

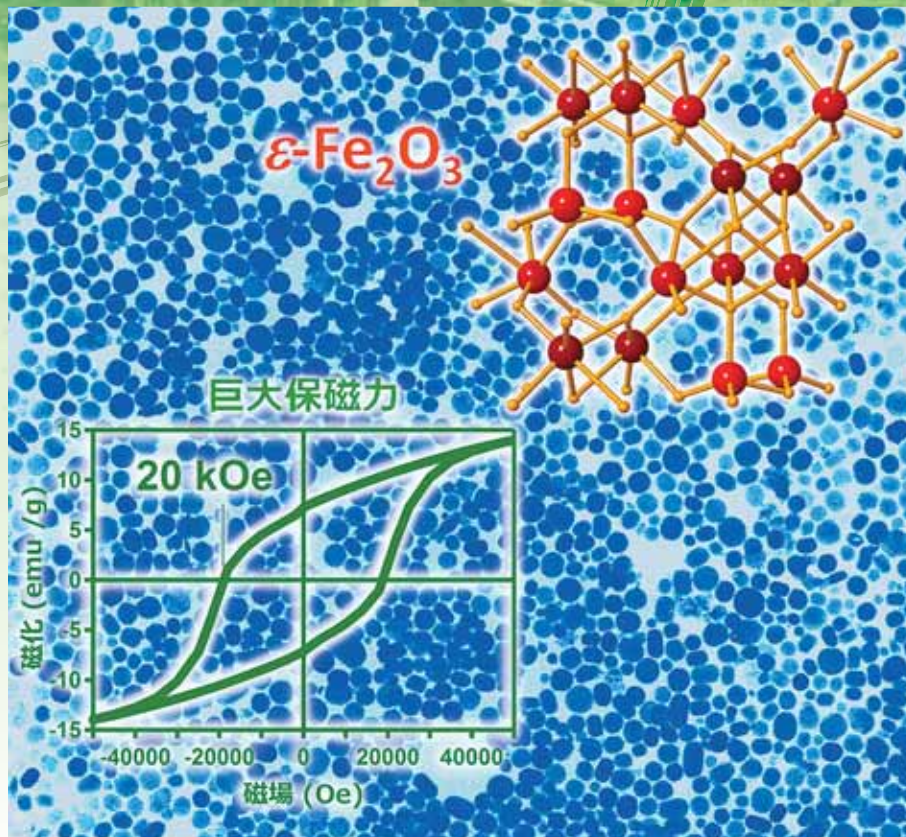


東京大学

# 理学系研究科・理学部ニュース

2011年7月号 43巻2号

<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/>



巨大保磁力を示す最強のフェライト磁石、イプシロン型-酸化鉄 ( $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )  
～理学の匠「最強のフェライト磁石」より～

本号の記事から

トピックス

学科の教育メニュー

研究ニュース

理学のキーワード

「学校の先生のための放射線勉強会」開催 ほか

生物情報科学科

中心子のマジックナンバー「9」の由来 ほか

「可積分系」「PとNP」「臨界温度と秩序パラメータ」

「星間分子雲」「アト秒パルス」「システム生物学」

## トピックス

山下恭弘准教授の文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞を祝して	小林 修 (化学専攻 教授) ……………	3
国立天文台家正則教授が東レ科学技術賞を受賞	林 正彦 (天文学専攻 教授) ……………	3
物理学専攻の平野哲文客員准教授, 第1回 Zimanyi Nuclear Theory Medal を受賞	初田 哲男 (物理学専攻 教授) ……………	4
大学院生出張授業プロジェクト BAP が, 2010 年度小柴昌俊科学教育賞奨励賞を受賞	横山 広美 (広報・科学コミュニケーション 准教授) ……………	4
東日本大震災を受けて開催「学校の先生のための放射線勉強会」	横山 広美 (広報・科学コミュニケーション 准教授) ……………	5
第19回理学部公開講演会開催される	横山 央明 (地球惑星科学専攻 准教授) ……………	5
第10回高校生のためのサイエンスカフェ本郷開催報告	角谷 良彦 (情報理工学系研究科 助教) ……………	6
美術作品「宇宙膨張進化の視覚伝達装置 ビッグバンと宇宙の晴れ上がり」	横山 広美 (広報・科学コミュニケーション 准教授) ……………	6
日本での3年間を振り返って	ロトコプ・アレクサンダ (物理学専攻 博士課程3年) ……………	7

## 学科の教育メニュー 第8回 生物情報科学科

膨大な生物データから, 生命のシステムを解く	程 久美子 (生物化学専攻・生物情報科学科兼任 准教授) ……………	8
------------------------	------------------------------------	---

## 理学の匠 第8回

最強のフェライト磁石	大越 慎一 (化学専攻 教授) ……………	10
------------	-----------------------	----

## 研究ニュース

光による体内時計の時刻合わせと目覚まし機構	羽鳥 恵 (生物化学専攻博士課程修了), 廣田 毅 (元生物化学専攻特任助教), 深田 吉孝 (生物化学専攻 教授) ……………	11
中心子のマジックナンバー「9」の由来	廣野 雅文 (生物科学専攻 准教授) ……………	12
ウニ精子の機械受容反応の発見と遊泳制御	蒲原 祐花 (生物科学専攻博士課程修了), 真行寺千佳子 (生物科学専攻 准教授) ……………	13
南極大型大気レーダーで初観測に成功	佐藤 薫 (地球惑星科学専攻 教授), 堤 雅基 (国立極地研究所 准教授), 山内 恭 (国立極地研究所 教授) ……………	14

## 連載: 理学のキーワード 第32回

「可積分系」	ウィロックス ラルフ (数理科学研究科 准教授) ……………	15
「P と NP」	河村 彰星 (情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻 助教) ……………	15
「臨界温度と秩序パラメータ」	内田 慎一 (物理学専攻 教授) ……………	16
「星間分子雲」	山本 智 (物理学専攻 教授) ……………	16
「アト秒パルス」	沖野 友哉 (化学専攻 助教) ……………	17
「システム生物学」	黒田 真也 (生物化学専攻 教授) ……………	17

## お知らせ

岩堀長慶先生のご逝去を悼む	寺田 至 (数理科学研究科 准教授) ……………	18
人事異動報告	……………	18
東京大学大学院理学系研究科・博士学位取得者一覧	……………	19
理学部オープンキャンパス 2011 のお知らせ	広報委員会 ……………	19

- 表紙 巨大保磁力を示す最強のフェライト磁石, イプシロン型 - 酸化鉄 ( $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )。右上図は  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の結晶構造 (大きい球が鉄原子, 小さい球が酸素原子を表わす), 左下図は室温における  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の磁気ヒステリシス曲線である。背景は  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の透過型電子顕微鏡像 (平均粒径: 18 nm)。



## 山下恭弘准教授の文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞を祝して

小林 修 (化学専攻 教授)

### 業績：「革新的有機合成を実現するスーパー触媒開発の研究」

医薬品などの複雑な分子を効率的に合成する上で、高い立体選択性をもった分子骨格構築反応は必要不可欠です。ここでは反応を促進する「触媒」がきわめて重要ですが、既存の触媒には現代科学の観点からすると多くの問題があり、新たな触媒の開発が強く望まれています。山下准教授はこの問題に取り組み、まず、これまで有機合成化学の分野ではほとんど未開拓であったジルコニウムやニオブを用いる新しい不斉ルイス酸触

媒の開発、および酸素を用いる金属ルイス酸触媒の新規活性化法の開発を行いました。また、有害な金属を含まない一酸化窒素 (NO) カチオンや、地球上に豊富に存在するアルカリ土類金属を触媒とする新規環境調和型反応の開発も行っていきます。さらに、不斉銀アミド触媒やアミノアルカンの直接的付加反応の開発を通して、既存の手法では困難であった分子骨格構築反応を実現しました。これらの一連の研究は、学術的にも新しい独自のコンセプトを提供するものであり、同氏の開発してきた触媒は世界をリードするものとなっています。有機合成化学を通じて、人類と環境の調和を図る山下准教授の研究は、今後ますますの発展が期待されます。



山下恭弘准教授

## 国立天文台家正則教授が東レ科学技術賞を受賞

林 正彦 (天文学専攻 教授)

国立天文台の家正則教授 (天文学専攻兼任) が、「初期宇宙史の観測的研究とレーザーガイド星補償光学装置の開発」で東レ科学技術賞を受賞されました。おめでとうございます。

家先生は、すばる望遠鏡の主焦点カメラを用いて、宇宙最遠方の銀河を発見されました。この銀河の出す光は、今から129億年前に放射されたもので、宇宙の涯 (ビッグバン) までの距離の94%を見通したことになります。この発見によって、今から129億年前には、宇宙の「再電離」がまだ完全には終わっていないことが分かりました。これが「初期宇宙史の観測的研究」です。

補償光学とは、大気の流れのために生

じる星像のボケ (シーイング) をリアルタイムで (0.001秒ごとに) 補正し、望遠鏡の主鏡直径で決まる (回折限界) 像を得る技術です。この方法は、「星の像は小さいはず」という原理に基づいて動作するので、撮影しようとする天体それ自身か、あるいはそのすぐ近く (30秒角以内) に、明るい参照星が必要になります。これでは、せっかくの技術も、適用できる天体が限られてしまいます。そこで、明るい星がない場合でも、地上からオレンジ色のレーザー光を打ち上げて、約90km上空にあるナトリウム原子を励起して人工の星を作り、その星を使って補償光学装置を働かせることにしたものが、「レーザーガイド星補償光学」(理学部ニュース2010年11月号「理学の匠第4回」参照) です。この研究は、家先生をはじめ、本研究科学学位取得者5名を含むチームの、10年来の努力の賜です。



家正則教授

## 物理学専攻の平野哲文客員准教授、第1回 Zimanyi Nuclear Theory Medal を受賞

■ 初田 哲男 (物理学専攻 教授)

物理学専攻の平野哲文客員准教授が、第1回 Zimanyi Nuclear Theory Medal を受賞され、フランスで開催された国際会議 Quark Matter 2011 の受賞式でメダルを授与されました。おめでとうございます。この賞はハンガリーの著名な高エネルギー物理学者、故 Zimanyi 博士の名を冠したもので、40歳以下で高エネルギー原子核物理の発展に多大な寄与をした若手理論物理学者1名に与えられるものです。

平野先生の授賞理由は以下の通りです。  
"For his outstanding contributions to heavy ion phenomenology through his extensive work on relativistic hydrodynamics applied to the understanding elliptic and radial flow as well as jet-medium observables and on quantifying the interplay between initial state effects, full three dimensional ideal fluid expansion, and the role of final state nonequilibrium decoupling dynamics."

平野准教授は、2010年度まで物理学専攻の講師を勤められ、2011年度より上智大学機能創造理工学科に准教授として転出されましたが、今年度は引き続き本研究科に客員として在籍されます。



■ 平野哲文客員准教授

## 大学院生出張授業プロジェクト BAP が、2010年度小柴昌俊科学教育賞奨励賞を受賞

■ 横山 広美  
(広報・科学コミュニケーション 准教授)

理学系の学生が中心になって始まった大学院生出張授業プロジェクト BAP (バップ) が、2010年度の小柴昌俊科学教育賞奨励賞を受賞した。本プロジェクトは、情熱をもって研究に取り組み、研究の現場を知ってほしいと強く願う大学院生が2008年に発足させたグループで、現在までに53件の高校へ出張授業を行い延べ2000人以上の生徒が彼らの話を聴講している。2009年からは理学系にとどまらず東京大学全学の活動として人文系を含めた多くの大学院生を高校に送りだしている。BAPとは英語で「母校に帰ろう (Back to Alma mater Project)」の略である。後輩たちが先輩の姿を見て研究の魅力を知る、進路の参考にすることを主眼におき、BAPは大学院生の母校を中



■ 左から初代代表・物理学専攻博士課程・音野瑛俊氏、  
2010年度代表・物理学専攻博士課程・宮武広直氏、  
2011年度代表・地球惑星科学専攻博士課程・白川慶介氏

心に実施してきた。

BAPの実績は、大きく分けると二つある。ひとつは大学院生による出張授業の枠組みを確立させたこと。出張授業を希望する学生を集め、母校とのやりとりをサポートし、多くの異なる分野を専門にする仲間が集まり高校生になったつもりで講演者の話を聞く「練習会」を徹底的に行い質の高い出張授業を行う。さらに反省会を行って反省点を集約しグループとしての経験を蓄積している。

もうひとつは、こうした大学院生による出張授業の枠組みをひとつのパッケージにし、他大学の学生たちにも提供する「エクスポート」を成功させていることだ。すでに東北大学のグループ、そしてマレーシアの留学生がBAPからの支援を受けて母校での出張授業を成功させている。

発足して間もないにもかかわらずこうしたシステムを確立したことが高く評価された。今後の彼らの継続的な活躍を期待したい。



## 東日本大震災を受けて開催 「学校の先生のための放射線 勉強会」

横山 広美  
(広報・科学コミュニケーション 准教授)

2011年5月8日(日)、理学系研究科広報委員会は「学校の先生のための放射線勉強会」を開催した。

東日本大震災によっておきた福島第一原子力発電所の事故により、放射性物質の拡散と人体への影響について社会全体の不安がひじょうに高まった。理学系研究科とその周辺の研究所には、放射線、放射性物質とその影響について詳しく話すことができる専門家が多く在籍する。そこで、学校の先生に放射線、放射性物質の基礎知識を提供することで、児童、生徒を通じ各家庭で基礎知識を共

有してほしいと考えた。申し込み後わずか4日間で小柴ホールを取容人数を超える申し込みがあり、当日も福島県の高校の先生をはじめ140名を超える参加があった。

講演会では山形俊男研究科長のご挨拶のあと、「原子核と放射線—放射線って何?それはどこから、どうして、どのように?—」を附属原子核科学研究センターの下浦亨教授、「放射線の基礎—単位から人体影響まで—」を化学専攻の谷川勝至助教、「放射性物質は大気によってどのように運ばれるか」を先端科学技



■ 小柴ホールでの講演のようす

術研究センターの中村尚教授がお話した。

幼稚園・保育園から高校の先生までが参加した講演会では質疑も活発に行われた。危険/安全の二元論ではなく、放射線や放射性物質について知ることによって自ら考える一助になることを期待したい。なお、近く「学校の先生のための放射線勉強会(2)」を開催予定である。

## 第19回理学部公開講演会 開催される

第19回実行委員長 横山 央明  
(地球惑星科学専攻 准教授)

第19回理学部公開講演会が、2011年6月5日(日)に安田講堂で開催された。当初4月24日の予定が、東日本大震災の影響で遅れての実施である。約570人の来場者があった。

テーマは「身近で大きな理学」。理学には、身近なところにも実はおもしろい研究の種が隠れているはず。今回は、大気・製鉄・植物について、理学的アプローチで取り組む研究について3件の講演を聴いていただいた。震災以前に決まっていたこのテーマが、参加者の「震災・放射線について知りたい」という要望とすれちがっているのではという不安はいまでも残る。しかし、同時期に実施されている震災・放射線への理学部の取り組みと合わせて、このような「日常」を変わず続けていくという姿勢も大事だと



■ 安田講堂で熱心に耳を傾ける聴衆

考え、そのまま開催させていただいた。

最初の講演は、佐藤薫教授(地球惑星科学専攻)による「大型レーダーが拓く新しい南極大気科学」で、極域が地球気候にとって重要な位置を占めること、南極昭和基地の新たな大気観測レーダーPANSYの初期成果が示された。2件目は、山本昌宏教授(数理科学研究科)の「数学は経済を動かすか? : 数学の応用の1つのありかた」という題で、一見とても非日常的にみえる数学が製鉄所の高炉で

どう生かされているかという話であった。最後は、邑田仁教授が、植物の多様性の進化を、土の中にあるイモの観察から解き明かすという、附属植物園前園長ならではの話を。講演に先立ち、山形俊男研究科長から震災に対する理学部の取り組みも説明した。講演後の歓談会でも多数の方々講師を取り囲み、多数の質問を浴びせて盛況であった。

次回は、2011年10月30日(日)に安田講堂で開く予定である。

## 第10回高校生のためのサイエンスカフェ本郷開催報告

角谷 良彦

(情報理工学系研究科 助教)

去る2011年6月12日、本郷キャンパス内の小柴ホールにて「第10回高校生のためのサイエンスカフェ本郷」が開催され、事前に申し込みのあった高校生および中学生約50名が訪れた。内容は、地球惑星科学専攻の橘省吾助教による講演と、講演に関連した実験室の見学、さらには、大学院生との交流と盛りだくさんであった。

「ちりもつもれば惑星となる」と題した橘助教の講演は、魅力的なスライドを使用したとても分かりやすいものであった。講演には、専門知識のない聴衆を引きつけるための工夫が随所になされており、参加者はみな真剣に講演に聞き入っていた。研究の魅力が十分に伝わったことは、講演後の参加者の表情からもうかがうことができた。



小柴ホール前ホワイエにて大学院生と談笑する参加者

講演の後には、各専攻から推薦された大学院生たちとグループに分かれての行動となった。グループごとに、順次、橘助教の実験室を見学、その合間には、各大学院生が所属する専攻のセミナー室や図書室の見学を行った。見学以外の時間は、参加者と大学院生が大学生活や研究内容について歓談し、交流を深めた。中高生にとっては、大学を知るまたとない機会であり、大学のカリキュラムや卒業後の進路についても、活発に質問がなされて

いた。

今回は、サイエンスカフェとしては初めての試みとして、出張授業などの活動を行っている学生団体BAPに協力をお願いした。そのおかげか、参加者は終始リラックスした表情で大学院生とテーブルを囲んでいた。予定の終了時刻になってもなかなか腰を上げずに談笑し続ける参加者と大学院生の姿が、まさにこのイベントの成功を物語っていたのではないだろうか。

## 美術作品「宇宙膨張進化の視覚伝達装置 ビッグバンと宇宙の晴れ上がり」

横山 広美

(広報・科学コミュニケーション 准教授)

2011年2月、理学部1号館1階のサイエンスギャラリーに、なじみ深い形が美術作品となって登場した。「宇宙膨張進化の視覚伝達装置 ビッグバンと宇宙の晴れ上がり」と名付けられたこの作品は、美術家で文教大学情報学部広報学科の藤掛正邦教授が理学系研究科と共同研究として約半年をかけて制作された。

藤掛教授はワイヤー・アートという独自の手法をもつ。理学系研究科で行われている研究を写真や画像でご紹介したところ、「逆釣鐘形の概念図は、理論をベースにした美しさ、とくに曲線が美し

く感じました。137億年の完成フォルムを両手で抱えてみたい願望。新しい美術作品になると直感した」とインフレーション理論の概念図をモチーフに制作がされることになった。

本作品では、「無」の状態を表す黒の丸い台の上に、宇宙が誕生しインフレーションをおこして膨張する様子が力強いワイヤーで表現されている。ビッグバンの「火の玉宇宙」は赤い金属のモビールで表現され、宇宙誕生後30万年のときに放たれた宇宙の晴れ上がりは透明な青いビーズを連ねて「光が放たれたときの壮快感(藤掛氏)」が表現されている。この作品は動的である。モビールが脇に設置された扇風機の風に揺れ、互いに触れ合いカラカラという音がする。さらに宇宙的なイメージの音楽(富田勲・シンセサイザー「月の光」



目線の高さに設置された作品。理学部を訪れる多くの方にご覧いただきたい。

“雪は踊っている”)がかけられ、宇宙創成の作品の神秘性を高めた。

注) 節電のため現在は扇風機と音楽は止めている



## 日本での3年間を振り返って

ロトコプ・アレクサンダ（物理学専攻 博士課程3年）

物理学専攻原子核理論物理の初田研究室の博士課程3年、ドイツ出身ロトコプ・アレクサンダ (Alexander Rothkopf) と申します。よろしくお願ひします。

今年卒業する同窓生の中には、私より日本に長くいるし、日本語がもっとペラペラの方がいるにもかかわらず、私が皆さんにスピーチをさせていただくことが嬉しいです。

まずは言うまでもなく日本の美しい季節、そしてお花見のよい思い出についての細かい話を期待する方は心外に思うかも知れませんが、ほかの留学生を含む送別会的なイベントで、きっと聞く話ですから、遠慮します。

その代わりに今までの3年間の間に印象的だったことの3つを紹介させていただきます。日本に暮らしながら大学構内・住んでいるゲストハウス・東京の23区の中で体験したことです。杉浦先生の授業に通いながら「日本の論点」を説明していただいた学生として、印象的だったことのランキングを作らざるをえませんでした。

### 3位：一般の日本人のツールボックス

ウィキペディアによると朝日新聞の2010年度の印刷部数は1100万に達しました。世界の新聞を比べるとこの数字は驚異的なことです。実際に発行高の順番のベストテンでは70%が日本の出版社です。ほかの国の新聞は300万ぐらいの印刷部数、例えば中国政府の「参考消息」とドイツの「Bild」というタブロイド新聞です。よくご存知の「New York Times」は250万にしか達しません。新聞市場が元気なのと同じ理由で朝の地下鉄は熱心に新聞や本を読んでいる方で溢れています。もちろんヤングジャンプ以外の読書のことです。

日本の長所のひとつは基礎的な数学そして読み書きをひじょうにしっかり身につけていることです。このように、社会の基礎



日本語でスピーチするロトコプさん。その素晴らしい内容に、教職員の間からは感心と驚きの声が上がった。

となる人々にきちんとした知識があるということは、社会の基盤がしっかりしているということです。日本の人々は、こうした日本の素晴らしい部分に自信をもち、もっと日本の未来に前向きに向き合うべきだと思います。ヨーロッパ人として、教養深い日本の人々は信頼関係の強いパートナーシップをこれからももちつづけたい相手です。

### 2位：日本の技術への情熱

2021年までに全部の原子力発電所を停止するドイツから来た私は、日本に来て、技術に対する尊敬と親近感をもち合わせる社会を経験するのは興味深い体験でした。ヨーロッパでは、産業革命による環境破壊を経験しているため、新しい技術の導入は敬遠される傾向があります。例えばロボティクスは新しい分野ですが、日本でこの分野での発展がめまぐるしいのには、日本でのロボティクスの人気が大きく関係していると思います。もしかしたら、命の無いものにも魂が宿るという伝統的な神道の考え方が、命の無いロボットのようなものにも親近感を湧かせているためかもしれません。キリスト教の影響が強いヨーロッパでは、魂があるのは人間のみで、ロボットに親近感を抱くという発想が育ちません。技術を大切にする日本の心は、科学や産業の発展をこれからも支えつづけていくと思います。

### 1位：民主的な科学

これまでにテレビのニュースで歴代の首相が使い捨てのように交代していくのを見るたびに、科学の世界の良さを実感しました。丸山真男の作品に、『「である」ことと「する」こと』というのがありますが、まさに政治の世界と科学の世界の違いを表現していると思います。科学の世界にも有名人はたくさんいますが、こうした人たちも、もともとはひじょうに重要な功績をあげて有名になりました。科学の世界は実力主義で、実際に業績をあげなくては生き残れませんが、その厳しい過程で能力のある人がリーダーシップをとっていきます。また、実力主義の世界では、「する」こと、で判断されるため、東京大学の理学系研究科を含む科学の世界ではさまざまな背景の人が公平に競争することができます。このような環境は、科学の世界だけでなく、日本の社会の中でも、いろいろな人が集まり、さまざまな意見を交換する機会を与えることで、偏りの無い良い結論を出すことができます。また、この点で東京大学は、ひじょうに能力のある人材が多く集まり、競争することにより、さまざまなことに対する好奇心を育てる環境を提供しているので、世界の中でも特別な大学なのだと思います。

私のした経験や思い出はとても大切にこれからも心に残っていきますし、それを与えてくれた理学系研究科にとっても感謝しています。この場を借りて、もう一度お礼を言いたいと思います。本当に3年間有難うございました。

本稿は3月9日行われた理学系研究科・理学部の教職員と留学生・外国人研究者との懇親会（理学部ニュース2011年5月号参照）でのスピーチである（日本語サポート：医学系研究科・太田瑞穂さん）。

ロトコプさんは2010年度に物理学専攻で博士学位を取得され、現在はビーレフェルト大学（ドイツ）に博士研究員として勤務しておられます。

# 膨大な生物データから、生命のシステムを解く

程 久美子（生物化学専攻・生物情報科学科兼任 准教授）

生物とは限りなく複雑であるが、その営みはひじょうに緻密な制御を受けていることが、次々と明らかになってきている。そして、予想もできない、おどろくべき発見はつきることはない。近年の生命科学においては、次世代型シーケンサーや大型計算機などが精力的に開発されたことにより、生命現象をつかさどる遺伝子やその産物、タンパク質相互作用によるシグナル伝達、さらには個体の表現型や、より高度な生命現象に関わる膨大な情報を一瞬のうちに取得することが可能な時代になりつつある。このような時代の流れに合致した最先端の研究は、これまでになかった視点から生命現象を理解するための切り口となるであろう。生物情報科学は、実験科学（ウェット）と情報科学（ドライ）が融合した新しい学問分野である。大規模な生物データを計算機を利用して情報処理することによって、新しい視点から生命の本質に迫ろうとするものであり、その発展は生命体という高度なシステムを解くことを可能とする。

生物情報科学科は、2007年4月に設立されたばかりの、理学部でもっとも若い学科であり、2011年3月に第一期生が卒業した。生物情報科学科のカリキュラムは、ウェットとドライの基礎を学び、その上で、それらの融合科目である生物情報科

学を学修するように構成されている。このような生物情報科学の本格的な学部教育は、国内でも初めてである。第一期の卒業生は、全員が学内の大学院へ進学したが、学部教育からウェットとドライの両方を修得した初めての人材であり、大学院においても独自性の高い研究が展開されることが期待される。生物情報科学科では、このような最先端生命科学において、既存の枠にとらわれない、独自の思考や新しい発想に基づいた研究が遂行できる人材を育成することを目指しており、将来的には世界の最前線で活躍することを期待している。

## ■ 進学振り分け

生物情報科学科の学生定員は10名である。第一段階においては理科全類から6名と全科類から1名、第二段階では理科全類から3名を受け入れる。

## ■ 学年ごとのカリキュラム概要

### 【駒場4学期】

生物情報科学を学ぶための準備期間として、ウェットとドライのそれぞれの基礎が中心となる期間である。また、情報科学



■（左上より時計回りに）ウェット実習風景，ドライ実習風景，演習室，講義風景



基礎実験で計算機の基本を学ぶ。並行して、生物情報科学科が独自に開講する生物情報学基礎論Ⅰ・Ⅱにより、生物情報科学の序論を学ぶ。

### 【3年生】

進学して3年生になると、生物情報科学の専門的講義が開始する。ほとんどの講義は午前中に行い、午後は演習・実験を行う。夏学期の月曜午後は情報科学実験を情報科学科の学生と一っしょに履修し、プログラミングを学ぶ。火～金曜日の午後は生物化学実験／生命科学基礎実験を行う。前半は生物化学科の教員が担当し、分子生物学・生化学の基礎的技術を修得する。後半は生物情報科学科の教員が担当し、ハイスループットな計測機器類を用いた実習を行う。冬学期の火～金曜日の午後は情報基礎実験で、計算機を用いた生物情報科学の演習を行う。

### 【4年生】

4年生になると、卒業研究（生物情報科学特別演習・実験Ⅰ・Ⅱ）が始まる。学生は研究室へ配属され、実際の研究活動にふれることになる。また、夏学期の月曜午後には、生物情報科学特別講義が開講されている。この科目では、進捗が早い生物情報科学研究の最先端研究について、学内外の専門家を招き、

まとまった講義を受けることができる。

## ■ 特色あるカリキュラム

### 生命科学基礎実験

生命科学基礎実験では、DNA マイクロアレイ、質量分析機、次世代型シーケンサーなどのハイテク機器を用いた実験と、その結果をバイオインフォマティクスを用いて解析する実習を行う。さらに、生化学反応を数理的に解析するシミュレーション実習も行う。いずれも、他大学には類をみない先端の実習である。この実習を通して、自ら得た大量の生物データを計算機を用いて解析するという生物情報科学研究を初めて体験することができるため、学生はひじょうに興味をもつようである。

### 生物情報科学特別演習・実験Ⅰ・Ⅱ

いわゆる卒業研究である。2011年度は、夏学期の初めに、学生の希望を取り入れて、3つの研究室を2週間ずつ見学してから、特定の研究室へ配属となった。配属された研究室では、1年近くをかけて1つの研究を継続し、卒業論文としてまとめることを体験する。その間、研究の進捗状況の報告や英文雑誌の論文紹介などによってプレゼンテーションのノウハウを身につける。2010年度末には卒業研究発表会が行われ、4年生だけ

だけでなく、教員や学生も多数参加して活発な意見交換が行われ、たいへん盛況であった。

## ■ 学科の教員構成と大学院進学

生物情報科学は生命科学と情報科学が融合した学際領域に位置する学問分野であり、その関連分野を網羅するため、専任教員は理学系研究科生物化学専攻、新領域創成科学研究科情報生命科学専攻、情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻のいずれかに所属している。生物情報科学科の卒業生は、それぞれの興味や適性に応じた進学先を、幅広い分野から選択することができる。

第4学期科目	3年		4年	
	夏学期	冬学期	夏学期	冬学期
生物情報学基礎論Ⅰ	ゲノム生物学	ゲノム配列解析論	環境ゲノム情報学	生物情報科学特別演習・実験Ⅱ
生物情報学基礎論Ⅱ	オーミクス論	生命情報表現論	生物情報科学特別演習・実験Ⅰ	論文構成法
計算機システム	生物情報ソフトウェア論	生物データマイニング論	分子遺伝学	生物情報科学演習Ⅱ
アルゴリズムとデータ構造	生物データベース論	情報基礎実験	生物物理化学Ⅰ	
情報科学基礎実験	生物ネットワーク論	バイオサイエンス基礎	数理生物学	
情報数学	システム生物学	連続系アルゴリズム	生物情報科学演習Ⅰ	
形式言語理論	情報科学実験	統計力学Ⅱ	生物情報科学特別講義Ⅰ	
生物化学概論Ⅰ	生物化学実験	細胞情報学	生物情報科学特別講義Ⅱ	
生物化学概論Ⅱ	生命科学基礎実験			
分子生物学	離散数学			
細胞生理学	統計力学Ⅰ			
生物統計学	細胞分子生物学Ⅰ			
遺伝学	植物生理学Ⅰ			
物理数学Ⅰ	地球惑星環境学野外調査Ⅰ			
物理数学Ⅱ				
物理実験学				
化学熱力学Ⅰ				
無機化学Ⅰ				
有機化学Ⅰ				

必修	選択
----	----

■ 2011年度 生物情報科学科カリキュラム

## 最強のフェライト磁石

大越 慎一 (化学専攻 教授)

磁性材料は現代社会のさまざまなところに利用されており、現在のわれわれの社会活動を支えている。磁性材料は、記録媒体や記録デバイスなどのエレクトロニクスの中心的な役割を果たすと同時に、電気自動車の駆動モーターや発電機に用いられている。最近、電気自動車などで使用されている保磁力（磁化を反転させるのに必要な磁場の値）の大きな希土類磁石には、希少元素が必要であるため、外交的な問題とも絡みながら社会的議論がされている。いっぽう、フェライト磁石（鉄酸化物をベースとした金属酸化物磁石）は、豊富に存在する元素からなり、安価で化学的安定性に優れ、絶縁性を有しているという特徴を備えているため、広く活用されてきた。しかし、フェライト磁石は一般に保磁力が小さく、用途が限られている。われわれは2004年に、室温で20キロエルンステッド (kOe)<sup>注</sup> という従来のフェライト磁石の3倍の大きさの保磁力をもつフェライト磁石を作りだすことに成功した。イプシロン型-酸化鉄 ( $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) というこの物質は、鉄 (Fe) と酸素 (O) のみからなる最も単純な磁性体である。

フェライト磁石としては磁鉄鉱 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) と二酸化三鉄 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) が有名である。後者の  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  の場合、自然界に存在するガンマ型-酸化鉄 ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) は磁気テープや磁性流体などに、アルファ型-酸化鉄 ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) は赤色顔料などに用いられてきた。われわれは化学的合成法を駆使することで、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  や  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  とは異なる結晶構造をもつ酸化鉄、イプシロン型-酸化鉄 ( $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) の単相を初めて得ることができた [Adv. Mater., 16, 48 (2004)] (図 a)。ここで用いた化学的手法とは、ナノメートルサイズ (7 nm) の逆ミセル中で化学反応を進行させる逆ミセル法と、生成したナノメートルサイズの前駆体をガラスで

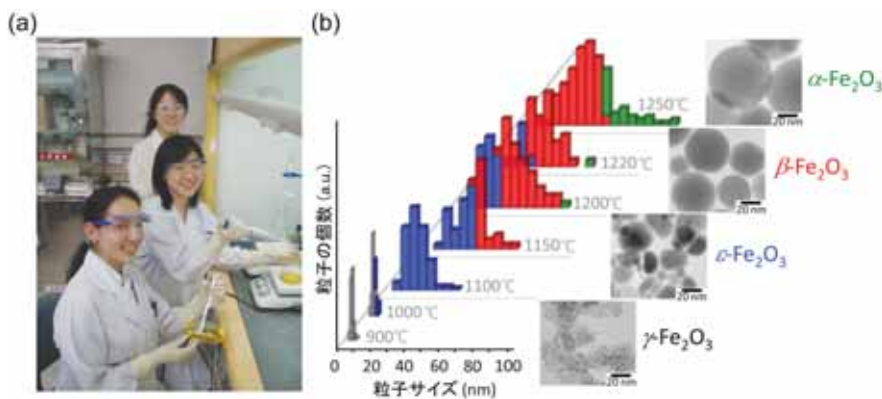
被覆するゾル-ゲル法を組み合わせたナノ微粒子合成法である。ナノサイズで焼成することで、相変態のさいに、表面エネルギーが寄与してイプシロン相が最安定相として焼結したと考えている (図 b)。

このようにして合成された  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  は、室温における保磁力が 20 kOe であり、酸化物磁石の中で最大の保磁力を示す。また、 $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の鉄イオン ( $\text{Fe}^{3+}$ ) の一部を、例えばアルミニウムイオン ( $\text{Al}^{3+}$ ) といった他の金属イオンで置換することも可能であり、保磁力の大きさなどの磁気特性を自在に制御することができる。このように大きな保磁力をもつ  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  ナノ微粒子は、粒径が十数ナノメートルまで小さくできるため、次世代用の高密度記録媒体としての応用展開が期待されており、現在企業で研究が進んでいる。

$\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  のもうひとつの特徴は、ミリ波 (30-300 GHz) とよばれる高い周波数の電磁波を吸収することにある。磁石は電磁波が照射されると、歳差運動とよばれる磁化の周期的運動が誘起され、物質固有のある周波数の電磁波が吸収される (この効果はジャイロ磁気効果とよばれる)。無磁場下で起こるこの共鳴現象を自然共鳴とよんでおり、吸収される電磁波の周波数は保磁力が大きいほど高くなる。われわれは2009年に  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  が 182 GHz (ギガヘルツ) にミリ波吸収することを見出した [J. Am. Chem. Soc., 131, 1170 (2009); Angew. Chem. Int. Ed., 46, 8392 (2007)]。これは最高の周波数である。また、自然共鳴周波数は金属置換によって 35 GHz から 182 GHz の幅広い領域で制御することができる。現在、 $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  は、ミリ波を用いた次世代超高速無線通信において、電磁干渉問題に対処するためのミリ波制御材料として大きな役割を果たすこ

とが期待され、複数の企業と研究を進めている。

基礎的研究から出発して、巨大保磁力をもつフェライト磁石である  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  に出会うことができた。現在、基礎・応用の両面からその可能性に関して、国内外の研究者らと議論できるのが楽しいと実感している。



(a)  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の合成風景。(b) 900°C ~1250°C で焼成して得られた  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ナノ微粒子の TEM 像 (右) と粒径分布図 (左)。粒子が大きくなるにつれて最安定相が  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \beta\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  と変化し、すべての  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  相を作り分けることができるようになった。粒径分布図の灰色で示した成分は  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、青は  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、赤は  $\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、緑は  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  に対応している。

注) 現在、小型モーターに用いられる磁性体の保磁力は 2-4 kOe、磁気記録媒体に用いられる磁性体の保磁力は 3 kOe 程度である。



# 光による体内時計の時刻合わせと目覚まし機構

羽鳥 恵 (生物化学専攻博士課程修了<sup>注1)</sup>, 廣田 毅 (元生物化学専攻 特任助教<sup>注2)</sup>, 深田 吉孝 (生物化学専攻 教授)

生物は一日の時刻を知る概日時計を体内に備えており、光を用いてその時刻を外界と合わせる。われわれは、この体内時計の時刻合わせに転写因子 SREBP が関与することを見出した。光は松果体において SREBP を活性化すると共に、神経ステロイドの一種である 7 $\alpha$ -ヒドロキシプレグネノロンの合成と分泌を促進し、行動を刺激することを発見した。松果体という脳内器官はこれまで長い間、夜の睡眠促進ホルモンであるメラトニンを分泌することで知られてきたが、活動レベルの上昇にも重要な役割を果たすことが初めて示された。

概日時計は約 24 時間の周期をもつ生物時計であり、睡眠・覚醒やホルモン分泌などのさまざまな日周リズムを制御している。概日時計は周囲の光環境の変化に同調するための時刻合わせ機能をもっていて、日暮れ後に光が当たる（夜更かしする）と時刻を遅らせ、いっぽう、夜明け前に光を受ける（早起きする）と時刻を進める。このように、時刻によって光刺激が正反対の位相調節を行うのはすべての生物の概日時計に共通した特徴だが、その仕組みはよく分かっていなかった。

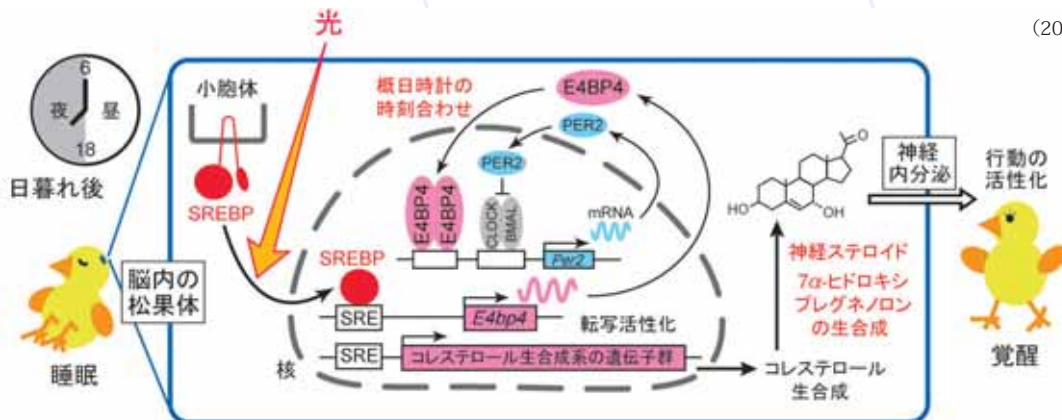
われわれは、日暮れ後または夜明け前の光で活性化される遺伝子を網羅的に探し、その遺伝子群の特徴に基づき、時刻依存的な光応答の仕組みに迫ろうと考えた。ヒヨコの松果体を用いた解析の結果、コレステロールの生合成に関係する多数の遺伝子が日暮れ後の光で活性化されることが明らかになった。興味深いことにこれらの遺伝子の光応答は、*E4bp4* という遺伝子の光応答パターンとひじょうによく似ていた。*E4bp4* は時計遺伝子 *Per2* の転写を抑制する位相制御遺伝子である。そこで、*E4bp4* を含めた一群の遺伝子の光応答を引き起こす上流因子を探索した結果、コレステロール生合成系の遺伝子群を誘導するタンパク質である SREBP が日暮れ後の光で活性化されること、そしてこの SREBP は *E4bp4* 遺伝子の転写を促進すること

を見出した。SREBP は日暮れ後における概日時計の光応答（位相の後退）を生み出す鍵となる因子であった（図）。

この研究は、さらに面白い方向へ展開した。*E4bp4* 遺伝子とともに、コレステロール生合成にかかわる一群の遺伝子群が光によって活性化されるが（前述）、その生理的な意味を深く追求した結果、松果体はコレステロールから 7 $\alpha$ -ヒドロキシプレグネノロンという神経ステロイドを活発に合成・分泌していることを発見した。たとえば、日暮れ後に松果体を取り出して光で刺激すると 7 $\alpha$ -ヒドロキシプレグネノロンの分泌量が上昇した。また、7 $\alpha$ -ヒドロキシプレグネノロンを生きたヒヨコ脳室内に投与すると行動量が大きく上昇した。これらの結果から、神経ステロイドの分泌を介して目覚ましにも寄与する、という松果体の新しい生理機能が明らかになった（図）。

本研究は、時刻に依存して光活性化される分子シグナルの経路を明らかにしただけでなく、遺伝子発現が行動を制御する仕組みを明確に示した点で注目される。メラトニンを介して睡眠を促進すると考えられてきた松果体が、じつは目覚ましにも寄与するという新たな知見は、今後、ヒトの睡眠異常の克服などにも重要な足がかりになると期待される。この成果は M. Hatori *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **108**, 4864 (2011) に掲載された。

(2011年3月8日プレスリリース)



光による概日時計の時刻合わせと目覚ましの仕組み

注1) 現所属：米国ソーク研究所 研究員  
注2) 現所属：米国カリフォルニア大学サンディエゴ校 研究員

# 中心子のマジックナンバー「9」の由来

廣野 雅文 (生物科学専攻 准教授)

◆ ◆ ◆  
 原生動物からヒトまで、繊毛の内部はきまって2本の管を9本の管が囲んだ特徴ある形をしている。「9+2」構造とよばれるこの構造パターンは、根もとにある中心子という細胞小器官がもつ、9回の回転対称形に由来する。この普遍的な形をつくる分子機構は長らく謎だったが、今回、中心子形成の足場として働くタンパク質のX線結晶構造と分子間相互作用を解析することにより、その一端が解明された。  
 ◆ ◆ ◆

真核生物の鞭毛や繊毛（以下、繊毛）の内部構造は、機能や生物種を超えて驚くほど共通性が高い。運動能をもつ繊毛の多くは、2本の微小管を9本の微小管が取り囲んだ「9+2」とよばれる骨格構造をもち、運動能を持たない繊毛の内部は「9+0」型になっている。いずれも外周にある微小管の数が9本だが、これを決めているのは鞭毛の根もとにある中心子（基底小体）という細胞小器官（図）である。9本の特殊な微小管（トリプレット微小管）からなる構造が繊毛微小管の鋳型として働くことにより、その内部構造を規定している。

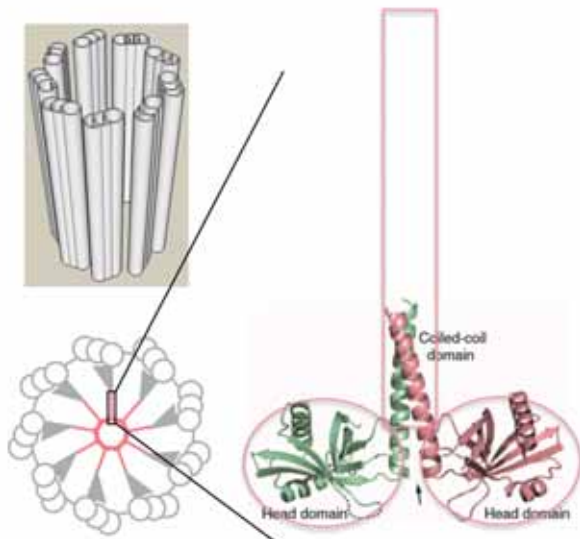
この中心子構造がどのように形成され、9という数がどのように決まるのかは、現代細胞生物学の大きな謎だった。われわれの研究グループは、最近、単細胞緑藻のクラミドモナスの突然変異体 (*bld12*) を用いた解析により、a) 中心子形成のさいに、カートホイールという9回対称の放射状構造が、中心子微小管の形成の足場として働くこと、b) カートホイールの中央部分を

作っているのはSAS-6というタンパク質で、これがなくなると中心子微小管の数が9本に固定されなくなることを明らかにした（図）。つまり、中心子の9回対称構造の由来は、SAS-6が作る形にあることが明らかになった（理学部ニュース2008年1月号掲載）。しかし、SAS-6がどのような分子構造で、どのようにカートホイールに組み込まれているかは不明であった。

今回、われわれは英国 Medical Research Council のX線結晶解析研究グループとの共同研究により、SAS-6の分子構造と分子間相互作用を解析した。その結果、SAS-6はコイルドコイルを介して二量体を形成し、2つの球状の頭部と繊維状の尾部からなる形をしていることと、この二量体どうしが頭部の先端で疎水性の結合をすることが明らかになった（図）。さらに、実際に *in vitro* でカートホイール中央部に似た構造を形成することもわかった。したがって、カートホイール中央部は、SAS-6二量体が尾部を外に向けて会合することにより形成されると予測される。

そこで、実際のカートホイールにおいてSAS-6がこの予測通りに配置して相互作用しているのかを検証するため、頭部間の疎水結合を阻害する変異と、コイルドコイルを介した二量体を不安定化する変異を導入したSAS-6を *bld12* 変異株に発現させ、それらが細胞内で機能するかどうかを検討した。その結果、発現したいずれの変異SAS-6も中心子または中心子形成サイトに局在したが、カートホイールは形成されなかった。さらに、モデルによるとSAS-6のC末端はカートホイールの中心から離れた場所に位置すると予測されるが、免疫電子顕微鏡法により、SAS-6のC末端が予測通りの局在を示すことも確認された。これらの結果から、分子構造のモデルから推測されるとおり、カートホイール中央部は9回対称に会合したSAS-6で構成されていることが確定的になった。この結果は、多くの真核生物に共通する幾何学的構造パターンの形成機構が、分子レベルで明らかになった数少ない1例である。本研究は M. van Breugel *et al.*, *Science* 331, 1196 (2011) に掲載された。

(2011年3月29日プレスリリース)



中心子とカートホイール

SAS-6 二量体

中心子の微小管骨格構造（左上図）は、基部にあるカートホイール（下左図）を足場として形成される。カートホイールの中央部分は、9回対称に会合したSAS-6二量体（右図）で構成されている。



# ウニ精子の機械受容反応の発見と遊泳制御

蒲原 祐花 (生物科学専攻博士課程修了<sup>注</sup>),  
真行寺 千佳子 (生物科学専攻 准教授)

◆ ◆ ◆  
海産動物の精子の多くは、卵まで遊泳して受精する。この遊泳を成功させる鍵が海水中のカルシウムにあるが、カルシウムにより決定される精子の遊泳制御の仕組みはまだ謎に包まれている。私たちは、ウニ精子の機械受容反応（精子頭部が物に衝突すると遊泳方向を変えて回避する反応）を発見し、その反応を指標とするという新たな試みにより、精子の遊泳方向が精子内部のカルシウム濃度の変化によりどのように制御されるのか、またそのカルシウム濃度の変化はどのような膜タンパク質の働きにより調節されているのかを解明することに成功した。

◆ ◆ ◆  
精子が、鞭毛運動により卵に向かって遊泳するには、遊泳方向の調節が重要である。遊泳方向の制御は、遊泳の推進力を生み出す鞭毛の運動制御と深く関連している。精子だけでなく、鞭毛・繊毛運動を行う生物や細胞には、さまざまな刺激により誘導されるカルシウム依存性反応が広く見られ、精子の遊泳制御も、そのひとつである。

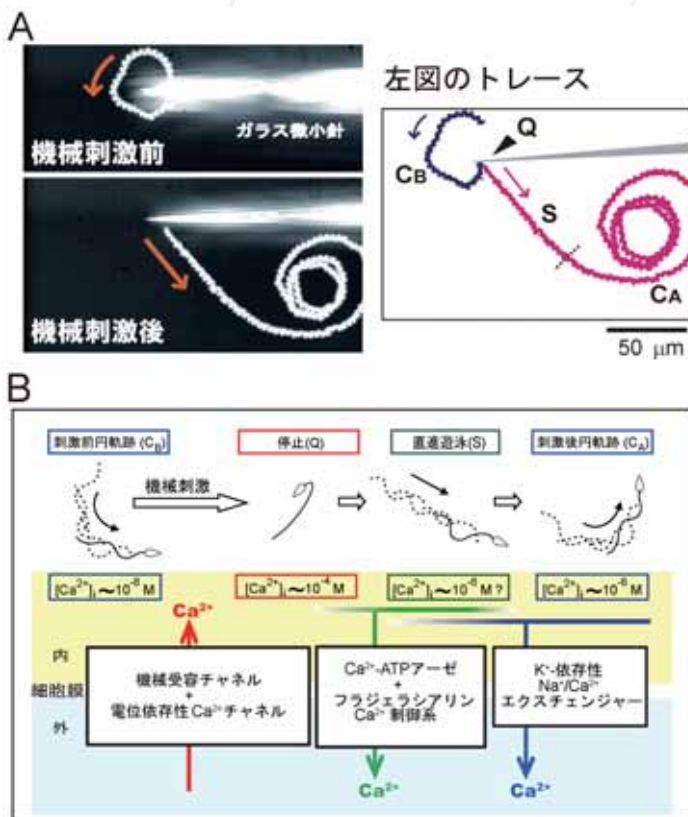
ウニ精子の機械刺激により誘導される機械受容反応の例を図Aに示す。スライドガラス面近くの精子は、円を描くように遊泳する（左上図と右図のC<sub>B</sub>）が、遊泳軌跡内にガラス微小針を挿入（図の右から左方向へ）して、精子頭部先端が針にぶつかるように操作すると、前進遊泳していた鞭毛が一時的に停止

(Q) する。このとき、精子頭部は停止前とは反対方向を向く。その後鞭毛運動を回復した精子は直進性の高い遊泳軌跡（左下図と右図のS）を示す。この結果、精子は障害物（実験ではガラス微小針）を回避する。やがて鞭毛の波形は通常に戻り再び円軌跡を描くように泳ぐ（C<sub>A</sub>）。

カルシウム依存性鞭毛反応は、数タイプの鞭毛波形変化が短時間に連続して起こるため、その機構解明はこれまで容易ではなかったが、今回、機械受容反応の発見により、この反応を指標としてカルシウム依存性鞭毛反応の基本機構の解明を実現した。まず、蛍光カルシウムインジケーターであるFluo4を精子内に導入し、カルシウム濃度と機械受容反応との同時測定を行った。その結果、細胞内カルシウム濃度は、停止を示すQの時に最も高く、直進遊泳時のSでは中間の高めの濃度であることが明らかとなった。このことは、鞭毛打の対称性の変化はカルシウムの特定の濃度によって誘導されるのではなく、濃度の時間的変化と関係して誘導されることを示唆する。また、ウニ精子で重要と考えられている主な膜タンパク質の阻害剤存在下で、機械受容反応の解析を行った。その結果、図Bに示すように、機械刺激の受容とそれに続くカルシウムの細胞内への流入に関わるチャネル、およびその後のカルシウム排出過程を担うと推測される膜タンパク質（図の枠内）の役割とそれらの関係が明らかとなった。

機械受容反応は、生命現象において重要な刺激反応機構のひとつであり、その概要が精子で解明できたことは大きな意義をもつ。また、今回得られたカルシウム濃度調節機構に関する成果は、他の細胞におけるカルシウム依存性反応機構の理解にも大きく貢献することが期待される。本研究は、Y. Kambara *et al.*, *Cell Structure and Function* 36, 69 (2011) に掲載された。

(2011年4月1日プレスリリース)



図：(A) 機械刺激前（左上図）と後（左下図）のウニ精子頭部の描く軌跡の変化、およびそのトレース（右図）。(B) カルシウム依存性機械受容反応のモデル。機械刺激前後の鞭毛波形変化（上段）と細胞内カルシウム濃度（中段）、およびカルシウムの流入と排出に関わる膜タンパク質（下段）を示す。

注) 現所属：株式会社ナガセ

## 南極大型大気レーダーで初観測に成功

佐藤 薫 (地球惑星科学専攻 教授),  
堤 雅基 (国立極地研究所 准教授), 山内 恭 (国立極地研究所 教授)

南極初の大型大気レーダー (PANSY レーダー) を昭和基地に建設し、初観測に成功しました。第 52 次日本南極地域観測隊により 2010 年 12 月下旬からほぼ 1 か月半の夏期間にアンテナ約 1000 基の設置が終了し、3 月末に試験観測を行ったところ予定通りの対流圏の乱流からの散乱信号が検出され、風速を推定できました。今後、積雪の状況などを見ながら調整を行い、2012 年初めには世界初の南極中間圏の乱流散乱の観測を試みます。極中間圏雲やオゾンホールなど人間活動の影響が強く反映される大気現象や、大気大循環を駆動する大気波動の物理を解明して気候システムにおける南極の役割を明確化する計画です。

PANSY レーダーの建設には、南極の環境保全のため地表面の整地を行わず、直径約 10 cm の小さな穴を開けて金属パイプを差し込み、アンテナを固定する方法をとりました。この夏は史上最低の積算日照時間を記録するなど、天気には恵まれませんでしたが、観測隊の超人的な努力により予定していたほぼ全数のアンテナ設置が終了しました (図 A)。2 月中旬に夏隊が帰国した後、越冬隊によりシステム調整が行われ、3 月 25 ~ 31 日に下部対流圏を対象とする観測を実施したところ、初データ取得に成功しました (図 B)。天気予報でおなじみの気象レーダーは雨粒からの散乱信号を検出しますが、このレーダーは大気中の乱流からの散乱信号を検出します。乱流はその場の風に流されているので、散乱信号のドップラー偏移からビーム方向の風速成分が求まります (図 C)。大型大気レーダーはビームを上に向けて鉛直風を高精度で観測できることが特長のひとつです。図 B に示すように鉛直風のデータも良好に得られています。しかし、2011 年の昭和基地の天気は夏が終わっても悪く、頻繁なブリザード (猛吹雪) に伴う大量の

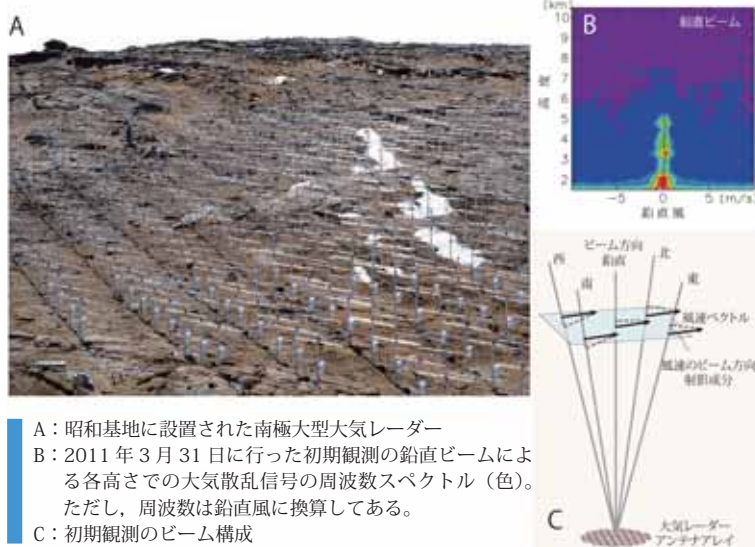
降雪があり一部のアンテナが埋没したため部分的な運用によるシステム調整を進めています。幸い、レーダー心臓部である送受信器には故障がなかったため、次の夏期間に 53 次隊によりアンテナ配置を変更し、観測を再開する予定です。

PANSY レーダーのフルシステムが稼働すれば、地上 1 km から 500 km の対流圏・成層圏・中間圏・熱圏/電離圏の観測が可能となります。これにより環境が苛酷であるため他の緯度帯に比べて遅れがちであった南極大気の観測的研究に大きな進歩をもたらすことが期待されます。極域は季節や高度領域によって大気の大循環の終着点とも出発点ともなる、きわめて重要な位置を占めています。その大循環の主要な駆動源のひとつである重力波 (浮力を復元力とする内部波) とよばれる、振幅の小さく周期の短い波の作用が、鉛直風観測の可能な PANSY レーダーによって初めて定量的にとらえられることとなります。その作用を温暖化予測などに用いられる気候モデルに組み込むことで、成層圏や中間圏の大循環がより正確に表現されるようになり、たとえばオゾンホールの予測

に関する気候モデルの系統誤差の解決に大きく寄与します。また、南極には、極成層圏雲・極中間圏雲とよばれるそれぞれ高度 20 km, 90 km 付近に現れる雲やオーロラをはじめとする極域固有の大気現象が多く見られます。なかには人間活動と深く関連する現象も複数存在します。PANSY はこのような南極の大気現象のほとんどすべてを精密に観測し、極域の地球気候における位置づけを明確にして、気候の将来予測の精度向上に寄与することを目指しています。

(2011 年 4 月 25 日プレスリリース)

PANSY プロジェクトホームページ：  
<http://pansy.eps.s.u-tokyo.ac.jp/>



A: 昭和基地に設置された南極大型大気レーダー  
B: 2011 年 3 月 31 日に行った初期観測の鉛直ビームによる各高さでの大気散乱信号の周波数スペクトル (色)。ただし、周波数は鉛直風に換算してある。  
C: 初期観測のビーム構成





## 「可積分系」

ウィロックス ラルフ (数理科学研究科 准教授)

ニュートンが17世紀にケプラー問題を解いて以来、それと同様に求積法で完全に解ける「完全可積分系」とよばれる力学系の探求が始り、可積分系という概念は微分積分学と古典力学の発端に起源と言っても過言ではない。オイラー、ラグランジュやハミルトンによる古典力学の形式化に基づき、J. リウヴィル (Joseph Liouville) が19世紀半ばに求積法で完全に解ける発展方程式の構造を初めて解明したが、実は、その構造で初等関数で記述できる厳密解をもつ方程式はまれなものであるため、可積分系の研究は特殊関数論の発展にも大きな刺激を与えた。

いっぽう、求積可能という性質より方程式の解を生成する特殊な変換群の存在は近年「可積分系」というものの定義的

特徴とされている。そのパラダイムシフトのきっかけとなったのは、M. クラスカル (Martin Kruskal) と共同研究者が1960年代に発見した非線形偏微分方程式であるKdV方程式の逆散乱法による解法である。たとえば、KdV方程式の解に周期的な境界条件を課すと、方程式による時間発展はヤコビ多様体上の線形の時間発展に対応することは知られているし、一般には、KdV方程式の解が無次元グラスマン多様体と関係し、解の時間発展はその多様体上の線形変換群に対応することは佐藤幹夫先生 (京都大学名誉教授) による有名な結果である。

それは連続系ばかりではなく、可積分系の研究は離散系にも拡大した。平面上の可積分な写像のプロトタイプであるQRT写像は、楕円曲線を定める保存量

をもち、写像自体はその楕円曲線上の加法定理に対応し、他の可積分な2次元の写像は同様の代数幾何学的な記述を認めることが知られている。

コンピュータで可積分系を数値的にシミュレートすると、その系の可積分性を証明する性質はほとんど保たれていないため、最近、連続可積分系の忠実な離散化についての研究は非常に盛んであり、さらに簡単にシミュレートできる可積分なセルオートマトンも活発に研究されている。数理科学研究科では筆者以外、時弘哲治教授 (可積分なセルオートマトン)、坂井秀隆准教授 (離散パルヴェ方程式) や白石潤一准教授 (量子可積分系) らがこの分野の研究を行っている。



## 「PとNP」

河村 彰星 (情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻 助教)

西暦2000年5月、クレイ数学研究所は千年紀の幕開けにあたり未解決問題を7つ挙げて各100万ドルの賞金を懸けた。その筆頭を飾るのが計算量理論の $P \neq NP$ 予想である。

$n$ 人の者がおり、どの二人が親しいか書き並べたリストがある。三つの班に分けて各班内はどの二人も親しいようにしたい。この間に答えるには、各人を班に割当てる3通りのそれぞれが条件を満たすか調べ尽くすという自明な方法があるが、手間が余りに膨大である。

もっと素早く班分けの有無を知る (そして有れば見出す) 術はないか。ここで「素早く」とは、入力長さに関する多項式の程度の手間で済むことをさす (ここでは入力リストの長さが $n^2$ 程であるから、 $n$ の多項式と言ってもよい)。たとえば三つでなく二つの班に分けるのであれば、そのような方法はある (考えてみよ)。このように入力長の多項式 (polynomial) 以内の時間で解き得る問題の全体を計算量理論では $P$ とよんでいる。勿論厳密には「問題」「時間」な

どの言葉にはきちんと定義があるが、その詳細よりも重要なのは、それが実際に即した概念であり、 $P$ は現実の計算機で素早く解ける問題におおむね一致するという事実である。

班が三つの場合、素早い判定法は知られていない。ただこの問題は、自ら班分けを見出すのは難しくとも、もし或る班分けを示されたら、それが条件を満たすか確かめるのはたやすいという性質をもつ。このように解を確かめることは多項式時間でできるという状況で解の存否を問う問題の全体を $NP$ とよぶ。解を自ら見出すことを要しないのだから、当然 $NP$ は $P$ よりも真に多くの問題を含む一と考えられるが、その証明が得られていない。これが $P \neq NP$ 予想である。上述の三班分けの問題も、 $P$ に属しないことが示せない。まだ人類の知らない上手い解き方がある可能性を除けずにいるのである。

何かを上手く配置したり、効率の良い解決を求めたりする工学の問題の多くは、 $NP$ に属する。そもそもあらゆる数

学的探究が、適当な定式化のもとで、やはり $NP$ 問題である (数学における証明というものは、発見するのは難しいが、与えられれば原理的にはただちに確かめ得るものである)。これらの本質的な難しさを問う $P \neq NP$ 予想は、知的な営みすべてに関わる重大な課題といえる。

さて、 $P \neq NP$ はそう簡単に示されそうにないが、周辺には実際上も理論上も興味深い豊かな研究の裾野が広がる。たとえば厳密に解くのが難しい問題なら近似解を求めるのがひとつの手である。ところが或る種の問題は近似的にすら解けないことが分かっている。このように計算量の研究では、優れた算法を見出すことと、そのような算法の非存在を示すこととの両面から、計算の本質に迫ろうとするのである。

筆者はこの計算量の理論を、実数を含む数値問題に応用する研究を行っている。また計算量における乱択 (ランダムネス) の役割の解明を目指す東工大、電通大との共同プロジェクトも進行中である。



## 「臨界温度と秩序パラメータ」

内田 慎一（物理学専攻 教授）

臨界温度という言葉は、気体がどんなに圧力を加えても液体にならない超臨界流体状態になる温度という意味でも使われるが、物質が相転移によりその形態（相）が変化する温度、相転移温度、として物理、化学の分野では広く使われている。多くの場合、臨界温度以下の温度では、物質を構成する原子、分子あるいは電子が秩序をもった相を形成する。たとえば、原子が規則的に整列する固体、電子のスピン磁気モーメントの向きが揃う強磁性が典型である。また、多数の粒子の波動関数の位相が揃う、ヘリウム原子の超流動や電子が抵抗を受けずに流れる超伝導も秩序相の例である。

このような秩序相では、エントロピーがゼロであり、多くの場合、対称性の破れが起こっている。強磁性では特別な向きにスピンの揃うために空間回転の対称性が破れており、超流動や超伝導では位相が特定の値に固定されることで「ゲージ対称性」といわれる対称性の破れが起

こっている。一般に、膨大な数の原子などにより形成される物質では、対称性が破れた方が系のエネルギー（熱力学の内部エネルギー）が秩序のない状態に比べ低くなるからである。このエネルギーは秩序の安定化エネルギーである。秩序相の科学的、定量的な記述のために導入されるのが秩序パラメータという物理量である。強磁性では物質内部に発生する磁化の大きさ、超伝導では電子対（クーパー対とよばれる）の束縛エネルギーなどが秩序パラメータとなる。秩序パラメータは、磁化のように必ずしもエネルギーの次元をもたないこともあるが、秩序相の安定化エネルギーの尺度ともなる。物質の温度を上昇させると秩序が徐々に乱れ、乱れの尺度であるエントロピーが増大する。同時に、秩序の安定化エネルギーも減少する。この結果、秩序パラメータが小さくなり、ある温度でゼロになってしまう。この温度が臨界温度である。

臨界温度  $T_c$  の高さは強磁性や超伝導

の応用上、重要なパラメータである。たとえば、超伝導の  $T_c$  の最高値は、銅酸化物の絶対温度 135 K であるが、 $T_c$  が常温を超える超伝導物質が発見されれば、そのインパクトは巨大であろう。 $T_c$  を高くするには、安定化エネルギーを大きくし、エントロピーの増大速度を抑えればよい。しかしながら、超伝導の  $T_c$  を理論的に予測し、それを上昇させる方策を示すことはきわめて難しい。膨大な数の電子同士のクーロン相互作用をはじめとして、結晶構造などの物質の微妙な状況が  $T_c$  に影響を与えるからである。理学系研究科の多数の研究室が、相転移・秩序パラメータに関する研究を行っている。物性だけではなく、宇宙・素粒子の分野では真空の相転移として、また、生体の自己組織化も一種の秩序・相転移として理解される。超伝導の  $T_c$  を上げる努力は、物理学専攻の青木研、小形研が理論的に、内田研が実験的に続けている。



## 「星間分子雲」

山本 智（物理学専攻 教授）

星と星の間には、ガス（星間ガス）と固体微粒子（星間塵）からなる星間雲がところどころに存在する。星間雲の中で最も密度が高く、水素が主に水素分子として存在するものを星間分子雲とよぶ。高いと言っても水素分子の個数密度は  $10^2 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$  程度で、常温大気圧での個数密度  $2.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  よりも著しく低い。しかし、大きさは 0.01 - 1 光年、質量は太陽の質量の数 10 倍から数 1000 倍以上に達する。銀河系を見渡すと、質量が太陽質量の 10 万倍程度に達する巨大分子雲も数多く存在し、それらの総質量は銀河系の星の総質量の約 1% 程度を占める。星間分子雲は数 10 万年から数 100 万年の時間をかけてゆっくりと自己重力で収縮して、新しい恒星と惑星系のもとになる原始星と原始惑星系

円盤を生み出す。われわれの太陽系も、46 億年の昔に、そのようにして星間分子雲から生まれたのである。

星間分子雲の温度は 10 - 100 K (-263°C から -173°C) 程度なので、マイクロ波領域から遠赤外線領域の放射を観測して調べる。星間分子雲には水素分子以外にも一酸化炭素、水、アンモニア、ホルムアルデヒドなどのさまざまな分子（星間分子）と星間塵が含まれている。星間分子雲は、主にこれらの星間分子の回転スペクトル線や星間塵の熱放射を電波望遠鏡や赤外線望遠鏡で観測することによって研究されている。その結果、星間分子雲から太陽程度の質量をもつ原始星が誕生する過程については、詳細な理解が進みつつある。

星間分子雲には、エチルアルコールや

ギ酸メチルなどの比較的大きな有機分子まで、微量ではあるが存在していることがわかっている。また、炭素が直線につながった炭素鎖分子も特徴的に見られる。星間分子雲の中心部では、含まれている星間塵のおかげで外部からの紫外線が遮断されるため、分子が壊されることなく成長できるのである。無味乾燥とも思える星間空間でも、分子の豊かな世界が広がっている。著者の研究室では、星間分子雲における星・惑星系形成とそれに伴う分子進化を観測的に調べ、太陽系物質との関係を探っている。星間分子雲は物理学、天文学、地球惑星科学、化学にまたがる研究対象であり、本研究科では他にもさまざまな関連研究が行われている。





## 「アト秒パルス」

沖野 友哉 (化学専攻 助教)

化学反応を誘起するのは、電子の運動である。たとえば、水素原子の基底状態において、電子が周回運動をするのに要する時間は約 150 アト秒 (1 アト秒 =  $10^{-18}$  秒) であり、これは、光でさえも、45 ナノメートルしか進むことのできないきわめて短い時間である。この分子振動 (10 ~ 100 フェムト秒) などよりもはるかに早い電子の運動をストロボ写真として観測するには、アト秒の時間分解能を有するパルスの発生が必要となる。アト秒パルスは、分子内の電子分布の変化を実時間で追跡し、化学反応を電子分布の変化から理解するための光源として、期待されている。

アト秒パルスは高次高調波発生過程 (基本波の  $n$  分の 1 の真空紫外から軟 X 線領域の短波長の光が発生する過程) を用いて発生される。その発生原理

は、1993 年に提案された、3 ステップモデルに基づいている (理学のキーワード第 23 回「3 ステップモデル」参照)。1995 年に、このモデルを用いて、アト秒パルスが発生できることが示され、2001 年に、初めてアト秒のパルスの発生が実験的に確認された。現在では、レーザー技術の進展により電場振幅の最大値が 1 か所となるように光の位相を固定した数サイクルフェムト秒レーザーパルスを用いて、最短で 80 アト秒の単一アト秒パルスが発生されている。

アト秒パルスを用いた応用研究については、始まったばかりであるが、これまでにいくつか報告されている。最近の研究としては、ネオン原子を光子エネルギー約 100 eV の 100 アト秒パルスで励起し、2s 軌道と 2p 軌道からの光電子放出に 20 アト秒程度の時間差があるこ

とが突き止められている。

しかし、これまでのところ、分子内の化学反応を、アト秒パルスを用いてポンプ・プローブ追跡することは実現していない。これは、アト秒パルスの発生効率が低いことから、ポンプ・プローブ計測を行うために十分な強度のアト秒パルスが得られていないことによる。

化学専攻の山内研究室では、上記の問題点を克服する高繰り返し高強度単一アト秒パルスを生じ、強いレーザー電場中での化学反応を実時間で追跡するための装置開発を行っている。特に、強レーザー場中できわめて速く動く炭化水素分子中の水素原子 (プロトン) の運動を、アト秒パルスを用いて高精度で実時間追跡することを目指している。



## 「システム生物学」

黒田 真也 (生物化学専攻 教授)

生物は、細胞や分子といった互いに影響しあう要素からなる、ある種のシステムとみなすことができる。システム生物学とは、生命現象をシステムの振る舞いとしてとらえ、その特性や動作原理を明らかにすることを目的とした、生物学の一分野である。英語表記では systems biology と複数形になるが、これは複雑な複数のシステムを扱う systems engineering の考え方を biology へ適用するという発想に基づいてこの分野が生まれたためとされている。

生命現象のシステムレベルでの理解は、古くから繰り返し試みられてきた生物学の大きな目標のひとつである。たとえば生理学はそのような試みのひとつで

あるが、システムを構成する分子についての知見が少ない時代に確立されたため、システムの振る舞いに関する現象論的な解析が中心であった。その後、生化学や分子生物学が盛んになり、さらに近年のオームクス研究の進展などにより、遺伝子やタンパク質といったシステムの構成要素についての知見が急速に明らかになった。システムの振る舞いと構成要素の両方の知見が蓄積されたことで、生命現象のシステムレベルでの本質的理解が初めて可能になったといえる。

システム生物学では、多数の構成要素の振る舞いを詳細に調べたうえで、それらを統合してシステムとしての特性を把握することが必要である。このような統

合的な解析を行うために、生物学に加えて工学や数学、情報科学などさまざまな分野の研究者が参加しており、実験データに即したモデル作成、シミュレーションによる分子ネットワークの特性解析、新たな実験・解析手法の開発など多様な研究が展開されている。またタンパク質や細胞、組織といった単一階層のシステムだけでなく、これら複数の階層にまたがったシステムに関する研究も行われている。さらにこれらの知見を製薬・医療に生かそうとする試みも活発である。このようにシステム生物学の適用範囲は広く、今後の生物学の主流となることが期待される。

## 岩堀長慶先生のご逝去を悼む

寺田 至 (数理科学研究科 准教授)

本学名誉教授の岩堀長慶先生は、ご闘病中のところ平成23年(2011年)5月29日、享年84歳にて逝去されました。先生は本学理学部数学科を卒業後、大学院特別研究生、教養学部助手・講師・助教授、理学部数学科助教授を経て、昭和39年(1964年)から23年余りにわたり同教授として活躍され、昭和61年(1986年)の定年退官後は上智大学でも教鞭をとられました。平成19年(2007年)春には瑞宝中綬章を受章されています。

先生は、Lie群・代数群および関連する有限群、それらの表現論、また組合せ論などで広く活躍され、中でも有限体上のChevalley群のHecke環の生成元と基本関係を与え構造を決定したこと

や、 $p$ 進体上のChevalley群に対し、岩堀部分群とよばれる部分群に関する新しいBN対を構成し、併せてこれに付随するアフィンHecke環の生成元と基本関係も与えたこと(いわゆるIwahori-Matsumotoの論文)などが特に有名で、この分野の世界の研究者に広く影響を与えました。こうしたHecke環(岩堀Hecke環)の研究は現在ますます深化するとともに量子群や結び目の不変量などとも結びつき、さまざまなバリエーションも生んで、重要な役割を果たし続けています。

私がセミナーに加えていただいたのは先生のごく円熟された時期に当たります。セミナーでは実例を重視され、また外国



■ 故・岩堀長慶先生

のお客様に、法則を求めてご自分で実験され作られた数表をお見せになるのが楽しみのご様子でした。

心よりご冥福をお祈りいたします。

## 人事異動報告

異動年月日	所属	職名	氏名	異動事項	備考
2011.5.16	地惑	准教授	三河内 岳	昇任	助教から
2011.5.16	地惑	特任助教	戸丸 仁	任命	特任研究員から
2011.5.27	ビッグバン	客員教授	TURNER EDWIN LEWIS	採用	
2011.6.1	生化	特任助教	石井 亮平	採用	
2011.6.16	ビッグバン	客員准教授	POLNAREV ALEXANDER	任期満了退職	
2011.6.29	ビッグバン	客員教授	TURNER EDWIN LEWIS	任期満了退職	
2011.6.30	生科	特任助教	末廣 勇司	辞職	
2011.7.1	地惑	特任助教	松井 仁志	採用	先端科学技術研究センター・特任助教から
2011.7.1	地惑	特任助教	茂木 信宏	採用	先端科学技術研究センター・助教から
2011.7.1	原子核	特任助教	土井 琢身	採用	
2011.7.1	経理	財務チーム(会計総務担当)係長	赤崎 公一	配置換	総合企画部企画課(東京大学教授・復興支援室遠野分室勤務)係長へ
2011.7.1	経理	研究支援・外部資金チーム(研究支援担当)係長	山村 仁子	配置換	産学連携部産学連携課企画チーム係長へ
2011.7.1	経理	経理系施設チーム(附属植物園事務室)係長	笹崎 浩一	配置換	財務部経理課出納チーム係長へ
2011.7.1	学務	教務チーム(学部担当)主任	角田 俊行	出向	独立行政法人大学入試センター事業部事業第一課試験実施第一係主任へ
2011.7.1	学務	学務系専攻チーム(生物科学専攻事務室)主任	西村 範子	配置換	教養学部等学生支援課厚生係主任へ
2011.7.1	学務	学生支援チーム専門職員	金子 勉	復帰	
2011.7.1	天文研	技術職員	越田進太郎	臨時的採用	
2011.7.1	経理	財務チーム(会計総務担当)係長	小坂 規	配置換	医科学研究所経理課プロジェクト経理係専門職員から
2011.7.1	経理	研究支援・外部資金チーム(研究支援担当)係長	菊地 眞悟	配置換	産学連携部産学連携課知的財産マネジメントチーム係長から
2011.7.1	経理	経理系施設チーム(附属植物園事務室)係長	鈴木 智明	復帰	国立大学法人政策研究大学院大学財務マネジメント課主査から
2011.7.1	学務	教務チーム(学部担当)係長	蠅野 明	復帰	独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所科学推進部大学共同利用課主査から
2011.7.1	学務	学務系専攻チーム(生物科学専攻事務室)一般職員	霜越友里江	配置換	教養学部等教務課教務企画係一般職員から

# 東京大学大学院理学系研究科・博士学位取得者一覧

(※) は原著が英文 (和訳した題名を掲載)

種別	専攻	申請者名	論文題目
<b>2011年4月25日付学位授与者 (3名)</b>			
課程	天文	黒田 仰生	一般相対論下での大質量星の磁気回転型重力崩壊：初期磁場の成長及び重力波 (※)
課程	化学	菅原孝太郎	付着性渦鞭毛藻 <i>Prorocentrum hoffmannianum</i> 由来ポリエンポリオール化合物 prorocontrol の構造研究 (※)
課程	生化	岩田 遼	線虫 <i>C. elegans</i> の感覚行動可塑性を制御するイノシトールリン脂質シグナルの遺伝学的解
<b>2011年4月28日付学位授与者 (1名)</b>			
課程	生科	末廣 勇司	メダカの視運動反応における視覚情報変化に対する適応的行動発現の神経行動学的解析 (※)
<b>2011年5月23日付学位授与者 (2名)</b>			
論文	生化	佐伯 智	Namalwa 細胞を用いた GPCR アッセイ系の構築と応用
課程	物理	竜野 秀行	K 中間子ヘリウム原子 X 線の精密分光 (※)
<b>2011年5月31日付学位授与者 (2名)</b>			
課程	生化	小田 茂和	線虫 <i>C. elegans</i> の塩走性学習に関わる神経可塑性の可視化 (※)
課程	生科	大林 祝	シロイヌナズナの新規核小体因子 RID2 の関与する細胞増殖制御機構の分子遺伝学的解析 (※)
<b>2011年6月17日付学位授与者 (1名)</b>			
課程	生科	VENTURA, Albert	ウナギの浸透圧調節における速効性ペプチドホルモンによるコルチゾルの分泌調節 (※)
<b>2011年6月30日付学位授与者 (1名)</b>			
課程	生科	三浦 千明	相互突然変異がある場合の 2 座位 2 対立遺伝子モデルの分布に対する近似公式について (※)

## 理学部オープンキャンパス 2011 のお知らせ

広報委員会

東京大学理学部では、例年 8 月初旬に開催しておりましたが、夏季の電力供給状況を勘案し、12 月 23 日 (金・祝) に開催することにいたしました。皆様にはご迷惑をおかけいたしまして誠に恐縮でございます。

給状況を勘案し、12 月 23 日 (金・祝) に開催することにいたしました。皆様

にはご迷惑をおかけいたしまして誠に恐縮でございます。

## あとがき

本年 4 月から理学部生物学科の新体制がスタートした。学部 3 年の進学の振り分けて「動物」と「植物」の区別がなくなった。毎年 4 月に植物学コースの 3 年生を対象にしていた「臨海実習」もなくなり、今年は 5 月に旧動物学コースの教員と合同の臨海実習を付属臨海実験所で実施した。動物の実習に混じって、

海産植物の観察を私は担当した。18 世紀に提唱された、分類学の開祖リンネの「生物 2 界説」がようやく消えたかのようである。好天に恵まれ、午前中は水平線の上に富士山を垣間みることもできた。神奈川県三浦半島の自然を満喫し、2 か月前に起きた東日本大震災を忘れさせるようでもあった。しかし、わずか 2 時間

半磯採集をただけで、半袖の私の両手首付近は真っ赤に腫れ上がった。いまだに左手首に腕時計の跡が残る。子供のころ日焼け止めをしないで海水浴をしていた昭和 30 年 (1955 年) 生まれの私は、21 世紀の 5 月の日差しの強さを再認識した。

野崎 久義 (生物科学専攻 准教授)

第 43 巻 2 号

発行日：2011 年 7 月 20 日

発行：東京大学大学院理学系研究科・理学部

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

編集：理学系研究科広報委員会所属 広報誌編集委員会 (e-mail: rigaku-news@adm.s.u-tokyo.ac.jp)

牧島 一夫 (物理学専攻) maxima@phys.s.u-tokyo.ac.jp

広報・科学コミュニケーション：

井出 哲 (地球惑星科学専攻) ide@eps.s.u-tokyo.ac.jp

横山 広美 yokoyama@sp.s.u-tokyo.ac.jp

野崎 久義 (生物科学専攻) nozaki@biol.s.u-tokyo.ac.jp

HP 担当：柴田 有 (情報システムチーム)

加納 英明 (化学専攻) hkano@chem.s.u-tokyo.ac.jp

shibata.yuu@mail.u-tokyo.ac.jp

清水 正一 (総務チーム) shimizu.masakazu@mail.u-tokyo.ac.jp

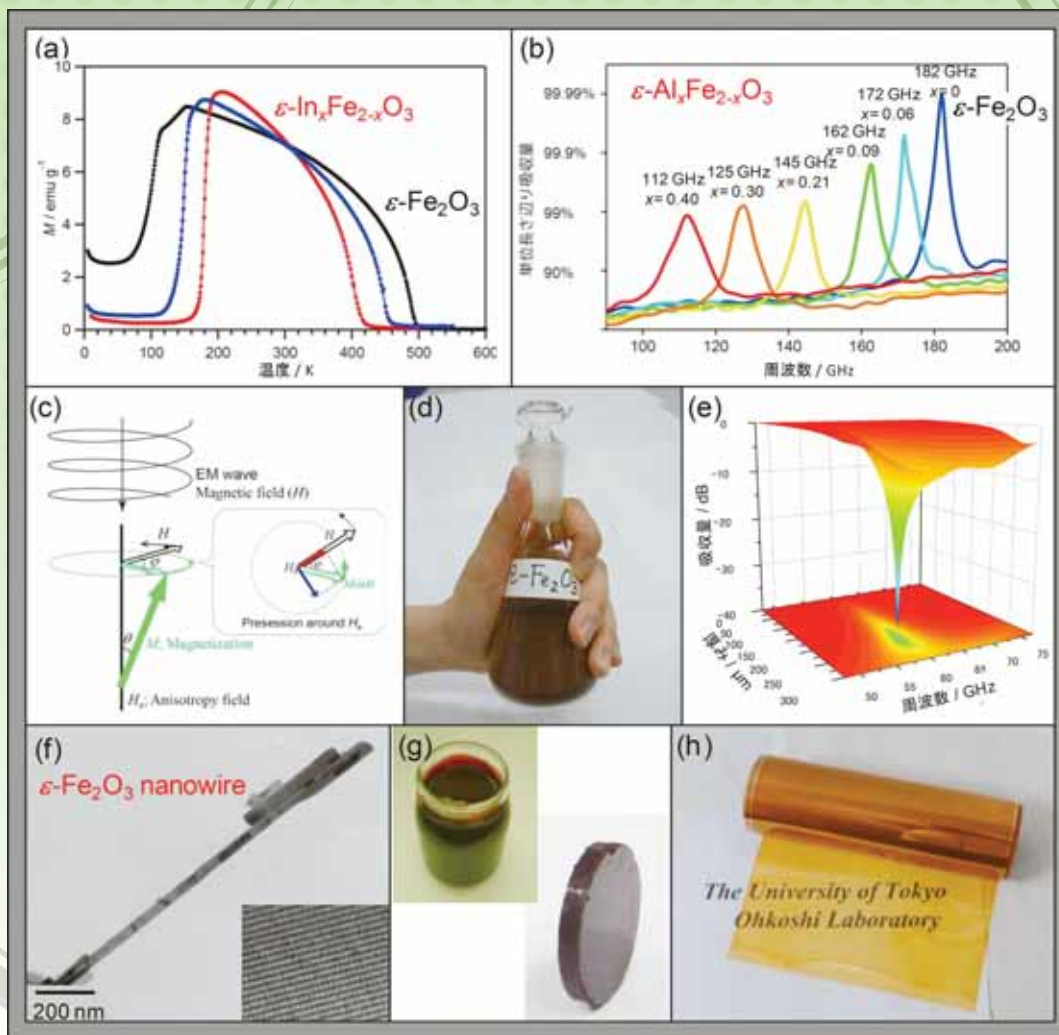
HP & ページデザイン：宇根 真 (情報システムチーム)

小野寺正明 (広報室) onodera.masaaki@mail.u-tokyo.ac.jp

une.makoto@mail.u-tokyo.ac.jp

印刷：三鈴印刷株式会社





(a)  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  と  $\epsilon\text{-In}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$  の磁化温度曲線。(b)  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  と  $\epsilon\text{-Al}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$  のミリ波吸収特性。(c) ジャイロ磁気効果による自然共鳴現象の模式図。(d) 合成した  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  ナノ粒子の写真。(e)  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  シートのミリ波吸収特性のシミュレーション。(f)  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  ナノワイヤーの透過型電子顕微鏡写真。(g)  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  の水インクおよびディスク。(h)  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  フィルム。