

研究会・学会スケジュール

動物と植物の有性生殖機構に関する国際シンポジウム
International Symposium on the Mechanisms of Sexual Reproduction in
Animals and Plants

開催日：2012年11月12日(月)～16日(金)
開催場所：ホテル名古屋ガーデンパレス(名古屋市)
主催：文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「動植物に共通するアロ
認証機構の解明」
問い合わせ：澤田 均 理学研究科 教授
hsawada@bio.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2514
http://allo-authentication.net/5thMCBEEC/index.html

第7回ニワトリ研究国際学術集会
The 7th International Chick Meeting

開催日：2012年11月14日(水)～18日(日)
開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館
主催：ニワトリ研究国際学術集会準備委員会
共催：名古屋大学大学院生命農学研究科附属鳥類バイオサイエンス研究センター
鈴木孝幸 理学研究科 助教
問い合わせ：suzuki.takayuki@j.mbox.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2997

「代数幾何、保型形式と物理への応用」
Algebraic geometry, modular forms and applications to physics

開催日：2012年11月26日(月)～30日(金)
開催場所：エディンバラ(イギリス)
主催：International Centre for Mathematical Sciences (ICMS)
問い合わせ：金銅誠之 多元数理科学研究科 教授
kondo@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2815
http://www.icms.org.uk/workshop.php?id=198

2012年国際ワークショップ「LHCによる強結合ゲージ理論の展望」
2012 KMI Workshop on "Strong Coupling Gauge Theories in the LHC
Perspective (SCGT 12)"

開催日：2012年12月4日(火)～7日(金)
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール
主催：名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構
問い合わせ：山脇幸一 素粒子宇宙起源研究機構 特任教授
yamawaki@kmi.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2862

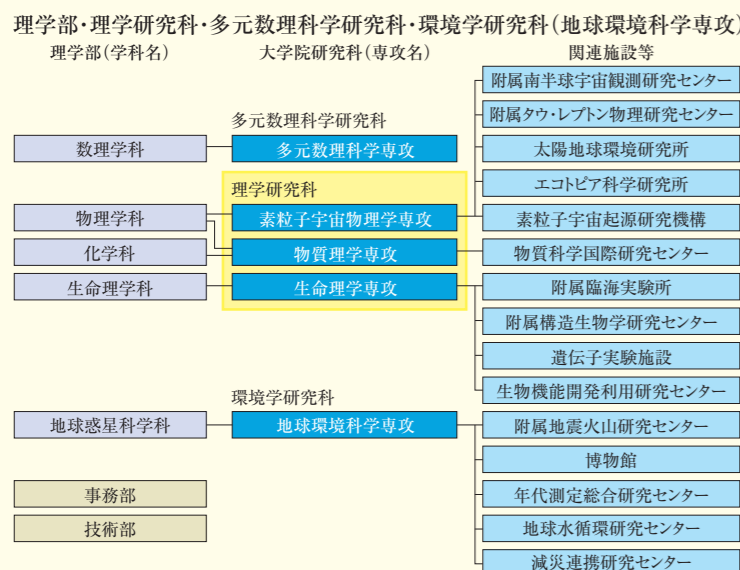
第11回坂田・早川記念レクチャー

開催日：2012年12月末
開催場所：名古屋市科学館
主催：名古屋大学大学院理学研究科・名古屋市科学館
問い合わせ：戸本 誠 理学研究科 准教授
makoto@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp / 052-789-5505

国際ワークショップ「NANTEN2による超広域分子雲観測」
Workshop on the super CO survey with NANTEN2

開催日：2013年3月4日(月)～9日(土)
開催場所：ホテル近鉄アクアヴィラ伊勢志摩(三重県志摩市)
主催：名古屋大学大学院理学研究科附属南半球宇宙観測研究センター
問い合わせ：福井康雄 理学研究科 教授
fukui@a.phys.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2837

組織図



編集だより

当広報委員会は、広報誌や理学懇話会を通じて、我々の学部、研究科で行われている教育や研究について、できるだけわかりやすく市民の皆さんに紹介したいと考えている。その際、技術や産業に直結しない、理学本来の醍醐味を伝えることに心をくんでいる。しかし、自然科学の面白さを味わっていただくためには、それなりの基礎知識と論理的な思考が求められる。これは「理Philosophia」に限らず、多くの科学雑誌にとって共通の悩みだ。そこで、今回の特集、「神経生物学に恋をする」では、神経生物学における最先端の研究の紹介とあわせて、講師の方に研究生活のエピソードや自身の「研究史」の紹介に紙幅をとっていただいた。研究の背景にある人物像を浮かび上がらせることにより、「この人あってのこの研究」であることをわかってもらいたい。研究者の人物としての魅力は、その人の研究の面白さと共通するものがある。そんなことを考えたからだ。果たしてその効果はいかに。(杉山伸)

表紙説明

ショウジョウバエの求愛歌、線虫の「好き嫌い」、小さな生物のこうした行動を決めているのは、人間と同じように脳の働きによるものという。生物の行動を神経レベルにさかのぼって探る神経生物学の世界をめぐる。



理 *philosophia* — No.23
autumn-winter 2012
2012年10月20日発行

広報委員 篠原久典(研究科長)
松本邦弘(副研究科長)
杉山 直(評議員)
南 和彦(数理学科)
福井康雄(物理学科)※委員長
中村光廣(物理学科)
寺崎一郎(物理学科)
山口潤一郎(化学科)
杉山 伸(生命理学科)
瀧口金吾(生命理学科)
ウォリス・サイモン(地球惑星科学科)
斉藤 肇(事務長)

編集発行 名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会
〒464-8602 名古屋市千種区不老町

ご意見、ご感想をお待ちしています。
本誌の原稿執筆や取材などに協力いただける方を求めています。
広報委員会までご連絡ください。
なお、ご投稿などの採否については当委員会にお任せください。
次号は2013年4月頃発行の予定です。

制作 株式会社電通
編集協力 株式会社コミケ
デザイン 株式会社ティ・エム・シー

・本誌記事、写真等の無断複写、転載を禁じます。 ISSN 1884-8486

TEL 052-789-2394 FAX 052-789-2800 E-mail kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp URL http://www.sci.nagoya-u.ac.jp

理

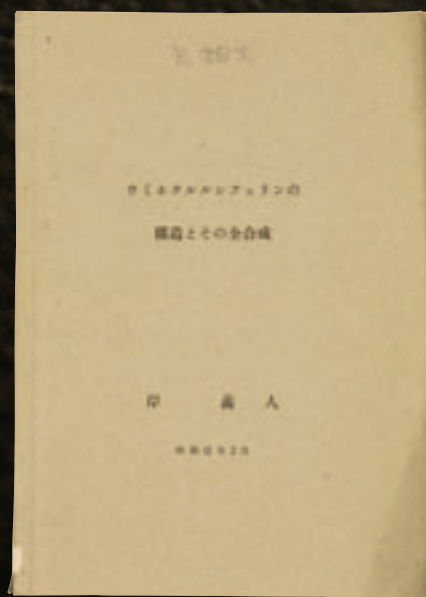
名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報誌
[理フィロソフィア]
autumn-winter 2012

23

philosophia

18 | 理学部交差点
12 | 理の先端をいく◇小山昌子／伊藤武男／中村光廣
03 | 理のエッセイ◇上羽牧夫
02 | 時を語るもの◇岸義人 博士◇上村大輔
08 | 「好き嫌い」をつくり出す神経回路をたどる◇森郁恵
04 | 「愛の歌」にときめく小さな脳の仕組み◇上川内あづさ
「神経生物学に恋をする」

岸 義人 博士 — 分子レベルのものづくりの匠

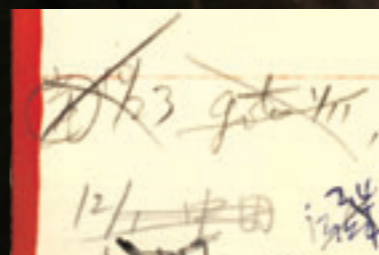


岸義人博士は1957年に名古屋大学理学部に入学、1964年に平田義正^{*1}教授の研究室においてフグ毒で有名な成分テロトキシンの構造決定を行った。また、下村脩^{*2}博士が単離したウミホタルの発光物質であるルシフェリンの構造決定、化学合成も達成した。その後、平田研究室の助手を務め、米国ハーバード大学博士研究員として渡米、帰国後、まもなく農学部（後藤俊夫^{*3}研究室）の助教授に着任した。そこで、テロトキシンの全合成（人工的に物質を化学合成すること）に取り組み、1972年、世界で初めてそれを達成した。2003年に次の合成が報告されるまで岸博士の合成は世界で唯一の成功例であった。1974年にハーバード大学教授

に抜擢され、主に生物活性をもつ化合物の全合成研究に取り組んだ。有名なウッドワード^{*4}の後継者として世界的に認知され、複雑な物質の合成手法や新規合成反応の開発を行い、その研究成果は現在の有機合成化学の進展に大きく寄与している。なかでも、2011年7月に国内で発売された天然物由来の抗がん剤「エリブリン」は岸博士が確立した62工程の精密な化学反応を介して製造されており、天然物化学と有機合成化学の集大成といっても過言ではない。現在も精力的に研究を行っている岸博士は、まさに分子レベルのものづくりの匠であるといえよう。（名古屋大学名誉教授・神奈川大学教授 上村大輔）



岸 義人 (1937-)
名古屋大学理学部卒、
同大学院博士課程修了 (1966)
元名古屋大学農学部助教授
(1969-1974)
ハーバード大学教授 (1974-1997)
ハーバード大学名誉教授 (1997-)
名古屋大学特別教授 (2010-)
文化功労者 (2001)



◇写真の説明
写真は平田研究室の図書と貸出カード。貸出カードには岸博士と後藤俊夫博士の名前が残る。左下はルシフェリンの化学合成を研究テーマとした岸博士の学位論文。

- *1 平田義正 (1915-2000)
元名古屋大学理学部教授
(本誌5号P.2、16号P.4参照)
- *2 下村 脩 (1928-)
元名古屋大学理学部助教授。
ノーベル化学賞 (2008) を受賞。
(本誌15号P.19、18号P.2参照)
- *3 後藤俊夫 (1929-1990)
元名古屋大学農学部教授
- *4 R.B.ウッドワード (1917-1979)
元ハーバード大学教授、
ノーベル化学賞 (1965) を受賞。

ITは人を賢くしたか

上羽牧夫 物質理学専攻教授



Illustration: Suharu Ogawa

私が学校で科学を学び始めてからもう半世紀になる。この間の科学技術の進歩は目覚ましいが、なかでも予想を超えて変わってしまったのが情報技術 (IT) である。インターネットとスマートフォンに代表されるITは私たちの知的生活を変えてしまった。昔なら何週間もかけてやっと手に入れたような情報が今は瞬時に手元に集まる。この恩恵は計りしれない。

だが、ITによって本当に人は賢くなったのだろうか。ITを象徴するものは「検索」であろう。同僚はいつも、検索的思考の学生が増えてゼミが成立しなくなったと嘆いている。ヒントになるキーワードをいうと、言葉として別のキーワードが返ってくるだけで論理的思考がまったくできないというのである。「検索」が手軽に回答を用意してくれるため、考えることをITに預けてしまった状態が出現しているのだろう。

ITが抱えるこの問題は科学にとって他人ごとではない。科学は物事を正しく予測することで、人々を幸せにする技術を生む。精密な実験装置や精緻な科学理論の発達が技術に貢献していることはいうまでもないが、科学の高度化が進んだ分野ほど科学自身がIT化しているように思えるのだ。答えを出すための有効性のみ目が行き、人を賢くするのにあまり役立っていないという事態である。もし人類の夢である室温超伝導体が発明され、実用化されたとしても、その原理や仕組みは人々に正しく伝わるのだろうか。科学を問題解決の手段であると割り切ればよいのかも知れないが、技術として使われるだけで、人々の知の世界が豊かになり人が賢くなることがないとしたら寂しいことである。この事態を放っておけば、ブラックボックスは大きくなり、科学のIT化がどんどん進むだろう。

20世紀の科学は私たちにこの世界の成り立つさまを教えた。21世紀に見出したことが、次の世代の「知」の中に組み込まれ、人の知恵となっていくように努めることも理学に携わる者の大切な仕事である。

Makio Uwaha

1951年福島県生まれ。名古屋大学理学研究科博士課程修了。現在の専門は結晶成長とパターン形成の理論。

小さな生き物たちも、生きのびるために意外に複雑な情報処理をしている。
 生物の行動はどうやって決まるのか、神経レベルにさかのぼって探る神経生物学。
 今回の懇話会では、その最前線で活躍する2人の女性研究者に研究の面白さを語っていただいた。
 ショウジョウバエは相手の求愛歌をどうやって聞き分けるか。
 線虫の「好き嫌い」はどうやって形成されていくのか。魅力的な神経生物学の世界へようこそ。
 (2012年6月9日、第21回理学懇話会より)

「愛の歌」にときめく小さな脳の仕組み

上川内あづさ 生命理学専攻教授



Azusa Kamikouchi

1975年東京生まれ。2002年東京大学大学院薬学系研究科博士課程修了、博士(薬学)。科学技術振興機構・バイオインフォマティクス推進センター(BIRD)・研究員、ドイツ・ケルン大学・博士研究員、日本学術振興会・海外特別研究員、特別研究員、東京薬科大学・助教を経て、2011年より現職。動物の脳が音を理解する仕組みを解明する目的で、ショウジョウバエをモデル動物とした研究を展開している。

神経生物学とは

本日の講演タイトルは「神経生物学に恋をする」です。「神経生物学」、あまり耳慣れない言葉だと思いますが、いってみれば脳についての学問です。たとえば私は春になると、いつも「桜は美しい」と思いますが、「なぜ美しいと思うのか」と考えてみると、よくわかりません。あるいは音楽が心に響いて感動することがありますが、「どうして音楽は心に響く

のか」ということもわかりません。そして「感動する自分とはなんなのだろう」、「私を感動させている世界は本当に実在するのだろうか」と思うこともあります。このような感情や不安を生みだしているのが脳です。脳について知りたいと思うことは人間にとって根源的な欲求なのではないでしょうか。その脳をつくっている要素を生物学的に詳しく調べていこうというのが神経生物学です。

神経生物学の対象は脳をつくりあげている「神経細胞」です。神経細胞は、脳の中で互いに複雑につながり合って機能しています。細胞体から軸索という枝がすくなく長く伸びていて、その枝の先で別の細胞とくっつき合っているのです。神経細胞がどのようにつながり合っているのか、神経細胞がどのような働きをしているのか、こうした疑問を私たちは解き明かしていこうと思っています。

脳の研究が進んだのは1800年代に入ってからです。カハール*1が「脳の中にはニューロンという細胞があり、それがつながり合って機能している」という「ニューロン説」を最初に唱えました。カハールはこの業績でノーベル賞を受賞しています。私は、このニューロンという細胞(神経細胞)を研究対象としています。脳をつくりあげている神経回路、神経細胞と神経細胞のつながり方をまず理解し、その構造、かたちが理解できたら、そのかたちからどうしてその機能が生み出されるのかということを知りたいのです。脳の病気は私たちにとって深刻な問題ですが、どうして異常になるのかを知るためには、まず「正常な状態」というのはどのようなものなのかを知る必要があります。「異常」を知るには、「正常」がわかっていることが大前提です。その観点からも、「正常な状態の脳がどのように組み上がっているのか」ということを理解したいのです。

ショウジョウバエとの出会い

現在、哺乳類の脳について、脳のどの場所がどのような機能を司っているのかということを示す大まかな地図ができあがっています。しかしこの地図は大まか過ぎる、と私は思っています。たとえば、「それぞれの領域に、どのような神経細胞がいくつぐらいあるのか」とか「それがお互いにどのようにつながっているのか」、ヒトの大きくて複雑な脳で全体像を探るのは少々難しい。神経回路の精密な地図をつくるためにはヒトの脳は大きくて複雑すぎるようです。

ヒトの脳に神経細胞は推定で860億ぐらい、ネズミでも数億個あるといわれています。そこで、もう少し小規模な生き物をモデルにして、その全体を調べる方がいいのではないかと発想を変えました。そこで今は、キロショウジョウバエを使って研究をしています。ショウジョウバエは世界中にいる、果物やワインやお酢が好きなハエです。研究している人たち

は「ドロソフィラ」とよびますが、それは学名の“Drosophila melanogaster”によるものです。ショウジョウバエは遺伝学の材料としてよく使われていて、高校の生物の教科書に1回は出てきます。実際にキロショウジョウバエが遺伝学の材料として使われはじめたのは1910年ぐらいですので、もう100年以上の歴史がある、由緒正しい実験動物です。このショウジョウバエは、脳の神経細胞の数が私たちに比べて圧倒的に少ないのです。実際に数えてみたところ10万個ぐらいです。また、脳をつくっている細胞や機能を操作する実験の方法がそろっているので、実験がやりやすいこともメリットです。すぐに増えるので実験も速く進みます。

ここでハエの脳を見てもらいましょう(図1)。ほかの動物の脳と同じように、ハエの脳も領域という機能区画に分かれています。それぞれ匂いの情報を処理する領域だったり、記憶を担っている領域だったり、あとは運動を制御



図1 ショウジョウバエの脳
 頭部(上図)の表皮を取り除くと、脳(下図)が観察できる。数十種類の領域に分かれていて、それぞれ特定の情報処理を担う。

する領域などがあります。このような領域が協力し合って、いろいろな行動を制御しているのです。

ショウジョウバエは攻撃行動や求愛行動もとります。夜は眠ります。また、嫌なことを覚えます。たとえば電気ショックを受けたときに嗅いでいた匂いには、そのあと寄りつかなくなるという記憶を示します。さらに、走光性、反走地性などの単純な走性も示します。あと、私たちにできない飛行もできます。飛行は自分が三次元的に動きながら体を制御するという複雑な行動ですが、ハエは簡単にできるわけです。

ヒトの脳とはかたちが全然違いますが、機能的には似ているところもあります。感覚情報を受け取って、処理して、行動に結びつけるだとか、嫌なことがあったらそこには近寄らないようにするとかです。ですから、私たちの脳を考えるうえでもキロショウジョウバエの脳をみていくことは面白い研究になるのではないかと考えています。違いや共通性をみていくことで、より広い視野で深く理解できるのではないかと期待しています。

*1 S.カハール(1852-1934)
 スペインの神経解剖学者。
 ノーベル生理学・医学賞(1906年)を受賞。



音を理解する脳

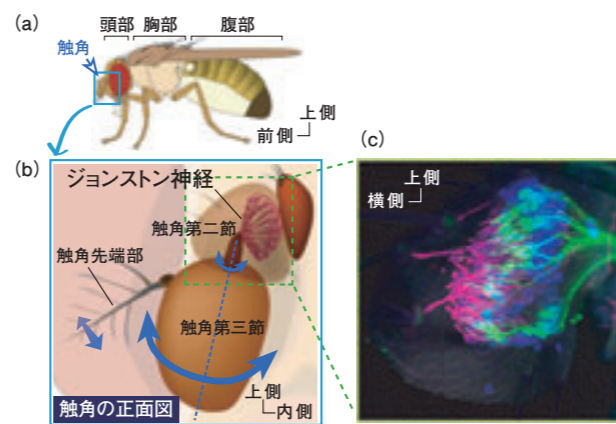
いよいよ「愛の歌」の話です。ショウジョウバエは「求愛歌」をもっています。求愛歌はいろいろなムシがもっていて、たとえば夏に聞くセミの声や、コオロギやキリギリスがリンリン鳴いているのも求愛歌です。ムシは音を求愛に使うわけですが、音の情報を受け取って、「自分の好みの歌かどうか」ということを脳で判別しなければいけません。そのような判別がどのような神経細胞と神経回路で行われているのかを、みつきたいのです。

ショウジョウバエの求愛行動をみてみましょう。オスは一生懸命メスを追いかけて求愛します。追いつくと片方の羽を振るわせて「求愛歌」とよばれる音を出します。つまりハエが「歌う」といっても、それは「羽音」なわけです。メスは聞いているうちに、その歌が気に入ってくればあまり逃げなくなり、カップルが成立する



図2 ショウジョウバエの「耳」

(a) 頭部にある触角で、音を検知する。(b) 触角の第三節は長軸(点線)を中心に回転振動し(双矢印)、触角の第二節にあるジョンストン神経を刺激する。ジョンストン神経は、直接脳へ軸索を投射する。(c) 触角第二節の内部を蛍光を使って撮影した様子。ジョンストン神経を緑色蛍光蛋白質で標識している。細胞体から軸索が伸びていく様子が観察できる。青色で神経細胞の核、紫色で神経細胞の繊毛を標識した。



わけです。ショウジョウバエは世界中に3,000種類以上いるのですが、種によって音の時間的なパターンが違って、それで自分の種を聞きわけているといわれています。つまりハエは「音を理解する脳」をもつわけです。そこで私たちは、音を受け取る神経細胞を調べることにしました。それがだいたい10年前です。最初の3年間で、まずどのような神経細胞がハエの中で音を受け取るのかを調べました。

ハエの脳を取り出すためには、高性能の実体顕微鏡を使います。ハエをピンセットで解剖して欲しい0.2mmぐらいの大きさの脳を取ってくるわけです。この脳を、「共焦点レーザー顕微鏡」という装置で観察します。解像度の高い画像がとれ、厚みがあるものでも情報を細かく取り出せるので、細かいものをじっくりみるには非常にいい顕微鏡です。ハエの脳は小さいので、共焦点レーザー顕微鏡を使うと脳の正面から奥まで連続画像を撮影できます。これによって、3次元的なかた

ちがすぐにわかるということも、ショウジョウバエの脳を研究する利点です。

では、ハエは求愛歌をどこで感じているのでしょうか。多くの昆虫は顔の前に触角が付いています。その触角の付け根にあるジョンストン器官とよばれる器官で、ハエは音を受け取っています(図2)。ジョンストン器官の中には音を感じる神経細胞が入っています。この神経細胞を少しずつ、GFP(Green fluorescent protein)というクラゲの緑色蛍光タンパク質で光らせます。その写真をとることで、細胞のかたちがよくみえるわけです。神経細胞は、軸索を伸ばしてターゲットに向かうのですが、この先にあるのが脳です。

緑色蛍光タンパク質で光らせた細胞の軸索が脳のどこに行くのかということを調べるために、何千匹ものハエを解剖しました。そして「この細胞はこの領域のこのあたりに行き先がある」とか「この細胞はこの中のこのあたりに行き先がある」と1個1個しらべました。これを繰り返していくことで、世界で初め

て、それぞれの細胞の行き先を示す地図をつくることに成功しました。この成果は「ジョンストン器官から脳へ投射する感覚神経の精密な投射地図」として、全40ページにもわたる膨大な論文として発表されました。

重力や風も聞く耳

これでショウジョウバエの脳の一次聴覚地図はできたのですが、次に知りたいのは「この地図は、なにを表しているのか」ということです。そのために2005年の終わりから、ドイツで研究を始めました。ここでは、カルシウムイメージングという方法を使いました。これを使うと、神経細胞の活動を色の変化で見ることができます。私が使ったタンパク質は、神経細胞が興奮していないときは青い光を出しているのですが、興奮すると黄色くなるということで、カメレオンという動物になぞらえて「カメレオンタンパク質」とよばれています。私はこれを使って、先ほどみつけた神経細胞たちがどのような状況で反応しているのか、を観察しました。その結果、耳の中にある細胞は大きく分けて、「揺らすと反応する細胞」と「引っ張ると反応する細胞」の2種類あることがわかりました(図3)。さらに研究を進めると、揺らすと反応する細胞は「求愛歌など音を聞く」ために、引っ張ると反応する細胞は「重力や風の方向を知る」ためにあることがわかりました。いままでハエの耳といっていた、音を聞く器官だと思われていたところは、実際には「音の情報」と「重力や風の情報」を受け取る細胞に分かれていて、それぞれ別々の経路で情報を脳に伝えている、

ということを世界で初めて発見しました。この発見を学術雑誌『Nature』に掲載したところ、非常に多くの反響をよびました。

さて、求愛歌を受け取る脳の仕組みはわかってきました。次の研究テーマは、脳の中にそれが自分の好みの歌なのかを判別する仕組み、つまり「愛の歌」を識別する仕組みを知ることです。これが名古屋大学で進めている最新の研究テーマです。私たちは、求愛歌を受け取る神経細胞をみつける「神経解剖学チーム」、どのような細胞がどのような刺激に反応するかということを見る「神経生理学チーム」、求愛歌への応答を調べる「行動解析チーム」とに分かれて研究を進めています。たとえば、オスしかいないところに求愛歌が響き渡ると、オスは走りまわって他のオスを追いかけて始めます(図4)。「どこかにメスがいるのではないか」という思いから、脳の中にあるスイッチがオンになるのだと思います。これから、どこにそのスイッチがあるのかを調べようと思っています。

ヒトも音楽や言葉をもっています。しかし、音楽や言葉は物理的には単なる空気の振動

図4 オスに求愛歌を聴かせる実験の様子

行動観察容器にオスを6匹入れ、スピーカーから録音した求愛歌を再生する。音がない状態ではバラバラだったオスが、音を再生することで互いを追いかける。

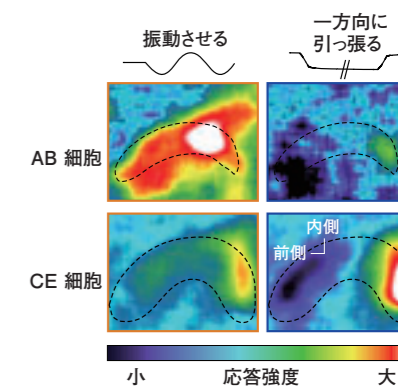
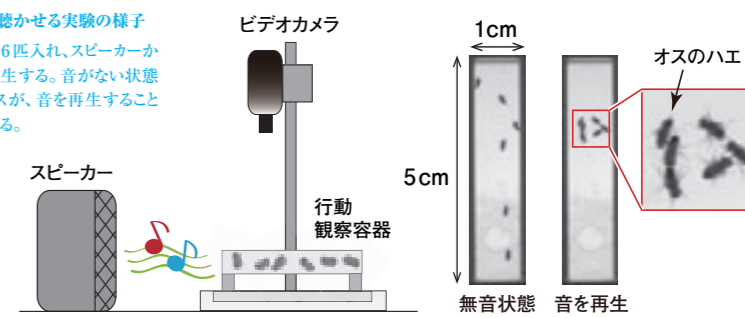


図3 耳の中にある感覚細胞のカルシウム応答
ジョンストン神経は、解剖学的にAB細胞群とCE細胞群に分けることができる。そのうちAB細胞群は振動させると反応し、CE細胞群は一方方向に引っ張ると反応する。点線は、おおよその細胞体の位置を示す。



です。私たちの脳があっはじめて意味がとりだされるのです。ハエには言葉はありませんが、求愛歌や攻撃音をもっています。それが脳の中で処理されて、その意味を理解します。かたちは違うけれども、なかで起きていることは似ているのかもしれない。

もう1つ面白いと思っていることがあります。ショウジョウバエの求愛歌は種によって違います。音を発する仕組みと音を受け取る仕組みは、それぞれの種で共進化してきたはずですが、これからその研究も進めたいと思っています。こういった研究を続けることで、音を介した動物のコミュニケーションの成り立ちや起源、さらには音楽を美しいと感じる心のメカニズムにも迫っていきたいと考えています。



Ikue Mori

1957年生まれ。Washington University 博士課程修了。九州大学理学部助手、名古屋大学大学院理学研究科助教授を経て、2004年より現職。専門は行動遺伝学、分子生物学。「何度読んでも新しい発見がある」といわれる論文を書き、「奥深く美しい」と形容される研究をするのが目標。

「好き嫌い」をつくりだす 神経回路をたどる

森 郁恵 生命理学専攻教授

線虫の魅力とは

私の研究材料は、体長約1mmの「線虫」です。学名を *Caenorhabditis elegans* といい、和名がないので、日本では「シー・エレガンス (*C. elegans*) 」とよばれています。線虫の研究は1960年代に分子生物学の創始者であるブレナー*1が始めました。彼は「今後、分子生物学を使って解き明かす問題は2つある」と考えました。1つは「生き物のかたちがどのようにつくられていくのか」という発生の問題、もう1つは「脳や神経系がどのように働くのか」という神経の問題です。この2つの問題を解くために最適な動物は何かを考えた末、ブレナーは、線虫シー・エレガンスを選びました。

2000年以降、6人の線虫研究者がノー

ベル賞を受賞しています。2002年に3人の線虫研究者がノーベル生理学医学賞を受賞しました。ブレナー、ブレナーの最初の弟子であるホロビッツ*2とサルストン*3です。彼らは、細胞が分裂して2つの細胞になると、そのうち1つの細胞が自然に死ぬことがあること、いわゆるアポトーシスを発見しました。2006年には、ファイアー*4とメロー*5がノーベル生理学医学賞を受賞しました。彼らは2本鎖のRNAが、線虫の遺伝子の発現を抑えることを発見し、この抑制は人間の遺伝子にもあることを突き止めました。2008年は、GFPの発見と応用に対して、下村脩先生を含む3人の研究者がノーベル化学賞を受賞しましたが、そのうちの1人が線虫の神経を研究しているチャルフィー*6です。線虫の研究は、ヒトを

含むほ乳類にもつながる生物学上の大きな発見を生むため、線虫は生物学の研究においてたいへんに魅力的な素材です。

研究者としての私

ここで研究者としての私の歩みを振り返ってみたいと思います。私もやはり動物が好きでした。子供の頃から、いろいろな動物を飼っていました。一方で、「人は、なぜ、このタイミングで人を傷つけるようなこと、あるいは、勇気づけることをいうのか」ということを疑問に思い、ずっと考え続けるような子供でした。朝会って「おはよう」の声か半音下がっていると、「この人、何かあったのかな」と心配になりました。人は日によって心の動きが違う。それはどうしてなのか、と興味はつきませんでした。

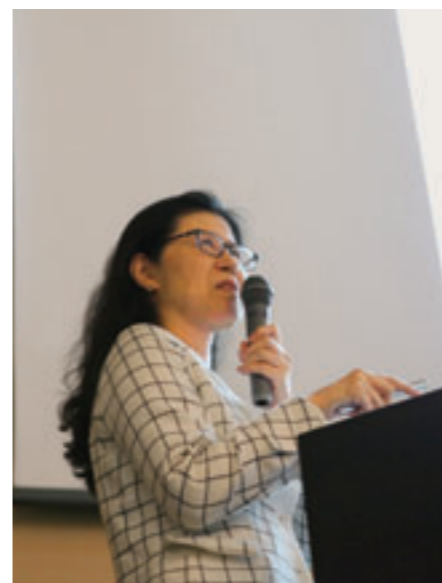
お茶の水女子大学理学部生物学科に入学し、3年生のころには、動物の社会性行動はどのように進化したのかについて研究したいと思うようになりました。そのためには、遺伝学をきちんと勉強することが大事だと思い、卒業研究は、ショウジョウバエの集団遺伝学を行っている研究室で、集団における遺伝的変異の推定や、分子進化の中立説に基づく進化などの理論的研究を行っていました。修士課程の時に、文部省国際派遣留学生制度を利用してイギリスのサセックス大学に1年間留学し、理論生物学者として著名なメイナードスミス*7教授が率いる研究グループで、チャールズワース*8博士の指導を受けていました。

帰国して、博士課程に進学する段階になった時に、お茶の水女子大学の指導教官から「将来何をやりたいのですか」と聞かれ

ました。「遺伝子の言葉で行動を語るようなことをやりたいです」と答えたら、「森さん、それは贅沢ですね。そんな学問はありませんよ」といわれました。日本では、やりたい研究ができないのであれば、と考えて、アメリカのセントルイスにあるワシントン大学の博士課程に入学しました。

厳しかったドクター時代

アメリカの大学院には、ラボローテーション制度というのがあり、学位を取得する研究室を決める前に、3つの研究室に、それぞれ3カ月程度滞在することになっていました。本命は、キロショウジョウバエの研究室でしたが、「ハエ以外のモデル動物を経験するのも、きっと将来、何かの役に立つだろう」と思い、3カ月間だけ滞在するつもりで、日本では聞き慣れない線虫の研究室に出入りすることにしました。ところが、線虫を知れば知るほど、「これは将来性がすごい」という思いが強



なり、線虫の研究室で、学位を取ることにしました。指導教官は、ブレナーの最初の弟子の1人であるウォーターストン*9です。

博士課程の大学院生は、家賃と食費に消えてしまうほど少ない奨学金をもらい、ひたすら研究に没頭することを課されました。そして厳しい教育を受けます。まず、「資格試験」という筆記試験に合格しなければ、学位取得のための研究を開始できません。2回不合格になると、退学です。次の関門は、「審査会」です。私の場合、主査はウォーターストン、副査の先生は5人いました。審査会で、「研究が進んでいない」と判断されると、退学になりました。そして、最後は学位論文公聴会です。通常の公開セミナーをして皆が部屋を出ていった後、副査の先生が1人30分程度、意地悪な質問をしてくるので、それに全部答えなければいけません。この儀式をディフェンスというのですが、文字通り、研究の根拠、必然性、成果について、「すべて妥当であり、重要である」と説明し、自分が行ったことを防衛するのです。

ディフェンスを終え、ちっぽけなアリになったような気分になって研究室に戻ったら、メンバー全員から「おめでとう!」といわれました。学位を取得する学生が出たら、指導教官は、シャンパンボトルを2ダースふるまうことになっているのですが、それはちゃんと用意されていました。ウォーターストン是非常に厳しい先生として有名でしたので、研究室ではポストドクが中心で、学生はほとんどいませんでした。私は図らずも、ウォーターストンの学生として博士号を取得した第一号となりました。アメリカで、このようなトレーニングを受けたことは、非常によかったと思います。



当時、日本には線虫の研究をされている先生は、ほとんどいませんでした。ショウジョウバエから線虫に実験材料を変えたこともあり、日本における研究上のコネを失いました。そこで、1987年、学位の目途がたつと、日本の大学を行脚し、線虫の紹介も兼ねて、自分の売り込みをしました。幸運にも、「線虫の神経生物学のラボをセットアップしたい」という九州大学の教授に、助手として採用していただきました。渡米前にお茶の水女子大学の先生にいった「行動を遺伝子の言葉で語りたい」という研究ができることになりました。「偶然が重なりあって、自分がやりたい研究ができるとは。なんとという幸せ者」と喜びに浸りました。

*1 S.ブレナー (1927-) イギリスの生物学者。ノーベル生理学・医学賞 (2002年)を受賞。

*2 R.ホロビッツ (1947-) アメリカの生物学者。ブレナーとともにノーベル生理学・医学賞 (2002年)を受賞。

*3 J.サルストン (1942-) イギリスの生物学者。ブレナーとともにノーベル生理学・医学賞 (2002年)を受賞。

*4 A.ファイアー (1959-) アメリカの遺伝学者。ノーベル生理学・医学賞 (2006年)を受賞。

*5 C.メロー (1960-) アメリカの生物学者。ファイアーとともにノーベル生理学・医学賞 (2006年)を受賞。

*6 M.チャルフィー (1947-) アメリカの生物学者。ノーベル化学賞 (2008年)を受賞。

*7 J.メイナードスミス (1920-2004) イギリスの生物学者。数学理論を取り入れて、進化生物学を確立した第一人者。

*8 B.チャールズワース (1945-) イギリスの進化生物学者。

*9 B.ウォーターストン (1943-) アメリカの生物学者。

私の線虫研究

線虫の頭部先端には、感覚神経細胞の先端が集合している感覚器官があり、そこでさまざまな外界刺激をキャッチし、応答行動をとることが知られています(図1)。線虫は、餌である大腸菌の存在下で、一定の温度で飼育された後、餌のない温度勾配上に置かれると、飼育温度付近に移動し、その温度付近にとどまろうとします(図2)。反対に、餌のない状態で飼育された後、餌のない温度勾配上に置かれると、飼育温度へは移動しません。この行動は温度走性とよばれ、行動の可塑性を直接的に観察できる行動として注目され、1975年に報告された当初から、多くの研究者の関心を集めました。しかし、国内外で本格的に温度走性の研究を深める研究者はいませんでした。そこで、1989年、九州大学に赴任した時に、温度走性につい

て研究を開始しました。

線虫で神経生物学を行うメリットは、302個存在する神経細胞のすべての結合様式、すなわち神経細胞の配線図が明らかになっていることです。この利点を生かし、最初に温度走性の神経回路を決める仕事にとりかかりました。幼虫期にレーザーの照射実験を行い、特定の神経細胞だけを殺します。成虫まで成長させてから温度走性が正常か異常かをみることによって、殺した神経細胞が温度走性の神経回路を構成する細胞かどうかを決めていきました。それらの結果から、1995年、温度走性の神経回路を提唱しました(図3)。

1998年、名古屋大学で研究室を立ち上げてからは、温度走性や連合学習を制御する多くの遺伝子が見つかり、それらが神経細胞や神経回路で機能する様子が、どんどん明らか

かになってきました。驚くべき発見の1つは、温度走性の神経回路において、温度を感知するだけの機能しかもたないと考えていたAFD細胞は、感知した温度を記憶していたことです。また、「餌があった」あるいは「餌がなかった」という餌情報は、AFD細胞とは無関係に、AFDと接続しているAIY細胞、そしてAIZ細胞やRIA細胞で認識されることにもわかってきました(図3)。つまり、「餌がある状態」で、ある一定温度で飼育された線虫は、AFDで記憶される温度情報と、3つの介在神経細胞(AIY、AIZ、RIA)で認識される「餌があった」という餌情報との間で連合学習が行われ、記憶している飼育温度を「好き」になり、温度勾配上で、飼育温度へ移動すると考えられます。逆に、「餌がなかった状態」で飼育された線虫は、AFDで記憶される温度情報と、3つの介在神経細胞

(AIY、AIZ、RIA)で認識される「餌がなかった」という餌情報を連合学習するため、飼育温度を「嫌い」になり、温度勾配上で飼育温度へ移動しないことになると考えられます。

研究も軌道に乗ってきた2006年ごろになると、個々の遺伝子の働きを見ているだけでは行動を規定する神経回路の神髄は解読できないのではないかと自問自答する日々が続きました。そして、入力から出力までが明確で、実験的にも理論的にも仮説の検証が可能な温度走性の系は、システムとして神経回路のダイナミックな情報の流れを理解するのに理想的だと気がつきました。タイミングよく、2008年度に「生命システムの動作原理と基盤技術」というシステム生物学を推進する研究費の公募が出たので申請したところ、採択していただきました。

それからは、自分の中に研究のクリアな



ビジョンがあり、研究のゴールが見えるようでした。高度なイメージング技術を企業と共同で開発したり、神経科学の最先端技術である光遺伝学を活用することで、神経回路内での情報の流れやその制御の理解が進みました。実験データをもとにした温度走性の理論モデルの構築なども、理論生物学者との共同研究として行いました。

人間の脳では、記憶は大脳皮質で行われ、学習や感情は大脳基底核で行われます(図4)。非常に興味深いことに、我々の研究によって明らかになってきた線虫の「温度の

好き嫌い」を決めている神経回路をみてみると、人間の脳と見事に一致していることが、最近、わかってきました。すなわち、温度を記憶するAFD細胞は、大脳皮質に対応し、その温度情報と餌の状態を学習している介在神経細胞は、大脳基底核に対応しているのです。一見似ても似つかない線虫と人間ですが、私たちは、線虫の温度走性行動の成り立ちを解読することによって、人間の脳が、どのような仕組みによって心の営みをつくり出しているのかを明らかにできると確信し、日夜、研究を続けています。

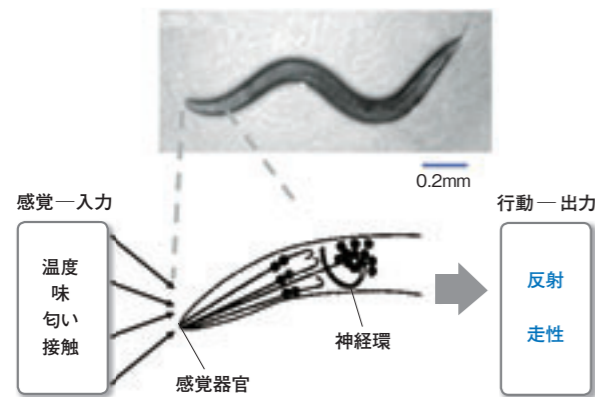


図1 線虫 *C. elegans* の感覚器官と神経細胞

線虫の応部先端には、感覚神経細胞の先端が集合している感覚器官があり、そこで、温度、味、匂い、接触刺激などの外界からの刺激の入力を受けます。それらの外部情報は、神経細胞どうしが多数のシナプスによって接続している神経環で処理され、最終的に、応答行動として出力されます。

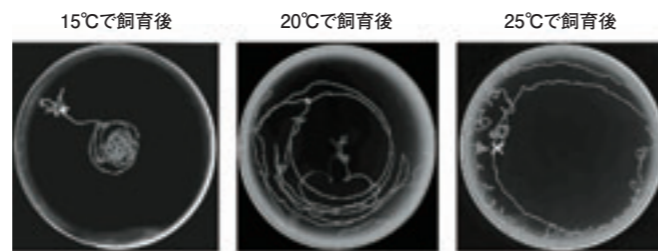


図2 線虫 *C. elegans* の温度走性

線虫は、ある温度において餌(大腸菌)が十分存在する条件で飼育された後、餌がない温度勾配上に置かれた場合、飼育された温度へ向かって移動する。図では、中心が約17°C、縁が約25°Cの放射状温度勾配上に、線虫を置いた場合を示す。15°Cで飼育された個体は、低温である中心の17°Cに移動し、20°Cで飼育された個体は20°C付近に円を描くように移動し、25°Cで飼育された個体は、縁の25°Cに移動する。図には示していないが、逆に、ある温度で飢餓状態を経験した後に温度勾配上に置かれると、その温度へ移動しなくなる。この温度走性行動は、線虫が過去の温度情報を記憶していること、そして記憶している温度記憶と過去の餌情報という2つの情報を連合学習していることを表している。

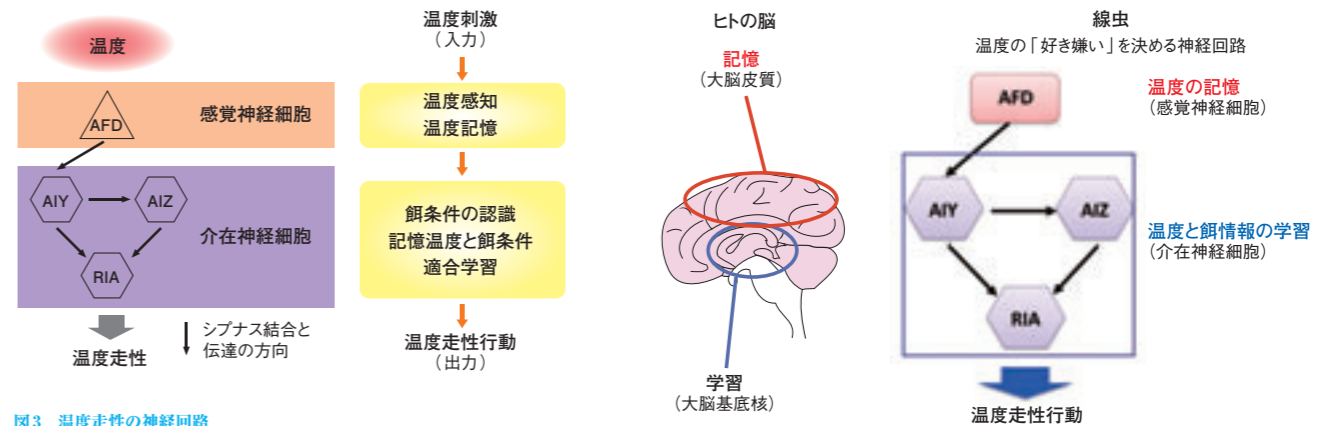
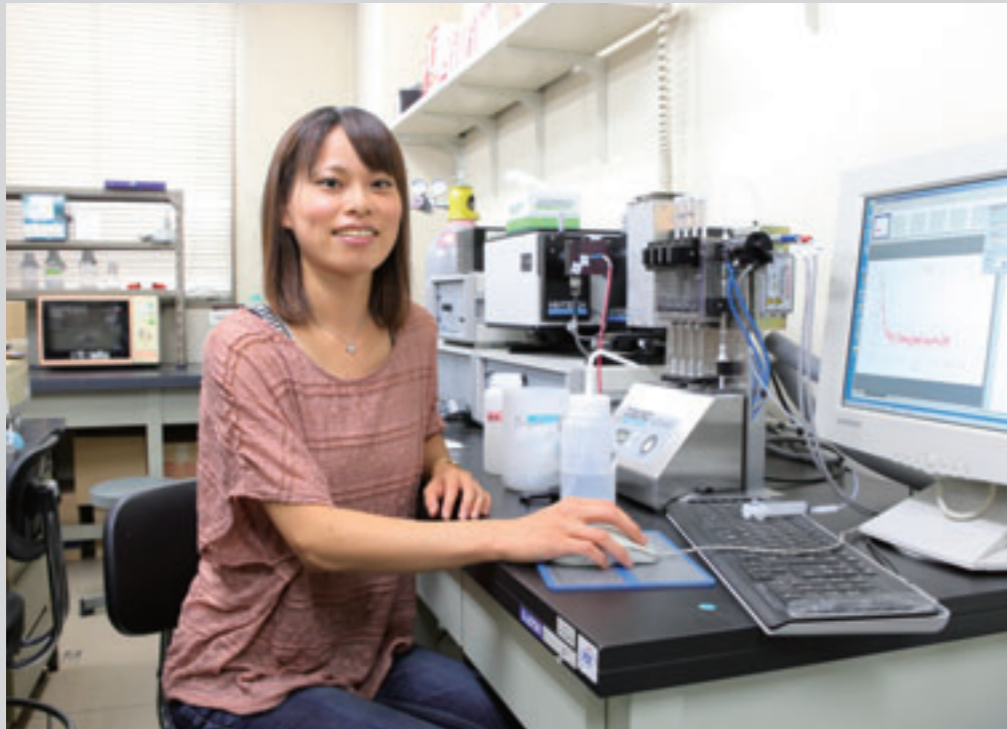


図3 温度走性の神経回路

温度は、主にAFD神経細胞で感知され、記憶されていると考えられる。餌状態(餌があり満腹なのか、餌がなく空腹なのか)は、AFD細胞とは独立に3つの介在神経細胞(AIY、AIZ、RIA)で認識されると考えられる。線虫は、AFD細胞で記憶されている飼育温度の情報と、3つの介在神経細胞(AIY、AIZ、RIA)で認識される餌情報を連合して学習している。

図4 線虫の「好き嫌い」の神経回路と人間の脳構造

人間の脳では、大脳皮質は記憶をにない、大脳基底核は学習や感情をになう。線虫で、温度を記憶するAFD細胞は、人間の脳の大脳皮質に対応し、温度情報と餌情報を連合学習している3つの介在神経細胞は、大脳基底核に対応している。



Masako Koyama

1984年愛知県生まれ。2007年名古屋大学理学部生命理学科卒業。2012年名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了。平成23年度日本学術振興会育志賞受賞。

「運び屋」蛋白質が働く仕組み

小山昌子 生命理学専攻 日本学術振興会特別研究員

構造生物学を志す

蛋白質は、生命が長い進化の過程を経て磨き上げてきた、柔軟にして精巧な「分子機械」であり、生体内においてじつに多様な機能を果たす。この分子機械が「どのような構造をしており、どのような原理で作動するのか」を解明することは、生命現象を理解するための重要な鍵となる。学部生時代の私はこのように考え、多様な生命現象を構造生物学的なアプローチにより研究している、松浦能行准教授の主宰する研究室の門をたたいた。主体性と独創性を育むことを重視する松浦准教授の指導方針に心ひかれたのも進路の決定要因だった。

物質輸送のメカニズム

私がこれまで取り組んできたのは、細胞の核と細胞質の間で行われる「物質輸送」という現象のメカニズム解明である。細胞の核は、ゲノムDNAという生命の設計図を保持しており、まさに生命の司令塔として機能する。この司令塔がうまく機能するためには、司令塔である核と細胞質の間で物質輸送による情報伝達が適切に行われることが必要不可欠である。

とくに着目したのは、CRM1という「運び屋」蛋白質である。CRM1はさまざまな生体分子を、核から細胞質へ一方向に運ぶ。CRM1によって運ばれる「積み荷」蛋白質は、核外輸

送シグナルという共通した「荷札」をもち、CRM1はこの荷札を識別して結合する。CRM1が積み荷を「核から細胞質へ運び出す」ためには、核内においては積み荷を「積み込み」（荷札と結合し）、細胞質に出たら速やかに「荷下ろし」する（荷札と解離する）よう空間的に制御される必要がある（図1）。これがどのような原理によるものであるかは、長年の謎であった。

積み込みと荷下ろしの原理

私はまず、新たに開発した速度論解析系を使って、細胞質に局在するある蛋白質が、CRM1からの積み荷の解離をスピードアップ

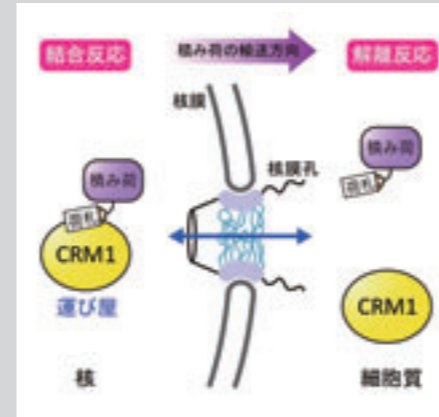


図1 核から細胞質への物質輸送

細胞内では、核と細胞質を隔てる脂質二重膜（核膜）に開いた孔（核膜孔）を通して盛んに物質が輸送されている。「運び屋」蛋白質は核膜孔を通して核内外を自由に出入りすることができるが（運び屋の出入りに方向性はない）、その他の蛋白質は積み荷として運び屋によって運ばれる必要がある。核内では運び屋CRM1と積み荷の結合反応が優勢に起こり、細胞質では解離反応が優勢に起こることによって、積み荷は「核から細胞質へ」一方向に輸送される。

させる「荷下ろし役」として機能することを見出した。このような機能を持った因子があればこそ、輸送というのは効率よく起こるのである。そこで、「荷下ろし役」が結合しているとき（積み荷が解離した直後の状態）のCRM1をターゲットとして構造解析にチャレンジし、2年間半の試行錯誤の末に、その結晶構造を解くことに成功した。そして、CRM1の立体構造を、積み荷が結合している状態と解離している状態と比較することにより、CRM1が運び屋として機能するメカニズムを明らかにした（図2,3）。

CRM1はその分子内部に、積み荷との結合・解離を制御する「スイッチ」をもっていた（図2）。この分子内スイッチには、積み荷の荷札と結合するCRM1表面の溝を、開いた構造にする「オン」と、閉じた構造にする「オフ」の二状態がある。CRM1が核内にいるときにはスイッチが「オン」になって積み荷と結合できるが、細胞質ではスイッチが「オフ」に切り替えられることによって、積み荷がCRM1から解離させられる。スイッチを「オン」に切り替える「積み込み役」蛋白質は核内にも局在し、逆

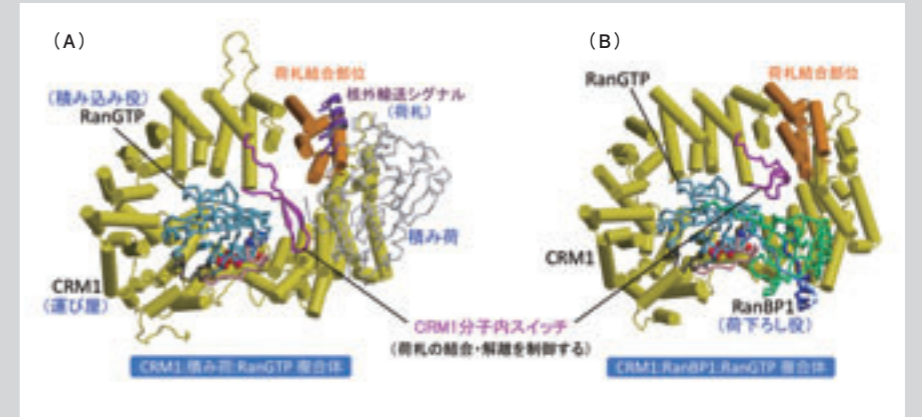


図2 輸送を制御する2種類の蛋白質複合体

(A)：核内で形成される、CRM1、積み荷、積み込み役（RanGTP）の3つの蛋白質からなる複合体。黄色がCRM1（マゼンタ色がスイッチ、オレンジ色が荷札結合部位）、紫色が積み荷の荷札（灰色は積み荷の他の部分）、水色が積み込み役。（Monecke, T. et al., 2009, Science, 324, 1087-1091）
(B)：細胞質で形成されるCRM1、荷下ろし役（RanBP1）、積み込み役（RanGTP）の3つの蛋白質からなる複合体。緑色が荷下ろし役。（Koyama, M. & Matsuura, Y., 2010, EMBO J., 29, 2002-2013）

に「オフ」に切り替える「荷下ろし役」蛋白質は細胞質にのみ局在するため、CRM1は核から細胞質へ、一方向に積み荷を運ぶことができるのだ（図3）。私はこの研究により、蛋白質複合体の構造を解くと、構造が解けるまでまったく予想できなかった新たな仕組みが見えてくる、という構造生物学の醍醐味を堪能することができた。しかし、運び屋CRM1への積み荷の積み込みと荷下ろしの原理については大きく理解が進

んだものの、CRM1の通り道である核膜孔が、通るべき分子のみを迅速に通過させる仕組みについては、依然として未解明な部分が多い。この仕組みを解明するためには、核膜孔という超巨大な蛋白質複合体の構造研究を推進する必要がある。そのためには新たな技術開発が不可欠となるだろう。研究から得られる感動を糧にして、今後もこのような難問に挑んでいきたい。

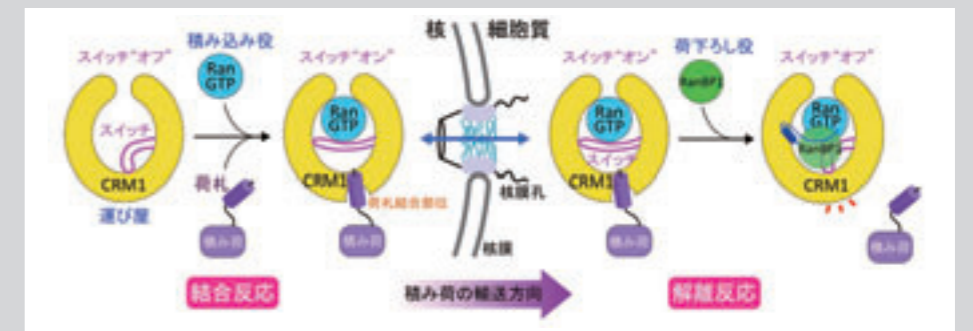


図3 輸送が一方向になる原理

「積み込み役」が局在する核内では、CRM1の分子内スイッチが「オン」に安定化されて、CRM1表面にある荷札結合部位の溝が開き、積み荷の荷札が結合できる（左）。逆に、「荷下ろし役」が局在する細胞質では、スイッチが「オフ」に切り替えられて、荷札結合部位の溝が閉じ、荷札がCRM1から解離させられる（右）。



Takeo Ito

2003年京都大学理学研究科地球惑星科学専攻博士課程修了、2003年日本学術振興会特別研究員 (PD)、2004年から現職。2009年～2011年、日本学術振興会海外特別研究員 (カリフォルニア工科大学)、専門は地震測地学。

海洋潮汐から地球の構造を診る

伊藤武男 附属地震火山研究センター助教

天体間の引力による地球の変形

潮汐という言葉はだれでも聞いたことがあるだろう。一般に「潮汐」という言葉は海面が1日に2回上下する潮の満ち引きのことである。これは海洋潮汐という現象であり、この海洋潮汐を引き起こす力を潮汐力とよんでいる。潮汐力は月などの地球外天体と地球と

の位置関係で決まる引力に起因するため、正確に知ることができるという特徴がある。

一方、潮汐力は固体地球も変形させ、建物も1日2回の周期で約1m動いている。20世紀の初頭から、多くの研究者は潮汐力による地球の変形を測定し、地球の大局的な構造を明らかにして来た。しかしながら、

潮汐力に対する固体地球の変形は1万km以上の空間スケールがあり、数百km程度の空間スケールの地球内部構造を知るには、地震波トモグラフィー*1の登場を待つしかなかった。

海洋潮汐による地殻の変形を探る

潮汐力によって生じる海洋潮汐は大量の海水の移動を伴う。図1は海洋潮汐のM2分潮*2の空間分布を示しており、海水の移動に伴って海面が1m近く変動する場所もあることがわかる。ただし、図1はある1つの分潮だけを示しており、実際の海面の変動は多くの分潮を重ねあわせたものである。たとえば、世界で最も大きな大潮の時の平均潮位差はカナダ南東部のファンデー湾で15mにも達する。この海水の移動は海底に荷重をかけるため、地殻を荷重変形させる。これは板に荷重かけたときに、板が変形するという単純な実験を地球で行うことに相当し、変形量は固い板よりも柔らかい板の方が大きい。この板を曲げる力に相当する海水荷重は海洋潮汐モデルにより正確に予測できるため、高い精度で地殻の変形を測定し解析すれば、上部マントルの基本的性質である弾性定数や密度がわかる。

この上部マントルの基本的性質を知ること

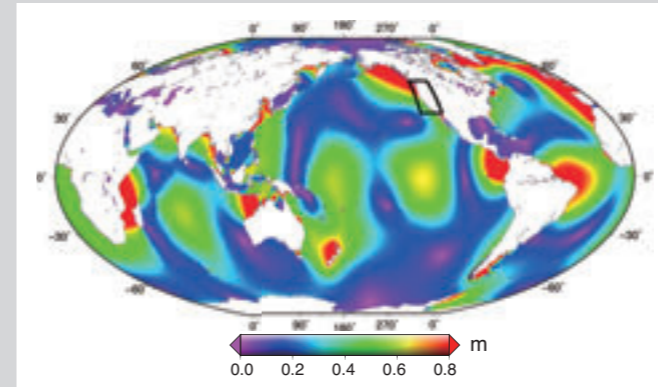


図1 M2分潮の海洋潮汐の振幅分布

衛星データと潮汐モデルとのデータ同化により推定した海洋潮汐モデル (FES2004) による結果。四角は研究対象領域を示す。ただし、実際の海面の変動は週・月・年などのさまざまな周期の分潮が重ねあわさるため、より複雑な振幅分布になる。

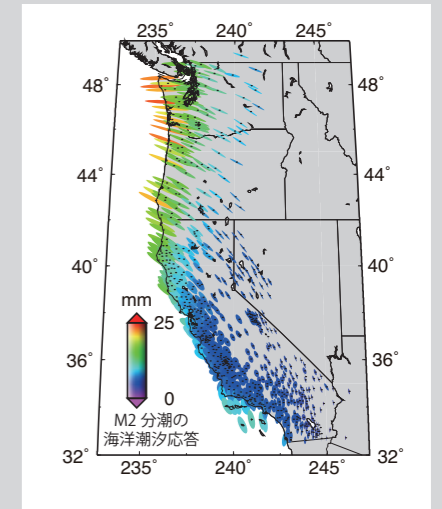


図2 M2分潮の海洋潮汐によって生じる変位分布
北アメリカ西海岸でのGPS観測によって得た海洋潮汐応答の変位分布。日月形の形は変形パターンを示す。

はマントル対流やテクトニックプレートの成長など地球の本質的な姿を理解する上で重要な情報であり、いまでも議論の対象である。これまでの海洋潮汐による地殻変形の研究は重力計やひずみ計を用いており、観測点の空間分布に限界があった。我々はGPSを使うことで、より多くのデータを大量に処理することができるようになり、飛躍的に精度をあげることに成功した。研究対象領域として北アメリカ大陸の西海岸地域に設置している約700カ所のGPS観測点で観測した1年間分のデータを解析し、海洋潮汐応答の時空間分布を得た (図2)。我々はこの解析を15の異なる周波数帯 (分潮) で解析し、海洋潮汐による地殻の変形を0.1mm程度の精度で測定することに成功した。

地震波に頼らない地下構造の推定

原理的に地震波から密度構造を直接推定することはできない。しかし、海洋潮汐による荷重変形は水平成層構造を成す地殻に水平方向の密度差を生じさせ、その力学的不安定により生じる浮力が荷重変形の復元力の一部として働く。このことから、荷重変形の解析は弾性定数だけでなく密度も推定することができる。しかし、地下構造の荷重変形への影響は極めて小さいため、全地球の海洋潮汐による荷重変形を約2万kmから100mのさまざまな空間波長で、0.1mmよりも高い精度で予測する必要がある。そのため、推定には600台の計算機を約2日間使って計算し、その結果、プレートの直下の約80kmから220kmの深さに低密度層が存在するこ

とが明らかになった (図3Bの灰色の部分)。また、地震波トモグラフィーや減衰構造*3と比較すると低密度層がまわりよりも約300℃高温であることがわかった。つまり、プレート直下がほかの領域よりも熱くて柔らかくなっており、プレート運動をするために必要な潤滑油の役割をしていること意味している。

このように、我々が開発した手法は地震が発生しない地域でも地下構造の推定ができることから応用範囲は広く、また、プレートテクトニクスの主な原動力は密度差によって生じる浮力であることから、密度構造を調べることはプレートテクトニクス、地殻の成長過程や大地形の生成要因などの理解が深まると期待できる。

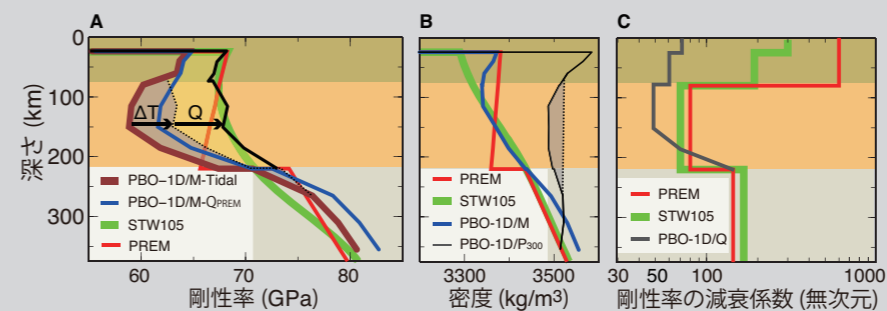


図3 海洋潮汐荷重による地殻変形解析により推定した構造分布

PBO-1Dモデルは我々が推定した構造。STW105は全地球モデル。A:剛性率を示す。温度の補正が灰色の領域、減衰(Q)の補正が太い黒線。B:密度を示す。密度の圧力補正後が細い黒線。C:剛性率の減衰を示す。

*1 地震波トモグラフィー
地震波のP波やS波の伝搬速度を視覚化する方法であり、現在では最も一般的な地下構造を可視化する手法として定着している。

*2 M2分潮
潮汐は決まった周期をもっており、それぞれを分潮とよんでいる。とくに、M2分潮は12時間25分の周期で、起源を月とする最も振幅が大きい分潮成分である。

*3 減衰構造
減衰構造は減衰係数(Q)を用いて、減衰の程度を表現する。たとえば、あるQ値をもつ媒質の中を伝搬する波動がQ回振動すると振幅ははじめの約23分の1になる。よって、ゼロに近いQ値は強い減衰を意味する。

ニュートリノ速度の測定実験とその顛末

中村光廣 現象解析研究センター准教授



Mitsubiro Nakamura

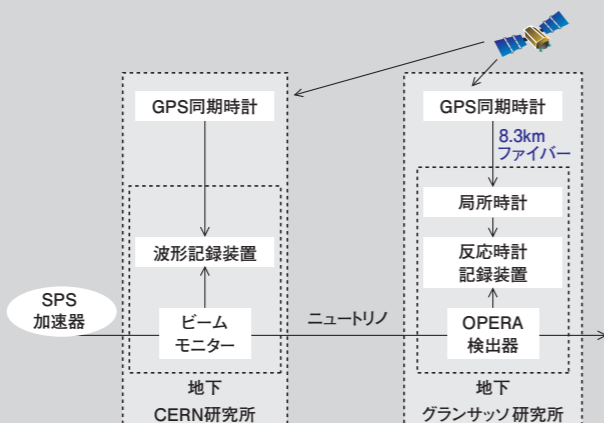
1957年生まれ。1980年信州大学理学部物理学卒業、1985年名古屋大学大学院理学研究科博士課程単位取得退学。名古屋大学大学院理学研究科助手、助教授、准教授を経て2010年より現職。2012年3月～6月 OPERA実験の実験代表。前代表辞任後、発覚した問題点の検証にあたり、5月の最終検証実験、6月の国際会議での報告、CERNでの経過最終報告を経て、事態を収拾。

実験の概要と経緯

世界中を騒がせたニュートリノの光速越えの実験結果は、その原因が実験装置の不備にあったことがわかり撤回、その発表が拙速すぎたとの誹りを免れない事態となった。本稿では、この騒動の経緯を当事者として反省の意も含めてまとめるとともに、実験の検証過程を省みて今後の教訓としたい。

ニュートリノは、スイスジュネーブ郊外のCERN研究所で生成後、730km離れたイタリア・グランサッソ研究所 (LNGS) のOPERA検出器まで直進してくる。この飛行の距離と時間を正確に測定することが速度測定の要である。OPERAにとって速度測定は実験の副産物に過ぎないが、ニュートリノの速度について実験室レベルでの正確な測定がな

かったことから、その測定に意味ありとして2003年から準備を行い、2007～2008年に高精度のGPS (Global Positioning System) システムを設置、730km離れた両研究所にある原子時計の時刻を1ナノ秒 (ns) の精度



で合わせることに成功した。また飛行距離の測定精度も、GPSと測量によって20cm以下にすることができ、世界最高精度での速度測定が可能となった (図1)。

実験では、装置の応答特性や、ケーブルによる信号の遅れを正確に把握する必要があったが、それらの測定を2006年から2008年にかけて重点的に行い、データの取得を2008年に開始、2011年3月、速度解析のふたを開け、ニュートリノが光より早く到着しているという結果を得た。研究グループでは、検証のための作業部会を立ち上げ、約半年の第一次の検証活動の後、同年9月に公表した。

2つの問題点

しかしながらビーム停止後の2011年12月から開始した第二次の検証活動の中で2つの問題点が明らかとなった。1つはLNGSで地上のGPS信号を地下に伝える光ファイバーの遅延時間が、基準とする測定に比べ74ns長かったこと。もう1つは局所時計のリセットが、予定の1ミリ秒 (ms) ごとではなく600msごとになっており、結果時計の誤差が積分され15ns程度になっていたことである。

図1 ニュートリノ速度の測定実験の概要
ニュートリノを発生させる陽子ビームの通過をCERNの地下に設置したビームモニターで検出し波形記録装置で記録する。またLNGSの地下にあるOPERA検出器でニュートリノ反応を検出し反応時刻記録装置で記録する。精密な測定のためには各々の装置の応答性、接続ケーブルの遅延時間などを正確に押さえる必要がある。図3に主要なものとその測定値をリストする。

前者に関しては、光ファイバーのコネクターが正確な位置で固定されておらず、光ファイバーの端面と光検出器 (PD) の間の距離が広がったことが原因であることがわかった。端面とPDの間の距離が変わるとPDが受ける光量が変化し、コンデンサーと見なせるPDへの充電率が変化する。ある閾値をもって信号到来とデジタル的に判断するので、結果信号が遅延する (図2)。第一次検証活動の中では、この部分は2006年度、2007年度の異なる方法での複数の測定結果と「信号が来ている」ことを根拠にして問題なしと結論したが、これは電線の場合の論理であって、光ファイバーの場合は信号が来ているからといって遅延に変化

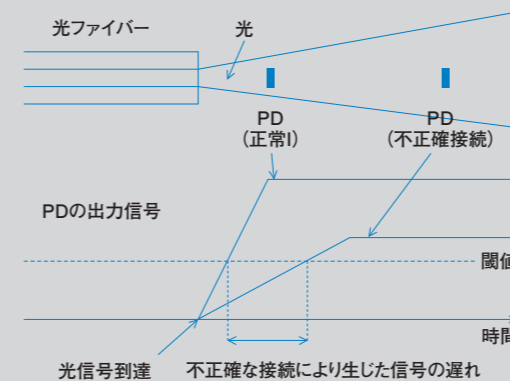


図2 光ファイバー端面と光検出器 (PD) の距離変化による遅延時間の発生メカニズム

光ファイバー端面とPDの間の距離が変わるとPDが受ける光量が変化し、コンデンサーと見なせるPDへの充電率が変化する。ある閾値をもって信号到来とデジタル的に判断するので、結果信号が遅延する。

なしとはいえないのが事実であった。電線を使い慣れてきた我々にとって完全な落とし穴であった。この不正確な接続がいつ起こったかを検証するため、同じくLNGSで実験中のLVD実験の助けを借り、OPERA LVDをつらぬく宇宙線のタイミングの変化をみたところ2008年の中頃に起こったことがわかった。この頃に誰かがコネクターを外し不正確な位置での再接続を行ったと思われる。

後者に関しては、第一次検証の中で、日本グループが厳しく指摘した箇所であったが、欧州の担当者の思い込みもあり、1msのリセットゆえに問題なしとされ、我々もこの「説明」で納得してしまっていた (図3)。

愚直さこそ原点

両者に共通することは、いずれも「論理」あるいは「説明」で納得をしてしまったところに間違いがあったことである。実験屋である限りは測定できる場所は愚直に測定をすることが重要であることを改めて思い知らされることとなった。

日本グループとしての反省は、課せられた検証の役割を十分に果たせなかったことにあり、この点に関して深く反省するとともに、支援いただいている皆さんの信頼を裏切ったことに対してお詫びを申し上げる次第である。現在本来の目的であるニュートリノ振動の研究で名誉回復を図るべく、研究グループをあげて反応解析に邁進しているところである。

対象	測定値 [ns]	主測定・校正 2006-2008	第一次検証 2011/3-8	第二次検証 2011/12-2012/2	バンチビーム実験 2012
CERN GPS 同期信号の遅延時間	10077 ± 2	・原子時計位相差 ・二方向遅延測定	再測定		実時間測定
波形記録装置の応答性	26 ± 1	オシロスコープ	再測定		
ビームモニターの応答性と信号遅延	580 ± 5	・原子時計位相差	LHCビームによる独立実験	再測定	
CERN-LNGS GPS時計合わせ	2.3 ± 1.7	・スイスの国立機関による校正	ドイツの国立機関の独立測定		
LNGS GPS 同期信号の遅延 (8.3kmファイバー)	40996 ± 1	・原子時計位相差 ・二方向遅延測定	論理	再測定	実時間測定
OPERA局所時計信号遅延リセット	4262.9 ± 1	・原子時計位相差 ・二方向遅延測定 ・設定	再測定 論理	再測定 測定	実時間測定
OPERA反応時刻記録装置応答性	24.5 ± 1	オシロスコープテスト実験	実験室で同型の検出器測定	本物の検出器で測定	
OPERA検出器の応答性 光電子増倍管ほか シンチレーター反応特性	50.2 ± 2.3 9.4 ± 3	・ピコ秒レーザー ・励起パルスのオシロスコープ観察 ・シミュレーション	実験室で同型の検出器測定	本物の検出器で測定	

図3 装置の応答特性ならびに遅延時間の測定値

間違いは第二次検証の赤と青で示したところで発見された。最終検証は2012年5月10～24日に速度測定に適したバンチビームを用いて行い、光との到着時間の差にして、 -1.6 ± 1.1 (統計誤差) $+6.1 - 3.7$ (系統誤差) nsと誤差の範囲で光速と一致する結果を得た。

同窓生から

神から授かった2年間に導かれた音楽への道

指揮者
内藤 彰 (Akira Naito)

私の現在の肩書きは「一般社団法人東京ニューシティ管弦楽団音楽監督」、つまりプロ楽団の指揮者である。しかし私も昔は化学者を目指し理学部に入学した。もう半世紀近くも前の話である。振り返ると、これまでの道程は“運命の悪戯”が大きく関係していた気がする。

私は団塊の世代一期生である。同期が激増したため(中学は1学年30クラス1600名であった)、昭和43年、学部進級時に一生の転機となる事件が思わぬかたちでやってきた。理学部の定員を増員したにもかかわらず、学部側は実験設備の拡充が間に合わないとして増員分に当たる化学科志願者に2年後期の必修授業の単位を与えないことで人数調整を図ったのである。私は授業で数分の遅刻が半年に4回、他に授業中の私語を1度注意された者、半年で2回“も”欠席した者等、ただそれだけの理由で「授業態度が学部生としてふさわしくない」とされた。それからの私は音楽三昧の1年であった。この1年がなければ音楽の道へ進むことなどあり得なかったであろう。

学部進学後は「看守の目を盗み脱獄を図る囚人のごとく」先生方の目を盗み音楽活動を続けていたが、なんと実験の出席日数不足(数え違い?)により、またもう1年となった。その間、名大交響楽団で学生指揮を務め、東京へ指揮のレッスンに通い、各地に武者修行に行く間に大御所の先生方の目に留まり、その方々の勧めもあり音楽の道に進む決心が固まっていった。万が一実験の単位が取れていたらと考えると、この余分な2年間は「神からの授かりもの」で

あったのかもしれない。

その後紆余曲折あり、小澤征爾氏他、多数の指揮者を育てられた齊藤秀雄先生のお誘いで桐朋学園大学指揮科の研究科(現大学院)に進学した。修了後、地方オーケストラの専属指揮者となり、海外で指揮する機会にも恵まれた。40歳近くで現在の楽団を組織し、近年ようやく文化庁からの助成金や公演の依頼もいただけるようになった。

一方では、世界中の楽団が見過してきた“名曲の中に潜む楽譜の誤り”や、“作曲家の意図に反する演奏慣習”に対し、根拠を明確に示した上で世界に先駆けて修正・発信していく仕事にも、評価をいただけるようになった。たとえば、歌劇「蝶々夫人」では、今までお寺の鐘が世界中で「ジャン(中国銅鑼の音)」と鳴っていた。信じ難い話であるが、私が大枚をはたき作成した鐘を「ゴーン」と鳴らすまでは誰もその誤りに気付いていなかったのである。その鐘は海を渡り、イタリアの劇場でも使われ、新聞紙上を賑わせた。

また楽譜に無数の誤りがあったドボルザークの「新世界より」他、多くの名曲に私のメスが入り、近々出版される。やがて世界中で正しく一新された名曲が聴かれるようになるだろう。

人は私の一連の仕事を見て、「やはり理系系だね、思考過程が」と言う。理学部学生であった私に使われた高額な国費が、このように間接的にも生かされているとするならば、税金の無駄使いではなかったかもと胸をなでおろしている昨今である。



キャンパス通信

市民と大学をつなぐために

物理学科3年
望月沙也可 (Sayaka Mochizuki)

名古屋大学ミュージアム活性化プロジェクトNUMAP(ニューマップ)は、本学の研究内容やその成果を市民にわかりやすく伝え、親しみをもってもらうことを目的とした社会貢献活動を展開する学生団体である。現在、文理双方の学部・大学院生約10人が所属している。2007年の設立以降「キャンパスにミュージアム力を」というスローガンを掲げ、名古屋大学博物館ガイドツアーや天文現象の観望会、サイエンスカフェなどさまざまなイベントを実施してきた。

とくに考古学・赤外線などメンバーの専門分野を生かした体験型のイベントに注力しており、学外での出展(JST主催「サイエンスアゴラ」)も行っている。今後はキャンパスを開かれた博物館として見立てる「キャンパスのミュージアム化」にも取り組む予定である。

もう1つの活動の柱は、自主ゼミや博物館見学、活動の評価に関する研究活動といったアカデミックな活動である。自主ゼミでは実践的なスキル・知識の他、博物館学や科学コミュニケーションなど幅広いテーマを扱い、社会における研究機関の役割を考える機会としている。

イベントで参加者の真剣な眼差しや笑顔に出会う度、伝える楽しさと同時に大学は研究成果の還元による社会貢献を求められていると強く感じる。NUMAPは名古屋大学と市民をつなぐ存在として、今後もさまざまな活動を展開していく。(NUMAP代表)



青色LEDの原理と本学との関係について説明する筆者。2011年オープンキャンパスにて。

書籍紹介

「海底ごりごり地球史発掘」

地球環境科学専攻教授
ウォリス・サイモン (Simon Wallis)

科学者はどのような研究生活を送っているのか、新しい発見に至るまでどのような作業を行い、頭の中で何を考えているのか。これらの疑問について、科学者を目指す学生をはじめ、基礎研究を支える納税者など関心のある方が多いであろう。その答えの一部が本書の中にある。

本書は、古生物学者である著者が参加した海底掘削プロジェクトの目的・背景、また船の上での著者の経験についてわかりやすく説明する。著者は船上の生活についての面白いエピソードと海底掘削に関わる研究テーマ(とりわけ地球環境変動履歴の解明など)をたくみに編み込みながら解説してくれる。近年の海底掘削研究において注目を集め、年代そして古環境の指標として非常に有用な微化石については特に詳しく解説されている。

船を航海させ、長時間海底を掘削することは莫大な研究費がかかり、国際的な協力が必要な場合が多い。その国際的な研究者のコミュニティーのなかで著者はどのような働きをしたのかについて書かれた箇所は留学を考えている学生にとって大いに参考になるであろう。

海洋地球科学の基礎について学び、学術海底掘削プロジェクトの仕組みとその意義について興味のある人には是非お勧めしたい一冊。表紙の宇宙飛行士・毛利衛氏による推薦文にあるように、「研究のリアルな描写が非常に面白い」ことが本書の醍醐味だ。



「海底ごりごり地球史発掘」
須藤 斎 (Itsuki Sato) 著
PHP研究所 / 2011年11月発行
880円(税別)