前、平安時代前期の貞観11年（西暦869年）に、「貞観地震」と呼ばれる巨大地震が発生し、大津波が三陸沿岸から東北地方南部沿岸に押し寄せた。その事実が東北大学や産業技術総合研究所（産総研）活断層・地震研究センター、大阪市立大学などによる地質調査でわかってきた。産総研は調査結果を踏まえたシミュレーション研究で、津波が平野部で3～4kmも内陸まで押し寄せたことを明らかにした。津波を生み出した地震の大きさはマグニチュード（M）8.4以上と推定された。

これまで西日本については南海地震

や東南海地震などの大地震が繰り返し起き、大津波が太平洋岸を襲ったことはよく知られていた。だが、東日本で、それらに相当する規模の地震と津波が起きていたことは、地震学者の間においても共通認識にはなっていなかった。

産総研による東北の太平洋沿岸各地の地質調査では、貞観津波を含め、古墳時代（400年頃）から室町時代（1500年頃）にかけて少なくとも4回、かなりの規模の津波が起きていたことも判明した。そうしたことから産総研の研究グループは、東北から関東にかけての沿岸を500～1000年の間隔で大津波が襲っていること、その周期性から考えれば、近い将来、同様の大地震と大津波が再来する恐れがあることを数年前から論文や学会で発表していた。東北大学や大阪市立大学の研究者も近い将来の大津波の再来に警鐘を鳴らしていた。

昨年には、地震学会での産総研の発

東日本大震災

地震の概要

正式名称：平成23年東北地方太平洋沖地震
発生日時：2011年3月11日14時46分頃
震源：宮城県牡鹿半島東方130km、深さ24km
マグニチュード：9.0

主要都市の震度

震度7：宮城県栗原市

震度6：仙台、宇都宮、日立、水戸、つくば
震度5：盛岡、秋田、福島、前橋、さいたま、千葉、東京、横浜、甲府

震度4：釧路、帯広、函館、青森、山形、静岡、長野、新潟、名古屋

主な余震

3月11日 M7.7（茨城県沖）、
M7.5（三陸沖）、M7.4（岩手県沖）
4月7日 M7.1（宮城県沖）

被害の概要（4月12日時点。警察庁調べ）

被災地域：北海道から関東、四国の南東部
死者数：1万3219人
行方不明者数：1万4274人
負傷者数：4742人
建物被害：全半壊6万4689戸
全半壊・浸水・一部破損など：15万8503戸
住居以外の建物被害：8505戸
避難者：14万2936人
津波による浸水域（4月8日、国土地理院発表）
807km²（山手線の内側の面積の約8倍）
想定被害総額：16兆～25兆円
（政府試算。原発事故関連は含まず）

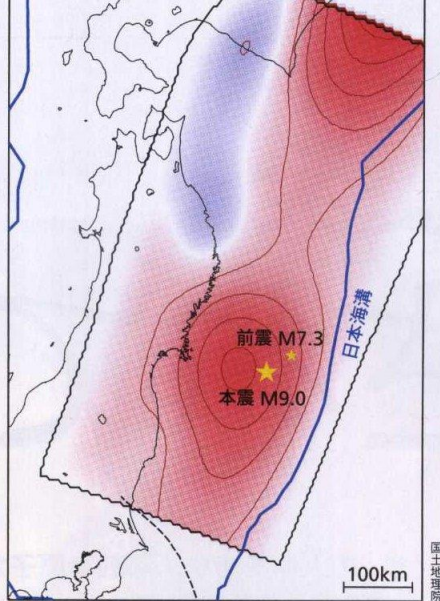
表を引用する形で、全国紙各紙が東日本太平洋岸への大津波襲来の可能性を報じた。政府の地震調査研究推進本部も今年4月、国が防災対策を立てるための基礎データである「地震活動の長期評価」に貞観地震の研究結果を反映する予定で、宮城県や福島県などへの連絡を進めていた。

しかし、地震は待ってくれなかった。3月11日、宮城県牡鹿半島の東南東約130km、深さ約24kmの地下深部を起点に巨大な断層が動き始め、M9.0という世界でも百年に数回しかない規模の大地震へと発展した。東日本の太平洋側の海底は岩手沖から千葉沖まで南北500km以上に及ぶ範囲で起伏が変化（24ページの図）、海水は大きく揺さぶられ、最大10m超の大津波が沿岸部に押し寄せた。

津波対策では、岩手県から宮城県北部にかけての三陸沿岸は万全だと考えられていたが、そうではなかった。

三陸沿岸は1896年の明治三陸地震や1933年の昭和三陸地震など度々、津波被害を受けた。そうした教訓を踏まえ、3階建てに相当する高さ10mの防波堤などが各地に築かれ、避難施設も整備された。製鉄で知られる岩手県釜石の湾口には1200億円をかけ、全長2km、海面からの高さ8m（水深最大63m）、厚さ20mという長大堅牢な防波堤が建設された。

一方、石巻から南の宮城県南部から



プレート境界に蓄積する歪み GPSによる地殻変動のデータと太平洋プレートの動きを総合すると、太平洋プレートと陸側プレートの境界面（地震の震源断層）に蓄積した歪みの量を推定できる。上の図は2000年4月から01年3月までの1年間に、新たに蓄積した歪みを示した。赤が濃いほどプレートどうしがしっかりくつき、歪みが増大した場所。等値線の間隔は2cm/年（年間2cm分のプレートの沈み込みが押しとどめられて生み出される歪み量）。波線で囲んだ部分が解析対象の領域。ここより外側の領域では歪み量の推定を行っていない。3月11日の巨大地震（本震）の震源と、その2日前に起きたM7.3の地震（前震）の震源を黄色の星印で表す。いずれも歪みの蓄積ペースが大きなところで発生したことがわかる。

福島県にかけての沿岸は、だいたいが平野で、三陸沿岸のような大津波の襲来は想定されていなかった。福島県沖についていえば、その地域を震源とする地震は最大M7級で、M8超のもの

は起きないというのが通説だった。

だが、今回の大津波は備えが弱かった宮城県や福島県の平野部はもちろん、万全な備えがあったはずの三陸沿岸の町々をも呑み込んだ。30年の歳月をかけて2009年に完成した釜石の防波堤も津波は乗り越え、そして破壊した。

平成の大津波は貞観津波と同様、多くの人命を奪い、平安時代には存在しなかった3つの原子力発電所も襲った。東京電力福島第1原子力発電所では4機の原子炉施設が深刻なトラブルに見舞われ、世界最大級の原発事故となった（40ページの記事）。環境中への放射性物質の放出量は米スリーマイル島原発事故を抜き、史上最悪のチェルノブイリ原発事故に次ぐ規模となった。

そもそも今回の巨大地震はなぜ起きたのか。前兆は検出できなかったのか。類似性が指摘されている貞観地震とはどのようなものだったのか。そして巨大地震によって日本列島の地下の応力バランスが変わった結果、他の地域に地震が誘発される恐れはないのか。東日本大地震に警鐘を鳴らしていた研究の全貌を紹介する。

東日本と西日本の違い

今回の巨大地震と貞観地震はいずれも太平洋プレートの沈み込み域で発生した海溝型地震だ（右ページの囲み）。海溝型地震は規模が大きく、津波被害をもたらすので数多くの研究がなされてきた。ただ、海溝型地震といっても、太平洋プレートの沈み込みに由来する日本海溝沿いのものと、フィリピン海プレートに由来する南海トラフ・相模トラフ沿いのものではかなりタイプが違うというのが一般的な認識だった。

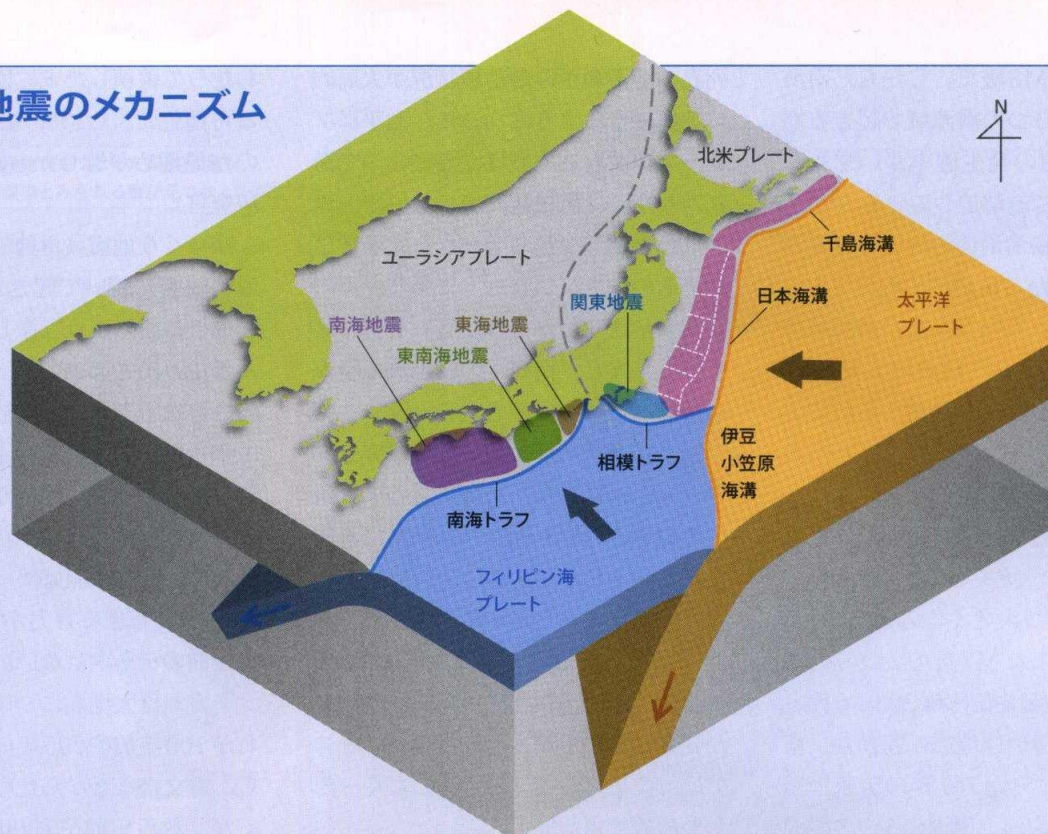
1つの違いは震源域（地震で動く断層）の規模。フィリピン海プレート由来の地震の震源域は一つひとつが非常に広い。南海トラフ沿いでは東海、東南海、南海の3つ。相模トラフ沿いでは1つ。震源域が広い分、地震も大き

KEY CONCEPTS

再来した巨大津波

- 3月11日に起きた東日本大地震は一般市民や行政だけでなく、多くの地震学者にとっても予想外だった。大津波が東北から関東にかけての太平洋岸を襲い、多くの犠牲者を出し、世界最大級の原子力発電所事故を招いた。
- ただ、約1100年前の平安時代に、今回と同様の大地震と大津波が東日本で起きていたことが広域の地質調査で判明。推定された発生間隔から考えて、次の大地震が迫りつつあることは明らかになっていた。地震対策に、その研究成果を反映させようとしていた矢先、恐れていた大地震が起きた。

海溝型地震のメカニズム



日本付近で起きる地震のエネルギー源はプレート運動だ。「プレート」とは地球表層を構成する地殻とマントル上層からなる巨大岩板のこと。太平洋や大西洋などを構成する海洋プレートは中央海嶺などで生まれ、マントル対流に乗って移動、大陸プレートにぶつかって沈み込む。沈み込みには2通りある。1つは陸側プレートの下に海洋プレートが滑らかに沈み込むタイプ。もう1つは両方のプレートが固着して歪みが蓄積するタイプで、そうした場所を「固着域」という。固着域では歪みが一定量まで蓄積すると、陸側プレートと海洋プレートの境界面が断層面となって岩盤が大きく動き、歪みが一気に解放される。断層の動きは振動として周囲に伝わる。これが地震だ。

断層運動には3通りある。1つは正断層型。岩盤に引っ張り力が働く場合に起こり、断層面の下側に対して上側がずり落ちる。2つめは逆断層型。岩盤に圧縮力が働く場合に起こり、断層面の下側に対して上側がずり上がる。海洋プレートの沈み込み域では陸側プレートと海洋プレートの固着域には圧縮力が加わるので、地震は逆断層型だ。3つめは横ずれ断層型で、岩盤の水平方向に応力の大きな不均衡が生じた場合に起こる。断層面は垂直になり、断層面の手前側に対して向こう側が左にずれる場合を左横ずれ断層、右にずれる場合を右横ずれ断層という。また海底で断層が動くと、海水も動く。正断層型だと海水は沈み込み、逆断層型だと海水は持ち上げられる。海水の動きは波となって四方に伝わる。これが津波だ。

日本近海には2つの海洋プレートがある。1つは太平洋プレート。東から西に向かって年間8cmの速度で移動、東日本の沖合にある千島海溝から日本海溝にかけて沈み込んでいる。

今回の東日本大地震は日本海溝付近で蓄積された歪みが広域にわたって一度に解放されて起きた。貞観地震も同様だ。こうしたプレート沈み込み域で起きる地震を海溝型地震という（上の図に示す震源域は海底面上に投影したもの。日本海溝沿いの海溝型地震の震源域の詳細は32ページ上の図）。

もう1つはフィリピン海プレート。南東から北西に向かって年間4～6cmの速度で移動している。同プレートには伊豆半島を構成する陸塊が乗っており、本州にぶつかっている（その陸塊の北端付近に富士山が位置する）。フィリピン海プレートは、伊豆半島をはさんだ両側の海域で、陸側プレートの下に沈み込んでいる。伊豆半島より東側のプレートの沈み込み域が相模トラフ（トラフは海溝の一種。海溝底部が船底のような形になっている）。その付近を震源域とする海溝型地震が1923年（大正12年）の関東大震災をもたらした関東地震だ。一方、伊豆半島より西側の沈み込み域は南海トラフ。同トラフ沿いの震源域は駿河湾から浜名湖沖まで、その西隣りから紀伊半島沖まで、さらにその西側から四国沖あたりまでの3つに分かれ、それぞれ東海地震、東南海地震、南海地震の震源域に相当する。これらの3地震は100年前後の間隔で繰り返し発生する。

地震はプレート境界域以外でも多数発生する。海洋プレートが陸側プレートにぶつかって沈み込むため、両プレート内には多くの断層があり、そうした断層が動くことで歪みが解放される。阪神・淡路大震災などの内陸直下型地震はこのグループに入る。プレート内では応力の加わり方が多様なので、正断層型や逆断層型、横ずれ断層型のいずれのタイプも起きる。

く、いずれもM8級だ。しかも、南海トラフ沿いの3つの震源域で起きる地震は30年以内の発生確率がいずれも60%以上とかなり切迫している。

一方、日本海溝沿いの地震の震源域は三陸沖北部から房総沖にかけて8つに細分される。うちM8級の震源域が2つ、M7級が4つ、過去に大地震の記録がなく発生確率が見積もられていない震源域が2つ(32ページ上の表と図)。南海トラフ沿いと比べると、やや規模が小さいものが多い(マグニチュードは1つ大きくなるとエネルギーは約32倍、2つ大きくなると約1000倍になる)。またM8級の2つの地震の30年以内の発生確率は20%以下だ。

もう1つの違いは地震の連動性。南海トラフ沿いでは1707年の宝永地震など東海、東南海、南海の3つの震源域が連動して一度に動いた事例がある。この場合、震源域は約600kmに及び、地震の規模は大きくなる(宝永地震はM8.5)。現在、宝永地震の再来を想定した防災訓練も始まっている。

これに対し、日本海溝沿いでは多数の震源域が連動する巨大地震はないとみられていた。東北地方の過去の地震を調べても、数百kmにわたって断層が動いた大地震の存在を裏づける有力な証拠が最近まで得られなかったことによる。こうした状況認識をみれば、人々の関心が西日本に向かっていたのも無理はないといえる。

地殻変動が物語っていたこと

しかし、日本海溝沿いでも震源域連動型の巨大地震が発生する可能性があることを示唆する研究は2000年代前半から出始めていた。それは地殻変動の広域観測からもたらされた。

国土地理院は全国にGPS(全地球測位システム)の観測網を展開、1994年から連続観測を始めた。これによって日本各地の地殻変動が3次元的にわかるようになり、そのデータから日本

列島の地下の歪みの蓄積状況が大局的に把握できるようになった。太平洋プレート沈み込み域は深海底なので海底地殻変動は直接観測できないが、東北地方の地殻変動のデータと太平洋プレートの動き(プレートに乗る島々の年々の位置変化からわかる)を合わせて分析すると、海底下の震源域の歪みの蓄積ペースを見積もれる。

国土地理院・地理地殻活動研究センターの西村卓也主任研究官らの調査研究の結果、「宮城県沖」と呼ばれる震源域を中心にM7.5級の地震を起こす歪みが毎年蓄積していることがわかった(26ページの図)。同地域では約40年周期でM7.5の地震(宮城県沖地震)が発生しているが、この程度のペースでは、ため込んでいる歪みのごく一部しか解放できない。

「宮城県沖」の東隣りには、「三陸沖南部海溝寄り」という震源域があり(32ページ上の図)、そこではM7.7の地震が約100年間隔で起きている。日本海溝沿いの地震の中で、これら両震源域についてだけは連動が想定されていたが、そうしたメカニズムを考慮してもなお、歪みの蓄積と解放の収支バランスは合わない。

では蓄積した歪みはどのように解放されるのか? 2つのシナリオが考えられる。1つは断層が非常にゆっくり動く「ゆっくり地震」が起きている可能性、もう1つは歪みが非常に長期に

わたって蓄積した末に巨大地震が起きる可能性だ。「ただ、どちらが真実なのか見極めが難しかった」(西村主任研究官)。

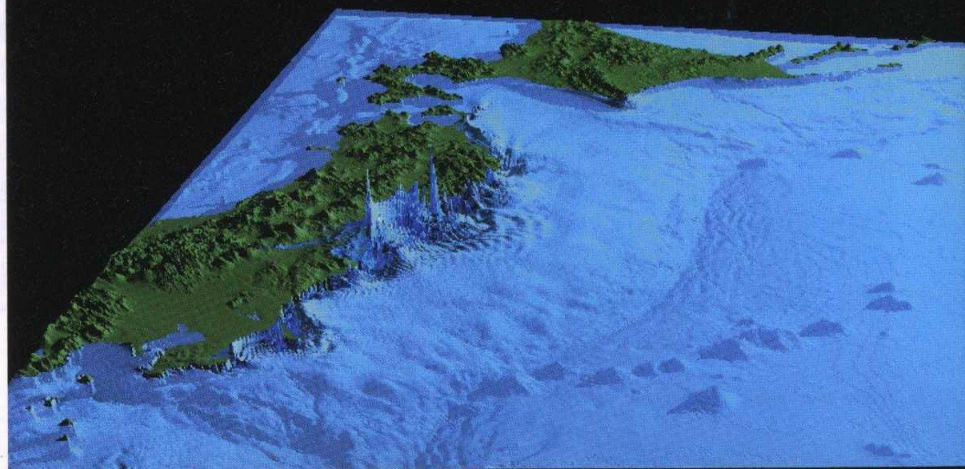
ゆっくり地震(単独で起きたり、普通の地震に続いて起きたりする)は、普通の地震のような激しい揺れをほとんど生み出さないで、人間が感じ取ることにはできない。解放される歪みのエネルギーが大きく、土地が隆起・沈降したとしても、建物が壊れたりするような被害は出ない。だから記録に残らない。GPS観測はゆっくり地震の発生を検知できる有力手段だが、1994年以前のデータはない。

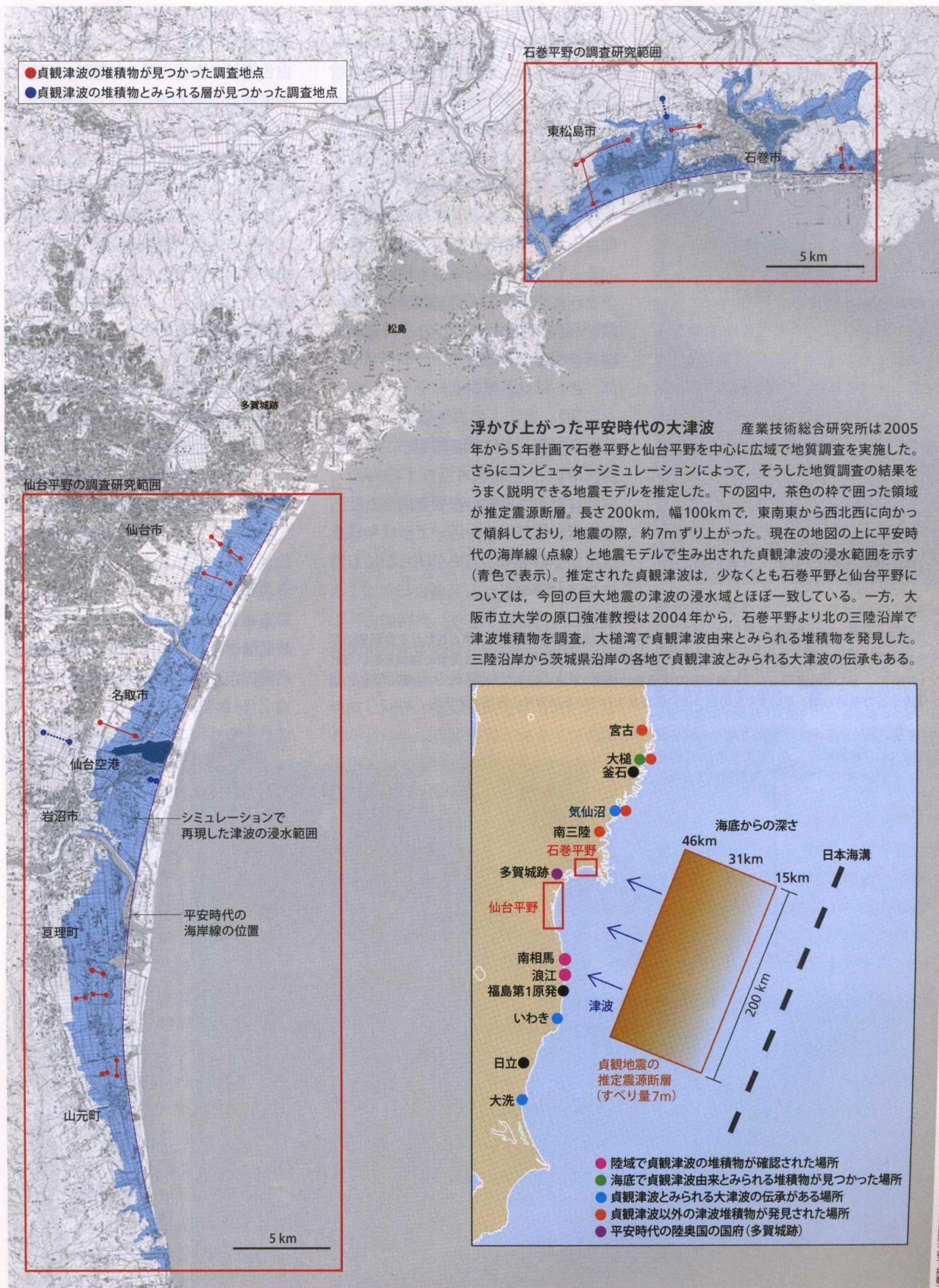
一方、巨大地震については、もしそれが100年前や200年前に起きたのなら、古文書などから比較的容易にわかるが、数百年前や1000年以上前になると、事実関係の調査は格段に難しくなる。しかし、ただ1つ、1000年以上前の平安時代に、ほぼ確実に大地震が起きていたことはわかっていた。国史『日本三代実録』で、かなりの紙幅を割いて記されている大地震があったからだ。それが貞観地震だ。

貞観津波に迫る

平安時代、東北地方の太平洋岸は陸奥国と呼ばれた。当時、国府は多賀城に置かれ、その名の通り城が築かれていた(多賀城は現在の宮城県多賀城市。仙台市の北東にあり、仙台港にも近い)。

貞観津波を再現 産業技術総合研究所は、東日本太平洋沿岸部での地質調査を踏まえたシミュレーション研究で、貞観津波の様子を3次元の動画像で再現した。下はそのワンシーン。三陸南部や仙台平野を大津波が襲っている(陸域や津波の高さ方向のスケールは誇張して表現されている)。





『日本三代実録』によると貞観11年5月26日(西暦869年7月13日)の夜、大地震が起きて建物が倒壊、多数の圧死者が出た。大津波も襲来、城下は海のようになり、溺死者は1000人に上った(36ページの記事)。この記述から貞観地震、貞観津波と呼ばれるようになった。

貞観地震の存在は古くから知られていたが、地震学の観点から研究が本格化したのは1990年代になってから。東北電力や東北大学の箕浦幸治教授らがそれぞれ仙台平野の地質を調査し、貞観津波で運ばれてきた堆積物の存在を確認、『日本三代実録』の記述が裏づけられた。津波は海底や海岸を削り、砂や礫を巻き上げ、内陸に運び上げる。こうした堆積物を津波堆積物と言い、専門家が調べれば、それが洪水由来か津波由来かなどが判別できる。

問題は貞観津波の規模だ。仙台平野では確認されたが、どのくらいの地域に及んだのか、全体状況がわからなければ、津波をもたらした地震の規模や震源域を特定するのは難しい。東北大の箕浦教授らは、福島県相馬市でも貞観津波由来の堆積物を発見していたが、それらの地域を含め、より広域で面的な貞観津波の調査が求められていた。

そこで産総研の活断層・地震研究センターによる本格的な調査が2005年度から5年計画で始まった。調査範囲は石巻平野から仙台平野、福島県沿岸部、さらには茨城県北部まで(前ページの図)。まず人の力や機械を使って地面を掘削し、柱状の堆積物のサンプル(コア)を採取する(下の写真)。次にコアの堆積物の種類を調べ、放射性炭素年代測定法を用いて形成年代を推定、その場所の歴史を明らかにした。

東北地方では貞観地震から約50年後の915年に十和田湖で噴火があり、白色細粒の火山灰層(十和田aテフラ)が広域で見られる。「コアを調べ、十和田aテフラの直下で津波で運ばれた土砂が見つかれば、それは貞観津波のものだ」(産総研活断層・地震研究センターの穴倉正展・海溝型地震履歴研究チーム長)。逆に十和田aテフラと貞観の津波堆積物層のセットが見つからなかった場合、その場所は平安時代の頃は海だった可能性が高い。そうした調査結果と沿岸の地形的特徴を分析すれば、当時の海岸線の位置を推定できる。堆積物の分布状況を知るため地中レーダー探査も行った。

その結果、貞観津波の堆積物は石巻平野から仙台平野、福島県南相馬市にかけて広く分布していることがわかった(東北大学などのグループは南相馬市より約10km南にある福島県浪江町でも貞観津波堆積物を発見した)。津波は場所によっては当時の海岸線から内陸に3~4kmも入り込んでいた。

大地に刻まれていた記録 仙台平野や石巻平野で行われた地質調査。数人がかりで金属製の筒を地面に押し込み(左)、堆積物の試料(コア)を得る(中央上)。場所によっては大型の機械も用いられた(中央下)。多くの調査地点から貞観津波の堆積物が検出された(右はコアの断面、中央部の灰色の層が貞観津波の堆積物層。そのすぐ上の白っぽい粒が含まれている部分が十和田aテフラ)。



地殻変動も検出された。例えば南相馬市の採取コアに含まれたケイ藻という微生物の遺骸の種類を調べると、貞観津波前に見られた淡水種が津波後かなりの期間見られず、代わりに汽水域から海水域に生息する種が見つかった。「貞観地震で土地が沈降、海が入り込んだようだ」（産総研活断層・地震研究センター海溝型地震履歴研究チームの澤井祐紀主任研究員）。

研究グループはシミュレーション研究によって、どんな地震が起きて津波が発生すれば、こうした地質調査のデータを無理なく説明できるのか調べた。その結果、宮城県沖から福島県沖にかけて長さ200km、幅100kmの逆断層型断層が約7mずり上がったとすればうまく説明できることがわかった。地震の規模はM8.4以上と見積もられた。

この地震モデルは現在8つに区分けされている日本海溝沿いの震源域のうち、3つが連動して起きたことを意味する。想定した貞観地震に伴う津波は、地質調査地点を含んでかなり内陸まで入り込んでいた（29ページの図）。貞観地震は従来考えられていたような日本海溝沿いの地震のイメージではまったく説明できない巨大地震であることが明確になった。

産総研の調査では石巻平野の北にある三陸沿岸は対象外だった。山が海に落ち込む三陸沿岸では津波堆積物が形成されるような平野がない。ただ、海岸線の背後の湿地や波静かな浅海では堆積物層が見られる場所も多い。

この三陸沿岸で2004年から地質調査に取り組んできたのが大阪市立大学の原口強准教授らのグループ。石巻の北約100km、岩手県の大槌湾内で貞観津波由来とみられる堆積物を発見した。海中試料の放射性炭素年代測定は陸上試料より難しいが、原口准教授らは一定の仮定の上で年代推定を行った結果、その堆積物が平安時代前期、つまり貞観津波の時代のものである可能

性が高いことを明らかにした。

三陸沿岸では、石巻の北約60kmの宮城県気仙沼あたりに、貞観津波と思われる大津波の伝承がある。原口准教授らの研究と合わせて考えると、貞観津波が三陸沿岸も襲った可能性は否定できない。また福島県いわき市や茨城県大洗町などでも同様の伝承がある。

仮に三陸沿岸や茨城県北部にも貞観津波が押し寄せていたとすれば、貞観地震の震源域は産総研の推定よりさらに南北に延び、地震の規模はM9.0に近くなる。つまり今回の大地震とほぼ同規模だ。

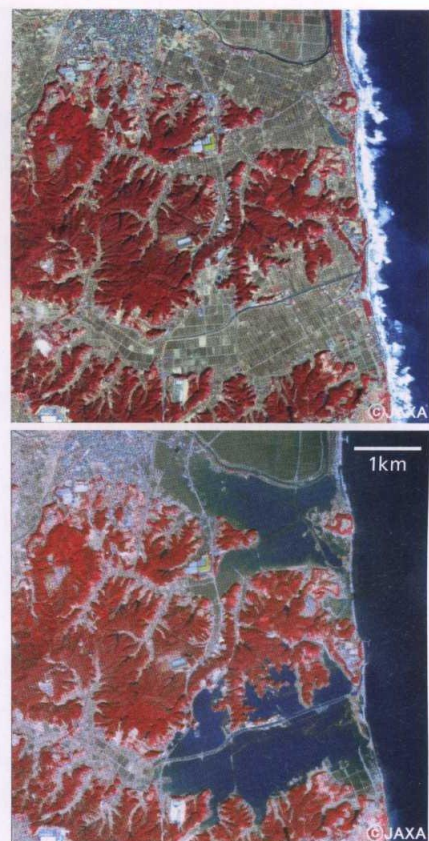
そして大津波は再来した

産総研の調査では過去3000年の間に、貞観津波を含め4回の大津波が襲来していたことも明らかになった。最新は1500年頃の室町時代の津波、その1つ前が貞観津波、その前は400年頃の古墳時代、そして最も古いのは紀元前400年頃の弥生時代のものだった。

これらのうち古墳時代の津波は貞観津波と同様、地殻変動を伴っていたことがわかり、貞観地震と同タイプの海溝型巨大地震で生み出された可能性が高い。一方、室町時代と弥生時代の津波は地殻変動の証拠が現時点では見つからないので、房総沖を震源域とする地震によるものか、南米チリなど超遠方の大地震による津波が太平洋を横断してやって来た可能性もある。

産総研の研究グループは、こうした分析を踏まえ、貞観タイプの大地震は約500年から約1000年の間隔で繰り返し起きており、直近が貞観地震だったとすれば、次の大地震はそう遠くない将来に起こる可能性があるとの結論をまとめた。

一方、大阪市大の原口准教授らは、貞観津波由来と見られる堆積物を発見した大槌湾のほか、宮古や南三陸町志津川、気仙沼など三陸沿岸各地で貞観津波以外の時代の津波堆積物を数多く



陸が海に変わった 陸域観測技術衛星「だいち」が高度約700kmから撮影した福島県南相馬市小高地区の津波襲来前の2月23日の画像（上段）と襲来後の3月19日の画像（下段）。樹木などの緑地（赤色）で覆われた丘陵に囲まれる形で田畑や集落（灰色）の低地があったが、画面右側の太平洋（青色）から津波が押し寄せ、内陸約3kmまで浸水した。この地域では、産総研の調査で貞観津波の堆積物が見つかった。

発見。6000年前～2000年前の堆積層を比較した結果、広域で津波堆積物をもたらす巨大地震が500～700年の間隔で繰り返し起きていた可能性が高いことを明らかにした。東北大学の箕浦教授らも、仙台平野の調査から過去3000年間に3回、大津波がやって来ており、直近のものが貞観津波であるとの研究を発表していた。ただ、地震研究の成果は毎年膨大な数が発表されており、貞観地震関連の報告もそれほど注目されなかった。

仮に今年4月、政府の地震調査研究推進本部が、「地震活動の長期評価」に、産総研などによる貞観地震の研究成果を反映し、国や地元自治体、関連学会

が危機意識をもって巨大津波を想定した対策を講じていたら、事態は変わっていただろう。しかし、地震は待ってくれなかった。

日本海溝付近のプレート境界が大きく動き始めたのは3月9日だったようだ。同日午前11時45分頃、三陸沖でM7.3の海溝型地震が起き、三陸沿岸各地で高さ20～30cm、大船渡では60cmの津波が観測された。震源は、日本海溝沿いの8分割された震源域の1つ「三陸沖南部海溝寄り」(右図の3)。

深さは約10km。太平洋プレートと陸側プレートの境界面にある断層が動いたと考えられる。

この震源域は、約40年周期でM7.5の地震が起きる「宮城県沖」(図の4)の東隣り。日本海溝沿いの地震では珍しいケースだが、「宮城県沖」との連動の可能性が指摘され、その時の地震はM8.0程度まで大きくなると以前から考えられていた。

その2日後の3月11日、今度は同じ「三陸沖南部海溝寄り」でも、9日の地震で動いたプレート境界面のもう少し陸側に近い深さ約24kmのところ

日本海溝沿いにおける海溝型地震の長期発生予測

震源域	想定される地震の規模	30年以内の発生確率	平均発生間隔
1. 三陸沖北部	M8.0前後	0.5～10%	97年程度
2. 三陸沖中部	過去に大地震の記録がないため評価せず		
3. 三陸沖南部海溝寄り	M7.7前後	80～90%	105年程度
4. 宮城県沖	M7.5前後	99%	37年
5. 福島県沖	M7.4前後	7%程度以下	400年以上
6. 茨城県沖	M6.7～7.2	90%程度以上	約21年
7. 房総沖	過去に大地震の記録がないため評価せず		
8. 三陸沖から房総沖の海溝寄り	M8.2前後	20%程度	133年程度

注) 政府の地震調査研究推進本部・地震調査委員会の資料による。

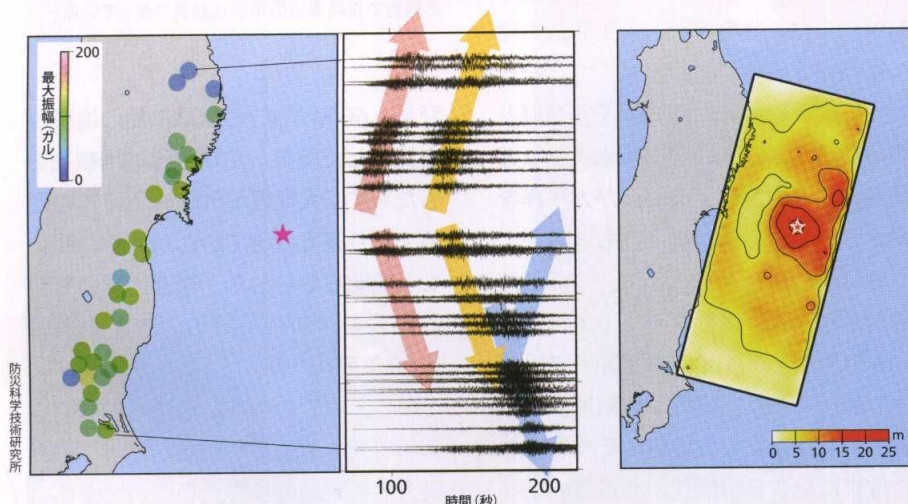
で断層運動が始まった。地震は一般に震源域の断層全体が一気に動くのではなく、どこかが起点になって動き始め、その動きが周囲に及んでいく。3月11日の地震の場合、断層の動きは「三陸沖南部海溝寄り」内部にとどまらず、「宮城県沖」へと広がっていった。ここまでは想定範囲内。しかし、断層の動きは止まることなく、日本海溝沿いを南北方向に向かってどんどん広がっていった。

震源断層の領域や動き方(震源モデル)は観測された地震波や津波、地殻変動からそれぞれ推定される。今回の地震については、震源域は北は「三陸

沖中部」(図の2)から南は「茨城県沖」(図の6)まで、「三陸沖北部から房総沖の海溝寄り」(図の8)も一部含まれる、との見方が大勢を占める。これは産総研が推定した貞観地震より大きい。震源域の長さは南北約500km。新幹線で言えば東京・京都間の距離だ。

これだけの広さの断層が場所によっては最大20m以上ずり上がった。ただ、断層の傾斜はかなり水平に近い角度だったので、動きの大きさの割には海底の隆起は小さかった。それでも例えば、国土地理院が地殻変動のデータから求めた震源モデルによれば、震源域付近の海底では最大約5mの隆起が見積もられ、逆に内陸に近い海底では約2mに達する沈降が起きたと推定された(24ページの図と右ページ下の図)。その高低差は10m近くになる。

これくらいの海底面の変動が短時間で起きると、海水は大きく揺さぶられて大津波が発生し、震源に近い沿岸部や三陸沿岸では高さ10mを超えるまでに立ち上がる。貞観地震が起きた当時、石巻平野や仙台平野などの海岸線は今より1～1.5kmほど内陸側にあ



複数回に分かれて動いた震源断層 防災科学技術研究所が東北地方に展開した観測拠点(左図、揺れの最大加速度を色で表示)でのM9.0の地震の最中の揺れ(上下動成分)を時系列で並べると、震源断層の動きを読み取れる(中央の図)。各観測点の波形は比較しやすいように大きさをそろえた。断層は宮城県沖を起点に(左図中の赤い星印)、2度にわたって南北に向けて動いた(ピンク色と黄色の矢印)。2度目に南方に向かった断層の動きは、福島県沖で新たな断層の動きを誘発し、南北方向に向けて水色の矢印で示すような動きをもたらした。右図は地震波から求めた震源断層の各場所での移動距離。震源付近と、その日本海溝側の領域で大きく動いた。これは国土地理院の西村主任研究官らが地殻変動から求めた歪みの蓄積ペースを示す図の状況(26ページ)と大局的に一致する。

前兆はつかめなかったのか

東日本大地震発生2日前の3月9日正午前、M7.3の地震が三陸沖であった。この地震の意味合いについて、京都大学防災研究所地震予知研究センターの遠田晋次・准教授は「2通りの解釈がある」と話す。1つはこの地震が引き金となって11日のM9.0の大地震が起きたとする見方。もう1つは9日時点で、すでにM9.0の大地震に至る断層の動きが始まっており、その動きの中で9日のM7.3の地震が起きたとする見方だ。どちらが事実に近いのかは、今後の研究課題となる。

ただ、大地震発生前の報道を見る限り、気象庁や大学・研究機関が、3月9日の地震に続いて、より大きな地震が発生する可能性を指摘する動きはなかった。また、東北地方に展開された国の地震観測網と地殻変動観測網のデータは防災科学技術研究所や国土地理院などが常時モニターしているが、結局、巨大地震につながる変動を認識して公表することはなかった。

3月9日午後には、政府の地震調査研究推進本部の地震調査委員会の定例会合が開かれ、2月に各地で起きた地震を評価、宮城県東方の震源域について「2月13日からM5.5の地震を最大とするまとまった地震活動があった」とのコメントを出した。この2月の活動も東日本大地震の前触れだった可能性があ

るが、会合直前の同日昼前に起きたM7.3の地震について、特段のコメントは出されなかった。

防災科学技術研究所の岡田義光理事長は3月25日付で東日本大地震に関する見解を発表した。その中で、東日本大地震が起ころ2日前のM7.3の地震と、大地震と貞観地震との関連について次のようにコメントした。一部抜粋して紹介する。

「(東日本大地震が発生する)2日前の3月9日、宮城県のはるか沖合でM7.3の地震が発生し、翌日のM6.8の地震を含んで活発な余震活動があった。これらの地震活動があった場所は今回の大地震のすぐ隣りであり、結果的にはM9.0の地震の前震活動であったものと考えられる。しかし、通常、M7.3といえば、単独で発生する立派な地震であり、これが、次に続くより巨大な地震につながると思像することは、なかなか困難であったと思われる」

「歴史的には平安時代の869年(貞観11年)に、大きな津波を伴った三陸沖巨大地震があり、多賀城下で溺死1000などの被害があったことは知られていたものの、それが現世に再現する、またはそれを上回る地震が起これとは、ほとんどの人が想像できなかった」

ったが、「私たちがシミュレーションした貞観津波の浸水域と、今回の仙台・石巻平野の津波浸水域はほぼ一致する」(産総研活断層・地震研究センター海溝型地震履歴研究チームの行谷佑一研究員)。平安時代から現在まで地域全体としての隆起・沈降はあまりなかったと考えられるので、今回の津波の波高は貞観津波とほぼ同じとみてよいかもしれない。

誘発される地震

東日本大地震の後、その震源域付近のほか東日本各地でM7級やM6級を含む地震が多数起き、それは4月上旬時点でも続いている。これらの地震は2つのタイプに分けられる。

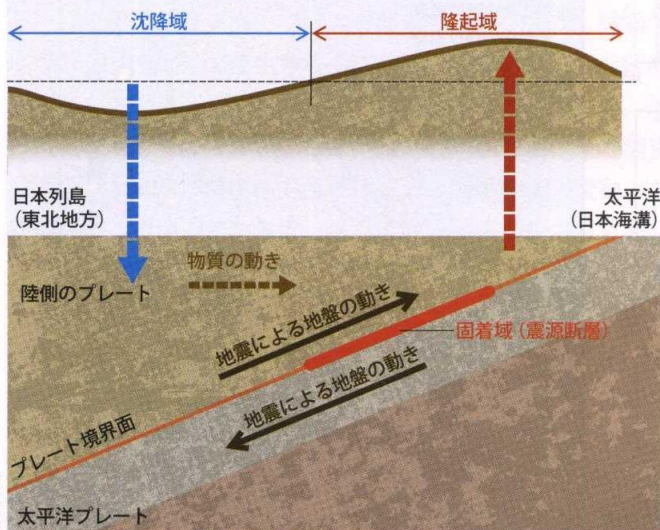
1つは、M9.0の地震を起こした震源断層のうち、一部で歪みが解放されていない領域が残り、そうした場所で時間遅れで断層が動いて起きた地震。いわゆる余震だ。M9.0の本震の20分後に三陸北部沖でM7.4、その10分後

に茨城県沖でM7.7の地震が起きたが、それらがこのタイプの代表だ。

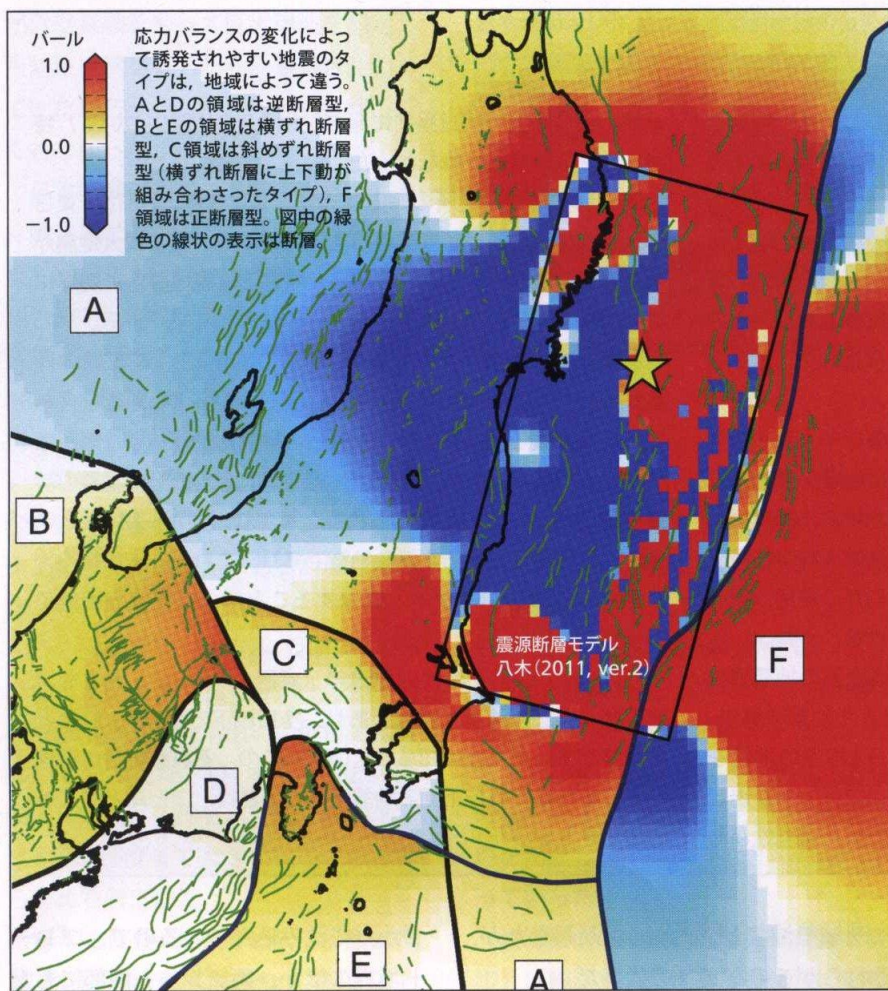
もう1つのタイプは巨大地震の震源断層とは異なる場所で起きている地震。M9.0の大地震によって断層が広域で大きく動いた結果、日本列島の地下で応力バランスが変化し、それによって誘発された地震だ。

太平洋プレートは陸側プレートにぶ

つかって沈み込んでいるので、プレート境界のほか、両プレート内部にも常に応力が加わっている。そのため、プレート内の広域にわたって多数の断層が生じ、そこに歪みが蓄積している。巨大地震によって応力バランスが変化すると、断層によっては応力が減るものもあるが、逆に応力が増して歪みの蓄積が加速されるものもある。応力が



地震による地殻変動
太平洋プレートの沈み込みに伴って固着域で歪みが蓄積される間、陸側プレートの先端(図の右上部分)には、太平洋プレートに引きずり込まれるような力が働く。しかし、固着域がはがれて陸側プレートがずり上がると、同プレートの先端はそれまでの反動で隆起する。その隆起による物質の移動を補うため、陸側プレートの少し内陸側では沈降が起きる。



増した断層の中には、耐えきれずに動き出して地震を起こすものも出てくる。それが誘発地震で、広義の余震とみることもできる。

このタイプに入るのは日本海溝沿いではM9.0の震源断層より北側の三陸沖北部や、南側の房総沖などを震源とする地震。M9.0の大地震発生から40分後、日本海溝よりさらに東側の太平洋プレート内で起きたM7.4の地震もそう。内陸では3月12日に長野県北部で起きたM6.7の地震や、その約50分後に秋田県沖で起きたM6.4の地震、同月15日に静岡県東部で起きたM6.4の地震などが代表的な誘発地震だ。福島・茨城両県にまたがる沿岸部でもかなりの地震が起きているが、M9.0の震源断層より浅いところが震源で、これらも別の断層が誘発されて動いた誘発地震とみられる。

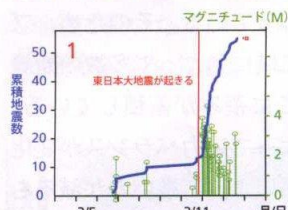
当面は注意が必要

京都大学防災研究所地震予知研究センターの遠田晋次・准教授は各地に存在する断層に、今回の巨大地震が与える影響を評価した（左上の図）。

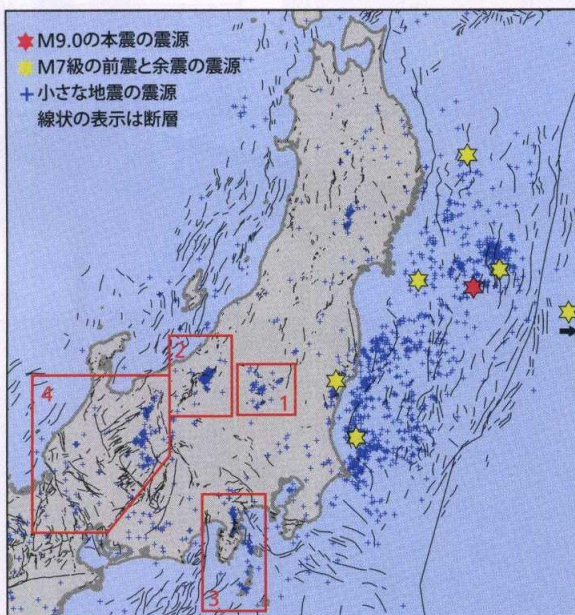
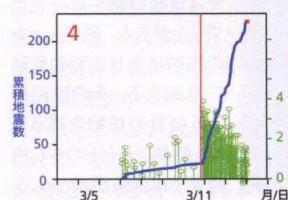
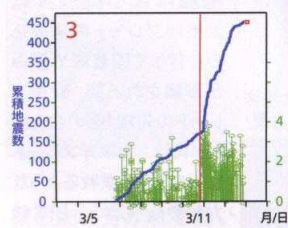
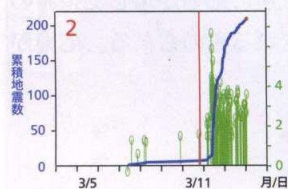
「今回の地震はM9.0と非常に大きかったために、その影響は日本列島の半分以上に及ぶ」（遠田准教授）。日本海溝沿いに南北に延びる巨大地震の震源断層の周囲を見ると、その北側（三陸沖北部）と東側（日本海溝東側）、南側（房総沖）で応力が強まり、逆に西側では弱まる傾向が示された。これは実際に起きた誘発地震の分布域とよく一致する。

注目されるのは、海底下ではなく内陸部にも応力がかなり強まる地域があることだ。それはM9.0の震源断層の北西側に当たる岩手県北部と、震源断層の南西側に当たる関東地方。また、伊豆半島から富士山にかけての地域や中部地方内陸部の糸魚川・静岡構造線のあたりも、ある程度応力が強まる。

そうした地域での地震発生状況をい



どこで誘発地震が起きやすいか M9.0の震源断層（上図の黒枠）が動き応力バランスが変化した（上）。応力が増す赤や黄色の領域では地震が誘発されやすくなり、応力が減る青や水色の領域では地震は起きにくくなる。応力が増す4地域（下図の赤枠の1から4）を例に累積地震数の推移（左の青線グラフ）を見ると、大地震を境に傾きが急になり、発生頻度が高まった。そうした中にはマグニチュード(M)の大きな地震も混ざっている（左の緑線の棒グラフ）。



くつか例にとってみると、M9.0の大地震発生後、発生頻度は高まり、相対的に規模が大きな地震も観測されている（左ページ下のグラフ）。

誘発地震の発生確率は時間とともに小さくなるが、当分の間は注意が必要だ。1896年6月15日に三陸沖北部でM8.2の海溝型地震が発生、沿岸を津波が襲い約2万人の死者が出たが（明治三陸地震）、2カ月半後の同年8月31日に秋田県東部を震源とするM7.2の内陸直下型の「陸羽地震」が発生、約200人が命を落とした。

記憶に新しいところでは、今年2月22日にニュージーランドのクライストチャーチ近郊で起きたM6.3の地震。市内で建物が崩壊、約30人の邦人が犠牲になった。「この地震は昨年9月4日、同市の約40km西方で起きたM7.0の地震で誘発された可能性が高い」と今年3月に現地調査した遠田准教授は話す。もしそうだとしたら、誘発地震発生までの時間差は約半年だ。

ここまで紹介してきた誘発地震はプレート内の断層が動くケース。プレート境界で起こる海溝型地震も誘発される可能性がある。フィリピン海プレートに関連する地震への影響だ。

遠田准教授の分析によると、今回の巨大地震は相模トラフ沿いの震源断層に加わる応力は弱まるが、南海トラフ沿いの方は応力が増す。応力の増加は0.1バール（1バールは約1気圧）。これまでの研究によると0.1バール以上の応力増は地震の発生に影響を及ぼす可能性がある。「影響が出るか出ないかギリギリのところ」（遠田准教授）だ。

ただ、南海トラフ沿いで想定されている3つの海溝型巨大地震（東海地震、東南海地震、南海地震）の震源域では、今回の大地震が起きる前の段階で、すでにかなりの歪みが蓄積されており、近い将来、大地震が起きる可能性が高いと推定されていた。地震調査研究推進本部の資料によると、30年以内の発

評価が難しい関東直下の地震

関東地方直下の地下構造は複雑で諸説あり、東日本大地震に伴う誘発地震の発生確率を見積もるのが難しい。中でも最近発表された1つの新しいモデルが注目されている。それによると、200万～300万年前、海山を乗せた太平洋プレートが銚子沖の日本海溝に沈み込む際、海山が引っかかり、プレートの破断が起きた。破断したプレートの上部は沈み込みから取り残され、関東地方の直下に存在する可能性があるという。陸側プレートと太平洋プレートとの間に、もう1枚、約100km四方のプレート断片（関東フラグメントと呼ばれる）が挟まっているわけだ（下左はその断面、下右は地図上に関東フラグメントの領域を投影したもの）。この場合、関東地方の直下には4つのプレートが存在することになるので、それだけプレート境界面の数が増え、応力バランスの変化が及ぼす影響は複雑になる。



生確率は東海地震が約90%、東南海地震が約70%、南海地震が約60%だ。それほどの応力増でなくても、これら大地震の発生を早める可能性はゼロではない。3月15日に静岡県東部で起きたM6.4の地震（震源は、ほぼ富士山直下）は、想定される東海地震との直接の関連は否定されたが、南海トラフ沿いの震源域は引き続き注意深く監視する必要がある。

一方、相模トラフ沿いで起きる関東地震が30年以内に発生する確率は、もともと2%以下とされており、今回の東日本大地震によってさらに応力が減少する。ただ、関東地方直下は地下構造がよくわかっておらず、本当に地震の発生が減るのかどうか、判断はかなり難しい（上の囲み）。

今回の東日本大地震が貞観地震の再来だとすれば、貞観地震発生後の状況を知ること、今後の推移を考える上で1つの手がかりになる。貞観地震が記された『日本三代実録』をひもとく

と、貞観地震の9年後に関東で大地震が、そしてそのさらに9年後に南海地震が起きている（次ページの記事）。

また貞観地震から2年後、東北地方の日本海側にある鳥海山が噴火した。火山活動は地下の応力バランスの変化とも関連するので、貞観地震が何らかの影響を及ぼした可能性がある。

「3.11」とも呼ばれるようになった東日本大震災。その警鐘は鳴らされていた。ただ、地震学者や行政が全体として、そうした認識を共有するには至っていなかった。地震発生後、全国の地震学者が現地調査を進めている。地震波や地殻変動のデータは様々な角度から解析されており、前兆となった変動が発見されるかもしれない。5月22日から千葉市幕張で始まる日本地球惑星科学連合大会（地震学会や測地学会、地質学会、気象学会などが合同で行う学会発表）では、今回の東日本大地震に関する緊急セッションが開かれ、多数の調査研究が報告される予定だ。■

国史が語る 千年前の大地動乱

東日本大震災と酷似した巨大津波が平安時代前期にあった
同じころ、富士山噴火や西日本を襲う津波地震も起きていた

中島林彦（編集部）

夜、大地が激動して明るく光った。立ってられないほどの揺れで、建物が壊れ、地が裂けて多くの人が命を落とした。海は吼え、大津波が押し寄せ、城下は海となった……。

これは今から1100年以上昔の平安時代前期、陸奥国（東北地方の太平洋側の地域）で起きた貞観地震と、それに伴う大津波の際の模様を書き記した史書からの引用だ。今回の東日本大震災はこの貞観地震、貞観津波の再来とも言われる。

平安時代は長岡京から平安京への遷都（794年）に始まり、源頼朝による鎌倉幕府成立まで約400年続いた。このうち平安前期、860年ころからの四半世紀は「平安」という名に背くような「大地動乱の時代だった」と京都府立大学の坂元義種名誉教授（日本史）は話す。富士山が噴火（864年）、次いで貞観地震（869年）、さらには関東大地震（878年）、南海地震（887年）などの大地震が発生した。

東日本の貞観地震は太平洋プレートの沈み込みに伴う海溝型地震、西日本の南海地震はフィリピン海プレートの沈み込みに伴うやはり海溝型地震で、富士山噴火はフィリピン海プレートの動きと強い結びつきがある。ということは当時、両プレートについて、ほぼ時を同じくして大規模な地殻変動が起きていたことになる。

一方、現代の日本。1995年に西日本で阪神・淡路大震災が起き、それから約16年後の今、私たちは東日本大震災のさなかにある。今後、10～20年を見通せば、東海地震や東南海地震、南海地震が連動して発生、西日本一帯を大津波が襲う可能性が指摘されている。

陸奥国で大地震 平安時代の貞観11年（西暦869年）、陸奥国（東北地方の太平洋側）で大地震があったことを示す『日本三代実録』の記録。

日経サイエンス

る。だとすれば、約1000年前の大地動乱の状況を改めて知ることは、私たちの将来を探る1つの手がかりになる。

この期間は清和、陽成、光孝の三代の天皇の時代（元号では貞観、元慶、仁和）で、史書『日本三代実録』が扱う時代と重なる。同書は『日本書紀』や『続日本紀』などと同様、国家事業として編さんされた国史で、全50巻からなり、901年に成立した。菅原道真も編者の1人となっている。

上に紹介した天変地異はいずれも、この『日本三代実録』の記録による。同書は漢文だが、戦前に刊行された読み下し文の『國文六國史 日本三代実録』（江戸時代の寛文13年に校訂された版に準拠）が復刻されている（『読み下し日本三代実録』戎光祥出版）。平安時代の大地動乱の状況を、同書と理科年表のデータをもとに振り返る。

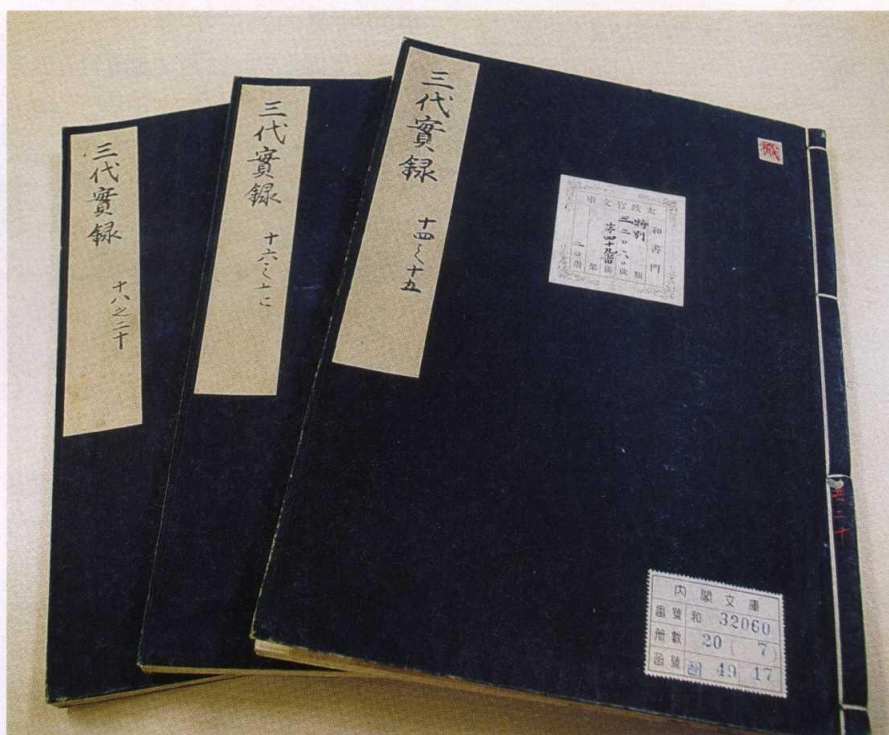
富士山が噴火

『日本三代実録』に記された大地動乱の始まりは863年7月（貞観5年6月）に起きた越中国（富山県）から越後国（新潟県）にかけての大地震。新潟県直江津近海にあったいくつかの小島が壊滅したといわれている。同書には次のように記されている（以下、色をつけた文章は同書からの引用。読みやすさを考慮し、編集部の判断で一部を省略、難字をひらがななどに変えている部分がある）。

越中越後等の国、地大いに震いき。陵谷ところを変え、水泉湧き出で、民の廬舎（家屋）を壊し、圧死するもの多かりき。

翌864年（貞観6年）初夏には富士山が噴火した。当時、山麓には「せの海」という大きな湖があったが、溶岩流が流れ込んでかなりの部分が埋まり、現在の「青木ヶ原」となった。残った2つの水域が西湖と精進湖となった。

甲斐国言いけらく「駿河国、富士の大山に、たちまちに暴火あり。崗



日本三代実録 国立公文書館に所蔵されている江戸時代初期の慶長19年（西暦1614年）の写本。その約60年後の寛文13年（1673年）に刊行された版については、読み下し文の書物が復刻されている。

らん（丘や山）を焼碎し、草木を焦殺し、土をとかし石を流し、本栖、ならびに「せ」の二つの水海を埋む。水熱くして湯のごとく、魚鼈（魚や亀）皆死に、百姓の居宅、海とともに埋もれ、あるいは宅ありて人無きもの、その数記し難し」と。

同年11月、阿蘇山も噴火した。

大宰府言いけらく「肥後国阿蘇郡の神の池（阿蘇山頂のカルデラ湖）、声ありて震い動き、池の水、空中に沸き上がりて東南にそそぎ落つ」と。その3年後の867年3月（貞観9年1月）、阿蘇山の北東にある鶴見岳（山麓には別府温泉がある）が火を噴いた。

大宰府言しけらく「豊後国速見郡鶴見山の頂に三つの池あり。池震動し、その声、雷のごとく、臭い硫黄のごとくにして国内にあまねく満ち、磐石の飛び乱ること上下数なく、石の大なるものは方丈（3m四方）、小なるものは甕のごとく、昼は黒雲蒸し、夜は炎火燃え、沙泥雪のごとく散りて数里に積もりき」と。

同年6月、再び阿蘇山が噴火した。

大宰府言しけらく「肥後国阿蘇郡、神の居せる山嶺、夜怪しき光照射て輝き、朝、震動して崩れること広さ五十丈（約150m）ばかり、長さ二百五十丈（約750m）ばかりなりき」と。

翌868年（貞観10年）からは地震活動が前面に出てくる。8月、播磨国（兵庫県西部）で大地震が起きた。マグニチュード（M）は推定7.0以上。震源断層は、阪神・淡路大震災の震源断層にも近い山崎断層である可能性が指摘されている。内陸直下型地震だ。

播磨国言しけらく「地大いに震動りて、諸郡の官舎、諸定額寺の堂塔、皆ことごとく崩れ倒れき」と。

翌869年1月（貞観10年閏12月）には、播磨国の東隣の摂津国（兵庫県南東部から大阪府北中部）でも地震が起きたことが記されている。その前年の播磨の地震によって誘発された可能性がある。

摂津国解しけらく「地震の後に小さな震え止まず」と。

日本三代実録に見る天変地異の記録

年(西暦)

860

863年(貞観5年)

- 越中国(富山県)から越後国(新潟県)にかけて大地震

864年(貞観6年)

- 富士山が噴火
- 阿蘇山が噴火

867年(貞観9年)

- 豊後国(大分県)別府の鶴見岳が噴火
- 阿蘇山が噴火

868年(貞観10年)

- 播磨国(兵庫県西部)で大地震(M7.0以上)

869年(貞観10~11年)

- 摂津国(兵庫県南東部から大阪府北中部)で地震
- 三陸沖で貞観地震(M8.4以上)
- 肥後国に台風と大地震?

871年(貞観13年)

- 出羽国(山形県と秋田県)の鳥海山が噴火

874年(貞観16年)

- 薩摩国(鹿児島県)の開聞岳が噴火

878年(元慶2年)

- 関東地方で大地震

880年(元慶4年)

- 出雲国(島根県東部)で大地震

881年(元慶4年)

- 京都を含む地域で地震(M6.4)

887年(仁和3年)

- 南海地震(M8.0~8.5)

890

貞観地震の津波被害

そして同年7月13日(貞観11年5月26日)夜、貞観地震が起きた(推定M8.4以上)。『日本三代実録』でもかなり詳しく記載されている。地震発生時、発光現象が観測されたが、こうした現象は実際に起きることが知られている。また、文中で「城下」という記述があるが、これは陸奥国の国府が置かれた多賀城(宮城県多賀城市)だと考えられている。

陸奥国、地大いに震動りて、流光屋のごとく隠映す。人民、叫呼び、伏して起つあたわず、あるいは屋倒れて圧死し、あるいは地裂けて埋もれ死にき。馬牛は驚き走りて、あるいは相昇り踏む。城郭倉庫、門櫓障壁の崩れ覆るもの、その数を知らず。海口は咆吼え、声雷に似、驚濤湧きあがり、浜徊(遡上)して長く漲り、たちまち城下に至る。海を去ること数十里、浩々としてその果てをわきまえず。原野も道路もすべて海となり、船に乗るいとまあらず、山に登るもおよびがたくして溺死者千ばかり。資産も苗稼もほとんど残るもの無かりき。

それから2カ月とたたない同年8月29日(貞観11年7月14日)。今度は肥後国(熊本県)が大災害に襲われた。

肥後国に大風雨あり。瓦を飛ばし樹を抜き、官舎、民居の転倒するもの多く、人畜の圧死するものあげて計うべからず。潮水漲溢(漲りあふれること)して六郡を漂没しき。水引きし後、官物を搜撫せしに、十に五、六を失いき。海より山に至る、その間の田園数百里、陥ちて海となりき。

ここでの記述は「大風雨」とあり、台風のことを示していると考えられる。だが、870年1月23日(貞観11年12月14日)に記載された伊勢神宮への告文(神に告げ奉る文)の中では「地震風水の災い」となっているので「台

風と同時に地震が起き、津波が発生した可能性が高い」(坂元名誉教授)。

仮に肥後国の災害が地震に由来するものとしても、貞観地震の震源域からは1000km以上離れており、直接、誘発された可能性は低い。ただ、『日本三代実録』にはその他の地域で誘発地震が起きていたことを示す記述が、やはり伊勢神宮への告文中に見られる。

陸奥国また常に異なる(異例の規模の)地震の災い言上したり。そのほかの国々も、またすこぶる件の災いありと言上したり。

当時、朝鮮半島の新羅が海賊行為を働くなど対外的にも緊張した状況にあり、内憂外患だった。貞観地震について、朝廷は調査官を派遣、被災者の救済と税の免除などを指示している。

ここまで紹介しただけでも数多くの大規模な自然災害が頻発したことがわかるが、その後も大地震や噴火が相次いだ。貞観地震から2年後の871年5月(貞観13年4月)、出羽国(山形県と秋田県)の鳥海山が噴火する。

出羽国司言しけらく「大物忌の神社、飽海郡の山上にあり。山上に火ありて土石を焼き、また声ありて雷のごとく、山より出る河は泥水泛溢(あふれること)して、その色、青黒く、臭気充滿して人、嗅ぐに耐えず。死魚多く浮き、擁塞(すし詰めになること)して流れず」と。

その3年後の874年(貞観16年)夏、薩摩国(鹿児島県)の開聞岳が噴火した。

大宰府言しけらく「薩摩国開聞神の山頂に火ありて自ずから焼け、煙けぶりて天に満ち、灰砂、雨のごとく、震動の声、百余里に聞こえ、社に近き百姓、震恐して精を失う」と。

関東大地震そして南海地震

878年11月(元慶2年9月)、今度は関東で推定M7.4の大地震が起きた。特に相模国(横浜・川崎を除く神奈川県)と武蔵国(東京都と埼玉県、神奈

令而奉之教令不能自行待誠信而行之斯
文不墜百代可知謹序是日以從五位上菅
野朝臣仿世為次侍從五月戊午朔五日壬
戌停端午之節廿六日祭未陸奥四地大震
動流矢如晝隱映頃久人民叫呼伏不能起
或屋小壓死或地裂埋殪馬牛駭奔或相舁
踏城郭倉庫門櫓墻壁頽落顛覆不知其數
海口哮吼声似雷建武瀋漏湖河廻漲長忽

至城下去海數十百里浩々不辨其涯溪原
野道路惣為滄溟垂舩不遑登山難及溺死
者十計資產苗稼殆無子遺罕六月亥朔十
一日丁酉月次神今食祭遣親王公卿於神
祇官奉祭十五日辛丑不雨而雷大宰府言
去月廿二日夜新羅海賊乘艦二艘來博多
津掠奪豐前國年貢絹綿即時逃竄發兵追
逐不獲賊十七日癸卯遣使者於伊弉大神

貞観津波を読む 『日本三代実録』（慶長19年の写本）に記された貞観11年5月26日の部分の全文。
右ページの右から4行目の中程から始まり、左ページの3行目まで。内容は本文を参照。

川県北東部）の被害が大きかった。

関東諸国の地、大震裂し、相模武蔵を特に最もはなはだしとなす。その後、五、六日震動止まず、公私の屋舎、一つとして全きもの無く、あるいは地、窪陷（陥没）して往還通ぜず、百姓の圧死はあげて記すべからず。

その2年後の880年11月（元慶4年10月）、今度は出雲国（島根県東部）で地震が発生した（推定M7.0）。

出雲国言しけらく「地、大震動し、境内の神社、仏寺、官舎、及び百姓の居廬（家屋）、あるいは転倒し、あるいは傾倚（傾くこと）し、損傷せしもの多し」と。

翌881年1月（元慶4年12月）、京都などで地震（推定M6.4）があり、

天皇が住まう宮城にも被害が出た。

地大震動し、夜より朝に至るまで十六度震いき。大極殿（天皇が政務を執る正殿）の西北隅の堅壇（壁）、長さ各々八間（約15m）破裂し、宮城の垣（えん）しょう（壁）、京師（都のこと）の廬舎、頽損（損壊）するものところどころはなはだ多かりき。

そして887年8月（仁和3年7月）、貞観地震級の大地震が今度は西日本を襲った。現代の日本でも近い将来の発生が懸念されている南海地震（推定M8.0～8.5）だ。京都も激しく揺れた。

地大震動し、数刻を経歴して震ることなお止まず。天皇、仁寿殿を出でて紫宸殿の南庭に御し、大蔵省

に命じて七丈（約21m）の“あく”（テント張りの仮小屋）二つを立てて御在所となしたまいき。諸司の倉屋および東西京の廬舎、ところどころ転覆し、圧殺せらるるもの多く、あるいは失神して頓死するものありき。五畿内七道（北海道を除く日本全国）の諸国も同日に大震ありて官舎多く損じ、海潮、陸に漲りて溺死者あけて計るべからず。そのうち摂津国、最もはなはだしかりき。

その3年後も京都は地震で被害を受けるが、以後40年以上、大地震の記録は途絶える。火山は915年の十和田カルデラの噴火を除くと不活発で、都は平穏に時が過ぎていくことになる。■

科学者の思考停止が 惨事を生んだ

福島第1原子力発電所で深刻な事態が続いている
科学はなぜ、これを防げなかったのか

滝 順一 (日本経済新聞論説委員)

これは「科学の失敗」だろうか。東日本大震災と福島第1原子力発電所の事故は、日本の科学や技術の専門家集団にとって手痛い失態だったことは間違いない。

昨年の福島民報(2010年11月26日付)にこんな記事が載っていた。

「県原子力防災訓練は25、26日の両日、東京電力福島第1原子力発電所が立地する大熊、双葉両町などで行われている。……最終日は原子炉の冷却機能が失われた状況から始まり、住民避難や初期被ばく医療訓練のほか、第

1原発では火災を想定した消火訓練などを繰り広げる」

訓練は、送電線の故障で福島第1原発が外部電源を喪失したと想定、非常用ディーゼル発電機の駆動にも失敗して、冷却機能を失った原子炉内で核燃料棒が損傷し放射性物質が压力容器から漏れ出すというシナリオで実施された。このことは、原発の全電源喪失という事態が関係者にとって、決して想定外ではなかったことを物語る。

訓練のシナリオは、事故発生2日目に非常用ディーゼルの一部が復旧して原子炉への注水が再開、放射性物質も格納容器内からは漏れず、事故は収束することになっている。

2006年3月1日、衆議院予算委員会の分科会で、吉井英勝議員(共産党)は、津波で海水が取水できなくなった場合、原発が冷却機能を失う危険性を指摘した。「最悪の場合は炉心溶融と起こり得るということを念頭に置いて対策を考えなきゃいけない」。

原子力安全・保安院の広瀬研吉院長(当時)はこう答えた。「必要な海水を一時的に取水できない場合におきまし

ても、原子炉隔離時冷却系等によりまして原子炉を冷却できる対策が講じられております」。

隔離時冷却系は停電でも動く装置だ。原子炉の余熱で発生する蒸気を使いタービンを動かし注水が続ける。今回の事故でもこのシステムは動くには動いた。しかし数時間で止まり、冷却水不足から1～3号機の压力容器で次々と核燃料が過熱し破損、水素爆発につながった。

停電や取水不能も想定外ではなかった。想定してはいたのだが、想定が甘かった。停電や取水不能が長く続くとは考えていなかった。しかし、現実には、冷却不足の事態が連鎖的に爆発や火災などを引き起こし、事故が



福島第1原発事故の経過

3月 11日	地震発生で緊急自動停止
12日	1号機原子炉建屋が水素爆発
14日	3号機原子炉建屋が水素爆発
15日	2号機原子炉建屋で爆発音 4号機原子炉建屋の損傷確認
26日	放水口付近の海水から高濃度の放射性ヨウ素を検出
28日	敷地内の土壌(21日と22日に採取)から放射性プルトニウム検出
4月 2日	取水口付近のピット(立て坑)から放射性物質を含む水が海へ漏水
4日	低レベル汚染水の水への放出を開始
5日	2号機取水口付近の海水から国の基準の約750万倍の放射性ヨウ素などを検出
12日	原発事故の深刻度の国際評価をチェルノブイリ事故と同じレベル7に引き上げ



放出続く放射性物質

被災後の福島第1原子力発電所。左から順に、建屋が吹き飛んで鉄骨の骨組みが露わになった4号機と3号機、右端の建屋は2号機。東京電力の依頼を受け、航空写真撮影会社のエア・フォート・サービス（新潟県妙高市）が無人機を使って3月24日に撮影した。いずれの原子力施設からも放射性物質の放出が続いている。

拡大、複雑化して手がつけられなくなったのだ。

これは「想定内」か「想定外」といふ単純な議論ではない。原発の設計や安全管理にかかわる人たちが自らの想定の上になたて、どこまで深く考え抜いたか、危機への想像力の問題のように思える。あえていえば、危機感の乏しさの問題かもしれない。

誤っていた「割り切り」

極端なケースまで想定して完全無欠な施設をつくらうとしたら、膨大な投資が必要になり、そもそも施設がつかれない。班目春樹・原子力安全委員長はかつてそうした趣旨の発言をしていたらしい。「割り切りが要る」と。工

学的な立場からは正しい指摘だ。ただし、どこで割り切るかは別の問題だ。

福島第2原発や東北電力の女川原発が、地震と津波を生き延びたことを考えれば、福島第1原発は割り切り方が間違っていたのだろう。健全な想像力や危機意識を鈍らせる、おごりや油断があったに違いない。

例えば、海水くみ上げポンプが海岸近くに無防備で設置してある事実などは、そんな実態を想像させる。リスクについて様々な指摘をうけながらも、「考えを突き詰め問題解決の方法を考えなかった」（松浦祥二郎・元原子力安全委員長）のだ。

地震予知連絡会の島崎邦彦会長は東日本太平洋沖のマグニチュード（M）

9級地震についてこう語っている。「ここはスルスルと滑って地震が起きない場所だと思い込んでいた。ところが実際には岩板（プレート）が強くくっつき、長いことひずみを蓄え、それが一気に壊れて大地震になった」（2011年3月28日付日本経済新聞朝刊）。

プレート境界で長期間にわたって大きな地震が起きない場合、2つの想定があり得る。非常に強固にプレート同士がくっついているか、固着せず常に滑っているか、どちらかだ。地震学の世界では、東日本沖のプレート境界は滑り型だと考えていたと島崎会長は話す。その結果、ここで起きる大地震は、何度も繰り返されてきたM7級の宮城沖地震が最大級で、それ以上は考えに

本当に想定外だったのか？

2年前に指摘されていた巨大地震の可能性

大津波で原子炉の冷却装置が機能不全に陥った福島第1原子力発電所。それは本当に想定外の事態だったのか？ 2年前、経済産業省の審議会で貞観津波の調査研究を踏まえ同原発の耐震性に対する懸念が東京電力側に伝えられていた。

2009年6月と同年7月、経済産業省の総合資源エネルギー調査会の会合で、福島第1・第2原子力発電所の耐震安全性が議論された。原発の耐震指針は1995年の阪神・淡路大震災や耐震技術の進歩を踏まえて全面的に見直され、政府の原子力安全委員会は06年、耐震指針を25年ぶりに本格改訂した。これを受け、東京電力は新指針に照らして福島第1・第2原発の安全性を再評価、その中間報告をまとめていた。総合資源エネルギー調査会の会合では、その報告書案が審議された。委員として出席した産業技術総合研究所活断層・地震研究センターの岡村行信センター長は報告書案に貞観津波の調査研究が反映されていないことを指摘、再検討の必要があることをかなり強く求めた。公開議事録に残された岡村氏の発言を2つ紹介する。

「ご存知だと思いますが、ここ（福島県沿岸）では貞観の津波というか、貞観の地震というものがあって、西暦869年で

したか、少なくとも津波に関しては、（中間報告で検討されている）塩屋崎沖地震とはまったく比べものにならない非常にでかいものが来ているということはもうわかっている、その調査結果も出ていると思うんですが、（報告書案が）それにまったく触れられていないところは、どうしてなのかということをお聴きしたいんです」「先ほどの繰り返しになりますけれども、海溝型地震で、塩屋崎のマグニチュード7.36程度で、これで妥当だと判断してしまうのは、やはりまだ早いのではないか」（編集部注：今回の地震はマグニチュード9.0だった）

結局、これらの会合の後、中間報告書案が若干の修正をされた後、承認され、東京電力は最終報告案のとりまとめに入ったが、その間、貞観地震級の大地震・大津波に対して特段の対策が取られることはなかった。そして原発は大津波に襲われた。福島第1・第2原発の安全性再評価に関する最終報告は現時点でもまとまっていない。改訂された耐震指針についても津波に対する配慮が十分だったのか疑問が残る。津波に関する記述は指針書の最後の項目「地震随伴事象に関する考慮」の最後に、「極めてまれではあるが発生する可能性がある」と想定することが適切な津波によっても、施設の安全機能が重大な影響を受けるおそれがないこと」との一文が記載されているにとどまる。また、福島第1原発が受けた地震の揺れも耐震指針の想定を超えている。指針見直しは避けられない情勢になっている。（編集部）

くいとされてきた。

現実には違った。M9級を引き起こす巨大な固着域が存在し、エネルギーをため込んでいた。滑り型であることを明確に実証するには、プレートの動きを詳細に把握できる海底のGPS（全球測位システム）が必要だが、まだ設置は少なく、滑りの実態が把握できていたわけではない。地震学者は「ここは滑り型である」との思い込みにとらわれていた。

政府の地震調査研究推進本部はM7級の宮城沖地震を警告していた。それが結果的に想定地震の規模を過小評価し、東北地方太平洋岸の防災対策を不十分な水準にとどめてしまった側面は否定できないだろう。

科学者や技術者の推測がはずれ、太鼓判があてにならないという事態はこれまでも繰り返されてきた。

1994年1月、米ロサンゼルスを襲ったノースリッジ地震で倒壊した高速

道路をみて、日本の土木工学者は「こんなことは日本では起きない」と言った。その1年後に神戸で高速道路が横倒しになった。1986年4月の旧ソ連のチェルノブイリ原発事故は運転員の安全意識の低さが大惨事を呼んだ。日本の原子力関係者は「そんなことは日本では起きない」と言ったが、99年に茨城県東海村の核燃料会社JCOで、核物質をバケツで扱うずさんな作業から従業員2人が亡くなり、周辺住民が避難する大事故が起きた。

科学と社会の距離をどうとるか

科学技術が誤るとき、2つのパターンがありそうだ。ひとつは、科学が政策推進の道具に利用され、科学的事実に基づく健全な議論ができない場合だ。日本の科学研究の多くは国家資金で支えられる。政策協力への圧力や偏りが人知れず研究の現場に浸透する。政策協力が一義的にいけないことだとは思

わないが、健全な議論を阻んだり安全確保が甘くなったりしては、結果として国民の信頼を裏切ることになる。

もうひとつは、扱うのが非常に困難で、不確実性がつきまとう問題について、科学技術が社会的なコミットメント（約束）をする場合だ。科学者の探求心は常に、未踏で不確実性が高い難問への挑戦を志向する。そうした心意気は後押ししたいが、成果の社会還元を安請け合いすると、不確実性の高い情報を社会に与え判断を誤らせかねない。これも結果的に国民の信任を失う。

では不確実なことは何も公表しないのがよいのか。それも正しくない。社会と科学の情報伝達を工夫し、社会が科学研究を賢く利用する道を科学者と市民がともに模索する必要がある。震災であらわになった判断の誤りやおごりを、科学技術全体への不信にしている。そのために科学者・技術者がいま何をするかが問われている。■

Nature 特別翻訳記事

予測できない放射線リスク

科学者たちは福島県で発生した低線量被曝の
長期的影響を予測しようと努めている

G. D. ザカイブ (サイエンスライター)

福島第一原子力発電所からの放射能漏れが人体に及ぼす影響につき、確かなことが1つだけある。その誘因となった3月11日の巨大地震や大津波がもたらした壊滅的な被害に比べれば、小さなことだということである。それでも、専門家たちは全世界の放射線レベルを追跡して、この事故についてもっとよく理解し、健康に及ぼしうる影響を評価しようとしている。

原子力発電所から放出された放射性物質を含む蒸気や粒子は周囲に広まり、さらに偏西風に乗って太平洋をわたっていった。福島県から放出された放射性同位元素を米国でいち早く検出した観測所の1つである「パシフィック・ノースウェスト国立研究所の核物理学者ボイヤー (Ted Bowyer) は「非常に大きいプルーム (放射性雲) です」と言う。

彼はまた、米国に到達した放射性ヨウ素、セシウム、テルル、キセノン、ランタンは微量で、通常自然放射線レベルよりもはるかに低く、健康に害をなすおそれはないと付け加える。ただ、検出された放射性同位元素の中には半減期が短いものもあるため、少なくともその一部は、過熱した使用済み核燃料プールからではなく、原子炉格納容器の破損箇所から出てきたものだと考えられるという。

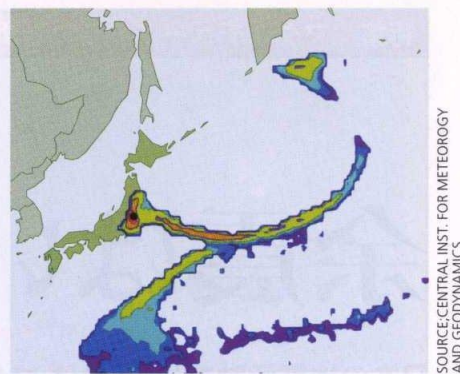
日本政府は、福島県と近隣の県で、原子力発電所の近くの海と食品および

上水道の放射能汚染が確認されたと報告した。原乳や、ホウレンソウなどの葉物野菜のほか、水道水でも放射性ヨウ素131とセシウム137が検出されており、摂取許容レベルを上回るサンプルもあったという。

マサチューセッツ工科大学 (MIT) 環境健康安全室放射能防御プログラム副主任のマッカーシー (William McCarthy) によると、そうした安全基準は、問題の食品を長期にわたり摂取することを前提にして策定されているという。「慎重を期するなら、その食品を食べないことです。食べてしまったからといって、ただちに健康に悪影響が出るわけではありません」。

日本の当局は、福島県と茨城県産の原乳を出荷制限とし、近隣の栃木県と群馬県産の一部の農産物についても同様の措置をとった。短期的に問題になるのはヨウ素131である。この物質は甲状腺がんを引き起こすおそれがある。しかし、ヨウ素131の半減期は8日なので、放出さえ止められれば、ほんの数カ月で環境からほとんど除去される。一方、同じく発がん性のあるセシウム137の半減期は30年で、はるかに長く残留する。

ノースカロライナ大学チャペルヒル校の疫学者ウィング (Steve Wing) は、微量であっても環境に放射能が残留していると、長期的には重大な問題を引き起こすおそれがあると指摘する。「原



風で運ばれる放射性物質 オーストリア気象学地球力学中央研究所のシミュレーションによる。

子力発電所から遠くなれば1人当たりの被曝量は少なくてすみますが、被曝する人の数ははるかに多くなります」。

MITの核工学者で放射線の専門家であるヤンチ (Jacquelyn Yanch) は、今回の原発事故が人体にどのような影響を及ぼすかを語るには時期尚早だと考えている。「このような状況のリスク評価は、行われていないからです。どれだけ被曝したら危険なのか、まだわかっていないのです」。

専門家たちは、福島第1原子力発電所の事故現場で戦っている作業員には、なんらかの長期間影響が出るおそれがあると認めている。日本政府は、緊急作業を続けさせるために、原発作業員の許容被曝量の上限を年間100ミリシーベルトから250ミリシーベルトまで引き上げた。これは、米国の放射線業務従事者の年間許容被曝量の5倍である。米国立衛生研究所 (NIH) は、250ミリシーベルトという被曝量を、放射線宿酔 (嘔吐、倦怠感、めまい、食欲不振など、二日酔いに似た放射線障害) の最初の症状が出現する被曝量の下限に当たると考えている。

(翻訳: 三枝小夜子)

(Nature 特別翻訳記事を許諾を得て転載)

著者 Gwyneth Dickey Zakaib
ネイチャー NEWS インターン・ライター。

原題名 Radiation risks unknown
(Nature vol. 471, page 419)

余震はいつ止むのか？

日本の地震活動をどう見ればよいか、不透明さが増している

4月7日にはマグニチュード7.1の大きな余震が発生した

余震はいつ止むのか、そして将来は……

SCIENTIFIC AMERICANがカリフォルニア工科大学の地震学者ヒートンに聞いた

語り：T. ヒートン（カリフォルニア工科大学）

聞き手：K. ハーモン（SCIENTIFIC AMERICAN オンラインニュース・リポーター）

度重なる余震が日本を揺さぶり続けている。4月7日午後11時32分に起きたM7.1の余震はこれまででも最大級だったが、幸い大きな被害の報告はなく、発生直後に発令された津波警報は2時間以内に解除された。

日本は環太平洋火山帯に位置しており、地震が多発する。しかし3月11日に起きたM9.0の地震は同国の記録に残るなかで最大のものだった。そして、地震にかねて備えてきたこの国にあっても、多くの地震学者はこれほどの巨大地震は予想していなかった。

しかし東日本大震災は壊滅的な津波を引き起こし、現在も放射能漏れが続く東京電力福島第1原子力発電所を破壊しただけでなく、この地域の断層帯の本性に関する多くの推定をも揺るがしている。

日本の地面はいつ落ち着きを取り戻すのか？ 科学的見通しはいまだに不確定だ。しかしカリフォルニア工科大学地震研究所所長のヒートン（Thomas Heaton）は、同地域でこれから起こりそうな事象と、M7.1の余震がなぜ驚くに当たらないかを説明

してくれた。以下はインタビューを編集したものだ。

——3月11日のM9.0の大地震以降、かなり大きな余震がいくつかありました。強い余震がこれほど長く続くのは異例では？

いや、ごく普通だ。余震に関するこれまでの統計データでは、本震よりもマグニチュードの値が1小さな余震が平均で1回、マグニチュードが2小さな余震が同10回起きている。だから、これまでの経過はM9の地震においては典型的なものだ。ただし、これは平均的な統計の話であって、地震というものはどれもみなそれぞれ違う。

——4月7日のM7.1を上回る大きな余震が起こる可能性は？

平均すると、地震の20に1つは「前震」であるので、3月に起こったM9の大地震が1つの前震である可能性は確かにある。しかし、以降の地震発生状況を見ると、その可能性はそう大きくはない。

ただし、日本海溝は世界で最も活発

な沈み込み帯の1つであり、今回の一連の経過は非常に独特なものだといえる。歴史的に見ると、日本海溝での地震活動は断層による地震活動に比べると少なかった。同海溝での地震活動が少なかったので、日本の地震学者はここを地震の危険が比較的小さな地域として分類していた。これに対し、私を含む米欧の地震学者の幾人かは疑問を抱いていた。

ここのプレートが過去1000年にわたって固着してきたとすれば、膨大な量の歪みが蓄積していると考えられる。そして、今回の地震はそれを解放したといえるほど大きなものではないだろう。そこで疑問が残る。つまり、残りの断層すべりがどこで生じるかだ。

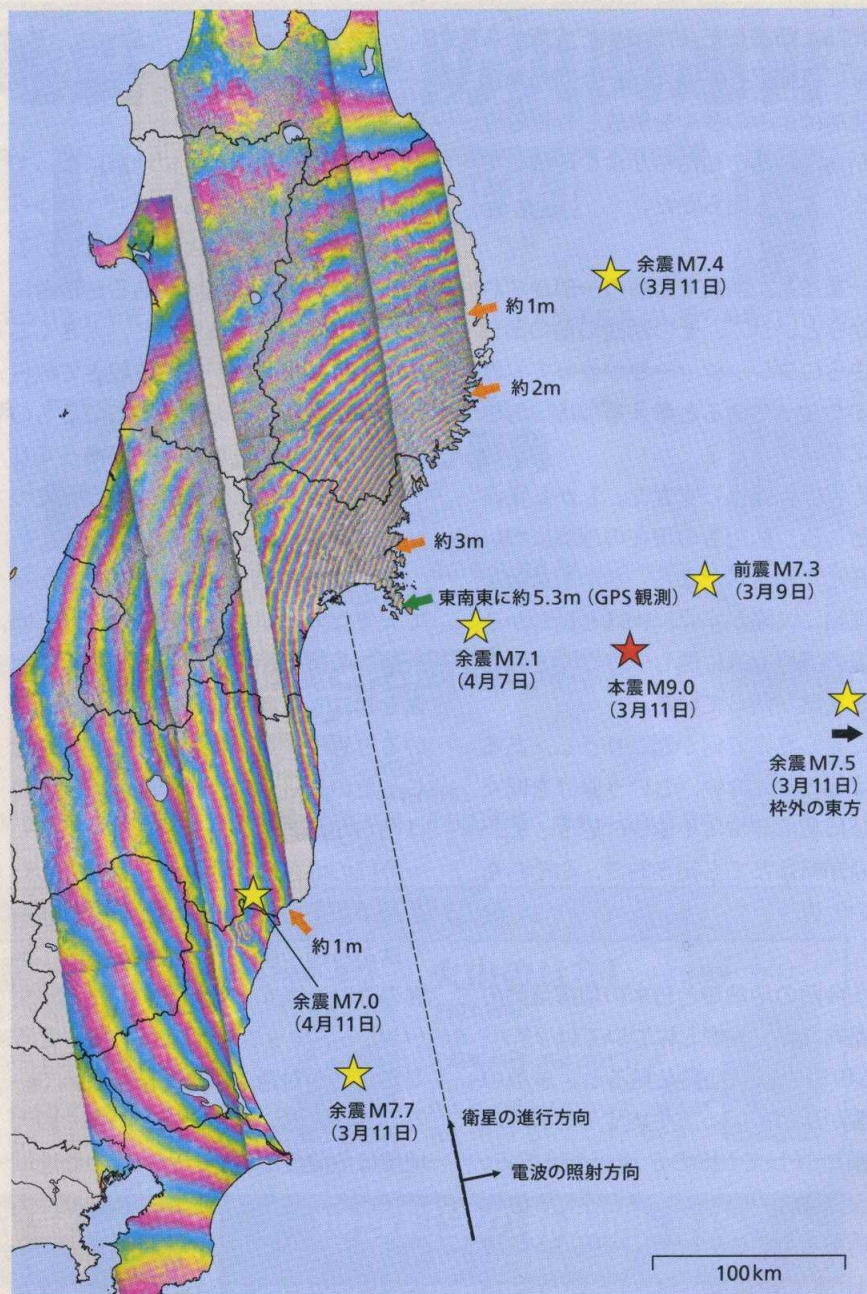
——どこまでが余震で、どこからが新たな地震として区別されるのでしょうか。発生時期や規模による線引きがあるのですか？

余震と呼ぶか別の地震と呼ぶか、実のところ決まりはない。どの地震も、その地域に新たな地震を起こす引き金になりがちだ。余震と呼ぶのをどの時

虹色の縞模様が物語る 広域地殻変動

高度約700kmを飛ぶ地球観測技術衛星「だいち」は進行方向斜め下の東日本に向けて電波を照射し、地表からの反射波をとらえて距離をレーダー測定している。3月11日の大地震で広域の地殻変動が起き、衛星と地表との距離が変化した。大地震前後のレーダー観測データを重ね合わせて（干渉させて）画像処理すると、地表の各場所の距離変化に応じて虹色の縞模様が生まれる（電波は斜め下方に照射されるので、ここでいう「距離」は、衛星の高度を三角形の高さに取った時の斜辺に相当）。この縞模様とGPS観測点のデータを組み合わせれば、同観測点以外の場所の地殻変動を見積もれる。

今回の地殻変動については、大地震の震源に最も近い牡鹿半島（緑の矢印）で一番大きく、そこから遠ざかるにつれて小さくなる。そのため虹色の縞模様は牡鹿半島あたりを中心に大きな円弧を描く。表示されている縞模様のさらに外側の地域が、大地震の前後で距離の変位量がほぼゼロの地域で、牡鹿半島に向かって縞の数が増えるほど変位量が増す（オレンジ色の矢印は変位量の目安）。右の画像は宇宙航空研究開発機構（JAXA）のデータを国土地理院が分析してまとめたもの。図中の星印はM9.0の大地震と前震、大きな余震の震源を表す。（編集部）



点でやめるか、意見はいろいろある。いまでもミズーリ州近辺で小さな地震が起ると、それを1812年の地震（訳注：M8級の大地震が3回立て続けに発生）の余震だという人もいるほどだ。

——もしこの地域でもっと大きな余震が起きたら、やはり津波が発生するでしょうか？

M9の地震は常にどこかに大津波を引き起こすことがわかっている。大地

震で大量の海水が動くのはほぼ確実だが、津波にとってカギとなるのは動いた水の量だ。マグニチュードの値が1上がるごとに、それは30倍になる。だからM8とM9では大違いであり、M9なら巨大津波の発生は確実だ。

米国の人々にとって今回の地震の大きな意味は、海溝型の巨大地震が先進国で起こるとどうなるかを実際に目の当たりにしたことだ。米国太平洋岸北西部でさらに大きな地震が起こりうる

確かな証拠がある。M9の大地震が起きたら、当該地域の人々すべてに甚大な影響が及ぶ。津波、地上施設の損壊、その後も長く続く大きな余震——非常に深刻な事態になる。

——日本周辺の地震活動に関してわかったことをもとに、次にどこで地震が起きそうか予測できますか？

今回の断層すべりのほとんどは日本海溝の北部で起こったとみられる。そ

して、少なくとも過去20年は、南部と北部は固着してきたようだ。だから、非常に単純化していえば、今回の地震で北部は歪みの多くを解放しただろう。だが、この系を私たちがよく理解していないことも明らかだ。

——すると、地震で断層の一部がずれたからといって、その断層の他の部分にさらにプレッシャーがかかってずれやすくなっていると考えるのは、あまりに単純すぎる？

それは単純化しすぎだ。しかし正直なところ、私たちの現在の理解について詳しく検討したなら、標準的な数々の理論に欠陥がすぐに山ほど見つかる。地震のプロセスに関してはたくさんの大きな謎が残っている。

こうした系で何が起ころうる、あるいは起ころえない、という論評を聞くたびに私は非常に不愉快に思う。私たちの知識はとても初歩的で、おそらく甘いと思う。

——今回の地震域と日本の地震活動の短期的な将来見通しについては？

M9級の他の地震を見ると、多数の余震が起きている。平均するとM9の地震に対してM8の余震が1回ある。今回は実は本震のデータの中にM8の地震が1つ隠れていた。余震はM7級が10回、M6級が100回といった具合に起こるだろう。それが典型的なパターンだ。

2004年のスマトラ島沖大地震(M8.8)では1カ月ほど後にM8.7の地震が起きたほか、これまでに多数のM8級地震がスマトラ島地震よりも南の場所で発生してきた。ある意味、この一帯は数年間、火がついた状態にあった。だから、今回もことが終了したといえる科学的な理由はない。概していえば、M9の地震は最大のものであり、普通は別の場所で起こることはないだろう。しかし、それさえもわから

ないというのが、本当のところだ。

——今回の震源域に関して未解決の大問題は？

この領域の断層が主に地震によってずれているのか、あるいはもっとゆっくりしたプロセスによってずれているのかという大きな疑問がある。後者には常に少しずつ滑るものと、大きくてゆっくりした地震が時おり起きて数日から数週間続くと考えられているものがある。主に地震なのか主にゆっくりしたプロセスによるのか、この点については何もわかっていない。

この領域では過去1000年にわたって大きな地震がなかったのも、多くの人はこの領域が定常滑りかゆっくり地震を起こしてきたに違いないと考えていると思う。しかし今回の大地震が起これば、その見方が誤りだったのは明らかだ。

今回の地震は、地震から身を守るための手法にも疑問を投げかけた。私たちはある種の確率的な地図を使って地震の危険を表すことが多い。この地図(ハザードマップ)に基づいて、どう対応するか対策の優先順位を決めている。しかしあいにく、近年の多くの大地震は危険度が低いとされていた地域で起きてきた。私にとってこれは、興味深い統計の問題だ。次にどこでどんな規模の戦争が起こるか、あるいは次にどこでどのくらいの規模の感染症流行が起こるかを予測しようとするのに似ている。現在私たちが使っているのは心臓発作のリスクモデルのようなものだが、予測すべき問題は鳥インフルエンザの流行に近い(喫煙や年齢に基づく心臓発作モデルは通用しない)。

——巨大地震とそれに続く大きな余震。この種の出来事に技術者や地震学者が備える方法はありますか？

本当に巨大地震はまれなので、そのときの地面の揺れがどうで、それに

耐える建物を造るにはこうすればよい、というふうに技術者が語るすべはない。M9巨大地震の地上観測データ記録が得られつつあるのは今回が初めてであり、私たちはみなそれに注目している。

しかし、データが入手できた段階で誰もが「さあ、これでM9巨大地震がどんなものかわかった」と言いはしないかと、私は少し気がかりに思っている。1つの例を見たことにはなるが、まだすべてを見たわけではないのだ。今回、破壊のほとんどは陸地から遠く離れたはるか海底で起こった。私の見方では、この距離のおかげでダメージはこれでも実に軽くてすんだ。

20年間固着していた断層の一部が陸に近づいたように見える。この部分は建物が多く立っている仙台から房総半島に至る領域にずっと近い。

私たちの目から見ても一連の出来事で本当に興味深かった部分は、日本が緊急地震速報システムの運用を始めていたことだ。どこかが揺れ始めたのをキャッチして、強い揺れが到達する前に人々に警報する(48ページ、R. アレン「揺れる前に警報 緊急地震速報システム」参照)。このシステムは今回の地震で実際にうまく働いた。仙台では警報から揺れ到来までに10秒、東京では1分近い猶予時間が生じた。

警告を与えるいくつかの新手段がすでにあるということ、そして今後何かが起きようとしているかについていくらかの考えがあるということは、以前にはなかった新しい状況だ。(編集部 訳)

注) 4月7日の余震について、米国地質調査所は現地時間の同日昼、マグニチュードを当初発表の7.4から7.1に引き下げた。元のブログ記事はそれ以前に公開されたため、一問一答部分ではこの余震をM7.4とした対話を現在もそのまま残しているが、この翻訳ではすべて7.1に書き換えた。

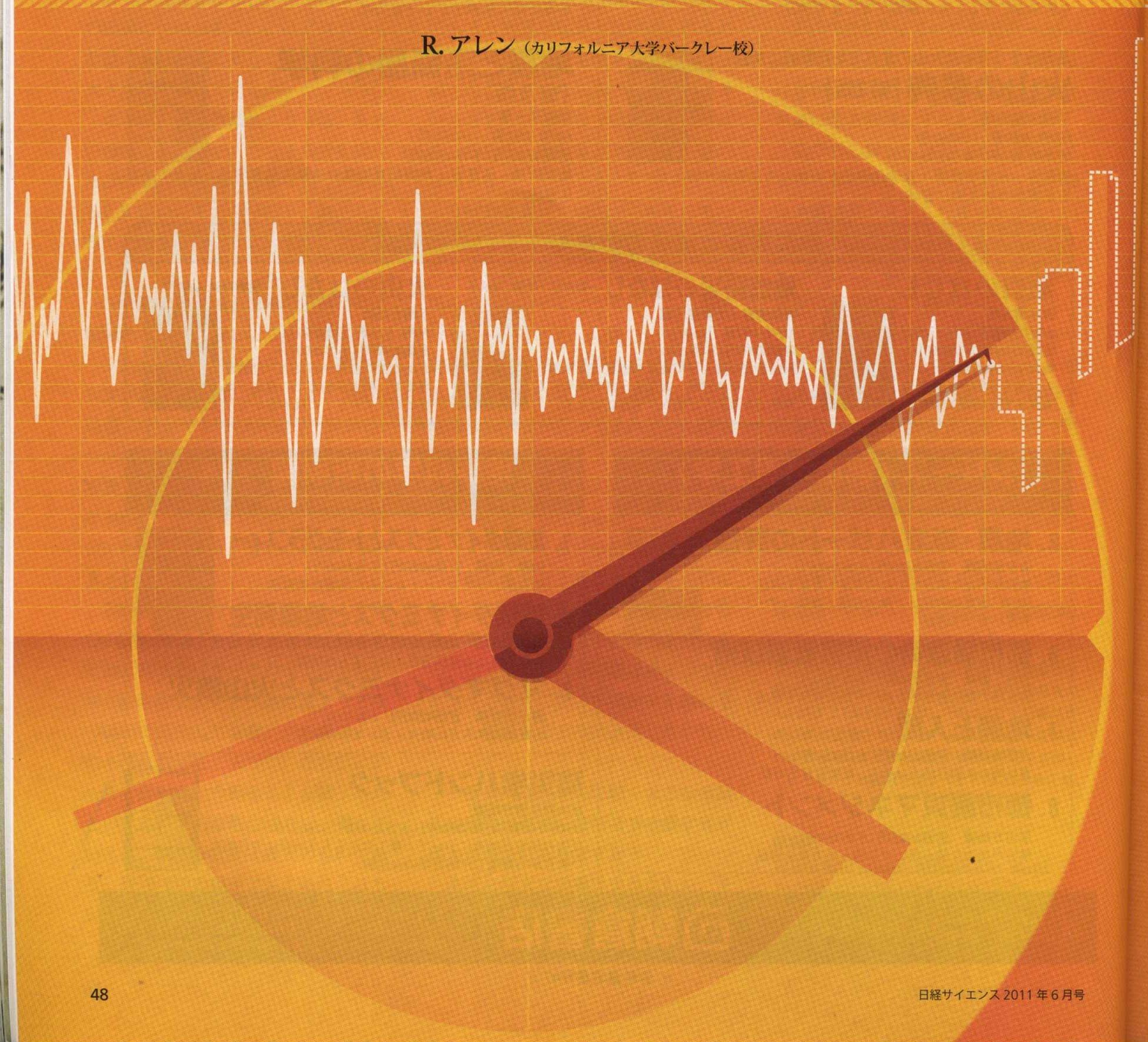
原題名

When Will Japan's Aftershocks Stop?
(SCIENTIFIC AMERICAN on line, Ask the Experts, April 7, 2011)

揺れる前に警報 緊急地震速報システム

強い揺れが襲う前に警報を発する緊急地震速報システム
多くの命を救うのに十分な時間的猶予が生じる

R. アレン (カリフォルニア大学バークレー校)



この記事は、訳者による53ページの囲み記事部分を除き、3月11日の東日本大震災〔平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震〕よりも前に執筆された。

数ある自然災害のなかで、地震は何の前触れもなく襲来するという点で最悪のものだ。1989年10月17日にサンフランシスコ・ベイエリアを襲ったロムプリータ地震について見てみよう。午後5時4分、サンフランシスコ・ジャイアンツとオークランド・アスレックスがその日のワールドシリーズを前にウォーミングアップを行っていたまさにその時、サンアンドレアス断層の突然のずれが同地域を揺るがした。

オークランドとサンフランシスコを結ぶベイブリッジと2階建て高速道路が3.5kmにわたって崩壊し、60人以上が亡くなった。

科学者たちは長年にわたり、大地震がいつどこを襲うかを正確に予知して人々を安全な場所に避難させられるような何らかのシグナル（かすかでも前兆となるもの）を探し求めてきた。しかし数十年を費やしても見つからず、いまや多くの地震学者はそうしたシグ

ナルの存在そのものを疑っている。

だが、すべての望みが絶たれたわけではない。現在、地震の揺れがどれほど強くどのように広がるかを、最初の小さな揺れを検出してから数秒以内に、ある程度の確実性をもって予測できるようになっている。新たな科学と最新の通信技術を統合することにより、関係当局は危険が及ぶ場所にいる人々に地震発生を知らせ、強い揺れが到達するまで20～30秒ほどの猶予時間を与えられるだろう。これはたいした時間には思えないかもしれないが、発電所や鉄道網に運転停止の指令を伝え、



KEY CONCEPTS

実行可能な最善の策

- 緊急地震速報を提供する地震観測網は地震の最初の小さな揺れを検出し、人々に警報する。この警報によって、揺れの到達まで数十秒の猶予時間が得られる。
- ほとんどのシステムは、地震波が2段階でやってくるという事実を利用している。速く伝わって突然の揺れをもたらすP波と、遅れてくるが被害の大部分を引き起こすS波の2つだ。
- 地震観測網を整備すれば、震央を素早く特定し、地震のマグニチュードを精度よく推定して、誤報を減らすことができる。
- この種の地震観測網は日本をはじめ世界中のいくつかの国ですでに導入されている。米国ではカリフォルニア州に整備する計画があり、同州全域で個人と企業を守ることになるだろう。

エレベーターのドアを自動で開放し、消防士に警戒態勢を取らせるには十分な時間だ。

ロマプリータ地震は、険しいサンタクルーズ山脈のふもと、サンフランシスコ湾の南側で発生した。地面が揺れ始めてから約100km離れたサンフランシスコとオークランドに破壊的な揺れが到達するまでには30秒以上あった。死者の80%以上は両市にいた人々だったが、もし当時、緊急地震速報システムが存在していたら、同地域の中心部に対して、おそらく20秒前に警報を出せただろう。

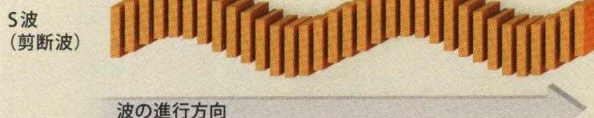
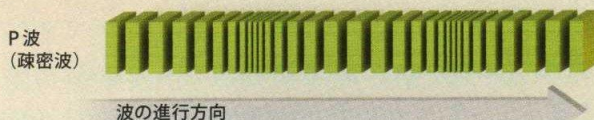
これは列車を減速・停止させ、着陸態勢に入っている飛行機に“上空待機”命令を出し、交通信号を赤に変えて車が橋やトンネルなどの危険な構造物に侵入するのを防ぐためには十分な時間だ。危険な作業環境で働いている人たちは安全な場所に移動できたり、精密機器を待機モードに切り替えて破損を減らすこともできたり。学童もオフィス勤務者も、揺れが到達する前に机の下に隠れて身を守ることができる。破壊的な揺れを乗り切る準備ができたはずなのだ。

こうした緊急地震速報の仕組みはメキシコや台湾、トルコ、ルーマニアなど世界各国に導入されている。なかでも日本のシステムは最も進んでおり、多くのテレビ局とラジオ局、いくつかの携帯電話事業者、商店街や公共施設の館内放送を通して警報を発する全国規模のシステムだ。稼働開始から3年半の間に、すでに10数回の地震において広域の警報が出された。工場や学校、列車、自動車のなかにいる人々に、わずかながらもあるが貴重な準備時間を与えた。そのうえ、警報後にパニックや高速道路事故が起こった例は皆無だ。米国はこれら諸国に後れを取っているが、カリフォルニア州では緊急地震速報システムの導入試験が始まっており、遠からず、断層がひしめく同州をカバ

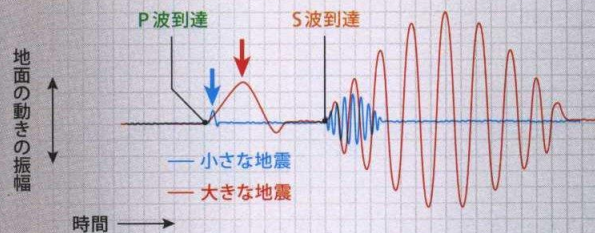
警報がもたらす貴重な猶予時間

緊急地震速報システムは地震の最初の小さな揺れを検出し、強い揺れがやってくる前に警報を発する。カリフォルニア州への導入が提案されている「シェイク・アラート」は同州全域をカバーするデジタル地震観測網（右ページ上図）を使い、人口の多い地域に地震波が到達する1分以上前に警報する（時間的猶予は震央の位置によって変わってくる）。これにより、企業や住民、公共機関は揺れに備えることができる（右ページ下図）。

緊急地震速報の科学



▲どんな地震も2種類の地震波を生じる。P波は音波（空気の疎密波）のように、地盤を圧縮しながら進んでいく。伝播速度は速いが、大きな被害はもたらさない。これに続くS波は、海の波のように岩盤を上下左右に変形しながら進む。地震の破壊力の大半はS波による。



▲何百もの小さな地震が毎日起こっている。緊急地震速報システムはP波の波形を調べることによって、そのなかから大地震を特定する。小さな地震のP波は短くて鋭いパルス（青の矢印）であるのに対して、大地震の場合は振幅が大きく周期の長い揺れとなる（赤の矢印）。



▲地震観測網からの信号を組み合わせ、大地震を見極め、震央を突き止める。その後、S波がまだ達していないところに向けて、警報を電氣的に送る。揺れを検出した地震計の数が多いほど、マグニチュードと震央の予測は高精度になる。

カリフォルニアの「シェイク・アラート」計画

カリフォルニア州は有

数の地震多発地域だが、まだ基本的な緊急地震速報システムすらない。大学と州、連邦政府機関が連携し、地震計を増設して同州全域をカバーする地震観測網を整備する計画を提案している。費用はたったの8000万ドル。ひとたび大地震が起こったときの被害と比較すれば取るに足らず、被害抑制効果を考えれば十分におつりがる。

地震の危険性



●稼働中の地震計

●提案中の地震計

下図の範囲

通勤電車
自動的に
減速・停止し、
脱線を防ぐ

工場
操業を停止し、
機械設備を安全
モードに切り替える

建設現場
危険な場所から
退避するよう
作業員に警報

オークランド

サン
フランシスコ

フリーモント

サンマテオ

サンノゼ

強い揺れまでの猶予時間

10秒

警報よりも
強い揺れが先に到達

ギルロイ

サンタクルーズ

サリナス

震央

**携帯電話や
パソコン**
その場に適した警告
情報を表示する

エレベーター
高層ビルでは
最寄り階に停止して
ドアを開ける

警報発信 地震観測網で強い揺れを検出したら、警報が発信される。図の例はサンフランシスコ・ベイエリアの南に位置するサンアンドレアス断層が破壊して強い揺れが生じた場合だ。人口密集地域の多くに、強い揺れに備えるのに30秒以上の猶予を与えることができると思われる。

学校
警告音を流し、
生徒が机の下に身を
隠せるようにする

飛行機
空港への着陸態勢に
入っている飛行機に
“上空待機”の
指令を発信

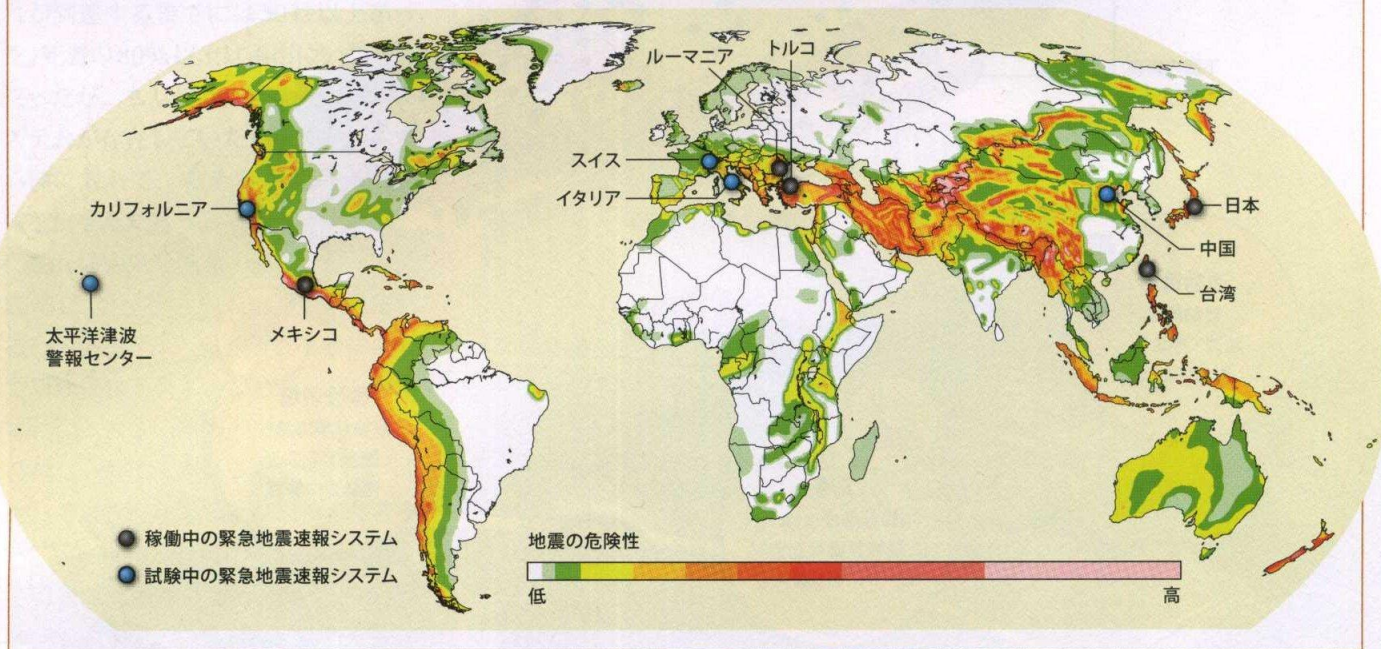
世界の地震速報システム

現在、世界で5つの緊急地震速報システムが導入され、それぞれは導入国の地勢に合わせた設計となっている。メキシコの場合、太平洋沿岸に設置した地震計によって沖合のプレート沈み込み帯で発生した地震を検出し、メキシコシティなどに警報を発する。同市は揺れを増幅する泥岩の上にあり、2000万人が住む大都市だ。ルーマニアのシステムも同様に、首都ブカレ

ストの南西約150kmのカルパチア山脈で発生した地震を、揺れの到達前に首都に警報するよう設計されている。

これに対し、日本は全国どこで地震が起こってもおかしくない。6000人以上が死亡した1995年の阪神大震災以降、日本は2000カ所以上に地震計を増設し、全国をカバーする体制を整えた。現在、世界で最も先進的なシステムだ。

【訳注】下図で稼働中としている5つのシステムのうち、一般向けに警報を提供しているのはメキシコと日本だけである。



一する本格的規模のシステムに発展するはずだ。

カリフォルニアは次の大地震がいつ起こってもおかしくない。いま警報システムを構築すれば、多くの命を救うことができる。

地震波から警報まで

私たちの足元の地面は動いている。プレートは地球の表面を漂っており、大陸どうしが互いにこすれ合ったり、高速道路での玉突き事故のように衝突したりする。地殻（私たちが住んでいる地球の最外層）は弾性的だが、それにも限度がある。地殻はプレート境界で曲げられるが、耐えられなくなるまで歪みが大きくなるとズルッとすべり、それまで何十年にもわたって蓄えられてきたエネルギーが地殻を引き裂いて、経路上のあらゆるものを揺らす。

実は何百という地震が毎日起こっている。幸運にもほとんどはごく小規模なものなので、高感度地震計の助けがなければ私たちはそれらの発生に決して気づかない。こうした地震は断層面がほんの1～2mずれるだけなので、人間には揺れを感じられないのだ。マグニチュード5.0の地震では、断層面が1.5～3kmほどずれる。この程度の揺れなら人間も容易に感じられるが、現代の建物は耐えることができる。マグニチュード8.0となると、ずれは断層面に沿って数百kmに及び、ずれが地表に達することもある。この場合、建物は真っ二つになるだろう。

過去に地震が起きてから歪みがどれだけ蓄積しているかを調べた結果、地殻の多くの領域がずれる寸前であることがわかっている。地下の断層の細かな構造も破壊核（地下で実際にずれ始

める部分）の形成とずれの広がりの方々に重要な役割を演じているが、こうした断層構造を直接採取することはできないため、ほとんどの地震学者は大地震の発生を数時間あるいは数日前に予測するような直前予知システムは不可能だと考えている。当面、実行可能な最善策は、大地震を素早く検出して警報を発することだ。

これを行ううえで、地震のいくつかの固有の特徴が役に立つ。私たちが感じる地震の揺れは、実は段階的にやってくる。地殻の破壊によるエネルギーは「P波」と「S波」という2つの形で地中を伝わる（50ページの囲み参照）。両方の波とも断層面を同時に出発するが、その点以外は大きく異なる。P波は音波と同様の疎密波であり、比較的速いスピードで伝わるが、あまり大きな力はない。地震の際、P波は突

然の縦方向の衝撃として感じられる。

一方のS波は海の波と似ており、比較のゆっくりと伝わり、エネルギーの大半を含んでいて、強い揺れを引き起こす。地面は水平方向と垂直方向の両方に動き、建物全体が波に翻弄される小舟のように激しく揺れることがある。

さらに、すべての波が似たような形をしているわけではない。地震のずれ領域のサイズによって、波形は異なってくる。小さなずれ領域から放射されたP波の場合、振幅は比較的小さく、周波数は高い。つまり、小さいが鋭いパルスになる。大きな地震では断層に沿って大きな領域がずれ、ずれ方も大きいので、P波の振幅はより大きく、周波数は低くなる。小鳥のさえずりと熊の咆哮の違いのようなものだ。

1台の地震計でこの情報をとらえるだけでも、地震のマグニチュードを推定可能だ。振幅が大きく周波数の低いP波を検出したら、警報を出せばよい。この単独地震計による手法は、震央近くの地域に警報を発する最速の方法だ。しかし、地震のずれの特徴はさまざまなうえ（例えばマグニチュード5.0の地震すべてが同様のP波を出すわけではない）、地震計直下の堆積物によってもP波の形は変わる。こうしたばらつきがあると、地震が起きていないのに警報を発してしまう「誤報」と、被害をもたらす地震が進行中なのに警報が出ない「見逃し」の危険がともに増してしまう。

誤報と見逃しを減らすには、互いに数km離れた場所に設置した複数の地震計でとらえた波形記録を組み合わせる。それぞれの地震計の下にある堆積物は異なるだろうから、各地震計によるマグニチュード推定値の平均を求めることができる。この手法には、各地震計でとらえたデータをセンターに伝送して統合するような地震観測網が必要だ。ただ、データの伝送と解析には数秒の時間がかかり、その1秒ごとに

被害をもたらすS波は3～5km伝わっていく。

最善の方法は、単独観測点と地震観測網に基づく手法を組み合わせることだ。そうすれば、震央に近い地域に素早く警報を発するとともに、より離れた地域には揺れが到達する数十秒前に

警報を出せる可能性がある。

どんなシステムも、正確さと警報の早さは二律背反にならざるをえない。地震観測網がより多くのデータを集めれば、予測の精度は上がるだろうが、一方では警報を出すのがやや遅れて揺れるまでの猶予時間は短くなるだろう。

地震波検出から数秒の勝負

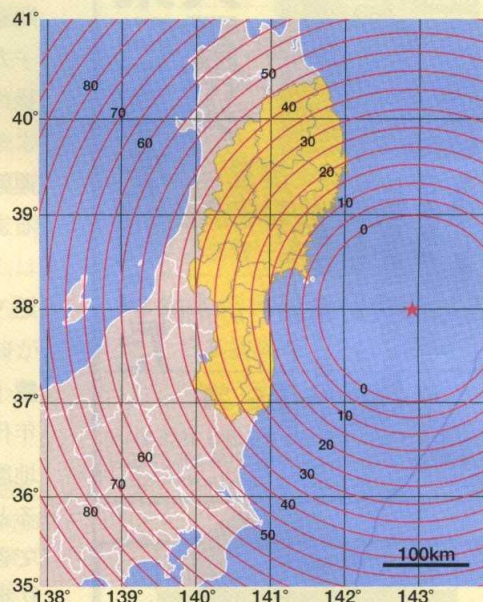
3月11日14時46分に発生した「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」において、気象庁は地震波検出の5.4秒後に緊急地震速報（予報）を、また8.6秒後に宮城県と岩手県の全域、および福島県、山形県、秋田県の一部に対して緊急地震速報（警報）を発表した（右の図）。気仙沼市、仙台市に警報が出されてから強い揺れが届くまでにはそれぞれ11秒、23秒以上の猶予時間があつた。

またその後、余震域からやや離れた地域で発生した長野県北部の地震（最大震度6強）、静岡県東部の地震（最大震度6強）についても、システムは想定通りの機能を発揮した。実際に、テレビやラジオ、携帯電話、情報端末などで緊急地震速報を受信した後に強い揺れを感じ、身の安全を図った事例が多数見られた。

今回のようにマグニチュードが9.0にも達する地震の場合、断層のずれる動きは一瞬では終わらない。三陸沖から茨城県沖に達する、長さ約500km、幅約200kmの広さを持つ断層面が160秒あまりかけてずれたのだ。一方、緊急地震速報は地震波の検出から数秒以内に予報や警報を出す必要がある。つまり、断層がずれ始め、強い揺れが予測された時点で、まだ地震現象の全容が把握できない状況下で警報を出すことになる。

その結果、今回は震源から離れた関東地域に対し、揺れの強さを実際よりも小さく見積もることになった。また本震後、地震観測点が停電や通信回線の途絶により一時的に使用できなくなったこと、及び、広大な断層域周辺で発生する数多くの余震、さらにその後に発生した長野県北部、静岡県東部の地震とその余震によって個々の地震の分離が困難になり、震源やマグニチュードを不適切に推定する事例が見られた。この結果、揺れの予測精度の低下や本来発表すべきでない予報や警報を発表するなどの状況が数日にわたって続いた。今後、M9クラスの地震発生時の統報の提供や地震多発時の地震識別について改善を図っていきたい。

（東田進也＝55ページの記者紹介参照）



警報が届いてから 東北地方太平洋沖地震で緊急地震速報（警報）が発表された地域を黄色で示した。同心円は強い揺れが最初にくるまでの猶予時間（秒、理論値）を示す。

nature ダイジェスト

書店、Amazon、Fujisan にて
毎月 25日 発売 定価 680 円



5月号 東日本を襲った 大震災

3月11日に発生した巨大地震は、未曾有の大災害となった。大津波は福島第一原発も襲い、日本最悪の原発事故となっていました。



**地震は科学研究も
揺るがす**

第二の地球を探して

悩める女性科学者

第三の光受容細胞

多数の科学ニュースを掲載！

定期購読がお得です！

7,980 円 / 年 (送料無料)

Nature ダイジェストオンライン版
バックナンバー全号を閲覧できます

お申し込みは、専用ウェブサイトから

www.naturejpn.com/NS

警報の結果、揺れ到達の50秒前に地下鉄を停止でき 学校では計画通りに避難が行われた

利用者によっては、猶予時間を確保できるなら誤報や見逃しを許容するかもしれない。例えば学校は生徒を避難させられるよう、できるだけ早い警報を望むだろう。誤報が年に数回程度なら、皆が何をすべきかを知るのに必要な定期避難訓練ともなる。これに対し、原子力発電所の場合は、原子炉を止める操作はたった1秒で可能だが、それによって莫大な経済的損失が生じるため、運転管理者は強い揺れが確実だとわかるまでは待とうとするだろう。

近くへ、そして遠くまで

いろいろな緊急地震速報システムが数十年前から整備されてきた。1960年代、日本の技術者は新幹線の軌道に地震計を設置した。強い揺れを検出すると警報を発し、運転者が列車を減速できるようにしたのだ。その後、より広域に展開した地震観測網を用いて、非常に強い揺れが到達する前に警報が届くように中継するシステムが考案された。メキシコの緊急地震速報システムは、海岸線の近くで起こった地震を検出して、メキシコシティなどに警報を送るように設計されている。2000万人以上が住むこの成熟した首都は、地震波を増幅する湖底堆積物の上にある。海岸からメキシコシティまでは距離があるため、警報から揺れの到達まで60秒以上の猶予時間が生じうる。

メキシコのシステムは1993年に稼働した。その2年後、初の試練となる地震が発生した。1995年10月9日、マンザニーロ沖をマグニチュード8.0の地震が襲ったのだ。システムは揺れを検出し、メキシコシティのテレビ局とラジオ局、そして米国の気象ラジオと同様の専用無線システムを通じて警報を放送した。この結果、揺れ到達の

50秒前に地下鉄を停止でき、学校では計画通りに避難が行われた。

2007年に稼働し始めた日本のシステムは、個人向けに情報を送る新技術フルに使っている。警報はテレビやラジオだけでなく、一般家庭やオフィス、学校に設置された専用受信機を通じて放送される。パソコン画面上のポップアップに震央の位置と地震波の伝播状況をリアルタイムで示す地図が表示される。あとどれくらいで揺れ始めるかをタイマーがカウントダウン表示し、予想震度を示す。携帯電話事業者は特徴的な警告音とともに、すべての携帯電話にテキストメッセージの警告を一斉同報する。原子力発電所や鉄道、空港、危険物を扱う工場などは、それぞれの必要に合わせた専用の通信システムを使っている。

日本の例からは、緊急地震速報が生命ばかりでなく、企業の利益を守ることともわかる。2003年に仙台付近で発生した2つの地震の際に、沖電気工業の半導体工場は火災と設備損傷、生産性低下によって1500万ドルを超える損失を被った。同工場は地震発生後にそれぞれ13日間と17日間の操業停止を余儀なくされた。そこで同社は60万ドルを投じて工場を改良し、警報システムを導入。その後、以前と同様の2つの地震に見舞われたが、損失はわずか20万ドル、操業停止はそれぞれ4.5日と3.5日ですんだ。

カリフォルニアの挑戦

カリフォルニアは地震の国だ。2006年に大学と州、連邦政府機関がコンソーシアムを組織し、「シェイク・アラート」と呼ぶ緊急地震速報システムの開発に乗り出した。現時点で約400の地震計を結ぶ試験システムがで

きており、近く少数のユーザー向けに警報の送信を試験的に始める予定だ。最終的には、震央付近を対象にした単独の地震計による最速の警報だけでなく、広範囲の地震観測網による遠隔地への警報も提供する計画である。すべて順調にいけば、最初にP波を検出してから5秒以内に警報を出せるようになるだろう。

しかし、カリフォルニアが日本のような包括的な地震観測網でカバーされるまでには、まだまだ長い道のりがある。前述した400の地震観測点はサンフランシスコ湾とロサンゼルス都市圏周辺に集中しており、至る所に隙間が残っている(51ページの囲み参照)。カリフォルニア州の住人のほとんどがこの2地域に生活しているとはいえ、こうした空白域のせいでP波を複数地点で検出するまでに長い時間がかかる。このため、警報の発信が遅れ、予測精度も低下する。日本では地震観測点が国土全体にわたって約25kmごとに設置されている。同様の間隔でカリフォルニアに地震計を配置すれば、誤報と見逃しを減らし、猶予時間の長い高性能のシステムが実現するだろう。

こうした緊急地震速報システムは、

日本で行われているように、多くの人が毎日持ち歩いている携帯機器を活用することになるだろう。予想震度や揺れ始めまでの時間、そしておそらくは「机の下に隠れる」、「安全な場所に移動せよ」といった簡単な指示を、個々の携帯電話に表示することになる。一方、広域のインフラを持つ大組織の場合は、地震波の伝播状況と当該地域全体にわたる揺れの分布をリアルタイムで地図表示するなど、より詳しい情報を求めるニーズが強いだろう。

大地震の潜在的な危険と比較すれば、そうしたシステムはささやかな投資で実現できる。既存設備の改修と地震観測点を100カ所新設するのに、総額8000万ドルあればよい。システムは5年以内に完成し、稼働できるだろう。そして6年後、作ってよかったと皆が納得するに違いない。

訳者 東田進也(つかだ・しんや)

翻訳・執筆時は気象庁地震火山部地震津波監視課調査官(4月から福岡管区気象台技術部地震情報官)。専門は地震学。1995年に東京大学大学院を修了、気象庁に入庁。鉄道総合技術研究所、東京大学地震研究所などにも出向し、緊急地震速報システムの開発にかかわってきた。共著書に『地震予知の科学』(東京大学出版会、2007年)などがある。理学博士。



著者 Richard Allen

カリフォルニア大学バークレー校の地球物理学の教授で、同大学地震研究所の副所長。現在、小規模の緊急地震速報システムをテスト中で、それをカリフォルニア州全域に拡張することを目指している。

原題名

Seconds Before the Big One (SCIENTIFIC AMERICAN April 2011)

もっと知るには…

NEW METHODS AND APPLICATIONS OF EARTHQUAKE EARLY WARNING. Edited by R. M. Allen, O. Kamigaichi and P. Gasparini. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, No. 5; 2009.

EARTHQUAKE EARLY WARNING. Edited by Richard M. Allen, Paolo Gasparini and Osamu Kamigaichi. *Seismological Research Letters*, Vol. 80, No. 5; September/October 2009.

THE STATUS OF EARTHQUAKE EARLY WARNING AROUND THE WORLD: AN INTRODUCTORY OVERVIEW. Richard M. Allen et al. in *Seismological Research Letters*, Vol. 80, No. 5, pages 682–693; September/October 2009.

カリフォルニア統合地震ネットワーク(CISN)のウェブサイト www.cisn.org

著者が東日本大震災発生後にSCIENTIFIC AMERICANのブログに寄稿した記事 THE ESSENTIAL LESSON FROM THE JAPAN EARTHQUAKE FOR THE U.S.がwww.scientificamerican.com/blog/post.cfm?id=the-japan-earthquakes-warning-to-th-2011-03-12に。

魚附林の地球環境学

親潮・オホーツク海を育むアムール川

白岩孝行 著 2415 円

生老病死のエコロジー

チベット・ヒマラヤに生きる

奥宮清人 編 3150 円

生態史から読み解く 環・境・学

なわばりとつながりの知

秋道智彌 著 2730 円

ぼくの生物学講義

人間を知る手がかり

日高敏隆 著 1890 円

ご好評につき
重版出来

生物多様性

子どもたちにどう伝えるか?

阿部健一 編 2310 円

生物多様性はなぜ大切か?

日高敏隆 編 2415 円

図書
出版

昭和堂

〒606-8224 京都市左京区北白川京大農学部前
TEL075-706-8818/FAX075-706-8878 *価格税込
<http://www.kyoto-gakujutsu.co.jp/showado/>

日経サイエンスの本

森羅万象を探る 科学の絵本

ーパワーズ オブ テンー

POWERS OF TEN

宇宙・人間・素粒子をめぐる

大きさの旅



C・イームズ他編著
村上陽一郎・公子訳
●4,077円(税込)

極大の宇宙から極小の素粒子へ、 10^{25} mから 10^{-16} mまで42段階の大きさを巡る科学の旅。スケールが一つ違うと何が見えてくるだろう。多くの美しい絵と写真によって興味深く紹介。

発行 日経サイエンス社

発売 日本経済新聞出版社

立ち直る力のメカニズム

大災害や近親者の死によって心に傷を負っても
多くの人はそれぞれの対処法を見つけて立ち直る
人間には苦境を乗り越える力が備わっているようだ

G. スティックス (SCIENTIFIC AMERICAN 編集部)

2009年秋、ジャーニン・ブラウン・ミラー (Jeannine Brown Miller) はニューヨーク州のナイアガラ滝を母親と一緒に訪れた後、夫と車で自宅に向かっていた。ナイアガラ大学の校門にさしかかったとき、警察が道路を封鎖しているところに出くわした。救急車のライトが点滅しているのが見えた。

ミラーは17歳になる息子のジョナサンが車で外出していたことを思い出した。何となく嫌な予感がして車を止め、その場にいた救急隊員に、事故車のナンバープレートは「J Mill」ではないかと尋ねた。数分後、警官と牧師が近づいてきた。それを見ただけで、彼女には警官たちが何を言おうとしているのかがわかってしまった。

彼女の息子は、何らかの病気のために運転中に突然死し、立木に衝突したのだ。彼女は打ちのめされた。

息子の死の直後から、時間はとても

ゆっくり進むようになった。「最初の1週間は、まるで永遠のように思えた」と彼女は述懐する。「時間は1時間ではなく、1分ずつ過ぎていった。朝、目覚めても、目の前のこと以外何も考えられなかった」。

しかし多くの人の助けと、彼女自身の決意が、回復を後押しした。ジョナサンが通っていたルイストン・ポーター高校の友だち500人が通夜と葬儀に出席してジョナサンの死を悼んでくれ、そのことが彼女の苦しみを和らげた。

KEY CONCEPTS

悲嘆から回復する力は誰にでも

- 大災害や親しい人の死といった苦しみ乗り越える力は、遺伝的・家庭的に恵まれた一部のみにしか備わっていないと思われてきた。しかし最近の研究から、かなり多くの人が苦しい状況から立ち直る力を持っていることがわかってきた。
- 人生最悪の事態の後にとる反応は人によってさまざま。中には健全とは言いがたい反応をする人もいるが、これらの行為は最終的に、困難を克服する上で役立っているようだ。
- ストレスに対抗する力を強化する予防的プログラムが米国の学校や軍で始まっている。このような介入が果たして本当に役に立つのか、懸念する声も上がっている。



悲しみを乗り越えて 息子ジョナサンが衝突した木に触れるミラー。2009年に息子を失ったが、その悲しみを乗り越えた。

また信仰していたカトリックの教えも慰めになった。2週間後、ミラーは人材コンサルタントとしての仕事に復帰した。事故の2カ月後には、事故当日の朝に息子と一緒に朝食をとったレストランを訪れることもできた。

地域の仲間からの支援は、途切れることなく続いた。高校の卒業式ではジョナサンが追悼され、「J Mill」ことジョナサンのフェイスブックのサイトも前と同じように更新された。地元のコーヒーショップには、彼がフットボールチームでつけていた番号にちなんで「76」という名のコーヒーがメニューに加わった。それから1年。ミラーはいまも毎日涙を流しているが、何とか耐える方法も見いだしている。

家族の死、テロによる攻撃、恐ろしい病気の流行、戦闘時の身も凍るほどの恐怖など、最悪の出来事に遭遇すると、人は大きなショックを受け、自分を見失ってしまう。しかし、このような恐ろしい出来事の影響を調べた神経科学・心理学的研究から、驚くべきことがわかった。悲劇を体験した人のほとんどは、間もなく回復し始め、最終的には心の傷がほとんどなくなるのだ。人生で時に生じる最悪の事態に対する驚異的な回復力を、多くの人は生まれながらに持っている。

心理学者が以前から用いてきたアンケート調査に加え、脳画像や遺伝子データベースを利用した研究によって、この回復力の背景にある一連のメカニ

ズムが解明され始めている。精神的に衝撃を受けると、生化学的、遺伝的、行動的な因子がともに働いて心のバランスを取り戻すのだ。研究者はこの精神的な強さの源を突き止めようとしている。それがわかれば、生来の回復機能がうまく働かない場合の対処法も見つかるだろう。

一方で学校や軍、企業は、遺伝子や神経伝達物質などについての全体像が得られるのを待たずに、人生最大級のストレスに対処する力をつけようという試みに乗り出している。信頼できる指針がまだないのに、人間に本来備わっている能力に手を加えるような試みはむしろ事態を悪化させるのではないかという見方もあり、大きな議論を呼んでいる。

この議論は今、特に急がれているといえる。米国陸軍が百万人を超える軍人とその家族を対象に、心の回復力を強化するため、大規模な訓練プログラムを始めているからだ。これは単一機関が行う心理学的な介入としては、おそらく過去最大規模のものになる。

心が回復する仕組み

著名な精神分析学者フロイト (Sigmund Freud) は、1917年に「グリーフワーク (悲嘆の作業)」の必要性について述べている。グリーフワークとは、「存在しなくなったもの」つまり亡くなった人に注がれていた感情エネルギー、フロイトのいう「リビドー」を取り戻すための行為のことだ。精神を体に流れる無意識の生命力としてとらえる1世紀近く前の考え方に基づくが、反証がなかったこともあって最近まで主流を占めていた。だが心理学者や神経科学者は、別の説明を探し始めている。

ひとつのカギは、回復力の本質は何かという問題だ。英語で回復力を意味する「resilience (レジリエンス)」は、ラテン語の「re (レ、後ろにの意)」

と「salire（サリーレ、跳ねるの意）」から来た言葉で、反発力という物理的な意味に加えて、心理学の用語としても使われるようになった。

カリフォルニア大学ロサンゼルス校で回復力を研究しているレイン（Christopher M. Layne）は、心理学的には回復力は「基本的に、短期間のうちに通常の機能状態に戻ることを意味する」という。鉄板が力を受けて曲がっても、元に戻ろうとするようにだ。

私たちの頭の中に小さな金属板のサーモスタットのようなものがあって、感情的に熱くなると曲がって一連の神経化学的な反応を引き起こし、心のバランスを既定値に戻してくれる——わけでは、もちろんない。人間の脳は、それよりもはるかに複雑だ。

回復に向けた最初の反応は、脳の根幹的な部分で起こる。例えば誰かがあなたに殴りかかってきたとしよう。すると、脳の視床下部（神経系と内分泌系をつなぐ中継点）がストレスシグナルとしてコルチコトロピン放出ホルモ

ン（CRH）を大量に分泌する。このホルモンがさまざまな化学物質の洪水を引き起こして、構えろとか逃げろといった指示を出す。あなたの脳では、戦うか逃げるか、逃げるか戦うか、と選択肢がライトのように点滅する。その後、この頭の中の嵐は収まる。

だが、身を守らなければならない状況が続くと、一連のストレスホルモンが大量に分泌されたままになる。そのうちの1つコルチゾールは、腎臓のそばにある副腎で作られるホルモンで、海馬や扁桃体（記憶や感情にかかわる脳領域）の脳細胞を実際に傷つける場合がある。そうになると、心も体も参ってしまう。だが幸いにも、大半の人は回復力を備えている。

回復の早い人の場合、ある種の保護物質のおかげで、ストレスホルモンの働きが早い段階で抑制されるようだ。近年、人間の精神的な強さの指標となる化学物質がたくさん見つかった。実に多くあるが、例えばコルチゾールの効果を弱めるDHEA（デヒドロエ

ピアンドロステロン）や、視床下部で作られコルチコトロピン放出ホルモンを阻害して不安を鎮めるニューロペプチドYなどがある（下の図を参照）。

2000年、コネティカット州ウエストヘブンにあるエール大学附属退役軍人病院のチャーニー（Dennis S. Charney）は、米軍兵士に偽の尋問で強いストレスを与えた上で訓練し、血中のニューロペプチドYの濃度が高い兵士ほど成績がよいことを見いだした。また2006年、ニューヨークにあるブロンクス退役軍人医療センターのイエフダ（Rachel Yehuda）らは、戦闘経験者のうちニューロペプチドYの血中濃度が高い人ほど心的外傷後ストレス障害（PTSD）を発症しにくいことを明らかにした。

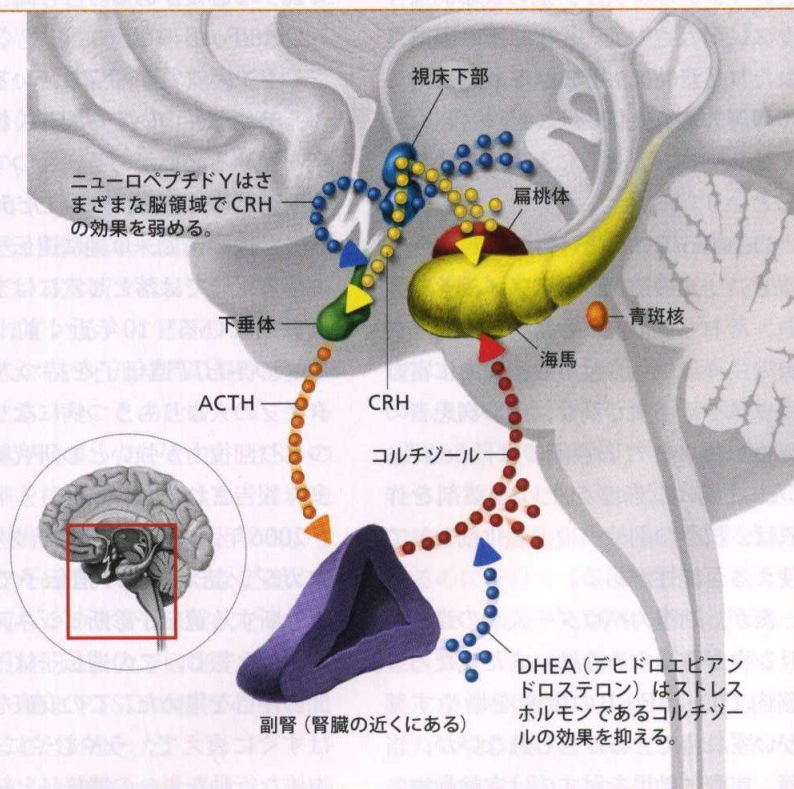
回復力のように多面的な性質を持つものには、多くの生物学的過程（複数のタンパク質による連鎖的相互作用）がかかわっている。だが今のところ、どのような生物学的性質が精神の回復力をもたらすかについては、気になる

心の傷を癒す脳内システム

危険な状況に直面すると、脳内で化学反応が連鎖的に生じて、立ち向かうか逃げるかといった行動の準備が始まる。一方、一連の化学物質がこれらの反応を弱め、ストレスから立ち直る力を高める。

視床下部からコルチコトロピン放出ホルモン（CRH）が分泌されると、立ち直りのカギとなる化学反応が始まり、下垂体から副腎皮質刺激ホルモン（ACTH）が血中に分泌される。これが刺激となって腎臓の近くにある副腎がコルチゾールというホルモンを放出する。

コルチゾールは困難な状況に対応する身体能力を高める働きがあるが、長時間にわたって大量に放出されると、脳細胞に回復しにくいダメージをもたらす場合がある。これを抑えるために、いくつかの化学物質（右図ではニューロペプチドYとDHEAの2つ）がストレス応答を弱める。薬剤や精神療法によって、これらの物質の生産を高められる可能性がある。





カトリナの被災者たち このハリケーンではニューオーリンズ市民の回復力が試された。

ヒントがたくさん集まってきている、という域を出ない。

例えば2010年5月、ニューヨークにあるマウントサイナイ医療センターのネスラー（Eric J. Nestler）らは、マウスを使った実験で、DeltaFosBというタンパク質が、別の攻撃的なマウスに脅かされたり、1匹だけ隔離されたりした時に生じるストレスに対して保護作用があるらしいと報告した。おそらくヒトでも同じように働いているという。

DeltaFosBは分子スイッチとして働き、一連の遺伝子群のスイッチを入れ、それらがコードしているタンパク質の生産を開始させる。回復力に富むマウスでは濃度が高く、うつ病患者の死後に採取した脳組織では低かった。DeltaFosBの濃度を上げる薬剤を作れば、抗うつ剤や回復力強化剤として使える可能性がある。

だが、回復力パウダー入りの栄養ドリンクが登場するのは、まだ先だろう。脳内でDeltaFosBの生産を増やす薬がいずれはできるかもしれないが、当面、実際に効果を試すのは実験動物に

限られるだろう。マウスが実験で死ぬほどの恐怖を与えられても堂々と立ち向かうことができるようになる薬は、脳の報酬系に作用して快感を生み、依存性をもたらす危険もあるからだ。研究では薬物のそうした微妙な作用をよく調べる必要がある。

DeltaFosBのほかにも多くの遺伝子やタンパク質が関係しているだろうが、それらについても同じく慎重に研究を進める必要がある。かつて重要な“回復力遺伝子”とみられた5-HIT遺伝子がよい例で、単純に遺伝子研究を進めるだけでは落とし穴にはまることを教えている。10年近く前、長いタイプの5-HIT遺伝子を持つ人は短いタイプの人よりもうつ病になりにくい、つまり回復力が強いとの研究結果が数多く報告された。

2006年、ニューヨーク・タイムズ・マガジン誌が5-HIT遺伝子で回復力を診断する遺伝子診断ビジネスが近く始まると報じ、この遺伝子は一躍、世間の注目を集めた。この安直な見通しはすぐに衰えて、うやむやになった。複雑な行動を単一の遺伝子と結びつけ

ようとする研究はたいてい同じ運命をたどる。

最近行われた2つのメタ分析（複数の研究結果を統合し、より信頼性の高い結果を求める統計解析）では、5-HIT遺伝子の長さと、ストレスに起因するうつ病との関係は確認されなかった。ただし、もう1つ別のメタ分析では、関係が認められた。この遺伝子が回復力と関係しているとしても、それほど強い相関はないとみられる。

最終的には、回復力の心理生物学的研究が新薬の開発やストレス適応力の正確な評価法につながるかもしれない。しかし当分のところ、回復力に関する直接的な知見を得るには、特定の遺伝子や受容体の研究ではなく、困難に陥っている人たちへの昔ながらの面接調査の方が有用だ。

回復力は万人のもの

行動学者はトラウマを被った成人や子どもを、何十年も前から調べてきた。ニューヨークにあるコロンビア大学ティーチャーズカレッジの心理学者ボナーノ（George A. Bonanno）は長年、さまざまな心の回復例を記録してきた。特に、愛する人の死や、戦争やテロ攻撃、病気に直面した人々の反応に着目した。その結果、どのケースでもほとんどの人が驚くほどうまく順応することがわかった。数カ月もすれば、ある程度まで通常の生活に戻るのだ。

コロンビア大学の古い建物にあるボナーノの研究室は、彼の研究テーマに関するものでいっぱいだ。ドアの内側には、彼を紹介したドイツの新聞記事の切り抜きが貼ってある。見出しは「ボナーノによれば『ひでえことは必ず起こるもの』」だ。

親しい人との死別など、トラウマをもたらす出来事に対する反応についてボナーノが研究を始めたのは、彼がカリフォルニア大学サンフランシスコ校にいた1990年代初めのことだ。当時、

親友や家族の死は消すことのできない心の傷を残すという見方が一般的だった。悲嘆から脱して元の生活に戻るにはいわゆるグリーフケアなどの元気づけが必要だと考えられていた。

だがボナーノらは先入観なしに研究を進めた。すると精神的な傷がその後の精神状態に影響していないケースが次々と出てきて、心の回復力はごく一般的なものである可能性が浮上した。たまたま好都合な遺伝子や良い家庭に恵まれた一部の人に与えられた能力ではなく、多くの人が自然に持っているものだとの見方だ。さらに、グリーフケアの現代版ともいえる対処法が、役立つどころか有害かもしれないという懸念も生じる結果となった。

例えばボナーノは同僚のケルトナー(Dacher Keltner)とともに、愛する人を失って間もない人々の表情を分析した。ビデオでは、治療を必要とするような、いつまでも和らぐことのない悲嘆の兆候はまったく見られなかった。予想通り悲しい表情も映ってはいたが、怒りや喜びの表情もあった。人々の表情は、失意から笑いへ、再び悲しみへと、何度となく変化した。

ビデオに映っている大笑いは本物だろうか？ ボナーノたちは疑い、ビデオをスロー再生して、目の回りの眼輪筋の収縮を調べた。この表情筋の動きのできるしわは「デュシェンヌ線」と呼ばれ、これを見ると、本物の笑いとい儀礼的な作り笑いを見分けることができる。その結果、悲嘆に暮れている人たちの笑いは本物だと判明した。悲しい気持ちと明るい気分が交互に来るこの振動は、その後の研究でも常に再現された。

これはどういうことだろうか？ ボナーノはこう推測する。誰かを失った後の沈んだ気分は癒しの助けになるが、仮借のない深い悲しみは、病的なうつ状態のように、とうてい耐え難いもので、人を押しつぶしてしまう。このた

め、たいていは私たちの脳の中の回路が働いて、悲しみに打ちひしがれた心理状態が続かないようにする。感情が熱くなりすぎたり冷えすぎたりすると、一種の内部センサー(サーモスタットならぬ“回復力スタット”)が元の平衡状態に私たちを戻してくれるのだ。

ボナーノは死別以外の事象にも研究を広げた。米国カトリック大学と後にはコロンビア大学で、性的虐待の被害者や米国同時多発テロを体験したニューヨーク市民、SARSの流行を生き延びた香港の住民らに聞き取り調査した。いずれも結果は同じで「多くの人はいずれも対処しているようだった」という。

研究から、一般的な傾向が浮かび上がった。調査した人の1/3から2/3は、親しい者の死や病気、大惨事にあった直後でも、トラウマと診断されるような症状(睡眠障害、過覚醒、フラッシュバックなど)がほとんど見られなかった。またこうした症状が見られる人は、6カ月以内に10%を切ることが多かった。

だが、もし大部分の人々は心に受けた痛手と向き合い続けているのではないとすると、彼らはいったいどのように感じているのだろうか。無傷ですんだといえるのだろうか？ それを知るのは難しい。

1980年に『精神障害の診断と統計の手引き』(訳注：米国精神医学会がまとめている診断マニュアル。世界的に使われている)にPTSDの項目が登場してから、心理学者の視野は狭まる傾向にあった。この診断マニュアルで枠組みが決まったことで、PTSDの診断基準を機械的に当てはめ、これに合った患者だけを研究対象とするようになったためだ。この新たな定義によって、何らかのストレス症状を示す患者は、最終的に自力で回復できる人までも、一律にPTSDの括りの中に入られることになった。

ボナーノは精神治療を受けたことの

ない人たちを対象に、感じ方を調べる研究に着手した。社会科学の調査では、質問票に記入してもらうと、過去の出来事は相当にゆがんだ形で表れる。それまでの自分の世界が崩壊してしまうと、人は、それがどの程度ひどい状態だったかをオーバーに見積もったり、実際以上に破滅的だったと考えがちだ。

こうした影響を排除するため、ボナーノはいわゆる「前向き研究」を始めた。さまざまな年齢の人で構成される集団について、その集団の中の誰かが亡くなる前から、追跡調査をすることにした。この方法だと、心理学でいう「思い出しバイアス」を排除できる。

ボナーノはまた、「潜在成長混合モデル」という優れた統計手法も取り入れ始めた。これによって、人々がトラウマを経験した後の反応をより正確に描き出せるようになった。

対処法は人それぞれ

先の笑いの研究と同様、死別を経験する過程をより詳細に見ると、喪失への健全な適応過程を表すのに使われてきた分類にうまく当てはまらないような、さまざまな反応がとらえられた。それが複雑多岐にわたるのを見て、ボナーノは従来の分類に当てはまらないこうした反応を「不格好な対処法」と名付けた。

一部の人は自分の存在や行動を過大評価する「自己高揚バイアス」に陥った。状況が異なれば、ナルシズムとの境界ともいえる反応だ。悲嘆にくれている人の場合、こうした少々ゆがんだ感覚が、「あの時違う行動を取っていたら、こんなことにはならなかったのでは」という終わりのない自問を回避するのに役立っているのかもしれない。

自我を増強する以外の対処法もあった。ネガティブな思考と感情を押さえ込んだ人もいたし、何があっても自分なりに切り抜けられると自分に思い込ませる人もいた。大声で笑ったり、微

笑んだりしてやり過ごそうとする人もいた——心理学者の多くは、こうした態度を不健全な否認の一形態だと考えているが。

ボナーノはこうした不格好な対処法が近親者に先立たれた人だけでなく、バルカン紛争を体験したサラエボのボスニア人や、米国同時多発テロの現場を目撃した人々にも見られたことを明らかにした。ジョンソン (Fred Johnson) も、これらの人々と同じようにしてハリケーン「カトリナ」を切り抜けた。

生まれてから57年間ずっとニューオーリンズで暮らしてきたジョンソンは、カトリナの際、ニューオーリンズの巨大フットボール場「スーパードーム」にいた人々の救出に携わることで、この危機に立ち向かった。町を離れるバスに乗ろうとする人々の行列がスタジアムから長く伸び、人々の不安をかき立てた。スタジアムから出てきた親たちは激しく取り乱し、幼い子どもを救急隊員に託そうとした人もいた。失禁する人も見られた。

この光景を目の当たりにしたジョンソンは呆然とし、度を失った。彼はドームの入り口から離れ、泣き崩れた。とても受け止めきれなかった。だが数分後、彼は泣き止んだ。彼の言う“制御機構”が動き出したのだ。「押しつぶされそうになると、私はいつもこうして切り抜ける。まず泣いて、それから涙を拭いて仕事に戻る。いつまでもただ泣き続けたりはしない。それが私の制御機構なんだと思う。そうやって私は正気を保つ」とジョンソンは語る。

ボナーノの研究は高く評価されているが、彼の研究が示すほどに心の回復力が生来のものであるとは納得していない人もいる。一部の研究者は、ボナーノが言う回復力は定義が広すぎると主張している。

これに対しボナーノも、子ども時代に逆境にあった場合、そのことは家族

の死や大災害の後に生じる一時的な感情よりも、長く影響し得ると認めている。だが失業にしろ津波にしろ、何らかの苦難に直面した人々の大半の反応からもわかるように、人は大人になってからは、立ち直る力を標準的に備えているのだ。

回復力は強化できるか？

回復力がほとんどの人にもともと備わっているのなら、トラウマに直面した時に立ち直ることができず、不安やうつ状態に陥ってしまう10%の人については、どう考えればいいのか

心の回復力は ごく一般的な能力で 遺伝子や家庭に恵まれた 一部の人だけではなく 多くの人が自然に 持っているものなのだろう

う？ 訓練すればもっと耐えられるようになるのだろうか？ 結論はまだ出ていないが、これまでの結果からすると、慎重に考えるべきだ。

災害現場に駆けつけた心理学者や支援スタッフはこれまでしばしば、「緊急事態ストレス・デブリーフィング」という手法によるインタビューを行ってきた。被災した個人またはグループに災害の体験を話してもらい、感情を発散するカタルシスをもたらすことで、起きつつあるトラウマ症状を解消しようという手法だ。米国のコロンバイン高校銃乱射事件や、オクラホマシティ一連邦政府ビル爆破事件の被害者に対しても行われた。

しかし、ここ15年以上の間に行われたいくつかの研究によって、この方法に効果はなく、むしろ有害である可能性が示された。グループセッション中に誰かが取り乱すと、それがほかの

人にも伝染して、参加者全員の状態がかえって悪くなることがある。2004年のインド洋津波の後、世界保健機関 (WHO) は、被災者の不安を増強する恐れがあるとして、デブリーフィングを行わないように警告した。こうした経緯から、最近の「ポジティブ心理学」の多様な手法を利用して心の回復力をつけるという試みには、疑問の声も上がっている。

ポジティブ心理学という新しい考え方がこの業界に正式に登場したのは1998年のことだ。ペンシルベニア大学教授のセリグマン (Martin E. P. Seligman) が、米国心理学学会の年会で、心理学は心の病だけを扱う学問ではないと主張した。

セリグマンがポジティブ心理学という発想に至ったのは、電気ショックをずっと与えられた犬が絶望して何の抵抗もしない状態 (彼は「学習性無力感」と呼んだ) に陥ることを見いだしたためだ。これと正反対の効果をもたらすような医学的介入の可能性を探り、それによって楽観的な考え方や幸福感、そして心の回復力を強化しよう、と考えたのだ。

セリグマンは20年前、いわゆる「ペンシルベニア回復力プログラム」の発足にも関わった。このプログラムは、特に小中学生において効果が認められた。うつ病に関する理論に基づいて「認知再構成」などのトレーニングをするもので、これは一般には認知行動心理学者が、患者が思考をとらえ直し、物事の明るい側面を見られるようにするために用いる手法だ。8～15歳の2400人の子どもを対象に、少なくとも21回の比較試験が行われ、プログラムにはうつ病と不安神経症を予防する効果があったことが示された。

現在、米陸軍が同様のプログラムをスケールアップし、数百万人の兵士とその家族に対して実施しようとしている。言うなれば、これまで行われた中

で「最大の意図的心理介入計画」だ。

プログラムには1億2500万ドル(約100億円)の予算と5年間を投じる計画で、すでに80万人の兵士が参加し、感情や幸福感などを評価する「グローバル評価ツール」というオンライン式の心理テストを受け、精神的回復力のさまざまな側面について「健全性」を高めるためのトレーニングを行っている。毎月150人の兵士がペンシルベニア大学を訪れ、他の兵士に回復力について教える方法を学んでいる。

最終的には、このプログラムで得られたデータによって心理学・健康統計学的大規模データベースが構築され、民間の研究者が回復力を研究するのに利用されるだろうとセリグマンはみている。「かつて心理学でこれほど科学的に高度な取り組みはなかった」と彼は言う。

このプログラムは、バタバタと大急ぎで始まった。陸軍参謀長のケーシー(William Casey)が、何度も繰り返し戦地に派遣される兵士らに、何らかの助けになればと強く期待していたからだ。10代の少年少女に対して効果があった手法が、3回目のイラク行きに臨む兵士にも適用できるかどうか、検証しようという予備試験は行われなかった。プログラムが進めば、兵士が軍隊生活のストレスに耐える力が強まったかどうかを調べることになるだろう。「手探り状態ではあるが、プログラムの評価は厳格に行われている」とセリグマンは言う。

ボナーノは個人的に、同プログラムが有効であるといえる証拠がないと指摘している。そして、過去の介入の試みに成功とはいえないものが少なかったことを考えると、効果よりも悪影響の方が大きくなるのではないかと懸念している。

ボナーノは未発表の共同研究で、約16万人の兵士を11年にわたって追跡調査した。うち約半数はイラクかアフ

ガニスタンに派兵された経験があった。そうした兵士のうち85%近くはトラウマ症状が見られず、回復力があると判断された。PTSDと診断された兵士はわずか4~6%だった。

「私たちのこれまでの研究が示しているように、ほとんどの人が心の回復力を持っているとしたら、そういう人にストレス耐性訓練を施した時に何が起きるのだろうか?」とボナーノは問う。「回復力が弱まりはしないだろうか? この点にはきちんと結論を出す必要があると思う」。

軍も全体がこの回復力プログラムを歓迎しているわけではない。以前に米海兵隊のストレスモニタリング計画の監視役を務めていた医師のナッシュ(William P. Nash)は、予防的な回復力強化訓練を支持する証拠はほとんどないという。

ナッシュは軍隊の状況をプロフットボールにたとえてみせる。選手が平日にどれだけ練習しても、週末の試合であざや傷を作るのは避けられない。「悪いことが起こるのは防げない」と彼は言う。「同様に、ストレスによるダメージを防ぐこともできない」。

ならば、苦境に陥った際の対応能力を高める方法はないのだろうか? あらかじめ回復力をつけておこうという試みは、うまくいくかもしれないし、いかないかもしれない。心の傷を癒す良い薬が登場するのは何年も先だろう。

災害が起きると、経験豊かな専門家たち、米国立PTSDセンターの心理学者や医師らは、被災者に自分の内面にある精神病理学的な反応について掘り下げてもらうより、その人自身が持

つ対応力を引き出すようなアプローチを編み出してきた。「誰かが大丈夫なら、だいたいみんな大丈夫だといえる」と、このアプローチを考えた1人であるワトソン(Patricia Watson)は言う。

正式には「サイコロジカル・ファーストエイド(心理的応急処置)」というこの方法では、多くの人が自力でうまく対処できるとの認識に立ち、まず現実的なことに注力する。食料や避難所の確保が最優先だが、併せて被災者には、どんな支援が受けられるか、自分の精神状態の回復の具合をどう判断していくかを教える。

9.11の米国同時多発テロが起きた後、世界貿易センターの近くにいた人の中には、不安やうつ状態が3カ月くらいは続くものだと思って、一時的なストレス症状以上のダメージがある人のための治療を受けなかった人もいた。「彼らは必要以上に長く苦しむことになってしまった。そうした症状があるのは普通だと思ってしまったのだ」とワトソンは言う。本格的なPTSDに対しては、さまざまな向精神薬や、ストレスの原因と向き合って克服する認知行動療法に、ある程度効果があることがわかっている。

心の回復力についての最近の発見は、降りかかってくる困難を受け入れる方法は一樣ではないことを教えている。最悪の事態が起きることはある。だが私たちには、立ち直る力がある。多くの場合、状況は改善するはずだ。

(翻訳協力:古川奈々子)

監修 飛鳥井 望(あすかい・のぞむ)
65ページの著者紹介の項を参照。

原題名

The Neuroscience of True Grit (SCIENTIFIC AMERICAN March 2011)

もっと知るには...

THE OTHER SIDE OF SADNESS: WHAT THE NEW SCIENCE OF BEREAVEMENT TELLS US ABOUT LIFE AFTER LOSS. George A. Bonanno. Basic Books, 2009.

FLOURISH: A VISIONARY NEW UNDERSTANDING OF HAPPINESS AND WELL-BEING. Martin E. P. Seligman. Free Press, 2011.

回復力だけには 頼れない

人には立ち直る力が備わっているが
専門家の助けが必要な場合もある

飛鳥井 望 (東京都医学総合研究所)

最初に、今般の東日本大震災でお亡くなりになられた方のご冥福をお祈りするとともに、今なおきわめて困難な状況にある被災者ならびに関係者の皆様に、心からお見舞いを申し上げます。

トラウマには2段階で対処

G. スティックス「立ち直る力のメカニズム」(56ページ)の内容はおおむねこの分野の標準的な考え方に沿っており、根拠となる科学的な知見についてもバランス良く紹介されている。ただ、ともすると記事の内容がやや極端に理解されかねない恐れもあるので、トラウマ及び心的外傷後ストレス障害(PTSD)の研究を専門とする臨床研究者の立場から、若干の補足的な解説を加えさせて頂きたいと思う。

大災害がもたらす精神的ショックは、被災者や関係者にとって深刻なトラウマ(心の傷)体験となる。災害や事件・事故後の「心のケア」については、2段階で対処するというのが基本的な考え方だ。つまり、人に備わった「立ち直る力(レジリエンス)」を十分に認めながらも、それだけに頼るのでは

なく、専門的な治療ケアを必要とする人が、しっかりと治療を受けられるようにする、ということだ。

このたびのような大災害のあとでは被災者のほとんどに、心理的变化として、被災の直後から、程度の差こそあれ様々な災害トラウマ反応が生じる。被災者だけでなく、消防士、自衛官、警察官、医療関係者など救援に駆けつけた人も同様だ。

具体的には、眠れない、突然気持ちがこみ上げてきて涙もろくなる、被災した光景がくりかえし頭の中に浮かんできってしまう、といった症状が起きる。あるいはそうした光景が夢にでてきたり、思い出すと不安になったりし、どきどきして冷や汗や身震いがすることもある。また突然の物音や揺れに対してもひどくビクッとしてしまう、イライラするといったことが多くなる。

このような災害トラウマ反応の大部分は、とくに専門的なケアを受けなくても、人間に本来備わっている回復力や家族や周囲の人との支えあいにより、数週間から数か月の間には和らぐことが多い。とはいっても災害トラウマ反

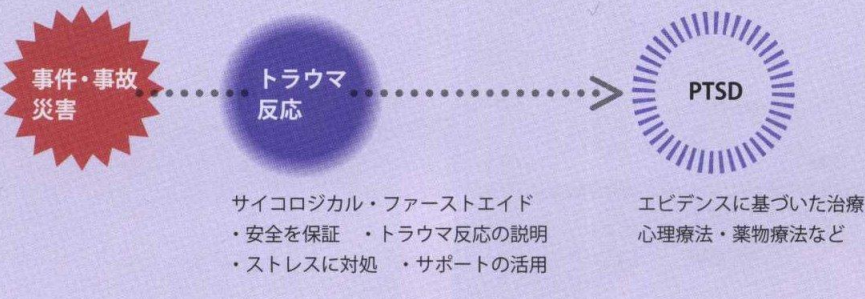
応の状態が続いている時は常に緊張し、気が休まらないので、心身に余分な負担がかかり、健康に悪影響を及ぼす危険がある。こんな時は、自分でできるセルフケアによって、ある程度トラウマに対処していくことも必要になる。

まず、できるだけ安全で安心のできる環境で、十分な休養を取ることを心がける。避難所では難しいこともあると思うが、適度に身体を動かすなどの気分転換や、心身をリラックスさせる色々なリラクゼーション法を試みるのもよい。精神的に孤立しないことも大事だ。こういう時こそ、家族や周囲の人との絆を普段以上に大事にし、信頼できる人に自分の気持ちを聞いてもらって、心を軽くしたい。

災害や事件の直後に起きる早期のトラウマ反応に対しては、かつて「緊急事態ストレス・デブリーフィング」(62ページ)という方法が広く推奨されたこともあった。だがいくつかの比較試験の結果、デブリーフィングは効果を証明されなかったか、かえって良くない結果をもたらす場合もあることが報告された。そのため、今では推奨されることは減り、むしろ使用に警鐘が鳴らされるようになった。

これにかわる対処法として最近、米国を中心に広まっているのが、サイコロジカル・ファーストエイド(PFA)だ。比較試験で効果が実証されたわけではなく、エビデンスに基づいた方法ではないが、これまでの経験知から、安全で、被災者などに負担をかけることがない非侵襲的なメンタルケアの内容を、項目ごとにわかりやすくまとめたものだ。日本語版『サイコロジカル・ファーストエイド実施の手引き』も作成され、インターネットから無料でダウンロードできる(URLは右ページ

心の傷に必要なケアの種類



飛鳥井望

の右下)。今般の震災支援活動においても広く参照されている。

涙もおびえも正常

災害トラウマ反応は、精神的に弱いから起きるというものではない。誰にでも起こりうる、正常で普通の反応である。上手に対処するために、まずセルフケアを心がけてみよう。それでもなお不眠が続いたり、不安感が強くて、自分では対処が難しいと感じたときは、無理をせずに医師や看護師、あるいは保健師に相談するとよい。

また災害トラウマ反応が、半年たち、1年たってもなかなか軽快しない場合には、PTSDを発症している可能性が高い。精神科などの専門医に相談し、治療を受ける必要がある。

PTSDが発症するかどうかは被害の程度にもよるが、それだけでは決まらない。ストレス耐性などの生物的要因や、不安の強さなど心理的要因、職場や地域との関係などの社会的要因といった、様々な要因が複雑にかかわっているからだ。阪神・淡路大震災では、住居が全壊あるいは全焼した被災者の約1割がPTSDになった。

PTSDを発症した場合、抗うつ剤などをういた薬物療法も行われるが、最も効果が高いとされるのは「トラウマ焦点化認知行動療法」と呼ばれる心理

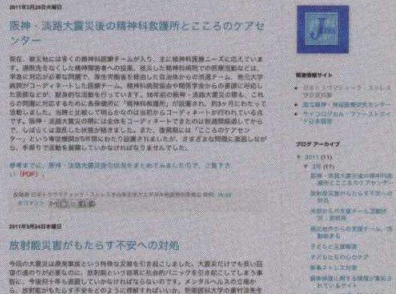
療法だ。トラウマ体験によって変化した認知（考え方）と行動パターンの修正をはかるもので、安全な環境の下で、あえてトラウマ体験を思い出して記憶に向き合い、あるいは恐怖心から避けているものに近づくことで、徐々に馴れ、不安や恐怖を改善していく。これまでの比較試験で最も高く有効性を評価されており、欧米の治療ガイドラインにおいても最初に試みるべき手法として推奨されている。

また医師が患者の目の前でリズミカルに左右に指を動かし、患者がこれを目で追いながらトラウマ体験を繰り返し思い浮かべる「眼球運動による脱感作と再処理法（EMDR）」も注目されている。嫌なイメージが薄れたら、肯定的な内容が連想され、さらに身体の緊張感や不快感が緩和するまで眼球運動を繰り返す。詳しいメカニズムはわかっていないが、比較試験によって一定の効果があることがわかっている。

今回の震災に当たっては、すでに多くの専門団体が支援活動を開始している。心的トラウマにかかわる研究や治療の関係者で作る日本トラウマティック・ストレス学会も、直ちに特別委員会を立ち上げ、被災地や避難所で心のケアに携わる方々の参考になる情報をホームページに掲載した。またブログ（右上の写真）を開設し、現地での心

日本トラウマティック・ストレス学会：大震災支援情報サイト

心身の健康に必要のケアを行うために必要な情報を集めたサイトです。このウェブ活動は、被災地域のニーズに応じた情報提供が重要で、十分なアクセスと閲覧の必要になります。本サイトはリンクフリーです。



日本トラウマティック・ストレス学会

学会が最新情報を発信 日本トラウマティック・ストレス学会は、主に心のケアに携わる人に向けて、「放射能災害がもたらす不安への対処」など実践的な情報の公開を始めた。

のケアを巡る医療状況など最新情報を発信している。

被災地ではすでに、全国の自治体や病院等から派遣された「心のケアチーム」が手分けして、避難所での巡回相談などの活動を展開している。いまだ状況は厳しいが、私たちも微力を尽くしたいと考えている。

著者 飛鳥井 望（あすかい・のぞむ）

東京医科学総合研究所副所長。同研究所の「心の健康プロジェクト」のプロジェクトリーダーも務める。精神科医。日本トラウマティック・ストレス学会の初代会長で、現在は理事。

もっと知るには…

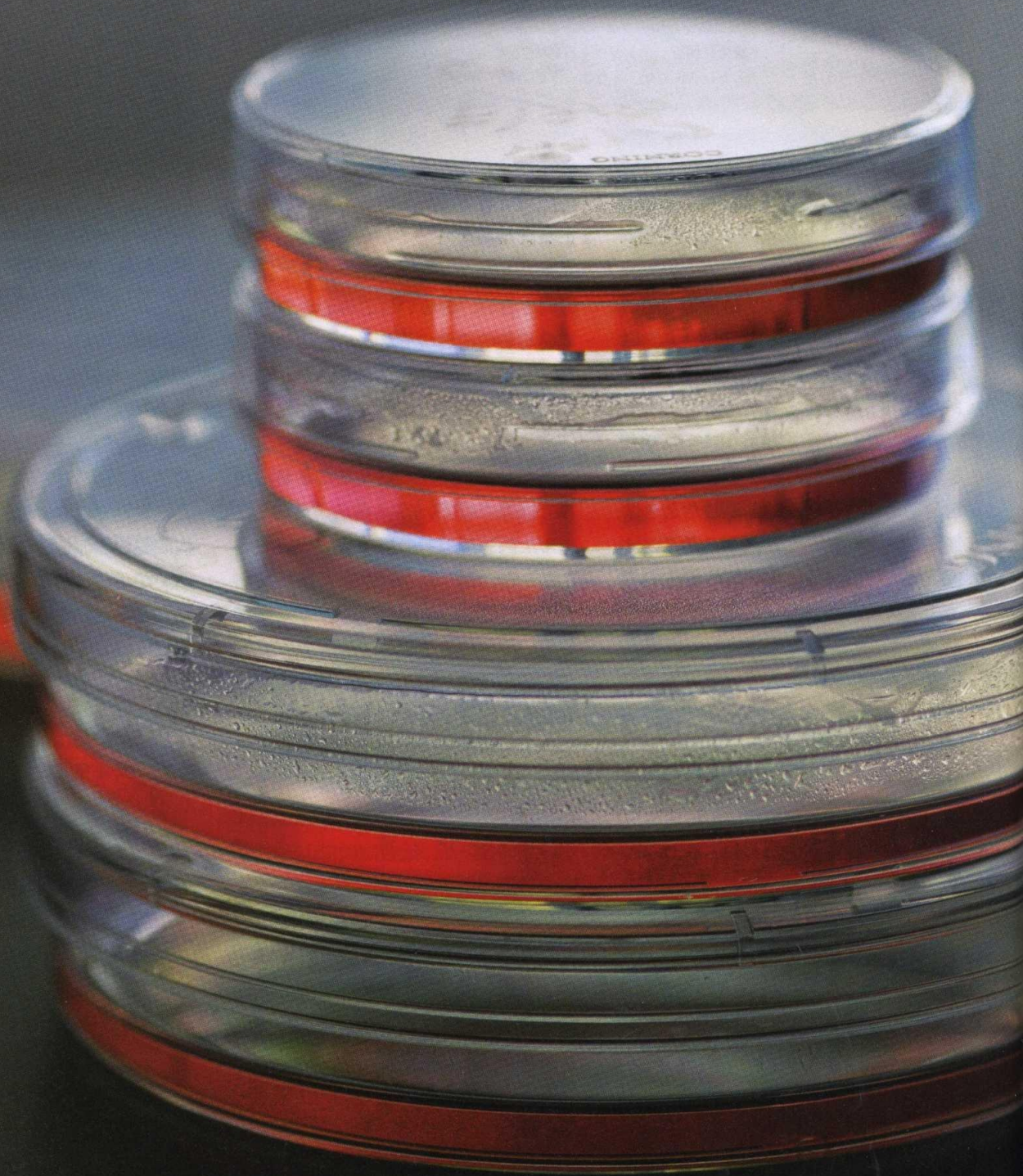
飛鳥井望『PTSDの臨床研究：理論と実践』金剛出版、2008年、3150円（税込）

飛鳥井望『認知行動療法（PE療法）によるPTSD治療—日本におけるエビデンスと被害者支援現場での実践応用』精神神経学雑誌：113、214-219、2011

『サイコロジカル・ファーストエイド実施の手引き 第2版』日本語版は、以下のサイトからダウンロード可能

www.j-hits.org/psychological/index.html





シャーレの中に何が 幹細胞を培地（赤い液体）の中で30日間培養すると、特定の機能を持った細胞に分化する。これを使って様々な病気のモデルを作ることができる。

iPS細胞が 変える 難病研究

患者の組織から人工多能性幹細胞を作り
シャーレの中で病気を再現する
治療法のない病気の医薬品開発が
加速するかもしれない

S. S. ホール (サイエンスライター)

2007年6月26日、コロンビア大学の臨床遺伝学講座を率いるチャン(Wendy Chung)は、ニューヨーク市クイーンズ区に車を走らせた。クロアチアのある不運な家系に生まれた老姉妹に、微妙な願いをするためだ。チャンは89歳と82歳になった2人に、医学の実験のために皮膚の細胞を少々提供してもらえないかと頼み込んだ。先の見通しはまるでつかないが、もしうまくいったら2つの点で役に立つと期待される先駆的な実験だ。

ひとつは2人の家系に伝わる、治癒の見込みがない病気の治療法の研究が加速するかもしれないこと。もうひとつは身体の中の細胞にでもなることができる「幹細胞」の、極めて有意義な新しい使い方を確立できると思われることだ。

「とても良い雰囲気でご一緒し、そのままご自宅にお邪魔して、皮膚を採取させて頂いた」とチャンは述懐する。82歳になった妹の方の娘に当たる女性は、皆が食卓を囲んで座り、2人が「喜んで腕を差し出した」ことを憶えている。妹はチャンにこう言った。「よくわかったわ。さあ、取ってちょうだい」。

2人が患っていたのは、筋萎縮性側索硬化症(ALS)だ。徐々に筋肉が萎縮し、筋力が低下していく進行性の神経疾患で、1939年にニューヨーク・ヤンキースの強打者ルー・ゲーリックが発症して2年後に亡くなったため、米国では「ルー・ゲーリック病」の名で知られている。チャンが会った時、89歳の姉にはほとんど症状が出ていなかったが、82歳の妹はすでに歩行と飲み込みが困難になっていた。

ALSはほとんどの場合、遺伝はしない。だが2人の家系では、複数の人がこの病気を発症し、いずれもある遺伝子の変異を受け継いでいた。変異の箇所によっては、ほかの患者よりもゆっくりと進行するタイプのALSを発症することが知られている。

チャンは欧州と米国で、この家系の人々に発生するALSを、数世代にわたって追跡していた。「ALSがもたらす死は、とりわけ辛い」とチャンは言う。「葬式のために一族が集まると、次の世代の人たちは、周囲を見回して『次は私だろうか』と自問する」。

2人の皮膚の採取は、ほんの数分ですんだ。腕の内側をちょっと摘み、直径3ミリほどの皮膚を2箇所から切り

取っただけだ。皮膚から取った細胞は、同様にして皮膚を提供した数十人のALS患者や健康なボランティアの細胞と一緒に化学的に処理され、「iPS細胞(人工多能性幹細胞)」と呼ばれる特別な幹細胞に作り替えられた。さらにこれを再プログラムして、ニューロン、特に運動ニューロンになるように誘導した。

運動ニューロンは直接または間接に身体筋肉を制御する神経細胞で、ALSではこの細胞が機能しなくなる。患者の皮膚細胞を再プログラムして作成した運動ニューロンには、提供者と同じ遺伝子の異常が生じていた。いわばシャーレの中でALSという病気が、驚くほど正確に再現されたのだ。

こうした細胞が手に入ったことで、ALS患者の神経細胞で実際にどんな異常が起きているかを調べることが可能になった。病気の細胞の治療に有効な薬の候補を選び出す試みも始まった。幹細胞のこうした利用法はこれまでなかった。幹細胞自体を治療に使おうという細胞移植治療の試みは期待に反して実際の治療に結びついていないが、それとは対照的な展開を見せている。

もしうまくいけば、シャーレに病気を再現するという手法は、様々な病気の解明を加速し、新薬候補のスクリーニングの迅速化と効率化をもたらすだろう。個々の病気を反映した培養細胞を使って、新薬候補の効果と毒性を調べることも可能になる。

患者由来のiPS細胞は現在、ALSだけでなく、鎌状赤血球症などの血液疾患やパーキンソン病など、様々な病気の疾患モデルを作るのに実験的に使われている。例えばドイツの研究チームは、不規則に脈打つ心筋細胞を作り出し、いろいろなパターンの不整脈を再現した。幹細胞の利用に長年消極的だった製薬会社も、強い関心を見せ始めている。シャーレの中に作り出した疾患モデルは、これまで産業界で行われ

KEY CONCEPTS

シャーレに病気を再現する

- 胚から作られた幹細胞(ES細胞)は、不治の病の新たな治療に利用できる可能性がある。だがこれまでのところ、幹細胞自体を使った治療法の開発は足踏みしている。
- 幹細胞は、それ自体を患者に移植して治療するより、薬の候補をスクリーニングしたり、様々な病気が身体にどのようなダメージをもたらすかを見極めるのに用いる方が価値が大きいと、少なからぬ研究者が考えている。
- 最近まで、こうした考えを確かめるのにはもっぱら、胚から作った胚性幹細胞を用いていた。だが2007年、iPS細胞技術の登場によって、成人の細胞を再プログラムして幹細胞のように作り替える方法が見つかった。
- こうして再プログラムされた細胞を用いて、シャーレの中で様々な病気を再現する研究が進んでいる。患者と同じ遺伝的特徴を備えた組織を使えば、薬の候補物質の効果を調べることができる。

てきた伝統的な創薬手法をさらに補強するものになるからだ。

ALS患者の組織からニューロンを作る実験の最初の成果は、2008年に発表された。技術革新の多くがそうであるように、この研究が成功したのは、アイデアが優れていただけでなく、アイデアを実現するのにふさわしい人材が集まったためだ。チャンのほかに主要な役割を担ったのは、バイオ産業からハーバード大学幹細胞研究所探索医療部門長に転じたルビン（Lee L. Rubin）と、同じくハーバード大学の若く疲れ知らずの幹細胞生物学者エッグアン（Kevin C. Eggan）、エッグアンの共同研究先のヘンダーソン（Christopher E. Henderson）らコロンビア大学の運動ニューロンの専門家たちだ。

幹細胞の新たな役割

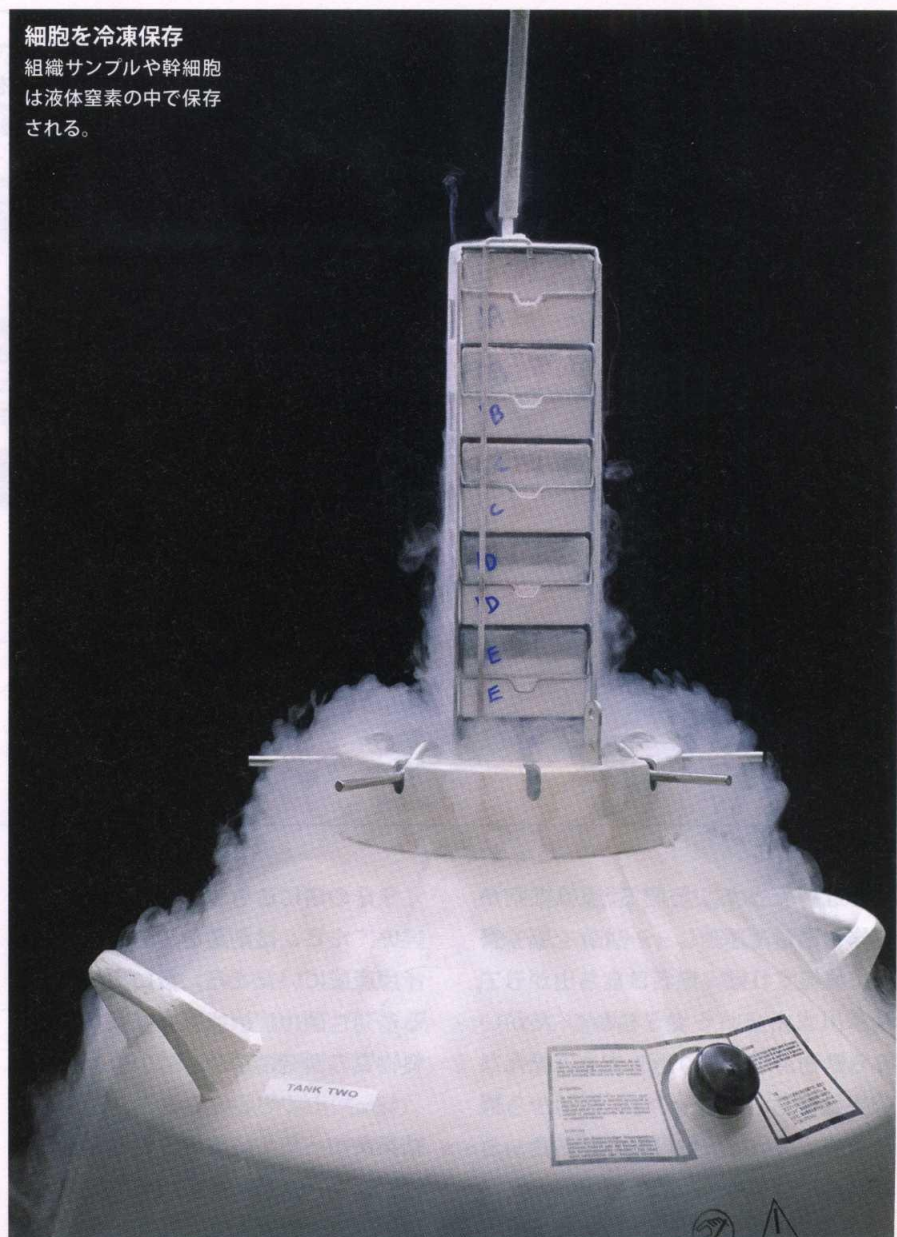
この研究で使っている幹細胞は、初期の胚から作る胚性幹細胞（ES細胞）とは別物だ。10数年前、ウィスコンシン大学マディソン校のトムソン（James A. Thomson）らは初めてヒトのES細胞を作り出し、世間をあっと言わせた。この未分化の細胞は高い増殖能力を持ち、無限に増殖できた。また身体のどの細胞にも分化できる「多能性」を持っていた。

幹細胞を用いて“オーダーメイドの移植組織”を作れば、パーキンソン病から糖尿病に至るあらゆる病気を治療できるという可能性が、医師や研究者、社会全体、そして誰よりも治療法のない病気の患者たちの希望をかき立てた。

だが、実際には2つの壁が立ちちはだかった。第一に、幹細胞研究の倫理性を巡る社会的な論議が巻き起こり、問題が政治化して、研究が進まなくなった。ES細胞を得るにはヒトの胚を破壊せざるを得ないため、モラルの問題を突きつけることになったのだ。

2001年8月、前大統領のブッシュ

細胞を冷凍保存
組織サンプルや幹細胞
は液体窒素の中で保存
される。



（George W. Bush）が、米国立衛生研究所（NIH）は今後、すでに作られているごくわずかなES細胞株を使う研究にしか助成金を出さないと発表すると、論争はピークに達した。新たなES細胞株の作成は事実上ストップし、当然、特定の病気に関連した細胞株も作れなくなった。ハーバード大学とコロンビア大学、スタンフォード大学にいる優秀な研究者らはこれに対抗し、「プロジェクトALS」や「ニューヨーク幹細胞財団」などの患者支援組織とともに“非大統領派”の研究所を設立し、民間から資金を調達して研究

を続けた。

2009年にオバマ政権は幹細胞研究に対する援助規制を緩和したが、2010年に米連邦裁判所が、NIHによる研究助成を再び差し止めた。この分野はまたもや研究できる見通しが立たなくなり、資金的な混乱に陥った。

もうひとつの壁は科学の側にあった。幹細胞から特定の細胞を作り出し、患者や動物にそのまま移植する細胞治療によって病気を治そうという研究が先を争うように行われたと、プロジェクトALSの科学主任、エステス（Valerie Estess）は振り返る。彼女は「それは

古い皮膚の新しい用途

ハーバード大学とコロンビア大学のチームは、成人から皮膚の組織を採取し、線維芽細胞と呼ばれる一定の機能を持つ細胞を分離した。日本で生まれた技術により、複数の遺伝子と化学物質を用いて、iPS細胞を経て線維芽細胞をニューロンに誘導した。



大きな夢だった」と語る。「幹細胞から作り出した運動ニューロンを脳や脊髄に移植すれば、患者は立ち上がって踊り出す、というようなね」。だがいくら動物実験を繰り返しても、そんな結果は得られなかった。「最初から最後まで、実験は失敗ばかりだった」とエステスは言う。

2002年、コロンビア大学のジェッセル（Thomas M. Jessell）とウィシュトルレ（Hynek Wichterle）らは、*Cell*誌に画期的な論文を発表した。ES細胞を運動ニューロンに分化させる具体的な方法と、それに必要な物質を解明したのだ。これを聞いたハーバード大学のルビンが、それまでとは異なる幹細胞の新たな使い方を思いついた。ルビンは陽気かつ熱心な研究者で、神経科学の専門教育を受け、マサチューセッツ州にあるバイオ企業キュリスの最高科学責任者を務めていた。彼はシャーレの中で疾患を再現できれば、創薬が根本的に変わる可能性があることに気づいたのだ。

象牙の塔にこもりきりの研究者とは違い、ルビンは創薬を知っていた。バイオ産業にいたころ、後に大ヒットする多発性硬化症治療薬タイサブリの原料物質の研究に携わっていたからだ。

ジェッセルとウィシュトルレの研究結果を知ったルビンは、新しい形の幹細胞研究所の事業計画を打ち出した。「幹細胞研究者は皆、再生医療を目指していたが、この新たな研究所は、創薬に幹細胞を利用するのを目的としていた」。

だが当時は、ベンチャーキャピタリストにまったく相手にされなかった。ルビンはキュリスでこのアイデアを温めつつ、脊髄性筋萎縮症（ALSに似た症状を示す小児の運動ニューロン疾患）の研究を進めた。2006年にキュリスが新研究所計画の断念を決めると、彼はハーバード大学幹細胞研究所に移り、シャーレ内疾患モデルの研究に着手した。

その後まもなく、日本の生物学者である京都大学の山中伸弥が、幹細胞を

巡る科学と政治の状況を一変させる技術を見いだした。2006年3月、カナダのプリティッシュコロンビア州ウィスラーで開催された学会で、山中らは哺乳類の成体から採取した一般的な細胞を再プログラムする方法を発表した。一言で言うと、成熟した細胞を生化学的にリセットし、胚のような、つまり幹細胞の状態に戻す方法だ。これなら胚を使ったり、破壊したりする必要がない。山中はこの細胞を「人工多能性幹細胞（induced pluripotent stem cells）」、略して「iPS細胞」と名付けた。

1年後、山中とウィスコンシン大学のトムソンはそれぞれ独立に、ヒトの組織からiPS細胞を作り出したと発表した（K.ホッケドリンガー「ここまで来たiPS細胞」日経サイエンス2010年7月号）。

ウィスラーの学会で山中の発表を聞いた中に、細胞の再プログラムの専門家であるエッガンがいた。彼もまた独自の方法で、シャーレの中で病気を再現する研究を始めていた。複数のプロ

4. iPS細胞は集まって「胚様体」という球状の塊を形成する。ここに2つの小さなシグナル伝達分子（レチノイン酸と細胞分裂促進物質）を加える。

シグナル
伝達分子

胚様体

5. シグナル伝達分子の指令により胚様体は運動ニューロンに分化する。

運動ニューロン

6. こうして作られたニューロンはALS患者に由来するため、病気の特徴を示す。

7. 作成したニューロンをトレイの各穴に入れ、区画ごとに異なる新薬候補を加えて反応を調べる。この作業は自動装置で行うため、一度に多種の新薬候補の効果を調べられる。

新薬候補物質

薬剤の効果あり

病気の特徴を示すニューロン

ジェクトを立ち上げ、成体組織の細胞を生化学的に誘導し、胚のような状態に戻した上で増殖させる。こうして作った細胞集団から、幹細胞を得ようとしていた。

しかし彼らが幹細胞を得るのに使っていたのは、クローン羊のドリーを作るのに使われた、昔ながらの技術だ。皮膚細胞などの成熟した細胞から核を取り出し、あらかじめ核を取り除いた未受精卵に挿入する。しかし、このようなクローン作成法は非常に効率が悪かった。またヒトの卵を再プログラムするような計画を立てれば、激しい論議を呼ぶのは必至だった。何しろ、卵を進んで提供してくれる女性を探さなければいけないのだ。

しかし山中の方法が登場し、エッガンらは2007年夏、ついにヒトの細胞でiPS細胞技術をうまく働かせることに成功した。

シャーレに疾患を再現するというアイデアの実験に必要な準備は、すでにすべて整っていた。例えばコロンビア

大学のチャンらはエッガンのクローン作成実験に使えるように、クロアチア人の老姉妹をはじめ多くのALS患者たちから細胞を採取していた。プロジェクトALSは民間資金を得てコロンビア大学の近くに特別実験室を設け、何カ月もかけて老姉妹やほかの患者たちから集めた細胞株を集積していた。

突然登場したiPS細胞技術は、実験成功の可能性を大幅に高めた。「運命のいたずらとしか言いようがない。私たちが皮膚の細胞を集めていたのは、まったく別の実験のためだったのだから」とプロジェクトALSのエステスは言う。

高齢者の細胞でも

集めたALS細胞株の中でエッガンらが最も注目したのは、あのクロアチア人老姉妹のうち症状の重い妹「患者A29」から取られた細胞株だった。老姉妹のどちらの皮膚細胞も再プログラムによってニューロンになったが、患者A29は高齢で病状も進行していた。

そうした重篤で一生にわたる病気の特徴を示す細胞を、iPS細胞技術によって作り出せることを実証したのだ。

「2人の細胞を使った理由は、実験に参加した人のうち最高齢だったからだ」とエッガンは言う。「たとえどんなに高齢で、長いこと病気にかかっていた人の細胞でも、再プログラムが可能だということを証明したかった。そういう特殊なケースだったんだ」。

エッガンの成果は*Science*誌2008年8月29日号に掲載され、画期的な成果としてメディアの注目を集めた。幹細胞を用いてシャーレの中で病気を再現できれば、ほかの方法では手に入れるのが難しい、あるいはまったく入手不可能な細胞を実験に使う道が開ける。ALSや脊髄性筋萎縮症の特徴を備えた運動ニューロン、様々な神経変性疾患を発症した脳細胞、若年性糖尿病に典型的な膵臓細胞などだ。

この2年間でコロンビア大学とハーバード大学の共同研究によって作られたALS患者特有のヒト細胞株はすで

幹細胞を用いてシャーレの中で病気を再現できれば ほかの方法では手に入れるのが難しい、あるいは まったく入手不可能な細胞を実験に使う道が開ける

に30を超え、今も増え続けている。その多くは、極めて重篤なALS患者に見られる変異を持っている。

さらに重要なのは、シャーレ内で病気を再現するという手法の威力が発揮され始め、運動ニューロン病の本質についての手掛かりが得られつつあることだ。例えば、クロアチアの老姉妹の細胞を用いた研究から、運動ニューロンの死と関係があるとみられる分子経路が見つかった（論文では未発表。右ページの監修者ノート参照）。運動ニューロンは、ニューロンをサポートす

るアストロサイトと呼ばれるグリア細胞から放出される毒素にさらされると死滅する。現在、ニューロンとアストロサイトを同じシャーレで培養し、アストロサイトの毒性を阻害するか、あるいは運動ニューロンの生存を助ける物質の探索が進んでいる。

また2010年1月、プロジェクトALSは、ALS患者からiPS細胞技術で作出した運動ニューロンを用いて、約2000の化合物の一次スクリーニングを始めた。ALS遺伝子に変異したニューロンの生存期間を延ばす分子がな

いかどうかを調べる。今回の予備的な計画は、薬剤スクリーニングにおける新しい考え方を取り入れている。ほかの病気の治療薬としてすでに米食品医薬品局（FDA）に認可されている薬剤から調べ始めたのだ。運が良ければ、すでにヒトでの安全性が試験され、確認されているものの中から目的の物質が見つかり、すぐさま運動ニューロン疾患に適用拡大できるだろう。

ルビンはハーバード大学で同様の研究を進め、プロジェクトALSが発見した分子経路の1つに作用して、運動ニューロンの生存期間を延長する低分子化合物を20種類以上見つけた。現在、脊髄性筋萎縮症財団が、この病気の動物モデルを用いてその1つを調べているところだ。

天からの蜘蛛の糸を生かすには

ベーブ・ルースと並んで、米メジャーリーグのニューヨーク・ヤンキースの顔だったルー・ゲーリックは、1938年に入り、プレーの精彩を極端に欠き始める。翌年、彼は、フランスの神経学者シャルコー（Jean-Martin Charcot）が1869年に記載した「脊髄が固くなる原因不明の麻痺」である筋萎縮性側索硬化症（amyotrophic lateral sclerosis：ALS）と診断されて引退を余儀なくされ、その2年後、37歳の若さで他界した。

それから70年たった現在、ALSは米国ではルー・ゲーリック病とも呼ばれているが、依然として有効な治療方法のない過酷な疾患であることに変わりはない。患者さんは症状の進行によって全身の運動機能を消失するが、進行後も、意識は清明で知的機能は保たれる。さらに、人工呼吸器を使用するか、そしてゴールのない介護を受けるかどうかという患者さんに突きつけられる選択は、ALSが最も容赦のない疾患の1つといわれる所以である。

1993年にALSの原因遺伝子の1つが同定され、さらにヒトと同様の症状を呈するモデルマウスが作出されたにもかかわらず、ALSの治療方法は確立していない。その解決のための重要なミッシングピースの1つがヒトの運動ニューロンであるという考えを、私たちのグループも有していた。そして米国のグループと同様、iPS細胞が発見される以前から、ALSの患者さんの皮膚にある幹細胞を収集し、運動ニューロンを作り出そうとしていた。米国のグループは核移植による方法を模索していたが、私たちは皮膚の幹細胞を運動ニューロンに分化させることに悪

戦苦闘していた。

取り組んでいた方法は違えど、私たちにとっても、iPS細胞技術は天からの蜘蛛の糸であった。2008年夏、いよいよ患者さんの皮膚細胞から滴を持してiPS細胞を作りはじめた1カ月後、私たちは、ALSの遺伝的特徴を持つ運動ニューロンを作り出したというエッグン博士らの論文に驚くことになる。

私たちを含め、この難問に取り組む世界中の研究者は、治療法の開発という最終ゴールのために、あらゆる可能性、考えるすべての手法を導入しようとしている。さらに、分野を超えて協力しうるすべての研究者との共同研究によって、全速力で、疾患の制圧を目指している。

その中で、iPS細胞作成技術というこれまでの歴史上に存在しなかった革命的技術はどうしても必要であり、それを用いることによって、シャーレの中での難病の疾患モデリングが可能となるであろう。ALSだけではない。慢性乳児神経皮膚関節炎症候群、多発性嚢胞腎、ダウン症、脊髄性筋萎縮症、肺高血圧症をはじめ、ほかの多くの病気についても、シャーレ内で疾患モデルを作る研究が日本と世界で精力的に行われており、知見が蓄積されつつある。

iPS細胞を用いた研究は、既存のパラダイムとの融合によって、病態解明、創薬開発をさらに加速することになると思われる。与えられた蜘蛛の糸を最大限に生かし、いかに疾患の治療法につなげていくかが、今後の重要課題である。

（井上治久＝右ページの監修者紹介参照）

iPS細胞が新薬開発の有望な手段となることは、ルビンがもう製薬会社に頭を下げて回る必要がなくなったことから明らかだ。2008年夏、コロンビア大学とハーバード大学のチームが、患者A29の細胞を用いてシャーレ内で患者と同じ遺伝的特徴を持つニューロンを作成できるようになると、製薬会社の方からルビンを訪ねてくるようになった。機密保持のため具体的な名前は明かせないが、「主要な製薬会社はすべて、この手法に関心を持っていると言える」とルビンは話す。

時間との闘い

興奮はバイオベンチャーにも広がっている。エッガンとルビンをはじめ、運動ニューロンのシャーレ内疾患モデルの開発に携わってきた研究者たちの多くは、カリフォルニアを拠点とするバイオ企業アイピエリアンとかかわるようになった。アイピエリアンは、セラー・ダイナミクス・インターナショナルやフェイト・セラピューティクスなどと並んで、医薬品開発にiPS細胞技術を利用しているバイオベンチャーだ。

その間も、シャーレ内で疾患モデルを作ろうと考える幹細胞の研究者は増えていった。2008年、エッガンらのALSの論文が発表されてからほどなく、ハーバード大学幹細胞研究所の別のグループが、iPS細胞技術を用いて若年性糖尿病やパーキンソン病など、ほかの病気の患者の細胞から、シャーレ内で疾患細胞を作ったと発表した。2008年後半には、ウィスコンシン大学のスヴェンセン（Clive N. Svendsen、現在はロサンゼルスシーダーズ・サイナイ医療センター）らが、脊髄性筋萎縮症患者の細胞からこの病気の運動ニューロンを作成し、疾患を再現した。

私はコロンビア大学とハーバード大学の研究者に、あの2人の老姉妹が、自分たちが提供した細胞からこの研究

が生まれたことを知っているかどうか聞いてみた。誰も知らないようだったが、後に患者A29の娘さんから、老姉妹が存命であると伺った。娘さんは、自身と家系のメンバーを匿名にするという条件で、取材に応じてくれた。

老姉妹の姉の方は93歳になったが、現在もALSの症状はほとんど表れていないそう。姪である彼女によれば、「自力で生活し、どこへでも歩いていき、買い物、料理、掃除もしている」という。患者A29と呼ばれた妹の方は、最近85歳になった。ALSではあるが、「ゆっくりと弱々しく」なら動くことができ、人助けの機会を持てたことを「感謝している」という。

この家系に課せられた残酷な運命が、遠ざかったわけでは決していない。むしろ幹細胞を用いた新しい医薬品開発は、これによって恩恵を受けられるかもしれない人々の切実さを、いっそう際立たせている。

「私はまだ比較的年が若いです」。そう言った患者A29の娘さん自身、2002年にALSと診断されている。「世代が進むにつれて病気の発症が早まるので

はないかと心配しています。それはまるで……」。彼女は言葉を切り、消えない恐怖に直面する勇気をかき集めるように続けた。「時間との闘いのように思えます。私には10代の娘がいま。このことは、いつも心に重くのしかかっているのです」。

（翻訳協力：古川奈々子）

監修者ノート

2011年4月10日現在、クロアチアの老姉妹の細胞を用いた研究から運動ニューロンの死にかかわる新たな分子機構が見つかったとの論文は、まだ学術誌に発表されていないが、記事は原文のまま訳した。老姉妹の細胞の中に運動ニューロンが死滅する新たな仕組みが見つかったとすれば大きな一歩だが、正式な発表があるまで、今しばらく状況を見極める必要があるだろう。

監修 井上治久（いのうえ・はるひさ）

京都大学iPS細胞研究所（CiRA）臨床応用研究部門准教授。ALSやアルツハイマー病などの神経疾患について、iPS細胞作成技術を利用した治療法の研究に取り組んでいる。



著者 Stephen S. Hall

科学と社会について30年近く執筆活動を続けてきたサイエンスライター。著書『不死を売る人びと』『夢の医療』とアメリカの挑戦（阪急コミュニケーションズ）で、幹細胞研究の曙について解説した。2010年5月に「Wisdom: From Philosophy to Neuroscience」を上梓した。

原題名

Diseases in a Dish (SCIENTIFIC AMERICAN March 2011)

もっと知るには…

別冊日経サイエンス177『先端医療をひらく iPS細胞、がん治療、創薬、医工連携』

別冊日経サイエンス152『人体再生 幹細胞がひらく未来の医療』

INDUCED PLURIPOTENT STEM CELLS GENERATED FROM PATIENTS WITH ALS CAN BE DIFFERENTIATED INTO MOTOR NEURONS. John T. Dimos et al. in *Science*, Vol. 321, pages 1218-1221; August 29, 2008.

STUDY SAYS BRAIN TRAUMA CAN MIMIC A.L.S. Alan Schwarz in *New York Times*, August 17, 2010.

iPS CELLS: A PROMISING NEW PLATFORM FOR DRUG DISCOVERY. George Daley in Children's Hospital Boston's science and clinical innovation blog, September 23, 2010: <http://vectorblog.org/ips-cells-a-promising-new-platform-for-drug-discovery>

DISEASES IN A DISH TAKE OFF. Gretchen Vogel in *Science*, Vol. 330, pages 1172-1173; November 26, 2010.

見えてきた ストーンヘンジの物語

この謎の巨大環状列石は
より広大な祭儀の場を構成する
一部にすぎなかったのかもしれない

W. アンダーヒル (ジャーナリスト)





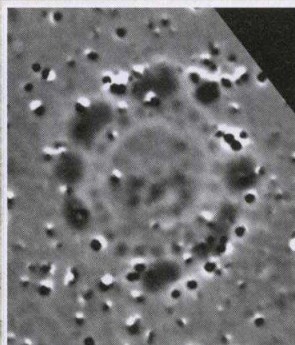
考古学者ガフニー (Vince Gaffney) は誇らしげにマウスをクリックし、パソコン画面に古代の風景を呼び出した。この52歳になる英バーミンガム大学の教授が散らかった自室で見せてくれたのは、英国で最も有名な先史時代の遺跡近くを“仮想発掘”した暫定結果だ。画面上に現れたのは、ストーンヘンジの北西約900mの場所に木製の柱が円をなして並んで立っていた跡で、ストーンヘンジをやや小振りにした木柱列がストーンヘンジと双子のように対になっていたとみられる。

ガフニーは2010年、国際チームを率い、最新技術によってストーンヘンジの周辺地域を調べて遺跡の謎を解明する3年計画のプロジェクトを始動させた。最初の成果はすぐに出た。高性能の磁力計と地中レーダーのおかげで、調査開始からわずか2週間のうちに、この環状木柱列の跡らしきものを発見したのだ。過去50年でこの遺跡に関する最も重要な発見といえるだろう。

ガフニーのほかにも近年に数多くの

あぶり出された全体像

近年、ストーンヘンジの周辺で大きな構造物がいくつか発見され、新石器時代の人々がこの一帯をどう利用していたのかについて、新たな見解が生まれてきた。1つの有力な仮説は、この環状列石を造った人々は建造中にダーリントン・ウォールズの集落に住んでいて、完成後は、ダーリントン・ウォールズのなかにある「サザンサークル」というストーンヘンジと対をなす木造の構造物に季節の祭式を行うために戻ってきていたというものだ。ここは「生者の領域」であり、その対極である「死者の領域」がストーンヘンジとその他のモニュメントで構成されていたのだろう。死者はダーリントン・ウォールズからエーボン川を下って「ブルーヘンジ」に運ばれて茶毘に付された後、「アベニュー」という大通りを通って最終的な安らぎの地であるストーンヘンジに向かった。



地中に残る柱の痕跡

磁力計を用いてストーンヘンジ周辺を調査した結果が2010年に発表された。ストーンヘンジから900mほど離れたところに、木柱サークルの跡とみられるものが見つかった。磁力計がとらえた左の画像で、環状に並んでいる穴の場所に木柱が立てられていた可能性がある。

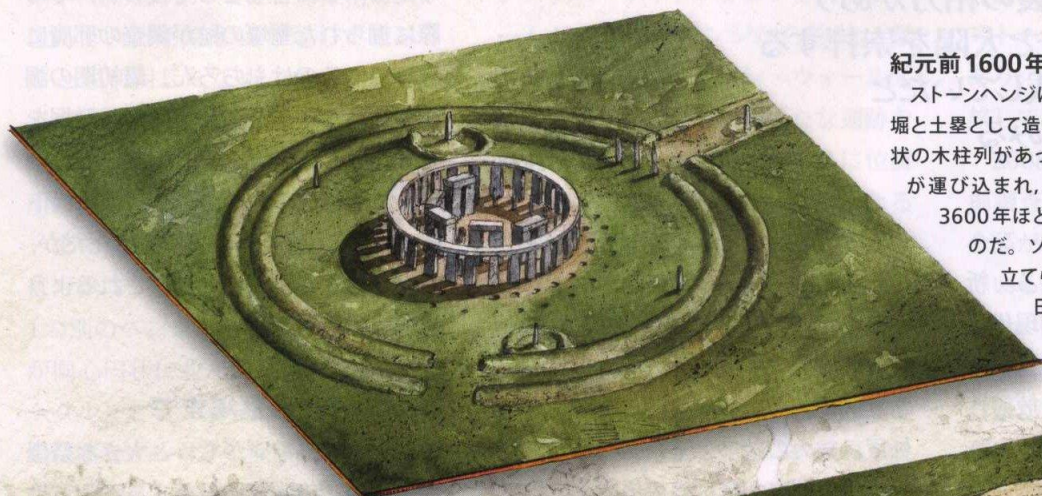
2010年に発見された環状木柱列の跡らしきもの

KEY CONCEPTS

生者と死者が集う場

- ストーンヘンジが何のために造られたのか、学者たちは何百年も前から推測を重ねてきた。
- これまでの推測はこの巨大な環状列石そのものに焦点を当てていた。しかし、近年の発見によって、ストーンヘンジが単独の建造物ではなかったことが明らかになった。
- ストーンヘンジはむしろ、もっと広大な祭儀の場の中心的存在だったとみられる。この発見によって、ストーンヘンジの真の機能に関して数々の新たな仮説が生まれた。





紀元前1600年ごろのストーンヘンジ

ストーンヘンジは約5000年前に、まず環状の堀と土塁として造られ、おそらくその内部には環状の木柱列があった。その後の1000年で巨石が運び込まれ、配置された。左の想像図は3600年ほど前の状況を想定して描いたものだ。ソールズベリー平原の傾斜地に立てられたこれらの巨石は、夏至の日の出の方角に合わせて並べられている。



生者の領域

ダーリントン・ウォールズ

サザンサークル

ウッドヘンジ

ウッドヘンジ

1925年、航空写真によって「ウッドヘンジ」と呼ばれる構造物の存在が明らかになった。上の復元図のように屋根を備えていた可能性もあるが、オープンな構造物だったかもしれない。ウッドヘンジが建造されたのはストーンヘンジやダーリントン・ウォールズよりも数百年後だが、過去数年に新たに発掘されたより古い時代の木柱列が完成時にどんな形だったのかを推定する手がかりを提供してくれる。例えばダーリントン・ウォールズのなかに位置する「サザンサークル」はウッドヘンジとほぼ同じ大きさだった。サザンサークルの方向は夏至の日の日没の方角を示しており、その点でストーンヘンジの鏡像となっている。

エーボン川

ブルーヘンジ

エームズベリー

ストーンヘンジには木製の相方があり 両者が対になって祖先と太陽を崇拝する 大きな祭儀の場を構成していたと パーカー＝ピアソンはみる

発見があり、研究者たちはストーンヘンジについて再考を迫られている。新試料の発掘と、過去の出土品を現代的な手法を用いて再解析した結果、新しい情報が続々ともたらされた。放射性炭素年代測定法の進歩によって、より正確な年代把握が可能になった。人骨などをより詳しく化学分析できるようになったため、その昔にこの地にやってきた人々のおよその出身地を特定することも可能になった。

調査のスピードも上がっている。レーダー装置によって、数年前には考えられなかった速度で地中に関するデータを集めることができる（ガフニーは先進機器を使った今回の調査で、以前の調査で3年がかかりで集めたのと同量のデータを2日で収集した）。

データが多く集まれば、斬新なアイデアが生まれる。新たな証拠から、ある先進的な仮説が有力になりつつある。ストーンヘンジは単独の存在ではなかったという見方だ。「ストーンヘンジはもっと広大な祭儀の場を構成する一施設だった」とガフニーはいう。

長年の謎

ストーンヘンジは何のために造られたのか、学者たちはその謎解きに17世紀から取り組んできた。だが、どの時代の学者も、誰が何のためにどのように造ったのかという大問題について、それぞれいろいろな説を唱えただけ。天体観測所だった、高貴な人の墓である、鉄器時代のドルイド（ケルト族の僧侶）の神殿だったなど、時代によってさまざまな説が出た。新石器時代に造られたことが科学的に立証される以前には、建造者はローマ人、あるいは

デーン人、果てはアーサー王伝説に登場する魔術師マーリンだともいわれた。

解明が難しいのは、建造者が残した痕跡が非常にわずかしかないたためだ。たき火跡の炭、石の碎片、畜牛の骨、矢尻、シカの角でできたピックなどがわずかに残されているのみだ。わかっているのは、大まかな年代だけ。木柱列を取り巻いていたとみられる環状の堀と土塁は紀元前3000年ごろに造られ、その後1000年をかけて徐々に最終的な形になった。

外側はサルセン石（砂岩の一種）のリングで、この巨大な砂岩はおそらく30km離れたマールボロ・ダウنزの採石場から運ばれてきたものだ。内側には、240kmほど離れた南ウェルズの山地から何らかの方法で運ばれてきたブルーストーン（粘土質の砂岩）が配置されているほか、大きなサルセン石の板を馬蹄形に並べたものがある。石の並びの中心軸は夏至の日の出と冬至の日没の方角を結ぶ線と一致しており、石の配置に意味があったのは確実だと思われる。

建造後に、考古学者の研究を混乱させる出来事がたくさん起こった。古くは、ストーンヘンジの初期の建造者がブルーストーンの配置を変えた。ブルーストーンのいくつかは完全に失われ、もともと80個ほどあったうち現在残っているのは半分くらいだ。

近くは、20世紀の人々の滅茶苦茶な行いが邪魔になってきた。ガフニーの磁力計による調査で、金属くずやボトルのキャップなどのゴミがたくさん検出された。1970年代と80年代にここで開かれた音楽祭の観客が落としていったものだ。第一次世界大戦時にこ

の地は軍事演習場として使われ、その際に掘られた塹壕の跡が調査の邪魔になっているのはもちろん、最初期の調査では考古学者たちが不用意な発掘を行い、痕跡を消してしまった。1986年に世界遺産に登録されたことでストーンヘンジと周辺の保護は進んだが、考古学的な発掘調査が制限されるようになった面もある。

揺りかごから墓場まで

ストーンヘンジがもっと大きな祭儀の場の中心施設であるとする考え方は新しいものではない。地図を見れば、周辺に多数の古墳が点在し、なかにはストーンヘンジより古いものもある。また、すでに1925年には、航空写真によって「ウッドヘンジ」と呼ばれる木柱列の存在が明らかになっていた。しかし、ここで生と死を取り仕切る祭儀がどのように行われていたのかを推測できるような証拠が集まるには時間がかかった。

ガフニーのチームが最新の木柱列を発見する数年前、別の発掘調査チームによる広域調査によって、遺跡一帯を包含する大きな描像の手がかりが得られ始めていた。2007年、英シェフィールド大学の考古学者パーカー＝ピアソン（Mike Parker Pearson）が率い、英国有数の考古学者が参加する「ストーンヘンジ・リバーサイド・プロジェクト」が、ストーンヘンジからわずか3kmほど北東に位置する人工の囲い地「ダーリントン・ウォールズ」に先史時代の大きな集落跡を発見したと発表した。この種の集落跡としては英国で最大とみられる。

土壌の化学組成（窒素やリンの濃度など）を分析した結果、住人がどこで食事を作りどこで眠っていたのかなど、間取りに関する多くの情報が得られた（例えば赤ん坊のおねしょによる微量の尿が数千年たった現在も残り、検出された）。そして超高精度の放射性炭

素年代測定によって、この集落に人が住んでいた期間は45年足らずであることが判明したため、パーカー＝ピアソンらは同集落はストーンヘンジ建造者の宿舎で、工事完了後には別の場所に移り住んだのだらうと考えている。

またパーカー＝ピアソンのチームはガフニーらの発見に先立って、もう1つ別のヘンジの跡を発見した。木柱が同心円状に並んだ跡で、「サザンサークル」と名づけられた。夏至の日没の位置をマークする配置になっているようで、ストーンヘンジの配置とは鏡像の関係になっている。パーカー＝ピアソンは、ストーンヘンジには対になる木製のヘンジがあり、それら2つのモニュメントが祖先と太陽の崇拜と結びついた1つの広大な祭儀の場を構成していたと推測している。「これは遺跡の真の目的を明らかにする証拠だ」と彼は主張する。「ストーンヘンジは、より大きな複合施設の半分にすぎない」。

対をなすモニュメントにはそれぞれ象徴的役割があったと彼は考えている。最も可能性が大きいのは、ストーンヘンジの大きなリングは死者の領分を表し、先祖を永久に記念するモニュメントであるのに対し、サザンサークルは反対に世俗の場であり、最初はストーンサークルの建造者が集い、後には季節ごとの祭式に使われたという線だ。

パーカー＝ピアソンがこの解釈を思いついたのは、チームにいたマダガスカル出身の考古学者による示唆が一因だ。マダガスカルにも、生者が木造の住居を構えるのに対し、死者にはそれに対応する石の建造物を造る習慣があるという。ダーリントン・ウォールズで出土した畜牛の骨の分析結果からも、この仮説を支持する結果が出た。牛は何kmも離れた南イングランドから連れてこられ、おそらく祭儀の宴に供されたものと推測された。

さらに2009年には、ストーンヘン

ジ・リバーサイド・プロジェクトのチームがストーンヘンジから約3km離れた場所（ダーリントン・ウォールズからも同距離にある）で新たな遺跡を発掘した。エーボン川のほとりに位置する25個のブルーストーンからなるサークルで「ブルーヘンジ」と名づけられた。

石板はすでになく、おそらくストーンヘンジへ運ばれたとみられるが、ブルーストーンの破片がはっきり残っている。さらに重要なことに、発見された微量の炭を分析した結果、建造時期が約5000年前であることがわかった。ブルーヘンジはおそらく火葬場で、死者がストーンヘンジへ向かう最後の旅に出る神聖な場所だったのだらうと、パーカー＝ピアソンはみている。

新石器時代の人々にとってブルーストーンは特別な意味を持っていたに違いない。さもなければ、より大きなサルセン石の石柱で守られたストーンヘンジの中央にブルーストーンを立てたわけがないだらう。そして、もう1つの新たな仮説によって、ストーンヘン

ジにさらに別の役割が付け加わった。ストーンヘンジは主に「癒しの場」であり、病人が回復を望んで何百kmも旅して訪ねてきたという見方だ。

2008年にストーンヘンジ内部の発掘調査が40年ぶりに行われ、その出土品がこの仮説を支持する証拠になっている。英ボーンマス大学のダービル（Tim Darvill）は「中世の大聖堂のように、ストーンヘンジではあらゆるが行われていただろうが、人々を引きつけた主な理由は、そこが神聖な癒しの場だったからだ」と主張する。ダービルはロンドン考古協会の前会長ウェインライト（Geoff Wainwright）とともに2008年の発掘を指揮した。

癒しの力

ダービルとウェインライトの仮説によって、人々が膨大な労力を注いで巨大なブルーストーン（1枚が4トン近くある）を240kmも離れた南ウェールズのプレセリ丘陵からイングランド南部まで運んできた説明がつくかもしれない（運搬がそれほど困難



癒しを求めて？ ストーンヘンジの近くに埋葬されていた10代の少年の遺骸を化学分析した結果、地中海地方の出身であることが判明した。これはストーンヘンジが死者のモニュメントというよりも、癒しの場であった可能性を示す発見のひとつだ。

ではなかった可能性もある。昨年秋、ある学生チームが小さな丸い石の上で石板を滑らせて運ぶ実験をした。スコットランドにある類似のストーンサークル周辺でそうした石のボールが見つかり、専門家がこの実験を提案した。

また、これまでに多くのブルーストーンが失われた理由にも説明がつく可能性がある。ダービルは2008年の発掘調査の際に、大量の小さな石片を発見した。大きな石からわざわざ削り取って作られたようで、おそらく魔よけのお守りとして用いられたのだろう。残りの大きな部分は、別のどこかで使うために運ばれていったのだろう。

しかし、ストーンヘンジが病を癒す奇跡の泉として巡礼者を集めているフランスの「ルルドの泉」の先史時代版だったことを如実に語る証拠は、石ではなく、死者からもたらされた。

2002年、ストーンヘンジから約5km離れたエームズベリーで発掘調査していた考古学者チームが青銅器時代の墓を発見した。紀元前2300年ごろのもので、豪華な副葬品とともに葬られていたこの男性は、弓を携えていたことから「エームズベリーの射手」と名づけられた。骨を調べたところ、片脚の膝から下が失われ、そこから骨の内部に感染が進んでいた。

そして興味深いことに、歯のエナメル質の化学組成を分析した結果、ストロンチウム同位体の構成比から、この男性が遠く離れたアルプスの出身であることが示された（エナメル質は幼少期に形成され、その人が育った場所に関する化学的記録を保存している）。

おそらくこの男性は、怪我の治癒、少なくとも痛みの緩和を求めて、すでに話に知られたストーンヘンジへとイングランドに渡ってきたのだろう。実際、周辺に数多くある墓を発掘したところ、重傷を負っていたとみられる遺体が見つかった。エームズベリーの射手も、ストーンヘンジに救いを求

めてやってきた多くの人々の1人だったと解釈できる。

最近、2003年にボスコム近郊で発見された墓の埋葬者について歯のエナメル質の同位体分析が行われ、エームズベリーの射手のほかにも遠隔地からやってきた人がいたことが示された。埋葬者のうち7人は幼少期をブルーストーンの産地であるウェールズで過ごしたとみられる。また昨年、英国地質調査所のエバンズ（Jane Evans）は、2005年に近くで発見された10代の少年の遺体を同様に調べた結果、温暖な地中海気候の地域からやってきたと考えられると報告した（ただしこのデータの解釈をめぐる疑問も残っている）。

ストーンヘンジが「ルルドの泉」だったとする説に対しては、他の仮説と同様、疑問視する人がある。最も厳しい反論は、この地で見つかる人骨のうち外傷の形跡を示しているものが過剰に多いといえる証拠が不十分だというものだ。この点では、もっと多くの人骨の試料が必要だろう。

しかし、さらに人骨が見つかったストーンヘンジ＝ルルドの泉説が有力になったとしても、パーカー＝ピアソンの説が否定されることにはならない。これら2つの仮説は二律背反ではないからだ。過去5000年間に、人々が時

代によってストーンヘンジを違う目的で使用し、違う意味づけをしてきたのは間違いない。

こうした新発見にもかかわらず、ストーンヘンジはまだほとんど謎のまま。石器時代の人々は自らの信仰や暮らしについて、実にわずかな手がかりしか残さなかった。しかし考古学者はこれからも最新技術を駆使して謎に挑み続けるだろう。ストーンヘンジの管理当局であるイングリッシュ・ヘリテージは今年、石をレーザーでスキャンし、引っ搔いて描いたマークや絵がないか調べる計画だ。パーカー＝ピアソンは「フィーディング・ストーンヘンジ・プロジェクト」の一環としてダーリントン・ウォールズで発見された動物の骨を解析しており、ストーンサークルを造った人々がどのように暮らし、何を食べ、どこから来たかを突き止めようとしている。

一方、約35km²の範囲をカバーするガフニーの“ハイテク探知網”は地中に眠っているものの包括的な画像を初めてとらえることだろう。新たな発見が続くのは確実だ。ストーンヘンジは「多数のモニュメントの複雑な複合体」の一部だろうとガフニーはいう。確かに複雑ではあるが、おそらく科学的調査によって解き明かせないものでもない。（翻訳協力：横原凜）



著者 William Underhill

英国在住のジャーナリスト。Newsweek誌のほかEconomist誌、Guardian紙、Daily Telegraph紙など多くの雑誌・新聞に記事を執筆。特に英国の歴史に強い関心を抱いている。

原題名

Putting Stonehenge in Its Place (SCIENTIFIC AMERICAN March 2011)

もっと知るには…

STONEHENGE EXCAVATIONS 2008. Timothy Darvill and Geoffrey Wainwright in *The Antiquaries Journal*, Vol. 89, pages 1–19. Published online April 21, 2009.

WHO WAS BURIED AT STONEHENGE? Mike Parker Pearson et al. in *Antiquity*, Vol. 83, No. 319, pages 23–39; March 2009.

ユネスコ世界遺産センターのストーンヘンジに関するウェブサイトは
<http://whc.unesco.org/en/list/373>

私がお薦めするテレビドラマ

現代は科学番組の黄金時代かも…

S. マースキー

(SCIENTIFIC AMERICAN 編集部)

現代生活の素晴らしい点に、テレビという技術がある。私が子どものころは、『原始家族フリントストーン』の放映時間とカプスカウトの集会在重なると、このアニメは見られなかった。もちろん、これはとっくの昔話。いまなら番組を見逃しても、後で都合のよいときにDVDや動画配信サービスHulu, iTunes, Amazon, あるいは国際著作権法に触れるその他さまざまな手段によって見ることができる。

私は最近、そうした新手段を使って比較的新しめの科学色の濃い2本のテレビドラマシリーズを見始めた。『デクスター』と『ブレイキング・バッド』だ。これらをご存じない読者も、以下を読めば見てみようという気になるかも。それから、最新の回まで見ている読者の皆さんにお願い。私にネタバレ情報を送ってこないでね！

『デクスター』はマイアミメトロ警察の鑑識主任マスカ (Vincent Masuka) の物語だ (ちなみにデクスターという登場人物は血痕専門の下っ端鑑識官)。マスカは署内での人望は薄い、主要な鑑識手法すべてに精通した万能鑑識官だ (訳注:「マスオカ」という日系人らしいが、同僚からはマスカと呼ばれている)。

このシリーズ (私はこれまでにシーズン3の序盤あたりまで見た) は、マスカの通常の仕事ぶりに加え、彼が単独で専門誌Forensics Quarterly向けに論文を執筆して法医学分野の進歩に寄与している様子も描いている。彼の論文は質が高く、受理後すぐに掲載される。テ

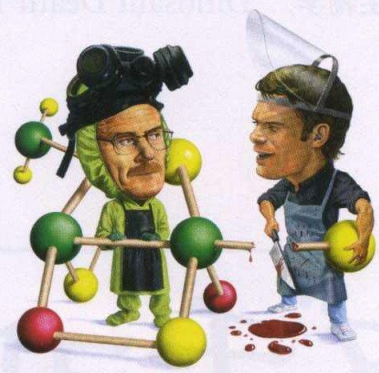
レビドラマの科学者でこんな芸当をやったのける人物は、私にはほかに思い浮かばない。

論文が掲載されると、マスカはコピーを署内の他のスタッフに配るが、皆に無視される。“鑑識眼”のない同僚がくずかごに捨てたコピーが見つかることもある。しかし、その論文がきっかけで、マスカは法医学会で基調講演を行うよう頼まれる。マスカは署内の警官と鑑識官全員のために学会出席のチケットを入手するが、部下のデクスターすら聴きに行こうとはしない。

さて、ここで断っておこう。私は米国のある現職大統領によるものを含め、多数の科学会議の講演に行ったことがあるが、チケットが必要なものなど皆無だった。マスカは自腹で買ったドーナツまで添えてチケットを皆に配るが、「警官にドーナツ」という最強のエサで釣っても、効果はさっぱりだ (訳注:警官はドーナツ好きという俗説がある)。彼の論文と基調講演は今度も無視されることだろう。

マスカが軽んじられているのは、番組の制作姿勢にも表れている。何しろマスカの登場時間はデクスターよりもはるかに短い。デクスターは実は——ネタバレ御免——精神病質の連続殺人鬼でもある！ そういうわけで、制作者はマスカという人物によって、暴力と混沌に満ちた状況のなかで文明を進歩させるべく孤軍奮闘する現代のシーシュポスとしての科学者を見事に描いているのである。ブラボー。

ホワイト (Walter White) という高



校の化学教師の冒険を描く『ブレイキング・バッド』については、まだ最初の3話を見ただけだが、すでに化学薬品の取り扱いに関する貴重な教訓を描き出している。

ホワイトは未熟な相棒に、フッ化水素酸を安全に保管できる特殊なプラスチック容器を買うよう言いつける。経験不足の助手はホワイトの指示を無視し、大型容器2つ分のフッ化水素酸をバスタブに注いでしまう (このバスタブには、ホワイトが殺したメタンフェタミン通称ヒロポンの売人の死体が入っている。ホワイトらはこの死体を溶かそうとしているのだが、これはこの際どうでもよい)。フッ化水素酸はバスタブの中身の大半だけでなく、バスタブ本体と床も溶かしてしまう。すべての残骸が階下に落ち、残っていた酸が階下の床も溶かし始める。マスカのような鑑識の達人がこの現場を見たら、どう解釈することか！

フッ化水素酸は強い腐食性があり、非常に危険だ。大学で化学を履修したとき、私たち学生は塩酸や硫酸を何のおとがめもなしに扱うことができたが、フッ化水素酸の容器には触れることさえ許されなかった。まれにこの薬品が必要になった場合、教官が保護具を着用して貴重な数ミリリットルを取り出し、学生はドラフトチャンバー中でそれを使ったものだ。

そういうわけで、『ブレイキング・バッド』は私に楽しかった大学時代と実地で学ぶ喜びを思い出させてくれた。次回が待ちきれない。現代のテレビ技術のおかげで、待つ必要はないけど。 ■

ダチョウ恐竜 集団死の謎

ゴビ砂漠で10体を超える恐竜化石がまとまって見つかった
恐竜研究史の中でも異例の発見だ
いったい何が起きたのか、9000万年前の恐竜の生と死の謎に迫る

P. C. セレノ (シカゴ大学)

「もう1体見つかったぞ！ 頭骨も完璧だ」。地面にへばりつくようにして発掘しているチームのメンバーに向かって私は叫んだ。私は古生物学者として長年、恐竜化石を探し歩いてきたが、このような化石の集合は見たことがなかった。私たちのチームは、中国北部の内モンゴル自治区にあるゴビ砂漠で調査を始めて15日たらずで、こ

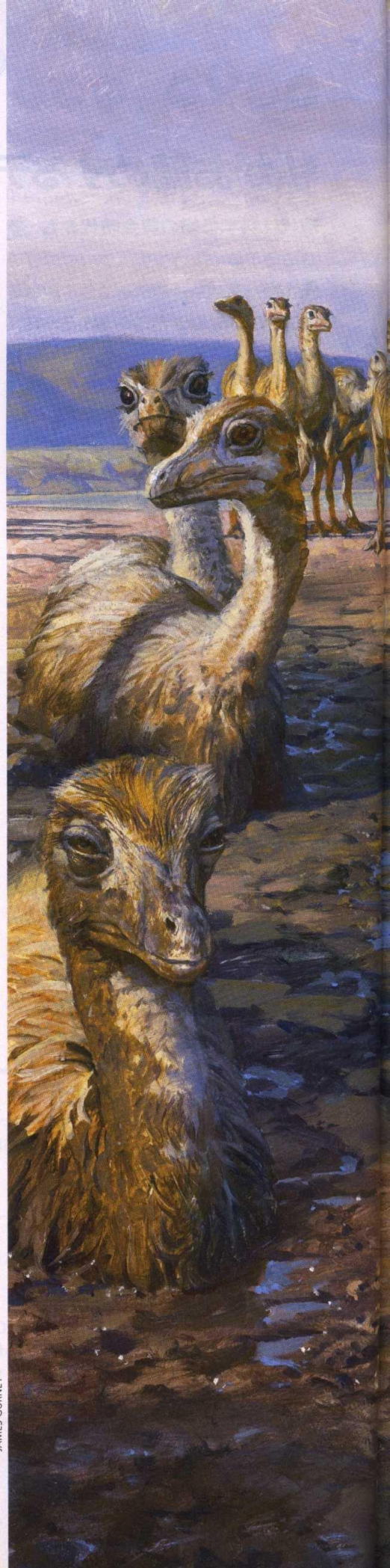
の恐竜の墓場を見つけ出した。

私たちはそれから2週間かけて、タガネやツルハシ、ブルドーザーなどを使い、10体を超える「ダチョウ恐竜」の骨格を発掘した。これらの化石が恐竜の研究界を騒がせるのは間違いないだろう。数の多さもさることながら、埋もれ方も特徴的だった。これらの化石を調べれば、この恐竜の生活や社会

KEY CONCEPTS

9000万年前の悲劇の真相

- 中国の内モンゴル自治区にあるゴビ砂漠を調べていた国際調査チームが、ダチョウ恐竜（オルニトミムス類）の一種であるシノオルニトミムスの骨格を同じ場所で13体も発掘した。
- これらの恐竜は、長い年月をかけて1カ所に集まったのではなく、同時に死んだことがわかった。
- この墓場の研究から、恐竜を襲った悲劇の謎だけでなく、恐竜社会の意外な一面が明らかになった。恐竜は大人と子どもで役割分担があり、群れを形成していたのだ。



JAMES GURNEY



構成がわかるだけでなく、奇妙な死の謎も明らかにできそう。私たちは9000万年前の“殺害現場”で最初の手がかりをつかんだのだ。研究生生活を続けていて、同一種の恐竜がこれほどたくさん眠る現場に出合えるとは想像もなかった。

魅惑のゴビ砂漠

米国の研究者は長年、ゴビ砂漠で恐竜調査を展開してきた。中でも有名なのは、ニューヨーク自然史博物館の冒険家アンドリュース（Roy Chapman Andrews）だ。アンドリュースは1920年代に外モンゴル（現在のモンゴル国）を探検し、恐竜の卵や鋭い爪を持つベロキラプトル（*Velociraptor*）を世界で初めて発見して脚光を浴びた。

だが同じころ、ほかにもゴビ砂漠を探索していた人がいた。スウェーデンの探検家ヘディン（Sven Hedin）だ。彼は内モンゴルに広がる南ゴビ砂漠で珍しい化石を発掘した。

内モンゴルではその後も、巣で卵を温める恐竜や鋭い爪の小型肉食竜などの化石が見つかり、外モンゴルに匹敵する発見が続いた。しかし、研究者や一般の人々はなぜか外モンゴルを好ん

だ。そのため、10年以上前に欧米に開かれてから、外モンゴルで国際恐竜調査が盛んに行われた。一方、内モンゴルは比較的手つかずのまま残された。

私が初めて内モンゴルを訪れたのは27歳のときだった。当時、地質学を学ぶ大学院生として、世界中を飛び回っていた。それは1984年で、ちょうど中国で外国人旅行客が護衛なしで歩けるようになった最初の年でもあった。

内モンゴル自治区の区都フフホトに蒸気機関車が着くと、私はまず博物館に立ち寄った。博物館は1本しか通りのない街の中心部にあった。街の外側には、西に何百キロにもわたって恐竜時代の地層が露出していた。その地層は、モンゴルの草原地帯と中央アジア中心部を結ぶシルクロードと並走するように伸びていた。

その後、北京に戻り、中国科学院古脊椎動物・古人類研究所の教授で、10種類以上の恐竜発見にかかわった中国最高の恐竜ハンターである趙喜進（Zhao Xijin）と会った。私たちは夢を語り合い、いつかこの地域と一緒に調査しようと約束を交わした。そして16年後、すべての準備が整い、夢が実現することとなった。

2000年、私はどこを調査するか話し合うため、趙とともにフフホトに戻った。フフホトで列車から降りると、譚琳（Tan Lin）が出迎えてくれて私たちは挨拶を交わした。譚は内モンゴルの竜昊地質古生物研究所の所長を務める地質学者で、若々しくて60歳にはとても見えなかった。

譚は翌年春のゴビ砂漠の発掘調査に必要な車や必需品について詳しく説明してくれた。昔は都合をつけるのが難しかった車も、今のフフホトでは問題なく手配できた。私の記憶にあった小さな町は、大通りにネオンサインが立ち並ぶせわしい大都会へと変貌していたのだ。

譚はヘディンやその後の調査チームが発見した恐竜産地に行ってみるのはどうかと提案した。まだそこに恐竜化石が埋もれているのは確かだ。しかし、私の意見は違っていた。私としては、まだ誰も足を踏み入れたことのない場所がよいと考えていた。そして翌年春、私たちは何かに引き寄せられるように、ゴビ砂漠の西を目指してシルクロードを進んだ。

最初の手がかり

2001年4月半ば、米国人、フランス人、中国人、モンゴル人からなる16人のメンバーがフフホトに集まった。4台のジープに分乗し、その後ろを何トンもの必需品を積んだトラックが続いた。700km先の砂漠に向け、黄河沿いの道をひたすら走った。

私たちはスホントウという小さな町の近くに最初のベースキャンプを張った。ゴビ砂漠の強風が中国の軍用テントに容赦なく吹き付け、テントの中のあらゆるものが砂埃をかぶった。キャンプでは水が貴重で気温も低かったためシャワーを浴びることもできず、私たちの髪の毛はジェルで固めたかのように逆立っていた。

その厳しい状況の中で、私たちは毎

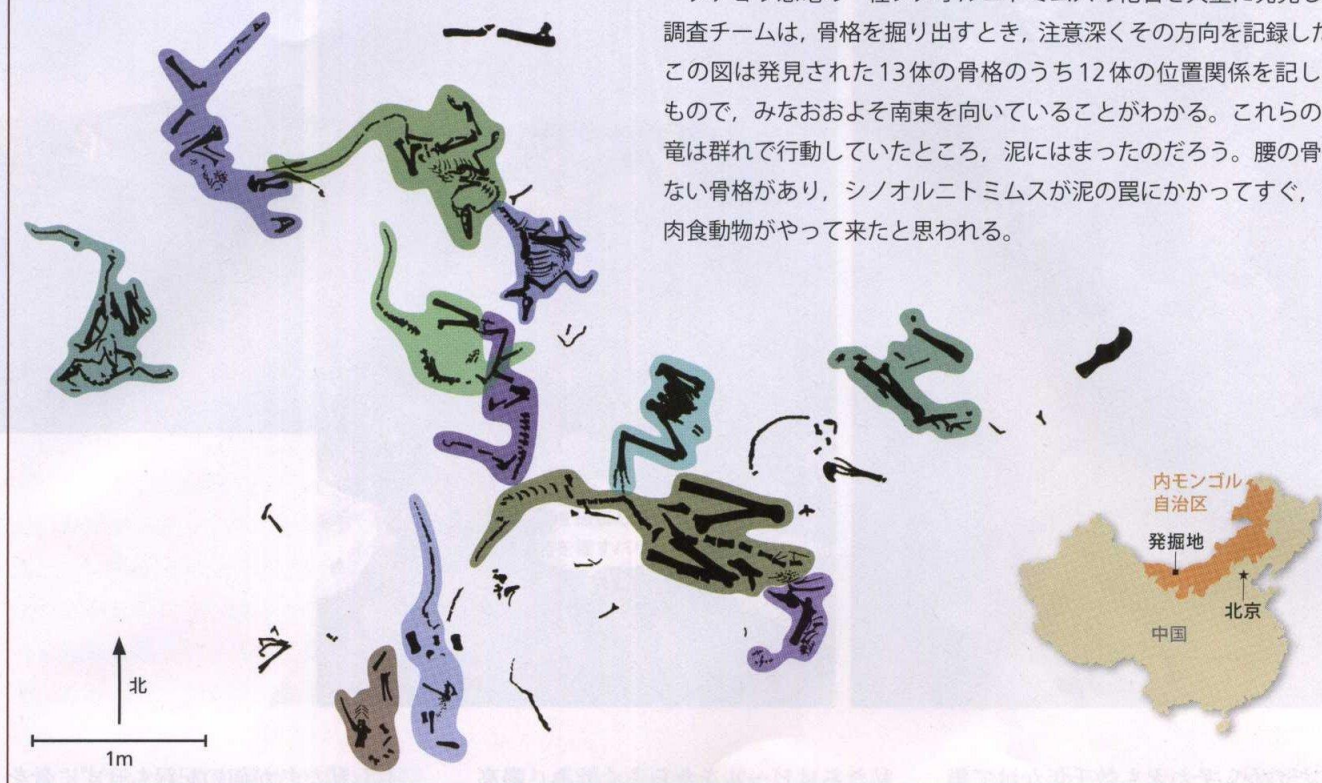


MIKE HETTER

ブルドーザーでさくさく発掘 中国軍がこのブルドーザーを貸してくれたおかげで、通常であれば何カ月もかかる発掘作業が数週間で終わった。

集団死の現場に残された手がかり

ダチョウ恐竜の一種シノオルニトミムスの化石を大量に発見した調査チームは、骨格を掘り出すとき、注意深くその方向を記録した。この図は発見された13体の骨格のうち12体の位置関係を記したもので、みなおおそ南東を向いていることがわかる。これらの恐竜は群れで行動していたところ、泥にはまったのだろう。腰の骨のない骨格があり、シノオルニトミムスが泥の罠にかかってすぐ、腐肉食動物がやって来たと思われる。



FROM "MUD-TRAPPED HERD CAPTURES EVIDENCE OF DISTINCTIVE DINOSAUR SOCIALITY", BY DAVID J. VARRICCHIO ET AL., IN ACTA PALAEONTOLOGICA POLONICA, vol. 53, No. 4, 2008 (bone map)

日化石を探した。化石が地中から顔を出していないかと、起伏の激しい道なき道を毎日何kmも歩き続けた。化石を見つけるには運も大事だが、化石を嗅ぎ分ける“鼻”も重要だ。

モンタナ州立大学の古生物学者バリッキオ（Dave Varricchio）が、岩層の下の方から最初の化石を見つけた。3本指の足跡化石だ。幅が狭く、サイズは恐竜としては小さめで、バリッキオの手より少し大きいくらいだった。私たちは、この足跡がダチョウ恐竜（オルニトミムス類）のものだと感じた。そして間もなく、この予感的中した。

25年前に作られた中国の地質図によると、私たちのキャンプの周りには約9000万年前（白亜紀後期）の地層が広がっていた。だが残念ながら、この地域ではほかにめばしい化石は見つからなかった。そこで、化石の多い広々とした谷に移動した。するとすぐにいくつもの当たりがあった。原始的なハ

ドロサウルス科の恐竜（カモノハシ竜とも呼ばれる）の化石が地表から出ているのが見つかったほか、4本脚で大型の植物食恐竜として知られる竜脚類の化石も発見された。

その後、赤と青の縞状の岩壁から数体の小型恐竜の脚の骨が飛び出しているのが見つかった。しかし、何かが変だった。その壁は自然にできたものではなく、タガネやツルハシで削った跡があり、化石の発掘現場の壁のようだった。私たちよりも前に、誰かがここにやって来たのだ。

譚の説明によると、ここはもともと彼の旧友が1978年に地質調査をしていたときに化石を発見した場所だという。「ここを見てくれ」。譚は地質図に記された記号を指差した。1997年、私たちが来る4年前、譚はこの地図をもとに日中蒙3カ国共同調査隊を案内していた。この調査隊は何体もの恐竜化石を見つけていたが、時間と物資が

限られていたため、すべては発掘できなかったという。

私は自分のリュックサックの中に、日本人若手研究者の小林快次（89ページの訳者紹介を参照）が1999年に発表した論文が入っていたことを思い出した。小林は当時、米国のサザンメソジスト大学の大学院生だった。そして私は、小林の論文が私の目の前の恐竜産地をもとにしたものだ気づいた。

小林は多数の骨格が発見された事実やその保存状態のよさについて記していた。さらには胃石（竜脚類恐竜のほか現生動物ではワニやアザラシ、鳥の消化器官の中にある石で、消化を助けるとされる）が残されているとも報告していた。2003年に小林はこの恐竜をシノオルニトミムス・ドンギ（*Sinornithomimus dongi*）と名付けた。

しかし、謎はまだ残っていた。こんな小さな場所にどうしてこれだけ多くの骨格が集まったのだろう？ 一斉に



死んだのか。それとも数千年かけて集まったのか。もし同時に死んだのだとしたら、何が起きたのだろうか？

現場は、吹きさらしの荒れ果てたゴビ砂漠にぽつんとある小さな丘のふもとにあった。そこで私たちが議論していると、地平線が急に灰茶色に変わった。砂嵐の前触れだ。砂漠でこのような警報が出ると、数時間ではなく数分後に天候が変わる。私たちは行きにつけた轍が見えるうちに急いでキャンプに戻ろうと、ジープに駆け込んだ。数分後、強風にあおられた砂が壁のように迫ってきて、車の遠く後ろの方が暗くかすんでいった。

あらゆる隙間に入り込む砂嵐と骨まで冷える寒さからくる疲れを、キャンプのコックの夕食が癒してくれた。コックは毎日違う7品の料理を作ってくれた。幸いにも、私たちのキャンプは中国軍基地からほど近いところにあり、新鮮な野菜を手に入れることができた。私は中華料理は世界一だと思う。それと同じくらい中国のビールもうまい。

私たちはビールをたらふく飲み、最高の発見をみんなで祝った。

死の罫

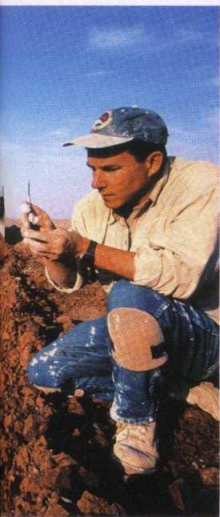
それから数週間、私たちは毎日その谷に通いつめた。私たちはシノオルニトミムスの謎を解くために調査を続けることを決めた。壁を崩しながら丘の奥深くまで掘り進むと、1体また1体と、次々に骨格が見つかった。岩肌についても観察し、この墓場を構成する岩石の詳細を記録した。

このように同じ種の恐竜骨格が何体も同じ場所で見つかり、私たち古脊椎動物学者はそれらが自然に集まったものかどうかを疑う。つまり、恐竜が家族や群れでまとまって行動していた際に何らかの原因で突然死んだのだろうか？ たいていの場合は、話はそれほど面白くはない。単に洪水などで、同じ種類の恐竜が長い時間をかけて同じ場所にたどり着いたものだ。そうした場合、集まった恐竜どうしは何の関係もなく、死因もわからない。

もし私たちが何の記録もせずに骨を掘り出して袋に入れていたら、恐竜の死の謎に迫る大切な証拠は永久に失われていただろう。謎解きに欠かせない死んだときの状況は骨そのものにはない。重要なのは遺骸のあった場所だ。位置関係や腐肉食動物に食べられた跡、骨の散乱具合、死ぬ前後の堆積物の変化などが証拠としてそこに残されている。そのため私たちは、単に古生物学者の戦利品としてではなく、殺害現場を見るような目で、この場所を分析していく必要があった。

調査を始めて間もなく、ある結論に至った。これらの恐竜はすべて同時に死んだのだ。骨格はみな、ほぼ同じ方向を向いて埋まっていた。洪水や河川の流れて同じ場所に運ばれてきた可能性についても調べたが、そのような形跡は見つからなかった。水に流されたのなら骨格はバラバラになるはずだが、骨はすべてつながっていた。

さらに、岩壁に露出していた地層は赤と青の薄い層が重なっており、泥や



発掘の様子 ゴビ砂漠での発掘現場の風景を撮影した写真。左から右へ：小さな骨を探すバリッキオ。ツルハシを振り下ろす著者。ブルドーザーの通った後の石を調べる調査隊。キャンプに襲いかかる砂嵐。泥岩に埋もれたシノオルニトミムスの前脚。

シルト（砂と土の中間サイズの粒子）でできていると考えられた。泥が乾燥して割れた跡もあり、雨期と乾期が交互にやってくる環境だったこともわかった。一部の骨格からは、淡水にすむ貝甲類という小さくて平たい動物の殻と一緒に見つかった。また、骨格の埋まっていた泥は不純物がほとんどなく、虫が這った穴も植物が根を張った形跡もなかった。骨格周辺の証拠から、この場所はときどき干上がる湖のようなところだったと考えられた。

このような形で化石が集合している例は初めてだった。火山灰に埋もれたイタリアの古代都市ポンペイの恐竜版といえる。私たちは調査を進めながら、これらの恐竜が死んだ状況について何時間も考えた。火山活動に巻き込まれたのか、それとも洪水にのみ込まれたのか？

「単に泥にはまって死んだのではないか？」と、メンバーの1人のリオン（Gabrielle Lyon）が、指を握りしめた状態の恐竜の脚の輪郭を細い金属棒

で削りながら言った。泥にはまるという考えは、私にはまったく思いつかなかった。発掘経験は豊富だが、リオンは教育者で、古生物学者でも地質学者でもない。確かに、現存生物でも牛などがぬかるみにはまって死ぬことがある。大型動物は膝まで泥につかると動けなくなり、水不足や飢えで死んでしまう。しかし、何体もの動物が集団でこのように泥にはまって死ぬのは非常にまれだ。それでも、化石生成論に詳しいバリッキオによると、野生の馬でそうした化石の例があるという。

発掘が進むにつれて、証拠がどんどん揃ってきた。骨格が埋もれていた層の近くで、バリッキオがV字状に曲がった地層を見つけた。まるで爪のような細い何かで下に押し曲げられたようだった。この恐竜が泥の中で最後にもがいた跡だろうか？

だが残念ながら、発掘作業を続けるのが難しくなってきた。シノオルニトミムスが眠る地層は丘の下の方にあつて、その日だけで発掘できるような状

況ではなかった。私たちの道具では、完全に掘り終えるまでに数年ではないにしろ数カ月はかかりそうだ。しかしその後すぐ、中国という国では何事も可能だということを私たちは知った。

休日、私たちは中国軍基地に出向き、軍人とバスケットボールを楽しんでいた。コート横でゲームを見ていた譚と趙は、近くにブルドーザーがとめてあるのを見つけた。その夜、バスケットボールで親しくなった軍人たちと一緒に、基地当局者に相談に行った。ここでは白酒（パイチュウ）というお酒も出た。アルコール度数の高い、おちょこで飲む酒だ。白酒を交えて交渉したかいあって、数日後、発掘現場にブルドーザーがやって来た。

ブルドーザーが数センチずつ丘の表面をはぎ取り、私たちはその後を追って墓場の上から化石を探した（上中央の写真）。突然、「機械を止めろ！」とミシガン大学の古脊椎動物学者ウィルソン（Jeff Wilson）が声を上げ、ブルドーザーではじかれた石を見つけて

殺害現場を見るような目で 恐竜の埋もれていた場所を分析していった

かがみ込んだ。ウィルソンは何かの顎の骨と歯を見つけた。私たちはブルドーザーが最後に通った場所にある石を片端から確認し、壊れた破片をすべて探した。シノオルニトミムスの集団が眠る地層から背丈ほど高い位置に埋まっていたのは、まだ知られていない肉食恐竜の45cmにも及ぶ頭骨だった。

4日目、ブルドーザーはシノオルニトミムスの墓場の少し上のところまで丘全体を削り取った。私たちは13体のシノオルニトミムスを掘り起こすため、再び発掘を始めた。通常、恐竜の骨格は平らなところに並び、その上に数cmの堆積物が積もるため、1つの面から見つけることが多い。しかし、

これらのシノオルニトミムスの骨格は、後脚が泥の中にはまったような形で埋まっていた。中には腰の骨だけがなくなっているものもあった。泥にはまって動けなくなり、捕食者に見つかって襲われたようだ。

この恐竜たちは、群れで移動しているときに湖岸の泥地で足を取られたのだろう。リオンの仮説は正しかった。彼女は骨に残されていた恐竜の苦しみを嗅ぎ分けたのだ。

恐竜の生と死

私たちはシカゴ大学に戻り、骨を岩石から取り出すクリーニング作業を行った。顕微鏡を見ながら異物を除いて

いくと、美しい骨格が現れた。胃石が保存されていただけでなく、植物繊維を消化する砂嚢らしき消化器官の形まで残っていた。さらに、その片側は黒い炭化物の膜で覆われていた。この黒い膜はシノオルニトミムスが最後にとった食事の名残なのだろう。

その後、さらなる証拠が見つかり、発掘中に抱いていた予想が実際に確かめられた。私たちは砂漠にいたときから、これらの恐竜がすべて亜成体であると考えていた。

発掘現場でその恐竜が成体か否かを判断するには、背骨を見るのが一番いい。背骨は円筒形の椎体とアーチ形の神経弓で構成されている。この2つが完全に癒合していれば成長の終わった成体で、していなければ亜成体ということになる。今回発見されたシノオルニトミムスの骨格はすべて、椎体と神

シノオルニトミムス発見の衝撃

この記事は、私たち日中蒙3カ国共同調査隊が発掘を行った4年後からストーリーが展開される。私たちの発掘の様子は彼らとさほど変わらない。唯一違うのは、私たちのときは灼熱の太陽が照りつけていたことぐらいだ。砂嵐と焼きつけるような日差しの中で調査は進められた。あまりの暑さで朝10時から夕方4時までには仕事にならず、シエスタを取っていた。その代わり、作業は早朝から始め、夜遅くまで続けた。

本文にあるように、私はすでにセレノらの研究の前にシノオルニトミムスについて2本の論文を発表していた。1999年の1本目の論文で私は、獣脚類であるオルニトミムス類が胃石を持つことを世界で初めて報告した。胃石は植物食動物の消化器官で見られる岩石だ。一般に獣脚類は肉食恐竜として知られ、基本的に肉を食べると言われていた。だが、鳥類に進化した獣脚類恐竜の中には植物を食べるように進化した種もあった。シノオルニトミムスの胃石の発見は、その植物食性の進化を明らかにした最初の報告となった。2003年に発表した2本目の論文では、シノオルニトミムスを命名し、その集団行動について言及した。その論文で私たちはすでに、集団行動だけでなく、成長過程や幼体が多いことについても議論していた。だが、最後の疑問である死因だけが謎のまま残されていた。

私たちは14体の骨格を発掘し、セレノらは13体の骨格を発見している。つまり、総数27体のシノオルニトミムスが1

力所から発見されたのだ。2008年にバリッキオらはシノオルニトミムスの死因に関する論文を発表しており、このセレノの記事はそれを基にしている。

バリッキオやセレノがその論文の準備をしている時、私は彼らとシノオルニトミムスの死因について議論したことがある。本文にもあるように、手足が泥にはまったような状態で埋もれている不思議な“現場”だったのだ。彼らと同様、私たちもシノオルニトミムスの死因が泥に埋まったからだという可能性は考えていた。それを詳細なデータを基に追究した彼らの功績は大きい。彼らの研究によって、シノオルニトミムスの研究がある意味完結されたからだ。

ただひとつ、私は同意できないことがある。腰の骨が捕食者によって食べられたという彼らの意見だ。確かに不思議なことに、骨盤と腰付近の椎体のみがバラバラになっていた。私はこの原因として、遺骸が腐敗して体内に発生したガスが腰の部分から抜けて、そのときにバラバラになったのではないかと考えている。同じような状況が羽毛恐竜で有名な中国の遼寧（りょうねい）省の化石にも見られるからだ。

どちらが正しいかは未来の研究者が解決してくれるだろう。結果はともあれ、シノオルニトミムスの発見が恐竜研究史に刻まれた貴重な発見であるのは間違いない。

（小林快次＝右ページの記者紹介の項を参照）

経弓が癒合していなかった。

しかし、背骨を観察しただけでは大まかな年齢しかわからない。そこで私たちは骨から薄片を作って断面を観察し、木の年輪のような線を数えた。その結果、これらの恐竜集団の年齢層は1歳から7歳で、1～2歳の個体が多いことが判明した。この事実から、2つのことが考えられた。1つ目はシノオルニトミムスが成体になるまでに10年くらいかかったこと。2つ目は、これらの恐竜が若い群れだったということだ。恐竜の若者がみんな一緒に歩き回っていたのだ。

こうしてシノオルニトミムスの生涯がわかってきた。どうして死んだのかだけでなく、どのように生きていたのかまで明らかになった。それまで多くの研究者は亜成体の集団行動に懐疑的だったが、今回の発見はそれを証明する最高の証拠となった。

成体になるまでに10年もかかるシノオルニトミムスは、若者どうしが集まる機会が多かったはずだ。繁殖期の成体は忙しい。交配相手を探し、巣を作り、巣を守る。孵化した子どもの世話もしなければならない。一方、若い

恐竜は自分たちで行動し、自分たちで身を守っていかなければならなかったのだろう。

この集団は不慮の死を遂げた。一見、何の変哲もない湖岸を通り過ぎようとしたとき、泥の罠がこの群れを捕らえた。真ん中の2体は9000万年前の悲劇を最も印象的に表していた。この2体は、脚を泥に奪われ、折り重なるように倒れた。また、腰の骨以外はそろっていた。腹をすかせた腐肉食動物の餌食になったのだろう。離れた場所で見つかった腰の骨が当時の状況を物語っていた。翼状の骨は、乱入者に踏まれ破壊されていた。

やがて水位が上がり、この墓場はその悲劇とともに泥の中へ埋もれていったのだ。 ■

訳者 小林快次（こばやし・よしつぐ）
北海道大学総合博物館准教授。本文に登場するシノオルニトミムスを最初に発見し、その名前をつけた本人でもある。恐竜や他の爬虫類化石、特に現生の鳥やワニを含む分類群である主竜類について、形態機能、古生物地理、生理や生態系のメカニズム等を研究している。



著者 Paul C. Sereno

シカゴ大学の古生物学者。5大陸にまたがって恐竜調査を行い、これまで20種類以上の恐竜の新種を発見してきた。また、都会の若者たちに科学のおもしろさを伝えることを目的とした「探検プロジェクト」という社会活動の発起人の1人でもある。

原題名

Dinosaur Death Trap (SCIENTIFIC AMERICAN March 2011)

もっと知るには…

HERBIVOROUS DIET IN AN ORNITHOMIMID DINOSAUR. Y. Kobayashi, J. C. Lu, Z. M. Dong, R. Barsbold, Y. Azuma and Y. Tomida in *Nature*, Vol. 402, pages 480–481; December 2, 1999.

A NEW ORNITHOMIMID DINOSAUR WITH GREGARIOUS HABITS FROM THE LATE CRETACEOUS OF CHINA. Y. Kobayashi and J. C. Lu in *Acta Palaeontologica Polonica*, Vol. 48, No. 2, pages 235–259; 2003.

MUD-TRAPPED HERD CAPTURES EVIDENCE OF DISTINCTIVE DINOSAUR SOCIALITY. D. J. Varricchio, P. C. Sereno, X. Zhao, L. Tan, J. A. Wilson and G. H. Lyon in *Acta Palaeontologica Polonica*, Vol. 53, No. 4, pages 567–578; 2008.

2001年米中共同恐竜発掘調査のウェブサイト www.projectexploration.org/mongolia

最新刊

きちんとわかる 燃料電池

○定価 1575円 345ページ

「環境とエネルギー」の21世紀。省エネ技術で世界をリードしてきた日本が、残された重要課題の1つ、内燃機関（エンジン）の革命・代替えに本格的に取り組み出した。本命が燃料電池だ。

最新刊

真空考 林主税

定価2100円 A5判 221ページ

きちんとわかるシリーズ

巨大地震

○定価 1575円 281ページ

環境共生化学

グリーン・サステナブル ケミストリー

○定価 1575円 433ページ

木質バイオマス

○定価 1575円 229ページ

糖鎖工学

○定価 1575円 331ページ

ナノバイオ

○定価 1575円 253ページ

時計遺伝子

○定価 1575円 268ページ

計量標準

○定価 1575円 435ページ

白日社

〒160-0023

東京都新宿区西新宿 1-3-3 榎本ビル4F
TEL:03-3342-0054, FAX:03-3342-0354
<http://www.hakujitsusha.co.jp>

<資料請求番号89>

もうひとつの温暖化危機 北上する赤道降雨帯

西暦800年以後の赤道付近の降雨状況を調べることで
熱帯地域の気候が2100年にかけて
どのように変化するかを予測できるようになった

J. P. サックス (ワシントン大学)

C. L. ミアボルド (在プリンストン大学)

午前2時、舟のエンジンが突然ブルブルと震え、それきり止まった。静寂がこれほど不安をかき立てるとは、かつてない経験だ。北太平洋亜熱帯のマーシャル諸島から外洋を小さな釣り舟で渡るといふ計画は決して賢明なものではなかったと、急に思えてきた。科学のフロンティアへの旅は、私たちをまったく異なるフロンティアへと導いた。打ち寄せる波の音が時折聞こえるだけの巨大な暗闇だ。

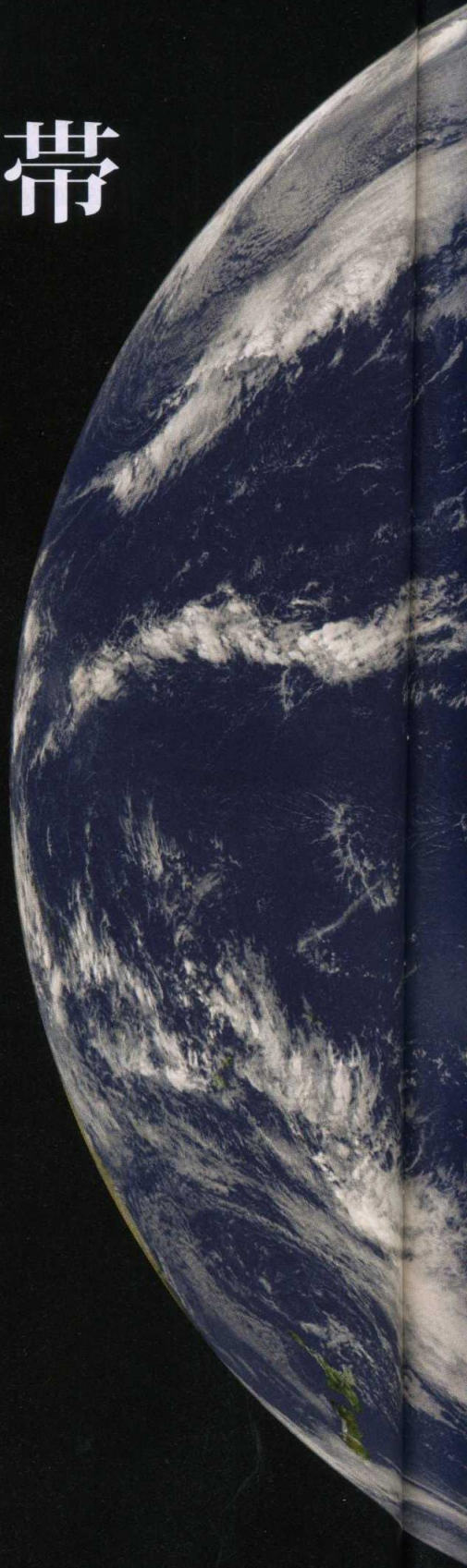
私たちは気候学者で、この舟旅（最終的には無事帰還できた）は、一見不可能に思える目標を達成するために計画された調査旅行の1つだった。その目標とは、太平洋全体の雨量変化を時代をさかのぼって再構築することだ。

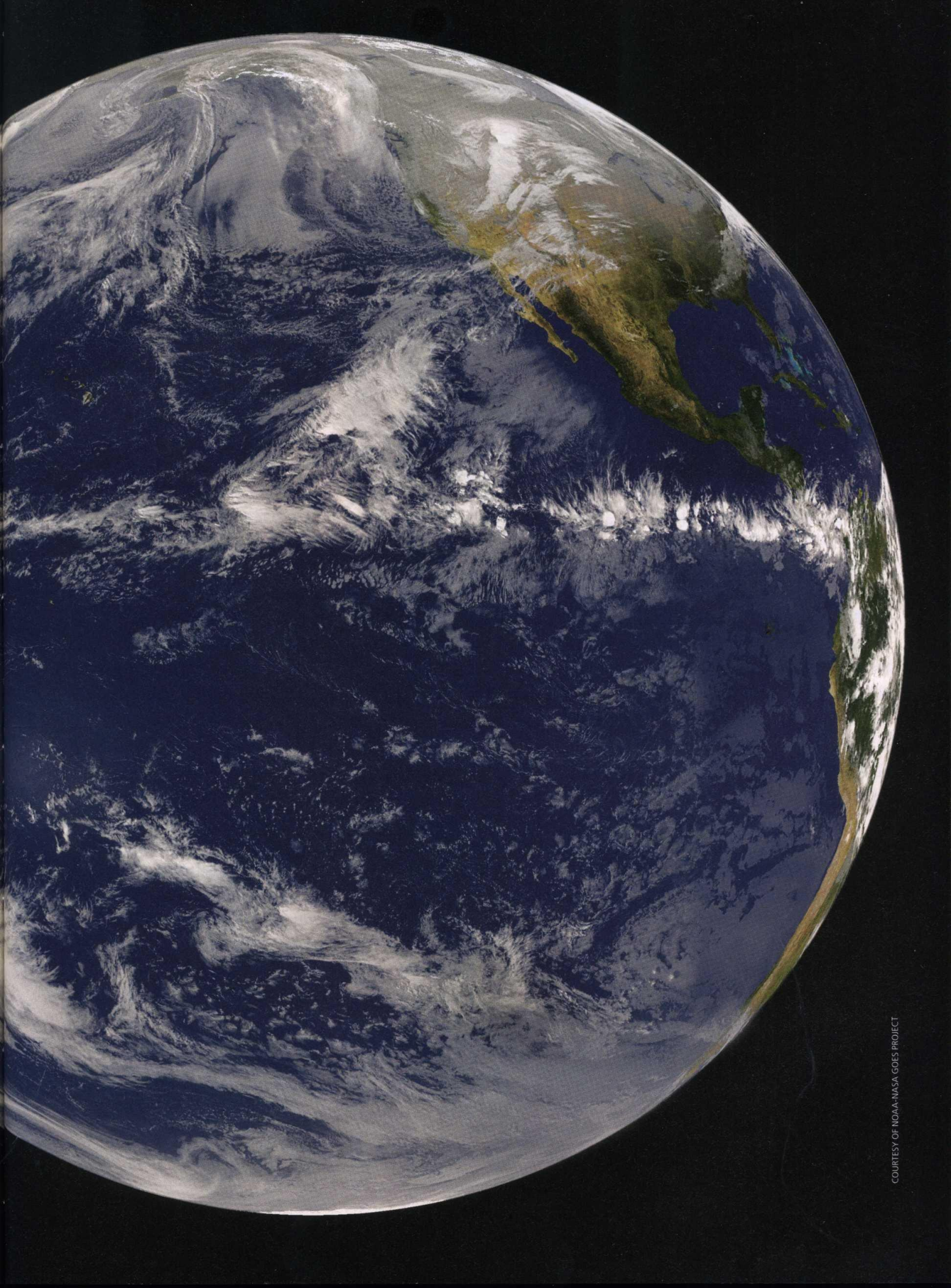
雨量の変遷をたどることで、大気中の温暖化ガスの増加や気温の上昇、熱帯地域における雨量の変化が将来の気候パターンをどう変えるかをより深く理解できる。そういうわけで、私たち

KEY CONCEPTS

温暖化が世界の降雨パターンを変える

- 気温が変化すると、赤道の北側で地球をぐりと取り巻いている「赤道降雨帯」が移動し、全世界の降雨パターンが変わる。
- 太平洋の島々に存在する湖の堆積物の解析から、赤道降雨帯は北緯3°から北緯10°にあり、少なくとも過去1200年間で最も北に位置していることがわかった。
- このままのペースで温暖化が進むと、赤道降雨帯は2100年までにさらに5°北上する可能性がある。エクアドルやコロンビアなどに住む何百万もの人々の農地が干上がってしまうだろう。
- 今後、米国南西部が現在のメキシコ北部のように半乾燥化する恐れがあり、長期にわたって干ばつに見舞われることになるかもしれない。





は太平洋に点在する多数の島々にはるばるの出向き、調査してきた。

太平洋におけるエルニーニョやラニーニャなどの気候パターンはよく知られている。それらに比べると知名度は低い、降雨特性も重要なパターンだ。雨量の非常に多い「赤道降雨帯」が熱帯付近で地球をぐるりと取り巻いており、季節とともに太陽の高度が変わるのに伴って、南北に動いている。赤道降雨帯が移動するこの領域を「熱帯収束帯 (ITCZ)」と呼ぶ。

原因が日射量であれ温暖化ガス濃度の変化であれ、気温の変化は、赤道付近の農業地域に恵みの雨をもたらしている降雨帯に影響を及ぼす。赤道降雨帯はアジアやアフリカ、インドのモンスーン (季節風) に伴う降雨と、熱を赤道から両極に届ける大きな対流セルにも中心的役割を果たしている。

エルニーニョ現象やラニーニャ現象の頻度と強さ、そして太平洋と大西洋のハリケーンの強さとそのシーズンの長さは、すべて赤道降雨帯の位置に影響を受ける。赤道降雨帯が移動して雨量が変化すると、赤道付近の環境は劇的に変わり、その影響は全世界に及ぶ

だろう。そして、赤道降雨帯が移動していると信じるに足る理由がある。

現在、赤道降雨帯の中心が太平洋上を年間に移動している範囲は北緯3°から北緯10°だが、以前もその範囲だったかどうかは、最近まで気候学者にも不明だった。しかし最近では、熱帯収束帯が覆っている地域を調べることで、赤道降雨帯が過去1200年間にどう移動してきたかがわかるようになった。

赤道降雨帯は約400年前から現在までに緯度にして5° (距離でいうと約550km) も北上したことがわかった。この発見により、私たちは驚くべき事実気づいた。温室効果がわずかに強まるだけで、熱帯地方の雨量が根本的に変わってしまう可能性があるのだ。

私たちは今、温暖化の進行とともに、熱帯収束帯が2100年にかけてどこへ移動するかを予測できる。また、赤道地域で雨量が増えるか減るか、そしてアジアや中米、米国南部の赤道よりやや北の地域への影響、さらにはこれらの変化が気候や食料生産にどのような影響を及ぼすかも推定できる。

熱帯収束帯の移動によって恩恵を受ける地域もあるだろうが、多くの地域

は干ばつに見舞われるだろうと私たちは懸念している。

知られざる中世の熱帯気候

私たちが雨量の変遷を調べ始めるまで、熱帯収束帯が過去1000年間にどこに位置していたかに関するデータはほとんどなかった。

赤道降雨帯は赤道付近にあるが、局所的な状況と日射量の季節変化によって、その幅は数十kmから数百kmまでいろいろだ。熱帯収束帯は太平洋上で特に明瞭なので、その動きの追跡に太平洋はうってつけの場所だ。そして赤道降雨帯は地球をぐるりと取り巻いているため、太平洋で見られる傾向が地球規模の変化を知る指針となる。

日射量の歴史的変動は木の年輪に含まれる炭素14や氷床コア中のベリリウム10の量などから推定でき、温暖化ガス濃度は極地で採取された氷床コアに閉じ込められていた気泡からわかる。日射量と温暖化ガス濃度を、熱帯収束帯の位置と数世紀にわたって比較することで、熱帯地域の雨量が温暖化ガス排出量の増加に伴って21世紀にどう変わるかを推測できる。

藻類は雨量の歴史を語る

藻類は体内に含む水素を生息地の水から取り込んでいる。このため、湖底の堆積物中に保存されている藻類の脂質に含まれる2つの安定した水素同位体、軽水素Hと重水素Dを測定することで、藻類が生きていた時代の雨量を推定できる。

多くの藻類の重水素/軽水素 (D/H) 比は、その生息地の水のD/H比と比例関係にある。湖水のD/H比は、湖がある地域の降水量に対する蒸発量の比を反映する。赤道降雨帯に覆われた地域は頻繁に豪雨に見舞われ、湖水や海水のD/H比は小さい。一方、降雨帯の外の地域では降水よりも蒸発が盛んなのでD/H比は大きい。だから、堆積層を深く掘り、そこに含まれる藻類の脂質のD/H比の変化を調べれば、過去の降雨状況を推定できるのだ。

また、藻類は生息地の塩分濃度に応じて自らの脂質のD/H

比を調整する。私たちが調査しているクリスマス島のある特徴のおかげで、藻類の脂質のD/H比と塩分濃度との関係を調べる“自然実験”ができた。クリスマス島には複数の池があり、水温や日射量、養分濃度、D/H比はほぼ同じだが、塩分濃度だけが大きく異なっているのだ。塩分濃度が高くなると、シアノバクテリアによって作り出される脂質のD/H比がそれに比例して大きくなる。塩水池の塩分濃度は雨季に低下し、乾季に上昇するので、降水量の変化による脂質のD/H比への影響を増幅することになる。このため、藻類は水理地質学的変化を敏感に示す“雨量計”となる。

藻類の脂質のD/H比を調べるだけでは降雨量の歴史はわからず、藻類が生きていた時代を知る必要がある。堆積物の年代は2つの放射性同位体、炭素14 (半減期は5730年) と鉛210 (半減期は22.3年) によって決まる。さまざまな年代のD/H比を比較することによって、私たちは過去1200年にわたる雨量の変遷を再現した。(J. P. サックス/C. L. ミアボルド)

過去1000年の地球の気温を知るさまざまな手がかりから、特徴的な時代が2つあったことがわかっている。西暦800年ころは、地球の気温は1800年代後半の気温と同程度だった。その後、中世温暖期（西暦800～1200年）に上昇し、20世紀の気温と同レベルに達した。それから徐々に安定した後、小氷期（西暦1400～1850年）に低下した。

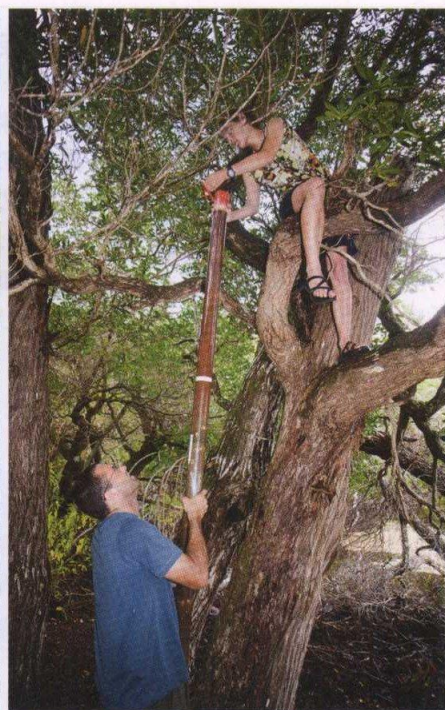
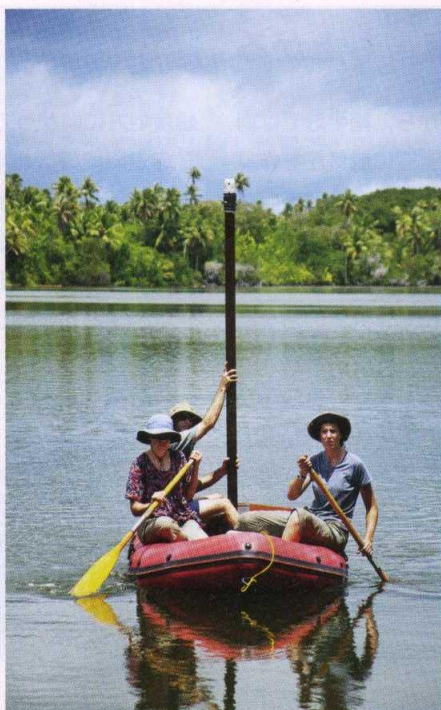
この20年間、太陽の放射エネルギーは基本的に一定だったが、気温と人間が作り出した最も豊富な温暖化ガスである二酸化炭素の濃度は、過去1200年のどの時期よりもかなり高かった。

だが、私たちがこの調査研究を始めたとき、過去の熱帯地域の気候について詳細はほとんどわかっていなかった。海底堆積物には数千年単位の気候変動が見事に記録されているものの、蓄積速度が非常に遅いため、過去1000年についての情報はほとんどない。また、多くの種類のサンゴが年輪を作るが、サンゴの寿命はせいぜい300年ほどだ。したがって、300年前から1000年前までの間の記録は空白だ。

降雨状態を地図上に記録できれば、過去1000年間の熱帯収束帯の位置に関する情報の欠落部分を埋められるだろう。通常、海に降った雨の量は測定できない。しかし、太平洋に点在する小島の池や湖を調べると、雨量の変遷を知ることができる。

私たちは過去6年間、太平洋のエキゾチックな孤島のいくつかで、湖沼から何十もの堆積物コアを採取してきた。採取場所は現在の赤道降雨帯とその南北にあたる地域で、太平洋を完全に横断している。

赤道降雨帯が特定の期間にどこにあったかを突き止めるには、その期間に豪雨を経験した場所を特定すればよい。また、降雨量が同じタイミングで変化する地域が南あるいは北に動いていたなら、それは降雨帯の太平洋全域にお



COURTESY OF CONOR L. MYHRVOLD

サンプル採取 左の写真はマーシャル諸島の1つ、リブ島（次ページの地図を参照）の湖底で採取した堆積物コアを舟で運んでいるところ。堆積物に保存されている藻類が、過去の雨量を明らかにしてくれる。サンプルを研究室に持ち帰るためにコアを薄く輪切りにする際、コアを垂直に維持するために木に登って作業した（右の写真）。

ける移動を示している。

野外調査はまさに冒険だ。さまざまな障害や道具の問題、言葉の壁、コアの採取場所へのアクセスの難しさなど、次から次に難題が降りかかる。例えば私たちがマーシャル諸島共和国の首都マジュロに到着したとき、地元の航空会社エア・マーシャルアイランズ〔地元の人々は愛情を込めて「エア・メイビー（たぶん飛ぶ航空会社）」と呼ぶ〕が所有する2機の飛行機のうち、2機ともが故障していた。

私たちは地元の企業家が所有する改造釣り舟（航海に適しているとは思えない代物だったが）を借り、その航行試験のため、2日間の旅に出かけた。しかし冒頭で紹介したように、近くのサンゴ礁から戻る夜通しの航海の最中にエンジンがだめになったのだった。

堆積物をその構造を保ったまま採取するには、湖底に長い管を押し込み、上端をたたいてねじ込まなければならぬ。堆積物の構成はコアの採取場所

ごとに独特だった。ワシントン島（次ページの地図）の湖などでは、厚さ数mに及ぶシアノバクテリアの赤いゼラチン状の層が見られる。また、硫化水素に富む褐色の泥土という場合もあり（これはひどく臭い！）、パラオのように、マングローブの葉の断片が含まれていたり二枚貝の層が見られることもある。

ぬかるみを徒歩で進みながら、そしてボートを漕いで浅瀬を進みながら、私たちは長い棒を堆積物に突き刺し、その深さや障害物の有無を調べる。棒が岩石や古代のサンゴ、砂、植物の根にぶつかって、コア採取を断念することも珍しくない。

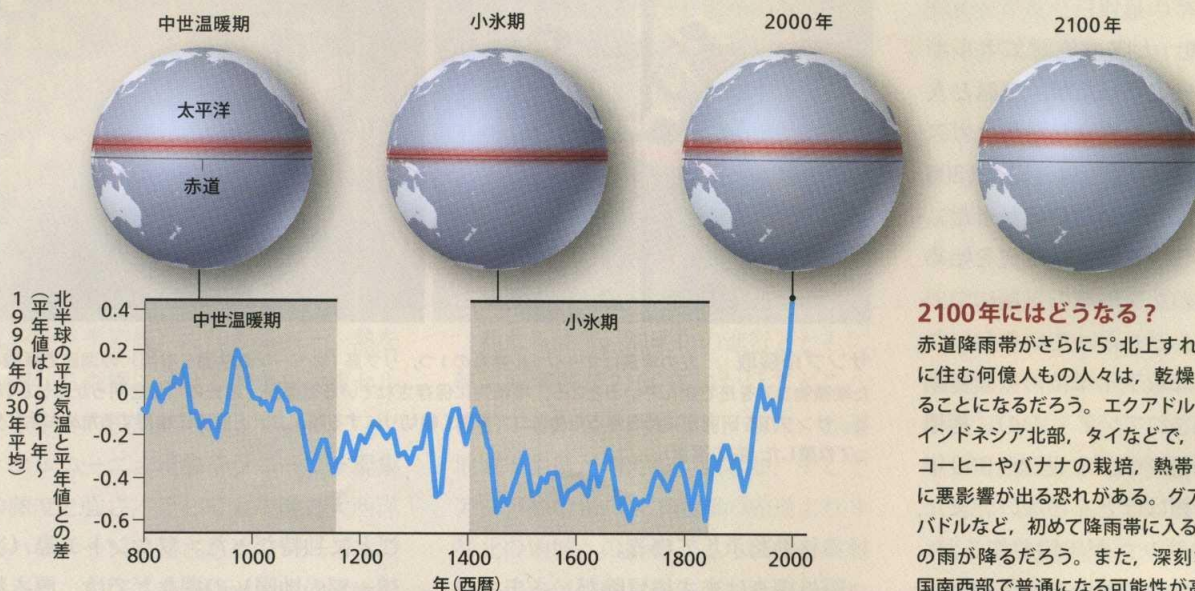
堆積物が沈殿する速さは非常に変則的なので、どのくらい深く採取すれば十分かはわからない。おおざっぱに言えば、厚さ1mの堆積物は数百年に相当する。例えばワシントン島で採取した9mの堆積物は3200年分に相当した。可能なときには、先端が「岩盤」

気温が上がれば、赤道降雨帯も上がる

北半球では貿易風が赤道に向かって北東から、南半球では南東から吹き込んでおり、これが赤道付近の上空に低気圧を作り出す。地球をぐるりと取り巻いているこの低気圧は「熱帯収束帯」(赤)と呼ばれる。日光で熱せられた水は蒸発して上昇し、凝縮して雨となるため、この地域には大量の雨が降る。この低気圧はまた、隣に巨大な高気圧セルを作り出し、大気のを高

緯度地方に向かって循環させ、その気象システムを駆動する。

赤道降雨帯は北半球の気温が上昇した中世温暖期に北上し、気温が下がった小氷期に南下した。降雨帯は現在、過去1200年間で最も北に位置している。温暖化ガスの地球規模の増加が予測されており、それに伴って降雨帯は2100年までにさらに5°北上する可能性がある。



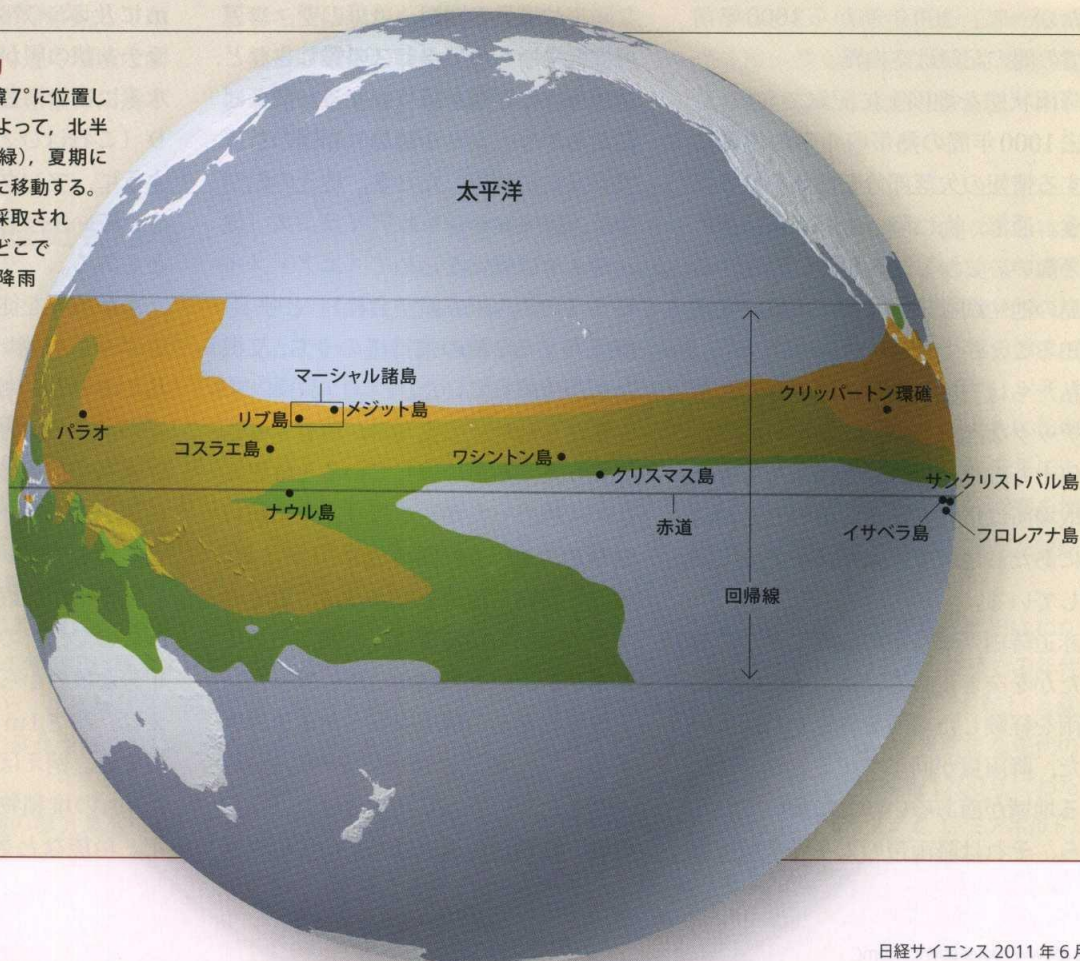
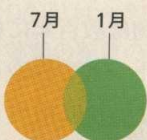
2100年にはどうなる？

赤道降雨帯がさらに5°北上すれば、赤道付近に住む何億人もの人々は、乾燥地帯に置かれることになるだろう。エクアドルやコロンビア、インドネシア北部、タイなどで、自給自足農業、コーヒーやバナナの栽培、熱帯の生物多様性に悪影響が出る恐れがある。グアムやエルサルバドルなど、初めて降雨帯に入る地域には多量の雨が降るだろう。また、深刻な干ばつが米国南西部で普通になる可能性が高い。

赤道降雨帯の季節変動

赤道降雨帯は平均して北緯7°に位置しているが、太陽の高度によって、北半球の冬期に北緯3°付近(緑)、夏期に北緯10°付近(オレンジ)に移動する。右に示す島などの湖底で採取された堆積物コアから、いつどこで雨が降ったかがわかり、降雨帯の位置の変遷がわかる。

1979年～2005年の
月平均降水量が
200mm以上の地域



に当たるまで深く掘り進める。岩盤直上の土砂やサンゴ、火山岩は、湖に堆積物が沈殿し始めた時期を示すものなので、過去の気候変動について最も完全な記録を得ることができる。

脂質は語る

私たちの目標は雨量の歴史を再現することだが、まずは現在の生態系について気候と関連するいろいろな特性を測定し、過去の試料について同じ測定をした時に過去の気候について何が言えるのかをはっきりさせておかねばならない。

そのために私たちは、さまざまな深さで水を採取し、その化学組成と水素同位体比を測定するとともに、それに含まれる藻類や菌類の特徴を調べた。目の細かいガラス繊維の濾紙で植物プランクトンと動物プランクトン、細菌を捕獲し、直ちに氷づけにする。後にそれらの脂質組成を分析するためだ。その近くの植物も、脂質を調べるために採集する。

湖底から慎重に引き上げられた堆積物コアは、そのままの状態に研究室に持ち帰らなければならない。コアの各層が混ざり合うのを防ぐため、特に軟らかい最上層は厚さ1cmの“輪切り”にし、それぞれポリ袋に入れてラベルを貼る。

その後、堆積物と水のサンプルが詰まったアイスボックスと、ポリ袋に入れる必要のないコアが入った長い段ボール箱をたくさん抱えてシアトルのワシントン大学の研究室に戻る。そして、堆積物コアの各層に保存されている藻類の脂質内の2つの安定した水素同位体を測定し、各サンプルの年代を特定して、その藻類が生きていた時代の雨量を推測する(92ページの囲みを参照)。

湿地が乾燥すると

私たちは数年かけてデータを集め、熱帯収束帯の位置の変遷を示す地図の

精度を上げてきた。そして現在も引き続き最新の調査結果に基づいて地図をアップデートしている。ミクロネシアのコスラエ島で実施した最近の野外調査のデータ分析にはさらに数カ月かかりそうだが、以前の調査旅行で得られたデータと、共同研究者のデータをもとに、次のようなことがわかった。

小氷期、気温のわずかな変化に伴って熱帯の降雨状況が大きく変わり、パラオなど湿潤だった地域が乾燥した一方で、ガラパゴス諸島など乾燥していた地域に大量の雨が降った。大気圏の最上層部に届く太陽のエネルギーが、約100年間にたった0.2%減少しただけで、熱帯収束帯は赤道に向かって500km南下した。

熱帯収束帯の位置が気温の変化にこれほど敏感に反応するというのは、私たちの未来にとってよいこととは言えない。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)によると、主に自動車の排気ガスと煙突からの煙によって、大気中の二酸化炭素濃度は産業革命前に比べて21世紀半ばまでに2倍、2100年までに3倍になると予測される。その結果、気温の上昇は小氷期の終わりに日射量の増加のみが原因で起こった気温上昇の2～3倍にもなるだろう。

小氷期には、赤道降雨帯の中心は北緯5°よりも南にとどまっていた。現在は、北緯3°から10°の間を行き来している。近年の温暖化ガスの増加によって、降雨帯の中心は2100年までにさらに5°北に移動、つまり550km北上する恐れがある。降雨帯の中心が北緯8°と北緯15°の間を往来するようになれば、多くの地域で雨量が大きく変わるだろう(左ページの囲みを参照)。

どんな変化が起こりうるか、島々での調査結果からいろいろとわかってきている。北緯5°に位置するワシントン島では、現在の年間降水量は3000mmだが、400年前は1000mm未満で、蒸発量は現在よりも大きかつ

た。逆に、砂漠のようなガラパゴス諸島の1つで南緯1°に位置するサンクリストバル島の高地は小氷期の間、かなり湿潤だった。

考古学的な証拠も有用だ。考古学者は、インドネシアと南太平洋の島々で防壁が次々と建設された時期が、熱帯収束帯が最も最近に大きく南下した時期に一致すると結論づけている。これらの防壁は近隣社会からの侵入を阻むための石造りの構造物で、ほとんどが小氷期の始まりから終わりにかけて建設されたものだ。赤道降雨帯の南下に伴って降雨帯から外れた北方の島々が乾燥し、その住民は南方の島に移住せざるを得なくなった。その結果、南部の島々の住民の間で侵略者に対する恐怖が高まったのだろう。

今日では、淡水化技術の開発と流通網の発達によって、人々の生活が雨量に大きく依存することはなくなったものの、赤道降雨帯がさらに5°北上すれば、熱帯の生物多様性は言うまでもなく、赤道付近に住んで自給自足農業を営んでいる何億人もの人々を危険にさらすだろう。

現在、赤道降雨帯に覆われている国のほとんどが発展途上国だ。そうした国々では今世紀に人口が急増する可能性が高く、降雨帯の移動にうまく対応できる余力があるとは思えない。数十年間にわたって、あるいは数年間であっても、雨量が減ったり、あるいは洪水が頻発すれば、作物の収穫高が減り、局地的な食料不足が起こって、政治不安が高まる。最終的には住み慣れた土地を捨てざるを得なくなるだろう。

エルサルバドルやフィリピンのマニラなど初めて熱帯収束帯に入る地域(北緯10°～15°)では、年間を通じて雨量が増え、湿度が高くなるだろう。一方、赤道降雨帯から外れる地域(北緯3°～8°)では、雨量が減って乾燥するだろう。この乾燥化が、場所によってはアジアモンスーンとインドモンス

温暖化ガスが現在のペースで増え続けると 降雨帯の中心は2100年までにさらに5°北上する 多くの地域で雨量が大きく変わるだろう

ーンに伴う降雨によって相殺される可能性も指摘されているが、実際にどうかはまだわからない。

コーヒーやバナナへの打撃

熱帯収束帯のおかげで今は雨の多い北インドネシアやマレーシア、フィリピン、ミクロネシア、タイ、カンボジアの湿潤な地域では、今後、雨量が激減するだろう。そうすると、現在の気候条件に適した作物はもはや育たない。例えばコーヒーの木は、ブドウの木と同様、生育期の初めに多量の雨を必要とし、よい豆を実らせるには総計1800mm以上の雨が必要だ。

南米ではエクアドルとコロンビアが熱帯収束帯から外れ、乾燥するだろう。都市化が進むコロンビアは、もはや経済が農業に大きく依存していないので、乾燥化にうまく対処できるかもしれない。だが、コロンビアは世界3位のコーヒー生産地だ。インドネシア同様、雨量の減少によってコーヒー豆の生産が長期的に影響を受ける可能性がある。コーヒー豆生産地の大部分（北緯8°未満）は今世紀中ごろから終わりにかけて苦境に立たされるだろう。特に降雨帯から最も遠い南部や沿岸の生産地は、そのリスクが最も高い。

エクアドルのバナナ産業の未来も明るくはない。良質のバナナを育てるには高温と年間2000～2500mmの雨量が必要だが、エクアドルはすでに熱帯収束帯から南に外れており、年間降水量は上の条件を満たしていない。降雨帯の移動によって、エクアドルの年間降水量は2100年までに1000mm以下になり、バナナ産業は立ち行かなくなるだろう。

バナナ生産量の大減少は非常に短期

間に起こる可能性がある。フィリピンでは2010年初め、異常な乾季のために、ほぼ半数の農園で生産されたバナナが小さく、重量不足のために商品にならなかった。

また、自給自足農業は前述のすべての地域で影響を受けるだろう。人々が都市に移住しても、地方の食料生産地の縮小は惨事を招く。

赤道降雨帯が過去400年の平均速度で北上し続けるなら、おそらく米国本土の雨量も大きく変化する。すでにその変化が始まっているかもしれない。温暖化ガス濃度が上昇し続けると、米国南西部は数年にわたるひどい干ばつに見舞われるだろう。そして、そうした干ばつが21世紀の普通の気象となる可能性が高い。気温の上昇と降雨帯の継続的な北上によって、降雨帯の北に位置する亜熱帯の乾燥地域（現在はメキシコ北部に広がっている）が、米国南西部に移動する恐れがあるからだ。

降雨帯の北上がハリケーンやモンスーン降雨の頻度や規模に影響するかどうかは、科学者にもわかっていない。エルニーニョやラニーニャへの影響もまたしかりだ。

モデルの改良

自信を持って警鐘を鳴らせるようになるには、さらなる研究が必要だ。コンピューターに基づく気候モデルは、熱帯における過去および現在の降雨パターンを正確には再現できていない。

堆積物コアなどから得られたデータを使って既知のパターンにより近いものを再現できるようになれば、世界中の人々は将来の雨量予測にもっと信頼を寄せるようになるだろう。このための研究は、ワシントン大学の仲間たちなどによって進行中だ。

私たちは、熱帯収束帯およびその北と南に点在する島々で採集した堆積物の研究を続ける。そして、過去1000年間の赤道降雨帯の位置をより正確に割り出し、降雨帯がこの先数世代にわたってどこへ移動していくかを予測できるようにするつもりだ。

（翻訳協力：古川奈々子）



著者 Julian P. Sachs / Conor L. Myhrvold

サックス（左）はシアトルにあるワシントン大学の海洋学准教授。主に分子技術と同位体技術を開発・駆使して、過去2000年間の気候と地球化学的・生化学的プロセスの解明に取り組んでいる。ミアボルド（右）はプリンストン大学で地球科学を専攻している。最近の野外研究でサックスのアシスタント兼カメラマンを務めた。

原題名

A Shifting Band of Rain (SCIENTIFIC AMERICAN March 2011)

もっと知るには…

PROXY-BASED RECONSTRUCTIONS OF HEMISPHERIC AND GLOBAL SURFACE TEMPERATURE VARIATIONS OVER THE PAST TWO MILLENNIA. Michael E. Mann et al. in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 105, No. 36, pages 13252–13257; September 2, 2008.

SOUTHWARD MOVEMENT OF THE PACIFIC INTERTROPICAL CONVERGENCE ZONE AD 1400–1850. Julian P. Sachs et al. in *Nature Geoscience*, Vol. 2, No. 7, pages 519–525; July 2009.

PALEOCLIMATES AND THE EMERGENCE OF FORTIFICATIONS IN THE TROPICAL PACIFIC ISLANDS. Julie S. Field and Peter V. Lape in *Journal of Anthropological Archaeology*, Vol. 29, No. 1, pages 113–124; March 2010.

サックスの研究室による古気候の研究については <http://faculty.washington.edu/jsachs>
著者らの太平洋野外調査のスライドショーが ScientificAmerican.com/mar2011/sachs に。

宇宙ステーションの至宝 アルファ磁気分光器

この分光器は極上の宇宙線検出装置だ
暗黒物質や反物質などの謎解きへ宇宙に旅立つ

G. マッサー (SCIENTIFIC AMERICAN 編集部)

16年の歳月と20億ドルをかけた世界最高の宇宙線検出器が、ちょっと前まで、どこかの倉庫に文字通りお蔵入りになりそうな情勢だった。米航空宇宙局 (NASA) は2010年までに国際宇宙ステーション (ISS) の建設を終えてスペースシャトルを退役させるよう命じられ、もはやこの観測装置を打ち上げる余裕はないと説明した。装置を救うには、物理学者たちの強力な働きかけと米国議会によるシャトル計画延長の議決を要した。その結果、スペースシャトル「エンデバー」が4月末、この「アルファ磁気分光器 (AMS)」をISSに運ぶ特別任務を負って最後の打ち上げに臨む。

宇宙線は宇宙空間を飛び交う素粒子や原子核で、その起源は恒星や超新星爆発、中性子星、ブラックホール、そして誰もまだ知らぬ何らかの天体だ。当然、この「誰もまだ知らぬ何か」が最大の興味の対象であり、新装置を送り出す主目的でもある。想定されている1つが暗黒物質 (ダークマター) だ。遠くの宇宙に暗黒物質が凝集しているところがあると、そこから時に素粒子が爆発的に放出され、観測に引っかかる可能性がある。物理学者のなかには、宇宙には物質ではなく反物質でできた銀河が存在し、そこから飛んできた風変わりな“反原子”が地球に降り注いでいるのではないかと考えている人もいる。

アルファ磁気分光器の特徴は、ごっちゃになって容易には判別できない“通常のもの”と“通常ではないもの”を見分けられることだ。粒子の質量、速度、タイプ、電荷など、すべての特性をとらえる検出器群を備えた装置は他にない。これに近い観測装置として欧州が2006年に打ち上げた宇宙放射観測衛星PAMELAがあった。これまでに暗黒物質など風変わりな存在の兆候をつかんだが、曖昧さを残している。低質量の反粒子 (例えば陽電子) と、同じ電荷を持つ質量の大きな粒子 (陽子など) を区別する能力がないためだ。

アルファ磁気分光器は従来の標準からすると怪物級で、重量は7トン (PAMELAの14倍)、消費電力は2400ワットにもなる。しかし、一風変わった共生関係というべきか、これを宇宙ステーションに搭載することによって、両者の存在がしっかり正当化される。AMSに電力を供給し軌道飛行させられるのはISSだけだし、AMSを搭載することでISSは少なくとも世界一級の科学研究を実行できる場になる (批判派は納得しないかもしれない)。欧州合同原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器LHCが地上で自然の深奥を探るように、アルファ磁気分光器は地球周回軌道上で同じことを実行してくれるだろう。

(編集部 訳)

飛行時間型

分光システム (ToF) 1

目的: 粒子の速度と電荷を計測する。

構成: 粒子が通過すると発光する透明な高分子シートを複数枚配置。

働き: いずれか2枚の検出シートを選び、その間を粒子が飛行するのにかった時間を計る。

磁石

目的: 荷電粒子の飛行経路を曲げる。

構成: 0.15テスラの磁場を発生する永久磁石。当初は低温に冷やして使う超電導磁石を用いる計画だったが、永久磁石への変更によって運用可能期間を長くした。

働き: プラスの荷電粒子が通過すると左へ、マイナスの荷電粒子は右に曲げられる。

シリコン追跡器

目的: 粒子の電荷と運動量を計測する。

構成: 9枚の平らな粒子検出器からなる。

働き: 磁場中を通過する粒子の飛跡を明らかにする。

原題名

The Space Station's Crown Jewel (SCIENTIFIC AMERICAN May 2011)



遷移放射検出器 (TRD)

目的：小質量の粒子と大質量の粒子を区別する。

構成：細い中空チューブをつけた“フリース”の層を20枚重ねてある。

働き：フリースの繊維のなかを小質量の粒子が通過するとX線を放出する。すぐそばにあるガスを満たしたチューブ列でこのX線を検出する。

プラスの
荷電粒子

マイナスの
荷電粒子

アンチ・コインシデンス・カウンター (ACC)

目的：横方向から入ってきた粒子を特定する。

構成：荷電粒子が通過すると発光する透明な高分子タイルで作った円筒。
働き：1個の粒子が装置全体を縦方向に貫いて各検出器すべてを通過しなければ、必要なデータを収集できない。この検出器は装置に横方向から入ってきた粒子を記録し、それらの粒子が他の検出器に残した信号を制御システムが放棄できるようにする。

飛行時間型 分光システム (ToF) 2

リング・イメージング・ チェレンコフ検出器 (RICH)

目的：粒子の速度を計測する。

構成：エアロゲルとフッ化ナトリウムの周囲に光センサーを環状に配置してある。

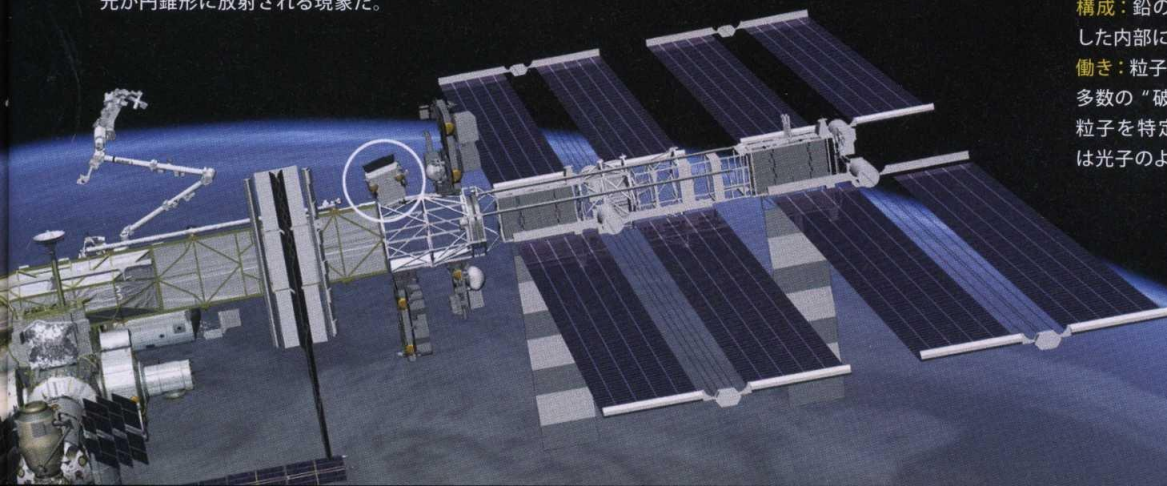
働き：エアロゲル中を光が進む速度は真空中に比べ5%遅く、フッ化ナトリウム中では同23%遅くなる。真空中での光速に近いスピードで運動する粒子は検出器のなかで「チェレンコフ放射」と呼ばれる特徴的な光を出す。青っぽい光が円錐形に放射される現象だ。

電磁カロリメーター (ECAL)

目的：粒子のタイプと方向を計測する。

構成：鉛の箔を重ねて全体をエポキシ樹脂で接着した内部に、光ファイバー光学系を埋め込んである。

働き：粒子が検出器に飛び込むと、鉛とぶつかって多数の“破片”をまき散らす。この破片の様子から粒子を特定する。他の測定器とは異なり、ECALは光子のような電荷を持たない粒子も検出する。



パズルの国

Alice's Adventure in Puzzle-Land

のアリス



スペードのエースの忘れ物

坂井 公 (筑波大学)

題字・イラスト：斉藤重之

トランプ城の大手門前で毎日行われる兵士たちのパレードは、いつもはハートの兵士たちの役割である。ところが、ハートの7が病気になり、スペードの兵士たちが急に代役を務めることになった。かなり大勢の見物人があるので、慣れないスペードたちは緊張しているようだ。東西の守衛所から5人ずつが現れ初期位置についたのはよいが、なんとなくそわそわしている。

パレードの進め方は『トランプたちの行進』(2010年3月号)で説明したのと同じである。各兵士は、200メートル離れた東西の守衛所の間に最初適当な間隔で並び、正午になると一斉に東西どちらかに歩き出すのだ。兵士たちは全員同じ速度で歩き、2人の

兵士が鉢合わせすると、2人ともそこでぐるりと向きを変え、逆方向に同じ速度で進む。そして、どちらかの守衛所に着いたら、その兵士の行進はそれで終わりである。

さて、定刻の正午になって、パレードが始まると、さすがに行進慣れしているのか、兵士たちは落ち着きを取り戻し、パレードの進行はスムーズだった。

ところが、アリスには、西から5人目の位置にいたスペードのエースの動きがやや不自然に見えた。正午になった瞬間には、まだどちらへ歩こうか迷っている風だった。ほんの一瞬遅れて西のほうへ動き出し、その後は、決められた通りの動きをしていたが、なに

か気がかりなことがあるらしく、途中で東を向くたびに、西の守衛所のほうをちらちらと見やっていた。やがて最後の1人となって西の守衛所に入ってしまった。

あとでエースに会ったとき、アリスがどうしたわけか聞くと、エースいわく、

「あれ、気づかれちゃったか。いや、俺としたことが……ちょっと恥ずかしいんだけど……西の守衛所で待機していたとき、2や3たちとちょっと賭けをやってたんだ。それはいいんだけど、守衛所を出てから財布を置き忘れたことに気がついた。いつもみんなをカモにしているから、東の守衛所に入っちゃうとあとで取り返すのは難しいと思っ

てね」

「あ、それで、最初、西の守衛所に向かって歩き出したんですね」

「うん、何とか西の守衛所に入れたので、誰かに盗られる前に財布は回収できたけど、入ったのは最後だったから結構危なかったかもしれない」

「でも、変ですね。最初に西に向かったからといって、西の守衛所に入るとは限らないでしょうに。案外、東に向かったほうが、よかったんじゃないですか？」

さて、今月の問題は、このアリスの言葉が正しいかどうかを考えていただくことだ。他の兵士の初期位置も最初に歩き出す向きもランダムだとすると、



西から5人目の位置にいたエースが西の守衛所に入るためには、最初に西へ向かうのと、東へ向かうのと、どちらがよいのだろうか。その場合に、エースが西の守衛所に入る確率はどのようになるだろうか。また、西へ歩き出したエー

スが(東西どちらに入るかに無関係に)守衛所に入る最後の兵士になる確率はいくつだろうか？

答えは次号、
または下記のサイトで5月中旬に公開
<http://www.nikkei-science.com/>

5月号の問題と答え

問題：店に1つしか残っていないガラガラをめぐって、お互いに譲ろうとしないトウィードルダムとトウィードルディーの兄弟。ダムとディーのおじさんは、ケンカをせずに決着をつける方法を提案した。

まず、それぞれの手元にある銀貨の何枚かに自分の印を付けて壺の中に入れる。第三者に、目をつむって中から1枚取り出してもらう。次にもう1枚取り出し、それが最初と同じ印ならば、さらにもう1枚取り出す。こうして違う印の銀貨が出てくるまで続ける。違う印の銀貨が出てきたら、1ラウンド終了で、最後に出てきた違う印の銀貨は壺に戻して、よく壺を振る。このラウンドを何度も繰り返し、壺から最後の銀貨が出てきたとき、それが自分の印だったら勝ちだ。

ただし、壺の中にあった銀貨は、負けたほうが全部もらうというルールなので、勝つために銀貨を多めに入れると、勝ったときに相手に取られる銀貨も多くなる。

ダムとディーがそれぞれ m 枚と n 枚の銀貨を最初に入れたとき、それぞれが勝つ確率を求めてほしい。

解答例：取り出した銀貨を壺に戻すことなしに単純に最後の銀貨の印で決めるなら、ダムとディーの勝率がそれぞれ $m/(m+n)$ と $n/(m+n)$ であることは明らかだが、違う印の銀貨が出てきたときにそれを壺に戻すことで状況ガラッと変わる。

もちろん $m>0$ 、 $n=0$ のときは確実にダムの勝ち、 $m=0$ 、 $n>0$ のときは確実にディーの勝ちである。ところが、 $m>0$ 、 $n>0$ のときは、意外なことに、 m と n の値によらず、勝率はともに $1/2$ なのだ。したがって、ダムもディーも壺に入れる銀貨は1枚だけにしておくのが、勝ったときの犠牲を最小にする戦略である。

もし、ガラガラに銀貨1枚分の価値もなければ、もちろん何も入れないのがよいが、そうでなければ、たとえ銀貨1000枚分の価値があったとしても、入れるのは1枚で十分だ。

枚数と無関係に勝率が一定になるというこの結論は、最初に取り出された銀貨がどちらであるかに応じた確率を計算し、数学的帰納法を駆使しても得られるが、考える時点を一足飛びに先に進めることで、ほとんど計算なしで

導くことができる。

勝者が決まる最後のラウンドを考えてみよう。この時点では、壺の中には同じ印の銀貨しか入っていない。では、その1つ前のラウンドでは、どうであったかということ、2種類の銀貨が入っていたが、一方の銀貨だけが先に全部取り出されてしまったことになる。このとき、どちらの種類の銀貨が残りやすいかという確率を考えてみよう。これは、厳密に言えば、2種類のうち一方が他方よりすべて先に取り出される場合の条件付き確率であるが、明らかに、一方の印の銀貨がすべて他方よりも先に取り出される可能性と、すべて他方よりも後に残される可能性は等しい(厳密に計算するなら、このとき壺に残っている2種の銀貨の枚数をそれぞれ i と j とすれば、条件なしの場合、どちらも確率 $i!j!/(i+j)!$ で起こる)から、この可能性は5分5分だ。

2人の場合に「勝率が枚数によらない」というこの結論自体も意外であるが、ある意味でもっと意外な感じがするのだが、この賭けを3人以上でやると、この結論が簡単には一般化できないということだ。つまり、3人がそれぞれの印を付けた銀貨を持ち寄り、同じルールで賭けをする。このとき、A、B、Cがそれぞれが壺に入れた銀貨を2枚、1枚、1枚としよう。やや面倒だが、このときの各人の勝率を計算してみると、 $26/72$ 、 $23/72$ 、 $23/72$ となる。また、A、B、Cがそれぞれ3枚、1枚、1枚を入れた場合は、 $6/16$ 、 $5/16$ 、 $5/16$ となり、たくさんの枚数を入れるほうがわずかに有利になることがわかる。他の枚数ではどうなるか、さらには、4人以上でどうなるかを調べてみるのも面白いかもしれない。

参考にした本

MATHEMATICAL PUZZLES: A CONNOISSEUR'S COLLECTION (2004) と MATHEMATICAL MIND-BENDERS (2007) P. Winkler 著

