

Newton

GRAPHIC SCIENCE MAGAZINE

ニュートン

目前に迫る
5.21「金環日食」

まもなくやってくる

100億人時代

「食糧」「エネルギー」「長寿命化」

第2特集 最新データ

南海トラフ巨大地震

マグニチュード 9.1, 津波 34メートル

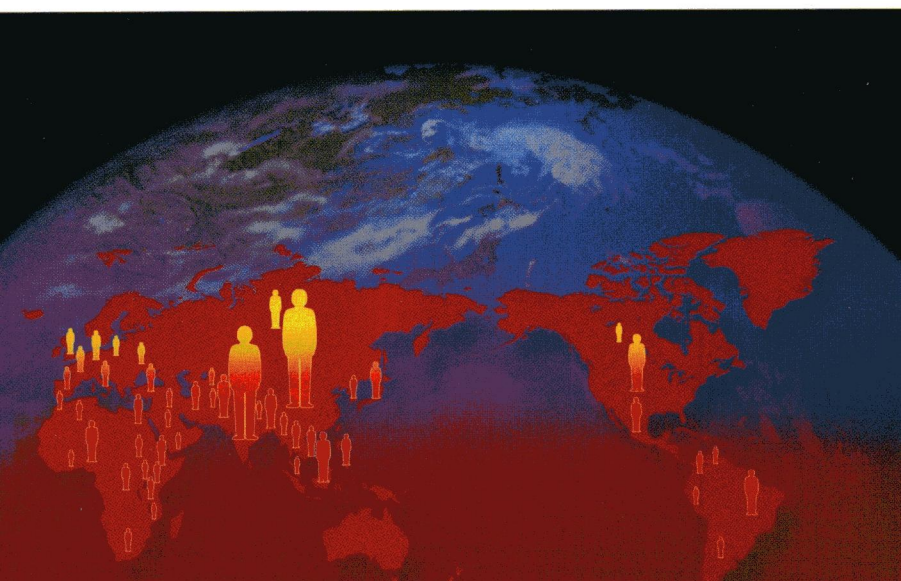


“宇宙の渚”で輝く謎の現象「スプライト」

地球と宇宙の境界線上を超高感度カメラがとらえた最新画像

6

2012



18 **Newton Special**

人類はどこまでふえるのか？ 地球100億人時代

協力 金子隆一／大塚博太郎／川島博之／深水克郎／
鹿島光司／荻本和彦／松本吉央／広瀬信義

世界の人口は、どのようにして70億にまでふえたのか？
今後、どこまでふえるのか？ そのとき食糧やエネルギーは足りるのか？
人類の過去と現在、そして未来を、人口という切り口から考える。



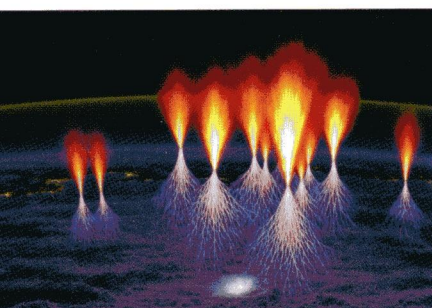
62 **Monthly Highlight**

生まれかわる すばる望遠鏡

視野10倍の高感度カメラがついに始動

協力 宮崎 聡

すばる望遠鏡に新しいカメラが搭載される。
日本の技術力が結集したカメラで、世界をリードする
観測が行われようとしている。



74 **Cosmic Wonder**

「宇宙の渚」を駆ける謎の閃光—スプライト

雷雲上空にあらわれる巨大な発光現象を
NHKの超高感度カメラがとらえた

協力 高橋幸弘／佐藤光輝 画像 NHK

雷雲のはるか上空に光の柱があらわれる—。
“妖精”と名のついたなその発光現象の正体を追う。



84 **Nature View**

熱帯雨林にゴリラを訪ねて

ヴィルンガ火山群に暮らすマウンテンゴリラ

写真・文 前川貴行

マウンテンゴリラの聖域、
アフリカの赤道直下に位置するジャングルで、
ゴリラの素顔をにらめ。

SCIENCE SENSOR

- 5 ポニーテールの物理学／殺されるなら産まず／銀河にガスをもどす／マヤを崩壊させた千ばつ／第2の地球の探索準備
- 7 次の超大陸はどこ？／不滅の“男性染色体”／瞬時に強化するクモの糸／遅れて届いた光
- 8 卵は有限ではない？／ほほ水の惑星／小惑星の小クレーター／サンゴの成長と高水温／海底深部の岩石に生命跡
- 9 暗黒物質の奇妙な分布／効率的な触媒／胃粘液の効能／繊維がぬれるしくみ

FOCUS

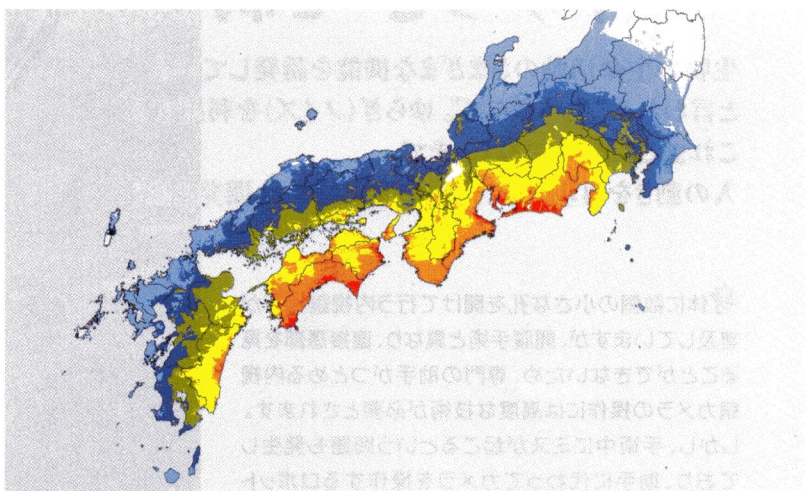
- 10 **Astronomy**
太陽の北極も南極もN極に？
協力 常田佐久
- 12 **Meteorology**
スカイツリーで、雷の観測がスタート！
協力 石井 勝
- 13 **Physics**
放射性物質を可視化するカメラ
協力 高橋忠幸
- 14 **Geoscience**
海底資源は「とる」から「育てる」へ？
協力 高井 研
- 15 **Medical Science**
衛生的すぎる環境でアレルギーが増加？
協力 谷口 克

Newton第2特集 50 最新想定 西日本M9と 首都直下地震

なぜ、従来を大幅にこえる想定結果となったのか

協力 阿部勝征／磯藤一起

南海トラフの巨大地震と首都直下地震について、深刻な想定結果が発表された。
マグニチュードは9クラス、津波は最大で34メートル……。
想定の内容と、その根拠を読み解く。

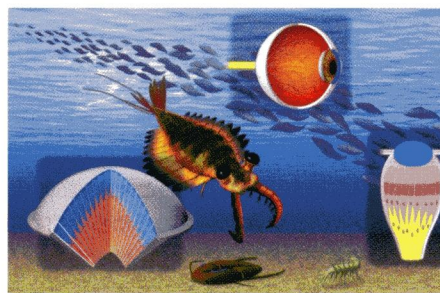


Topic 94 知られざる眼のヒストリー

かつて私たち哺乳類は紫外線を見ていた？

協力 田中源吾／河村正二

生命は「眼」によって進化した？
なぞ多岐形の進化と、多彩な色覚の変遷をたどる。

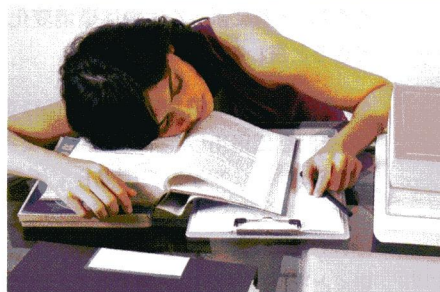


Topic 100 疲れに悩んでいませんか

なぜこんなに疲れるの？
疲労を回復する方法とは？

協力 征矢英昭／佐々木 司／倉恒弘彦

日々私たちが感じる「あー、疲れた」の正体は？
さまざまな「疲れ」のしくみや効果的な疲労回復の方法を紹介。



シリーズ・フラワーサイエンス 前編 106 花が色とりどりののはなぜ？

昆虫も人間も魅了する花の色や形は
どのようにしてできるのだろうか？

協力 大宮あけみ／福原達人／星野 敦

植物は色とりどりの花を咲かせる。
多様な花の色のできかたと最新の研究を紹介する。



- 16 SUPER VISION
オーロラ爆発の瞬間をとらえた
協力 片岡龍峰
- 112 テクノロジー・イラストレイティッド
早く、正確に体温を測定できる
電子体温計
協力 オムロンヘルスケア株式会社
- 114 パレオントグラフィ
重量級どうしの激突
ティラノサウルスvs.トリケラトプス
協力 小林快次／斎木健一
- 116 身近な「？」の科学
指紋
協力 井上 馨
- 118 Basic of Science
時間
協力 洪 鋒雷／池上 健
- 120 STAR-WATCHING
金環日食
渡部潤一
- 124 STAR-WATCHING 特別編
金環日食はなぜめずらしい？ 観察法は？
協力 渡部潤一



“生体ゆらぎ”を制御に活かす

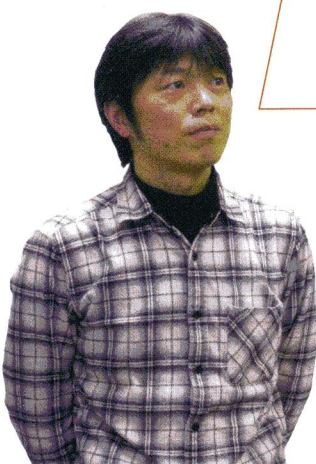
生物の生命活動のさまざまな機能を誘発していると言われる“生体ゆらぎ”。ゆらぎ(ノイズ)を利用するこれまでにないアプローチで、人の動きを再現する、生体に学ぶロボット開発とは？

身体に数個の小さな孔を開けて行う内視鏡手術が普及していますが、開腹手術と異なり、直接患部を見ることができないため、専門の助手がつとめる内視鏡カメラの操作には高度な技術が必要とされます。しかし、手術中にミスが起こるという問題も発生しており、助手に代わってカメラを操作するロボットの開発が注目されています。

手術に際しては、ケースごとや場面ごとに求められる視野が異なるため、熟練したカメラ助手の技術を単純にモデル化してロボットを制御するのは限界があります。そこで着目したのが、“生体ゆらぎ”を利用する方法でした。たとえば、筋肉の収縮はミオシンという生体分子がゆらゆらと揺れながら動くことで誘発されるのですが、動作のみならず、知覚や生体調整などあらゆる生命活動にさまざまなゆらぎが存在し、それによって生物は環境変化に柔軟に対応できると言われているのです。

そうした生物の環境適応能を表わす“ゆらぎ方程式”を制御に応用した、内視鏡手術支援ロボットが開発されました。左手器具の動きで医師にとって心地よい視野かどうかを判断するというもので、左手の動きが安定していると“心地よさ”が、左手が急激に動くと“ゆらぎ”が支配的になるという相互作用を繰り返すなかでロボットは学習し、目標値を更新してカメラを自律的に動かすことが可能となりました。

医師による実験の結果、熟練したカメラ助手が行ったときと非常に近いという高評価も得られました。また、人の動きを再現するハンドロボットの研究なども進められており、複雑で正確な操作をこなすロボットの実用化に期待が寄せられているのです。



生体に学んだロボット

内視鏡手術支援ロボット(写真左)は最初に人の手でセッティングされ、手術開始後は完全な自律制御によりカメラを操作する。人の手の構造に倣ったロボットハンド(写真右上)には指の部分に空気圧で駆動する人工筋肉(写真右下)がいくつも内蔵されており、人の筋肉のようにそれぞれが互いに協調し合うことで5本の指を自在に動かすことができる。

人から学び、人と共存するロボットをつくる

信州大学 繊維学部バイオエンジニアリング課程
西川 敦 教授

科学と工学の融合に興味をもったことがキッカケで、ロボティクスの研究をするようになりました。人とロボットが共生するためには、コミュニケーションが重要な要素であり、ロボットに人の動きを認識させ、解析させる研究が続けていたところ、医療ロボットを開発してほしいという話をいただいて、生物と工学を融合させたバイオエンジニアリングの研究へとつながってきたのです。

現在は、“生体ゆらぎ”の応用研究と並行して、人の指、筋肉、骨格構造などに倣った人と同じ大きさの筋骨格ロボットの開発も行っています。人の筋肉や関節の動きがどう制御されているのかを学び、それを再現することで、従来のロボットとは違うメカニズムで、人のようにしなやかに動くことができるロボットが実現できるのではないかと考えています。

積水化学は「自然に学ぶ」研究を
助成しています

百年先、千年先を見据えた、持続可能な社会の形成に向けて……。『積水化学 自然に学ぶものづくり 研究助成プログラム』は、生物模倣科学、バイオ技術、再生可能資源などを活用する材料研究や関連技術の開発を応援しています。

積水化学工業株式会社

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

お客様相談室 TEL: 03-5521-0505(東京) TEL: 06-6365-4133(大阪) 〒105-8450 東京都港区虎ノ門2-3-17(虎ノ門2丁目タワー)
 <この広告に関するご意見・お問い合わせは、(E-mail)market@sekisui.jp までお寄せください。>

ポニーテールの物理学 特徴のある曲線をえがくポニーテールの形状を説明する方程式が見いだされた。

● Physical Review Letters
2012年2月17日号

ポニーテールとは長い髪を頭のうしろで束ねた髪型だ。よくみると、髪の毛の1本1本は、不規則に曲がった形であり、複雑だ。そのため、この馬のしっぽのような毛束の形が、どのようにして決まるのかよくわかっていなかった。

イギリス、ケンブリッジ大学のゴールドスタイン博士らは、市販

のカツラを用いてポニーテールの髪型を再現し、その形状が一つの方程式で表せることを見いだした。この方程式は、髪のかたさやふくらんだ毛の束にかかる重力などを考慮し、どのような形状になるかを予測することができる。

得られた実験のデータは、この方程式を使って予測した形状に一致し、独特の曲線をえがいた形を再現できた。また、博士らによると、左右にゆれ動くポニーテールの形状の予測も可能だという。

今回の成果は、工業などで使われる光ファイバーなどの束の形状の予測に応用できるだろうと、博士らはのべている。

殺されるなら産ます あるサルでは、ボスが交代すると、前のボスの子の妊娠が中断されるようだ。

● Science 2012年3月9日号

実験室で飼育されたマウスでは、妊娠したメスに別のオスをつがわせると、妊娠が中断されることがある（ブルース効果）。これまで、ブルース効果が自然界でおきるのかは不明だった。

ミシガン大学のロバート博士らは、野生のゲラダヒビの群れの頭数変化やホルモンデータを5年間収集し、野生でもブルース効果が

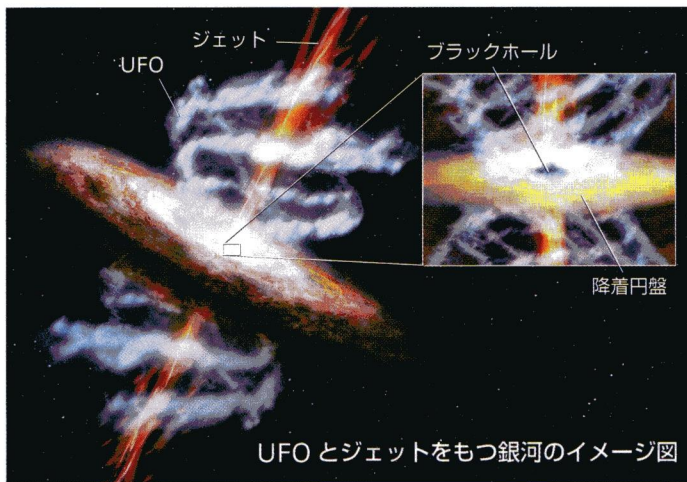
おきることを示した。博士らによると、ボスが交代すると交代後6か月間の出産数は減少し、7か月以降の出産数は倍増するという。このヒビの妊娠期間は6か月なので、7か月以降に生まれるのは新しいボスの子だ。また、妊娠中に増加するホルモンがボス交代後に減少したことから、メスの妊娠が中断されていたこともわかった。

このヒビでは、新しいボスは前のボスの子を殺してしまう。そのため、妊娠が中断され、新たなボスの子を妊娠することは子孫を残すうえで有利だ。ブルース効果は、自然界にも存在するようだ、と博士らはのべている。

銀河にガスをもどす ブラックホールが太りすぎないのはジェットとは別の噴流があるためらしい。

● イギリス王立天文学会誌
2012年2月28日

銀河中心のブラックホールには、銀河のガスが徐々に落ちこむ。これに対し、銀河にガスをもどすしくみがあると考えられてきた。そのしくみとしてブラックホール近くから噴出するジェットがあげられる。だがジェットは細いうえ、銀河よりも速くにガスを飛ばしてしまう。またすべての銀河に



超高速噴出流（UFO）が銀河とブラックホールの進化に影響を与えているようだ。

強いジェットがあるわけではない。近年注目されているのが、ジェットほど噴出方向がたよらない超高速噴出流（UFO）だ。

アメリカ、NASAのトンベシ博士らは、強いジェットがない銀河に対し、X線データからガスの速度を調べた。するとUFOは約40%もの銀河にあり、UFOが多く銀河に普遍的な現象である可能性が判明した。またUFOは銀河にガスをもどす効果を十分にもつ可能性があることもわかった。

2014年に打ち上げ予定で日本が主導するX線天文衛星Astro-Hで、より詳細にUFOが解明できる、と博士らは考えている。

マヤを崩壊させた干ばつ 環境の復元により、干ばつがマヤ文明の崩壊につながった可能性が高まった。

● Science 2012年2月24日号

メキシコ南東部のユカタン半島と中央アメリカに広がっていたマヤ文明は、紀元800～1000年ごろに崩壊したとされている。崩壊の原因の一つとして干ばつが考えられていたが、実際におきた気候変動の程度は不明だった。

今回、イギリス、サウサンプトン大学のメディナ・エリゾルデ博士らは、ユカタン半島において、

マヤ文明が崩壊しつつあったところに堆積した湖底の物質などの分析を行った。堆積物中の酸素の同位体比（同じ酸素原子だが質量のこととなるものの比率）は、降水量の変動に影響される。そのため、当時の気候を復元できるのだ。

分析の結果、文明が崩壊したとされる期間に、くりかえし干ばつがおきていたことがわかった。ときには、例年より40%も雨量が減った年もあったという。

博士らは、今回の分析によって、当時の気候変動の程度がわかり、干ばつがマヤ文明の崩壊の原因の一つである可能性が高まった、とのべている。

第2の地球の探索準備 月面で反射した地球の光から、地球の大気の成分などを読みとることができた。

● nature 2012年3月1日号

暗い夜空で月を観察すると、太陽に直接照らされていない部分がうっすらと見える。これは「地球照」とよばれ、太陽に照らされた地球からの光が月面で反射して生じる現象である。

ヨーロッパ南天天文台のスタージク博士らは、地球照を利用して「第2の地球」の探索の予行演習を行った。生命を育む惑星をみつ

けるには、恒星に照らされた惑星の反射光から生命の兆候を読みとる必要がある。その準備段階として、まず地球照から地球の情報を読み取ることに挑戦したのだ。

博士らは、地球照の偏光状態（光の波の振動方向のかたより）を調べた。偏光は惑星が恒星の光を反射する際に生じ、偏光の度合いは大気成分や地表面の状態に応じて変化する。解析の結果、地球の大気中の酸素や、地表面の海や緑の割合が読みとれたという。

今後この方法をさらに精密化すれば、第2の地球探しで威力を発揮するだろう、と博士らはのべている。

サッカー漬けの息子と 私がはじめて続けられた 外国語トレーニング。

木村 美砂さん・聡介さん

息子がイタリアのサッカークラブから入団の誘いを受けていて、近いうちに親子二人でイタリアへ渡ることになりました。参考書で勉強するのは苦手だし、練習中心の毎日で時間が取れないので、会話するように学べる学習法がないか探していたんです。

信頼している塾の先生に相談すると、ロゼッタストーンを薦められて、すぐ購入を決めました。

写真を見ながら直感的に単語やフレーズを学べるから、耳慣れないイタリア語でもどんどん身につけていきます。またオンラインでネイティブの人とおさらい

レッスンができる*点もいいですね。自分では覚えなつもりでも、実際にネイティブの人と会話してみると、フレーズが出てこないことがよくあります。だからどこが弱点なのか、自分の課題を把握して、復習に活かしています。

息子も「コーチが何を言ってるか分からないと良いプレーができないから、言葉は早く覚えないと…。勉強は苦手だけど、これならゲーム感覚で覚えられるね」と言っています。

息子は毎日遅くまでサッカーの練習があるし、学校の宿題もあります。その上、イタリア語も勉強しないといけな

ので、本当に時間がないんです。でもロゼッタストーンなら、ちょっとした空き時間にできるし、忙しい息子には最適です。いろんな学習法を試したんですが、これはちゃんと続いていますね。イタリアに行ったら移動時間も増えるので、iPadも使ってマスターしたいと思っています。

親子で早くイタリア語を覚えて、「世界一のエースストライカーになる」という息子の夢をサポートしていきたいですね。



○商品にパソコン、iPad、iPhoneは含まれません。

※ご利用(13歳以上の方のみ対象)には、製品ご購入後6ヶ月以内に利用登録いただく必要があります。また利用登録後、製品に応じて最大15ヶ月間(450日間)、無料で利用できます。○画面は貼り込み画像です。○製品の仕様、サービス内容、価格は予告なく変更になる場合があります。

外国語を母国語にする。

RosettaStone®



無料体験やっています!

ロゼッタストーン®

検索

0120-725-240 午前9:00~午後6:00 月~土曜日まで。祝日を除く
iPhoneおよびiPadは、米国及びその他の国々で登録されたApple Inc.の商標です。
©2012 Rosetta Stone Ltd. All rights reserved.

川島 永嗣

Global Athlete PROJECT

Powered by RosettaStone®

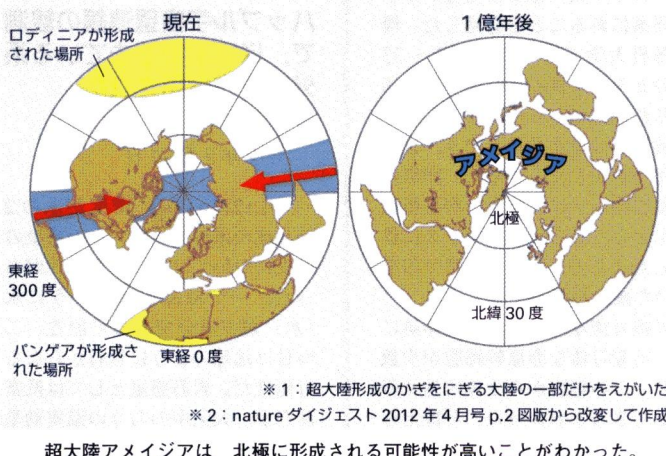
次の超大陸はどこ？

将来、現在の大陸が北極に集まって超大陸を形成するようだ。

● nature 2012 年 2 月 9 日号

過去に地球は、何度も大陸が集まり、パンゲア、 Gondwana、ロディニアなどの超大陸を形成していたことがある。現在のそれぞれの大陸も将来は、ふたたび集合し、次の超大陸「アメイジア」が形成されるという一つの有力な説がある。これまでのモデルは、太平洋、もしくは大西洋に現在の大陸が集まっていくと考えられてきた。

次の超大陸アメイジアの分布の予測図



アメリカ、エール大学のミッチェル博士らは、古い大陸の岩石に記録された過去の地磁気を分析して、過去の超大陸の中心部の位置を割りだし、地球上で超大陸ができた場所を特定した。この手法では、約 5 億年以上前の先カンブリア時代までの超大陸の正確な中心の位置を知ることができる。この結果をもとにすると、アメイジアは、これまでのモデルとはことなり、北極に形成されるという。

大陸の動きを復元した今回のモデルから、過去の生物が生息していた地理的分布と大陸との関係についてもわかるだろう、と博士らはのべている。

不滅の“男性染色体”

9 割以上の遺伝子を失ってきた Y 染色体には、残りの遺伝子がよく保存されていた。

● nature 2012 年 3 月 1 日号

哺乳類のオスだけがもつ Y 染色体は、過去 2～3 億年間の進化の過程で、9 割以上もの遺伝子を失った。このまま Y 染色体は消えてしまうのだろうか？

アメリカ、マサチューセッツ工科大学のヒューズ博士らは、2500 万年前にヒトと分かれて進化した、アカゲザルの Y 染色体の遺伝子を調べ、ヒトやチンパンジー

の Y 染色体と比較した。その結果、2500 万年の間で、どちらの霊長類でも Y 染色体の遺伝子はほとんど失われなかったことがわかった。またヒトの Y 染色体に残っている遺伝子の大部分は、ほかの動物にも共通にみられる古い遺伝子であり、これらがよく保存されていることもわかった。

今回、遺伝子の喪失は早い段階で行われ、残った遺伝子は厳重に保存されていることが確かめられた、と博士らはのべている。さらに、Y 染色体が遺伝子を大量に失ったことについて博士らは、不要になった遺伝子が切り捨てられたのだろう、と指摘している。

瞬時に強化するクモの糸

● nature 2012 年 2 月 2 日号

クモの巣は、雨や風がはげしい日でも耐えられる。この強さはクモの糸が弾性に富む繊維質からできているためだと考えられてきた。しかし最近の研究によると、クモの糸の別の性質が、巣の強さに関係していることがわかってきた。

アメリカ、マサチューセッツ工科大学のクランフォード博士らは、ひっぱる力が強いほど急速に強さ

が増すクモの糸の性質により、クモの巣がやぶれにくいことを見いだした。網目状のクモの巣では、部分的に弱くひっぱると巣全体でこの力を受け止める。

一方、巣を部分的に強くひっぱると、その部分の糸だけ耐性が強くなり、その部分だけで力を受け止めるという。このクモの糸の性質により、たとえ糸が切れるほどの強い力がかかったとしても、巣全体が切れずに、部分的に糸が切れるだけの損傷でおさえることができるというのだ。

博士らは、このような性質は、建造物の構造に応用できるかもしれない、とのべている。

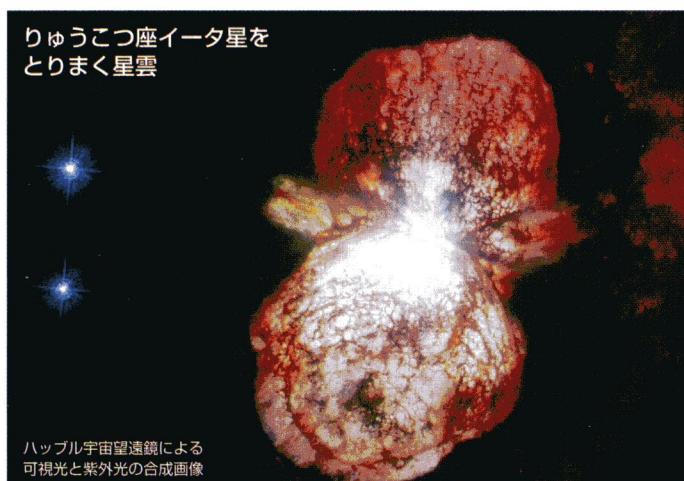
遅れて届いた光

19 世紀に観測されたりゅうこつ座イータ星の大爆発の反射光がとらえられた。

● nature 2012 年 2 月 16 日号

太陽から 7500 光年先にあるりゅうこつ座イータ星は、銀河系の中でも最重量級の連星だ。今は肉眼では見えないが、19 世紀中ごろに増光し、全天で 2 番目に明るくなった。この増光現象は、星の“死”である超新星爆発ではなかったが、10 年間に太陽の 10 倍もの質量の物質を放出した巨大爆発であった。天体写真による当時の記録

りゅうこつ座イータ星をとりまく星雲



りゅうこつ座イータ星は、かつての大爆発で大量のちりやガスを放出した。

はない。だが光が周辺のちりで反射して遅れて届く「光エコー現象」によって、現在でも当時の光が地球に届いている。

アメリカ、宇宙望遠鏡科学研究所 (STScI) のレスト博士らは、チリの光学望遠鏡などを使い、りゅうこつ座イータ星からの光エコーをとらえ、その起源が 19 世紀半ばの増光によるものだと明らかにした。さらに、増光時のイータ星の表面温度は、5000 度程度の巨星であることが示唆された。

この温度は従来のモデルから予想されるよりも低く、イータ星の増光を説明する新たなモデルが必要だと、博士らはのべている。

卵子は有限ではない？ 出産適齢期の女性の卵巣に、 卵子をつくる能力のある 幹細胞が存在した。

● nature medicine

2012年3月号

精子とちがいが、卵子は出生後には新たにできないとされていた。だが2004年、生殖可能な卵子をつくる「卵原幹細胞」がマウスの卵巣に少数あることがわかり、出生後にも卵子をつくれることが明らかにされた。だがこのような幹細胞がヒトにもあるか不明だった。

今回、アメリカ、マサチューセ

ッツ総合病院のホワイト博士らは、ごく少数の卵原幹細胞がヒトの卵巣にあることを発見した。埼玉医科大学で行われた、22～33歳の6人の女性の性転換手術で切除された卵巣からみつかった。この幹細胞は数か月培養でき、自然に卵子が生じた。さらに、卵原幹細胞に印をつけてヒトの卵巣組織にもどし、この組織をマウスに移植したところ、1～2週間で印をつけた細胞が卵子になった。

妊娠可能な年齢の女性の卵巣には、培養可能な卵原幹細胞が少数あり、この細胞から生体内外で卵子ができるとわかった、と博士らは結論している。

ほぼ水の惑星

ハッブル宇宙望遠鏡の観測で、ほぼ水でできている系外惑星が確認された。

● CfA プレスリリース

2012年2月21日

「GL1214b」は、密度が水の2倍程度の系外惑星だ。この惑星の組成については二つの可能性があった。一つは海王星のように氷（水）が主成分である可能性。二つ目は地球のように岩石からなる可能性だ。岩石惑星としては低密度だが、大気中のちりの温室効果で過熱されて大気が膨張し、密度

が下がっている可能性があった。

今回、ハーバード・スミソニアン天体物理学センター（CfA）のバータ博士らは、ハッブル宇宙望遠鏡を用い、GL1214bが恒星の前を通過する際の恒星の明るさの変化を詳細に観測した。ちりは、可視光線を吸収するが赤外線を透過させる。この性質からちりの有無を調べられるのだ。博士らの観測の結果、ちりは大量には存在しないことがわかった。

理論的には、水（氷）の惑星は恒星の近くでは形成されにくい。遠くでできた氷惑星が、恒星近くまで移動してきたのだろう、と博士らは考えている。

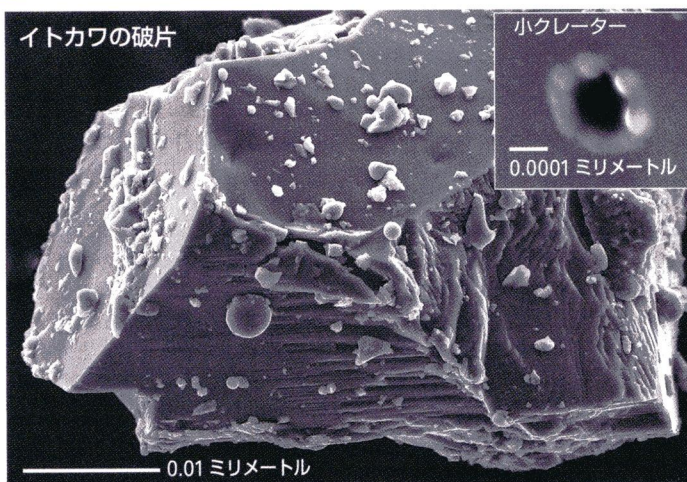
小惑星の小クレーター

はやぶさがもち帰った小惑星の破片には、微小なクレーターが刻まれていた。

● PNAS 2012年1月28日

天体の表面に残された大小さまざまな衝突の痕跡から、天体の形成過程を知ることができる。小惑星にも多様なサイズのクレーターがあることは知られていたが、微小サイズの天体の衝突状態は不明だった。

今回、岡山大学の中村栄三教授らのチームは、日本の小惑星探査機「はやぶさ」が回収した小惑星「イ



イトカワは、非常に小さな粒子の衝突を受けてきたようだ。

トカワ」の粒子の電子顕微鏡観察を行った。そして、その粒子の表面に、さらに微小な粒子が衝突してできたと考えられる、1万分の1ミリメートルほどの小さなクレーターを複数発見した。これは、小惑星の表面がごく微小な粒子の衝突を受けていたことを意味する。太陽系では「ダスト」とよばれる微粒子が飛びかっている。小惑星も、このダストの衝突を長年受けてきたのだろう。

今回の研究やほかの関連研究が今後進むにつれて、イトカワがどのようにして現在の姿になったのかにより明らかになってくるだろう、と博士らはのべている。

サンゴの成長と高水温 水温上昇より海水の酸性度 の変化のほうがサンゴ礁の 成長に影響をもつようだ。

● Science 2012年2月3日号

人間活動による大気中の二酸化炭素の上昇は、海水温の上昇や海水の酸性度（pH）の変化などを引き起こす。こうした海水の性質の変化は、海の生態系において重要なサンゴ礁の成長に悪影響をあたえるとされている。しかしこれまで、海水の酸性度の変化と水温の上昇のどちらがより深刻な影響をあたえるかは不明だった。

このたび、西オーストラリア大学のカーバー博士らは、オーストラリア西岸の27のサンゴ礁で、サンゴ礁の成長速度と海水温の上昇との関係を調べた。するとこの110年の間、全サンゴ礁の平均的な成長速度はかわっていなかった。さらに、最も温度上昇のはげしい二つのサンゴ礁では、成長が速くなっていた。海水温の上昇は、サンゴ礁の成長につねに悪影響をあたえるとはいえないわけだ。

今回の結果から、サンゴ礁の成長には、水温上昇よりも酸性度の変化のほうが大きな影響をもつことがわかった、と博士らは結論している。

海底深部の岩石に生命跡 マントル由来の海底岩石 の中から、過去に微生物 がいた痕跡が見つかった。

● nature geoscience

2012年2月号

海底には海洋プレートが生みだされる「海嶺」がある。海嶺の下では、地球深部のマントル由来の岩石が海底まで上昇するとき、海水と反応し、冷却されて蛇紋岩ができる。この反応の際、水素が発生する。この水素を利用して、蛇紋岩が形成される過程の岩石内部で微生物が生息できるはずだと考

えられていた。

フランス、パリ地球物理研究所のメネス博士らは、大西洋中央海嶺の海底から得られた蛇紋岩を電子顕微鏡などを使って観察や解析を行った。その結果、蛇紋岩化が進行した岩石中に有機物が濃集していることを発見した。この有機物は、タンパク質、脂質や核酸といった生物活動の結果生じるものを含んでいた。これは、蛇紋岩が形成される過程の岩石中に、過去に微生物がいた痕跡といえる。

この発見は、マントル物質と海水から、微生物が生息しうる環境ができるという考えを支持する証拠になる、と博士らはのべている。

暗黒物質の奇妙な分布

銀河団の衝突現場で、通常の理論と矛盾する奇妙な現象が再発見された。

● The Astrophysical Journal
2012年3月10日号

宇宙は正体不明な暗黒物質で大部分が占められているという。暗黒物質の性質を知るため、銀河団どうしの衝突、合体の現場が詳細に調べられている。通常の理論では、銀河団どうしが衝突した際、暗黒物質と銀河は素通りし、銀河間に充満するガスのみが、衝突によって減速すると考えられている。

衝突銀河団 Abell 520 の中心域



衝突後に素通りした銀河に対し、暗黒物質が取り残されていることが分かる。

そんな中、Abell 520 という衝突、合体中の銀河団で、暗黒物質と銀河の分布が一致しないことが2007年に明らかになった。解像度の悪さが原因と考えられたため、アメリカ、カリフォルニア大学のジー博士らはこのたび、より高品質なデータが得られるハッブル宇宙望遠鏡を使い、Abell 520 を再観測した。だが2007年と同様の結果が得られ、なぞは深まった。

博士らはこの結果の説明としてさまざまな説を考えているが、現段階では結論を出せていない。衝突合体中の銀河団の観測例を増やすことが必要だ、と博士らはのべている。

効率的な触媒

工業利用されている触媒の有効な部位をまねた、水素をつくる触媒ができた。

● Science 2012年2月10日号

化学反応を促進する触媒は一般に、ごくわずかな部分が触媒の効果をもつ（触媒活性をもつ）。したがって、効率のよい触媒を開発するためには、分子レベルでその構造を研究する必要がある。最近このような研究が行われている典型的な触媒に、二硫化モリブデンがあげられる。二硫化モリブデンは、化石燃料から硫黄を取り除く

触媒に広く用いられており、近年、水から水素を生成する触媒としても有望だとわかってきた。

アメリカ、カリフォルニア大学パークレー校のヘママ博士らの研究グループは、二硫化モリブデンの構造を詳細に解明し、触媒活性をもつ部位を模した分子をはじめて合成した。触媒活性は、分子の表面の三角形の構造をした部位がもっていた。この部位の構造をまねて合成した分子は海水や酸性水からも水素をつくれるという。

この分子は、現在水素生産に利用されている高価なプラチナにかわる、安く効率的な触媒として有望だ、と博士らはのべている。

胃粘液の効能

胃の粘液は、ピロリ菌の感染だけでなく、がん化も防ぐことがわかった。

● Journal of Clinical Investigation
2012年3月1日号

胃粘液は、末端に単糖「N-アセチルグルコサミン（GlcNAc）」が結合した「O-グリカン」という分子を含むことが特徴だ。信州大学の唐沢文寿博士らはこれまで、GlcNAcが試験管内で、胃がんの原因となるピロリ菌の増殖と運動を抑制することを解明していた。だが生体内での機能は不明だった。

今回博士らは、胃粘液にGlcNAcを含まないマウスを作製した。するとこのマウスは、ピロリ菌の感染がなくても、胃の組織が増殖、異常化し、胃がんを発症した。このマウスの胃粘膜の遺伝子を調べたところ、炎症や増殖に関わる遺伝子のはたらきが上昇していた。さらに、ヒトの胃がんでもGlcNAcが減少しており、ヒトにおいてもO-グリカンががん化と関連していることがわかったという。

今回の発見により、胃粘膜はピロリ菌の感染を防ぐと同時に、がん化をうながす炎症を抑制していることがわかった、と博士らはのべている。

繊維がぬれるしくみ

液滴の大きさによって、繊維のぬれ方が変化することがわかった。

● nature 2012年2月23日号

動物の羽毛や毛は、規則正しく平行に繊維が並び、水をはじく効果がある。しかし、条件によっては、繊維と繊維のすき間に水が入りこみ、その効果が失われる。その条件が、よくわかっていなかった。

アメリカ、プリンストン大学のデュブラット博士らは、平行に並べた2本のしなやかな繊維の間に液滴を落とし、液滴の表面張力による

繊維のぬれ方の実験

(a) 繊維がくっついてぬれる

(b) 中間の状態

(c) はじく

(c) はじく

二本の繊維の間に液滴を落とし、繊維がどのように変化するかを調べた。

によって、繊維がどのように変形するかを調べた。その結果、ある値よりも大きな液滴では繊維にはじかれ、逆にそれより小さな液滴では繊維どうしがくっつき、水が取りこまれることを発見した。その境界の値は繊維の素材、長さや間隔によって決まるという。

鳥の羽毛に油のまじった水を噴霧すると、小さな油滴によって繊維どうしがくっつき、水をはじく効果が弱まってしまう。原油の流出により、海鳥の生存率が悪化するのはこのためだと考えられる。

今回の発見を利用すれば、繊維表面のぬれ具合を自在に制御できる、と博士らはのべている。

太陽の北極も南極もN極に？

極域で奇妙な磁場のかたまりが発見され、両極がN極になりつつあることがわかった

太陽の極域は、表面の爆発などの活動の原因となっている重要な場所だという。だが、実際に極域で何がおこっているのか、よくわかっていなかった。そんな中、太陽観測衛星「ひので」は、極域のようすをくわしくとらえることに成功した。そして、このたび北極も南極も同じN極になりつつあるという意外なことが明らかになった。

太陽表面にあらわれる黒いしみのようにみえる部分のことを「黒点」という。

黒点の数は11年周期で増減している。黒点の多い時期は、太陽全体を包んでい高温の希薄なプラズマの層である「コロナ」が明るく輝き、太陽表面でおきる巨大な爆発「フレア」が頻発するなど、太陽の活動が活発になる。黒点の数が減ると、これらの活動はおだやかになる。

実は、黒点は強力な磁石そのものだという。黒点の数が増減するのは、太陽の内部で磁場をつくる機構（ダイナモ）が、この黒点のもととなる磁場を強めたり、弱めたりしているためだ。これが黒点の磁場の源だ。太陽の極域には、黒点の種となる南北をつらぬく磁場がある。そのため、太陽の極域は、太陽の活動や磁場の起源を理解する上でも、重要な場だ。

黒点が最も多くあらわれる活動的な時期を「極大期」、黒点が最も少なくなる時期を「極小期」という。太陽では極大期に極域のN極、S極が約半年～1年で急激に反転する特徴が知られている。

現在太陽の黒点数は増えつつあるが、直前のサイクルでは、11年周期が12.6年にのびた。このような周期の変動は、1800年ごろの「ダルトン極小期」以来、観測されたことはなかった。

これまで、地上の太陽望遠鏡や太陽観測衛星によって、太陽の極域が観測され

てきたが、極域の磁場のようすを把握するのは困難だった。このため極域で何がおきているのか詳細は不明だったのだ。

太陽の極域を衛星でくわしく調べる

太陽観測衛星「ひので」は、JAXA（宇宙航空研究開発機構）と国立天文台などによって、2006年9月に打ち上げられた。「ひので」に搭載された可視光・磁場望遠鏡により、太陽の磁場の構造をこれまでない解像度で観測ができるようになった。国立天文台の常田佐久教授、下条圭美助教、理化学研究所の塩田大幸研究員らは「ひので」で両極域の観測を継続し、極域の磁場の全容を知ることができるマップを得ることに成功した。

常田教授らは、極小期前の活動が低下しつつある時期（2007年）と活発化しつつある時期（2012年）の極域の磁場の観測結果を比較した。2007年は、北極がS極、南極がN極となっていた。そして2013年なかばごろに予想される極大期には両極域の磁場が同時に反転すると予想されていた。ところが2012年の観測結果から、北極域のみS極からN極への反転が進行していることを発見した。

奇妙な磁場のかたまりを発見

常田教授らのグループは、2007年9月の観測結果から、太陽の南北の極域に

斑点状の磁場のかたまりが存在することを見つけていた。このような、磁場のかたまりは、太陽の赤道付近ではみられないという。両極域にはN極の磁場のかたまりと、S極の磁場のかたまりが点在していた。大きなものは小さな黒点の大きさほどで、その磁場の強さも黒点並だという。大きなかたまりに着目すると、太陽の北極域でほとんどすべてがS極、南極域のほとんどすべてがN極となっていた。細かくみれば、それぞれ逆の極性の磁場も存在するが、その大きさは小さく、無視できる程度だ。

この奇妙な磁場のかたまりがいったい何を示しているのか、よくわからなかった。そこで、極大期にむかっている2012年1月の観測データと比較した。極大期には達していない2012年も本来ならば、2007年とそれほどかわらない結果になると予想された。しかし、北極域だけが大きく変化し、2007年は顕著にみられたS極の磁場のかたまり（右図上のオレンジ色の斑点）が目立たなくなっていた。その一方で、2012年では北半球の低緯度側でN極の磁場のかたまり（右図下の青色の斑点）が増えていたのだ。

この奇妙な磁場のかたまりは、黒点がくずれた破片だと考えられ、極域へ流れている可能性があるという。

極性が反転するタイミングがずれている

この観測結果から、太陽の北極域では、S極の磁場の大規模な消滅と極性の反転が生じている過程だと推定できるという。一方、南極域では極性の反転の兆候がほとんどみられず、安定してN極が維持されている。

これまでは、極性の反転がおきるとき北極と南極で同時に極性がかわると考えられていた。しかし、今回の観測結果から、その考えがくつがえされてしまった。極性の反転するタイミングがずれているというのだ。常田教授は、「今、太陽の基本的な対称性がくずれていると考えられます。本来は両極域とも次の極大期にほぼ同時に極性が反転すると考えられていました。しかし、北極域は本来の約11年周期で極性が反転しつつあり、南極域は約12.6年で反転する可能性があります」と話す。今は、太陽の北極域も南極域もN極になっていると推定されるという。

両極域がN極の異常な構造？

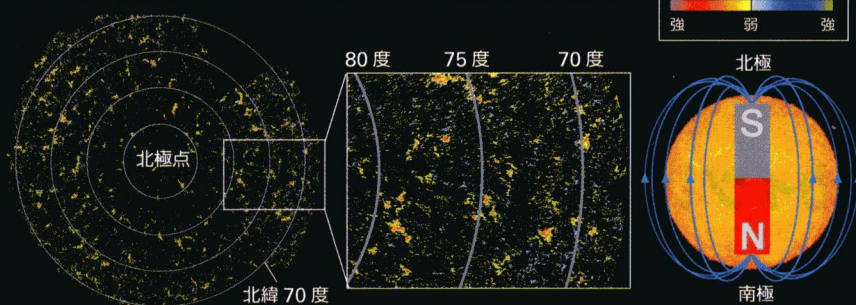
2007年の太陽は、磁力線が南極側のN極からでて、北極側のS極に入るふつうの構造(2重極)だった。それが、2012年1月では、南北の両極域にN極ができ、太陽の中心付近にS極ができるという構造になっている。つまり、同じ向きの棒磁石が二つ連なった構造(4重極)になっていると想定できる。

この先、太陽はどうなる？地球への影響は？

太陽の極域の観測は、将来の太陽の活動を予測する上でも、きわめて重要だという。2012年10月ごろ、「ひのぞ」による北極域の集中観測が実施される予定だ。この観測によって、北極域の極性がN極に完全に反転していることが確認できると考えられる。

ダルトン極小期のほかにも、1645年～1715年にかけて、「マウンダー極小

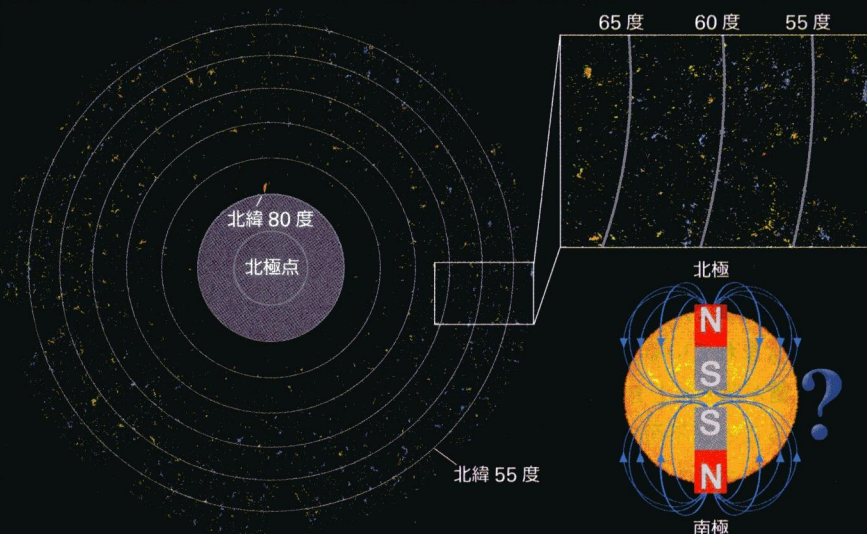
2007年(極小期にむかっている)の太陽の北極域の磁場分布



2007年9月における太陽の北極を真上から見たときの磁場の分布。図の中心は、太陽の北極点の北緯90度、円は緯線である。オレンジ色の斑点はS極の磁場のかたまり、青色の斑点はN極の磁場のかたまりをあらわしている。オレンジ色の大きめの斑点には、黒点並みの強さの磁場がある。北極域にS極が点在していることがわかる。S極の磁場のかたまりのほかにも、小さなN極の磁場のかたまりがあることから、S極だけの磁場のかたまりでおおわれているわけではないことがわかる。ただし、N極の磁場のかたまりはS極の磁場のかたまりにくらべると、とても小さく、全体的にみれば北極域はS極を示しているという。

太陽を巨大な磁石だと仮定した場合、2007年9月は、太陽の南極域がN極、北極域がS極になっていると考えられる。太陽の南極域のN極側からでた磁力線が北極域のS極に入る構造(2重極)だと想定できる。

2012年(極大期にむかっている)の太陽の北極域の磁場分布



2012年1月における太陽の北極を真上から見たときの磁場の分布。90度～80度までは観測できていないため、データが欠損している(灰色)。拡大図では、2007年にみられたようなS極の磁場のかたまり(オレンジ色)は目立たず、低緯度側からN極の磁場(青色)が増えてきていることがわかる。この観測から、北極域の極性が変化しつつあることがわかった。

太陽を巨大な磁石だと仮定した場合、現在は、太陽の南北の両極域がN極になっていると考えられている。極域にあるN極側からでた磁力線が太陽中心部のS極に入る構造(4重極)だと想定できる。

期」という黒点がほとんどなかった時期があった。これが原因となって、地球の平均気温が低下し、寒冷化をもたらしたといわれている。これらの極小期の直前は、太陽の周期が13年や14年と長いという特徴があった。今回、直前の太陽の周期は12.6年だった。もしかすると、地球を寒冷化させる太陽

の極小期にふたたび突入する可能性もあるかもしれないという。

常田教授によると、あと10年は極域の調査を観測しないと、今後の太陽の活動予測はできないという。今後の観測結果を待ちたい。

(担当：編集部 浅見智子)

スカイツリーで、雷の観測がスタート！

**確実に雷が落ちる絶好の場所で、
いまだなぞの多い雷の性質の解明へ**

東京スカイツリーは自立式電波塔として世界一の高さを誇る。2012年3月、その高さを利用した、雷の観測がスタートした。雷は身近でありながら、その性質にはいまだなぞが多い。雷がどこに落ち、どのような影響をあたえるのか。落ちた雷の詳細な観測によって、そのなぞの一部が解明されるかもしれない。

2012年3月、東京スカイツリーの高さ497メートル地点で、^{かなり}雷の観測がスタートした。

雷はときに火災をおこしたり、大きな電流の影響でパソコンなどの機器がこわれたりといった被害をもたらす。雷の電流は複雑で、さまざまな周波数の成分が^{ふく}含まれている。被害を防ぐためには、雷が落ちたときの電流を^{しょうさい}詳細に観測することが不可欠だ。しかし雷の発生をピンポイントで予測し、観測することはとてもむずかしいという。

毎年、確実に落ちる絶好の観測場所

今回の観測を行う東京大学の石井^{いし い まさる}勝教授は「毎年鉄塔に落ちているじゃないかとお思いかもしれませんが、一つの鉄塔をとってみれば数十年に一度落ちるかどうかわからない^{ひん ど}頻度しかありません」と話す。そのため、観測装置を設置して落ちる雷を観測するというのは至難^{しなん}のわざなのだ。

その点、高さ634メートルのスカイツリーは毎年10回程度は雷が落ちると予想されていて、確実に雷の電流を観測できる絶好の観測場所なのである。

ちなみに高さ333メートルの東京タワーでは、雷は年に1回落ちるか落ちないかという頻度しかない。

雷のなぞの一端がわかるかも

スカイツリーでは、内部の人に危険がないよう、落ちた雷がその構造（鉄骨）を伝って地下へと流れるようになっていいる。観測は、タワーの先端^{せんたん}を囲むように装置を置き、スカイツリーを流れる電流の時間変化（周波数）と大きさを測定する。実際に流れる電流の性質がわかれば、建物にどのような雷対策をすべきかがより明確になるという。

今回の観測の特長^{とくちょう}は、低い周波数も含めて幅広い周波数を計測することだ。「以前は、強い電磁波を発生させて被害をもたらす、高い周波数の成分の測定に重点が置かれていました。近年、比較的長い時間流れ、家屋の火災の原因にもなる低い周波数の成分が注目されています」（石井教授）。

また観測によって、雷が上空をどのように進んできたかといった情報も得ることができる。「雷は高い電圧によって、絶縁体^{ぜつえんたい}の空気の中を無理矢理、進

設置された雷の観測装置

雷の電流が流れる鉄骨



高さ497メートル地点に設置されたコイル

東京スカイツリーはそれ自体が「避雷針」の役割をもつ。タワーに雷が落ちると、タワーの構造をつくる鉄骨自体に電流が流れるのだ。鉄骨を通った電流は、地下で拡散する。観測用の装置（管の中にコイルがある）はタワーを囲むように設置され、タワーに流れた電流の周波数や時間的な変化を観測できるように設計されている。六角形をした装置の管は直径約16.5センチメートル、管の長さは全長約30.6メートルにもなる。



みます。そのため直線ではなく、ジグザグと複雑なルートをとります。その情報が、電流の振動^{しんどう}となってあらわれるのです」と石井教授は説明する。

さらに、上空のようすを観測できる高速度カメラや電磁波の観測と合わせることで、これまでほとんどわかっていない、雷の上空での「進み方」やどこに落ちるのか、といった疑問の答が出るかもしれない。

落ちた電流の性質も調査予定

さらに石井教授らは、スカイツリーのさまざまな場所に観測装置をつけて、建物内をどのように電流が流れ、変化するのも測定しようとしている。観測によって建物を流れる電流の性質がわかれば、パソコンなどの機器の被害をより適切に防ぐ方法がわかるかもしれない。

雷が落ちるであろう、今年の夏の成果が楽しみだ。

（担当：編集部 森 久美子）

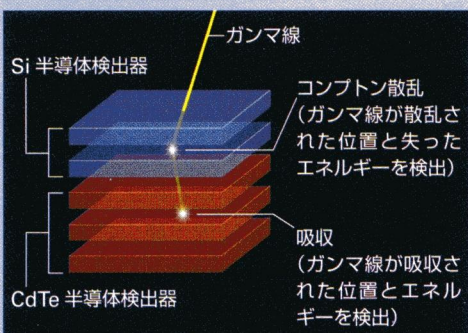
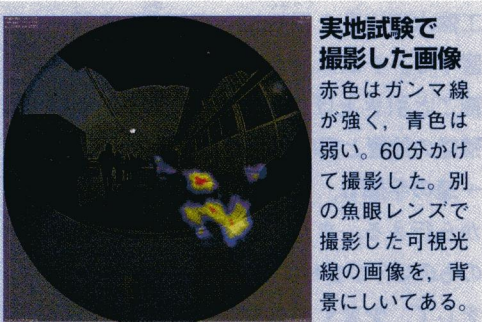
協力

石井 勝 東京大学生産技術研究所教授

放射性物質を可視化するカメラ

ガンマ線を放つ放射性物質の効率的な除去につながる成果

2011年3月11日に発生した東日本大震災で、福島第一原子力発電所から大量の放射性物質が放出された。いまでも環境に残る放射性物質は、大震災からの復旧、復興のさまたげとなっている。宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、宇宙望遠鏡に搭載するガンマ線観測装置の技術に応用し、ガンマ線を放つ放射性物質を撮影するカメラを試作した。



超広角コンプトンカメラの原理

ガンマ線をシリコン(Si)半導体検出器で散乱させ、テルル化カドミウム(CdTe)半導体検出器で吸収する。半導体検出器が検出した値から、ガンマ線が飛んできた方向を逆算できる。なお、ガンマ線は散乱や吸収をされずに、半導体検出器を透過する場合もある。

放射性物質は、アルファ線やベータ線、ガンマ線などの放射線を放つ物質である。放射性物質の除去に時間がかかる理由の一つは、放射性物質が目に見えないからだ。放射性物質の存在は、放射線の検出でわかる。しかし、通常使われるガイガーカウンターなどでは、せまい範囲の放射線しか検出できず、放射性物質の分布もよくわからない。

ほぼ180度の範囲にわたって画像化成功

ガンマ線は、可視光線とことなり、飛んできた方向を知るのがむずかしい。

2012年3月29日、JAXAは、ガンマ線をとらえて撮影する「超広角コンプトンカメラ」を試作して、2月11日に福島県で実地試験を行ったと発表した。その結果、ガンマ線を放つ放射性物質の分布とガンマ線の強さを、ほぼ180度の範囲にわたって画像化することに成功した。セシウム137やセシウム134などの、ガンマ線を放つ放射性物質の効率的な除去に貢献する成果と考えられている。

超広角コンプトンカメラの試作は、大震災の発生後、東京電力からJAXAに相談がもちかけられたことではじまった。当時JAXAでは、2013～2014年の打ち上げをめざして、X線やガンマ線を観測する宇宙望遠鏡「ASTRO-H」の開発がすすめられていた。

ASTRO-Hプロジェクトマネージャーを務めるJAXAの高橋忠幸教授は、「私たちは、三菱重工業やアクロラドと共同で、1997年ころから半導体検出器を使った新しいコンプトンカメラの開発を行ってきました。ガンマ線を放つ天体を、かつてない精度で観測するためです」と話す。そこに大震災が発生した。開発中の技術が、すぐに応用されることになった。

ガンマ線を散乱させて、その後吸収する

超広角コンプトンカメラは、「コンプトン散乱」とよばれる現象を利用してガ

ンマ線を画像化する。コンプトン散乱とは、ガンマ線と電子が衝突する際に、ガンマ線のエネルギーの一部が電子に受け渡される現象である。ガンマ線は、失ったエネルギーの大きさに応じて、決まった角度で進行方向をかえる。

超広角コンプトンカメラは、ガンマ線をまずシリコン(Si)半導体検出器でコンプトン散乱させ、その後テルル化カドミウム(CdTe)半導体検出器で吸収する。すると、ガンマ線が「散乱された位置」と「散乱されたときに失ったエネルギー」、「吸収された位置」、「吸収されたときのエネルギー」の値が得られる。

これらの値をコンピューターで処理すると、どの方向からどれくらいのエネルギーのガンマ線が飛んできたのかを画像化できる。ガンマ線のエネルギーは放射性物質ごとに決まっているので、放射性物質の種類も特定可能だ。

検出器の枚数をふやせば時間短縮可能

ガンマ線を撮影する従来のカメラは、画像化できる範囲が40～60度程度しかなかった。超広角コンプトンカメラは、半導体検出器の平面を向けた方向のほぼ180度の範囲を画像化できる。「高精度な2種類の半導体検出器を組み合わせたことで、ガンマ線の飛んできた方向を、広い視野で数度程度まで見分けられるようになりました」と高橋教授は語る。

試験では、ガンマ線の画像化に20～60分かかった。しかし半導体検出器の枚数をふやして感度をあげれば、時間は短縮できるという。現在JAXAでは、カメラの実用化の方法を検討中だ。カメラの1日も早い完成と活躍に期待したい。

(担当：編集部 井手 亮)

協力

高橋忠幸 宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所教授

海底資源は「とる」から「育てる」へ？

深海底で熱水噴出孔を人工的につくり、 「レアメタル」を含む鉱物の採取に成功

深海底には、熱水がわきだす「熱水噴出孔」があることが知られている。熱水噴出孔では、さまざまな金属と硫黄の化合物が沈殿する場合が多く、有望な海底資源として期待されている。このたび、熱水噴出域に縦穴を掘り、「人工熱水噴出孔」をつくる実験がおこなわれた。将来的には、人工熱水噴出孔から継続的に金属を採取できるかもしれないという。

陸上で温泉がわきだすように、海底でも、「熱水噴出孔」から熱水がわきだしている。火山活動が活発で、なおかつ世界6位という広い排他的経済水域（EEZ）をもつ日本は、比較的多くの熱水噴出孔にめぐまれている。

この熱水には、金、銀や「レアメタル」など、さまざまな金属がとけこんでいる。これらの金属は、わきだして海水で冷やされると、主に硫黄との化合物として析出し、熱水噴出孔に「チムニー」とよばれる煙突状の構造をつくる。チムニーは海底資源として期待されている。

人為的な掘削で、チムニーが急速に成長

海洋研究開発機構の高井研博士らのグループは、「人工熱水噴出孔」をつくり、断続的に観察する実験を行った。

グループは2010年9月、沖縄本島の北西約150キロメートルにある「伊平屋北熱水活動域」（水深約1000メートル）で、熱水活動の中心から約500メートルの範囲内に、四つの人工熱水噴出孔を掘った。翌2011年2月に観察すると、最大で高さ約6メートルのチムニーができていた。このチムニーは採取し

ようとした際に崩壊したが、2011年8～9月にふたたび観察すると、約11メートルまで再成長していた。

自然の状態のチムニーはほとんど成長しないこともある。実験により、人工熱水噴出孔では、非常に速いペースでチムニーが成長することがわかった。

また、四つの人工熱水噴出孔のチムニーの成長速度には差があった。これは熱水の成分がことなるためと考えられるという。伊平屋北フィールドの海底下では、熱水が2層に分かれて存在している。上層は、主に沸騰した蒸気のもとになった熱水、下層は、沸騰によって成分が濃縮された熱水である。チムニーの成長速度は、下層付近まで掘り進めた人工熱水噴出孔の方が速かった。

レアメタルも採取できた

また、チムニーを分析したところ、下層の熱水のチムニーには、有用な金属が多く含まれていた。たとえば銀（約1%）、アンチモン（約0.1%）などだ。アンチモンはレアメタルの一種であり、ポリエステルを生産するための触媒などとして、工業分野でよく利用されて

人工熱水噴出孔にできたチムニー



実験でできたチムニー。高さはトータルで約11メートルある。いびつな形だが、1本のチムニーだという。写真は複数枚をつぎ足してある。



採取されたチムニーの一部。有用な金属が含まれていることが確認された。

写真は、人工熱水噴出孔にできたチムニーと、その一部を採取したものである。チムニーには、銀、アンチモンのほか、金、テルル、ビスマスなどが含まれていた。ほかの熱水活動域を掘削すれば、含まれる金属の種類もかわると考えられており、今後の調査で明らかにする予定だという。

いる。一方、上層の熱水のチムニーの主成分は硫酸カルシウムだった。

現状の技術で、すでに採算がとれる可能性

チムニーの“養殖”手順は、まず、人工熱水噴出孔を掘削し、“養殖籠”を設置する。チムニーが成長すると、養殖籠ごと引き上げて回収する。以下、養殖籠の設置と回収をくりかえしていく。一連の手順は、基本的にはすべて海上から行える。また、人工熱水噴出孔そのものは、つまりにくくなるような工夫をして、少なくとも10～15年程度は継続して使用できると考えられている。

高井博士らの試算によると、各金属の生産コストは、現状の技術でも、現在の取引価格と同程度におさえられるという。技術の進歩で採算性の向上も期待できるといい、鉱物資源生産の新たな道を切りひらく可能性がある。🍎

（担当：編集部 赤谷拓和）

協力

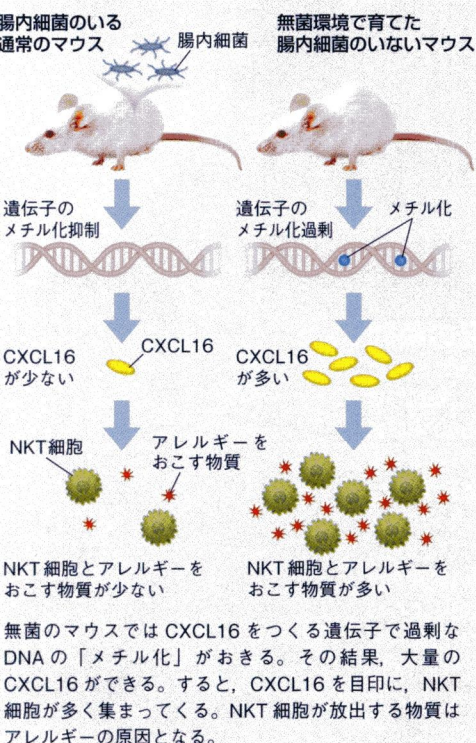
高井 研 海洋研究開発機構
海底資源研究プロジェクト上席研究員

衛生的すぎる環境でアレルギーが増加？

幼少期に腸内細菌がいることが重要であることが確かめられた

近年、喘息などのアレルギー性疾患の子供が増えている。その原因の一つとして疑われているのが、衛生的すぎる環境だ。このたび、マウスを使った実験から、生まれた直後に腸内に細菌がすみつくことでアレルギー性の喘息や腸炎がおさえられるしくみが解明された。清潔さを追求してきた現代社会に警鐘をならす成果だ。

腸内細菌の有無による体内の反応のちがい



1989年、イギリスのデイビッド・ストラチャン博士は、子供を対象とした大規模な調査を行い、衛生的すぎる環境で育つとアレルギー性疾患になりやすくなるという「衛生仮説」を唱えた。

アレルギー性疾患とは、病原体から体を守る免疫システムが、病原体でない異物を攻撃してしまうことによっておきる、花粉症や喘息といった病気の総称だ。日本でも、小児喘息がここ20年で約3倍になるなどアレルギー性疾患は増加している。しかし、衛生的すぎる環境により、アレルギー性疾患が増加するしくみは不明だった。

無菌ではアレルギー性疾患になりやすい

このたび、アメリカ、ハーバード大学のトーステン・オーザック博士らの研究により、衛生仮説を実証する結果が得られた。その成果は、アメリカの科学誌『Science』の電子版(3月22日)で発表された。

細菌のいる通常環境で育ったマウスでは、食物とともに細菌が体内に侵入し、腸内に細菌がすみつくようになる。博士らは、通常環境で育った腸内細菌のいるマウスと、無菌状態で育った腸内細菌のいないマウスを用意し、アレルギー性疾患のなりやすさを調べた。すると、腸内細菌のいるマウスでは、アレルギー性の喘息とアレルギー性の腸炎になりにくかったという。

遺伝子のはたらきが変わっていた

なぜこのような結果になったのだろうか？博士らは、それぞれのマウスの肺や腸を詳細に調べた。すると、無菌で育ったマウスの肺や腸では、免疫細胞の一種である、ナチュラルキラーT細胞(NKT細胞)が増加していた。このNKT細胞が出す物質はアレルギー性疾患の一因となることがわかっている。

また、無菌で育ったマウスの肺や腸で

は、「CXCL16」というタンパク質が多くつくられていた。CXCL16は、NKT細胞を集めるための信号となるタンパク質である。この信号によってNKT細胞が集合し、増加していたわけだ。

タンパク質のつくられる量は、遺伝子のはたらきに支配されている。そのため、CXCL16の増加の背景には遺伝子のはたらきの変化があるのだろう、博士らはそう考え遺伝子を調べた。すると、無菌で育ったマウスの肺と腸では、CXCL16をつくる遺伝子に「メチル化」が過剰におきていた。メチル化とは、遺伝子を構成するDNAの一部にメチル基がつくことをさす。これによりつくられるタンパク質の量が増えることがある。

生まれた直後に腸内細菌がすみつくことが重要

「衛生仮説では、子供のころの環境が重要だといわれています。この研究のポイントは、細菌にふれることの影響が、生まれた直後のマウスと大人のマウスでちがったことです」とアレルギーに詳しい理化学研究所の谷口克教授は語る。

オーザック博士らは、無菌で生まれた直後に通常マウスの腸内細菌を移植したマウスと、無菌で育て、大人になってから腸内細菌を移植したマウスを比較した。すると、生まれた直後に腸内細菌を移植したマウスでは、DNAの過剰なメチル化がおきず、通常マウスと同様にアレルギー性疾患になりにくかった。しかし、大人になってからでは腸内細菌移植の効果はみられなかった。

今後は、なぜ細菌のいる環境ではこのような遺伝子のはたらきの変化がみられるのか、なぜ生まれた直後のみ効果があるのかといった点の解明が望まれる。

(担当：編集部 向井伸生)

協力

谷口 克 理化学研究所

免疫・アレルギー科学総合研究センター長

オーロラ爆発の瞬間をとらえた

一瞬にして、空を緑色にいろどるオーロラが現れた

協力 片岡龍峰

東京工業大学理学研究流動機構特任助教

この写真は、2012年3月、アラスカ、フェアバンクス^{しせつ}の山奥にあるアラスカ大学の研究施設ポーカークラット実験場^{さつえい}で撮影されたオーロラ爆発^{ばくはつ}の瞬間だ。オーロラ爆発とは、短時間で空がオーロラでおおいつくされることだ。オーロラは、太陽から放出された電子などの粒子^{りゅうし}が、地磁気の影響^{えいきょう}を受けて極域に運ばれ、地球の大気にぶつかって輝く現象だ。高度約100～400キロメートルで発光する。いま、太陽の活動は最もさかんな時期をむかえており、オーロラ爆発がよくおきている。2013年にかけて、太陽の活動がさらに活発になれば、地球上でオーロラに見える範囲^{はんい}が広がる。そのため、北海道でも北の空にぼんやりと赤いオーロラが見えても不思議ではないという。

オーロラのできる高さを含めたくわしい立体的な構造を知るには、複数の地点で同時に観測する必要がある。東京工業大学の片岡龍峰^{かたおかりゅうほう}特任助教らは、このたび数キロメートルはなれた2地点での同時観測に成功した。この写真は、そのうちの1地点で撮影されたものだ。これを調べると、オーロラをつくる電子が、どのようにして地球に入ってくるかがわかるという。片岡特任助教は、「オーロラは、地球と宇宙のつながりを知る手がかりを与えてくれるでしょう」と話す。

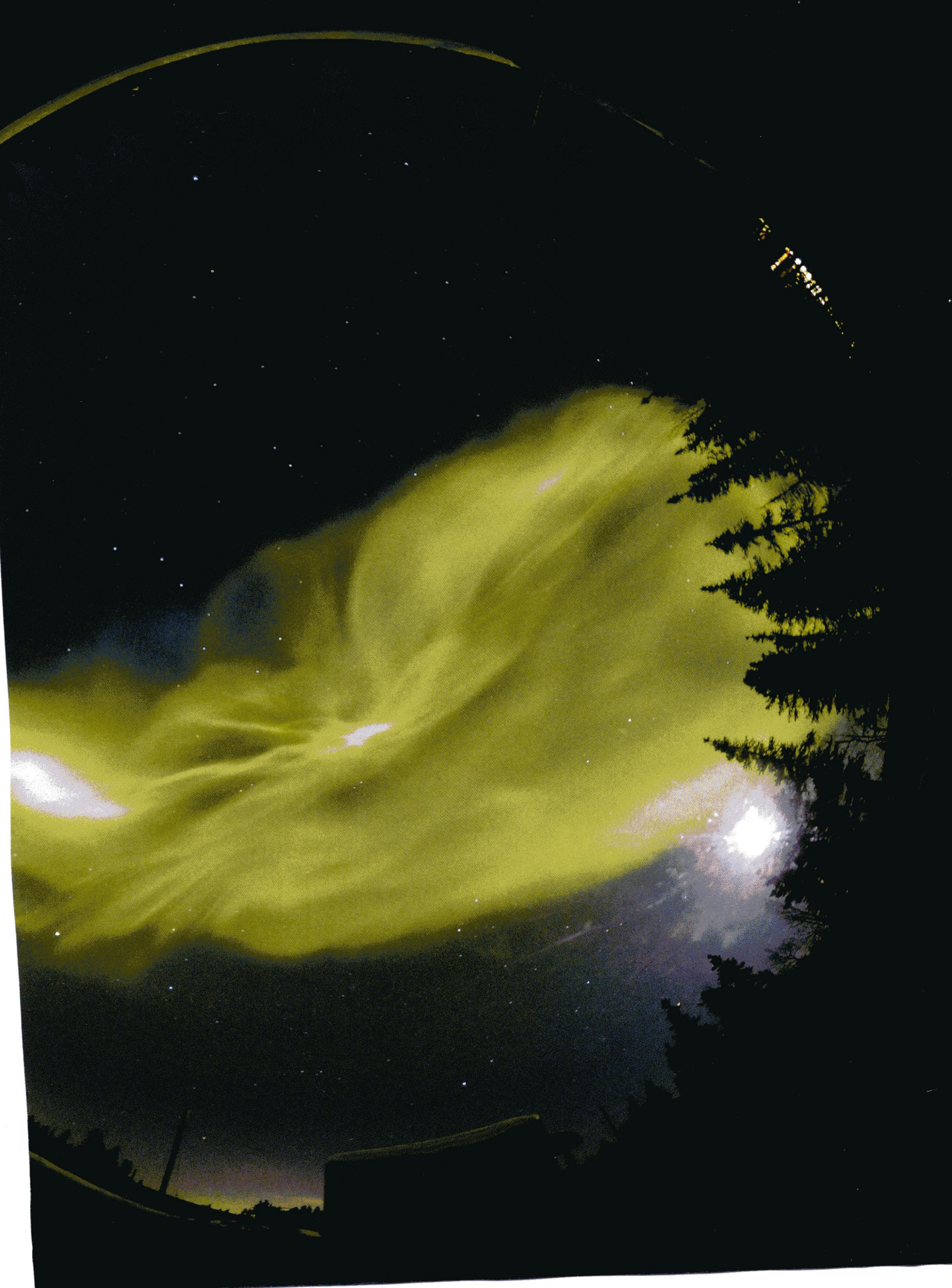
(担当：編集部 浅見智子)



オーロラ爆発がおきる1分前の写真。

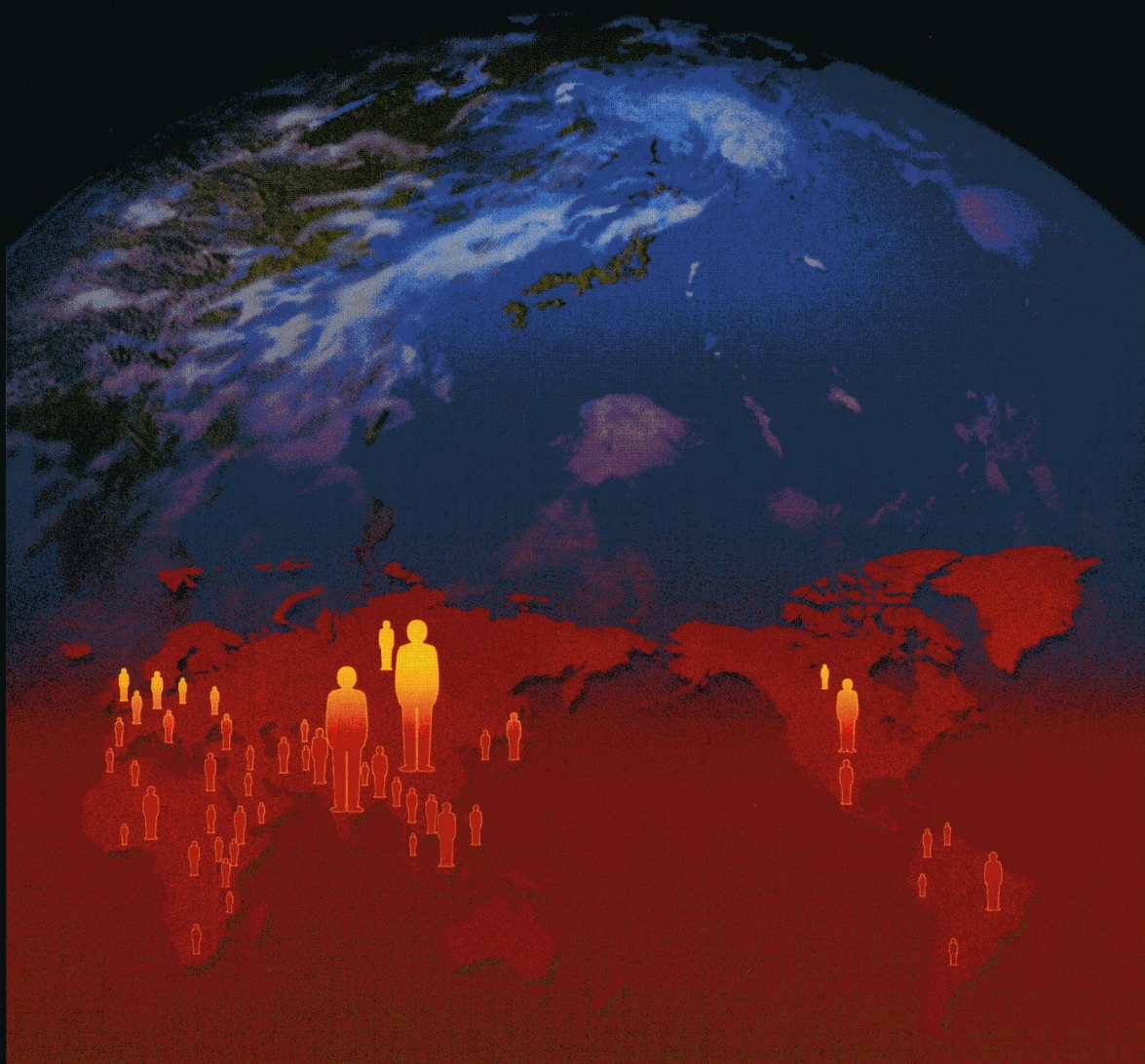
オーロラの爆発の瞬間

2012年3月1日9時11分（世界標準時）に撮影されたオーロラ爆発だ。画像が丸いのは、全天を一度に観測できるように、魚眼レンズで撮影したためだ。直径500キロメートルほどの空を見ることができる。ほんの1分前は一本の緑色の筋であったが（写真上）、オーロラの爆発がおき、空一面がオーロラの輝きに包まれた。いつ何がきっかけとなって、このように爆発するのかはわかっていないという。これは、オーロラの最大のなぞとされ、研究者の興味をかき立て続けている。このオーロラは、太陽の活動により放出された電子などの粒子が、上空100～150キロメートルの大気中の酸素原子にぶつかることで、緑色に輝いている。ちなみに、右下の光は半月が映っているため、白くなっている。写真の縁がほんのりと緑色なのは、地面に積もった雪に反射したオーロラが映っているためだ。



Newton Special

人類はどこまでふえるのか？ 地球 100 億人時代



人口の動きから人類の未来がみえてくる

2011 年 10 月、世界の人口は 70 億を突破した。国連は、今後、世界の人口はさらにふえ、2083 年ごろに 100 億を突破すると予想している。人口増加の歴史は、人類の技術革新の歴史でもある。さまざまなくふうで衣・食・住を改善することで、やしなえる人口をふやしてきたのだ。

今後の人口予測のほか、社会を大きく変革し、人口の動向に影響をあたえる可能性を秘めた最新の研究を紹介する。はたして人類にはどんな未来が待っているのだろうか？

協力

金子隆一 国立社会保障・人口問題研究所副所長

大塚柳太郎 自然環境研究センター理事長、東京大学名誉教授

川島博之 東京大学大学院農学生命科学研究科准教授

深水克郎 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構ナノ工学研究センター研究員

鹿島光司 株式会社朝日工業社技術本部主任

荻本和彦 東京大学生産技術研究所特任教授

松本吉央 産業技術総合研究所知能システム研究部門研究グループ長

広瀬信義 慶應義塾大学医学部老年内科診療部長

ここ数百年の人口増加は、まさに“爆発”

私たち人間（ホモ・サピエンス）が地球上にあらわれたのは、およそ 20 万年前だといわれている。

今から 1 万年ほど前に農耕がはじまった。農耕が開始されてから、人口のふえ方がそれまでより速くなったといわれている。農耕がはじまったころの世界の人口は、数百万～1000 万程度だったと推測されている。

西暦 1 年には、総人口は 1 億～3 億程度にふえていた。西暦 1 年以降も、着実に人口はふえていき、西暦 1000 年には、2 億～4 億程度になったと推測されている（下のグラフ参照）。

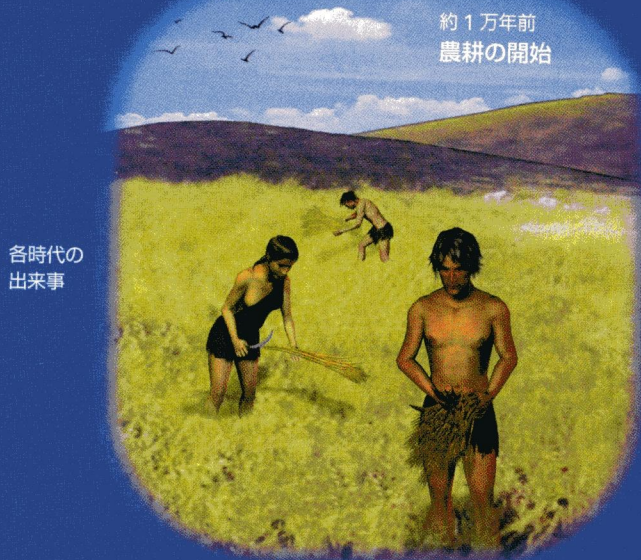
西暦 1000 年以降、中国からヨーロッパ全土、アフリカにまで広がったペストの世界的な流行（14 世紀）により

■ 驚異的にのびた、世界の「人口」と「平均寿命」

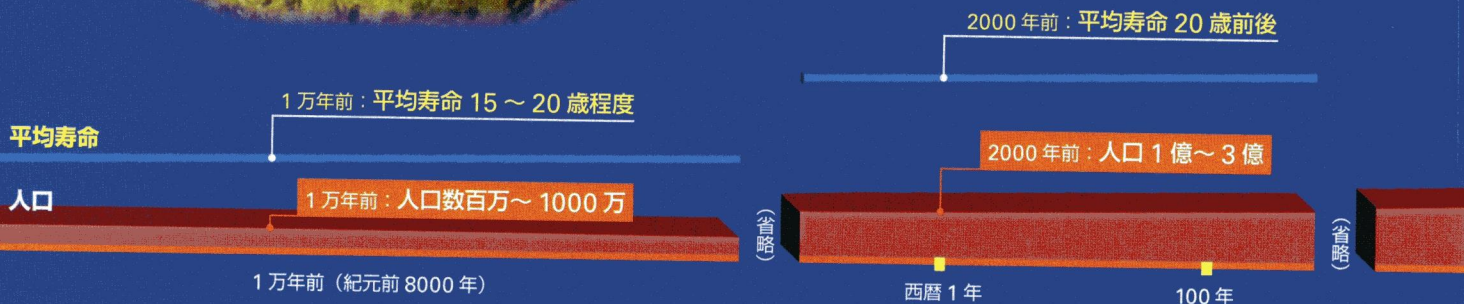
18 世紀にはじまった産業革命によって、人口は世界的にふえはじめた。平均寿命も、人口の増加に合わせるように、1800 年ごろから急激にのびはじめた。人口と平均寿命がともにのびた理由として、食糧生産が安定し、人々の栄養状態がよくなったことや、ワクチンの発明などにより感染症が克服されたことがあげられる。

なお、世界の人口を正確に数えることは、時代をさかのぼるほど困難であり、その推測値には幅がある。平均寿命も同様だ。ここでは、平均的な値をもとにグラフを作成した。

出典：1950 年以降の人口と平均寿命は、国際連合（国連）のデータ（World Population Prospects, the 2010 Revision）に
もとづき作成した。1950 年よりも古い年代の人口は、主に「新「人口論」」（ジョエル・E・コーエン著）を参考に作成した。また、
1950 年よりも古い年代の平均寿命は、『世界経済 2000 年史』（アンガス・マディソン著）、『寿命の数理』（古川俊之著）などを参
考に作成した。



各時代の
出来事



一時的に人口が減少することはあったが、基本的に人口はゆるやかにふえつづけた。それが1700年をすぎたあたりから、人口増加のペースが速くなり始める。1800年ごろには、世界の人口はついに10億の大台を突破した。

その後も人口増加の勢いは衰えず、20億（1930年）、30億（1960年）、40億（1974年）、……と人口がふえ

ていった。そして2011年10月、世界の人口は70億に達した。人類の長い歴史から考えると、ここ数百年の人口増加は急激であり、まさに人口爆発だ。

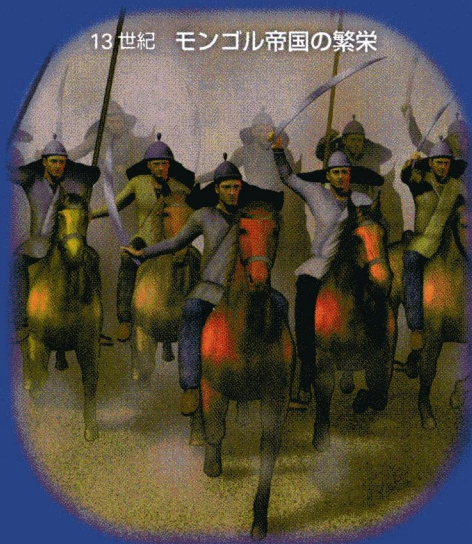
人口はなぜこれほど急激に増加したのだろうか。そして、70億人にまでふくれあがった人類は今後もふえつづけ、やがて地球は人であふれてしまうのだろうか。

平均寿命

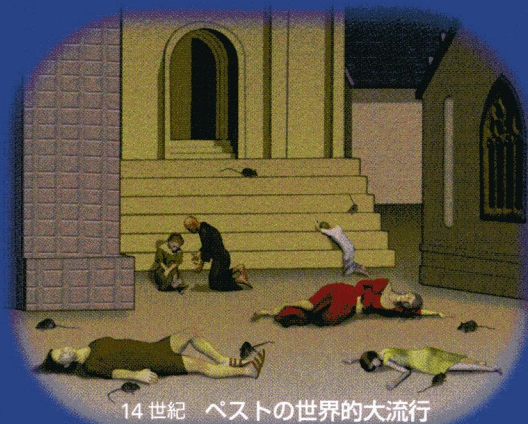
ある年の平均寿命とは、その年に生まれた子供が平均であと何年生きられるか（0歳時の平均余命）を示したものだ。数世紀前まで、平均寿命は非常に短く、30歳にも満たなかった（下のグラフ参照）。これは、成人の死亡率が高かったことに加えて、乳幼児の死亡率が非常に高かったことが大きな原因だ。たとえば平均寿命30歳とは、60歳程度まで生きる人もいる中で、0歳のうちに亡くなってしまう乳幼児が多数いたことを示している。



11～13世紀
十字軍の遠征



13世紀 モンゴル帝国の繁栄



14世紀 ペストの世界的大流行

1000年：平均寿命 20歳代前半

1000年：人口 2億～4億

14世紀：人口3億～4億から
ペストによって2割ほど減少？

1000年

1100年

1200年

1300年

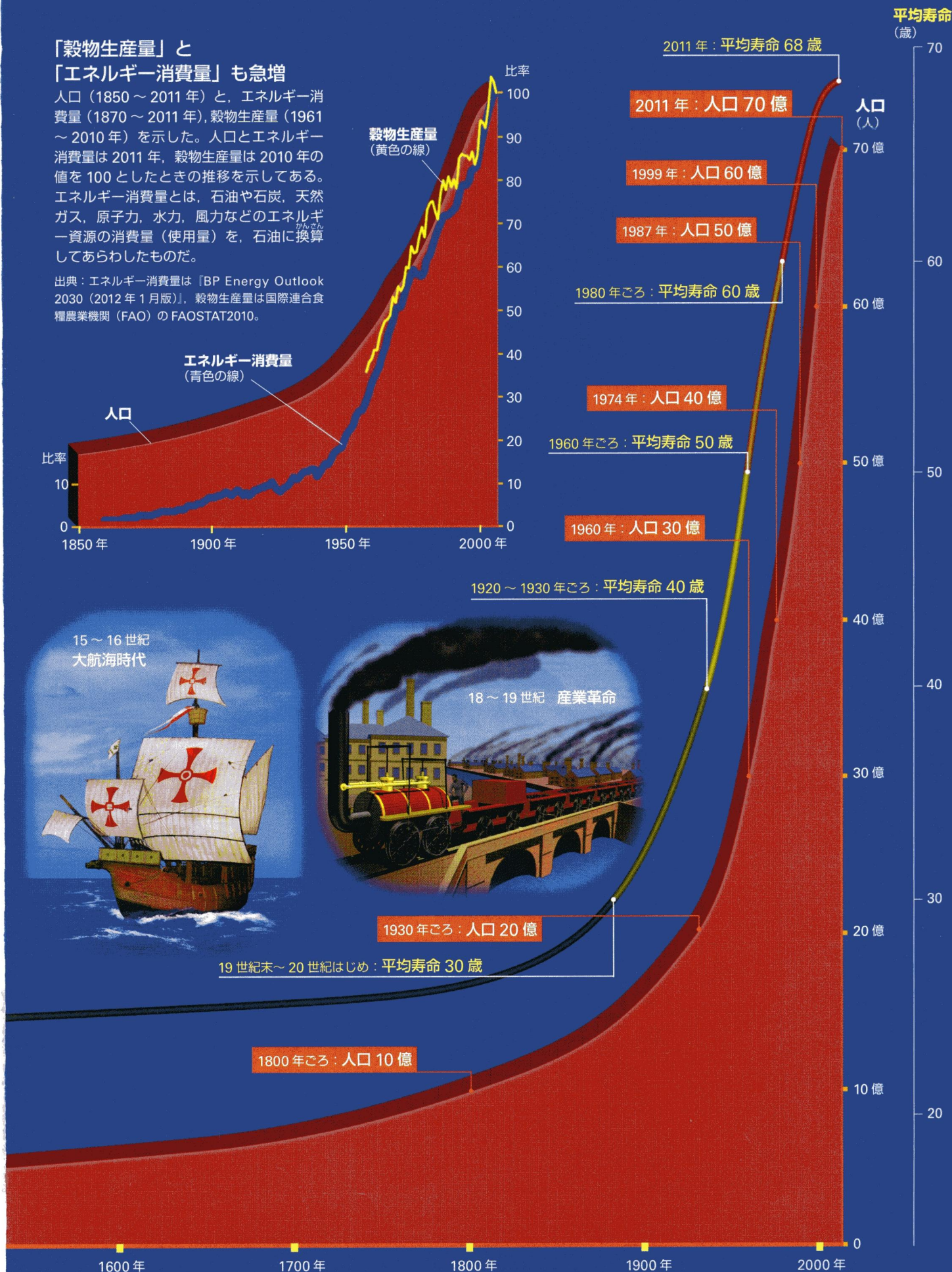
1400年

1500年

「穀物生産量」と 「エネルギー消費量」も急増

人口（1850～2011年）と、エネルギー消費量（1870～2011年）、穀物生産量（1961～2010年）を示した。人口とエネルギー消費量は2011年、穀物生産量は2010年の値を100としたときの推移を示してある。エネルギー消費量は、石油や石炭、天然ガス、原子力、水力、風力などのエネルギー資源の消費量（使用量）を、石油に換算してあらわしたものだ。

出典：エネルギー消費量は「BP Energy Outlook 2030（2012年1月版）」、穀物生産量は国際連合食糧農業機関（FAO）のFAOSTAT2010。



世界の人口の6割は、アジアに集中している

2011年の世界70億人の分布を示したのが、下の図だ。中国、インドをはじめ、アジア地域に人口の多い国が集まっており、現在、70億人の約6割（42億人）はアジアに住んでいる。アジアの主食である米は、単位面積あたりの収穫量が^{しょうかく}多く、多くの人口をやしなうことができるという。^{いなさく}稲作を行う地域は伝統的に人口が多い。

下の図において、国の色は人口増加率をあらわしている。ヨーロッパ諸国やアメリカ、日本など、先進国といわれる国々は人口増加率が低い。一方、中東とアフリカでは人口増加率が高く、今後も人口が大きくふえると予想される。先進国の人口増加率の低下についてはPart1で、各地域の^{しょうかい}今後の人口予測についてはPart2でくわしく紹介する。



人口トップ50 (2011年)

出典：国連 World Population Prospects, the 2010 Revision による予測、日本のみ総務省統計局

1 中国	13億 4757万人	14 エチオピア	8473万人	27 コロンビア	4693万人	40 モロッコ	3227万人
2 インド	12億 4149万人	15 エジプト	8254万人	28 スペイン	4645万人	41 ネパール	3049万人
3 アメリカ	3億 1309万人	16 ドイツ	8216万人	29 タンザニア	4622万人	42 ベネズエラ	2944万人
4 インドネシア	2億 4233万人	17 イラン	7480万人	30 ウクライナ	4519万人	43 ベルー	2940万人
5 ブラジル	1億 9666万人	18 トルコ	7364万人	31 スーダン	4463万人	44 マレーシア	2886万人
6 パキスタン	1億 7675万人	19 タイ	6952万人	32 ケニア	4161万人	45 サウジアラビア	2808万人
7 ナイジェリア	1億 6247万人	20 コンゴ民主共和国	6776万人	33 アルゼンチン	4077万人	46 ウズベキスタン	2776万人
8 バングラデシュ	1億 5049万人	21 フランス	6313万人	34 ポーランド	3830万人	47 ガーナ	2497万人
9 ロシア	1億 4284万人	22 イギリス	6242万人	35 アルジェリア	3598万人	48 イエメン	2480万人
10 日本	1億 2780万人	23 イタリア	6079万人	36 ウガンダ	3451万人	49 北朝鮮	2445万人
11 メキシコ	1億 1479万人	24 南アフリカ	5046万人	37 カナダ	3435万人	50 モザンビーク	2393万人
12 フィリピン	9485万人	25 韓国	4839万人	38 イラク	3266万人		
13 ベトナム	8879万人	26 ミャンマー	4834万人	39 アフガニスタン	3236万人		

※上位50か国で全人口の87%を占める

人の大きさは人口に対応、
人の色は人口密度に対応

国名 人口

国の色は人口増加率
に対応

人口密度 (2011年)

1平方キロメートルあたりの人数



人口増加率 (2005~2010年平均)



カナダ 3435万

日本 1億 2780万

アメリカ 3億 1309万

メキシコ 1億 1479万

コロンビア 4693万

ベネズエラ 2944万

ペルー 2940万

ブラジル 1億 9666万

アルゼンチン 4077万

70億人は世界のどこに住んでいるか？

2011年の人口上位50か国(上の表)の人口を、人型のシルエットの大きさ(面積)であらわした。国の色は人口増加率(2005年~2010年の平均)に対応し、人型のシルエットの色は人口密度(2011年)に対応している。アジアには人口が多い国がいくつもあり、トップ10(太字で強調)のうち、6か国がアジアの国だ。中東やアフリカには、人口は現在それほど多くないものの人口増加率が高い(赤い)国がひしめいている。人口増加率が高い国は、急激に人口がふえる「人口転換」(32ページで紹介)という現象がおきている国である。

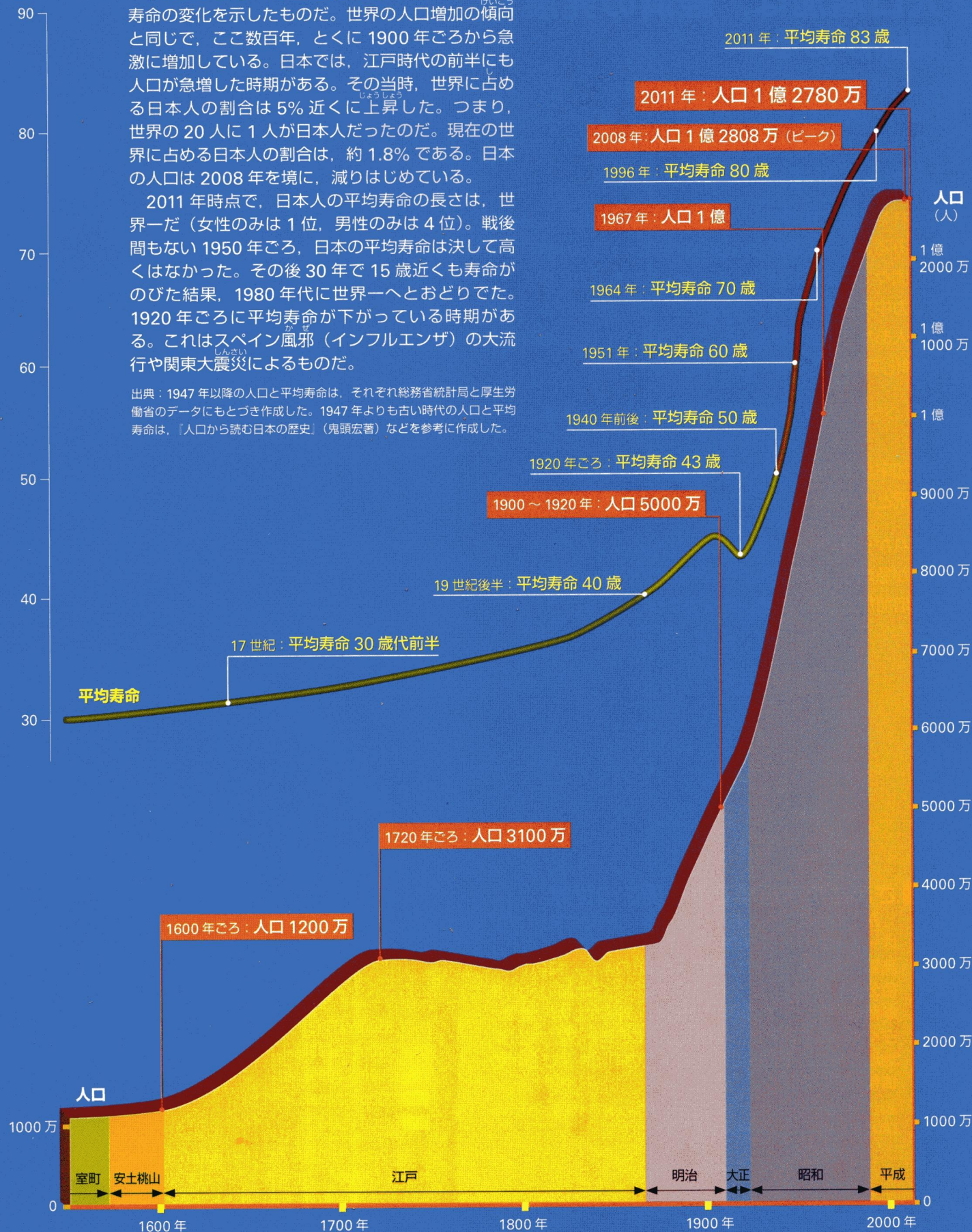
平均寿命 (歳)

日本の人口も“爆発”した

下のグラフは、16世紀以降の日本の人口と平均寿命の変化を示したものだ。世界の人口増加の傾向と同じで、ここ数百年、とくに1900年ごろから急激に増加している。日本では、江戸時代の前半にも人口が急増した時期がある。その当時、世界に占める日本人の割合は5%近くに上昇した。つまり、世界の20人に1人が日本人だったのだ。現在の世界に占める日本人の割合は、約1.8%である。日本の人口は2008年を境に、減りは始めている。

2011年時点で、日本人の平均寿命の長さは、世界一だ（女性のみは1位、男性のみは4位）。戦後間もない1950年ごろ、日本の平均寿命は決して高くはなかった。その後30年で15歳近くも寿命がのびた結果、1980年代に世界一へとおどりた。1920年ごろに平均寿命が下がっている時期がある。これはスペイン風邪（インフルエンザ）の大流行や関東大震災によるものだ。

出典：1947年以降の人口と平均寿命は、それぞれ総務省統計局と厚生労働省のデータにもとづき作成した。1947年よりも古い時代の人口と平均寿命は、『人口から読む日本の歴史』（鬼頭宏著）などを参考に作成した。



人口増加は、経済の発展と関係がある

経済の発展度を示す指標の一つである「一人あたり GDP」（左上の図）を見れば、経済的に豊かな国（先進国）と、貧しい国（発展途上国）の分布がわかる。

これを「一人あたり^{せつしゅ}摂取カロリー」（左下の図）と見くらべてみると、一人あたり GDP が高いヨーロッパやアメリカの国々では栄養状態がよく、一人あたり GDP が低いアフリカ中央部の国々は栄養状態が悪いことがわかる。同様に一人あたり GDP が高いと、「平均^{じゆみよう}寿命」（右上の図）や「高^{こうれい}齢化率」（右下の図）も高い傾向がある。

23 ページの人口増加率の地図と見くらべてみると、一般的に、一人あたり GDP が低く平均寿命が短い国は、人口増加率が高いことがわかる。これは、**経済発展（近代化）の状況と人口のふえ方に関係がある**ことを示している。

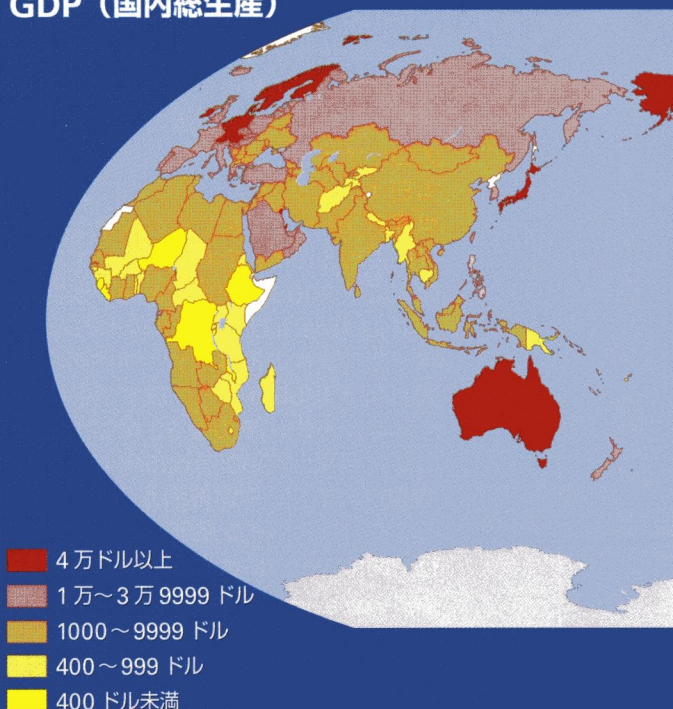
これから経済発展が進もうとしている国（貧しい国）で人口が急増し、経済発展が一段落した国（豊かな国）では人口増加が止まる、あるいは減少することが多いのだ。

■ さまざまな指標でみる現在の世界

左上の地図は一人あたり GDP（国内総生産）、左下は一人あたり摂取カロリー、右上は平均寿命、右下は高齢化率（人口に占める 65 歳以上の割合）に応じて、色分けしてある。色分けの基準値は、各地図の凡例を参照のこと。一部の国・地域は、データがないため、白くぬられている。各指標について、データがある国・地域の中での上位 5 か国と最下位の国、および日本の情報を示した。

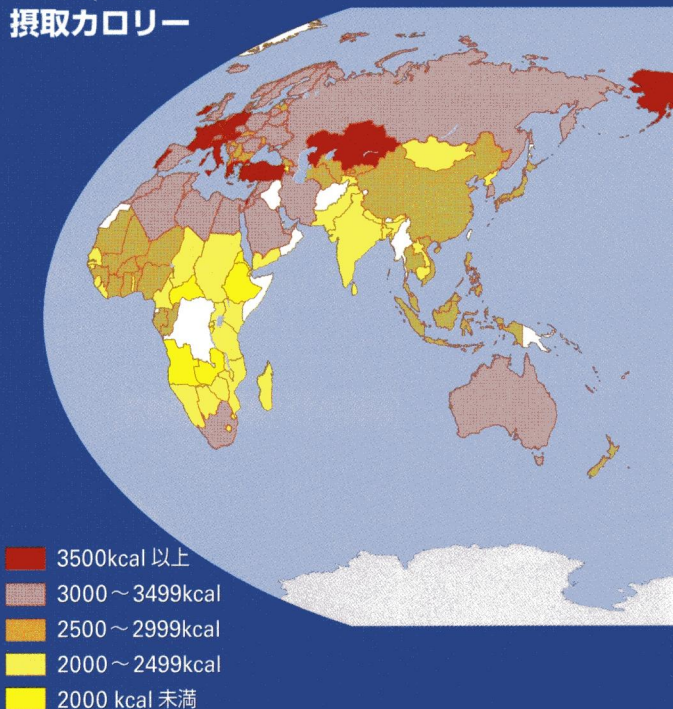
出典：一人あたり GDP は世界銀行と外務省、一人あたり摂取カロリーは FAO、平均寿命と高齢化率は国連のデータをもとに作成。

一人あたり GDP（国内総生産）



2010 年（一部は 2009 年）の年間 GDP（米国ドル）を人口で割った値によって、色分けしたのが上の地図だ。人口が少ない国は、一人あたり GDP が高くなる傾向がある。国全体の GDP の順位は、1 位がアメリカ、2 位が中国、3 位が日本である（2010 年）。一人あたり GDP が 400 ドルに満たない国は、世界で 8 か国存在する。

一人あたり 摂取カロリー

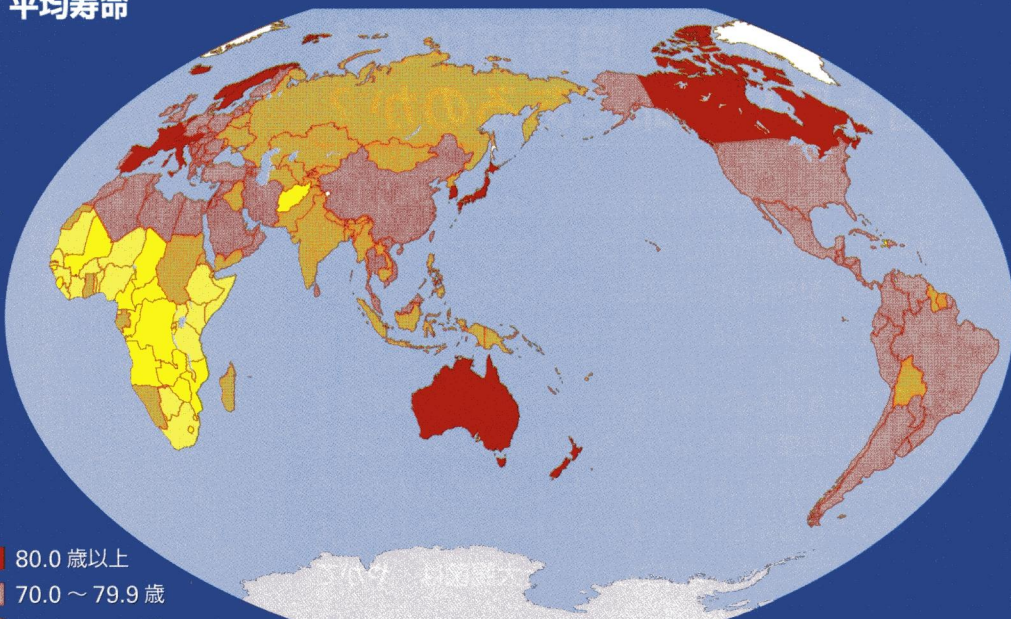


1 日一人あたりの摂取カロリー（kcal）によって、色分けしたのが上の地図だ（2006～2008 年平均）。日本人の成人男性の摂取カロリーの目安は 1 日 2600kcal 前後、成人女性は 2000kcal 前後である。これは年齢や体格などによってことなる。摂取カロリーの量には、経済的豊かさに加えて、食文化も影響している。

平均寿命



世界平均 9228 ドル



男女あわせた平均寿命の長さに応じて色分けしたのが上の図である。値は、2005 ~ 2010 年の平均値を使用した。日本は 1980 年代以降、世界一の長寿国でありつづけている。一般的に、経済が発展している（一人あたり GDP が高い）ほど、平均寿命が長い。平均寿命が長い国は、人口増加率が低いことが多い（23 ページの地図参照）。

世界平均 67.9 歳

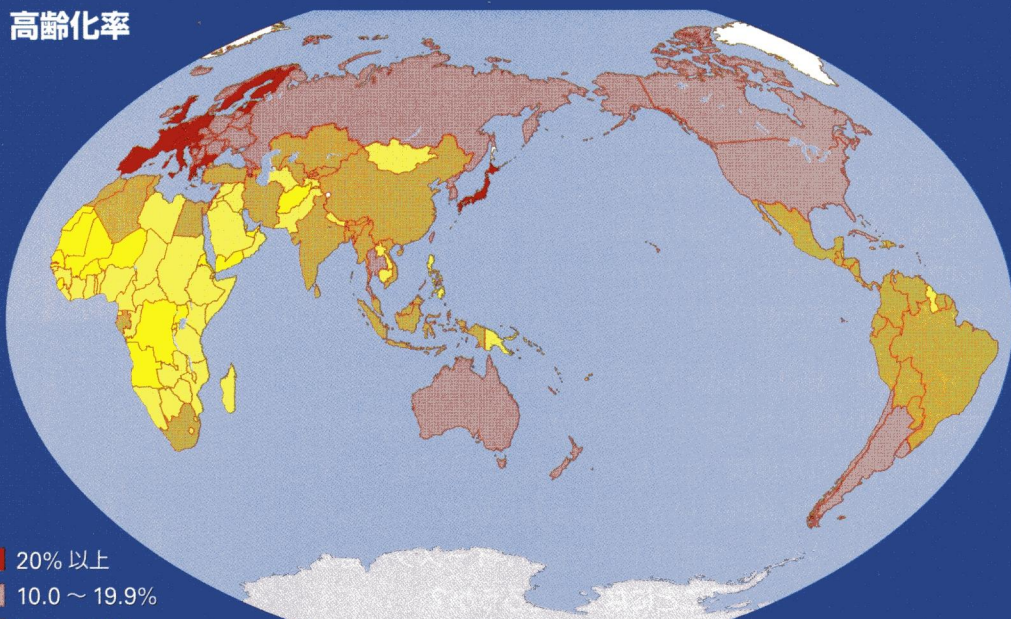
- 1 位：日本 (82.7 歳)
- 2 位：スイス (81.8 歳)
- 3 位：オーストラリア (81.4 歳)
- 4 位：イタリア (81.4 歳)
- 5 位：アイスランド (81.3 歳)
- ...
- 最下位：中央アフリカ (45.9 歳)

- 1 位：ルクセンブルグ (10 万 5000 ドル)
- 2 位：ノルウェー (8 万 5000 ドル)
- 3 位：スイス (6 万 7000 ドル)
- 4 位：デンマーク (5 万 6000 ドル)
- 5 位：スウェーデン (4 万 9000 ドル)
- ...
- 13 位：日本 (4 万 3000 ドル)
- ...
- 最下位：ブルンジ (192 ドル)

高齢化率



世界平均 2790kcal



2010 年の高齢化率（人口に占める 65 歳以上の割合）によって、色分けした。一般的に、平均寿命（本ページ右上の地図）が長い国と、人口増加率が低い国（23 ページの地図参照）は、高齢化率も高い。日本は現在、世界で最も高齢化が進んでいる国であり、高齢化が進行するペースが最も速かった国でもある。

世界平均 7.6%

- 1 位：日本 (27.3%)
- 2 位：イタリア (24.8%)
- 3 位：ドイツ (24.2%)
- 4 位：スウェーデン (22.3%)
- 5 位：ギリシア (22.3%)
- ...
- 最下位：アラブ首長国連邦 (0.5%)

- 1 位：オーストリア (3800kcal)
- 2 位：アメリカ (3750kcal)
- 3 位：ギリシア (3710kcal)
- 4 位：ベルギー (3690kcal)
- 5 位：ルクセンブルグ (3680kcal)
- ...
- 84 位：日本 (2800kcal)
- ...
- 最下位：エリトリア (1590kcal)

人間の増加も、培養液中の大腸菌と同じ運命にあるのか？

もし広さや栄養が無制限にある環境で大腸菌を培養したら、大腸菌は加速度的にふえつづける。しかし、通常、大腸菌を培養する培養液や培養皿は“閉じられた環境”であり、広さや栄養に限りがあるので、そうはいかない。

大腸菌を培養液中で培養すると、最初は急激に増殖するが、大腸菌の密度が高くなり、環境が悪くなってくると、増加のペースは徐々にゆっくりになり、やがて止まる。そこが培養液中でふえることができる大腸菌の数の上限、すなわち“定員”なのだ。増殖が止まった大腸菌は、やがて減少しはじめる。

「環境の“定員”をこえては生きられないというのは、人間も大腸菌も同じです」。こう語るのは、人類生態学を専門とする、自然環境研究センターの大塚柳太郎博士だ。実際に“定員”をこえたことで生じた悲劇がある。それは、モアイ像で有名なチリのイースター島での出来事だ。

イースター島に人類が住みはじめたのは、5～6世紀ごろだといわれている。15～16世紀のピーク時には、島の人口は少なくとも7000をこえたといわれている。ピーク時の人口は、考古学による検証で推定されたものだ。

ところが、18世紀にヨーロッパ人が島を訪れたときには、人口は3000程度にまで減っていた。地中に堆積した花粉などを分析した結果、森林破壊によって土壌が浸食され、農地の生産力が低下したことがわかっている。食糧不足と、食糧をめぐる部族間の争いによって、人口が激減したのだ。

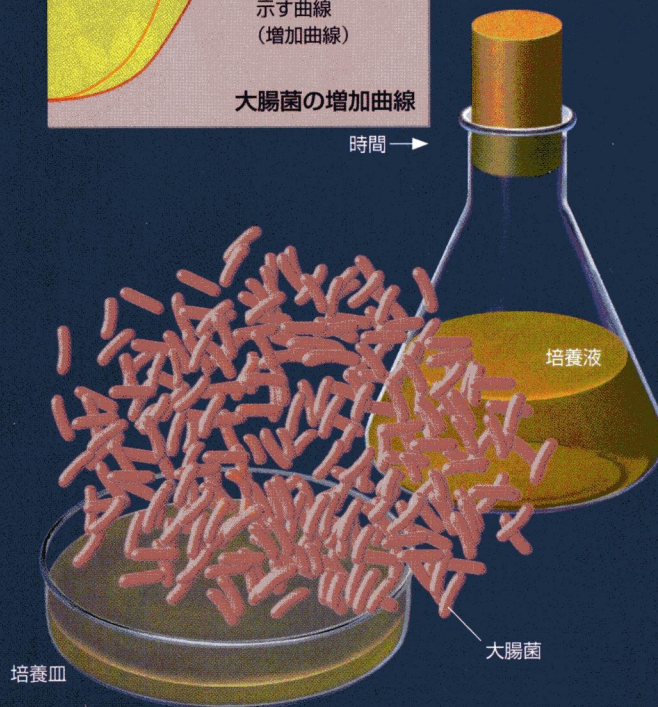
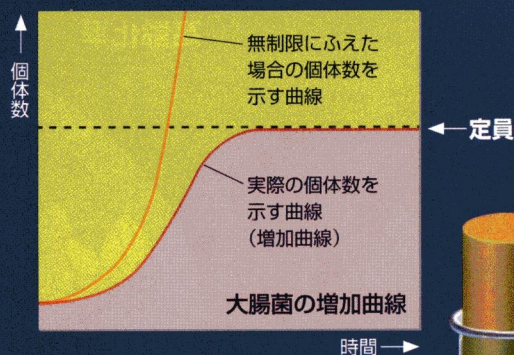
イースター島は、周囲に大きな島がない絶海の孤島だ。交通手段の発達していなかった当時は、大腸菌の培養液と同じ“閉じられた環境”だったといえる。地球規模で考えたとき、私たちも地球という“閉じられた環境”に住んでいる。人類もやがて、培養液中の大腸菌やイースター島の島民と同じ運命をたどることになるのだろうか？

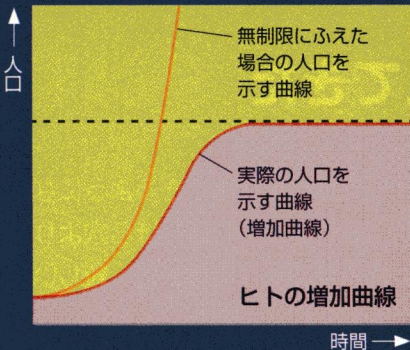
大腸菌も人類も、ふえ方は同じ？

培養皿や培養液中で繁殖する大腸菌、そして地球上でふえる人類のイメージをえがいた。それぞれのイラストの近くには、個体数の変化を示す「増加曲線」のグラフをえがいた。限られた広さと栄養しかない環境で生物がふえる場合、一般的に増加曲線のように個体数がふえていく。

大腸菌の増加曲線

広さや栄養が無制限にある環境で大腸菌がふえる場合、大腸菌の数は、加速度的にふえていく（オレンジ色の線）。ところが広さや栄養に限りがある環境で培養すると、次第に環境中の栄養が不足し、みずからの老廃物がたまり、大腸菌の密度も高くなる。つまり、環境が悪化する。そのために少しずつ増殖の速度が遅くなり、個体数は一定になる（赤色の線＝増加曲線）。そこが、その環境の定員である。





ヒトの増加曲線

ヒトも大腸菌と同じく、広さや栄養（食糧）に制限がなければ、加速度的に人口はふえていく（オレンジ色の線）。その場合、女性は一生のうちに平均で10人以上の子供を産むことになると考えられる。しかし、現実にはヒトが生活する環境は広さや栄養に限りがある。そのため、大腸菌と同じように、人口増加は上で示すような曲線（赤色の線＝増加曲線）をえがくと考えられる。つまり、やがて増加は止まり、その環境でやしなうことができる定員をこえることができない。



🍷 イースター島の悲劇

イースター島は、南太平洋に浮かぶ周囲58キロメートルほどの小さな火山島だ（右の地図参照）。香川県の小豆島とほぼ同じ大きさである。周囲には、目立った島もなく、まさに絶海の孤島だ。

イモ類中心の農業やイノシシなどの家畜の飼育、漁業などによって島は栄え、最盛期（15～16世紀）には島の人口は少なくとも7000をこえた。島の各地には、「モアイ像」とよばれる宗教的な意味合いをもつ巨大な石像が、いくつも建てられた。

ところが土地の生産性が落ち、食糧危機におちいった結果、部族間の争いがおき、人口は激減した。1722年にオランダの調査団が島を訪れたときには、島民の数は3000人程度に減っていた。その50年後には2000人程度にまで減少し、非常に困窮した暮らしをしていたという。



人類は、地球の“定員”を拡大しながらふえてきた

人類も大腸菌と同じく、自分たちが住んでいる環境の定員をこえることはできない。ただし、人類と大腸菌で大きく異なる点がある。それは、**人類はみずからの力で、定員そのものを拡大することができる**という点だ。

太古の時代、人類はほら穴にすみ、動物を狩ったり、木の実や貝をとったりして暮らしていた。やがて人類は、ほら穴を出て家（たて穴式住居）をつくりはじめた。すると

生活範囲が広がり、広い地域で食糧を調達できるようになった。また、家の数をふやして村をつくれれば、ほら穴よりも多くの人数がいっしょに暮らせるようになった。**新しい技術の獲得で、定員（やしなえる人口）が拡大したのだ。**

人類の歴史の中で、**大きく定員を拡大した最初の例は、約1万年前の「農耕開始」**だという。狩猟採集の生活にくらべ、手間と時間はかかるが、麦や米といった貯蔵しやすい

地球の定員を押し上げてきた人類の歴史

地球の定員（やしなえる人口）をふやしてきた歴史上の出来事をえがいた。中でも農耕の開始は、都市をつくったり、財産（農作物）をたくわえるようになったり、さまざまな身分や職業が生まれたりするなど、現在の社会の出発点だといわれている。農耕開始のほかにも、大小さまざまな技術の獲得が地球の定員拡大、つまり人口増加につながった。たとえば、古くは「火の獲得」や、農耕開始以降では「青銅や鉄の製造」などだ。

たて穴式住居の発明（約1万3000年前）

ほら穴など自然の地形（横穴）を住居に利用していた人類が、穴（たて穴）を掘って、そこに屋根をかぶせた住居（たて穴式住居）をつくり、住むようになった。これにより、ほら穴などがなかった場所にも住めるようになった。また、より大きな集団で住めるようになった。たて穴式住居は世界各地で発明され、広まっていった。



たて穴式住居での生活



ほら穴での生活

定員拡大

新たな定員

従来の定員

農耕の開始（約1万年前）

農作物を収穫し、それを長期保存する技術を高めたことにより、動物を狩ったり木の実や貝をとったりする生活から、年間を通じて食糧が安定的に得られる生活へとかわった。栄養状態が安定したうえ、農作業に多くの人手が必要とされたため、多くの子供を産むようになり人口がふえた。同時に、大きな集団での生活のために感染症の広まり方が速くなり、死亡率が上がったといわれている。農耕は中東やアジアなどの地域ではじまり、世界中に広まった。



狩猟採集による食糧調達

い食糧が安定的に得られるようになった。農耕開始で定員が拡大したことからわかるように、**人類の定員を決める重要なかぎは、衣・食・住のうち「食（食糧）」**である。

その時々^{よゆう}の定員に対して、人類はどのくらいの余裕をもってふえてきたのだろうか？「それほど余裕はなく、**ほとんど定員ぎりぎり**でふえてきたと考えるのが現実的でしょう」と、自然環境研究センターの大塚博士は語る。

たとえば、「定員に対して余裕がある状態で農耕がはじまり、定員にさらなる余裕が生まれたために人口がふえた」という流れは、考えにくいという。むしろ、狩猟採集でや

しなえる定員の限界にまで人口がふえたため、必要にせまられて農耕がはじまったと考えるのが**妥当**^{たとう}なのだ。

「狩猟採集の生活のほうが、農耕の生活よりもタンパク質などの栄養素の摂取量が多いという説もあります。ふえた人口をやしなうために、手間のかかる農作業をはじめざるを得なかったのだと推測されます」（大塚博士）。

定員近くまで人口がふえ、その状況を打破する技術革新がおき、定員が拡大する。そして、ふたたび定員近くまで人口がふえる。このくりかえしによって、人類は 70 億にまでふえてきたのだ。

農耕による食糧生産



産業革命（約 250 年前）

蒸気機関や織物機械などの発明で、工業生産や輸送の方法が大きくかわった（産業革命）。農業分野にも技術革新がおよび、食糧生産がふえた。輸送方法の改善で食糧供給も安定し、人口増加につながった。産業革命は 18 世紀後半にイギリスでおき、その後世界中に広まった。



工業化後の輸送手段



工業化前の輸送手段

定員
拡大

新たな定員

従来の定員

定員
拡大

新たな定員

従来の定員

🍎 地球の“究極的な定員”は何人か？

これまでさまざまな科学者が、人口密度や食糧生産量、エネルギー資源の量などから「地球の定員」を計算してきた。古くは、オランダの博物学者アントニー・ファン・レーウェンフック（1632～1723）が、地球の定員を計算している。彼は、地球の陸地の 3 分の 2 に、当時のオランダの人口密度（1km² あたり 120 人）と同じ密度で人が住む場合を計算した。その結果は「約 134 億」だった。ちなみに、同じ計算を、現在の東京 23 区の人口密度（1km² あたり 1 万 4000 人）で行うと、総人口は 1 兆を軽くこえる。

アメリカの人口学者ジョエル・コーエン博士は、『新「人口論」』という著書で、過去に計算されたさまざまな「地球の定員」を紹介している。研究者によって、その値は 10 億以下から 1 兆以上までと実に幅広い。これは、人々がどのような水準の生活を望むかによって、定員がことなることを示している。推定値の多くは 40 億～160 億の範囲に入っている。

「多産多死」から「少産少死」への転換が人口を爆発させた

人口がふえる理由は、基本的に一つだ。死亡する人数より、新たに生まれる人数のほうが多いためである。

人口の爆発的な増加は、18世紀のイギリスで最初におきた。そのころイギリスでは、農業技術の進歩により、食糧生産量がふえ、人々の栄養状態がよくなっていた。その結果、感染症に対する抵抗力が上がり、死亡率が下がりはじめた。死亡率が下がっても、出生率は高いままだったため、人口は急激にふえはじめた。

同時期にイギリスでおきたのが「産業革命」だ。蒸気機関や織物をつくる機械などが発明され、工業化が進んだ。産業革命の技術革新は、工業だけでなく、農具の改良など農業分野にもおよび、農業の生産性を高めた。

20世紀に入ると、イギリスの人口増加のペースがゆるやかになってきた。生まれる子供の数が減ってきたのだ。やがて出生率が死亡率と同程度にまで下がり、人口はあまりふえなくなった。

出生率も死亡率も高い「多産多死」の社会から、出生率は高いままで死亡率が低い「多産少死」の社会へと移り、最後には出生率も死亡率も低い「少産少死」の社会にかわる。この一連の出生率と死亡率のうつりかわりを、「人口転換」という。

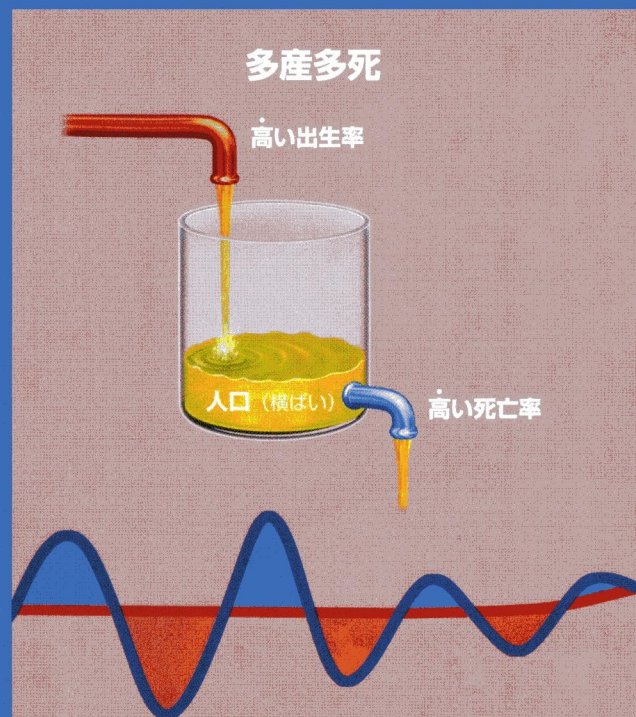
人口転換は、イギリスで最初におきたあと、産業革命とともに世界各地に広まった。人口転換は、「多産少死」の時期に人口をいちじるしく増大させる。世界各地でこの人口転換がおきたことが、18世紀以降におきた世界的な人口爆発の原因だった。

現在、先進国とよばれる国々では、人口転換はすでに終了した。アフリカや中東の国々では、今まさに人口転換がおきている。世界各国の人口増加率の差（23ページ）は、人口転換がおきた時期の差が生みだしたものののだ。

人口爆発を引き起こす「人口転換」

出生率も死亡率も高い社会から、そのどちらも低い社会へとうつりかわる「人口転換」を、模式的にあらわしたのが下の図だ。出生率と死亡率の差が、人口の増加分となるようすを、容器にたまる水（＝人口）で表現した。イギリスでは約200年かけて、人口転換が終了した。人口転換が進む速さは、人口転換がはじまった時期によってことなる。一般的に、あとの時代になっておきるほど、人口転換は速く進む。

↑ 出生率・死亡率・人口



飢饉、疫病、戦争などがくりかえしおこり、死亡率は変動する。一方、農業に一定の人手が求められることなどを背景に、出生率は高いまま維持される。

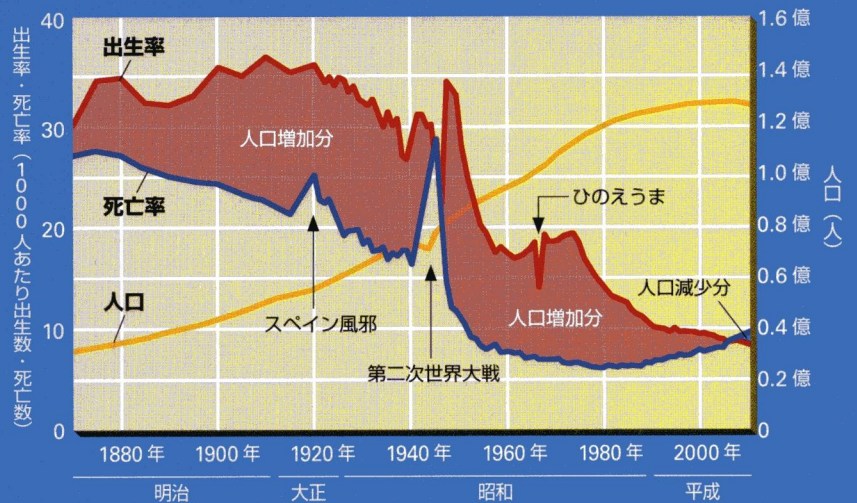
日本でおきた人口転換

人口転換は、日本では明治時代にはじまった。右のグラフは、日本の出生率、死亡率、人口の推移を示したものだ。

1920 年ごろの死亡率の上昇は、スペイン風邪（インフルエンザ）の大流行によるものだ。日本での死者は約 40 万人にのぼった。1945 年ごろに死亡率が急上昇し、出生率が急低下しているのは、第二次世界大戦によるものだ。

1966 年にも、出生率の急な低下がみられる。1966 年の干支は「ひのえうま（丙午）」だった。当時、ひのえうま年生まれの子供は氣性がはげしいという迷信が広まっていたために、出産をひかえる人が続出した。

日本では現在、出生率が死亡率よりも低くなってしまったため、人口の減少がはじまった。今後は人口減少が加速していくと予想されている。



多産少死



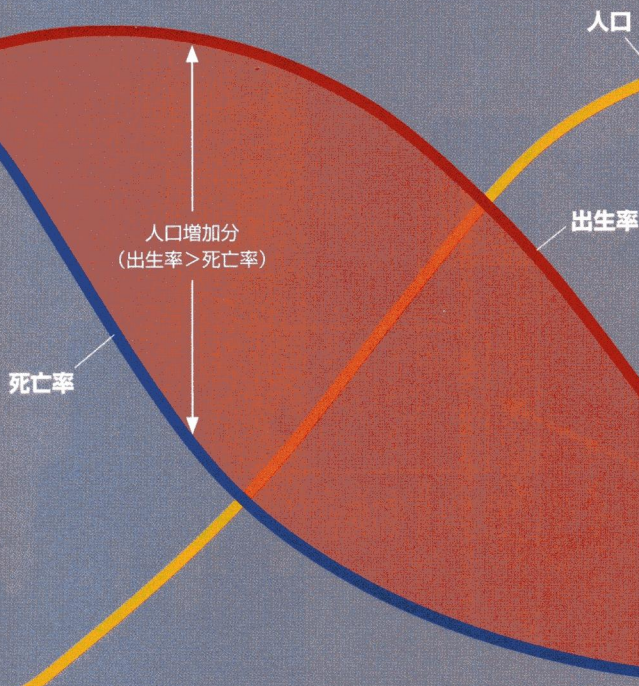
少産少死



出生率には2種類ある

このグラフの出生率は「普通出生率」とよばれるもので、一定の人口に対して（たとえば1000人あたり）、1年間に産まれた子供の数を示している。一方、36ページで紹介する「合計特殊出生率」とよばれるものは、一人の女性が生涯に産む平均的な子供の数を示すものだ。将来の人口変動を予測する際には、普通出生率ではなく、合計特殊出生率が使われることが多い。

感染症や食糧不足の危険が減り、死亡率はほぼ一定になる。一方で、経済状況をはじめとする社会的要因によって出生率は変動する。



栄養の改善、公衆衛生・医療技術の進歩などにより、死亡率が下がる。乳幼児の死亡率が下がるとともに、出生率も低下する。

「少産少死」となった国は、必ず高齢化が進んでいる

人口転換によって変化するのは、人口の数だけではない。人口の中身(構成)も大きく変化する。**人口転換がおきると、人口に占める高齢者の割合が必ず多くなるのだ。**

下の図は、日本における年齢ごとの人口を、男女に分けてグラフ化したもので、「**人口ピラミッド**」とよばれる。人口転換の真っ最中(多産少死)だった1950年の日本は子供が多く、人口ピラミッドはまさにピラミッドの形をして

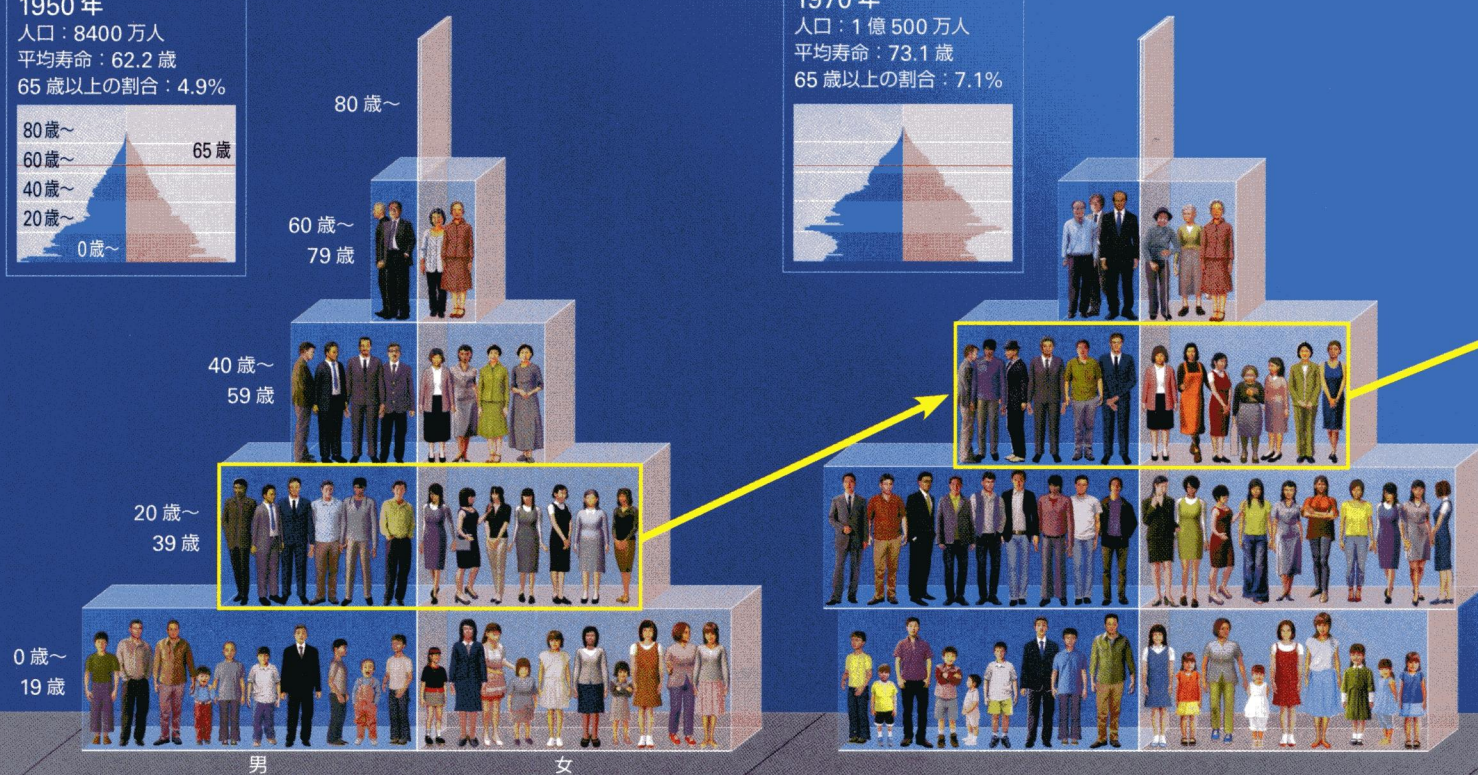
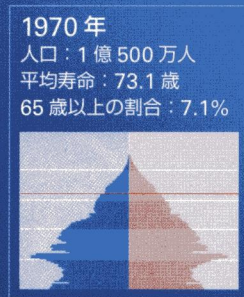
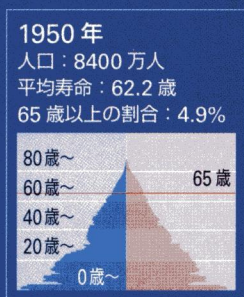
いた。それが時代が進むにつれ、子供の数が減り(多産から少産への移行)、ピラミッドの下側がすぼまっていった。その間、栄養状態の改善や医療の進歩によって寿命がのびた結果、高齢者がふえ、ピラミッドの上側がふくらんだ。

高齢者の比率を高める要因としては、寿命がのびることよりも、出生率が低下することのほうが大きい。日本は急速に少子化が進んだため、人口の高齢化も急速に進んだ。

人口ピラミッドで見る、高齢化する日本

日本の人口ピラミッドを、1950年から20年ごとに模式的にえがいた。ピラミッドの一つの段の年齢幅は20年である。ただし、80歳以上は一つの段にまとめてある。一つ右の人口ピラミッドに進む(20歳、年をとる)と、一つ上の段に移動することになる(例：黄色い枠で囲んだ世代)。人口と平均寿命、65歳以上の高齢者の割合、詳細な人口ピラミッドを、それぞれの図の近くに示した。

時代が進むにつれ、生まれる子供の数が減り、ピラミッドの一番下の段の横幅がせまくなっている(少子化)。また、死亡率が下がり、高齢者がふえて、ピラミッドの上のほうの段が幅広くなっている(高齢化)。こうした傾向が今後もつづけば、ピラミッドの土台はさらに細くなっていき、人口減少が急速に進むと考えられている。



1950年

1970年

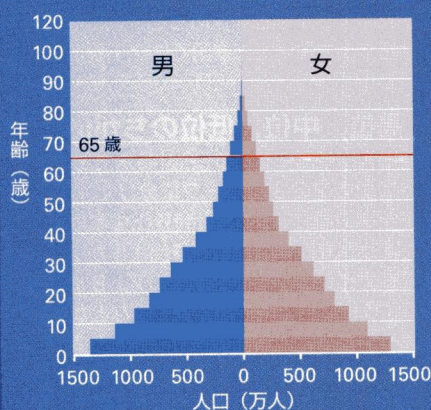
● 世界各国の人口ピラミッド

人口ピラミッドは、人口転換のどの段階にあるかによって特徴的な形をとる。ナイジェリアは現在、人口転換のまったく中だ。そのため、人口ピラミッドの形は、1950年の日本のようにすそが広がっている（下の図・左側）。これは人口が急増している国の典型的な形だ。

現在のドイツの人口ピラミッドは、2010年の日本と同じように、下がすぼまった形をしている（下の図・中央）。これは、高い平均寿命と少子化傾向をもつ先進国の典型的な形だ。一方、アメリカの人口ピラミッドは、下側がそれほどすぼまっておらず、つり鐘のような形をしている（下の図・右側）。また、アメリカの65歳以上の高齢者の割合はナイジェリアよりは高いが、日本やドイツほどは高くない。これらは、アメリカの出生率が、日本やドイツよりも高い値を維持していることが理由だ。

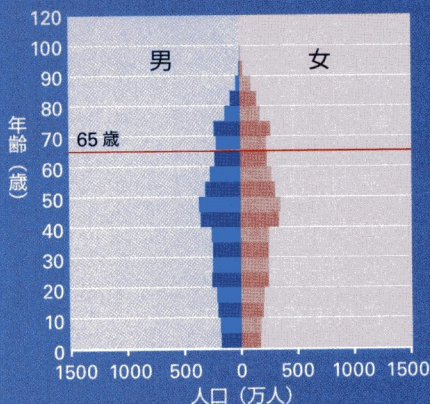
ナイジェリア
(2010年)

人口：1億5800万人
平均寿命：50.9歳
65歳以上の割合：3.4%



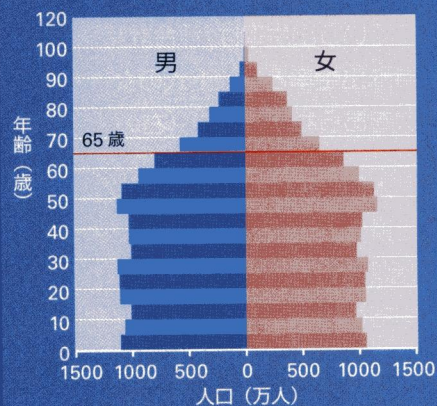
ドイツ
(2010年)

人口：8200万人
平均寿命：79歳
65歳以上の割合：18.6%



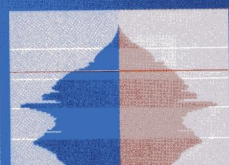
アメリカ
(2010年)

人口：3億1500万人
平均寿命：78歳
65歳以上の割合：12.4%



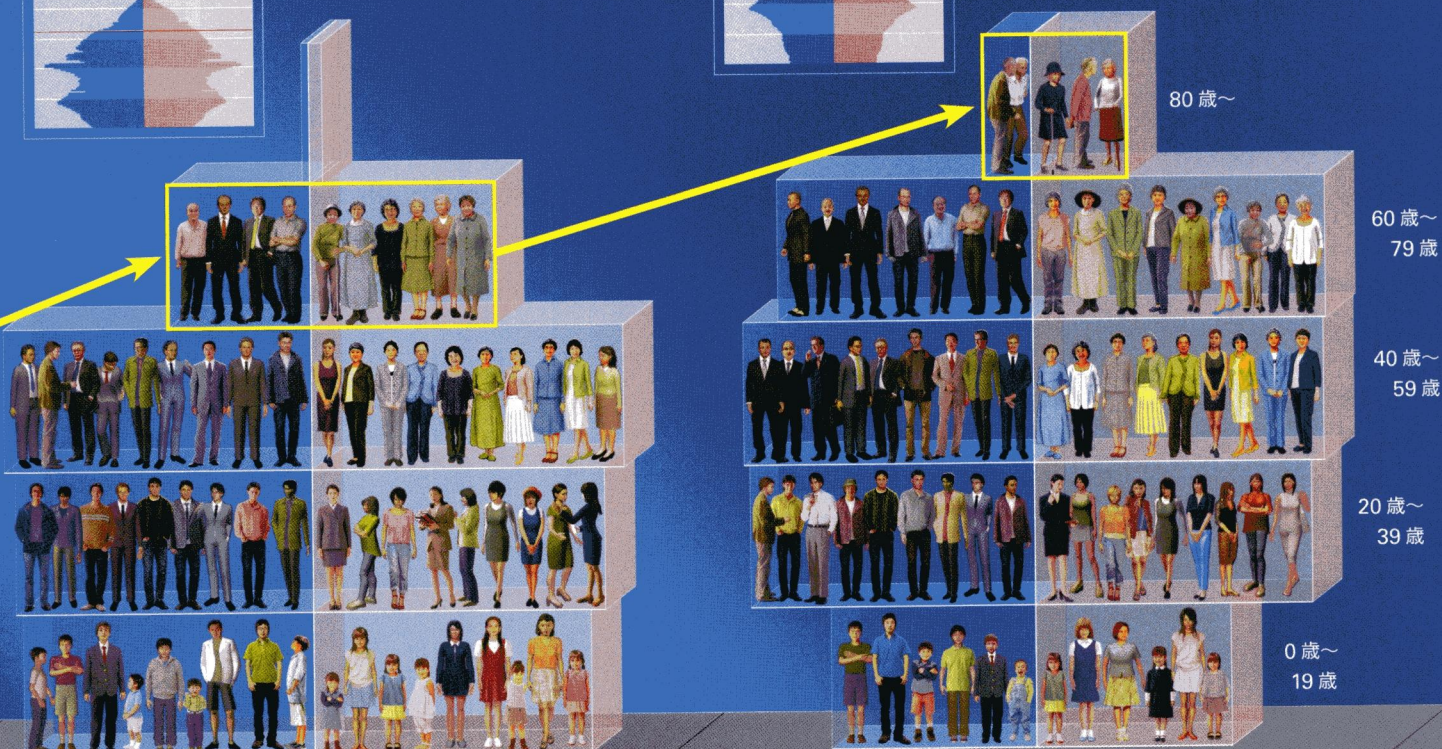
1990年

人口：1億2400万人
平均寿命：79.5歳
65歳以上の割合：12.1%



2010年

人口：1億2800万人
平均寿命：82.7歳
65歳以上の割合：23.0%



2083 年，人口 100 億突破 —— 国連予測の根拠とは？

将来の世界人口を予測するときのかぎとなるのは、「出生率」と「死亡率」、そして「国際的な人口移動」の値だ。ここでいう出生率は、「合計特殊出生率」のことである。合計特殊出生率とは、1 人の女性が生涯に産む平均的な子供の数をあらわすものだ（右の「合計特殊出生率とは？」参照）。

人口転換は基本的にどの国でもおきる。そのため、人口転換のどの段階にあるかによって、今後どのように出生率（合計特殊出生率）や死亡率が下がっていくかはある程度予測できる。国際的な人口移動についても、これまでの傾向から、今後の傾向は予測できる。こうして合計特殊出生率、死亡率、国際的な人口移動を予測すれば、各国の将来の人口が計算できる。最後にすべての国の計算結果を合計すれば、将来の世界の人口が予測できるというわけだ。

国連は、合計特殊出生率が今後、どのように変化するかによって、四つのシナリオを用意している。

一つ目は、各国の合計特殊出生率が、現在の値のまま今後も一定であると仮定した、「合計特殊出生率一定」のシナリオだ。このシナリオでは、2100 年には、なんと 260 億を突破する（右のグラフの赤い線）。

残りの三つは、今は合計特殊出生率が高い国もやがて下がっていき、将来的にある一定の値におさまっていくと仮定したシナリオだ。将来的におさまる合計特殊出生率の値が高い順に、「高位」、「中位」、「低位」とよばれる（くわしくは右の「高位、中位、低位のちがい」参照）。

現時点で最も実現の可能性が高いと考えられているのは、「中位」の予測だ（右のグラフの黄色い線）。この予測では、2083 年ごろに人口が 100 億を突破するが、頭打ちになる。100 億という値は、人類の成長が一つのピークに達したことを示す数字になるのかもしれない。

人口
(人)

250 億

200 億

150 億

100 億

50 億

0

1950 年

合計特殊出生率とは？

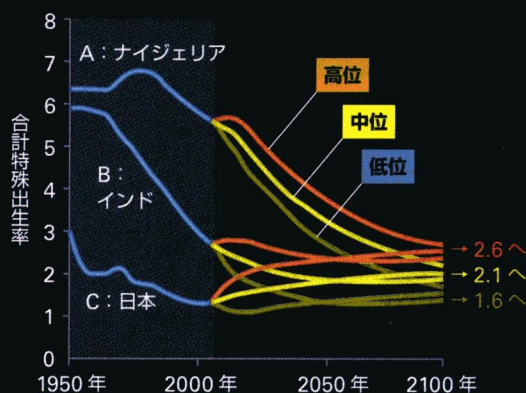
合計特殊出生率は、女性が一生のうちに産む子供数の平均値だ。夫婦 2 人で 2 人の子供をもうけると（合計特殊出生率 = 2）、子供の世代と親の世代の人数が同じになる。このことからわかるように、ある国の人口を維持するには、合計特殊出生率が 2 以上であることが必要だ。乳幼児の死亡率などを含めると、人口を維持するための合計特殊出生率は、先進国では 2.1 程度になる。

高位、中位、低位のちがい

国連は人口予測にあたり、合計特殊出生率の値によって、世界の国を次の 3 グループに分けた。「A：合計特殊出生率が高い国」、「B：合計特殊出生率は下がっているが 2.1 以上の国」、「C：合計特殊出生率が 2.1 より低い国」。A にはナイジェリアやタンザニア、B にはインドやメキシコ、C には日本や中国、ドイツなどが分類される。

ナイジェリアの現在の合計特殊出生率は、5 よりも高いが、国連は今後下がっていくと予測している。将来的に「2.6」に下がると予測するのが「高位」予測だ。「2.1」に下がると予測するのが「中位」予測で、「1.6」にまで下がるという予測が「低位」予測だ（下の図）。

同様の考え方で、B や C のグループの国々も、今後の合計特殊出生率を予測する（下の図）。こうして各国の合計特殊出生率を予測し、人口を計算したものが、本ページの世界人口の予測である。

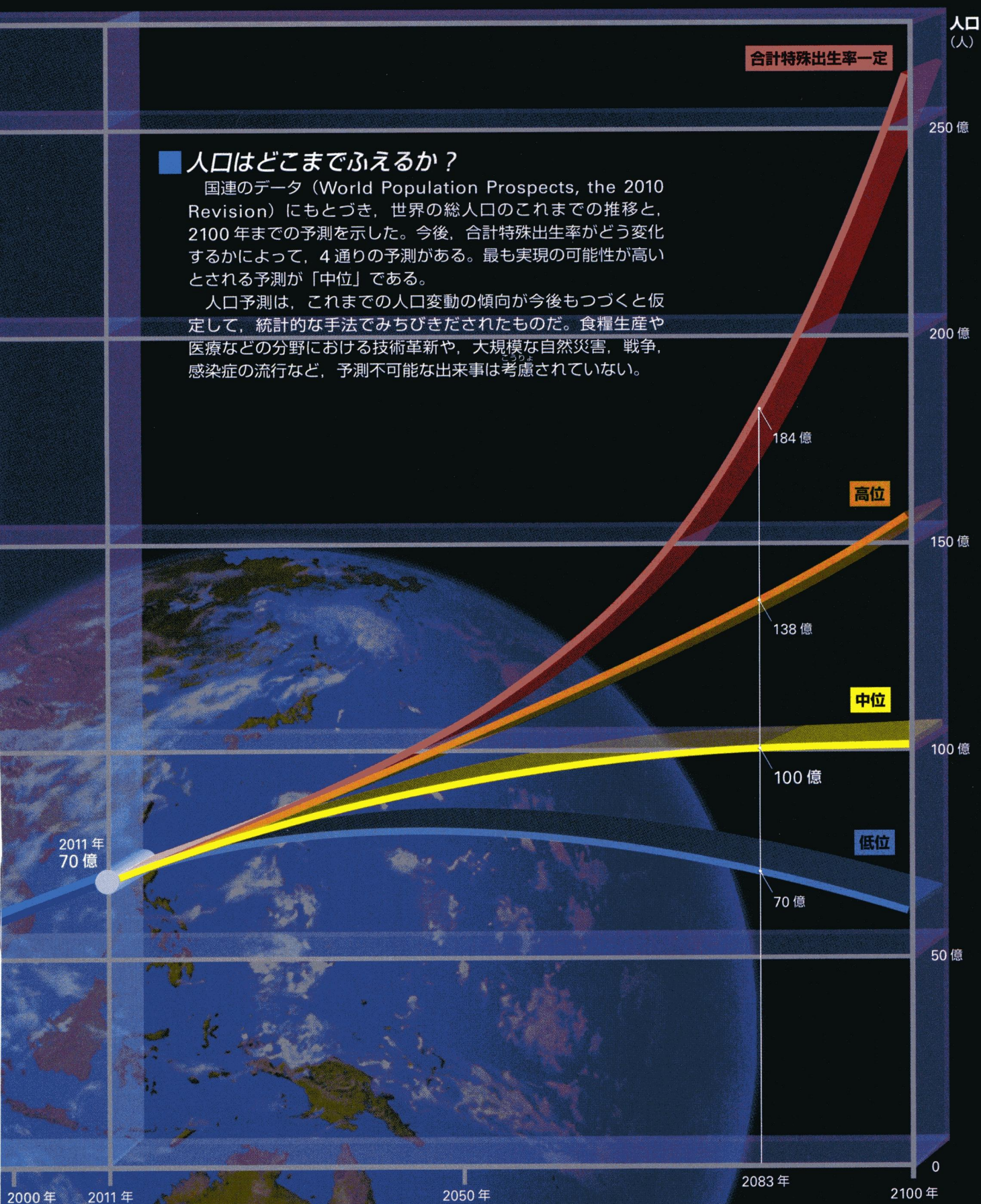


人口

■人口はどこまでふえるか？

国連のデータ（World Population Prospects, the 2010 Revision）にもとづき、世界の総人口のこれまでの推移と、2100年までの予測を示した。今後、合計特殊出生率がどう変化するかによって、4通りの予測がある。最も実現の可能性が高いとされる予測が「中位」である。

人口予測は、これまでの人口変動の傾向が今後もつづく仮定して、統計的な手法でみちびきだされたものだ。食糧生産や医療などの分野における技術革新や、大規模な自然災害、戦争、感染症の流行など、予測不可能な出来事は考慮されていない。



アフリカは 21 世紀もふえつづける。一方アジアは……

地域別の人口の推移を示した右のグラフを見ると、1950 年から 2011 年までに、アジアだけで 30 億人近くがふえている。20 世紀の人口爆発にアジアが大きく寄与したことがわかる。

ところが今後の予測をみると、現在 42 億のアジアの人口は 2050 年代に 51 億程度にまでふえたあと、減少しはじめる。これはともに 10 億以上の人口を抱える中国とインドで人口転換が終わり、少子化によって日本のように人口が減りはじめると考えられているからだ。

現在の人口がおよそ 13 億 5000 万である中国は、2026 年ごろに 14 億弱までふえたあと、減少をはじめると考えられている。現在 12 億 5000 万のインドは、2060 年ごろに 17 億程度にまでふえて、その後は減少すると予測されている。

21 世紀の人口増加のかぎをにぎるのはアフリカだ。人口転換が終わっていない国が多いアフリカは今後も増加をつづけ、世界で存在感を増していく。世界の人口に占めるアフリカの人口の割合は 2011 年には約 15%だ。それが、2100 年には約 36%にまで上昇すると予測されている。

人口予測は、あくまでも現時点で考えられるシナリオにもとづく予測だ。国立社会保障・人口問題研究所の金子隆一副所長は、次のように語る。「人口予測は、“現在の人口変動の傾向を引きのばした” ものです。将来の状況変化を見こして、未来の人口を“予言” するものではありません。予測できない出来事の発生により、今後の人口はプラスにもマイナスにも変化するのである。

人口トップ 10 (2100 年) 出典：国連中位予測

1 (2)	インド (アジア)	15 億 5000 万人
2 (1)	中国 (アジア)	9 億 4100 万人
3 (7)	ナイジェリア (アフリカ)	7 億 3000 万人
4 (3)	アメリカ (北アメリカ)	4 億 7800 万人
5 (29)	タンザニア (アフリカ)	3 億 1600 万人
6 (6)	パキスタン (アジア)	2 億 6100 万人
7 (4)	インドネシア (アジア)	2 億 5400 万人
8 (20)	コンゴ民主共和国 (アフリカ)	2 億 1200 万人
9 (12)	フィリピン (アジア)	1 億 7800 万人
10 (5)	ブラジル (中央・南アメリカ)	1 億 7700 万人
27 (10)	日本 (アジア)	9100 万人

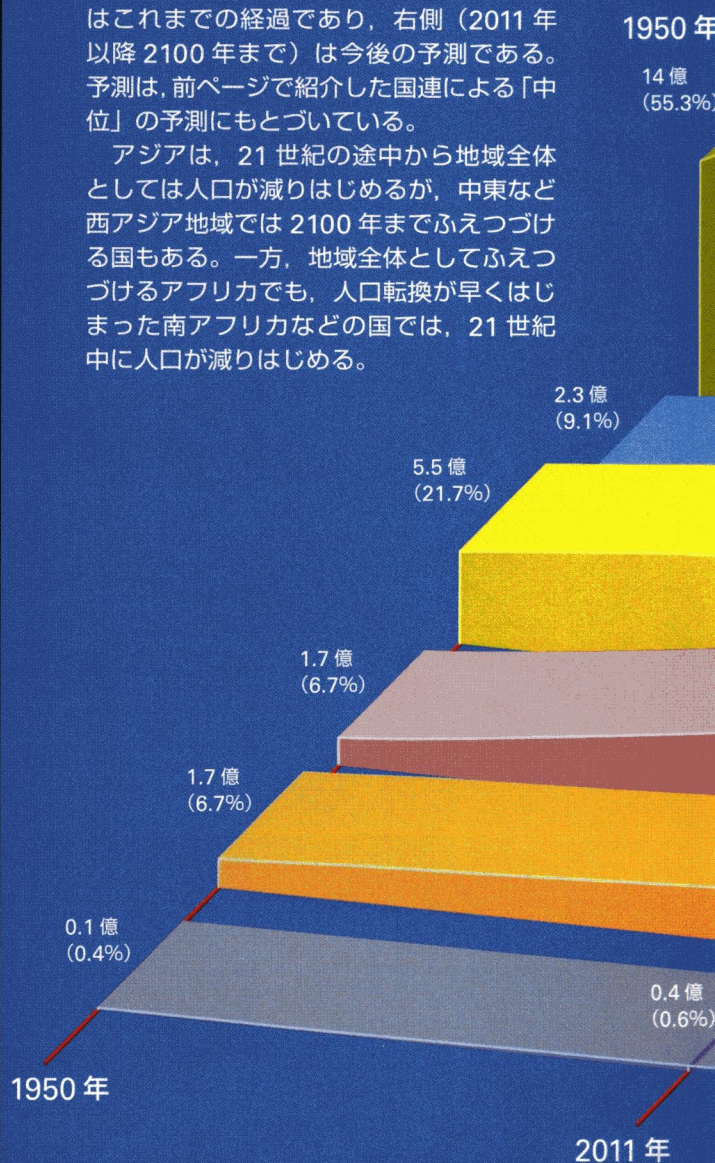
左端の数字は 2100 年の順位。かつこ内の数字は 2011 年の順位。

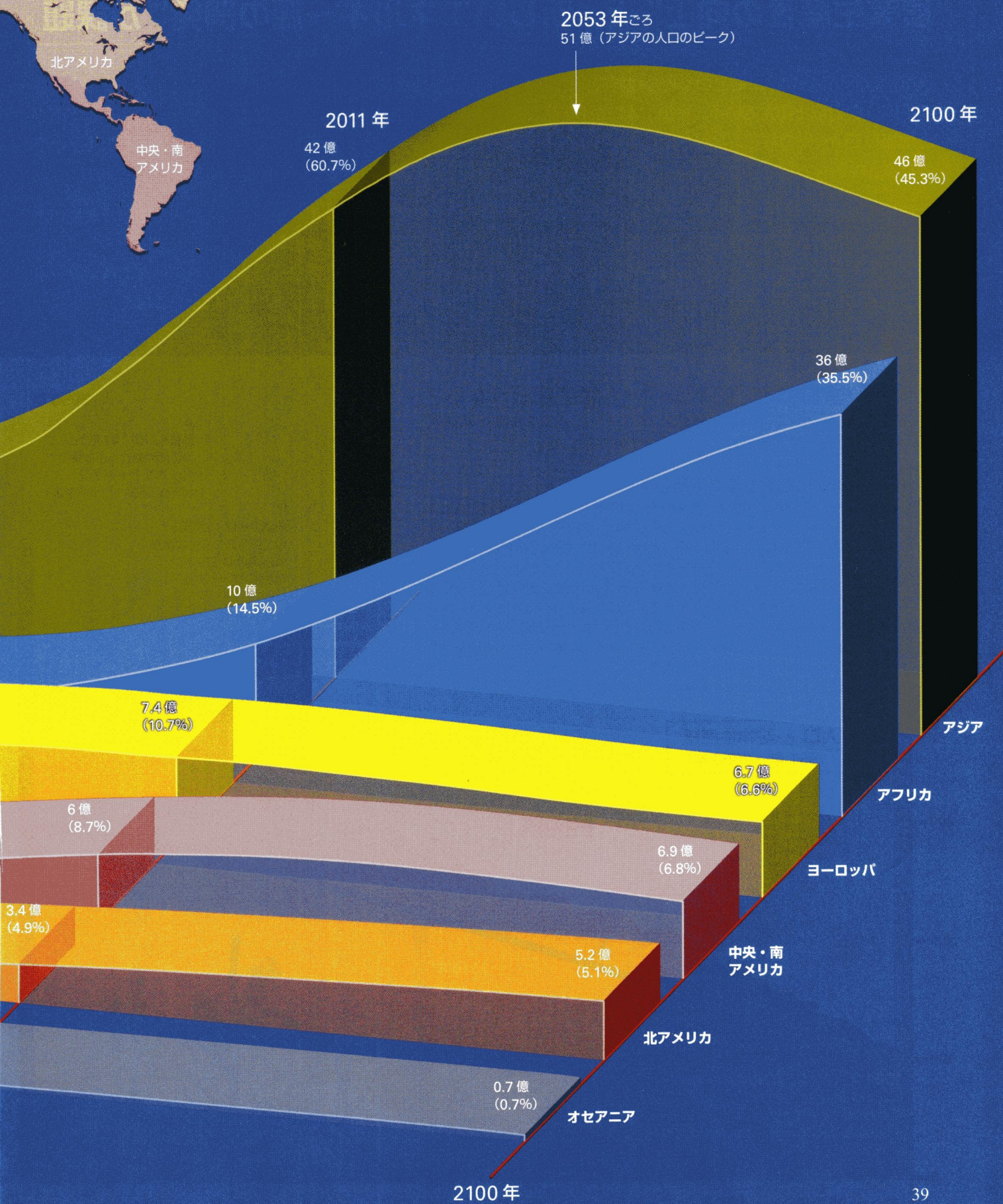


存在感を増すアフリカ

アジア、アフリカ、ヨーロッパ、中央・南アメリカ、北アメリカ、オセアニアという六つの地域（それぞれの範囲は上の世界地図参照）における人口の推移を示した。グラフの左側（1950 年から 2011 年まで）はこれまでの経過であり、右側（2011 年以降 2100 年まで）は今後の予測である。予測は、前ページで紹介した国連による「中位」の予測にもとづいている。

アジアは、21 世紀の途中から地域全体としては人口が減りはじめるが、中東など西アジア地域では 2100 年までふえつづける国もある。一方、地域全体としてふえつづけるアフリカでも、人口転換が早くはじまった南アフリカなどの国では、21 世紀中に人口が減りはじめる。





“農業生産性の向上”と“新しいエネルギー源の開発”が課題

2010 年の人口増加率にもとづくと、世界の人口は現在も 1 日に 20 万以上ふえている。今後、人口が 80 億、90 億と増加していくにつれて、食糧が足りなくなることはないのだろうか？

「世界の農業生産力にはまだ“余力”があります。人口が 100 億になっても世界的な食糧不足におちいる可能性は少ないでしょう」と、統計データから食糧問題などを分析する東京大学の川島博之准教授は語る。

過去 50 年間で人口は 2 倍以上にふえたが、食糧生産量はそれを上回るペースで増加してきた（左ページ下のグラフ）。今後数十年間で人口はさらに 3 割ほどふえると予想されており、必要となる食糧もふえる。

これまで食糧生産量が順調にふえてきたのは、農地がふえたからではなく、単位面積あたりの収穫量がふえたことによる。アメリカと西ヨーロッパ以外の地域の農地は、単位面積あたりの収穫量がまだそれほど高くなく、農業技術

「食糧」と「エネルギー」は今度どうなる？

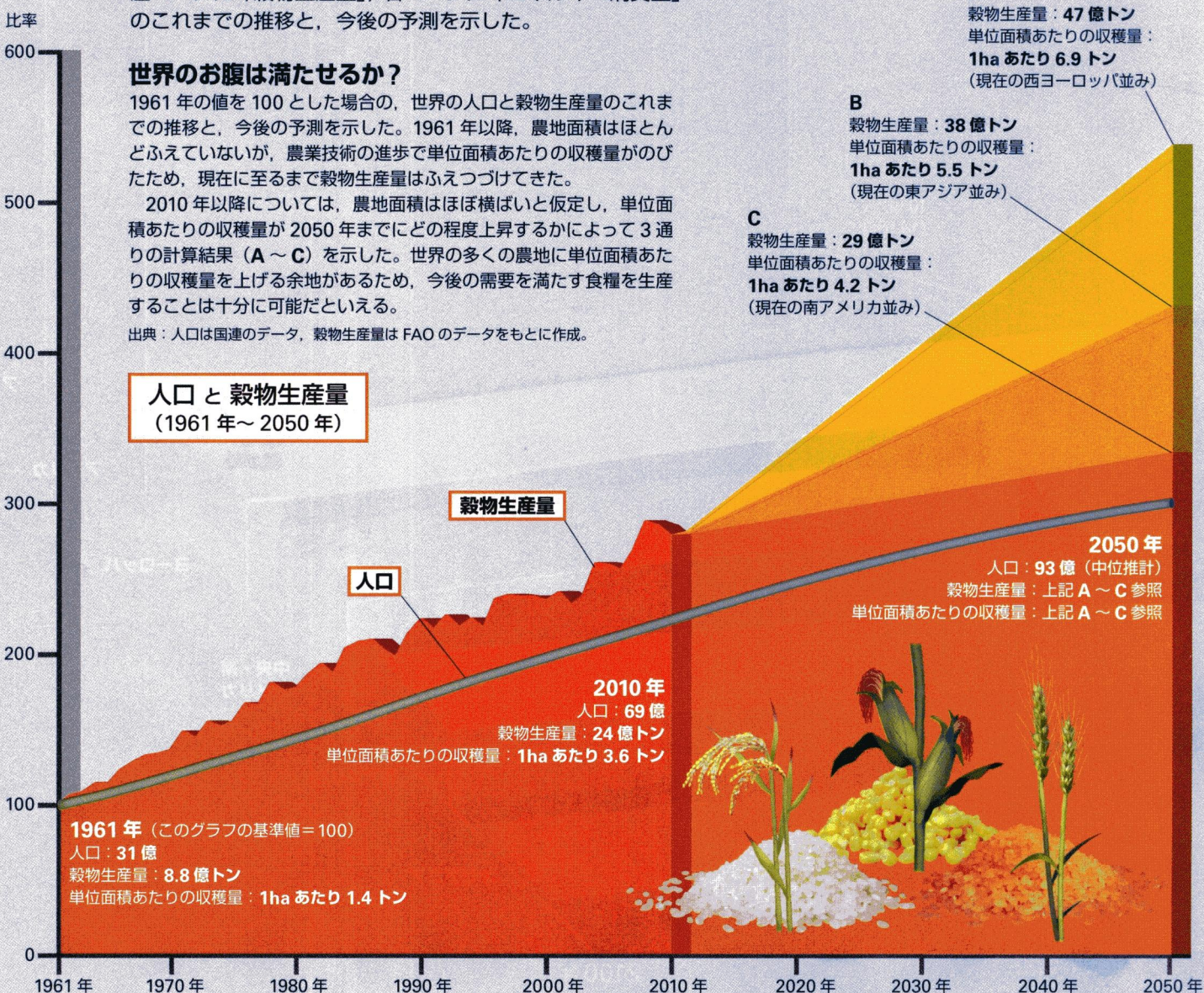
左ページに「穀物生産量」、右ページに「エネルギー消費量」のこれまでの推移と、今後の予測を示した。

世界のお腹は満たせるか？

1961 年の値を 100 とした場合の、世界の人口と穀物生産量のこれまでの推移と、今後の予測を示した。1961 年以降、農地面積はほとんどふえていないが、農業技術の進歩で単位面積あたりの収穫量がのびたため、現在に至るまで穀物生産量はふえつづけてきた。

2010 年以降については、農地面積はほぼ横ばいと仮定し、単位面積あたりの収穫量が 2050 年までにどの程度上昇するかによって 3 通りの計算結果（A～C）を示した。世界の多くの農地に単位面積あたりの収穫量を上げる余地があるため、今後の需要を満たす食糧を生産することは十分に可能だといえる。

出典：人口は国連のデータ、穀物生産量は FAO のデータをもとに作成。



を改善することで、今後向上する可能性が十分にあるという。まだまだ食糧生産量はふやせるというわけだ。

食糧と同じく、人口増加によって需要が増すものといえ
ば、石油や石炭などのエネルギー資源だ。世界のエネルギー
消費量は、19世紀以降、人口増加を上まわるペースで増
加してきた。一人あたりの消費量がふえてきたためだ。

中国やインド、ブラジルといった新興国の経済発展により、
世界のエネルギー消費量は、今後も人口増加を上まわ
るペースで増加すると考えられている。2010年から2030
年までに、人口はおよそ20%ほど増加するのに対し、世

界のエネルギー消費量は38%ほども増加すると予測され
ている（右ページ下のグラフ）。

現在、エネルギー消費量の9割近くを、石油・天然ガス・
石炭が占めている。これらの「化石燃料」とよばれる資源
にたよる傾向は、少なくとも今度数十年はつづくと予測さ
れている。ところが、化石燃料の資源量には限りがある。

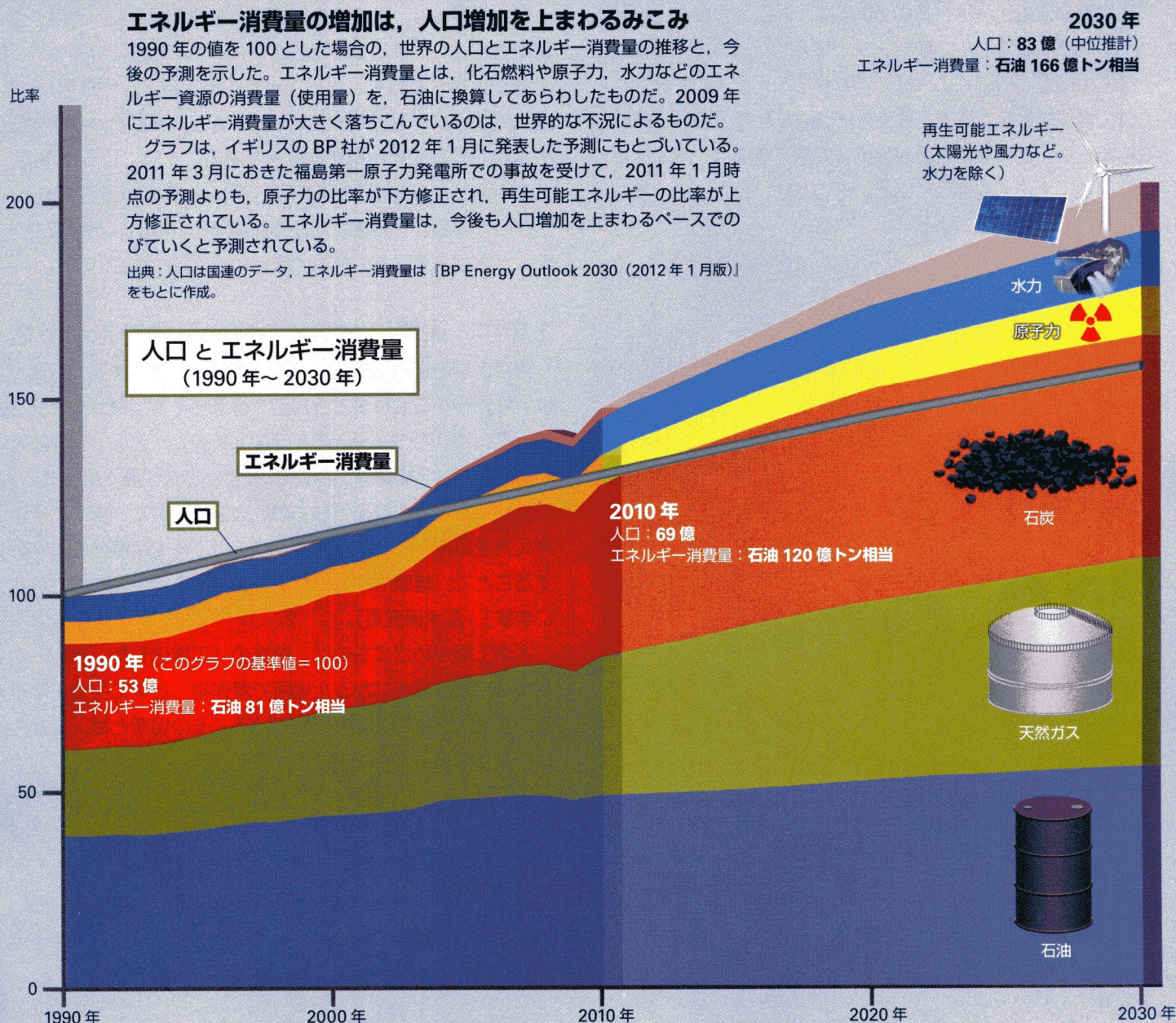
「化石燃料の使用量をなるべく減らす省エネ技術を開発
し、それをどう世界に普及させるか。そして、化石燃料に
かわる新たなエネルギー源をどのように開発するかが、エ
ネルギーに関する現在の課題です」（川島准教授）。

エネルギー消費量の増加は、人口増加を上まわるみこみ

1990年の値を100とした場合の、世界の人口とエネルギー消費量の推移と、今
後の予測を示した。エネルギー消費量とは、化石燃料や原子力、水力などのエネ
ルギー資源の消費量（使用量）を、石油に換算してあらわしたものだ。2009年
にエネルギー消費量が大きく落ちこんでいるのは、世界的な不況によるものだ。

グラフは、イギリスのBP社が2012年1月に発表した予測にもとづいている。
2011年3月におきた福島第一原子力発電所での事故を受けて、2011年1月時
点の予測よりも、原子力の比率が下方修正され、再生可能エネルギーの比率が上
方修正されている。エネルギー消費量は、今後も人口増加を上まわるペースで
のびていくと予測されている。

出典：人口は国連のデータ、エネルギー消費量は「BP Energy Outlook 2030（2012年1月版）」
をもとに作成。



Part3 100 億人時代の食糧生産

「イネ工場」は農業に革命をおこせるか？

技術革新の積み重ねによって、人類は 70 億までふえてきた。新たな科学技術の登場は、ときに大きく世界をかえ、将来の人口変動のシナリオにも影響をあたえる。

今後、人口は 100 億までふえて頭打ちになるのか、はたまた新たな人口増加の時代に突入するのか。Part3 では、食糧やエネルギー、高齢化問題などの分野で、世界をかえる可能性を秘めた最新の研究を紹介する。

世界の食糧生産は、この 50 年間、人口ののびを上まわるペースでふえてきた。前ページで紹介したように、今後も順調に生産量がのびていけば、これからふえる人口をまかなう分の食糧を生産することは十分に可能だと考えられている。

ただし、どんなに技術が進歩しても、農業は、基本的に自然環境に大きく依存している。そのため、ひとたび台風など

の自然災害や異常気象が発生すると、収穫量が激減する危険性をはらんでいる。また、農業は自然環境にも大きな影響をあたえる。農作物を同じ土地でつくりつづけると、土地の栄養がなくなり、土地が「やせて」しまう。過剰な肥料や農薬が、土地や水を汚染することもある。

周囲の環境から切りはなされた空間で、農作物をつくることができれば、外の環境に左右されず安定的な収穫を得ることができる。また、環境に負荷をあたえることもない。その方法の一つが「植物工場」だ。

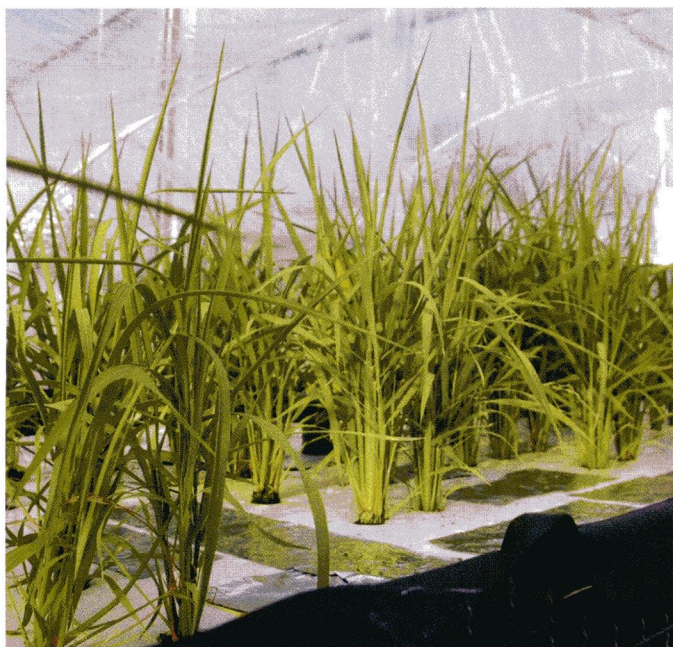
植物工場とは、その名のとおり、田畑ではなく、温度や湿度が管理された工場の中で農作物をつくる施設だ。基本的に土を使わず、肥料をとかした水で栽培する（水耕栽培）。完全に閉鎖された屋内で人工的な光で育てる場合と、半閉鎖型の施設で太陽光を利用する場合がある。すでに世界各地で、トマトやレタスなどが植物工場で栽培されている例がある。しかし、収穫までの期間が長く採算がとれないなどの理由から、イネや小麦などの穀物はほとんど栽培されていない。

1 年中、環境に左右されずに自動で米を栽培

東京大学の深水克郎^{ふこうすかつろう}研究員と、朝日工業社の鹿島光司^{かしまこうじ}博士は、種まきから収穫まで全自動で行う「イネ工場」の研究を行っている（右ページ上のイラスト参照）。「製品の量産技術で最先端^{さいせんたん}を走る半導体の製造では、すべての工程を数値化し、制御^{せいぎよ}することで、高品質なものを大量生産しています。その考え方を応用し、イネが育つすべての工程を数値化し、制御することで、経験^{けいけん}やかんにたよらないイネの生産をめざしています」（深水研究員）。

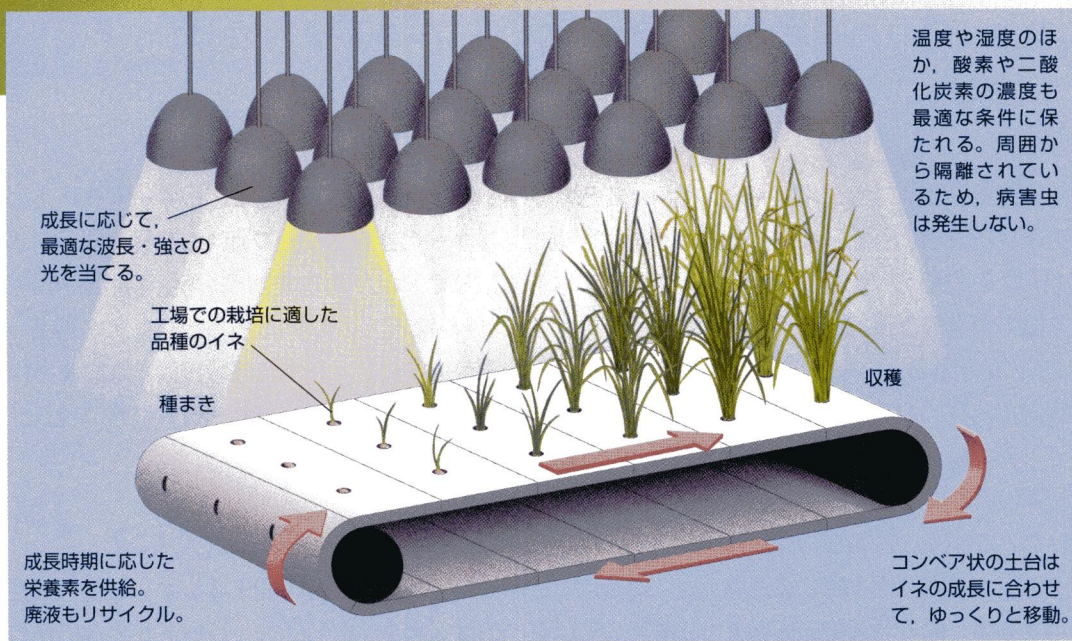
イネ工場がめざすものは、農業の「工業化」だ。また、これまで農業ができなかった場所で農作物、とくに主食となる穀物を生産することをめざしている。その場所とは、たとえば砂漠や南極であり、究極的には宇宙である。

現在の農作物の品種は、あるものは 1 万年以上の歳月をかけて、人間が改良してきたものだ。たとえば、野生のイネは本来、種（米）ができると、すぐに地面に落ちる性質をもっている。しかし、それでは収穫するのに都合が悪い。人間は、米ができて地面に落ちず、稲穂を保ちつづける品種を選抜



イネ工場の完成をめざして

上の画像は、東京大学にある実験施設の様子だ。右ページ上のイラストのようなイネ工場の実現をめざして、くりかえし試験栽培が行われている。施設内の温度や二酸化炭素濃度、光量のほか、イネの茎や葉の温度などを監視することで、水耕栽培でイネを育てるときに最適な温度や光、栄養条件などを探っている。



全自動でイネをつくる

左の図は、イネ工場の完成予想図を模式的にえがいたものだ。イネは、肥料をとかした水で栽培される。イネを植える土台はコンベア状になっており、図の右側へ向かってゆっくりと移動する。左端でまかれた種が、数か月かかって右端に到達するころには収穫できるほどに成長しているというしくみだ。種まきから収穫までの全行程を自動で行うことをめざしている。

工場内は、外部と隔離されており、イネの成長に最適な温度や湿度、酸素や二酸化炭素濃度に保たれる。また、個別のイネの成長段階に応じて、光や栄養を調節する。

し、現在のような品種をつくりあげてきた。

工場でイネをつくる場合、地面での栽培とはまったくことなる性質が求められてくる。「周囲から隔離された工場では、強い風も吹かず、温度も一定で、病害虫もいません。現在栽培されている品種のように茎が太く、寒さに強く、虫がつきにくい性質をもつ必要はまったくないのです」（鹿島博士）。

極端なことをいえば、工場ではイネをつるして上下逆さまに育てることも可能だ。その場合、重力にさからってのびるための太くて強い茎は不要になる。さらに、できた米は自然に落下するほうが、収穫の手間がはぶけてよい。

工場での生産は、春に苗を植えて、秋に収穫するといった季節や時間の常識にとらわれる必要もまったくない。1か月ずつ時期をずらして種まきをしておけば、1年を通して、1か月おきに米を収穫できる。さらに、広い田んぼも必要ない。たとえば高層ビルの中で生産すれば、せまい土地で田んぼ何枚分ものイネをつくることも可能になる。

必要最小限の光と栄養で効率的に生産

現在、研究グループでは、温度や光量の変化に対するイネの反応などを計測しながら生育実験をくりかえし、どんな条件がイネの成長を最大限にするのかを探っている。

工場では、温度や湿度を管理できるので、植物の成長する能力を最大限に引きだす環境を、人工的に作りだすことができる。それぞれの成長段階で必要な栄養や光の「質」や「量」

が正確にわかれば、必要最小限の栄養と光のみで成長させることが可能になる。それまであたえていた余計な栄養や光を省くことができるため、きわめて効率的な生産が可能になる。このような研究成果は、イネ工場だけでなく、既存の農業の効率化にも貢献することができる。

成長段階によるちがいだけでなく、外部の環境や刺激によって、イネの栄養素の取りこみ方がどのように変化するかについても計測しようとしている。植物が栄養素をどれだけ取りこむか、あるいは取りこまないかを知することは、植物に果たえた肥料が環境中に流れて、どれだけ自然環境に負荷を加えているかををはかることにつながる。

2030年には極限環境で稲作を実現したい

一般的に、植物工場の課題は「経済性」だ。現段階でイネ工場をつくろうとすれば、施設の建造費や栽培のための光熱費が高額で、とても採算がとれる状況ではない。ただし、「効率的に栽培する方法が確立すれば、人件費も農薬代もかからずに安定的な収穫が得られるので、ある程度までコストは下がるはずだ」（深水研究員）。

研究グループでは、2030年ごろに、極地や砂漠などの極限環境で、試験的にイネ工場を稼働させたいと考えている。将来的には、イネやさまざまな農作物の工場が世界各地に設置され、いつでもどこでもどんな環境でも食糧が生産できる時代がやってくるのかもしれない。

Part3 100 億人時代のエネルギー

無尽蔵のエネルギー源として期待の太陽光。普及の課題とは

人類は、産業革命によって、石炭という新たなエネルギーを本格的に使いはじめた。その後、石油というさらにあつかりやすいエネルギーを手に入れた。これらの“新しいエネルギー”を手に入れたことが、人口の爆発的な増加を支え、今日の繁栄をつくりあげたといっていよう。

石炭や石油は、限りがある資源だ。長い目でみれば、いつかは必ずなくなってしまう。そこで、新たなエネルギー源として期待が高まっているのが、「再生可能エネルギー」だ。具体的には、太陽光や風力、地熱などを指す。これらのエネルギーは、(地球や太陽があるかぎり) つきることがないのが特徴だ。また、エネルギーを利用する際、地球温暖化の原因とされる二酸化炭素を出さないという特徴もある。

石油を使わず、二酸化炭素を排出しないためには、なるべく多くのエネルギーを再生可能エネルギーでまかなえよように思われる。たとえば、日本の国土の 10% の面積に太陽電池をしきつめるだけで、日本の全エネルギー消費をまかなうことが可能になるという試算がある。

ところが 2010 年時点で、世界の全エネルギー消費に占める再生可能エネルギーの比率は、わずか 1.3% 程度だ。日本での比率は 5% 程度で、水力発電が主だ。再生可能エネルギーは、なぜあまり普及していないのだろうか？ エネルギー問題に詳しい東京大学の荻本和彦特任教授は、次のように語る。「普及をはばむ壁は、二つあります。それは『経済性』と、電力の『需給調整』の問題です」。

太陽光発電のコストはさらに安くなる

現時点で日本そして世界に再生可能エネルギーがそれほど普及していないのは、何より経済的なメリットが少ないからだ。つまり、再生可能エネルギーはコストが「高い」のだ。

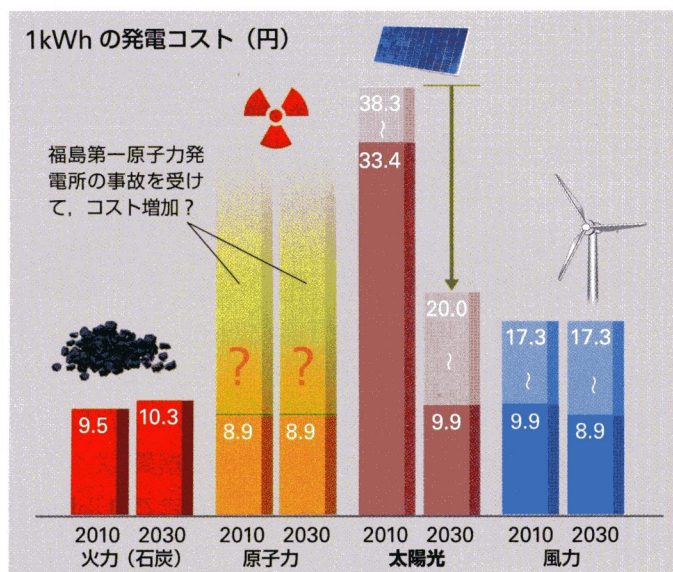
現在の日本で、発電にかかる費用(単価)を燃料別に比較した場合、最も安価なものは石炭を使った火力発電だ(左下のグラフ参照)。2010 年時点で、太陽光発電や風力発電の単価は、火力発電にくらべておよそ 2 ~ 4 倍も高い。

再生可能エネルギーの中では、太陽光発電が最も発電コストが下がる可能性が高いと、荻本特任教授は語る。「風力発電は、現在最も経済的な再生可能エネルギー発電ですが、そのコストはこれから劇的に下がる要素が見あたりません。一方、太陽光発電のコストは、太陽電池の性能向上と大量生産による製造コストの低下によって、まだまだ下がる余地があります」(荻本特任教授)。

現在の太陽電池の主流は、シリコン(ケイ素)の結晶を使ったものだ。2010 年に出荷された太陽電池の 8 割以上を占める。太陽電池が受けた太陽光のエネルギーをどれだけ電力にかえられるかという「変換効率(セル変換効率)」は、15% 前後だ。日本の新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は、2017 年までに変換効率を 20% 近くに上昇させることを目標にかけけている。

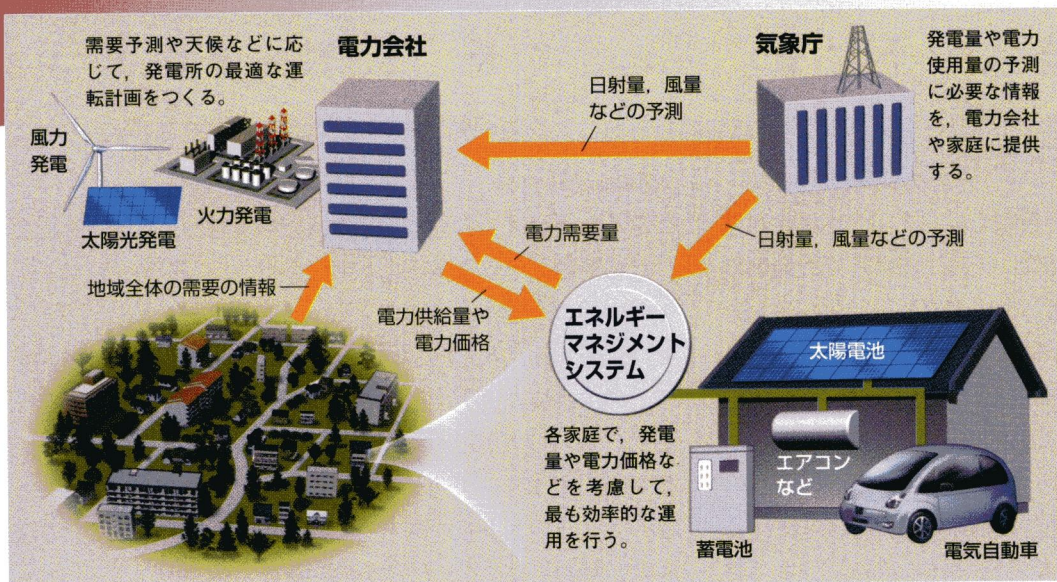
まだ実用化はされていないが、理論上の変換効率が 60% をこえるような「量子ドット型」という新しい原理の太陽電池の研究も、大学やメーカーで進んでいる。

変換効率が低くても、安価な太陽電池が出まわれば、日本でも一気に普及しないだろうか？ 「日本の小さな家の屋根に設置するには、ある程度の変換効率の高さが必要です。た



発電にかかる費用の比較

四つの発電方法について、2010 年の発電費用と 2030 年に予測される発電費用を比較した(出典: コスト等検証委員会)。1 世帯が 1 か月に使用する電力は、平均して 400kWh (キロワット時) 程度だ。太陽光発電は、次世代の革新的な技術が実用化されることで、さらなるコストダウンが期待されている。



スマートグリッドとは
「スマートグリッド」のしくみを、模式的に示したのが左の図だ。気象庁は、発電量や電力使用量を予測するための情報を提供する。電力会社は、その日の電力の需要と供給の予測に応じて、発電所の最適な運転計画を立てる。各家庭では、エネルギー・マネジメントシステムが電力に関する情報をとりまとめて、最適な運用を行う。電力が余りそうならその時間に需要を移動したり、電気自動車や蓄電池に電力をためたりする。また、不足しそうなほかの時間に需要を移動したり、電力の使用をおさえたりする。

に安いだけでなく、小さくて変換効率が高く、エネルギー供給インフラとしての信頼性が高い太陽電池システムが登場することが、日本での普及に必要でしょう」(荻本特任教授)。

かぎをにぎる「スマートグリッド」と「蓄電池」

再生可能エネルギーのコストが改善できたら、次にこえるべき壁は「需給調整」の問題だ。再生可能エネルギーは多くの場合、電力に変換して利用する。電力は、基本的に石油や石炭のようにためておくことができない。蓄電池にためることはできるが、現状では非常に高価なため、大量の蓄電池を現実に利用するのはむずかしい。電力を使って貯水池に水をくみ上げておき、あとで水力発電に利用する「揚水発電」は、自然を利用した巨大な蓄電池といえる。ところが今後、揚水発電を大規模にふやすのはむずかしく、電力の損失も少なくない。そこで現在の電力供給システムは、基本的に電力をためることはせず、使う分だけ発電する方法で需要と供給のバランスをとっている(需給調整)。

電力が不足するのは問題だ。ところが、需要と供給の変動を調整しきれず、発電しすぎて電力が余ることも同じくらい大きな問題だ。電力が余ると発電機の運転が不安定になり、結局は大きな停電を引きおこす。需要と供給を調整することは、安定的な電力需給の基本なのだ。

太陽光発電や風力発電は、季節や天気、時間帯によって発電量が変動する。現状の電力システムは、再生可能エネルギーが大量に導入された場合の発電量の変動に対応できるほどの、需給のバランスを調整する能力をもっていない。

それを解決する方法の一つが、「スマートグリッド(賢い送電網の意)」とよばれる技術だ。電力をつくる側と使う側がたがいに需要と供給の情報をやりとりし、需要を調整する新たな要素を加えること(「需要の能動化」という)で、従来の電力システムよりも高い需給調整力を実現する(上のイラスト参照)。スマートグリッドは、電力をつくる側(供給側)だけでなく、電力を使う側(需要側)でも使用量を調整することで、需要と供給のバランスをとる能力を高めるのだ。

EU(欧州連合)は、ここ数年、風力発電の比率を高めてきた。その結果、EUの全エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの比率は約10%にまで高まっている。「EUも需給調整の問題に直面しています。当面は既存の発電所の調整力を徹底的に活用することで切り抜ける予定です。次の段階として、揚水発電所を新設するほか、需要の能動化により電力システムの柔軟性を高めることで、さらなる再生可能エネルギーの導入を実現しようとしています」(荻本特任教授)。

将来は、大容量の蓄電池が量産されるようになり、価格が下がると予想されている。蓄電池が普及すれば、需要を調整する新たな要素が加わることになるので、より多くの再生可能エネルギーを受け入れることができるようになるはずだ。

再生可能エネルギーの導入は世界的な流れだ。まだコストが高く、需給調整の問題もあるが、将来的な資源の枯渇や環境問題が導入をあとおししている。かつて化石燃料の獲得が世界をかえ、人口増加を支えた。同じように再生可能エネルギーの普及が世界をかえ、人口の動向にも影響をあたえるかもしれない。

Part3 100 億人時代の 高齢化と労働力

高齢化で生じる人手不足を、人とふれあうロボットが補う

現在、先進国といわれる国々を中心に、人口の高齢化が進んでいる。子供の数が減った結果、人口に占める高齢者の割合が急速に高くなっているのだ。世界で最も高齢化が進んでいる国が日本だ。2011 年の日本の高齢化率（人口に占める 65 歳以上の割合）は、約 23%だ。しかも日本は、高齢化の進行が非常に速かった。ほかの国をあっという間に追い抜いて、世界一の高齢化進行国となった（下のグラフ参照）。

急速に高齢化が進むことで問題となるのが、社会を支える働き手が急速に少なくなることだ。15～64 歳の人口は、「生産年齢人口」とよばれる。この世代が、いわゆる社会の働き手だ。2011 年の日本の生産年齢人口の割合はおおよそ 64%だ。それが 2025 年には約 59%、2050 年には約 52%へと急速に減っていくことが予想されている（国立社会保障・人口問題研究所による予測）。

労働力が減る一方、高齢者の増加に比例して、^{かいご}介護や医療にこれまでより多くの人手が必要になってくる。働ける人が

少なくなるうえ、介護が必要な人が多くなっていく。いったいこの問題にどうやって対応すればよいのだろうか？

日常生活に入りこむロボットは安心感も必要

このような人手不足の問題を、日本が得意とする「ロボット」の力で解消しようと研究をつづけているのが、産業技術総合研究所の松本吉央研究グループ長だ。ここでいうロボットとは、カメラやセンサーなどで周囲の状況を読みとって、ある程度自動的に動くことができる機械のことを指す。

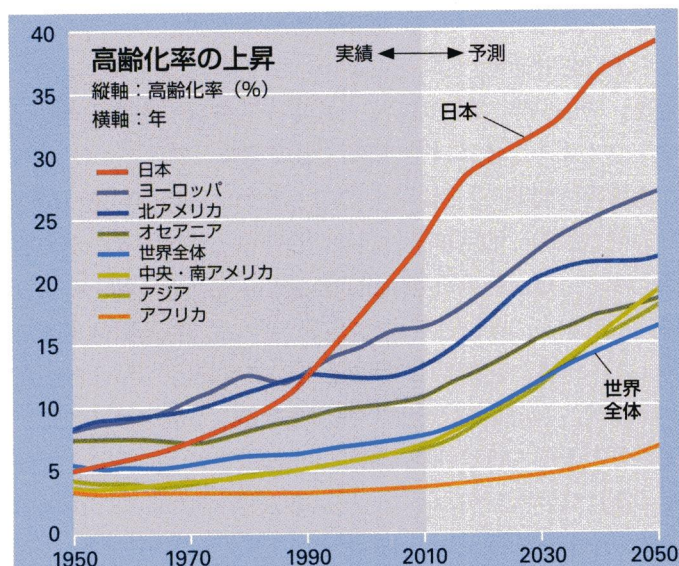
松本研究グループ長らは、「生活支援^{しえん}ロボット」や「サービスロボット」とよばれる種類のロボットを開発している。たとえば、部屋の中で物をとるなど、日常生活を支援するロボットアームや、多彩な表情で人との自然な対話を行うロボットなどが開発中だ（右ページの画像）。

生活支援ロボットは、車の塗装や半導体の製造など、製品を取り扱う「産業用ロボット」と大きくちがう点がある。生活支援ロボットは、私たちの生活の中に入りこみ、直接、人とふれあうロボットであるという点だ。そのため、人に危害を加えることのない高い安全性のほか、周囲の状況を見きわめる能力、操作のしやすさ、見た目の安心感など、産業用ロボットはことなる性能が求められる。

「人の生活を助けるロボットは、“支援しすぎ”で本人のやる気や体力が落ちてしまう『^{はいよう}廃用症候群』の問題など、ロボットの性能以外の問題も検討する必要があります。実用化に向けて、どんな技術がどこまで求められているのかを幅広く検証しています」（松本研究グループ長）。

まずは医療や介護の現場での活躍に期待

産業用ロボットが誤作動をおこしても、不良品ができる程度ですむ。しかし、生活支援ロボットが誤作動をおこすと、人に危害をあたえてしまうこともあるため、非常に高い安全性が求められる。「人に直接ふれるロボットは、普及に向けて高い壁があります。これは裏を返せば、現状では、どんな重労働でも人に直接ふれる作業は人がやるしかないと意味します。“人に直接ふれる重労働”を支援するロボットには、非常に高い期待が集まっています」（松本研究グループ長）。



2050年、日本人の約4割は65歳以上

上は、世界の高齢化率（人口に占める 65 歳以上の割合）を示したものだ。2010 年以降の予測は、国連による「中位」の予測にもとづいている（36 ページ参照）。日本ほかの国々くらべて、高齢化の進行が非常に速かった。これは出生率の低下が急激に進行し、子供の数が減ったため、相対的に高齢者の比率が高まったことが原因だ。今後、日本のみならず、世界中で高齢者の割合が高まっていく。



開発中の生活支援ロボットたち

左側は、腕や手に障害をもつ人の生活支援を目的とする小型ロボットアーム「RAPUDA^{ラピューダ}」。RAPUDAは、500グラムまでの物を持ち上げることができる。人間の日常生活の動作を分析した結果、動作の約9割が「300グラム以下のものを持ち上げる」こととなりたっているという研究結果がある。つまり、RAPUDAは日常の動作のほとんどを支援できるというわけだ。

右側の画像で右奥のいすに座っている“女性”は、人が安心して対話できるロボットの実現をめざしてつくられた女性型ロボット（アンドロイド）だ。対話している人の顔をカメラで読みとり、笑顔や怒った顔など多彩な表情をまねることができる。この画像のように“うなずき役”として診察中の医師のうしろに置くと、診察に対する患者の満足度が上がったという実験結果がある。

ひとたび私たちの生活の中にロボットが普及すれば、労働環境が一変する可能性を秘めているということだ。

“人に直接ふれる重労働”がとくに多いのが、医療や介護の現場だ。日本は、世界で最も産業用ロボットが普及しているロボット大国である。ところが医療や介護の現場には、患者をベッドから持ち上げたり、となりのベッドに移したりする重労働を支援する、比較的単純な動作の機器ですら、ほとんど普及していない。

一方、オーストラリアなどの国では、医療や介護の現場で、そのような機器があたりまえのように活躍している。看護師や介護士の負担を減らすため、「No Lift Policy^{ノーリフトポリシー}（持ち上げない方針）」という考え方が採用されている。これは、患者の移乗などの重労働を行う際には、人の力だけで行わず、必ずリフトなどの機器を使って行わなければならないという方針だ。

オーストラリアなどで使われている介護支援の機器は、人を持ちあげたり、寝ている人をとなりに移動させたりするもので、技術的にそれほど高度なものではないという。「日本のロボット技術があれば、日本のせまい病院や介護施設でも

使いやすい、より高度でコンパクトなものをつくるのは十分可能でしょう」（松本研究グループ長）。

2025年ごろの普及開始をめざして

生活支援ロボットの実用化には、機能・価格・安全性の三つの要素のバランスが必要だと、松本研究グループ長は説明する。とくに安全性については、いまだに安全基準がはっきりと定まっておらず、実用化をさまたげる大きな要因になっている。それを解決するため、2010年に生活支援ロボットの安全規格を定めるための「生活支援ロボット安全検証センター」が、茨城県つくば市に開設された。

「高齢化が進行し、労働力が不足することを考えると、日本では2025年ごろには、生活支援ロボットが普及しはじめていることが理想です。安全規格を定めることは、普及に向けての大きな一歩です」（松本研究グループ長）。

現在の社会はすでに、掃除や洗濯、食器洗いなど、日常生活のさまざまな作業が機械によって自動化されている。現状は人が行うしかない残りの作業も、数十年後には、すべてロボットが行ってくれているかもしれない。

Part3 100 億人時代の 寿命と健康

長寿遺伝子の発見が“超長寿命”時代のとびらを開く

2011 年の日本の平均寿命は、女性が 86.39 歳で世界 1 位、男性は 79.64 歳で世界 4 位である。

平均寿命の伸びとともに、「百寿者」^{ひゃくじゅうしゃ}とよばれる 100 歳以上の人も急増している。1950 年、日本の百寿者は 100 人程度だった（80 万人に 1 人の割合）。それが 2011 年の日本では、4 万 7000 人にまでふえた（2700 人に 1 人の割合）。百寿者は、世界で急増しているという。いわゆる先進国だけでなく、発展途上国とよばれる国々でもふえているようだ。

人はだれしも健康で長生きしたいと願うものだ。慶應義塾大学医学部の広瀬信義診療部長^{ひろのり のぶよし}らは、500 人以上の百寿者の心と体、遺伝子などを調査し、長寿の秘けつを探っている。「百寿者は、健康長寿の代表者です。百寿者に共通する性質を明らかにすることで、究極的には“健康長寿の薬”などもつくれるかもしれません」（広瀬診療部長）。

100 歳をこえると“死にくくなる”

百寿者ともなると、ほとんど全員が何らかの病気をわずらっている。中でも「高血圧」が多く、約 60% の人がわずら

っている。その一方で、興味深いことに「糖尿病」^{とうにょうびょう}や「動脈硬化」^{こうか}の人は少ないという。糖尿病をわずらっている百寿者の割合はおおよそ 6% だ。70 歳代では 20 ～ 30% の人が糖尿病をもっているというから、百寿者では明らかに少ない。動脈硬化についても、90 歳代では 80% 以上の人に症状があるのに対して、百寿者では 60% 程度だ。

また、60% の百寿者は、一度も脳卒中、心疾患、がん（日本人の 3 大死因）にかかったことがない。「100 歳まで生きる人は、何らかの理由で老化の進行が遅く、老化とともに増加する脳卒中などの病気に“まだかかっていない”可能性あります。もしくは、病気にかかりにくい何らかの性質をもっていると考えられます」（広瀬診療部長）。

百寿者は、ほかの年代とくらべ、亡くなる際の死因もことなる。100 歳未満の年代は、脳卒中や心疾患、がんで亡くなることが多い。ところが 100 歳をこえると、病気^{きよじやく}よりもむしろ、栄養状態の低下や日常生活動作の低下など、「虚弱」が原因で亡くなるが多くなる。なお、百寿者は感染症に強く、ほとんど風邪を引くことがないという。

通常、人は年齢とともに死亡率が高くなる。ところが 100 歳をこえると、90 歳代よりも死亡率はふえるどころか低下するという。105 歳をこえると、100 歳よりもさらに死亡率は低下する。「長生きすると死にくくなるという現象は、人間以外の生物でも確認されています。ただし、その理由は、まだわかっていません」（広瀬診療部長）。

女性・栄養状態・開放性が長寿の条件

広瀬診療部長らの調査によって、100 歳まで長生きするための重要な条件として、次の三つが浮かび上がってきたという。それは「女性である」、「栄養状態がよい」、そして「開放性（新しいことを受け入れる性格）」だ。

日本では、女性の百寿者が圧倒的に多い（男性の 4 倍）。なぜ男性より女性のほうが、平均寿命が長く、百寿者も多いのか、はっきりとした理由はまだわかっていないようだ。「男性のほうが社会的なストレスにさらされる機会が多かったり、飲酒や喫煙の量が多かったりすることが原因で短命^{きつせん}だという説がありますが、解明されていません」（広瀬診療部長）。

アポタンパク E (Apo E)

1994 年に、百寿者と若年者の遺伝子の比較によってみつかった。血中でコレステロールを運ぶタンパク質をつくる遺伝子。E2、E3、E4 という三つの型があり、百寿者には E2 の保有者が多い。

ADAR2 と ADAR3

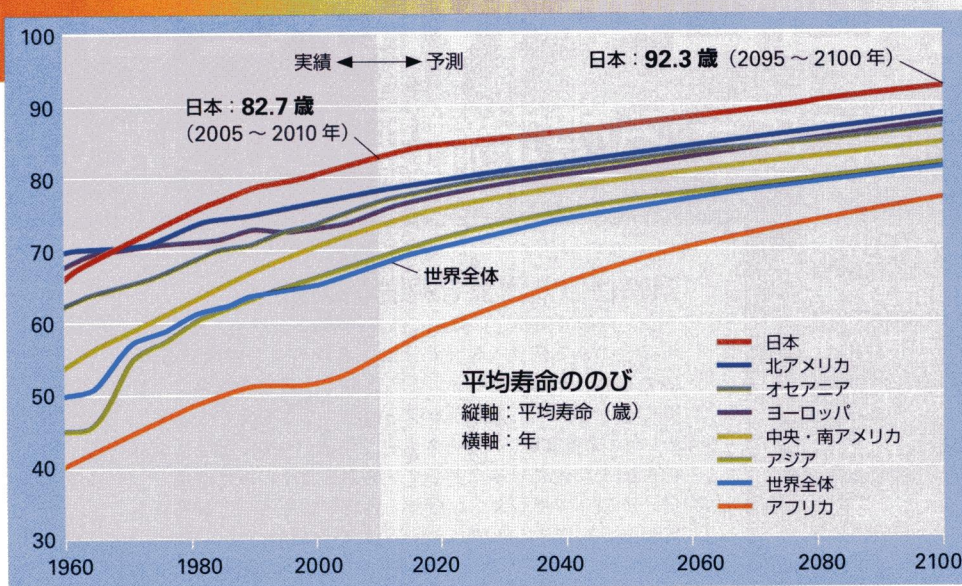
2009 年、百寿者の全遺伝情報（ゲノム）の探索からみつかった。ADAR がつくるタンパク質は、細胞内の RNA（リボ核酸）という物質に作用することで、さまざまな生物現象に関与すると考えられている。

サーチュイン (Sirtuin)

遺伝子のはたらきを調節する機能をもつ。ハエやネズミ、サルなどで、カロリー制限によって寿命がのびることが知られている。サーチュイン遺伝子はカロリー制限によって、活性化するといわれている。

「長寿遺伝子」の候補

これまでに長寿に関連するとされる遺伝子は、いくつか報告されている。そのうち、三つを紹介する。これらの遺伝子はすべての人がもっている一般的なものだ。しかし百寿者は、特徴的な「型」を多くもっていたり、はたらきが強かったりする。いずれも長寿との関連が指摘されてはいるが、メカニズムは不明な点が多い。



平均寿命はどこまでのびるか？

左の図は、男女あわせた平均寿命のこれまでの推移と、今後の予測を示したものだ(国連による推計)。日本は1980年代以降、長寿世界一の座にあり、今後も1位でありつづけると予想されている。日本の男女あわせた平均寿命は、2075年ごろに90歳をこえるみこみだ。

国連による平均寿命の予測は、これまでの傾向をもとに統計的にみちびきだされたものだ。組織や臓器を再生させる「再生医療」や、問題のある遺伝子を補正して病気を治す「遺伝子治療」など、革新的な医療技術が今後普及した場合、予測をこえて大きく寿命がのびる可能性がある。これまでの個人の長寿記録はフランス女性の122歳だが、この記録も大幅に更新されるかもしれない。

「栄養状態がよい」ことは、病気にかかりにくく、日常の活動量も多くなるので、長生きに必要な条件だといえる。百寿者は食べ物を飲みこむ筋肉が衰えておらず、普通の食生活を送れる人が多い。

世界中で標準的に使用されている性格検査用のアンケートを使って百寿者を調査したところ、「神経症傾向」、「外向性」、「開放性」、「調和性(きちょうめんな性格)」、「誠実性」の五つの要素のうち、男女に共通して「開放性」が高かったという。「新しいことを受け入れるオープンで前向きな性格が、長生きしやすい性格といってよいでしょう」(広瀬診療部長)。

超百寿者の iPS 細胞で長寿遺伝子にせまる

長寿県として知られる沖縄で、長寿者の家系を調査したところ、百寿者の家系は長生きの人が多かったという。これは何らかの「長寿遺伝子」があるためだろうか？

「その遺伝子をもっていれば長生きできるという『長寿遺伝子』の候補が、いくつか報告されています」(広瀬診療部長)。

たとえば、百寿者は病気になりにくくする遺伝子(防御因子)をもっているという説がある。現在、「Apo E」という、コレステロール濃度やアルツハイマー病の発症に関与していると考えられる遺伝子が、長寿に関連する遺伝子として研究されている。Apo E 遺伝子には、E2、E3、E4 という3種類の型があるが、百寿者は E2 の型をもつ人が多い。

この Apo E 遺伝子のように、特定の型が百寿者に多くみられる遺伝子はいくつかみつかったが、長寿との因果関

係が不明なものが多いという。「はっきりと長寿遺伝子とよべるものは、まだみつかっていません」(広瀬診療部長)。

ヒトには、2万個程度の遺伝子があるといわれている。現在、広瀬診療部長らは、百寿者や超百寿者(105歳以上)の遺伝子と、ほかの年代の人の遺伝子を、網羅的に比較する研究を行っている。また、広瀬診療部長らは、2011年に110歳の男女11名の細胞から「iPS細胞(人工多能性幹細胞)」をつくりだした。iPS細胞とは、さまざまな組織や臓器になることができる細胞だ。今後、110歳のiPS細胞から神経細胞などをつくり、その性質を解析する予定だという。研究の手法は、年々進化している。「数年以内に長寿遺伝子はみつかると考えています」(広瀬診療部長)。

2100年、日本人の平均寿命は90歳をこえていると予想される。iPS細胞などを使って組織や臓器を再生させる「再生医療」など、新たな医療技術の進歩によっては、平均寿命がさらに劇的にのびる可能性もある。寿命ののびは、これまで人口転換や少子高齢化を社会にもたらしてきた。さらなる寿命ののびは、社会にどんな影響をおよぼすのだろうか。

人類はこれまで、技術革新の積み重ねによってやしなえる人口(定員)を拡大してきた。今後、食糧生産やエネルギー、医療などの分野ですぐれた技術が新たに登場すれば、劇的に定員がふえることもおこりうる。人類の未来を切り開いていくのは、ほかならぬ人類自身なのだ。

(担当：編集部 福田伊佐央)

最新想定 西日本M9と首都

なぜ、従来を大幅にこえる想定結果となったのか

2012年3月末、「南海トラフ」での発生が懸念されている巨大な地震の“最悪ケース”について、震度と津波の想定結果が内閣府によって公表された。それによると、地震の規模は、東北地方太平洋沖地震と同等のマグニチュード9または9.1、津波の高さは、最大で34.4メートルに達する地域があるという。

また、首都圏での発生が懸念されている「首都直下地震」の新たな震度想定も、文部科学省から発表された。こちらは、首都圏でも震度7の地域が点在するとの結果である。

新たな想定はいずれも、従来のものよりも深刻な想定となっている。想定結果の内容と、その計算根拠を読み解いていこう。

協力

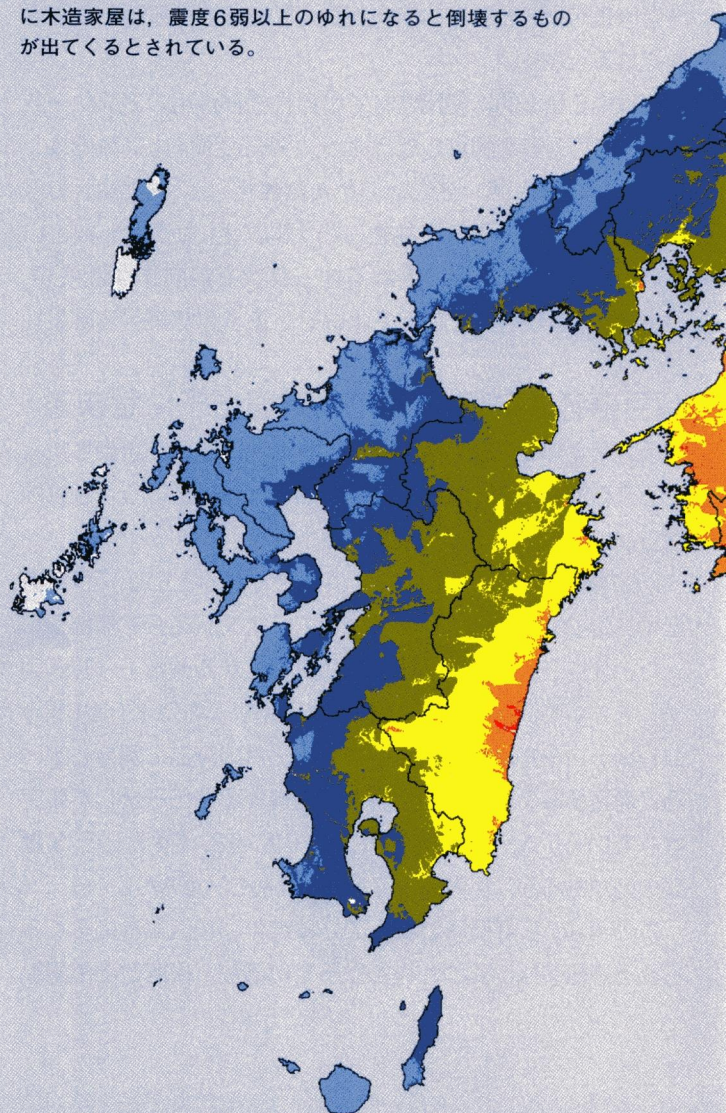
阿部勝征 東京大学名誉教授

瀬戸一 起 東京大学地震研究所教授

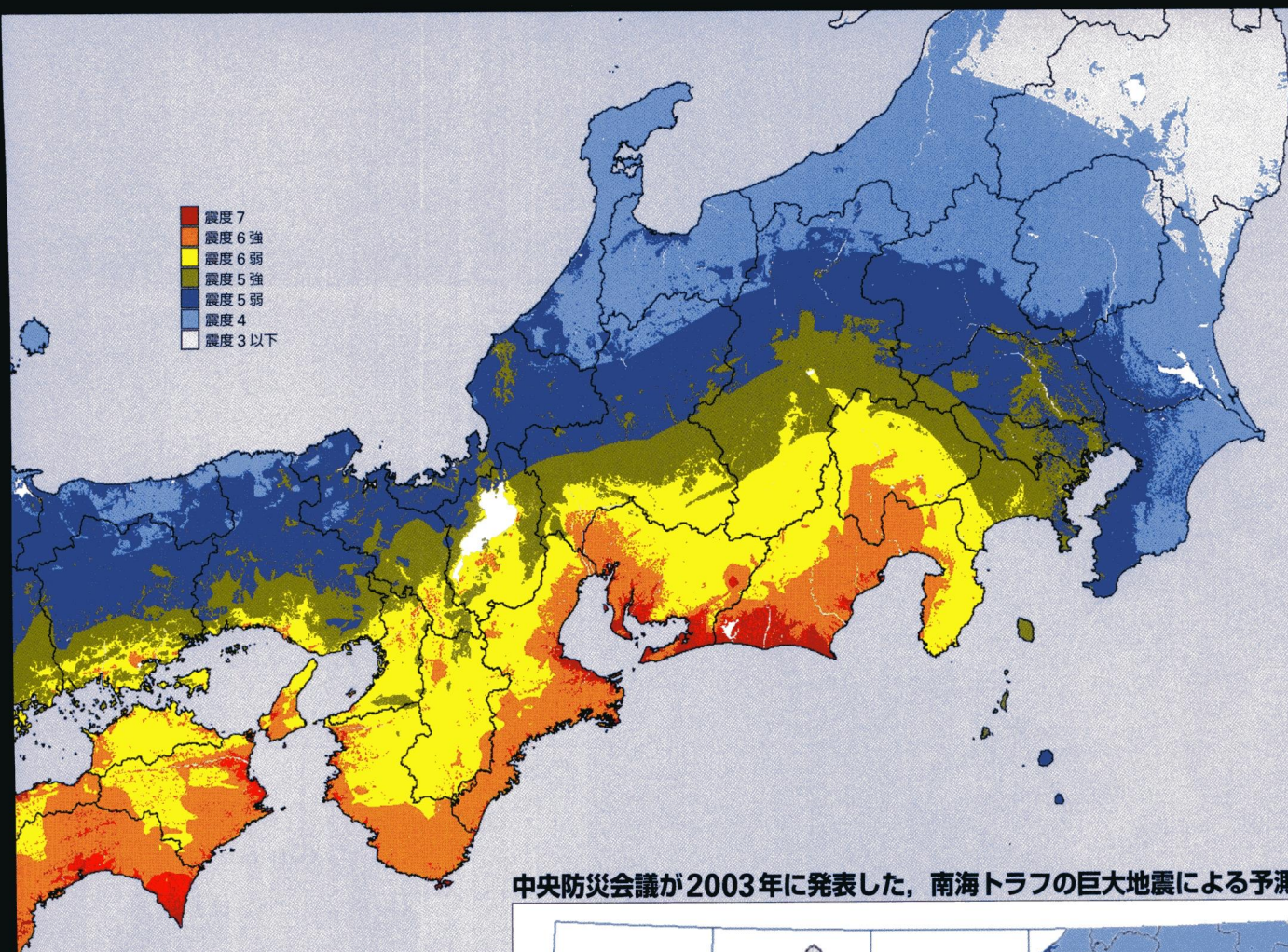
東海から九州まで震度6以上

下は、内閣府が新たに発表した、「南海トラフ」で発生する可能性のある巨大な地震による、各地の予測震度である。後で詳しく解説するが、この予測は、現在の科学的な知見にもとづいて、考えうる最悪のケースを想定したものだという。「震源域」のうちでもとくに強いゆれを発生する領域の位置を変化させるなどして、合計5通りの震度計算を行い、そのうち最も大きな値が、各地の震度として採用されている。震度7の領域（赤色）が太平洋側沿岸部に見られ、震度6強（オレンジ色）や震度6弱（黄色）の領域も、東海地方から九州地方にかけて広範囲に広がっている。

右下の小さな図は2003年に内閣府の「中央防災会議」が発表した、南海トラフの巨大な地震の震度予測である。2003年の想定にくらべると、今回の想定は、強いゆれに襲われる地域が広がっていることがわかる。なお、一般的に木造家屋は、震度6弱以上のゆれになると倒壊するものが出てくるとされている。

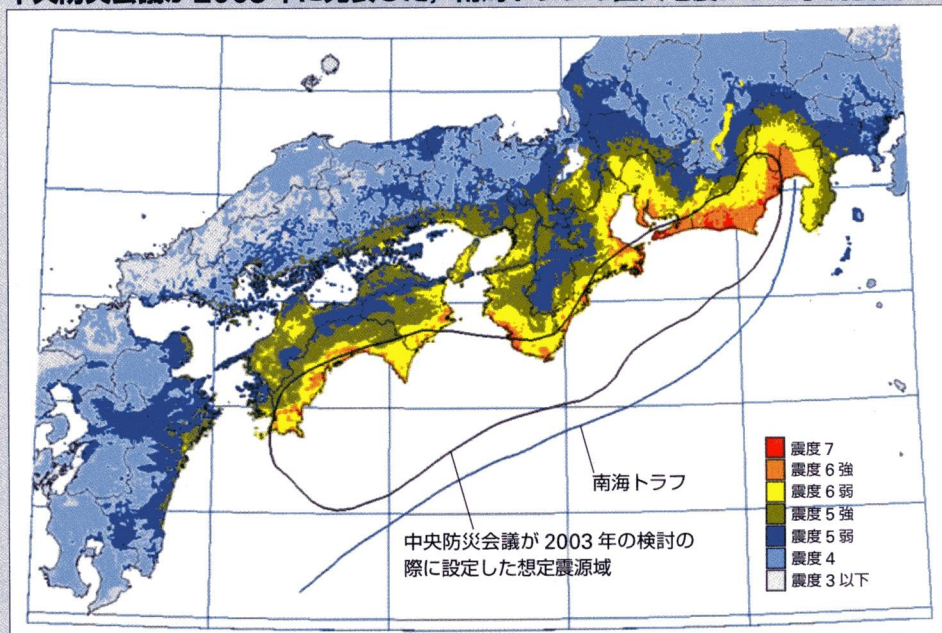


直下地震



中央防災会議が2003年に発表した、南海トラフの巨大地震による予測震度

右図の2003年の想定では、南海トラフで発生する最大級の地震として、「東海地震」、「東南海地震」、「南海地震」が同時に発生した場合が検討された。右はその際の予測震度である。今回は、これよりもさらに巨大な地震が想定されている。



太平洋沿岸の多くの地域で、津波は10～30メートル

内閣府による今回の発表は、現時点での知識にもとづいて科学的に考えうる、最悪のケースを想定したものだ。前ページの予測震度^{しんど}にひきつづき、想定された津波の高さをみてみよう。

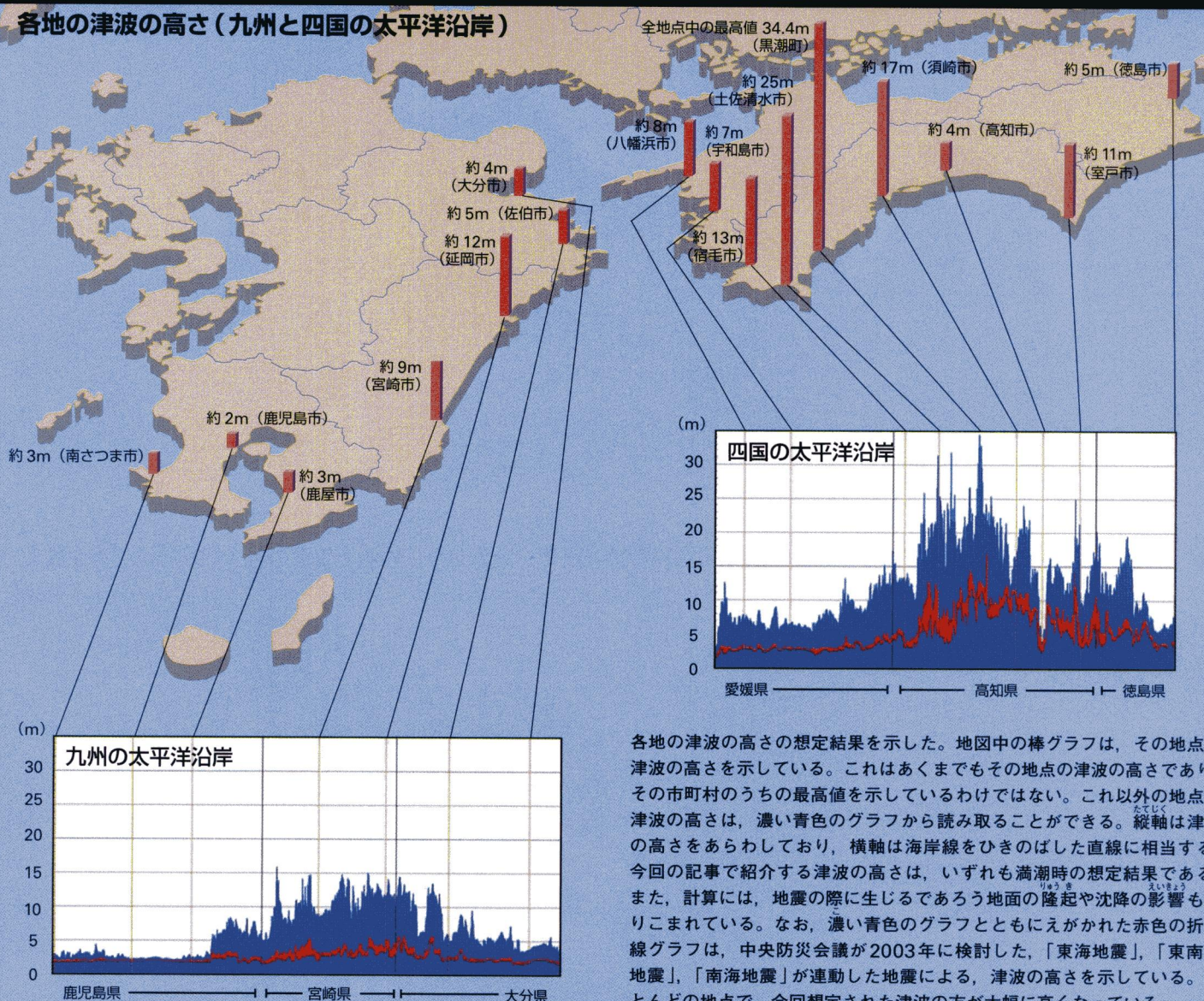
太平洋沿岸では、多くの地域で10メートル以上、場所によっては20メートル、30メートルをこえる津波が押しよせるという想定になっている。最大は高知県黒潮町の34.4メートルだ。

また、瀬戸内海沿岸でおおむね3メートル以上、東京湾でも3メートル近い津波が押しよせる可能性があるという。

下段のグラフ中の赤い線は、内閣府の中央防災会議が2003年に想定した、南海トラフの巨大な地震による津波の高さである。このときの想定にくらべて、今回（青い線）は非常に高い津波を想定していることがわかる。

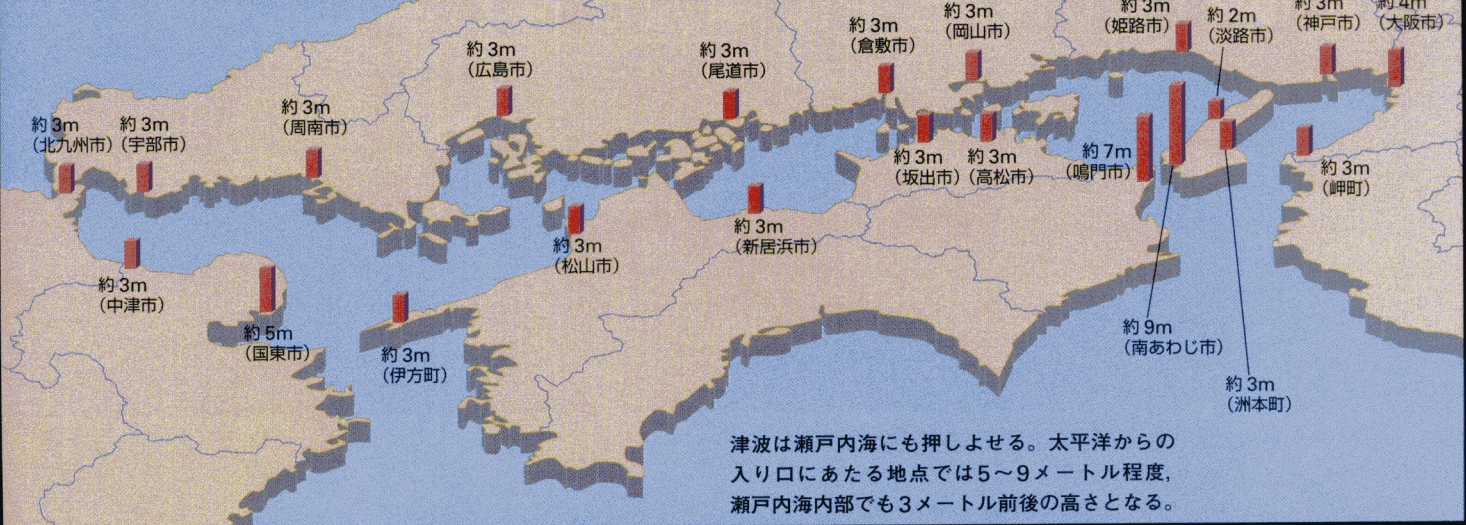
想定をとりまとめた東京大学名誉教授の阿部勝征博士は、次のように語る。「最悪のケースを想定した今回の試算では、広域にわたって高い津波が押しよせるという結果になりました。津波の高さは従来の想定を大幅にこえており、実際に発生すれば、大きな被害をもたらすと心配されます」。このような想定結果になった理由は、後で詳しく解説する。

各地の津波の高さ（九州と四国の太平洋沿岸）

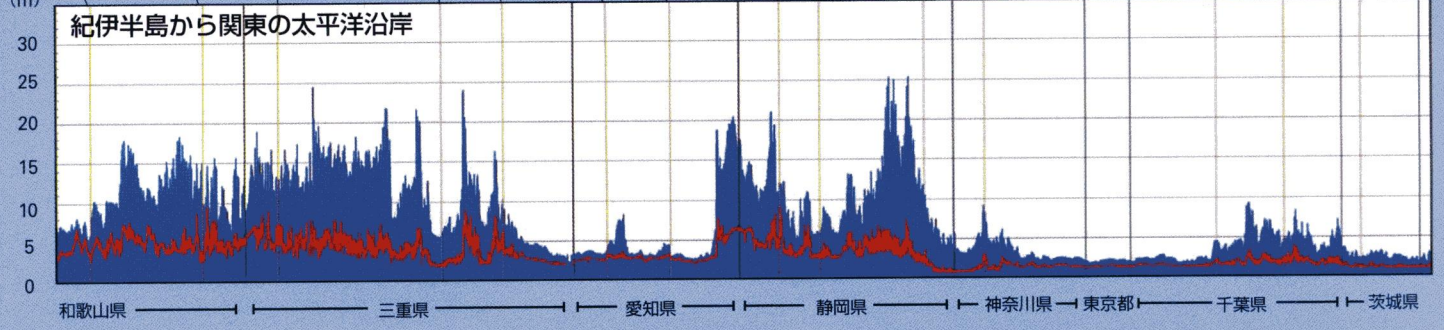
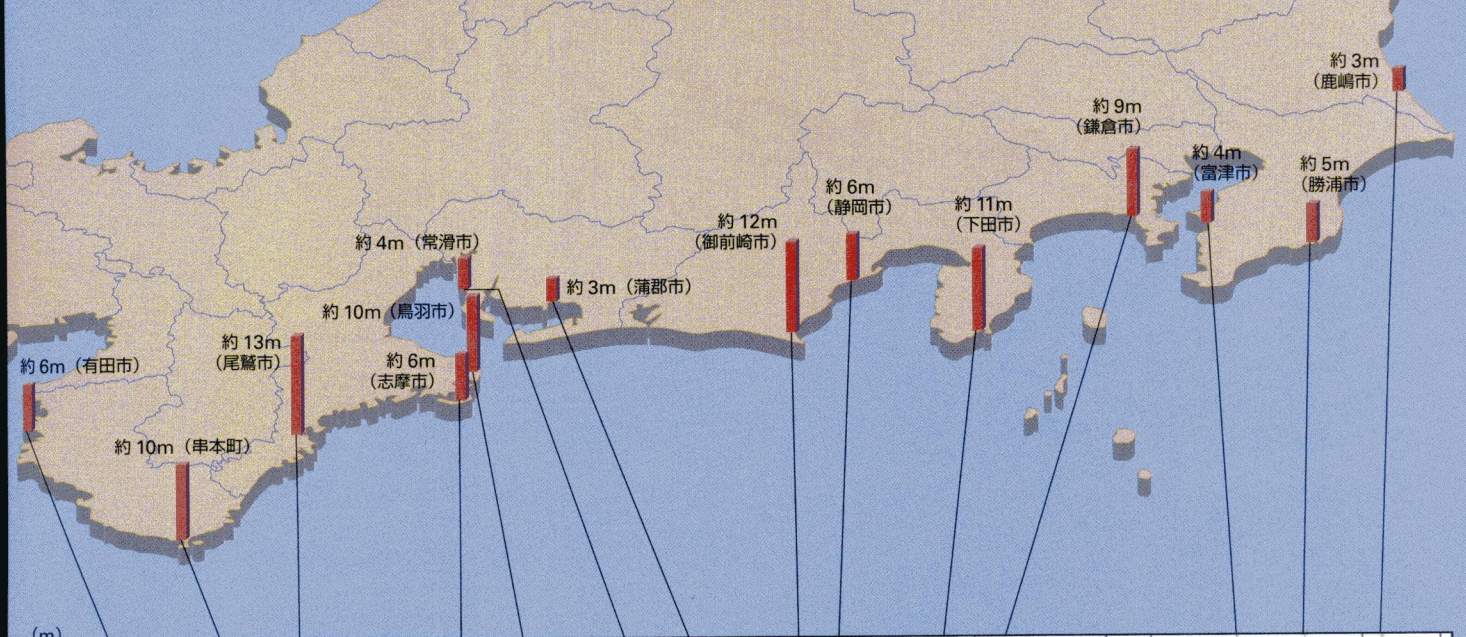


各地の津波の高さの想定結果を示した。地図中の棒グラフは、その地点の津波の高さを示している。これはあくまでもその地点の津波の高さであり、その市町村のうちの最高値を示しているわけではない。これ以外の地点の津波の高さは、濃い青色のグラフから読み取ることができる。縦軸は津波の高さをあらわしており、横軸は海岸線をひきのばした直線に相当する。今回の記事で紹介する津波の高さは、いずれも満潮時の想定結果である。また、計算には、地震の際に生じるであろう地面の隆起や沈降の影響も盛りこまれている。なお、濃い青色のグラフとともにえがかれた赤色の折れ線グラフは、中央防災会議が2003年に検討した、「東海地震」、「南海地震」、「南海地震」が連動した地震による、津波の高さを示している。ほとんどの地点で、今回想定された津波の方が大幅に高くなっている。

各地の津波の高さ（瀬戸内海沿岸）



各地の津波の高さ（紀伊半島から関東の太平洋沿岸）



左ページのグラフと同様に、地図中の棒グラフは、その地点の津波の高さを示している。その他の地点の津波の高さは、濃い青色のグラフで示した。また、赤色の折れ線グラフは、中央防災会議による、2003年の津波の想定結果である。

まだゆれている最中に津波が押しよせる地域も

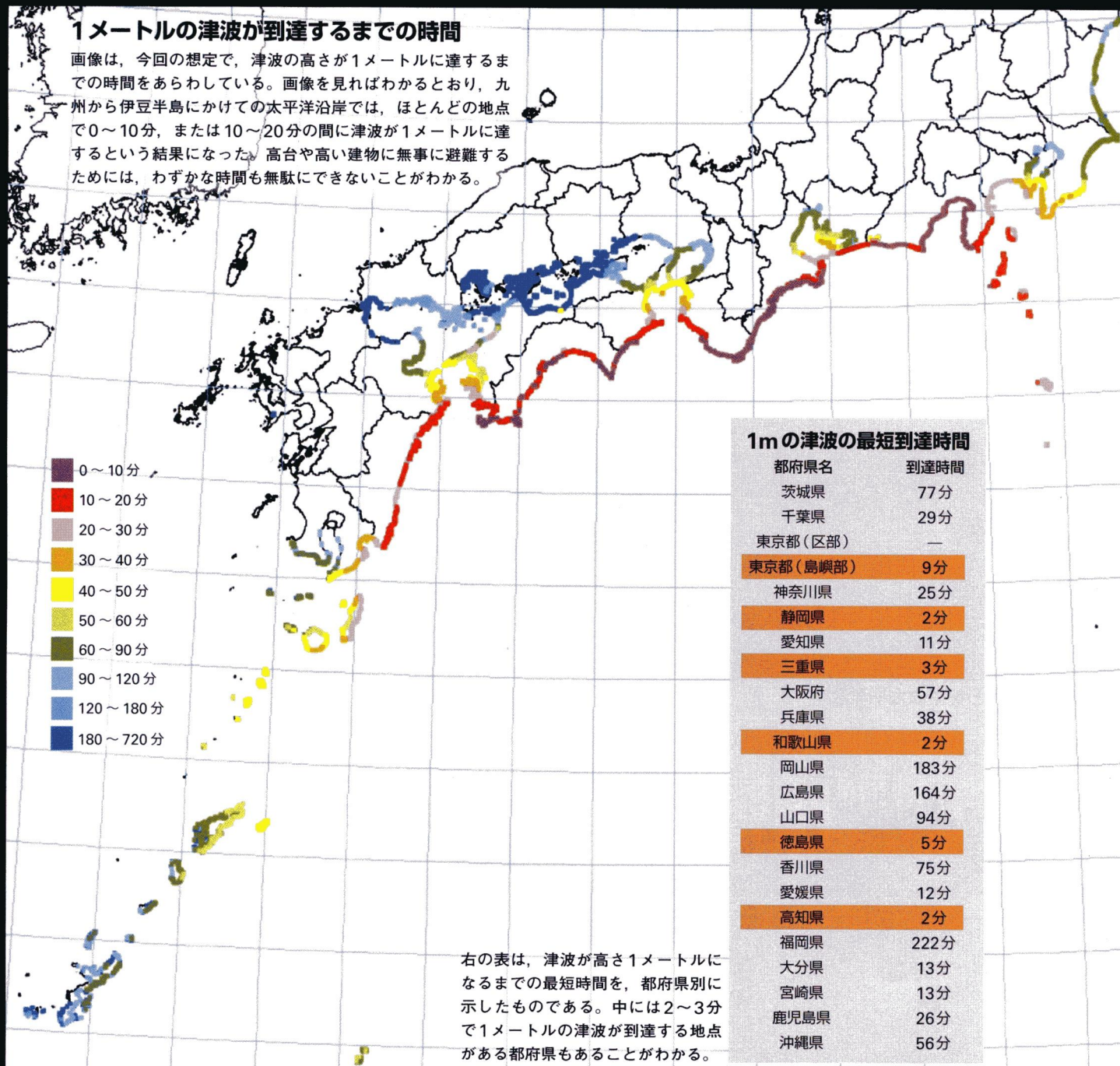
次に、津波が到達するまでの時間についての想定結果をみてみよう。

津波は、その高さだけではなく、地震の発生から何分後に、どの程度の高さの津波が押しよせてくるか、ということも非常に重要である。そのことは、2011年3月の東北地方太平洋沖地震の例を見ても明らかだ。逃げる時間^{ひなん}がどの程度確保できるかによって、とるべき避難行動もかわっ

てくるだろう。

今回の想定では、津波の高さが1メートルになるまでの時間が公表されている。1メートルの津波の威力とは、乗用車を簡単に押し流してしまうほどのものである。

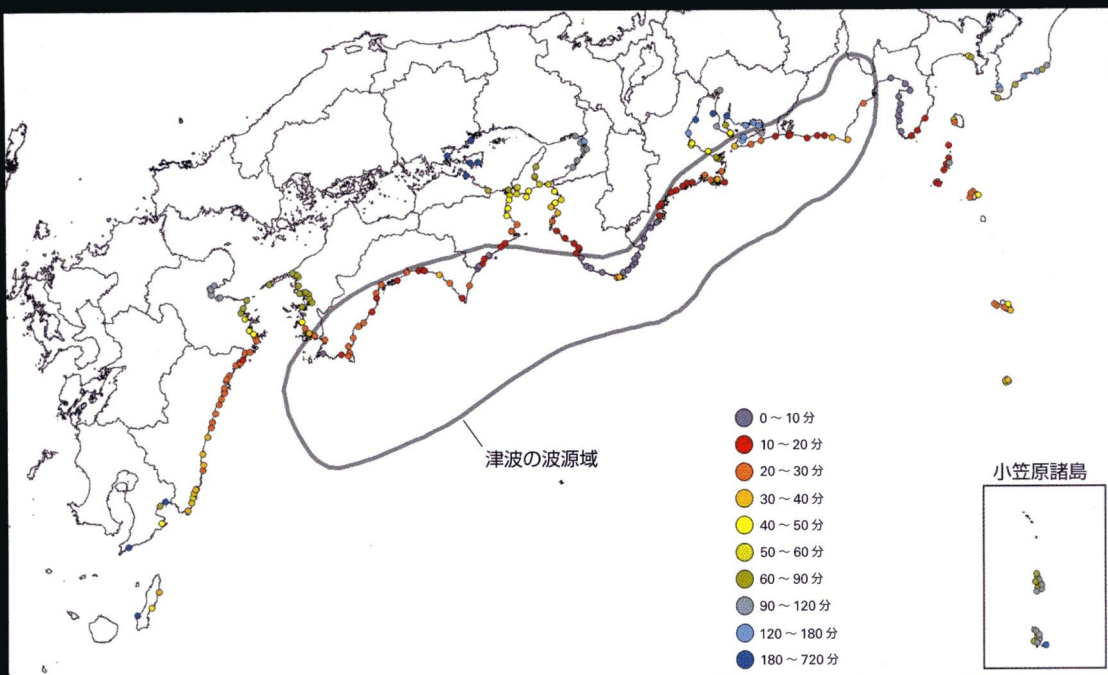
想定によると、東海から九州地方にいたる太平洋沿岸の地域では、ほとんどの場所で10分以内、あるいは20分以内に、1メートル以上の津波が押しよせてくる可能性が



あるという結果になっている。発生する津波が大きくなったため、従来の想定にくらべて、高さが1メートルに達するまでの時間も短くなったのである。

さらに、南海トラフの巨大地震の想定震源域は、東北地方太平洋沖地震にくらべて陸に近いという特徴がある。このため、避難のための時間的猶予は、東北地方太平洋沖地震の津波よりもさらに短くなる。

今回の想定では、場所によっては、地震発生から2～3分後には1メートルの津波が押しよせるというところもあるとされている。2～3分後といえば、東北地方太平洋沖地震であれば、まだ地震のゆれがつづいていた時間である。南海トラフの巨大地震では、まだ地震のゆれがおさまらないうちに、避難を開始しなければならない地域も出てくるということだ。

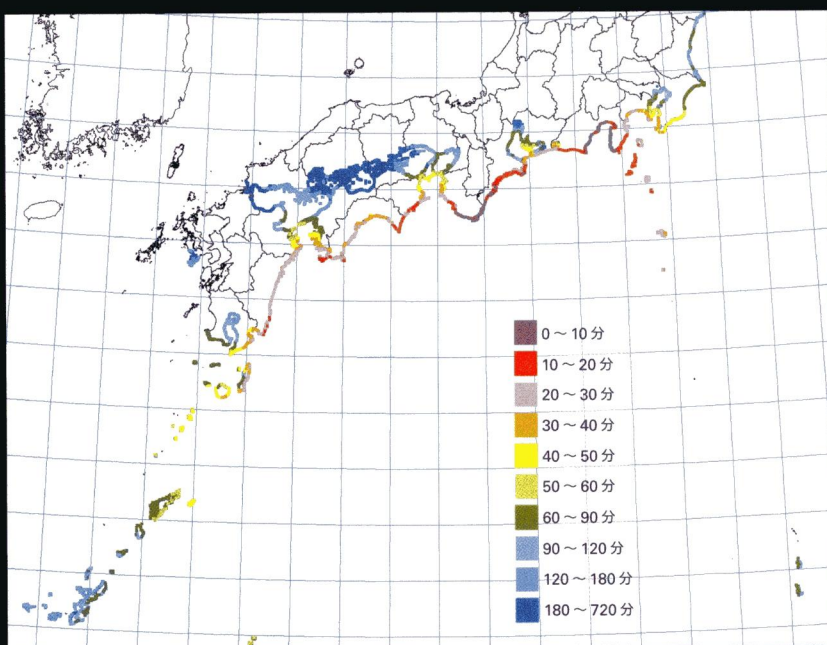


2003年の想定による、1メートルの津波の到達時間

左は、2003年に中央防災会議が発表した、南海トラフの巨大地震（東海地震、東南海地震、南海地震が連動）による、高さ1メートルの津波が到達するまでの時間である。2003年の想定と、左ページの今回の想定を比較すると、今回の想定では津波の到達時間が短くなっていることがわかる。

今回の想定で、最大の津波が到達する時間

右は、今回想定された津波が、各地点において、最大の高さになる時間を示している。第1波が最大となるとはかぎらず、あとから押しよせる波の方が高くなる場合もあることに、注意が必要である。



なぜ、これほど深刻な想定結果となったのか？

今回の発表は、過去になされてきた想定を、はるかにこえる深刻な結果を示している。なぜ、このような想定結果となったのだろうか。

南海トラフとは、駿河湾から九州沖の海底にある深い溝^{みぞ}のことである。海溝^{かいこう}は水深 6000 メートルよりも深い溝であるのに対し、トラフはそれよりも浅い溝のことをさす。

南海トラフは、東北地方太平洋沖地震が発生した「日本海溝」付近と同様に、「プレート境界地震」を発生させる領域だ。南海トラフで発生する巨大地震としては、「東海地震」、「東南海地震」、「南海地震」がよく知られている。

これらの地震は、過去に、およそ 90 ～ 150 年ほどの間隔^{かんかく}でくり返し発生してきた。ときには三つの地震が連動して同時に発生することもあり、実際に三つの地震が連動した 1707 年の「宝永地震」は、マグニチュード 8.5 前後だったと考えられている。

これまで、南海トラフで発生する地震の「最悪ケース」は、この宝永地震が念頭^{ぶんげん}にあった。歴史文献で判明している限

りでは、宝永地震が、南海トラフで発生する巨大地震の最悪ケースであったというのは事実である。2003 年に内閣府の中央防災会議が最悪ケースとして発表した想定は、まさに宝永地震と同じように、東海地震、東南海地震、南海地震が連動したタイプの地震であった。

想定される震源域を大幅に拡大

しかし今回、内閣府は、**想定される震源域（地震を発生させる断層面）の面積をこれまでの約 2 倍に拡大した**。地震の規模は、震源域が広くなればなるほど、大きくなる。新たな最悪ケースの地震の規模は、東北地方太平洋沖地震と並ぶマグニチュード 9.0 か、それをこえる 9.1 となったのである。

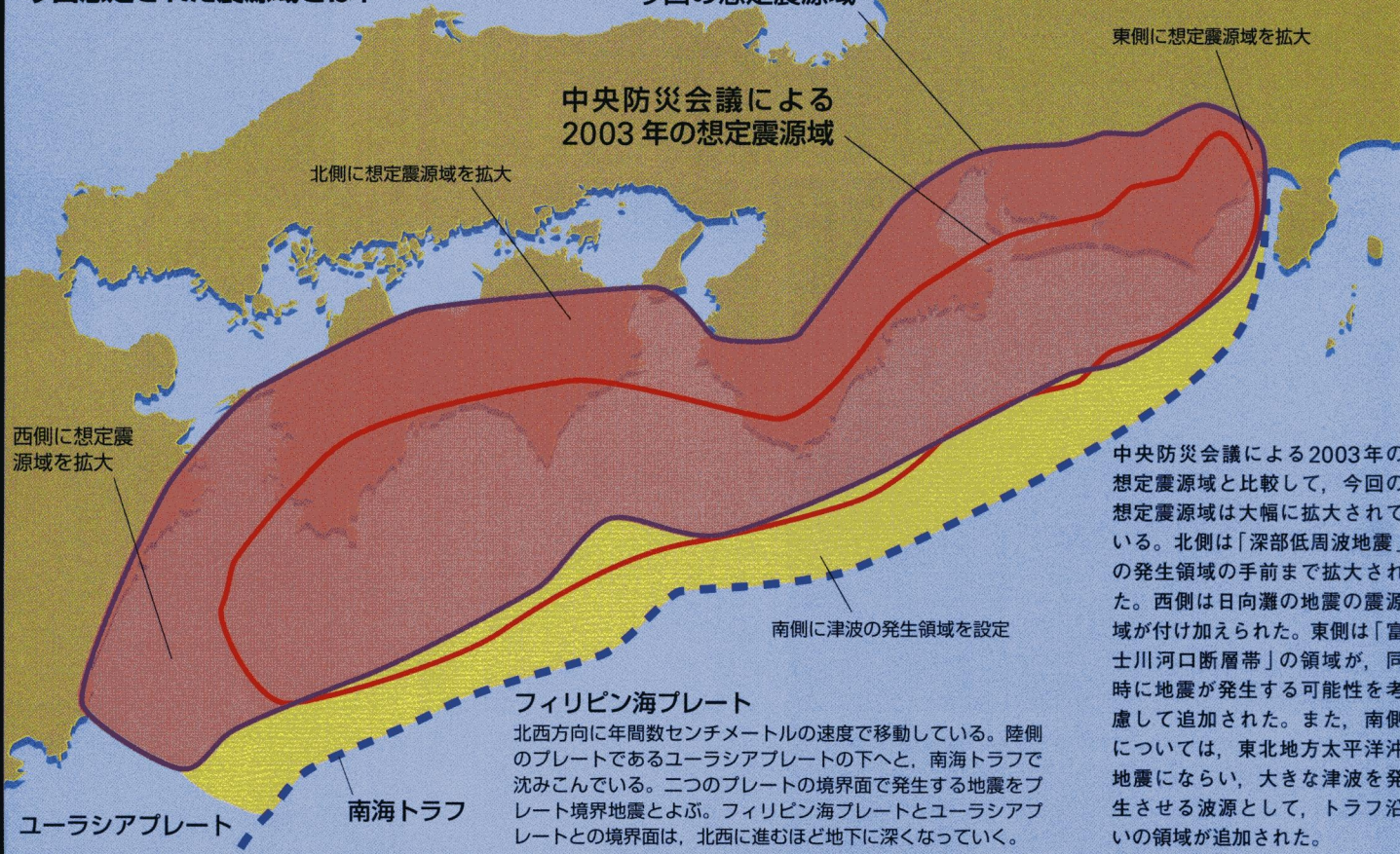
まず、北側への想定震源域の拡大は、プレート境界の深い部分で発生している「深部低周波地震」の発生領域が、近年になって明らかになってきたことを根拠としている。

深部低周波地震は、周波数の低い（つまりゆったりとし

今回想定された震源域とは？

今回の想定震源域

中央防災会議による 2003 年の想定震源域



た) かすかなゆれとして観測される、プレート境界の深い部分で発生する地震である。これがおきる領域は、地上に被害をもたらすような激しいゆれを引きおこすことはないと考えられている。逆に考えれば、それよりも浅い部分では、強いゆれを引きおこす地震が発生する可能性があるということである。観測網が整備されたことにより、南海トラフのプレート境界の、深部低周波地震が発生する領域が明らかになった。今回はその領域よりも浅い部分が想定震源域に新たに加えられたため、結果的に、想定震源域は北側に大幅に拡大したのである。

また、西側にも想定震源域が拡大された。これは過去の津波の際に海の砂が運ばれてできた堆積物の層の調査が近年になって進み、宮崎県沖の「日向灘」の付近の地震も、東海地震、東南海地震、南海地震と連動して発生する場合があるらしいことがわかってきたためである。

さらに、東側でも想定震源域が拡大された。これは、その付近にある「富士川河口断層帯」でも同時に地震が発生

する可能性を考慮し、想定震源域に組みこんだためである。

なお、南側にも想定震源域は拡大されたが、この領域は地震の「震度」とはほとんど関係しないと考えられたため、震度の計算には組みこまれていない(津波とは深く関係する。後に説明)。

このように、北側、西側、東側に想定震源域が拡大されたことで、地震の規模は、マグニチュード9.0になった。

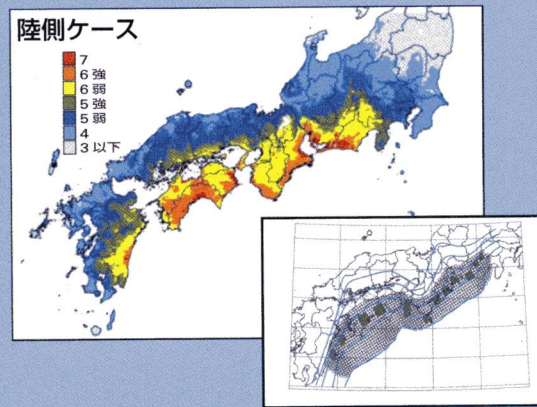
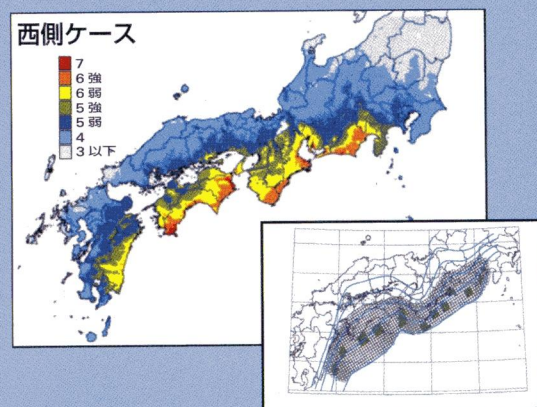
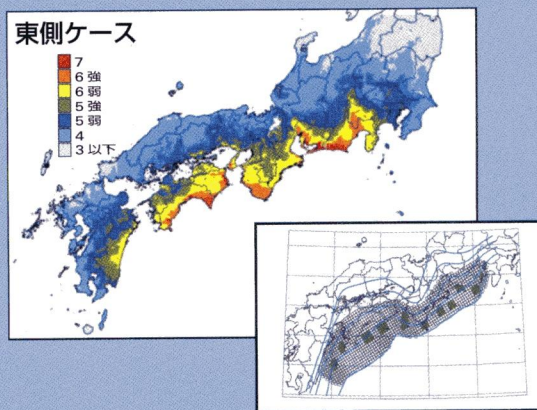
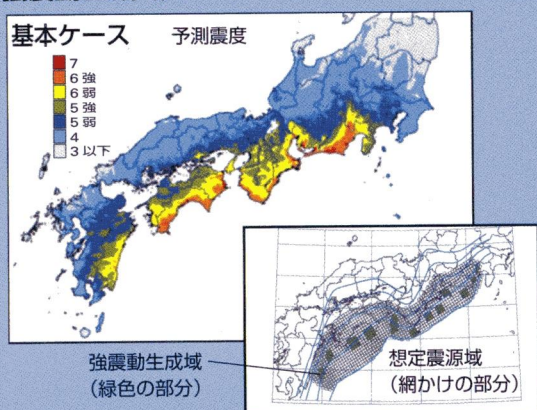
想定震源域が拡大されたということは、**それだけ震源に近くなる場所が増えるということである**。今回の発表で、従来よりも広い範囲で強いゆれが想定される結果となった理由の一つが、これである。

とくに強いゆれを出す領域の位置を4パターン設定

もう一つ、深刻な想定結果が出た理由として、「強震動生成域」の場所を、四つのパターンに分けて震度計算を行い、その結果を重ね合わせたということがあげられる。

強震動生成域とは、震源域の中でも、とくに強いゆれを

強震動生成域のパターンと、それぞれの震度予測



震源域の中でも、とくに強いゆれを発生させる「強震動生成域」の位置は、正確にはわからない。そこで今回の想定では、強震動生成域の位置を、「基本ケース」、「東側ケース」、「西側ケース」、「陸側ケース」の四つのパターンに分けて、震度の計算を行った。各図の想定震源域の中の、緑色の部分が強震動生成域である。四つのパターンでは、想定震源域は変化させず、また、強震動生成域は、たがいの位置関係はそのままに、東側、西側、陸側に動かして設定されている。今回は、この四つのパターンに加え、震源域からの距離によって震度を計算をする「経験的手法」も行われた。合計五つの震度計算結果があるということになる。記事の冒頭で紹介した震度予測マップは、各地点ごとに五つのパターンの震度計算結果を比較し、最も大きな値を採用したものである。

発生させる場所である。「アスペリティ」とよばれることもある。実は、震源域の中で、どの場所に強震動生成域ができるのかについては、よくわかっていない。そこで今回は、強震動生成域の位置を、従来の設定どおりの基本ケース、東側のケース、西側のケース、陸側のケースという四つのパターンに分けて震度の計算を行った。各地の震度は、強震動生成域が近くなれば、それだけ大きな値となる。なお、これら四つのパターンとは別に、強震動生成域を考慮せず、震源域からの距離をもとに震度を計算をする「経験的手法」による想定も行われている。

記事の冒頭の予測震度マップは、これら合計五つの震度の計算結果を、各地点ごとに重ね合わせたものである。たとえばある地点で、計算結果が震度6弱から震度7まで

ばらついたとしたら、その地点の震度の最悪ケースは震度7とするわけだ。これが、広範囲で強いゆれが想定されることになった、二つめの理由である。

津波は東北地方太平洋沖地震を教訓に計算

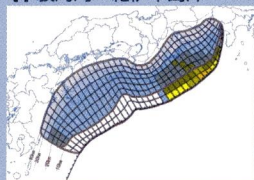
津波については、東北地方太平洋沖地震の発生を受けて、新たな設定が取り入れられた。

東北地方太平洋沖地震では、震源域のうち、陸寄りの領域が強いゆれを発生させたとともに、日本海溝沿いの領域が巨大な津波を引き起こした。海溝沿いの領域が巨大な津波を引き起こす場合があることは以前から知られていたが、あまり注目されてこなかったのである。今回の想定は、東北地方太平洋沖地震を参考に、南海トラフ沿いの領域が

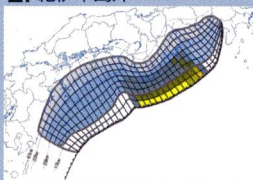
津波の想定結果は、11パターンの重ね合わせ

大すべり域の設定

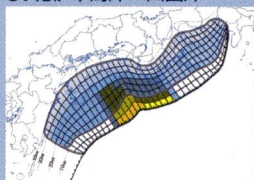
1. 駿河湾～紀伊半島沖



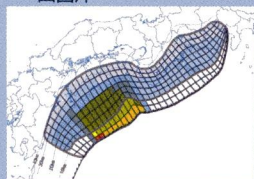
2. 紀伊半島沖



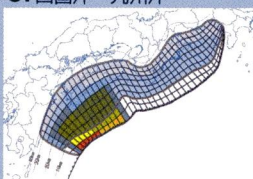
3. 紀伊半島沖～四国沖



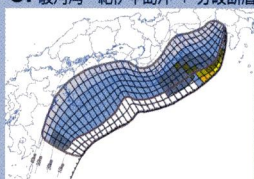
4. 四国沖



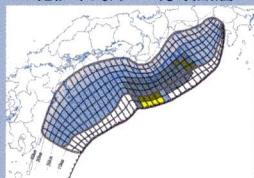
5. 四国沖～九州沖



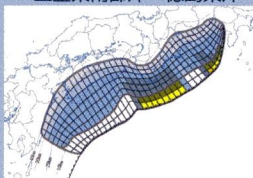
6. 駿河湾～紀伊半島沖 + 分岐断層



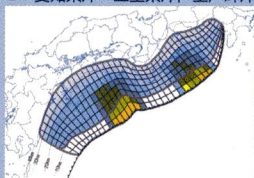
7. 紀伊半島沖 + 分岐断層



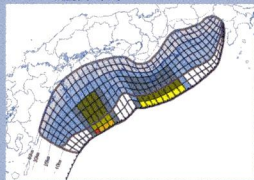
8. 駿河湾～愛知県東部沖、三重県南部沖～徳島県沖



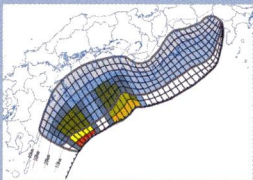
9. 愛知県沖～三重県沖、室戸岬沖



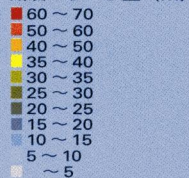
10. 三重県南部沖～徳島県沖、足摺岬沖



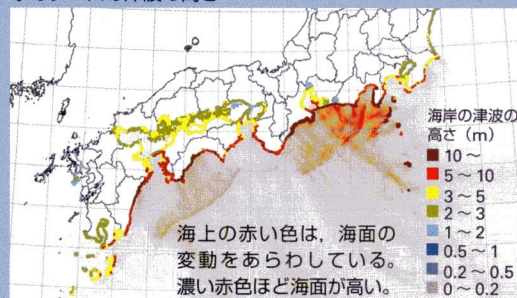
11. 室戸岬沖、日向灘



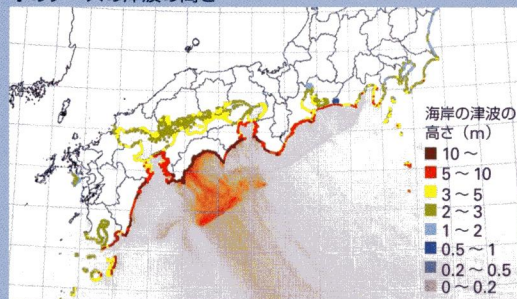
断層のすべり量 (m)



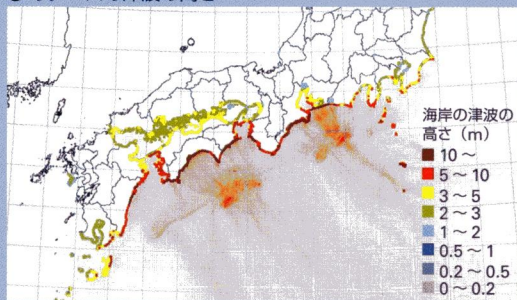
1のケースの津波の高さ



4のケースの津波の高さ

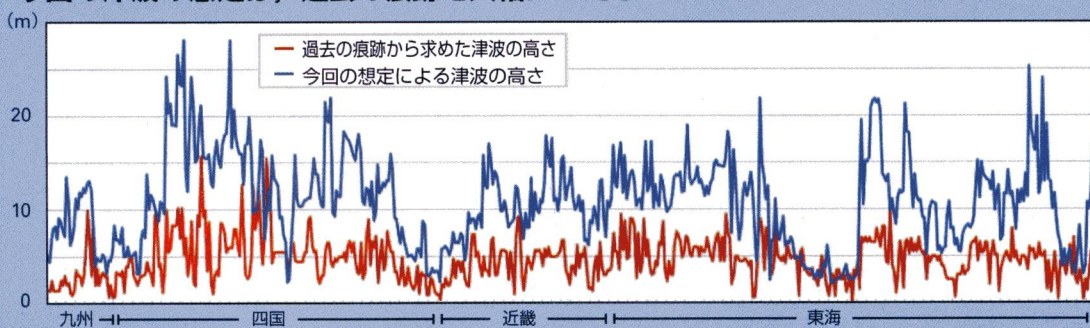


9のケースの津波の高さ



津波を発生させる領域は、震度を計算する際に想定した震源域をベースとしている。ただし、とくに強い津波を発生させる場所として、「大すべり域」と、それに隣接するトラフ沿いの領域に「超大すべり域」を設定している。これらのパターンは合計11通り設定されており、それぞれについて津波の想定が行われた。52～55ページで紹介した津波の想定結果は、各地点ごとに11のパターンの結果を比較して、最悪のケースを選びだしたものである。なお、上に出てくる「分岐断層」とは、トラフの近くにある、プレート境界から枝分かれした断層のことである。分岐断層は、強い津波を発生させる場合があると考えられており、今回の想定に組みこまれた。

今回の津波の想定は、過去の痕跡を大幅にこえる



グラフは、今回の想定によって計算された津波の高さと、各地に残された津波の痕跡の高さを比較したものである。今回の想定は、科学的に考える最大級の津波を想定しているため、過去の津波（ただし判明しているものにかぎる）と比較しても、非常に高い津波が予測されている。なお、過去の津波の痕跡が残っている地域だけをとりだして比較しているため、このグラフが今回の想定全体の像を示しているわけではない。

巨大な津波の波源となる可能性が考慮されている。

基本となる想定震源域は、震度計算の際に設定したものと同じである。ただし津波の場合は、想定震源域の中に、大きな津波を発生させる「大すべり域」を設定している。そしてそのさらに南側（トラフ沿い）の領域には、とくに高い津波を発生させる「超大すべり域」を設定した。地震の規模は、超大すべり域が足されている分、震度の計算の際の想定よりも大きいマグニチュード9.1となっている。

大すべり域や超大すべり域がどの場所になるのかはわからないため、今回の想定では、合計11のパターンを設定して計算が行われた。そして、震度予測マップと同様に、それぞれの結果を重ね合わせて、各地点ごとに最悪のケースを選びだしたものが、今回の津波の想定結果である。

現時点で科学的に考える最大級の地震を想定

今回の想定的前提となる考え方について、阿部名誉教授は、次のように語っている。「これまでは、確認されている限りにおいて、その地域の過去最大の地震を想定してきました。しかし東北地方太平洋沖地震により、過去に発生したことが明確にはわかっていない地震も、発生することがあるということが明らかになりました。今回は、過去に実際にそのような地震が発生したことがあるのかではなく、現在の科学的な知見の範囲内で、考える最大の地震を想定したということです」。

実際、今回の想定結果は、過去に知られている地震と比較して、かなり規模が大きくなっている。上の図は、今回の想定によって計算された津波の高さと、各地に残された過去の津波の痕跡の高さを比較したものである。過去の津波の痕跡にくらべて、今回の津波の想定は非常に高いことがわかる。現時点で発見済みの過去の津波の痕跡を見ただけでは、このような巨大な津波は想像できないだろう。

ただし、次に南海トラフで発生する地震が今回想定され

た規模となるかどうかはわからない。東海地震、東南海地震、南海地震が単独で発生するかもしれないし、連動するかもしれないし、今回の想定のような規模となるかもしれない。また、今回の想定のような地震がおよそ何年に1回発生するのかについても、はっきりとはわかっていない。

なお、南海トラフはその先の琉球海溝へとつながっている。南海トラフの地震の際に、琉球海溝まで震源域が広がる可能性（つまり今回の想定をさらにうわまわる地震が発生する可能性）を指摘する研究者もいる。

また、自然現象である地震にはそもそも「不確実さ」があるため、たとえ今回の想定震源域と同じ領域で地震が発生したとしても、今回の想定マグニチュード9.0（あるいは9.1）をこえる可能性がある。そして、強震動生成域や超大すべり域の位置によっては、今回の想定をこえるゆれや津波に襲われる場所が出ることも十分考えられる。

さらに、西日本において発生する地震は南海トラフの地震だけではない。たとえば内陸で発生した局地的な地震による震度が、今回の想定をうわまわることもあることも、忘れてはならないだろう。

物的被害、人的被害の想定も発表の予定

今回発表されたのは、震度と津波についての想定だけである。内閣府では今回の想定をもとにして、さらに詳細な想定を行い、2012年4月から5月ごろにかけて発表していく予定だという。追加される予定となっているのは、高層ビルや石油タンクなどの巨大な構造物を大きくゆさぶる「長周期地震動」や、「液状化現象」の想定、さらには、津波が時間差で発生した場合の、足し合わされた津波の高さなどだ。また、物的な被害、人的な被害についての予測値も、2012年6月ごろに発表される予定である。

さらに、これらの被害による経済的な損失についての検討結果は、2012年秋ごろに発表される予定だという。

首都直下で懸念されている地震の最新の想定は？

2012年3月末には、首都圏でマグニチュード7前後の地震が発生した場合の震度予測マップも、文部科学省から発表された。今回、発表されたのは、「東京湾北部地震」（マグニチュード7.3を想定）とよばれている地震と、千葉県北西部で発生する地震（マグニチュード7.1を想定）の2タイプである。

東京湾北部地震とは？

東京湾北部地震とは、2005年に内閣府の中央防災会議が、首都圏で今後100年程度以内に発生する可能性があるマグニチュード7程度の地震を対象として地震対策を

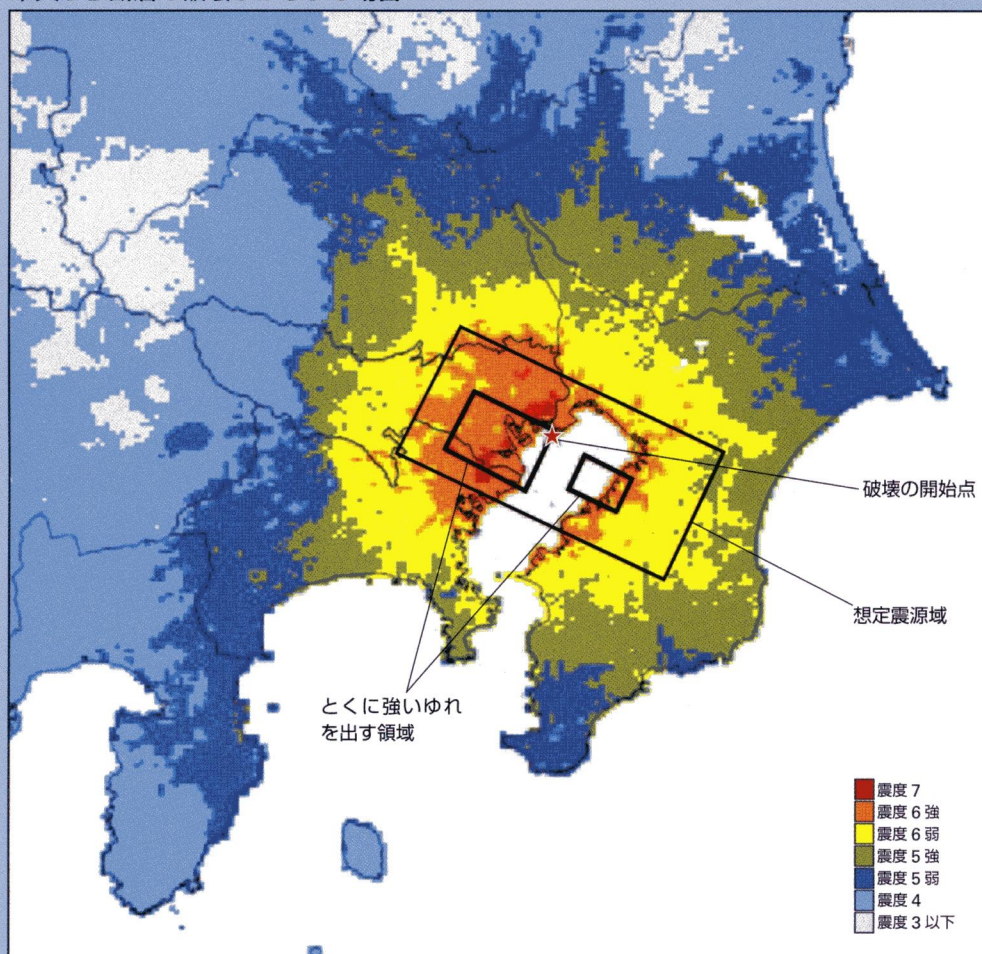
検討した際に、想定された地震である。このときには合計18の地震が想定され、このうち最も被害が大きくなると予測されたのが、この東京湾北部地震であった。

東京湾北部地震は、首都圏の地下に沈みこんでいる「フィリピン海プレート」と、陸側のプレートとの境界面で発生する可能性があると考えられている、プレート境界地震である。ただし東京湾北部付近を震源とするマグニチュード7クラスのプレート境界地震は、少なくとも知られている限りにおいては、過去に発生したことはない。

首都圏に甚大な被害をもたらした地震といえば、1923年に関東大震災を引き起こした関東地震が知られている。

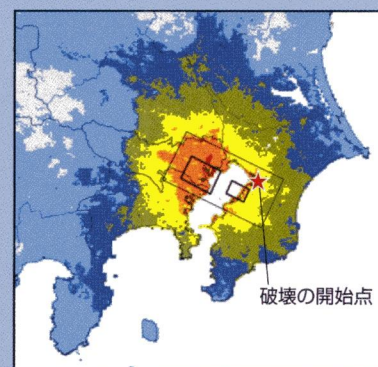
東京湾北部地震の予測震度

中央から断層の破壊がはじまる場合

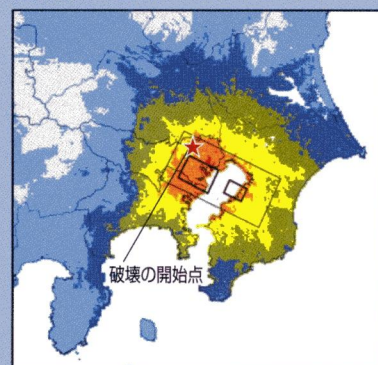


文部科学省によって発表された、マグニチュード7.3の東京湾北部地震の予測震度。上は、断層の破壊が、想定された震源域の中央付近（星印）からはじまった場合のものである。震度7の地域が点在するほか、震度6強の地域も広範囲にわたっている。中央防災会議が2005年に想定したときに比べて、プレート境界面（断層）が10キロメートル浅いことが改めて確認されたため、予測震度が大きくなった。

東側から破壊がはじまる場合



西側から破壊がはじまる場合



想定震源域や、とくに強いゆれを出す領域（アスペリティ）の位置はそのままに、破壊の開始地点を変更して行った震度の予測結果。上段は東側から、下段は西側から破壊がはじまった場合である。一般的に、断層の破壊が拡大していく方向はゆれが大きくなるという傾向があるため、これだけの変更でも、予測される震度に差が出てくる。

関東地震は、およそ 200 年の間隔で発生すると考えられている、マグニチュード 8 クラスの巨大なプレート境界地震である。東京湾北部地震の想定震源域は、関東地震の震源域の北隣に位置する。関東地震のタイプの発生は、その発生間隔からすると、次の発生は 100 年以上先だと考えられている。このため、現在は東京湾北部地震の方が警戒されているわけだ。東京湾北部の沿岸部は首都機能が集中しているため、ここで地震が発生すれば、被害が非常に大きくなると心配されている。

震源が従来の想定よりも浅いことを反映させた

さて、今回、文部科学省が東京湾北部地震の予測震度マップを新たに作製したのは、理由がある。実は、2005 年の中央防災会議による検討結果が発表されるのと同じころ、東京湾北部地震を引き起こすとされるプレートの境界面の位置が、従来の考えよりも 10 キロメートルほど浅く、深さ 20 ～ 30 キロメートルであるということが発見された。地震の発生源が浅い（地表に近い）ということは、地表の震度もそれだけ大きくなるということになる。今回の研究プロジェクトでは、プレート境界面が約 10 キロメートル浅いということを、別の観測によって確認した。そしてこれを反映させ、東京湾北部地震の震度予測を新たに計算しなおしたというわけだ。

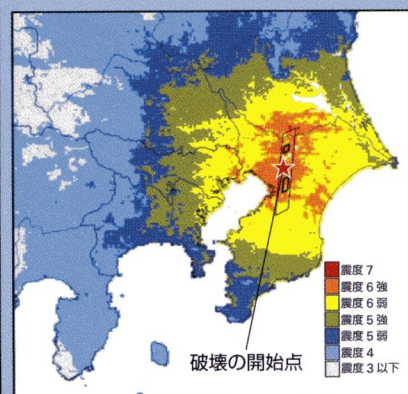
実際、新たな想定の結果は、2005 年の中央防災会議による検討結果にくらべて、多くの場所で震度が大きくなった。2005 年の検討結果では震度 7 の地域はほとんど見られなかったが、今回の想定では、震度 7 の地域もところどころにみられる。震度 6 強の地域も広がっている。なお、今回の想定では、地震が発生しはじめる位置（断層の破壊の開始点）を 3 パターン用意し、それぞれについて震度の計算をおこなっている。破壊の開始点がどこになるかをかえただけでも、震度の計算結果は変化する。

また、今回は、千葉県北西部の、フィリピン海プレートの内部に震源となる断層を仮定した、「スラブ内地震」による震度の計算も発表されている（右上の図）。

特定の地震だけを警戒するのは危険

今回の研究プロジェクトのメンバーである東京大学地震研究所のこうけつかず 教授は、今回の想定結果の受け止め方として、次のように注意をよびかけている。「プレート境界

千葉県北西部のスラブ内地震の予測震度



文部科学省による、マグニチュード 7.1 のスラブ内地震の予測震度。スラブ内地震とは、プレート境界ではなく、プレートの内部で発生する地震のことである。過去の地震の傾向や、地震波を利用した地下の構造探査の結果などから、この場所に断層を設定したという。この地震も東京湾北部地震も、首都圏で発生する可能性のある、数ある地震のうちの一つである。

が従来考えられていたよりも浅いわけですから、当然、想定される震度は大きくなりました。強いゆれへの対策が、より一層必要です。ただし心配なのは、今回の想定結果が強調されるあまり、今回の想定では強いゆれになると予測されなかった地域の人が、地震対策を進めなくなってしまうということです」。

今回想定の対象となった東京湾北部地震も千葉県北西部の地震も、あくまでも、首都圏で発生する地震の、「数ある可能性のうちの一つ」なのである。想定の対象となった二つの地震だけを警戒するのは、非常に危険なことである。別の場所で地震が発生すれば、当然、震度の分布もかわる。

また、そもそも今回の想定には、不確定な要素が含まれていることも重要である。仮に東京湾北部地震が発生したとしても、マグニチュードの値が想定通りの 7.3 となるかどうかかわからないし、強いゆれを発生させる領域（アスペリティ）の位置が想定通りになるかどうかかわからない。これらのことをふまえたうえで、今回の想定結果を受け止める必要があるのだ。

想定結果を冷静に受け止め、対策につなげよう

最初に紹介した南海トラフの地震の想定は、特定の地震が、現時点で科学的に考えうる最悪のケース（またはそれに近いケース）となった場合を検討したものである。一方、首都圏の地震の想定は、首都圏で発生する地震として、数ある可能性のうちの一部に注目したものだ。地震の想定という点では両者は同じだが、その性格は大きくことなっていることに注意が必要である。想定結果を冷静に、そして正確に受け止め、対策につなげていきたいところだ。 🍏

（担当：編集部 赤谷拓和）

生まれかわる すばる望遠鏡

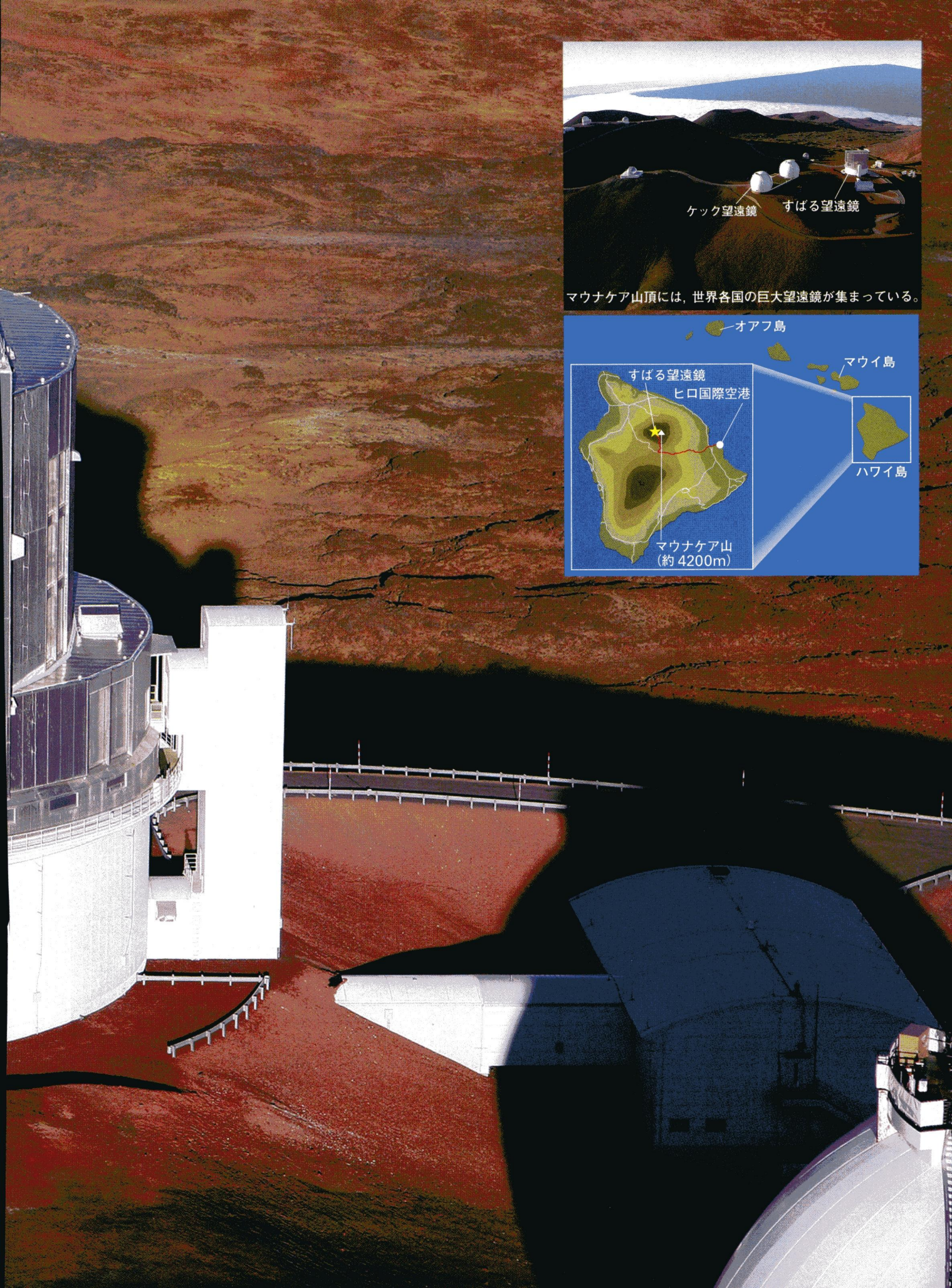
視野10倍の高感度カメラ がついに始動

すばる望遠鏡は、ハワイのマウナケア山頂にある。1999年に観測をはじめた、口径8メートルの巨大望遠鏡だ。2012年5月、すばる望遠鏡の新しい主焦点カメラ「Hyper Suprime-Cam (HSC)」がいよいよ始動する。新しいカメラは視野が従来の10倍に広がり、それによって、より広い範囲を鮮明に撮影できるようになる。世界中の地上望遠鏡を見渡しても、これほどの高性能のカメラは例がない。日本の技術が結集されたHSCはどのようにつくられたのか。そして、HSCを使うと、どのような観測が可能なのか。HSCプロジェクトを統括する国立天文台の宮崎聡室長に聞いた。

協力 宮崎 聡 国立天文台 Hyper Suprime-Cam Project 室長

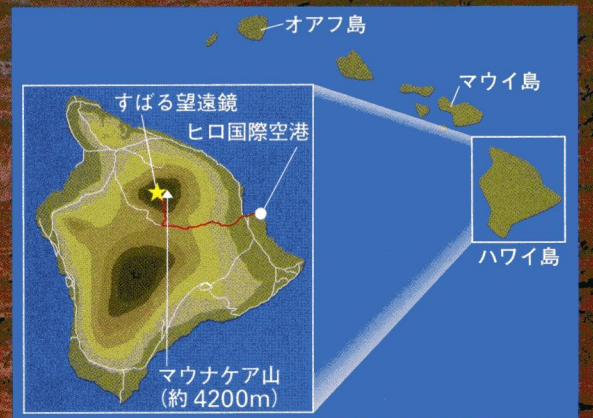
望遠鏡本体は「ドーム」とよばれる構造におおわれている。多くの地上望遠鏡は半球状のドームをもつ。それに対して、すばる望遠鏡のドームは空気の乱れをおさえるため、円筒型のめずらしい形をしている。写真では、開いたドームから望遠鏡の一部が見えている。





ケック望遠鏡 すばる望遠鏡

マウナケア山頂には、世界各国の巨大望遠鏡が集まっている。



オアフ島

マウイ島

ハワイ島

すばる望遠鏡
ヒロ国際空港

マウナケア山
(約 4200m)

新しいカメラ「Hyper Suprime-Cam」

2012年5月、すばる望遠鏡^{ほうえんきよう}の新しい主焦点カメラ^{しゅしやうてん}「Hyper Suprime-Cam (HSC)」がいよいよ試験観測を開始する予定だ。作製に10年以上かけられたHSCは、国立天文台だけでなく、多くの日本企業が^{けっしやう}開発からかかわった、日本の技術の結晶ともいえるカメラである。

そもそも“常識外れ”だったすばるのカメラ

すばる望遠鏡は、反射式望遠鏡だ。直径約8メートルの主鏡で光を反射させ、光を焦点（「主焦点」とよぶ。下図参照）に集め、観測を行う。その主焦点で画像の撮影^{さつえい}を行うのが「主焦点カメラ」である。

そもそもすばるの主焦点カメラは従来から“常識外れ”だった、と国立天文台 HSC Project^{みやざきとし}の宮崎聡室長は説明する。「大きな望遠鏡に、広い視野をもつ

カメラをのせ、探査的な研究を行うことは非常識なことでした」（宮崎室長）。すばる望遠鏡が登場する前、欧米では、鮮明な画像の撮影は大気圏外で行うというのが主流な考え方だった。地上よりも大気の影響を受けず、より鮮明な画像が取得できるからだ。実際にハッブル宇宙望遠鏡が美しい画像を次々と撮影し、探査的な研究でも成果を上げていた。

その常識を破り、技術を駆使^{くし}して地上で可能な最高解像度を実現したのが、すばる望遠鏡である。地上望遠鏡で、広い視野を観察し、探査的な研究を行う主焦点カメラは世界中探してもほかにない。広い視野があれば宇宙の広い範囲を短時間で効率的に観測できる。このユニークなカメラを使って、これまで数多くの新しい成果が生みだされてきた。

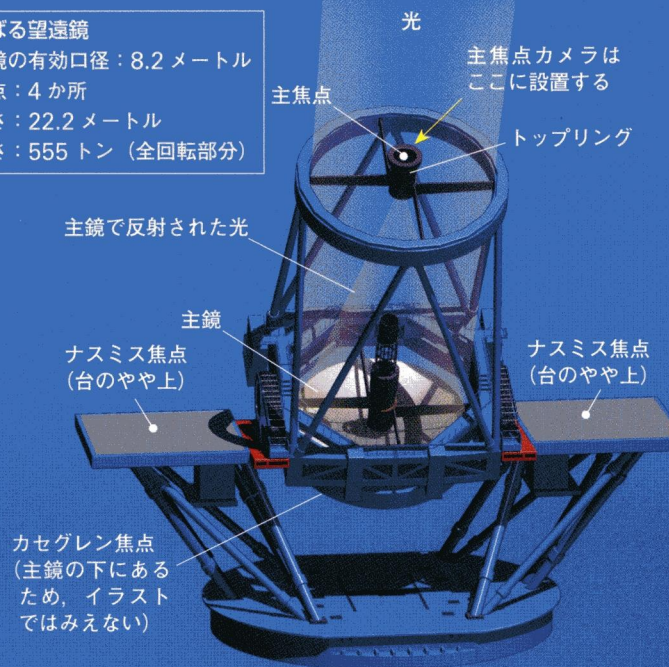
そして「さらに従来の10倍の視野に挑戦したのがHSCです」（宮崎室長）。しかし視野を広げ、かつ高解像度をもつカメラの作製は簡単ではなかった。

すばる望遠鏡の基本構造は？

すばる望遠鏡は、直径約8メートルの主鏡をもつ。主鏡の約15メートル上に主焦点がある。今回開発された新しいカメラ「Hyper Suprime-Cam (HSC)」は、主焦点にあるトップリングに設置される。すばる望遠鏡には主焦点カメラ以外の観測方法もある。トップリングに副鏡を設置してさらに光を反射させ、ほかの三つの焦点（カセグレン焦点と二つのナスミス焦点）で観測を行うのだ。そのため、HSCは取りはずし可能で、使用時にだけトップリングに設置される。

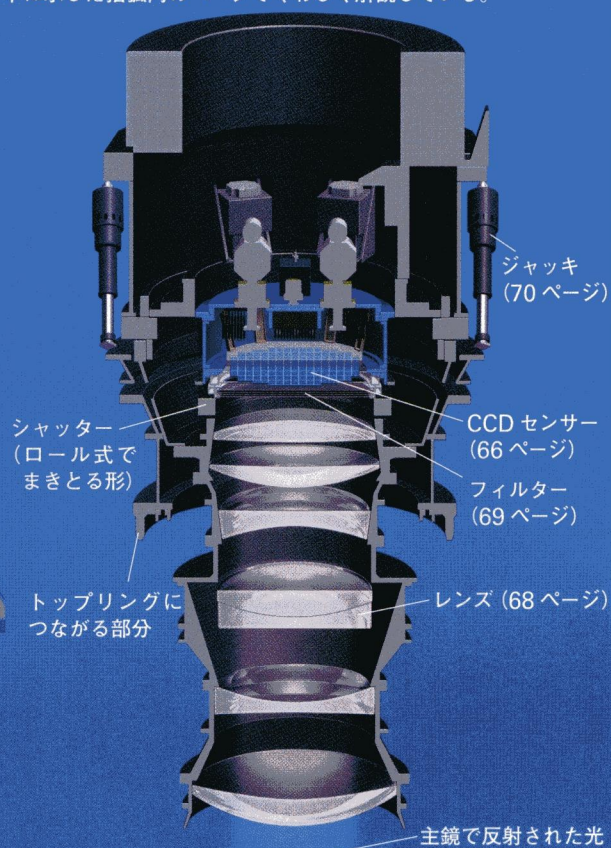
すばる望遠鏡

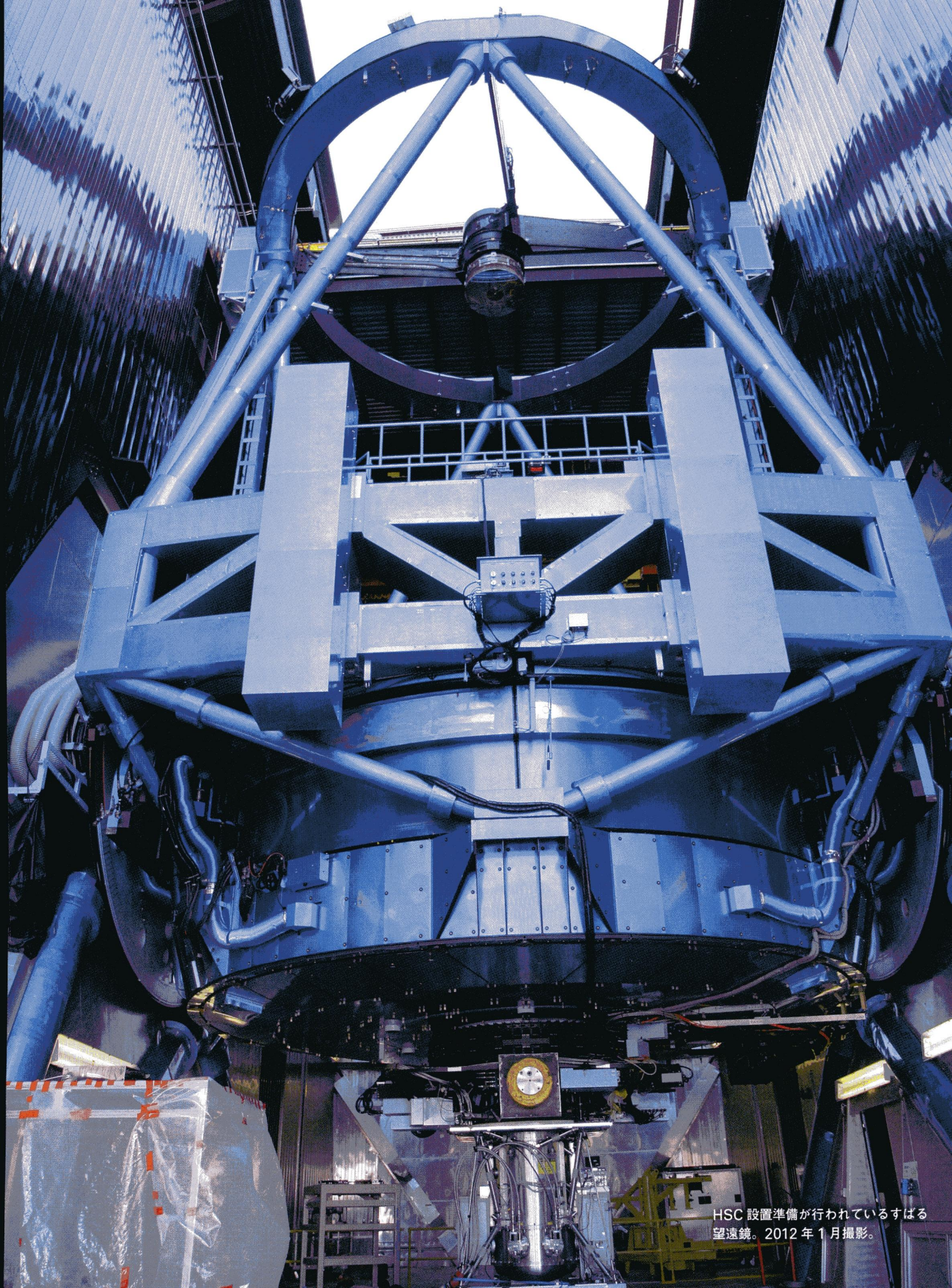
主鏡の有効口径：8.2メートル
焦点：4か所
高さ：22.2メートル
重さ：555トン（全回転部分）



新しい主焦点カメラ(Hyper Suprime-Cam)

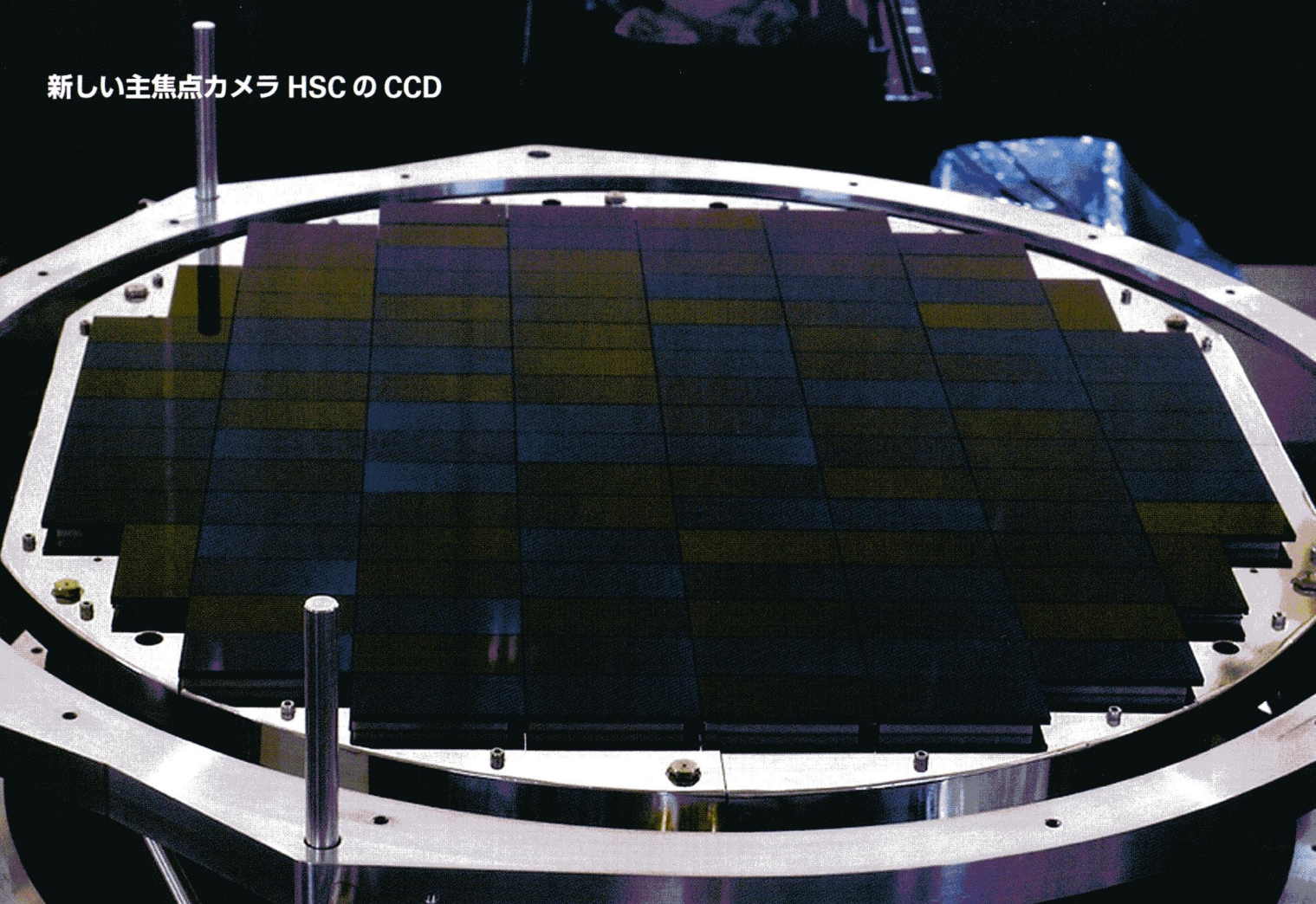
HSCは全長約3メートル、重さは3トンをこえる巨大なカメラだ。可視光線と赤外線を観測する。下はカメラの断面図だ。図中に示した括弧内のページでくわしく解説している。



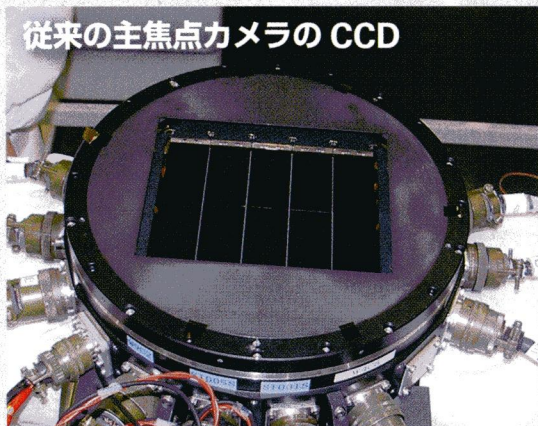


HSC 設置準備が行われているすばる望遠鏡。2012 年 1 月撮影。

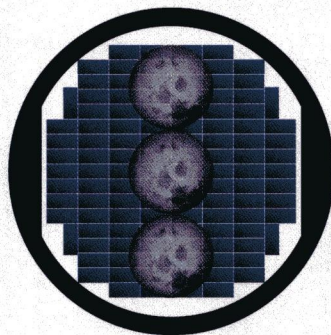
新しい主焦点カメラ HSC の CCD



従来の主焦点カメラの CCD



CCD を 100 枚以上並べ、視野が約 10 倍に広がった



HSC

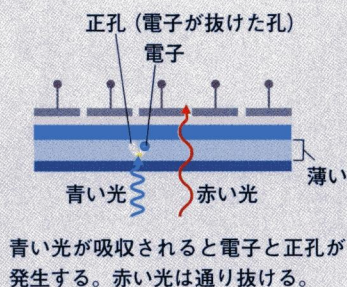


SC (従来のカメラ)

これまでの主焦点カメラ (SC: Suprime-Cam) のセンサーは、CCD センサー (3 センチメートル×6 センチメートル) が 10 枚並んだものだった。新しい HSC では同じサイズの CCD を 116 枚並べてつくられた。これまでの SC の視野が満月 1 個分だったのに対して、HSC では満月 9 個分の視野を一度に観測できる。イラストは観察される視野の大きさがわかるよう、模式的に月を重ねてえがいている。

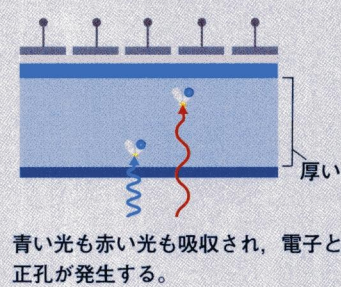
高い感度の CCD センサーを開発

従来の CCD センサーの断面



青い光が吸収されると電子と正孔が発生する。赤い光は通り抜ける。

新しい CCD センサーの断面



青い光も赤い光も吸収され、電子と正孔が発生する。

光は、CCD センサーの内部で吸収され、電子と正孔 (電子が抜けた孔) が発生する。それらを、電流として観測することで光を検出するのだ。センサーは厚ければ厚いほど感度がよくなる。「色付きの下敷きが、厚いほど向こう側が見えにくい (光が内部に吸収される) のと似ています」(宮崎室長)。厚くするためには高い技術が必要とされる。従来の主焦点カメラの CCD センサーは、厚さ 40 マイクロメートル (0.04 ミリ) だったが、新しいセンサーは厚さが 200 マイクロメートルと 5 倍も厚くなった。それによって、波長の長い光 (赤い光) も検出可能になったという。この感度の高い CCD センサーは 2008 年、一足先に従来の SC カメラに搭載された。10 個の CCD センサーを入れかえたのだ。「HSC のように 100 枚以上のせるというのはたいへんなことです。従来のカメラで性能が確認されたからこそ、HSC に搭載できたといえるでしょう」(宮崎室長)。

高感度 CCD で約 8 億 7000 万画素

従来の 10 倍の視野を手に入れるためには、まず光を検出する大きな CCD センサーと大きなレンズが必要だった。ちなみに主鏡の大きさは視野に関係しない。「主鏡の大きさはカメラの“しぼり”に相当します。しぼりをかえても明るさがかわるだけで、見える範囲はかわらないのと一緒で、視野には関係しません」と宮崎室長は解説する。

HSC 計画は、まず感度の高い CCD センサーの作製からはじまった。宮崎室長は「天体観測用の CCD センサーに関しては、感度が高いことが絶対使命です」と話す。普通の撮影用カメラは、光が足りなかったら、フラッシュなどの補助光を被写体に当てればよい。しかし、天体に光を当てることはできないため、センサーの感度を高めて観測するしかない。「せっかく遠くて暗い天体を観測するために、大きな主鏡で光を集めても、CCD センサーで失ってしまったら元も子ありません」（宮崎室長）。

百数十個の CCD を検査するだけで 2 年以上

HSC には、世界最高の感度をもつ CCD センサーが 116 個並べられ、合計解像度は 8 億 7000 万画素にもなった。CCD センサーの数は、従来の主焦点カメラが 10 個だったのにくらべると、10 倍以上にもなる。CCD センサーを 116 個も並べるのはやはりたいへんな作業なのだろうか。「CCD センサーは静電気に弱いので気をつかいました。搭載した CCD センサーは回路がむき出しで、何の保護もないため緊張しましたね」（宮崎室長）。センサーはほこりをきらうため、作業はほこりをへらした「クリーンルーム」で作業服を着て行われた。

しかし、並べる作業よりも性能確認に時間がかかったという。「センサーは並べる前に実験室で一つ一つ性能を確認する必要があります。その確認作業に、2 年半かかりました」（宮崎室長）。

CCD センサー自体の保護枠が、はずす際にぶつただけでセンサーはこわれてしまう。確認作業中は、非常に繊細な作業がつづけられた。「性能確認の項目がとても多いので、製造元の出荷テストにもれるものがどうしても出てきます。センサーはこのカ

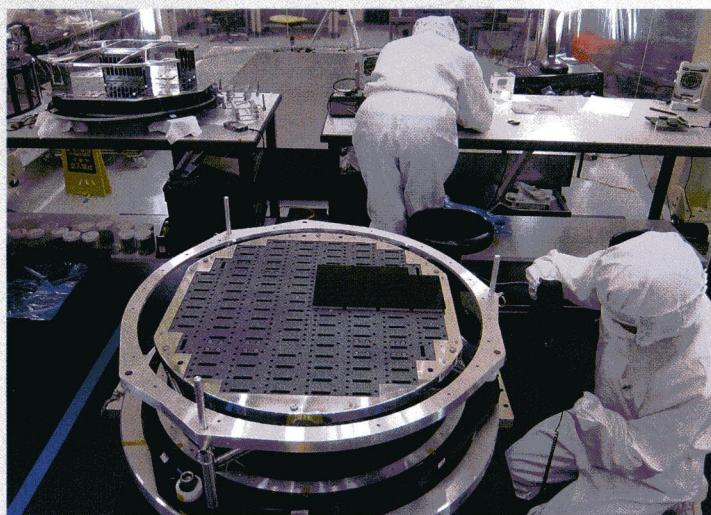
メラの鍵ですから、慎重に作業が行われました」（宮崎室長）。

CCD をマイナス 100 度 C まで冷やす

観測時、CCD センサーは、マイナス 100 度 C まで冷やされる。CCD センサーの温度が高いと、材料内の電子の動きがノイズになってしまうためだ。

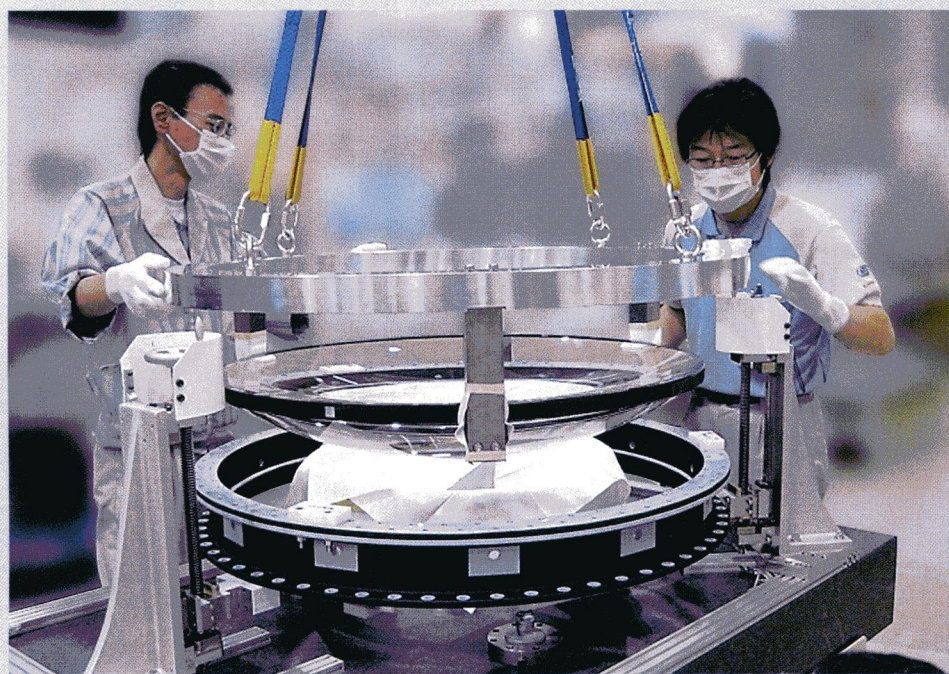
ただセンサーを冷やすだけでは、装置の透明な窓が結露でくもってしまい、せっかくのカメラが台無しになってしまう。そこで結露を防ぐため、装置内部は真空にされる。

CCD を慎重に並べて、装置内部を真空に



クリーンルーム内で CCD センサーを並べているところ（上の写真）。ノイズを減らすため、CCD センサーはマイナス 100 度 C まで冷やされる。また、CCD センサーがおさめられた装置内は結露防止のため真空にされる。真空にしたときにかかる大気圧に耐えるように、装置の透明な窓は 52 ミリメートルの厚い石英製だ。重さは二十数キログラムもある。組み立てのために運ぶのも一苦労だ（下の写真）。

7枚のレンズを最適な位置に組み上げる



主鏡からの光

左の写真はカメラの最下にあるレンズを枠にはめているところ。レンズはそれぞれ枠にはめられ、枠ごと組み立てられた。主鏡からの光は、上のように入射し、CCDセンサーに集められる。



レンズを組み立てているところ。なお、2011年3月11日の東日本大震災の際は、栃木県宇都宮市の工場ではレンズの組み立て・確認作業中だった。写真のフレームにレンズがのっている状態で地震がおきた。フレームがはげしく動き、天井が落ちてきたが、奇跡的にレンズは無事だった。

主鏡からの光を補正するレンズ

センサーとともに重要なのが、光を補正するレンズである。実は、すばる望遠鏡の主鏡は本来、主焦点で撮影する目的で設計されていない（ほかの焦点での観測に合わせて設計されている）。そのため、そのままでは光が主焦点にきれいに集まらず、ぼやけた画像しか撮影できない。つまり、補正レンズを使って光をきれいに集める必要があるのだ。

さらにHSCでは視野を拡大するため、巨大なレンズをつくる必要がある。従来のカメラのレンズが直径50センチメートルだったのにくらべ、HSCでは直径85センチのものが必要だった。「まず透過率の高い、大きなガラスを手に入れることに苦労しました」と宮崎室長は話す。レンズは光を透過させて使うため、微小な泡が入っていたりにごっていたりしては困る。均一に高い透過率をもつ、質のよいガラスを手に入れるのは簡単ではなかった。しかも、ガラスと一言でいっても何百もの種類がある。「材料の配合のちがいで、屈折率などのレンズの性能が変わります。実現可能な種類のガラスを探し、全体の設計を考える必要がありました」（宮崎室長）。

HSCは上のイラストのように7枚のレンズが上下

に並んでいる。ガラスの性能を考慮^{こうりょ}して、それぞれのレンズの形や配置が設計されたのだ。

非球面の凸レンズをつくった高い技術

7枚の中には、作製が技術的に非常にむずかしい「非球面凸^{とつ}レンズ」が含まれている。「非球面凸レンズを使うと、より像の質を高めることができることが計算されていました。しかし、はじめは実現はむずかしいのではないかと考えていました」(宮崎室長)。まず非球面レンズとは、球面ではない曲面レンズをさす。球面レンズはおわんのような形のものにみがき粉をつけてけずれば比較的簡単にできあがる。しかし非球面はそうにはつくれない。「小さい範囲^{けんま}を研磨する筆のようなものを使って、コンピュータ制御で細かくけずる必要があります」(宮崎室長)。しかも研磨したあと検査して確認、といったぐあい^{ぐあい}に研磨と検査をくりかえしてつくるため、時間とコストがかかる。

しかも非球面凸レンズはさらにむずかしい。「凹^{おう}レンズは検査が簡単にできますが、凸レンズはそう簡単ではありません」(宮崎室長)。作成された凸レンズは、プローブ(極小の針)でレンズの面を“なでて”検査をするという特殊な検査方法^{とくしゅ}が採用された。「これは世界に類がない技術です。この技術がなければ実現できなかったでしょう」(宮崎室長)。

フィルターやシャッターもはじめてづくし

レンズに加えて、カメラ内でセンサーに向かう光を調整するものに、フィルターやシャッターがある。フィルターはセンサーに向かう光の波長を調整する。たとえば赤い光だけを通すとといったぐあいだ。シャッターはセンサーに光が入る時間を調整する。一般に天体観測では、暗い光をとらえるため、分単位の長い時間シャッターをあける。

HSC でははじめて、フィルターの交換装置が本体の外に飛びだす形でとりつけられる予定だ。そもそもHSCは視野を最大限に広げるため、主焦点にある筒(トップリング)ぎりぎりのサイズにつくられている。そのため、フィルター交換装置をカメラ本体に入れるスペースがなかった。必要にせまられて外にとりつけることになったものの、外にとりつける

がゆえにいろいろな苦労があったという。

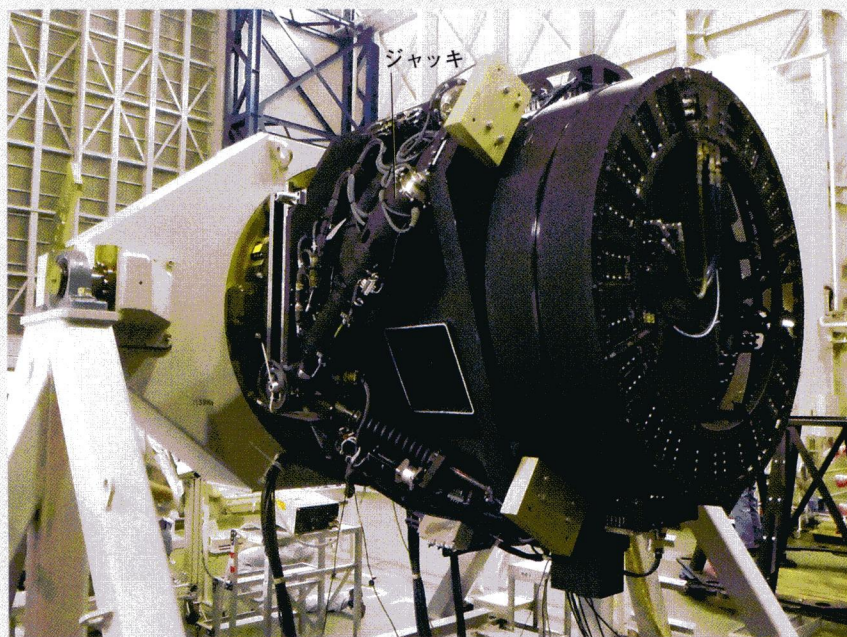
「カメラの下には主鏡がありますから、万が一、装置がこわれて部品が落ちることがあっては大変です。そのため、非常に信頼性の高い装置をつくる必要がありました」(宮崎室長)。マウナケア山頂ではときに風速30メートルという強い風がふく。もちろん風がドームの中に入らないよう、ドームの向きは調整されているが、ふきつけないとも限らない。たとえそんな状況^{じょうきよう}になっても大丈夫なように、万全を期した。そして信頼性を証明するため、フィルター交換装置は、マウナケア山の山頂で、試験観測開始^{たいきめう}ぎりぎりまで耐久試験が行われるという。

巨大なフィルターと外付けされる交換装置



視野が広いHSCではフィルターも巨大にする必要がある。フィルターは全部で6枚。大きなサイズで均一な性能を出すのに、さまざまな苦労があったという。上はフィルターの写真。下は、フィルター交換装置の写真。従来のカメラではフィルター交換装置は、カメラの上部にあった。しかし、HSCではカメラ全体が巨大化したため、上部に入れることができず、外付けする形になった。

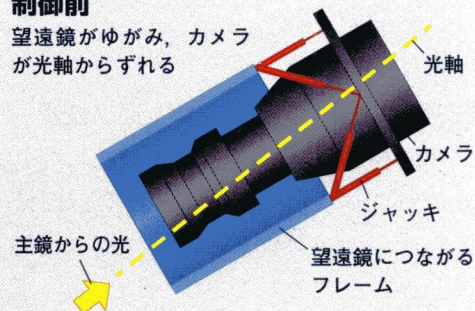
制御能力を確認している試験のようす



HSCが設置される主焦点は主鏡から約15メートルの高さにある。そのため、観測時に望遠鏡を傾けると、主焦点にある筒を支える棒にわずかなゆがみが生じる。それを補正するのが、このジャッキだ。写真は、実際にカメラを傾けて、ジャッキの動きなどを確認しているようす。

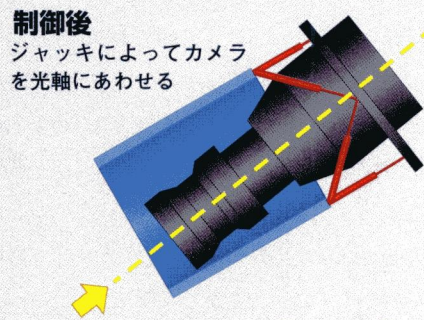
制御前

望遠鏡がゆがみ、カメラが光軸からずれる



制御後

ジャッキによってカメラを光軸にあわせる



ミクロン単位で姿勢を制御

レンズで光を補正するとはいえ、カメラが主鏡から集まる光の中心軸（光軸）に合っていないと、きれいな像は得られない。しかし、カメラが設置される筒（トップリング）は、いわば約15メートルの“棒”で支えられた状態だ。ゆがみが少なくなるように設計されているとはいえ、観測のためにカメラを傾けるとどうしてもその棒にわずかなゆがみが生まれ、カメラと光軸がずれてしまう。

また宮崎室長は「温度が1度かわると支える棒がのびちみして、長さが数百マイクロメートルかわります」と話す。ドームをあけて観測する望遠鏡は、外の環境にさらされるため、大きな温度変化の影響を受ける。これらさまざまな原因によって発生するずれを補正するのが、カメラと望遠鏡をつなぐ部分にあるジャッキである。

HSCは、望遠鏡本体と6本のジャッキでつながった構造をしている。これによっていわば、カメラは、筒の中に“浮いた”状態（上のイラスト参照）になっているのだ。6本のジャッキを動かすことで、“浮いた”カメラ部分を自由に傾けることができる。この動き

で光軸に合わせるのだ。

一見簡単なようだが、「筒の中のカメラはそれだけで約1.5トン近くの重さがあります。鮮明な画像を得るには、1.5トンのものを1マイクロメートル単位で位置決めする必要があります。これには高い技術が必要です」と宮崎室長は解説する。この技術は従来の主焦点カメラでも採用されている。しかしHSC用に、より軽量でひずみが少なくなるように新規に設計し直したという。

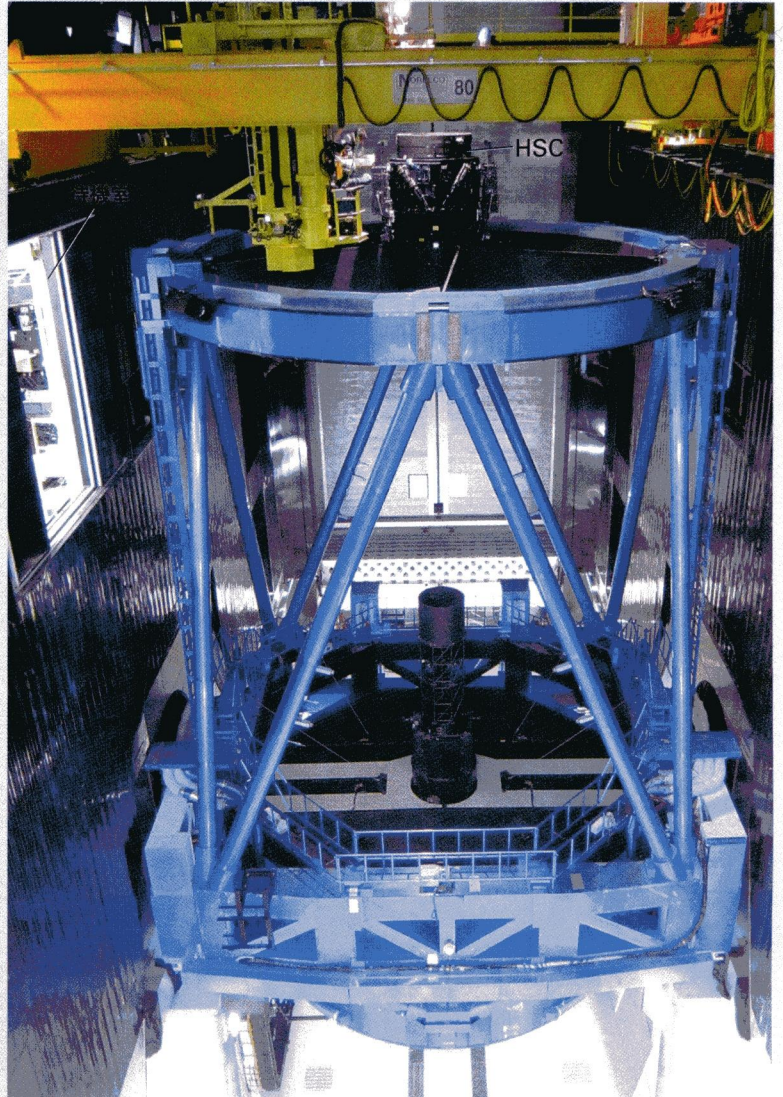
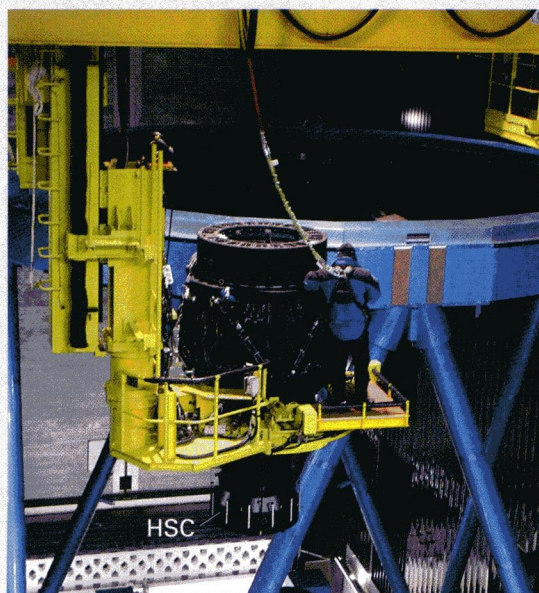
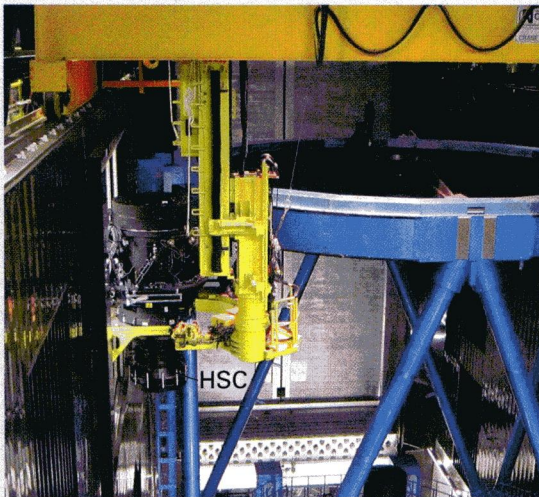
「ピント合わせ」もこのジャッキで

カメラは主焦点に設置されるが、それだけでは完全にピントが合うことはない。姿勢制御に使われるジャッキは、カメラのピント合わせにも使われる。これらのジャッキは、カメラの高さと傾きを自由に微調整することができるためである。

「ピントは計算値としてここだというのはありますが、それではどうしてもずれてしまうので、実際に星を見ながらジャッキを動かして合わせるのです」（宮崎室長）。

6本のジャッキも鮮明な像を得るために、重要な役割をはたすのだ。

望遠鏡への HSC 取り付け試験 HSC は黄色の装置にのせられて待機室から運びだされ（左上、左下）、設置される（右）。



富士山をこえる高地で取り付け

上の写真は、2011 年 10 月に行われた、すばる望遠鏡への HSC の取り付け試験のようすだ。主焦点の筒（トップリング）と HSC のすき間は約 2 センチメートルしかないため、HSC が筒にぶつかっていないか、などが細かく確認された。

すばる望遠鏡は、標高約 4200 メートルの山頂にあり、その高さは富士山より高い。当然、空気も薄く、組み立て作業や、確認作業は平地で行うより、たいへんだ。普通に動くことさえ、なれないとむずかしい。しかも HSC をとりつける筒は、ドームの床から 20 メートルの高さにある。そして主鏡の上での作業に

なる。下に何かを落とすことは許されない。「取り付け試験はたいへんな作業ですが、機器の担当者が責任をもって確認してきました」（宮崎室長）。

主焦点の筒（トップリング）にはカメラ以外に、さらに光を反射させる副鏡がのることもある。そのため、実際に運用がはじまれば、HSC はつけたり、はずしたりすることになる。

トップリングへの装置の出し入れは、プログラミングされ、自動制御で行われる予定だ。使わないときは、HSC は、望遠鏡のとなりにある「待機室」にしまわれる。待機室にはさまざまな装置が置いてあり、必要に応じて、写真の黄色の装置によって、主焦点へと運ばれる。

ダークエネルギーの解明を目指す

すばる望遠鏡の新しい主焦点カメラ HSC を使うことで宇宙の何が明らかになるのだろうか。宮崎室長は「私たちがいちばんの研究目標にかかっていることは、『ダークエネルギー』を調べることです」と話す。

これまでの天文観測結果から、宇宙には、目に見えないが、周囲に重力をおよぼす未知の物質「ダークマター（暗黒物質）」と、宇宙の膨張を加速させる正体不明のエネルギー「ダークエネルギー」が存在するとされている。ダークマターが宇宙の構成成分の約 23%、ダークエネルギーが約 72% を占め、二つ合わせると宇宙の成分の約 95% にもなる。宇宙の大部分は正体不明のものでできているのだ。

重力レンズ効果で、ダークマターの分布を調べる

ダークエネルギーの量は、宇宙膨張の歴史を調べることで推測できる。宇宙膨張の歴史を調べる方法にはいくつかある。「私たちは、ダークマターの分布を宇宙膨張の歴史にやきなおすというルートで、ダークエネルギーを調べる予定です」（宮崎室長）。

HSC の強みはどこにあるのだろうか。宮崎室長は「HSC は、非常に鮮明なイメージを広い視野で観測

できます。しかもすばるは大きな主鏡をもつので、暗い天体も観測できます。この三拍子がそろった望遠鏡はほかにはありません」。

HSC の特性をいかすと、遠くて暗い非常にたくさんの銀河の、精密な形状を観察することができる。「その観測結果を使って、重力レンズ効果から、ダークマターの空間分布を直接調べるができるのです」（宮崎室長）。

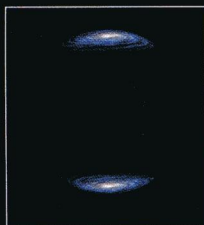
「重力レンズ効果」とは、強い重力をもつものが、まるでレンズのようににはたらき、光を曲げる現象だ。銀河と地球の間に、ダークマターが大量に存在すると、重力レンズ効果によって銀河からの光がゆがみ、地球では銀河の像が二重に見えたり、ゆがんで見えたりするのだ。「ゆがんだ銀河の変形量を調べると、銀河の手前にあるダークマターの分布を推測することができます」（宮崎室長）。

ダークマターの分布は、宇宙膨張を知る手がかりに

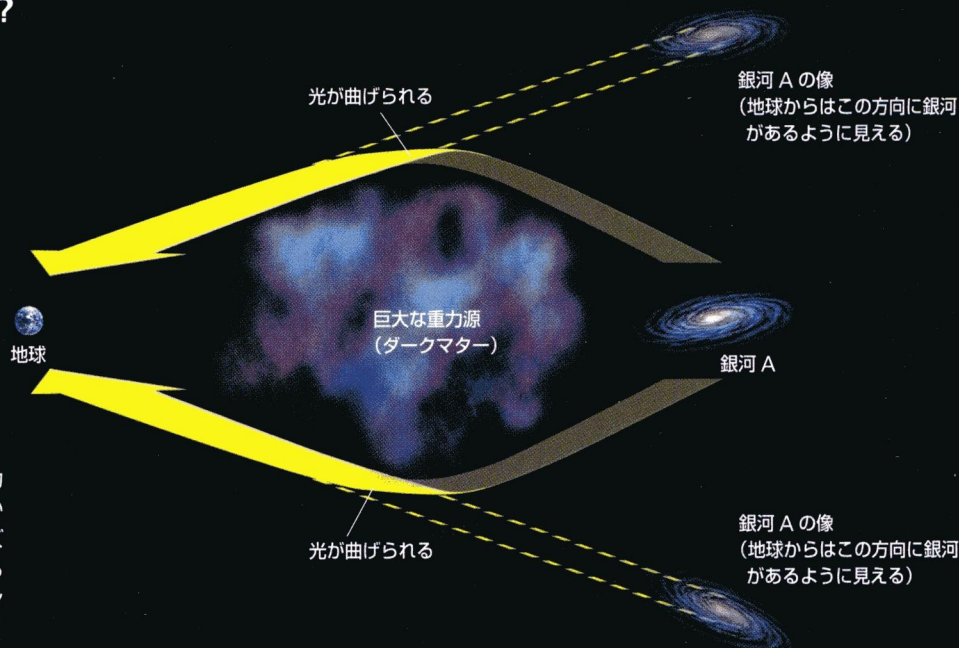
ダークマターとダークエネルギーはどのようにつながるのだろうか。

ダークマターの分布は宇宙の進化とともに、一様な状態から、重力の作用で“むら”（濃淡）がある状態へと変化してきたと考えられている。「ダークマタ

重力レンズ効果とは？



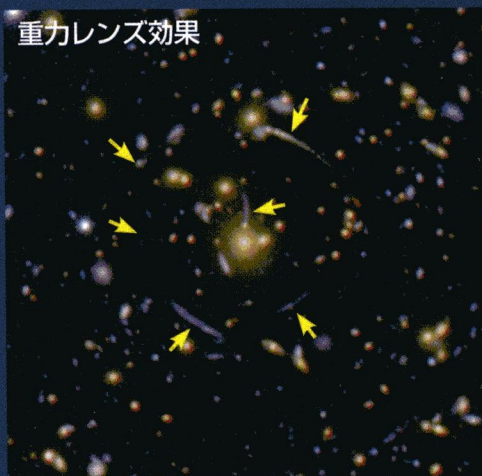
地球から見た、ゆがんだ銀河 A の二つの像



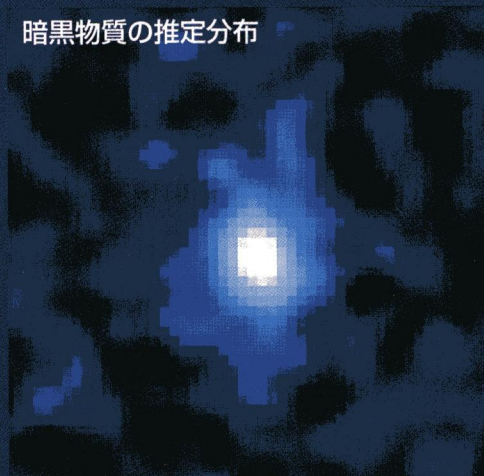
天体と地球の間に、強い重力をもつものがあると、天体からの光が曲げられて、レンズのはたらきをすることが知られている。これは「重力レンズ効果」とよばれている。

従来のすばる主焦点カメラで撮影された重力レンズ効果

重力レンズ効果



暗黒物質の推定分布



左は、すばる望遠鏡の従来の主焦点カメラで撮影された銀河団の画像。黄色矢印が、重力レンズ効果によって、ゆがんだ銀河の像だ。右は重力レンズ効果から計算された銀河団内のダークマターの分布。これは、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構（IPMU）の大栗真宗特任助教らのグループによって解析された結果だ。HSCで広い領域を一度に観測することで、今後、さらにダークマターの分布が明らかになるはずだ。

一の“むら”の成長ぐあいを調べると、まず宇宙の膨張の歴史を知ることができます」（宮崎室長）。宇宙は膨張している。宇宙の膨張が速いと、“むら”が成長する前にひきのばされてしまうため、“むら”がでにくくなる。そのため、ダークマターの“むら”の成長ぐあいを調べると宇宙膨張の歴史がわかるのだ。

そして「宇宙膨張の歴史がわかれば、ダークエネルギーの分量を推定することができます。ダークエネルギーは、宇宙膨張の勢いをます作用があるとされるものだからです」（宮崎室長）。

ライバルを頭一つリード

現在、世界中の天文学者がダークエネルギーの解明を目指している。アメリカでは、すばるよりも視野の広い望遠鏡をつくってダークエネルギーについて調べようとする計画が進められている。「LSST」とよばれる望遠鏡計画で、南米チリが建設地に決まっている。計画はまだ先で、今のところ、現存する望遠鏡で、HSCのような性能をもつカメラを物理的に搭載できるものは存在しないという。そのため、しばらくの間は「視野が広い」、「感度がよい」、「遠くまで見られる」という「三拍子」そろったカメラは、すばる望遠鏡にしか搭載されない。

「新しく建設するにしても時間がかかります。観測のレースで、すばる望遠鏡は頭一つリードしていることになるでしょう」（宮崎室長）。HSCの観測がはじまれば、世界初の画期的な成果がうまれるだろう



取材に答える国立天文台 Hyper-Suprime-Cam Project の宮崎聡室長。プロジェクト全体をマネジメントしている。すばる望遠鏡のあるハワイと日本を往復する忙しい日々のなか、ニュートンのために時間を割いていただいた。

と、世界中の注目が集まっている。

「ほかに期待することは？」という問いに、宮崎室長は「すばる望遠鏡の従来の主焦点カメラは、最初の目的をこえて、宇宙最遠方の銀河の発見といった、結果としてまったく新しいフロンティアを切り開いてきました。このHSCも10年使ううちに、予想しなかった新しい分野がきりひらけたらいいと思います。それが一番楽しみです」と語る。

非常識といわれた従来の主焦点カメラが搭載されて約10年、すばる望遠鏡は当初の想像をこえる数々の成果を生みだしてきた。HSCは、2012年中は試験観測を行い、2013年はじめから本格的な観測をはじめるとを予定している。HSCが宇宙観測の新しい時代をつくろうとしている。

（担当：編集部 森久美子）

「宇宙の渚」を駆ける謎の閃光

雷雲上空にあらわれる巨大な発光現象を NHKの超高感度カメラがとらえた

地球の大気が、真空の宇宙と接する場所。地球を陸、宇宙を海にたとえると、そこは「宇宙の渚」ともよぶべき場所だ。その宇宙の渚では、地上の雷にもなって、高さ数十キロメートルにもわたる巨大な光があらわれることが、1989年に発見された。2011年7月、NHKが開発した超高感度カメラでの撮影が行われ、スプライトの微細な構造が変化するように世界ではじめてとらえることに成功した。なぜにつつまれた巨大な発光現象の正体を追う。

協力 高橋幸弘 北海道大学大学院理学院教授

佐藤光輝 北海道大学大学院理学院講師

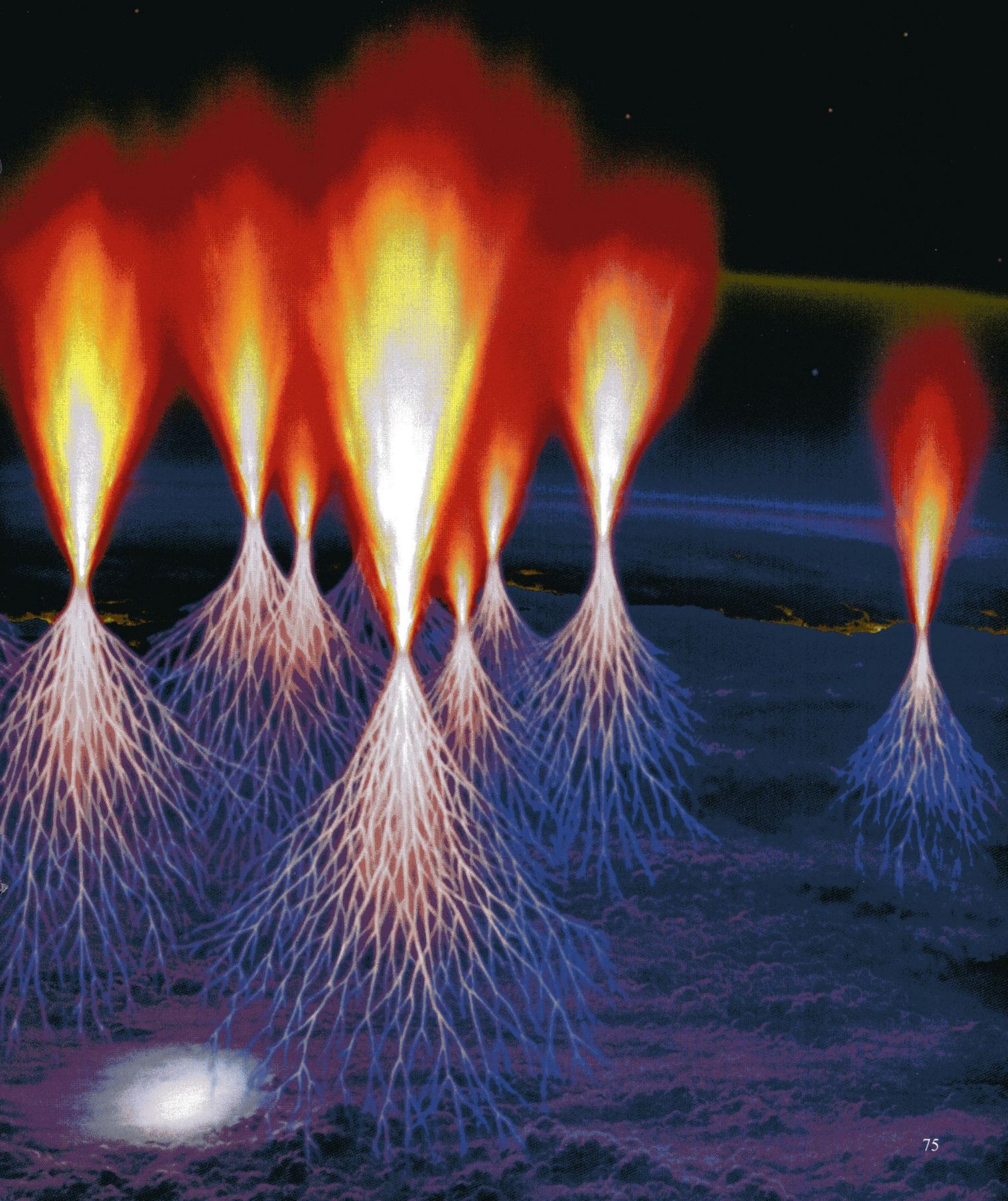
画像 NHK 日本放送協会

雷雲上空にあらわれた「スプライト」

雷で光る雲のはるか上空に、いくつもの巨大な光の柱「スプライト」がのびるようすをえがいた。雷にともなわれてあらわれるスプライトの輝きは、ほんの一瞬だ。奥に見える緑の光は「大気光」とよばれ、高度100キロメートル付近の酸素原子が出す光である。



—スプライト



「宇宙の渚」では、さまざまな発光現象がおきる

地上からはるか上空、高度 10 数キロメートルから数百キロメートル。そこは地球の大気と真空の宇宙がせめぎ合う「宇宙の渚」^{なぎさ}ともよぶべき領域だ。

地球と宇宙が接するこの場所は、その高さによってさまざまな現象がおきている。たとえば、北極域や南極域の空をいろうどる「オーロラ」は、高度 90 キロメートル以上の上空で大気が輝く現象だ。^{かがや}また、一瞬にして夜空を横切る「流星」は、宇宙のちりが大気に突入し、^{とつにゅう}高温になって発光するものだ。ちりは高度 90 キロメートル付近で燃えつきる。

もっと地球に近いところではどんな現象がおきているのだろうか。高度約 10 キロメートル以上では、大気が安定しており、目立った現象はおこらないと長い間考えられてきた。ところが近年、この静かだと思われてきた領域に、高さ 50 キロメートルにもなる、宇宙へ向かって放たれる巨大な放電現象が、おきていることがわかってきた。

1989 年、アメリカ、ミネソタ大学の研究チームは、ロケット搭載用カメラの試験のために地上から星空を観測していた。すると偶然、^{くうぜん らいうん}雷雲上空に不思議な“雷”をとらえたのだ。

雷は普通、^{ふつう}雷雲から地上へ向けて放たれる。しかし、ミネソタ大学の研究チームがとらえた光は、雷雲のはるか上空から宇宙へ向けてのびていたのだ。

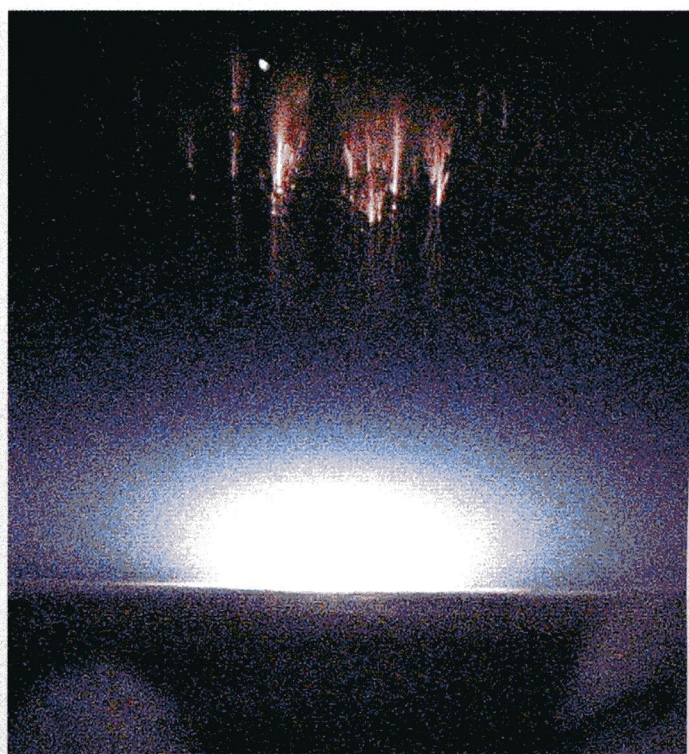
高高度でおきる、この正体不明の発光現象はのちに、英語で「妖精」を意味する「スプライト (sprite)」と名づけられた。この発見が 1990 年にアメリカの科学誌『サイエンス』^{サイエンス}に掲載されて以降、にわかにスプライトの研究がはじまったのである。

実はこの現象は、飛行機のパイロットたちが以前から^{いくど}幾度も目にしていたものだった。雷雲の上空を飛んでいるとき、宇宙へへのびる一瞬の閃光を見たという例があったのだ。ところが、そうしたなぞの光の正体が何であるかは、実際に確かめられたことがなかったのである。

ほんの一瞬の巨大な発光

巨大な放電現象であるスプライトは、地上へ落ちる雷にともなって発生する。大きな雷がおきると、その雷雲のはるか上空にスプライトがあらわれる。地上からの高度約 40 キロ

飛行機から撮影したスプライト



飛行機に搭載した NHK の超高感度カメラを使い、上空で撮影したスプライト。それぞれの画像下の白く明るい光は、大気で散乱した雷の閃光で、その下の水平にのびる線が雷雲の上端にあたる。画像上の不思議な形をしたオレンジの光がスプライトだ。左と右ではことなる形をしているのがわかる。スプライトにはさまざまな形がみられるが、なぜそのような多彩な姿となるのか、くわしいことはあまりよくわかっていない。



夜空にあらわれた2本の“ニンジン”

二つの「キャロットスプライト」。中心の明るい部分が起点となり、光が下と上へのびてこのような形状になる。下部の筋状の構造がニンジン^{ニンジン}の根のように見え、上部のもやもやとした雲状の構造がニンジン^{ニンジン}の葉のようにみえる。



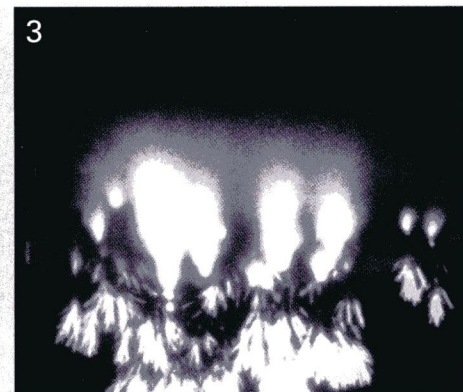
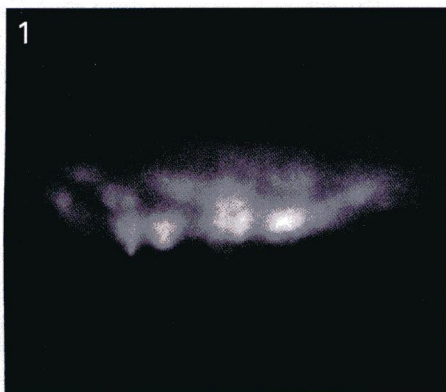
クラゲのような姿

カラム状スプライト。複数の柱（カラム）が集まって全体としてクラゲのような形にも見える。



樹状にのびる光の枝

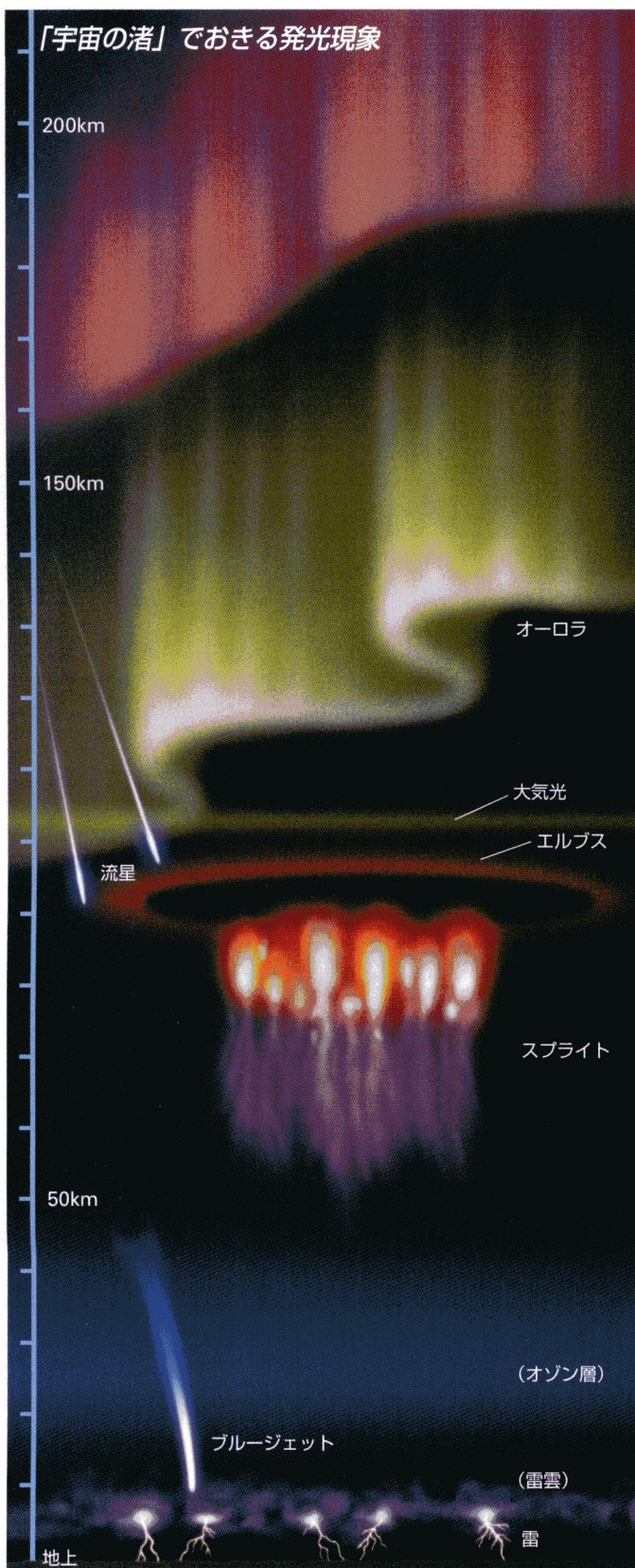
よく見ると中心の太い光の筋から、斜め上^{ななめ}に向かって無数の細い枝がのびているのがわかる。



下にのびて行くにつれ、碎け散っていく光の筋

スプライトの光の筋がのびていくようすを、時間を追ってとらえた画像。はじめ雲のようなぼんやりとした光があらわれ（1）、そこから下に向かって垂れ下がるように光の筋がのびていく（2）。光の筋は下にのびていきながら、次々と碎け散るように枝分か^くれしていくのがわかる（3）。一方で、はじめに光の筋があらわれた部分は明るさを増し、上にものびていくのがわかる。また、ぼんやりとした光も上へ広がっていく。

「宇宙の渚」でおきる発光現象



地上から高度 200 キロメートルまでの領域でおきる、さまざまな現象を示した。雷雲は緯度にもよるが、最高でおよそ 10 キロほどの高さになる。スプライトの研究がはじまった後、雷雲上端から高度 40 キロあたりまで、青い光が一瞬にして昇る「ブルージェット」という現象も見られた。スプライトは、高度 40 ～ 90 キロにあらわれる。流星が輝く高度はおよそ 80 ～ 90 キロ付近だ。高度 90 キロ付近では、スプライトとともに、リング状の光が外へ向かって広がる「エルプス」という現象がおきることも知られている。北極域や南極域でみられるオーロラは、高度 90 キロ以上で輝いている。

メートルから約 90 キロメートルのあたりに、ほんの一瞬輝くのだ。その時間はわずか 1000 分の 1 秒から 100 分の 1 秒程度だ。

スプライトの形状は大きく分けて 2 種類ある。一つは、「キャロットスプライト」だ。まるでニンジン(英語でキャロット)のような形をしているためそうよばれる。もう一つは、「カラム状スプライト」だ。これは、光が上下に柱状にのびる。たくさんの柱が同時にたくさん並ぶこともある。

これらスプライトの大きさは大小さまざまだが、一般的なものは直径数十キロメートルほどもある。

雲にたまった静電気が雷を生む

では、スプライトはどのようなメカニズムで発生するのだろうか。スプライトの発生は、雷の発生と深く結びついている。まずは、雷の発生のしくみをみていこう。

積乱雲(雷雲)の中では、強い上昇気流がおきている。水蒸気を多く含む地表近くの空気が上昇気流に乗って上空へ持ち上げられる。持ち上げられた水蒸気は急激に冷やされて、氷晶(約 100 分の 2 ミリメートルほどの氷の結晶)やあられ(数ミリメートルほどの氷の粒)になる。

氷晶やあられは雲の中で風にあおられ、たがいに衝突しあう。すると多くの場合、氷晶は正の電気を帯び、あられは負の電気を帯びるようになる。つまり、静電気がたまるのだ。氷晶は小さく軽いので上昇気流に乗って上空にたまりやすく、逆にあられは比較的大きく重いので、雷雲の下層に集まりやすい。こうして雷雲の上層は正の電気、下層は負の電気に帯電する。

この雲中にたまった電気によって、大気を突き破って地上との間に放電がおきる。これが落雷である。落雷以外にも、雷雲の中で放電したり、雷雲間で放電したりもしている。

雷雲上空で放電がおきるメカニズム

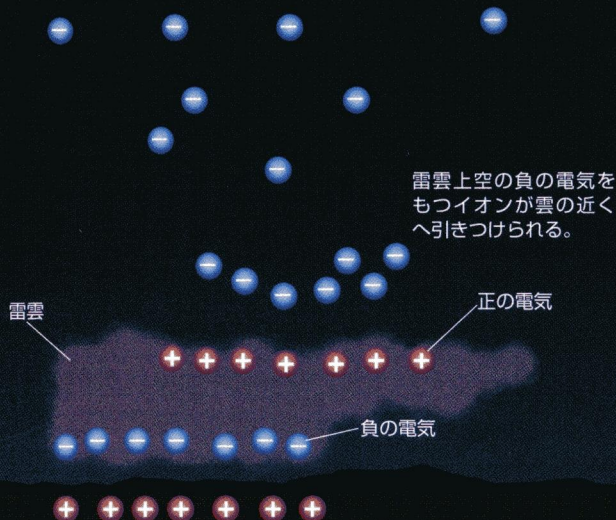
通常の落雷は、雷雲の下層にたまった負の電気が地上へ落ちることでおきる。しかし、雷雲の上層にたまった正の電気を打ち消すように放電がおきる場合もある(雷全体の 10% ほどといわれている)。こうした落雷がおきたとき、雷雲上空にスプライトが発生するという。

雷雲上空の大気には、紫外線などの影響で生じた負の電気をもった粒子(イオン)がただよっている。それらの粒子は、雷がおきる前には、雷雲にたまった正の電気に引かれて雷雲近くへ引き寄せられている。このとき、落雷によって雷雲に

スプライト発生のおきみ（準静電場モデル）

落雷の発生前

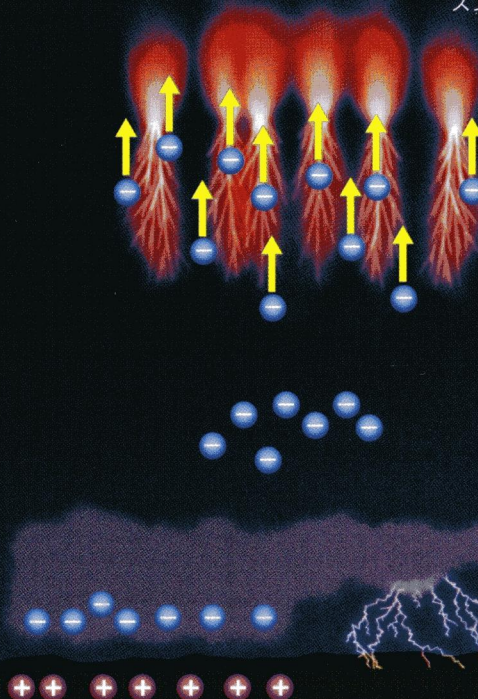
高度約 60 キロメートル以上では、太陽の紫外線などによって大気の一部は電離した（原子や分子から電子が引きはがされた）状態になっている。



落雷の発生時

スプライト

雷雲近くの負の電気をもったイオンの影響で高い電圧がかかる。これにより大気中の電子が上へ向かって一気に加速される。



落雷によって、雷雲上層の正の電気が打ち消される。

落雷がおきる前には、雷雲の上層にたまった正の電気によって、雷雲の上には負の電気をもつイオンが引きつけられている（左）。落雷によって雷雲上層の正の電気が消えると、その上にたまった負の電気の影響でその上空に高い電圧がかかる（右）。すると、高高度の大気中にある電子が上へ向かって急激に加速され、大気中の窒素分子などに衝突する。このときに出る光がスプライトだ。電子が大気中の分子に衝突すると、分子から電子がはじき出される。はじき出された電子も、高い電圧で加速されて周囲の分子に衝突し、さらに光と電子を生む。こうして、次々と光の筋が伸びていくわけである。

たまっていた正の電気が瞬時に消えると、取り残された負の電気の影響で、雷雲上空の領域に高い電圧がかかる。この高い電圧がスプライト発生のカギだ。

スプライトがあらわれる高度の大気には電子が下層にくらべて多くあり、それらの電子は、落雷の結果発生した高い電圧により、上へ向かって急激に加速される。加速された電子は、周囲の大気中の分子と衝突して光を放つ。これがスプライトだ。これは「準静電場モデル」とよばれ、現在研究者たちが考えている、スプライトの基本的な発生メカニズムである。

鮮明な姿をとらえるのはむずかしい

この準静電場モデルは、15 年ほど前に提唱されたものだ。しかしその後の観測が進むにつれて、このモデルだけでは説明できないことが数多くあることがわかってきた。

雷やスプライトの研究をしている、北海道大学大学院の高橋幸弘教授は、「なぜスプライトには、ニンジン状や柱状など、形状にバリエーションが生まれるのかを説明するには、単純な準静電場モデルだけでは不十分です」と話す。

また、スプライトが同時に複数発生したり、落雷から最大で 0.1 秒以上遅れてあらわれたりすることなども、くわしいおきみはわかっていないという。

こうしたなぞの答を見つけるには、スプライトのくわしい観測が不可欠だ。しかしスプライトは、高度 40 キロメートル以上ものはるか上空でおきる一瞬の現象である。詳細な姿をとらえる必要があるが、それはなかなかむずかしい。

スプライトを地上から観測するには、条件がかぎられる。まず、雷雲の上空にあらわれるため、雷雲がなくてははいけないが、厚い雲を通して上空を見ることは当然できない。そのため、観測地点には雲がないが、遠くに雷雲があるという条件が必要だ。雷雲が地平線近くに見える、遠くはなれた場所から観測しなくてはならないのである。そのため、どうしても細かい部分までとらえることはむずかしいのだ。

また、発光している時間は 1000 分の 1 秒から 0.1 秒と、きわめて短いので、どのようにしてニンジンやクラゲのような姿に成長していくのかという、時間変化をとらえるのはむずかしい。

超高感度カメラで上空から撮影

地上からの観測には限界がある。そこで 2011 年 7 月、スプライトの研究者と NHK は、飛行機を使い、上空からスプライトハンティングを行った。NHK が独自に開発した超高感度ハイスピードカメラを飛行機 2 機に搭載し、間近でスプライトをとらえようというのだ。

上空では、地上とことなり空気が薄^{うす}いため、スプライトの光が大気に吸収されたりぼやけたりしにくい。また、何より地上からの観測よりも接近してスプライトをとらえることができるため、微細^{びさい}な部分まではっきりとらえることができる。

この観測で、多くのスプライトの詳細な姿をとらえることに成功した。76～77 ページで紹介している写真は、そうしてとらえられたスプライトだ。77 ページ下の 3 枚の画像からは、光の筋がのびていくようすがよくわかる。光の筋は、のびて行くにつれ、しだいに碎^{くだ}けて細かな筋になっていく。

スプライトなどの発光現象を観測的に研究している、北海道大学大学院の佐藤光輝講師は「このように、スプライトの光の筋が細かく砕け散っていくようすをとらえたのは、世界でもはじめてのことです」と話す。こうしたことは、これまでの粗^{あら}い画像からは発見できなかったのだ。

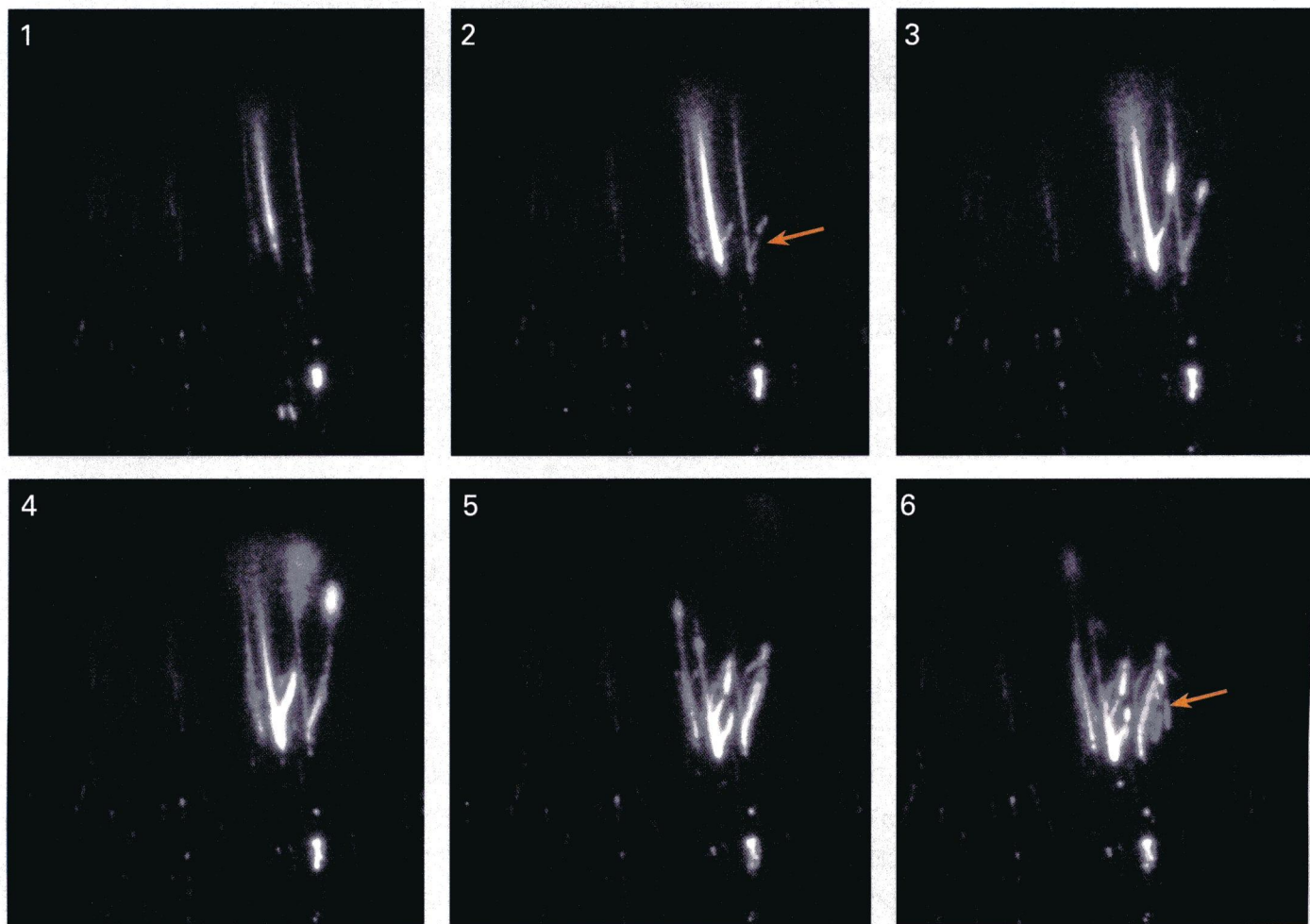
1 万分の 1 秒の動きの変化をとらえた

この観測で使用された NHK の超高感度ハイスピードカメラでは、1 秒間に 8300 枚もの画像を撮ることができる。今回、スプライトがあらわれはじめる瞬間から、消えていくまでの一部始終^{こくめい}を克明に記録することにはじめて成功した（下の写真）。

この映像によって、これまで知られていなかった現象がとらえられた。下の写真を見てみよう。これまで、スプライトは高度 70 キロメートルのあたりから光りはじめ、そこから下に向かって光の筋がのびていくと考えられていた。

しかし、ハイスピードカメラの映像からは、柱状にのびた

超高感度ハイスピードカメラがとらえたスプライト（連続画像）



あるスプライトが成長していく瞬間をとらえた連続画像。光の筋ははじめ、下に向かってのびていた（1）。しかし、上へ向かう枝がのびはじめる（2 の矢印）。上へのびていく光の筋は、その後ふたたびのびる方向をかえ、今度は下へ向かってのびていく（6 の矢印）。その後、またも上へのびる筋があらわれる（10 の矢印）。このような現象は、今回の観測ではじめて見つかった。

光の筋が途中で折り返して、今度は上へと伸びはじめることがわかるだろう。そして上へと伸びた光の筋は、あるところでまたも下へ折り返していったのだ。その後も、光の筋はジグザグとした折り返しを何度もくり返したのである。

佐藤講師は、「こうした現象が確認された例はありませんでした。なぜこのように光の筋が何度も折れ曲がるのか、くわしいことはわからないというのが正直なところですよ」と話す。この観測によって新たな現象が発見され、さらに挑戦すべき課題が見えてきたのだ。

雷の真上にあらわれるとはかぎらない？

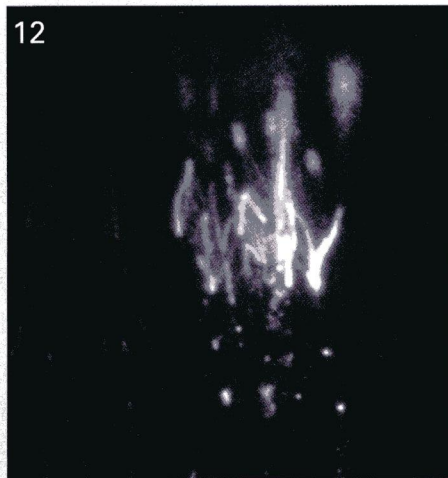
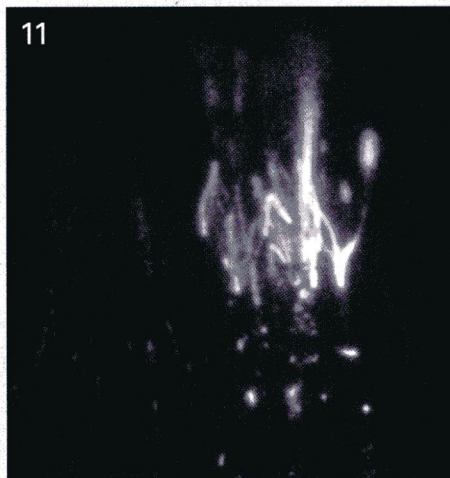
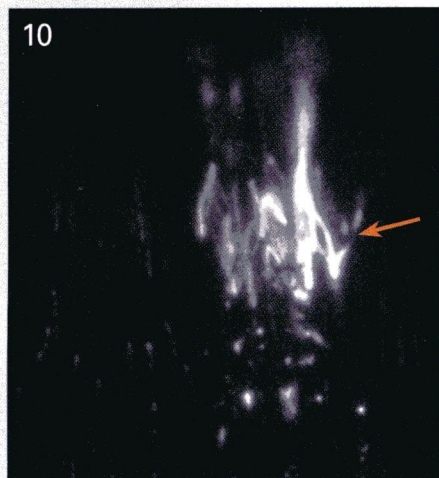
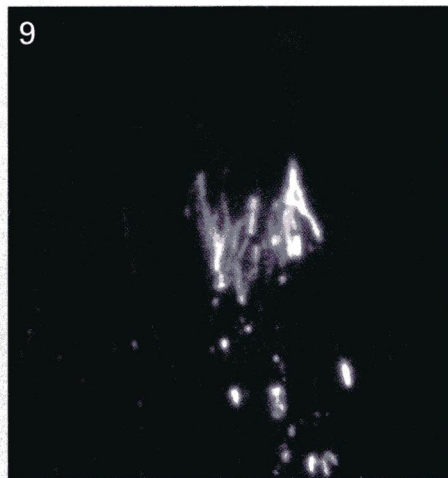
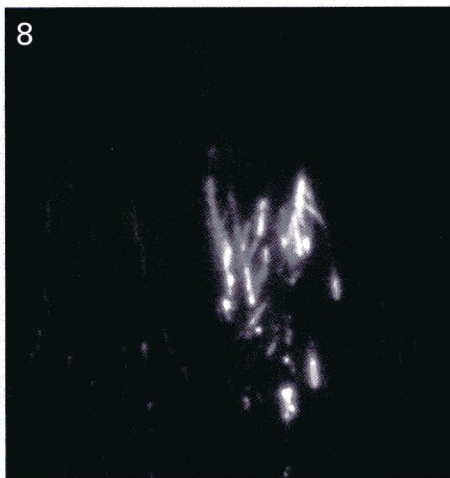
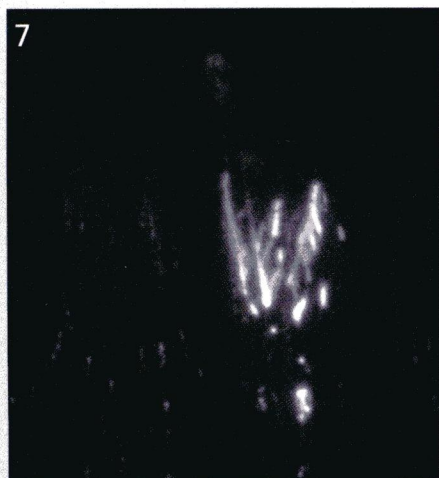
こうしたスプライトの微細な構造ができるしくみだけでなく、スプライトが、雷の発生した地点に対してどこにあらわれるかといった、広い範囲でのメカニズムもよくわかっていない。実はスプライトは、雷雲の真上にあらわれるとは限らないのだという。「スプライトは、雷の発生地点から最大で

50 キロメートルもはなれたところにあられることもあります」(高橋教授)。

これまでのスプライトの観測では、地上のある1地点から撮影されたものがほとんどだった。これだと、スプライトが雷の位置に対して、真上にあらわれたのか、もっと撮影地点に近いところや遠いところにあられたのかがわからない。また、1回に複数あらわれるスプライトが、それぞれどういう位置関係で分布しているのかもわからない。

しかし、2地点から同時にスプライトをとらえることができれば、「立体視」によってスプライトの位置関係や立体的な構造がわかる。ただ、地上からの観測ではどうしても画像がぼやけてしまい、どの光とどの光が同じものか対応関係を精度よく決めることがむずかしい。だが、超高感度カメラによる鮮明な画像であれば、対応関係を特定することができる。

そこで、今回の上空からの観測では、およそ100キロメートルはなれた場所を飛ぶ2機の飛行機から、同じスプライト



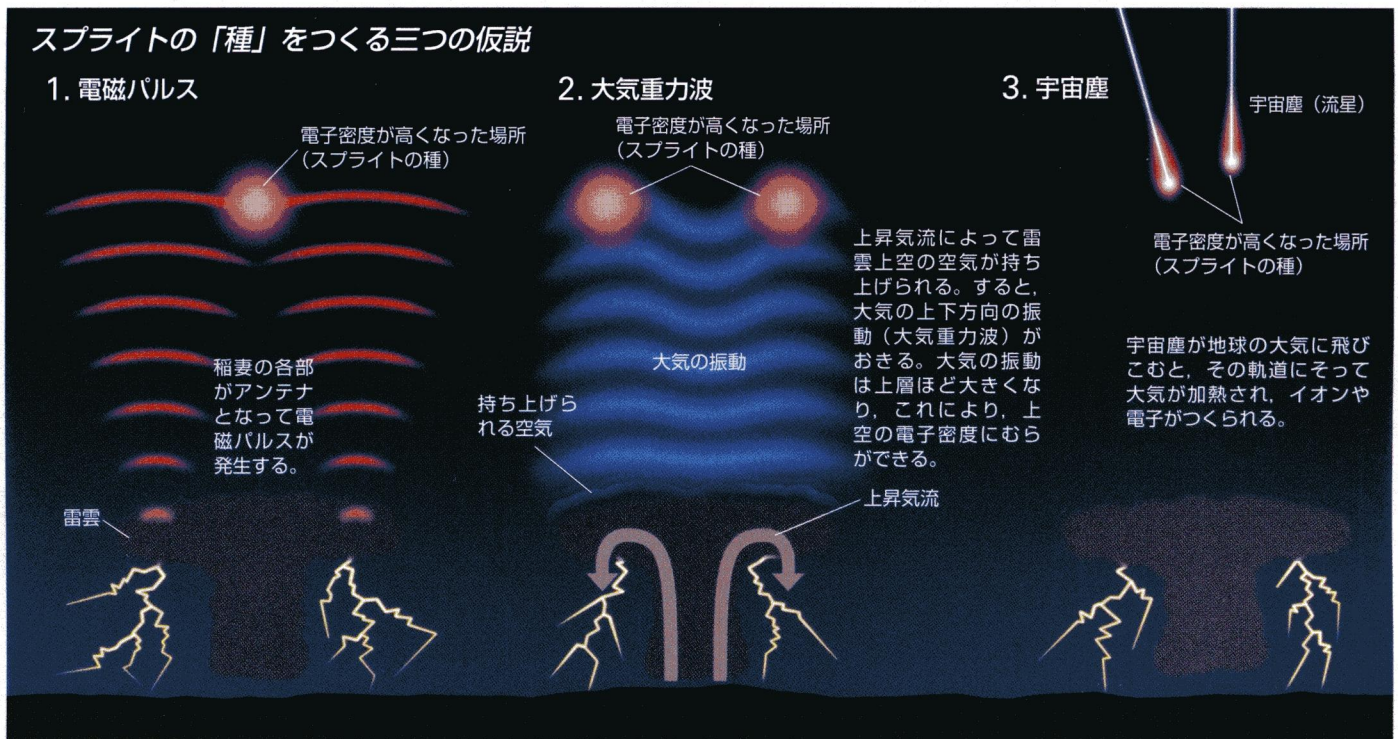
スプライトの枝の細かな部分までとらえるには、光をたくさん集めなくてはならない。一方、短い時間の変化をとらえるということは、1コマの画像を撮影する時間が短いということなので、受け取る光の量は少なくなってしまう。そこで、カメラに入る光を増幅する特殊な装置をつけて、このジレンマを克服している。10分の1秒以下というほんの一瞬でおきるスプライトを、ここまで細かい時間間隔でとらえたのは世界でも例がない。

スプライトの「種」をつくる三つの仮説

1. 電磁パルス

2. 大気重力波

3. 宇宙塵



スプライトがその光の柱をのばすきっかけとなる「種」は、上空で電子密度が高くなっている部分だと考えられる。上では、その「種」を生み出すメカニズムの三つの仮説を示した。最近特に注目されているのが、雷が発生した際に出る、瞬間的で強力な電磁波（電磁パルス）である。スプライトと雷が出す電磁パルスの観測データから、この電磁パルスがスプライトの発生に大きな役割を果たしていることがわかってきたという。

をねらった。そして、みごと同じスプライトを別の方角からとらえることに成功したのだ。この成果から、スプライトのなぞの解明につながる、新たな研究結果が得られることが期待されている。

スプライトの「種」はどうやって生まれる？

今回得られたスプライトの微細構造をつくるメカニズムや、その変化の仕方を決めるメカニズムは、今まさに研究が進められている部分だ。佐藤講師は「スプライトが発生するきっかけをつくる主な原因として、三つ考えられます」と話す。

雷が発生するとき、稲妻の経路が送信アンテナのようになり、瞬間的な強い電磁波（電磁パルス）が発生することが知られている。稲妻は枝分かかれた複雑な形をしているので、電磁パルスはそうした枝のそれぞれの場所から放射される。

電磁パルスは上空で重なり合い、場所によっては強め合う。すると、強め合った場所で電子密度が増加することが考えられるという。こうして、高高度の大気中に電子の密度のむらができ、電子の濃い部分がスプライトの「種」になるという。そこが光の筋の起点となると考えられるのだ。電子密度の濃い部分が複数あれば、複数のスプライトが同時に発生することも説明できる。

スプライトの種をつくる原因は、ほかにも考えられる。そ

の一つは雷雲の上空に伝わっていく大気の波（大気重力波）だ。雷雲をつくる上昇気流によって雲の上端の大気が押し上げられる。すると大気中に上下振動する波が発生する。この波が、スプライトが発生する高高度で大気や電子の密度のむらをつくるわけだ。

ほかにも、宇宙から降り注ぐちり（宇宙塵^{じん}）が種をつくる可能性もある。地球には、大きさが1ミリメートル以下の小さなちりが無数に降り注いでいる。宇宙塵が大気に突入すると、その道筋では大量のイオン（電気を帯びた粒子）がつくられる。これがスプライトの種となりうる。

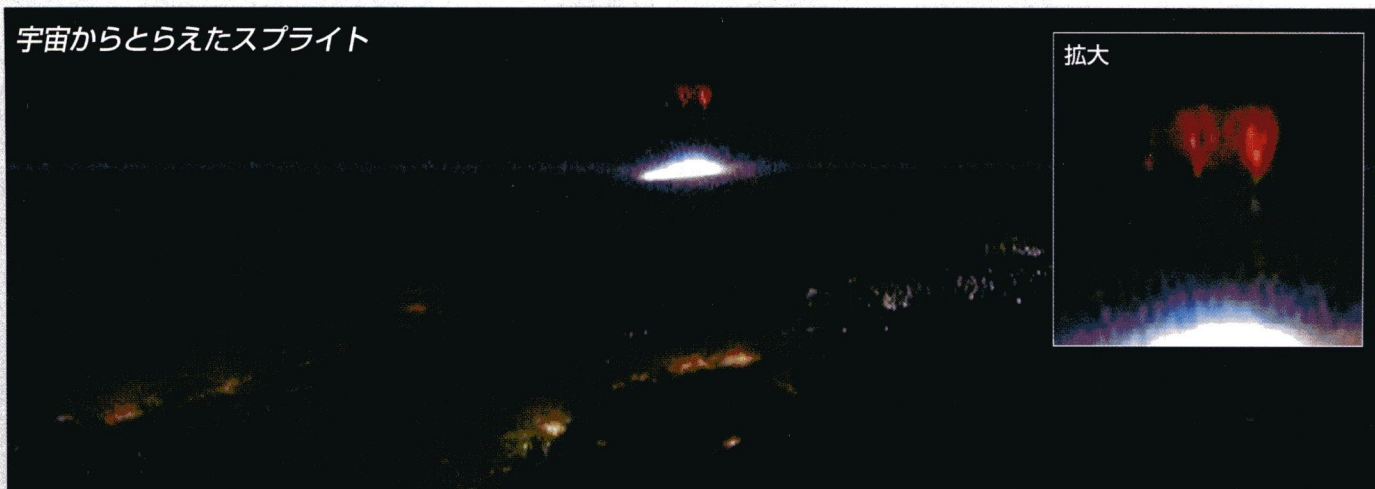
高橋教授は、「世界中から、多くの観測データを集められれば、どんな条件下で、どんな特徴をもったスプライトが生まれるのか、スプライト発生メカニズムにせまることができるでしょう」と話す。

宇宙からスプライトの出現をとらえる

なぞ多きスプライトの正体を突き止めるため、宇宙からもその姿をとらえる試みがある。今回紹介した超高感度カメラは、国際宇宙ステーションにも持ちこまれた。そして、宇宙からもスプライトをとらえることに成功している（上の写真）。

また、宇宙からのさらなる観測計画が世界中で進んでいる。その一つが日本の「JEM-GLIMS」という計画だ。この計画

宇宙からとらえたスプライト



拡大



画像中央に赤い筋が縦にのびている。国際宇宙ステーションに持ちこんだ NHK の超高度カメラによってとらえられたスプライトだ。その下の白くまぶしい光は雷の閃光である。カメラは、国際宇宙ステーションから地球の縁の方向へ向けられている。画像中央の下端に暗く見えるのが台湾本島の一部で、その周囲や、右上にちらばる光は漁船の明かりだ。奥は中国大陸で、このときその上空では雷が多発していた。そして、スプライトはその雷雲のさらに上空にあらわれた。

では、国際宇宙ステーションの日本実験モジュールにスプライトをとらえる専用のカメラを設置し、地球全体のスプライトを一網打尽にしようというものだ。

これまでの宇宙からのスプライトの観測は、地球の縁^{ふち}の方向へカメラを向け、スプライトを横からとらえようというものだった。しかし、これではスプライトが雷の発生場所に対してどの位置にあらわれたのかを正確に知ることはできない。そこで JEM-GLIMS では、カメラを真下^{みち}に向け、スプライトを真上からとらえることで、位置を正確にとらえようとしている。

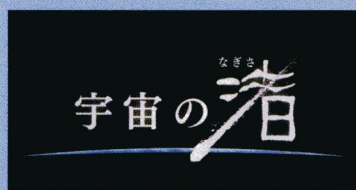
実は、スプライトを真上からとらえることは、とてもむずかしい。スプライトは雷とともにおきるので、カメラには雷とスプライトの光が同時に入ってくることになる。しかし、雷の閃光は非常に明るいので、より暗いスプライトの光が雷の光にうもれてしまうのだ。

そこで、JEM-GLIMS ではカメラに特殊なフィルターをつけ、スプライトの出る特定の波長の光だけをとらえるくふうをしている。雷もこの波長の光を出すのだが、雷は高度が低いので、その光は宇宙に向かう間に地球の大気に吸収されて、宇宙ステーションまでは届かない。一方、スプライトは高度の高い場所でおきるため、空気に吸収されずに宇宙ステーションまで届くわけである。

高高度の大気成分をかえている？

スプライトの研究の中で、雷雲の上端から青い光が高度約 40 キロメートルまでのびる「ブルージェット」とよばれる放電現象も発見されている。スプライトやブルージェットは、

NHK スペシャル「宇宙の渚」



NHK 総合では、NHK スペシャル「宇宙の渚」シリーズが放送されている。スプライトをはじめとする、宇宙の渚でおきるさまざまな現象を貴重な映像とともに紹介する番組だ。

放送予定

5月20日(日) 午後9時～『第2集 天空の女神 オーロラ』

6月17日(日) 午後9時～『第3集 46億年の旅人 流星』

※『第1集 謎の閃光 スプライト』は放送済みだが、NHK オンデマンド (<http://www.nhk-ondemand.jp/>) で視聴できる(有料)。

NHK 宇宙チャンネル 宇宙の渚ウェブページ

<http://www.nhk.or.jp/space/nagisa/>

その放電によって大気を加熱し、オゾンや窒素^{ちっそ}酸化物などをつくる可能性がある。もし世界各地で頻繁^{ひんぱん}におきているならば、放電によって生じた物質が、高高度の大気の成分に地球規模で影響をあたえていることも考えられるのだ。

とくにブルージェットは、オゾン層のまったなかで発生する。そのためオゾン層の化学反応によって、これまでまったく考えられてこなかった影響があるかもしれないのだ。ただし、こうした現象がいったいどの程度の影響をあたえているのかは、ほとんどわかっていない。宇宙からの観測によって地球全体でどれくらいの頻度で発生しているのかがわかれば、ほんとうに影響があるのかを知る大きな手がかりとなる。

発見から 20 年以上が経ち、少しずつその正体がわかってきたスプライト。しかし、まだまだ多くのなぞが残されている。いま世界中の研究者が、地上から、上空から、そして宇宙から、“妖精”の正体を追いかけている。

(担当：編集部 小松研吾)

熱帯雨林にゴリラを訪ねて

ヴィルンガ火山群に暮らすマウンテンゴリラ

アフリカの赤道直下に位置し、たがいに国境を接するルワンダ、ウガンダ、コンゴ民主共和国に広がるヴィルンガ火山群の熱帯雨林。そこは、マウンテンゴリラが生息する貴重な聖域だ。われわれ人間と97%以上も共通する遺伝子をもつといわれる彼らが、この地でどのように生きているのか、その暮らしぶりに接近してみた。

写真・文 前川貴行



標高 4507 メートルのカリシンピ山を筆頭とするヴィルンガ火山群は、ルワンダ、ウガンダ、コンゴ民主共和国の3国が国境を接する位置にあり、それぞれの国で名称のことなる国立公園として保護されている。また、ヴィルンガ火山群の北北東数十キロ先には、ウガンダの「ブウィンディ原生国立公園」があり、両地域がマウンテンゴリラの希少なすみかとなっている。

群れのリーダー

草を食べる、群れの最年長の雄。ことなる群れのリーダーとはげしく争うこともあるが、普段は温和に群れをまとめて導く。





火山の中腹域に暮らす

ルワンダ、火山国立公園内の山の中腹で、若いマウンテンゴリラが周囲の葉を食べながら寝転がり、こちらのようすを興味深くみつめる。

絶滅が危惧^{ぜつめつ}されている彼らは、標高1000メートルから4000メートルあたりを日々採食しながら移動している。とげだらけの植物が生い茂^{しげ}るジャングルで彼らを追うのは困難ではあるが、間近で接するその存在感は感動的である。

今回のマウンテンゴリラの取材は、2011年9月にウガンダのブウィンディ原生国立公園、2011年2月と2012年1月にルワンダの火山国立公園で行った。

子煩悩なマウンテンゴリラ

マウンテンゴリラは一般に、1頭の大人の雄と、複数の雌やその子供からなる、10頭前後の群れを形成している。大人の雄は、背中がくらのように白くなるため「シルバーバック」とよばれている。シルバーバックは、採食のために移動するときは先頭に立ち、寝場所の決定も行う。ほかの雄の侵入やヒョウなどの肉食獣の接近から、群れ全体を守るリーダーである。

巨大なゴリラだが、産まれたての赤ちゃんは2キログラム弱と、人の赤ちゃんよりかなり小さい。1年ほどは、母親が肌身はなさず世話に没頭し、母乳で育てる。群れの若いゴリラたちも、赤ちゃんには興味津々だ。かまいたくて、たびたび近づいていく。

生後1年を過ぎると、母親は赤ちゃんをときどきシルバーバックにあずけるよう

になる。シルバーバックは子煩悩で、積極的に赤ちゃんの面倒をみる。徐々にシルバーバックと過ごす時間が長くなり、3才を過ぎて乳ばなれをするようになると、寝るときもシルバーバックのそばにすることが多くなるようだ。

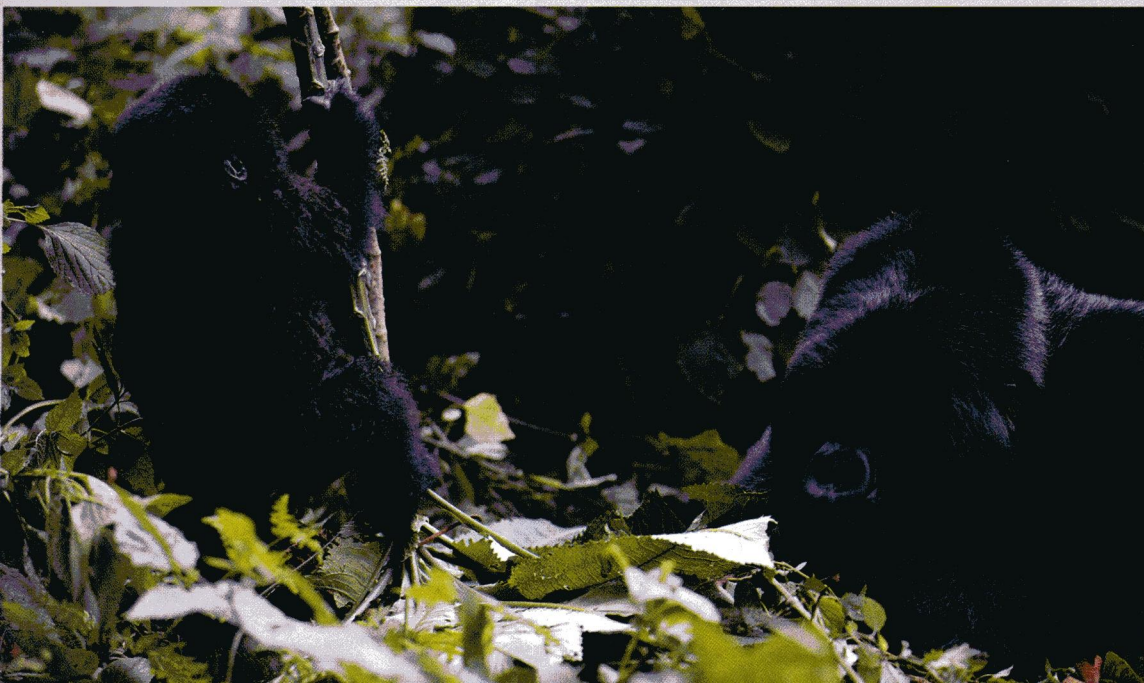
写真はシルバーバックのまわりに集まるファミリーである。子供たちはシルバーバックの背中に乗るのが大好きだ。



食後の休息中の親子

あおむけに寝転がった母親の胸に、赤ちゃんゴリラがのっている。右奥には父親であるシルバーバックがいる。食事を終えた親子が休息のためにしばらく寝ているところである。近距離から撮影する私の存在が気になるようで、よちよち歩きで近づこうと向かってくるが、すぐにまた母親の元へともどってしまう。こちらがおとなしくしていれば、ゴリラたちは興奮することなく、そばにいてを許してくれる。





子供をみつめる 群れのリーダー

木につかまって遊ぶ子供を、やさしくみつめるシルバーバック。絶大な信頼が寄せられるシルバーバックのまわりには、いつも子供たちがまとわりついている。シルバーバックはいやがるようすはまるでなく、おだやかに見守っている。子育ては母親からだんだんと父親中心に移行し、子育てから解放された雌は次の出産へとむけて、発情を再開する。



遊ぶ子供たち

相手にかみついて荒々しく遊ぶゴリラの子供たち。ケンカをしているようにも見えるが、本気でかんでいるわけではなく、かまれた方も大げさな表情だ。この後に取り組み合うが、両者とも楽しんでいるのが見ていて伝わってくる。遊び方は雌より雄のほうが荒っぽいようで、相手をみつけては顔をのぞきこんだり、ちょっかいを出して遊びへと誘う。

つるに登って遊ぶ

子供のゴリラは、木やつるに登って遊ぶのが大好きだ。つるにぶらさがって体をクルクルと回転させたり、木へ飛び移ったりと、笑顔をみせて仲間と遊ぶ。子供でも腕の力はそうとう強いようで、片手で長いあいだぶらさがっていることができる。大人も木に登って採食したりするが、体重の軽い子供にくらべて登る頻度はだいぶ少ないようだ。



食事中の若いゴリラ

ヒレアザミにかじりつく若いゴリラ。マウンテンゴリラは基本的に植物食で、ジャイアントセロリやヤエムグラ、ヒレアザミ、雨期のタケノコなどを好む。ときには動物性タンパク質となるグンタイアリなども食べるようだ。ジャングル内の植物はとげのあるものも多く、それらの茎を食べるときは、いったん手でしごいてとげをはらってから口に入れている。





家族団らん 食事のあとで思い思いで休憩をするファミリー。中央奥にいる群れのリーダーであるシルバーバックのまわりに、みなが集まってくる。植物の葉や樹皮で満腹になったゴリラは、食物繊維を消化するために数時間はゆったりと過ごす。右の雌ゴリラの乳房がたれているのは、一度ふくらんだあと、子供が乳ばなれしてしぼんだためで、子供を産んだ経験があるあかし。

熱帯雨林で出会った温和な動物

火山の中腹に広がる鬱蒼としたジャングルをかきわけて行くと、そこはマウンテンゴリラの聖域だ。

類人猿で最も大きなゴリラは、「ニシゴリラ (*Gorilla gorilla*)」と「ヒガシゴリラ (*Gorilla beringei*)」の2種に分かれる。さらに、ニシゴリラは「ニシローランドゴリラ」と「クロスリバーゴリラ」の2亜種、ヒガシゴリラは「ヒガシローランドゴリラ」と「マウンテンゴリラ」の2亜種に分類されている。

マウンテンゴリラはとくに毛が長いのが特徴だ。体高は1.2～1.8メートル、体重80～230キロ、寿命は約40年ほどとみられる。生息数は800頭弱で、国際自然保護連合のレッドリストで絶滅危惧種に指定されている。

手を軽くにぎって指の背を地面につける特徴的な歩き方は、ナックルウォーキングとよばれている。また、ポコポコと乾いた音をさせて胸をたたくドラミングは、敵を威嚇する意味合いもあるが、自分の存在を周囲にアピールするためのもの、という可能性がより濃厚である。

国立公園内のマウンテンゴリラの生息地へ行くには、レンジャーの同行が義務づけられている。観察時間も、ゴリラにストレスを与えないため、出会ってからきっか



ヴィルンガ火山群をのぞむ 八つのピークからなるヴィルンガ火山群を東側からのぞむ。手前に見えるのは標高 4129 メートルのムハヴラ山。すそ野には原住民が切り開いた田畑が広がる。保護区との間に緩衝地帯はなく、境界が山の中腹にひとすじの線となってくっきり表れていた。

り 1 時間と決められている。ゴリラは採食のために日々移動をしているので、群れに遭遇できるまでの所要時間がまちまちだ。生息地の入り口から 30 ～ 40 分で出会えることもあれば、傾斜のきついジャングルを 6 ～ 7 時間歩かなければならないときもある。

ゴリラは粗雑で凶暴な生き物というイメージを多くの人が抱いているかもしれない。しかし私が見たかぎりでは、それとはことなる、温和で繊細な印象をうけた。

群れをつかさどるシルバーバックは、筋骨隆々で巨大なうえに、想像を絶する怪力の持ち主である。だが思慮深そうなおだやかなひとみをたたえ、子煩悩で仲間の面倒見がとてつもない。長い間研究対象となり、人を見なれてきたせいもあるが、われわれが近づいてもいきなり襲いかかってくるようなことはない。すくなくとも、ゴリラを刺激しないよう静かに接しているかぎりでは、ゴリラが日常のペースを乱すことはない。争いを好まず、遊び好きでファミリーのきずなも固い、平和な生き物といった印象を強く感じた。

しかし研究者によれば、群れの雌がほかの雄の子を連れているケースで子殺しが行われたという報告もある。私が目にした姿は、ゴリラの奥深い生態のほんの一面でしかないことは、容易に想像できる。1960 ～ 1970 年代

に、アメリカのジョージ・シャラーやダイアン・フォッシーらがゴリラ研究のいしずえを築き、現代は京都大学の山極寿一博士ら第一線の研究者が势力的に生態解明にいどんでいる。50 年前まではまったくのなぞだったゴリラの生態が、近年くわしく解明されつつある。

成果があらわれはじめた保護活動

マウンテンゴリラを含め、ゴリラの生息環境は深刻な状況だ。森林の伐採や鉱物資源採掘のために熱帯雨林が切り開かれ、年々その面積が縮小している。密猟も横行し、ブッシュミートとよぶ食用肉として流通されるケースも多い。またゴリラの生息する国が政情不安で内戦をおこしたことや、エボラ出血熱の流行によって、大量のゴリラが感染死するなどの事態も、状況を悪化させている。

そうした一方で、関係国が連携して生息地を厳重に管理し、レンジャーや獣医を常駐させてゴリラを保護する活動もさかんになっている。世界中の NGO (非政府組織) も、積極的にゴリラ保護に務めるようになってきた。そうした努力のかいがあって、最近では、わずかながらゴリラの数が増えてきている。私たち人間と最も近い種の一つ、ヒト科のユニークな仲間であるゴリラ。彼らの未来は私たちの手にゆだねられている。

(担当：編集部 疋田朗子)

知られざる眼のヒストリー

かつて私たち哺乳類は紫外線を見ていた？

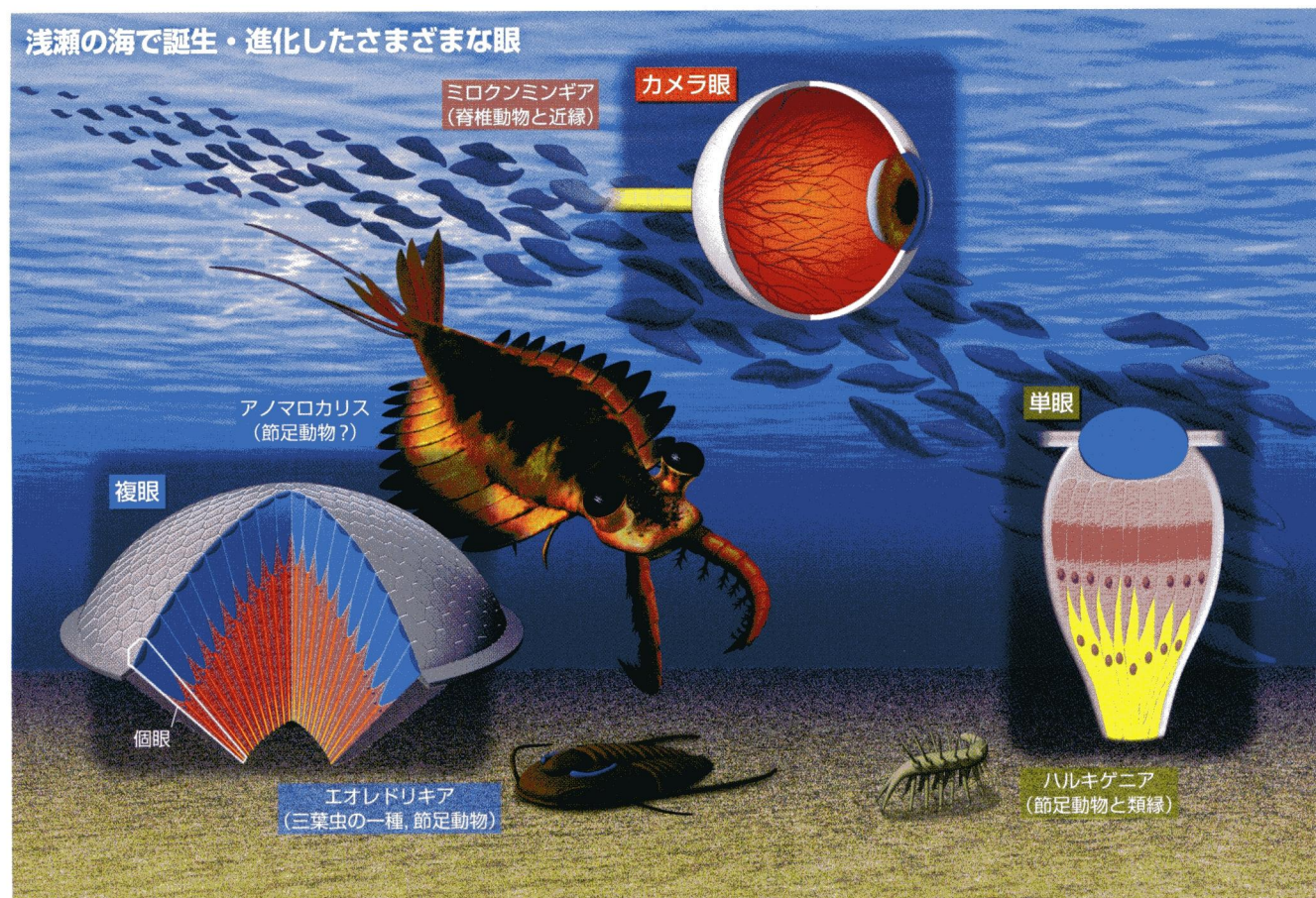
生物の「眼」は、見た目も性能もさまざまである。ピント調節できるカメラのような私たちヒトの眼は、その一例でしかない。昆虫の複眼は常時広い視野を確保でき、鳥や魚の眼はヒトには見えない紫外線を見ることがもできる。眼は、生物の暮らす環境にあわせて最適なものに進化してきたのだ。眼から得られる情報は重要であるからこそ、その進化は生命の歴史とも直結している。眼はいつ誕生し、どんな改良が加えられてきたのだろうか？ その壮大な歴史をたどっていこう。

協力 田中源吾

群馬県立自然史博物館主任（学芸員）

河村正二

東京大学大学院新領域創成科学研究科教授



約5億2500万年前のカンブリア紀初期の海中にはすでに、主に明暗だけを感じる「単眼」、視野の広い「複眼」、ピント調節できる「カメラ眼」など、さまざまな眼をもつ生物が暮らしていた。眼が誕生したことで生存競争がはげしくなり、眼の種類や数が多様化しただけでなく、ひれなどの形態も発達したと考えられている。また、明るさのわかりやすい浅瀬の環境は、色覚の進化の一因となったとみられている。

いわゆる進化論を発表したことで知られる 19 世紀の生物学者チャールズ・ダーウィンは、かつてこうのべた。「機械のような構造をもつ眼が自然につくられたとは、合理的でないように思われる」。眼がきわめて手のこんだ構造をしていることにふれた言葉だ。

眼の誕生や進化には、なぞが多い。というのも、眼の大部分はやわらかい組織であり、骨などところがって化石として残りにくいのである。

数少ない化石記録では、眼の歴史はどこまでさかのぼれるのだろうか？ 三葉虫に代表される節足動物化石の眼を研究している群馬県立自然史博物館の田中源吾学芸員によると、現在の中国にある約 5 億 2100 万年前の地層からみつかった三葉虫の「複眼」や別の節足動物の「単眼」が、知られているなかで最古の眼だという。この時点ですでに、現生の昆虫などがもつ複眼とかわらない構造の眼ができあがっていたようだ。それだけでなく、ヒトがもつ「カメラ眼」を含むさまざまな眼の原型は、この時代にすべて登場していたと考えられているのである。

5 億年以上前の浅い海で、眼は急激に進化した

ときは約 5 億 2500 万年前のカンブリア紀。眼の誕生と進化の舞台は、当時大陸付近に広がっていた浅瀬の海だ。まずは、眼の形の進化史をみていこう。

眼の構造は、カンブリア紀の最初の 500 万年間に爆発的に進化したと考えられている。約 38 億年とされる生命の歴史を 1 日とすると、2 分間足らずの出来事である。その過程はおおまかに次のようなものだ。

—カンブリア紀より前の時代、光を受け取る細胞などが集まっただけの“眼”をそなえた生物が誕生していた。眼を手に入れたことで、捕食者は獲物を効率よくさがせるようになった。一方の獲物側は、捕食者より性能のよい眼をもつものが生き残りやすくなり、かたい殻やとげを身につけるものもあらわれた。すると捕食者は、さらに高性能な眼が必要となり、同時にひれをもつなど泳力を高めるものも登場した。こうして眼を含めた体の形態が大進化した—。

これが、有名な「カンブリア爆発」である。カンブリア紀以前に体の構造を多様化させる“準備”はできており、眼という器官ができたことで、食うものと食われるものの進化にスイッチが入ったとする仮

説（光スイッチ説）が知られている。なお、光を受け取る細胞の起源は、今から 21 億年以上前の単細胞生物にまでさかのぼるとみられるが、定かではない。

それにしても、眼のように複雑な構造がわずかな時間でつくられたとは、ほんとうだろうか？ たとえばヒトのカメラ眼には、レンズにあたる「角膜」や「水晶体」、何種類もの神経細胞がつながった「網膜」など複雑な組織が必要だ。実は、ある生物が 1 年で世代交代すると考えたシミュレーションでは、カメラ眼まで進化するのに 40 万年もかからないという。ちなみにダーウィン自身も、眼の構造は自然にできると考えて、その過程を著書で説明している。

眼の二大頂点、「複眼」と「カメラ眼」

眼の構造は具体的にどのように進化してきたのだろうか？ そのヒントは、眼の構造をさまざまな系統の生物どうしでくらべることにより得られる。また、ある生物の受精卵が個体に成長するまで（個体発生）に眼がどのように形づくられるのか観察する方法もヒントになる。これは、個体発生が生物の進化の流れをある程度再現するためだ。たとえばヒトの胎児は、ある時期に魚類のようなえらをもつ。

こうした研究によってわかってきた、眼の構造の進化をみてみよう（次ページのイラスト参照）。カンブリア紀におきた眼の進化は、2 種類の構造に行き着いた。視野の広さがきわだつ「複眼」と、遠くのものまで細かく見られる「カメラ眼」である。

昆虫などがもつ複眼は、細長い個眼が多数集まってできている。一つ一つの個眼が光を感知するセンサーであり、さまざまな方向を向いた個眼にそれぞれ光を集めるレンズができたことで、広い範囲のものをみる（像を結ぶ）ことができるようになっている。なお、個眼と単眼は、意味するところは似ているが、ことなる内部構造をもつなど似て非なるものだ。

複眼の原型は、表皮にある光を受け取る細胞が集まり、もり上がったもの（眼点の一種）だとみられている。集まった細胞が一つ一つの個眼となり、それぞれレンズをもったようだ。さらにレンズの形が変化したり、内部構造が変化したりして、集光性能や感度のよい高度な複眼になったと考えられている。

複眼は、小さなサイズでも、ものの形をそれなり

に見ることができるとされる。また、動きをとらえる性能も高いという。三葉虫などの初期の節足動物が、カンブリア紀以降の約3億年間にわたって繁栄した要因の一つだと考えられている。

しかし複眼にもデメリットがある。複眼でものを細かく見るには個眼の数をふやさねばならない。ドット数の多い画像が精細に見えるのと似ている。しかし、そうすると体に対して眼が大きくなりすぎるという。ヒトの網膜には光を受け取る細胞が1億個以上あり、その信号を脳に送る細胞も約100万個あるが、個眼の数は多くてもトンボなどの数万個だ。

また、遠くまではっきり見ることもむずかしくな

る。昆虫の視力はせいぜい0.01だとされている。

ヒトの眼とタコの眼は、似たような進化をとげた

カンブリア紀初期の海では、複眼が進化する一方で、可動式の大きな1枚のレンズや、広いフィルム（またはCCD）にあたる網膜をそなえた「カメラ眼」も進化していた。カメラ眼は、取りこむ光量の調節機能や、ピント調節機能をそなえた、まさにカメラのような眼だ。また、レンズとフィルムを広くすることで、大型化した生物でも、眼のサイズをそれほど大きくせずとも、よい視力が得られるとされる。

脊椎動物の魚類、両生類、爬虫類、鳥類、哺乳類は基本的に同じ構造のカメラ眼をもち、無脊椎動物でもイカやタコの仲間が例外的にカメラ眼をもつ。無脊椎動物のカメラ眼と脊椎動物のカメラ眼は一見同じだが、実は別物だ。眼が形づくられる過程を観察すると、前者は表皮となる部分のみからできるが、後者は脳となる部分から主のできるのである。

ただし、形の進化には共通点が多い。無脊椎動物のカメラ眼の進化は比較的よくわかっており、表皮にある光を感じる細胞が集まって、くぼんだもの（眼点の一種）が起源だとみられている。くぼんだことで、ある方向から来た光が当たる部分と当たらない部分ができ、光の方向がわかるようになったようだ。

くぼみは、その後ガラスのようにくびれた形状になったとされる。くびれ部分を通じた光が像を結ぶようになったのだ。角膜や水晶体（レンズ）ができると、像を結ぶ性能は高まった。加えて水晶体を動かす筋肉などが発達したことで、ピントの合う距離は飛躍的に長くなったのである。

近年の研究では、脊椎動物のカメラ眼も、おおまかには同じような形の進化をたどったと考えられている。脊椎動物の共通祖先があらわれた約5億年前には、カメラでいうところの骨組みや部品にあたる眼の構造は、ほぼ完成していたのである。

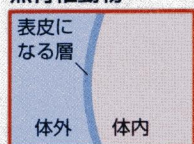
光を感じて色を見るしくみとは

眼の歴史は、構造の進化で終わりではない。カメラのフィルムにあたる網膜が改良されるなど、進化をつづけてきたのだ。その代表例が、色覚をになう「オペシン」の進化である。進化の話の前に、オペシン

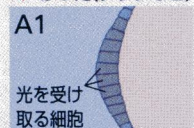
眼の構造進化のシナリオ

注：各項目の（ ）内はその形状の眼をもつ生物の例

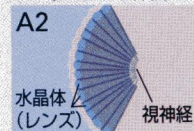
無脊椎動物



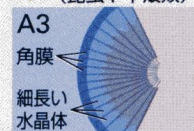
光を受け取る細胞が集まり、もり上がった(クラゲなど)



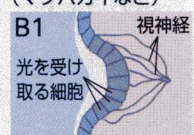
レンズができた(ゴカイの仲間など)



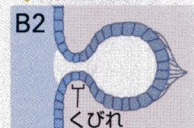
集光性能アップ(昆虫や甲殻類)



光を受け取る細胞が集まり、くぼんだ(マツバガイなど)



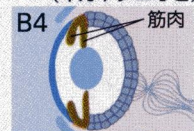
くびれた(アワビなど)



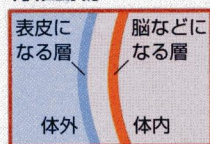
レンズができた(カタツムリなど)



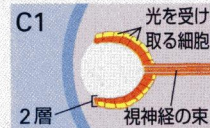
ピント調節機能(イカやタコなど)



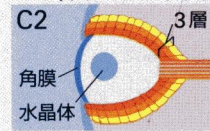
脊椎動物



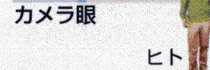
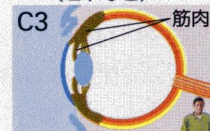
くぼんだ(メタウナギなど)



レンズができた(ヤツメウナギなど)



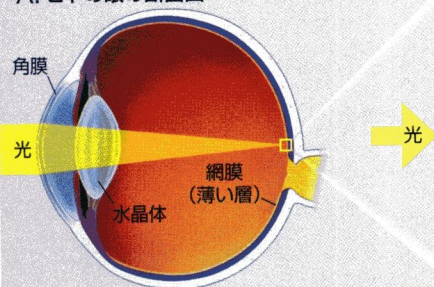
ピント調節機能(ヒトなど)



最も高度だとされる「複眼」と「カメラ眼」に至るまでの、おおまかな形の進化の流れをえがいた。ハエなどがもつ複眼ができるまでには、表皮にある光を受け取る細胞が集まって、もり上がり（A1）、個眼ごとにレンズができ（A2）、レンズが変形するなどして光を集める性能が高まった（A3）と考えられている。一方、タコなどの無脊椎動物がもつカメラ眼ができるまでには、光を受け取る細胞が集まって、複眼とは対称的にくぼんで（B1）、くびれがつくられた（B2）。ヒトなどの脊椎動物のカメラ眼でも、まずくぼみができ（C1）。無脊椎動物と脊椎動物のいずれでも、やがてレンズにあたる角膜や水晶体ができ（B3、C2）、レンズを動かす筋肉も発達してピント調節できるようになった（B4、C3）。無脊椎動物の眼が表皮になる部分からできるのに対して、脊椎動物の眼は主に脳になる部分からできる。なお、どの眼の水晶体も表皮からつくられる。

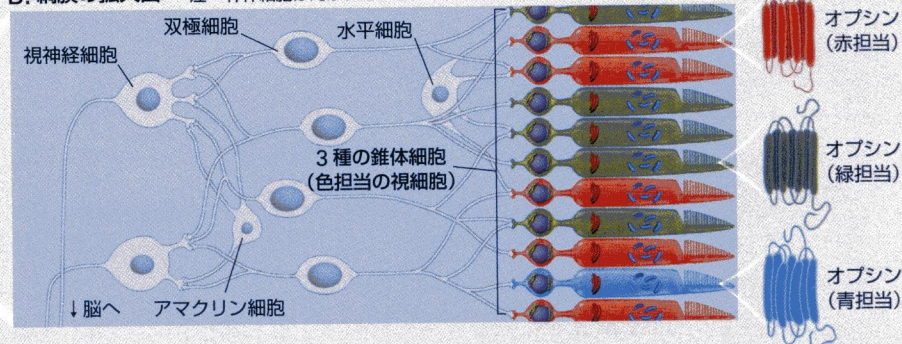
色覚を生み出す目のしくみ

A. ヒトの眼の断面図

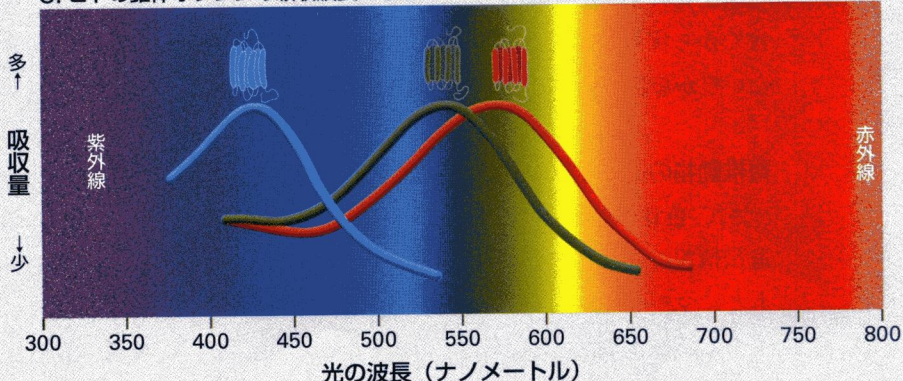


ヒトのカメラ眼の構造をえがいた。光は主に角膜と水晶体という二つのレンズで屈折し、眼の奥にある網膜に届く(A)。網膜には、光を受け取る視細胞(錐体細胞と桿体細胞)が無数にしきつめられている。色覚をになうのは3種類の錐体細胞である(B)。3種類の錐体細胞は吸収する光の波長の範囲がことなるオプシンをたくわえており、赤担当、緑担当、青担当としてはたらく(C)。光を受け取った視細胞では電気信号が生じ、電気信号は双極細胞を介して視神経細胞へ、さらには脳へと伝わる。水平細胞やアマクリン細胞は、信号の強弱や伝わる経路を調節するといわれている。

B. 網膜の拡大図 注: 桿体細胞はえがいていない



C. ヒトの錐体オプシンの吸収波長のちがい



のはたらきをみておこう (上のイラスト)。

オプシンとは、光センサーとしてはたらくタンパク質分子の総称である。眼の奥にある網膜では「視細胞」に大量にたくわえられており、光を吸収する。そして電気信号に変換する過程のはじめのステップをになうのだ。カメラ眼だけでなく、すべての種類の眼において光センサーの正体はオプシンである。

視細胞は明るいところではたらく「錐体細胞」と暗いところではたらく「桿体細胞」に分けられ、錐体細胞が色覚をになう。錐体細胞は、それぞれことなる種類のオプシンをたくわえている。オプシンの仲間は構造がわずかにことなり、それぞれ受け取る光の波長の範囲がちがうのだ。たとえばヒトの錐体オプシンは3種類あり、最も吸収しやすい波長はそれぞれ約420ナノメートル付近(青担当)、530ナノメートル付近(緑担当)、560ナノメートル付近(赤担当)である(100ナノメートルは1万分の1ミリメートル)。つまりヒトの色覚は「3色型」となる。

仮に650ナノメートル程度の波長の光が網膜に届くと、赤担当のオプシンのみが光を吸収し、脳へと電気信号が送られて“赤く”見えることになる。通常、光はさまざまな波長を含んでおり、どんな波長の光

ヒトには見えない紫外線の世界

写真提供: 鳴橋直弘 (富山大学名誉教授)



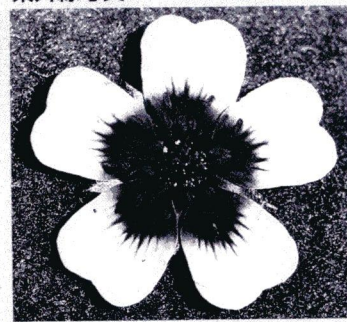
ツルキンバイ (学名: *Potentilla rosulifera* H. Lévl.)

花茎長 10 ~ 15cm, 花の直径 1.5 ~ 2cm。地をうす茎を出す多年草。日本(本州・四国・九州の山地)と韓国に分布する。

可視光写真



紫外線写真



上の写真は、本州・四国・九州の山地などに分布するツルキンバイの花を、可視光で撮影したもの(左)と350ナノメートルを中心とした紫外線で撮影したもの(右)である。花びらのつけ根が紫外線を吸収するため、右の写真では中央に黒いものが見える。このように道しるべとなり、紫外線の見える昆虫を引き寄せる(蜜標)との見方が一般的だ。こうした蜜標は多くの花で見られる。

をどれだけ受け取ったかによって脳に送られる信号はことなる。つまり、ことなる色が見えるのである。

ヒトのいずれかの錐体オプシンが吸収する光の波長の範囲を可視光とよんでいる。400ナノメートル程度(紫色に見える)より波長の短い「紫外線」や、800ナノメートル程度(赤色に見える)より波長の

長い「赤外線」をヒトが見られないのは、それらを主に吸収するオプシンをもたないためだ。

しかし生物によっては、3種類のオプシンに加えて紫外線を吸収するオプシンをもつ。紫外線を色として見るのできるのである（4色型色覚）。その代表例は、昆虫や鳥類だ（前ページ下部の画像を参照）。
 霊長類（サル仲間）と魚類を中心にオプシンと色覚の進化を研究する東京大学^{かわむらしやうじ}の河村正二教授は、「4色型色覚の生物はより多くの色を区別できることが、古くから実験で示されています。ヒトには想像できない豊かな色の世界で暮らしているのです」と話す。

脊椎動物の錐体オプシンは4種類から増減してきた

さて、色覚の進化の話に入っていこう。オプシンは、遺伝情報であるDNAにある「オプシン遺伝子」をもとにつくられる。その数や性質は、DNAが親から子へと伝わっていく間に変化することがある。

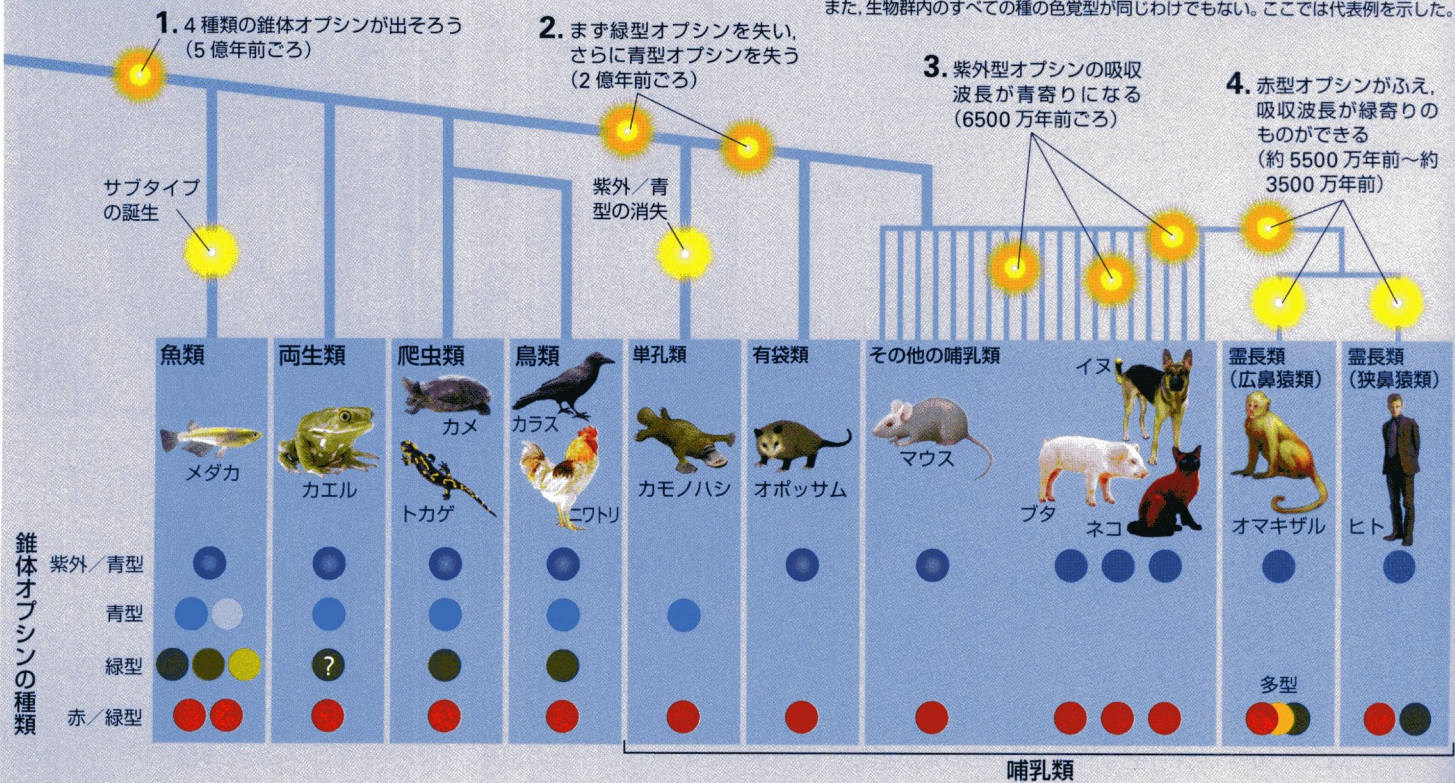
オプシン遺伝子はどのように変化するのだろうか

か？ DNAは、親から子へと伝わる際にコピーされる。そのとき、コピーミスなどによって遺伝子の数が増減することがあるのだ。また、オプシン遺伝子の実体は、遺伝情報をするす文字にあたる「塩基」の並びである。ところどころの塩基は、さまざまな要因によって、おきかわる。すると、その遺伝子からつくられるオプシンの吸収する波長が変化しうるので。吸収波長のことなる新たなオプシンが生物にとって何らかのメリットをもたらす場合、その遺伝子は残りやすくなり、受けつがれていく。こうして色覚も変化するのである。

こうしたオプシン遺伝子の進化の「履歴」は、塩基の並び方を生物どうしでくらべることでわかる。現生の脊椎動物がもつ錐体オプシンを比較すると、大きく4タイプに分けられるという。4タイプとは、「紫外／青型」、「青型」、「緑型」、「赤／緑型」である。紫外／青型と赤／緑型は、それぞれ紫外線から青へ、赤から緑へと、吸収波長が変化したことを意味する。

色覚の変遷をたどる

注：各生物群は必ずしも一つの共通祖先から誕生したわけではなく、便宜的な図である。また、生物群内のすべての種の色覚型が同じわけでもない。ここでは代表例を示した。



進化の流れに沿って、現生の脊椎動物がもつ錐体オプシンを示した。錐体オプシンは、4タイプに分類されている。脊椎動物の共通祖先は4タイプをすべてもっていたとされ(1)、魚類、爬虫類、鳥類はすべてを受けついでいる。両生類も4タイプを受けついでいるとされるが、まだ緑型はみつかっていない。魚類では、4タイプが微妙に変化したオプシン(サブタイプ)を1個体が多数もつ種が多い。成長にあわせて海と川で使い分けたり(回遊魚)、網膜の場所に応じて使い分けたりしているという。ほとんどの哺乳類は、青型オプシンと緑型オプシンを失っている(2)。のちに哺乳類の多くでは紫外型オプシンが青寄りの光を吸収するように変化し、青担当としてはたらくようになった(3)。霊長類のうちヒトを含む狭鼻猿類では、緑寄りの吸収波長をもつ赤型オプシンができ、緑担当としてはたらくようになった(4)。また、霊長類のうち中央・南アメリカに暮らす広鼻猿類では、個体ごとに赤／緑型のサブタイプがことなる(多型)。

これら4タイプのオプシンは、約5億年前までに
出そろっていたと考えられている。その進化の舞台
も、眼の形の進化の舞台と同じく、浅瀬の海だった。

太陽が降り注ぐ浅瀬を想像してほしい。波間で光
がまたたき、海中の明るさや届く波長の範囲はかわ
りやすい。こうした環境では、明暗のちがいでだけよ
りも、明暗に加えて色のちがいでものを見分けるほ
うが有利だとみられているのである。実際、魚類の
色覚は脊椎動物のなかで最も多様だ（左下の図）。

哺乳類もかつて紫外線を見ていた可能性あり

海で誕生した4タイプのオプシンは、約4億年前
に陸上へ進出した脊椎動物にも受けつがれた。両生
類、爬虫類、鳥類は、基本的に4タイプをすべてもつ。

しかし、多くの哺乳類は、青型と緑型のオプシン
を失っている。つまり、2色型の色覚となったのであ
る。初期の哺乳類は夜行性で、色覚があまり重要で
はなかったためだと考えられている。

その後ほとんどの哺乳類では、紫外線を吸収する
オプシンが可視光の青色にあたる波長を主に吸収す
るように変化した。理由は不明だが、紫外線を見る
能力を失ったわけだ。ただし、早くに分岐した有袋
類など一部の哺乳類は、紫外型のオプシンをもった
ままである。「哺乳類の祖先や初期の哺乳類も、紫外
線を見ていた可能性があるといえます」（河村教授）。

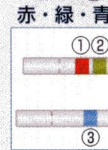
森林で進化した、霊長類の特殊な色覚

2色型がほとんどの哺乳類のうち、例外的に3色型
となった動物もいる。それが私たちヒトを含むサル
の仲間、霊長類である。霊長類の進化の舞台は森林だ。
木々の間から降り注ぐ光の明るさや波長の範囲は変
化しやすい。そのため、浅海と同じく、色でものを
見分けるメリットが大きかったと考えられている。

霊長類のなかでも、中央・南アメリカに生息する
鼻幅の広いサル（広鼻猿類）の色覚は独特だ。ヒト
を含む鼻幅のせまいサル（狭鼻猿類）では、オプシ
ン遺伝子に変異がなければ、雌雄とも同じような「赤
・緑・青」の3色型色覚になる。だが広鼻猿類では、
集団内に3種類の2色型色覚と3種類の3色型色覚
の個体があり、6種類のことなる色覚型をもつ個体が
まざっているのである（くわしくは右上のイラスト）。

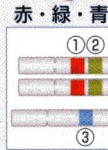
霊長類の特殊な色覚

ヒト
(男性)



3色型色覚

ヒト
(女性)



2色型色覚

X染色体
常染色体

オマキザル(オス)



オマキザル(メス)



ヒトを含む狭鼻猿類とオマキザルなどの広鼻猿類の色覚のつくりのちがいを示
した。ヒトもオマキザルも、性によらず本数の同じ常染色体に、青担当オプシ
ンをもつ。ヒトの9割強は、男性には1本、女性には2本あるX染色体に、
赤担当と緑担当のオプシン遺伝子をもつ。そのため、どの遺伝子にも変異がな
ければ男性でも女性でも同じような3色型色覚となる。一方のオマキザルでは、
X染色体に赤もしくは、緑もしくは、その中間（黄色で示した）のいずれか一
つを担当するオプシン遺伝子しかない。そのため、雌雄（X染色体が1本か2
本か）とX染色体にあるオプシンの組み合わせによって、一つの種に3種類の
2色型色覚と3種類の3色型色覚、つまり計6種類の色覚が混在する。

見える色の少ない2色型は不利に思えるが、実は
必ずしもそうではない。中央アメリカでオマキザル
の集団を観察した2007年の研究では、2色型の個体
は3色型の個体より擬態した昆虫を多くつかまえる
ことがわかったという。2色型では見える色が少ない
ぶん、背景にまどわされにくいと考えられている。

一方で、若葉食の多いアフリカ地域などでは、3色
型のほうが有利だとされる。若葉に反射される光の
波長を分析すると、ほかの葉より赤みをおびている。
3色型は赤色の範囲を区別しやすいため、若葉をみつ
けやすいと考えられているのだ。現在のところ、各
色覚型に有利な点があるため、混在状態のまま今に
至ったのではないかと、この見方が有力である。

5億年以上におよぶ眼と色覚の進化史。小さな眼に
は、生命そのものの壮大な歴史がひそんでいる。 ●

（担当：編集部 松田壮一郎）

疲れに悩んでいませんか

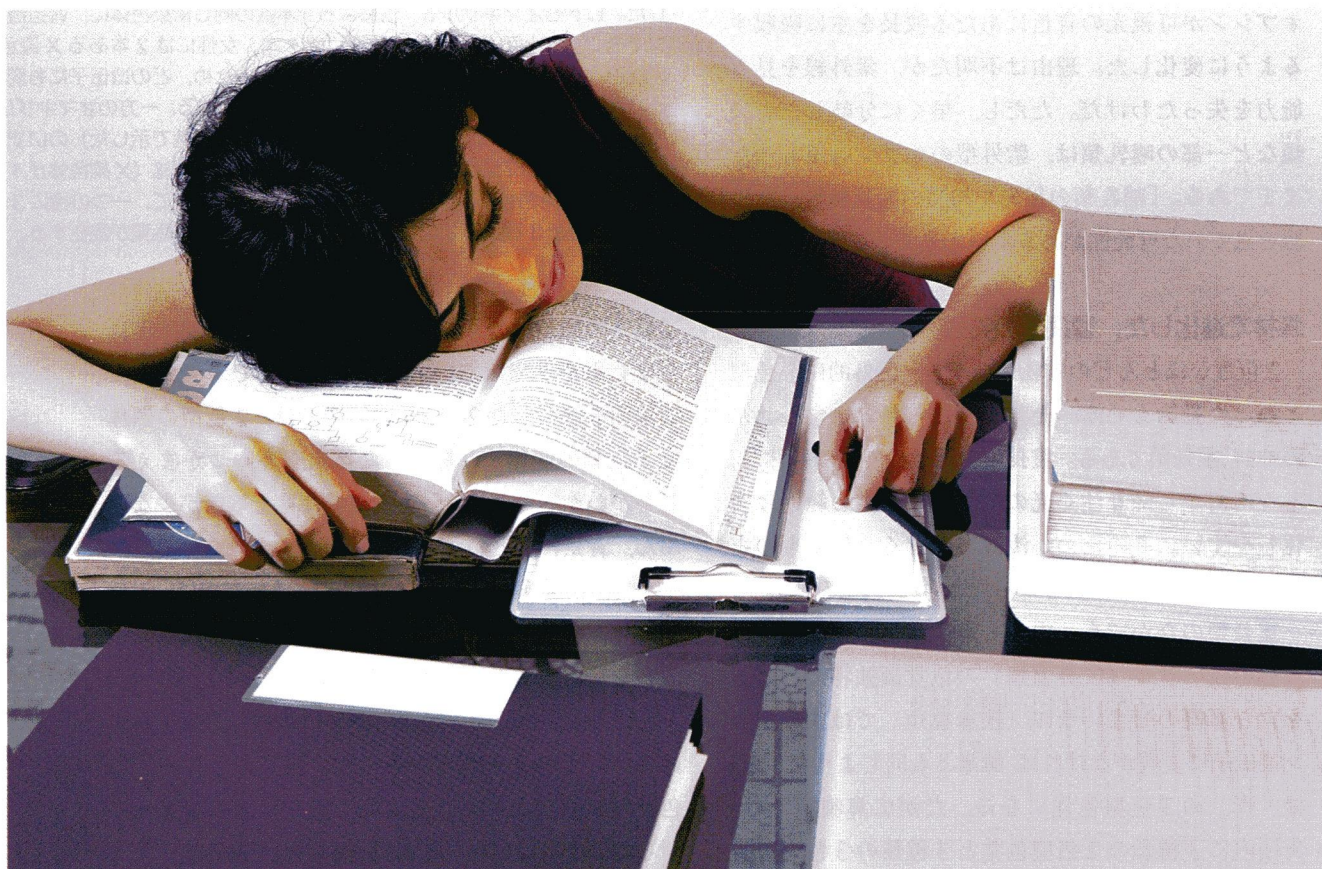
なぜこんなに疲れるの？ 疲労を回復する方法とは？

私たちの日々の生活から、切っても切りはなせない「疲れ」。「疲れ」は病気ではない。それにもかかわらず、目の疲れから肩こり、気力の減退など、体のあらゆる場所にわたって、肉体的にも精神的にもさまざまな症状が出てくるのが疲れである。いったい、疲れているとき、私たちの体の中ではどんなことがおきているのだろう。また、疲れを解消するための効果的な睡眠とはどんなものなのか。寝ても休んでもずっと疲れがとれない慢性疲労のしくみとは？ ちょっと一息ついて、疲れについて考えてみよう。

協力 征矢英昭 筑波大学大学院人間総合科学研究科教授

佐々木 司 (財) 労働科学研究所慢性疲労研究センターセンター長

倉恒弘彦 関西福祉科学大学健康福祉学部教授



疲れは、日々の生活の中で当たり前のようにやってくる。疲れていると感じるとき、私たちの体の中ではいったい、どんなことがおきているのだろうか。

「ああ、^{つか}疲れた。ちょっと休みたいなあ……」。勉強、仕事、家事、そして人づきあいに追われる生活の中で、つい心の中でこんな一言をつぶやいてしまう瞬間はないだろうか。

「自分は今、疲れている」と感じるときは、肩がこっていたり、目がかすんでいたり、何かをやる意欲や集中力が低くなっていたりと、病気ではないのに何やら体の調子がよくない。いったい、疲れているとき、体の中では何がおきているのだろうか。

パソコン作業は、目のかすみや乾燥を引きおこす

科学技術が発達し、作業の機械化が進むなどして、現代は昔にくらべて肉体的な労働を行うことが少なくなった。そして、ビジネスマンにとっては今やパソコンが欠かせないアイテムになっている。しかし、パソコンは独特の^{ひろう}疲労をもたらすことがあるようだ。

2008年、厚生労働省が行った「平成20年技術革新と労働に関する実態調査」という調査では、ディスプレイのついたコンピュータ機器（パソコンなど）を使って作業する人に、コンピュータ機器の操作をしていて、どんな体の症状を感じるのかを聞いている。9107人の回答の中で、最も多かったものは、目についての症状であった。

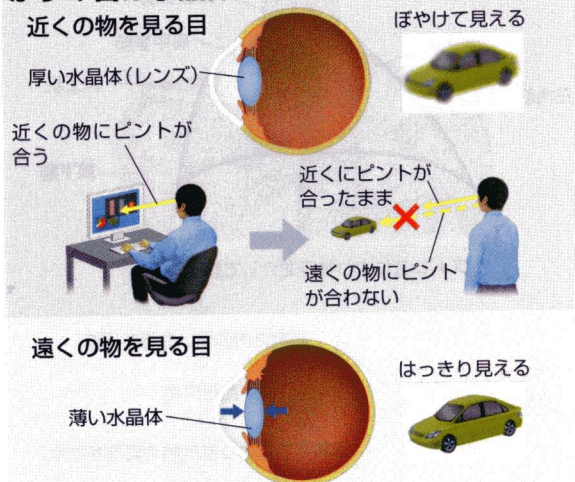
私たちは物を見るために、まず、物から反射されてくる光を、目の奥の網膜に集める。この光の“集合”が網膜から前後にずれた場所でおき、物が見えにくくなっているのが「近視」や「遠視」だ。これらの人は、目の疲れた感じがおきやすい。

また、パソコンを長時間操作したあとに遠くを見ると、視界がかすんでみえるという経験をしたことはないだろうか。これは、「近くのディスプレイを見る用の目」が、「遠くの景色を見る用の目」に切りかわっていないためにおきる。

近くの物を見ると、私たちの目の中では「^{すいしょう}水晶体」というレンズが厚くなっている（右上のイラスト）。こうすると、近くの物からの光ほど網膜によく集まり、はっきりと見えるのだ。逆に、遠くの物を見るとは水晶体が^{うす}薄くなっている。

私たちは、水晶体が厚くなった状態の目で近くのディスプレイを見ている。しかし、この状態を長時間つづけると、パソコン作業を終えたあともしばらく

かすみ目は水晶体の厚みがかわらずにおこる



近くの物を見るときは目の水晶体が厚くなり、遠くの物を見るときは薄くなる。長時間近くの物（ディスプレイ）を見ていると、その目の状態がつづいて、遠くの物（車）を見ようとしてもピントが合わずにぼやけて見える。

くは、水晶体の厚さを“操作する”筋肉の^{きんちよう}緊張がとけずに水晶体が厚いままになる。この状態で、遠くの物を見ようとしても焦点が合わず、ぼやけて見えてしまうのだ。これが「かすみ目」の正体である。

また、パソコン作業が引きおこす目の症状には^{かんそう}乾燥もある。パソコン作業でディスプレイが見えづらかったり、ディスプレイ上に表示されている内容がむずかしかったりすると、まばたきをせずについてじっと見入ってしまうことがある。実は私たちの目の上部にある涙腺からは、つねに涙が^{なみだ}分泌されており、まばたきをするたびに目をおおって乾燥から守っている。そのため、まばたきの回数が少ないと目が乾燥してしまうのだ。

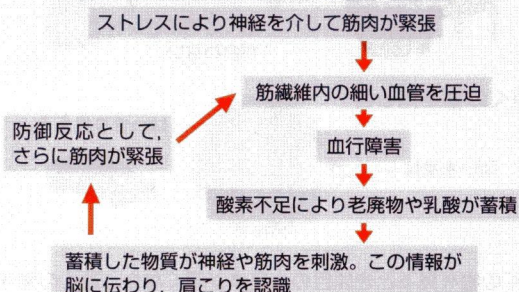
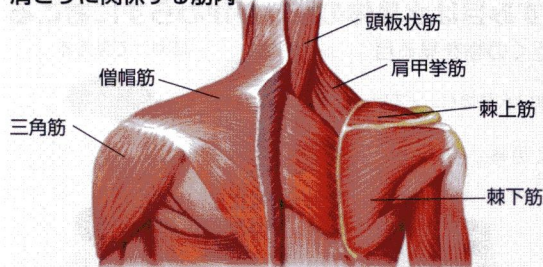
長時間の同じ姿勢は、筋肉を緊張させる

コンピュータ機器を使って作業する人が感じる^{しょう}症状の中で、目の症状の次に多かったのが、首、肩のこり・痛みであった。

首や肩のこりは、ずっとパソコンの前に座って作業をしたり、ずっと電車の中でつり革につかまって立っていたりと、長時間同じ姿勢をとることでおきやすくなる。また、同じ動きをくりかえす、不自然な姿勢をとるといったことでもおきる。さらに、このような体にかかるストレスのほかに、精神的なス

肩こりでは、ストレスで筋肉が緊張している

肩こりに関係する筋肉



肩こりに関係する筋肉と、肩こりのおきるしくみ(上)。
肩こりは、ストレスから筋肉が緊張することではじまる。

ストレスがこりを生む原因になることもある。

ストレスを受けると、そのストレスの情報が脳に伝わり、首や肩のあたりに広がる筋肉が緊張状態になる。筋肉が緊張すると、そこを走る細い血管が圧迫され、血液の流れがさまたげられる。そのため、血液が運び去っていくはずの老廃物が筋肉にたまったり、血液から酸素が供給されないことで生じる乳酸が筋肉にたまったりする。これらが神経細胞を刺激し、刺激が脳に伝わって「肩こり」として認識されるのだ。さらに、この状況がストレスととらえられ、筋肉がさらに緊張するという悪循環を招く。

運動したときに疲れているのは脳？

私たちが経験する疲れには、日々の生活の中で何となく感じる疲れのほかに、運動をしたあとに生じる疲れがある。この運動には、競技としての運動のほか、歩行、手作業など、日常生活の作業としての運動も含まれる。これらの運動により生じる疲れの定義は、「作業の能力が落ちること」である。はっきりとした境界はないが、疲れていないときとくらべ、走る速度が遅くなったり、ボールを飛ばす距離が短くなったりといったことを指す。

長時間ジョギングをしたり、ダンベルを上げ下げしたりすると、足や腕の疲れを感じてくる。そのため、

運動能力を低下させる原因は、体を動かすときに使う筋肉にあると考える人が多いかもしれない。確かに、使いすぎて筋肉の構造が破壊されたり、筋肉が動くために必要なエネルギー源「グルコース（単糖の一種）」が枯渇したり、エネルギー源を運んでくる血液の流れがさまたげられたりすると運動能力は低下する。しかし、運動による疲労に詳しい筑波大学の征矢英昭教授は、「運動による疲労で重要なのは脳でおきる疲労なのです」と語る。

私たちの筋肉は、いくつもの神経細胞を経て脳の神経細胞とつながっている。脳の神経細胞から、筋肉に「動け」の指令が送られて筋肉は動く。そのため、脳の神経細胞が十分にはたけなくなると、筋肉に指令が伝わらず、十分に動くことができない。

実際、私たちが最大の努力をはらって運動しても、限界の力の1～2割低い力しか発揮できないと征矢教授は語る。これを証明するのが「火事場の馬鹿力」だ。火事やとっさの事故にあったとき、ふだんでは考えられないような力が出て、重い物を運べたりすることがある。つまり、私たちが疲れたと思っているときは、筋肉自体には余力があるにもかかわらず、脳が疲労して限界を訴えている場合が多いのである。

では、運動をつづけるとなぜ、脳の神経細胞は指令を活発に送れなくなってくるのだろうか。一つの理由が、脳温（脳の温度）の上昇だ。運動をつづけていると脳温が上昇し、脳から筋肉への指令が弱まってくるのだ。

もう一つの理由はエネルギーの枯渇である、と征矢教授は語る。脳の神経細胞がはたらくためにはエネルギーが必要だ。このエネルギーを生むため、神経細胞は血液中のグルコースを使う。しかし運動をすると、筋肉や肝臓がグルコースを消費するため、血液中の濃度が低くなっていくのだ。

神経細胞はエネルギー源として乳酸も使う。この乳酸は、脳内では「アストロサイト」とよばれる細胞の中にたくわえられている。アストロサイトは、グルコースからつくられたグリコーゲンを分解して乳酸をつくり、神経細胞へ受け渡す。いずれにしても、神経細胞がエネルギーを生むためにはグルコースが必要になる。

このため、血中のグルコースが不足していくと、

神経細胞は十分なエネルギーを得られず、筋肉に指令が出せなくなり、運動の能力が低下してくるのではないかと征矢教授は考える。

運動による疲労への対策としては、筋肉のグルコースの蓄積量（グリコーゲンとして保管）を試合前の3日間、意図的に増加させる「カーボローディング法」が行われてきた。

「運動はただ疲れるだけではありません。適度な運動であれば逆に、日々のストレスを解消することができます」と征矢教授は語る。たしかに、勉強や仕事、家事で疲れているときに、「気晴らし」と称して散歩をしたり、軽いランニングをしたり、スポーツジムに行って一汗かいてきたりすると、何やら気分がすっきりしたという経験はだれもがあるだろう。

「運動をすることで体の感じる刺激が脳へ伝わると、脳のさまざまな部分が活性化します。このとき、ノルアドレナリン、セロトニン、ドーパミンといった、神経細胞を興奮させるような化学物質を合成、分泌する脳の領域もいっしょに活性化されます。合成、分泌されたこれらの化学物質が感情を支配する脳の領域に伝わり、元気が出るのです。ただし、あまり長時間の運動をすると脳内のグリコーゲン量が減りすぎるため、注意が必要です」（征矢教授）。

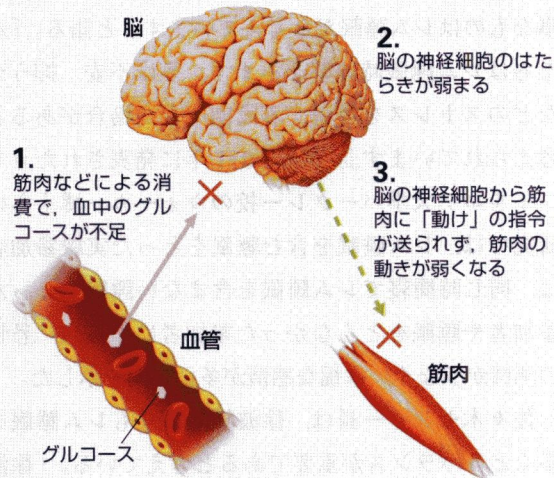
疲労の回復には、夢をみる睡眠が重要らしい

一日にたまった疲れを解消する最も有効な方法の一つが睡眠である。疲れた体をひきずって家に帰っても、ぐっすり寝て次の日の朝におきると、気分がすっきりして元気になっている。反対に、一晩寝ずにずっとおきていると、次の日は一日中疲れた状態で過ごさなければならない。睡眠による疲労回復の効果は、だれもが日常的に経験しているだろう。

なぜ、眠るだけで疲れはとれるのだろうか。実はそのしくみはまだわかっていない。しかし、約24時間眠らせなかったサルを調べた実験によると、眠らなかった状態では、神経細胞の間で、「GABA」という化学物質の受け渡しが増加しているらしいことがわかっている。GABAは、神経細胞の活動をおさえる化学物質で、注意力の維持などにかかわる。

また、脳は熱に弱い臓器だ。睡眠時、脳温は下がっている。私たちは、お風呂から出た直後など、体

運動による疲労は筋肉に指令を送る脳の疲労



運動をつづけると、筋肉や肝臓が、エネルギーの元となるグルコースを使うため、これらの血中濃度が低くなる(1)。このため脳の神経細胞は、エネルギーが不足して活動が弱まり(2)、筋肉へ「動け」の指令を十分に送れなくなる(3)。これが運動による疲労のしくみの一つだ。

温をいったん上げて下げたタイミングで寝つきがよくなる。寝る直前の赤ちゃんの手足が熱くなるのは、体内の熱を体外に放出しているためだ。こうして脳温が下がった状態にすることで、脳を熱から守り、休めているとも考えられている。また、寝ている間は大部分の脳の活動が、おきているときにくらべておさえられるため、エネルギーを節約しているのではないとも考えられている。

ところで、いったいどのような睡眠をとれば効果的に疲労が回復するのだろうか。まずは、夜寝てから起きるまでに経験する、健康的な睡眠のうつりかわりを追ってみよう。

睡眠は、5段階の眠りの深さに分類される。最も浅い睡眠が「レム睡眠」で、脳の活動が比較的活発な状態の睡眠だ。これより深い睡眠がノンレム睡眠で、1から4までの段階がある。このうちとくに、段階3と4の深いノンレム睡眠を「徐波睡眠」という。

眠りにつくと、最初は徐波睡眠がおこる。やがて寝ついてから約90分後に、レム睡眠があらわれる。このあと、ノンレム睡眠とレム睡眠が約90分周期で交互にあらわれる。そして明け方近くになるにつれ、レム睡眠の持続時間は長くなっていく。

睡眠と疲労回復の研究をしている労働科学研究所慢性疲労研究センターの佐々木司センター長は、「5段階の睡眠の中で、精神的ストレスの疲労回復に大

事なものはレム睡眠だと考えています」と語る。「私たちはレム睡眠時に夢をみます。夢は不安、抑うつなどのストレスを解消する役割をもつ場合があると考えられています」。実際 2011 年に発表されたカリフォルニア大学バークレー校のウォーカー博士らの研究では、レム睡眠を含む睡眠をとった実験参加者は、同じ時間寝てレム睡眠を含まない睡眠をとった参加者や睡眠をとらなかった参加者に比べ、恐怖の感情が少なく、幸福な感情が多い傾向を示した。

佐々木センター長は、徐波睡眠よりもレム睡眠を多くとるバランスが重要であると考えている。「徐波睡眠は主に身体的な疲労の回復をになうと考えられています。しかし、一度に徐波睡眠をとりすぎてレム睡眠が減ると、逆に自律神経系が過剰に興奮するという実験データもあります」（佐々木センター長）。レム睡眠は明け方に多くなるので、レム睡眠の合計量が徐波睡眠の合計量より多くなるには 7 時間以上の睡眠が必要だという。

夜勤中の仮眠は効果的

私たちの体には、朝起きて夜眠るような体内リズムがそなわっている。このリズムには体温が関係している。昼間の活動時間帯に高くなり、夜間に低くなる体温のリズムだ。ところが、このリズムにしたがえない生活を送る人たちがいる。夜勤の看護師や警備員など、夜間に仕事をして昼間に眠る人たちだ。

佐々木センター長が、夜勤を終えて昼間に眠る看護師の睡眠のようすを調べてみたところ、最も深い睡眠段階 4 に達することはなく、段階 3 の持続時間も短かった。途中で何度も目覚め、レム睡眠と徐波睡眠の量のバランスが悪い睡眠になっていた。

「夜勤勤務の方には 2 時間以上の仮眠をおすすめします」と佐々木センター長は語る。これは寝ついてから 90 分後によくレム睡眠があらわれるためだ。

仮眠には体内リズムをずらさない効果もあるという。私たちの体温の上昇のピークは 18 時くらいだ。夜おきる生活をしていると、この上昇ピークの時間が次第に遅い時間にずれて「夜型人間」になってしまう。仮眠をするとこのずれがなくなるというのだ。

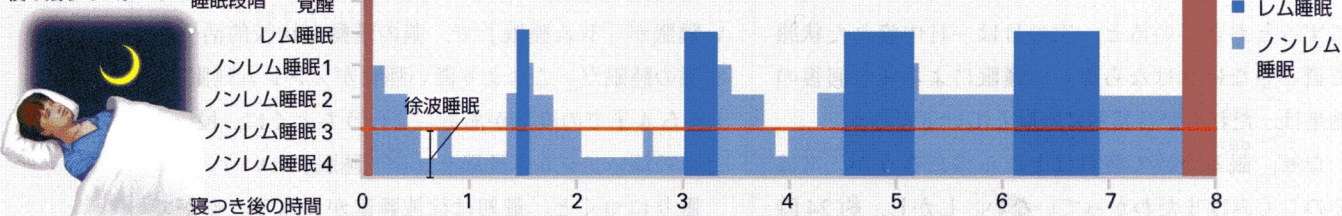
慢性的な疲労は、免疫や神経の異常が引き起こす

通常、私たちの 1 日の疲れは一晩眠れば回復する。しかし、数日から数か月にわたって疲れがとれない場合もある。疲れが半年以上つづく場合を「慢性疲労」という。この慢性疲労の中でも、6 か月以上症状がつづき、日常生活に大きな支障をきたすようなはげしい疲労症状がみられ、かつ疲労症状の原因となるような病気が認められない場合は「慢性疲労症候群」という病気と診断される。

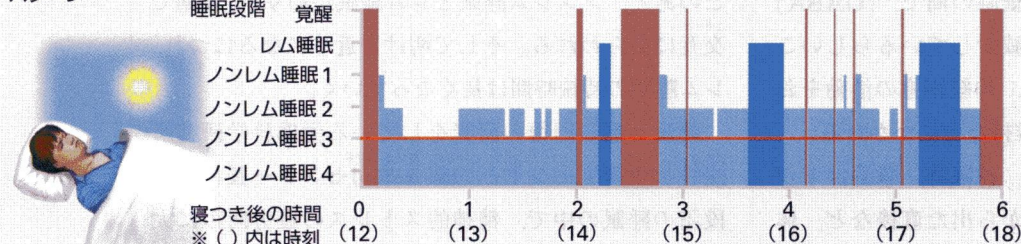
1999 年に、厚生労働省が愛知県の住民に疲労の聞き取り調査をしたところ、3015 名のうち約 6 割が「疲れている」とこたえた。このうち 6 か月以上疲れが

夜勤後の睡眠は、通常の睡眠とは眠りの深さのパターンがことなる

夜の眠りのパターン

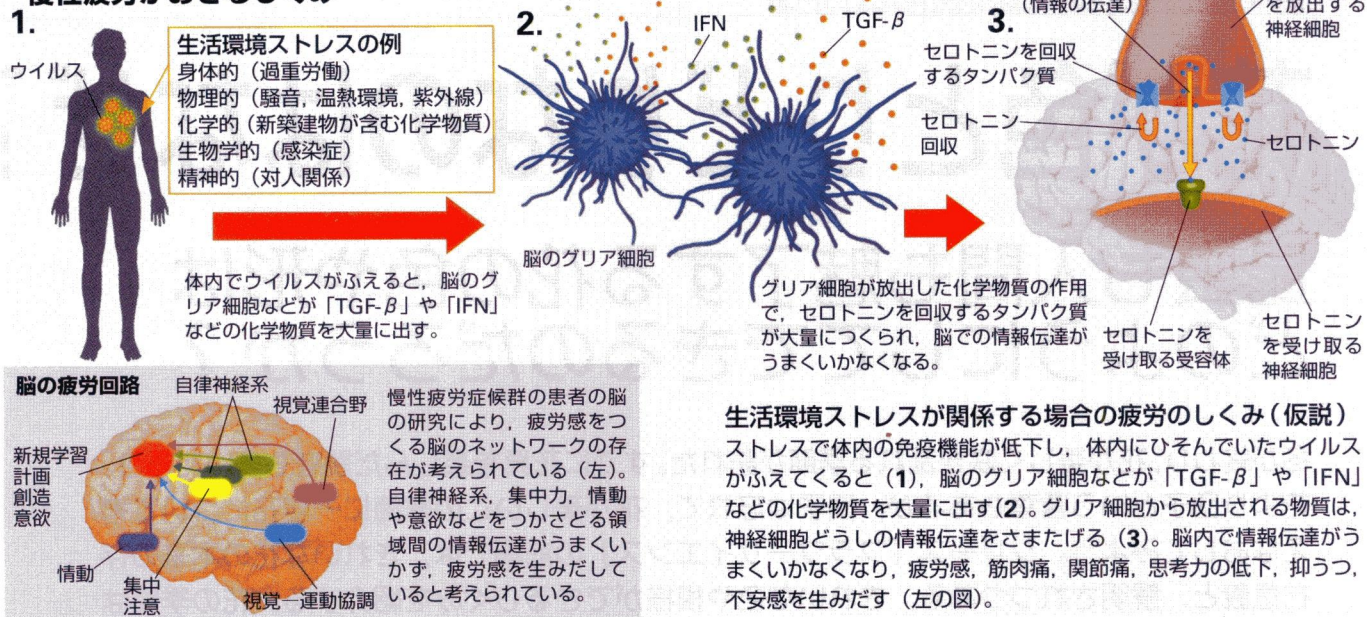


夜勤後の昼の眠りのパターン



普通の睡眠（上）では、浅いレム睡眠が 90 分周期でくる。疲労回復には、深い徐波睡眠量よりレム睡眠量の多いバランスがよいと考えられている。佐々木センター長の研究データでは、夜勤後の昼の睡眠（下）はノンレム睡眠 4 に達せず、睡眠 3 の持続時間も短い。レム睡眠も少なく、中途覚醒が多くなる。

慢性疲労がおきるしくみ



生活環境ストレスが関係する場合の疲労のしくみ (仮説)

ストレスで体内の免疫機能が低下し、体内にひそんでいたウィルスがふえてくると (1)、脳のグリア細胞などが「TGF-β」や「IFN」などの化学物質を大量に出す (2)。グリア細胞から放出される物質は、神経細胞どうしの情報伝達をさまたげる (3)。脳内で情報伝達がうまくいけなくなり、疲労感、筋肉痛、関節痛、思考力の低下、抑うつ、不安感を生みだす (左の図)。

でているとこたえた人は約 36%，その中の 8 人は慢性疲労症候群の診断基準を満たしていた。この慢性疲労症候群の研究により、慢性疲労がおきる体内のしくみが明らかになっていった。

発症のきっかけについては約 3 割の患者はウィルス感染、残り 7 割はさまざまな生活のストレスが関係していると考えられている。ストレスにより、体をウィルスなどの病原体から守る免疫機能が低下し、それまで体内におとなしくひそんでいたウィルスが急にふえはじめる。するとこれをおさえようと、体中の免疫細胞は「TGF-β」や「IFN」とよばれる化学物質を出して免疫機能を活発にしようとする。

実はこのとき、脳のグリア細胞 (神経細胞以外の神経系の細胞) も同じ化学物質を放出する。そして、脳内に放出されるこれらの化学物質はやっかいな問題を引き起こす。脳内の神経細胞どうしの情報のやりとりをさまたげるのだ。そのしくみの一つが、神経細胞間で情報を伝える化学物質「セロトニン」の回収をうながすことだ。セロトニンが回収されすぎると、神経細胞間で情報が伝わらなくなり、情報が伝わってこなくなった脳の領域の機能が落ちる。

ではいったい、どんな機能をにう領域にこのようなことがおきるのか。慢性疲労症候群の人の脳の局所的な血流量、神経伝達にかかわる物質の状況、萎縮の有無などから、実際に脳内のどんな領域に異常がみられるのかが調べられた。そして、これらの

結果から、脳のどんな領域間のやりとりが弱まり、疲労感をつくりだしているのかが考えられた。現在、自律神経、集中力、痛み、感情、意欲などをつかさどる領域が影響を受けていると考えられている。

ところで、慢性疲労症候群はこれまで主に問診による診断がなされ、総合的な診療をにう内科では患者が病気と診断してもらえないことが多かった。この事態を改善しようと、関西福祉科学大学の倉恒弘彦教授のチームは、慢性疲労症候群を客観的に診断できる方法の確立をめざしている。診断方法には、指先の脈拍から自律神経のバランスを分析するものや、腕につけるセンサーで人の動きの回数をはかり、活動状況や睡眠時の覚醒状態をチェックするもの、血液中の酸化ストレスと抗酸化力の量をはかるもの、脳の機能を調べる簡単な試験などがある。

このように、疲れを客観的に判断できるようになるとよいことがほかにもある。「体は疲れていても、周囲の期待や自己満足が疲労感を打ち消して、疲れを感じていない人がおられます。このような状態がつづくとうつと突然の過労死に結びつく可能性があります。疲れの客観的な診断は、そのような人に警告ができる手段にもなるでしょう」(倉恒教授)。「あー、疲れた」という感覚は体を休息させるための警告信号なのだ。

記事を読んで、何か疲れてきたな、と感じたあなた。休息を欲している自分の体に正直になって、ひとまずゆっくり休んでみてほしい。

(担当：編集部 遠津早紀子)

花が色とりどりなのはなぜ？

昆虫も人間も魅了する花の色や形は どのようにしてできるのだろうか？

冬が終わり、花が美しく咲き乱れる季節が訪れた。すでに花見を楽しんだ読者も多いだろう。花より団子という言葉もあるが、団子は忘れて、花が美しいこの季節に一度花について考えなおしてみよう。シリーズ「フラワーサイエンス」の前編では、きれいな花の本来の存在意義と、解明されつつある、きれいな色や模様ができるしくみを紹介する。花の季節ははじまったばかりだ。記事を読みおえたら、花を探しにでかけてみてはいかがだろうか。

協力 **大宮あけみ**

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構
花き研究所上席研究員

福原達人

福岡教育大学教育学部准教授

星野 敦

基礎生物学研究所助教



上にえがいたのは、左からバラ、アサガオ、ヒマワリだ。それぞれの花の左側の色は自然界に存在する色、右側の色は自然界には存在せず、品種改良によってもつくられていない色だ。花の色はどのようにしてできるのだろう。

ひとそろい^{いろえんぴつ}の色鉛筆とスケッチブックを渡され、「植物の葉の絵をえがいてください」といわれたとしよう。多く人は、迷いなく緑色の色鉛筆を選び、葉の絵をえがきはじめるだろう。

それでは、次に、「花の絵をえがいてください」といわれたらどうだろう。この場合、赤、青、黄など、人によって手にする色鉛筆はわかるだろう。ピンクのサクラ、黄色いタンポポ、青いアサガオ……。たしかに、すぐに思いつく身近な花でも、さまざまな色のものがある。なぜ植物はこのような色とりどりの花を咲かせるのだろうか？

きれいな花の本当の目的

花の色や形はさまざまだが、実は、すべての花は基本的に共通の目的をもつ。それは、おしべでつくられた花粉をめしべにつけることである。

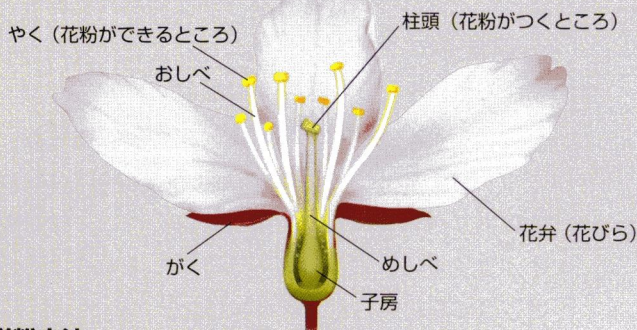
多くの動物では雄の精子が雌の卵子に到達することで子供ができる。このように、雄と雌から新たな個体ができることを有性生殖^{せいせいしよく}という。植物も有性生殖を行う。花は、そのための器官だ。花粉内には精子に相当する細胞^{さいぼう}が入っており、めしべのつけ根の子房内には卵子に相当する細胞がある。動物の場合は、みずから移動できるので、雄と雌が近づき、有性生殖をすることができる。しかし、植物の場合はみずから移動できないので、有性生殖のためには、同じ花の中で花粉をめしべにつけるか、自分以外の何かの力を借りて、ほかの花に花粉を届ける（送粉する）必要がある。

どうすれば花粉をはなれた場所にあるほかの花にまで届けることができるだろうか？「そのやり方の多様性が、花の色や形の多様性を生みだしたと考えられています」と福岡教育大学の福原達人^{ふくはら たつんどじん}准教授は語る。陸上の植物の花には、送粉に風を使う「風媒花^{ふうばい}」と、昆虫などを利用する「動物媒花^{どうぶつばい}」がある。

イネやスギなどは風媒花だ。風媒花は、同種がまとまって存在している場所などでは有利である。しかし、はなれた場所への送粉では、途中でほかの植物などの障害物^{しょうがいぶつ}にさえぎられ、花に花粉が届かないことも多い。そのため、風媒花では送粉を成功させるため花粉をたくさんつくる。花粉症の原因となるのは、こうして大量につくられた風媒花の花粉だ。

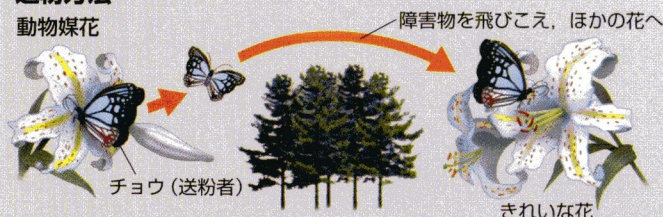
花の基本構造

※例はソメイヨシノ



送粉方法

動物媒花



風媒花



風媒花では、ほかの植物などの障害物があると花粉がさえぎられてしまうことがある。そのため、大量の花粉をつくる必要がある。動物媒花では、より高い確率で花に花粉が運ばれる。しかし、そのためには、きれいな色の花びら、香り、蜜などの動物を招くくふうが必要である。

一方、花から花へと移動する昆虫や鳥などに花粉を運ばせる動物媒花では、高確率で花へと花粉を届けることができ、効率的だ。実は、私たちがきれいだと感じる花は、動物媒花であることが多い。

運び手にあわせて多様化してきた花

送粉を成功させるためには、花粉の運び手（送粉者）が花に来て、おしべの花粉を体につけ、次にほかの花に行き、そこで運んできた花粉をめしべにつける必要がある。

昆虫は、栄養価の高い花の蜜や花粉を食べに花を訪れる。その際、昆虫にみつけれやすい花のほうが、より昆虫に花粉をつけるチャンスがふえと考えられている。野に咲く花が色とりどりできれいなのは、そうすることで昆虫に発見されやすくなり、生存に有利となるためなのだ。

昆虫は花に到達すると、花粉や蜜を集める。多くの植物の花では、その間に昆虫にうまく花粉がつく

ように、おしべ、めしべなどが配置されている。なかには、確実に花粉が昆虫につくような特殊な形状になっているものもある（下図）。

特殊な形の花では、訪れる昆虫が限定されることが多い。このような花では、花粉をつけた昆虫が、次に同じ種の花に行く可能性も高いため、送粉の効率がよくなる。植物はこのように、送粉者にあわせてさまざまな花を発達させてきたのだ。

さまざまな花の色はいつどうやってできる？

花の色は、送粉が成功するかどうかのかぎをにぎる、非常に重要な要素だ。送粉の準備のできていないつぼみの段階では、昆虫が来ても意味がない。そのため、多くの場合、つぼみは目立たないうすい色をしている。鳥やチョウなどの送粉者に色でアピールする花では、その後、開花にともない、赤、黄、白といった、送粉者の色覚で葉と区別が付きやすい色となる（色覚については、94 ページからの「知られざる眼のヒストリー」を参照）。

それでは、これらの花の色はどのようにしてできるのだろうか？ 花の色にくわしい、農研機構花き研究所の大宮あけみ^{おおみや}上席研究員は、「開花にあわせて花の細胞内に色素がたまることで、それぞれの花に特有の色がつくられます」と語る。

植物は、細胞内での化学反応により、水や二酸化

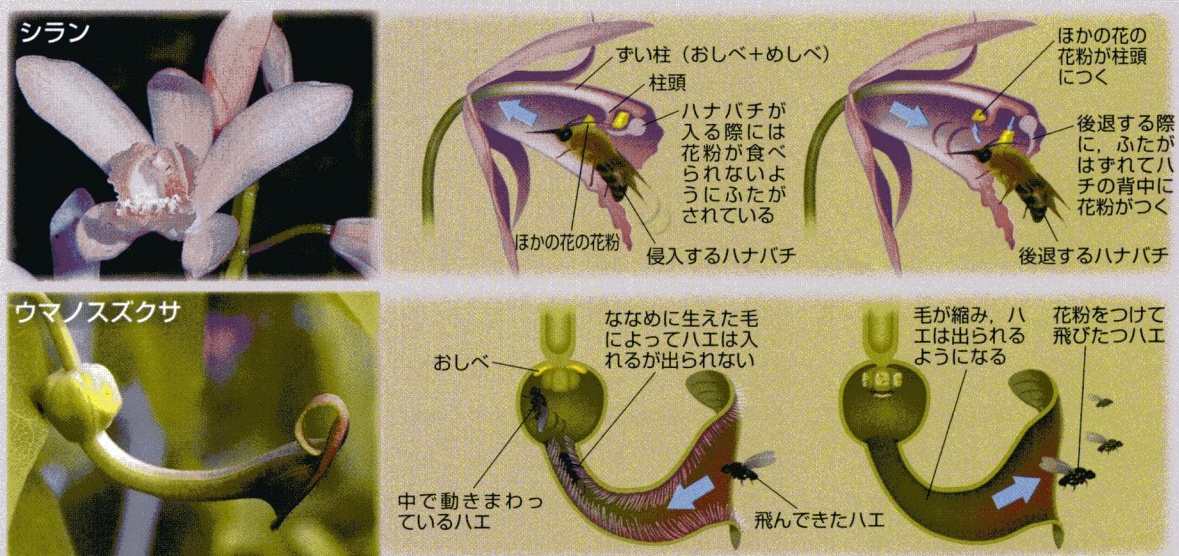
炭素などからさまざまな物質を生産している。色素もそうしてつくられる物質の一つだ。色素のできたのは、自動車工場の生産ラインをイメージするとわかりやすい。各工程でさまざまな部品がつけ加えられていくことで、最終的に自動車ができあがるように、植物の細胞内で、さまざまな化学反応を経て、色素はつくられる。ここで、部品を付け加えるはたらきをするのが「酵素^{こうそ}」というタンパク質だ。それぞれの化学反応には、特定の酵素が必要である。

色素には、さまざまな構造のものがああり、それぞれの構造ごとに決まった色（波長）の光を吸収し、ほかの色の光を反射する。そのため、色素ごとにことなった色に見える。

花の色素は、基本的な構造の共通点からフラボノイド、カロテノイド、ベタレイン、クロロフィルという四つのグループに分けられる。同じグループの似た構造の色素でも、ささいなちがいで、大きな色のちがいになることもある。四つのグループの全色素をあわせるとその数は、数 1000 にものぼるという。

また、同じ色素でも、pH（酸性度）や一緒にあるほかの色素などの条件により、色が変わることがある。たとえば、ソライロアサガオでは、開花の直前は赤紫色^{あかむらさき}だが、開花とともに、ソライロの名のとおり^{あかむらさき}の青い色に変化する。これは pH の変化によるものだ。また、アジサイの場合は、色素と一緒に存在す

確実に昆虫に花粉を付着させるために特殊化した花



シラン（上）では、おしべとめしべが一体化している（すい柱）。ハナバチが、花の中央部にもぐりこみ出て行く際に、ハナバチが運んできたほかの花の花粉は、うまく柱頭につき、つづいて新たに花粉がハナバチの背中に付着する。ウマノスズクサ（下）では、ラッパ状の花の中にハエを誘いこむ。ハエは、内部の毛のせいで、入ることはできるが出ることができない。そして、ハエが中で動きまわるあいだに花粉がハエに付着する。数日で毛が縮み、ハエは花粉がついたまま飛びだしていく。

るアルミニウムイオンの濃度によって色が変わる。

色素の構造のちがいや、こうした条件のちがいに
どにより、さまざまな花の色はできるわけだ。

白い花の不思議

色素で色が決まるのなら、白い花は、白い色素
をもっているのだろうか？ 実は、白い花には色素
がない。そのため実際には透明だが、花びらの内部
に小さな気泡があるために、ビールの泡と同様に白
く見えるのだ。

なぜ、色素がない花ができるのだろうか？ 「白い
アサガオと白いキクでは、色素がないのは共通です
が、そのしくみがことなります」(大宮上席研究員)。

まず、アサガオでは、色素がつくられないことで
白い花ができる。色つきのアサガオの花びらでつく
られている色素(フラボノイドの一種のアントシア
ニン)をつくるのに必要な酵素が、正常にはたらか
ないために、色素ができないのだ。

一方、キクの場合は、色素はつくっているのに、
それを分解することで白くなっているという。「キク
の場合は、アサガオとちがって、カロテノイドを花
びらではつくらないようにするスイッチをもたない
ようです」(大宮上席研究員)。カロテノイドは、葉
でつくられる、光合成に必要な色素(黄色)だ。ア
サガオには、この色素が花びらではつくられないよ
うにするスイッチのようなしくみがある。しかし、
キクの場合は、なぜかこのスイッチがはたらかず、
カロテノイドを花でもつくってしまう。

それではなぜ、白いキクは黄色くならしまわな
いのだろうか？ 実は、白いキクの花びらでは、カ
ロテノイドを分解する酵素がはたらいている。つま
り、色素の生産がとめられないために、できた色素
を片っ端から分解することで白くなっているわけだ。

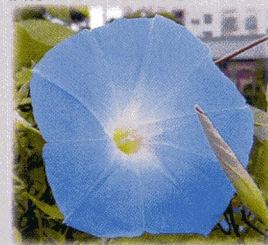
模様をつくる「動く」遺伝子

次に、花の模様について考えてみよう。たとえば、
アサガオでは、一枚の花びらの中に、色のある細胞
とない細胞があることで模様ができる(上の写真右)。

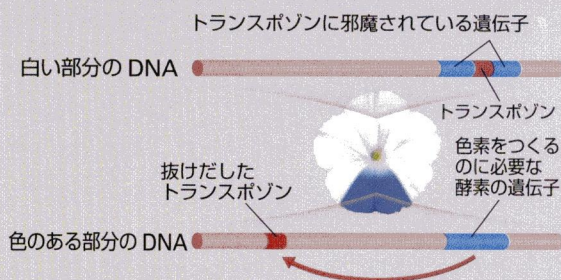
「模様のできかたはさまざまなのですが、トランス
ポゾンという“動く遺伝子”と模様の関係が最もよく
研究されてきました」と花の模様にくわしい基礎生

模様をつくる動く遺伝子

模様のないアサガオ



模様のあるアサガオ



模様入りのアサガオでは、色素をつくるのに必要な遺伝子の中
に動く遺伝子(トランスポゾン)が入って、色素をつくる
のを邪魔している。そのため、そのままでは白い花になる。
花びらの発達中にトランスポゾンが動いて遺伝子から抜けだ
すと、色素がつくれるようになる。花の色のついた部分は、
トランスポゾンの邪魔がなくなった細胞の集まりである。

物理学研究所の星野敦助教は語る。

遺伝子とは、DNA 上の、機能的なまとまりをもつ
領域をさす。トランスポゾンとは、みずからを 1
度 DNA 上から切りはなし、DNA 上のそれまでとは
ことなる場所に戻ることができる遺伝子だ。この遺
伝子を発見した、アメリカのバーバラ・マクリント
ック博士は 1983 年にノーベル賞を受賞している。

この遺伝子がどのように模様に関係するのだろ
う？ 先述のように、色素は酵素というタンパク質
のはたらきでつくられる。遺伝子は、いわばタンパ
ク質の設計図だ。そのため、設計図である遺伝子に
異常があると、正常な酵素がつくられなくなる。

模様のあるアサガオでは、アントシアニンという
色素をつくるのに必要な酵素の遺伝子に、トランス
ポゾンが入りこんでいるという異常がある。そのた
め、その状態では色素ができずに白くなる。ところが、
このトランスポゾンが動いて抜けだすと、遺伝子が
正常に戻り酵素ができる。すると、色素がつけられ
て細胞に色がつくようになるため模様ができる。

「模様のパターンは、花びらの発達中にトランスポ
ゾンが動く頻度とタイミングにより決まります。高
い頻度で動く^{ひん ど}と色のついた部分が多くできます。ま

た、花びらができる早いタイミングで動くと、色のついた部分がより大きくなります。トランスポゾンの動く頻度とタイミングは一定ではありません。そのため、できる模様は花びらごとにことなります。なお、パンジーのような決まった模様は、ちがうしくみでつくられます」(星野助教)。

実は、トランスポゾンは、ヒトを含むさまざまな生物のDNA中にあるのだが、通常は動かないように制御されているという。アサガオの場合は、動きやすいトランスポゾンが、アントシアニンをつくるのに必要な酵素に入っているものが江戸時代に偶然発見され、それが品種として今に伝えられているのだ。

人がつくりだしてきた花

江戸時代に、模様入りのアサガオがつくりだされたように、人はこれまでの歴史の中で、さまざまな花をつくりだしてきた。人間にとって好ましい特徴をもった個体を人為的に選び、交配させていくと、世代を重ねるごとにその特徴が徐々にきわだつようになっていく。これを品種改良という。動物では、イノシシからブタへ品種改良された例がある。

実は、花屋の店先に並んだバラやチューリップなども、長い年月をかけた品種改良によってつくられたものであり、花の色や花びらの大きさなどが、もとなつた原種とは大きくことなっている。

しかし、品種改良ではどうしてもつくりだせない花もある。青いバラ、白いヒマワリ、黄色いアサガ

オなどがその例だ。白いヒマワリがないのは、ヒマワリでは、キクと同じく、葉でできるカロテノイド(黄色)が花でもできてしまうためだ。そして、ヒマワリは白いキクとちがってカロテノイドの分解酵素の遺伝子をもたない。そのため、白くならないのだ。

アサガオでは、ヒマワリとは逆に、カロテノイドを花ではつくらないうまくみをもつ。そのため、花ではカロテノイドがつかられず、黄色くならない。

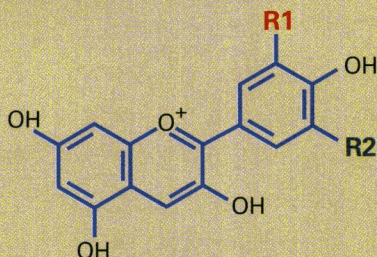
また、バラでは、必要な酵素の遺伝子がないために、青の色素が合成できない。バラは品種改良の長い歴史をもつ。その中で、青いバラをつくり出そうという熱心な取り組みがなされてきた。それでも青いバラはどうしてもできず、不可能とされてきたのだ。

遺伝子組み換え技術で青いバラの実現へ

青いバラはどうすればできるだろうか？ バラやその他の花の色のできるしくみが解明されるにつれ、青いバラは、たった一つの酵素がかわるだけでできる可能性があることがわかってきた。赤いバラの赤系の色素のシアニジンと、青色のツククサや青紫色のラベンダーなどの青系の色素のデルフィニジンは、たった一つの酵素のちがいでつくりわけられている(下図)。そのため、必要な酵素の遺伝子をつ一つ加えることができれば、青系の色素(デルフィニジン)をつくるバラができるわけだ。

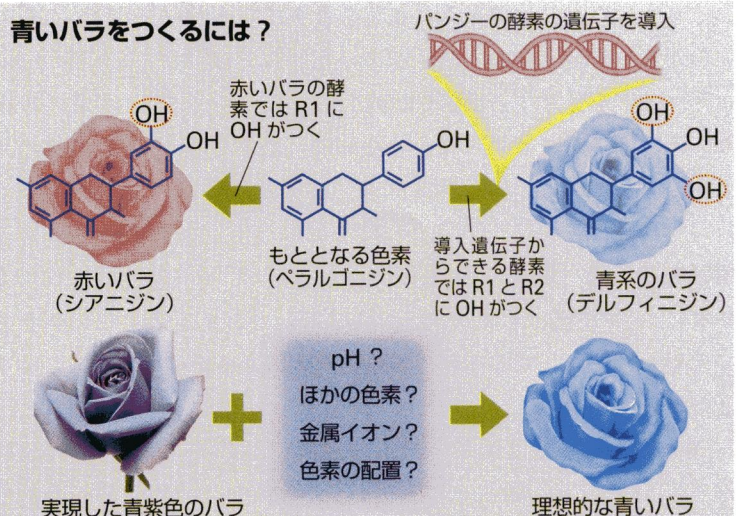
実際に、サントリーフラワーズ株式会社では、デルフィニジンをつくるのに必要なパンジー由来の酵

アントシアニン(色素のグループ)の発色にかかわる部位の構造



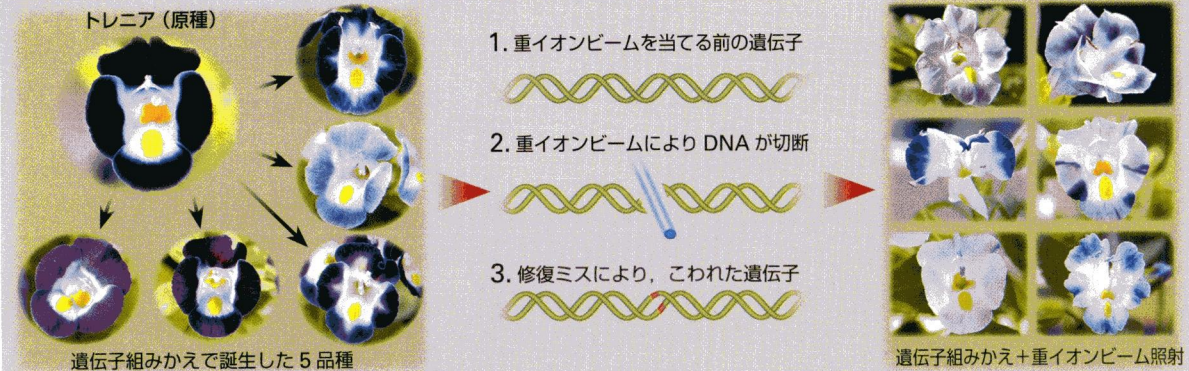
色素名 (アントシアニンの仲間)	R1	R2
ペラルゴニン	H	H
シアニジン	OH	H
デルフィニジン	OH	OH

青いバラをつくるには？



アントシアニン(色素のグループ)の仲間は、構造が似ていても、その構造につく分子(官能基: 左下表のR1とR2)により、色が大きくかわる。たとえば、シアニジンは赤系の色素、デルフィニジンは青系の色素である。この性質をいかして、デルフィニジンをもつバラがつけられたが、まだ完全な青いバラはできていない。デルフィニジンをもつ花がすべて同じ色になるわけではなく、pH(酸性度)やほかの色素などの影響で、同じデルフィニジンでも紫や青などのことなる色になるためだ(右下)。

遺伝子組みかえと重イオンビーム照射を組み合わせる誕生した新たな花



重イオンビームによる品種改良では、植物の DNA に、光速の 70% 程度まで加速させたイオンを当てる。すると、DNA のごくせまい領域が切断される。切断された DNA は修復されるが、その際にミスがおきることもある。そのほかの放射線などを使った同様の手法では、DNA の広範囲が破壊され、植物が死んでしまうことも多かった。重イオンビームの照射では、ごくせまい領域だけが傷つくため、植物は死なない。上のトレンニアの例では、まず、遺伝子導入により、色素をつくる酵素のはたらきをかえた (左)。そして、これらに重イオンビームを照射した。すると、色も形も模様もさまざまな花ができた (右)。トレンニアは観賞用の花だが、花が咲くまでの期間が短いこと、遺伝子組みかえの手法が確立されていることなどから、近年では実験用植物として注目されている。

素の遺伝子をバラに入れることに成功している。そして、2009 年よりこのバラを販売している。

しかし、このバラは現在、むしろ青紫色で、あざやかな青ではない。それは、色素だけでは花の色が決まらないためだ。さらに、pH や一緒にできるほかの色素などのさまざまな条件をかえることができれば、完全な青いバラも実現するかもしれない。

遺伝子を導入せずに新たな花をつくる

青系の色素をもつバラの場合は、遺伝子を導入することでつくられた。それでは、ヒマワリにカロテノイドを分解する酵素の遺伝子を導入して白いヒマワリをつくったりすることもできるのだろうか。

「実は、植物の遺伝子導入は簡単ではないのです」(大宮上席研究員)。遺伝子の導入自体がうまくできなかったり、導入には成功しても遺伝子からつくられた酵素がうまくはたらかなかったりすること多いというのだ。上記のバラの場合でも、パンジーの遺伝子では成功したが、ほかの植物の同じ酵素をつくる遺伝子では成功しなかった。なぜある花の遺伝子では成功し、ほかの植物ではうまくいかないのかという点は未解明だという。

一方で、遺伝子導入とは逆に、通常はたらいっている遺伝子をはたらかなくすることで新しい特徴をもった花をつくることもできる。

その技術の一つに「重イオンビーム」を照射する手法がある。この手法は、炭素、ネオン、鉄などの

イオンを加速させ、植物の葉や芽に当てることで、植物の DNA を切断するというものだ。細胞には、DNA が切断された際に、それを修復する機能がそなわっているが、ときには修復に失敗することがある。こうして遺伝子の一部がこわれた葉や芽を培養して植物を再生すると、花の色や形などにかかわる遺伝子がこわれた、通常とはことなる色や形の花が出現することがあるのだ。この際、イオンが DNA のどこを切断するかはわからず、植物を再生するまでは、どのような花ができるかわからない。

理化学研究所と花き研究所の共同研究では、遺伝子組みかえと、重イオンビームの照射を組み合わせることで、さまざまな特徴をもつ花を生みだすことに成功している (上の写真)。

また、2010 年には、理化学研究所の研究で、重イオンビームの照射により「仁科乙女」というサクラが誕生している。このサクラは、野外で栽培すると、春と秋の二季咲きになるという。

決まった季節に花が咲くのはなぜ？

仁科乙女が注目を集めるのは、サクラが通常は年に一度しか花を咲かせないためだ。サクラだけでなく、多くの花が決まった季節に咲く。これは、考えてみれば不思議なことだ。花はどうやって季節を知るのだろうか。

今回は、植物がどのように季節を知り、なぜ花が決まった季節に咲くのかななどを紹介する。

(担当：編集部 向井伸生)

早く、正確に体温を測定できる 電子体温計

水銀体温計は測定に 5 分以上。電子体温計はなぜ早い？

体が何だか熱っぽい。そんなときは、誰もが体温計のお世話になるはずだ。電子体温計の性能は向上をつづけており、近年は、「予測式」で 15 秒程度、赤外線を使った「非接触式」に至っては 1 秒での測定が可能になっている。

かつて、体温計といえば「水銀体温計」が主流だった。しかし、水銀の熱膨張^{ぼうちよう}を利用する水銀体温計は、測定が完了する（つまり体温と体温計の温度が同じになる）までに 5 分以上（理想的には 10 分程度）が必要となる。

水銀体温計にかわり、近年主流となっているのは「電子体温計」である。電子体温計には、大きく分けて二つのタイプがある。

最も普及しているのは「予測式」だ。文字どおり、体温を「予測」する。予測式の電子体温計のセンサーは、先端^{せんたん}の金属部分の中にある。センサーには、「サーミスタ」が使われている。サーミスタとは、温度によって電気抵抗^{でいこう}の値が大きく変化する素材のことだ。ここに一定の電圧をかけて、流れる電流を測定すれば、そのときの電気抵抗の値、つまりサーミスタの温度が測定できるというわけだ。ただし水銀体温計と同様に、正確な測定のためには、数分（理想的には 10 分）程度が必要となる。これは不便だ。

そこで、予測式の電子体温計では、測定をはじめた後のサーミスタの温度上昇^{じょうじょう}の推移をもとに、最終的に到達^{とうたつ}するであろうサーミスタの温度（つまり本当の体温）を予測する、という方式をとっている。オムロンヘルスケア株式会社の最上位機種では、15 秒という短時間での体温測定が可能になっている。

一方、「非接触式^{せつしよく}」の電子体温計もある。これは、体（通常は耳の鼓膜^{こまく}）が発している赤外線をセンサーで感知し、その強さをもとに、耳の鼓膜の温度（体温）を測定するという方法だ。この方式は、「予測」ではない実際の体温を、1 秒という短時間で測定できる。ただし、測定のしかたによっては、鼓膜以外の場所の温度を測定してしまうことがある。このため「予測式」の方が正確に体温を測定しやすいとされる。●

（担当：編集部 赤谷拓和）

協力

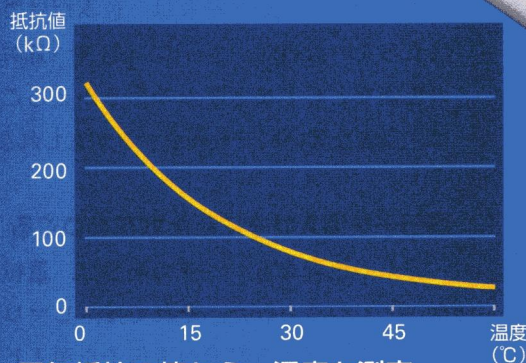
オムロンヘルスケア株式会社

予測式の電子体温計

サーミスタ

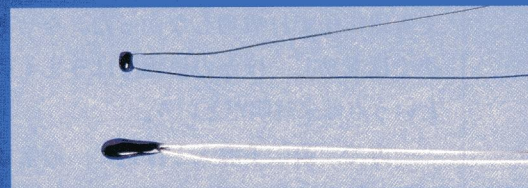
温度によって電気抵抗の値が大きく変化する性質があり、温度センサーとして使われている。オムロンヘルスケア株式会社では、セラミックスに数種類の金属粉をまぜ合わせた素材を使用。

金属製のキャップ。体温をすみやかにサーミスタに伝えるため、熱を伝えやすいステンレスが使用されている。



電気抵抗の値から、温度を測定

グラフは、「サーミスタ」の抵抗値が、温度の変化にもなって変化するようすを示している。サーミスタは、温度が上昇すると抵抗値が下がるタイプのものと上がるタイプのものがある。オムロンヘルスケア株式会社で使用しているサーミスタは、温度が上がると抵抗値が下がるタイプのものである。電気抵抗の値を読みとることで、その時点のサーミスタの温度を測定できる。



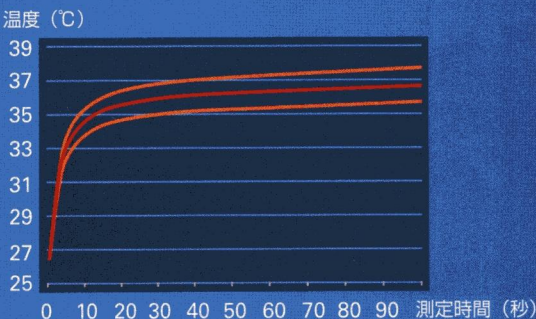
小型化が進んだサーミスタ

先端^{せんたん}の黒い部分がサーミスタである。上段は、オムロンヘルスケア株式会社の体温計で現在使用されているサーミスタであり、下段は旧モデルで使用されていたサーミスタである。旧モデルにくらべて、体積が約 3 分の 1 に小型化されている。小型化により、サーミスタが早く温まりやすくなるため、より早く正確な体温の予測が可能になる。

■ 予測式と非接触式、電子体温計のしくみは？

オムロンヘルスケア株式会社の製品をもとに、電子体温計のしくみをえがいた。下がサーミスタを使った「予測式」、右が赤外線を利用した「非接触式」の電子体温計である。いずれも非常に短時間で体温の測定ができるようになっている。

非接触式の電子体温計



温度上昇の推移から、体温を予測

グラフは、体温の測定開始直後からの、サーミスタの温度変化をあらわしている。サーミスタの温度は、測定開始直後に急激に上昇し、その後はゆるやかに体温の値に近づいていく。初期の温度上昇の推移を分析することで、ほんとうの体温の値をかなり正確に予測することができる。オムロンヘルスケア株式会社の最上位モデルでは、15秒で予測を終え、体温を表示する。予測精度は、日本工業規格（JIS規格）によって、プラスマイナス0.2度C以内におさまる割合が95%以上と定められている。



鼓膜の温度を赤外線で測定

すべての物体は、その温度に応じた赤外線を発している。このことから、赤外線を分析すれば、その物体の温度がわかる。非接触式の電子体温計は、鼓膜が発している赤外線をセンサーで感知することで、体温を測定する。「予測」ではなく、実際の温度を即座に直接測定できるため、測定時間は1秒である。測定時間が短いため、赤ちゃんの体温測定で使用される場合が多い。

測定の仕方によっては、誤差が出る可能性も体温計を耳の穴に入れる角度がずれると、鼓膜ではなく、耳の穴の側面の温度を測定してしまう。その場合、体温よりも低い値が測定されてしまう。また、耳あかも測定誤差の原因となる。誤差をなるべくなくするために、1秒の間に何度も温度を測定して、そのうち最も高い温度を体温として表示している。また、とりかえ式のカバーをかぶせることで、耳あかの影響をおさえている。

基盤の裏面

CR 発振回路

サーミスタの電気抵抗の値は、そのままでは利用しにくい。ため、交流の周波数という情報に変換する。

マイクロコンピューター
体温を予測する計算を行う。

注：「予測式」に対して、体温を実際に測定する方式を「実測式」という。また、「非接触式」に対して、体に体温計が接するタイプのものは「接触式」とよばれる。この分類にしたがえば、正確には、サーミスタを使った電子体温計は、予測式でなくかつ接触式、赤外線を利用した電子体温計は実測式でなくかつ非接触式ということになる。また、日本工業規格（JIS規格）によって、予測式の機能しかもたない体温計は、電子体温計とは認められないことになっている。このため、サーミスタを使った予測式の電子体温計は、計測時間を長く取ることで、実測式としても使用できるようになっている。

電池

■ 太古の生存競争編

重量級どうしの激突

ティラノサウルス vs. トリケラトプス

時代：白亜紀後期（マーストリヒチアン：7060 万年前～ 6550 万年前ごろ）

場所：北アメリカ大陸西部

協力

小林快次 北海道大学総合博物館准教授

斎木健一 千葉県立中央博物館主任上席研究員



ティラノサウルス

学名：Tyrannosaurus rex

学名の意味：暴君トカゲ

推定体長：約 12 メートル（体高約 4 メートル）

推定体重：約 6 トン

巨体^{きょたい}どうしがぶつかり、森林の空気がふるえる——。1頭は、強^{はこ}じんなあごを誇る肉食恐竜のティラノサウルス。もう1頭は、長い3本角と後頭部に大きなフリルをもつ植物食恐竜のトリケラトプスである。いずれも推定体長10メートル前後の巨大な恐竜だ。

ティラノサウルスのあごの力は、陸上動物で史上最強とされる。あるシミュレーションによると、あご全体で約8万ニュートン※の力を発揮できたという。この値は、ヒトが奥歯^{おくは}でかむ力の100倍以上である。

そのティラノサウルスの歯形が残るトリケラトプスのフリルや腰骨^{こしほね}の化石と、ティラノサウルス自身の化石が、同じ時代・場所の地層から発見されている。こ

れは、2種の恐竜が時間を共有していたことの直接的な証拠^{しやうこ}となる。近年、ティラノサウルスの歯形がついたティラノサウルスの足や指の骨もみつっている。異論はあるものの、共食いすることも多かったのでは、との説をとる研究者もいる。

ティラノサウルスの歯形が残るフリルの持ち主は、食べられてしまったのだろうか？ 実は、なんとか生きのびたようだ。傷に治癒した跡がみられるのである。フリルと角は、主に威嚇^{いこく}や異性へのアピールの役割をになう一方で、ときには防御^{ぼうえぎょ}や反撃^{はんげき}にも直接使われたという。イラストでは防御しにくい瞬間^{しゅんかん}をえがいた。

トリケラトプスのような巨漢は、一般に襲われにくい。だがそうした動物ですら、ティラノサウルスの獲物^{えもの}となった。ティラノサウルスを頂点とする生態系、それが白亜紀後期の北アメリカの世界だったのだ。🍏

(担当：編集部 松田壮一郎)

※：1ニュートン(N)の力は約0.1 kilogramsの重量に相当する。つまり8万ニュートンは約8000 kilograms(8トン)の重量にあたる。

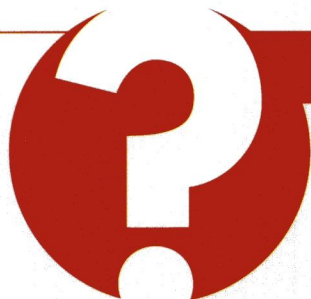
トリケラトプス

学名：Triceratops horridus

学名の意味：おそろしい3本角の顔

推定体長：約8メートル(体高約3メートル)

推定体重：約9トン



身近な "?" の科学

【指紋】

何の役に立つ？どのようにしてできる？

指紋は「万人不同，生涯不変」といわれ，古くから拇印として，また現在は入国審査や犯罪捜査などでの個人識別に，幅広く使われている。なぜ指紋は個人識別に使えるのだろうか？そもそも指紋自体は何の役に立っているのだろうか。またどのようにしてできるのだろうか？

協力

井上 馨 北海道大学大学院保健科学研究院教授

指紋とは，表皮に線状に並ぶ出っ張り（^{しもん}）と溝（^{みぞ}）がつくる模様「皮膚紋理」の一つである。ヒトの場合，手や足の裏の全体に，皮膚紋理がある。

指紋が個人の識別に使われるわけ

指紋は犯罪捜査をはじめ広く個人識別に利用されてきた。古代のパピロニアや中国でも個人認証に使われていたことが知られ，日本でも印鑑（^{いんかん}）のかわりに長く拇印が使われてきた。

指紋が個人識別に使えるのは，以

下の条件を満たしているからだ。

まず，同じ指紋が二つとないことだ。一卵性双生児（^{いっちゅうせい}）でも，紋様の種類（左下図）が高い確率で一致するが，細かな特徴（特徴点。右ページ左図）はことになっており，完全には一致しない。また，同じ人のことなる指でも，指紋はそれぞれちがう。

また指紋は，基本的に生涯かわらない。子供から大人に成長しても，指紋は拡大するだけで，線の数などがかわることはない。

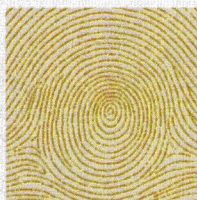
表皮の下には，真皮という層があり，表皮と真皮の境が凹凸に入り組んでいる。この凹凸が鑄型（^{いがた}）になり，指紋は形づくられるという。たとえば摩滅（^{まめつ}）などで表皮が失われても，深部が傷ついていなければ同じ形の指紋が再生するのだ。ただし鮮明さは，年齢とともに失われていく。

なお，指紋が犯罪捜査など個人識別に利用できることを科学的に示した研究は，明治初期に日本に滞在したイギリス人宣教師兼医師のフォー

指紋の種類



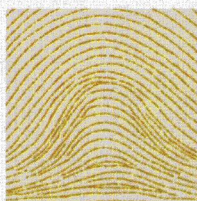
蹄状紋 (loop)
隆線が指の片側から入ってひづめのような輪をえがき，同じ側に流れる。三角州*は一つ。
*右ページ左図参照



渦状紋 (whorl)
中心部の隆線が渦，同心円，複雑なものでは二重蹄状のもの。三角州は基本的に二つ。



二重蹄状紋 (渦状紋の亜型の一例)



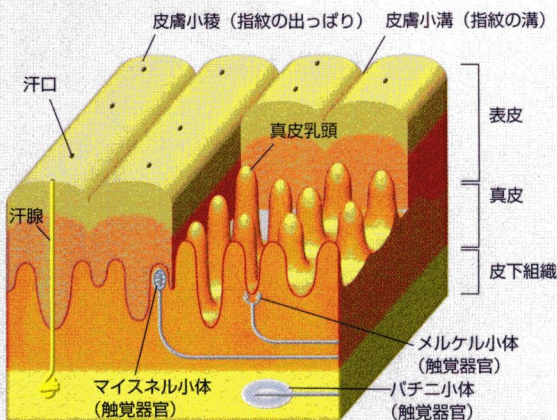
弓状紋 (arch)

湾曲した隆線が指の一方から他方に流れる。



突起弓状紋 (弓状紋の亜型の一例)

指紋の内部構造

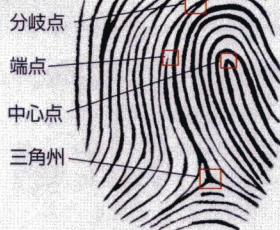


皮膚は表皮，真皮，皮下組織の3層からなる。指紋は，表皮の表面に走る「皮膚小稜」と「皮膚小溝」がつくる模様である。皮膚小稜の上には汗の出口が，下には真皮の突起「真皮乳頭」が2列に並んでいる。皮膚内にはさまざまな触覚器官がある。

左図は，指紋の3大パターン（蹄状紋，渦状紋，弓状紋）を示した。渦状紋と弓状紋では，その亜型の一つも示している。右図は皮膚の内部構造を示した。触覚器官はほかにもあるが，本文で取り上げたものを示している。

指紋照合の方法

特徴点の例



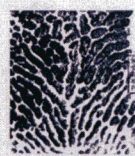
指紋照合は通常、全体を重ね合わせるのではなく、上のような特徴点の種類や位置などを抽出して行われる。

動物たちの皮膚紋理



オランウータンの指紋
多摩動物園の雄のオランウータン「ボルネオ」の人差し指

コアラの指紋
大人のコアラの中指



皮膚紋理は、霊長類やコアラの手足によく発達し、ある種のサルの上唇や、牛などの鼻にもみられる。

牛の鼻紋

鼻紋で個体識別ができるので、和牛の戸籍「子牛登記証明書」には鼻紋が添付されている。

ルズが、1880年、イギリスの科学雑誌『nature』に寄せた短報が、最初といわれている。

指紋は遺伝するのだろうか

同じ指紋が二つとないといっても、指紋は一卵性双生児では傾向が似る。また、同じ人のちがう指にも似た紋様があらわれやすい。あらわれやすい紋様のタイプには、性差や人種差もみられるという。たとえば日本人では、蹄状紋と渦状紋が同程度で、この二つが全体の9割以上を占める。これにくらべ、ヨーロッパ人は蹄状紋が多く、アフリカ人は弓状紋が比較的多いという。

一卵性双生児や同じ人種で指紋に傾向があることから、指紋が「遺伝する」といってもよさそうである。

だが実際には、指紋にはいくつもの遺伝子がかかわっている可能性があり、さらに環境などの要因の影響も受け、指紋は形づくられる。「指紋にかぎらず、ヒトの体の形は、細部が一人一人ちがいます。指紋が広く個人認識に使われてきたのは、最も使いやすかったためでしょう」と、解剖学が専門の北海道大学の井上馨教授はのべる。

指紋はどのようにできるのか？

指紋は4か月の胎児にはすでにみられる。それ以前、胎生10週目ごろをピークとして、指先などには一時、大きな球状のふくらみができる。ネコなどの肉球と同じもので、これが指紋形成に大きな役割をはたす。

このふくらみがちぢみはじめるころ、表皮と真皮の境にしわが寄りはじめる。“指紋の鋳型”の芽生えだ。この鋳型で生まれた細胞が表層へ押しだされ、4か月目には表皮に指紋があらわれる。ふくらみの曲面に並びつめられた鋳型からつくられるので、指紋の形はもとのふくらみの形や大きさで決まると考えられている。

ほかの動物にも“指紋”はみられる

ヒトだけでなく、ゴリラやチンパンジー、オランウータンをはじめとする霊長類には、皮膚紋理が手足のひらや指にみられる。また木に登るコアラとその仲間（クスクス科）にも同じくみられるという。

また、クモザルやオマキザルなど、南アメリカのサルは、物を器用につかむことができる尾をもつ。その尾の内側にも皮膚紋理がみられる。

これらのことから、物をつかむ

部分の皮膚には紋理があらわれやすいということが推測される。

指紋は普段、何の役に立っている？

指紋がもつ機能として一般に、以下の二つが知られている。

一つは、皮膚の摩擦を大きくして、滑り止めの効果を出すことだ。指紋の凹凸に加え、皮膚から分泌される汗が、摩擦力を高めるといわれる。

指紋のもう一つの役割は、皮膚触覚器官（前ページ右図）の感度を高めることだ。真皮と表皮の境界付近にはマイスネル小体、メルケル小体がある。これらには、指紋もしくは真皮の凹凸があるおかげで、物にふれた際の力が集中し、感度が高まるという報告がある。また指紋の凹凸は、物体をなぞるときに皮膚におきる振動をうまく増幅して、皮膚深部のパチニ小体に伝えるという報告もある。これによって物体の細かな形状を感知するのを助けるのだという。

滑り防止も感度上昇も、ヒトの指のたくみな作業を助けるものだ。「指の器用さはヒトの大きな特徴です。指紋は機能的にも、ヒトがヒトであるために重要なはたらきをしているといえるでしょう」（井上教授）。🍏

（担当：編集部 疋田朗子）

時間

セシウム原子が1秒の基準をつくる

私たちは時間を知るために時計を使う。腕時計、置き時計、パソコンや携帯電話の時計など、現在使われている時計のほとんどは水晶（クォーツ）を使って時をきざむ（Quartz 時計）。

水晶に、電圧をかけると安定して振動する。水晶が一定の時間に振動する回数（周波数）は、その重さや形によってことなるが、腕時計に使われるほどの小さな水晶は1秒間に3万2768回振動する物が多い。水晶が3万2768回振動した瞬間に、秒針を1秒進ませるわけだ。

正確に1秒をきざむ時計の技術が進む一方で、1秒という時間の長さを決める定義も変化していった。

時間の基本単位は「秒」である。人々は昔から、一定の時間間隔で、くりかえし運動する自然現象をもとに時間の長さを決めてきた。紀元前3000年ごろのエジプトでは、太陽が南中する時間の間隔を1日とし、1日を24時間に分けた。この考えが進み、1時間が3600（60×60）で割られて1秒の長さが決められていったのだ。

1956年には国際度量衡委員会が、より安定な基準として、地球の公転を秒の基準に採用した。しかし天体の観測にもとづいて決めなければならず、十分な精度が得られなかった。

最も正確な1秒をきざむ原子時計

現在、1秒の定義に使われているのはセシウム133原子だ。そもそも原子というものは、決まった周波数（1秒あたりの波の振動回数。単位は「ヘ

ルツ」）の光だけを吸収して、エネルギー状態が高くなる性質をもつ。セシウム133原子の場合、周波数が91億9263万1770ヘルツの光「マイクロ波」を吸収すると高いエネルギー状態になる。現在は、セシウム133原子の吸収するマイクロ波が91億9263万1770回振動するのにかかる時間を、1秒と定めている。

この原理を使って正確な時刻をきざむのが原子時計だ。原子時計は、カーナビに使われるGPS衛星や携帯電話基地局、また、電機メーカーが製品の時計のずれを直すためなどになくしてはならないものだ。

このように、1秒の定義は国際的に決められているが、国どうしで頻繁に情報をやりとりする時代に世界共通の時刻もないと不便だ。世界共通の時刻は、「国際原子時（TAI）」と「世界時（UT1）」をもとに定められる。

国際原子時は、50か国以上にある約300台の原子時計の時刻をもとに定められる時刻で、1秒の長さを最も正確にきざむ。一方、世界時は地球の自転をもとに定められ、私たちの生活に合った時刻だ。しかし、地球の自転は、月や太陽の引力による影響などで少しずつ遅くなるため、1秒の長さがかわってきてしまう。

そこで、1秒のきざみには正確な1秒をきざむ国際原子時を用いつつ、数年に1回、「うるう秒」という1秒を入れ、地球の自転の影響を取り入れた「協定世界時（UTC）」が、世界共通の時刻として使われている。 ●

（担当：編集部 遠津早紀子）

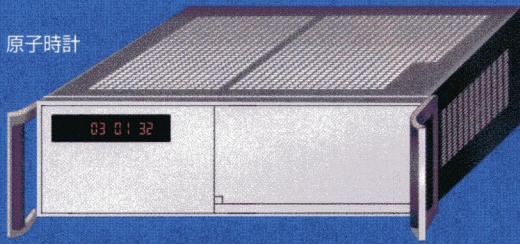
1秒をきざむものとは？

私たちが日常生活の中で使っている時計は、水晶の振動回数をもとに1秒進むしかけになっている。一方、1秒の長さの基準として国際的に使われているのはセシウム133原子だ。この原子が吸収するマイクロ波の振動回数が、1秒の長さのもとになっている。この原理を利用した時計を原子時計という。



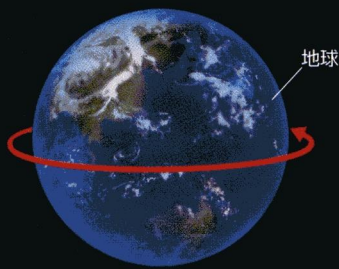
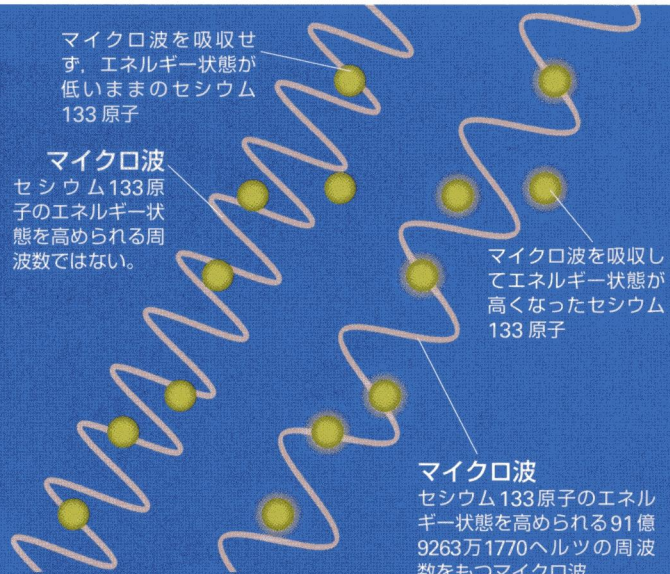
身近な時計は水晶の振動を検知して1秒進む
水晶時計の中には、電池と水晶と発振回路（水晶を振動させるための回路）が入っている。水晶の結晶は、二つの面の間に、ある向きの電圧をかけるとのび、反対方向の電圧をかけるとちぢむ性質をもっている。そこで、ことなる向きの電圧を水晶の両面にタイミングよく交互にかけつづけると、水晶片は振動する。水晶は、重さや形、切りだし方により決まる一定の周期の電圧をかけたときだけ振動する。振動した回数をカウントし、決まった振動回数に達したときに時計の秒針を1秒進めると、精密な時計ができる。なお、水晶時計の中には、原子時計のきざむ時刻の情報を乗せた電波を受信して、時刻の調整を行う電波時計もある。

原子時計



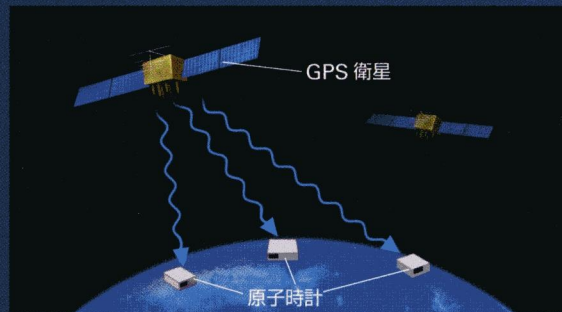
あるマイクロ波が91億9263万1770回振動すると1秒
セシウム133原子は、91億9263万1770ヘルツの周波数をもつ
マイクロ波のみを吸収してエネルギー状態が高くなる。この性
質を利用した原子時計では、セシウム133原子の蒸気マイクロ
波をあて、セシウム133原子のエネルギー状態が高められた
ことを確かめてから※、マイクロ波の振動回数をカウントする。
そして、この振動回数が91億9263万1770回を数えたときに1
秒経ったとして時間を1秒進める。

※ 磁石を使って、エネルギー状態の高いセシウム133原子の進路のみ、
検出器の方向に向かって曲げる。検出器に入ったセシウム133原子
はイオン化されて回路に電流が流れるので、それで確かめられる。



世界時

経度0度上、イギリスの旧グリニッジ天文台があった場所の
時刻にあたる。地球の自転をもとに決められ、私たちの生活
に合った時刻であるが、少しずつ遅くなり、1秒の長さがか
わってしまう。



国際原子時

GPS衛星の搭載する原子時計が、世界の各原子時計に1秒
の信号を送る。この1秒とのずれの情報を集めて全原子時計
の平均時刻を出し、最も高精度の原子時計「一次周波数標準
器」の時刻とくらべ、調整したものが国際原子時だ。

世界時の時刻

Jun 30 23:59:58²⁰

0.8 秒時刻がずれている
(協定世界時の方が速い)

Jun 30 23:59:59²⁰

協定世界時にうるう秒を入れる

Jul 1 00:00:00²⁰

時刻の差を縮小

協定世界時の時刻 (国際原子時の秒のきざみに忠実)

Jun 30 23:59:59⁰⁰

Jun 30 23:59:60⁰⁰

うるう秒
の挿入

Jul 1 00:00:00⁰⁰

正確な1秒の長さを保つ国際原子時にしたがって1秒をきざむ協定世界時に、数年に1回、「うるう秒」とよばれる1秒を入れて、私
たちの生活に合った世界時の時刻に合わせている。うるう秒は、経度0度で大晦日から元旦へ日付が変わるときや、6月30日から7
月1日へ日付が変わるときに挿入されてきた。2012年は6月30日に入る予定だ。

STAR-WATCHING

はじめてでもわかる星のみかた



1991年1月16日の朝、オーストラリアにて撮影された金環日食（藤井 旭撮影）。

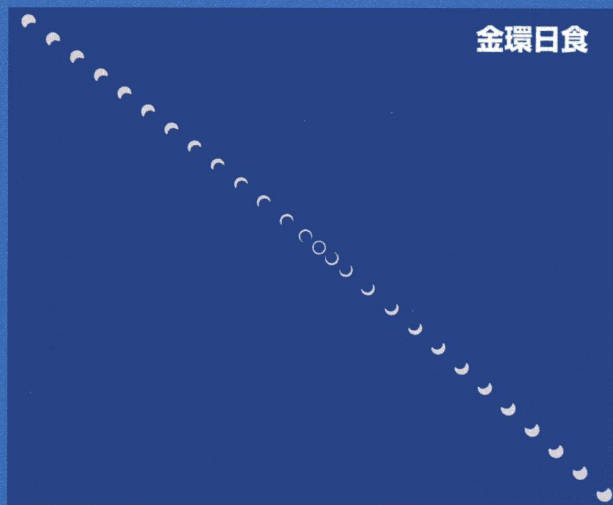
金環日食

2012年5月21日の朝、待望の「金環日食」がみられる。日本列島を縦断する広い地域で観察できるものとしては、実に932年ぶりだ。金環日食が観察できる地域からはずれた場所でも、大きく欠けた部分日食がみられる。この日食観察の好機を、ぜひ楽しもう。

国立天文台副台長 **渡部潤一**

5月21日は、 日本では932年 ぶりの規模の 「金環日食」

金環日食



金環日食は、太陽が月に完全にかくされず、環のように残る日食だ。

2012年は「天文現象の金の年」といわれている。金環日食^{きんかんにちしょく}、金星の太陽面通過、金星食という、「金」の文字がだけでなく、めずらしさでは金メダル級の天文現象が次々とおきるからだ。その先がけになるのが、5月21日に起きる金環日食である。

日食は、月が太陽をかくす現象である。月の見かけの大きさは、時期によって1割もことなる。これは、月がゆがんだ楕円軌道^{だえんきどう}で地球をまわっているからで、1割ほど地球との距離^{きょり}がかわるからだ。月が地球に近い場所で日食になる場合、太陽全体が月にかくされる「皆既日食^{かいにちしょく}」となる。だが距離が遠いと月が太陽をかくしきれず、月のまわりに太陽が環のように残って見える「金環日食」となる。

今回の金環日食は、日本でみられる

ものとしては、1987年の沖縄以来、25年ぶりだ。次は2030年の北海道で、18年後となる。その意味でめずらしさも金メダル級だが、今回の金環日食の大きな特徴^{とくちょう}は、なんといっても東京、名古屋、大阪などの日本の主要都市で観察できることだろう。金環日食は、月の影の中心が通過するせまい帯状の領域「金環日食帯」で観察できる。今回はそれが上記の人口密集地を通るために、ある試算では、日本のおよそ6～7割の人が、いながらにして金環日食をながめることができるという。このように日本を横断するような金環日食は、1080年以来、932年ぶりである。

日食の開始は6時台で、終了は8時30分から9時過ぎだ。金環日食帯では、その中心時刻付近（7時20分～35分）において、最長で4～5分間の金環日

食となる。金環日食帯からはずれた場所でも、かなり深く欠けた部分日食が観察できるのも特徴で、北海道稚内市^{わっかない}でも食分（欠けた幅の直径に対する割合）が0.8程度と深い。日食がはじまるころには、すでに日本各地で日の出となっている。晴れていれば部分日食を含めた全過程が観察できる。

ただ、心配事もある。今回の金環日食は月曜日の早朝で、通勤通学時間帯にあたる。道路などで観察すると事故をおこす可能性もあるので、ぜひ安全な場所での観察をお願いしたい。また、金環日食は太陽がかなり残っているのので、裸眼^{らがん}で見るとは絶対にいけない。網膜^{もうまく}が損傷する日食網膜症^{しじょう}になる可能性がある。ぜひニュートン臨時増刊号の付録などの日食グラスを使い、安全に観察されることをお願いしたい。🍏

星ごよみ

5月1日



八十八夜。雑節（季節のかわり目を示す特別な日）の一つで、立春からかぞえて88日目の日。この日を前後に春から夏へと季節がかわる。

5月6日



みずがめ座流星群の極大。早朝、みずがめ座に放射点をもつ流星が散見される。1時間あたり10個以上の速度の速い流星がみられる。今年は満月が邪魔となり条件は悪い。

- 1等星
- 2等星
- 3等星
- 4等星
- 変光星
- ☁ 星雲
- ⋯ 星団
- 〇 銀河

月の満ち欠け(午後11時の位置)

- 4月29日 ● 上弦
- 5月6日 ● 満月(望)
- 5月13日 ● 下弦
- 5月21日 ● 新月(朔)
- 5月29日 ● 上弦



南の空を見るときは
星図の南を下にし
て、南の方向を向く。

南

北緯35度の地平線

この星図の日時

- 5月1日 午後11:00
- 5月15日 午後10:00
- 5月31日 午後9:00
- 6月15日 午後8:00
- 6月30日 午後7:00

5月21日

★★★★★★

金環日食。7時30分前後に東京、名古屋、大阪などで金環日食となり、ほかの地域でも深く欠ける部分日食がみられる。

5月23日

★★★★★★

金星と三日月の接近。日没後の西の地平線付近で、金星と三日月が10度以内に接近する。

5月23日

★★★★★★

小惑星ジュノーの衝。ジュノーがへび座で、太陽と正反対の位置にくる衝をむかえる。ただ、10.2等なので双眼鏡でもわかりにくい。何日かおいて写真を撮ると移動がわかる。

金環日食はなぜめずらしい？ 観察法は？

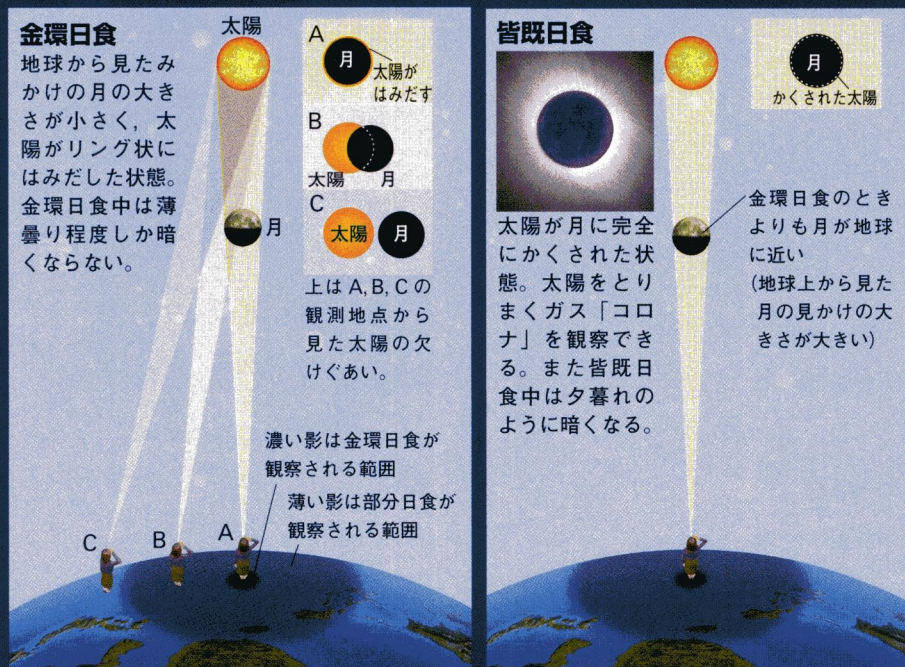
ここからは、金環日食がおきるしくみや実際の観察方法についてみていこう。

2012年5月21日の日本各地の日食予報や、観察の注意点もまとめた。当日は、

協力 **渡部潤一** 国立天文台副台長

事故に気をつけ、世紀の天文ショーを安全に楽しもう。

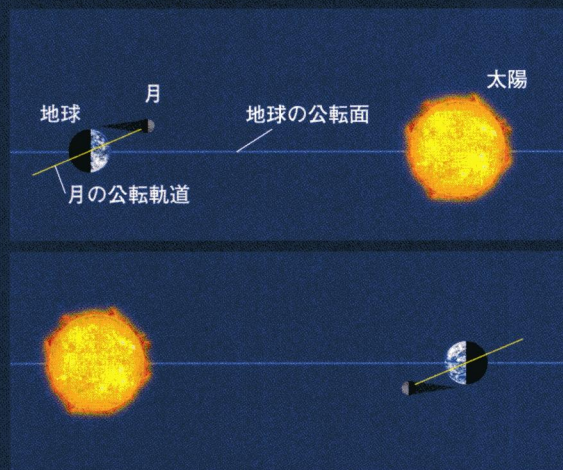
金環日食とは？ 皆既日食とのちがいは？



なぜ金環日食や皆既日食はめずらしいのか

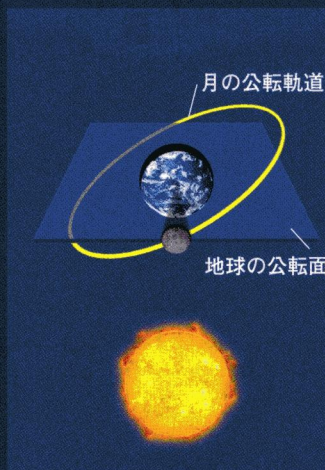
金環や皆既日食にならない

地球・月・太陽と並んでも、月の影が地球に落ちない。つまり地球から見て、月が太陽をかくさない。



金環や皆既日食になる

月の影が地球に落ちると、金環もしくは皆既日食がおきる。



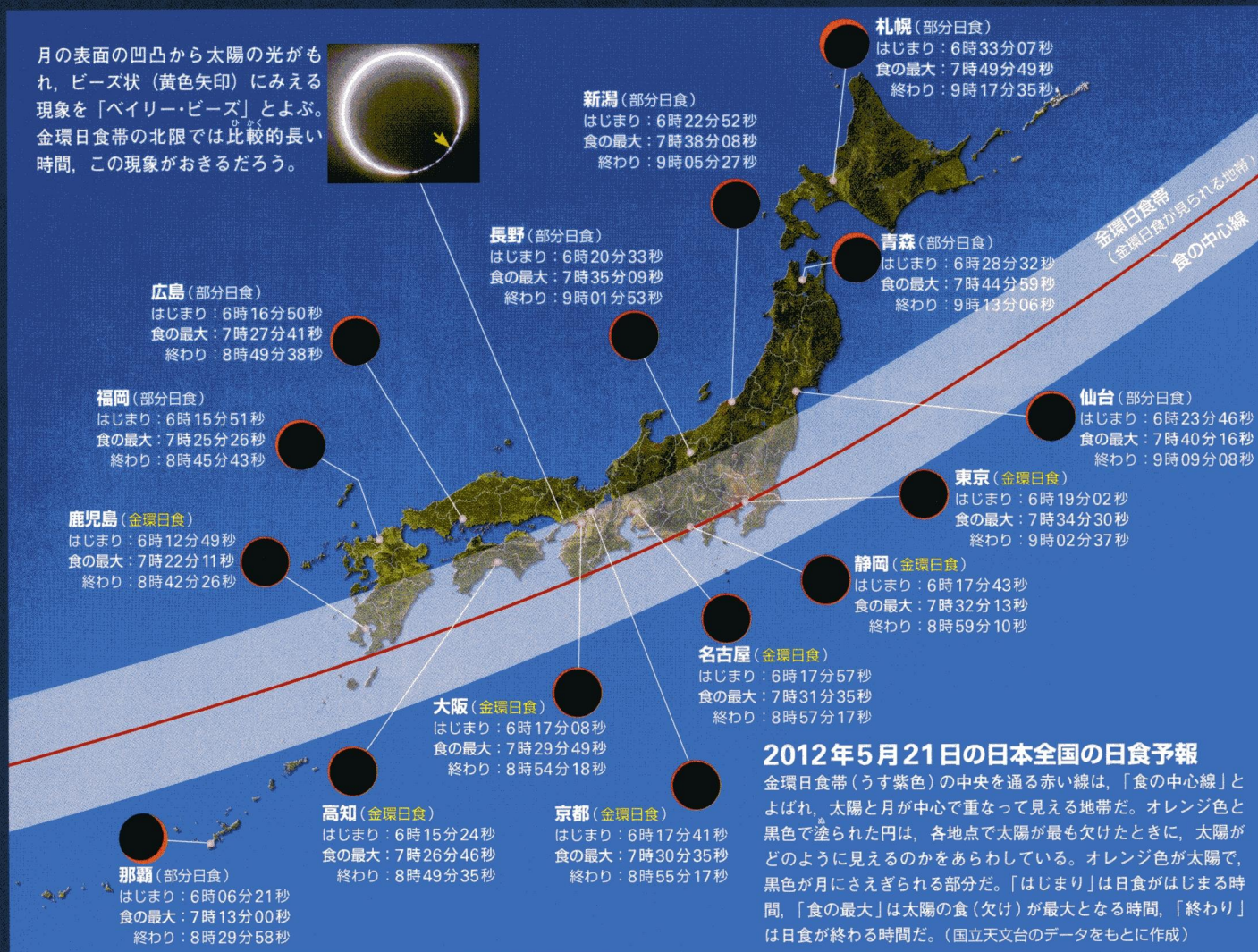
月が地球をまわる軌道は、地球が太陽をまわる軌道に対して約5度傾いている。その軌道の傾きによって、たとえ太陽・月・地球という配置に並んでも、（地球から見て）月が太陽をかくさないことが多い（左の図）。月がちょうど太陽をかくす位置（右の図）にないと、日食はおこらないのだ。この状態は、年に2回ほどおきる。つまり毎年2回以上は世界のどこかで金環日食や皆既日食が見られることになる。

ただし、月の軌道面の傾く方向が少しずつずれているため、日食が見られる時期は毎年同じではない。また月の影の範囲がせまく、影がちょうど人の住む地域におちる頻度は低い。そのため、めずらしい現象となるのだ。左の図は大きさや傾き、距離などを誇張してえがいた。

ちなみに同じ場所で、金環日食（もしくは皆既日食）がおきるのは数百年に1度とされる。たとえば東京で次に金環日食が見られるのは2312年で、300年も先だ。

日本各地で日食はどう見える？

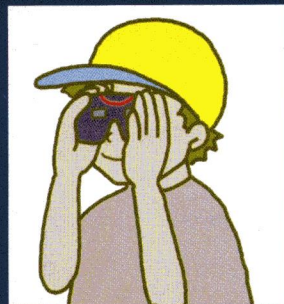
5月21日、日本各地でどのような日食がみられるかをあらわしたのが下の図だ。金環日食帯（うす紫色の帯）が金環日食の見られる地域である。東京では、最大5分ほど金環日食を見ることができる。帯からはずれた地域でも、図のような大きく欠けた太陽が見られる。



2012年5月21日の日本全国の日食予報

金環日食帯（うす紫色）の中央を通る赤い線は、「食の中心線」とよばれ、太陽と月が中心で重なって見える地帯だ。オレンジ色と黒色で塗られた円は、各地点で太陽が最も欠けたときに、太陽がどのように見えるのかをあらわしている。オレンジ色が太陽で、黒色が月にさえぎられる部分だ。「はじまり」は日食がはじまる時間、「食の最大」は太陽の食（欠け）が最大となる時間、「終わり」は日食が終わる時間だ。（国立天文台のデータをもとに作成）

専用のメガネなどで観測を！



日食観測には、太陽観測用の日食メガネ（日食グラス）などを正しく使用しよう。たとえ1秒ほどでも太陽を肉眼で見てしまうと、目に悪影響が出る。あやまった方法での観測は目の網膜を傷つけ、永久的な視力低下や、最悪の場合は失明することもあるので、注意が必要だ。以前は、観測法として紹介されていた黒色下敷きやろうそくのすすで黒くしたガラスなどを使う方法は、現在では危険だと考えられている。紫外線や赤外線などの有害な光を十分にカットすることができないためだ。必ず、専用のものを使うようにしよう。

間接的には、木もれ日を見るときといった方法でも観測可能だ。ピンホールカメラと同じ原理で、小さなすき間を通った太陽の光が壁や地面で像を結ぶ。金環日食が見られる地域では、リング状の太陽の像を見ることができる。

（担当：編集部 森久美子）

やってはいけない観測方法



肉眼

黒い下敷き

感光したフィルム

ガラスにすす

サングラス



安全な日食メガネの付録がついた、臨時増刊『金環日食 2012』（定価1575円〔税込〕）が発売中です。記事では紹介しきれなかった、各県庁所在地での日食予報や、正しい観測方法、日食のしくみなどをくわしくイラスト解説しています。ぜひご購入ください。

次号 (5月26日発売) 拡大版 Newton Special のお知らせ

読者モニターの意見を取り入れて徹底的に

素粒子の世界

宇宙の根源に迫る科学をイラストでやさしく解説

今、科学の全分野の中で、最も熱い注目をあびているといっても過言ではない研究所、それがセルン CERN (ヨーロッパ合同原子核研究機関) です。CERN は、山手線 1 周に匹敵する、全長 27 キロメートルの巨大実験装置「LHC」を有しています。

この装置を使い、素粒子物理学者たちは、宇宙空間のあらゆる場所に満ちているとされる「ヒッグス粒子」を、真空から“たたき出そう”としているのです。ヒッグス粒子は、万物に重さ(質量)をあたえているとされる素粒子であり、その発見と性質の解明は、物理学を新たなステージへと引き上げると期待されています。

素粒子とは、自然界を形づくっている“最小の部品”で、それ以上、分割できないとされているものです。次号の Newton Special では、素粒子物理学の基礎から、ヒッグス粒子探索などの最先端研究までを徹底的に分かりやすく解説していきます。現在、読者から募ったモニターの皆様に、制作途中の記事を読んでもいただき、その意見を反映させるという作業を進めています。

CERN のロルフ・ホイヤー所長をはじめ、LHC 実験に関わっている複数の研究者の生の声もお届けします。是非、ご期待ください。

大特集の主な内容(予定)

プロローグ

- 山手線と同規模の巨大実験装置 LHC とは？
- 素粒子とは「自然界の最小の部品」
- 素粒子の大きさは？ 何種類ある？

Part1 物質をつくる素粒子の仲間

- 電子と原子核の発見——原子はスカスカだった
- 原子核をつくっている素粒子「クォーク」
- 地球すらもすり抜ける「ニュートリノ」
- 反粒子——素粒子には“影武者”がいた
- ビッグバンで誕生した反粒子はなぜなくなった？

Part2 力を伝える素粒子の仲間

- 素粒子どうしは“キャッチボール”で力をおよぼし合う
- 「バットでボールを打つ」を素粒子レベルで考えると？
- 陽子と中性子を形づくる「強い力」
- 地熱と太陽の輝きをもたらす「弱い力」
- すべての力は、元は同じ一つの力？

Part3 素粒子物理学 最前線

- あなたの目の前にも「ヒッグス粒子」が満ちている
- ヒッグス粒子は、あらゆる素粒子に重さを与える
- ニュートリノは本当に光速をこえたのか？

分かりやすく！ 70ページ大特集

監修 村山 斉

東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構 機構長

協力 ロルフ・ホイヤー

CERN 所長

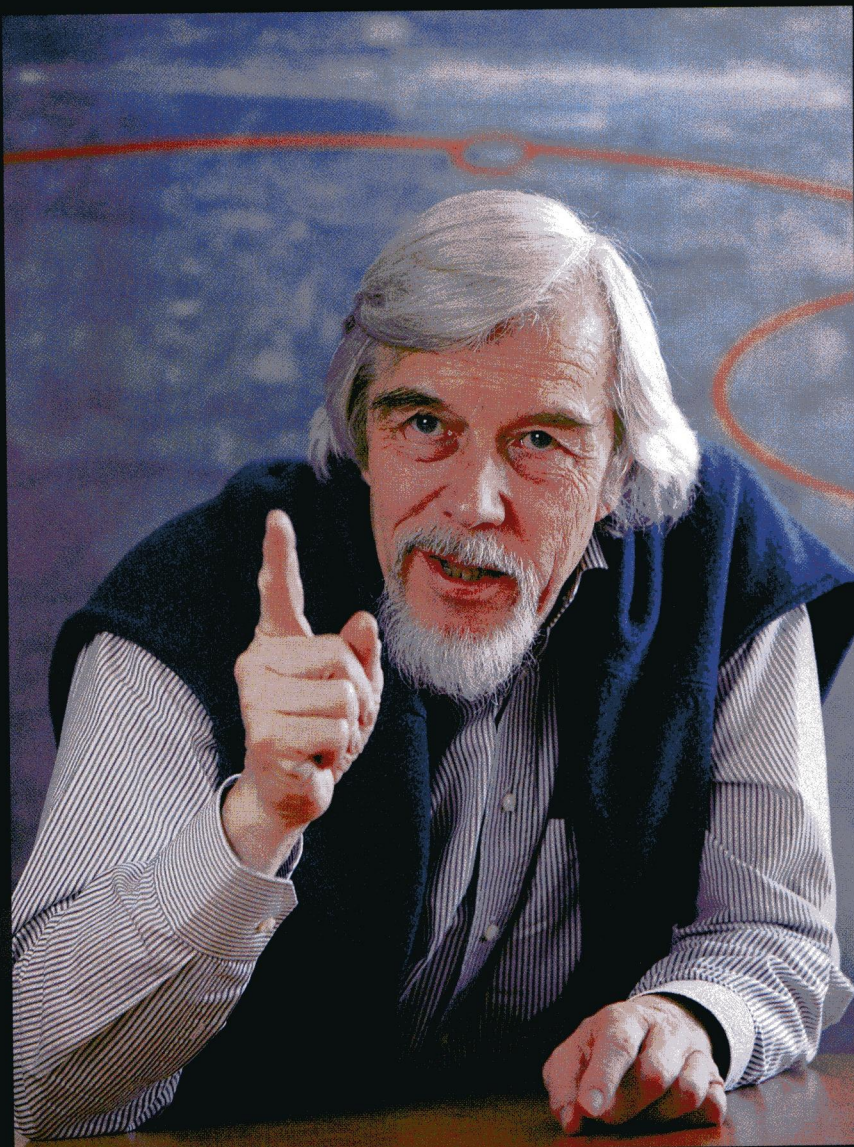
ファビオラ・ジアノッティ

CERN, ATLAS 実験代表

浅井祥仁

東京大学大学院理学系研究科准教授

他、多数



Newton のインタビューに答えるロルフ・ホイヤー CERN 所長。

●宇宙を支配する「ダークマター」、その正体は？

●すべての素粒子は、同じひもでできている？

Part4 特別インタビュー

●LHC 実験で活躍する若手日本人研究者たち

●ファビオラ・ジアノッティ博士

— ヒッグス粒子探索の最前線

●ロルフ・ホイヤー博士

— 素粒子物理学の新たな地平



活発な議論が交わされた、3月の「モニター会議」の様子。

サイエンス思考[∞]

 **Discovery**
CHANNEL™

 特集

セックスの 科学

Science of Sex

5月7日(月) 夜11時～

現在視聴者モニターを募集しています。
詳細は右記をご覧ください。 <http://dsc-ch.jp/n/>

人に薦めたい
チャンネル
6年連続No.1!

推奨
No.1

出展 CSチャンネルブランド
調査2006-2011
(ジューターテレコム調べ)

ディスカバリー
チャンネル
DISCOVERY CHANNEL

ケーブル
テレビで見る! 
(10:00～20:00 年中無休) お電話頂く前に、有料放送約務契約約款 (<http://www.skyperfectv.co.jp/top/legal/yakkan/>) の内容をご確認ください。

スカパー!HDで見る!
☎0570-039-888 

スカパー!e2で見る! 
☎0570-08-1212

IPTVで
見る! 

ご視聴に関する
お問い合わせは

カスタマーセンター



0120-777362
通話無料 10:00～18:00(年中無休)

ディスカバリーチャンネル

検索

携帯サイト公開中
<http://dsc-ch.jp/>



●ディスカバリーチャンネルオリジナル動画をニコニコ動画、YouTube公式パートナーサイトで公開中!!

NEWTON INFORMATION

読者のための情報ページ

Chemistry Grand Prix



化学の面白さを体験できるコンテストです

化学グランプリ2012 参加者募集中!

化学グランプリ（化学 GP）は、高校生以下のだれでも無料で参加できる、全国規模の化学コンテストです。参加者から国際化学オリンピック日本代表候補を選出しています。

化学 GP では、一次選考と二次選考の2度の試験が実施されます。一次選考では全国の会場でマークシート式の試験を行い、80名程度を二次選考に選出。二次選考では一つの会場に集まり、合宿形式で実験をとまなう記述式の試験を行います。一次選考と二次選考の総合成績によって、大賞（グランプリ）、金賞、銀賞、銅賞の受賞者が選ばれます。

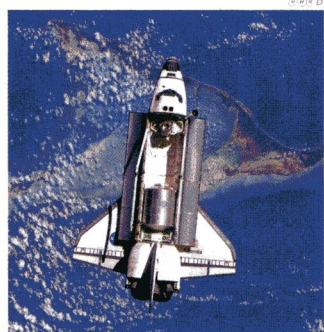
化学 GP の試験には教科書ではあつかわない内容もあり、学校の試験問題とはちがった「化学」を体験できます。実験器具になじみのない参加者でも操作できるように、ていねいな解説があるので安心してください。みなさんの挑戦を待っています。

●参加費＝無料

●日程・会場＝[一次選考] 7月16日（月・祝）、全国55会場にて／[二次選考] 8月9日（木）～10日（金）、慶應義塾大学日吉キャンパス（神奈川県横浜市）にて

●web・お申し込み＝<http://gp.csj.jp/>

●申込期限＝6月8日（金）



スペースシャトル その成功と挫折

～世界を変えた宇宙開発～
The Space Shuttle's Last Flight

DVD プレゼント「スペース シャトル その成功と挫折」

本格的な有人宇宙飛行時代を切り開いたスペースシャトルが2011年7月に役目を終え、長い歴史に幕を降ろしました。その40年余りの活動の記録をたどり、宇宙飛行士たちの活躍を紹介するDVDとブルーレイディスク（BD）が4月27日に発売されます。開発の舞台裏やシャトルでの暮らしを追う前編と、事故や偉業をたどる後編の計95分です。本DVDをNewton読者2名様にプレゼント。

●DVD＝¥3,800（税別）[16:9/モノラル・ドルビーデジタル/片面二層/カラー]

●BD＝¥4,300（税別）[1920×1080i

Full Hi-Def/モノラル・リニアPCM/片面一層/カラー]

※封入特典：ブックレット「シャトルが果たした役割と宇宙開発の未来」

●発行・販売・お問い合わせ＝

NHKエンタープライズ

TEL：03-5478-0780

●応募方法＝葉書に住所、氏名、年齢、電話番号、今月号の感想を明記し下記住所へ郵送

〒151-0053 東京都渋谷区代々木2-1-1

新宿マインズタワー（株）ニュートンプレス

NEWTON INFORMATION 担当]

●応募期限＝5月25日（金）必着（当選発表は発送をもってかえさせていただきます）



2008年ノーベル物理学賞を受賞した小林誠 KEK 特別栄誉教授を囲んで記念写真（昨年のような）

NTTコミュニケーション科学 基礎研究所の研究成果を紹介

NTTコミュニケーション科学基礎研究所では、「オープンハウス2012」を開催します。講演と展示を通して、最新の研究成果をわかりやすく紹介します。

●開催日＝6月7日（木）・8日（金）

●会場＝NTT 京阪奈ビル（京都府相楽郡精華町光台2-4）

●入場料＝無料（事前登録不要）

※ご来場時に名刺を2枚ご持参ください

●プログラム＝

招待講演：北田暁大（東京大学准教授）

「繋がり／社会／政治——若者のコミュニケーション態勢と社会性」

所長講演：上田修功

「Big data 時代のコミュニケーション科学」

研究講演：光から乱数をつくる／心地よさと

「やみつき」の神経科学／センサネットワーク

を通して見えてくる世界／デジタルコンテンツ保存における標準化とその課題

研究展示：26件 ※詳細は下記 URL

●お問い合わせ＝日本電信電話株式会社

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

TEL：0774-93-5020

E-mail：cs-openhouse@lab.ntt.co.jp

URL：<http://www.kecl.ntt.co.jp/openhouse/2012/>

研究を体験しよう！ 第6回サマーチャレンジ

高エネルギー加速器研究機構（KEK）は「第6回サマーチャレンジ」を開催します。研究の最前線で活躍する研究者から直接指導を受けながら、研究の一連の流れを体験することができるイベントです。小林誠 KEK 特別栄誉教授による特別講演も行われます。

●日程＝8月20日（月）～28日（火）

●会場＝高エネルギー加速器研究機構（茨城県つくば市）

●対象＝主に大学3年生

●定員＝90名程度（素粒子・原子核コース60名、物質・生命コース30名の予定）

※参加申し込み時に記入する志望動機（700字程度）をもとに選考を行います

●参加費＝無料（旅費、宿泊費、食費などは支給予定）

●申し込み方法＝下記 URL から参加申し込みページに進んでお申し込みください

●申込期限＝5月18日（金）

※参加可否は5月下旬に電子メールで通知

●お問い合わせ＝高エネルギー加速器研究機構（KEK）サマーチャレンジ事務局

E-mail：ksc12@kek.jp

TEL：029-864-5196

URL：<http://ksc.kek.jp>

現代統計 実務講座

統計プログラム集
CD付き

(金) 日 8・(木)
解題で案内

「文部科学省認定通信教育」

統計的手法を実際の仕事に活かす。

統計の資格と実力!

統計スペシャリストを養成。

- 文部科学省認定社会通信教育「現代統計実務講座」開講
- 修了者に「修了証書」授与。成績優秀者には表彰制度あり。

●このような方におすすめします!

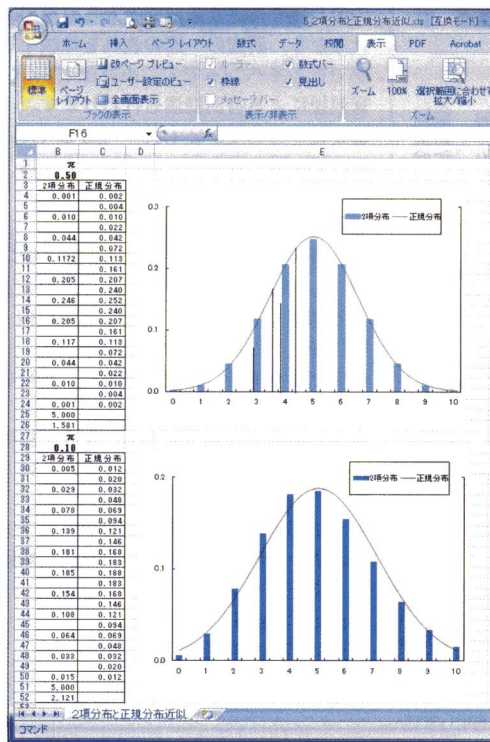
▼パソコンで簡単に統計値が出るが、その意味がわからない。
▼市販の本をみるが、数学的過ぎてわからず、実務に役立たない。
▼ある程度統計は使っているが、一度体系的に統計の基本、手法を学習しておきたい。

●統計的手法の重要さ!

データや資料は加工・集約して生きたデータ(情報)とする必要があります。その手法が統計的手法です。パソコン(統計ソフト)が利用され、データの入力、出力は容易な今日、入力データの正しい吟味、出力データの的確な読み取り、説明をできる人の重要性が一層高まっています。今ほど統計の基本と統計的手法を身につけた人が要求される時代はありません。

●テキストと連動するエクセルプログラムの提供!

補助教材として、表計算ソフトエクセル上で稼働する統計解析プログラム集(芳賀敏郎指導委員開発)を提供します。このプログラムは実務にも即活用可能です。



Excelによる学習例 2項分布と正規分布近似

「統計士」資格認定制度

「統計士」資格が 取得できる!

(詳細は資料で)

本講座の受講実績企業紹介

- ★医薬 エーザイ/バイエル薬品/科研製薬/岩城製薬/久光製薬/山之内製薬/住友製薬/大鵬薬品工業/積水メディカル/第一三共/中外製薬/田辺三菱製薬/和光純薬工業/ジョンソン・エンド・ジョンソン
- ★サービス オリエンタルランド/ビデオリサーチ/マーケティングリサーチサービス/養食/化学及血清療法研究所/関西電気保安協会/日本不動産研究所/関西大学/インテリサーチ/オリコム/ニッテクリサーチ/東京三菱UFJリサーチアンドコンサルティング/松山市役所/東京都下水道局/全日空システム企画
- ★化学 東燃ゼネラル石油/ボーラ化成工業/ブリヂストン/三菱化学メディエンス/ダイセル/旭硝子/宇部興産/花王/三菱マテリアル/三菱化学/住友化学/大阪チタニウム製造/大分石油化学コンビナート/中国化薬/トクヤマ/日本ペイント/日本精蠟/日本曹達
- ★金融 日本銀行/おきぎん経済研究所/静岡信用金庫/セディナ
- ★食品 ネスレ/ヤクルト本社/加ト吉/アサヒビール/エバラ食品工業/カルピス/キッコーマン/キリン/クノール食品/日本ホーネンコーポレーション/ハウス食品/雲海酒造/亀田製菓/江崎グリコ

●本講座はテキスト2冊、ガイドブック2冊、統計数値表、機関誌、他。標準学習期間は8ヵ月。8単元 32単位。統計入門、平均、分散、標準偏差、正規分布、推定と検定、比率、標本調査法、品質管理、実験計画法など基礎から統計データの作り方まで、実例を中心に体系的に学びます。

統計資料を無料進呈!

◆詳しい統計資料をご希望の方には、無料でお送りします。ご請求は下記へ。

財団法人

実務教育研究所 ニュートン係

〒160-0015 東京都新宿区大京町25の245

URL <http://www.jitsumu.or.jp>

ケータイ jk@jm.md ※左記へ空メールか二次元コードで

TEL 03-3357-8153

FAX 03-3358-7259



統計士になる

検索

LETTERS

博士の言葉が印象的

吉田幸子／神奈川県横浜市

2012年4月号Newton Special「宇宙の法則」を読みました。むずかしい数式がたくさんありましたが、イラストのおかげで、よく理解できました。今後、どのような新しい法則が見つかるのか、楽しみです。パールムッター博士のインタビューもよかったです。博士がいった言葉の「科学には、新しいアイデアを面白がるような遊び心が必要だと思いますね」が印象的でした。

- 宇宙の法則にまつわる具体例をあげながら、イラストを使って説明しました。楽しんでいただけたでしょうか。

高校生にも読んでほしい

野々部恵美子／愛知県知多市

「宇宙の法則」の記事では、物理の授業で習った数式を思いだして楽しかったです。高校の教科書にもこのようなイラストと説明があれば、楽しく勉強できたらと思います。ぜひ、今の高校生にも読んでほしいと思います。

- 物理法則の面白さをあらためて感じていただけたでしょうか。

わかりやすいイラストで理解

村石誠一／東京都世田谷区

「アレルギーとは何か？」の記事は、イラストでわかりやすく説明されており、とてもよかったです。花粉症、金属アレルギーなどが具体的にどのようなしくみで引き起こされるのか、よくわかりました。

- 「身近なアレルギーについて理解が深まった」などのご意見が多数寄せられました。

不確定性原理を知る

中岡康二／愛媛県松山市

「書きかえられる『不確定性原理』



の記事では、難解そうな不確定性原理について、わかりやすい文章とイラストで説明されていて、たいへん面白く読ませていただきました。粒子のゆらぎが数式によって説明できるというのは、不思議な感じがしました。

- そもそも不確定性原理とは何なのか、基礎からわかりやすく解説した記事でした。

火星の地形がわかった

山本大誠／静岡県浜松市

「火星の大地を空からめぐる」を読みました。火星探査車「マーズ・エクスプレス」で撮影した画像から、巨大洪水でけずられた谷底や氷河の跡などがあることがわかり、とても神秘的な気持ちになりました。2012年8月に降り立つ予定の火星探査車「キュリオシティ」にもがんばってほしいです。

- キュリオシティによって、火星の生命の痕跡などが調査される予定になっています。結果を楽しみに待ちたいですね。

大王の雄姿を思いえがけた

澤田由美／東京都世田谷区

「新説アレクサンドロス大王の東方遠征ルート」を読みました。ベルシア帝国のけわしい山脈や溪谷は、想像していたものとはまったくちがう、はじめて見る光景でし

た。厳冬期に、この地形を侵攻する若きアレクサンドロス大王の雄姿を思いえがきました。現地での調査の重要性を感じました。

- ほかにも「有名な大王なのに、不明な点がまだまだたくさんあることに驚いた」などのご感想が寄せられました。

北国の動物にいやされた

柴本瑞恵／千葉県船橋市

「雪の大地を生きる動物たち」の写真では、エゾモモンガが木の枝に並んだり巣穴からのぞいたりする姿が、とてもかわいかったです。極寒の中でも一生懸命生きているんだと思いました。

- 「きびしい寒さに耐えながら、たくましく生きるかわいい姿の動物に釘づけになった」というご感想を多くいただきました。

原発事故、ほど遠い終結

三輪徳子／岐阜県大垣市

「原発事故からの1年とこれから」を読みました。原発事故が終結するためには、気が遠くなるような年月がかかることがわかりました。このような悲惨な事故が二度とおこらないことを願わずにはいられません。

- 今後も、どのように事態が進んでいくのか注視する必要があります。

人工智能って面白い

廣嶋 綾／三重県四日市市

「進化をつづける人工智能」の記事がとても面白かったです。「コンピューター＝賢い」というイメージでした。しかし、この記事を読んで、人間がコンピューターを使って複雑な処理ができるのであって、コンピューターがみずから考えるのとはちがうということが、よくわかりました。

- 最先端の人工智能の研究から、人工智能の未来を紹介する記事でした。

Newton2012年4月号の記事の一部誤りがありました。おわびして訂正いたします。

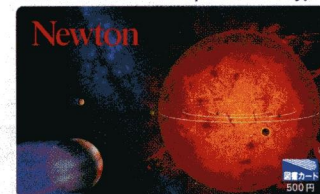
- ・21ページの本文、左側の列、上から7行目、および同ページのイラストの説明文「中性子のスピンとは?」、上から2行目「N極」→「S極」
- ・同ページのイラストの二つの磁石は、ともに上下が逆。

皆さんの声を お聞かせください

Newtonでは、読者の皆さんからのご意見やご希望、記事のリクエストなどをお待ちしております。住所、氏名、年齢、職業（学生の方は学年も）、電話番号を明記のうえ、はがき、または電子メールでお寄せください。LETTERSのコーナーに採用させていただいた方には、Newton特製図書カードをさしあげます。

●宛先：〒151-0053 東京都渋谷区代々木2-1-1 新宿マインズタワー(株)ニュートンプレス「ニュートン・レターズ」係

●電子メールのアドレス：
letters@newtonpress.co.jp



Newton 特製図書カード

0次元の世界から高次元宇宙まで、
不思議な次元の世界をくわしく解説！

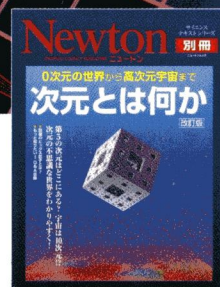
4月26日発売

ニュートン別冊

0次元の世界から高次元宇宙まで

次元とは何か 改訂版

A4変型判／オールカラー／160ページ 定価 2,415円(税込)

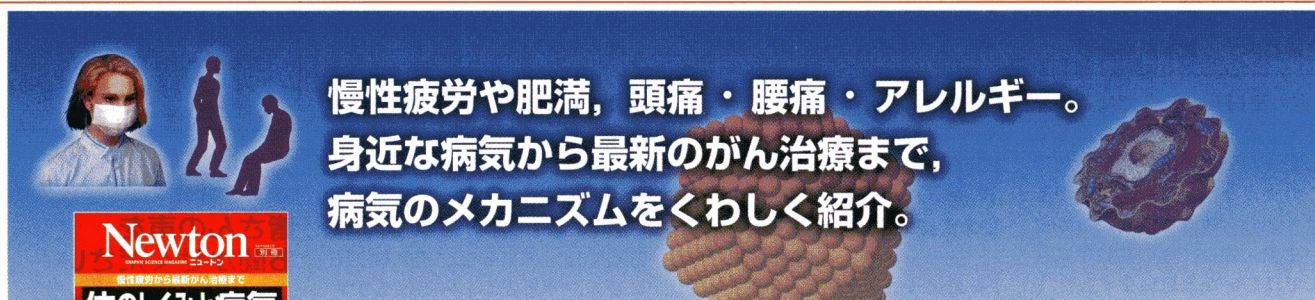


2008年4月に刊行したNewton別冊「次元とは何か」は、たいへん好評をいただきました。このたび、不思議な次元の世界をさらにわかりやすく紹介するため、完成度を高めた“増ページ改訂版”を刊行することとなりました。

私たちは、縦・横・高さでつくられた3次元空間に加え、1次元の時間を合わせた、「4次元時空」に

住んでいると考えています。しかし、今、科学者たちの間で大きな注目を浴びている理論によれば、「宇宙には『高次元の空間』が存在するかもしれない」といいます。はたして、4次元時空をこえた高次元の世界とはどのようなものなのでしょうか。

0次元から多次元まで“次元”の世界をわかりやすく解説した一冊です。ぜひご一読ください。



慢性疲労や肥満、頭痛・腰痛・アレルギー。
身近な病気から最新のがん治療まで、
病気のメカニズムをくわしく紹介。

4月26日発売

ニュートン別冊

慢性疲労から最新がん治療まで

体のしくみと病気

A4変型判／オールカラー／160ページ 定価 2,415円(税込)

本書では、誰もがかかりうる身近な病気から、日本人の死因の1位を占めるがんまで、さまざまな病気のしくみと治療法を解説しています。

心臓や肺などの重要な臓器は、それぞれに典型的な病気があります。

インフルエンザやアレルギー、頭痛などがおきたとき、私たちの体内ではいったい何がおきているのでし

ょうか。また、睡眠のリズムや疲労、肥満などの生活習慣は、私たちの体調にどうかかわっているのでしょうか。

がんは、治療技術の発展により、「かかるとすぐに死に至る病気」ではなくなりました。本書では、がんの最新の研究と治療技術をくわしく紹介します。どうぞご期待下さい。

Newton別冊 近刊のお知らせ

A4変型判／オールカラー 5月下旬刊行予定

※書名、価格、刊行時期などは変更になる場合があります。

●ゼロと素数と無限(仮) 予価2,415円(税込) ●タイムトラベルはできるだろうか(仮) 予価2,415円(税込)

お問い合わせはニュートンプレス営業部(TEL 03-5352-6054)までご連絡ください。