

## 研究会・学会スケジュール

第15回名古屋国際数学カンファレンス「多変数ゼータ関数とその応用」  
Zeta Functions of Several Variables and Applications

開催日：2015年11月9日(月)～13日(金)  
開催場所：名古屋大学多元数理科学棟309号室  
主催：名古屋大学大学院多元数理科学研究科  
問い合わせ：松本耕二 多元数理科学研究科 教授  
kohjimat@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2414  
https://sites.google.com/site/zetafunctionsconference/

一般相対性理論誕生100年記念市民講演会

開催日：2015年11月21日(土)  
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール  
主催：素粒子宇宙起源研究機構  
問い合わせ：白水徹也 多元数理科学研究科 教授  
shiomizu@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-5577  
http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/jpn/events/20151121\_public\_lecture.php

第14回坂田・早川記念レクチャー

開催日：2015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：福井康雄 理学研究科 教授  
fukui@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2837

「星間水素」国際ワークショップ2016  
International workshop on interstellar hydrogen 2016

開催日：2016年1月6日(水)～8日(金)  
開催場所：名古屋市  
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  
日本学術振興会科学研究費特別推進研究  
「星間水素の精密定量による新たな星間物質像の構築」  
問い合わせ：福井康雄 附属南半球宇宙観測研究センター長  
fukui@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2837

第16回名古屋国際数学カンファレンス  
「ナビエ-ストークス方程式と関連する話題」  
The Navier-Stokes Equations and Related Topics

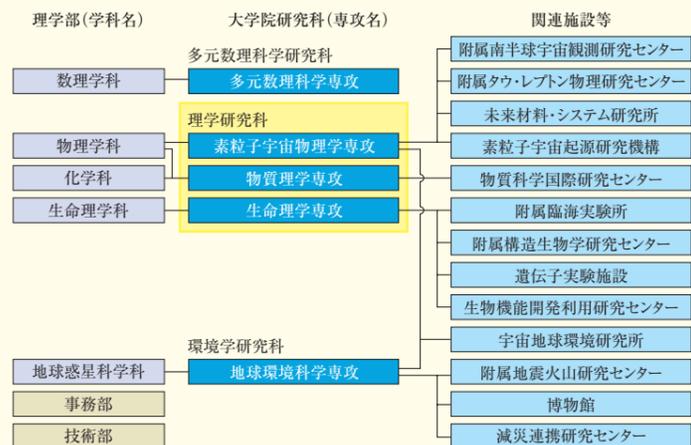
開催日：2016年3月7日(月)～11日(金)  
開催場所：名古屋大学多元数理科学棟509号室  
主催：名古屋大学大学院多元数理科学研究科  
問い合わせ：菱田俊明 多元数理科学研究科 教授  
hishida@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-4838



坂田・早川記念レクチャー  
贈呈メダル

## 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)



編集日より

今回の特集は、中学校の理科でも登場する、「植物の受精」と「気孔の開閉」という研究テーマを取り上げている。専門知識がないと面白さが理解できないような研究ではなく、科学ドキュメンタリーを連想するようなテーマだと思ふ。高度な科学がよく知られた現象に挑むことで逆に敷居が低くなったいい例かもしれない。もう1つ大事なことは、現象の面白さを動機とした研究であっても、特に今は比較的短期間で、作物増産など生産活動に応用でき、社会に革命をもたらし得ることである。

懇話会が終了し、数日経過してから、知人の高校教員から連絡がきた。参加した教え子のなかに文系から理系に進路を変えることにした生徒がいたとのこと。理由は「実験をしたくなった」からだそうだ。実験をすることの面白さが伝わったのならば、それは研究テーマの重要性よりも、研究の社会的意義よりも、さらに大事なことが伝わったのであり、講演者も喜んでた。(杉山伸)

### 表紙説明

夏になると紫色の花を咲かせるトレニアは、卵細胞のある胚嚢が外に出ているため、花粉管が伸びて卵細胞を探す様子を生きのまま観察できる。葉の上皮にあって唇のようなかたちをした気孔は的確に開閉を繰り返すことで、光合成を司る。活発に動く植物の世界をのぞく。



理 *philosophia* — No.29  
autumn-winter 2015  
2015年10月20日発行

広報委員 松本邦弘(研究科長)  
杉山 直(副研究科長・評議員)  
阿波賀邦夫(副研究科長)  
栗田英資(数理学科)  
福井康雄(物理学科)※委員長  
戸本 誠(物理学科)  
加藤祐樹(物理学科)  
萩原伸也(化学科)  
杉山 伸(生命理学科)  
瀧口金吾(生命理学科)  
林 誠司(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2016年4月頃発行の予定です。

制作 株式会社電通  
編集協力 株式会社コニケ  
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/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]  
autumn-winter 2015

29

philosophia

「植物を動かすもの」  
特集

04 受精をめぐる細胞たちの物語 ◆ 東山哲也  
08 生き残りのための環境突破力 ◆ 木下俊則  
02 時を語るもの(岡崎恒子博士) ◆ 町田泰則  
03 理のエッセイ ◆ 戸本 誠  
12 施設紹介 ◆ トランスフォーメティブ生命分子研究所  
14 理の先端をいく ◆ 須藤 斎 / 阿部 洋 / 西山朋子  
20 理学研究科・発 ◆ 坂田 早川記念レクチャー  
22 理学部交差点

## 岡崎恒子博士 — DNAの不連続複製を実証する

1960年代のはじめには、巨大分子であるDNAの複製の仕組みをDNA合成酵素の反応だけで理解することは困難であった。それはDNA合成酵素の反応が一方向に進むのに対し、細胞内のDNA複製が見かけ上逆方向にも「進む」という矛盾があったからである。岡崎令治\*博士と岡崎恒子博士が提唱したDNAの不連続的複製機構は、これを解決する画期的なモデルであった。不連続複製の中間産物の短いDNAは岡崎フラグメントとよばれるようになり、生物学の分野で定着するかに思われたが、まもなくして分解産物の可能性も指摘された。1975年、令治博士はこのような批判のさなかに亡くなり、研究は共同研究者の恒子博士に引き継がれた。恒子博士は岡崎フラグメントの合成の仕組みを解明すれば、これらの批判を克服できると考えた。恒子博士は、複製部位ではまずRNAがプライマーとして合成され、それに引き続いて短いDNAが合成されるという仮説をたて、細胞中にはRNAが結合したDNA分子が存在することを示した。さらにRNA部分の構造を決定し、ゲノムDNAが複製される時には、このような短いDNAの合成が繰り返されることを証明した。これらの研究が不連続複製を実証する決め手となった。現在岡崎フラグメントは、世界中の生物学の教科書に記載されている。(町田泰則 名古屋大学名誉教授)



おがきつねこ  
**岡崎恒子** (1933-)  
 名古屋大学名誉教授(1997-)  
 第39回中日文化賞受賞(1986)  
 紫綬褒章受章(2000)

### ◇写真の説明

写真の左が1968年の、右が1978年のコールドスプリング・ハーバー・シンポジウムの報告集であり、この2つのシンポジウムはDNA複製研究のマイルストーンであった。当時、このシンポジウムに招かれ、報告することは『ネイチャー』や『サイエンス』での論文掲載よりも生物学分野ではインパクトがあった。目次を見ると、いずれのシンポジウムにおいても岡崎フラグメントに関するセッションが開催され、前者では令治博士が、後者では恒子博士がトップバッターとして招待講演をしたことがわかる。1968年のシンポジウムにおいて、短いDNAは岡崎ピーシーズと名付けられ、その後一般的には岡崎フラグメントとよばれるようになった。1978年のシンポジウムでは、恒子博士により複製点における短いDNAには数塩基のRNAが連結されていることが報告された。複製点で検出される短いDNA分子は分解産物ではなく、新規に合成された分子であることが10年の研究を経て明確にされたのである。左上はそれぞれの論文の冒頭ページ。

\* 岡崎令治(1930-1975)  
 元名古屋大学教授(本誌3号P.2参照)

## 最先端研究を支えるもの

戸本 誠 タウ・レプトン物理研究センター准教授



2012年、CERN(欧州合同原子核研究機構)にあるLHC実験によってヒッグス粒子が発見された。すべての研究がそうだが、LHC実験のような巨大な実験装置を使って偉大な研究成果を出すためにはとくに必要なものがある。

2015年6月、LHC実験が再稼働した。加速器の衝突エネルギーを1.6倍に増強して、「標準模型」を超える新粒子の発見をめざす。そのために、2013年と2014年は、加速器と検出器のアップグレードに費やした。名古屋大学からも、研究員や大学院生たちがCERNに常駐し、わたしたちが担当する20メートルもの高さのある検出器を調整した。ヘルメット、ヘッドライト、安全靴、ハーネスを装備した、研究者というよりも建設作業員の出で立ちで、検出器まわりに設置した足場を縫って、必要ならばはしご車に乗って、検出器や電気回路を交換し、信号線の敷設を行った。おかげで、より良い検出器の状態、実験の再開を迎えることができた。

高エネルギー加速器実験では、ひとたび実験がはじまると24時間体制のデータ収集が毎日休みなく続く。8時間交代のシフト要員が検出器のコントロール・ルームに張り付いて、順調にデータが収集されているか監視する。予期せぬ問題が起これば、直ちにエキスパートと連絡を取り事態の收拾を図る。私たちはシフト要員としてだけでなく、検出器のエキスパートとしても活躍している。問題が起これば、真夜中だって携帯電話でたたき起こされる。緊張感あるデータ収集のおかげで、正確な物理解析が可能になるのだ。

最先端の研究を支えているのは若者たちである。精神的にも体力的にも過酷だと思うが、彼らはむしろその過酷さを楽しんでいるように見える。少しでも良いデータを取って、新しい発見をしたいからだ。実際、彼らは、エキスパートとしての活躍の合間を縫って、物理解析を楽しんでいる。こうした若者たちの活躍によって、ヒッグス粒子の発見という偉業が達成された。次は、何が見つかるか、期待してほしい。

*Makoto Tomoto*

1971年生まれ。2001年名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了、博士(理学)。高エネルギー加速器研究機構研究員、米国フェルミ研究所リサーチ・アソシエイトを経て2006年より現職。専門は高エネルギー加速器を用いた素粒子実験。

植物は、地面に根を張り固定されて生きている。しかし、動くことのできない植物も、自らが生きていくために、そして子孫を残すために、一部の細胞は活発に動いている。オスとメスの細胞が、それぞれ臨機応変に助け合いながら受精を成功させたり、周囲の環境に応じて気孔を開閉させて光合成を制御するなど、静かにしかし活発に動く植物細胞の世界を2人の研究者が案内する。(2015年6月6日、第24回理学懇話会より)

## 受精をめぐる細胞たちの物語

東山 哲也 トランスフォーマティブ生命分子研究所教授

### 植物の受精を生きのまま見る

今日のテーマは「植物を動かすもの」です。見た目は動かないように見える植物も、実は中では細胞が活発に動いています。その例として植物の受精の話をしたと思います。植物の受精というと教科書の中だけの話のように感じられると思いますが、我々が毎日食べている米や麦の1粒1粒は、植物の受

精によってつくられており、米や麦、トウモロコシだけでなく、豆類、野菜、果実はすべて植物の受精によってつくられます。受精は、実は身近な現象だといえます。花粉がめしべにつくと実が実る、あるいは種子ができることは、皆さんよくご存じだと思います。花粉がめしべに着いて受粉した後、細胞が活発に動き、花粉から花粉管が伸び



Tetsuya Higashiyama

1971年山形県鶴岡市生まれ。東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。同研究科助手を経て、2007年より現職。2010年よりERATO東山ライブホロニクス研究総括、2013年よりITbM副拠点長。専門は植物分子生物学。

ていって受精が達成され、種子をつくることになります。しかし、これまでその動きについてはよくわかっていませんでした。植物の受精は絵で描いてしまうと静的な、動きのない世界なのですが、私は「それを生きのまま見たい」と思って研究をはじめました。

それでは、今日の「受精をめぐる細胞たちの物語」のお話に入っていきます。受精に関わる細胞といえば、普通、皆さんは動物における精子と卵子を思い浮かべられると思います。では、植物ではどうでしょうか。花の咲く植物、被子植物では、構造がかなり複雑になっています。卵があり、精子に相当するものが到達して受精するのは同じなのですが、それを支えるシステムがまったく異なります。

動物にしる、植物にしる、生殖を行うにあたって減数分裂という特殊な細胞分裂を行います。動物の場合、減数分裂により直接、卵や精子がつけられます。

一方、植物ではどうでしょう。卵をつくる雌側では、最初は動物の卵と同じように減数分裂によって1つの細胞ができるのですが、その後、核分裂によって核が増え、増えた核が細胞内できれいに配置されます。そして、配置された場所に応じて1つ1つ、違った細胞がつくれ、最終的には一部の核が融合し、動物の卵と比べて複雑な構造になります。雄側でも似たようなことが起こります。

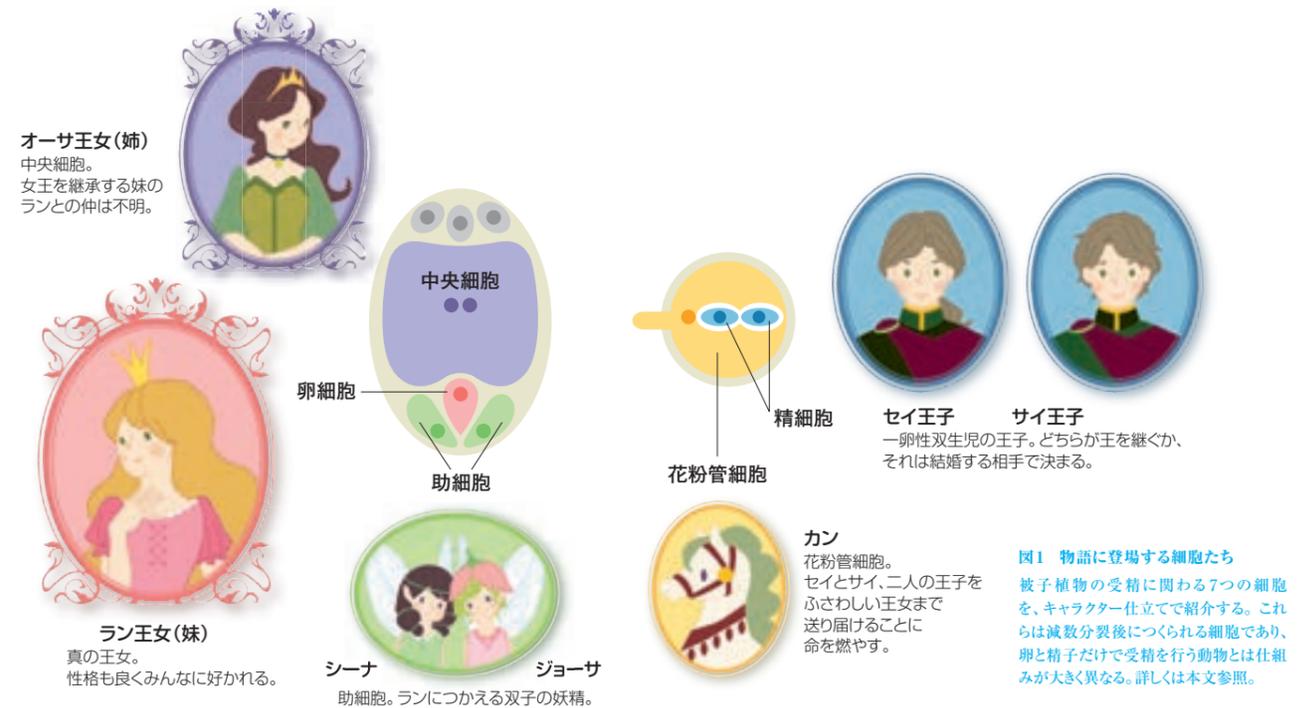


図1 物語に登場する細胞たち  
被子植物の受精に関わる7つの細胞を、キャラクター仕立てで紹介する。これらは減数分裂後につくられる細胞であり、卵と精子だけで受精を行う動物とは仕組みが大きく異なる。詳しくは本文参照。

### 物語に登場する7人

植物の受精を語るときには複数の登場人物が現れます。そこで、私の11歳になる小学生の娘に相談し、できるだけわかりやすく伝えるために細胞に名前をつけることにしました(図1)。

一番大事な卵細胞は、卵細胞ですのでラン王女としました。真の王女で、私のイメージでは性格も良く皆に好かれるようなキャラクターです。卵細胞の隣にある2つの助細胞は、ラン王女に仕える双子の妖精のイメージです。名前は、助細胞と、助細胞の英語であるsynergidからとって、ジョーサとシーナとしました。もう1つ、卵細胞の隣にある大きな中央細胞は、中央細胞の途中の音をとってオーサ王女という名前をつけました。「大きいし、ちょっと怖そう」ということでお姉さんのイメージがあり、「女王を継承する妹のランとの仲は不明」としておきましょう。

それでは、雄側はどうでしょうか。植物の精細胞は精子のように自分で泳ぐことはできません。その代わりに、花粉から花粉管が伸びはじめ、精細胞は膜に包まれた状態で花粉管細胞によって運ばれていきます。花粉管細胞は素早く精細胞を運んでくれる細胞です。名前はカンにしました。カンは「2人の王子をふさわしい王女に送り届けることに命を燃やす」というキャラクターです。運ばれ

る精細胞はセイ王子とサイ王子です。一卵性双生児の王子で、どちらが王を継ぐか、それは結婚する相手を決まるといえます。これはあとで詳しく説明しましょう。

### 花粉管を引き寄せる妖精たち

物語の登場人物が決まったところで、めしべの中で進行する、受精をめぐる細胞たちの物語をはじめましょう。長い間、受精の物語は謎に包まれてきました。なぜ謎に包まれてきたのかというと、ラン王女のいる場所が組織に包まれていて調べるのが難しいということが、その大きな理由でした。

しかし私はトレニアというユニークな植物と出会うことができました。トレニアがどのようにユニークかといいますと、普通、組織に完全に包まれているはずの卵細胞のある部分、難しい言葉では胚嚢といいますが、この胚嚢がトレニアでは外に出おり、卵細胞が観察しやすい状態になっています。私は大学院生のころからトレニアを使って花粉管が卵細胞のところに伸びていき、受精する仕組みを研究しています(図2)。

それでは花粉管が引き寄せているのは、雌の細胞たちのうち誰でしょうか。レーザーを使って細胞を1つ1つつぶしていく実験を行いました。すると、花粉管の誘引は、卵細胞や中央細胞といった王女たちではなく、

卵細胞の隣にある妖精にたとえた2つの助細胞をつぶしたときに止まることがわかりました。逆に、受精をする卵細胞あるいは中央細胞、つまり王女たちがいなくても、助細胞、ジョーサとシーナのどちらかがいれば花粉管は誘引されます。2つの助細胞が花粉管を誘引していることがわかりましたので、続けて助細胞が分泌する誘引物質について調べていきました。

助細胞だけを取り出して調べるために顕微鏡の下で細胞をより分け、1つ1つ見目で区別し、助細胞を選んで集めていきます。そして、ついに助細胞が分泌する魔法のような誘引物質を発見しました。140年にわたって謎とされてきた誘引物質です。



図2 卵細胞が含まれる部分(胚嚢)に誘引されるトレニアの花粉管

トレニアの卵細胞のある部分に向かって花粉管が伸びている様子。花粉管は卵細胞がある部分に伸びていき、中に入って受精しようという挙動を見せる。ガラス針を突き刺して、卵細胞や助細胞が含まれる雌側の組織を動かすと、花粉管細胞がそれを追いつけるという挙動も見える。



名前をルアーと名づけました。ルアーはシステインというアミノ酸がいくつか入ったペプチドです。ルアーは助細胞であるジョーサとシーナの両方から分泌される分子で、花粉管細胞はルアーに向かっていき、誘引されるということになります。

### カンとジョーサの最期

花粉管細胞のカンが助細胞のジョーサとシーナに導かれ、無事に胚嚢に到達した後、いよいよ受精が始まります。このときジョーサかシーナの一方、そしてカンが、最期の時をむかえます。

精細胞の王子たちを運ぶカンと花粉管を導く助細胞は、実に献身的な細胞で、王子や王女たちのために自分を捧げます。花粉管は胚嚢に到達すると先端が破裂し、精細胞を放出します。つまり、カンは自分が死ぬことで中の精細胞を送り届けているわけです。同時に、それを受け取るために2つの助細胞のうちの1つが自ら死んで、受精のための場をつくります。花粉管の中に入っている受精に関わる精細胞が勢いよく流れこんで受精が起こります。

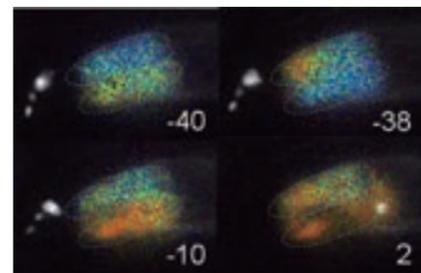


図3 2つの助細胞におけるカルシウム濃度の変化  
ジョーサとシーナが会話をするように、それぞれの細胞内のカルシウム濃度が交互に上下を繰り返す。数字は精細胞放出の瞬間を0とした時間(分)。白く見える点は花粉管(カン)と精細胞の核(セイ王子とサイ王子)。

「2つの助細胞のうちの1つが自ら死ぬ」といいましたが、このとき2つの助細胞の間で、どのようなやり取りが行われているかということも、もう少し違った見方で見てみます(図3)。細胞の働きは、細胞内のカルシウム濃度を観察することで調べることができます。上と下の2つの助細胞が交互に、まさにジョーサとシーナが会話をするように、それぞれの細胞内のカルシウム濃度が交互に上下を繰り返します。そのやり取りが何を意味するのか、我々研究者にもまだわかりません。たとえば、助細胞のジョーサが会話をしながら「それでは、私が死んでいきます」と決めているのかも知れません。するとジョーサのカルシウム濃度がどんどん高まり、花粉管が破裂し、それとともに自分も死にます。どのように死ぬほうが決まるのか、とても興味もたれます。

### 王子たちと王女たちの物語

2つの精細胞、セイとサイが王女たちのところに送り届けられて、いよいよ王女たちと王子たちの物語、重複受精という植物特有の

現象が始まります。重複受精は「じゅうふくじゅせい」あるいは「ちようふくじゅせい」と読みますが、1898年にナワシン\*1が、1899年にギニャール\*2が、それぞれ独立にユリ科の植物を使って発見しました。植物は、卵細胞だけが受精するわけではなく、隣の中央細胞も受精します。それにより種子の中に次世代の赤ちゃんである「胚」と養分となる「胚乳」をつくります。これを重複受精とよびます。

この重複受精は組織の中で素早く起こる現象で、誰もとらえることはできませんでした。私も大学院生のときには見ることはできませんでした。しかし、名古屋大学に移ってきて、世界で初めて重複受精の映像を撮影することに成功しました(図4)。

精細胞は自分では泳げませんが、セイ王子とサイ王子は花粉管による放出の勢いで素早く、わずか9秒で卵細胞(ラン王女)と中央細胞(オーサ王女)の間に送り届けられ、そこに約7分間とどまった後、その間に、確実に結婚相手を決めています。本当の王様に

なるためにはラン王女と結婚しなければいけません。セイ王子とサイ王子の2人の王子がどのように結婚相手を決めているのでしょうか。そこで、セイ王子とサイ王子、2つの精細胞は花粉管内での並び順が決まっているといわれているため、紫外線レーザーで片方の細胞だけを色を変えて前後を区別し、実験を行いました。そうすると、後ろの精細胞は、卵細胞とも中央細胞とも50%の確率で受精し、花粉管内での並び方で受精相手は決まらないことがわかりました。つまりセイ王子もサイ王子も等しくラン王女と結婚できる権利があることになりました。しかし、2人ともラン王女と結婚するということはありませんし、2人ともオーサ王女と結婚するということもありません。

### なぜシーナだけが残るのか

そして、受精が成功した後も物語は続き、さらにドラマがあります。先ほど助細胞の1つ、ジョーサは死んでいましたが、もう1つの助細胞、シーナが残っています。そのシーナがどうなるかを調べていきました(図5)。緑色に光らせた中央細胞、オーサ王女を

よく見ていきますと、胚乳と助細胞の間の壁がなくなり、完全に細胞が融合していることがわかりました。これまで「卵細胞や精細胞を除いたほかの植物の細胞は、細胞壁をもつため細胞融合は起こらない」という常識がありました。ところが、受精以外で、植物の通常の育成で見られる最初の細胞融合現象が発見されたわけです。

助細胞の不活性化の仕組みは以下の通りです。第1段階では、胚乳と融合し、助細胞が分泌する誘引物質ルアーも急激に拡散して外に出せなくなります。そして第2段階で、胚乳の核分裂に無理やり引き込まれるかたちで核が壊れていきます。さらに驚いたことに、隣にある性格が良いはずの卵細胞、ラン王女からも、助細胞の核を破壊するシグナルが出されます。このシグナルには、エチレンというシグナル分子がかかわります。

このように2人の王女からのシグナルを受けて、シーナは徹底的かつ急速に機能を停止します。この現象は、シーナが生きていると余計な花粉管が誘引されるため、それを防ぐために必要な現象だと考えられます。それでも重複受精が完了するまでシーナ

を残しておくのは、ラン王女とオーサ王女にとって重要な意味があります。2人のうち一方でも受精に失敗した時にはシーナをいかし、2本目の花粉管、つまり2人目のカンを呼んで、受精を回復するのです。動物のようにたくさん精子が群がって受精する動物と違って、これまで植物ではたった一本の花粉管、つまり一人のカンにすべてを託すと思われてきましたが、実は植物にもしたたかな戦略があったことがうかがえます。

このようにめしべの中での細胞の動きを調べることで、さまざまな発見や、細胞の物語が明らかとなりました。私はもともと人より「見たい」という欲求が強くて、研究を続けてきました。名古屋大学に、世界最先端のライブイメージングセンターを立ち上げています。今は最先端の有機合成化学の力も借りて、細胞の動きだけではなくルアーそのものの動きを観察するような、新しい研究の展開をめざしています。本日はどうもありがとうございました。

\*1 S.G.ナワシン(1857-1930) ロシアの植物学者。  
\*2 L.ギニャール(1852-1928) フランスの植物学者。

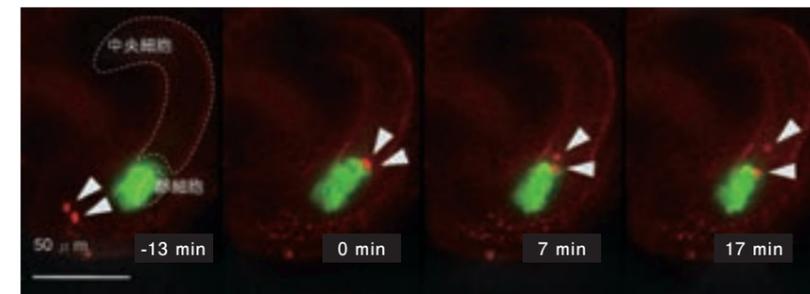


図4 重複受精の様子  
矢印で示す赤い2つの点が精細胞核(セイ王子とサイ王子)。卵細胞(ラン王女)と中央細胞(オーサ王女)の位置が点線で示されている。2人の王子(セイ王子とサイ王子)が2人の王女(ラン王女とオーサ王女)に接してじっとしている7分間にどのような交渉が行われているのか、現在、研究の最先端で研究者が明らかにしようとしている。

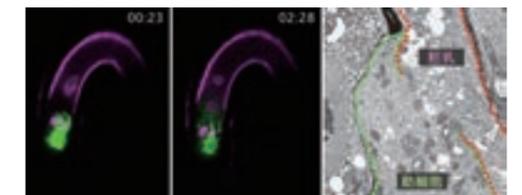


図5 胚乳と助細胞の融合  
左の2枚の写真では、緑色に光る助細胞(シーナ)のミトコンドリアが胚乳(受精後のオーサ王女)に移動する様子を示す(数字は時間と分)。右は助細胞(シーナ)と胚乳(オーサ王女)の融合を示す電子顕微鏡写真。



Toshinori Kinoshita

1968年生まれ。1991年九州大学理学部生物学科卒業。1994年九州大学大学院理学研究科博士課程中途退学。同・教務員、助手を経て、2007年名古屋大学大学院理学研究科・准教授、2010年同・教授。2013年から現職および名古屋大学遺伝子実験施設長。博士(理学)。専門は植物分子生理学。

## 生き残りのための環境突破力

木下俊則 トランスフォーマティブ生命分子研究所教授

### 植物の環境応答

植物の一番の特徴といえば、やはり太陽光の光エネルギーを利用し、二酸化炭素と水から有機化合物、酸素をつくり出す光合成を行うことがあげられます。植物は一度、土に根を生やすと、その場所で成長し、最終的には花を咲かせ、種をつけ、子孫を残さなければいけません。そのため植物は周囲で変化する環境要因に敏感に応答しています。植物周囲で変化する環境要因といえばやはり光が一番にあげられます。光といっても、光合成に必要なエネルギーとしての光だけではなく、効率よく光合成を行うための情報としての光も含まれています。ですから植物は光の強さだけではなく、光の波長、さらに季節によって変わる日長にも応答しています。

光に応答するためには光を感じる目が必要になります。動物は基本的に目で光を感じ、神経などの中枢システムを通じて全身に情報を伝えますが、植物には神経がないため、目に相当する光受容体を組織もしくは細胞全体にもっていて、各々の場所で局所的に、そして自律的に応答していると考えられています。植物の細胞内で光を感じる光受容体は、主にフィトクロム、クリプトクロム、フォトロボリンの3種類があり、さまざまな反応を引き起こすことが知られています。

3つの受容体のうち、フォトロボリンは、植物が光のある方向に向かって育っていく光屈性、光合成に必要な二酸化炭素を取り込むための反応である気孔開口、そして光合成を行う細胞小器官である葉緑体を動かす葉緑体運動、といった3つの反応を仲介する光

受容体であることが知られています。これら3つの反応は、まったく違う組織や細胞で行われており、一見なんの関係もないように思われますが、すべて光合成を効率よく行うために必要な反応であり、光合成のための光エネルギーを吸収する色素クロロフィルを光合成の実動部隊ととえるなら、フォトロボリンは光合成の司令塔といえるかも知れません。

最初に本日の主題となる気孔開口について簡単に紹介します。植物の表皮に存在する気孔は、1対の孔辺細胞に取り囲まれてできる孔の部分になります。植物が光合成を行うような太陽光、とくに青色光に応答して気孔は開口します。気孔を開口することで葉っぱの中に二酸化炭素を取り込み、同時に水が蒸散します。蒸散には根からの水分吸収を促進する働きがあるといわれています。

気孔開口は朝、太陽が昇ると、それに反応して気孔が開き、夜、日が沈むと閉じるという反応を、日々繰り返しています。この反応を制御しているのがフォトロボリンです。一方、気孔は蒸散にもかかわっているため、気孔を閉鎖する働きも大切です。植物は水不足の状況になると、植物ホルモンのアブシジン酸 (abscisic acid: ABA) を合成します。そして、ABAに応答してすみやかに気孔を閉鎖し、植物から水分が失われることを防ぐ働きを担っています(図1)。

### 気孔を制御するもの

ここからは私自身の気孔に関する研究を振り返りながら、その内容についてご紹介したいと思います。私が研究をはじめたのは20年以上前、大学4年生からです。私も東山先生と同じく研究をスタートしてからほぼテーマを変えずに研究を進めてきました。研究をはじめた当時、気孔開口のメカニズムに関しては、青色光によって気孔が開くことはわかっていましたが、その青色光を吸収する光受容体がフォトロボリンとは

まだわかっておらず、また孔辺細胞に存在する水素イオンを能動的に輸送するなんらかの酵素が働いていると考えられていました。この2つの因子を明らかにしたいと考え、私は研究をスタートしました。

まず、水素イオンを輸送する酵素についての研究を進めました。この実験は私の研究人生において最も時間のかかった研究で、約8年かかりました。植物材料や細胞調製の工夫が実を結び、細胞膜に存在するプロトンポンプという酵素が、青色光によって活性化され、さらにその活性化は、タンパク質のリン酸化という修飾によって引き起こされていることもわかりました。

長い間、1つの研究をしていると、いろいろと面白いことがわかってきます。中でも一番面白かったことは、細胞膜プロトンポンプ(95 kDa)より大きいタンパク質も孔辺細胞内で青色光によってリン酸化されていることを発見したことです。これは興味深い現象だと思い、このタンパク質が何であるかをさらに追究したところ、どうやらフォトロボリンらしいことがわかりました。そこで、次にフォトロボ



リン変異体を用いた研究を行った結果、野生株では正常な植物体は青色光に応答して気孔開口が起こりますが、フォトロボリン変異体では、どれほど強い青色光を照射しても気孔開口は起きないことがわかりました。

以上の研究により、青色光を吸収する光受容体はフォトロボリンであることと、気孔開口の駆動力を発生する酵素は細胞膜プロトンポンプであることが明らかとなりました。気孔が光により開口する現象は、100年以上前にF.ダーウィン(進化論で有名なC.ダーウィンの息子)により発見されましたが、100年以上経過して、ようやく気孔開口にかかわる主要因子が明らかとなりました(図2)。これらの結果は、平成25年度から高校生物の教科書にも記載されるようになりました。

### 気孔開度制御のシグナル伝達

以上のように気孔開口にかかわる主要因子が明らかになってきましたが、これまでの研究結果はあくまでもシグナルを受ける入口の部分と、そのシグナル伝達のアウトプット、標的の部分の部分が明らかになっただけで、その

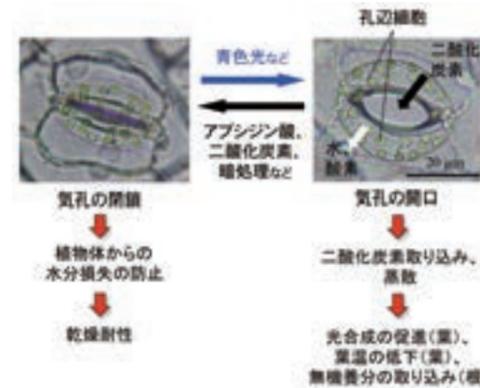


図1 植物における気孔の働き

気孔は1対の孔辺細胞により構成される。孔辺細胞内の丸い粒は葉緑体で一般に表皮組織では孔辺細胞にのみ葉緑体が存在する。写真はツユクサ表皮の気孔。研究によく用いられるシロイヌナズナでは、葉の裏側に1 mm<sup>2</sup>あたり約100個の気孔が存在する。

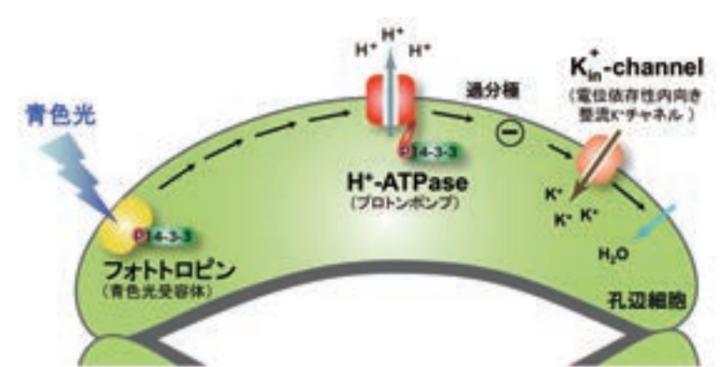


図2 青色光による気孔開口反応の模式図

青色光はフォトロボリンに受容され、シグナル伝達を経て、細胞膜プロトンポンプを活性化し、電位依存性内向整流K<sup>+</sup>チャネルによるK<sup>+</sup>取り込み、孔辺細胞の体積増加を引き起こし、気孔開口を誘導する。14-3-3・14-3-3タンパク質、p:リン酸化、K<sup>+</sup> channel:電位依存性内向整流K<sup>+</sup>チャネル。



間のことはまだほとんどわかっていません。現在は、気孔開口のシグナル伝達について研究を進めています。その1つの方法が気孔開度変異体の単離です。変異体を探索することをスクリーニングといいます。スクリーニングで単離した変異体の原因遺伝子を解析し、気孔開口でどのような役割を果たしているかを調べます。ただ、変異体を単離するためには、4万～8万個以上の個体をスクリーニングする必要があるといわれています。また、気孔が開くまでには2時間以上かかり、顕微鏡で観察すると3時間はかかってしまうため、慣れた人でもせいぜい1日5～10個体を調べるのがやっとで、この方法で気孔の開度がおかしくなった変異体を単離することは困難です。

このようなスクリーニングをするときには、いかに気孔を見ずに気孔開度を評価する方法を考え出せるかがポイントになります。現在、我々は、葉の表面温度を指標にしたスクリーニングや、気孔開口の駆動力を形成する細胞膜プロトンポンプの活性化状態をモニターするスクリーニングなどを行っています。ここでは最も直感的にわかりやすい、

葉の表面温度を指標にした一次スクリーニングを紹介したいと思います。

皆さん、赤外線サーモグラフィという機械はご存じだと思います。赤外線サーモグラフィは、対象物から出ている赤外線の放射エネルギーを温度に変換し、温度分布を擬似カラーとして表示する装置です。赤は温度が高く、青は温度が低いことを示しています。気孔の開口には二酸化炭素を取り込む働きがあるのと同時に、蒸散の働きがあります。蒸散時には水が気化するため、気化熱を使います。つまり、物自身の熱を奪って水は蒸発するため、もし気孔が大きく開いていれ

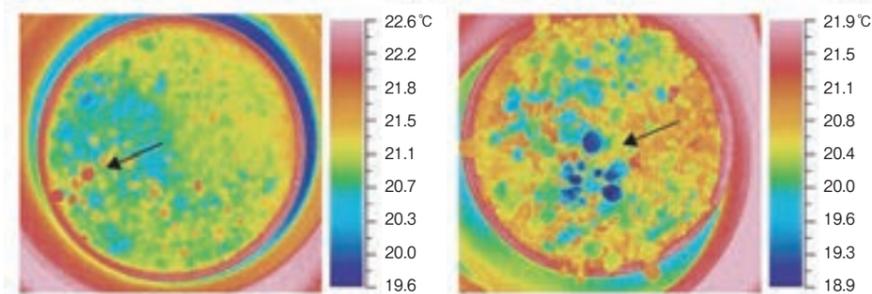


図3 赤外線サーモグラフィによる気孔開度変異体のスクリーニングの様子  
変異処理を行ったシロイヌナズナを50株程度ずつポットで生育させ、赤外線サーモグラフィにより撮影した像。  
左:矢印で示す赤色が気孔を閉じている高温変異体。右:矢印で示す青色が気孔を開いている低温変異体。

ば、盛んに蒸散が起きて葉っぱの温度が下がっていきます。逆に気孔が閉じていれば、蒸散は少なく、温度が高いと想像できます。実際のスクリーニングでは50株程度の植物をサーモグラフィで測定しています。そうすると、まわりの植物と比べて葉っぱが赤く見えて温度が高い植物、つまり気孔が閉じている高温変異体や、逆にまわりの植物と比べて葉っぱが青く見えて温度が低い植物、つまり気孔が開いている低温変異体が見つかります(図3)。このようにサーモグラフィを用いることで、顕微鏡による観察と比べて、100倍以上の速度での気孔開度変異体のスクリーニングが可能となりました。

#### 気孔開度の人為的制御

私たちの研究室では、気孔開閉の分子機構を解明し、さらに気孔開口において重要な働きをする細胞膜プロトンポンプという酵素の活性調節機構を解明することを大きな目標にしていますが、同時に、気孔は、植物にとって二酸化炭素の唯一の取り込み口であり、蒸散の制御部位であるため、気孔開閉を制御することができれば、気孔の開口を促進し光合成を高めることで生育の良い植物

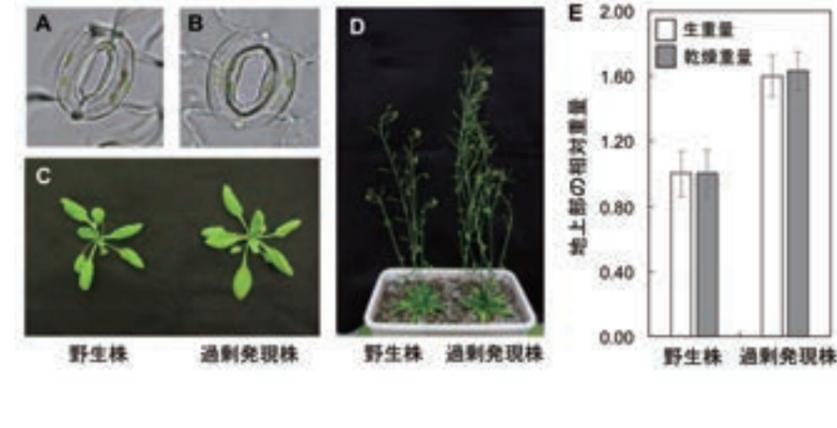


図4 細胞膜プロトンポンプの過剰発現による植物の成長促進  
細胞膜プロトンポンプ過剰発現株を光強度200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の白色光(16時間明期/8時間暗期)の条件下で生育させた播種後25日目の野生株(A)と過剰発現株(B)の気孔と植物体(C)、播種後45日目の植物体の写真(D)。播種後25日目の植物の地上部の相対重量(E)。バーは標準偏差を示す。

をつくることができたり、逆に気孔の閉鎖を促進することで、本来、枯れてしまうような環境でも枯れない植物をつくれたりできるかもしれないと考え、そういった取り組みもはじめています。これまでは気孔を大きく開かせ過ぎると、同時に多くの水を失うという問題や、技術的な問題点もあり、その制御は困難でした。そこで私たちは、これまでの研究で明らかになった気孔開口にかかわる主要因子を孔辺細胞のみで発現誘導し、その量を増加させれば、うまく気孔開口が促進されるのではないかと考え、研究を進めました。

まず、プロトンポンプを過剰発現させたシロイヌナズナにおける気孔の開口反応を見ました。大切なことは、夜に閉鎖するかどうか、乾燥時はABAに応答して閉鎖するかどうかですが、野生株と同様な表現型を示すことがわかりました。さらに、光照射により25%程度、野生株より気孔が大きく開口することがわかりました。そこで光合成蒸散測定装置を用いて生きた葉っぱの光合成活性を測定しました。光が十分に当たっていると過剰発現株は野生株と比べて15%程度光合成活性が高まっていました。さらに、光合成

活性が高まっているのなら、うまく育てれば植物が大きくなるのではないかと考えて生育を行うと、野生株と比較して播種後25日目で42～63%、播種後45日目で36～41%、過剰発現株は大きく育っていました(図4)。

この結果により気孔開度が光合成や生産量の制限要因となっていることを初めて実証することができ、また気孔開口の促進にはプロトンポンプを孔辺細胞で過剰発現させることが有力な方法であることがわかりました。陸上植物の気孔開口のメカニズムは基本的に共通なので、この技術を農作物やバイオ燃料用植物に適用することで、植物の生産量の増加、もしくは植物を利用した二酸化炭素の削減に役立てることができると期待しています。実際、私たちは農学部や企業と共同研究をしながら実用植物への展開を開始しています。

一方で気孔を閉鎖させることで、乾燥耐性を向上させた植物をつくらうという研究にも取り組み、気孔閉鎖に関与する遺伝子(CHLH)を孔辺細胞で過剰発現させることにより、乾燥に対してより敏感に気孔を閉鎖し、野生株がほぼ枯れてしまう条件において



図5 CHLH過剰発現による植物への乾燥耐性の付与  
野生株とCHLH過剰発現株を通常条件下で3週間生育後、18日間水やりを停止した時の植物体の写真。#1と#2は独立したCHLH過剰発現株。

も枯れないシロイヌナズナの作出に成功しました(図5)。

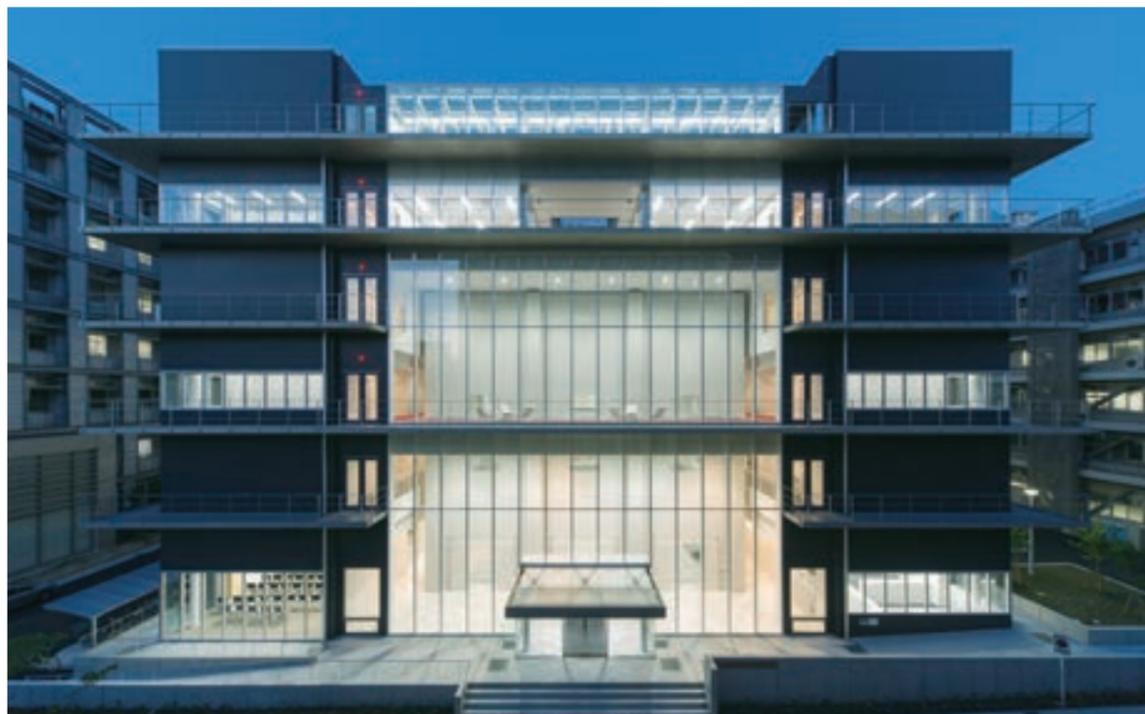
今後は、気孔の閉鎖についても、実用植物への展開を進めていきたいと考えています。

これらの研究により、気孔開度を制御することは植物の光合成や乾燥耐性に大きな影響を与えることが明らかになってきました。しかしながら、これらは遺伝子組換え技術を用いるもので、社会実装の大きな障壁となっています。そこで、現在は、遺伝子組換え技術に頼らない方法として、交配による育種的手法や化合物による気孔開度の制御にも取り組んでいます。これまでに気孔がよく開いた品種の同定や気孔開口や気孔閉鎖させる新規化合物の単離に成功しました。新規化合物については特許の出願も行い、さらなる進展が期待されます。

このように植物の環境応答のモデル材料として気孔を用いた基礎研究を進めるとともに、気孔を対象とした研究では植物の光合成能や乾燥耐性に直結するため、そこで得られた基礎的な知見をできれば実用面にも生かせればと考えながら研究を進めています。本日はどうもありがとうございました。

# ミックスラボの理念を施設全体に反映する

佐藤 綾人 トランスフォーマティブ生命分子研究所特任講師・研究推進主事



(上) ITbM棟外観 (下) ITbMの象徴ともいえるミックスラボ(居室—実験室エリア)

世界トップレベル研究拠点、トランスフォーマティブ生命分子研究所(WPI-ITbM)の新研究棟(ITbM棟)が2015年4月に稼働を開始した。

研究分野、言語そして文化の壁を排除した新しい研究スタイル「ミックスラボ」を建物全体のデザインに反映させたITbM棟で、ITbMのゴールである「トランスフォーマティブ生命分子\*」の開発をめざす。

## オープンな研究環境を創出

2012年12月、名古屋大学そして世界各国から研究者が集い、「分子」をキーワードに動植物の生殖・成長・体内時計の仕組みの解明や制御を研究する国際研究所、トランスフォーマティブ生命分子研究所(ITbM)が発足した。ITbMの特徴は、研究室という物理的な壁を排除し、化学者、生物学者、計算科学者が同じ空間で研究するミックスラボである。すでに、この斬新な研究スタイルからいくつもの分野融合研究が生まれ、多くの研究成果を上げることになっている。

2015年4月に完成したITbM棟には、ミックスラボの理念を建物全体に拡大し、人々とのコミュニケーション、研究の融合、斬新なアイデアの創出のためのさまざまな工夫が盛り込まれている。

入口を抜けると高さ15mの吹き抜けを有する開放感のあるエントランスホールがある。この広い空間はITbMのメンバーの交流だけでなく、本学のメンバーが自由に使用することができる。将来的にはITbMの研究に気軽にふれることができる一般社会へのアウトリーチ空間となる予定である。1階には、このホールを取り囲むように、レクチャールーム、事務室、サーバ室などが配置されている。



2階と4階の化学実験室にはドラフトを50台ずつ配置。国内の大学では例を見ない構造

2、4階と3、5階がそれぞれ実験エリアと居室エリアになっている。2階と3階、4階と5階がそれぞれ2層一組となっており、居室エリアからは実験室を眺めることができる。居室には教員・研究員・学生・技術補佐員そして事務補佐員が研究室の区別なく



居室と実験室をつなぐらせん階段。前方に居室、その先に化学実験室が見える

混在し、シームレスなコミュニケーションを可能にしている。このように、異分野融合研究を加速させるため、化学エリアと生物学エリアのコミュニケーションをささげざる要素を最小限にとどめ、ITbM棟全体が一体感のある空間となっている。



ES館を望む3階のリフレッシュスペース

## ミックスラボから生まれる成果

ITbMが世界に誇る植物生物学、動物生理学グループと合成化学グループの融合によって、斬新なアイデアが誕生し、予想以上のスピードで研究が進展している。

一例として、東山哲也教授(ITbM副拠点長)らは、独自で展開してきたイメージング技術と山口茂弘教授(ITbM副拠点長)らが開発した蛍光分子を組み合わせることで、従来の能力をはるかに超える蛍光分子の創製に成功している。これ以外にも、生物学と化学との学際領域において積極的に融合を進めた結果、今までには想像しえなかった研究成果を手につつある。

発足後のわずか2年で、200を超える論文を発表した。この中にはITbMならではの融合研究が含まれている。まさにミックスラボ効果といえよう。今後、ITbM棟に込められたデザインや機能が、融合研究をさらに加速させることが期待される。「分子をつなぎ、価値を生み、世界を変える」をスローガンに、学生、研究員、事務員、教員が一丸となって、トランスフォーマティブ生命分子を開発し、化学を武器に生物学の問題解決をめざす。

\* トランスフォーマティブ生命分子  
アスピリン、ペニシリン、フラベンなど、社会を変えた画期的な分子を我々はトランスフォーマティブ生命分子とよぶ。



研究者の日常的な意見交換の場となるウッドデッキ

写真提供：施設・環境計画推進室 脇坂圭一環境学研究所准教授



Itsuki Suto

1976年ドイツ国リンダウ市生まれ。2004年筑波大学大学院地球科学研究科博士課程修了。名古屋大学大学院環境学研究科助教を経て2012年より現職。専門は、古生物・古海洋学。著書に、『0.1ミリのタイムマシン』（くもん出版、2009年産経児童出版文化賞大賞受賞）、「海底ごりごり 地球史発掘」（PHPサイエンスワールド新書）などがある。

## 海が混ざると生き物も進化する

須藤 齋 地球環境科学専攻准教授

### 過去の環境を教える珪藻化石

あまり知られていないが、陸上や海底の堆積物中には顕微鏡を使わないと見ることができない小さな化石が大量に存在している。これは微化石とよばれ、水中・地中に住む小さな生物の骨格や殻などからなる。当時の生息環境によってさまざまな種が存在していたので、これらを観察・分類すれば、過去の地球環境や堆積物ができた時代を知ることができる。私は珪藻（けいそう）という小さな植物プランクトンの化石の研究をしている。海洋や淡水に住む珪藻の光合成量は熱帯雨林に匹敵するくらい重要な生き物でもある。

### 見捨てられていた休眠胞子化石

珪藻の仲間のキートケロス属は、さまざまな生物が住んでいる沿岸周辺の一次生産

の90%以上を担っており、魚介類などのエサとして漁業・養殖業においても重要な生物である。多くの種は海中での栄養が豊富なきときは分裂を繰り返して増えていく(図1)。一方で、栄養がなくなると、殻が厚くて丈夫な休眠胞子という特殊な細胞を形成し、海水混合\*1によって栄養状態が良くなった海面へ運ばれるまで、海底に沈んで一時期を過ごすという特殊な生活をする。

休眠胞子の化石も沿岸域の堆積物中からよく見つかるが、ほとんど研究が行われてこなかった。しかし、休眠胞子化石の増減は、沿岸域の海水混合強度や持続性、栄養の枯渇と供給量、生物生産量などの変遷を知る情報となるはずである。そこで私は世界中の陸上調査や海底下から得られた約4000万年前から現在までの堆積物中に含まれる休眠

胞子化石の分類と群集変化を調べてきた。その結果、3370万年前(始新世と漸新世の境界)に多様性と産出頻度が増加していること(図2の赤線部分。ACEイベント\*2と名付けた)、それを起こした地球環境の変遷や他の生物の進化との関連性がわかってきた。

温暖な始新世では海水が混ざりにくい環境だったが、急激に寒冷化した漸新世ではよく混ざりようになり、海底に貯まっていた栄養が珪藻の住む海面付近に豊富に運ばれてくるようになった。このような環境に変化したことでキートケロス属がさまざまな種に進化・増加したのである。一方でそれまで繁栄していた植物プランクトンはその数を減らしていった。

### 大型海洋生物と珪藻の共進化

珪藻やキートケロス属の多様化と急増は、

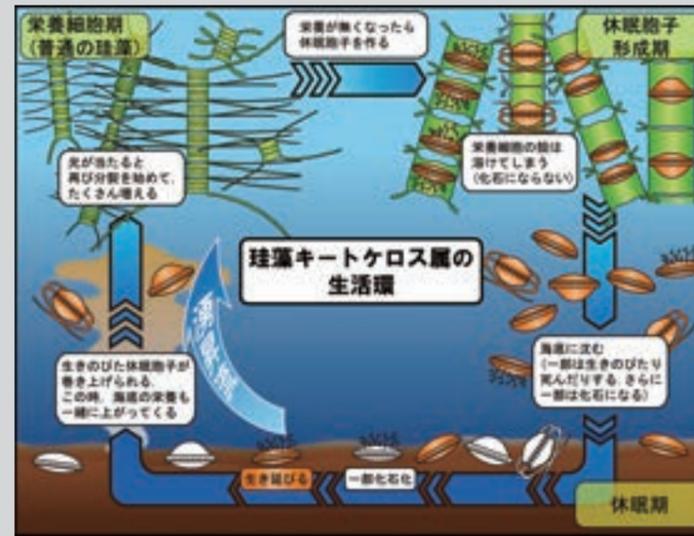


図1 珪藻キートケロス属の生活環  
光合成や分裂をするために必要な海面の栄養状態や光の当たり具合が悪くなると休眠胞子を形成して海底に堆積する。海底にはさまざまな生き物の死体や岩石などから染み出した栄養分が豊富に存在し、これが休眠胞子とともに海面へと運ばれ再び分裂を開始する。

他の海洋生物の進化にも大きな影響を与えたようである。たとえば、クジラ類に目を向けると、それまでインド亜大陸に生息していた原始クジラ類は、河畔から海洋へと移動し、現代型のハクジラとヒゲクジラに分岐・増加していった(図2左)。ヒゲクジラ類は、海中の珪藻類をエサとしているオキアミを食べているため、キートケロス属などが増えた結果、ヒゲクジラのエサであるオキアミも増加し、その数や種類を増やすことができたのではないかと考えている。また、オキアミ類を食べる魚類が増加した結果、ハクジラ類も同じ時代に

進化していったのかもしれない。他の海生哺乳類を見ても、アザラシやセイウチ、アシカ類、海鳥やペンギン、ジュゴンやマナティなども多様化しており、やはりエサが増えたことがきっかけであった可能性がある。

これらの生物の進化・多様化が、栄養塩供給量や珪藻類などの増加によるものであることを証明することは簡単ではないだろう。しかし、現在進んでいる地球温暖化によって海水の混合が弱体化した場合、沿岸域での栄養供給が低下して一次生産を減少させることになる。すると、漁獲量が減るだろうし、

海生生物の多様性も失われるかもしれない。どのようなシステムで海洋環境が変化し、それが生物多様性に影響を与えてきたのかを明らかにすることは、今後起こりうる環境変動によって、どのように生態系が影響を受けるのかを予測する大きな手助けになるはずである。

- \*1 海水混合  
冬になると海洋表層の海水が冷やされることにより重くなり沈み、一方で、相対的に軽い低層の海水が上がって、表層と低層の水や栄養分が混ざること。
- \*2 ACEイベント  
Atlantic Chaetoceros Explosion(大西洋キートケロス属爆発) イベントの略。大西洋で約3370万年前にキートケロス属の多様性と産出頻度が急激に増加した事象のこと。

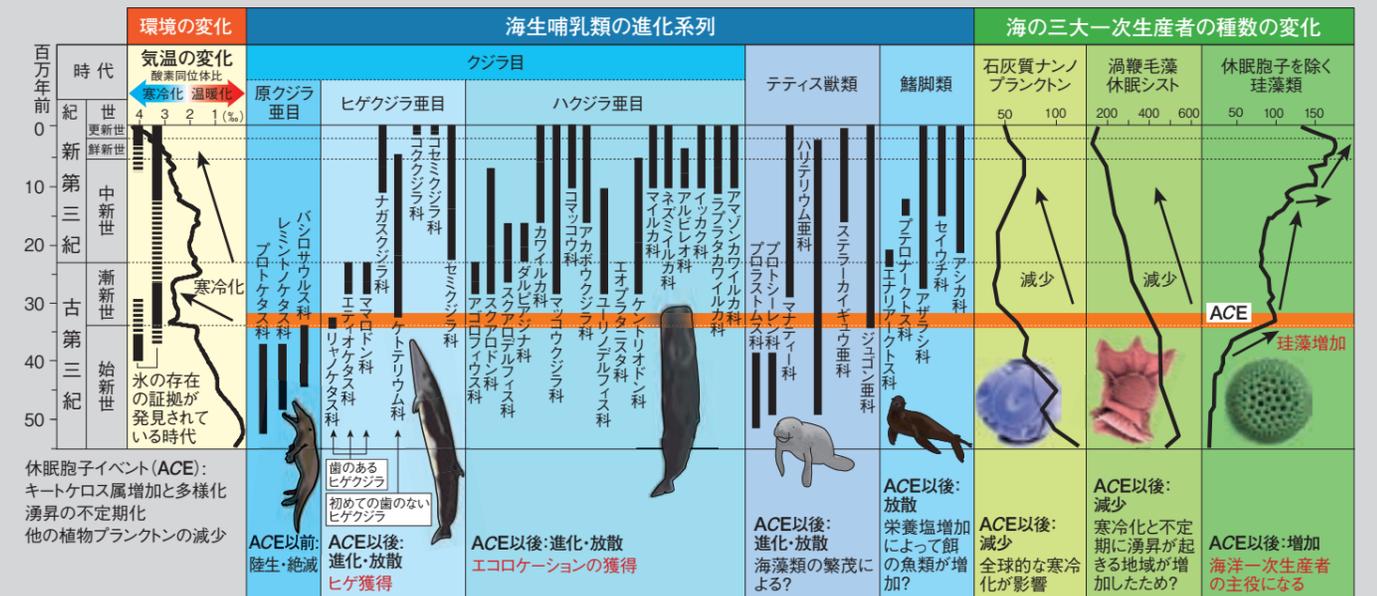


図2 海の三大一次生産者の種数の変化と海生大型哺乳類の多様性変動  
約3370万年前の寒冷化以降、円石藻と渦鞭毛藻は種類を減らしているのに対して、キートケロス属を含む珪藻類はその数を増やしている。同じ時代には、さまざまな海生哺乳類もその多様性を増加させており、これらには何か関連性がある可能性がある。

# RNAをデザインして薬をつくる

阿部 洋 物質理学専攻教授



Hiroshi Abe

1972年生まれ。2001年、北海道大学大学院薬学研究所博士課程修了。マサチューセッツ工科大学博士研究員、スタンフォード大学博士研究員、理化学研究所研究員などを経て、2013年より北海道大学大学院薬学研究所准教授。2015年より現職。

## ナノサイズの分子デザイン

近年、RNA<sup>\*1</sup>が単なる情報分子としてだけでなく、さまざまな機能を有していることが明らかになってきた。たとえば、2006年にノーベル賞が授与されたRNA干渉<sup>\*2</sup>とよばれる遺伝子発現の抑制機能がある。また、1989年にノーベル賞が授与されたリボザイムとよばれるタンパク質酵素のような触媒機能をもっているRNAの発見がある。このような発見を契機としてRNAを利用した創薬研究が行われるようになった。とくに、遺伝子発現を特異的に抑制するRNA干渉はバイオテクノロジーや医療技術においてきわめて利用価値が高いといえる。私はRNAが本来もっている機能以上の能力を引き出すことをねらい、ナノサイズの分子設計を行い、それらの分子を合成し、新しいバイオ医薬技術として利用することをめざしている。

図1に示すのは、ダンベル型、環状二本鎖や3方向・4方向分岐型の構造を有するRNAで、天然には存在しない構造である。RNA干渉法には通常二本鎖のRNAを用いるが、生体内ではきわめて不安定であることが問題となってきた。生体内のヌクレアーゼという酵素がRNAの末端を認識し分解するためである。

図2に示すように、ダンベル型RNAは末端をもたないため分解酵素によって分解されない。また、分岐型RNAは分岐構造により立体的にかさ高く分解酵素を近づけない。いずれの構造設計も生体中でのRNA安定性を著しく向上させた。一方、これらナノ構造化RNAは細胞内に入ると特殊な酵素によりゆっくりと活性型二本鎖RNAに変換され長期的な遺伝子発現抑制を示した。

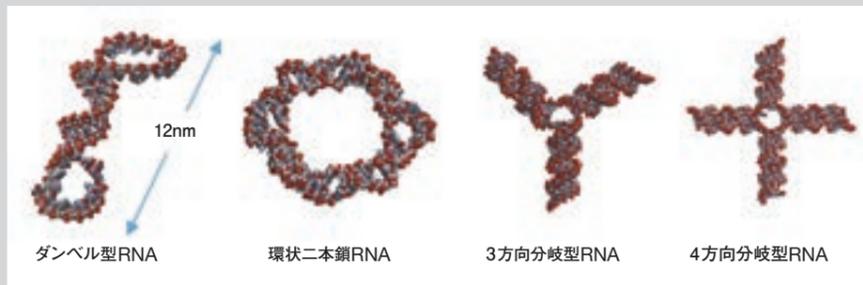


図1 ナノサイズの分子設計  
ダンベル型、環状二本鎖や3方向・4方向分岐型の構造を有するRNAは、生体中でも安定に存在できる。

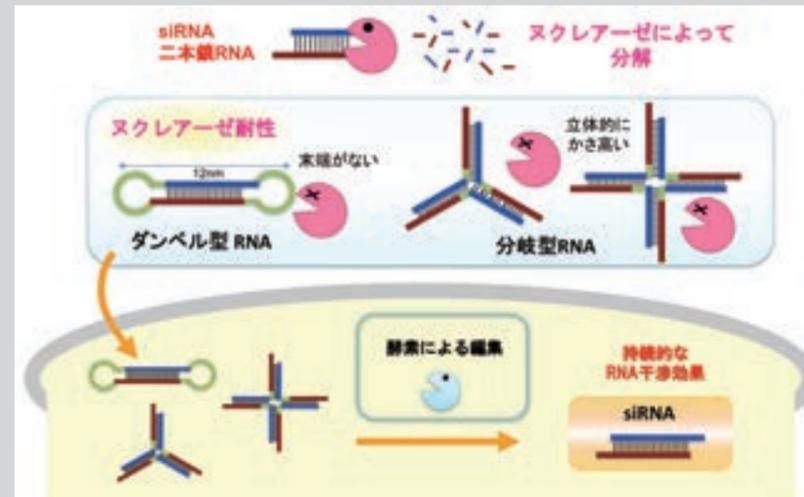


図2 ナノ構造化RNAによるRNA干渉法  
生体内の分解酵素は、RNAの末端を認識して分解するため、二本鎖のRNAは極めて不安定であり、一方、ダンベル型RNAや分岐型RNAは末端が存在しないことや立体的にかさ高いことから、分解酵素に対して安定である。そのため、ダンベル型RNAや分岐型RNAは長期的なRNA干渉効果をもたらす。

分子デザインで面白い機能をつくることもできる。メッセンジャーRNA<sup>\*3</sup>は、アミノ酸配列をコードしておりリボソームによりタンパク質に翻訳される。通常タンパク質の翻訳は、開始コドンではじまり終止コドンで終わる。私は、「タンパク質の翻訳反応で、もし終止コドンをのぞいた環状型構造のメッセンジャーRNAを翻訳型として用いるとどうなるであろうか」と考えた(図3)。リボソームが一度結合し、タンパク質合成を開始すると終わりがないので原理的には永久にタンパク質合成を続けることになる。実際に、環状メッセンジャーRNAを用いてタンパク質合成を行ってみると、長いタンパク質ができることがわかった。また、この終わりのない回転式タンパク質翻訳は、通常の直線状のメッセンジャーRNAよりも効率よくたくさんのタンパク質をつくりだせることもわかってきた。

## 細胞内でビルドアップする

バイオ医薬はタンパク質や核酸が成分になっている。どちらもナノサイズの高分子である。医療応用する際に、これら分子の弱点は、細胞内に入りにくいことや免疫応答を引き起こしてしまうことにある。一方、低分子は

細胞膜透過性が高いことや免疫応答が起こりにくいことがわかってきた。そこで、私は新しい方法論として細胞内に低分子材料を導入して、有機化学反応を起こして、細胞内部で活性型の高分子医薬品をつくりだすことをめざしている。Ship in a bottleのつくり方を考えるとうかりやすい(図4)。小さな材料をビンの中に入れて、大きな船をつくりあげる。最近、この細胞内ビルドアップ法の概念を用いて、低分子のRNAから細胞内で高分子RNAをつくりだし、遺伝子発現を抑制できることを証明した。本法が、バイオ医薬が抱える問題点を解決できると期待して、日々研究に励んでいる。

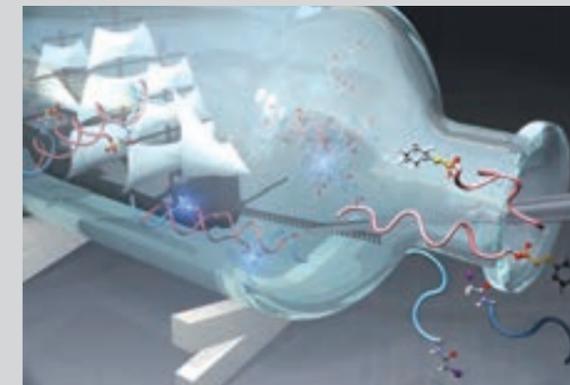


図4 Ship in a bottle の概念に基づくビルドアップ法  
RNA干渉などに用いるRNA分子は、一般的に大きな分子(高分子)である。そのため、細胞内に入りにくいという問題点がある。そこで、その問題を解決するために、低分子化したRNAを細胞内に導入して、内部でビルドアップすることで、生体活性のある高分子RNAをつくり出す概念を考案した。

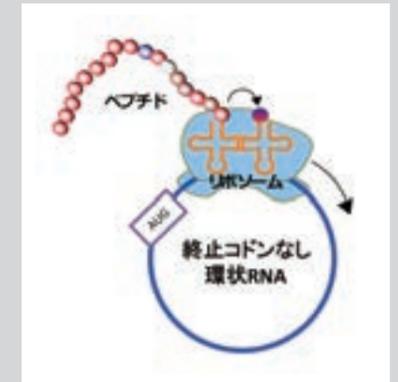


図3 終わりのない回転式翻訳現象  
タンパク質翻訳は、通常は終わりのある直鎖RNAを鋳型として起こる。一方、終わりのない環状RNAを鋳型として用いると、タンパク質合成が永久に続くことになる。

\*1 RNA  
遺伝子の本体である DNAから転写されてできる核酸。リボ核酸。DNAの情報に基づいてタンパク質を合成する働きを担う。  
\*2 RNA干渉  
短いRNAと相補的な塩基配列をもつメッセンジャーRNAが分解される現象。ねらったメッセンジャーRNAを特異的に分解できることから、医薬への利用が期待される。  
\*3 メッセンジャーRNA  
タンパク質をコードしているRNA。

# 遺伝情報分配の仕組みを探るフロンティア

西山朋子 高等研究院特任講師



Tomoko Nishiyama

1979年生まれ。2002年東京工業大学生命工学部卒業。2007年東京工業大学大学院生命理工学研究科修了。2008年ウィーン分子病理学研究所(IMP)ポスドク。2012年3月より現職。

## 染色体分配の本質を探る

生命の設計図を記録する遺伝情報は、我々が1つの受精卵として発生を開始する瞬間から、体をかたちづくるすべての細胞にその設計図が行きわたるよう、細胞分裂によって娘細胞に分配されていく。そしてその設計図はまた、生殖細胞において多様化の

プロセスを経たのち、新しい設計図として次世代の個体へと受け継がれていく。この設計図のいわば「運び屋」が、染色体である。細胞分裂期において染色体が紡錘体微小管\*1にとらえられ、娘細胞に分配されていくさまは、染色体の凝縮と分配が初めて記載された19世紀末以来、100年以上にわたっ

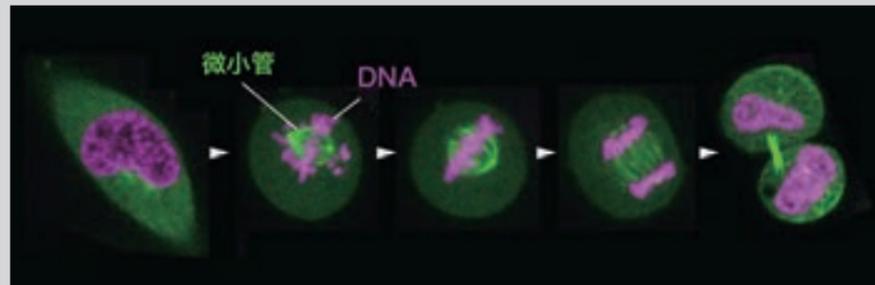


図1 細胞分裂期と染色体分配  
ヒト細胞の分裂前期(左端)から細胞質分裂期(右端)に至るまでの染色体(DNA:マゼンタ)と微小管(緑)の様子。染色体は紡錘体微小管によって捕捉され、スピンドル赤道面上に整列し(中央)、娘細胞に均等に分配される。

て多くの研究者たちを魅了し続けてきた(図1)。私も学生時代に劇的な染色体分配の様子に衝撃をうけ、以降、染色体研究にのめり込むこととなった。染色体の分配は、1) 紡錘体による染色体の牽引と 2) 牽引による張力を感知する保証機構\*2に依存する。しかしそもそも、なぜ「分配」という作業が必要なのだろうか。無論、DNA複製の結果生じた姉妹染色分体\*3同士が接着しているからにはほかならないが、実はここに染色体分配の本質がある。つまりゲノムのコピー同士の接着があるからこそ、両極に牽引する張力が生じ、この張力を感知する保証機構が作動・解消し、染色体が分配される。遺伝情報のコピーを等しく分配するためには、それらがまずは接着されなければならない。「分配のための接着」というパラドックスが実は遺伝情報分配の根底に存在する。

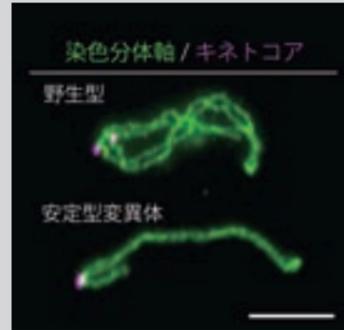


図2 ソロリン安定型変異体存在下における染色体の表現型

野生型ソロリンまたは安定型変異体ソロリンを添加したアフリカツメガエル卵抽出液中で形成させた分裂期染色体。染色分体の軸を緑、キネトコア(動原体)をマゼンタで示す。野生型ソロリンは分裂期にリン酸化修飾をうけて染色体から解離するため、接着不安定化因子の働きにより姉妹染色分体間接着が解離し、姉妹染色分体の軸同士が離れて見える。一方、分裂期にリン酸化修飾を受けない安定型変異体ソロリンを添加すると、分裂期においても接着不安定化因子が不活性化されたままになり、姉妹染色分体間接着が解離せず、染色分体軸が密に接着してしまう。このような染色体は染色体不分離の原因となる。

## 接着が確立する仕組み

姉妹染色分体間の接着を担う実働部隊は、コヒーシン複合体\*4(以下、コヒーシン)とよばれるリング状のタンパク質複合体である。このリングがどのようなトポロジーで2本のDNAを接着しているかは未解決の問題であるが、私が接着研究をはじめた2008年当時、少なくともコヒーシン単独では接着に不十分であり、接着を確立する機構が存在すると考えられていた。私が着目したソロリンというタンパク質は、1) コヒーシンの結合因子であること、2) 接着に必須であること、3) コヒーシンのDNAへの結合には必要ないことが知られていたため、接着確立因子の候補として白羽の矢が立った。

私たちは脊椎動物細胞を用いた解析から、ソロリンは接着に必須であるものの、接着を不安定化させる別の因子を欠損させた特殊

な条件下では必須でなくなるという興味深い結果を得た。つまりソロリンは接着不安定化因子の働きに拮抗することで接着を確立し、細胞はソロリンの染色体上での安定性を制御することで、染色体上に常駐する接着不安定化因子の活性を制御していたのである(図2)。このことは、接着の確立が不可逆的な一方向の反応ではなく、不安定化要素を内包したまま安定状態と不安定状態の間を遷移するダイナミックな現象であることを示しており、「接着確立」に対する新しい概念を提唱するものとなった(図3)。

## 接着の現場をとらえる

コヒーシンとその制御因子による接着制御機構が明らかになりつつある今、それでもなお、我々の前に立ちはだかるブラックボックスがある。それは「接着の現場」である。

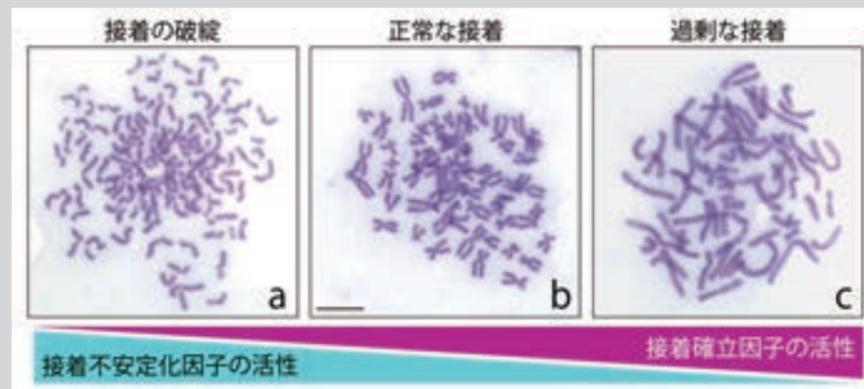


図3 分裂期染色体の接着

通常、分裂期において姉妹染色分体間の接着は不安定化するため、染色体腕部の接着が解離する(b)。一方、染色体の中央領域(セントロメア)は微小管に捕捉されて張力を生み出す必要があるため、接着が保護され、結果として染色体中央領域が接着し腕部が解離したX型の染色体となる(b)。接着不安定化因子であるWaplを欠損した細胞では、過度の接着が観察され(c)、逆に接着確立因子であるソロリンを欠損した細胞では、Waplの活性が抑制されないため、染色体全長にわたって接着が破綻してしまう(a)。

これまで接着に必須な数々の因子が同定されてきたが、それらが一体どこで・どのように接着を確立しているのかは依然として謎である。私たちはこの問題に挑戦するため、独自の系を開発し、DNA上の一分子のコヒーシンがDNAを接着する瞬間をリアルタイムで目撃しようとしている。この挑戦は、接着の瞬間をとらえるだけでなく、コヒーシンリングが遺伝子の転写や複製のマシナリーとどのように共役し、接着を達成するのかを理解する重要な手がかりを与えることになると期待している。

長い分裂期研究の歴史の最先端にあって、独自のアイデアをもって、これまでだれも目にしたことのない現場をとらえることで、染色体分配に潜む生命の基本秩序を1つずつ詳らかにしていく作業を、私たちの研究室では日々続けている。

\*1 紡錘体微小管  
染色体を対極に引き離す分裂装置を紡錘体(スピンドル)、紡錘体を形成する微小管を紡錘体微小管とよぶ。

\*2 保証機構  
ここでは分裂期チェックポイント(スピンドル形成チェックポイント)のこと。すべての染色体が両極から伸びる微小管に正しく捕捉されるまで、分裂期の進行を停止させておく機構。

\*3 姉妹染色分体  
DNA複製の結果生じる、同じゲノム情報をもつ2本のDNAのこと。1本の染色体は1対の姉妹染色分体から成り、姉妹染色分体同士はコヒーシン複合体によって接着されている。

\*4 コヒーシン複合体  
4つの異なるタンパク質からなるリング状のコア複合体を一般にコヒーシン複合体とよぶ。実際にはコア複合体に、不安定化因子Waplや接着確立因子ソロリンなどいくつかの結合因子が、細胞周期の進行に応じて結合している。コヒーシンリングの開閉が接着とその解離に重要な役割を果たしていることが知られている。

# 物理学教室の先人の名を冠した講演会を 若者たちに大志を抱かせる契機に

—坂田・早川記念レクチャー—

福井康雄 素粒子宇宙物理学専攻教授

海外では、さまざまなレクチャーシップが制度として定着している。研究業績の優れた研究者をたたえ、講演会を開いてその業績を中心とするレクチャーを聞く機会を設け、学問の将来を展望する。

天文学の世界では、「ラッセル・レクチャー」がアメリカ天文学会によって開催されている。ラッセルは、星の進化を表すヘルツシュプルング・ラッセル図(HR図)の創始者の一人として著名である。また、宇宙電波の発見者であるジャンスキーの名を冠した「ジャンスキー・レクチャー」も米国立電波天文台によって開催されている。ただ、日本では、この種のレクチャーシップはあまり先例がなかった。

一方で2000年当時、坂田昌一博士、早川

幸男博士の名前を知らない新入生も珍しくなかった。このままでは好ましくない、という意識が関係者には強かった。そこで坂田、早川両博士の名前を冠したレクチャーシップの開催を筆者が物理学教室に提案し、検討が始まった。

2002年、理学研究科の顕彰制度の1つとして「坂田・早川記念レクチャー」の開催が決定された。第1回の選考は、三田一郎名誉教授らのお骨折りで順調に進み、益川敏英博士に講演をお願いすることになった。講演会は名古屋市科学館の協力を得て、2002年12月27日、会場いっぱい参加者を迎えて盛況のうちに開催された。以来、毎年300人前後の高校生や一般市民の聴講を

得て講演会は開催され、坂田・早川両家の方々にもご出席いただいている。

講演者には、坂田・早川記念レクチャー選考委員会より、記念のメダルと盾が贈られる。メダルと盾は、画家であり椋山女学園大学非常勤講師である洞谷吉浩(どうや・よしひろ)氏のデザインによる。

記念講演者はすべて公募による。素粒子宇宙物理学専攻が中心となって国内を対象に公募を行い、海外の研究者も選考委員に加わってもらい講演者を選考している。今後も、次の世代を担う若者がこのレクチャーに参加し、大いに触発されて大志を抱くことを願いたい。

記念のメダルと盾



## 坂田・早川記念レクチャー 2015年度講演者公募文

坂田・早川記念レクチャー選考委員会

### ◎これまでの講演者

- 第1回(2002年度) 益川敏英氏(素粒子)
- 第2回(2003年度) 田中靖郎氏(宇宙)
- 第3回(2004年度) 戸塚洋二氏(素粒子)
- 第4回(2005年度) 杉本大一郎氏(宇宙)
- 第5回(2006年度) 西島和彦氏(素粒子)
- 第6回(2007年度) 西村 純氏(宇宙)
- 第7回(2008年度) 丹生 潔氏(素粒子)
- 第8回(2009年度) 佐藤勝彦氏(宇宙)
- 第9回(2010年度) 小林 誠氏(素粒子)
- 第10回(2011年度) 古在由秀氏(宇宙)
- 第11回(2012年度) 生出勝宣氏(素粒子)
- 第12回(2013年度) 佐藤文隆氏(宇宙)
- 第13回(2014年度) 矢崎紘一氏(素粒子)

名古屋大学大学院理学研究科・素粒子宇宙物理学専攻は同大学物理学教室創設以来、素粒子物理学と宇宙物理学の両分野において世界の研究の発展に寄与し、ノーベル賞受賞者をはじめ社会の各方面で活躍する多くの人材の養成に貢献してきました。

素粒子物理学の分野では、故坂田昌一教授の「二中間子論」提唱、クォーク模型の原型となった「坂田模型」とその延長線上でのニュートリノ混合の提唱などにより、現在の素粒子論の世界的流れを創出しました。一方、宇宙物理学の分野では、故早川幸男教授のエクス線や赤外線などを用いた多波長観測天文学の開拓によって観測的宇宙論や星間物質研究の地平が大きく拓かれました。

坂田・早川記念レクチャー制度は、両教授の業績を讃えるとともに、未来の発展につながる次世代を担う研究者の育成を目的として設けられました。記念講演者には、若者が物理の面白さを幅広い観点から理解し、その道に自らも挑戦したいという大志を抱く契機となるようなご講演をお願いしています。これまでに、13名の方を講演者として選考し記念のメダルと盾を授与するとともに、高校生・一般市民に向けて、記念講演を行っていただきました。

本年度も、名古屋大学大学院理学研究科・名古屋市科学館共催で、第14回の記念レクチャーを開催します。従来通り公募による講演者の選考を行います。今回は宇宙物理学観測分野において、坂田・早川記念レクチャーにふさわしい講演者の推薦をお願い申し上げます(右記これまでの講演者のリストを参照ください)。ご推薦にあたっては、候補者のお名前にごく簡単な推薦理由を添付していただければ幸いです。



名古屋市科学館サイエンスホールでの講演風景(2009年)

同窓生から

極域の解明に挑む

海洋研究開発機構地球環境観測研究開発センター・センター長代理  
原田尚美 (Naomi Harada)

今、北極海で何が起きているのか。日本は、北極評議会のオブザーバー国として、気候や海洋環境、生態系まで北極域で起きている変化を捉える基礎研究への貢献が期待されている。海洋研究開発機構の海洋地球研究船「みらい」での2006年の航海以来、北極環境変化とそれに対する海洋生物の応答に関する研究に取り組んでいる。2014年8月21日から9月29日まで約40日、研究航海を行った。水温、塩分などのセンサーを搭載した採水器(1本24リットルボトル×36本搭載)による海水採取、20m長のパイプで採取する海底堆積物、ネットを用いた動物プランクトンの採取と、観測は24時間にわたって実施された。

荒れ狂うベーリング海を抜けてチャクチ海へ入ると想像以上に穏やかな海が広がっている。目前には激減している海水がゴロゴロと浮かび、その向こうにはぶ厚い多年氷の帯が見えてくる。アイスパイロットのアドバイスを聞き、海水分布の衛星画像や気象予報の情報とにらめっこしながら氷を避け、観測海域や項目を大幅に変更しながらの航海ではあったが、無事に目的を達成して終えることができた。

大学院博士課程で参加した南極地域観測隊(第33次隊)ではじめて極域に足を踏み入れてから20数年。興味が尽きることはない極域の解明に挑み続けている。(1996年博士(理学)名古屋大学)



キャンパス通信

分野を越えて  
研究の最前線にふれる  
理学部コロキウム

2015年7月24日、第4回理学部コロキウムが理学南館坂田・平田ホールで開催された。理学部コロキウムは、学部生から教員までを対象とした講演会で、理学部の構成員が分野を越えて興味をもてるトピックスに関して、その分野の第一人者を招いて講演会を開催するものである。2013年12月に第1回を開催し、半年に1度のペースで開催している。

4回目となる今回は、東京大学大学院工学系研究科教授で、理化学研究所招聘主任研究員である香取秀俊教授を招いて「18桁の時間測定で見えること」と題して講演会を開催した。香取教授が開発した光格子時計は、レーザーを干渉させて作りだした光の格子の中に原子を閉じ込め、原子の状態遷移を時計として用いるもので、従来の1000倍の精度をもち、18桁まで正確な時を刻む。講演では、原子時計研究の状況や光格子時計開発の経緯について紹介された。講演の終盤では、光格子時計によってダークマターや火山噴火、津波発生などの観測に新たな応用が広がることが示され、基礎科学研究の可能性を再確認するよい機会となった(K)。

理学部コロキウムの開催実績

- 第1回 2013.12.20 「不確定性原理の反証可能性」  
小澤正直 名古屋大学大学院情報科学研究科教授
- 第2回 2014. 6.20 「構造生理学と創薬科学」  
藤吉好則 名古屋大学大学院創薬科学研究科特任教授
- 第3回 2014.11.21 「地殻流体と沈み込み変動」  
高橋栄一 東京工業大学大学院理工学研究科教授
- 第4回 2015. 7.24 「18桁の時間測定で見えること」  
香取秀俊 東京大学大学院工学系研究科教授



書籍紹介

『「ゆらぎ」と「遅れ」  
不確かさの数学』

物質理学専攻助教  
加藤祐樹 (Yuki Kato)

生活の中で、「ゆらぎ」や「遅れ」はあまりうれしくないものと思われる。しかし、そうした「悪役」に思われがちなものを有益に生かすという研究や現象が世の中にはあり、それを本書は身近な出来事を例にして紹介してくれる。本書の主題は「ゆらぎ」や「遅れ」がもたらす不確かさを数理的にどのように扱うかということにあるが、単なる解説書ではなく、人の常識的な「感覚」がいかに曖昧であるかを興味深く教えてくれる。

たとえば「トーナメント戦での番狂わせ」や「感染症検査の精度」を数理的にみてみると、導かれる確率は常識的な感覚とだいぶずれていることがわかる。番狂わせは決して確率の低いことではないようだ。「指先で棒を立てる」というバランスをとる行為は「ゆらぎ」と「遅れ」が合わさった例といえるが、かえって邪魔なことに思える「もう片方の手で別のことをする」と意外にうまくいこうと、人の感覚の遅れを逆手にとった例といえる。

上記に挙げたもの以外にも本書が取り上げるトピックスは多岐にわたり、その大部分は数学に入り込まずに説明がなされているから、理工学書というよりは、読み物としても十分に楽しめる(バランスの話に数学は一切出てこない)。もともと文系志向で「ゆらぎ」のある経歴の持ち主が記した一冊、文理問わずだれでも楽しめるものとしてお勧めしたい。



『「ゆらぎ」と「遅れ」  
不確かさの数学』  
大平 徹 (Toru Ohira) 著  
新潮社 / 2015年5月刊  
1200円(税別)

キャンパス通信

地球惑星科学科の  
アウトリーチ活動

地球環境科学専攻講師  
林 誠司 (Seiji Hayashi)

近年、地球温暖化等の環境問題の顕在化、東日本大震災や相次ぐ火山噴火、はやぶさ2をはじめとする惑星探査計画の進展などにより、市民の地球惑星科学への関心はよりいっそう高まっている。このような時代の要請にこたえるべく、地球惑星科学科では、学内外で、学科教員を派遣講師とするサイエンスカフェや講演会を行っており、過去半年間に9件の活動実績がある。

サイエンスカフェでは、毎回小学生から熟年世代まで幅広い年齢層の皆さんに参加をいただいている。普段はなかなか目にする事のない、隕石や深海掘削船のドリルビット(ドリルの先端)など、「本物」に直接ふれられることが魅力のようだ。小学生から鋭い質問が来ることもしばしばで、派遣講師がはっとさせられる場面もある。

講演可能テーマのリスト\*は、学科のウェブページで閲覧できるので、小中学校、地域コミュニティーでのイベントなどに是非利用していただきたい。また本学科では昨年度より、公式twitter、facebookを立ち上げ、研究・教育活動の紹介や、アウトリーチ情報を配信している。これらのソーシャルネットワークサービスでは、サイエンスカフェや講演会の開催情報をいち早くお知らせしているので、ぜひご覧いただければ幸いです(インターネットで「名大 地惑系」と検索)。

\* <http://www.eps.nagoya-u.ac.jp/haken/koushi.htm>



サイエンスカフェ「隕石の衝突と生命の誕生」の様子。  
講師は三村耕一准教授