

JST News

Vol.1/No.4
2005/January

1 月号

Special Report

人と社会に 役立つ脳科学



独立行政法人
科学技術振興機構
Japan Science and Technology Agency



1万人の乳幼児を対象に、「環境が子どもの心身や言葉の発達にどんな影響を与えるか」を、5年間追跡する調査研究がはじまる。

C O N T E N T S

03 *People*

**過疎の町から世界につなげる
和歌山県美里町立みさと天文台**
豊増伸治研究員と大成高校美里分校の
天文台同好会会員

04 *Special Report*

**子育て、健やかな老後を支援する
人と社会に役立つ脳科学を求めて**

心身健やかな子供を育てる教育や環境とは？

高齢者が達者であり続けるための方法は？

こうした疑問に脳科学の研究者が答えようとしている。

よりよい人生のため、そして社会に役立つために始まった
子供の追跡調査など研究の最前線を紹介する。

12 *Research & Development*

**細胞の生き残り戦略
「オートファジー」に迫る**

10 *Eco-technology*

**フラーレンを使った新素材
植物光合成をしのぐ「有機太陽電池」**

08 *Local Technology*

**5ccの血液で病気を瞬時に診断
DNAチップが製品化**

14 *Literacy*

**江戸期に花開いた数学文化
企画展「和算の贈り物」から**

16 *Science Entertainment*

**有馬朗人が選ぶ
「1月の本・映像・展示」**

JSTの役割と使命

Japan Science and Technology Agency

JST（科学技術振興機構）は、国の科学技術基本計画を実施する機関として、研究や開発が活発に進むようにさまざまな支援活動をおこなっています。

新しい技術を生み出すもとなる基礎的な研究を方向づけ、支えることは大切な仕事です。研究者から研究課題を募り、そのうちから選んだ個人やグループに研究費を配分し、チームには集約的な研究を進める形の支援をしています。

新しい技術と企業や地域を結び、生まれた技術を社会に生かす糸口をつけるのも私たちの仕事です。また日本や海外の科学技術の情報を収集し、それを必要とする皆さんに提供する業務もおこなっています。

さらにもう一つの使命は、市民の皆さんに科学技術についての理解を深めていただく手助けをすることです。科学技術のさまざまな成果や生き生きとした活動の様子を広く知っていただくために、日本科学未来館やサイエンスチャンネルを運営しています。

JSTは、科学技術を社会に役立てるための力強いサポーターでありたいと願っています。

編集長

佐藤年緒

編集委員

黒田雅子 齋藤仁志

瀬谷元秀 古旗憲一

前田義幸 森本茂雄

制作協力

サイテック・コミュニケーションズ

表紙はりがねアート

羽田智恵

デザイン

グリッド

写真撮影・提供

由利修一

高尾 純

学習療法研究会

小泉英明 川島隆太

野島 博 タカラバイオ

今堀 博

吉森 保

真島秀行 鈴木クニエ

李学亮

日本科学技術振興財団

東京電力 電気の史料館

過疎の町から世界につなげる

和歌山県海草郡美里町立みさと天文台。観測ドームの最上階には、口径105cmの日本最大級の反射望遠鏡が待ち受ける。そして、張り出したデッキの向こうには緑の山並み。豊かな自然と人間味、最先端の知識と技術。これらをつないで、いま有形無形のネットワークが築かれつつある。



美里町立みさと天文台研究員
豊増伸治 (写真中央)
大成高校美里分校
天文台同好会現役生

「無線を使って街から美里町にブロードバンドを引いてこよう」と豊増伸治みさと天文台研究員に決心させたのは、世の高速ブロードバンドブーム。山間の過疎の町まではまず来ないという現実が見えたからだ。

「過疎と高齢化と予算削減で田舎は元気を失っている。情報の孤島にまでなると、内からの発信が途絶えてしまう。何かせねばと思った時に浮かんだのが、非常勤講師を務める大成高校美里分校の生徒たちの顔」

彼らと一緒に無線ブロードバンドを実現しようと、JSTの2003年度地域科学館連携支援事業に応募し、採用された。3年生19人がプロジェクトに参加。「アンテナの設置場所を見極めるのも、地主さんの設置許可を得るのも、土台をつくるのも、すべて彼らと一体で進めました」。そ

の結果、最初は「本当に自分たちでやるの?」と半信半疑だった生徒たちも、だんだんと本気になり、最後はどんどん自分たちのアイデアを出すようになった。*

それから1年。豊増さんは新しい構想を練っている。「以前にやはりJST支援事業として、スウェーデンのキルナ市にCCDカメラを設置し、常時オーロラ観測を行い、データをここに送信するシステムをつくりました。これを広げたい。できるなら、南極にもカメラを置き、すばらしいオーロラを皆に楽しんでもらいたい」。これには、美里分校天文台同好会の現役生たちも興味津々。まずは、キルナ市のカメラのハードディスクの取り替えに行く豊増さんに同行できれば、と思っているらしい。

(サイエンスライター 由利伸子)

*プロジェクトの映像化

ブロードバンド・プロジェクトは、サイエンスチャンネルで映像化され、次のURLで見ることができる。
http://sc-smn.jst.go.jp/8/bangumi.asp?i_series_code=B033306&i_renban_code=001

子育て、健やかな老後を支援する 人と社会に役立つ脳科学を求めて

私たち人間を人間たらしめているのは、わずか1リットルほどの大きさの臓器「脳」である。

都市化や情報化、少子・高齢化が進むなかで、心身の健やかな子供を育てる学習や教育とはどんなものか、高齢者の脳を元気に保つよい方法は？ さまざまな分野を融合して進む最近の脳科学が、こうした疑問に答えやヒントを用意してくれる日は遠くないようだ。

「脳」をテーマにした本が売れ続けている。脳科学の研究者によるエッセイ、赤ちゃんや子供を対象にした教育関連の本、脳の老化を防ごうという実践的なドリル、そして脳科学の最新の知見に基づいた科学書に至るまで、タイトルに「脳」の一字が入った本が多数、書店の棚を占める。

ブームのきっかけをつくったのは、人間の意識や個性について脳科学を踏まえて論じた北里大学教授・養老孟司さんの著書『バカの壁』（新潮新書、2003年）だった。出版された年にベストセラーのトップを走り続け、翌2004年にも年間ベストスリーに顔をのぞかせた。

科学が不人気と言われるなかで、脳の科学は、本ばかりでなくテレビ番組でも講演会でも、不思議に人気を集める。

激変する社会に見えない 子供への影響

（株）日立製作所フェローでJSTの

「脳科学と社会研究センター」を主宰する小泉英明さんは、この現象を「社会が脳科学を必要としていることの現れではないか」と見る。「子供をどう育てるか、自分たちがこれからどうなるか、老いた親はどうなるか、みんな脳科学が関係するテーマです」

子供をどう育てるか―。たくさんのお母さんたちが幼稚園の先生や保育園の保母さんにこんな質問をぶつける。「毎日TVばかり見ている子供はどうなるか」「ゲームに熱中すると切れる子供にならないか」「携帯をもたせると子供はどうなるのか」

こうした疑問に対して養老さんは「どれも、子どもの発育についての基礎的なデータがないから何とも言えないのです」と、科学者としてはそう答えるほかないのだと言う。

「子供を取り巻く環境はここ数十年で激変しています。テレビやゲーム、携帯が子供にどんな影響を及ぼすか、メーカーやテレビ局は、普及

* コホート研究

「同じ時期に生まれた子供」のように、統計因子を共有する集団について観察する方法で、集団的前方視的研究(prospective study)とも呼ばれる。



する前にあらかじめ調査すべきだったんです。人間が意識的に作り出したものではないという意味で、子供は自然です。子供の問題は環境問題と似た構造をもっています。環境アセスメントと同じように、何事につけ子供への影響についてアセスメントが必要じゃないですか」

養老さん流の「子供」と「環境」のアナロジー（類比）を借りれば次のようなことになる。

かつて環境問題については、環境に放出された化学物質による健康障害や気候変動のような異変が起こってから対策がとられた。しかし次第に、新しく工場を建設したり道路を造ったりする時には、環境にどんな影響がありうるかを事前に調査したうえで着工するようになった。これが環境アセスメントだ。社会を大きく変えるような科学技術が子供たちを巻き込んでいる今、子供に何か問題が生じてからその原因を問い対策を講じるのではなく、あらかじめ子供に対する影響を調査するアセスメントを行うべきだ。

「子供の発達」で大規模調査スタート

「子供アセスメント」を行うにしても、欠かせないのは基礎的なデータである。どのようにしてデータを集め、それをどう解析するのか、その十分なノウハウを実際のところ私たちはまだ十分手にしてはいない。不安を抱きながら子育てしているお母さんやお父さんに答えるには、きち



仙台市の「脳ウェルネスプロジェクト」では、高齢者がスタッフと対面して教材を学習する。

んとした調査が必要だ。

昨年11月、小泉さんたちは「日本における子供の認知・行動発達に影響を与える要因の解明」という大規模な調査研究の計画を公表した。1万人の乳幼児を対象に5年間、専門の研究者や医師、看護師などが寄り添いながら両親とともに子供たちの発達や行動を見守るという研究事業である。0歳と5歳の子供一人一人を長期間見続けることで、環境が心身や言葉の発達にどんな影響を及ぼすのかを追跡調査するという、世界にも例のないコホート研究*だ。

「これまで何か問題をおこしたお子さんを対象に、過去にさかのぼって環境や行動を調査することはしばしば行われてきましたが、こうしたやり方で原因を追及することは必ずしも科学的とはいえません。バイアス(偏り)がかかるからです。この研究では、一定の地域に生まれた子供の多くを対象に、バイアスをもたず、に時間を追って観察していきます」

と、小泉さんは2006年春から本格的に始まる調査研究の枠組みを説明する。

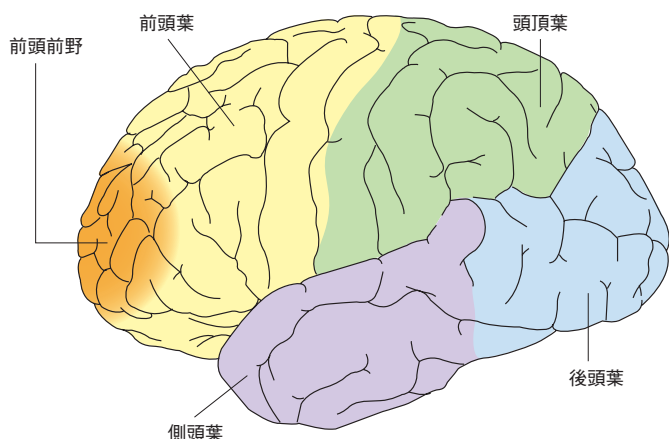
倫理と個人情報管理が大前提

今回の調査が画期的である点はいくつかある。

その第一に小泉さんがあげるのは、調査する側の「倫理」の徹底だ。調査研究は必ず保護者の同意を前提におこなう。子供自身が意思を表明できる年齢なら、本人の意思を最大限尊重する。また、得られたデータの管理については、外部に個人が特定できない「連結可能匿名化」という方法でプライバシーを完全に守る。調査にかかわるスタッフや専門家はすべて倫理について十分な教育を受け、認定された上であたることにしている。

第二は、調査の厳密性と信頼性の確保だ。従来も質問票を配布して保護者に記入してもらう形での統計調査は行われてきた。しかし、この方法だけでは回答がどのくらい真実かわからない。そこで、地域ごとに規格化した観察室を設けて子供と保護者に来てもらい、そのなかで専門家が直接に行動を観察することにした。調査のしかたについてはシステム化し、関係者の徹底した教育をおこなう。

三番目は、研究結果は研究者のものではなく、みんなの財産にしようという方針だ。どんな環境が子供の心を健やかに育むのか、どんな環境



額の内側に位置する前頭前野は、人間では大脳皮質領域の3割を占め、思考、行動抑制、コミュニケーション、意思決定、情動制御、記憶のコントロール、注意の集中や分散などの高次機能を担う。

が子供の言葉を豊かにするのか。研究成果はできる限り公開し、多くの人の理解を得る方針だ。また、小泉さんは「調査に参加して下さる方はギブ・アンド・テイクの関係で」と言う。つまり、調査協力者にもし治療が必要な病気や障害が発見された場合には専門医の治療を優先させ、また発達について専門家による個別相談にも応じる。こうした対応をしても、調査結果に偏りが生じることのないように社会統計学的な補正をすることができるという。

最後に、必要に応じて、また本人と保護者の了解が得られた場合に、人体に影響を与えずに脳機能を計測する技術(非侵襲的計測技術**)を適用する可能性が考慮されていることも、この調査の画期的な点としてあげられる。特に、幼い子供にも適用できる光トポグラフィーという計測技術が活躍しそうだ。光トポグラフィーは近赤外光を利用して脳内の酸

化ヘモグロビンの分布を知る技術で、これを画像化すると、脳のどの部分の神経細胞が活動しているかを知ることができる。大きな装置や特別な測定室、造影剤がいらない、簡便かつ安全で負担のない方法だ。

「脳は環境によって基盤がつけられます。その意味で人間は環境を反映したデータベースであるとも言えますね。遺伝子情報を組み合わせて脳を造り上げていくのは環境のさまざまな因子です」

小泉さんは、この4月に予定されている準備段階の調査の開始を前に、協力者や対象地域を訪れ、理解を求めることに忙しい。

高齢者の痴呆予防策に自治体も期待

子供を対象とした大規模調査が始まろうとしている一方で、多くの自治体が、高齢者の脳の機能を健やかに保つ方策に強い関心を示している。

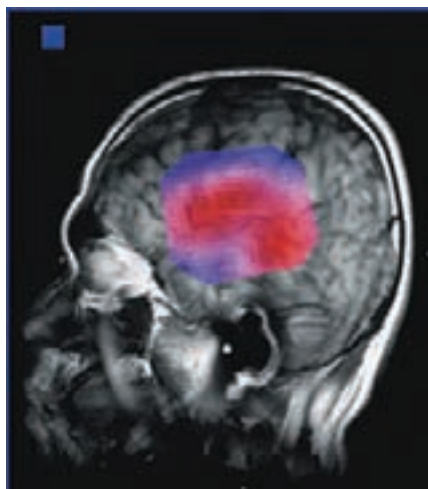
仙台市では2003年10月、70歳以上の健康な市民を対象とした「脳ウェルネスプロジェクト」がスタートした。簡単な文章の音読と計算を取

り入れた学習を続けてもらい、在宅高齢者の脳機能の低下を予防しようというものだ。週に1回は地元の小学校でスタッフと共に、残る6日は家庭に教材を持ち帰って自分で学習する。この方法が効果をあげて痴呆の発症を1年先にずらすことができれば、自治体が負担する費用は1人につき400万円減ると仙台市は試算している。

このプロジェクトの土台となっているのは、東北大学未来科学技術共同研究センターの川島隆太教授の研究グループと福岡県大川市にある特別養護老人ホーム永寿園の共同研究の成果だ。

川島さんは東北大学医学部出身の脳科学者で、人間の脳機能を画像化する技術を応用して、認知、情動、記憶など、人間が人間として生きるために最も大切な機能をつかさどる前頭前野の研究を続けてきた。一般にはベストセラー『脳を鍛える大人のドリルシリーズ』の著者と紹介したほうが通りやすいかもしれない。

「高齢者にとって大きな問題は、自立能力とコミュニケーション能力

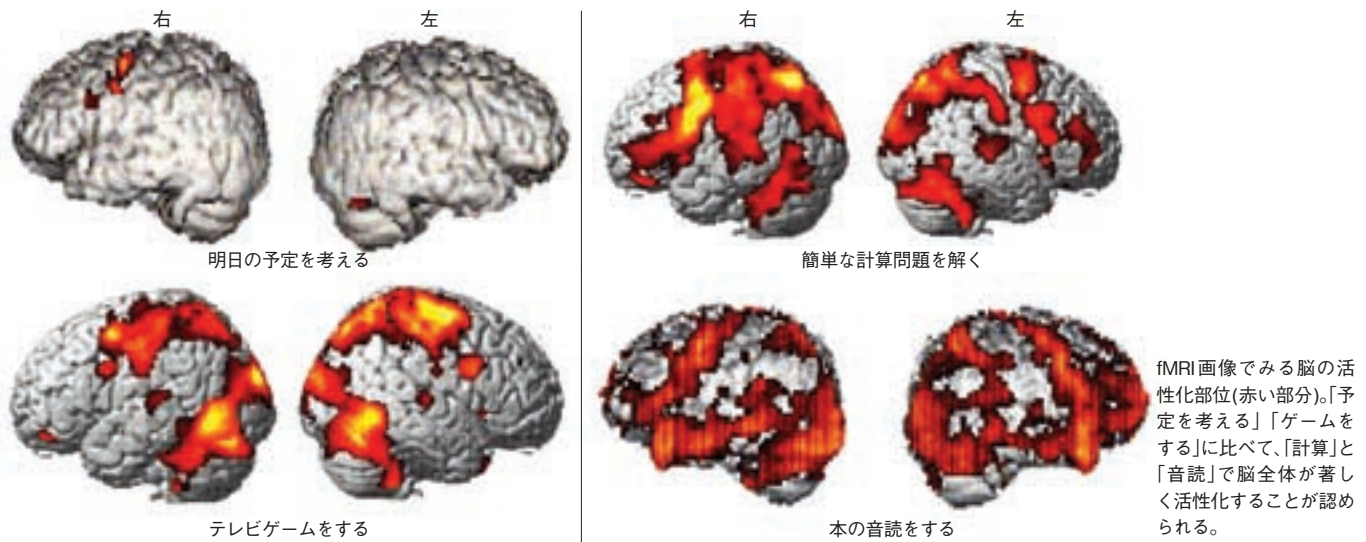


**脳の非侵襲的計測技術

対象を傷つけずに脳の構造や形態を知るにはMRI (magnetic resonance imaging=核磁気共鳴画像法)によって任意の断面や3次元で見ることができる。機能を知る非侵襲的画像技術にはfMRI (functional MRI = 機能的MRI)、NIRS (near infrared spectroscopy = 近赤外分光法)の1種である光トポグラフィー(トポグラフィーは地図学の意味)、MEG (magneto-encephalography = 脳磁図)がある。前のふたつは脳血流量の変化をとらえて画像化し、脳の活動の様子や部位を知る。MEGは神経活動によって生じる微弱な磁場を計測する。

左はMRIによる脳の断層図に光トポグラフィー画像を重ねたもので、字を書いたことにより言語野(赤い部分)が活性化していることを示す。下は光トポグラフィーの装置をつけた様子。





の低下です。いずれも前頭前野がかわる問題です」。川島さんは長く研究してきた脳機能イメージングの成果を洗い直してみたところ、読み・書き・計算の基礎的な学習が左と右の前頭前野を最も活性化させることに気がついた。そこで、4年前から介護施設の痴呆性高齢者(脳血管型・アルツハイマー型)のケアにこの方法を取り入れてみた。教材を用意し、47人の高齢者を対象に1日15分、生活習慣に組み込む形で実施した。

川島さんによると、その結果は「3ヶ月で5割以上の人にコミュニケーション能力の改善が認められ、笑顔も出てきました。2割はおむつも取れる、という驚くべきものでした」。光トポグラフィーで調べると左の前頭前野が活動度を増していた。ミニメンタルテストや前頭葉機能検査という心理テストでも、放置すれば低下するはずの脳機能が3年間維持されていることが判明した。

「学習療法」を開発 海外からも関心

「音読や計算によって脳が活性化する理由はまだわかりませんが、人類が言葉や数を操作する能力を獲得し、それによって脳全体をさらに発達させてきた歴史が遺伝子のなかに刻まれているのではないかと。言葉や数を扱うことが前頭前野を含む脳の機能を活性化させるスイッチになっていて、これが高齢者でも働くの

ではないか、と考えています」

川島さんは、2004年4月に心理学や教育の専門家、高齢者介護の専門家、そして公文教育研究会とともに「学習療法研究会」を組織し、教材の開発や学習療法士の育成と認定を始めた。所属する東北大学未来科学技術研究センターがめざす新産業育成の一環としても位置づけられる「学習療法」は、正しいやり方を普及させる目的で商標登録され、今年から実践活動が始まろうとしている。これまでに例のない脳を鍛える療法については、全米アルツハイマー協会など、海外からの問い合わせも増えてきた。

学習療法を応用した高齢者の脳の衰えを防ぐ学習プランは、岐阜県が県単位で取り入れることを決めたのをはじめ、東京都品川区、豊島区、横浜市の一部や堺市(大阪府)なども実施する方針を打ち出している。医療費や介護費用の膨張に悩む各自治体が寄せる期待は大きい。

人文、社会科学も融合して 総合科学に

多くの脳科学者が、脳研究の究極の目的は「心」がどのようにして脳に宿るか、それを知ることだと言う。心は最近まで、心理学や認知科学の対象ではあっても脳科学の対象とされることはなかった。脳科学が心に切り込めるようになったのは、安全な脳機能イメージング技術の発達に

よるところが大きい。これによって脳科学は応用への足場を得た。もともと物理学者である小泉さんは、企業研究所で機能的MRIや光トポグラフィーの開発をおこない、脳の機能を計測する技術を入り口として「脳科学と教育」のテーマにかかわるようになった。「今度のコホート研究も含めて、脳科学と教育は、自然科学と人文科学や社会科学に橋を渡して融合する新しい分野になっていくと思います」と、今後の展望と抱負を語る。

「脳科学と教育」については、2001年からJSTの公募型研究プロジェクトが小泉さんをまとめ役として動いている。今回のコホート研究の先駆けをなすテーマ別研究だ。川島さんの研究もこのプロジェクトの一環である。海外では2002年に経済協力開発機構(OECD、本部＝パリ)が「学習科学と脳研究」プロジェクトを立ち上げた。米国の国立保健研究所(NIH)も、子供を対象に2006年から10万人規模で20年間の調査を開始する計画だ。これらの研究プロジェクトとも連絡をとりながら、国際的な視野で研究を行いたいと小泉さんは言う。

脳科学は、社会の要請を推進力として、子供たちが健やかに育ち、高齢者が健やかに老いることのできる社会の実現に寄与できる力量を、少しずつ貯え始めている。

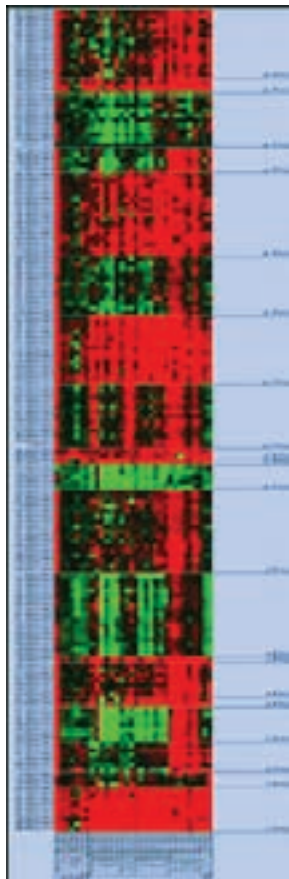
(サイエンスライター 古郡悦子)

5ccの血液で 病気を瞬時に診断できるチップ

血液は健康状態のバロメーター。血液中の成分を調べるだけで、貧血の有無、免疫状態、内臓や内分泌系などの異常を発見できる。

がん研究で培った画期的な技術を、血液診断用のDNAチップに結びつけた研究者がいる。

Local Technology



チップを用いた新しい血液診断のイメージ

「わずか5ccの血液で、関節リウマチやアトピー性皮膚炎などが診断でき、治療後の効果を測定することもできる」。そんな時代がすぐそこまで来ている。大阪大学微生物病研究所難治疾患バイオ分析部門・分子遺伝研究分野の野島 博教授は、1枚で「血液中にどんな種類のRNAが、どのくらいの量あるのか」を検出し、その反応のパターンで病気を診断できる血液診断用DNAチップを開発した。

血中RNAの種類や量の異常を蛍光色素で検出

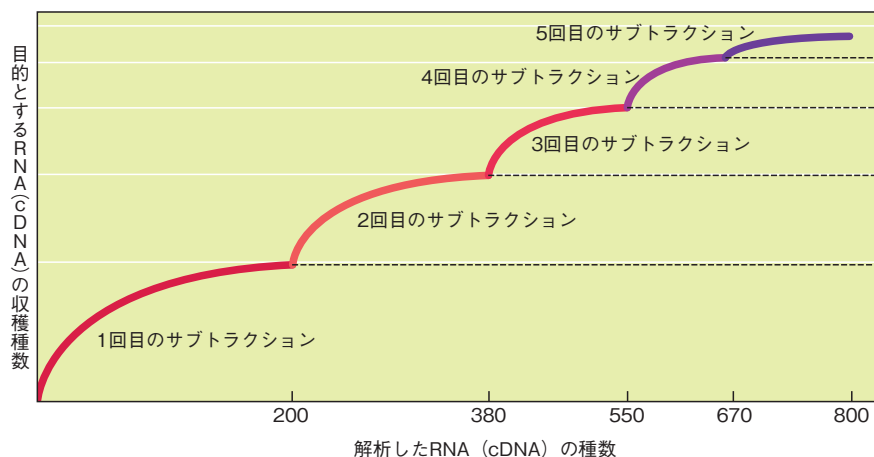
私たちの細胞は、DNAに含まれる遺伝子の情報がRNA（mRNA：メッセンジャーRNA 以下同様）に写し取られ、それをもとにタンパク質の合成などが行われて維持されている。細胞中には、さまざまな遺伝子から作られた何十万ものRNAが存在しており、その種類や量は時々刻々と変化している。RNAの種類や量に異常が現われると、そのRNAから作り出されるタンパク質にも異常がおよんで、病気が引き起

こされる。DNAチップは、こうしたRNAの異常を蛍光色素を使って検出でき、すでに診断などで使われはじめている。

今回の血液診断用DNAチップも、見かけはこれまでのDNAチップと変わらない。薄く小さな基盤に多数のDNAが貼られており、それが、スライドガラスにのっている。ただし、中身はかなり違う。従来のDNAチップでは、「どんなタンパク質を作り出すか」といった機能がわかっているRNAを検出できるDNAが貼られていた。一方、今回の場合、まず血液にしか存在しないRNAを、野島教授が開発した画期的な技術（段階的サブトラクション法）で残らず取り出した。その中には、機能が明らかなものも、未知なものもあるが、その大半のRNAを検出するようにDNAを貼ったのである。

「特定のRNAの異常を見るのではなく、多数のRNAによる蛍光色素の発色パターンを健康な人のパターンと比較することによって、血液に異常が現われるさまざまな病気を1枚のDNAチップで診断できるとこ

段階的サブトラクション法によるRNAの収穫曲線



* cDNA

mRNAの塩基配列の鋳型となるような、1本鎖DNA（2本鎖DNAを指す場合もある）をcDNAという。「相補的DNA」ともよばれる。「RNAの構造は壊れやすいが、DNAは安定している」などの理由から、mRNAをcDNAに置き換え、そのコピーを増やして試料とするのが、遺伝子研究の一般的な手法となっている。

ろが、従来のものとはまったく違います」と、野島教授はその有用性を語る。

2種の細胞で、RNAの差を見る

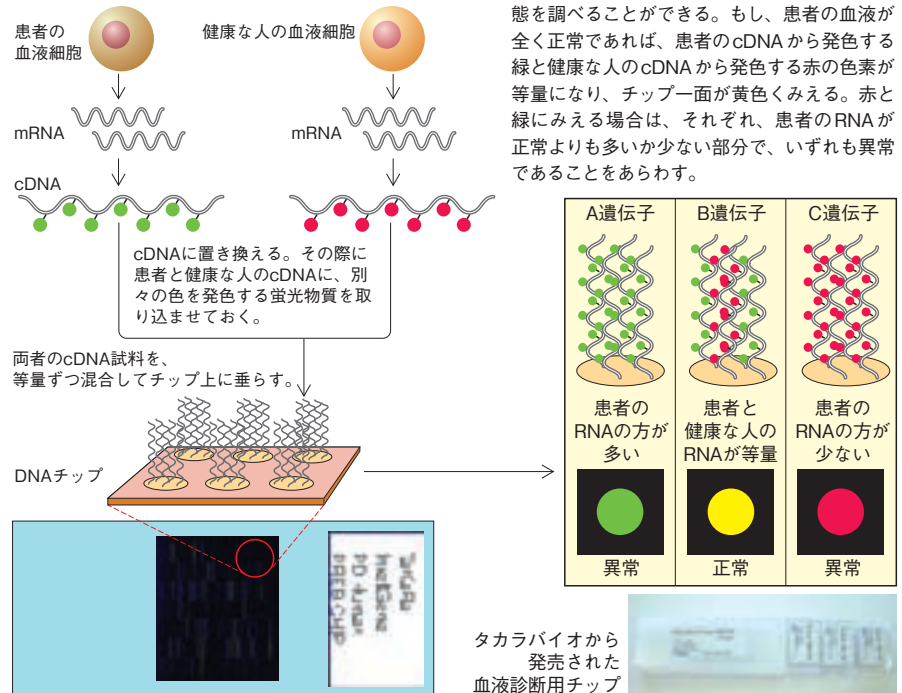
血液診断用チップの要となっている野島教授の「段階的サブトラクション法」について、簡単に説明しよう。これは、2種の細胞があったとき、片方にしか存在しないRNAをすべて「確実に」「かつ」「容易に」取り出すことのできる技術である。

がん化のメカニズムを研究していた野島教授は、ある細胞だけに見られるRNAを取り出し、その機能を調べる作業を行っていたが、当時の膨大な手間と時間がかかる手法に疑問をもち、自ら新しい技術を開発しようと考えた。発想から10年をかけ、1998年に完成させたのが「段階的サブトラクション法」である。「これを使えば、2～3カ月で、ある細胞に特有のRNAのすべてを選び出すことができるんです」と野島教授。

具体的には以下の手順で行なう。XとYという2種の細胞があり、X細胞だけに存在するRNAを取り出したいとしよう。まず、XとYの両方の細胞の何十万種にもおよぶRNAを特殊なDNA（cDNA*）に置き換え、それを大量にコピーする。次に、ある手法を用いて、そのcDNAの種数を約10分の1に絞りこむ。その中から任意に200種を、さらにそこから任意に20種を取り出し、一つずつ調べてX細胞だけにあるものを選び出す。

次いで、別の20種を同様に調べる。さらに同じ作業を繰り返し、累計していくと、確率論的に同じ種類のcDNAの出現頻度が高くなり、収穫できる種数がだんだん頭打ちになってくる（P.8の下図を参照）。グラフが水平になったところで、残りのcDNAから、この200種と同じものを、すべて取り除いてしまう。その後、また新たな200種を選び、同じ作業を一から繰り返す。cDNAがな

血液診断用チップのメカニズム



くなるまで続けると、X細胞だけに存在したものが、残らず取れてくる。

偶然が招いた製品化への道

1999年、JSTの「プラザ事業」の前身となった「RSP事業」のコーディネーターが、用事で大阪大学を訪れ、空いた時間に野島教授に面会にきた。これが、血液診断チップ開発への第一歩となった。2002年1月末、プロジェクトとしての採用が正式に決定し、タカラバイオと東洋紡、ベンチャー企業のジーンデザインを共同研究先として迎えた。

野島教授は、ヒトの血液細胞とありふれた細胞の代表である繊維芽細胞を使い、段階的サブトラクション法で、血液細胞のみにあるRNAを305種取り出した。そこには、ヘモグロビンやインターロイキン2といった、よく知られた血液成分のRNAもあったが、約半分は機能が全くわからないものだった。305種のうちの225種のRNAに対応するcDNAを使って、タカラバイオがDNAチップとして製品化した。「長いcDNAは、どこを切り出して貼ればセンサーとしてより有効かを、いろいろと検討しました」。タカラ

バイオの大門尚志さんは、当時をそう振り返る。

発売されたのは、2004年8月（商品名はプレップチップ。3枚セットで5万5000円）。チップの使い方は、次のとおりだ。まず患者から約5ccの血液を採取し、そこに含まれるRNAを取り出す。RNAはcDNAに置き換え、その際に蛍光物質を取り込ませる。一方で健康な人の血液サンプルにも同じ操作を加え、患者とは違う色の蛍光物質を取り込ませておく。これらの2種の試料を同量ずつ混ぜてチップに流し込むと、チップ表面に貼られたcDNAのうち鋳型となるDNAに結合して発色する。発色パターンを解析すれば、関節リウマチや慢性腎炎をはじめさまざまな疾患の診断に使えるという。

このプロジェクトは、研究期間が1年延長され、2005年9月に終了の予定。「製品化という目標は果たせた。次段階として、リウマチなどの疾患別チップの開発に取り組んでいるが、2005年はこれまでの成果を論文にまとめることに専念したいですね」。技術開発最優先で走り続けた3年間。振り返ると、まとめるべき成果が山になっていた。

（サイエンスライター 西村尚子）

植物光合成をしのぐ「有機太陽電池」

太陽電池は究極の再生可能エネルギーであり、大きなビジネス分野でもある。

変換効率が高く、安価な製品が目標だ。新たに期待されているのが「有機太陽電池」。

しなやかでカラフル、携帯性に富むために、ビルのガラス壁面や衣服にも応用できそうだ。

低コストと高い変換効率が目標

結晶シリコンあるいはアモルファス太陽電池が実用化されているが、課題も多い。例えば原料の酸化ケイ素は無限にあるように見えるが、コストに見合う形で使える高純度の原料は限られている。

製造コストも、結晶シリコン太陽電池は高い。アモルファスでは少し下がるが変換効率の低さが問題になる。広く普及させることを考えると、なお、変換効率が高く、安価な製品が求められているのだ。

この点から期待を集めているのが有機太陽電池。プラスチックと同様に軽くて柔らかく、彩色も可能という特徴がある。原料の炭素はふんだんにあり、変換効率が向上する余地も十分に残されている。

フラーレンの使用を発想

太陽電池の原理は、①光が当たることによって(光捕集)②物質内の電子が遊離し(電荷分離)③電子は+極、電子が欠けた場所である正孔は-極

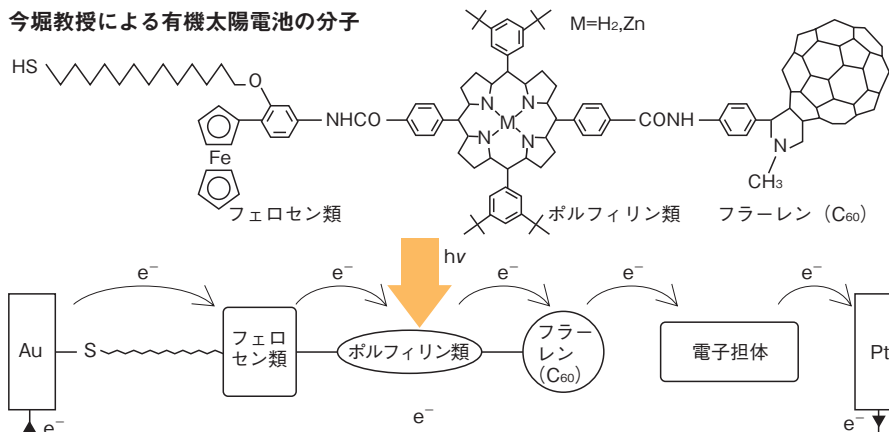
までそれぞれうまく伝わって行って(電荷輸送)④最終的に+極と-極の間に電流が流れることだ。

有機太陽電池でも同じで、このような現象を効率よく実現できる分子や仕組みを設計すればよい。

今堀博・京都大学教授(JST さきがけ21研究代表者)の頭にひらめいたのがフラーレン(C₆₀)だった。大阪大学にいた1993年ころのこと。フラーレンは「電子を受け取りやすく戻しにくい」ので、うまく使えそうだと見られていたが、今堀教授以外、世界中でそれを実現できる人はいなかった。

具体的に作った分子は、そのフラーレン(C₆₀)と有機金属錯体のフェロセン(Fc)とポルフィリン(P)とを連結させたもの。導電性分子を通じて左端を金の電極(-極)に結合させ、全体を電解質の中に入れて、白金の+電極とつないだ(下図)。これによって金電極から白金電極まで電子がうまく移動し、この種のタイプとしては最高の20-25%という内部量子収率(吸収された光子が電子に変

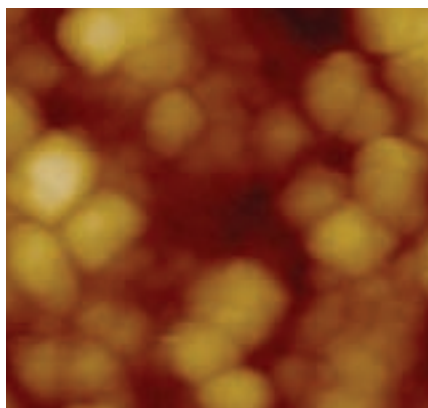
今堀教授による有機太陽電池の分子



* フラーレン

60個の炭素がカゴ状に結合した物質。化学的にはベンゼンなどと同じパイ電子化合物で、基礎と応用の両面で精力的な研究が展開されている。

フェロセン(Fc)―ポルフィリン(P)―フラーレン(C₆₀)で、左端の長鎖のアルカンチール分子を通して金電極と結合させている。



ポルフィリン修飾金コロイド・フラーレン集合体の原子間力顕微鏡(AFM)画像。導電性ガラス上の酸化スズに結合している。

換される割合)が達成された。「このような分子を作るのは簡単ではなく、私たちだけが作れたのです」と今堀教授。

ここで光を電気に変換するのがポルフィリン。自然界で光合成を担うクロロフィル(葉緑素)も同じ仲間だ。自身、理学部学生のころは植物の光合成を研究していた。だから今の研究をみずからは「人工光合成」と呼ぶ。

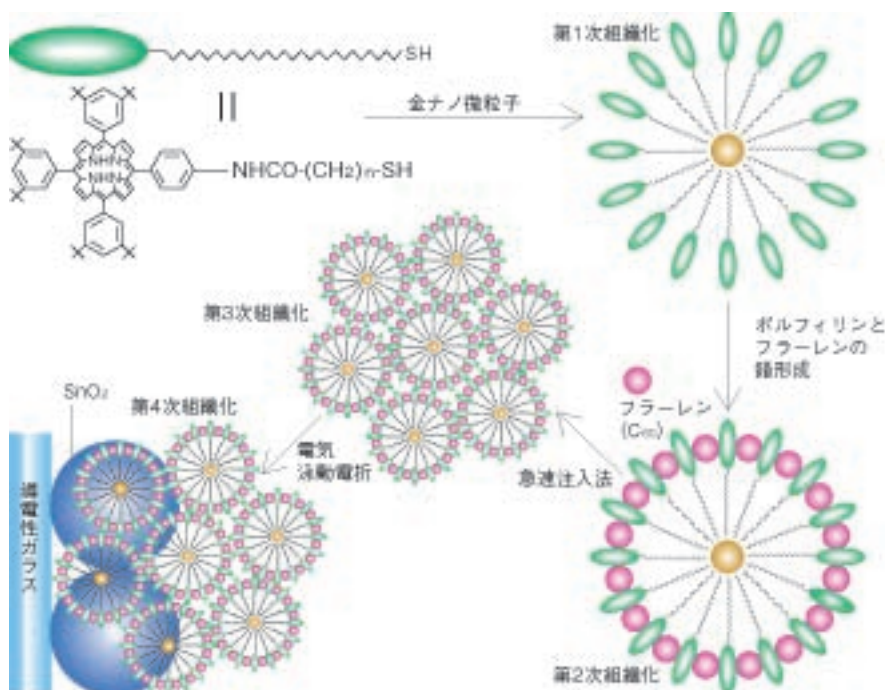
それはともかく、成果はフラーレンという話題性もあって注目を集め、今堀教授の論文は、2001年に公表された過去5年間の論文引用件数ランキングにおいて、材料科学分野で日本人の第2位となった。特許も出願した。

二つのブレークスルーを具体化

フラーレンを使うだけでも十分に話題性があるのに、今堀教授は次に、「ナノテクノロジー」と「自己組織化」という注目の技術を駆使して太陽電池を作った。しかもそれは、有機太陽電池でここ10年になされた二つのブレークスルー、すなわち「色素増感」(電離物質を微細化して光を受ける面積を1000倍にすること)と、「バルクヘテロ」(分子のレベルでヘテロ接合をつくり、それを集合体にする)を具体化したものでもあった。

これは4段階の手順を踏む(上図)。

今度は「ポルフィリン+アルカ



4段階の自己組織化の仕組み。この“部品分子”ではフェロセンは取り除いている。

ンチール(導電性分子)」から始める。ほぼ1 nm (ナノメートル)の大きさだ。この“部品分子”の中に、数nmの金の微粒子(金ナノ粒子)を入れると、まわりにくっついて、ちょうどクリのイガのようなものができる(第1次組織化)。ポルフィリンがついているので先は尖っていない。イガ全体は約10nmである。

外側のポルフィリンの間は、実はスカスカで隙間があいている。そこで、この隙間にフラーレンを入れて、ポルフィリンとフラーレンの複合体を形成してやるのだ。こうすると、中心に金ナノ粒子があって、そのまわりをポルフィリンとフラーレンが囲んだ“ボール”ができる(第2次組織化)。

次に、これを急速注入法というやり方で集合化すると、多数のボールがくっついて大きなコロイド粒子ができる(第3次組織化)。さらに、このコロイドを電気泳動という手法によって、導電性ガラス表面の酸化スズ(SnO₂)と結合させる(第4次組織化)。これでガラス表面についた薄膜ができ、電解液と電極を用意すると太陽電池になった。

このように、4段階の組織化はすべて、外部から条件を整えてやって、あとは自然の成り行き、自己組織化

にまかせるのである。こうした構造を作らないままの「ポルフィリン+C₆₀」と比べると、効率は50倍にもなった。

実用化へと広がる夢

精細な複合構造が作れるようになり、教授の頭にいろいろなアイデアが浮かんできた。例えばイガの針の長さを一律でなく、いろいろ変えてみたらどうだろう。実際、この工夫だけで特性は1.5倍も向上した。もちろんJST出願特許になった。今堀教授の自己組織化構築法がいかに広い可能性を秘めているか、わかるであろう。

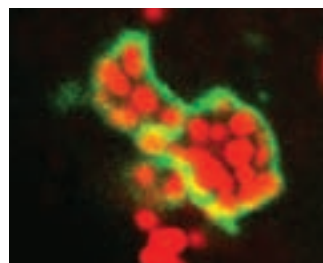
有機太陽電池の実用化という点では、あと何段階かのブレークスルーが必要かもしれない。しかし、ある程度の高効率化が達成できれば、新分野を中心に普及は進むはず。衣服に利用できる太陽電池など、楽しい。

最後に、今堀教授の太陽電池と自然植物の光合成の効率はどっちが高いか聞いてみた。植物の光合成の効率はせいぜいが1%ということで、なんと有機物太陽電池でも、すでに植物をしのぐ効率が実現しているのだ。「人工光合成」の研究から目がはなせない。

(サイエンスライター 松尾義之)

「オートファジー」に迫る

「オートファジー」は、細胞という限られた場の中で、いらなくなったタンパク質を分解して、合成反応との均衡を保つ機構と考えられていた。それが病原菌のような、細胞に入り込んだ外敵の排除にも働いていることがわかった。



オートファゴソーム内に捕らえられた
A群レンサ球菌

オートファジーとは、auto (「自己」) と phagy (「食べる」) というギリシヤ語からの造語で、日本語では「自食作用」と呼ばれている。自分を食するとはいったいどういうことだろう。

この現象は、すでに半世紀近くも前に動物細胞で見つかった。ところが最近、それに関与するタンパク質が明らかになり、電子顕微鏡による観察でオートファジーの基本的な筋書きが見えてきた(下図)。

細胞内にどこからともなく二重膜構造が現れて大きくなり、たちまち細胞質の一部分を包み込み、口を閉じて風船のような形の「オートファゴソーム」へと成長する。外側の膜が「リソソーム」という一重膜構造の袋の膜と融合して「オートリソソーム」になると、オートファゴソームの内側の膜とその中身は、リソソームがもっている酵素で分解されてしまう。分解産物は新しいタンパク質などの合成素材となり、生物は生き延びているのだらう。動物が少し空腹になった程度でも、肝臓の細胞ではオートファゴソームが観察されるという。

これまでその作用や機構をタンパク質の働きを基に説明できなかったのは、それを取り出して調べるのが難しいということもあるが、いちばんの問題は、この二重膜と細胞の

中のほかの膜とを区別できなかったことである。

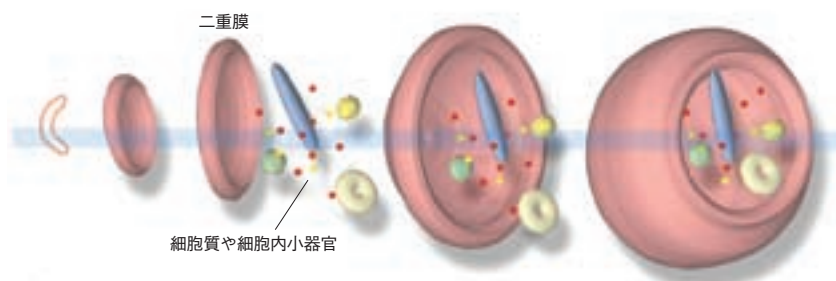
酵母の遺伝学が道を拓く

日本の研究者たちは、タンパク質分解の重要性に早くから注目していた。それが現在オートファジーの研究を積極的に進める原動力となった。

オートファジー研究で突破口を開いたのは、基礎生物学研究所(愛知県岡崎市)の大隅良典教授であった。酵母細胞では、液胞の中で自己の成分が分解される現象が見られ、それとオートファジーとが結びつけられた。さらに教授は酵母遺伝学の手法を駆使して、オートファゴソームができるのに必要な遺伝子を16個も見つけた。酵母は単細胞ではあるが、高等動植物と同じ真核生物である。動物で発見されていたオートファジーにも同じような遺伝子が関与しているという考えが生まれるのは、当然だったかもしれない。

大隅研究室の助教授として研究に参加した吉森保・現国立遺伝学研究所教授は、相当する遺伝子を哺乳類で見つけるところから研究に入った。それまでも、タンパク質が膜に包まれて細胞外に運び出される仕組みについて、ドイツで研究していたし、「ありきたりのことはやりたくない。他人のやらない未知の分野こそ、リ

オートファジーの概念図



スクはあるけれど、やりがいがある」
 と思っており、「7年前は、コンピューター上で遺伝子を探していた」という。

細胞質には、さまざまな膜がある。その中でオートファゴソームができる過程を追うためには、その膜をエンドソーム膜(細胞外の物質を包み込んで、細胞内に取り込む膜)やリソソーム膜と区別できなくてはならない。その目印となる動物のタンパク質を見つけたのが基礎生物学研究所時代の吉森教授である。オートファゴソームだけにある、他にはないそのタンパク質に蛍光物質を結合させておけば、蛍光顕微鏡を使って、膜が成長して変態する様子を追跡できる。「その目印は、たちまち世界中のオートファジー研究者が使うようになりました。毎日のようにリクエストが来ます」。

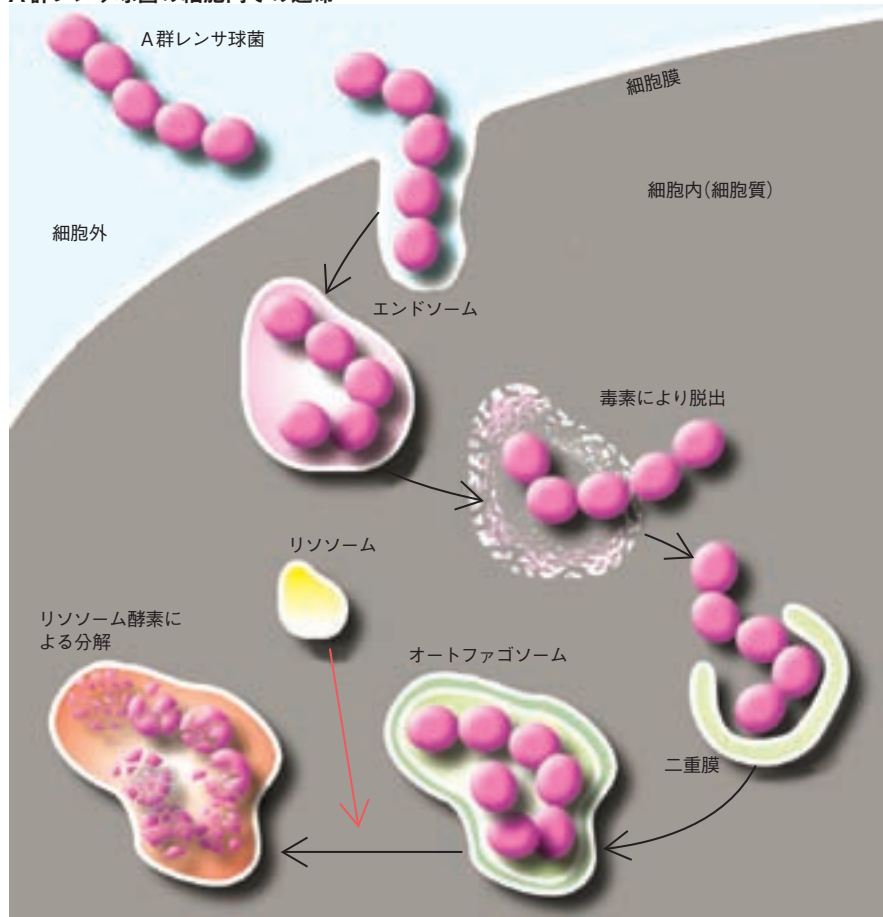
殺菌作用を発見

さらに吉森教授は、チーム型の戦略研究(CREST)において、中川一路大阪大学講師(「さきがけ」研究者)と共同で、オートファジーの殺菌作用を実験ではっきりと示すことに成功した。「細菌がオートファジーで食べられるらしいという不確かな報告は、いろいろありましたが、幸いA群レンサ球菌ではっきりと結果が出せました。これはオートファジーにとっても、菌についても新しい発見でした」と吉森教授。

オートファゴソームの膜には蛍光タンパク質の目印を付け、菌のDNAを別の色素で染めると、菌がオートファゴソームに捕らえられている顕微鏡像が見える(写真)。

ヒトの咽頭炎、扁桃炎、子供がよ

A群レンサ球菌の細胞内での運命



非免疫細胞に感染したA群レンサ球菌は、オートファゴソームによって捕獲・分解される。

くかかる「とびひ」などの原因菌として知られているA群連鎖球菌は、白血球のような免疫系の細胞を避けて上皮細胞に侵入する。そこではまずエンドソームに入り、自身のもつ溶血毒素でエンドソームの膜を壊して細胞質に逃れるが、結局はオートファゴソームに取り込まれて、オートリソソームの中で最期を遂げる(上図)。

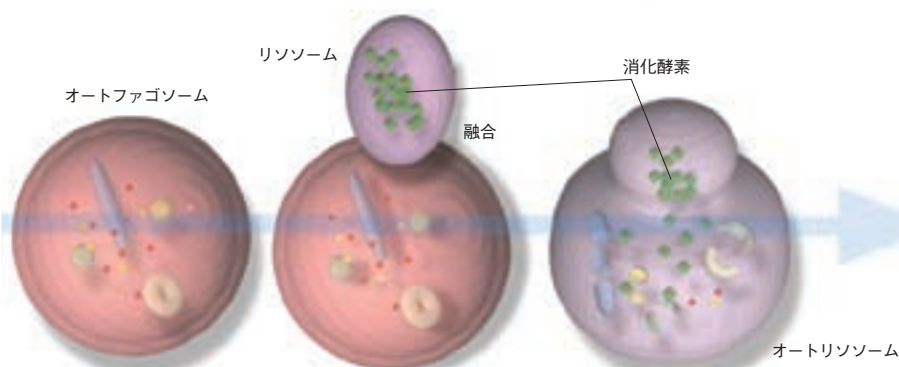
さらにオートファゴソームの形成に必要な不可欠な遺伝子が働けないように操作した細胞を使うと、オートファゴソームは出現せず、菌も増殖するという実験結果から、オートファジーによって病原菌が処分されたことが確かめられた。

オートファジーの多彩な作用

オートファジーは、アミノ酸のような栄養源が不足したときや、外敵が侵入したときに、はっきり見られるようになる現象であるが、それだけにはとどまらない。発生・分化など生命現象のあらゆる場面でさまざまな働きをしていると考えられるし、病気とも関係がありそうだ。

何が膜の動く方向を制御しているのか、オートファゴソームに入る中身は、どのようにして選ばれるのかなど、わかっていないことが多い。とはいえ、手が届かないところにあるわけではない。蛍光顕微鏡の進歩、ゲノム解析の成果、細胞工学の進歩という強い味方がある。オートファジーの機構が明らかになるにつれ、その医学や医療への応用はたちまち開けるに違いない。オートファジーは、研究者にとって「宝の山」だと言えるだろう。

(サイエンスライター 三井恵津子)



江戸期の文化を知る「和算の贈り物」

江戸時代、日本には数学を楽しむ文化が花開いていた。

庶民が習い事のひとつとして数学に親しむ。一方、志を持った人々は、師の下で高度な内容を追究し研鑽を積む。「楽しむ数学」と「励む数学」が車軸の両輪のように、文化や社会の一端を担っていた。

Literacy

「数学」で思い出すものは？ ピタゴラスの定理に、二次方程式の解の公式、サイン・コサイン・タンジェント——。海外のカタカナ人名やアルファベットの記号ばかりが頭をかすめるにちがいない。

だが、縦書きや筆文字の数学が日本にはあった。江戸時代に驚くほど発展した和算である。

数学を楽しんでいた庶民

「そろばんの教科書である『塵劫記（じんこうき）』という和算書が、江戸時代にベストセラーになりました。日常的な題材を取り上げて、実用的な計算をできるようにするための本ですが、大成功の陰にあったのは数学遊戯のブーム、いわばパズルのよ

うなものです。実用ではなく、“おもしろさ”をねらって後から加えられた部分が、広く受け入れられました。日本人は昔から算数・数学をずっと楽しんできたんです」

こう話すのは、真島秀行・お茶の水女子大学教授。東京・文京区のシビックセンターで2004年12月11日から25日まで開かれた企画展「和算の贈り物」の実行委員長を務めた。

日本ではぐくまれた数学文化である和算を紹介するために、お茶の水女子大学と文京区が共同で企画し、JSTをはじめ、日本学術会議の「若者の科学力増進特別委員会」、日本数学協会、日本数学史学会、和算研究所といった多くの団体が役割を分担。貴重な和算書などの展示に加え、作家や研究者による講演会や、算数パズルを作る実習会も行われ、多くの人がさまざまな角度から和算や数学のおもしろさと楽しさを体験できる場となった。

有名な『塵劫記』には、吉田光由によるオリジナル版以外に、吉田本人による新版、さらにまったく別の



遠藤寛子氏の著作『算法少女』（岩崎書店）の表紙。1973年に刊行された子供向け歴史小説。（左）

関孝和による『発微算法』（和算研究所蔵）（下右）

西田明則による『直線三角術』（お茶の水女子大学附属図書館蔵）（下左）



人々によってそれぞれ作られたものがある。和算研究所が所蔵するいろいろな『塵劫記』が、展示会ではずらりと並んだ。「江戸時代は、数学・算数の文化が幅広く浸透していました。でも今は、子供のころに数学好きでも、だんだんと嫌いになりがちです。江戸時代のような数学力を回復して、数学文化を現代に育てたいですね」(真島教授)。

近代日本の基礎支えに

『塵劫記』だけではない。お茶の水女子大学附属図書館で、司書も把握していなかった古い和算書を真島教授は探し出した。西田明則という人の和算書(有名な和算家・関孝和の『解伏題之法』の写本)など、どれも江戸から明治期に実際に使われた和算や数学の教科書。閉架書庫のさらに奥にある書庫から蘇った財産だ。昔の卒業生が、父親の学んだ本を寄贈したものらしい。江戸から明治初期、こういった教科書によって勉強した結果が、西欧列強と渡り合う原動力となり、さらには新しい学問体系を西欧から吸収していく素地にもなっていた。

お茶の水女子大ならではの着眼点もある。今から約230年前にあたる1775年、「女性の手になる唯一の和



会場風景。幾何学の問題を彫った珍しい算題墓石も展示されていた。

算書」と言われる『算法少女』という本が書かれた。おそらくは父親によるものだろうが、女性が関係する数学の本が江戸時代にあったこと自体とても興味深い。当時、秘中の秘であった円周率の計算が、現代的な数学と変わらないレベルで解説されているという。その原本も東京大学附属図書館から借りて展示した。

実は、昭和になってから作家の遠藤寛子さんが、この和算書をモチーフにした同名の『算法少女』という少女向け歴史小説を出版している。11日には、作家自身によるこの小説にまつわる話が披露された。

輸入品ではない科学

書物以外からも、数学遊戯の人氣が見て取れる。研究した問題を絵馬のように仕立てた算額を作って神社に奉納したり、熱心に勉強したことを子孫に伝えるために幾何学の問題を墓石に彫ったりしている。当時の人々が愛した数学の姿が、いろいろな形で今も残っていた。

科学技術には、「舶来品」というイメージがどうしてもつきまとう。明治時代にお雇い外国人から教わったもの。第2次世界大戦後に先進国から取り入れたもの…。しかし和算の歴史や広がりを見ると、「科学」や「技術」の多様な文化が日本の中にあり、かつそれを楽しんでいたことが伝わってくる。そんな“意外な贈り物”をもらえる企画展だった。

(フリーライター・鈴木クニエ)

算数のパズルを作って遊ぼう！

18日には、岡部恒治・埼玉大学教授による算数パズルを作る実習会が行われた。紹介された2種類のパズルは、子供も大人も楽しめるものだったが、これで数学が学べる？「もちろん遊びです。でも、図形や対象を深く理解して、その構造を見極め、手順を再現し説明していくには、論証という数学的な能力も必要です。遊びながら訓練できればいいことないですよ」と、岡部教授はニコリ。

子供も大人もトライしたパズルの一つは、4つの正方形がつながった輪の表裏をひっくり返す、マーチン・ガードナーが紹介したパズル。できるようになった子供から、大人が手順を教えてもらう場面が、そここで見られた。

もう一つは、西山豊・大阪経済大学教授が『数学文化』(日本数学協会編集、No.3, 2004)で解説した「オリガミ六角形」で、折り込んだ六角形からパタパタパタと何色も色の面が表れる不思議な図形ができあがった。もとはイギリスの数学者が考案したパズルだという。今回は4色のパターンでトライしたが、全部の色を見せるには一工夫がいる。じつはこのオリガミ六角形の縁をたどっていくと、「三つ葉結び目」という形が出てくる。遊びが現代数学につながっているのだ。

できあがったパズルは江戸時代さながら額縁に収められ、立派な算額になった。



有馬朗人が選ぶ 1月の本・映像・展示

今年は、アインシュタインが光量子説、ブラウン運動の理論、特殊相対論という3つの革命的な論文を発表してから100年目で、「世界物理年」となっています。私のオススメが物理学再考の一助になれば幸いです。

Profile

有馬朗人／科学技術館館長。世界物理年日本委員会会長。「科学は楽しく、技術は美しい」ということを、子どもにも大人にも「わかってほしい、感じてほしい」と、いろいろな活動を展開中。

Book

アインシュタインのパラドックス

量子論の確率性に対してアインシュタインの出した反証が量子の絡み合いだが、逆にその存在が実験的に確かめられ、通信に利用されんとしている。その経緯を物理学者たちの奮闘を通して面白く描いている。

量子のからみあう宇宙
アミール・D・アクゼル 著
水谷 淳 訳
早川書房 2100円(税込み)



やさしく読める物理のあらまし

「どんな人たちが、どのようにして物理学を進めてきたのか」という物理の歴史を、主に中学生を対象にして書いた本。誰もがわかるようにと心を砕いたので、手にとってもらえれば著者としては嬉しい限り。

物理学は
何をめざしているのか
有馬朗人 著
筑摩書房 1260円(税込み)



Image

25年ぶりのシルクロード探訪

1980年にNHK特集「シルクロード」が放映されたが、今回は最新の研究成果をもとに新シルクロード像を展開。楼蘭を始め、トルファン、タクラマカンなどの映像を楽しみ、いつか自分の目で見る一助に。



NHKスペシャル
新シルクロード
総合第3日曜日
21:00~22:00
BSH第2月曜日
21:00~22:00
<http://www.nhk.or.jp/silkroad/>

「地球」に取り組む日本人の姿

地球を始め月、惑星にも取り組んできた日本の研究成果をさまざまに紹介。冒頭の、岩手県水沢臨時緯度観測所長の木村栄が100年前に緯度測定で発見した「Z項」の話は、日本人の観測の確かさを示しており興味深い。



不思議の星・地球
—国立天文台紹介
ビデオシリーズ—
第45回科学技術映像祭入選作
天文学振興財団で販売
2950円(税込) <http://www.fpastron.jp/>

Exhibition

電力技術の歴史を実感する

東京電力が収集してきた電力・電気に関する史料を展示してある。歴史的な発電機など実物がズラリと並び、明治以来の日本の技術導入、キャッチアップ、自主開発のありようを実感できる。



電気の史料館
神奈川県横浜市
http://www.tepco.co.jp/shiryokan/H_home-j.html

産業の高度な技術に触れる

建設や自動車、鉄鋼などの工業会が各分野の技術をわかりやすく、面白く紹介している。ここに来れば、科学技術の基礎を学ぶだけでなく、産業の高度な技術を目の当たりにすることができるので、ぜひ一度。



科学技術館
東京都千代田区
<http://www.jsf.or.jp/>

JST News

Vol.1/No.4
2005/January

発行日／平成 17 年 1 月
編集発行／独立行政法人 科学技術振興機構 総務部広報室
〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ
電話／03-5214-8404 FAX／03-5214-8432
E-mail / jstnews@jst.go.jp ホームページ / <http://www.jst.go.jp>