

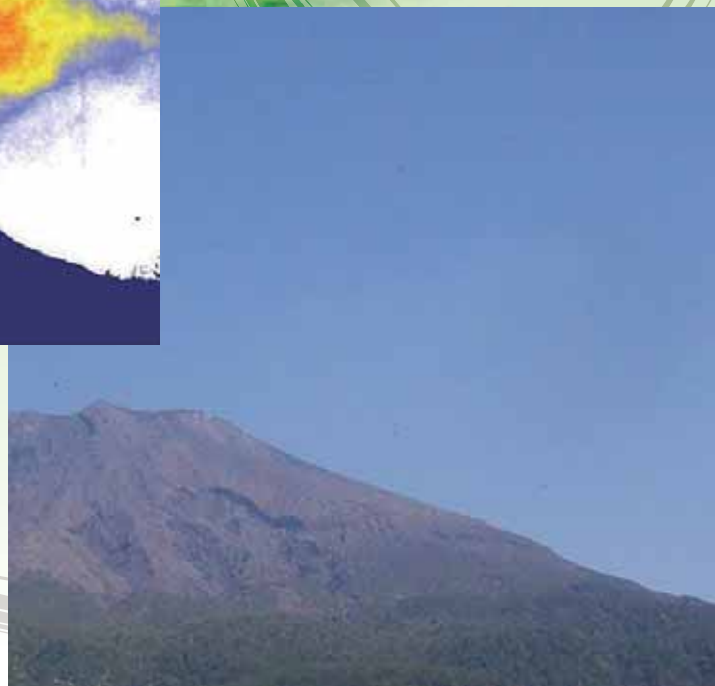
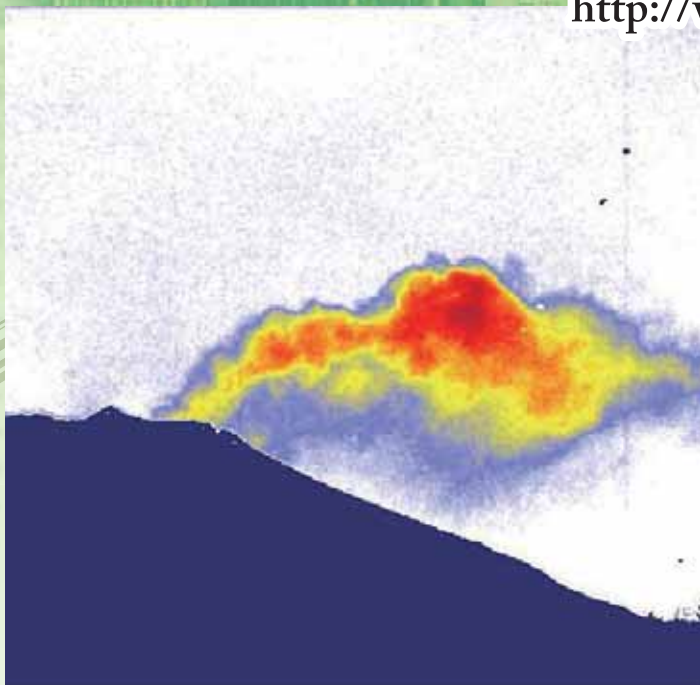
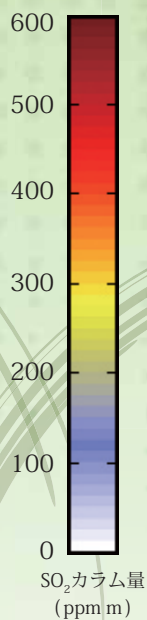


東京大学

理学系研究科・理学部ニュース

2011年9月号 43巻3号

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



桜島火山で可視化した火山噴煙中の二酸化硫黄
～理学の匠「見えない火山ガスを可視化する」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

理学系研究科の電力危機対策 ほか

情報科学科

東北沖巨大地震はどのような現象だったのか? ほか

「リー群の離散部分群」「高調波」「晩期型星」

「超高圧」「磁性半導体」「代謝, メタボローム」

トピックス

理学系研究科の電力危機対策	西原 寛 (化学専攻 教授) ……………	3
「物理の哲人」レゲット教授を迎えて	福山 寛 (物理学専攻 教授) ……………	4
本郷と三鷹で第3回「全国同時七夕講演会」の取り組み	川良 公明 (天文学教育研究センター 准教授)	
	牧島 一夫 (物理学専攻 教授) ……………	6
学校の先生のための放射線勉強会(2)	横山 広美 (広報・科学コミュニケーション 准教授) ……………	6

理学の匠 第9回

見えない火山ガスを可視化する	森 俊哉 (地殻化学実験施設 准教授) ……………	7
----------------	---------------------------	---

学科の教育メニュー 第9回 情報科学科

情報科学科で学びコンピュータサイエンスを極める	平木 敬 (情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻・ 理学部情報科学科兼務 教授) ……………	8
-------------------------	--	---

研究ニュース

ミドリムシの祖先は「アカムシ」だった?	丸山真一郎 (元生物科学専攻 博士研究員)	
	野崎 久義 (生物科学専攻 准教授) ……………	10
東北沖巨大地震はどのような現象だったのか?	井出 哲 (地球惑星科学専攻 准教授) ……………	11
励起子ボース・アインシュタイン凝縮の実現	吉岡 孝高 (物理学専攻 助教)	
	五神 真 (物理学専攻 教授) ……………	12
細胞内の交通網はどのように整備されたのか	海老根一生 (生物科学専攻修了)	
	上田 貴志 (生物科学専攻 准教授) ……………	13
緑藻の光の好き嫌いを決める細胞内シグナル	若林 憲一 (生物科学専攻 助教) ……………	14

連載：理学のキーワード 第33回

「リー群の離散部分群」	金井 雅彦 (数理学研究科 教授) ……………	15
「高調波」	酒井 広文 (物理学専攻 准教授) ……………	15
「晩期型星」	宮田 隆志 (天文学教育研究センター 准教授) ……………	16
「超高圧」	船守 展正 (地球惑星科学専攻 准教授) ……………	16
「磁性半導体」	福村 知昭 (化学専攻 准教授) ……………	17
「代謝, メタボローム」	有田 正規 (生物化学専攻 准教授) ……………	17

お知らせ

東京大学大学院理学系研究科・博士学位取得者一覧	……………	18
人事異動報告	……………	18
理学部紹介用しおりの新シリーズ	広報委員会 ……………	18
第20回東京大学理学部公開講演会のお知らせ	広報委員会 ……………	19

■表紙 桜島火山で可視化した火山噴煙中の二酸化硫黄。上図は可視化装置で得られた噴煙中の二酸化硫黄カラム量分布。下図は同火山のデジカメ画像。噴煙は透明で右方向に流れていた。

理学系研究科の電力危機対策

副研究科長 西原 寛 (化学専攻 教授)

9月に入って酷暑の峠を過ぎ、電力供給問題も冬までもち越しとのニュースが流れている。東日本大震災直後に行われた東京電力の計画停電は、われわれに電力の貴重さを実感させた。政府は夏の節電対策として、管内の契約電力500kW以上の大型事業所に対し、7月1日から電力使用制限令を発動した。東京大学は東京電力の供給量の0.1%にあたる6万kWを使用してきた大口消費者であり、大学本部は3月中には電力危機対策チーム、研究継続対策WGを立ち上げ、夏期、冬期の電力危機を乗り切る対策を進めてきた。当初、政府の電力使用制限は昨年と比較して25%削減が有力だったが、最終的には15%削減に落ち着いた。本学は、社会への影響を考慮して当初から30%の削減を掲げ、そのまま維持した。シミュレーションで30%削減が不可能ではないという判断からである。その根拠は3年前に二酸化炭素排出量削減のため設置された東大サステイナブルキャンパスプロジェクト (Todai Sustainable Campus Project, TSCP) 室のデータなどであり、工学部2号館をモデルに電力有効利用を研究してきた本学の専門家の寄与も大きい。具体的な設定目標は、「目標1：ピーク時電力の削減目標—7月(年間最大月)まではその月の対前年度比の30%を削減、8月以降は対前年7月比の30%削減値以下に抑制。目標2：使用電力量を対前年度比の25%を削減。」である。年間使用電力量は、上述したTSCP室を中心に本学が第一フェーズの目標としている「2006年度に比べ2012年度には非実験系の二酸化炭素排出量の15%削減(大学全体の二酸化炭素排出量に対する削減率13%)」と関連している。

全学での節電対策

電力消費量30%削減に向けて、本部は「研究を止めない」ことを前提に3段階の対策を提示した。Step1は非実験系の日常の節電であり、おもな施策は空調、照明、電算サーバの使用の最少化であり、冷蔵庫、エレベータなどの使用の間引きなども含まれる。Step2は平日業務の休日シフト、Step3は空調の全面停止である。それに加えて、強く推進したのが電力使用量のリアルタイム測定オンライン見える化である。構成員が常時、電力量を監視しながら活動することで、かなりの削減ができるとの見込みである。この見える化は、6月終わりから、大学のウェブページに1時間ごとの消費量がアップされるという形で実現した (<http://ep-monitor.adm.u-tokyo.ac.jp/>

campus/denryoku を参照)。

理学系での節電の実施方針・対策

理学系では、電力危機が迫る4月に各専攻、センターごとの節電対策を立てることを要請した。本部のピーク時電力の30%削減目標は厳し過ぎるとの意見も多かったが、5月の教授会の前に磯部TSCP室長に上記の全学の節電およびTSCP活動の解説をしていただき、理解を深めた。実際にこれまでかなりの自主努力が行われてきた。具体的には、空調の使用削減(温度設定調整の徹底)、電算機使用量の削減、エレベータ使用台数の削減、照明の最少化、冷凍・冷蔵庫の必要最小限利用、電算サーバの集約化、仮想化、こまめな電源のオンオフ、自主的な土日、休日への実験研究のシフトなどである。たとえば理学部1号館の素粒子物理国際研究センターでは大型電算機を4割程度カットで運用している。7月、8月の真夏日には削減割合が目標値に届かなかつたりもしたが、総合的には各号館とも本部の目標値をほぼ達成しており、努力の成果が表れている。非実験系の節電は研究にさほど大きな支障を与えていないが、研究用機器の大幅な節電を行っているところは、非常事態が継続中である。いかにこの状態を脱して正常な研究環境に復帰できるか、今後の対策を練る必要がある。

非常用電源の設置

3月の計画停電以降、停電は起こってはいないが、今回の電力危機はいつ突発的な停電が起こっても不思議ではないことを示した。そのような非常事態に備えるため理学系では非常用電源の設置を進めている。きっかけは、3月に計画停電が実施されたさいに、生物科学、生物化学専攻から要望された貴重な生物試料用の非常用電源の設置要望である。その後、非常用電源WGを設置して検討して、2号館、3号館に100KVAのディーゼル発電機を設置することを研究科で決め、具体的な設置プロセスに入っている。3号館では、建物の外側に発電機を設置するため、全学キャンパス計画委員会に諮り、景観を損なわない措置を施す予定である。

夏期の山場は越えたが、暖房が必要となる冬期に向けての対策は抜かりないように準備する必要がある。理学系教職員、学生の皆様に、引き続きのご協力を願いたい。

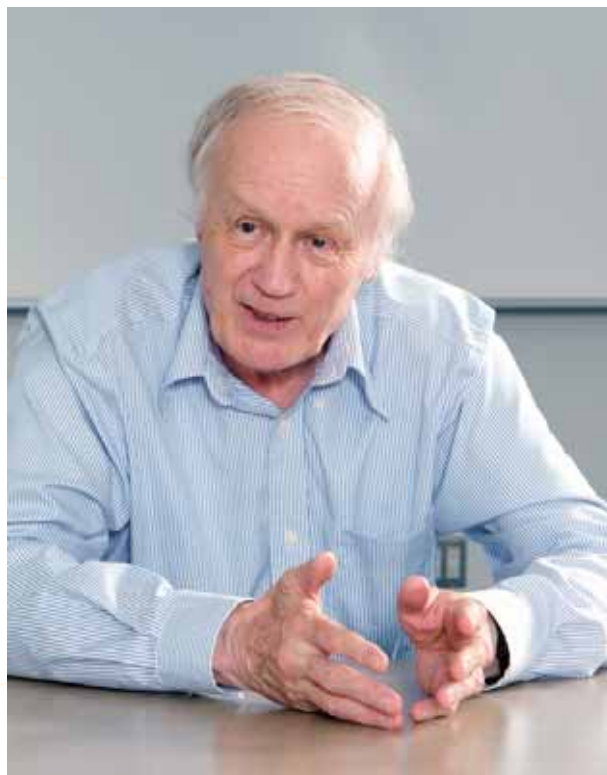
「物理の哲人」レゲット教授を迎えて

福山 寛 (物理学専攻 教授)

理学系研究科では、去る5月16日から6月10日にかけての4週間、初めて外国人のノーベル賞受賞者を教壇に迎え、物理学専攻の大学院集中講義を英語で担当いただいた。講師は米国イリノイ大学アーバナ・シャンペン校のサー・アンソニー・ジェームス・レゲット教授。異方的超流動・超伝導、冷却原子気体のボース・アインシュタイン凝縮、量子力学の基礎問題などの卓越した理論研究で知られる物性物理学の世界的権威で、2003年にノーベル物理学賞を受賞している。その懇切丁寧な指導ぶりと緻密で精力的な研究姿勢は、われわれに強烈な印象を残してくれた^{注1)}。

レゲット教授が本研究科の教壇に立つのはこれが初めてではない。1973年度の12月から2月にかけて計8回の特別講義を「日本語」で行っている。当時、英国サセックス大学に所属していた教授は、物理学教室の和田靖教授の招きで、外国人客員研究員として8か月間、本学に滞在した。後にノーベル賞に輝いた研究の一部はその時に行われたものである。今回の東大招へいは、それからじつに38年ぶりとなり、日本学術振興会の外国人著名研究者招へい事業の援助を受けて実現したものである。今年を含めて3年間、ほぼ同じ時期に来日し、毎年異なるテーマの集中講義を担当いただくことになっている。来年以降は、国内会議や他大学の訪問あるいは一般講演会なども予定している。

今年度の講義題目は「エキゾチック超伝導」であった。通常講義が8コマ、大学院学生が自身の研究内容を英語発表するインタラクティブ・セッションが5コマ、補講が2コマの計15コマ行われた。講義は早朝8時30分から(1限)であった。ちなみにイリノイ大学では8時から講義されているとのこと。それでも他専攻・他研究科の学生も含む常時30名近い熱心な学生が出席し、講義の最中にも盛んに質問が出て、それに教授が的確に答えるという、知的刺激に溢れた講義が1か月間繰り広げられた。インタラクティブ・セッションでは、発表学生が提供する話題を即興の教材とし、レゲット教授と聴講学生全員が参加する形で質疑応答が交わされた(発表25分、質疑応答15分)。発表者にとっては、ノーベル賞学者に自分の研究内容をじっくり聞いてもらい、なおかつ英語プレゼンテーションの訓練にもなる、またとない機会となった。このような授業方式は、広く深い学識を有するレゲット教授にして初めてなし得るものであることは言うまでもない。『毎回レベルの高い質問が多数出て、楽しかった』『日本人学生の英語力は、この38



■ サー・アンソニー・ジェームス・レゲット教授 (Photo: 佐藤久)

年間で格段に進歩した』とは教授の感想である。

レゲット教授の講義ぶりは明快にして淀みないものである。同時に、授業中何度も『ここまでで質問はないか?』と学生の理解度を常に気にかけている。レポート課題も、講義期間中に必ず自分のもとを訪問し、取り上げようとする課題が適切かどうか相談することを義務づけていた。滞在2週間が経ったとき『まだ2名しか相談に来ない』と心配するので、『学生は最後まで授業を受けて、それからレポート題材を決めるのだと思いますよ』と応えた。それでも心配だったのか、2回の補講は自ら買って出たものである。離日後、次の滞在先であるカナダ・ウォータールー大学から返送されてきた採点済みレポートを見ると、コメントが随所に書き込まれ、内容の総評も添付されていた。一人一人のレポートを本当に丁寧に読み込んでいる。ちなみに、冬学期は本務イリノイ大学での講義に専念するため海外出張はせず、夏学期に世界中の大学や研究機関あるいは国際会議に招待されてイリノイをほとんど留守にするのがここ何年ものライフスタイルだそうである。

講義資料は、来日後、レゲット教授が昔懐かしいOHPシートに専用カラーペンでほとんど丸一日かけて手書きした原稿

を、アルバイトの学生諸君がタイプし、それを教授に校正してもらって当該授業の前日までに仕上げるといふ突貫工事で準備した。てっきり、これまでの講義資料をマイナーチェンジして使われるのだらうと思っていたので、ほぼすべてが書き下し原稿と聞いて驚くと同時に、その熱意に頭が下がる思いであった。ちなみに、レゲット教授の手書き文字はごくごく小さい。その上、失礼ながら一見では英語というよりアラビア語のように見える。イリノイ大学で担当秘書を雇うとき、教授の手書き原稿がどのくらいのスピードでタイプできるかが採用のポイントなのだそうである。アルバイトの学生諸君のミッションはそれだけにとどまらない。こうして作成した講義資料をもとに、この記念すべき集中講義の講義録を編纂し、これを専門誌に投稿して、広く公開することになっている。これは38年前のリバイバルであるが、前回は日本語の講義ノート^{注2)}、今回は英語の講義録である。さらに、東京大学のビデオアーカイブ(UTオープンコースウェア)に収めるため、講義風景をビデオ撮影した。早晩、世界中の人々が講義風景を動画閲覧できるようになる^{注3)}。

滞在中は、物理学教室の配慮でレゲット教授専用のオフィスが用意され、学生であれ研究者であれ、だれもが自由にアポイントメントを取り、レゲット教授と研究討論や講義の質問をすることができた。受入研究者として、こうした時間的・空間的な交流環境を整えることに一番腐心したつもりである。物理の議論をするさいの教授の精神的・体力的な強靱さには驚くべきものがある。73歳という年齢をまったく感じさせない。生活のすべてが研究と教育のためにあり、それ以外のことにはほとんどこだわりをもっていないように見える(もちろん「家族

を除けば)。まさに「物理の哲人」とよぶにふさわしい。その純粹さと少しはにかんだような笑顔に毎日接していると、こちらでも幸せでやる気が満ちてくる。世界中にレゲット・ファンが大勢いるのもうなずける。

ところで、1973～1974年の滞在時ほどではないにせよ、レゲット教授は今でも日本語をかなり話す。オックスフォード大学の古典学コースでラテン語や古代ギリシャ語そして哲学を勉強して学士を取得した後、物理学に転じたという経歴から分かるように、言語に対する並々ならぬ興味と才能をもっている(程度の差こそあれ、7つの外国語を理解されるとのこと)。1965～1966年に博士研究員として単身京都大学に滞在したさいは、日本の欧文専門誌に投稿されてくる論文の英語添削を依頼されたことが縁で、「日本人物理学者のための科学英語について」と題する文章を日本物理学会誌に寄稿している^{注4)}。これは、わが国の物理関連の研究者にとって隠れたベストセラーとして知られるもので、若い世代にもぜひ一読をお勧めする。『日本語はかなり忘れてしまいましたから』本人はそうおっしゃるが、日本人でもたまに間違えそうな敬語や謙譲語の難しい言い回しが気にかかるようである。

レゲット教授は、昨年3月、東京大学から5人目となる名誉博士称号を授与された^{注5)}。今年4月には、本学の大学院入学式で来賓として祝辞を述べるよう招待され、東日本大震災後の混乱が続く中を来日し、東大の新入生だけでなくすべての日本人を身をもって激励くださった^{注6)}。この心優しい大学者と本学そして本研究科との絆が、今後もますます強固となることを念じてやまない。

『レゲット先生、来年もお待ちしていますよ』



レゲット教授にインタビューする遠藤晋平氏(左:物理学専攻 博士課程)と沈希(シンキ)氏(右:化学専攻 修士課程)。二人とも集中講義の熱心な聴講生。インタビュー内容は注1)のURLに掲載済み。(Photo:佐藤久)

今年度の滞在プログラムは、この紙面に収まりきれないほど多くの方々のご協力のもとに成功裏に終了しました。理学系研究科を挙げての受入体制を敷いてくださった山形研究科長以下、事務部、広報室、情報システムチームの皆様と早野専攻長はじめ物理学教室教職員の皆様に深く感謝します。とくに秘書兼通訳としてプログラム全般をサポートくださった国際化戦略室の池上裕奈氏、講義資料作成・講義録編纂とビデオ撮影に参加協力してくれた有能な学生諸君に厚くお礼申し上げます。

注1) 2011年度の滞在プログラムの詳細は以下のURLに詳しい。

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

注2) A. J. Leggett, 「Fermi 液体・非等方的超流体・液体³Heの新しい相について」, 物性研究 22, 276 (1974).

注3) <http://ocw.u-tokyo.ac.jp/>

注4) A. J. Leggett, "Note on the Writing of Scientific English for Japanese Physicists", 日本物理学会誌 21, 790 (1966).

注5) http://www.u-tokyo.ac.jp/public/public01_220303_01_j.html

注6) http://www.u-tokyo.ac.jp/gen01/h15_01_j.html
レゲット教授は東京大学を通じて、東日本大震災で被災された方々へ多額の義援金を送られた。

本郷と三鷹で第3回「全国同時七夕講演会」の取り組み

■ 川良 公明 (天文学教育研究センター 准教授)
牧島 一夫 (物理学専攻 教授)

2009年はガリレオ・ガリレイが望遠鏡で天体観測を行なった400周年を記念する「世界天文年」で、その一環として日本では、「全国同時七夕講演会」が企画された。この試みは大成功だったため、その後も続けられている。その3回目当たる今年度は、震災の被災地を含め、全国の80か所を越す学校、研究所、公共天文台などで講演会などが企画され、本研究科では、本郷キャンパスと三鷹

キャンパスの2か所でこのイベントに参加した。

本郷キャンパスでは、2011年7月7日の18時から19時まで、理学部小柴ホールに中学生からシニアまで約60名の参加者を迎え、ビッグバン宇宙国際研究センターと日本学術振興会先端拠点形成事業「暗黒エネルギー研究国際ネットワーク」の共催で、講演会が行なわれた。講師は坂井南美助教で、「星の誕生～太陽系の奇跡～」と題し、稼働を開始しようとしているALMA計画などを含め、太陽系、惑星形成、太陽系外惑星の最新像などが、わかりやすく紹介された。講演後には、星間分子など宇宙での物質のありかたから、生命や宇宙の起源などにつ

いて、活発な質疑応答が交わされた。

三鷹キャンパスでは、天文学教育センターの主催で2011年7月9日14時より開催され、川良公明准教授により「織姫の天文学」というタイトルで講演が行われた。天文観測では標準星として強度較正の基礎となっていた織姫星だが、赤外線観測により、この星では原始惑星系の形成が進行中であることが分かってきたことが紹介された。参加者は十数名で、こじんまりとした講演会だったが、そのぶん和やかでくつろいだ雰囲気醸成され、聴衆と講演者の間で活発な討論が行われ、こちらでも生命の起源や宇宙論にまで対話が及んだ。

学校の先生のための放射線勉強会(2)

■ 横山 広美
(広報・科学コミュニケーション 准教授)

安全・危険の線引きはできなくとも、何が基本的事実なのか整理したい。学校の先生の多くは、こうした思いをもっていただようである。研究者が知る科学的事実と、日常の中で科学的事実に基づいた判断をすることの間には乖離がある。その間を埋める一助となる講演会を行うことが、理学系研究科広報の震災に対する貢献だと考え、5月8日に開催した第1回目につき、7月16日に第2回目となる「学校の先生のための放射線勉強会(2)」を開催した。第1回目のときほど申し込みが殺到することはなかったが、170席ある会場がいっぱいになる来場者があった。

山形俊男研究科長の挨拶のあと、「原



■ 小柴ホールは前回同様熱心な先生方で満席となった

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？—理学系研究科附属原子核科学研究センター・下浦享教授、「放射性物質の海洋拡散—どこへ、どのようにして運ばれるのか？」独立行政法人海洋研究開発機構・升本順夫准教授、「生き物と放射線—どのようにして放射線は作用するのか」新領域創成科学研究科先端生命科学専攻・三谷啓志教授の講演が行わ

れた。質疑も多く、終了後にもメールなどで「また開催してほしい」という声もお寄せいただいた。これらの講演から提供された科学的事実が、学校の先生を通じて、広く生徒、保護者の方々と共有されることを願っている。福島からいらした先生や、福島に実家がある先生もご参加くださった。今後は現場のご苦勞や要求にさらに直球で答えるような企画も検討していく必要があるだろう。

見えない火山ガスを可視化する

森 俊哉 (地殻化学実験施設 准教授)

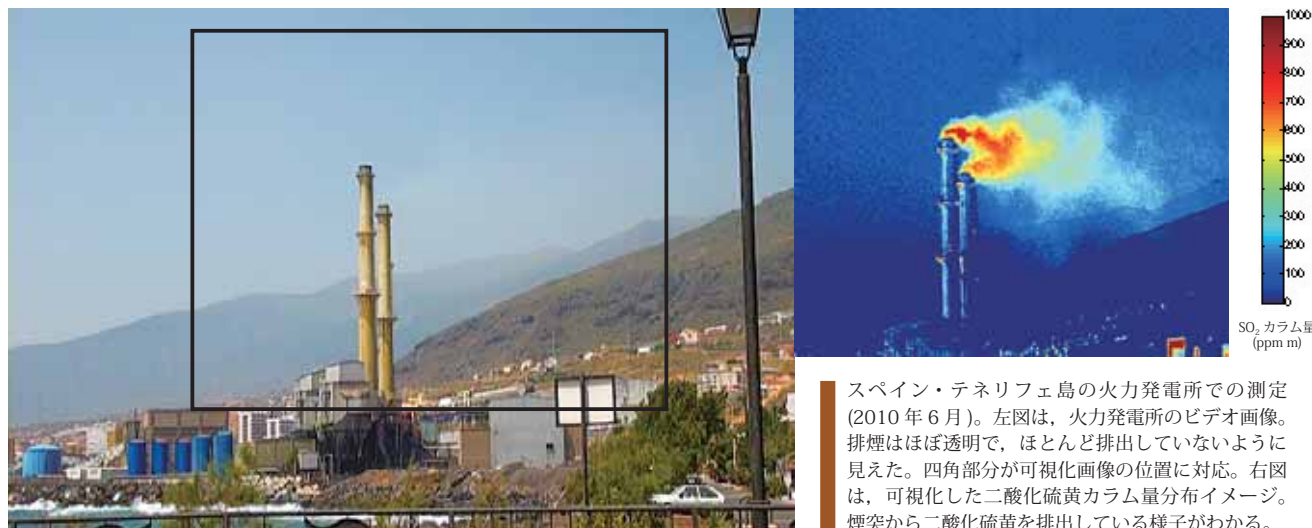
人の目に見えないものを見えるようにすることは、理学研究で利用される常套手段のひとつであり、これによりさまざまな新しい情報が得られる。火山学の分野でも、人の目には透明な火山ガスを定量的に可視化することが可能となってきた。

火山ガスのほとんどは水（水蒸気）で、そのほかに二酸化炭素、二酸化硫黄、塩化水素、硫化水素などを含んでいる。これらは、いずれも人の目には無色透明である。火山ガスの放出率は、地下にあるマグマの状況を反映して変化するので、放出率をモニタリングすることで火山の地下の状況を知ることが可能である。これまで火山ガス放出率は、望遠鏡を装着した紫外分光計を用い、望遠鏡の視野方向にある二酸化硫黄のカラム量を遠隔測定することで求められてきた。カラム量とは、ガス濃度を視野方向に積分した量を表す値である。二酸化硫黄を用いるのは、測定で使用する近紫外波長域（240～320 nm）に強い吸収をもつだけでなく、大気中の濃度が水や二酸化炭素に比べるときわめて低く、分光測定が容易だからである。これまでの紫外分光計を用いた装置では、視野方向1点の二酸化硫黄カラム量しか測定できないので、火山からの放出率を求めるには噴煙をスキャンする必要があり、放出率は数分から数十分の時間間隔でしか測定できなかった。噴煙中の二酸化硫黄を定量的に可視化してイメージとして一度に測定できれば、二酸化硫黄放出率を高時間分解で測定できるだけでなく、噴煙の挙動も明らかにできるというのが定量的可視化手法開発の動機である。

二酸化硫黄の可視化手法といっても、原理は至って簡単である。紫外光に感度のある CCD カメラで、二酸化硫黄の吸収帯に当たる波長（～310 nm）だけを撮像し、光の吸収量から

二酸化硫黄量を算出する。実際は、エアロゾルの影響などを取り除くため、二酸化硫黄の吸収帯からずれた波長（～330 nm）のイメージも同時に撮像し、これら2波長のイメージを処理することで、二酸化硫黄カラム量分布イメージを求めている。こうして開発された可視化装置を用いて得られた桜島火山の二酸化硫黄のカラム量分布イメージが表紙画像（上）である。表紙画像（下）には同時刻のデジカメ画像も合わせて示した。この日は、火山ガス噴煙は人の目に透明であったが、可視化したイメージを見るとわかるように、二酸化硫黄を含んだ噴煙が山頂火口から右方向に流れている。こうしたイメージが複数枚あれば、噴煙中の二酸化硫黄の挙動がわかると共に、二酸化硫黄放出率を測定することができる。この可視化手法により、放出率の測定レートは約1 Hz まで飛躍的に進歩した。また、面的にカラム量分布をとらえることができるようになったため、これまで難しかった噴火やガス噴出現象に伴うガス量の定量も可能になった。現在は、可視化技術の特性を生かし、日本の火山だけでなく海外の火山でも観測を実施し（裏表紙写真）、火山からの脱ガス機構の解明を目指し研究を進めている。

あたりまえのことだが、この可視化技術は、火山だけでなく、工場などからの二酸化硫黄排出状況の測定にも使用できる（図）。海外では、脱硫装置がっていない火力発電所が現在でもあるようで、二酸化硫黄が煙突から排出される様子を測定できる場合もある。東京近郊の火力発電所でも、この可視化装置を用いて測定してみたことがあるが、こちらは脱硫装置がきちんと稼動していたようで、（残念ながら??）二酸化硫黄の可視化はできていない。



スペイン・テネリフェ島の火力発電所での測定（2010年6月）。左図は、火力発電所のビデオ画像。排煙はほぼ透明で、ほとんど排出していないように見えた。四角部分が可視化画像の位置に対応。右図は、可視化した二酸化硫黄カラム量分布イメージ。煙突から二酸化硫黄を排出している様子がわかる。

情報科学科で学びコンピュータサイエンスを極める

平木 敬 (情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻・理学部情報科学科兼務 教授)

理学部情報科学科では知と計算とは何かということを出発点にして、今日社会基盤となり将来の社会・自然科学の展開に不可欠な情報科学について教育・研究を行っている。情報技術は広く科学技術の根幹を成す技術であり、情報と名のつく学科や情報に関連する教育を行っている学科は数多く存在するが、そのほとんどは計算機を道具として利用するだけのものである。理学部情報科学科では、情報処理の根本原理の究明・まったく新しい動作原理の計算機的设计・計算機の新しい使い方の提案というように、計算機・情報そのものを教育・研究対象としている点を特徴としている。

■ カリキュラム概要

情報科学科では、情報科学の最先端の研究を行うために必要な素養を習得することを目的に、計算機科学の基礎科目を中心としたカリキュラムが組まれている。特に、駒場の4学期から3年の夏冬学期において、情報科学のための数学や論理学、各種アルゴリズムの基礎、計算システム(ソフトウェアおよびハードウェア)の構成法、人工知能などに関する講義と演習・実験など非常に重要性をもつ科目を学習する。特に、実験・演習ではコンパイラなどのソフトウェアを開発するプログラミング実験、プロセッサを作成するハードウェア実験を通して情報システムの基本を身に付けるとともに、大学院での研究や就職後における研究開発の基盤となる実践力を体得する。

情報科学科カリキュラムの特徴は、数少ない講義で基礎項目の実力練成を狙っていることである。そのため、駒場の4学

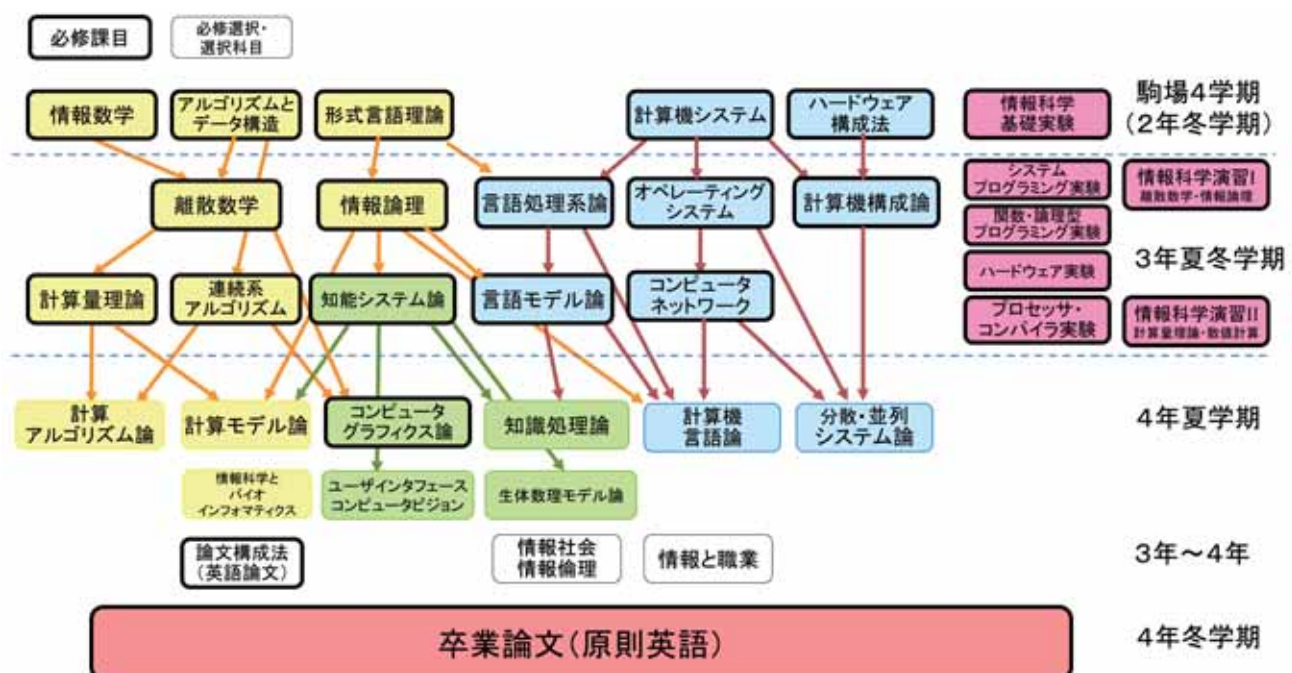
期から3年の夏冬学期における講義はすべて必修講義になっている。また、3年の夏冬学期は原則として講義が午前中2限に1科目開講されるだけで、午後はすべて実験・演習に充てられる。

■ 2年生4学期

駒場4学期は、情報科学の基礎中の基礎を必修6科目で学ぶ。情報数学では情報を扱う数学的基礎である集合・関係・束、情報理論、代数とその情報科学的応用(符号、暗号、乱数など)を扱う。形式言語理論では正則言語、有限オートマトン、文脈自由言語、チューリング機械とその停止性問題に関して扱う。計算機システムでは逐次計算機の構成、動作原理として、機械語、数の表現法、番地指定の方式、オペレーティングシステムの基本原理を講義する。ハードウェア構成法ではASICの論理回路設計に必要な回路設計、ステートマシンによる同期、順序制御、排他制御、演算回路を教授する。アルゴリズムとデータ構造では計算機の成立、計算機による問題解決とプログラミング、データ構造、リストとリスト処理、集合の表現と探索、文字列の照合などを扱う。情報科学基礎実験ではアセンブリ言語によるプログラミング、C++、Schemeによる「アルゴリズムとデータ構造」に関するプログラミングを行う。

■ 3年夏冬学期

3年生夏冬学期には、情報科学の基礎を必修10科目と実験・演習で固める。図に科目間の学習内容関係を示す。



■ 情報科学科のカリキュラム

オペレーティングシステムではオペレーティングシステムの機能および構造、すなわちプロセス、プロセス間の同期・通信、スケジューリング、メモリ管理、ファイルと入出力、トランザクション処理、セキュリティなどを学ぶ。離散数学ではグラフ理論や線形計画法をはじめとして、有限離散の組合せ構造の諸性質を解析し、組合せ最適化を効率よく行うアルゴリズムを講究する。情報論理では計算機科学の基礎となる記号論理に関して講義を行う。命題論理のコンパクト性、一階述語論理の構文と意味、エルブランの定理、一階述語論理の完全性、チューリング機械、原始帰納的関数、一階の算術、ゲーデルの不完全性定理を扱う。言語処理系論では高級プログラミング言語で記述されたソースプログラムをオブジェクトプログラムへ翻訳するコンパイラを中心とした言語処理系について学ぶ。計算機構成法では冬学期に実施するプロセッサ・コンパイラ実験でプロセッサを設計する際に必要なアーキテクチャの基礎と、プロセッサ高速化技法を学ぶ。

冬学期科目である知能システム論では人工知能の基本的な技法である探索手法と問題解決、知識表現と推論、学習、分散人工知能および言語理解を扱う。言語モデル論ではプログラミング言語に現れる基本概念と理論基盤を学び、プログラミング言語を高い立場から理解することを目指す。実際のプログラミング言語への橋渡しとして OCaml のほかに Scala や Prolog を取り上げる。計算量理論では問題をコンピュータで計算によって解くときの本質的な計算量について講究する。決定性 / 非決定性 Turing 機械、クラス P/NP/PSPACE、単項式時間還元、Cook-Levin 定理、NP 完全性などを扱う。連続系アルゴリズムではデジタルな機械である計算機で、連続な量の表現や演算と数値計算アルゴリズムについて講義する。コンピュータネットワークでは Ethernet や Bridge, Spanning Tree について述べ、Layer-3/4 に関して TCP/IP を中心に経路制御や IPv6, TCP のアルゴリズムを扱う。

■ 4 年夏学期

4 年夏学期は必修科目としてコンピュータグラフィクスを学ぶとともに、各研究室における研究の最先端に触れる選択科目を 3 科目以上履修する。コンピュータグラフィクス論では 3 次元コンピュータグラフィクスの基本技術、図形の描画と座標変換、3 次元幾何モデル、曲面の表現形式およびその表示、隠面消去アルゴリズム、陰影表示技法について講義する。選択科目については字数の都合により割愛する。情報科学科ホームページを参照されたい。

■ 4 年生冬学期

4 年生冬学期は、情報科学科における教育の総仕上げとして学科内研究室に配属され卒業論文に取り組む。同時に、卒業論文を英語で作成するための基礎を必修科目である論文構成法で習得する。



■ 情報科学科の実験風景

■ 特徴のある実験

情報科学科における学習の中心のひとつが系統だった実験である。3 年夏学期には、ハードウェア実験で論理回路構成法、最適化方法を書き換え可能な LSI (FPGA) を用いて学習し、システムプログラミング実験ではコンピュータをコンピュータらしく動かす根源であるオペレーティングシステムを使い、またその部分を作り上げることで理解を深める。論理・関数型プログラミング実験では理論的裏付けがしっかりし、生産性の高い言語である Prolog (Lilfes) 言語と ML (Ocaml) 言語を用いたプログラミングを行う。論理・関数型言語が自由に使えるようになることは、将来のプログラミングへの深さと幅を加えるものである。

3 年冬学期に実施するプロセッサ・コンパイラ実験は情報科学科における学習の華である。学生が自ら設計した命令セット、アーキテクチャを大規模 FPGA を用いてプロセッサとして実現し、そのプロセッサに対するコンパイラを作成することにより、情報システムをゼロから作り上げる経験、コンパイラを完成させる経験を得る。実験の最後に、作り上げたシステムの速度を競う競技会を行い、ソフトウェアとハードウェアが協調した高速化技法を競う。

■ おわりに

情報科学科における教育は、世界のトップレベルのコンピュータサイエンスの基礎力と展開能力を学生全員が身に付けることを目的とし、全教員が一丸となって目的達成のために努力している。情報科学科で 2 年半学ぶ内容の密度、レベルは学部教育だからこそ実現できるものであり、大学院や就職してから同じことを学ぶことは非常に困難である。将来の職業として情報を考えるならば、ぜひ情報科学科で真の実力を身に付けましょう。

参考：<http://www.is.s.u-tokyo.ac.jp/appli/curriculum.html>

情報科学科のカリキュラム紹介ページ

ミドリムシの祖先は「アカムシ」だった?

丸山 真一郎 (元生物学専攻 博士研究員^注)
野崎 久義 (生物学専攻 准教授)

長い研究の歴史をもちながらも、まだその進化過程に謎の多いミドリムシ。今回、われわれが独自に開発した遺伝子解析法を用いてスーパーコンピュータでミドリムシのゲノム情報を解析したところ、緑藻由来の「緑色」の葉緑体をもつミドリムシが、実は紅藻由来葉緑体をもつ別の生物からも「紅色」の遺伝子を取り込んで進化してきた「ハイブリッド生物」であることが示された。本研究は、われわれヒトを含む真核生物のゲノムが、他生物からの遺伝子伝達や細胞内共生などを経て複雑な進化を遂げる過程を理解する上で重要なモデルとなると考えられる。

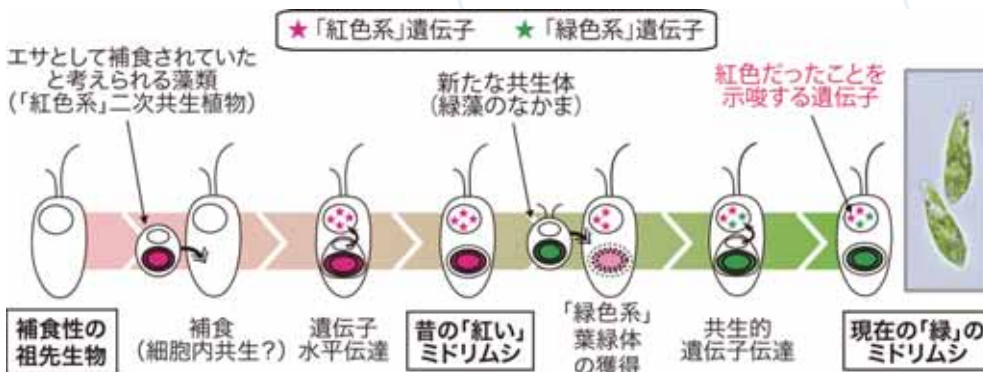
太古の地球において、ある真核生物が光合成をする細菌（現在のシアノバクテリアに近縁な種）を細胞内に共生させること（一次共生）に成功し、緑藻（およびそこから派生した陸上植物）や紅藻などが誕生した。ミドリムシはさらにこの緑藻の仲間を細胞内に共生させて「緑色」の葉緑体をもつに至ったため、二次共生植物とよばれる。地球上の全光合成量の約半分を担うと言われる藻類は、多様な海藻、淡水藻、普段われわれが目にする陸上植物を含めさまざまな系統へと進化してきたが、これらの複雑な進化の過程はいまだに不明な点が多い。

われわれは、ダルハウジー大学（カナダ）、神戸大学、ハインリヒ・ハイネ大学（ドイツ）との共同研究で、ミドリムシ（学名 *Euglena gracilis*）の細胞核のゲノム情報を対象にして、東大医科学研究所のスーパーコンピュータを使った大規模分子系統解析プログラムを独自に構築し、遺伝子を進化的な由来ごとに振り分ける解析を行った。その結果、ミドリムシの（祖先的原生動物に由来する）核ゲノムには、緑藻のもつ遺伝子と類似性をもつものだけでなく、紅藻に由来する葉緑体をもつ二次共生植物と進化的に起源が近いと考えられる遺伝子が複数見つかった。この中には、現在の「緑色」の葉緑体を獲得する以前の、藻類を餌として補食していた祖先生物の時代からゲノム中

に保存されてきたと考えられる遺伝子も含まれていたことから、おそらくこれらの遺伝子は餌の藻類から祖先生物の核ゲノム中へと移行すること（遺伝子水平伝達）により獲得されたと考えられる。

「紅色系」遺伝子をもたらしただけの藻類が単なる餌以上の存在だった可能性もある。まだ緑藻由来の葉緑体を獲得する（「緑色」になる）前の進化段階にあった祖先生物は、「紅色系」藻類を細胞内に維持し、あたかも現在の「紅色系」二次共生植物のようにふるまう「紅い」ミドリムシ（『アカムシ』）だったのかもしれない。そして、この『アカムシ』が緑藻のなかまを細胞内に取り込んで、「紅色」から現在のミドリムシのような「緑色」の藻類へと進化を遂げたのかもしれない。こうした中間的生物はまだ報告されていないが、今後より多くの新規系統を探索し、そこから得られたゲノムを解析することで、詳細な進化史が明らかになることが期待される。静的なゲノム情報からダイナミックな進化現象を読み解くことは、自然界の多様性を真に理解するための生物学の新たな挑戦である。『アカムシ』の探求はその第一歩であり、まだ始まったばかりだ。本成果は S. Maruyama *et al.*, *BMC Evolutionary Biology* 11, 105 (2011) に掲載された。

(2011年4月19日プレスリリース)



注) 現所属: ダルハウジー大学 (カナダ) 博士研究員

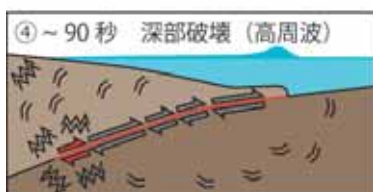
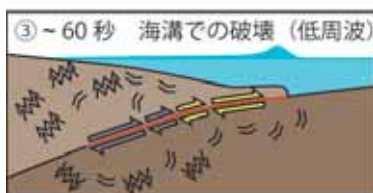
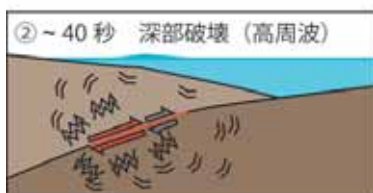
ミドリムシの進化過程を表すモデル図。祖先生物が「紅色系」遺伝子と「緑色系」葉緑体を獲得したことにより、現在の複雑なゲノムが進化してきたと考えられる。

東北沖巨大地震はどのような現象だったのか？

井出 哲 (地球惑星科学専攻 准教授)

2011年3月11日の東北沖地震はマグニチュード9という日本史上最大の地震であり、広範囲での揺れと巨大な津波によって東日本大震災を引き起こした。地震の源は、海底下の岩盤中に生じた破壊すべりである。本研究ではその破壊すべりがどのように進行したのかを世界各地の地震波データを用いて解明した。その結果からは超巨大地震ならではの特殊性がみえてきた。

今回の研究では全世界のデジタル地震観測網で観測された地震波記録と、「経験的グリーン関数法」という地震波解析法を用いた。この手法では小さい地震の地震波を合成して大地震の地震波と比較することにより、大地震の破壊すべりの時間空間分布を推定する。分析により、破壊すべりは次のように進行したことがわかった。①最初数秒の初期破壊(低周波)、②プレート境界深部、陸地方向へ向かった破壊すべり(約40秒後まで)、③一番浅い部分(海溝)を一度に断ち切るような大きな破壊すべり(約60秒後)、④再びプレート境界深部、陸地方向へ向かった破壊すべり(約90秒後まで)。破壊すべりはさらに150秒後くらいまで続いたが、その全体に占める割合は小さい。この4つのフェーズのうち①と③は主にプレート境界浅部、②と④は深部で起きた。



東北沖巨大地震の破壊プロセスを特徴付ける4つのフェーズ

地震に伴う災害は主に津波によって引き起こされた。その津波を引き起こしたのが③の海溝を断ち切るような破壊すべりである。破壊すべりが地下深部から地表に向かって進行し地表に現れるとすべり量が増幅される。さらに地表に現れた直後に再び深い方へ向かって破壊すべりが伝播する。これらの現象は過去に数値計算で理論的に予想されていたが、今回上記③から④への転換として実際に観察された。数値計算ではさらに、すべり量が増幅され、境界面の応力が動摩擦レベルより減少すること(ダイナミックオーバーシュート)が予想される。これも東北沖地震後の奇妙な現象として現れた。ふつう沈み込み帯の地震ではプレート境界をはさんで上盤が下盤に対して跳ね上がる(逆断層地震)。その反対、上盤が下盤に対してずり落ちるような地震(正断層地震)はまず起きない。にもかかわらず東北沖地震の直後、3月12日と14日に正断層地震が2つ発生した。地震によって境界面の応力状態が反転したことを示唆する。

東北沖地震では③のフェーズが重大であったが、奇妙なことに日本列島で観測された地震波を調べると、特に体に感じるような高周波の地震波は②と④の深部の破壊すべりからしか放射されなかったと分かる。海溝近傍での最大のすべりからはこのような地震波はあまり放出されず、その意味で「静かな」破壊すべりだったといえる。東北では過去にもプレート境界浅部で「静かな」破壊すべりと巨大津波を伴った1896年明治三陸地震が知られている。いっぽうで1978年宮城県沖地震は高周波地震波も励起したふつうの地震であった。このすべりの性質の違いは境界面の摩擦特性と応力場の特徴を反映したものであろう。ただし両者が互いに影響するかもしれないで起きる地震の振る舞いは大きく異なり、東北沖地震はこの両者の相互作用が顕著であった。今後、沈み込むプレート境界での地震の発生パターンを予測する際には、このような性質の違いを考慮する必要がある。本成果はS. Ide, A. Baltay, and G. C. Beroza, *Science*, 332, 1426 (2011)に掲載された。

(2011年5月20日プレスリリース)

細胞内の交通網はどのように整備されたのか

海老根 一生 (生物科学専攻修了^{注1)})
上田 貴志 (生物科学専攻 准教授)

真核細胞のオルガネラ（細胞小器官）の間では、小胞や小管を介して物質のやりとりがさかんに行われている。この仕組みは、自動車などを介した交通の仕組みになぞらえ、膜交通とよばれる。膜交通経路網は、それぞれの生物の体制や生活様式に応じて多様化していることが知られているが、この多様性がいかにしてもたらされたのかは不明であった。われわれは、モデル植物であるシロイヌナズナを用いて研究を行い、植物が進化の過程で独自に獲得した膜交通経路を発見するとともに、この経路が塩ストレス耐性に関わることを明らかにした。

真核細胞の細胞内には色々なオルガネラが存在しており、それらの間は膜交通により結ばれている。それぞれの都市がその歴史や目的に応じて独自の交通網を整備してきたのと同様に、この膜交通経路網やオルガネラの働きも、生物ごとに多様化していると考えられている。膜交通において機能する基本的な分子自体は、真核生物においてひじょうによく保存されている。例えば RAB とよばれる分子は、オルガネラ間の輸送を仲介する輸送小胞を目的地のオルガネラにドッキングさせる働きをもつ。細胞内のオルガネラ間を結ぶさまざまな輸送経路では、それぞれ異なる RAB が機能していることから、この RAB をコードする遺伝子の増加とそれに続く機能の多様化が、膜交通経路の多様化のために必要であったと考えられる。

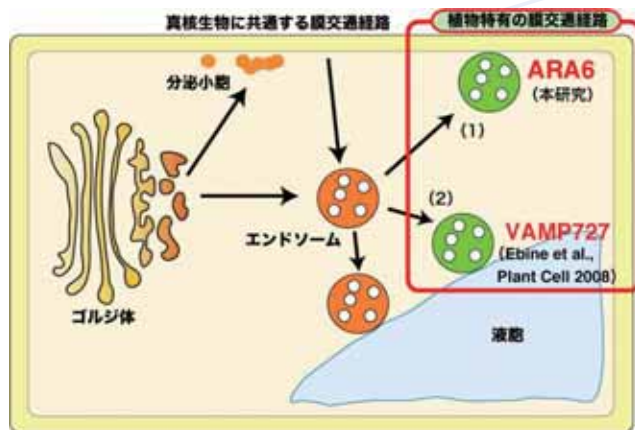
動物の細胞では、RAB5 という RAB の仲間が、エンドサイトーシス^{注2)}のさまざまなステップで重要な働きを担っている。植物にも、動物の RAB5 とよく似た分子（保存型 RAB5）が存在し、動物の RAB5 と共通の働きを担っていることが知られている。いっぽうでわれわれは、独特の構造をもつ変わった RAB5 の仲間（ARA6 グループ）が、植物にのみ存在していることを明らかにしている。つまり、植物は 2 種類の RAB5（保

存型 RAB5 と ARA6 グループ）をもっているのである。

ARA6 グループは、植物が陸上化したころに誕生したと考えられ、ARA6 の獲得に伴い、植物細胞内に新たな膜交通経路が誕生したと推測される。この新たな膜交通経路の詳細を明らかにするため、われわれは遺伝学的、および生化学的な手法を駆使して、この ARA6 の働きをシロイヌナズナを用いて徹底的に調べた。その結果、植物の保存型 RAB5 がエンドソームから液胞への輸送経路を制御しているのに対し、ARA6 はエンドソームから細胞膜（または細胞外）へと物質を輸送する経路で働いていることを突き止めた（図）。エンドソームから細胞膜への輸送経路は動物にも存在するが、植物は動物とは異なる仕組みで類似の輸送経路を開拓していたのである。

では、この輸送経路は植物のどのような生命現象に関わっているのだろうか。ARA6 の機能を壊したり活性化したりしたシロイヌナズナは、通常の栽培条件では野生型のシロイヌナズナと同じ表現型を示した。しかし、それらを塩分の高い条件で生育させると、ARA6 の機能を壊したものは塩ストレスに弱くなり、活性化したものは耐塩性を獲得した。このことから、ARA6 が関わる膜交通経路が、植物が環境ストレスに応答するさいに重要な役割を担っていることが判明した。植物は陸上に進出するに当たりさまざまなストレスに対し耐性を獲得する必要があったと考えられる。ARA6 グループの誕生が植物の陸上化の時期と重なることから、ARA6 が関わる輸送経路を獲得したことにより、植物は陸上の環境に対しより高い適応能力を獲得できたのかもしれない。本研究成果は、K. Ebine *et al.*, *Nature Cell Biology* 13, 853 (2011) に発表された。

(2011年4月1日プレスリリース)



植物が独自に開拓した膜交通経路。本文で述べた ARA6 が関わるエンドソームから細胞膜への輸送経路（図中 1 の経路）のほかにも、植物は独自の輸送経路を獲得している。VAMP727 は、ARA6 と同様に植物が進化の過程で独自に獲得した膜交通制御因子であり、エンドソームから液胞への新規輸送経路（図中 2 の経路）の開拓に寄与した (K. Ebine *et al.*, *Plant Cell*, 2008)。

注 1) 現所属：国立感染症研究所寄生動物部

注 2) 細胞の内部から細胞外へと物質を輸送する仕組みをエキソサイトーシスとよぶのに対し、細胞の外部から細胞内へと物質を輸送する仕組みをエンドサイトーシスとよぶ。細胞内に取り込まれた物質は、エンドソームとよばれる細胞小器官へと運ばれ、そこからさらに最終的な輸送場所へと運ばれる（液胞／リソソームなどの分解系オルガネラへ運ばれ分解されるものもあれば、再び細胞表面や細胞外へと戻されるものもある）。

緑藻の光の好き嫌いを決める細胞内シグナル

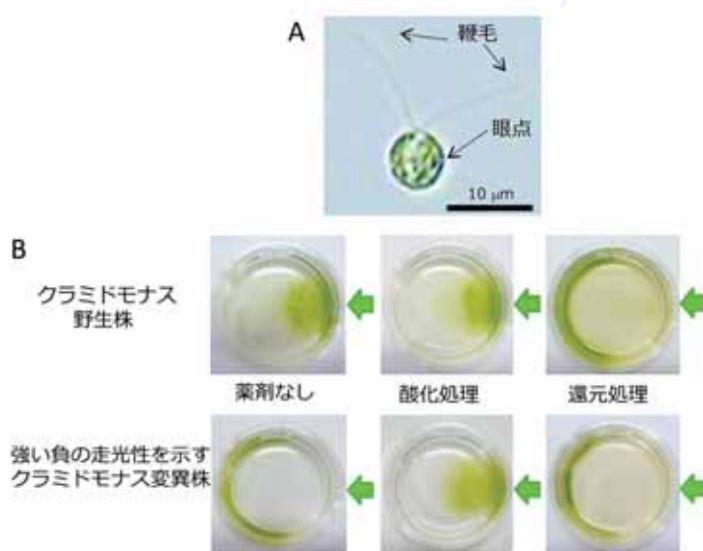
若林 憲一 (生物科学専攻 助教)

◆◆ 単細胞緑藻は、鞭毛とよばれる毛状の運動器官を巧みに操って水中を泳ぎまわり、光源に向かったり (正の走光性)、光源から遠ざかったり (負の走光性) できる。走光性の正負を切り替えられることは、藻類が生存に適した光環境に移動するために重要だが、その切り替えのしくみは分かっていなかった。われわれは細胞内のレドックス (酸化還元) 状態に着目し、これを人為的に変化させる実験によって、レドックス状態の変化が走光性の正負切り替えスイッチになることを突き止めた。

光合成を行う生物にとって、葉緑体が受ける光を「強すぎず、弱すぎない」適切な強さに調節することは生存に必須のしくみである。ミドリムシなどの単細胞緑藻は「走光性」を示して水中を泳ぐが、このとき、光源に向かう「正の走光性」と光源から遠ざかる「負の走光性」を適宜切り替えることで最適な光環境に移動すると考えられている。走光性の正負を切り替える要因として、これまでに光強度が知られていた。(強い光からは逃げ、弱い光には集まる。) しかし、同じ細胞でも、一定強度の光環境下に長時間置くとやがて最初と逆の走光性を示すようになったり、あるいは細胞によって正負がまちまちであったりする。そのため、光強度が正負を一意的に決めるのではなく、細胞内のなんらかの因子が最終的に正負を決めると考えられる。しかし、そのような因子は長らく謎であった。光合成活性が走光性の正負に影響を与えるという過去の知見があったが、具体的に光合成がどのようにして影響を与えているかは分かっていなかった。

多くの細胞では、タンパク質や脂質を酸化変性から守るため、細胞質を適度に還元的に保つレドックス (reduction-oxidation, 酸化還元) 恒常性が機能している。しかし、外部環境の影響や光合成、呼吸の活性変化によって、一過的に酸化あるいは過剰に還元的になることがあり、細胞内ではそれをシグナルとしてさまざまな生理活性が調節される。この現象は「レドックス調節」とよばれ、近年注目を集めている。われわれは光合成が細胞内のレドックス状態を変化させる大きな要因であるという知見に基づいて、この「細胞内レドックス状態」が走光性の正負を決定しているのではないかと考えた。そこで、走光性研究の良い材料である単細胞緑藻クラミドモナス (図A) を用いて、細胞内のレドックス状態を酸化的または還元的に偏らせる実験を行った。具体的には、活性酸素種 (H_2O_2 など) を用いて酸化的にし、逆に活性酸素種消去剤 (ジメチルチオ尿素など) を用いて還元的にした。その結果、細胞内が酸化的になると正、還元的になると負の走光性を示すことが分かった (図B)。また興味深いことに、強い負の走光性を示す突然変異株でも同じ結果が得られた。簡単な実験ではあるが、このように走光性の正負を自由に操ることができる条件が見出されたのは今回が初めてである。クラミドモナスが細胞質レドックス状態をどのようにモニターしているかなど、分子レベルの機構解明が今後の課題である。なお、今回の結果を応用すれば、ポンプや遠心機を使わずに光だけで細胞を簡便に濃縮することができる。藻類の基礎研究や、軽油生産藻によるバイオ燃料生産の工業分野に貢献する可能性がある。本研究は K. Wakabayashi *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 108, 11280 (2011) に掲載された。

(2011年6月21日プレスリリース)



A: 単細胞緑藻クラミドモナス (和名コナミドリムシ)。眼点で光を感じ、2本の鞭毛を平泳ぎのように動かして水中を泳ぐ。
B: クラミドモナスの野生株と、強い負の走光性を示す変異株の培養液をディッシュにいれ、右 (緑の矢印) から光を当てた。どちらの株も、酸化処理をすると正、還元処理をすると負の走光性を示す。



「リー群の離散部分群」

金井 雅彦 (数理学研究科 教授)

代数構造と幾何構造、これらを共に有するのがリー群である。少々乱暴な言い方をすればこうなろう。最も簡単な例はユークリッド空間 \mathbb{R}^n である。とくに $n=1$ の時には直線、 $n=2$ の時には平面に他ならない。ユークリッド空間はもちろん幾何学の対象である。いっぽう、 \mathbb{R}^n の要素(点)は n 個の実数の組、すなわち n 次元ベクトルであり、そのふたつの要素に対し和が定義される。これが \mathbb{R}^n の代数構造である。より面白い例として、行列群が挙げられる。たとえば、行列式の値が 1 の実 n 次正方行列全部の集合 $SL(n, \mathbb{R})$ はリー群である(代数構造としては行列の積をとる)。物理にもしばしば登場するリー群であるが、その最大の強みは微積分を利用して代数構造を記述できる点にある(それを可能た

らしめるのは結局のところ幾何構造である)。

次にリー群の離散部分群について、例をとり説明しよう。ユークリッド空間 \mathbb{R}^n の要素であってその座標が整数であるものの集合を \mathbb{Z}^n と書く。和に関し \mathbb{Z}^n は閉じている。このようなものを部分群という。とくに、 $n=1, 2$ の場合には \mathbb{Z}^n を \mathbb{R}^n の中に図示することも可能である。部分群 \mathbb{Z}^n が \mathbb{R}^n の中に離散的に分布している様子が見てとれよう。このようにリー群の中に離散的に分布している部分群を離散部分群とよぶ。行列式の値が 1 であり、しかも成分がすべて整数であるような行列の集合 $SL(n, \mathbb{Z})$ は、 $SL(n, \mathbb{R})$ の離散部分群である。

リー群の離散部分群であって、リー群全体に「一様」に分布しているものを、

特に格子とよぶ。代数学に限らず、幾何学、力学系理論など、それが関わる分野は数多い。1960 年前後から格子に対する研究が活発に行われるようになり、その後わずか十年少々の間にそれに対する理解は飛躍的に増大した。20 世紀数学の中でも最も華々しい出来事のひとつではなからうか。当時得られた特に重要な成果のひとつが、G. D. モストウ (George Daniel Mostow) の強剛性定理である。 $SL(n, \mathbb{R})$ などの非コンパクト単純リー群はその格子で完全に決定されることを(妥当な仮定のもと)強剛性定理は主張する。離散が連続を統制できることを保証するのがモストウの定理であると解釈することもできる。



「高調波」

酒井 広文 (物理学専攻 准教授)

振動現象の基本振動数 ω をもつ成分に対し、その整数倍の振動数 $n\omega$ (n は 2 以上の整数) をもつ成分を「高調波」とよぶ(ここでは簡単のため角振動数 ω を単に振動数とよぶ)。また、基本振動数 ω をもつ成分を基本波とよび、振動数 $n\omega$ をもつ成分を第 n 高調波とよぶ。周期性をもつ任意の振動波形は基本波とすべての高調波成分を含むフーリエ級数展開で表すことができ、その係数はフーリエ解析の手続きにより決定される。非線形特性をもつ電子回路に正弦波信号を入力すると、その振動数の高調波成分を含む歪み波が発生する。音の場合はとくに、基本波を基本音、第 n 高調波を n 倍音とよび、2 倍の振動数までの範囲をオクターブとよぶ。楽器が奏でる音(楽音)が楽器ごとに異なる音色をもつのは楽器ごとに倍音の含まれ方が異なるためである。

いっぽう、光の高調波は 1960 年にルビーレーザーが発明された翌年にルビーレーザー光を集光した水晶中からの第 2 高調波の発生が報告され、1967 年には

希ガス中からの第 3 高調波の発生も報告された。とくに注目すべき現象は、超短パルス高強度レーザー光を気体原子や分子に照射したときに観測される、元のレーザー光の波長の数十分の一から数百分の一(反転対称性をもつ媒質中では奇数分の一)の波長をもつ「高次高調波」の発生である。高次高調波発生は、高強度レーザー電場と原子分子との相互作用に特有な高次の非線形光学効果のひとつであり、高調波強度がほとんど変化しない広いプラトー領域を伴うことを特徴とする。高次高調波の研究の歴史は 1987 年まで遡り、当初は高次高調波発生の物理過程の解明と元のレーザー光と同等以上のコヒーレンス(光の位相が揃った可干渉性のよい性質)を有する波長可変コヒーレント極端紫外～軟 X 線光源開発を目指した研究が進められた。1993 年には高次高調波の発生メカニズムを説明する 3 ステップモデル(理学のキーワード第 23 回「3 ステップモデル」参照)が提案された。また、高次高調波の波長は水中の生体分子の X 線イメージング

を可能とする「水の窓」領域(2.3 nm ~ 4.4 nm)に達している。

21 世紀に入り、高次高調波に関する研究は大きく分けて二つの潮流となります。ひとつはアト秒パルス(1 アト秒 = 10^{-18} 秒)の発生(理学のキーワード第 32 回「アト秒パルス」参照)とその応用である。アト秒パルスの発生は、波長が短く(たとえば波長 30 nm の光の 1 周期が 100 アト秒である)広いバンド幅(超短パルスの発生にはそのパルス幅の逆数程度の広いバンド幅が必要である)を利用できる高次高調波を用いる研究が主流となっており、最近 77 アト秒パルスの発生が報告された。もうひとつの潮流は、配列あるいは配向した気体分子中から発生する高次高調波の観測から分子の構造と超高速ダイナミクスを明らかにする研究である。筆者の研究室では、気体分子の配列・配向制御技術の高度化を進めるとともに、後者に関する研究を進めている。



「晩期型星」

宮田 隆志 (天文学教育研究センター 准教授)

夜空に輝く恒星は多様であり、その性質は主に星の質量と誕生してからの進化の度合いによって決まる。恒星の分類は20世紀初頭に確立したハーバード法を基礎としている。その中で星の温度が比較的高くヘリウムや水素のラインが目立つものを早期型、対して温度が低くスペクトル上に金属の吸収線が多数見えるものを晩期型とよぶ。晩期型の星は、中心部で安定した水素燃焼をしているものの質量がもともと低いため表面の温度が低い矮星と、中心部での水素燃焼を終え外層が大きく膨らんだ巨星とに分かれる。銀河系の大半の星は晩期型矮星であり、太陽もその仲間である。また太陽の8倍以下の質量の恒星は進化末期にすべてこの晩期型巨星段階を通ると考えられている。その意味で晩期型星はわれわれに最も馴染みある恒星種だといえる。

従来、恒星といえば望遠鏡を通して

みても点にしか見えない存在であったが、近年の観測技術の発達は星そのものの空間分解も可能にしつつある。たとえばヨーロッパ南天天文台の赤外線干渉計VLTiでは0.01秒角を切る空間解像度で晩期型巨星表面の構造をとらえている。このような観測によって晩期型巨星の少なくとも一部は平坦な球面ではなく、非軸対称な姿をしていることが分かってきた。太陽もやがてはこのような巨星へ進化すると考えられており、この結果は太陽がどのように進化していくかを探る上でも興味深い。

晩期型巨星は宇宙空間にあまねく存在する星間ダストの供給源としても重要である。特にわれわれの住む天の川銀河ではダストの多くはこれら晩期型星が供給していると考えられている。このようなダスト形成史を探るには低温度(<1,000 K)領域のトレーサーである中間・遠赤

外線が有用である。日本の赤外線観測衛星「あかり」は晩期型巨星から放出され広がっていくダストシェルの直接撮影を行い、シェルが幾何学的に薄い球殻のような構造をしていることを明らかにした。これは質量放出現象が短期間に間欠的に行われていることを示唆しており、恒星から宇宙空間への物質還元を考えるうえで重要な結果である。将来の衛星計画や地上望遠鏡計画でより高感度かつ高解像なデータが得られれば、宇宙の物質循環がどのように行われているかについてより詳しい描像が得られるものと期待できる。

理学系研究科では著者の研究室や木曾観測所、天文学専攻の尾中研究室で観測研究が行われている。またダスト形成の観点から地球惑星科学専攻の永原研究室でも実験研究が進められている。



「超高压」

船守 展正 (地球惑星科学専攻 准教授)

地球や惑星の内部は、探査機を送り込むことのできない超高压高温の世界である。その圧力温度は、地球中心で360 GPa・6000 K、木星中心で5000 GPa・20000 Kにも達する(1 GPa ≒ 1万気圧)。与えられた圧力温度環境下において、物質はギブスの自由エネルギー $G = U + PV - TS$ を最小化するように振る舞う(U : 内部エネルギー, P : 圧力, V : 体積, T : 温度, S : エントロピー)。地球表面では U が支配的であるが、地球や惑星の内部では PV 項 (と $-TS$ 項) の寄与が重要になる。例えば、ケイ酸塩中のケイ素は、地球の上部マントルでは4個の酸素に囲まれた4配位の状態であるのに対し、下部マントルでは6個に囲まれた6配位になる。これは、結合エネルギー的に有利な sp^3 混成軌道から充填率の高い構造をとる上で有利な

sp^3d^2 混成軌道への変化(圧力誘起相転移)として理解できる。木星内部では、流体水素が分子解離して金属化し、ダイナモ効果によって強力な磁場を作り出しているものと考えられている。

超高压科学の研究は、20世紀初頭のブリッジマン教授(P. W. Bridgman; 1946年ノーベル物理学賞受賞)による10 GPa級の高圧発生装置の開発にさかのぼる。20世紀後半には、ダイヤモンドアンビル装置が開発され、改良を重ねられた結果、現在では地球中心を超える400 GPa領域までの静的圧縮が可能になっている。さらに高い圧力の発生もレーザー衝撃などの動的圧縮によって可能である。

超高压の静的な発生は、小さな面積に大きな力を加えることで実現される。高圧装置内の微小試料に対する測定に威力

を発揮してきたのがシンクロトロン放射光X線である。放射光源の高輝度化により、現在では結晶だけでなく、液体やガラスの相転移まで観察することが可能になっている。さらに、次世代放射光源の計画が実現すれば、エミッタンスやコヒーレンスなどの光の質の向上も見込まれる。その特色を活かした技術開発が進めば、物質の平均的な構造(規則性を持つ構造)だけでなく、詳細な構造のより直接的な測定が可能になるなど、飛躍的な発展が期待される。

筆者の研究室では、放射光実験のほか、ミュオン実験などに取り組んでいる。理学系研究科では、中性子実験(地殻化学実験施設)や計算機による第一原理分子動力学シミュレーション(物理学専攻)など、様々なアプローチで超高压科学の研究が行われている。



「磁性半導体」

福村 知昭 (化学専攻 准教授)

磁性半導体とはその名の通り磁性をもつ半導体で、半導体程度のバンドギャップをもった遷移金属を含む物質である。なかでも最近さかんに研究されているのは、通常の半導体に少量の遷移金属をドーピングした希薄磁性半導体である。少量のドーピングのため母体の半導体のバンド構造が保たれており、空間的に離れた遷移金属のもつ局在スピンの相互作用を(スピン1/2をもつ)キャリアが交換相互作用により媒介することで強磁性を生じる。このような強磁性を示す半導体は、電子のもつ電荷とスピンの自由度の両方を用いて高機能な電子デバイスを実現するスピントロニクスなどの分野への活用が期待される。たとえば、不揮発な情報であるスピンを磁場ではなく電気的手段で制御することができる。しか

し、少量の遷移金属ドーピングでは交換相互作用の大きさも限られており、強磁性転移温度(キュリー温度)は最も高いとされていたMnドーピングGaAsでさえ室温を約100℃下回っていた。

酸化物半導体は大きなバンドギャップをもつ。すなわち可視光に透明だが良好な電気伝導性を示すため、液晶ディスプレイ内部の透明トランジスタなど透明電子デバイス材料として活用されている。その大きなバンドギャップは酸化物半導体中のキャリア(主に電子)の有効質量が重いことを意味する。したがって、酸化物半導体に局在スピンをドーピングすれば、キャリアと局在スピンの大きな交換相互作用による高温強磁性の発現が期待でき、透明磁石材料の実現の可能性がある。実際に、Coをドーピングした酸化物

半導体TiO₂の室温強磁性が2001年に発見された。最近、電界効果を用いたキャリア量の増減による室温強磁性の制御が実現し、室温強磁性をキャリアが媒介していることが明らかになり、室温動作スピントロニクスへの道が開けた。しかし、少量のCo濃度で約400℃ものキュリー温度が発現する理由は今も明らかではない。

本研究科では化学専攻の長谷川哲也教授の研究室で、われわれがCoドーピングTiO₂の薄膜試料を作製して基礎物性やデバイス応用に関する研究を行っている。物理学専攻の藤森淳教授の研究室では、放射光設備を活用した分光実験研究によりCoドーピングTiO₂の室温強磁性の発現メカニズムに迫る研究を行っている。



「代謝, メタボローム」

有田 正規 (生物化学専攻 准教授)

代謝とは細胞内における物質生産やエネルギー生成をつかさどる物理化学反応の総称で、一般に新陳代謝とよばれるプロセスと同じである。代謝によって生成・消費される物質を代謝物とよぶ。メタボローム(metabolome)とは「代謝物の総体」という意味で、メタボリズム(metabolism)という英語表記と総体を意味する接尾辞のオーム(ome)からなる造語である。また、代謝物の総体をそれらの生成・消費・化学変化を含めて研究する学問がメタボロミクス(metabolomics)である。定義からはDNAなどの核酸やタンパク質もすべてメタボロームに含まれるが、それぞれゲノム(gene + ome)、プロテオーム(protein + ome)とよばれている。メタボロームという場合、通常はペプチドより小さい分子(分子量50~1000)、例

えば糖・有機酸・核酸・脂質などを対象とする。

代謝の研究は古くて新しい。酵素やDNAの正体が明らかになったのは20世紀に入ってからだ。アミノ酸のアスパラギン酸がアスパラガスから抽出されたのは1806年である。その後、天然物化学や薬学において多くの代謝物が発見・研究された。1930年代以降、細胞内物質の生成・消費プロセスが精力的に調べられ、現在は3000を超える酵素反応のパターンや、その生化学ネットワークが知られている。それにもかかわらず、細胞内にどのような代謝物がどれだけあるのかは、大腸菌においてすら分かっていない。個々のバクテリアが3000程度、植物界全体で20万種類などと適当な憶測もされているが、代謝物の数え方すら統一されていないのが実情である。

ゲノムやプロテオームはそれぞれ核酸、アミノ酸という決まった構造のポリマーを扱う学問だが、メタボロームは物理化学的性質が様々に異なる対象を扱う。そのため、単一の測定機器や手法で全体像を把握できない。最近では、細胞内の代謝物をできるだけ幅広く正確に測定する機器開発と、複数の測定機器による計測結果を統合する技術開発が注目されている。筆者の研究室では、データベース構築を含め代謝物の同定技術を研究テーマにしている。同定できる代謝物数は現在数百に過ぎないが、これを数千にスケールアップできれば、ゲノム・プロテオーム情報と並んで生命現象を解明するための情報基盤になるだろう。

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
2011年7月25日付学位授与者 (1名)			
論文	化学	岩崎 正興	Fe/ゼオライト触媒を用いた NH ₃ 選択触媒還元による窒素酸化物除去 (※)
2011年7月29日付学位授与者 (1名)			
課程	生化	多田 健志	染色体凝集因子コンデンシンのクロマチン局在機構の研究

人事異動報告

異動年月日	所属	職名	氏名	異動事項	備考
2011.7.31	化学	助教	縫田 知宏	辞職	
2011.8.31	化学	助教	SCHNEIDER UWE	辞職	
2011.9.1	化学	特任助教	YOO WOO JIN	採用	

理学部紹介用しおりの新シリーズ

広報委員会

理学系研究科・理学部広報委員会では、前回の「ノーベル賞受賞記念しおり」に引き続き、東京大学を見学に来る中高校生を対象に、理学部 10 学科の周知を図るため、「理学部 10 学科イラストしおり」と「理学部各学科ゆかりのある教授しおり」を配布することになった。前者では各学科の研究対象をイラストで表現し、後者では各学科の過去の実績・歴史を紹介することにより、理学部新旧のイメージを喚起している。



理学部 10 学科イラストしおり



山川健次郎

会津藩出身で白虎隊に入隊していた。国費留学生に選ばれ、米国で物理学を学んだ。東京大学の教授補を経て、1879 年日本人初の物理学の教授となった。分光器による太陽スペクトルの観測などの研究業績を残した。その後、東京帝国大学、京都帝国大学、九州帝国大学の総長などを務めた。



和田維四郎

若狭国小浜藩の貢進生として開成学校で学び、鉱物学では日本人初の東京大学教授となった。地質調査の必要性を政府に説き、ドイツ人地質学者ナウマンと地質調査所を建議して初代所長となり、鉱山局長も兼務した。また、八幡製鉄所の建設に奔走し、長官を務めた。鉱物コレクションは世界的に有名である。



大森房吉

東京帝国大学地震学講座教授。余震頻度が、時間とともに反比例して減少していく事実の発見(余震の大森公式)、震源距離が初期微動継続時間に比例する事実の発見(震源距離の大森公式)をはじめとして、明治・大正期の地震学に大きな業績を残した地震学者である。



小平邦彦

複素多様体論を創始し、代数幾何・複素関数論・数理物理等に大きな影響を及ぼした。1954 年、日本人として初めてフィールズ賞を受賞、学士院賞・文化勲章・Wolf 賞も受賞した。プリンストン大学教授兼高等研究所研究員、ジョンズ・ホプキンス大学教授、スタンフォード大学教授、東京大学教授を歴任した。

第20回東京大学理学部公開講演会のお知らせ

広報委員会

理学の魅力を伝えるため2002年に始まった東京大学理学部講演会も回を重ねること20回を迎えました。今回は、分子から個体レベルまでの理解を目指す植物学、原子の謎に迫る物理学の最前線を走る研究者による講演に加え、震災を経た社会における基礎科学研究のありようを考えるパネルディスカッションを行います。さらに、講演に先立って、声楽家による音楽会を開催します。

「反物質」早野 龍五（物理学専攻 教授）

「子どもの頃の興味から始めて、実際に植物学者になるまでの話」塚谷 裕一（生物科学専攻 教授）

パネルディスカッション：司会 横山広美（広報・科学コミュニケーション 准教授）

音楽会：菊地美奈（ソプラノ）二期会会員／飯田俊明（ピアノ）／牧千恵子（ヴァイオリン）／ミヤック（アコーディオン）

日時 2011年10月30日（日）13:00～17:30（12:00開場） 中継 インターネット配信を予定。

会場 東京大学本郷キャンパス 安田講堂

主催・問い合わせ先 東京大学大学院理学系研究科・理学部広報室

入場 無料。事前申込不要。どなたでもご参加いただけます。

TEL：03-5841-7585 E-mail：kouhou@adm.s.u-tokyo.ac.jp

定員 700名（当日先着順）

URL：http://www.s.u-tokyo.ac.jp/PL20

あとがき

宇宙で最も多い元素は、言うまでもなく水素で、2番目のヘリウムを飛ばすと、3番目に多い元素は、酸素である。よって水素と酸素が結びついてできる「水」は、宇宙に多い物質のはずで、じっさい宇宙のあちこちから、水分子の回転遷移にともなう波長1.36 cmのメーザー電波が観測されている。とはいえ液体の水

が大量に存在するのは、地球の著しい特徴だろう。人間を含めて生物にとって水は不可欠だが、ありすぎると恐ろしいことになる。3月の大震災・津波に続き、7月末には新潟県で大洪水が、また9月初めには紀伊半島で、台風12号による未曾有の大水害が起きてしまった。先日、行きつけの新潟県南魚沼市を尋ねてみる

と、山肌があちこち地滑りを起こし、川や沢の流路がすっかり変わった場所もあり、コンクリートの頑丈な橋が流されるなど、7月豪雨の爪痕はまだ生々しいものがあつた。水は、多過ぎても少な過ぎても困ってしまう。水分子に炭素原子2個と水素原子4個がくっついたシロモノも、「適量」が難しい。

広報誌編集委員長 牧島 一夫（物理学専攻 教授）

第43巻3号

発行日：2011年9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



メキシコ・ポポカテペトル火山での観測の様子（2008年11月）



イタリア・ストロンボリ火山での観測の様子（2010年5月）

～理学の匠「見えない火山ガスを可視化する」より～