

研究会・学会スケジュール

IRSF—これまでの10年と今後の展望
10 years of IRSF and the future

開催日：2010年11月16日(火)～18日(木)
開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館1階会議室
主催：グローバルCOE「宇宙基礎原理の探求」
問い合わせ：永山貴宏 理学研究科 COE特任助教
nagayama@z.phys.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2922

第4回物質科学フロンティアセミナー

「分子の集合が拓く科学の最前線:高分子・超分子のサイエンス」

開催日：2010年11月19日(金)・11月20日(土)
開催場所：名古屋大学野依記念物質科学研究館2階
主催：グローバルCOE「分子機能物質科学の国際教育研究拠点形成」
問い合わせ：渡辺芳人 物質科学国際研究センター 教授
gcoe-office@chem.nagoya-u.ac.jp / 052-788-6200

"Biophysical view of the living state"—大澤文夫さんの米寿をお祝いしておよび、GCOE、構造生物学研究センター 国際シンポジウム:
「分子集合と分子構造のダイナミクス」

開催日：2010年11月22日(月)～24日(水)
開催場所：名古屋東急ホテル(22日)、名古屋大学野依記念学術交流館(23日・24日)
主催：実行委員会、グローバルCOE「システム生命科学の展開:生命機能の設計」
および構造生物学研究センター
問い合わせ：前田雄一郎 理学研究科 教授 ymaeda@cc.nagoya-u.ac.jp

格子、鏡映群と代数幾何

Lattices, Reflection Groups and Algebraic Geometry

開催日：2010年11月24日(水)～26日(金)
開催場所：名古屋大学理学部1号館
主催：日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(S)
「格子、保型形式とモジュライ空間の総合的研究」
問い合わせ：金銅誠之 多元数理科学研究科 教授
kondo@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2815

第20回名古屋大学理学懇話会「自然がつかれない結晶格子」

開催日：2010年12月3日(金)
開催場所：名古屋大学野依記念物質科学研究館講演室
主催：名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会
講演者：内藤久資 多元数理科学研究科 准教授
松本正和 岡山大学大学院自然科学研究科 准教授
問い合わせ：名古屋大学理学部庶務掛
kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2394
http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/

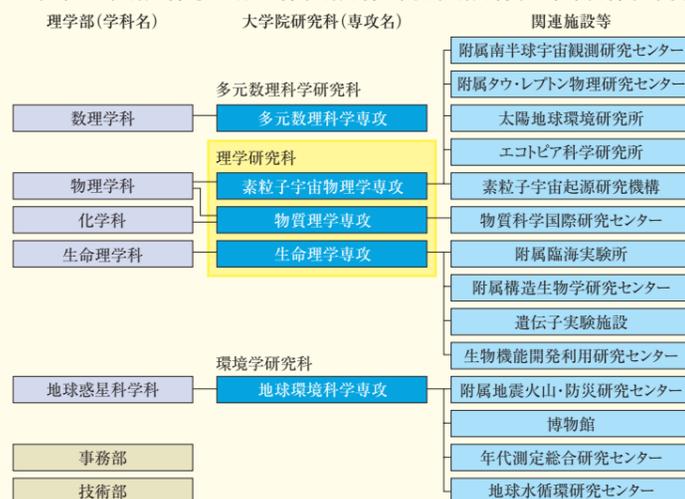
2011年銀河進化[メガ-セージ]研究会

Mega-SAGE Meeting 2011

開催日：2011年3月21日(月)～26日(土)
開催場所：名古屋大学
主催：名古屋大学大学院理学研究科天体物理学研究室、
大阪府立大学大学院理学系研究科宇宙物理学研究室、
SAGE (Surveying the agents of galaxy evolution) 国際共同研究
問い合わせ：河村晶子 理学研究科 准教授 kawamura@a.phys.nagoya-u.ac.jp

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

巻頭の「時を語るもの」は、名古屋大学において優れた研究を成し遂げた研究者の姿をたどり、その当時の写真とともに、研究者の人となり、エピソードなどで構成する。第16～18号ではノーベル賞の益川敏英氏、小林誠氏、下村脩氏がこのページでそれぞれ紹介された。今号は中野藤生氏を取り上げた。電気伝導度の「中野・久保公式」は、ブラウン運動の研究からアインシュタインが見出した関係式を量子論的に拡張したものであり、20世紀後半から現在に至る非平衡統計力学の元祖的研究として位置づけられている。と教科書的に書いてみたが、実は、筆者が中野氏の業績を知ったのは、恥ずかしながら、『物性研究』84,157(2005)の中野氏のインタビュー記事を読むように同僚から勧められたのが契機である。その後、2006年4月に83歳の中野氏に最新の研究成果に関するセミナー講演をしていただいた。その内容は学術論文として『物性研究』86,733(2006)に掲載された。80歳を越えてもおお衰えない中野氏の研究意欲に圧倒された次第である。(岡本祐幸)

表紙説明

角砂糖といえば一辺が15mm程度の立方体。そんな小さな空間に 10^{23} 個もの原子が集まって私たちの身のまわりの物質は構成されている。そこでは電子が強く相互作用することで、さまざまな現象が起こる。物性物理という学問の魅力が垣間見られる。



理 philosophia

No.19
autumn-winter 2010
2010年10月15日発行

広報委員 國枝秀世(研究科長)
篠原久典(副研究科長)
松本邦弘(評議員)
佐藤周友(数理学科)
福井康雄(物理学科)※委員長
飯嶋 徹(物理学科)
岡本祐幸(物理学科)
大木靖弘(化学科)
杉山 伸(生命理学科)
瀧口金吾(生命理学科)
川邊岩夫(地球惑星科学科)
伊藤正彦(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2011年4月頃発行の予定です。

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

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

TEL 052-789-2394 FAX 052-789-2800 E-mail kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp URL http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/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 2010

19

philosophia

More is different.

— P. W. Anderson



特集

「多くなると何かが変わる

—多数の電子の多様な機能—」

04 — 電流が溶かす電子の氷◇寺崎一郎

08 — 高温超伝導現象を探る◇紺谷 浩

02 — 時を語るもの〈中野藤生 博士〉◇木村初男

03 — 理のエッセイ◇河村晶子

12 — 若手研究者がいく◇成田哲博／奥田哲弘・筒井大貴／柳澤周一／川平友規

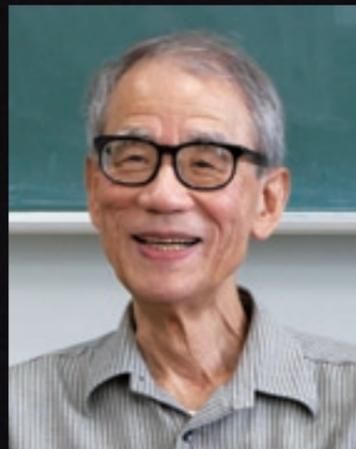
20 — 名誉教授に聞く◇杉浦昌弘

中野藤生博士——電気伝導度の「中野・久保公式」の発見

中野藤生博士は、1955年1月に33歳で大阪大学助手から物理学教授として名古屋大学教養部に着任した。赴任してまもなく、同僚の実験家荒川泰二の依頼で読んだ久保亮五^{*1}と富田和久^{*2}の磁気共鳴の論文からヒントを得て、新しい電気伝導理論を考えつき、『物性論研究』84号に「ひとつの電気伝導計算法」を発表した。電流の流れる導体は熱的に非平衡状態であり、電気伝導度をミクロな立場から計算する従来の方法は何段階もの論理の連鎖で組み立てられる複雑なものだった。中野が提出したのは統計力学的に厳密で極めて簡明な公式だったから、金属や半導体の電子輸送現象の研究が盛んだった時期でもあり、たちまち研究者に受け入れられ、引き続く活発な研究をよびおこした。直後の1955年6月に来名したファインマン^{*3}博士も非常に興味を示し、中野に自分の考えた同様な公式のメモを残した。

その後、久保亮五らを中心とした日本の研究者たちによる研究が、非平衡統計力学の線形応答理論とよばれる有名な公式系に集大成された。その先駆となった電気伝導の公式も次第に「久保公式」とよばれて、不運にも中野の名は忘れられてしまう。しかし、近年の研究で、この公式の第一発見者である中野の寄与が再評価され、この公式は「中野・久保公式」とよばれることが多くなってきている。

以後中野は、理学部物理、工学部応用物理の教授を歴任し、統計物理学の基礎的分野で多くの成果を上げたが、その研究姿勢や学生との真摯な接触から、指導生は大きな影響を受けた。教養部での指導生だった益川敏英もその一人である。1986年の停年退官後も、線形応答理論の基礎研究を続けたが、益川がノーベル物理学賞受賞の報告に訪れた4カ月後、2009年8月に中野は86歳で永眠した。
(名古屋大学名誉教授 木村初男)



中野藤生 (1922-2009)
元名古屋大学教養部・理学部・工学部教授



◇写真の説明
左ページ左は『物性論研究』84号(1955年5月発行)に掲載された中野博士の論文。謄写印刷独特の誌面が時代を物語る。『物性論研究』には、中野の論文に続いて1年間に重要な関連論文が15編も投稿されるほど、当時の物性研究者の活発な研究討論に大きな役割を果たした。上は『物性論研究』表紙。左ページ右上は中野の回想的論文Int. J. Mod. Phys. B 7(1993)2397に掲載されたファインマンの筆跡。切り絵は、益川がノーベル物理学賞受賞を報告するため中野博士宅を訪ねた際の様子を描いたもの。中央が中野博士、右が益川。それぞれノーベル賞の賞状とメダルを手にしている。左上が切り絵の作者で中野博士に絵を指導していた早瀬ふさこ氏。

*1 久保亮五(1920-1995)
元東京大学理学部教授
*2 富田和久(1920-1991)
元京都大学理学部教授
*3 R.ファインマン(1918-1988)
アメリカの物理学者。ノーベル物理学賞(1965年)を受賞。

23時の国際会議

河村 晶子 素粒子宇宙物理学専攻准教授



Illustration: Miho Nakagawa

受話器を通して、「ハロー、ハウ・アー・ユー・ドゥーイング？」という聞き慣れた声が聞こえてくる。それに続いて20名程度の参加者が挨拶を交わし1時間の会議がはじまる。パリ午後4時、ロンドン午後3時、ボルチモア午前10時、ツーソン・ロスアンジェルス午前7時、名古屋午後11時——、世界中からアクセスする定例テレビ電話会議のヒトコマである。

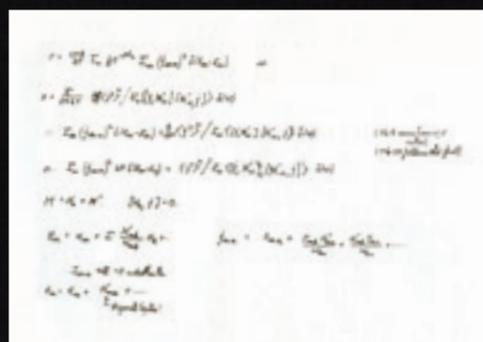
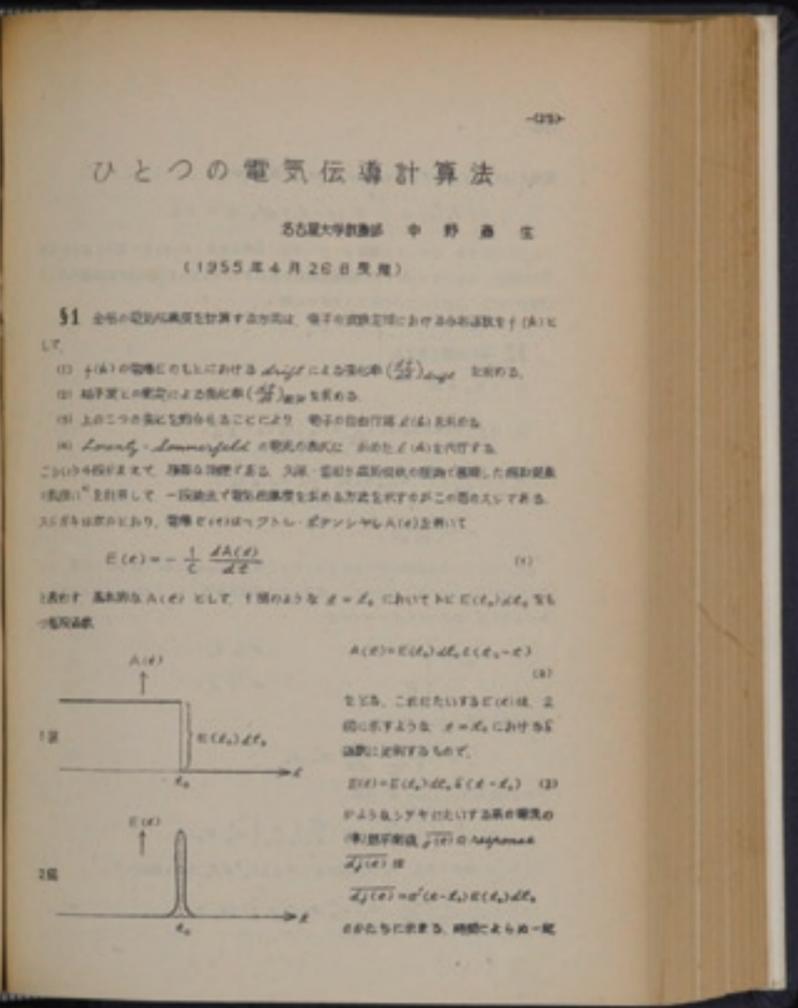
ここ十年あまりの、インターネット通信の発展は著しい。私たち研究者の活動もより国際化し、日本と世界が太いパイプでつながれている。宇宙の研究の多くも、広い国際的な協力のもとに進められている。筆者が日本側の窓口をつとめる国際共同研究の1つが、マゼラン雲の赤外線観測である。大小マゼラン雲は、太陽系に最も近い銀河である。ハッブル宇宙望遠鏡に続く最新の赤外線天文衛星が、心躍る鮮明な銀河の画像をもたらす。この研究には世界約10カ国60名の研究者が参加しており、女性天文学者マーガレット・マイスナー博士がリーダーを務める。皆で議論した観測計画は着々と実行され、次のステップを週単位できめなくてはならない。定例の電話会議は、月何回かのペースで開かれる。

海外渡航や外国人研究者受け入れの間口が広がったことの効果も大きい。自然科学に基本的に国境はないが、考え方には個性があり、またマネジメントに関してはお国の事情を考慮せざるを得ない。歴史的に各国得意の専門があり、国境をこえて協力することで、新鮮な価値が生み出される。マゼラン雲の研究では、「なんてん」望遠鏡の電波地図が日本の存在感を高める。

年2回ほど実際に会って議論をすることで、共同研究は一層深みを増し、効果的になる。2010年はパリ近郊のサックレイで会合もあった。メンバーの強い要望により2011年3月に予定される次の会合の開催地は名古屋に決まった。ホスト役としての名古屋大学側の準備が、これから忙しくなる。

Akiko Kawamura

高校より英国に留学し、マンチェスター大学物理宇宙物理学科卒。名古屋大学大学院理学研究科にて博士号取得。2009年より現職。



私たちの身のまわりの物質は、角砂糖くらいの大きさの中に 10^{23} 個を超える原子がひしめいて、

互いがさまざまな相互作用することで、かたちを保っている。

相互作用がなくなれば、世界はたちまちばらばらになってしまう。

電子の結晶化や高温超伝導現象など、強い電子間相互作用によって発現する、不思議な物性物理の世界を解き明かす。

(2010年6月26日、第19回理学懇話会より)

電流が溶かす電子の氷

寺崎一郎 物質理学専攻教授



Ichiro Terasaki

1963年生まれ、1990年東京大学大学院工学系研究科博士課程中退。東京大学助手、超電導工学研究所主任研究員、早稲田大学教授を経て2010年より現職。専門は物性物理学の実験的研究。とくに、遷移金属酸化物や有機伝導体の新機能開拓。「新しく、面白く、役に立つ物質」の研究がモットー。

物質の物理学とは

きょうは、「電子の氷」についてなるべくわかりやすく興味をもっていただけるようにお話をしたいと思います。

まず、物質の物理学の魅力を知っていたくために、「多くなると何かが変わる」というお話をします。物理に興味のある一般の方が思う疑問の1つが「宇宙」、もう1つが物質の

究極の姿である「素粒子」です。私たちは「星の先に何かあるのかを知りたい」と思い、「世界は何でできているのかを知りたい」と思います。宇宙物理学や素粒子物理学は、人間の本性に関わる自然な疑問です。ある意味、自明な問いであり、みんなと面白さを共有できる問題です。

一方、物理学は「少数の基本法則と少数の基本粒子がこの世のすべてをかたちづけている」と訴えている学問でもあります。しかし、一度「少数の基本法則しかない」「少数の基本粒子しかない」ということを認めると途端に浮かび上がってくる謎があります。私たちの世界が、100に満たない種類の元素が集まって、10くらいの基本法則でできているのならば、「どうして私たちの世界はこれほど豊かで多様なのか」という疑問です。

たとえば「空が青く、木々が緑なのはなぜか」「水は蒸気になったり、凍ったりするのはなぜか」「金属が光って、ガラスが透明なのはなぜか」「電気が流れる流れない、磁石になるならない、は何で決まるのか」ということが疑問です。このような問題を取り扱うのが物質の物理学です。そのような意味では「宇宙」や「素粒子」などの自明な疑問ではなくて、私たちが賢くなったことではじめて浮かび上がる疑問です。

こうした疑問の多くは電子の働きによるものです。素粒子を研究している人にとって、電子は素粒子の1つにすぎませんが、その1つの電子が膨大に集まると、いろいろな現象を見せはじめます。

そのことをノーベル物理学賞学者のアンダーソンは、「多くなると何かが変わる (More is different)」という言葉で表現しました。

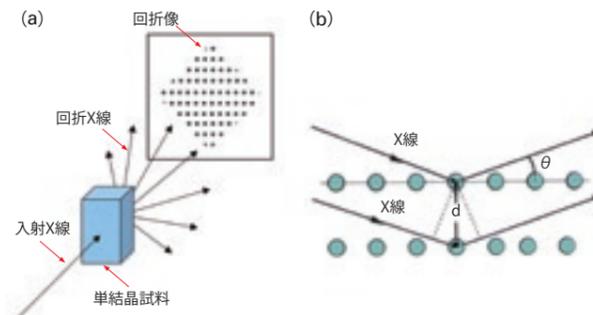


図1 X線回折

(a) X線回折の模式図。X線を結晶に当てると、X線はとびとびの角度で結晶から出ていく。それを結晶の後ろに置いたスクリーンで検出すると、規則的なパターンが現れる。(b) X線回折の原理。結晶の周期 d に対して、波長 λ のX線は $2d\sin\theta=\lambda$ を満たす角度で回折される。

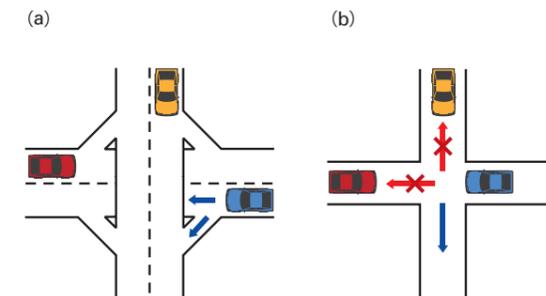


図2 強相関電子系のイメージ

(a) ハイウェイのジャンクション。ハイウェイには中央分離帯とジャンクションがあるので、青い車は黄色の車や赤い車を気にすることなく走行できる。(b) 信号のない一車線の交差点。青い車は、黄色の車と赤い車を避けるために左折するしかない。

アンダーソンの言葉を言い換えると、「1つ1つの原子や電子のことがわかって、すべてが理解できるわけではない。原子や電子がたくさん集まるとすべては変わってしまう」ということになります。このようなことを「創発性 (emergence)」といいます。今日の講演のもう1つのテーマである「高温超伝導」も創発性によるものです。物質の物理学とは、日々、私たちの想像を超えて自然は豊かだということを実感する学問なのです。

水と氷は何が違うのか

次に、水と氷のお話をします。「多くなると何かが変わる」ということの最も典型的な例が「水と氷」です。水が水素原子2つと酸素原子1つが集まってできた分子であることはだれでも知っています。しかし、水分子1個では、その分子が水なのか氷なのかはわかりません。たくさん集まってはじめて水か氷かがわかります。

私たちのまわりには目にはみえないけれども原子や分子があります。「気体」はその密度が低く、でたらめな方向に飛びまわっています。気体の温度が下がると「液体」になります。「液体」は原子がぎゅうぎゅう詰めになりながらも動いています。液体の温度がさらに下がると、「固体」になります。「固体」では、原子は等間隔でなっています。等間隔でならんでいるとはいっても、その場所で止まっているわけ

ではありません。昼休み前の高校の教室のように、学生は椅子に座っていますが、早く食堂に行きたくて、うずうず動いています。それが固体の状態です。

液体も固体も原子と原子は接していますから、原子と原子の間の平均的な距離はだいたい同じです。同じですが、固体は、椅子の位置は決まっていますから、1つの椅子の位置が決まれば無限の彼方にある椅子の位置まで予測できます。液体は、規則正しくならんでいませんから、椅子の位置を1つ決めても無限の彼方にある椅子の位置は予測できません。つまり、「原子が規則正しくならんでいるかどうか」が液体と固体の違いです。

原子どうしが並ぶ間隔は私たちの目にみえないほど小さく、それにちょうど合うような物差しが必要です。その物差しがX線です。X線が結晶に当たると、とびとびの角度でX線が結晶から飛び出していきます。これを回折現象といい、規則正しく整列した原子によって散乱されたX線が強め合って遠くまで伝わる現象です(図1)。回折は規則正しく並んだ構造がなければ生じません。つまりX線を当てて、スクリーンに模様が出てくると、「このなかでは原子が規則的にならんでいる」と判断できるわけです。液体の場合は、X線をあててもこのような模様は見えません。X線回折は液体と固体を区別する強力な道具です。

「強相関電子系」とは何か

「電子の氷」についてお話をする前にもう1つ知っておきたい現象があります。電子がたくさん集まったときに現れる「強相関電子系」です。強相関電子系を説明してみましょう(図2)。図2(a)のように、中央分離帯で区切られている幅の広いハイウェイがあるとします。ハイウェイにはジャンクションがあり、左に曲がるのも右に曲がるのも自在です。前から来る対向車とぶつかることは決してありません。このようなジャンクションだけでできた町で、地点Aから地点Bまで最短コースを見つけるのは簡単で、単に地図上で最短コースをみつければいいわけです。それは基本的に地図の問題です。



それに対して、図2(b)のように一車線では信号のない狭い道路を考えます。この場合は、他の車のことを考えながらでないと、自分の車の運転はできなくなります。つまり、上と同じ最短コースの問題は、もはや地図上に置いたすべての車に関して同時に解かなければならない問題になるわけです。このような問題を「強く相関する系の物理」とよびます。

車を電子に置き換えて、交差点を原子に置き換えると、そのまま強相関電子系の舞台ができ上がります。シリコンのような半導体は高速道路のジャンクションにあたります。道路を走る車もまばらで、はるか彼方まで眺めても自分しか走っていません。そのようなときには地図(物理学ではバンド構造という電子状態に対応します)を描けばいいわけです。一方、強相関電子系では2つの交差点に車が1台は必ずいるというぐらゐ詰まっているところを車は走っています。そのようなときには、すべての車が融通を利かせながら動かないといけません。その結果、生じる1つが「電子の氷」ともよぶべき電荷整列現象です。

電子はどうやって凍るのか

私たちが有機サイリスタと名づけた有機伝導体には、2分子あたり1個の電子が存在し、強相関電子系をつくり上げています。温度

が高いときは、電子は互いに避け合いながら動いていますが、温度が下がるにつれて動けなくなり、電子は規則正しくならんで止まります。これが電子の氷です。水と氷の問題に比べて厄介なことは、電子は規則的な周期性をもっている固体のなかを背景にしながら動いているということです。つまり、すでに凍っている原子の氷のなかを自由に動いている電子がいましたが、電子はさらに原子の氷の上で凍ることになります。図3にその様子を示します。

残念ながら、電子が凍ったかどうか、手でさわって確かめることはできません。しかし、電子が規則的に止まったかどうかはX線を使えばわかります。X線が同じように見えているときには物理学者は氷のような固体として扱うわけです。

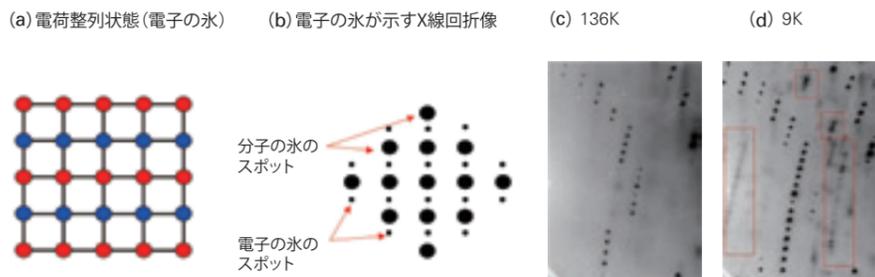


図3 有機サイリスタのイメージ
(a)有機サイリスタにおける電子の氷の模式図。○で描かれた格子は有機分子の位置。有機分子は結晶をつくらせて規則的に並んでいる(分子の氷)。電子はその分子の氷の上に1つ置きに整列している。赤丸は電子がいる場所、青丸は電子のいない場所を表す。電子は、縦方向に格子の2倍の間隔で整列している。(b) (a)の状態から予想されるX線回折像。大きなスポットは分子の氷からくるもので、その間に電子の氷からの回折スポットが現れる。(c) 高温のX線写真。分子の氷のスポットだけが見える。(d) 低温のX線写真。四角で囲った部分に、分子の氷の間に別のスポットが現れている。これが電子の氷のスポット。

「有機サイリスタ」の可能性

温度を上げて凍った電子の氷を溶かしてみます(図4(a))。温度を上げていくと、だんだん薄くなり、72Kぐらいになるとほとんど見えなくなります。氷は温度を上げると0℃で溶けますが、それより少々低い温度です。9Kぐらいから温度を上げていくと氷は溶けるということを見て、確かに物質のなかの電子が溶けたということがわかりました。

私たちは、この実験で面白い現象を見つけました。それは、電子が氷になっているときには電気抵抗が高くて電流が流れにくいのに、無理やり電流を流すと氷は溶けるといふのです(図4(b))。この発見には興奮しました。この電流を流すと消えていく氷のふるまいは、温度を上げて消えていく氷のふるまいとまったく同じです。これは一体どういうことなのでしょう。

冬の寒い日に、池は凍りますが、川は凍りません。また、冬、雪国の人は水道管の破裂を防ぐために、水道の水を少し流しておきます。流れている水道の水も温度がもっと下がっていけば凍ります。しかし、何度かということはいけません。いったいどれぐらいの温度で凍るのか、流れている水と流れていない水は何が違うのか、という問題を解く必要があります。これについて、私の知るかぎり満足のいく物理学の解答はありません。「流れる電子は

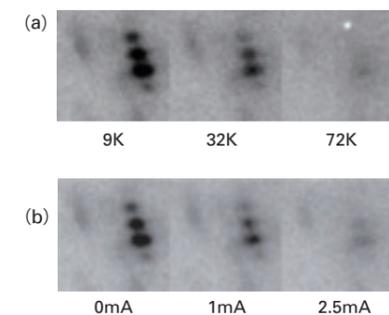


図4 電子の氷
(a)電子の氷の温度変化。温度が上がるとスポットが消える、すなわち電子の氷が溶けるのがわかる。(b)温度を低温に保ったまま電流を流したときのX線写真。温度が上がったときと同じように、電流によって電子の氷は溶ける。



なぜ凍らないのか」がわかれば、「流れる水はなぜ凍らないのか」がわかるかもしれません。

電流を流すと電子の水が溶けて電気が流れやすくなる、ということから、電圧-電流特性がN字型になることがわかります(図5(a))。このN字型は、実は半導体のデバイス「サイリスタ」の特性と同じです(図5(b))。私たちが「有機サイリスタ」とよぶわけはここにあります。有機サイリスタは自発的に凍った電子に電流を流して溶かすだけで、この構造を実現します。つまり天然の物質が微細加工なしに半導体のようにふるまうことができると

いうことです。この物質は、それ自体がデバイスとして動くわけです。

サイリスタがインバータ(直流を交流に変換する素子)の部品になれるように、有機サイリスタは、そのまま有機インバータになります。私たちは、この有機物に直流電圧を印加すると交流電流が生じることを発見しました(図5(c))。そうなる面白い物質は同時に役に立つ物質になるかもしれません。面白くて役に立つ物質の物理を調べていくなかで、できれば新しい物理学をつくりたいと考えています。本日はどうもありがとうございました。

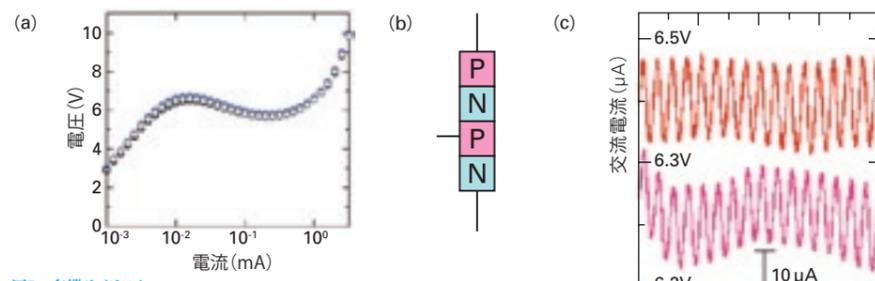


図5 有機サイリスタ
(a)有機サイリスタの電圧-電流特性。N字型の非線形特性が観測される。有機サイリスタでは電流によって電子の水が溶けるため、電流によって抵抗が1000倍以上低下する。そのため電圧降下が電流に比例せず、電流とともに減少することが起きる。(b)サイリスタ素子の模式図。サイリスタはN字型の電圧-電流特性を示す素子で、N型-P型の素子を4個または8個組み合わせでつくられる。(c)有機サイリスタに直流電圧を加えたときに生じる交流電流振動現象。電圧が6.3V付近で急に交流が生じることがわかる。この電圧は、(a)で電圧が電流の減少関数になる電圧に近い。直流から交流を生成することをインバータというが、これは有機インバータといってよい現象である。

機能性物質物性研究室ホームページ <http://www.condmat.net/>

物質科学の新しいパラダイム

松下未知雄
物質理学専攻准教授

今回の寺崎氏の講演では、物質科学における最先端の研究について、その面白さを、巧みなたとえ話を駆使して専門外の聴衆にもわかりやすくお話しいただいた。

講演で取り上げられた物質は「有機伝導体」とよばれる物質群のうちの1つである。有機伝導体の研究は1950年代の有機半導体にはじまり、有機合成金属、有機超伝導体へと進化し、近年ではこれらの研究から派生した有機エレクトロニクスの研究も盛んである。これらの研究は、基本的にはすでに存在する無機の金属や半導体、および超伝導体を手本とし「さらによく電気を流すにはどうしたらよいか」を追求する方向に展開してきたといつてよいであろう。これに対し、2005年の寺崎氏の「有機サイリスタ」の発見は、この分野が、有機伝導体かつ有機物ならではの側面に焦点を当てた研究へと転換するきっかけをつくったものと評価されている。

寺崎氏が発見した有機サイリスタの性質は、「物質を流れる電流によって、さらに電流がよく流れるようになる」という現象に帰結することができる。講演の中では、そのメカニズムを、物質の中で動きにくくなった電子を「電子の氷」にたとえ、流れる水で氷が融解したり、逆に流れている水が凍りにくい現象を例にとり、非常にわかりやすく解説された。そこに至るまでも、本来はさまざまな専門的概念の理解を必要とするところを、強相関電子系を一車線の道路でたとえるなど、自然現象における種の普遍性をも感じさせる巧みなたとえ話を用いて聴衆の理解と興味を深めていったことには感銘を受けた。

一方、このような有機サイリスタの性質は、柔らかさや構造の自由度の大きさという、有機物質に共通する特性に起因するため、この研究を契機に他の有機伝導体においても類似の性質が発見され、さらに多様な物性の発見に結びついている。無機物質をまねるのでなく、有機物にしか実現できない物性の探求が物質科学の新しいパラダイムを拓くものと期待される。



高温超伝導現象を探る

紺谷 浩 物理学専攻准教授

Hiroshi Kontani

1968年生まれ。1995年京都大学大学院理学研究科博士課程中退。東京大学物性研究所助手、文部省若手在外研究員、埼玉大学助教授を経て、2004年名古屋大学大学院理学研究科助教授。2007年より現職。

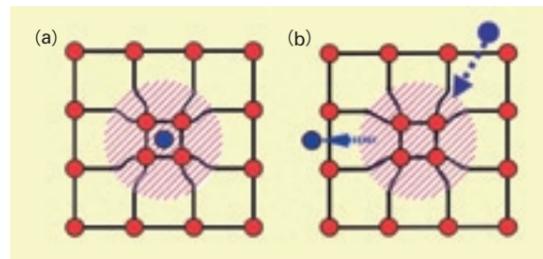
超伝導とは何か

超伝導は、特定の金属や化合物などの物質を超低温に冷却したときに、電気抵抗が急激にゼロになる現象です。医療の現場で利用されるMRI^{*1}は非常に強力な磁場をつくる装置ですが、これは超伝導磁石によって実現されています。リニアモーターカーの重たい車体を浮かび上がらせる電磁石は超伝導のマグネットが使われています。

最初に、超伝導の研究の歴史についてお話しします。1908年、オネス^{*2}がヘリウムの液化にはじめて成功しました。液体ヘリウムの沸点は常圧下では4.2K(−269℃)ですが、ポンプを使って減圧すると沸点は下がり、1Kまでの低温を実現できるようになりました。オネスはこの液体ヘリウムを使って「電気抵抗の温度変化」についての研究に着手しました。

絶対温度0K(−273.15℃)に向けてどんどん温度を下げていくと金属の電気抵抗がどうなるのか、当時の学者たちはさまざまな予想をしていました。熱力学の大家である

ケルビン卿^{*3}は「絶対零度で電気抵抗は無限大になる」と予想しましたが、別の学者は「温度を下げると電気抵抗も小さくなり、絶対零度で一定値に近づく」と考えました。いろいろな予想がなされましたが、オネスは1911年にすべての予想を覆す新現象である「超伝導現象」を発見しました。なお今日では常圧下で27種類の、圧力下では50種類もの単体金属が超伝導になることがわかっています。興味深いことに、金、銀、銅は電気抵抗が大変小さい金属ですが、超伝導にはなりません。伝導度の良い金属ほど高い転移温度を示すわけではありません。



BCS理論とクーパー対

1957年に、パーディーン^{*4}、クーパー^{*5}、シュリーファー^{*6}によりBCS理論が提唱されました。BCS理論は超伝導現象の基本的なメカニズムを説明するものです(図1)。

超伝導状態において金属中の電子はどうなっているのでしょうか。金属中の電子はプラスイオンである格子と引きつけ合うため、電子の周囲の格子はわずかに歪みます。電子は軽いため、光速の100分の1ぐらいのスピードですぐに移動してしましますが、格子の歪みはすぐには回復しません。歪みの個所はプラスイオンが集まりプラスに帯電しているため、別の電子が引き寄せられます。このように、

図1 BCS理論

超伝導状態の金属において、電子のまわりの格子(プラスイオン)は引き寄せられ、格子変形する。格子は電子より1万倍以上重いので、電子が移動した後も格子変形はすぐには回復しない。格子変形した個所はプラスイオンが集まり、プラスに帯電しているため、別の電子が引き寄せられる。このように、格子変形を介して電子間に「時間差の引力」が働くことがわかる。これが「従来型超伝導体」におけるクーパー対の形成機構を与える。

格子歪を介して電子間に引力相互作用が働くことがわかります。BCS理論によると、格子歪による引力相互作用により2つの電子はクーパー対といわれる、風変わりな分子を形成します。

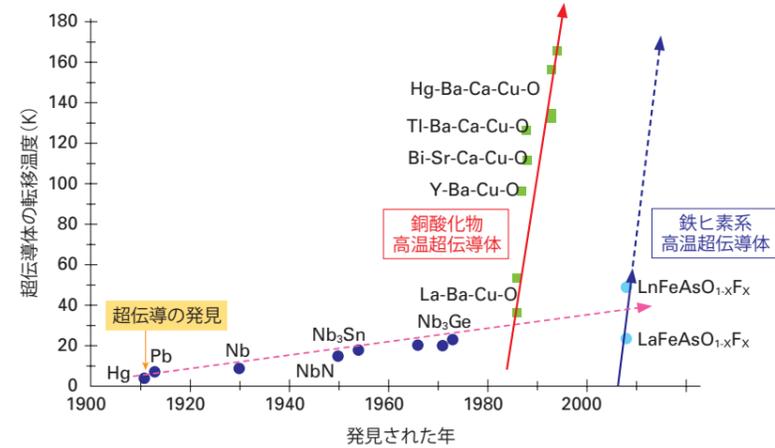
では、クーパー対ができるとなぜ超伝導になるのでしょうか。これを説明するためには、すべての物質は粒子性と波動性の2つをもっているという量子力学の考え方を説明しなければなりません。世の中の物質は粒子でもあり、波でもあります。物質波の波長は、「ド・ブロイ波長」といって、その粒子のもつ運動量に反比例します。金属中の電子は非常に高速で動いているため、ド・ブロイ波長は1Å程度と大変短いです。一方クーパー対は一種の合成粒子ですが、BCS理論によるとその重心運動量はほとんどゼロなので、1cm、1m、100mという目に見えるぐらいの長い波長をもった状態、巨視的量子現象が実現します。クーパー対の物質波は最大10²³個の電子がつくる位相がそろった丈夫な波であるため、簡単に散乱されることなく永久電

流が流れます。クーパー対ができると超伝導が起こる理由はここにあります。量子力学の摩訶不思議な粒子性、波動性の二面性を、超伝導状態においてはマクロに観測することが可能になります。なおBCS理論は後に南部陽一郎先生^{*6}によって素粒子理論に応用され、物質の質量の起源が明らかにされました。さらに原子核や中性子星においては、核子によるクーパー対が形成されることがわかっています。また究極の基本粒子であるクォークも、カラー超伝導とよばれるクーパー対形成を起こします。BCS理論は、今日の物理学における最重要概念の1つです。

高温超伝導体の発見

1986年に銅酸化物高温超伝導体が発見され、高温超伝導の研究がはじまりました。超伝導体発見の歴史をグラフにまとめました(図2)。

1911年から70年の間、超伝導転移温度は4Kから20数Kまで徐々に上がっていきました。ところが1986年に「銅酸化物高温超



伝導体」が発見されまして、その数年後に転移温度は160Kまで達し、そこで止まっています。その後、2008年に鉄ヒ素系高温超伝導体が発見されました。これは50Kを超えた2つ目の高温超伝導体です。

*1 MRI (Magnetic Resonance Imaging) 磁場と電波を用いて体内などの画像を撮影する装置。超伝導電磁石を利用したものや永久磁石を利用したものがある。

*2 H.K.オネス(1853-1926) オランダの物理学者。ノーベル物理学賞(1913年)を受賞。

*3 ケルビン卿(1824-1907) イギリスの物理学者。本名、ウィリアム・トムソン。ケルビン卿は通称。

*4 J.パーディーン(1908-1991) アメリカの物理学者。1956年にショックレー、ブラッテンとトランジスタの発明によって、1972年にクーパー、シュリーファーとBCS理論の提唱により、それぞれノーベル物理学賞を受賞。

*5 L.クーパー(1930-) アメリカの物理学者。パーディーンとともにノーベル物理学賞(1972年)を受賞。

*6 J.R.シュリーファー(1931-) アメリカの物理学者。パーディーン、クーパーとともにノーベル物理学賞(1972年)を受賞。

*7 南部陽一郎(1921-) 素粒子物理学者。小林誠、益川敏英とともにノーベル物理学賞(2008年)を受賞。

図2 超伝導体発見の歴史
超伝導現象は、1911年に水銀において発見された。水銀の超伝導転移温度は4.2Kであるが、その後70年かけて超伝導転移温度は20数Kまで徐々に増加していった。ところが1986年に、強相関電子系である銅酸化物が100Kを超える高温超伝導を示すことが発見された。従来型超伝導体と異なり、クーパー対の形成機構は電子相関に由来する「反平行スピン間の有効引力」であり、スピンゆらぎ機構とよばれる。さらに2008年に鉄ヒ素系超伝導体が発見され、現在転移温度が50Kを超えた。



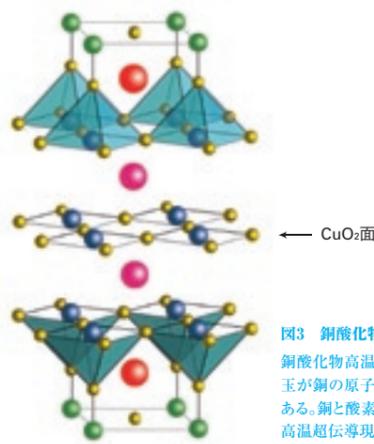


図3 銅酸化物高温超伝導体の結晶構造
銅酸化物高温超伝導体の結晶構造。青い玉が銅の原子、黄色い玉が酸素の原子である。銅と酸素から構成されるCuO₂面が、高温超伝導現象の発現の舞台である。

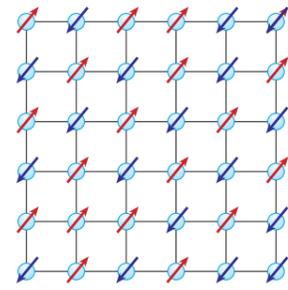


図4 銅酸化物高温超伝導体における電子状態
銅酸化物高温超伝導体の母物質におけるCuO₂面。銅原子上に上向きスピンの電子と下向きスピンの電子が交互に並んだ、反強磁性的状態である。母物質では電子が銅原子上に局在した絶縁体状態であるが、ここから電子を間引くことで空き間が生じて金属になる。これをキャリアドーピングとよぶ。このとき、「上向きスピンと下向きスピン間に働く有効引力」を起源としたクーバー対が生じ、超伝導転移を起こす。

銅酸化物高温超伝導体はペドノルツ*8とミュラー*9によって発見されました。銅酸化物高温超伝導体はかなり複雑な原子構造をしています(図3)。

超伝導の発現の舞台はCuO₂面といわれる二次元面です。青い玉が銅の原子、黄色い玉が酸素の原子です。この二次元面内に10²³個の電子が閉じ込められた「強相関電子系」です。このとき高温超伝導現象という、誰も予想しなかった新現象が発現しました。「なぜ金属中の電子は多彩なふるまいを示すのだろうか」という疑問に対する1つの答えが“More is different.”であり、高温超伝導現象はその典型例といえます。

銅酸化物では、電子間斥力で超伝導が発現します。これからその理由をお話します(図4)。

銅酸化物高温超伝導体の母物質は、電子が凍結した絶縁体です。丸い点が酸素、銅の原子です。強い電子斥力が働く結果、各銅原子上に電子が1つずつ凍結した絶縁体が発現します。さらに電子はスピンの自由度をもち、「上向きスピン」と「下向きスピン」の2つの状態を取ります。母物質における凍結状態は、上向きスピンと下向きスピンの銅原子上に交互にならんだ状態です。なぜなら、隣り合う電子のスピンは逆向きを向くことで、エネルギーが下がるからです。その説明には、同一

スピンの2電子が同じ場所を占めることができないというパウリの排他律と、絶縁体中でも電子の移動を許す不確定性原理という、量子力学の基礎原理について理解する必要がありますが、ここでは割愛させていただきます。

超伝導状態を実現するためには、電子の凍結を溶かし、金属にする必要がありますが、「電子を間引く」ことで実現できます。これをキャリアドーピングとよびます。金属状態においても、上向きスピンと下向きスピンの隣同士になっている方が、エネルギーが下がります。そのことは「異なるスピンの間に大きな有効引力が働く」と読み換えることができます。これが強相関電子系から引力が生まれる説明になります。このとき形成されるクーバー対は、d波クーバー対といって、宇宙における2つの星のつくる連星のような状態です。強い電子相関を避けるように、くるくると衝突を避けながらクーバー対を組んでいます。

このとき有効引力は、格子歪のエネルギーの10倍に達するため、高い転移温度が実現します。今は150Kぐらいですので、これを何らかのかたちで2倍にできれば300Kになり、室温超伝導になります。室温超伝導は、我々物理学者の夢の1つです。

「上向きスピンと下向きスピン間の有効引力による超伝導」は、「スピンゆらぎ機構」とよ

ばれ、銅酸化物以外にもさまざまな強相関電子系の超伝導体において実現します。守谷享*10たちによって始められたスピンゆらぎの理論が発展し、超伝導のみならず転移温度以上におけるさまざまな「異常物性」が説明されるにつれて、スピンゆらぎ機構は広く認められてきました。ただし、金属相から絶縁相まで統一的に記述する理論はこれからの課題です。「異常物性」の代表例として電気抵抗、ホール係数などの輸送現象があり、理論家の挑戦を長年阻んできました。我々は1999年に、輸送現象の異常の原因は、スピンのゆらぎがもたらす電子散乱効果(場の理論におけるパーテックス補正)であることを見出しました。この発見は、スピンゆらぎ機構を強くサポートする結果となりました(図5)。

新たな高温超伝導体

最後に鉄ヒ素系高温超伝導体についてお話します。これは細野秀雄*11先生によって2008年に発見されました。発見と同時に世界中の物理学者が一斉に研究にとりかかりました。当時の転移温度は23Kぐらいでしたが、現在は56Kまで転移温度が上がりました。この物質では、FeAs面とよばれる二次元面に電子を閉じ込めることで、50Kを超える超伝導が出現します(図6)。

鉄ヒ素系高温超伝導体の研究は、銅酸

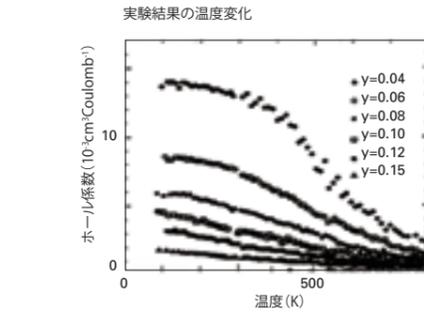
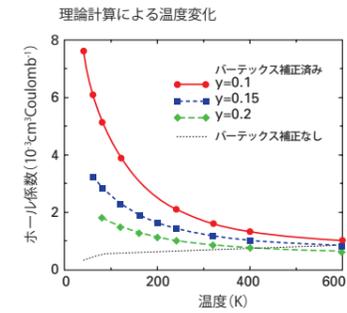


図5 銅酸化物高温超伝導体におけるホール係数の実験と理論

左は、銅酸化物高温超伝導体La_{2-x}Sr_xCuO₄におけるホール係数の温度依存性の実験結果。ホール係数が定数である半導体や通常金属と異なり、ホール係数が降温につれて顕著に増大し、長年の謎であった。右は、スピンゆらぎ理論に基づく計算結果。本理論により、ホール係数の増大はスピンゆらぎがもたらすパーテックス補正によって再現されることがわかり、スピンゆらぎ機構を強くサポートする結果となった。(左は、J. Takeda, T. Nishikawa, and M. Sato: Physica C 231 (1994) 293からの引用)



化物高温超伝導体で進められたスピンゆらぎの理論をそのまま適用する方向ではじまりました。しかし、スピンゆらぎの大きさと超伝導転移温度との相関が明確ではないことや、転移温度に対する不純物効果が小さすぎるなど、スピンゆらぎ理論と矛盾する結果が出てきました。

これまでお話してきたように、銅酸化物超伝導体では電子のもつ「スピンの自由度」を活用した超伝導が発現しました。ところで鉄イオン上の電子はd軌道を占めますが、d軌道にはxz軌道、yz軌道など5つの軌道状態が存在します。つまり鉄ヒ素系中の電子は、スピンに加えて「軌道」という、真空中の電子がもたない新自由度を獲得します。見方を変えると、電子とは違う「新素粒子」が物質中に出現したともいえます。私自身は

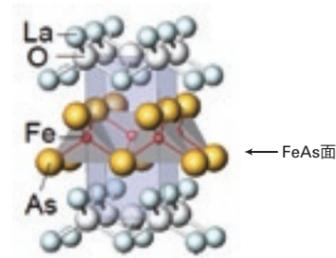


図6 鉄ヒ素系高温超伝導体の結晶構造
鉄ヒ素系高温超伝導体の結晶構造。赤い玉が鉄の原子、黄色い玉がヒ素の原子である。鉄とヒ素から構成されるFeAs面が、超伝導現象の発現の舞台である。

最近、鉄ヒ素系では「スピンゆらぎの代わりに軌道ゆらぎが高温超伝導をもたらしている」と考えています。アインシュタインは「実験は理論に対する仮借のない裁判官である」と述べましたが、この理論が正しいかどうかは、今後の実験の発展によって明らかになると期待しています。

“More is different.”というのは、我々の豊かな世界を形成している原理です。そして、我々は多分、その一部しか理解していません。金属電子系においては、「10²³個の電子を物質内に閉じ込めることで、高温超伝導をはじめ、思いもよらない豊かな現象が発現する」をご紹介しました。これからは、物性物理の世界では、ますますいろいろな面白いことが起こるのだと思います。本日はご静聴ありがとうございました。

実験は理論に対し 仮借のない裁判官である

原田正康

素粒子宇宙物理学専攻教授

タイトルは、講演半ばごろに紺谷さんが引用された言葉で、紺谷さんと同様に理論研究に携わる筆者にとって心に響く言葉だった。

講演は、科学者オネスがすべての理論予想を否定する水銀の超伝導を発見し超伝導研究ではじめてノーベル賞を受賞した、とのくだりからはじまった。多くの理論家がその説明に苦心し、40年以上たつてついにBCS理論ができたことは、筆者自身ある程度は知ってはいたが、改めて現象の奥深さを実感した。その後、他分野への広がりとして南部陽一郎博士の研究がふれられた。ハドロン物理学では、陽子・中性子の質量、すなわち我々の質量生成は、南部博士が導入された「カイラル対称性の自発的破れ」のメカニズムによって起こると考えられており、その研究に従事している筆者としては、物性物理との深い関連を再認識した。

講演の後半は、高温超伝導に関するもので、まず、強い電子間力に由来する銅酸化物超伝導の紹介があった。多くの研究者が参加した十数年におよぶ論争の中、実験による仮借のない審判を受けながら、「スピンゆらぎ理論」に基づく理解が大きく進展してきたとのことである。陪審員として審判に一役かったという自信がにじみ出ている迫力のある話だった。現在は、鉄ヒ素系での高温超伝導が「軌道ゆらぎ」に起因している可能性を研究しているとのこと、近いうちに紺谷さんの理論研究に支えられた実験研究によってその審判が下されることは間違いなくと思う。

講演の最後に、とくに強相関電子系では、我々は“More is different.”の一部しか理解しておらず、今後もますます面白いことが起こると、断言されていた。紺谷さんの自信に満ちた言葉を聞いて、私の研究しているクォーク・ハドロン多体系でも、面白い“More is different.”が眠っていると自信をもつことができた。

アクチンフィラメント

—最もシンプルな分子モーターの謎に迫る—

成田哲博 附属構造生物学研究センター助教

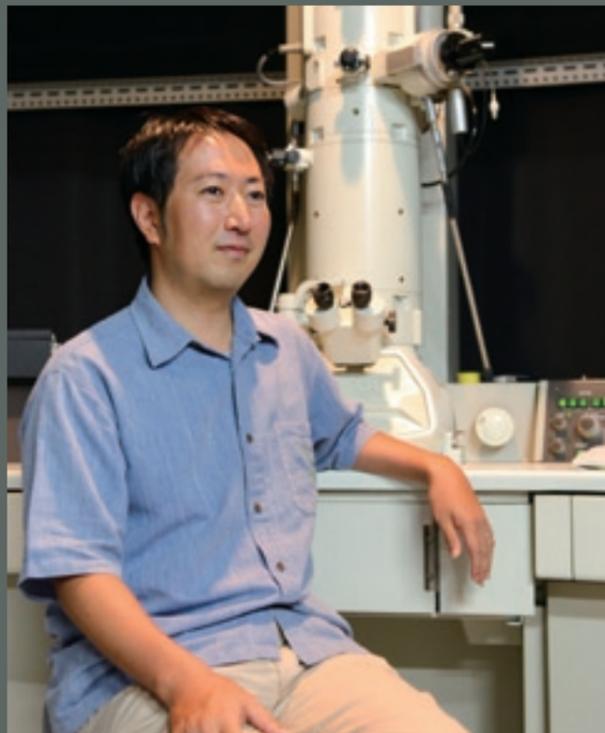
アクチンモーターとは

生物はさまざまに動く。その動きには多くの場合蛋白質からなる分子モーターが関わっている。分子モーターには、人類が開発してきたものに似た動作をする回転モーターやリニアモーターもあるが、私たちが研究しているアクチンモーターはいままで人類が開発したモーターとはまったく異なる作動原理をもっている。

アクチンは分子量4万程度(水素原子1個が分子量1に相当)の球状の蛋白質分子で

ある。各々の分子が溶液中に浮いている状態をアクチン単量体とよぶ。この分子は繊維状に集合する性質がある。この集合体をアクチンフィラメントとよぶ(図1)。これは直径8nm(1nmは1mmの100万分の1)程度の非常に細いフィラメントである。単量体とアクチンフィラメントは溶液中で平衡状態にあり、同時に存在している。アクチンフィラメントの両端は性質が異なり、それぞれB端、P端とよばれて

いる。B端はアクチン単量体を結合しやすい性質があり、B端ではアクチンフィラメントは伸張する。P端においてはアクチン分子を解離しやすい性質があり、P端ではアクチンフィラメントは短縮する。その結果、アクチンフィラメントはB端に向かってその長さを変えずに移動する(図2)。この動きは実際に細胞内で頻繁に利用されており、私たちがこのシステムをアクチンモーターとよんでいる。



Akihiro Narita

1973年生まれ。2001年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。2002年理化学研究所基礎科学特別研究員、2005年ERA TO前田アクチンプロジェクト研究員を経て、2007年より現職。専門は生物物理学。

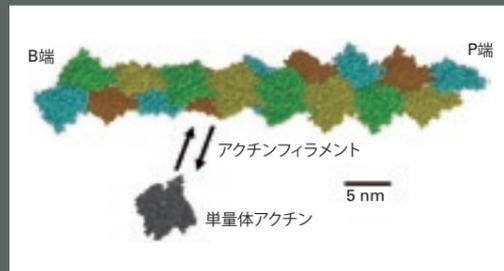


図1 アクチンフィラメントの構造
アクチンは単量体が重合することでアクチンフィラメントをつくる。

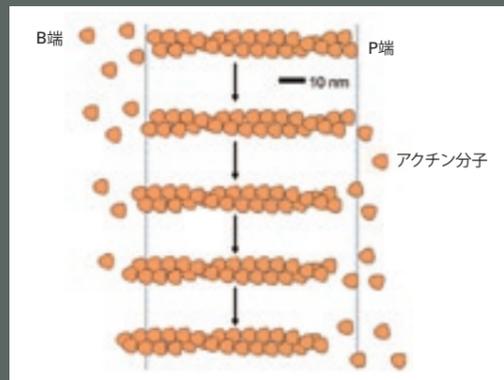


図2 アクチンモーターの模式図
B端からアクチン単量体が結合し、P端から解離することで、フィラメントは全体としてB端側に移動する。

アクチンモーターが稼働する最も顕著な例が仮足運動である。真核細胞の多くはアメーバのような仮足を伸長することによって運動するが、この仮足の中には無数のアクチンフィラメントが、B端を細胞膜に向けて配向している。この状態でアクチンフィラメントが移動することによって、膜を外側に押しだし、仮足が前に進むのである(図3)。

このような機構は神経突起の成長や花粉管の伸長、がん細胞転移の際の移動など、非常に多くの場面で働いている。このような分子の結合解離によって駆動するモーターは、いままで人類が開発できたことのないものであるだけでなく、たった1種類の蛋白質からなる、考えられる限り最も単純な分子モーターでもある。

機構を探るさまざまな新技術

このアクチンモーターの機構の理解は、その重要性に関わらず、従来の手法では研究が難しい。私たちは、X線繊維回折法、

蛋白質発現技術、電子顕微鏡法等におけるさまざまな新技術の開発を通して、その謎に迫ろうと努力している。その1つが電子顕微鏡写真からのアクチンフィラメント端の三次元構造決定である。

アクチンフィラメントの端は実際にアクチンフィラメントにアクチン分子が結合、解離する現場であり、アクチンモーターの核心部であるが、その構造がどのようになっているのかを明らかにするのは大変難しく、いままで誰も成功しなかった。電子顕微鏡は光の代わりに電子を使ってものを見る顕微鏡で、光学顕微鏡より2桁以上高い倍率で物を見ることができる。わずかに直径8nmのアクチンフィラメントでも直接観察することができる(図4A)。

この電子顕微鏡像は二次元像であるが、元の三次元構造の情報をもって、アクチンフィラメントの像を多数集めてコンピュータ上で解析することで原理的には元の三次元構

造を再構築できる。私たちは、世界ではじめてこの電子顕微鏡写真から、アクチンフィラメントの端の三次元構造を決定するアルゴリズムを開発した(図4B、C)。

その結果、B端において新しいアクチン分子の結合を停止し、アクチンモーターにブレーキをかける機構や、アクチンモーターがなぜP端に向けてではなくB端に向けて移動するのかを決定する機構が明らかになった。私たちは他にもX線繊維回折法を用いたアクチンフィラメント原子座標モデルの決定(図1)を行う一方、アクチン分子の変異体(分子配列が標準のものとは異なる蛋白質を変異体とよぶ)を作成するための新しいシステムを確立、アクチンモーターを駆動するための重要な分子配列の同定も行った。これらの新技術によって、アクチンモーターについて多くの新しいことが理解されつつあり、これからアクチンモーターの研究は大きく進展すると私たちは考えている。

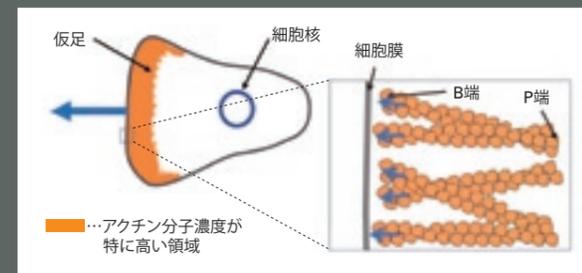


図3 仮足運動の模式図
仮足の先端はとくにアクチン分子濃度が高く、その中ではB端を膜に向けた多くのアクチンフィラメントが存在する。これらのアクチンフィラメントがB端へ向けて移動することで、膜を外側に押しだし、仮足全体が前に進む。

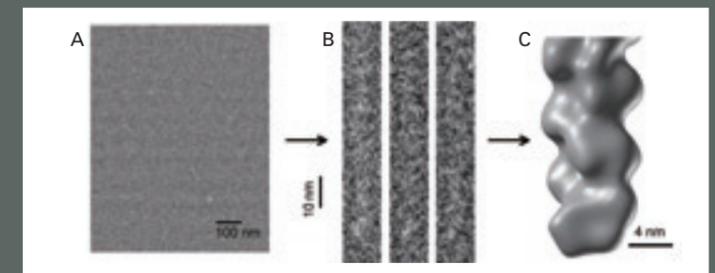


図4 アクチンフィラメントの端の構造の決定
Aは、アクチンフィラメントの電子顕微鏡写真。白い線上の構造がアクチンフィラメントである。それぞれのアクチンフィラメントに、アクチンモーターのブレーキを担うキャッピング・プロテインという蛋白質が結合している状態で撮影した。Bは、電子顕微鏡写真からフィラメント端の像を取り出し、拡大した。このような像を500~1000個程度集めて、コンピュータ上で解析することによって三次元構造を再構築する。Cは、得られたアクチンフィラメント端の三次元構造。この構造により、アクチンモーターにブレーキをかける機構が明らかになった。

花粉管誘引物質に導かれて

—研究者の卵はこうして駆け出した—

奥田哲弘 生命理学専攻博士後期課程1年
筒井大貴 生命理学専攻博士前期課程2年



図1 ルアーにより“N”を描く花粉管
花粉管誘引物質ルアーをゼラチンビーズに含ませ、培地上で花粉管の前に置いたところ、ビーズの置かれた方向へと先端の向きを変えた(中央部の緑色)。さらに、もう一度ビーズを置くと、再び方向を変えた(右上の赤色)。写真は、ルアーを2か所に順に置くことで、Natureの“N”を花粉管で描いた(「Nature」2009年3月19日号より)。

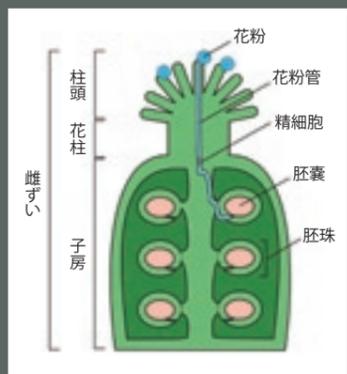
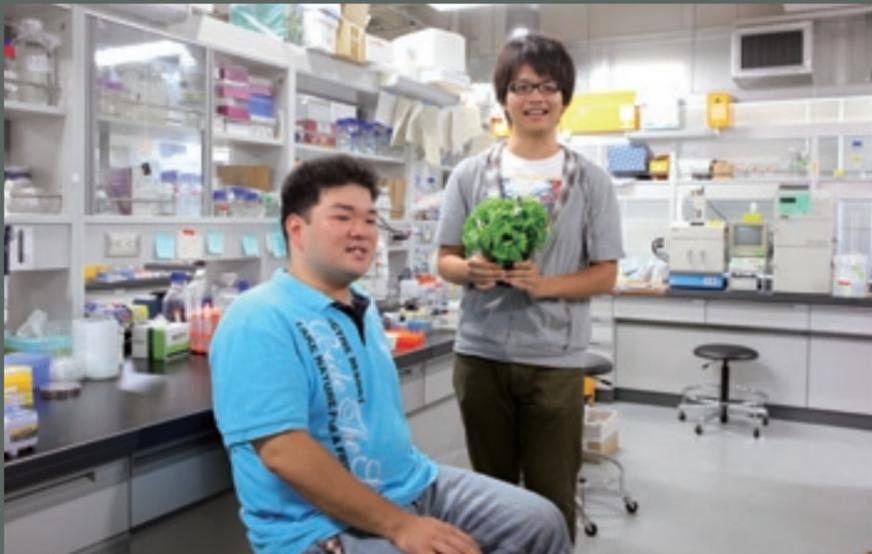


図2 花粉管ガイダンス
風や虫によって運ばれた花粉はめしべ(雌ずい)の柱頭に付着し、花粉管を伸ばす。花粉管はめしべの組織の中を迷うことなく進み、精細胞を卵細胞へ届けます。花粉管の誘引や受精はめしべの組織の奥深くで起こるために解析が難しく、植物生殖は未だ多くの謎が山積している分野でもある。



Satoshiro Okuda

1984年愛知県生まれ。2008年名古屋大学理学部生命理学専攻卒業。同年名古屋大学大学院理学研究科博士前期課程入学。2010年同研究科博士後期課程進学。同年日本学術振興会特別研究員(DC1)。高校在学時に生物学の面白さにふれ、自身もその面白さを伝えられる生物教師を志して生物学に進んだが、研究の醍醐味に魅了されて現在に至る。

花粉管ガイダンス

奥田が博士前期課程1年、筒井が学部4年で、まだ研究者の卵としても駆け出したところ、私たちの研究室は140年にわたって謎だった花粉管誘引物質を、世界に先駆けて同定することに成功した。そして、この研究成果はネイチャー誌の表紙を飾るに至った(図1)。

食卓を賑わせる穀物や野菜・果物が実るには、オスである花粉管がメスである胚珠と出会わなくてはならない。花粉管は、めしべの

Hiroki Tsutsui

1986年和歌山県生まれ。2009年名古屋大学理学部生命理学専攻卒業。同年名古屋大学大学院理学研究科博士前期課程入学。海や山に囲まれ、生き物がごく身近にある環境で育つ。幼いころに見た科学番組でサイエンスの面白さを知り、研究の道を志した。

先端から胚珠へと正確に導かれるが(図2)、そこに道のようなものはないにもかかわらず、なぜ花粉管は迷うことなく胚珠に到達できるのか。この疑問に対し、ヴァン・ティーゲム*1は、約140年前に「花粉管をおびきよせる“誘引物質”がメス側から分泌される」という仮説を提唱した。

しかし、誘引物質の探索は混迷をきわめ、カルシウムイオンなど多くの物質が候補となっては否定された。そのようななか、卵細胞

の横にある2つの助細胞*2が誘引物質を分泌することが当研究室で明らかとなった。さらに、助細胞では少なくとも256個の遺伝子が働くことがわかり、そのうち助細胞だけで働く、ある種の遺伝子7個に注目し、解析を進めた。

口どけチョコ

候補の遺伝子がつくる物質が実際に花粉管を誘導するかテストする手法を模索していたときに、奥田は指導教員である東山哲也*3教授から「口どけチョコをつくってみたら」といわれた。つまり、チョコが口のなかでゆっくり溶けていくように、候補物質が培地上でじんわりと溶け出して広がっていけば、花粉管をうまく誘導できるかもしれない、というアドバイスだった。これは花粉管誘引物質が、分泌する助細胞に近いほど濃く、遠ざかるほど薄い濃度勾配をつくることで花粉管を誘導するという仮説によるものであった。

そこで、候補物質をゼラチンと混ぜてビーズ状に冷やし固めたものをテストしてみた。すると花粉管は助細胞がそこにいるかのようにだまされて、ビーズの置かれた方向へ

と見事に誘導された(図1)。

最初の洗礼

候補物質が花粉管を誘導するだけでなく、実際に助細胞で働くことを証明するために、次にそれらを助細胞でつくらせないようにした場合に花粉管が誘引されなくなることを確認した。その実験で活躍したのが、レーザーマイクロインジェクターという微細注射装置である(図3)。この装置が当研究室で開発され、今までは難しかった植物細胞への試料注入が比較的簡単に行えるようになった。簡単とはいっても、直径1/20mmほどの胚嚢が相手。しかも、微細ガラス針はどこにでも刺さるわけではなく、胚嚢の「ツボ」を見定めなくてはならない。

筒井は学部4年生の6月にこの装置での実験を任された。提示されたデータ締め切りは8月末。はじめはガラス針づくりもインジェクションも思うように進まず、来る日も来る日もデータなしの状態が続いた。結局、コツを修得し、何とかデータをそろえることができたが、あのころは布団に入るとまぶたの裏に胚嚢と

2つの助細胞が見えた。それは筒井の研究生活における最初の洗礼だった。

誘引物質の正体

ビーズで花粉管をおびきよせる様子が釣りの疑似餌に似ていることから、私たちはつきとめた物質をルアー(LURE)と名付けた。そして、一世紀以上にわたり、先輩植物学者たちが追い求めて来た花粉管誘引物質の正体は、抗菌ペプチドと似た構造の小さなタンパク質だった。抗菌ペプチドは、細菌はしりぞけ、免疫系の細胞はよびよせる二重の作用をもつ。ルアーも花粉管を招きよせるだけでなく、細菌をしりぞけるという2つの働きをもっているのかもしれない。植物は進化するなかで、既存の仕組みを応用するといった巧妙な手段で花粉管誘導能を獲得したのだろうか。

そういったことをはじめとして未解明の現象が山ほどあり、その謎に迫っていくことこそが研究の醍醐味だと、ルアーの発見を通して身にしみて感じた。そして私たちが研究の道に導いたのも、もしかしたらルアーだったのかもしれない。

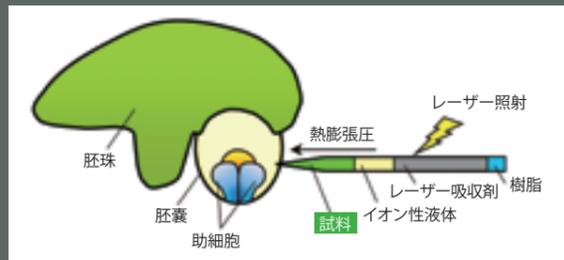


図3 レーザーマイクロインジェクターによるインジェクション
針の内部にはレーザー吸収剤が充填されており、それにレーザーを照射することで生じる熱膨張圧を利用して試料注入(インジェクション)する。今回は誘引物質候補の遺伝子に結合してその生産を阻害するアンチセンスDNAを用いた。実験に用いたトリア(ゴマノハグサ科)の胚嚢は一般的な被子植物と違って外に飛び出しているため、インジェクションなどといった顕微操作が可能である。

*1 P. Van Tieghem (1839-1914) フランスの植物学者。元フランス国立自然史博物館教授。
*2 助細胞 卵細胞の隣に位置する細胞。花粉管ガイダンス以外にも、植物の受精過程で重要な役割を担っていることが近年明らかになりつつある。
*3 東山哲也(1971-) 生命理学専攻教授。(本誌14号P.12参照)

100億分の1メートルのものづくり

—分子の気持ちを理解する—

柳澤周一 物質理学専攻博士後期課程3年



Shuichi Yanagisawa

1983年埼玉県生まれ。2006年名古屋大学理学部化学科卒業。同年名古屋大学大学院理学研究科博士前期課程入学。2008年同研究科博士後期課程進学。同年日本学術振興会特別研究員(DC1)。自らの手で、ものをつくることに憧れて化学の道を志す。化学史などにも興味をもっている。

師からの言葉

「研究のコツは分子の気持ちを理解することやで！」。

私の師である伊丹健一郎*1教授は、研究室に入りたての私にそう声をかけた。4年生の私が、その言葉の意味を理解できていたかは、はなはだ怪しいものだが、最近になってその言葉の奥深さを実感する。

私の研究分野である有機合成化学は、100億分の1メートルのサイズでもものをつくる学問である。単純にものをつくるといえばそれまでだが、このスケールでのものづくりは、たとえるならば、日本の国土と同じサイズの巨人が小鳥の巣箱をつくっているようなものであり、思いのままに望みのものをつくること

は容易ではない。

これまでに私が取り組んできた研究は、ベンゼン環などの芳香環*2を理想的な方法でつなげることである。その結果として得られる、芳香環と芳香環がつながったビアリールは、医薬品や有機材料に頻繁に見受けられる骨格であり、これらを効率的に合成する方法論の開拓は恒久的に望まれている(図1)。このような背景のなか、我々は独自に開発した触媒*3を用いることで、これまでにない直接的な芳香環連結をいくつか開発することに成功している(図2)。研究には、運も必要であるといわれるが、開発した方法の1つは思いもよらない偶然による発見であった。

偶然が生んだ発見

博士課程に進学した私は、これまでに開発した芳香環連結法を組み合わせ、ビアリール骨格をもつ新しい機能性物質の合成に取り組んでいた。しかし、ある日を境に用いていた反応の1つがまったく進行しなくなったのである。その標的化合物は別法による合成が困難なものであったため、何が何でもこの原因を突き止める必要があった。それに加え、1カ月後にはカナダへの留学が決定していたため、渡航前にこの問題を解決したいという気持ちが私を焦らせていた。後輩には渡航前で緊張しているのだと思われていたようだが、この焦りが私の鬼気迫る雰囲気を生み出していたのだと思う。

さて、原因を解明しなければならぬのだが、何が起きているのか見当もつかな

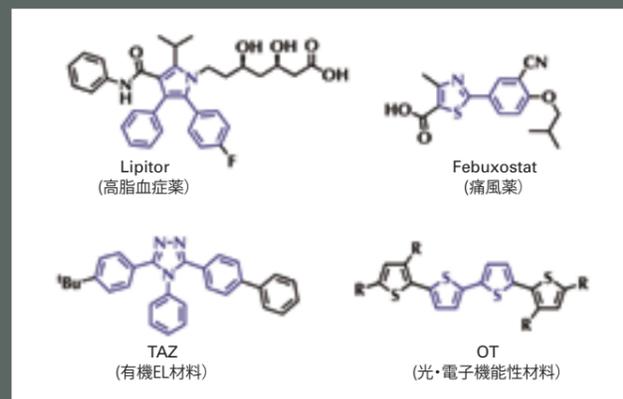


図1 ビアリール骨格をもつ分子群
芳香環—芳香環結合をもつ分子群(ビアリール)は、医薬品や有機材料の分野で数多く見受けられる。

かった。触媒量や使う薬品の種類、解析方法や使用している機器など細かく条件を検討しても、望みの反応は進まない。ひょっとして自分の実験台は縁起が悪いのではないかと思ひ、後輩の実験台を使うといった非科学的なことも行った。しかし、反応は一向に進行する様子がなかった。自分は本当に反応を発見していたのだろうか、あれは幻だったのではないかと、自問自答する日々が続いた。そんなある日、一見論理性的ななさそうなネガティブデータのなかに、規則性を見出すことができた。使っている原料の純度を高くするほど、反応が進行しなくなっていることに気がついたのだ。原料を合成する際に用いていた、ごく少量の金属が取り除けぬまま残っていたのが原因だったのである。さらに驚く

べきことに、ごく微量混入していたその金属こそが、真の触媒であったのだ。カナダ渡航日まで一週間ほどのときだったと記憶している。

分子たちからのメッセージ

化学反応は100億分の1メートルの世界で起きているドラマだ。決して肉眼でとらえることはできない。しかしながら、注意深く観察することで分子はさまざまな足跡を残してくれていることに気がつく。分子たちはなぜこのような挙動を示すのか、私たちにどんなメッセージを送ろうとしているのか。これを理解することが分子の気持ちを理解することであり、ひいては化学反応を理解するコツなのである。先のような偶然による発見も、分子の気持ちを理解することで必然に変えることが

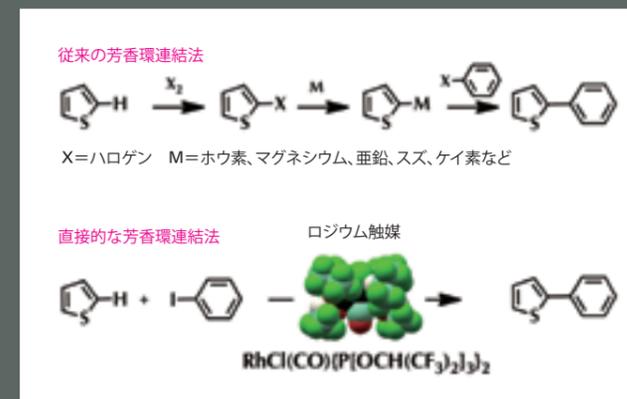


図2 芳香環連結反応
上は、従来の芳香環連結法。下は、独自に開発した芳香環連結法。従来の芳香環連結法では、ビアリールを合成するまでに多段階を要していた。また、多段階反応に耐えられる化合物にしか適用できないという問題があった。これに対し我々は、独自の触媒を開発することで一段階での、より直接的なビアリール合成を可能にした。

できると私は信じている。

研究を始めて、5年が過ぎた。私は分子の気持ちを理解できているだろうか。この小さなスケールでのものづくりは、毎日が苦勞と失敗の連続である。しかしながら、毎日少しずつではあるが分子の気持ちや世界を理解した気になる喜びを糧に、これからも研究に邁進していきたい。

*1 伊丹健一郎
物質理学専攻教授。(本誌17号P.12参照)

*2 芳香環
ここでは、五・六角形の亀の甲を指す。

*3 触媒
我々の触媒はロジウムやパラジウムなどの金属をもつ分子である。触媒は、反応のなかにほんの少し存在するだけで、通常は考えられないような分子変換を可能にする。

カリフラワーは「カ学系」でつくる

川平友規 多元数理科学専攻准教授



Tomoki Kawahira

2003年東京大学大学院数理科学研究科博士課程修了。日本学術振興会特別研究員を経て、2004年名古屋大学大学院多元数理科学研究科助手、2007年職名変更により助教。2010年より現職。



図1 普通のカリフラワーとロマネスコ
カリフラワー(左)の白いモコモコした部分は、小さなカリフラワーが寄り集まったようなかたちをしている。なかでもロマネスコ(右)という品種は、緑のイボイボが螺旋状に寄り集まったさらに特異な形状をもつ。味のほうは、カリフラワーとブロッコリーの間といったところ。

カリフラワーの自己相似性

カリフラワーにはちょっとした愛着を感じる。むかし、『カリフラワーの正則葉空間について』という(数学の)論文まで書いたほどだ。

何よりも、見た目が面白い。八百屋でふつうに見かけるカリフラワーの、あのモコモコした感じもよいけども、日本ではあまり見かけない、ロマネスコという品種がまた面白い(図1)。

ロマネスコのイボイボした表面には、明らかに形状の反復がみられる。大きなイボイボの中に、さらにイボイボが。そのイボイボの中にまたイボイボが…と、なんとも興味をそそるのではないか。これこそ、自己相似(フラクタル)図形の典型である。自己相似、すなわち自分そっくりのコピーが、自分を埋めつくしているのである。

自然界にはそうした例がたくさん見られる。たとえば海岸線は、どんなスケールの地図を見ても同じようにギザギザしている。海岸線は、ギザギザで埋めつくされたギザギザなのである。

これらの図形を生成する原理は、いったい、何なのだろうか。

カリフラワーのレシピ

自己相似図形をつくるレシピはいろいろあるが、イボイボやギザギザを立体的に生成するのは若干手がかかる。ここでは私の研究に近いところで、平面内(xy 平面)に生成する方法をひとつ紹介しよう。

まず、 xy 平面の点 (x, y) は複素数 $x+yi$ (i は虚数単位、 $\sqrt{-1}$)の別名だと考える。次に適当な複素定数 c を固定して、漸化式

$$z_0 = x + yi; \quad z_{n+1} = z_n^2 + c$$

によって定まる複素数の数列 z_0, z_1, z_2, \dots を

(無批判的に)計算する。もちろん、こんな計算はコンピューターにやらせればよい。

ここでさらに、

- 数列 z_n の絶対値が無限大に発散していれば、 $x+yi$ のある場所を白で塗る
- それ以外は緑で塗る

というルールを与える。数列の初項 $x+yi$ が平面内をくまなく動きまわるとすれば、このルールに基づいて xy 平面(=複素平面)に色分けが施されるはずである。

いくつかの定数 c に対して上の操作を行って得られたのが、図2である。モコモコ、イボイボ、ギザギザ、ちゃんとそれらしい図形が生成できている。

このレシピの秘訣は、単純なルール(漸化式)を繰り返し、繰り返し反復するところにある。これによって、無限の細部にまで一様な造形がいきわたるのである。ロマネスコの「生長する」という1ステップを支配するのは、イボイボの分岐を生成するごく単純なルールなのだ。

「カ学系」という世界観

上の方法は自己相似図形をつくる技法として十分面白いのだが、それだけでは、数学者たちの深い洞察を見逃すことになってしまう。

- 数学者はこれを、「世界」のモデルと見る。「世界」を構成する3要素として、
- モノで満ちた「空間」、
 - そこに流れる「時間」、
 - モノたちが従う「運動法則」

を考え、数学的にモデリングしたいとしよう。しかもできるだけ、単純に。

いま私たちは、次のように選択したのである:
「空間」=複素平面
「時間」=0, 1, 2, 3, 4, ... (秒)
「運動法則」=“ z_n は1秒後に z_n^2+c に移る”
最後の「運動法則」は、先ほどの漸化式 $z_{n+1} = z_n^2 + c$ に対応する。定数 c はこの「世界」に事前に与えられた物理定数のようなものである。数学者はこのような「世界」を複素平面上の力学系(dynamical system)とよんでいる。

この一見単純な「世界」で、何がおきているのか。たとえば、個々の数列 z_n は、どのようなふるまいをしているのか。定数 c をわずかに変化させたとき、「世界」は激変してしまうのか。それとも、安定しているのか。

力学系理論が問いかけるこれらの疑問は、われわれの世界、秩序と混沌の狭間にある、この世界をもっと理解したい、そんな根源的な欲求から生まれているのかもしれない。

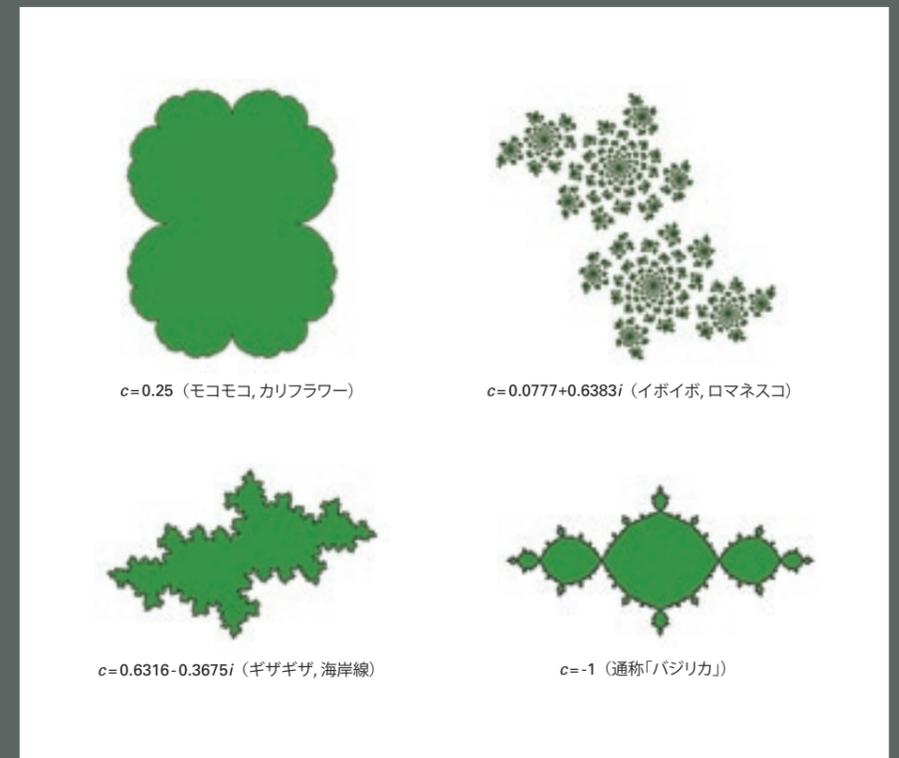


図2 漸化式が生成する自己相似図形たち
定数 c の値に応じて、さまざまなかたちが生成される。「バジリカ」とは、キリスト教教会の建築様式の1つ。

今どんな研究がされているかを調べ、
誰も手をつけていない透き間を探しましょう。
ただ、その透き間はいつか山になるものがある。

杉浦昌弘 名古屋大学名誉教授

2009年度の文化功労者として顕彰された、杉浦昌弘名誉教授。

国立大学第2号となる組換えDNA実験施設の設立準備段階から深くかかわり、長くその施設長を務めた教授は、当時、誰も手がけていなかったタバコ葉緑体ゲノムの解読を成し遂げ、分子生物学に大きな足跡を残した。そんな教授に、科学者としての思いや当時の研究のご苦労、学生へのアドバイスなどについてお話をお聞きました。

<インタビュアー> 曾田 翠 生命理学専攻博士後期課程1年



Masahiro Sugiura

名古屋大学名誉教授 1936年生まれ

- 1960年 名古屋大学理学部生物学科卒業
- 1960年 名古屋大学大学院理学研究科入学
- 1963年 イリノイ大学植物学部研究員
- 1965年 カリフォルニア大学サンディエゴ校生物学部研究員
- 1966年 広島大学原爆放射能医学研究所助手
- 1968年 京都大学化学研究所助手
- 1972年 国立遺伝学研究所室長
- 1982年 名古屋大学理学部教授
- 1986年 名古屋大学遺伝子実験施設施設長
- 2000年 名古屋大学名誉教授
- 2000年 名古屋市立大学教授
- 2005年 名古屋市立大学名誉教授
- 2005年 椋山女学園椋山人間学研究センター客員研究員
- 2010年 名古屋大学特別教授

私は植物屋ではありません

曾田 生命理学を専攻しております曾田といます。植物の表皮に存在する気孔が開いたり閉じたりするメカニズムについて研究しています。遺伝子についてはあまり詳しくないので、今日はよろしくお願いします。

杉浦 気孔ですか。なかなか重要なテーマですね。いや、私は、「植物屋」だと思われているようですが、実は植物のことはよく知らないんですよ。自分では分子生物学者だと思っています。

曾田 先生が葉緑体DNAの全塩基配列を調べようと思ったきっかけは、なんだったのでしょうか。

杉浦 もともと私は自然科学がやりたくて研究者になりました。最初にちょっと植物をかじりましたが、主に大腸菌の分子生物学に携わってきました。1976年、当時スイスのパーゼル免疫研究所にいたススムから「マサヒロ、ちょっとこっちに来て自分の研究を手伝ってくれないか」と誘われました。ススムとは、1987年にノーベル生理学・医学賞を受賞した利根川進くんです。彼とは名古屋大学の院生時代に留学していたカリフォルニア大学で友だちになりました。パーゼルにいたのはわずか3カ月でしたが、世界のトップレベルの研究にふれ、このままではとても太刀打ちできないとショックを受けました。

曾田 それで方向転換をされたのですか。



遺伝子実験施設を訪れた利根川進博士と(1991年4月)

杉浦 はい。誰もやらないことをやらないとダメだと考えたわけです。当時、トップの研究者たちはみな、何か役に立つ遺伝子、重要な遺伝子を取り出して調べようとしていました。そこで僕は逆に、DNAの全体の構造を丸ごと調べることにしました。それには小さなDNAがいいだろうということで、ミトコンドリアやウイルスを検討しましたが、いずれも専門の分野の研究者には負ける。そうして目をつけたのが葉緑体だったのです。ですから、最初にも申しあげたように、たまたま葉緑体が植物にしかないから植物を扱っているけれど、自分自身では、決して「植物学者」だとは思っていないわけです。

曾田 なるほど。では、タバコが使われたのはなぜでしょうか。

杉浦 光合成の研究では、ハウレンソウを使うのが一般的でした。八百屋で手軽に入手できて、柔らかいので葉緑体を取り出しやすいからです。ところが、ある植物遺伝学者から「DNAの研究に使うなら交雑していることの多いハウレンソウはやめて純系の植物を使った方がいい」と、アドバイスされたんです。タバコは、専売公社、現在のJTと契約した農家しか栽培ができなかったため交雑する心配がありませんでした。これは非常に重要な点でした。

今ならコンマ何秒ですが

曾田 DNAの全塩基配列を決定するのに10年かかっていますが、これは当初の予定どおりだったのでしょうか。

杉浦 いやいや。私がこの研究に着手したのは40歳のときで、定年までにできればいい、と考えていました。

曾田 そんなに長期計画だったんですね。当時の研究手法は、どんなものだったのか

でしょうか。

杉浦 実験道具は自分で工夫し、酵素や試薬も自分で精製したり合成したりしていました。今だったら機械に試料を入れれば、コンマ何秒でわかってしまっていますが、当時は自分で現像したエックス線フィルムに写った塩基配列を目で読んでノートに1つずつ書き進めていきました。

曾田 とてつもない時間が必要ですね。その間、研究に迷いなどはお感じになりませんでしたか。

杉浦 自分が研究しているだけなら、「こういう目的でやるんだ」という信念があったので楽しく充実していました。しかし、大学院生の指導には悩みました。一人ひとりに解析の一部を担当してもらい、「ここは君、ここは君」とDNAを振り分けたので、1つの完結した研究テーマにはなりません。「こういう課題の与え方は酷だなあ」といつも思っていました。とくに、まったく同じ配列だろうと予想されている部分を担当してもらった学生には、頭を下げてお願いしました。結果は予想通りだったので、本当に申し訳なく思っています。



曾田 その後、1984年度の特別推進研究に採択されています。

杉浦 どんな研究も立ち上がりは暗闇の中でもがき続ける時期があります。ある程度めどが立ってくると、研究費を投入することで一気に進む段階に入ります。特別推進研究に選ばれたときは、ちょうどそういう段階にさしかかっており、実にタイミングがよかった。それで、1986年にタバコ葉緑体の全塩基配列15万5844塩基対を決定することができました。引き続き1988年にはイネ葉緑体の全塩基配列13万4525塩基対の決定に成功しました。

遺伝子実験施設を立ち上げる

曾田 1985年に完成した遺伝子実験施設についてお聞きます。この施設は、なぜつく

られることになったのでしょうか。

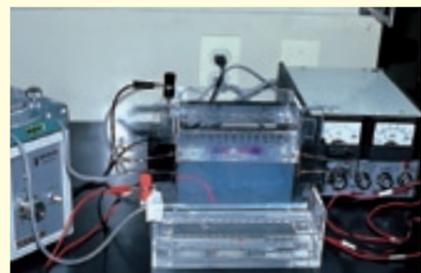
杉浦 分子生物学の発展で組換えDNA実験技術が生まれ、1980年代には次第に普及していきましたが、その過程で危険な生物ができるのではという不安が生まれました。そこで、組換えDNA実験について、科学者が自ら規制をしようという気運が高まり、各国でガイドラインができました。その延長線上で、日本でも組換えDNA実験の指針を周知させるとともに、将来有用な技術でもあるので、その促進も図るための施設をつくらうということになったのです。名古屋大学でも、「遺伝情報システム解析施設」という名前で「国立大学第1号」をめざしました。初年度は惜しくも東京大学に第1号を譲り、2年目の1984年度に全学共同教育研究施設



竣工当時の遺伝子実験施設。既設の建物の上階を増築した(理学部F館の4階～6階)



かつて理系食堂の南にあったタバコ専用温室



杉浦博士自ら設計したゲル電気泳動装置



自作したDNA塩基配列決定装置にDNA試料を注入



として「遺伝子実験施設」が創設されることになりました。

曾田 先生は設立要求がはじまった1981年頃から、設立申請に関わっておられたそうですね。

杉浦 1981年には、私は静岡県三島市にあった文部省の国立遺伝学研究所にいて、「遺伝子実験施設」の設立について名古屋大学理学部から相談を受けていました。タバコ葉緑体DNAの全遺伝子配列の研究は、国立遺伝学研究所時代にすでに着手しており、私が名古屋大学に転入したのは1982年のことです。

自分の研究室をもつという夢

曾田 今の学生に、アドバイスをいただけませんかでしょうか。

杉浦 そうですね。研究するなら、誰もやっていないことを見つけてください。それにはまず、今どんな研究がされているか調べ、その透き間を探しましょう。ただ、その透き間は最後まで透き間のままのもの、そびえたつ山になるもの2種類ある。私自身、DNAの研究をしました。それがゲノム科学という大きな研究分野になるとは思っていませんでした。そういう透き間を見つけられるかどうかは、結局、運かもしれません。

曾田 今の研究以外にも、幅広くアンテナを立てることが大切ですね。

杉浦 しかし、アンテナに引っかかってきたことは捨ててしまったほうがいい。アンテナに

引っかかるということは、誰かがどこかでやっていることなんです。生命科学の場合、「新しいモデル生物を見つける」「新しい実験方法を考える」「新しい生命現象を見つける」。この3つのうちどれか1つでも当てはまれば、長く忘れられない研究になる可能性があると思います。どれにも当てはまらないものはオリジナリティがないということです。私の研究も、当初は、DNAの全塩基配列の解析など無意味でバカなことだといわれていました。しかし、そのすべてを解析してはじめて発見できたことが多くありました。研究者なら、「あなたがいなかったらこの研究はできなかった」と評価される研究に取り組みたいですね。

曾田 パイオニアというのは、はじめるとき難しいのではないのでしょうか。

杉浦 でも、誰もやっていなければ、競争相手がいないので楽ですよ。ただし、研究技術や道具を自分で工夫して確立する必要があります。そうすれば、あとから研究をはじめた人に対するアドバンテージとなります。

曾田 学生には、自発的な研究は難しいかもしれません。

杉浦 すぐには無理でも、将来、自分の研究室をもつという夢は忘れないでください。そのとき、ボスの亜流では、いつまでたっても勝ち目はない。私は、やる気のあるドクターコースの若い人には、「私の研究室を出たら植物はやめなさい」といっています。だから優秀な人ほど動物へ行く。アメリカにも、ずいぶん輸出しました。上手に研究室を変わって、いろんなボスの下で働き、それぞれのいいところを吸収することです。そして最後には植物に戻ってくる。それが、植物科学の発展にとってもいいことなのではないでしょうか。

曾田 今日は有意義なお話をありがとうございました。

「研究を楽しむ」を知る

曾田 翠 Midori Soda
生命理学専攻博士後期課程1年

今回のインタビューで杉浦先生のお話を伺っている間、一貫して感じたのは「本当に楽しんで研究を行っている」ということでした。私は、誰もやったことのない研究をはじめ、1つの大きな分野を築くほどの結果を残すということ、さぞかし多くのご苦労をなさったのではないかと想像していました。しかし、実際にインタビューしてみると、杉浦先生自身からは「大変だった」「苦労した」といった話はまったくなく、むしろ大変時間がかかったことや、試行錯誤が必要だったことをとても楽しそうに話されていたのが印象に残りました。研究すべてに面白みを感じて、楽しんでいらっやることがよくわかりました。

そしてそこから、将来大きな「山」となるような独創的な研究というのは、誰もやったことのない「透き間」に面白みを見つけ、楽しんで研究を行ううちから生まれてくるものなのだと痛感しました。

私を含め、科学の世界に進んだ人は少なからず、今まで見つからない「透き間」や「山」を見つけたいと考え、現在の道にいます。しかし、目の前の研究を行うだけで、研究全体に対する視野がとて狭くなっているのではないかと、感じました。アンテナにひっかからない「透き間」を探すという、一見矛盾する、難しい課題に取り組みつづける研究者像を杉浦先生に教えられたと思います。

