

## 研究会・学会スケジュール

### 第213回アメリカ電気化学会 「フラーレンとナノチューブに関するシンポジウム」

開催日：2008年5月18日(日)～23日(金)  
開催場所：フェニックス(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@cc.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2482

### 日本地球惑星科学連合2008年大会

開催日：2008年5月25日(日)～30日(金)  
開催場所：幕張メッセ国際会議場(千葉県)  
主催：日本地球惑星科学連合  
問い合わせ：鷺谷 威 環境学研究所 教授  
sagiya@seis.nagoya-u.ac.jp / 052-789-3043

### 公開講演会「光合成をささえる多様な分子機構」と 日本光合成研究会2008年度年会

開催日：2008年5月30日(金)～31日(土)  
開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館  
主催：日本光合成研究会  
問い合わせ：伊藤 繁 理学研究科 教授  
itoh@bio.phys.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2883

### 第15回名古屋大学理学懇話会「地球温暖化に挑む」

開催日：2008年6月21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：安成哲三 地球水循環研究センター 教授  
高野雅夫 環境学研究所 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8回名古屋国際数学コンファレンス Combinatorics and Representation Theory (組み合わせ論と表現論)

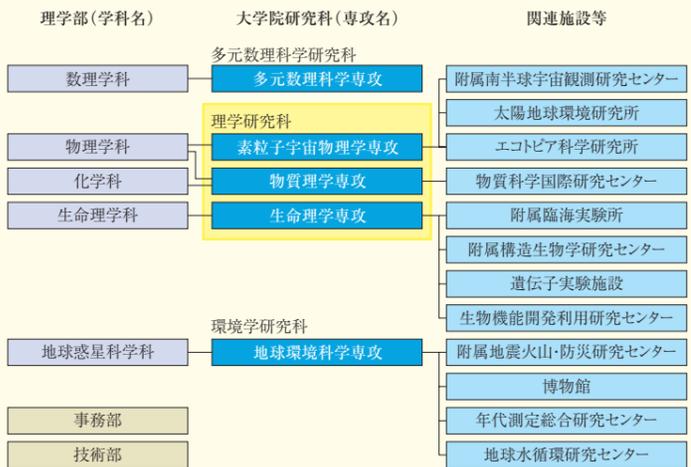
開催日：2008年9月1日(月)～5日(金)  
開催場所：名古屋大学理学部1号館509号室  
主催：多元数理科学研究科  
問い合わせ：岡田聡一 多元数理科学研究科 教授  
okada@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-5596  
http://www.math.nagoya-u.ac.jp/ja/research/

### 日本遺伝学会第80回大会

開催日：2008年9月3日(水)～5日(金)  
開催場所：名古屋大学IB電子情報館  
主催：日本遺伝学会第80回大会組織委員会および日本遺伝学会  
問い合わせ：森 郁恵 理学研究科 教授  
m46920a@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp / 052-789-4560

## 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

編集に参加して2号目になる。一般読者を想定した作業を通じて、改めて名古屋大学理学部・理学研究科をながめてみると、ここはさまざまな色や味や香りのする「智のビュッフェ (Buffet)」のように思えてくる。日頃、自分の専門分野に没頭している限りは、おいしいながらも時には単調に感じる味だが、目線を少しずらせば、新鮮で刺激的なものがここにはある。

たとえば、生命分野の私からみると遺伝情報の記録媒体であるDNAは、パソコンのハードディスクみたいなもので、情報を読み取ったり、書き込んだりするばかりで、その合理性に感心しつつも、他の用途に使えらると思ふことはまずない。しかし、それが今回特集した「ナノの世界の匠」の手にかかると、本来の用途はお構いなしに、「よくできた素材だから生かさなければもったいない」ことになり、DNAが「電線」に変身する。同じ分子をながめながら、専門によって、ここまで違った見方ができることは痛快だ。また、電池や磁石の原理は金属特有の性質に基づくイメージがあるが、必要な性質さえ持ち合わせていれば、有機物だって金属の代わりになり、金属とは全然ちがう、柔らかくかつ軽い「もの」がつけられるはずだという発想にも、柔軟な思考によって常識が覆されていく心地よさがある。私の感じた新鮮な驚きがみなさんにも伝われば幸いである。(杉山伸)

## 表紙説明

最近よく耳にするナノとは、どのくらいの大きさなのか。1ナノメートルを、約2ミリメートルのゴマにたとえると、1メートルは2000キロメートル。北海道から九州までの距離とほぼ同じとなる。こんな極小の世界でも可能な「ものづくり」とは。



## 理 philosophia — No.14 April 2008 2008年4月1日発行

広報委員 近藤孝男(研究科長)  
國枝秀世(副研究科長)  
大島隆義(評議員)  
栗田英資(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)  
斎藤 進(化学科)  
杉山 伸(生命理学科)  
舩本 寛(生命理学科)  
鷺谷 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2008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/

# 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] April 2008

14

philosophia



## 特集

### 「ナノの世界のものづくり」

- 04 — 有機分子でつくる柔らかい磁石と電池◇阿波賀邦夫
- 08 — 生体分子にヒントをもらうものづくり◇田中健太郎
- 02 — 時を語るもの〈石崎宏矩博士〉◇溝口 明
- 03 — 理のエッセイ◇浪川幸彦
- 12 — 理の先端をいく◇東山哲也／川村友美
- 16 — 講義探検◇臨海実習／原子核物理学Ⅱ
- 18 — 理学部交差点



## 石崎宏矩博士— 絵筆を持った昆虫ホルモン学者

蝶や蛾の幼虫は、十分に成長するとからだを大改造して蛹、成虫へと変化する。変態とよばれるこのプロセスは脳からの前胸腺刺激ホルモン（PTTH）の分泌が引き金となって起こる。1960年にPTTHの構造決定を目指し研究を開始した石崎宏矩博士は、ライバルが精製の困難さから次々と研究を断念する中、30年間におよぶ苦闘の末、1990年、ついにその全構造を明らかにした。その数年前には昆虫インスリンの構造を世界に先駆けて決定する快挙も成し遂げている。

石崎博士の経歴は一風変わっている。はじめ画家になることを志し、京都市立美術専門学校（現京都市立芸術大学）洋画科を卒業した博士は、その後、京都大学に入学し生物学の世界に入った。名古屋大学には1973年、助教授として着任。研究のかた

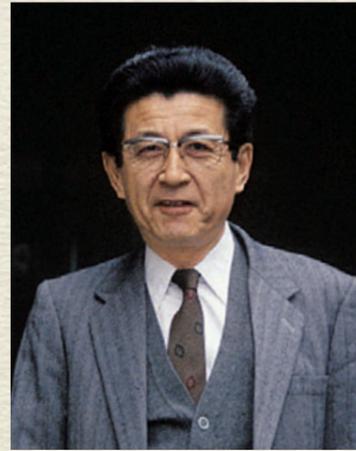
わら、水彩画やドライポイントの制作にもいそしみ、何度か個展も開いている。もう1つの趣味である昆虫採集も、時代により、シャクガ、カミキリ、キノコバエと対象が変わったが、研究の疲れを癒す大事な清涼剤であったようだ。（溝口明 生命理学専攻准教授）



写真(上) 蚕種会社から譲り受けたカイコの雄蛾  
写真(右) カイコ蛾頭部の採取



*Dr. Ishigaki 2002*



いしざきひろのり  
石崎宏矩(1930—)  
名古屋大学名誉教授。日本学士院賞(1992)



石崎宏矩博士の近著、  
名古屋大学出版会 2006年発行

### ◆写真の説明

日本の蚕糸業がまだ盛んであった1970年代までは、蚕種(卵)製造業者から大量の使用済み蚕の雄蛾を無償で譲り受けることができ、その頭部がPTTH精製の材料となった。いったん冷凍し、冷凍倉庫で保管していた蛾から頭部を切断する作業は、農閑期の農家の主婦を雇って行われた。こうして集められた蛾頭部は、ピーク時には年間500万個、通算では3000万個に達した。PTTHの精製は最初は独力で、名古屋大学着任直前の1972年からは東京大学農学部田村三郎博士\*1(退官後は後任の鈴木昭憲博士\*2)との共同で進められた。東京大学が精製作業を、名古屋大学が活性検定作業を分担した。東京大学から送られてくる大量のサンプルの活性検定には膨大な数の除脳蛹が必要で、その作製には多大な労力を要した。この共同研究はPTTHと蚕インスリンの構造決定のかたちで実を結び、その功績により1992年、鈴木昭憲博士とともに日本学士院賞を受賞した。最近発行された自伝的研究小史「サナギから蛾へ」は、当時の研究の息吹を伝える名著である。絵画の近作「貝と羽毛」には博士のやさしいお人柄がしのばれる。

\*1 田村三郎(1917—) 東京大学名誉教授  
\*2 鈴木昭憲(1935—) 東京大学名誉教授

### ◎理のエッセイ

## 読み書きそろばん、リテラシー

浪川幸彦 多元数理科学専攻教授



教育問題に関連して、近年「リテラシー(literacy)」という言葉がよく聞かれる。元来は「読み書き能力」を意味するが、昨今「科学リテラシー」などといわれる場合には、むしろ「科学的素養」とでも訳す方がぴったりする。

これは単に言葉を知っているだけではなく、文化的営みとしての科学の価値を認め、「科学的にもものを見、考える」とはどんなことかを理解し、科学の知識や考え方を個人あるいは社会生活の中で応用できることを意味する。

昨年末にOECDの「PISA2006国際学力調査」の結果が出て話題になった。残念ながらマスコミは日本の順位しか問題にしない。しかしこの調査はまず「科学リテラシー」(および「数学リテラシー」「読解リテラシー」)は何かを明確に規定した上で、そのどこに問題があるかを調査しているのである。

これを含む各種国際学力調査の結果明らかになった日本の問題点は大きくいって2つある。1つは科学のもつ価値・効用の理解が世界で最低レベルだということである。これはPISA調査でも同様の結果が出たが、「理科が日常生活に重要ではない」とする生徒が半数をはるかに超える(IEA調査)事実にも最も端的に現れている。

もう1つは「読解リテラシー」つまりテキストを理解し、利用していくという、本来の意味での「読み書き」能力がOECD平均レベル程度しかない、という事実である。「科学リテラシー」が曲がりなりにもなおトップレベルであるのに比べ、大きく見劣りする。これは前回2003年のPISA調査で明らかになり、今回も改善が見られない。

「数学リテラシー」は両者の中間になる。数学が1つの言葉であり、科学はその言葉として数学を用いていることから、この結果はうなずける。

いわゆる「学力低下」問題を最初に提起したのは数学を含めた自然科学分野の研究者たちであったが、それは単なる知識の不足ではなく、こうした「論理的思考力」を含む言語能力の低下、あるいは文化としての科学の価値の認識不足の指摘であった。その意味で近年明らかになった日本の現状は、まさに10年前に我々が指摘した「学力低下」の姿そのものといえよう。

ただ現在のPISA国際調査にあるような具体的「リテラシー」像を当時の我々が持ち合わせておらず、指摘が抽象的一般的であったことは否めない。

遅ればせながら、日本でも北原和夫氏(国際基督教大学)を中心として日本人のもつべき科学(技術)リテラシー像の策定作業が進められ、間もなくその報告が公にされる。筆者もこれに関わっているが、日本の教育「再生」にはこうした地道な基礎作業こそが有効であると信じて、まとめのラストスパートに入っているところである。

Yukihiko Namikawa

1945年千葉県生まれ。東京大学理学部卒業、同大学院修了。理学博士(名古屋大学)。名古屋大学理学部、教養部を経て1995年より大学院多元数理科学研究科教授。2008年4月より相山女学園大学教授。専門は代数的幾何学および数学高等教育。現在は数学教育カリキュラムの理論的基礎付けおよびその具体化に取り組んでいる。

## ナノの世界のものづくり

1ナノメートル、それは1メートルの10億分の1の長さであり、水素原子1個の直径の約10倍に相当する。

このナノの世界では、物質は原子・分子といった単位で取り扱われ、ニュートン力学ではなく、量子力学の法則に従うために、私たちがふだん見ているマクロな世界では考えられないようなふるまいをする。

「ナノの世界の匠」は、ナノの世界の法則を利用して、人工的に分子や原子をナノサイズで集め、

これまで予想もできなかったようなさまざまな性質をもつ物質をつくりだす。

大きな可能性を秘めたナノの世界のものづくりについて、2人の研究者に最新の研究成果を紹介していただいた。

(2007年11月17日、第14回理学懇話会より)

## 有機分子でつくる柔らかい磁石と電池

阿波賀 邦夫 物質科学国際研究センター教授

### 有機物で磁石をつくる

本日は、硬い無機物のイメージがある「磁石」や「電池」を柔らかい有機物あるいは分子でつくる話をします。「分子でものづくりを進める化学」は、とくに日本で活発な研究分野です。井口洋夫<sup>\*1</sup>先生はそれまで絶縁体だと思われていた有機物がトランジスタ<sup>\*2</sup>のような半導体<sup>\*3</sup>として働くことを発見しました。この研究は、近年、急速に発展した有機エレクトロニクスの基礎となっています。有機物でものづくりのもう1つの潮流として、有機強磁性体研究が挙げられます。有機物で磁石をつくる研究です。私はこの分野で研究を続けてきました。

有機半導体や有機磁性体をつくるためには、分子のなかで、電気を伝えたり磁石の性質を示したりする粒子である電子が余分に存在している状態にしなければなりません。通常、分子のなかでは電子は2個ずつ対をつくって安定に存在しています。しかし、特別な場合に、不対電子とよばれる、対をつくらぬ電子をもつことがあります。とくに不対電子をもつ有機物のことを、有機ラジカルとよびます。有機ラジカル中の不対電子が、電気を伝え、また小さな磁石としてふるまうので、有機物で半導体や磁石をつくることのできるのです。

では、有機物で実際にどのように磁石をつくるのか、次にお話ししましょう。そのためには、まず、有機物上に磁石のもととなる不対電子をつくらなければなりません。有機物でおなじみの亀の

甲のかたちをしたベンゼン環を考えてみましょう。ベンゼン環に・CH<sub>2</sub>基(ここで、・は不対電子を表す。炭素のもともとの4つの不対電子のうち、2つは水素と、1つはベンゼン環と結びつき、1つ残る)を2個つけてみます。これをつける場所の位置によって、「オルト」「メタ」「パラ」とよばれる3種類の構造が違う分子をつくることができます。このなかで、オルトとパラ体は不対電子が出会って対(電子対)をつくるため、これをもたないのですが、メタ体は不対電子を2個もつのです。図1Aにはこのメタ体のいくつかの構造が記してあります。2つの電子でつくる対、すなわち電子対1つで、

炭素と炭素の間に1つの結合ができます。そして炭素と炭素の間では4つの結合をつくることができます。この図では、炭素の原子価を4、つまり結合1個をつくる電子対の片割れを腕1つとした場合、その腕の数を4に固定して、単結合と二重結合(それぞれ1本の実線と二重線で表されている)を入れかえたいくつかの構造が記してあります。この図から明らかなように、どうしてもメタ体では2個の不対電子が残ってしまうことがわかります。ですので、この例に限っていえば有機ラジカルとは、「3つの手(結合)と不対電子(結合をつくらぬ電子1個)をある炭素上にもつ有機分子」といえ

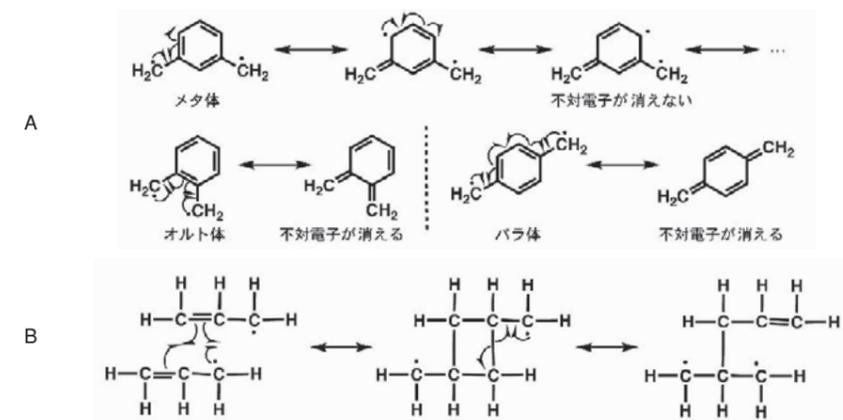


図1 有機分子上の不対電子をつくる化学的方法論  
A.分子内で・CH<sub>2</sub>基2つをベンゼン環のメタ位でつないだ場合、どのように結合を組み替えても2つの不対電子が対をつくる結合にはならない。オルト体およびパラ体では、不対電子が出会い、結合をつくる。半矢印は電子1個の移動を表す。B.分子間で2分子のアリルラジカルが結合1つ分だけずれて配置された場合、不対電子は対をつくらぬ。

るかもしれません。これは、有機分子に工夫をこらす(この場合はメタ体をつくる)ことで、不対電子が残った分子を設計できることを意味しています。このメタ位の不対電子効果を実験的にはじめて示したのが伊藤公一<sup>\*4</sup>先生です。この研究が発表されるやいなや、メタの位置だけでベンゼン環をつないだ有機ポリマーが、有機磁石のモデルとして提案されました。不対電子が対をつくらぬ、連なることで有機磁石となりえるのです。有機磁石の可能性が化学者に意識された瞬間です。

ここまでは、1分子のなかで不対電子を残す話でしたが、分子と分子の間でも不対電子を残す分子設計が可能です。たとえば、図1Bに書いたのは、アリルラジカル<sup>\*5</sup>(・CH<sub>2</sub>CH=CH<sub>2</sub>)という分子が2つ相対している様子です。アリルラジカル自身が、不対電子を1個もちます。つまり有機ラジカルです。ここで、図にあるように、アリルラジカルを2つ、C-C結合1個分だけずらして、結合させてみましょう。すると、どうやっても、2個の不対電子が残ってしまうことがわかります。一方、もし結合をずらさずにならべると、すべての炭素から4本の手がでますので、不対電子は存在しないことになります。以上のことからわかるのは、「有機ラジカルを結合1つ分ずらして相対させる」ことが、不対電子を残すために必要な設計だということです。

アリルラジカルはあくまでモデル物質で、実際には不安定ですぐに壊れてしまうために、ものづ



Kunio Awaga 1959年生まれ。1988年東京大学大学院理学系研究科単位取得退学。同年、岡崎国立共同研究機構分子科学研究所助手。1992年東京大学教養学部助教授を経て、2001年より現職。専門は物性化学。とくに分子の機能開拓に関心をもち。

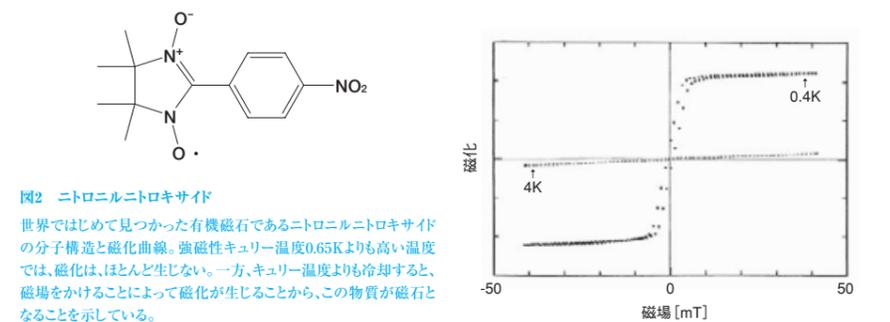


図2 ニトロニルニトロキサイド  
世界ではじめて見つかった有機磁石であるニトロニルニトロキサイドの分子構造と磁化曲線。強磁性キュリー温度0.65Kよりも高い温度では、磁化はほとんど生じない。一方、キュリー温度よりも冷却すると、磁場をかけることによって磁化が生じることから、この物質が磁石となることを示している。

くりには使えません。そこで我々は、アリルラジカルの特長を保ちつつ、もっと安定な分子を探した結果、ニトロニルニトロキサイド<sup>\*6</sup>という分子群を見つけました。この分子群をモデルに、その性質を変えないように改変した分子をたくさんつくって調べたところ、幸いなことに、そのうちの1つが実際に低温で磁石になることがわかりました(図2)。世界ではじめてつくり出された有機磁石です。ただし、キュリー温度という、この温度以上になると磁石の性質を失ってしまう温度が、絶対温度1K以下というとても低く低い温度だったために、この分子は残念ながら実用とは縁のないものでした。ところが、いったんブレイクスルーがあると、面白いもので、その後続々と、有機強磁性体が発見されるようになってきました。今のところキュリー温度の最高記録は15Kぐらいで、室温にはほど遠いのですが、実用化のために、あと10年ぐらいで何とか室温ぐらいにもっていきたいと考えています。

\*1 井口洋夫(1927-) 東京大学名誉教授。有機物質の電気伝導に関する研究を先駆的に進め、有機半導体の概念を確立して今日の有機エレクトロニクスの基礎を築いた。1965年に日本学士院賞、2001年に文化勲章。

\*2 トランジスタ 増幅、またはスイッチ動作をする半導体素子。「電気抵抗の変化による信号変換器」を意味する。近代の電子工学における主力素子である。「トランジスタラジオ」を中学生のころ作ったことのある方も多くであろう。

\*3 半導体 電気を流す「導体」や電気を流さない「絶縁体」に対して、それらの中間的な性質を示す物質のこと。周囲の電場や温度、あるいは光の照射の有無や不純物の多い少ないによっても電気の通りやすさが変わる場合がある。これらは金属にはみられない性質である。

\*4 伊藤公一(1934-) 大阪市立大学名誉教授。有機物は強磁性を示さないという常識に挑戦し、高スピン有機分子の合成、強磁性的磁気相関の解明を通じて、有機強磁性を発見した。岩村秀、木下賢とともに2003年に日本学士院賞受賞。

\*5 アリルラジカル 奇数個の電子をもつ中性ラジカル。不安定化合物だが理論モデルとして有用。

\*6 ニトロニルニトロキサイド 奇数個の電子をもつ中性ラジカル。有機強磁性体やカゴメ格子反強磁性体など、さまざまな性質が見出された。

## 分子で電池をつくる

さて、ここで冒頭の有機半導体に話を戻しましょう。有機半導体の研究は、さらに高い電気伝導性を求めた結果、有機金属や有機超伝導体の研究に発展しました。大きな成果へと至る過程では、有機磁石の研究と同様に、分子設計から物質合成、その物性測定という一連の作業の莫大な試行錯誤があったのはいうまでもありません。最近では、有機半導体を電子回路に応用する研究が進展しています。有機エレクトロニクスとよばれる研究領域で、有機半導体を利用した有機トランジスタ、超薄型画面が実現可能ということまで話題の有機EL\*7、そして有機太陽電池まで、有機物中の電子の動きを制御することによって高い機能性を得ています。

このような潮流にのって、有機物のような分子性物質で、電池をつくる研究がスタートしています。普通の電池には、使いきりの1次電池と充電ができる2次電池があります。そして、現在2次電池として広く普及しているのがリチウムイオン電池です。これは携帯電話やコンピュータに使用されており、皆さんもその恩恵に少なからずあずかっているはずです。この電池の長所は電池容量が大きいことですが、欠点は充電に必要な時間が長いことでしょう。また充電しすぎることによって正極と負極がショートして発火するといった事件があり、安全面からも難があります。

リチウムイオン電池の充電の遅さは、その電気化学反応において、 $\text{LiCoO}_2$ などの無機物へ、リチウムイオンが入っていくプロセスがあるためです。リチウムイオン電池に比べてはるかに充電が速い電池として期待されているのが、有機ラジカル電池です。この電池は、負極がリチウム、正極が有機ラジカルのポリマーで構成されています。もともとは中性の有機ラジカルが、酸化されたり還元されたりすることによって、充放電が可能となるのです。充電が速い理由は、リチウムイオン電池の場合とは違って、ラジカル部位での酸化還元反応が非常にスムーズだからです。ただし、残念ながら今のところまだ、ラジカル部位に電子を1、2個しか貯められないことから、電池容量が小さく、大量の電流を流すような用途には使えません。電池容量とは、電流がどれだけ流れたかを示す量で、電流値に時間をかけたものです。そのために、リチウムイオン電池の座を脅かすまでには至っていませんが、その将来性には大き

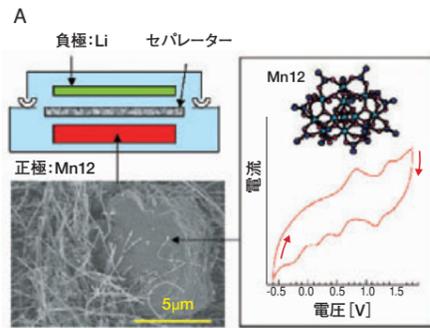


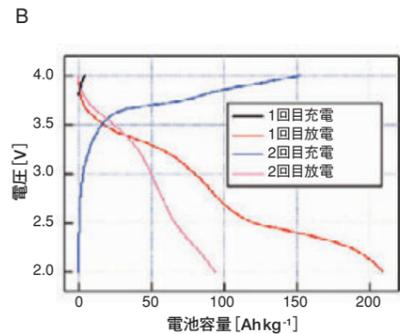
図3 単分子磁石Mn12を使った電池

A. Mn12の分子構造とサイクリックボルタモグラム。これをカーボンファイバーに練りこみ、正極とした。Li負極と組み合わせて、分子クラスター電池を作製した。B. 分子クラスター電池の充放電曲線。横軸は電池容量で電流が流れた時間に相当する。1回目の放電曲線(定電流を取り出しながら電位の減少を観測したもの)はゆっくり減少し、電池として作動することを示している。その容量は200Ahkg<sup>-1</sup>を超え、リチウムイオン電池よりも高い。

な期待が寄せられています。無機物の独壇場とされていた電池材料の世界に、初めて有機物が登場したのです。

さて、このような分子でつくる2次電池について、我々の行っている研究を紹介しましょう。我々は、先の分子でつくる磁石研究の一環として、単分子磁石研究に携わってきました。これは、1個の分子が磁石として働くものをつくって、これまでとは比べものにならない大容量ハードディスクの実現などに発展させようという研究です。単分子磁石として最も有名なものがMn12 ( $[\text{Mn}_{12}\text{O}_{12}(\text{RCOO})_{16}(\text{H}_2\text{O})_4]$ )とよばれる分子です。これは、1分子中にマンガンイオンが12個あり、それらが図3Aに見るように、分子と電子対を通じて結びついています。このような、金属イオンと分子が結びついているものを金属錯体とよび、この場合のような複数の金属イオンを含むものをとくに、クラスター錯体とよびます。Mn12は、とても大きいですが、1個の分子です。これは、極低温で磁石のようにふるまいます。単分子磁石なのです。しかし、ここで今日お話ししたいのは、電池としての応用です。この分子の溶液に電極をひたし、電圧を変化させながら流れる電流を測定してみました。その結果が図3Aです。電圧を上げていくと、Mn12が1電子ずつ酸化あるいは還元されることを示す電流のピークが図に出現します。この図を見ますと、1つのMn12分子に、ピークの数に相当する、多くの電子を出したり入れたりできることがわかります。電子を取り入れたり、出したりするのが電池として必要な性質ですから、これは電池として使えるのでは、と思いついたのです。

企業の協力を得て、早速Mn12の電池を試作してみました。負極はリチウム、正極をMn12の結



晶を砕いてカーボンファイバー\*8に練り込んだものにしました(図3A)。3Bに、この電池の充放電試験の結果を示します。縦軸が電圧、横軸が電池容量です。実験では、充電、放電を繰り返しました。充電時(1回目黒線、2回目青線)には、定電流を電池に与え、電圧の上昇を測定します。また放電時(1回目赤線、2回目ピンク線)には、定電流を電池から取り出しながら電圧の減少を観察します。図を見ると、まず1回目の充電曲線(黒線)が極端に短いこと、つまりすぐに充電が完了したことに気づきます。これは、電池作成のプロセスで、偶然ですが充電されていたことを示しています。次いで測定した1回目の放電曲線(赤線)はゆるやかに減少しています。このことは、Mn12の電池から電流をうまく取り出すことができたことを意味しています。電圧を保ったまま、電流を流すことができたのです。この際、示された電池容量は200 Ah/kg (Mn12、1kg当たり200アンペアが1時間継続して流れたことに相当)以上で、リチウムイオン電池をしのぐほど大きなものです。続いて、2回目の充電ですが、曲線(青色)は、電圧の急上昇の後に飽和して、充電が完了したことを示しています。そして2回目の放電(ピンク線)でも電流を取り出すことができることを示しています。ただ、残念ながらその容量は半減してしまいました。しかしながら、実験を続けると、3回目以降の減衰はあまりないこともわかりました。

Mn12の電池実験は、初回としては大成功でした。我々は、このような金属クラスター錯体を電極に使った電池を、分子クラスター電池と名づけました。まだまだ改良する余地はありますが、2次電池を分子設計する時代の到来を告げる実験であると自負しています。

## 化学太陽電池を構造設計する

最後に、化学の視点から「環境問題」について考えてみたいと思います。さまざまな問題が指摘されていますが、とりわけ重要なものとして、二酸化炭素濃度の急増による地球温暖化があります。二酸化炭素濃度が増加した原因は、産業革命以来の、石油や石炭といった化石燃料の爆発的な消費にあります。大気中に放出された二酸化炭素は、地球から宇宙に放出される赤外線(つまり熱)を遮断して、地球の温度を上げる温室効果をもたらすのです。化石燃料の消費を減らすことは、人類緊急の課題です。



脱化石燃料の方策の1つとして、太陽電池が期待されています。これは、太陽から来た光のエネルギーを電気エネルギーに変換するものです。テレビCMにもたびたび登場していますので、皆さんもきっと夢のエネルギー源として期待されているのではないのでしょうか。しかし、せっかくの太陽電池も、電池をつくるのに必要なエネルギーが、太陽光を変換することで生み出す電気エネルギーよりも多いようだと、環境のために何をやっているのかわかりません。どうも現状の太陽電池は、環境のためによいかどうか怪しいという指摘もある

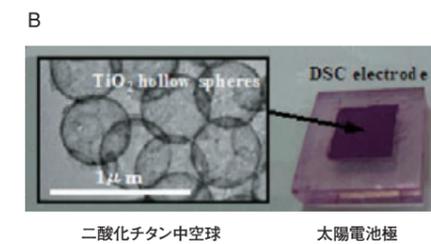
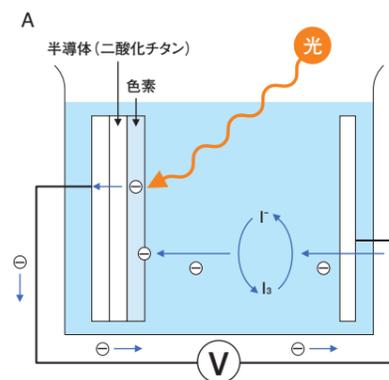


図4 色素増感太陽電池  
A. 色素増感型太陽電池の原理。B. 化学合成された中空球殻形状の二酸化チタンとこれを用いた太陽電池電極。電極の色は色素のもの。1μmは1000nmに相当。

のです。太陽光を電気に変換する効率をもっと高めないと、温暖化対策の決め手とはなりません。そこで紹介したいのが、色素増感太陽電池です(図4A)。1991年にグレッツェルらが提案した新しい太陽電池で、製作に大量の電気を必要とするシリコン半導体を用いた通常の太陽電池とは異なり、大がかりな設備を必要としない低コストの太陽電池として、大変期待されています。その構造ですが、半導体である二酸化チタンの表面に色素がつけられています。この色素が光を吸収すると、光エネルギーによって電子を放出して、二酸化チタンに渡します。これが外部回路を通過して仕事をした後、反対側の電極に移動し、電解溶液中のヨウ素を経由して色素が受け取ります。光を受けて、電子が回路を通過して仕事をするのですから、電池として働いていることになります。色素を用いた化学電池です。

軽く、色や形状を自由に設計できる色素増感太陽電池ですが、難点は、太陽光を電気に変える効率が低いことです。そこで、新しい色素の開発をはじめとしたさまざまな取り組みがされています。次にご紹介する我々の研究は、色素を塗っている二酸化チタンの構造をつくりかえることで、光をもっと効率よく色素に吸収させようというものです。さて太陽光ですが、これはさまざまな波長の光が集まったもので、その中心は波長が500ナノメートル(nm)ぐらいの可視光です。光は波の性質をもっています。波長よりも小さな物質を光は回り込んですり抜けるのです。この現象を回折とよびます。つまり、500ナノメートルよりも二酸化チタンが小さければ、光がすり抜けてしまっ、効率よく表面の色素に吸収させることができせん。一方、物質の大きさが波長よりも大きければ

この現象は起こらず、光は衝突するようになります。ナノサイズである二酸化チタン粒子を、可視光の波長以上の大きさにすれば、太陽光の吸収効率がぐっと上がることが期待されるのです。そこで、我々は二酸化チタンを可視光の波長程度の大きさの中空球殻構造に化学合成するという取り組みを行いました。図4Bは二酸化チタン中空球の電子顕微鏡写真です。直径が500nm、球殻の厚さが30nm程度の中空球殻構造をしています。このような中空球殻二酸化チタンを電極の上にならべて色素をつけ、太陽電池を試作しました。その結果、単位物質質量当たりの効率が、二酸化チタンナノ粒子を使った既存の太陽電池の2.5倍程度になることがわかりました。期待した通りの結果がたのです。

このように、化学の力は化合物をつくるばかりでなく、自在にナノ構造をつくるにまで発展しています。光やエネルギーに対するしっかりとした物理化学的理解に基づき、新しい感覚の物質設計が行われる時代がやってきたのです。

約束の時間になりました。本日はどうもありがとうございました。

### \*7 有機EL

有機エレクトロルミネッセンス(Electro-Luminescence)の略。エレクトロルミネッセンスとは、注入された電子と正孔(ホール)の再結合によって生じた励起子から発光する現象。光を発する層が有機化合物のフィルムからなる発光ダイオードを有機EL(材料)とよぶ。携帯電話など、厚さがミリメートルサイズ以下の超薄型ディスプレイなどへ応用されている。

### \*8 カーボンファイバー

炭素繊維ともいう。熱安定性や物理的な力に対する強度や耐久性にすぐれており、金属よりもはるかに軽量であることから、近年大きな注目を集めている炭素材料。ロケットや航空機などの大型輸送機からテニスラケットや釣り竿など身近な道具にまで用途を広げている。



# 生体分子にヒントをもらうものづくり

田中 健太郎 物質理学専攻教授



Kentaro Tanaka

1967年生まれ。1990年東京工業大学工学部卒業、1995年同大学院生命工学研究科博士課程修了。カリフォルニア大学アーバイン校博士研究員、分子科学研究所助手、東京大学大学院理学系研究科助手、助教を経て、2007年より現職。

## 分子を集める、分子をならべる

生体分子とはタンパク質や核酸、糖類など、生物がつくり出す有機分子、無機分子のことです。生体分子がどのようにできていて、どのような働きをしているかを見てみると、新しい物質をつくるためのヒントが見えてきます。そこで生体分子のものづくりの方法からヒントをもらい、新しい人工的なものをつくっていく、そんな研究について話をさせていただきます。

生体分子にかぎらず、さまざまな物質のなかでは、分子や原子が集まることによっていろいろな機能を発現します。たとえば、日常生活に欠かせない携帯電話、テレビ、パソコンの液晶ディスプレイのなかでは、細長い液晶分子のならば方向を自在にコントロールすることが大事な設計要素になっています。このように、分子もしくは原子が集まることをいかにコントロールするか、集めた分子や原子にどういかに働きをもたせるかということが機能性の高い物質をつくる上で大切になってきます。そこで、まず最初に、いかに原子や分子を集めるかについて考えていきたいと思います。

多数の原子や分子を集めるためには、結晶化や高分子的な自己組織化、ポリマーの上に分子をならべる、といった方法が考えられます。結晶化によって、原子や分子を規則正しくならべることができますが、石鹸の分子からシャボン玉をつくるような自己組織化によっても分子を整列させることができます。また、ビニールやプラスチックの分子は長い線状の分子です。こうした線状の分子をポリマーといいます。線状の分子をつくる際には、1つ1つの小さいパーツとなるモノマーとよばれる分子を重合という方法でつなげることによって合成しますが、このモノマーとして自分がつなげたい分子をならべて重合することによって、分子を集めることが可能になります。

ここにあげた3つの方法は多数の分子を集める上では効率的ですが、数や配列を厳密に制御して分子を集めるのはなかなか難しいといえます。たとえば100個ずつの分子を集めようとしても、101個のもの、99個のものなど、その数に分布が生じてしまいます。数の制御が難

しいということは、違う種類のを決められた順番にならべるといことも難しくなってきます。たとえば、AとBという2種類の分子を単純に交互にならべるのはうまく設計すればできるかもしれませんが、もっと複雑な配列、たとえば「A・B・A・B・A・A・B・B」などと設計し、その通りにならべるのは難しくなってきます。

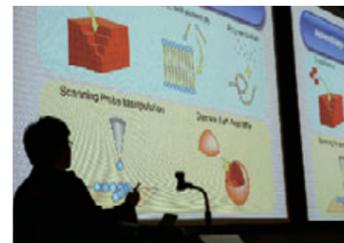
一方、分子の数や配列を正確にコントロールして集める方法として、走査型プローブ顕微鏡を使って原子を集めてくる方法や、閉じた構造をつくるようなかたちでの自己組織化があげられます。

走査型プローブ顕微鏡とは、原子レベルの分解能をもった物質の表面を見ることができるとのことです。

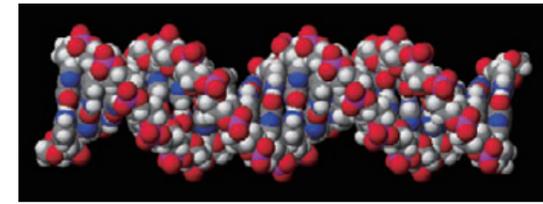
走査型プローブ顕微鏡の1つである走査型トンネル顕微鏡を開発したIBMの研究者は、顕微鏡を原子を見るだけでなく、ならべてみるために使いました。キセノンの原子を1個1個、針先でつまんで金属の表面上にならべ、「IBM」という字を書いたデモンストレーションを行い、鉄イオンを使って「原子」という字を書いています。集める原子の数を厳密に制御し、思う場所に原子を置くことができるようになったのです。

また、環状構造などの閉じた構造を設計することにより、自己組織化という方法を通して、ボール型の分子など、サイズやかたちがきっちりと決まった構造の分子をつくることができます。うまく分子設計をすれば、ねらった数の分子をねらった空間配置で集めることができるようになります。

これからは、よりたくさん分子を、いかに簡単に集積するか、新しいアイデアを考えていくことが必要になってきます。



DNA



DNAやタンパク質は:

- 人工的には合成し得ないような高分子量をもつ
- 「数」「組成」「配列」「方向」が自然の法則によってプログラム化されている
- 厳密な「選択性」と正確な「空間配置」で集積化する
- 生体の定めた規律に従い、適切な「タイミング」で高度な機能を発現する

タンパク質

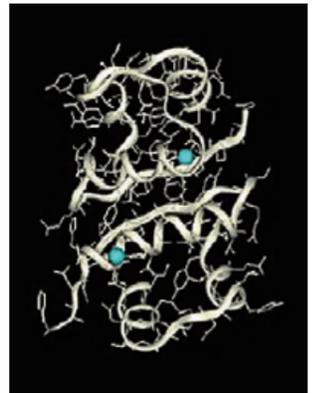


図1 生物がつくる高分子

生物がつくる高分子を生体高分子という。DNAやタンパク質、糖など、その分子構造や機能から、「ものづくり」の視点で、多くのヒントを見いだすことができる。

## 驚くべき生体分子の力

人工的に分子を集めたり、ならべたりする方法を見てきましたが、では、自然界において生物がつくる分子にはどんな特徴があるのでしょうか(図1)。

まず、DNA、タンパク質、糖類などの生体分子は人工的には合成しえないような高分子量の長い分子であることがあげられます。

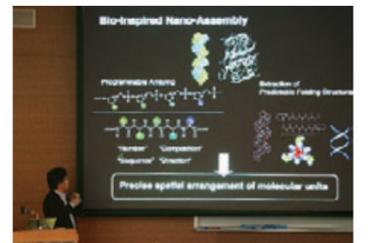
代表的な人工的な高分子であるポリエチレンは、超高分子量のものでも100マイクロメートルはありません。これに対して人間の細胞、1個のなかに約2mのDNAが入っています。細胞が分裂するたびに、このような長いDNAが複製されています。こんなサイズのものを生物は簡単につくっている、これはまさに驚異的なことです。

高分子量であるということだけでも驚きますが、そのうえ「数」「組成」「配列」「方向」に分布

をもたないことも驚きです。

ご存じのとおり、DNAはA、T、C、Gという4種類の核酸塩基が順番にならぶことによって遺伝情報を形成しています。人間の遺伝子のなかには30億個の塩基対が連なって、二重らせんを形成しています。それが、配列どおりに複製されて新しい細胞が生み出されます。ここに、分布が生じるような合成方法をつくると、次に新しくできた細胞は、元の細胞とはまったく違った遺伝情報をもってしまい、生物としてなりたたなくなってしまう。生物のすごいところは、分布なく、これだけの数の分子を1個ずつつなげる方法を確立しているところにあります。

そして、生体高分子は3次元的なものづくりの方法、「選択性」と「空間配置」を厳密に制御し、さらに時間的な「タイミング」も緻密に制御する機能をもっています。



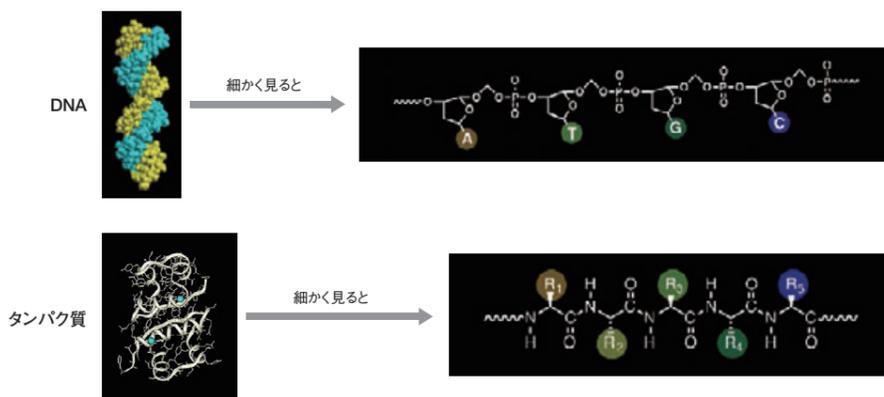


図2 生体分子からヒントをもらい分子ナノ組織をつくる  
 スクレオチドやアミノ酸が、意味のある配列で長い鎖となり、DNAやタンパク質などの生体高分子ができあがる。DNAでは4種類の塩基A、T、G、Cをもつスクレオチドが、一方タンパク質では20種類の残基(R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>…)をもつアミノ酸がある順列でつながり、繰り返し構造をつくる。これら DNAやタンパク質などの生体高分子は、繰り返し構造の“数”、“組成”、“配列”、“方向”も自動プログラム化されることで、らせん構造、シート構造、環状構造、二重らせん構造など、特徴的な分子構造をつくる。このような分子構造をヒントとして、人工的な新しい機能性分子をつくることができる。

### DNAを分子合成に利用する

いよいよ、生体分子が小さいパーツとなる分子を階層的にくみ上げている方法をもとに、ものづくりのアイデアを抽出することを考えていきましょう(図2)。

アミノ酸というパーツが1個ずつ順番につながってタンパク質になります。また、スクレオチドというパーツが1個ずつ順番につながって線状の分子になり、二重らせん構造をつくりDNAになります。さらに、それが組み合わされて、いろいろな分子の集合構造をつくり、体のなかの機能性分子は働いています。このような階層的な分子の構築方法から、新しい分子を合成するうえでのヒントを得ることができます。

まずDNAの構造について考えてみましょう。DNAは右巻きの二重らせん構造をつくっています。横幅は2.5ナノメートルぐらいの非常に長い分子です。スクレオチドが10個ずつでらせんが1巻きします。

1本ずつのDNAはリボースという糖がリン酸ジエステルという結合で1個1個がつながる繰り返し単位でできています。その横に遺伝子のコードになるC、T、G、Aが順番にならんでいるという構造をつくっています。

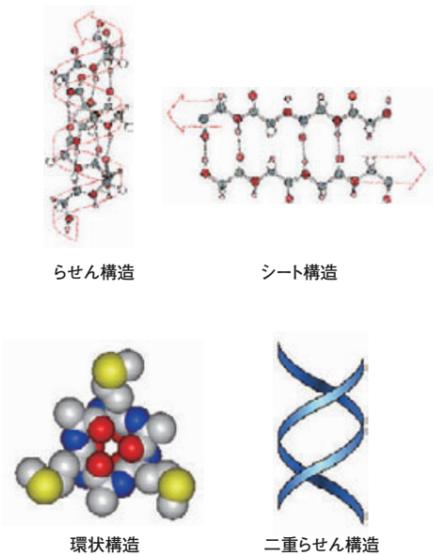
1950年代にワトソン\*<sup>1</sup>とクリック\*<sup>2</sup>がDNAの二重らせん構造を発見し、その構造を解明してから約50年経ちました。発見してしばらくすると、遺伝子のもとになるDNAを人工的につくってみようという研究がスタートしました。現在ではDNAの

自動合成機が市販されています。自動合成機は、自分がつくりたいA、T、G、Cの配列をボタンでインプットしておく、自動的にDNAを合成してくれる機械です。

スクレオチドを順番に1個1個つなげていくという方法を基点にして、現在、機械を使って100個ぐらいのスクレオチドをならべることができます。生物学的に応用するにはさらに長くする必要がありますので、その場合には酵素でつなぐ方法が用いられます。

こうしたDNAの二重らせん構造をいろいろな分子をつくるうえで、利用できないかというのがここでのテーマです。

ナノテクノロジーの分野にDNAを利用しようという考え方が、1980年代後半に現れました。まずは特徴的な分子構造をDNAの二重らせん構造を使ってつくりだすことがなされ、ナノメートルサイズのDNAでできた立方体などをつくることに成功しました。こうしたナノ構造をタンパク質の配列化、触媒などに応用できる金微粒子、光のワイヤーとなるような色素分子の配列化などに利用する研究が活発に行われるようになってきました。100ナノメートルぐらいからナノメートル以下のサイズまで、幅広いスケールで分子や原子を集める場としてDNAを利用できることがわかってきました。これらの研究は、本来、遺伝子であるDNAに、分子材料としてのまったく新しい機能を吹き込むことになります。



### DNAに金属イオンをならべる

最後に私たちのしている研究についてお話します。

DNAの塩基対の間で水素結合を使い、二重らせん構造をつくります。私たちは、その水素結合をつくっている部分を、何か別の力に置き換えた、人工的なDNAをつくることを考えました。そこで、化学的な有機合成の力を使い、天然の核酸塩基といわれるA、T、G、Cの部分を金属配位子に置き換えたような人工的なDNAを合成しました。そうすると、人工的なDNAは、水素結合の代わりに、金属イオンを介した結合で2本の鎖が集まってきて二重らせん構造をつくります。こうしてつくった二重らせん構造のなかに、金属イオンが中心にならぶような構造をつくることができます(図3)。

金属配位子と金属イオンの相性を考えてうまくデザインすると、結合の強さ、スピードをコントロールできるようになります。つまり、天然のDNAのなかに1カ所だけ人工的なDNAを入れておくにより二重らせん構造がついたり離れたりすることをコントロールできるようになります。金属イオンを入れると二重らせん構造をつくり、金属イオンをとると二重らせん構造がばらばらにわかるような機能を、DNAに組み込むことができます(図3)。

生物の複製やDNAのシーケンスからタンパク質をつくっている過程では、必ずらせん構造がほどけなければならないため、それを制御する方

法論として人工DNAが利用できるかもしれません。

さらに人工的なDNAの二重らせん構造のなかに金属イオンをたくさんならべたらどうなるだろうかと考えました。自分の好きな数だけ人工的な塩基対をつくるような場所をならべておきます。そうすると、その数にきっちりあわせて金属イオンを集めることができることがわかりました。物を一度に集めるという方法論を考えると、そこには分布が必ず生じてしまいます。しかし、これはDNAの骨格が数をきっちり決めて合成するため、集めてくる分子の数を自分でデザインすることができます。



たとえば、不対電子というスピンを1個もつ2価の銅イオンを集めるとします。そうするとナノサイズのDNAの構造のなかで、それぞれの金属イオンが強磁性的にスピンの矢印の方向を合わせるかたちで集まるということがわかりました(図4A)。

これまでは難しかった、数を制御してスピンを集めるという方法を確立することにより、将来的には、新しい分子レベルの磁石をつくることも可能になると期待しています。

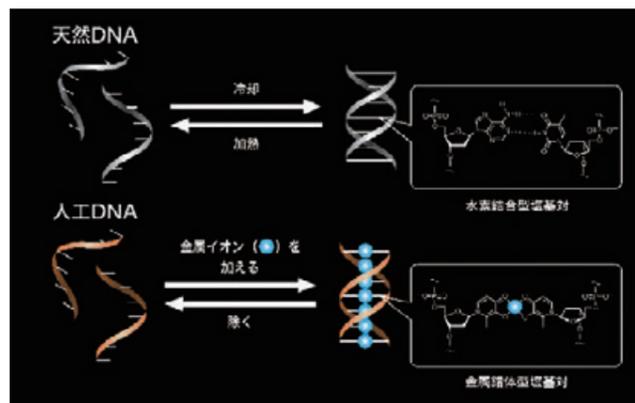


図3 金属配位子型人工DNA  
 DNAは核酸塩基間の水素結合で2本の鎖が集まり、二重らせん構造をつくる(上図)。水素結合の代わりに、金属イオンとの配位結合で塩基対をつくる人工DNAを合成し、これに対して金属イオン(青丸)を加えると2本の鎖が集まり、二重らせん構造をつくる(下図)。金属イオンがなければ、人工の二重らせん構造はつくれない。この人工DNAの二重らせんを使って、その中心に金属イオンをならべることができる。

### 人工DNAの可能性

金属イオンの数をそろえることができることがわかったため、今度は、DNAを使って好きな金属イオンを好きな数だけ好きな配列でならべることができないか考えました。

DNAは、もともとは4種類の核酸塩基を自分の好きなかたちに順番にならべることができます。この方法を使えば金属イオンといろいろな相性をもっている金属配位子を順番にならべることができるようになる考えたのです。

たとえばHという人工核酸塩基は銅イオンに強く結合するPという人工核酸塩基を順番にならべることによって、そのなかに金属イオンをデザインして順番にならべてみました。HPHという配列をつくと、銅、水銀、銅という順番で金属イオンを集めることができます。HHPHHとすると、それに合わせたかたちで、銅、銅、水銀、銅、銅という並び方ができます。いろいろな組み合わせをしてみると、今のところ、10個まで、こういう金属イオンを好きな順番にならべることができました(図4B)。

この方法にはいくつかの特長があります。まずは、いっぱい分子のパーツをいっぺんに集めることができます。しかも、分布をもたないかたちで、金属イオンの配列をプログラムすることができます。さらに熱を使わずに、つまり、室温ぐらいの温度の水中で混ぜるだけで100%の収率で合成ができます。

また、こういう方法論で、DNAだけではなく、

タンパク質になるアミノ酸がつながったペプチドを使っても新しい分子をつくることができます。異なるタイプの金属イオンワイヤーをデザインすることができるようになりました(図4C)。

将来的にはこうした方法を分子レベルの電線や磁石、触媒などに利用できる可能性があります。たとえば一番端に置いておいた金属イオンに光を当てると、そのなかに電線の役目をする部分があり、電子がつながっていくことで最後にどこかが光る、そういう分子レベルのデバイスをつくることができるようになるかもしれません。

本日は、生物の機能の一部である、生体分子がもついろいろな構造や配列を制御して合成する方法論からアイデアを抽出することにより、すぐれたものづくりができるようになってきたことをご紹介しました。こうした研究は非常に時間がかかります。科学をしているうえで一番面白い部分は、これまで誰もつくったことがないような物質を世の中ではじめて自分の手でつくり上げることができるというところにあります。そういうところに面白みを感じつつ、毎日、研究室で楽しんで実験をしています。本日はありがとうございました。

\*1 J.ワトソン(1928-) アメリカの生物学者。ノーベル生理学・医学賞(1962年)を受賞。  
 \*2 F.クリック(1916-2004) イギリスの生物物理学者。ワトソンとともにノーベル生理学・医学賞(1962年)を受賞。

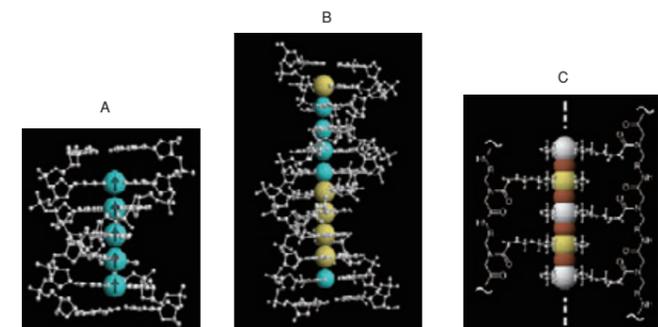


図4 DNAやペプチドの中に金属イオンをならべる  
 DNAやペプチド(タンパク質の部分構造)の分子骨格を利用して、高分子に通じる方法論を使い、金属イオンなどの化学的機能を精密に集積化できるようになってきた。A.金属イオンのスピン(矢印で示している)を配列する。B.さまざまな金属イオン(青丸や黄丸)をデザイン通りにならべる。C. DNAではなく、ペプチドを鋳型にして、結晶中でしかできなかった金属ワイヤー(白丸、橙丸、黄丸がつながった部分)をつくる。

# 植物学者140年の夢、花粉管誘引物質の同定に迫る

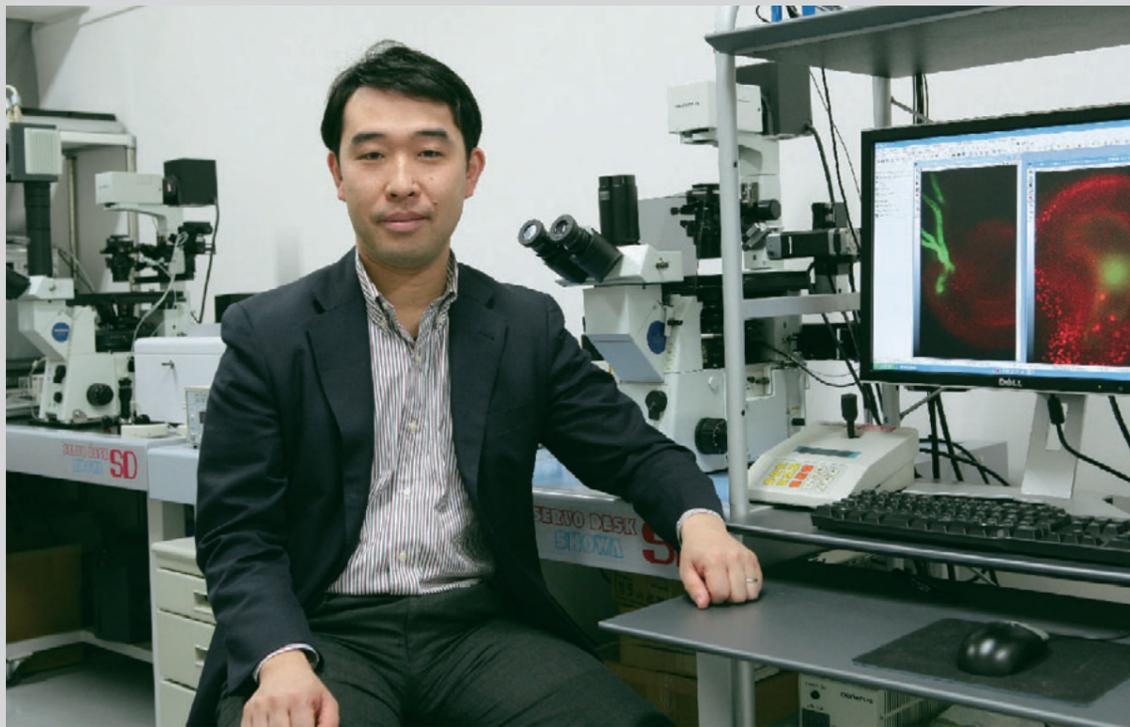
東山 哲也 生命理学専攻教授

## 誘引物質は幻か？

植物の花が受粉すると、花粉から花粉管という細胞が伸びだし、卵がある場所まで精細胞を運ぶ。植物の受精が成立して種子がみえるためには、花粉管が複雑なめしべのなかで迷うことなく、卵がある場所を見つけることが必要不可欠である。今から140年以上も前から、めしべのなかに花粉管をおびき寄せさせる物質、すなわち“花粉管誘引物質”があると考えられ、多くの植物

学者がこの物質の同定を試みてきた。この物質が見つければ、植物の受精の基本的な仕組みを明らかにできるだけでなく、人為的に花粉管伸長をコントロールして、従来は不可能だった交雑により新しい植物をつくりだすことも可能となる。しかし、その同定の試みは混迷を極めることになる。誘引物質を検出するためのさまざまな試験管内の検出法が開発され、それらを利用し

てめしべ抽出液から物質の精製が試みられた。しかし、試験管内の検出法で“誘引”と“伸長促進”を厳密に区別することは難しい。また、めしべの構造が物理的に花粉管の伸長方向を規定する例も示され、ことはそう単純ではないことが明らかとなってきた。そもそも誘引物質など存在しないのではないかという意見も出され、「誘引物質：事実か幻か」といった論文までもが発表された。



Tetsuya Higashiyama

1971年山形県鶴岡市生まれ。1999年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。同年より同研究科にて助手。2007年より現職。専門は、植物の顕微分子生物学。



図1 トレニア (Torenia fourieri) の花  
ゴマノハグサ科に属し、日本ではポピュラーな園芸植物である。

## 誘引物質に迫る

花粉管誘引物質の研究は、トレニア (図1) というユニークな植物を用いた我々の研究から進展する。どうユニークかという点、トレニアでは、普通は胚珠とよばれる受精前の種子組織の内奥に埋め込まれているはずの卵装置が、胚珠の外に突出してむき出しになっている。トレニアの花粉管とむき出しの卵装置で何とか試験管内で受精を再現できないか試みていた時に、ある条件で花粉管が卵装置の先端、花粉管の入り口にあたる場所に誘引されることに気がついた (図2)。卵装置には複数の細胞が含まれるが、UVレーザーで1つ1つ破壊したところ、卵細胞の隣にある2つの“助細胞”という細胞から誘引シグナルが出ていることが明らかとなった (図3)。この成果を受けて、再び世界中で助細胞が

分泌する誘引物質探しの競争が行われている。我々の研究から、誘引シグナルには強い種特異性が存在することが示されている。トレニアに近縁なアゼトウガラシという植物があり、この植物でも卵装置は突出している。トレニアとアゼトウガラシの胚珠を顕微操作により近接させて培養し、それぞれの花粉管を伸長させると、花粉管は同種の卵装置だけに選択的に誘引される。このように非常に近縁な種間でも特異性が生じていることから、誘引物質は、助細胞で生合成されるような進化速度が速い物質であることが予想される。我々はトレニアの特徴を生かし、助細胞だけを顕微操作で取り出してきて遺伝子解析を行うことに成功した。そして、しばしば分泌性のシ

グナル分子となるタイプの遺伝子が1つ、助細胞で活発に働いていることを明らかにした。低分子量のタンパク質をコードするこの遺伝子は、トレニアのすべての細胞のうち助細胞だけで働いていた。さらに、このタンパク質を試験管内で合成したところ、強い誘引活性があることが明らかとなった。このタンパク質こそが、長年探し求められてきた花粉管誘引物質であると考えられる。現在、最終的なデータのとりまとめを急いでいる。卵装置が突出しているトレニアを用いることで、存在が明らかになった誘引物質。何とかその物質の正体についても世界に先駆けて発表し、長いつきあいとなってきたトレニアに恩返ししたいものである。

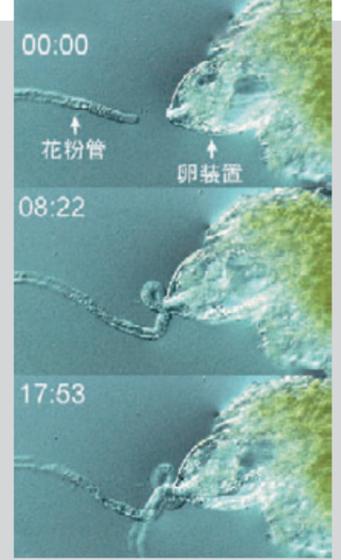


図2 突出する卵装置に誘引される花粉管  
時間は観察開始からの分:秒。1本目の花粉管が進んでくまごついている間に、2本目の花粉管も誘引されている。花粉管の太さは約10マイクロメートル。



図3 花粉管誘引の模式図  
卵細胞 (EC)、2つの助細胞 (SY)、中央細胞 (CC) からなる卵装置 (胚嚢) から拡散性の誘引物質 (赤点) が分泌され、その濃度勾配に従い花粉管が誘引される (左)。助細胞を2つともUVレーザー (UV) で破壊すると花粉管は誘引されなくなり (中央)、逆に助細胞を1つ残せば誘引が見られる (右)。このことから、2つの助細胞が誘引物質を分泌していることがわかる。



Tomomi Kawamura

1972年生まれ。東京郊外でのんびり育つ。お茶の水女子大学理学部卒、東京大学大学院数理科学研究科修了。青山学院大学理工学部助手を経て2007年より現職。専門は結び目理論。

## 結び目越しにみる4次元空間

川村友美 多元数理科学専攻准教授

### 4次元空間に浮かぶトマト

立体図形を内部まで詳しく平面上のデータとして表す方法の1つとして、端から極薄くスライスした断面図をならべていく方法がある。医療で用いられる断層撮影がその代表例といえよう。中身の詰まった立体をこの方法で表すと、平らな切り絵をたくさんならべたものになる。ゴム毬や浮輪のような薄い膜でできた空間図形(数学では曲面とよばれるもの)の断層写真は、い

くつかの例外を除いて平面上の曲線として表される。いい換えると、3次元空間内の図形(立体図形)を2次元の断層写真で表すと多くは、中身の詰まった3次元図形は2次元図形として、2次元図形(曲面や平面)は1次元図形(曲線や直線)として得られる。

この方法を応用すると、4次元空間内の図形も表すことができる。ただし、このときの断層写

真は長方形ではなく直方体である。大雑把に例をあげてみると、トマトを薄切りにしたものを1枚ずつ端から順番に、それぞれ同じ大きさの直方体の中の同じ場所で同じ向きにあるようにびらびらと浮かせたとしよう(図1)。3次元空間内の図形を断層写真から読み取った要領でこの直方体の断層写真を考えると、今まさに我々は4次元空間内にあるトマトを眺めていることになる。

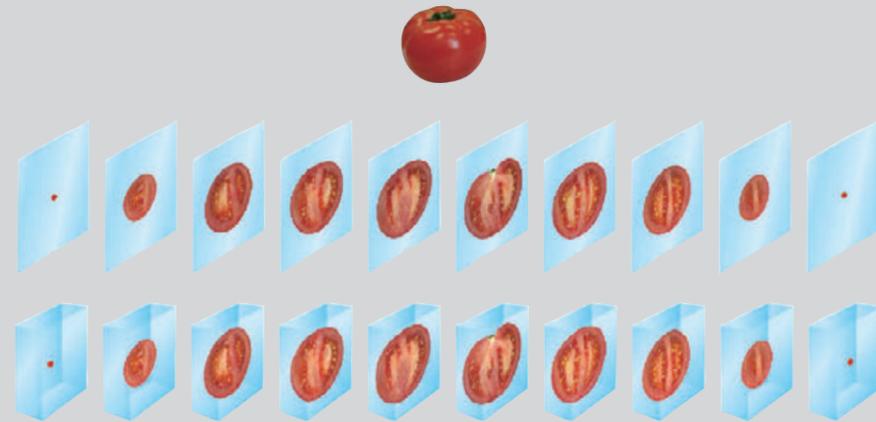


図1 3次元空間内のトマトと4次元空間内のトマト  
ここでは4次元空間内のトマトを「3次元空間内の宙に浮く薄切りのデータ」で表している。

### 結び目を数学で解く

すでにご存じの方もいらっしゃるかもしれませんが、数学にはトポロジーという「柔らかい幾何学」と形容される分野があり、その一種として結び目理論が発展し、現在も活発に研究が進められている。この理論はその名の通りに紐を結んで得られる図形を研究対象としている。ただし紐の両端は継ぎ目が目立たないように閉じておく。もう少し数学らしくい直すと、3次元空間内の閉じた曲線を結び目とよび、その複雑さを研究するのである。ここで、回転させたり平行移動させたり、紐がゴムのように伸縮したり、あやとりのような変形を施したりしたものは、すべて「同じ図形」として考える(あやとり愛好家の苦労は報われない学問である)。この複雑さの調べ方は数多くあり、さまざまな「物差し」を用意してそのデータを見ることが多い。

私の現在までの研究では、2つの結び目を4次元空間の中で曲面でつなぐことで結び目やその曲面の性質を分析してきた(図2)。即ち、4次元空間内の図形の「断層写真」の最初と最後がこの2つの結び目になるように両者間の連続的な断層写真をなるべく変化度が少ないように構成することでこれらの性質を調べてきた。とくに2つの結び目のうちの一方を、研究がかなり進んだ特別な結び目にする、もう一方がどの程度それに近いかを論ずることができ、大まかではあるが性質がある程度読み取れるのである。たとえば、ある結び目に対して、紐が交差している部分の上下を何カ所交換すれば普通のあやとり紐の状態になるか(図3)、という研究も行った。実はこれは一般的な公式が未だに見つかっていない問題でもある。

### 危険な4次元空間

4次元といえば、多くの方が一度は憧れたであろうあの不思議なポケットを連想するかもしれない。しかし、3次元空間内の立体図形を4次元空間内に収納保管することは、(それがそういう設定かどうかは不明だが)かなり困難な技術を要するものと思われる。あやとりに向かない結び目を直方体に収め、さらにこの結び目を直方体ごと4次元空間に、図形が写るただ1枚の断層写真とこの直方体が一致するように収める。ところがこの結び目のある

部分を伸ばして直方体から「垂直方向」にはみ出させると、そのまま結び目がほどけてしまい保管に失敗してしまう事態が起こる(図4)。そう考えると、脳内でのみでは飽き足らずにうかつに実際に4次元空間へ冒険へ出かけると、自身の肉体を維持することすら難しくなるであろう。少しだけ手を出したり足を踏み入れるのも危険であるといえよう。少々夢のない話になってしまったが、その自由度が数学では大変魅力的であったりもするのである。



図2 2つの結び目を4次元空間の中で繋ぐ曲面の表示例  
この例は、結び目の紐を結合させたり、つなぎかえたりして得られる。理フロフィア第13号の表紙のイラストの意味が理解できれば、これはその応用問題である。

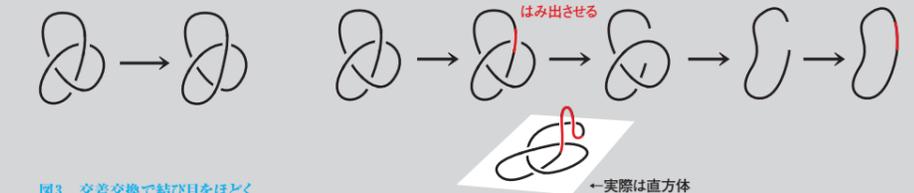


図3 交差交換で結び目をほどく  
左の結び目の場合1カ所の交差の上下を交換すると、右のようにあやとり紐として使えるものができる。一般には1カ所だけではなく2カ所以上交換しないとならないことも多い。

図4 4次元内での収納保管失敗  
最も左の結び目はあやとりに向かない。あやとりに向かない左側の結び目も、その赤い部分を「浮かせるように」断層写真の直方体からはみ出させ、直方体の中身だけを見ると、するとほどけてしまう。

## ナマの生物を学ぶ実習

【臨海実習／3年前期】——— 澤田 均 附属臨海実験所所長・教授

周囲13km、鳥羽市中之郷市営定期船乗り場から船で10分ほどのところにある、豊かな自然に恵まれた菅島。この菅島にある名古屋大学附属臨海実験所で本実習は行われた。実習では、研究所に付属する宿泊施設に泊まり、学生は6日間レクリエーションをはさみながらしっかりと講義、実験を行う。そして、その中で自分が興味をもったテーマを見つけ、最終日にその成果を発表する。

最初の講義ではウニ、ホヤの受精におけるアロ認識について学んだ。アロ認識とは生物が自己と他の個体を識別することで、とくにホヤにおいては雌雄同体で繁殖期に生殖細胞をばらまいて増えるため、自家受精が起こらないように自己の生殖細胞と他の生殖細胞をわけることが重要となる。次の分類学の講義では、動物界を分類する門について学び、実際に生物を分類し、スケッチを取った。スケッチは外観だけでなく解剖し、詳細な内面まで観察している学生や薬品でたんぱく質を分解し、骨格を調べている学生も見られた。

「この実習を通して教科書の中でなく実際のイキモノを通してセイブツを学んでほしい」と

語ってくださったのは講義も担当されている本実験所所長の澤田均教授である。教授のお話通り、分類学の講義や実験に使う生物は近くの磯で学生自身が採取する。この採集では実験所から少し離れた磯まで行き、ウニやヒトデ、ナマコ等の生物を採集した。珍しい生物が見つかるたびにあちこちで歓声が上がリ、気がつくとも夢中で石の裏に何かいないかを探していた。

この実習の大きなテーマである自由実験では採集した生物を使い、実験の目的から方法までを教員の指導を受けながら各学生が計画する。この実習での実験を進展させて修士論文にした学生もいるそうで、短い期間ではあるが将来研究に必要とされる自主性を磨く良い場となっているようだ。今回のテーマの中には異種間ウニの交雑やヒトデの発生といったものがあり、自ら取った生物を前にどうやって実験を進めるか苦悩している姿が見られた。

今回は最終日まで滞在しなかったため、残念ながらこれらの実験の成果を見届けることはできなかったが、学生の生物を見つめる真剣なまなざしからは、何か新しい発見が起こりそうな期待を抱かされた。



◎取材・文  
杉本耕一 Kouichi Sugimoto  
(物理学科4年)



Hitoshi Sawada

1982年北海道大学大学院薬学専攻科博士課程修了。北海道大学薬学部助手、東京工業大学理学部助教授、米国ハーバード大学博士研究員等を経て2002年より現職。現在のテーマは原索動物の受精と同種異個体認識の分子機構。

附属臨海実験所ホームページ <http://www.bio.nagoya-u.ac.jp/~SugashimaMBL/Marine.html>

## 探究心を育てる講義

【原子核物理学Ⅱ／3年前期】——— 原田正康 素粒子宇宙物理学専攻教授

私たちが暮らす、この世界のあらゆるもの、すべての物質は細かく分割していくと、非常に小さな原子に分けられる。レウキッポスやデモクリトスが、そのように原子論を提唱したのは2000年以上も昔のことになる。科学の進歩により、かつては不可分とされていた原子は、実は陽子、中性子や電子などの、さらに小さな粒子からなることが明らかになった。このように長い時間を経て、素粒子を追い求める研究が続けられてきたわけである。

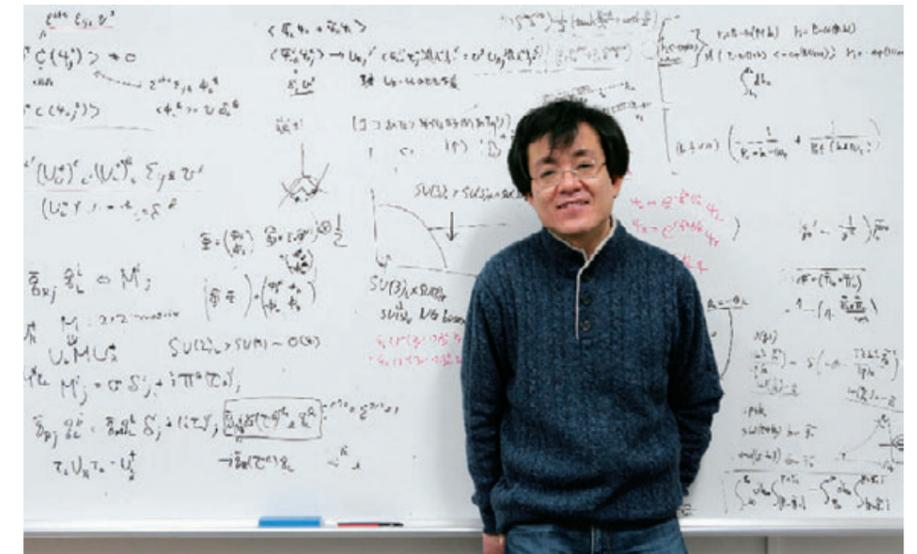
今回、私は陽子や中性子の仲間であるハドロンの分類に関する講義を聴講した。ハドロンは、大きくバリオンとメソンにわけられ、バリオン数やスピン、ストレンジネスといった粒子の性質によりさらに細かく分類される。これらさまざまなハドロンを、アイソスピン成分とストレンジネスという粒子の性質を座標軸とする二次元平面上にプロットし、電荷に注目してながめてやると、規則正しい美しい並びが現れる。原田先生はこの並びを黒板に大きく描き、大変見やすい図として私たちに示された。その並びは非常に簡単な式で定式化され、ハドロンの基本的な構造が見て取れる。こうして視覚的に整然

とした配列を目の当たりにすると、科学の簡潔さの前に美しさすら感じてしまう。マレー・ゲルマンは、ハドロンのこのような特徴から、それらがさらに小さなクォークから構成されるという模型を提唱したそうだ。このクォーク模型は数百というハドロンの性質を予測し、実際に発見される前にその性質を予言されたものもあったという。なんと革命的な発見であったことだろう。ゲルマンが分数電荷という考え方を発見したことの重要性を先生は強調されていた。この偉大な発見について語る先生の口調には熱がこもっており、新たな発見によって科学の歴史が塗り替えられていく世紀の瞬間を垣間見たように感じられた。

今回の取材で、原田先生は学生への図の見せ方、話の流れに対して、とても気を配っておられるように感じた。こうした講義の工夫からは、学生に科学や素粒子のおもしろさを伝えたいという先生の熱意がひしひしと伝わってくる。このような熱心な指導をしてくださる先生の講義を受け、学生は未知なるものへの探究心を育てていくのであろう。さらなる発見を求めて、これからも素粒子の探究は続くのだと感じた。



◎取材・文  
小澤和浩 Kazuhiro Ozawa  
(地球環境科学専攻博士前期課程1年)



Masayasu Harada

1964年愛知県生まれ。名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了。米国シラキュース大学研究助手、名古屋大学助教授などを経て、2005年より現職。専門はハドロン物理学。主として有効理論を用いてハドロン現象の解明を進めている。

ハドロン理論研究室ホームページ

<http://hken.phys.nagoya-u.ac.jp/>

キャンパス通信

中西香爾博士に文化勲章

物質理学専攻教授\*  
上村大輔 (Daisuke Uemura)

名古屋大学理学部出身者である中西香爾<sup>こうじ</sup>コロンビア大学名誉教授に平成19年度文化勲章が親授された。

中西博士は1925年香港に生まれ、その後神戸市の旧制甲南高校を卒業し旧制名古屋大学に入学、1947年9月に卒業されている。1954年に平田義正名古屋大学教授のもとで学位を取得、助手、助教授を務められた後、1958年には東京教育大学教授、1963年には東北大学へ移られ、1969年からはコロンビア大学の教授として研究・教育に従事された。卒業生、博士研究員を数えると500人以上の門下生が現在世界中で活躍しているものと思われる。

中西博士の周辺での逸話には事欠かない。たとえば、御父君が外交官であった関係で、エジプトをはじめ世界の各地を転々とされ、その間に得た国際性を遺憾なく発揮、当時の有機化学、とくに天然物化学の分野で国際的にその存在を早くから知られたようである。単に英語に強いだけでなく、学術に対する高い志に裏打ちされていたことも事実であろう。現在の理学部A館の「くの字」に曲がったあたりの一階で、真夏の暑い時に3階の図書室からChemical Abstractsを運び込んで死に物狂いで勉強されたと聞いている。

受賞の対象は生物活性天然有機化合物の作用メカニズムを分子構造レベルで解明したことで、生物有機化学の世界の第一人者としての貢献が大きいと判断される。ほとんどの世界的な賞を受賞されているが、残っている賞は1つであると皆が思い期待しているところである。中西香爾氏のご健勝を心より祈念するとともに、次世代の真に国際人たる若者の出現を待望する。

\*2008年4月より慶応義塾大学教授



2007年7月に京都で開催された天然物化学国際会議での中西香爾博士

キャンパス通信

企画展「宇宙137億年の旅」開催

附属南半球宇宙観測研究センター長  
福井康雄 (Yasuo Fukui)

2007年9月8日から17日まで、東京・上野公園の国立科学博物館において、国立科学博物館と名古屋大学の共催による第15回上野の山発・匂の情報発信シリーズ「宇宙137億年の旅」を開催した。

名古屋大学21世紀COEプログラム「宇宙と物質の起源：宇宙史の物理学的解説」(ORIUM)が中心となって企画した展示は、137億年前のビッグバンに始まる時空をこえた宇宙の旅を体験してもらうことを目的とし、会期中、1万5765人の入場者を集めた。

会場は、「ビッグバン-宇宙と物質のはじまり」「銀河、星、惑星が生まれる」「ブラックホールに大接近」「不思議な物質と生き物の世界」「野依・赤崎記念コーナー/名古屋大学の知と創造」という5つのセクションからなり、各セクションでは、素粒子加速器や電波望遠鏡「なんてん」、「あかり」や「すざく」などの天文衛星の模型のほか、ブラックホールや磁石、細胞など、物理学の魅力を知ってもらえる多彩な展示が行われた。

これら展示のほか、アクリルレンズを使ってブラックホールの世界が体験できたり、霧箱をつくって宇宙線を観測したりする「実験・体験ステーション」を設け、クイズに答えて賞品がもらえるなどの催しを行った。また、9日、16日、17日には「宇宙のはじまり」「ブラックホールに大接近」「不思議な物質と生き物の世界」というテーマで特別講演会を開催して、盛況だった。

宇宙の歴史や科学に興味をもってもらいたい機会となったほか、名古屋大学をPRするなど、収穫の大きなイベントとなった。



グローバルCOE①

「システム生命科学の展開：生命機構の設計」

生命理学専攻特任教授  
伊藤知彦 (Tomohiko Itoh)

今年度7月にグローバルCOEプログラム「システム生命科学の展開：生命機能の設計」が採択された。このプログラムでは、システム生命科学をポストゲノム時代の新しい生命科学と位置づけ、将来の日本の研究の最前線を担う若手研究者の育成を大きな目標にしている。現在の分子生物学の発展は、ゲノム解読という大きな成果を挙げた。これは、生物をつくりあげている分子設計の全貌がわかりはじめたことを意味する。「システム生命科学」は、生命をつくる部品である分子の理解を踏まえた上で、その部品同士が複雑に相互作用してできる生物をシステムとして理解しようという学問である。このプログラムでは、基礎研究を推進する当理学研究科生命理学専攻と応用面を推進する生命農学研究科が連携しており、システム生命科学のレポーターを網羅した、世界レベルの研究拠点形成の構築を目指している。

このような新しい生命科学をつくりあげていくには「学際的能力」と「国際的能力」にすぐれた人材育成も重要である。自身の研究を深めながら、かつさまざまな異なった視野から見つめ直す能力、また、研究成果は国際的に通用しアピールできなければならない。グローバルCOEでは、研究者を目指す博士課程後期の大学院生を経済的に支援するとともに、学生の能力を高めるための企画、「学内留学」、「第2専門分野制度」、学位取得後にプラスαのトレーニングをする「プレフェロー制度」、研究交流である「リトリート」、専門講師による英会話クラスや学生による国際シンポジウム主催、海外の企業や大学の研究室への短期派遣、などの実施をはじめた。



理・農の生命系研究室が一堂に会して研究交流するリトリート

グローバルCOE②

「分子性機能物質科学の国際教育研究拠点形成」

物質科学国際研究センター教授  
渡辺芳人 (Yoshihito Watanabe)

2002年度に開始された21世紀COEに引き続いて、昨年からグローバルCOEが始まった。21世紀COEは、分野ごとに平均すると25件程度の採択であったが、本COEは12件程度の採択となり、ますます狭き門となっている。

今回の申請では、理学系と工学系の分子性物質を対象とする基礎化学分野で世界をリードする研究者が結集し、「分子性機能に重点をおく物質科学の新たな流れを生み出す総合的かつ世界水準の教育研究によって、未来を担う若い国際的研究リーダーを育成することを目指した提案」を行った。特に、大学院の講義に関して、理・工系の相互乗り入れを可能とするための統一的なカリキュラムの整備・実質化、化学系共通セミナーの実施などが初めて実現した。

さらに大学院講義やセミナーと並行して、幅広い学術的見識を養成するための様々な活動を行っている。特に、「社会における科学」を主題とするセミナーやキャリアパス教育セミナーを実施することで、高い倫理観と社会性をもった人材を育成したい。

「国際性の涵養が重要である」ことは明らかであるが、なかなか実現できない問題である。自立して世界で活躍できる若手研究者を育成する手始めとして、国際交流のためのコミュニケーション技術を教授するコースを整備した。同時に、優秀な外国人院生を獲得するためのシステムの確立、英語による講義の開講、「日独共同大学院プログラム」など海外の大学院との連携を通じて、世界に開かれた大学院教育を実現するために日々汗をかいている今日この頃である。



外国人招聘教授による英語での講義