

## 研究会・学会スケジュール

### 第17回スペース重力波アンテナDECIGOワークショップ

開催日：2018年11月1日(木)・2日(金)  
開催場所：名古屋大学理学南館セミナー室  
主催：DECIGOワーキンググループ  
問い合わせ：川村静児 理学研究科 教授  
kawamura@u.phys.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2920

### 公開シンポジウム “2020年代の海洋生物学の展望” 並びに平成30年度日本動物学会中部支部大会

開催日：2018年12月8日(土)・9日(日)  
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール  
主催：名古屋大学大学院理学研究科附属臨海実験所  
問い合わせ：田中実 理学研究科 教授  
mtanaka@bio.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2979

### 岡崎フラグメント-不連続DNA複製モデル 50周年記念国際シンポジウム OKAZAKI Fragment Memorial Symposium: Celebrating the 50th anniversary of the discontinuous DNA replication model

開催日：2018年12月17日(月)・18日(火)  
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール  
主催：名古屋大学大学院理学研究科  
問い合わせ：本間道夫 理学研究科 教授  
okazakifragment@bunshi4.bio.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2991

### 第24回名古屋メダルセミナー

The 24th Nagoya Medal of Organic Chemistry

開催日：2019年2月28日(木)  
開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館  
主催：名古屋メダルセミナー組織委員会  
共催：名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所  
問い合わせ：伊丹健一郎 トランスフォーマティブ生命分子研究所 教授  
nagoya-medal@itbm.nagoya-u.ac.jp / 052-788-6098

### 変成岩などシンポジウム 2019

開催日：2019年3月17日(日)～19日(火)  
開催場所：ホテル竹島(愛知県)  
主催：名古屋大学理学部地球惑星科学科岩石鉱物学研究室  
名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究部  
問い合わせ：額綱佑衣 環境学研究所 助教  
kouketsu.yui@nagoya-u.jp / 052-789-2520

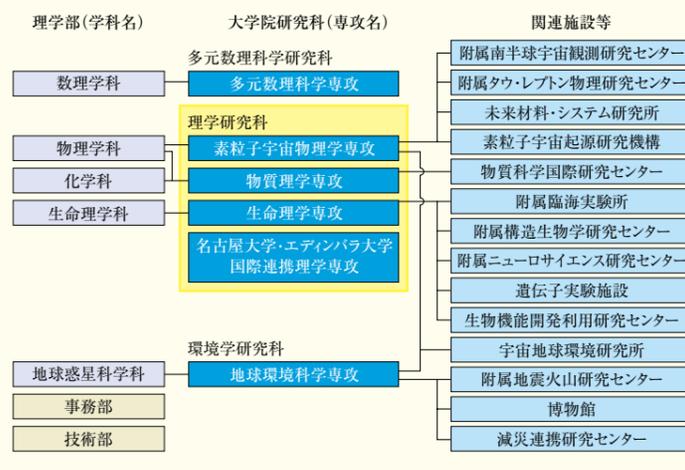
### 下村脩博士ノーベル賞受賞10周年記念国際シンポジウム 「GFP 発見の展開と展望」

Nobel Prize 10th Anniversary Symposium :Expansion and Expectation since  
“Discovery and Development of GFP”

開催日：2019年3月18日(月)・19日(火)  
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール  
主催：下村脩 特別教授  
共催：名古屋大学大学院理学研究科附属ニューロサイエンス研究センター  
問い合わせ：小橋常彦 理学研究科 特任講師  
kohashi-t@bio.nagoya-u.ac.jp / 052-747-6346

## 組織図

理学部・理学研究科・多元数理科学研究科・環境学研究所(地球環境科学専攻)



## 編集だより

一説では紀元前300年代のアリストテレスやその後継者テオフラストスが「植物学」の創始者とのこと。彼らが生きた古代ギリシャの時代より、植物研究は自然哲学・理学の観点と、薬学・農学の観点の双方から行われていたという。それから2300年後の現代において、植物研究に対する期待はかつてないほどに高まっている。世界中の植物学者が会する国際植物学会議の開催規模が昨年、過去最大となったことから、それは明らかである。

今号の特集では、植物がその進化の過程で独自に獲得した、生きるための巧みな機構を取り上げた。先日の懇話会は大勢の参加者を集め大盛況であった。その後のサイエンスカフェでは、講演者両氏と高校生の自由なディスカッションが行われた。話題は懇話会の講演内容や最先端の研究、そして研究者になる方法や人生哲学等多岐にわたり、終了時刻を大きく延長した。彼ら彼女らが、人類の歴史を通じて続く植物研究の次代の担い手になるのだと思い、感慨深かった。(白石洋一)

## 表紙説明

植物細胞には、動物細胞にはない葉緑体、液胞、細胞壁がある。シンプルな構造をもつ植物のからだだが、情報伝達やかたちを制御するために、精緻なシステムを備えている。その秘密に分け入る。



理 *philosophia* — No.35  
autumn-winter 2018  
2018年10月30日発行

広報委員 杉山 直(研究科長)  
阿波賀邦夫(副研究科長・評議員)  
大隅圭太(副研究科長)  
柳田伸太郎(数理学科)  
飯嶋 徹(物理学科)※委員長  
川村静児(物理学科)  
谷口博基(物理学科)  
多喜正泰(化学科)  
杉山 伸(生命理学科)  
白石洋一(生命理学科)  
城野信一(地球惑星科学科)  
齋藤勝行(事務長)

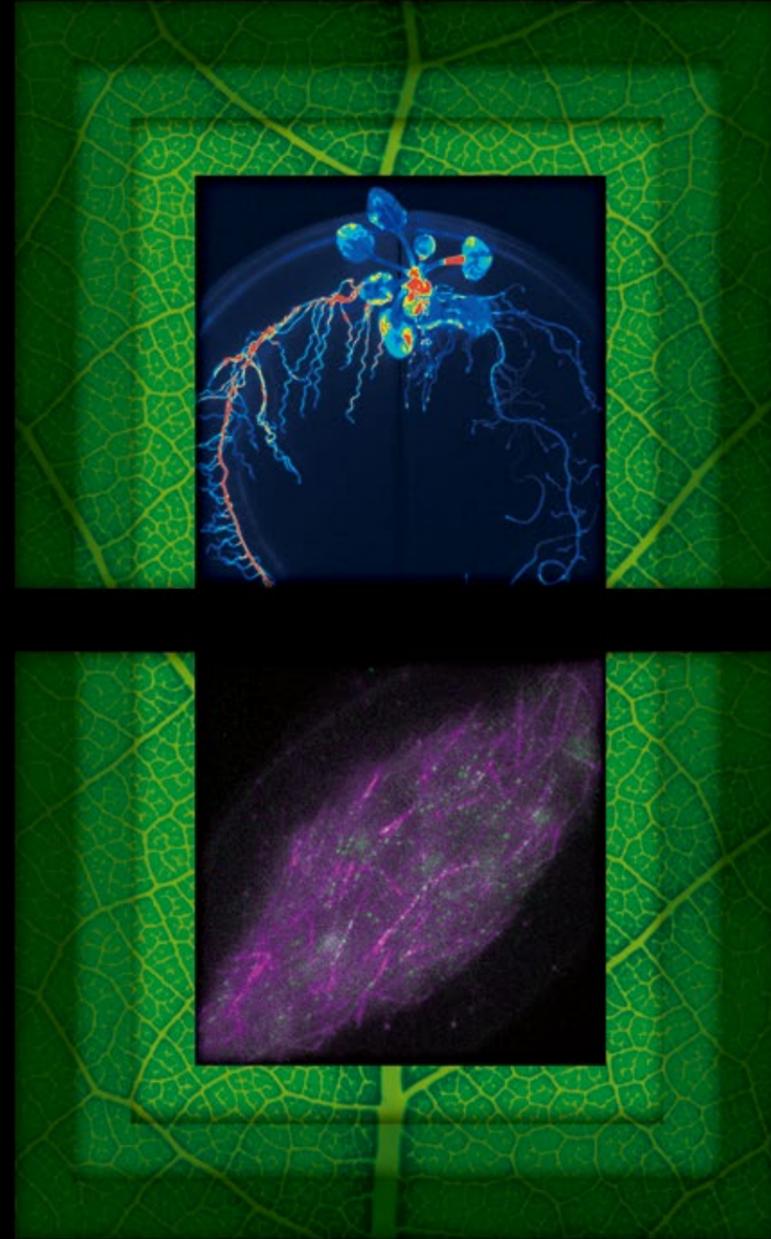
編集発行 名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会  
〒464-8602 名古屋市中千種区不老町

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ご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2019年4月頃発行の予定です。

制作 株式会社電通  
編集協力 株式会社エスケイワード  
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/kouhou/



## 特集 「植物たちの巧妙な生き方」

- 04 — 化学で植物の知恵を理解する ◇ 松林嘉克
- 08 — 植物のかたちをつくり出す細胞の骨格 ◇ 五島剛太
- 02 — 時を語るもの 〈鈴木和博博士〉 ◇ 榎並正樹
- 03 — 理のエッセイ ◇ 寺川寿子
- 12 — 理の先端をいく ◇ 川村静児 / 荏司長三 / 松尾信一郎
- 18 — 理学部交差点

## 鈴木和博博士 — 新年代測定法確立への道のり

鈴木和博博士は、地質学、地球化学、そして考古学などの広い分野で重要な業績を数多く残された。それは、日本地質学会と日本地球化学会から学会賞を受賞されたことが物語っている。

しかし、その研究の基礎には、つねに地質学的発想があった。鈴木博士は、鉱物が記録している年代情報を読み解くための、高い空間分解能をもつ年代測定法の確立が、地質学にとって不可欠であると考えた。一連の研究は、1983年のEPMA<sup>\*1</sup>改造着手に始まり、度重なる改良を経て、

同位体組成分析を行うことなく年代値を求めるCHIME<sup>\*2</sup>として結実した。その野心的な試みは、当初は理解されず投稿原稿のリジェクトが繰り返された。そして、最初の論文の公表は1991年であった。それから四半世紀が経ち、現在ではCHIMEは広く年代測定法として利用されている。

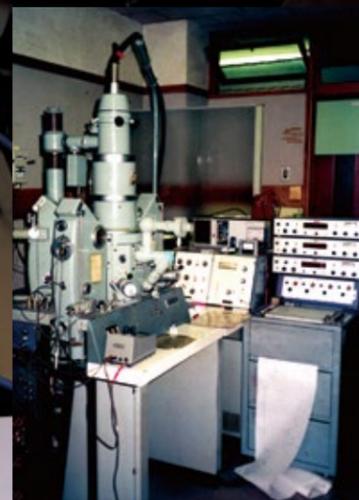
CHIMEは、地質学から出発し「他人がやらないことをやる」をモットーとしていた鈴木博士だからこそ歩むことができた、長い旅路の先にあったゴールの1つであった。(榎並正樹 宇宙地球環境研究所教授)



鈴木和博 (1947-2016)  
元名古屋大学教授  
瑞宝中綬章受賞(2016)

\*1 EPMA  
電子線を用いた微小領域非破壊組成分析装置

\*2 CHIME  
EPMAを用いた高空間分解能地質年代測定法(本誌6号P.16 - 17参照)



◇写真の説明  
写真は、亡くなる4日前まで記録していたログノート。CHIME2号機の机上に置かれていた。2号機の総運転時間は5万7402時間であった。上の写真は、1990年代中頃まで使用されていたCHIME1号機。このEPMAは、1972年頃に理学部地球科学教室に導入され、当初は鉱物などの化学組成分析装置として汎用的に使用されていた。鈴木博士は、分析精度や感度の向上と電子線照射強度の安定化などを目指し、真空管でつくられていた制御・測定回路の大部分をトランジスタでつくり直した。その結果、10~100ppm単位の微量定量分析が可能となった。

## モール円のご縁

寺川寿子 附属地震火山研究センター准教授

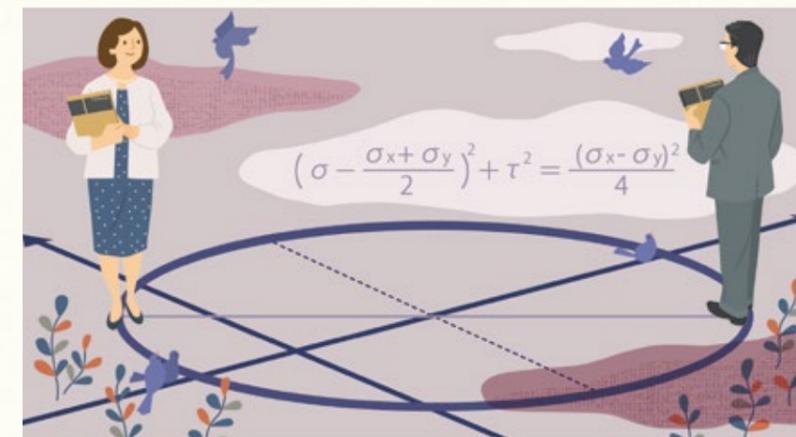


Illustration: Mari Kaneko

J.C. Jaegerの『弾性・破壊・流動論』を手にとったのは、もう20年以上も昔のことになる。当時の私は民間のシンクタンクで働いており、有限要素法という数値計算法を用いて構造物等の変形解析を担当していた。構造物の強度や破壊を評価するためには、物体に働く応力の情報は欠かせない。学部・大学院修士課程で数学(代数学)を専攻して入社した私にとっては、全くなじみのない分野が仕事になり、新しい勉強を余儀なくされて『連続体の力学』などの本を漁った。どの本にも「モール円」が出てきた。

応力は、実はなかなか奥が深い物理量である。「ある応力状態下で面の向きを変化させると、そこに働く力が変化する」といわれて、すぐに理解できる人は多くないだろう。私は、不思議な感じがしたのを覚えている。これを上手に教えてくれるのがモール円である。大抵の本では、おそらくその複雑さの故に、2次元のモール円の説明で終わっている。どうしても3次元の応力状態を知る必要が生じ、たどり着いたのが『弾性・破壊・流動論』であった。

その後、地震学を志した私は、会社を辞めて大学院生に戻り、時を経て名古屋大学に就職することができた。3次元のモール円は、断層の応力状態を知ることや、断層強度に関係する断層帯内の間隙流体圧レベルを推定するのに大変役に立つ。私が手にした前出の本は飯田汲事先生(1909~2000)の訳本であったが、その飯田先生が名古屋大学理学部の教授として、私の現職場、附属地震火山研究センターの前身である犬山地震変動観測所初代所長(1966~1972)を務めていらしたとは。名大着任後しばらくしてその事実を知ったとき、不思議なご縁を感じた。お会いすることはかなわなかったが、研究者の仕事は未来とつながりをもつことができ、いいものだなと思う。

Toshiko Terakawa

東京都出身。2006年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、博士(理学)取得。東京大学産学官連携研究員、ボン大学シュタインマン研究所研究員、名古屋大学大学院環境学研究所助教、講師を経て、2018年から現職。第38回猿橋賞受賞。

植物のからだの構造は一見シンプルだが、ホルモンを介した情報伝達や、細胞内の骨格によりかたちを制御する仕組みなど、きわめて精緻な機構を備えている。自然界でしたたかに生きる植物の巧妙な知恵を訪ねる旅へ、2人の気鋭の研究者がいざなう。

## 化学で植物の知恵を理解する

松林嘉克 生命理学専攻教授



Yoshikatsu Matsubayashi

1971年三重県生まれ。1997年名古屋大学大学院生命農学研究科博士課程修了。同助手、助教授(准教授)を経て、2011年より基礎生物学研究所教授。2014年より現職。専門は、植物分子生理学、生理活性物質化学。

### 植物を動かす分子たち

本日は「化学で植物の知恵を理解する」というタイトルで話します。

植物の研究をやっていると、なぜ植物の研究をしているんですかと、よく聞かれます。そういったとき、いつも「植物が好きだから」と答えます。祖母は園芸が好きで、家には園芸の本がたくさん置いてあり、私は小学校の頃すごくハマって、よく植物を育てるようになりました。中でも一時期、大輪の菊にすごく魅了されて、『大輪菊づくり』という本を買ってもらいましたが、この中に「福助

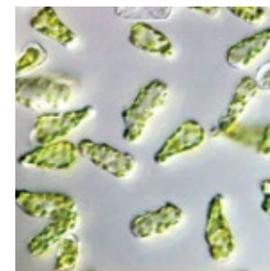
づくり」が書いてありました。菊は、本当は大きく育つ植物なのですが、福助づくりは40cm以下になるように小さくつくります。福助づくりには、ピーナイン (N-(ジメチルアミノ) スクシニアミド酸) という矮化剤を使うのですが、この分子がかかるだけで菊が小さ

くなることを実際に体験しました。薬剤で植物の生育が変わるということが、こうして小学校の頃に原体験として心に残りました。私は名古屋大学農学部に入りました。当時は「バイオテクノロジー」という言葉がブームになっていた時期でした。4年生で研究室に配属されるのですが、私は研究内容に惹かれて生理活性物質化学研究室を選びました。ここで坂神洋次\*教授と出会います。坂神先生は、天然に少ししか存在しないけれども、すごく重要な活性がある分子を探してくる「ものとり」のプロでした。そこで研究したテーマが「植物培養細胞の密度依存的な増殖現象」でした(図1)。植物の細胞は、増殖に必要な分子を培地中に出していることが示唆されていて、この分子を探すことになりました。

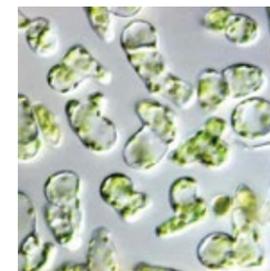
細胞培養液から分子を分けるのはクロマトグラフィーを使いますが、どこに細胞分裂を活性化する分子が分離されたかということは、それぞれの画分を細胞に与えればわかります。いくつかの精製過程を経て、あるピークに活性があることがわかりました。それは、たった5個のアミノ酸からできている短いペプチドでした。私たちはそのペプチドに「ファイトスルフォカイン (phytosulfokine:PSK)」という名前を付けました。これが植物で最初に見つかったペプチドホルモンになります。

当時、私は「研究者になりたい」という思いはあったのですが、実際に踏み出すかどうかは迷っていました。博士課程の時期にこの分子に出会えたことで「この世界でやっていこう」と思うようになりました。

私が助手の頃に、PSKの受容体を探すという研究をしました。釣りと同じようにあるホルモンのうまく餌ズにつけておけば、それにピッタリくっつく受容体だけがとれてき



低密度 10<sup>4</sup>細胞/ml



高密度 10<sup>5</sup>細胞/ml

図1 植物細胞の密度依存的な増殖現象  
培養された細胞が未知のホルモンを細胞外に分泌しており、その濃度が細胞密度に比例するために、増殖効率が変化すると考えられていた。

### ペプチドホルモンと受容体

PSKは5アミノ酸のペプチドですが、最初から5アミノ酸ではなくて、80アミノ酸ぐらいの長い前駆体ポリペプチドがつくられて、そこから切り出されていました。また、いろいろな植物の配列を比べてみると、最後にホルモンになる重要なところだけが配列が完全に保存されていて、あとはバラバラであることがわかりました。

身のまわりにある菌ブラシを思い出してください。菌ブラシは、もつところはいろいろ大きさやデザインが変えられていますが、先端のブラシの部分のかたちだけは共通です。道具も遺伝子も進化の上で変えていいところと変えてはいけないところがあります。このように、ある特定の部位だけ配列が保存されているということが、短いホルモンを生産する特徴かもしれないことに気がつきました。

また、ホルモンの機能について考えると、ホルモンとその受容体の両方を考える必要があります。生物の情報交換の選択性は、かなりの場合、受け手側に依存しています。出す側は、まわりの細胞すべてに対してホルモンを出しますが、それを受け取ることができるのは、受容体をもつ細胞だけです。そうするとホルモンは受容体がわかってこそホルモンであるということになります。

私が助手の頃に、PSKの受容体を探すという研究をしました。釣りと同じようにあるホルモンのうまく餌ズにつけておけば、それにピッタリくっつく受容体だけがとれてき

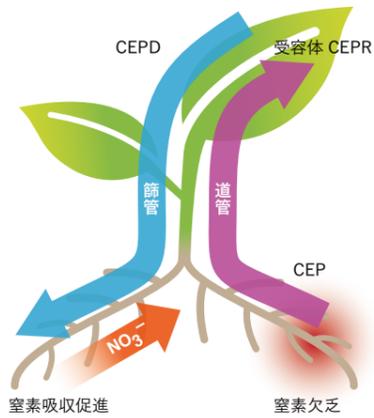


ます。この仕組みを使ってPSKの受容体を捕まえることに成功しました。面白いことに、植物にはこのPSK受容体に非常によく似た受容体がまだ200個もあるということがわかりました。つまり、ホルモンと受容体によって分子の会話が行われているとすると、その会話はまだまだたくさんあるに違いないということがいえます。そのようなホルモンと受容体の会話に耳を傾け、植物の生きる仕組みを解き明かすことが、私の研究テーマになりました。

### 新しいペプチドホルモンを探す

それでは、どうやって新しいホルモンを探していけばよいのでしょうか。すでにいろいろな植物でゲノムが読まれており、ペプチドホルモン配列ならゲノムのどこかに書かれていますので、これを利用することにしました。また、ホルモンを受け取る受容体も重要です。受容体をすぐに見つけられるようにすることが研究を進めるうえではとても大事になってきますので、あらかじめ細胞に200種類の受容体候補をつくらせたものを準備しました。

Arabidopsisは日本語ではシロイヌナズナで、世界で最初にゲノム配列が完全に解読された植物です。このシロイヌナズナのゲノム情報、約3万5000個の遺伝子をダウンロードして、ここからホルモンになりそうなものを絞り込んでいきます。菌ブラシの法則で話したような短い保存された領域があるかどうかを鍵になりました。次に、こ



うして選んだホルモン候補の構造を決めなければいけません。遺伝子組換え植物をつくって水栽培すると、培養液の中にホルモンが出てきますが、その培養液を質量分析計で解析しました。最後にどの受容体候補とくっつくかを見れば、受容体がどれかということもわかります。このようにして分子の会話を交わすホルモンと受容体のペアを探し出していき、最終的に3種類の新しいペアが見つかりました。

### 根の窒素欠乏を伝えるホルモン

次にそれぞれのホルモンと受容体のペアが植物の中でどのようなはたらきをしているかを解析していきました。

ここで、野性の植物がどのような環境で生きているかということに目を向けましょう。自然界にある植物は、たとえば片方の根の近くには鳥の糞や腐った落ち葉があって窒素の栄養分があっても、もう片方の根の近くには何もありません。このような場合に、片方の根で窒素が欠乏したときに、その情報を反対側の根に伝えて、伝えられた根が普段の倍の窒素を取り込むという現象が知られていました。私たちが見つけたホルモンと受容体のペアの1つ目は、この現象に関わることがわかりました(図2)。

このホルモンは、CEP (C-terminally



encoded peptide) と命名しました。窒素欠乏になったほうの根で CEP がつくられ、道管という水を通す組織を通して葉へ移行します。葉で受容体が CEP を認識すると、別のペプチドである CEPD (CEP Downstream) がつくられ、それが篩管を通して遠い根に行くことがわかってきました。このような仕組みによって、植物は不均一な窒素環境に置かれていても、必要なだけの窒素を取り込むことができます。植物の根では、このような情報交換が毎日のように起こっていて、非常に厳密に栄養の取り込み量を考えているようです。

### 根端の位置情報を与えるホルモン

さて、2つ目のホルモン候補はどのような役割をしているのでしょうか。このホルモン候補は根の先端のところだけで発現し、受容体はこの先端の部分を含めて根の全体で発現していることがわかりました。また、受容体を欠損させると、根の長さが半分ぐ

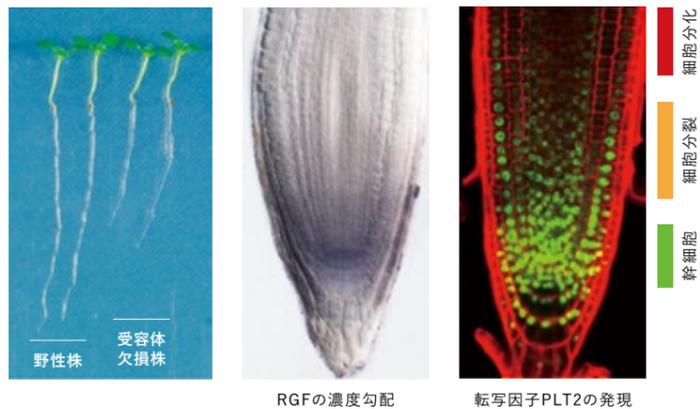


図3 RGFの発現と作用の仕組み  
根の先端でつくられるRGFが細胞外に拡散してできる濃度勾配が位置情報となり、根の形成パターンを制御している。左側は、RGF受容体を欠損する植物の根の成長の様子。中央は、抗体を用いて可視化したRGFペプチドの分布。右側は、細胞の状態を規定する転写因子であるPLT2-GFPを用いて根端細胞の運命づけを可視化したもの。

図2 CEPとCEPDを介した植物の不均一な窒素環境下への適応  
窒素欠乏を感じた根で CEPがつくれ、道管を通して葉へ移行し、受容体CEPRがCEPを認識すると、別のペプチドであるCEPDがつくられる。CEPDは、篩管を通して反対側の根に伝えられ、窒素吸収を促進して不足分を補う。受容体CEPRが欠損した植物では、窒素吸収不足による生育不良が観察される。

らいになりました。この根が短くなることにヒントがありそうです(図3)。

まず、根のつくられる仕組みを知っておきましょう。大事なのは根の細胞は自分が先端から何番目にいるか知っているということです。それを位置情報といいます。野生株の根では、一番先端の部分は幹細胞の役割をします。途中の部分は、約50番目までは細胞分裂を行い、50番目以降は急に伸びていきます。先端の少数の細胞が、ある分子をつくり、それが自由拡散で流れていくと、どんどん希釈されて濃度が下がりますが、この濃度で場所を測っていると「ああ、自分は50番目だ」ということがわかるわけです。

実は、2つ目の候補こそが、この位置情報を与えるホルモンだということがわかりました。受容体を欠損させた植物では、自分の位置情報がわからなくなって、すぐに分裂をやめて伸び始めていました。これで

は根が短くなります。このホルモンはRGF (root meristem growth factor) と命名しました。このRGFというペプチドは、濃度勾配を形成して位置情報となって、根の形成パターンを制御していました。

根の成長になぜこのようなペプチドを使うのか、疑問に思うかもしれませんが、分子が自由拡散していく速度は主に分子量という物理定数で決まるので、風が吹くのが、温度が変わろうが、それほど変わりません。この物理定数で決まる濃度勾配をつかって、自分の細胞の位置情報を伝えれば、それは自然界の変動環境でもとても安定しているのです。

### 根の防水バリアを維持するホルモン

最後に、3つ目のホルモン候補です。ホルモンは根で発現しているのですが、根を輪切りにすると中心柱とよばれる層で出ています。受容体は、その一層外側の内皮という層で発現していました。面白いことに、このホルモンの欠損株を植えると、土の中から体内に不必要なイオンが流入してきます。たとえば鉄は、必要なイオンなのですが、毒性もあります。鉄濃度が高い条件で植えると、野生株は平気なのですが、欠損株は体内に多量の鉄が入って枯れてしまいました。

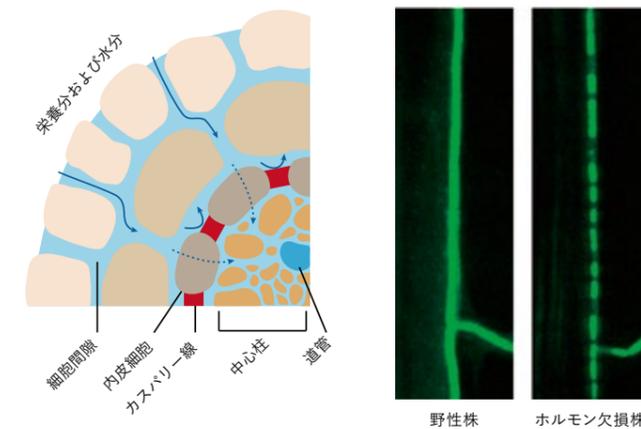


図4 根の横断面とカスパー線  
細胞間隙に入り込んだ栄養分や水分は、防水バリアとしてはたらくカスパー線でブロックされるため(実線矢印)、内皮細胞が選択的に汲み上げる経路(点線矢印)のみ道管に入ることができる。ホルモンCIFがないとカスパー線が途切れ、不要なイオンが体内に流入してしまう。

人間が一番表面に皮膚があって、そこですべてのものはじっていますが、実は根は内側に皮膚があります。内側にあるので内皮といいます。内皮までは水が自由に出入するのですが、ここで完全にブロックします。この内皮細胞同士の間隙を埋めているのがカスパー線という組織で、これで余分な水やイオンが入ってこないようにブロックしています(図4)。レンガでつくった構造物の間隙を埋めている漆喰のようなものです。どうしても中に取り入れたい水や養分は、この内皮細胞を通してポンプで汲み上げていることがわかっています。

3つ目のホルモン候補は、このカスパー線の形成に必要であることがわかりました。このホルモンがないとカスパー線が途切れてしまうことから、CIF (Casparian strip integrity factor) と命名しました。それでは、なぜカスパー線を常にホルモンの維持しないといけないかという疑問が出てきます。根は一度、主根が真っ直ぐ伸びて、途中から側根が出ますが、実は側根が出る時に、側根は内側から出てくるので、一度、内皮を壊します。この内皮が壊れた瞬間に、もちろんカスパー線も壊れます。この内皮を壊して側根が外に出てくる瞬間は、植物にとってはとても危ない

瞬間ですので、すぐに直さなければいけません。そのために常にCIFをもっていて、壊れるやいなや、ホルモンがすぐに修復するので内皮といえます。

### 頑丈さとしなやかさ

今日は4種類の新しいペプチドホルモンとその受容体の発見について話しました(図5)。こうしたペプチドホルモンを通して見えてくるのは、植物には実は驚くべき賢さ、巧みさがあり、しかもそれはすごく合理的だということです。人間のようにたくさんの臓器を利用して生きているわけではなくて、最小限のパーツを使って、精一杯生き延びています。シンプルだけれども、頑強でしなやかというところに注目して、ぜひ植物を見ていただきたいと思います。

今日話した生物学は覚えるような学問ではなくて、私の場合は化学を使って、精製をする、合成もする、質量分析もします。人によっては物理も使いますし、あるいは数学も使います。そのようなものを総動員して行うのが最先端の生物学です。そのような観点からも生物学を見てもらえるとうれしく思います。本日はご清聴ありがとうございました。

\*坂神洋次 (1948-2012)  
名古屋大学元教授。

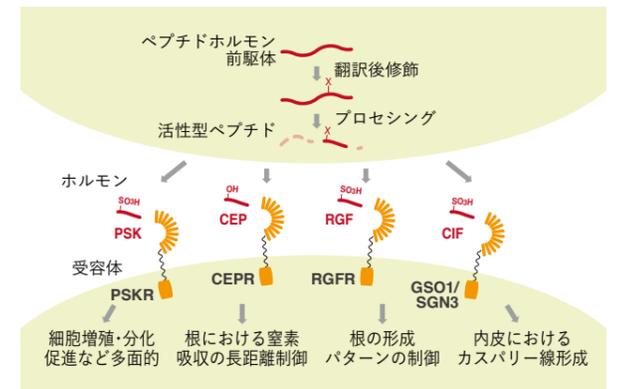


図5 発見した新しいペプチドホルモンとその受容体  
短鎖ペプチドホルモンは、前駆体ポリペプチドの一部が切り出されて活性型となり細胞外に分泌された後、ターゲット細胞の受容体に結合して情報を伝える。発見した4種類の新しいペプチドホルモンは、それぞれの特異的な機能を通して植物の生存戦略に大きく貢献している。

# 植物のかたちをつくり出す細胞の骨格

五島剛太 生命理学専攻教授

## スタートは酵母遺伝学

私は25年前に理学部に入学しました。理学部の魅力の1つは、入学時に専攻を決めなくていいことでした。学びたいことを具体的に決められずにいた私は、入ってからそのうち決めようと考えました。ところが、理学部に入って最初に、分子生物学入門という講義に出て、びっくりしました。高校で生物を選択しなかった私には、生物学といえば、中学のときにやってあまり面白く感じられなかった校庭の花の解剖、スケッチなんかがありました。それとは全く違って、DNAやRNA、タンパク質が出てきて、すごく新鮮でした。そして、3回生の専攻選びのときに生物系を選択しました。

4回生の卒業研究から、研究生活がはじまりました。その後、大学院修士課程に2年間、博士課程に3年間在籍して、合計6年間、研究を続けました。研究テーマとして選んだのが、単細胞生物の酵母を使った「細胞分裂」研究で、具体的には「染色体の分配機構」でした。多細胞生物の植物でも動物でも最初は1個の細胞ですから、分裂を繰り返して個体ができます。この細胞分裂の研究に取り組むというのは、生物学の根源的な問題に挑むことだといえます。

細胞が分裂するとき、分かれた後の2つの細胞に、遺伝情報の主体である染色体DNAを均等に分配しなければいけません。しかし、その分配が異常になる

面白い変異体がありました(図1)。なんらかの遺伝子に変異があるから分配異常が起こるのですが、増殖の早い酵母の良い点は、研究を始めたばかりの学生でも1カ月もあれば変異を見つけられることです。私の場合は、変異が入っていたのは、分配に必要な染色体上の「動原体」とよばれる構造体の構成因子の1つだとわかりました。動原体は細胞骨格「微小管」と結合し引っ張られることで、染色体の分配を保障しています。この変異体が縁となり、私は以来ずっと微小管の動態に興味をもって研究を進めています。

世界中の多くの研究室で酵母の変異体を使った遺伝学が展開され、結果的に、細胞分裂など基本的な細胞活動に関わ

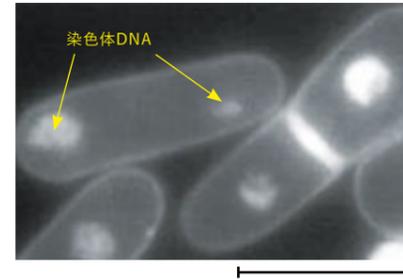


図1 分裂酵母の染色体分配異常変異体  
ある遺伝子に変異が入ったことによる染色体の不均等な分配(細胞核の大きさが均一でない)。原因遺伝子がコードするタンパク質は、染色体上の動原体に存在する新奇のタンパク質だった。スケールバーは10μm。

る遺伝子の多くは酵母を使って発見されました。しかし、酵母の知見はどれほどヒトに当てはまるのか、酵母を使った研究を展開しているといつも気になることでした。私が見つけた酵母の動原体タンパク質の研究を続けていくと、4年目ぐらいに、ヒトにも類似のタンパク質があることがわかりました。さっそく、当時開発されたばかりの「RNAi」という手法を使って、このヒトの類似タンパク質をヒトの細胞からなくしました。すると、やはり染色体分配が異常になりました。これは酵母でやっていたことがそのままヒトにも当てはまったという例です。これらの研究成果が認められ、博士号を得ることができました。

## 動物の細胞分裂装置研究

理学博士になった後、私はカリフォルニア大学サンフランシスコ校で博士研究員(ポスドク)になりました。ポスドクは後に独立した研究者となる前段階として、研究トレーニングを積む期間です。ときどき誤解されますが、給料がしっかりもらえ、研究に専念できる職業です。ポスドクの後、大学の先生になったり、企業で研究をしたり、いろいろです。研究の面からも、生活の面からも、私にはサンフランシスコがいちばん魅力的で、ポスドク先として選びました。

いくつかの研究に取り組みましたが、その1つは、微小管が主体となり形成され細胞分裂を司る分裂装置「紡錘体」の形成に必要な遺伝子を網羅的に見つけようというものでした。酵母では十分明らかにされていたので、より複雑な動物(ショウジョウバエ)の細胞を使いました。ハエのもつ全1万5000ほどのタンパク質を逐一なくして、紡錘体のかたちを観察していきましたところ、200を超えるタンパク質が紡錘体形成に大切だとわかりました(図2Aに一例)。その多くはそれまで想定されていなかったタンパク質で、類似のタンパク質はほぼすべてヒトにも見つかりました。特に着目したタンパク質については名古屋大学に着任したあとも研究を続けました。たとえば「オーグミン」と命名した因子を詳しく調べることで、これまで教科書に書かれていた紡錘体

の構造がずいぶん実際とは異なることが明らかになりました(図2B)。間もなく教科書に出ていた細胞分裂の図が改変されるものと思われます。

## 実験材料に悩む

いよいよ植物の話に入ります。高校の生物の教科書を見ると、植物と動物の細胞分裂は分けて描かれています。同じ細胞なのに、なぜなのでしょう。おそらく、紡錘体がずいぶん異なるかたちをしているからでしょう。しかし、動物も植物も元は共通の祖先から進化しました。実際のところ動物と植物はどれぐらい共通で、どれぐらい違うのでしょうか。この単純な疑問に答えるために、植物細胞を使った研究をしたと思いました。動物の細胞の研究は、実験材料として扱いやすいこともあって、ものすごく進んでいます。



Gohta Goshima

1974年生まれ。1997年京都大学理学部卒業。2002年京都大学大学院理学研究科修了。2002年カリフォルニア大学サンフランシスコ校(UCSF)ポスドク。2007年名古屋大学高等研究院特任准教授。2010年4月より現職。

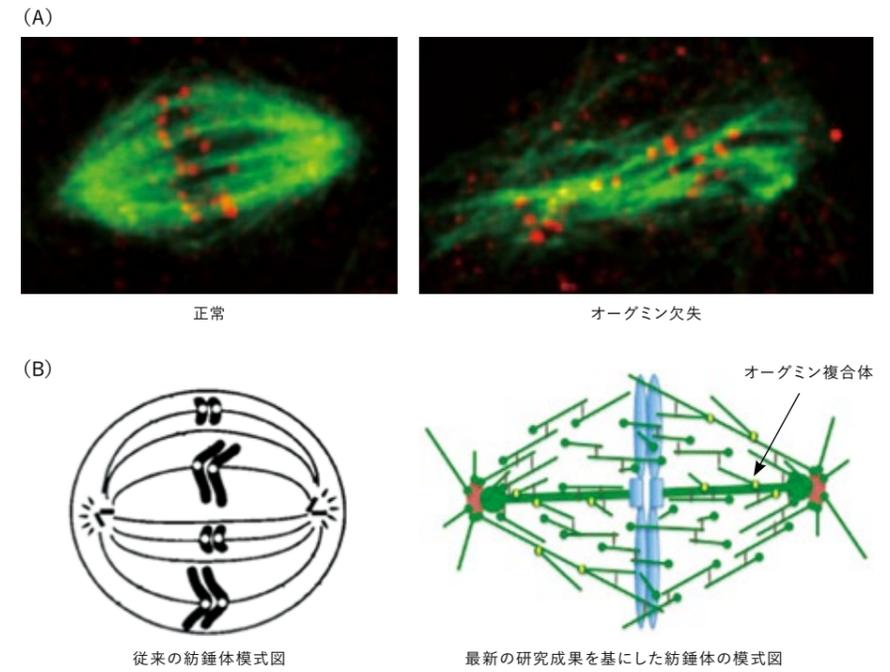


図2 動物細胞の紡錘体(細胞分裂装置)  
(A) ショウジョウバエ培養細胞の紡錘体。オーグミンと命名したタンパク質複合体を欠失させると動原体(赤)がバラバラになり、微小管(緑)の数も減る。  
(B) 紡錘体の模式図。従来(左)のものとして新しく提唱されたもの(右)を並記。オーグミンの詳細な解析から、紡錘体の微小管の様子は従来紡錘体とは大きく異なることが明らかになった。たとえば、紡錘体の内部では、オーグミンによって生み出された短い微小管が多く存在する(左図は平成21年度センター試験問題を改変)。



それに比べて植物は、遅れていました。逆にいうと、未開拓のワクワク分野ということになります。

細胞の研究者が新しいことを始めるときに最初に考えることは、何を実験材料に使うべきかということです。最初は身近なものとして、タマネギくらいがいいんじゃないかと思いました。家の冷蔵庫からタマネギをもってきて細胞分裂を見ようとしたのですが、分裂している細胞が全く見つかりませんでした。当然ですよね。長いこと低温に置かれていたら、分裂活性はありません。緑がなかったのだとあきらめました。次はイネです。イネの研究だと米の収穫を増やすのに役立つかもしれないとか、考えました。しかし、文献を調べてみると、イネは世代時間が長くて実験材料としてはなかなか難しいのです。そして、さきほどの松林先生の話にも出てきたシロイヌナズナは非常に有力な材料で、多くの先生に勧められたのですが、「みんながやっていることをやってはいけない」と思って手を出しませんでした。

こうなってくるとやはり最後はGoogle検索です。適当なキーワードを入れて「何か面白そうな植物はないか」を調べました。すると、ある日、ヒメツリガネゴケというコケ植物がヒットしました。それまで聞いたことがない生物でしたが、培養が容易

とか細胞観察に優れているなど、見るからに実験しやすそうでした。近くにエキスパートがおられることもわかり、手紙を書いて、実験を習いにきました。

これまで酵母やハエの細胞でやってきたように、コケ細胞の分裂や骨格機能を担う遺伝子を見つけたいと思いました。そのための手法を確立することが必要で、3年くらい苦労しましたが、最終的に「誘導型RNAi法」という手法を確立できました。これができる、あとは進むだけです。これまでに、この手法を駆使して、植物の細胞分裂や細胞骨格の動態を制御する遺伝子をたくさん見つけ出すことができました。

### 植物の骨格と物質の運搬

最後に、私の最新の研究テーマを紹介します。専門的な言葉で表現すると、「植物細胞において微小管依存的な逆行輸送を担う新奇モータータンパク質の探索」です。かみ砕くと、「植物における細胞内の物質の運び屋の探索」くらいでしょうか。

微小管細胞骨格は紡錘体の中で染色体を引っ張るために必要なものですが、荷物の輸送のためのレールの役目も果たします。レールというからには、そこに列車が走るのですが、列車は「分子モーター」とよばれるタンパク質群です。動物細胞では研究が進んでいて、積み荷を運ぶのはキネシンという列車とダイニンという列車であることがわかっています。名古屋駅と栄駅の間の地下鉄を思い浮かべましょう。列車の場合は名古屋と栄を行ったり来たりできます。しかし細胞の中の分子モーターは、両方向に動くものではありません。キネシンはいつも名古屋駅行き、ダイニンは栄駅行きです。ところが、植物は進化の過程でダイニンを失ってしまいました。ということは、植物ではダイニンの代わりに何かがその役割を担っていることになります。それはいったい何でしょうか。

この研究にもヒメツリガネゴケを使いました。いくつか予備的な実験を重ねた後、候補が出てきました。キネシン-14というキネシンです。先ほど「キネシンは名古屋駅行きだ」と言いましたけれども、キネシンは60種類以上存在しています。その中でもキネシン-14は特別で、他のキネシンと違って逆方向に歩く能力を備えているということが、主に動物の研究でわかっていました。ただ1つ大きな問題がありました。キネシン-14は、一歩しか歩くことができません。レールの上で動き出した瞬間、すぐ脱線してしまいます。これではものは運べません。

しかし、ある日、列車を連結してみようというアイデアが生まれました。複数のキ

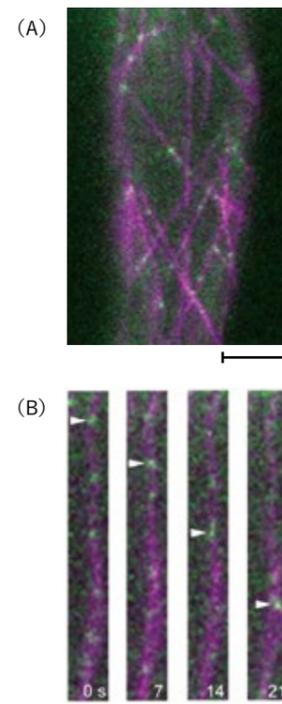


図3 キネシン-14の細胞内での運動の様子  
(A) ヒメツリガネゴケ細胞で微小管(紫)とキネシン-14(緑)を撮影したもの。キネシン-14は微小管上に存在している。緑の輝点の強度測定により、輝点は1つのキネシン-14分子ではなく、複数のキネシン-14分子が集合したものとわかった。スケールバーは5 μm。  
(B) キネシン-14の長距離歩行の様子(一本の微小管)。矢印で示したものは同一のキネシン-14集合体を追跡したもの。秒速0.5 μmで10 μm程度移動した。ナノ分子のキネシンがマイクロの距離を移動したので、「長距離移動」といえる。スケールバーは2 μm。

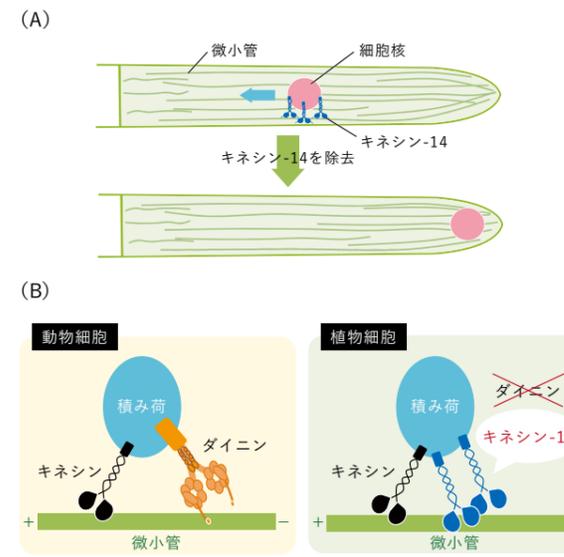


図4 キネシン-14による細胞内輸送  
(A) キネシン-14が運ぶ積み荷の1つは細胞核だった。正常な細胞ではキネシン-14と通常のキネシン(14以外のもの)が左に行ったり右に行ったりさせているので、細胞核は細胞の中央付近に配置されるが、キネシン-14を破壊した細胞では、残った通常のキネシンが優勢になって、細胞の右端まで運んだ。  
(B) キネシン-14は1つだけだとすぐに「脱線」するが、複数連結したり、あるいは複数のキネシン-14が1つの積み荷に結合することによって、長距離移動が可能になった。つまりキネシン-14は「植物のダイニン」とも呼べるタンパク質であった。

ネシン-14を人工的に連結したらどうなるでしょうか。やってみると、たいへ面白いことに、長距離歩行できることがわかりました。なぜ歩けるようになったのか、物理化学的な説明はいまだにできないのですが、ともあれ歩きました。ただ、これは試験管内反応といって、人工的に連結したものを細胞の外で観察したものです。細胞の中で本当に歩いているかどうかはわかりません。実際のコケの細胞の中ではどうだろうかと見ることにしました。すると、キネシン-14が集合(いわば連結)することによって微小管上を長距離歩行している様子が観察されました(図3)。学生さんが撮影した動画を最初に見たときは、本当に興奮しました。

キネシン-14が歩く能力を備えていることはわかりましたが、次の疑問は、キネシン-14が何を運んでいるのかです。キネシン-14を細胞から取り除いて何が異常かを探せばいいと着想し、数年かけて、キ

ネシン-14は細胞核や葉緑体を運んでいることを見出しました(図4A)。この一連の研究で、植物の細胞骨格系の進化の謎を1つ解明したのではないかと思います。キネシン-14が、長年、探索されていた栄行きの列車で、「植物のダイニン」とも呼ぶべきものでした(図4B)。

キネシン-14欠失コケを観察していると、植物の成長やかたちについて予期せぬ発見もありました。まず、個々の細胞の成長が遅くなるのがわかりました。コケは水と光があると土やコンクリートの上を広がっていきますが、実験室でもその様子は寒天培地上で再現できます。キネシン-14欠失コケではその広がりが劇的に遅くなりました(図5A)。さらには、葉のかたちがおかしくなることにも気づきました。通常のコケと違って、ねじれたかたちをしていました(図5B)。面白いことに、キネシン-14のタンパク質の一部を改変したものをキネシン-14欠失植物に戻してみると、

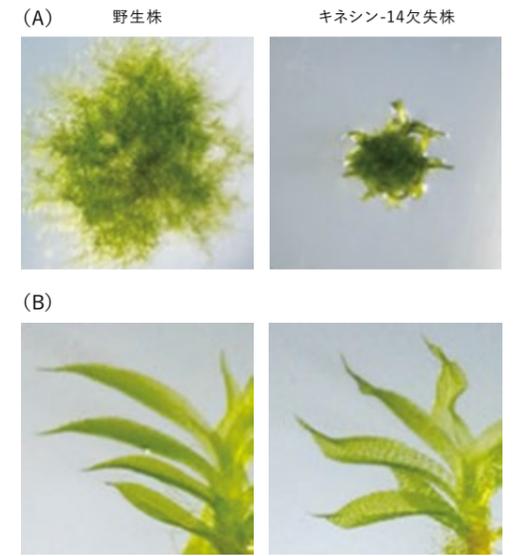


図5 植物のかたちとキネシン-14  
(A) キネシン-14を欠失させるとコケの成長は著しく阻害された。  
(B) キネシン-14欠失株では葉がねじれた。

核の運搬は通常のコケ同様にまで回復できたのですが、細胞の成長や葉のかたちは元に戻りませんでした。つまり、キネシン-14は核を輸送する機能以外にも細胞の成長や葉のかたちづくりを司る機能をもっているということになります。それらの機能がどう発揮されるのか、今はわかりません。これからの研究が楽しみです。動物や酵母でとても大切な役割を担う遺伝子が植物で失われている例は他にもたくさんあります。それに対応して、植物はときには独自の仕組みをつくり上げてきたに違いありません。一方、今回の例では、動物にも存在する遺伝子を、少し性質を変えて利用することで対応したといえます。植物と動物を比較しながら研究することで、私たちが想像もしていない細胞の動態や個体のかたちを制御する仕組みがまだまだ見つかるものと信じて、これからも研究に取り組んでいくつもりです。

# 宇宙の産声とシュレディンガーの猫

川村 静見 素粒子宇宙物理学専攻教授



Seiji Kawamura

高知県生まれ。1989年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻で理学博士を取得後、カリフォルニア工科大学サイエンティストのちにメンバーオブプロフェッショナルスタッフ、国立天文台助教授のちに准教授、東京大学宇宙線研究所教授を経て、2017年より現職。専門は重力波物理学。著書に、「重力波とは何か」(幻冬舎、2016年)、「重力波物理の最前線」(共立出版、2018年)などがある。

## 重力波天文学の時代

重力波は、1916年にアインシュタインの一般相対性理論によりその存在が予言された光速で伝わる時空のさざ波である。重力波は加速度運動をする物体から放射され、重力波がやってくると物体間の距離が変化する。しかし、その変化量はきわめて小さく、最大級の重力波ですら、太陽・地球間の距離をわずか水素原子1個分ほど伸び縮みさせるにすぎない。人類は、このきわめて微かな時空のひずみを計測すべく、数十年の間、重力波の検出に挑戦し続けてきた。そして、ついに2015年9月、アメリカのLIGOプロジェクトが重力波の初検出に成功したのである。その後もブラックホール連星や中性子星連星の合体からの重力波が相次いで検出され、重力波天文学という全く新しい分野が一気に花開いた。そして今後も、装置の感度向上に伴って、超新星爆発やパルサーからの重力波検出が期待でき、重力波天文学のより一層の発展が予想される。

## 宇宙の産声

しかし、何と云っても、重力波天文学において最もエキサイティングなサイエンスといえば、宇宙誕生直後に発生した原始重力波を検出し、宇宙誕生の謎を解明することである。誕生後38万年以前の宇宙は、電磁波では直接見ることはできない。なぜなら電子が自由に飛びまわっており電磁波がまっすぐに進めないからである。しかし、重力波は何でもすり抜けるため、宇宙誕生直後の直接観測が可能である(図1)。では、重力波観測は宇宙誕生のどのくらい直後まで迫ることができるのだろうか。驚くべきことに、なんと宇宙誕生後 $10^{-35}$ 秒後頃まで観測可能である。これは、電磁波の38万年( $\sim 10^{13}$ 秒)後と比べて、なんと

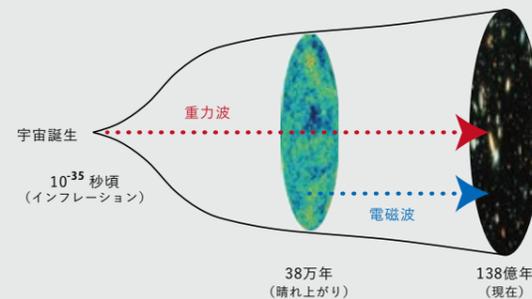


図1 膨張する宇宙と観測の限界

電磁波による観測では宇宙誕生38万年後(晴れ上がり)以前の宇宙を直接観測することはできない。重力波であれば宇宙誕生直後 $10^{-35}$ 秒後(インフレーション)あるいはそれ以前まで直接観測が可能である。

48ケタも短い。

実際、宇宙が誕生して $10^{-35}$ 秒後頃に、宇宙はそのスケールが数十桁も大きくなったと考えられており(これをインフレーションという)、その頃に時空の量子ゆらぎから原始重力波が発生したと予想されている。したがって、もし、この原始重力波を検出することができれば、インフレーション存在の確証を与えることができ、またその特性も詳細に調べることができる。

ところで、重力波は我々の鼓膜を震わせるため、原理的には音として聞こえるはずである。つまり、電磁波による観測が「見る」といえるように、重力波による観測は「聞く」といえる。そういう意味で、宇宙誕生直後の原始重力波を検出することは「宇宙の産声を聞く」ことになる。

## シュレディンガーの猫

この「宇宙の産声を聞く」ことを可能にするのが、日本の将来計画であるスペース重力波アンテナDECIGOである。DECIGOでは、互いに1000km離れた3つの人工衛星をレーザー干渉計で結び、重力波によって生じる衛星間の距離の変化を計測する(図2)。また、感度を高めるために衛星間の光を直径1メートルの鏡を用いた光共振器で増幅させる。しかし、予測される原始重力波の強度には不定性があるため、検出をより確実に行うためだけ装置の感度を高めておく必要がある。そこで、我々が独自に考案した手法が、鏡を量子的に制御することにより、不確定性原理で規定される標準量子限界を破る感度を実現することである(図3)。これは、いうなれば、巨視的物

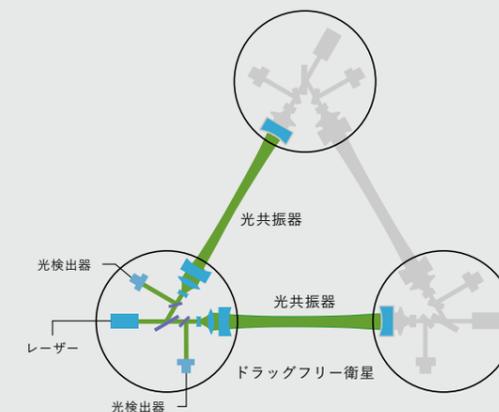


図2 DECIGOの予備概念設計

ドラッグフリー衛星の中には鏡が浮かんでおり、1000km離れた衛星間で光共振器を構成する。衛星内にはレーザーや光検出器が搭載されている。(DECIGO提供)

質である鏡を量子状態にする、つまり、いわゆるシュレディンガーの猫\*をつくり出すことに等しい。なお、シュレディンガーの猫には驚くべき性質があることが予想され、それを研究すること自体、量子論の基本原理の解明にとって非常に面白い発見をもたらすことが期待されている。

我々は、今後は、まずシュレディンガーの猫を産み出し、その性質を調べ、そしてその猫の手を借りて(誤用)、宇宙の産声を聞き、宇宙誕生の謎を解明したい。

\*シュレディンガーの猫  
シュレディンガーによって提案された思考実験。放射性物質、検出器、毒ガス発生装置、猫を箱の中に入れて、放射性物質が崩壊したら毒ガスが発生して猫が死ぬようにしておく。一定時間後の放射性物質(ミクロな系)の状態は、崩壊状態と非崩壊状態の重ね合わせで記述できるが、猫(マクロな系)の場合も死と生の重ね合わせでよいのかというもの。

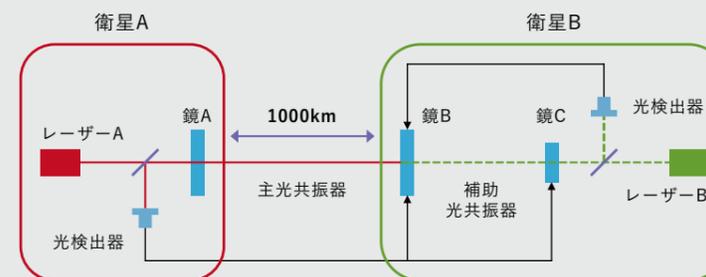


図3 広帯域量子制御の概念図

DECIGOの主光共振器は1000km離れた鏡Aと鏡Bで構成されている。この光共振器の感度はショットノイズと輻射圧雑音からなる量子雑音で制限されている。ここに鏡Cを加えて、鏡Bと鏡Cで補助光共振器を構成する。この光共振器の光ばね効果を利用してホモダイン検出を行い、鏡Bを量子的に制御する。これにより、鏡Bの輻射圧雑音を広帯域で完全に除去することができる。鏡Aにも同様の処理を行うことにより、主光共振器において広帯域で標準量子限界を破る感度を実現できる。

# 酵素の誤作動を利用する反応系の開発

莊司長三 物質理学専攻准教授



Osami Shoji

1975年生まれ。2002年千葉大学大学院自然科学研究科博士課程修了。奈良先端科学技術大学院大学博士研究員、名古屋大学大学院理学研究科助教を経て、2013年より現職。専門は、生物無機化学、酵素化学。

## 遺伝子操作に頼らない方法

生体内では、生命維持のためさまざまな化学反応が起こっている。生物は生体内に取り入れた物質を変化させて利用しているが、その化学反応において触媒として機能する分子が酵素である。生体内での物質変換を担う酵素は、対象とする分子を正確に認識して反応するように緻密に設計されている。酵素反応は、鍵（標的分子）と鍵穴（分子が結合する部位）の関係で説明されるように、鍵穴の形状に合致しない分子は反応しない。酵素の鍵穴の形状は、遺伝子操作によってある程度つくりかえることが可能で、標的分子とは構造が異なる分子と反応するように酵素を改変することができる。

しかし、遺伝子操作による酵素改変は万能ではなく、必ずしも目的とする分子と反応する改変酵素が得られるわけではない。さらに、遺伝子操作の繰り返しと改変酵素の評価には膨大な時間がかかってしまうため、遺伝子操作を伴わない新しい酵素改変法が常に求められている。

## 長所が災いする

シトクロムP450は生物界に広範に存在する酵素で、我々の肝臓にも存在し、薬物の代謝、毒物の解毒、ホルモンの生

合成に関連する酸化反応を行っている。シトクロムP450は、ヘム（鉄ポルフィリン錯体）を活性中心として利用して酸素分子を活性化することで強力な酸化活性種を生成し、不活性なC-H結合を高効率に水酸化することができる。細菌由来のシトクロムP450BM3（以下、P450BM3）（図1）は、シトクロムP450の中でも最も活性が高く、バイオ触媒としての利用が早くから期待されてきた。ところが、P450BM3は長鎖脂肪酸のみを水酸化するある意味非常に優れた酵素であったため、他の基質の酸化反応には適用できないという弱点があった。

遺伝子操作によって長鎖脂肪酸以外の分子を水酸化できるように改変された多くの改変P450BM3が作成されてきたが、遺伝子操作を繰り返しても活性の向上は頭打ちになることも多かった。そんな状況の中、著者らは、長鎖脂肪酸よりも分子の長さが短いカルボン酸が取り込まれた場合に、別の分子が反応する可能性に着目し、天然に存在する野生型のP450BM3であっても標的分子以外を水酸化できる全く新しい反応系にたどりついた。

## 「偽の鍵」を利用する

P450BM3は、長鎖脂肪酸が取り込まれた場合のみスイッチが「ONの状態」になって酸化活性種を生成するため（図2A）、長鎖脂肪酸と構造が大きく異なる分子のベンゼンの場合には、スイッチは「OFFの状態」のまま反応は全く進行しない（図

2B）。P450BM3に長鎖脂肪酸よりも分子の長さが短いカルボン酸を「偽の鍵」（デコイ分子）として取り込ませるとベンゼンを水酸化できるようになる（図2C）。デコイ分子は、長鎖脂肪酸の特徴であるカルボキシル基（-COOH）をもつが、分子の長さが長鎖脂肪酸よりも短い分子群で、デコイ分子と名付けた。P450BM3は、デコイ分子を長鎖脂肪酸と間違えて取り込んでしまうが、分子の長さが短いためデコイ分子自身は水酸化されない。デコイ分子とベンゼンが同時に取り込まれると、P450BM3は長鎖脂肪酸を取り込んだと勘違いして誤作動し、スイッチを「ONの状態」にしてしまうため、ベンゼンが水酸化される（図2C）。

これまでに、図3に示したさまざまなデコイ分子を開発してきた（図3）。面白いことに、長鎖脂肪酸と構造が多少違って

して取り込んでしまう。C7-Pro-Pheが最も活性が高く、一分子のP450BM3が1分間に259分子のベンゼンをフェノールに変換することができる。

デコイ分子を用いるベンゼンの水酸化反応の活性は、遺伝子操作によりつくられたすべての改変P450BM3よりも高く、ベンゼンの水酸化などの難易度の高い酸化反応に対してより強力な手法になることが示された。取り込ませるデコイ分子の構造の違いによって酵素活性は大きく変化するため、デコイ分子の設計次第でさらなる高活性化が可能であり、高効率なバイオ触媒反応系の実現を目指して、新規デコイ分子の開発を続けている。今後は、デコイ分子を用いる手法の適用範囲をP450BM3以外の酵素へと順次拡大し、遺伝子操作不要の酵素改変手法として確立していきたい。

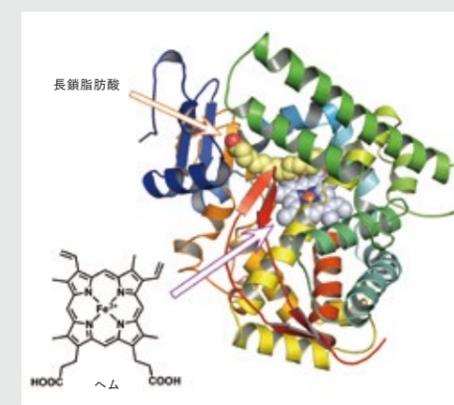


図1 P450BM3の結晶構造  
長鎖脂肪酸を結合したP450BM3のX線結晶構造。長鎖脂肪酸と活性中心のヘムをオレンジ色と紫色の矢印でそれぞれ指し示した。

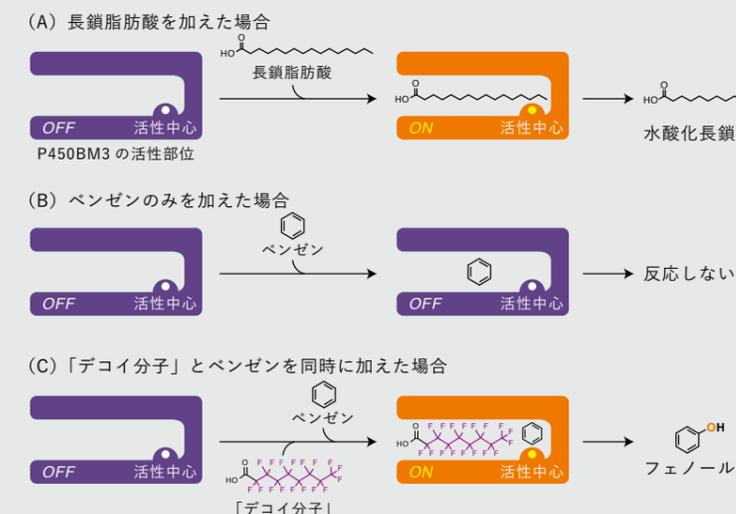
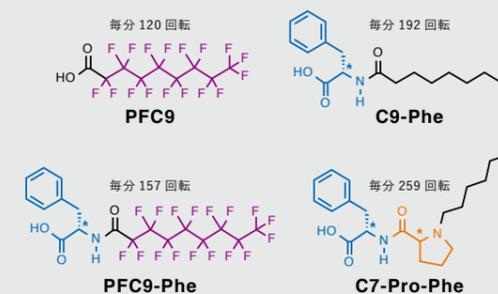


図2 P450BM3による反応の模式図

(A) 左側に示した紫色のコの字型は、P450BM3の活性部位（鍵穴の形）の模式図で、長鎖脂肪酸を取り込むための形状をしており、活性部位に何も取り込まれていないときは「OFFの状態」である。長鎖脂肪酸が取り込まれると「ONの状態」（オレンジ色のコ字型）になり長鎖脂肪酸が水酸化されて水酸化長鎖脂肪酸が生成される。  
(B) ベンゼンのみを加えた場合には「OFFの状態」のままであるため反応はまったく進行しない。  
(C) デコイ分子とベンゼンが同時に取り込まれると、P450BM3は誤作動して「ONの状態」となりベンゼンが水酸化されてフェノールが生成される。

図3 これまでに開発したデコイ分子の構造とベンゼンの水酸化活性  
1分間当たり何分子のベンゼンがフェノールに変換されたのかを示す、反応回転数を構造の上に示した。

# 無限への憧憬

松尾信一郎 多元数理科学専攻准教授

## 世界遺産での研究集会

灼熱の名古屋を離れ、ドイツの古都レーゲンスブルクでの研究集会に参加した。ミュンヘンから電車で一時間ほどのところにあるレーゲンスブルクは、二度の大戦の戦火を辛くも逃れ、中世の街並みを今に伝えている。研究集会は2週間の長きにわたったが、毎日のスケジュールはゆったりと組まれており、22時近くまで明るい初夏のピアガルテンで存分に議論を交わすことができた。集会のテーマはドナルドソン理論である。私は「四次

元球面の上の反自己双対方程式の解のモジュライ空間の直径のインスタント数が増大する極限での漸近挙動」について講演した。その周辺について書きたいのだが、まずは数学を構成する三本の柱について説明しよう。

### 数学=代数+幾何+解析

私の母がその教育方針を参考にしたという広中平祐<sup>\*1</sup>先生は「数学には『数』と『形』と『動き』の3つの柱がある。この点は、小学生の教育から始めて、数学

の教育をしている人のすべてが、はっきり頭の中に入れておいたほうが良いと考える」と言っている。つまり、数学は「代数」と「幾何」と「解析」から構成されるということだ。「代数」とは、第ゼロ近似としての定義としては、素数と方程式の研究である。「幾何」は高次元の曲がった空間である多様体の研究であり、「解析」は微分方程式の研究である。

しかし、もちろん、これら三本の柱は、独立しているのではなく、深く交錯している。例えば、三次関数や四次関数のグ

$$\begin{aligned} F_{12} + F_{34} &= 0 \\ F_{14} + F_{23} &= 0 \\ F_{13} + F_{42} &= 0 \end{aligned}$$

図1 反自己双対方程式  
四次元ユークリッド空間のときの反自己双対方程式を具体的に書き下すとこの連立方程式となる。ヤン=ミルズ汎関数の最小値として特徴付けられる。

ラフを描くときは、その関数を微分して極値や変曲点を求めるのが定石だった。極値や変曲点はグラフのかたがたが変化する場所であり、グラフの特徴はそこに現れるからだ。逆に、極値を持つ函数には必ず微分が0になる点がある。ここでは解析と幾何が互いを規定している。

私の研究では偏微分方程式を多様体の上で考える。一般に、偏微分方程式の解は具体的に書けない。それどころか解の存在を示すだけでも難しい。だが、幾何学的手法で解の存在を示せる場合があり、そのような議論は舞台となる多様体の幾何を深く反映する。アティヤ<sup>\*2</sup>とジンガー<sup>\*3</sup>による指数定理は、線型偏微分方程式に対してこのような枠組みを与えた。彼らの理論は線型偏微分方程式を無限次元の線型代数として幾何学化するもので、幾何が解析と自然に交わり無限次元空間の幾何を生み出す出発点となった。20世紀半ばの大域解析学の金字塔である。

### 無限次元空間の幾何としてのドナルドソン理論

アティヤとジンガーによる無限次元空間の幾何の流れは、ドナルドソン<sup>\*4</sup>の1982年の研究により新潮流を迎える。ドナルドソンは私が最も尊敬する数学者の一人であり、1982年には私も生まれた。

ドナルドソン理論の指導原理は、線型

$$\text{diam}_{L^2}(M_k(S^4)) = O(\sqrt{k})$$

図2 ドナルドソンの基本予想  
四次元球面のときに反自己双対方程式の解のモジュライ空間の直径の漸近挙動を決定した。

偏微分方程式を超えて、非線型偏微分方程式を無限次元空間の幾何学として考察するというものである。ドナルドソンは四次元多様体の上で反自己双対方程式を考えた(図1)。反自己双対方程式は、素粒子物理のヤン=ミルズ理論に由来する非線型偏微分方程式である。ドナルドソンの画期的洞察は、解の存在問題を超えて、解の全体からなるモジュライ空間を考えたことにある。反自己双対方程式はスケール変換不変な方程式であり、従って、一点に集中する解の列が存在する。このデルタ函数的な解の列をバブルと呼ぶ。バブルはモジュライ空間の無限遠へと発散する点列であり、デルタ函数を点の拡張概念と見なすことにより、その無限遠に四次元多様体が析出する。こうして、四次元多様体の幾何と自己双対方程式の解のモジュライ空間の幾何が結びつく。

しかし、バブルの無限遠への発散の定量的側面については今まであまり良く分かっておらず、1990年にドナルドソンが提出した基本予想も手つかずのままだった。私も学生時代からずっと考えている。今年になってようやく部分的に解決できた(図2)ので、それをレーゲンスブルクで講演した。

私にとって、数学の議論で最も興奮する瞬間は無限が出てきたときであり、現

代数学を特徴付けるものは無限である。四次元多様体の幾何学は、目に見えない想像の彼方にあるとはいえ、あくまで有限次元の対象である。上で述べたように、ドナルドソン理論では、あえて無限次元空間の幾何を用いることで、四次元空間の幾何について重要な結果を示すことができる。しかし、なぜその技法でうまくいくのか、この技法でないと本当にうまくいかないのか、その根源は未だに闇の中にある。私はその闇を照らしたい。レーゲンスブルクでは、理論の誕生から現在に至るまでずっと静かに根源的なことを考え続けている北欧の研究者の講演もあれば、才気煥発なアメリカの学生の講演もあり、その対比は印象的だった。だが、無限次元への憧憬は共通している。集会は理論の基礎を考え直す良い機会を与えてくれた。この夏のドイツも暑かったことだけがただ一つの誤算であった。

\*1 広中平祐 (1931-) ハーバード大学名誉教授。フィールズ賞 (1970) を受賞。

\*2 M.アティヤ (1929-) イギリスの数学者。フィールズ賞 (1966) を受賞。

\*3 I.ジンガー (1924-) アメリカの数学者。M.アティヤとともにアーベル賞 (2004) を受賞。

\*4 S.ドナルドソン (1957-) イギリス・アメリカの数学者。フィールズ賞 (1986) を受賞。



Shinichiroh Matsuo

1982年生まれ。東京大学理学部数学科卒 (2005)、東京大学大学院数理科学研究科修士 (2010)。博士 (数理科学)。2012年大阪大学大学院理学研究科数学専攻助教、2016年から現職。専門は幾何解析。

松尾信一郎 ウェブページ <http://www.math.nagoya-u.ac.jp/~shinichiroh/>

同窓生から

学生時代の経験を支えに

名古屋大学未来材料・システム研究所特任准教授  
 (豊田合成GaN先端デバイス応用産学協同研究部門)  
 牛田泰久 (Yasuhisa Ushida)

現在私は、名古屋大学未来材料・システム研究所で特任准教授として働いている。2002年に名古屋大学理学研究科のポストドクから企業へ入社し、その企業から出向というかたちで大学へ戻って来た。なんでも経験と思い、飛び出したのだが、世の中は本当に広く「なんでもあり」の世界であることを身をもって経験することになった。教科書や参考書、問題集などから得られるいわゆる勉強は、事象や環境を単純化し、1つの答えを導き出すものである。実際は、そんなに単純な問題は存在しない。

それぞれの人生経験から得た土台の違う2人は、同じ問題をみた時、違う答えにたどり着くこともある。もし、問題に出会うタイミングが違えば、同じ人でも違う答えを用意すると思う。さまざまに改善がなされているが、世の中は未熟であり、混沌としていて、本当に広い。

そんな中でも私の支えとなったのが、学生やポストドク時の経験である。まず、第一に、「とにかくやってみる」という考えをもったことである。理学研究科には、金属工作室やガラス工作室があった。そこには、頼りになる専任の技官の方もおられ、つねに工作機械などが使える状態で準備されていた。小さいころからのづくりが好きだったので、夢のような環境である。研究に必要な実験装置は、自分で設計し、手づくりできる。その作業は、大変だが、世の中にはないものをつくり、初めて実験できる喜びがまさっており、全く苦にならなかった。現在では、実験設備などは買ってできることがあろうかと思うが、当時困難であり、ちょうど良いタイミングで、良い経験をさせていただいた。真剣に取り組めば、できないことはないのではないかと思えるようになった。

第二に、「多くの方々とつながり」をもったことが重要な経験となった。指導いただいた先生方を筆頭に先輩後輩とのコミュニケーションを始め、隣の建屋で研究されていた野依先生のノーベル賞受賞のニュースに接したり、そののちに受賞される益川先生とばったりお会いしていたりと興奮する出来事もあった。

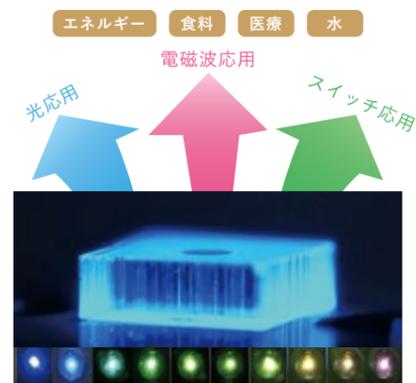


私が入社した豊田合成は、ちょうど発光ダイオードの事業化拡大の波に乗っているタイミングにあり、非常に勢いのある事業を経験させていただいた。

仕事をする上で、大変親しくしていただいた赤崎先生、天野先生が、ノーベル賞を受賞されるという機会にも恵まれ、本当に身近で経験をすることができた。その縁も名古屋大学へ戻ってくるきっかけとなったと思う。

今回の出向は、オープンイノベーションの場を活用した企業の研究開発を実践する機会であり、今後の新たな社会創出に向けたモデルケースになるように努力したい。

名古屋大学での経験は私の財産であり、この機会を得られたことに感謝したい。また、その経験をもとに、より良い社会へ貢献し続けるべく、走り抜きたい。



薄膜形成 | GaN | 接合技術 | 品質管理 | パートナー

豊田合成GaN先端デバイス応用産学協同研究部門の研究イメージ

キャンパス通信

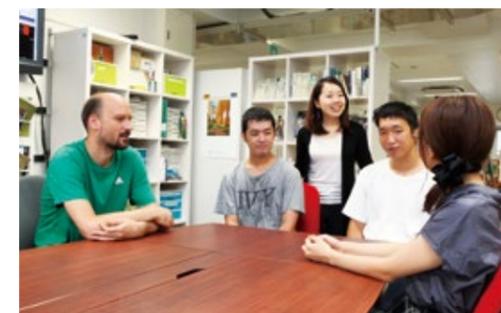
もっと国際的な名古屋大学に

現象解析研究センター特任准教授  
 アレサンドロ・ガズ (Alessandro Gaz)

私は名古屋大学に着任して2年半になるが、海外からの研究者が多く採用されていることに良い意味で驚いた。新しいアイデアの共有や発展のため、近年では大学の国際化が叫ばれている。ただ、多くの日本人学生や研究者は留学生や海外からの研究者と肩を並べて研究するのに抵抗があるのか、キャンパス内のカフェでも多くの外国人は外国人同士で群れをなしている印象をもった。その主な原因は、会話を築くための共通した背景が欠けているため、多くの日本人は自分の専門分野の話以外で、他の言語で自分を表現することに慣れていないように感じる。

というわけで、私が所属する高エネルギー素粒子物理学研究室では、お茶の時間にほぼ定期的集まり、英語で学生と日常的な会話を交わしている。海外経験の豊富な秘書による週に一度の英会話レッスンでは、新しい言いまわし方や文化を学び、研究とはかけ離れたトピックについても英語で表現する練習の場になっている。また、KMI(素粒子宇宙起源研究機構)では月に一度通称“cheese and wineセミナー”を開催しており、カジュアルな雰囲気の中、各自の研究について発表し、教員学生問わずフランクに話し合う機会を設けている。

最近の研究では、世界中の国の人々と良い関係を築くことが欠かせない。若者の英語コミュニケーションの自信をできるだけ早い段階で培うことが、彼らのキャリアの成功につながると信じている。



書籍紹介

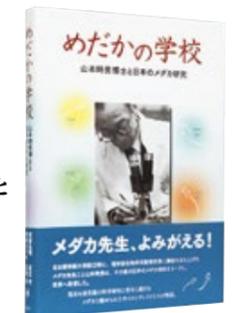
『めだかの学校 山本時男博士と日本のメダカ研究』

現象解析研究センター教授  
 飯嶋 徹 (Toru Iijima)

自らの研究テーマを冠して「○○先生」とよびたしまれている研究者が何人いるだろう。「メダカ先生」こと山本時男博士(1906~1977)は、メダカ研究一筋に生きた。本書は、2015年の名大博物館企画展での6人の講演を中心に、教え子による回顧録、最近のメダカ研究の報告、企画展の記録で構成されている。

教え子の回顧録には、研究室出身者が定期的集まる「メダカの会」、博士作詞の替え歌である「メダカの歌」などが紹介され、博士のメダカ研究への愛情が垣間見える。一方、研究にはあくまで厳しく、一度東山キャンパスに足を入れたら、研究以外のことはほとんど話をせず、教授室でもむだなことは話すなというオーラがあったという。教育者としては、学生の研究指導はあまり気にしていないようでありながら、突然長期の海外出張先から研究試料を送ってきたことや、研究テーマを断りなく変えたにもかかわらず、研究発表を聞いて「ユニークだわ」といってエンカレッジしたこと、博士後期課程への進学を躊躇していた教え子に「ドクターに行きますか」ではなく、「ドクターに行きますね」と大きな声でいい、思わず「ハイ」と答えさせたことなど、懐の深さ、肝の太さを感じさせる。

博士が論文執筆の場とした今池の音楽喫茶や、よく一杯飲んで食事をしたという食事処のエピソードも楽しい。本書は、こうした一途な大学教授の姿を浮き彫りにしている。



『めだかの学校 山本時男博士と日本のメダカ研究』  
 宗宮弘明・足立 守・野崎ますみ・成瀬 清 編著  
 あるむ / 2018年1月発行  
 2000円(税別)