

研究会・学会スケジュール

第219回アメリカ電気化学会「新奇なナノカーボン物質に関するシンポジウム」
The 219th ECS Meeting: Symposium on Novel Nanocarbon Materials

開催日：2011年5月1日(日)～6日(金)
開催場所：モントリオール(カナダ)
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

K3曲面、カラビ・ヤウ多様体の数論的および幾何学的研究集会
Workshop on Arithmetic and Geometry of K3 surfaces and Calabi-Yau threefolds

開催日：2011年8月16日(火)～25日(木)
開催場所：トロント(カナダ)
主催：フィールズ研究所
金銅誠之 多元数理科学研究科 教授
問い合わせ：kondo@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2815
http://www.fields.utoronto.ca/programs/scientific/11-12/CalabiYau/index.html

上田良二先生生誕百年記念講演会「科学する精神と日本社会」

開催日：2011年10月1日(土)
開催場所：名古屋大学IB電子情報館大講義室
主催：応用物理学会・日本物理学会名古屋支部
問い合わせ：齋藤弥八 工学研究科 教授
ysaito@nagoya-u.jp

第48回日本細菌学会中部支部総会

開催日：2011年10月21日(金)・22日(土)
開催場所：名古屋大学シンポジオン
主催：日本細菌学会中部支部
問い合わせ：本間道夫 理学研究科 教授
g44416a@cc.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2991

日本測地学会第116回講演会

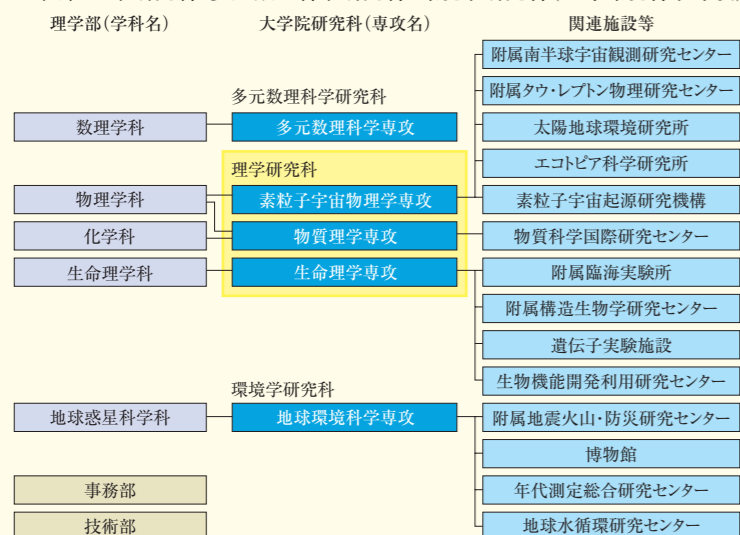
開催日：2011年10月26日(水)～28日(金)
開催場所：高山市民文化会館(高山市)
主催：日本測地学会
問い合わせ：鷺谷 威 環境学研究科 教授
sagiya@seis.nagoya-u.ac.jp / 052-789-3046

日本測地学会公開講座

「測地学が解明する飛騨・高山の地震、火山と地球ダイナミクス」
開催日：2011年10月29日(土)
開催場所：高山市民文化会館(高山市)
主催：日本測地学会
問い合わせ：鷺谷 威 環境学研究科 教授
sagiya@seis.nagoya-u.ac.jp / 052-789-3046

組織図

理学部・理学研究科・多元数理科学研究科・環境学研究科(地球環境科学専攻)



編集日より

今回の特集は多元数理科学研究科が担当することになり、「未知なる結晶格子の数理」と題して内藤先生と松本先生に講演していただいた。多忙にもかかわらず快く講演を引き受けてくださった両氏に、この場を借りて深くお礼申し上げたい。ところで、自然科学の中でも数学は、調べたい現象や対象をまずモデル化・抽象化し、それを計算するという方法をとる。そのため数学者の話は最初から最後まで抽象的であることが多い。私は抽象的な話を聞いている方が生きた心地がする。そういう環境に長年身を置いてきたからである。極端な話、私の専門分野である「数論幾何」では具体例といえば「特定の(数学的な)対象」という意味で、つまるところ抽象的なモノである。大抵は絵にかけない。このような私にとって理学部広報委員としての活動は悪くいえばストレスであったし、良くいえば刺激であった。ちなみに名古屋大学には私と同じ数論幾何の研究者が多いのだが、この分野で「特集」を組むのはまず無理だな、と思うと少し寂しい。(佐藤周友)

表紙説明

「六花」は「りっか」「ろっか」「むつのはな」とも読む雪の別名であり、由来は雪の結晶が六角形であることによる。ほかにも「六辺香」という異称もある。しかし雪の結晶は本当に六角形しか存在しないのだろうか。未知なる結晶格子の世界を探る。



理 *philosophia* — No.20
spring-summer 2011
2011年4月15日発行

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

編集発行 名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会
〒464-8602 名古屋市千種区不老町

ご意見、ご感想をお待ちしています。
本誌の原稿執筆や取材などにご協力いただける方を求めています。
広報委員会までご連絡ください。
なお、ご投稿などの採否については当委員会にお任せください。
次号は2011年10月頃発行の予定です。

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

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

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

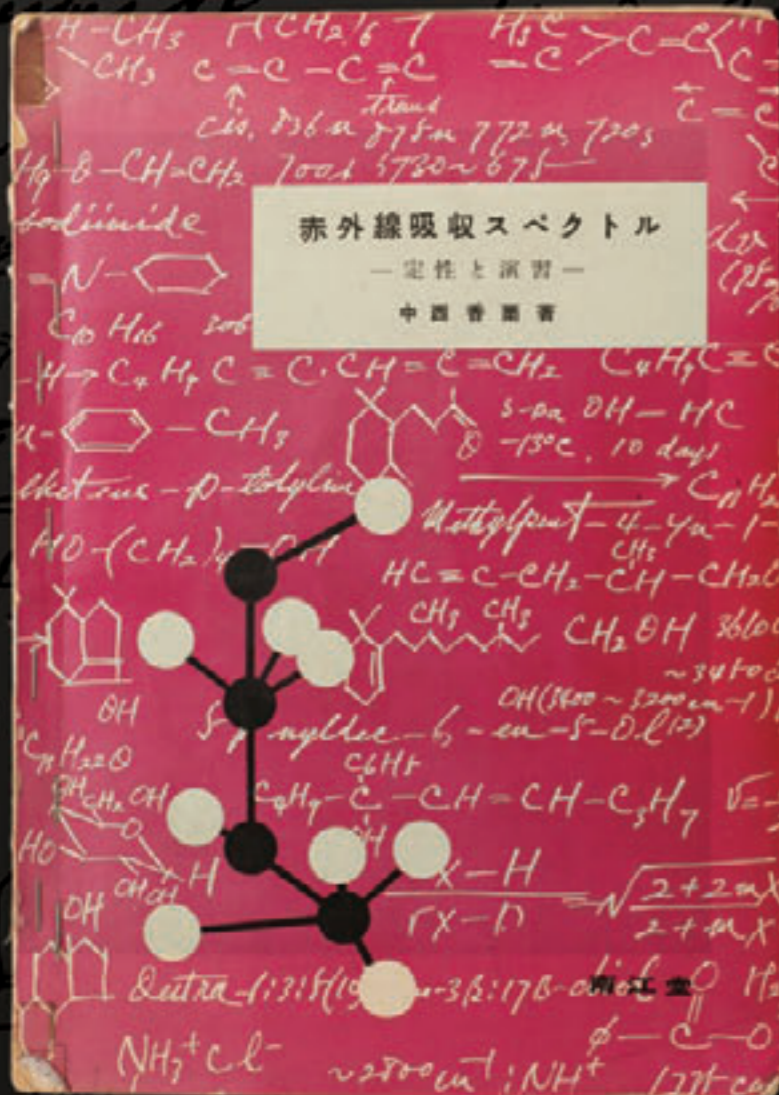


特集

「未知なる結晶格子の数理」

- 04 — 五角形の雪はつくれるか◇松本正和
- 08 — 数学で結晶格子を探そう◇内藤久資
- 02 — 時を語るもの(中西香爾 博士) ◇上村大輔
- 03 — 理のエッセイ◇庄司俊明
- 12 — 理の先端をいく◇五島剛太 / 古本宗充 / 中野敏行
- 18 — 理学部交差点

中西香爾博士——天然物化学の風雲児



中西香爾博士は1947年9月、旧制の名古屋大学理学部を卒業した。中西博士を指導したのは、当時助教授になったばかりの平田義正^{*1}博士であった。中西博士の卒業研究は抗生物質アクチノマイシン副産物の構造決定であったが、引き続き大学院特別研究生として平田博士のもとに残り、1949年に蚕の色素ヒドロキシキヌレリンの構造決定と合成を完成させた。中西博士は1925年香港生まれで、ご父君が世界各地を転勤し、英語教師をつけて教育されたこともあり、語学力に長け、当時の博士と外国人講演者との議論のやり取りを聞いた旧帝大の化学者が、「いったいあの若造はどこものか」と驚いたというエピソードがある。そんなこともあり、1950年から

のハーバード大学留学中には遺憾なくその才能を発揮した。当時のアメリカの有機化学は、赤外吸収スペクトルや紫外吸収スペクトルが構造決定に利用され始めたころであり、帰国後の博士はこの研究分野のパイオニアとして注目された。その後、東京教育大学、東北大学、コロンビア大学と異動し、動くたびに大きな研究成果をあげてきた。その功績は日米両国で讃えられ、日本化学会唯一の人名を冠した賞Nakanishi Prizeとして日米両化学会にその名が刻まれている。60年前に出現した天然物有機化学分野の申し子、風雲児であった中西香爾博士は、現在まさに待望されている人材の好例といえよう。(名古屋大学名誉教授・神奈川大学教授 上村大輔)



中西香爾(1925-) 名古屋大学理学部卒、同大学院特別研究生後期修了(1952) 元名古屋大学助教授(1955-1958) コロンビア大学センテニアル教授(1980-) コロンビア大学名誉教授(2007-) 名古屋大学特別教授(2010-) 文化勲章(2007)

◇写真の説明
左上は有機化学者のバイブルとなった名著「赤外吸収スペクトル」。右上は、1957年の平田研究室、長良川での写真^{*2}。右から2人目が平田博士。3人目が中西博士。右下は、2010年11月に名古屋大学豊田講堂で開催された名古屋大学レクチャー2010での1コマ。中西博士は「彷徨える天然物化学者」と題する講演で得意の小品を披露して締めくくった。

*1 平田義正(1915-2000) 元名古屋大学理学部教授 (本誌5号P.2、16号P.4参照)
*2 写真提供 奥村保明 静岡大学名誉教授

例外的なものや普遍的なもの

庄司俊明 多元数理科学専攻教授



Illustration: Mikan Tenmyo

数学の発展の歴史は、常に例外的なものに強い関心を示してきたように私には思われる。私の専門は代数群とよばれる群の生態を研究するもので、表現論の一分野である。1980年代にこれらの群の表現を統括する理論が完成したが、その理論の核心は最も特殊な群である E_8 に現れる特異な現象を理解することであった。すべてが解明された後で見ればこの例外的な現象こそが、完成された標準的な構造をもっており、他はすべて、それがつぶれてできたものに過ぎないのである。その意味でこの現象の現れる空間の次元4480に代数群の表現論のすべてが凝縮されているといってもよい。大般若経600巻が300字に満たない般若心経にまとめられ、1行の陀羅尼に凝縮されたようなものである。

1980年代のもう1つの大きな出来事は有限単純群の分類の完成である。分類の結果、有限単純群の無限系列と、散在型単純群とよばれる26個の単純群が確定した。26個の中の最大のものは、モンスターとよばれる元の個数が10の53乗もある巨大な群である。有限単純群の分類の最大の功績は、例外中の例外であるこの怪物を世に送り出したことにあるといっても過言ではない。90年代以降、モンスターはムーンシャイン予想と関連して数学世界を興奮の渦に巻き込んだ。

私は、数学の研究の目標は普遍性の追求にあると思う。例外を取り込んでより普遍的な理論の構築をめざすのである。普遍性の立場からは、その対象が自然界に存在しているかどうかというのは、自然な条件ではない。自然科学の目的がこの世界をつくった神様の心の中をのぞくことにあるとしたら、数学の目的は別の世界をつくった神様たちの心も、ともに理解することにある。そして神様たちの心が織りなす「数学的自然」とでもいうべき世界が実在すると数学者は信じているのである。普遍性を羅針盤にこの世界を駆け巡り、未知の大陸に足を踏み入れることこそ数学の醍醐味ではないだろうか。

Toshiaki Shoji

1947年静岡県生まれ。東京大学大学院修了。東京理科大学教授を経て2003年より現職。専門は代数群の表現論。「数学的には存在せず、その表現の痕跡のみを残す奇妙な群の表現論を、化石から恐竜を復元するようにつくりあげるのが夢」と語る。

水晶や雪の結晶など、我々の目に見える結晶の美しさは分子や原子が規則正しく並んでいることから生まれる。

そしてその「規則正しさ」には数学的な美しさが隠されている。

結晶格子、その未知なる可能性について、化学者と数学者、それぞれの視点から語っていただいた。

(2010年12月3日、第20回理学懇話会より)

五角形の雪はつくれるか

松本正和 岡山大学大学院自然科学研究科 准教授

五角形の結晶はつくれるのか

雪は、六花ともよばれ、美しい六角形の結晶で知られていますが、雑誌やディスプレイのデザインでは、五角形や八角形の雪を見ることがあります。水や雪の研究者は、デザイナーが描いた五角形の雪の結晶を見ると、「また間違った雪を描いている」と笑うのですが、本当にこういう雪はありえないのでしょうか。我々の生活している環境では、たまたま雪は六角形ですが、遠い宇宙のどこかには、圧力や温度が違う環境があって、そこでは雪は五角形なのかもしれません。本当に五角形の結晶をつくることはできないのか、あらゆる可能性を考えてみたいと思います。

雪の結晶について考える前に、そもそも五角形の結晶はつくれるのでしょうか。答えはいエスでありノーでもあります。

まずは、五角形の結晶がつかれない理由を説明しましょう。結晶とは、原子が周期的に並んだ構造です。周期的に並んだ構造は、ある角度回転すると、元の構造に重ねることができます。回転してもとの構造に重なる性質のことを、回転対称性とよびます。

結晶の回転対称性には、6回対称性以外に、4、3、2回の対称性があり、それぞれ60、90、120、180度回すと元の格子に重なります。回転しても元の格子に重ならない、回転対称性のない構造というものもあります。



Masakazu Matsumoto

1967年生まれ、1995年総合研究大学院大学大学院数物科学研究科博士課程中退。名古屋大学助手、同助教を経て2010年より現職。専門は分子動力学の理論的研究。とくに、水および水溶液系の基礎物性の解明。多数の分子が関与する複雑な現象を、過度に単純化することなくとらえる解析手法を追究している。

では、5回対称性はどうか、というと、結晶の点の間隔をどんなに調節しても、72度回転して元の格子に重なるような格子をつくることはできないことが幾何学的に示されます。

ところが、イスラム寺院を飾る多種多様なタイルングの中には、変わったタイルングが見つ

かっています。イランのイスファハンにあるこの寺院のタイルングには、至るところに五角形や10回対称性が見られる一方、通常のタイルのような、周期構造が見えません。かといって、同心円状の模様のように、どこかにタイルングの中心があるわけでもありません(図1)。

このようなタイルングは、ペンローズ*¹によって再発見され、ペンローズ・タイルングという名で広く知られています。ペンローズ・タイルングでは、2種類の菱形のタイルが、ある規則に沿って、整然と並んでいます。決して周期的な構造にはなりません。こういうタイルングを準周期タイルングといいます。準周期タイルングでは、2種類のタイルはランダムに並んでいるように見えますが、必ず5つの方向のいずれかを向いています。

この図形はどういう意味をもつのでしょうか。ペンローズ・タイルングの規則性に従って、原子を並べることができれば、その物質は巨視的な5回対称性や10回対称性をもちます。このような物質は、準結晶とよばれています。そんなに都合よく原子を並べることができるのでしょうか。実は、1984年に、シェヒトマン*²は、実際に5回対称性をもつ準結晶を現実の合金でつくってしまいました。現実にはこのような物質がつけられたことで、結晶学は大きな

衝撃を受け、またこの発見によって大きな飛躍を遂げました。その後、数々の合金で準結晶が発見され、現在では100種類も知られています。

準結晶の構造を考える

準結晶の構造の中で、原子がどんなふう

に並んでいるかを見てみましょう。金属などの結晶のかたちを決めるのは、原子の「つめあわせ」です。一番簡単なケースとして、球のつめあわせを考えます。最もすきまが小さくなるように、三角形に球をつみあげたかたちを最密充填構造とよびます(図2)。

この最密充填構造を分解すると、球が正四面体型に4つ組み合わせられている部分と、正八面体型に6つ組み合わせられている部分が混在していますが、厳密には、正四面体のほうが、すきまが少しだけ小さいのです。

それでは正四面体だけで空間を埋めつくすことができたら、超最密充填構造ができるのではないのでしょうか。

しかし、この構造には無理があります。正四面体をあわせていくと、2面角が70.5度なので、5個で352.5度になり、少しギャップができます。このギャップは、四面体をどんどんはりあわせていくほど開いていき、つなげればつなげるほど、ごまかせなくなります。このため、正四面体では空間をうめつくすことはできません(図3)。

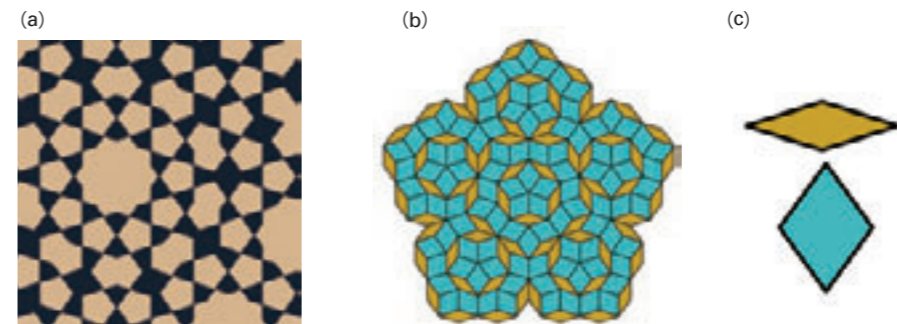


図1 イスファハンの寺院のタイルングとペンローズ・タイルング
(a) イスラム寺院のタイルング。正五角形のモチーフが随所に現れる。(b) ペンローズ・タイルング。(c) 2種類の菱形タイル。2辺のなす角度はどれも $180 \div 5 = 36$ 度の倍数である。

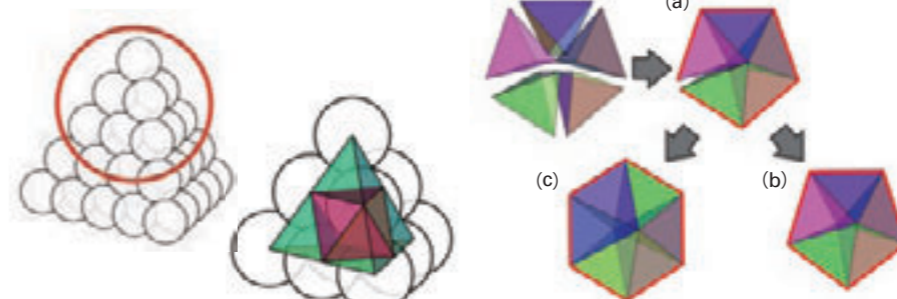


図2 最密充填構造
球を最も密につめあわせた構造(最密充填構造)は、正四面体(緑)と正八面体(赤)でできている。

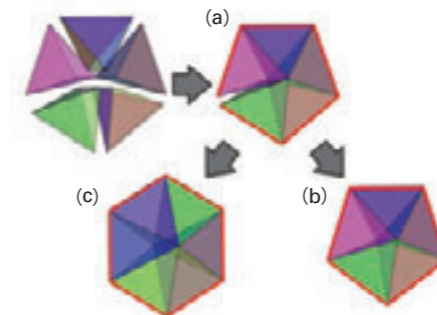


図3 ギャップのある双五角錐、双五角錐、双六角錐
(a) 正四面体を5つつけるとすきまができてしまう。(b) 外周の辺(赤線)を少し伸ばして、すきまを埋めると双五角錐になる。(c) 外周の辺を少し縮め、もう1つ四面体を入れると双六角錐ができる。

*1 R. ペンローズ (1931-) イギリスの数学者。

*2 D. シェヒトマン (1941-) イスラエルの科学者。



このギャップを克服するために、四面体をすこしだけ歪めてもいいことにしましょう。1つは、すこしだけ辺を伸ばすことを許せば、双五角錐がつけれます。もう1つは、逆に辺を少し縮め、ギャップに四面体を1つ余分に押しこむと、双六角錐もつけれます。双五角錐と双六角錐をうまい比率で組みあわせると、ギャップをつくることなく、四面体だけをつめあわせた結晶構造をつくることができます。このような構造のことを、四面体充填構造とよびます。

四面体のかたちを歪めるといことは、辺の長さがまちまちになるということです。2種類以上の大きさの球を組み合わせるほうが、つめ合わせがよくなることになります。実際、四面体充填構造は、合金の構造でよく見られる構造です。また、双五角錐と双六角錐の

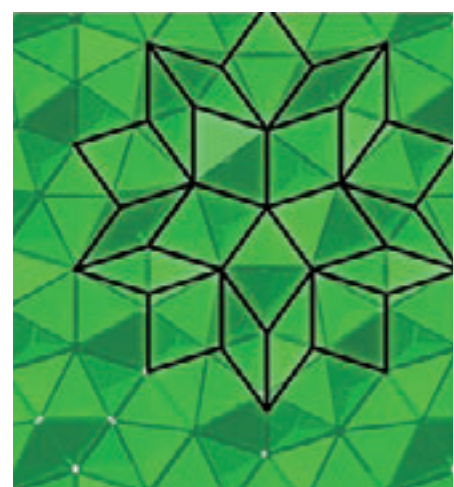


図4 四面体によるペンローズ・タイリング
双五角錐と双六角錐をうまくつめあわせると、ペンローズ・タイリング(太線)を模倣することができる。現実の原子の大きさにより、理想的なタイルのかたちから多少ずれる。

位置をうまく選ぶと、ペンローズ・タイリングをつくることもできます(図4)。これが、準結晶合金の基本的な構造です。

五角形の結晶はつくれるのか、という質問の答は、幾何学的な理由では5回対称性結晶は不可能ですが、合金のような準結晶を考えれば5回対称性の構造は可能、ということになります。

氷の準結晶はつくれるか

5回対称性をもつ構造は、ある特殊な条件ではつくれることもあることはわかりました。しかし、氷でそんなかたちをつくることはできるのでしょうか。

氷の結晶には、圧力によっていくつもの種類が存在しますが、もちろん、5回対称性をもつ準結晶はこれまで見つかっていません。そのような構造を理論的に予測するために、まず、普通の氷の中で、水分子がどんなふうに並んでいるかを見てみましょう。実は、氷の構造は、さきほど紹介した最密充填構造と深い関係があります。最密充填構造には、4つの球が四面体型につまっている部分と、6つの球が八面体型に合わさっている部分が

あります。この四面体の2つに1つを選んで新しい球を追加すると、氷の構造ができます。これはダイヤモンド構造ともよべれます。

これと同じ要領で、四面体充填準結晶構造の四面体のいくつかに球を追加することで、準結晶氷構造をつくれるのではないかと考え、いろんな可能性を試してみました。しかし、残念ながら、今のところそのような構造をデザインすることには成功していません。水だけで、準結晶をつくるのは難しそうです。

メタンハイドレートの可能性

発想を変えましょう。これまでに見つかった準結晶は、必ず2成分以上の合金です。それなら、水と何か別の混ぜ物といっしょに凍らせれば、準結晶になるのではないかと考えました。しかし、これも一筋縄ではいきません。

食塩のように、水によく溶けるものでも、氷が凍るときには必ず溶質は排除されて水だけの結晶ができてしまいます。水に少し他の分子が混ざった結晶は、通常つくれません。

ところが、水にはまったく溶けないのに、水といっしょに結晶になる物質が存在します。それはメタンハイドレートです。メタンハイドレート

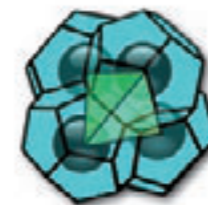
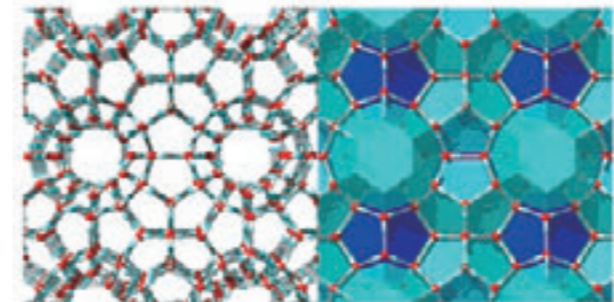


図5 ハイドレートの構造
左図は水分子の配置を、中図は水の水素結合ネットワークがかたちづくるカゴ構造を示す。それぞれのカゴにメタン1分子が含まれる。右図はカゴの立体的なつめあわせ状態を表している。4つのカゴが四面体型につめあわせられている。

は、水分子約6に対しメタン1の割合でいっしょに凍ったものです。メタンハイドレートに含まれているメタンガスの量は、炭酸水に溶けている二酸化炭素の量の、実に100倍にもなります。ガス分子の密度でいえば、ガスボンベ(150気圧)に匹敵するほどの量です。天然のハイドレートは、雪か霜のような真っ白の固体ですが、実験室で時間をかけて結晶化させると、きれいな透明の単結晶をつくることができます。

水とメタンはどんな風に結晶をつくっているのかを説明します。

この結晶の中で、水分子同士は水素結合でつながって、多面体型のカゴ構造をつくっています。それぞれのカゴに、黒い球で示したメタン分子が1つずつ含まれています。ここで大事なことは、メタンを包むカゴが、全部四面体型に組み合わされているということです(図5)。それぞれのカゴにメタンが1分子ずつ入っているので、メタン分子の位置に注目すると、四面体充填構造になるということです。

たとえば、メタンハイドレートの結晶の中の、メタン分子の配置は、合金の結晶構造で

いえば、A15とよばれる四面体充填構造と同じです。四面体充填構造は、合金のデータベースをさがせばほかにいくらでもあります。理論的には、どんな四面体充填結晶構造からも、ガスハイドレートの結晶構造をつくりだすことができます。

そして、四面体充填構造の合金の中には、準結晶もありますから、この合金の原子の位置にガス分子を並べ、それを囲むように水分子のカゴをつくれれば、準結晶のハイドレートをつくることができるはず(図6)。現実そんな構造がありえるのかを確かめるために、コンピュータシミュレーションで、合金の構造から、準結晶ハイドレートの構造をつくり、安定性を予測しました。

計算の結果、この構造は、最安定構造にはなりませんが、別の最安定結晶に次ぐ、準安定構造になりうるということがわかりました。

通常の方法で結晶をつくると、必ず最も安定な結晶が生成しますから、準安定構造を実際につくるためには、実験上の工夫がいろいろ必要になります。実際の製造方法については、まだ研究途上ですが、いずれは

5回対称性をもつハイドレートの透明準結晶はつくれるだろうと見込んでいます。

5回対称性をもつ水をつくって何かの役に立つのか、と必ず聞かれます。私は3つの答をもっています。

1つは、未知の物性の発見です。合金の準結晶は、熱伝導性が低く、非常に固くて強靱、電気抵抗が非常に大きいといった、通常の結晶にはない性質をもちますが、準結晶ハイドレートがどんな性質をもつかはまだわかりません。

2つめは、結晶構造設計の可能性です。準結晶を実現する方法を見つけたことで、結果的に、ハイドレートの結晶構造を自在につくりわける技術が得られます。実用的にはこれが最も重要です。

そして最後が、常識への挑戦です。準結晶ハイドレートは、誰もまだ見たことがないものですから、それを理論で予測し、実験で実際につくることができれば大きな驚きです。氷が5回対称性^{*3}をもつわけがない、という常識を打ちやぶることこそ理学の使命と私は考えています。本日はご静聴ありがとうございました。

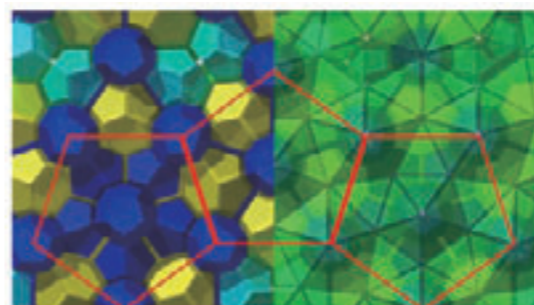


図6 準結晶ハイドレートの構造
左半分には、カゴのつめあわせ方が描かれている。右半分には、図4を重ねた。正五角形の局所構造がわかりやすいように、赤い補助線を引いた。

*3 5回対称性
今回の理学懇話会の質疑応答において、樋口敬二名古屋大学名誉教授より、正五角形以外の広い意味の五角形の結晶が存在することが紹介された。(Contributions from Inst. Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., 1957, Jour. Met. Soc. Japan, 39, No.5, 1961)

数学で結晶格子を探そう

内藤久資 名古屋大学大学院多元数理科学研究科准教授



Hisashi Naito

1961年生まれ。大阪大学理学部卒業。名古屋大学大学院理学研究科修了。理学博士。名古屋大学理学部助手を経て1995年より現職。専門は微分幾何学、非線型偏微分方程式。幾何学的オブジェクトの視覚化、離散幾何解析に関連する数値計算、コンピュータネットワーク認証システムなどの研究も行っている。

結晶格子を数学的に考えてみる

今日は、数学において結晶構造をどのように考えるべきか、についての話をさせていただきます。数学では対称性を表す群の言葉を使って、空間中の結晶を表す群がどれくらいあるのかが古くから研究されてきました。今日は、そのような古典的な結晶の話ではなく、結晶構造と変分原理との関係を明確に表す結晶格子の概念とそれを通じて砂田利一*1先生が“発見”された K_4 結晶格子について紹介したいと思います。

はじめに、数学における対称性について考えましょう。その簡単な例として正 n 角形を考えます。正 n 角形は、角度 $2\pi/n$ の回転変換と対称軸に関する鏡映変換で図形が自分自身に映り合っています。正 n 角形を動かさない変換全体は、変換の合成を演算と考えることによって“演算のできる集合”となります。このような集合を数学では「群」とよびます。逆に、この群で動かない図形は正 n 角形と同じ対称性をもつと考えます。このように、数学では図形の対称性を群の言葉に置き換えて考えます。

次に「結晶」について考えてみましょう。結晶と聞くと「原子」が“規則正しく無限に”並んでいるイメージを思い浮かべます。そのイメージを数学では「空間群」とよばれる群に置き換え、それを結晶の原子配置の

対称性と考えます。2次元空間群は17種類、3次元空間群は230種類に分類されることが1900年代前半には知られていました。ここで次元とは、独立な平行移動の方向がどれだけあるかを表しています。つまり、2次元空間群とは、平面上に無限に広がる規則的な図形の規則性を表し、それは17種類に限ることがわかります。古典的な日本の文様とよばれる図柄も、その規則性を空間群を用いて表すことが可能です。

さて、ここまでの結晶の話では欠けていると考えられることが2つあります。我々は結晶の図を描くとき、点だけではなく点のつながりの様子も描きます。ところが、結晶を数学的に表したと考えている空間群は点配置の対称性のみを表していて、点のつながりは表していないと考えられます。ですので、点のつながりも含めた結晶構造を表す数学的対象を見つけることが必要です。これが上で“欠けている”といったことの1つ目です。

もう1つの“欠けている”ことは自然界に目を向けるとわかります。光は、その通過時間が最小となるような経路を進みます。また、古典力学での運動は、そのエネルギーが最小となるように実現されることを表す運動方程式によって記述されます。これらに代表されるように、自然界に現れる多くの現象は、

何かの量を最小にするように現れるという「変分原理」（最小作用の原理）に従っています。この変分原理が2つ目の“欠けている”ことです。自然界の現象の1つとして得られる結晶も何らかのエネルギーが最小になるものとして得られているわけですから、変分原理と関係づけて考えるのが自然です。

結晶格子を数学的に定義する

結晶構造を点のつながりの様子や変分問題と関連づけて考えるために、結晶格子を数学的に定義し、その標準実現という概念を紹介します。この研究は、砂田先生と小谷元子*2先生によって2001年に発表されました。

結晶格子は、ある条件を満たす抽象的なグラフとして定義されます。これはあくまで抽象的な概念であり、次元や具体的なかたちはもたず、単に点とその間のつながりの情報だけが与えられています。そこで、抽象的に定義された結晶格子をしかるべき次元の空間に“書き込む”ことを考え、それを「実現」とよびます。つまり、抽象的に定義された結晶格子は実現を行わないと、その“かたち”はわからないと考えます。一方で、1つの抽象的な結晶格子に対しても、その実現の方法は数多く（無限に）あり、その中でも最も“きれいな”ものを変分原理を通して探し、それを「標

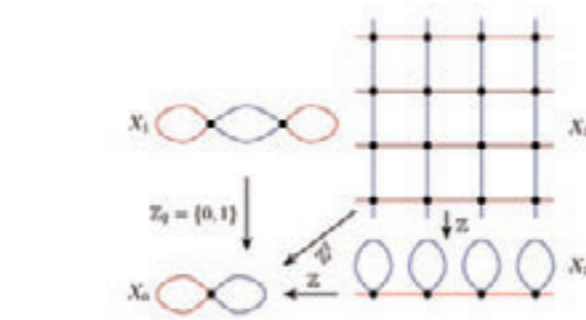


図1 被覆グラフ

X_1 は X_0 の被覆グラフの1つの例である。 X_0 は1個の頂点と青と赤の自己ループをもっている。 X では頂点が2個あるが、いずれも X_0 に“落とす”と同一の頂点に対応する。また、 X_1 の赤の辺・青の辺のいずれも X_0 で考えると同一の頂点間を結ぶ自己ループに落ちることがわかる。よって、 X_1 は X_0 を2枚被覆していることがわかる。 X_1 は X_0 の2枚の被覆となっている例であるが、 X_2 は“無限枚”の被覆となっている。 X_0 の頂点に $\dots, -1, 0, 1, \dots$ と番号をつけることができ、“1つ右へ移動する”ことと、番号を+1することが対応する。整数全体は、加算によって群をなしていることを考えあわせれば、被覆変換群が \mathbb{Z} となることがわかる。同様に、 X_1 は X_0 の $^2 = |(n, m)| : n, m \in \mathbb{Z}$ 被覆となっている。 X_0 に含まれる本質的な閉路の数が2であることは容易にわかる。従って、 X_0 からつくることのできる最大次元の結晶格子は X_0 となる。

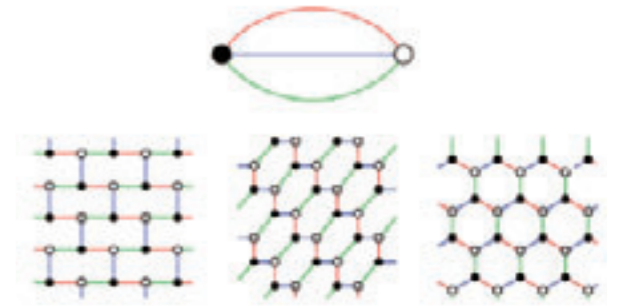
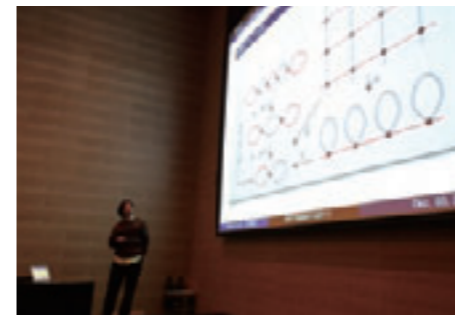


図2 六角格子の基本グラフと種々の周期的実現

上の3つのグラフは、いずれも黒・白の頂点の間を赤・緑・青の3本の辺が結んでいる構成は同一であるので、上のグラフを基本グラフとする結晶格子の周期的実現である。他にも周期的実現は数多く考えることができるが、右の実現が最も“美しい”（対称性が高い）実現であると考えられる。

準実現」とよびます。すなわち、結晶格子の標準実現を、数学的には、自然界に存在する結晶に対応するものであると考えます。

ここからは、グラフの話からはじめて、結晶格子の標準実現とは何かを説明します。数学でいうグラフとは頂点の集合と、頂点を結ぶ辺の集合の組のことです。グラフを考える際には、わかりやすい図を描いて説明しますが、実際には抽象的なグラフを考えていて、図はそれをわかりやすく表しているものに過ぎません。



グラフに対する数学的または情報科学的な問題としては、2点を結ぶ最短路を求めたり、隣り合う頂点を異なる色で塗り分けたりという問題がよく知られていますが、結晶格子を定義するために、ここでは、「被覆グラフ」を考えましょう。あるグラフ X が、グラフ X_0 の被覆グラフであるとは、図1のように、 X の

頂点のつながりの様子が、局所的に X_0 のそれと一致しているものです。グラフ X_0 を与えたととき、その被覆グラフとして多くのグラフが考えられます（図1）。このような種々の被覆グラフの中で、結晶格子を表すと考えられるものを選びだすために、被覆グラフを考えると自然に現れる「被覆変換群」とよばれる群を利用します。被覆変換群は、被覆グラフ X の中で、同じ X_0 の部分に対応する部分を移し合う群であって、その群の“大きさ”は“被覆の枚数”に一致します*3。図1では X_0 の2枚の被覆グラフだけでなく、“無限枚”の被覆をもつ被覆グラフが描いてあります。この時の被覆変換群は整数全体の加算による群 \mathbb{Z} と一致します。さらに、もう1つの“方向”に無限回の被覆をとることにより、被覆変換群として2つの整数の組全体の加算による群 \mathbb{Z}^2 をもつ被覆グラフを得ることができます。

このように、有限グラフ（点と辺の数が有限個のグラフ） X_0 から出発して、被覆変換群が X_0 から決まるある数 d 個の整数の組のなす群 \mathbb{Z}^d となる被覆グラフを X_0 を基本グラフとする「 d 次元結晶格子」とよびます。今日の話では、有限グラフからつくることのできる最大の次元をもつ結晶格子の話に限ることにしましょう。すると、図1の X_0 からつくられる結晶格子は、右上の正方形の格子が表す

グラフとなります。図では正方形の格子を描いていますが、この段階では結晶格子は抽象的に定義されたグラフに過ぎません。すなわち結晶格子とだけいった場合には、抽象的な頂点と辺の情報しか与えられていません。ですから、“結晶格子のかたちをみる”には、それを d 次元空間に配置する必要があり、それを「結晶格子の実現」とよびます。なお、有限グラフからつくることのできる結晶格子の最大の次元は、その有限グラフに含まれる本質的な閉路の数に一致します。もう1つの例として図2には、結晶格子の実現の例を3種類描いてあります。これらの結晶格子はすべて同じ有限グラフの \mathbb{Z}^2 被覆グラフで、抽象グラフとしては同じものです。このように、同じ結晶格子であってもその実現方法は無限にあり、その中で“最も対称性が高いもの”の特徴づけを考える必要があります。

*1 砂田利一（1948-）
明治大学理工学部教授・東北大学名誉教授。元名古屋大学教授・東京大学教授。

*2 小谷元子（1960-）
東北大学理学部教授。

*3 正しくは、被覆変換群の大きさが被覆の枚数に一致するのは、正則被覆とよばれる場合に限られる。

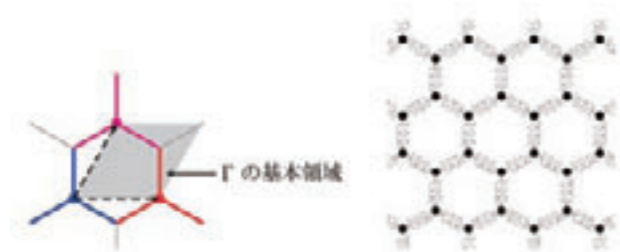


図3 平行移動の基本領域

図2の基本グラフは、六角格子では左図の青で示した部分に対応する。それを、左図で示した2つのベクトルによる2方向への平行移動を繰り返すと六角格子が現れる。このときの「基本領域」が灰色で示した部分であり、この領域の体積を一定に保って変分問題を考える必要がある。頂点間の距離の2乗和をエネルギーとする変分問題を考えることは、右図のようにバネで頂点がつながれているときの釣り合いの位置を求めることに相当する。

$$\sum_{e \in E_x} v(e) = 0, \quad \forall x \in V_X$$

$$\sum_{e \in E_{X_0}} (v(e), x)^2 = c|x|^2, \quad \forall x \in \mathbb{R}^d$$

数式1 結晶格子の標準実現が満たす条件

第1式は、結晶格子の各頂点で「力の釣り合い」がとれていることを表している。第2式の意味は少々把握することが難しいが、正三角形・正四面体の重心から各頂点へのベクトルが満たす性質に一致している。

対称性が高いものを探すために、周期的な実現の中で探そうと考えることは自然です。「周期的」とは、結晶格子の中で、基本グラフが平行移動によって移り合っていることを表す言葉で、被覆変換群⁴が平行移動として働いていることに対応します。次に、与えられた基本グラフに対する結晶格子の周期的実現に対して、前に述べた、自然界の基本原理と考えられる変分原理を適用します。変分原理を考えるためには、結晶格子の実現に対して「エネルギー」を考える必要があります。結晶格子の実現のエネルギーを、実現の中にある1つの基本グラフに対応する部分の各辺の長さの2乗和と定義します。この時、実現された結晶格子を相似変形によって小さくしていくと、エネルギーも小さくなるため、平行移動のベクトルがつくる格子の体積(面積)を一定に保つ制約条件の下で、格子も自由に変形させたとき、エネルギーが最小となる実現を「標準実現」とよびましょう(図3)。すると、その結果得られる結晶格子の標準実現は、数式1で示す2条件を満たすことがわかり、最も対称性が高い実現であることがわかります。このようにして、有限グラフから出発して、被覆グラフ(群作用)と変分原理を用いることにより、結晶格子の標準実現をつくることができました。図4(a)左上のグラフ

を基本グラフとする結晶格子の標準実現は、ダイヤモンドの結晶と一致し、標準実現は自然界に現れる結晶を表しているといってもよいでしょう。

K₄格子の発見

ここまでの話では、与えられた結晶格子の実現の中で、最もエネルギーが小さいものの特徴づけることで、標準実現という概念を得ることができました。そこで、標準実現された結晶格子が“より美しい対称性をもつ”ための条件を考えましょう。美しい対称性とは

「等方性」と言い換えるべき言葉で、結晶格子が等方性をもつためには、結晶格子の各頂点から出ている辺の数が一定であるべきです。さらに、標準実現された結晶格子に関して、1つの頂点から出る辺の順序を任意に入れ替える結晶格子を不変にする合同変換が存在するとき、その結晶格子は強い等方性をもつといってもよいでしょう。ある結晶格子がこの2つの条件を満たすとき「強等方的」であるとよび、美しい結晶格子となっていると考えます。

砂田先生は、標準実現された結晶格子で

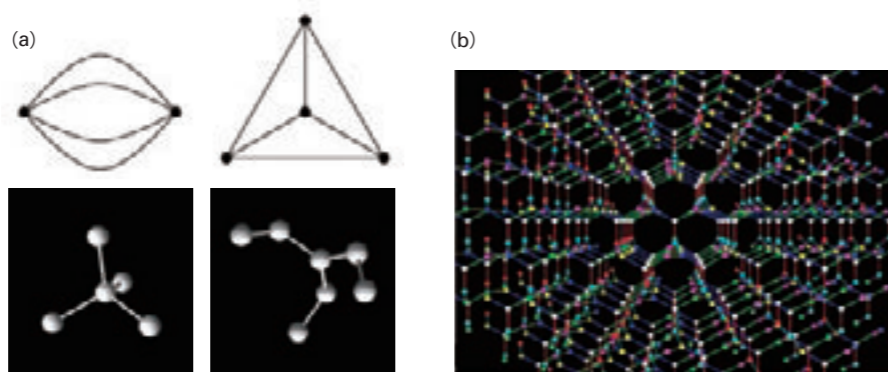
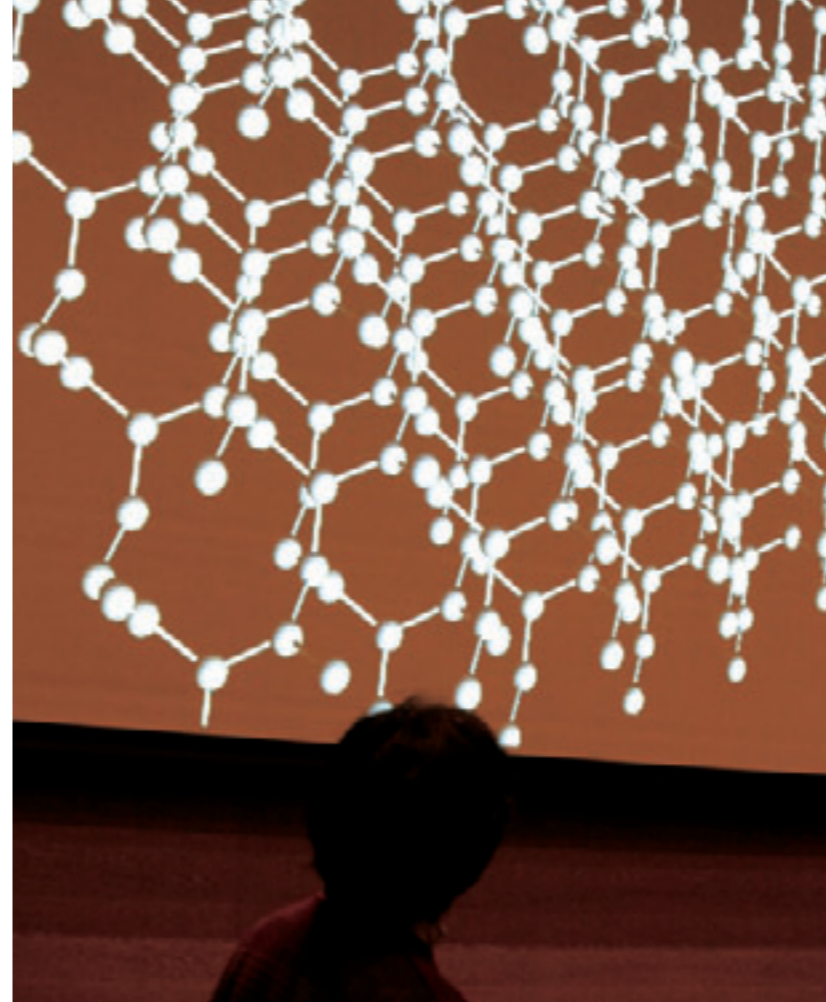


図4 ダイヤモンド格子とK₄格子

(a)の上側の2つのグラフは、それぞれ、ダイヤモンド格子・K₄格子の基本グラフである。それらのグラフから結晶格子の標準実現をつくと、結晶格子の中での基本グラフは、それぞれ、下の形となる。これらを基本グラフから決まる3方向の平行移動でコピーしたものが、それぞれ、ダイヤモンド格子・K₄格子となる。ダイヤモンド格子では、基本グラフが正四面体の重心と頂点となることかわかる。K₄格子は抽象的な結晶格子ではなく(b)のように3次元空間に標準実現されたものを意味する。K₄格子では、各頂点とそのまわりの3つの頂点は、正三角形の重心と頂点となる。



	ダイヤモンド	六角格子	K ₄
広がり次元	3	2	3
頂点ごとの辺の数	4	3	3
最短閉路のステップ数	6	6	10
1つの頂点を通る閉路の数	12	3	15
2色塗り分け可能か?	○	○	○
鏡像対称性	○	○	×

図5 ダイヤモンド格子・六角格子・K₄格子の性質

ここで実現の方法に依存するのは「鏡像対称性」のみである。炭素で結晶をつくることを考える場合、ダイヤモンド格子の1つの炭素原子は他の4つの炭素原子と結合していることになる。一方、K₄格子の場合、結合する炭素原子は3つであるので、六角格子(グラファイト)と同様に、sp²軌道で結合することが期待でき、第一原理計算によると、事実そうになっていることがわかる。

強等方的なもの、2次元の場合には六角格子に限り、3次元の場合にはダイヤモンド格子と「K₄格子」に限ることを証明されました(図4(b))。ここでいう「K₄格子」とは、抽象的な結晶格子ではなく、3次元空間に標準実現されたものを意味します。K₄格子は結晶学の分野では古くから知られていたのですが、ダイヤモンド格子と同様な強い等方性をもつという認識は必ずしももたれていなかったようです。その意味でK₄格子は砂田先生により再発見され「Sunada格子」ともよぶべき対象です*4。ここで、K₄格子・ダイヤモンド格子・六角格子の性質を比較してみましょう(図5)。K₄格子はある頂点を通る10員環を15個もちます。この事実は標準実現でなくても成り立つ性質なのですが、基本グラフだけを見てわかる性質ではなく、現時点では実際に実現を描いてはじめてわかります。また、「2色塗り分け可能」という意味は、隣り合う頂点を異なる色に塗り分けられることができることで、仮想的に(数学的に)2種類の原子によ

て結晶を構成することができることを示しています。また、K₄格子の標準実現は鏡像非対称性をもちます。「強等方性をもつ結晶格子」として見つけ出したK₄格子が鏡像非対称であることは非常に興味深い事実です。最後に、K₄格子のかたちをした結晶が実在するか、考えてみましょう。図6のK₄格子以外の2つの炭素のみからなる結晶は、ダイヤモンドとグラファイト(グラフェン)として古くから知られています。また、そのほかの炭素結晶としては、ロンズデーライトとよばれる隕石中で発見された鉱物が知られています。そこで、私たちはK₄格子のかたちをした炭素による結晶のコンピューターによる計算を行いました。この計算は「第一原理計算」とよばれるもので、シュレディンガー方程式を用いて、電子の波動関数の密度分布や結合エネルギーを計算するものです。その結果として、炭素によるK₄結晶が理論的には存在する可能性があり、その結晶は金属的なふるまいをする(電気伝導性がある)ことがわかりました。

しかしながら、K₄炭素結晶は機械的には不安定であることがわかるため、簡単な方法で実際にモノをつくることは容易ではないと考えられます。数学は、それ自身が重要な研究対象である一方で、“数学は何の役に立つのか”と質問されることがあります。物理学・情報科学などの元々数学と深い関わりをもつ学問だけでなく、純粋に数学的な興味から出発して、材料科学との関わりが得られたことも、この研究の1つの側面であり、上の質問への答の1つではないかと考えています。最後に、この記事をもとめるにあたり、砂田利一先生と小谷元子先生には有益なコメントをいただいたことを感謝します。

*4 砂田自身は“Diamond Twin”というび方をしている。「K₄格子」とよぶ理由は、その基本グラフが「4点からなる正則グラフ」(K₄グラフ)であること由来して、砂田が命名した。古くは「Net1」または「(10,3)-a」などとよばれていた。

◎参考文献
「ダイヤモンドはなぜ美しい〜離散調和解析入門〜」
砂田利一著/シュプリンガー・ジャパン刊

細胞分裂装置スピンドルの研究フロンティア

五島 剛太 生命理学専攻教授

スピンドルに魅せられる

細胞分裂は生命現象の最も根本的なプロセスの1つであり、約130年前の発見以来、多くの細胞生物学者を魅了してきた。細胞の分裂異常と癌化の因果関係も古くから示唆されており、その解明は、我々人間の疾患の理解の観点からも重要だと考えられている。細胞分裂を司る「装置」とよばれるのが「スピンドル（紡錘体）」という複雑な構造体である（図1）。スピンドルは微小な管状繊維（微小管）を中心とする数多くのタンパク質によって構成され、1つの細胞を2つに分裂させ、染色体DNAを分配する際に必須の役割を果たす。我々の研究室は、どうやって精巧なスピンドル構造が作り出されるのかに関心をもっている。しかしこのテーマ、中学でも基礎的な知識として習うぐらいであるから、「重要

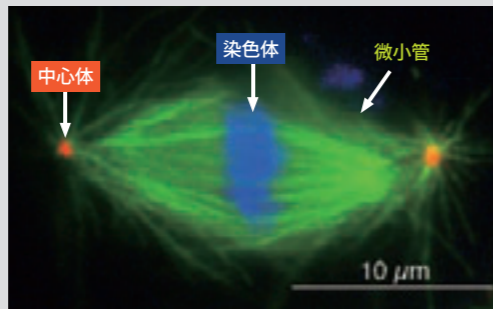
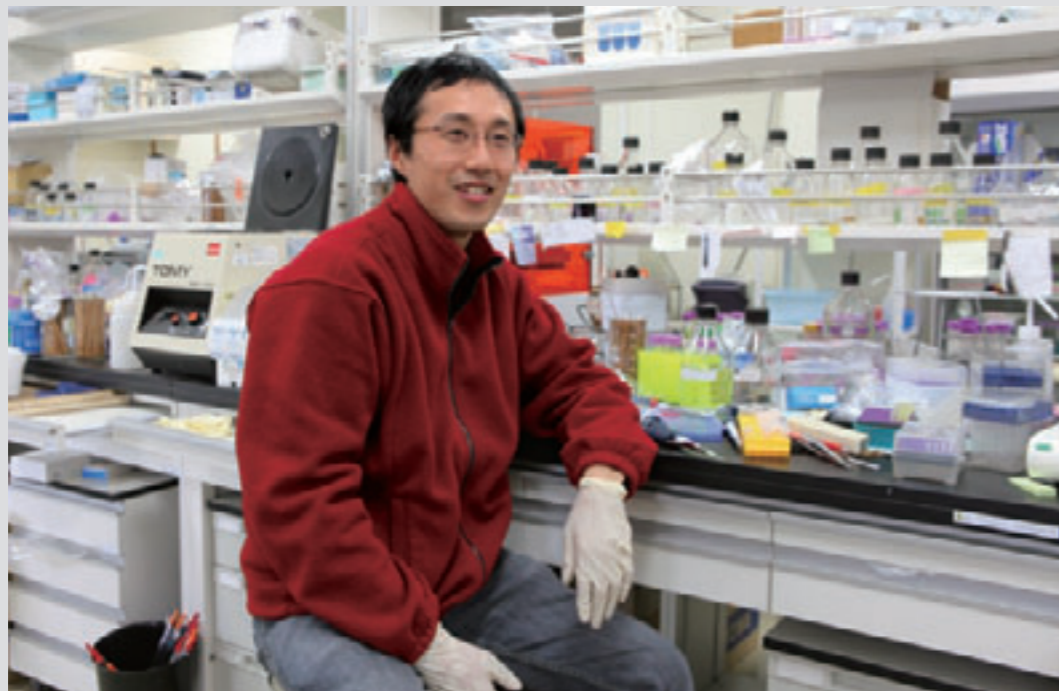


図1 分裂期スピンドル像

動物細胞の分裂期中期スピンドル像。ショウジョウバエ細胞の染色体DNA（青）、微小管（緑）、中心体（赤）を染色し、蛍光顕微鏡で撮影した。スピンドル中央に整列した染色体DNAは、微小管繊維によって中心体とつながっている。この後、分裂後期に入ると、染色体の分離、スピンドルの伸長が起こり、遺伝情報DNAが2つの細胞へと均等に分配される。写真は大学院生の李文静による。

な問題はもう解かれているから先はないよ」と思われる方もいらっしゃるだろう。実は私も学位取得後、数年前にそういう懸念を抱いたことがある。そのとき、この分野で長年活躍をされているアメリカの先生がアドバイスをくださった。「剛太、心配するな。研究を続けろ。俺もおまえくらいの年だった30年前、同じこと

を考えた。でも見てみる、今のスピンドル研究は当時よりずっと面白いじゃないか」。このアドバイス、即座に聞き入れた。「偉い人のいうことは、ともあれ黙って聞くもんですよ」という大学院時代の恩師の至言もあったからである。よし、スピンドル研究で飯を食っていく（研究を続けよう）と決めた。



Gohta Goshima

1974年生まれ。1997年京都大学理学部卒業。2002年京都大学大学院理学研究科修了。2002年カリフォルニア大学サンフランシスコ校（UCSF）ポスドク。2007年名古屋大学高等研究院特任准教授。2010年4月より現職。

構成因子を同定する

そこで、100年以上にわたるスピンドル研究における最重要テーマの1つ（と私が考えたもの）に取りかかることにした。動物細胞のスピンドルをつくるのに必要なタンパク質を片っ端から同定しようというものである。戦略は単純で、ショウジョウバエの培養細胞を用いて全ゲノムRNAiスクリーニング（ハエがもつ約1万5000の遺伝子の機能を逐一阻害する手法）を行い、スピンドルのかたちが異常になるものを探すことにした。それまでにも、より単純な生物種を用いて、種を超えて保存されたスピンドル構成因子は相当数同定されていたこともあり、果たして我々が新規の遺伝子を見つけられるのかどうかは不安だったが、共同研究者に恵まれたおかげもあり、10以上も見つけることができた。

オーグミン複合体とスピンドル微小管の増幅

その中で今最も注目しているのが、「オーグミン」と命名したスピンドル微小管増幅に関わるタンパク質複合体である。大半のスピンドル微小管は「中心体」というスピンドル極に存在する構造体から生み出されるというのがこれまでの定説だったが、どうやらそうではなく、多くのスピンドル微小管はスピンドル内部でオーグミンに依存して作り出されることが明らかになった（図2）。つまり、地球儀の極（中心体）から派生する経線よりは、線香花火の火花の枝分かれする軌跡のイメージに近いのではないかと我々は考えている。「すでにわかりきっていること」だったはずの、教科書に出てくるスピンドル像は、将来、書き換えが必要かもしれない（図3）。

スピンドル研究、「次の一手」は？

細胞内で起こっている現象は、細胞外でも再現できてはじめてそのメカニズムが理解されたこととなる。したがって、我々もオーグミンによる微小管増幅の様子を試験管内で再現することをめざしている。すなわち、オーグミン複合体と微小管を試験管内で混ぜると本当に微小管の枝分かれ構造が作り出されるのか、検証したいと思っている。実は、微小管増幅だけに留まらず、スピンドル内で起きていていると思われる現象の大半は、構成因子が同定されていないが、まだ試験管

内で再構成できていない。したがって、主に細胞観察を通じて立てられてきたスピンドル形成の理論の多くは、実際には真偽が確かめられていないことになる。我々は今後、スピンドル内で起こっているさまざまな事象の試験管内再構成をめざして研究を展開したい。

では、再構成が成功すればよいよ教科書は完成し、スピンドル研究は終わるのか。私は研究室の学生に、「そんなはずはないぞ。おれも数年前にそう思ったこともあったけど、そのときにあの先生がな…」と語っている。

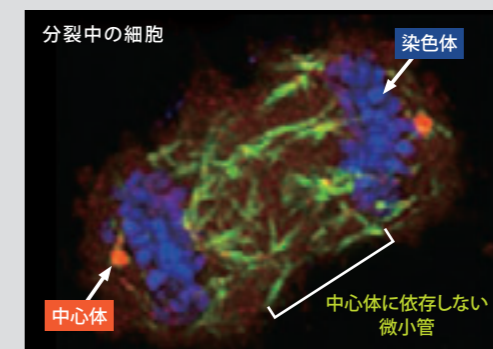


図2 オーグミンによる微小管生成

細胞の中央付近で微小管（緑）が中心体に依存せず生まれている様子。微小管は、チューブリンという球状のタンパク質が重合してできる繊維である。この細胞は、分裂後期にいったん微小管繊維を脱重合させたのちに再形成させて撮影した。中心体から離れた位置で微小管が生成されている様子がわかる。オーグミン複合体を欠失した細胞に対して同様の処理を行うと、このような微小管はほとんど生まれない。すなわち、この像で見られる微小管の大半は、オーグミン依存的に生み出されたことになる。なお、微小管重合の核となる因子を赤色で染色しており、中心体以外に、生成された微小管上にも存在が認められる。オーグミンは、この重合核形成因子を微小管上に集積させる働きを担うと考えている。（図はJournal of Cell Biology誌2010年10月号表紙を改変）

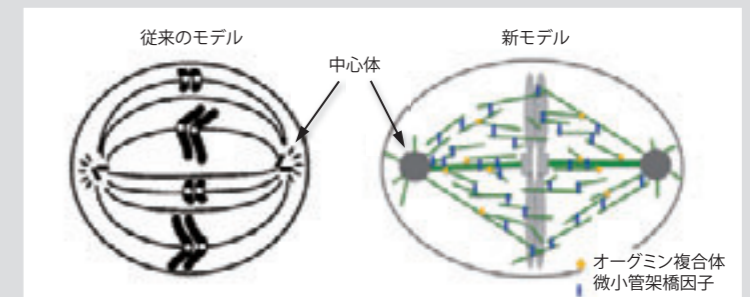


図3 スピンドル微小管生成の新モデル

左は教科書でおなじみのスピンドルの模式図。長い微小管繊維が中心体と染色体をつないでいる。右は、オーグミン（黄）によってスピンドル内部で生み出された短い微小管が架橋され（青）、全体として安定な構造をとるとする最新のモデル。この両モデルの違いを際立たせるには、それぞれ中心体を取り除いてみると良い。左の図では、中心体が微小管の大半を生み出しているため、中心体の除去は微小管の消失を引き起こさず。一方、右の図では、スピンドル構造はおおむね維持されるはず。実際に行われた中心体消失実験は、後者を支持した。では、右の図が正しいとして、中心体とオーグミンを同時に除去するとどうなるか。これは私が4年前に行った実験であるが、大半の微小管が消失し、スピンドルは崩壊する。オーグミンは、中心体と同等に重要だったわけである。（左図は平成21年センター試験問題を改変。右図はGoshima and Kimura, 2010, Current Opinion in Cell Biology, 22, 44-49を改変）

機能調節学講座
細胞内ダイナミクスグループウェブページ

<http://bunshi4.bio.nagoya-u.ac.jp/%7etenure2/goshima.html>



Muneyoshi Furumoto

1951年岐阜県大野郡（現高山市）生まれ。1976年名古屋大学大学院理学研究科博士課程中退。名古屋大学教務員、助手、金沢大学助教授、教授を経て2005年より現職。専門は地震学・地球惑星物理学。

「はやぶさ」の最後の声を観測する

古本宗充 地球環境科学専攻教授

待ち続けた瞬間

2010年6月13日23時頃、オーストラリアのウーメラ砂漠に小惑星探査機「はやぶさ」が帰還した。南半球では初冬でかなり寒いななか、待ち続けたその瞬間がきた。真っ暗の平原で見る美しい星空の一点から、「はやぶさ」が湧き出るように出現し明るさを増しながらゆっくり流れた。「はやぶさ」が文字通り燃え尽きる姿であり寂しさもあったが、非常に楽しかった。

「はやぶさ」の冒険譚や「イトカワ」探査における工学・科学的な成果はさまざまところで紹介されているが、「はやぶさ」の計画は幅広い裾野をもっており、ほとんど知られていないさまざまな工夫や努力そして研究が行われている。ここではそのようなあまり知られていない研究の1つである「はやぶさ」帰還時の観測について述べたい。「はやぶさ」の大気圏突入時に、カプセル回収を目的とする観測に合わせていろいろな観測が行われた。大学研究者および流星観測熟練者からなる我々のチームの観測は、JAXAとの共同研究として、この回収隊の一部に加わるかたちで行われた。

我々が行ったのは、「はやぶさ」やそのカプセルが超高速（突入時12km/秒）で大気を突っ切るときに出る衝撃波を微気圧計や地震計で捉える観測である。強い衝撃波が起きると、その圧力変動で地面が揺すられ、地震計に「妙な振動」として捉えられる。逆に考えると、地震計の記録を解析することで、大気中を突っ切る物体の性質を調べることができる。今回の観測ではその物体が「はやぶさ」やそのカプセルである。

1つの目的は衝撃波データからカプセルの落下軌道を決めることである。カプセルの落下点決定の手段はカプセルからの電波信号利用であり、今回正常に働き回収がすみやかにされた。しかしながらこのシステム

が動かない可能性もある。それに備えて何種類かの予備観測が行われ、その最後の手段が衝撃波による軌道の決定である。我々の実際の出番はないと考えていたが、現地では帰還日の前日まで曇天が続き、少し現実味を感じたときもあった。

もう1つの（我々としては主な）目的は衝撃波の強さの測定である。微小な天体が地球

に衝突する現象は小の流星からクレーターをつくるような大衝突まである。幸いにして記録に残る範囲で被害を出した衝突は少ないが、将来大きな衝突に見舞われる可能性がある。しかしこうした衝突現象についてよくはわかっていない。また盾になっている大気中での様子もよくわかっていない。この様子を少しでも理解しようとして利用しているのが、



図1 ウーメラ砂漠内の観測点付近の風景
「はやぶさ」の突入経路のほぼ下にあたる場所の何方かで観測した。灌木が点々とあり、カンガルーの足跡・尾の跡などもあったがここではカンガルーは見なかった。ただ、何か野生動物がいて、夜間に観測機器の信号線を噛み切られるという不測の事態もあった（古本撮影）。



図2 観測点の1つから見た「はやぶさ」の帰還
地表や雲が写っているのは「はやぶさ」の光に照らされたからである。写真は観測チームの石原吉明（国立天文台）による。

地震計に記録された衝撃波である。個人的には、天体と地震計という予想外の組み合わせが面白いと気に入ったテーマであるが、余人はどうだろうか。

千載一遇のチャンス

このような研究で問題となるのは、地震計から推定した衝突物体の大きさが本当に正しい値になっているかである。地球に飛び込んできた微小天体の大きさは不明であるので、研究結果の正しさの確認ができない。場合によっては隕石として手にすることができるが、大気との衝突・摩擦により摩擦しているため突入時の大きさはやはり不明である。またジェット機などによる衝撃波の解析はできるが、20km/秒という速度で突入した場合でも同じ理論が適用できるか確かめないうちは意味がない。

その意味で「はやぶさ」の帰還は千載一遇のチャンスである。形状、質量、速度、そして軌道がわかった物体が突入してくるのであり、推定法の正しさの検定にはもってこいである。これが数年間「はやぶさ」の帰還を待ちわびた理由である。最近流行の衛星擬人化で表現すれば、「はやぶさ」君が「帰宅」して大気のドアを強く押し広げて叫んだ声が、数年間待ったデータだったわけである。公式の成果にはまだほとんど入れられることのない研究であるが、「はやぶさ」が最後に残した科学的データの1つである。天体衝突の科学や太陽系の科学に少しでも新たなデータを付け加えたいと考えている。

最後に、この観測に関わって面倒な手続きなどをすすめてくださった大学事務、JAXA関係者、そして同じ観測チームのメンバー（高知工科大、金沢大、国立天文台、日本流星研究会）に感謝します。



Toshiyuki Nakano

1969年愛知県生まれ。1998年名古屋大学大学院理学研究科博士(後期)課程終了。2000年日本学術振興会特別研究員、2002年科学研究費補助金による研究員を経て、2004年より現職。

ニュートリノ振動を直接検出する

中野敏行 素粒子宇宙物理学専攻助教



図1 ニュートリノ検出器

イタリアのグランサッソに設置した原子核乾板と鉛で構成したニュートリノ検出器。ニュートリノを反応させる標的重量は1200トン。8.3kg単位に分割した標的を12万個使用する。スイスのジュネーブにあるCERNの加速器を用いて生成したミューニュートリノを照射することで、一日あたり約30のニュートリノ反応が起こる。そのほとんどが振動していないミューニュートリノによる反応である。

ニュートリノに質量はあるのか

ニュートリノという素粒子は、1930年にパウリ*1がβ崩壊におけるエネルギー保存則*2を成立させるためにその存在を仮定してから、ライネス*3とコーワン*4によって実験的に存在が証明されるまでに26年を要した。その後の研究でニュートリノには複数の種類があることがわかったが、3番目のニュートリノであるタウニュートリノを検出し存在を証明することができたのは、さらに44年後の2000年である。これほどまでに年月がかかった理由は、ニュートリノが物質を構成する陽子・中性子・電子とほとんど反応せず、地球ですらほとんど貫通してしまうからである。

一方で、この宇宙には1cm³に300個ほどのニュートリノが存在していると考えられている。これは水素のような原子の数の10億倍にもなり、ニュートリノの性質を知ることは宇宙の進化・物質の成り立ちを理解する上で非常に重要である。とくにその質量は標準模型では長らくゼロとされていたが、牧二郎*5、中川昌美*6、坂田昌一*7により提唱されたニュートリノ振動という現象を通じて、有限の値をもつことがわかってきた。ニュートリノ振動とは、ニュートリノがゼロでない質量をもてば、3種類のニュートリノが相互に入れ替わることがあるというものである。これは、デイビス*8による太陽中の核融合から発生するニュートリノの数の観測値が期待値より少ないことの発見に端緒を發している。その後スーパーカミオカンデ*9による大気ニュートリノの観測でも特定のニュートリノの減少が観測され、これらはニュートリノ振動によるものと考えられている。

私たちは、加速器により人工的に発生させたミューニュートリノを730km離れた位置に設置した検出器で測定し、減少を測定するのではなく、振動がなければ含まれていないはずのタウニュートリノを捉えることで振動現象の存在を確かなものとしようとしている。このような、変化して生じた別種のニュートリノを直接検出した実験はいまだにない。しかし、

ニュートリノの物質との反応のしにくさから、用意した1200トンの検出器(図1)をもってしても5年間に期待できるタウニュートリノの数はわずかに10個程度である。

はじめての検出に成功

タウニュートリノを検出し、その種類を同定することは容易ではない。唯一の方法は、そのタウニュートリノと物質との反応後に発生するタウ粒子を検出することである。タウ粒子は電子によく似た性質をもつが、質量は3500倍ほどもあり、約0.3ピコ秒*10と極めて短時間で崩壊してしまう不安定な素粒子である。ニュートリノが反応起こすのに十分な量の標的となる物質を実現しながらも、このような同定が行えるのは、銀塩写真技術を元につくられサブマイクロメートルを超える3次元空間分解能で素粒子の飛跡を記録することができる原子核乾板しかない(図2)。その使用量は10万m²にも及ぶことから、この実験の最大の難点は記録された飛跡を高速高精度に読み取ることにあった。私たちは、3次元画像解析による自動化された原子核乾板読み取りをはじめたタウニュートリノの存在を証明したときよりも2桁高速化し、この実験の遂行を可能にした(図3)。昨年5月にははじめて

振動により変化した1個のタウニュートリノ反応の候補を検出することができている(図4)。

確かな結論を得るには複数の同様な反応を捉えなければならないが、実験もなかばであることから今後順調に増加するものと期待できる。また、高速化した原子核乾板解析技術をさらに発展させるとともに、開発が進行している位置分解やエネルギー測定能力をより高性能化した原子核乳剤を用い、ニュートリノとその反ニュートリノの同一性を検証するニュートリノレス二重β崩壊*11の検出や、この宇宙の最大の謎の一つともいえる暗黒物質*12の探索への展開を計っている。

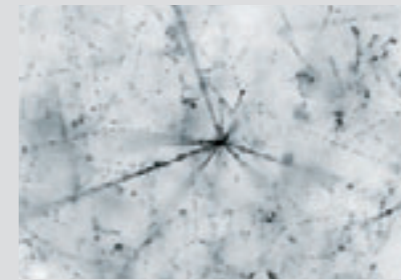


図2 原子核乾板による素粒子飛跡の記録例

原子核乾板の150μm×120μmを拡大した顕微鏡写真。ほぼ中心にある原子核にニュートリノが衝突したものと考えられ、放射状に伸びる濃い線は破壊された原子核の破片による飛跡である。実物の飛跡は立体的に記録されており、ニュートリノのエネルギーにより生成された素粒子の飛跡が主には紙面垂直方向に記録されている。これらは高分解能の顕微鏡光学系による断層撮影により3次元観察および測定が可能である。



図3 超高速原子核乾板自動飛跡読み取り装置

原子核乾板に記録された素粒子の飛跡情報を3次元画像解析により高速かつ高位置分解能で読み出すために開発した装置。高速な撮像素子とFPGA(書き換え可能な大規模集積回路)による並列画像処理によって、従来の2桁の処理能力の向上を果たした。



図4 原子核乾板から読み出された飛跡情報

ニュートリノ振動によってミューニュートリノがタウニュートリノへ変化したものを捉えたと考えられる最初の候補。色は粒子の違いを表現するために着色したものである。左から右向きに加速器によって生成されたニュートリノが入射し標的物質(鉛)と衝突し反応を起こしている。ニュートリノの運動エネルギーの一部が、タウニュートリノの反応の特徴であるタウ粒子(赤)を生成し約2mmで他の粒子(青)に崩壊している。さらに崩壊点からはガンマ線が発生していると考えられる。

*1 W. パウリ (1900-1958) オーストリアの物理学者。ノーベル物理学賞(1945年)を受賞。

*2 β崩壊におけるエネルギー保存則 β崩壊では電子とニュートリノを放出するため、電子のみを観測すると始状態と終状態で、一見エネルギー保存則が成立していないように見える。

*3 F. ライネス (1918-1998) アメリカの物理学者。ノーベル物理学賞(1995年)を受賞。

*4 C. コーワン (1919-1974) アメリカの物理学者。

*5 牧二郎 (1929-2005) 元名古屋大学理学部助教授。

*6 中川昌美 (1932-2001) 元名古屋大学理学部助手。

*7 坂田昌一 (1911-1970) 元名古屋大学理学部教授(本誌2号P.2、16号P.4参照)

*8 R. デイビス (1914-2006) アメリカの化学者、物理学者。ノーベル物理学賞(2002年)を受賞。

*9 スーパーカミオカンデ 岐阜県飛騨市にある地下1000mに設置された世界最大のニュートリノ検出器。

*10 ピコ秒 1ピコ秒は1兆分の1秒。

*11 ニュートリノレス二重β崩壊 ニュートリノは正粒子と反粒子の区別がない可能性が指摘されており、その場合ある種の核種では2つの中性子が同時にβ崩壊を起こし、かつ、ニュートリノを放出しないことが予想される。

*12 暗黒物質 宇宙にある星間物質のうち電磁波では観測できない仮説的物質。宇宙全体の物質エネルギーの22%を占める。

同窓生から

科学の芽がよきよきと

NSA合同会社サイエンスアカデミー教務
佐光裕康 (Hiroyasu Sakou)

8月の名古屋は夏の真っ盛り。名古屋大学東山キャンパスは、緑が多いとはいえ、木陰にいても、熱いねっとりした空気の底にいるようである。野依記念物質科学研究館から森へ向かうと、涼しそうなガラスの外観の野依記念学术交流館が姿を現す。中からは楽しそうな子どもたちの声が聞こえてくる…。

私たちNSA合同会社のスタッフは、夏休み後半の2日間、小学生とその保護者を対象に「サイエンスアカデミー夏の理科実験教室」を開いている。参加型のサイエンスショーと工作教室を組み合わせた内容で、2日間で100名前後の参加者があり、毎年大好評いただいている。

学習塾サイエンスアカデミーの小学生部門に、理科実験教室を開講したのが2009年4月。この授業とは別に、サイエンスショーのようなイベントを開いて、もっと多くの子どもたちに科学を楽しんでもらおうと話がふくらみ、「サイエンスアカデミー夏の理科実験教室」になった。2009年度は「色・イロいろ」と題して色と光の織りなす世界を、2010年度「サウンド・オブ・サイエンス」では手づくり楽器を鳴らして音の世界を楽しんだ。

そして今年、2011年度も「夏の理科実験教室」は開催される。タイトルは「はっ! とトリック?! サイエンスショー!!」。目を輝かせて「なぜ」「どうして」と問いかけてくる子どもたちを思い浮かべながら準備を進めている。



昨年の「サイエンスアカデミー夏の理科実験教室」の様子

書籍紹介

「宇宙史を物理学で読み解く
—素粒子から物質・生命まで—」

現象解析研究センター教授
飯嶋 徹 (Toru Iijima)

現代物理学は、相対性理論と量子力学の発見を基礎として20世紀に飛躍的に進歩し、素粒子、宇宙、物質、生命現象といった各分野に専門化されてきた。21世紀においては、こうして先鋭化された研究の融合・連携が新しい物理世界を切り開くと期待される。たとえば素粒子と宇宙の境界では、2001年に打ち上げられたWMAP衛星による宇宙背景輻射の精密データが、宇宙の構成成分の23%および73%が、それぞれダークマター、ダークエネルギーとよばれる未知の物質やエネルギーであることを示し、素粒子物理の最先端研究がこの宇宙の最大の謎の解明につながると期待されている。

本書には、宇宙の形成と進化を軸として、名古屋大学が展開する素粒子や宇宙から、物質、そして生命におよぶ最先端研究の数々が紹介されている。そのもとに、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」の研究教育活動である。そこでは、最先端の先鋭研究だけでなく、分野を超えた交流と連携が大きな目標であり、「たこつぼ化」しがちな研究に分野横断の新風を送り込んだ。本書はこうした活動の集大成といえる。「宇宙史を物理学で読み解く」という壮大なテーマもさることながら、名大物理研究の最先端の現場を紹介し、今後の分野連携の可能性や重要性を提示する一冊である。



宇宙史を物理学で読み解く
—素粒子から物質・生命まで—
福井康雄監修
名古屋大学出版会
2010年5月発行 / 3,675円

名誉教授だより

大沢文夫名誉教授が
ネイチャーメンター賞を受賞

生命理学専攻助教
杉山 伸 (Shin Sugiyama)

大学院での伝統的な教育のあり方を「徒弟制度」と批判する声もあるが、より適切な表現がメンターリングだと思う。メンターの語源は、ギリシャ神話でユリシーズが息子の育成を委ねたメントルの名前に由来し、1対1の師弟関係を指していた。欧米の高等教育はメンターリングを欠かせないものとし、その充実を図る努力が現在は制度的にもなされている。そんな中で、大沢文夫名誉教授のネイチャーメンター賞の受賞はうれしい出来事である。同時に見遇ごされがちなメンターリングにおける功績を表彰することで、教育研究の発展を促そうとするネイチャー誌の編集方針は流石だと感心させられる。

大沢名誉教授は日本の生物物理学の立ち上げにおいて果たした功績で有名だが、独特な人の育て方に関するお話もよく耳にする。当時の研究室は「おおさわ牧場」として有名だったが、人材育成において、自由を許しながらも、しっかり力強く育てる「放牧」スタイルに成功する研究室はいつの時代も少なく、1つの理想といえる。

ネイチャーメンター賞は毎年対象国を変え、第5回となる2009年はアジアで初めての日本での開催となり、「中堅キャリア賞」を受賞したソニーコンピュータサイエンス研究所の北野宏明氏とともに大沢名誉教授は「生涯功績賞」に選ばれ、同じ、この東山の地で「牧場主」を志す研究教育者たちの励みとなっている。



ネイチャーメンター賞の授賞式にて

キャンパス通信

理学図書室オープン

事務部図書掛長
河合成典 (Shigenori Kawai)

2010年7月15日、学科毎に設置されていた図書室は統合され理学図書室として新たにオープンした。場所は改修・改装が終わったA館の西側1階および2階。面積は約1900㎡、蔵書冊数は約19万冊(収容能力は25万冊以上)、雑誌は約3,000タイトルを収蔵している。これら資料は主に1階南側の開架スペースおよび北側の新着雑誌室、集密書庫に排架されている。

2階には多目的室、AV室、貴重書室(ヒルベルト文庫)、地図・地質図書室、閲覧室等、さまざまな用途の部屋を備え、多目的室はセミナー、グループ学習等の目的で予約して利用でき、予約のない時は自由に利用できる。

安全対策として、集密書庫には免震装置、開架書庫には感震式書籍落下防止装置、また出入口・非常口に防犯カメラ、各部屋には防犯ブザーを設置した。

サービス面では貸出・返却処理が電算化(バーコード読み取り方式)されたことで手続きが大幅に簡略化され、貸出予約、文献複写依頼もWebからの申し込みが可能となった。また、コピー機3台(職員証・学生証で利用可能)、検索用パソコン(12台)、無線LANも図書室内のどこからでもつながるようになった。開室時間は月・火・木は午前9時から午後5時まで、水・金は午後8時まで夜間開館を行っている。

このように広いスペースに資料、設備、職員がまとなり、サービスも拡大した理学図書室をぜひ利用してほしい。

