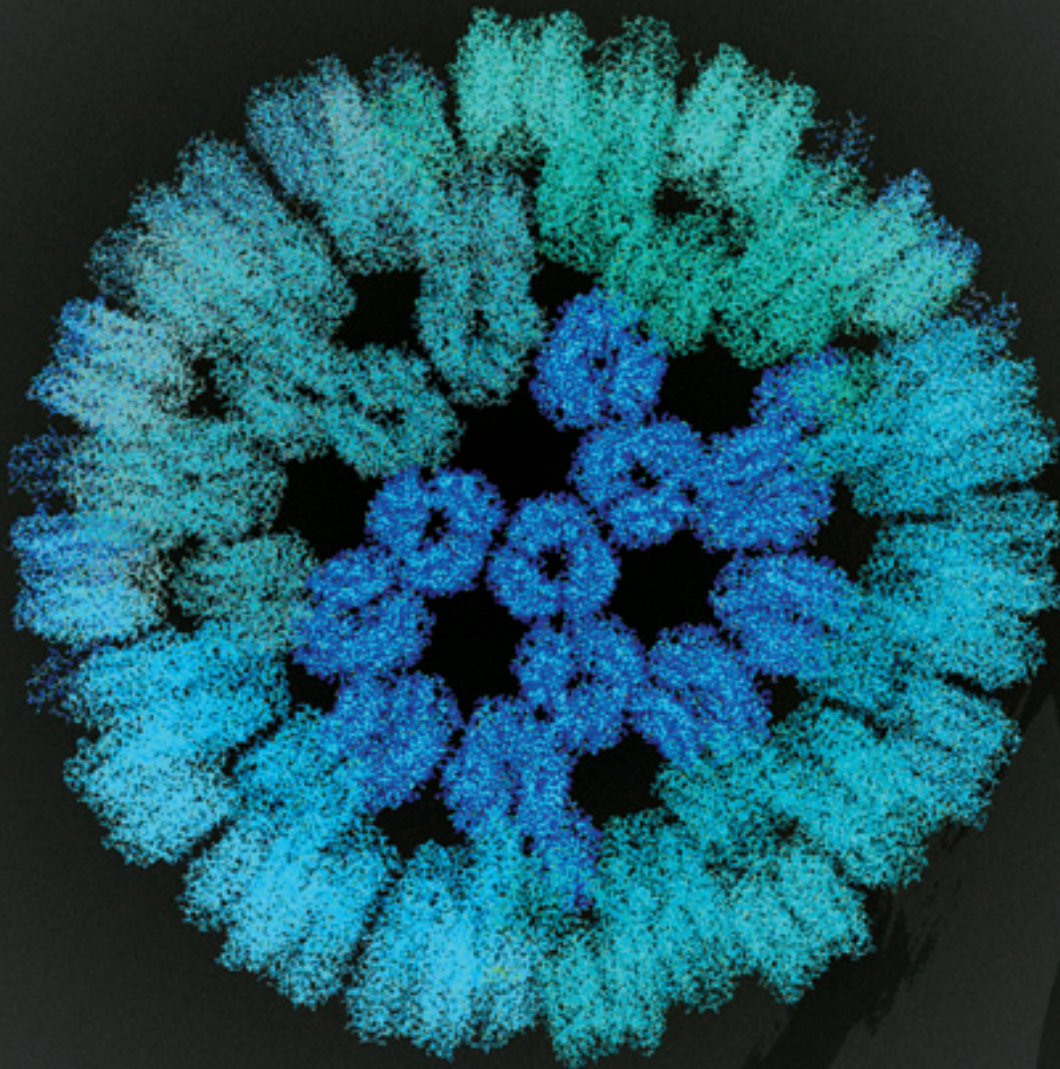


理

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 2007

12

philosophia



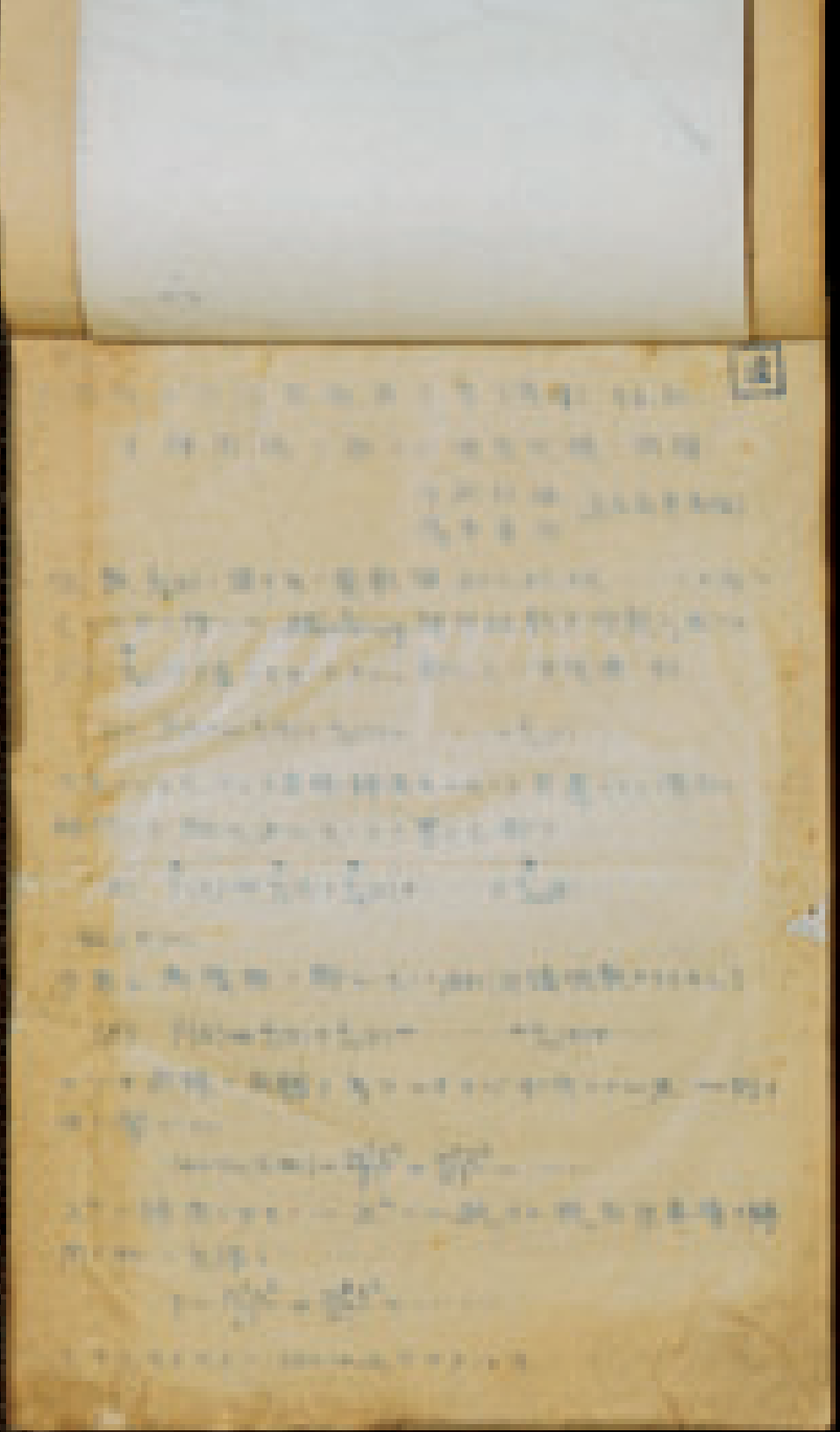
特集

「X線で探る蛋白質の動的構造」

- 04 | 光で動くプロトンポンプ ◆ 神山 勉
- 08 | 蛋白質分子の動態と機能の関係 ◆ 前田雄一郎
- 02 | 時を語るもの ◆ 吉田耕作博士 ◆ 小松彦三郎
- 03 | 理のエッセイ ◆ 堀 寛
- 12 | 理の先端をいく ◆ 大島隆義 / 上村大輔
- 16 | 講義探検 ◆ 現代数学研究 / 岩石学
- 18 | 理学部交差点

吉田耕作博士—

もう少し
わかりやすく
抽象的に
話をしてくれませんか



先生が東大を停年退官された直前の大学構内は、学生紛争の嵐が吹き荒れ、鉄パイプで武装した全共闘系の学生に、総長の呼びかけで防衛に立ち上がった学生が頭部を打たれ負傷するという事件が起きた。理学部教授会はその期に及んでも、警官隊導入の是非、その場合の条件等で議論が錯綜し、何の結論も出せない有様であった。上はそのときの先生の発言である。

先生のご専門、関数解析では、個々の関数の性質を調べるより、あるクラスの関数は1つの空間をつくっていると考え、関数をあたかもその中の点のように見なして扱う。先生は一般性のあ

る美しい理論をつられるとともに、常にその応用を心がけ、ご自身で他の分野での有用さを示してこられた。1965年シュプリンガー社から出版された“Functional Analysis”（“関数解析”）は、こうした理論展開が歓迎され、6つもの違った版を重ねた。

ご退官直後の1969年4月、数学では戦後二番目になる大規模な国際会議「函数解析学国際会議」が開かれた。この会議には造反学生たちも全面的に協力し、その準備、運営に支障はなかった。

（小松彦三郎 東京大学名誉教授）



よしだ こうぞく
吉田耕作(1909-1990)
元名古屋大学教授。日本学士院恩賜賞(1967年)

◆写真の説明

先生は1931年東大理学部数学科卒業後、大学院に残り、2年後、阪大数学科創設に際して助手になられた。そこで同僚の清水辰次郎^{*1}、南雲道夫^{*2}らとともに始められたのが「全国紙上数学談話会」という謄写版刷の同人雑誌である。ここに示した創刊号第1ページは先生の手になる。南雲道夫のバナッハ環の導入、「バナッハ環に埋め込まれた局所コンパクト群はリー群である」という先生の博士論文ができあがっていく様子は、この紙上で刻々とおっていくことができる。

1942年名大数学科創設と同時に、先生は教授として赴任され、1953年阪大、そして1955年東大に移るまで在任された。この間の最も重要な業績は1948年に発表された「線形作用素の1径数半群論」である。独立に同年同じ結果を出版したヒレ^{*3}と合わせて「ヒレ-吉田の定理」として知られる。これは、 $t \geq 0$ を強連続な径数とする指数関数 e^{tA} の理論である。先生は、これを有界線形作用素の半群とみなして、 $t=0$ での微係数として定義される生成作用素 A が満たすべき必要十分条件を与えた。これが容易に検証できる条件であったため、ヒレ-吉田の理論は、直後から先生ご自身、伊藤清^{*4}、加藤敏夫^{*5}、藤田宏^{*6}など多くの人たちによって偏微分方程式論、確率過程論等の基礎として広く活用された。

先生は、これらの功績により、1967年に日本学士院恩賜賞を受賞された。

写真は吉田博士直筆の同人雑誌「全国紙上数学談話会」創刊号第1ページ。

*1 清水辰次郎(1897-1992) 元大阪大学教授

*2 南雲道夫(1905-1995) 元大阪大学教授

*3 E. Hille(1894-1980) 元エール大学教授

*4 伊藤清(1915-)

元名古屋大学助教授、京都大学名誉教授

*5 加藤敏夫(1917-1999)

元カリフォルニア大学パークレー校教授

*6 藤田宏(1928-) 東京大学名誉教授



理のエッセイ◎堀 寛 生命理学専攻 教授

Human Zoo：ヒトは獣(ケモノ)、ただ

ほんのひと月前、Human Zooという新聞記事が目にとまった。オーストラリア南部の州都、アデレードの動物園でのこと。期間限定とはいえ、ヒトの入る檻をつくり、これをHuman Zooとよんで、なんとサルとヒトを並べて観覧していたというのだ。厳しいオーデションを通過したボランティアの彼(彼女)が、自身の思うところのヒトらしさを檻の中で演じたいらしい。さすがカモノハシやコアラなど生物進化の劇場、オーストラリア。ヒトもケモノの一員であることを巧妙に演出してしまうことには驚いた。そして「実際、(他の)動物ほど面白くはありません」という観客の厳しい批評も好ましい。たしかに「ヒトはケモノの成れの果て」である。

さて、この考えの出発点はいわずと知れたあのダーウィンである。彼の自然淘汰説はヒトの由来を示唆し、「ヒトがケモノから由来した」と推測してみせた。次の衝撃は、この進化論の影響を受けて、動物の本能とヒトの精神活動を結び付け、精神世界を神秘的呪縛から解放したフロイトの精神分析だろう。ではヒトとケモノの距離はどれだけか？ この点に関しては近年の分子進化学の成果も大切である。ここでは(筆者もいくばくかの貢献をしたのだが)生物種の数では3000万ともいわれる全現世生物の35億年の歴史が1本の系統樹として表されている。ヒトの中では1本の細い枝にすぎず、兄弟のチンパンジーとわかれたのはたかだか600万年ほど前のことである。そして決定的な最後の衝撃は2004年のヒトのゲノムDNA完読である。これにより、ヒトの全遺伝情報はDNAのA、T、G、Cの4文字で書かれた塩基配列として記載され、それ以上でも以下でもないことが示されたのだ。

ヒトのゲノムはこうして他生物のゲノムとも容易に比較可能となった。だが比較すればするほど、その差の少なさには驚くのである。「ヒトのゲノムとメダカのゲノムを比べるとわかるのですが、その95%以上の遺伝子は同じなんです」などと私は学生に話す。すると、誰でも「エー、あのサカナとヒトとがそんなに似ているの？」とその距離の近さに驚き、また失望もするのだが、今やそれは生物学の常識である。それほどサカナとヒト、ましてサルとヒトのDNAとしての距離は近い。

では何が違えばヒトは人なのか。もし私があのアデレードの動物園の檻の中に入り、ヒトを演ずるとしたら、どのようなヒトを演じてみせるのか。そう、きっと

ああ 人は獣 牙も毒も棘もなく

ただ痛むための涙だけを持って生まれた

裸すぎる獣たちだ*

というあの歌びとの詩を謳いながら、辿り着けもしないヒトの“涙の遺伝子”なるものを、いつまでも、どこまでも追って見せているのかもしれない。

*「瞬きもせず」 作詞・作曲 中島みゆき

©1998 by YAMAHA MUSIC FOUNDATION All rights reserved. International copyright secured.

財団法人ヤマハ音楽振興会 出版許諾番号07021P(この楽曲の出版物使用は、(財)ヤマハ音楽振興会が許諾しています。)

Hiroshi Hori

生命理学専攻教授。1945年広島生まれ。広島大学医学部、同大学院卒業。医学博士(広島大学)、理学博士(名古屋大学)。広島大学原爆放射能医学研究所助教授を経て1992年より現職。専門は進化遺伝学。現在はゲノム進化やチョウの擬態の分子機構に興味をもっている。

X線で探る蛋白質の動的構造

蛋白質は、酵素として働いたり、物質の輸送を担うほか、

細胞の構築や運動性、さらには免疫に関わるなど、生体内でさまざまな役割を果たしている。

蛋白質の構造やその働きを研究することは生命現象探究の大きなテーマの1つだ。

その研究手段として注目を集めているのが大型放射光施設である。

世界有数の放射光施設であるSPring-8を利用した

蛋白質研究の最前線に立つ2人の研究者に語っていただいた。

(2006年12月2日、第12回理学懇話会より)

光で動くプロトンポンプ

神山 勉 物質理学専攻教授



Tsutomu Kouyama

1951年生まれ。1974年名古屋大学理学部卒業、1979年同理学研究科博士課程満了。カリフォルニア大学サンフランシスコ校などでポスドク生活を5年間、理化学研究所の研究員として11年間過ごし、1995年より現職。

細胞膜の不思議な働き

生き物が生きていくためには、エネルギーが必要です。私たち人間も、食べ物を毎日食べて、食物中の物質を分解することでエネルギーを得ています。最近、蛋白質の働いているときの構造を、詳しく分析することが可能になってきました。生物の中のミクロな世界に踏み込むことで、エネルギーを取り出す巧妙な仕組みが見えてきたのです。

ここでは、光エネルギーを利用して「陽子」=「プロトン」を運ぶ蛋白質を紹介したいと思います。細胞膜や細胞内小器官を包む膜ではいろいろな物質がさかんに輸送されています。プロトンポンプとは、プロトンを能動輸送する蛋白質のことです。生命体は、プロトンポンプが膜の内外に生み出したプロトンの濃度差を、生体内の「石油」に相当するアデノシン三リン酸という高エネルギー化合物の合成に利用しています。

約35年前、塩湖に生息するバクテリアの細胞膜から「第二の光合成系」が発見されました。この「光合成系」はバクテリオロドプシンとよばれる一種の膜蛋白質^{*1}で構成され、色素としてレチナール^{*2}を含みます(図1)。バクテリオロドプシンという命名は私たちの目の中で光受容体として働くロドプシン^{*3}との類

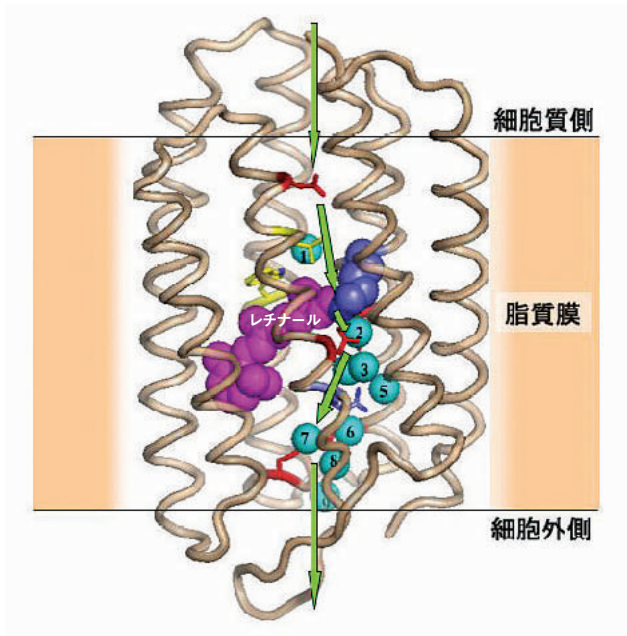


図1 バクテリオロドプシンの構造
主鎖構造をリボンモデル、荷電性のアミノ酸残基を赤色または青色のスティックモデルで表示。中央の紫色で示した部分がレチナール。水色の球は水分子を表す。緑の矢印はプロトンの移動経路を示す。

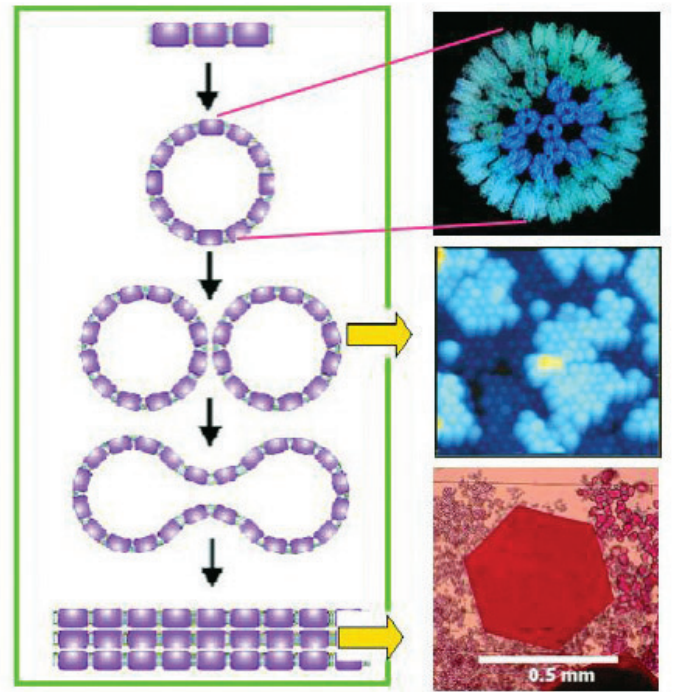


図2 膜融合法によるバクテリオロドプシンの3次元結晶の作成
シート状の2次元結晶をサッカーボール様膜小胞体に変換した後、膜小胞体を互いに融合させ、平面膜が積層した結晶を得る。

似性に由来しますが、ロドプシンが光の明暗を検知するのに使われるに対して、バクテリオロドプシンは光で駆動するプロトンポンプとして働いています。

生体高分子を結晶にする

X線を使う分子の構造解析は、よく使われる方法です。放射光の出すX線は、ビームがきれいにそろっているので、小さい結晶をシャープに照らすことができます。結晶の構造に応じて、散乱されたX線は規則正しい模様を描きます。この模様を分析すると、分子の構造を知ることができます。

兵庫県にあるSPring-8は、世界最高性能の放射光実験施設で、私たちの研究もこの施設のX線を利用したものです。

バクテリオロドプシンは細胞膜上で、5ナノメートル(5×10⁻⁹m)ほどの薄い二次元結晶を形成しています。しかし、結晶構造を調べるには少なくとも0.1mm角の三次元結晶が必要です。これより小さくは、散乱されるX線量が足りません。この結晶づくりが難しく、良質な結晶をつくるのに、研究者は苦勞しています。

膜蛋白質は、創薬に関する蛋白質科学*4の研究推進においては最重要ターゲットと位

置づけられています。しかし、水に不溶であるため、結晶化するのが非常に難しいと考えられてきました。そのような状況の中で、私たちは膜融合法とよんでいる結晶化法を開発しました(図2)。この方法では、シート状構造体からサッカーボール様膜小胞体への変換をうながし、ついで、膜小胞体が互いに融合するのをうながします。このような過程を経ることにより、座布団状の膜小胞が積み重なってできた結晶を得ることができました。



- *1 膜蛋白質
細胞膜や細胞内小器官を包む膜に存在する蛋白質のことで、生理活性をもつ状態では水中に溶けだすことはない。細胞質中に漂って存在する水溶性蛋白質と区別するのに使われる。
- *2 レチナール
ビタミンAの誘導体で、蛋白質に結合すると、緑色光ないし黄色光を吸収するようになる。そのため、レチナールを結合した蛋白質の多くは、紫色ないし赤色を呈する。
- *3 ロドプシン
命名はバラ色を意味するギリシャ語に由来する。
- *4 創薬に関する蛋白質科学
脳内細胞などの細胞膜には多種類の情報伝達物質の受容体が存在する。それらの構造情報が得られると、多くの病気を治療するための薬を効率的に開発できるようになる。

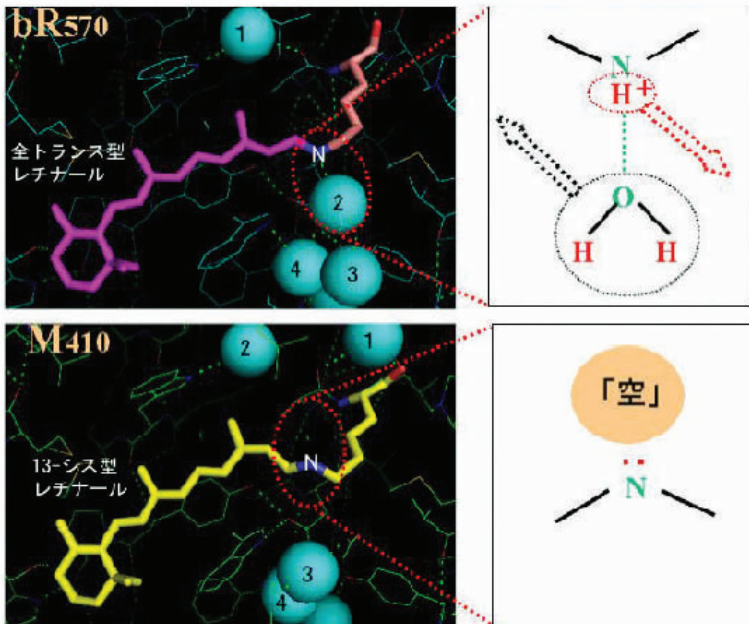


図3 バクテリオロドプシンの光反応に伴う変化
バクテリオロドプシンの照射前(bR570)および反応中間体(M410)の構造(左図)。光反応に伴い、活性中心にあるレチナールの構造が変わる。水分子が細胞質側に移動すると、レチナールからプロトン(H⁺)がはずれ、細胞外側に移動する(右図)。

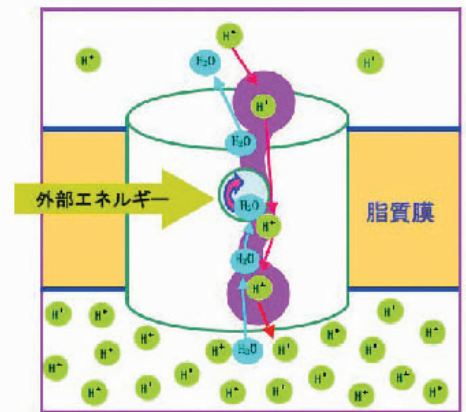


図4 「プロトン(H⁺)／水分子(H₂O)対輸送」のイメージ

バクテリオロドプシンの構造変化

私たちはこのように作成した結晶を用いてバクテリオロドプシンの反応状態の構造を調べてきました。

図1に示した照射前の状態では、蛋白質の中央を貫くプロトン輸送経路に沿って9個の水分子が存在しています。それらのほとんどがレチナール結合部位から細胞外側の表面に至る輸送経路に偏って存在しているのが特徴的です。数珠繋ぎになった水分子を介してプロトン移動が起こるのであろうとの考えがありましたが、その考えにたてば、反対側(細胞質側)の領域に水分子が存在しないのが謎めています。この謎に対する答えを反応状態の構造解析から見つけることができました。結論からいえば、反応状態では細胞質側の領域にも水分子が入り込み、プロトン輸送経路が一時的につくられるのです。

もう少し詳しく説明しましょう。プロトン輸送サイクルがスタートするのは、レチナール色素が光を吸収して全トランス型(=直線状の構造)から13-シス型(=「く」の字型の構造)に異性化するときです(図3)。レチナールの構造が変わると、まわりのアミノ酸残基が押しつけられ、そのわずかな構造変化が蛋白質全体の構造変化へと伝播し、いくつかの特徴的な構造を現しながら最終的には数ミリ秒で始状態に戻ります。この間に1個のプロトンが細胞質側から細胞外側に輸送されます。

蛋白質内の水分子の役割

私たちが注目しているのは、プロトン移動に先立って蛋白質内の水分子が移動するという現象です(図3)。このような観測結果をもとに、「バクテリオロドプシンは単純なプロトンポンプ

ではなく、『プロトン／水分子』の対輸送体である」という説を、私たちは提唱しました。すなわち、細胞外側の領域にあった水分子が細胞質側に移動することで、プロトンが細胞質側から外側方向に流れる経路が作り出されるのであろう、と私たちは考えています(図4)。

私たちの主張は、現時点では、まだ仮説段階にあると考えています。たとえば、水分子には番号がついてないため、どの水がどのように動いたかは決めることはできないではないか、という反論があります。また、水分子の動きを制御している機構はなんなのか、という質問もあります。後者の問いには、蛋白質内の空隙の形態変化が大きな役割をしていると考えていますが、実験的裏づけを得るために、さらに高度な測定手法の開発に取り組んでいきたいと考えています。



蛋白質の結晶構造解析に活躍する 放射光実験施設 SPring-8

兵庫県の播磨科学公園都市にあるSPring-8(スプリングエイト: Super Photon ring-8GeV)は、フランス・グルノーブルにあり欧州諸国が共同で運営するESRF(European Synchrotron Radiation Facility)、アメリカ・シカゴ郊外にあるAPS(Advanced Photon Source)とならぶ世界最高性能の放射光実験設備である。

電子を円形加速器の軌道上で光速に近い速度で走らせると、接線方向に強い電磁波(X線から可視光まで)が放射される。この現象をシンクロトロン放射とよぶ。これは素粒子の世界を探る高エネルギー物理学実験には好ましくない現象である。高エネルギー物理学実験ではできるだけ高いエネルギー状態で素粒子を衝突させようとするが、シンクロトロン放射のため粒子は次第にエネルギーを失うからである。しかし、逆にX線の光源として見ると、ビームの平行性が高い、輝度が高い、波長を(ほぼ)任意に選べる、という優れた特性をもつ。

一方、X線には結晶格子によって回折されるX線回折とよばれる現象がある。これを利用して、X線の回折の結

果を解析して結晶内部で原子がどのように配列しているかを決定することができる。つまりシンクロトロン放射によって発生したX線を蛋白質の結晶に照射することで、結晶構造を観察する。これがSPring-8の仕組みである。施設は蛋白質の構造解析に代表される生命科学のほかに、物質科学、地球科学、環境科学、産業利用などの分野で多くの研究成果をあげている。

現在、国や地域ごとにシンクロトロン放射光利用施設の建設が進み使用が開始されつつある。これは最高の性能をもつ装置は世界に数台でよいが、8-9割の研究課題に応じられる装置が研究現場の近くに必要である、との考えによるものだ。他方、もっと高い性能をもった光源(高輝度、高指向性など)を求めてX線自由電子レーザーも建設されようとしている。生命科学の研究、とくに蛋白質の構造から生命機能を解明しようとの立場からは、どの程度の性能をもった装置がどの程度の距離にあれば効率的で有意義な研究が可能なのか、慎重に検討する必要がある。(前田雄一郎)



SPring-8全景 写真提供:(財)高輝度光科学研究センター

蛋白質分子の動態と機能の関係

— 動きがおかしい蛋白質は病気を起こす? —

前田雄一郎 生命理学専攻教授



Yuichiro Maeda

1947年栃木県生まれ。東京大学理学部物理学科卒。名古屋大学理博(1978)。EMBL(欧州分子生物学研究所)グループリーダー(8年間)、松下電器国際研究所所長(6年間)、理化学研究所主任研究員(8年間)を経て、2004年より現職。専門は、蛋白質の原子構造と動態に基づいて細胞の機能を解明する構造生物学。

「筋収縮の調節」の仕組み

私の専門は筋肉の収縮を調節するメカニズムの研究です。蛋白質の構造を解明して生理学の課題を解く学問ということができます。本日は、研究の現場で実際に考えていることをありのまま、しかし専門家でなくても理解できるようにお話したいと思います。

基礎知識として、まず「筋肉の構造」、そして「収縮のしくみ」について説明します。私たちの手足の骨格筋も、心臓の筋肉(心筋)も、光学顕微鏡で観察すると横紋が見えます。これら横紋筋の薄い切片を電子顕微鏡で観察すると、ミオシンという分子からなる「太いフィラメント」と、主にアクチンという分子からなる「細いフィラメント」が規則的に配列しており、その配列が横紋(蛋白質濃度の大小)の原因になっていることがわかります(図1)。筋肉の収縮は

2種のフィラメントの間の滑りの結果です。その滑りの力はどのように発生するか? 詳細はまだわかっていませんが、「太いフィラメント」上にミオシン分子の頭部が突起として並び、これが「細いフィラメント」のアクチンと結合・解

離を繰り返すことが原因であることは間違いありません。

次に「収縮の調節」について。調節メカニズムとそれを担う蛋白質を発見したのは当時東大におられた江橋節郎*1さんです。江橋さ

筋細胞(筋繊維)

筋原繊維

細いフィラメント
分子模型

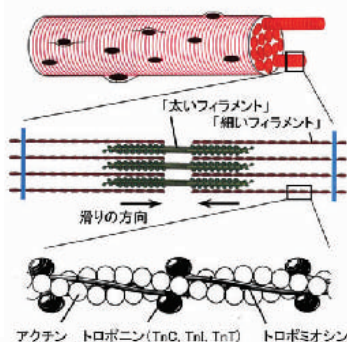


図1 横紋筋の構造

筋細胞は筋原繊維の束である。筋原繊維に横紋が見えるのは、「太いフィラメント」と「細いフィラメント」の規則的配置による。江橋らが提案した「細いフィラメント」の分子模型は「筋収縮のカルシウム調節」のメカニズム研究の出発点となった。

んは弛緩因子を探す目的で研究を開始し、ついに筋細胞内でのカルシウムイオン (Ca^{2+}) が担う信号伝達システムの全貌を発見しました (図2)。弛緩状態の筋肉細胞の中では、 Ca^{2+} 濃度は1リットル当たり 10^{-7} モル以下と、非常に低く抑えられています。それは細胞中の筋小胞体という袋の働きです。筋小胞体の側面には多数のカルシウム汲み上げポンプがあり、それがいつも働いて細胞内の Ca^{2+} 濃度を非常に低く抑えるとともに、筋小胞体内に Ca^{2+} を蓄えます。脳からの「収縮せよ」という指令が筋小胞体に届きますと、その両端にあるカルシウム放出チャネルから細胞の中に向かって Ca^{2+} を放出します。

こうして細胞内の Ca^{2+} 濃度が一過的に上昇します。この濃度上昇によって「細いフィラメント」の上にあるトロポニンに Ca^{2+} が結合し、トロポニンは「細いフィラメント」を「on」状態とします。その結果ミオシンの結合・解離が回転し始め収縮が開始されます。「収縮せよ」との指令が止むと、 Ca^{2+} ポンプだけは働いているので、細胞内の Ca^{2+} 濃度は下がり、トロポニンから Ca^{2+} は解離し、「細いフィラメント」は「off」となって筋は弛緩します。

江橋さんたちは一連の仕事の締めくくりとして、「細いフィラメント」の分子模型を提案しました (図1)。1969年のことです。当時、江橋さん本人もこの分子模型をそれほど重要だとは考えなかったようです。しかし、この分子模型



は世界中の研究者の知的興味をおおいに刺激しました。 Ca^{2+} がトロポニンに結合する、その信号がトロポミオシンに伝わる、それがアクチン全体に伝わる、そしてトロポニン、トロポミオシン、アクチンの分子数の比が1:1:7である、これまで未知であったトロポミオシンの局在も役割も明確になった。この分子配置は美しい！しかし具体的に何がどう伝わるのだろうか、そのメカニズムを知りたい！より深くメカニズムを知るには分子模型では不十分で個々の蛋

白質分子の原子構造 (原子の座標) を知らなくてはならない、今や分子模型から原子構造の解明に向かう時だ！1972年に名大の大学院に入って研究を始めた私も、原子構造を解明してカルシウム調節のメカニズムを解明する研究に飛び込みました。

*1 江橋節郎 (1922-2006)
生理学者。カルシウムイオン濃度の変化が細胞のはたらきの開始・停止に使われていることを世界で最初に示し、トロポニンを発見した。文化勲章受章者。

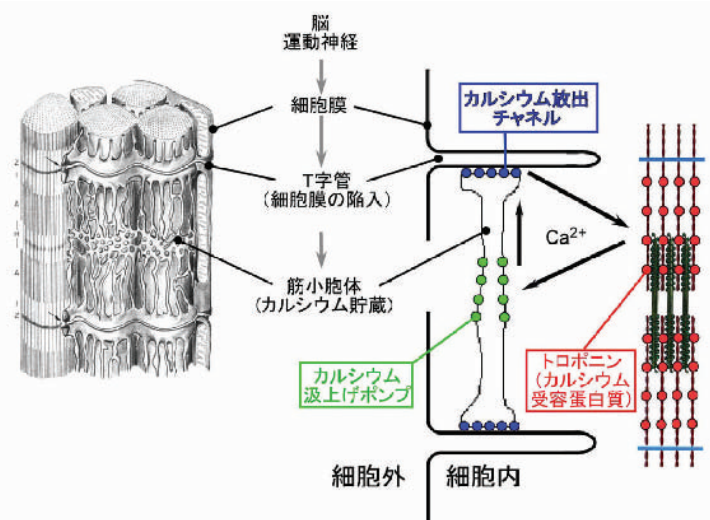


図2 神経の興奮から筋収縮への信号伝達経路とカルシウムの役割
カルシウム放出チャネル、トロポニン、カルシウムポンプの3つの「分子装置」はすべて江橋らによって発見された。

分子スイッチの解明

これから私たちの1998年の仕事について説明します。私たちは、カルシウム調節の中心にある蛋白質、トロポニンの結晶構造解明に取り組みました。トロポニンはC、I、Tとよばれる3つのポリペプチド鎖それぞれ1本から成り立っている3量体*2です(図1)。名前はそれぞれの役割分担を表しています。Cはカルシウム結合、Iはアクチン・ミオシンの結合障害、Tはトロポミオシン結合です。

私たちはまず小さな複合体から始めようということで、「トロポニンC」が「トロポニンI」の小さな断片と結合した小さな複合体を結晶にしました。その当時、トロポニンCの単独の結晶構造はカナダのグループが解明していました。これは蛋白質としては非常に特異なかたちをしていて、N領域とC領域に分かれ、真ん中を一本のアルファヘリックスが結んでいるという亜鈴形をしています(図3A)。

C領域、N領域は互によく似たかたちをしていて、それぞれ2つのCa²⁺結合部位があります。結晶中では、C領域にはCa²⁺が結合し、開いたキノコの傘のようなかたちをしていました。N領域にはCa²⁺は結合しておらず、キノコの傘も閉じていました。このN領域にCa²⁺が結合すると、C領域と同じように傘が開くこともNMRの測定からわかっていました(図3B)。傘が開くとそこにはトロポニンIの一部が結合すると考えられていました。つまりN領域とC領域という2つの傘があるので相手のトロポニンIにも2つの(トロポニンCとの)結合部位があるだろう、と考えられていました。そしてC領域の結合相手はトロポニンIの残基1-47の部分であることがわかっていました。しかしN領域の結合相手はまったくわかっていませんでした。

そこで私たちはとにかくトロポニンCとトロポニンI(1-47)の複合体の結晶をつくり、ここでの2分子の結合の様子を知ろうと考えました。こんなちっぽけな複合体ですが、蛋白質と蛋白質の結合を実際に結晶構造で見るとはとても大事です。最先端の大型計算機といえども蛋白質同士の結合の様態と場所を未だ予測することができないからです。しかし得られた結晶構造(図3C)は私たちが予期した以上

のことを語っていました。私たちは、C領域での疎水性部位とトロポニンI(1-47)の側鎖の入り組み方の詳細を知りました。同じような側鎖の入り組み方を相似のN領域にも想定すると、その結合相手はトロポニンI(117-127)の部分に違いないと予測できたのです(図3D)。しかもこの部分にすぐ隣接する部分は、以前より、アクチンに結合してアクチンとミオシンの結合を阻止するブレーキ部であるとわかっていました。

そうすると、ストーリーはできてきます。Ca²⁺がN領域に結合してN領域の傘を開く。傘が開いたところに、この117-127が引き込まれる。隣接するブレーキも付いてくるのでブレーキがアクチン上から外れる。つまり、Ca²⁺の結合が引き起こす分子スイッチの仕組みが見えてきたわけです。結晶構造を解いて蛋白質-蛋白質の結合の詳細を「見る」ことはやはりすごい。同時に、「見た」構造を基に「まだ見えない」構造を予測するという科学的推論も重要です。

しかし、これを発表したときには、多くの人はすぐに信用してくれませんでした。科学的推論はあくまでも推論ですから、実験的に実証なくてはならない。それで私たちは、トロポニン3量体の結晶構造を解きました。2003年のことです。この結晶構造で初めて、トロポニンが発見されてから実に38年目にして、3本のポリペプチド鎖がどのように絡み合っているのかその全体像がわかりました

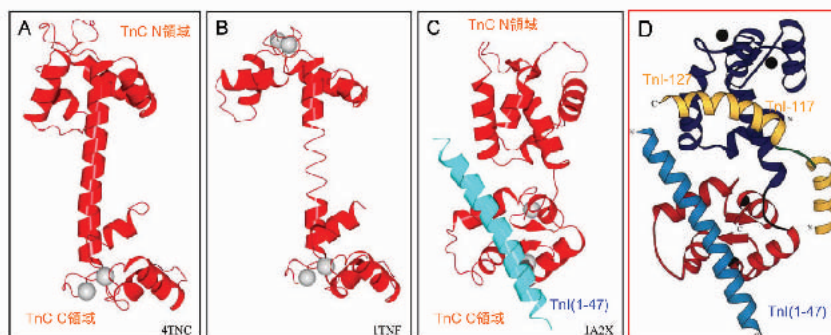


(図4A)。また、この結晶ではCa²⁺結合部位のすべてにCa²⁺が結合していましたので、トロポニンCのN領域でのトロポニンIとの結合の構造が見えました。そしてそれは予想したとおりでした。こうして私たちは、Ca²⁺結合によって駆動される分子スイッチを解明しました。

しかし、このCa²⁺結合の信号がどのようにトロポミオシンに伝わるのかについては全然わからないままです。また、カルシウム調節のメカニズムの全体を理解するには、やはりトロポニン、トロポミオシン、アクチンすべてを含む複合体の結晶構造を解いて、原子構造を知る必要があるでしょう。これからやるべきことがたくさんあります。「細いフィラメント」上のトロポニン分子(図4A)の向きすらまだわかっていません。

揺れの異常が心臓病を引き起こす

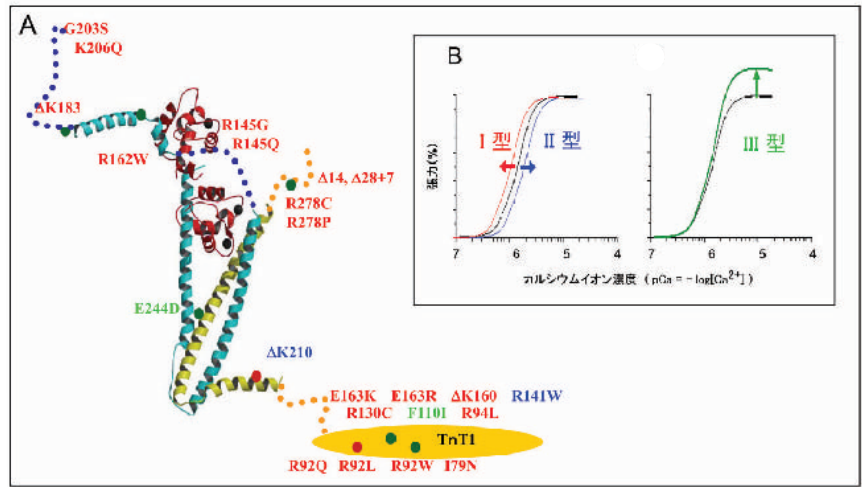
これからの研究として有望だと考えている計画についてお話をします。トロポニン3量体の結晶構造を解いたときに、ちょうど九州大学



Vassilyev D, et al. (1998) PNAS 95:4847-4852

図3 トロポニンCとトロポニンIの結合

蛋白質をリボン表示している。A. トロポニンC単独の結晶構造。C領域には2つのCa²⁺(銀色の球)が結合し構造は開いている。それとよく似たN領域にはCa²⁺が結合していないため構造は閉じている。B. N領域にCa²⁺が結合すると構造が開く。C. 1998年に私たちが発表した構造。開いたC領域にTnI(1-47)が結合している。D. Cをもとに私たちが予測した構造。開いたN領域にはTnI(117-127)が結合するに違いない。



結晶構造は Takeda S, Yamashita A, Maeda K & Maeda Y (2003) *Nature*, 424:35-41 による

図4 トロポニン3量体の結晶構造と心臓病を引き起こす変異

A. 2003年に私たちが発表した3量体(赤、TnC:空色、TnI:黄、TnT)の結晶構造の上に心臓病の原因となるアミノ酸残基の変異箇所をE244Dなどと図示。点線で示した構造は、結晶に含まれていたが乱れているためか原子位置を確認できなかった部分。TnT1部分は結晶に含まれていない。変異はそれが引き起こす機能変調の型によって色分けしている。B. 機能変調の型(概念図)。縦軸、発生張力。横軸、Ca²⁺濃度。

医学部の大槻磐男・森本幸生グループによる興味深い仕事が始まりました。それは「遺伝性心疾患」には「トロポニン変異」で起こるものがたくさんあるというものでした。つまり、トロポニンのたった1つのアミノ酸が他に置き換わっただけで心臓の重い病気になります。若年性の突然死を引き起こし、とくに男性に多い肥大型心筋症はその一例です。また、拡張性心筋症は心臓移植でしか治療できない病気としてよく報道されます。九州大学のグループは、そういう家系の患者さんの心臓のトロポニンの異常(以下では「変異」トロポニンとよびます)を調べて、その変異トロポニンを大腸菌につくらせます。それをウサギの心筋に戻します。ウサギの心筋とヒトの心筋は大きく違わないため、これでも機能の異常は十分再現します。こうして研究室の中で、蛋白質の上の1つのアミノ酸置換で起こる機能変調を調べることができます。そういう例はたぶんほかの病気の研究ではないと思います。

この実験を繰り返した結果、非常に興味深いことがわかりました。変異トロポニンを30種調べたところ、それによる機能変調はたったの3種類しかありませんでした。張力—Ca²⁺濃度の関係を調べると、正常なトロポニンを持つ筋肉に対して、一群の変異トロポニンを持つ筋肉ではより低いCa²⁺濃度で大きな張力が出ます。つまり、Ca²⁺に対する感受性が亢進しています。これをI型の変異とよぶことにします。II型は逆で、Ca²⁺に対する感受性が減少します。III型は、Ca²⁺濃度によらずに、張力が2割方ふえています。

心臓病の機能変調が3つの型だけである、ということは何を意味するのでしょうか。これは「カルシウム調節」のメカニズムを2つか3つの要素メカニズムに分解できることを示していると考えています。さらに重要なことに気が付きました。I型、II型、III型の異常を起こすトロポニンの上のアミノ酸の位置を私たちの結晶構造の上に図示しました(図4)。そうすると、特定の型の機能変調が蛋白質のある特定の空間的な部分に集中しているのではなく、全体に散らばっていることがわかりました。蛋白質

の構造領域と要素機能が1対1に対応するような単純な話ではないのです。では何を意味しているのか。これは私の直感ですが、この蛋白質は多分、いろいろ揺れているのだろうと思います。アミノ酸の置換があるとその揺れ方に異常が生じる。揺れ方の異常が機能変調、つまり病気という結果になるのではないかと。

揺動を測定する新たな手法

これからトロポニンの働きを解明するためには、蛋白質分子の揺れを理解するべきだろうと考えています。構造の揺動が重要であるという間接証拠はすでにいくつか集まっています。しかし、実際に構造の揺れを測定することが必要です。この目的のためにはNMR法*3を使うしかない。正常なトロポニンと心臓病を起こす変異トロポニンについて、分子の揺れを実際に測定する。分子の揺れが両者で異なることがわかれば、その揺れの違いこそが病気を起こす原因なのではないか。逆にトロポニンの働きの原因が分子の揺れにあることがわかってくるのではないかと我々は期待しています。

ここで新しい点は、蛋白質分子の構造そのものではなく、構造の揺れ(動態)が機能の直接の原因ではないかと考える点、実際に動態を測定する点、さらには人工的変異を使うのではなく、実際に遺伝病を引き起こす変異を使うという点にあります。

今、NMR法を使うと申しましたが、従来の蛋白質NMR法では、分子量が2万までしか測定できないとの制限がありました。トロポニンの場合には、中核部分だけで5万の分子量があ

るため、従来の方法は使えません。いままでのNMR法が大きな分子を扱えなかったのは、必要以上の原子を(スピンをもつ)同位体原子に置き換えているのが原因でした。しかし、首都大学東京の甲斐荘正恒さんが10年間の開発研究の後、今年(2006年)発表されたSAIL法*4では、必要最小限の原子を同位体原子に置き換えます。そのためには、そのような特殊なアミノ酸20種を人工的に合成して、それを無細胞蛋白質合成系の助けで蛋白質をつくります。この方法を使えば分子量5万から8万の蛋白質の全原子の測定が可能となります。甲斐荘さんは、2007年4月から名古屋大学に移られて研究を続けられます。SAIL法の技術を完成させ、今後の世界の標準にすることが目標です。SAIL法を駆使してトロポニンという重要な蛋白質の研究を進めた、しかも分子内の揺動を知ってメカニズムを知るといって蛋白質研究の新しい地平を拓くことができた、ということになれば、SAIL法もまた広く使われるようになるでしょう。

*2 3量体
3つのポリペプチド鎖(蛋白質分子)が結合して形成する複合体。

*3 NMR法
核磁気共鳴法。原子核のスピンと外部磁場(ラジオ波)の相互作用から原子間相互間の距離と原子の揺動を知る方法。この方法によって水溶液中の蛋白質の原子配置と原子の揺動が解明できる。

*4 SAIL法
立体整列同位体標識法。NMR法のための蛋白質調製法。NMR法を蛋白質に適用するには、炭素原子等を同位体原子に置換する必要があるが、同位体原子のみを含む培地中で大腸菌に蛋白質をつくらせるとすべての原子が置換され逆にNMR信号が過多となり構造解明に支障を来す。SAIL法はこの問題を解決するために考案された。

革命前夜の物理学

タウ・レプトンの崩壊探索から未知の素粒子世界の発見に挑む

大島隆義 素粒子宇宙物理学専攻教授

素粒子と宇宙

宇宙はビッグバンで始まり、膨大なエネルギーから素粒子と反素粒子*1が同数生まれた。そこは想像を絶した高圧・高温*2の、高エネルギー素粒子のみが存在する極微の世界である。自然法則も対称で、シンプルだった。

宇宙の膨張とともに温度が下がり、水蒸気が水に姿を変えるように真空中に相転移が起こる。真空の対称性が破れ、素粒子が質量をもつようになる（以下、素粒子を単に「粒子」と

記す）。この結果、粒子と反粒子の自然法則に極々わずかのバランスの崩れが生じ、粒子が優勢となった。このバランスの崩れのために、宇宙、わが銀河、地球、さらにはわれわれ自身が、「粒子」からなる「物質」でつくられた。「反粒子」でできた「反物質」の宇宙は、見つかっていない。

この「標準理論」*3シナリオは粒子・反粒子世界のバランスの崩れを必然的に導き、そ

の背後に潜む「質量」を生成する未知の「ヒッグス粒子」*4の存在を预言する。さらに「標準理論」を超えて、宇宙創世の高エネルギー世界ではわれわれの知る電磁気力、強い力、弱い力の三種の力（図1）は「大統一」された単一のものであった、と現代の研究は推測し、「超対称性粒子」（図1）とよぶ未知の粒子世界の存在をも预言する。これらの超対称性粒子群を、以下、スーパー粒子とよぼう。



Takayoshi Ohshima

1946年大阪市生まれ。名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了。米国ロチェスター大学研究員、東京大学原子核研究所助手、高エネルギー加速器研究所助教授を経て1995年より現職。専門は素粒子実験物理学で、Bファクトリーでの粒子・反粒子の対称性の破れ、タウ・レプトン崩壊での未知の現象探索など。

図1 素粒子ファミリーのモデル

積み木の左は基本粒子であり、上の二段は陽子や中性子などを構成するクォーク、下の二段は電子やニュートリノなどのレプトンを示す。上から下への4つの粒子ごとにファミリーを構成し(たとえば、u, d, e, ν_e)、左から右へと大きな質量をもつ。本文に登場するタウ粒子は第三ファミリーのレプトンである。右の積み木には、電磁気力を介する光子(γ)、強い力で原子核を構成するグルーオン(G)、原子核の崩壊を引き起こす弱い力のボソン(W, Z)を示す。球「H」と示したのはヒッグス粒子であり、これらが標準理論の素粒子たちである。背後にこれらの素粒子たちとは瓜二つだが、スピン量子数が異なる「超対称性粒子」群が控える。なお、クォークは電磁気力、強い力、弱い力の三つの力と作用するが、タウ粒子を含む荷電レプトンは電磁気力と弱い力、電荷をもたないレプトンであるニュートリノは弱い力のみ作用する。



図2 電子・陽電子衝突型加速器KEKBファクトリーの Belle素粒子検出器

写真はKEK(高エネルギー加速器研究機構)におけるBelle素粒子検出器の建設最終段階の風景。円筒型検出器を側面から見たところで、電子ビームが写真右から検出器中心軸を通り入射し、逆方向からの陽電子ビームと検出器中央で衝突し素粒子反応を起こす。本学出身者の小林・益川の理論は標準理論の骨格を構成するものであり、対称性の破れを必然のものとして説明する。これを実験的に検証するのがBファクトリーであり、私たちのグループはBelle国際共同実験(13カ国、400名の研究組織)の最大規模の大学チームとしてB物理ならびにタウ物理の研究に従事している。

未知の粒子を求めて

スーパー粒子は、「質量」が陽子質量の数百倍から数100万倍と推定される。アインシュタインの示したように、「エネルギー」と「質量」は等価である($E=mc^2$)。陽子質量の数100万倍=10¹⁵電子ボルトは大きすぎて、現有の加速器の限界、10¹²電子ボルトを大きく超える。したがって常識では、未知の粒子を生成し、その存否を検証できない。しかし、素粒子の世界は「量子力学」の支配する極微の世界であり、「不確定性原理」*5がはたらく。極々短時間の現象に限れば、確率は相当小さいが、不確定性関係のためにエネルギーが大きくゆらぎ、10¹⁵電子ボルトの高いエネルギー状態も存在し得る。その時、スーパー粒子が極短時間あらわれ、標準理論では起こりえない粒子反応を生み出す可能性がある!

崩壊の物理過程がよく知られ、かつ最も重いレプトンである「タウ」粒子(τ) (図1)はこれら未知の粒子の存在に極めて感度が高く、通常起こりえないと考えられる崩壊様式*6を引き起こすと期待される。しかしながら、その発生頻度は、未知の物理のため確定的には予測できない。

私たちの研究グループは、世界最高の衝突強度を誇るわが国の電子・陽電子衝突型加

速器施設「Bファクトリー」でのBelle(ベレ)国際共同実験(図2)において、従来の数百倍におよぶ10億個のタウ粒子崩壊事象という膨大なデータを収集し、本学の高エネルギー実験データ解析施設の高速コンピューター・システムを集中的に活用し、かつ、ユニークな物理解析法を考案して、50種におよぶタウ粒子崩壊様式を、世界最高の感度で追求している。

一例として、タウ粒子がミュー粒子と光子に崩壊する反応($\tau \rightarrow \mu\gamma$ 崩壊)をみよう(図3)。既知の物理機構に従えば、このような崩壊は起こりえない。ところが、スーパー粒子が存在すれば、十分実験的に検出できる頻度で崩壊が起こり得る。このような未知の反応事象を見出せば、即新しい物理現象の大発見であり、未知の素粒子世界が存在することの証明となる。これらの粒子の存在は荒唐無稽なものでなく、多くの実験、理論研究から予測され、今の加速器で到達しえるエネルギー限界の「ほんの鼻先」にある、と推論されている。

本研究をはじめ、多くの探索実験が世界で進行中であり、どこから新しい素粒子世界が顔を出すか予測はつかないが、ぼつぼつ発見に至るであろうと期待されている。データ量の蓄積とともにわれわれの探索感度は年々

向上しており、未知の崩壊が現れ得る感度領域にはすでに踏み込んでいる。

大発見はなかなか容易に起こらない。新事象の出現をてぐすねを引いてまっている段階である。

*1 反素粒子

反粒子とは粒子と瓜二つであるが、電荷などの基本的な量子数が逆の符号をもつ素粒子をいう。身近な素粒子である電子(マイナスの電荷)の反粒子は、プラスの電荷をもった電子、陽電子である。

*2 高温

ビッグバン直後の10⁻³⁷秒では10²⁹度の温度である。太陽の表面温度は6000度、現宇宙は3度(ケルビン)である。

*3 標準理論

図1のクォークとレプトンを大きさのない基本粒子とし、「場の量子論」とよばれる対称性にもとづく理論体系により素粒子間の3種の相互作用を理解する。いままでのところ、すべての実験事実は標準理論により矛盾なく説明できる。

*4 ヒッグス粒子

素粒子に質量をもたせると考えられている未発見の素粒子である。

*5 不確定性原理

この原理によれば、極微の世界では物質の状態を表す物理量を、不定性なく完全に決めることができない。位置と運動量、時間とエネルギーの関係は、一方を精度よく決めれば、他方の不定性が大きくなる。

*6 崩壊様式

ここでは、レプトンについてのある種の量子数が崩壊の前後で不変であるとする「レプトン・フレーバ保存の法則」が破れること(LFV:レプトン・フレーバ・バイオレーション)をいう。

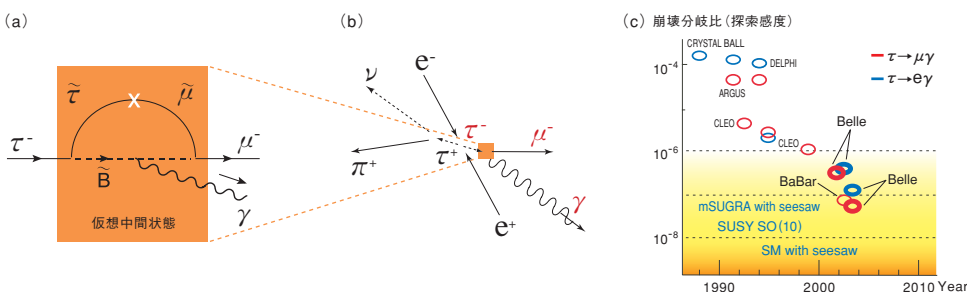


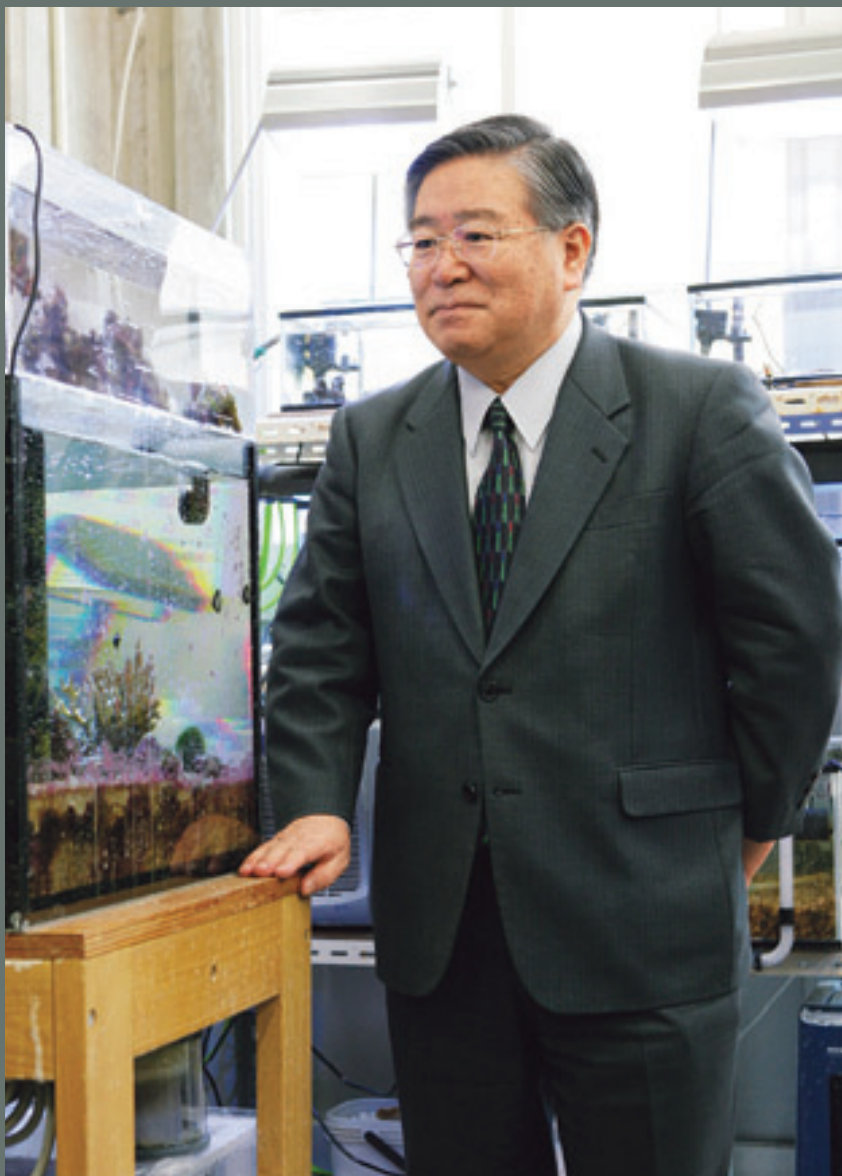
図3 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ の反応

(a) 超対称性粒子($\tilde{B}, \tilde{\tau}, \tilde{\mu}$)が中間状態として介在し、 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ の崩壊を引き起こす。(b) 実験で測定する $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 崩壊の様子を示す。電子・陽電子が衝突消滅し、タウ・レプトン対ができる。一方のタウ(-)は探索するLFV事象 $\mu\gamma$ に崩壊するが、他方のタウ(+)は既知の崩壊様式の1つに崩壊する。現在までのところ、数億個のタウ崩壊を探索したが、1つも $\mu\gamma$ 事象は発見できていない。つまり、未知の粒子は非常に大きな質量をもつ。(c) $\tau \rightarrow \mu\gamma$ ならびに $\tau \rightarrow e\gamma$ 探索の推移を示す。横軸に年代を、縦軸に探索感度(崩壊頻度)をプロットする。各種の理論計算は、黄色で示された領域に反応が起こり得ることを予測する。「Belle」と記したわれわれの研究はLFV崩壊事象が現れる領域にすでに突入している。

海洋生物由来の“切れ者分子”の謎

— 誰が何のためにつくるのか —

上村大輔 物質理学専攻教授



Daisuke Uemura

1945年岐阜県生まれ。1973年名古屋大学理学部化学科博士課程単位取得退学。同年助手、1979年静岡大学教養部助教授を経て、1991年同教授、1997年より現職。日本化学会進歩賞(1977年度)。日本化学会賞(2005年度)。専門:天然物有機化学、生物分子科学

海洋生物はなぜ“切れ者分子”の宝庫か

近年、海綿やホヤなどの海洋生物から極めて少量でヒトや生物に特異な作用を示す化合物が数多く見出されてきた。これらの“切れ者分子”^{*1}はその特性ゆえに生化学研究用試薬や医薬品開発の端緒として役立ってきた。しかし、これらを誰が何のためにつくるのかは永年の謎であった。フグ毒はふぐ特有のものではなく西表島のツムギハゼやアメリカのカリフォルニアイモリなどにも存在することがわかり、何か共通の真の生産者がいると予想された。多くの研究者が血眼になってこれを探し、ありふれた海洋細菌がわずかではあるがフグ毒を生産することまではわかったが、高濃度に蓄積する理由は依然不明のままである。

フグ毒の真の生産者が海洋細菌であるなら、他のいわゆる切れ者分子も細菌が生産しているのではないだろうか。海綿などは海水中から微細な藻類や細菌などを濾しとり食物としているようである。また、ある種の高濃度動物では体の何と容積にして40%が共生する細菌であり、自己の細胞を越える数の細菌が棲息しているといわれる。このように海洋細菌の濃縮体と考えられる海洋生物は有用な切れ者分子の宝庫として、近年精力的な探索研究的となった。一方、自らは移動できないこれらの生物は栄養分の少ない海水中にあっては細菌の絶好の標的となり得るが、抗菌性物質を蓄えることによる防御機構が働いているとも考えられる。この辺りが切れ者分子蓄積の理由を解く鍵かもしれない。以下、私の手がけた2つの研究成果を紹介する。

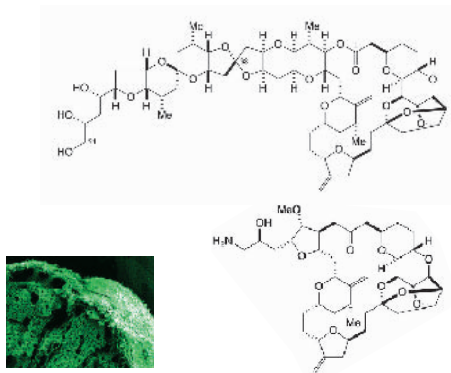


図1 抗腫瘍性物質ハリコドリニンB

クロイツカイメン(左下、断面図において藍藻類がみられる)から発見した、ポリエーテルマクロライド、ハリコドリニンB(上)。この分子の右半分から設計した誘導体(右下)は、有望な制がん剤として臨床試験が進められている。

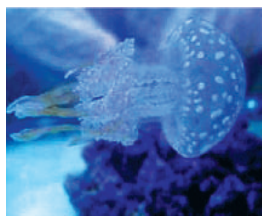


図2 タコクラゲ

褐色の足部分には多数の共生藻が棲息している。体長約4cm。共生藻の光合成産物により、光さえあれば密封容器内でもしばらく生きることができる。

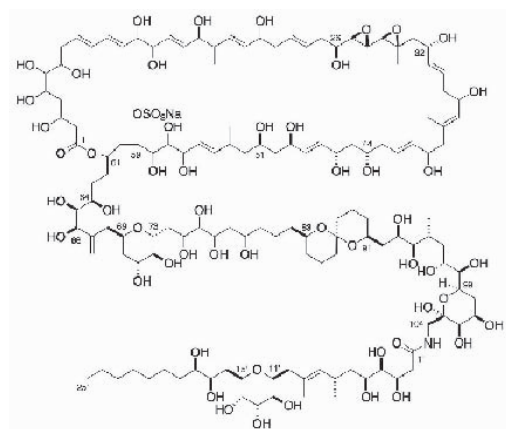
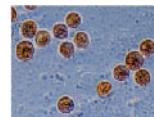


図3 シンピオジノライド

共生渦鞭毛藻(右、直径約20μm)由来の新規ポリオール化合物。このように高度に酸素官能基化され、長い本の炭素鎖からなる化合物群は、海洋生物独特の産物物質である。



クロイツカイメン由来のハリコドリニンB

房総半島以南の潮間帯でよく見られるクロイツカイメンから、腫瘍細胞の増殖を強力に抑えるハリコドリニンB(図1)と名付けた分子を発見し、その複雑な構造を1985年に報告した。これまでに類のない特徴的な構造は多くの研究者との熾烈な競争の未解明することができたのである。しかし、実際にこの分子を抗がん剤として利用することを考えると、自然界からの供給だけではとても足りない。解決には、化学合成と真の生産者の培養という2つの方法が思い当たる。前者は、ハーバード大学の岸義人*2教授の研ぎすまされた合成研究の過程で、注目の作用は分子の右半分(図1、右下)だけで生じることがわかり、一気に進展した。実際にはこの右半分から改良設計されたものを化学合成により年間に数キログラム供給できるようになり、現在耐性のある乳がんの特効薬として認可を待っているところである。後者については多くの研究者が挑戦しているが、困難を極めている。海洋に存在する細菌のうち現実に培養可能なのは1%以下ともいわれる状況を見ると大変難しそうだ。

共生関係から生まれる物質

海洋生物の中には体内に微細な藻類を棲まわせているものがある。藻類は宿主から栄養を得、お返しに光合成で得た酸素を提供する。タコクラゲ(図2)は密封容器内でも、日光さえあれば10日間でも生きることができる。このような共生関係の維持には化学物質が

関与すると予想された。そこで、さまざまな共生藻の単独培養を試みた。そこで発見したシンピオジノライド(図3)は藻類自身に対してはまったく作用しないが、宿主に対しては体内に共生する藻類を吐き出させ、やがて死に至らしめた。どうも宿主に吸収されてしまわないように防御物質として働いているらしいのである。一方、猛毒パリトキシン(図4)をもつイワスナギンチャクの共生藻からは、分子量が5170のよく似た構造の分子を発見し、宿主に特徴的な分子の生産者が共生する藻類であることもわかってきた。いずれにしても、こういった分子をなぜつくらなければならないのかという疑問は残る。共生関係に必要な分子であろうことを手がかりにして、この難題を解き明かしてみたい。

研究では苦しい場面にしばしば遭遇するが、そこを超えなければ自然の深淵なる仕組みに感嘆する喜びに浸ることはできない。にじみ出る汗をいとわず、夢の中にさえ現れるほど実験に細心の注意を払ってこそ他の追従を許さない結果に巡り会えるのである。

*1 “切れ者分子”

蛋白質や炭水化物、脂質などの高分子化合物およびその構成単位であるアミノ酸、単糖類などに代表され、生命維持に必須の役割をもつ一次代謝産物に対し、生命維持における役割が不明で特定の生物に限定的な物質のことを二次代謝産物という。二次代謝産物の内、きわめて少量で生物に対して特異な作用を示すものを“切れ者分子”とよぶことにする。

*2 岸義人(1937-)

元名古屋大学助教授。現ハーバード大学名誉教授(本誌第2号P.21参照)

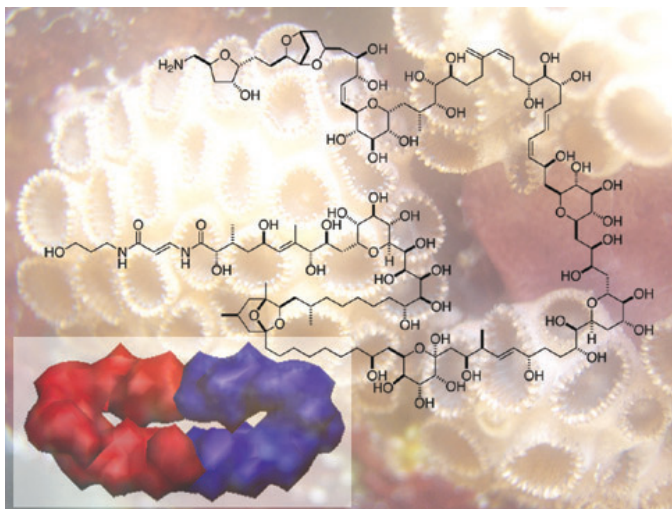


図4 猛毒パリトキシン

腔腸動物イワスナギンチャク由来のパリトキシン。放射光X線小角散乱測定とGASBORプログラムによるピーズモデル計算により、本化合物は水溶液中で2量体(左下)を形成していることを明らかにした。

人に伝える大切さ

【現代数学研究／3年後期】——— 岡田聡 一 多元数理科学専攻教授

「現代数学研究」は、グループ学習として進められている。授業は、興味あるテーマを学生自身が見つけることからスタートする。そこで同じ疑問をもつ者が集まり、文献やネットなどを駆使して調べ、また討論をすることで解決し、最終的にはポスターを製作して皆の前で発表する。私が取材したのは、ちょうどポスター発表の回であった。

発表内容は、「折り紙の数学」、「不完全定理のいろいろなアプローチの仕方」、さらには「公開鍵暗号の数学的仕組み」など多岐にわたるものだった。

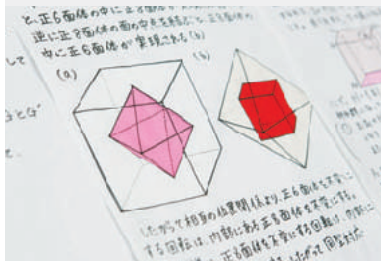
「折り紙の数学」のポスター発表を例にあげると、折り紙が日本の伝統文化を越えて現代数学でも重要な役割を果たし得るということに強く印象づけられた。折り紙で折ることのできるパターンと代数学が深く結びついているというのである。たとえば正9角形を折ることは、3次方程式の解を求めることにほかならない。定規とコンパスによる作図では3次方程式の解を求めることはできないのであるが、折り紙はそれを可能にするのである。しかし、正11角形は折れない。このことは5次方程式の解を求めることに対応していて、5次方程式に

は解の公式が存在していないために折ることができないのである。

発表を見て感じたのは、学生が疑問をもつ者どうしで協力して問題を解決していこうとする熱意だ。私自身には、数学的に厳密なこととはわからないところも多々あったが、数学に対する熱意、そして自分たちが理解、証明したものを何とかして伝えようとする気持ちは大変よく伝わってきた。なかには講義に先立ち、夏休み中から自主的に研究をスタートさせていた学生たちもいたのには驚かされた。学生の自主性に基づいて進められている授業で、岡田先生は学生の熱意を受けとめ、議論を深めていく役割をこなされていた。

授業を通じて学生たちは、自ら問題を見つけ解決していくことの喜びと苦しさを味わっただけでなく、理解したことをほかの人たちにわかってもらうことの難しさを感じたのではないだろうか。数学を社会に向けて発信していくことは、数学の研究者を志す者に限らず必要とされることであろう。今回の講義で彼らはこれらの能力を育むための良い経験ができたのではないかと私は感じた。

(取材・梅本直規 素粒子宇宙物理学専攻博士前期課程1年)



Soichi Okada

1962年大阪府生まれ。東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。名古屋大学理学部助手、大学院多元数理科学研究科助教授を経て、2006年より現職。専門は組合せ論、表現論。とくに組合せ論と表現論などの他分野が交錯する場面で研究を進めている。

歴史を記録する岩石

【岩石学／2年後期】

榎並正樹

地球環境科学専攻教授

地球が誕生してから、約46億年、地球は今も進化を続けている。岩石には、その進化の過程が書き込まれているという。その岩石に書き込まれている情報を読み取ることで、過去の地球の状態を知ることができるのだそう。

では岩石には、いったいどのような情報が、どのように刻まれているのか。またその情報を、どのようにして、解読していくのか。これが最初の疑問であった。実際にはこの疑問の前に、岩石と地球の歴史、この2つのキーワードから、私の頭のなかには、化石が思い浮かんでいた。しかし講義を体験したことで、化石に限らずすべての岩石が地球の記録を刻んでいることがわかった。

今回の講義では、火山活動が活発である地域で見られる岩石について、実際に岩石を見せたり、さわらせたりしながら、解説が行われていた。火山の近くで見られる岩石の多くは、地球深部で形成された液体状に溶けた岩石（マグマ）が、冷えて固まったものである。これらの岩石は、マグマが固まり岩石となる際の、周囲の温度や圧力といった環境によって種類が異なるという。また、マグマが固まる際の

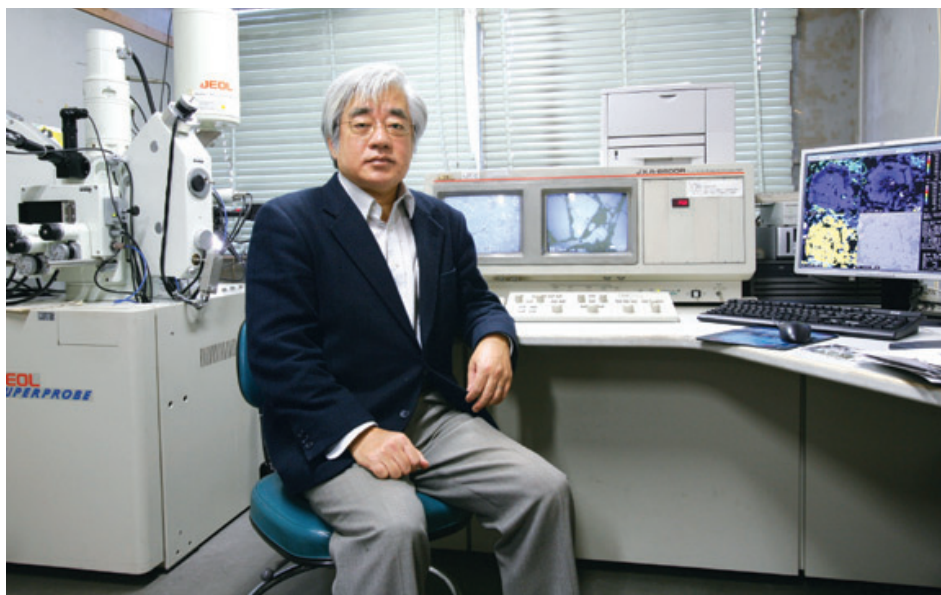
環境のみにとどまらず、マグマのでき方にも違いがあり、それが岩石の種類に影響するという話を聞き、岩石の奥深さにふれた気がした。

現在は、地球の活動的な場所である日本列島や中国大陸などで採集した岩石に含まれる鉱物の組成を解析し、さらにその岩石に含まれる、さまざまな元素の濃度を測定している。これにより岩石が生まれてから、どのような環境を経験してきたのかがわかっていくという。

「長い時間をかけてできた岩石が、経験してきた記録を、含まれている物質から、読み取ってやる。読みとった情報から、岩石が経験してきた当時の地球の姿を推測してやる」と語っている榎並先生は、無機物である岩石を、まるで生き物のようにとらえているような印象を受けた。

今なお、進化を続ける地球、その歴史を、どこかで記録している岩石があり、何億年も後に、その岩石は、地球の歴史を語るのであろう。そして、今もどこかで、地球の歴史を語るべく、発見されるのを心待ちにしている岩石があるのだらう。

（取材・立川さやか 生命理学専攻博士前期課程2年）



Masaki Enami

1954年生まれ。金沢大学理学部卒。名古屋大学大学院理学研究科単位取得退学。専門は岩石学。微小領域分析、最近はとくに分光分析の地球科学への応用に興味をもっている。

同窓生から

宇宙物理からアートへ

写真家

荻野 NAO之 (Naoyuki Ogino)

先日、ある月刊誌の取材を受けた。それがこれまでの自分を振り返る良い機会になった。少年時代のサッカー熱。学生時代に魅せられた宇宙物理学、そして今惹かれている写真…。インタビューに答えながら、自分が魅力を感じてきたこれらに共通する何かがあることを思った。それは、「美」

少年時代、メキシコのプロユースで唯一の外国人登録選手としてプレーしていたとき、プレーを忘れて感動していたのは、敵味方関係なく繰り広げられる美しいプレーの瞬間だった。思わず敵にゴールを決められて拍手しそうになったことさえあった。

宇宙物理への憧れもある種の美への憧れだった。宇宙の原理がものすごく短い数式で表されてしまう美しさに感動していた。 $E=mc^2$ など、今でも人間が創りだしている科学という“ものの見方”の美しさに感動を覚える。

そして今、僕の関心ごとは大学時代から約12年撮り続けている写真に向いている。今度こそは、人生を懸けて取り組みたいことが見つかったかなと…。そこで昨年、6年半勤めた会社を辞め、写真に専念することにした。ちょうど饞別のような、サロン・ドントス入選の報が届いた。僕が追い求めている写真は、日常の生活の中に点在している「美」の瞬間を捉える写真だ。とくに伝統をどこかで継承している日常の中に、生き生きとした「美」の瞬間を感じる事が多くある。昨今の文明偏重社会でないがしろにされがちな、文化の貴重な薫り…。21世紀の今に生きる文化の薫りをドキュメンタリー・アートとして捉えてゆきたいと思っている。 (物理学科2000年卒業)

<http://www.naogino.to/>



2006年10月ニューヨークでの個展会場にて。
来年にはアメリカ市場向けの英語版写真集の出版も決まっている。

キャンパス通信

レディースランチへのお誘い

多元数理科学専攻講師

伊藤由佳理 (Yukari Ito)

理学部に入学したとき、女性の少なさに驚いた方も多いと思う。たくさんの男性に囲まれてちょっと落ち着かない気分を味わっている女子学生には、ぜひ数理学科のレディースランチに遊びに来てほしい。

レディースランチは、毎週水曜日のお昼に、理学部1号館2階のカフェ・ダビッドの隣で開催している。これは女子学生専用のオフィスパワーである。実際にはみんなでおしゃべりしながら、お弁当を食べているだけなので、「なーんだ、おしゃべりしているだけか」と言われそうだが、これが大切なのである。数学には、研究室という研究グループがないので、理学部の中でも特殊かもしれないが、大学に来て誰も言葉をお互いに交わさずに過ごす人も多い。とくに女子学生の場合、その傾向が顕著で、下手をすると研究上の情報もあまり入らなくなってしまう。そんな状態を少しでも改善しようと思ったのが、この活動のきっかけである。当初は大学院生のみであったが、最近は学部生の参加も増え、教育実習や就職活動、大学院入試などの情報交換もしているし、将来のことなど女性特有の悩みも気軽に相談できるような場になってきた。

去る12月20日、名大の理系(理・工・農)女性教員だけの昼食会が初めて開催され、30名以上が参加した。初対面にもかかわらず、皆すぐに打ち解けて、とても和やかな集まりであった。たった1時間だったが、そこで私自身たくさんの元気と勇気もらった。そして、レディースランチに参加した女子学生たちが活発になった理由がわかり、その重要性をあらためて意識した。



キャンパス通信

坂田模型50年 国際シンポジウム開催

素粒子宇宙物理学専攻教授
山脇幸一 (Koichi Yamawaki)

2006年11月25、26両日に理学部1号館5階大講義室において標記の国際会議を開催した。ノーベル物理学賞受賞者G.トフーフをはじめ、ノーベル賞の有力候補の小林誠^{*1}、益川敏英^{*2}など国内外の超一流の物理学者多数を含む90人の素粒子論の研究者が参加し、坂田模型の誕生とその後の発展について著名物理学者らによる14の講演が行われた。

中性子、陽子、そしてラムダ粒子が最も基本的な素粒子であるとする「坂田模型」は1956年12月に本学の故坂田昌一^{*3}教授によって提唱された。これは3種類のクォークが基本的な素粒子であるというクォーク模型の原型となって今日の素粒子物理学に決定的な一歩を与えたものである。

坂田模型に基づいて提唱された「名古屋模型」の延長線上として、ニュートリノに対する牧・中川・坂田理論(MNS行列)が生まれ、さらには坂田門下の小林誠、益川敏英によるクォークに対する小林・益川理論(KM行列)へと発展した。MNS行列は、神岡での実験によって、またKM行列は、筑波の高エネルギー加速器研究機構やスタンフォード大学でのBファクトリー実験でそれぞれ検証され、今日の素粒子物理学を根底から支えている。物質を構成する最小単位の素粒子理論がいずれも本学の業績によることは奇跡的である。会議ではこの坂田模型の歴史的意義がさまざまな角度から掘り下げられ、その偉業が改めて浮き彫りにされた。

*1 小林誠(1944-)

高エネルギー加速器研究機構ダイヤモンドフェロー(本誌第2号P.21参照)。

*2 益川敏英(1940-)京都産業大学教授、京都大学名誉教授(本誌第2号P.21参照)。

*3 坂田昌一(1911-1970)元名古屋大学理学部教授(本誌第2号P.2参照)。



キャンパス通信

X線天文衛星「すざく」 国際会議 in 京都

附属南半球宇宙観測研究センター教授
國枝秀世 (Hideyo Kunieda)

藤原定家の「明月記(冷泉家所蔵)」をご存じの方もあられるかもしれませんが、その中に、今からちょうど1000年前、1006年に起きた、超新星爆発の記録があることはあまり知られていない。重い星は大爆発とともに華々しい最期をとげることがある。「明月記」によれば木星ほど明るくなり、昼間でも見られたという。現在、X線でこの天体の方向を見ると、爆発の残した高温のガスが明るく輝いている。この超新星の跡では、さらに高いエネルギーの粒子加速が起きていることがわかり、地上に降り注ぐ、宇宙線の加速現場だと考えられている。

2005年7月に打ち上げられたX線天文衛星「すざく」では、こうした天体を中心に、熱い宇宙、高エネルギー現象の観測を続けてきた。その新しい観測成果を議論するため、「明月記」ゆかりの地、京都で国際会議を開催した(2006年12月4日~8日)。約400名の参加者の内、外国人研究者は150名を越え、世界的な注目度の高さを見て取ることができた。

「すざく」の優れた性能の1つは、我々がつくり上げた、明るく、迷光の少ない、クリーンな光学系である。これにより、我が銀河系中心の込み入った領域の観測に威力を発揮した。また、活動的銀河に潜む、大質量ブラックホール周辺の強い重力場の様も、確実に見えてきた。すざく衛星は順調に観測を進め、今は世界中からの観測提案に基づいて、観測計画を進めている。すざくはその力の限り、世界の天文学者のために発見の「タマゴ」を産み続けてくれている。4日間のこの会議の結果には、多くの参加者が満足し、京の夜の街に消えていった。



研究会・学会スケジュール

第211回アメリカ電気化学会

「フラーレンとカーボンナノチューブに関するシンポジウム」

開催日：2007年5月6日(日)～11日(金)

開催場所：シカゴ(アメリカ)

主催：アメリカ電気化学会

問い合わせ：篠原久典 名古屋大学大学院理学研究科 教授
noris@cc.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2482

日本地球惑星科学連合2007年大会

開催日：2007年5月19日(土)～24日(木)

開催場所：幕張メッセ国際会議場(千葉市)

主催：日本地球惑星科学連合 加盟64学協会

問い合わせ：鷺谷 威 名古屋大学大学院環境学研究所 助教授
sagiya@seis.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-3043

第13回名古屋大学理学懇話会「超弦理論の数理」

開催日：2007年6月16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

問い合わせ：名古屋大学理学部庶務掛
kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2394
http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/

「局所空間」の銀河

Galaxies in the Local Volume

開催日：2007年7月8日(日)～13日(金)

開催場所：シドニー(オーストラリア)

主催：CSIRO 他

問い合わせ：福井康雄 名古屋大学大学院理学研究科
附属南半球宇宙観測研究センター長
fukui@phys.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2837

コンパクト複素多様体の双有理自己同型と力学系

Birational automorphisms of compact complex manifolds and dynamical systems

開催日：2007年8月27日(月)～31日(金)

開催場所：名古屋大学理学部1号館509号室

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 名古屋大学大学院多元数理科学研究科 教授
kondo@math.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2815
http://www.math.nagoya-u.ac.jp/ja/research/conference/2007/birational.html

第15回上野の山発 旬の情報発信「宇宙137億年の旅」

開催日：2007年9月8日(土)～17日(月)

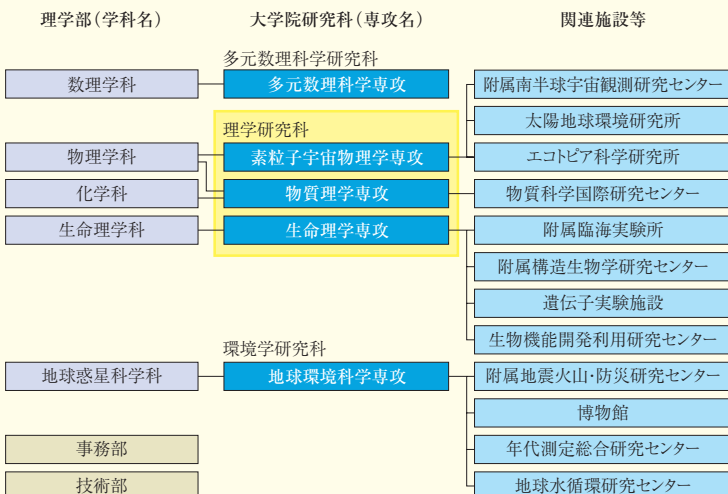
開催場所：国立科学博物館(東京都)

主催：国立科学博物館・名古屋大学

問い合わせ：奥村久士 名古屋大学大学院理学研究科 ORIUM-COE特任講師
h_sera_okumura@ybb.ne.jp / TEL:052-789-5730

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)

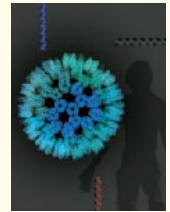


編集だより

4年前、名大に赴任して手にした「理フィロソフィア」は、私が大学から離れていた十数年間に生じた変化を象徴していた。昔は、こんな立派な冊子をつくる予算も、広報という概念もなかった。昨年4月に理学部広報委員になり、大学や理学における広報について考える機会が増えた。一口に広報といっても、その目的は多岐にわたる。将来名大理学部を受験してもらえよう中高生の理学への興味をかき立てる、学生に自分の専門分野以外にも興味を広げてもらう、研究成果の普及を通して社会に潤いを与える、役人やマスコミに研究業績を宣伝して次なる予算獲得の足がかりにする等々。いずれにしても、研究・教育を行っている身のまわりの外側にいる人々に、我々の日頃の活動を知ってもらおうのが広報の役目だろう。だが、広報活動の評価は結構難しい。毎号の「理フィロソフィア」や懇話会のアンケートを見ると、おおむね好意的なことが書いてある。しかし、サンプル数が少ないので少々心許ないし、広報の限られた側面しか評価できない。費用対効果の観点も重要だ。結局、質の高い学生が増え、予算が潤沢になり、研究・教育環境が改善される、といった結果で判断すべきなのかもしれない(すべてが広報と結びつくわけではない)。いずれにしても、構成員一人ひとりが、各自の専門分野で世界をリードする業績を挙げ、優秀な人材を輩出することこそ一番の広報活動であることは間違いない。そのお手伝いとして、最新の研究成果や研究の醍醐味を伝えていきたい。(鷺谷)

表紙説明

長い鎖を幾重にも折りたたんだ構造をしている蛋白質。その複雑で多様な構造を解析することは、生命現象研究の大きなテーマの1つ。蛋白質の研究は医薬品の開発や病気の治療にも役立つことが期待される。写真はサッカーボール状に集合した膜蛋白質の結晶。



理 *philosophia*

No.12 April 2007
2007年4月5日発行

広報委員 近藤孝男(研究科長)
関 一彦(副研究科長)
大島隆義(評議員)
栗田英資(数理学科)
福井康雄(物理学科)※委員長
杉山 直(物理学科)
岡本祐幸(物理学科)
高木秀夫(化学科)
森 郁恵(生命理学科)
古賀章彦(生命理学科)
鷺谷 威(地球惑星学科)
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2007年10月発行の予定です。

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。

・本誌は再生紙および大豆油インクを使用しています。

(大豆油インクとは、石油系溶剤にかわり大豆油を使用したもの。揮発性有機化合物が大気中へ排出されるのを減少させ、また廃棄物の生分解がはやく、再生紙化も容易で環境にやさしいインクです)

