

研究会・学会スケジュール

2009年度森野レクチャー

Morino Lecture
 開催日：2009年5月15日(金)
 開催場所：富山大学理学部多目的ホール(富山市)
 主催：分子科学研究奨励森野基金
 問い合わせ：平原靖大 環境学研究科 准教授
 yasu@nagoya-u.jp / 052-789-3992

第215回アメリカ電気化学会「内包フラーレンシンポジウム」

The 215th Electrochemical Society Meeting: Endofullerene Symposium
 開催日：2009年5月24日(日)～29日(金)
 開催場所：サンフランシスコ(アメリカ)
 主催：アメリカ電気化学会
 問い合わせ：篠原久典 理学研究科 教授
 noris@nagoya-u.jp / 052-789-2482

モジュライと離散群

Moduli and Discrete Groups
 開催日：2009年6月8日(月)～12日(金)
 開催場所：京都大学数理解析研究所(京都市)
 主催：日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A)
 「格子、保型形式とモジュライ空間の研究」
 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17回名古屋大学理学懇話会「小林・益川理論を超えて」

開催日：開催日:2009年6月13日(土)
 開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館カンファレンスホール
 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：棚橋誠治 理学研究科 教授
 戸本 誠 理学研究科 准教授
 問い合わせ：理学部庶務掛
 kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2394
 http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/
 ※懇話会終了後、「高校生のためのサイエンスカフェ in 名大」を開催。

第14回国際生物無機化学会議

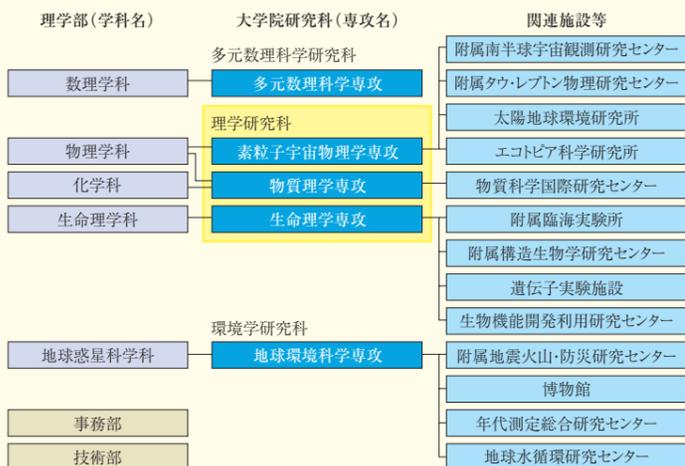
14th International Conference on Biological Inorganic Chemistry (ICBIC14)
 開催日：2009年7月25日(土)～30日(木)
 開催場所：名古屋国際会議場(名古屋市内)
 主催：ICBIC14組織委員会、日本学術会議、日本化学会、錯体化学会
 問い合わせ：渡辺芳人 理学研究科 教授
 yoshi@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp / 052-789-3049

第9回名古屋国際数学コンファレンス

Harmonic Analysis and Partial Differential Equations (調和解析と偏微分方程式)
 開催日：2009年9月28日(月)～10月1日(木)
 開催場所：名古屋大学理学部1号館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：杉本 充 多元数理科学研究科 教授
 sugimoto@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2544

組織図

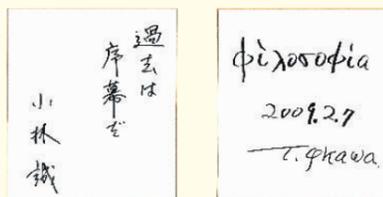
理学部・理学研究科・多元数理科学研究科・環境学研究科(地球環境科学専攻)



編集だより

今回の「理フィロソフィア」はノーベル賞特集だ。理学部の歴史に輝く坂田スクールと平田スクールにスポットライトを当て、両スクール関係者の座談会を行い、まとめてみた。物理と化学、また理論と実験、と分野や手法は違えど、非常に高いレベルで独自の研究成果を多数挙げた両者には、共通するものが大変多く、期待を越えて興味深いお話をうかがうことができた。

2月7日には、名古屋大学豊田講堂で名古屋大学レクチャーが行われ、小林先生、益川先生に同時にお目にかかる機会を得た。千載一遇とばかりに、理学部・理学研究科の在校生に何かエールを送っていただけないか、とお願いしてみたところ、お二人とも快くお引き受けくださった。まず、益川先生からは、即座に「少し高めが目標、でも着実に」という言葉をいただいた。一方、小林先生は、その翌日に「過去は序幕にすぎない」と書かれた紙をそっと私に手渡してくださった。なお、写真はその折りに、理学部に向けて書いていただいた色紙で、小林先生は同じ意味のお言葉を書かれ、益川先生は、期せずしてギリシャ語でフィロソフィア(知を愛する)とお書きになっている。(杉山直)



表紙説明

細菌に力強い推進力を与えるべん毛モーター。シアノバクテリアの中で正確に時間を刻むタンパク質。極めて微小な世界で精緻な動作を行う生物のふるまいに思いを馳せるとき、ふと思う。「生物は誰が何のためにつくったのか」。科学には人の思考を飛躍させる大きな力がある(K)。



理 philosophia — No.16 April 2009

2009年4月25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)
 吉田健一(数理学科)
 杉山 直(物理学科)※委員長
 福井康雄(物理学科)
 飯嶋 徹(物理学科)
 岡本祐幸(物理学科)
 吉久 徹(化学科)
 杉山 伸(生命理学科)
 瀧口金吾(生命理学科)
 鷲谷 威(地球惑星科学科)
 森本正廣(事務長)

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

ご意見、ご感想をお待ちしています。
 本誌の原稿執筆や取材などにご協力いただける方を求めています。
 広報委員会までご連絡ください。
 なお、ご投稿などの採否については当委員会にお任せください。
 次号は2009年10月頃発行の予定です。

制作 株式会社電通

・本誌記事、写真等の無断複写、転載を禁じます。

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

- 特集 「機械仕掛けの生きものたち」
- 08 細胞に組み込まれたマイクロのモーター ◆本間道夫
 - 12 生命の時を刻むタンパク質 ◆近藤孝男
 - 02 時を語るもの ◆益川敏英博士 ◆山脇幸一
 - 03 理のエッセイ ◆巽 和行
 - 16 理の先端をいく ◆井龍康文
 - 18 講義探検 ◆物性物理学Ⅱ / 数理物理学Ⅳ
 - 20 追悼・関 一彦 ◆有機エレクトロニクスを究める
 - 22 理学部交差点
 - 23 ノーベル賞授賞式に参列して ◆渡辺芳人

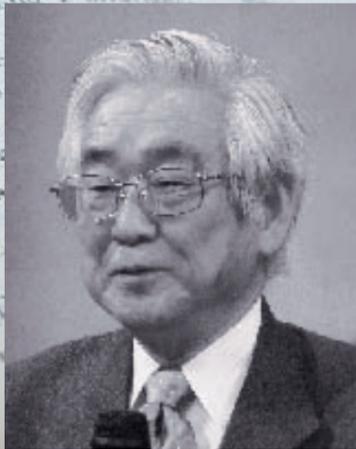
04 ノーベル賞受賞記念座談会
 「坂田スクール、
 平田スクールが残したもの」

益川敏英博士 —

CP対称性の破れ*1の起源の発見者

益川敏英博士がE研に入った1962年に、坂田模型*2(1955年)の発展として牧・中川・坂田理論が生まれた。これは1998年に神岡の実験で検証されたニュートリノ振動を予見したことで有名であるが、それに関連して第4番目の基本粒子をも示唆していた。そのため、小林・益川理論誕生の1972年当時、クォークそのものに懐疑的な世界の大勢に抗して、坂田学派はu、d、sクォークはもちろんのこと、cクォークの存在までも信じていた。さらに益川博士は、くりこみ可能性を意識*3する中でGIM理論*4の重要性に気づいてクォーク4種類の論理的必然性に確信を深めていた。当時グラشوウ・サラム・ワインバーグ(GSW)理論は実験的に(誤って)否定されていた*5。にもかかわらず、1971年そのくりこみ可能性が証明されるや、この理論の枠内でCP対称性の破れを4種類のクォークで説明することを試みたのである。もくろみに反して4種類では否定的な結論を得たが、6種類のクォークならば説明できることを発見した。cクォークまで信じた坂田学派の伝統の上に高度の論理性を追求した結果、素粒子物理学の新時代を切り開くこととなった。

(山脇幸一 素粒子宇宙物理学専攻教授)



益川敏英(1940—)
名古屋大学理学部卒、理学研究科修了(1967)
元名古屋大学理学部助手(1967—1970)
京都大学名誉教授、京都産業大学理学部教授(2003—)
名古屋大学特別招へい教授(2007—2009)
名古屋大学特別教授(2009—)
文化勲章(2008)、ノーベル物理学賞受賞(2008)

◆写真の説明

2008年ノーベル物理学賞の受賞論文はわずか6ページのもので、E研の5年後輩の小林誠博士(ノーベル賞共同受賞者)との共著である。くりこみ可能な理論(Renormalizable Theory)がどのようにクォークの性質を規定するか?基本的なテーマであり、その過去の例として、3種類クォークの困難が4種類なら解決するというGIMの結論と、4種類のクォーク間の力はすべて同じになるという牧博士との共著が挙げられている。論文の主要部分は4種類のクォークではCP対称性の破れを説明できないことの厳密証明に費やされて、当時としてはあまりにも突飛な6種類クォークの提唱は、その困難を避けるための可能性の1つとして挙げられているに過ぎない(要約にも明示されていない!)。本人たちも含め当時だれもこの論文が大発見であるとの認識はなかった。歴史の妙というべきであろう。

*1 CP対称性は粒子(物質)と反粒子(反物質)の世界が対称(同じである)ことを意味するが、素粒子レベルでこの対称性は破れている。CP対称性の破れは、我々の宇宙が物質のみで構成され反物質がないことを説明するために必要である。CP対称性の破れが実験で確かめられたのは1964年であるが、当時大学院生であった益川博士は、この結果を文献紹介で研究室に報告している。
*2 当時知られていた強い相互作用をするすべての素粒子を、3種類の基本粒子(陽子・中性子・ラムダ粒子)の複合粒子とする模型。u、d、sの3種類のクォークの概念は、坂田模型が発展して生まれたものである。
*3 当時一般的であった弱い相互作用の理論はくりこみ不可能な理論(計算の過程において制御できない発散が現れ、自ずから適用限界をもつ理論)であったが、益川博士はくりこみ不可能な南部理論(2008年ノーベル物理学賞受賞論文)を徹底的に検討した結果、この問題点について強く意識していた。
*4 グラشوウ・イロポウロス・マイアニ(GIM)理論(1970年)。4種類のクォークを導入することによって、ストレンジネスを変える中性カレントの問題が解消されることを示した。
*5 GSW理論を否定した(と当時受け取られていた)実験を覆す高精度な実験結果が得られたのは、小林・益川理論の翌1973年のことである。

理学研究：理念の不変性と学術の変遷

異 和行 物質科学国際研究センター長



知の創造とその継承をうたう「理学」精神は、我々科学研究者の共通の拠り所である。数学・物理・地学・化学・生物と専門分野は異なっている、何かしらお互いに意図が通じるように思えるのも、理学の理念が共有されているからであろう。学術研究が極細分化したといわれる昨今でも、その共通理念の普遍性と不変性は暗黙裡に了解され、大学の存在意義を示す1つの重要な論拠ともなっている。

しかし、我々の「知の創造」活動を客観的に評価することは実に難しい。誰も理解し得なかった現象を解説し、新たな発見をめざすことは当然としても、その「知る」ことの学術的価値と意味、そして学術研究がめざす到達目標と成果に対する評価基準はあくまで相対的であり、かつ主観的である。また、価値観は時代とともに変遷するかも知れない。社会から見れば、我々の研究は良くて「何か難しいことをやっておられますね」という外交辞令の評価を受ける程度であろう。精度や論理性に欠ける研究は論外としても、たとえば、根本的に重要な意味をもつ研究なのか、あるいは蜻壺に入った些細な研究であるのかに対して、まず我々自身で辛口の判定をなすべきであろう。一方、「知の継承」も悩ましげな問題をはらんでいる。学問は絶えず変遷しつつ進化するものであるから、継承されるに足る「知」であるかどうかの判断が求められる。研究の内容と形態がそのまま若手研究者に引き継がれることには善し悪しの二面性がある。「知の継承」が負のスパイラルに入るものであってはならない。

何か禅問答めいた話となったが、このエッセイを私の自戒の念として読み取っていただければ幸いである。私自身、「名古屋大学理学研究科」は研究者にとってたいそう居心地の良いところであると常々感じている。また、そのような優れた教育研究環境を提供し続けてきた本理学研究科を誇りに思っている。

いつの頃であったか、金沢での学会を終えて寿司屋に立ち寄った際に、ランチョンマットに記された「心算10カ条」が目にとまった。その書き出しが振るっている。

- 高いつもりで低いのが教養
- 低いつもりで高いのが気位
- 深いつもりで浅いのが知識
- 浅いつもりで深いのが欲望
- ．．．．．

四句熟語風に詠まれたものを「心算即是正」ともいうらしいが、“庶民”の機知に富んだ戒めである。独善に陥りやすい知識人、そして理学人を揶揄しているようにも読め、言い得て妙である。

| Kazuyuki Tatsumi | 1949年奈良県生まれ。1976年大阪大学大学院基礎工学研究科修了。現在の専門は無機化学。分子の世界の美しさに魅せられている。



坂田スクール、平田スクールが残したもの

◎出席者／大貫義郎 名古屋大学名誉教授／北門新作 名古屋大学名誉教授／江口昇次 名古屋大学名誉教授／上村大輔 慶応義塾大学教授・名古屋大学名誉教授／杉山 直 素粒子宇宙物理学専攻教授(司会)

2008年のノーベル物理学賞に輝いた小林誠博士と益川敏英博士、そしてノーベル化学賞の下村脩博士は、それぞれ名古屋大学理学部の物理学科・坂田昌一博士と化学科・平田義正博士の門下生であった。坂田博士、平田博士の研究室は、どちらも多数の優れた人材を輩出し、また独自の研究スタイルは、国内外に大きな影響をもつものであった。それは、単に理学部の物理・化学の一研究室であるに留まらず、学派(スクール)とよばれるにふさわしい広がりをもっていた。今回の3名のノーベル賞は、坂田スクールと平田スクールの活動最盛期の頂点を示す研究成果に対して与えられたものであり、またどちらのスクールにもこれに匹敵する業績が他にもいくつも残されている。戦後の混乱期に新しい研究室として産声を上げ、研究室のあり方を模索していくなかで、やがて大輪の花となって輝いた坂田スクールと平田スクールについて、OBの方々に当時を振り返っていただき、次代の名古屋大学を見通すヒントを得たい。

民主的な教室運営をめざした草創期

杉山 本日、司会を務めさせていただきます理学研究科の杉山です。このたび、名古屋大学理学部にゆかりの深い小林誠先生、益川敏英先生、下村脩先生のノーベル賞受賞を記念し、座談会を開催することとなりました。ご出席いただいたのは、3人の先生方が学ばれた坂田スクールと平田スクールの当時の様子をよくご存じの方々です。**大貫** 小林・益川理論の元となった坂田模型が発表された当時、坂田研究室に籍を置いていたものとして、私の知っていることが少しでも役に立つのであれば喜ばしいことです。**北門** 僕は、益川君と同級生で、いっしょに坂田研究室に入門した仲間でした。当時、坂田先生はすでに学部長などの公職で大変にお忙しく、直接指導を受けることは少なかったのですが、

今日は、益川君や小林君の身近にいた存在として、お話しできればいいなと思っています。**江口** 私は、大学院生のときに下村先生の指導の下でウミホタルの研究をしていました。当時は右も左もわからない学生でしたから、研究室の雰囲気などを思い出しながら、お話ししたいと思います。**上村** 平田先生の最後の弟子の1人で、平田先生が1979年に退官されるまで助手を務めておりました。下村先生との接点はありませんが、研究室の雰囲気や平田先生がどのように下村先生のことを語っていらしたかをお話ししたいと思います。**杉山** ありがとうございます。坂田昌一先生と平田義正先生のお人柄や、それぞれの研究室

の雰囲気を大いに語っていただくことで、ノーベル賞受賞者を輩出した秘密を解き明かし、今後の糧にしたいと思いますので、よろしく願いいたします。では、まずはそれぞれの研究室の草創期のお話をうかがいたいと思います。**大貫** 坂田先生は、第二次世界大戦中に名古屋大学の教授になられ、戦後、物理学の研究だけでなく、民主主義国家にふさわしい研究室のあり方についても構想を練ったそうです。そのときにお手本としたのが、イギリスの物理学者パーナルの『科学の社会的機能』という著書です。坂田先生は、「研究者はすべて対等でなければならない」というお考えで、1946年4月に、初めての物理学教室会議を開催しています。会議では、教室の方針について議論をしたと

記録に残っています。**杉山** その後、有名な「物理学教室憲章」が制定されたのですね。**大貫** ええ。憲章には、教室の運営は民主主義の原則に基づくとうたわれ、研究室会議では指導教官も院生もなく、みな自由に発言していました。**北門** 僕が入ったときは、すでに坂田先生は一線を退かれ、中堅の助教授や助手を先生が後ろから御している感じでした。大貫さんと牧二郎さん、大槻昭一郎さんの3人が先頭に立ち、まるで3頭だての馬車のような勢いがありました。**江口** 私が平田研究室に入ったのは、平田先生が名古屋大学の教授になられて2年目のところで、先生も若かったし、教授室にいることはほとんどなく、食事も来客の応接も、いつでも実験室か「たまり場」でした。**杉山** たまり場というのは。**江口** 大実験室の隣にあった、細長いウナギの寝床のような部屋のことです。30人くらいでいっぱいになる広さでしたが、主だった化学学術雑誌はほとんどそろっていて、それが天井まで積み上がっていました。実験装置も最新のものが入っていましたし、研究環境の整備には相当気を使っていたかと思っています。また、学生だけでなく、大学や企業の研究者などいろいろな方が先生をしたって集まっていたので、いつもにぎやかでした。

自由な風土から生まれたノーベル賞

杉山 どちらの研究室にも勢いがあったのは、両先生のお人柄にもよるのでしょうか。**江口** 人間性豊かで、厳しい言葉にも愛情を感じられましたし、うまく言葉では表現できません

が古武士のような人間的魅力がありましたね。**上村** それに、人を育てるのがお上手でした。中西香爾さんや岸義人さんなど、優れた人が集まってきていて、それが活気につながっていました。「いい弟子から外に出す」というのが持論で、有機化学に留まらず、物理化学や生物学、数学など、いろんな才能を育てて世界中に送り出していました。**大貫** 坂田先生もそうです。坂田先生は、伸びる人をちゃんと伸ばした、素晴らしい指導者でした。「あしなさい」「こうしなさい」とは決していわず、研究室会議などでとことん議論させたので、みんな、自分で勝手に研究していると思っていたんですが、不思議なこといつのまにか大きな影響を受けている。**北門** そうでしたね。コロキウム室で世界中の論文について討論しあうんですが、そういう場でも、研究員はみな平等でしたから、かなり辛辣な議論をしていた記憶があります。そういう自由な雰囲気の恩恵を一番受けていたのは、益川君だったでしょう。「いちゃもん益川」と異名を取るほど、議論好きなヤツでしたから。**杉山** 益川先生のお話が出たところで、今回のノーベル賞受賞者のエピソードをお願いします。**北門** 益川君は、学生時代から非常に個性の強い人でした。あるとき、演習を指導しに来た助手の先生が波動方程式の解き方を出题されたんです。普通はフーリエ変換を使うんですが、益川君はそれをラプラス変換で解いてみせるわけ。先生は「こんな解き方を他の学生に見せちゃマズイ」と思ったんでしょう。黒板を半分に仕切って、右側でオーソドックスな解き方を説明しはじめ、僕たちは右にフーリエ変換、左にラ

プラス変換と、同時進行する2つの解き方を見せられて、目を白黒させていました。**大貫** 小林君は、益川君とは正反対で、優等生の見本のような人でした。エピソードのないのがエピソードというくらい。でも、その優秀さは噂になるほどで、上級国家公務員試験にも合格し、スカウトも多かったようですね。その後、72年に京都大学の助手になるんですが、そのとき実は、金沢大学からも誘いがあり、最初彼は、静かで研究に没頭できそうだと、金沢大学に心が傾いていたんですよ。あのときまわりの者が京都へ行くことをすすめなかったら、歴史は変わっていたかもしれません。**江口** 下村さんは研究一筋の人でしたが、研究室のソフトボールや飲み会には、よく参加されていました。**上村** 平田先生が、下村さんのことを「実験がうまくて、勘がいい人だ」とおっしゃっていたのを覚えています。酸素に弱いウミホタルの発光物質を、爆発するかもしれない水素気流下で抽出するなんていう難しい実験をこなしていたそうです。だから、平田先生も「下村さん、下村さん」といってかわいがっておられたそうです。**江口** そうでしたね。下村さんがGFPを発見した後の話ですが、アメリカへ来ないかという誘いの手紙を彼からもらったことがありました。ドイツの学者がプリンストン大学に来て君と同じ研究を始めるから、負けなようにとハッパをかけられたんです。そのとき僕は、事情があってプリンストン大学へは行けなかったんですが、海外ですでに活躍していた平田スクールの門下生らしく、常に世界の動向に目を向けて、後輩にも情報を発信されていたらっしかったですね。



坂田昌一 (1911-1970)

元名古屋大学理学部教授。1933年京都帝国大学卒業。1942年に提唱した二中間子論は、クォーク模型の先駆けとなった「坂田模型」や、ニュートリノ振動を予見した「牧・中川・坂田行列」とともに、現在の素粒子標準模型の基礎をつくる。1942年に名古屋帝国大学理学部教授。1946年、戦後の名古屋大学物理学教室の再建において、その民主的運営を定めた「物理学教室憲章」を策定し、全国の大学・物理学教室に大きな影響を与えた。1950年、恩賜賞・日本学士院受賞。



平田義正 (1915-2000)

元名古屋大学理学部教授。1941年東京帝国大学卒業。1944年に名古屋帝国大学に講師として着任、1954年名古屋大学教授。フグ毒テトロドトキシン、イワシナイオンギンチャクの猛毒パリキシンなど、複雑な構造をもつ生物活性物質の化学構造を次々と決定する。優れた教育者としても知られ、中西香爾(コロンビア大学名誉教授)、岸義人(ハーバード大学名誉教授)など、門下から多数の研究者を輩出している。1977年、日本学士院賞受賞。1977年から2000年まで日本学士院会員。

平田スクールと坂田スクールの違い

杉山 平田研究室は海外との交流はかなり盛んだったのでしょうか。

上村 平田研究室には中西香爾さん、後藤俊夫さんなどハーバード大学への留学者が多く、また世界の研究者が良く顔を出されました。そのため、日本オリジナルの研究テーマを世界最先端の実験方法を駆使して解明することをポリシーにしていました。また後年、平田先生は中国からの学生や博士研究員を熱心に招いていました。漢文がお好きで中国に興味があったのと、ご自身がハーバード大学で学ばせてもらった経験を、今度は中国の若者に還元しようという思いがあったのではないのでしょうか。

杉山 逆に、坂田研究室は、海外との交流が少なかったことが独創的な研究に結びついたりともお聞きしますが。

北門 坂田先生が戦時中に確立した二中間子論は、純粋に国内で構築されたもので、そのころから独自の理論を打ち立てる流れがありました。現在の素粒子の標準模型も、名古屋大学だけでつくられた、オリジナルな成果がいっぱいつまっています。

大貫 でも、まったく外国との交流がなかったかというそうでもなくて、坂田先生は、1955年にストックホルムへ行った帰り、旧ソ連と中国に渡り、まだ国交のなかった中国のあちこちで講演を

行ったとか。当時の文部省が問題視したようですが、これが、日本と中国の科学者の交流の始まりになったのです。ただ、坂田先生は反戦運動に力を入れられていたこともあって、アメリカの入国ビザがおりなくて、おそらく生涯、アメリカの土は踏んでないんじゃないのでしょうか。

自由の伝統を生かして

杉山 多くの優秀な人材を輩出し、世界に通用する成果をあげられた坂田スクールと平田スクールですが、この偉大な業績から現在の我々が学ばなければいけないのは、どんな点だと思いますか。

上村 シンポジウムなどの席で、学生にもどんな発言させることが大切ではないのでしょうか。打たれ強くなるし、キャリアに関係なく同じ土俵で議論させることに意義があるんです。それには、せっかくな手を挙げて発言しても、間違っていたらペケをつけられるような今の減点法を変える必要があります。

北門 議論をする機会を増やすことには僕も賛成です。僕が名古屋大学にいたころは、机があってもそこにおとなく座っている人なんてほとんどいなくて、研究室などに集まって散々議論したものです。ところが、博士課程を修了して助手として京都大学に移ってみると、みんな1人で部屋に閉じこもっているんですよ。最初は寂しくてしょうがなくてね。僕自身は、京都大学で部屋に閉じこもることを習いましたけれど、研究のためには、みんなで議論しあえる方が断然いいと思います。

江口 そうですね。今の学生は、横のつながりは強いのですが、上下の交流が少ないのが気になります。先輩後輩関係なく、積極的にコミュニケーションをとってほしいですね。

北門 坂田スクールの伝統でもありましたけれど、「先生」というよび方はやめて、みんな「さん」づけでよぶのがいいですね。「研究の前では、みんな平等」という意識が徹底してこそ、自由な討論もできるのだと思います。

江口 研究にとって、自由であることは本当に大切だと思います。平田先生も、坂田先生同様、研究テーマを与えたら、あとは細かいことはいわずに、自由にやらせていました。だからでしょうか、特別教養を受けたという覚えはないのに、平田研究室にいと、気づかないうちに、自然に感化され教育されている感じでした。

北門 当時は、教える方も自由だったんですよ。今の先生は、キチッと教えることを義務づけられ

GFPについての私的な思い出

生命理学専攻准教授 高木 新 Shin Takagi

GFP。今秋のノーベル賞フィーバーの後で、この緑の蛍光を放つ蛋白質について説明は不要だろう。ところで、私は名大関係ではGFPを最初に扱った人間ではないかと思っていた。1993年10月、私はマックギル大学の線虫*C.elegans*の研究室に滞在していた。カナダの秋の早い夕暮れ時、研究室でスナックをかじりながら線虫研究者の情報誌、その名も「線虫フリーダ通信」をめくっていた大学院生アン（アン）の声を今でも憶えている。“Glow Worms? How stupid! Ha!”翌年のサイエンス誌への発表に先立って、チャルフィー博士らがGFPを用いて線虫の神経細胞を光らせた実験について報告していたのだ。アン（アン）の冷笑に反してこの蛋白質は瞬間に線虫業界、そしてあらゆる実験生物に広まった。私も即座にGFP遺伝子を取り寄せて実験を始め、虫が輝きながら動き回る姿に歓声をあげた一人だった。しかし、私は寡聞にしてGFPの生みの親ともいえる下村脩博士のことをほとんど存じ上げていなかった。博士が名古屋大学理学部に在籍されていた事実を今回はじめて知り、驚いた次第

である。新聞によれば「家族総出でクラゲ集めをする極めて寡黙な」老学究の、今回のご受賞を皆さまとともに祝いたい。それにしても、先見の明をもってGFPの遺伝子クローニングを成し遂げながら研究費打ち切りで姿を消し、今は自動車の販売店で送迎車の運転手として生計を立てておられるというブラッシャー博士の話の聞き、嘆息を禁じえないのは私だけだろうか。



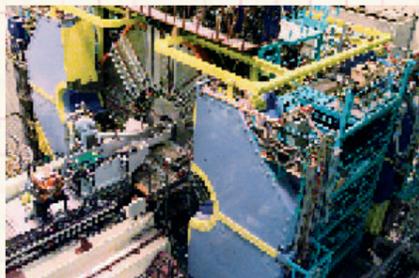
GFPによって緑色に光る線虫

小林・益川理論を実証した実験

素粒子宇宙物理学専攻准教授 飯嶋 徹 Toru Iijima

ノーベル賞決定後の記者会見で益川さんが、「2002年-2003年の実験で我々のいったことが正しいとわかった。それが科学者としては一番重要なこと」と語った。この「実験」が、「Bファクトリー実験」である。つくば市の高エネルギー加速器研究機構（KEK）にある加速器で電子と陽電子のビームを衝突させ、自然界には存在しない大量のB中間子とその反粒子である反B中間子を生成し、両者の崩壊の違いを精密に測る実験だ。「粒子・反粒子（CP）対称性の破れ」を説明する理論として小林・益川理論は提唱されたが、B中間子の崩壊では大きく対称性が破れて小林・益川理論の定量的な検証が可能となる。そのことを理論的に世界で最初に示したのが、名古屋大学名誉教授である三田一郎博士たちであった。そして実験家たちは、加速器のビーム強度を1000倍に増強し、わずか1兆分の

1秒の寿命しかないB中間子の崩壊を精密に測るといふ提案当時には常識破りと思われた実験技術を磨き上げ、小林・益川理論の最終検証を達成した。名古屋大学の実験グループはこの実験を中心になって進めた。名大発の理論を名大が中心となって実験的に検証しノーベル賞につながった。優れた理論的予言も実験で定量的に実証されて初めて科学となる。今後も名大の素粒子研究が理論と実験の両面から大きな貢献を果たしていくであろう。とくに、宇宙がなぜ反物質ではなく物質でできているかを説明するには、小林・益川理論を超える新たな物理理論が必要となっている。そのために理論家が多岐にわたる可能性を模索する一方、実験家はその発見をめざしてヨーロッパのCERN研究所でLHC実験を開始し、さらにKEKではビーム強度を増強したスーパーBファクトリー実験を計画している。



「Belle（ベル）」測定器とよばれるBファクトリーの実験装置。測定器の中央部で電子と陽電子のビームが衝突し、生成されたB中間子と反B中間子の崩壊が記録される（写真提供：高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所）。



大貫義郎 Yoshio Ohnuki
名古屋大学名誉教授。1928年生まれ。1953年名古屋大学理学部物理学科卒業。同年、名古屋大学大学院理学研究科に進み、1960年、名古屋大学理学部助手。1971年、名古屋大学理学部教授。院生時代から坂田研究室に在籍し、益川敏英博士と小林誠博士には助教として指導に当たる。



北門新作 Shinsaku Kitakado
名古屋大学名誉教授。1938年生まれ。1962年名古屋大学理学部物理学科卒業。同年、名古屋大学大学院理学研究科に進み、1967年、京都大学基礎物理学研究所助手。1991年より名古屋大学に戻り、教養部教授、理学部教授を務める。益川敏英博士とは同級生で、ともに坂田研究室に在籍。



江口昇次 Shoji Eguchi
名古屋大学名誉教授。1934年生まれ。1957年名古屋大学理学部化学科卒業。同年、名古屋大学大学院に進み、1962年名古屋大学工学部助手。1985年名古屋大学工学部教授。平田研究室には1957年～1962年まで在籍し、「ウミホタルシフェリンの構造研究」で下村脩博士の指導を受ける。



上村大輔 Daisuke Uemura
慶應義塾大学教授・名古屋大学名誉教授。1945年生まれ。1968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に進み、1973年名古屋大学理学部助手。1997年より同大学院理学研究科教授。平田研究室には、1967年から平田義正博士が退官される1979年まで在籍。2008年4月より現職。



杉山 直 Naoshi Sugiyama
素粒子宇宙物理学専攻教授。1961年生まれ。1984年早稲田大学理工学部物理学卒業、早稲田大学大学院理工学研究科修士課程、広島大学大学院理学研究科博士課程を修了。東京大学理学部助手、京都大学助教授、国立天文台教授を経て、2006年より現職。名古屋大学理学部・理学研究科広報委員会委員長。

機械仕掛けの生きものたち

「やわらかさ」や「なめらかさ」をイメージさせる生きもの。

そんな生きものも分子レベルで観察すると精巧な機械のようにふるまっている。

生きものの奥底には、機械仕掛けの何かがひそむ。その正体を探る。

(2008年11月15日、第16回理学懇話会より)



細胞に組み込まれた マイクロのモーター

本間道夫 生命理学専攻教授



Michio Homma | 1955年生まれ。東京大学大学院理学系研究科修了。その後日本学術振興会特別研究員、エール大学研究員を経て現職。専門分野は、生物物理学、分子生物学、細菌学。

生きものを機械ととらえる

「機械論」や「唯物論」という言葉を聞いたことはないでしょうか。これは哲学でよく使う言葉で、精神的なものを物質的なことばで表現しているというものです。すなわち「精神」と「物質」のうち、物を基準にしていろいろなことを説明する立場です。ギリシア哲学から脈々と続いてきた考え方で、「物によって精神はつくられる」という客観的なものの見方がされてきたわけです。

『生命とは何か』という本があります。1943年

にシュレディンガー*1が「What is Life?」という題で講演を行い、翌年、それをまとめて書かれた本です。シュレディンガーは量子力学の創設者で物理の第一人者です。生命に興味を持った彼は、「量子力学で生命を説明しよう」と考えました。当時としては大胆なことでした。

そして、このような考え方に刺激されて、DNAの二重らせん構造を解いてノーベル賞を受賞したウィルキンス*2、クリック*3、ワトソン*4などの

学者が、物理学的見地から生命現象を研究しようと試み、それが、生物物理学や分子生物学の発展を支えてきたのです。

『生命とは何か』では、物理の言葉、化学の言葉で生命現象を記述しようとしています。「物質として生命をとらえて、その立場で生命を証明していこう」ということで、まさに機械論であり、生物学ではこのような物質論的なアプローチが成功をおさめてきたのだと思います。

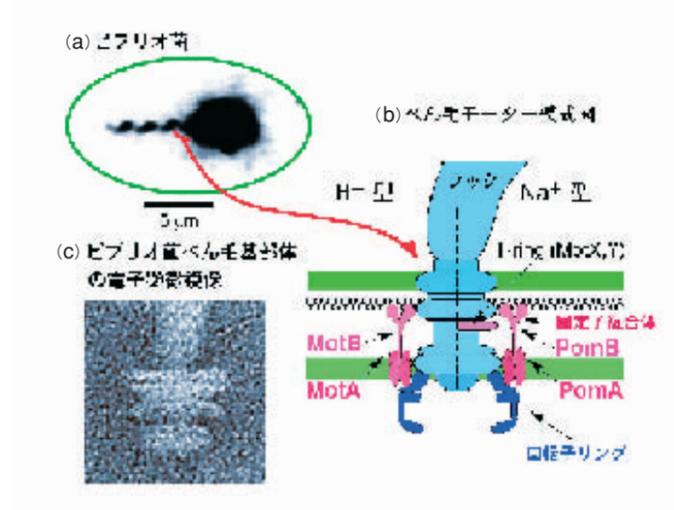


図1 ビブリオ菌のべん毛モーター
(a)べん毛を見ることが可能な特殊な光学顕微鏡で観察したビブリオ菌。(b)細菌のべん毛基部に存在する膜に埋まった回転モーターの模式図。青で書かれた回転子の周りに赤で示された固定子が集合して、固定子と回転子の相互作用により、回転力がつくれる。(c)ビブリオ菌からべん毛構造を取り出して、電子顕微鏡観察した基部体部分。精製過程でモーター機能に大切な部分はとれてしまっている。

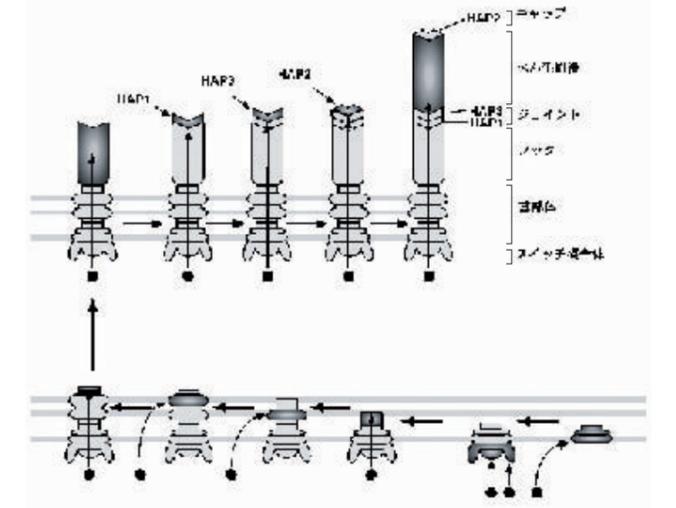


図2 タンパク質が積み重なってできあがるべん毛構築過程の模式図
最初に構築の基礎となるリング構造が細胞膜につくられ、その基部にタンパク質を輸送する装置が構築され、自分自身のなをつくられたタンパク質が輸送されて、べん毛の構築が進行する。影がついているのが新たに加わったタンパク質。

モーターはどうやって動くのか

私は、「生きものが動く仕組みはどうなっているのか」ということを研究しています。生きものといっても、サルモネラ菌やビブリオ菌といったばい菌(細菌)です。こうしたばい菌は、べん毛を回転させて活発に動くことができます。べん毛の根元に「モーター」が入っています。べん毛のかたちはらせん状で、船のスクリューのようにぐるぐるとまわすことで推進力をつくり泳ぐことができます。モーターが回転し、ばい菌が泳ぐ仕組みを解明するのが私の研究テーマです。

たとえば機械がどうやって動くのか調べたいときに、まずは分解して中身を見てみます。細胞を分解しモーターを見てみるとこのような構造になっています(図1)。モーターは細胞の膜に埋まっており、軸を支えるリング状の「固定子」と、

進む力をつくる「回転子」からなります。モーターをまわすエネルギー源は、ナトリウムイオンや水素イオンの流れです。水力発電で、水を落としてタービンを回転させたり、風力発電で風車をまわすように、イオンが流れるときのエネルギーを使って、この小さなモーターを回転させることができます。

このように、単純なばい菌にも実は非常に巧妙な仕組みがあります。さらに、人間と同じようにばい菌も「あっちに美味しいものがある」と感じて、そちらに動いていくことができます。具体的には、化学反応(認知)が起こり、それがシグナル(信号)を生じ、モーターに伝わり(伝達)、回転の方向(動き)が決まります。このような視点から、バクテリアのモーターをみてみると、小さな機械仕掛けの生きものだといってもいいと思います。

図2には、小さな機械であるべん毛の部品が組み立てられて、膜に埋まってできていく過程が示されています。この図1枚をつくるのに、何十人も研究者が10年や20年の時間を費やしています。私もその一端を担いました。

*1 E.シュレディンガー(1887-1961)
オーストリアの物理学者。ノーベル物理学賞(1933年)を受賞。
*2 M.ウィルキンス(1916-2004)
イギリスの生物物理学者。ノーベル生理学・医学賞(1962年)を受賞。
*3 F.クリック(1916-2004)
イギリスの生物物理学者。ウィルキンスとともにノーベル生理学・医学賞(1962年)を受賞。
*4 J.D.ワトソン(1928-)
アメリカの生物学者。ウィルキンス、クリックとともにノーベル生理学・医学賞(1962年)を受賞。

学生時代の私

ここで自分が科学の道に入ったときのことをお話しします。

私は研究室にいて実験をするのが好きでした。それで、大学を卒業するときに「もっと実験をしたい。大学院に行きたい」と思って勉強を始めました。けれども、実験が好きなので、勉強はほとんどしなかったのです。東京大学の植物学科に入ることができたのは本当に偶然といってもいいような出来事でした。また、細菌を扱っているということでもたまたま選んだ研究室がべん毛の研究をしていて、私も何となくべん毛の研究をすることになったのです。

当時はべん毛のモーター部分が、どのような部品(タンパク質)でつくられているのかがまだわかっていませんでした。そこで、まずは調べたいべん毛の根元の部分を、分離して集めていきました。とはいっても、モーター部分だけ

では小さ過ぎて取り出せないのです、モーターにつながった回転軸にあたるフックとよばれる部分を含めて取り出すという作業に必死になって取り組んでいました。当時はフックとプロペラとして働くべん毛の繊維部分の間は直接につながっていると思われていました。ところが、その他のタンパク質があるはずのないところから発見したのが、HAP1、HAP2、HAP3という私が名前をつけたタンパク質です。最初は、私のような大学院生が「変なタンパク質がある」といっても、みんな、「単なるゴミだろう」といっていたのです。今の技術では、フックを取ってくれば簡単に検出できるタンパク質ですが、なぜか、そのときは、私にしか検出することができていませんでした。この発見で、無事に学位を取ることができ、その後、海外に留学した際も、この研究を発展させ、評価していただきました。



べん毛モーターのエネルギー

ここからは、べん毛モーターの動く仕組みの話をしていきます。いろいろなモーターを比較したいと思います。私たちが研究しているべん毛モーターは、直径が45nmという、ほんとうに小さなモーターです。このnmという単位は、1mmの100万分の1の長さになります。タンパク質1つの分子を、球状なものと仮定すると、その分子の大きさは、直径が3~5nmとなります。これらが、何十個も積み重ねられてべん毛モーターはつくられています。まさに、分子モーターということがわかると思います。

一方、普通のおもちゃなどに使われる電池モーター(マブチモーター)の大きさは、 2.5×10^7 nm(2.5cm)です。桁違いに、サイズも性能も違う2つのモーターですが、それよりも何をエネルギーにして回転するのかの違いです。

電池モーターは、電子の動きによって磁力が誘発され、その誘引力により回転します。べん毛モーターは、水素イオンやナトリウムイオンの流れで回転します。他のイオンでは回転力をつくることはできません。イオンをエネルギー源に使う動かす生物界の器官は、淡水と海水に多くあるこの2つのイオンのどちらかが用いられているといってもいいと思います。大腸菌のべん毛モーターでは、固定子として、MotA(モータータンパク質A)、MotB(モータータンパク質B)という膜に埋まったタンパク質が必要となります。大腸菌の場合、これらに水素イオンが流れ込んで回転力をつくります。

私たちが発見した海に住んでいるピブリオ菌のナトリウムイオン駆動型モーターでは、MotA、MotBと相同なタンパク質であるPom(polar motor: 極べん毛モーター)Aタンパク質とPomBタンパク質に加えて、2種類のモータータンパク質MotXとMotYがいっしょになって初めてべん毛モーターがまわります。こちらは水素イオンではなく、ナ

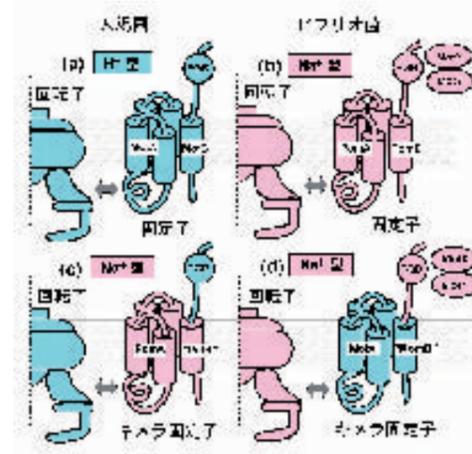


図3 固定子をキメラにしたときのイオン特異性 (a)大腸菌の固定子-回転子モーター。(b)ピブリオ菌の固定子-回転子モーター。(c)大腸菌の中でNa⁺駆動型の固定子とキメラにしたモーター。(d)ピブリオ菌の中でH⁺駆動型の固定子とキメラにしたモーター。モーターは、PGB部分で固定される。

リウムイオンをエネルギー源に使う回転することが明らかになりました。

ところが、水素イオンとナトリウムイオンは分子の大きさが違うのです。それぞれどうやって、水素イオンとナトリウムイオンを使うのでしょうか。これは大きな謎です。このような疑問をもとにして、このようなエネルギー源の違いがうまれる原因はどこにあるのか、結果として、機械仕掛けのモーターがどのようにイオンを使ってまわっているのか、という根源的な問題に立ち向かっていくわけです。

まず、私は、なぜ水素イオンとナトリウムイオンが区別されてモーターが動くのかということを研究しました。これには誰もが考える当たり前の方法を使いました。光合成する紅色細菌であるロドバクター菌の水素イオンで動くモーターのMotAとMotBは、ナトリウム型モータータンパク質であるPomAとPomBとのアミノ酸配列の類似性が、水素イオンで動く他のモータータンパク質よりも高いので、大きな違いはないはずでした。このことから、MotAとPomAの似たもの同士を入れ換えるという実験をやってみます(図3)。PomAとMotBでつくられたモーターと、MotAとPomBでつくられたモーターがどちらのイオンを使って動くのかを調べます。PomAとMotBの組み合わせのモーターは機能しませんが、MotAとPomBの組み合わせのモーターはナトリウムイオンで動きました。そのことから、「あっ、PomBが使うイオンを決めているのだ」という結論になります。

このように、つくるタンパク質を自由に組み合わせさせてモーターを改造できるのは、遺伝子工学などが発達して、簡単に遺伝子(DNA)を切り貼りして、ある一部分のタンパク質を簡単につくらせることが可能となったからです。

次に、ナトリウムイオン駆動型のPomBタンパク質のイオンが通ると考えられている部分を、水素イオン駆動型のMotBの対応する部分と入れ替えます。前半がMot由来で、後半がPom由来の“MomB”というキメラタンパク質をつくらせます(図3d)。そうすると、イオンが通る部分は、全部水素イオン駆動型の部品にしたことになり、相変わらずこのモーターが、ナトリウムイオンで動いてしまうのです。これは矛盾です。

この結果を出したときには、みんなに「お前、これ、何をやっているんだ。これではわからないじゃないか」といわれたのですが、実験事実は曲げられません。何度実験を繰り返しても同じ結果になってしまいます。

つまり、私たちが考えるように、水素イオン駆動型かナトリウムイオン駆動型というのは、イオンの通り道だけで単純に決まっているのではなく、もう少しダイナミックにタンパク質の構造がイオンに対応して変動する流動的なモデルを考える必要があるのではないかという印象をもちました。これが生物機械の特徴かもしれません。

私たちの出した結果からは、イオンの特異性をタンパク質のどこの部分が決めているかはわかりませんでした。しかしながら、モータータンパク質AとBがどのようにイオン特異性を決めているかというヒントを得ることができたと思っています。

さらに、PomBとMotBを切り貼りして配列が入り子になったキメラタンパク質“PotB”をつくり、大腸菌の中でPomAといっしょに、新たにモーターをつくらせてみました。大腸菌のべん毛モーターは、水素イオンが流れてまわるモーターです。面白いことに、この新しいモーターは何とナトリウムイオンで動くモーターになります(図3c)。

すなわち、モータータンパク質AとB以外は



講演前にはフルートを演奏

水素イオン駆動型モーターの部品なのに、2種類のタンパク質を入れ換えただけで、水素イオン型からナトリウムイオン型に変化させることができたのです。つまり、大腸菌のモーターの性質を、人工的に大きく改変させることができたことになりました。

大腸菌のべん毛モーターによる運動は、塩(塩化ナトリウム)の濃度には依存しません。塩を入れない場合も、塩を入れた場合も、両方ともによく泳ぎます。ところが、先ほど作成した新しいモーターをもった大腸菌では、塩がないと泳がないけれども、そこに塩をパッと入れると、活発に泳ぐことができました。そして、塩の濃度をどんどん濃くしていくと、つまりナトリウムイオンの濃度が高くなるほど、スピードが上がってきます。面白いことに、元の大腸菌の水素イオンモーターで運動できるスピードよりも、ナトリウムで速く運動できるようになります。

まさに、べん毛をより速く、強く回転させるモーターをつくることができました。つまり、一般的な大腸菌のモーター(水素イオン型)のエンジン部分に、ナトリウム駆動型のモータータンパク質(Pom)を、新しいエンジンとして入れ換えることで、大腸菌はナトリウムイオンで運動できる菌となり、それまでより速く動くようになりました。

今後、大腸菌で機能するこの新しいモーターを使った実験で、べん毛モーター研究が大きく進むことを期待しています。なぜかという、大腸菌というのは分子生物学のなかでは研究者が多く、多くの情報を共有でき、その扱い方が知り尽くされています。回転がどのように制御されているのか、エネルギー源であるナトリウムイオンの流れがどのように回転力につながるのかというべん毛モーターの機械的な仕組みの研究をさらに進めることができるからです。べん毛モーターを機械論で本格的に語れるのはこれからです。

生命の時を刻む タンパク質

近藤孝男 生命理学専攻教授

生物時計とその3つの特徴

ちょっと信じ難いかもしれませんが、生物のひとつひとつの細胞は腕時計のような仕組みもっています。ヒトの生物時計の存在を明らかにするためには2、3カ月間、ボランティアの人に外部と遮断され、時間を知る手がかりがない隔離室で生活してもらった実験を行います(図1)。人工時計や昼夜のない条件でもヒトは周期的に睡眠覚醒を繰り返しますが、この条件ですと、睡眠時間が規則的に1日に1時間ずつ後ろにずれていきます。これは、われわれの身体の中に時計がひそんでいて、それが25時間周期で動いていることを意味します。周期が25時間サイクルであることは、このリズムが地球の24時間のサイクルによるものではなく、生物時計によるものであることを示しています。一方、この実験中に24時間周期の明暗のサイクルをつけると、睡眠のサイクルはすぐ24時間周期になります。私も皆さんも、本当は25時間の時計をもっているのですが、毎日、1日1時間ずつ早起きしてそれを24時間に調整しているのです。この昼夜サイクルへの同調機能も生物時計の重要な特徴です。

生物時計があることを証明したデータは、1960年ごろにはすでにいくつも報告されていましたが、生物が24時間を独自に計れるなんていうことはおおよそ信じ難いもので、ほとんどの研究者は信じていませんでした。ですが、私はこれは信じざるを得ない、面白いと思ってしまった。



Takao Kondo

1948年生まれ。名古屋大学理学部の太田行人教授の研究室でウキキサの概日時計の研究を始める。1978年岡崎国立共同研究機構基礎生物学研究所助手、1995年名古屋大学大学院理学研究科教授。概日時計の研究から生物の生き様を理解したいと考えている。

ということで私は研究を始めたわけですが、こういう非常に「ニッチ」なテーマを選びますと、なかなか苦労します。しかし、面白いと思った以上はほれたようなものですから、もう容易に逃げ出すわけにはいきません。

多くの生物時計を調べていくと必ずみつかるといわれています。1つは、約24時間周期で持続することです。2つ目は、温度を変えても時計の速さはほとんど変わらないことです。これを周期の「温度補償性」といいます。地球の自転に合わせるためには、夏と冬で時計の速さが変わると困るわけです。3つ目の特徴は先ほども話しましたが、外から24時間サイクルがくれば、簡単に同調できることです。生物時計は時計として不可欠なこの3つの条件を満たしてはじめて地球上で生活するために役に立つのです。このメリットがあるため生物時計は進化してきたわけで、これらを説明しないと生物時計の謎を解明したことにはなりません。

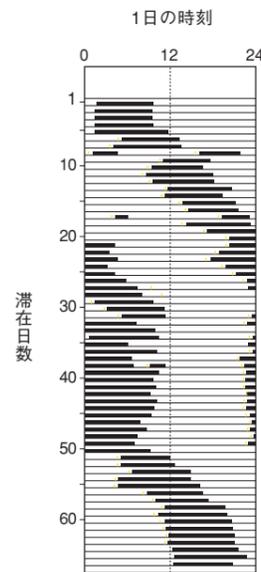


図1 ヒトの生物時計実験
外界の昼夜環境の変化を遮断し、時間情報の手がかりを得られない隔離実験室での睡眠の記録。1日の各時間(横軸)のうち睡眠時間を黒線で示した。最初の1週間、32~50日、60日以降24時間の昼夜サイクルを与えた。

時計遺伝子の発見

こうして私は生物時計の研究を始めたのですが、その仕組みの解明は当時の生物学では歯が立たない状況でした。謎が解明されてきたのは1980年ごろから普及した遺伝子工学技術のおかげです。スタートになったのは、私が大学院に入った1971年の報告です。ショウジョウバエの野生型は24時間周期で羽化しますが、3種の突然変異(リズムがなかったり、周期が短くなったり、周期が長くなったりする)が見つかりました。これらは同じ遺伝子の変異であることがわかり、*period* (*per*)*1と命名されましたが、その実体が明らかになるまでには、10年以上かかりました。

余談ですが、当時、私は理学部ではなく山岳部ではないかといわれるほど、山登りに一生懸命でした。山登りもそろそろ一段落したころ、気づいて見ると、1984年、*per*遺伝子がクローニングされ、解読されました。実体が明らかになると、芋づる式に多くの時計遺伝子が明らかになり、急に多くの研究者が参入するようになりました。さらに*per*遺伝子とよく似た遺伝子が我々哺乳類にもあることがわかり、時計研究はさらに我々に身近なものになっていきます。その成果ですが、*per*遺伝子発見以来、約15年ぐらいかかって、多くの重要な発見が積み重なり、それが時計として働く機構を説明する仮説がまとまってきました。その考えは時計遺伝子の「転写翻訳モデル」とよばれるものです。この考えの基本は時計遺伝子のつくる時計タンパク質が時計遺伝子自身の働きを抑える負のフィードバックの存在です。時計タンパク質が自分の発現(転写)を抑えますから、タンパク質の合成(翻訳)も停止します。時計タンパク質が一定の速度で分解されることで、タンパク質濃度がしばらくして下がり、また、時計遺伝子が発現します。これで、24時間の振動が発生します。実際、測ってみれば時計遺伝子のメッセンジャーRNA(mRNA)もタンパク質も少しずれた24時間の振動を示し、時計遺伝子の発現を乱してやれば、リズムも変化します。DNAからタンパク質へのセントラルドグマ(分子遺伝学の中心原理)で生物時計も説明できる。めでたし、めでたし、というわけです。

シアノバクテリアとの出会い

私は1990年ごろまでは植物の時計の研究をしていましたが、ショウジョウバエの時計研究と競うには限界を感じて、何かいい研究材料はないかと探していました。そんなときにテキサスA&M大学のスーザン・ゴールデン博士に偶然出会い、シアノバクテリアを利用して新しい研究を進めることができました。これは私にとっては大変ラッキーなことでした。シアノバクテリアの示してくれた生物時計の謎は、おそらく他のどの生物より本質に迫るものでした。このバクテリア(図2)は自然がその時計の秘密を我々にささやくために準備した生物のような気がします。その一部をこれからご紹介しようと思います。

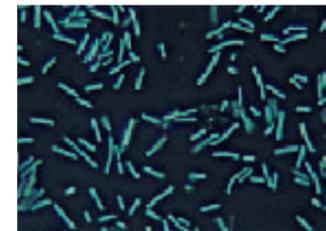


図2 シアノバクテリア

最初に行ったことは生物時計に応じてシアノバクテリアを光らせることです。まず発光細菌の発光遺伝子をシアノバクテリアのゲノムに組み込みます。生物時計にコントロールされて発光遺伝子が動くようにいろいろ条件を試し、24時間周期の生物発光リズムを得ることに成功しました。生物時計の動きを光でモニターできるようになり、測定が飛躍的に正確になりました。よく調べて見ると、バクテリアの時計であっても、温度によっても周期は変わらないし、光や温度の24時間サイクルに同調することもできました。重要なことは生物発光による測定を利用すれば、1万個以上のバクテリアの生物時計測定を自動化することができます。そこで石浦正寛博士(現・名古屋大学)やカール・ジョンソン博士(現・バンダービルド大学)らとともに分子遺伝学の手法に従って突然変異体を分離し、時計遺伝子を探しました。みつかったのが3つの*kai*遺伝子*kaiA*、*kaiB*、*kaiC*です。その突然変異は*per*遺伝子と同じように周期が長かったり短かったり、リズムがなくなったりしますが、50以上のさまざまな突然変異はすべて*kai*遺伝子に変異をもっていました。

「グルグル回る」ということで*kai*(回)と名づけたのです。

次に、先ほどの転写翻訳モデルにしたがって*kai*遺伝子の発現を調べると動物の場合と同じことが起こります。*kaiC*からつくられるKaiCタンパク質が自分自身の遺伝子を非常に強く抑えるのです。実験ではKaiCタンパク質だけを細胞の中で大量につくらせます。すると、この遺伝子の発現はパッとなくなってしまいます。つまり、強い負のフィードバックが起こっていますから、これが原因で振動が起こっていると考えられます。おまけに、一時的にKaiCタンパク質だけたくさんつくる実験をすると、いかにもKaiCタンパク質の量を変えて、時計をずらせることもできました。そこで、私たちは疑うことなく、シアノバクテリアでも転写翻訳モデルが当てはまると考え、論文を出しました。

こうした話を講演ですると、必ず「わかった。これがフィードバックを起こして、こういう仕組みで振動しても不思議はないだろう。だけど、なぜ24時間で振動するのだ。どうして12時間じゃないんだ」と聞かれます。それから、「なぜ温度を変えてもスピードは変わらないのか」と聞かれますと、実は答えようがないのです。改めて先ほど私が示した3つの特徴を考えてみると、もしこれが24時間でなければ何の役にも立ちません。温度によって変わるようでは、やっぱり役に立たない。「これで満足してはいけい。そこを説明しなければ肝心なことには何も答えていない」と考えて、さらに研究を進めたわけです。

*1 生物学の決まりでは、遺伝子を表すときには「*per*」や「*kaiC*」のように斜体の文字で示す。これに対して、その遺伝子からできるタンパク質は「Per」や「KaiC」のように書き表す。



大学院生時代に登ったヒマラヤにて

タンパク質による時計

なぜ24時間になるのか。この問いに答えるには細胞の中でのKaiCタンパク質の働きを調べるしかありません。なぜならKaiCの突然変異だけ、周期が大きく変わるからです。いろいろなことを調べた末わかったことは、量が多い時にKaiCタンパク質にリン酸基がくっつくことでした*2。つまり、KaiCのリン酸化も1日の間でサイクルを刻んでいたのです。「このリン酸化は怪しい」と考えたのですが、実はその先、どうやればいいのかまったくわかりませんでした。こうした時は五里霧中の努力を続けていると、なぜか運のいいことがまわってきます。この時もこうしたことが起きました。シアノバクテリアを外の24時間サイクルに同調させるためには、12時間真っ暗にすればいいのです。その時「どういう仕組みで同調するか」ということが私の研究室の富田淳さんという大学院生の研究テーマでした。シアノバクテリアは暗くなると転写や翻訳が止まります。そもそも転写翻訳モデルからすれば、転写や翻訳が止まるということは時計が止まるということです。そんなところを調べて何になるのだということで、それまで誰もやらなかったのですが、彼はまる3日間徹夜して、真っ暗な状態でKaiCタンパク質の状態を測定してみました。このバクテリアでは暗くすると、遺伝子はまったく読まれなくなり、タンパク質の合成も分解も止まってしまいます。しかし、驚いたことに、KaiCの量はずっと変わらないのに、KaiCのリン酸化のサイクルだけは続いており、時計が止まってないことに富田さんは気づきました(図3)。これは転写翻訳のフィードバックが振動の原因だとするモデルという考え方を根底からひっくり返し、KaiCのリン酸化のサイクルが振動の原因だということを意味します。

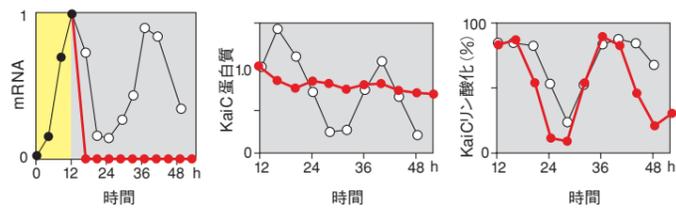


図3 暗期中のKaiCタンパク質の状態

シアノバクテリアを長時間暗黒中に置き、kaiC-mRNA、KaiCタンパク質量、およびそのリン酸化を測定した。黒丸は前培養の明期中の状態。赤丸がそのあと連続暗条件、白丸は連続明条件にしたときの状態。

僕たちも困りましたが、他の生物の時計研究者もショックだったと思います。実際、KaiCのリン酸化のサイクルは温度を変えても周期は変わりませんでした。

もしもこれがタンパク質だけで起こっているのなら、試験管の中でタンパク質を混ぜただけでリズムが出るのではないか。そういうことに、われわれは気づいた、といえバカッコいいのですが、「まあ、やってみよう」あるいは「誰か他の人がやっちゃうと悔しいから」ぐらいの感じで、みんなでワイワイいって始めました。そして、数カ月の努力の結果、試験管の中でKaiCのリン酸化振動を再構成する、つまり、生物時計を試験管の中でつくり出すことができたのです。3つのタンパク質(KaiA、KaiB、KaiC)を精製し、エネルギー源としてのATPといっしょに混ぜ、KaiCの状態を2時間ごとに測定します。そうするとリン酸化されたKaiCとそうでないKaiCがきれいに12時間ずれて交互に現れたり消えたりしています(図4)。この周期は温度を変えても、もちろん変わりません。さらにkaiCの突然変異のタンパク質を精製し、再構成して周期を調べてみると、もとの突然変異の示す周期と同じ21時間や28時間という周期を示します。このデータが示されると、「試験管の中で発生しているリズムが、細胞の中で実際に時間を測定している」以外の可能性はちょっと思いつくのが難しいわけです。

KaiCがリン酸化されたり脱リン酸化されるサイクルが実は自発的に振子として働いていて、細胞の中で遺伝子発現がサイクルで起こっているのは、その時計の針に過ぎないことになります。これまでオーケストラを指揮していたと思われていた指揮者は、実は、オーケストラにあわせて



踊っていたのかもしれないということです。どちらの場合もほとんど同じに見えるのですから。区別するために片方を止めてみればよいのですが、その結果は富田さんの実験が示したとおりです。つい最近までは、私たちが発現フィードバックモデルで説明できると思っていましたし、データも見事にそのようになっていました。生命の各プロセスは細胞の中で相互に影響しあって進んでいます。ですから2つのプロセスの関係(原因と結果)を混同しないのはとても難しいことなのです。「遺伝子の発現がより重要だ」なんて思い込んでいて、いつい「こっちが原因で、こっちが結果だ」と勝手に考えてしまいます。注意が必要です。

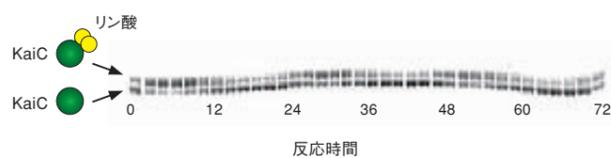


図4 試験管の中のKaiCリン酸化時計

精製したKaiA、KaiBおよびKaiCをATPとともに試験管内で混合し30℃に保った。2時間ごとに少量を採り、反応を停止させ、電気泳動によりKaiCの状態を調べた。KaiCタンパク質は上のリン酸化型および下の脱リン酸化型の2本のバンドとして検出される。図から明らかのようにリン酸化の状態は約24時間周期で振動した。この周期は温度補償されており、突然変異体のタンパク質は変異体のリズムと同じ周期のリズムを示した。

1万分の1程度にしかならず、酵素としては壊れていると考えるべきレベルで、普通であれば測定を諦めるどころです。しかし我々は非常にゆっくりした振動を扱っているため、長時間根気強く測定することは慣れていました。測って見ると2つの驚くべき性質が明らかになりました。まず驚いたことは、ほとんどゼロでもその活性は大変安定で温度に左右されないことです。大変理解し難かった温度補償という現象を支えていたのは、たった1つの「壊れかけ」の酵素だったのです。さらに驚いたことは、異なる周期の突然変異のKaiCタンパク質をつかって調べると、ATPase活性が高いKaiCだと時計は速く進み、低いと遅く進んだことです。KaiCタンパク質時計は、ATPをゼンマイに、KaiCのATPaseを振り子として動いていたのです。KaiCのATPase活性は、転写翻訳モデルでは説明することが絶望的であった生物時計の周期決定機構とその温度補償性の両方を説明する重要な鍵を与えてくれたのです。

大切なことはこの2つの性質がKaiCのみの性質であることです。ですからKaiCのATPase活性という酵素反応が、2つのユニークな性質を満たすと考えざるを得ません。多くのATPaseではATP分解により発生したエネルギーはすみやかに他の分子へ移され、多くの仕事がなされますが、KaiCの場合にはこのエネルギーは分子内歪みとして蓄積され、自身の活性を強く抑えるのではないのでしょうか(図5)。とすればこれは強い負のフィードバックになります。これが十分強くすみやかに行われれば、温度上昇により潜在的ATPase活性が強まってもブレーキも強まるので実活性は一定に保たれます。KaiCはどのようにしてそんなことを可能にしているの

ATPで時を測る

最後にお話したいことは最初に申し上げた24時間の謎について、シアノバクテリアのKaiCが何を教えてくれたかです。結論から先に申し上げれば、KaiCによるATPの分解*3が時を刻む最も基本的な素過程ではないか、ということです。実はKaiCタンパク質時計の主役であるKaiCはATP分解酵素(ATPase)です。実際にKaiCタンパク質時計にはATPが不可欠です。タンパク質時計のATP分解を調べると、その活性の低さにもう一度驚かされることになりました。1つのKaiCは一日に16個のATPを分解するだけです。これはそれまで知られていた最も活性の弱い酵素の

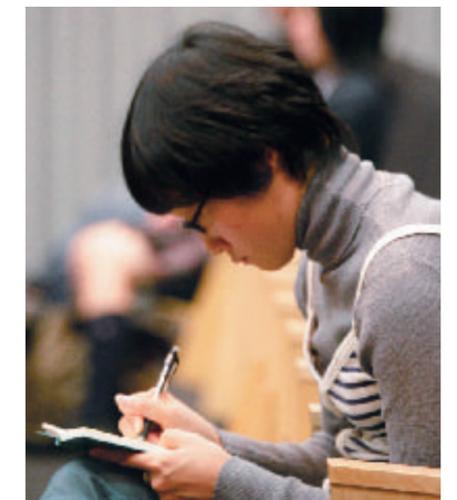


図5 KaiCのATPase活性とその温度補償の仮説

KaiCによりATPが分解されると得られたエネルギーはKaiCのなかに蓄えられ、ATPase反応を強く抑制する。この負のフィードバックがKaiCの温度補償性を支えていると考えられる。

でしょうか。その答えはおそらく生物時計研究の最終解答となりますが、現在はまったくわかっていません。それが得られるためにはKaiCタンパク質のダイナミックで高精度な構造解析が不可欠となります。これは大変困難な作業ですが、KaiCタンパク質の原子構造の中に、これこそ時計のからくりだと、我々が感動するであろう答えがかくされているはず。これはタンパク質による情報処理という新たな視点を拓くものになるでしょう。

*2 タンパク質の中には特定のアミノ酸にリン酸基が結合したものが多く、これをタンパク質のリン酸化という。このリン酸基は特殊な酵素によって結合させたり、解離させたりできるので、生物はしばしばリン酸化をタンパク質の機能制御に用いている。
*3 ATPはアデノシン3リン酸とよばれる化合物で、生体内ではいろいろな生化学反応のエネルギー源として用いられる。ATPaseはこのATPを加水分解して、ADPとリン酸にする酵素。この際に放出されたエネルギーが、多くの場合、他の生体反応に利用される。



サンゴ骨格から古気候を読み解く

井龍康文 地球環境科学専攻教授

記録の空白をうめる造礁サンゴ

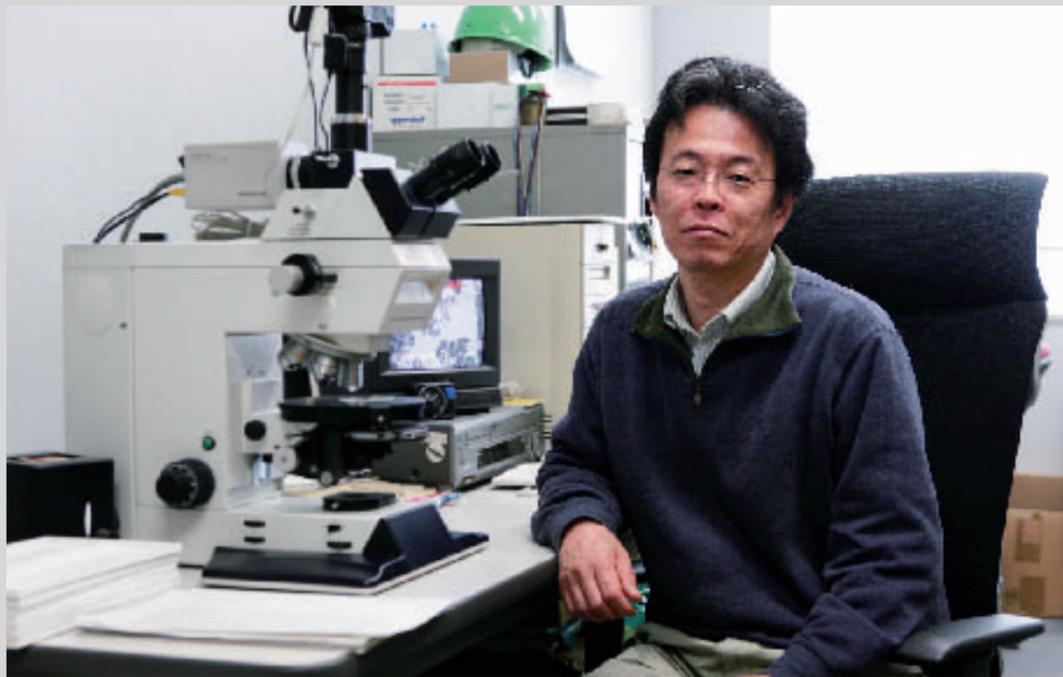
近年、異常気象による大規模災害が多発しているといわれている。しかし、私たちが直面している「異常気象」が、本当に「異常」なものかを適切に判断し、地球環境の将来像を正確に予測するためには、気候変動のメカニズムを理解するだけでなく、測器記録のない過去にまで遡って気候の変遷を明らかにする必要がある。

そのような異常気象を地球規模で引き起こす典型例としてENSO(エルニーニョ・南方振動)^{*1}が挙げられる。過去のENSOに関しては、樹木の年輪や古文書の研究から陸域において数多くの記録が得られているが、海域(とくに

低緯度域)における長期間のデータが不足している。このデータの空白域を埋める優れた情報源として、熱帯・亜熱帯の浅海域に広く生息する造礁サンゴを挙げることができる(図1)。造礁サンゴは1年間に約0.5~2cm成長し、その際に骨格には木の年輪のような成長バンドが形成される。また、その骨格の伸長さ、密度、化学組成・同位体組成(金属元素濃度や炭素・酸素同位体比)には成育時の生息環境の変化が記録される。したがって、直径が数メートルを越えるサンゴ群体を研究すれば、過去数百年間の海洋環境変動を詳細に復元することができる。



図1 造礁サンゴのサンプリング
サンプリングの様子および採取されたサンゴのサンプル。
写真はサイパン島のもの。



Yasufumi Iryu

1958年鹿児島県川内市(現薩摩川内市)生まれ。1987年東北大学大学院理学系研究科博士課程修了。東北大学大学院理学研究科助手、助教授、准教授を経て、2008年より現職。専門は、炭酸塩堆積学・地球化学。

研究フィールドとしてのグアム島

私たちは、西太平洋低緯度域に位置するグアム島で採取した造礁サンゴの骨格コア試料(1787年~2000年に形成された骨格)を用いて、過去200年間の古海洋環境の復元に取り組んだ。グアム島の造礁サンゴに着目した第一の理由は、この海域に存在する西太平洋暖水塊が地球上で最大の熱の貯蔵庫であり、その大きさの変化や挙動がENSOの規模や持続期間等と密接に関連するため、この海域での古海洋環境研究がENSOの実態解明に重要な情報をもたらすと考えられるためである。第二に、造礁サンゴの骨格記録からENSO履歴(発生回数・規模・周期変動)を復元した研究例が西太平洋では少なく、古海洋環境記録の空白域になっていた。これまで研究が少なかったのは、西太平洋低緯度域における数年スケールの海水温変化が中央~東太平洋低緯度域に比べて小さく、過去のENSOを捉えにくかったためである。

過去数百年間の環境を描き出す

私たちの研究チームは、造礁サンゴの炭素・酸素同位体比を詳細に(1年あたり12~24試料)

測定し、1980~2000年の測器観測による気象・海洋データとの関係を解析した。その結果、この造礁サンゴの酸素同位体比は海水の酸素同位体比と水温の変化を反映していることがわかった。海水の酸素同位体比は塩分と相関をもつため、ENSOに伴うグアム島付近の海水温と塩分の変化が記録されていることになる。次に、1980年以前に形成された骨格の同位体比分析を行い、過去200年間の水温と塩分のデータ(1年あたり12試料)を得た。このデータの解析を行った結果、この造礁サンゴには、エルニーニョが46回、ラニーニャが53回記録されていること、また、ENSOの周期は一定ではなく3~7年の間で変化してきたことが明らかになった(図2)。さらに、この海域では15~45年の周期で温暖な時期と寒冷な時期が繰り返しており、これは太平洋十年規模変動^{*2}といわれる気候イベントに対応していると考えられる。さらに、18世紀末から現在にかけて、この海域の海水温が0.75℃上昇し、塩分は0.85減少したことが示された。この長期トレンドは西太平洋暖水塊の拡大もしくは産業革命以降の長期

温暖化傾向によるものと推定される。このように造礁サンゴは過去の環境を記録した優れた古文書として非常に有用であり、今後、世界各地の骨格記録を網羅的に解析することにより、過去数百年間の熱帯~亜熱帯海域の海洋環境変動を高精度かつ高解像度で描き出すことができると期待される。

最後に、ここで紹介した研究には、浅海竜司博士(琉球大学理学部)が大きな貢献を果たしたことを付記する。

*1 ENSO(エルニーニョ・南方振動)

エルニーニョおよびそれと密接に関連した現象である南方振動の総称。エルニーニョは東太平洋の赤道付近で海水の温度が上昇する現象(ラニーニャとは、エルニーニョ現象と逆に東太平洋の赤道付近で海水の温度が低下する現象である)。西太平洋と中央太平洋で地上気圧がシーソーのように東西振動する現象を南方振動とよぶ。

*2 太平洋十年規模変動

気候レジームシフト(気候がある状態から他の状態へ急激なシフトを伴って変化する現象)の代表例。北太平洋中央部の水温と赤道域中部~東部・北西岸海域の水温が数十年スケールでシーソーのように変動し、それに伴ってアリューシャン低気圧や偏西風の強さが変化する現象。

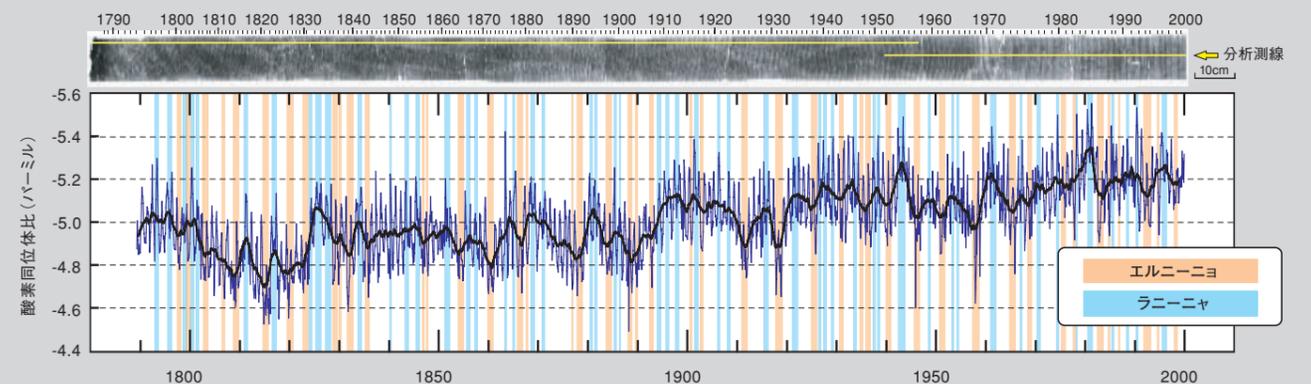


図2 グアム島で採取された造礁サンゴの軟X線写真画像と酸素同位体比変動

グアム島で採取された造礁サンゴの軟X線写真画像(上図)には年輪が明瞭に認められる。分析測線に沿って測定した酸素同位体比(下図。青は月毎の値、黒は25ヵ月移動平均値)は、明瞭な季節変化、数年~数十年スケールの変化、長期温暖化の傾向を示す。この造礁サンゴに刻まれたENSO記録を復元したところ、グアム島周辺では過去210年間に46回のエルニーニョと53回のラニーニャが発生していたことが明らかになった。

物理の面白さと奥深さを「魅せる」講義

【物性物理学Ⅱ／3年後期】—— 佐藤憲昭 物質物理学専攻教授

「私は皆さんに、物理の面白さを伝えたいのです」。先生は、穏やかな表情で、私たちに真剣なまなざしを向けた。私が受講したのは佐藤憲昭先生による「物性物理学Ⅱ」の最終回。ノーベル物理学賞で話題となった「自発的対称性の破れ」を磁性体に関して解説されると聞き、取材依頼を受けてからとても楽しみにしていた。

講義は前回の復習から始まった。原子レベルでの磁性をおさらいした後、ヘルムホルツの自由エネルギーの式を用いて、温度変化による磁性状態の変化、相転移へとテンポ良く展開されていく。

絶対温度零の時、すべてのスピンの方向がそろい強磁性体ができる。逆に絶対温度を無限大にすると常磁性状態、つまり磁石でなくなる。ここで先生はテレビ番組のクイズを引用された。「こんなクイズがありました。磁石をバーナーで加熱するとどうなるでしょう。これはまさに今の説明で磁石でなくなるわけです。芸能人で答えられた人はいなかったですね」。

先生の講義は、わかりやすく面白。ペースは常にシンプルで、何より丁寧だ。私は、先生の世界に惹き込まれた。

「キュリー温度を超えると、磁石は常磁性体と

なり回転させても区別できない。これを『回転対称性をもつ』といいます。一方、回転させると区別できる時は『回転対称性が破れている』というのです。言葉は難しいけれどそんなに難しいことではないのですよ」。

さらに話は「自発的対称性の破れ」へと拡張され、磁性体の自発的対称性の破れのアイデアを素粒子論に導入した南部-ゴールドストーンモードの励起まで進展した。宇宙レベルから日常的なレベルまで、相転移は非常に一般的に理解される。物理現象の法則の美しさをまさに実感した。

講義の最後は、次のようなメッセージで締めくくられた。「私は、難解なディテールで、物性物理を嫌いになってほしくない。まずはわかった気持ちになってもらって、物理学の面白さを伝えたい。そして、その後、君たちがもう一度勉強した時に、厳密に考えたときの疑問を解決して欲しいのです」。

人類が積み上げてきた発見の源にある、サイエンスに対する興味と好奇心、それを先生は非常に大切にされている。講義後、質問に向かう学生が絶えなかったのは、そうした先生の思いが伝わったことの証明だろう。物理の素晴らしさに魅せられた講義であった。



◎取材・文
朝日友香 Yuka Asahi
(地球環境科学専攻博士前期課程1年)



Noriaki Sato

1955年宮城県生まれ。1984年理学博士(東北大学)。名古屋大学、東北大学、マックスプランク研究所を経て1999年名古屋大学大学院理学研究科助教授。2007年より現職。専門は、物性とくに磁性の物理学。磁性体を舞台上に展開される奇妙な現象・ふるまいの発見および解明に意欲を燃やす。

物理学を数学で考える

【数理物理学Ⅳ／4年後期】—— 菅野浩明 多元数理科学専攻教授

朝10時半。博士課程に入ってから講義というものを受けることがなくなった。久しぶりに講義を受けるということで内心ちょっと楽しみであった。

今日は、菅野先生の数理物理学を受講する。数理物理学とは端的にいえば、物理学の内容を数学的にしたものだ。具体的には、物理学で出てくる数学をより厳密にしたり、数学的な問題を解く方法などを扱う。

この日の内容は、物理学の3年生が量子力学の講義で勉強する調和振動子(単振り子)の量子化に関するものであった。数理学科では物理への応用にどれだけの人が興味をもっているのかな、と思いつつ教室に入ると、人があまりいない。あれれ、あんまり興味がなさか。ちょっと残念に思っていたが、講義が始まる時にはけっこうな人数になっておりちょっと安心。数理学科の人は純粋な数学のみに興味があるわけではないようだ。

講義が始まると、前回のまとめを復習してくれて、前回の講義に出ていない私にも内容がよくわかった。そして、量子力学の基本的な方程式であるシュレディンガー方程式を使って計算する。3年生の時に計算したなあと思いながらノートを取る。次は調和振動子を生成・消滅作用素を

用いた手法を用いて解く。これもやりました。懐かしいなと思いながらノートを取っていく。こまではよく見知った内容だ。しかしそのあと、菅野先生は次のような問いを發した。「調和振動子の解をシュレディンガー方程式を使った方法と生成・消滅作用素を用いた方法で求め、両者が等価であることを示しました。しかし、他に解はないのでしょうか。ああ、そういえば考えたことなかったな。ここからが数学者の本領発揮だ。ハイゼンベルグ代数の表現論とよばれる数学を用いて他に調和振動子を表すことのできる方法はないことを示していった」。

この講義を受講して感じたことは、数学を専攻している人には物理を知るきっかけに、物理を専攻している人には数学を知るきっかけになる素晴らしい講義だということだ。そして私は、昨年ノーベル賞を受賞された益川先生の言葉をさらに実感した。

「自然には理由がある」。



◎取材・文
竹井一陽 Kazuaki Takei
(素粒子宇宙物理学専攻博士後期課程1年)



Hiroaki Kanno

1960年生まれ。京都大学理学部卒、京都大学理学博士(1989)。理論物理学国際センター博士研究員、仁科記念財団海外派遣研究員等を経て、1993年広島大学大学院理学研究科助手。同助教授を経て2001年多元数理科学研究科助教授。2004年より現職。

有機エレクトロニクスを究める

— 関一彦先生が残されたもの

阿波賀邦夫 物質科学国際研究センター教授

2008年6月30日、理学研究科、関一彦教授が60歳の若さで他界された。

関先生は、学生時代より、有機分子を対象とするさまざまな「電子分光法」の発展に尽力され、多くの物質の電子構造を明らかにされた。

ここ10数年ほどは、金属と有機物の境界（界面）の電子構造の解明に精力的に取り組まれ、近年急速な発展を遂げた有機エレクトロニクス研究の礎となる成果を上げられている。

電子分光という基礎研究によって、応用指向の強いエレクトロニクス分野に強いインパクトを与え、基礎と応用が絡み合った国際的な研究プロジェクトを推進されていた矢先のことで、

この分野の研究リーダーを失った喪失感是国内外において極めて大きい。

本稿では、理学研究の理想的モデルとでもいふべき

関先生のご業績を振り返り、その足跡をたどることにする。



関
一
彦

東京大学理学部化学科卒業（1970年）、同理学系研究科化学専攻修了（1975年）、理学博士。学振奨励研究員をへて分子物性化学部門助手（1978～1986年）。その後広島大学理学部物性学科助教授（1986年）、名古屋大学理学部化学科教授（1991年）、同物質科学国際研究センター教授（1998年）をへて2005年より同大学院理学研究科教授。この間、2006～2007年には副研究科長に任ぜられる。専門は有機固体・薄膜・界面の物性化学。21世紀COE「分子機能の解明と創造」拠点リーダー（2002～2007年）、学振先端研究拠点事業「有機エレクトロニクス関連薄膜・界面の電子構造と電子過程」日本側コーディネーター（2007～2008年）などを務める。温厚さと高潔さを兼ね備えたご性格で、さまざまな研究教育に対する見識の高さと献身的な姿勢から、分野を超え、また世代を超えて多くの方々から慕われていた。2008年6月30日ご逝去。享年60歳。

電子分光とは何か

電子分光とは、物質から積極的に電子を叩き出したり、あるいは逆に物質に電子を打ち込む過程で生じる電子や光の放出を検出し、物質中で電子がもつエネルギーやその分布を知る手法で、物質の構造や反応に関する基本的な情報が得られる。その歴史は古く、光照射によって金属表面から電子が放出される現象の発見は19世紀にまで遡る。これは、1905年アインシュタインによって「光電効果」として説明されたが、電子分光が化学あるいは分子科学の領域に入ってきたのは1960年代以降である。これは、電子のもつエネルギー分布の分析法などの技術的発展とともに、有機半導体*1の発見や分子分光学の発展に呼応する動きでもあった。そして今、関先生のご業績を科学的に位置づけるとすれば、ともかく有機分子の分光データが取れるといった黎明期を脱却して、精密計測手法としての分子電子分光法を確立し、この手法がもっとも真価を発揮する分野に応用した、ということができる。

手法を磨く

関先生のご研究の一貫した特長は、常に計測法の発展に注力され、さまざまな測定装置を新しく開発された点にある。有機物を対象としたPenningイオン化電子分光や逆光電子分光法などの電子分光用の装置開発のほか、ケルビン法の利用、種々の有機薄膜試料作製法の開発など、多くの手法や装置を開発された。最新の成果の1つが、真空中・気体中の両方でイオン化エネルギー*2を測ることのできる「光電子収量分光装置」（図1）の開発である。有機半導体の

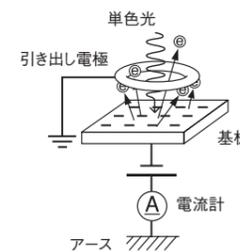


図1 光電子収量分光装置の外観図

Aは試料に照射する特定の波長の可視・紫外光を発生する機構。Bは測定を行う超高真空槽。光電子収量は、光電子の放出に伴う微小電流を捉える事で測定される。光電子収量の照射光の波長依存性から、試料のイオン化エネルギーを決定することができる。

電気的な性質が周囲の気体によって大きく影響されるという化学者の日常体験を、電子分光法によって定量的に解明することにはじめて成功した。世界に1台しかない装置を開発し、世界に先駆けてユニークなデータを取る、という物理化学の理想を有言実践されたのが関先生で、残された手法は今後多くの研究者によって受け継がれ、発展していくことだろう。

解けた謎—界面電気二重層の発見

関先生はご研究の初期に、さまざまな分子性の固体について光電子分光の計測が行われた。ここで得られたイオン化エネルギーなどの情報は、現在の有機電子物性研究の発展を支える極めて貴重なデータベースとなった。

研究中期からは、電子分光法の手法を駆使して、有機物と金属電極がつくる界面の電子構造の研究に精力的に取り組まれた。有機半導体を応用した有機エレクトロニクスが脚光を浴びているが、当時、金属電極に挟まれた有機半導体がn型とp型*3のどちらの性質をもつかといった極めて基本的な問題すら未解決であった。関先生は光電子分光法によって、有機分子と金属とが接した面で、正・負電荷のシートが平行に向かい合う「電気二重層」が自発的に形成され、これによって有機層と金属層のエネルギーの相対関係が大きく変化することを発見した。電気二重層を考慮することで、用いた有機半導体がn型、p型どちらとなるかもごく自然に説明できることを見出した。さらに最近、関先生は、光電子分光法とケルビン法という物質表面の電位の測定法を併用し、有機半導

体と金属とが接した界面付近で電子の取り得るエネルギー状態を詳しく解析した。そして、有機半導体でもわずかな不純物を加えることで、このエネルギー状態を制御できることを発見した。これによって有機半導体の電気的な特性を飛躍的に向上させることにも成功している。

有機エレクトロニクスの分野では、いまや上記の成果は新しい常識として受け入れられている。事実、関グループの研究成果をまとめた総説は、他の論文での引用回数が800回を超え、この分野の研究者・技術者にとっての定番となっている。関先生が残された光電子分光の新しい手法や研究業績が、今後、有機エレクトロニクスなどの研究分野をますます発展させることは疑いない。また関先生は生前、国際的な人材育成にも大変な情熱をもたれていた。関先生の薫陶を受けた学生や若手研究者が、日本だけでなく世界の有機エレクトロニクスを進展させ、また新しい分野を切り開いていくことだろう。

*1 有機半導体
通常の半導体（トランジスタやダイオード）はケイ素やゲルマニウムなどを中心とした無機物質で構成される。これに対し、炭素骨格をもつ有機化合物を利用した半導体を有機半導体とよぶ。

*2 イオン化エネルギー
分子や原子などから、電子1個を引きはがすのに必要なエネルギー。反応に関わる可能性の最も高い電子の状態を知るための基本的な値。

*3 n型半導体、p型半導体
半導体のうち、負電荷を運べるものをn型、正電荷を運べるものをp型とよぶ。ケイ素をベースにする半導体では、リンやホウ素など特定の不純物をわずかに加えることでn型、p型いずれかの性質をもたせることができる。両者を適切に配置することで、トランジスタをつくることできる。

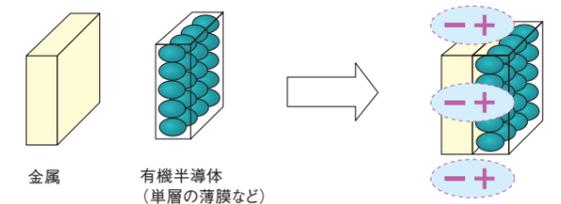


図2 界面電気二重層の形成

左図のような金属と有機半導体を貼り合わせた場合、右図に示すように金属と有機分子との界面には片方に負の電荷、反対側に正の電荷が集まった、電気二重層が形成される。これを考慮すれば、有機半導体のもつp型、n型特性を、自然に理解することができる。

キャンパス通信

タウ・レプトン物理研究センター発足

附属タウ・レプトン物理研究センター長
大島隆義 (Takayoshi Ohshima)

理学研究科の全面的支援のもと、2008年10月、「タウ・レプトン物理研究センター」を発足させることができた。本センターは、本学の特徴である世界的に高水準の素粒子研究をさらに飛躍的に展開させることを通して、本学の研究ならびに教育の発展に貢献する。

クォークとレプトンの素粒子を世代でグループ分けし、素粒子の現象を統一的に扱う理論は、本学の素粒子理論グループによって坂田模型として誕生し、小林・益川理論、三田一郎名古屋大学名誉教授のBファクトリー提唱を経て発展した。小林・益川理論の実験的検証は、本学の高エネルギー素粒子実験グループが活躍するBファクトリー国際共同実験(Belle実験)にて達成され、これらの理論・実験の連携研究が小林・益川両氏のノーベル物理学賞に大きく貢献したといえる。

こうした背景の中、Belle実験のタウ・レプトンやB中間子物理研究は、小林・益川理論を超える「新しい物理」の探索が期待できる実験感度に到達している。とくに、タウ・レプトンは、電子の仲間でありながら約4000倍もの重い質量をもつ素粒子である。このタウ・レプトンの崩壊に現れる「新しい物理」の探索は、本学が世界をリードしている。そして今、欧州でスタートした世界最高エネルギーLHC-ATLAS実験で、ヒッグス粒子や超対称性粒子とよばれる新しい素粒子の直接検出をも射程内に捉える段階に突入した。

素粒子物理の革命期を目前にひかえ、本センターでは国内外の二大国際共同実験(Belle、ATLAS)を強力に推進し、加えて、理論と実験グループの連携を一層強化させ、国内外の素粒子研究の結節点として役割を担う。また、最先端の研究環境が最高の教育の場を提供するであろう。さらに、最先端の素粒子研究の情報発信拠点としての機能も果たしていく所存である。



2008年10月10日に開催されたタウ・レプトン物理研究センター主催のイベント「小林・益川の理論とは？」での講演風景

グローバルCOE

宇宙基礎原理の探求

素粒子宇宙物理学専攻教授
杉山直 (Naoshi Sugiyama)

平成20年度から、素粒子宇宙物理学専攻と太陽地球環境研究所を中心とした表記グローバルCOE(GCOE)プログラムが始まった。これまで、GCOEには名古屋大学全体で6つ、理学で3つが採択されている。

本拠点は、素粒子から太陽系、そして宇宙全体までを俯瞰する国際的教育研究拠点の設立をめざす。教育では、宇宙を理解するための包括的な教育体制を構築し、新たな研究領域を創成する人材を育成する。研究では、分野間融合テーマを設定して研究グループを組織し、また先鋭的研究も同時に推進していく。多数の国際拠点と国際共同研究体制が基盤となる。また、オックスフォード大学など海外5大学と包括的な協力協定を結び、共同教育研究体制を進めている。

具体的には、教育面では、確固とした基礎と広い視野の獲得のため、カリキュラムを見直し、宇宙を学ぶ上で必要な知識を確実に身につけるための科目群、物理学MINIMAを用意した。チューター制度やものづくり実習など、学生個々に対する手厚い指導プログラム、自発的研究推進能力涵養のための、若手主導分野横断セミナー、リトリート合宿、優れた研究提案に対する資金援助などを進めている。国際性を養うため、海外協力大学院に数カ月単位で学生を派遣、また英語力強化のための授業も実施している。

研究面では、粒子加速、暗黒物質・暗黒エネルギー、物質の起源、星間物質と構造形成といった具体的な分野間横断研究テーマを設定し、分野間の連携を推進していく。

グローバルな宇宙教育研究拠点構築を目指し、拠点推進メンバー一丸となって、プログラムの実施に邁進しているところである。



2009年2月17日～21日に開催されたウィンタースクールの様子

ノーベル賞
授賞式に参列して

名古屋大学広報室長
物質科学国際研究センター教授
渡辺芳人 (Yoshihito Watanabe)

ひょんなことからノーベル賞の授賞式に参列する機会が巡ってきた。その吉報は、益川敏英先生が授賞式に参加できる切符を3枚、名古屋大学にプレゼントして下さったことに端を発している。ともあれ、フランクフルト経由でストックホルムに到着したのは、ノーベル賞講演の前日(12月7日)の夜だった。ノーベル賞講演は朝9時過ぎに始まるというので、8時前には会場(ストックホルム大学)に到着した。この時間でも日の出前ということで、外は薄暗く、陰鬱な雰囲気が漂っていた。開場が講演の10分程度前だったので、ホールのドア付近はあふれる人たちでごった返すようであった。

物理学賞講演の二番手として、小林誠先生がちょっと緊張した面持ちで登壇され、挨拶に引き続き、受賞対象の研究が名古屋大学で始められたものであることを最初に指摘し、坂田昌一先生の業績にもふれられながら、約30分の講演を行われた。引き続き、益川先生の講演に移り、開口一番「I'm sorry, I can't speak English.」と宣言され、日本語による講演が始まった。スクリーンには、講演の逐次訳が英語で表示されるという、一風変わったご講演となったが、愉快な話題では会場から笑い声が聞かれるなど、和やかな雰囲気が講演会場を包んでいたのが印象的であった。実は、講演が始まったときに、益川先生が原稿を一生懸命読んでいらっしゃるの、「日本語の講演なので、原稿なしで講演されればよいのに」と感じていた。しかし、上述のようにスクリーンに逐次訳が映し出されるので、脱線するわけにはいかなかったというのが本当の理由だろうと納得した。

約1時間半の休憩を挟んで、化学賞の講演へと移り、トップバッターの下村脩先生は、登壇するなり、おもむろにGFP入りの試験管を取り出し、紫外光を当てて緑色に輝くGFPのデモで講演を始められた。ご家族全員でオワンクラゲを採取に行ったときの集合写真も使いながら、非常にわかりやすく講演をまとめられていた。

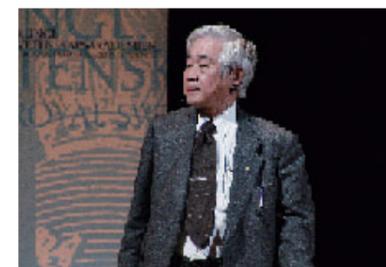
ノーベル賞受賞者は、いっぱい詰まった毎日のスケジュールを必死にこなしているように見受けられた。80歳とご高齢な下村先生には相当きつかったようで、キャンセルできるイベント中はほとんどホテルでお休みになっていたと奥様からは伺っている。

メインイベントの授賞式はさすがに華やかで、出席者は燕尾服か民族服の着用が求められる格式の高いものだった。平野眞一総長、近藤孝男研究科長、山脇幸一教授の燕尾服姿は、良くお似合いで、威風堂々とはこのことかと思ってしまう。かく申す私は、バルコニーの後方席であったため、ダークスーツで出席しても良いとお話で、ほっと胸をなで下ろした次第だ。

テレビニュースなどで、愉快なお話をされる益川先生が話題になっているが、私が写真を撮る際に、「益川先生、1枚お願いします」と一声をおかけしてからカメラを構えると、必ず直立不動の姿勢をとられたのが非常に印象的だった。益川先生は、本当は生真面目な先生であることがよくわかった。なお、御三名の先生方は、2009年3月に名古屋大学特別教授となられた。



小林誠教授



益川敏英教授



下村脩教授