

本誌『理フィロソフィア』が、記念すべき40号の節目を迎えた。2001年度の創刊以来20年間にわたり、毎年2号の発行ペースを守り、装丁や構成を大きく変更することもなく、名大理学の研究を世に伝えてきた。「創刊のこぼし」にあるように、理学部・理学研究科は、外的な動向に即応しつつもそれに惑わされることなく、20~30年先を見越した長期的な展望のもとに、真理を探究する基礎研究の発展を目指している。この精神に沿って、タイムリーなトピックスの解説に終始することなく、特徴ある研究とそれを営む研究者の姿を伝えるよう心がけてきた。地道にそのことを丁寧に続けてきたことを名大理学の一員としても誇りに思う。本来であれば、記念パーティを開催したいところだが、コロナ禍のためそれもできない。この場を借りて、これまでの発行に携わった多くの協力者と本誌を読み感想や意見を送ってくださった読者の方々に感謝申し上げたい。(飯嶋徹)

お知らせ

▶ 理学南館にバックナンバーが勢ぞろい

今号で『理フィロソフィア』は創刊40号を迎えました。理学南館1階ロビーには創刊以来の全号がそろそろバックナンバーコーナーが設けられています。ポケット式の棚には40号の表紙がすべて見えるように収納されており、気になった号がピックアップできます。40号の歴史をぜひ「一覽」してみたいかがでしょうか。

▶ バックナンバーはウェブからも入手できます

理学部・大学院理学研究科のウェブページにある広報誌サイトでも、すべてのバックナンバーがPDFファイルでダウンロードできます。こちらにもぜひアクセスをお願いいたします。
<https://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/backnumber.html>



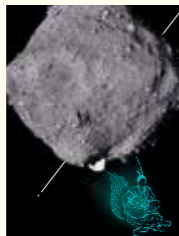
▶ 名古屋大学のコロナ対策

新型コロナウイルス感染症が世界的に猛威を振るい、日本国内においても感染が拡大しています。政府において、新型コロナウイルス感染症対策の基本方針が策定されたことを踏まえ、名古屋大学でもさまざまな対応策を講じています。名古屋大学の最新の活動指針については以下をご参照ください。
<https://www.nagoya-u.ac.jp/>



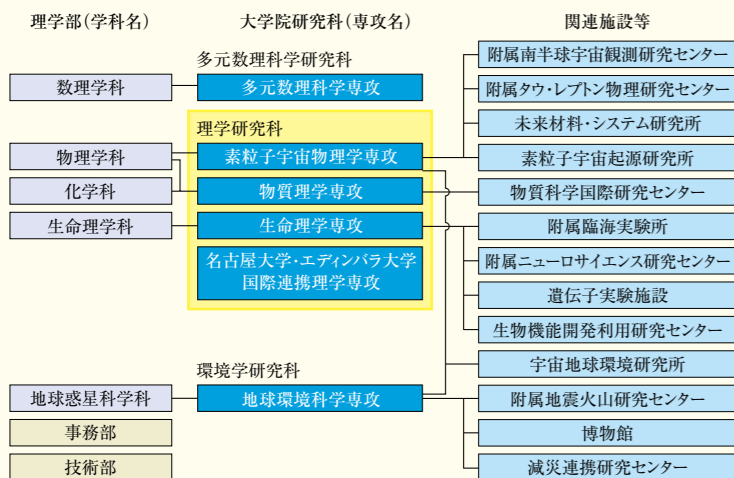
表紙説明

炭素を含む有機物や水が存在すると考えられている小惑星リュウグウ。炭素と水は地球上の生物の原材料とも言える。「はやぶさ2」が持ち帰った玉手箱が今あけられようとしている。



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)



理 *philosophia* — No.40
 spring-summer 2021
 2021年05月14日発行

広報委員 阿波賀邦夫(研究科長)
 寺崎一郎(副研究科長)
 嘉村 巧(副研究科長)
 松尾信一郎(数理学科)
 飯嶋 徹(物理学科)※委員長
 中澤知洋(物理学科)
 川崎猛史(物理学科)
 伏谷瑞穂(化学科)
 杉山 伸(生命理学科)
 平子善章(生命理学科)
 夏原由博(地球惑星科学科)
 南崎 梓(素粒子宇宙起源研究所)
 堂前弘樹(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。

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 052-789-2308 FAX 052-789-2800 E-mail kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp URL http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/



特集

「生命の謎を宇宙に探る」

04 — 「はやぶさ2」の竜宮城往還記 ◇ 渡邊誠一郎

08 — 隕石が運ぶ生命の素 ◇ 三村耕一

02 — 時を語るもの〈福井崇時博士〉 ◇ 飯嶋 徹

03 — 理のエッセイ ◇ 森吉仁志

12 — 理の先端をいく ◇ 谷口博基 / 井上晋一郎 / 柳井 毅

18 — 理学部交差点



福井崇時博士 — 飛来する粒子を可視化する

福井崇時博士は、1950年代に、「ネオンホドスコープ」と呼ばれる装置を粒子が通過する際に生じる放電を使って、宇宙線が大気中で引き起こす空気シャワーの構造を精密に決定した。やがて福井博士は、宮本重徳^{*1}博士とともに、この放電がガラス管全体ではなく、粒子の飛跡に沿って起こることを見出した。そこで、2枚の導電ガラス板の間にネオンガスを封じ込め、宇宙線粒子が入射した時に短時間、高電圧のパルス（トリガー）を印加すると粒子の飛跡に沿って局所的な放電が起こることを確かめた。「放電箱」の発明である。

スパークチェンバーともよばれるこの装置は、粒子が通過した位置の決定精度が高いうえに、応答時間が極めて短く、トリガーを使うことで目的の現象のみを観測できる。そのため、宇宙線研究のみならず、事象頻度が高い加速器を使った高エネルギー物理実験の主流装置の一つとなり、1960年代の数々の発見^{*2}をもたらした。福井博士は、放電箱を応用した加速器実験に軸足を移し、日本の高エネルギー物理学の先駆けともなった。「最先端の研究成果は最先端の装置開発から」-名古屋大学の伝統をここにも見ることができる。（飯嶋 徹 素粒子宇宙起源研究所教授）



福井崇時 (1923 - 2018)
元名古屋大学理学部教授
紫綬褒章受章(1985)

***1 宮本重徳 (1931 - 2017)**
大阪大学名誉教授

***2 1960年代の数々の発見**
ミュー型ニュートリノの発見 (1962)、CP対称性の破れの発見 (1964) の実験で放電箱が使われている。



◇写真の説明
名古屋市科学館における放電箱の常設展示。1978年に名古屋市科学館は日本で初めて放電箱の一般公開を行った。現在の装置は外装を変えているが、放電箱そのものは科学館導入時のままで作動させている。写真は宇宙線粒子の飛跡に沿って放電箱で起こる放電の様子と展示外装。

うたかたの表現性

森吉仁志 多元数理学専攻教授



Illustration: Junichi Kishi

1年前の今頃コロナウィルス感染者数が増え始めた。本学では春学期は対面授業を休止して遠隔講義とし、秋学期は一部対面授業を再開した。

昨年6月に遠隔授業に関する調査を行ったところ、学生の8割が肯定的であった。動画を好みの場面で止めたりして自分のペースで学習できる、通学がないので効率的、時間に縛られないという。

しかし遠隔が対面に勝るとは思えない。この結果は、私にとって対面授業の特性を熟考する良い機会となった。対面の利点と遠隔の不利な点（カッコ内）を列挙してみよう。黒板では多量の情報を見渡せる（PCの画面は小さい）、気軽に質問ができる（同時の質問は聞き取れない）、その場で説明を追加省略できる（ファイルは変更できない）、流れに乗り先に進める（一人では理解できないと止まる）。

こうして対面授業の特性がわかってくる。一つは、教員と受講者の意思疎通が極めて密接に行われていることである。対面授業では、送り手は話しかける最中にも受け手の反応を確かめており、次の働きかけを刻々と修正している。意思疎通は、瞬間においてすら一方通行ではない。もう一つは、消えるものに託した表現の有効性である。コンサートに行くことや寄席で落語を聞くことなどは、すべて送り手の流れに乗って進むことである。流れは止むことなく、現れた泡沫は消えては生まれて生まれては消え、片時もとどまることはない。忘れ去られ消えゆくからこそ表現できることもある。冗談を交えた講義の説明によって、書籍を何度読んでも理解できなかった概念を頓悟した数理教員も多いと思う。

泡沫をうたかたという。瞬間での意思疎通や消えゆくことを前提にした表現とは「うたかたの表現性」であろうか。

対面授業から離れてほぼ1年になる。うたかたの表現性に気づいて対面授業の深みを再認識し、講義を楽しみに思えるようになった。感染症流行が終息し、全面的に対面授業が再開される日が早く来ることを強く希う。

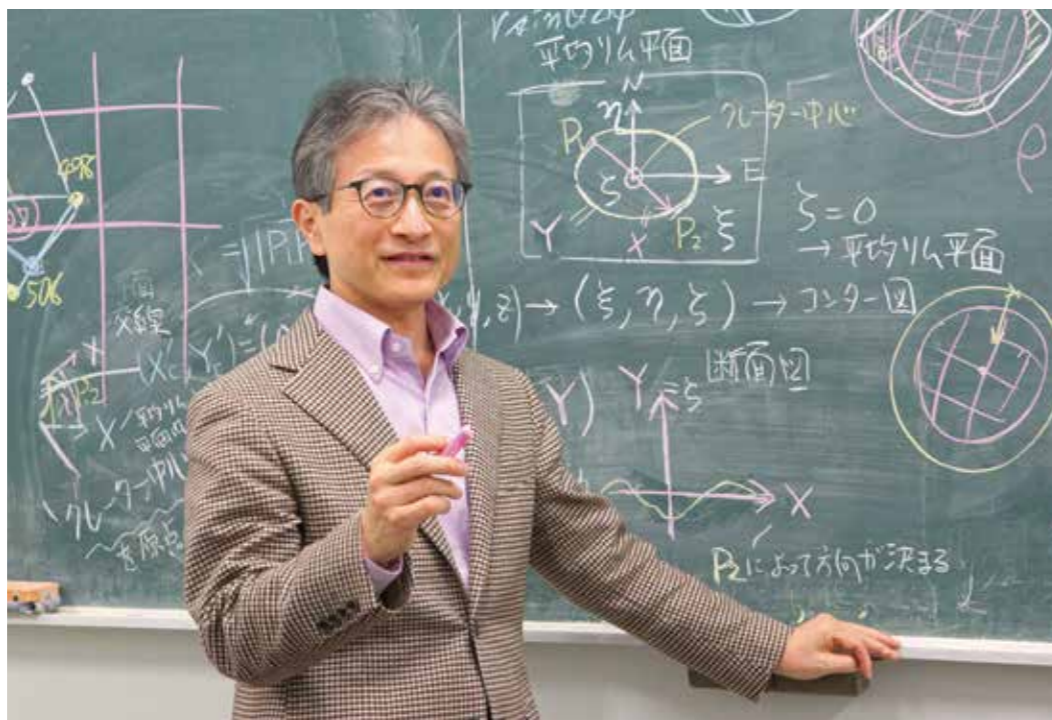
Hitoshi Moriyoshi

1961年広島県生まれ。東京大学理学系研究科、ブラウン大学大学院、ペンシルベニア州立大学 (Ph. D.) を経て、ニューヨーク州立大学、東京工業大学、北海道大学、慶應義塾大学で教鞭をとり、2009年より多元数理学専攻教授。指数定理と非可換幾何学に関心を持っている。

「はやぶさ2」が小惑星リュウグウから試料を持ち帰った。生命の原材料である有機物や地球の海水の起源を探求する。詳細な分析は今後なされるが、今号の特集では「はやぶさ2」のリュウグウへの到達から地球への帰還についての経過と意義について論考いただいた。もう一編は、地上に落下した隕石からわかった宇宙での生命の進化の可能性についての研究成果である。生命の謎を宇宙に探る研究は新しい局面を迎えた。

「はやぶさ2」の竜宮城往還記

渡邊 誠一郎 地球環境科学専攻教授



Sei-ichiro Watanabe

1964年静岡県生まれ。1990年、東京大学大学院理学系研究科地球物理学専攻博士課程中退。1990年、山形大学理学部助手。1993年、名古屋大学理学部助手。1995年、同大学大学院理学研究科助教。2001年、同大学院環境学研究科助教を経て、2008年より現職。理学博士。専門は惑星科学。2012年より、はやぶさ2プロジェクト・サイエンティスト。

竜宮城への到着まで

『理フィロソフィア』25号の「理の先端をいく」で、「はやぶさ2」計画をご紹介してから7年半。当時は探査機開発の山場を迎えていて、打ち上げに間に合うか心労の日々だったが、昨年12月6日（以下

も含め、日本時間）に小惑星表面試料が入った再突入カプセルが無事オーストラリアで回収され、現在は宇宙航空研究開発機構（JAXA）宇宙科学研究所内の施設で、分取作業を進める段階に至っている。私は、太陽系形成論が専門で、2012年以

来、サイエンスを統括するプロジェクト・サイエンティストとして、本ミッションに携わってきた。

「はやぶさ2」ミッションは小惑星リュウグウの表層物質を地球に持ち帰るサンプルリターン探査である。サンプラーは、機



図2 小型ローバーMINERVA-II 1B（アウル）が写したリュウグウ表面
9月21日、同一設計の2台の円筒状のローバー1A（イブ）と1Bが同時に「はやぶさ2」から放出され、トリトニスと名付けられた領域に着陸した。これらのローバーは表面をホップして移動する。この画像はホップする直前に撮影。岩石に覆い尽くされた表面の様子がわかる。
(写真提供: JAXA/工大/明治大/会津大/産総研)

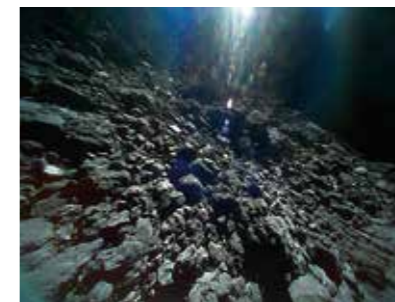


図1 「はやぶさ2」がとらえたC型小惑星リュウグウ
2018年9月20日撮影。ONC-Tの7バンド7枚の連続画像を超解像処理。赤道リッジが目立つそろばん珠の形状で、赤道直径は約1km。南極付近にはオトヒメボルダー（岩塊）。赤道上のやや左にはウラシマクレーター。「はやぶさ2」の観測は基本的に天体上空の地球方向から行う。超解像処理はJAXA横田康弘氏による。
(写真提供: JAXA/東京大/高知大/立教大/名古屋大/千葉工大/明治大/会津大/産総研)

体下方に伸びる筒状のサンブラホーンが着地（タッチダウン）した瞬間にホーン内部から弾丸が表面に向けて発射され、衝撃で跳ね飛ばされた砂礫がホーンに導かれキャッチャーに入る方式だ。他にも光学カメラONC-T、中間赤外カメラTIR、近赤外分光計NIRS3、レーザ測距計LIDARが科学観測機器として、衝突装置SCIと分離カメラDCAM3が宇宙衝突実験用に搭載されている。

「はやぶさ2」は2014年12月3日、種子島宇宙センターから打ち上げられ、地球スイングバイや長期のイオンエンジン運転によって軌道を変え、2018年6月にリュウグウ近傍に達した。その後、探査機がゆっくりと近づき、6月27日に小惑星中心から地球方向に20kmのホームポジションに到着した。3年半の旅路の末に門前に至った竜宮城は、そろばん珠のようなかたちで、入城を峻拒する鬼の如き岩塊がひしめき、炭素質の暗い輝きを放っていた（図1）。

ミッションの最大の難関は、地上からはかたちも自転軸方向も未知の天体に対して、到着後の短期間の観測データを分析

して、試料採取点とアプローチ計画を立てねばならなかったことだ。実は、到着前の1年以上をかけて、私たちは3億ポリゴンの仮想小惑星リュウグウの形状・熱モデルを計算機上に作成し、それを使った模擬観測、データ解析、着陸点選定の訓練を実施した。その経験を生かし、到着直後から機器較正をしながら、観測を開始し、データ解析と形状モデル作成を進めた。

大地への接吻を祝う紙吹雪

自転軸が軌道面にほぼ垂直であったのは観測に好都合であった。しかし、全球に無数に転がる岩塊の隙間に、なるべく広い着地候補領域を見つける作業は困難をきわめた。2018年8月の時点で、赤道付近のL08と名付けられた100m四方の地域はボルダー数密度が低く、候補地域に選定された。しかし、9月から10月にかけて相次いで表面に投下されたローバーMINERVA-IIや着陸機MASCOTは、岩塊に覆われた恐ろしい地表を映し出した（図2）。また、投下運用時の低

高度からの観測で、L08地域にも岩塊が多数あり、安全な着地には高精度の自律制御により狭い領域をめざす必要があった。訓練時に人造天体リュウグイドには着地可能領域が仕組んであったが、神の手なるリュウグウははるかに強敵だったのだ。

そこで、私たちはタッチダウン方式を変更する決断をした。まず、ターゲットマーカー（TM）とよばれる目印を降下運用で設置し、その後、TMから目標点までの相対位置を探査機にセットした上で再び降下し、TM捕捉後、目標点まで自律移動させる方式を選んだ。10月25日にまずは高度13mまで降下して、TMを設置した。しかし、TMは目標点からずれて静止したため、近くに新たな目標領域L08-E1（半径3m）を設定した。その後、リュウグウと地球の間に太陽が入ってしまう合期間があったため、翌2019年2月22日に第1回目のタッチダウンを行う計画を立てた。

トラブルで前日の降下開始が遅れたものの、降下速度を上げて予定に追いつき、見事に目標点へのタッチダウンを果たした（図3）。サンブラホーンを視野に収めたモ

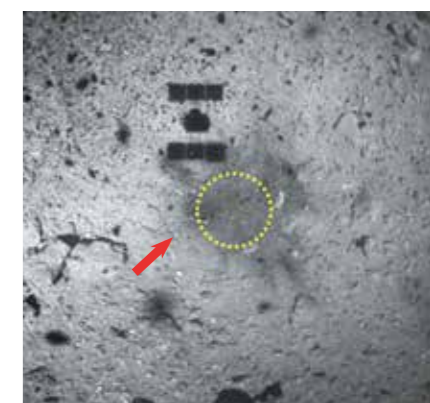


図3 第1回目のタッチダウン直後の着地点付近の様子
2019年2月22日、高度25mから可視広角カメラONC-W1で撮影。赤矢印は事前設置されたターゲットマーカー。黄色の破線は半径3mの着地目標域L08-E1で、その中に誤差1mでピンポイント着地に成功したことが事後解析で確認された。中央付近の黒い模様は表面離脱噴射で舞上がった岩片と表面の擦痕。
(写真提供: JAXA/東京大/高知大/立教大/名古屋大/千葉工大/明治大/会津大/産総研)

ニタカメラCAM-Hの画像によって、タッチダウン直後に大量の砂礫が表面から舞い上がる様子が確認され、私は試料採取の成功を確信した。実はCAM-Hは試料採取用の弾丸が造った小クレーターを写すために搭載されたのだが、弾丸衝突と探査機の表面離脱噴射により舞い上がった砂ばかりで、表面の様子はわからなかった。しかし、成功を祝う紙吹雪のように砂礫が舞い飛ぶ画像は、私たちに忘れえぬ感動を残した。

扇的を射よ

2019年4月5日、「はやぶさ2」は小型衝突装置SCIによる人工クレーター生成実験に挑んだ。爆薬入りの起爆部は底面に2kgの銅板が張られた円錐形だが、起爆とともに銅板は自然と半球状に成形され、秒速2kmで天体表面に衝突する設計だ。容器は爆発で四散するため、探査機は小惑星の陰に隠れねばならない。待避に要する約30分間、円柱型のSCIは小惑星近傍空間で中心軸のまわりを回りながら待ち、時限起爆する。SCIの衝突でリュウグウ表面から放出物が出る様子は、探査機待避の途中で分離される小型カメラDCAM3によって撮る計画である。

危険を伴うSCI運用のため、チームはいつも増した緊張に包まれた。待避が無事にできた後も、クレーター生成は未確認の中、母船経由で地上に伝送されたDCAM3の画像を、私も固唾を飲んで見守った。DCAM3にはアナログ系とデジタル系の2系統のカメラが組み込まれているが、解像度は低いがデータ容量の小さいアナログ系の起爆推定時刻前後の画像のみがダウンロードされた。傾いたリュウグウの像に目を凝らすと、一筋の白線が表面に対して45°ほど傾いて伸びていた。アナログ系の1秒後に撮られたデジタル系の画像を図4に示す。たちまち、チームメンバーがディスプレイを何重にも取り囲み、歓喜の叫びが続いた。

その後、探査機はホームポジションに戻り、人工クレーターの降下観測を行った。縁から縁までの直径が18mにも達する巨大なクレーターが生成されていた。本番と同条件で事前に行った地上実験では生成孔の大きさは2mあまり。ここまで大きくなったのは、天体重力が地球の重力に比べ8万分の1ときわめて小さく、かつ、表層を構成する砂礫を固着させる力が非常に弱かったことが原因で、クレーターからの放出速度がとても遅くても遠くまで

飛んだためだ。クレーター生成の様子はDCAM3のデジタル系の画像では、まさにスローモーションを見るようで、10分近く続いた。

生成されたクレーターは半円形で、放出物は北西側半円の方に偏っていることもONC-T画像解析から明らかになった。そこで、次のタッチダウンはSCIクレーターの北北西の約20m離れた領域に設定された。7月11日、第2回目のタッチダウンが敢行され、CAM-Hの視野には再び成功の紙吹雪が舞ったのである。

竜宮城でわかったこと

リュウグウ近傍探査の成果は、2021年2月時点でScienceやNatureなどの一流国際科学誌に30編近い論文として発表されている。主な成果を簡潔に紹介しよう。

赤道が張り出したそろばん珠のようなかたちは、過去の高速自転で生じたことが形状モデル解析から明らかになった。表面熱放射の非等方性によって自転状態が変化するYORP効果によって、リュウグウの自転周期は、過去には現在の7.63時間より短時間で自転していたことがわかった。自転周期が3.5時間程度まで短い時に、遠心力により表層地滑りが起こり、形状形成

されたことが示された(図5)。

リュウグウ表面には含水鉱物がほぼ全域に存在することが近赤外分光計NIRS3の観測から明らかになり、表面反射率が低く炭素質物質の含有率が高いと予想されることとあわせて、小惑星帯から地球へもたらされた水や有機物の起源に関する制約が、帰還試料の分析から得られるのではと期待される。

リュウグウ表面の分光学的特徴は地域変化が小さく、平均密度が1.2g/cm³と低いこととあわせて、母天体が破壊された際に比較的均質な破片を集めて生成された「がれき(ラブルパイル)天体」であることを示す。ただし、岩相や色に違いもあることなどから、母天体上での熱変成や衝突破砕の影響が示唆される。過去の一時期に特に表面風化が進んだことを示す解析結果から、その頃、太陽にかなり近づく楕円軌道をしていたことが示唆された。このようにリュウグウの歴史も紐解かれつつあり、帰還試料の絶対放射年代測定による検証が待たれる。

SCI衝突実験の大きな成果は、小惑星上で初めて衝突実験を行って、衝突エネルギーと生成クレーター半径の関係を求め、従来の想定よりも小さな衝突体でも大きなクレーターができることを明らかにした点にある。これをリュウグウ上の天然のクレーターのサイズ頻度分布にあてはめ、小惑星帯での小惑星サイズ個数分布の関係を組み合わせることで、その表面年代を推定すると、約1000万年と若いことがわかった。これは起源と目される母天体が衝突破壊を起こしてリュウグウを形成したと推定される時期よりもずっと若く、形成後に高速自転による地滑りなどで表面更新された(それまでに蓄積されたクレーターがかき消された)可能性を示唆する。

中間赤外線カメラTIRによるリュウグウの熱画像からも大きな発見があった。表

面の放射温度の日変化は、日の出とともに急上昇して、その後は日中にわたって変化は少なく、日没の直前になって急降下するという特異なものだった。大気をもたず岩だらけの天体表面では、面の向きはさまざまで、太陽光が低角入射する朝夕でも、太陽に正対する面があって、高温となる。大気がないため隣接する面で温度が違っていても緩和しない。こうした表面をホームポジションから観測すると、上述の特異な温度変化が得られるのだ。表面の凹凸を加味した熱モデルはTIRの観測結果を再現しており、小天体の標準的な熱モデルになるだろう。

玉手箱の中にあった宝物

「はやぶさ2」は2019年11月にリュウグウを出発し、2020年12月6日未明、リュウグウ試料を格納したカプセルを地球に投入し、オーストラリアにパラシュートで落下させた(図6)。回収された5gを超える試料はキャッチャーから取り出され、分別・秤量と可視・近赤外線分光が進められている。2021年6月には全国の研究機関に分配され、各種の初期分析や高次記載が実施される。近傍観測は多くの発見をもたらしたが、それ以上に多くの謎を生み出している。それらの謎は、今後の地上分析によって決着がつくものと期待される。

NASAの打ち上げた探査機OSIRIS-RExがリュウグウに似た炭素質小惑星ベヌスの詳細な周回観測を行い、2020年10月20日に1回りの試料採取に成功した。2023年9月に試料を地球に持ち帰る予定である。リュウグウとベヌスの近傍観測結果と試料分析結果を比較することで、炭素質小惑星としての共通性とそれぞれの天体のもつ個性とが弁別できるものと大いに期待される。

「はやぶさ2」は予定通りカプセルを地球に投入した後は、地球離脱のための噴射を行って、地球と金星の軌道をつなぐよう



図6 「はやぶさ2」再突入カプセルの火球画像
2020年12月6日、オーストラリアのクーバーベディ付近で撮影。画像を横切る明るい光跡が、大気圏突入による昇温で発光して火球となったカプセルが描いたもの。ケンタウルス座α星(画像中で最も明るい星)付近で温度が下がり減光したのがわかる。火球の左上の光跡はスペースXのスターリンク通信衛星の1機とみられる。(写真提供:JAXA)

な楕円軌道に入った。これによって7年後に再び地球に戻り、二度の地球スイングバイで、1998KY26という仮符号がつけられた自転周期10.7分で高速自転する微小な(直径30m前後)小惑星へのランデブーをめざす計画を立てた。直径1kmのリュウグウと数m以下の隕石とをつなぐサイズの微小小惑星への探査は世界初であり、どれほどの強度をもつ天体なのかなど、興味は尽きない。到着は2031年7月とはるかに先となり、それまで探査機や観測機器が健全な状態を保てるかは予断を許さないが、この新たな挑戦を若いメンバーが引き継ぎ、成功させてくれることを期待したい。

はやぶさ2プロジェクトホームページ
<https://www.hayabusa2.jaxa.jp/>

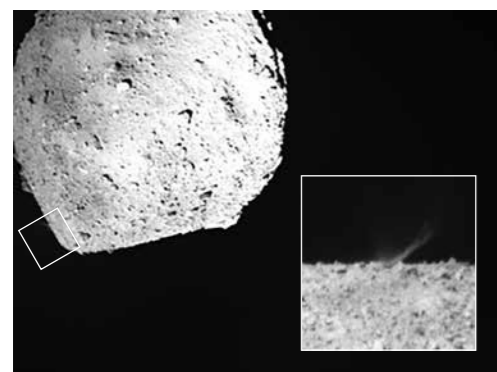


図4 分離カメラDCAM3がとらえた人工衝突放出物
2019年4月5日撮像。衝突装置SCIの銅球殻が表面に衝突して3秒後のDCAM3デジタル系の画像。リュウグウの赤道よりやや北に衝突。衝突点付近の拡大図(120°右回転)に生成クレーターから掘削された放出物の白い筋が見える。放出物は非対称で、北側(右側)の方が濃くのびている。(写真提供:JAXA/神戸大/千葉工大/高知大/産業医科大)

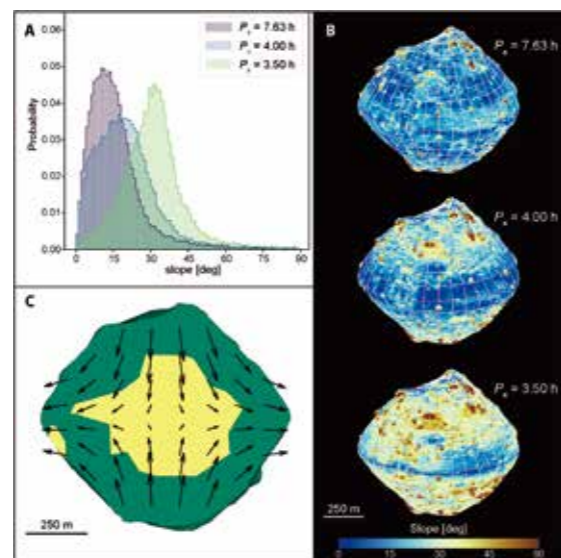


図5 表面傾斜分布と降伏モードの数値解析例
密度一定の形状モデルを使用。(A) 周期7.63時間、4.0時間、3.5時間で自転させた場合の面積重み付きの表面傾斜分布。(B) それぞれの自転周期での形状モデルに投影した表面傾斜マップ。周期3.5時間になると、岩塊などを除いて表面傾斜が35°程度となる。これは過去の高速自転で広範な領域で表面地滑りが起こり形状形成されたことを示唆する。(C) 自転周期3.5時間ときの内部降伏領域(黄色)と変形ベクトル。砂礫間の凝集力が弱いこのケース(数Pa程度)では内部崩壊モードだが、凝集力が増加して十数Pa以上となると表面地滑りモードに移行する。(Watanabe et al. (2019), Science 364, 268)

隕石が運ぶ生命の素

三村 耕一 地球環境科学専攻准教授

有機物を含む隕石

1969年9月28日午前11時ごろ、オーストラリア、ビクトリア州の空を光り輝く光球が横切った。その軌道の先に位置するマーチソン村一帯(15km²)に散らばった真っ黒な塊は、マーチソン隕石と名付けられる。隕石は落下後すぐに採集され、回収量は合計100kgに達した。隕石の表面は、鉄などの沸点が高い物質でできたフェュージョンクラスト^{*1}に覆われ、落下時に隕石が高温に曝されて溶融したことを物語っている(図1a)。隕石の内部は黒く、0.5~2mm程度の

球形をしたコンドリュール^{*2}とよばれる球粒が点在している(図1b)。これらの特徴から、マーチソン隕石は炭素質隕石と分類され、太陽系ができて間もないころに存在した状態を保ち続けている隕石であることが判明した。

マーチソン隕石の薄片を偏光顕微鏡で観察すると、さまざまな鉱物が確認できる(図2)。これまでに、マーチソン隕石については、鉱物組成、化学組成、有機物組成、同位体組成の分析が詳細に行われてきている。特に、有機物分析については、マー

チソン隕石が落下後ただちに回収され、地球の有機物汚染を最小限に留めたことが有利に働いた。さらに、マーチソン隕石が落下した1969年はアポロ計画のまただ中で、同年の7月にはアポロ11号が人類史上初めて月に着陸し、月試料を地球に持ち帰っていた。アポロ計画により確立された高度な分析技術が、隕石の分析にも適用されることになったのだ。

マーチソン隕石には炭素が2%程度含まれており、多種多様な有機物が存在している(図3)。この中には、酸にも有機溶媒に



図1 マーチソン隕石の外部(a)と内部(b)
マーチソン隕石のようなケイ酸塩鉱物からできている隕石は、地球の岩石と区別が付きにくく、道端に落ちていても隕石とは気づかないかもしれない。
(a) 隕石の表面はフェュージョンクラスト^{*1}に覆われていて、溶けた物質が流れてできた模様も観察できる。
(b) 隕石内部は、主に黒く見える細かい粘土鉱物で構成されており、白く見えるコンドリュール^{*2}が全体に散らばっている。有機物はこの黒い部分に保持されている。
スケールの最小目盛りは、両写真とも1mm。(所蔵:名古屋大学地球環境科学専攻)

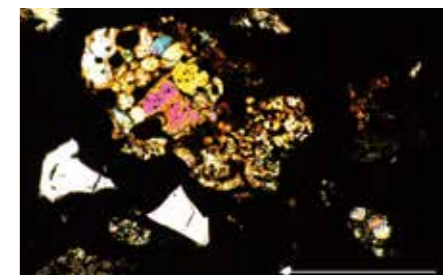


図2 マーチソン隕石の薄片写真
隕石を50μmほどに薄く磨いて偏光顕微鏡で観察すると、鉱物が光を透過して特有の色を呈する。写真中央部で色鮮やかに見える部分の集合体は、主に輝石という鉱物でできているコンドリュールである。コンドリュールは原始太陽系星雲の中でできたため、分析することで初期太陽系のさまざまな情報を得ることができる。写真右下の白いスケールバーの長さは500μm。(写真提供:橋口未奈子名古屋大学地球環境科学専攻助教)

も溶解しない不溶性有機物や、アミノ酸、核酸塩基、尿素など生命体と密接に結びついている有機物も含まれる。これらの化学組成と同位体組成から、検出された有機物は地球の生命体によってつくられたものではなく、もともと隕石中に存在していた宇宙有機物であることが明らかになった。

これ以前にも、隕石に対して有機物分析が行われたことはあった。たとえば、スウェーデンの化学者ベルセーリウスは1834年にアレ隕石の有機物分析をしているが、検出された有機物を地球外物質と

結論づけることはなかった。その6年前の1828年、ベルセーリウスは、自分の弟子であるウェーラーが無機的に尿素をつくり、天然有機物の人工的な合成に成功したことを知っていたはずだが、当時、有機物は生命体がつくる物質だという認識が非常に強く、宇宙有機物の存在を受け入れることができなかったのである。さらに、当時は有機物の起源を判断するための分析技術がなかったことも、隕石有機物の起源を正確に把握できなかった理由であろう。

それに比べ、マーチソン隕石は落下直後に注意深く回収され、高い分析技術でデータが得られたため、宇宙有機物の存在を証明する歴史的な隕石となった。その後、過去に回収された数種類の炭素質隕石の再分析により、これらの隕石も、マーチソン隕石と同様に多種多様な有機物を含んでいることが確認された。これにより、炭素質隕石は宇宙有機物を保持しているという認識が一般的になった。

化合物	存在度 (ppm)
脂肪族炭化水素	35
芳香族炭化水素	30
カルボン酸	370
アミノ酸	60
アルデヒド、ケトン	30
糖アルコール	60
アミン	10
尿素	25
核酸塩基	0.2
スルホン酸	70
ホスホン酸	2
不溶性有機物	1.45%*

図3 マーチソン隕石から検出された主要な有機物の種類とその存在度
不溶性有機物は、ベンゼン環、カルボキシル基、アミノ基など様々な基が複雑に絡み合っていてできる有機物である。また、不溶性有機物は、炭素質隕石から検出される有機物のなかでも圧倒的に高い存在度を示すため、他の有機物が不溶性有機物から生成したと考える研究者も多い。*は不溶性有機物のみ、単位は%。(主にSephton, 2002より)。

隕石から検出されたL体過剰のアミノ酸

地球生命体のタンパク質を構成するアミノ酸(以下、タンパク質アミノ酸)のうち、マーチソン隕石からは、グリシン、アラニン、グルタミン酸、バリン、プロリン、アスパラギン酸、ロイシンが検出された。その他はタンパク質を構成しないアミノ酸(以下、非タンパク質アミノ酸)で、その化学種は70種類以上報告されている。また、マーチソン隕石から検出されたアミノ酸の中にはD体に比べてL体が過剰に存在するものがある。

一般に、グリシンを除くα-アミノ酸は、異なる旋光性を示す異性体(鏡像異性体)を持ち(図4)、触媒を使わず無機的に合成されたアミノ酸はD体とL体が等量のラセミ体となる。一方で、マーチソン隕石の非タンパク質アミノ酸の中にはL体の鏡像異性体過剰^{*3}が2~9%程度を示すものが報告されている。L体過剰の原因としては、原始太陽系星雲に円偏光が降り注ぎ、選択的にD体アミノ酸が分解されてL体過剰のアミノ酸が隕石中に残ったという考え方が提案されている。

マーチソン隕石のタンパク質アミノ酸が示すL体の鏡像異性体過剰については、地球生命体からの汚染を排除しきれないということで、その信憑性に関して賛否両



Koichi Mimura

1966年生まれ。1995年、名古屋大学理学研究科にて博士(理学)取得。名古屋大学理学部助手、日本学術振興会海外特別研究員(アメリカ地質調査所アンバー)、名古屋大学環境学研究所助手を経て、2005年より現職。専門は、地球化学。現在、衝撃圧縮と静水圧縮でつくられる高温高圧環境(250~900℃、1~35GPa)での有機物の挙動を研究。

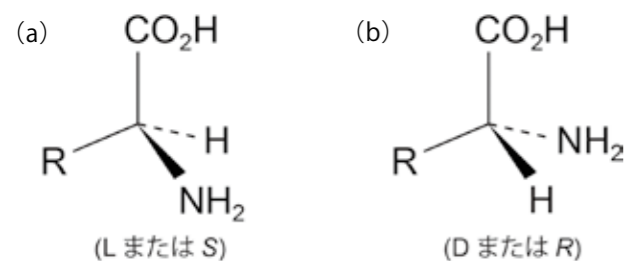


図4 アミノ酸の鏡像異性体
グリシン以外のα-アミノ酸は不斉炭素を持つため、片方がもう片方の鏡像となる鏡像異性体を持つ。鏡像異性体は、直線偏光を透過する時に偏光面を回転させる性質を示し、その回転方向によって、LまたはS体、DまたはR体と区別される。
(a) L-アミノ酸、(b) D-アミノ酸。
図中のRはH以外のアルキル基。

論ある。しかし、宇宙起源のアミノ酸がL体の鏡像異性体過剰を持つという事実は、地球生命体がL体アミノ酸のみを使用するホモキラリティー^{*4}を示すことと無関係とは思えない。

宇宙には有機物があふれている

有機物は地球生命体の最も重要な構成要素の一つである。自然界に有機物が存在する場合、そこに生命体の存在を意識するのはごく普通のことだろう。それは、ベルセーリウスの時代はもちろんのこと、有機物がいとも簡単に実験室で合成されるようになった現在でも変わっていない。では、隕石中の有機物は宇宙生命体の存在を裏付けるものなのだろうか。実際に、隕石中の有機物には、アミノ酸、核酸塩基、尿素など、地球の生命体と密接に関連している化合物も含まれている。

地球の生命体は「入れ物を持つ」、「自己複製できる」、「代謝機能を持つ」、「進化する能力を持つ」という四つの特徴を持っている。これまで、この四つの特徴を持つ物体は、隕石中にも地球外の天体にも見つからない。ただし、存在していたがすでに死んでいるため、その特徴が検出できないのかもしれない。そもそも、宇宙生命体は地球のものではないため、同じ特徴を示す必要もないのかもしれない。

隕石中には地球生命体に類似した物体はこれまで見つかっておらず、隕石の有機物は非生物的に生成したの物と考えるのが一般的である。電波望遠鏡での観測により、星間分子雲にはさまざまな有機物が

存在し、それらを構成している水素、炭素、窒素などの元素は重い同位体 (D、¹³C、¹⁵N) を多く含むことが報告されている。隕石中の有機物も重い同位体の水素、炭素、窒素を含むことから、隕石は星間分子雲でできた有機物を含んでいると考えられている。さらに、太陽系の進化を考慮すると、原始太陽系星雲から隕石母天体 (隕石のもとになった天体) が形成するまでに、有機物の変質や分解、新たな有機物の生成などの過程があったはずである。そのため、隕石中の有機物の成因としては、生成した場所に合った反応が提案されているので、以下に紹介する。

星間分子雲では、気相でのイオン-分子反応や星間塵の表面での光反応が提案されている。特に、有機物に重い同位体 (D、¹³C、¹⁵Nなど) を濃縮させるイオン-分子反応は重要である。

原始太陽系星雲では、熱分解反応、鉱物表面での触媒反応、光反応、放電反応などが提案されている。このステージでは、星雲の中心で輝き始めた太陽からの距離によって温度が変わるため、それに伴って熱分解反応で生成される有機物組成が変化する。また、星雲中では対流が起こるため、上の反応で生成した有機物の混合が起こる。

隕石母天体では、熱分解反応、鉱物表面での触媒反応、加水分解反応、光反応、放電反応、衝撃反応などが提案されている。隕石母天体での反応の特徴は、液体の水が存在する環境での反応である。この環境下では、アルデヒド、シアン化水素、ア

ンモニアからα-アミノ酸を合成するシュトルッカー反応が起こり得る。以上で挙げた宇宙有機物の生成環境は、私たちの太陽系に限ったものではない。宇宙のいたるところで有機物がつくれ、宇宙には生命の構成要素となる有機物があふれていると考えてよい。

宇宙生命体は存在するのか

「パンスペルミア説」という考え方がある。これは、宇宙空間に存在する「生命の種」が初期地球に降り注ぎ、その種が発芽・進化して地球生命体になったという説だ。そんなSF小説みたいな話があるのかと思われるかもしれないが、スウェーデンの化学者アレニウスやイギリスの科学者で二重らせん構造の発見者クリックなど、名だたる科学者がこの説を支持していた。

宇宙生命体の報告例がないのでパンスペルミア説を肯定することはできないが、宇宙生命体の存在を否定できないのも事実である。ただし、地球生命体の起源を解明する場合、もし宇宙生命体に起源を持つとしても、宇宙生命体の発生過程を考えなければならず、根本的な解決にはならない。そのため、地球内で生命体が発生したと仮定し、地球生命体の起源を解明しようというのが現在の主流である。

現在、地球には生命体が存在する。いつ、地球生命体が現れたのだろうか。46億年前、無数の天体が衝突・合体して地球ができた。できたばかりの地球の表面は、天体の衝突エネルギーで岩石が溶けるほど高温になり、マグマオーシャンに覆われていた。

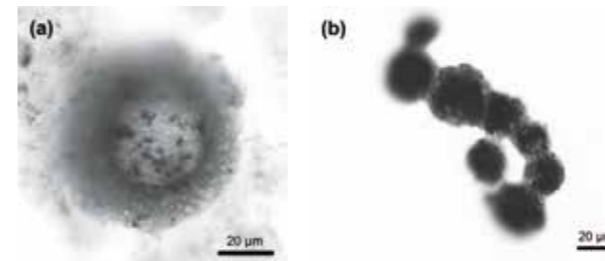


図5 34億年前に生息していた生物の化石
これらの化石は、オーストラリアのビルバラ地域に産出する34億年前の地層から、名古屋大学の杉谷健一郎教授によって発見された。
(a) 赤道面に帽子のツバのような飾りをつけた球体の化石。ツバは網目状で、ツバや球体上の黒色の点は主に炭素から構成されており、窒素、硫黄、リンを含むこともある。
(b) 球体の化石が直線状にいくつも連なる化石群。球体の化石がシート状に連なる化石群も発見されており、当時の複雑な生態がうかがえる。
(写真提供: 杉谷健一郎名古屋大学地球環境科学専攻教授)

43億年前になると、液体の水をたたえた原始海洋が現れる。そして、34億年前には図5のような明瞭な形態を持つ生命体が発生した。34億年前より古い時代では明瞭な化石は報告されていないが、生命体がつくった有機物由来のグラファイトが38億年前の地層から見つかっている。このグラファイトは炭素の同位体分析から、生命体がつくったものと解釈されている。これらは、地球では43~38億年前までの5億年の間に生命体が発生したことを示す。隕石中の有機物分析からわかるように宇宙にはたくさんの有機物が存在しているため、初期地球と同様の環境が5億年間ほど保たれる場所であれば、生命体は発生するのである。

隕石は宇宙物質の標本か

隕石は、無機物、有機物、同位体組成について多くの情報を私たちに提供してくれている。私たちは、これらを宇宙についての正確な情報として捉え、これをもとにしてさまざまな科学的考察を行ってきた。たとえば、著者は、隕石が初期地球に運び込んだ有機物から地球生命体が発生したという仮説に基づき、研究を進めている。隕石が地球に衝突する時には、隕石の温度と圧力を上昇させる衝撃圧縮が起こる。そして、その温度と圧力は隕石衝突の速度と角度によって決まる。マーチソン隕石の衝突を模擬した実験 (図6) を行ったところ、隕石の有機物は、激しい衝突では全てが分解し、穏やかな衝突では全く変化がなく、中間的な衝突では生命発生の原

料として有利な化合物に変化することが明らかになった (アミノ酸の一部はペプチドに変化)。これにより、地球生命体の誕生に隕石が果たした役割を正確に把握することが可能となる。

ただし、この正確な把握が可能になるのは、マーチソン隕石が宇宙の一部をそのまま切り取ったもの、つまり「宇宙物質の標本」と見せる場合である。隕石は、とても乱暴なやり方で地球に届けられる。マーチソン隕石の場合、13~14 km/sの速度で大気圏に突入し、隕石表面は数千~1万℃程度になったと見積もられている。この過酷な環境で、隕石の内部に存在した物質は変質してしまうかもしれない。特に、有機物は熱に対して敏感に反応し、容易に別の物質に変化してしまう。マーチソン隕石は宇宙にあった状態をよく保存していると見なされているが、大気圏突入時の熱や落下時に経験した衝撃圧縮の影響が心配だ。

熱や衝撃圧縮の影響を除外したいのであれば、宇宙に存在する宇宙物質をていねいに回収し、地球に届けられればよい。つまり、サンプルリターンである。サンプルリターンで入手した物質の分析により、真の意味での宇宙有機物の情報を得ることが可能となる。「はやぶさ2」プロジェクトの対象天体、リュウグウはマーチソン隕石のように炭素を多く含む天体である。リュウグウ試料の分析により、タンパク質などの複雑な有機物の存在、大きなL体過剰を示すアミノ酸の存在、地球生命体と同様の特徴を持つ有機体の存在などが確認されるか

もしれない。私たちに届けられたリュウグウ試料から、今後、どんな分析結果が得られるのだろうか。期待に胸がふくらむばかりだ。



図6 衝突実験装置
火薬銃の銃身 (指さしている部分) の下端から弾丸が発射され、減圧容器内に置かれた試料 (オレンジ色の部分) に衝突する。これにより、試料は最高900℃、35GPaの高温高圧状態になる。弾丸の減速を防ぐため、装置内は減圧状態に保たれる。

***1 フェュージョンクラスト**
大気圏突入時に、隕石が大気を圧縮することで高温になり、隕石表面が溶けてできる外皮。
***2 コンドリュール**
原始太陽系星雲で、高温のために溶けた物質が、無重力環境下で表面張力により球体になって冷却・固結した球粒。
***3 L体の鏡像異性体過剰**
L体の鏡像異性体過剰 = (L体量 - D体量) / (L体量 + D体量) × 100
***4 ホモキラリティー**
鏡像異性体のうち、一方のみが存在する現象。地球の生命体内において、アミノ酸はL体のみが、糖はD体のみが存在する。

電荷を蓄え放つもの

谷口博基 物質理学専攻准教授



Hiroki Taniguchi

福岡県生まれ。2001年大阪大学理学部物理系学科卒業。2003年九州大学大学院理学府修士課程凝縮系科学専攻修了。2005年北海道大学大学院理学研究科博士後期課程物理学専攻中退。2005年東京工業大学応用セラミクス研究所助教着任。2006年博士(理学)取得(北海道大学)。2013年より現職。専門分野は、物性物理学、誘電体材料工学、光散乱分光学。

コンデンサとバッテリー

私たちは日常的にコンデンサやバッテリーに電荷を蓄え、そして放ちながら快適な生活を送っている。バッテリーは身のまわりで比較的良く見かけるが、コンデンサはおおよそ機器の中に隠れており、直接目にする機会は少ない。

バッテリーが化学反応を用いて電荷を蓄える一方で、コンデンサは分極現象を用いて電荷を蓄える。バッテリーは大量の電荷を蓄えることが出来るが、その反面蓄放電に長い時間を要する。それに対してコンデンサは、バッテリー程多くの電荷を蓄え

ることはできないながらも、その蓄放電に要する時間は桁違いに速い。私たちの滑らかな動作が持久力のある「遅筋」と瞬発力のある「速筋」の相補的な働きによって支えられているように、バッテリーとコンデンサの働きも時に相補的である。たとえば大型ロボットを駆動することを考えると、コンデンサによって動き出し、そしてバッテリーによって動き続けることによって、より器用で効率的な作業が可能となる。

コンデンサは単に電荷を蓄えるだけでなく、その高速な蓄放電特性を生かしてたとえば周波数フィルタなどさまざまな用

途で応用されている。特に最近、パワーエレクトロニクスや高密度高速情報通信における技術革新が強く望まれているが、より優れたコンデンサの開発がそのカギを握るといっても過言ではない。

高誘電率物質の開発

物質に電場を加えた時、内部の電荷が「偏る」ことで「分極」を生じる物質と、「流れる」ことで「電流」が生じる物質とが存在する。特に前者は「誘電体」とよばれており、コンデンサの材料となる。加えた電場に対して物質中に生じる分極の大きさ

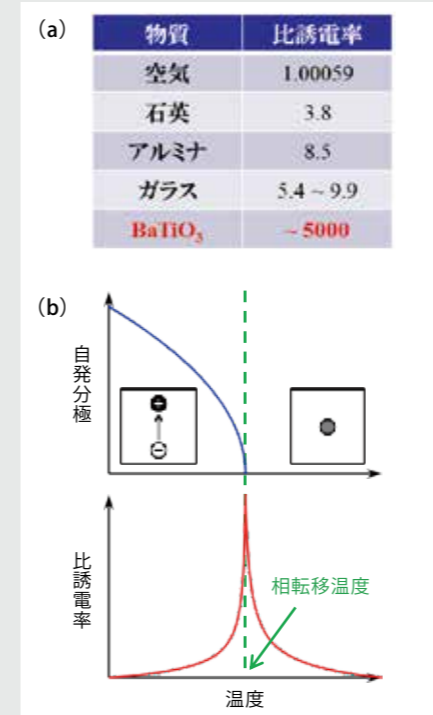


図1 典型的な常誘電体および強誘電体の比誘電率と、強誘電性相転移の概要

(a) 種々の誘電体の比誘電率。
(b) 強誘電相転移における自発分極(上段)と比誘電率(下段)の温度変化の模式図。ここで、図上段の挿入図は、正と負の電荷分布の中心が強誘電性相転移に伴って互いに逆方向に変位し、それによって自発分極を生じる様子を表している。

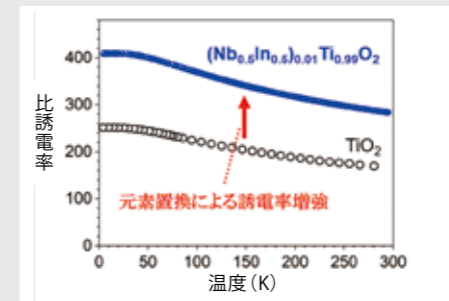


図2 TiO₂と(Nb_{0.5}In_{0.5})_{0.01}Ti_{0.99}O₂の比誘電率の温度変化

図中の○および●で示されたデータプロットは、それぞれTiO₂および(Nb_{0.5}In_{0.5})_{0.01}Ti_{0.99}O₂の比誘電率の温度依存性を示している。図より、TiO₂のTiサイトをそれぞれ0.5%ずつ(合計で1%)のNbとInで置換することで、TiO₂の比誘電率が広い温度領域に亘って一様に増大する様子が現れとれる。

は、「比誘電率」という値によって表される。物質の「比誘電率」が大きいほど、より多くの電荷を蓄えることができる。身のまわりの一般的な誘電体(たとえば窓ガラスや木材)の比誘電率は10にも満たないが、さまざまな基礎学理を縦横に活用することで数百、数千にも達する巨大な比誘電率を備えた誘電体をつくり出すことができる(図1)。

その処方箋の一つが強誘電性相転移とよばれる、ある種の相転移現象である。強誘電性相転移とは、ある温度(相転移温度)を境として自発分極の「ない」状態から「ある」状態へと移り変わる現象であり、それに伴って比誘電率が著しく増大する。たとえば典型的な強誘電体であるチタン酸バリウム(BaTiO₃)では、比誘電率が数千にも及ぶ(図1)。

一方、最近私たちは欠陥制御による新しい高誘電率物質の開発に精力的に取り組んでいる。図2はTiO₂のTiの1%を等量のNbとInで置換した物質((Nb_{0.5}In_{0.5})_{0.01}Ti_{0.99}O₂)の比誘電率の温

度変化を示している。図より、室温で200弱のTiO₂の比誘電率が、たかだか1%の元素置換によって300程度にまで大幅に増加していることがわかる。ここで、元素置換によって物質中に生じる複合欠陥の分極率を実験結果より見積もると、TiやOなどの構成元素の分極率と比較して桁違いに大きな値となる。このような巨大な分極率を有する複合欠陥は、高誘電率材料開発の新たな道筋を示している。

ここで紹介した前者の例は、構成元素間の協奏的相互作用を用いた基礎物理学的アプローチである。それに対して後者の例は、無機化学的観点による組成デザインと材料工学的観点による焼成プロセスを駆使している。このように、一つの課題に向かって多様な分野の学理を結集する学際性は、誘電体研究の一つの魅力である。

誘電率を光で制御する

電気伝導率を光で制御するフォトレジスタ*1やフォトトランジスタ*2が私たちの身のまわりで活躍する一方で、誘電率を光

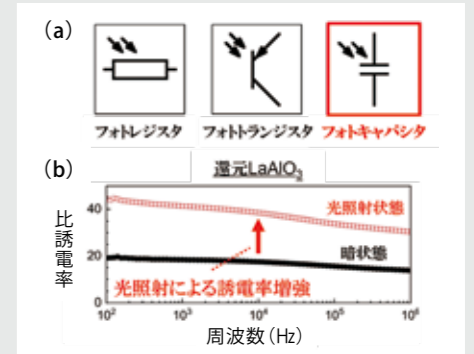


図3 従来型および非従来型の光デバイス素子の紹介と、非従来型光デバイス素子開発の基礎となる光誘電効果

(a) 左よりフォトレジスタ、フォトトランジスタ、そしてフォトキャパシタを示す回路記号。ここで、フォトキャパシタの回路記号は、筆者が仮につくった記号であり、実際には存在しない。
(b) 弱還元条件下で焼成したLaAlO₃の暗状態および光照射下における比誘電率の周波数依存性。

で制御する素子、いわばフォトキャパシタはまだ存在しない。フォトキャパシタの実現が、たとえば次世代の光無線通信や光マンマシンインターフェイスなどの新しい光テクノロジーを切り拓くと信じて、私たちはこれまで、光照射によって誘電率が変化する現象(光誘電効果)の探索に取り組んできた。そして最近、いくつかの化合物で光誘電効果を発見するに至った。この発見に基づいて現在、より優れた光誘電効果を示す物質の設計と開発を喜々として進めているところである(図3)。

誘電体は緑の下の力持ちである。物性物理学を駆使して誘電体に新しい能力を授け、その能力を無機化学や材料工学によって伸ばし、次世代を支える新たなプレイヤーとして世に送り出したい。

*1 フォトレジスタ
光を照射することによって電気抵抗が低下するデバイス素子。暗くなる時自動で点灯する街路灯などに応用されている。

*2 フォトトランジスタ
光を照射することによって出力電流を制御するデバイス素子。光センサや光通信などに応用されている。

太陽光のもとで植物の気孔が開くしくみ

井上 晋一郎 生命理学専攻講師



Shin-ichiro Inoue

1978年生まれ。2002年九州大学理学部生物学科卒業。2007年同大学大学院理学府生物科学専攻で博士(理学)を取得。日本学術振興会特別研究員DC2、SPD、2012年名古屋大学大学院理学研究科・助教を経て、2018年より現職。専門は植物生理学。

青色光が気孔を開かせる

植物は太陽光のもと光合成を行うことで糖やデンプンなどの有機物を生み出し、自身の生命活動のエネルギー源としている。また、植物が生み出した有機物を、我々を含めた多くの生物が利用するため、植物は地球上の生命活動を支えてもいる。固着生活を営む植物は、刻々と変動する環境に対応して光合成を最適化するためのさまざまな環境応答を誘導する。その応答の一つとして知られる「光による気孔開口」は、光合成基質であるCO₂を植物体内へ取り入れるために重要なものである。植物は葉面にある「気孔」とよばれる孔を介して大気中からCO₂を取り込む。気孔は光合成が可能な光条件下でのみ開くことで、植物体からの過剰な蒸散を抑えるとともに光合成組織への効率的なCO₂の供給を可能にしている。

気孔は一对の孔辺細胞により構成され、その開口は孔辺細胞が太陽光に含まれる青色光に反応して膨張することにより誘導される(図1)。孔辺細胞において、青色光は光受容体フォトロピンにより受容され、シグナル伝達を経て細胞膜H⁺-ATPase*1を活性化させる。この酵素がH⁺を細胞内から細胞外に運び出すことで細胞膜を過分極させ、電位依存性カリウムチャンネルを活性化させる。こうしてカリウムが細胞内に取り込まれて浸透圧が増加し、水が流入して孔辺細胞が膨張する(図2)。このような開口機構のあらましは、2001年までには明らかになっていたが、フォトロピンがどのようにカリウム取り込みを駆動するのか、そ

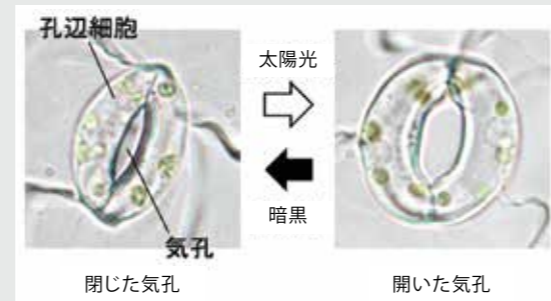


図1 光による気孔開口
植物の表皮の孔である気孔は、暗黒下では閉じているが、太陽光下で大きく開口する。植物が光合成を行うことができる光条件下でのみ気孔は開く。

のシグナル伝達の理解は断片的であった。そのため、私はこれを解明すべく長年研究している。

新たなシグナル伝達経路

15年ほど前、私が博士研究員だった頃も、気孔開口のシグナル伝達の解明は難航していた。そこで、当時確立された化学増幅型発光系を利用した新たなタンパク質間相互作用検出法を採用し、フォトロピンと相互作用するタンパク質を網羅的に探索した。その結果得られた候補の一つがプロテインキナーゼ*2のCIPK23であった。

CIPK23の機能を解明するため、CIPK23を働かないようにした*cipk23*変異株を用いて気孔開口を観察した。その結果、野生株で見られる光による気孔開口は、変異株ではほとんど見られず(図3A)、CIPK23が青色光による気孔開口に必要であることが明らかになった。

次に、CIPK23が開口機構のどこで働いているのか、植物から孔辺細胞だけを単離

して詳しく調べた。変異株の孔辺細胞では、野生株と比較して細胞膜H⁺-ATPaseの活性には差が見られなかったが(図3B)、予想に反してカリウムチャンネル活性が低下していた。野生株では青色光の照射によってカリウム電流の増加が観察されたが、変異株ではこの増加が抑制されていた(図3C)。したがって、CIPK23はH⁺-ATPaseを介さずにカリウムチャンネルを活性化することが明らかになった。

これらの結果から、フォトロピンは細胞膜H⁺-ATPaseを活性化するシグナル伝達に加えて、CIPK23を介してカリウムチャンネルを活性化するシグナル伝達も誘導することを新たに明らかにした(図4)。

残された謎

こうした新たなシグナル伝達経路の発見により気孔開口機構の理解は前進しているものの、依然として大きな問題が残されている。それは、細胞膜H⁺-ATPaseの活性化機構である。細胞膜H⁺-ATPaseは

特徴的なカルボキシル末端のリン酸化により活性が促進されるが、このリン酸化を触媒するプロテインキナーゼが20年以上未知であり、気孔開口機構を完全に理解するための障壁となっている。昔から細胞膜H⁺-ATPaseは細胞内でフォトロピンと複合体を形成することが知られており、実際に私は、細胞膜H⁺-ATPaseをリン酸化するプロテインキナーゼ候補を、フォトロピンの相互作用パートナーの中から見出している。したがって、今後の研究により、細胞膜H⁺-ATPaseの活性化機構を完全に解明し、気孔開口機構の理解をさらに深められると考えている。

*1 細胞膜H⁺-ATPase
ATPの加水分解エネルギーを利用して細胞の内から外にH⁺を輸送する酵素。細胞膜プロトンポンプともよばれる。この酵素の働きにより、細胞内外のH⁺勾配と電位の差が形成され、これが他の様々な物質の能動輸送のエネルギーとして利用される。

*2 プロテインキナーゼ
タンパク質のアミノ酸にATP由来のリン酸基を転移する酵素の総称。リン酸化されたタンパク質は、構造や性質が変化し、様々な細胞過程に働く。

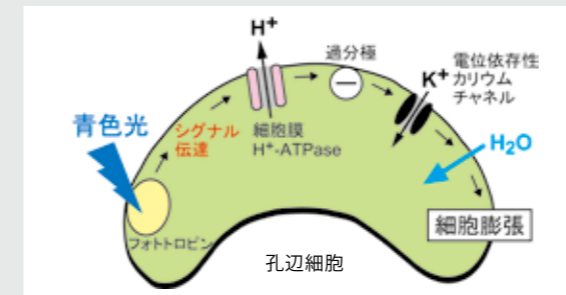


図2 これまでにわかってきた気孔開口のしくみ
太陽光に含まれる青色光は、フォトロピンに受容され、シグナル伝達を経て細胞膜H⁺-ATPaseを活性化させる。この酵素の働きが細胞膜を過分極させ、電位依存性カリウムチャンネルを活性化させる。細胞内に蓄積したカリウムが浸透圧を上昇させ、水が流入し、孔辺細胞が膨張することで気孔が開口する。

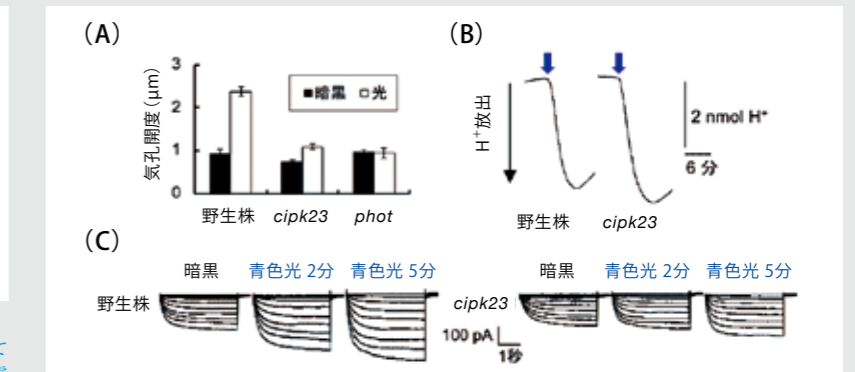
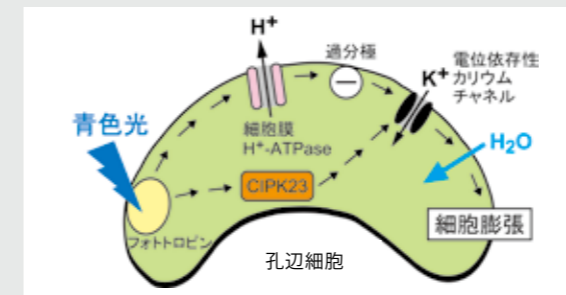


図3 *cipk23*変異株の気孔開口の表現型
(A) 気孔開口測定。野生株を*cipk23*変異株、フォトロピン(*phot*)変異株と比較した。(B) 細胞膜H⁺-ATPase活性の測定。青色光を照射した孔辺細胞から放出されるH⁺を、細胞懸濁液のpH変化としてモニターした。青い矢印は、青色光照射を示す。(C) 電位依存性カリウムチャンネル活性の測定。ホールセルパッチクランプ法により、チャンネルを介して取り込まれたカリウムに由来する電流を測定した。野生株の孔辺細胞では青色光に反応してカリウムチャンネル活性が増加し(C左:野生株)、変異株ではこれが低下していることがわかる(C右:*cipk23*変異株)。それまではカリウムチャンネルの活性は細胞膜の過分極のみに依存すると考えられていたが、本研究により青色光による新たなカリウムチャンネルの活性化経路の存在が示された。

図4 気孔開口の新しいシグナル伝達経路の発見
我々の研究により、CIPK23を介したカリウムチャンネルの活性化という新たなシグナル伝達経路が、青色光による気孔開口には必要であることが明らかとなった。

井上 晋一郎 ウェブページ <https://researchmap.jp/read0129244>

機械学習モデルを用いた量子多体理論： 量子化学計算法の開発

柳井 毅 トランスフォーマティブ生命分子研究所教授

計算機による物質の探求

化学物質の微細構造をコンピュータ上でシミュレーションし、物質の機能・反応性を理解する手法（量子化学計算）は、理論化学の先端手法の一つとなっている。本稿では、最近の理論開発の進展について述べる。

化学を記述する電子論

化学結合は、量子力学に基づき、電子の波動性を考慮することで記述される。その基礎理論として分子軌道論が知られ、

その簡便さから化学の電子論の中心的存在にある。この理論は化学結合・反応に対する極めて直感的で確かな理屈と解釈を与えてくれる（福井謙一のフロンティア軌道理論1981年ノーベル化学賞などが有名）。また、量子化学計算で広く用いられている「密度汎関数理論」（1998年ノーベル化学賞）はこの枠組みにある。この理論の前提では、厳密な波動関数を $|\Psi\rangle=|\Psi_0\rangle+|\Psi_\Delta\rangle$ のように単一の電子配置 $|\Psi_0\rangle$ と残渣 $|\Psi_\Delta\rangle$ に分解したとき、 $|\Psi_\Delta\rangle$ は摂動的にしか寄与しない。 $|\Psi_\Delta\rangle$ は電子の量子的な

多体相互作用に起因し、「電子相関」ともよばれる。化学の電子論における先端的チャレンジの一つとして、この前提が妥当でなくなる「化学」に直面したときどのように波動関数をモデルするか、すなわち分子系に表れる非摂動的な電子相関を取り扱う有効な理論を構築する、という課題がある。このような電子相関が顕著になる分子系での現象には、反応による電子構造の転位、励起状態、電子・エネルギー移動など、重要な化学の問題が含まれている。



Takeshi Yanai

2001年東京大学大学院工学研究科博士取得。同年米国Pacific NorthwestおよびOak Ridge国立研究所ポスドク研究員（日本学術振興会海外特別研究員）、2005年Cornell大学ポスドク研究員、2007年分子理論・計算分子科学研究領域准教授、2018年4月より現職。

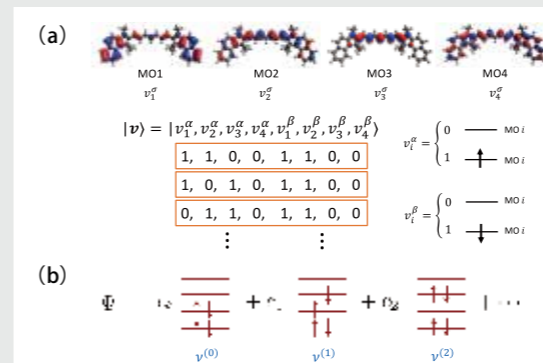


図1 量子的多体計算での波動関数モデル
(a) 分子軌道 $\{v_i\}$ に対する電子占有0または1として電子配置 $|v\rangle$ は記述される。
(b) 電子配置の量子的重ね合わせとして波動関数を記述する。 $|c_i\rangle$ は展開係数を表す。
Adapted with permission from Yang *et al.*, *J. Chem. Theory Comput.* 2020, 16, 3513–3529. Copyright 2020 American Chemical Society.

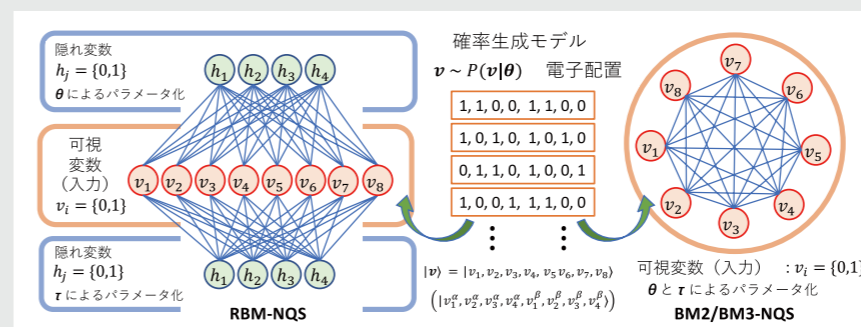


図2 RBMと二次・三次BM (BM2/BM3) のニューラルネットワーク量子状態 (NQS) 電子配置の占有状態を記述してその生成確率分布を修得させる。
エネルギー変分原理に基づき最適解の探索が行われる。
Adapted with permission from Yang *et al.*, *J. Chem. Theory Comput.* 2020, 16, 3513–3529. Copyright 2020 American Chemical Society.

分子計算の量子多体アルゴリズム

量子多体問題（電子相関）は、一般的には非多項式的な困難さを孕む。電子相関が顕著となる場合、波動関数の記述に与する複数の電子配置が擬縮重し、それらの重ね合わせが要求される（図1）。問題の難しさは、この擬縮重の度合いが指数関数的な複雑さを有することから生じる。本稿では、ボルツマンマシン（BM）を確率分布モデルとして利用する量子多体計算法に関する我々の研究（Yang *et al.*, *J. Chem. Theory Comput.* 2020, 16, 3513–3529）を紹介する。BMは、ニューラルネットワークとして古くから研究されている分布モデルであり、制限ボルツマンマシン（RBM）は歴史的には深層学習の開発舞台となったモデルとして知られる。近年、RBMを物理モデルの量子多体計算に適用する研究が行われている（Carleo *et al.*, *Science* 2017, 355, 602–606等）。量子的重ね合わせの分布を、機械学習の手法を用いたオートエンコーダとしてのRBMに学習させる手法である。我々はこれを量

子化学計算へと展開する実装を行った。本手法では、配置関数の電子占有の情報記述子として用いられる。量子化学で与えられる分子の情報（ハミルトニアン）のみから、波動関数の分布をBMに学習させる。学習は変分原理に基づき、事前の学習データを必要としない強化学習のスキームに従い、最適解を探し求める。また重要な拡張として我々は、RBMの代替として、隠れ層無しの高次BMを導入することを提唱した（図2）。高次BMのエネルギー関数は凹と知られ、そうでないRBMと比した数値的な安定性を我々は主張している。RBM同様、展開次元を拡張することで厳密表現への収斂が保証される。この新規なBMの導入なども含めて、メトロポリスサンプリングを利用した分子系の波動関数計算の機械学習ソルバの実装を達成した。

実証計算とまとめ

バイオイメーキング分子として知られるインドシアニングリーン（ICG）分子の全電子エネルギーの計算例を示す。図3で示

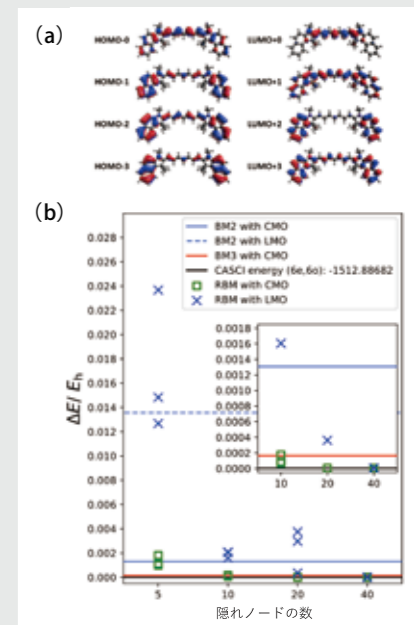


図3 インドシアニンググリーン（ICG）分子の分子軌道と算出エネルギーの誤差
(a) 波動関数の決定計算に用いられた分子軌道。
(b) 厳密計算から誤差（原子単位）。RBMに用いた隠れ層ノードの数に対してエネルギー誤差が示されている。BM2/BM3は隠れ層を有しない。
Adapted with permission from Yang *et al.*, *J. Chem. Theory Comput.* 2020, 16, 3513–3529. Copyright 2020 American Chemical Society.

すように、計算でICGの分子軌道6個を用い占有電子6個による波動関数をRBMおよび2次、3次のBMモデルに修得させた。テストとして正準軌道（CMO）（図3a）と局在軌道（LMO）の利用での違いを比較した。図3bのグラフが示すように、隠れ層40ノードのRBMを用いて、0.1kcal/molの精度で厳密解を再現した。一方で、局所解を与える数値的不安定性も確認された。本研究で導入された3次BMはRBMと同程度の精度を与えることが示された。また数値的安定性の優位性が確認された。

本研究では分子科学の電子系の量子多体計算に機械学習の数理モデルを用いるアルゴリズム開発とソルバ実装を達成した。まだ基礎段階であるが、着想を実証することができた。機械学習の発展は高速演算器の利用などエンジニアリングに大きくよるが、本手法もハードウェアを駆使する高度な実装研究が求められる。

関連する出版論文
<https://doi.org/10.1021/acs.jctc.9b01132>

柳井毅ウェブページ <http://www.itbm.nagoya-u.ac.jp/ja/members/t-yanai/>

同窓生から

氷河で人生の目標を見つける

FGWRS社勤務

アレクシア・ファビアーニ (Alexia Fabiani)



モナコにある水リサイクル企業のプロジェクトマネージャーをしている私は、昨年、仏伊合同の南極基地 Concordia で雑排水をリサイクルする装置をテストする計画であったが、残念ながら COVID-19 のために、現地を訪れることができなかった。外出禁止令によって、ここモナコでは自由が制限されて辛い、過去に自分が参加した遠征を思い出すことは、気持ちを和らげてくれる。折角なので皆さんをジュノー氷原に少しだけ「案内」してみたい。

2019年の夏、私は60人の学生、研究者、スタッフとともに2カ月かけ南西アラスカのジュノー氷原をスキーで120キロ自力縦断する研究プログラムに参加した。このプログラムは70年以上続いており、毎年、学生の氷上訓練と雪氷学教育と中継キャンプ施設の保守をしている。

家族との連絡が遮断された上、全くの他人ばかりの集団と馴染める自信もなく、いざとなると、こんな冒険は恐怖でしかなかった。アラスカに到着した時点では、来て失敗したと思った。しかし、最初の10日間で、青く、美しく、変化に富む氷河で訓練することで、私と仲間たちは遠征生活のリズムや装備に慣れた。同じ目的のために働く人々とも打ち解け、また目の前の自然の雄大さに勇気づけられた。

訓練が終わると、我々はキャンプからキャンプへと氷原の上を、目的地カナダ、ブリテッシュコロンビア州のアトリンに向けて進み始めた。進行のスピードを決めるのは雪解けの具合で、溶けるに従い、安全を脅か

すクレバスが現れはじめる。氷河は美しくもはかない存在で、これまでの長年の雪の堆積で形成された雄大な姿は、近年消失が加速しており、それがわれわれ皆の環境にさらに劇的に作用している。そこで私たちが行ったのは、物理から生物までの分野におよぶ融解要因の解析だった。私自身は氷河の表面に生え、着色させることで融解を促進する紅藻の空間分布を調べた。岩石の露頭がどのように紅藻の分布に影響するか理解しようとしたが、残念ながら統計学的に信頼できる結論には至らなかった。

遠征の経験は、私の意識を大きく変えるものであり、自分の中に深く埋もれていた底力を発見できた。世間から隔離されたことで、「現実」世界に戻った時に自分が本当にしたいことが何なのか、あらためて気づくことができた。そして、フィールドワークを続け、微生物集団が気候変動によってどのような影響を受けるのかを理解することが、現在の私が出した答えだ。2021年の秋には、カリフォルニア大学サンディエゴ校の生命理学博士課程で勉強を再開する。私の研究への情熱や旺盛な好奇心は名古屋大学の理学部での優れた教育と研究に育てられたものであり、学問の道に進むよう刺激してくれた教授や指導教員たちに感謝している。(2019年物理学卒業)



キャンパス通信

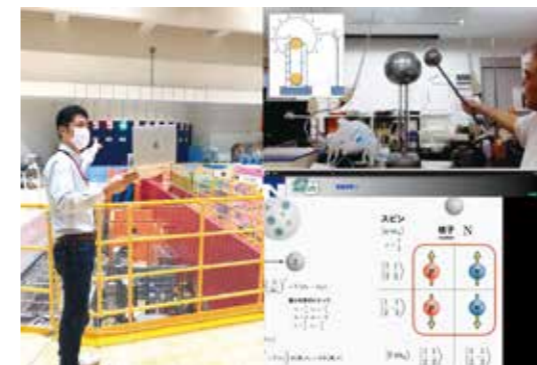
コロナ禍の教育を振り返る

素粒子宇宙物理学専攻教授

清水裕彦 (Hirohiko Shimizu)

今年度は期せずして非対面型あるいは反転教育型の教育が実施された。この急激な変化に対する意見は多様で端的にまとめるのは困難な状況である。ここでは、教育委員長としての経験をもとに私見を残す。

まず、従来型の教育活動が阻害されたとも、新たな可能性もたらされたとも言える。あらためて振り返ると、従来型は学生への個別対応の融通が効きづらく、一過性的な性格が濃厚だった。これに対して、今年度は教材が保存されたかたちで提供され、学生が意欲に応じて学習を進める自由度は増し、遠隔の研究現場からの配信も可能になった。その一方で、学生が相互に議論して理解を深めたり、同級生の反応を観察したりして、自分の理解度に気づく機会は限られた。機能面から言えば、従来はフロー型、今年度はストック型とも表現できるかもしれない。しかし、学生の創造性を養うという観点に立てば、課題をこなす効率性から両者の優劣を拙速に議論することは不適当であり、効果を確認するには長い時間がかかるであろう。確実に言えることは、利用できるツールが一気に増えたということである。来年度以降、どちらか一方の方式に限定せず、新たなツールの利点を従来型の教育に取り込むかたちで組み合わせていくのが妥当であろう。そして何よりも教員側の連絡を緊密に保って、細やかなフィードバックをかけ続けることが重要と考えている。



書籍紹介

『宇宙の始まりに何が起きたのか』

生命理学専攻講師

平子善章 (Yoshiaki Hirako)

本書は、宇宙の始まり、いわゆるビッグバンから、今の宇宙ができ上がるまでについて、現在わかっていること、わかっていないことを、第一線の研究者がごく平易な言葉で語った解説書である。元素の起源についての論争から、宇宙の始まりと成長についての仮説が提唱され、その仮説がいかんにして観測結果により検証されていったかが、歴史的展開とともに解き明かされていく。時に著者自ら接した研究者たちとの逸話なども披露され、研究が進展していくさまにも臨場感がある。物理学科の学生諸氏や天文学好きの高校生の皆さんであれば、一気に読めてしまうのかもしれない。ただし、平易な言葉で語られているからといって、誰でも一読してたちまち理解できるような内容というわけではない。私のような浅学非才な人間では基礎知識が不足、また与えられる情報量が多いのである。なんとかついていけたのは全13章のうち4章くらいまで、以後は理解するというよりも楽しむつもりで読み進めていった。

それでも読了したころには、宇宙マイクロ波背景放射の観測とその理解が宇宙論の発展にいかん貢献してきたかが少しはわかったような気がした。今後は、NHK深夜のコズミックフロントを見る時にはビールに加えて本書も傍に置き、ときおり「ダークマターってなんだっけか」などと開いてみようと思っている。

『宇宙の始まりに何が起きたのか』

杉山 直 (Naoshi Sugiyama) 著
講談社ブルーバックス/
2020年6月発行
1100円(税別)

