

研究会・学会スケジュール

第25回名古屋メダルセミナー

The 25th Nagoya Medal of Organic Chemistry

開催日：2020年5月29日(金)
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

日本植物形態学会第32回大会

開催日：2020年9月18日(金)
開催場所：名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所
主催：日本植物形態学会
問い合わせ：東山哲也 トランスフォーマティブ生命分子研究所 教授
higashi@bio.nagoya-u.ac.jp / 052-747-6404

日本植物学会第84回大会

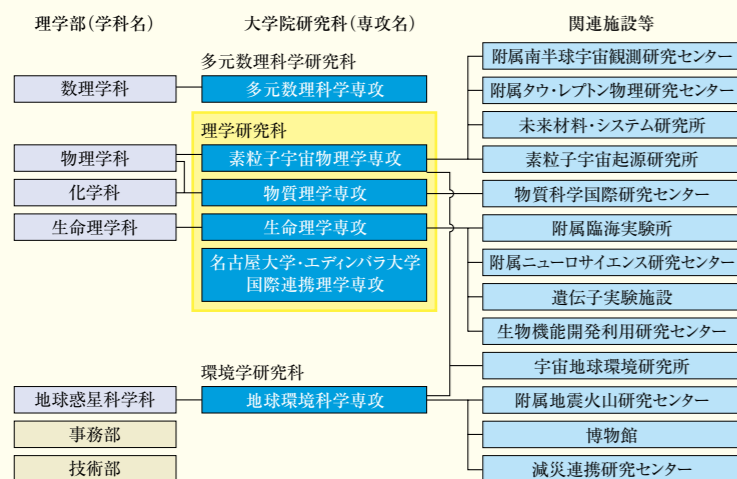
開催日：2020年9月19日(土)～21日(月)
開催場所：名古屋大学豊田講堂、全学教育棟本館、南部食堂
主催：公益社団法人 日本植物学会
問い合わせ：東山哲也 トランスフォーマティブ生命分子研究所 教授
higashi@bio.nagoya-u.ac.jp / 052-747-6404

第29回有機結晶シンポジウム

開催日：2020年9月26日(土)・27日(日)
開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館
主催：日本化学会有機結晶部会
問い合わせ：阿波賀邦夫 理学研究科 教授
crystal@chem.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2487

組織図

理学部・理学研究科・多元数理科学研究科・環境学研究科(地球環境科学専攻)



理 *philosophia*

オリジナルバインダをご用意しました

12冊綴じ・透明樹脂製 1部 790円(送料/消費税込み)

「理」philosophiaをびったり綴じ込むことができるオリジナルバインダをご用意しました。ご希望の方は郵便局備え付けの郵便振替用紙にてお申し込みください。なお、お申し込みから配送まで3週間程度かかりますのでご了承ください。

編集だより

「生物」と「物理」の掛け合わせは意味があるのかとよく問われる。なるほど表面的に理科をかじっただけでは両者は到底混ざりそうもなく思えてしまう。ところが、分子レベルに立ち戻ると、タンパク質は原子・電子が織りなす精密でやわらかい分子機械であることがわかる。そして、それらが生命活動を支える役者であることを認識する。我々は細胞内のタンパク質分子たちに、逐一指令を出すことはしない。ところが彼女／彼らは、見事に調和しながら自律的に役割をこなしている。電子やプロトンキャッチボールしたり、長い分子の紐を綱引きのように引っ張りあったり、あるいは切ったりつないだりしながら。こうしてみると「物理なしには生命は語るができない」ように思えてくる。我が国における生物物理学は名古屋大学で誕生した。「生物」と「物理」にまたがるユニークな特異点として、いまも理の遺伝子を生み続けるホットスポットである。(倭剛久)

表紙説明

タンパク質・脂質・核酸・糖・アミノ酸など、生命現象において重要な働きをする高分子の有機化合物を生体分子とよぶ。ナノメートルスケールの世界に生命の不思議を見る。



理 *philosophia*

No.38
spring-summer 2020
2020年4月24日発行

広報委員 阿波賀邦夫(研究科長)
寺崎一郎(副研究科長)
嘉村 巧(副研究科長)
松尾信一郎(数理学科)
飯嶋 徹(物理学科)※委員長
川村静児(物理学科)
倭 剛久(物理学科)
大木靖弘(化学科)
杉山 伸(生命理学科)
寺島浩行(生命理学科)
夏原由博(地球惑星科学科)
堂前弘樹(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。

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 052-789-2308 FAX 052-789-2800 E-mail kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp URL http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/

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]

spring-summer 2020

38

philosophia

特集

「ありのままの生体分子の姿を追い求めて」

- 04 — タンパク質の姿と動きを直接視る◇内橋貴之
- 08 — 拡張アンサンブル法による生体分子系の計算機シミュレーション◇岡本祐幸
- 02 — 時を語るもの〈野依良治博士〉◇北村雅人
- 03 — 理のエッセイ◇野尻伸一
- 12 — 理の先端をいく◇依田 憲／田中良弥／中澤知洋
- 18 — 理学部交差点

野依良治博士—右・左の美

野依良治博士のノーベル化学賞の原点は、野崎一博士*1の研究室にて取り組んだ「反応機構解明研究」にある。「不斉な銅錯体と結合したカルベンが基質と反応するならば右手形か左手形に偏って生成物が得られる。旋光計の針が右か左に回るはず」と考えて実験したところ、針がかすかに振れた。1966年のことである。その2年後、平田義正博士*2の眼にとまり、29歳の若さで本学理学部講座担当助教授に大抜擢される。天然物有機化学の世界的研究者に「化学教室に一つ違う流れの化学を創ってほ

しい」との天命を受けた野依博士は、分子触媒科学の新領域創成に邁進する。共同研究に携わった私には、先生の研究姿勢は「真・善・美」として映り、左右にこだわった触媒設計は芸術である。「美」の追求の先にBINAP*3が誕生し、旋光計の針はぐるぐる回った。資源枯渇・環境問題が顕在化する現在、野依法の重要性はより一層、高まっている。野依青年の発見から半世紀を経て、分子触媒科学は今、普遍的技術として確立されるに至っている。(北村雅人 名古屋大学大学院創薬科学研究科教授)

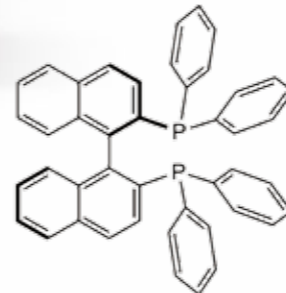


野依良治 (1938 -)
名古屋大学教授 (1972 - 2003)
名古屋大学特別教授 (2004 -)
日本学士院賞 (1995)
文化勲章 (2000)
ノーベル化学賞 (2001)

*1 野崎 一 (1922 - 2019)
元京都大学工学部教授

*2 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)

*3 BINAP
すべてベンゼン環が結合したC2対称性のホスフィンであり広く世に知られる配位子。



◇写真の説明
左は光学活性生成物の鏡像体比を精密に分析した高速液体クロマトグラフィー (HPLC) 装置。現在は名古屋大学野依記念物質科学研究館2001ノーベル賞展示室ケミストリーギャラリーで公開されている。上は左右のこだわりを表現したノーベル賞の盾。

博士から始まる道

野尻伸一 素粒子宇宙物理学専攻教授



Illustration: Mari Kaneko

文部科学省科学技術・学術政策研究所の資料によれば米国、ドイツ、フランス、英国、韓国、中国を含めた中で日本だけが博士号取得者の数が減っている。それに連動してか論文数も日本だけが2006年をピークとして減少している。

博士後期課程に学生が進学しない理由は、(1) 他の多くの国ではほとんどの大学院生に給料が支払われるのに対し、日本では経済的な支援を受ける機会が少なく、受けたとしてもその額は少ない、(2) 博士号を取った後に研究機関に残れる可能性が低く、企業に行くことも難しい、という2点であると考えられる。(1)の点の改善を目指し文部科学省が進めた大学院教育プログラム (GCOEやリーディング大学院) に協力してきたが、根本的な解決にはまだほど遠い。(2)については企業がより積極的に博士人材を採用してくれることを願っている。大学院で実際に研究することによってのみ自分が研究者に向いているか、また本当に自分が研究者になりたいのかを学生は知ることができる。将来の選択肢が多ければ、安心して博士後期課程に進学することができ、進学する学生も増える。一方、実際に研究を行った経験は企業に入っても役に立つはずである。リーディング大学院の制度を使って企業にインターンシップで送り込み、結局その企業で採用していただいた大学院生が私の研究室には何人かいる。リーディング大学院の予算はなくなったが、元学生たちが業績をあげ企業の意識を変えたとともに、将来より多くの博士人材を採ってくれることを期待しており、すでにその兆しを感じている。

また、一旦ポスドクになった者が企業に行くことは日本ではより難しく、これも他の国とは大きく異なる。ポスドクを経た者は研究の経験がより深く、自ら課題を見つけるとともに、それにどのように取り組んで解決していくかを自分で考える能力がより高く、企業が正しく使うことができれば有用な人材となる。このことについても企業に送り込んだ博士人材の活躍により、企業の意識が変わっていくことを期待する。

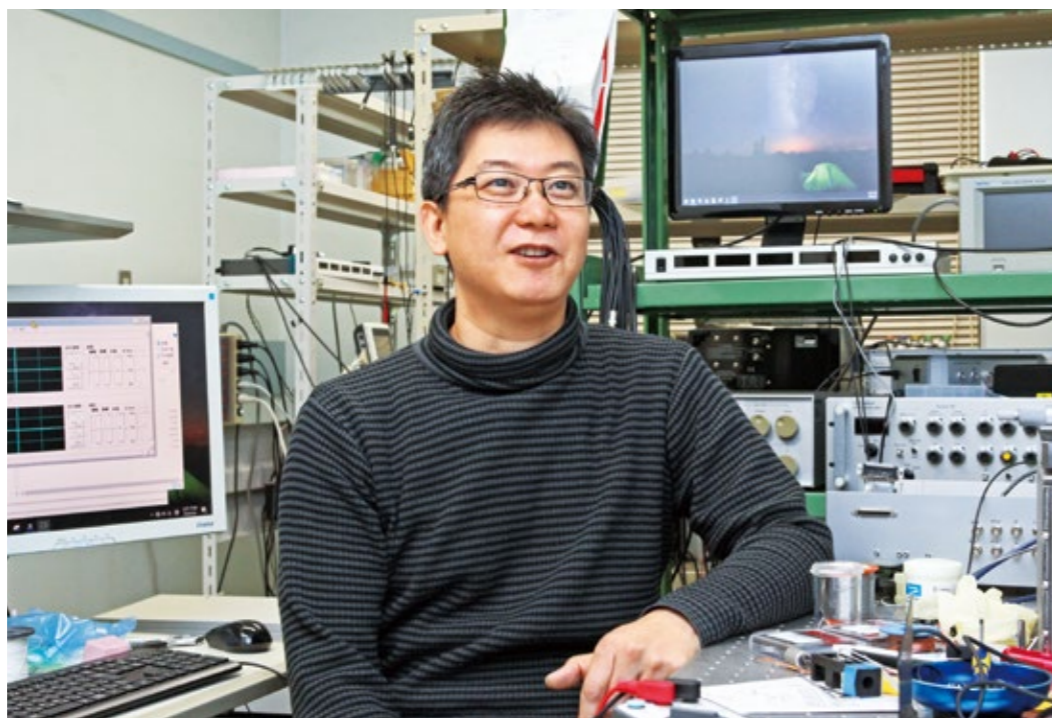
Shin'ichi Nojiri

1958年京都市生まれ。1986年京都大学大学院理学研究科物理学第二専攻博士後期課程修了(素粒子論)。京都大学基礎物理学研究所非常勤講師、日本学術振興会特別研究員、高エネルギー物理学研究所非常勤講師、東京大学教務補佐員、防衛大学校助手、講師、助教授を経て、2006年より現職。専門は素粒子の宇宙論・重力理論。

1966年のSF映画『ミクロの決死圏』は、人間の体の中でどんなことがおこっているのかを当時の映像技術を駆使して表現していた。テクノロジーやコンピューターの進歩した2020年の現在、生物の体内における生体分子の一挙手一投足を驚くほど高い分解能で追跡することができる。今号の特集は実験・理論の双方から生命を支える生体分子の挙動にアプローチする研究の最先端を案内する。

タンパク質の姿と動きを直接視る

内橋 貴之 物質理学専攻教授



Takayuki Uchihashi

1970年生まれ。1998年大阪大学工学研究科電子工学専攻修了。博士(工学)取得。アトムテクノロジー研究体・博士研究員、姫路工業大学工学部助手、タフリン大学トリニティカレッジ・シニアリサーチャー、金沢大学自然科学研究科助手、金沢大学理工研究域准教授、教授。2017年より現職。専門は走査型プローブ顕微鏡の開発と応用、一分子生物物理学。

タンパク質の構造とダイナミクス

20種類のアミノ酸が連なった高分子であるタンパク質の種類は10万にもおよぶといわれ、生命活動を維持するためのさまざまな機能を独自に担い、相互に絡

み合いながら精緻で頑強な生命現象を織りなしている。タンパク質は単にアミノ酸が数珠状につながったヒモではなく、アミノ酸の種類と結合順で決まる独自の立体構造を有し、それが周囲の環境変

化や基質の結合などに応じて柔軟に変化し、さらには周囲の分子とのダイナミックな相互作用を通して機能を発現している。タンパク質が働いている様子を描いたアニメーションをご覧になったことがあ

るだろうか。インターネットを検索すると世界中の研究者が作製したタンパク質が働く様子を描いた動画を見つけることができる。たとえばDNA複製の様子を描いた有名なアニメーション動画(URL後掲)があるが、その動画では、DNAの二本鎖を解くヘリカーゼやDNA合成を担うDNAポリメラーゼといった複数のタンパク質がDNAに結合して整然と働いている様子が示されており、まさにタンパク質が分子機械であることを感じさせる。このようなあたかも「見てきた」かのような動画はどのようにして作製されたのだろうか。もちろん、タンパク質そのものを直接見ることはできない。膨大な時間をかけて蓄積されたさまざまな生化学的・物理的な計測と解析結果を突き合わせて、矛盾のない論理的な帰結が根拠となっているのである。どの程度真実を表しているのかを知ることはできない。もしも、直接タンパク質が働いている様子を直接的に「視る」ことができれば、タンパク質が機能を発揮するメカニズムを一目瞭然に、しかも短期間に知ることができるに違いない。

見えないものを見る技術

タンパク質の大きさは普通10-50nm

(ナノメートル:10億分の1m)程度ときわめて小さいので、当然直接目で見ることはできない。このような極微サイズのタンパク質の構造やふるまいを知るための多種多様な技術が開発されてきた。計測とは外部から対象物に何らかのプローブを当てて、測定対象により乱されるプローブの反応を検出することである。プローブとして光を使う光学顕微鏡では、タンパク質に照射した光の散乱や吸収、波長変化を検出し、それらからタンパク質の位置や構造の変化を測定する。光学顕微鏡の空間分解能は光の回折限界により波長の半分程度に制限されるので、可視光(400-700nm)では1個のタンパク質を直接可視化することはできない。X線や電子線といった波長がnmより小さな波をプローブとして用いればタンパク質の構造を高精度に決定することもできるが、タンパク質を結晶化する必要やプローブの性質から真空環境での計測が必要であったりして、溶液環境下の生きた状態でタンパク質を計測することはできない。これら従来からあるタンパク質の観察法は全てプローブとして波を利用したものである。つまり、人間の視覚と同じ原理である。

一方、我々は視覚以外にもっとプリミ

ティブな感覚で物質のかたちを検知することができる。触覚である。タンパク質のサイズより小さな触覚でその表面をなぞってやればその構造を知ることができるはずである。実際、触覚を原理とした原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscopy:AFM)とよばれる顕微鏡が1986年に発明された。「原子間力」というと何か難しそうな原理を使った装置のように聞こえるが、原理はきわめて単純で、先の鋭い針を試料表面に接触させて針と試料の間に働く力から試料の表面構造を画像化する。AFMでは鋭い針がカンチレバーとよばれる柔らかい板バネの先に取り付けられており、針先端が試料に接触するとカンチレバーがたわむので、そのたわみをカンチレバー背面に照射したレーザー光の反射角度の変化から検出する(図1)。測定原理から明らかのように、AFMは溶液中でも動作することから、タンパク質を生きた状態で観察でき、生物試料の光学顕微鏡や電子顕微鏡観察で必要とされる面倒な試料の前処理を必要とせず、ナノメートルスケールの分解能が比較的容易に得られる。

AFMは販売もされており世界中で利用されてきたが、欠点は画像化の速度が著しく遅いことであった。普通、1枚の画像を得るのに1分以上かかるので、タンパク質が動いている様子を撮影することはできない。我々のグループではAFMの高速化に長年にわたって取り組み、100msで1枚の画像を取得できる高速AFMの開発に成功し、今では世界中でタンパク質の動態撮影に使われるようになってきている。以下では、高速AFMで撮影されたタンパク質の動態観察例を二つ紹介する。

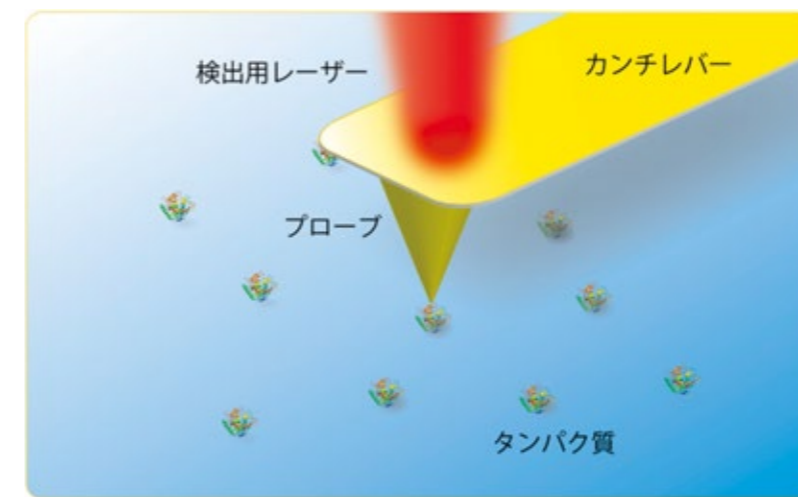


図1 AFMの動作原理
プローブ(探針)と試料表面を接触させた際にプローブに加わる力をカンチレバー背面に照射したレーザー反射光の角度変化で検出する。

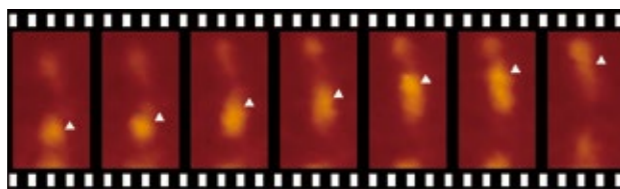
リニアモータータンパク質の歩行運動

ある種のタンパク質はレール状タンパク質の上を移動して、細胞内で小胞やさまざまな物質を輸送したり、筋肉に代表されるような生体運動を担っている。このような運動機能をもつタンパク質は一般にモータータンパク質とよばれる。よく知られたモータータンパク質の一つに筋肉の収縮を司るミオシンとよばれるタンパク質がある。筋肉の収縮とはアクチンとよばれる線維状タンパク重合体に沿ったミオシンの滑り運動に還元される。ミオシンはリン酸化化合物であるATP（アデノシン三リン酸）を加水分解した際に放出されるエネルギーを利用して構造変化することで力を発生しており、化学反応と力学運動がカップルした典型的なモータータンパク質として、その運動機構の解明は長年にわたって生物物理学の中心的研究テーマであった。筋肉に限らずミオシンは同様の原理で細胞内において小胞輸送も担っており、そのうちの一つにミオシンVとよばれるタンパク質がある。ミオシンVの面白い点は1個の分子がアクチン線維に結合すると、長距離にわたって一方へ連続移動運動をすることである。プロセス運動とよばれるこの運動は、蛍光標識したミオシンVを光学顕微鏡で観察することで、蛍光色素の輝点の移動として観察することができる(図2)。ミオシンVの詳細な構造は電子顕微鏡によって明らかにされており、二つのアクチン結合部位から伸びたヒモ状の構造(脚)がより合わさった二本脚構造をしている。

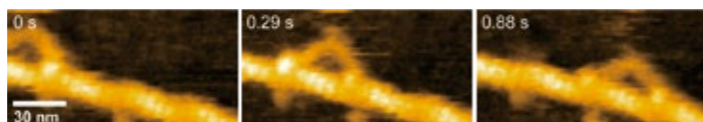
図2 ミオシンVのアクチン線維に沿った歩行運動

光学顕微鏡では蛍光標識したミオシンVがアクチン線維に沿った一方の移動が蛍光輝点の移動として観察される。高速AFMではミオシンの動きそのものを可視化することができる。

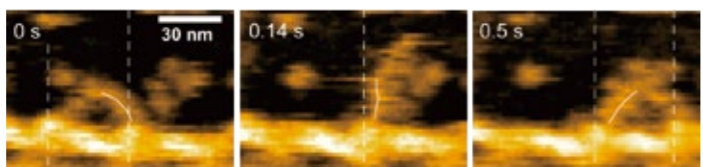
光学顕微鏡で観察されたミオシンVのアクチン線維に沿った連続運動



高速AFM撮影されたミオシンVの線維に沿った運動



ミオシンVの後足がアクチン線維から外れてから再び結合する様子



ミオシンVの構造



問題はミオシンVがどのようにアクチン線維上を移動するのか。さらには、力発生の原理やATPの加水分解と運動との関係(ATP1個でどれくらい移動するのか)である。ミオシンVのかたちを見るときにも「歩き」そうである。ところが、単純に移動方法に関してだけでも二通りの様式が考えられる。一つは尺取虫のように後足がアクチンから離れてから前足と同じ位置で再び結合するインチワーム方式、もう一つは後ろ足が前足を飛び越えるハンドオーバーハンド様式である。これを調べるだけでも、ミオシンVのプロセッシブ運動が発見されてから実に10年以上の年月とさまざまな手法を用いた膨大な研究の蓄積が必要であった。

アクチン線維を固体基板に固定して、ミオシンVとATPを観察溶液に入れて高速AFMで観察すると、ミオシンVがアクチン線維に沿ってステップ状に歩く様子が直接動画として撮影することができた。この動画から、ミオシンVがハンドオーバーハンド様式で移動していることがひと目でわかる。さらに、基板に小さなタンパク質分子をまくことで、これが障害物となってミオシンVの移動を減速すること

もでき、後足がアクチン線維から外れたあとにブラウン運動でブラブラしながらアクチンを探索しつつ再び結合する様子も見ることができる。このように、動画としてタンパク質の動きを直接撮影することで、さまざまな手法を駆使しても決定的な証拠が得られなかった分子機構を見ただけで即座に理解することができる。

分子の「交通渋滞」

セルロースはグルコース(ブドウ糖)が直鎖状につながった多糖で、植物細胞壁の約半分を占める物質である。地球上で最も豊富に存在する有機物であり、再生可能な生物資源(バイオマス)としての利用が望まれている。セルロースをいかに低エネルギーかつ低コストでグルコースにまで分解できるかが、セルロース系バイオマスを有効利用するための鍵である。しかしながら、セルロースはさわめて安定な化合物であるため、その分解には強酸や高温、高圧といった過酷な条件下で膨大なエネルギーが必要となる。一方で、自然界においてセルロースは、セルロース分解性の微生物によって常温、常圧下の温和な環境でも分解されている。この反応を担ってい

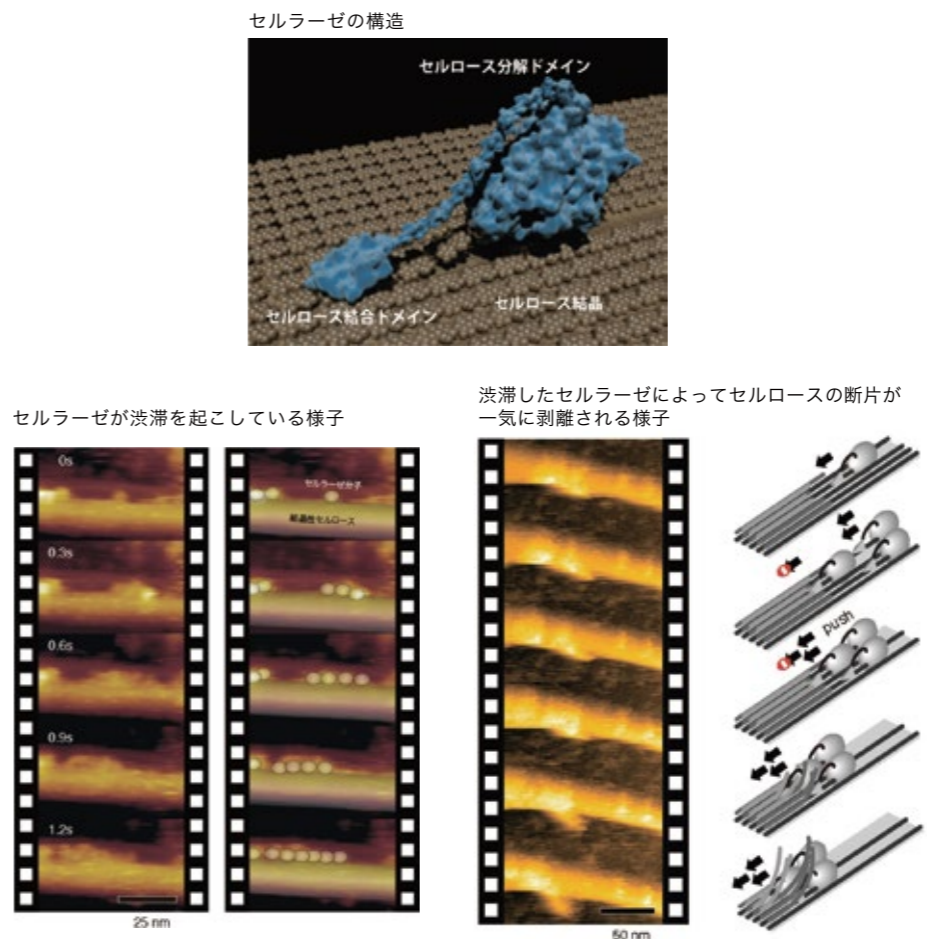


図3 セルラーゼによるセルロースの加水分解運動
セルロース結晶に結合したセルラーゼは平均速度5.3nm/sで移動しながらセルロースを分解する。セルラーゼ分子がセルロース結晶上で停止すると後続の分子が渋滞を起こし、見かけの分解活性が著しく低下する。

るのが一般的にセルラーゼと総称されるセルロース分解酵素である。セルラーゼはセルロース結合部位でセルロース結晶に結合し(図3)、活性ドメインに取り込んだセルロースの鎖を加水分解しながらセルロース表面を連続的に移動すると想定され、生化学的計測から見積もられたセルラーゼの移動速度は1nm/minと非常に遅いものであった。酵素反応の場合は固液界面であり、かつ、強固な水素結合で形成されているセルロースが基質なので、加水分解反応が速く進むのが困難は自明であると理解されてきた。

カビの一種から精製したセルラーゼの固体基板上にまいた結晶性セルロース上での挙動を高速AFMで観察した。天然セ

ルロースではセルラーゼがモノレールのように一列に並んで進んでおり、移動したり止まったりしている様子が観察された。速い分子では7.1nm/sもの移動速度で進み、平均の移動速度は5.3nm/sと見積もられ、セルラーゼは従来考えられていたよりも実が200倍以上速い速度で移動できることが明らかになった。一方で前を走っている分子が減速ないし停止すると、後続の分子が進めなくなるという「渋滞」現象が頻繁に起こり、さらに、一定程度の分子が蓄積すると多数の力によってセルロースは大きな断片として剥離される様子が見られた。このことから、生化学的に見積もられたセルロースの分解効率は見かけの値であり、個々の酵素自体は高い分解活性を

有していることがわかった。また、アンモニアによる化学処理で活性化したセルロースではセルラーゼの分解活性が向上することがよく知られていたが、その分子メカニズムは謎であった。高速AFM観察で、処理したセルロースでは結晶構造の変化によって表面に多くの「車線」ができた結果、セルラーゼ分子の渋滞の影響が低減されていることもわかった。

広がる可能性

高速AFMはこれまでアンサンブル平均あるいは静止画としてしか観測できなかった生体分子の構造をリアルタイムで可視化できる今のところ唯一の技術である。「百聞は一見に如かず」の諺通り、動画は多くの情報を含み、これまでさまざまな解析手法を駆使して明らかにされてきた事実や仮説が高速AFMによる1回の観察によって視覚的証拠として一目瞭然に検証できるようになった。さらに、そこから新しい事実の発見も可能になった。

タンパク質の一分子観察にとどまらず細胞やバクテリアなどのより複雑な生体試料の観察への応用や光学顕微鏡との同時観察も可能な複合機の開発も進んでいる。また、針で試料に力学負荷をかけるAFMの特徴を積極的に生かして、分子の構造を機械的に操作し、その応答を追跡する試みも行われている。さらに、最近では応用範囲は生物分野だけにとどまらず、超分子の重合過程や高分子ハイドロゲルの動的挙動、固体基板へのミセルの吸着挙動といった化学分野への応用も広がってきている。今後ますます応用範囲は拡大するものと思われ、さまざまな科学の発展を支える解析ツールとして活躍することが期待される。

参照動画
DNA複製のアニメーション動画
<https://www.biointeractive.org/classroom-resources/dna-replication-advanced-detail>

拡張アンサンブル法による生体分子系の 計算機シミュレーション

岡本 祐幸 物質理学専攻教授

仮想空間での実験とは

実験は実際の生体分子を直接観測するが、計算機シミュレーションは計算機上の仮想空間で生体分子を観測する。実験は複雑な系を扱うことができるが、計算機が扱える生体系には計算機の能力に限度があるので、扱える系は比較的小さなものになってしまう。たとえば、普通の実験では、 10^{-3} モルとか 10^{-6} モルとか（すなわち、 10^{21} 個とか 10^{18} 個とかの分子数）のサンプルを扱うが、計算機上では、世界最大のスーパーコンピュータをもってしても 10^8 個とか 10^9 個の原子数しか扱えない。また、実験では、

よく数時間とか数日間の現象を観測するが、計算機上では、ニュートンの運動方程式を差分方程式として解き、時間ステップを1フェムト秒（ 10^{-15} 秒）として、時間発展を追っていくので、膨大なステップ数の計算が必要になり、現在のスーパーコンピュータの計算能力ではマイクロ秒（ 10^{-6} 秒）とか最長でもミリ秒（ 10^{-3} 秒）ぐらいの間に起こる現象しか観測できない。

それでは、計算機シミュレーションは生体分子系のような多自由度複雑系には全く歯が立たないのかといえば、そうではなく、現在では、実験屋と計算屋の

共同研究が普通に行われるようになっているのである。計算機シミュレーションの強みは、各原子の位置と速度をフェムト秒の時間ステップで時々刻々追えることであり、仮想空間上ではあるが、時間および空間の超高解像度をもつ顕微鏡で観測した情報を提供することができることである。筆者らは、素粒子物理学や物性物理学の分野で開発された拡張アンサンブル法と総称される手法を生体分子系に導入するとともに、生体分子系に適した新手法を開発して、さまざまな問題に挑戦してきた。

従来の計算機シミュレーションは、実

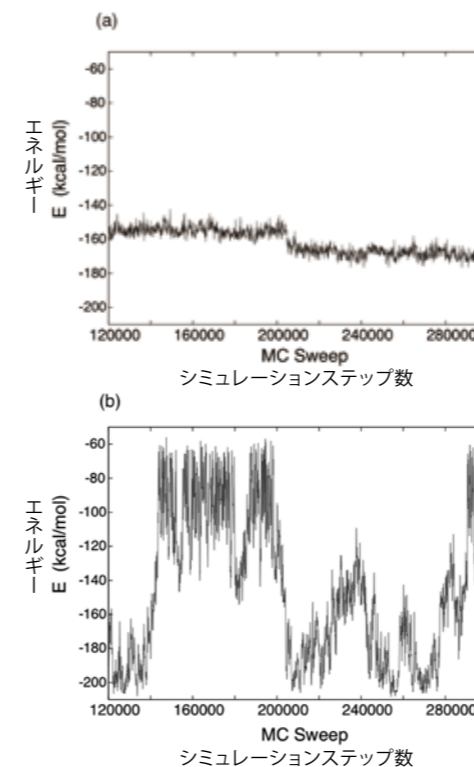


図1 計算機シミュレーション中のポテンシャルエネルギーの「時間発展」
リボヌクレアーゼT1というタンパク質の一部である17アミノ酸残基のペプチドフラグメントの結果。
(a)は温度T = 200Kにおける従来のシミュレーション。
(b)は拡張アンサンブル法によるシミュレーション。従来のシミュレーションでは、エネルギーが約20の幅をゆらいでいるだけなのに対し、拡張アンサンブルシミュレーションでは、約140もの広い幅のエネルギーの酔歩が実現している。

拡張アンサンブル法の原理

まず拡張アンサンブル法の原理を小ペプチドの例で説明する。リボヌクレアーゼT1というタンパク質の一部である17個のアミノ酸残基からなるペプチドフラグメントは、 α ヘリックスとよばれる螺旋構造をもっていることが実験によって知られている。しかし、従来の温度一定のシミュレーションを実行しても、 α ヘリックス構造はできない。それに対し、拡張アンサンブルシミュレーションを実行すれば、エネルギーが高い時にはコイル状態であるが、エネルギーが下がってくると α ヘリックス構造が形成される。図1にこれら2種類のシミュレーション中のエネルギーの時間発展を示す。従来のシミュレーションでは、エネルギーが約20の幅をゆらいでいるだけなのに対し、拡張アンサンブルシミュレーションでは、約140もの広い幅の酔歩が実現していることがわかる。そして、この2シミュレーションのシミュレーションステップ数が12万から30万に至るまでの間でそれぞれ四つの構造を抽出して図2に示した。

図2 (a1) - (a4)の従来のシミュレーションでは、図2 (a3)でペプチドの左端

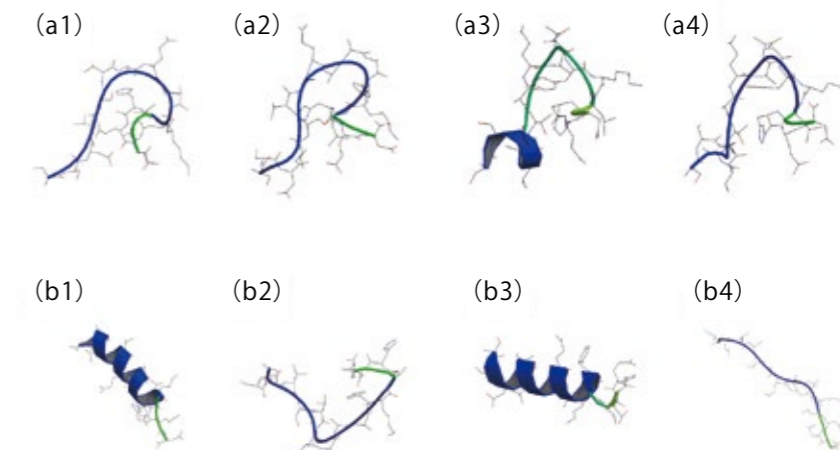


図2 計算機シミュレーション中の立体構造のスナップショット
リボヌクレアーゼT1というタンパク質の一部である17アミノ酸残基のペプチドフラグメントの結果。
(a1)-(a4)は図1 (a)の従来のシミュレーションからのスナップショット。
(b1)-(b4)は図1 (b)の拡張アンサンブルシミュレーションからのスナップショット。
対応するシミュレーションステップ数は(a1)と(b1)は13万8000、(a2)と(b2)は19万、(a3)と(b3)は24万3000、(a4)と(b4)は29万5000。

が α ヘリックス構造をつくりかけているが、エネルギー極小状態にとどまってしまっていて、長いヘリックス構造ができないのに対し、拡張アンサンブルシミュレーションでは、図2 (b1)、(b2)、(b3)、(b4)と時間発展するにつれて、 α ヘリックス構造とコイル状態の間を行き来して、幅広い立体構造空間をサンプルしていることがわかる。すなわち、従来のシミュレーションでは一つの状態にとどまってしまうのに対し、拡張アンサンブルシミュレーションでは、エネルギー（温度）が上がった時に熱振動が増すため、エネルギー極小状態から脱出することができ、幅広い立体構造空間の効率良い探索が可能になるのである。

レプリカ交換法の適用例

次に拡張アンサンブル法の一つであるレプリカ交換法の適用例を紹介する。レプリカ交換法では、系のコピー（レプリカ）と温度の値をそれぞれM個ずつ用意して、それぞれのレプリカに一つの温度値を対応させる。平行して独立な従来の温度一定シミュレーションを実行しながら、一定時間間隔ごとに隣り合う温度



Yuko Okamoto

1956年三重県尾鷲市須賀利町生まれ。1975年静岡県立浜松北高校卒業。1979年ブラウン大学卒業。1984年コーネル大学大学院修了、Ph.D.の学位を取得。1984-1986年バージニア工科大学博士研究員。1986年奈良女子大学理学部助手（1993年、助教授）。1995年分子科学研究所助教授（総合研究大学院大学助教授併任）を経て、2005年より現職。専門は生物物理、計算科学。

対を交換していく。これによってすべてのレプリカにおいて温度空間の酔歩が実現されて、シミュレーションがエネルギー極小状態にとどまるのを避けることができる。

一つ目の例は、膜タンパク質の立体構造予測である。膜タンパク質は細胞膜などの脂質2重膜を貫通しているタンパク質であり、膜貫通部分は多くの場合、 α ヘリックス構造をとっている。タンパク質の動きの観測には前稿の高速原子間力顕微鏡が有力であるが、自然の立体構造はX線回折、核磁気共鳴(NMR)、電子顕微鏡などの実験で決定され、プロテインデータバンク(PDB)に登録されるが、現在、16万個を超えるデータが蓄積され、無料で公開され、他の研究者の研究に利用されている。ゲノム解析によると各生命体が合成するタンパク質の約4分1は膜タンパク質であるにも関わらず、膜タンパク質では膜も一緒に結晶化するのが難しいので、X線回折実験等で構造決定するのが困難で、PDBのデータはほとんどが水溶性タンパク質のものであり、膜タンパク質のものは全体の数パーセントにすぎない。

実験で構造決定が難しいなら、計算機シミュレーションでやろうというのが筆者らの考えであった。この問題に我々は大胆な近似を導入した。すなわち、膜の外側の水分子も膜を構成する脂質分子も省略し、膜貫通ヘリックスだけを考慮した。シミュレーションの操作としては、ヘリックスの平行移動と回転、側鎖の構造変化、そしてヘリックスのたわみの4種類である。図3にバクテリオロドプシンという7本のヘリックスからなる系のレプリカ交換シミュレーションの時間発展を示す。温度が高い時は空間的にも離れるとともにヘリックスが大きく歪むが、低温ではヘリックス同士が会合していることがわかる。図4にPDBに登録されて

いるX線回折実験で決定された構造と我々の予測結果を比較した。実は、7本のヘリックスの並び順ばかりでなく、各ヘリックスの理想形からの曲がり具合も良い一致が得られた。

二つ目の例は、抗体(免疫グロブリン、IgG)の糖鎖の構造ダイナミクスに関する、我々が独自に開発した、レプリカ交換分子動力学(REMD)法の適用例である。抗体タンパク質は、Fc γ 受容体(Fc γ IIIa)とよばれるタンパク質に結合することで機能を発揮する。IgGとFc γ IIIaの相互作用には糖鎖が関わっており、抗体の糖鎖からフコース残基を取り除くことによってガン細胞を殺す活性が大きくなる。我々は糖鎖を含むIgGとFc γ IIIaの複合体のうち、フコース残基を含む系と取り除いた系の二つの場合において、温度の酔歩を実現するREMDシミュレーションを実行した。ここでは、主に糖鎖の構造ゆらぎを調べた。図5に計算の初期構造を示す。その結果、X線回折実験の結果と同じように、フコース残基が付いた系ではFc γ

IIIaの糖鎖の構造が大きくゆらいでおり、IgGとFc γ IIIaの糖鎖同士の接触が失われていることが示された(参照動画)。この計算結果により、抗体の糖鎖からフコース残基を取り除くことにより、抗体の制ガン作用が促進される仕組みの理解を深められた。また、本計算の副産物として、構造ゆらぎが大きく、X線回折実験では決定できなかった糖鎖の一部の立体構造を決めることもできた。

期待される創薬設計への利用

本稿では、筆者らの生体分子系の拡張アンサンブルシミュレーションの結果を紹介した。はじめに述べたように、これらは仮想空間上のものであり、実験結果を再現できない場合も多い。すなわち、計算機上で扱う系のエネルギー関数が正確でなければ、計算結果は信用できないということである。現在の計算は古典力学に基づいているが、エネルギー関数の精度を上げるためには、より精度が高い量子力学に基づく計算を実行する必要がある。現在のスーパーコン

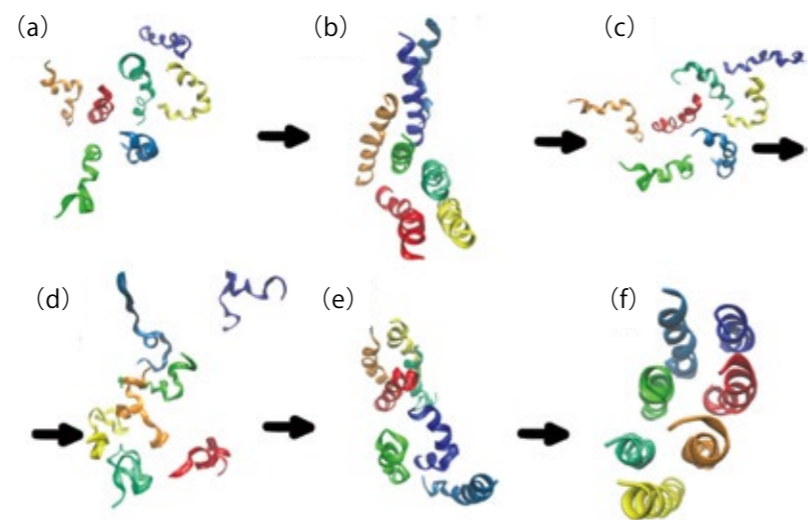


図3 レプリカ交換モンテカルロシミュレーション中の立体構造のスナップショット
バクテリオロドプシンの7本の膜貫通ヘリックスのレプリカ交換モンテカルロシミュレーションからの立体構造のスナップショットの時間発展。温度が高い時(a),(c),(d)は空間的にも離れるとともにヘリックスが大きく歪むが、低温(b),(e),(f)ではヘリックス同士が会合している。

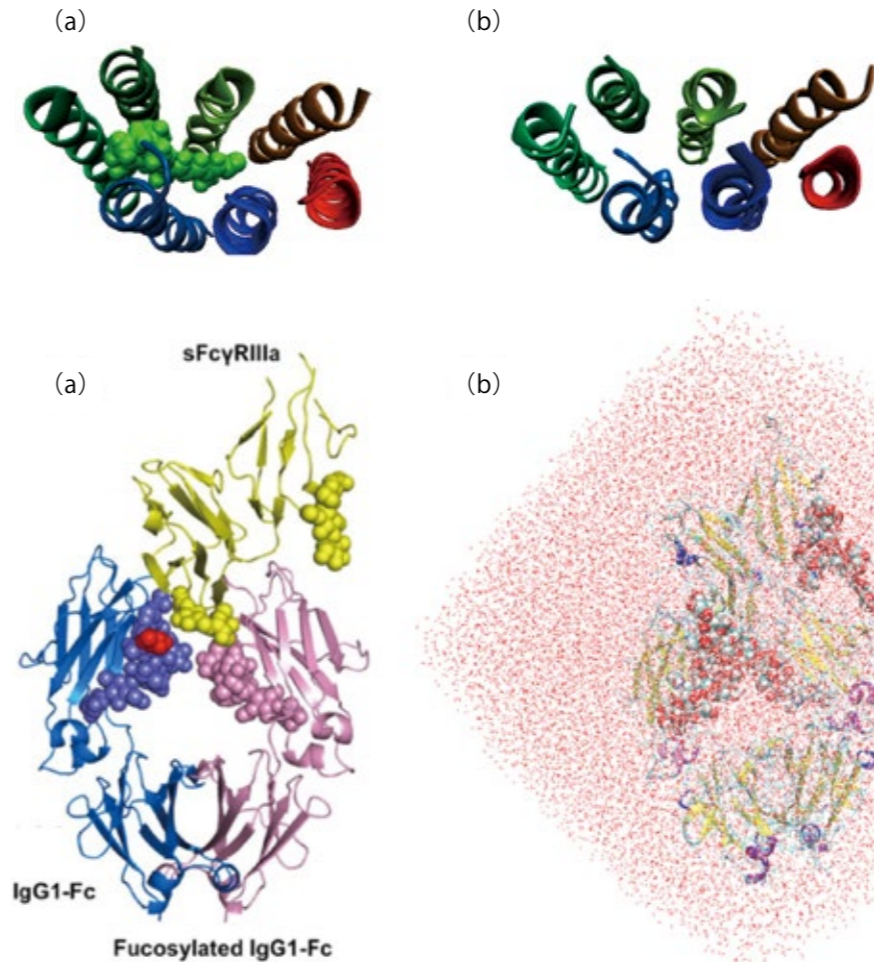


図4 実験結果と計算結果の比較
(a)はX線回折実験で決定された、バクテリオロドプシンの7本の膜貫通ヘリックスの自然の構造(PDB code: 1PY6)。レチナル分子も空間充填図で示した。
(b)はレプリカ交換モンテカルロシミュレーションで予測された構造。両者において、7本のヘリックスの並び順ばかりでなく、各ヘリックスの理想形からの曲がり具合も良い一致が得られた。

図5 レプリカ交換分子動力学シミュレーションの初期状態
二つのタンパク質IgGとFc γ IIIaとそれらの糖鎖のレプリカ交換分子動力学シミュレーションの初期状態。
(a)はPDBデータから構築したフコース残基(赤色)を含む系。タンパク質の部分(リボン図で青色と紫色はIgG、黄色はFc γ IIIa)は583個のアミノ酸からなる。糖鎖は球の空間充填図で表した。水分子は省略した。
(b)は水分子も表示した図。水分子の数は約9000個であり、系の全原子数は、フコースを含む系と含まない系で、それぞれ、9万6323個と9万6797個であった。

ピュータの能力がまだ低すぎるのである。ただし、計算機技術の進歩は絶え間なく、これまで、大体、30年間で約100万倍の計算能力の向上がずっと得られてきた。よって、正確なエネルギー関数の計算はいずれ可能になるであろう。精度の高いエネルギー関数と幅広い立体構造空間を探索できる拡張アンサンブル法を合わせることによって、計算機上で百発百中の実験結果の再現が可能となると期待される。

本稿では、拡張アンサンブル法の最も基本的な例として、温度空間の酔歩を引き起こす手法である、レプリカ交換法による結果を紹介した。我々は拡張アンサンブル法を他の変数空間の酔歩を実現する手法へと一般化してきた。たとえ

ば、圧力(と体積)空間の酔歩を実現する拡張アンサンブル法の開発によって、タンパク質の高圧変性のメカニズムを解明することに成功した。また、薬剤候補分子とタンパク質の距離の酔歩を実現する拡張アンサンブル法を開発することによって、どの薬剤候補分子が標的とするタンパク質に結合しやすいかを予測できるとともに、その結合自由エネルギーを高い精度で計算できるようになった。これは、製薬会社の創薬設計に大きな革命を引き起こすと期待している。すなわち、創薬においては多くの薬剤候補分子が標的とするタンパク質に結合するかどうかを実験で決定する必要がある(スクリーニングとよばれる)。これには長い時間と膨大な費用がかかる。これ

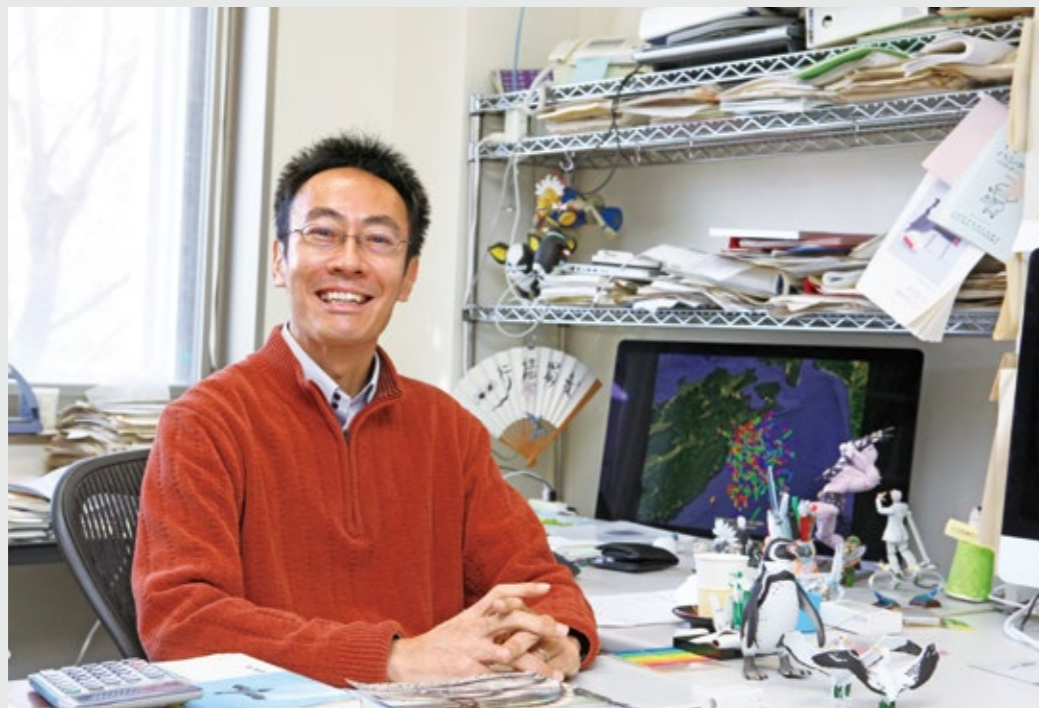
を計算機シミュレーションによってやってみれば、創薬設計にかかる時間と費用を大幅に削減できる訳である。

実験屋と計算屋が緊密な共同研究を繰り返すことによって、生物物理学の分野の将来の発展はめざましいものになるであろう。

参照動画
フコース残基を含まない場合と含む場合の糖鎖、IgG、Fc γ IIIaの複合体のREMDシミュレーション
<https://www.nature.com/articles/s41598-017-13845-8>
中のElectronic supplementary materialの二つの動画を参照。
フコース残基を含まない糖鎖、IgG、Fc γ IIIaの複合体の場合 (Video S1)
フコース残基を含む糖鎖、IgG、Fc γ IIIaの複合体の場合 (Video S2)

バイオロギングで解き明かす野生動物の行動

依田 憲 地球環境科学専攻教授



Ken Yoda

2003年京都大学大学院理学研究科より博士(理学)取得。京都大学大学院理学研究科リサーチ・フェロー、カリフォルニア大学サンタクルズ校Research Associate、日本学術振興会特別研究員を経て、2007年より名古屋大学大学院環境学研究科准教授、2014年より現職。専門は動物行動学、動物生態学。

空、海、大地を大移動する動物たち

大移動する野生動物の魅力に取り憑かれている。つい最近も、海上しか飛ばないと思われていた海鳥のオオミズナギドリ(図1)が、本州の険しい山地の上空を飛んで日本海から太平洋まで移動することを発見した。翼開長(翼を広げたときの長さ)が1m以上もある大きな鳥が、人知れず頭上を飛んでいた(ただし幼鳥のみ)のは驚きである。

オオミズナギドリの陸上飛翔の発見が今世紀まで遅れたのは、空や海や大地を大移動する野生動物を追跡する技術

の誕生を待つ必要があったからだ。動物行動学では「野生動物を目で見て観察すること」が基本となるが、ほとんどの野生動物は長時間にわたって追跡することが難しい。

この観察限界を突破するために誕生したのが、野生動物に小型のセンサを装着し、動物の行動や動物の経験する環境に関する情報を記録するバイオロギング(Bio-logging)手法である。1960年代に大型のアザラシに水圧計を装着して潜る深さを測ったことに端を発し、今世紀に入って測器の多様化と小型化が急速

に進み、ついにオオミズナギドリにGPSを装着できたのである。

進歩するバイオロギング

バイオロギングで使われるのは、位置を記録するGPS(図2)だけではない。動物の行動は動きを伴うので、運動を加速度センサで記録すれば行動を再現できるし、加速度からエネルギー消費量も推定できる。また、ビデオカメラを装着すれば、周囲の自然環境や個体間の社会性を記録することができる(図3)。さらに、これらの複数のセンサが効率的に働くように、



図1 オオミズナギドリ

春から秋にかけて日本周辺の島嶼で繁殖し、子育てが終わると赤道付近まで渡る。形態も行動も海上飛翔に適応しているため、日本海側で繁殖する個体群が南へ渡る際には、弧状の本州が障壁となる。バイオロギングによって、成鳥は津軽海峡か対馬海峡を巧みに通過してから太平洋を南下する一方、幼鳥は本州上空を飛んで渡っていることが判明した。

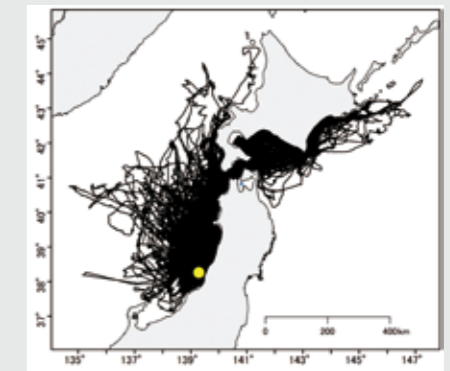


図2 オオミズナギドリ親鳥の移動経路

動物装着型GPSによって記録された移動経路(黒色)。親鳥は繁殖地(黄色)の巣穴で待つ雛のために、巣穴と海洋の採餌場を往復して、カタクイワシなどを運搬する。

我々は世界で初めて人工知能(AI)を搭載したバイオロギング装置を開発した(図4)。たとえば、ビデオカメラは小型化が必要ことから鳥の場合は数時間しか記録できないが、低消費電力の加速度センサを常時動かしておき、事前に学習した興味深い動きをAIがとらえたときのみカメラを起動する。この新型の装置によって、新しい動物の行動が次々と発見されている。また、大量の移動データがあれば、AIを使って動物の移動を予測することもできる。動物の移動予測をAIで高度化することで、動物の保全や管理に対して新しい指針を作ることに貢献している。

バイオロギングによって、野生動物が複雑に変化する環境に柔軟に対応していることがわかってきたが、脳内でのような情報処理をしているのか、至近的メカニズムはよくわかっていない。そこで、

無線式の脳神経活動計を頭部に装着し、野鳥の脳内で何が起きているのかも調べたところ、前述のオオミズナギドリの渡り行動をうまく説明する神経活動がとらえられた。至近メカニズムについては実験室の齧歯類で詳しく研究されているが、野外環境下で自然淘汰という力学を受けて進化した動物の大移動を理解するためには、実験室から飛び出すことも必要である。

環境について野生動物に教えてもらう

動物の行動は自然環境の影響を受けるので、バイオロギングで行動を記録すれば、地球環境に関する情報を抽出できる。たとえば海鳥は海上での休息中に海流に流されるので、GPSで記録された鳥の漂流経路から現場の海流がわかる。また、風を受けて飛翔速度が変化するので、

逆に飛翔行動から風向・風速を推定できる。こうした情報は人工衛星からもわかるが、細かい情報や沿岸部の情報は得られないので、鳥が現場から報告してくれる情報が衛星データの間隙を埋める。実際に、こうした動物データを取り込んで(データ同化して)、海況の予測精度が高まることも示している。

動物の行動を研究していると、それはヒトの役に立つのか、と聞かれる。役に立つために研究しているわけではないのでどちらでも良いが、こうした応用術もある、と最近はいえるようになった。これらは動物の行動を穴が空くほど見ていたから思いついた研究であって、動物を利用してやろう、などと考えていたら生まれなかっただろう。自然に対する敬意が良い観察となり、優れた発想を生み、たまにヒトの役に立つこともあるのだ。



図3 アオアシカツオドリの撮影した映像

ビデオカメラを背中に装着したアオアシカツオドリによって撮影されたペルーの大地。左下に見えるのはアオアシカツオドリの後頭部。こうした「動物目線」の情報が、動物行動学を大きく変えつつある。



図4 人工知能搭載ロガーを背中に装着したウミネコ

従来のビデオロガーは、記録する時刻を事前に決める程度の単純な設定しかできなかったが、機械学習を用いることによって、狙ったシーンを逃さず撮影することが可能になった。このAIoA(AI on Animals)とよばれる日本発の技術が、バイオロギング分野で注目を集めている。

動物行動学研究室ウェブページ <http://yoda-ken.sakura.ne.jp>

行動の多様化をもたらす神経メカニズムの探求

田中良弥 生命理学専攻助教

昆虫が示す行動の「多様性」

私は幼い頃から昆虫に強い興味をもち、これまで飼育や観察を続けてきた。私にとって昆虫の最大の魅力は「多様性」だと感じている。図鑑を開けば昆虫の色彩や形態のパラエティを知ることができるだろう。しかし、昆虫の多様性は「見た目」だけではない。それぞれの種が示す「行動」にも、大きな多様性がある。昆虫にとって「行動」は餌や配偶相手を得るために重要である。それぞれの種が行動を巧みに進化させることでさまざまな環境への適応を実現した

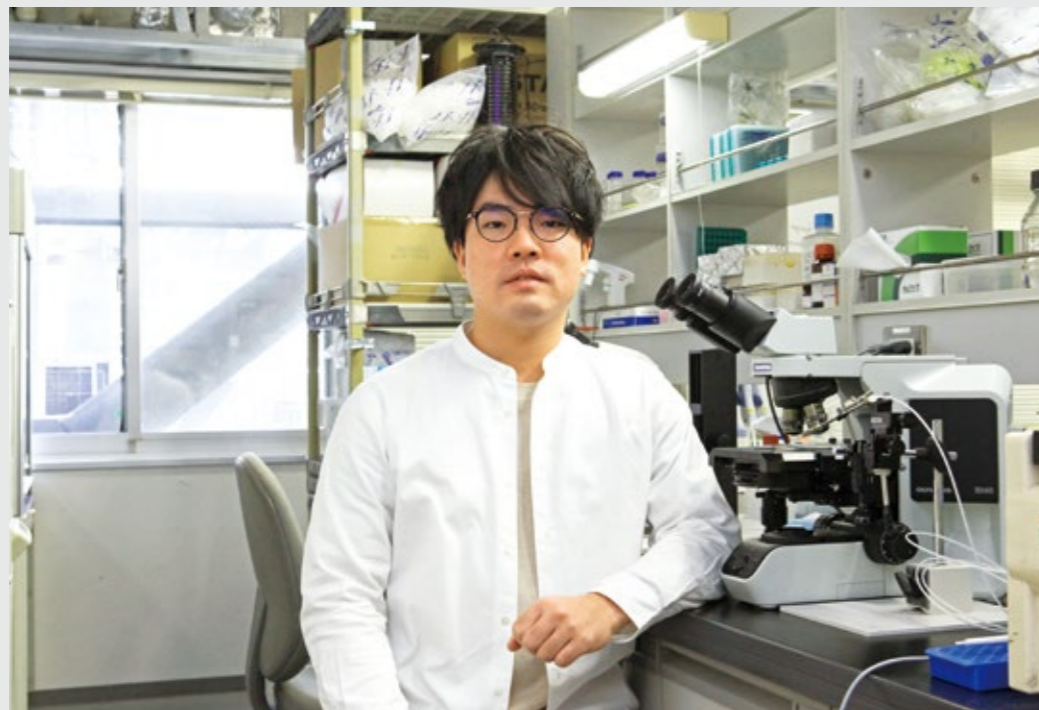
と考えられている。私は昆虫が示す行動の多様性が脳や神経系によってどのように生み出されるのかに興味を持って研究をしている。

キロショウジョウバエは遺伝学的な解析に優れており実験生物として100年以上の歴史がある。そのため遺伝学的手法が確立されており、行動を制御する神経メカニズムについても理解が進んでいる。キロショウジョウバエのオスはメスに対して交尾に至るまでに定型的な求愛行動を示す(図1)。まず、オスはメスを見つけると、

前肢でメスの腹部を触る行動を示し、翅を震わせて求愛歌を奏でる。そして、メスの生殖器をなめた後に、腹部を曲げて交尾を試みる。これまでの研究から、キロショウジョウバエの求愛行動はfruitlessという性決定遺伝子が働く神経回路によってかたちづけられることが知られている。

プレゼントを渡すショウジョウバエ

ショウジョウバエの仲間、世界に約3000種が生息し、それぞれのオスが異なる方法で求愛行動を行いメスにアプロー



Ryoya Tanaka

1989年神奈川県生まれ。2018年、東北大学大学院生命科学専攻で博士(生命科学)を取得。日本学術振興会特別研究員DC1、同PDを経て、2019年より現職。2019年時実利彦記念神経科学優秀博士研究賞。専門は神経生物学、行動遺伝学。

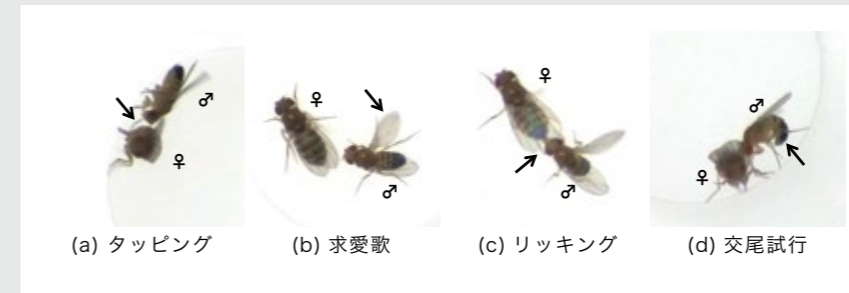


図1 キロショウジョウバエの求愛行動 (a) オスはメスを見つけると前肢でメスを触るタッピング(矢印)を行い、(b) 片方の翅を震わせて求愛歌(矢印)を奏でる。(c) その後、メスの生殖器をなめるリッキング(矢印)をした後に、(d) 腹部を曲げて(矢印)交尾を試みる。



図2 *Drosophila subobscura*の婚姻贈呈 オスは消化管の内容物を吐き戻してメスに与える。実験ではオスに赤く着色した餌をあたえ、婚姻贈呈を観察しやすくしている。矢印はオスが吐き戻した消化管の内容物を示す。

光遺伝学を用いた神経細胞の強制活性化

光遺伝学は、神経細胞の活動を活性化もしくは抑制する技術であり、今回は前者を用いた。本来は藻類の光受容体で働く「光活性化タンパク質」を特定の神経細胞(オレンジ)のみに遺伝子工学的に発現させる。光を照射するとこのタンパク質をもつ神経細胞のみが活性化されるが、それ以外の神経細胞(灰色)では活性化は起こらない。活性化によって誘起された行動を観察することで、特定の神経細胞がどのような行動を制御しているかを調べることができる。

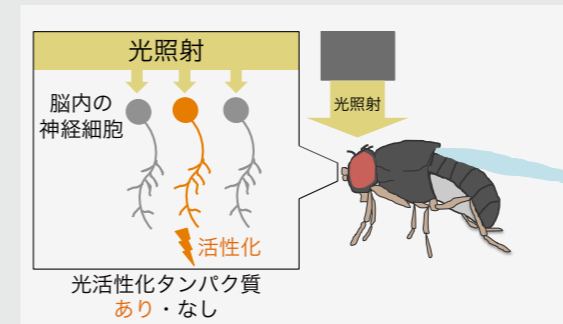


図4 名古屋大学構内で採集したショウジョウバエの一部 構内にも多くのショウジョウバエが生息している。それぞれの種が異なる環境に生息しており、種に固有の行動パターンを示す(2019年10月採集)。

チする。私たちが着目したのは*Drosophila subobscura* (*D.subobscura*)という種だ。この種はキロショウジョウバエと同属だが、他の種では見られない婚姻贈呈という一風変わった方法でメスに求愛する(図2)。これは*D.subobscura*のオスが消化管の内容物を吐き戻してメスに与える行動である。メスがプレゼントを食べているうちにオスは交尾を試みる。この種において、求愛行動を制御する仕組みを調べてキロショウジョウバエの知見と照らし合わせることで、「婚姻贈呈」の獲得を実現する神経メカニズムを明らかにできるのではないかと考えた。

光で神経活動を操作する

そこで、光遺伝学とよばれる手法によって、*D.subobscura*の脳内でfruitlessが働いている神経回路を強制的に活性化する実

験を計画した(図3)。このために、光の照射によってこの神経回路が活性化するようにゲノムを改変した系統を作製した。この系統のオス個体に光を照射して誘起される行動を調べることでfruitlessが働く神経回路が制御している行動を知ることができる。実験の結果、強制活性化によって腹部を曲げる交尾試行と考えられる行動が誘起された。これは、*D.subobscura*においてもキロショウジョウバエと同様にfruitlessが働く神経回路によって求愛行動が制御されていることを示している。これに加えて、消化管の内容物を吐き戻す行動も光照射によって誘起された。この結果は、種に固有な婚姻贈呈がこの同じ神経回路によってコントロールされていることを示唆している。すなわち、fruitlessが働く神経回路は「求愛行動の制御」という種間で共通した機能を持ちながら、求愛行動の種間

の違いを生み出していることがわかった。さらに解析を続けることで、神経回路のどのような変化によって婚姻贈呈の獲得がもたらされたのかを突き止めることができるだろう。

こうした取り組みによって、求愛行動の多様化を生み出す神経メカニズム、その一端が見えてきた。一方で、昆虫全体では行動が記載されている種は少なく、野外でどのような行動をしているのかよくわかっていないものがたくさんいる(図4)。行動の多様性について調べるためには、丹念な観察を通して行動を記載し、背景にある生活史や生息環境とのかかわりを理解することが大切であると感じている。今後も、こうしたマクロ生物学的な視点と私たちがこれまでに活用してきた神経生物学的手法を組み合わせることで、昆虫が示す行動の多様性の不思議に迫りたい。

雷からのガンマ線を 高エネルギー宇宙物理学者の視点で探る

中澤知洋 素粒子宇宙起源研究所准教授



Kazuhiro Nakazawa

1974年生まれ。東京大学理学部卒(1996)、同大学院卒(2001)。博士(理学)。2001年宇宙科学研究所助手、2007年東京大学理学系研究科講師、2018年から現職。専門は高エネルギー宇宙物理学実験。

雷ガンマ線とは

雷放電に伴って30MeV(メガ電子ボルト)に達する高エネルギー光子(ガンマ線)がやってくることに人類が気づいたのは1990年ごろである。宇宙の高エネルギー現象を探るガンマ線天文衛星が、地球側から到来する突発ガンマ線(Terrestrial Gamma-ray Flash:TGF)を多数観測し、雷放電と同期していることが発見されたことで1990年代後半以降に広く知られるようになった。1MeVは電子を100万Vで加速したエネルギーで、30MeVともなると原子核反応すら引き起こす(光核反応とよばれる)。雷ガンマ線は約30MeVに加速された電子から放射される。雷雲の電圧は1億ボルトにもなるが、常温の世界の電子を大気圧中で電場加速するのは電離損失のぶ厚い壁が邪魔で不可能とされてきたため、この発見は大きな驚きを与えた(図1、2、3)。

雷ガンマ線観測に適した日本

私はX線・ガンマ線での宇宙観測を専門とする高エネルギー宇宙物理学者であるが、雷ガンマ線にも興味をもち、国内外の共同研究者とともに観測研究を行っている。日本は、雷ガンマ線大国である。冬季の日本海岸は雷が活発で雷雲の高度が低く、地上から雷ガンマ線がよく検出される世界でも珍しい場所である。それでも、一地点で一冬に一回検出できる



図1 雷放電

雷放電は静電気とは異なり、開始から終了まで数百ミリ秒かかる複雑な現象である。積乱雲中をステップを踏みながら放電が進展してゆき、これが地上などに達したところで、大電流を解放して稲光と大音響を巻き起こす。©Yuuki Wada

程度なので、遠隔動作型の検出器を多数設置し、待ち伏せする。衛星用装置を開発する我々は、小型、軽量、低消費電力で高性能な検出器の専門家であり、2006年から始めて現在では26個の検出器を金沢や新潟に設置している(図4)。

最近の観測で我々は、下向きTGFが地上に降り注ぎ、原子核を光核反応で破壊して高速中性子と陽子過剰核を生む過程を、初めて観測的に明確にとらえた。冒頭のガンマ線の被曝量はレントゲン写真の0.5回相当と、驚くほど高い。人類は雷ガンマとともに暮らしてきたのだから健康を害する量とはいえないが、そもそも、去年になるまでこの現象に人類が気づいていなかった事実こそが驚きである。

電子の加速と増幅の仕組み

私が最も興味をもっているのが、雷ガンマ線の静電場加速の仕組みと、これを

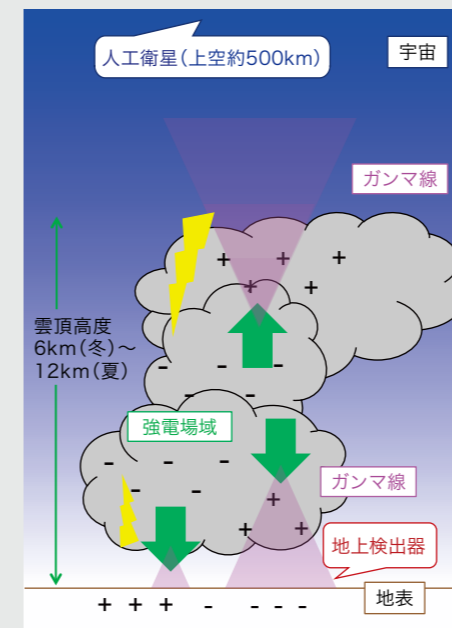


図2 雷雲からのガンマ線放射の概念図

積乱雲の中で氷晶などが摩擦で帯電し、上昇気流の力で雲中に大きな電場がかかる。この強電場域の中で、何らかのメカニズムで継続的に電子が30MeVまで加速され、ガンマ線を放射する時がある。特に雷放電の過程で一時的に強電場域が生まれ、そこから突発的なガンマ線が出ることもあり、これがTGFの起源とされる。TGFは長らく衛星から観測されてきたが、観測体制が確立されたことで、近年、地上でも確認されるようになった。

支配する物理量である。たとえば雷雲そのものから数分にわたって継続する「雷雲ガンマ線」の起源は、宇宙線などに起因する0.2-1MeVの高エネルギー電子が、電離損失の壁をすり抜ける「逃走電子」となり、30MeVまで加速されつつ雪崩増幅で劇的に数を増やすとされる。宇宙で広く観測される磁場を中心とする加速機構と全く異なる仕組みで、大変興味深い。しかし、すぐそこにあるにも関わらず、どこに加速領域があり、どのような電場強度で、どのくらいの増幅率なのかすらまだ解明できていない。雪崩増幅はしばしば不安定になるものなのに、上昇気流によって刻々と帯電する雷雲の中で、なぜ安定して放射を続けているのだろうか。

気象学や大気物理の研究者に話を聞いたところ、(ガンマ線は当然として)実は放電の物理すら不明確であることがわかった。驚くことに、定量的な物理モ

デルがまだ確立していないのである。雲中の電場測定は難しく、「雷ガンマ線で雲中電場が測定できないか」と逆質問されてしまったほどである。

そう、雷雲は自然科学の最も身近な未踏領域、フロンティアなのである。身近なものであるからこそ、その仕組みを物理的に解明し、放射線被曝量や放電の仕組みを知ることが重要である。火山でも惑星大気でも雷が起きている事実から、宇宙においてもいろいろな場面で活躍している可能性があり、高エネルギー物理としても大変興味深い。我々は今、大気物理、気象学などの研究者との連携によって、放電、ガンマ線、気象レーダーやシミュレーションを組み合わせ、雷の謎を解明しようとしている。雷観測専用衛星(図5)の打ち上げも近づいており、雷ガンマ線の物理に大きく迫れると期待している。

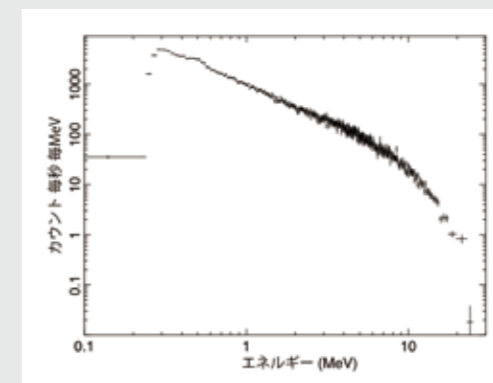


図3 雷雲ガンマ線のエネルギースペクトル

地上に設置した雷雲ガンマ線検出器で観測。10MeVを超えるガンマ線は、30MeVに達する電子からの「制動放射」でよく説明できる。エネルギーが高いため、電子陽電子対生成や、光核反応も起きている。



図4 地上設置の雷雲ガンマ線検出器

30cm四方の、耐候性のある箱に収められている。透過力の高いMeVガンマ線を検出するために、検出器は密度の高い結晶シンチレータを用いており、小型低消費電力な回路基板を用いて小型化を果たした。モバイルルーターを使って遠隔から監視・運用している。冬の嵐の風で飛ばないように、鎖をつけている。



図5 雷ガンマ線観測衛星TARANIS

2020年6月にフランスCNESにより打ち上げ予定。著者もそのガンマ線装置の開発の手伝いをしてい。©CNES

高エネルギー天文学グループウェブページ <http://www.u.phys.nagoya-u.ac.jp/uxgj.html>

同窓生から

科学の専門家と、科学を「伝える」専門家

名古屋市科学館
学芸課天文係 学芸員
中島亜紗美 (Asami Nakashima)

名古屋市科学館で天文学の学芸員として働き始めて、早7年になる。プラネタリウムの暗闇が私たちの仕事場だ。50分間の生解説に原稿はない。季節とともに移ろいでゆく星空の下、伝えたい話題は日々変わっていくからだ。それに、用意された台詞には魂がないように思う。もちろんよく使う定型句のようなものはあるけれど、多用すると言葉が死んでしまう。そらんじるだけの言葉には表情がないのだ。ドーム内に座る人々の反応を想像しながら、「伝えたい」と感情を込めて言葉を紡いでいくことで、やっと生きた言葉を届けられる気がしている。科学をわかりやすく説明するだけでなく、その面白さや素晴らしさを感じてもらえるよう咀嚼して伝えるのが私たちの仕事だ。

学芸員を進路として意識したのは名古屋大学に入学してからだったと思う。新入生ガイダンスで「学芸員資格」というものがあることを知った。頭に浮かんだのは、私に宇宙の奥深さを教え、天文学の道へと誘ってくれた名古屋市科学館のプラネタリウムだった。「この資格があれば、プラネタリウムの解説者になれるかも」と、6年掛かりで必要単位を集めた。

けれど、当時の私にとって学芸員は選択肢の一つに過ぎなかった。天文学を仕事にしたいからと、研究者を目指して迷わず大学院に進んだ。3年間お世話になった物理U研赤外線グループでは気球搭載望遠鏡の姿勢制御を担当した。自分が書いたプログラムに従って巨大な望遠鏡ゴンドラが姿勢を変えるのは大変面白かったし、気球打ち上げのために出張したブラジルでの1カ月は貴重な海外経験となった。ただ、修士課程の途中で指導教官が他大学へ移られたため、どこの博士課程に進もうか改めて考えて、憧れの国立天文台で学ぶために東京大学に進学した。私の勝手な選択を受け入れてサポートしてくださった芝井先生、金田先生には感謝しかない。

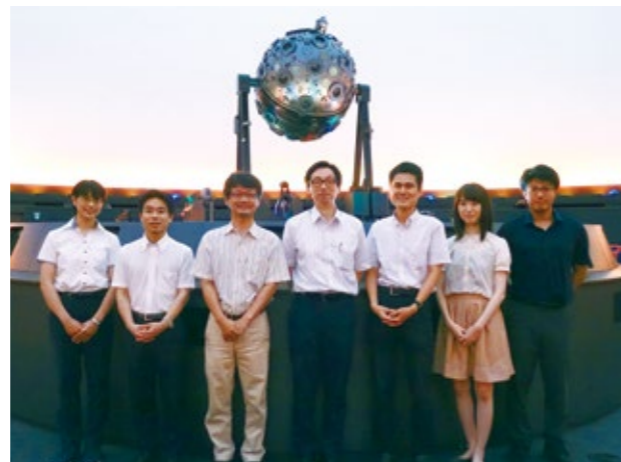
そこからの3年間、学業の傍ら国立天文台のアウトリーチ活動に参加していたのが今の仕事につながっている。望遠鏡で天体を見せたり、研究紹介をしたり



と、学んできた科学を一般の方に伝える活動だ。自分は人とコミュニケーションをとるのが不得手だと思っていたのだが、これがやってみると非常に楽しい。タイミング良く故郷で学芸員の募集が出て、天に任せるような気持ちで応募したところ、就職が決まって現在に至る。当初目指した研究者にはならなかったが、天文学を仕事にできたのは幸運だったし天職だと思っている。

ちなみに名古屋大学と名古屋市科学館は、講演会を共催するなど仕事上の関わりも深い。専門知を生み出す大学と、それを市民に伝える科学館は互いの強みを活かしかえる関係だと思う。学生時代につながった人の縁を大事にしながら、これからも科学の普及に努めていきたい。

(素粒子宇宙物理学専攻、2010年修士(理学)名古屋大学)



当館プラネタリウムの学芸員(左から高羽幸*、持田大作、毛利勝廣*、野田学*、小林修二*、筆者*、稲垣順也*)。7人中6人(*印)が名古屋大学理学研究科の出身(2018年7月撮影)

キャンパス通信

無限から無限を引いて
無限で割ったら、無限か

多元数理論科学専攻准教授
松尾信一郎 (Shinichiroh Matsuo)

「第6回高等研究院シンポジウム」が2020年1月14日に開催された。「専門性と学際性の狭間で」をテーマとして、学内の理工系の若手研究者7人による講演と座談会が行われた。登壇者の一人として、報告したい。

そもそも、高等研究院シンポジウムの目的は、本学の研究の最先端を文系理系問わずに全学に向けて紹介することにある。しかも、今回の重点は「学際性」だ。ところが、筆者は数学者である。専門性の極みのような数学を研究している私は、何をどのように話せばよいのだろうか。登壇依頼は気軽に引き受けたのだが、発表の準備の段になり途方に暮れた。結局、頭をひねりにひねって、「無限から無限を引いて無限で割ったら、無限か」と題して、筆者三十代前半の研究テーマを「無限」への興味という観点から整理して紹介した。望外の好評をいただき、安堵した。数学の講演への期待値が低いことが、逆に幸いしたのだろう。座談会では、数学者として、物理学者との共同研究の経験に基づき、数学のような孤高の学問における学際研究の困難と魅力について話した。

絵の具を何も考えずに混ぜたら汚い灰色になってしまう。原色の鮮やかさを際立たせ、配色の妙で新しく美しい色を生み出すことが、専門性と学際性の狭間でもがくときの憧れの矢であろう。そのとき、数学とは、無限に広がる真っ白なキャンパスではないだろうか。



書籍紹介

『目に見える世界は幻想か？
物理学の思考法』

生命科学専攻助教
寺島浩行 (Hiroyuki Terashima)

私は、物理学は好きだが数式は苦手というタイプである。高校で学ぶ物理が、数式の羅列と計算ばかりで退屈だった人は多いかもしれない。本書は、まさにそういった人たちに向けた物理学入門書になっている。物理学は、この世界がどのような法則で動いているのか理解しようという学問なので、数式で表すのが最も適しているのだと思う。しかし本書では、あえて数式・図表を使わずに言葉だけで物理学とその歴史について描き切っている。

本書では、世界がどのような仕組みで動いているのかについて、これまでの物理学の歴史をたどりながら、古典力学から量子力学、重力から宇宙論まで解説してくれる。受験物理では、物理現象を示す法則については学んでも、それを解き明かした人物について思いをはせることはまれかもしれない。しかし実際には、皆誰も自然や物理現象をつぶさに観察し、自分自身の常識と物理現象の現実の狭間で苦悩・奮闘してきたのだ。そう思うと、物理学がより身近に感じられるのではないだろうか。ニュートンの変人エピソードを読めば、完璧な人間なんていないのだと親近感を覚えるかもしれない。本書を読んだ後には、自分が当たり前だと思っていたことをもう少し深く考えてみるきっかけになるのではないだろうか。もしかしたら常識を覆す新しい発見ができるかもしれない。

『目に見える世界は幻想か？
物理学の思考法』
松原隆彦 (Takahiko Matsubara) 著
光文社新書 / 2017年2月発行
780円(税別)

