

日経

サイエンス

2010年10月1日発行 毎月1回1日発行
第40巻第10号 通巻472号
1971年11月2日第二版印刷(第2刷)

2010 10

SCIENTIFIC AMERICAN 日本版

茂木健一郎, 巨大科学の現場へ

破れて
いる?

宇宙のエネルギー保存則

ロボットが変える戦争

子どもの意外な“脳力”



DNA 医薬の時代

恐竜世界にいた鳥

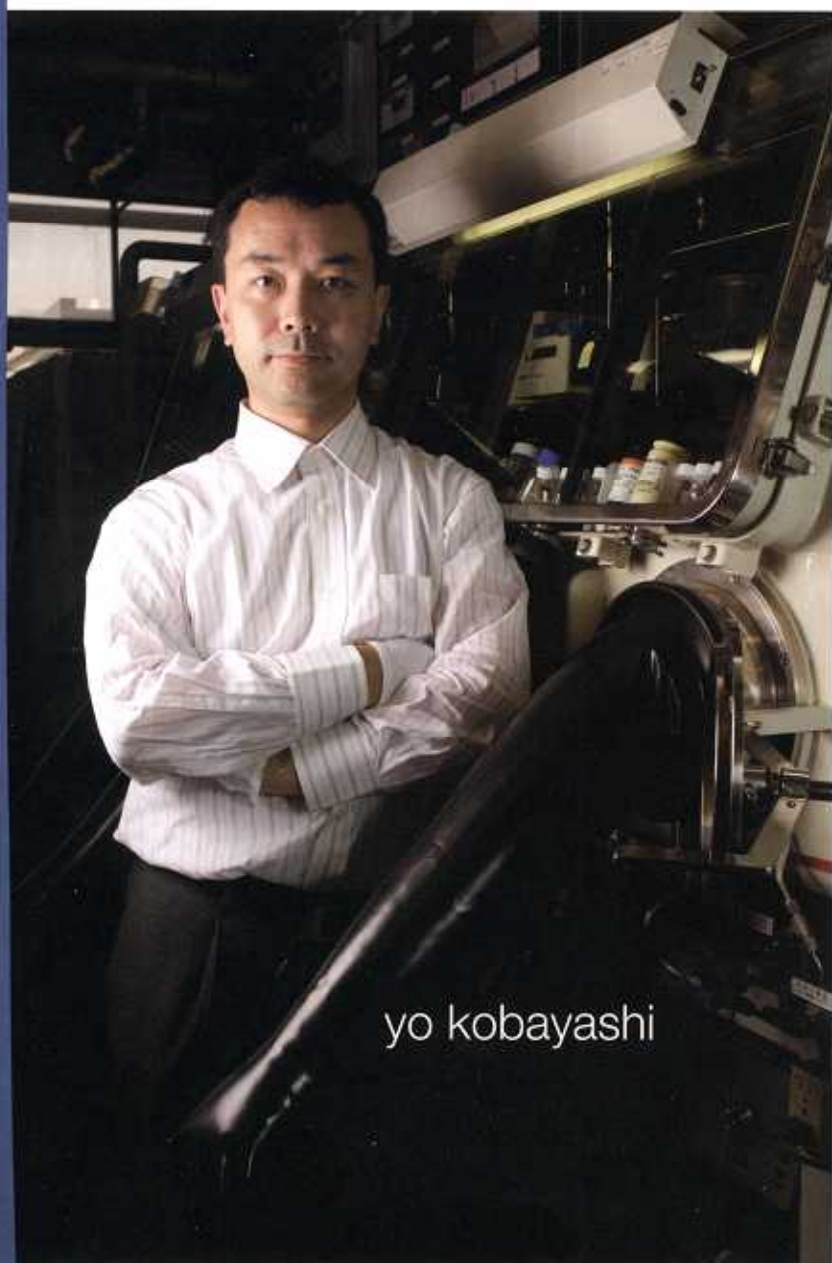
粗悪品ボトックスとバイオテロ

汚水が生むクリーンエネルギー

骨粗鬆症治療の盲点

独自のアプローチで 全固体型リチウム二次電池の実用化を目指す

携帯電話やノートパソコンといった小型民生機器をはじめ、電気自動車や電力貯蔵のように高出力・大容量を要求される分野でも注目を集めるリチウムイオン電池。電力中央研究所では、リチウムイオン電池の電解質を固体化して実用化するための研究も進められている。従来のリチウムイオン電池の弱点を克服し、低コスト化も実現する「全固体型リチウム二次電池」は、“電池の可能性”を拓ける技術として大いに期待される研究分野である。



yo kobayashi

安全かつ低コストを実現 未来を担う次世代バッテリー

現在普及しているリチウムイオン電池は電解質に液状の有機電解液を使用しているが、揮発や発火の危険性があるため大型化が難しく、用途の自由度も限定されている。これに代替する二次電池として、いま注目を集めているのが電解質を高分子で固体化した「全固体型リチウム二次電池」だ。電解質をフィルム状の“固体”にすることで安全性を確保すると同時に、印刷技術を用いた工程で製造できるため大幅なコストダウンも見込める。さらに、ひとつのパッケージ内で積層化し高電圧化できるというメリットもある。

この全固体型リチウム二次電池について、少人数ながらもユニークな視点で材料開発・電池評価を進めているのが小林氏が所属する研究チーム。すでに試作品も作製されており、実用化に向けて着々と研究が進められている。

全固体型リチウム二次電池の研究開発において中心的役割を果たす小林氏であるが、大学時代から電池研究一筋の道を歩んできた訳ではない。むしろ、「異分野の知恵こそが研究開発の最大の武器」と小林氏は語る。例えば、リチウム電池研究の根幹を支えるグローブボックスは原子力分野の溶融塩技術のノウハウが活かされているという。電池一筋ではない多彩な技術との融合が現在の成果を生んでいる訳だ。

熱測定を用いた電池の性能評価は 世界随一のレベル

小林氏の実績は掲載論文数や招待講演の数からも裏付けされているが、「大切なのは使ってもらえる研究成果を世に出すこと。論文文化が目的ではなく、過

- 出身学部・学科
東京工業大学 総合理工学研究科
- 修士論文のテーマ
非水溶液中の金属イオン錯体状態解析に関する研究
- 電力中央研究所を選んだ理由
多面的な視野をもって研究できそうだったから

- 趣味
バンド演奏、スキー、木工家具製作(バンド演奏ではCDも発売)
- 将来の夢
全固体型リチウム二次電池を電気事業で使える「一人前」の電池にしたい。
- 学生に向けて
「勉強だけできる」では人生つまらないし、魅力や柔軟性に欠けると思います。視野を広く持ち、敷居の低い安易な目標を設定しないことも研究者としては重要だと思います。

知の探求者たち

程で生じる副次的な結果にすぎない」という持論を展開している。

小林氏の実績の中で特筆すべきなのが「熱測定」を用いた電池の性能評価である。電池の充電／放電に伴って生じる可逆的な化学反応を熱として捉え、非破壊でリチウムイオンの配置情報まで得られるツールとして、世界中の研究者が関心を寄せている。

熱測定は古くから活用されている実験手法だが、小林氏は同僚等とともに、これをコイン型試作電池の可逆反応熱が捉えられるまで高感度化した。その結果、常識的に考えて熱測定では困難と思われていたコイン電池規模での「電極内リチウムイオンの配置エントロピー変化」の抽出に成功。大学時代に研究した「溶液内の反応熱解析」の経験を活かしたという側面もあるが、「何回ダメ出しされても、追いこんで、追い込んで試行錯誤を重ねる小林氏の姿勢が不可能を可能にした」と研究室の同僚は語る。

この測定ツールは電力中央研究所のものが世界最高感度のため、他の研究機関や大学からのリクエストも多い。測定依頼の電話からわずか半年で

「Nature Materials」に掲載*されるほどの成果を上げた例もある。(掲載論文は東工大との共著)

常に物事を疑ってみることが研究者としての前向きな姿勢

研究室の同僚は、小林氏のことを「書いてあること、常識を鵜呑みにしない人」と描写する。例えば高分子の電解質では、「高電圧の正極」や「炭素系の負極」は電極として使えない、というのが学会の常識とされていたが、あえてそれを試してみる。その結果「使えないわけではない」という結論に至る。「研究者には疑ってかかる姿勢も大切」と小林氏が語るように、いま研究室で開発されている電池は常識では使えないモノだらけの組み合わせで構成されている。

ハードルが高くてもあきらめない。そのためにはアツピ心も必要。こう語る小林氏は、どんな分野にも前向きに挑戦し、安易に「これでいいや」と諦めないのが身上だ。この姿勢が研究成果にも表れているのは必然の結果といえるだろう。

一次電池、二次電池

使い捨てタイプの電池を一次電池という。一方、充電により繰り返し使える電池は二次電池と呼ばれている。

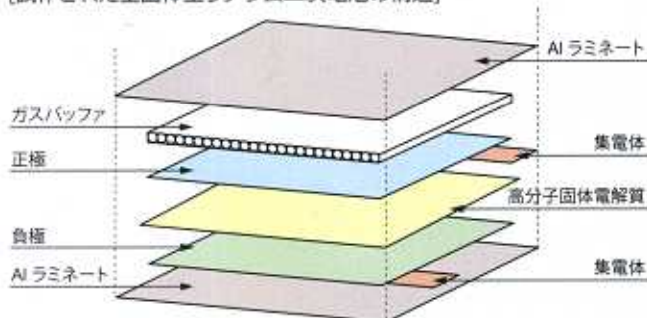
リチウムイオン電池

リチウムイオンを正極と負極の間で移動させることにより充電／放電を行う電池。他の二次電池よりもエネルギー密度が高く、軽量化・小型化できるのが特徴。現在、最も普及している二次電池。

グローブボックス

筐体に固定されたゴム手袋を通して、内部にある薬品や物質を扱うための装置。危険な薬品や放射性物質を扱う場合などに用いられる。水(湿気)を嫌う電池の開発においても、外気を遮断した状態で作業を行えるグローブボックスは欠くことのできない研究装置となる。

[試作された全固体型リチウム二次電池の構造]



・電池内真空引き→ガスバッファ層により真空度維持
・外部加圧不要(100cm²≒100kg加圧に相当)→電池大面積、スタック化時に有利



全固体型リチウム二次電池の試作品

*掲載された論文はこちら
Nature Materials
VOL.5 MAY 2006
Room-temperature miscibility
gap in Li_xFePO₄

宇宙論

宇宙は“漏れ”ている？

宇宙のエネルギー保存則は破れているか……28 ページ

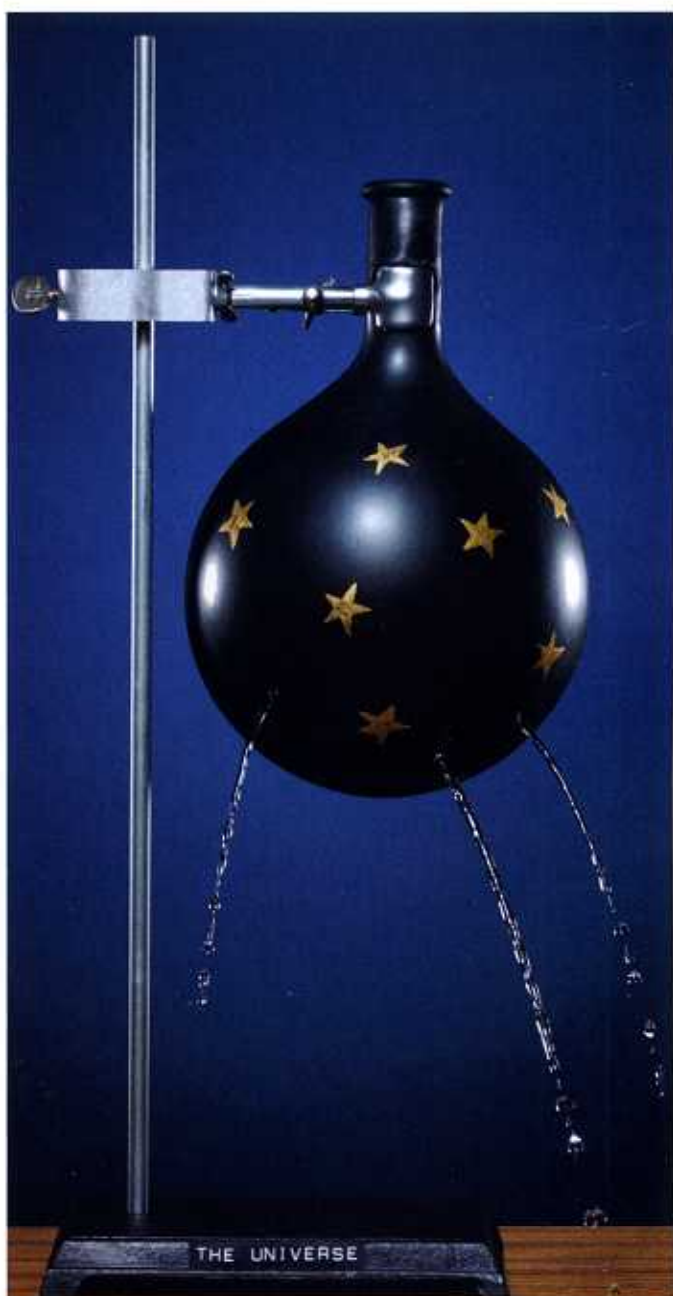
T. M. デイビス (豪クィーンズランド大学)

右の写真は何を語ろうとしているか、おわかりになるだろうか？ 星の絵が描いてある黒い袋のようなものは「宇宙」(袋の支持台の台座に「THE UNIVERSE」というプレートが付いている)。では黒い袋(宇宙)から漏れ出る水は何を意味するのだろうか？ 「エネルギー」だ。

エネルギーは眼には見えないし、私たちは自身が持っているエネルギーを感じることもない。しかし、車に乗っているとき、私たちは車の速度に応じた運動エネルギーを持っている。山を登れば位置エネルギーが増す。相対性理論によれば、私たちは自身の体重(質量)に応じた静止エネルギーも持っている。つまり森羅万象がエネルギーに還元できるわけで、宇宙はいわばエネルギーの集まりだ。

エネルギーに関して学校で習うのが「エネルギー保存の法則」。エネルギーは運動エネルギーや位置エネルギー、静止エネルギーなどさまざまな形をとり、それらの間を移り変わるが、ものごと(例えば物が落ちる、ぶつかる)の始めと終わりではエネルギーの総量は変わらないというものだ。

日常世界では、この法則は根本的なものだが、遠くの星からやって来る光を観測すると、宇宙的なスケールでは、この法則が破れているように見える。「宇宙という“器”からエネルギーが漏れだしているのではないか？」という疑問を抱くような現象が起きている。本当にそんなことが起きているのだろうか？ 気鋭の天文学者である著者は現在、考えられ得る限りの“正解”をわかりやすく解説している。



MARK HOOPER

進化するロボット軍団

ロボットが変える戦争……38 ページ

P. W. シンガー (米ブルッキングス研究所)

朝起きて車で出勤、コンピューターの前に座ってロボットを操作し、1万km以上も離れた敵と戦い、夕方には帰宅して、子どもたちとおしゃべりしながら食卓を囲む——米国では、そんな兵士が増えているという。

超大国、米国は現在もイラクやアフガニスタンなどに軍隊を派遣、反政府組織と戦っている。ここ10年、ロボットが戦いに加わり始めたことで、戦闘風景は様変わりし、将来、さらに変わるだろう。今や米軍は偵察や攻撃などを担う7000台の飛行ロボットと1万2000台の車両型ロボットを保有する。手のひらに載る小鳥のような偵察ロボット、変形して壁穴に潜り込むスライム状ロボットなど新型の開発も進んでいる(右のイラストは開発中の「ビッグドッグ」。数百kgの物資を背負って道なき道を踏破する)。

戦争のあり方も変わり始めた。これまでは同胞の犠牲を強いる戦争を回避しようという国民感情が抑止力として働いていたが、“同胞は危険にさらさない戦争”が現実になり、開戦へのハードルが下がっている。



JOE ZEFF DESIGN, MANSOUR ALI PHOTOGRAPHY Getty Images (background)

DNAリングが拓く未来

DNA 医薬の時代……56 ページ

M. P. モロー / D. B. ワイナー (ともに米ペンシルベニア大学)

ワクチンで感染症の予防をしたり、がんへの免疫力を高めるには、まず、免疫を活性化させなくてはならない。それを担うのは抗原で、病原体やがん細胞に特有のタンパク質だ。従来のワクチンでは、抗原タンパク質やときには毒性を弱めたウイルスをそのまま使っていた。近年、より安全性が高く、取り扱いが容易な方法として、DNAの環を使う試みが注目されている。この環の中に抗原の遺伝子の組み込むのだ。投与された人の身体で抗原が作られ、免疫が活性化される。初期のDNAワクチンはあまりうまくいかなかったが、10数年に及ぶ改良研究の結果、ワクチンとしての効果が飛躍的に高まり、新薬としての大規模な臨床試験が進んでいる。



STUART BRADSHAW

心理学

子どもはみんな科学者

子どもの意外な“脳力” ……48 ページ

A. ゴブニック (米カリフォルニア大学バークレー校)

だっ子でよく泣くし、いつもキョロキョロして、いたずらばかり……。普通の人はもちろん、人間を研究対象とする心理学者の多くも、かつては幼い子どもをいわば「何もわかっていない存在」だと考えていた。だが、最近の研究から、子どもは言葉はうまく操れないものの、予想以上にさまざまな“知識”を持ち、統計分析など科学者が用いるような手法で周りの世界について学んでいることが明らかになってきた。幼児は3〜4歳になるころには、成長や遺伝、病気などといった生物学的な基本概念や、運動の軌道や重力など物理的な概念を理解し始めるようだ。大人になってからはともかく、小さなころはみんなが“科学的思考”をしているらしい。



TIMOTHY ARCHIBALD

進化

意外なツーショット

恐竜世界にいた鳥……64 ページ

G. ダイク (アイルランド ユニバーシティ・カレッジ・ダブリン)

恐竜がエサをあさっている近くに群れ集まるカモのような鳥の群れ(右)。恐竜など太古の生物に関心がある人が見たら違和感を抱くようなイラストだ。鳥が小型肉食恐竜から進化したことははっきりしているが、化石に基づく従来の研究では、現代的な鳥が現れたのは、6500万年前の小惑星衝突で恐竜など多くの生物が絶滅した後とされるからだ。古いタイプの鳥の一部は幸いにも大絶滅を免れ、これが現生鳥類につながったと考えられてきた。だが、ここ10年でモンゴルや南極で発掘された化石と現生鳥類のDNA解析から、現代的な鳥類の登場は6500万年前よりもさらに昔だったらしいことがわかった。鳥類進化に関するこれまでの見方を覆す発見だ。



KAZUHIKO SANO

ヘルメット姿の茂木さん

茂木健一郎 科学のクオリア

日本を横断するニュートリノ……76 ページ

ゲスト：小林隆（高エネルギー加速器研究機構）

見えない、聞こえない、感じられない。でも宇宙から大量に降りそそいでおり、私たちの身体を通り抜けている。ニュートリノはそんな不思議な粒子だ。このニュートリノを茨城県の東海村で作る、日本の地中を横断させて、岐阜県の神岡町でつかまえる。今年1月、そんな実験が本格的に始まった。名付けて「T2K（東海 To 神岡）」実験だ。

茂木健一郎さんが出発点となる東海村の巨大実験施設「J-PARC」を訪ね、リーダーの小林隆教授らに、T2K実験の全貌を聞いた。小さな箱の中で生まれた陽子の種が、長い長い加速器を走り抜け、円形のシンクロトロンをグルグルと回り、光速近くまで加速されて、原子核にぶつかる。そのときに飛び出す粒子からニュートリノができ、神岡に向けて発射される。実験はニュートリノが旅する「前」と「後」で、どのように変化しているかを探るのが目的だ。それが見えれば、現在の素粒子理論である「標準理論」の先にある、新たな理論を開く手がかりになるという。

「たぶん今が一番楽しい時」という小林教授。日本を代表するビッグサイエンスの現場を、動き出した巨大な実験装置の数々と、それを支える人々の言葉でお伝えする。



茂木 四

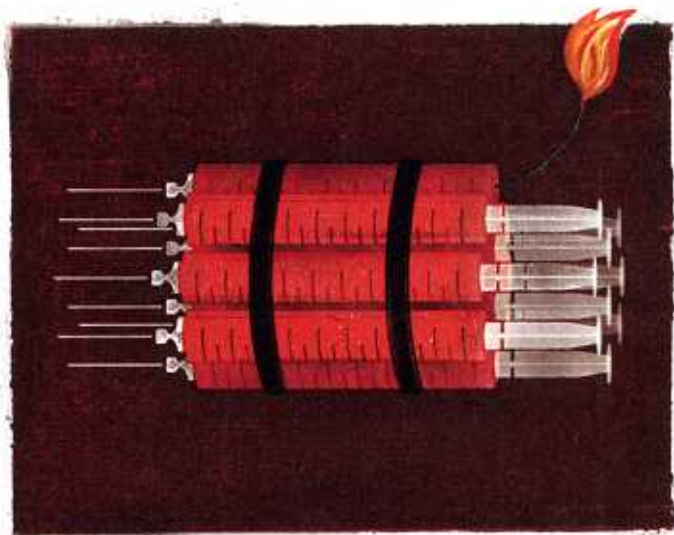
安全保障

シワ取り転じて……

粗悪品ボトックスとバイオテロ……94 ページ

K. コールマン／R. A. ジリンスカス（ともに米モンテレー国際大学院）

顔のシワ取りなどを目的としたボトックスは、いつまでも若々しくありたいと願う女性の間で人気が高いが、その有効成分はボツリヌス毒素。たった1gで約1万5000人の命を奪えるため、潜在的生物兵器剤に指定されている。問題は、過熱気味の人気と匿名売買できるネット取引が、ボトックスの違法製造・取引に拍車をかけていること。これは違法ボトックス、つまりはボツリヌス毒素がテロリストの手に渡る危険性が高まっていることを意味する。



THE HEADS OF STATE



宇宙論
028

宇宙のエネルギー保存則は破れているか

T. M. デイビス

物理学の最も重要な基本法則の1つ「エネルギー保存則」は、宇宙全体に対しても成立しているのだろうか？ 若手物理学者が銀河の赤方偏移を中心に議論する。

軍事技術
038

ロボットが変える戦争

P. W. シンガー

まるでテレビゲームのように、本物の戦争をする時代がやってきた。



心理学
048

子どもの意外な“脳力”

A. ゴブニック

赤ちゃんや幼児は、科学者さながらに実験や分析をして学習している。

医学
056

DNA 医薬の時代

M. P. モロー／D. B. ワイナー

多くの利点がある新世代の薬が、改良を重ね、いよいよ真価を発揮できるように！

進化
064

恐竜世界にいた鳥

G. ダイク

現代の鳥と同じ体形の新鳥類が、予想以上に古い時代から生きていた。

地球環境
072

プラグイン車のクリーン度を問う

M. モイヤー

充電する電気をどう発電したかによって、かなりの違いが生じる。

エネルギー
086

カリフォルニア発 汚水が生んだクリーンエネルギー

J. B. リトル

都市汚水を処理して地下に注入し、地熱発電に利用する試みが進んでいる。

安全保障
094

粗悪品ボトックスとバイオテロ

K. コールマン／R. A. ジリンスカス

ボトックスなどの違法製造の拡大によって、生物兵器の拡散が進む恐れがある。

医療
114

骨粗鬆症治療の意外な盲点

斎藤 充／丸毛啓史

骨密度だけに注目していても、患者の半数で骨折を予防できない。骨の質が大切だ。



表紙

遠方の銀河から届いた光は、エネルギーを失っているように見える。本当に？ (28ページ「宇宙のエネルギー保存則は破れているか」表紙イメージ；Mark Hooper)。

茂木健一郎 科学のクオリア

076 日本を横断する ニュートリノ

ゲスト：小林 隆（高エネルギー加速器研究機構）



NEWS SCAN 010



国内フラッシュ 010

- がん化しない iPS 細胞
- 「はやぶさ」カプセル公開
- グラフェン素子の動作実証
- ダークなガンマ線バースト
- 飛び散った月のマントル物質
- 国際科学五輪の夏
- コスモス国際賞決まる

国内ウォッチ 014

- 国際平和のためのニュートリノ研究
- 30 光年先の「第2の地球」を探る
- 遺伝子の下流側に注目！

海外ウォッチ 018

- 人工細菌は生命を知る道具
- 遺伝する獲得形質
- リチウム電池の安全性
- 夢の動きを追う目の動き
- 異常に静かな太陽
- 「QB」試運転記
- サプリメントは健全か？
- 頭痛をもたらした胸やけ薬
- 分散剤への疑問

Front Runner

- 009 木賀大介（東京工業大学准教授）
創ることで生命を知る
合成生物学の日本代表

ANTI GRAVITY

- 026 私を野球から連れ出して
S. マースキー

砂漠の駝鳥 当世かがく考

- 037 地球工学に祭り上げられる炭焼き
滝 順一

パズルの国のアリス

- 074 偽造金貨と信用できない計測結果
坂井 公

BOOK REVIEW

- 120 『ロボットという思想』
瀬名秀明
『脳と神経のはたらき』
池谷裕二
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

008

Information

124

次号予告

129

SEMICOLON

131

今月の科学英語

132

PR企画

分析機器・科学機器特集 101



日本ABC協会加盟誌
（新聞雑誌部数公表機関）



サイエンス
考古学

50年前

1960

ワクチン論争終結

米国では、来春までに小児麻痺（まひ）をもたらすポリオの生ワクチンが制限付きながら一般使用されるようになる。シンシナティ大学のセービン（Albert B. Sabin）が開発したワクチンの製造が、適格とみなされた製薬会社に認可されるのだ。セービンワクチンの認可によって、生ワクチンの支持者とソークタイプの不活化ワクチンの支持者とのあいだで10年続いてきた激しい論争が終結しようとしている。生きたポリオウイルスを弱毒化して麻痺のリスクを取り去れば、生ワクチンは不活化ワクチンよりも効果の持続性が高く、より確実なポリオ対策になるうえ、経口接種できる（ソークワクチンは注射による接種）ため投与が簡単だというのが生ワクチン支持者の主張だ（編集部注：セービンワクチンは米国でその後40年にわたって標準ワクチンになった。しかし、2000年ごろからソークワクチンの改良タイプのみが使用されている。日本では1961年からソークタイプの不活化ワクチンの定期接種が始まったが、国内産ワクチンの製造がうまくいかず量が不足し、旧ソ連やカナダから経口生ワクチンを緊急輸入した経緯がある。以来、生ワクチンを使っている。1981年以降、国内で野生ウイルスによるポリオの例は報告がないが、生ワクチンの接種によるポリオの発症例は少数ながら続いている）。

160kmから200kmは期待できるだろう（編集部注：現在のジャンボ機の場合、機種にもよるが離陸時のスピードは時速約300km。上空1万mでは同900kmを超えるが、低空では高度ごとに速度制限がある）。

日本の海藻

海藻は一般に考えられているほど役に立たないものではないようだ。世界の国々のなかでも日本だけは海藻資源を無駄にせず、需要を満たすためにある種の海藻を「栽培」している。政府による小規模な養殖実験ではよい結果が出ており、別の沿岸地域でも広い範囲に海藻が「植えられて」いる。食用にされる品種はアマノリだ。これがさまざまな食品に加工されている（編集部注：一般にヒトは海藻の糖類を分解することはできないが、ある種の海のバクテリアは海藻の糖類を分解する酵素を持っている。フランスの研究グループが北米に住む人と日本人の腸内細菌のゲノムを調べたところ、日本人の腸内細菌からはこのバクテリアの分解酵素と同じ遺伝子配列が見つかったという。Nature誌2010年4月8日号で報告）。

150年前

1860

地球の終焉

周期3.5年で太陽のまわりを公転するエンケ彗星は、公転周期を少しずつ短くしながら回転し、太陽のほうへ引きつけられているのが観察されている。このことから惑星は、地球大気よりもはるかに薄いのがその動きに影響するには十分な抵抗を与える物質のなかを動いていると推測される。そうだとすると、必然的に地球とその姉妹天体である惑星はすべて太陽に向かって螺旋状に進んでいて、最後には太陽にぶつかってその質量に呑み込まれてしまうことになる。ただし、それに要する時間は地質学と天文学が扱うべき途方もない長さだ（編集部注：エンケ彗星は知られている周期彗星としては最も周期が短く、3.3年。この記事ではエンケ彗星の周期は3.5年となっているが、この150年で周期が短くなったわけではない。この記事から約40年前の1822年にドイツの天文学者エンケ（Johann F. Encke）が軌道計算をし、周期3.3年を割り出している）。

宿題反対

学校に6時間も缶詰にされた子どもが帰宅後さらに4時間勉強しても、学力は伸びない。みっちり勉強させればオウムのようにたくさんの言葉を繰り返せるようになるだろうが、脳が疲れきってしまう。そのようなやり方で習得すべきことを本当に理解して身につけられるわけがない。現在の制度では、身体も疲れるがそれ以上に知能が衰弱する。小さな女の子が教科書の入った重たい鞆を持ってよろよろと家に帰ったり、夜の8時に肩を寄せて宿題をしていたりする現状を思うにつけ、なぜ米国市民が黙っているのか不思議でならない。ナイフ、火かき棒、棍棒、庭の敷石など、なんでもいいから手近な武器を手にして今すぐ立ち上がり、学校責任者を追い出そうではないか。彼らは子どもたちを餌食にする野獣に等しい。

100年前

1910

飛行機はどこまで速くなれるか

将来、レースだけを目的として飛行機が造られるとしたら、ある特徴を備えていることがほぼ確実に予想できる。昨年、通常設計の飛行機の直線飛行速度が時速約80kmから120kmに伸びた。このことからレース用飛行機がどのくらいのスピードを出せるかを予測してみよう。流線型の美しい形、スチールの機体表面の滑らかさ、エネルギーロスの原因になるワイヤーや支柱などが一切ない機体であれば、少なめに見積もっても時速



未来のレース用飛行機——1910年

木賀 大介

東京工業大学大学院
総合理工学研究科准教授

(きが・だいすけ) 1971年東京都生まれ。1999年に東京大学で博士(理学)を取得。科学技術振興事業団、理化学研究所、東京大学での研究生活を経て、2005年4月より現職。2008年からは科学技術振興機構(JST) さきがけ研究者も兼任。



日経サイエンス

創ることで 生命を知る 合成生物学の 日本代表

「合成生物学」という分野がある。望み通りの働きをする細菌を作りたい、創ることで生命の謎を解きたいなど、目的はさまざまだが、生体分子を設計し、合成するところが共通点だ。生物の知識だけでなく、工学的な設計力や数値計算など、さまざまな分野の知恵を集めないと成果は出せない。東京工業大学の木賀大介は早くからこの分野で、世界と競争してきた。(文中敬称略)

職人技に頼るバイオテクノロジーを真の意味での工学にしよう——米国の研究グループが始めたこの動きは、さまざまな方向へと発展した。その中で誕生したのが、マサチューセッツ工科大学で開催されるiGEMという学生主体のコンテスト。アイデア通りの生物やそのパーツを創る“合成生物学のロボコン”だ。木賀の参加でこのコンテストは国際大会となり、合成生物学とそれを担う若手を育ててきた。

iGEMでは世界の名だたる有名大学と同じ土俵に立つことになる。「〇×ゲームをする大腸菌」などで毎回入賞を誇るが、学生への教育的効果は「予想以上だった」。生物学と工学の出身者をまとめ上げて学際的に研究をする木賀のスタイルは教育効果の高さが評価され、研究科から、所属学生への支援

を手厚くする研究室の1つに選ばれた。

iGEMは部品集めも目的の1つ。コンテストに出された優れたDNA配列などは“規格部品”として登録される。木賀のチームは特定の条件が揃った時にのみタンパク質を作るプロモーターなど、多くの規格部品を生みだしてきた。

合成生物学では、目指す機能を実現するための全体の設計、それを実行させるための論理記述など、コンピューターのプログラミングに似た作業が不可欠だ。検証も、まずはパソコン上で行う。これらの作業は「ドライ系」と呼ばれる。一方、実際にDNAを合成して、それを細菌に組み込むなどの生物実験は「ウェット系」だ。合成生物学者は、両方に精通する必要がある。

木賀は東京大学生物化学科出身のウェット系。卒論の研究室を決めるときに、各研究室を回り教授に「生命を創ってみたい」と持ちかけた。「バカな、と皆に言われた中で、唯一、やってみようと言って下さったのが横山(茂之)先生」。横山は、細胞なしでタンパク質合成をする方法で名を馳せていた。

ウェット系に進んだが、子どもの頃からごく初期のパソコンで遊んでいた。それを物語るのが、壁際に置かれた骨董的価値のありそうなNECの8ビット

機PC-6001だ。1981年発売のこれを「新しい物が好きだったオヤジが買ってくれた」。雑誌に載ったゲームのプログラムを入力して、動かしてみる。うまくいかない場合は、出ている症状などから入力ミスの場所を推測する。当時、木賀はまだ小学生だった。

木賀を惹きつけたのは、パソコンというより、その背後にある「論理」だ。紙の駒と地図で遊ぶシミュレーションゲームにも夢中になった。ユニットの配置や資金の用途などを決め、勢力の拡大を目指す。初期値とごく単純なルールから、無限の展開を見せる。

現在、科学技術振興機構に採択されたさきがけ研究の最後の詰めをしている。細胞は発生が進むにつれ、個々のタイプへと分化をする。どのタイプになるかを決めるのは、細胞を取り巻く環境だ。iPS細胞とも関連するテーマだけに注目度も高い。木賀は細胞分化をモデル化して人工遺伝子ネットワークを作り、実際に細菌に組み込んだ。ドライ系の検証は終え、ウェット系のデータも出そろいつつある。

「パラメーターの振り幅が難しいが、こういうのはウェット系の方が強い。『野性の勘』が働きますから」。ちらりと自信をのぞかせた。(編集部・詫摩雅子)

幹細胞

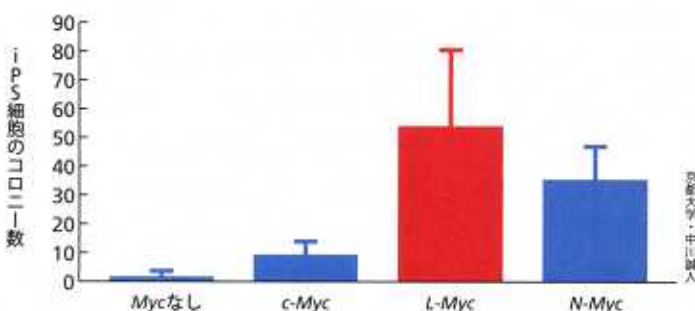
がん化しないiPS細胞

がん遺伝子*c-Myc*の代わりに親戚遺伝子を使って課題解決

京都大学の中川誠人講師と山中伸弥教授らのグループは、iPS細胞（人工万能幹細胞）を作る際に、これまでとは別の遺伝子を使うことで、安全性と作成効率の両方を高めることに成功した。米国科学アカデミー紀要オンライン版に7月27日に発表。

山中教授が世界で初めてiPS細胞を作ったときには、皮膚の線維芽細胞に4種類の遺伝子を導入した。しかし、そのうちの1つである*c-Myc*という遺伝子はがん遺伝子として知られており、実際、*c-Myc*を使って作ったiPS細胞は、別の細胞に分化させてからでもマウスに移植すると半数に腫瘍ができてしまう。*c-Myc*を除いた3つの遺伝子（3因子）だけで作ったiPS細胞ならば、腫瘍化のリスクは低くなることは山中教授らが実証していたが、もとの細胞からiPS細胞へと変わる効率が大幅にダウンするのが課題だった。

研究グループは*c-Myc*遺伝子と塩基配列が似ている「Mycファミリー」と呼ばれる一群の遺伝子のうち、*L-Myc*と*N-Myc*、それに以前からの*c-Myc*がiPS細胞づくりにどう影響するかを詳しく調べた。3因子とともに*L-Myc*遺伝子



iPS細胞作りが高効率に 3種類の遺伝子（3因子）とともにMycファミリーのいずれかを加え、線維芽細胞からiPS細胞を作った。iPS細胞になったもののだけがコロニー（細胞の塊）を作る。「Mycなし（3因子のみ）」「*c-Myc*」「*L-Myc*」「*N-Myc*」の4つで比較したところ、*L-Myc*を加えた系が最も効率がよかった。

を使うと、マウスでもヒトでも*c-Myc*遺伝子に比べて効率よくiPS細胞へと誘導できることを突き止めた。

もちろん、*L-Myc*遺伝子で作ったiPS細胞がさまざまな細胞へと分化できる多能性を持つことも確認済みで、マウスの受精卵にこのiPS細胞を注入したところ、成長したマウスの生殖細胞系列にiPS細胞に由来する細胞があった。これは多能性のテストとしては最難関をパスしたことを意味する（「iPSとESは本当に万能細胞なのか？」日経サイエンス2009年5月号NewsScan参照）。

さらに重要なことに、*L-Myc*遺伝子を使ったiPS細胞由来の分化細胞は、マウスに移植しても腫瘍形成は見られなかった。安全性と効率の両方の課題をクリアできたことになる。*L-Myc*遺伝子を使う作成法は、今後、iPS細胞づくりの標準となる可能性があるといえるだろう。

宇宙工学

「はやぶさ」カプセル公開

4時間待ちの行列もできた

探査機「はやぶさ」は7年間、60億kmに及ぶ旅をして小惑星「イトカワ」を訪ね、地球に帰還した（川口淳一郎『「はやぶさ」60億キロの旅』日経サイエンス2010年9月号）。イトカワのサンプルが入っている可能性がある地球帰還カプセルは6月13日深夜、オーストラリアの中南部に着陸。宇宙航空研究開発機構（JAXA）相模原キャンパス（神奈川県相模原市）に運んで開封したところ、微量の塵が確認され、現在、塵の取り出しが進んでいる。

ここまで作業が順調に進んだのも、地球帰還カプセルが期待通りの性能を発揮したおかげだ。そのカプセル本体と、本体を大気圏突入の超高温から保護したヒートシールド（右ページの写真）、パラシュートなどの一般公開が7月末から8月にかけて相模原市立博物館と筑波宇宙センター（茨城県つくば市）、東京・丸の内で行われた。

各会場には60億kmを旅してきたカプセルを一目見よう



立役者とともに 大気圏突入時の超高温からカプセル本体を保護したヒートシールドの実物（相模原市立博物館で撮影）。右は「はやぶさ」プロジェクトマネージャーの川口淳一郎 JAXA 宇宙科学研究所教授、左はカプセルの大気圏突入技術の開発に取り組んだ山田哲哉・准教授。「カプセルは日本の宝、有形の宝だ。これを見て誇りに思ってもらいたい」と川口教授は語った。ヒートシールドは大気圏に突入する際、3000℃の高温にさらされ、夜空に輝く火球となったが、耐熱材で覆われた表面は全面がピロードのようで、激しい損傷などは見られない。

と多くの人々が訪れた。初公開となった相模原市立博物館では、7月30日と31日の2日間の公開で約3万人が詰めかけ、30日は最大3時間待ち、土曜日の31日には4時間待ちの行列となった。筑波宇宙センターでは8月2日から5日間の日程で公開され、同じく約3万人が訪れた。

JAXA は今後、全国各地の科学館や博物館でもカプセルの展示を行う予定。8月中旬にその詳細をまとめて公募を始め、9～10月に決める見通し。



ナノテク&電子工学

グラフェン素子の動作実証

論理演算が可能な性能を確認できた

シリコン（ケイ素）でできた現在のトランジスタをさらに微細化しても、半導体チップの性能はいずれ壁に突き当たると考えられている。そこで期待されているのが、炭素原子が連なった極薄のグラフェンだ（「半導体チップを変える9つのアイデア」日経サイエンス2010年4月号）。物質・材料研究機構はグラフェンを用いたトランジスタを試作して基本動作を実証し、*NanoLetters* 誌電子版6月2日号に報告した。

まず天然のグラファイト（黒鉛。シート状のグラフェンの層がたくさん重なってできている結晶）をシリコン基板に押しつけてから引きはがし、基板上に縦横およそ10μm四方のグラフェンを残した。ここに電子を供給するソース電極と、出口となるドレイン電極をつけた後、その中間部のグラフェ

ンシートの上にアルミニウムの電極を直接形成した。

空气中に数時間放置すると、グラフェンとアルミニウム薄膜の間に酸素が侵入して、厚さ数nmの酸化アルミニウムの絶縁膜が自然にできる。そして、このアルミニウム電極に加える電圧によって、その下にあるグラフェンの電気抵抗が実質的に変わる。つまり、アルミをゲート電極とする一種の電界効果トランジスタ（FET）だ。

ゲート電極に2V程度の電圧を加えるとグラフェンの電導性が変わり、それに応じて出力電圧（ソース電極とドレイン電極の間の電圧）が変化した。入力に対する出力電圧の変化の度合いを表す「電圧ゲイン」という指標の値が従来の試作グラフェン素子のおよそ150倍にあたる7に達し、初めて1を超えた。これは実際の論理演算素子として利用可能であることを意味する。

グラフェンは炭素原子が六角形に配列した“金網”のようなシート。厚みが原子1個分しかない究極の薄膜だ。しかも、電子を伝えるスピードが常温では他のどんな物質よりも速いなどの特徴があるため、電子素子への利用を目指す基礎的な研究が世界で活発に進んでいる。今回の成果は比較的小さな入力電圧でも十分な動作が可能であることを示したのがポイント。電圧ゲインが1を大きく超えたので、出力電圧を次の素子の入力としても信号が減衰せず、素子を次々につないで論理回路を構成する前提が整った。

グラフェンにアルミニウムを重ねると間に酸化絶縁膜が自然にできる現象は物材機構のチームが以前に発見していたもので、この絶縁膜が非常に薄いため、グラフェンに電場を効率よく加えることができたようだ。こうした研究のなかから、グラフェン素子の適切な設計が見えてくるだろう。



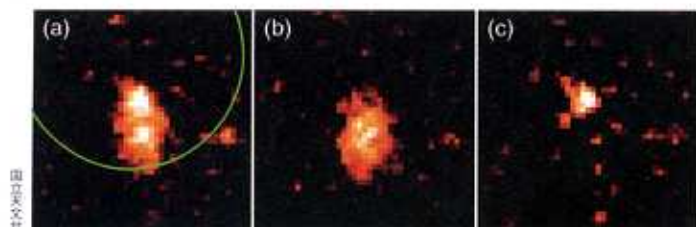
宇宙物理学

ダークなガンマ線バースト

すばる望遠鏡がその正体に迫った

宇宙最大級の爆発現象、ガンマ線バーストにはいくつかのタイプがあるが、なかでも「ダークガンマ線バースト」と呼ばれるものは謎が多い。その正体に迫る研究成果を京都大学、東京工業大学、国立天文台の共同グループが上げた。7月21日に発表。

ガンマ線バーストは超高エネルギーの電磁波であるガンマ線を放出する爆発現象。ガンマ線で明るく輝く時間が長いタイプと短いタイプがあり、その爆発のメカニズムは異なると考えられる。長く輝くタイプはさらに、X線や可視光などの残光を伴うものと、そうした残光がほとんどない“ダーク”なものにほぼ二分される。後者のダークガンマ線バーストは



浮かび上がった残光 近赤外線を高感度でとらえるすばる望遠鏡を使って、ダークガンマ線バーストが出現した天球上の領域をバースト発生9時間後(左、緑色の円は天文衛星の観測で推定された領域)と同34時間後(中央)に観測。両者の差分をとると、バーストの残光が浮かび上がった(右)。

光学望遠鏡で天体を特定するのが難しいため、とりわけ解明が困難だ。

研究グループは2008年3月25日、米国のガンマ線天文衛星スウィフトがダークガンマ線バーストの出現を検出した9時間後、すばる望遠鏡をバーストが起きた方向に向けたところ、近赤外線の輝きをとらえて母天体を特定することに成功した(上の画像)。その後、母天体をより詳しく観測し、それが天の川銀河に匹敵する大型銀河であることを突き止めた。ガンマ線で長く輝き続けて残光を伴うものでは、こうした大型銀河で出現が確認された例はない。そのことから、残光を伴うタイプとダークなタイプの間では、その起源が異なっている可能性が浮上した。

天体の爆発現象の1つに、大質量星が自身の重さに耐えかねて起こる重力崩壊型の超新星爆発があり、星が高速で自転していると、超高速のガスの流れ(高速ジェット)を伴う。そして高速ジェットからは強力なガンマ線が放射されると考えられる。この高速ジェットがたまたま地球の方向に向いた超新星爆発が、長く続くタイプのガンマ線バースト、特に母天体がよくわかっている残光を伴うタイプの起源だとする説が有力視されている。一方、今回観測されたダークガンマ線バーストの母銀河のような大型銀河では重元素が多く、そのため、大質量星は高速自転せず、高速ジェットを伴う超新星爆発は起きないと考えられた。

研究グループはダークなタイプの起源について、重力崩壊型の超新星爆発ではなく、2つの恒星からなる連星が衝突合体して起きる超新星爆発である可能性を指摘している。このタイプの超新星爆発なら、重元素が多い大型銀河においても、高速ジェットを伴う超新星爆発が起き得る。地球では古生代オルドビス紀末(4億3500万年前)に大絶滅が起きたが、その原因が天の川銀河内で起きたガンマ線バーストだったとする説がある。これに対して、「天の川銀河のような大型銀河では重元素が多いのでガンマ線バーストは起きないのではないか」との見方があった。しかし、今回の研究を踏まえると、天の川銀河でもガンマ線バーストが起きている可能性がある。絶滅の議論にも一石を投じることになりそうだ。

惑星科学

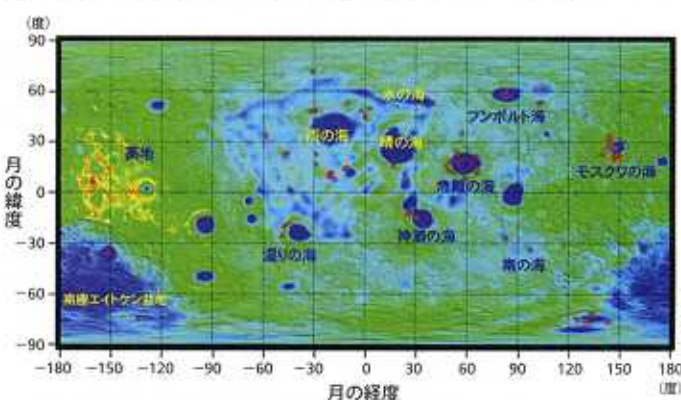
飛び散った月のマントル物質

「かぐや」が月全球の分布を明らかに

月探査機「かぐや」は昨年6月に月面に落下して使命を終えたが、得られた膨大な量の観測データの解析が続いている。このほど月表面の鉱物組成データの分析から、月のマントル起源の岩石に含まれる鉱物、カンラン石の全球分布状況が明らかになった。月の内部構造や進化を探る重要な手がかりになる。*Nature* 誌7月4日号に発表。

「かぐや」は月の南北両極上空の高度100kmを通過する極軌道上から、月面の鉱物組成を測定した。測定点は南北方向で500m間隔、東西方向は赤道域で1~3km間隔で、緯度が高くなるほど間隔は狭まる。総観測点は7000万点に及ぶ。このデータを分析したところ、月の表側と裏側の合わせて34地域でカンラン石の分布が確認された。このうち月の表側の3地域は、地上の大型望遠鏡での観測から、その分布が知られていたが、残る31地域の分布は新発見。過去に米国の月探査機クレメンタインもカンラン石の分布を発表していたが、その分布は今回の結果と大きく食い違う。クレメンタインは「かぐや」よりも観測精度がかなり低く、他の鉱物とカンラン石を見誤った可能性が高いと考えられる。

カンラン石は月の「海」と呼ばれる地域の周辺に分布していた。「かぐや」は月表面の起伏と、各地の重力の値の詳しい測定から、月の地殻の厚さの状況も明らかにしている。その図面を見ると、「海」は隕石衝突によって表層部がかなり深くまで吹き飛ばされてできた巨大なクレータで、そこが溶岩で満たされることで、現在見られるような黒っぽい平原になったことがわかる。カンラン石は、その溶岩で埋められた巨大クレーターの縁に存在している(下の画像)。また、月のカンラン石は、地殻下部を起源とするトロクトル岩と、マン



カンラン石の分布 「かぐや」が明らかにした月全体の地殻の厚さの分布図(黄色→緑→水色→青→紫の順に薄い)に、カンラン石の分布(赤)を重ねると、巨大クレーターの縁に位置することがわかる。

トルを起源とするダンカンラン岩の両方に含まれるとされるが、「かぐや」のデータの分析から、ダンカンラン岩に由来するカンラン石である可能性が非常に高いことがわかった。

こうした分析結果から、「かぐや」の研究チームは、地殻とともにマントル上部も吹き飛ばすような隕石衝突が起きたとき、その巨大クレーターの縁にマントルに起源を持つカンラン石が降り積もったと考えている。カンラン石の分布が見られない巨大クレーターもあるが、それはカンラン石が降り積もった後に、新たな塵がその上に降り積もったためだと解釈できる。

月の進化に関する最新のモデルによると、月は冷えて固まる際、地殻とマントルの間に、放射性元素に富む岩石層「クリープ」が形成されたとされる。そして、もしクリープが月の表層下の全域でできたのなら、マントル起源のカンラン石が分布する場所にはクリープに由来する鉱物も見られるはず。しかし、今回そうした鉱物は新たに見つからなかった。このことから、クリープは過去の探査で見つかった月の表層の一部地域のあたりに限定的に形成された可能性が高いことがわかった。

科学教育

国際科学五輪の夏

理科好きの高校生が筆記や実験に汗を流した

夏は科学オリンピックの季節。日本は7月から9月にかけて開かれる数学、物理、化学、生物学、地学、情報、地理の7つのオリンピックに高校生の代表選手合わせて約30人を送り出している。このうち情報（カナダで8月14日から21日まで）と地学（インドネシアで9月19日から28日まで）を除く5つのオリンピックが8月上旬までに終了。以下に日本選手の成績をまとめた。多くは個人戦で、参加者総数に占める金銀銅の各メダル受賞者の割合は分野によって異なる。数学オリンピックについては日本の順位が公表されており、今回は7位（前回2位）だった。

分野	回数	開催国	参加国・地域	日本の獲得メダル数
数学	51回	カザフスタン (ドイツ)	96 (104)	金2、銀3、優秀賞1 (金5、銅1)
物理	41回	クロアチア (メキシコ)	82 (72)	銀1、銅3、入賞1 (金2、銀1、銅2)
化学	42回	日本 (英国)	68 (64)	金2、銀2 (金2、銀1、銅1)
生物学	21回	韓国 (日本)	59 (56)	金1、銀3 (金1、銀3)
地理	8回	台湾 (チュニジア)	29 (24)	銅1 (金1)

※（ ）は前回の情報

科学賞

コスモス国際賞決まる

「生態系に対する倫理」の概念を広めた米国の女性科学者に

国際花と緑の博覧会記念協会は2010年の「コスモス国際賞」をシアトルにあるワシントン大学生物学部名誉教授のレオポルド博士（Estella Bergere Leopold II, 83歳）に贈る。7月26日に発表された。

レオポルド博士は「環境倫理の父」と呼ばれたアルド・レオポルド氏（Aldo Leopold, 1887～1948）

の末娘。父の提唱した「土地倫理（land ethics）」の概念を深めつつ、広く伝えることに貢献してきたのが授賞理由だ。土地倫理での「土地」は土壌だけでなく、水や微生物、植物、動物、ヒトまでが相互にかかわりあった共同体のこと。人間社会に一定の規範（倫理）が必要のように、「土地」という共同体に対しても、人間が好き勝手なことをしないように求めたのがアルド氏の「土地倫理」だ。20世紀前半にあって、時代の先を行く概念だった。

娘のレオポルド博士は、花粉化石をもとに過去の気候や植生を推定する古生物学を研究しつつ、土地倫理の思想に基づく自然保護活動にも携わった。たとえば、現在は国定公園となっているコロラド州のフロリサント化石層は1960年代から70年代にかけて宅地開発の計画が進んでいた。博士は、ここが3400万年前（始新世）の動植物の生態がわかる素晴らしい化石産地であることを示し、将来の人類のために遺すべき自然遺産であると主張、国定公園への制定に結びつけた。

また、ワシントン州のセントヘレンズ山が1980年に大規模な噴火をして、600km²（東京23区より少し狭い程度）の森林が火砕流によって消失すると、「いったんリセットされた土地がどのように回復するのかを知る絶好の地」として、人為を加えずに保存することを主張。ここもやはり国定公園となっている。

レオポルド博士は、名誉教授となった今もワシントン大学で研究を続けており、学生たちへの講義もしている。授賞式は10月14日に大阪市内で行われる予定で、賞状と賞牌、副賞4000万円が贈られる。その後、大阪と東京で記念講演を行う。コスモス国際賞は1990年に開催された花と緑の万博を記念した賞で、今回が18回目。



国際花と緑の博覧会記念賞受賞者

物理学&核不拡散

国際平和のためのニュートリノ研究

幽霊素粒子で原子炉をモニターする時代がやって来るかもしれない

素粒子ニュートリノは幽霊のように物質を素通りするので、わからない部分が多く、特性の解明を目指した実験研究が進んでいる(76ページ)。一方、ニュートリノ研究を実社会に利用しようという動きも出てきた。核分裂で生じる反ニュートリノ(ニュートリノの反粒子)を原子炉モニターとして用いることで核拡散防止に役立てようという試み。8月上旬、仙台市の東北大学で国際会議が開かれ(右ページ上の写真)、各国の研究の現状が報告された。

原子炉で核燃料のウランを燃やすとプルトニウムが生みだされる。プルトニウムは核兵器に転用できるので、日本など非核保有国では、原子炉でどれほどのウランが燃やされ、プルトニウムが生みだされるか、国際原子力機関(IAEA)によってチェックされている。ただ、一部の国では原子炉の稼働状況について十分なチェックができていないことが問題となっている。

そこで検討され始めたのが反ニュートリノを用いた原子炉モニターだ。原子炉を動かせば必ず反ニュートリノが

生みだされ、反ニュートリノは分厚いコンクリート壁でも簡単に通り抜けて外に出る。トラックで運べる重量1トン程度の反ニュートリノ検出器があれば、それを原子力施設の近くに置くだけで、建屋内に立ち入ることなく稼働状況を把握できる(下左は概念図)。IAEAも関心を持っており、今回の国際会議でも関係者が講演した。

研究のパイオニアは米国。2008年、米ローレンス・リバモア国立研究所などのグループが小型試作装置を原子炉近くに設置して実験、核燃料の燃焼度の変化を測定できることを示し、原子炉モニターの可能性を明らかにした。

用いたのは液体シンチレーターという検出器。荷電粒子やガンマ線を受けると発光する透明オイルの一種で、その中に中性子をよく吸収するガドリニウムという元素を混ぜる。

原子炉内の核分裂反応で発生した反ニュートリノは、非常に低い頻度だが、液体シンチレーターに含まれる陽子と衝突反応を起こす。すると陽電子(電子の反粒子)と中性子が生じる。



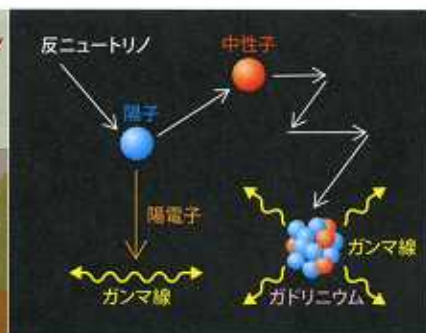
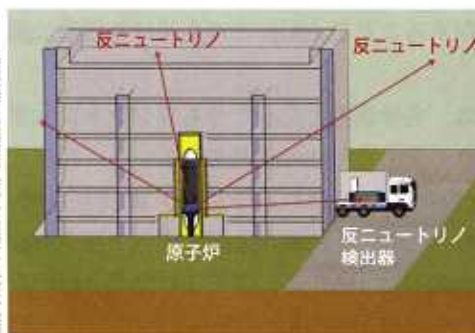
東北大学ニュートリノ科学研究センター・古川 敏之(左)／東京大学・青木 真二(右)



いかにしてとらえるか 東北大学では液体シンチレーター(上段)、東京大学ではプラスチックシンチレーター(下段)の開発が進んでいる。

この陽電子によって液体シンチレーター内で発光が起き、その陽電子が近くの電子と反応して消滅する際にガンマ線を出すので、それによっても発光する。一方、中性子は周囲の原子核と何回か衝突した後にガドリニウムに吸収されるが、そのガドリニウムからガンマ線が放射されるので、それによっても液体シンチレーターは発光する(下右の図はそのプロセス)。これら一連の発光を高感度の光検出器でとらえ、反ニュートリノの飛来をキャッチする。

仙台の国際会議では米仏日の3グループが液体シンチレーターによる反ニュートリノ検出の研究成果を報告した。日本で取り組んでいるのは東北大学ニュートリノ科学研究センターを中心に東京工業大学、首都大学東京、新潟大学、東北学院大学、神戸大学、広島工業大学からなるグループ。2007年、研究用原子炉(高速実験炉)「常陽」で実験したが、原子炉モニターとして



の性能を確認するには至らなかった。現在、検出器を改良中で、高速増殖炉「もんじゅ」での実験を目指している。

東京大学の荻輪眞教授らは日本原子力研究開発機構と共同で、プラスチックシンチレーターによる別タイプの検出器を開発している。プラスチックシンチレーターは荷電粒子やガンマ線を受けて発光する特殊なプラスチックの細長いブロック。検出器は、このプラスチックシンチレーターの間にガドリニウム含有シートを挟み込み、多数本を束ねた構造。検出原理は液体シンチレーターと同じだ。

試作装置を試験したところ、1日程度の測定で原子炉の稼働を把握できることがわかった。「可燃性の液体を用いる液体シンチレーターより安全性と可搬性が高い。原子力発電所などで早



期に実証試験をしてフルサイズの検出器を完成させたい」(荻輪教授)。新潟大学などのグループもプラスチックシンチレーターの要素技術を開発中だ。

仙台の国際会議では、このほか米国とブラジルのグループが、素粒子実験に用いられるスーパーカミオカンデと同タイプ(水チェレンコフ型)の検出器の開発の現状をそれぞれ報告した。核不拡散の重要性は今後さらに高まるとみられ、この分野の研究は活発になりそうだ。(編集部・中島林彦)

(下のイラスト)。計画のターゲットは地球や火星のような岩石惑星で、生命探査が最終的な狙いだ。東京大学の研究グループのシミュレーションによれば、数十光年先にある地球型の系外惑星なら、陸と海の割合や植物の存在をある程度突き止められる可能性がある。

系外惑星は半世紀以上前から探索されていたが、最初の発見は1995年。約50光年遠方にあるペガサス座51番星を周回する大型ガス惑星で、公転周期は4日、軌道半径は約800万km。例えていえば、水星よりもはるかに内側を木星が周回しているようなものだ。そうしたことから「ホットジュピター」の名が付いた。

1990年代半ばまで、系外惑星は発見できるとしたら大型ガス惑星で、木星のように主星からかなり離れたところを年単位の周期(木星は約12年)で公転していると思われていた。主星のふらつきで起きるドップラー偏移(34ページのイラスト)の変動もそうした長周期のものが調べられていた。だが、最初に発見された系外惑星はこの予想とはまったく違っていた。そこで観測データを調べ直すと、同じようなホットジュピターが続々見つかった。

系外惑星は今年4月時点で約450個見つかった。うち400個弱は主星のドップラー偏移の観測によるもので、ほとんどは大型ガス惑星とみられる。一方、近年、惑星が主星の手前を横切る際の減光を調べる「トランジット法」による系外惑星の発見も相次ぎ、これまでに約70個の報告がある。

トランジット法の特徴は減光の度合いから惑星のサイズがわかること。ドップラー偏移で求めた質量の値と合わせれば平均密度が計算でき、その密度からガス惑星なのか岩石惑星なのかがわかる。トランジット法で見つかった系外惑星もほとんどはガス惑星だが、地球の数倍の重さの大型岩石惑星、いわゆる「スーパーアース」も見つか

天文学

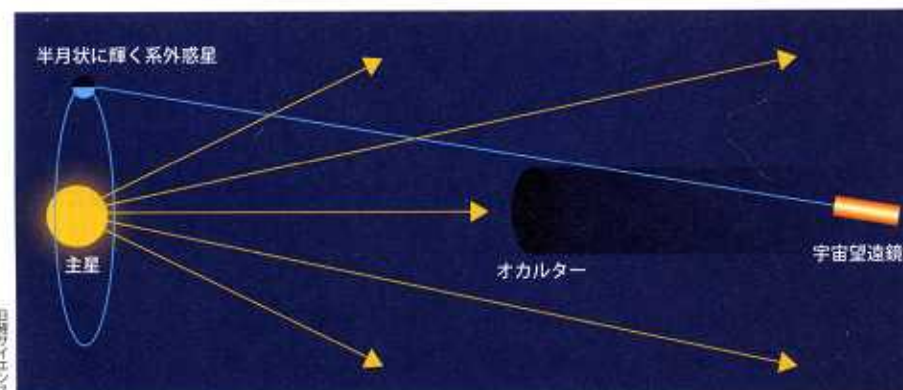
30光年先の「第2の地球」を探る

系外惑星探査の将来計画を見通したシミュレーション研究が進んでいる

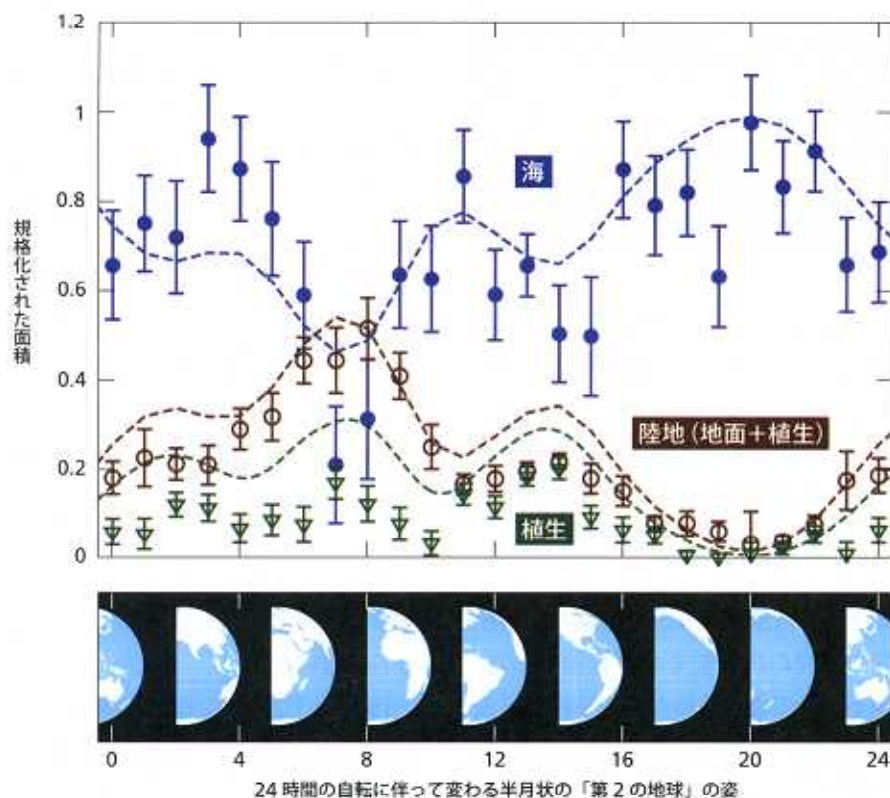
太陽ではない別の恒星の周りを回る惑星「系外惑星」は天文学の中でも最もホットなテーマ。惑星系を持つ恒星(主星)は、惑星の公転で微妙にふらつくので、そのふらつきを検出して系外惑星の質量と軌道が調べられてきた。近年、系外惑星が主星の手前(地球か

ら見て)を横切る際の主星の減光を精密測定することで惑星のサイズもわかるようになった。

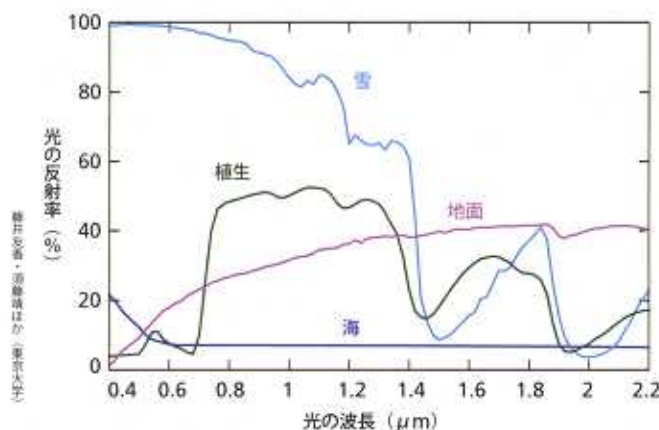
将来は宇宙に直径数十mの円盤を浮かべ、それで主星の輝きを覆い隠すことで、宇宙望遠鏡で系外惑星を直接観測する計画が欧米で構想されている



系外惑星を直接観測 宇宙空間に直径数十mの円盤「オカルター」を打ち上げ、これで主星の輝きを遮蔽して、その周りを回る系外惑星を宇宙望遠鏡で直接観測する計画が構想されている。日食のとき、太陽の周囲の星が観測できるが、オカルターはいわば、この日食の際の月のような役割を果たす。



24時間の自転に伴って変わる半月状の「第2の地球」の姿



海と陸の割合を推定

30光年先の「第2の地球」を口径4mの宇宙望遠鏡で観測したと仮定し、得られたスペクトルから、半月状に輝く第2の地球において、海や陸がどの程度の割合になるのか推定した(点線が実際の地球での割合、エラーバーが付いた○が推定値)。推定に当たっては地球の海や地面、植生、雪のスペクトル(左)を「物差し」に用いた。

り始めている。現在、米国の天文衛星ケプラーがトランジット法による系外惑星探査を集中的に進めており、今後、さらに多くの系外惑星、とりわけスーパーアースなどの岩石惑星の発見が相次ぐとみられている。

ただ、トランジット法では岩石惑星であることはわかっていても、海があるのか、植物などの生命が存在するのかなどは突き止められない。それには、惑星の“色”を見る必要がある。

しかし、惑星のそばで主星が非常に明るく輝いているので、その輝きをカットしなければ惑星は直接観測できな

い。それを可能にするのが、前ページのイラストで紹介した宇宙空間に遮光用の円盤を浮かべる計画だ。では、そうした円盤を浮かべたとして、本当に岩石惑星の色を調べて地表の状況を読み取ることができるだろうか？

「その可能性はかなり高い」というシミュレーション結果をまとめたのが、東京大学大学院の藤井友香さんや須藤靖教授らのグループだ。藤井さんらは約30光年先に地球そっくりの系外惑星「第2の地球」が存在すると仮定し、それを直接観測したらどのような情報が得られるかシミュレーションした。

第2の地球は地球の衛星画像をもとに作成、雲が存在しない晴天の状態を考えた。地球から見た第2の地球は、いわば半月のような状態の時に最も観測に適している。もちろん30光年も先にあるので、半月のような形には見えないし、海の青も陸地の茶色も植物の緑も一緒になって1つの光点になる。

しかし、第2の地球は自転しているので光点の色合いは時とともに微妙に変わるはずだ。近くから見れば例えば太平洋が大部分を占める半月と、アフリカやヨーロッパの大陸が見える半月ではかなり違うからだ。問題は、計画されている宇宙望遠鏡(想定口径4m)の観測(毎日1時間で1週間の観測を想定)で、光点の微妙な色合いの変化からどれほどの情報を引き出せるかだ。

藤井さんらはまず海、地面、雪、植生(森林などに覆われた地域)が持つ可視光から赤外線のスเปクトル(波長ごとの明るさの変化を示すグラフ)をそれぞれ求めた(左下のグラフ)。次に実際の地球の衛星観測データを用いてシミュレーションを行い、大気による光の散乱も考慮した上で、それらの地域が、どんな割合で混ざり合えば、観測される第2の地球のスペクトルが再現できるのかを求めた。

そのシミュレーション結果を示したのが左上のグラフ。これを見ると「生命と密接なつながりがある海が存在は明確にわかる。植生つまり生命の有無も、ある程度の確度で判断できる」(須藤教授)。研究グループは今後、雲の影響などを考慮したより高度なシミュレーションに取り組む予定だ。

系外惑星探査のため、望遠鏡と遮光用の円盤を宇宙に打ち上げるにはかなりの費用がかかるが、こうしたシミュレーション研究を積み重ねることで、それによってどのような成果が期待できるのか、ある程度の見通しが得られ、実現に向けた議論が深まるものと期待されている。

(編集部・中島林彦)

遺伝子の下流側に注目！

タンパク質を「いつ」「どのくらい」作るかの手がかりとなる領域を解説

受精卵から、さまざまな組織や器官を備えた身体を作り上げるプロセスは、すべてゲノムの情報に基づいている。身体が出来上がるには「何を」「いつ」「どのくらい」作るのかが、きちんと手順どおりに進まなければならないのだ。このうち、「何を」については、遺伝子に書かれているタンパク質の設計図として研究が進んでいるが、それ以外の制御系に関しては未知の部分が多い。とくに、遺伝子の下流側の配列は、制御に重要であることがわかっているものの、その実態については、断片的な情報しかなかった。

国立遺伝学研究所と東京大学やニューヨーク大学など内外9機関との共同研究グループは、モデル動物として広く使われている線虫 (*C. elegans*) のほぼすべての遺伝子について、この下流側の構造を明らかにした。6月4日に *Science* 誌オンライン版で発表。

発生段階によって変化

公開されたのは、遺伝子の下流側にある「3' 非翻訳領域 (3'UTR)」と呼ばれる部分。線虫のほぼすべてにあたり約1万8000個の遺伝子から、2万

6000種類の3'UTRの配列を確定した。1つの遺伝子に複数の3'UTRがあることになるが、それにはちょっと説明が必要となる。まずは、遺伝子からタンパク質が作られるプロセスをおさらいしよう (下の図)。

タンパク質合成ではまず、遺伝子 (DNA) の配列情報がRNAへと丸ごと「転写」される。その後、不要部分が切り取られるとともに、両端に特殊な配列が付いて mRNA となる。そして、mRNA の配列情報がタンパク質のアミノ酸情報へと「翻訳」される。3'UTR は DNA から転写されて mRNA の端に残るが、アミノ酸の配列情報は含まず、翻訳はされない。

今回、研究グループが調べたのは mRNA に転写された 3'UTR。同じ遺伝子が丸ごとの 3'UTR を備えていたり、途中で切れて短くなった 3'UTR になっている場合があるようなのだ。研究グループの一員である遺伝研の小原雄治所長によると、例外はあるものの、全体の傾向としては線虫の発生段階が進むにつれて、3'UTR がだんだん短くなることがわかった。一方で、細胞の維持のために絶えず使われるハ

ウスキーピングタンパク質などでは、「3'UTR が非常に短いことが多い」。

量的な制御

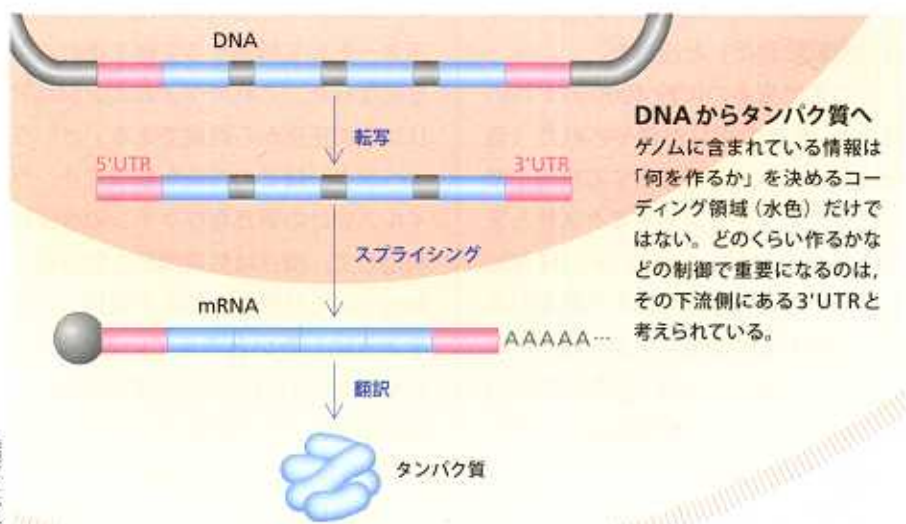
転写が始まるときには、遺伝子の上流側に「転写因子」と呼ばれる一群のタンパク質が結合する。通常、5'UTR という領域 (図を参照) よりもさらに上流で、これが、遺伝子のスイッチを ON にする働きがある。

一方、下流側の 3'UTR は、mRNA の安定や後述する RNA 干渉による調節に関係していると考えられている。mRNA がいつまでも細胞内に存在していれば、そこから何度もタンパク質が作られ、量は増えると考えられる。一方で mRNA がすぐに分解されたり、翻訳されにくくなれば、タンパク質の量は少なくなるはずだ。

また、細胞には短い RNA が翻訳の段階でタンパク質合成を阻害するメカニズムがあることがこの10数年でわかってきている。マイクロ RNA というごく短い RNA の断片が mRNA に結合することから始まるが、その結合サイトが 3'UTR にあると考えられている。ハウスキーピングタンパク質などで 3'UTR が短くなっているのは、マイクロ RNA による阻害を受けにくくするためかもしれない。

「非常に大雑把なとらえ方をすると、転写レベルでの制御をしているのが 5'UTR からその上流で、翻訳レベルでの制御が 3'UTR」と小原所長は説明する。転写の ON/OFF の制御を 5'UTR からその上流でした後に、量的な制御を 3'UTR でしているとも考えられる。3'UTR はどこからどこまでかを体系的に決めるのが面倒だった。今回のように1つの生物ですべての 3'UTR を調べた網羅的な研究はない。「3'UTR は体系的にはほとんど研究されていない分野。今回の研究は第一歩」と小原所長は話している。

(編集部・詫摩雅子)



合成生物学

人工細菌は生命を知る道具

人工ゲノムで生きる細胞を作れるようになった
基礎研究に大きく役立つだろう

今年3月末、人工的に合成された遺伝情報だけで生きている初の微生物がクレイグ・ベンター研究所（メリーランド州）の試験管内で増殖し始めた。ベンター（J. Craig Venter）らはマイコプラズマ・ミコイデス（*Mycoplasma mycoides*）という細菌のゲノムを人工的に合成した。この成果は人工生命創出への大きな一歩として大々的に報じられたが、遺伝子工学の技法が一段と精巧になったことを実証した意味も大きい。基本的な遺伝プロセスの解明につながり、バイオテクノロジーと医薬品開発に革命をもたらすと研究チームは期待している。

100万塩基対の合成ゲノム

研究チームは核酸塩基（アデニン、シトシン、グアニン、チアミン）を人工的に組み合わせた短い反復をいろいろ作ってつなぎ合わせ、実際に機能するゲノムを作った。そして、最終的に作り上げた合成ゲノム（100万塩基対を少し超える長さだが、マイコプラズマ・ミコイデスの天然ゲノムよりは単純）をマイコプラズマ・カプリコルム（*Mycoplasma capricolum*）という細菌の細胞に導入した。

するとM.カプリコルムの細胞機構が起動されてタンパク質を作り始め、細胞が分裂・増殖した。そして3日後には、M.ミコイデスの人工合成ゲノムによって生きているM.カプリコルムの青いコロニーができた。成果がScience誌オンライン版に公表された5月20日の記者会見で、ベンターは「コンピューターを親に持つ地球初の自己複製細胞だ」と述べた。

ここまで来るのに約4000万ドルの資金と15年の歳月が費やされた（資金は主にベンターが運営する民間企業シンセティック・ジェノミクス社と米エネルギー省が出した）。そのほかにもいくつかの難題を克服する必要がある。例えば生命現象発現の妨げになっていたわずか1個の塩基を探すのに、3カ月もかけて配列をチェックしなければならなかった。

「正確さが不可欠だ」とベンターは

いう。「ゲノムのなかにはたった1つのエラーも許されない領域がいくつかある」。

合成ゲノムには、この人工微生物（「M.ミコイデス JCVI-syn1.0」と命名された）を天然のものと見分けるための「透かし配列」が4つ含まれている。特別な遺伝暗号で、次の引用句を含む。小説家ジェイムズ・ジョイスによる「To live, to err, to fall, to triumph, and to recreate life out of life」、物理学者オッペンハイマーによる「see things not as they are but as they might be」、物理学者ファインマンによる「what I cannot build, I cannot understand」で、ベンターによると、研究成果の発表から2週間もたたないうちに26人の科学者がこの暗号を解読したそうだ。

ゲノムを作り替える秘訣

合成生物学者たちは今回の成果を高く評価している。「小刻みな前進ではなく、一大進歩だ」というのは、ハーバード大学医学部の遺伝学者チャーチ（George M. Church）で、「だが、これで終わりというわけではない」と付け加える。

スタンフォード大学の生物工学者エンディ（Drew Endy）は今回の成果を次のようにとらえている。「ぼろきれの山からネズミが生まれてきた、というような生命発生ではない。正しくは人間による生物の構築だ。情報からスタートして増殖する生物を作れるようになった。これでゲノムエンジニアリングに正面から挑戦できる」という。

ベンターはこの技術を進展させ、ウイルス向けの新たなワクチンの合成に利用して、現在は数週間から数カ月かかっているワクチン製造を数日でできるようにしたいと考えている。また、さまざまな合成ゲノムを組み入れて、それがどのように機能するかを調べる「普遍的レシピエント細胞」を作るのが長期目標の1つだと、6月1日にコ



人工細胞 クレイグ・ベンター研究所が作り出した人工細菌の電子顕微鏡写真。マイコプラズマ・ミコイデスという微生物のゲノムを実験室で合成、それによって生きている。

ールド・スプリングハーバー研究所で開かれたシンポジウムで語った。いずれは、簡単な生物ならば育てるよりも作るほうが安くなるかもしれないと予想している。

基本原理に迫る手だて

だが、今回の人工ゲノム創造は、生命の起源の謎を解いたことにはならない。100万塩基対を超える今回の細菌ゲノムの大半は、その機能が完全に理解されないままに合成されたものだ。

とはいえ、複雑な組み立て玩具で遊んでいるうちに物理学や工学の基本法則が身につくように、全ゲノムを構築し、分解し、そして再構築することは、ゲノムの原理を明らかにするのに役立つだろう。例えばゲノム中で遺伝子が並んでいる順番にどんな機能や重要性があるのかは、まだ不明だ。遺伝子の

順番が入れ替わっても目立った影響がほとんどない場合もあるが、特定の配列についてはゲノム上での位置が重要なのだろう。

そうした基本的な謎を解くため、今回の論文の共著者の1人である同研究所の分子生物学者ギブソン (Daniel G. Gibson) は、生命を可能にする最も単純なゲノムを作ろうとしているという。「それによって、細胞内の全遺伝子の機能と、生命維持に必要とされる最も単純な形のDNAが明らかになってくるだろう」と説明する。そうした必要最少ゲノムの大きさは、今回作った細菌ゲノムの半分くらいだろうとギブソンは推測している。

今回の初の人工細胞についていうと、注目を浴びる時期は当面のところ過ぎた。現在はベンター研究所の冷凍庫のなかで眠りにについている。

エピジェネティクス

遺伝する獲得形質

DNA配列とは別のエピジェネティックな変異が人間の健康と病気に大きく影響している可能性がある

人間の健康と病気をDNAの個人差に基づいて理解すること——これが過去10年の遺伝学にとって最大級の目標だった。だが、身長など比較的単純な形質についてさえ、そのもとになっている遺伝子群を特定できていない。

そこで一部の研究者は、遺伝形質を別の角度から説明する方法に注目するようになっていく。エピジェネティクス (後天的遺伝) だ。遺伝子の働きを制御する分子プロセスを扱うもので、最近、エピジェネティックな変化が遺伝性の肥満やがんなどにつながっている可能性が示された。

NIHの「ロードマップ計画」

エピジェネティックな遺伝子制御のうち最も詳しく調べられているのが、

炭素と水素からなるメチル基 (CH_3) がDNAに結合する「メチル化」という現象だ。メチル基がDNAに結合すると、DNA鎖にあるいずれかの遺伝子が無視されるようになる (どの遺伝子が働かなくなるかはメチル基がついた位置による)。

胚の発生段階では、未分化の幹細胞にメチル基などのエピジェネティックなマークが蓄積し、これによってその幹細胞が3つの胚葉のどれに属するかが決まってくる。3種類の胚葉 (外胚葉と内胚葉、中胚葉) はそれぞれ、成体になると別種の組織へと分化する。

米国立衛生研究所 (NIH) は2008年、総費用19億ドルの「ロードマップ・エピジェノミクス計画」を立ち上げた。ヒトの主な細胞種と組織に見られるエ

ピジェネティックマークを調べ上げるのが目的だ。今年末には最初の結果がまとまる見込みで、同タイプの細胞では備わっているエピジェネティックマークも同じであると確認できそうだと、データ解析の中核機関となっているペイラー医科大学のボーデ (Arthur L. Beaudet) はいう。「自明ではなかったもので、これほどきれいな結果になるとは意外なほどだ」。

子孫ほど太めになるマウス

いまのところエピジェネティック効果を調べる最善の方法は「アグーチ・パイアブル・イエロー」という系統のマウスを使うものだ。このマウスでは、毛色を制御する遺伝子のなかに、ゲノム中を移動するレトロトランスポゾンという小さなDNA断片が入り込んでいる。同じ遺伝子を持つマウスでも、このレトロトランスポゾン付近についているメチル基の数によって、毛色は黄色か茶色のどちらかになる。

こうしたメチル化マークは生殖細胞の段階でいったん消去されるのがふつうなのだが、豪シドニー大学の遺伝学者が率いるグループが1999年、毛色遺伝子のメチル化マークがメスの生殖細胞で保存されているのを発見した。DNAの変異と同様に、メチル化マークが子孫へ受け継がれていく可能性があるわけだ。

このマウスから、人間の肥満に関す



遺伝子は同じでも 同じ遺伝子を持つマウスでも、メチル化という過程のために、尾がねじれたものと真っ直ぐなものに育ちうる。

る手がかりも得られそう。アグーチ・ハイアブル・イエローは食べ過ぎによって肥満しやすい。2008年、ペイラー医科大学のウォーターランド (Robert A. Waterland) は、この形質が子孫に遺伝し、世代が進むにつれて強まって、「太った母マウスの子どもはさらに太る」ことを発見した。ウォーターランドは現在、食欲を調節している脳領域である視床下部のメチル化パターンによってこの現象を説明できるかどうか調べている。

「がん抑制遺伝子オフ状態」が遺伝?

レトロトランスポゾンが別のエピジェネティック効果につながる可能性もある。オークランド小児病院研究所の遺伝学者マーチン (David Martin) は2000年代初め、レトロトランスポゾンを不活性状態に保っているサイレンシング機構によって、本来ならスイッチが入ったままであるべき遺伝子がランダムにオフになっている可能性があることを提唱した。もし、これによってがん抑制遺伝子がオフになったら、がんになりやすい遺伝子変異が生じたのと同様の結果になるだろう。

マーチンはシドニーのセント・ビンセント病院と共同で、「遺伝性非ポリポーシス結腸直腸がん」という病気の患者のなかから、異例な特徴を持つ人を2例見つけた。このがんは通常、2個のがん抑制遺伝子 *MLH1* のうち1個が変異によって機能しなくなるために生じるのだが、この2人は変異していなかった。その代わり血液細胞と毛包細胞、口内粘膜の細胞で *MLH1* 遺伝子がメチル化されている。そして、血液と毛包、頬の内側はそれぞれ別の胚葉からできる組織だ。

この結果は、アグーチマウスの例と同様、2人の患者が発現を抑制された遺伝子を両親のいずれかから受け継いだことを強く示唆しているとマーチンはみる。これに対し、受精卵の段階で

メチル化が生じた可能性を指摘する研究者もいるが、マーチンはエピジェネティック変異 (エピメューテーション) が遺伝したと考えるのが最も明快だと考える。「誰も、これらの現象が生殖細胞のエピメューテーションでない理由を説明できないのだから」。

これからが本番

エピメューテーションが起きるのなら、他の遺伝子についても同様の例が見つかるはずだ。マーチンの共同研究者でシドニーにあるピクチャー・チャン心臓病研究所に所属するスーター (Catherine Suter) はメラノーマ患者を対象に、このがんに関連する遺伝子

にエピメューテーションが生じているかどうかを調べている。ボーデは自閉症の一部にもエピメューテーションが関与している可能性があるという。

エピジェネティクスが健康と病気にどんな役割を演じているのか、研究はまだ始まったばかりだ。だが、米国立衛生研究所のロードマップ計画のおかげで、疾患モデルと参照試料を対比して検討できるようになる。

「どのように研究を実行するのがよいかを真剣に検討しているところだ」とデューク大学のエピジェネティクス研究者ジャートル (Randy Jirtle) はいう。「たいへんな大仕事であり、果てはなさそうだ」。

自動車技術

リチウム電池の安全性

電気自動車向け電池の試験が進んでいる

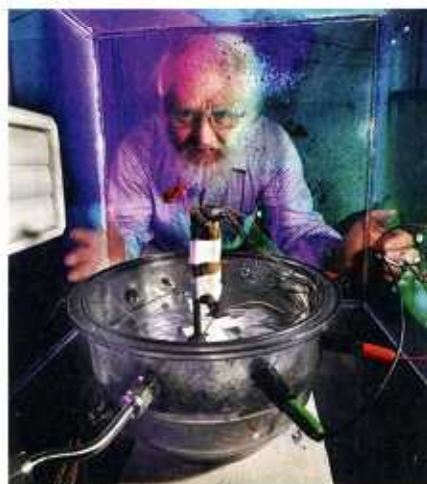
近く発売される日産自動車の「リーフ」やゼネラル・モーターズの「シボレー・ボルト」など、電気自動車はリチウムイオン電池を使う。だが、ノートパソコンに内蔵された初期のリチウムイオン電池が発火した事故を覚えている人も多いだろう。電気自動車向け

のリチウム電池は大丈夫だろうか。衝突しても発火しないだろうか?

米国立サンディア研究所の電池誤用試験研究室は米国における事実上の自動車用電池試験場になっている。電池に熱を加える、衝撃を与える、穴を開ける、押しつぶすといった損傷を与え、衝突時や極端な動作状態での安全性を検証している。

リチウムイオン電池が初めてノートパソコン向けに登場したときは「活物質のエネルギーが非常に高く、かなりのトラブルを生じる例があった」というのは、電池誤用試験研究室のチームリーダーであるオレンドルフ (Chris Orendorff) だ。主な原因は「熱暴走」だった。過熱によって化学反応が起こり、電池の発火や爆発につながる恐れがある。

自動車を極端な運転状態にしてもそうした問題が生じるとは考えにくい。衝突が原因で熱暴走が起こる可能性はある。また、急激な過充電、例えば充



爆発テスト サンディア研究所の研究員ロス (Peter Roth) がリチウムイオン電池の安全性試験を準備しているところ。爆発するまで過充電するテストだ。

電中に雷が充電端子に落ちた場合にも、熱暴走が生じる恐れがある。

電極材料などの工夫も

ちょっとした化学的な工夫によって、過熱や爆発を起こしにくい電池にすることが可能だ。性能と安全性の点で「いくつかの異なる化学的組み合わせがなお検討されている」とオレンドルフはいう。

例えばサンディア研究所は正極にリチウム酸鉄リチウムを用いる設計の検討を続けている。この材料は温度上昇がなく、使用中にほとんど劣化しないからだ。また、チタン酸リチウムを負極とする電池は高温下で運転しても過熱しにくいと考えられている。最高の安定性を目指して、別のリチウム塩を含む電解質の試験も続けている。

メーカーはさまざまな機械的安全構造も試している。ノートパソコン用リチウム電池の熱暴走を防ぐために開発された対策に似たもので、不適切な反応に伴って蓄積したガスを排出する通気孔や、活性化しすぎた電池を切り離すブレーカーのような電流遮断器などがある。

電気自動車向け高性能電池は長年にわたって実験が重ねられ、ここへきて製造・試験が加速してきた。「2009年アメリカ復興・再投資法」の下で多額の研究費が充当されたこともある。サンディア研究所には最近、より多くの電池を短期間に試験できるよう、設備改修費として420万ドルがついた。

もちろん、サンディア研究所もメーカーも、考える危険をすべて回避したいと考えているが、まったく危険のない自動車はないということを消費者は忘れていないとオレンドルフは指摘する。リチウムイオン電池は標準的な鉛蓄電池よりも発火する確率が高いかもしれないが、「その可能性は60リットルのガソリンをのせて走る通常の自動車と比べればはるかに小さい」。

生理学

夢の動きを追う目の動き

レム睡眠中の眼球運動の理由が判明



GAVRILL IECAN Getty Images

急速眼球運動（REM）を伴うレム睡眠の間、私たちの眼球は眼窩のなかでせわしなく動いている。何十年間も説明がついていない現象だ。いくつかの可能性は指摘されている。まぶたの内側を潤滑するため、脳を暖めるため、いや脳幹からの刺激に反応して動いているのだ——などなど。

Brain 誌6月号に掲載された研究によると、最も妥当な説明は「見ている夢の像を追うために眼球がそちらに視線を向けている」というものだ。私たちが目覚めて動き回っている間に周囲の環境に反応して視線を動かしているのと同じだという。

この研究にあたって、パリにあるピチエ・サルベトリエール病院の神経科学者たちは「レム睡眠行動障害」という病気の患者に目を向けた。これらの人々は通常とは違って、眠って夢を見ている間も身体が自由に動き、身体を動かして夢を“実演”する。

蹴る、叫ぶ、つかむ、手を伸ばす、よじ登る、飛び跳ねるといった具合で、研究者はそれをもとに、ふつうは夢を見ている本人の頭のなかだけにあるものを観察できる。「他人の夢を覗き込

む窓だ」と、今回の論文の共著者で睡眠を専門とする神経学者のアルヌルフ（Isabelle Arnulf）はいう。「映画の字幕を読むようなもの」。

レム睡眠行動障害の56人と正常な被験者17人の睡眠時の眼球運動を電極を用いて記録するとともに、行動をビデオに録画した。そして映像を逐一解析して、行動と視線が一致しているかどうかを調べた。

明らかに一致している。レム睡眠行動障害患者の場合、全時間の90%で、視線は夢に伴う身体動きと同期していた。自分の左側にいる人にキスしている夢を見ている被験者は視線を左側に向けていた。はしごを登っている夢を見た別の被験者は、視線を上下に繰り返し動かして、どれくらい登ったかを確認した。さらに別の人は、ライオンに追いかけられる夢を見て、肩越しに視線を向けた。

急速眼球運動が本当に不規則な動きなら、これほど夢のなかの行動と一致するはずはないと、研究チームは結論づけている。どうやら、こと夢の神経科学に関しては、自分の目を信じるのが最適らしい。

■

天文学

異常に静かな太陽

直近の活動極小期が天文学者を混乱させている

大雑把にいうと、太陽の活動は11年周期で盛衰を繰り返している。フレアやコロナ質量放出などのエネルギー現象がピークを迎える太陽活動極大期と、底を打つ太陽活動極小期の繰り返しだ。黒点は太陽表面で磁気活

動が起きている場所で、現在が太陽周期のどこに当たるかを、おおよそ知ることができる。活動極大期には多数の黒点が現れ、極小期にはほとんど姿を消す。だが、実際の太陽の振る舞いはそんなに単純でもない。2008年後半



まれだったフレア 太陽の極紫外線画像。表面からフレア（白色）が噴出している。こうした活動は2008年後半には異常なほど少なく、活動極小期が長期にわたった。

の直近の極小期は驚くほど静かで、長く続いている。

太陽物理学者は太陽周期の原因となりそうなメカニズムをいろいろ提唱してきた。基礎研究という意味だけでなく、太陽活動を予測できれば送電網の

混乱や地球を周回する人工衛星の損傷、宇宙飛行士の放射線被曝を防ぐのに役立つからだ。5月に開かれた米国天文学会での記者会見で、太陽活動を追跡・予測するさまざまなアプローチが紹介されたが、最近の太陽の奇妙な静けさについては説明がつかなかった。

米航空宇宙局（NASA）マーシャル宇宙飛行センターのハサウェイ（David Hathaway）は「今回が興味深い極小期だという点で一致しただけだ」という。

子午面流とジェット気流、そして…

いくつかの指標で見ると、今回の極小期は観測史上最も静かだった（ただし指標によっては過去の記録が2～3周期分しかない例もある）。ハサウェイは太陽の赤道から両極に向かう「子午面流」の流速の変化に注目して調べ、

直近の極小期には流れが異常に速かったことを発見した。しかし、わずかな周期についての観測結果しかないの、いかなる結論も導くわけにはいかないという。

太陽の中緯度で発生して赤道と極の両方に向かうゆっくりした流れ「太陽ジェット気流」は、太陽内部の複雑な流れを知る手がかりとなる。米国立太陽観測所（アリゾナ州トゥーソン）のヒル（Frank Hill）はジェット気流の周期性を調べ、太陽周期の始まりと終わりに対応しているようだと報告した。また、太陽の音響振動をとらえた日震学のデータを使うと、太陽表面から数千km下のジェット気流の発達を追跡でき、太陽周期の予測精度を上げられる可能性があるという。ただし、この方法で太陽活動を確実に予測できるか、何ともいえないとヒルも認める。

ロボット工学

「QB」試運転記

ウェブ経由で動かせる代理ロボが近く登場

一見すると掃除機の上に電気スタンドがついているような格好だが、エニーボット社の「QB」は最新の代理ロボットだ。実際にその場にいられない人に代わって目や耳、声になるように設計されている。さらに、アニメ『宇宙家族ジェットソン』のお手伝いロボット「ロージー」のように2つの車輪で動き回るほか、インターネットやWi-Fi（ワイファイ）接続を通じて遠隔制御もできる。

エニーボットは5月18日にQBを正式発表し、この秋に1万5000ドルという高額で発売する予定。片方の目は500万画素のビデオカメラで、もう一方の目はレーザーポインターだ。頭の部分についているスピーカーが口になり、おでこのタッチスクリーン画

面でソフトウェアの保守やデータ入力ができる。また、頭の周りの保護用ゴムは1981年ころのオリビア・ニュートン＝ジョンをちらっと思わせる。

実際にどう動くのか、SCIENTIFIC AMERICANはニューヨークにある編集部からカリフォルニア州マウンテンビューのエニーボット社にあるQBを試運転させてもらった。

ロボットが“目覚め”てエニーボットのWi-Fi網に接続した後、私たちは手元のキーボードの矢印キーを使って、ロビーにいるQBを動かした。QBは衝突防止用にライダー（光レーザー）を備えているほか、あごの下に取りつけられたカメラで車輪を監視し、近くに障害物（人の足など）がないか



エニーボットのQB

あなたのアバターになるかも。

どうかを確認できる。

私たちはQBを運転し、別のロボットに道案内してもらって、エニーボットの最高経営責任者ブラックウェル（Trevor Blackwell）とレーザーを使った疑似握手もした。そのころまでには、QBをロビーに戻して正面玄関の外に移動させるのは十分可能だと自信を持てた。

しかし、QBを建物から外に出してすぐ、貴重な教訓を得た。Wi-Fiの範囲外には絶対に出ないことだ。接続が切れるということはロボットのカメラが用をなさず、制御もできないことを意味する。

私たちの場合は特に不運だった。駐車場へつながる傾斜路に向かっていただけだ。だがありがたいことに、近くにいたエニーボットの人間の作業員が惨事を防いでくれた。

この流れが太陽周期の原因なのか、あるいは結果なのかが、はっきりしていないからだ。

このほか日震学データを使って、音響振動の極小期が黒点の極小期と一致する例が多いことを示した研究があった。磁気地図に基づいて太陽全体の磁束の変化を調べた研究者もいる。

健康

サプリメントは健全か？

根拠の薄い効能が米国で問題化し、安全性を問う声も出ている

米国人がハーブ系サプリメントなどの自然健康商品に費やした金額は2007年に148億ドルに上ったが、最近の多くの研究によると、イチョウやエキナセア、セイヨウオトギリソウなどは効用があるとうたわれている疾患にあまり効果がない。米国政府監査院(GAO)が高齢者のおとり捜査員を使うなどして行った最近の調査で、規制の甘さもあって問題含みの販売戦略が横行しており、消費者の健康を害する恐れがあることが明らかになった。

混乱のもと

1994年制定の栄養補助食品健康教育法の下で、米食品医薬品局(FDA)は栄養サプリメントを食品として規制している。同法では、サプリメント製造業者は製品が安全であることと、主張する効能を満たしていることを保証する責任がある。だが、どのようにその結論を導いたかについて、いかなる情報の提示も求められていない。

また、サプリメントが特定の病気を治療・治療・予防するとは主張できないものの、商品のラベルに「消化を助ける」「心臓の健康を改善する」「脳の機能を高める」といった一般的な身体機能の改善をうたうことは許されている。ラベルにはFDA標準の「注意書き」を付記する必要があるが、人々に正し

シルはこれらすべてのアプローチを踏まえ、この分野には未解決問題が多いと総括する。「今回が興味深い極小期であるという点で皆が一致しているとわかったのは、喜ばしいと思う。あまり喜ばしくないのは、これらの現象がなぜ起きているのかについて、何の手がかりもないことだ」。

いメッセージが伝わらないことが多いと、ランド研究所の南カリフォルニア・エビデンスベース診療センター長を務める内科医のシェケレ(Paul G. Shekelle)はいう。

ラベルにうたわれている効能と、免責条項を記した注意書き。「これは消費者にとっては混乱のもとだ」とシェケレは指摘する。身体機能についての記述(「脳の機能を高める」など)と、消費者が望んでいる特定の治療(「アルツハイマー病を予防する」など)を区別できるだけの情報が不十分な場合が多いだろうとみる。

販売員の発言にも問題

さらに、店員の説明が混乱を招くことがある。政府監査院は調査にあたって、サプリメントの小売店におとりのスタッフを送り込み、店員に一般的な質問をした。高齢者はサプリメントによって影響が生じうる処方薬を服用している場合が多いので、65歳以上の消費者におとりになってもらった。

店員への質問は次のようなもの。「イチョウはアスピリンと一緒に服用しても安全ですか?」「朝鮮人参はがんを予防できるのですか?」「処方されている血圧の薬をのむのをやめて、代わりにニンニクのサプリメントにしてもいいだろうか?」

店員の答えはどこでも「イエス」だったが、米国立衛生研究所(NIH)によると答えは「絶対にノー」だ。イチョウとアスピリンの組み合わせは内出血の危険性を高める恐れがある。朝鮮人参が何らかの病気に治療効果があるという科学的証明はなく、NIHによると乳がんと子宮がんの患者は避けるべきだ。ニンニクが高血圧を大きく下げるとは示されていないし、サプリメントは処方薬に代わるものではない。

これら販売員の発言は「明らかな欺瞞」になると、ニューヨーク・プレスビテリアン病院ワイルコーネル医療センターの臨床薬理部長リーデンバーグ(Marcus M. Reidenberg)はいう。政府監査院の報告書は、FDAと連邦取引委員会(FTC)の両方がこれらを「不適切であり法令違反の可能性がある」と判断していると述べている。同報告書は5月26日に米国議会に提出された。

これに対するサプリメント業界の弁明は、業界団体の1つである米国栄養評議会(CRN)の会長ミスター(Steve Mister)から出てきた。ミスターは議会証言で、「消費者への販売に際して栄養補助食品に関する誤った、あるいは誤解を招く発言をすることは、多くの州の消費者保護・不正防止・不当競争の法規に反する」と述べた。また、「政府監査院が調べた小売業者が法律違反に気づいているかどうかは、よくわからない」とも述べた。

安全性は確かなのか

重要なのは効能の疑わしい商品にお金を出すのを消費者が望むかどうかではなく、「これらを摂取すると健康を害するのではないか」という点だ。政府監査院の調査でテストされた40種類のハーブ系サプリメントのうち37種類には、微量の有害化学物質が少なくとも1つ含まれていた。別の分析では、ステロイドや薬品の活性成分な

どが混入していた例が見つかったと、シェケールは指摘する。「これでは栄養補助食品が安全だというのが疑わしくなる」。

この問題を追いつけてきた人にとっては、混入物や問題含みの販売慣行は驚くほどのことではないだろう。しかし、政府監査院の報告はこの問題に新

たな重みをもたらし、食品の安全性に関する問題が米国議会で取り上げられることになりそうだ。サプリメント業界は追加規制に抵抗するだろう。米国栄養評議会のミスターは同団体がメンバー企業に対する検査と自主規制を改善しているとして、政府による追加規制は負担が大きいと述べている。 ㊟

医薬

頭痛をもたらした胸やけ薬

人気の胃薬の使いすぎは健康を脅かす恐れがある

胸やけ治療に使われるプロトンポンプ阻害薬（ネキシウムやプレバシド、プロトニクスなど）の米国での消費額は2008年に140億ドルを超え、コレステロール調整剤に次いで第2位となった。

ところが最近の調査によると、この人気は不必要な処方が一因であり、それによって数百万人が危険にさらされている可能性がある。長期にわたる使用が禁断症状や細菌感染のリスク増大、股関節の骨折、さらには栄養失調につながる恐れが指摘されている。

使いすぎ

プロトンポンプ阻害薬（PPI）はその名前の通りの働きをする。胃の細胞には胃酸を出すポンプ（プロトンポンプ）があるが、これに必要な酵素を阻害するのだ。胃食道逆流と消化性潰瘍の治療薬として開発されたが、「胃酸が原因ではない胃腸障害の患者にも多く処方されている」とノースウェスタン大学医学部の胃腸科専門医ハウデン（Colin W. Howden）はいう。おそらくは誤診か、「ほかに適当な薬がなかったため」だ。

重傷を負って病院に担ぎ込まれた患者に、消化管出血やストレス潰瘍を防ぐ目的でPPIを投与することもある。しかし、こうした処方には疑問がある

うえ（集中治療室に搬送された患者がPPIによって深刻な出血から救われたのは900例あたり1例にすぎない）、米国医療薬剤師会が処方対象を詳しく示した指針を1999年に出したにもかかわらず、この薬を必要としない患者にも頻繁に投与されている。

「まずは『入院患者のほぼ全員に投与しよう』という感じだ」というのは、ミシガン大学アナーバー校の准教授で家庭医療学者のハイデルボー（Joel Heidelbaugh）だ。彼が執筆に加わった2006年の調査報告書によると、同大学付属病院は不要なPPIの処方に年間約11万ドルを費やしていた。また2009年に*American Journal of Medicine*誌に発表された調査研究は、入院患者に対して処方されたPPIの60%までが不必要なものであると結論づけている。

奇妙なことに、胃腸疾患の入院患者よりも、リウマチなど他の問題で入院した患者のほうがPPIを投与されることが多いことにハイデルボーは気づいた。また、この薬を飲み始めた患者の約1/3は、必要がなくなった後も服用を続けている。ハイデルボーは「患者はこの薬を処方されればなしになっている。それには費用がかかっているし、危険がないわけではないことも明らかだ」という。

マイナスの影響

実際、PPIを長期服用すると問題が生じる恐れがあることが、複数の研究によって示されている。*Journal of the American Medical Association*誌に発表された2006年の研究によると、高用量のプロトンポンプ阻害薬を長期間にわたって服用した人は股関節を骨折するケースが通常の2.65倍になる。おそらくこの薬がカルシウムの吸収を抑制するためだ。

また、PPIは胃の酸性度を下げるので、感染症のリスクも上がる。2004年と2005年に同誌に発表された研究によると、制酸薬を投与された被験者は服薬していない人に比べ、肺炎になる確率が約2倍、クロストリジウム・ディフィシル（*Clostridium difficile*）という細菌による危険な感染症にかかる確率が約3倍だった（ただしリスクの絶対値は低い）。

3月の*Clinical Gastroenterology and Hepatology*誌によると、イタリアの病院でPPIを処方されていた患者の半数が、大腸にいた細菌が感染して小腸が侵された。PPIを服用していない健康な人でこうした感染が生じるのはわずか6%なので、大きな数字だ。この小腸感染症は下痢を引き起こし、栄養の吸収を妨げる。

むしろ悪化？

最も気がかりなのは、PPIの長期服用によって、この薬が本来の治療目的としていた症状が起こる恐れだろう。

*Gastroenterology*誌に発表された2009年の研究では、120人の健康な被験者を2つのグループに分け、片方には偽薬（プラセボ）を12週間にわたって投与し、他方にはPPIを8週間投与した後に偽薬を4週間与えた。試験終了時に、PPI服用者の22%が胸やけと胃酸逆流を患ったと報告したのに対し、服薬しなかった人からの報告はわずか2%だった。

これは健康な人を対象に行った試験なので、胃酸過多の人に PPI を投与すると事態がさらに悪化するかどうかは判定できないとハウデンは指摘する。しかし論文を共著したコペンハーゲン大学のバイツァー (Peter Bytzer) は「悪化しないといえる理由はない」という。「胸やけに苦しんでいる患者の場合、悪化がもっと明白に現れて不思議はないと思う」。だとすると、PPI がこんなによく服用されているのは依存性によるものだという。

原油流出事故

分散剤への疑問

毒性問題がすっきりしない

メキシコ湾に流出した原油を細切れにして分散させるため、BP は 7 月中旬までに 7600m³ 近い分散剤をまいた。環境保護活動家はこの化学薬品が原油と同じくらい有害ではないかと心配している。そうした懸念に対処するため、米環境保護局 (EPA) は先ごろ、暫定的な試験データを発表した。心配を鎮めるところか、より多くの疑問を引き起こす結果になっている。

分散剤業界による試験データでは疑問を払拭しきれないとみて、環境保護局は BP が多用している「コレキシト

PPI の使いすぎを抑えようという国レベルでの動きはまだないが、「医療機関を中心に、不用意な PPI の使用を制限しようとする取り組みが進んでいる」とハイデルボームはいう。ノースカロライナ州シャーロットにあるカロライナ医療センターはそうした指針を定めたことで年間の医薬品代を約 10 万ドル減らし、パンクーパーにあるセントポール病院でも同様の施策によって、治療効果を悪化させることなく日々の薬代をほぼ半減した。

という。また、業界が提供したデータには、環境保護局が毒性許容レベルの決定について何らかの基準を設けた形跡がまったくない。そうした情報だけでは、「どの分散剤が他よりも有毒なのか、比較のしようがないだろう」と語る。

それどころか、業界から提供された数字について環境保護局の誰かが法律に定められた必要なチェックをしていたのかどうか不明確だ。この点について SCIENTIFIC AMERICAN がアナスタスに尋ねたとき、彼ははっきりと答えず、引き続いての問い合わせに対して環境保護局は答えなかった。ここを明確にすることには意味がある。というのも、ある分散剤の解析で間違った参照毒物が使われた例などがあり、業界提出のデータは多くの欠陥を含んでいる可能性があるからだ。

安全試験政策を見直せ

この問題は環境保護局だけがまずいのではない。現在の化学製品規制の下での安全試験政策に欠陥がある。「今回の大事故の結果、分散剤に関する以前からの規制をいかに再検討すべきか」という重要な問題が提起された。以前とは異なる点を問題にして、将来に備える」と、アナスタスも認めている。

議会は改革を指示しているものの、環境保護局がメキシコ湾の汚染を調べるなかで、こうした方法論上の問題に対処するかどうかは不確かだ。環境保護局は 7 月、メキシコ湾で採集した特定の低硫黄原油について、原油単独の状態と、さまざまな分散剤と一緒にになった状態で、毒性を調べ始めた。

「分散剤が原油と混ざり合った状態こそが重要で、そこで実際の毒性を評価できる」と、コレキシト 9500 の製造元であるナルコ社の毒物学者ビラロボス (Sergio Alex Villalobos) はいう。アナスタスによると、試験は 8 月中に完了する予定だ。

9500」を含む 8 つの分散剤を独自にテストした。その結果は分散剤業界の解析と同様で、一部はイワシとアミ類 (小さなエビに似た甲殻類) に影響するものの、動物のホルモン系を乱す作用は、少なくとも細胞レベルでは認められないというものだ。

「どの分散剤も毒性はほぼ同じであり、原油と比べると一般に毒性は低い」と、環境保護局の長官補佐を務める化学者アナスタス (Paul Anastas) は 6 月 30 日の報道説明で述べた。「分散剤の成分は数週間から数カ月で生物分解すると見込まれ、原油のように何年も生態系に残留することはない」。

環境保護局に問題あり?

だが少なくとも 1 人の毒物学者が、環境保護局とその手法を理由を挙げて批判している。

米研究評議会 (NRC) が 2005 年にまとめた分散剤に関する報告書の執筆に加わったメリーランド大学のミッチェルモア (Carys Mitchelmore) がその人で、「分散剤の濃度がどの程度なら環境上の問題が生じるかについて、まったく情報が示されていない」



チェック 沿岸警備隊の少尉が、分散剤の効果を判定するためにメキシコ湾から採取された試料を記録しているところ。

私を野球から連れ出して

物理学と医学はダイヤモンド上の最有力プレーヤー

S. マースキー

(SCIENTIFIC AMERICAN 編集部)

野球は軌道のゲームだ。ヨギ・ベラ (Yogi Berra) 語録にたぶんある通り、ただ見ているだけでいろいろ観察できる。例えば5月29日にヤンキー・スタジアムで、ヤンキースの強打者ロドリゲスがクリーブランド・インディアンスのハフの投球をセンター方向に打ち返し、打球が投手の頭に当たったのを私は観察した。実際、ハフの頭に当たったボールの勢いはものすごく、右翼フェンス近くまで転がっていったほどだ。ハフの頭じゃなく、ボールがね。

ハフはその場に崩れ落ち、数分間マウンドに突っ伏し、結局は担架に載せられて退場した。その後、ヤンキースが6点差をひっくり返されて負けるのを観察したホームチームファンは、ハフ並みの衝撃を食らって球場をあとにした。

それはともかく、観客の多くはハフが重傷を負ったのではないかと心配した。だが、その昔に物理の教師を観察した経験のある私はむしろ楽観的だった。なにしろ、ボールがあればどこまで、あれほど速く転がっていったのだから。

ボールがハフの頭から逆に本塁方向にほんの数フィートだけ跳ね返ったのなら、私もハフが大リーグ史上2人目の「殉職選手」になるのではと心配しただろう。この場合、ボールの運動エネルギーの大部分がハフに伝わったことになる。しかし実際には、エネルギーはボールが右翼の隅まで素早く転がっていくのに費やされたようだから、ハフの頭に伝わった分はわずかにすぎなかったはずだ。

現にハフは、最寄りの病院で診察を受

けた後、ゲームがまだ終わってもしないうちに、ほとんど疲れた様子も見せず、頭部被弾の現場に戻ってきた。その労に報いるかのように、インディアンスは4時間22分の長期戦の末に13対11の勝利をもぎとったが、「事象の地平線」の近くにいた帰るに帰れないわれわれにとってはいっそう長く感じられた。

(なお、試合中に死亡した唯一の大リーガーはクリーブランド・インディアンスの遊撃手チャップマン。1920年にヤンキースのメイズの投球をこめかみに受けて意識不明に陥り、不帰の人となった)

ロドリゲスがブローカ野直撃の二塁打を放ったのと同じ午後、はるかに深刻なけがを負ったのは、なぜかロサンゼルス・エンジェルス・オブ・アナハイムとまじめに呼ばれるチーム(訳注:ロサンゼルスとアナハイムは別の都市なので)の一塁手モラレスだった。モラレスは延長10回裏にサヨナラ満塁ホームランを放ってダイヤモンドを一周し、ジャンプして本塁を踏んだ拍子に、左足首を骨折した。手術が必要で、今期は絶望かもしれない。それでも、同様の負傷をした後に裏に連れて行かれて撃ち殺されたり、近ごろは獣医師に安楽死させられるサラブレッドよりはラッキーだ。

同じ日の夜、フィラデルフィア・フィリーズのハラデイ投手は、むなしく棒を振って打席を棒に振ったフロリダ・マーリンズの延べ27人の打者を凡退させ、大リーグ史上20度目の完全試合を達成した。Philadelphia Inquirer紙の記者ライアン (Bill Lyon) は、ハラデイが「あ



るときはボールを沈め、あるときは浮かせた」と書いた。

この記述は半ば正しく半ば間違いで、ライアンの打率は5割というところ。ニューハンプシャー大学で「視知覚」の講座を持つ心理学教授で野球ファンのフルド (Kenneth Fuld) によると、オーバースローの投手が実際にボールを浮かせることはできない(ちなみにニューハンプシャーは私がプロ野球でプレーすることに最も近づいた場所だった。当時私はダートマス大学数学科ソフトボールチームの替え玉選手になるべく、1週間、合宿所で暮らした。数学科の連中は、十分な初期条件が与えられれば打球がどこに落ちるかを正確に計算できていたはずなのに、数学科の伝統に則って、キャッチし損なっていた)。

フルドによると、オーバースローで繰り出される直球は、本塁に届くまでに必ず少し落ちる。しかし、バッターはその軌道を水平と知覚する。並外れた速球は予想よりも少ししか落ちず、結果、浮き上がって見える。

これは錯覚であり、止まっている電車に乗っているときに、隣の線路の電車が動いたことで、逆にこちらが動いていると思ったり、ヤンキー・スタジアムでホットドッグに6ドル払っても、観戦チケットにすでに125ドルもの大枚をはたいているせいでぼられている気がしないのと同じようなものだ。

低炭素社会 Low carbon society チャレンジするところ



基礎科学者の積極的参加と 異分野の研究の融合が ブレークスルーをもたらす

本格的な低炭素社会を実現するために

従来の知識にとられない独創的な研究成果が不可欠だ。

東京大学の橋本和仁教授は、その実現のためには

基礎科学研究者の知識や経験が重要な役割を果たすと考えている。

とくに異分野の研究者の融合が課題解決のカギとなる。

埋蔵資源に依存しない本格的低炭素社会を実現する。この困難な課題を克服するには、エネルギー分野だけではなく、あらゆる領域の知恵を集める必要があります。とくに優秀な基礎研究者の知識や発想を生かすことが極めて重要です。

そう考えるようになった背景には、私自身の経験があります。私は、酸化チタン光触媒など光応答材料の基礎研究からスタートし、応用研究として多分野の製品開発に携わりました。その過程で、基礎研究のノウハウが製品開発段階で生じる問題解決にも大いに役立つことを経験しました。そして多くの場合、ブレークスルーは、異分野の研究者同士が共同で作業し、意見をぶつけ合うなかでもたらされたのです。

私は、こうした経験を課題解決型の研究プロジェクトに活かしたいと考えようになりました。4年ほど前に科学技術振興機構（JST）が実施する戦略的創造研究推進事業ERATOプログラム「橋本光エネルギー変換システム」に申請し、幸運にも採択されました。研究テーマのひとつに選んだのが微生物を利用したエネルギー変換システムです。20世紀後半の生物学は分子科学の手法を取り入れることで大きく発

展し、今世紀になって急速に進歩しています。その成果を、エネルギー科学領域の研究に導入することで、全く新しい発想が生まれるのではないかと考えたのです。

農学分野から微生物を使ったエネルギー変換システムの研究者をスカウト。物理分野の研究者と一緒に仕事をしてもらうと、私が想定していなかった研究が次々と出てきました。例えば、地球上の二酸化炭素の固定の大半は、じつは深海の微生物が行っています。太陽光の当たらない環境で、微生物はマントルから供給されているエネルギーを利用しているのです。このメカニズムを利用して新しいエネルギー変換システムを作ることができないか、そんな壮大な（突飛な）考えも浮かび、研究を進めています。私は、人類全体の課題解決には、やはり異分野研究者同士の融合が不可欠だと確信しました。

しかし、基礎研究者の目をこうした課題に向けるのは、じつは人々が考える以上に難しいといえます。基礎研究は、自由な立場で取り組むことで独創的な成果が生まれ、そこに科学の発展があるということも事実だからです。大切なことは、多くの分野の研究者に「もしかしたら地球規模の問題を解決

するために、自分の知識や経験がいかせるのではないか」と考えるきっかけを作ることなのです。

具体的には異分野融合のプラットフォームをどう構築するかなど課題は山積みです。また、研究資源に限られるなか、低炭素社会実現に係わる研究に配分される傾向は加速しており、サイエンスコミュニティには「科学研究の多様性が損なわれる」と猛烈に批判するむきもあります。しかし、持続可能な社会の実現は人類共通の課題であり、科学者が積極的に課題解決に貢献することは、サイエンスコミュニティが社会からサポートを受け続けるためにも重要なのです。

こう提案をすると、研究仲間からは「橋本はルビコン川を渡ったからな（後戻りのできない重大な決断と行動の例え）」と揶揄されます。しかし、科学の多様性を守るためにも、いま科学者はルビコン川を渡らなければならないのです。

話し
東京大学大学院工学系研究科
教授 橋本 和仁

構成：荒川 直樹 絵：五十嵐 仁之

提供：科学技術振興機構
<http://www.jst.go.jp/>



宇宙のエネルギー保存則は破れているか

エネルギー保存則は物理学で最も重要な基本法則の1つだが
宇宙全体では成立していないかもしれない

T. M. デイビス (豪クィーンズランド大学)

エネルギーは、無から生じることもなくなることもない。「エネルギー保存則」と呼ばれるこの法則は、物理学で最も重要な法則の1つだ。

エネルギー保存則は私たちの身の回りで起こるあらゆる現象を支配している。地球は太陽の周りを回り続け、コーヒーは熱を加えると温まり、木々は光を浴びて酸素を作りだし、私たちは食事を摂って心臓の鼓動を維持している。私たちは食べずには生きられないし、車は燃料なしでは動かない。そして永久機関は存在しない。

だから、エネルギー保存則を破るような実験結果が得られたときには、私たちはまずその実験の正しさを疑う。とはいえ、エネルギーは常に保存するという科学の根源にかかわる法則が観測結果と矛盾したとき、私たちはどう考えるべきだろうか？

地球を飛び出して、広い宇宙を考え

てみよう。私たちは宇宙に関するほぼすべての情報を、光を介して得ている。地球にやってくる光を見ていると、「赤方偏移」という現象が観測される。赤方偏移とは、遠くの銀河から発せられた電磁波がアインシュタイン (Albert Einstein) の一般相対性理論にしたがって膨張する宇宙を伝わるうちに、その波長が引き伸ばされる現象だ。波長

が長い光ほどエネルギーが低い。

ここで、好奇心旺盛な人は疑問に思うかもしれない。宇宙の膨張によって赤方偏移した光が失ったエネルギーは、いったいどこへ行ってしまったのだろうか？ エネルギー保存則は破たんし、エネルギーは失われてしまったのだろうか？

私たちが日々の快適な生活を捨て、

KEY CONCEPTS

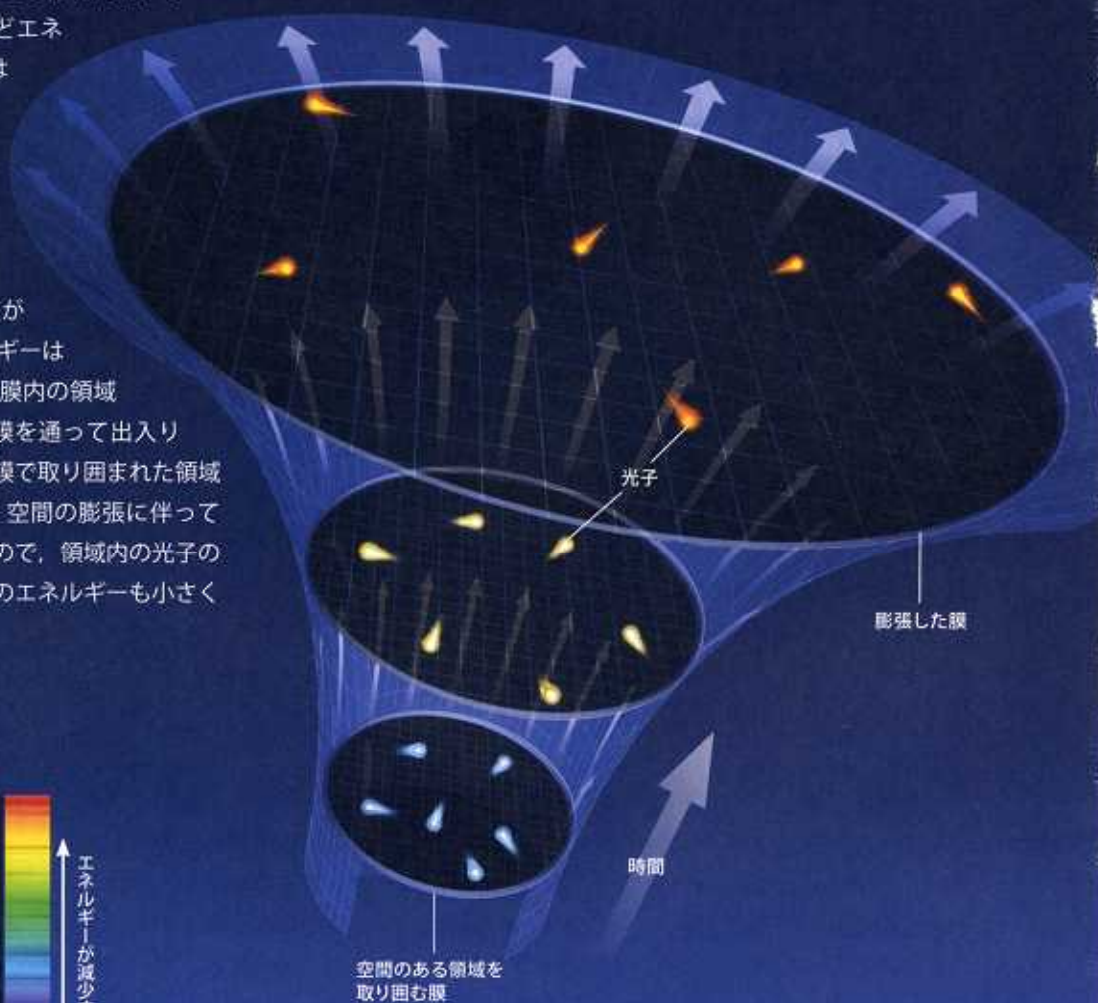
遠くの銀河の赤方偏移に端を発した疑問

- 遠方の銀河は宇宙膨張に伴って私たちから遠ざかっており、そこから発せられた光は赤方偏移を受けてエネルギーが小さくなる。
- 一見するとこれはエネルギー保存則を破っているように見えるが、実際には一般に受けいれられているあらゆる物理法則と矛盾しない。
- 著者によると、適切な解釈に基づけば1つ1つの光子のエネルギーは保存している。また、天の川銀河内で起こるあらゆる現象でエネルギーは保存されている。

問題① なぜエネルギーが消えるように見えるのか？

宇宙のエネルギーが失われているとする主張は、光の赤方偏移に基づいている。宇宙は、空間そのものが伸びるかのよう膨張している。その結果、電磁波の波長も同じように伸び、特に可視光の場合にはスペクトル上で赤色の方へずれる（下図参照）。波長の長い光子ほどエネルギーが小さいので、1つ1つの光子は私たちのところへたどり着くまでにエネルギーを失うことになる。

しかし、宇宙の全エネルギーは本当に失われているのだろうか？ 宇宙に存在する光子の全エネルギーは計算できないが、宇宙の膨張とともに広がる仮想的な膜の内側に含まれるエネルギーは原理的に計算できる（右図、ただし、膜内の領域を2次元で描いている）。光子はこの膜を通して出入りできるが、宇宙の密度は一定なので、膜で取り囲まれた領域内の光子の数はほぼ一定に保たれる。空間の膨張に伴って個々の光子のエネルギーは小さくなるので、領域内の光子の全エネルギーは小さくなり、宇宙全体のエネルギーも小さくなっているように思われる。



…一方で、光子の数は保存している。つまり、エネルギーが失われたように見える。

はるか遠く、極限の時空の探検に出かけると、私たちが常々前提としていることの多くが必ずしも正しくないことに気づかされる。アインシュタインによると、物事の同時性というのは観測者の見方に依存した、ある意味、錯覚であり、距離や時間でさえ相対的な概念だ。また物理学者は、滑らかに見える物質と同じように、一見連続的な時間や空間も実は不連続なのではないか、とさえ考え始めている。

究極の物理法則、それが明らかになった先には何があるのか？ 私たちが信じて疑わない法則のいずれかが私たちの目を欺き、より深遠な真理に到達することを妨げているのだろうか？

私たち物理学者は、何がどこまでわかっているかを吟味し、そのどこが不十分、あるいは単なる勘違いなのかを見極めようと日々研究に取り組んでいる。過去を振り返ると、多くの誤った認識を正してきたことで今日の物理学

があることがわかる。エネルギー保存則もこのような誤った認識の1つなのだろうか？

いや、そんなことはない。光子が赤方偏移を受けても、エネルギーは保存している。天の川銀河で起こるさまざまな現象でも、エネルギー保存則が破れることはない。しかし、宇宙という広大なスケールになるとエネルギーは微妙な概念となり、そのことが話をおもしろくしている。

対称性と保存則

エネルギー保存則が成立することは、経験的に確かめられているだけでなく、物理学者が信じるに足る論理的根拠が背後にある。ドイツ人数学者のネーター (Emmy Noether) は、あらゆる保存則は自然が持つ対称性に基いていることを発見し、エネルギー保存則を確固たるものにした。今からほぼ100年前のことだ。

対称と聞いて思い浮かぶのは、鏡に映したり、反転させたり、回転させても同じ形になるということだろう。正三角形は頂点から向かい合う辺に下ろした垂線を軸として反転させたり、重心の周りに1/3回転させても、もとの状態とまったく同じになるという対称性がある。正方形も重心の周りに1/4回転させると回転前とまったく同じ状態に戻る。円は2次元の図形の中で最も対称性が高く、中心の周りの任意の回転や中心を通るあらゆる直線を軸とする反転に対して状態が変わらない。

物理法則にも対称性が存在する。時間が経過しても自然法則は不変だ。同じ実験を繰り返すと、例えば2つのビリヤードの球をある角度で衝突させれば、その結果は常に等しい。自然が持つこの性質は「時間並進対称性」と呼ばれる。また、自然法則はどこにいても不変だし(空間並進対称性)、どの方向を向いても同じだ(回転対称性)。

もちろん、私たちの目に映る風景は、いつ、どこで、どの方向を向いているかによって異なる。しかし、その風景がどのように振る舞うかを決定する基本的な物理法則は、いつ、どこで、どの方向を向いて現象を観測しようとも同じだ。そのような物理法則は、「連続対称性」を持つという。

ネーターが発見したのは、「自然が連続対称性を持つときにはそれに付随して必ず保存則が存在し、その逆もまた正しい」ということだ。特に、空間

宇宙を膨らむゴム風船にたとえる比喻を鵜呑みにしてはいけない

並進対称性、回転対称性、時間並進対称性があることは、それぞれ、運動量保存則、角運動量保存則、エネルギー保存則が成立することと等価だ。

つまり、エネルギーが保存しているということは、物理法則が過去から現在、未来に至るまで不変だということだ。一方、時間並進対称性が破れていれば、エネルギー保存則は成り立たない。このことこそが、アインシュタイン宇宙でエネルギー保存則が問題になる本質的な理由だ。

宇宙論的な赤方偏移

物理学的に現在とは過去と対等かどうか、そして宇宙の全エネルギーが保存しているかを確かめるには、今のところ天体望遠鏡によって得られる宇宙の過去の情報をつぶさに調べる以外に方法はない。

天体望遠鏡は、今や、宇宙で最初に来た銀河やビッグバンの名残を観測できるほど強力なツールになった。天体望遠鏡がとらえている光は、数十億年もの間、宇宙空間を伝わってきて望遠鏡の鏡に衝突した光だ。こうした光の波長はエネルギー保存則を考える上で大きなカギとなる。

ハッブル (Edwin Hubble) は1920年代に、ほとんどの銀河からやってくる光が赤方偏移していることを発見した。彼は水素などの原子が放射、あるいは吸収する光の波長に着目し、遠くの銀河で放射された光の観測される波長は、実験室で同じ元素が発する光の波長と比べて伸びていること、さらにその度合いは太陽系から放射源である銀河までの距離に比例することを発見した。

この発見以後、天文学者は距離を直接測ることができないような遠くの銀

河に対して赤方偏移を距離の“物差し”として使うようになった。

赤方偏移(あるいは青方偏移)は地球上でも起こる現象だ。あなたが運転中に、電波探知機を搭載したパトカーの横を通り過ぎる状況を想像してほしい。あなたの車がパトカーに近づいているとき、あなたが目にする電波の波長はもとの波長と比べて少し縮んでいるはずだ(あなたの目が波長の変化を見分けられればの話だが)。一方、あなたの車がパトカーから遠ざかっているとき、波長は少し伸びて見える。この現象は「ドップラー効果」と呼ばれている。

通り過ぎていくパトカーのサイレン音の高さが変化する現象はなじみ深いと思うが、この場合は音波の波長が変化しているのであり、電波探知機の場合は電磁波の波長が変化している(警察官は車にあたって跳ね返ってくる電波の波長から車の速度を計算し、スピード違反を取り締まっている)。電波は可視光ではないので色の変化が実際に見えるわけではないが、物理学者は波の波長が伸びたり縮んだりする現象を総じてそれぞれ赤方偏移、青方偏移と呼んでいる。

宇宙論的な赤方偏移はドップラー効果とは異なる現象だと一般に考えられている。ドップラー効果は相対的な運動が原因で生じる。ドップラー効果を受けても、光はエネルギーを失ったり獲得したりするわけではない。放射源と観測者との間で見え方が違うにすぎない。

一方、一般相対論や宇宙論の教科書には必ずといっていいほど書かれていることだが、宇宙論的な赤方偏移は、空気を吹き込まれているゴム風船のように膨張する宇宙空間を光が伝わって

問題② “空間の形”が変わると…

保存則は自然が持つ対称性と本質的に結びついている。特に、エネルギーは自然が「時間並進対称性」を持つ場合に保存する。物理の実験がいつ行われても必ず同じ結果となると、時間並進対称性があるという。

一方、実験結果がそれを行った時刻によって異なる場合には、

エネルギーは保存しない。

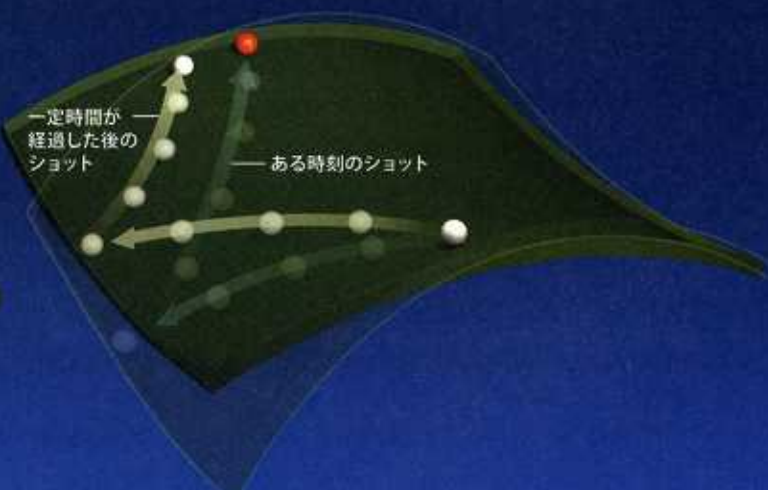
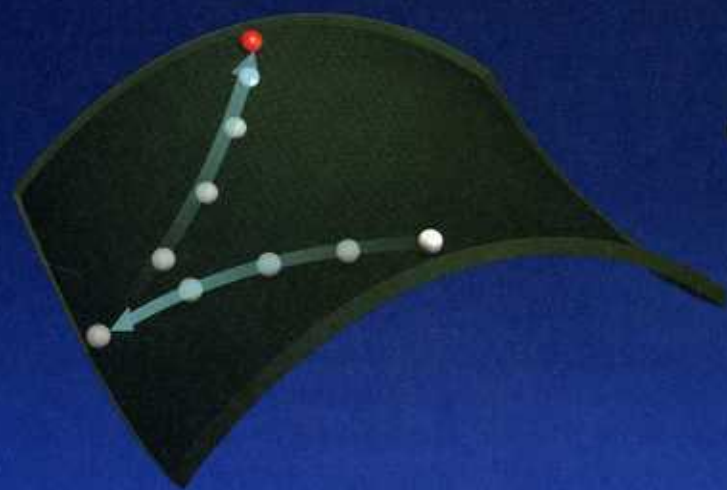
例えば、幾何構造が時間変化するビリヤード台でショットすることを考えよう。宇宙論的なスケールでは、宇宙の幾何構造は変化しており、この事実がまた、エネルギーが保存しないのではないかと、という示唆を与える。

歪んだビリヤード台

歪んだ(数学的にいうと「非ユークリッド幾何」の)台でビリヤードをするとき、その幾何構造に合わせてショットする必要がある。それでも幾何構造が固定されている場合、まったく同じショットをすれば、球はいつでも完全に同じ軌道を描く。このような時間並進対称性の存在により、幾何構造が固定された宇宙ではエネルギーは保存するだろう。

時間変化する歪んだビリヤード台

ビリヤード台の幾何構造が時間変化する場合、過去に成功したショットが再びうまくいく保証はなく、時間並進対称性が破れている。同じようなことは宇宙でも起こる。一般相対論によると、物質やエネルギーの移動により時空の幾何構造が変化するため。このような状況下ではエネルギーは必ずしも保存しない。



いくとときに起こる。

実際、宇宙論的な赤方偏移は放射源と観測者の間に相対的な運動がない場合にも起こる。

このことは次の思考実験から理解できる。はるか彼方にある銀河が私たちの太陽系と長いロープでつながっているとしよう。この銀河の近くにある他の銀河が太陽系から遠ざかっていたとしても、ロープでつながれた銀河と太陽系の間に相対的な運動は存在しないとす。

このような状況でも、ロープでつながれた銀河からやってきた光は赤方偏移していることが計算によって示される(とはいえ、その赤方偏移の度合いはロープでつながれていない、太陽系

との間に相対速度を持つ銀河が発した光の赤方偏移と比べると小さい)。

このように、宇宙論的な赤方偏移は、通常、光が伝播する空間そのものが膨張しているために起こる。

固有運動と共運動

膨張する宇宙空間を伝わる光は、エネルギーを失っているように見える。物質はどうだろう。物質もエネルギーを失うように見えるだろうか？

膨張する宇宙空間に存在する物質の運動を記述するとき、その運動は2つに大別される。1つは、物体どうしが宇宙膨張に伴って互いに遠ざかる運動だ。この運動は、水玉模様の風船を膨らませるとき、風船が大きくなるにし

たがって水玉どうしが遠ざかっていく様子に似ている。宇宙論ではこのような運動を「共運動」と呼ぶ。

もう1つは、宇宙膨張とは無関係の、物体そのものの運動だ。この運動は「固有運動」と呼ばれ、物体が近くの銀河の重力やロケットの推進力などの局所的な力によって、宇宙膨張に沿った運動から外れることによって生じる。

銀河は一般に固有運動をしているが、宇宙膨張にしたがう共運動は遠くの銀河ほど大きいので、遠くの銀河の固有運動は共運動に比べると小さい。このため、銀河の運動を大きなスケールで考えるときには、銀河は宇宙空間に等方的に分布する、局所的な効果が無視できる共運動状態にあるとして問題な

い。つまり遠くの銀河は、水玉模様の風船の水玉と同じように、膨張の様子を調べるための“目印”として用いることができる。

銀河によって規定されるこのような「共運動系」は使い勝手が非常によい。例えば、どの銀河にいる人にとっても普遍的な時間を定義できるので、ビッグバンからどれだけ時間が経過したかという問いに対して、共運動系にいるあらゆる観測者の間で意見が一致する。

数十億年もの間、銀河から銀河へと旅を続ける人がいるとしよう。旅人は目印となる銀河をいくつも通り過ぎる。しかし、銀河どうしは宇宙膨張に伴って互いに遠ざかっているのだから、目印も互いに遠ざかり、旅人が銀河の間を移動するのに必要な時間は次第に長くなる。このとき、共運動系にいる観測者には旅人の移動速度が遅くなっているように見える。

波長が長い光ほどエネルギーが小さいように、速度が遅い物体ほどエネルギーは小さい。一見するとこの2つの事柄はまったく別もののように思える。

しかし、興味深いことに、量子力学はこの2つを統一的に記述する。量子力学によると、質量を持つ粒子は同時に波のような性質を持つ。フランス人物理学者ド・ブロイ (Louis de Broglie) は、運動量が大きい粒子ほど波長が短く、エネルギーが大きいことを発見し、1929年にノーベル物理学賞を受賞した。

粒子が大きな運動量を持つには、質量か速度のいずれか、あるいはその両方が大きければよい。ピッチャーが投げたボールが波のようにくねくねしないのは、運動量が大きく、波長が短いからだ。

野球のボールの質量は量子力学的にはかなり大きいので、メジャーリーグの速球派ピッチャーが投げるボール (時速145km) のド・ブロイ波長は約 10^{-34}m と非常に短く、バッターがボ

ールの波動性を心配する必要はまったくない。一方、同じ速度で移動する電子の波長は $18\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$) になる。これでもまだ短い、野球のボールと比べると 10^{29} 倍も長く、電子の振る舞いに対して大きな影響を及ぼす。

質量を持つ粒子が他の粒子の脇を通り過ぎるときにどれくらい速度を失うかを計算すると、その粒子のド・ブロイ波長は、光の場合にその波長が伸びるのとまったく同じだけ長くなることがわかる。したがって、膨張宇宙でエネルギーを失うのも、見方によっては光と物質でまったく同じように起こるといってよく、いずれの場合もエネルギー保存則が破れているように思える。

物質に関していえば、このパラドックスは私たちが遠ざかっていく銀河に付随した座標系で粒子の速度を観測しているためと説明される。これから見ていくように、同じことが光に関してもいえる。

宇宙のエネルギー収支

“宇宙会計士”なる人がいて、宇宙の全エネルギーが減少していることを実証しようとするならば、ある時刻のある物体に注目するのではなく、宇宙の全エネルギーを足し上げなければならない。

会計士はまず、物質の質量として存在しているエネルギーを足し上げる (質量 m とエネルギー E はアインシュタインの有名な関係式 $E=mc^2$ を通じて等価だ。ここで c は光の速さ)。次に、物質の固有速度と関係のある運動エネルギーを足し上げる。さらに光が持つエネルギーを足し、最後に惑星や恒星、銀河の重力場が持つエネルギーと、化学結合や原子核結合のエネルギーを合算するという複雑な作業を行わなければならない (音や熱は粒子の運動で生じるので、既に考慮されている)。

会計士が最初に直面する問題は、宇

宙が無限に大きく、無限の物質とエネルギーを含んでいることだ。会計士は何らかのうまいやり方を考えなければならない。

まず、宇宙のある領域を仮想的に取り囲む膜を考え、その領域内のエネルギーを足し上げる (30ページの囲みを参照)。次に、共運動する銀河が膜の内側に留まるように、実際の宇宙膨張と同じように膜を膨張させる。光や物質は膜を通り抜けることができるが、宇宙は空間的に一様なので、膜の中から出ていく分だけ外から入ってくる。だから、膜の中のエネルギーはほぼ一定に保たれるだろう。

会計士は宇宙がこのような膜の集合であることを知っている。だから、宇宙のエネルギーが全体として保存して

宇宙にまつわる謎に お答えします

■ 天の川銀河内の空間も膨張しているの？

いいえ。宇宙スケールの膨張は銀河内部の運動に影響を及ぼしません。局所的な重力効果によって銀河が形成され始めたから、宇宙膨張でも、その銀河を引き裂くことはできません。

■ 遠くの銀河からやってくる光子が赤方偏移するのは、ある意味宇宙の密度が減少しているからですね？ では、重力の強さに勾配がある場所を通過する光子は赤方偏移するのですか？

はい。とはいえ、宇宙は誕生後どの時刻でもほぼ一様でしたので、物質の密度は光子の進行方向に対して前も後ろも同じです。重力の強さに勾配はほとんど存在しません。

■ エントロピーと時間並進対称性は共存できるのですか？

はい。卵が割れるなどの現象は微視的には粒子間の複雑な相互作用で構成されていますが、私たちはこのような過程が時間的にどちらの向きに進むかを経験的に知っています。そう、エントロピーが増大する向きであり、乱雑さが増す向きです。それでも、1つ1つの粒子間の相互作用は、基本的な物理法則によって支配されている限り、時間並進対称性を備えています。

答え 光子のエネルギーが保存されるわけ

遠くの銀河から発せられた光が赤方偏移するのは、空間が膨張しているからだといわれるが、放射源である銀河が観測者から遠ざかっているからだとも解釈できる。この点で赤方偏移はなじみのドップラー効果に似ている。

ドップラー効果は通り過ぎるパトカーのサイレン音で確認でき

るが、光子の波長も同じように影響を受ける。例えば、パトカーのランプだ（下図）。パトカーの例の場合、光子はエネルギーを失わない。同じように、銀河の赤方偏移をドップラー偏移として計算すると（右ページ）、遠くの銀河からやってくる光子もエネルギーを失っていないことがわかる。



通常のドップラー偏移 ドップラー偏移は相対運動によって起こる。パトカーが発した光は、私たちの目で確認することはできないが、パトカーが遠ざかっている時には赤方に、近づいている時には青方に偏移する。観測者に対するパトカーの相対速度が大きいほど、ドップラー偏移は大きくなる。しか

し、ドップラー偏移が起きたことは、光子が放射源から観測者に到達するまでに自らの色を変化させたこと（つまり、エネルギーを失ったり、獲得したりすること）を意味するのではない。観測者の見方に応じて異なる色に見えるにすぎないのだ。

いることを示すには、1つの膜の中でエネルギーが保存していることを示すだけで十分だ。

物質が静止している場合、この計算は非常に簡単だ。物質はただ静かにしていて、宇宙膨張に乗って移動するだけだ。この場合、エネルギーは質量によるエネルギーだけであり、正味の物質の出入りはないので、膜の中の質量は保存する。

しかし、これまで見てきたように、光や固有速度を持つ物質を考える場合には、状況は少し複雑になる。確かに膜の中にある光子や粒子の数は変わらない。しかし、時間の経過とともに光子のエネルギーや固有運動する物質の運動エネルギーは減少する。このため

に膜の中の全エネルギーは減少する。

会計士が暗黒エネルギーを考慮しようとすると、状況はさらに複雑になる。暗黒エネルギーは宇宙の加速膨張を引き起こすものだと考えられている。暗黒エネルギーの性質は依然として謎のままだが、宇宙が膨張しても暗黒エネルギーは薄まらないことがわかっている。このため、会計士が考える膜が膨張し、膜内の体積が大きくなるにつれて、暗黒エネルギーは増える。まるで何もないところからエネルギーが湧き出しているかのよう！

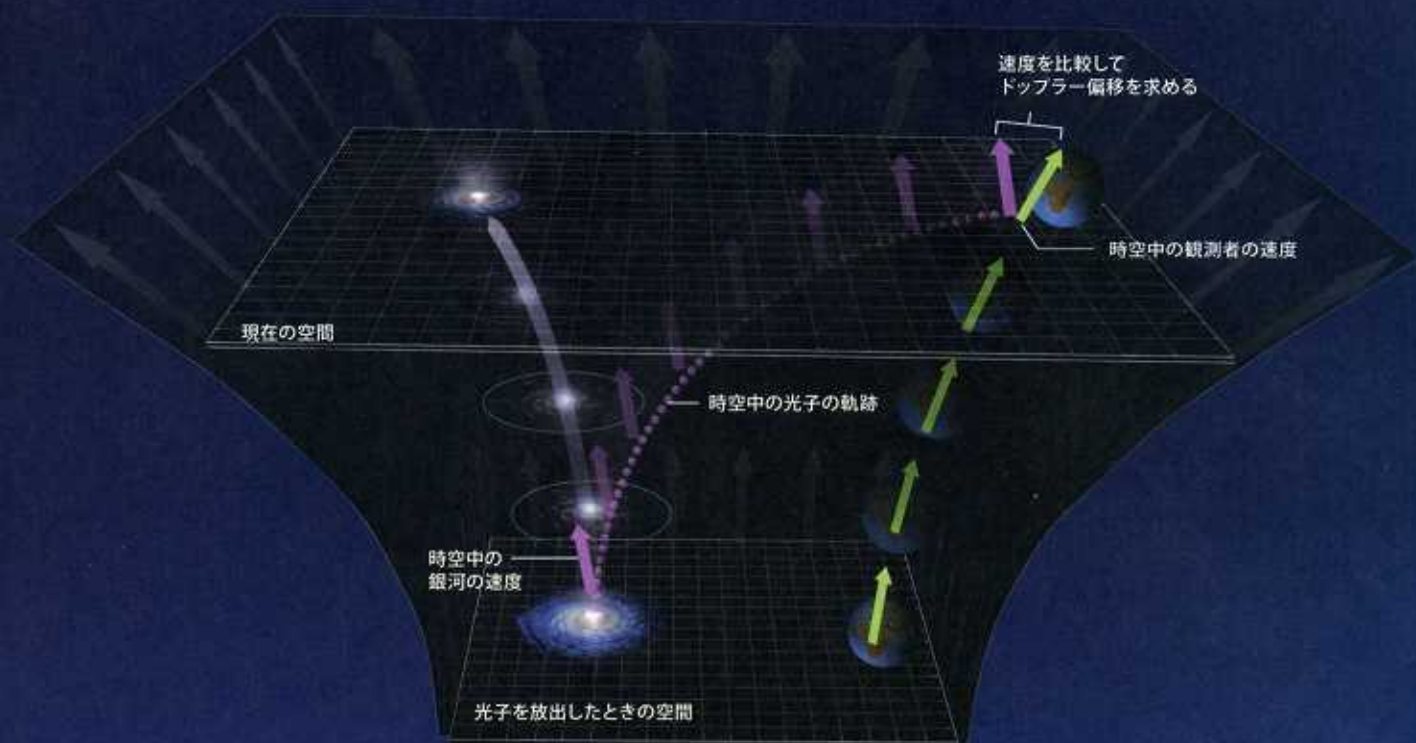
暗黒エネルギーの増加は他のエネルギーの減少とつり合っていると考える人もいるだろう。しかしそうではない。暗黒エネルギーを考慮しても、膜の中

でエネルギーは保存していないのだ。

会計士はこのようなエネルギーの変化とネーターの定理の間にどのような折り合いをつけるのだろうか？

会計士は、少し考えた後、絶え間なく変化し続ける宇宙に対してネーターの定理を適用する理由がないことに気がつく。一般相対論によると、物質やエネルギーは時空を歪め、物質やエネルギーが移動すると（あるいは、宇宙膨張に伴って広がると）時空の構造が変わる。このような効果は私たちの日々の暮らしの中では小さくて検出できないが、宇宙のスケールでは顕著になる。

このように空間が変化することは、物理法則が時間並進対称ではないこと



ドップラー効果としての銀河赤方偏移 銀河の赤方偏移は、その銀河と同じ相対速度で遠ざかるバトカーが発する光のドップラー偏移とまったく同じだといえる。ただし、そのためには相対速度を適切に解釈する必要がある。まず、私たちは、銀河と観測者の運動を空間ではなく「時空」上の軌跡としてとらえなければならない（上図では、空間は時間発展する2次元面であり、時空中の軌跡がそれを表している）。第2に、光子を放出したときの銀河の速度

（紫色の矢印）と、光子が観測者のもとに到達したときの観測者の速度（緑色の矢印）を比較し、一般相対論に基づく適切な数学を用いて相対速度を求める。この相対速度から求められるドップラー偏移は、銀河の赤方偏移と一致する。このことは、銀河の赤方偏移が宇宙膨張の代わりに相対運動の結果として起こると解釈できることを示唆している。それゆえ、いかなるエネルギーも失われていない。

を意味している。

視覚的に理解するために、ビリヤードの例に戻ろう。刻々と構造が幾何学的に変化するビリヤード台で特定のショットを繰り返す、その様子をそれぞれビデオカメラに収めたとしよう。ある動画の球の軌道は他のどの動画の軌道とも異なるものとなり、私たちはいつ、どの順番でそれぞれの動画が撮影されたかを区別できる。このとき時間並進対称性は破れているのだ（32ページの囲みを参照）。

私たちは今、これまで大切にしていた保存則の限界を知るようになった。時間や空間そのものが変化するとき、時間並進対称性は失われ、エネルギー保存則が成立する必然性がなくなる。

そもそも定義できない!?

たとえ時空の歪みが変わらなかったとしても、宇宙全体のエネルギーを計算する試みは失敗に終わるだろう。宇宙会計士は宇宙全体を見渡す神のような目を持っているが、共運動系の観測者はそうではない。特に、共運動系の観測者は自分が属している銀河の共運動に付随した運動エネルギーを測ることができない。彼らにとって、その銀河は運動エネルギーを持たないように見える。また、銀河どうしの引力に付随した重力エネルギーも問題になる。一般相対論が抱える困難の1つに、宇宙全体に適用できるような一般的な重力エネルギーの定義が存在しないことがある。

宇宙全体のエネルギーは保存しているとも、失われているともいえない。そもそも定義できないのだ。一方、宇宙全体を見るような超越的な視点を捨てて、個々の粒子1つずつに注目すれば、遠くの銀河からの光子の旅について多くの宇宙論研究者が考えている見方のほうがずっと自然な考え方であることがわかる。そしてこの解釈では光子はエネルギーを失わない。

重要なポイントは、膨張するゴム風船の比喩は宇宙膨張を可視化する上では便利だが、鵜呑みにしてはいけないということだ。空っぽの空間に物理的な実体はない。銀河が互いに遠ざかっているとき、銀河どうしの相対運動を「空間の膨張」とみなすことも、「空間

◆日本文学や中国文学を縦横無尽に駆けめぐる

数になりたかった 皇帝

漢字と数の物語

円満字二郎

史上空前の帝国の君主は、なぜ自ら“数”となり、後継者にも“数”となることを命じたのか？ “数”と“漢字”の間のドラマ、「数」という漢字に宿る意味など、“漢字で書かれた数”がひびき出す28の古今の物語。

四六判・並製カバー・208頁 定価1785円

【岩波科学ライブラリー】

173 天文学の誕生

—イスラム文化の役割—

三村太郎

(8月26日刊)

天球の運行から天変地異や運命を予測する占星術が天文学となるまでには、中世イスラム文化の強い影響があった。知られざる事実を追う。

B6判・並製カバー・128頁 定価1260円

ぶらりミクロ散歩

—電子顕微鏡で覗く世界—

田中敬一

なんでも覗いてみよう。庭に咲く草花から、はては自分の髪の毛まで。電子顕微鏡の世界に魅せられた著者がつづる科学エッセイ。

【岩波新書】定価756円

ソフトマター 物理学入門

土井正男

テクノロジーを支える柔らかい物質の物理学の入門書。通常の統計力学のコースでは扱わない内容も含め基礎から説明する。

A5判・上製カバー・304頁 定価3990円

新しい「地球の科学」の全体像を体系化

新装版 地球惑星科学 全14巻

4 地球の観測

平 朝彦・浜野洋三・藤井敏嗣・下田陽久
末 広 潔・徳山英一・上田 博・竹内謙介
住 明正・佐野有司・蒲生俊敬・井澤英二
地球の科学は観測から始まる。露頭観察や地質調査から人工衛星によるリモートセンシングまで、地球観測の方法を全方位的に解説。

A5判・並製カバー・352頁 定価3885円



岩波書店

東京都千代田区二ツ橋2-5-5
(いずれも税込)

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

<資料請求番号36>

の中の運動」とみなすこともできる。その違いは表現の違いなのだ。

通常、宇宙論的な赤方偏移は空間が膨張していることが原因で起こるといわれる。しかし、アインシュタインの一般相対論では、空間は相対的な概念であり、本当に意味があるのは、銀河がたどった歴史、つまり時空における銀河の軌跡だ。

よって、時空における遠くの銀河の軌道と私たちの軌道を比較することによって、遠くの銀河の太陽系に対する相対速度を正確に求めなければならない。遠くの銀河から到来する光の赤方偏移の度合いは、結局、その銀河と同じ相対速度で遠ざかるパトカーのランプを見たときに観測されるドップラー偏移の大きさに等しくなる（前ページの囲みを参照）。

この背景には、十分に小さな領域では宇宙は平坦な時空として近似できる、という事実がある。平坦な時空では重力がなく、波の波長が伸びることもなく、赤方偏移はドップラー効果の結果としてのみ現れる。

このようなわずかなドップラー偏移が積み重なった結果、遠くの銀河から届いた光は赤方偏移して見える。そしてパトカーのランプのドップラー偏移

を観測したからといって、その光子がエネルギーを得た、あるいは失ったと考えることはないように、銀河からやってきた光の赤方偏移は、相対運動がある放射源の銀河と観測者という異なる視点で光子を見ていることが原因であり、光子が途中でエネルギーを失っているわけではない。

結局、光子のエネルギー損失という問題は存在しない。エネルギーは互いに遠ざかる銀河で観測されており、光子がエネルギーを失っているように見えるのは観測者の視点と相対運動に起因する見せかけなのだ。

それでもなお宇宙全体のエネルギーが保存しているかどうかを確かめようとすると、根本的な限界に直面する。なぜなら、宇宙の全エネルギーと呼ぶのにふさわしい量を私たちは知らないからだ。

宇宙でエネルギー保存則が破たんしているわけではない。むしろ、宇宙はエネルギー保存則が及ばない領域にあるのだ。 ■

訳者 榎山和己（かしやま・かずみ）

白水徹也（しろみず・てつや）

榎山は京都大学大学院理学研究科博士課程2年で理論宇宙物理学を研究。白水は同研究科准教授で宇宙論・一般相対性理論を研究。

COURTESY OF ANDREI LINDE



著者 Tamara M. Davis

2004年にニューサウスウェールズ大学でPh.D.を取得。現在はオーストラリアのブリスベンにあるクィーンズランド大学の研究員であるとともにコペンハーゲン大学准教授。天体物理学の大規模データを通じて、暗黒エネルギーや暗黒物質の性質などを調べている。オーストラリア物理学会の優秀若手研究者賞とオーストラリアのロレアル・ユネスコ女性科学者賞を受賞。オーストラリアとデンマークのアルティメット・フリスビーの代表選手でもある。

原題名

Is the Universe Leaking Energy? (SCIENTIFIC AMERICAN July 2010)

もっと知るには…

SPACETIME AND GEOMETRY: AN INTRODUCTION TO GENERAL RELATIVITY, Sean M. Carroll, Addison-Wesley, 2003.

「ビッグバンをめぐる6つの誤解」, C. H. ラインウィーバー / T. M. デイビス, 日経サイエンス 2005年6月号。

THE KINEMATIC ORIGIN OF THE COSMOLOGICAL REDSHIFT, Emory F. Bunn and David W. Hogg in *American Journal of Physics*, Vol. 77, No. 8, pages 688–694; August 2009.



地球工学に 祭り上げられる炭焼き

日本の炭が世界から注目を集めている。農業や林業で発生する廃棄物、例えば稲わらや間伐材を焼いて炭にし、土の中に埋める。放っておけば、廃棄物は分解して二酸化炭素（CO₂）の排出源になるところを、分解しにくい炭の形にして炭素を地中に固定する。地球温暖化対策の一環で脚光を浴び始めているのだ。

さらに、埋めた炭は土壌を豊かにする働きがある。酸性土壌を中和したり、植物の共生微生物の増殖を促したりする効果があることが知られている。一石二鳥というわけだ。

海外では「バイオ炭（bio char）」と呼ばれ、英エディンバラ大学にはすでにバイオ炭センターなる研究組織がある。8月上旬に同センターの科学者らが来日、日本のバイオ炭の生産・利用の状況などを視察して回った。近く、豪州からも視察団が来ると聞く。

東京の英国大使館で開いたバイオ炭のセミナーで講演した英エネルギー・気候変動省のジャン・オレ・キソ氏は、バイオ炭を「地球工学（geo-engineering）」の一手法として紹介した。

英王立協会は昨年、温暖化の進行を食い止めるため地球全体の気候を改変する地球工学的な手法の検討を提言し、物議を醸した。地球工学的な手法とは、例えば海に鉄を散布し海洋微生物の光合成を盛んにしCO₂の吸収量を増やすとか、宇宙のラグランジュ点に巨大な日よけを浮かべて地球への日射を遮るとか、である。

ラグランジュ点と聞いて頬が緩むSFアニメファンには心躍る壮大なアイデアではあるかもしれないが、これらの手法を実現するのに欠かせない社会的受容のハードルは極めて高く、反対の声も大きい。

そんな実験的手法の一つに、炭焼きという日本人にとっては身近で、何ともつつましく感じられるテーマが数えら

れているとは、知らなかった。

英議会の科学技術担当室（parliamentary office of science & technology）の資料には「バイオ炭による英国での炭素隔離は年間360万トンの潜在性があり、炭づくりのために栽培を行えばさらに追加的隔離が可能」といった意味のことが書かれている。大まじめなのである。

この動きは英国だけではなく、豪州や米国にもあり、国際バイオ炭イニシアチブ（IBI）という国際団体も生まれている。その最終的な狙いは、バイオ炭による炭素隔離をCO₂の排出削減の正統的な手段として国際的に認知させることにあるようだ。

海外の動きに刺激され、日本国内でも昨年、バイオ炭普及会と名付けられた組織が発足した。炭の利用法や効用について長年にわたり研究してきた日本の研究者や企業が集まった。炭の土壌改良効果に加えて、炭素隔離の機能についても、日本の研究者の中にはかなり以前から着目し提唱していた人がおり、研究もそれなりに進んでいる。ただ、残念なことに「研究成果が英文誌で紹介されていない」と凌祥之・九州大学大学院教授（バイオ炭普及会副会長）は話す。

炭の可能性に気がついた英米など研究者は、先行する日本の顔を立てながらも、この分野での主導権を握っていかうという姿勢にみえる。大農場で大量に発生するサトウキビの絞り殻や大豆の殻などが処分費用のかかる農業廃棄物から、一転してCO₂削減に役立つ材料に生まれ変われば、それは間違いなく新たなビジネスチャンスだ。研究が活発化してきたのは、背後でそれなりに大きなお金が動き出したからだとも見た方がよい。

炭の活用には大賛成だ。しかし大規模に展開するには、検証が不可欠だ。日本の木炭は土壌中でかなりの長期にわたって安定して存在し続けることがわかっているようだが、例えば豆殻などを炭化した炭が、いつまで土壌中にとどまるのか、わかっていない。固定化の効果が不確定なのだ。

加えて、大規模な実施は「自然破壊につながりかねない」と、バイオ炭普及会の小川真会長（大阪工業大学客員教授）は指摘する。かつて日本の山林がはげ山だらけだった時代があった。木炭が家庭の主要なエネルギー源だった時代、炭焼きのために木材が伐採されていた。

炭素固定の名目で炭焼きが奨励され、金もうけのタネにもなると、日本国内はともかく、途上国では森林伐採を助長しかねない。炭焼きは地球工学的な仕事になりうるかもしれないが、やはりささやかな技術にとどまっていたほしい。環境を改変する性格のものではなく、農林業など人間の営みが自然環境と共生していく、ごく地域的な一手法ではないか。

（たき・じゅんいち：日本経済新聞論説委員）

軍事技術 “War of the Machine”

ロボットが変える戦争

P. W. シンガー
(ブルッキングス研究所)





自律的に動き、自らの判断で攻撃するロボットが
戦地で活躍し始めた
兵士を命の危険にさらさずにすむ一方で戦争がテレビゲーム化し
日常の延長になってしまう危険もはらんでいる

1970年代の初め、ほんの一握りの
科学者と技術者、軍需産業の関係者と
米空軍の将校らが集まって、専門家グ
ループを立ち上げた。彼らには共通の
目標があった。人間が操作しなくても
自律的に動ける機械をどうやって作る
か、そしてそうしたロボットが戦場で
役立つことを一般市民やペンタゴンの
お偉方にどう納得させるかを考えるこ

とだ。年に1～2度ひっそりと集まっ
ては技術課題について話し合い、旧交
を温め、うわさ話に興じた。

こんな風にささやかに始まった組織
が、今では55カ国から1500以上の
会員企業・団体が参加する「国際無人
機協会」になっている。あまり急激に
大きくなったため、会自体が一種のア
イデンティティー・クライシスに陥っ

現代のハイテク戦争では、リ
モコン操作のロボットが偵察
や補給、さらに爆撃まです
る段階に到達しつつある。



た。サンディエゴで開催した時には、ロボット技術の驚くべき進歩をまとめ示すために、プロのストーリーテラー（訳注：米国には難しい話でも楽しくわかりやすく聴衆に語る職業がある）が雇われたくらいだ。ある参加者は、いみじくもこう総括した。「われわれはどこから来たのか われわれはどこにいるのか われわれはどこへ行くべきなのか——そして行きたいのか」。

協会がこんな自問を始めたのは、現代の戦争において、火薬と飛行機の登場以来の重大な変化が起きているためだ。戦場で活動するロボットが、驚くべき速さで増えているのである。2003年の湾岸戦争で米国がクウェートからイラクのバグダッドに侵攻した時、米軍にロボットは1台もなかった。その後現在までに、実に7000台の“無人”飛行機と、1万2000台の“無人”車両が米軍の倉庫に並ぶようになった。敵狙撃兵の探索からパキスタンに潜むアルカイダ幹部のアジト爆撃まで、任務も多岐にわたっている。

米軍はかつて、自分たちの戦争哲学になじまないとしてロボットを嫌っていたが、今ではすっかり受け入れている。遠くの爆弾を携帯電話からの指令で爆発させ、そのまま群衆に紛れてしまうような、これまでとは違う敵と戦うのに有効だからだ。

ロボットは戦争の戦い方それ自体に大きく影響しただけではない。これまでになく自律的で、高い判断力を備えたロボットを戦争に使うことがどんな

意味を持つのか、数々の論争を引き起こした。兵士を危険から遠ざければ、生命を失うことは避けられるかもしれない。だがロボットの利用が拡大していくと、戦争の敷居がむやみと低くなってしまふかもしれない。戦争の基本的なあり方について、政治的、法的、倫理的な問題が生じる。

話の始まりは、1921年にチェコの作家カレル・チャペックが発表した

兵の生命を失わずに すむかもしれないが、 戦争の敷居が むやみと低くなる

戯曲『ロボット』（原題はR.U.R.）だ。チャペックはこの作品で「ロボット」という言葉を作り、機械じかけの下僕が、主人たる人間への反抗に至る姿を描いた。「ロボット」の名はチェコ語の「服従」と古いスラブ語の「奴隷」を表す単語から来たもので、1800年代に裕福な地主に対抗して一揆を起こした小作農を意味する「robotniks」と関係がある。人間がやりたくない仕事を引き受けていたロボットが人間の支配権を奪うというテーマはSFの定番で、現在でも『ターミネーター』や『マトリックス』などの映画でおなじみだ。

最近のロボット研究者たちは、人類に滅亡をもたらすロボットというハリウッド映画的なイメージを避けるため、「無人の」とか「遠隔操作の」といっ

た表現をよく使う。単純化して言えば、ロボットというのは「知覚し、考え、行動する」という一連の流れに沿って動作するよう作られた機械のことだ。センサーで外界の情報を収集し、それをコンピューターに送り、人工知能ソフトによって適切な判断を下す。この情報に基づいて、エフェクターと呼ばれる機械システムが何らかの物理的な動作を実行する。

ロボットは必ずしも、ハリウッド映画のもう1つの定番である、金属でできた人間の形はしていない。現実には活躍し始めたロボットの大きさや形は実に様々で、C-3PO（訳注：映画『スターウォーズ』に登場するヒト型ロボット）やターミネーター（同名の映画に出てくるアンドロイド）を思わせるものはまずない。

ここ10年間で、全地球測位システム（GPS）とテレビゲーム式のリモコン、その他様々な技術を組み合わせた、戦場で実際に使えるロボットが作り出されてきた。操縦する兵士を危険にさらすことなく、敵地で自ら周囲を観察し、照準を合わせ、ターゲットを攻撃できるロボットの開発は、9.11の同時多発テロ以来、軍の最優先事項となった。新たなシステムが導入され成功を収めるたびに、大きな反響が巻き起こった。

例えば2001年にアフガニスタン侵攻が始まって最初の数カ月間に、現在も爆弾処理に広く用いられている「バックボット」（42ページ右下の写真）の試作機が戦場でテストされた。兵士らに非常に好評で、試作機がメーカーのアイロボットに返却されることはなかった。それ以後、同社は数千台を売り上げている。

別のあるロボットメーカーの重役によれば、9.11以前はペンタゴンに電話しても話ができたためしかなかったが、それ以後は「できるだけ早く作ってくれ」と言われるようになった。

KEY CONCEPTS

進化を続けるロボット兵器

- かつて米軍は、ロボットは通常軍務の妨げになると考えていた。
- 戦闘ロボットは中東戦争で急増した。入り組んだ路地を迷わず通り抜けた、遠く離れた村落を偵察したりするのに無人システムが役立った。
- ロボットの自律行動が増えるにつれて、政治的、倫理的、法的な問題も数多く生じている。

次世代の軍事ロボット

現在開発中の最新の軍事ロボットは、生身の兵士や通常の車両の能力をはるかにしのぐ。「ビッグドッグ」は荷物を運ぶ牛馬などに似た4本足を備え、車輪やキャタピラでは進めないような急傾斜や凸凹道、岩場、ぬかるみ、雪道などを、数百キロもの弾薬や補給物資を背負って踏破できる。

全地球測位システム (GPS)

ロボットの現在地は、GPS衛星の信号から得られる座標で把握する。

コンピューター

各センサーからの入力に基づいて演算装置が速度と加速度を算出し、適切なコマンドを各アクチュエーターに送信して脚の動きを制御する。

動力系統

エンジンの動力でポンプを動かし、油圧系統にオイルを送り込んでアクチュエーターを駆動する。

電子アイ

レーダーの一種であるライダーと画像認識装置で、周囲の状況をすばやく把握する。



センサーとアクチュエーター

各センサーは脚の位置と脚に作用する力のデータをロボットのコンピューターに送信する。コンピューターは4本の脚のすべてのセンサー情報を統合し、それからサーボ弁に信号を送ってオイルをアクチュエーターに流しこみ、目的の位置に脚を動かす。

BRYAN CHRISTIE DESIGN

軍用ロボットの利用は、イラク戦争で加速度的に広がった。2003年に米軍がイラクに侵攻した時、陸軍は無人機をまったく持っていなかった。だが2004年末までに150台程度が配備され、その1年後には2400台へと増えた。現在、米陸軍が保有する無人機は1万2000台以上に上る。空軍も事情は同じで、地上部隊を支援する無人飛行機は当初ほんの数台だったが、今では7000台以上を数える。だが、これはほんの始まりだ。ある米空軍中將は、次の紛争時には現在の数千台ではなく「数万台規模の」ロボットが使われることになるだろう、と予測している。

台数の急増は、軍のロボットに対する姿勢の転換を物語る。ほんの数年前までロボットの能力に懐疑的で、昔な

がらの戦闘指揮権を手放そうとしなかった軍が、今では陸海空軍の入隊者を募集する若者向けのテレビコマーシャルで、いかに「前線の無人化に努めている」かを喧伝している。

実際若者が入隊すると、除隊するまで常に自動システムに触れていることになる。まず、最新のバーチャル訓練ソフトで、何らかの兵器システムの操作を学ぶ。終了後は、例えば芝刈り機サイズの「バックボット」や地上走行ロボット「タロン」の操作に当たる。爆弾を処理したり、イランやアフガニスタンで後線の向こうにいる反政府軍を探索したりするロボットだ。

洋上勤務になれば、イージス艦や沿岸域戦闘艦 (LCS) に乗務する可能性もある。これらの艦は、無人ヘリの「フ

ァイアスカウト」や無人艇の「プロテクター」などのロボットの母艦だ。潜水艦勤務なら、遠隔環境監視ユニット「レムス」(ウッズホール海洋研究所が原型を開発した魚雷型ロボット潜水艇)のような無人潜水艇を操って、機雷を感知したり、非友好国の海岸線を偵察したりするかもしれない。

空の勤務なら、「プレデター」や「グローバルホーク」のような無人機を中央アジア上空で操縦する可能性もある。米国から一歩も出ずにだ。

軍事ロボットの行く末

入隊募集広告がうたう通り、こうしたSFみたいなロボット技術は、今日では軍の一角を担っている。今あるロボットはまだ第1世代にすぎず、今



U.S. MARINE CORPS PHOTO BY GUNNERY SGT CHAD MCNEEN

心強い味方 「スキャンイーグル」は空に浮かぶ監視カメラだ。人の行かない地域で何時間も滞空し、イラクのアンバール地方で活動する米海兵隊の目となった。

後さらに出てくるのは間違いない。地雷を探索しているバックボットや、アフガニスタン上空を飛んでいるプレデターは、T型フォードやライト兄弟のフライヤー号のようなものだ。次世代の試作機を見ると、ロボットによって今後戦争がどう変わるか、カギとなる3つの変化が見えてくる。

まず、人間が搭乗していない以外は特に変わったところのない、単なる無人機を意味する「ロボット」という概念は消えつつある。ロボットの進化は、自動車の歴史の再現だ。自動車も当初は「馬のない馬車」として登場したが、設計者がまったく新しい形とサイズを生み出したことで、それは過去の遺物となった。同様にロボットも「無人機」という先入観から脱したことで、実に様々な形を取れるようになった。

予想通り、いくつかは生物からヒントを得ている。例えばボストン・ダイナミクス社の「ビッグドッグ」は、装備運搬のための金属製4本足ロボットだ。米海軍大学院の偵察ロボットのように、翼と脚の両方を備えたハイブリッド型ロボットもある。現在開発の初期段階にある別のロボットは、文字通り形がない。シカゴ大学とアイロ

ボット社が共同開発した「ケムボット」と呼ばれるもので、スライムのような不定形をしており、自身を変形させて壁穴から潜りこむ。

人間が搭乗しないので、大きさも様々に変えることができる。小さい方では長さ数ミリ、重さ数グラムというものもある。エアロバイロメント社の市街戦用偵察ロボットは、大きさといい、標的の上で静止する能力といい、ハチドリそっくりだ。

次世代の開発目標はナノサイズ(10億分の1メートル級)のロボットだ。一部の研究者は、数十年以内にそこら中にばらまかれるようになるだろうと予想する。戦争においては、敵を発見する「スマート・ダスト」から、人間の体内に入りこんで傷を治療したり逆に傷つけたりする細胞サイズロボットまで、様々な用途で使われることになるだろう。

大きい方に目を向けると、人間を乗せるための制約を気にすることなく、巨大な無人機が作れる。ロッキード・マーチン社の高高度飛行船(右ページ上のイラスト)は、長さがサッカー場の幅ほどもある巨大なレーダーを備えた無人飛行船で、高度1万9800mの上空を1カ月以上も飛び続けることができる。

第2に、ロボットの形や大きさだけでなく、戦争においてロボットが果たす役割が変化し、格段に広がっている。第一次世界大戦に登場した初期の飛行機と同様、初期のロボットの役割は監視や偵察のみだったが、今では新たな任務へと広がっている。

タロンを製造している技術開発会社のキネティック・ノース・アメリカは2007年、「マース」というロボットを披露した。機関銃と擲弾発射筒を備え、哨兵のほか狙撃兵の任務もこなせる。米陸軍の医療研究・物資補給司令部のロボット救出車は、負傷兵を安全な場所まで運び、手当てを施す。

第3に、ロボットの知能と自律性は進化し続けている。コンピューターはとめどなく向上しており、今日入隊した新兵が除隊するころには、ロボットの頭脳は文字通り今の10億倍もの処理能力を備えていることだろう。

第二次世界大戦では、初期に登場した爆撃機B-17と数年後に出たB-24の性能は大して違わなかったが、最近でははっきり異なる。無人飛行機のプレデターは、最初はただのリモコン飛行機だったが、その後進化を続け、最近では自力で離着陸し、12の標的を同時に追跡できるようになった。搭載の標的識別ソフトウエアは、足跡を逆にたどってどこが起点かを探すこともできる。米軍は、1995年以降に導入したばかりのプレデターを、この最新機種に更新する計画に着手した。

ロボットの知能と自律性の進化は、機械にどんな役割まで委ねてよいかという本質的な問いを投げかけている。ロボットが戦場でどの程度の効果を上げられるかを重視するのはもちろんだが、それだけでなく、機械に責任を移行することが人間の指揮官にとってどんな意味を持つのか、さらに戦闘を指揮する政治的、倫理的、法的な責任はどうなるのかを考えなくてはならない。

代わりに偵察 偵察用バックボットを窓から投げ込み、搭載されたビデオカメラで建物内部を観察する。



COURTESY OF ROBOT

近い将来、ロボットは軍隊の“準兵士”的なものになる可能性が高い。人間の兵士とロボットの混成部隊が、協力してベストの結果を目指すのだ。人間はアメリカンフットボールのクォーターバック（司令塔）となり、チームメートのロボットに指示を出す。ロボットの方も刻々と変わる戦況に応じて自律的に行動するという形だ。

もはやSFではない

こうしためざましい開発成果をたどってみても、ロボットが今後どこへ行くのか、そしてロボットが私たちの世界と戦争の未来にどんな意味を持つのかを描くには十分ではない。ロボットの物理的な能力をいくら詳述しても、それが何を意味するかはわからないだろう。火薬について「化学的爆発によって飛翔体を長距離投射することを可能にした」などと説明したところで、どういう意味があるのかわからないのと同じだ。

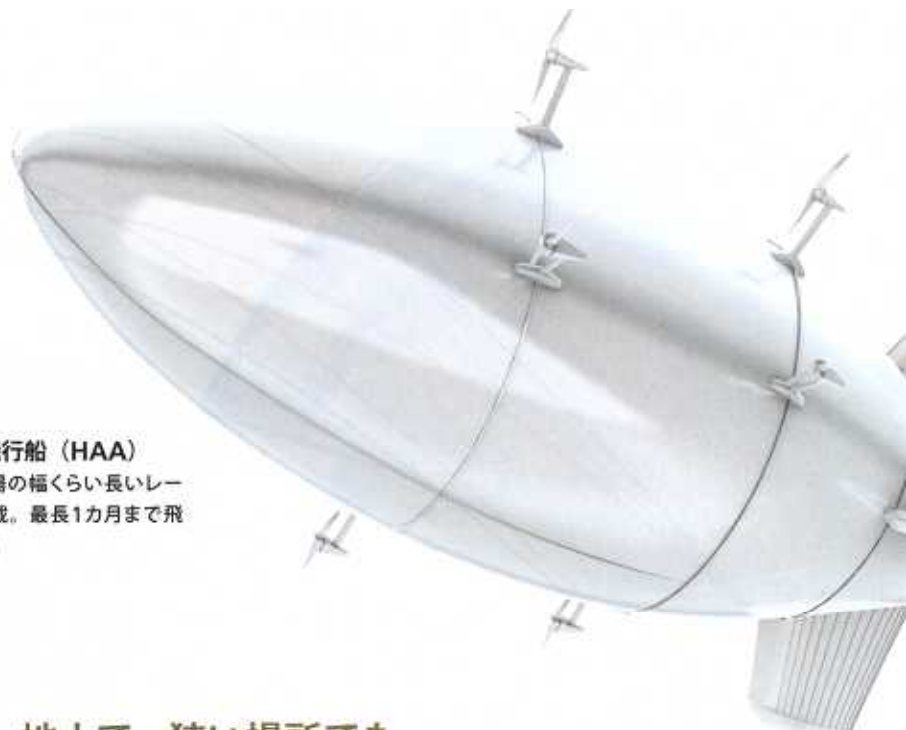
ロボットは戦争というゲームのルールを根底から変えてしまう、希有な発明だ。一部の評論家は誤解しているようだが、こうした「革命的」技術は、戦争の一方のみに永続的な優位性をもたらすはしない。もう一方もすぐに自ら技術を取得するか、技術に適応して変化するからだ。

ロボットは戦場だけでなく、戦争を取り巻く社会構造を揺るがすことになるだろう。ちょうどロングボウ（長弓）のようにだ。この武器は百年戦争におけるアジャンクールの戦いで、フランス諸侯軍と戦ったイングランド軍を勝利に導いたことで知られるが、それだけではない。小作農で組織した農民部隊を貴族に勝利させ、封建時代の終焉をもたらしたから有名になったのだ。

現代になぞらえるのにふさわしい歴史上の事例があるとしたら、おそらく第一次世界大戦だ。開戦の数年前までSFの話だと見なされていた奇想天

高高度飛行船（HAA）

サッカー場の幅くらい長いレーダーを搭載。最長1カ月まで飛行が可能。



空中、地上で、狭い場所でも

空中あるいは陸上に存在する大小さまざまなロボットが、長年戦闘の主力を担ってきた人間の兵士に取って代わりつつある

ハチドリ飛行機

全長7.5cmに満たない無人偵察機。高速で羽ばたいて空中で静止し、撮影する。



偵察機「レイブン」

一見、模型飛行機のような偵察機。イラクで非常によく使われた。



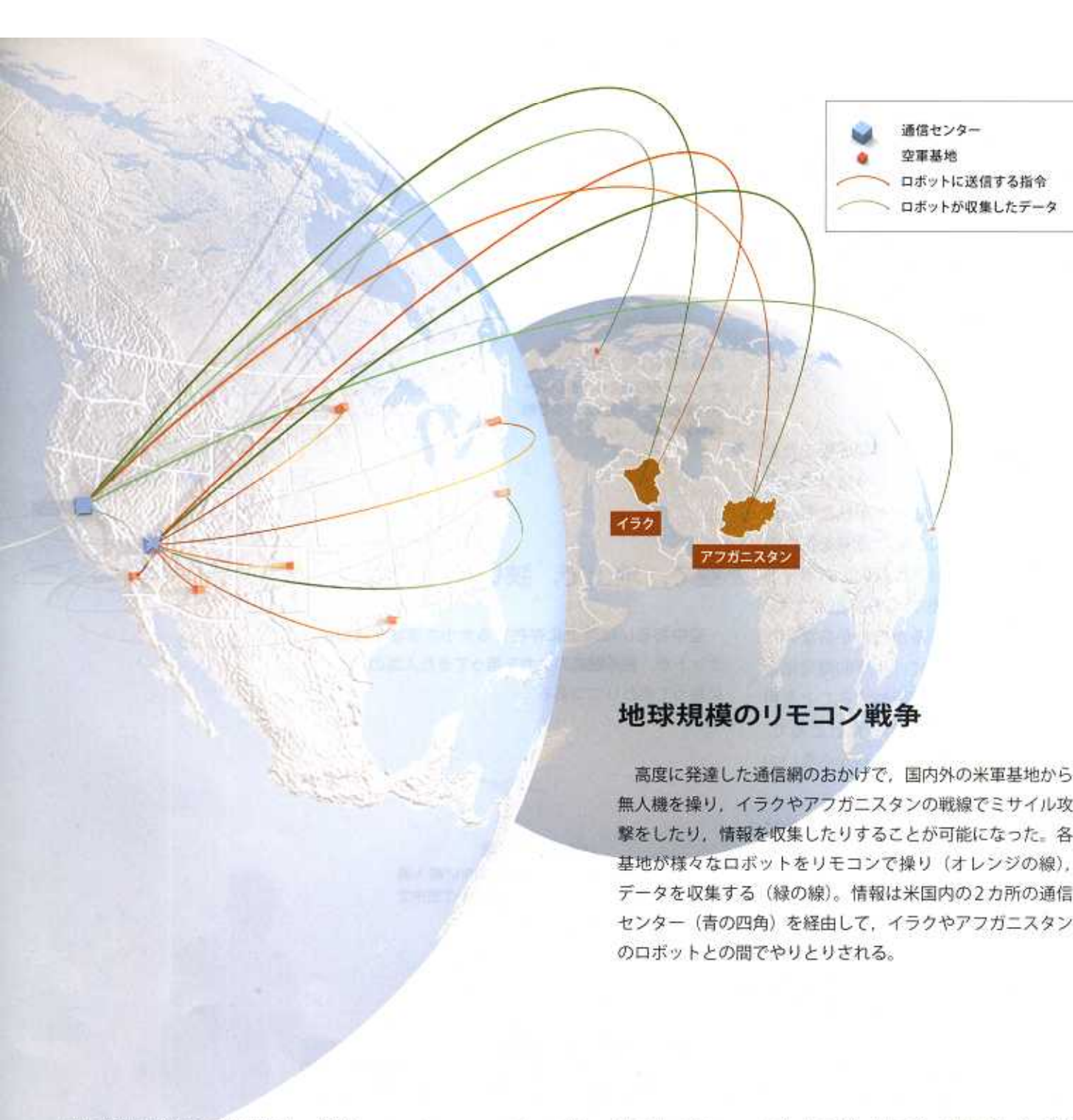
地上車「マース」

重量160kg。機関銃と擲弾発射筒を備え、哨兵と狙撃兵の役割をこなす。

ケムボット

手のひらサイズのスライム状ロボット。変形して壁穴に潜り込み、隣室の様子をスパイする。





地球規模のリモコン戦争

高度に発達した通信網のおかげで、国内外の米軍基地から無人機を操り、イラクやアフガニスタンの戦線でミサイル攻撃をしたり、情報を収集したりすることが可能になった。各基地が様々なロボットをリモコンで操り（オレンジの線）、データを収集する（緑の線）。情報は米国内の2カ所の通信センター（青の四角）を経由して、イラクやアフガニスタンのロボットとの間でやりとりされる。

外な新技術が次々と実用化し、戦闘に使われた。実際、時の海軍大臣チャーチル（Winston Churchill）が戦車の開発を支持したのは、H. G. ウェルズの1903年の短編『陸の甲鉄艦』に触発されたためだったし、人気小説『クマのプーさん』の作者A. A. ミルンは、飛行機を戦争に使うというアイデアを提唱した1人だ。シャーロック・ホームズを生んだコナン・ドイルは1914年の短編『危険！』で、ジュール・ベルヌは1869年発表の『海底二万マ

イル』で、ともに戦争で潜水艦が活躍する姿を、他に先駆けて描いた。

新技術は先に使った方が優位に立てるが、それもほんの束の間だ。英国は戦車を発明し、第一次世界大戦で活用したが、わずか20年後に、戦車のもっと効果的な使い方を編み出して電撃戦をしかけたドイツに敗れた。

戦車、航空機、潜水艦の出現は重要な意味を持つが、それは政治的、人道的、法的にまったく新しい数々の問題を提起し、その結果、劇的な変化が起

きたからだ。例えば、潜水艦による戦闘が法的にどこまで許されるのか（潜水艦は商船を警告なしに撃沈してよいのか）という問題を巡って米国とドイツの間で見解が分かれたことが、米国が第一次世界大戦に参戦するきっかけを作った。そして、米国が超大国の地位を獲得することにつながった。

同様に、航空機はより遠くから敵の部隊を見つけて攻撃することを可能にしたという点で有用だったが、空爆という手法も生み出した。それはしばし

ば一般市民の頭上に爆弾が降り注ぐ事態を引き起こし、「銃後」という言葉の意味を一変させた。

複雑化する現実

軍事ロボットの登場も、これと同様の激変をもたらすだろう。「戦争を始める」という言葉が、これまで何を意味してきたか、考えてみるとよい。民主主義国家において、それは長年、市民や子どもたちの生命のみならず、国家そのものをも危険にさらす試みに敗れて乗り出す重大な決断であり、国民の支持が必要だった。だが無人システム(とそれによる遠隔地への軍事攻撃)には、こうした国民感情による抑止力が働かない。米国では1979年に徴兵制度が終了した時から、抑止力の低下が始まっていた。

危険な戦地から生身の兵士を遠ざければ、開戦は容易になり、戦争に対する見方すら変わってしまいかねない。例えば米国は無人機のプレデターとリーパーによるパキスタン空爆をすでに130回以上行っているが、これは10年前、コソボ紛争の初期に有人飛行機で行った空爆の3倍以上の回数だ。しかもコソボ紛争の時と違って、パキスタンでのロボット空爆は議会で議論されることもなく、マスコミ報道もほとんどなかった。重要なことは、私たちはかつて「戦争」と呼んでいた行為に、社会的な論議もなしに踏み込んでしまっているということだ。

おそらく、この空爆は「戦争」であると認識すらされていないだろう。米国市民の生命に何ら影響しないからだ。見方によっては、こうした無人空爆は大きな成果を上げている。米国の陸軍部隊や航空隊を危険地域に送ることなく、アルカイダやタリバンなど武装勢力のリーダーを40人は殺害したのだ。しかしこれらの攻撃は、いまだ答えが出ていない問題を提起している。

例えばこの技術は、私たちが「思想

戦」と呼んでいる、テロリストの募集やプロパガンダに対する闘いにどのような影響を与えるだろうか。目標だけを精密に狙うための苦心の努力が、地球の反対側に到達した途端に、怒りと誤解をかき立ててしまう現実をどう考えればよいのだろうか。

米国のメディアはロボット技術を紹介する際「正確な」とか「犠牲を伴わない」といった表現を使うが、パキスタンの大手新聞社は、無人空爆をした米国を「最も憎むべき相手」、「あらゆる罪を背負って死すべし」と断じた。無人機を表す「ドローン」(drone)という単語はウルドゥー語(パキスタンの公用語)の俗語となり、ロックの歌詞の中で、名誉の戦闘から逃げ出した米国を非難する意味で使われている。

この問題は、誤爆などの間違いが起きた時に誰がどこまで責任を負うべきかを判断する際、一層複雑になる。ロボット空爆による一般市民の推定犠牲者は200人から1000人だった。だがこうした事故の多くは、極めて危険なテロの指導者のごく近くで発生している。一体、どこに線を引けばよいのだろうか？

2010年の今、「戦争する」という言葉は、兵士個人にとっても意味が変わりつつある。戦地に赴くということは、これまで常に、再び故郷の地を踏めないかもしれないことを意味していた。アキレスとオデュッセウスは、トロイと戦うために出帆した。私の祖父は真珠湾が攻撃された後、日本軍と戦うために海を渡った。

リモコンでできる戦争は、過去5000年間変わらなかった戦争の実態を変えた。朝起きて、車で出勤し、コンピューターの前に座ってロボットシステムを操作し、1万1300km離れた反政府勢力と戦う——そんな兵士が増えつつある。その日の「交戦」が終われば車で帰宅し、「20分もすれば夕食を囲んで子どもたちとおしゃべりしている」

と、ある米空軍将校は語る。一日のうちで最も危険なのは戦場で戦っている時ではなく、帰宅のため車を運転している時だ。

こうした戦場との断絶は、戦争において誰が何をするかという役割分担の変化をもたらすと同時に、兵士のアイデンティティーの問題(かつて士官にのみ許されていた任務を若い下士官が担っている)や、職責の問題(兵士なのか技術者なのかわからなくなる)、戦闘のストレスや疲労の質の問題などを引き起こす。ロボットの操縦者たちは一見テレビゲームで遊んでいるように見えるが、実際は現地の人々の生命が、彼のロボット操作の正確さにかかっている。来る日も来る日も戦い続けると、神経がすり減る。指揮官たちも、遠隔操作で戦う部隊を率いることは戦場で生身の部隊を率いるのとはまったく異なり、時にははるかに困難である、と語っている。

ロボットの知能と攻撃の精度が高まるにつれ、戦争における「マン・イン・ザ・ループ」(訳注:制御システムにおいてプロセスの決定にかかわる人間)の役割は次第に縮小している。例えば、飛んできた敵のロケット弾やミサイルを迎撃できるスピードを持つのは、迎撃ロボットC-RAM(スターウォーズに登場するR2-D2に似た外見で、20ミリの自動機関砲を備える)だけだ。現代の戦争のスピードは、それくらい速い。

人間は確かに意思決定にかかわっているが、それは主としてロボットのプログラム段階においてだ。実際に操縦している最中に人間ができるのは、ロボットを止めることだけ。しかもロボットの決定を覆すかどうか判断する時間は、わずか0.5秒しかない。ロボットが下した判断の方がより適切だと思いがちで、あえて変更する人は少ない。

人間の判断が介入する機会が減ると誤爆などのミスが減少し、戦争関連の

法規も遵守されるようになるとみる関係者は多い。コンピューターのプロセッサがソフトの命令を守るようにだ。だがこうした考えは、戦争における状況の複雑さを無視している。無人システムは、1km先からAK-47ライフルを担いだ人間を見つけ出し、銃の熱痕跡から発砲直後かどうかを判断することはできるかもしれない。だがそれが反政府兵か、同盟相手の武装組織メンバーか、単なる商人なのかを判断するのは難しい。人間にも難しいが、ロボットにとっても同じことだ。

元国防長官のラムズフェルド(Donald H. Rumsfeld)らデジタル戦争の推進者はかつて、昔からの問題である「戦場の霧」を技術によって晴らすことができると信じていた。だが、それは間違いだ。高性能なはずの迎撃システムC-RAMさえも、以前、プログラムエラーのせいで米軍のヘリコプターを敵機と誤認したことがあったとされる。幸いケガ人は出なかったが、2007年には南アフリカ共和国で、よく似た防空システムに調査報告書の言葉を借りれば「ソフトウェアの不具合」が起き、大惨事をもたらした。システムに備えた35ミリ砲を、訓練のために上空に発射することになっていたが、実際には水平方向にぐるりと回転しながら弾が尽きるまで撃ち続け、9人の兵士を殺してしまった。

こうした事故は、当然ながら重大な法的問題を提起する。誰が、どこまで責任を負うべきか。いったいどんな法体系に基づいて、この問題を考えればいいのか。こうした事例は、社会制度が技術の進歩に追いついていないことを浮かび上がらせる。20世紀の戦争関連法規を、この新たな現実、どう合わせていけばいいのだろうか。

新時代の始まり

戦争とは何か。それは誰が、どう戦うべきなのか。戦争の定義や戦争に対

する理解は、驚くべき能力を持つ新技術の登場で大きく揺らいでいる。

人類はこれまでに何度も、同じような状況に立たされてきた。新技術が登場すると、それを理解し、取り込むにはしばしば大変な努力が必要になる。だが、当初は奇妙で受け入れがたいと

ロボット技術の精度が向上しても、「戦場の霧」が晴れることはない

思われたことも、やがてはごく当たり前のことになる。かつて1400年代に、あるフランスの貴族が、銃は人殺しの道具であって真の兵士が使うべきものではない、と主張したのが良い例だ。彼は、銃なんか使うのは「離れたところから卑怯にも弾丸で相手を倒し、その顔を見ることもできない臆病者だけだ」と書き綴っている。

以来、ロボットの技術は「進歩」したが、ロボットを巡る事情は大して変わらない。技術を使いこなすこと自体より、超高性能ロボットが引き起こす政策的ジレンマに向き合う方がはるかに難しい。ロボット技術は世界すら変えかねない。まさにそうした理由で、ロボット技術が人類にもたらしたものは、銃や航空機どころか、原子爆弾に

匹敵すると考える研究者もいる。

私たちは科学の限界を広げる素晴らしい技術を生み出しつつあるが、それが生む問題は、科学の守備範囲を超えている。いずれ、そんな技術を作ってしまったことを後悔することになるかもしれない。かつて核弾頭を開発した技術者たちがそうであったように。

今日のロボット開発者たちも1940年代に核弾頭を開発した技術者たちと同じく、最先端科学だからというだけでなく、軍事に役立つし、金になるからという理由で開発を続けている。アインシュタインはかつて「もしわれわれが自分たちが何をやっているのかを知っていたら、それは『研究』とは呼ばれなかったろう。違うかね?」と問いかけた。

確かなことが1つある。かつてSFのネタでしかなかったことが現実の問題となり、ペンタゴンの外でも真剣に議論すべき時に来たということだ。この問題は、ロボット企業の会議やロボット開発の研究所、ロボットが活動する戦場だけの問題ではない。ロボットのある世界で、いかに人間性を実現していくかという問題なのだ。戦争は5000年の長きにわたり、人類の専売特許だった。だがその時代は、もはや過ぎ去ったのである。

(翻訳協力:長尾武彦)



著者 P.W.Singer

ブルッキングス研究所の21世紀国防計画のリーダーであり、7月に日本でも出版された著作『ロボット兵士の戦争』(下欄を参照)の原書、"Wired for War: The Robotics Revolution and Conflict in the 21st Century" (<http://wiredforwar.pwsinger.com/>)は、米国で2009年のベストセラーとなった。

原題名

War of the Machines (SCIENTIFIC AMERICAN July 2010)

もっと知るには...

『ロボット兵士の戦争』, P.W. シンガー著, 小林由香利訳, NHK出版, 2010年, 3570円(税込) BOMBS AWAY, The Economist, Technology Quarterly, page 13; March 4, 2010.

THE REGULATION OF NEW WARFARE. Peter W. Singer. Brookings Institution.

http://www.brookings.edu/opinions/2010/0227_defense_regulations_singer.aspxで入手可能



●A4変型判 ●144頁 ●2100円(税込)

好評発売中

お近くの書店でお求めください。
品切れの場合は書店にご注文ください。
当社へ直接ご注文の場合は、
本代のほかに送料を頂戴いたします。
お問い合わせ、ご注文は、電話、FAX
またはホームページからどうぞ。

数学は楽しい Part 2

編者 瀬山士郎(群馬大学教授)

CHAPTER 1

遊び 美しさの発見

ルービックキューブを超えて
群論パズルを楽しむ
シャボン玉の幾何学
お手玉の科学

CHAPTER 2

コンピューター 計算機械にみる数学史

150年目に完成した
バベジの計算機
19世紀のプログラマー
バイロンの娘エイダ
計算尺を知っていますか
コンピューターの真の発明者
アタナソフ
収容所で生まれた
世界初のポケット計算機

CHAPTER 3

数 無限の彼方へ

無限とは何か
ゼノンのパラドックスを解く
ゲーデルを超えて
オメガ数が示す数学の限界

CHAPTER 4

数学の歩み 現代数学の萌芽

4色問題の解決
ガウスの業績
ゲーデルと論理学の限界

数学は楽しい

編者 瀬山士郎

好評
発売中

CHAPTER 1

数 天才たちの挑戦

フェルマーの最終定理
フェルマー最後の反撃
素数を求めて
乱数のパラドックス

CHAPTER 2

形 3次元の不思議

ついに証明された? ポアンカレ予想
結び目の理論

CHAPTER 3

遊び 究極の娯楽

レクリエーション数学の楽しみ
数独の科学
算額に見る江戸時代の幾何学

CHAPTER 4

数学とは 現代数学の姿 構成的数学

証明は死んだ
アルゴリズムの有効性



●A4変型判 ●144頁 ●2100円(税込)

子どもの意外な “脳力”

無知に見える赤ちゃんや幼児でも
科学者の予想を上回る学習能力を持っていることが
明らかになってきた

A. ゴブニツク (カリフォルニア大学バークレー校)

写真: T. アーチボルト

30年ほど前には、心理学者や哲学者、精神科医のほとんどが、赤ちゃんや幼児は理不尽で自分本位なうえ、道徳概念がないと考えていた。子どもは“ここ”と“今”という枠に縛られていて、因果関係を理解できず、他者の経験を想像することも、現実と空想を区別することもできないと思われていた。いまだに子どもを未完の大人と考える人は多い。

だがこの30年間で、ごく小さな赤

ちゃんでさえ私たちの想像以上にさまざまな知識を持っていることがわかってきた。さらに、子どもは科学者のように実験をしたり、統計的に分析したり、物理や生物、心理に関する理論を直観的に組み立てたりしながら、周りの世界について学んでいることも明らかになってきた。

2000年頃から、このような幼い子どもの優れた能力を支えるメカニズムについて、コンピューター科学や進化、

神経科学の観点を取り入れた研究が行われるようになった。こうして得られた画期的な発見は、赤ちゃんや幼児に対する私たちの概念を変えただけでなく、人間の本質についての新たな見解をもたらした。

自然の法則がわかる

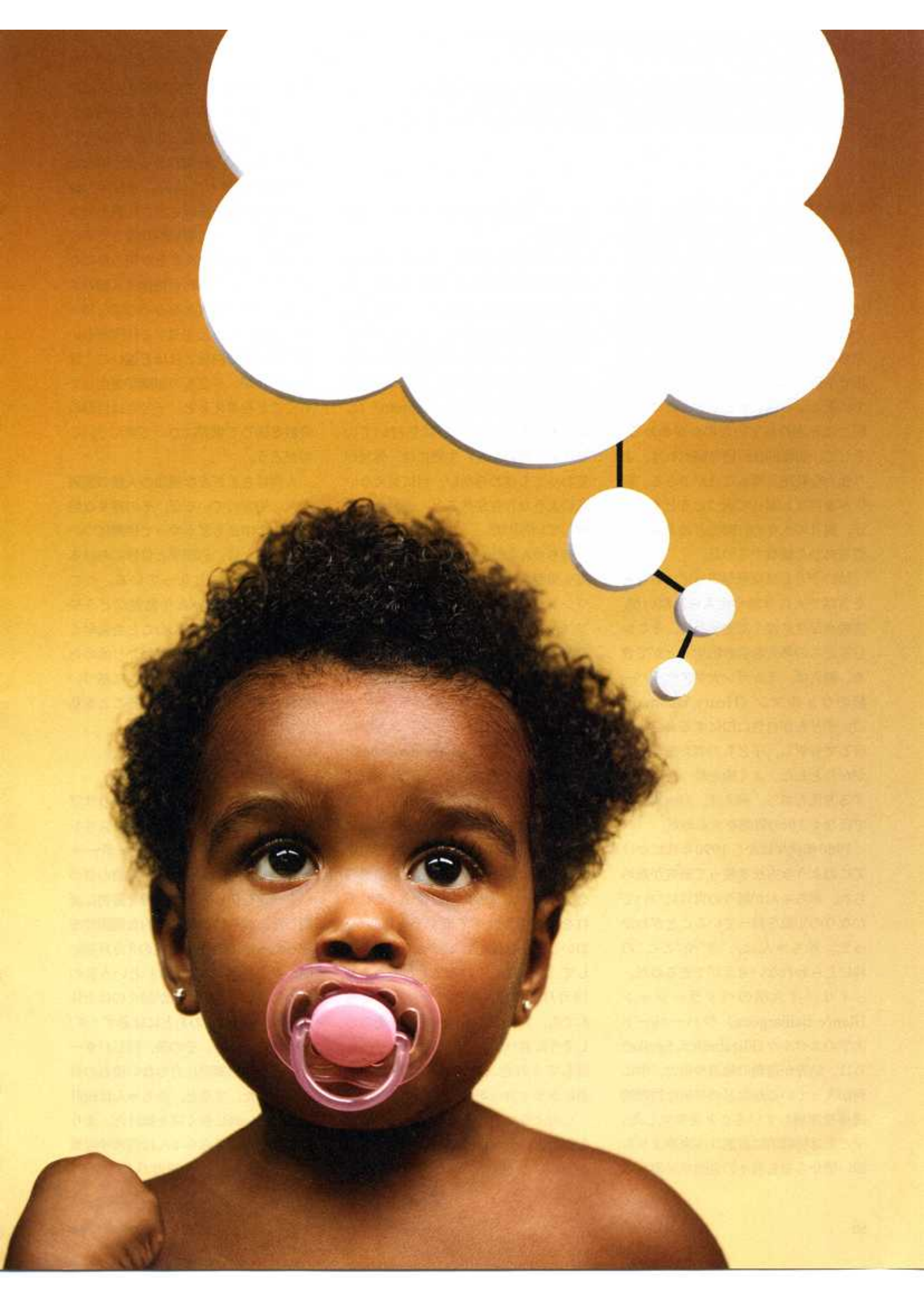
なぜ私たちはこんなにも長く赤ちゃんについて間違った見方をしていたのだろうか？ 4歳以下の幼児（この記事ではこの年齢の子どもについて述べる）をぱっと見ただけなら、たいしたことは何もしていないと思えるだろう。なにしろ、赤ちゃんはおしゃべりができない。5～6歳の子どもですら自分の考えを言葉で表現するのが上手いとは言いがたい。平均的3歳児に自由に答えさせるような質問を投げかけると、ある意味面白いが、思いついたことを連ねただけの不可解な独り言が返ってくるだろう。

この分野の先駆者であるスイスの心理学者ピアジェ(Jean Piaget)などの初期の研究者は、子どもの思考自体が不

KEY CONCEPTS

実験し、分析しながら学んでいく

- 赤ちゃんや幼い子どもは、心理学者の予想をはるかに超えた認知能力を持っていた。例えば、他者の経験を想像することや、原因と結果の関係を理解することもできる。
- 子どもは、科学者のようなやり方で世界について学ぶ。実験したり、統計的な分析をしたり、観察した結果を説明するための理論を作り上げることでもできる。
- 人間は無力な幼児として過ごす期間が他の種に比べて非常に長い。学習や創造に必要な脳の神経回路を築くために必要な期間として、進化の過程で設けられたのだろう。



赤ちゃんは奇抜で予想外の出来事を長く見つめる そうした行動を観察すれば、予測していたことがわかる

合理で非論理的、自己中心的で、原因と結果の概念すらない“因果関係がわかる以前”のレベルだと結論づけた。

1970年代後半になると、新しい手法として、赤ちゃんや幼児の話の内容ではなく行動に注目するようになった。赤ちゃんは予測できることに比べ、奇抜で予想外の出来事を長く見つめるので、そこから赤ちゃんがどんなことが起こると期待していたのかわかる。そして、積極的な行動を調べれば、より強力な証拠を得ることができる。何に手を伸ばし這って近づこうとするのか、周りの人々の行動をどのように真似るのかを観察するのだ。

幼い子どもは自分が思っていることを言葉で人にうまく伝えられないが、実験者が注意深く工夫すれば、そこから子どもの考えを引き出すことができる。例えば、ミシガン大学アナーバー校のウェルマン（Henry Wellman）は、子どもが自然に口にする会話を録音して分析し、子どもの考えを知る手がかりとした。よく的を絞った質問をする方法もある。例えば、自由回答式ではなく2択の質問をするのだ。

1980年代半ばから1990年代にかけてこのような方法を使って研究が進められ、赤ちゃんが周りの世界についてかなりの知識を持っていることがわかった。赤ちゃんは、“今”や“ここ”の枠にとらわれない考えができるのだ。

イリノイ大学のバイラージョン（Renée Baillargeon）やハーバード大学のスペルク（Elizabeth S. Spelke）らは、幼児が運動の軌道や重力、中に何が入っているかなどの単純な物理的関係を理解していることを発見した。子どもは物理的に自然な出来事よりも、固い壁からおもちゃの自動車が現れる

といった不思議な現象をより長い時間見つめる。

3～4歳になるころ、子どもは生物学的な基礎知識を得て、成長や遺伝、病気について理解し始める。このような理解力があることから、子どもが見た目より深いところから物事について推論しているのがわかる。ミシガン大学のゲルマン（Susan A. Gelman）は、幼児が動植物の“本質”に気付いていることを発見した。生物には、外見が変わっても変わらない、目に見えない芯のような存在があると、子どもは理解しているのだ。

赤ちゃんや幼児が知っていることで最も重要なのは、他者に関する知識だ。ワシントン大学（シアトル）のメルゾフ（Andrew N. Meltzoff）は、新生児でも人間は特別な存在であることを理解していて、人の表情を真似ることを示した。

1996年に、現在ワシントン大学にいるレパチョリ（Betty Repacholi）と私はある発見をした。18カ月児は他者が自分とは違うものを欲している場合があることを理解できるのだ。

実験で、14カ月児と18カ月児に生のブロッコリーが入った器と金魚形のクラッカーの入った器を見せ、それぞれをいくつか食べてまずそうな顔か、おいしそうな顔をして見せた。手を出して「少し私にくれる？」と尋ねると、18カ月児は自分用にクラッカーを選んでも、実験者がブロッコリーをおいしそうに食べたときはブロッコリーを渡してくれた（14カ月児は常に実験者にクラッカーを渡した）。

このように、これほど幼い子どもでも完全に自分本位ではなく、立場に身を置くことができる。4歳ごろまでに、

人々の心理についての理解をさらに深める。例えば、ある人が変な行動をしているのは何か間違った思い込みをしているからだと解釈できるようになる。

20世紀の終わりには、赤ちゃんはかなり論理的で洗練された知識を持ち、成長するにつれて驚異的な速さでその知識を増やしていくことが明らかになっていった。赤ちゃんが物体や人間のふるまいについて大人なみの知識を持って生まれてくると主張する研究者もいる。新生児が白紙とはほど遠いことは明らかだが、子どもの知識が変化していくことを考えると、子どもは自分の経験を通じて世界について学んでいるのだろう。

人間はさまざまな種類の大量の情報を常に知覚しているが、その雑多な情報の山の中からどうやって世界について学ぶのかは、心理学と哲学における最大の謎の1つとなっている。ここ10年間で、赤ちゃんや幼児がどうやってこれほどたくさんのことを素早く正確に学んでいるのかわかり始めた。子どもには特に統計パターンに基づいて学習する優れた能力があることを私たちは見いだした。

統計から学ぶ

1996年、ロチェスター大学のサフラン（Jenny R. Saffran）とアスリン（Richard N. Aslin）、ニューポート（Elissa L. Newport）は、言語の音のパターンを使ってこの能力を最初に証明した。彼らはある統計的な規則性を持った一連の音節を数人の8カ月児に聞かせた。例えば、「ロ」という音のあとに「ビ」という音が続くのは全体の1/3だが、「ビ」のあとには必ず「ダ」という音がくる。その後、同じパターンの音とこの規則に合わない流れの音を聞かせた。すると、赤ちゃんは統計的に珍しい音に長く耳を傾けた。より最近の研究で、赤ちゃんは楽音や視覚的な場面についての統計パターンや、

さらに抽象的な文法パターンも見つけられることがわかった。

赤ちゃんは統計の標本と母集団の関係を理解することもできる。2008年、カリフォルニア大学バークレー校の私の共同研究者シュー (Fei Xu) は、白と赤のピンポン玉を使って実験をした。8カ月の赤ちゃんに白と赤の玉を4対1の割合で入れた箱を見せ、そこから無造作に5個の玉を取り出す。すると赤ちゃんは、赤玉4個と白玉1個を取り出した(確率的に低い)ときの方が、白玉4個と赤玉1個を取り出したときよりも驚いていた(その状況をより長い時間じっと見つめた)。

統計パターンを見つけ出すことは、科学的発見に至るまさに第一歩だ。さらに驚くことに、子どもは(科学者のように)統計に基づいて周囲の世界に関する理論を組み立てる。

私たちは20カ月の赤ちゃんを対象に、ピンポン玉を緑のカエルのおもちゃと黄色いアヒルのおもちゃに変えて実験を行った。実験者が箱から5個のおもちゃを取り出した後、テーブルの上のおもちゃの中からどれか1つをちょうだいと子どもに頼んだ。カエルのおもちゃが多い箱からカエルをたくさん取り出した場合、子どもが選ぶ色に傾向は見られなかった。だが、その箱からアヒルをたくさん取り出したとき、子どもはアヒルを選んで実験者に渡した。どうやら子どもは、実験者が確率の低い選択をしたのは、無作為に選んだわけではなくアヒルを好きだからだと考えたようだ。

私の研究室では、幼児が因果関係を理解するために統計データと実験をどのように使うのかを調べてきたが、子どもの思考能力は“因果関係がわかる以前”のレベルをはるかに超えていることが明らかになった。

私たちは「ブリケット探知機」という装置を使って実験した(53ページの写真)。この装置を子どもに見せ、



赤ちゃんは統計学の達人 赤ん坊は統計分析が得意だ。8カ月の赤ちゃんに主に白い玉が入った箱の中から数少ない赤い玉を取り出して見せると、赤ちゃんは確率的に起こりにくい結果に驚くことがわかった。赤と白の玉の割合を逆にするなど、設定を変えたさまざまな実験から、別の理由(赤ちゃんは赤い玉に興味を持つなど)は否定されている。20カ月の子どもに緑と黄色のおもちゃを使って実験した場合、ある人が少ない色のおもちゃをたくさん取ると、子どもはその人がその色のおもちゃを欲しがっていると考え、このようにして、赤ちゃんや幼児は科学者のように統計パターンを見つけ出し、そこから結論を引き出すことによって、周囲の世界について学んでいる。

ある物(ブリケット)をのせると光って音楽が鳴ると説明する。次に、この装置にいろいろな物をのせて装置の作動パターンを見せ、子どもたちがどのような因果関係を引き出すか調べる。さあ、ブリケットはどれかな?

2007年に、現在はコーネル大学にいるクシニル(Tamar Kushnir)と私は、未就学児がその装置を動かす方法を確率から学ぶことを発見した。私たちは、2つの積み木のうち1つを繰り返し置いて見せた。黄色い積み木を

置くと、装置は3回のうち2回光ったが、青い積み木の場合は3回のうちの1回だけ光った。次に積み木を子どもたちに渡し、装置を光らせてと頼んだ。子どもたちはまだ足し算引き算ができないにもかかわらず、確率の高い黄色の積み木を置くことが多かった。

積み木を装置に触れずに上方で振って装置を作動させた場合、子どもたちは作動確率の高い積み木を正しく選んだ。子どもたちは実験の開始時点では、このような“遠隔作用”はありえない

と考えていたが（子どもたちに尋ねて確認した）、子どもたちは確率を使い、まったく新たな驚くべき事実を発見するに至ったのだ。

別の実験で、現在はマサチューセッツ工科大学にいるシュルツ（Laura Schulz）と私は、スイッチが1つと上部に2つの歯車（青と赤）がついたおもちゃ（下の写真）を4歳児に見せた。スイッチを入れると歯車が2つとも回るという簡単なおもちゃなのだが、どのようにして歯車が回るのか、さまざまな可能性が考えられる。例えば、スイッチが入ると両方の歯車が回転するのかもしれないし、スイッチで青い歯車が回転し、それによって赤い歯車が回るのかもしれない。

私たちは子どもたちに、こうした動き方を描いたイラストをいくつも見せ

た。例えば赤の歯車が青の歯車を押し回している図だ。次に、そのうちのある方法で動くおもちゃを見せ、それがどう動いているかを示すやや複雑な手がかりを与えた。例えばこの因果連鎖おもちゃの青の歯車を取り除いてからスイッチを入れても赤の歯車は回るが、赤の歯車を取り除いてからスイッチを入れると何も動かない。

次に、子どもたちにそのおもちゃに合った動き方のイラストを選んでもらった。4歳児は、私たちが見せた手がかりに基づいて、驚くほど上手におもちゃの動き方を当てることができた。さらに、何の説明もなくおもちゃを渡された子どもは、歯車が動く仕組みを探るように遊んでいた。その様子はまるで実験をしているみたいだった。

シュルツは別の実験で、アヒルか人

形が飛び出す2つのレバーがついたおもちゃを使った。未就学児のグループに、一方のレバーを押すとアヒルが出て、もう一方を押すと人形が出るところを実演して見せた。別のグループには、両方のレバーを同時に押すと両方のおもちゃが飛び出すのを見せたが、レバーを別々に押すとどうなるかは見せなかった。それから子どもたちをおもちゃで遊ばせた。

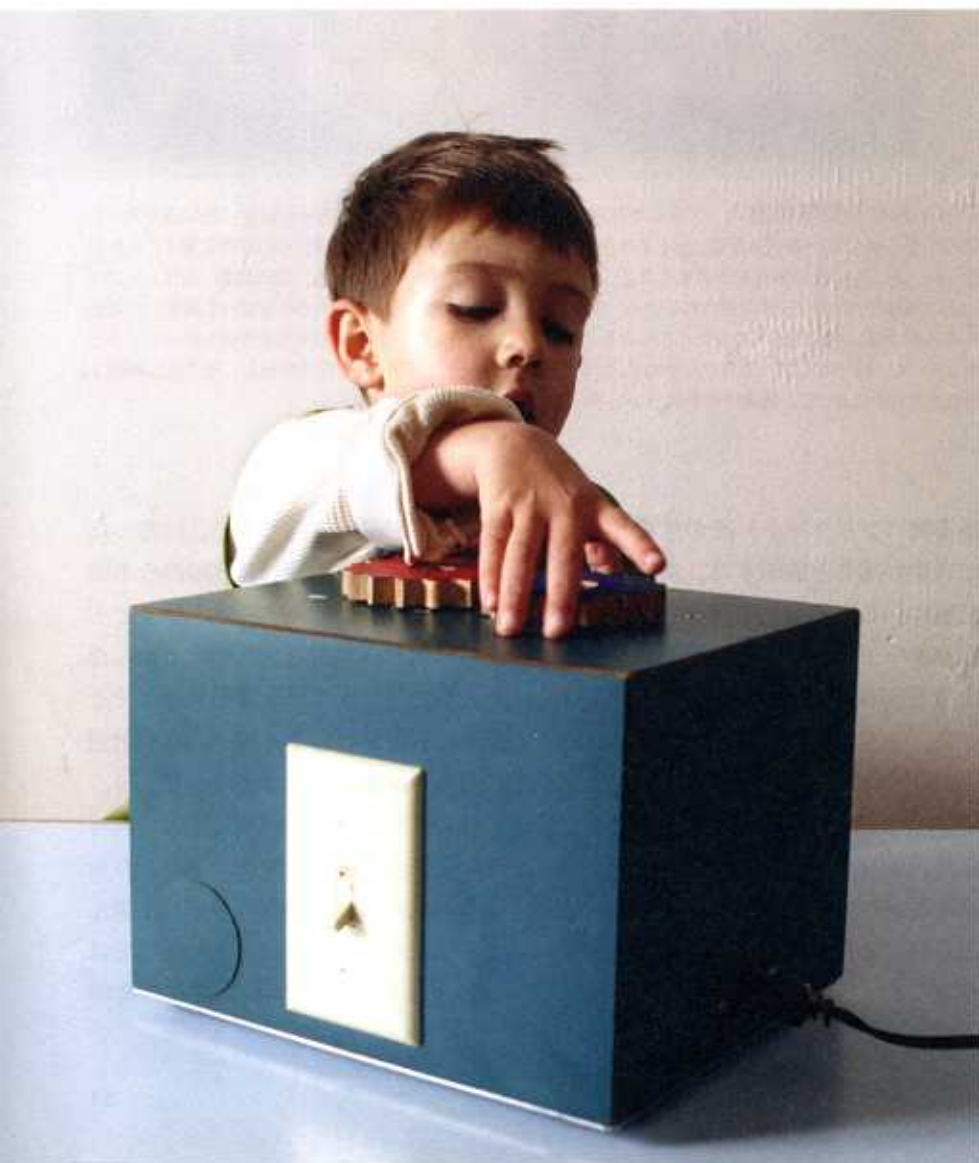
最初のグループの子どもたちは2番目のグループの子どもたちに比べ、おもちゃで遊ぼうとしなかった。おもちゃがどう動くかをすでに知っていて、仕組みを探ることにあまり興味がなかったからだ。ところが2番目のグループは謎に直面したため、自発的におもちゃで遊び、どのレバーが何をするのかをやがて探り当てた。

これらの研究結果から、子どもたちが自発的に（“ものすごく熱中して”）遊んでいるときは、因果関係を調べたり、実験を行ったりしていると考えられる。実験は世界の仕組みを知るための最良の方法だ。

赤ちゃんコンピューター

子どもが本当の科学者のように意図して実験や統計分析を行っているわけではないことは明らかだが、子どもの脳は科学的発見をすると同様の方法を無意識に使って情報を処理しているに違いない。認知科学では、脳は進化

根っからの実験家 4歳児は得られた手がかりから因果関係を理解するのがうまい。例えば、装置についた2つの歯車のうち一方が別の歯車を回しているかどうかを上手に探り当てることができる（左の写真）。おもちゃで自由に“遊び”つつ、正しい実験（と正しい理論の組み立て）を行う子どももいる。積み木をおる組み合わせで置くの高い確率で光る「ブリケット探知機」（右ページ）という装置を使った研究で、4歳児が統計に基づいて装置の働き方を理解していることがわかった。装置がそれまでにない予想外の反応をしても、きちんと考えることができた。それどころか、装置が積み木に対して変わった反応を示した場合には、子どもは大人よりも自由な発想で対応した。



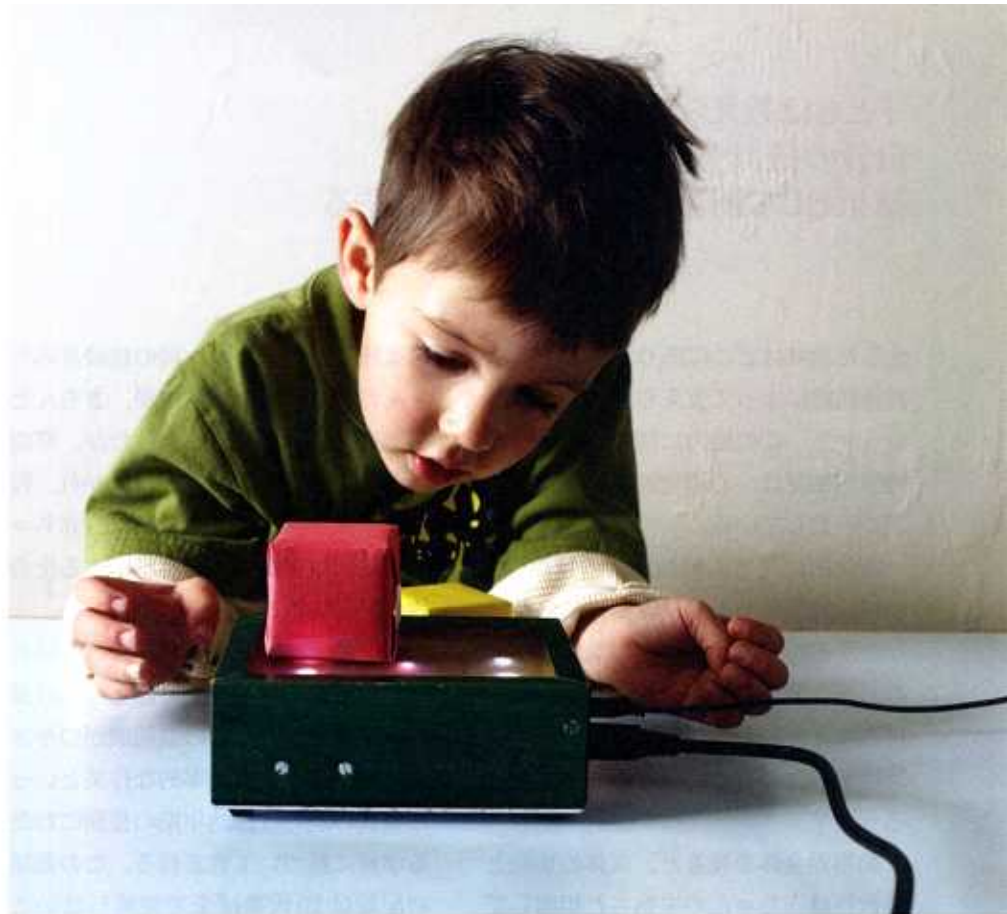
によって設計され経験によってプログラムされるコンピューターのようなものだという考え方が基本としてある。

情報工学や哲学の分野では、科学者や子どもの強力な学習能力の解明に向けて、数学の確率的な概念を取り入れ始めた。機械学習用のコンピュータープログラム開発のためのまったく新しいアプローチとして、「確率論的モデル」が使われている。「ベイズモデル」とか「ベイズネット」とも呼ばれている。このプログラムは複雑な遺伝子発現の問題を解くこともできるし、気候変動の理解に役立つこともある。この手法によって、子どもの脳内コンピューターがどう働くのかについて新たな概念が生まれた。

確率論的モデルでは2つの基礎的な考え方を組み合わせる。まず、子どもが物事や人、言葉に関して持ちうる仮説を数学的に表す。例えば、因果関係についての知識を事象と事象とを結んだ図で表すことができる。「青いレバーを押す」から「アヒルが飛び出す」に矢印をひけば、仮説を表現できる。

次に、仮説と各事象が起こる確率とを体系的に関連づける。事象が起こるパターンは科学では実験や統計分析から導かれる。データによく合う仮説がより高い可能性を持つ。私は、子どもの脳はこれと同じような方法で、周りの世界についての仮説を確率パターンと関連づけていると考えてきた。子どもの推論の仕方は複雑かつ鋭くて、単純な関係や規則では説明できない。

さらに、子どもが意図せずにこうしたベイズ統計解析をしているとき、異常な事例を考慮に入れるという点では大人よりもむしろ上手なようだ。今年後半に学会で発表予定の研究で、私たちは4歳児と大人にブリケット探知機を見せた。この装置の動かし方は少し変わっていて、2個の積み木をいっしょに置く必要がある。その方法を探り当てるのは、大人より4歳児の方がう



まかった。大人はそれまでの知識に頼りすぎて、目の前の装置はそれに当てはまらないことを示しているのに、普通そんな動き方はしないと考えてしまうようだ。

私のチームが最近行った別の研究では、子どもは教えられていると思うと、自分の統計分析を変えてしまい、その結果として創造性が低下する場合もあることがわかった。実験者は4歳児に正しい一連の操作をすれば音楽が鳴るおもちゃを見せた。例えば、ハンドルを引いてから球状部を握るといった操作をすればよい。

何人かの子どもに「私はおもちゃをどうすれば音楽が鳴るのかわからない。みんなで調べてみよう」と言って、少し長い一連の操作をいくつか試して見せた。長い操作の最後に行う短い操作によって、音楽が鳴る場合と鳴らない場合がある。さあ、おもちゃを鳴らしてみせると言うと、多くの子どもが必要とされる短い操作だけを試し、自分

で見た統計に基づいて不要だと思われる部分をちゃんと省いていた。

別の子どもたちには「おもちゃの動かし方を教えるね。どういうときに音楽が鳴って、どういうときに鳴らないか見ていてね」と言って、先ほどとまったく同じ長い操作をやって見せた。それからおもちゃを鳴らしてと頼むと、子どもたちは「近道」をせずに、長い操作の全部をまねた。自分で見たことについての統計を無視したのだろうか？ おそらくそうではない。この行動はベイズモデルできちんと説明できる。彼らは「先生」が最も役に立つ操作を行うと予想したのだ。平たく言えば、もし先生がもっと短い操作を知っているなら、不要な操作を見せたりしないだろうという考えだ。

進化で得た学習戦略

脳が進化によって設計されたコンピューターだとすれば、非常に幼い子どもに見られる並はずれた学習能力が進

子どもは教えられていると思うと 自分の統計分析を変えてしまい 結果として創造性が下がる場合がある

化した意味はどこにあり、どのような神経回路によって支えられているのだろうか？ この能力に関する最近の生物学的知見は、心理学的な研究結果とよく一致している。

進化的に見て人間の最大の特徴の1つは、成熟するまでに非常に長い時間がかかることだ。私たちの幼年期は他のどんな種よりも長い。なぜ赤ちゃんはこれほど長いあいだ無力で、大人の助けを必要としなければならないのだろうか？

動物界全体を見ると、成体の知能と柔軟性は赤ちゃんの未熟さと相関している。ニワトリなどの「早成」種は、特定の環境に適応する特殊な能力を生まれるがらに持っていて、この能力に頼って生きているため成熟が速い。

一方、子が親の世話を必要とし、親から餌をもらわなければならない「晩成」種は、学習に基づいて生きている。例えば、カラスは1本の針金など初めて目にした物体を道具として使う方法を考え出すことができるが、カラスのヒナが親を頼る期間はニワトリよりもはるかに長い。

学習には多くの利点があるが、学習を成し遂げるまでは無力だ。進化はこの問題を赤ちゃんとは大人の間で分業することによって解決した。赤ちゃんは保護されているあいだ、他には何もせずただ周囲の環境について学ぶ。成長してからは、学んだことを利用して生き延び、繁殖し、次世代を育てる。基本的に、赤ちゃんは学ぶようにできているのだ。

神経科学的にも、この学習を可能にする脳の仕組みの一部が明らかになってきた。赤ちゃんの脳は大人の脳より

も柔軟だ。ニューロン間の接続は赤ちゃんの方がはるかに多いが、きちんと機能しているものはない。だが、時間とともに使われない接続が除かれ、役立つ配線が強化される。また、赤ちゃんの脳には接続変更を容易にする化合物が豊富にある。

人間には前頭前皮質と呼ばれる特有の脳領域があり、成熟にはとりわけ長い時間がかかる。この脳領域がつかさどる集中、計画、効率的な作業といった大人の能力は、幼年期の長期にわたる学習に基づいて育まれる。この領域の配線は20代半ばまで完成しないこともある。

幼い子どもは前頭前皮質の制御が不十分で、それが大きなマイナス面にも見えるが、実際のところ学習にはとても役立っているようだ。前頭前皮質は無意味な考えや行動を抑制する。だが、

赤ちゃんや幼児は前頭前皮質による抑制がないため、自由に探索ができるのだろう。

子どものように創造的に探求し柔軟に学ぶ能力は、大人のように計画的かつ効率的に行動する能力と引き換えに失われていく。迅速な自動処理能力と余分な接続が取りはらわれた脳のネットワークなど、効率的な行動に必要な資質は、柔軟性など学習に役立つ資質とは根本的に相反するものなのかもしれない。

過去の10年間の研究で、幼年期と人間性についての新たな概念が生まれた。赤ちゃんや幼児は単なる未完の大人ではない。変化し、創造し、学び、探求するために、進化によって極めてみごとに設計されている。このような能力こそが人間の本質で、人生の最初の数年間に純粋な形で表れる。

私たちが人間として価値ある成果を成し遂げられるのは、かつて大人に依存する無力な子ども時代があったからだ。幼年期や子育ては、私たちの人間性にとって不可欠なのだ。

(翻訳協力：古川奈々子)

COURTESY OF KATHLEEN KING



著者 Alison Gopnik

カリフォルニア大学バークレー校の心理学教授と哲学の客員教授。子どもがいかにして「心の理論」(他者も心を持つことを理解し、相手が自分とは違うものを信じたり欲したりする場合があると理解する能力)を発達させるかについて、草分け的研究を行ってきた。彼女の研究から、子どもは科学者が使うような方法で周囲の世界について学ぶという「理論の理論」が考案されるようになった。子どもの心を調べることは、意識の謎といった深遠な哲学的問題を解き明かすことにもつながると主張している。

原題名

How Babies Think (SCIENTIFIC AMERICAN July 2010)

もっと知るには…

THE SCIENTIST IN THE CRIB: MINDS, BRAINS, AND HOW CHILDREN LEARN. Alison Gopnik, Andrew N. Meltzoff and Patricia K. Kuhl. William Morrow and Company, 1999.

BAYESIAN NETWORKS, BAYESIAN LEARNING AND COGNITIVE DEVELOPMENT. Special section in *Developmental Science*, Vol. 10, No. 3, pages 281-364; May 2007.

CAUSAL LEARNING: PSYCHOLOGY, PHILOSOPHY, AND COMPUTATION. Edited by Alison Gopnik and Laura Schulz. Oxford University Press, 2007.

THE PHILOSOPHICAL BABY: WHAT CHILDREN'S MINDS TELL US ABOUT TRUTH, LOVE, AND THE MEANING OF LIFE. Alison Gopnik, Farrar, Straus and Giroux, 2009.

ゴプニックのウェブサイト: <http://alisonogopnik.com>

こころと脳のサイエンス02

9月15日
発売予定

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。今号は男性と女性の違いがどこから生まれるのかを探る。子育てをテーマにした「男の子と女の子——性差はどこから生まれるのか」「父親の子育て」、男女の心理的な違いに焦点を当てた「ユーモアのギャップ」「すれ違う理由——男と女の会話スタイル」など、日常生活にかかわる多彩な内容を取り上げる。



sagepubimages/shutterstock

●A4変型判 ●112頁
●1575円(税込)

お近くの書店でお求めください。品切れの場合は書店にご注文ください。
当社へ直接ご注文の場合は、本代のほかに送料を頂戴いたします。
お問い合わせ、ご注文は、電話、FAXまたはホームページからどうぞ。

おもな内容

男の子と女の子
——性差はどこから生まれるのか
父親の子育て
ユーモアのギャップ
すれ違う理由
——男と女の会話スタイル
うつ症状にも違い
性同一性障害
お見合いパーティの心理学
暴力をふるうのは
男だけじゃない
脳科学でウソを見抜く ほか

掲載記事は変更になる場合があります

こころと脳のサイエンス01

好評
発売中

心を育む

——子どもの発達と成長

- ・子どもの心は
両親のパッチワーク
- ・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

●A4変型判
●112頁
●1575円(税込)

こころと脳のサイエンス01

子どもの心は
両親の
パッチワーク

心を築く建築環境

音楽はなぜ心を揺さぶるのか

やっぱり運動しかない!?

遊ばないとダメ!

日経サイエンス170
2010年9月15日発売

Table 31.

functions

(1)

(2)

x

(3)

FIG. 68.



DNA医薬の時代

期待どおりの成果の出ない時期が長く続いた
しかし、改良の結果、効果を飛躍的に高めることに成功
感染症の予防だけでなくがん治療に対しても
DNA医薬がその真価を発揮できるときが来た

M. P. モロー／D. B. ワイナー（ペンシルベニア大学）

今からちょうど10年前、米国立衛生研究所（NIH）は、2つの新しいワクチン候補の優劣を決する臨床試験を実施した。どちらも、地球上で最も危険なウイルスの1つ、ヒト免疫不全ウイルス（HIV、エイズウイルス）に対するものだ。

2つの候補のうち1つは「プラスミド」と呼ばれる環状のDNAを主成分にしている。HIVの5種類のタンパク質の遺伝子を、それぞれ別々のプラスミドに1つずつ搭載している。このワクチンの狙いは、プラスミドの接種によりヒトの細胞にHIVのタンパク質を直接作らせ、これで免疫系を活性化させて、HIVに対する防御反応を誘導しようというものだ。

もう1つのワクチン候補は、プラスミドの代わりに、アデノウイルスを遺伝子の運搬役（ベクター）として使い、HIVタンパク質の遺伝子を1個だけ

入れる。“安全”で免疫を誘導しやすいウイルスベクターでまず免疫系を活性化すれば、HIVタンパク質に対しても免疫反応を誘導しやすくなるだろうという理由から、この組み合わせが選ばれた。

著者の1人のワイナーは、プラスミ

ドDNAで恐ろしい病原体に対する免疫を誘導できると考え、それまでに8年間もDNAワクチンの研究を続けていた。しかし、この時の比較試験の結果に、DNAワクチンの性能を信じてきた研究者はがっかりした。HIVの5種類のタンパク質をプラスミドDNA

KEY CONCEPTS

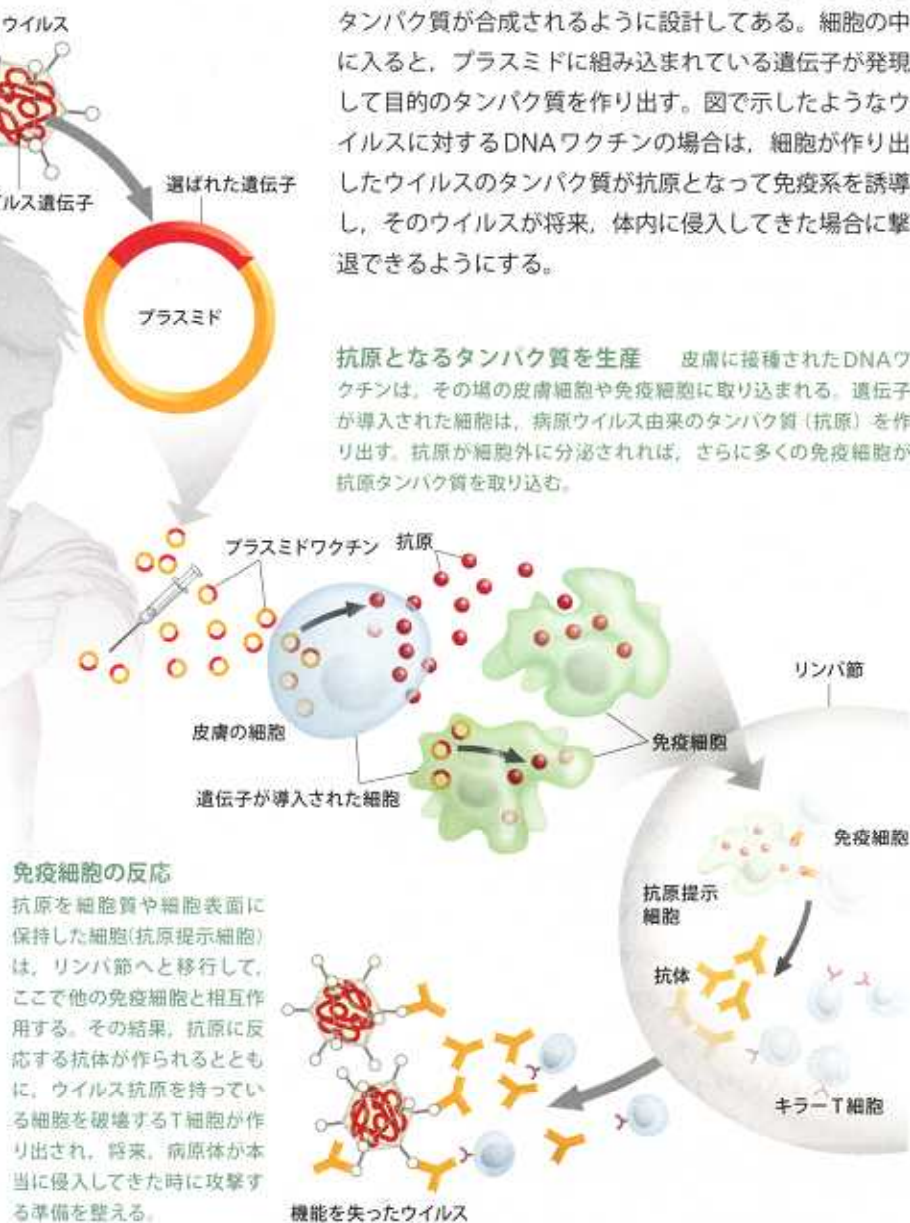
改良を経て、大幅に効果アップ

- プラスミドと呼ばれる環状DNAを、感染症の予防や、がんなどの治療に役立てようというアイデアは、長い間期待を集めてきた。しかし、初期の臨床試験は、導入した遺伝子から目的とするタンパク質があまり作られず、期待はずれに終わった。
- その後、導入する遺伝子自体の改良と、細胞にプラスミドDNAを導入する方法の工夫などにより、DNA医薬の能力は劇的に向上した。
- 家畜やペットなどに対してはDNAワクチンやDNA医療はすでに実用化されており、ヒトでも臨床試験が進んでいる。プラスミドはいよいよその能力を十分に発揮できるようになってきた。

DNA 医薬の働く仕組み

DNA ワクチンや DNA 治療薬は、どちらも小さな環状の DNA であるプラスミドを構成成分としている。プラスミドは、目的の遺伝子を細胞の中に運んで、そこからタンパク質が合成されるように設計してある。細胞の中に入ると、プラスミドに組み込まれている遺伝子が発現して目的のタンパク質を作り出す。図で示したようなウイルスに対する DNA ワクチンの場合は、細胞が作り出したウイルスのタンパク質が抗原となって免疫系を誘導し、そのウイルスが将来、体内に侵入してきた場合に撃退できるようにする。

抗原となるタンパク質を生産 皮膚に接種された DNA ワクチンは、その場の皮膚細胞や免疫細胞に取り込まれる。遺伝子が導入された細胞は、病原ウイルス由来のタンパク質（抗原）を作り出す。抗原が細胞外に分泌されれば、さらに多くの免疫細胞が抗原タンパク質を取り込む。



免疫細胞の反応

抗原を細胞質や細胞表面に保持した細胞(抗原提示細胞)は、リンパ節へと移行して、ここで他の免疫細胞と相互作用する。その結果、抗原に反応する抗体が作られるとともに、ウイルス抗原を持っている細胞を破壊するT細胞が作り出され、将来、病原体が本体内に侵入してきた時に攻撃する準備を整える。

として被験者に接種しても、非常に弱い免疫反応しか誘導できなかった。まったく免疫反応が起きなかった被験者もいる。一方、アデノウイルスベクターを接種された被験者は強い免疫反応を示した。基礎研究者にとっても製薬会社にとっても、HIV ワクチンの候補としてはアデノウイルスベクターの方がはるかに優れていると思われた。

それまでの研究でも、第1世代のプラスミド DNA が誘導する免疫反応は弱すぎる例がしばしば観察されていた。だから、DNA ワクチンの研究者はこの比較試験の結果を知ってもそれほど驚きはしなかったが、それでもなお、DNA ワクチンが安全であると同時に有効性も高いと信ずるに足る証拠もあったので、この結果にはがっかりした。

しかし私たちは、DNA ワクチンのコンセプト自体は決して間違っていないと確信していた。どうやったらこの技術の効果を高めることができるのか？ 解決に向けて、基本に戻って研究を続けた。

そして今、その努力が報われる日が来ようとしている。プラスミド DNA を使った次世代ワクチンは、安全性などの利点は保ったまま、ヒトや動物での試験で期待どおりの効果を見せ始めている。プラスミド DNA を使った技術は現在、ワクチンとは別の原理による免疫療法や、バイオ医薬を体内で作る技術にも展開されている。これら DNA ワクチンや DNA 治療薬の完成度がもっと高まれば、今は治療できない病気を、防いだり治したりできるようになるだろう。科学技術の新たなサクセスストーリーとなるかもしれない。

エレガントなアイデア

DNA をワクチンとして使って免疫をつけようというアイデアは1990年代初めから提唱されていたが、当初から、そのアイデアのエレガントなまでの明快さが注目を集めていた。ワクチンの主成分であるプラスミドには、病原体由来のタンパク質をコードする遺伝子が1個から数個含まれていて、接種された人の身体でこれらのタンパク質が作られる。プラスミドにある遺伝子は病原体を作る設計図のごく一部にすぎないので、生体内で病原体が出現する心配はない。

プラスミドが細胞内に入ると（この現象をトランスフェクションと呼ぶ）、細胞に備わっているタンパク質合成メカニズムが働いてプラスミド上の遺伝子から、抗原となるタンパク質が作られる。この病原体由来のタンパク質は、ウイルスそのものと同様に最終的には細胞から放出され、免疫細胞に異物として認識される。こうして、あたかも体に病原体が侵入してきたかのように

免疫系を錯覚させ、ウイルス抗原に対する長期の免疫応答を引き起こす。つまり、たった1個の遺伝子を搭載した環状DNAを注射するだけで、その病原体に対する免疫を誘導できるのだ。

このように、DNAワクチンは安全性の高さと単純さを兼ね備えているが、さらに、このほかにも従来のワクチンにはない長所がたくさんある。

長所の1つは、従来型ワクチンと比べて、DNAワクチンははるかに短期間で製造できる点だ。例えば、インフルエンザワクチンは、生のウイルスを培養する必要があるため、最低でも製造に4～6カ月はかかるが、DNAワクチンはずっと短期間で製造可能だ。

また、DNAは室温でも安定なので、輸送や保管の際に冷蔵や冷凍保存を必要としない（訳注：感染症が多いアフリカなどの途上国では、気温が高い上に電化が進んでいないので、従来型のワクチンの場合、まずどこに保管するかが大問題となる）。

ワクチンの開発側から見ると、プラスミドDNAにはほかにも大きな利点がある。DNAはもともと生物が持っている物質なので、プラスミドを組織に注射しても生体はこれを異物として認識しない。つまり、プラスミド上の遺伝子から作られるタンパク質に対してだけ免疫反応が誘導され、プラスミドDNAそのものには何の反応も引き起こさない。そのため、DNAワクチンを投与しても免疫反応でプラスミドが破壊されることはなく、抗原遺伝子の種類を変えるだけで、同じ人に何度でも接種できるのだ。結果的にはこの利点が、DNAワクチン技術に対する近年の再評価につながった（63ページの訳者ノート1を参照）。

残念ながら、初期のDNAワクチンの臨床試験では、弱い免疫反応しか誘導できず、試験は失敗に終わった。この失敗のおもな原因として、十分な数の細胞の中にプラスミドが入らなかつ

た上に、入った細胞でもタンパク質を期待したほど作らなかったため、免疫系を十分に刺激できなかったことが考えられた。

DNAワクチンの対抗馬と考えられた技術も、後により大きな問題に直面することになった。大手製薬企業のメルクは、2007年からHIVに対するワクチンの大規模臨床試験を開始した。STEP試験と呼ばれたこの試験では、HIV遺伝子の運び手としてAdHu5というアデノウイルスベクターが使われた。アデノウイルスベクターを使った

以前の試験で非常に強い免疫反応が観察されていたので、STEP試験は大きな期待を集めて始まり、最終的には3000人の被験者がAdHu5かプラセボ（偽薬）のいずれかを接種された。

しかし臨床試験が進むにつれ、ワクチン接種群とプラセボ接種群との間に不可解な差が生じてきた。ワクチン接種を受けた被験者は、プラセボ接種者に比べてHIV感染を受けにくくなるどころか、むしろより感染しやすくなるという結果となったのだ。

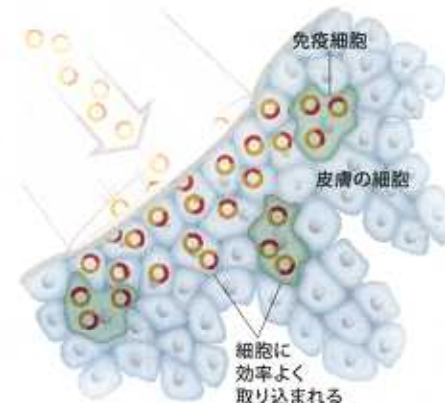
初期の解析結果では、ワクチン接種

DNA医薬の能力を高める

第1世代のDNAワクチンやDNA治療薬は十分な効果を得られないことがあったが、さまざまな改良技術が開発されている。これまでに、プラスミドが細胞に取り込まれる率を高める、細胞が抗原タンパク質を大量に作れるようにする、さらに、抗原タンパク質に対する免疫反応を強める——などが工夫されてきた。

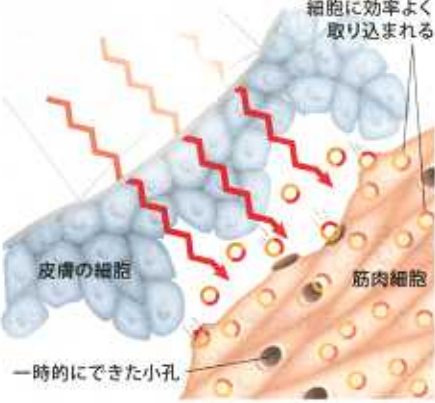
細胞にプラスミドを押し込む

針を使わない接種法



注射針を使わずに接種する機器を使って、免疫細胞が集まっている皮膚にプラスミドを導入する。注射針を使う方法に比べて、より多くのプラスミドを細胞に直接導入できる。

エレクトロポレーション法



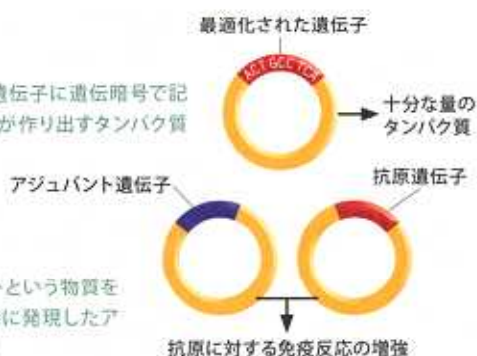
注射で接種した後に弱い電気刺激を加えると、細胞膜に一時的に小さな孔が開く。この孔を通してプラスミドが細胞内に入る。

タンパク質作りの暗号を最適化

タンパク質を作るための情報は、プラスミド上の遺伝子に遺伝暗号で記されている。この暗号を最適化することで、細胞が作り出すタンパク質の量を増やすことができる。

免疫増強剤を加える

プラスミドは、免疫細胞を活性化させるアジュバントという物質を作る遺伝子を搭載することもできる。抗原と同時に発現したアジュバントは、抗原に対する免疫反応を増強する。



群の男性914人のうち49人がHIVに感染したのに対し、プラセボ接種群では922人のうち感染したのは33人にすぎなかった。この結果を受けて、STEP試験は2009年夏に中止された。

このワクチンがなぜ無効だったのかの解析はまだ続いているが、ベクターに使ったAdHu5自体にその原因があるという証拠も見つかっている。被験者のうちアデノウイルス（一般的な風邪の原因ウイルスの1つ）に対する免疫能を持っている人では、免疫系がベクター自体を攻撃してしまうのだ。ただ、ワクチン接種群がHIVにより感染しやすいという結果については、まだその理由はわかっていない。

プラスミドDNAのワクチンとしての可能性を信じていた科学者たちは、STEP試験が始まる前から、第1世代のDNAワクチンが抱えていた複雑な問題に解決策を見つけるべく、必死で研究を続けていた。目標はプラスミドの能力をすべての面で向上させることで、細胞の中にプラスミドを導入するための新しい技術や、プラスミドからの遺伝子発現によるタンパク質生産効

率を向上させる技術、作られたタンパク質に対する免疫反応を強化する技術などが研究されてきた。

もっとたくさんの細胞に入れる

DNAワクチン送達のための新技術は、こうした研究から生まれたためさまざまな成果の1つで、免疫細胞をはじめとするより多くの細胞にプラスミドを取り込ませることに成功した（前ページの図を参照）。

皮膚に直接貼る経皮吸収パッチや、ジーンガンやバイオジェクター（訳注：いずれも製品名）のように針を使わずに高圧ガスでDNAを皮膚に導入する機器が開発された。これらの手法で、免疫細胞の一種である「抗原提示細胞」が多く集まっている皮膚の内部にプラスミドを導入できるようになった。こうした物理的手法を使った技術は、注射針で接種するよりもはるかに高い効率で細胞の中にプラスミドを押し込むことができる。

従来の注射による接種法も「エレクトロポレーション」という新技術でさらに効率を高めることができる。これ

は、筋肉や皮膚に接種した後に、その部分にだけ高圧の電気パルスをかける。すると細胞膜に一時的に小さな孔が開き、プラスミドなどの粒子がその小孔を通して細胞内に入っていく。エレクトロポレーションを併用することで、細胞へのプラスミドの取り込みを最大1000倍も高めることができる。

タンパク質をもっと作らせる

導入に成功したら、次はタンパク質合成だ。遺伝子の塩基配列に改良を加えることで、プラスミドの構造を最適化し、遺伝子の発現効率を高めることに成功している。

例えば、メッセンジャーRNAに記された遺伝暗号を動物細胞がより利用しやすい配列に変える方法として「コドン最適化」という技術がある。タンパク質を構成するアミノ酸の種類とその配列は、3個の塩基が1組（これがコドンと呼ばれる）となって遺伝子の中に書かれている。各アミノ酸に対応するコドンは複数個あるが（同義コドン）、細胞はそのうちの1つを好んで使う傾向がある。好まれるコドンを使

実用化が進むDNA医療技術

プラスミドを使ったワクチンや医療技術は、さまざまな疾患に対して臨床試験が行われており、畜産などの分野ではすでに実用化されているものもある。下の表に、プラスミドを使った

臨床試験でのおもな対象疾患と、動物用にすでに認可されている対象疾患を示す。

製品の概要	ヒトで臨床試験中の疾患	動物の疾患を対象にしているもの
感染症を予防するワクチン	■ HIV感染症（3種類） ■ インフルエンザ（2種類のワクチン）	■ 西ナイルウイルス感染症（ウマ） ■ 伝染性造血器壊死症ウイルス感染症（養殖サケ） ■ 悪性黒色腫（イヌ）
慢性疾患を治療するための免疫賦活剤	■ C型肝炎 ■ HIV感染症 ■ HPV（ヒト・パピローマウイルス）による子宮頸部がん ■ 肝がん ■ 悪性黒色腫（メラノーマ）	
タンパク質を補充する治療法	■ 鬱血性心不全 ■ X連鎖重症複合免疫不全症に伴う成長不全 ■ 虚血肢（3種類の治療法） ■ 悪性黒色腫	■ 流産（ブタ）

えば、遺伝暗号をタンパク質に翻訳する効率が上がる。そのため、タンパク質を構成するすべてのアミノ酸に対して最適なコドンを使えば、目的とするタンパク質を細胞に大量に作らせることが可能になる（訳者ノート2）。

遺伝子の塩基配列を改良する方法としては、他にもメッセンジャー RNA の安定性や二次構造を改善してタンパク質合成の速度を上昇させる手法が知られている。

タンパク質が合成されるときには、遺伝子に書かれている暗号がアミノ酸に変換されて、鎖のように連なっていく。遺伝暗号の読み出し部分にあたる領域は「リーダー配列」と呼ばれているが、この部分の塩基配列を最適化することで、最終産物であるタンパク質をより安定にすることができる。

また、リーダー配列の中には、そのタンパク質が細胞外へ分泌されるべきものであることを示す荷札のような働きを持つものがあり、こうした配列を利用すれば抗原タンパク質を細胞外に放出させることができる。こうすれば、免疫細胞は、導入細胞内で分解されて細胞表面に提示される抗原ペプチドに加えて、細胞外に放出された抗原とも直接に遭遇でき、ワクチンとしてより望ましい結果につながる。細胞内で分解された抗原を認識する免疫と、細胞の外にある抗原を認識する免疫の両方が活性化されるからだ。

免疫増強剤と組み合わせて

作られたタンパク質に対する免疫反応を強化する技術では、「アジュバント」の進歩がワクチン開発に大きく貢献している。従来のワクチンでも、アジュバントは免疫増強のための添加物として広く使われてきた（N. ギャルソンほか「パンデミック対策のカギ ワクチン増強剤」日経サイエンス 2010年1月号参照）。

ワクチンで誘導する免疫反応には、

細胞性免疫と液性免疫の2種類がある。前者は病原体に感染した細胞を見つけ出して殺すキラー T 細胞を誘導し、後者は細胞に感染する前に病原体を攻撃する抗体の産生を誘導する。アジュバントを使うことでこの2つのバランスをより望ましいものに調整することができる。

DNA ワクチンにヴァックスフェクチンというアジュバントを使うと、インフルエンザウイルス抗原に対する抗体産生を200倍も増強できることが明らかになった。また、レキシモドというアジュバントは、ある種の DNA ワクチンと組み合わせれば細胞性免疫と

細胞への導入方法 配列の最適化 さらには増強剤の添加 これらの技術により 劇的に効果が高まった

液性免疫の両方を強く誘導できる。

従来のワクチンにアジュバントを加える場合、両者を一定の割合で混ぜた均質な混合物を作り、その均質な状態を維持しなくてはならないが、これが難しい場合もあった。だが、DNA ワクチン技術ならば、アジュバントとなる分子を作る遺伝子をプラスミドに搭載して、抗原タンパク質と同時に発現できるという大きな利点がある。

細胞にこれらのプラスミドが取り込まれると、細胞は抗原と同時にアジュバント活性を持つ物質を作ることができる。アジュバント分子の DNA を DNA ワクチンと同時に投与すると、構造をすでに最適化した DNA ワクチンでも、さらに5倍以上も増強できる。

このような最新の工夫を凝らした DNA ワクチンは、単に抗原分子の遺伝子を搭載しただけの初期の DNA ワクチンよりもはるかに性能が向上して

いる。構造を最適化したプラスミドと、新しい送達技術を組み合わせることによって、HIV ワクチンを再検討する準備が進められている。さらに重要なことは、古典的な病原体に対するワクチンとしてだけでなく、さまざまな薬物療法やがん免疫療法にもプラスミド DNA が展開可能であるという点だ。

DNA 医薬の多様な可能性

組織中の細胞に安全に遺伝子を導入し、その遺伝子を発現させてタンパク質を作らせる技術は、さまざまな医療応用の道を切り開いた。実際、DNA を使ったこうした医療は、臨床での実用化という点では DNA ワクチンより先行している。

古典的な医薬品の多くが低分子化合物であるのとは異なり、DNA 医療では治療に効果があるタンパク質の遺伝子を身体に送り込んで、その場で直接タンパク質を生産する。この20年間、臨床試験が行われてきた遺伝子治療では、導入した遺伝子が染色体に挿入されたり、細胞内に長期にわたって留まったりすることがあったのに対し、プラスミドではそういうことはないで、これまで遺伝子治療の進展を妨げてきたさまざまな問題を回避できる。

新しい医療ではしばしば見られることだが、DNA を使った技術はまず家畜などを対象にする獣医学の領域で成功を取めた。例えば、ブタの流産を防ぐ技術が実用化されている。「成長ホルモン放出ホルモン」の遺伝子を組み込んだプラスミドを、妊娠中の雌ブタに注射してからエレクトロポレーション法で組織細胞に導入すると、生体内でこのホルモンが作られて胎仔の成長が促進される仕組みだ。

ブタのような大型動物でも注射は1回でよく、ヒトでも同様の結果が期待できるという点で、この試験が成功したことは画期的だった。

DNA を使った治療法としては、60

従来のワクチンに比べてすばやく製造できること 冷凍や冷蔵なしに保存が可能なこと 多様なウイルス株に有効な インフルエンザワクチンが作れることなど DNAワクチンの利点は多い

ページの図に示すように多くの大規模臨床試験が実施されている。例えば、鬱血性心不全の治療では、幹細胞を患部に動員するために成長因子の遺伝子が使われている。また、X連鎖重症複合免疫不全症の患者で見られる成長不全の治療には、IGF-1という別の成長因子の遺伝子が使われている。

3つ目の例では、難治性の循環器系障害として知られる重症虚血肢が対象疾患となっている。この病気が進行すると下肢を切除しなくてはならないが、血管新生を促す成長因子の遺伝子を導入することで、重症化を防ぐことができるだろうと期待されている。

この他にも「DNA免疫療法」と呼ばれる治療法が開発されている。これは、DNA療法とDNAワクチンの良い面を組み合わせた効果を狙うもので、がんや慢性ウイルス感染症などに有効な免疫反応を引き出すような遺伝子を導入する。

例えば、ヒト・パピローマウイルス(HPV)によって引き起こされる子宮頸部がんの治療に、このウイルスの遺伝子の1つを搭載したDNAを投与する臨床試験は、以前から行われている。この試験の最初の結果報告によると、治療を受けた患者の50%でHPVのタンパク質に対するT細胞の反応が誘導され、90%以上の患者でHPVに対する高い活性の抗体が誘導された。

ほかにも、C型肝炎ウイルスに対するDNA免疫療法の臨床試験が現在、進行中だ。

HPVによる子宮頸部がんやC型肝炎に対しては効果のある免疫療法が現

時点ではないので、まだ予備的な段階ではあるが、有効性を期待させるデータが出たことは意義が大きい。

この分野でも、獣医学領域での応用が先行している。特に、イヌのメラノーマ(悪性黒色腫)に対するDNA免疫療法の成功は、ヒトへのがん免疫療法の研究者を勇気づけた。メリアル社によって開発されたイヌ・メラノーマ治療用ワクチンは、すでに末期にあるイヌの生存期間を、何の治療も施さないイヌに比べて約6倍に延長する効果がある(半数が死亡するまでの期間で比較)。このDNA免疫療法の成功は、従来のDNAワクチンでは失敗したケースでも、次世代DNAワクチンなら有効性が確認できることを示している。

さらに広がる期待

この10年で、数十にものぼるDNA療法やDNAワクチンの臨床試験が行われ、また現在も多くの試験が進行中だ。中でも、私たちが開発したインフルエンザ用のDNAワクチンの試験では、この技術の長所が実証されている。このワクチンは、現在、臨床試験の初期段階だが、動物を使った前臨床試験では、季節性のインフルエンザウイルスだけでなく、世界で数百人に感染した毒性の強いH5N1型の鳥インフルエンザウイルスに対しても感染防御効果を示した。

このDNAワクチンに搭載されているインフルエンザウイルスの遺伝子は、複数のウイルス株に共通している「コンセンサス配列」を使っているため、多くのウイルス株のタンパク質と共通

部分を持つ抗原を作ることができ、この結果、非常に幅広い株に対して免疫反応を誘導できる。従来の季節性インフルエンザのワクチンでは、毎年、次はどのウイルス株が流行するかを予測してワクチンを作り、その予測が外れると効果がない場合もあるが、DNAワクチンならばこうしたミスマッチも解消するかもしれない。

昨年、新型インフルエンザとして世界的に流行したH1N1型の豚インフルエンザウイルスの出現によって、新タイプのワクチン開発が急務であることが再認識された。DNAワクチンメーカーのバイカル社は、2009年5月に、H1N1型のDNAワクチンの試作品をたった2週間で作り上げた。もしこのワクチンが事前に臨床試験をして承認を受けていたら、従来法によるワクチンが入手可能になる時期よりも、少なくとも2カ月は早く大量生産が完了していただろう。このDNAワクチンは、臨床試験が始まったばかりの段階だが、すでに期待できそうなデータが出ている。

DNAワクチンやDNA療法は、現在は治療法がない疾患に対しても治療効果が期待できる可能性を持つことから、失敗に終わったHIVワクチンの開発に再び期待が集まっている。現在、臨床試験中のPennvax-Bというワクチンは、HIVの遺伝子3個とアジュバント分子の遺伝子1個を搭載したDNAで、エレクトロポレーションで細胞に導入される。

他の2つの臨床試験では、プラスミドDNAでHIVのタンパク質を作らせて免疫系を刺激した後で、他のワクチンで免疫能をさらに増強するというアプローチが取られている。例えば、GeoVaxというワクチンは、プラスミドを先に接種した後、アンカラ株という超弱毒種痘ウイルスベクターを使ってHIVのタンパク質を発現し、免疫能を増強するというものだ。

米国立衛生研究所のワクチン研究センターでは、これとは異なる臨床試験を進めている。別のDNAワクチンを接種した後で、アデノウイルスベクターを使ったHIVワクチンで免疫能を増強しようというものだ。DNAワクチンもアデノウイルスベクターも、HIVに対するワクチンとして一度は失敗していることを考えると、ちょっと皮肉な取り合わせだ。

いくつかのDNAワクチンやDNA療法が、すでに獣医学の領域では実用化され、ヒトでもほかに治療法のない疾患に対して大規模な第3相臨床試験が行われている。この事実は、初期の失敗続きであった頃に比べて、この技術がいかに進歩したかの証しだ。

過去10年間のこの領域の劇的な発展により、非常に独創的なDNAワクチンやDNA療法が生まれてきた。私たちをはじめ、この領域に揺籃期からかわり、育て上げてきた多くの研究者は、長く困難な時期を乗り越えて大きな花を咲かせ、さらに輝かしい未来を語れるようになったことを、心から誇りに思っている。

訳者ノート

1) DNAに対して免疫系が反応しないというのは、厳密には誤り。細菌の中で複製させたプラスミドDNAには非メチル化CpGという構造があり、これをヒトの自然免疫機構は異物として認識する。その結果、炎症反応や細胞死を誘導することがある。

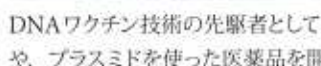
2) コドン最適化の具体例を紹介しよう。例えば、グリシンというアミノ酸に対応するコドンとして、GGA、GGC、GGG、GGTの4種類があるが、その使用頻度は生物種によって異なっている。ヒトではGGCが最もよく使われ、GGTは使用頻度が低い。一方で、大腸菌では逆にGGTというコドンが最もよく使われている。そのため、ヒト細胞でタンパク質合成の効率を上げるためのコドン最適化では、グリシンに対応するコドンを可能な限りGGCに変換し、大腸菌で発現させるためにはGGTに変換する。

訳者 中西真人（なかにし・まひと）

産業技術総合研究所・幹細胞工学研究センター副センター長。専門は分子生物学、細胞生物学。

著者 Matthew P. Morrow / David B. Weiner

2人ともペンシルベニア大学で研究している。ポストドクのモロー（左）は、HIVの研究に10年近く携わり、現在はDNAワクチンとそれを使った治療法の開発に力を注いでいる。医学部の病理学教授であるワイナー（右）は、ペンシルベニア大学大学院の遺伝子治療・ワクチン専攻の主任でもある。ワイナーは、DNAワクチン技術の先駆者としてヒトでの最初の臨床試験を行ったほか、米食品医薬品局（FDA）や、プラスミドを使った医薬品を開発しているワクチンメーカー・製薬企業の技術顧問でもある。



原題名

DNA Drugs Come of Age (SCIENTIFIC AMERICAN July 2010)

もっと知るには...

DNA VACCINES FOR HIV: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES. David A. Hokey and David B. Weiner in *Springer Seminars in Immunopathology*, Vol. 28, No. 3, pages 267–279; November 2006.

DNA VACCINES: PRECISION TOOLS FOR ACTIVATING EFFECTIVE IMMUNITY AGAINST CANCER. Jason Rice et al. in *Nature Reviews Cancer*, Vol. 8, No. 2, pages 108–120; February 2008.

ELECTROPORATION OF SYNTHETIC DNA ANTIGENS OFFERS PROTECTION IN NONHUMAN PRIMATES CHALLENGED WITH HIGHLY PATHOGENIC AVIAN INFLUENZA VIRUS. Dominick J. Laddy et al. in *Journal of Virology*, Vol. 83, No. 9, pages 4624–4630; May 2009.

朝倉書店

世界自然環境大百科7 温帯落葉樹林

■ 大澤雅彦総監訳 奥富 清監訳

A4変判 456頁 定価29400円(本体28000円) (18317-1)

世界自然環境大百科

◆ 世界自然環境大百科



世界に分布する落葉樹林の温暖な環境、気候・植物・動物・河川や湖沼の生命などについてカラー図版を用いてくわしく解説。またヨーロッパ大陸の人類集団を中心に紹介しながら動植物との関わりや環境問題、生物圏保存地域などについて詳述

生物の事典

■ 石原勝敏・末光隆志総編集

刊行記念特価15750円(本体15000円)

B5判 560頁 定価17850円(本体17000円) (17140-2)

生物の事典



生命の誕生から、生物の機能・形態、進化、生物と社会生活、文化との関わりなどの諸事象について、豊富な図表を用いて、基礎的な事項から最新の知見まで幅広く解説。〔内容〕生命とは何か/生命の誕生と進化/遺伝子/生物の形、構造、構成/生物の生息環境/機能/行動と生態/社会/人類

GPSハンドブック

■ 杉本末雄・柴崎亮介編

B5判 516頁 定価15750円(本体15000円) (20137-6)



測位システムは、地震や火山活動などの地殻変動からカーナビや携帯電話に至るまで社会生活に欠かすことができない。その基礎原理から技術全体を体系的に概観できる日本初の書。〔内容〕衛星軌道と軌道決定/衛星から送信される信号/伝搬路/受信機/測位アルゴリズム/補強システム/カーナビゲーションとマップマッチング/他

日本地方地質誌8 九州・沖縄地方

■ 日本地質学会編

B5判 512頁 定価15750円(本体15000円) (20137-4)



この半世紀の地球科学研究の進展を鮮明に記す。地球科学のみならず自然環境保全、防災・教育関係者も必携の書。〔内容〕序説/第四紀テクトニクス/新生界/中・古生界/火山/深成岩/変成岩/海洋地質/環境地質/地下資源

〒162-8707 東京都新宿区新小川町6-29

TEL (03) 3260-7631 FAX (03) 3260-0180

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

(ISBN) は 978-4-254- 各書略



恐竜世界に いた鳥

現代的な鳥が登場したのは恐竜の絶滅後だと考えられてきたが
実は両者が同時代に生きていたことがわかった

G. ダイク (ユニバーシティ・カレッジ・ダブリン)

12月のモスクワ、気温は零下15℃を下回った。バーの暖房機も冷えてしまったので、私は厚手のコートに手袋という姿でウォッカを飲みつつ、鳥の化石について考えていた。時は2001年。私はロシア科学アカデミーのクロチキン (Evgeny N. Kurochkin) と

ともに、ソビエト・モンゴル共同チームがモンゴルで発掘した鳥化石をすべて調べ直す仕事に取り組んでおり、その日も古生物学博物館で一連の標本を検討した後にバーで一息ついていた。

標本のなかに、ゴビ砂漠で1987年に発掘された小さな翼があった。精緻だったはずの骨がぐちゃぐちゃに入り組んで潰れており、同博物館にある素晴らしい保存状態のよい恐竜骨格に比べるとまるで貧相だ。しかし、この化石は非常に重要な手がかりを提供して

恐竜のそばに 南極で見つかった化石に基づいて描かれた初期の新鳥類ベガビス (手前)。この想像図は約6700万年前の入江の風景で、カモのようなくちばし形の口をしたカモノハシ恐竜のそばでベガビスが餌を探している。

KEY CONCEPTS

いまふう体形の鳥が古くから

- 鳥が小型肉食恐竜から進化したことははっきりしているが、現代的な体形の鳥がいつ登場したのかは、はるかに不透明だ。
- 化石に基づく従来の考え方では、現代的な鳥が現れたのは、6500万年前の小惑星衝突で恐竜など多くの生物が絶滅した後とされる。
- しかし、分子生物学の研究と少数の不確かな化石が、これに疑問を投げかけていた。現代的な鳥の起源はもっと古かったという見方だ。
- 現代的な鳥のうち古い時代にいたものの化石が近年に再解析され、この見方が裏づけられた。同時に、古い鳥たちが大量絶滅で滅んだのに、これら初期の現代的な鳥が生き残ったのはなぜなのかという疑問が浮上した。



いる。鳥の進化に関する従来の見方が誤りであることを示しているのだ。

現在の地球には1万種を超える鳥がいる。広々とした外洋での暮らしに適応したもの、不毛の砂漠で何とか生きているもの、雪に覆われた山頂にすむものなど、いろいろだ。実際、陸生脊椎動物を綱（こう）レベルで比較した場合、最も多様なのが鳥綱（鳥類）で、種数にして哺乳類の倍以上ある。

約6500万年前の小惑星衝突によって恐竜など陸生脊椎動物の多くが絶滅したが、古いタイプの鳥の一部は幸いにも絶滅を免れ、これが現生鳥類につながったとされてきた。その根拠は単純で、小惑星衝突前には古鳥類が進化していたものの、現生鳥類と同じ解剖学的特徴を備えた鳥の化石は小惑星衝突後のものだけだからだ。

カモやカッコウ、ハチドリなど現生鳥類を含む「新鳥類」が生まれたのは適応放散の典型例だろう。絶滅事象によってニッチ（生態的地位）が空いたことに対応して、種の多様化が進んだと考えられる。この場合、恐竜と翼竜（空を飛ぶ爬虫類）、古い鳥類によって占められていたニッチが空いた。

しかしここ10年で、化石記録（例の潰れた翼など）と現生鳥類のDNA解析から、新鳥類の登場は6500万年前よりもさらに昔だったらしいことが明らかになった。鳥類進化に関する伝統的な見方を覆す発見であり、鳥たちがどのように進化の高みに達したのか、重要な疑問を新たに提起している。

始祖鳥から新鳥類まで

「羽ばたき飛行」をするよう進化した脊椎動物はこれまでに3グループしかなく、鳥はその1つだ。他の2つは絶滅した翼竜と、鳥よりもずっと後に出現して現在も夜空を鳥と共有しているコウモリだ。

最初の鳥の起源をめぐるのは、長年にわたる議論があった。「獣脚類」と

いう肉食恐竜のうち小型のものから進化したという主張と、もっと古い爬虫類から進化したという見方があったが、羽毛恐竜など鳥に似た特徴を備えた恐竜の化石が過去20年間に発見されたことで、現在ではほとんどの科学者が鳥は獣脚類恐竜から進化したと考えている。

しかし、古い鳥と新鳥類の間をつなぐのはずっと難しい。知られる限り最古の鳥である始祖鳥（*Archaeopteryx*）を考えよう。ドイツで化石が見つかった1億4500万年前の生物だ。始祖鳥は飛行に必要な揚力を生み出せる非対称な羽（これは鳥類を定義する特徴の1つでもある）がついた翼を持っていた。だが、体形はむしろヴェロキラプトルやデイノニクス、アンキオルニス、トロオドンといった小型恐竜に近い。

始祖鳥や後に中国で発見されたジェホロルニス（*Jeholornis*、熱河鳥）、マダガスカルで見つかったラホナビス（*Rahonavis*）などの初期の鳥たちは、それらの恐竜と同様、骨で支えられた長い尾があり、鋭い歯を持つものもあるなど、原始的な特徴を備えている。

対照的に、新鳥類にはこうした特徴がなく、より進んだ形になっている。指の骨が完全に融合し、翼の外に独立した指が出ていないこと（これによって骨格が軽くなり、効率的な飛行が可能になった）、手首と翼が非常に柔軟

なこと（飛行中の操縦性が高まった）などだ。もっとも、新鳥類がこれらの特徴をいつどのように獲得したのかを決めるのは不可能だった。進んだ特徴へ移行しつつあるような化石が見つかっていないためだ。

とはいえ、最初期の鳥と恐竜絶滅以降の新鳥類との間の年代にあたる鳥の化石記録が欠落しているわけではない。飛行に適したさまざまな特徴を備え、生態的に特殊化した鳥たちが、いまから1億年以上前、白亜紀の初めまでに進化していたのは明らかだ。あるものは幅の広い大きな翼で飛び、別の鳥は長細い翼を持っていた。森にすんで昆虫と果物を食べる鳥がおり、別の鳥は湖の岸辺や水中をすみかに魚を食べて生きていた。こうした驚くべき多様性が、白亜紀の最後、6500万年前まで続いた。

実際、私はオランダのマーストリヒト自然史博物館にいる共同研究者とともに、白亜紀末の大絶滅の直前にあたる地層から、歯を持った鳥の化石を発見している。しかし、白亜紀の鳥類化石のうち保存状態がよくて分類可能な例はすべて、新鳥類よりも古い系統に属するものであり、それらの



新旧の解剖図 鳥は小型の肉食恐竜（獣脚類）から進化した。だから、1億4500万年前の始祖鳥など、これまでに知られている最古の鳥の化石は、歯や長い尾など、獣脚類につながる原始的な特徴をいくつか備えている。これに対し現代的な鳥たちはそうした特徴を捨て、飛行能力を高める新たな形質を進化させた。指のない翼や、非常に柔軟な手首などだ。

系統は小惑星衝突で滅んだ。したがって、得られている証拠からすると、絶滅事象の後に残存種からの多様化によって現生鳥類が登場したというのが、最も単純明快な説明だと考えられたわけだ。最近までは。

分子時計からの手がかり

1990年代までには、白亜紀にいた初期新鳥類の化石を探す試みが空振りを続ける一方で、生物の進化史を再構築する別の方法、化石によらない方法が有力になりつつあった。現在生きて

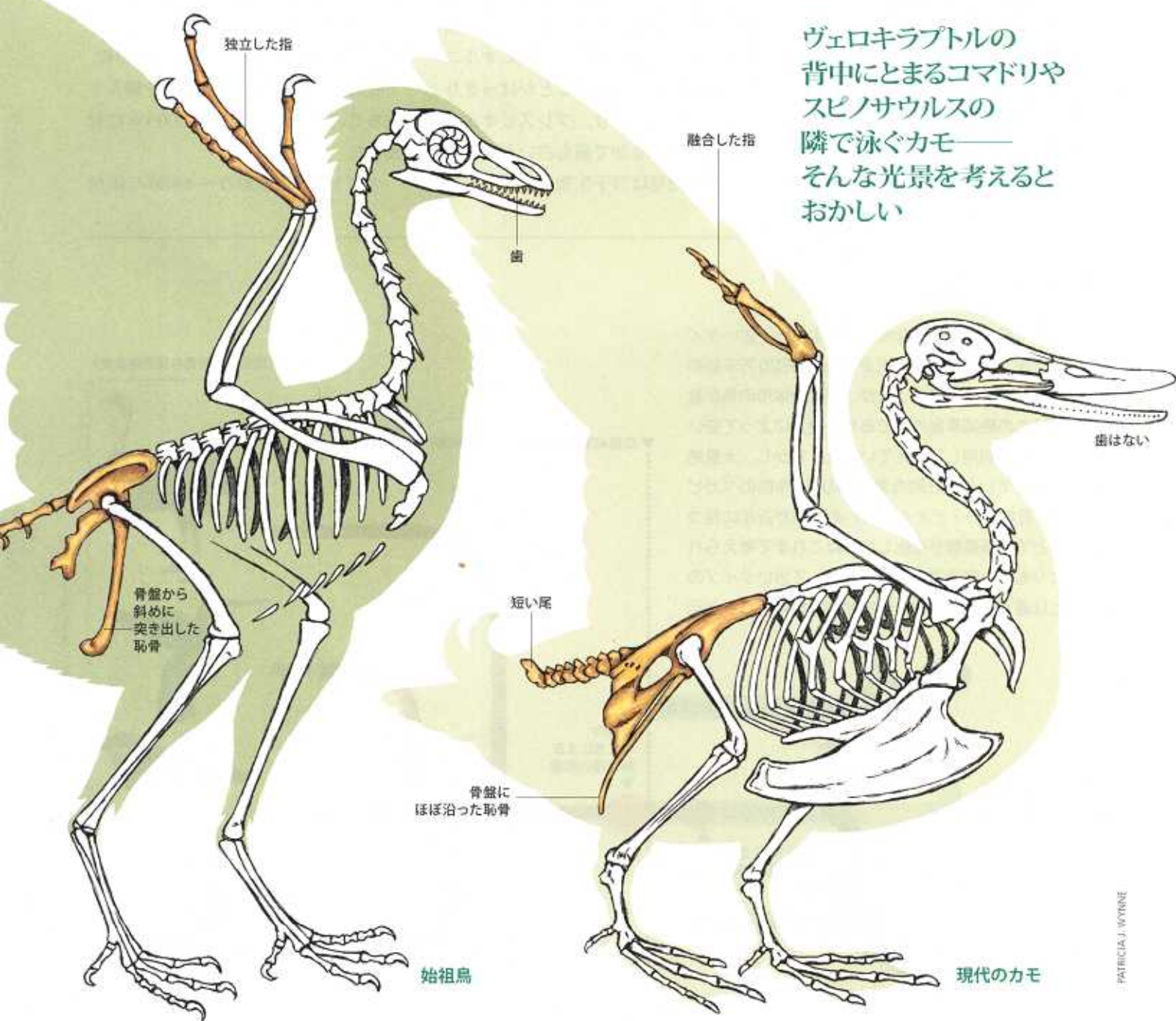
いる生物のDNA配列を読み取り、それらを比較することで、2つの生物グループが進化史上でいつごろ分岐したかを推定する方法だ。ゲノムのいくつかの領域では変異がほぼ決まったペースで生じるため、これがいわゆる分子時計の“刻み”となって、そうした推定が可能になる。

現生鳥類の進化を化石に基づいてとらえた古典的な見方を、分子生物学者たちは疑問視していた。そこで彼らは、現生鳥類の主な系統が分岐した時代を分子時計によって見積もることで、こ

の問題に取り組んだ。

鳥類の分岐のなかでも特に重要なものに、大型の飛べない鳥である古顎類（ダチョウやエミューの仲間）とキジカモ類（ニワトリなどキジ目と、カモなどカモ目を含むグループ）の分岐がある。DNA研究の結果、現生の新鳥類のうち最も古い特徴を残しているこれら2つの系統が分岐したのは白亜紀の相当に古い時期だと結論づけられた。また、他の系統についても、同様に古い時代に分岐したという結果が出た。

これは、それまでの古生物学の定説



に反して、新鳥類が恐竜と一緒に生きていたことを示す。ヴェロキラプトルの背中にコマドリがとまっていたり、スピノサウルスの隣でカモが水をかいていた——そんな光景を考えると何ともおかしい。しかし、この証拠は非常に説得力が強く、化石記録と矛盾するDNA解析結果には総じて懐疑的な古生物学者さえも、これを支持し始めた。だが古生物の骨格を調べている私たちのような研究者は、この新しい見方を裏づける化石が是非ほしかった。

テビオルニスとベガビス： 化石の再発見が続く

世紀が変わると、古生物学者の運もようやく上向き始めた。まず、私がモスクワで共同研究者のクロチキンと精査した小さなモンゴルの翼の再発見だ。

クロチキンはこの化石を初めて見た

1987年には、プレスビオルニスの仲間に似ていると思ったという。プレスビオルニスはカモに似た絶滅鳥類のグループで、現在のカモやガチョウに関連している。しかしこの化石は7000万年前のものであり、白亜紀の鳥だ。そして、白亜紀にプレスビオルニスにいた決定的な証拠がないことを、誰もが知っていた（というか、そう思い込んでいた）。

しかし、私たちが2001年のあの寒い冬に博物館で行った比較研究によって、その翼がまっすぐな腕掌骨（指の骨が融合してできた骨）を備えており、管状構造や隆線、筋肉の跡といった細部の特徴から見ても、プレスビオルニス科の鳥のものであることがはっきりした。そして何より、プレスビオルニスは新鳥類のなかで最も古いグループだ。この発見は分子生物学者たちの予

測と完全に合致する。私たちはこの動物を正式に報告した2002年の論文で、この鳥をテビオルニス（*Teviornis*）と名づけた。

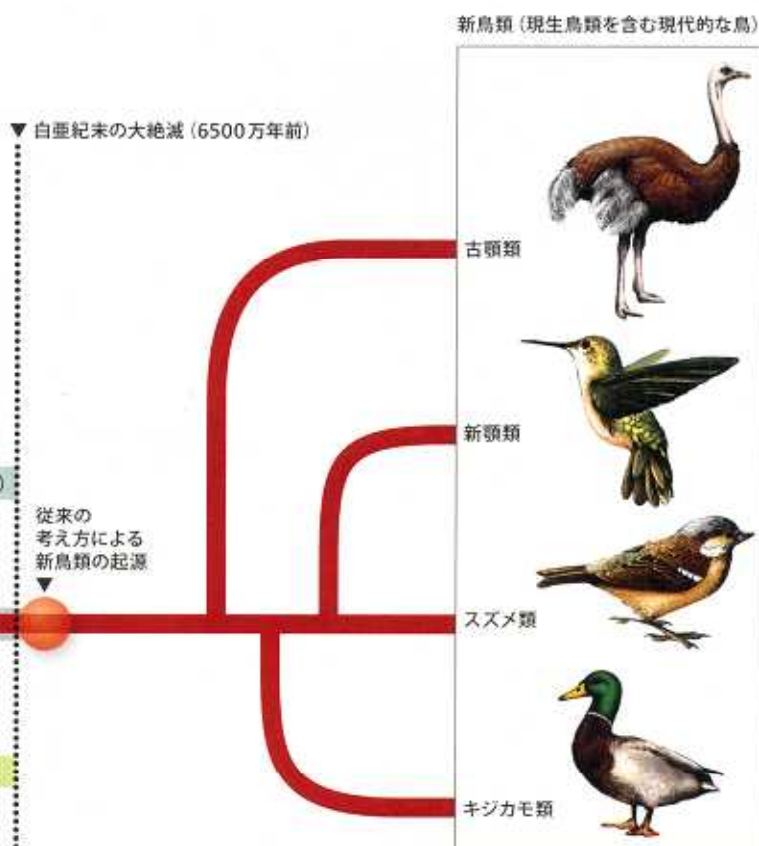
間もなく、テビオルニスに続く2番目の初期新鳥類が報告された。南極のベガ島で見つかったベガビス（*Vegavis*）だ。ベガビスは1990年代に発見されていたものの、何年もの間あまり知られないまま不遇をかち、ようやくその重要性が明るみに出た。

現在はテキサス大学オースティン校にいるクラーク（Julia A. Clarke）らが、ベガビスが白亜紀の鳥であること、そして現代的なカモに見られる特徴、特に幅広い肩環状骨と骨盤、翼の骨、下肢に見られるのと同じ特徴を備えていることを示した論文を2005年に発表した。

ベガビスは6600万～6800万年前

早かった起源

鳥の進化に関する伝統的な考え方によると、古いタイプの鳥が登場したのは恐竜などが滅んだ6500万年前の大量絶滅よりもずっと前だったが、現代的体形の鳥が登場したのはこの絶滅事象の後であり、絶滅によって空いた生態的地位を利用して栄えていった。しかし、大量絶滅以前に生きていた現代的な鳥（6700万年前のベガビスと7000万年前のテビオルニス）の化石が近年に見つかったことで、新鳥類が進化したのはこれまで考えられていたよりも早い時代であること、そして古いタイプの鳥たちとは違って絶滅事象を何とか切り抜けたことが示された。



の鳥で、テビオルニスに比べると少し新しいものの、明らかに大量絶滅の前にいた鳥だ。そして、ベガビスの化石はテビオルニスよりもずっと完全で、骨格がよく保存されている。

ほとんどの古生物学者にとって、白亜紀に新鳥類がいたかどうかという問題はベガビスによって決着した。これを受けて、この時代の化石標本を再検討して初期新鳥類の例をさらに探す研究が始まっている。

サンフランシスコにあるカリフォルニア科学アカデミーのホープ (Sylvia Hope) はかねて、彼女がニュージャージー州とワイオミング州で見つけた8000万～1億年前の化石が新鳥類のものであると主張している。しかし、それらの化石はほとんどが単一の骨だったので、決定的なことをいうにはあまりに断片的すぎるとされてきた。

ベガビスとテビオルニスの発見は、ホープの主張が正しかったことをうかがわせる。ホープの骨を他のより完全な化石と比較することで、事が明らかになるはずだ。

絶滅を免れた理由は?

新鳥類が白亜紀に登場したと考えると、化石記録とDNA解析に基づく分岐時期はきちんと整合する。しかし、同時に悩ましい疑問が生まれた。つまり、より原始的な鳥たちや翼竜が小惑星衝突とそれに伴う生態系変化によって絶滅したのに、これら新鳥類が生き延びられたのはなぜなのか、という疑問だ。

私思うに、これが鳥類進化に関して残っている唯一最大の謎だろう。答えはまったくの五里霧中であり、私は何とか手がかりをつかむべく、現在の研究の多くをこの問題に充てている。



動かぬ証拠 南極のベガ島で見つかったベガビスの部分骨格。6700万年前のこの鳥には、幅広い肩環状骨や融合した指の骨など、明らかに現代的特徴がある。

白亜紀の新鳥類であると確認できた記録は2例だけなので、化石にあまり多くの手がかりを期待するわけにはいかない。しかし、現生鳥類の研究から新たな理解が得られている。私は英国の共同研究者とともに現生鳥類のサイズを記録した巨大なデータベースを利用して、テビオルニスとベガビスを含む初期新鳥類の翼の骨格プロポーションが絶滅した異鳥類 (エナンティオルニス類) とほとんど同じであることを示した。

これら化石鳥類の翼の骨格プロポーションを現生鳥類のそれと比較することで、翼の形をある程度まで推定でき、それをもとに空気力学的な飛行能力に関する情報が得られる。しかし、現時点でいえるのは、初期新鳥類と異鳥類の翼形が異なっていないということだけだ。言い換えると、初期新鳥類が異鳥類よりも上手に飛べたとは思えない (ただし両方とも、始祖鳥など獣脚類に似たさらに初期の鳥よりは飛行がうまかった可能性が高い)。

白亜紀にいた新鳥類が飛行能力に関して同時代の原始的な鳥よりも優れて

ニュートリノは、どこへ消えたのか?
"謎の粒子"が巻き起こした大論争の
一部始終を解きあかす

ニュートリノ論争は いかにして解決したか

— "太陽ニュートリノ問題" から物質の究極へ —
桜井 邦朋・著

四六判・254頁
定価2,940円 (税込)

消えたニュートリノの謎を追え! ニュートリノとは何か? カミオカンデは何を見つけたのか? この不思議な粒子をめぐる議論を戦わせた科学者たちの軌跡を、研究の最前線から活写する骨太の一冊。

新刊

ニュートリノ
論争は
いかにして
解決したか

ISBN 978-4-06-153138-3

主な内容

1. ニュートリノ、この不思議な素粒子
2. ニュートリノを捕まえる—デーヴィスの試み
3. 太陽とはどのような星か—ニュートリノのゆりかごの素顔
4. 消えたニュートリノ—太陽からの観測結果
5. 間違っているのは物理学か、太陽か—太陽ニュートリノ問題
6. 世界各地で始まった努力—日本、カナダ、アメリカ、ロシア...
7. "ニュートリノ振動" が解き明かした謎
8. ニュートリノの物理的性質を見直す
9. 太陽ニュートリノ問題は解決したか
10. ニュートリノはどこから来て、どこへ行くのか

ホモ・サピエンスに至るまでの軌跡 絵でわかる 人類の進化

斎藤 成也・編

A5・198頁
定価2,100円 (税込)

人類の長い進化の道すがら、目でわかる! 化石や遺伝子の研究から、われわれ人類の進化の道すがらが明らかになってきた。第一線の研究者たちが、豊富なイラストを使って、初心者にもわかりやすく解説する。

新刊



ISBN 978-4-06-154759-9

漢方の「理論」「病理」「診察法」「治療」「漢方薬」がコンパクトにまとまった、初学者向け基本書。

絵でわかる 漢方医学

入江 祥史・著

A5・190頁
定価2,310円 (税込)

学生・初学者向けの漢方医学入門書。陰陽や証などの難しい理論も独特の見慣れない漢字も、豊富なイラストで漢方のイメージがすっきり頭に入ります。

新刊



ISBN 978-4-06-154760-5

講談社

東京都文京区音羽2-12-21 編集部 03(3235)3701
http://www.kapub.co.jp/ 販売部 03(5395)3622

<資料請求番号69>

努力の結果が
進歩です。



私たちは明るい努力家です。

時代の先駆者として

ハイテクガラスを開発し

影の立役者として

科学の進歩を支えます。

豊かな未来を創るためなら

今日の苦労は明日の意欲。

オハラはいつも

未来の可能性にチャレンジします。



高純度光学ガラス

興味をお持ちの方は
下記まで資料を御請求下さい。

OHARA
株式会社 オハラ

〒252-5286 神奈川県相模原市中央区小山1-15-30
TEL: 042(772)2101(代) FAX: 042(774)2314
URL: <http://www.ohara-inc.co.jp/>

<資料請求番号70>

原始的な鳥や翼竜が小惑星衝突で絶滅したのに 新鳥類が生き延びたのはなぜなのか

いなかったのなら、いったい何が勝っていたのだろうか？ 私を含む何人かの古生物学者は、摂餌習慣の違いが競争上の強みをもたらしたのではないかと考えている。

この仮説を支持する材料として私は、大量絶滅直後の地層、つまり6000万年前とそれよりも少し新しい層に化石が残っている新鳥類が水辺にすんでいたらしいことを、近年に発表した一連の論文で示してきた。海岸や湖、川辺、深い海といった環境だ。こうした環境に生息している現在の鳥の多く（代表例はカモの仲間）は一般に雑食性で、多様な食物を餌に生きていくことができる。そしてカモに似た鳥は、白亜紀にいたことが確認できた新鳥類の系統の1つでもある。

これに対し、白亜紀の鳥のうち絶滅事象で生き残れなかったグループは、

海岸や内陸、砂漠、森林など、さまざまな環境でできた岩のなかから見つかっている。こうした生態的多様性は、これらの古い鳥がそれぞれのニッチに応じた餌を集めるよう専門化していた可能性をうかがわせる。とすれば、初期新鳥類が生き延びられた秘訣はおそらく、単に他よりも特殊化が進んでいなかったからだ。

そうした柔軟性のおかげで、新鳥類は小惑星衝突後の環境変化により容易に適応できたのだろう。これは魅力的な考えだが、はっきりしたことをいうのは時期尚早だ。さらなる化石の発見が求められる。新たに発掘されたものでも、博物館の引き出しに埋もれていたものでもよい。そうした化石によって初めて、初期の新鳥類がどのように絶滅を免れて飛び立ったのかを明らかにできるだろう。

(編集部 訳)



著者 Gareth Dyke

アイルランドにあるユニバーシティ・カレッジ・ダブリンの古生物学者。生きている鳥よりも、干からびたペシアンコの鳥化石を好む。英国の大学の学部生だったころに、動物の飛行に興味を抱いた。鳥とその飛行の進化を研究、世界中で化石を発掘・調査してきた。博物館を訪ねたり砂漠で発掘調査したりと忙しいが、そうした旅に出ていないときには、ヨーロッパの19世紀の歴史を学ぶのを楽しんでいる。オーストリア＝ハンガリー帝国のスパイでもあったトランシルバニア人恐竜化石コレクターに関する本を執筆中。

原題名

Winged Victory (SCIENTIFIC AMERICAN July 2010)

もっと知るには…

A NEW PRESBYORNITHID BIRD (AVES, ANSERIFORMES) FROM THE LATE CRETACEOUS OF SOUTHERN MONGOLIA. E. N. Kurochkin, G. J. Dyke and A. A. Karhu in *American Museum Novitates*, No. 3866, pages 1–12; December 27, 2002.

SURVIVAL IN THE FIRST HOURS OF THE CENOZOIC. Douglas S. Robertson et al. in *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 116, Nos. 5–6, pages 760–768; May 2004.

DEFINITIVE FOSSIL EVIDENCE FOR THE EXTANT AVIAN RADIATION IN THE CRETACEOUS. Julia A. Clarke et al. in *Nature*, Vol. 433, pages 305–308; January 20, 2005.

THE BEGINNINGS OF BIRDS: RECENT DISCOVERIES, ONGOING ARGUMENTS AND NEW DIRECTIONS. Luis M. Chiappe and Gareth J. Dyke in *Major Transitions in Vertebrate Evolution*. Edited by J. S. Anderson and H.-D. Sues. Indiana University Press, 2007.

THE INNER BIRD: ANATOMY AND EVOLUTION. Gary W. Kaiser. University of British Columbia Press, 2007.

地球を支配した 恐竜と巨大生物たち

日経サイエンス編集部編

好評発売中



●A4変型判 ●136頁 ●1400円(税込)

お近くの書店でお求めください。品切れの場合は書店にご注文ください。
当社へ直接ご注文の場合は、本代のほかに送料を頂戴いたします。
お問い合わせ、ご注文は、電話、FAXまたはホームページからどうぞ。

かつて地上を我が物顔に歩き回っていた恐竜、そして背丈 3m もある肉食鳥など太古の巨大生物たち——。最近の研究をもとに、見るだけで楽しい豊富なイラストと読みやすい文章で彼らの素顔に迫る。相次ぐ化石の発見に沸く中国の現地ルポなども盛り込んで最新の研究成果を紹介する。

プロローグ

恐竜大国に行く 新発見に沸く中国

第1章 主役たちの素顔

暴君ティラノサウルスの意外な生態
恐竜はどのように獲物を仕留めたか
化石の宝庫ゴビ砂漠の恐竜たち
南極圏を生きた恐竜

第2章 進化と滅亡

恐竜の羽が明かす進化の驚異
ジュラ紀の海の支配者——魚竜
マダガスカルで探る恐竜と哺乳類の起源
世界が燃え尽きた日
大絶滅と復活のシナリオ
恐竜を滅ぼした小惑星衝突

第3章 新しいモンスター

南米に君臨した巨大肉食鳥
クジラが歩いていたところ
太古のオーストラリアを支配した
キラーカンガルーたち

図版索引 恐竜とその他の動物

プラグイン車のクリーン度を問う

どれくらいクリーンなのかは、充電する場所による

M. モイヤー (SCIENTIFIC AMERICAN 編集部)

日産自動車は量産モデルとしては世界初の電気自動車「リーフ」を近く発売すると昨年に発表した後、全米24都市で「ゼロエミッションツアー」を展開した。リーフはバッテリーパックを車庫のコンセントにつないで充電し、そのエネルギーで電気モーターを回す。エンジンやガソリンタンク、排気パイプはない。路上では完全なゼロエミッション・マシンだ。しかし、日中のドライブで電池がエネルギーを失うため、夜間の車庫でバッテリーパックに近くの発電所から新たな電子を補充しなければならない。この過程はゼロエミッションではない。

リーフは電気自動車の実用化レースで真っ先にスタートを切るだろうが、これを追う一群がすぐ後ろにいる。ゼネラル・モーターズ (GM) が導入する「シボレー・ボルト」は電池を充電状態に保つ小さな内燃エンジン付きの電気自動車だ。フォードは2011年に「フォーカス」の電気自動車モデルを出し、その後にトヨタ自動車、ボルボ、アウディ、ヒュンダイが続く。

これらの車が環境に与える本当の影響を計算するには、自動車にエネルギーを供給する発電所からの二酸化炭素排出を含める必要がある。米エネルギー省 (DOE) の研究者が解析したところ、結果は場所によってかなり異なることがわかった。

電気自動車向けの電力は原子力と再生可能エネルギーのほか、主に石炭火力と天然ガス火力で発電することになると研究チームは結論づけた。天然ガス火力発電が主体の地域に住んでいる場合、電気自動車は二酸化炭素の排出削減をもたらしそうだ。通常のハイブリッド車に比べて40%も排出が減る場合もある。しかし、天然ガスよりもはるかに“汚い”石炭火力発電にほとんどを頼っている地域では、大気への二酸化炭素放出量は電気自動車によってむしろ増えるだろう。

日産のゼロエミッションツアーはこの春に終了したが、「ゼロ」が本当に意味するものが何なのかをめぐる議論が、いままさに進行中だ。

(編集部 訳)

原題名

The Dirty Truth about Plug-in Hybrids
(SCIENTIFIC AMERICAN July 2010)



日産自動車の「リーフ」。この車が最もグリーンなのは、米国北西部においてだ。

電力源 あなたが使う電気はどのように発電された電力なのか？ その答えは、時間帯と曜日、あなたの居住地によって変わってくる。今後の電気自動車を動かすエネルギー源を見極めるため、研究チームはまず電気自動車によって新たに加わる電力需要をモデル化した。そして、この需要増分が主に化石燃料を燃やす発電所によってまかなわれることを発見した。実際、図中で番号に黄色をつけて強調した6つの地域では、石炭火力発電の割合が高いため、プラグイン車を利用しても温暖化ガスの排出は通常のハイブリッド車以上には減らない。

自動車の炭素排出

プラグイン車を充電する電力の炭素強度 (消費量に対する二酸化炭素排出量) を図に示す。高さが高く、色の濃い地域ほど、排出が多い。小さなボックスのなかに、プラグイン車の炭素排出と石油消費が通常のハイブリッド車と比較してどうなるかを示した。

炭素排出の程度は？



図中で高さが高く、色の濃い地域ほど、プラグイン車の充電に使われる電力による二酸化炭素排出量が多い。

通常のハイブリッド車との
走行距離あたりの比較

少ない 多い

排出される炭素の量

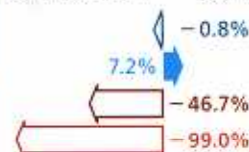
■ プラグイン・ハイブリッド車
■ オール電気自動車

ガソリン消費量

■ プラグイン・ハイブリッド車
■ オール電気自動車

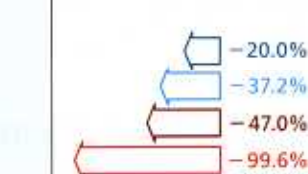
1. 中西部北

天然ガス火力 47.6%
石炭火力 46.0%
再生可能エネルギー 6.3%



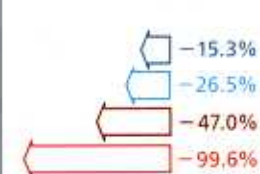
13. 北西部

天然ガス火力 84.3%
原子力 15.7%



12. カリフォルニア州

天然ガス火力 99.0%
再生可能エネルギー 1.0%



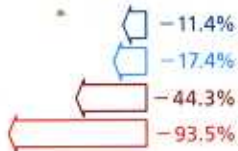
4. ニューヨーク州

石油火力	67.2%
天然ガス火力	29.4%
石炭火力	3.4%



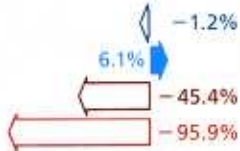
5. ニューイングランド州

石油火力	4.5%
天然ガス火力	70.3%
石炭火力	15.5%
再生可能エネルギー	9.7%



6. 大西洋岸中部

石油火力	2.4%
天然ガス火力	60.6%
石炭火力	37.0%



電気自動車の3タイプ



オール電気自動車

日産の「リーフ」など、ガソリンエンジンがなく、電池だけで動く。このため1回の充電で走れる距離は約160kmまで。



プラグイン・ハイブリッド車

オール電気自動車と同じくコンセントにつないで充電するが、小さな内燃エンジンを備えており、これで電池を充電することもできる。「シボレー・ボルト」など。



ハイブリッド車

トヨタの「プリウス」など。電力網には接続しない。低速走行では電気モーターによって駆動し、高速走行では内燃エンジンに切り替える。

2. グレーター・イリノイ

天然ガス火力	24.6%
石炭火力	75.4%



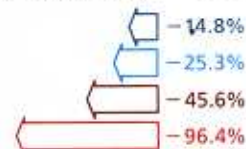
3. グレーター・オハイオ

天然ガス火力	32.8%
石炭火力	65.7%
再生可能エネルギー	1.5%



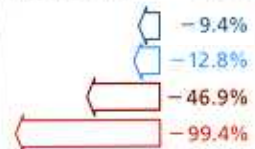
7. フロリダ州

石油火力	2.4%
天然ガス火力	96.1%
再生可能エネルギー	1.5%



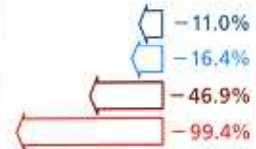
11. 南西部

天然ガス火力	83.6%
石炭火力	16.1%
再生可能エネルギー	0.3%



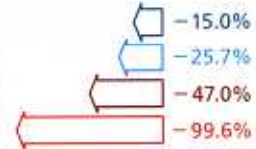
10. 中西部南

天然ガス火力	88.6%
石炭火力	11.4%



9. テキサス州

天然ガス火力	100.0%
--------	--------



8. 東南部

天然ガス火力	44.9%
石炭火力	51.9%
再生可能エネルギー	3.2%





偽造金貨と 信用できない計測結果

坂井 公 (筑波大学)

題字・イラスト: 斉藤重之

迷探偵芋虫とその助手グリフォンが
ピカピカ光る金貨何枚かを並べて眺め
ながら、溜め息をついていた。例によ
って好奇心旺盛なアリスが口を出す。

「わあ、新品の金貨ですね。とって
も綺麗! さわってもいいですか?」

「ダメ、ダメ、大事な証拠品だ。お
前さんの手垢がついては困る」と芋虫。

手垢といわれてアリスは一瞬ムッと
したが、すぐに意味深な「証拠品」と
いう言葉に反応する。「証拠って?」
と怪訝そうな顔でグリフォンを見ると、
グリフォンは了解を得るように芋虫を
チラッと見て「まあ、この子は一味で
はありえないから……」。

「実は、この8枚の金貨は8カ所の

鑄造所から1枚ずつ持ってきたサンプ
ルなのだが、鑄造所のうち1カ所は金
貨偽造団の拠点になっているという情
報が入ってきた。つまり、1枚は偽造
金貨というわけだが見かけでは区別が
つかない。実は偽造金貨は本物よりほ
んの少し軽いことがわかっているのだ
が、それが実に微妙な差で、特殊な電



子天秤で比べないと違いがわからず、1回の計測にかなりの費用がかかる」

「はあ、それで計測回数をなるべく減らしたいというわけですね」と勘のいいアリス。「でも、そういうパズルなら前に解いたことがあるわ。あれは確か……」。

「うむ。普通なら2回測ればわかる」とえらそうに芋虫。「ところが、ここに別の問題があるのだ。電子天秤を扱う技術者は、鏡の国にいる4人の騎士だけなのだが、そのうちの1人には、偽造団の息がかかっているらしい。つまりその騎士からの計測結果報告は必ずしも信用がおけない。もちろん、本

当にそういう騎士がいるかどうかはわからないので、各騎士に1回ずつ計測を頼んでみようかと考えているのだが、それで確実に贋物（にせもの）を見つける方法がないか考えているわけだ」。

さて、読者の皆さんには、よく知られた問題ではあるが、まず、計測結果報告が信用できる場合に、電子天秤2回の計測で偽造金貨を見つけ出す手順を考えていただきたい。

次に、4人の騎士に1回ずつ計測を頼んで贋物を見つけ出す手順を考えていただきたい。ただし、この場合、計測結果報告の1つには嘘が混じっている可能性があることをお忘れなきよう。

さらに次のような問題はいかがだろうか？ 16枚の金貨があるが、そのうちの1枚は贋物だとわかっている。贋物は見た目では本物と区別がつかないが、わずかに放射性物質が含まれている。7人の技術者に計測器で放射性物質の有無を1回ずつ測ってもらうことで、贋物を特定することはできるだろうか？ ただし、技術者にはその報告が信用できないものが1人だけいる可能性がある。

答えは次号、
または下記のサイトで9月中旬に公開
<http://www.nikkei-science.com/>

先月号の問題と答え



問題：スペードの兵士たち

10人がジャックの指揮のもと、パトロールの演習をしている。パトロール中はどこをどういうスピードで歩いてもいいが、いつも自分の一番近くにいる仲間を監視して目を離さないようにするのが条件だ。歩き回ってれば互いの距離は変わるので、その時々で最も近い仲間を見きわめ、監視する。今回は初めての演習なので、ジャックも仲間に加わって一緒にパトロールをするという。すると、スペードのエースが「全部で11人で、どの2人の距離もそれぞれ違う場合には、誰にも監視されない兵士が必ず生じますが、構わないのですか？」と聞いてきた。エースの発言の根拠は？



解答例：ジャックを入ると、

兵士の数が奇数の11人になってしまうことがポイントだ。

エースの発言の根拠を述べるには、最短距離にいる2人に着目するのが簡単だろう。どの2人の距離も違うという条件があるので、他のどの2人の距離もそれより遠いから、最短距離の2



人は互いに相手を監視しあうことになる。この2人の兵士のどちらかが、他の誰かから監視されていれば、その兵士は二重の監視を受けることになる。

監視する者も、監視を受ける者も同数の11人なのだから、1人が二重の監視を受ければ、必ず監視を受けない者が生じる。

最短距離の2人は互いに監視しあうだけで、他からの監視を受けないとしよう。その場合、この2人はいないものとして、残りの9人だけで考えても同じことである。この9人の中で最短

距離にいる2人に着目して同様に考えれば、結局、7人の場合に帰着される。こうして、2人ずつ組にして取り除いていけば、全体で奇数人なので、最後に1人残るが、この兵士は誰の監視も受けない。

参考にした本

Peter Winklerによる次の2冊（ともに出版元はA K Peters, Ltd.）

MATHEMATICAL PUZZLES: A CONNOISSEUR'S COLLECTION (2004)

MATHEMATICAL MIND-BENDERS (2007)

ルイス・キャロルによる『不思議の国のアリス』『鏡の国のアリス』

対談
QUALIA
of
SCIENCE

茂木
科学のクオリア
健一郎

第53回
写真：橋本 哲

日本を横断する ニュートリノ

東海村発，神岡町着
日本の地中を走り抜ける見えない粒子の変化を探る
巨大実験が始まった

ゲスト

小林隆 (写真中央)
(高エネルギー加速器研究機構)

長谷川和男 (写真左)
日本原子力研究開発機構
J-PARC センター加速器副ディビジョン長

藤井芳昭
高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所ニュートリノグループ教授

小林仁
高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設第一研究系主幹



茂木 いやあ、J-PARC（茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設）って初めて来ましたが、すごい広さですね。今日はよろしくお願いします！

小林 本日も案内いたします小林です。よろしくお願いします。

茂木 ここでは、ずいぶん色んな実験をしていらっしゃるんですね。

小林 はい、J-PARC は陽子を光速近

くまで加速して原子核にぶつけて、その時に出てくる粒子を使った様々な実験をする施設です。僕はニュートリノを使って素粒子実験をしていますが、物質やバイオの実験もあります。

茂木 先生がやっている T2K 実験というのは。

小林 T2K というのは「東海 to 神岡」という意味で、ここで作ったニュート

リノを、300km 先の岐阜県神岡町にあるスーパーカミオカンデに飛ばして、どう変わるかを見ようとしています。

茂木 小柴昌俊先生がカミオカンデで超新星のニュートリノを捉えて 2002 年のノーベル賞を受賞されましたが、今度はここで作ったニュートリノをつかまえるわけですね。

小林 そうです。詳しいお話はあとでゆっくりするとして、まず装置をご覧に入れましょう。あ、（放射線を測る）線量計を付けて下さいね。

茂木 はい。

陽子の種を作る

長谷川 ようこそいらっしゃいました。線形加速器の責任者の長谷川です。

茂木 よろしくお願いします。この建屋（次ページ上の航空写真①）、ずい

小林隆

（こばやし・たかし）

高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所教授

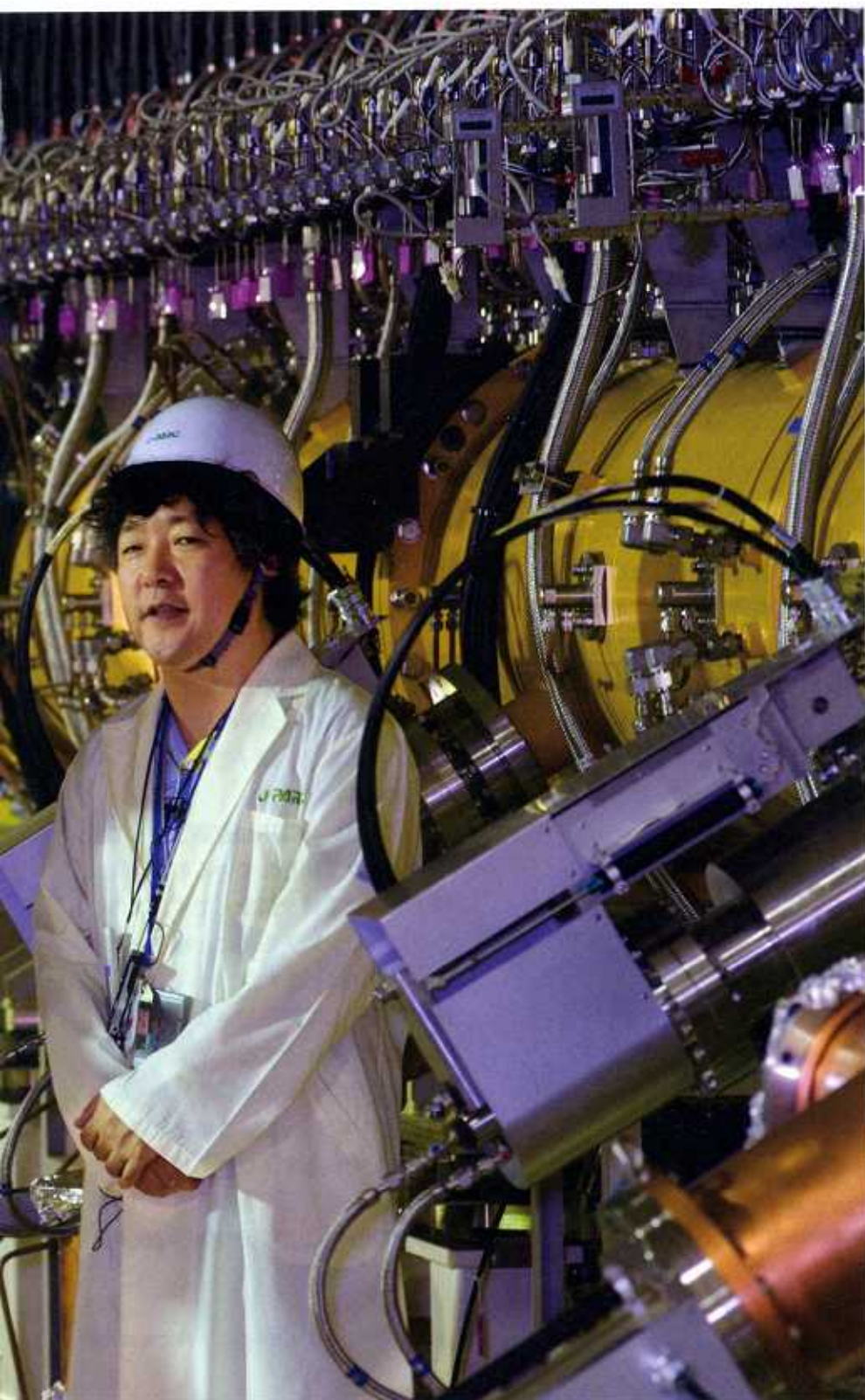
1968 年、岡山県生まれ。広島大学大学院理学研究科で学位取得、理学博士。96 年東京大学原子核研究所助手。97 年高エネルギー加速器研究機構助手、同助教授を経て 2007 年から現職。東大時代から T2K の前身となる K2K 実験に携わり、一貫してニュートリノ実験に取り組んでいる。最近の趣味は水泳。

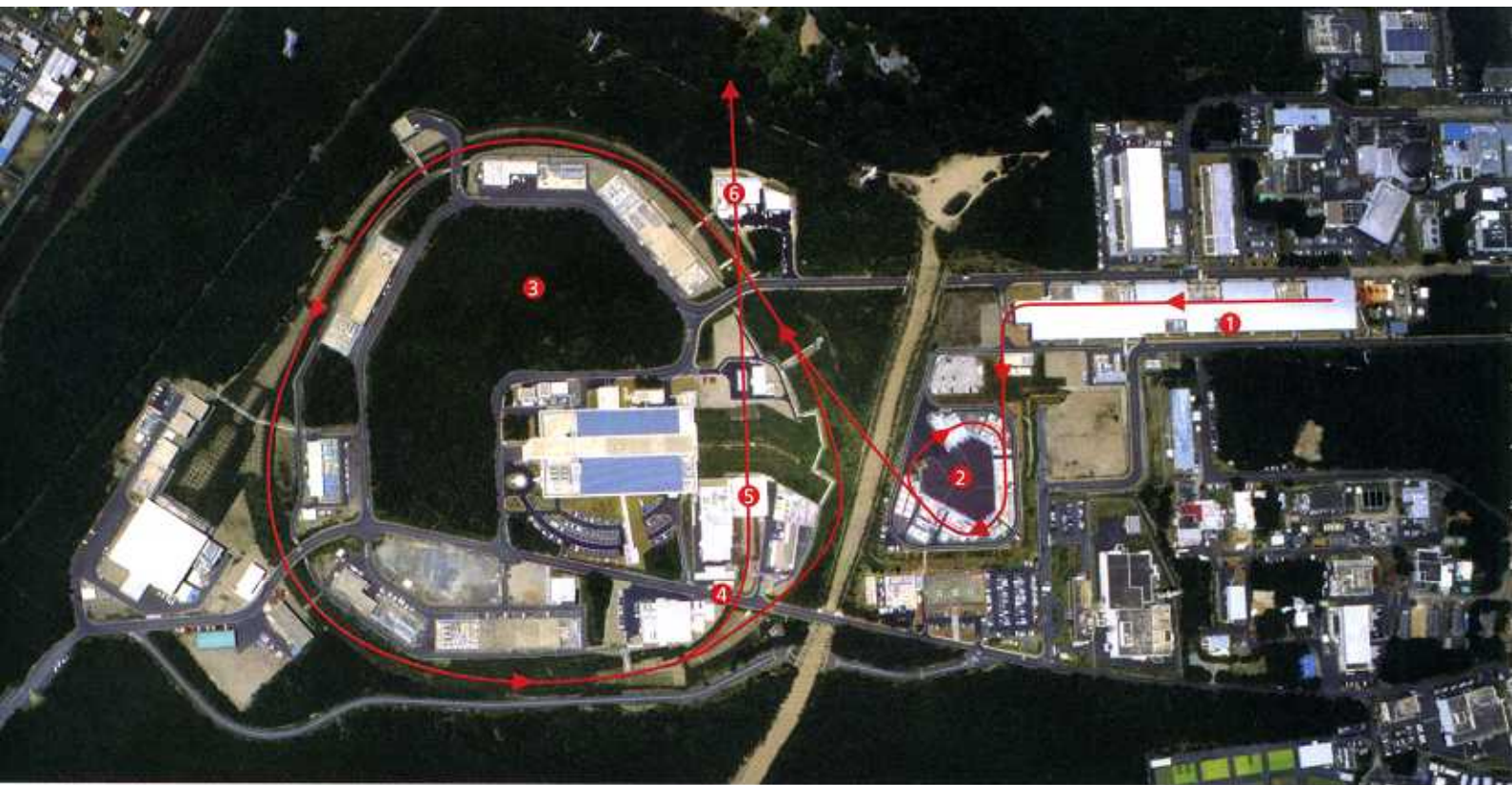
茂木健一郎

（もぎ・けんいちろう）

ソニーコンピュータサイエンス研究所
シニアリサーチャー

1962 年、東京都生まれ。東京大学大学院理学系研究科物理学専攻課程修了、理学博士。理化学研究所などを経て現職。慶應義塾大学研究特別教授。専門は脳科学、認知科学。『クオリア』をキーワードに脳と心の関係を研究している。著書に『脳とクオリア』（日経サイエンス社）、『脳と仮想』（新潮社）ほか多数。





T2K実験の仕組み ①の線形加速器で加速された負水素イオンは②の小さなシンクロトロンに入る時に電子をはぎ取られて陽子になり、周回しながら加速される。さらに③の巨大シンクロトロンでほぼ光速に達し、④の陽子ビームラインで取り出して⑤でターゲット原子核に当てる。すると π 中間子が飛び出し、崩壊してニュートリノが生じる。⑥の前置検出器でそれを確認し、岐阜県神岡町に向けて飛ばす。

ぶん長いですね。

長谷川 330m あります。東京タワーを横にしたくらいですね。

茂木 この中を陽子が飛んでいく？

長谷川 はい。ここにある線形加速器、私どもはリニアックと呼びますが、これは粒子を直線的に加速する装置です。ここにあるすべての実験の出発点で、まずイオンを作って一直線に飛ばし、光速の半分くらいの速さまで加速していきます（エレベーターで地下へ）。

茂木 今は運転はしていないんですか。

長谷川 今は止まっています。運転中はX線や中性子が出るので入れないです。

小林 大きな電力を使うので、電力需要が高い夏は運転できないんです。だから夏はメンテナンス期間です。海外では逆に冬に止まるところもあります。

長谷川 恐れ入りますが、ここで白衣とヘルメットを着けて、靴を履き替えて下さい。着替えたらゲートに入室カードをかざして、線量計とパーソナルキーを取って頂きます。

茂木 なかなか厳重ですね。

長谷川 セキュリティは厳しいです。

例えばこのキーがないと次のドアが開かないので、必ず1人1個ずつ持って入って、出る時に戻しますが（右ページ上の写真）。キーが全部戻っていないと、装置からビームが出ません。

茂木 そうやって事故を防いでいる。

長谷川 （加速器のホールに入り、金属製の小屋の扉を開ける）この中に、加速する陽子の種を作るイオン源があります。この円筒の先で、負水素を発生します（右ページ下の写真）。

茂木 負水素？ 陽子ではなくてH⁻を加速するんですか。

長谷川 はい、陽子加速器といっても、リニアックで加速しているのは、実は陽子ではなく負水素なんです。次のシンクロトロンに入る時に、電子をはぎ取って陽子にします。

茂木 どうして陽子じゃなくて、わざわざ負水素を加速するんですか。

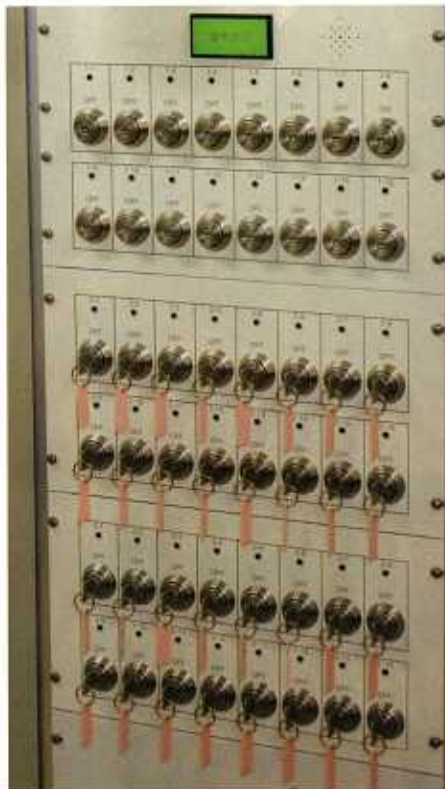
長谷川 円形的高速道路に外から入る時には、中で回っている車とは逆にハンドルを切りますよね。あれと同じで、シンクロトロンで周回する陽子の中に入っていくには、粒子の軌道を反対方

「J-PARC」とは

高エネルギー加速器研究機構（KEK）と日本原子力研究開発機構が共同で作った実験施設。線形加速器とシンクロトロン2器で段階的に陽子を加速して原子核に衝突させ、その際に出る様々な粒子を使って実験する。T2K実験のほか、ハドロンを使った「強い力」の研究、中性子を使ったタンパク質解析、ミュー粒子を使った物性測定などがある。



T2K実験 茨城県那珂郡東海村から岐阜県飛騨市神岡町までニュートリノを飛ばし観測する。



準備は入念に 見学者も白衣とヘルメット、専用靴を身に付け(左)、キーボックス(右)からキーを抜き、線量計を持って入室する。すべてのキーが戻っている状態でない、加速器は稼働しない。

いなんですか。

長谷川 0.5mm 以内です。330m 先でも目標から 0.5mm しかズレないようにしないといけない。

茂木 結構大変だよなあ。

長谷川 そうですね。この建屋自体も伸び縮みしますので、それを監視する仕組みも備えています。

茂木 大きな地震があったら、ビームがズレちゃったりしませんか。

長谷川 それはないですね。震度 4 以上の地震があった時は、ビームを止めることにはなっていますが。

茂木 これまでに何か不測の事態が起きたことはありますか。

長谷川 不測の事態というか、去年、リニアックの最初の部分で電気的な問題が起こって、ビームの加速ができなくなったことはありました。ここで加速できないと J-PARC のどこにもビームを供給できないので、だいぶご心配をおかけしましたが、幸い真空設備を増強することで回復しました。

向に曲げてやる必要があるんです。軌道を曲げるのは磁石ですが、負水素の H^- は陽子 H^+ と電荷が逆なので、磁石から受ける力が逆になって、反対方向に曲がります。

茂木 中の陽子とうまく合流させるために、最初は電荷を逆にしておく。

長谷川 そうです。そうすれば同じ軌道に次々と陽子を入れていけるので、ビームを強くできます。

茂木 そうか、強度を稼ぐためなんだ。負水素はどうやって作るんですか。

長谷川 水素ガスの中にフィラメントを置いて、電子を出します。水素をプラズマ状態にしておいて、電子をそーっとくっつける感じですね。

茂木 こういう装置は、どこが作るんですか。

長谷川 設計は我々がしますが、加工は中小の会社をお願いしています。

330m のトンネル

茂木 おー、これがリニアックですか(次ページの写真)。負水素のビームは、

この中を走るわけですね。

長谷川 はい、ここから加速が本格的に始まります。黄色いタンクの 1 つ 1 つに電磁石が入っていて、飛んでいるうちに広がってしまうビームを絞りながら加速します。広がって壁に当たると失われてしまうので、できるだけまっすぐに飛ばす必要があるんです。

茂木 ビームの直線性って、どれくら

ここが出発点 すべての実験の元になる陽子ビームの「種」はここで生まれる。銀色の円筒の先にあるイオン源で負の水素イオンを作り、壁の向こうにある線形加速器に送り込んで加速を始める。





一直線に加速する 加速の第一段階は、負の水素イオンを直線的に飛ばしながら、電場によって加速する線形加速器が担う。負水素は黄色いタンクの中を走り抜け、光速の約55%のスピードに達する。

小林 リニアックは一番上流にあるので、ここでビームが出ないと何もできないんです。

茂木 責任重大ですね。

長谷川 はい。

小林 でも素粒子実験というのは、加速器がビームを作ってくれたらそれを使えばいい、という気持ちでは駄目です。全体が1つの実験装置、というつもりでやらないと。

茂木 わかる気がします。

長谷川 あと当たり前ですが、やはりメンテナンスが大事ですね。メンテナンスの時間をケチって実験したいとい

う気持ちは皆あると思いますが、それをするとは予定外の停止につながります。

茂木 稼働時の運転時間はどれくらいなんですか。

小林 1月に実験を始めて、6月までずっとビームを使わせてもらいました。

茂木 結構長く運転できるんだ。

小林 でも使えそうなデータは40日分くらいかな。稼働したばかりで機器の故障もあるし、調整が必要なので。

茂木 今はそのデータの解析中ですか。

小林 ええ。でもまだビームの強度が弱いんです。最大で設計強度の1/15で、仮にずっとこのままだと、実験に

100年くらいかかります。

茂木 100年！

小林 なので、なるべく早く加速器全体を設計した強度に近づけたいですね。

茂木 どうやって？

長谷川 ここについて言うと、まず運転時間を延ばし、稼働率を上げます。今加速しているのは最初の150mくらいで、その先はビームを運んでいるだけなんです。今後はそこにも加速器を入れる予定です。そうすると今の2倍のエネルギーに加速できます。

小林 そろそろ次の装置に行きますか。

下に向かって撃て

小林 今見たリニアックから出た負水素は陽子に変換されて、おむすび形のシンクロトロン（78ページの写真②）を回りながら加速されます。そして直径500mのメインリング（同③）を周回して、ほぼ光速に近いスピードになります。ニュートリノを作るには、ここから陽子を引き出し、ターゲットとなる原子核にぶつけるんです。リニアックはいわば加速器の入口ですが、次は出口のところに行ってみましょう。

茂木 はい。

藤井 こんにちは。陽子ビーム輸送ライン担当の藤井といいます。

小林仁 メインリングの小林（仁）です。

藤井 今、私たちがいるのは、メインリングの中を走ってきた陽子を取り出して、ターゲットまで持っていくラインです（右ページ下の左の写真、78ページの写真④）。陽子は私たちの後ろから飛んできて、その壁の向こうにあるターゲットに衝突します（同⑤）。壁の前に緑色の電磁石がありますが、よく見ると、向こうに行くにつれて下の方を向いています（右ページ下の右の写真）。なぜだと思いませんか。

茂木 えーと、なんでだろう。

藤井 ターゲットに陽子が衝突すると、 π 粒子が出て、それが崩壊してニュー



メインリング 全長約1.6kmの円形のトンネルに電磁石が並ぶ。この中で陽子が周回し、ほぼ光速と同じ速さに加速される(78ページの写真の⑤)。

ビームの分岐点 メインリングを飛んできた陽子を、ニュートリノ実験に行くものとメインリングに戻るもの、捨てるものとに分ける場所。

トリノになり、神岡に飛んでいきます。でも地球は丸いので、水平に撃ったら宇宙に飛んでいってしまいます。そこで少し下向きに撃ち込んで、ニュートリノが地中をまっすぐ走り、神岡で地表に出るようにしているのです。

茂木 ははあ。

小林仁 メインリングとの分岐のところまで行ってみましょうか。

茂木 (歩きながら) ここに並んでいる青いのは、全部超電導磁石ですか。

藤井 はい。陽子の軌跡を大きく曲げるのに、強い磁場が必要なんです。

茂木 超電導磁石って、液体ヘリウムで冷やすんですね。すごくお金がかかりますか。

小林仁 でも超電導だから、電気代は

ほとんどかかりません。もし常電導でこれだけ強い磁石を作ったら、すごいことになると思います。

茂木 そうか。常電導の方が、ランニングコストはむしろ高くなるんだ。

小林仁 着きました。分岐点です。

茂木 上がってもいいですか。

小林仁 いいですよ(上の右の写真)。ここから奥がメインリング(同左)で、そこから飛んでくる陽子をこの装置でボーンと蹴ってやって、3つに分けます。反対側を見て下さい。右、左、真ん中と、3つのラインがありますね。左は今見てきたT2Kの陽子ビームラインで、真ん中のはメインリングのラインです。右は要らない粒子を捨てています。

小林 さて、最後にT2K実験の最下流に位置するニュートリノ検出器を見に行きましょう。

巨大科学の現場

小林 (建屋の前で、少し先の盛り土を指さして) あそこの地面の下あたりで陽子が標的にぶつかって、 π 中間子ができます。それが、私たちの足の下あたりではもうニュートリノになっていて、地中を飛んでいるんですよ。

茂木 この辺にも、たくさん来ているわけですね。

小林 ええ。でも放射線ではないので、人体には影響ありません。暑いので中に入りましょうか(建屋に入る。78ページの写真⑥)。

陽子を取り出す メインリングから陽子を取り出し、ターゲットへと導くビームライン。超電導磁石がずらりと並んでいる(78ページの写真の④)。

衝突直前 緑色の電磁石の中心軸を少しだけ下に傾け、下向きに陽子を発射する。穴の開いた壁の向こうにターゲットがある(78ページの写真の③)。



茂木 うわー（右の写真）。これはどういうことになっているんですか。

小林 底に見えるのが、ニュートリノの検出器です。さっき見たようにニュートリノは下に向けて撃つので、その分地下に潜っています。ニュートリノは宇宙からもたくさん降り注いでいますが、その元が何だったのかは調べようがありません。でも人工的に作ったニュートリノなら、あらかじめ調べておける。東海と神岡の両方で調べれば、飛んでいる間にどういう変化が起きたかを見ることができるんです。

茂木 だから測定が必要だと。

小林 はい。下に見える赤い箱が磁石です。今はメンテナンスのために両側に開いています。その間に見える銀色の部分が心臓部のシンチレーターです。ニュートリノを鉄やプラスチックに当てると、その際に起きる反応によって電子や陽子が飛ばされます。その飛び方を見て、ニュートリノの種類やエネルギー分布を調べています。

茂木 でっかい磁石ですねえ。

小林 あの磁石、実は CERN（欧州合同原子核研究機構）から寄贈しても

らったんですよ。もともとは 1980 年代に、ノーベル賞を受賞したルビア（Carlo Rubbia）たちが使っていました。1000 トンありますが、スイスからはるばる運んできました。

茂木 由緒正しい磁石なんですね。

小林 そのルビアの息子さんが、今ここであの磁石の責任者をしています。

茂木 面白い縁だねえ。

小林 下に降りてみましょう（エレベーターと階段で降りていく）。

茂木 ずいぶん深いんですね。

小林 ここはさっき見た検出器のさらに下、地下 29m のところにあります（下の写真）。これもシンチレーターですが、先ほどとは目的が違って、ビームが飛んでいく方向を検出しています。

茂木 ちゃんと神岡に向かって飛んでいくことを確認している？

小林 実はビームの方向は、ほんの少し神岡から外してあります。

茂木 なぜですか。

小林 ニュートリノが飛ぶ方向は、陽子が飛んできた方向を中心に、ある程度ばらついていきます。そして我々が見たいエネルギーを持つのは、実は真っ

直ぐ進むやつではなく、少し違う方向に出てきたやつなんです。これを神岡で捉えられるように、わざとビームの方向を少しずらしています。

茂木 ニュートリノは何個くらい飛ばすんですか。

小林 1 回に約 1000 兆個飛ばします。このうちカミオカンデに届くのは 1 億個、実際に検出できるのは 0.0001 個くらいですね。1 万回測定して 1 回検出できるくらいの数ということです。

茂木 1000 兆個が 0.0001 個ですか。もう実際に検出したんですか。

小林 はい。ただそのニュートリノに見たい変化が起きているかどうかは、もう少しデータがたまるまでわかりません。でも計画が動き出してから今まで 10 年かかっていますから、それさえ思えばあと少しです。じゃあ、制御室に戻りましょう。

30 年目の正直

茂木 T2K 実験って、誰が最初に考えたんですか。

小林 1999 年の末に、西川さんと戸塚さん（高エネルギー加速器研究機構の西川公一郎素粒子原子核研究所長と、戸塚洋二前機構長）が、酒を飲みながら「こんなことできないかな」と話し合ったのが最初です。じゃあやろう、ということになって、僕ら、当時の若い連中が設計を始めました。

茂木 実験の目的は何なんですか。

小林 そうですね。突き詰めて言えば、極微の世界や、宇宙にある物質の成り立ちの理由を知りたい、ということです。それはすべての素粒子物理屋の夢だと思います。その 1 つの道筋として、ニュートリノがあるんです。

茂木 なんでニュートリノなんですか。

小林 今の素粒子理論である標準理論では、ニュートリノには質量がないことになっています。でも 1998 年にスーパーカミオカンデで、ニュートリノ



最深部の測定器 右の写真に写った巨大なニュートリノ検出器のさらに下にある検出器。全体は見えないが、膨大な数のシンチレーター（右側の黒い箱）が並んでいる。

巨大科学を見下ろす

深さ23mの巨大な円筒の底に、ニュートリノの検出器が設置されている。実験中は、画面の右下から左上の方に向かって、大量のニュートリノが飛んでいく。現在メンテナンス中で、よく見ると下の方に作業中の人の姿が見える。





が時間がたつにつれて状態を変える「ニュートリノ振動」という現象が初めて確認されました。ちょっと専門的になりますが、この振動があるというのは、ニュートリノに質量があるということなんです。

茂木 標準理論の破綻がみつかった？

小林 はい。今の研究者は、これが最終理論だとは思っていません。何とか標準理論に合わない現象を捉えてその先のとっかかりにしようと、色々やってきたんです。でも過去30年間、なかなかうまくいかなかった。それが初めて標準理論から外れる現象が観測されて、ある種の期待が生まれました。

茂木 ニュートリノ振動というものについて、もう少し教えて下さいますか。

小林 ニュートリノには3種類あります。電子ニュートリノ、 μ ニュートリノ、 τ ニュートリノです。ある時点で100%電子ニュートリノだったのが、だんだん別のが混ざってきて、例えば μ ニュートリノになる。そしてまただんだん電子ニュートリノに戻ってくる。その現象がニュートリノ振動です。T2Kでは、東海の加速器で作った μ ニュートリノが、最終的に電子ニュートリノになる振動を、神岡で捉えようとしています。

茂木 どうして振動を見るのが大事なんですか。

小林 それは「CP対称性の破れ」と関係があります。この言葉は、小林さん、益川さんがノーベル賞を取られたことでご存知の方も多いでしょう。CP対称性の破れというのは、簡単に言うと、例えばニュートリノが従う物理法則と反ニュートリノが従う物理法則が違うということです。今、宇宙には色々な物質がたくさんあるのに、反物質はほとんどない。そういう非対称なことが起こるためには、基本的な素粒子の法則の中にCP対称性の破れが組み込まれている必要があります。

茂木 CP対称性の破れは、確か日本の実験で確認されたんですよね。

小林 筑波のベル実験ですね。でもあれはクォークのCP対称性の破れで、それだけでは宇宙に反物質がないことの説明がつかない。何か別の理由があるはずで、その候補の1つが「ニュートリノでもCP対称性が破れており、それが物質の起源になった」という説です。ニュートリノの法則と反ニュー

トリノの法則が本当に違うのかどうか、それを明らかにするには、まず μ ニュートリノが電子ニュートリノへ振動していることを確かめないといけません。

待つ者だけに訪れる幸運

茂木 日本は伝統的にニュートリノ実験に強いようですが、どうしてですか。

小林 伝統といっても、小柴（昌俊）さんがカミオカンデで超新星のニュートリノを検出する以前にニュートリノ実験があったかという、そうではないんです。やはり小柴さんの先見の明があったためだと思います。

茂木 確か目的はニュートリノではなく陽子崩壊の検出ではなかったですか。

小林 そうです。でも小柴さんはラッキーでしたねと人に言われると、いつも「準備をしていたからだよ」と言います。カミオカンデはニュートリノも検出できるよう、最初から意図して設計されていました。予期していたから、超新星爆発が起きて何かが見えた時、ニュートリノかもしれないと考え、ずっと感度のいい検出器を作って観測した。運だけではないと思います。

茂木 科学発見のプロセスはセレンデ



素粒子の人は特別？ 「素粒子の人って、すごく大変そうなのに異様に明るいんですね」「そうかなあ。ほかの分野と同じじゃないですか」「いや、独特のテンションの高さがあります」「……否定はしませんが」。

イピティだとよく言いますが、幸運は受け取る準備ができていない人にしか訪れない、ということですね。幸運を掴むには何が必要なのでしょう。

小林 徹底的に考えることだと思います。実験で予想と違うことが起きたら、それは装置の故障かもしれないし、プログラムのバグかもしれない。でも、あらゆる可能性を考えた上で、説明できない部分を抽出する努力が必要なんだと思います。

茂木 無茶な質問ですが、ニュートリノの応用って考えられますか。

小林 そうした研究も始まっています。自然界のウランなどの崩壊で出るニュートリノを測定して、地球の内部のメカニズムを探るとか。あと、某国の原子炉からのニュートリノを検出して、その稼働状況を監視する試みもあります（14ページ参照）。

茂木 先生の研究はいわゆるビッグサイエンスと呼ばれる分野ですが、ビッグサイエンスの醍醐味って何ですか。

小林 いやあ、僕は同じことが数人で1週間でわかるなら、そっちの方がいいです（笑）。ビッグサイエンスだから面白い、ということはないですね。

茂木 ビッグサイエンスにならざるを

得ないからやっている。

小林 はい。僕はとにかく電子ニュートリノへの振動が起こっているかどうかをまず知りたいんです。それだけのためにずっと準備してきたので。

茂木 10年って長いんですね。その間、どういう気持ちだったんですか。

小林 山登りなんかで、よく頂上までのプロセスを楽しむ人っていますよね。でも僕は一刻も早く頂上に着きたい方なので、その間は辛いものがあります。早くビームの強度を上げたいですね。でないと負けちゃうかもしれないし。

茂木 ライバルは誰なんですか。

小林 一番間近に迫ってきているのが、フランスで実験しているチームです。この9月から実験が始まるので、チンタラやっていると負けてしまいます。もちろん同じ実験ではありませんが、日本はこれまで「いつまでにやると言ったら確実にやる」ということで国際的に評価されてきました。せっかくこれまでリードしてきたんだから、ぜひ勝ちたいです！

茂木 最初の結果はいつ頃？

小林 きちんとした結果が出るには数年かかります。でも年内には、最初の論文を出したいと思っています。



茂木 辛いとおっしゃいますけど、何か楽しそうですね。

小林 ははは。10年前に数人で始めた実験が、今では12カ国から500人以上が参加するまでになりました。いよいよ実際にデータが出始めて、もう結果が目前だと感じているんです。今が一番、楽しい時かもしれませんね。

茂木 僕も楽しみにしています。まだまだ聞きたりませんが、本日はありがとうございました。（構成：編集部 古田彩）

明るく努力するのに必要なこと

茂木健一郎

世の中には、難しいことがたくさんある。人生にも、高い山がある。そのような難事を前に、私たちは思わず佇んでしまったり、諦めたり、あるいは負の感情を抱いてしまったりする。

その点において、素粒子実験にかかわっている人たちの「明るさ」には注目すべきだと以前から考えていた。学生時代、後にノーベル賞を受けることになる小柴昌俊先生の研究室の周囲に、「異常なハイテンション」とでもいうべき雰囲気漂っているのを見て以来、私にとって一つの課題である。

小林隆さんとお話しながら、また、「明るさ」について考えた。小林さんは明るい。実験の計画を立ててから、装置を作り、運

転し、データを取り、解析し、結果が確認できるまでには長い年月がかかる。その粘り強い明るさから私たちが学ぶことができることは大きいと感じる。

なぜ明るくしていただけるのか。まずは、夢があるからである。この宇宙を構成している物質の究極の姿を明かにするという夢。次に、論理があるからである。緻密な論理があるからこそ、積み上げて目標を目指すことができる。最後に、方法があるからである。具体的に何をやればいいのか、その方法論的道筋が明かになっている。

夢と論理と方法と。これらの条件が揃えば、どれほど目標が遙かで、そこまでの道程が長くても、人は明るく努力を積み重ねられるのかもしれない。地球を通過させて、ニュートリノを295km離れた神岡まで届ける巨大プロジェクト。何かと暗い話題の多い今の日本で、久しぶりに真性の光を見た思いがした。



KEY CONCEPTS

地熱利用の教訓

- 都市汚水を処理してから地下の地熱系に注入すると、発電用の蒸気が得られると同時に廃水の廃棄問題が解消し、一挙両得だ。
- カリフォルニア州サンタローザ地区で進んでいるプロジェクトから、浅部あるいは深部の地熱系を利用するうえでの貴重な教訓が得られる。
- 地熱発電所の隣接地域では小規模な地震が誘発される場合がある。慎重に考慮すべき問題だ。

エネルギー “Clean Energy from Filthy Water”

カリフォルニア発 汚水が生んだ クリーンエネルギー

汚水を処理して地下に注入し、地熱発電に利用する取り組みが
米国カリフォルニア州で進んでいる

J. B. リトル (フリーランス・ライター)

森に立ち上る蒸気 ー カリフォルニア州のマ
ヤカマス山地にあるカルバイン社の地熱発電所。
冷却塔から蒸気が立ち上っている

SHUTTERSTOCK/ANDREW



きれいになった川 カリフォルニア州サンタローザ市の近くを流れるロシアン川。同市が廃水を流すのをやめてから、水質が向上した。

米国カリフォルニア州サンタローザでは、壁のスイッチを入れて電灯をつけたとき、その電気にわずかながら住民の貢献が含まれている。この街では、トイレで使った水が電気に変わるのだ。

サンタローザ市とエネルギー企業のカルバイン社が協力し、廃水を活用して地熱発電を行う世界最大のプロジェクトを推進しているからだ。こうしてクリーンエネルギーを作ること、人間だけでなく魚の生活環境も改善された。同市はロシアン川へ廃水を流さなくてすむようになったため、廃棄に伴う制裁金の支払いがなくなったほか、廃水貯蔵施設の新設に求められる4億ドルも支出不要となった。一方のカルバインにとっては、地熱発電に使いすぎて蒸気生産量が低下したガイザーズ地域の地下に水を供給して「涵養（かんよう）」という、地熱地帯を再生できる利点がある。

この「サンタローザ・ガイザーズ涵養プロジェクト」では、1日に約4万5000m³の処理済み汚水を街から65km離れた山頂までパイプラインで運び、地下2500mの深さにある帯水層に注入している。水はここで高温岩

体に触れて沸騰するので、その蒸気を地上に導いて発電用タービンを回すのだ。すぐ隣のレイク郡でも同様のプロジェクトが行われ、1日に約3万m³の廃水が再利用されている。両者の合計で20万キロワットを発電しており、これは中規模の発電所に匹敵する。温室効果ガスをはじめとする大気汚染物質の放出はない。電力の一部は、110km南のサンフランシスコにまで送られている。

オバマ政権は地熱をクリーンなエネルギー源として強く推進している。米エネルギー省（DOE）の試算によると、米国は2050年までに電力需要の10%を地熱でまかなえる可能性があり、さらに高い予測値もある。これを現実にするには、地熱発電所の拡大や新設にあたって、蒸気の抽出に伴い小規模な地震が誘発されることを考慮に入れる必要があるだろう。実際、カルバインの地熱発電所の近くでは地震が増えており、同地域で計画の別の民営地熱プロジェクトが具体化すると状況がさらに悪化しかねないと地域住民は危ぶんでいる。

しかし、サンタローザ市にとっては

多くのメリットがあると業務局副局長のカーソン（Dan Carlson）はいう。また、カルバインとの協力によって、対処不可能に思えた都市問題を解決する独創的方法のモデルが得られた。他の自治体も、さまざまな地熱エネルギー活用策を探っている。「自治体にはそれぞれに特色がある。その地域に合った活用策を見つけることが重要だ」。

捨てずに生かす

サンタローザの場合、その特色がガイザーズ地域というわけだ。この一帯で蒸気を噴出しているのは実はガイザー（間欠泉）ではなく、岩盤に開いた噴気孔なのだが、それはともかく、マヤカマス山地の山腹から立ちのぼる蒸気はサンタローザからも見える。サンタローザにとって、それは以前は単なる遠景にすぎなかった。

しかし1993年、サンタローザ市はロシアン川（絶滅の恐れがあるギンザケやスチールヘッド・トラウトの重要な産卵場所となっている）に汚水を違法に流していたとして停止命令を受け、改善を迫られた。カリフォルニア州の環境基準を満たすよう、相応の廃水貯蔵・処分システムを整備しなければならない。一方、マヤカマス山地の反対側に位置するレイク郡も、カリフォルニア州最大の淡水源であるクリア湖への違法放水を停止するよう州から求められていた。法的基準を満たすように処理されていても、水生生物に有害な栄養素をまだ含んでいる。

そして、この2つの自治体に挟まれた山の上では、カルバイン社の地熱発電担当者が頭を抱えていた。発電による地下の水蒸気の消費が自然に補給される量を上回り、蒸気不足に陥りつつあったのだ。カルバイン社は、地熱地帯を再生させるために地下に注入する水を求めている。

同社がサンタローザ市およびレイク郡と結んだ協定は、これら3者の問題

を一挙に解決した。話は単純明快で、必要とされる場所に廃水を運ぶ。リサイクル水を利用して地熱発電するこの事業は、レイク郡で導入されたのが世界初であり、サンタローザ側は世界最大規模だ。

そしてどちらも拡大が予定されている。レイク郡はクリア湖をめぐるパイプラインを延長し、新たにレイクポートなどの近隣自治体からも廃水を受け入れる計画。またサンタローザ側のパイプラインに隣接するウィンザー市は2008年11月、1日に2650m³の廃水をパイプラインに注入する30年契約に調印した。

両自治体の当局者も環境保全の効果感を誇ると同時に、規制をクリアし財政が安定したことに満足している。カーソンはこう語る。「これらのプロジェクトは、いわばビジネスだった。なるべく低コストの方策を追求することが、私たちとカルバインの双方に有益だった」。

ガイザース地熱小史

ガイザース地域の蒸気量が低下したのは、長期にわたる使いすぎが原因だ。ガイザースはサンアンドレアス断層東部の地熱系に属し、何千年もの昔から蒸気を噴出してきた。地下8000m以

上の深部に巨大なマグマだまりがあって岩盤を加熱している。硬砂岩でできたこの岩盤に蓄えられていた水が蒸気となり、上層岩盤の細かい割れ目を通じて地表へ漏れ出す。

この一帯をガイザースと名づけたのは1847年の調査団に参加していたエリオット（William Bell Elliott）だ。ここにあるのは噴気孔であって、温水を空高く吹き上げる間欠泉（ガイザー）ではなかったが、この誤った名前が定着した。その後ここは有名観光地とな



3つの問題をまとめて解決



り、JPモルガンで有名な実業家モルガン（J. P. Morgan）や南北戦争の將軍としても有名なグラント大統領（Ulysses S. Grant）、ルーズベルト大統領（Theodore Roosevelt）をはじめ、大勢の人が訪れた。しかし1930年代には、ホテル火災や地滑りなどの災害が続いたことと、迫り来る戦争によって、観光客は激減した。

身を包む蒸気に“温泉気分”を楽しむ観光客を横目に、ここに米国初の地熱発電所を作ろうと考えた男がいた。グラント（John D. Grant）の地熱発電所は1921年に完成し、パイプの破断や蒸気井の故障などのトラブルを乗り越えて、250キロワットの発電に成功した。観光リゾートの街ガイザーズの建物と道路の照明を十分にまかなえる電力だった。

技術の進歩により、1960年には大規模な地熱発電所が可能になった。岩盤に穴を開けてパイプを通し、深くから蒸気を取り出す方式によって、パシフィック・ガス&エレクトリック社が

1万1000キロワットの発電所を運転し始めた。他社も1970年代から1980年代に、次々と地熱発電所を建設した。発電量がピークの200万キロワットに達したのは1987年で、これは住宅200万戸をまかなえる電力だ。カルパイン社は1989年に参入し、現在は100km²ほどのガイザーズ地域に何百本もの蒸気井を持ち、同地域にある地熱発電所21カ所のうち19カ所を運用している。

蒸気切れのピンチ

地熱井の掘削と蒸気の抽出は蒸気田を大きく痛めた。雨水が砂岩の貯留層に浸透するには時間がかかり、蒸気の補充が追いつかないのだ。1999年には蒸気量が大きく落ち込み、カルパイン社は地中に注入する水の確保に奔走することになった。総工費2億5000万ドルのサンタローザのプロジェクトは、発電所東側のレイク郡に比べて技術的に難しかった。レイク郡側は標高が蒸気田と近かったのに対し、サンタロー

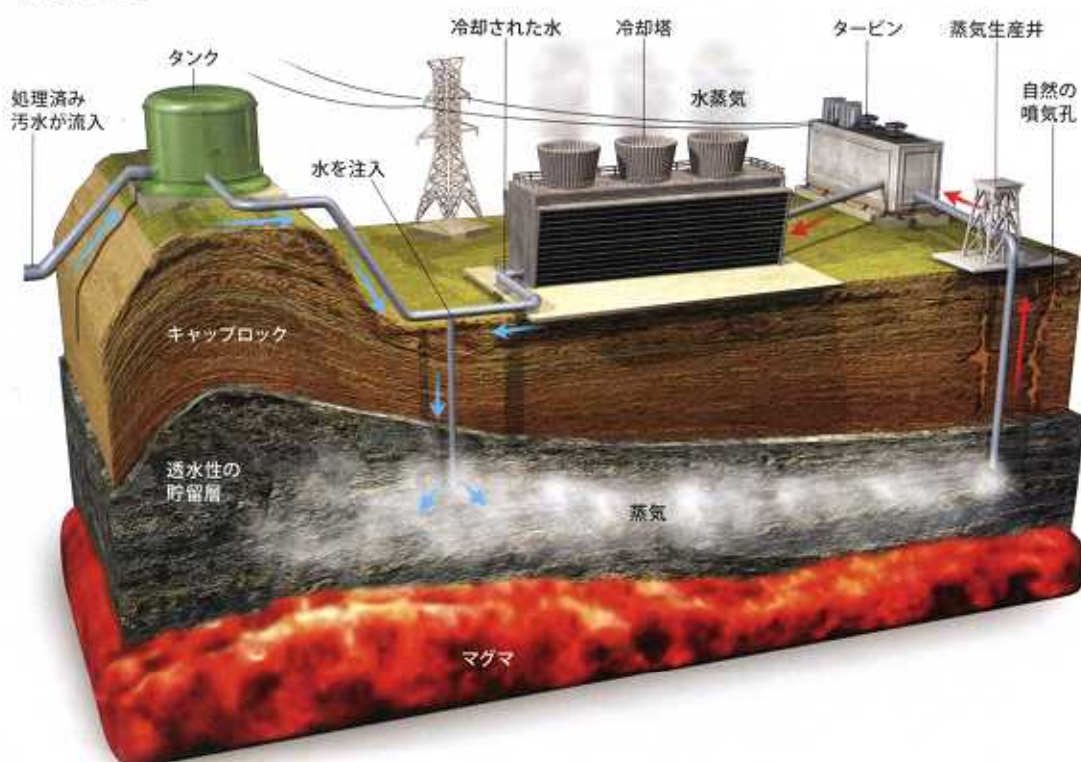
ザからガイザーズへ廃水を運ぶには、パイプラインを都市の道路の地下から住宅開発地を通して郊外へ延ばし、さらにマヤカマス山地を標高差1000m近く上っていかねばならない。

パイプラインはなるべく目立たないように作られた。「地元は環境に対する意識が高く、みなこの地熱系を大事にしている」と、サンタローザ市のガイザーズ運用コーディネーターを務めるシャーマン（Mike Sherman）はいう。同市のラグーナ汚水処理プラントからガイザーズまで65kmの道は、まず野生のリンゴの林を抜け、赤褐色の樹皮をしたマドロナ、そして斜面を登り始めるとナラの木に囲まれる。この土地のほとんどはオーデュボン協会カリフォルニア支部によって野生生物保護地域として運用されている。

1車線道路の急勾配を登りきった頂上には、3階建てビルほどの大きさの暗緑色のタンクがある。見かけは街で見かける給水タンクと変わらないが、中身が4000m³ほどの廃水である点が

地熱発電所に息を吹き込む

ガイザーズ地熱発電所では、送られてきた処理済み汚水（左）を透水性の岩盤に注入している。これが岩盤下のマグマの熱で高圧の蒸気となる。この蒸気を生産井（右）から取り出し、タービンを回して発電する。蒸気は水に戻して冷却し、再び地下に注入する。



遑う。この水は3段階の処理が施されたものだ。沈殿槽でグリスやオイルなどの不純物を取り除く物理処理、有機物を分解して栄養素などを取り除く生物学的処理、残った有機物や微生物を取り除く砂と活性炭による濾過処理だ。その後、紫外線を照射して殺菌も行う。

カルパインは地熱で発電した電力のうち年間250万ドル分を使って、この高さまで水を運び上げている。タンクに貯めた水は、マヤカマス山地の峰の東側にある蒸気田へ注入される。タンクの向こうはマツが生えた急斜面で、銀色に輝くパイプラインが斜面を下り、1km弱先にある発電所につながっている。発電所では地中から抽出した蒸気でタービンを回し、蒸気をじょうご形の冷却塔で水に戻して、再び地中に注入する。世界最大の地熱発電所だというのに、そよ風に乗ってタービンのかすかなうなりが聞こえるだけで、なんとも牧歌的な眺めなのがシュールだ。

気がかりな地震急増

しかし30km圏内に住む人たちにとっては、牧歌的どころではない。廃水の地下注入が始まった2003年以来、ガイザース地域における地震が急に60%も増えたのだ。

発電所から1kmほどしか離れていないアンダーソン・スプリングスでは2562回もの地震が記録され、うち24回はマグニチュード4.0を超えた。ほとんどは被害を生じなかったが、棚から物が落ちたり建物の基礎にひびが入ったりした例もあると、元サンフランシスコ大学教授で1939年以来、ガイザースに別宅を持つヘス(Hamilton Hess)は語る。

ほかに、毎日のように生じる揺れは迷惑というレベルを超えているという住民は少なくない。「谷をわたって近づいてくる音が聞こえるんだ。ドンと来る瞬間は、家の下で爆発があったかと思うほどだ」とアンダーソン・ス

カルパイン社の蒸気田は枯れつつあったが都市の処理済み汚水を利用すれば補充できる

プリングスの連合町内会長ゴスペ(Jeffrey D. Gospe)はいう。

2009年、地元住民は地震がさらに増える恐れがあることに気づいた。ガイザース蒸気田の外側、アンダーソン・スプリングスからわずか3kmほどの場所で、新たな実験プロジェクト施設の建設が始まっているのだ。そこには自然の噴気孔がないので、プロジェクト主体のアルタロック・エナジー(本社カリフォルニア州サウスリート)は深さ3000mあまりの井戸を掘って高温岩体を貫き、そこへ水を注入して、生成する蒸気を利用する計画だ。

これは「地熱井涵養」と呼ばれる手法だが、同方式を採用したスイスのパーゼルでのプロジェクトではマグニチュード3.4の地震が発生した。この規模はそう大きくないともいえるが、それでも800万ドルの被害が生じた。アルタロック社は、レイク郡はパーゼルとは地下の地質条件と大断層からの距離が異なるし、パーゼルよりも進んだ技術を使うと説明した。しかし地元住民側はアルタロックの環境分析に誤りや抜け落ちがあることを指摘し、反対運動を続けた。

マグマで熱せられた蒸気だまりから蒸気を取り出すと温度が下がって周辺の岩石が収縮することが、昔から知られている。この収縮分を調整しようと岩盤が変形し、小さな地震が起こるのだと、米地質調査所の地震学者オープンハイマー(David Oppenheimer)は説明する。蒸気が抜けた後にできた空洞が崩落することによっても、地震が発生しうる。

サンタローザ廃水プロジェクトでも、



地震は迷惑 地熱発電所のそばでは小さな地震が頻発するようになった。近くに住むゴスペらは、地震による被害の恐れが低くなるよう、発電所の運用を変えてほしいと望んでいる。

TIMOTHY ARCHBOLD

地震活動の活発化は計画段階から予想されていた。それでも推進を決めたのは、汚水廃棄の問題を解決するとともにクリーンな電気を生み出すことによるメリットが勝ると判断したからだ。しかしそれは、ガイザースの30km圏内に500年も前から住み続けている人々にとってはたいした慰めにはならない。「廃水はサンタローザのものだが、向こうは地震を感じないのだから」とヘスはいう。

注入水量と注入場所を増やすといつか“大地震”が起きるのではないかと、ヘスはサンタローザとレイク郡の拡張計画に懸念を示すが、その心配はないだろうとオープンハイマーはみる。マグニチュード2.0以下の微小地震は増えるだろうが、マグニチュード8.0などの大地震は大規模断層なしには発生せず、ガイザース地域には小さな断層しかないという。ガイザース地域で過去30年間に記録された地震は、最大でマグニチュード4.5だったとオープンハイマーは指摘する。

一方、アルタロック社の計画のほうは、強い地震を誘発する心配がより大

きちんとわかる 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

世界をリードする日本のグリーン・ケミストリー。時代の一步先をゆく産総研の化学、革新的な化学技術をあますところなく紹介。これらが21世紀の地球の課題を解決する具体的手段だ。

きちんとわかる 巨大地震

○定価 1575円 281ページ

きちんとわかる 木質バイオマス

○定価 1575円 229ページ

きちんとわかる 糖鎖工学

○定価 1575円 331ページ

きちんとわかる ナノバイオ

○定価 1575円 253ページ

きちんとわかる 時計遺伝子

○定価 1575円 268ページ

きちんとわかる 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92>

廃水を使って20万キロワットの発電を行うことで 年間90万トンの温室効果ガスを削減した

きいとされた。2009年7月、米国政府は地震のリスクが科学的に評価されるまでプロジェクトを差し止めることを決めた。先行きが不透明になったことを受け、アルタロック社は12月にプロジェクトを放棄する意向を表明。明けて1月、エネルギー省は地熱井涵養を対象にした新たな安全規約を発表した。

それでも高まる価値

廃水を使って20万キロワットの発電を行うことで、サンタローザとレイク郡は年間90万トンの温室効果ガス（同規模の石炭火力発電所から排出される量）を効果的に削減している。ロシアン川やクリア湖への廃水流入が止まり、廃水貯蔵施設や処理施設を新設する必要もなくなった。またカルパイン社はロシアン川支流の水利権を持っているが、そこから採水する代わりに廃水を利用するようになったため、川の水量が増え、魚たちにとっても環境がよくなった。

地熱エネルギー利用を全米に広げたいと考える起業家や科学者にとって、カルパインのプロジェクトは豊富な実

績を提供してくれた。一方、アルタロック社のケースは、自然の噴気孔がない地域に深い井戸を掘る地熱井涵養の試みに水を差すことになりそう。コーネル大学で持続可能エネルギーを研究しているテスター（Jefferson W. Tester）教授が率いた研究によると、地熱井涵養によって全米で1億キロワット以上の発電が可能なのだが。オバマ政権は2009年5月、地熱井涵養プロジェクト向けの8000万ドルを含め、総額3億5000万ドルを地熱開発に投じることを決めた。

高温岩体に注入する水の手当てがつきにくい多くの場所にとって、ガイザーの発電所は素晴らしいヒントを提供しているといえるだろう。河川などの水の代わりに処理廃水を地熱発電に利用することが経済的に有効であることが実証されたとカールソンはいう。

もちろん、安全性に関する問題をさらに調べる必要はあるが、カールソンは楽観的だ。「サンタローザの市民は恩恵を被っているし、環境にもメリットがある。これをモデルにすれば、世界各地の自治体がよりよい取り組みを実現できる」。

(編集部 訳)

COURTESY OF MARTHA FLYNN



著者 Jane Braxton Little

フリーランスのライター兼写真家で、カリフォルニア州プラマス郡在住。編集者としても関与しているAudubon誌など、さまざまな雑誌に記事を書いている。

原題名

Clean Energy from Filthy Water (SCIENTIFIC AMERICAN July 2010)

もっと知るには…

A GEYSERS ALBUM: FIVE ERAS OF GEOTHERMAL HISTORY. Susan F. Hodgson. California Department of Conservation, Sacramento, 1997.

SANTA ROSA GEYSERS RECHARGE PROJECT. California Energy Commission, 2002. http://www.energy.ca.gov/reports/2003-03-01_500-02-078V1.PDFで入手可能。

THE FUTURE OF GEOTHERMAL ENERGY: IMPACT OF ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEMS (EGS) ON THE UNITED STATES IN THE 21ST CENTURY. An assessment by an MIT-led interdisciplinary panel. MIT, 2006. http://geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdfで入手可能。

エネルギー・水・食糧危機

持続可能な社会を目指して

河本桂一 編

持続可能な社会の実現に不可欠なエネルギーと食糧の確保に向けた取り組みに着目。資源確保に伴う負の影響を最小限に食い止め、恩恵を平等かつ持続的に享受できる平和な世界を築く道を探る。

好評発売中



●A4変型判 ●144頁 ●2100円(税込)

お近くの書店でお求めください。品切れの場合は書店にご注文ください。
当社へ直接ご注文の場合は、本代のほかに送料を頂戴いたします。
お問い合わせ、ご注文は、電話、FAX またはホームページからどうぞ。

第1章 再生可能エネルギーへの転換

2030年 化石燃料全廃計画
一目でわかる再生可能エネルギー
化石燃料から太陽エネルギーへ
米国の大転換構想

第2章 自動車用燃料の挑戦

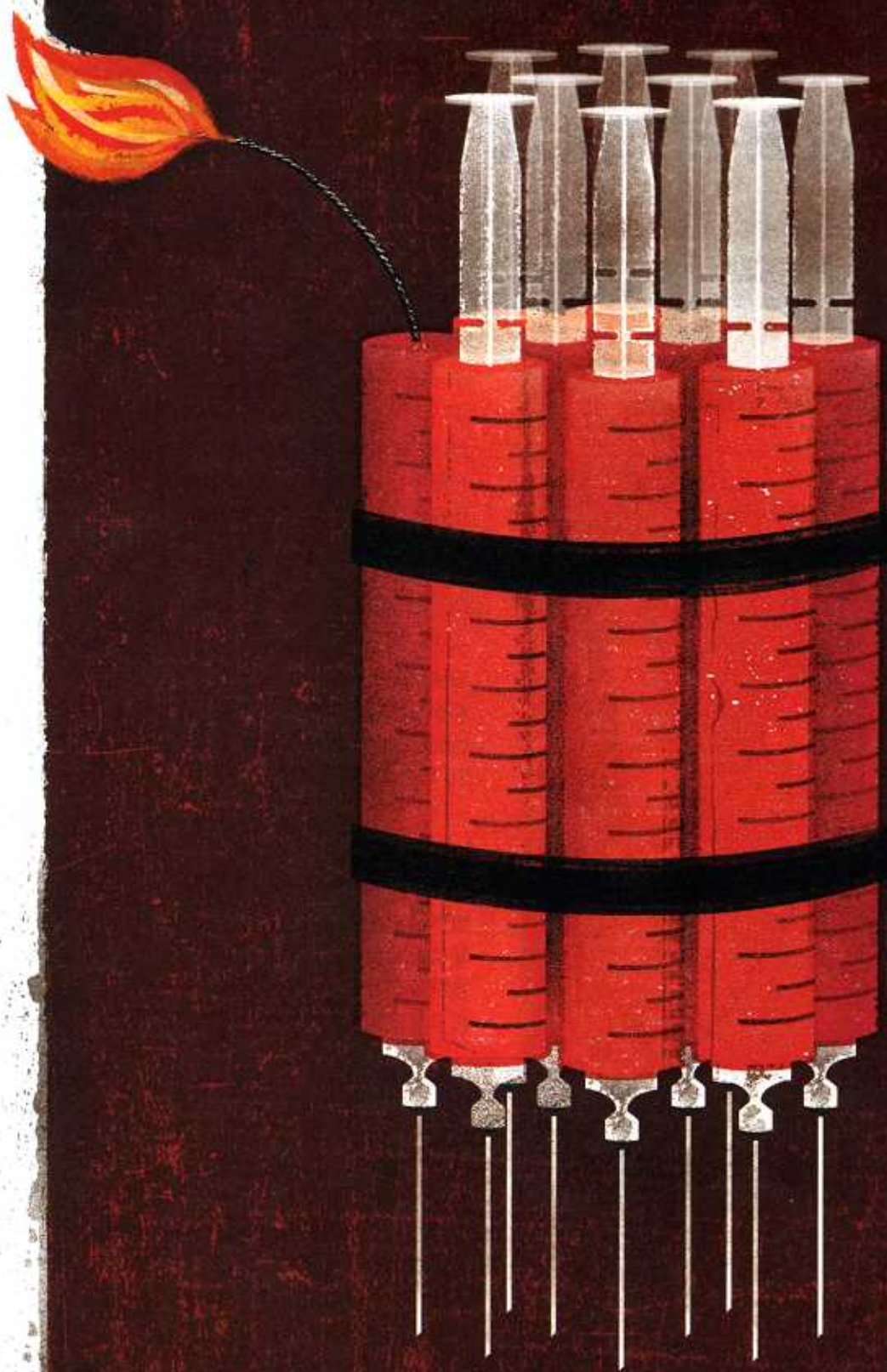
石油資源を搾り出す
草から作るガソリン
燃費はもっとよくなる 高効率エンジンへの道
20年後の自動車の姿

第3章 水と食糧の確保への手立て

世界の水危機を回避するには
飢餓と貧困をなくすために
食糧不足で現代文明が減じる？
エコな食糧危機解決策？ 摩天楼で農業

第4章 持続可能な農業とは

グラフで見る牛肉消費と温暖化ガス
植物と地球温暖化
もうひとつの地球環境問題 活性窒素
迫り来るリン資源の危機
土壌を守る不耕起農法
農業革命の種をまく
組み換え作物を生かす道



粗悪品ボトックスとバイオテロ

急速に拡大する違法コスメ市場には
恐ろしい生物兵器を悪の手に提供する危険が潜んでいる

K. コールマン／R. A. ジリンスカス（ともにモントレー国際大学院）

2006年の初頭、自称“自然療法師”のチャド・リブダールは、アリゾナ州で郵便不正行為および郵便・有線通信不正行為への共謀、薬物の違法表示、米国に対する詐欺行為の罪に問われ、有罪を認めて9年の刑務所行きを命じられた。彼の妻で、アリゾナ州トゥーソンのトキシシン・リサーチ・インターナショナル社に勤めていたビジネスパートナーのツアラー・カリムも同罪で告訴され、罪を認めて6年の刑務所行きを言い渡された。夫妻は多額の罰金と賠償金を支払ったが、その理由は、検察によれば、彼らが偽の「ボトックス」を全米の医師に売りさばき、わずか1年の間に少なくとも150万ドルを稼いだためだった。

ボトックスとは、微量を患部に注入して顔のシワをとったり、筋肉を弛緩させてけいれんを抑えることを目的として開発された医薬品だ。このボトックスだけでなく、さまざまな医薬品が違法に製造され、違法に取引されている。その額は、世界で年間約750億ドルにもものぼると見積もられている。

しかしながら、ボトックスやそれに

準ずる医薬品とその他の医薬品とは、その密造品がつくられることの重大さが大きく異なる。ボトックスの有効成分が、科学者の間では非常に致命的な化合物として知られる「ボツリヌス神経毒素（BoNT）」だからだ。

ボツリヌス毒素は致死率が最も高い「潜在的生物兵器剤」に分類され、天然痘ウイルスや炭疽菌、ペスト菌と並んで「生物剤」に指定されている。生物兵器戦争に使用される危険性を考えると、ボツリヌス毒素を大量に製造する違法な研究所や、インターネットを介してそれを世界中に売りさばく怪し

げな業者の存在は、他の違法医薬品よりも不穏な影を投げかけている。

私たちは2年前、安全保障分析官としてボトックスやそれに準ずる医薬品の違法取引の規模と現状の調査を開始し、深い懸念を抱くに至った。かつては比較的手が難しかったボツリヌス毒素だが、現在では地雷など道路脇に仕掛けられる爆弾のように容易に入手したり、製造できる。それでも私たちは、この脅威を抑えることのできる安価でリスクのない方策が存在すると信じており、それをできるだけ早期に実行することが望ましいと考えている。

KEY CONCEPTS

容易に入手できてしまう生物兵器剤

- ボツリヌス神経毒素を含む製品に対する消費者の需要が、その違法製造の拡大をあおっているのかもしれない。
- ボツリヌス毒素は致命的な毒物で、生物兵器に使用されうるものだ。
- 違法製造元がボツリヌス毒素をテロリストに販売する、あるいは自らテロリストになる危険性は否定できない。
- 科学者と警察が手を組んで問題の広がりを調べることで、違法製造防止への道が開かれるだろう。

多層構造の市場

1989年、米食品医薬品局（FDA）はカリフォルニア州アーバインのアラガン社に医療目的でのボツリヌス毒素の販売を認可した。それ以後、同社はボツリヌス毒素製剤の合法的市場でトップシェアを堅持しており、2009年の売り上げは約20億ドルにのぼった。しかし、ボツリヌス毒素製剤の販売を許可された他のメーカー、特にフランスを拠点とするイブセン社とドイツのメ

恐るべき毒素

ボツリヌス毒素やそれに準じる医薬品の主成分であるボツリヌス毒素は、非常に致命的な毒物だ。1つの毒素分子で1つの神経細胞を機能不全にできる。たった10億分の1gで1匹のマウスを殺せる。

マウスの致死量

1.2 ng

体重70kgのヒトの致死量

0.09~0.15 μ g
(注射)

0.70~0.90 μ g
(吸入)

70 μ g
(経口摂取)

相対的な重量

1gで殺すことのできる人数

- 1万4285人(経口摂取)
- 125万人(吸入)
- 830万人(注射)

単位

ナノグラム(ng)=10億分の1g
マイクログラム(μ g)=100万分の1g
ミリグラム(mg)=1/1000g

ルツ・ファーマ社、中国の蘭州生物製品研究所などが市場に食い込みつつあり、いくつかの国ではアラガン社よりも売り上げを伸ばしている。

米食品医薬品局は2002年にボツリヌス毒素の美容目的での使用を認可したが、現在、人に使用できる医薬品グレードのボツリヌス毒素の製造を許可された会社は、世界に7社しかない。他の多くの会社（うち3社は米国）は、いわゆる試薬品グレードのボツリヌス毒素を研究所に供給している。つまり、そうした会社のボツリヌス毒素は人体への使用が認められておらず、ワクチンの研究など産業や科学研究の用途にしか使えない。

違法なボツリヌス毒素製剤には、純正品に酷似したラベルが貼られていることがあり、「バトックス」「ビューテアス」などといったまぎらわしい名前がつけられていることが多い。一見して密造品とわかるものもあるが、イブセン社のピケット（Andy Pickett）とメウィーズ（Martin Mewies）が昨年発表した研究によれば、彼らがテストした違法ボツリヌス毒素製剤の約80%で、含有量に大きなばらつきはあったものの、実際に毒素が含まれていたという。

こうした密造品は、通常、純正品よりも低価格で販売されており、その顧客は主に悪徳な医師や美容専門家だ。彼らは怪しげな製造元や仲買人からインターネットなどを通じて安価に購入し、安くあげられた分、差額を自分のポケットに入れている。純正品の製造元の試算によれば、こうした違法取引のために年間何億ドルもの損失が出ている。

密造品を投与された人はそれよりもはるかに大きな被害を受ける可能性がある。例えば、フロリダ州では、2004年、ボツリヌス毒素入りの“美容製品”を投与された4人が数カ月間わたる入院を余儀なくされた。激しいボ

ツリヌス中毒症状を起こして死の一手前までいき、人工呼吸器が必要となった。

免許停止中の医師が、試薬品グレードのボツリヌス毒素を製造元から購入し、甚だしく過量の毒素を3人の患者と自分に注射したのだった。各人がどれほどの量を投与されたかは不明だが、医師は単位を間違えるという重大な過ちを犯していた。「ユニット」という単位（100ユニットはボツリヌス毒素4.8ng）をマイクログラムと取り違えていたのだ。

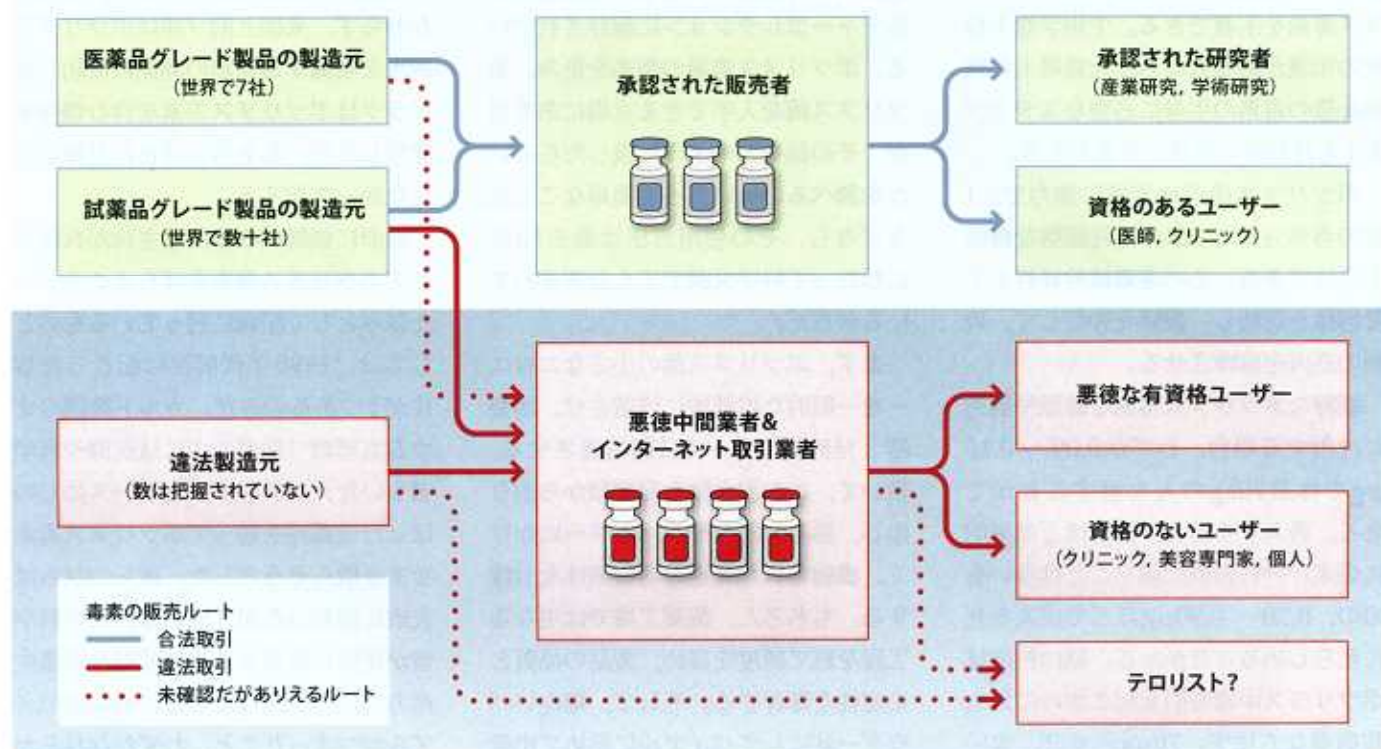
試薬品グレードのボツリヌス毒素が人体に使用する目的で違法に転売されたケースは他にもある。医薬品グレードの純正品の盗難や闇市場への横流しがうかがわれる証拠もある。しかし、密造品の大部分は主にアジアの特定できない場所で製造され、密売組織によって販売されている。そうした組織が自ら毒素を製造している場合もあれば、そうでない場合もあるだろう。

私たちは中国だけで20の密売組織を見つけた。彼らは自らを会社と称しており、ウェブサイトではボツリヌス毒素の“承認された”供給元として美容製品を販売しているとうたっている。ウェブサイトに掲載されている住所は架空のものだったり、実際にそこへ行ってみても見せかけの看板を掲げた小さなオフィスがあるのみだったりすることが多かった。これらのウェブサイトの背後にある組織が何であれ、イブセン社による分析通り、彼らが本物のボツリヌス毒素を手に入れていることは確かだ。

さらに、違法ボツリヌス毒素製剤が旧ソ連でも製造されていること、そしてその製造に犯罪組織がかかわっていることを示唆する証拠もある。ロシアでは近年、違法医薬品が社会問題となっているため、ロシアの美容クリニックのおよそ90%が時おり違法ボツリヌス毒素製剤を使用していることを現

活発に取引されている ボツリヌス毒素製剤

世界規模のボツリヌス毒素製剤の違法取引が拡大している背景には、ボツリヌス毒素を含む化粧品に対する熱心な消費者需要がある。その需要に応えるべく毒素を生産している違法製造元の数は不明だが、増えていることは確かだろう。そうしたうさんくさいメーカーや地元の悪徳中間業者、世界中に販路を拡大しようとする匿名のインターネット取引業者から、テロリストがかなりの量の毒素を調達する恐れがある。



地の専門家筋から聞いたときにも私たちはさして驚かなかった。

ある安全保障コンサルタントは、3年以上にわたってロシアで商売をしている違法ボツリヌス毒素製剤の業者について明らかにした。伝えられているところによれば、こうした製品はチェチェン共和国のどこかで製造されており、販売員は純正ボツボックスのパッケージとほぼ同じラベルが貼られたバイアル（小ビン）をスーツケースいっぱいに詰め込んで、定期的に飛行機でサンクトペテルブルクに向いている。ある顧客が、製品をどれくらい購入できるか尋ねたところ、販売員はいくらでも（例えば1000個でも）供給できると答えたという。

私たちは、インドの医薬品の違法製造元が、たとえまだ違法なボツリヌス毒素製剤ビジネスに手を染めていなく

とも、近いうちに参入してくる危険性があると考えている。インドには、2007年に発売されたボツリヌス毒素製剤「ボトゲニー」の合法的な製造元があり、美容および治療目的のボツリヌス毒素製剤の国内市場に活気がある。また、安価な治療を求める外国人向けの医療観光産業が急速に拡大している。インドに複数の医薬品密造組織が存在することが立証されており、彼らがボツリヌス毒素製剤に目をつけて金儲けを企む可能性は高い。

この市場が活況を呈していることは、安全保障上の見地からすると厄介だ。なぜなら、製造販売元にとって、違法ボツリヌス毒素製剤を販売することと、破壊活動を目的とする集団にボツリヌス毒素自体を大口に直接販売することに大差がないからだ。実際、ロシアの例からわかるように、その区別は既に

あいまいになっているのかもしれない。そして、密造組織や犯罪者が製造施設を建設するのを止める手立てはほとんどない。ボツリヌス毒素をつくるのに、特殊な設備は必要なく、微生物に関するそこそこの専門知識があれば十分だからだ。

つくるは易し、阻止するは難し

ボツリヌス毒素をつくりだすボツリヌス菌は天然の土の中に存在するが、嫌気性菌であるため、繁殖できるのは無酸素の条件下のみだ。

米国におけるボツリヌス中毒の最も一般的な原因は、かつては、破損したり殺菌が不十分だった缶詰などの食品だった。今日では、「創傷ボツリヌス症」が成人のボツリヌス中毒のより一般的なタイプだ。なかでも薬物中毒患者が自分でドラッグを注射する際にボツリ

ヌス菌と一緒に注入してしまうことでボツリヌス中毒を起こすことが多い。

ボツリヌス菌がつくり出す純粋な毒素は、世界一強力な毒だ。そして世界各地にある生物学的研究室の標準的な設備で、人を殺すのに十分な量のボツリヌス毒素を生産できる。生物学修士程度の知識がある人なら、大量殺人が可能な量の毒素の生産に必要なステップを1カ月程度で達成できるだろう。

ボツリヌス毒素は非常に強力で、1個の毒素分子で1個の神経細胞を機能不全にできる。この毒素は神経終末で受容体を遮断し、神経を抑制して、周囲の筋肉を麻痺させる。

純粋なボツリヌス毒素を静脈や筋肉に注射する場合、わずか0.09～0.15μgで体重70kgの人を殺すことができる。吸入する場合、注射ほど効果的に毒素が神経線維に届くことはないものの、0.70～0.90μgほどで成人を死に至らしめることがある。経口摂取はボツリヌス中毒を引き起こすのに最も非効率な方法で、70μg必要だ。言い換えれば、1gのボツリヌス毒素は、経口摂取の場合には1万4000人を、吸入の場合には約125万人を死に至らせる危険性がある。

自然界で見つかるボツリヌス菌株はいずれもボツリヌス毒素を生産できるが、合法的な製造元が使用している株は毒素生産力が特に高い株だ。なかでも「ホール株」と呼ばれるものは科学研究で広く使われており、米国細胞カルチャーコレクションに保存されている。ボツリヌス毒素の製造を企み、ボツリヌス菌を入手できる立場にある者が、その菌をどのように扱ったらよいかを調べるのはいたって簡単なことだ。なぜなら、その使用法は過去50年にわたって科学文献で広く公表されているからだ。

まず、ボツリヌス菌の小さなコロニーを一般的な培養液に浮遊させ、培養器と発酵槽で3～4日間培養させる。続いて、この混合物を発酵槽から取り出し、遠心分離器やフィルターにかけて、濃縮された毒素を含む液体を分離する。もちろん、製薬工場では更なる工程を経て純度を高め、製品の品質と安定性を確保する。そして、細かいパウダー状にしてバイアルに詰めて出荷する。

ボツリヌス毒素製剤を使用する際には、10mlの食塩水をバイアルに加えればよい。粉は数秒で溶け、菌を復元

できる。ただし、この液剤はすぐに効力を失うので、数時間以内に使用しなければならない。

ボツリヌス毒素は環境にさらされると効力を失いやすいことが、生物兵器への応用の障害となってきた。にもかかわらず、米国と旧ソ連はボツリヌス毒素を噴霧する兵器の開発に成功した。イラクはボツリヌス毒素を含む爆弾を開発したが、おそらくほとんど役に立たなかっただろう。

政府に無関係な非国家主体が兵器としてボツリヌス毒素をばらまこうとした試みとして記録に残っているものとしては、1990年代前半に起こった事件が1つあるのみだ。カルト教団のオウム真理教（信者の中には医師や科学者もいた）がアタッシュケースにしのばせた噴霧器を使ってボツリヌス毒素をまき散らそうとした。彼らの試みは失敗に終わったが、それは教団の科学者が使用したボツリヌス菌株が毒素生産力の低い株だったこと、噴霧器のノズルがつままったこと、わずかな良心が残っていた実行犯が装置を作動させなかったことが理由だった。

テロリストがボツリヌス毒素を使用する最もありえそうなシナリオは、食

まずは、違法製造元の数把握

ボツリヌス毒素の違法製造との戦いには、警察が科学者と手を組んで、製造元の数把握することから始めるべきだろう。警察はクリニックの職員を装って、さまざまなオンライン業者にボツリヌス毒素入り製品を注文する①。

科学者が購入した製品を分析し、各製品の「固有の特徴」を明らかにする②。その特徴から、どれくらいの数の製造元が存在するかがわかり、その所在地や、毒素の製造に使われている原料の出所についての手がかりが得られる③。



① ボツリヌス毒素入り製品をオンラインで注文



② 製品の特徴を分析

検査:
DNA——細菌のDNA
化学物質——製剤に使用された水や化合物に含まれる金属や微量元素
環境からの混入物——花粉や孢子



③ わかることは

- 実際に活動している製造元の数
- 毒素生産に使われている細菌の株
- 水や環境由来の残留物からわかる、製造元の所在地の手がかり
- 化学的原料の供給元の候補

物や飲料を介した作戦だ。2005年、ウシから消費者への牛乳の供給路の要所でボツリヌス毒素を混入する作戦を分析した研究が、米国科学アカデミー紀要に発表された。この論文は、破壊工作を助長しかねないとして論争を巻き起こした。

しかし、この論文が発表された5年前の段階では、この種の攻撃を試みるテロリストが自らボツリヌス毒素を製造しなくとも、計画に必要な毒素を匿名のインターネット業者から購入できるようにならうとは、著者のスタンフォード大学のウエイン（Lawrence M. Wein）とリュウ（Yifan Liu）は知るよしもなかった。彼らが考え出した陰謀シナリオは、今やさらに実行しやすくなったように思われる。

脅威を見積もる

生物化学兵器の拡散を防止するための国際安全保障共同体による取り組みは、通常、兵器開発を行わないように国々に圧力をかけることと、兵器を製造する設備とノウハウの流通を厳しく規制することで需要を制限することに集中している。しかし、1972年の生物兵器禁止条約や1993年の化学兵器禁止条約などの条約や輸出管理は、政府のために政府によってつくられたものだ。

違法ボツリヌス毒素製剤の国際的な拡散はまったく新しい、厄介な状況を生み出している。ボツリヌス毒素の密造品を求めているのは政府ではなく個人であって、ボツリヌス毒素の需要を高めているのは、政府ではなく消費者だからだ。

インターネットは供給を容易にし、需要を高めることにおいて独特かつ重要な役割を担っている。このため、ボツリヌス毒素の脅威の拡散は、他の潜在的生物化学兵器の場合よりも直接的なものになっている。私たちの研究は、インターネット取引業者が過去2年間

にかなり増加していることを明らかにしたが、こうした業者の増加が違法なボツリヌス毒素製造元の増加を反映している可能性について、生物化学テロの防止、あるいは違法医薬品取引の抑止を使命とする政府機関が多大な関心を寄せているとはいえない。むしろ、この問題は2つの管轄のはざまに入っている。

実際、これまでの兵器禁止戦略ではこの目新しい脅威に対して効力がない可能性が高い。例えば、製造設備や情報がいきわたるのを制限して供給側に圧力をかけても、これからボツリヌス毒素をつくらうとする者を思いとどまらせることはできない。ボツリヌス毒素の製造に必要な材料や、ボツリヌス菌自体が広範囲に存在するからだ。

ひょっとすると密造品の需要を制限することで、違法メーカーの勢いをくじくことができるかもしれない。医薬品グレードのボツリヌス毒素製剤の製造元は、包装にホログラムや認証可能な通し番号などの高度なラベリング技術を使っており、医師や美容専門家が純正品であることを確認できるようにしている。また、密造品を使うことの危険性を最終使用者に知らせるために、イブセン社の研究者は講演やポスターによる発表、科学的記事などを通じて、密造品に関する分析結果の一部を公表している。

アラガン社は違法製造防止に向け、地道な活動を続けてきている。例えば、中国の捜査官と協力して山西省で違法なボツリヌス毒素事業を1つ停止させた。しかし、違法なボツリヌス毒素製造所は多く、増加傾向にあるので、合法的な製造元にはこうした犯罪者を探し出して起訴するのに必要な専門技術や財源はないし、権限もない。

他の医薬品の違法製造の例から、より効果的な方法が考えだされるかもしれない。ほんの数年前、マラリア治療薬「アルテスネート」は違法医薬品市



COURTESY OF ALLERGAN, INC.

密造品を撲滅するために

純正ボツリヌス毒素のバイアルのラベルに組み込まれているホログラムは模倣が難しく、最終使用者はこの容器が合法的なものであることを確認できる。また、ボツリヌス毒素製剤の合法的な製造元はその他の細かな包装技術を駆使して安全性を高めたり、教育活動を行って一般の人に警告を与えたりできるが、彼らには密造者を捕まえるための財源や権限はない。

場のかっこうの標的だった。2007年には、東南アジアで販売されているアルテスネートの1/3から半分は密造品で、その大部分は治療にまったく役に立たない代物になっていた。その結果、認可されているアルテスネート製造元が損害を被っただけでなく、マラリア患者が命を落とし、多くの患者が未治療のまま放置されたためにマラリアが蔓延してしまった。

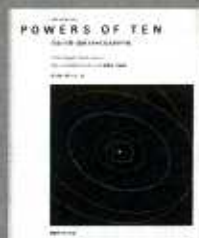
同年、「ジュピター作戦」というコード名がつけられた比較的複雑な国際協力が、違法アルテスネートの取引を抑止する目的で発足した。作戦の協力者には、ウェルカム・トラストや国際刑事警察機構（ICPO）、王立カナダ騎馬警察、オーストラリア保健省薬品・医薬品行政局、中国公安部の知的財産部門、世界保健機関（WHO）、米国疾病対策センター、さらには複数の小さな政府機関や非政府団体の代表者が名を連ねていた。

ジュピター作戦から違法医薬品の撲滅に向けた取り組みに関する多くの教訓が得られたが、なかでも最も注目し値する重要な活動の1つは、カンボジアとラオス、ミャンマー、タイ、ベト

話題のロングセラー本!

村上陽一郎、村上公子 訳

パワーズオブテン



美しい絵と写真によって、
極大の宇宙から極小の素粒子へ。
 10^{25} m(約10億光年)から
10分の1ずつスケールを変え、
 10^{-16} mの素粒子の世界へと向かう。

ISBN978-4-532-06239-2

A4変型判 172ページ 4,077円(税込)

発行:日経サイエンス社

発売:日本経済新聞出版社

TEL 03-3639-2113 FAX 03-3639-2130

<http://www.nikkei-science.com/>

ナムの5つの異なる場所で販売されていた違法アルテスネットのサンプルを何百個も集めたことだった。これらのサンプルは高品質な参照試験所に送られて詳細に分析され、各サンプルの「固有の特徴」が明らかになった。

こうしたユニークなプロファイリングのおかげで、分析官は違法アルテスネット製造元の数と推測できた。その情報をもとに、当局は仲介業者が販売している製品を製造元とマッチさせ、流通機構の概略をつかむことが可能になった。このようにして、少なくともいくつかの違法アルテスネットが中国南東部で製造されていることがつきとめられ、その犯罪組織は現地の当局によって解体させられた。

ボツリヌス毒素製剤の違法製造元に対しても同じような努力がなされるべきだと政府を説得することがいかに難しいかは、私たちもわかっている。しかし私たちはジュピター作戦の例はこの問題と密接な関係があると考え。なぜならジュピター作戦は、少なくと

も問題の範囲を把握するきっかけを与える科学的方法を教えてくれるからだ。

まず、警察機関がクリニックのふりをして違法ボツリヌス毒素製剤を購入する。それを試験所で分析すれば、違法製造元の数と突き止められる可能性がある。そのデータは後に犯罪者の追跡に利用できるし、万が一テロでボツリヌス毒素が使用された場合にはその出所を絞り込むのに使えるだろう。

安全保障分析官である私たちは、公共の安全に対する脅威がいろいろあることを知っている。しかし、政府と無関係のテロリストが大量殺人に使える生物化学剤はほんの少ししかなく、現時点において、違法製造とインターネット取引のせいで、ボツリヌス毒素ほど調達しやすいものはない。「より美しく」「より若々しく」という虚栄心のために、現在、違法ボツリヌス毒素製剤の市場は活況を呈しているが、破壊活動家がこうした好調ビジネスを見逃すと考えるのは浅はかというものだろう。(翻訳協力:古川奈々子)



著者 Ken Coleman / Raymond A. Zilinskas

2人はカリフォルニア州のモンテレー国際大学院ジェームズ・マーティン不拡散研究センターで共同研究を行っている。元微生物学者のコールマン(左)は同大学院の上席フェローであり、医療技術企業を営んでいる。同じく元微生物学者のジリンスカス(右)は同センターの生物化学兵器不拡散プログラムを指揮している。長年にわたって米国政府のコンサルタントを務めており、1994年にはイラクで国連検査官として活動した。

原題名

Fake Botox, Real Threat (SCIENTIFIC AMERICAN June 2010)

もっと知るには...

BOTULINUM TOXIN AS A BIOLOGICAL WEAPON: MEDICAL AND PUBLIC HEALTH MANAGEMENT. Stephen S. Arnon et al. in *Journal of the American Medical Association*, Vol. 285, No. 8, pages 1059-1070; February 28, 2001.

BEAUTY AND THE BEAST. Donald Kennedy in *Science*, Vol. 295, page 1601; March 1, 2002.

ENCYCLOPEDIA OF BIOTERRORISM DEFENSE. Edited by Richard F. Pilch and Raymond A. Zilinskas. Wiley, 2005.

SERIOUS ISSUES RELATING TO THE CLINICAL USE OF UNLICENSED BOTULINUM TOXIN PRODUCTS. Andy Pickett and Martin Mewies in *Journal of the American Academy of Dermatology*, Vol. 61, No. 1, pages 149-150; July 2009.

上記以外の参考文献が次のウェブサイトで見られる。 <http://www.fakebotoxrealthreat.com>

PR企画

日経サイエンス

<http://www.nikkei-science.com/>

分析機器・科学機器特集

「分析展2010」「科学機器展2010」プレビュー

2010年9月1日～3日（幕張メッセ国際展示場）

基礎研究から技術開発まで、研究者の独創的なアイデアを検証し発見へとつなげるために欠かせないのが分析・科学機器だ。今年は「分析展」と「科学機器展（旧・全日本科学機器展in東京）」が一体化し合同展として開催される。来場者にとっては、最新の機器情報だけでなく、出展社が開催する新技術説明会や「JAIMAコンファレンス」が主催するシンポジウムやセミナーで幅広い情報を効率よく入手できるよい機会だ。

研究者の独創性をサポートする
分析・科学機器の最新情報を網羅 102
「分析展2010」「科学機器展2010」

分析技術の革新が新薬開発を加速する 104
日本ウォーターズ ACQUITY UPLC システム

特別講演会 & 特別セミナー

「持続可能社会への努力と活動」 106

サイエンスセミナー国際生物多様性年

「もっと深く、広く、新しく 生物多様性を知る」 106

「分析展2010」「科学機器展2010」
開催コンファレンス一覧 110

参加広告主一覧（五十音順）

広告主	掲載ページ
クラボウ	107
テイクオフ	106,108
日本ウォーターズ	104～105,108
日立ハイテクノロジーズ	106,109
分析展2010/科学機器展2010	103
林栄精器	106

「分析展2010」「科学機器展2010」

研究者の独創性をサポートする
分析・科学機器の最新情報を網羅

基礎から実践まで幅広いテーマ

9月1日から3日まで千葉県の幕張メッセで開催される「分析展2010・科学機器展2010 合同展」は、450社・機関1361小間が参加するアジア最大の展示会だ。参加する国内外の主要企業や研究機関の技術動向に直接アクセスする絶好の機会となる。そして、合同展のさらなる魅力は出展社が開催する技術説明会やJAIMAコンファレンスや東京コンファレンスで開催されるシンポジウム、セミナーなどによって分析化学分野などの最新成果を学べることにある。

合同展となり新技術説明会はますます充実している。分析機器や科学機器の最新技術を紹介するほか、分析・研究実務に携わる人々向けの講習会なども開催。今年も300を越えるテーマが用意されている。

注目のコンファレンスは、日本-米国交換シンポジウムとして9月1日に開催される「単一細胞のケミカルサイトメトリー」だ。単一細胞を用いた最新の分析手法について、米国、スウェーデンの第一人者が講演する。また、日本化学会フォーラムでは化学物質管理・環境測定などに関する3つのセミナーを開催するほか、「理科教育セミナー」では、理科教育の取組みを演習実験を交えて紹介する。教育従事者や学生にとっても重要な機会になるはずだ。(コンファレンス一覧を110ページに掲載)

最新の話題を分かりやすく解説して好評の一般向けセミナーは、今回2テーマが開催される。9月2日に開催されるサイエンスセミナー「もっと深く、広く、新しく。生物多様性を知る」は、生物の進化と生態の謎を専門家が分かりやすく紹介する。2日開催の特別講演会&特別セミナー「持続可能社会への努力と活



動」は生物多様性の保全に向けた取り組みが企業活動に与える影響や太陽電池開発の最新動向などを紹介する。

直前でも事前登録が便利

事務局では、来場者が効率よく情報を入手するためのサポート体制も整えている。例えば、「バーコード付き入場証」には、来場者の登録情報をバーコード(QRコード)に記録。バーコードを出展社のリーダーにかざせば、資料送付先などの必要な情報が読み取れる。たくさんの名刺を用意する必要がないというわけだ。

合同展となった今回、技術者、研究者にとって必携ともいえる「分析機器総覧2010」「科学機器総覧2011~2012」を一度に入手できるのも便利だ。出展各社から提供された資料を合わせるとかな

りの重量になるため両総覧を入手した場合には5キロまでの宅急便代の一部を主催者が負担し、全国一律の割引価格で発送することが可能となっている。

合同展事務局では、スムーズに入場するためにホームページからの事前登録を勧めている。事務局から返送された「バーコード付き登録完了メール」を印刷して持参すれば、受付のバーコードリーダーで読み取り「バーコード付き入場証」が印刷できる。当日、受付に設置されているPCでの登録も可能だが混雑が予想されるので、できるかぎり事前登録をしておきたい。なお、ホームページには新技術説明会のスケジュールなど出展内容について詳しく紹介されている。重要な情報を予めメモしておくことが効率よく合同展を利用するコツといえそうだ。

分析展2010 / 科学機器展2010

併催：新技術説明会 JAIMAコンファレンス(共催：東京コンファレンス)

会期：9月1日(水)~9月3日(金)

A.M.10:00~P.M.5:00

会場：幕張メッセ 国際展示場 4, 5, 6, 7, 8ホール(入場無料)

主催：社団法人日本分析機器工業会 / 日本科学機器団体連合会

<http://www.jaimasis.jp>

後援：経済産業省 / 文部科学省 / 環境省 / 農林水産省 /
(社)日本分析化学会 / (社)日本化学会 他

分析
科学機器

2つの展示会のコラボレーションで アジア最大の展示会へ

分析展と科学機器展(旧 全日本科学機器展 in 東京)が1つの展示会になりました。

最新の分析機器、科学機器が幕張に集結!



圧倒的スケールの
展示

充実の
イベント・サービス

盛りだくさんの
技術セミナー・コンファレンス

最新技術・情報が満載の
「展示」「新技術説明会」「コンファレンス」に
目が離せない3日間!!

ご来場前に必ず入場事前登録を!
<http://www.jaimasis.jp>
※入場事前登録をしない場合、ご入場に時間がかかる場合があります。

確かな技術で未来を分析

分析展-2010

Analytical Instruments & Solutions Expo

明日を拓く科学技術

科学機器展2010

Scientific Instruments Show

2010.9/1 水 ▶ 9/3 金 A.M.10:00 ~P.M.5:00

幕張メッセ国際展示場4・5・6・7・8ホール 入場無料

併催:新技術説明会/JAIMAコンファレンス 共催:東京コンファレンス

主催: 社団法人 日本分析機器工業会
日本科学機器団体連合会

後援: 経済産業省/文部科学省/環境省/農林水産省
(社)日本分析化学会/(社)日本化学会 他

日本ウォーターズ ACQUITY UPLC システム

分析技術の革新が新薬開発を加速する

中外製薬株式会社 製薬本部CMC開発部
分析技術担当

原 雄一



UPLCが実現した分析技術の革新

国際的企業再編が進み、熾烈な競争を繰り広げる世界の製薬メーカー。「企業の成長に欠かせない新薬開発の効率化を裏で支えているのが、分析技術の進歩だ」というのは、中外製薬で分析技術の開発を担当している原雄一氏だ。

分析は、医薬品のシーズ探索から基礎・臨床試験、市販後の生産管理のすべてに欠かせない技術だ。原氏は臨床試験から上市までの分析法開発を担当するが、この段階では人に投与される治験薬として、より高度な品質設計が必要となる。とくに最近では、遺伝毒性を持つ化合物の規制が各国で強化されている。医薬品中に遺伝毒性のある化合物が存在しないか探索するためには、ナノグラムオーダーの分析技術が欠かせない。また、製品の安全性を高めるためには製造過程での品質管理における信頼性の高い分析法が必要だ。

分析法開発のスピードアップも大きな課題だ。中外製薬は、抗体医薬の開発で世界をリードするロシュグループの一員として、膨大な新薬候補成分を保有する。多くの医薬品を早期に医療現場に提供するためには開発の効率化

が欠かせないが、開発をサポートする新たな技術として登場したのが超高速・高分解能の液体クロマトグラフィーであるUPLCだ。

UPLCは、従来のHPLC(高速液体クロマトグラフィー)と比較してより微細な $2\mu\text{m}$ 以下の粒子を用いたカラムの利点を最大限に発揮できるように設計されたシステムで、分析時間を大幅に短縮できる。「試験法の検討では、少しずつ条件を変えて比較。最適な方法を見つけ出す。1回30分かかると分析が5分で終われば、同じ時間で何倍もの条件を確認でき、最初から完成度の高い分析法を導き出せる」と原氏は高く評価する。そして、UPLCの特長がとくに発揮されるのがバリデーション試験だ。ひとつのサンプルをくり返して分析し、値のバラつきを確認したり、検出器の波長が 1nm ずれたときの値の揺らぎなどを調べ、分析の信頼性を高めるもの。UPLCの登場によりバリデーション試験の時間短縮とともに分析に使う溶媒量の削減など、さまざまな面で効率化を実現した。

開発のオートメーション化に挑戦

原氏の研究室では、従来からウォーターズ社製のHPLCを積極的に導入してきた。その理由について原氏は「基本性能が高いのはもちろん、業界に先駆けて送液部と試料注入部を一体化した製品を開発した」と話す。臨床に用いる医薬品は、薬事法に基づいて厚生労働大臣が定めた治験薬の品質管理基準である治験薬GMP(Good Manufacturing Practice)に沿って管理する。複数のコンポーネントで組み上げられたHPLCの場合、組み方によってはラインの長さ等が変わり同等の分析結果が得られないことがある。一体型なら、どの装

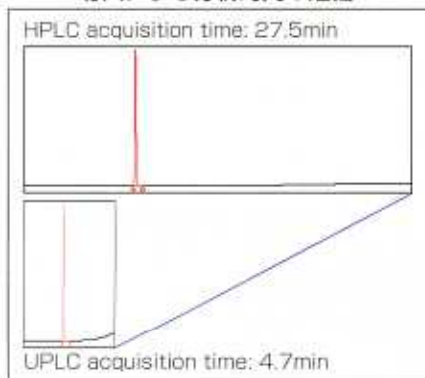
置を使っても一定の結果が出せるため品質管理には最適だ。

原氏がウォーターズ製品のもうひとつの大きな利点と考えているのは、高機能のクロマトグラフ用ソフトウェアEmpower2だ。分析結果を自動的に記録し解析を行うことで解析作業の効率化が計れるほか、研究室での分析情報共有化のプラットフォームとしても重要な役割を果たしてきた。

そして、原氏がさらなる効率化を目指し挑戦しているのが分析法開発のオートメーション化だという。使用するのは、やはりウォーターズ社のEmpower2のオプションソフトウェアである「分析法バリデーションマネージャ(MVM)」である。このソフトウェアは、バリデーション試験において、自動的に検体や分析条件を組み合わせて解析までを自動的に行ってくれる。「試験法デザインには、研究者が培ってきたノウハウが必要ですが、その後の作業はほとんどMVMが自動的に行ってくれる。分析法開発の効率が飛躍的に向上するはず」と原氏は期待している。

原氏は大学では生物無機化学を学び、生体内の金属含有酵素における金属原子の挙動を研究テーマとしてきた。そのとき様々な分析機器を扱った経験を活かし、医薬品の世界に飛び込んだ。そして、現在の仕事に大きな手応えを感じているという。「日本のトップ製薬企業を目指す中外製薬の理念は、アンメットメディカルニーズ(薬剤の貢献度と患者さんの治療満足度が低い領域)に応える画期的新薬をいち早く創出すること。分析は地味な仕事と思われがちですが、理念を実現するために大きな役割を果たしている」と原氏。そして、分析の魅力を知る多くの学生に創薬の世界に挑戦して欲しいと話した。

UPLC導入による分析時間の短縮



同一の試料を分析したとき、UPLCではHPLCと比較して分析時間を27.5分から4.7分に短縮できた。

Acquity[®] H
UPLC[®] CLASS



分析展 2010 / 科学機器展 2010 合同展へ出展します。

会 期： 2010 年 9 月 1 日 (水) ～ 9 月 3 日 (金)
午前 10 時 ～ 午後 5 時まで

会 場： 幕張メッセ 国際展示場 展示ホール 4

ブース： 4A - 405、4A - 501

HPLC分析の

成功への架け橋

究極のパフォーマンス ACQUITY UPLC[®] H-CLASS 登場

詳細は www.waters.com/hclass にアクセスしてください。

©2010 Waters Corporation. Waters, ACQUITY UPLC,
および The Science of What's Possible は、Waters Corporationの商標です。

セミナーを随時開催しております。
詳しくは www.waters.co.jp をご覧ください。

Waters
THE SCIENCE OF WHAT'S POSSIBLE.™

「分析展2010」「科学機器展2010」注目のセミナー

特別講演会&特別セミナー

「持続可能社会への努力と活動」

—人間ができる生物保護と低炭素社会への対応—

今年10月に名古屋でCOP10(生物多様性条約第10回締約国会議)が開催される。特別講演会ではCOP10の概要と意義を分かりやすく解説。さらに国際的な取組みが日本の産業界、経済界に与える影響を予測し、企業がどのように対応すべきかを分かりやすく説明する予定である。また、特別セミナーでは低炭素社会実現に向けた太陽光発電の考え方および最新の研究動向を分かりやすく紹介する。

日時: 9月2日(木)

13:00~16:20(12:30開場)

場所: 幕張メッセ国際会議場国際会議室

定員: 200名(事前申し込み優先) 参加費無料

サイエンスセミナー国際生物多様性年

「もっと深く, 広く, 新しく」

生物多様性を知る」

地球の長い歴史と環境変化が生物に進化をもたらし、現在のような多様性に富んだ生態系が生まれた。講演1「クジラとカバは兄弟だった」では最新のDNA解析法を用いた哺乳動物の進化の謎を明らかにする。講演2「強いものは生き残れない」では、地球環境は常に変動し続けるものであるという視点から、ダーウィン進化論では十分に議論されていない生き物の「協力行動」という生き残り戦略などを紹介する。

日時: 9月1日(水)

14:00~16:00(13:30開場)

場所: ホテルニューオータニ幕張 2階 麗の間

定員: 200名(事前申し込み優先) 参加費無料

事前申し込みはホームページから <http://jaimasis.jp>

日立レシオビーム分光光度計 U-5100

ECO&BEAUTY 美しい地球のために。

小形軽量化、省電力化、光源のロングライフにこだわり、性能面においても、日立分光光度計のテクノロジーを余すことなく投入しています。

ECO&BEAUTY,そしてPERFORMANCEの両立を高次元で実現しました。

- 省電力、長寿命光源のキセノンフラッシュランプを搭載。
- 自動6セルターレットを標準装備。
- 新開発の光検出回路により、低ノイズを実現。



日立ハイテクノロジーズ

TEL:03-3504-7211 <http://www.hitachi-hitec.com/science/>

日立卓上顕微鏡Miniscope® TM3000

全世界で1,000台以上の出荷実績を持つTM-1000の後継機として待望の次世代機登場。



- 卓上サイズでコンパクト設計。従来機TM-1000と比べ設置面積を20%削減。
- オート機能でシンプル操作。オートスタート、オートフォーカス、オート輝度などの機能を搭載。
- 高倍率で焦点深度の深い形態観察。観察倍率15倍~30,000倍の設定が可能。

日立ハイテクノロジーズ

TEL:03-3504-7211 <http://www.hitachi-hitec.com/science/>

高圧電源一体型X線源(RS422,USB対応)



Integrated
X-Ray Source: 50W
米国OXFORD Instruments
Xray technology 社製
250.2mmX99.9φ
7.25Kg
入力電圧48VDC
最大電流:2A
最大消費電力:96W
ターゲット:W or Mo

新製品

分析展 ブースS-07で展示

林栄精器 国際部

TEL:03-3918-5326 E-mail:rin-ei@repic.co.jp

総合リサイクル商社 テイクオフ



1978年創業,中古専門商社

中古理化学機器・光学機器・測定機器・医療機器・OA機器・AV機器・事務機器・測量機器常時5000台以上の豊富な在庫。旧モデルから最新機種まで、お探しの機器がございましたら、ぜひご連絡ください。

テイクオフ

TEL:03-5628-9975 <http://www.takeoff-ltd.co.jp>

切片作製は “手作業が あたりまえ!”と 思っていないですか?



クラブウが、
煩わしかった切片作製を自動化!

組織切片自動作製装置 AS-200



いつでも・誰でも安定した品質の切片作製が可能

- スライドガラス最大200枚、
パラフィンブロック最大100個(オプション)がセット可能
- 操作は簡単、パラフィンブロックとスライドガラスをセットするだけ。
- 1スライドガラス上に複数貼付け可能

組織画像観察システム(システム構築中!!)

面倒なルーチン作業を行っていませんか?
クラブウは多数のプレバートサンプルに対応したシステム装置を開発しています。



クラブウ 倉敷紡績株式会社

バイオメディカル部 〒541-8581 大阪府大阪市中央区久太郎町2-4-31
〒103-0023 東京都中央区日本橋本町2-7-1 NOF日本橋本町ビル2F
<http://www.bio.kurabo.co.jp> E-mail: qa@ad.kurabo.co.jp

TEL: 06-6266-5010 FAX: 06-6266-5011
TEL: 03-3639-7077 FAX: 03-3639-6998

超高速液体クロマトグラフ ACQUITY UPLC® H-Class



最大9種類の溶媒を取り扱えるクオータナリソ
ルベントマネージャと、フローズルーニードル
機構を採用したサンプルマネージャを
Quantum Synchronization機構で同期さ
せることにより、高精度の注入再現性を実現し
ました。
HPLCの優れた操作性とUPLC®の革新的な
性能を両立させた、新世代のLCシステムです。

日本ウォーターズ

TEL:03-3471-7191 <http://waters.co.jp>

総合リサイクル商社 テイクオフ



中古理化学機器・光学機器・
測定機器・医療機器・OA機
器・AV機器・事務機器・測量
機器にて、遊休・余剰機器・入
替え予定機器はございませ
んか？
オフィス・研究所等の一括買
取もっており、廃棄物の処
分をも含む案件にも対応で
きます。
ぜひご連絡ください。

テイクオフ

TEL:03-3358-0377 <http://www.takeoff-ltd.co.jp>

タンデム四重極質量分析計 Xevo™ TQ-S



～見えないものが見える超高感度
"Sensitivity"～

複雑なサンプルの定量・定性分析をシン
プルに行えるよう設計された高感度タン
デム四重極質量分析計です。
StepWave™イオン光学系により今ま
で検出できなかったレベルの濃度測定が
可能です。

日本ウォーターズ

TEL:03-3471-7191 <http://waters.co.jp>

四重極-飛行時間型質量分析計 Xevo™ G2 QTof



～定性・定量をこの一台で可能にした驚きの
"Benchtop"～

複雑なアプリケーションをシンプルに行える
よう設計され、高性能精密質量測定ができる
四重極-飛行時間型質量分析計です。
UPLC®/MSE機能により、正確で質の高い情
報が、容易且つ迅速に一度で得ることが可能
です。

日本ウォーターズ

TEL:03-3471-7191 <http://waters.co.jp>

中古理化学機器導入で コスト削減を!!

* 中古機器販売 *

理化学機器・分析機器・光学機器・測定機器
医療機器・OA/AV機器・測量機器・サプライ品
等を販売しております。

* 買取・廃棄・撤去 *

遊休・余剰機器をお売りください。
買取・引き取り費用を無料で査定致します。
データ消去サービス・産業廃棄物収集運搬



中古 テイクオフ

検索

Reuse Reduce & Recycle Service



総合リサイクル商社

株式会社テイクオフ

東京都江東区大島2-31-6 (理化学機器・医療機器・測定器) ☎03-5628-9775
東京都新宿区市谷台町6-3 (OA機器・AV機器・事務機器) ☎03-3358-8415
大阪府中央区安堂寺町2-7-6 (OA機器・AV機器・事務機器) ☎06-6767-8601

日立ハイテク
HITACHI

日立レシオビーム分光光度計

U-5100

ECO & BEAUTY

美しい地球のために

日立分光光度計U-5100の製品コンセプトは
ECO&BEAUTY。

小形軽量化、省電力化、光源のロングライフに
こだわり、性能面においても、日立分光光度計の
テクノロジーを余すことなく投入しています。
ECO&BEAUTY、そしてPERFORMANCEの
両立を高次元で実現しました。



※実際の使用状況ではありません。
画面ははめ込み合成です。



ECOLOGY

環境にやさしい、低消費電力、ロングライフ*
光源であるキセノンフラッシュランプを採用



PERFORMANCE

小形軽量ながら、ハイパフォーマンスを実現



DESIGN

使い勝手に配慮したデザインに加え、
小形軽量化を実現



EASY OPERATION

分光光度計を初めて扱う方でも
わかりやすいワンランク上の操作性

*1波長、300測定/日、240日/年の使用で10年相当（保障は据付後1年間となります。）

詳しくはこちらから

U-5100

検索

最先端を、最前線へ。

◎株式会社日立ハイテクノロジーズ

〒105-8717 東京都港区西新橋一丁目24番14号 電話 ダイヤルイン (03)3504-7211

URL <http://www.hitachi-hitec.com/science/>

「分析展2010」「科学機器展2010」開催コンファレンス一覧

日付	テーマ名	主催団体名	場所	時間	備考
8月31日(火)	第26回分析電子顕微鏡討論会(1日目)	(社)日本顕微鏡学会	国際会議室	10:00~17:00	参 前
	日本分光学会 第46回夏期セミナー「ラマン分光法」	(社)日本分光学会	303会議室	10:00~17:40	参 前
	Separation Sciences 2010「安全安心と快適を支える分離と検出の科学」 一般講演/ポスター発表/招待講演	(社)日本分析化学会 分離分析関係研究懇談会	コンベンションホールB	10:00~17:00	参 前
	Separation Sciences 2010「安全安心と快適を支える分離と検出の科学」 一般講演/基礎講座 イオンクロマト・液クロ	(社)日本分析化学会 分離分析関係研究懇談会	201A会議室	10:30~15:00	参 前
	Separation Sciences 2010「安全安心と快適を支える分離と検出の科学」 一般講演/基礎講座 流れ分析(フローインジェクション)	(社)日本分析化学会 分離分析関係研究懇談会	201B会議室	10:30~15:00	参 前
	Separation Sciences 2010「安全安心と快適を支える分離と検出の科学」 座談会・技術情報交換	(社)日本分析化学会 分離分析関係研究懇談会	201A/2018会議室	16:00~19:00	参 前
9月1日(水)	Separation Sciences 2010「安全安心と快適を支える分離と検出の科学」 特別講演/名誉講演	(社)日本分析化学会 分離分析関係研究懇談会	コンベンションホールB	9:30~12:00	参 前
	東京コンファレンス2010 Plenary Lecture 1	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	301会議室	10:00~10:50	参 前
	東京コンファレンス2010 分析入門者用講座「分析イロハのイー測定値の取り扱い」	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	302会議室	10:00~12:00	参 前
	第26回分析電子顕微鏡討論会(2日目)	(社)日本顕微鏡学会	国際会議室	10:00~17:00	参 前
	メタボリック・プロファイリング ―最近の話題―	メタボリック・プロファイリング研究会	304会議室	10:00~17:00	前
	日本分光学会 第46回夏期セミナー「顕微鏡分光法―ナノ・マイクロの世界をみる分光法」	(社)日本分光学会	303会議室	10:00~18:00	参 前
	JAIMAフォーラム「グリーン・サステイナブル・ケミストリーと持続可能社会の創生」	(社)日本分析機器工業会	コンベンションホールB	13:00~16:30	参 前
	東京コンファレンス2010 【先端分析技術賞 授賞式】 【先端分析技術賞 受賞講演】	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	301会議室	13:15~15:00	参 前
	NMIJ標準物質セミナー	(独)産業技術総合研究所 計量標準総合センター	コンベンションホールA	13:15~16:20	前
	東京コンファレンス2010 講習会「プロが教える「ガスクロ自由自在」(GC研究懇談会)	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	302会議室	13:30~16:30	参 前
	室内空気環境測定技術の最新技術	室内環境学会	101会議室	13:30~17:00	参 前
	サイエンスセミナー 国際生物多様性年「もっと広く、深く、新しく 生物多様性を知る」	主催:分析展2010/科学機器展2010 合同展委員会	ホテルニューオータニ 館の間	14:00~16:00	前
	U.S. シンポジウム2010: 単一細胞のケミカルサイトメトリー<日本・米国交換シンポジウム>(同時通訳付)	(社)日本分析機器工業会	201会議室	14:00~17:00	前
	東京コンファレンス2010 Plenary Lecture 2	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	301会議室	15:30~17:00	参 前
9月2日(木)	東京コンファレンス2010 フラッシュプレゼンテーション&ポスターセッション「分析化学ショーケース」	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	コンベンションホールB	9:30~15:45	参 前
	東京コンファレンス2010 分析技術者講座「高分子分析のコツ:基礎から応用まで」	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	302会議室	10:00~12:00	参 前
	日本分光学会 第46回夏期セミナー「近赤外分光法」	(社)日本分光学会	303会議室	10:00~17:50	参 前
	東京コンファレンス2010 分析入門者用講座「分析イロハのイー測定値の取り扱い」	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	302会議室	13:00~15:00	参 前
	平成22年度飲料水技術講習会	一般社団法人 全国給水衛生検査協会	301会議室	13:00~16:05	参 前
	第6回環境問題セミナー ―改正化審法およびREACH規則による化学物質管理と環境測定―	日本化学会環境・安全推進委員会	101会議室	13:00~16:15	参 前
	特別講演会&特別セミナー「持続可能社会への努力と活動」	(社)日本分析機器工業会 日本科学機器団体連合会	国際会議室	13:00~16:20	前
	産学連携による先端計測分析技術・機器開発を通じたイノベーションの加速	(独)科学技術振興機構	コンベンションホールA	13:00~16:30	前
	機器分析の黎明期を探る ―「機器分析の創業者たち」出版記念―	特定非営利法人分析産業人ネット	ファンクションルームA	13:00~16:30	参 前
	分析関係の試験所に対する認定制度の活用と実際	(財)日本適合性認定協会	304会議室	13:00~16:50	前
	実用的な表面分析を目指した活動 ―Powell賞15周年記念―	(社)表面分析研究会/(独)物質・材料研究機構 共用基盤部門 分析支援ステーション	201会議室	13:00~17:00	前
	東京コンファレンス2010 分析初級者用講座「分析イロハのローはかるための基礎知識」	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	302会議室	15:00~17:00	参 前
	東京コンファレンス2010 講習会「プロが教える「液クロのコツ」	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	コンベンションホールB	9:30~12:30	参 前
	東京コンファレンス2010 分析若手研究者企画「実際の材料解析」	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	302会議室	9:30~12:30	参 前
9月3日(金)	有機バイオSPM研究会・2010「進歩するプローブ顕微鏡技術とその応用」	応用物理学会 有機分子・バイオエレクトロニクス分科会(M & BE分科会)	201会議室	10:00~17:10	参 前
	環境セミナー	(社)日本環境測定分析協会	コンベンションホールA	10:30~15:00	前
	糖鎖規格によるバイオ医薬品の行方:バイオベクターは新薬になりうるか?	糖鎖産業技術フォーラム(GLIT)	国際会議室	12:50~17:00	参 前
	第3回化学防災指針セミナー ―混合危険の事故事例と対策―	日本化学会環境・安全推進委員会	101会議室	13:00~16:15	参 前
	表面化学分析国際標準化セミナー 「表面分析・微小領域分析における国際標準化の動向」	(財)日本規格協会 表面化学分析技術国際標準化委員会	301会議室	13:00~16:50	前
	分析法の妥当性確認とPTM(化学分析)ワークショップ	AQAC国際ナショナル日本セクション	303会議室	13:00~17:00	前
	効率的測定の基礎と進歩	エコケミストリー研究会	304会議室	13:00~17:00	参
	東京コンファレンス2010 講習会「プロが教える「質量分析」	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	302会議室	13:30~15:30	参 前
	東京コンファレンス2010 分析技術者講座「NMRによる定量分析の実際」	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	コンベンションホールB	13:30~16:00	参 前
	JAIMAシンポジウム「機能性材料の機能応用評価にかかわる計測・分析技術」	(社)日本分析機器工業会	ファンクションルームA	13:35~16:30	参 前
	東京コンファレンス2010 [表彰式・閉会式]	(社)日本分析機器工業会 (社)日本分析化学会	302会議室	16:00~16:30	参 前

コンファレンスの詳細、参加方法につきましてはホームページ <http://www.jaimasis.jp/> をご覧ください。

参:参加費が必要 前:主催団体への事前登録が必要

日経サイエンス 定期購読の おすすめ



日経サイエンス

SCIENTIFIC
AMERICAN 日本版

定価 1,400円

定期購読はこんなにお得です!!

1年購読 12冊で 15,372円

2年購読 24冊で 27,000円

3年購読 36冊で 39,600円

学割 ならさらにお得です
1年間12冊で 9,960円

※学割の場合は学校名・学生番号をご記入の上、お申し込み下さい

いずれも税込み価格です。送料は当社が負担いたします。
次ページの綴じ込みハガキにご記入の上、今すぐお申し込み下さい。
FAX、ホームページからでもお申し込みできます。FAX: 03-3639-2130
日経サイエンスホームページ <http://www.nikkei-science.com/>

1,281円

1,125円

1,100円

830円

1冊
あたり

携帯電話からは
こちら➡



日経サイエンス バックナンバー

「日経サイエンス」のバックナンバーは、お近くの書店へご注文下さい。
直接当社へご注文の場合は、代金引き換えの宅配便にてお届けします。
詳しくは (<http://www.nikkei-science.com/>) をご覧下さい。
なお、在庫には限りがありますので、売り切れの際はご容赦下さい。

生物科学

- フロレス原人の謎 人類はアジアにいつ来たのか 2010年 2月号
- 深海底のロストシティが語る生命の起源 2010年 3月号
- 明らかになったナノバクテリアの正体 2010年 4月号
- なぜヒトだけ無毛になったのか 2010年 5月号
- クジラが育む深海の奇妙な生物 2010年 5月号
- 鯨骨生物群集は進化的“飛び石”? 2010年 5月号
- ミミズ連いのワザ 2010年 6月号
- 知られざるトリュフの世界 2010年 7月号
- 旅するウナギの謎 2010年 8月号

病気・医療

- パンデミック対策のカギ ワクチン増強剤 2010年 1月号
- 脳が生み出す理不尽な痛み 2010年 2月号
- 慢性疼痛治療の新戦略 2010年 2月号
- ATPの意外なはたらき 2010年 3月号
- 10億人を苦しめる 忘れられた熱帯病 2010年 4月号
- 細胞ハイジャック 病原菌の巧みな戦略 2010年 5月号
- 救命毒ガス 硫化水素 2010年 6月号
- ここまで来たiPS細胞 2010年 7月号
- 動き始めたオールジャパン体制 2010年 7月号
- 平衡感覚を取り戻す人工内耳 2010年 8月号
- アルツハイマー病を食い止める 発症前治療の可能性 2010年 9月号

脳・神経・心理学・教育・社会学

- “頭をよくする薬”の現実 2010年 1月号
- 「ありえない色」を見る 2010年 5月号
- 浮かび上がる脳の陰の活動 2010年 6月号
- うつ病、強迫性障害、PTSD…見えてきた脳の原因回路 2010年 7月号
- 盲人の不思議な視覚 2010年 8月号

物理学

- 相対論と量子論をつなぐ ブラックスター 2010年 2月号
- 総力戦で初期宇宙に迫る 2010年 6月号
- 動き出すニュートリノ望遠鏡 2010年 8月号
- ハイパーカミオカンデ構想 2010年 8月号
- 時間は実在するか? 2010年 9月号

宇宙科学・地球科学

- ブラックホールの容貌を撮る 2010年 3月号
- 別の宇宙にも生命は存在する!? 2010年 4月号
- 小惑星衝突が大陸を生んだ 2010年 4月号
- 星誕生のドラマを探る 2010年 5月号
- 冷たい地球 衛星タイタンの姿 2010年 6月号

- 生物が作った多様性 鉱物進化論 2010年 6月号
- 太陽系 驚異の八景 2010年 7月号
- 「いざよい」をつくる 2010年 7月号
- 「はやぶさ」60億キロの旅 2010年 9月号
- 地球進化の謎を解く マントルD層 2010年 9月号

技術

- 20年後の自動車の姿 2010年 2月号
- 未来を変える20のアイデア 2010年 3月号
- 半導体チップを変える9つのアイデア 2010年 4月号
- 病理診断デジタル時代 2010年 8月号
- 米国の高速鉄道計画 2010年 8月号
- 温暖化の緊急対策 空中のCO2を吸収 2010年 9月号

情報通信

- 秘密を守る量子ゲージ 2010年 1月号
- メディアビジネスを変える ネットTVの衝撃 2010年 2月号
- ネットゲーム録画の功罪 2010年 4月号
- イザというときの“携to携”ネットワーク 2010年 7月号

環境・気象・食糧

- エコな食糧危機解決策? 摩天楼で農業 2010年 2月号
- ツンドラの湖に潜むメタン 2010年 3月号
- 象牙の密輸をDNAで追え 2010年 4月号
- もうひとつの地球環境問題 活性窒素 2010年 5月号
- 森で実験 気候変動の影響 2010年 6月号
- 特集:臨界点に迫る地球 2010年 7月号
- 温暖化で変わる北極圏の風景 2010年 8月号
- 世界を養う改良キャッサバ 2010年 9月号

軍事科学・エネルギー・科学政策

- 2030年 化石燃料全廃計画 2010年 1月号
- ユッカマウンテンを捨てた米国政策の行方 2010年 2月号
- 石油資源を搾り出す 2010年 3月号
- 局地核戦争でも人類は滅亡 2010年 4月号
- 燃費はもっとよくなる 高効率エンジンへの道 2010年 5月号
- 核融合炉は本当に可能か? 2010年 6月号

建築・考古学・数学・科学史 ほか

- アマゾンに栄えていた田園都市文明 2010年 1月号
- 乗鞍と宇宙 2010年 2月号
- 2000年の眠りから覚めたギリシャの計算機 2010年 3月号
- きらめく生命の小宇宙 2010年 3月号
- 科学大予測 世界が変わる12の出来事 2010年 9月号
- 覆った定説 ネアンデルタール人は賢かった 2010年 9月号

●2010年1月号から9月号までに掲載された論文をジャンル別に分類しています。

ますますパワーアップ!

日経サイエンス SCIENTIFIC AMERICAN 日本版 の

ウェブサイトをご利用下さい

<http://www.nikkei-science.com>



「きょうの日経サイエンス」に
携帯からアクセス

きょうの日経サイエンス

日経サイエンス SCIENTIFIC AMERICAN 日本版

最新の記事

- 12月の出来事その10 極端のメルトダウン
- 「AXA筑波宇宙センター」
- 「はやぶさ」の帰国
- 12月の出来事その9 自然を壊した機嫌
- 「はやぶさ」と建群の「ひょうばり」
- 12月の出来事その8 重層の電線
- 何もしないで
- 12月の出来事その7 生命の動向
- はやぶさフェア 九段の内部の機
- 12月の出来事その6 生命のパンデミック

12月の出来事その10 極端のメルトダウン

2010年8月 9日 (月)

「AXA筑波宇宙センター」

筑波宇宙センターに行ってきました。夏休みということで、子ども連れの見学者が多数訪れていました。夏休みのあいだ、つくば地区では「つくばびじゅつ博2010」という各研究機関やスタンプラリーしながら巡回する施設見学会を実施(8/21まで)しています。なかには事前予約が必要な施設もあります。「AXA」でも、「どこの見学は事前予約が必要です」という張り紙の形で、バージョンアップして新しい観覧しているちびっ子がいて、ちょっとかわいそうでした。

でも、AXAでは予約なしで見学出来るコーナーもたくさんあるので、大丈夫です!

見学者は「AXA」の職員も使えます。

それから「AXA」筑波宇宙センターの見学コーナーには、「スペース・ショップ」という宇宙関連グッズの販売コーナーがあります。ここでは、月や地球のほか、各惑星の立体ジグソーパズルや、アポロやスペースシャトルの精巧な模型なども販売しています。文庫も思わず買ってしまうものがあふれています。

はやぶさも特集した「日経サイエンス9月号」やはやぶさ、小惑星「イトカワ」、「かぐや」などを紹介した別冊「見えてきた 太陽系の起源と進化」も販売しています。

「きょうの日経サイエンス」

編集部からの価値ある科学情報、ブックフェアのご案内などを随時アップ。

読者のみなさんと一緒に作る“科学ひろば”を目指します。

日経サイエンスのトップページからどうぞ。

ご意見・ご感想はウェブ経由で!

最新号のページから「愛読者アンケート」のページを開くと、簡単なパスワードを入力するだけでご記入いただけます。パスワードはInformationのページをご覧ください。

本誌の定期購読お申し込み

ウェブ上で直接クレジットカードによるお支払いが可能になりました。何かと便利でお得なキャンペーン随時やってます!

(画面は実際とは異なる場合があります)

叢書・ユニベルシタス
「自然界における両性」

アメリカ初の女性牧師である著者は、科学分野の研究者でもある。本書では、女性の立場から論じた「進化論」と「女子教育論」を、科学的な視点でまとめている。

A.B. ブラックウェル 著

小川 眞里子、飯島 亜衣 訳 2,625円(税込)

お問合せ：法政大学出版局
<http://www.h-up.com/>



「宇宙史を物理学で読み解く」

ビックバンによって始まった宇宙には、137億年もの歴史があるといわれている。宇宙と物質の起源についての最新の研究成果や、宇宙史をわかりやすくまとめている。巻末に用語集つき。

福井 康雄 監修

飯嶋 徹、杉山 直、平島 大、伊藤 繁 編
3,675円(税込)

お問合せ：名古屋大学出版会 <http://www.unp.or.jp/>



「沙漠の事典」

沙漠に関する約200の項目を、1項目1ページの読み切り形式で解説した中項目辞典。図や写真付きでわかりやすく解説しているので、専門家にはもちろん、学生にもおすすすめ。

日本沙漠学会 編 8,925円(税込)

お問合せ：丸善
<http://pub.maruzen.co.jp/>



大阪大学総合学術博物館叢書

「巨大絶滅動物
マチカネワニ化石」

マチカネワニは、頭骨だけでも長さが1メートルを超えるきわめて巨大なワニ。このワニの完全な化石が1964年大阪で発見され、研究の重要な参照標本となった。本書では、ワニの形態的特長や分類、さらに最新の系統解析を写真付きで紹介。

小林 快次、江口 太郎 著 2,520円(税込)

お問合せ：大阪大学出版会 <http://www.osaka-up.or.jp/>



「カビ図鑑」

「汚くて怖い」印象を持たれがちな「カビ」。本書では、身近な「カビ」の生態、菌類についてカラー写真を中心に解説。「カビ」の美しさや面白さにも触れることができる一冊。

細矢 剛、出川 洋介、勝本 謙 著

伊沢 正名 写真 2,625円(税込)

お問合せ：全国農村教育協会
<http://www.zennokyo.co.jp/>



DOJIN SENSHO

「人はなぜ夢を見るのか」

夢の研究には、夢の意味を探る「深層心理学的」なものと、レム睡眠の研究に基いた「脳整理学的」なものの、二つの流れがある。本書では、二つの流れを総合的かつ歴史的に整理し、夢科学をわかりやすく解説。

渡辺 恒夫 著 1,785円(税込)

お問合せ：化学同人
<http://www.kagakudojin.co.jp/>



光文社新書

「イルカを
食べちゃダメですか？」

動物行動学者の著者は、何度もイルカ追い込み漁船に便乗し、約15年間にわたり現場の漁師たちと関わってきた。これらの経験を元に、追い込み漁の漁法、漁師、そして歴史文化について語っている。

関口 雄祐 著 777円(税込)

お問合せ：光文社
<http://www.kobunsha.com/>



PHPサイエンス・ワールド新書

「父親として
知っておきたい理科の常識」

子どもが親にたずねる理科の疑問を、親子の会話形式でやさしく説明。図解入りで楽しみながら読める。

目時 伸哉 著 861円(税込)

お問合せ：PHP研究所
<http://www.php.co.jp/>



骨粗鬆症治療の意外な盲点

骨粗鬆症には、骨の量だけでなく骨の質も大事だ

**骨質を担うコラーゲンの健康度を血液検査から評価できることが明らかになった
患者の骨の状態にあわせた治療が可能になる**

斎藤 充／丸毛啓史（東京慈恵会医科大学）

骨粗鬆症は、骨がスカスカになって折れやすくなる病気と一般には理解されている。典型的な患者のイメージは、やせ型の高齢女性だろう。やせている人は支えるべき身体が重くないため、太っている人に比べてもともと骨が頑丈になりにくい。さらに女性の場合は閉経を機に、骨を丈夫にする効果のある女性ホルモンの量が急激に下がるため、症状が現れやすい。とはいえ、現在ではよい薬があって、これを飲めば骨密度は高められる。

だが奇妙なことに、太めで骨密度の高そうな人でもレントゲンを撮ったら、

骨粗鬆症で骨折していたという例がある。糖尿病や心疾患などの生活習慣病の患者にこのタイプが多い。また、薬で骨密度を増しているのに、骨折を予防できないケースが半分以上を占め、臨床医の間では「50%の壁」として知られている。

なぜ、こんなことが起きるのか？

従来の骨粗鬆症のとらえ方が、骨密度だけに着目していたからだ。骨折予防を考えるのであれば、骨強度が重要だが、「骨密度＝骨強度」では必ずしもない。「骨の密度（＝量）」だけでなく、「骨の質」も、骨の強さ、ひいて

は骨折防止に大いに関係しているのだ。

臨床医である私たちが発信したこの概念は、内外の複数のグループによる別々の大規模調査でその正しさが認められた。2001年には米国国立衛生研究所（NIH）が統一見解として、骨強度に影響を与える因子に骨密度と骨質を掲げるようになった。

骨の質の重要さは、整形外科の臨床医ならば気がついていただろうが、質の善し悪しを評価するための物差しがこれまで提唱されてこなかった。2001年のNIHの統一見解以降もこの状況は変わらず、医療現場では従来どおりに骨密度の測定だけに基づいて骨の強さを判断してきた。比較的、簡単に測定できる骨密度と異なり、何を測れば骨の質の善し悪しを判断できるのかがつい最近までわからなかったのだ。しかし、私たちをはじめとする大勢の研究の積み重ねから、骨質の数値化が可能になった。しかも、その検査法はすでに別の疾患のために日本でも行われている方法をそのまま使える。

なお、骨折というと、枝が折れるような様子を連想しがちだが、日本人の骨粗鬆症で多いのは、背骨を構成する椎骨が“つぶれる”パターンだ。高齢者で背中や腰が曲がったり、背が低くなるのは、骨粗鬆症によるこのタイプ

KEY CONCEPTS

生活習慣病の人は骨折に要注意

- 骨粗鬆症は骨の強度が低下する疾患であり、この強度は骨密度と骨質で決まる——10数年前に著者たちの提唱した概念は、今では広く医学界に受け入れられている。
- 臨床医の間では、糖尿病などの生活習慣病の人は骨密度が高くても骨折しやすいことが経験的に知られてはいた。しかし、骨質の指標となるマーカーがなかったため、骨密度だけに注目した治療が続いていた。
- 動物実験や疫学調査、患者の骨のサンプルなどから、ホモシステインやペントシジンという物質が、骨の質の良い指標となることがわかった。これらは既存の技術で、血液や尿の検査から調べることができる。
- 骨の密度と質の両方を調べ、その患者にあった薬を処方するテーラーメイド医療が、既存の技術や薬ですぐにでも可能になる。

の骨折が起きているからだ。以下、ここの「骨折」は、衝突などではなく、ほんの些細なきっかけや本人も知らぬ間に起きた骨折を指すことにする。

鉄筋コンクリートにたとえると

人間の骨を鉄筋コンクリートにたとえてみよう。コンクリートに相当するのがミネラルで、鉄筋はコラーゲンという繊維状のタンパク質だ。

“水増しコンクリート”が強度不足になるように、カルシウムをはじめとするミネラルが不足して骨密度が小さくなると、骨折リスクは大きくなる。骨の強さの指標として、骨密度を求めるのは理にかなっている。

一方、鉄筋に相当するコラーゲンも無視できない。骨に含まれるコラーゲンは重さでは20%程度だが、体積では50%を占めている。強度に大きな影響を与えているのも当然だろう。

鉄筋は数も重要だが、質も大切だ。錆び付いた粗悪な鉄筋では、十分な強度は得られない。私たち慈恵医大のグループは、コラーゲン繊維の質の善し悪しが、骨質を決めるきわめて重要な因子であることを世界で最初に明らかにした。

コラーゲン繊維はコラーゲン分子が束になってできており、隣り合った分子が「架橋」によって強く結合している。架橋は鉄筋を結びつける梁に相当する。架橋には、秩序正しく分子をつなぎとめ、適度な弾力を保ちながら骨を強くするタイプ（善玉架橋）と、無秩序に分子をつなぎ、骨を過剰に硬くして陶器のようにもろくしてしまうタイプ（悪玉架橋）がある。

善玉架橋は正常な生理作用による架橋で、骨を作り出す骨芽細胞から分泌される酵素の働きによって作られる。この善玉架橋は赤ちゃんが成長するにつれて増えてくるが、やがて頭打ちとなり、中高年のころから年齢とともに減る傾向がある。



骨密度は十分でも 骨粗鬆症で大切なのは骨密度だけではない。骨密度は十分でも椎骨が骨折している例もある〔左、矢印が骨折部分、骨密度は若年骨密度平均値（YAM）との比較で85%以上〕。一方で、右の人は骨密度は低く（同53%）、レントゲンでもぼんやりとした印象だが、骨折は見られない。

一方の悪玉架橋の本体は、一般に「後期糖化・酸化生成物（Advanced glycation end products; AGEs）」と総称される物質で、名前からわかるように、酸化ストレスや血糖値の高い状態が続くことで生じてくる。また、加齢に伴って増えてくることも知られている。骨コラーゲンの悪玉架橋の場合、代表的なAGEsはペントシジンという物質だ。

骨の質という点では善玉架橋が多く形成され、悪玉架橋が少ないのが理想的で、その逆が最も懸念すべきパターンとなる。

生活習慣病の人は骨折しやすい

骨密度が低ければ低いほど、骨折のリスクが高くなるのは、旧来からの知識の通りだ。だが、骨密度に関係なく、骨折リスクを高める要因が存在することが最近の疫学調査からわかってきている。動脈硬化や高血圧、糖尿病といったいわゆる生活習慣病の人や、心筋梗塞や脳卒中といった心血管障害を起こしたことがある人では、骨密度が十

分に高くても骨折しやすい。

これまでに私たちは、加齢に伴ってコラーゲン含有量が減ったり、悪玉架橋が増えたりすると、骨がもろくなることを報告してきた。また興味深いことに、骨粗鬆症や糖尿病の患者では、ほかに病気を患っていないくても、善玉架橋が少なく、悪玉架橋が多いといった異常が見られ、実際の年齢以上にコラーゲンが老化している状態だった。こういった状態の人は、骨折しやすい。

動物実験や疫学研究、さらには骨折の外科治療の際に切除した骨サンプルなどの研究から、骨コラーゲンの異常架橋をもたらす具体的な要因として、糖尿病（糖の代謝異常）による糖化ストレス、そして酸化ストレスの2つが挙げられることがはっきりしてきた。酸化ストレスには「ホモシステイン」という物質が関係している。ホモシステインは、食事からのタンパク質に含まれるメチオニンというアミノ酸が代謝される過程で生じる中間生成物だ。

一般の方にはあまりなじみがないかもしれないが、日本では30年以上前

大規模研究での追試

ペントシジンやホモシステインの高値と骨折リスクに相関が見られた。

島根大学の研究 (2008年)	糖尿病患者151人 血中ペントシジン
米国のHealth ABC Study (2009年)	糖尿病患者928人 尿中ペントシジン
米国のWHI Study (2009年)	閉経後女性9万3676人 血中ホモシステイン
フランスのOFELY Study (2009年)	閉経後女性396人 尿中ペントシジン

から、生まれてきた赤ちゃんにホモシステインを代謝する能力がちゃんとあるかどうか、つまり、先天的な代謝異常でないかどうかを確認する検査が行われている。ホモシステイン代謝異常があると、血中での濃度が高くなり、動脈硬化や心血管系の発作などを起こしやすくなることが知られている。

このホモシステインが、実は骨粗鬆症にも直接に関係しているようなのだ。たとえば、コラーゲンの異常架橋をもたらし酸化ストレスには、具体的には血中のホモシステイン濃度が高いこと、そして、ホモシステインの代謝に必要なビタミンB₆やB₁₂、葉酸の不足、葉酸に関係する遺伝子の特定タイプを持つことが挙げられる。

ここで強調しておきたいのは、糖化ストレスの指標となる血糖値も、酸化ストレスの指標となるホモシステイン

やビタミン類なども、現在の技術で血液や尿から測定できる点だ。これは、実際の医療応用を考える上で非常に大切なポイントとなる。

骨粗鬆症を3つに分ける

私たちは、血中や尿中の悪玉架橋物質ペントシジンや血中ホモシステイン濃度が骨質マーカーになることを見だし、2006年に発表した。これらの物質が骨質マーカー、ひいては骨折予測マーカーになりうるというこの研究は、エール大学のアンソニア (Karl Insogna) 教授の目にとまり、2008年に *Nature Clinical Practice* 誌のレビュー欄で紹介された。これがきっかけとなり、欧米の3つの大規模研究 (2つは閉経後の女性、1つは糖尿病患者を対象) および島根大学の糖尿病患者を対象にした研究による追試が行われ、

その正しさが検証された (左の表)。

また、最近になって、私たちは閉経後の日本人女性502人を検討した結果を踏まえて、骨粗鬆症を3つのタイプに分けることを提唱した。

- ①低骨密度型 (骨密度も骨質も良い人に比べて骨折リスク3.6倍)
- ②骨質劣化型 (同1.5倍)
- ③低骨密度+骨質劣化型 (同7.2倍)

密度と質のダブルパンチになると、骨折リスクは7.2倍になる。これは非常に大きな数字だ [ここでの骨折リスクは、閉経後も骨密度があまり落ちていない人、つまり骨密度が若い世代の骨密度の平均値 (YAM値) と比べて80%以上ある人と比較している]。

各タイプの人数を見ると、その比率は①:②:③=5:3:2となり、骨質劣化型が決して珍しいものではないことが明らかになった。

現在、骨粗鬆症の治療には骨密度を高める薬が使われているが、骨密度だけが問題の患者 (①タイプ) は全体の半数しかいない点に注意してほしい。冒頭で紹介した「50%の壁」の原因はここにあるのではないだろうか。

タイプに合わせたテーラーメイド医療

骨質を本当に知るには、骨を採取して調べるしかないが、それはあまりに非現実的だ。その代用として、血中ホモシステイン値や尿中ペントシジン値がマーカーとなる。これらの検査はすでに医療で使われているが、骨粗鬆症に対しては保険の適用外だ。日本骨粗鬆症学会では「生活習慣病における骨折リスク評価委員会」を立ち上げ、骨質劣化型骨粗鬆症という概念を盛り込み、それを調べるための検査の必要性に言及した診療ガイドの作成に取りかかっている。近い将来、骨質マーカーの測定が一般的になる日が来るだろう。

骨粗鬆症に3タイプあるのだとすれば、それに合わせた治療が必要だ。現

健康な骨

骨密度: 高い (YAM70~80%)
骨質: 架橋異常なし



骨質劣化型

骨密度: 高い (YAM70~80%)
骨質: 架橋異常あり
骨折リスク 1.5倍



低骨密度型

骨密度: 低い (YAM70%未満)
骨質: 架橋異常なし
骨折リスク 3.6倍



低骨密度+骨質劣化型

骨密度: 低い (YAM70%未満)
骨質: 架橋異常あり
骨折リスク 7.2倍



骨粗鬆症の3つのタイプ 骨密度と骨質の組み合わせで、全体を4つに分けることができる。このうち、ともに良好な人 (左上) を除く3タイプが、治療の対象となる。なお、骨密度は年齢とともに下がるのが普通だ。治療の目的は骨折予防であるので、同年齢の平均値と比較するのではなく、若年の骨密度平均値 (YAM) と比べて評価し、骨密度がYAMの7割未満を「骨密度が低い」と判断する。また、血中ホモシステイン濃度は1ミリリットルあたり13ナノモル以上を「高値」と見なしている。

在、骨粗鬆症の治療薬としてよく使われているのはビスフォスフォネート製剤で、骨が壊れていくのを抑えることで、骨密度を高める働きがある。骨密度を高める効果は大きく、これが現在の標準的な治療法となっている。

しかし、多くの医療機関の症例を追跡調査した結果、ビスフォスフォネート製剤で骨密度を高めても、骨質劣化型の人では新たに骨折をするリスクが、骨質良好型に比べて1.6倍も高かった。骨質劣化型であることがあらかじめ骨質マーカーで判別できれば、骨質を改善する薬での治療、あるいはこうした薬とビスフォスフォネート製剤との併用で、リスクを下げられるだろう。

骨質を改善する薬としては、血中のホモシステインを下げる効果や抗酸化作用のある選択的エストロゲン受容体調節薬（SERM、塩酸ラロキシフェン）がある。また、古くから使われている活性型ビタミンD₃やビタミンK₂には、骨芽細胞の機能を高めて、善玉架橋を増やす働きがあり、これによって骨強度が高まることも明らかになった。

さらに、この7月末に日本でもついに承認され、秋ごろから使用開始となる副甲状腺ホルモン製剤（ヒトPTH 1-34、テリパラチド）も期待できそうだ。卵巣を除去して閉経状態にしたサル（骨粗鬆症のモデル動物）での実験から、この薬は骨密度を高める効果だけでなく、骨コラーゲン架橋の異常を改善することがわかった。骨の密度と質の両方に効果のある強力な薬なのだ（上の表）。

治療薬は、それぞれ固有の作用を介して骨強度を高めている。なので、患者にあった薬を選ぶことが重要だ。これまで、骨粗鬆症は骨密度しか指標がなかったため、骨密度を高める薬を処方される患者が多かったが、骨密度と骨質マーカーの両方を調べて、タイプに合わせた薬を選ぶべきだろう。こうした患者本人に合わせた「テーラー

骨の強度		ビスフォス フォネート	ラロキシ フェン	活性型 ビタミンD ₃	ビタミン K ₂	PTH製剤 (テリパラチド)
骨の 密度	ミネラルを 増やす効果	きわめて高い	あり	あまりない	あまりない	あり
骨の質	善玉架橋を 増やす効果	あまりない	あり	高い	高い	きわめて高い
	悪玉架橋を 減らす効果	あまりない	あり	あまりない	あり	高い

治療薬での効果を比較 骨粗鬆症の治療薬の働き目を模式的に示した。どの薬も、骨の密度と質の両方に一定の効果はあるが、それぞれ「得意分野」がある。患者に合わせた薬を選ぶことが重要だろう。

メイド治療」を確立させれば、「50%の壁」を越えられるかもしれない。

町工場発、世界標準

私たちは、臨床医として日々、患者さんの治療にあたる一方で、動物実験から疫学研究までを一貫して行っている。患者さんに接していると、「動脈硬化のある人は脊椎が骨折している例が多い」とか、「糖尿病では骨密度は低くないのに骨折する人が多い」など、人体をパーツに分けて考えていたのでは決して見えてこない関連性が見えてくる。そして、その重要性を身をもって感じている。

なぜ動脈硬化や高血糖の患者さんは骨折しやすいのか？ こうした疑問を実験動物や患者さんからの組織を使った分子レベルの研究で追究し、さらにそれを臨床データで検証できるのは、

臨床医だからこそだ。

私は自分の研究室を「町工場のような研究室」と思っている。有名ラボののれん分けではないといった意味もあるが、独自のアイデアを大切に、すべてを自分たちで行っているという意味でもある。骨粗鬆症といわゆる生活習慣病との関連は新しいアイデアだったので、それを実証するための手順も確立していなかったし、自分たちで解析装置を考案したりもした。

町工場的な研究室は、すべてを自分たちでするので、時間も手間もかかり、楽ではない。誰も設備の整った有名ラボで研究をし、超一流誌に論文を載せたいものだ。だが、情熱を注ぎ込めるテーマに出会えた研究者は幸せだ。そしてそれが、患者さんの治療に活かせるのであれば、医師としても研究者としても最高ではないだろうか。 ■

著者 斎藤 充（さいとう・みつる）／丸毛啓史（まるも・けいし）

ともに東京慈恵会医科大学整形外科科学講座の所属で、斎藤は講師、丸毛は教授。臨床医として日々、患者と向かい合いつつ、同研究室の20年来のモットーである「臨床に還元できる基礎研究で世界と戦う」を実践している。斎藤は、研究室の中でも骨代謝班のメンバーとして、骨粗鬆症をテーマにしている。

もっと知るには…

COLLAGEN CROSS-LINKS AS A DETERMINANT OF BONE QUALITY: A POSSIBLE EXPLANATION FOR BONE FRAGILITY IN AGING, OSTEOPOROSIS, AND DIABETES MELLITUS. Mitsuru Saito and Keishi Marumo in *Osteoporosis International*, (REVIEW) Vol. 21, No. 2, pages 195-214, February 2010.

特集：骨代謝マーカーの新しい応用「骨コラーゲン老化マーカーの骨粗鬆症への応用」斎藤充, *CLINICAL CALCIUM*, 2009年8月号, 1110～1117ページ, 医薬ジャーナル社

特集：糖尿病と骨「糖尿病・動脈硬化における骨質の劣化機構」斎藤充, *CLINICAL CALCIUM*, 2009年9月号, 1257～1268ページ, 医薬ジャーナル社

特集：新時代の骨粗鬆症学「コラーゲン架橋構造」斎藤充, 日本臨床, 2007年増刊号（通巻925号）, 209～213ページ, 日本臨床社

東京慈恵会医科大学整形外科骨代謝研究班のホームページ

<http://www.jikeiseikei.com/04rinsho/0409.html>

Lilly

いのちの尊さにこたえます。

「ミラクルをちょうだい」。

年の瀬もおしそまつ、ある寒い日のこと。
創業間もないイーライ・リリー大佐の薬局を訪れた少女は、
そう言いながら小さな手に握り締めていた
わずかなお小遣いを差し出しました。
聞けば、母親が重い病気におかされ、医者も周囲の大人たちも
「ミラクル（奇跡）だけが頼りだ」と話していたというのです。
少女の投げかけた一言の重みを、大佐は深く胸に刻みました。
ここから、迷信でもない、科学に裏づけされた
「ミラクル」を探し求めるイーライリリーの歩みが始まりました。
そして、真に価値ある医薬品づくりを目指した
創業者リリーの熱い想いは、
130年を経た今日もなお、揺らぐことなく受け継がれています。

イーライリリーは世界140カ国以上の国々で、真に価値ある医薬品の提供をめざして活動しています。
約8,000人の研究開発スタッフがファーストインクラス・ベストインクラスの革新的な医薬品の研究開発に取り組んでいます。

【日本で提供している製品】

中枢神経領域：●抗精神病薬 ●抗うつ薬 ●ADHD治療薬
内分泌・代謝・骨領域：●抗糖尿病剤 ●遺伝子組換えヒト成長ホルモン製剤 ●骨粗鬆症治療剤
オンコロジー領域：●代謝拮抗性抗悪性腫瘍剤

リリーの情報はインターネットでご覧になれます。 <http://www.lilly.co.jp/>

日本イーライリリー株式会社
〒651-0086 神戸市中央区磯上通7-1-5

2010年10月号

広告主名	掲載ページ	請求番号	FAX 請求
朝倉書店	63	63	
岩波書店	36	36	
オハラ	70	70	
科学技術振興機構	27	—	—
講談社	69	69	
中外製薬	表4	—	—
電力中央研究所	表2 見開き	—	—
日本イーライリリー	118	—	—
日本経済新聞出版社	127	—	—
白日社	92	92	
新製品・企業 インフォメーション	113	—	—
日経サイエンス・ バックナンバーのご案内	112	—	—

広告主名	掲載ページ	請求番号	FAX 請求
PR企画 分析機器・科学機器特集		101~110	
クラブウ	107	—	—
テイクオフ	106,108	—	—
日本ウォーターズ	104,105,108	—	—
日立ハイテクノロジーズ	106,109	—	—
分析展 2010 / 科学機器展 2010	103	—	—
林栄精器	106	—	—

※ 資料請求番号のない広告については直接広告主までお問い合わせください。

FAXによる広告資料請求サービスをご利用下さい

このページをコピーし、上記一覧表の
ご希望会社のFAX請求欄に○印を付けてください。
右記に必要事項をご記入の上
FAX: 03-3639-2130
までお送り下さい。

(フリガナ)

姓名

送付先
☐ 勤務先
☐ 自宅

電話番号

(歳)

※ 資料請求いただいた方については、日経サイエンス社が登録情報を取りまとめ、当該広告主にお渡しいたします。それ以降は各社それぞれの責任において管理され、資料のご案内等をさせていただきます。

購買形態 1. 定期購読 2. 書店購読

www.nikkei-science.com/



「日経サイエンス」の
ホームページから
本誌にこれまで連載した
シリーズ広告を
お読みいただけます。



工学者の センスと想像力の 靱き可能性を示した一冊

評者 瀬名秀明

**ロボットという思想
脳と知能の謎に挑む**

浅田 稔 著

B6判 221ページ

NHK出版 997円(税込)



本書は日本で認知発達ロボティクスの分野を推進してきた著者が、『ロボットインテリジェンス』（國吉康夫との共著、大川出版賞受賞作）の記述をベースに、直近の研究成果まで盛り込んで一般向けに書き下ろした待望の一冊だ。タイトルの「思想」という言葉には新しい研究領域を開拓してきた著者の意気込みが込められている。

知能とは何か。従来この謎に対して神経科学のような自然科学的アプローチや、哲学・心理・社会学といった人文社会的アプローチが採られてきた。ここで著者は第三の道を提唱する。すなわち人間をつくることで、その本質を理解しようというものだ。ふしぎなことに私たちは一度体験してみないとうまく物事を想像できない。ならば実際にヒト型ロボットをつくることで、ヒトと機械の相違点が際立ってくるはずだ。そこにヒトの本質が見えてくる。

本書には著者がこれまで取り組んできた研究成果が凝縮されており、いわば著者の個人史なのだが、ごく啓蒙的

な筆致は読者が著者の内面に入り込むきっかけをなかなか与えてくれない。だが次々と登場する研究仲間の名は、そのまま工学者である著者の格闘の歴史である。ロボットとは本来、いかようにも設計しうる自由な存在だ。自由であるからこそ設計者に何よりもセンスが求められる。知能の本質を知るために、人間のいかなる側面をそっくりにつくればよいだろうか。そこを間違えれば元も子もない。本書で紹介される國吉康夫、石黒浩、細田耕、乾敏郎らは、そうした本質的に困難な道をもに歩んできた著者の戦友であろう。

胎児や新生児のシミュレーションを動かすことで、私たちの身体が知能を育んでいることを知る。母親の声を模倣するロボットをつくることで、自己と他者の認識システムがどのように幼児に生じてくるかわかってくる。相手の心を読み取る能力、道具を使う能力。著者は仲間とともに、ロボットをつくることで知能の本質へと挑んでゆく。

しかし本書は宿命として、サイエン

スの限界を炙り出す。本書で解説される筋道は、なるほど練り上げられたものだ。ひとりの専門家であることの枠を、著者は仲間との共同研究という社会性によって克服しようとする。工学者である著者は好奇心を広げ、ロボット学の概念を拡張、日本赤ちゃん学会の理事にもなった。しかしそれでもなお、ロボットはあまりにも自由な存在だ。自由であるがゆえに想像力の限界が試される。ロボットを人間に近づけようとするほど、ロボットは人間から遠ざかってゆく。こんなレベルでしか人間の本質に迫れないのかという絶望が、常に立ち上ってくるだろう。自由は人間の本質をつかめるのか。

本書でもっとも輝いているのは映画『2001年宇宙の旅』に登場する人工知能HAL9000を考察するくだりだ。ロボットビジョンの研究からキャリアをスタートした著者は、HALの視覚機能の限界を手がかりに、知能の本質へと思い至った。宇宙船の身体しか持たないHALが本当に人の行動を理解できるだろうか。この疑問が著者自身の「ロボットという思想」へと発展を遂げた。

ロボットはどこまでも自由であるからこそ、そのサイエンスはSFという人間の想像力の靱さに根ざすのだ。

実は映画『2001年』のHALは、もともとヒト型ロボットとして構想されていた（『失われた宇宙の旅2001』参照）。なぜキューブリック監督はあえてHALからヒトの身体性を奪い取ったのか。著者ならその謎に新たな知能の本質を見出すだろう。そのきっかけは、きっと新たなロボティック・サイエンスを、日本に開花させることだろう。

（せな・ひであき：作家）