

SCIENTIFIC
AMERICAN
日本版

日経サイエンス

<http://www.nikkei-science.com/>

2009
08

特集 再生医学の現在
実用間近に迫った
iPS細胞

ヒトとサルを分けるDNA

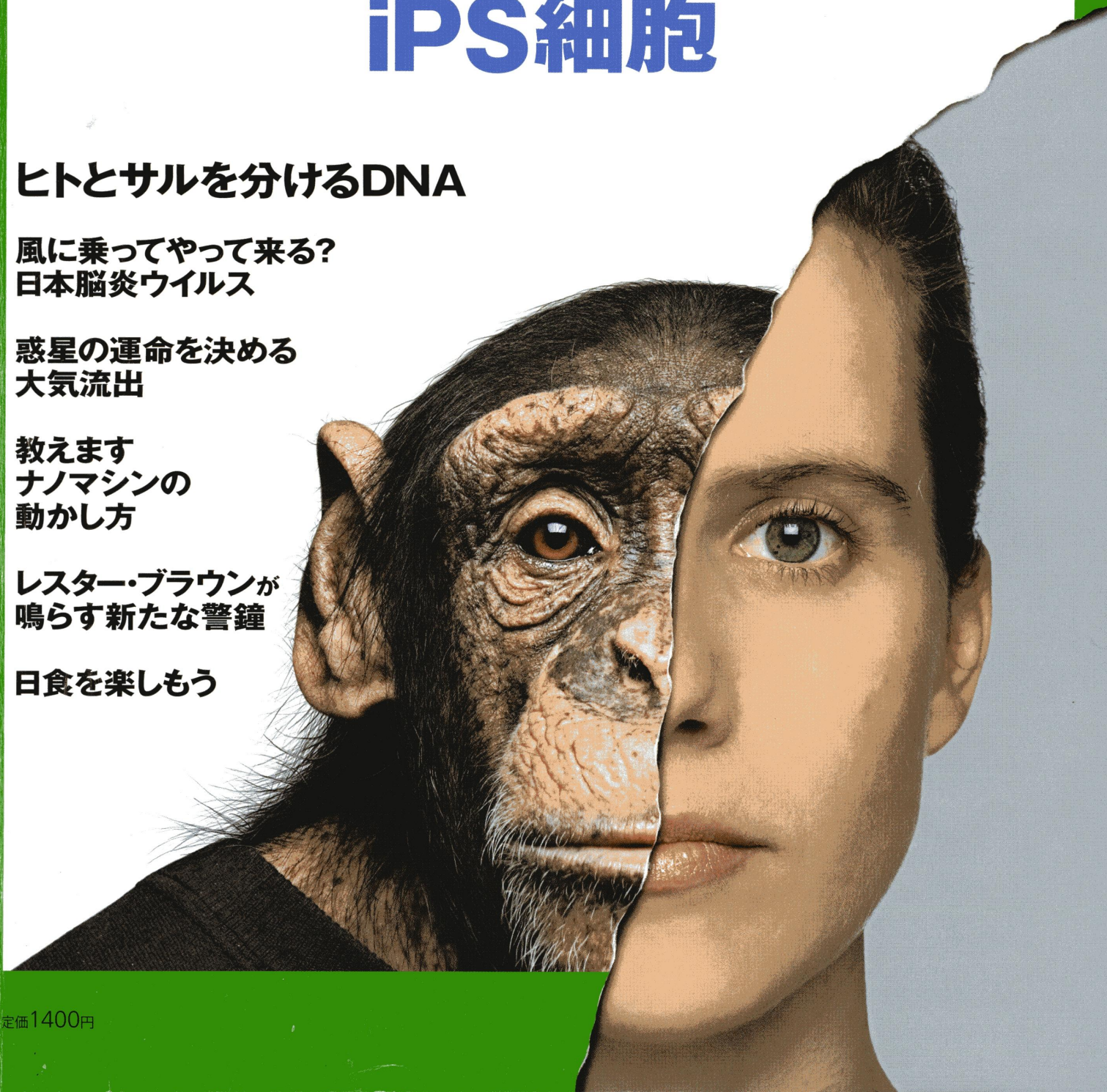
風に乗ってやって来る?
日本脳炎ウイルス

惑星の運命を決める
大気流出

教えます
ナノマシンの
動かし方

レスター・ブラウンが
鳴らす新たな警鐘

日食を楽しもう



再生医療

特集 幹細胞を医療現場へ

022

血の通った臓器をつくる

A. カデムホッセイニ / J. P. バカンティ / R. ランガー

031

動物で育てるヒトの臓器

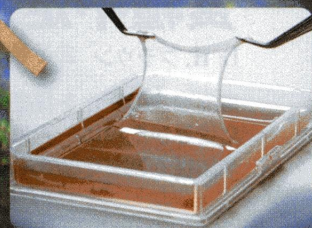
訖摩雅子

034

創薬に活躍するiPS細胞

訖摩雅子

成体幹細胞や胚性幹細胞 (ES 細胞) の発見は、近年の医学・生物学での大きなトピックスだ。人工多能性幹細胞 (iPS 細胞) の開発もあって、医療応用に対する期待も大きい。幹細胞を使って臓器をつくる試みや、ついに実用化が始まった iPS 細胞の産業利用を紹介する。



感染症

038

海を渡る日本脳炎ウイルス

古田 彩 / 協力: 森田公一

日本脳炎は過去の病気? 東南アジアで毎年数万人の患者を発生させているウイルスが、日本にも渡ってきている。潜在的な脅威は消えていない。



038

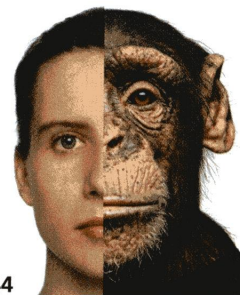
進化

044

DNAに見えた「人間の証し」

K. S. ボラード

ヒトとチンパンジーが共通祖先から分かれて 600 万年。この間に大きく変化したゲノム領域を探ることで、私たちが人間にした DNA 配列が明らかになった。



044

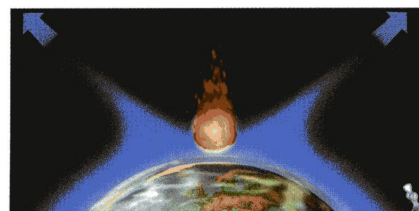
惑星科学

052

惑星の顔を決める大気流出

D. C. キャトリング / K. J. ザーンレ

惑星大気を構成する気体は少しずつ漏れ出している。こうした流出によって太陽系のさまざまな謎が解けることがわかってきた。



052

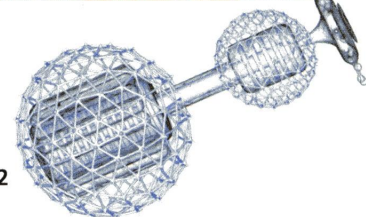
ナノテクノロジー

062

ナノマシンを動かすエンジン

T. E. マルーク / A. セン

ナノマシン実現の課題はマシンを動かすエンジン開発にあった。細胞の生体モーターに着想を得て、ついに微小世界で機能するナノエンジンが登場した。



062

環境

068 食糧不足で現代文明が減じる?

L. R. ブラウン

自然環境の変化を背景に食糧生産が不足し、貧困国を中心に国家が破綻して全世界が危機に——思想家レスター・ブラウンは現代文明崩壊の恐れをもはや無視できなくなったと説く。危機回避に向けた行動計画を示す。



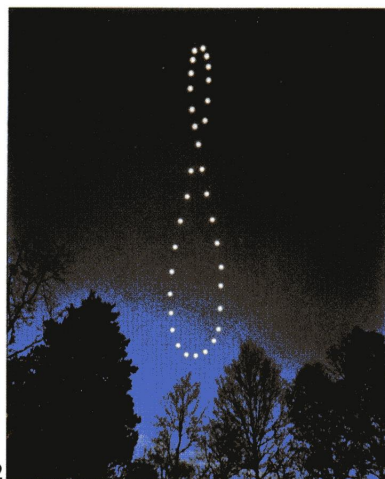
068

天文学

088 7月22日の日食を楽しもう

中島林彦

日本国内で46年ぶりに皆既日食が見られる。観測に役立つデータのほか、各地の科学館や公設天文台、プラネタリウムなどで開く観望会情報を掲載。



092

サイエンス・イン・ピクチャー

092 宇宙，身近に感じて 野村仁の世界

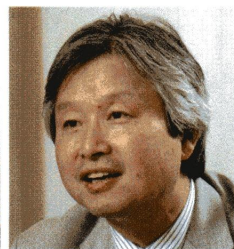
中島林彦

青空に8の字を描く太陽，五線譜の音符となった月，化石と並ぶ遠い銀河の写真……。現代芸術家，野村仁氏の作品は宇宙を身近に感じさせてくれる。

080 茂木健一郎と愉しむ科学のクオリア

メスだけで生まれた ネズミが語る男女の差

ゲスト：河野友宏（東京農業大学）



012 NEWS SCAN

- ウイルスの出所に目を向けろ
- がん化のプログラム
- ミツバチ受難の時代

- 厄介ワームまたも登場
- 大空へジャンプ!
- もうひとつのオリンピック
- 利き手が変わる

- ゾウリムシが光通信
- 曲がるレーザー光線
- 的を射た注射針 ほか



編集顧問

太田次郎 お茶の水女子大学名誉教授
佐藤勝彦 明星大学客員教授
塚田裕三 慶応義塾大学名誉教授
中村桂子 JT生命誌研究館館長
西沢潤一 東北大学名誉教授

006 ダイジェスト

010 サイエンス考古学

021 UPDATES

- ペルム紀大絶滅に新たな謎
- 副作用、警告しても免責なし
- “万能ワクチン”に一步
- 氷が溶けて海面混乱

077 いまどき科学世評

科学が要請する排出削減は？
塩谷喜雄

078 パズルの国のアリス

運試しのような神経衰弱
坂井 公

086 個性派 ミュージアム巡礼

国立科学博物館
筑波実験植物園
文・写真：キュラトウス

096 TREND

動き始める日本のジオパーク

121 ANTI GRAVITY

知らざあ言って聞かせやしょう
S. マースキー

122 BOOK REVIEW

『分子進化のほぼ中立説』
『ビジュアル
ハッブル望遠鏡が見た宇宙』
連載 森山和道の読書日記 ほか



086

126 Information

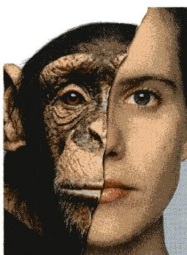
130 次号予告

131 SEMICOLON

132 今月の科学英語



121



表紙

ヒトとチンパンジーのゲノムの違いは1%にも満たない。重要なのは変異の数ではなく変異の場所だ(44ページ「DNAに見えた『人間の証し』」, 表紙イメージ; Cary Wolinsky)。

PR企画

101 バイオ研究の最前線

111 研究者・技術者のための
データ解析ソリューション/
学術情報データベース

日経サイエンスホームページ

<http://www.nikkei-science.com>

過去の主要記事ダウンロードは

<http://www.nikkei-science.net> へ



日本ABC協会加盟誌
(新聞雑誌部数公査機構)

発行人 田口恒雄

編集部長 神野幹雄

編集長 中島林彦

編集部 菊池邦子, 詫摩雅子, 古田 彩, 越智泰子

編集協力 湯浅 歩

デザイン 八十島博明, 石川幸彦,
井上大輔, 飛岡綾子

写真 梅岡弘

営業部長 佐藤俊明

販売 青木修, 武田浩司, 新家耕介, 中村 寛

広告 小田伸二

株式会社 日経サイエンス

東京都千代田区大手町 1-3-7

〒100-8066 電話 03 (3270) 0251

編集 03 (5255) 2821

広告 03 (5255) 2831

販売 03 (5255) 2839

代表取締役社長 田口恒雄

代表取締役副社長 Steven Yee

取締役 斎田久夫, 堀内健一,

Michael Florek, 澤田宏之

監査役 峯尾一弘, 大根田信雄

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF: John Rennie

EXECUTIVE EDITOR: Mariette DiChristina

MANAGING EDITOR: Ricki L. Rusting

CHIEF NEWS EDITOR: Philip M. Yam

SENIOR WRITER: Gary Stix

EDITORS: Peter Brown, Davide Castelvecchi,

Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky,

Michael Moyer, George Musser, Christine Soares,

Kate Wong

CONTRIBUTING EDITORS: Mark Alpert,

Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs,

Marguerite Holloway, Christie Nicholson,

Michelle Press, Michael Shermer, Sarah Simpson

MANAGING EDITOR, ONLINE: Ivan Oransky

ART DIRECTOR: Edward Bell

VICE PRESIDENT, FINANCE, AND GENERAL

MANAGER: Michael Florek

VICE PRESIDENT: Frances Newburg

MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL:

Kevin Hause

PRESIDENT: Steven Yee

75 Varick Street, 9th Floor,

NEW YORK, NY 10013-1917 U. S. A.

©NIKKEI SCIENCE, INC.,
SCIENTIFIC AMERICAN, INC., 2009

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。



SCIENTIFIC AMERICAN の商標およびその商品ならびにそれに属するロゴタイプは、サイエンティフィック・アメリカン社がその全権利を保有しています。

ここまで進んだ臓器づくり

血の通った臓器をつくる22 ページ

A. カデムホッセイニ (米ハーバード大学) / J. P. パカンティ (米マサチューセッツ総合病院) ほか

動物で育てるヒトの臓器31 ページ

託摩雅子 (編集部)

創薬に活躍する iPS 細胞34 ページ

託摩雅子 (編集部)

今や医学や生物学に詳しくない普通の人でも知っている「iPS細胞」。自分の皮膚を少しとり、バイオ技術を用いてiPS細胞を作ることができれば、それを元手に、自分の体内にあるのとそっくりの心臓や肝臓、血管などを再生することも夢ではなくなった。

重い病気や事故にあっても、他人の臓器などに頼ることなく、再生した自身の臓器のスペアを移植すればすむ。金属やポリマー製の臓器や他人の臓器を移植する場合と違って、命にかかわる拒絶反応が起きないのが大きな特徴だ。iPS細胞のパイオニアである京都大学の山中伸弥 (やまなか・しんや) 教授はノーベル賞有力候補と目される。

ただ、iPS細胞で作ったスペア臓器が実現するのはもう少し先。それより早く、別種のヒトの細胞をもとにしたスペアが医療現場に登場するかもしれない。今回の特集では米国で先行するさまざまな臓器作りの事例と日本国内の先進的な取り組みについて紹介する。

一方、iPS細胞については創薬現場での実用化が先行するとみられている。iPS細胞で各種の臓器の細片を作り、それを新薬候補物質の効果や毒性を調べるチップとして使おうという試みだ。特集の3本目の記事は、山中教授への取材などをもとに、これまであまり一般には知られることが少なかったiPS細胞の創薬への応用に焦点をあてる。

臨床応用が始まっているヒトの細胞をもとに作った臓器や組織の代表例は皮膚や軟骨、補修パッチ (血管などの損傷を補修する素材) などだ。これらは比較的、構造が単純で、いずれも組織内に血管が通っていない (血が通っていない)。培養液中で育てた皮膚や軟骨は、患者への移植後、周囲の毛細血管から酸素や栄養を受けとり、患者の組織と一体化していく。

こうした段階を経て、現在、米国で臨床応用が模索されているのは、より複雑なもの、つまり内部に血管が組み込まれた臓器 (血の通った臓器) で、その代表格が肝臓だ。肝臓は血液に含まれる栄養素と毒素を取り出し、栄養素は蓄え、毒素は分解する。いわば体内の化学工場だ。左上の写真に示した一見、チップのようなものが人工肝臓の試作品で、白っぽい基板のようなものは薄い生体適合性ポリマー、赤色に見えるのは血液、そして血液に縁取られた細かいパターンのようなところに肝細胞が植え込まれている。

日本では将来的にヒトiPS細胞をブタに植えてヒト臓器を育てたり、ブタ胎仔などから取った臓器のもとになる組織を患者に植えて臓器に育てたりする基礎研究が進んでいる (左下の写真は医学研究用のブタ)。ヒトの臓器を育てるのに適したブタを遺伝子組み換え技術で作る研究も成果が出つつある。

風に乗って広がる? 日本脳炎

海を渡る日本脳炎ウイルス ……38 ページ

古田 彩 (編集部) / 協力: 森田公一 (長崎大学熱帯医学研究所)



蒸し暑くなって蚊が現れ始めた。枕元で鳴かれたり、刺されるなど不愉快な存在だが、一昔前は日本脳炎ウイルスを媒介する害虫として怖がられた。1960年代、毎年1000人以上の患者が出て、そのうち2~3割は死に至った。

現在は年間10人以下に減少しているが、過去の病気になったのかといえ、そうではない。かつて、ほとんどの子どもは日本脳炎ワクチンの接種を受けていたが、2005年、政府は副反応を理由に接種勧奨を中止、以来4年にわたって接種が事実上止まっていた。この6月から新ワクチン出荷が始まったが、接種に反対する声も残っている。

実際の患者が極めて数少ないことが接種反対の背景にあるが、実は患者が減った主因がはっきりしていない。ワクチンが効果を上げたこともあるが、日本脳炎ウイルスの流行の変化による影響がより大きかった可能性もある。

その意味で、流行の仕組みの解明に関心が持たれているが、近年、東アジアや東南アジアで毎年3~5万人の患者を発生している日本脳炎ウイルスのタイプが、1年から数年遅れで日本に入ってきていることがわかってきた。ウイルスを体内に宿した蚊が風に乗って東シナ海を渡り、日本にやって来ている可能性があるという。

ナノマシンが細菌のように動いた

ナノマシンを動かすエンジン ……62 ページ

T. E. マルーク / A. セン (ともに米ペンシルベニア州立大学)



虫眼鏡でも見えないほど小さな機械、ナノマシンの開発が進み、フラーレン(サッカーボール状炭素分子)をタイヤとする分子サイズの車さえできるようになった。しかし、その車には今のところエンジンが積まれていない。分子サイズの車の場合、エンジンはそれより小さくしなければならないが、物質を構成するのは原子や分子だから、現在の自動車エンジンのようなものを分子サイズで作ることは原理的に不可能。ナノマシンのエンジンにはまったく新たな発想が求められる。

動かすだけなら簡単だ。ナノマシンを液体中に入れば、液体分子と衝突

を繰り返すことで、でたらめな動きをする。ブラウン運動だ。実はブラウン運動をうまく利用して微生物は動いたりしている。ナノマシンにこの“生物の知恵”を生かそうという試みがある。

もう1つ、これも生物をまねたアイデアがある。化学反応で生み出すエネルギーの活用だ。カプセル状ナノマシンの表面で電気化学反応を起こさせることで、周囲に一定方向の液体の流れを生み出す。するとナノマシンはその液流とは反対の方向に動くようになる。著者らが試作したそのナノマシンの動きを顕微鏡で観察すると、細菌が遊泳する姿と驚くほど似ていた。

風に乗って広がる? 日本脳炎

海を渡る日本脳炎ウイルス ……38 ページ

古田 彩 (編集部) / 協力: 森田公一 (長崎大学熱帯医学研究所)

蒸し暑くなって蚊が現れ始めた。枕元で鳴かれたり、刺されるなど不愉快な存在だが、一昔前は日本脳炎ウイルスを媒介する害虫として怖がられた。1960年代、毎年1000人以上の患者が出て、そのうち2〜3割は死に至った。

現在は年間10人以下に減少しているが、過去の病気になったのかといえ、そうではない。かつて、ほとんどの子どもは日本脳炎ワクチンの接種を受けていたが、2005年、政府は副反応を理由に接種勧奨を中止、以来4年にわたって接種が事実上止まっていた。この6月から新ワクチン出荷が始まったが、接種に反対する声も残っている。

実際の患者が極めて数少ないことが接種反対の背景にあるが、実は患者が減った主因がはっきりしていない。ワクチンが効果を上げたこともあるが、日本脳炎ウイルスの流行の変化による影響がより大きかった可能性もある。

その意味で、流行の仕組みの解明に関心が持たれているが、近年、東アジアや東南アジアで毎年3〜5万人の患者を発生している日本脳炎ウイルスのタイプが、1年から数年遅れで日本に入ってきていることがわかってきた。ウイルスを体内に宿した蚊が風に乗って東シナ海を渡り、日本にやって来ている可能性があるという。

ナノマシンが細菌のように動いた

ナノマシンを動かすエンジン ……62 ページ

T. E. マルーク / A. セン (ともに米ペンシルベニア州立大学)

虫眼鏡でも見えないほど小さな機械、ナノマシンの開発が進み、フラーレン(サッカーボール状炭素分子)をタイヤとする分子サイズの車さえできるようになった。しかし、その車には今のところエンジンが積まれていない。分子サイズの車の場合、エンジンはそれより小さくしなければならないが、物質を構成するのは原子や分子だから、現在の自動車エンジンのようなものを分子サイズで作ることは原理的に不可能。ナノマシンのエンジンにはまったく新たな発想が求められる。

動かすだけなら簡単だ。ナノマシンを液体中に入れば、液体分子と衝突

を繰り返すことで、でたらめな動きをする。ブラウン運動だ。実はブラウン運動をうまく利用して微生物は動いたりしている。ナノマシンにこの“生物の知恵”を生かそうという試みがある。

もう1つ、これも生物をまねたアイデアがある。化学反応で生み出すエネルギーの活用だ。カプセル状ナノマシンの表面で電気化学反応を起こさせることで、周囲に一定方向の液体の流れを生み出す。するとナノマシンはその液流とは反対の方向に動くようになる。著者らが試作したそのナノマシンの動きを顕微鏡で観察すると、細菌が遊泳する姿と驚くほど似ていた。

火星が「赤い星」になったわけ

惑星の顔を決める大気流出52 ページ

D. C. キャトリング (米ワシントン大学) / K. J. ザーンレ (NASA エイムズ研究所)

もし植物をはぎ取ったら大地は何色に見えるだろう？ それは私たちが探査機からの画像を通じて知っている隣の惑星、火星とそっくりの姿になる。赤い大地だ。もう1つの隣の惑星、金星は二酸化炭素の厚い大気をまとい硫酸の雲に覆われているので地球から表面を見ることができない。しかし、仮に硫酸の雲が消えたら、そのとき見える地表もやはり赤茶けているだろう。

3惑星に共通する赤色は酸化鉄の赤だ。なぜ鉄が酸化したか？「突き詰めて言うと、これら惑星の大気から水素が散逸したため」と著者は言う。太古、3惑星には水素も豊富にあったが、

最も軽い水素は大量に宇宙へ流出していった。すると水素と結びついて水を構成していた酸素は、相手を失い、今度は鉄に結びついた。宇宙への大気の流失は、惑星の色を決める要因になっている。別の見方をすれば、惑星大気の流出は惑星大気の組成を左右する大きな要因であることにもなる。

惑星や衛星からの大気の流出メカニズムはいくつもあり、どのメカニズムが中心的な役割を果たすかは惑星や衛星の質量や環境によって違ってくる。「環境」とは例えば小天体落下の頻度の高さ。頻度が高いと、宇宙に吹き飛ばされる大気の量も増えるからだ。

宇宙を実感してみませんか

7月22日の日食を楽しもう88 ページ

中島林彦 (編集部)

宇宙、身近に感じて 野村仁の世界92 ページ

中島林彦 (編集部)

普段、日常生活の中で「宇宙」を身近に感じることはあまりない。しかし、山や海に行ったら素晴らしい星空を眺めたとき、私たちの前に宇宙が開けていることを実感するだろう。

宇宙空間において太陽と月、地球という3天体が一直線上に並んだときに起きる天体現象、日食もまた、宇宙を感じることができる貴重な機会だ。7月22日、日本国内で46年ぶりに皆既日食が見られる。皆既食となるのは九州南方に浮かぶトカラ列島周辺だが、他の場所でも部分食は見られる。今回、

この世紀の日食の詳しいデータとともに、各地の科学館などで開かれる日食観望会の情報を集めて掲載した。

もう1つ、「宇宙」や「時間」を身近に感じるができる場が、期間限定で東京に設けられた。7月27日まで東京・六本木の国立新美術館で開かれている現代芸術家、野村仁（のむら・ひとし）の大規模な回顧展「野村仁 変化する相一時・場・身体」だ。氏の作品は太陽や月、隕石、化石などを素材としており、今回、その一部を誌面で紹介している。

サイエンス 考古学

50年前

1959

波の振る舞い

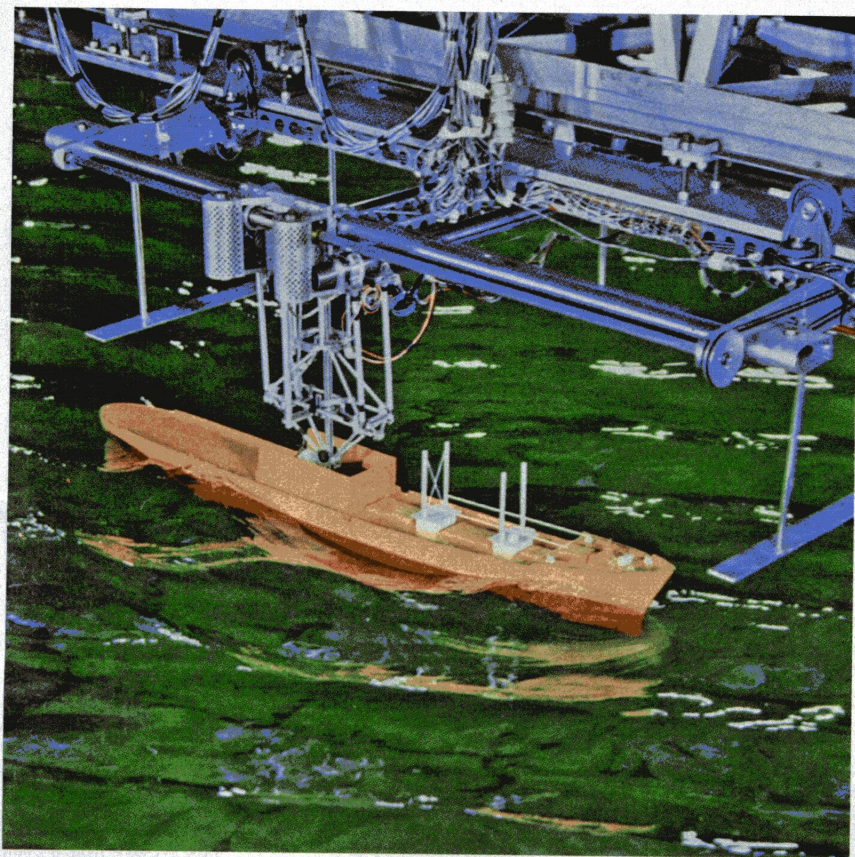
波がどこに向かっているのかを知ろうとしても、ただ目で観察するだけでは夢の世界に誘われてしまい、目的を果たせない。ために無数の波を数えてみるがいい。波を知ろうとするなら、海洋の詳しい調査と巨大な水槽での実験が必要だ。新しい知識と技術によって、海洋と沿岸で暮らし働く人々の生活を守るために、波の力を計測してその動きを予測することができるようになった。ニュージャージー州ホーボーケンのスティーブンス工科大学では、巨大な水槽を設置し、実際の海の変化に似せた不規則波を人工的に起こしている。この写真（下）では、模型の船が装備された動力で推進し、その動きを上部の機器で記録している。

100年前

1909

ブレリオの快挙

ブレリオ（Louis Charles-Joseph Blériot）による劇的なイギリス海峡横断飛行は、飛行機の進歩が画期的な段階に入ったことを示した。人々の記憶に永く残るに違いない。陸地では、これより前にもっと長い距離の飛行に成功しているが、そのことを持



人工波を起こした水槽で実験中の全長1.5mの模型船——1959年

ち出して今回の快挙をけなすような不心得者は一人もないだろう。危険とそれ乗り越える勇気にかけては、あの大胆な早朝の海峡越えの飛行はほかに類を見ない。海峡を越えた第一号機が単葉機だったことで、この型の飛行機の声望が高まった（編集部注：ブレリオは1909年7月25日に、自身の設計したブレリオVI号で史上初のイギリス海峡横断飛行に成功した。フランスのカレーから英国のドーバーまでの直線距離にして約34kmを37分で飛行した）。

テレビ創成期

無線電信電話システム分野での発明で知られるベルリンのルーマー氏（Mr. Ernest Ruhmer）が、テレビ受像機の問題を実質的に解決したと考えられる最初のデモ機を完成させた。本誌記者は、ブリュッセルへ送られる直前にこの興味深い機械を見るチャンスを得た。ブリュッセルでは、来年に計画されている万国博覧会の開催者の前で披露されることになっている。実際のところ、わずか125万ドルのコストで完成したこのテレビ受像機は、来る万博の目玉になるだろう。

宇宙の訪問者

ハレー彗星の接近は、1909年から1910年の天文学分野における最大のイベントだ。この驚くべき天体は、非常に長い楕円軌道を取りながら75～76年ごとに太陽のまわりを一周する。最後に観測したのはケープ天文台で、1836年5月のことだったが、人間の視界から消えても、その宇宙での軌道は船乗りが道のない海での航路を知っているように、非常に正確にわかっている。帰ってきた彗星をどこが一番に見つけるかについて、大型望遠鏡を備えた天文台のあいだに競争らしきものは少しも見られない。

150年前

1859

黄金の墓

東方から海を越えてきた白人がアメリカ大陸を発見したとき、そこに住んでいた中央アメリカの先住民には、死者を金で飾って埋葬する習慣があった。現在、墓地という新しい“探鉱地”に大勢の白人が押しかけ、金がざくざく採れると報告されている。だが、この地はすでに17世紀にスペイン人による略奪を受けているので、伝え聞かれるほど大量の金が残っているはずはない。副葬品の像は鑄造されて磨き上げられたもので、芸術的にも優れた作品だ。これを作った人々は、非常に高度な文明をもっていたに違いない。このようなすばらしい像の発見を契機に、アメリカの古代文明の研究が進むのは間違いなく、出土した像は未加工の金塊や金属片のように坩堝（るつぼ）に投げ込んでしまわず、保存するべきだ。

ダンゴムシの知性

お話
情報・システム研究機構
国立情報学研究所准教授

古山宣洋



画・クロイワ カズ

——ヒトとダンゴムシの行動を比較して、知性を探る研究をなさっていますが、そのきっかけは何ですか。

古山 「知性とは何だろうか？」という疑問が出発点でした。一般に、知性は合理的な推論など、大脳のはたらきとして捉えられていますが、それでいいのだろうかとか…。

そんなことを考えていたとき、ダンゴムシ研究を専門とする信州大学特任助教の森山徹さんに出会いました。ダンゴムシは進行方向に障害物があると最初は右に曲がり、次は左に曲がるというように、左右交互に曲がる方向を変えます。交替性転向反応と呼ばれ、機械的もしくは本能的な反応と考

に置くと、一部の個体は普段は見られない行動を始めます。刺激に対して単に機械的に、あるいは本能に従って行動するだけではないことがわかったのです。

ダンゴムシの行動をヒトと比較しようということで、早稲田大学の三嶋博之准教授と僕がヒトの行動を、森山さんと滋賀大学の右田正夫准教授がダンゴムシの行動を担当する共同研究を3年前にはじめました。

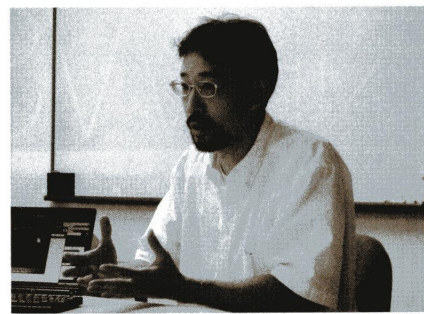
——どんな実験を行っているのですか。

古山 例えば、ダンゴムシの触角にチューブを付けて通常の1.5倍くらいの長さにします。そして、上から降りるにつれ、段差が大きくなる階段を用意します。上から3段目に、触角にチューブを付けていれば届くが、チューブなしだと届かない段差を設定しておきます。階段のいちばん上にダンゴムシを置くと、チューブ付きの触角で段差の底を探りながら降りていくのですが、3段目でも、チューブの先が下にカツンと当たれば、つんのめりながらも降りてしまう。チューブの先に感じる機械的な振動を「脚が届く場所」と勘違いしているのでしょう。ところが、階段に投入する前に平坦な場所で10分間ほど放してやると、3段目にさしかかりチューブの先に機械的な振動を感じても踏みとどまるようになります。機械的に判断をするのではなく、もっと複雑な判断をするようになります。身体の一部が変化しても、環境の意味を正しく探知する学習能力がある、ことを示唆しています。

——環境適応という視点で、知性を考えるのは非常に新しい考え方なのですか。

古山 動物行動学では、下等な動物の環境に対する反応は機械的、または本能によるという考え方が根強くあります。一方、僕たち心理学者は、ヒトの行動は推論などの知性に基づいていると考えがちです。じつは、進化論のダーウィンは、環境への適応という観点で動物の知性を考え『ミミズと土』という本でミミズの知性に触れています。

イギリスのミミズは地面の巣穴が乾かないように、葉っぱで穴をふさぎます。その際、葉の大きさや、先端か根本かなどを選んでることを、ダーウィンは発見しました。そこで、巣穴の周りに、いろいろな大きさや形状に切った紙や、イギリスのミミズが出会ったことのない外来種の葉っぱを置いてみました。すると、ミミズは適切なものを選んで穴をふさぎます。紙の蓋の利



るものがうまく利用できるかどうかを判断する能力、ある意味での知性があると考えたわけです。僕らの共同研究では、これをさらに発展させようと考えています。

——大脳の概念的な知性とは違うタイプの知性が存在するということですか。

古山 そうです。触角にチューブを付けられたダンゴムシは、ゴム手袋をつけて皿洗いをする人間のようなものです。素手のときより触感が鈍くなりますが、そのまま洗い続けられれば、どの程度の力を入れてスポンジでこすれば汚れがおちるか、どう持てば皿を落とさないかが分かってきます。同様に、ダンゴムシもチューブ付きの触角の使い方を覚えるのでしょうか。ただし、大脳で意味づけしているわけではない。

心理学に「アフォーダンス」という考えがあります。環境の意味は、ヒトや動物が概念的に解釈するのではなく、環境が、探索する我々にその意味を与えてくれるという考え方です。知性にはこのようなタイプも含まれていて、人間もダンゴムシもその部分はある程度共有しているのでしょうか。

昨今、脳科学は飛躍的に進歩していますが、ヒトの知性を考える際に、何でも大脳の功績と考えがちです。認識や知性に関して広く見渡すことで、ブレイクスルーに繋がらないかと考え、研究を進めています。

技術の翼
革新の心

Wings of technology
Spirit of innovation

UBE

宇部興産株式会社

化成品・樹脂／機能品・ファイン

建設資材／機械・金属成形／エネルギー・環境

この頁についてご意見・ご希望がありましたら
宇部興産(株) 経営管理室IR広報部(宣伝)

〒105-8410 東京都港区芝浦1-2-1 三井ビルディング
TEL 03-3433-1111 FAX 03-3433-1112

NEWS SCAN

ニュース・スキャン

パンデミック

ウイルスの出所に目を向けろ

動物を監視すれば新型インフルエンザ到来をつかめるはずだ

工場や公共施設、一戸建て住宅まで至るところに監視カメラやセンサーが配備されるようになった現代では、私たちは誰かが常に事態を注視していてトラブル発生に備えていると思っている。なのに3月以降、新型インフルエンザAウイルス（H1N1）が種の壁を飛び越えて人間に感染した件では、このウイルスがどこからやってきたのか、関係当局はいまだに解明を試みている段階だ。

今回のH1N1ウイルスの出現で、インフルエンザの流行をとらえる既存の監視システムの有効性が示されるとともに、ブタがウイルスの“混合容器”となってパンデミック（世界的大流行）を引き起こす新型ウイルスが生まれるという長年の仮説が証明された。しかし一方、そうしたウイルスがどこの動物の体内でどのように進化しているかを検出してヒトへの感染を予想するという点では、残念ながらいっそうに進歩がないことも浮き彫りになった。これが可能になれば、パンデミックの回避、あるいは少なくとも素早く警戒警報を出すのに役立つのだが。

動物検疫のネットワークが必要

インフルエンザ研究に力を注いできたにもかかわらず、人間に害を及ぼす新たな動物ウイルスをいち早く見つけて警戒する効果的な仕組みはまだない。例えば米農務省・動物病センター（アイオワ州エイムズ）のリヒト（Jürgen A. Richt）らは2007年、新たなインフルエンザAウイルス株（H2N3）がブタに感染していることを発見し、パンデミック

を起こす恐れがあると考えたが、「事実を伝えて対処を求める先がなかった」という。「誰も関心がなく、ルールも規制も整備できていなかった」。リヒトらは新ウイルスに関する評価を論文発表し、その論文で「ブタと、職業上ブタと接触する人たちを対象に、注意深い監視体制を確立することが賢明だろう」と結論づけた。

ここで監視（サーベイランス）とは、少なくとも特定の病原体について医師と研究機関がすべての検出事例を報告することを意味する。例えば米国なら、人間のインフルエンザ症例はすべて疾病対策センター（CDC）に報告でき、同センターはこれに基づいて発病率と病気の移動を追跡する。しかし人間と動物の両方にいえることだが、研究機関による任意の検査では、医師を受診したケースのそれもほんの一部しかカバーできない。また、家畜ブタについて組織的な抽出検査と結果報告が義務づけられているのは、豚コレラやニパウイルスなど、畜産上の影響が大きな少数の病気に限られている。

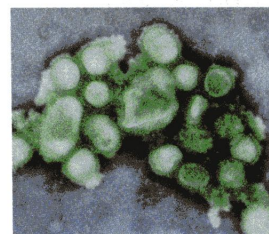
現在はカンザス州立大学に所属するリヒトは、動物のスクリーニング検査を強化するうえで獣医学の診断・研究機関が重要な役割を担えるはずだとみる。いろいろな目的で提出された全サンプルを対象に、あらゆる病原体を調べるのだ。「動物集団を最新技術によって調べて新興感染症の病原体を探すネットワークが必要だ」。

米国最大級の養豚州であるアイオワやノースカロライナなどでは、州立の研究所がさま



混合容器

動物の新型インフルエンザウイルスは人間にパンデミックを引き起こす可能性があるが、動物中の新型ウイルスを監視する取り組みはいまだに遅れている。写真はミシガン州にある養豚場。



H1N1 型ウイルス

人間に感染するよう適応が進みつつある。今後どのように進化していくかは予測できない。

さまざまなブタの病気を検査できるだけの技術的能力をすでに備えているとリヒトは説明する。より小さな研究室も遺伝子検査チップを使えば、ブタやウシ、家禽に特有の病原体を大研究所と同様に検査でき、家畜のなかで変異しつつある新型鳥インフルエンザウイルスなど、新たな病原体の脅威を包括的にリアルタイムで把握できるだろう。

予測困難なウイルス進化の行方

動物に感染した新たなインフルエンザウイルスを発見すると、そのウイルスが人間に危険をもたらすかどうかを見極めるのは別の話だ。「そうした予測が可能かどうか、私はかなり悲観的だ」というのは、米国立アレルギー感染症研究所 (NIAID) のタウベンバーガー (Jeffery K. Taubenberger) だ。

タウベンバーガーはH1N1型の豚インフルエンザウイルス2株に関する系統樹解析の結果を3月に論文発表した。うち1株はユーラシア起源で、現在ヒトに感染している新型H1N1ウイルスの一部になったものだ。解析対象の2株はH1N1型の共通祖先を持つが、それぞれブタ集団のなかで別々に進化し、新しい宿主に感染可能になるためのわずかな遺伝子変異も両者で異なっていた。一方、ウイルスが宿主を変えつつあることや、より伝染性を高めつつあること、病原性が強くなっていることを示すサインが懸命に探されているものの、明確なパターンはまだ見つからない。

このため、H5N1型の鳥インフルエンザウイルスが世界（主にアジアとアフリカ）で約400人に感染しながらも、いまのところ完全には人間に適応しきっていないのはなぜな

のか、説明がついていない。また、1918年のパンデミック（いわゆるスペイン風邪）を引き起こした最初のウイルスがどこから来たのか、その遠い子孫である今回の新型H1N1株がどうなっていくのかも、わかっていない。

6月11日時点で70カ国以上に広がり、3万人近くに感染して144人の命を奪ったこのウイルスがどこまで広がるか予断を許さないし、ヒトからヒトへより容易に伝染する能力を獲得するかもしれない。そして秋には北半球に戻ってくる恐れがある。そのとき、獅子のごとく人に襲いかかるのか子羊のように穏やかに振る舞うのかは未知数だ。

タウベンバーガーは米軍病理学研究所の研究者と共同で、1918年のスペイン風邪犠牲者の保存組織から原因となったH1N1型ウイルスを1996年に初めて分離したが、インフルエンザウイルスをめぐる基本的な生物学・生態学について未知のことが多すぎるという。地域全体の生態系、つまり豚、鳥、人間のほか、犬や猫、馬などの家畜や野生動物を含めた全体を監視すれば、インフルエンザウイルスがなぜどのように進化するのが、多少なりともわかってくるはずだという。

幸いにも、パンデミックの備えに充てられた資金と研究努力によって、人間を対象にしたインフルエンザ感染監視と対応システムは劇的に進んだ。リヒトは今回の新型インフルエンザに際し、カリフォルニア州南部で2人の子供が罹患した米国初の症例を研究機関がいち早く確認し、CDCに警告して、迅速な対処が可能になったことを指摘する。ただし残念ながら、新型ウイルスの源である動物を監視しない限り、人間に感染するまで何も手を打てないという現状は変わらない。 ㊦

ついに「フェーズ6」

世界保健機関 (WHO) は6月11日、今回の新型インフルエンザに対する警戒水準を最高の「フェーズ6」に引き上げた。冬場を迎えた南半球での感染拡大などを受けたもの。一方、事態の「シビアリティ（苛烈さ）」を3段階で示す尺度を新たに導入し、今回は「中度」とした。

日本国内の感染者数は同日時点で548人、死亡例はない。ただ感染事例はなお増えているので、注意を怠らずに秋以降に備える必要がある。

腫瘍学

がん化のプログラム

通常は胎児の発生段階だけで働く遺伝子が、がん細胞では再び活性化している

がんは単一の病気ではなく多数の病気が集まったものだ、という見方がある。個々のがん細胞がそれぞれ異なる機能不全に陥っているように見えるからだ。細胞のDNAに起きたランダムな突然変異のせいで異常が生じて

くる。そうしたランダムな変異が蓄積する結果、同じ組織にできた腫瘍でも患者によって性質がさまざまに異なってくるのだと考えられている。

だが、がん細胞の悪性化に一種の規則性が



生きる

この初期胚で働いている遺伝プログラムが、腫瘍の成長を促進しているかもしれない。

成長を止める

通常は胚や胎児の発生期にだけ働いている遺伝プログラムを、がん細胞が勝手に使って自らの成長と拡散に利用しているらしい。とすれば、そうしたプログラムを遺伝子サイレンシング療法によって阻害すれば、腫瘍の最も恐ろしい性質を弱体化できる可能性がある。

ハーバード・MIT健康科学技術部門のコハネは、がんを胚発生の各期に対応した3グループに分類した。あるがんに対して有効な既存薬を、この3分類の同じグループに属する別のがんについても試してみるべきだと、コハネは提唱している。

あるという研究結果が増え、がんの本質を見直す動きが出てきた。

共通の遺伝子活性パターン

ハーバード・MIT健康科学技術部門のコハネ (Isaac S. Kohane) は数十種類の組織から採取した腫瘍を分析し、驚いたことに、がん細胞の遺伝子活性がよく知られたパターンに従っていることを発見した。胚や胎児の発生段階に活性化すると同じ指令が働いているのだ。初期胚の成長や、胎児の段階で四肢などの構造形成をもたらす遺伝子群はふつう、その後の生涯を通じて活性化することはない。ところが多くの腫瘍細胞では、そうした遺伝プログラムのスイッチが再びオンになっている。

発生のどの段階における遺伝子活性パターンに最も似ているかに基づいて腫瘍をグループ分けすると、その腫瘍の将来をある程度まで予測できることをコハネは発見した。例えば肺がんの場合、「悪性度と患者の余命が、遺伝子活性パターンの“初期度”に比例していた」という。

肺がん以外のいろいろなタイプのがんでも同じことがいえることが、コハネによる最新の大規模な調査研究で示された。30種類を超えるがんと前がん組織の遺伝子活性を、発生段階を時間的に10に区分したそれぞれの遺伝子活性と比較することで、共通点のないように見えるこれらの疾患を3つにグループ分けできた。

例えば胚発生の初期段階と同じ遺伝子活性パターンを持つものは肺腺がん、結腸直腸腺腫、T細胞リンパ腫、一部の甲状腺がんなどで、これらのうち特に攻撃的ながんは未分化で胚に近いように見える。妊娠後期の胎児と新生児の遺伝子発現パターンに近いものは前立腺がん、卵巣がん、副腎腺腫、肝形成異常などで、これらのがんは成長が遅いタイプだ。3番目のグループは、両者の活性パターンを併せ持つ混合型だった。

がんは「体細胞の妊娠」

胚と腫瘍の類似性は「注目に値する」と、先駆的ながん研究者でルートヴィヒがん研究

所ニューヨーク支部の所長を務めているオールド (Lloyd J. Old) はいう。「これが興味深いのは、がんと発生にいくぶん関連があるという考え方が昔からあるからだ」。例えば19世紀の病理学者ビード (John Beard) は腫瘍と栄養膜 (初期胚の一部で後に胎盤になる部分) に類似性があることに気づいた。「栄養膜が子宮に侵入したら、どんどん広がって血液供給の仕組みができる。また、母体の免疫系を抑制する」とオールドはいう。「いずれもがんの特徴だ」。

オールドは過去に、腫瘍細胞と生殖細胞で共通の遺伝プログラムが働いていることを発見している。彼の現在の研究テーマの1つでもある「CT抗原 (がん・精巣抗原)」は、精子や卵子になる生殖細胞系列と腫瘍細胞だけが作り出すタンパク質群だ。CT抗原のこの特異性を使えば、がんワクチンや抗体医薬の理想的な標的になるという。

腫瘍でのCT抗原遺伝子活性化は容易に確認できる。「あなたや私が生殖細胞だったころに使ったプログラムと同じなのだから」。オールドはこれらの原初のプログラムが腫瘍内で再び活性化していることを確認し、がんを「体細胞の妊娠」と表現するようになった。

続く挑戦

これら通常なら眠っているはずの遺伝子が腫瘍細胞ではオンになるという事実から、がんの重要な特徴はでたらめに生じたものではないとオールドは考えている。「これは根本的に異なる考え方だ。変異細胞が自分の増殖にプラスになる遺伝子を探し、一連の発生遺伝子のなかにそれを見つかる。ダーウィンの起源というよりは、遺伝子プログラムのな起源が、がんの形質を生み出している」。

しかし、がん化についてのこの2つの見方は必ずしも矛盾するものではない。マサチューセッツ工科大学のワインバーグ (Robert A. Weinberg) は、発生プログラムの活性化が突然変異の結果として起こっている可能性もあると指摘し、「突然変異が蓄積しても、識別可能なプログラムと齟齬を来すことはないようだ」という。

ワインバーグは昨年、胚性幹細胞 (ES細胞)

が未分化のままでいられることに関与する遺伝子活性が、最も未分化で正常組織への侵入の激しい腫瘍にも共通して見られることを示した。

ただし、胚で働いている原初プログラムがこれらのがんを生み出しているのかどうかは

まだわからないとワインバーグは警告する。「興味深い考え方だが、現段階では非常に不確かだ。人間の形質すべてをがんの原因と考えて研究すれば、治療に役立つ知識が得られると期待することもできるだろう。だが、悪魔は細部に宿る」。



生命科学

ミツバチ受難の時代

働きすぎも原因？ CCDの複合的要因を探る

2006年から2007年にかけての冬、米国で飼育されているミツバチの1/3が姿を消した。のちに「蜂群崩壊症候群（CCD）」と名付けられたミツバチの“大量失踪”だ（「消えたミツバチの謎」日経サイエンス2009年7月号参照）。特定の病原体や農薬を主犯とする見方もあるが、背景にはさまざまな要因が絡み合っているものと考えられる。そのなかで研究者や一部の養蜂家が問題視しているのが、ミツバチの飼育方法の不備だ。

自然のサイクルから外れた飼育環境

昨年12月、農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所みつばちグループの木村澄（きむら・きよし）主任研究員は、同グループの芳山三喜雄（よしやま・みきお）研究員、名古屋大学の門脇辰彦（かどわき・たつひこ）准教授とともに米国を視察。CCDワーキンググループの研究者から最新情報を得るとともに、養蜂家らにも意見を聞いた。そこで浮かび上がってきたのが、米国のミツバチが置かれた過酷な飼育事情、なかでも特徴的なのはカリフォルニアでのアーモンドの授粉だ。

カリフォルニア州は世界のアーモンドの8割を栽培している。2007年の年間輸出額は18億7900万ドルで、農産物としては2位のワインおよびワイン製品（8億7300万ドル）を大きく引き離す。輸出先は欧州や中国、インドに次いで日本も大きなターゲットだ。

広大なアーモンド農場を訪れた木村主任研究員らは、冬枯れの景色に点在する大量の巣箱を目にした。授粉は花をつける1～3月に行われるが、ミツバチは前年の秋からカリフ

オルニアに集められる。授粉に必要なコロニー数は120万。米国の全コロニー数の半数が、カリフォルニアに集結する。花のない2カ月間、ミツバチは巣箱でじっと待っているのだろうか。木村主任研究員はミツバチの習性をこう説明する。

「気温が十分に低ければ、ミツバチは巢内で越冬する。真ん中に固まって少しずつ入れ替わりながら、背中を振るわせて35℃の熱を保つ。ところがカリフォルニアは気温が高いため、働きバチは偵察に出かけてしまう。しかし花がないので戻ってくる。この繰り返しでハチは消耗していく」。さらに、本来なら春を待って産卵するはずの女王バチは、気温が高いために卵を産んでしまう。しかし栄養不足で育たない。

カリフォルニアへの長距離移動、越冬期の高温、栄養不足。その結果、コロニーは弱っていく。そこに追い打ちをかけたのが、何らかのウイルス感染ではないか、と木村主任研究員は推理する。かぜやインフルエンザが抵抗力が衰えた人や集団内で広がるのと同じだ。

日本のミツバチも超多忙

状況は異なるが、日本でもミツバチの飼育環境に問題が生じている。年間を通して、蜂蜜の採取とハウス栽培での授粉媒介に追われるミツバチの過重労働だ。ミツバチのコロニーは通常数万匹からなるが、狭いハウスでは



畜産草地研究所

12月のアーモンド農場

1～3月の開花に備えて、全米の半数にあたる120万群のミツバチがカリフォルニアに集められる。周囲に花はまったくない。

日本の養蜂家へのアンケートから

問：CCDが何か知っているか	
よく知っている	8.3%
大体わかっている	34.8%
あまりよくわからない	31.2%
よくわからない	16.9%
聞いたことがない	8.8%

問：原因不明で蜂群が突然いなくなったことはあるか

はい	23.4%
いいえ	76.6%

（※2008年12月集計）



ストレス・サイクル 通常、気温の低い冬期は巣内で越冬するが、ハウス栽培が盛んになったことでミツバチの生活は激変した。さらに農薬、寄生ダニ、低栄養、人為的な群の分割など、さまざまな要因がミツバチにストレスを与えている。

数が多すぎる。そこで、4000～6000匹の小さな群に分割し、足りない女王バチは海外からの輸入で補われてきた。今春、日本でミツバチ不足が問題

になった背景には、オーストラリアからの女王バチの輸入が停止したことがある。

採蜜のほかに、ハウスでの花粉媒介という仕事に加わったことで、ミツバチの生活は激変した。巣内で越冬し、春に産卵して、花のある時期に採蜜という本来のリズムが崩れ、一年を通して休む暇がなくなってしまった。

「突然いなくなった」は本当か？

蜂群崩壊症候群の被害を強調するあまり、突然ミツバチが消えたかのような印象を与える報道もなされた。しかし被害を訴えた養蜂

家のなかには、3カ月間一度も巣箱を確認しなかったという人もいるようだ。巣箱をチェックしなければ、ハチが徐々に減っていったとしても気づかない。また死骸がないこともCCDの特徴とされているが、働きバチ（外勤バチ）の多くは巣内で死ぬわけではない。むしろ巣の内部や周辺で大量の死骸が見つかるほうが不自然で、その場合は農薬被害がほとんどだという。原因解明にとって重要なのは「ひとつひとつを疑ってみること」と木村主任研究員は話す。

現在のところ、日本で米国と同様の問題が起きる可能性は低いとみられる。しかし原因がはっきりしない以上、まず現状を把握しておく必要がある。木村主任研究員らは日本養蜂はちみつ協会の会員約2600人を対象にアンケート調査を行った（2008年8月～12月、回答率36.3%，前ページの囲み参照）。飼育蜂群数、養蜂の方法などの基礎データのほか、病気の発生状況、農薬の被害、原因不明でミツバチがいなくなった経験があるかどうかなどをたずねた。今後、大規模に蜂群をなくした経験（最大250群）をもつ養蜂家への聞き取り調査を進める予定だ。

15

情報技術

厄介ワームまたも登場

金銭詐取を狙った「コンフィッカー」が蔓延

去る4月1日にパソコンの電源をずっと切っていた人は、正解だったといえるかもしれない。「コンフィッカー」というコンピューターウイルスが昨年11月に出現し、世界で推定1000万台のパソコンに感染して、近年では最大の脅威となっている。

このワーム型ウイルスはウィンドウズマシンに忍び込み、密かにエイプリルフールの日を待った（この時期設定は後になって判明）。当日になると、新しい命令セットをダウンロードして実行するように仕組まれていた。その結果に何が起るかを知らず人は誰一人としていなかったが、このワームの精巧さは、世界の“コンピューターウイルス産業”が効率的な企業モデルへと進化しつつあることを示す明確な例だ。同時に、これらの悪党から技

術を盗んで対抗する必要性をセキュリティ研究者に示した。

高度な「イタチごっこ」続く

ワームは広く普及したソフトウェア（今回はマイクロソフトのウィンドウズ）のセキュリティホールを悪用し、自らのコピーを広める。しかし、コンフィッカーは極めて高度なワームで、パソコンのウイルス対策ソフトを無力化するほか、自身の機能を高度化する更新情報を受け取ることができる。

コンフィッカーが突如として蔓延したことで、かねて議論を呼んできたセキュリティ保護策が再び注目されるようになった。「善玉ワーム」をウェブ上に解放するというアイデアだ。通常の悪玉ワームと同様に広がるの

だが、感染先のパソコンのセキュリティ保護を助ける。この方法は一度試されたことがある。2003年の終わりごろ、当時流行していたワーム「ブラスター」がつけ込んだのと同じ脆弱性を利用して、善玉ワームの「ワレダック」がウィンドウズマシンに潜り込んだ。マイクロソフトのウェブサイトに攻撃を仕掛けるブラスターとは異なり、ワレダックは感染先のパソコンに最新のセキュリティパッチを施した。

その点では成功に見えたが、ワレダックも他のワームと同様、ネットワークの通信量を増やして“渋滞”を招いた。また、ユーザーの同意なしにパソコンを再起動した（一般の自動更新機能も、セキュリティパッチ更新に伴って再起動が必要な点が不満のタネとなっている。不都合なときに再起動させられることもあるので、多くの人が自動更新機能をオフにしている）。さらに、善玉ワームの目的がどれほど高貴であっても、断りなしにパソコンに侵入することには変わりはない。

もはや悪質な犯罪に

ワレダックの後、善玉ワームに関する議論は下火になった。ワーム自体が下火になったのが一因だ。「2000年代初期にはウイルス拡散の動機となるようなビジネスモデルが存在しなかった」というのは、非営利のセキュリティ研究会社SRIインターナショナルのプログラム部長ポラス(Philip Porras)だ。「ハッカーたちは自分の存在を主張し世に認知させる手段としてワームを使っていた」。

ワームは多くのパソコンを束ねてボットネット（乗っ取られたパソコンの巨大集団）を作り上げ、これが適正ウェブサイトを攻撃してダウンさせる。人によってはワクワクするような刺激を感じるかもしれないが、経済的な利益はほとんど得られない。

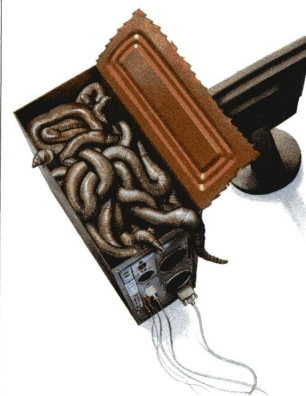
しかし過去5年で、コンピューターウイルスは金銭的な性格がずっと強まった。フィッシング詐欺の仕掛け人たちは人々に電子メールを送りつけ、ユーザー名やパスワードをだまし取ろうとする。また、正規のショッピングサイトに検出の難しいプログラムをアップロードし、これによってクレジットカード情

報を密かに盗み取る犯罪も出現している。盗まれた情報はネット上の闇市場で売り飛ばされる。銀行決済サイト用の個人ユーザー名とパスワードは10～1000ドルで売られ、クレジットカード番号は数が多いためかわずか6セント程度だ。ネットセキュリティ会社のシマンテックによると、これら闇市場の取引高は年間70億ドルを超えているという。

こうした詐欺の背後にはきっちり管理された犯罪組織があり（多くはロシアや旧ソ連の国々を拠点とする）、ビジネスとして取り組んでいる。ネット上の闇市場で高度なプログラムを仕入れ、それを目的に合わせて改変し、最高額を提示した相手にボットネットを売ったり貸したりする。ワームの寿命をできる限り延ばすため、更新（別名を保守という）に投資する。この組み立てライン的な方式は実に有効だ。シマンテックが過去20年間に探知した全ウイルスの60%までが、この12カ月間に出現したものだ。

4月1日の活動開始から1週間後、コンフィッカーの仕掛け人たちが強い金銭的動機を持っていたことが判明した。このワームはよく知られたスパム生成ソフトをダウンロードしていた。さらに、感染パソコンはとても煩わしい“ウィンドウズ・セキュリティ・アラート”を頻繁にポップアップ表示するようになった。パソコンがウイルスに感染したことを知らせる警告だ。まさしくその通りなのだが、警告はさらに、そのウイルス感染から回復する唯一の方法は50ドルのプログラムをダウンロードすることだとして、購入を勧めた。支払いにはクレジットカードのみでございませう、さあどうぞ、というわけだ。

皮肉なことに、コンフィッカーの蔓延はそもそも通常のアップデートで防げた可能性がある。実際、コンフィッカーが出現したのはマイクロソフトが「緊急パッチ」を公開してからまる4週間後だった。明らかに、何百万台ものパソコンは更新されていなかった。そしておそらくいまも、何百万台ものパソコンが適切な対策をアップしていないままだろう。コンフィッカーが4月の活動後も別の指令を待って再び動き出したことを考えると、何とも厄介なことだ。



ワームだらけ あなたのパソコンのなかにもワームがうじゃうじゃいる？

MATT COLLINS

大空へジャンプ!

でかい翼竜がどのように飛び立っていたのか生体力学に基づく新説が登場

翼竜(プテロサウルス)という絶滅爬虫類がどのように飛び立てたのか、科学者たちは100年近く悩み続けてきた。小ぶりの翼竜なら鳥モデルで十分だ。静止状態から、あるいは助走しながら羽ばたけば飛び立てるだろう。だが大きな翼竜には翼幅8m、体重90kgに達するものもいて、鳥モデルは通用しない。

ジョンズ・ホプキンス大学で機能解剖学と進化を研究するハビブ(Michael Habib)は、翼竜の離陸法が鳥とは異なっていたとみる。生体力学的な分析結果を踏まえ、静止状態から四肢すべてを使って空中にピョンと飛び上がっていたのだと提唱している。2本の後足で助走したり、高所から飛び降りたりしていたのではないという。

強力すぎる前肢

「もともと私は鳥を研究していた」とハビブはいう。「飛翔動物の力学的な限界に興味を持ち、自然と翼竜にたどり着いた」。

そうした限界の極端に位置するのが、ケツアルコアトルス(Quetzalcoatlus)のような翼竜だ。ケツアルコアトルスの骨は鳥の骨に似た中空構造だが、それでも体重は110~250kg、翼幅は約11mもあった。ちなみに飛べる鳥としては最大級のアホウドリの体重は約8kg、翼幅は3m強だ。ケツアルコアトルスが飛んでいたのは間違いないが、どうやって離陸したのか、説明がつかなかった。

ハビブは翼竜の腕の骨の形を解析し、前肢が飛翔時にかかるよりもずっと大きな応力に耐えられたことを計算で示した。しかし、大きな応力を経験しなかったとしたら、どうしてそんな頑丈な翼が進化したのか? その後ハビブは、大型翼竜の四足歩行と吸血コウモリに見られる四肢によるジャンプ離陸を結びつけた。大型翼竜が四肢すべてを使って地面から飛び上がっていたとすれば、超強力な前肢と謎に包まれていた翼竜の離陸の両方に説明がつくだろう。

しかし、何かをする能力があったというだけでは、実際にそうしていたとはいえない。また、翼竜が地面からどのように飛び上がったかをハビブのデータで説明できるのか、納得していない古生物学者もいる。英レスター大学の古生物学者で「The Pterosaurs: From Deep Time」の著者であるアンウィン(David Unwin)は、「論文原稿を読んでまず思ったのは、『うーむ、これは奇妙だな』という感じ。もっとも、翼竜を研究していると奇妙なことには慣れっこだが」という。

アンウィンは「大型の翼竜の場合に問題が生じる」という。「大型翼竜の飛行速度は時速50~65kmとかなり速い。静止状態からジャンプして飛び始めたとしたら、どうしてそんな速度に達したのか理解に苦しむ」。

カリフォルニア大学バークレー校の古生物学者パディアン(Kevin Padian)もハビブの結論の一部に疑問を呈する。小型翼竜(スズメほどの大きさのものもいた)は二足歩行であり、4本ではなく2本の足で飛び上がったとパディアンはみる。

翼竜研究者と“翼竜を調べた研究者”とのこうした不一致は、古生物学の領域にはよくあることだ。アンウィンもハビブも、これほど大きな生き物が飛べたという異常さのせいで、生体力学の専門家は生物学よりも物理学の視点から翼竜を見ているという。アンウィンは「翼竜の奇怪な特質が、古生物学以外の研究者の注目を引きつけてきた」という。「そのため古生物学以外から不相応なまでに多くの研究者が入ってきて、もともと翼竜研究者ではなかった多くの人が試しに空気力学を適用してみる、そんな状況になっている」。

それでも、ハビブが興味深い点を指摘したことは誰もが認める。生体力学的に興味深いだけではない。大型翼竜が崖から飛び降りなくとも離陸できたとすれば、生息できた場所が広がり、生態に関していろんな疑問がわいてくる。「謎が解けたと思うたびに、別の変化球がやってくる」とパディアンはいう。■

空高く 翼竜のケツアルコアトルスは四肢を使ってジャンプすることで大空へ離陸していたのかもしれない。



もうひとつのオリンピック

「国際生物学オリンピック・つくば2009」が7月13～18日に筑波大学で開かれる。世界約60カ国・地域からの高校生約240人が生物学の知識と実験能力、考察力などを競う。生物学に対する一般の人々の理解を深めてもらう契機にすると同時に、未来の生物学を切り開く子どもたちを見つけ出しその才能を一段と伸ばすことを狙って、政府や教育関係者、企業などが協力して開催を準備している。

科学の「オリンピック」は生物学、数学、物理学、化学、情報の5分野があり、それぞれ毎年世界各地で開いている。日本での開催は2003年の数学オリンピックに次いで2度目。来年7月には化学オリンピックが東京で開かれる予定だ。

今回出場する日本代表は4人。2008年12月に約2500人の応募者から3回の試験を経て選抜された。千葉県立船橋高校の大月亮太さん、灘高校（兵庫県）の中山敦仁さん、桜蔭高校（東京都）の谷中綾子さん、山川眞以さん。4人とも学校の部活では生物部や物理部で活躍する理科好きだ。

競技は「理論」の試験が5時間、「実験」が6時間。総合成績で上位10%に金メダル、それに次ぐ20%に銀メダル、さらに30%に銅メダルが与えられる。出題範囲は日本の高校で教えられている水準を超える高さなので、4人は代表決定後、4回にわたる特別教育（合宿）で主に大学教員から最先端の生物学の知識を学び、実験手法の指導も受けてきた。

代表4人への特別教育プロジェクトのリーダーを務めてきた東京学芸大学附属高校大泉校舎の齋藤淳一教諭は「競技に勝つための詰め込み教育では本末転倒。最先端の研究に取り組む大学の先生から研究の醍醐味を話していただき、学生たちの知的な興味を引き出し満足させることを重視してきた」と話す。

日本は2005年の中国大会から生物学オリンピックに参加。これまで5回で銀メダルが最高成績だった。オリンピックの応援サイト (<http://contest.jst.go.jp/o-en/index.html>) を通じて声援を送ることができる。



利き手が変わる

両手を移植された患者は、利き手が以前とは変わることがある。

仕事中の事故で両手を失った男性2人が事故の3～4年後に手の移植手術を受けた。手が切断されると一般に、脳はなくなった手のコントロールに関連する領域を別の筋肉の制御に振り向けるようになるのだが、これらの患者は切断から長い時間がたったにもかかわらず脳と新しい手がつながり、細かな作業もできるようになった（一方の患者は電線をつなぎ直す修理作業を試みせた）。

2人とも以前は右利きだったが、左手のほうが右手よりも1年以上早く脳につながり、そのまま左利きになった。米国科学アカデミー紀要オンライン版4月6日号にこの事例を報告したフランス国立認知神経科学研究センター（リヨン）の研究チームによると、利き手が変わった理由ははっきりしない。以前に右手優位だったために右手に対応する脳領域が確立していて、新たな右手に再結合する柔軟性がやや乏しくなっていたか、手術が左右でわずかに違っていた、といった可能性が考えられる。



ゾウリムシが光通信

単細胞生物が“光通信”によって会話している可能性がある。バーゼルにあるスイス熱帯研究所のフェルス（Daniel Fels）は微生物のゾウリムシを複数の透明なチューブに入れ、完全な暗闇のなかで育てた。チューブが壁になってゾウリムシは化学物質による情報交換はできないが、それでも隣りのチューブにいる仲間の採食行動と増殖率に影響を及ぼすことがわかった。電磁的な信号が関与している可能性を示している。

少なくとも2種類の周波数を使って通信しており、うち1つは紫外線領域の信号らしい。例えば少数のゾウリムシが多数のゾウリムシと紫外線を通さないガラスで隔てられている場合、紫外線を透過する石英ガラスで分



器用な手先 移植した手でワイヤをよじっているところ。

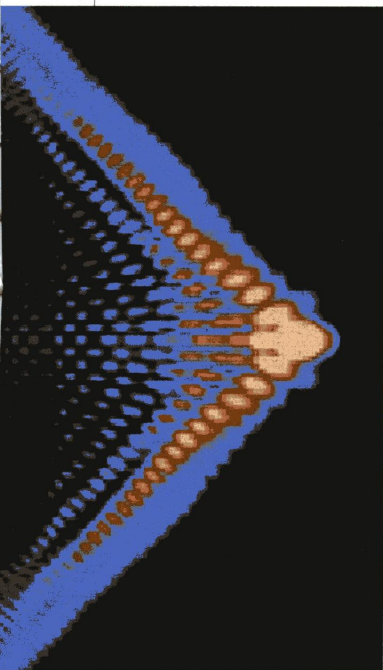
COURTESY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES/PNAS



光で会話 ゾウリムシは2つの周波数の光を使って通信しているようだ。

M. I. WALKER Photo Researchers, Inc.

曲がった後に エアリーパ
ルスのコンピューターシミュ
レーション（パルスは誌面の奥か
ら手前に向かってくる）。明るい
輝点はプラズマの曲がった尾を
ひく。



離されている場合よりも増殖率ははるかに高くなった。

この光通信の背景にある細胞組織はまだ特定されていないが、これらの信号伝達を研究していけば新たな非侵襲の医療技術につながるかもしれないと、フェルスは *PLoS ONE* 誌4月1日号で述べている。

SA

物理学

曲がるレーザー光線

特定の成分が非対称なレーザービームが空气中を進むとき、直進せずに、わずかに曲がる場合があることが2年前に示された。「エアリービーム」と呼ばれるものだ。最近、パルス状の高強度エアリービームが、その航跡として空気を電離し、プラズマのカーブを残すことが実験で示された。

それぞれのパルスは幅1cmで、時間になると35フェムト秒。これをガラス板に通すと、一端に強いピークを持ち、その横にいくつかの弱いピークが並んだ三角形のパルスになる。最も明るい部分と、より暗い部分は反対の方向に曲がっていく（ただし、パルス全体の運動量は保存される）。

この明るい部分は非常に高強度なので空気をイオン化し、プラズマの曲がった筋を航跡として残す。ビームの直径を超えて曲がることはないが、それでもレーザーパルスの構造を調べるには十分だ。*Science* 誌4月10日号に掲載された。

SA

医療機器

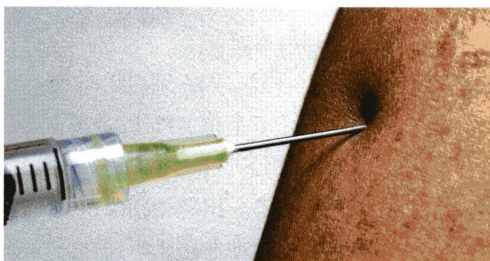
的を射た注射針

注射針が必要以上に深く刺さって神経を傷つけるなどの事故が、毎年何十万件も起きている。そんなトラブルのない新しい注射針をハーバード大学医学部などのチームが開発した。適切なところで自動的に止まる。

中空の針のなかに先端が丸くて曲がりやすいワイヤが入っており、注射器のピストンを最初に押したときには、力がこのワイヤにだけ伝わる。そもそもワイヤが曲がらずにまっすぐな状態だと特殊な歯止め機構の働きで針は先に進まないが、ワイヤが皮膚などの組織に当たると抵抗を受けて曲がり、歯止めが外れて針全体が先に進むようになる。

針先が血管など目的の空間部に到達するとワイヤに抵抗力がからなくなってまっすぐに伸び、針がそれ以上先に進まなくなると同時に、先端のカバーが取れて薬剤が出る仕組みだ。この注射針、3～5年先に実用化するかもしれない。米国科学アカデミー紀要4月7日号に掲載。

SA



JEFFREY HAMILTON/Getty Images

ちっくん ときには深く刺さりすぎることがある。

ひとくち NEWS

「人類誕生の地」を特定

大規模な遺伝学調査によって、人類誕生の地が突き止められたようだ。アフリカにいる121の集団と、非アフリカ系の60集団、4つのアフリカ系アメリカ人集団の遺伝子配列を解析した結果、アフリカの人々をさかのぼると東経12.5度・南緯17.5度で生まれた14の先祖集団に行き着くことがわかった。現在のアンゴラとナミビアの国境近くの場所だ。

この研究は人類の移動・拡散について従来よりもはるかに詳しい理解をもたらすだけでなく、これら人口集団の健康と病気に関する理解も深めてくれそうだ。*Science* 誌5月22日号に掲載。

遺伝子使わずヒトiPS細胞

米韓の研究チームが遺伝子を導入することなく、ヒトの皮膚の細胞からiPS細胞を作成することに成功した。山中伸弥教授がiPS細胞を開発した際に細胞に導入した4つの遺伝子で作るタンパク質を直接、細胞内に入れたもの。タン

パク質が細胞膜を通過するように、あらかじめ工夫してある。マウスでは他チームが4月に成功していたが、ヒト細胞では初。iPS細胞化にかかる時間や効率の成績は落ちるものの、遺伝子を使わない分、安全性は高いと見られる。*Cell Stem Cell* 誌6月5日号に掲載。

ワトソン君、これは事件かも

このコンピュータープログラム、米国で人気のクイズ番組『ジョパディ!』の解答者をしのぐ人工知能になるかも……。少なくとも開発元のIBMは、「ワトソン」と名

づけられたこの強力な意味解析プログラムをスーパーコンピュータ上で動かすと、それに近いことが実現すると期待している。

知識データベースを利用するが、インターネット接続は使用しない。IBMはチェスコンピューター「ディープ・ブルー」で人間のチャンピオンを打ち負かした後、より一般的な問題を処理する人工知能の研究に力を入れ、2年近くをかけてワトソンを改良してきた。人間と何度か「練習試合」をした後、2010年の最終対決で優劣を決したいという。



■ペルム紀大絶滅に新たな謎

古生代と中生代の区切りをなす大イベントが、2億5000万年前に起こったペルム紀末の大量絶滅。すべての海洋生物種の少なくとも90%と陸生脊椎動物種の70%が絶滅した(D. H. アーウィン「何がペルム紀末の大量絶滅を起こしたのか」日経サイエンス1996年9月号)。新たな調査結果は、この致命的な出来事が陸と海で別々に起こった可能性を示している。

コルビー大学の古生物学者ガスタルド(Robert Gastaldo)らは南アフリカ共和国のカルー盆地で古代の堆積岩を調べた。そこでの以前の調査では、ペルム紀と直後の三畳紀とを隔てる明確な境界が確認されていた。「ライフレス・ゾーン」と名づけられたこの堆積層は絶滅爬虫類の化石よりも上にあって、ペルム紀末絶滅の影響が陸地に急速に及んだ直接の証拠とされてきた。

しかしガスタルドのチームは今回、ライフレス・ゾーン堆積物の一部がペルム紀・三畳紀境界よりも約8m下にあることを発見した。ところによっては絶滅爬虫類の化石よりも下にあり、陸地で大量絶滅が起きたと考えられる時代よりもずっと前に堆積したことを意味している。この時期の違いは、陸と海での絶滅が異なるきっかけで生じた可能性を示す。気候と海の問題を致命的なものに変えた原因としては、持続的な火山活動や大陸移動などが考えられる。より詳しくはGeology誌3月号に。

■副作用、警告しても免責なし

米国の製薬会社は薬の副作用に関して訴訟を起こされる恐れが以前よりも高まりそうだ。米最高裁

は3月4日、薬がたとえ米食品医薬品局(FDA)が認めた正規の警告ラベルを表示していた場合であっても、有害な副作用に対する損害賠償を課すことを陪審に認める判決を下した。

この判決は製薬会社ワイイスに対するものだが、他の多くの係争(一部の患者に心臓発作を引き起こしたメルクの鎮痛剤「バイオックス」に関する訴訟など。D. マイケルズ「悪用される科学」日経サイエンス2005年10月号)に和解を促す可能性がある。また、医療機器メーカーを相手取った提訴を許すための新法制定の動きを後押しすることにもなるだろう。米最高裁は昨年、医療機器メーカーを同様の免責対象とはしない判断を示していた。

■“万能ワクチン”に一歩

多くのインフルエンザウイルス株に効くような“万能ワクチン”が望まれている。一度接種すればすべてのウイルス株に免疫ができるものだ。しかし実際には、ウイルスの外被が頻繁に変異するため、毎年の流行シーズンごとにそれに合ったワクチンを作り直さざるをえない。外被は主にヘマグルチニンとノイラミニダーゼというタン



1回打てば どのインフルエンザウイルスにも効く“万能ワクチン”に向け、新たな期待が出てきた。

パク質からできている。

最近、ヘマグルチニンのうちあまり変異しない領域を標的とするヒト抗体を発見したという研究報告が2件あった(これに対しタミフルなどの現在の薬はノイラミニダーゼを標的にしている)。一方の抗体をマウスに投与した実験では、鳥インフルエンザ(H5N1型)

などのウイルス株を致死量与えても死を免れた。しかし大量の投与が必要だったので、人間を対象にした予防・治療に利用できたとしても費用は高くなるだろう。

論文はNature Structural and Molecular Biology誌3月号およびScience Express誌オンライン版2月26日号に。

■氷が解けて海面混乱

極域の氷が解けることによって海面がどう上昇するか、新たに詳細がわかりつつある(R. E. ベル「海面上昇を招く新たな脅威 なられ落ちる氷床」日経サイエンス2008年5月号)。トロント大学(カナダ)とオレゴン州立大学の共同研究チームは、海面上昇の幅が世界で均一にはならず、差が生じる可能性がある」と提唱している。

研究チームは西南極の氷床を調べた。海になだれ落ちた場合、世界の海面を5m上昇させるのに十分な量がある。しかし、南極大陸でそうした巨大な質量再分配が起こると、その重力が弱まって、地球の自転軸が500mほどずれるだろう。このほかの要因も考慮に入れると、南極大陸近くの海面は以前の予想よりも下がり、北半球の海面は以前の予想よりもさらに1~2m上昇すると考えられるという。Science誌2月6日号に掲載。



SHELLA TERRY Photo Researchers, Inc. (fossil); JEFF HAYNES Getty Images (flu shot); SETH JOEL Getty Images (ice)

血の通った臓器をつくる

培養した幹細胞などから移植用の臓器や組織をつくる「組織工学」

皮膚や軟骨など血管のいらない組織はすでに実用化している

次の課題は厚みのある臓器をつくることだ

A. カデムホッセイニ (ハーバード大学) / J. P. バカンティ (マサチューセッツ総合病院) /
R. ランガー (マサチューセッツ工科大学)

10年前に著者の2人（ランガーとバカンティ）は、組織工学の可能性について本誌に総説を書いた。細胞と非生物材料を工学的な手法で組み合わせ、「生きた組織を構築する」という私たちのアイデアを、当時は多くの人々が非現実的と考えていた。だが、ケガや病気などでダメージを負った臓器や組織の機能を肩代わりできる移植用の臓器・組織は、必要とする患者が常に順番待ちをしている状態だ。現在、米国では約5000万人が、臓器の機能を肩代わりするさまざまな治療法の恩恵を受けている。また先進国では65歳以上の高齢者の5人に1人は、一生を終えるまでに何らかの形で臓器の機能を代替する技術が必要とする可能性が非常に高い。

臓器代替法として利用されている現在の医療技術には、人工心臓や人工透

析、臓器移植などがあり、多くの命が救われてきた。だがこれらは患者の負担が大きかったり、ドナーが不足していたりで、解決策としては不十分だ。組織工学によって細胞から作る再生組織ならば、患者の免疫系に適合したものを提供でき、臓器の機能不全に苦しむ患者の生活を大きく変える可能性がある。さらに、再生組織は新薬候補の毒性試験をしたり、将来的には副作用の有無を投与前に確かめる「臓器チップ」としても役立つだろう。

組織工学によって、すでに細胞集合体、薄い細胞シート、厚みのある複雑な構造物などが実現しているが、最終的なゴールは完全に機能する臓器を丸ごと作ることだ。最初に私たちが組織工学の課題を示してから、今日までの間に大きな進歩があった（R. S. ランガー／J. P. バカンティ「新しい医療

を目指して」日経サイエンス1999年7月号を参照）。人工皮膚や人工軟骨などの製品は、すでに多くの患者に使われている。膀胱や骨、角膜、気管支、血管などの再生組織は臨床試験が進んでいる。より複雑な組織構造を構築しようという研究でも、有望な結果が得られている。

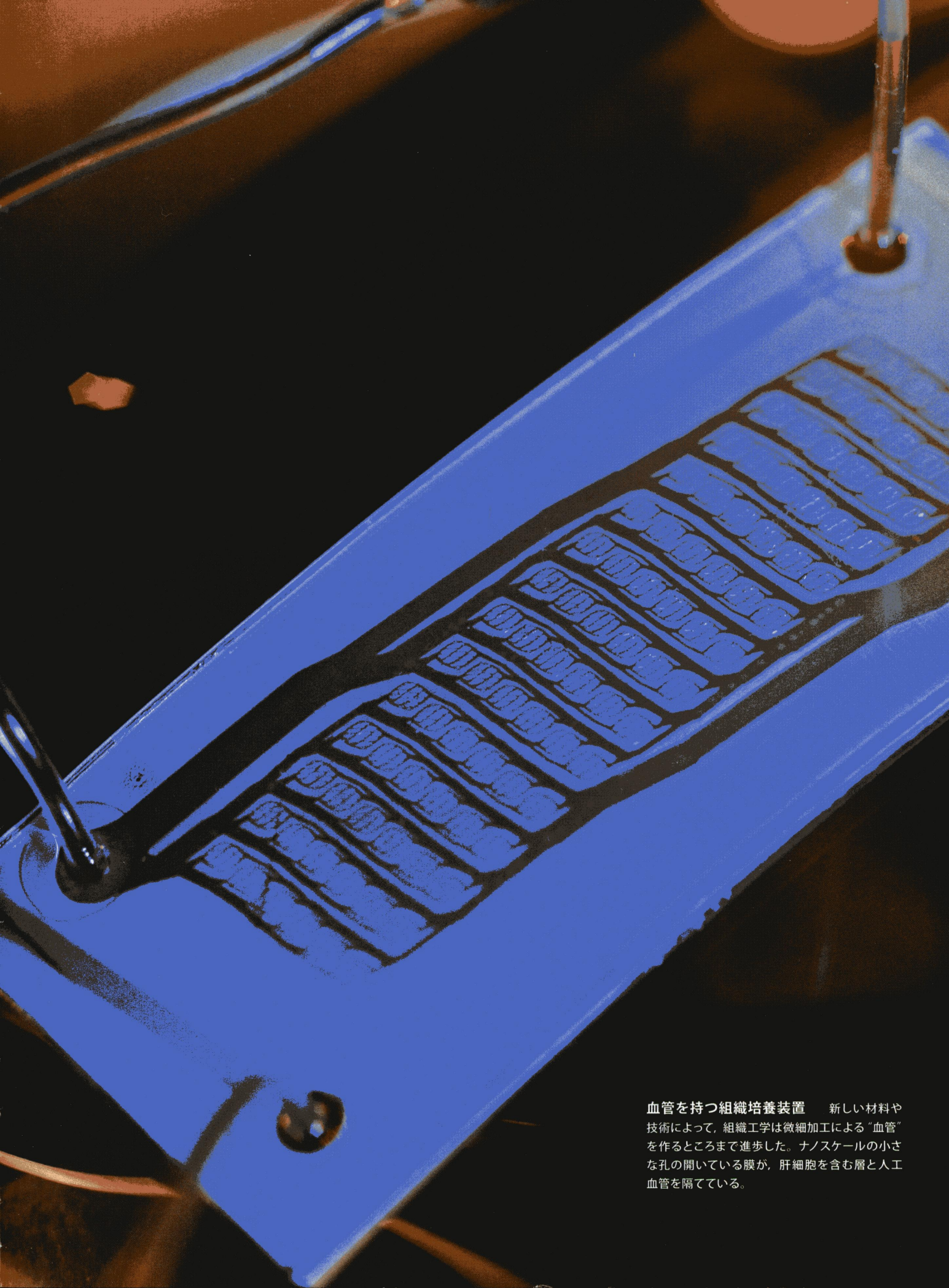
10年前に私たちが指摘した課題の一部はまだ解決していない。だが、胚からの発生や自然治癒の過程で、身体の組織が作られたり、修復される仕組みが詳しくわかるようになり、その知識をもとに組織工学は大きく進歩した。また、組織工学のもう1つの主役である非生物材料についても、化学的、生物学的、機械的な性質の改良が進んだし、組織構造を構築するための工学的手法も進歩してきた。こうして、組織工学は大いに発達し、その成果である人工組織の移植が新しい治療法として選ばれることもますます増えている。

血流をどうやって通す

最初に臨床試験に進んだ再生組織が皮膚や軟骨だったのは、これらの組織の内部に大規模な血管系を構築する必要がないからだ。しかし、ほとんどの組織では血管系が必要となるため、血液供給の難しさが壁となって、大きなサイズの再生組織を作るのは困難だっ

「SF」から「手の届く技術」に

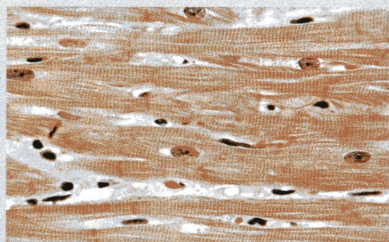
- 臓器や組織の代わりとなるものを細胞から作ろうという試みは、この10年で大きく進歩した。一部の簡単な再生組織はすでに医療現場で使われている。
- この進歩は、細胞の振る舞いが詳しくわかったことと、細胞の足場となる材料の改良や開発が進んだことによる。
- 次の課題は再生組織に血管系を構築することだ。血管系なしには、厚みのある組織や臓器の細胞はすぐに弱って死んでしまうからだ。
- 技術的な課題は多いが、臨床試験中やその準備段階の製品は数多くある。



血管を持つ組織培養装置 新しい材料や技術によって、組織工学は微細加工による“血管”を作るところまで進歩した。ナノスケールの小さな孔の開いている膜が、肝細胞を含む層と人工血管を隔てている。

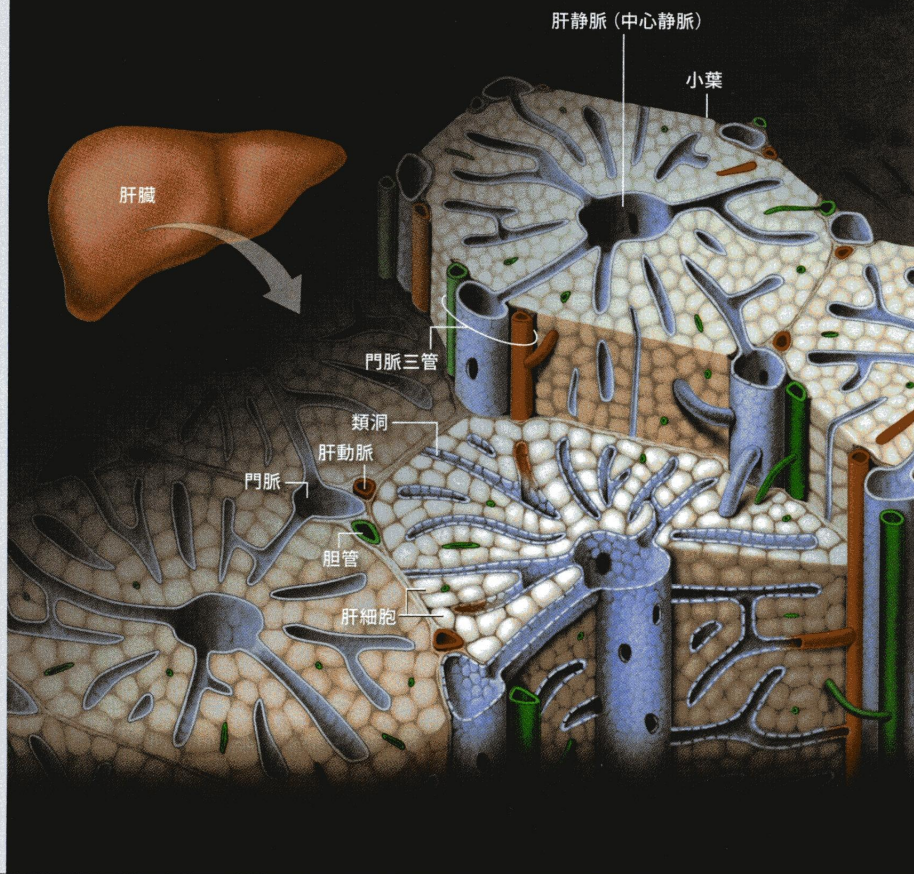
生体組織の構造を再現する

身体が組織が機能したり、自らを維持したりするには、組織そのものの内部構造が大きくかかわっている。組織を構成する数種類の細胞が一体となって働いて、1つの器官としての仕事を行っているのだ。例えば肝臓（右）のおもな仕事は血液の巨大な濾過器として働くことであり、心臓（下）は筋肉でポンプを形成している。細胞と周囲の環境の間で交換されるシグナルは、組織の発達や維持、機能にとって必要不可欠だ。そのため代替組織を作るときには、人工材料と細胞を用いてその器官本来の複雑な構造をまねることが課題となる。



心臓を作る長い繊維状の筋細胞は結合組織の鞘に包まれており、その間に血管が組み込まれている。また結合組織は筋線維の束の端と端をつなぎ、収縮を制御する神経シグナルを伝えている。このため、心臓組織内の電気的、機械的性質にとって、筋細胞の形や方向性が重要となっている。

ヒトの肝臓は小葉と呼ばれる多角柱に分かれており、小葉の中心にある肝静脈（中心静脈）の周囲をスポンジ状の組織が放射状に取り囲んでいる。各小葉の角には肝動脈、胆管、門脈（小葉間静脈）からなる、いわゆる門脈三管がある。肝細胞の列の間に挟み込まれた内皮細胞は、類洞という幅の広い毛細血管を形成している。血液は門脈と肝動脈の両方から肝臓に入り、類洞を通して小葉の肝細胞の列に浸透していく。肝細胞は血液中の栄養素と毒素を取り出し、栄養素は蓄え、毒素は分解する。濾過された血液は肝静脈から出ていく。肝細胞への血液の流量を最大にするため、肝臓では小葉構造が何重にも重なっている。



た。これを解決しようと、血管を設計して再生組織に組み込むことに焦点を合わせた研究が数多く行われている。

厚さが0.1mmを超える組織では血管系が必要となる。毛細血管が近くにないと、細胞は酸素や栄養素を吸収できないからだ。これらの燃料を取り上げられると、細胞はすぐに弱って、そのまま回復不能になってしまう。

ここ数年の間に、組織の内外に血管を構築する新しい方法が数多く開発された。それは、血管内皮細胞の研究が進んだことが大きい。内皮細胞は毛細

血管を作っている細胞で、太い血管では内側を覆っている。この内皮細胞が必要とする環境条件についての理解が進んだほか、材料を非常に微小なスケールで加工できるようになった。例えば足場となる材料の表面を加工し、幅が髪の毛の1/1000しかないナノスケールの溝を並べる。その上に内皮細胞を置くと、毛細血管のような管のネットワークが形成される（27ページの囲みを参照）。この溝は体組織の構造をまねたもので、内皮細胞による血管形成を支え、重要な環境シグナルとし

て働いている。

パソコンや携帯電話用の電子チップに使われる微細加工技術も、毛細血管ネットワークを作るために利用されている。例えばバカンティはマサチューセッツ州ケンブリッジにあるドライパー研究所のボレンスタイン（Jeffrey T. Borenstein）とともに、組織中の毛細血管ネットワークをまねようと、生分解性ポリマーでできた足場の中に多くの微小流路を直接作り込んだ。これらの流路の内部で培養した内皮細胞は血管を形成する一方で、足場材料に

血液がくっついたときの影響を最小限に抑える天然のバリアとしても働く。代わりに薄膜フィルターを使い、血液が流れる流路と組織中の機能細胞を隔てる方法もある(23ページの写真, 27ページの囲みを参照)。

細胞と血液を分離する一方で、互いにさまざまな分子を交換できるように位置関係を近く保つ仕組みとしては、細胞をハイドロゲル中に浮遊させる方法もある。ハイドロゲルはポリマーの網目構造に水が含まれたゼラチンのような材料で、組織中のすべての細胞を取り囲んでいる天然の細胞外マトリクス(細胞と細胞の間を埋めている基質)と化学的によく似ている。ハイドロゲルの中に機能細胞を埋め込み、ゲル中を走る流路の内側を内皮細胞で覆えば、血管に似た構造を備えた組織を作ることができる。

太い血管や血流との接続

エール大学のニクラソン(Laura Niklason)の研究室とランガーは、足場に平滑筋細胞と内皮細胞をまき、バイオリアクター内で心臓と同じような拍動圧をかけながら培養すると、より太い血管を作成できることを明らかにした。太い血管は2層構造になっていて、外側を覆っているのが平滑筋細胞だ。体内での血流をまねた環境で作られたこの再生動脈は、機械的にも丈夫で、動物に移植したあとも機能を保った。こうした人工血管は、より大きな構造に組み込むこともできれば、動脈硬化症のバイパス手術で移植片として使うことも可能だろう。

毛細血管のような構造やより太い血管を体外で作ることは重要な突破口となる。だが、移植した再生組織が患者の体内で生き続けるには、患者自身の血管系からすぐに血液が供給されなくてはならない。したがって、移植後に患者の体内で新しい血管系の形成を誘導することも同じくらい重要だ。例え

ばハーバード大学のムーニー(David Mooney)は、ポリマービーズや足場材料から増殖因子が放出されるようにした。こうすると、新たな血管の形成が促され、移植した組織片に入り込むように誘導できる。

ランガーとバカンティがかかわっているパーベシス・セラピューティクス社では、この原理を応用した血管損傷の治療法について臨床試験を行っている。これは平滑筋細胞と内皮細胞を含む3次元の足場を損傷部位の近くに移植し、増殖を刺激するシグナルを出して損傷した血管の自然な再生を促すものだ(右の囲みの下の写真)。

こうした進歩はあるものの、血管を持つ大きな再生組織や人工血管を作るには、多数の問題が未解決のまま残っている。身体の新しい血管はゆっくりと成長して移植した再生組織片に入り込んでいくため、移植直後の血流が足りずに再生組織片の多くの細胞が死んでしまう。このため大きな再生組織を移植するには、その中にあらかじめ血管系を作っておく必要があるだろう。これと、血管形成を刺激する増殖因子を放出する方法を組み合わせれば、再生組織片内の血管の成長をさらに誘導できる。

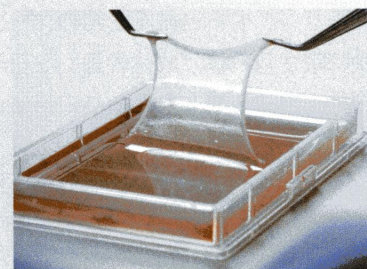
人工の血管系と患者の血管系を統合することも重要だ。患者の組織細胞と移植細胞の結びつきを促すには、これらの細胞間の情報交換について詳しく理解する必要がある。細胞が互いや自分を取りまく環境と交換するシグナルをより多く解読すれば、最適な生体材料の選択など、再生組織片を作る際にも大いに役立つだろう。

移植に適した細胞は

ほとんどの場合、患者の免疫系に適合した移植組織を本人の細胞から作るのが理想的だ。実用面からも、移植片の材料を患者自身から採取するなら、倫理的な問題は少なくなる。だが通常

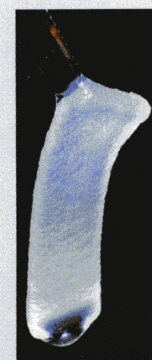
組織工学による製品が実用化

組織工学によって作られた多数の製品が臨床試験中だ。すでに米食品医薬品局(FDA)の承認を得て、患者の治療に使われている製品もある。例えば、簡単な皮膚や軟骨、組織の治癒を促進するパッチなどだ。



皮膚 やけど治療用の恒久的な人工表皮のエピセルは患者本人の細胞から作られる。

軟骨 カーティセルは細胞を用いる治療法として最初に販売されたものの1つ。患者から採取した軟骨細胞を増殖促進因子と培養して懸濁液を作り、患部に注入して軟骨を修復する。



血管パッチ

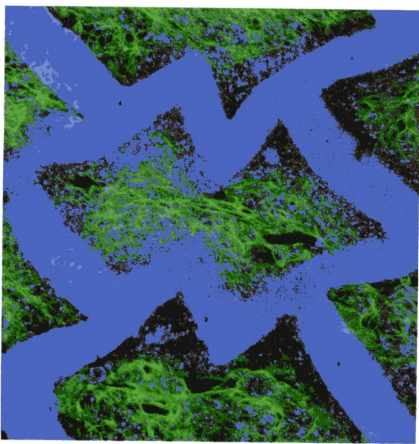
バスケルが現在臨床試験中。ドナーの血管内皮細胞から作り、損傷した血管の上に置くパッチとして使う。パッチに含まれている健康な細胞から、損傷した血管の細胞にシグナルが送られ、治癒を促進するとともに炎症や瘢痕化を抑制する。

の細胞は培地で増殖する能力が限られており、移植用の十分な組織を作るとは難しい。これに対し、患者やドナーの身体から採取できるいわゆる「成体幹細胞」はいくぶん増殖能が高く、血液や骨、筋肉、血管、皮膚、毛包、腸、脳、肝臓など、いろいろなところに存

在することがわかっている。

成体幹細胞は成人の組織に存在し、もとの組織に特有のさまざまな細胞を作ることができる。だが、普通の細胞と見た目が大きく違うわけではないので特定が難しい。そのため幹細胞であることを示す分子マーカーとなるような特殊な表面タンパク質を探さなければならない。もっとたくさんのマーカーが特定されれば、成体幹細胞を組織工学に応用する研究もかなり容易になるだろう。幸いここ数年の間に数多くの重要な進歩があった。例えば細胞を単離して増殖させる方法や、培地中でさまざまな組織に分化させる方法などが新しく開発されている。

ペンシルベニア大学のチェン(Christopher Chen)とディッシャー(Dennis Discher)は筋肉や骨、脂肪などに存在する「間葉系幹細胞」が、周囲の環境からの機械的刺激に反応することを明らかにした。間葉系幹細胞は、培養に使われている基質材料と機



心筋の再生 ハチの巣状に設計した足場(青)によって、ラットの心筋細胞は一定方向に並ぶようになる。緑色に染色されているのは収縮繊維。ヒトの心筋は一生を通じて絶えず収縮と弛緩を約3億回も繰り返さなくてはならない。マサチューセッツ工科大学のフリード(Lisa E. Freed)とエンゲルマイヤー(George C. Engelmayer, Jr.)は、柔軟性のあるアコーディオンのような足場を作って、細胞の収縮能を高める機械的シグナルを再現した。この足場の素材となったのは、ワン(Yadong Wang)とランガーが開発したユニークな弾性材料「バイオラバー」で、これにレーザーでハチの巣状に孔を開けた。

械的剛性(外力を受けても変形しにくい性質)が最も似ている組織に分化することが明らかになった。

また、何らかの組織の細胞に分化するように成体幹細胞を方向づけるには、基質や周辺環境からの化学シグナルが重要なこともわかってきた。だが、成体幹細胞から本来のものととは系統の異なる細胞を作れるか、つまり、例えば間葉系幹細胞から肝細胞などが作れるかどうかは意見が分かれている。

ES細胞やiPS細胞の出番

成体幹細胞とは対照的に、胚性幹細胞(ES細胞)は培地で増殖しやすく、人体のすべての細胞に分化できる。ランガーはハイファにあるイスラエル工科大学のレーベンバーグ(Shulamit Levenberg)らとともに、ES細胞を組織工学用の足場材料の上で、目的とする組織の細胞に分化させられることを実証した。このことから、ES細胞から直接足場の上に3次元の組織を作れる可能性が示唆された。だがこれらの細胞にはさまざまな課題がある。

ES細胞を、目的とする細胞だけに分化させることは、今でも非常に困難だ。適切に分化させるには、ES細胞を取り囲む本来の複雑な微小環境をまねすればいい。そこで、さまざまな材料や基質用化合物から、どんなシグナルをどのような組み合わせで出せばよいのかを突き止めようと、多数の条件を同時に調べる研究が行われている。

また「幹細胞性」を制御している因子を特定するために、さまざまな低分子やシグナルタンパク質も調べられている。分化した子孫細胞を作りながらも自分自身は未分化なままで、新しい細胞が必要になったらいつでも増殖して作ることができるのは、幹細胞性がうまくコントロールされているからだ。

ES細胞から得た知識は、ES細胞と同様の性質を持ちながら、問題のより少ない細胞を作り出すのにも応用でき

る。幹細胞には上に述べた課題に加え、患者に移植した後にどうなるかを予測できないなどの問題が残っている。未分化なままのES細胞は腫瘍を形成することがあるので、移植前にすべての細胞がきちんと分化していないとがんになるリスクがある。さらに、ES細胞はヒト胚から作るため倫理的な問題があり、胚以外の細胞からES細胞に似た性質を持つ細胞を作る方法も研究されている。

皮膚細胞などの成人の普通の体組織からES細胞に似た細胞を作る方法は、ここ数年で大きく進歩した。これらの改変細胞は「人工多能性幹細胞(iPS細胞)」と呼ばれ、組織工学に用いる細胞の供給源として、ES細胞の絶好の代替手段になると注目されている。2006年に京都大学の山中伸弥(やまなか・しんや)のグループがES細胞を特徴づけていると考えられるいくつかの遺伝子経路を再活性化することによって、マウスでiPS細胞の開発に成功した。翌2007年には山中チームとウィスコンシン大学マディソン校のトンプソン(James A. Thomson)のチームが、ヒトの成体組織の細胞を未分化の状態に戻せることを別々に同日に発表した。

わずか4個の重要な制御遺伝子を成体の皮膚細胞に導入すれば、未分化のES細胞に似た状態に戻る。初期の実験では、これらの遺伝子を細胞に挿入するのにウイルスを使っていたので、患者に移植する組織を作るには危険すぎた。最近の研究では、ウイルスを使わないより安全な技術を用いて同じ遺伝子を導入できること、さらにはたった1つの制御遺伝子を導入するだけで十分かもしれないことが明らかになっている。

この分野の急速な進歩から、組織工学用の理想的な材料として、もうじき患者自身の細胞から作り出したiPS細胞を使えるようになると期待されてい

る。また私たちはさまざまな細胞で実験を行っているが、私たちが開発した組織の構築方法も、他の研究者によって改良が加えられている。

本来の構造をまねる

10年前、私たち研究者は「細胞は頭がいい」と考えていた。適切な細胞が近くにあれば、何をすべきかを“理解”して、自分たちでもとの組織を作ってくれるだろうと考えたのだ。この方法はある程度までは効果がある。だが今では、発達中の、あるいは正常に機能している器官や組織において、細胞がお互いや周囲の環境と交わす複雑なシグナルについて、より詳しいことがわかっている。また、再生組織を作るときには、状況に合わせた環境を用意するのがきわめて重要なことも明らかになってきた。

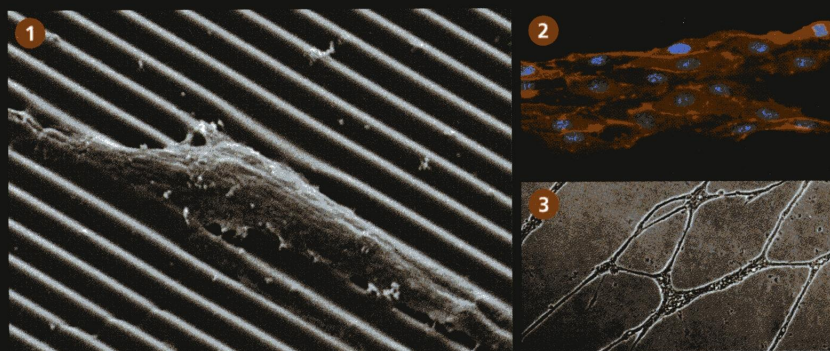
体内の組織にはどれも特定の機能がおり、組織工学による代替物はその機能を果たせなくてはならない。対象とする組織の基本的な性質や状態をできる限り再現することが、きちんと機能する再生組織を作るのには必要不可欠だ。複雑な器官では、複数の種類の細胞が協調して働いている。例えば肝臓での細胞の仕事には、解毒や栄養素の分解などがある。望み通りの機能を実現するには、再生組織でも本物の組織の微細構造と細胞どうしの配置を再現する必要がある。

初期の組織工学では、さまざまな材料を使って作りたい組織の3次元形状をまねた足場を作った。ここに、大まかにではあるが生体内での配置に似せて、必要な種類の細胞をまいた。ここ数年の数々の進歩によってますます複雑な再生組織が作られ、より本物に近い組織環境も再現できるようになってきた。例えば、生体組織の細胞をすべて取り除き、残った結合繊維だけを使った足場も作られている。これらの骨組みを用いれば、もとの組織の機能を

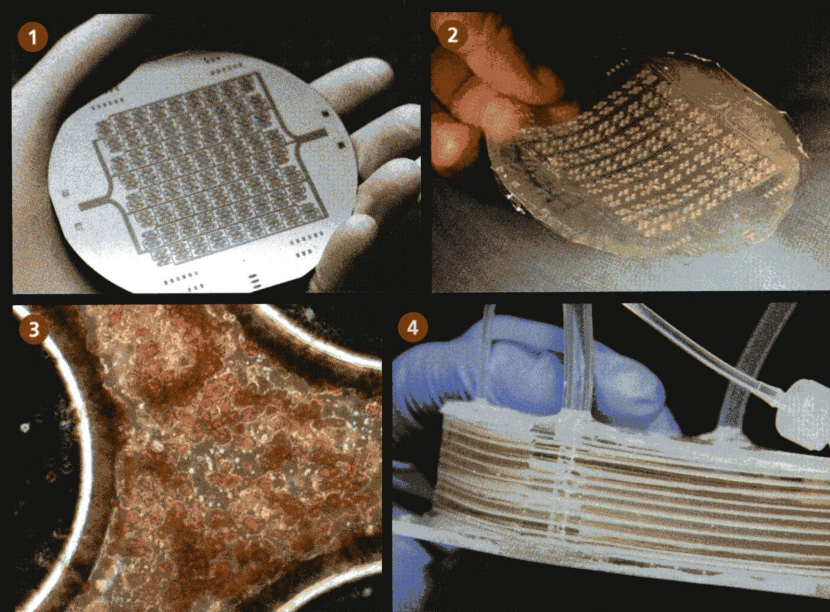
血管系を作りあげる

血液によって酸素や栄養が細胞に届けられないと、生体組織はすぐに飢餓状態になってしまう。そのため細胞が数層以上に重なった再生組織では、内部に血管系を組み込む必要がある。血管内皮細胞は生体組織の中で微小な毛細血管を形成したり、より大きな血管の内側を覆ったりしている。この内皮細胞が再生組織に入り込んで、血管ネットワークを作るように誘導することが大きな課題だ。現在は半導体産業のような他の分野から借用したナノスケール技術や微細加工技術によって、細胞の振る舞いや配置をかつてない精度で制御できるようになっている。

ナノレベルのパターン加工をした表面 細胞は近くの細胞や細胞外マトリクスからの化学シグナルに反応するが、自分が成長している表面の形や構造による機械的シグナルにも反応する。深さ600ナノメートル(nm)、幅1200nmの溝は、ある生体組織のマトリクス構造をまねたもので、内皮細胞の形や移動、増殖速度に影響する機械的シグナルとなる(1)。ナノレベルのパターン加工をした表面の上で6日間培養すると増殖した細胞が溝にそって並び(2)、毛細血管のような管のネットワークを形成する(3)。



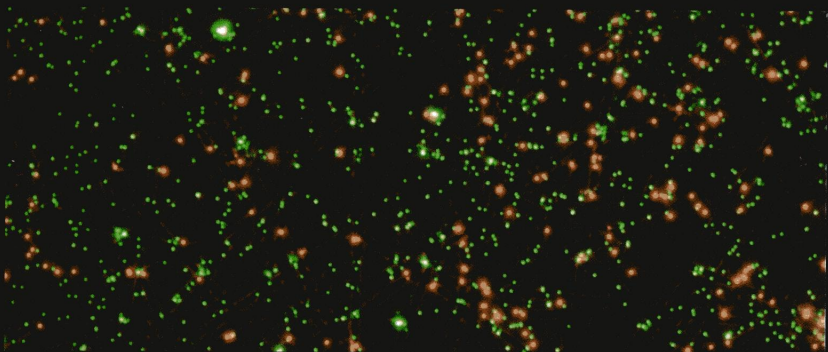
微細加工 埋め込み型補助肝臓装置の内部の血管系パターンを制御するため、シリコンの鋳型に望ましい血管の配列をエッチングする(1)。シリコンの鋳型から生体適合性ポリマーで足場を作り(2)、内皮細胞をまいて人工の血管壁を覆う。もう1種類の足場では肝細胞を培養する(3)。「血管」を含んだ足場と肝細胞を含んだ足場をナノ多孔膜を挟みながら交互に重ねれば、肝細胞の近くに常に血液が供給される(4)。できあがったハイブリッド型の組織装置は動物で試験されている。この装置の目的は、肝臓移植を待っている患者の“つなぎ”として使用することだ。



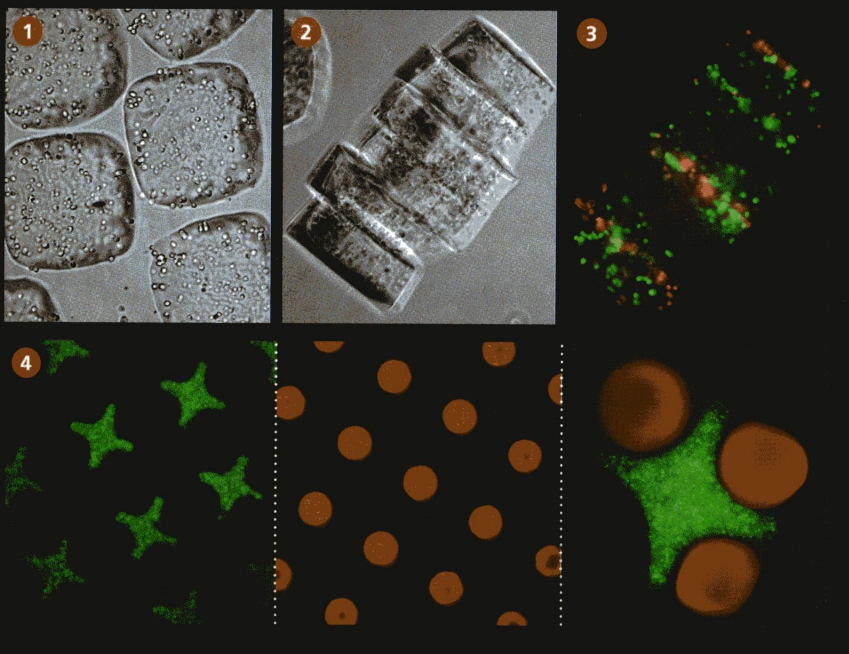
最新の足場材料

細胞は環境シグナルを頼りに自分自身を維持し、機能を発揮しているため、生体組織の内部構造をできるだけ細かく再現することが望ましい。新しい技術や材料のおかげで、機能する移植片に成長するよう設計した細胞構造物をより速く作製し、より精密に制御できるようになった。

静電紡糸法による繊維 最近では、液体などから直径数nm～数 μ mという極細繊維を作る生産技術を応用して、網目状の細胞足場が作られている。このタイプの表面では、細胞が利用できる空間や、細胞と足場材料自体の接触面積を最大にすることができる。これは細胞外マトリクスの構造をまねたもので、細胞の増殖を促進する化学物質を浸透させることも可能だ。こうした足場は絹をはじめとしたさまざまなポリマーで作られている。生きている細胞を繊維そのものに組み込んで、足場全体に均等に分布させることもできる（緑の点）。



ハイドロゲルの集合体 細胞をポリマーのハイドロゲルの中に浮遊させれば、生体組織の構造をまねた細胞配列を作ることができる。ポリマー分子は紫外線に反応すると互いに結合して固くなる。こうして作ったブロック状のゲルが集合すると、より大規模なパターンが形成される。ハイドロゲルでできた自己集合性の細胞ブロックを作る方法では、最初に細胞を含んだ親水性のゲルを作製し、このゲルからフォトリソグラフィーを利用して立方体のブロックを作る（1）。このブロックを油の中で攪拌すると、親水性のブロックが互いに引き寄せ合って大きな集合体を形成するので、もう一度、紫外線を当てて架橋結合を促し、安定化させる（2）。紫外線を当ててもブロック中の細胞（緑）は生きている（3）。4の写真では、中に入っている細胞の種類によって、ブロックを色分けしている。このハイドロゲルユニットが自己集合すれば、肝臓の類洞のような天然の組織構造を反映した、より大規模な構造物を形成できる（4の右の写真）。



かなり再現した再生組織を作ることができる。特に目覚ましい研究例では、ネズミの心臓から細胞を取り除いて作った足場に心筋細胞と内皮細胞をまいたところ、拍動する心筋線維と血管構造物ができた。

プリンターで細胞を配置

細胞を正確に配置するため、さまざまな「バイオプリンティング技術」も使われている。パソコンにつないで使う一般的なインクジェットプリンターを改良すれば、足場の材料や細胞そのものを適切に配置（印刷）でき、細胞をまくための骨組みを作ったり、配置した細胞から組織を作ることもできる。

組織内の本来の細胞の配置をまねると、細胞の誘導に役立つが、工学分野から借用したもう1つの技術である「静電紡糸法」によって、生体の組織マトリクスと似た構造を持つ足場を作ることができる。非常に細いポリマー繊維を紡いだクモの巣のような足場は、細胞にとってより自然な3次元環境となるうえ、ポリマー材料の化学的・機械的性質を細かく調整できる。タフツ大学のカプラン（David Kaplan）は、絹の成分を使ってこうしたクモの巣状の足場を作成し、靱帯や骨組織を作り上げている。

ハイドロゲルの生物学的、化学的、機械的性質は簡単に操作できるため、細胞を支えたり包んだりするのに役立つほか、できあがった組織の機能も高くなる。細胞を含んだハイドロゲルをバイオプリンティングやその他の方法で並べたり層状に重ねたりすれば、正確な組織構造を作製できる。

例えば著者の1人（カデムホッセイニ）は細胞集合体をハイドロゲルに埋め込み、互いに組み合わせることができ形を成型した。それらを一緒にしておけば、より大きくて複雑なパターンが自然に自己形成される（左の囲み）。この技術を使えば、肝臓のよう

続々と医療現場へ

工学的な手法で材料を細胞と組み合わせ、ヒトの組織の機能を代替・回復できる移植用の組織工学製品を手がけている企業は少なくとも70社にのぼる。市販されている製品のほとんどは、患者本人の細胞を使う。また、細胞を含まないさま

ざまな足場材料もある。これらは患者自身の組織や移植細胞による再生を促すものだ。移植用組織には、大規模な人工血管や患者のもとの組織を完全に代替できるその他の移植片、さまざまな種類の複合皮膚などがある。複合皮膚は患者への移植だけでなく、動物実験の代わりに新薬候補などの毒性試験に使われることが増えている。

移植片の種類	企業の例と製品の開発段階		
	前臨床	臨床試験	承認済み
無細胞支持体 移植または注射可能な 足場材料や組織マトリクス成分	3DM, カルディオ, サイトマトリックス, リジェンテック, リジェンティス・バイオマテリアルズ, テファ	セルトリックス, フォーティセル・バイオサイエンス, クロス・バイオサージャリー, セリカ・テクノロジーズ	アドバンスト・バイオポリマーズ, バクスター, クック・バイオテック, フィディア, イメデックス・バイオマテリア, インテグラ, ジョンソン・エンド・ジョンソン, ライフセル, メドロニック, オーソビタ, バイオニア・サージカル・テクノロジー, リジェン・バイオリジクス, TEIバイオサイエンス, ティッシュ・リジェネレーション・セラピューティクス
細胞利用製品 カプセル化細胞 1種類の細胞集合体や細胞シート 臓器補助装置	バイオエンジン, セルコ・メディカル, ジーングラフツ, マイクロアイレット	アルブラスト, エクスコープ, ヘパライフ・テクノロジー, アイソラゲン, LCT, ニューロテック, ノボセル, Nsジーン, パーベシス・セラピューティクス, タイジェニクス, バイタル・セラピーズ	アドバンスト・バイオヒーリング, アースロカインेटィクス, バイオ・ティッシュ・テクノロジー, セル・マトリクス, セルトラン, ジェンザイム, ハイブリッド・オルガン, インターフェース・バイオテック, オルガノジェネシス, セウォン・セロンテック, テテック, パンティッシュ・テクノロジーズ
移植用組織 血管, 軟骨, 骨, 膀胱, 心筋, 複合皮膚	バイオノバ, ヒューマサイト	バイオミメティック・セラピューティクス, サイトグラフト, エデュセル, ヒストジェニックス, インターサイテックス, ISTO, テンジョン, セレジェン	ユーロダーム, ジャパン・ティッシュ・エンジニアリング, カロセル・ティッシュ・エンジニアリング, マットテック, スキン・エシック・ラボラトリーズ

な組織の中にある細胞の自然な構造を複製できる。肝臓は、毒素を濾過する細胞が中央の血管を取り囲んだ、「肝小葉」という六角形の構造が集まってできている（24ページの囲み）。

ゲルには紫外線に反応してポリマーが互いに結合するタイプがある。成型した後で、全体や一部に紫外線を当てるとゲルが固まる。コロラド大学ボルダー校のアンセス（Kristi Anseth）とジョンズ・ホプキンズ大学のエリセーエフ（Jennifer Elisseeff）は、こうした光架橋性ハイドロゲルを使って軟

骨と骨組織を作製した。

ゲルに多数のシグナル分子を染みこませて、組織の成長や分化を促すこともできる。ノースウエスタン大学のスタップ（Samuel Stupp）は、細胞の振る舞いを指示する環境シグナルとして働く小さなタンパク質をハイドロゲルに加えると、神経幹細胞が神経細胞に分化することを明らかにした。スタンフォード大学のブラウ（Helen M. Blau）も細胞外マトリクス成分を含んだハイドロゲルを用いて、幹細胞の特性の制御などについて研究している。

細胞の培養法から工夫

最後になるが、移植に適した細胞シートの作製にはナノテクノロジーが利用されている。東京女子医科大学の岡野光夫（おかの・てるお）は、温度が37℃から20℃に下がると表面が疎水性から親水性に変わる温度応答性ポリマーを開発した。底をこのポリマーで覆った培養皿で細胞を培養して単層の細胞シートを作り、それから温度を下げるとポリマーが親水性に変わって、細胞シートが傷つくことなく浮いてくる。こうした細胞シートには、細胞か

ドナーによって細胞の振る舞いが違ったり 患者によって移植片への反応が異なる場合がある こうした“個人差”を見極めることが課題だ

ら分泌された適切なマトリクス分子が含まれており、積み重ねたり巻いたりすることで、より大きな構造物を作ることができる。

こうした進歩によって、作製できる足場の大きさや種類は大いに向上したが、まだ課題も残っている。組織や臓器が発生するときや自然治癒の過程では、さまざまな増殖因子や細胞外分子がかかわっているが、その濃度や組み合わせに関する知識が不足していることだ。治癒や発生をまねて組織を作るには、こうした要素についての理解を深める必要がある。組織工学だけでなく、組織の発生や傷の修復のために働いている遺伝子やタンパク質の相互関係の研究など、他の分野にも注目していなくてはならない。そうした発見を高度な組織培養と組み合わせれば、体外での細胞の反応を制御できるだろうが、まだまだ進歩が必要だ。

時代の到来

紹介してきたような課題は残っているものの、再生組織はもはや夢ではない。簡単な再生組織はすでに臨床の場で使われているし、生物学的機能を回復・代替するこれらの方法は、数百万人の患者に実施できる治療法になりつつある。2008年末現在、さまざまな組織工学製品の年間売上高は15億ドル近い。

前回、私たちが組織工学の展望について本誌に寄稿した直後にこの分野が経験した挫折のことを考えると、この数字は感慨深い。1990年代末から2000年代初めには投資意欲も高かったが、ITバブルがはじけるとバイオ関連の新しい企業への資金提供は減っ

た。米食品医薬品局（FDA）の承認を受けた組織工学製品を持つ企業でさえ、ビジネスモデルを見直さなければならず、製品の市場導入が遅れた。再生組織は細胞と生理活性物質、非生物学的な足場材料などでできているため、FDAの厳しい審査を受けなければならぬが、それには多額の費用と時間がかかる。資金不足のために、企業は大規模な臨床試験を実施しにくくなった。皮肉なことに、中には商品化の遅れがプラスとなったものもある。十分な研究を行い、より高度な経営手法を取り入れる時間が得られたからだ。

改善の余地はいろいろある。FDAの承認を得るのが難しい一因は、細胞の振る舞いがドナーによって違うこと

と、同じタイプの移植片に対する反応が移植を受けた患者によって異なることだ。こうした予測不可能性がFDAによる再生組織の安全性や有効性の検討を難しくしている面がある。どのような個人差があり、それがなぜ生じるのかを突き止め、不測の結果が生じないようにする研究がさらに必要だ。将来のビジネスモデルでは、この研究にかかる多額のコストも考慮する必要がある。

それでも、組織の発達や身体 of 自然な修復過程に関する最新の知識に基づいて、機械的、化学的、機能的な面でこれまで以上に生体組織に近い、次世代の製品が作られようとしている。現在の厳しい経済情勢下においても、ナノテクノロジー、幹細胞生物学、システム生物学、組織工学の研究を結集すれば、現在非常に多数の人が必要としている高度な代替臓器を開発するため、新しいアイデアが間もなく得られるだろう。（翻訳協力：千葉啓恵）

著者 Ali Khademhosseini / Joseph P. Vacanti / Robert Langer

カデムホッセイニはハーバード-MIT健康科学技術部門およびハーバード大学医学部の助教。ランガーの指導の下でPh. D.を取得した後、組織工学や薬物送達に向けた細胞の振る舞いを制御するマイクロスケールとナノスケールの技術を開発している。バカンティはマサチューセッツ総合病院小児外科医長、ハーバード大学医学部教授、マサチューセッツ総合病院再生医療センター副所長を務める。ランガーはマサチューセッツ工科大学のインスティテュート・プロフェッサーで、史上、最も論文引用回数が多い研究者だ。ランガーとバカンティは組織工学の先駆者で、この2人による総説は日経サイエンス1995年11月号と1999年7月号にも載っている。

原題名

Progress in Tissue Engineering (SCIENTIFIC AMERICAN May 2009)

もっと知るには…

BRINGING SAFE AND EFFECTIVE CELL THERAPIES TO THE BEDSIDE. Robert A. Preti in *Nature Biotechnology*, Vol. 23, No. 7, pages 801–804; July 2005.

MICROSCALE TECHNOLOGIES FOR TISSUE ENGINEERING AND BIOLOGY. Ali Khademhosseini, Robert Langer, Jeffrey Borenstein and Joseph P. Vacanti in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 103, No. 8, pages 2480–2487; February 21, 2006.

ENGINEERING COMPLEX TISSUES. Antonios G. Mikos et al. in *Tissue Engineering*, Vol. 12, No. 12, pages 3307–3339; December 2006.

GREAT EXPECTATIONS: PRIVATE SECTOR ACTIVITY IN TISSUE ENGINEERING, REGENERATIVE MEDICINE, AND STEM CELL THERAPEUTICS. Michael J. Lysaght et al. in *Tissue Engineering*, Part A, Vol. 14, No. 2, pages 305–315; February 2008.

別冊日経サイエンス152『人体再生 幹細胞がひらく未来の医療』、日経サイエンス編集部編、日経サイエンス社、2006年、1995円（税込）

動物で育てるヒトの臓器

生体の外で細胞から臓器を作るのはきわめて難しい
ならば、生体の力を借りて臓器を育てる手法はどうだろう

詫摩雅子（編集部）

バカンティとランガーらが1990年代に提唱した組織工学は、あくまでも生体の外で移植用の組織や臓器を作ろうというアイデアだ。金属や樹脂、セラミックスで作る人工関節や埋め込み型人工心臓などとの違いは、材料として生きた細胞を使っている点にある。組織工学の成否を握っているのは、発生段階や自然治癒のプロセスをどこまで生体外で再現できるかだ。

幹細胞を使った再生医療のうち、細胞シート（皮膚や角膜など）はすでに使われているし、年内にも米国で胚性

幹細胞（ES細胞）を使った脊髄損傷の臨床試験が行われる予定だ。だが、22ページからの記事にもあるように、生体外で細胞を培養して丸ごとの臓器を作るのはまだ先になる。生体内で起きていることを再現するのが難しいのなら、いっそ生体の力を借りて臓器を作ろうというアイデアがある。

国内初のブタ実験センター

7月中旬、栃木県下野市の自治医科大学のキャンパスの一角に、先端医療技術開発センター（CDAMTec）が

フルオープンする。医学研究用のブタを中心とした大型動物の実験・研究・研修施設で、遺伝子組み換えなどの高度な実験も行える。ここで「移植可能な臓器の作成を目指す」と小林英司（こばやし・えいじ）客員教授は言う。医学研究用のブタを扱うこのセンターは、食肉用の家畜ブタとはまったく異なるレベルで感染を防御する設備や仕組みを備えている。

遺伝子組み換え実験などを行う施設は、実験動物が施設外に出ないように、封じ込め設備が義務づけられている。微生物やマウスなどの小動物についてはこうした施設はたくさんあるが、ブタを中心とした大型動物では国内では初めて、世界でもこのような専門施設は米国とドイツにそれぞれ1カ所あるだけだ（韓国が計画中）。

生体の力を借りた臓器づくりとしては、動物にヒト臓器を丸ごと作らせてそれを移植するアイデアがある。

医学に貢献するブタ 食肉用の家畜ブタは100kgにもなるが、医学研究で使うブタは45kgほど。臓器のサイズはヒトとほぼ同じだ。



DATA BOX

臓器移植を希望している登録患者

(2009年6月1日現在)

●肝臓：254人

●腎臓：1万1695人

2008年に行われた移植手術

●肝臓：13件

●腎臓：210件

(データ出典：日本臓器移植ネットワーク)

例えば、東京大学医科学研究所の中内啓光（なかうち・ひろみつ）教授は遺伝子に欠陥があって腎臓を作ることのできない腎臓欠損マウスの初期胚に、健康なマウスのES細胞を移植して母胎に戻す実験を行っている。生まれてきた仔マウスは両方の細胞がまだらに入り混ざったキメラマウスとなるが、腎臓はすべてES細胞由来だった。腎臓欠損マウスの側には腎臓を作る能力がないためだ。

同様の遺伝子操作で特定の臓器を作れなくしたブタはまだいないが、同じ手法をヒトiPS細胞と臓器欠損ブタで行えば、ブタにヒト細胞だけでできているヒト臓器を作ることが少なくとも理論的には可能だ（詫摩雅子／中内啓光「特集：再生医療 iPS細胞の衝撃」日経サイエンス2008年7月号参照）。

ブタに丸ごとの臓器を作らせる方法は小林教授も研究中だが、ここでは別

のアプローチを紹介しよう。臓器の“もと”になるものを動物から採取し、これを患者に移植して臓器に育てるという方法だ。すでにネコを患者に見立てた実験が行われている。

患者の体内で育てるミニ腎臓

手順は次のようになる。まず、ブタ胎仔の体内にある、将来、腎臓になることが決定した「腎臓原基」を取り出し、ここにネコの間葉系幹細胞を注入する。間葉系幹細胞は骨髄や皮下脂肪などから採取できる体性幹細胞だ。この「ネコ幹細胞入りブタ腎臓原基」をおとなになったネコの腹膜に移植した。

腎臓原基は腎臓になるための方向性がすでに定まっているので、腎形成に必要な細胞増殖因子や分化因子を盛んに分泌する。それを受けて、移植したネコ間葉系幹細胞は増殖するとともに腎細胞へと分化していく。腎臓原基は周囲にも働きかけて、ネコの血管を引き寄せる。

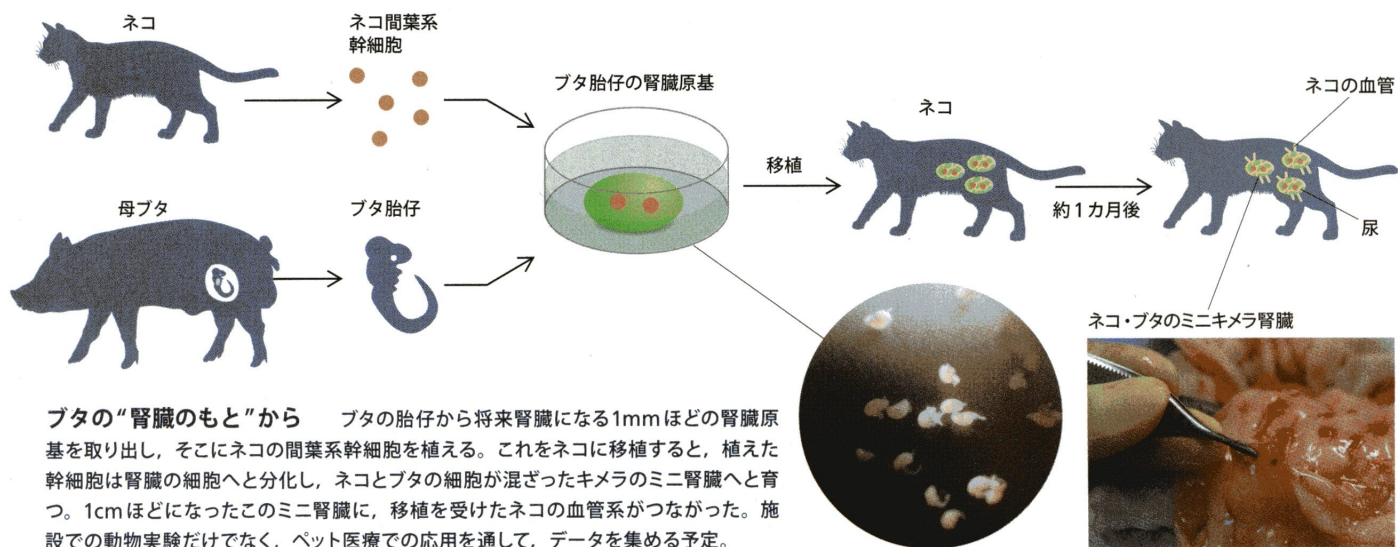
腎臓原基の移植から約1カ月後に、もう一度ネコに手術を受けてもらい、移植した腎臓原基の様子を見たところ、移植時には直径1mm以下だった腎臓原基は1cmほどのミニ腎臓へと成長していた。そこにはネコの血管が通り、中に尿がたまっていた（実験では尿管につないでいないので排泄されない）。

発生途中の胎仔の腎臓原基を使ったのは、腎臓になるための因子を出しているからだ、もう1つ大きなメリットがある。免疫抑制剤をそれほどたくさん使わなくてもすむという点だ。

ヒトからヒトへの移植やブタからブタへの移植など、同種どうしでの臓器移植でも免疫抑制剤は必要となる。さらに、ブタからネコへのように異種動物への移植となると、非常に激しい超急性の免疫拒絶反応が起きる。サイズの合うブタやヒトなどの臓器を移植に使おうという試みは古くからあり、実際にヒトに移植された例も海外ではあるが、医療として日の目を見ていないのはこの強い拒絶反応のせいだ。

だが、ヒトでのデータはないものの、異種移植でも胎仔の臓器や細胞を移植した場合には、同種移植と同じ程度の拒絶反応ですむことが動物実験でわかっている。

患者の体内でミニ腎臓を育てる手法は移植した腎臓原基が機能し始めるまでに時間がかかるので、人工透析を受けているような慢性患者に使うことを想定している。「尿を誘導するための移植場所や、移植する個数を見きわめる必要がある」と小林教授は言う。腎臓の機能を肩代わりさせるからといって、本来の腎臓の位置に移植する必要はなく、尿の排出ルートを考えれば



ブタの“腎臓のもと”から ブタの胎仔から将来腎臓になる1mmほどの腎臓原基を取り出し、そこにネコの間葉系幹細胞を植える。これをネコに移植すると、植えた幹細胞は腎臓の細胞へと分化し、ネコとブタの細胞が混ざったキメラのミニ腎臓へと育つ。1cmほどになったこのミニ腎臓に、移植を受けたネコの血管系がつながった。施設での動物実験だけでなく、ペット医療での応用を通して、データを集める予定。

膀胱近が有力候補になりそうだという
(通常の腎移植は、太ももの付け根付
近に移植する。開腹せずにすむので、
患者の負担やリスクが少ない)。

肝臓を腸の中で发育させる

自治医大で研究が進められている肝
不全の治療アイデアも本来の場所では
ないところにミニ臓器を作るタイプだ。
名付けて「腸詰め肝臓作戦」。患者の
小腸を10～15cmほど切り取って袋
状にし、ここに患者自身の肝臓細胞と
幹細胞を混ぜて移植してミニ肝臓にす
る。組織工学でいう「足場」として患
者自身の小腸の一部を使うわけだ。

もともとは肝硬変による「門脈圧亢
進(こうしん)症」の対策に、代替臓
器作りを組み合わせたもの。門脈は本
来は肝臓に流れ込むが、肝硬変が進む
とうまく流れずに門脈圧が異常に高
くなってしまふ。放置すると静脈瘤破
裂の危険があるので、圧を下げるため
にバイパスする手術が行われる。

そこで、門脈から肝臓に流れる血流
の一部を、切り出した小腸へとバイパ
スする。そのままでは、血液が肝臓で
浄化されずに静脈に出てくるので、袋
状にした小腸に肝臓の細胞とある種の
幹細胞を移植してミニ肝臓として働か
せる。肝臓の細胞はもともと必要に応
じて増殖する能力があるが、増殖因子
を分泌する幹細胞と一緒にすること
により、より増殖が盛んになるという。

健康なラットを使った実験では、小
腸に移植した肝臓細胞は時間とともに
減ってしまったが、本来の肝臓を切除
すると小腸内の肝臓細胞が増殖し始め
た。ブタでの実験も始まっている。

この手法は、患者自身の小腸と細胞
(肝臓の細胞と幹細胞)を使うこと
になり、動物や他人からの細胞、臓器は
使わない。体内に新しくミニ肝臓を作
ることになるが、移植というよりもむ
しろ「新しい手術方式」に近い。小林
教授はブタを使ってこのやり方の実験



日経サイエンス

自治医科大学の先端医療技術開発センター

東京ビッグセンター機構として、東日本を中心に広
く日本中の研究者や学生を受け入れる予定。日本ビッグセンターとしなかったのは「こうした拠点施設がたと
えば関西など、日本には数カ所は必要だから」と小林教授はいう。逆に関東ビッグセンターとしなかったのは、
「日本から世界に成果を発信するのに、KANTOでは通じないから」。人間用と同じ手術台や画像診断装置、
集中治療室などを備え、動物福祉にも配慮している。右は犠牲死させた動物のための慰霊碑。

を積み重ね、今年度中にも臨床応用へ
の糸口をつかみたいという。

しかしこの「腸詰め肝臓」は、あく
までも補助肝臓にすぎず、移植できる
肝臓を待つ間の時間稼ぎにしかならな
いという(ただし、門脈圧を下げると、
本来の肝臓にある健康な細胞が増殖し
やすくなることが臨床データとして得
られており、もともとの肝機能の改善
も期待できる)。いずれは肝臓移植が
必要になるため、ブタにヒトの肝臓を
丸ごとを作らせる研究も米国のチーム
と組んで進めている。

ヒト臓器作りに向けた要素技術

ブタは畜産で培った飼育や繁殖のノ
ウハウがある上、臓器のサイズがヒト
とほぼ同じために医学研究には以前か
ら使われてきた。とはいえ、マウスな
どに比べると実験数が圧倒的に少なく、
遺伝子操作などの基本的な要素技術が
必ずしも確立していない。将来的にブ
タにヒト臓器を作らせるのなら、遺伝
子操作によってブタ自身の臓器は作ら
ない臓器欠損ブタを作る必要がある。
小林教授のチームではこうした要素技
術の確立も手がけている。

遺伝子組み換えの例を紹介しよう。
マウスなどでは受精卵に目的の遺伝子
を導入してから母胎に戻す。すると、

全身の細胞に目的の遺伝子が入ったマ
ウスが生まれてくる。ブタでも同じ手
法が試されているが、成功率がきわめ
て低く、ほとんどが遺伝子導入されて
いない普通の仔ブタになってしまう。

小林教授のチームは遺伝子導入とク
ローン技術を組み合わせる方法をとっ
た。目的の遺伝子をブタの皮膚の培養
細胞に組み込み、遺伝子導入に成功し
た細胞だけを選んで、その細胞からク
ローンブタを作るのだ。やはり成功率
は低い、無事に誕生した仔ブタには
確実に目的の遺伝子が入っている。

すでにこの手法で緑色蛍光タンパク
質(GFP)遺伝子を組み込んだGFP
ブタやピンクに光るRFPブタを作る
ことに成功している。こうした遺伝子
組み換えブタを実験に使える点が自治
医大・新設センターの大きな強みだ。

センターはほかの大学や研究機関に
対してもオープンにし、大型動物を使
った研究を希望する研究者を受け入れ
る予定。「課題は多いが、国の支援や
社会全体の理解を得ながら、ここで必
ずヒトに移植可能な臓器を作り出す」
と小林教授は意欲を見せている。 ■

もっと知るには…

「ブタを医学・医療に使う意義——現状と将来」
小林英司, Biophilia2009年夏号(Vol 5,
No. 2)

創薬に活躍するiPS細胞

いよいよiPS細胞の実用化が始まった
入手しにくいヒト心筋細胞となって新薬の開発に活躍する

詫摩雅子（編集部）

成人の皮膚の細胞から人工多能性幹細胞（iPS細胞）を作ること成功した直後、iPS細胞の生みの親である山中伸弥（やまなか・しんや）京都大学教授は、「再生医療への応用には10年はかかる」と機会あるごとに繰り返してきた。安全性の確認などにそのくらいは必要だからだ。その一方で、「すぐにでも応用が可能になる」と言ってきた分野もある。その1つが、iPS細胞を使った創薬支援技術だ。

この4月、東京に本社のあるベンチャー企業のリプロセルはヒトiPS細胞を使った創薬支援の受託サービスを始めた。いよいよヒトiPS細胞が実用化されたのだ。同社がヒトiPS細胞から分化させた心筋細胞も、医療機器メーカーのニプロを通して販売される。製薬会社をターゲットにした商品だ。

「ヒトiPS細胞が発表されたとき、

細胞ネットワークのチップ 丸い電極の部分にiPS細胞から分化させた1つ1つの心筋細胞が載る。隣の細胞との間隔は50μm。各線は計測装置につながり、個々の細胞の挙動を調べるとともに、隣の心筋細胞との運動も見る。

再生医療への期待が語られたが、本当の意味で大きかったのは、ヒト細胞の安定した供給源ができたことだ。こう語るのはリプロセルの横山周史（よこやま・ちかふみ）社長だ。

身体に“効く”すべての化合物は毒になる危険性も秘めている。このため、新薬の候補化合物は、ヒトでの臨床試験に入る前に、何段階にもわたって毒性の有無が検査される。そこでまず必要となるのはヒト細胞を使った細胞機能性試験だ。動物実験も行われるが、コストがかかるため、まず細胞での実験を先に行って、候補化合物を絞り込むのがよくある手順だ。

ところが、一般にがん細胞でないかぎり、体外に取り出したヒト細胞を永続的に増やすのは難しい。例えば骨髄移植に使われる造血幹細胞は、体内に移植すればさかんに増殖して長期間にわたって血液細胞を作り続けることが臨牀的にも確認されているが、培養皿の中で増やすのはきわめて難しく、研究を進める上で障害になっていた。

線維芽細胞や間葉系幹細胞などは比

較的分裂しやすいが、それでも分裂を重ねるうちに分化して別の細胞になったり、染色体異常を起こしたりする。幹細胞の性質を保ち、かつ、正常なまま無限に分裂する——それが、ES細胞やiPS細胞の際立った特徴なのだ。

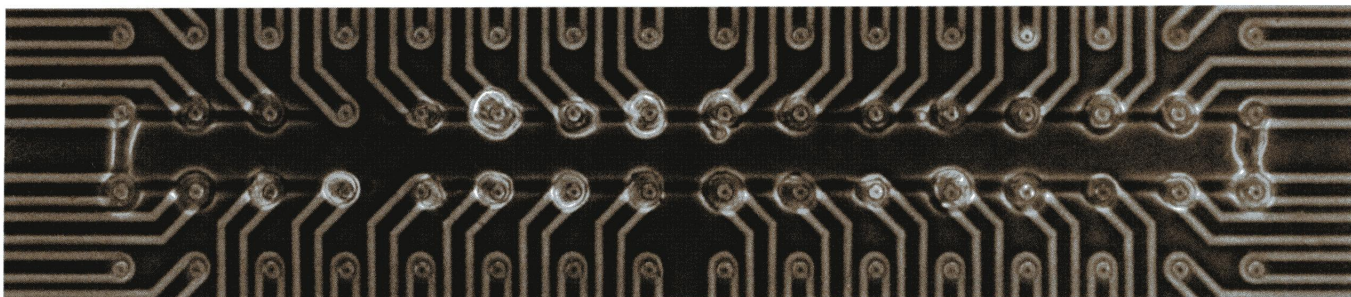
無限に増殖するということは、いったん手に入れば細胞の安定した供給源になりうることを意味する。「一般の人にはぴんとこないかもしれないが、これは医学・生物学の研究に携わっている者にはものすごく大きな意味がある」と横山社長は強調する。

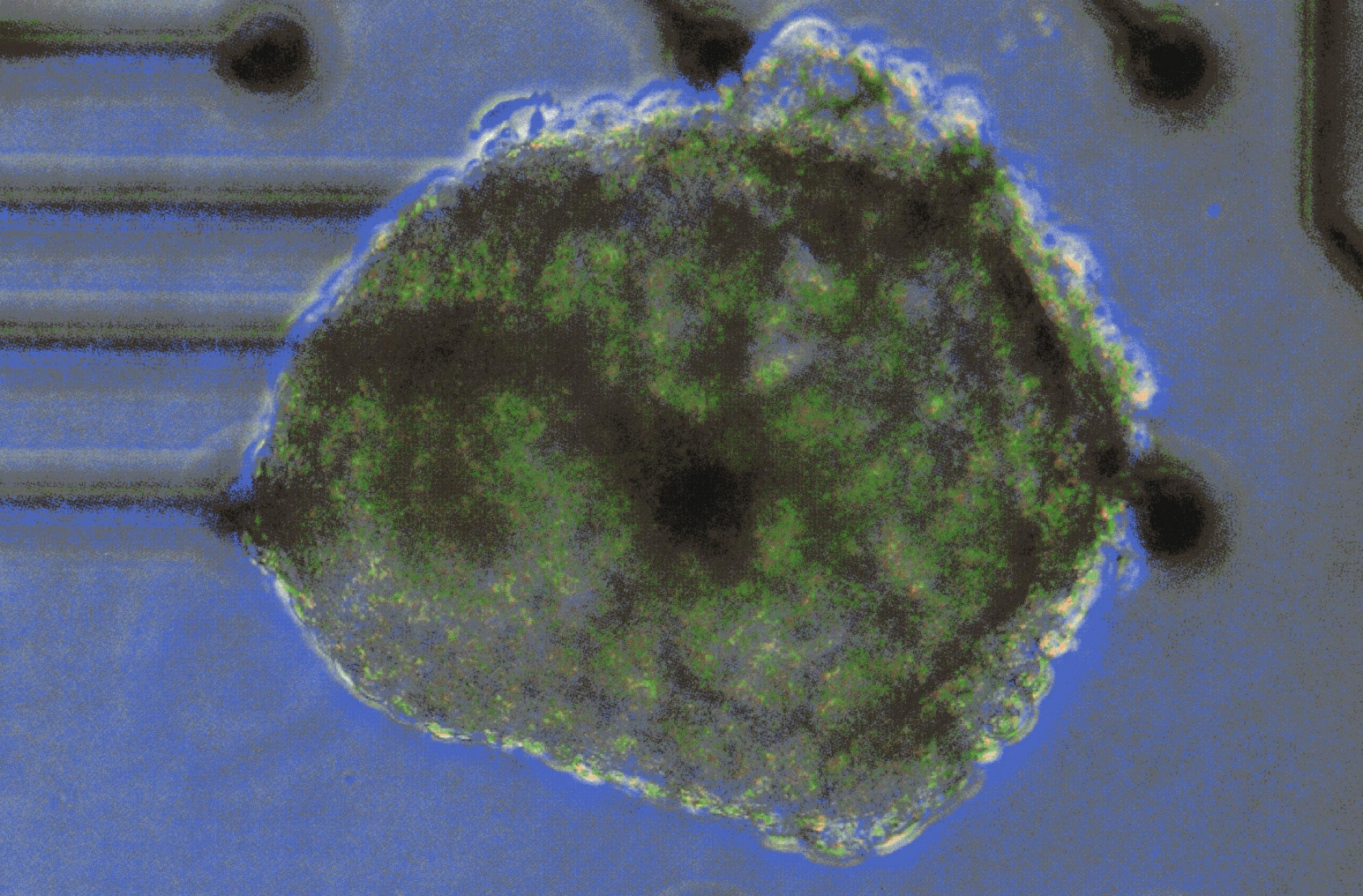
薬の副作用を考えた場合、重視されるのは心臓と肝臓だ。ある種の化合物は、命にかかわる不整脈を引き起こすことが知られている。また、投与された薬が肝臓で処理されないと、いつまでも体内に残って“毒”となる。だが、ヒトの心筋細胞や肝細胞はなかなか手に入らないうえに、入手できたとしても増やせないから、実験をするたびになくなってしまふ。

細胞塊から“心電図”

心臓に対する毒性試験の場合、これまでは増やすことができる培養がん細胞を使っていた。もともと心筋細胞ではなかったがん細胞に遺伝子を導入して、心筋細胞の膜にあるhERGというイオンチャネルを作らせ、これで心筋細胞の代用をしていたのだ。

心筋細胞にはカルシウムやナトリウム、カリウムなどのイオンの出入りを調節しているチャネルがそれぞれ細胞膜にある。イオンチャネルは互いに協調して働くことで、心筋細胞を収縮・





弛緩させる。そして、個々の心筋細胞がタイミングを合わせることで、その集合体である心臓のポンプ機能を実現している。ところが、薬などのせいで心筋細胞がうまく収縮・弛緩できなくなると、心臓全体の動きは時としてけいれんしたようにぶるぶる震えてしまい、血液を身体に送り出せなくなる。hERGはカリウムチャネルの1つだ。

ある種の化合物は、このhERGカリウムチャネルの働きを阻害してしまう。すると、心筋細胞はうまく拍動できなくなり、不整脈を引き起こす。hERGカリウムチャネルをもつ培養がん細胞を使った毒性試験では、新薬の候補化合物がhERGの機能を阻害するかどうかを見ていた。これをhERGアッセイと呼ぶ。

「けれども、1つのイオンチャネルの機能を見るだけでは、拍動への影響を説明するには不十分」(横山社長)。

このため、hERGアッセイでは“毒性なし”となった化合物の約20%が、イヌを使った動物実験では致死性の不整脈を引き起こすという。逆に、hERGアッセイで“毒性あり”となったのにイヌでは問題ない化合物もあった。

リプロセル社が4月から始めたサービスでは、ヒトiPS細胞を心筋細胞に分化させた直径数百 μm の細胞塊を使う。それぞれの心筋細胞塊は使い切りだが、iPS細胞という安定した細胞供給源があるため、いくらでもヒト心筋細胞塊を作ることが可能だ。96個のくぼみ(ウェル)に1つずつ心筋細胞塊を入れたプレートを使って、一度に96種類の新薬候補の毒性試験ができる。イメージとしては「細胞の塊から心電図を計測するようなもの」と横山社長は言う。

ヒトや動物に致命的な不整脈を起こすかどうかすでに明確になっている

拍動する細胞塊で“心電図” ヒトiPS細胞から心筋細胞へと分化させた細胞塊が新薬の毒性検査に使われている。拍動するこの数百 μm ほどの細胞塊から“心電図”をとり、新薬の候補化合物をかけても異常が生じないかを確かめる。

化合物でテストしたところ、hERGアッセイよりもヒト心筋細胞塊を使った検査のほうが、結果を忠実に反映していた。さらに、hERGアッセイとは異なり、カリウム以外の複数のイオンチャネルの機能を見たり、拍動数の変化を見ることもできる。hERGアッセイでは細胞に針をさすような職人技が必要となるが、iPS細胞由来の心筋細胞塊から心電図をとる方法ならば誰でもできるし、ほとんど自動化が可能だ。

現在、1つの薬を開発するのに10年以上、数百億円以上かかるといわれている。製薬会社としては“モノにならない化合物”を開発の最初期段階でふるい落とすことができれば、コストを



再生医療への臨床応用は ES細胞を先行させるべきだが 創薬支援や病態モデルはiPS細胞でいける

大きく削減できる。hERGアッセイでは大丈夫だったのに動物実験で不整脈が生じたとなれば、それまでのコストがすべて無駄になる。動物実験もクリアしたのに臨床試験で心筋毒性が初めて明らかになったりしたら、取り返しのつかない結果になりかねない。

心筋細胞ネットワークで 心臓の反応を再現

リプロセル社は細胞の集合体を使うが、東京医科歯科大学生体材料工学研

究所の安田賢二（やすだ・けんじ）教授は1個1個の心筋細胞をチップ上にネットワークを形成するように配置することで、心臓モデルを組み上げることに成功している。安田教授の心臓モデルは、1つ1つの細胞のイオンチャネルの機能障害を電氣的に計測するだけでなく、細胞ネットワークを構築することで心臓そのものの動きを再現できる。特に注目しているのは「期外収縮」と呼ばれる、本来はないタイミングで起きる心臓の異常な収縮で、これ

が患者の突然死につながる。

実際の心臓では、隣り合った心筋細胞がわずかずつタイミングをずらしながら規則的に収縮・弛緩し、血液を絞り出すようにして身体に送る。大切なのは細胞どうしの同期性で、これが心臓全体としてのポンプ機能を支えていると言ってよい。

新薬の候補化合物などで心筋細胞のイオンチャネルの働きが障害されるとタイミングが遅れ始める。それでも、心臓のポンプ機能が保てる場合もあるが、隣り合った細胞の動きが同期でなくなるほど大きな遅れが生じると命にかかわる事態となる。個々の細胞は収縮・弛緩を繰り返していたとしても、そのタイミングが不適切であるために心臓としてのポンプ機能を果たせなくなるからだ。つまり、細胞集団の同期性が崩れるかどうかは致死的な不整脈につながるかどうかの分かれ道で、それは、「個々のイオンチャネルの機能障害を見ているだけでは判別できない」と安田教授は言う。

安田教授のシステムでは、チップ上にずらりと心筋細胞を並べた回路を使う（34ページの写真）。このように心筋細胞を配置すると、自発的にネットワークを作って、隣とタイミングを取りながら拍動を始める。測定では、1つ1つの細胞でのイオンチャネルの機能不全を電氣的に計測しつつ、隣り合った細胞との同期性も見ると。心電図のデータと同じ反応を再現できるのだ。

一番の狙いは抗がん剤や抗菌剤など毒性の強い候補薬について「ここまでならば大丈夫という、投与量のヒトでの安全域を見きわめること」と安田教授は話す。イオンチャネルの状態を見るだけの従来法はもちろん、動物実験でも、この安全域を決めるのは難しい。

安田教授の研究は、iPS細胞の産業応用を目指した新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクトの一環として進められている。

病態モデルへの応用も

山中伸弥教授がすぐにでも実現可能になりそうなiPS細胞の応用例として、創薬支援技術とともに当初から挙げていたのは「病態モデル」だ。病態モデルとは、患者と同じ病気を発症する実験動物や病気の原因となった変化を示す細胞のことで、これがあれば、発病メカニズムを調べることができ、治療法の開発にもつながる。

整形外科医でもあった山中教授がよく例に出すのは「運動ニューロン病」だ。何らかの理由で運動ニューロン（運動神経細胞）が変性して徐々に死滅してしまい、そのニューロンが動かすはずの筋肉に指令が伝わらなくなる。筋肉はやせ細り、ついには呼吸のための筋肉さえも働かなくなる。一方で、知覚や知能は正常なままだ。宇宙論研究で有名なホーキング（Stephen W. Hawking）がかかっている筋萎縮性側索硬化症（ALS）はこの運動ニューロン病の一種で、このほかに遺伝性の脊髄性筋萎縮症（SMA）が知られている。ALSもSMAも「残念ながら、治療法はまだない。それは病態モデルがないから」と山中教授は言う。運動ニューロン病では、患者自身が異変に気がつくのは手足に力が入らなくなってからだ。「おかしいなと病院を訪れるが、そのときには運動ニューロンはすでに変性してしまっている。だから、なぜ変性したのかを突き止めることが難しい」（山中教授）。

だが、患者の皮膚の細胞からiPS細胞を作り、それを運動ニューロンへと分化させれば、時間を巻き戻して変性に至るプロセスを追うことができる。すでにウィスコンシン大学のチームが遺伝性のSMAの患者からiPS細胞を作り、運動ニューロンの異常を再現することに成功している。ALSで異常を再現した例はまだないが、京都大学のチームをはじめ、世界中のグループがすでにこのテーマに挑んでいる。

山中教授はiPS細胞が医療に貢献することを強く望んでいるが、患者の身体に移植する再生医療の形での臨床研究にはきわめて慎重だ。「iPS細胞よりも安全性の確認研究が進んでいるES細胞を先行させるべき」と主張する。その山中教授も、「創薬支援や病態モデルならば、iPS細胞で十分いけると思う」と話している。

産業化に向けiPS細胞の評価基準を

山中伸弥教授が最初に作ったヒトiPS細胞は、皮膚の線維芽細胞に4種類の遺伝子をレトロウイルスベクターを使って導入したものだった。その後、山中チームをはじめ、さまざまなグループが手法を少しずつ変えながらiPS細胞を作っている。違いを生み出す要素には、①どのタイプの細胞から作るか、②何を入れるか（どの遺伝子やタンパク質のどんな組み合わせか）、③どうやって入れるか、の3つがある。それぞれの手法には、細胞の採取のしやすさ、効率のよさ、安全性の高さなど、メリットもある一方で、デメリットがある場合もある。

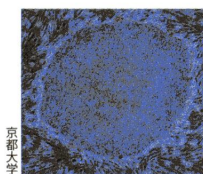
例えば、山中教授が最初に作ったiPS細胞は、分化させて成熟細胞にしたあともマウスに移植すると高い確率でがん化することが知られていた。このため4つの遺伝子のうち、がんとかかわりが深いc-Myc遺伝子を除いた3つの遺伝子に変えると、がん化は防げたが、iPS細胞ができあがるまでにかかる時間は長くなり、その効率も1桁下がった。さらにどの細胞からiPS

細胞を作ったかによって、目的の細胞への分化のしやすさなどに違いがあることもだんだんとわかってきた。皮膚の線維芽細胞から作ったiPS細胞は皮膚細胞に分化しやすいなどといった具合だ。一口にiPS細胞といっても、作り方によって個性があるようなのだ。

創薬や医療の現場で使うのであれば、こうした個性を把握した上で、用途に最も適したiPS細胞を使うのが望ましい。再生医療のように、iPS細胞に由来する細胞や組織を患者の体内に移植することが前提であれば、コストには目をつぶってでも長期的な安全性の確保が重要となるだろう。しかし、新薬の毒性試験などに使うなら、コストが大事になり、がん化の危険性は重視しなくてもいい。本文の最後に紹介した、患者に薬を投与する前に副作用が出ないかどうかを調べるパーソナル医療の使い方ならば、患者の細胞からiPS細胞を経て、心筋細胞などに分化させるまでのスピードが重視されるだろう。

NEDOのプロジェクトではさまざまな作り方によるiPS細胞の個性を見きわめ、用途別の評価基準を作る予定だ。

製薬会社18社と連絡を取りながら開発を進め、厚労省や米食品医薬品局（FDA）などに臨床試験を申請する際の「グローバルスタンダードとなる技術を作る」と安田教授は話している。



創薬支援で期待が大きいのは肝臓の細胞 iPS細胞から分化させて作るなら 体質の個人差を考えたライブラリーも可能だ

期待が大きい肝臓の細胞

新薬を開発するときには、心臓だけでなく肝臓に対する毒性も重要だ。「ES細胞やiPS細胞から作った（毒性試験に使える）肝細胞はないのか、と製薬関係の人からよく聞かれる」とリプロセルの横山社長は言う。残念ながら、まだ新薬開発に使えるような肝細胞をiPS細胞から分化させた例はないが、「需要はものすごく大きい。世界中の研究室がしのぎを削っているから、今この瞬間にできていても不思議ではない」（横山社長）。

ES細胞やiPS細胞、そのほかの幹細胞から肝細胞を作る手法がまだ確立していないため、多くの製薬会社では亡くなった人からの提供に頼っている。それもほとんどが輸入だ。

もちろん、一度、使った肝細胞は別

の実験には使えない。培養しても増えないので使えばどんどん減っていく。また、飲み会の席にいけば誰でもわかるように、肝機能はもともと個人差が大きい。同じ実験をしてもドナーによって結果が大きく異なる場合がある。このため、ある実験が終了するまでは、同じドナー由来の肝細胞を確保しておくことが製薬会社では至上命題となっている。さらにドナーからの提供に頼っているため、日本人由来、白人由来などとさまざまなタイプを一度にそろえることは難しい。

だが、iPS細胞から肝細胞を作ることができれば、安定した細胞供給源を確保できる。日本人や黒人、白人といった民族だけでなく、例えばアルコールに強い人とまったくの下戸など、遺伝的な体質にあわせて細胞をそろえることも十分に現実味がある。

iPS細胞で個別化医療

さらに、患者自身の細胞からiPS細胞を作り、それを肝臓や心臓の細胞に分化させて、投与する前に薬の副作用を予想することも可能になるかもしれない。抗がん剤のような強い薬では、投与前から副作用の予測ができれば、その恩恵は計り知れない。現在では、患者の細胞からiPS細胞を作り、それをさらに別の細胞に分化させるまでに数カ月かかってしまうが、この分野は猛スピードで研究が進んでいる。細胞の採取から短期間で肝臓や心臓の細胞が得られる日がそう遠くない将来に来るだろう。

「そうなれば、iPS細胞を使ったパーソナル医療が実現することになる」と横山社長は言う。iPS細胞は再生医療よりも、個別化医療で先に活躍することになりそうだ。 ■

海を渡る日本脳炎ウイルス

日本のあちこちの豚や蚊に潜んでいる日本脳炎ウイルスは
東南アジアから南西風に乗ってやってきたのかもしれない
もとの場所ではウイルスは今も日本脳炎の流行を起こしている

古田 彩 (編集部)

協力: 森田公一 (長崎大学熱帯医学研究所)

6月2日、新しい日本脳炎ワクチンの出荷が始まった。4年間にわたって事実上の停止状態にあったワクチン接種の再開に向けた第一歩だ。福岡市立西部療育センターの宮崎千明(みやざき・ちあき)センター長は、「待望のワクチンがようやく出てきた」とほっとした表情で話す。

日本脳炎は発症したら20～30%が死亡し、30～40%に後遺症が残るとされる。長年、3歳前後から子供にワクチンを接種してきたが、2004年に接種を受けた中学生が重い急性散在性脳脊髄炎(ADEM)を発症。厚生労働省はワクチンとの因果関係が認められるとして、翌2005年に接種の勧奨を中止した。以後、接種率は激減し、現在6歳以下の子供たちの大半はウイルスに対する抗体を持っていない。

だが、日本脳炎ワクチンが本当にADEMを引き起こすのか、専門家らは疑問を持っている。ADEMを発症する子供は年間30万人に1人。一方

でワクチン接種後にADEMを起こした子供は1ケタ少なく、年に1人か2人だ。この数では「発症がワクチンのせいなのか、たまたま接種後の時期に発症しただけなのか、判別は困難」(宮崎センター長)だ。感染リスクが高い地域では、勧奨中止後も希望者には接種を続けてきたが、すでに従来ワクチンは製造を中止。在庫も残り少ない。

今回発売された新ワクチンは、培養細胞を使って作ったものだ。マウスの脳で作っていた従来ワクチンよりも、理論的にADEMのリスクが小さいとされる。専門家らは、供給が軌道に乗り、一般的な安全性が確認されたら勧奨を再開するよう求めている。

だが一方で「接種すべきでない」と主張する医師や市民グループもある。理由は患者数の減少だ。1960年代には年間1000人以上が発症し猛威を振るったが、最近では年間10人以下。大半が中高年者で、子供はまれだ。

意見が対立し続けるのは、なぜこれ

ほど患者が減ったのか、理由がはっきりしないことが大きい。ワクチンのおかげかもしれないし、都市化が進んでウイルスを媒介する蚊に刺される機会が減ったせいかもしれない。日本にいるウイルスの病原性が以前より弱くなり、病気を起こしにくくなった可能性も指摘されている。

長崎大学熱帯医学研究所の森田公一(もりた・こういち)教授らは最近、こうした論争に一石を投じる研究結果を発表した。日本で見つかった日本脳炎ウイルスの遺伝子を調べ、その前年までに中国やベトナムで見つかったウイルスとほぼ同一であることを突きとめたのだ。これは、東南アジアで毎年数万人の患者を発生させているウイルスが、海を越えて日本に渡ってくることを意味する。「決して日本のウイルスが弱くなったわけではない」という。本稿では森田教授の協力を得て、日本における日本脳炎ウイルスのルーツを探った。(以下、文中敬称略)

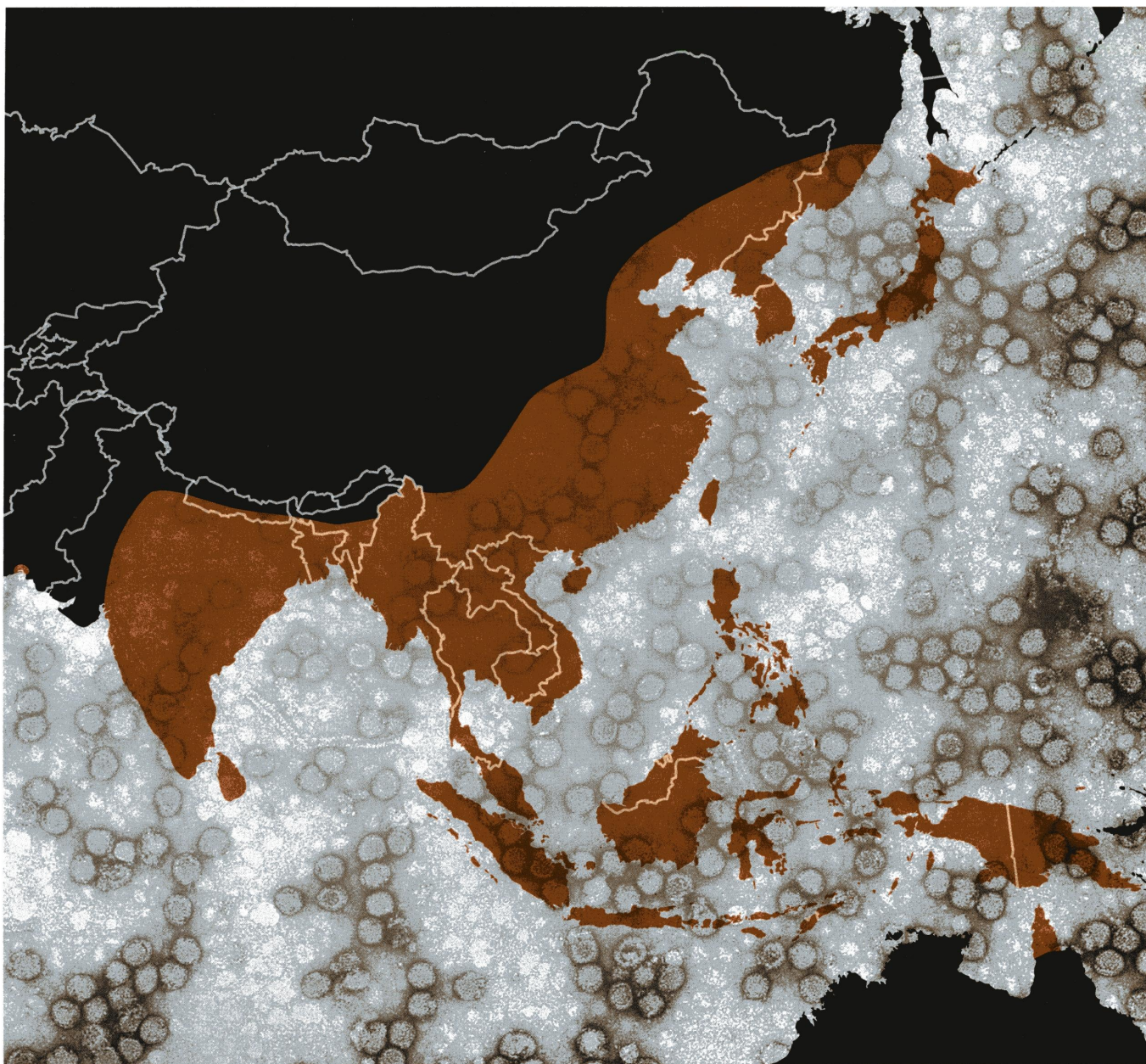
脅威は消えていない

- 日本脳炎のワクチン接種が、再開に向けて第一歩を踏み出した。
- 最近の遺伝子研究から、日本脳炎ウイルスは東南アジアからやってくることが明らかになった。感染した蚊が、上空の南西風に乗って飛ばされてくるのかもしれない。
- 東南アジアでは、日本脳炎は依然として猛威をふるっており、同じウイルスが日本の豚や蚊などの体内に潜んでいる。潜在的な脅威は消えていない。

越冬か飛来か

日本における日本脳炎ウイルスの動きには、東南アジアにはない特徴がある。夏の間に流行し、冬の間は姿を消して、春になるとまた出てくることだ。

ウイルスは人間や豚、馬など様々な動物に感染するが、動物同士が直接に感染しあうことはなく、もっぱら蚊がウイルスを運ぶ。春先、どこからか現



森田公一

アジアで広く見られる日本脳炎 日本脳炎はアジアからオセアニアの幅広い地域で見られる（赤い部分）。球形をしているのは日本脳炎ウイルス（上）。ネパールでは流行期には病院のベッドが足りなくなり、患者が廊下にまであふれてしまう（右）。

れたウイルスが豚に感染し、血中で増え始める。その血を吸った蚊もまたウイルスに感染し、ほかの豚を刺して感染を広げる。豚は感染しても病気にならず、社会の話題にもならないが、ウイルスは豚と蚊を交互に渡り歩きながら、静かに増え続ける。

ウイルスの流行域は、気温の上昇と



森田公一

ともに、桜前線のように北上する。年によって違うが、例えば5月に九州、6月に東京、8月に東北といった具合だ。九州や中国地方では、しばしば豚の80%以上が感染する（右ページの下の図を参照）。

人間も、ウイルスに感染した蚊に刺されることによって感染する。感染してもほとんどの人は何の症状も起こさないが、100～1000人に1人の割合で、脳炎を発症してしまう。豚と違って人の血中にはウイルスが少ないため、感染者を刺しても蚊が感染することはない。人間はウイルスの終着点となり、ほかの人や動物にうつすことはない。

吸血した蚊は、冬が来るまでに産卵して死に絶える。豚は感染後1週間もすると抗体の働きでウイルスを排除するので、新たなウイルスの供給が止まると、ほどなく豚の間からウイルスは消えてしまう。だが翌年の春には再び現れ、広がり始める。一体、このウイルスはどこから来たのだろうか？ 冬の間、ウイルスはどうしていたのだろうか？ このことは、日本脳炎が猛威を振っていた1960年代から大きな問題となり、多くの研究者が解明に挑んできた。

2つの仮説がある。ウイルスが動物

の体内などに潜んで冬を越し、春に出てくるという「越冬説」と、冬にはいったんなくなり、春に改めて海外からやってくるという「飛來說」だ。

越冬説の検証には、冬場にウイルスが潜んでいる場所を特定する必要がある。ウイルスを運ぶコガタアカイエカは、産卵したことがない処女蚊のみ越冬するが、吸血するのは産卵期にある蚊だけなので、ウイルスの越冬場所にはならない。感染した蚊から母子感染した可能性は残るが、冬場の蚊をいくら調べてもウイルスは出てこなかった。

1960年代から、ウイルスの越冬場所を探して、豚やイノシシ、野鳥、コウモリ、ヘビ、カエルまで様々な動物が調べられた。ウイルスが感染したことを示す抗体を持つ動物は少なからずいたが、体内で越冬していることを示す証拠は見つからなかった。

もう一方の飛來說についても、精力

的な研究が続けられた。長崎大学熱帯医学研究所の林薫（はやし・かおる）と国立予防衛生研究所（現国立感染症研究所）の朝比奈正二郎（あさひな・しょうじろう）らは、1960～70年代、何度も東シナ海の気象観測船に乗り、夜間、洋上でサーチライトを灯して、光をめがけて飛んでくる虫を捕獲した。その中にコガタアカイエカも数匹いて、「海洋飛来する事実を強く支持する所見である」と報告している。だがウイルスは分離できず、決定的な証拠にはならなかった。

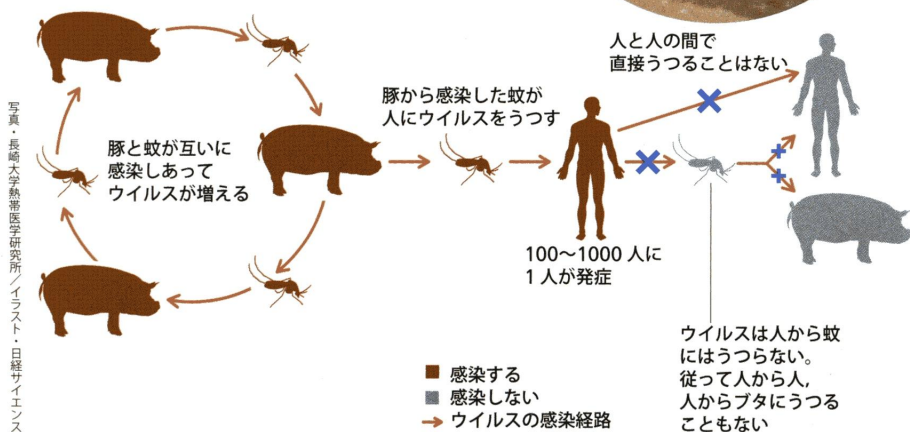
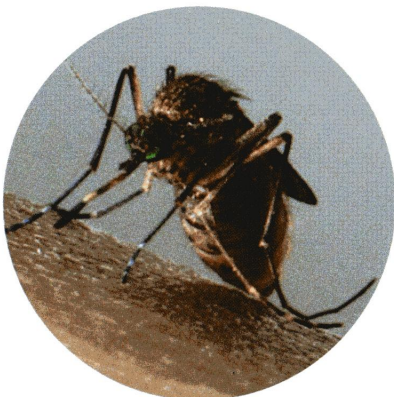
新世代ウイルスの登場

1990年代に入ると、日本脳炎ウイルスの世界に異変が起きた。最初に気づいたのは、金沢医科大学の竹上勉（たけがみ・つとむ）らのグループだ。1994年夏、竹上らは北海道大学の高島郁夫（たかしま・いくお）と共同で、石川県の豚の日本脳炎の感染状況を調べていた。ウイルスを分離し、遺伝子の解析を始めたところ、「どうも変だと感じた」という。

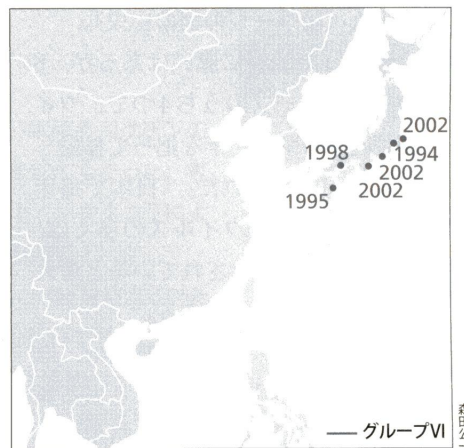
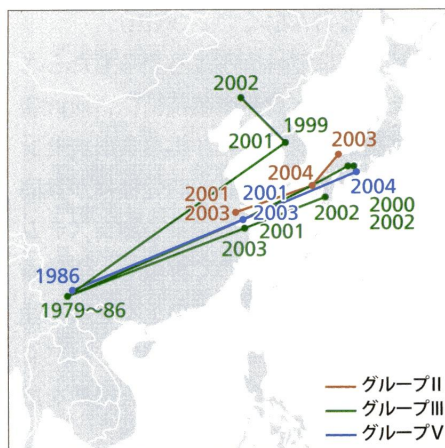
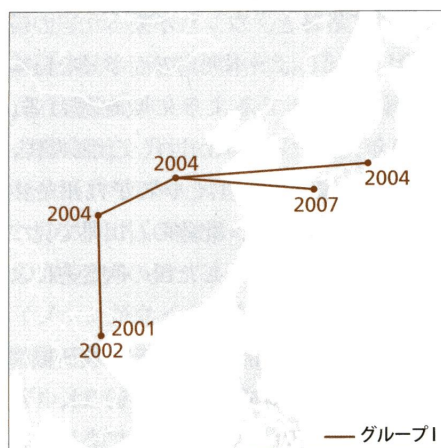
それまで日本にあったウイルスは、すべて遺伝子型が「3型」と呼ばれるタイプだった。だが見つかった遺伝子は、3型の特徴に一致しない。むしろ、その数年前にタイで見つかった「1型」ウイルスによく似ていた。

竹上は注意深く全ゲノムを解析し、やはり1型だと確信した。早速学会で報告したが、それまで日本になかったタイプだけに、反応は芳しくなかった。「研究室でのウイルスのコンタミ（紛れ込みの意味）ではないか、と言われてしまった」と竹上は苦笑する。

日本脳炎はもともと3型がアジアに広く分布し、1型はタイやマレーシアなどごく一部にしかなかった。当時は3型以外のウイルスは各地域に土着し、それぞれ独立に進化していくという「日本脳炎ウイルスの地域進化説」が定説となっており、日本で1型が見つ



日本脳炎ウイルスの感染経路 ウイルスは豚と蚊が互いに感染しあって増殖する。感染した蚊に刺されると人間も感染し、一部が脳炎を発症する。感染者が蚊にウイルスをうつすことはないで、ほかの人や豚に感染を広げることはない。日本脳炎の流行をもたらすのは感染者の増加ではなく、感染豚や感染蚊の増加なのだ。写真はウイルスを運ぶコガタアカイエカ。口の針に白い帯があるのが特徴だ。



日本脳炎ウイルスの移動 同系統のウイルスの見つかった場所と年を地図上に記入していくと、東南アジアから日本の方に移動してくるもの（左，中央）と，日本の中に定住しているもの（右）があることがわかる。飛來說と越冬説の両方を裏付ける結果だ。

かったと聞いても，すぐには信じられなかったのだろう。

だが，その後，日本各地やベトナム，上海で続々と1型のウイルスが見つかり始めた。一方で3型が減り始め，ウイルスの世代交代が起きつつあることが明らかになってきた。竹上はその後蚊に感染したウイルスを解析し続け，「1998年ごろまでは3型も取れていたが，今ではほとんどが1型に置き換わっている」という。

日本に現れた1型ウイルスは，以前から1型が存在していたタイやマレーシアからやってきた可能性が高い。森田はそれを証明できないかと考えた。70年代と違って，今は遺伝子解析という武器がある。各地域のウイルス遺伝子を比較すれば，ウイルスの源をたどることができるはずだ。

森田はベトナム国立衛生疫学研究所のガー（Phan Thi Nga）らと共同で，ベトナムの蚊と豚から分離した1型ウイルスの遺伝子を解析，日本の蚊から取ったウイルスと比較した。その結果，ベトナムで2001年と02年に分離されたウイルスが，その直後の2002年に日本で分離されたウイルスと極めてよく似ていることがわかった。ウイルスの移動を示唆する有力な証拠だ。

2005年，研究にもう1つ追い風が吹いた。新型肺炎（SARS）が発生した時に海外とうまく連携できず対策が後手に回った反省から，アジアやアフ

リカと連携して感染症研究を進める，政府の「新興・再興感染症研究拠点形成プログラム」がスタートしたのだ。この一環として，長崎大学はベトナムの衛生疫学研内に研究室を設け，本格的な共同研究に乗り出した。森田は研究室の鍋島武（なべしま・たけし）とともに，日本とベトナムの蚊や豚からウイルスを分離して遺伝子を解析した。また，これまでにアジアの各地で分離された1型ウイルスの遺伝子情報を収集。1型ウイルス270株の膨大な系統

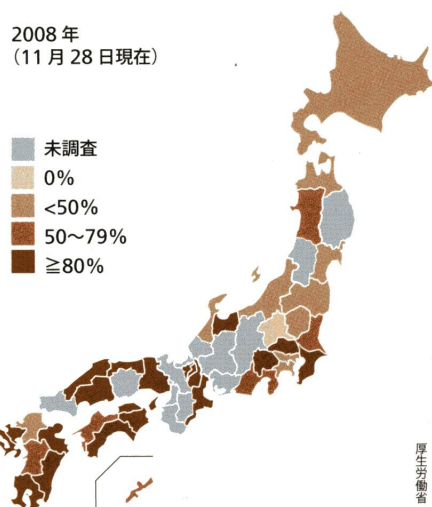
樹を作成した。

その結果，日本で分離された1型ウイルスは，8つのサブグループに分けられることがわかった。同じグループに属するウイルスは，1つのウイルスが連続的に変異して生じたものだ。グループⅠ～Ⅷのそれぞれについて，ウイルスが分離された場所と年を地図上に記入していくと，ある傾向が浮かび上がってきた。

旅するもの定住するもの

グループⅠのウイルスは，2001年にベトナム北部で最初に分離された。その後2004年に中国の河南省と四川省，そして日本の三重で見つかり，2007年には長崎でも見いだされた。このウイルスは，ベトナムから中国を経て日本に移動してきたと考えられる（上の図の左を参照）。

同様のパターンは，ほかのサブグループでも見られる。グループⅤのウイルスは1986年に中国南部の雲南省で分離され，2001年と2003年には中国東岸の上海で見つかった。翌2004年には日本の香川に到達している。グループⅢのウイルスも，1979～86年に雲南省で複数分離され，1999～2003年に上海と韓国，日本各地で見



ウイルスに感染した豚の割合 2008年 中に，養豚場で飼育されている豚の何割がウイルスに感染したかを示す。年によって変動はあるが，西高東低の傾向は変わらない。

つかった（前ページの図の中央）。

発見された地域に違いはあるが、8つのサブグループのうち4つで、ウイルスが西から東へと年を追って移動していく傾向が見られた。「日本で毎年発生している脳炎ウイルスの多くは、東南アジアから供給されていると考えられる」と森田は主張する。

一方、グループVIのウイルスは、ほかのグループと明らかに異なる振る舞いを示した。このウイルスは日本でしか見つかっておらず、しかも毎年のように現れる。東南アジアから飛来するのではなく、日本に土着していると考えられる（前ページの上の図の右）。「初期のころに日本に渡ってきた1型ウイルスが、土着して越冬するようになったのでは」と森田は推測する。

蚊が風に乘って飛来？

日本脳炎ウイルスのかかなりの部分が、東南アジアから渡ってきていることは間違いない。だが、その“乗り物”は何だろうか。

まず考えられるのは野鳥だ。日本脳炎ウイルスは野鳥に感染するし、カモやツバメなどが、東南アジアや中国と日本の間をしばしば行き交っている。だが、鳥だとすると腑に落ちない点もある。ウイルスの移動方向が常に西から東で、逆が見られないという点だ。「鳥が運ぶなら、移動が常に一方向と

いうのは考えにくい」（森田）。

ヒントは意外なところからもたらされた。農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）九州沖縄農業研究センターと日本原子力研究開発機構が共同で開発したウンカの飛来予測システムだ。ウンカは稲につく害虫で、中国南部で発生し、東シナ海の上空を吹く強い南西風に乗って日本に飛ばされてくる。その数や発生地に合った農薬を選択し、散布しておく必要があるため、全国の農協にとって、ウンカの飛来予測はとても重要な情報だ。

システムは原子力機構（当時は日本原子力研究所）がチェルノブイリ原発の事故後に開発した、大気中に放出された放射性物質の行方を気象データに基づいて予測する数値モデルがもとになっている。農研機構が、放射性物質に代えてウンカの発生地や振る舞いなどの生物学的なデータを組み込んだ。日本各地で実際に捕獲されたウンカの数と比較したところ、75～85%の高い精度で飛来を予測できた。

中国南部で朝晩発生するウンカは、南西風に乗って東シナ海を渡り、1日から1日半で九州に到着する。コガタアカイエカはウンカよりも若干大きいですが、同じように飛ばされてくる可能性はある。

森田が特に注目したのは、ウンカが到達する場所だった。過去の予測結果

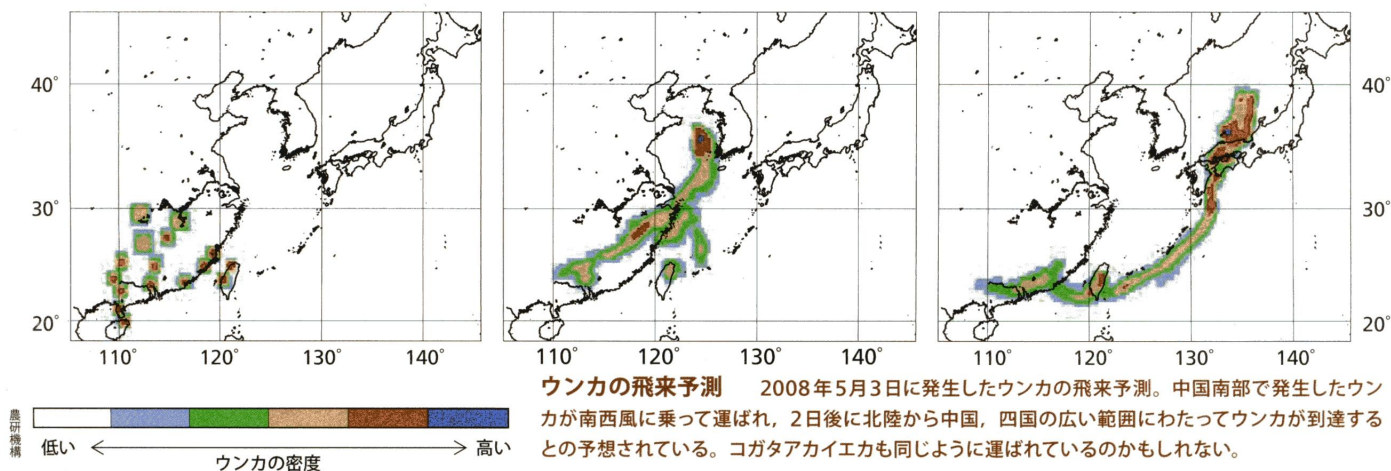
を見てみると、ウンカが乗った風の帯は、しばしば日本列島の西半分を日本海側からなでるように吹き付ける。90年代にウイルスが世代交代した際、新しく来た1型ウイルスが九州や中国・四国でなく、北陸の石川県で見つかったのは、こうした風の吹き方によるものかもしれない。

システムの開発に当たった農研機構の大塚彰（おおつか・あきら）は、「仮にコガタアカイエカについてもウンカと同じことが言えるとしたら、九州を飛び越え、先に北陸に到達することはあり得る」と指摘する。森田も「豚の多くがウイルスに感染している地域よりも先に、比較的少ない石川県で見つかったのが意外だった。だがこの予測を見ると納得できる」と話す。

ただ、感染した蚊が南西風に乗って飛来するとすれば、以前から1型が日本に来ていたとしても不思議はない。なぜそれまで存在していた3型に代えて突然1型が台頭したのか、その理由はわかっていない。

蚊がウンカのように風に乗って飛び、ウイルスを運んでくるというのは、まだ仮説の段階だ。結論は今後の研究を待たねばならないが、有力な候補であることは間違いない。

森田の研究は、東南アジアから飛来してくるウイルスだけでなく、日本に土着して越冬しているウイルスもある



ことを示している。こちらに関しても最近、新たな進展があった。昨年12月、国立感染症研究所ウイルス第一部室長の高崎智彦（たかさき・ともひこ）と昆虫医科学部の小林睦生（こばやし・むつお）が、兵庫県の野生のイノシシの血液から、ウイルスを分離したのだ。イノシシがウイルスの抗体を持つことはすでに報告されていたが、実際にウイルスを分離できたのは初めてだ。

哺乳類は一般にウイルスに感染すると抗体ができ、体内からウイルスを排除する。その攻撃を避けて、ウイルスが体内のどこかに潜伏するようなメカニズムがないと、ウイルスが越冬することはできない。

だが血中にウイルスがいたとなると、話は別だ。「ダニのような吸血する虫にウイルスが移行し、保持されるかもしれない」と高崎は言う。昆虫は抗体を作らないので、体内に入ったウイルスはしばしば消えずに残る。「東南アジアから飛来するウイルスだけでなく、日本に土着して越冬するウイルスもあると思う」（高崎）。

日本脳炎は過去の病気か

日本で発生する日本脳炎の患者数が10人を下回るようになって、10数年が経過した。今や日本脳炎は「過去の病気」とのイメージが定着している。

だが、ウイルス自体がなくなったわけではない。日本で飼育されている豚のうち、場所によっては8割以上が、毎年ウイルスに感染している。そしてそれは、東南アジアで今も毎年3万5000人～5万人の患者を発生させているウイルスなのだ。

ワクチン接種がストップしていた4年間に日本脳炎を発症した人のうち、ワクチン未接種の子供は1人だけだった。だが幼児のうちは、そもそも蚊が活動する夜間に外出する機会が少ない。今後、子供たちが抗体を持たないまま大きくなり、夜間にしばしば外出する

ワクチンは供給不足が続く

2005年5月に厚生労働省が発表した日本脳炎ワクチンの勧奨中止は、現場の医師たちにとっては寝耳に水だった。専門家委員会による検討も、事前の周知もなく、マスコミによるスクープ、続く正式通知という異例の展開をたどった。

厚生省が決断を急いだのは、当時すでに開発を終えていた新ワクチンが速やかに承認され、すぐにも移行できるとの予測があったからだ。だが予測に反して医薬品医療機器総合機構は追加のデータを求め、新ワクチンはなかなか出てこなかった。かといって、副反応の可能性を理由に接種勧奨を中止したワクチンを、そのまま再び勧奨するわけにもいかない。行政は膠着状態に陥り、ワクチン接種には長い空白が生じるようになった。

勧奨中止のきっかけとなった中学生のADEM発症例で、科学的な根拠がはっきりしないにもかかわらずワクチンとの因果関係を認めたのは、被害者救済を優先したためだ。そのことに異を唱える医師はいないが、「それを理由に接種勧奨を中止したのは間違いだった」と福岡市立西部療育センターの宮崎千明は言う。

日本脳炎ワクチンは、まず3歳と4歳の時に第1期接種をして基礎免疫を付け、9歳の時に第2期接種をするのが標準的だ。本来ワクチンを受けるはずの時期に受けられなかった子供は、この4年間で約800万人に上る。検定に時間がかかることなどから供給量には限界があり、今回出荷できたのは14万人の第1期接種分だけだ。製造元の阪大微生物病研究会は「今後は毎月20万人分ずつ出荷したい」としているが、未接種者に行き渡るまでには、かなりの時間がかかりそうだ。



ようになった時、一体何が起きるかは、まったく予測がつかない。エアコンが普及し、都市化が進んで蚊に刺される機会が格段に減った今、かつてのような大流行が起きる可能性は小さいかもしれない。しかし、だからといってワクチン接種を事実上の停止状態にして

おくのは「怖すぎる社会実験だ」と森田は指摘する。人間が抑え込んだと思っていた感染症が、環境のちょっとしたバランスの変化や、病原体の変異によって再び勢いを盛り返すことはしばしばある。日本脳炎がそうならないとは、誰も保証できないのだ。 ■



協力 森田 公一（もりた・こういち）

長崎大学熱帯医学研究所病原体解析部門教授。医学博士。長崎大学大学院医学研究科修了後、ニュージャージー医科大学歯科大学助手、世界保健機関（WHO）西太平洋地域事務局感染症対策課課長などを経て、2001年から現職。専門は熱帯性ウイルスで、特に蚊が媒介する日本脳炎、デング出血熱、西ナイル熱などの疫学と予防、診断・治療について研究している。

もっと知るには…

EVIDENCE OF FREQUENT INTRODUCTIONS OF JAPANESE ENCEPHALITIS VIRUS FROM SOUTH-EAST ASIA AND CONTINENTAL EAST ASIA TO JAPAN. T. Nabeshima and K. Morita et al. in *Journal of General Virology*, Vol. 90, pages 827-832, 2009.

ウんカの飛来予測システムと過去のデータは以下のホームページで見ることができる

<http://agri.narc.affrc.go.jp/indexj.html>

高崎らによるイノシシからのウイルス分離の報告は、国立感染症研究所の『病原微生物検出情報』

2009年6月号に掲載予定。以下で閲覧できる <http://idsc.nih.gov.jp/iasr/index-j.html>

DNAに見えた「人間の証し」

ヒトとチンパンジーのゲノムの比較から
人間だけに存在するDNA配列が明らかになってきた

K. S. ポラード (カリフォルニア大学サンフランシスコ校)

6年前、私はチンパンジー（学名 *Pan troglodytes*）のゲノムの塩基配列を解読する国際研究チームに参加する機会に飛びついた。ずっと以前から人類の起源に興味を抱いてきた生物統計学者として、私はヒトに最も系統的に近い生物とヒトのDNA配列を比べてみたいという強い願望をもっていたのだ。

ところが実際に解読が進むと、ヒトのDNAのほぼ99%はチンパンジーと全く同じという、やや期待はずれの結果が得られた。つまり、ヒトとチンパンジーが共通祖先から分かれた後の約600万年の間に变化したのは、わずか1500万文字だけで、全ヒトゲノム30億文字の1%にも満たない。

進化理論では、こうした変化の大部分は、生物としてのヒトに影響はあってもほんのわずかであると考えられている。けれども、この約1500万塩基のどこかに、ヒトをヒトたらしめる差が存在するのだ。私は、その差をぜひ明らかにしたいと考え、その後、私を含む何人かの研究者が、ヒトとチンパ

ンジーを隔てるいくつかのDNA配列を同定していった。

最初の驚き

ヒトゲノムに占める割合は小さいものの、1500万塩基は探索するには膨大だ。そこで私は探索の効率を上げるために、ヒトゲノムをスキャンして、チンパンジーとの共通祖先から分かれた後に最も大きく変化したDNA配列を見つけるコンピュータープログラムを書いた。ランダムな遺伝子突然変異の大半は、生物体にとって有益でも害でもないため（訳注：純粋な中立進化）、2つの現生種が共通祖先から分かれた後の経過時間を反映して一定の速度で蓄積していく（この変化率は「分子時計の刻み」と表現される）。

一方、ゲノムの特定領域の進化速度がこの速度よりもずっと速ければ、「正の選択」を受けたことの証拠となる。正の選択とは、生存や生殖に有用な変異であれば、後の世代に伝えられる確率が高くなることを意味する。言い換えれば、チンパンジーとヒトの系統が

分かれてから大きな変化を受けた部分こそが、種としてのヒトを創りあげた可能性の高い配列にほかならない。

数カ月間に及ぶプログラムのデバッグと最適化を終え、カリフォルニア大学サンタクルーズ校に設置された大規模なクラスター型コンピューターで計算を開始し、2004年11月、進化の過程で変化速度が速かった配列を洗い出したファイルをついに手に入れた。肩越しに画面を覗き込む指導教授のハースラー（David Haussler）とともに、リストの一番上に目をやった。そこには118塩基対の配列があった。のちに、ヒト系統における進化の速度が速いという意味で「ヒト加速領域1」（human accelerated region 1；HAR1）として知られるようになる配列だ。

同校のゲノムブラウザー（公共データベースに登録されたゲノム情報をもとに生物学的情報を盛り込んだ可視化ツール）を使ってHAR1のページを呼び出してみた。すると、HAR1の配列が、ヒト、チンパンジー、マウス、ラット、ニワトリに存在することがわかった。その時点でゲノム解読が終わっていた脊椎動物のすべてにHAR1に対応する配列があったのだ。さらに、過去に行われた大規模スクリーニング実験で、HAR1の活性がヒト脳細胞の2つの試料中で検出されていたことも判明したが、その配列を命名したり詳しく調べたりした者はいなかった。HAR1が脳内で活発に発現しており、

ヒトをチンパンジーと隔てるもの

- チンパンジーはヒトに最も近い霊長類であり、DNAの約99%が共通だ。
- チンパンジーとヒトが共通の祖先から分かれた後に大きく変化したゲノム領域を探る試みは、ヒトをヒトたらしめるDNA配列を決定するのに役立つ。
- 研究の結果から、DNAがほぼ同じであるにもかかわらず、チンパンジーとヒトがなぜこれほど違うのかという疑問に対する重要な知見も得られている。



JAMES BALOG Getty Images

かつ研究者が注目していなかった遺伝子だとわかった瞬間、ハースラー教授と私は思わず「やった！」と声をあげた。

私たちは大当たりを引いたのだ。ヒトの脳とチンパンジーの脳は、大きさや構成、複雑さなどが大きく異なる。しかし当時は、ヒトとチンパンジーの脳を隔てる特徴の基礎となる発生およ

び進化のメカニズムは、ほとんどわかっていなかった。HAR1は、ヒトの生物学におけるこの最大の謎を明らかにする可能性を秘めていた。

その後1年を費やして、新たにゲノム解読を終えた他の12種の脊椎動物を含む、さまざまな種のHAR1に対応する塩基配列を比較検討し、この配列の進化についてできる限りの情報を

1%の差 ヒトは、DNAの約99%がチンパンジーと同じであるにもかかわらず、多くの重要な点で異なる。最近の研究によって、2つの種を分けたゲノム上の部分が明らかになりつつある。

集めた。その結果、ヒトが登場するまでは、HAR1の進化は極めて緩やかだったことがわかった。ニワトリとチンパンジーのHAR1は約3億年前に分岐したが、118塩基中2塩基しか違

わない。これに対し、かなり最近になって分岐したヒトとチンパンジーでは18塩基も異なる。HAR1が数億年以上も凍結状態だったという事実は、この配列が極めて重要であることを意味する。そしてHAR1がヒトの進化の過程で突然大きな変更を受けたという事実は、ヒト系統でこの配列の機能がかなり変化したことを示唆する。

脳内におけるHAR1の機能に関す

る決定的な手がかりは2005年に得られた。私たちと共同研究していたブリュッセル自由大学のバンデルハーゲン(Pierre Vanderhaeghen)が、HAR1のDNA断片を私たちの研究室からベルギーへ持ち帰ったことがきっかけだった。バンデルハーゲンはそのDNA断片を改変して蛍光分子タグを設計し、生きている細胞中でHAR1が活性化される、すなわちDNAからRNAの

コピーが作られると、光を放つようにした。一般に遺伝子は、細胞内で発現のスイッチがオンになると、まずDNAからメッセンジャーRNAが作られる。次にこのRNAが鋳型となってタンパク質が合成される。

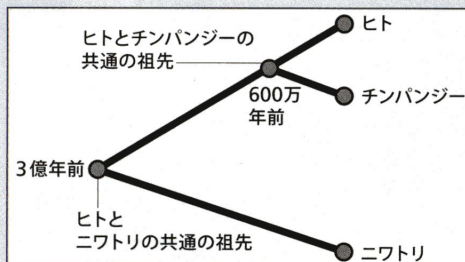
蛍光標識の結果、大脳皮質(脳の最も外側のしわのある層)の発生期におけるパターン形成とレイアウトに重要な役割を果たすニューロン(神経細胞)集団で、HAR1が活発に発現することがわかった。このニューロンに異常があると、滑脳症という死に至ることもある先天的な異常を生じる。滑脳症では、大脳皮質表面にしわができず、皮質の表面積が著しく減少する。また、このニューロンの機能不全は、成人における統合失調症の発症にもかかわっている。

HAR1は決まった時期に決まった場所で発現することで、健康な皮質の形成を促す。HAR1が精子の生成にも関与することを示唆する証拠もある。しかしHAR1が皮質の発達に具体的にどう影響しているかは謎であり、私の研究グループは現在、解明を試みている。なんとしても解き明かしたいものだ。HAR1上の塩基置換が進化上最近になって急激に増えたことが、ヒトの脳を大きく変えた可能性があるからだ。

ユニークな進化の歴史をたどってきただけでなく、HAR1はタンパク質をコードしていないという点でも特徴的だ。数十年以上にわたって分子生物学が目を向けてきたのは、細胞の基本構成単位であるタンパク質の遺伝子だった。しかしヒトゲノムプロジェクトによって、私たち自身のゲノム塩基配列が決定されたおかげで、タンパク質の遺伝情報を持っている遺伝子は、全DNAのわずか1.5%にすぎないことがわかっている。残る98.5%は「がらくたDNA」と呼ばれることもあるが、他の遺伝子に働きかけて発現のス

最も変化の激しいDNA配列は？

ヒトに固有のゲノム領域を明らかにするために、著者は、ヒトとチンパンジーが共通祖先から分かれた後に大きく変化したDNA配列を探索するコンピュータープログラムを書いた。最も変化が大きかったのは、118文字からなるヒト加速領域1(HAR1)と呼ばれる配列だ。脊椎動物の進化の過程の大半を通じてこの領域にはほとんど変化がなく、チンパンジーとニワトリでは、違いは2文字にすぎない。しかし、ヒトとチンパンジーのHAR1は18文字も異なり、HAR1がヒトにおいて新たな重要な機能を獲得したことがうかがわれる。



T	G	A	A	C	G	G	A	G	G	A	G	A	C	G	T	T	A	C
A	G	C	A	A	C	G	T	G	T	C	A	G	C	T	G	A	A	T
G	A	T	G	G	C	G	T	A	G	A	C	G	C	A	C	G	T	C
A	G	C	G	G	C	G	G	A	A	A	T	G	G	T	T	T	C	T
T	C	A	A	A	A	T	G	A	A	A	G	T	G	T	T	T	A	G
G	A	T	T	T	T	C	C	T	C	A	A	G	T	T	T	T	C	A

ヒトとチンパンジーで異なる配列

T	G	A	A	A	T	G	G	A	G	G	A	G	A	A	A	T	T	A	C
A	G	C	A	A	T	T	T	A	T	C	A	A	C	T	G	A	A	A	T
T	A	T	A	G	G	T	G	T	A	G	A	C	A	C	A	T	G	T	C
A	G	C	A	G	T	G	G	A	A	A	T	A	G	T	T	T	C	T	A
T	C	A	A	A	A	T	T	A	A	A	G	T	A	T	T	T	A	G	A
G	A	T	T	T	T	C	C	T	C	A	A	A	T	T	T	T	C	A	

チンパンジーとニワトリで異なる配列

T	G	A	A	A	T	G	G	A	G	G	A	G	A	A	A	T	T	A	C
A	G	C	A	A	T	T	T	A	T	C	A	A	C	T	G	A	A	A	T
T	A	T	A	G	G	T	G	T	A	G	A	C	A	C	A	T	G	T	C
A	G	C	A	G	T	A	G	A	A	A	C	A	G	T	T	T	C	T	A
T	C	A	A	A	A	T	T	A	A	A	G	T	A	T	T	T	A	G	A
G	A	T	T	T	T	C	C	T	C	A	A	A	T	T	T	T	C	A	

イッチを入れたり切ったりする調節配列や、タンパク質に翻訳されないRNAをコードする遺伝子、さらにはいまだ機能が不明な数多くのDNAからなる。

HAR1の配列のパターンからは、HAR1がRNAをコードしていることが推定された。これは2006年に、当時カリフォルニア大学サンタクルーズ校に在籍していたサラマ (Sofie Salama)、イーゲル (Haller Igel)、アレス (Manuel Ares) によって確認された。今日では、ヒトのHAR1は、2つのRNA遺伝子に重なって存在することがわかっている。2つの遺伝子に共有されているHAR1配列は、既存のRNA遺伝子の6タイプとは全く異なるRNAの折りたたみ構造を生じる。RNA遺伝子はそれが作り出すRNAの細胞内での構造と機能によって1000種類以上のファミリーがあるが、既存のRNA遺伝子はすべて6タイプに分類されていた。HAR1はまた正の選択を受けたと推定されるRNAコード配列の最初の例でもある。

この118塩基のヒトゲノム配列について、これまで誰一人として注目してこなかったのは意外なことのように思われるかもしれない。しかし、ゲノム全体を容易に比較可能な手法が存在しなかった状況では、HAR1がただのがらくたDNAではないことを知る手立てはなかった。

言語とDNA

ヒトとチンパンジーはほぼ同じゲノムをもつにもかかわらず、なぜこうも違うのか。他の生物種のゲノム比較データが、この疑問に対するもうひとつの決定的なカギを与えてくれる。最近数年間で、大半は細菌とはいえ、数千種以上のゲノム配列が決定されている。その結果、重要なのはDNAの置換の「数」ではなく「位置」であることがわかってきた。つまり、新たな種が創ら

れるために多くの変化は必要ない。チンパンジーとの共通祖先からヒトが進化したのは、分子時計の針の動きが全体的に速まったからではない。進化のカギは、塩基配列が置き換わると生体機能に重要な影響を及ぼすような部位で、急速な変化が生じたことにある。

HAR1はまさにそのような配列だ。同様の存在にFOXP2と呼ばれる遺伝子がある。FOXP2は発話にかかわることが知られており、私が発見した一連のHAR配列とは別の加速領域を含んでいる。FOXP2遺伝子が発話に関連することは、英国オックスフォード大学のグループによって2001年に発

重要なのはDNAの置換の「数」ではなく「位置」であることがわかってきた

見された。この遺伝子に変異があると、言語を処理する認知能力に異常はなくとも、発話に必要な細かくて速い顔面の動きができない。典型的なヒトFOXP2の配列には、チンパンジーの同じ配列とは何カ所かの違いがある。具体的には、2塩基の置換がタンパク質を変化させ、残りの数カ所の置換は、人体でFOXP2タンパク質がいつ、どこで、どのようにして使われるかを変化させているのかもしれない。

最近の研究で、発話を可能とするタイプのFOXP2がヒト科の系統に現れた時期に光があてられた。2007年に、ドイツのライプツヒにあるマックス・プランク進化人類学研究所の研究グループは、ネアンデルタール人の化石から抽出したDNAからFOXP2の配列を決定した。

この絶滅した人類は現生人類と同じFOXP2の塩基配列をもっていたので、おそらく私たちと同じように言葉を発

音していたのかもしれない。ネアンデルタール人と現生人類が系統樹上で分かれた時期から、新しいタイプのFOXP2は少なくとも50万年前に出現していたと推定されている。とはいえ、ヒトの話す言語と、他の生物種の音声コミュニケーションの違いの多くは、身体部位の動きというよりも認知能力によるものであり、認知能力は脳のサイズと相関が強い。一般に霊長類は、身体の大きさから推定されるよりも大きな脳をもつ。しかし、ヒトの脳容積は、チンパンジーとヒトの共通祖先から3倍以上になっており、この急激な増大の要因については、遺伝学者による解明が始まったばかりだ。

ヒトや動物の脳の大きさと関連する遺伝子として最も詳しく研究されているのがASPMである。脳の大きさが最大で70%も小さくなる小頭症の人々を対象とした遺伝学的研究から、ASPMと3つの遺伝子(MCPHI, CDK5RAP2, CENPJ)が、脳の大きさの調節に重要な役割を果たすことが報告されている。また最近では、シカゴ大学とミシガン大学アナーバー校の研究チームによって、ASPMが霊長類の進化の過程で数回の大規模な変化を起こしたことがわかった。つまり、この変化が正の選択であることを示すパターンだ。それら大変化の少なくとも1回は、チンパンジーと進化的に分かれた後のヒト系統で生じており、ヒトの大きな脳の進化に寄与した可能性がある。

ゲノム上の他の部位は、ヒトの脳の形態形成にそれほど直接的な影響は及ぼしていないようだ。HAR1が同定されたコンピュータースクリーンでは、他に201種類のヒト系統での加速領域の存在が確認されたが、その大半はタンパク質をコードしておらず、RNAさえ発現していない配列もある。英国のウェルカムトラスト・サンガー研究所で実施された同様の研究でも、私たちが発見したのと同じHARの多く

人間特有のDNA

ヒトに固有のDNAを見つける試みによって、ヒトとチンパンジーで異なる配列が確認されている。このような配列の一部を、その機能とともに紹介する。

HAR1

脳で強く発現。ヒトで特に大きい大脳皮質の発生に必要と考えられている。精子の生成への関与も指摘されている。

FOXP2

現生人類の発話を可能にし、言語によるコミュニケーションを促進させた。

AMY1

デンプンの消化を促進。初期のヒトが新たな食物を摂取できるようにした可能性がある。

ASPM

脳の大きさを制御。人類進化の過程で脳の大きさは3倍以上になった。

LCT

成人でも乳糖を消化できる。家畜の乳を食事に加えることが可能となった。

HAR2

胎児発生期に手関節と親指における遺伝子活性を誘導。手を器用に操ることで、複雑な道具の作製、使用が可能になった。

が検出された。これらの配列は、近傍の遺伝子の発現のタイミングを決める調節配列ではないかとみられる。

驚くべきことに、ゲノム上でHARの近くに位置する遺伝子の半数以上は、脳の発生や機能に関与する遺伝子だ。そしてFOXP2と同様に、これらの遺伝子産物の多くは他の遺伝子の発現を調節している。したがって、HARがゲノムのほんの一片であっても、こうした領域の変化は遺伝子のネットワーク全体の活性に影響を及ぼすことで、ヒトの脳を大きく変えてきた可能性がある。

脳以外にも

ヒトの精巧な脳の進化の謎に迫る遺伝学研究に加え、人間特有の身体的特徴がどのように生まれるかも明らかになりつつある。遺伝子調節領域であり、私が出たリストで2番目にランクされた加速領域HAR2が、そのよい例だ。2008年に米国立ローレンス・バークレー研究所の研究グループは、ヒトのHAR2（別名HACNS1）と、ヒト以外の霊長類でそれに対応する遺伝子（訳注：順系相同遺伝子）との間に見られる塩基の違いに注目した。そして、ヒトのHAR2は胎児発達期に手の関節と親指における遺伝子活性を誘導できるのに対して、他の霊長類に見られる祖先型のHAR2では誘導できないことを明らかにした。この結果は極めて注目される。なぜなら、ヒトの手の形態が、複雑な道具の製作や使用に必要な器用な動きを可能とするように変化してきたという学説を支持するからだ。

身体の形状に見られる現在進行中の変化のほか、私たちの祖先は、環境への適応を促したり、新たな環境への移動を可能にする行動や生理上の変化も受けてきた。例えば、人類は100万年以上前に火を使えるようになり、約1万年前には農業革命が起きたことで、

MELISSA THOMAS

デンプンに富む食料が容易に手に入るようになった。しかし、文化面での変化だけでは、高カロリーの食品を利用するには十分ではなく、私たちの祖先は、そうした変化に遺伝的にも適応しなければならなかったはずだ。

デンプンの消化に関与する酵素、唾液アミラーゼをコードする遺伝子AMY1に生じた変化は、よく知られる適応のひとつだ。哺乳類のゲノム上にはこの遺伝子がいくつも存在し、そのコピー数は種によって異なり、ヒトの場合は個人差も大きい。しかし全体として見ると、他の霊長類に比べてヒトのAMY1のコピー数は並はずれて多い。2007年にアリゾナ州立大学の遺伝学者たちは、AMY1のコピー数が多い人は、唾液中のアミラーゼの量が多く、このため、より多くのデンプンを消化できることを示した。したがって、AMY1の進化には、遺伝子のコピー数と、そのDNA配列の特異的な変化の両方が寄与してきたと考えられる。

食物に対する適応の別の有名な例が、哺乳類が乳糖（ラクトース）を消化する際に用いる酵素ラクターゼをコードする遺伝子（LCT）である。多くの種では、体内で乳糖を分解できるのは授乳期の乳児だけだ。しかし、約9000年前という進化の歴史ではつい最近にヒトゲノム上に生じた変化によって、成人でも乳糖を消化可能とするLCTが出現した。改変型のLCTは、ヨーロッパとアフリカの集団で独立に進化し、このタイプのLCTを持つ人たちは家畜の乳を消化できるようになった。LCT遺伝子の型が古く、家畜の乳を飲むとお腹がゴロゴロするようなアジア人やラテンアメリカ人に比べて、古代の牧畜民の子孫には成人後も乳糖を消化できる人が多い。

ヒトで進化が進行中の遺伝子はLCTだけではない。チンパンジーのゲノム解読計画によって、現生人類の

系統では新しい型へと変異してきた15個の領域が発見された。これらの遺伝子の古い型は、人間とチンパンジーの共通祖先では全く正常なもので、今日の他の哺乳類でも問題なく機能しているが、現生人類では、この古い型の遺伝子はアルツハイマー病やがんなどの病気に関連している。このような疾患の一部は、ヒトに特有の病気であるか、または他の霊長類に比べるとヒトで発症する率が高い病気だ。これらの遺伝子の機能に関する研究は進行中であり、なぜ祖先型遺伝子が今日の人類には有害に作用するようになったのかが探られている。こうした研究は、生命にかかわるこれらの疾患を発症する可能性の高い患者の見極めに役立ち、予防にも役立つことが期待される。さらには、新たな治療法の発見と開発にも弾みがつくと考えられる。

試行錯誤の進化

遺伝子を後の世代に伝えられるように、病気に打ち勝つ能力を獲得する——これはすべての生物種と同様、ヒトの進化史の中でも常に繰り返されてきた出来事だ。こうした闘いが最も明瞭に見て取れるのが免疫系で、正の選択を受けた遺伝子候補をゲノムから探した結果、上位に来るのは免疫に関連する遺伝子が多い。進化が免疫関連のさまざまな遺伝子を改変してきたことは、ある意味で当然だろう。抗生物質もワクチンもない時代には、個体が遺伝子を子孫に伝えるのを阻む最大の障害は、子をもうける年齢を終える前に襲いかかる致死的な感染症だったと考えられる。免疫系が進化を速めると、病原体は病原体でこの防御システムに適応して常に進化を続け、宿主と病原体の間で“進化の軍拡競争”が展開される。

こうした闘いの記録は、私たちのDNA上に刻まれている。その好例は、遺伝物質をヒトのゲノムに潜り込ませることで増殖するHIV（ヒト免疫不

岩波科学ライブラリー

B6判・並製カバー

〈生きもの〉オールカラー版

159 フジツボ

魅惑の足まねき

倉谷うらら

泳ぎ、歩き、慎ましく脱ぐ。バルチック艦隊と因縁があり、歯医者も注目？ 図鑑・観察ガイド・変態パラパラ付き。
定価1575円



既刊

〈生きもの〉オールカラー版

161 ハダカデバネズミ

—女王・兵隊・ふとん係—

吉田重人・岡ノ谷一夫

動物園で人気急上昇！
裸なのにもワケがある。
定価1575円



© べつやく れい

158 環境をく感じる

—生物センサーの進化—

郷 康広・蛸田葉子 定価1260円

157 猿橋勝子という生き方

米沢富美子 定価1260円

156 イメージ脳

乾 敏郎 定価1260円

155 新版 再現！巨大隕石衝突

6500万年前の謎を解く
松井孝典 定価1260円

切っても切っても プラナリア 新装版

阿形清和文／土橋とし子 絵

驚くべき再生能力をもつ小さな生物。採集・飼育ガイドから簡単な実験方法までイラスト入りで紹介。好評書の新サイズ版。
B5判変型・上製・48頁 定価1890円

ヒトと動物の関係学 全4巻(完結)

【編集】

林 良博・森 裕司・秋篠宮文仁・池谷和信・奥野卓司
動物中心の生命科学や人間中心の志向ではなく、ヒトと動物の関係性を軸に、新たな学際的な挑戦を始める。

1 動物観と表象

奥野卓司 編著
秋篠宮文仁 監修

2 家畜の文化

秋篠宮文仁 編著
林 良博 監修

3 ペットと社会

森 裕司 編著
奥野卓司 監修

4 野生と環境

池谷和信 編著
林 良博 監修

A5判・並製カバー 定価各3045円



岩波書店

東京都千代田区一ツ橋2-5-5
〔定価は消費税5%込みです〕

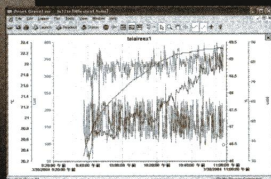
http://www.iwanami.co.jp/

<資料請求番号49>

温度・湿度・照度・電圧・水温・CO₂・ドア開閉・モーター on/off 等のデータ収集に最適

高信頼・小型 データロガー

100万台の実績を誇る米国オンセット社製

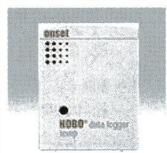


U9シリーズ



- モーター on/off 対応
- 照明 on/off 対応
- 状態変化発生日時記録

U10シリーズ



- 温度・湿度対応
- 屋内用低価格

ペンダントロガー



- 温度・照度・イベント対応
- 超小型・完全防水型

ティドビットV2



- 気温・水温対応
- 300m水深耐圧 完全防水型

CO₂モニター



- ポータブル型CO₂計測器 (0~10,000ppm)
- データロガーに接続記録可

ウエザーステーション



- 各種気象データ対応
- 選択自由なセンサー 組合わせ

使用例 空調、省エネ、ヒートアイランド、居住環境、生態、農業気象等の研究調査

日本総代理店

パシコ貿易株式会社

〒113-0021 東京都文京区本駒込2丁目10番3号
ウエスト・ワンビル

TEL:03(3946)5621 FAX:03(3946)5628

URL <http://www.pacico.co.jp>

E-mail sales@pacico.co.jp

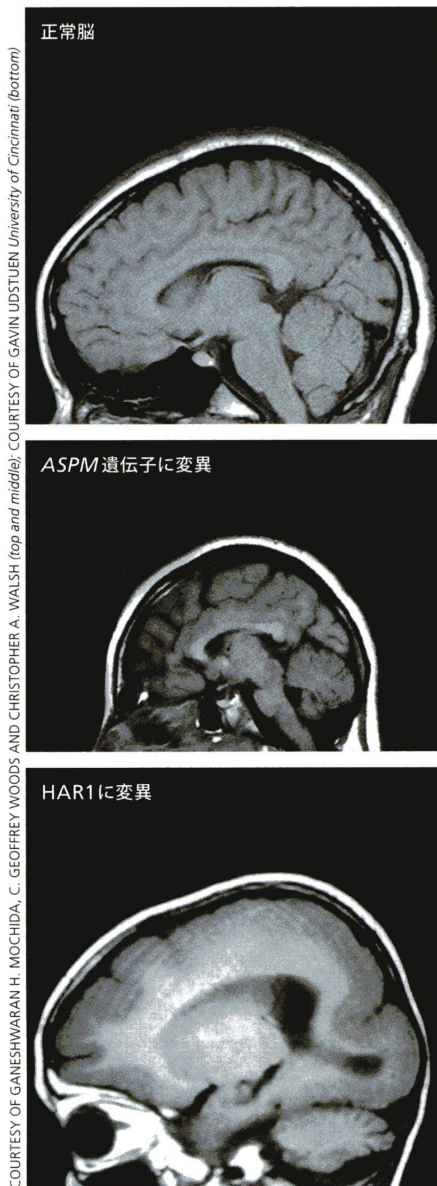
全ウイルス)のようなレトロウイルスだ。ヒトゲノム上のあちこちには、レトロウイルスゲノムの短いコピーが散らばっており、その多くは数百万年前に病気を引き起こしたが、今日では流行していないウイルスに由来する。これらの配列は、時間の経過とともにランダムな変異を蓄積していくため、ヒトゲノム内のウイルス由来のコピーは似通ってはいても完全に同一ということはない。これらのコピーの多様性の程度を調べて、分子時計の技法を適用すれば、当初のレトロウイルス感染の時期を推定できる。古代の感染の傷あとは、進化しつづけるレトロウイルス

と闘うべく適応を重ねてきた宿主免疫系の遺伝子上にも見つかる。

そのような大昔のウイルスの一例が PtERV1 だ。現生人類では、PtERV1 や関連レトロウイルスの複製を TRIM5 α と呼ばれるタンパク質が防いでいる。遺伝学的な証拠から、PtERV1 の大流行が約 400 万年前のアフリカにいたチンパンジー、ゴリラ、ヒトの祖先たちを襲ったことが推定される。それぞれの霊長類が PtERV1 に対してどう反応してきたかを明らかにするために、フレッド・ハッチンソンがん研究センター (シアトル) の研究グループは 2007 年に、チンパンジーゲノムに見られるさまざまな変異 PtERV1 コピーをもとに当初のレトロウイルスの復元に成功した。

そしてヒト型と大型類人猿型の TRIM5 α 遺伝子が、復元 PtERV1 ウイルスの活性をどのように抑えるかを実験で調べた。その結果、ヒトの TRIM5 α に存在する 1 カ所の変化によって、私たちの祖先は他の霊長類より効果的に PtERV1 感染と闘えた可能性があることが判明した (ヒトの TRIM5 α に見られる他の変化は、近縁レトロウイルスとの闘いに対応して変化したと考えられている)。他の霊長類の TRIM5 α には独自の一群の変化が見つかり、これは彼らの祖先がレトロウイルスとの闘いに祖先が勝利してきたことの痕跡だろう。

しかし、1 種類のレトロウイルスを抑え込んだからといって、他のウイル



COURTESY OF GANESHWARAN H. MOCHIDA, C. GEOFFREY WOODS AND CHRISTOPHER A. WALSH (top and middle); COURTESY OF GANESHWARAN H. MOCHIDA, C. GEOFFREY WOODS AND CHRISTOPHER A. WALSH (bottom)

脳の形を決める遺伝子 ゲノム上の特定の配列の変化が脳に大きな作用を及ぼす。例えば ASPM 遺伝子の変異は、脳の大きさを正常脳 (上段) と比較して顕著に小さくする (中段) ことから、この遺伝子が、ヒトの大きな脳の進化に重要な役割を果たしていることがわかる。一方、脳の発生中に HAR1 が強く発現するニューロンの機能が損なわれると、大脳皮質が適切に折りたたまれない重度の障害を来す場合がある (下段) ことから、HAR1 が正常な皮質の形成に不可欠なことがわかる。

スとの闘いにも勝ち続けることは必ずしも保証されない。ヒトのTRIM5αに生じた変化は、PtERV1との闘いでは有効だったかもしれないが、HIVとの闘いには無力である。この事実は、HIV感染がヒトではエイズの発症につながるものの、ヒト以外の霊長類では発症しないことの説明になる。進化の過程は、一步進んで二歩戻るようなものだ。科学の研究も時に同じような道のりを歩む。ヒトの形質の遺伝的背景を説明する有望な候補はいくつか見つかっているが、たいていの場合、こうした配列の機能の全貌はわからない。特に、タンパク質をコードしていないHAR1やHAR2などのDNA領域に関する理解はいまだ十分ではない。

迅速に進化するヒト固有の配列領域は、今後の研究の方向性を示している。ヒトをヒトたらしめる要因は何かというストーリーの基調はおそらく、細胞の構成要素であるタンパク質に生じた変化ではなく、進化によって、体内の多様な遺伝子の発現時期や部位が変化してきた過程へと推移していくのだろう。世界中の何千もの研究室によって

進行中の実験やコンピューターによる研究は、タンパク質をコードしていないヒトゲノム上の98.5%の領域が果たす役割の解明に迫りつつある。以前は「がらくた」と見られていた領域は、日に日に重要になっている。

(翻訳協力：小畑史哉)

監修者ノート

この総説は、人間を人間たらしめている遺伝子の変化がほとんどすべて正の自然選択によるものだという前提に立っているようだが、自然選択の結果ではない中立進化によるものも存在する。たとえば、人間の系統だけでミオシン重鎖16番遺伝子が壊れて偽遺伝子となっているが、これは中立進化の結果、下あごを動かす頬の筋肉が脆弱になったのだと推測されている。

監修 斎藤成也(さいとう・なるや)

国立遺伝学研究所集団遺伝研究部門教授。総合研究大学院大学教授、東京大学大学院理学系研究科教授を兼任。専門は人類進化を中心とするゲノム進化学。

COURTESY OF MICHAEL MCCOLL



著者 Katherine S. Pollard

カリフォルニア大学サンフランシスコ校の生物統計学者。2003年にカリフォルニア大学バークレー校でPh. D.を取得後、同校でポスドク研究を行う。カリフォルニア大学サンタクルーズ校で比較ゲノミクス研究を開始し、チンパンジーゲノムの配列解読プロジェクトに参加。その後、この配列をもとに、ヒトゲノム上で最も速く進化してきた領域を同定した。2008年にスローン研究奨励金(コンピューター・進化分子生物学部門)を得る。人体内に生息する微生物の進化に関する研究を最近始めた。

原題名

What Makes Us Human? (SCIENTIFIC AMERICAN May 2009)

もっと知るには...

MAPPING HUMAN HISTORY: DISCOVERING THE PAST THROUGH OUR GENES. Steve Olson. Houghton Mifflin, 2002.

THE ANCESTOR'S TALE: A PILGRIMAGE TO THE DAWN OF EVOLUTION. Richard Dawkins. Houghton Mifflin, 2004. (邦訳は『祖先の物語 ドーキンスの生命史』(上・下) リチャード・ドーキンス 著、垂水雄二 訳、小学館、2006年)

INITIAL SEQUENCE OF THE CHIMPANZEE GENOME AND COMPARISON WITH THE HUMAN GENOME. The Chimpanzee Sequencing and Analysis Consortium in Nature, Vol. 437, pages 69-87; September 1, 2005.

カリフォルニア大学サンタクルーズ校のゲノムバイオインフォマティクスのサイト
http://genome.ucsc.edu

よくわかる分子生物学・細胞生物学実験

原理&実験の組み立て方

佐々木 博己・編著
河府 和義・檀上 穂穂／
青柳 一彦・著 (2色刷)
B5・206頁
定価3,570円(税込)
複雑な分子生物学の実験手法が豊富な図版で、原理と流れがよくわかる! 100を超す項目と原理を紹介し、バイオ実験初心者でも実験の全貌をスムーズに理解できます。ISBN 978-4-06-153874-0

よくわかる
分子生物学・
細胞生物学
実験

新刊

単位が取れる解析力学ノート

橋元 淳一郎・著

A5・175頁
定価2,520円(税込)

難しい解析力学も、橋元流なら楽々! 「物理はイメージだ!」でおなじみの人気予備校講師・橋元淳一郎先生が、解析力学をマスターする秘訣を伝授。満足度120%の最高・最強の入門書登場!

単位が取れる
解析力学
ノート
橋元淳一郎

新刊

ISBN 978-4-06-154475-8

ゼロから学ぶ解析力学

西野 友年・著

A5・224頁
定価2,625円(税込)

ラグランジアンとハミルトンの意味がよくわかる。数式だらけでよくわからない解析力学も、意味がわかれば面白い。初学者向け、丁寧に説く基礎の基礎。物理の本質は解析力学にあり!

ゼロから学ぶ
解析力学
西野友年

新刊

ISBN 978-4-06-154684-4

理工系学生が学ぶべき応用数学の集大成!

マックオーリ 初歩から学ぶ数学大全

ドナルド・A・マックオーリ・著 入江 克/入江 美代子・訳

1. 微分積分

B5・239頁
定価2,940円(税込)

微分積分の初歩から様々な特殊関数まで、豊富な図と演習問題を使って解説する。応用・実用を重視した、理工系学生のための新しい微分積分教科書。

微分積分
マックオーリ

新刊

ISBN 978-4-06-156201-1

2. 線形代数

B5・192頁・定価2,625円(税込)

近刊

ISBN 978-4-06-156202-8

Excelで簡単統計

データ入力一発解答

CD-ROM付き

Excel 2007対応版

小椋 将弘・著 ISBN 978-4-06-155783-3
A5・230頁・価格3,675円(税込)

新刊

よくある質問 NMRスペクトルの読み方

福士 江里・著 ISBN 978-4-06-280304-5
A5・190頁・定価2,625円(税込)

新刊

講談社

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

<資料請求番号51>

惑星の顔を決める大気流出

地球の大気は少しずつ宇宙空間へ漏れ出している

私たちの惑星、地球も金星のようにになってしまうのだろうか？

D. C. キャトリング (ワシントン大学) / K. J. ザーンレ (NASA エイムズ研究所)

惑星大気の多様性は、太陽系の最も顕著な特徴の1つだ。金星は地球とほぼ同じ大きさ・質量だが、厚い二酸化炭素大気に覆われており、その表面温度は460℃に達する（金星の大気圧は非常に大きく、地球上の水深1000mの地点でかかる水圧に等しい）。木星の大型衛星カリストと土星の大型衛星タイタンは同程度の質量だが、タイタンには地球よりも厚い窒素大気があるのに対し、カリストには大気がない。

このような極端な違いはどうして生じたのだろうか？ その答えがわかれば、なぜ地球だけが他の惑星と異なって生命で満ちあふれているのかを知る手がかりになるだろう。大気がどのように進化してきたかを知ることが、太陽系外で生命を育む可能性がある惑星を特定する上でも欠かせない。

惑星はさまざまなプロセスで大気を獲得する。惑星内部からのガスの噴き出しや惑星に衝突してきた彗星や小惑

星からのガス成分の供給、惑星自身の重力による星間ガスの捕獲などだ。一方で、惑星科学者たちは大気の散逸もまた重要な役割を果たしていると考え始めている。地球の大気は岩石と同じように永続的なものと考えられがちだが、実際には宇宙空間へ少しずつ漏れ出している。

現在、地球大気の宇宙空間への散逸速度は極めて小さく、最も軽い気体である水素やヘリウムでもそれぞれ1秒間に3kg、50gほどだ。しかし、地質学的タイムスケールでは大きな影響を与えうる。また、かつての散逸速度は今よりもずっと大きかっただろう。フランクリン (Benjamin Franklin) の言葉を借りれば「ほんの少しの水漏れでさえ、大きな船を沈める」のだ。

現在観測されている地球型惑星や巨大ガス惑星の衛星の大気は、廃墟と化した中世の城、つまり長い間略奪に遭い、朽ち果てた財宝に似ている。より

小さい天体の大気は、防御の弱い、極めてろい粗末な要塞のようだ。

大気散逸の重要性が認識されたことで、私たちの太陽系観は変わった。科学者は数十年にわたり、なぜ火星の大気がこれほど薄いのかを考えてきた。しかし現在の疑問はむしろ「なぜ火星に大気が残っているのか」だ。

他にもさまざまな疑問がある。タイタンとカリストの違いは、タイタンが大気成分を多く含んだ物質から生まれたというより、カリストが大気を失ったことによるのか？ かつてのタイタンの大気は現在より厚かったのだろうか？ 金星はどのようにして窒素と二酸化炭素を保持したまま、すっかり水を失ったのだろうか？ 水素の散逸は地球上で複雑な生命が進化するきっかけとなったのだろうか？ いつの日か地球も金星のようにになってしまうのだろうか？

暖められて逃げ出す

宇宙船が惑星の重力を振り切るには、最低限、脱出速度に達することが必要だ。同様に、原子や分子が惑星から逃げるにも、脱出速度に達しなければならない。大気が散逸するプロセスとして次の3つが考えられる。気体が地球にとどまれないほど高温に加熱される「熱的散逸」。化学反応や荷電粒子との反応によってエネルギーを得た原子や分子が地球から放り出される「非熱的散逸」。そして「小惑星や彗星の衝突」

大気散逸で太陽系の謎を解く

- 地球など惑星の大気を構成している気体は、少しずつ宇宙空間へと失われている。高温のガス、なかでも軽いものは、徐々に散逸する。化学反応や粒子間の衝突は原子や分子を宇宙へとはじき出す。小惑星や彗星が衝突すると、大気のかたまりが吹き飛ばされる。
- こうした大気の散逸によって太陽系のさまざまな謎が説明できる。例えば、火星が赤いのは、水蒸気が水素と酸素に分解し、その水素が逃げ出すことで、余った酸素が岩石を酸化したからだ。金星では同様のプロセスによって二酸化炭素の厚い大気が形成された。皮肉なことに金星の厚い大気は気体が失われた結果なのだ。

過去 (30 億年前)

現在

未来 (30 億年後)

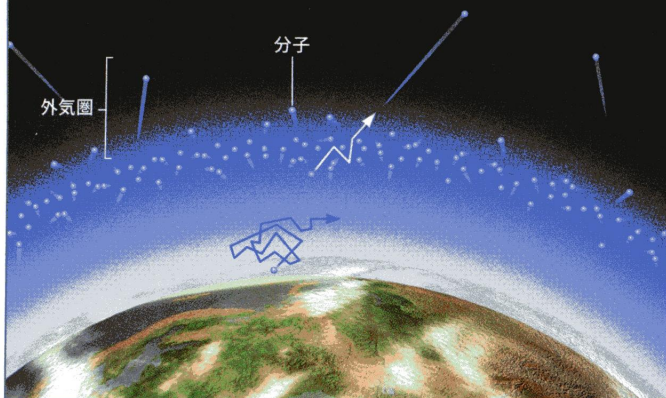
ALFRED T. KAMAJIAN

地球の過去・現在・未来 気体、特に水素の散逸は、地球を大きく変えてきた。また大気中に酸素が蓄積した一因でもある。将来、水素の散逸によって地球は干からび、気候を安定化させている地質学的なサイクルが止まる。極域にのみ生命がcaろうじて存続できるような厳しい環境だ。

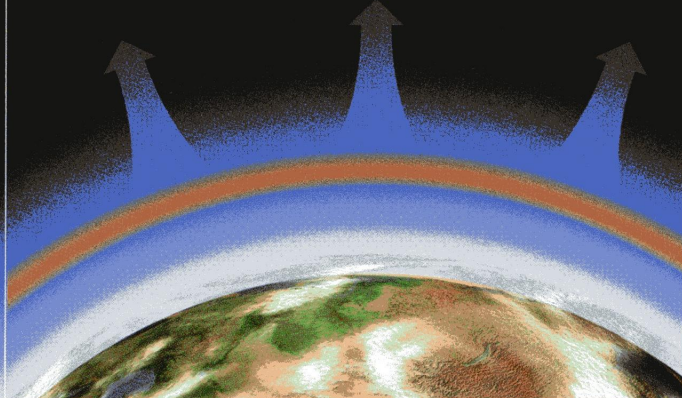
散逸メカニズム① 熱的散逸

大気を散逸させる主要因の1つは太陽光による加熱だ。加熱による大気散逸プロセスには2種類ある。

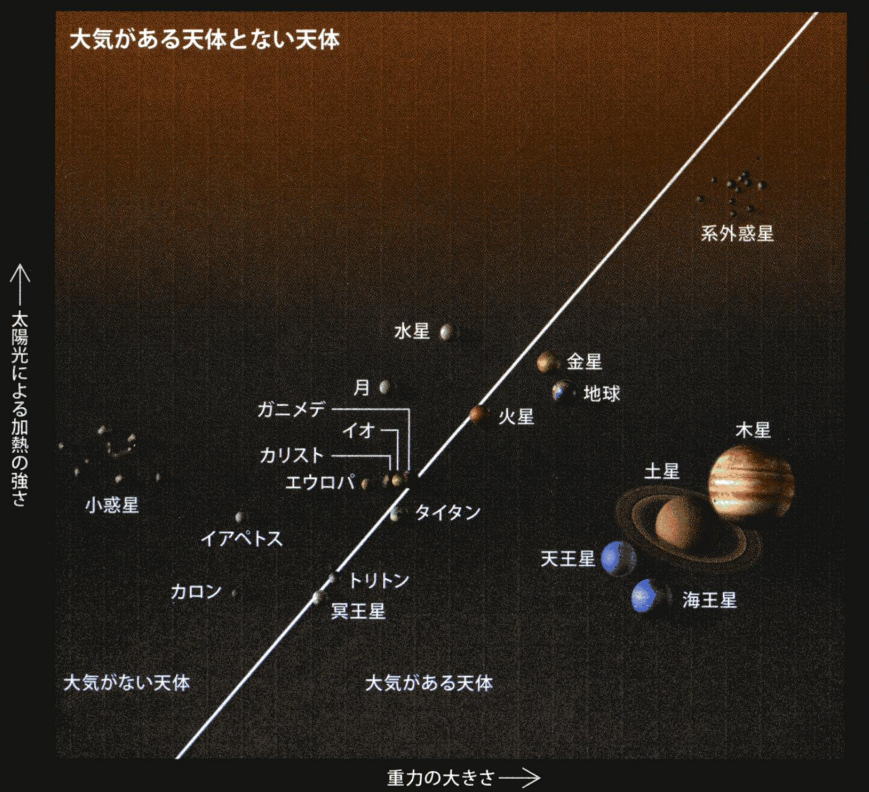
分子が1個ずつ漏れ出す 大気の最上層部、外気圏では大気が非常に希薄なため、高速で運動する原子や分子は妨げられることなく宇宙空間へ逃げる。このプロセスはジーンズエスケープとして知られ、地球からの水素散逸の大半はこのプロセスによるものだ。



加熱され、まとまって流出 太陽光によって加熱された大気は上昇、加速し、脱出速度に達する。このプロセスはハイドロダイナミックエスケープとして知られ、特に初期の地球や金星で顕著だったプロセスだ。金星はこのプロセスによって現在のような姿になったのだろう。



大気がある天体とない天体



大気の有無を決める要因 惑星や衛星のうち、どのような天体が大気があり、どのような天体が大気がないかを整理すると、熱的散逸が起きている証拠が得られる。決定的な要因は、天体の重力の大きさ(グラフ横軸)に対する太陽光による加熱の強さ(縦軸)だと考えられる。大気がない天体では、加熱が強く、重力が弱い(直線の左側)。一方、大気がある天体では、加熱が弱く、重力が強い(直線の右側)。

され、その大気ははぎ取られるだろう(大気は惑星の質量のほんの一部でしかない)。

太陽系には大気がない天体がそここにあり、一般に熱的散逸がその原因と考えられている。大気がない天体では、太陽光による加熱が重力によって決まるある閾値を超えている(左図を参照)。

熱的散逸には2種類ある。1つめは大気の上端から原子や分子が文字通り逃げ出すもので、この現象は20世紀初頭にそれを記した英国の天文学者ジーンズ (James Jeans) にちなんで「ジーンズエスケープ」と呼ばれている。低い高度では気体粒子どうしが頻繁に衝突するので、粒子はある領域に閉じこめられている。しかし、外気圏界面(地球では高度約500km)より高い高度では、大気が希薄なため気体粒子ど

で大気が吹き飛ばされるプロセスだ。これらの中では、熱的散逸がいろいろな意味で最も一般的で単純だ。太陽系内のすべての天体は太陽光によって加熱されている。暖められた天体は「赤外放射」と「物質の流出」という2種

類の方法でその熱を逃がす。地球など寿命の長い天体では前者が、彗星など他の天体では後者が有効に働く。地球と同程度の大きさの天体であっても、熱の吸収と放射のバランスが崩れれば、宇宙的尺度では「またたく間に」加熱

うしの衝突はめったに起こらない。ぶつかるものが何もなければ、十分な速度を持った原子や分子は自由に宇宙空間へと逃げ出してしまう。

水素は最も軽い気体であるため、惑星の重力を簡単に振り切ることができる。しかしそれにはまず、水素が外気圏界面に達しなければならない。これは地球では時間のかかるプロセスだ。水素を含んでいる分子は下層大気にとどまる傾向にある。水蒸気は凝縮し、雨となって地表に戻る。メタンは酸化され、二酸化炭素を生成する。だが、一部の水蒸気やメタンはそのまま成層圏に達し、分解して水素を放出する。その水素は拡散によってゆっくり上昇し、外気圏界面に達する。こうして少量の水素が散逸しているのは確かで、水素原子のハローが地球を取り囲んでいる様子が紫外線画像から確認できる(右図を参照)。

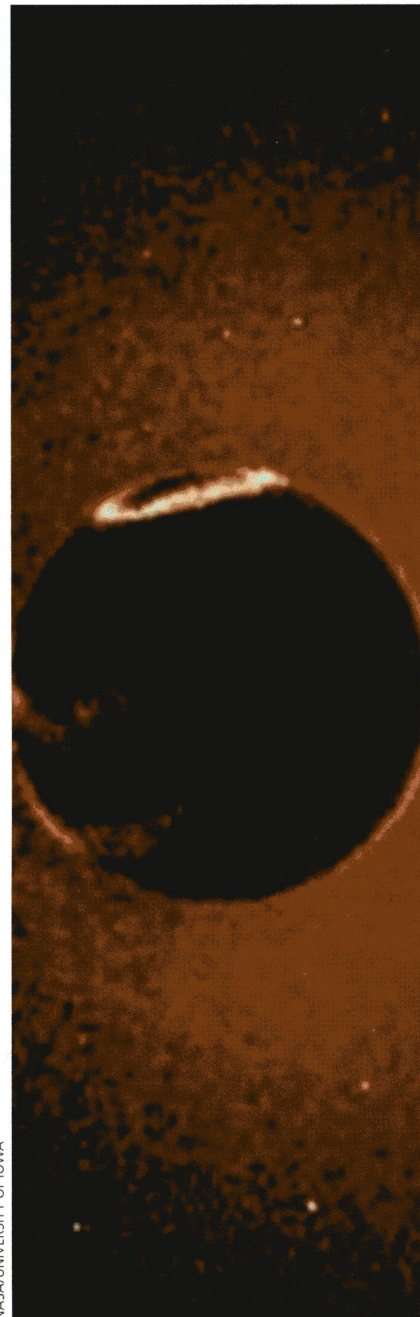
地球の外気圏界面における温度は、変化はあるものの絶対温度でおよそ1000K(0Kは -273°C)であり、これは水素原子の平均速度が秒速5kmであることに相当する。この値は地球の外気圏界面における脱出速度(秒速10.8km)を下回るが、一部の水素原子は速度が平均値よりも大きいので、地球の重力から抜け出す。この高速粒子の散逸で、現在の地球の水素散逸量の10~40%を説明できる。また、ジーンズエスケープは、月にはなぜ大気がないかも説明する。月面で気化したガス成分が容易に宇宙空間へ逃げているのだ。

もう1つの熱的散逸はもっと劇的なものだ。ジーンズエスケープは気体が1分子ずつ散逸するものだが、熱された大気が一斉に流れ出すことがある。上層大気は太陽からの紫外線を吸収し、加熱・膨張して上昇する。上昇した大気は音速を経て速やかに加速され、脱出速度に達する(61ページの記者ノートを参照)。この種の熱的散逸は「ハ

イドロダイナミックエスケープ」、または荷電粒子が太陽から星間空間へと流れ出す太陽風になぞらえて「惑星風」と呼ばれている。

すべては風の中に

水素に富んだ大気は、ハイドロダイナミックエスケープに最も弱い。水素



逃げていく水素 地球の夜側を撮影した紫外線画像(NASAの探査機ダイナミック・エクスプローラー-Iが1982年に撮像)。赤く見えるのは流出している水素原子だ。北極で帯状に、赤道域で細いすじ状に見えるものは酸素と窒素だ。

が流出する際、大気中の重い分子や原子を引きずる可能性がある。砂漠の風がダストを海の向こうまで飛ばし、砂粒を砂丘から砂丘へと運ぶ一方で礫をその場に残すのと同様、“水素の風”は軽い分子や原子ほど多く運び去る。このため、現在の惑星大気の組成を調べることで、かつてこの散逸プロセスが働いていたかどうかを知ることができる。

実際、太陽系外の木星型惑星HD209458b上でハイドロダイナミックエスケープの徴候が見つかった。パリ天体物理学研究所のヴィダル=マジャール(Alfred Vidal-Madjar)らは、ハッブル宇宙望遠鏡による観測で、HD209458bが膨れ上がった水素大気を持つことを2003年に報告した。その後の観測で、その膨らんだ大気中に炭素や酸素が含まれていることもわかった。炭素や酸素は自ら散逸するには重すぎるため、散逸する水素に引きずられてきたに違いない。

また、HD209458bより恒星の近くを回る巨大ガス惑星が見つからないこともハイドロダイナミックエスケープで説明できる。軌道半径が300万km以下(HD209458bの軌道半径のおおよそ半分)の惑星は、ハイドロダイナミックエスケープによって数十億年で大気をすべて失い、あぶられた残骸だけが残る。

こうした惑星風の証拠は、形成直後の金星や地球、火星でのハイドロダイナミックエスケープに関して1980年代に提案されたアイデアを裏付けるものだ。このプロセスが過去にこれらの惑星で起こっていたとする根拠は3つある。

1つは希ガスだ。散逸がなければ、ネオンやアルゴンなど化学的に不活性なガスは永久に大気に残る。その場合、希ガスの同位体比は今も昔も同じであり、やはり原始太陽系円盤に起源を持つ太陽の希ガス同位体比と一致す



茂木健一郎 著

脳

とクオリア

なぜ脳に心が生まれるのか

脳という物理的世界に、なぜ心という精神世界が宿るのか？
この超難解な問題の突破口が「クオリア（質感）」という概念だ。
脳科学者、茂木健一郎の原点がここにある。



A5判 325頁
3,360円(税込)

ISBN978-4-532-52057-1

発行：日経サイエンス社
発売：日本経済新聞出版社

TEL 03-5255-2839 FAX 03-5255-2863
<http://www.nikkei-science.com/>

るだろう。しかし実際は異なっている。

第2に、若い恒星は強力な紫外線を放出し、おそらく太陽もその例外ではなかった。この強い放射によってハイドロダイナミックエスケープが駆動されていた可能性がある。

第3は、初期の地球型惑星は水素に富んだ大気を持っていた可能性があるということだ。水素は原始太陽系円盤ガスに由来するものや、水と鉄の化学反応や紫外線による水分子の分解で生じたと考えられる。惑星が生まれて間もないころは小惑星や彗星の衝突が現在よりも頻繁に起き、それらが海に衝突するたびに大気は水蒸気で満たされた。数千年かけて水蒸気は凝縮し、雨となって地表に降り注いだ。しかし金星の場合、太陽に近いため水蒸気は凝縮せずに大気中にとどまり、太陽からの放射で分解された可能性がある。

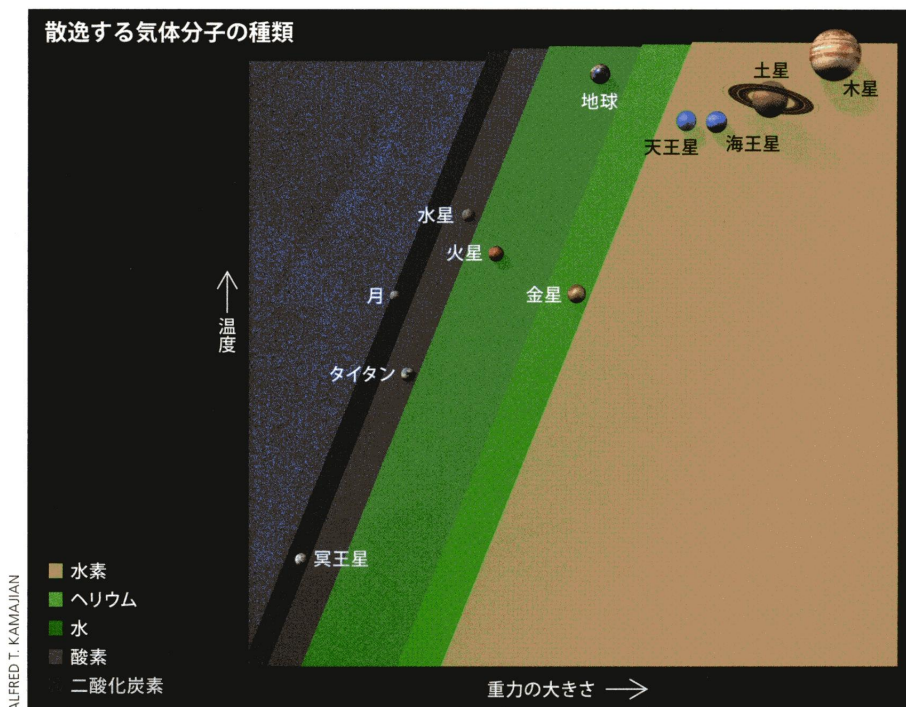
そのような条件下ではハイドロダイナミックエスケープが起りやすい。ペンシルベニア州立大学のカスティング

グ (James F. Kasting) は、金星ではハイドロダイナミックエスケープで地球の海洋に匹敵する量の水素が数千万年足らずのうちに失われた可能性があることを1980年代に示した (J. F. カスティング/O. B. ツーン/J. B. ポラック「金星・地球・火星の気候の進化」日経サイエンス1988年4月号)。

さらにカスティングと私たち著者の1人ザーンレは、散逸する水素に引きずられて酸素の大半も散逸する一方で、二酸化炭素は残ることを示した。水が存在せず、二酸化炭素を石灰岩などの炭酸塩鉱物として固定する反応が起らなかったため、二酸化炭素は大気に蓄積し、灼熱地獄のような現在の金星が誕生した。

程度こそ小さいが、火星や地球でもハイドロダイナミックエスケープが起っていたと考えられている。その根拠として、質量の軽い、つまり散逸しやすい同位体ほど量が少ないことが挙げられる。地球と火星の大気中のネオ

散逸する気体分子の種類



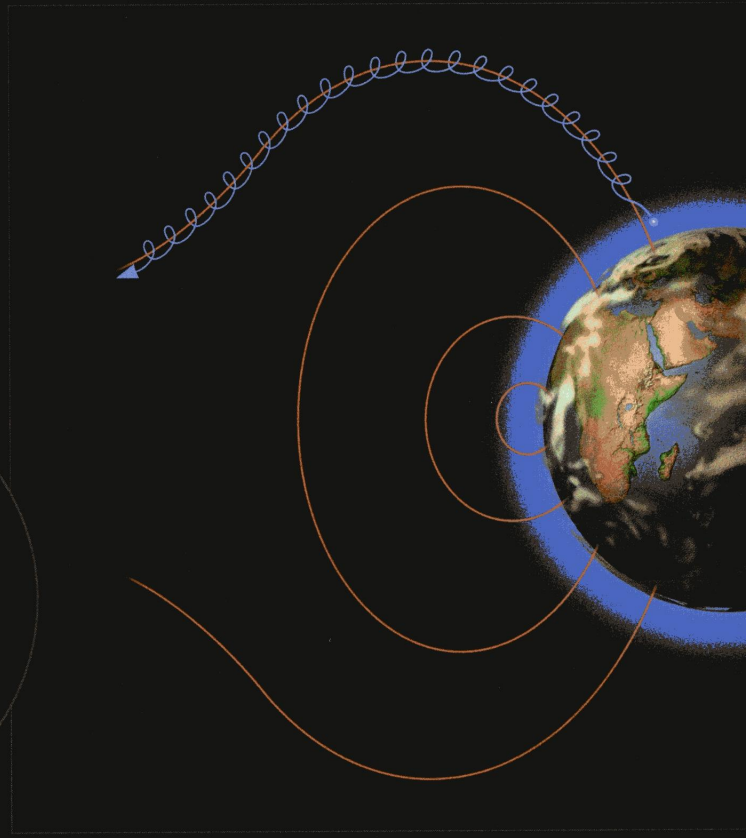
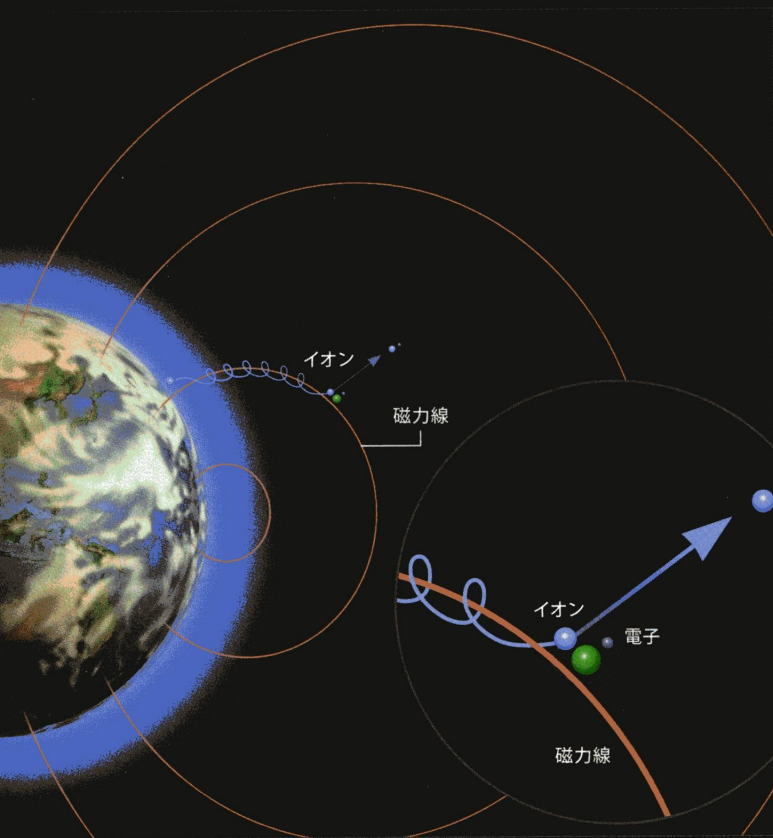
軽い気体ほど逃げ出す 水素などの軽い気体は、酸素のような重い気体は比べ簡単に宇宙へ逃げてしまう。ジーンズエスケープによる逃げやすさは、大気上端の温度（月など大気がない天体の場合は地表の温度、グラフ縦軸）と重力の大きさ（横軸）によって決まる。各天体はグラフ上で自分よりも左側に示された気体は保持し、右側の気体は失っていく。例えば、火星は水素とヘリウムを失うが、酸素や二酸化炭素を保持でき、かろうじて水も保持する。

散逸メカニズム② 非熱的散逸

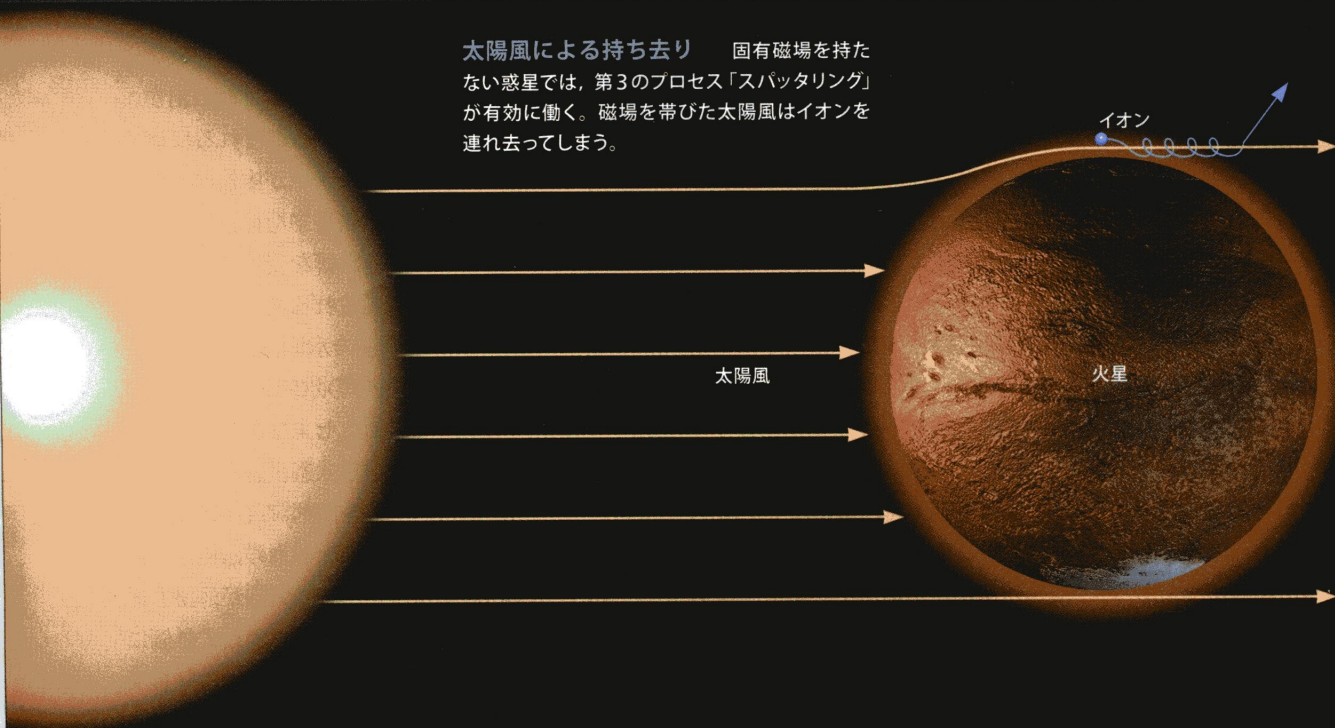
第2の大気散逸メカニズムは、荷電粒子を伴った反応によるものだ。電場はイオンを簡単に脱出速度へと加速する。イオンは惑星の磁場に束縛されているが、さまざまなプロセスで逃げ出していく。

電子を盗んで道を拓く イオンが磁場から抜け出す1つの方法は、中性の原子と衝突して電子を奪い、電気的に中性になることだ。

開放端磁場に沿って抜け出す 高緯度の磁力線は地表へ閉じずに星間磁場へとつながっている。これに沿って抜け出す場合もある。

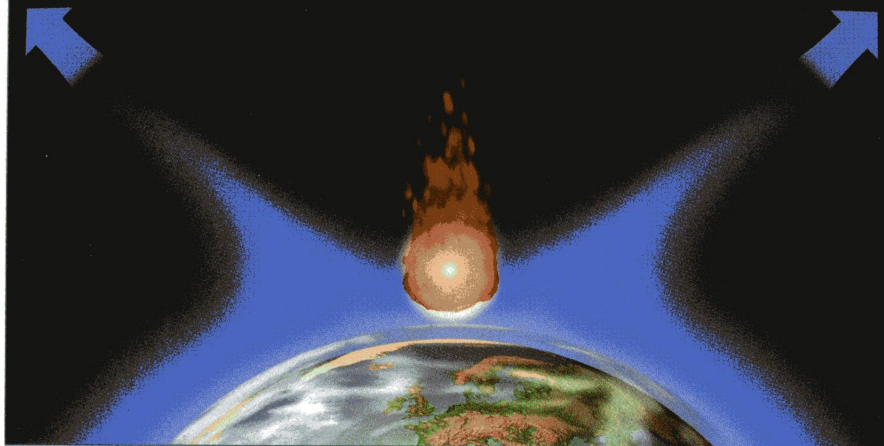


太陽風による持ち去り 固有磁場を持たない惑星では、第3のプロセス「スパッタリング」が有効に働く。磁場を帯びた太陽風はイオンを連れ去ってしまう。



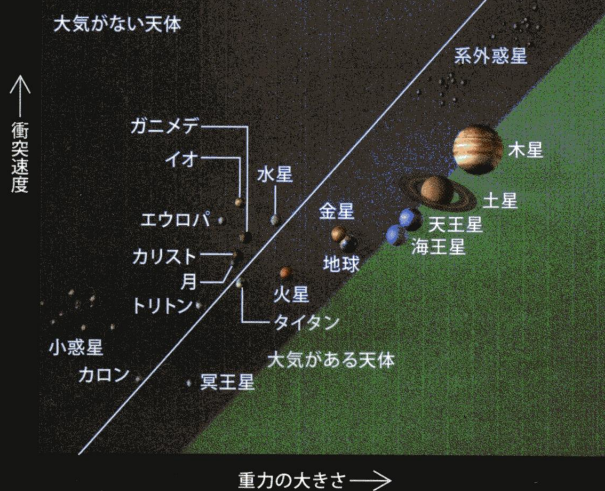
散逸メカニズム③ 天体衝突で吹き飛ぶ

彗星や小惑星が惑星へ落下すると、巨大な爆発が起こる。岩石や水、恐竜、そして大気さえも宇宙空間に放り出される。



天体の重力(右図横軸)が弱く、小惑星や彗星の衝突速度(縦軸)が大きい場合、衝突による大気の吹き飛ばしは非常に深刻だ。大気を持たない天体は、グラフ線よりも左上、天体衝突による大気損失が最も起こりやすい領域に位置している(衝突速度の最小値は重力の大きさに決まり、緑色の領域は自然界で起こりえない速度領域だ)。

衝突の影響に強い天体と弱い天体



ン22に対するネオン20の比は、太陽での値と比べて25%小さい(ネオン22はネオンの同位体のうち質量数が22のもの、以下同じ)。また、火星ではアルゴン38に対してアルゴン36が少ない。汚染物質を除いて地球大気内で最も重い気体であるキセノンの同位体比さえ、ハイドロダイナミックエスケープが起こっていたことを示唆している。

ハイドロダイナミックエスケープが

キセノンを引きずって流出させるほど激しいものだったなら、なぜ大気中の他のガスはそれに伴ってすべて失われなかったのだろうか？ この問題を解決するには、キセノンが他のガスとは異なる経緯をたどってきたと考える必要があるかもしれない。

ハイドロダイナミックエスケープはタイタンの大気をはぎ取った可能性もある。欧州宇宙機関(ESA)は2005年にホイヘンス探査機をタイタンの大

気投下し、窒素15に対する窒素14の比が、地球の値の0.7倍であることを明らかにした。

これら2つの同位体の散逸のしやすさがほとんど同じであることを考えると、この違いは非常に大きいと言える。タイタン大気の窒素同位体比がもともと地球と同じだったとすると、ホイヘンスの観測結果を説明するには、現在タイタンに存在する窒素量の数倍に相当する大量の窒素を失っていなければならない。つまり、かつてのタイタン大気は現在よりも厚かった可能性があり、謎は深まる一方だ。

化学反応による散逸プロセス

現在の地球を含むいくつかの惑星では、熱的散逸よりも非熱的散逸の方が重要だ。非熱的散逸では、化学反応や粒子どうしの衝突によって原子が脱出速度へと一気に加速される。非熱的散逸メカニズムの共通点は、原子や分子が外気圏界面以上の高度での1回のイベントで高速に加速され、他の粒子との衝突による散逸の妨げがないことだ。非熱的散逸の多くはイオンを伴う。通常こうした荷電粒子は、惑星の活動で生成される全球的な磁場や太陽風の通過に伴って誘起される局所的な磁場に束縛されているが、次第に漏れ出す。

「電荷交換」として知られる反応では、高速の水素イオンが中性の水素原子と衝突し、その電子を捕獲する。その結果、磁場の影響を受けない高速の中性原子が生成される。現在観測されている地球からの水素散逸量の60~90%、金星からの水素散逸量のほぼすべてがこのプロセスによるものだ。

別の方法として、惑星磁場による束縛の“抜け穴”を利用するものがある。ほとんどの磁力線は一方の磁極から他方の磁極へつながっているが、最も広がった磁力線は太陽風によって外側に引っ張られており、磁極とつながらずに星間空間に開いている。この隙間を

オックスフォード 科学辞典

■ 山崎 飛記

B5判 928頁 定価19950円(本体19000円) (10212-3)
 定評あるオックスフォードの辞典シリーズの一冊
 "Science(Fifth Edition)" (2005年) の完訳版。生物学(ヒトを含む)、化学、物理学、地球科学そして天文学といった科学全般にわたる約9000項目を50音配列で簡明に解説。

確率・統計 一文題のモデル解法

■ 岡部靖憲著

A5判 196頁 定価2940円(本体2800円) (11127-9)
 中学・高校・大学の確率・統計の初歩的かつ基本的な多くの文章題のモデル解法について懇切丁寧に詳述。
 [内容] 文章題/集合/場合の数を求める文章題のモデル解法/確率を求める文章題のモデル解法/統計学における文章題のモデル解法

現代基礎数学3 線形代数の基礎

■ 和田昌昭著

A5判 176頁 定価2940円(本体2800円) (11753-0)
 線形代数の基礎的内容を、計算と理論の両面からやさしく解説した教科書。独習用としても配慮。[内容] 連立1次方程式と掃き出し法/行列/行列式/ユークリッド空間/ベクトル空間と線形写像の一般論/線形写像の行列表示と標準化/付録

金融工学ハンドブック

■ 木島正明監訳

A5判 1032頁 定価29400円(本体28000円) (29010-3)
 各テーマにおける世界的第一線の研究者が専門家向けに書き下ろしたハンドブック。デリバティブ証券、金利と信用リスクとデリバティブ、非完備市場、リスク管理、ポートフォリオ最適化、の4部構成から成る。

シリーズ(現代の品質管理)2 統計的品質管理 ステップアップのためのガイドブック

■ 永田 靖著

A5判 212頁 定価3360円(本体3200円) (12802-4)
 SQCの深い理解と知識の整理のために手法間の関連を重視した新視点の手引書 [内容] 確率分布(工程能力指数と不良率の関係他) 検定・推定(最小2乗法他) 実験計画法(実験データのグラフの作り方と見方他) 多変量解析法(線形代数入門他)

炎症・再生医学事典

■ 松島綱治・西脇 徹編

B5判 584頁 定価18900円(本体18000円) (30099-4)
 内外環境に対するヒトの生体応答機構の知見を、基礎領域から臨床応用領域まで多角的観点から考察できるよう網羅。炎症・免疫学、再生医学における各分野の専門家が最新の研究成果をテーマごとに読みやすくコンパクトに解説。

新版 トキシコロジー

■ 日本トキシコロジー学会教育委員会編

B5判 392頁 定価10500円(本体10000円) (34025-9)
 トキシコロジスト認定試験出題基準に準拠した標準テキスト。2002年版を全面改訂した最新版。[内容] 毒性学とは/発現機序/動態・代謝/リスクアセスメント/化学物質の有害作用/臓器毒性・毒性試験/環境毒性/臨床中毒/実験動物/他

〒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) 978-4-254- を省略

<資料請求番号59>

利用してイオンは逃げる事ができる。正確には、イオンは重力に打ち勝つ必要があり、水素やヘリウムのような軽いイオンだけが逃げる事ができる。こうして生じた荷電粒子の流れは「極風」と呼ばれ(惑星風とは別物だ)、地球からの水素散逸量の10~15%、ヘリウム散逸量のほぼすべてがこのプロセスによる。

軽いイオンが散逸する際、重いイオンを引きずることがある。このプロセスによって先に述べたキセノンの謎をうまく説明できるかもしれない。もし過去に極風が非常に強かったなら、キセノンイオンも引きずられて散逸した可能性がある。その証拠の1つとして、クリプトンはキセノンに比べて軽く散逸しやすいはずだが、キセノンと違って同位体比は変化していないことが挙げられる。クリプトンはキセノンと異なりイオン化しにくいいため、極風が強くてもその影響を受けなかったと考えられる。

第3の非熱的散逸プロセスは「光化学反応」によるもので、火星やおそらくタイタンで起こっているプロセスだ。酸素や窒素、一酸化炭素分子は漂いながら上層大気まで達し、太陽放射によって電離する。電離した分子は電子と再結合したり、互いにぶつかり合ったりするが、そのときに放出されるエネルギーによって、分子は重力を振り切るのに十分な速度を持つ原子へと分解する。

火星やタイタン、金星は全球的な磁場を持たないため、「スパッタリング」と呼ばれる第4の非熱的散逸プロセスの影響も受けやすい。惑星磁場が存在しない場合、上層大気は磁場に守られることなく太陽風に直接さらされる。イオンは太陽風に乗って流され、その後、電荷交換を起こして散逸する。

火星大気の水素と炭素には質量の大きな同位体成分が多く、これは火星がもともと持っていた大気の90%を失

ったことを示唆している。そしてその主な原因はスパッタリングと光化学反応だと考えられる。イオンや原子の散逸量を測定し、惑星大気の進化を再構築するため、米航空宇宙局(NASA)は2013年に火星探査機MAVENの打ち上げを予定している。

必然的な結果

彗星や小惑星が惑星に衝突して大気を吹き飛ばすのに比べれば、熱的散逸も非熱的散逸も微々たるものだ。もし衝突天体が十分に大きく、かつ高速なら、衝突天体自身とそれと同程度の質量の地表岩石が蒸発する。生成した高温の気体ブルームは脱出速度よりも高速で膨張し、周囲の大気は惑星からは

非熱的散逸では 化学反応や 粒子どうしの衝突で 原子が加速されて逃げ出す

ぎ取られる可能性がある。

衝突エネルギーが大きいほど、吹き飛ばされる大気の内層は広がる。6500万年前に恐竜を絶滅させた小惑星の場合、その円錐の頂角は垂直方向からおおよそ80°であり、全大気量の10万分の1が散逸した。より大規模な衝突であれば、衝突地点を接点とした接平面よりも上の大気すべてが吹き飛ばされるだろう。

吹き飛ばされる大気円錐の広さは大気の密度によっても変わってくる。大気が希薄なほど、失われる大気の割合は増える。その結果、悲観的な結果が予想される。いったん大気が希薄になると、衝突によって大気がますます失われるようになって、最終的に大気はほとんどなくなってしまう。不幸なことに、火星は小惑星帯近くの“悪環境”で生まれ、しかも質量が小さいため、とりわけ衝突によって大気を失いやす

かった。初期太陽系内の小惑星などのサイズ分布を仮定してシミュレーションすると、火星はその大気の大半を1億年以内に失ってしまう。

木星の巨大な衛星たちもまた木星の重力という“危険な環境”にあり、大気を失いやすい。衝突してくる小惑星や彗星の速度は、木星の強い重力場によって高速に加速される。もし衛星に大気があれば、その大気は衝突によってはぎ取られるだろう。対照的に、タイタンの軌道は比較的土星から離れており、衝突速度も遅いため、大気は残ることができる。

このように、大気の散逸はカリストやガニメデに大気がないことや金星に水が存在しないことなど、大気の大規模性の大半を説明する。

さらにもっと微妙な影響もある。水素は酸素よりも失われやすいので、散逸には惑星を酸化させる傾向があるのだ。火星や金星、地球が赤いのは、突き詰めると水素が散逸したためだ。多くの人は地球が赤い惑星だとは思っていないが、大陸地殻の大半は赤い。土

天体の衝突は 大量の大気を吹き飛ばす 木星の衛星や火星に 大気がない一因だ

壌や植生が本来の色を隠しているだけだ。これらの3つの惑星はすべて灰〜黒色の火成岩から出発し、もともとの鉱物が酸化鉄（さび）へと酸化されるにつれて赤化した。火星の場合、この色を説明するには、深さ数m〜数十mの全球的な海洋に相当する質量の水を失っていなければならない。

地球上で24億年前に酸素が蓄積した原因は、一般に光合成生物の発生と考えられている。しかし、私たちは2001年に、水素の散逸もまた酸素の蓄積に重要な役割を果たしたことを示した。微生物は光合成によって水分子を分解する。水素はリレーのバトンのように有機物からメタンへと渡され、最終的には宇宙空間に逃げていく。それによって予想される水素の散逸量は、

現在の地球上にある酸化物の正味過剰量と一致する。

大気の散逸は、なぜ火星の大気が希薄なのかという長年議論されてきた謎を解き明かすカギを握る。これまで科学者たちは、水と二酸化炭素、岩石の化学反応がもともとの厚い大気を炭酸塩鉱物へ変えたという仮説を立ててきた。火星は小さく、すぐに冷えて火山活動が止まったため、これらの炭酸塩は決して二酸化炭素として大気中へ戻されることがなかったというものだ。

このシナリオの問題点は、これまでの探査で火星のごく一部の地域にしか炭酸塩岩が見つかっていないことで、見つかった露頭もおそらく温かい地下水の中で形成されたと考えられている。さらにこの炭酸塩説は、なぜ火星には窒素や希ガスが少ないのかという問題に答えられない。しかし、散逸説ならよりうまく説明できる。大気は岩石として固定されたのではなく、宇宙空間へ失われたのだ。

依然として残る問題は、天体衝突が火星の大気を完全に吹き飛ばしてしま

大気散逸プロセスの変遷

3つの散逸プロセスが働いた時期やその程度は惑星によって異なる。

天体	時期	散逸する気体	熱的散逸		非熱的散逸			天体衝突
			ジーンズ エスケープ	ハイドロ ダイナミック エスケープ	電荷交換	極風	光化学反応	スパッタリング
 地球	現在	水素	○		○	○		
		ヘリウム			○	○		
	初期	水素、ネオン		○				
 金星	現在	水素、ヘリウム			○			○
	初期	水素、酸素		○				
 火星	現在	水素	○					
		炭素、酸素、窒素、アルゴン					○	○
	初期	すべての気体						○
		水素、二酸化炭素		○				
 木星の衛星	初期	すべての気体		○				○
 タイタン	現在	水素	○					○
		メタン、窒素		△				○
	初期	水素、メタン、窒素		○				
 冥王星	現在	水素、メタン、窒素		△				
HD209458b	現在	水素、炭素、酸素		○				

ったはずだ、ということだ。何がそれを止めたのだろうか？ 1つの答えは単に偶然だったということだ。巨大な衝突は本質的にまれな現象であり、衝突頻度はおよそ38億年前に急激に低下した。火星は最後の一発を免れたのかもしれない。また大きめの氷微惑星や彗星が衝突して大量のガス成分をもたらした、これがその後の衝突を生き延びて残ったのかもしれない。あるいは、火星大気の一部が地下で逃げ残り、衝突が収まった後に漏れ出した可能性もある。

地球は比較的散逸の影響を受けていないように見えるが、今後はそうではない可能性がある。水素を成分に持つ気体として地球上では水蒸気が圧倒的に多いが、これは下層大気中で凝縮し地表に戻されてしまうため、現在水素はわずかにしみ出しているにすぎない。しかし太陽は10億年に10%の割合で少しずつ明るさを増している。これは人間からしてみれば気づかないほどゆっくりした変化だが、地質学的なタイムスケールでは打撃を与える。太陽が明るくなり大気がより暖められると、上層大気は湿度が高くなり、水素の散逸量が増すだろう。

著者 David C. Catling / Kevin J. Zahnle

キャトリングは惑星科学者であり、主に惑星の表層と大気との相互進化を研究している。NASAエイムズ研究所に所属後、2001年にワシントン大学(シアトル)に異動。昨年12月に終了したNASAの火星探査機フェニックスの共同研究者でもある。ザーンレは1989年からNASAエイムズ研究所に所属する科学者。惑星の内部から表層、大気まで惑星科学を広く研究している。シューメーカー・レヴィ第9彗星の木星への衝突に関する研究に対して、1996年にNASA Exceptional Achievement Medalを獲得している。

原題名

The Planetary Air Leak (SCIENTIFIC AMERICAN May 2009)

もっと知るには...

ORIGINS OF ATMOSPHERES. K. J. Zahnle in *Origins*. Edited by C. E. Woodward, J. M. Shull and H. A. Thronson. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 148, 1998.

AN EXTENDED UPPER ATMOSPHERE AROUND THE EXTRASOLAR PLANET HD209458b. Alfred Vidal-Madjar et al. in *Nature*, Vol. 422, pages 143–146; March 13, 2003.

PLANETARY ATMOSPHERES AND LIFE. D. C. Catling and J. F. Kasting in *Planets and Life: The Emerging Science of Astrobiology*. Edited by W. T. Sullivan and J. A. Baross. Cambridge University Press, 2007.

このプロセスは太陽が10%明るくなったとき、つまり10億年後には顕著になり、さらに10億年ほど経つと地球の海は干上がってしまうだろう。地球は非常に微量の貴重な液体が極域に残る砂漠の惑星になる。さらに20億年後、太陽は情け容赦なく地球に照りつけ、極域のオアシスは枯れ、残っていたすべての水が蒸発し、大気の温室効果によって岩石が溶融する。地球は金星のような生物のいない不毛の惑星になってしまうだろう。 ■

訳者ノート

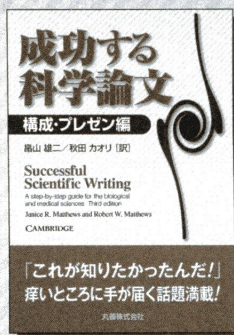
通常、大気の色は加速されても音速を超えることなく、上昇するに従って遅くなる。だが、いったん音速に達した大気はさらに加速されて天体から離れていく。

訳者 阿部 豊 (あべ・ゆたか)

濱野景子 (はまの・けいこ)

阿部は東京大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻准教授。地球型惑星の多様性の起源、とくに生存可能惑星の形成と進化や惑星の気候を研究。濱野は同研究科博士課程3年在学中。天体衝突による大気散逸と付加など、惑星大気の形成進化を研究。

畠山雄二〈最新図書のご案内〉



成功する科学論文

構成・プレゼン編

A5・208頁 / 定価2,100円

ISBN 978-4-621-08132-7

「これが知りたかったんだ!」
痒いところに手が届く話題満載!

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS
で最も定評ある科学論文書の前半部分の翻訳。

〈後半部分〉『ライティング・投稿編』
(2009年秋刊行予定)

好評既刊 / 著作

情報科学のための 自然言語学入門

A5・168頁 / 定価2,205円

情報科学のための 理論言語学入門

A5・168頁 / 定価2,205円

科学英語読本

A5・160頁 / 定価2,730円

科学英語の読み方

A5・160頁 / 定価2,520円

好評既刊 / 翻訳

大学生のための 成功する勉強法

A5・264頁 / 定価2,625円

まずはココから! 科学論文の基礎知識

A5・152頁 / 定価1,575円

うまい!と言われる科学論文の書き方

A5・176頁 / 定価1,890円

完璧!と言われる科学論文の書き方

A5・232頁 / 定価2,520円

言語科学の百科事典

【編集幹事】

A5・888頁 / 定価24,150円

※価格はすべて税込

M MARUZEN

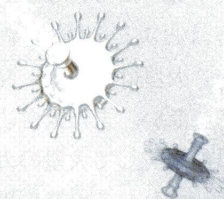
丸善株式会社 出版事業部

〒103-8244 東京都中央区日本橋3-9-2 第二丸善ビル
営業部 TEL(03)3272-0521 FAX(03)3272-0693
http://pub.maruzen.co.jp/

<資料請求番号61>

ナノマシンを動かすエンジン

微小世界の物理法則に阻まれ実現できずにいたナノエンジン
細胞の生体モーターをヒントにさまざまな駆動法が開発され
ドラッグデリバリーや顕微手術への応用が期待される



T. E. マルーク / A. セン (ともにペンシルベニア州立大学)

自動車や飛行機、潜水艦を細菌や分子サイズで作ることができたらどうだろう？ 顕微鏡でしか見えない“ロボット外科医”を体内に注入し、例えば動脈内にたまった血栓や、アルツハイマー病の原因といわれる異常タンパク質の蓄積など、病気の原因を見つけ出して治療できるようになるかもしれない。鋼鉄製の橋桁や飛行機の翼の内部にナノマシン（ナノメートルサイズのロボット）が入り込み、目に見えない微小な亀裂を補修して、大惨事を未然に防ぐこともできるだろう。

近年、こうした微小マシンの部品となる分子サイズの構造物が数々作られている。ライス大学のツアー（James Tour）らは、ヒトの細胞の1/5000の大きさの4個のフラーレン（サッカーボールのような炭素分子）を車輪とする分子サイズの車を合成した。

しかし、ツアーらの“ナノカー”のボンネットを開けてもエンジンは見当たらず、いまのところ「ブラウン運動」という分子どうしの不規則な衝突でしか動かせない。これこそが分子マシンが抱える最大の問題で、マシンの製造法はわかっているのに、動力をどうすればいいかわからない。

細胞レベルの微小世界では、独特の問題が生じる。空気や水はシロップのように粘っこく、ブラウン運動の影響で一定方向へ前進できない。このような条件では、自動車やドライヤーなど

をナノサイズで作ることができたとしても、ピクリとも動かないだろう。

ところが、自然界にはナノモーターの実例がたくさんある。生きた細胞を観察すればわかるだろう。細胞はナノエンジンを使って変形したり、細胞分裂の際に染色体を分離したり、タンパク質の製造、栄養分の取り込み、化学物質の輸送などを実現している。筋肉の収縮や鞭毛の回転運動を含め、こうしたモーターはすべて同じ原理に基づいている。アデノシン三リン酸(ATP)として蓄えられている化学エネルギーを力学的エネルギーに変換していることと、ATPの分解反応を促す「触媒」が使われていることだ。

研究者たちはこれらの原理を応用して、人工ナノモーター製造に向けた飛躍的な進歩を遂げようとしている。

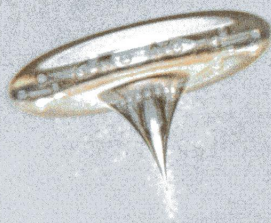
2004年、私たちはペンシルベニア州立大学のチームで、燃料に蓄えられたエネルギーを触媒によって運動に変換する単純なナノモーターを開発していた。ハーバード大学のイスマギロフ（Rustem Ismagilov）とホワイトサイズ（George Whitesides）が2002年に発表したかなり大きな触媒モーターが研究のきっかけだった。彼らは過酸化水素（ H_2O_2 ）の水溶液を入れた水槽に白金触媒片を船尾に付けたセンチメートルサイ

ズのボートを浮かべると、ボートが水面上をひとりで動くことを見つけた。過酸化水素が白金触媒によって酸素と水に分解され、発生した酸素の気泡の反動でボートが前進しているように思われた。ちょうど、ロケットが噴射の反動で推進力を得るようなものだ。

微小世界の物理法則

私たちはハーバード大学のエンジンの“小型版”として金と白金でできたロッド（棒）を作った。長さは細菌ほど（ $2\mu\text{m}$ ）、幅は細菌の半分（ 350nm ）だ。これを水面に浮かべるのではなく、過酸化水素水に混ぜ入れた。細胞内でATPを動力源とする分子モーターと同じように、この微小触媒ロッドも燃料となる過酸化水素水に浸っているわけだ。そして実際、ロッドは毎秒数十 μm 程度の速さで自発的に動いた。顕微鏡で見ると、その姿は細菌が遊泳しているのに不気味なほど似ていた（この動画は<http://www.SciAm.com/nanomotor>で見ることができる）。

科学の世界ではよくあることだが、実験の基となった仮説は実は誤りだった。私たちはナノロッドの後部から発生する微小な気泡の反動で推進しているものと考えていたが、実際はもっと興味深い現象が起きていた。それは、微小世界の運動には、通常の世界とはまったく異なる考え方が必要であることをナノテク研





究者に思い出させてくれた。

通常の大きさの世界では、反動は十分な意味を持っている。泳いだりボートを漕いだりする場合、手足やオールが水を後ろに押しやると、その反動で体やボートが前進し、水を押しやる動作を止めてもしばらくは動き続ける。どのくらい移動するかは、粘性力（抗力）と慣性（同じ速度を保とうとする性質）によって決まる。抗力は物体の幅に比例し、慣性は質量に比例し、質量は幅の3乗に比例する。物体が小さくなると、慣性の影響は急激に小さくなり、やがて無視できるようになって抗力が優勢となる。ミクロンサイズでは慣性運動は約1マイクロ秒で終わり、移動距離は0.01nmにも満たない。ミクロンサイズの物体を水中で運かすのは、蜂蜜の中で泳がせるようなものだ。ナノモーターは押されても勢い（慣性）が続かないため、慣性推進（気泡の反動後の惰性運動など）は絶望的となる。私たちのナノロッドが実際に前進するのは、持続的に力を出すことで慣性

運動なしに抗力に打ち勝っているからだ。ロッドの白金側では、過酸化水素が1個の酸素分子と2個の電子、2個のプロトン（水素イオン）に分解される。反対の金側では、電子とプロトンが1個の過酸化水素と結合して2個の水分子が生成される。これらの化学反応の結果、片側でプロトンが余り、反対側では不足するため、プロトンがロッド表面に沿って白金から金へと移動していく。

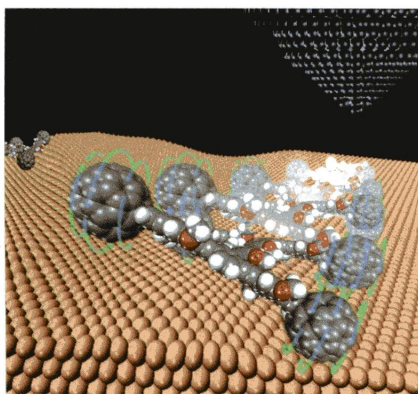
水中のあらゆる陽イオン同様、プロトンは水分子の負電荷を帯びた領域を引き付け、プロトンが移動すると水分子もそれに引っ張られる。そして、すべての作用には反作用があるというニュートンの法則に従って、ロッドは反対方向へと進む（65ページの囲み）。

この原理がペンシルベニア州立大学の学生や共同研究者のクレスピ（Vincent H. Crespi）、ベレゴル（Darrell Velegol）、キャッチマーク（Jeffrey Catchmark）の協力によって確認されるやいなや、ほかにも数種

ナノマシンの救世主 未来の微小ロボットの動力がついに見つかったといえるかもしれない（図はイメージ）。化学エネルギーを運動に変換するエンジンによって、これまでブラウン運動や液体の粘性の壁に阻まれていたナノマシンを動かせるようになる。



類の触媒ナノモーターが設計された。テキサス大学オースティン校のヘラー（Adam Heller）らとアリゾナ州立大学のワン（Joseph Wang）らは、異なる燃料分子（グルコースと酸素、または過酸化水素とヒドラジン）を混ぜると、混合しない場合よりもモーターが速く動くことを見つけた。



ナノカー 可動部のある分子マシンで、主に炭素原子からなる車軸とフラーレン（サッカーボール状の炭素分子）でできた4つの車輪を持つ。いまのところエンジンはなく、表面の温度上昇に伴う不規則な前後運動しかできない（青矢印）。

固定されていない金属ナノロッドが溶液中を移動するのに対し、固定されたロッドは溶液との界面で液流を生む。このため溶液中にある他の物体の動力源となる可能性がある。私たちは金の表面に銀をパターン形成したものによってこの液体ポンプ効果を実証した。

方向を制御する

私たちが作った最初のナノロッドは、ブラウン運動のため移動方向がでたらめで、絶えず不規則な方向転換を繰り返していた。ナノマシンを実現するには、当然ながら目的地まで操縦するしくみが必要だ。

この問題を解決する手段として、まず磁場を試してみた（66ページの囲み）。ロッドにニッケル製の円盤をいくつも埋め込み、コンパスが南北を指示するように円盤が磁場に応じて向き

を変えるようにした。メモ貼り用の市販の磁石を2～3mm離れたところに置いてだけで、ブラウン運動による不規則な方向転換に打ち勝つ十分なトルクが得られた。ロッドの長軸方向に沿った触媒反応による力だけが残って、ナノロッドは直線運動し、磁石の向きを変えることで操縦できる。この動きは細菌が微弱な地磁気方向に向くのに似ている。同様のモーターで、マイクロサイズの磁石でできた迷路を磁力線に沿って通り抜けることができた。

昨年、クレスピと私たちの1人（セン）は磁気操縦モーターで、モーターの約10倍の大きさのプラスチック球を引っ張れることを実証した。こうした貨物輸送モーターには、多種多様な魅力的な応用が考えられる。例えば体内の特定の細胞に薬剤を届けたり、ナノサイズの組み立てラインに部品を運んで他の分子を化学結合させたりできるだろう。

ナノロボットを外部から操縦するのは役に立つが、用途によっては自律運動が必要な場合もある。ベレゴルとセンは、自分たちのナノロッドが細菌と同様、化学的な「パンくずの目印」を追いかけることを発見した。通常、細菌は直線運動と不規則な方向転換の組み合わせで移動しているが、化学勾配の高い（エサに近づくほどエサの匂いが強くなるなど）方向に直線運動している場合は移動距離が長くなる。エサの乏しい方向より豊富な方向への移動が長くなるため、目標への直接的な

誘導手段を備えていなくても最終的には目標に到達する。「走化性」と呼ばれる戦略だ。

私たちのナノモーターは燃料濃度が高いとスピードが上がるので、その方向への移動距離が実質的に伸びる。このため、過酸化水素をしみ込ませたゲル粒子などの燃料に向かって移動する（66ページの写真、オンラインの動画）。

さらに最近では、光で駆動する走光性モーター粒子も実証した。この粒子は分子を光で分解し、陽イオンと陰イオンを生成する。それぞれのイオンは異なる速度で拡散し、生じた電場によって粒子が移動する。放出されるイオンの性質と粒子の電荷に応じて、粒子は光の強さが最も大きい領域に近づく方向、または離れる方向に向かって動く。この技法に少し手を加えると面白いものができる。一部の粒子が“捕食者”で、他は“獲物”となる光駆動システムだ。この場合、片方の粒子がイオンを発生させ、このイオンに向かって他の種類の粒子が動く。こうした連携する動きは、白血球が細菌を追跡するのに驚くほどよく似ている。

走化性と走光性モーターはまだ原理実証の段階だが、おそらく生物の体内や周辺環境に豊富に存在するグルコースなどの燃料からエネルギーを得て、自主的に標的に向かって移動する賢い自律ナノロボットの設計につながる可能性がある。私たちの研究は、化学的に相互コミュニケーションして群れをなして移動し、パターンを形成するなどの集団で機能するような新型ロボットの設計の原点ともなるだろう。

スケール則の見えざる壁

こうした集団的な振る舞いを示す粒子は無生物だが、その動きは生体細胞と同様の物理現象に支配されている。そのため、ナノモーターは生物学からヒントを得るだけでなく、生体システムの可動部品の動作原理に関するヒン

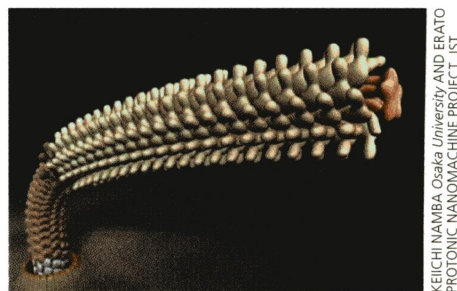
ついに実現したナノエンジン

- ナノマシン研究によって将来さまざまな応用が期待できる。例えば体内に薬剤を届けたり、顕微手術をしたり、機械を組み立てたりする微小ロボットの開発だ。
- ナノマシンは独特な物理法則に支配される。微小世界では液体がシロップのように粘りを持ち、ブラウン運動によってあらゆるものが絶え間なく揺さぶられる。
- 化学者たちは細胞の生体モーターから着想を得て、微小マシンを触媒反応で駆動する方法を研究している。

トも与えてくれる。触媒ナノモーターの研究から判明した単純な規則の1つは、ナノモーターの巡航速度が一般にその線形サイズ(長さや幅などの寸法)にほぼ比例するということだ。このスケール則は抗力がサイズに比例する一方、触媒反応速度は表面積に比例し、表面積が長さの2乗に比例する、という事実に基づく。

ペンシルベニア州立大学の生物学者マーデン (James H. Marden) は、モーターの質量と最大出力に関する一般的なスケール則を発見した。分子モーターからジェットエンジンに至るまで適用可能なこの一般則の結論は、「モーターは小さいものほど低速になる」ということだ。このスケール則を触媒ナノモーターに当てはめていくと、触

生体モーター 大腸菌などの細菌は鞭毛という尻尾状のフィラメントを分子モーターによって回している(右は鞭毛のコンピューターモデル)。ネジを反時計回りに回すと抜けるように、これによって細胞が前進する。細菌が暮らしている環境では、慣性よりも粘性の影響が大きいので、鞭毛の回転が止まると細菌の前進もすぐに止まる。



KEIICHI NAMBA, Osaka University AND ERATO PROTONIC NANOMACHINE PROJECT, JST

媒反応によるいかなる推力もブラウン運動を超えられない壁(約50~100 nm)に突き当たる。このため、ミクロンサイズの細菌が生物学における自由遊泳動物の最小サイズとなる。これより小さくなると、ブラウン運動が邪魔して一定方向へ運動できなくなってしまうのだ。事実、筋タンパク質やATP合成酵素も含め、自然界に存在する分子サイズのあらゆるモーターは、

細胞内のレールの上を走るだけか、さもなければ膜に埋め込まれている。将来登場するであろう分子ロボットも同様にしなければならないだろう。

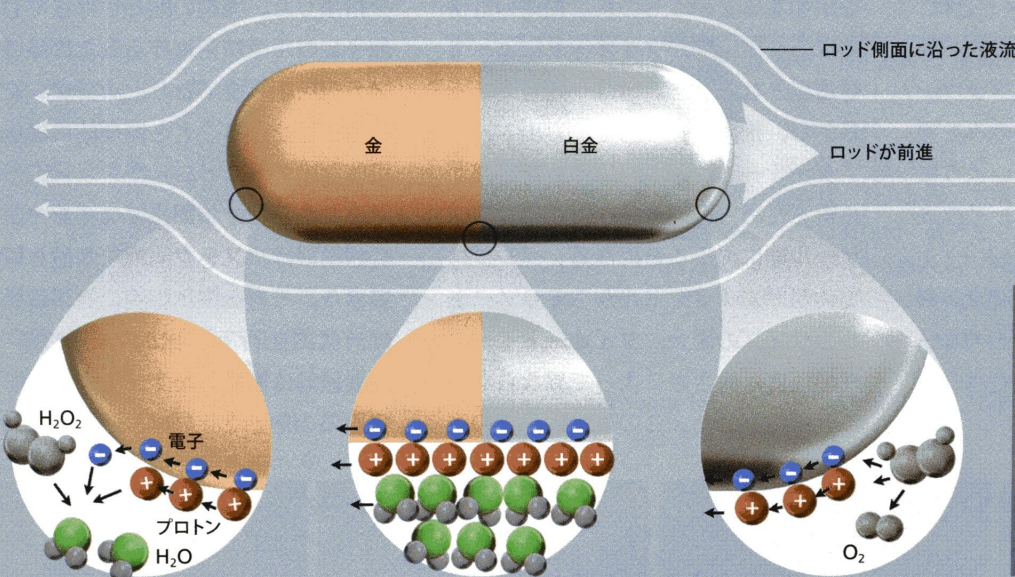
ブラウン運動を生かす

分子サイズのモーターの場合、ロボットの動く場所が制限されているかどうかにかかわらず、私たちがナノロボットで実証したような単純な表面触媒作

触媒エンジンのしくみ

著者が作った長さ2 μm の金・白金製ロッド(棒)は、過酸化水素(H_2O_2)の水溶液中でロッド側面に沿って溶液を押しやることで推力を得ている。液流は金と白金それぞれの表面(拡

大図)で起こる2種の化学反応で生じる。この連続的な液流によってロッドは液体の粘性に打ち勝つことができる。触媒エンジンを使えば、体内を移動できる細菌サイズのナノロボットや、右下の顕微鏡写真の歯車のような微小サイズのナノマシンの動力源となるだろう。



1 反応に必要なプロトン

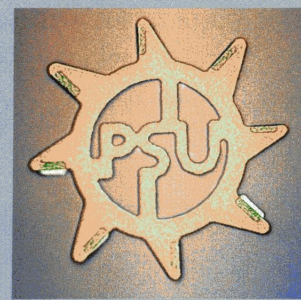
金の表面では触媒作用で電子、プロトン、 H_2O_2 が結合して H_2O となる。この反応には、プロトンと電子が白金側から流れてくる必要がある。

2 水分子を引き寄せる

電子はロッド内部を流れ、電子と同じ数のプロトンがロッド表面を移動する。プロトンの正電荷に H_2O が引き寄せられ、 H_2O もロッドに沿って移動する。

3 プロトンが生成

白金表面では、触媒作用によって H_2O_2 がプロトンと電子、 O_2 へ分解し、必要となるプロトンが連続的に生成される。



ロータリーモーター

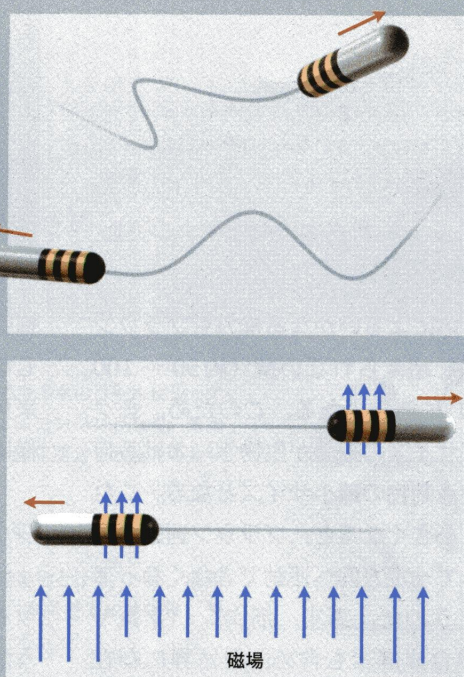
左と同様の化学反応によって、プロトンと水が100 μm の歯車の歯の周りで移動し、歯車が回転する。

SOURCE: "DIRECTED ROTATIONAL MOTION OF MICROSCALE OBJECTS USING INTERFACIAL TENSION GRADIENTS CONTINUALLY GENERATED VIA CATALYTIC REACTIONS," BY JEFFREY CATCHMARK, SHYAMALA SUBRAMANIAN AND AYUSMAN SEN, IN SMALL, VOL. 1, NO. 1, 2005 (nanomotion)

磁場で方向制御

ナノロボットを動かすにあたって推進力は問題の半分にすぎず、移動する方向を一定に保って目的地に到達させるという課題がまだ残されている。ロッドの垂直方向が南北を指すようにコンパスを内蔵させた特製ナノロッドならば、磁場によって方向を制御できる。

一定方向に移動 磁場がないと運動は不規則になる(上)。磁場を発生させるとロッドは磁場に対して垂直方向を向こうとし、一定方向に移動する(下)。磁場の向きを変えればロッドの移動方向を制御できる。



用ではやはりブラウン運動に打ち勝つには効率が悪すぎるだろう。ところが、自然界はブラウン運動に抵抗するのではなく、逆に活用する道を見いだしていた。多くの生体モーターは「ブラウン・ラチェットの原理」に基づいているのだ。ブラウン・ラチェットとは、触媒作用のエネルギーで一定方向への運動を生み出すのではなく、ブラウン運動から望みの方向への運動のみを獲得し、反対方向には移動しないように制限した爪車のことだ(R. D. アツミアン「カオスから生体分子モーターへ」日経サイエンス2001年10月号)。最近になって、世界初の人工ブラウン・ラチェット実験が始まった(右ページの囲み)。

ノースカロライナ州立大学のベレブ(Orlin Velev)らは別の推進操縦方法を実証し、燃料を含んでいない溶液中で物体を推進する方法を示した。彼らの手法は、電流を一方向のみに流すダイオードを物体に組み込み、交流電場を印加するというものだ。物体の近傍では、交流電場がダイオードによって静電場となる。静電場は一定方向を指し示し、推力となる力を生み出す。

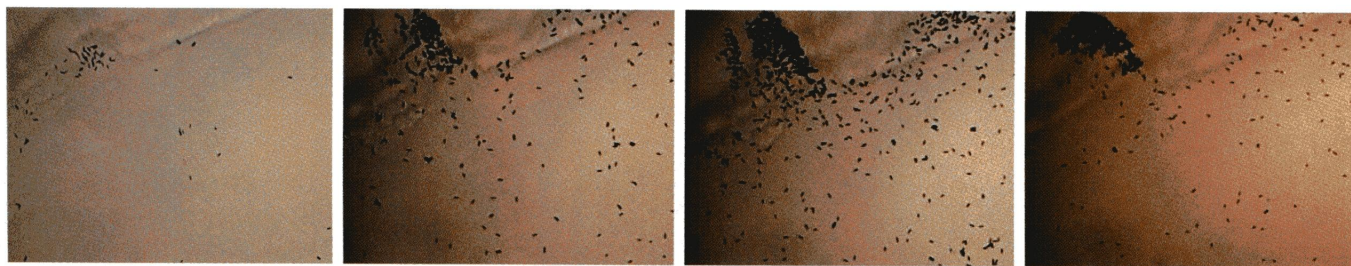
ダイオードモーターは動力を外部から得るため、触媒モーターとは別のスケール則に従うことになる。ベレブは物体がセンチメートルからミリメートルのサイズの場合、ダイオードモーターの速度は大きさによって異なることを実証した。この事実、この種

のモーターが数十 μm (ヒトの細胞ほどの)のレベルでは非常に強力となる可能性を示唆している。

コンピューターチップ技術の進歩で、いまではミクロン以下のダイオードを製作でき、長さ2~3nmの分子ダイオードもすでに作られている。これなら、微小なシリコンチップ上にパターン形成された推進部、操舵部、センサー部からなる顕微鏡レベルのメスが実現でき、人体に吸収されない無線周波数帯の電場で遠隔操作できるようになるだろう。最終的には、こうした微小メスを注射針を通して体内に送り込み、遠隔操縦して目的地に届けられるかもしれない。

1959年、物理学者のファインマンが「Plenty of Room at the Bottom(ナノ領域にはまだたくさんの可能性が残っている)」と題された先進的な講演で、機械や情報記憶システムのサイズ限界について考察して以来、科学者(やSF作家)はナノマシンに思いを巡らせてきた。ファインマンは分子の長さでも物理法則が有効であることを指摘した。実現の難しさはさておき、原子レベルで精密に作られた部品でナノカーを組み立てたり、ナノマシンの量産工場を作ることも原理的には十分可能なのだ。

それから数十年間、ファインマンのこの講演はナノテク研究を刺激し続けてきた。一方、生体細胞に対する見方は、代謝を行う酵素の“スープ鍋”から機械的に連結したナノモーター群からなる“精密時計”というイメージへ



エサにつられて… 触媒ナノロッドは燃料の存在下で直線運動と不規則な方向転換を繰り返すが、燃料が濃いところでは移動距離が長くなる。細菌がエサ

の匂いにつられるように、ナノロッドは燃料の化学勾配が高い方へ移動する。燃料をしみ込ませたゲル(各写真の左上)の周囲にロッドが集まっているのがわかる。

ブラウン運動を利用する

分子は決して静止することではなく、液体の場合、その不規則な動きは「ブラウン運動」と呼ばれている。化学者たちはいま世界初の人工ブラウン・ラチェットを製作しようとしている。ブラウン・ラチェットとは、ブラウン運動に逆らうのではなく逆に利用する分子サイズのマシンのこと、例えば英エディンバ

ラ大学のリー (David Leigh) のチームは、不規則な運動を方向性のある動きに変える“モノレール・システム”を開発している (下の図)。彼らの発明は熱力学の法則 (ただで得られるものはないという原理) に反した永久機関のように見えるが、ブラウン運動から特定の動きを選び出す過程自体がエネルギーを消費し、このモノレールも例外ではない。エネルギーの供給が停止すれば、運動も止まる。

1 車両が不規則に運動

モノレール車両の分子は液体に浸された1本のレールに沿って移動できるようになっている。車両にはエンジンがなく、車両がブラウン運動にさらされて、液体の超高速分子が当たるたびに不規則に前後進する。

2 障害物に妨害される

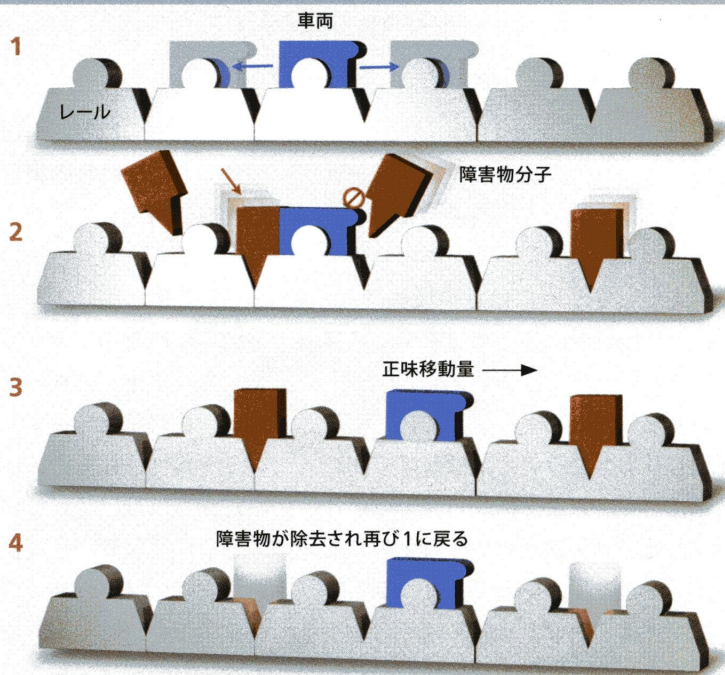
液体内の分子はレールとも結合し、障害物となる。一方、車両は前後非対称に設計されているため、車両前方には障害物分子が結合できない。

3 不規則運動から一方向の動きを選ぶ

ブラウン運動をしている分子が車両に当たっても、障害物が後方にあると後進はできない。この障害物のおかげで、車両の移動は後進よりも前進の可能性が高くなる。

4 障害物が除去される

別の溶液によって障害物の分子が周期的に分解されるため、車両分子は前進し続ける。1回の前進は不規則で、ブラウン運動からエネルギーを得るが、熱力学の第二法則に従い障害物の分解にはエネルギーが消費される。



DON FOLEY

変わった。多くの意味で細胞はファインマンが思い描いた“分子工場”といえる。

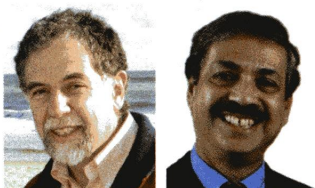
研究者は生物学にヒントを得て非生物モーターの製造法について多くを学んだものの、微小サイズにおける触媒推進の原理について知るべきことは数多く残っている。今後の研究で臨床医学やエネルギー変換、化学合成などの分野でこうした知見を活用する、思いもよらぬ方法が見つかるだろう。

(翻訳協力: 長尾武彦)

監修 鈴木正浩 (すずき・まさひろ)

信州大学大学院総合工学系研究科生命機能・ファイバー工学専攻の准教授。著者のマルーク教授のもとで研究員として人工光合成システムを研究し、帰国後も共同研究を進めている。専門は超分子光化学で、主に刺激応答性超分子ゲルを研究している。

COURTESY OF THE AUTHORS



著者 Thomas E. Mallouk / Ayusman Sen

マルーク (左) はペンシルベニア州立大学の物質化学と物理学の教授。ナノスケールの無機物の合成および特性を研究している。セン (右) はインドのカルカッタ生まれで、現在はペンシルベニア州立大学の教授。触媒反応と無機物および有機物の研究を主とし、ワイン学と美食の探究などを趣味としている。2人は何気ないおしゃべりの最中に、マルークの研究室がすでに製作していたナノロッドを使えば、センの発案した触媒モーターが実現可能であることに気付いた。

原題名

Powering Nanorobots (SCIENTIFIC AMERICAN May 2009)

もっと知るには…

LIFE AT LOW REYNOLDS NUMBER. E. M. Purcell in *American Journal of Physics*, Vol. 45, No. 1, pages 3–11; January 1977.

MOLECULES, MUSCLES AND MACHINES: UNIVERSAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF MOTORS. James H. Marden and Lee R. Allen in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 99, No. 7, pages 4161–4166; April 2, 2002.

CHEMICAL LOCOMOTION. Walter F. Paxton, Shakuntala Sundararajan, Thomas E. Mallouk and Ayusman Sen in *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 45, Issue 33, pages 5420–5429; August 18, 2006.

CAN MAN-MADE NANOMACHINES COMPETE WITH NATURE BIOMOTORS? Joseph Wang in *ACS Nano*, Vol. 3, No. 1, pages 4–9; January 27, 2009.

食糧不足で現代文明が滅びる？

世界秩序に対する最大の脅威は

貧困国の政府崩壊を引き起こす食糧危機の可能性だ

ますます悪化する環境破壊によってその危機が高まっている

L. R. ブラウン (地球政策研究所)

突然の変化を予想するのは難しい。私たちはふつう、過去のトレンドを外挿することによって未来を予想する。このアプローチはたいていの場合うまくいく。しかし時には見事に失敗し、今日の経済危機のような出来事に不意打ちを食わされる。

ほとんどの人にとって、現代文明が崩壊するという考えはばかげて聞こえるだろう。日常生活から完全にかけ離れたそんな事柄を真剣に考えることが困難でない人があるだろうか？ どんな証拠があれば、私たちはそんな不吉な警告に耳を傾け、懸命に対処するようになるだろうか？

私たちは、ありそうにもない破局の恐れを飽きるほど聞かされて耳にたこができ、そうした一切の警告を「またか」という感じで無視するのが習性になっている。そう、確かに人類の文明は大混乱に陥るかもしれない、何せ地球が小惑星と衝突する恐れだってあるくらいだから——というわけだ。

私は世界の農業、人口、環境、経済の傾向と、それらの相互作用を長年にわたって研究してきた。それらトレンドの複合的影響と、その結果として生じる政治的緊張は、いくつかの政府と社会の崩壊を指し示している。それでも、食糧不足が個別の政府だけでなく地球規模の文明を破滅させかねないという考えには私も抵抗があった。

だが私はもはや、そのリスクを無視できない。世界の食糧経済を蝕みつつある環境破壊——特に地下水面の低下、土壌の浸食、気温上昇に私たちは相変わらず対処できておらず、そうした世界文明崩壊が起こりうると結論せざるをえない。

破綻国家の問題

現在の世界秩序の状況をざっと見ただけでも、残念ながら私の結論は裏づけられる。私たち環境分野の人間は複数の環境悪化トレンドをかれこれ30年近くも指摘してきたが、その間、そ

れらトレンドのどれ1つについても傾向逆転を図る目覚ましい努力はなされていない。

過去9年のうち6年は世界の穀物生産が消費を下回り、穀物備蓄量の減少を招いた。2008年の収穫開始時に、世界の穀物持ち越し備蓄（新収穫期の初めに存在する在庫量）は消費62日分で、最低記録に近かった。この影響で、昨年春と夏の世界穀物価格は過去最高水準に上がった。

供給を上回るスピードで食糧需要が増えた結果、食糧価格が高騰し、かねて破綻の危機に瀕している各国政府を厳しく圧迫している。穀物を購入あるいは自給できないため、飢えた人々がデモを起こしている。実際、2008年に穀物価格が高騰する以前にも、破綻に瀕する国家の数は増えていた（70ページ左上の囲み参照）。主に人口抑制に失敗したことによるが、食糧事情が悪化し続けたら、これらの国々はすべて、これまで以上のスピードで崩壊に向かうだろう。

私たちは地政学的に新しい時代に入った。20世紀には、国際安全保障に対する主な脅威は超大国の対立だったが、現在の脅威は破綻しつつある国々だ。力の集中ではなく、その不在が私たちを脅かしている。

貧困国の現実 コンゴ民主共和国のドゥビエの村で食べ物を求める子どもたち。2005年12月に撮影。

世界秩序の崩壊に先手を打て

- 食糧不足とそれに伴う食糧価格の高騰が貧困国を大混乱に陥れている。
- そうした「破綻国家」は病気やテロリズム、違法薬物、武器、難民を世界に広げる源になりかねない。
- 水不足と土壌喪失、地球温暖化による気温上昇によって、食糧生産には厳しい限界が生まれている。
- これら3つの環境要因に対する大規模な取り組みを迅速に行わないと、一連の政府が崩壊して世界秩序が脅かされかねないと著者は主張する。



破綻しつつある国々

平和基金会 (Fund for Peace) とカーネギー国際平和基金は共同で毎年、各国の状態を12の社会的、経済的、政治的、軍事的な指標について分析し、得点づけている。下は2007年での合計点が最も低かった国から順に並べたもので、国家崩壊に近い20カ国のリストだ。

- | | |
|------------|----------|
| ①ソマリア | ⑪ギニア |
| ②スーダン | ⑫バングラデシュ |
| ③ジンバブエ | ⑬ミャンマー |
| ④チャド | ⑭ハイチ |
| ⑤イラク | ⑮北朝鮮 |
| ⑥コンゴ民主共和国 | ⑯エチオピア |
| ⑦アフガニスタン | ⑰ウガンダ |
| ⑧コートジボワール | ⑱レバノン |
| ⑨パキスタン | ⑲ナイジェリア |
| ⑩中央アフリカ共和国 | ⑳スリランカ |

SOURCE: "The Failed States Index 2008," by the Fund for Peace and the Carnegie Endowment for International Peace, in Foreign Policy, July/August 2008

個人の安全と食糧安全保障、教育や医療など基本的な社会サービスを政府が提供できなくなったのが破綻国家で、国土の一部または全域を統治できなくなる場合がしばしばだ。政府が支配力を一手に握れなくなると、法と秩序が崩れ始める。ある時点で国は非常に危うくなり、救援食糧物資を扱う職員の安全が確保できなくなって救援事業が停止する。現にソマリアとアフガニス

タンでは、状況悪化によってそうした事業が危機に陥っている。

破綻国家が国際的懸念となっているのは、それらがテロや麻薬、武器、難民の輸出元となって世界のあちこちで政治的安定を脅かすからだ。2008年の破綻国家リストの第1位であるソマリアは海賊行為の基地になってしまった。第5位のイラクはテロリスト訓練の温床であり、第7位のアフガニスタンは世界最大級のヘロイン供給元だ。ルワンダでは1994年の大量虐殺によって多くの難民が生まれ、数千人の武装兵士とともに国外に流出して、隣国のコンゴ民主共和国(同リスト第6位)の情勢悪化に拍車をかけた。

私たちの世界文明は政治的に健全な国民国家のネットワークによって、感染症の拡大を抑制し、国際金融システムを管理し、国際テロを抑え込み、そのほか多くの共通の目的を達成している。もしポリオや新型肺炎SARS、鳥インフルエンザなどの感染症を抑えるシステムが崩れれば、人類は困難にさらされるだろう。また、破綻国家が他国への債務を履行するとは期待できない。国々が崩壊すると、世界文明そのものの安定性が脅かされることになる。

新種の食糧不足

2007年と2008年の世界穀物価格の高騰とそれが食糧安全保障にもたらした危機は過去の事例とは質的に異なり、より厄介な問題を抱えている。

20世紀後半、穀物価格は何度か劇的な上昇を示した。例えば1972年、当時のソビエト連邦は自国の不作をいち早く察知し、密かに世界的小麦市場を買い占めた。その結果、小麦価格は各所で2倍以上に高騰し、米とトウモロコシの価格もそれに従って上がった。しかし、これらの価格ショックは、ソ連の干ばつやインドにおけるモンスーン不順、米国のコーンベルトでの異常高温など、特定の事象が引き金となった「イベント・ドリブン型」だった。価格高騰は短期間で終わり、次シーズンの収穫とともにほぼ標準に戻った。

対照的に、近年の世界穀物価格急騰は複数のトレンドを背景とした「トレンド・ドリブン型」であり、そうした潮流そのものを変えない限り逆転しそうにない。需要側についていうと、まず人口が毎年7000万人以上増え続けていることがある。また、多くの穀物を必要とする畜産品など、高級な食材を求める人口が増えている(N. フィ

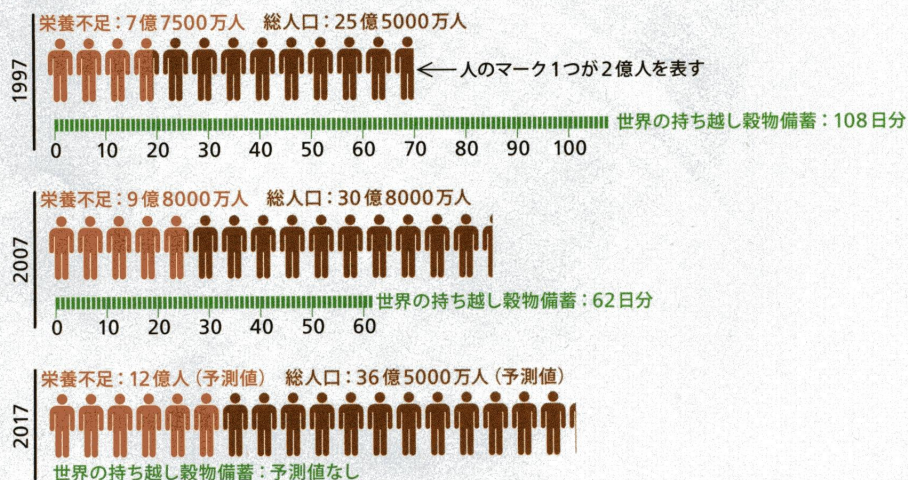
深刻化する食糧不足——2つの数値が示す悪化傾向

世界の低開発70カ国で慢性的栄養不足にさらされている人は絶対数も比率もともに増えている。一方、世界の持ち越し穀物備蓄(新たな収穫が始まる時点での在庫量)は減りつつある。



出典：米農務省、2008年；米国勢調査局

低開発70カ国で飢えた人々が増加



このように食糧経済とエネルギー経済が融合したということは、穀物の食糧としての価格が燃料としての価格を下回ったなら、穀物がエネルギー市場へと流されることを意味する。こうしたダブル需要は穀物供給をめぐる自動車と人間の競争につながり、先例のない政治的・倫理的問題をもたらす。米国は穀物を主原料とする燃料への転換によって石油の海外依存を減らそうという心得違いの取り組みを通じて、世

71

った脅威は水不足の広がりだ。最大の難問は、世界の淡水の70%を消費している灌漑（かんがい）である。多くの国にある何百万もの灌漑井戸は現在、降雨による補充を上回るスピードで地下水源から水を汲み上げている。その結果、3大穀物生産国である中国とインド、米国を含め、世界人口の半数が住む国々で地下水面が低下している。

帯水層は通常は再充填されるが、最も重要な帯水層のいくつかは違う。いわゆる「化石帯水層」がそれで、古代の水を保存しているが降水による補充が利かないものだ。米国のグレートプレーンズの地下にあるオガララ帯水層、サウジアラビアの帯水層、中国華北平原の地下深くにある帯水層など、これら化石帯水層が枯れると、もはや水の汲み上げは二度とできなくなる。乾燥した地方の場合、農業そのものが

破綻国が世界を脅かす理由

ある国の政府が市民に安全や基本的なサービスを提供できなくなると、その結果として生じる社会的な大混乱によって、深刻な悪影響が国境を越えて他国へも広がる恐れがある。

- 感染症が拡大
- 無法地帯となって、テロリストと海賊の天国に
- 麻薬や武器の取り引きが拡大
- 政治的に極端な勢力が生じやすい
- 暴徒と難民が生じ、近隣諸国にも流入

不可能になるだろう。

中国では、同国の小麦の過半とトウモロコシの1/3を産出する華北平原の地下水面が急速に低下している。過剰汲み上げによって浅部帯水層の水がほぼ使い果たされ、再充填の利かない深部帯水層にまで井戸を掘らざるをえなくなった。世界銀行の報告書によると、

水使用と供給のバランスを速やかに回復しない限り「将来の世代にとって破滅的な結果」が生じると予想される。

地下水面が低下し灌漑井戸が枯れたため、中国の小麦収穫量（世界最大）は1997年に1億2300万トンでピークに達してから現在までに8%減った。米の生産は同期間に4%減った。世界で最も人口の多いこの国は、間もなく大量の穀物を輸入することになるかもしれない。

しかし水不足はインドのほうがさらに気がかりだ。インドは食糧消費量が生存に必要なレベルぎりぎりの不安定な状況にある。多数の灌漑井戸によって、ほぼ全国にわたって地下水面が低下した。ピアース（Fred Pearce）は *New Scientist* 誌にこう報告している。

「インドの伝統的な手掘り井戸の半数と何百万もの浅いポンプ井戸が枯れ、それらに頼って生きてきた人々の間で自殺が急増した。最高1kmの深さから水をポンプで汲み上げるのに総電力の半分を使っている諸州では、停電が日常茶飯事となっている」

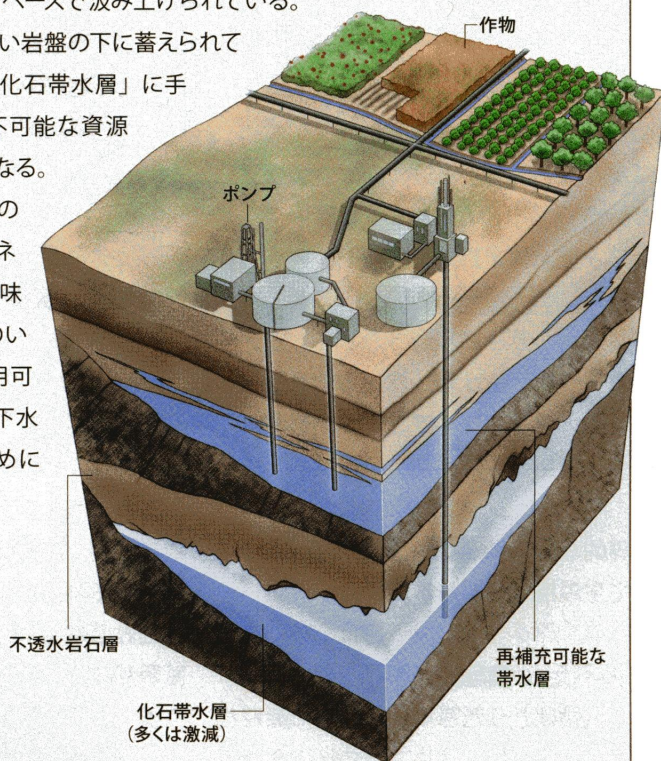
世界銀行の調査によると、インドの食糧供給のうち15%が地下水汲み上げによって生産されている。別の表現をすれば、1億7500万人のインド人は間もなく枯渇するだろう灌漑井戸の水によって生産された穀物を消費して生きている。このまま水供給が細り続けると、手のつけられない食糧不足と社会紛争につながりかねない。

地下水面の低下——灌漑が水不足に拍車

最も大量の淡水を使っているのが灌漑で、淡水利用の70%を占める。灌漑はほとんどの集約農業に不可欠だが、灌漑作物に水を供給している帯水層の多くは降雨による補充を上回るペースで汲み上げられている。

さらに、雨水を通さない岩盤の下に蓄えられている古代の水である「化石帯水層」に手をつけた場合、再生不可能な資源を採掘していることになる。

より深い井戸からの汲み上げは、多くのエネルギーを食うという意味でも問題だ。インドのいくつかの州では、利用可能な電力の半分が地下水汲み上げポンプのために消費されている。



土壌喪失で飢餓拡大

第2の気がかりなトレンド、表土喪失の行く末も恐るべきものだ。世界の耕地のおそらく1/3で、表土が生成を上回るスピードで浸食されている。植物に栄養を与えているこの薄い層は文明を支えるまさに基盤であり、地質学的な長い年月をかけて蓄積されたものだが、わずか15cmほどの厚みしかない。風と水による表土喪失のため、初

期文明のいくつかが滅びた。

2002年、ある国連チームがレソトの食糧状況を評価した。レソトは南アフリカ共和国に囲まれた小さな内陸国で、200万人が暮らしている。チームが発見したのは、農業が破滅的な将来に直面しているという明白な事実だった。「収穫は減り続けており、土壌の浸食・減損と肥沃度低下を逆転する手を講じなければ、同国の大部分で収穫は完全に不可能になる恐れがある」。

中米に目を転じると、ハイチ（最も早く破綻の危機が認識された国の1つ）は40年前には穀物をほぼ自給していたのに、その後、森林の大半と表土の多くを失い、穀物需要の半分以上を輸入せざるをえなくなった。

第3の要因、食糧安全保障をおそらく最も広域的に脅かす環境問題である気温上昇は、世界各所の収穫高に影響を及ぼす可能性がある。多くの国で、農作物はそれぞれ最適またはそれに近い温度条件で栽培されているので、成長期の間にわずかな温度上昇が生じただけでも収穫量が減る。米国科学アカデミーが公表した研究結果は農業生態学者たちの経験則を確認した。気温が基準温度より1℃上昇するごとに、小麦と米、トウモロコシの収穫量はそれぞれ10%減る。

1960年代と1970年代に肥料と灌漑、高収率品種の小麦と米によって「緑の革命」が達成されたように、過去においては、食糧需要増への対応策は科学的農業の適切な実施だった。技術的な解決策だ。しかし今回は残念ながら、生産性向上をもたらす農業技術のほとんどがすでに実施済みであり、農地の生産性上昇は長期的に見ると鈍っている。1950年から1990年までは、世界の耕地面積あたりの穀物収穫量が年率2%以上で増え、人口の増加を上回っていた。しかし1990年以降、収穫量の伸びは年率1%をわずかに超える水準にまで鈍化している。日本と中国で

細る土壌——耕地が失われつつある

世界の食糧供給を支えるうえで不可欠なもう1つの要素である表土もまた、本質的に再生不可能な資源だ。湿気と有機物・無機物が十分に供給されている健全な生態系であっても、厚さ1インチ(2.5cm)の表土ができるには数百年かかる。土壌を安定させている植物が消失すると(森林伐採や、過放牧による草地の砂漠化などで)、表土は風と雨によって失われる。道路や建物など、農業以外の使用によっても、耕地は脅かされている。

海や湖

小さな谷



SAMUEL VELASCO 5W/Infographics

の稲作に見られるように、いくつかの国では収穫高が事実上の限界近くに達しているようだ。

一部には、遺伝子組み換え品種を苦境脱出の手段とみる向きもある。しかし残念ながら、「緑の革命」で小麦と米の収穫高が2倍や3倍になったのとは違って、劇的な収穫量増加をもたらすような遺伝子組み換え作物はない。また、そうなる見込みもない。収量増につながる形質のほとんどは、従来の育種技法を通じてすでに品種改良に利用済みだからだ。

食糧確保を図る策動

世界の食糧安全保障に緩みが生じるにつれ、食糧不足に対する危険な政策が現れるようになった。個別の国家が狭量な自己利益に基づいて行動し、多数の国が直面する窮状をむしろ悪化さ

せているのだ。

このトレンドは2007年に始まった。ロシアとアルゼンチンなど主要な小麦輸出国が、自国の国内需要に振り向ける小麦の量を増やすことで国内食糧価格を下げることを狙い、輸出を制限あるいは禁止した。ベトナムはタイに次ぐ世界第2位の米輸出国だが、同じ理由で米の輸出を数カ月間禁止した。こうした動きは当の穀物輸出国に住む人々を安心させるかもしれないが、残る輸出可能穀物に依存せざるをえない輸入国にパニックを引き起こしている。

輸入国はこうした規制に対応して、将来の穀物供給を確保すべく長期的な二国間貿易協定をとりつけようとしている。フィリピンは世界市場からの米の調達にもはや頼れなくなったため、ベトナムとの間で年間150万トンの米供給を保証する3年契約を最近になっ

て結んだ。食糧輸入をめぐる不安は、輸入国が他国の農地を買収あるいは賃借するというこれまでにない動きまで生んでいる（右の囲み参照）。

こうした一時しのぎの方策が取られてはいるが、他の多くの国々での価格高騰と飢餓の拡大が社会秩序を打ち壊し始めている。タイの複数の地方では「米どろぼう」による強奪を防ぐため、農民が夜間にショットガンを持って田んぼを警備しなければならなくなった。パキスタンでは武装兵士が穀物トラックを護送している。スーダンでは2008年前半、ダルフルの難民キャンプに向かう83台の穀物輸送トラックが途中で乗っ取られた。

食糧供給逼迫の影響から無縁でいられる国はない。“世界のパンかご”である米国でさえ、例外ではない。中国が大量の穀物を世界市場に求めた場合（最近大豆を輸入したように）、米国から購入せざるをえないだろう。米国の消費者にとってこれは、所得急増中の13億人の中国人消費者と米国産穀物をめぐって競い合うことを意味する。悪夢のようなシナリオだ。

そうなった場合、米国は輸出制限の

危うい政治ゲーム

将来の穀物供給を心配して、いくつかの国は他の穀物生産国と密かに交渉し、他国で耕作する権利を得ようとしている。この行為は他の穀物輸入国への供給を圧迫し、穀物価格の上昇を招く。以下にいくつか例を挙げる。

■ 中国

オーストラリア、ブラジル、ミャンマー、ロシア、ウガンダから土地を賃借しようとしている。

■ サウジアラビア

エジプト、パキスタン、南アフリカ共和国、スーダン、タイ、トルコ、ウクライナで農地を探している。

■ インド

複数の農業企業がパラグアイとウルグアイに耕地を探している。

■ リビア

自国の油田での採掘権を与えるのと引き換えに、ウクライナから1000km²の土地を借りている。

■ 韓国

マダガスカル、ロシア、スーダンの土地利用を目指している。

誘惑にかられるかもしれない（実際、国内価格が高騰した1970年代に穀物と大豆の輸出を制限した例などがある）。しかし、中国に対してはこの選択肢は取りえない。中国の投資家は現

在1兆ドルを優に超えるドルを保有しているし、財政赤字をカバーするため発行された米国債の主要購入者でもある。好むと好まざるとにかかわらず、食糧価格がいかに高騰しても、米国の消費者は中国の消費者と穀物を分け合うことになる。

唯一の選択肢「プランB」

現在の世界食糧不足はトレンド・ドリブン型だから、原因となっている環境トレンドを逆転しなければならない。それには、従来通りのやり方（私たち地球政策研究所が「プランA」と呼ぶもの）からの大転換という、途方もなく厳しい手だてが必要になる。文明を救うための第二案、「プランB」だ。

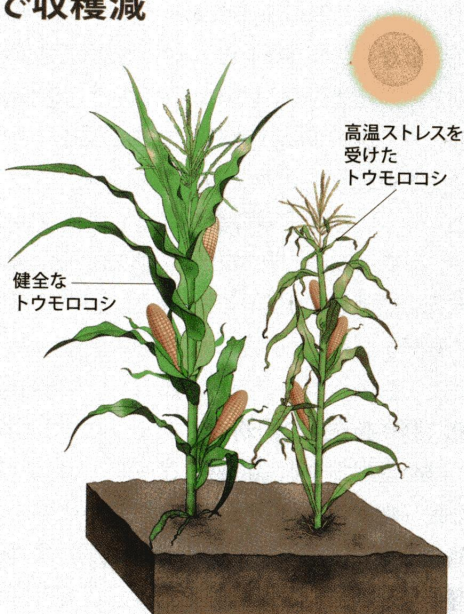
第二次世界大戦で米国が国家を総動員したのと同じ規模と緊急性が求められるこのプランBは4つの部分からなる。①2020年までに二酸化炭素排出を2006年水準の80%減にカットする大規模な努力、②2040年までに世界人口を80億人で安定化、③貧困の根絶、④森林と土壌、帯水層の回復——の4つだ。

二酸化炭素の正味排出は、エネルギー効率の計画的な向上と、再生可能エネルギー源の開発に大規模に投資することによって削減可能だ。また、いくつかの国がすでに行っているように、森林破壊を世界で禁止し、二酸化炭素吸収のために何十億本もの木を植える必要もある。化石燃料から再生可能エネルギーへの移行は、炭素税を課す一方で所得減税によって増税分を相殺することによって加速できる。

人口安定化と貧困根絶は相互に関連して進む。小家族への移行を速めるうえでのカギは貧困の根絶であり、その逆も真だ。1つの方法は、すべての子どもたちが、男の子と同様に女の子も、少なくとも小学校教育を確実に受けられるようにすること。もう1つは、村レベルの基本的な保健サービスを提供

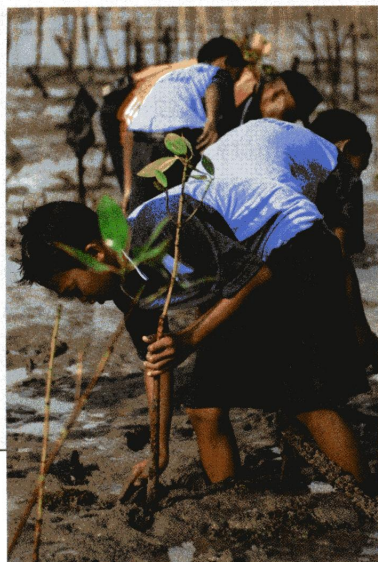
気温上昇——温暖化で収穫減

過去1万1000年にわたる農耕の歴史を通じて、気候システムはほとんど変化しなかった。現在の農業は、その気候システムに基づいて形作られたものだ。多くの作物はそうした安定な条件のもとで最大の収穫をもたらすように改良されたものなので、地球温暖化によって気温が上がると耕地面積あたりの収穫量は低下するだろう。農作物生態学者の計算によると、平均気温が例年水準より1℃上がるごとに、米と麦、トウモロコシの収穫量は最大10%低下する。



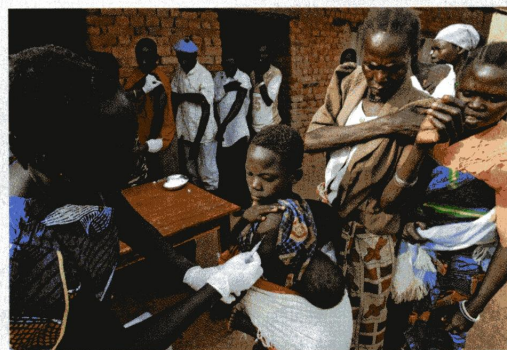
解決策——「4つの柱」を軸に

文明を脅かす諸要因を正すために著者が示す「プランB」は4本柱の行動計画だ。①2020年までに二酸化炭素排出を2006年水準の20%に削減する大規模な取り組み、②2040年までに世界の人口を80億人以下で安定化、③貧困の根絶、④森林と土壌、帯水層の回復——これらの目標達成に必要となる大掛かりな取り組みのうち、いくつかを示す。



▲電力と熱に使われている化石燃料を再生可能エネルギーに転換する。

◀植林によって、洪水を減らし、土壌を保全し、二酸化炭素を吸収し、伐採による森林減少を埋め合わせる。



▲基本的な保健サービスと出産健康管理、家族計画をくまなく提供する。



▲廃水をリサイクルして生産性を上げる。写真はカリフォルニア州オレンジ郡の汚水処理プラント。

し、人々が自分の子どもたちが成人するまで生き残って育つと確信できるようにすることだ。全世界の女性が出産健康管理と家族計画サービスを利用できるようにする必要がある。

地球の生態系と天然資源を修復するという第4の要素については、水の生産性を上げることによって地下水面の低下を抑える世界規模の取り組みを導入する。これによって、すでに利用している水から「もう一滴」を搾り出すことができる。つまり、より効率的な灌漑システムへの転換と、より少ない水で育つ作物への移行が必要だ。これは、ある国については、多くの水を必要とする米の栽培（と消費）を減らし、

代わりに小麦を増やすことを意味する。また産業と都市については、一部ですで行われていること、つまり水をリサイクルし続けることを意味する。

同時に、土壌を保全する世界的な取り組みを始める必要がある。1930年代に米国が中西部のダストボウル（黄塵地帯）で行った対策と似ている。最重要の土壌保全処置としては、傾斜地を段状に整地する、土が風に吹き飛ばされないよう防風林を設ける、耕起を最小限に抑える（農地を耕さず、収穫後に残留物を農地にそのまま残しておく）、といった手法がある。

これら相互に関係する4つの目的は、何ら新しいものではない。個別には何年も前から議論されてきた。それどころか、貧困緩和を目指して設立された世界銀行など、いくつかの問題につい

ては解決に取り組む専門機関も作られている。そして、少なくとも1つの問題に関しては、いくつかの地域で相当の前進を果たした。家族計画サービスの提供と、それに伴う小家族化によって、人口が安定化した地域がある。

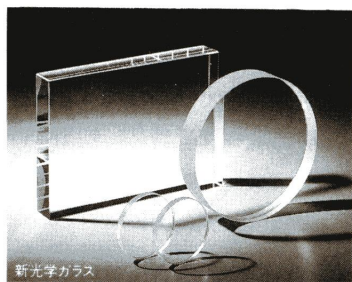
プランBのこれら4つのゴールは開発コミュニティの多くの人から前向きに受け止められてきた。費用がかかりすぎない限り、開発を促進することになるからだ。また他の人はこれを人道的な目標ととらえた。政治的に正しく、倫理的にも妥当なとらえ方だ。

そしていま、第3の、そしてはるかに重大な存在理由が出現した。つまり、私たちの文明の崩壊を防ぐには、これらの目標達成が必要と考えられる。私たちの見積みでは、文明を救うために必要となるコストは年間2000億ド



やがて目覚める
無限の可能性。

さまざまな用途に使われる「ガラス」。
まだ無限の可能性を秘めてその力は眠っています。
テクノロジーを駆使したガラスは先進のエレクトロニクスを舞台にぞくぞくデビュー。
未来を築く新しい材料として活躍します。
ガラスの力を呼び覚ますのはオハラの高テク技術です。



新光学ガラス

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

〒229-1186 神奈川県相模原市小山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76>

私たちに必要なのは 「縛りとなる枠組みなどない」 という考え方だ

ルに満たず、現在の世界の軍事支出の1/6にすぎない。実際、プランBは新しい形の安全保障費なのだ。

時間：最も希少な資源

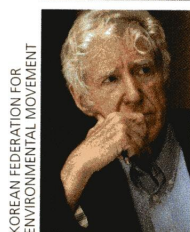
目標はプランBを実行することだけではない。それを速やかに実行することだ。世界は政治的臨界点と自然の臨界点の綱引き状態にある。例えばグリーンランドの氷床が海になだれ込んで海岸線が水浸しになるよりも早く、石炭火力発電所の閉鎖を実行できるか。十分なスピードで二酸化炭素の排出を削減し、アジアの山岳氷河を保てるか。これら山岳氷河の融水は、インドと中国の主要河川を乾季に維持している水源であり、ひいては何億人もの人々を支えている。インドやパキスタン、イエメンなどの国々が農業灌漑用水の不足によって立ち往生する前に、人口を安定化できるだろうか？

私たちが直面している苦境の緊急性は、いくら強調しても強調すぎることはない。1日といえども無駄にはできない。残念なことに私たちは、例えばグリーンランドの氷床を保全できなくなるまで、どれだけの期間にわたって石炭火力発電で都市を照明し続けられるのか、わからない。最終期限を決めるのは自然だ。自然がタイムキーパーなのだが、私たち人間はその時計を見ることができない。

私たちは新しい思考様式を絶対的に必要としている。私たちをこの苦境に陥れた従来の考え方は、苦境脱出の助けにはならないだろう。New Yorker誌の記者コルバート(Elizabeth Kolbert)がエネルギー問題の権威ロビンズ(Amory Lovins)に対して「従来の枠組みにとらわれない新しい妙案はないか」と尋ねたとき、ロビンズはこう答えた。「私たちを縛る枠組みなど、そもそもないと考えることだ」。

私たちを縛る枠組みなどない。文明を生き残らせるために私たちが必要とする思考様式は、まさにこれである。

(編集部 訳)



著者 Lester R. Brown

Washington Post紙の言を借りると「世界で最も影響力のある思想家の一人」であり、カルカッタのTelegraph紙は「環境運動の導師」と呼んだ。1974年にワールドウォッチ研究所を、2001年に地球政策研究所を創設し、現在は地球政策研究所の所長。50冊の著書・共著書がある。最新刊は『プランB3.0 人類文明を救うために』(邦訳はワールドウォッチジャパン)。24の名誉学位とマッカーサー・フェローシップを含め、多くの賞を受賞している。

原題名

Could Food Shortages Bring Down Civilization? (SCIENTIFIC AMERICAN May 2009)

もっと知るには...

OUTGROWING THE EARTH: THE FOOD SECURITY CHALLENGE IN AN AGE OF FALLING WATER TABLES AND RISING TEMPERATURES. Lester R. Brown. W. W. Norton, Earth Policy Institute, 2004. これは<http://www.earthpolicy.org/Books/Out/Contents.htm>から入手可能。

COLLAPSE: HOW SOCIETIES CHOOSE TO FAIL OR SUCCEED. Jared Diamond. Penguin, 2005. CLIMATE CHANGE 2007. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2007. <http://www.ipcc.ch>

なお、IPCC第4次評価報告書の日本語訳へのリンクが以下の気象庁のページにある。<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/index.html>

PLAN B 3.0: MOBILIZING TO SAVE CIVILIZATION. Lester R. Brown. W. W. Norton, Earth Policy Institute, 2008. これは<http://www.earthpolicy.org/Books/PB3>から入手可能。

科学が要請する 排出削減は？

イラスト・石井正美



塩谷喜雄 **科学世評**
いまだき

2020年には、CO₂など温室効果ガスの排出を2005年比で15%削減する。麻生首相はこの中期目標を発表する記者会見で、「温暖化防止交渉で日本はリーダーシップを発揮する」と、ちょっぴり「みえ」をきってみせた。

折からドイツで開催中だった温暖化防止の国連作業部会（AWG）では、意欲的なはずのこの目標を「消極的」「逃げ腰」とする日本批判が相次ぎ、不名誉な「化石賞」をちょうだいした。前向きか後ろ向きかの評価は、多分に価値観に左右されるので、熟慮の末の合理的選択ならば、批判にひるむ必要はない。

気になるのは、日本の目標を「目くらまし」とする指摘が多いことだ。世界第2の経済大国の最高権力者が胸を張って発表した数字が、詐術とか目くらましの類であっていいはずはない。それは、世界に向かって、日本が信頼を賭けて公約したものなのだから……。

目くらまし呼ばわりは、首相の発表がすべて2005年比の数字であることからきているようだ。この基準年問題はずっとくすぶり続けている難題ではある。その国の産業構造やエネルギー構造によって、基準年をどこにとるかで、見かけ上の削減率が大きく変わってくるからだ。

日本の財界の一部と経産省は1990

年比は日本には著しく不利だと主張してきた。オイルショック後に省エネに努めて世界一のエネルギー効率を達成した時期と重なるからで、そこを基準にして欧米横並びの削減率を義務付けられては、日本は相対的に重い負担をかぶるという理屈である。

とてもわかりやすい分、「日本は京都で不平等条約をのまされた」などという被害者意識、薄っぺらなナショナリズムとすぐに結びついてしまう。排出枠の配分で、公平な基準年などというのは存在しない。ことの本質は軍縮問題とよく似ている。基準をどこに設定しようと、必ず有利不利のどこができる。

だから京都議定書では、森林吸収や排出量取引などを導入して、そこでどこをならすように配慮している。排出削減義務は、1990年比で日本とカナダが6%、米国が7%、EU（欧州連合）が8%だが、日本は森林が吸収する分として3.8%、海外の排出削減に協力する分として1.6%を認められ、国内での純粋な削減はわずか0.6%である。

ドイツや英国に認められている森林吸収分はわずか0.4%ほどで、日本の1/10でしかない。当然、京都議定書を日本の国会は満場一致で批准・承認した。また、国際交渉の場では、経済界も経産省も京都議定書は不平等条約

などとは決して言わない。国際社会では通用しない、国内向けの内向き議論でだけボリュームアップする主張であることを、熟知しているからだろう。

基準年議論の危ういところはまだある。自らが主導しておきながらブッシュ政権になって京都議定書から勝手に離脱した米国は、2005年時点で排出量が90年より14%も増えてしまった。それを90年のレベルに戻すだけで、05年比では14%減になるのである。

日本も最近まで有効な政策措置をとらず、産業界の自主行動に依存した結果、05年には排出量が90年比6%以上増えた。このため、90年比で8%減らすだけで05年比は15%減になる。欧州は排出量取引の導入や太陽光や風力などの再生可能エネルギーの定額全量買い取り制度などで05年には90年比で6~7%減らしており、90年比20%減という意欲的な目標も、05年比にすると13%減にしぼんでしまう。

試合の途中でルールを変えるところという妙な具合になる。エネルギーを使いまくってCO₂を垂れ流し続けてきた国が得なのだ。「省エネが進んでいる日本に配慮した公平な配分」を主張している日本が、効率改善をさぼった国ほど有利になる基準年変更を求めている。自己矛盾であり、低炭素社会の本質から逸脱している。

科学が求めているのは、先進国全体で2020年までに90年比25~40%の削減である。科学の示唆に応じて、将来の危機と多額の経済負担を、事前に回避するというのが、国連気候変動枠組み条約の趣旨である。そのための排出枠の合理的な配分が国際交渉の本題だ。

奇妙な数字遊びに、文明の未来を託すわけにはいかない。90年比8%減、京都議定書の目標にわずか2ポイントかさ上げしたにすぎない目標を、欧米を上回るなどと強弁すると、批判ではなく失笑や冷笑を買うことになる。

（しおや・よしお：日本経済新聞論説委員）

パズルの国 Alice's Adventure in Puzzle-Land のアリス



運試しのような神経衰弱

坂井 公 (筑波大学)

題字・イラスト：斉藤重之

ヤマネが帽子屋とトランプの神経衰弱をしていた。

アリスが見ていると、最初にヤマネがハートのAとスペードのKをめくった。次に帽子屋はスペードのAをめく

ったがハートのAを取ろうとしない。

「あなた、覚えてないの？ さっきハートのAが出てたじゃない」とアリスはつい口を出した。

「失敬なやつだな。わかってもいな

いことに口を出すなって、ママに言われてないのか？」と帽子屋。アリスがキョトンとしてヤマネを見ると、ヤマネは気の毒そうに「この神経衰弱は、カードの番号だけ合ってもだめなんだ



よ。色も合わないと……」。

アリスは、「あんな言い方をしなくとも」と思ったが、ルールも聞かないで口を出したことを後悔して、しばらく黙って見ていることにした。

ゲームがしばらく続くと、帽子屋がヤマネよりずっとうまいことが明らかになった。どうやらヤマネは、めくったカードをろくに覚えていないらしい。しばしばすでにめくったカードを再度めくっている。

たまりかねたアリスが「ねえ、ヤマネさん、それはスペードの7でしょ。さっき、クラブの7が出ていたじゃない」と口を出すと、帽子屋は噛み付きそうな顔でアリスをにらんだ。

アリスが慌てて口を閉ざすと、たまたま通りかかったグリフォンが帽子屋をなだめた。

「確かに口数の多い子だね。でも、帽子屋のだんな、君が強いのはよくわかったから、ヤマネくんにもチャンスをやったらどうだい」

「ふん、めくったカードを覚えていないのは、俺のせいじゃないぜ。いったいどうすればいい？」

「そうだね。一度めくったカードは伏せるのをやめて、開きっぱなしにするってのはどうだい。これなら覚えていられなくとも何とかなる」

「それじゃただの運試しになっちまう。でも、もうだいぶ勝ったあとだし、それで少し付き合ってやるか」

「運試し？ そうかな」とグリフォンはニヤッと笑って、ヤマネになにやら耳打ちした。ヤマネは、ポカンとしてグリフォンの言葉に耳を傾けていたが、やがて頷いた。

ゲームが開始されると、今度はじわじわとヤマネのほうが優勢になってきた。不思議なことに、相変わらずヤマネはすでにめくって外れとわかっている表になったカードを2枚目を選ぶことがある。

帽子屋はかんかんになって、グリフォンにくっつかかった。「やい、グリ

フォン、てめえ、何か変な知恵をつけやがったな。ヤマネのやつ、ときどき外れのカードをわざと選びやがるが、それと関係があるに違いない」。

今月の問題：グリフォンがヤマネに授けた戦略はどういうものだったか？

カードの番号だけでなく色もそろえる以外は通常の神経衰弱通りだが、念のために補足すると、ペアを作った場合には続けてもう一度めくることができる。ゲームでの得点は作ったペア数そのもので、カードの番号は関係ない。

ヒント:「めくったカードが表のまま」に惑わされないように。これはプレイヤーがめくったカードをすべて記憶しながら神経衰弱を進めていると考えればよい。自分の番で2枚めくるときに、既知のカードを選ぶか未知のカードにするかで戦略を考えてみるとよい。

答えは次号、
または7月中旬に下記のウェブサイト。
<http://www.nikkei-science.com/>

先月号の問題と答え

問題:どこからでも好きなところから好きな方向に車を走らせ、一周できたらアリスの勝ちというレースをドードーが提案してきた。ちょうど一周するのにかけりの燃料がコース上に6カ所に分けておいてあり、その

位置と燃料の量は教えてもらえる。燃料を拾って補充しながら、完走できればアリスの勝ちで、途中で燃料切れを起こしたら負けだ。十分な燃料を積んでの試走が許されている。どこから走り出せばよいかをどうすれば知ることができるだろう？



解答例:一周するのに十分な量の燃料を積んでコースのどこから仮に走り出したとしよう。方向はどちらでもいい。燃料を拾うたびにそれを補充しながら旅を続けると、ちょうど一周して出発点に戻ってきたときには、燃料の量は、消費量と補給量が同じだから、最初に出発したときと同じになっているはずだ。

この試走の間じゅう、燃料計の動きを監視していれば、その針が一番低くなった場所があり、そこで燃料が補給されたはずである。従って、その場所からスタートして同じ方向に回れば、燃料計の針がスタート地点での燃料積み込み前の水準より下がることはないので、燃料が空の状態からスタートしてもコースを一周することができる。

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・キャロルによる次の2冊（さまざまな翻訳本や注釈本が出ている）

『不思議の国のアリス』『鏡の国のアリス』



メスだけで生まれた ネズミが語る男女の差

ゲスト

河野友宏 (東京農業大学)

茂木 河野さんは、マウスのメスだけで子供を作る実験に、世界で初めて成功しました。世の中には昆虫のようにメスだけで子供を作れる生物もありますが、哺乳類では起こりえないと考えられていたので、非常に注目されました。「男は必要なのか」といった誤解も生んだようですが(笑)、今日は

実験の狙いは何だったのか、実験から何が見えてきたかについてお聞きしたいと思います。

河野 まず前段として、子供はどうしてできるかについて、少しご説明しておいた方がよいと思います。お父さんがいて、お母さんがいて、卵子と精子が受精して赤ちゃんが生まれる。このことは、私たちの社会で当たり前のように受け入れられています。しかし振り返ってみて、お父さんとお母さん、生物学的に言うとオスの精子とメスの卵子は、一体何が違うのでしょうか。

茂木 すぐにわかるのは形の違いですね。

河野 はい。学生に聞いても、精子は小さくてしっぽが生えていて泳ぐ、卵子は丸くて大きくてメスが排卵する、という答えが返ってきます。しかしよく考えてみると、それは決定的な違いではありません。現代の生殖技術では、もはや精子が精子の形である必要はなくなってきています。父親から精子になる前の細胞を取り出し、ピペットでつまんで卵子に入れてあげれば、子供が生まれるのです。

茂木 精子や卵子は体細胞の中にある常染色体の半分と、性染色体を1本持っていますね。性染色体は卵子は必ずX、精子はXかYだと学校でも習います。

河野 確かに精子も卵子も人間なら22本の常染色体と性染色体を持っていて、精子の性染色体によって子供の性が決まります。ただメスを誕生させる精子のゲノムと、卵子のゲノムを比べるとどうでしょうか。

茂木 精子のゲノムは常染色体とX。卵子も同じですね。

河野 そしてどの染色体にも、同じ遺伝子がのっています。違ったら困るのです。ではなぜ、子供を作るのに精子と卵子のゲノムが必要なのでしょう？ 完全に同じものなら、別に精子と卵子でなくても、卵子2個だっていいということになります。しかし哺乳類の場合、精子と卵子の両方がないと子供は絶対に生まれません。精子と卵子には、どこかに決定的な違いがあるのです。そこが今日、私が一番お話ししたい



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。東京工業大学大学院客員教授。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、1997年)、『脳と妄想』(新潮社、2004年)、『クオリア入門』(筑摩書房、2006年) ほか多数。

ところですよ。

茂木 面白いお話になってきました。

オスとメスの本質的な違いは何か

河野 近年ゲノム・サイエンスが大きく進展し、ヒトもマウスも、ゲノムがすべて解読されました。しかしそれで逆に、ゲノムを全部読んでも、遺伝子の働きを全部理解したことにはならないということがわかってきました。体の中にある細胞は、数万個あると言われる遺伝子がどのようなセットで使われるかによって、その機能が決まります。そして精子と卵子では、働いている遺伝子のセットが違うのです。

茂木 精子と卵子の両方の遺伝子セットが、子供の誕生に必要であると。

河野 はい。遺伝子の働きを調節するのは化学物質です。遺伝子の配列に「働きなさい」と言う物質が付いたり、「働くのをやめなさい」と言う物質が付いたりすることで、働きを制御します。化学的な修飾によって働く遺伝子が変わる仕組みをエピジェネティクスと呼びますが、このエピジェネティクスを担う修飾が、精子と卵子で異なるのです。この違いの一部が、子供ができるかどうかに関わっていることがわかってきました。ならば、もしその化学修飾のパターンをメス型からオス型に変えることができれば、卵子同士で子供を誕生させることができるのではないかと考えたのです。

茂木 そのための実験だったのですね。

河野 そうです。誤解しないで頂きたいのですが、決してメスだけで子供を作りたいと思ったわけではありません。あくまでオスとメス、精子と卵子のゲノムの本質的な違いはすべて化学修飾にあると示すのが目的でした。

茂木 メスの遺伝子の働きをオスのように変えることで子供ができれば、オスとメスの差は本質的に遺伝子の化学修飾の差である、ということの証明になるわけですね。

河野 その通りです。メス型やオス型に化学修飾（マーキング）されるプロセスは、非常に興味深いのです。例えば私のゲノムは、母親の卵子から来たメス型にマーキングされたゲノムと、父親の精子から来たオス型にマーキングされたゲノムできています。つまり私の体細胞ゲノムの半分は、メス型にマーキングされているのです。ところが私が作る精子には、メス型のゲノムはまったく入っていません。精子を作る過程で、すべてオス型にリセットされます。女性も同様にオス型にマーキングされた父親のゲノムを受け継いでいますが、女性を作る卵子はすべてメス型にリセットされています。父親からもらったゲノムもメス型になるのです。

茂木 哺乳類はすべてそうなのですか。

河野 はい、このような性によるゲノムのリセット機構を持

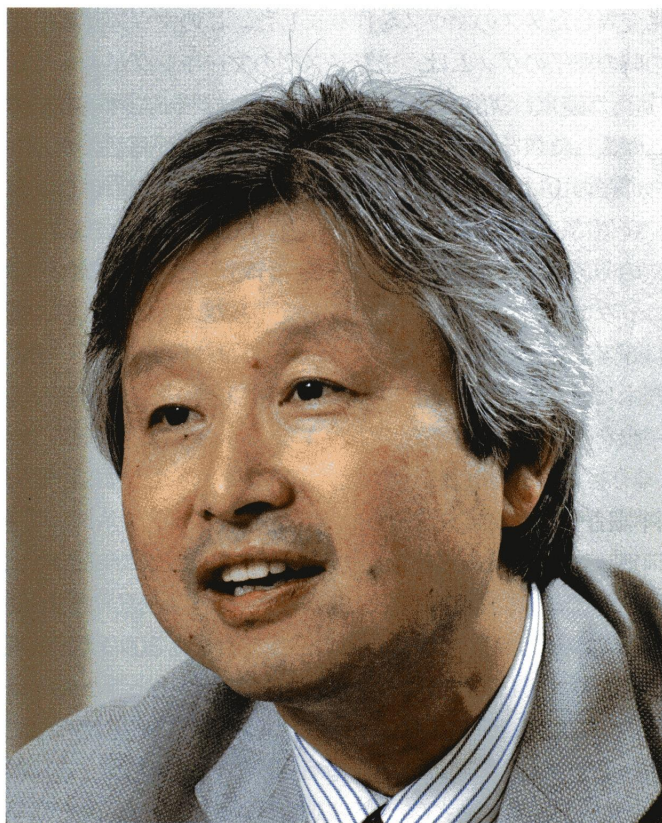
つのが、哺乳類の特徴です。僕らはこのリセットに興味を持ちました。もし体の中でそういうリセットが行われているなら、それを人為的に誘導することもできるだろう。メス型をオス型に直すことも、ひょっとして可能ではないかと。

茂木 それが研究のきっかけになった。

河野 ゴールにたどりつくまでに、2つの大きなプロセスがありました。1つは、卵子のマーキングが行われる時期の発見です。生まれたばかりのメスのマウスの卵子は、まだメス型のマーキングがまったく行われていないことに気づいたのです。両親から来たマーキングが消され、オス型でもメス型でもないニュートラルな状態になっている。今から10年前のことですが、この時、今日に至るまでの研究のアイデアが、ばあっと頭の中にめぐるようになりました。

茂木 ひらめきの瞬間ですね。

河野 あとは実験的にそれを証明できるかどうかの戦いでした。私たちのグループは非常に小さいですから、個人的にこつこつとやって、10数年を要しました。大きなグループな



河野友宏

(この・ともひろ)

東京農業大学
応用生物科学部
バイオサイエンス学科
教授

1953年、東京都生まれ。82年東京農業大学大学院博士課程修了、農学博士。同大講師、助教授を経て93年に英MRC実験発生学・奇形学客員研究員。96年東京農業大学農学部教授、2000年より現職。日本繁殖生物学会島村賞、日本哺乳動物卵子学会特別賞受賞。専門は発生にかかわる遺伝子刷り込み。趣味は溪流釣りドライブ。

らもっと短い期間でできたかもしれません。競争相手がいないことが幸せだったのでしょう。私たちにしかできない特殊な技術が必要だったせいか、そんなばかばかしいことを考える人がほかにいなかったためかはわかりませんが……（笑）。研究するうちに、卵子は卵巣の中で育っていく間にメス型にマーキングされることがわかってきました。

茂木 もう1つのブレークスルーは何ですか。

河野 オスの役割は何なのかというアイデンティティーの問題です。オス側にも、オスにしかない独特のマーキングがあったのです。ですがその場所は非常に限られていて、発生に重要なのはたった2カ所でした。

茂木 案外少ないですね。

河野 メス型独自のマーキングに比べたら、ずっと少ないです。このマーキングを卵子に入れてやれば、卵子が精子として働くはずですが、でも、卵子のゲノムをオス型に直すのはそう簡単ではありません。まず海外から、遺伝子操作によってこの2カ所のうちそれぞれ1カ所ずつを変異させたマウスを頂きました。このマウス同士をかけ合わせて、2カ所が同時に変異したメスのマウスを作りました。このマウスが新生児の時の卵子のゲノムは、まだメス型のマーキングが入っておらず、限りなく精子に近いのです。この赤ちゃん卵子のゲノムが入った核を、あらかじめ核を除いておいたおとなのメスの卵子の中に入れてあげますと、卵子なのに精子のように働く疑似精子ができます。この卵子と、また別のおとなのマウスの卵子を取ってきて、クローンを作るのと同じようなテクニックで一緒にすると、ちょうど受精したようになって、子供が誕生しました。

茂木 つまりゲノムを精子型にした卵子と、普通の卵子から子供を作ったというわけですね。

神様が僕に微笑んだ

河野 2007年に最終的な結果が得られました。ゲノムの入れ替えなどをすると卵子には非常にストレスがかかり、子供を誕生させるのは難しいのですが、それでも30%以上が正常なマウスとして生まれてきました。子供が生まれたのは画期的でしたが、それはメスだけから生まれたためではなくて、精子と卵子の機能差は、すべてゲノムのマーキングにあったことが証明されたからなんです。なぜ精子と卵子が出合わないとか次世代が生まれないのか、その仕組みを説明することができました。

茂木 基本的なことをお尋ねしますが、遺伝子の化学修飾のメカニズムとしては、メチル基がくっつく「メチル化」が知られていますね。これが起きると、遺伝子が読まれなくなるって聞きましたが。

河野 大体、その理解でいいと思います。ただオス・メスのマーキングに関するメチル化の機構は、非常に複雑です。例えば複数の遺伝子が集まって作るクラスターでは、その中の1カ所が全体の発現を制御しています。全部の遺伝子が同じようにオン・オフされるのではなく、あるものがオフになると別のものがオンになる、といったことも起こります。こうした仕組みの全体は、まだ理解できていません。

茂木 メチル化が起きる場所はわかっているんですか。

河野 それはだいぶわかってきました。

茂木 どれくらいあるんですか。

河野 すごくたくさんありますが、その中でオスとメスでメチル化の起き方が異なる場所が重要なのです。精子か卵子のどちらかだけでメチル化される場所は、哺乳類では現在約30カ所が知られています。

茂木 最初にマウスが生まれた時は、実験の成功率はどれくらいだったんでしょうか。

河野 0.2%から0.6%くらいですね。

茂木 それが30%になった要因は何だったのですか。

河野 先ほど、オスのマーキングの2カ所が発生には決定的に重要だ、と申し上げましたね。でもその時、私たちは1カ所しかオス型にしていなかったんです。その後、このどちらが欠けてもいけない、2個揃ったときに初めて完全なオス型になって正常な子供ができるということがわかりました。

茂木 なるほど。しかし、その1つしか入れなかった時に0.2%が成功したのはどうしてですか。

河野 それは、神様が僕に微笑んだ。ゲノムは何万回かに1回の割で、メチル化の変異を起こすことがあるんです。

茂木 たまたま変異が起きたということですか。

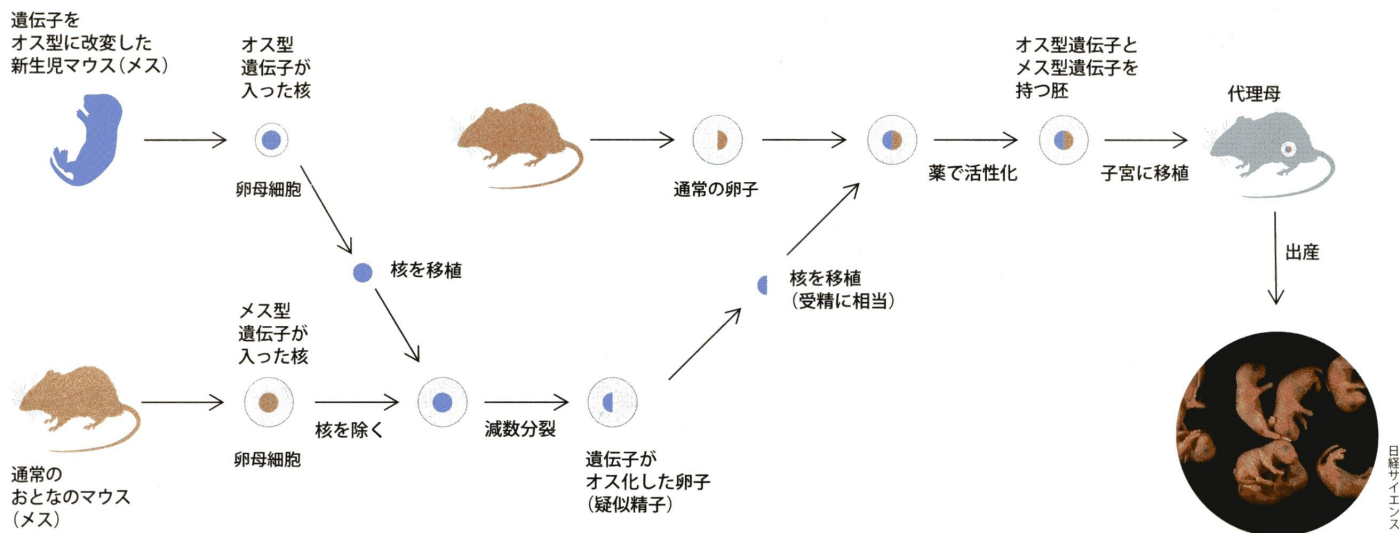
河野 そうです。たまたま、完全な形ではないにしろ、その場所にメチル化が起きたんです。

茂木 なるほど。

河野 もちろん、僕らは当初からその2カ所が決定的だとらんでいました。2つともメチル化する実験もすでに計画はしていましたが、その前に1つずつ確認している段階で、偶然にも先に1匹だけ生まれてしまったんです。それはあくまで偶然に、もう1カ所の決定的な場所にメチル化が起きて、卵子がオス型に変わってくれちゃった。

茂木 それにしても、なぜ哺乳類だけは、精子と卵子の両方がないと子供が生まれないんでしょうか。

河野 よくわからないんです。いまだにいろんな説があります。生物の中で哺乳類だけが完全な胎盤を持つ胎生動物です。胎盤を作ること自体に、特定の遺伝子が必要だったのかもしれませんが。また胎生になったことで、妊娠、出産における母親のリスクは非常に高くなりました。排卵のたびに妊娠して



いたら困るので、単為発生しなくなったのかもかもしれません。あと、哺乳類はパートナーがいて、家族という単位ができて成り立つ動物種だとの考えがあります。そのためにオスの関与を不可欠にする仕組みが必要だったのかもかもしれません。胎児の大きさを制御するためだという考え方もあります。

茂木 河野さんはどうお考えですか。

河野 僕は胎盤説、それに母胎の保護説ですね。メス側から来る遺伝子は胎児を小さくするように働いて、出産のリスクを下げようとします。逆にオスは自分の遺伝子を持つ子供を生存競争に勝たせたいから、オス側の遺伝子は胎児を大きくするように働きます。両方でバランスを取っているのです。絶妙なバランスだと思いますよ。赤ちゃんがあれ以上大きかったら出産できないし、小さかったら生存が脅かされます。

人間への応用は絶対に不可能

茂木 マウスが誕生したとき、社会の反響はどうでしたか。

河野 思ったより大きかったです。特にキリスト教の国では少しセンシティブな反応もありました。日本でも高名なお坊さんから毛筆の手紙を頂きまして、「直ちにそのような不謹慎な仕事はやめなさい」と怒られたりしました。

茂木 ヨーロッパでは、聖母マリアの処女懐胎、といった受けとめられ方もされたんじゃないですか。

河野 そう考える人たちもいたと思います。ただヨーロッパの人たちは生殖や科学に対して、日本人より理解は高いかなという気がします。サイエンスが好きなんだと思います。日本より海外で多く取り上げてくれて、びっくりしました。

茂木 生命倫理の問題とのかかわりも当然出てきますね。すぐに人間に応用されることはないにしても、そういうことを考える人はいたと思うんです。

河野 いっぱいいました。クローンのように、これでいろん

オスなしでマウスの子供を作る まずゲノムの2カ所をオス型に変異させたメスのマウスを作る。メス型のマーキングが入らない新生児のうちに卵母細胞を取り出し、核を除いたおとなのメスの卵母細胞の中に入れる。すると減数分裂が起き、オス型の“疑似精子”ができる。この核を通常の卵子の中に入れると、疑似精子のゲノムと通常の卵子のゲノムを受け継ぐ子供が誕生する。この子マウスたちには遺伝的な父はいないが、母が2匹いるので「二母性マウス」と呼ばれる。

な動物を再生できるかという質問はたくさん受けました。電話もよくあるんですよ。これで人間が生まれるのか、とか。これまでずっと、そういう愚問には一切答えません、と言ってきました。でも、そういう風に対応していると、勘違いされてしまうんです。それが最終目的なんじゃないかと。

茂木 そうでしょうね。

河野 今考えてみれば、そういった疑問を持たれるだろうということは理解できますし、しっかり答えなきゃいけない立場だろうとも思います。じゃ、実際できないのかということ、理論的にはできるはずなんです。マウスもヒトも同じようなメカニズムで動いているんですから。ただ、本当にできるかとなると、これは絶対にできません。倫理的にも、論理的にも。マウスなら何百匹、何千匹と実験に使えます。新生児の卵子をたくさんもらうことも、おとなの卵子を何百個も使うことも、遺伝子操作したマウスを作ることも可能です。同じことが人間でできますか。考える必要もなく不可能です。「どうなればできる」との仮定を入れる余地さえない。

茂木 今、iPS細胞や幹細胞の研究が盛んですが、そういった分野への影響はありますか。

河野 iPS細胞や幹細胞は、そこから様々な細胞を作り出すことを目指して研究が進んでいます。良いか悪いかは別として、生殖細胞も候補の1つになっています。もし作るとしたら、精子や卵子のマーキングをしっかり正しくやらないと、とんでもないものになってしまう可能性があります。そうい

った方面の研究にも、今後展開していくと思われます。

茂木 この分野は生殖医療や再生医療への応用という面から注目されることが多いと思いますが、河野さんにとって一番面白いのはどこですか。

遺伝子発現がすべてを決める

河野 生物におけるエピジェネティクスのプログラムです。生物は世代ごとに、卵子と精子のゲノムをプログラムし直しています。リセットし、マーキングし、またリセットし、マーキングし……。複雑怪奇なプロセスなのに、人類なら数百万年に及ぶ間、間違えることなく機能し続けて、ここまで種が続いてきている。

茂木 そう思うとすごいですね。

河野 これはとても大事なことです。このリセット機能が解明できれば、再生医療の要として注目される幹細胞のことも、もっとよく理解できると思います。幹細胞は万能細胞と呼ばれますけれど、いくら培養しても、子供はできません。何かの細胞になるだけです。受精卵は、たった1個ですべてを作るのです。まったく次元の違う全能性だと思います。

茂木 そのプログラミングに興味深いです。

河野 決定的に興味深いです。

茂木 マウスとヒトのゲノムは何%くらい違うんですか。

河野 大体1～2%です。ゲノムの差というのは、種に特有な形態とか生理機能を決めているのであって、生命活動の根源である細胞の機能を決めているのは、すべてエピジェネティクスのプログラムだと言っても過言ではありません。

茂木 仮に基本となる受精卵があったとして、神様がエピジェネティクスのプログラムを自由に換えられるとします。そうしたら同じゲノムから、ヒトができたり、マウスができたりする可能性がありますか。

河野 あるかもしれませんね。ヒトとネズミではかなりの遺伝子が共通です。必要な遺伝子がフルセットあれば、エピジェネティクスですべてをコントロールできる可能性はある

と思います。

茂木 ゲノムはある意味、非常に取りやすい情報でした。エピジェネティクスのプログラムを解析するのはもっと難しそうですが、どうすればいいのでしょうか。

河野 ゲノムは機械的に読んでいけばよかったのですが、エピジェネティクスの解明はとても難しいと思います。遺伝子配列のどこがメチル化されているかを調べる技術は既にあって、今後5年くらいでものすごい情報が出てくると思いますが、そのメチル化が生物学的にどんな意味を持つかを理解するというのは、また別の話です。それを調べるにはゲノム全体で遺伝子の発現がどう変わるかを見て、その時に細胞や生体がどんな機能を持つかを確認しなくてははいけない。

茂木 今後のエピジェネティクス研究において、メスだけ生殖によるマウス誕生に相当するようなランドマークとなる仕事には、どんなものがあると予想されますか。

河野 1つは、体の細胞を完全に受精卵の状態に戻すこと。究極の体細胞クローンです。クローンもエピジェネティクス技術です。ゲノム配列を変化させたり、遺伝子を導入したりは一切せず、体細胞の核を卵子の中にぽんと入れるだけでリセットが起き、受精卵と同じ状態になる。ただし今のクローンは未完成です。核を卵子の中に入れて、ガラガラポンでまたまうまくいくと子供が生まれる。けれども、このクローンは完全な個体とは言えず、色々な障害を持っている可能性があります。もしもリセットのプログラムを完全に解明でき、ゲノム全体のリセットを誘導して受精卵の状態に戻せるようになったら、ランドマークになるでしょう。

茂木 リセットを起こすのは卵子の細胞質だと聞いています。細胞質の中にリセットを促すような物質があるのでしょうか。

河野 ええ、あるんです。

茂木 それはどの程度、解明されているんですか。

河野 全然です。

茂木 分野は違いますが、鉄系で超電導物質を見つけた東京工業大学の細野秀雄さんから面白い話を伺いました。超電導は長らく理論的にマイナス243℃以上の温度では起こらないと考えられていたのに、86年に銅の化合物で実験をやってみたらできた。物理は生物学より理論が発達していますが、それでも理論通りにはいかない現象が次々と起こる。まして生物学は理論はまだまだで、ある程度、できるかどうかかわからないけどやってみるということが……。

河野 バイオロジーはそういうことの積み重ねですね。物理学に比べると、再現性は薄いし、理論的裏付けも十分とはいえない。流動的でファジーなところがたくさんあります。これからもおそらく、分子1つ1つの動きを理路整然と解析する研究が進む一方で、僕らのマウスやクローン羊のドリーの



河野友宏

二母性マウス「かぐやシスターズ」 2004年に偶然も重なってオスなしで生まれた子マウスは、国語教師をしている河野夫人の提案で「かぐや」と命名された。その後、オス型にするメカニズムが解明され、30%の高い成功率で子マウスが作れるようになった。

理論が現実を追いつかない

茂木健一郎

河野さんとお話して、改めて生命というものの不思議さと奥深さを思った。

科学は本来、理論と実験がともに手を携えて進展する。しかし、生物学においては、理論はなかなか実験のインパクトに及ばない。生命現象は複雑であり、ある現象が起こった時に、その理由を理論的には説明し尽くせないのである。

なぜかはわからないけれどもうまくい

く。そのようなことが生命現象では数多くある。科学の営みとしては、本当は起こっていることをすべて理解しないと完結しないのであるが、どうしても現象が先行してしまうのである。

人間がある操作をする。それが、細胞の中のエピジェネティクスや情報系に働きかけてある効果を引き起こす。その詳細がわからないままに技術的にみて画期的な現象が起こる。クローン動物やiPS細胞、そして河野さんの二母性マウスなどの研究成果が上がるのである。

理論と実験のバランスの良い発展が見

られたのは、物理学だろう。相対性理論や量子力学など、驚くべき新現象の発見と深遠な理論の展開がほぼ同時期に起こり、科学という営みの一つの理想型を作った。しかしその物理学でも、高温超電導物質の例のように、実験の成果に理論的説明が追いつかない事態が生じている。

理由はわからないけれども、うまくいく。これは複雑な構造やダイナミクスを持ったシステムに固有の問題なのかもしれない。科学の対象が非線形性を内包した複雑なシステムに移行するにつれ、理論と実験の関係は変質していくのだろう。

ように、直接に結果を示してしまうような研究も行われるでしょう。それは両方、必要だと思います。

茂木 ドリーにしても、今回のマウスにしても、生物の持っている潜在的な力に助けられている部分があるような気がします。理論的にできると予想されてからやっているわけではないという点で。

河野 それはそうです。100パーセント確実じゃなくて、なるかもしれないという段階でこういうことをすると、思わぬ成果が生まれることがあります。実は時々言われるんです。おまえの仕事は偶然の産物だろうって。だけど、たとえ確率論でも、見る方向を間違えていたら結果は出ない。今まで蓄積された成果を理解しながら、方向性を見定めていくことが重要だと思います。

茂木 実験家の立場から、理論生物学に期待するのはどういうことですか。

河野 僕らのように、とにかく結果を見せてしまう、という研究をしている者には、分子レベルで緻密にデータを積み上げ、それに基づいた理論を出して頂けるとというのが、とてもありがたいですね。

茂木 でもお話を伺っていると、生物学はまだまだ圧倒的に実験の学問というか、実験をしなければどうしようもないと感じます。

河野 絶対、そうだと思います。

生殖技術は生命観を変えるか

茂木 生物学研究の将来はどうなっていくと思われますか。

河野 僕はそんな大それたことは言えませんが、生殖に関わっている研究者の一人として、考えることはあります。自分がやってきたことを「興味本位だ」と言われればその通り

です。サイエンティストは皆、根本的には知りたいという単純な動機から研究していると思います。ただ、最近の生殖医療を含めた生殖科学の研究の進み方を見ると、次世代の若い人たちに対して、技術がどういった生命観を植え付けていくのか、すごく心配です。生命科学から生まれてくる知識と技術が人間社会にどんな影響を及ぼすかを考える教育や、実際の評価方法の構築は、すごく立ち遅れていると思います。

茂木 生物学に携わる研究者や学生でも、そういうことを考えている人は少ないかもしれません。

河野 ただ現実には僕らができることは、今起きていることを、正しく若い人たちに伝えることだと思います。例えば、いま日本で生まれてくる子供の50人に1人は、なんらかの生殖医療によって生まれています。僕ら農学の分野では、酪農用に作られている牛は全部、人工授精で生まれていて、そうでない牛は1匹もいません。現状は、すでにここまできているのです。そのことを教育でも取り上げてもいいのかなという気がします。ただ、生命をどう考えるかということは、基本的には一人ひとりの考え方に委ねるしかない。僕らからこう考えろと言える問題じゃないんです。

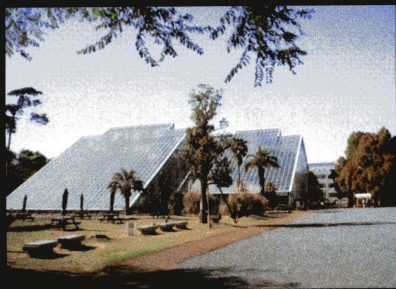
茂木 河野さん御自身の生命観は。

河野 僕は、生命はいつまでも不思議なものであってほしいなと思います。生命の不思議を解明する研究をしながら矛盾していますが、ある部分、生命は不思議さをいつまでも保ち続けてほしい。それは生命に対する尊敬というんじゃないけれども、憧憬を抱くという感じです。そういう感情がなくなり、生命を物体として見ていくという観念が人類にも生まれたら、それは非常に危ないことだと思います。

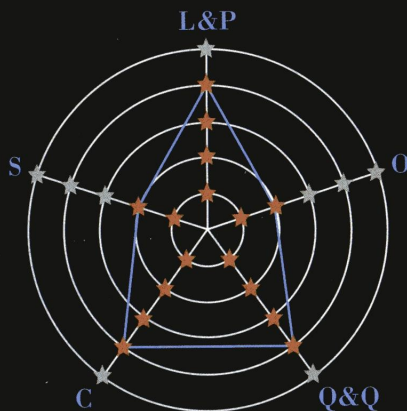
茂木 そう思います。本日はどうもありがとうございました。

(構成：荒川直樹)

国立科学博物館 筑波実験植物園



大温室 左がサバンナ、右が熱帯資源の温室。他に熱帯雨林や水生植物の温室がある。



Love & Passion 愛情と情熱
Originality 創造性、独創性
Quality & Quantity コレクションの充実度
Communication コミュニケーション
Sophistication おしゃれさ、洗練度

交通 つくばエクスプレス「つくば」駅下車。路線バス「テクノパーク桜循環」で「筑波実験植物園前」下車徒歩5分

開館時間 9:00~16:30 (夏休み中は17:00まで)

休館日 月曜 (祝日の場合はその翌日), 12/28~1/4

入館料 一般・大学生:300円, 65歳以上・高校生以下:無料

住所 茨城県つくば市天久保4-1-1

問合せ 029-851-5159

URL <http://www.tbg.kahaku.go.jp/>

アドバイス 季節ごとに訪れて自然の変化を楽しみたい。

季節の“目玉展示”を楽しむ

文・写真 キュラトウス

2005年のつくばエクスプレスの開業で、茨城県つくば市中心部へのアクセスが急に便利になった。おかげで少し離れた筑波山も関東だけでなく全国からの登山客で賑わっているという。同市にあるこの植物園もぐっと行きやすくなった。東京の東大植物園（小石川植物園）や神代植物公園などと比べ知名度はいまひとつだが、一度は訪ねてみたい所である。

ここは1983年に上野の国立科学博物館（科博）直轄の研究施設としてオープンした。広さ約14万m²。都内にある小石川植物園が約16万m²もあるのに比べると少々規模が小さいが、郊外にあるせいか開放感があり、狭いという感じはしない。

開設当時のこの植物園の主なコンセ

プトは日本中部の山地に見られる常緑広葉樹林をはじめ12の植生を人為的に育ててみようということであった。そうした実験，研究も行うので，植物園には珍しく「実験」という冠がついているのである。現在の植生区画は9つ。一部を統合したためだ。一方，4つの大型温室にはサバンナ，熱帯雨林などから世界の植物が集められている。

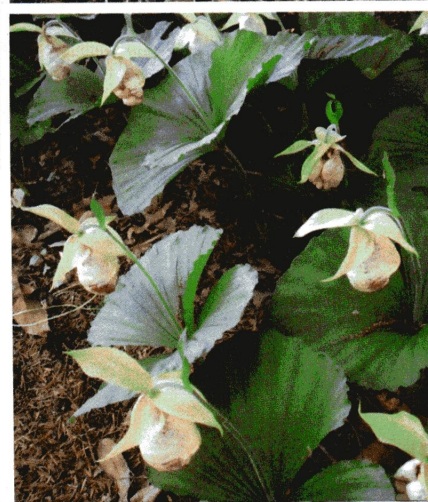
屋外の植物園見学が他の博物館見学などと決定的に違うのは，当たり前だが，見るべき“目玉展示”が季節によって大きく異なるということである。

旬の花々を観る

今回，訪れたのは4月下旬，多くの花が咲き揃い，新緑も輝いて，ベストシーズンといえそうだ。この時期，園



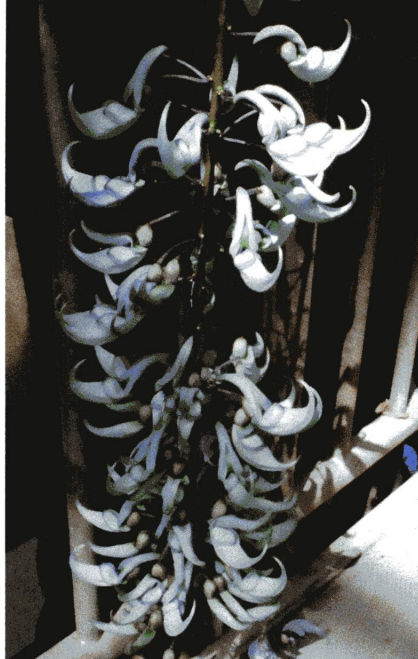
癒しの光景 上の写真は水生植物の区画。水辺に生えるミズバショウ、アサザなどがある。トンボやカエルもいて、自然観察もできそうだ。園内きっての憩いの場。右上は可憐なフデリンドウ。すぐ右はユニークな形のクマガイソウの花。右ページの写真は咲き誇るセイヨウシャクナゲの「太陽」。



内で目立った花は、中央広場では高さ7mはあろうかと思われるセイヨウシヤクナゲの「太陽」。大木が真っ赤な大輪の花で覆われていた（下の写真）。満開時の花の数は約1000個にもなるという。見たことのないシヤクナゲの大木に圧倒されてしまった。園では「見ごろベスト3の第1位」と親切な看板を掲げていた。

暖温帯落葉広葉樹林の下ではクマガイソウが群れで咲いていた。源氏の武将、熊谷直実（くまがい・なおざね）にちなんでこの名を付けられたラン科の多年草だ。独特の袋状の花が面白い。近年は乱獲がたたって環境省のレッドデータブックで絶滅危惧Ⅱ類に指定されている。ガイドブックによると、この花の花粉を媒介するのはミツバチの仲間のマルハナバチだけ。袋状の花弁の穴からハチが入れるが、そこからは出られない。唯一出られる穴には柱頭と花粉が待ち構えているため、もぐりこんだマルハナバチは自動的に花粉の受け渡しをすることになるという。

熱帯雨林温室で目立ったのはマメ科のヒスイカズラの花。解説には「フィリッピン島のルソン島とミンドロ島に自生するツル性の低木」とあるが、ここ



小さな花から大木まで 上はヒスイカズラの垂れ下がる花。独特の翡翠色が何とも美しい。右はサバナ温室の内部。木々が成長し過ぎて、まるで熱帯雨林のよう。維持管理は大変だ。



のは元気が良く、ツルがかなり高いところまで生い茂っていた。約10cmの花は独特の蛍光のある翡翠色をしている。これらが長さ約60cmの軸に鈴なりになっている。熱帯性らしくかなり派手である。この色は「コウモリ、特にフルーツバットに好まれ、それによって受粉が行われる」という。

植物園の秘かな楽しみ

こうした言わば「スター級」の花々とは別に、ひっそりと咲く「脇役」を見つける楽しみが植物園にはある。

山地草原植生区画の道端で可憐な紫色のフデリンドウを見つけた。花の直径は2～3cm、高さは5cmもない。小さいのでうっかりすると踏みつけてしまいそうである。花の閉じた形が毛筆の穂先に似ているのでこの名がある。このフデリンドウには名札も解説もなく、ガイドブックにも載っていなかった。こうした花を見つけると何か得をしたような気持ちになるのが不思議である。

植物園と博物館との相違点はいろいろ

ある。植物園では“展示品”がどんどん成長してしまうのだ。

サバナ温室では、ナツメヤシ2本が大きくなりすぎてガラスの天井に届きそうな勢いで、その影響で陰にあるバオバブの木には陽が当たらないのが貧弱そのものだった。どうも手入れがいまひとつ行き届いていないようである。植物園の維持管理には博物館以上に人手や費用がかかるのだ。さらに近年は稀少植物の保護・育成の場としての役割も重要性が増している。科博も上野本館だけでなくここ筑波にももっと力を入れるべきだろう。

日本では、花を集めた公園、いわゆるフラワーパークと植物園が混同されることが多い。しかし欧米では、このように植物学の研究の場と市民の憩いの場とを兼ねて、はじめて植物学の園（ボタニカル・ガーデン）として認識される。単に入園者数だけで評価してはいけないのである。 ■

巡礼者 キュラトウス

好奇の館に仕える司祭がとびきりのミュージアムを巡礼し、5つの視点で採点します。



7月22日の日食を楽しもう

日本で約半世紀ぶりに皆既日食が見られる

各地では観望会などさまざまな関連イベントが予定されている

中島林彦（編集部）

図表提供：国立天文台

2009年7月22日、インドから中国、日本近海を経て南太平洋に至る幅広い地域で日食が起こる。日本は全国で部分日食が観測できるほか、九州南方に浮かぶ屋久島や種子島南部、トカラ列島、奄美大島北部では皆既日食を見ることができる。

日本の陸地で眺められる皆既日食は1963年7月21日に北海道東部で見られて以来46年ぶり。次回の皆既日食は26年後、2035年9月2日に北陸や北関東で見られる。日本に住んでいる人にとって皆既日食に出会えるのは一生に1度か2度という非常に珍しい天文イベントだ。

皆既日食の継続時間は場所によって異なり、今回の皆既日食では小笠原諸島南部の北硫黄島や硫黄島あたりの海域で継続時間が6分39秒と最も長くなる。この継続時間は今世紀に起きる皆既日食の中でも最長だ。この「7.22

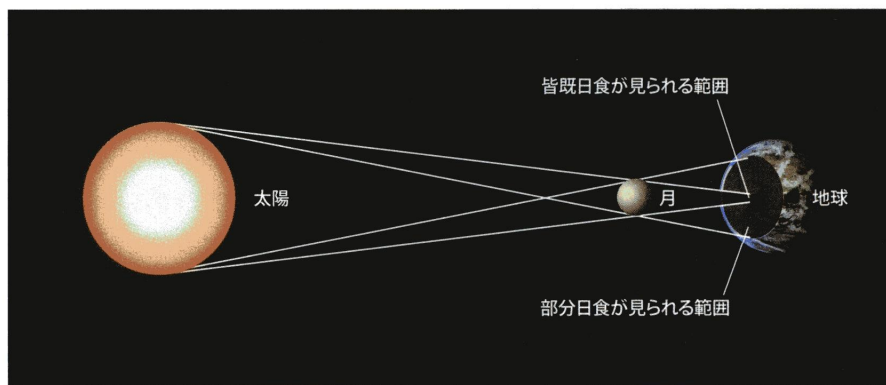
日食」の概要を国立天文台の協力を得て解説、各地の科学館や公設天文台、プラネタリウムなどが開く日食観望会の情報を紹介する（90～91ページ）。

地球と太陽を結ぶ直線を月が横切るとき、月の影が地球に映る。この現象を地球から眺めたのが日食だ。ただ、月の影は地球全体を覆うほど大きくはないので、太陽が月によって完全に隠

される地域（皆既日食が起きる地域）は、ごく一部に限られる。

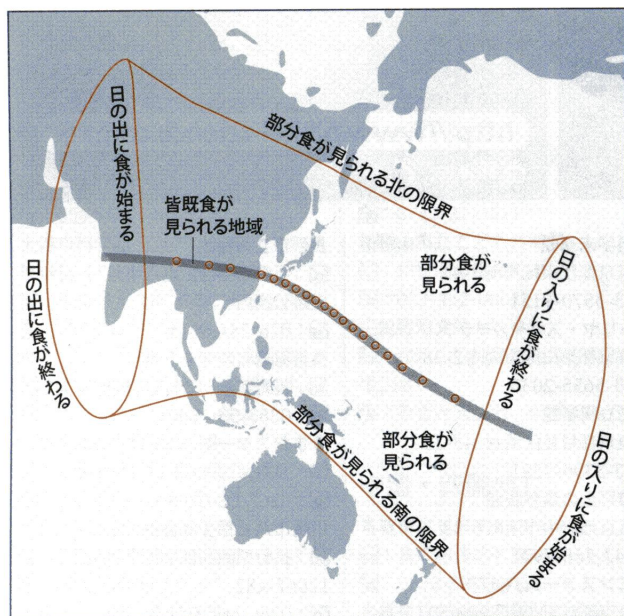
もし、地球を回る月の公転軌道（白道）が、地球の公転軌道（黄道）の面内にあれば、新月のたびに日食が観測されることになる。しかし、実際には白道面は黄道面に対して約 5° 傾いているので、日食はそうは起こらない。

しかも月の公転軌道は、地球の公転

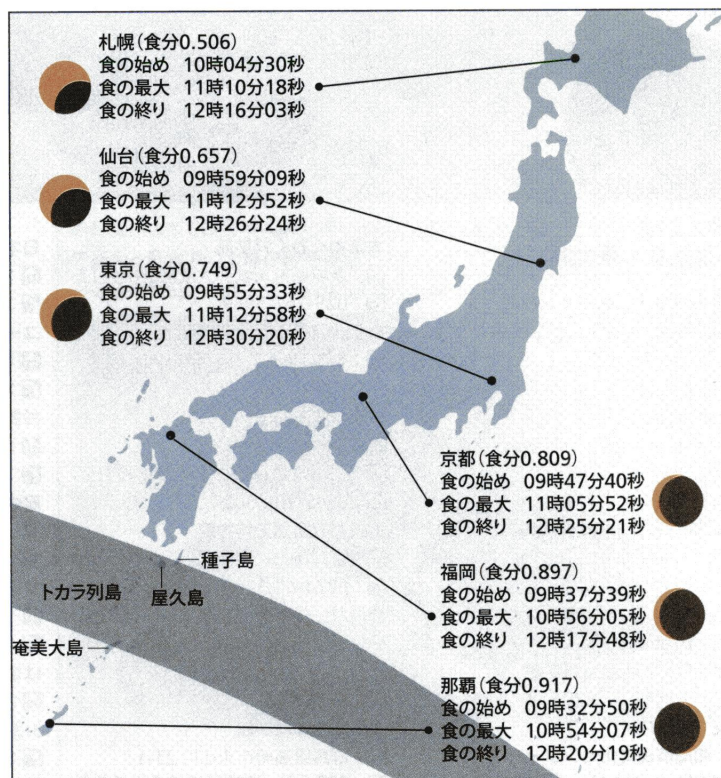


日食が起こる仕組み 太陽と地球の間を月が横切るときに日食が起きる。皆既日食が見られる地域はごく一部。その周囲の地域では部分日食が見られ、皆既日食の地域に近いほど欠けが大きくなる。

2001年6月21日のアフリカ・ザンビアでの皆既日食（撮影：福島英雄氏）



南アジアから南太平洋までを横断 7月22日の日食では、月の影がインドから中国、日本近海、南太平洋までを横断する(上)。皆既日食の継続時間が最も長いのは、小笠原諸島南部の北硫黄島、硫黄島の近海で、6分39秒と今世紀最長になる。日本全国で部分日食が見られる。皆既日食帯に近い地域ほど太陽の欠け(食分)が大きくなる。



軌道に比べて離心率が大きい(軌道がより楕円になっている)ので、地球と月を結ぶ距離は長くなったり短くなったりする。だから地球から月と太陽を眺めたとき、天球上での見かけの大きさの変動は月のほうが太陽よりも大きく、太陽に比べて月が微妙に大きくなったり小さくなったりして見える。月が小さく見えるときに日食が起きると、月で太陽を完全には覆い隠せず、太陽が月の陰からはみ出る場合がある。そうした日食を金環日食という。

日本国内で前回、金環日食が見られたのは1987年9月23日の沖縄本島などで、次回は2012年5月21日。今回の皆既日食と同じトカラ列島などのほか、九州から東北にかけての一部地域で見られる。

7月22日の日食では、月の黒い影が早朝のインド北部からブータン、中国内陸のチベット、上海などの中国沿岸部を経て、日本のトカラ列島などを通過し、正午ごろに小笠原諸島南部の海域に到達、午後にはギルバート諸島

などを経て、南太平洋上で日没とともに終わる。

日本で皆既日食が見られるのは、トカラ列島海域あたりの幅300km弱の帯状地域。この皆既日食帯をはさむ南北の幅広い地域で部分日食が見られる。皆既日食帯に近いほど日食による欠けは大きくなる。

欠けの大きさを示す指標を「食分」と言い、太陽の視直径のどの程度の割合まで月の陰になっているかで表す。例えば札幌では食分約0.5の部分日食となり、太陽の半分まで欠けることになる。福岡や那覇では食分約0.9で、太陽の約90%まで月が入り込む。食分1.0なら皆既日食だ。

世紀の皆既日食を楽しもうと、トカラ列島などの島々や中国などに行く日食ツアーが多数予定されており、多くはキャンセル待ちの状態になっている。皆既日食の継続時間が最も長い小笠原諸島南部の海域には何隻もの日食クルーズの客船が集まる。日本全国各地でも部分日食を楽しむイベントが開かれ

る。しかし日食を見るには十分な注意が必要だ。

日食の観測で絶対にやってはいけないことは肉眼で太陽を直接見ること。太陽の一部が月に隠れていても太陽が発する強い光と熱で目を痛めてしまう。

黒い下敷きや感光したフィルムの切れ端、サングラス、ススを付けたガラス板なども、光の遮蔽が不十分だったり、目に見えない赤外線を通しやすいものもあるので危険だ。日食専用のメガネも売られているが、それを使っても、双眼鏡で覗くのはいけない(双眼鏡は光を集めるので)。詳細は国立天文台のウェブサイト(<http://www.nao.ac.jp/>)に掲載されている。

日食は天文学者にとっても、太陽を研究するまたとない機会だ。現在は太陽専用の天体望遠鏡や天文衛星による観測が中心になっている。しかし、そうであっても皆既日食では、太陽の大気(外層大気)を特殊な装置なしに直接観測できるので、有用なデータが得られる可能性があるという。 ■

宇宙，身近に感じて 野村仁の世界

空に8の字を描く太陽，五線譜の音符となった月，古代の化石と並ぶ銀河 ……

現代芸術家，野村仁氏の作品は「宇宙」や「時間」を新鮮な形で人々に語ってくれる

中島林彦（編集部）



野村仁「正午のアナレンマ'90」(1990年、和歌山県立近代美術館蔵)

『正午のアナレンマ'90』 野村は1990年の1年間，正午の太陽を多重露光してこの作品を制作した。『午前のアナレンマ』や『午後のアナレンマ』，プラネタリウムを利用した太陽系各惑星のアナレンマも制作した。右ページ下段は魚眼レンズで1日の太陽の動きを光の線として表現した『曲がった大気中の自転』。上段はそうして得た毎日の写真を時系列でつなげたものの一部。

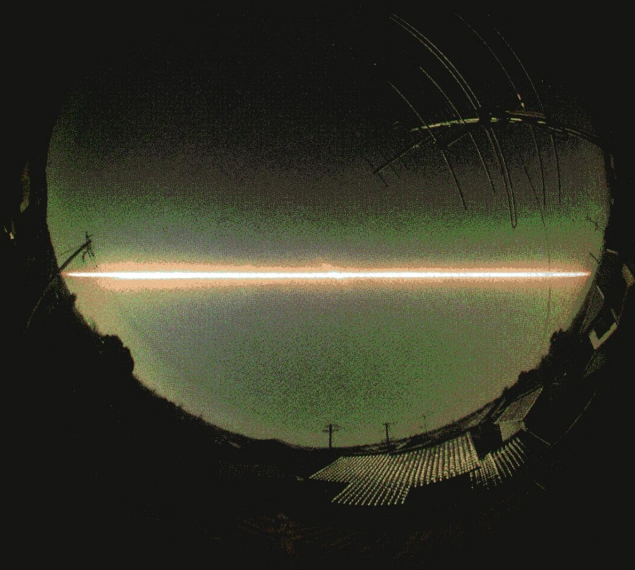
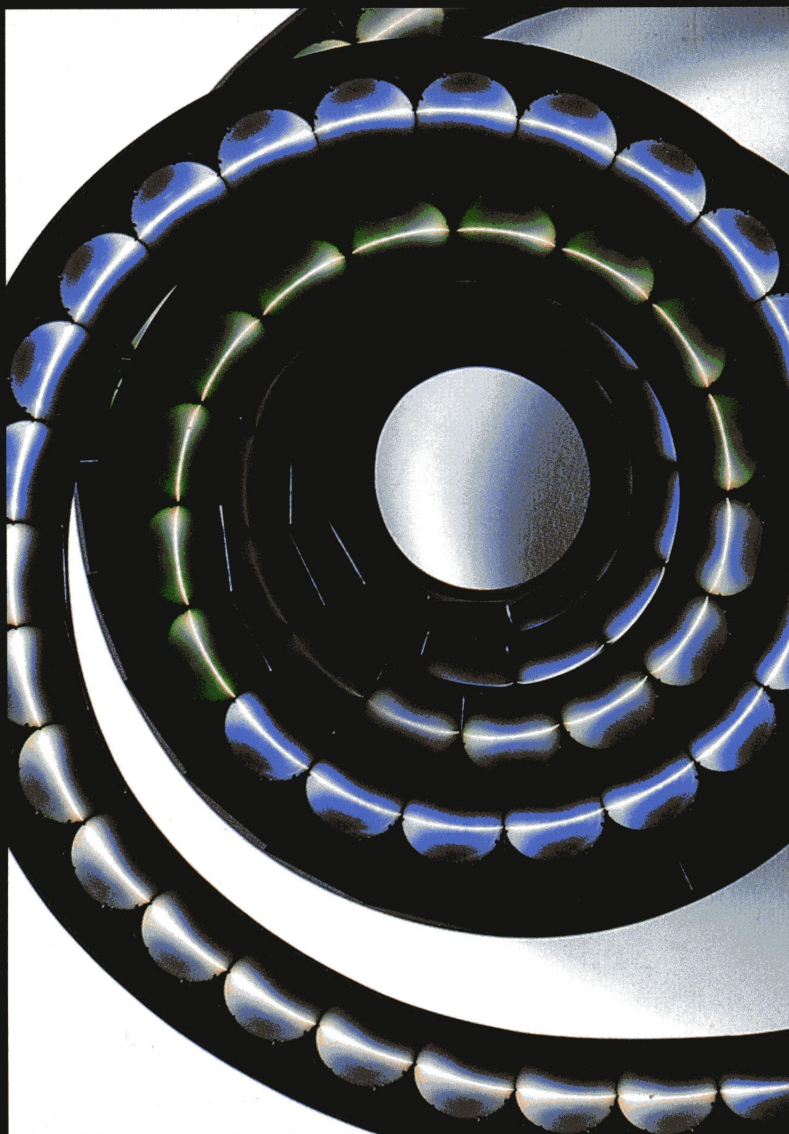
東京・六本木の国立新美術館に宇宙や時間を感じる“神殿”が出現した。広い真っ白な部屋がいくつも続く。ある部屋には太古から生きてきたストロマトライト（藍藻類）の大きな写真が掲げられ、その手前には、静かに泡立つ液体酸素（美しい水色）を収めたガラス容器が並ぶ。満月や三日月とともに五線譜が写し込まれた天体写真が膨大な枚数張られ、静かな女声コーラスが、その“月の譜面”を奏でている部屋もある。隕石やDNAの二重らせん模型などを安置した部屋、宇宙からの電波が音に変換されて流れている部屋、遠い銀河の写真と化石が対になっていくつも掲げられている不思議な部屋もある。現代芸術家、野村仁（のむら・ひとし）氏の40年に及ぶ仕事を集大成した展覧会「野村仁 変化する相一時・場・身体」だ。（文中敬称略）

野村は作家活動の初期から「見る」ことにこだわってきた。「人は風景を前にして、全体を眺めたり、脈絡がないかのように視線をさまざまに動かす。それはあたかも微粒子のブラウン運動のようでさえある」と感じた野村は、「ならば、そのすべてをありのまま記録し、人が見るといふことの性質を明らかにしよう」と思い立つ。そして1970年代初めから約10年、重さ3kgのカメラを毎日持ち歩いた。

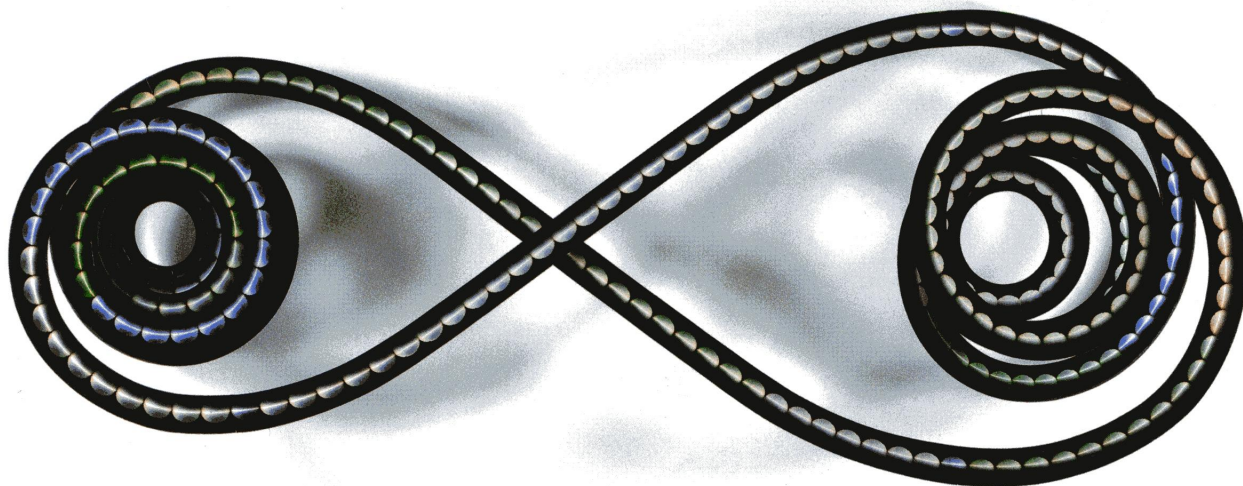
そうした日々の中、出勤途中にふと空を見上げると、電線越しに淡く白い昼の月が浮かんでいた。「電線を五線譜に見立てれば楽譜ができるんじゃないか」と思ったのが月の作品群が生まれる1つの契機だった。

五線を写し込んだフィルムで月を撮影すると、カメラを構えた手のブレで五線の中の月の位置が変わる。これを音の高低とし、月齢を音の長短として時系列で並べてみると不思議なことに美しい曲ができた。

国際宇宙ステーションに滞在していた若田光一（わかた・こういち）宇宙



野村仁「北緯35度の太陽」部分、1982〜1987年、撮影・豊永政中、京都市美術館蔵／野村仁「曲かった太空中の目」(1980年)



宇宙と時間 『北緯35度の太陽』(上段)は長さ3m以上もある半立体作品(前ページ上段の写真は左側のらせん部を拡大)。『Plagiophyllum&NGC2207+IC2163』(中段)は約1.6億光年先の銀河の写真と、約1.6億年前の植物化石のペア展示。見ているとさまざまな思いがわき上がってくる。『天路1910年ハレー彗星の回帰』(下段)は天球上にハレー彗星の軌跡を投影したもの。星座も描かれている。

飛行士などが撮った月も素材に加わった。「距離にして地上から400kmしか離れていないので、眺めた月にどれほどの違いがあるのか」と思っていた野村のもとに届いたのが、奇妙にゆがんだ月だった。「これが月だろうか? ジャガイモみたいな形だなあ」と最初思ったそうだが、「実は、そうした月がまさしく彼らが眺めていた月だった」。地表近くに浮かぶ月は地球大気の影響を受け、地上からは絶対に見られないような姿を見せていた。

“月の譜面”作りでは、月の形と発声する口の形を合わせるようにコーラ

『影を通過する物体』(部分) 皆既月食になった中央の赤い月を挟むように、その前後の月が多重露光されている。3つの月によって地球が宇宙に投げかけている巨大な影が浮かび上がる。

ス曲を作ることもある。「宇宙ステーションからの月はそうそうないような形をしている。どんな音楽になるのか楽しみだ」。

月に凝っていた野村が太陽にも関心を持つようになったきっかけは、同僚から「野村、お前はクライなあ」と言われたから、と冗談めかして話すが、太陽を眺めていて、時計と実際の太陽の動きがずれていることに気付いた“驚き”が背景の1つにある。全天を収められる魚眼レンズ付きカメラを使って日中ずっとシャッターを開放し、太陽を天空に輝く光の線としてとらえた『曲がった大気中の自転』を発表した。

太陽が描く光の線を純粹に美しいと感じた野村は晴れた日に毎日、魚眼レンズで太陽を撮影するようになった。撮りためた写真を眺めているうち、光の線のカーブが季節によって違うことに気付いた。春分と秋分のとき光の線は直線になり、夏至と冬至では、光の線のカーブのそり方が反対になる。

そこで撮りためた写真を時系列に並べ、それぞれの光の線がスムーズに接続するように貼り合わせてゆくと、非対称の2つのらせんが無限大の記号 ∞ のように結びついた不思議なものができあがった。それが『北緯35度の太陽』(左ページ上段)。「曲線を描くだろうとは思ったが、こんな形になるとはまったく予想していなかった。太陽の光のラインがつながっていくのを見るのは理屈抜きに楽しかった」。

『アナレンマ』(92ページ)は天球上に太陽によって描かれる縦長の「8の字」パターン。晴れた日に同じ時刻、同じ場所から同じアングルで1年間、太陽にカメラを向け、同じフィルムに、それら太陽の像を多重露光すると浮かび上がってくる。8の字のパターンは、

地球の自転軸が公転面に垂直ではないので南中高度が季節で変わることで、公転軌道が楕円なので1日の長さ(南中から次の南中までの時間)が季節によって違うことによっている。ただ、アナレンマに凝った結果、「他の仕事ができなくなってしまった」。

野村は展覧会に次のような文を寄せた。「気の遠くなるような時の経過を想像しながら隕石を見つめ、そっと触れていると、名状しがたい不思議な気分には包まれるのです。また、ソーラーカーに乗って風を切っているときにも

同様のことを感じます。思い返してみると、宇宙がこのような身近になるときが幾度となくありました。例えば、自然の事象にレンズを向け、長時間露光や二重撮影の反復をしているときにもしばしば生じ、宇宙が至近距離にあるのだと気づかせてくれます」。

お知らせ 「野村仁 変化する相一時・場・身体」は東京・六本木の国立新美術館で7月27日まで開催。美術評論家の中原佑介氏による関連講演会「時間の知覚」は7月12日に同館で。同館研究員による解説会も7月18日に開かれる。詳細は同館ウェブサイト(<http://www.nact.jp/>)。



野村仁

地球科学 & 社会

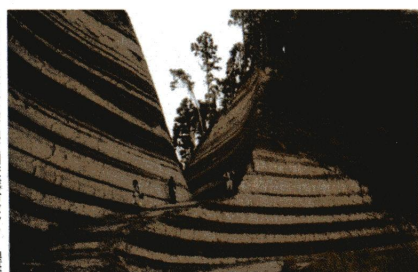
動き始める日本のジオパーク

地形や地質を見どころとする自然公園、ジオパーク
欧州や中国を追うように日本でも推進運動が活発になっている

地震や火山、地質、海洋などの研究者が集まる大きな学会で、専門家に交じって自治体の首長が講演するという過去に例がない光景が見られた。5月16日から6日間、千葉市幕張で開かれた日本地球惑星科学連合大会、その2日目のセッションでの一コマだ。高知県室戸市の小松幹侍（こまつ・けんじ）市長や京都府京丹後市の中山泰（なにかやま・やすし）市長らが相次ぎ登壇し、地元、室戸岬や山陰海岸の素晴らしさを語った。

両市長の口から「室戸岬で見られる四万十付加体（しまんとふかたい）」や「中緯度縁辺海としての日本海」などといった言葉が自然に出てきたのが強く印象に残った。「四万十付加体」と「中緯度縁辺海」は、地球科学の観点から室戸岬と山陰海岸を理解する上で、まさしく最重要のキーワードだ。

このセッションのテーマは「ジオパーク 地球科学がつくる持続的な地域社会」で、立ち見が出るほどだった。



大地の物語を楽しむ 崖に見える美しい地層には「大地の歴史」が記されている。その歴史を人々に魅力的に伝える語り部の育成がジオパーク実現のカギになる。上は房総半島の露頭。

京都大学前総長で地震学者の尾池和夫（おいけ・かずお）氏も最前列で聞き入った。市長と地質学者が熱心に議論する場面もあった。

前日の5月16日には北海道洞爺湖や南アルプス、長崎県雲仙など13地域の自治体関係者が東京に集まり「日本ジオパークネットワーク」が設立された。室戸市や京丹後市もメンバーで、初代会長には新潟県糸魚川市の米田徹（よねだ・とおる）市長が選ばれた。

さらに約3カ月さかのぼった2月20日の東京大学小柴ホール。尾池氏が委員長を務める専門家組織、日本ジオパーク委員会や自治体、関係省庁の代表者などが初めて一堂に会し、日本ジオパーク記念式典が開かれた。一般にはまだあまり知られていないが、今年は日本におけるジオパーク推進元年となりそうだ。

3地域が国際組織に加盟申請

ジオパークとは地質や地形を意味するジオ（Geo）と公園（Park）を組み合わせた言葉だ。「一言で言えば、地質や地形を“見どころ”とする自然公園の一種」と日本ジオパーク委員会事務局を務める産業技術総合研究所の渡辺真人（わたなべ・まひと）主任研究員は話す。学術的にみて価値が高い地質や地形は後世に残すべき自然遺産の1つ。ジオパークはそうした地質・地形遺産を保全すると同時に「ジオを楽しむ旅」（渡辺氏）、ジオツーリズム

を通じて地球科学の普及と地域の振興を目指している。

ジオパーク推進運動は1990年代後半に欧州で活発になり、2000年以降、中国でも国立の地質公園が相次ぎ設立されるようになった。こうした動きを受け、01年からはユネスコが各国の活動を支援、04年にはユネスコの働きかけでジオパークの国際組織、世界ジオパークネットワークが設立された。この組織への加盟が認められた地域だけが「世界ジオパーク」を名乗ることができる。現在、欧州と中国を中心に約20カ国約60地域が加盟している。日本は活動が立ち上がったばかりで現時点ではゼロだが、3地域が申請中だ。

1つは洞爺湖・有珠山地域。有珠山は20世紀に4回噴火した大地の動きを実感できる火山で、その有珠山を含む洞爺湖カルデラの雄大な景観は洞爺湖サミットを契機に国内外に広く知られるようになった。2つめは糸魚川地域。本州はフォッサマグナという大規模な地溝帯（断層で区切られた帯状のくぼ地）で東西に分かれるが、糸魚川地域にはフォッサマグナの西側境界となる糸魚川・静岡構造線がある。3つめは島原半島。この地域の特徴的なジオは雲仙地溝帯で、そのハイライトは雲仙普賢岳だ。有珠山と同様、大地の動きを実感できる火山で、前回の噴火では火砕流によって多数の犠牲者が出たことでも人々の記憶に残る。

これら3地域は世界ジオパークネットワークの専門家による審査が進んでおり、順調に行けば8月下旬にも加盟が決まる。5月16日に発足した日本ジオパークネットワークに参加する自治体は最終的には世界ジオパークネットワークへの加盟を目指している。



洞爺湖・有珠山ジオパーク提供



洞爺湖・有珠山ジオパーク 有珠山は20世紀に4回噴火した。左は2000年の噴火の様で、上は1977年の噴火の際の遺構。噴火を経験した地域防災のリーダー「火山マイスター」が、ジオパークの語り部として活躍することになる。

もしれない。

ジオパークはそれが貴重な地質や地形であるだけに未解明な部分も多い。尾池氏は「語り部は無理に説明しようとせず、わからないものは『まだわからない』と紹介することが重要」と言う。謎は謎であること自体が大きな魅力。それを語り部から聞いた子どもが「それなら自分が謎解きに挑戦しよう」

と考えると、専門家の道に進むかもしれない。セッションに参加した専門家の間からは「ジオパーク推進のため積極的に協力したい」という声も聞かれた。

世界自然遺産との違いは？

ユネスコが進める似た事業に世界遺産がある。世界遺産は人類が後世に残すべき貴重な遺産で、自然遺産と文化

遺産、複合遺産に分類される。日本は自然遺産では屋久島と白神山地と知床の3地域が登録されている。

世界遺産になると国際的な知名度が向上、内外から多くの観光客が押し寄せるようになるため、地方自治体などが登録に向けて熱心に活動するケースも見られる。ただ、世界遺産の第1の目標は遺産を保全することで、立ち入りが厳しく規制されている地域が多い。観光客が押し寄せるのは副次的な効果だ。一方、世界ジオパークは地形・地質に関する“大地の遺産”（ジオヘリテージ）を保存すると同時に、その活用が2本柱となっている。別の言い方をすると、いくら立派なジオヘリテージがあっても、その素晴らしさを伝える取り組みがされていなければジオパークとしては認められない。

また世界遺産は、いわゆる世界遺産条約という枠組みのもとで各国政府が推進し、ユネスコが直接、事業を行うのに対し、世界ジオパークは条約による枠組みがないので推進体制は国によって異なり、ユネスコの関与も間接的なものとどまる。

糸魚川ジオパーク 糸魚川・静岡構造線の断層（右下、子どもが指しているところ）があるところはくぼ地になっており、古来、海岸部と内陸を結ぶ「塩の道」として多くの人が往来した。ヒスイの産地（下）として知られ、縄文時代の遺物（左）などが出土している。



糸魚川市ジオパーク推進室提供





島原半島ジオパーク推進室提供



島原半島ジオパーク 雲仙地溝帯には雲仙普賢岳などの火山が活動している(左)。1990年から95年までの噴火では、大規模な火砕流によって、多くの犠牲者が出た(上は火砕流で埋まった建物の遺構)。

ている。世界ジオパークの知名度はまだ低いが、取り組み次第では世界遺産並みのブランド価値と知名度を持つようになり、「ジオヘリテージの

活用」を柱としていることから地域振興にもかなりの貢献が期待できる。

地震や火山の災害が多い日本において、ジオパークは防災教育の観点からも推進する意義がある。地震を起こした断層や火山災害の現場を実際に歩いてみて、楽しみながらジオを学ぶことによって、防災に関してより深い知識が身につく。

見方を変えれば、地震や火山噴火が多い変動する大地であるからこそ、日本には起伏に富む地形が生まれ、そうした地形と湿潤な気候に適した独自の生活文化が育まれてきた。火山の恵みである温泉がこれほど好きな国民も世界で珍しい。こうした日本の独自性や豊かさをジオパークによって世界にアピールできる。さまざまな期待を込め、日本でのジオパーク運動が本格的に始まる。

(編集部・中島林彦)

世界遺産は審査が厳しく、申請しても認められないケースがかなりあるのに対し、世界ジオパークはジオパークの概念そのものがいわば発展途上にあるため、中身にばらつきがある。例えば中国にある世界ジオパークの中には入場料をとるところがある。これはジオパークでは異例だ。途上国の世界ジオパークの中には、欧州より環境整備や活動実績が不十分なところも見られる(背景には、その国のジオパーク運動を支援しようと加盟認定を先行させてきた経緯がある)。ただ、加盟後、活動が不活発になって除名された事例もある。

こうした現状を踏まえ、世界ジオパークネットワークは加盟地域を増やすのではなく、審査の厳密化やユネスコとの連携強化によりブランド価値の向上を目指す方向に舵を切ろうとし

産総研ブックス

最新刊

きちんとわかる 木質バイオマス

○定価 1575円 229ページ

京都議定書の第1期約束期間(2008-2012)に入り、木質バイオマスは世界的にますます注目されている。植物を燃料にすれば、CO₂排出量にカウントされないからだ。しかし、日本が最終的にめざす道は、豊かな森を維持しながら、その間伐材や廃棄物から液体燃料を作って利用すること、そのための洗練された技術を開発することだ。

- 第1部 木質バイオマスを開拓する
第2部 木質バイオマスから液体燃料へ
1. なぜ木質バイオマスなのか
 2. 木質バイオマス実用化へ向けて
 3. メカノケミカルと水熱処理
 4. 酵素糖化とエタノール発酵
 5. BTL液体燃料製造プロセスと乾式ガス精製法技術
 6. FT合成触媒の開発とFTディーゼル合成法
 7. 経済性・環境性・社会性の評価技術

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

きちんとわかる 巨大地震

○定価 1575円 281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99>

コンビネーション型真空計「タフゲージ」新発売

測定子に従来のB-A型電離真空計に加えて、ピラニ真空計も搭載した真空計で、 10^4Pa ~ 10^{-7}Pa (従来タイプ: 10Pa ~ 10^{-7}Pa)と広範な測定が可能となった。併せて、セパレートタイプも発売。ともに、電極を加熱し汚染物質吸収を防止し、長期間清浄に保つ。

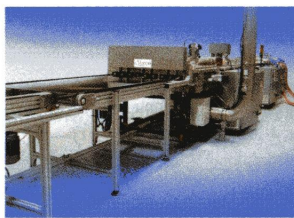
お問合せ:アンペール
<http://www.ampere.co.jp/>



CIGS薄膜太陽電池製造用

「FastLine」ガラス基板用成膜装置を発表

日本ビーコは、PV-Series蒸着源を有効活用した、ガラス基板用成膜装置FastLineを発表。Veecoの新システムFastLineは、CIGS (銅、インジウム、ガリウム、セレン) 太陽電池製造において、低製造コストで高スループットを実現できるよう設計。



お問合せ:日本ビーコ <http://www.veeco.co.jp/>

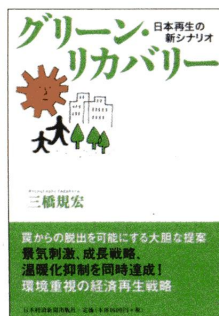
日本再生の新シナリオ

「グリーン・リカバリー」

今回不況を全治10年と位置づけ、前半の5年間は緊急対策期間として、再生・回復シナリオを「グリーン・リカバリー」と名づけて具体的に提案。

経済成長のためには、新エネ、省エネ、省資源、資源リサイクルなど環境分野の潜在需要を掘り起こすことが必要と説く。

三橋 規宏 著 1,680円 (税込)



お問合せ:日本経済新聞出版社 <http://www.nikkeibook.com/>

「わくわくする数学」

靴下や万国旗、トランプやコインなど、身の周りのありふれたものから、読者を、美しさと楽しさに満ちた「数学の世界」へ誘う。

難解な数式は使わず、わかりやすいイラストとユーモアあふれる文章で知っていると便利な数学が身につく。

ロブ・イースタウェイ 著 岩谷 宏 訳
1,680円 (税込)

お問合せ:ソフトバンク クリエイティブ
<http://www.sbc.jp/>



カールツァイス製

走査電子顕微鏡の新製品「Σ IGM A」

クロスオーバーフリー構造および電磁界・静電界複合型対物レンズを採用したGEMINI鏡筒により、極低加速電圧による極表面観察や分析を安定して行うことが可能。

さらに、各種分析検出器の装着により発展的な使用ができる。



お問合せ:エスアイアイ・ナノテクノロジー <http://www.siint.com/>

非接触3次元デジタイザーを発売

今回発売する「KONICA MINOLTA RANGE5」は、「RANGE7」の高い精度と機能を備えながら、500~1000mmのワークに最適なレンズだけを装備することにより、導入コストを大幅に抑えた。光沢面や黒物測定でのスプレーが不要となり、計測前後の洗浄工程がなくなった。



お問合せ:コニカミノルタセンシング
<http://www.sensing.konicaminolta.jp/>

素朴な疑問で開く宇宙のとびら

「夜空からはじまる天文学入門」

現代天文学が明らかにしつつある宇宙の姿を紹介。星はなぜ瞬いているのか、星座の形はずっと同じなのか、地球は特別な天体なのか、なぜ彗星は突然現れるのか、といった素朴な疑問に答えながら、古くから人類を魅了してきた宇宙をめぐる旅へと案内する。

渡部 潤一 著 1,890円 (税込)



お問合せ:化学同人 <http://www.kagakudojin.co.jp/>

「日常の化学事典」

空気も水に溶けるのか、エビ・カニをゆでると赤くなるわけ、アルカリ性食品を食べると体がアルカリ性になるのか、マイナスイオンの正体など、身の回りの不思議を化学の視点で解明。

左巻 健男 監修

山田 洋一 吉田 安規良 編 2,940円 (税込)

お問合せ:東京堂出版
<http://www.tokyodoshuppan.com/>



知らざあ言って聞かせやしょう

人類は種の分化を見たことがない？

S. マースキー

(SCIENTIFIC AMERICAN 編集部)

3月初め、船上でシカゴ大学の進化遺伝学者コイン (Jerry A. Coyne) の講演を聞いた時、ちょっとしたアイデアが浮かんだ。当コラムの読者なら、先月紹介した苦難に満ちた洋上の科学講義のことをご記憶だろう。最大の試練は激しい波と風にもみくちゃにされること——ではなく、美味なる食べ放題のディナーに日々翻弄されることだった。おっと脱線、今回は口に入れるんじゃないくて、吐き出す話だ。

創造説を信じる人たちは、「種の分化を見た者はない」と主張する。昨年の大晦日、ウェルズ (Jonathan Wells) はディスカバリー研究所という、名が体を表さない見本のような団体のウェブサイトでご述べた。「ダーウィンの進化論は1つの種が2つに分かれ、それぞれが分化してさらに分かれ、何度も繰り返すという仮説に基づいて、進化論に必要な系統樹を作り上げている。だが、そんな分化はいまだかつて一度も観察されたことがない」。

こんな主張を聞くと、酒場のケンカで相手の耳を食いちぎったと訴えられた男の裁判を思い出す (ちなみにマイク・タイソンではない)。目撃者が証言台に立つと、被告側の弁護士が聞いた。「あなたは被告人が問題の耳を食いちぎったところを見たんですか?」「いいえ」「それならどうして、被告が確かに相手の耳を食いちぎったと言い切れるんです?」「彼がその耳を口から吐き出すところを見たんです」。そう、私たちは進化が「吐き出した」ものを山ほど見ている。化石とか、変化の過程を示す中間化石とか、比較解剖学

とか、人間とサルの遺伝子の相同性とか。

コインは講演で、進化論には議論の余地のない科学的証拠がたくさんあると指摘した (彼の新著「Why Evolution Is True」を読みつつ暴飲暴食すれば、あなたもクルーズに参加した気分が味わえる)。かつてダーウィンも指摘したが、特定の性質を持つものを人工的に選択する品種改良は、自然選択による進化の良いモデルだ。「これまでに作られたイヌの品種が、何らかの理由で生きたイヌではなく化石として地層に残されていたとしたら、古生物学者たちはそれを1つではなく複数の種と見るだろう。その数が、現在自然界にいるイエイヌ以外のイヌ科動物の36種を上回るのは確実だ」とコインは話した。

非常に似通った生物集団同士であつても、生殖を阻む何らかの障壁があれば、異なる種とみなされる。障壁は染色体のミスマッチには限らない。ヤギ以外の動物にとってはヤギの住処である山が生殖障壁となるし、モグラ以外の動物にはモグラ塚が生殖障壁だ。

やはり船上で講義したデューク大学の

ノア (Mohamed Noor) は、そんな生殖障壁を研究している。ノアは50年に1度贈られるリンネ協会のダーウィン=ウォレス・メダルを受賞しているが、あのウェルズならその間の49年間だけ調査して、こんな風に主張しかねない。「何人たりとも、この賞を受賞するのは不可能だ。受賞が観察されたことは一度もない」。

ノアはウスグロシヨウジョウバエのメスを近縁種であるパーシミリスシヨウジョウバエのオスとかけ合わせて子孫を作らせる実験に成功したが、自然界ではこのかけ合わせは起こらない。ウスグロのメスは、パーシミリスのオスのにおいも、歌も、求愛ダンスも、すべて嫌いなのだ。

さて、私の提案はこうだ。「イヌの異なる品種を異なる種とみなそう」。同じイヌでもまったく違う例として、コインは体重80kgのイングリッシュ・マスティフと1kgに満たないチワワを挙げた。ともにイヌ科イヌ属イエイヌ (カニス・ルプス・ファミリアリス) に分類され、人工授精をすれば、原理的にはある種のハーフか、超巨大チワワみたいなものを作れるはずだ。だが現実問題、オスのチワワがメスのマスティフをモノにするには、ロッククライミングか洞窟探検の装備が必要になる。

この件について生物学者は控えめな態度を崩さず、2つを同じ種に分類している。だが創造説の信奉者がそこら中で進化論の教育に戦いを仕掛けている今、思い切った行動も必要だ。あのいつも震えている、つぶらな瞳のチワワを、独立種と認めようではないか。そうすれば、ほら、人類はちゃんと種の分化を観察したことになる。

この新種のイヌはカニス・ビクビクデスとか、カニス・ウルウルデス、またはカニス・ソノヒトミニハマケマスと命名しよう。驚くべきことに、チワワはいまだにカニス・ルプス・ファミリアリスと呼ばれており、これはオオカミの亜種という意味だ。チワワをオオカミと呼ぶなんて、まるでディスカバリー研究所の連中を科学者と呼ぶようなものではないか。



集団遺伝学の第一人者が 提唱する新モデル 「〈ほぼ中立〉説」とは？

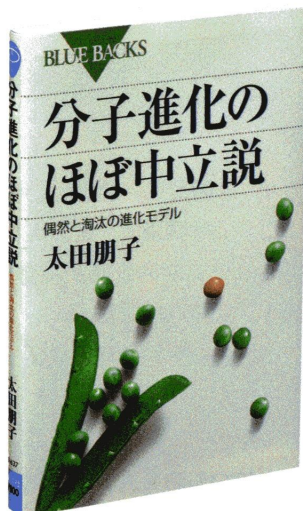
評者 長野 敬

分子進化のほぼ中立説 偶然と淘汰の進化モデル

太田 朋子 著

新書判 170 ページ

講談社ブルーバックス 840 円 (税込)



ほぼ中立説というのは、わかりやすく親切な命名だと思う。しかしこの説の含みを「一般」読者——科学をあなたのポケットに、と呼びかけているブルーバックスが想定するような「あなた」——が正しく受け止めるのに、この呼び方は有利だったのか。これには研究の足取りがからんでいる。

著者が三島の国立遺伝学研究所に参加したのは、木村資生 (1924~94年、以下人名の敬称略) による中立説の最初の論文 (タイトルはジュークスの派手な「非ダーウィンの進化」と違って、地味な「分子レベルでの進化速度」) が、1968年に発表される前年で、それに続く論争の時期に多くの論文が太田／木村の連名で発表された。だから新しい主張も「一般」読者の目には、手直しかパッチ当て修理を施したもとの理論、「ほぼ〈中立説〉」と受け取られがちだっただろう。しかしこれは違う。「〈ほぼ中立〉説」でなければならない。

本書の図3は、(a) 自然淘汰説、(b) 中立説、(c) ほぼ中立説での突然変異

の部類分けを横棒グラフで比べている。(a) の左には大きな「有害」部分があり、(b) では当然、中央に大きく「中立」部分があるが、(a) (b) いずれも右端に小さく「有利」領域がある。しかし宝くじの1等2億円はたしかに存在するが、その当選を予定に組み込んだ未来設計が現実上まず間違いなく破綻するように、「有利」な突然変異に頼って組み立てられる分子進化の理論はまず間違いなく破綻するから、「有利」は辻褄合わせに書かれているにすぎない。

(c) では中央に大きく「ほぼ中立」領域が描かれると同時に、右端の「有利」が見当たらない。どうせ辻褄合わせだから、ついでに消してしまった？ まさか。そして左側の「有害」が「淘汰」と看板替えしている。注釈を読むと、「淘汰」の領域は「有害」と共に「有利」も含むという。これで事態ははっきりした。つまり (c) の理論では、有害にせよ稀に生ずるかもしれない有利にせよ、淘汰の網に確実に掛かる手応えある突然変異を、まず1つの類とす

る。そして、集団が小さければ揺らぎに紛れて淘汰の網をすり抜ける確率 (ドリフト) が無視できない変異を「ほぼ中立」という別の類とする。この第2の類を特に重視する分子進化の新しい理論が「〈ほぼ中立〉説」なのだ。変異は微小でも「微有害」な場合が多いから、初期の論文では「(very) slightly deleterious mutations」の表現が使われている。英語論文での一般化された「near neutrality」という言い方は、90年代から目立つようだ。

本書は、書き方はやさしいが構成は数理遺伝学の講義特論ふうに整然と始まっている。最初のあたりに数式が出てくるからいやだという読者は、自分で勘違いしているだけのことも多いだろうが、とにかく、たとえば図3を入り口として、概説である前半の「基礎篇」に遡るなり、または遺伝子発現の調節とかエピジェネティクス、形態の進化など発展しつつある分野の理解への適用を論ずる後半の「応用篇」に進むなりすることもできる（「一般」読者にとって平易な読み物ではないが）。

適用の相手分野の研究は、ほぼ中立という概念に特に言及していない場合も多い。それでも、たとえばロバストネス (発生過程の「耐震性」) について、本書とカーシュナー／ゲルハルトの『ダーウィンのジレンマを解く』(みすず書房) は波長の合うところが多いし、同じリンドキストの仕事を取り上げたりもしている (有名な研究だから当然だろうが)。つまり分子進化や「エボデボ」で目立ちつつあるダイナミックで柔軟な遺伝子観は、「ほぼ中立」説のそれでもあるということだろう。(ながの・けい: 河合文化教育研究所／自治医科大学名誉教授)

“進化する望遠鏡” ハッブルの 栄光と苦難

評者 野本陽代

ビジュアル
ハッブル望遠鏡が見た宇宙
デビッド・デボーキン／ロバート・W・スミス 著
金子周介 訳
31×28cm 223ページ
日経ナショナルジオグラフィック社
9800円(税込)



2009年5月11日、スペースシャトル・アトランティス号が宇宙に向けて飛び立った。行き先はハッブル宇宙望遠鏡。任務はハッブルの修理・維持と、2つの新観測装置の設置である。

これまで4度にわたって同様のミッションが行われてきたが、今回はこれまで以上に大きな意味をもっていた。まず最後のミッションであること。もうひとつは、前回のミッションから7年以上もたっているため、2つの観測装置の故障、ジャイロ、電池、ガイドセンサー、断熱材などの老朽化、科学データを地上に通信するシステムの故障など、ハッブルが満身創痍の状態であったこと。

5日間、37時間にわたる船外活動によってハッブルは生まれ変わった。打ち上げ以来初めて、5つすべての観測装置が稼働し、紫外線から近赤外線まで、可視光を中心として広い波長で宇宙を観測することのできる、21世紀の宇宙望遠鏡となったのである。これから5年から10年、ハッブルは宇宙の

データを取り続け、私たちに新たな情報を提供してくれるだろう。

今回のミッションにかかった費用は、スペースシャトルの打ち上げ費用もいれて10億ドル(約1000億円、日本の年間宇宙開発予算の約半分)といわれている。これだけの費用をかける価値がハッブルにあったのだろうか。その答えはまちがいにイエスである。それは本書を見て、読んでもらえれば納得してもらえると思う。

まず、ハッブルの撮った天体写真はじつに美しい。そして、細部まではっきりと見ることができる。観測装置がよくなり、データ処理技術が向上したことで、地上から撮った写真にも美しいものはたくさんあるが、その鮮明さにおいて、ハッブルの写真は群を抜いている。とくに遠く離れたところにある天体については、独壇場といってもいい。ハッブルの写真によって私たちの宇宙観が大きく変わったといえるだろう。

写真がきれいなだけではない。その

科学的成果もまた群を抜いている。19年間に89万回以上の観測が行われ、2万9000の天体の57万枚の画像が撮影された。そのデータを使って、世界中の4000人の科学者が7500以上の論文を書いたという。その成果は多岐にわたり、誕生まもないころの宇宙、銀河、星、太陽系、あらゆる分野で数多くの発見をしたことで、天文学の教科書は大きく書き換えられることになった。世界でもっとも生産的な科学装置の1つと評価されるのも当然である。

もし、ハッブルがほかの天文衛星のように、打ち上げ後には劣化していくのみであったなら、これほどの成果をあげることはできなかっただろう。ハッブルがつくられた70年代の技術では、おのずと能力が限られてしまう。しかし、宇宙飛行士によって何度もサービスミッションを行い、そのつど最先端技術でつくられた装置と交換することで、ハッブルはつねに第一線の望遠鏡でありつづけた。まさに進化する望遠鏡であった。

とはいうものの、すべてが順風満帆だったわけではない。打ち上げまでの苦労、打ち上げ直後に判明した不具合、薄氷を踏むような修理作業、政治的判断など、困難の種はつきなかった。しかし、それらを上回る一般の支援があったおかげで、ハッブルの今日がある。

本書には、美しい写真とともに、ハッブルのたどった栄光と苦難の日々、新発見の数々と科学的成果、そして天文学の最新の知識がふんだんに盛り込まれている。迫力のある大きな写真を楽しむもよし、読み物として楽しむもよし、非常に贅沢な一冊だと思う。

(のもと・はるよ：サイエンスライター)

『単純な脳、複雑な「私」』は、書名が著者の考え方を端的に表している本だ。著者は、複雑に思える「私」は、実は単なる再帰の繰り返しによって生み出されているだけで、脳の動作原理そのものは単純だと考えているようだ。脳や心について考えるときには物事を複雑だと捉えてしまいがちな罠に陥らないように注意すべきだという。

脳の研究者が高校生向けに行った講義を元にしたもので、まず多くの高校生向けに行った講義と、興味を持った学生たちに向けた、より深い講義の2段構成になっている。脳がノイズを利用して秩序を作り出す仕組みや、心の問題を相手にするときの考え方などが、学生とのやりとりを通してわかりやすく解説されている。

特に、対象を捕まえてブレイクダウンし考えるための科学的な思考を披露することに注力されている。少数の高校生を対象にして、逆に多くの人の心をつかめるものになったことも面白い。

なお再帰とは入れ子構造のことだ。たとえば記述がそれ自体を参照するものになっていたり、ある命令が自分自身を呼び出すような命令となっているようなもののことだ。コンピューターを扱う人たちにはおなじみだろう。

でも『アンティキテラ』の話は知らない人が多いかもしれない。紀元前70年から60年頃にローマを目指して出航し難破したと考えられる沈没船から、1901年に引き揚げられた歯車の付いた残骸、それが「アンティキテラ

の機械」である。

何のために、誰が作ったのか。アテネ国立考古学博物館に収められた機械の正体がほぼ解明され、論文が「ネイチャー」に掲載されたのは2006年のことだ。実に100年以上にわたって機能を推定するために、ときには互いに成果を奪い合いもした研究者たちの物語である。機構に関する説明がややこしく、想像しにくいところもあるのだが、実に面白い。特に、文献から推定するしかないため本書ではさらっと流されているのだが、作成者の推測にも興奮させられた。機械は作成者の知識を形にしたものだ。この機械の存在は高度な知識と高度な技術が古代ギリシャに存在したことを意味している。しかもそれが、今日にそのまま引き継がれなかったことも――。

『10万年の世界経済史』は、特に経済史に着目して我々の文化や生活がどのように形成されたか考えた本だ。技術進歩による食料増産が人口増大で帳消しになってしまう「マルサスの罠」時代がなぜ長く続き、そしてそれがなぜ通称「産業革命」と呼ばれる時期に打ち破られたのか、だがしかし、世界全体が発展せずに国家間で格差が生まれてしまったのかを考察している。『銃・病原菌・鉄』（J・ダイヤモンド著、草思社）という本があるが、あの手の「大きな疑問」を大胆にズバッと考察した本が好きな人にはおすすめできる。

前半は出生率と生活水準、清潔や勤勉さと所得の関係のような、ごく単純に思われる事象ひとつとっても直感と

『単純な脳、複雑な「私」』

池谷裕二 著
四六判 421ページ
朝日出版社
1785円（税込）



反する結果をもたらすことがあるという話が多数披露される。後半では産業革命が英国で起きた理由について、生産性上昇率が高まったことと、人口がその前に無関係に増大したから、つまり偶然だったと述べている。

いずれにしてもその結果が現在だ。これからどうなるのか。『「エコ罪びと」の告白』は自分たちが食べているもの飲んでいるもの身につけている物の由来と行く末について世界中を回ってルポした記録だ。邦題で損をしているが、予想外に面白い本だったので一読をすすめる。世界の仕組みは単純ではない。

（もりやま・かずみち：サイエンスライター）

『アンティキテラ
古代ギリシアのコンピュータ』
ジョー・マーチャント 著 木村博江 訳
四六判 291ページ
文藝春秋
1995円（税込）



『10万年の世界経済史』（上・下）
グレゴリー・クラーク 著 久保恵美子 訳
四六判 320, 336ページ
日経BP社
各2520円（税込）



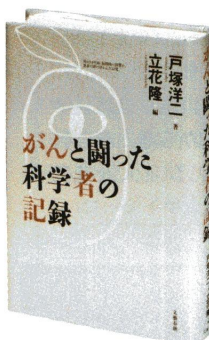
『「エコ罪びと」の告白』
フレッド・ピアス 著 酒井泰介 訳
四六判 368ページ
NHK出版
1890円（税込）



がんと闘った科学者の記録

戸塚洋二 著 立花隆 編 文藝春秋 1750円(税込)

ニュートリノ研究で世界的業績をあげた戸塚洋二氏が逝去されて約1年。追悼シンポジウムが6月9日に東京大学安田講堂で開かれ、ノーベル賞学者の小柴昌俊、小林誠両氏など内外から多くの研究者が参加、足跡を偲んだ。戸塚氏の生涯は物理学とともにあったが、晩年、病に倒れ研究の最前線から退いた後にも、人々への大きな“贈り物”を残した。それは氏が闘病生活を送りながら日々つづったブログだ。「A Few More Months」と題したブログは離れて暮らす家族や知人に自身の消息を伝えるのが目的で、それだけに自身の病(末期がん)や学問、社会問題などに対する氏の率直な思いや考えが語られている。そしてそれは、

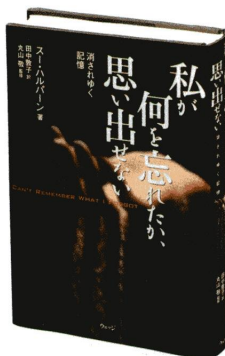


氏の亡き後、はからずも現代を代表する自然科学者の思想が詰まった第一級の随筆集としての性格を帯びるようになった。ブログのうち科学に関する話題は『戸塚教授の「科学入門」』として講談社から昨秋上梓され、今回は闘病や思い出に関する部分が収録されている。しかし、これら2冊が出た後でもまだかなりの量の文章が残っている。

私が何を忘れたか、思い出せない 消されゆく記憶

スー・ハルパーン 著 田中敦子 訳 丸山敬 監修
ウェッジ 2520円(税込)

診断や治療薬、サプリメント、脳の基礎研究など、認知症へのさまざまな疑問に答える。タイトルからは特定の患者を描いた読み物のような印象を受けるが、著者の個人的体験(父に関する回想)はところどころに挿入されているだけで、専門医からベンチャー企業まで幅広い取材をもとにした構成。多くの人が興味をもつ内容だろう。



オバマのグリーン・ニューディール

山家公雄 著 日本経済新聞出版社 1680円(税込)

プラグイン・ハイブリッド、バイオ燃料、スマートグリッド(賢い電力網)——米国が近年これらの開発に力を入

れてきことは本誌の記事でもご存じだろう。本書は、それがオバマ新政権のもと、一挙に加速して大きな潮流に姿を変えていることをリポートしたタイムリーな一冊。特にスマートグリッドと、“知る人ぞ知る”日本のスマートグリッド技術について、章を割いて詳説している。

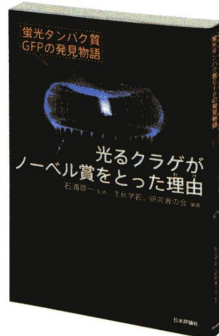


光るクラゲがノーベル賞をとった理由

蛍光タンパク質GFPの発見物語

生化学若い研究者の会 編著 石浦章一 監修

日本評論社 1785円(税込)



下村脩氏のノーベル化学賞受賞で脚光を浴びたオワンクラゲ。そのクラゲから抽出した蛍光タンパク質GFPは生命科学の研究に欠かせない。大学院生を中心に若手研究者が執筆したユニークな解説書で、基礎知識から脳やがん研究の最先端の成果まで、広く取り上げている。

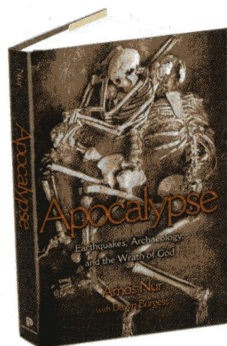
SCIENTIFIC AMERICAN書評欄より

APOCALYPSE: EARTHQUAKES, ARCHAEOLOGY, AND THE WRATH OF GOD

Amos Nur / Dawn Burgess 著

Princeton University Press 26.95ドル

古代文明の崩壊をめぐる地球科学と考古学の見方は大きく対立する。考古学者が戦争のような人為的要因を重視するのに対し、地球科学者が主張するのは、自然が引き起こす破壊力、つまり地震だ。スタンフォード大学の地球物理学者アモス・ヌルは、トロイやエリコ、クノッソス、ハルマゲドンといった古代都市はいずれも断層に位置していたと指摘。聖書やイリアッドなどの記述と照らしあわせて検討する。



その他の新刊科学書を日経サイエンスのホームページ

<http://www.nikkei-science.com/>に掲載しています。

今月の科学英語



本誌のもとになっている SCIENTIFIC AMERICAN は世界の科学ファンに最も多く読まれている一般向け科学誌だ。そこには世界標準の「科学英語」がたっぷり。今号の記事からキーワードをいくつか紹介しよう。例文の末尾に、対応する日本語が掲載されているページを示した。

このほか <http://www.nikkei-science.com> に一部記事の対訳をアップしてあります。Don't miss it!

「惑星の顔を定める大気流出」より

■terrestrial planets: 地球型惑星

主に金属や岩石からなる惑星で、太陽系では水星と金星、地球、火星を指す。これに対し固体核の周りを液体や気体を取り巻いているのが木星型惑星で、巨大ガス惑星、巨大氷惑星などの分類も。The atmospheres of **terrestrial planets** and outer-planet satellites we see today are like the ruins of medieval castles—remnants of riches that have been subject to histories of plunder and decay. (→p52)

■exobase: 外気圏界面

大気のもも外側の層が外気圏 (exosphere) で、その下の熱圏 (thermosphere) との境界が外気圏界面。エクソベース、外圏底などともいう。exo-は「外」の意。

At lower altitudes, collisions confine particles, but above a certain altitude, known as the **exobase**, which on Earth is about 500 kilometers above the surface, air is so tenuous that gas particles hardly ever collide. (→p54)

■escape velocity: 脱出速度

慣性飛行によって天体の重力を振り切るのに必要とされる最小の初速度のこと。地表からの脱出速度は秒速約 11.2 km。

A spaceship that reaches **escape velocity** is moving fast enough to break free of a planet's gravity. (→p52)

「DNAに見えた『人間の証』」より

■positive selection: 正の自然選択

適応に有利な突然変異が出現し、この遺伝子が個体集団中にしだいに広がっていくこと。逆に、有害な変異は負の選択 (negative selection) によって淘汰されていく。

Acceleration in that rate of change in some part of the genome, in contrast, is a hallmark of **positive selection**, in which mutations that help an organism survive and reproduce are more likely to be passed on to future generations. (→p44)

■substitution: 置換

ゲノムに生じた変異が古い型に取って代わり、それが集団中で定着すること。DNA 塩基配列の置換、アミノ酸の置換、遺伝子がそっくり入れ替わるものなど、いろいろなレベルがある。

It turns out that where DNA **substitutions** occur in the genome—rather than how many changes arise overall—can matter a great deal. (→p47)

「血の通った臓器をつくる」より

■endothelial cell: 内皮細胞

血管の内表面である血管内皮 (endothelium) を作っている細胞。end-/endo-は「内」の意。左に出てきたexo-の反対だね! Many techniques rely on an improved understanding of the environmental needs of **endothelial cells** (which form capillaries and line larger vessels), as well as an advanced ability to sculpt materials at extremely small scales. (→p24)

■matrix: マトリクス, 基質

生体構造の周囲を満たして支えている物質。染色体基質, 細胞質基質などがあるが、この記事では細胞外マトリクスを指す。Hydrogels chemically resemble the natural **matrix** that surrounds all cells within tissues. (→p25)

■mesenchymal stem cell: 間葉系幹細胞

間葉 (mesenchyme) は上皮組織の隙間を埋めている細胞集団と細胞間質のことで、ここに存在する体性幹細胞が間葉系幹細胞。皮下脂肪から採取できるので、再生医療分野で注目を集めている。Notably, Christopher Chen and Dennis Discher, both at the University of Pennsylvania, have demonstrated that **mesenchymal stem cells** will respond to mechanical cues from their surroundings. (→p26)

「ナノマシンを動かすエンジン」より

■chemotaxis/ phototaxis: 走化性/走光性

生物が外部刺激に反応してある方向性をもって運動することを走性 (taxis) という。化学物質の濃度差に反応するのが走化性 (化学走性), 光が刺激となるのが走光性 (光走性) だ。このほかにも走地性 (重力走性, geotaxis) や走流性 (水流走性, rheotaxis), 走風性 (気流走性, anemotaxis), 走熱性 (温度走性, thermotaxis) など、いろんな言葉がある。

Because favorable runs last longer than those in unfavorable directions, the net effect is that the bacterium eventually converges on its target, even though it has no direct way to steer itself—a strategy called **chemotaxis**. (→p64)

More recently, the two of us have also demonstrated motor particles that are driven by light, or **phototaxis**. (→p64)

ではまた来月。See you!