

## 研究会・学会スケジュール

**第20回超高エネルギー宇宙線相互作用に関する国際シンポジウム**  
 20th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions  
 開催日：2018年5月21日(月)～25日(金)  
 開催場所：名古屋大学 野依記念学術交流館  
 主催：名古屋大学宇宙地球環境研究所、名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構  
 共催：東京大学宇宙線研究所  
 後援：国際純粋・応用物理学連合  
 問い合わせ：伊藤好孝 宇宙地球環境研究所 教授  
 isvhcri2018@isee.nagoya-u.ac.jp / 052-789-4319

**第16回国際棘皮動物学会議**  
 16th International Echinoderm Conference  
 開催日：2018年5月28日(月)～6月1日(金)  
 開催場所：名古屋大学 野依記念学術交流館  
 主催：第16回国際棘皮動物学会議組織委員会及び名古屋大学博物館  
 問い合わせ：大路樹生 博物館 教授  
 oji@num.nagoya-u.ac.jp / 052-789-5761

**植物生殖研究の最先端と未来**  
 Frontiers & Future of Plant Reproduction Research  
 開催日：2018年6月10日(日)・11日(月)  
 開催場所：名古屋大学ITbM棟、ES総合館ESホール  
 主催：トランスフォーマティブ生命分子研究所  
 問い合わせ：東山哲也 トランスフォーマティブ生命分子研究所 教授  
 higashi@bio.nagoya-u.ac.jp / 052-747-6404

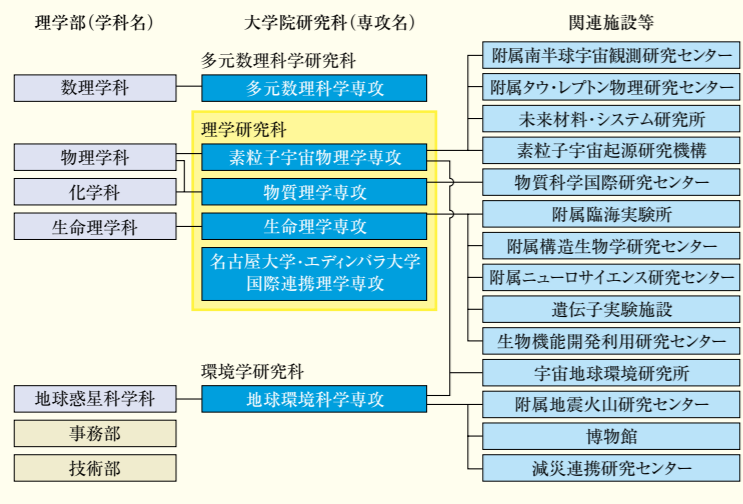
**第25回国際植物有性生殖会議～植物生殖2018～**  
 25th International Conference on Sexual Plant Reproduction  
 -Plant Reproduction 2018-  
 開催日：2018年6月11日(月)～16日(土)  
 開催場所：長良川国際会議場(岐阜県)  
 主催：国際植物生殖研究連盟  
 問い合わせ：東山哲也 トランスフォーマティブ生命分子研究所 教授  
 higashi@bio.nagoya-u.ac.jp / 052-747-6404

**第31回生物無機化学夏季セミナー**  
 開催日：2018年9月13日(木)～15日(土)  
 開催場所：ホテル竹島(愛知県)  
 主催：生物無機化学研究会  
 問い合わせ：愛場雄一郎 理学研究科 助教  
 aiba.yuichiro@i.mbox.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2953

**星間フィラメントパラダイム：その形成・進化と星形成に及ぼす影響**  
 Interstellar filament paradigm: On their formation, evolution, and role in star formation  
 開催日：2018年11月5日(月)～9日(金)  
 開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール  
 主催：名古屋大学大学院理学研究科  
 問い合わせ：大塚修一郎 理学研究科 教授  
 inutsuka@nagoya-u.jp / 052-789-2811

## 組織図

理学部・理学研究科・多元数理科学研究科・環境学研究科(地球環境科学専攻)



## 編集だより

本号では、火山の診断研究と防災教育の最前線特集した。日本では人の命が失われる火山災害が続き、長期的にはカルデラ噴火による国家的破局のリスクすら懸念される。しかし、日本の風土や文化は火山のもたらす恵みとは切り離して語れないのも事実である。理学の新たな観測手段や理論モデルが火山災害のリスクを軽減し、人と火山の共存に資すると信じている。

火山の恵みの1つが温泉であり、そこは生命進化のサンクチュアリでもある。全地球が凍結した約7億年前、生命が生き継いだのが温泉だとも言われる。私の関わる探査機はやぶさ2は目的の小惑星に到着直前だが、この探査には、太陽系形成期の微惑星上にあった温泉での生命材料物質の進化の証拠を得る目的もある。微惑星が合体してオーロラの輝く惑星となり、酵素やヘビが生まれ、やがて温泉につかりクォークまで発想するヒトに至った。さまざまにつながっていく理学—その連鎖を今後も本誌は紡いでゆきたい。(渡邊誠一郎)

## 表紙説明

マグマが運ぶ熱は温泉の熱源となり、大きな火山体は多量の水をたくわえる水源となる。そして火山は独特の美しい風景を見せてくれる。火山と上手につき合うために私たちは火山のことをもっと知るべきだろう。



**理 philosophia** — No.34  
 spring - summer 2018  
 2018年4月25日発行

広報委員 杉山 直(研究科長)  
 阿波賀邦夫(副研究科長・評議員)  
 大隅圭太(副研究科長)  
 糸 健太郎(数理学科)  
 飯嶋 徹(物理学科)※委員長  
 立原研悟(物理学科)  
 宮崎州正(物理学科)  
 荘司長三(化学科)  
 杉山 伸(生命理学科)  
 白石洋一(生命理学科)  
 渡邊誠一郎(地球惑星科学科)  
 齋藤勝行(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2018年10月頃発行の予定です。

制作 株式会社電通  
 編集協力 株式会社エスケイワード  
 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/



名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報誌  
 [理フィロソフィア]  
 spring - summer 2018

34

philosophia

## 特集 「火山を診る」

- 04 — マグマの動きを捉える◇熊谷博之
- 08 — 噴煙の化学組成を利用した火山診断◇角皆 潤
- 11 — 火山学と防災◇山岡耕春
- 02 — 時を語るもの〈丹生 潔博士〉◇中村光廣
- 03 — 理のエッセイ◇岡本祐幸
- 12 — 理の先端をいく◇鈴木孝幸/山田泰之/渡邊智彦
- 18 — 理学部交差点

## 丹生 潔博士 — 原子核乾板があぶりだしたチャーム粒子

丹生 潔博士は世界で初めてチャーム粒子の存在を見出した研究者である。その反応は飛行機で日米を往復し宇宙線反応を記録した原子核乾板中に捉えられ、丹生博士らの解析によりまだ知られていなかった新粒子であることが示された。

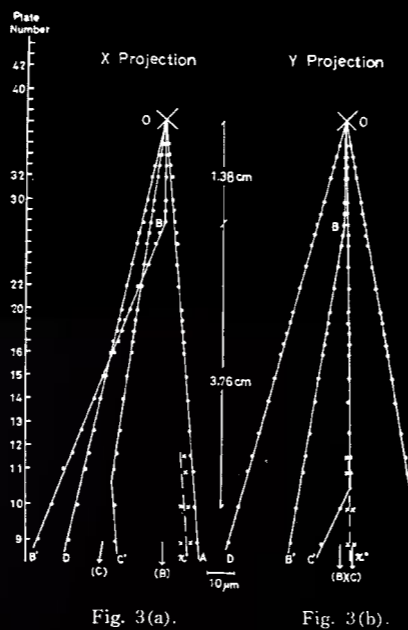
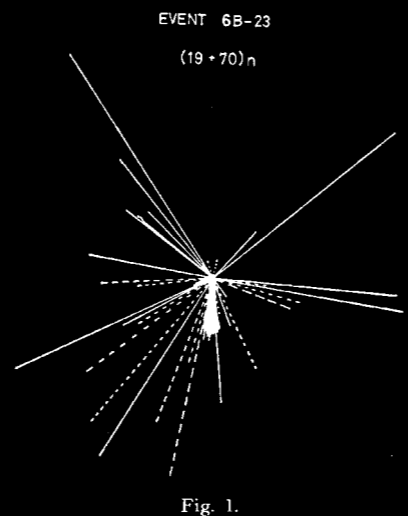
丹生博士の研究対象は、素粒子反応での中間子多重発生の研究であり、新粒子の検出を狙ったものではなかったが、多重発生の研究のために創意工夫された高精度の検出器 (ECC) と、手間のかかる顕微鏡下での緻密な原子

核乾板の解析作業が、チャーム粒子の存在をあぶりだした。

原子核乾板の技術はこの検出をきっかけに名古屋大学で発展をとげ、タウニュートリノの世界初の検出、ニュートリノ振動現象の最終検証をはじめ、今日ピラミッドの未知の空間の検出などの応用研究にもつながっている。

丹生博士はなくなられる直前まで、中間子多重発生の研究をライフワークとされ、論文も執筆されていた。まさに生涯、一研究者でありつづけられた方であった。

(中村光廣 未来材料・システム研究所教授)



に う さいし  
丹生 潔 (1925-2017)  
元名古屋大学理学部教授



◇写真の説明  
ECCは、プラスチックの両面に原子核乳剤を塗布した両面塗布乾板と、炭素板や鉛板などを重ねた検出器。原子核乾板の特長であるサブミクロンの位置精度を生かして高エネルギー素粒子反応から発生する粒子の高精度測定や粒子種の道程を実現した。図は1971年に発表されたチャーム粒子反応。反応点から発生した粒子の中からチャーム粒子の対生成とそれぞれの崩壊をとらえた。上は検出器を組み立てる丹生博士。

## 日本の大学の世界ランキング

岡本 祐幸 物質理学専攻教授



Illustration: Junichi Kishi

日本の大学の世界ランキングがどんどん落ちている。たとえば、U.S.Newsのデータでは、名古屋大学は2011年には世界91位だったが、2018年現在、247位である。また、東京大学は2011年に24位だったが、現在、57位であり、100位以内に入る我が国唯一の大学である。21世紀に入ってから17人(うち6人が名古屋大学関係者)もの日本人がノーベル賞を受賞しているのになぜと多くの人が意外に思うだろう。いい加減な評価だからと無視する人も多い。しかし、なぜそうなのかを考えることも必要ではないか。もちろん、近年の予算削減や大学改革の厳しい環境下で、大学の研究力が伸び悩んでいるという側面もあるだろうが、我が国の大学の底力を考えるとそれだけが理由であるとは考えにくい。

私は、一番の理由は、日本のもつ研究力を海外に発信する努力が足りないためだと考えている。世界ランキングの評価項目の1つに「reputation (評判)」があるからだ。米国の大学では、この「評判」を維持するために、学生への経済援助や広報に努力を惜しまない。また、大学の各研究者も、Google Scholarなどの個人プロフィールを用いて、積極的に自分の研究業績を英語で公開している。学生への経済援助は、日本の実情を考えると簡単ではないが、教員の研究情報発信ならばすぐにでもできそう。先日は、「評判」下落の原因がもう1つあることに気づかされた。国際会議で米国人の研究者と日本の大学のランキング急落について話したときのことである。彼は、即座に「以前は、日本からの博士研究員が多く海外に出ていたが、今ではその数が極端に少なくなっているのが原因です」といった。よく考えると、これこそ「評判」を一番左右するものかもしれない。日本から留学生や博士研究員が海外に行くと、日本の大学でどれほどの教育を受けて来たかを海外の研究者が常日頃評価するわけで、結局、日本の大学の「評判」の良し悪しにつながるのである。だから青年よ、海外を目指せ。

Yuko Okamoto

1956年三重県生まれ。1979年ブラウン大学卒業。1984年コーネル大学大学院修士、Ph.D.の学位を取得。1984-1986年バージニア工科大学博士研究員。1986年奈良女子大学理学部助手(後、助教授)。1995年分子科学研究所助教授(総合研究大学院大学助教授併任)を経て、2005年より現職。専門は生物物理、計算科学。

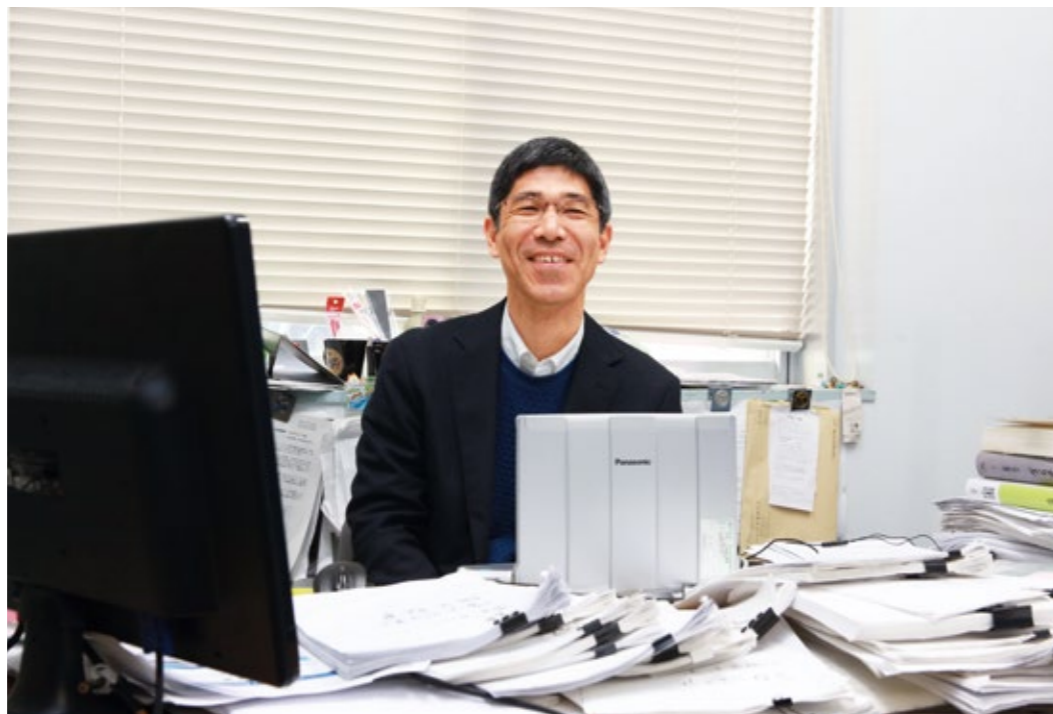
近年、御嶽山や草津白根山で人命が失われる火山噴火が起こっている。

マグマなどの火山性流体が山体や大気に作用して生じるさまざまな現象を研究することは、噴火メカニズムの解明だけでなく、火山活動の監視や予測にもつながっている。

この特集では、地球物理学および地球化学に基づく、火山の状態を診断する最新の研究を解説するとともに、火山災害を軽減する取り組みについても紹介する。

## マグマの動きを捉える

熊谷博之 地球環境科学専攻教授



Hiroyuki Kumagai

1993年名古屋大学大学院理学研究科博士課程中退。1994年名古屋大学にて博士(理学)取得。名古屋大学理学部助手、米国地質調査所客員研究員、防災科学技術研究所主任研究員を経て、2013年より現職。専門は火山地震学と地震発生物理学。

### 火山で発生する地震

マグマとは、融けた岩石と揮発性成分(水や二酸化炭素)から構成される流体である。揮発性成分は、地下深くにおいては融けた岩石の中に溶け込んでいるが、マグマが上昇して圧力が下がってくると気体(ガス)となる。この現象は発泡と呼ばれる。発泡が起こるとマグマの体積は増加する

ので、マグマは軽くなり上昇しやすくなる。それによりさらに発泡が進むという過程により、爆発的な噴火が発生する(図1)。発泡によるマグマ体積の増加やマグマの上昇により、地震の発生や地面の変形、さらにガスの放出といった様々な現象が起こる。これらを捉えることは、噴火を予測し監視することに役立つ。ここでは地球物理学的

な手法によりマグマの動きがどのように捉えられているのかについて解説する。マグマが上がってくると、それまでとは違う力が地面にかかり、その力の変化によって、断層運動を伴う地震が発生する。これを火山構造性地震と呼ぶ(図2a)。さらに、マグマの発泡や、マグマによって熱せられた地下水が水蒸気に変化することなどに



図1 爆発的な火山噴火とマグマ発泡の痕跡  
左はトングラワ火山(エクアドル)で2006年7月14日に起こった爆発的な噴火。右は火山噴出物(軽石)のサンプル。多くの穴があいており、これらはマグマの発泡によって生じたもの。

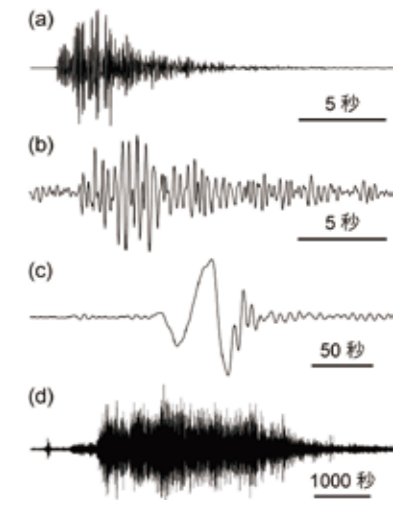


図2 火山で発生する地震と微動の観測波形  
(a)火山構造性地震、(b)低周波地震、(c)超長周期地震、(d)微動。火山構造性地震は断層運動によって発生するのに対して、低周波地震・超長周期地震・微動はマグマや熱水などの流体が関与して発生する。

よっても地震が発生する。これらは低周波地震や超長周期地震と呼ばれる(図2b、2c)。さらに、マグマやガスなどの流体の流れに伴って地震波が観測される。これは微動と呼ばれており、長時間にわたって振動が続くという特徴を持っている(図2d)。さらにマグマが上がってくると地面の変形が生じる。このような変形は、カーナビにも使われているGPSや、地面の傾きを精度よく計測できる傾斜計、さらには衛星画像を用いた手法によって測定することができる。これらの地震の発生や地面の変形は、マグマが上昇して火山活動が活発化するとほとんどの火山において起こり、その発生の仕方には規則性があるため、これらを観測することは噴火を予測する上で重要である。

### マグマはどのように上がって来るか

実際にこのような地震の発生や地面の変形の例として、2000年に三宅島で起こった噴火を紹介する。6月26日に、三宅島の直下で火山構造性地震が起こり始め、その後地震が西へ移動するのと同時に、地面の大きな変形がGPSや傾斜計によって捉えられた(図3)。このときマグマは浅部まで上昇していたが、噴火には至らなかった。どのようにマグマが上昇していたのかについては、後で詳しく述べる。さらに地震は神津島に向かって西に線上に広がっていった。ここには三宅島の下に溜まって

いたマグマが貫入したと考えられている。その後、7月8日に小規模な噴火が山頂で起こった。さらに7月11日から超長周期地震が1日に1~2回の頻度で三宅島の下で起こるとともに、山頂の陥没が進行した。そして8月18日に規模の大きな噴火が発生し、その後数年にわたって噴火活動が継続した。このように噴火の様々な前兆現象が捉えられたため、その情報に基づいて住民の避難が行われ、この噴火による直接的な人的な被害はなかった。しかしながら、有毒な二酸化硫黄ガスの放出が数年

にわたって続いたため、住民はその間、島外への避難を余儀なくされた。

マグマはどのように上がってくるのかを考えてみよう。これは以下のような実験で確かめることができる。板状のコンニャクの中心に十字に切れ目を入れ、これを端から押してみる。すると押した方向とは直交する方向に切れ目が開くことがわかる(図4)。地下にもこのような割れ目が存在し、強く押されている方向とそうでない方向が存在する。マグマは強く押されていない方向に割れ目を開きながら上昇する。この方向

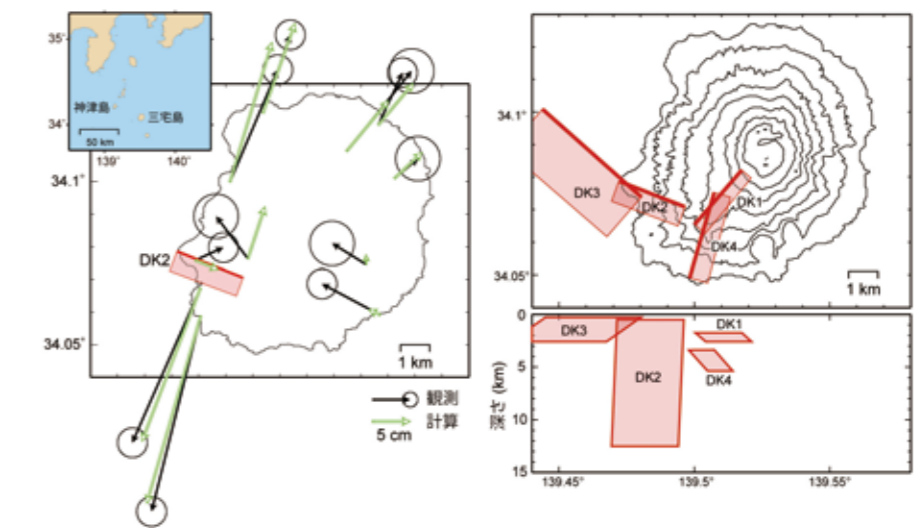


図3 2000年三宅島噴火活動において推定されたマグマに満たされた割れ目(ダイク)  
左は2000年6月26日21:00から6月27日01:00に観測された地面の変形(黒矢印)と、推定されたダイク(赤四角)およびその計算値(緑矢印)。右は2000年6月26日18:00から6月27日06:00までの観測データから推定されたダイク。この期間に三宅島には複数のダイク(DK1-DK4)が貫入したと推定されている。(Ueda et al. 2005, Gephys. J. Int., 161, 891-906)

が水平の時は、ダイクと呼ばれる垂直な板状の構造となる。ダイクにより生じる地面の変形は弾性論により求めることが可能であり、三宅島で2000年6月26日から27日にかけて起こった地面の変形は、非常に浅部まで上がってきたダイクの変形で説明できること、さらにこのようなダイクが他にもいくつかあったことがわかった(図3)。



図4 割れ目の開口の実験  
コンニャクの中心に十字の切れ目を入れて左右から押した場合の形状。マグマもこのような割れ目を形成しながら上昇する。

#### 流体に満たされた割れ目の振動

マグマなどの流体に満たされた割れ目は、火山の下に一般的に存在する。このような割れ目は、内部の流体の急激な体積変化により振動を起こすことが知られている。その振動は地震波として観測され、徐々に振幅が小さくなっていく減衰振動を示す(図5)。このような波形は見た目が印象的なので、世界各地で特別な名前が付けられており、日本では単色地震、中南米ではネジを意味するトルネージョとよばれている。この流体に満たされた割れ目の振動の理論的な研究が、米国地質調査所や名古屋大学などによって進められた結果、減衰振動の波形の特徴(振動周期と

減衰率)は割れ目の大きさだけでなく、どのような流体が内部に存在するかによって決まることがわかった。つまり観測された減衰波形の特徴から、震源にある流体の状態を調べることができる。このような研究が進んだ結果、八丈島では玄武岩質マグマ、草津白根火山では霧状の水蒸気ガス、コロンビアのガレラス火山では火山灰を含んだガスといったさまざまな流体が、割れ目の振動を起こしていることがわかった(図5)。さらにこれらの火山で観測された減衰振動は時間的に変化しており、そこから流体の状態や割れ目の形状の変化を推定するという研究も進んでいる。

#### 地震観測による噴火の監視

爆発的な噴火は、マグマの発泡が急激に進むことで起こるということを述べたが、マグマの中で発泡が進むと、ガスの膨張に

よって無数の穴ができる(図1)。さらに発泡が進むと、穴の構造を維持できなくなりマグマは粉々に砕け散ることになる。このようにしてできたものが火山灰である。つまり爆発的な噴火とは、発泡によって砕け散ったマグマである火山灰と、ガスが噴き出して来る現象である。規模の大きい噴火では、この噴き出した噴煙が高度 10 km 以上に達することがある。このような噴火は地域住民だけでなく飛行機の運航にも影響を与える。火山灰が飛行機のジェットエンジンに入ると、エンジン内部は高温なので火山灰が融けてエンジン内部に付着することでその動きを止めてしまう。よって、どのような規模の噴火が起こっているかを即時的に知ることは防災上重要である。噴煙がどこまで上がったかは、目視やカメラ画像によって調べられるが、天候が悪い場合にはそのような観測はできない。

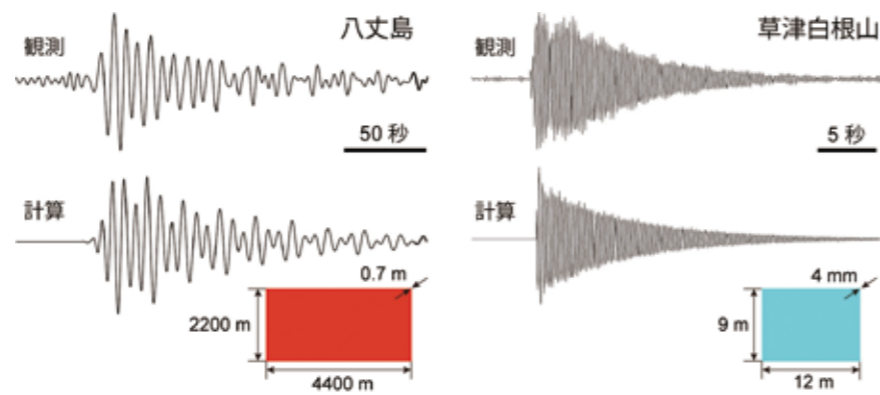


図5 流体を含んだ割れ目の振動  
八丈島と草津白根山で観測された地震波形と、それらを説明する割れ目の振動モデルによる計算波形。割れ目の形状は色をつけた四角に示されており(3つの数字は割れ目の長さ、幅と厚さ)、八丈島は玄武岩質マグマ、草津白根山は霧状の水蒸気ガスを割れ目の中に仮定した。このような様々な流体に満たされた割れ目の振動が火山の下で発生していると考えられている。

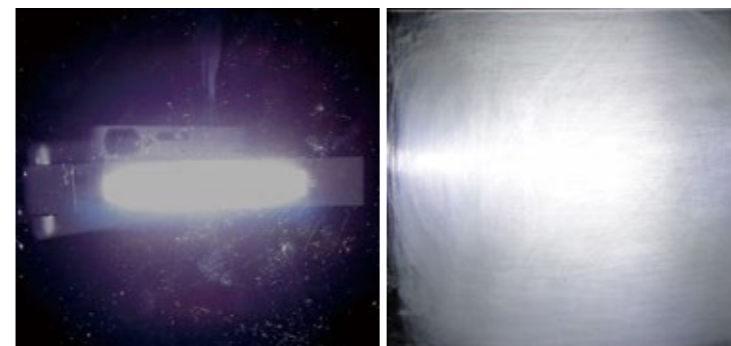


図6 光の散乱の実験  
透明なアクリル板(左)と表面にキズをつけたアクリル板(右)での光の透過の様子。キズをつけたアクリル板では表面にできたキズによって光が曲げられたため曇って見える。このような現象は散乱とよばれ、火山の地下で地震波が伝わる時にも散乱が起こっており、そのために火山で観測される地震波形は複雑な特徴を示す。

一方、爆発的な噴火では上に述べた微動が観測される。微動は地面が短周期で揺れる波から成り立っており、非常に複雑な波形の特徴を示す。このような複雑な波形は、震源での地震波の発生の仕方だけでなく、地震波が伝わる時に起こる散乱という現象によって生じており、それらをすべて説明することは困難である。しかしながら、その平均的な振幅の大きさが、噴煙の高さと良い相関があることが名古屋大学などの研究によってわかってきた。

散乱というのは、地下にある小さな割れ目や堆積物が場所によって異なるといった地下構造の不均質性によって、地震波が曲げられる現象である。たとえば、透明なアクリル板に光をあてると光を出した方向が強く光るが、このアクリル板の表面をやすりで削って同じように光をあてると曇って見える(図6)。これはアクリル板の表面にできたキズによって光が曲げられたためである。このような現象が散乱で、火山の地下で地震波が伝わる時にも起こっている。よって、散乱した地震波を説明するためには、小さな割れ目などがどのように地下にあるかということを知る必要があるが、それは現実的には不可能である。しかしながら、そのような地震波がある時間幅にどれぐらいの強さで観測点に届くかは、地震波を出した現象の大きさの指標となる。日本などで起こった噴火の噴煙の高さ( $H$ )と、微動の10秒間の平均振幅( $A$ )を比較したところ、 $H$ は $A$ のほぼ1/4乗に比例することがわかった。噴煙は、噴火によって生じた高温の火山灰とガスによって温めら

れた空気が、まわりの空気より軽くなって上昇する。その理論的な考察から、 $H$ は噴火の体積の時間変化率の1/4乗に比例することが知られている。よって、この理論的な考察と微動の振幅と噴煙の高さとの関係から、 $A$ は噴火の体積の地震変化率と比例する関係にあることがわかる。このことは、どのような規模の噴火が起こり、噴煙の高さがどの程度なのかを、微動の振幅から知ることができることを示している。地震波は、天候に関係なくリアルタイムで観測することができ、多くの火山でその観測が行われている。よって、噴火に伴う微動の振幅を用いることによって、噴火の監視と即時的な噴煙高度の予測を行うことが可能であり、そのような手法の実用化に向けた研究も進められている。

#### 火山防災と人材育成

このように、地球物理学的な観測によってマグマの動きに伴うシグナルが捉えられ、それを解析する手法の開発や高度化が進んでいる。また地球化学的な手法によっても、噴火に伴う現象が捉えられており、その例は本特集の角皆潤先生の記事に述べられている。上に述べたように、2000年の三宅島の噴火ではさまざまなシグナルが噴火前に観測され、それらの解析結果に基づいてマグマの動きを捉え、その情報は住民避難に生かされた。しかしながら、2014年9月27日の御嶽山の噴火では、前兆的なシグナルが捉えられながら、噴火の予測に生かすことができず、63名の死者・行方不明者という戦後最悪の噴火

被害が起こった。御嶽山は2007年にも小規模な噴火を起こしており、その時は噴火までに約2か月にわたって様々な地震や微動が発生し、地面の変形も観測された。しかし2014年の噴火では、地震が起こり始めてから、地面の変形も観測されず、2週間程度という短期間で噴火が起こった。このように同じ火山でも噴火ごとに前兆の出方は大きく異なるため、噴火を正確に予測することは簡単ではない。また2018年1月23日に起こった草津白根山の噴火では、これまで噴火を繰り返してきた湯釜ではなく、本白根山という歴史時代には噴火のなかった場所から突然噴火が起こった。この噴火に訓練中の自衛隊員が巻き込まれ1名の死者が出るとともに、付近にいたスキー客も危険な状態におかれた。

御嶽山の噴火による被害は、噴火を予測する技術が不十分であるとともに、観測情報を地域住民や登山者に伝達する上で多くの問題があることを示した。また噴火が起こった場合に、噴石に耐えられる施設の不足といった問題もあげられる。噴火の災害を軽減するためには、総合的な取り組みが求められている。火山学と防災の関係については本特集号で山岡耕春先生が解説している。将来の火山防災に関わる人材の育成を目指した文部科学省のプログラムが2016年度から始まっており、名古屋大学もそのプログラムに参加している。火山学は、その基礎的な研究が社会に直接的に貢献できる学問であり、名古屋大学ではそのような研究を担う人材の育成を積極的に進めている。

# 噴煙の化学組成を利用した火山診断

角皆 潤 地球環境科学専攻教授

## 火山ガス研究の歴史

火山から大気中に放出される成分（火山噴出物）のうち、気体のものを「火山ガス」とよぶ。火山ガスの主成分は水蒸気（ $H_2O$ ）である。噴出時の温度は、静穏な火山であれば $100^\circ C$ 前後のことが多いが、活動的な火山だと $1000^\circ C$ を超えることもある。しかし、この火山ガスが大気中に放出されると、その直後に大気と混合して急冷されて水蒸気が凝縮し、雲のような見た目になる（図1）。この希釈された火山ガスは噴煙、もしくはブルームとよばれ、大気中を上昇しながら拡散し、やがて消えていく。火山ガスには、水蒸気以外に、二酸化炭素（ $CO_2$ ）や二酸化硫黄（ $SO_2$ ）、水素（ $H_2$ ）、一酸化炭素（ $CO$ ）、硫化水素（ $H_2S$ ）、塩化水素（ $HCl$ ）

などが含まれることが多い。

火山ガスが最初に注目されたのは、1960～1970年代である。火山岩や火山灰は過去の噴火時に形成されたものが多いのに対して、高温の火山ガスは、現在地下に存在するマグマに由来すると考えられる。したがって火山ガスを調べることで、地下に存在するマグマの現況を把握できると考え、多くの研究者が、図2に示すように火山の噴気孔（火山ガスの放出孔）に赴いて火山ガスを採取し、化学組成や同位体組成を測定した。

多くの火山で火山ガスの化学組成が報告されるようになると、高温の火山ガスは $SO_2$ や $H_2$ に富み、低温だと $H_2S$ に富む傾向が明らかになった。これは、マグマの中、もしくはその周囲の山体内で、 $H_2S$ が $H_2O$ と

反応して、 $SO_2$ や $H_2$ が生成する反応と、 $SO_2$ が $H_2$ と反応して、 $H_2S$ や $H_2O$ が生成する反応が平衡状態に到達していることを反映していると考えられている。すなわち、高温になると平衡反応が $SO_2$ 側に傾いて $SO_2$ や $H_2$ の濃度が上昇し、低温になると $H_2S$ 側に傾いて $H_2S$ の濃度が上昇する。

したがって、もし地下深部から新鮮なマグマが補給されるなどして高温化すると、 $SO_2$ や $H_2$ の濃度が上昇する。実際にこれを反映すると考えられる現象は各地の火山で観測され、たとえば、火山ガスの化学組成が1966年から継続的に観測されていた群馬県の草津白根山では、1976年3月の水蒸気噴火の約1年前から、 $SO_2/H_2S$ 比や $H_2$ 濃度の増大が観測されていた。この噴火前



Urumu Tsunogai

1996年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、博士（理学）取得。東京工業大学大学院総合理工学研究科講師、北海道大学大学院理学研究科助教授を経て、2012年より名古屋大学大学院環境学研究科および理学部教授。専門は地球化学・環境科学。



図1 桜島と火山口から放出された噴煙  
山頂から放出され、白色雲状になって広がっているのが噴煙（ブルーム）である。手前側に見えるのは鹿児島市の市街地。



図2 噴気孔における火山ガス試料採取の様子  
右手に見える直径約1mの噴気孔から、 $100^\circ C$ を超える火山ガスが轟音とともに噴き出しており、低姿勢で直撃を避けながら火山ガスを集めている（2017年7月、宮崎県の霧島硫黄山で撮影）。

にかけて噴火を繰り返した九州霧島の新燃岳では、UAV（無人航空機）を用いた噴煙観測が繰り返し実施され、噴火開始直後は高かった $SO_2/H_2S$ 比が、噴火開始から2カ月後には、噴火開始直後の10分の1まで低下したことが明らかになった。さらに $SO_2$ や $HCl$ は、特定波長の赤外光を吸収するので、望遠鏡と赤外分光計を用いることで、リモートセンシングで定量することもできる。

さらに近年では、火山ガス中の各成分の濃度だけでなく、各成分の安定同位体比も、噴煙を利用して推定できるようになった。以下では、噴煙を利用して火山ガス中の水素（ $H_2$ ）の安定同位体比を遠隔から求め、これを噴気温度の遠隔測定に活用した、HIRETS法（Hydrogen Isotopes Remote Temperature Sensing）とよばれる新手法についてご紹介する。

## 同位体交換平衡を利用した温度測定

火山ガスが大気中に放出された時の温度は「噴気温度」とよばれ、火山の山体内で進行しているマグマからの脱ガス様式や、地下水系との接触の有無、火山活動度の現況や今後の推移などを推定する上で極めて有用であることが知られている。たとえば火山の噴火様式は「水蒸気噴火」、すなわち、マグマによって加熱された地下水が膨張・爆発することで引き起こされる噴火と、「マグマ噴火」、すなわち、マグマそのものが噴出することで引き起こされる噴火に大別されるが、水蒸気噴火は理論的に $400^\circ C$ 程度が噴気温度の上限と考えられている。この噴気温度は、火山岩の融点（ $1000^\circ C$ 前後）まで上昇する可能性のあるマグマ噴火の噴気温度とは大きく異なるので、噴気温度は両者を区別する指標となる。

しかし、噴火が近づいている可能性のある火山で噴気温度を直接測定するのは、正気の沙汰ではない。また、物体がその温度に応じて異なる波長の電磁波を放射する性質を利用して遠隔から温度を推定する方法もあるにはあるが、現状の技術だと100m以上離れるとかなり不正確になって

に、地震活動の有意な変化はほとんど認められていなかったことから、火山ガスは噴火予知の有力な指標として脚光を集めた。

## 噴煙を利用した新展開

ところが1980～90年代になると、火山ガス研究は大きな壁に直面する。草津白根山のように放出される火山ガスを容易に採取できる火山は限られ、大部分の火山は、地形的に火山ガスの採取が不可能であった。つまり、頻繁に観測を実施して噴火予知につなげることができる火山は限られる。さらに、噴火の可能性が高くなってくると、観測は大きな危険を伴う。1990年代には著名な火山研究者が、噴火に遭遇して死亡するという悲劇も起きた。さらに噴火中、あるいは噴火直後の火山は危険で観測でき

ないので、噴火に伴う火山ガスの組成変化を実測することは難しかった。

そこで火山ガスが大気と混合して形成された噴煙（図1）を利用して、火山ガスの組成を推定する新手法が、2000年代に入って開発された。火山からある程度離れた場所に流下してくる噴煙は、放出前と比べると、1000分の1前後に希釈されている。しかし、 $SO_2$ や $H_2S$ 、 $HCl$ は一般の大気にはほとんど含まれていないので、高感度センサーを用いて噴煙の中のこれらの成分の相対存在比を定量化することで、火山ガス中の $SO_2$ や $H_2S$ 、 $HCl$ の相対比が推定できる。また、一般大気中にある程度存在する $H_2O$ や $CO_2$ 、 $H_2$ などの成分でも、噴煙内外の微小差異を検出・定量することで、火山ガス中の相対比を推定できる。2011年3月から9月

使えない。また噴気孔が火山灰等に覆われて視認できなくなると測定できない。「水蒸気噴火は理論的に400℃程度が噴気温度の上限」と書いたが、これを実測して確認した人はいない。このような噴気温度測定に関する問題の解決を目指して開発されたのが、HIReTS法である。

たとえばH<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-CO間のO原子とか、H<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S間のH原子に代表されるように、火山ガス中には、複数種の分子間にまたがって共通に存在している原子がいくつか存在する。またこのような原子の多くは複数の安定同位体から構成されており、たとえばH原子であれば、<sup>1</sup>Hと重水素(<sup>2</sup>HもしくはD、以下ではDと表記)の二種類の安定同位体から成り立っている。化学反応が進行すると、この二種の安定同位体の相対比(D/<sup>1</sup>H比)は、その反応物と生成物の間で、微小に変化する。

高温のマグマ中では、一部の化学反応が平衡に到達していることをご紹介したが、ある原子が共通に含まれる異種分子間で何らかの化学反応が平衡に到達すると、分子間の同位体比の相対値は、各分子の構造と温度のみの関数となり、経由する化学反応の種類や圧力には依存しなくなる。この状態は「同位体交換平衡」とよばれる。たとえばH<sub>2</sub>OがH<sub>2</sub>化する反応と、その逆反

応であるH<sub>2</sub>がH<sub>2</sub>O化する反応が、ある温度で平衡に到達すると、H<sub>2</sub>OのD/<sup>1</sup>H比と、H<sub>2</sub>のD/<sup>1</sup>H比の相対値((D/<sup>1</sup>H)<sub>H<sub>2</sub></sub> / (D/<sup>1</sup>H)<sub>H<sub>2</sub>O</sub>)は、温度のみの関数となる。

具体的にどのような化学反応が、H<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの間の同位体交換に介在しているかはいまだに明らかにはなっていないのだが、とにかく高温の火山ガス中では、H<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの間の水素同位体交換反応が平衡に到達しており、H<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの間に水素同位体交換平衡を仮定して算出した推定温度(「平衡温度」とよび、AET<sub>D</sub>と表記する)が噴気温度と一致することが、古くから知られていた(図3)。たとえば昭和新山(北海道)では、1954年に800℃だった噴気孔が1977年に617℃へ、また那須岳(栃木県)では1960年に489℃だった噴気孔が1969年には277℃へ温度が低下する様子が観測されたが、この噴気温度の減少に追隨して、火山ガス中のH<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの間のAET<sub>D</sub>も、昭和新山では750℃から630℃に、那須岳は470℃から290℃に低下した。

その一方で、室温付近の温度だとH<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの間の水素同位体交換反応は一切進行しなくなる。したがって、高温の火山ガスが大気中に放出され、その直後に空気と混ざって急冷されると、火山ガス中のH<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの間の同位体交換反応が停止し、それ

ぞれのD/<sup>1</sup>H比は変化しなくなる。つまり、急冷直前の噴気温度が、火山から大気中に放出されたH<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>OのD/<sup>1</sup>H比に記録されるので、これを利用して急冷直前の平衡時の温度を遠隔測定することができる(図4)。しかもH<sub>2</sub>OのD/<sup>1</sup>H比は不要で、H<sub>2</sub>のD/<sup>1</sup>H比を求めただけで、十分な精度と確度で噴気温度が推定できる。これは、ある程度高温の火山ガスであれば、火山間にH<sub>2</sub>OのD/<sup>1</sup>H比に差はほとんどなく、これらの平均的なD/<sup>1</sup>H比で代用することができるからである。火山ガス中では、H<sub>2</sub>Oの存在量がH<sub>2</sub>より圧倒的に多いため、平衡温度の変化は主にH<sub>2</sub>のD/<sup>1</sup>H比の変化にのみ反映され、H<sub>2</sub>OのD/<sup>1</sup>H比はほとんど変化しない。

最初にHIReTS法の検証が行われた北海道の樽前山では、609℃の噴気孔で火山ガス試料が、またその周囲の大気中で噴煙試料が採取され、それぞれの試料のH<sub>2</sub>の濃度とD/<sup>1</sup>H比が調べられた。噴煙試料のH<sub>2</sub>濃度は、噴気孔から風下側に約15m離れた場所で大気中の約60倍、約50m離れた場所で4倍、約100m離れた場所で1.3倍であった。この噴煙試料のH<sub>2</sub>濃度とそのD/<sup>1</sup>H比から、大気H<sub>2</sub>の寄与を補正することで、火山ガス中のH<sub>2</sub>のD/<sup>1</sup>H比を推定したところ、噴気孔において採取された火山ガス試料中のH<sub>2</sub>のD/<sup>1</sup>H比と誤差内で

Column

## 火山学と防災

山岡 耕春 地震火山研究センター教授



2017年7月に長野県木曾町にオープンした名古屋大学御嶽山火山研究施設の除幕式。写真は左から木曾町長、長野県知事、名大総長、王滝村長。施設は御嶽山火山防災研究の拠点となる。

一致した。さらに、推定された火山ガス中のH<sub>2</sub>のD/<sup>1</sup>H比から算出した噴気温度は、およそ580℃となり、実測された噴気温度と誤差範囲内で一致した。また火口内に多数の噴気孔が存在する薩摩硫黄島(鹿児島)では、火口域全体から放出された噴煙から推定した噴気温度は813℃となり、火口内の噴気孔の実測最高温度(800-900℃)と誤差範囲内で一致することも確認された。噴煙から推定した噴気温度が、実測された噴気温度と一致したことで、HIReTS法が噴気温度の遠隔温度測定法として有効であることが証明された。

### 噴煙を利用した火山ガス研究の将来

HIReTS法が開発されたおかげで、2011年以降は、阿蘇中岳(熊本県)や桜島(鹿児島県)といった、それまで誰も噴気温度を測定することができなかった世界有数の活火山で、噴気温度が遠隔測定できるようになった。その結果、阿蘇中岳の

火山学は、火山という現象を解明することを目的とする学問である。マグマの発生・上昇・分化・噴出・固化などの一連のプロセスを理論・実験・観測等の手法を駆使して解明していくものである。このような研究手法は理学一般に共通であるが、火山学においてはさらに実社会への適用として防災と直接かかわることが多い。それは、火山防災が理学研究の力を用いて火山噴火を予測することを必要としているからである。それでも火山噴火の確実な予測は困難である。火山活動の変化が観測された場合であっても、噴火発生後にあわてて噴火警報が発表されることが多い。火山研究者と行政などの火山防災担当者がふだんから顔の見える関係を築いて、いざという時に科学的な説明ができるようにしておく必要がある。

2014年の御嶽山噴火以前は研究者と地元防災担当者との交流がなく、噴火の前兆の地震活動の知見が地元の防災行動に十分に生かされなかった。そのような反省から、名古屋大学では、噴火後に長野県の支援を受けて御嶽山のふもとの木曾町に火山研究施設を開設した。施設では、火山の観測・研究だけでなく、防災教育や地域住民に対する火山防災知識の啓発など、地域といっしょになった防災力向上を図っている。これは自然科学の研究と社会とのかかわりに関する新しい姿で、超学際的研究として期待されているものである。

Koshun Yamaoka

1986年名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程修了、1986年東京大学地震研究所助手 1991年名古屋大学理学部助教授。2003年東京大学地震研究所教授を経て、2007年より現職。

噴気温度は、高温時は920℃、低温時は800℃と、高温を保ちつつも120℃程度の幅で変動していることが明らかになった。また桜島の噴気温度は、観測が行われた2014年9月時点で、930℃以上と推定された。これは火山岩の融点(1000℃前後)に匹敵する高温で、観測時点でマグマが桜島の火口直下に迫っていたことが明らかになった。桜島は連日のように鹿児島市内に降灰をもたらすことで有名だが、この桜島は、爆発的噴火の危険性と隣り合わせにいることが証明された。桜島を上回る噴気温度を示す火山は、国内では見つかっていない。

火山ガスの化学組成・同位体組成に関する研究が本格的に始まってからすでに50年以上が過ぎてはいるが、噴火時(あるいは噴火の危険性が高まりつつある状態)の火山ガスに関する情報が入手できるようになったのは、噴煙が利用できるようになったごく最近のことであり、研究は未だその端緒にあるといつてよい。今後は、噴煙を

利用することで、爆発的噴火時や、その直前・直後の火山ガスの組成変化や同位体比変化が定量できるようになるので、火山活動の現状把握や将来予測技術に、革新的進歩をもたらすことが期待されている。

また、今回ご紹介した桜島における噴気温度の遠隔測定は、セスナ機を用いて噴煙の採取に成功したおかげで実現した。図1を見てもわかるように、火山の火口は山頂に位置することが多く、またこの山頂の火口から放出された噴煙は、火口からある程度上昇してから、水平方向に広がっていく。したがって、火口の縁まで登山するか、そうでなければ航空機をはじめとした何らかの機器類を使わないと、噴煙を採取することはできない。火山そのものに関する学術研究の進歩はもちろんだが、ドローンや無人航空機、無人探査車といったような工学的技術の発展を推進し、その成果を組み込むことができるかどうか、今後の火山学の発展にとって重要になってくるだろう。

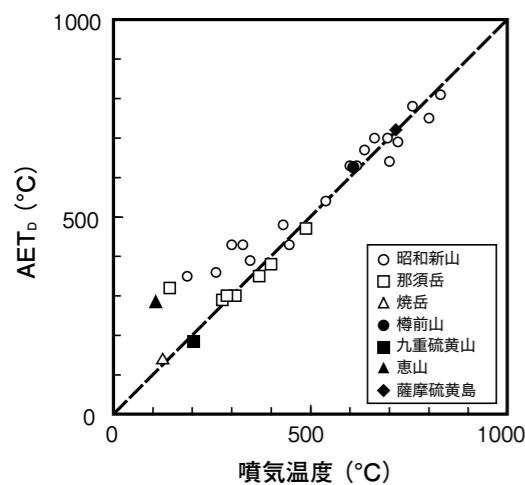


図3 噴気温度実測値と同位体平衡温度(AET<sub>D</sub>)の関係 AET<sub>D</sub>は、各噴気孔から放出される火山ガス中のH<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの間に水素同位体交換平衡を仮定して算出した。

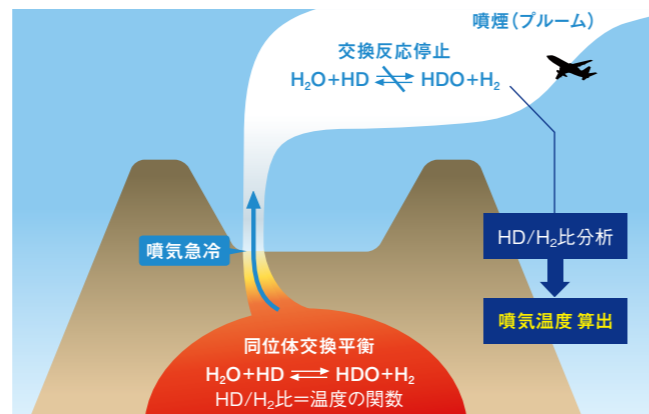


図4 火口温度遠隔測定法(HIReTS法)の原理 噴煙中のH<sub>2</sub>のD/<sup>1</sup>H比を測定することで、噴煙中のHD/H<sub>2</sub>比を求めることができる。これは、H<sub>2</sub>と共存するH<sub>2</sub>Oが同位体交換平衡に達していた急冷直前のHD/H<sub>2</sub>比が保持されたものである。同位体交換平衡に達している時のHD/H<sub>2</sub>比は温度のみで決まるので、噴煙中のH<sub>2</sub>のD/<sup>1</sup>H比から急冷される直前の温度を求めることができる。

# ヘビの胴体が長い謎の解明

鈴木孝幸 生命農学研究科准教授 (2018年3月まで生命理学専攻講師)



Takayuki Suzuki

1977年生まれ。1999年慶應義塾大学理工学部応用化学科卒業、奈良先端科学技術大学院大学バイオサイエンス研究科後期博士課程修了。博士(バイオサイエンス)。日本学術振興会特別研究員、ウィスコンシン大学海外特別研究員、さきがけ研究員(兼任)などを経て、2010年名古屋大学大学院理学研究科生命理学専攻助教、2016年同講師。2018年4月より現職。

## 脊椎動物の骨格パターンの進化

私たちヒトを含む脊椎動物は、体の中心に背骨(せばね)をもっている。背骨はたくさんの脊椎骨(せきついこつ)が1列に並んだ構造をしており、脊椎骨はかたちの違いで頭に近い方から頸椎(けいつい)、胸椎(きょうつい)、腰椎(りゅうつい)、仙椎(せん

つい)、尾椎(びつい)とよばれている(図1)。これらのかたちの違いは発生中に将来の脊椎骨になる領域に発現するHox(ホックス)遺伝子群\*1によって決められている。前足は胸椎の最も前端に位置しており、後ろ足は、骨盤(こつばん)を介して仙椎に接続している。前足から後ろ足の間の部分

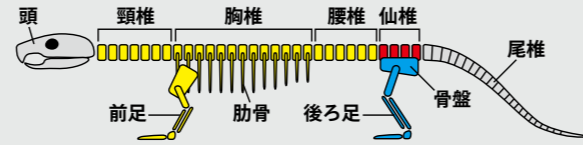


図1 脊椎動物の骨格パターン

マウスを例に脊椎動物の骨格パターンを示す。背骨は頭側から頸椎、胸椎、腰椎、仙椎、尾椎に分けられる。脊椎動物の後ろ足(青色)は仙椎(赤色)に接続している。

は胴体とよばれている。

さまざまな動物の骨格パターンの進化を見てみると、今生きている動物だけでなく既に絶滅してしまった恐竜や首長竜、ヘビの祖先で手足を持つテトラポドフィスに至るまで、あらゆる生物種において後ろ足は仙椎に接続していることが分かる(図2)。また興味深いことに、進化の過程でそれぞれの動物の総脊椎骨の数や、頭から後ろ足までの脊椎骨の数(図2内の黒色の数字)は大きく変化しているにも関わらず、後ろ足は必ず仙椎の位置につくられる。このことから、私たちは仙椎の位置に後ろ足をつくる進化的に高度に保存された発生メカニズムが存在するのではないかと考えた。

“進化”は、受精卵から体がつくられ産まれる直前までの状態である「胚」の“発生過程”の変化の蓄積によって起こる。そこで私たちは、さまざまな脊椎動物において後ろ足ができる時の発生過程を調べれば、なぜ後ろ足が必ず仙椎の場所につくられるのか、また進化の過程でどのようにして後ろ足の位置が多様化していったのかを、明らかにできるのではないかと考えた。

## 仙椎の位置に後ろ足をつくる

### 発生メカニズム

近年の研究で私たちは、体の発生過程を観察しやすいニワトリの胚を用いて後ろ足の発生メカニズムを詳細に調べた結果、

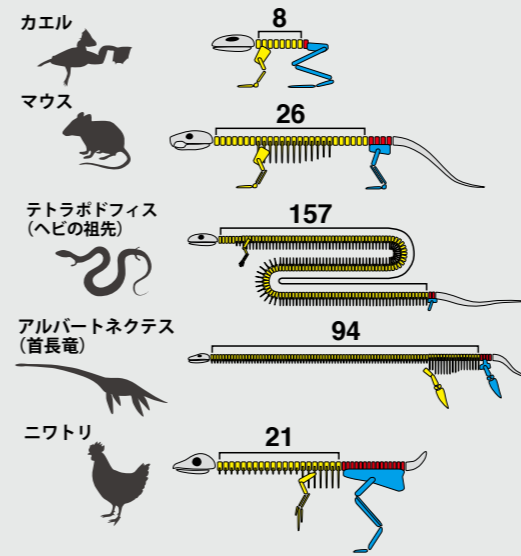


図2 脊椎動物の骨格パターンの進化の様子

進化の過程で脊椎骨の数は多様化しても、後ろ足(青色)は必ず仙椎(赤色)に接続している。黒色の数字はそれぞれの動物の頭から後ろ足までの脊椎骨の数を示している。

胚の中でGDF11(ジーディーエフイレブン)\*2とよばれる分泌タンパク質が働きはじめた場所が、将来の仙椎になることを発見した(図3)。GDF11の機能を破壊したマウスでは後ろ足の位置が脊椎骨6個分体の後側にずれることがわかっている。私たちの研究で、GDF11タンパク質は仙椎になる組織の隣の組織(専門用語で側板中胚葉\*3という名前の組織)にも働きかけて、そこに後ろ足と骨盤をつくることがわかった。すなわち、GDF11タンパク質が発生中に働き

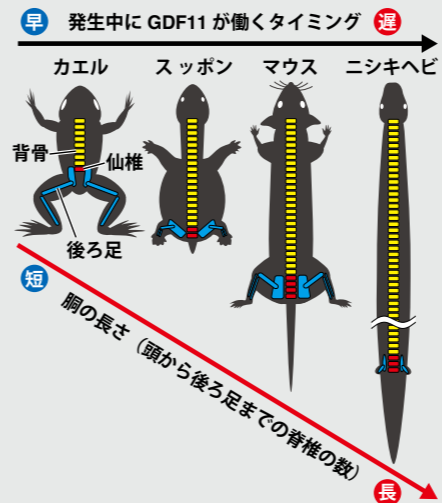


図4 脊椎動物において後ろ足の位置の多様性を生み出す仕組み  
発生中にGDF11の働きは始めるタイミングが遅い種ほど、頭から後ろ足までの位置が遠くなり、胴体が長くなる。ヘビではGDF11の働きは始めるタイミングが極めて遅いために長い胴体をもつ。

出したところに仙椎と後ろ足が同時に形成されることがわかり、この発生学的なメカニズムによって、我々脊椎動物の後ろ足が必ず仙椎の位置につくられるという進化的に保存されたシステムを明らかにした。

## 後ろ足の位置の多様性を生み出すメカニズム

次に私たちは、動物種間で後ろ足の位置の違いが生まれる仕組みを調べるために、脊椎動物の中で胴体が短い(頭から後ろ足までが近い)ものと、胴体が長い(頭から後ろ足までが遠い)もの、合わせて9種の動物においてGDF11の働き方を調べた。その結果、カエルやカメなどの胴体が短い(頭から後ろ足までが近い)ものは発生中にGDF11が働き始めるタイミングが早く、エミュー(鳥の仲間)やヘビなどの頭から後ろ足(ヘビでは多くが退化してなくなっているが、ニシキヘビなどの一部のヘビでは痕跡が残っている)までが遠いものではGDF11が働きは始めるタイミングが遅いことがわかった。

この進化発生学的知見から、進化の過程で後ろ足の位置が多様化していった原因は、GDF11というたった1つの遺伝子からつくられるタンパク質の発生中に働くタイミングが異なるためであることが明らかとなっ

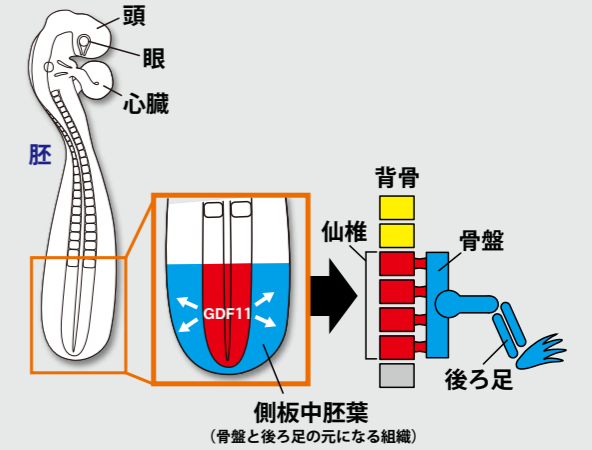


図3 仙椎の位置に必ず後ろ足がつくられる仕組み

卵卵して2日目のニワトリ胚の模式図を示す。発生中に分泌タンパク質であるGDF11が発現した場所が仙椎(赤色)となる。GDF11は隣接する後ろ足をつくる場所となる側板中胚葉にも作用し、仙椎の位置に必ず後ろ足(青色)をつくる。

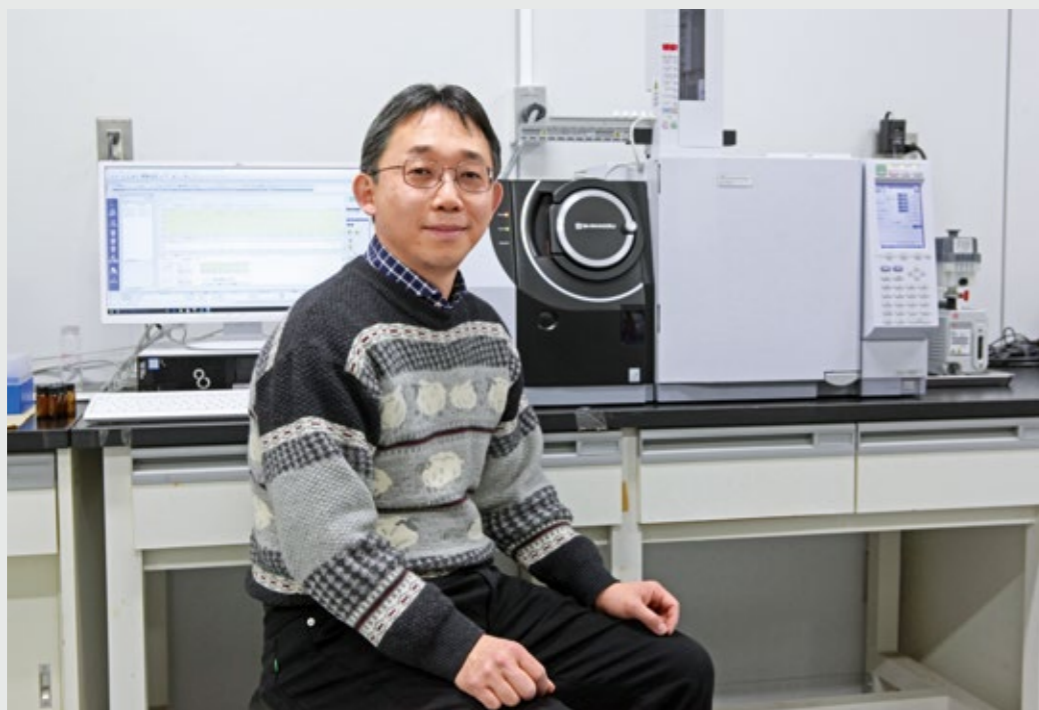
た(図4)。私たちの研究により、ヘビは他の動物と比べてGDF11が働き始めるタイミングが極めて遅いために、後ろ足の形成のタイミングも遅くなるために長い胴体(前足と後ろ足の間)をもつことが判明した。ちなみにダックスフントは胴体が長く見えるが、手足が短い変異体なため相対的に胴体が長く見えているだけである。

後ろ足の位置の多様性に代表される生物の大進化は、これまで進化学の分野では体のかたちをつくるHox遺伝子の変化によって引き起こされたと考えられて来た。今回の研究で、GDF11はHox遺伝子の働く場所をまさに制御している働きをもつことが判明した。これにより生物の形態の大進化は、オーケストラの指揮者のように働く、思った以上に少数の遺伝子の変化によってもたらされた可能性が推測される。

\*1 Hox遺伝子  
ホメオティック遺伝子ともよばれ、動物の初期発生段階で体の前と後のそれぞれの場所にかたちをつくり出すために必須な重要な遺伝子。  
\*2 GDF11  
細胞の外に分泌される分泌タンパク質。仙椎が形成される場所で特異的に働き、隣接する後ろ足の元の組織である側板中胚葉にも作用し、仙椎が形成される位置に後ろ足の形成をスタートさせることがわかった。  
\*3 側板中胚葉  
後ろ足が形成される前の発生段階で将来の後ろ足をつくる細胞がいる場所の総称。

# 酵素から着想を得た「分子の容れ物」

山田 泰之 物質科学国際研究センター准教授



Yasuyuki Yamada

1975年生まれ。2003年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。パデュー大学化学科博士研究員、東京理科大学薬学部助教、名古屋大学物質科学国際研究センター助教を経て、2014年より現職。専門は錯体化学・超分子化学。

## 分子のかごをデザインする

分子ケージは、内部に空間をもつ「分子の容れ物」であり、分子を内部に取り込むことで（取り込まれる分子を「ゲスト分子」という）化学センサーや分子の貯蔵・反応場として利用できることから、近年精力的に開発が進められている。分子ケージのデザイン上重要な要素の1つに、「骨格の柔軟性」がある。分子ケージが簡単には変形しない硬い構造をもつ場合と非常に柔らかい構造をもつ場合とをそれぞれ想像してみよう。まず硬い構造をもつ場合には、ある特定の構造をもつゲストと安定な

会合体を形成できるようになるが、その分、ゲストの構造が限定される。これはちょうど「鍵と鍵穴」のようなもので、酵素の分子認識の仕組みの1つとして知られる。一方、ケージが柔らかい構造をもつ場合には、ケージが変形してさまざまなゲストを取り込むようにはなるが、ゲストとケージの会合体が熱エネルギーによって簡単に変形することが困難になる。このため、「ケージ・ゲスト会合体が高い安定性をもつ」と「柔軟に構造変化して多様なゲストと会合できる」という2つの特徴を併せもつ分子ケ

ジを合成することは容易ではない。

## 人工の超分子構造の利用

ところが、ある種の酵素は図1に示すように、自分自身がゲストの構造に併せて柔軟に変化することで、さまざまなゲストと安定な会合体を形成できる。この会合体形成の様式は「誘導適合型モデル」とよばれ、タンパク質が非常に大きな分子であることに加え、その構造がある程度の柔軟性をもっているからこそ実現可能なユニークな性質である。我々はこの誘導適合型会合体形成から着想を得て、ケージ自体の構造がダイ

ナミックに変化しながらもゲストと安定な会合体を形成できる新しい分子ケージを合成したいと考えた。もちろん、酵素のようにアミノ酸を用いてそのようなケージをつくることも可能かもしれない。しかし、目的実現のための「仕掛け」として我々が用いたのは、軸状分子が環状分子を貫通した「ロタキサン」という人工の超分子構造である（図2a）。我々の考えたシステムの概念図を図2bに示した。まず、3つの平面性分子を、面と面を向かい合わせて配置する。一番上と一番下の分子を軸状の「レール」で連結しておき、「ロタキサン」構造を介して真ん中の分子をレールに連結することで、ケージの内部にはナノ空間が2つできる。このとき、真ん中の分子が「スライドドア」のように移動できれば、仮に空間の入り口のサイズよりも大きなゲストがやってきたとしても、

真ん中のドアがスライドしてゲストを挟んだ後入り口が閉じ、強固にゲストと会合できると我々は考えた。ロタキサン構造では、分子同士が共有結合で連結されているわけではなく、図2aのように絡まり合っている状態であるため、「スライドドア」式の分子運動が可能になると期待したわけである。

## 天然の分子システムへの挑戦

実際に合成した分子ケージの構造を図3aに示した。ピンク色で示したポルフィリンという平面性色素2分子が4重にレールで架橋された二量体に、4つの環をもつフトロシアニン（図中オレンジ色）1分子を4つのロタキサン構造を介して連結した超分子ケージである。我々が期待した通り、このケージはアニオンを側鎖にもつ平面性分子と非常に安定な会合体を形成することに

加え、入り口のサイズよりも大きなゲストも取り込むことができる。また、このケージは環境・大きさの等しい内部空間を2つもち、図3bのゲストをそれぞれの空間に1分子ずつ取り込むことができるが、その際、ゲストは1分子ずつ段階的にケージに入ることもわかった。これは、1段階目の会合の強さが2段階目の会合の強さよりもずっと大きいことを意味しており、図2bのようなケージの骨格変形が関与していると我々は考えている。

酵素の誘導適合に限らず、生体内には未だ人工分子では実現困難なほど高度な機能をもつ分子システムが数多く存在する。その分子システムから着想を得て新しい機能性分子を構築することは、天然のシステムを超える分子システムの創出につながると信じて我々は研究に取り組んでいる。

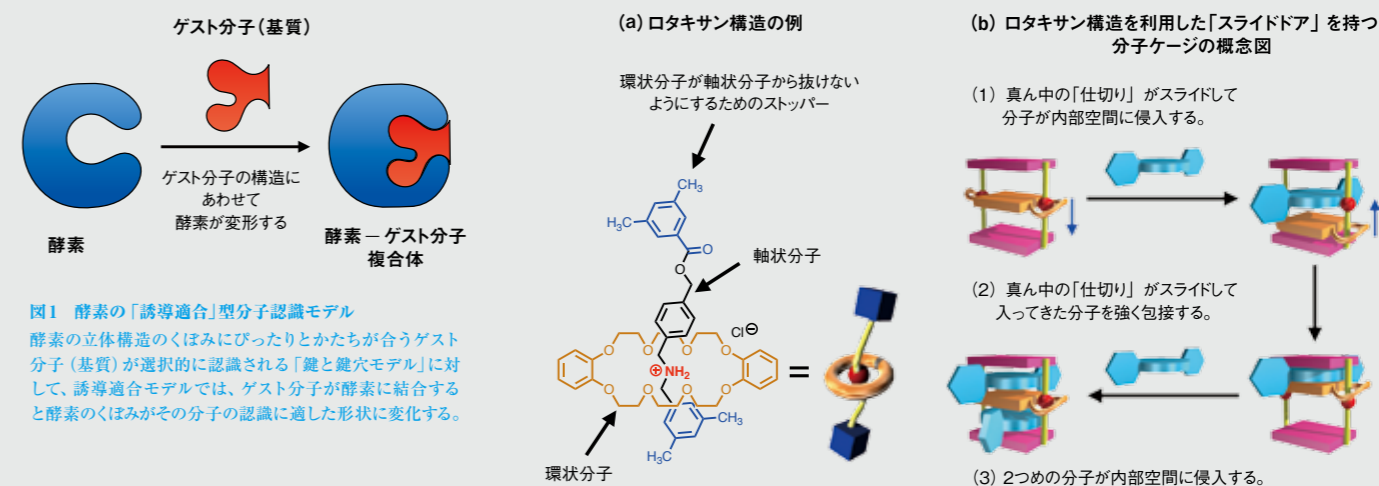
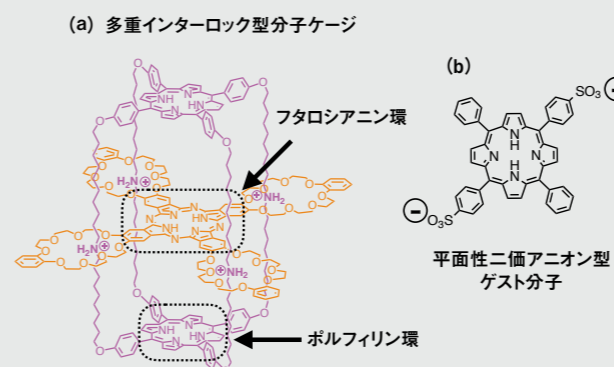


図2 ロタキサン構造を利用した「スライドドア」をもつ分子ケージの概念図  
ロタキサンとは、(a)に示すように、環状分子に軸状分子が貫通した構造をもつ分子の総称である。ロタキサンを利用して3つの平面性分子同士を(b)のように連結すれば、真ん中の平面性分子がスライドドアのように可動式になるため、平面性分子同士の間のナノ空間の大きさが変化する分子ケージが構築できる。







Tomo-Hiko Watanabe

新潟県生まれ。1993年東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻で学位取得後、核融合科学研究所助手、助教授、准教授、教授を経て、2014年2月より現職。核融合プラズマにおける乱流輸送やオーロラなどの宇宙プラズマ現象の理論・シミュレーション研究を進めている。

## プラズマ物理から解くオーロラのかたちと運動

渡邊智彦 素粒子宇宙物理学専攻教授

### オーロラの謎

極夜に輝くオーロラは、多くの人々を魅了してやまない。その妖しげな、または、神々しい光は、宇宙から降下する電子が地球上層にある電離層大気中の原子・分子を衝突励起して発光させるものである。たとえば図1に見られるオーロラに特徴的な緑色の光は、電子との衝突により励起された酸素原子の発光である。このオーロラを光らせる電子は、図2に模式的に示したように地球磁気圏とよばれる宇宙空間から飛来する。その元となるエネルギー源は、磁気圏中の電離気体（プラズマ）の対流であり、ひいては太陽からの高速プラズマ流（太陽風）にある。これまでの地上観測や衛星観測から、オーロラ発生の特徴的なパターンや、地磁気活動との相関など



図1 極地方で観測された多重オーロラ 特徴的な緑色の光は電子との衝突により励起された酸素原子の発光である。オーロラは地球磁気圏と電離層のプラズマの相互作用を反映していると考えられる。(NASAウェブサイト<https://www.nasa.gov>より転載)

が詳しく調べられてきた。しかし、この最も身近な宇宙現象であるオーロラにも、未だ解明されていない謎が残されている。その1つが、どのようにして、図1のようなカーテン状や渦巻き構造をもつオーロラがつくられるのか、という点である。この謎をプ

ラズマ物理学の観点から理論的に解き明かすことを目指して研究を進めている。

### オーロラとプラズマ

オーロラの舞台となるのは、地上から高度80kmから800km程度にある弱く電離

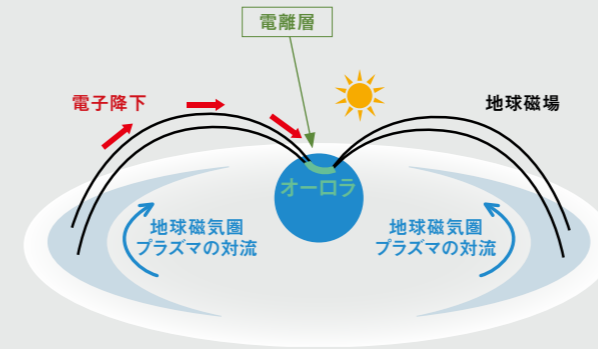


図2 地球磁気圏と電離層の模式図 太陽から来る高速のプラズマ流（太陽風）により地球磁気圏内に大規模なプラズマ対流が生じ、それをエネルギー源として電離層に向けて電子が降下し、中性大気を励起発光させて極域電離層にオーロラが発生する。

したプラズマの層、すなわち電離層と、高度およそ1000km以遠から宇宙空間に広がるほぼ完全電離したプラズマからなる磁気圏である（図2）。イオンと電子の混合ガスからなるプラズマでは、その密度変化に応じて電場が誘起され、また、イオンと電子の相対速度差による電流から磁場変動が生じる。この電磁場変動は、また、荷電粒子の運動に影響を及ぼし、粒子の集団運動が引き起こされる。なかでも、巨視的でゆっくりとした変動は磁場に沿って伝搬し、数10秒から数100秒程度の周期をもつ地磁気擾乱として観測される。このプラズマの波は、地球磁場に沿って流れる電流、すなわち、宇宙から地球へと降り注ぎオーロラを発光させる電子を運ぶ役割を担っている。一方、電子が降り込むと、電離層の電子密度が増加し電流が流れる。つまり、

宇宙と地球との間にプラズマを介した電流回路がつくられる。

では、どのような仕組みでオーロラの構造が生まれるのだろうか。以下では我々が取り組んでいる理論モデルについて概説する。図1の写真に見られるように、オーロラはしばしば多重構造をもって現れる。これを一種の波と見なそう。電離層中にプラズマ密度の濃淡ができたとする。これは水平方向に波として伝わると同時に、電磁場擾乱を生み、電流を運ぶプラズマの波として磁気圏中を伝播する。この電流回路に生じた2つの波がうまく共鳴すると互いに増幅しあい、オーロラとして発達すると考えられる。

### オーロラ発達のシミュレーション

こうした考えから、核融合プラズマの研究でも用いられるプラズマ物理の基本方

程式に基づいて、オーロラの発達を計算機で再現する試みを進めている。計算モデルとして、磁気流体方程式で記述される磁気圏プラズマと二流体方程式で表される電離層プラズマの結合モデルを構築した。そして、磁気圏プラズマの運動と磁場変動に加え、電離層プラズマの密度変化と電場変動を名古屋大学のスーパーコンピュータで追跡し、オーロラをかたちづくる密度や電流の構造変化を調べた。

図3はシミュレーション結果の一例をカラー表示したもので、色はプラズマ中に生じた渦の強さとその回転の向きを表している。初期に与えた平面波状のゆらぎが、不安定性の成長を介し、電磁場や速度場変動の増幅をもたらす。それが発達すると、2次的な不安定性が発生し、波面の変形や渦の巻き上がりが生じる。さらに非線形状態に入ると渦構造は大きく乱れ、電磁場をともなった乱流状態に遷移することがわかってきた。こうした乱流中では粒子加速が生じることも指摘されており、オーロラ発光をもたらす降下電子の加速機構としても興味深い。

今後は、プラズマの運動論的效果を含んだより詳細なシミュレーション研究を行うとともに、人工衛星観測によるオーロラ発達理論の定量的な検証を進めたい。

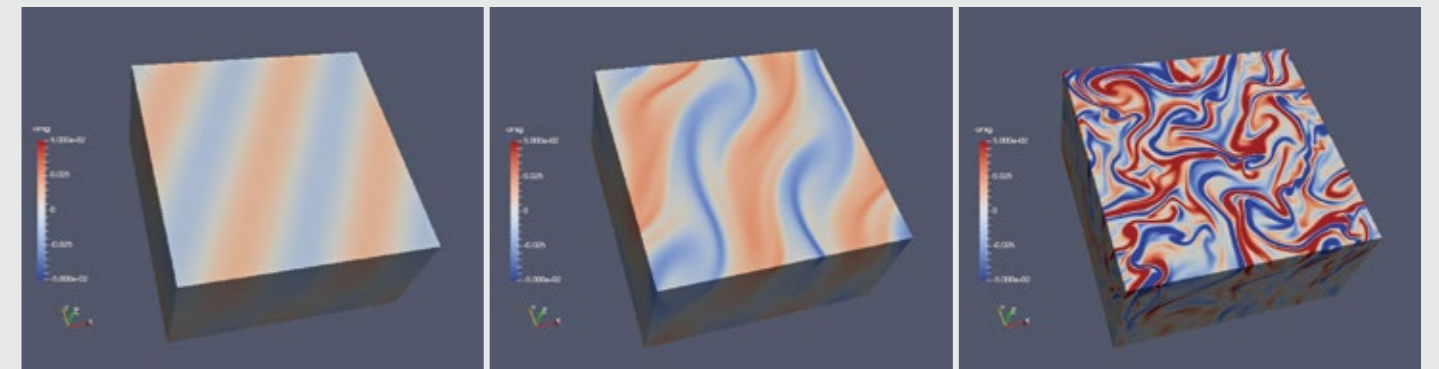


図3 オーロラ構造発達の計算機シミュレーション結果の例 図は磁気圏プラズマ中に発生した渦度分布を示す（赤色は反時計回り、青色は時計回りの渦を表す）。シミュレーション領域の上面が磁気赤道面、下面が電離層に対応する。不安定性の線形成長段階（左図）から、2次的不安定性の発達（中図）を経て、非線形な乱流状態（右図）に遷移する。(T.-H. Watanabe et al.2016, New J. Phys. 18, 125010)

プラズマ理論研究室ウェブページ <http://www.p.phys.nagoya-u.ac.jp/>

キャンパス通信

世界に開かれた大学を体感する

生命理学専攻講師  
杉山 伸 (Shin Sugiyama)

スチュージウム・ジェネラーレ (Studium generale) とはヨーロッパ中世初期の大学の呼び方であり、現代に続くUniversitasの前身にあたる。その特徴は、自国に限らずどこの学生であっても学ぶことができたこと、他大学において修士号 (Master) を取得した者であれば新たな審査なく教鞭をとることを認めたこと、そして地元の言葉ではなく当時の学問の共通言語であったラテン語を用いたことである。いまでも感心させられるような学問的な自由と国際性を13世紀の時点ですでに実現していた。

その名を冠した名古屋大学のスチュージウム・ジェネラーレは現代の共通言語である英語で開講される講義のシリーズである。理学部の教員がとりまとめているが、内容は人文科学、自然科学と多岐にわたる。伝統を踏襲し、一般学生、留学生、高校生、大学職員、教員など、名古屋大学関係者ならば誰でも受講でき、講師は毎回交代し、外国人の時もあれば、日本人の時もある。本学、他大学に限らず、実業界、芸術など諸分野から多彩な人材が招かれ、通常の講義では扱われない内容も取り上げる。書画のライブパフォーマンスや講義に登場した飲料の無料配布が行われたこと

スチュージウム・ジェネラーレウェブページ <http://bio.nagoya-u.ac.jp/G30StudiumGenerale/>



もある。日本では異色のこの講義形式は人気を博し、夕方を開講されることも手伝い、毎回100人前後の聴講者が熱心に耳をかたむける。

どこでも国際化は優先課題であり、名古屋大学では一部の専門科目を英語で受講することを卒業要件にすることが検討されている。スチュージウム・ジェネラーレの実績から判断すると、これは一般に思われているほど困難なことではない。内容が面白ければ、他では聞くことのできないような話であれば、そしてインターアクティブな講義が実施されれば、使用言語が英語であっても聴衆の集中力が途切れることはあまりない。現代の教育スタイルが中世に誕生した時から大学は自由で、国際性豊かな学問の場であったはずだ。そして、スチュージウム・ジェネラーレは正式な全学教育科目ではあるが、国際的な教育の広がりを目指してスタートしたことから、最近の大学では珍しく一般聴講も歓迎している。

読者のみなさんも、スチュージウム・ジェネラーレに参加してみて、中世の大学から続く学問のそんな伝統を少しだけ味わってみてはいかがだろうか。それは同時に数年先の名古屋大学の講義を体験したことにもなるかもしれない。

同窓生から

今も続く理学研究科との関係

ガジャマダ大学生物学部教授  
エンダン・セミアルティ (Endang Semiarti)

インドネシアは多くの熱帯雨林を有し、それらは5000種近くの野生蘭の棲息環境である。コチョウラン属を含むいくつかの蘭は、花が長持ちで鑑賞に優れ、経済価値が高い。そんな蘭の大量栽培と品質向上に必要な試験管培養手法と遺伝子工学技術が私の研究の対象である。

日本学術振興会の支援を受けて2カ月間過ごしたあとに、1995年10月から文部省の国費留学生として生命理学専攻の町田泰則教授の指導の下、植物の分子生物を学んだ。その時から続く共同研究が後に実り、コチョウランに遺伝子を導入する新手法を確立し、現在も日本学術振興会の二国間交流事業の支援で名古屋大学との共同研究を実施している。

大学院生としての5年半の間、たくさんの素晴らしい経験をした。日本や世界各国の多くの友人ができ、研究においても、友情においても、世界が広がった。忘れられないのは、1995年12月25日の夜、名古屋大学や東山タワーが綿布団のような厚い層の雪におおわれた景色がインターナショナル・レジデンスの私の部屋の窓からはっきり見えたこと。美しく、素晴らしかった。外に出てみると震え上がるほど寒く、しかし、それでも素晴らしかった。

私は理学研究科の出身であることを誇りに思う。そして名古屋大学の名声が世界でさらに高まることを願っている。



書籍紹介

『研究するって面白い！  
科学者になった11人の物語』

多元数理科学専攻准教授  
糸 健太郎 (Kentaro Ito)

11人の女性科学者が、自らの専門をわかりやすく解説するとともに、現在に至るまでの道のりを楽しく紹介している。それぞれの専門は植物学、医学、暗号理論、触媒化学、分子生物学、地球化学、代数学、幾何学などさまざまである。いずれも、数理学科の伊藤由佳理准教授が、高校時代から現在に至るまでに会って親交を温めてきた人々であり、その交友の広さは特筆に値する。

本書を一読して感じたのは、最初からその分野の専門家になろうとしていた人はほとんどいないということである。大学で歴史を学んだのちNHKに入社したものの脱サラして植物学の研究者になった人。食品メーカーでアイスクリームの商品開発をしていたのに、マーケティングに興味をもったことがきっかけでデータサイエンスの研究者になった人。他にも、海外の研究機関で働いている人、夫の仕事の都合で別の分野にチャレンジした人、あの秋山仁の影響で数学者を目指した人など、さまざまな研究者人生を垣間見るのはとても楽しい。

若い人が読めば、目の前に広がる多様な可能性にワクワクするに違いない。女性の視点から見た結婚や子育てなどの話題は参考になるだろう。男女を問わず広く研究者を目指している人、進路に悩んでいる人におすすめしたい。自分の計画通りに人生が進まなくても、思いがけないところから路は開けることを感じさせてくれる一冊である。

『研究するって面白い！  
科学者になった11人の物語』  
伊藤由佳理 (Yukari Ito) 編著  
岩波書店 / 2016年 10月発行  
820円(税別)

