

火の鳥「はやぶさ」未来編 その34 ～リュウグウから学ぶ：フェーズ2キュレーション 高知の挑戦と試み～

伊藤 元雄¹, 富岡 尚敬¹, 上相 真之², 上杉 健太郎², 山口 亮³, 今栄 直也³, 大東 琢治⁴, 白井 直樹⁵, 中藤 亜衣子³, 与賀田 佳澄⁶, 矢田 達⁶, 安部 正真⁶, Ming-Chang Liu⁷, Richard Greenwood⁸, 湯澤 勇人⁹, 木村 眞³, フェーズ2キュレーション高知チーム

(要旨) リュウグウ試料の分析・研究により、多様な有機物や水、特定の揮発性元素の存在が確認され、太陽系最初期の物質の化学進化の過程、とりわけ有機物や水の起源に関する理解が大きく進展した。一連の研究成果は、チーム内の機器と達成すべき科学目標を中心に研究者同士が有機的に連携することで、極少量の試料からでさえ、多くの科学的知見を得られることを示した。また、試料が地球由来の汚染を受けていない状態で初期記載から実際の分析まで実施できたことは、Ph2KとASRGで培った惑星物質のキュレーション技術全般がもたらした大きな成果である。今後、得られた知見を活かし、惑星物質キュレーションのさらなる高度化を図るとともに、戦略的かつ持続的な惑星物質の分析基盤の構築と人材育成を含む国際的な研究ネットワークの拡充が期待される。

1. はやぶさ2試料分析に至るまで

反射スペクトルがC型に分類される小惑星は、過去の熱的影響をほとんど受けておらず、有機物と水に富んでいると考えられてきました [1]。そのため、このような始原的小惑星からの試料採取が、多くの惑星物質研究者から強く望まれていました。リュウグウは有機物と水に富む小惑星であること、そして比較的地球に近い領域に存在、つまり地球近傍軌道を持っている点から「はやぶさ2」ミッションの対象に選ばれました。

「はやぶさ2」のサンプルカプセルは、2020年12月6日にオーストラリア・ウーメラ砂漠へ帰還し、12月9日にJAXA宇宙科学研究所のキュレーション施設へ搬送されました。12月14日からの開封作業では、予想を上回る量の黒色粒子が確認され、その総量は約5.4 gに達しました。粒子の多くはミリメートルサイズでしたが、1 cmを超えるものも含まれていました [2-4]。

2021年6月からの最初の1年間は、国内の研究者が主導する8チームがリュウグウ試料の「初期分析」を担当しました [5]。ここでは、化学組成、鉱物学(粗粒・細粒)、揮発性物質、有機物(可溶性・不溶性)をそれぞれ対象とする6つのチームが分析を進めました。さらに「フェーズ2キュレーション」では、JAXAのキュレーション活動を拡張しつつ、科学成果の創出も目指して、岡山大学惑星物質研究所(フェーズ2キュレーション三朝)、並びに海洋研究開発機構高知コア研究所(フェーズ2キュレーション高知、Ph2K)を中心とするチームが組織されました。Ph2Kでは、国立極地研究所、高輝度光科学研究センター、分子科学研究所、オープン大学、カルフォルニア大学ロサンゼルス校、名古屋大学、東京都立大学、大阪大学など国内外の研究者が連携しました。これらの8

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構 高知コア研究所
2. 公益財団法人高輝度光科学研究センター 散乱・イメージング推進室
3. 大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所
4. 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所
5. 神奈川大学 理学部 化学科
6. 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
7. ローレンス・リバモア国立研究所
8. オープン大学
9. 自然科学研究機構分子科学研究所極端紫外光研究施設(UVSOR)
motoo@jamstec.go.jp

チームによる成果は、2022年夏頃から2023年初頭にかけてScience誌とNature Astronomy誌に特集を組まれ、また日本学士院紀要から報告されました [6-13]。そして、2025年3月現在、約200本の論文が報告されています。

いうまでもなく、リュウグウの粒子は惑星科学にとって極めて重要な試料であり、これまで隕石研究のみでは確証が得られなかった知見の深化に大きく貢献しました。その成功の背景には、はやぶさ2探査機の運用、サンプリング機構の工学的設計、そしてキュレーション活動の円滑な遂行があったことを我々は忘れてはいけません。本稿では、Ph2Kの活動を振り返りつつ、小惑星リュウグウの科学的意義と今後の惑星物質キュレーション活動について紹介します。

2. 惑星物質キュレーション： Lessons learnedから始まる!

地球惑星科学におけるキュレーションは、地質学的試料の収集・管理・保管を科学的視点で体系化し、物質科学的データに基づく分類を通じて普遍的価値を持たせるプロセスです。さらに、それらの分類情報を国内外の研究コミュニティと共有し、研究目的に応じた試料を配布することが求められます。

日本国内では、地質学的試料を取り扱う代表的なキュレーション組織として、隕石の収集と分類を長く続けている国立極地研究所の南極隕石ラボラトリー、極地の氷床や氷河からの掘削コアを収集する国立極地研究所のアイスコア研究センター、海底掘削コアの拠点である高知コアセンター (JAMSTEC と高知大学の共同運営)、そして2010年以来、小惑星 (イトカワとリュウグウ) からの帰還試料を扱う JAXA 地球外物質研究グループ (ASRG) がよく知られています。それ以外にも、産総研地質調査総合センター、国立科学博物館、そして全国の地質標本館や博物館などがあります。国外に目を向けると、南極隕石と月の石のコレクションを保有する NASA ジョンソンスペースセンター、またスミソニアン博物館、米国、英国、フランス、オーストリア、ドイツ、ベルギーなどの自然史博物館、英国オープン大学など大学内の標本館があります。これらの組織が日々行っているキュレーション作業が、地球惑星物質の科学

的価値を担保しています。

ASRGでは、はやぶさ2試料のキュレーションを第一段階 (フェーズ1キュレーション)、第二段階 (フェーズ2キュレーション) と区別しています。安部ら (2020) に詳しく記載されているように、フェーズ1キュレーションでは、すべての試料に対する初期記載が、実体顕微鏡、秤量、顕微赤外分光装置、パリ・サクレ大学宇宙天体物理学研究所 (Institut d'Astrophysique Spatiale) との共同作業である MicrOmega を用いた近赤外分光観察などの非破壊分析に限定されました [5]。この分析の主目的は、次に行われる初期分析やフェーズ2キュレーション、そして国際公募研究での配分に資する試料データのカatalogを構築することでした。

2014年12月のはやぶさ2探査機の打ち上げを受け、ASRGは国内の惑星物質の研究者を集め、試料のハンドリング、国内外の研究機関に配分するためのキュレーション設備の仕様に関する委員会 (2015年6月～、のべ40名) を9回にわたり行いました。委員会では、帰還試料をJAXA相模原キャンパスで受け入れるための設備の仕様検討、およびオーストラリアでの帰還カプセルの回収～クリーンチャンバーへのサンプルコンテナへの導入～サンプルコンテナの分解～試料の取り出し、そして初期記載・分別・保管と配分に至る一連のキュレーション作業の確認を行いました。その議論をキュレーション設備に反映させ、2016年度までに設置することがゴールでした。リュウグウ試料の帰還予定が2020年12月であったため、キュレーション施設・設備の仕様決定から完成までを1年半という短期間で行って、その性能確認とリハーサルに2年を費やすとギリギリのスケジュールでした。当時は、帰還試料の全量は設計上の最低期待値で100 mg、ベストケースシナリオで1 gと見積もられていました [1]。2020年にコンテナを開けたところ、センチメートルサイズの粒子を含む総重量5.4 gの試料を確認したことは [2, 4]、ASRGメンバーのみならず、本委員会に参加した研究者にとって大きな驚きでした。

ここで少しPh2Kの成り立ちについて振り返ります。2015年3月に、ASRGを核とし海洋研究開発機構・高知コア研究所、国立極地研究所、自然科学研究機構分子科学研究所UVSOR、高輝度光科学研

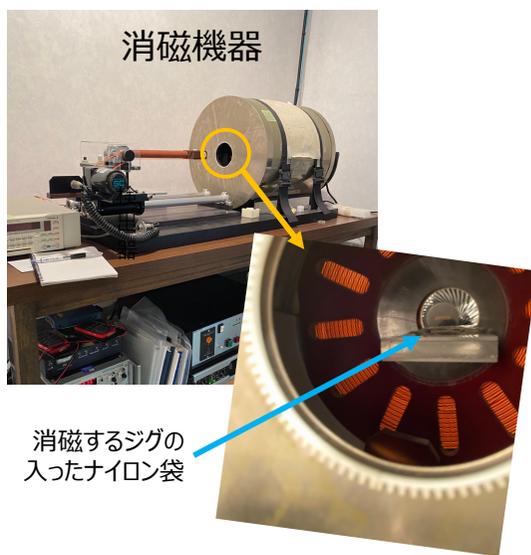
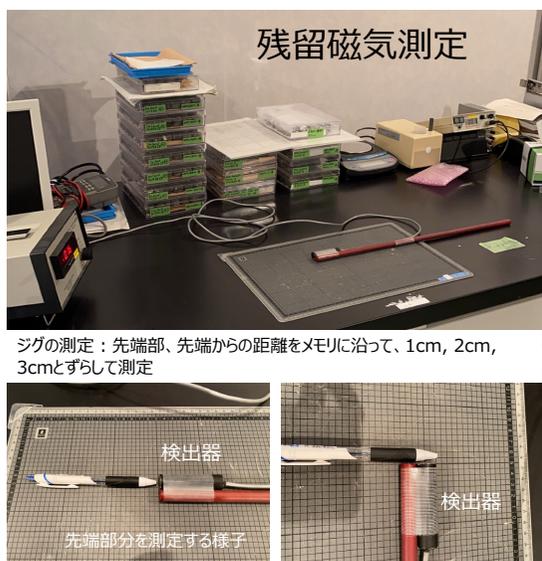


図1: (a)はやぶさ2試料のハンドリング用ジグの残留磁気測定と消磁@高知コアセンター。



図1: (b)左: ハンドリングのリハーサルに用いたテスト試料(コバルトオケルマナイト, $\text{Ca}_2\text{CoSi}_2\text{O}_7$), 右: クリーンチャンパー内で真空ピンセットとテスト試料を用いたリハーサル。

究センター/SPring-8と「小惑星探査機はやぶさ2試料受入準備にかかる連携協定」を締結しました。この協定がPh2Kの大元であり、「はやぶさ2」により獲得される新しい地球外物質の分析を見据え、機関が連携して分析・研究基盤を構築することが求められました。そして、この連携協定を結んだ機関ごと「キュレーション設備の仕様に関する委員会」にメンバーとして参加、その活動の中で「はやぶさ2試料の輸送検討チーム」、そして高知コア研究所が中心となりPh2Kという組織となりました。

Ph2Kのメンバーは、地球外物質試料分析・技術

に精通し、また大型機器の管理研究者や放射光施設のビームライン研究者から構成されました。Ph2Kのタスクは、リュウグウ試料を分析し、そこから科学的成果を創出することだけではありません。リュウグウ試料が到着する前に、ASRGと共同で以下の準備作業を行いました。各分析機器に専用の試料ホルダーやジグ、大気非曝露搬送機構を開発し、分析機器間での共有も可能にしました。また、ホルダーなどの汚染を高感度分析により評価しました。さらに、試料ハンドリングツールの残留磁力の評価と消磁(図1(a))、地球由来の汚染を防ぎながらの試料

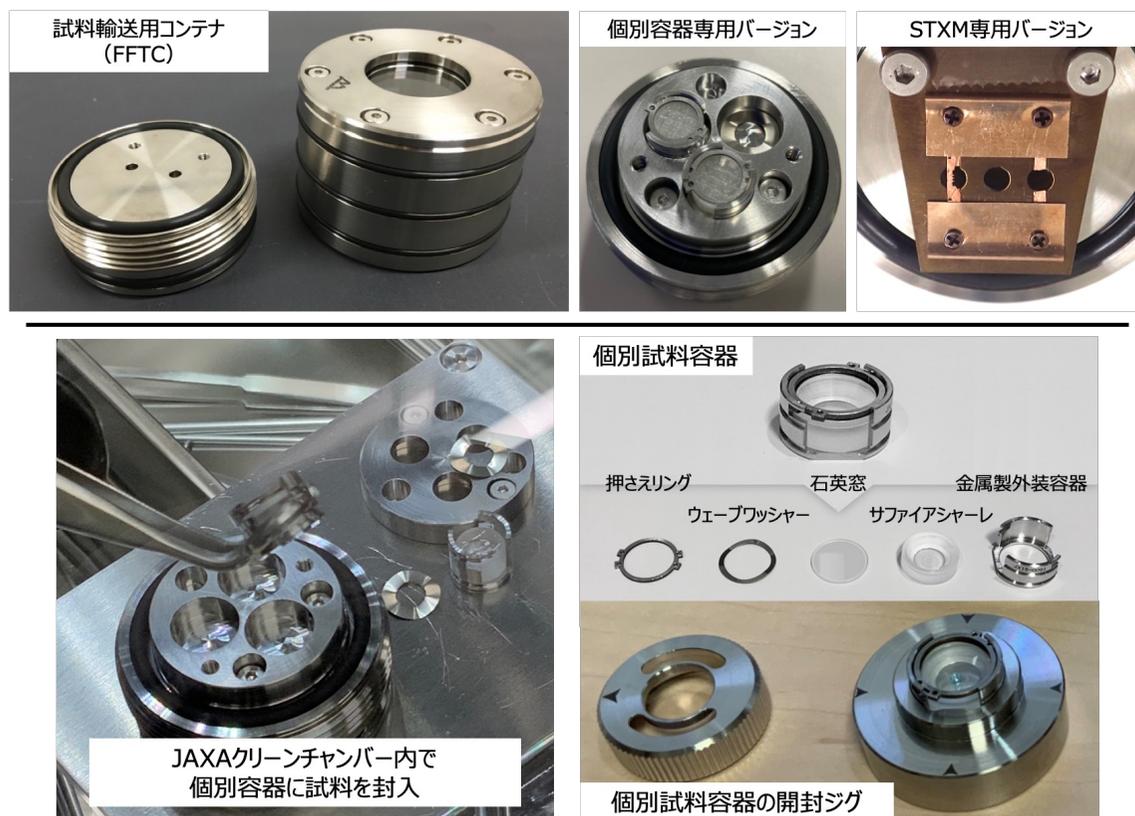


図2: はやぶさ2試料の輸送容器(FFTC, 個別試料容器)。

の取り扱い手法，ハンドリングのリハーサルに用いられるテスト試料の提供 (図1 (b), コバルトオケルマナイト, $\text{Ca}_2\text{CoSi}_2\text{O}_7$, これは人工的に作った結晶であるため, 天然に存在せず, 万が一クリーンチャンバー内に落ちたとしても容易に識別可能なため選ばれました), ミリメートルサイズ試料分割手法の開発 (チゼルとハンマーによるチップング), 試料容器や保管ケースの製作, 国内外に安全に輸送するための専用容器の開発, そしてリュウグウ試料のデータベース (Ryugu Sample Database System, RS-DBS) 作成支援なども行いました [14-21].

3. すべては試料を研究者に届けるために: Mission Impossible?

惑星物質試料は, 我々の手元に届くまでに様々な過程を経ます. 隕石の場合, 大気圏通過時の加熱,

長期間にわたる地球大気や水が関与する化学反応, そして人為的な汚染などによる影響があります. 一方, リュウグウの粒子は地球外物質として「最も地球由来の汚染のない試料」といえます. この試料には小惑星由来のガスや揮発性成分が含まれ, 鉱物と有機物が微細な組織として複雑に共存することも予想されました. これらの情報から太陽系46億年にわたる過去を遡り, 低温の分子雲であった最初期, 高温期に起きたと考えられる化学反応, そして熱と水により複雑な過程を経る小惑星上での進化の痕跡を読み取ることが必要です.

JAXAキュレーション施設のクリーンチャンバーから取り出した試料に対して, 各研究機関, 各装置への搬送時の汚染を最小化するために, FFTC (Facility to Facility Transfer Container) と呼ばれる試料輸送容器と個別試料容器を製作しました [16]. これらはJAXAキュレーション施設の「小

カメラレンズ用の肩掛けかばん

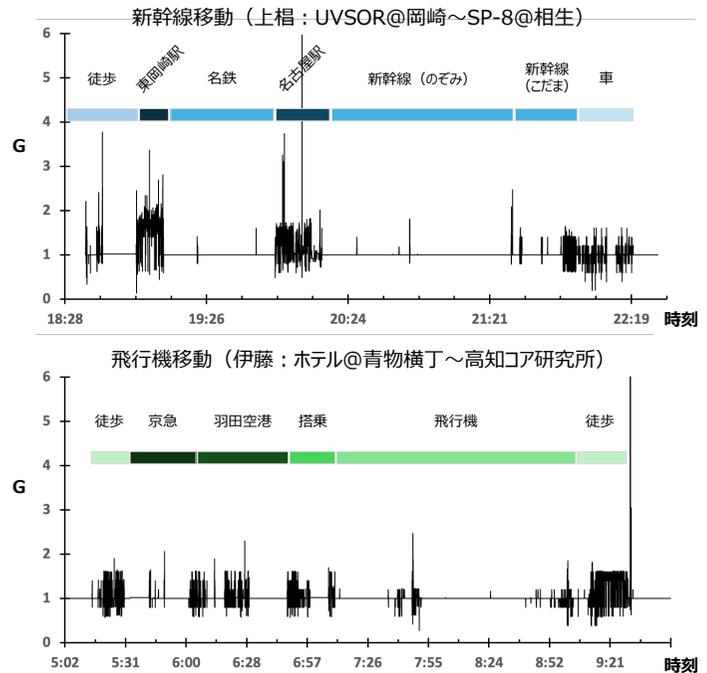


図3: ハンドキャリアによる試料運搬時の振動テスト.

惑星リュウグウ」専用クリーンチャンバー内で定常的に使用されるため、以下の点を重視しました (図2).

- 簡便に洗浄できること
- リュウグウ試料と容易に識別するため、クリーンチャンバー、および内部で使用するジグなどと同じ材料を使用すること
- クリーンチャンバーの分厚いバイトンコートブチルグローブ越しに簡便かつ安全に取り扱えること
- 窒素ガス充填をした状態で、長期間の密閉が可能なこと

さらに、世界中の研究者がグローブボックス内で使用することを考慮し、グローブ越しに容易に操作できる個別容器の開閉ジグを開発しました。この製作は、SPring-8の上相・上相らを中心に、金属加工を専門とする佐藤精機株式会社、あるいは北海道大学・グローバルファシリティセンター所属の技術員らとの共同で行いました。個別試料容器 (カプセルパック) は市販部材を流用することで、コスト削減と大幅な開発期間の短縮を実現しました。

当初、個別試料容器は数mm程度の大きさの試料を安全に格納できることを基準として進められました。しかし、コンテナ内には黒く数えきれないほどの砂状、数ミリメートルサイズの粒子だけではなく、センチメートルサイズのものも確認されました。つまり、想定100 mgはおろかベストケースの1 g さえも凌駕する大量の試料の獲得が実現していたのです。すぐに、センチメートルサイズの試料に対応する大容量の個別試料容器の設計と準備、規定サイズの個別試料容器の大量購入に奔走しました。実際の試料を扱い始めると、他にも想定外の課題が多く発生したため、現場での調整と改良を幾度となく行ったことも印象深い思い出です。

貴重なリュウグウ試料の輸送容器の準備は整いましたが、誰がどのように持ち運ぶのか、また輸送経路や宅配便の可否についても検討を行いました。まず、人が手持ちで運ぶ方法として、超小型温度振動記録計を入れたカメラ用の肩掛けカバンを使用し、神奈川県にあるJAXA宇宙科学研究所から高知県にあるJASMSTEC高知コア研究所、および兵庫県

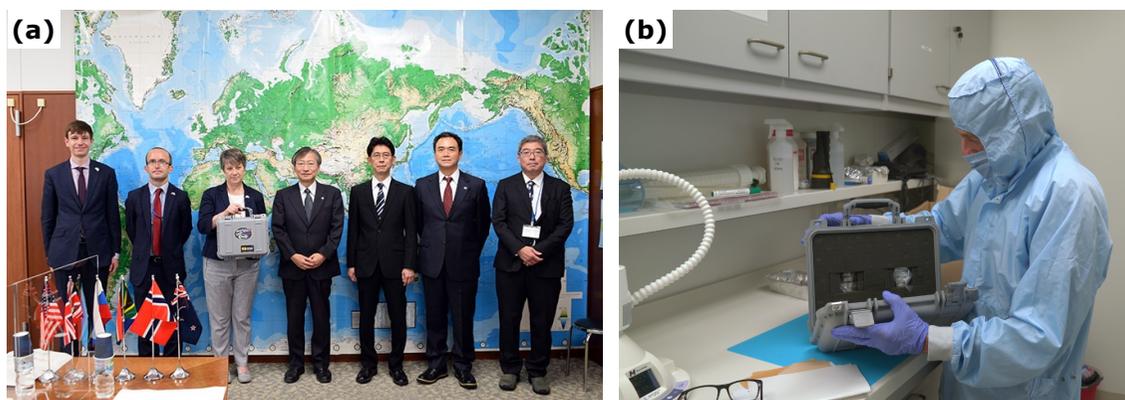


図4: (a) 2021年7月7日に小惑星リュウグウの試料を英国に輸送するための引渡しを極地研究所で行いました。

(b) 同年7月21日に英国オープン大学にてグリーンウッド博士がリュウグウの試料を確認しました。

にあるSPRing-8までの経路での試料にかかる加速度変化をそれぞれ確認しました。その結果、飛行機や電車内よりも、人の往来が激しい時間帯の駅構内で通行人を避けながら歩行する際の振動が最も大きいことが判明しました(図3)。この結果を踏まえ、人の少ない時間帯での移動を考慮し、輸送ルートと時間帯を慎重に検討しました。2021年6月の初回輸送時(50 mg)には、安全性を担保するため宅配便の使用は見送りましたが、2022年3月の試料配分時(50 mg)には、あえて宅配便を利用しました。結果として、宅配便を使用しても試料と個別容器への振動の影響は見られず、少なくとも国内輸送には問題がないことを確認できました。

試料は適切なタイミングで、米国のカリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)および英国のオープン大学にも輸送する必要がありました。しかし、2021～2022年は新型コロナウイルス感染症の世界的流行により、国外出張の前後二週間の隔離期間が義務付けられ、現地へ直接持ち運ぶことが困難な状況でした。対策を練るために、オープン大学のグリーンウッド博士と協議する中で、過去にチェリャビンスク隕石を分析した際、ロシアの英国大使館が輸送の支援を行った事例を伺いました。そこで、無理を承知で駐日英国大使館の科学・イノベーション担当参事に支援を打診したところ、すぐに快諾が得られました。早速、輸送計画を周到に準備し、極地研究所にて英国副大使一行に試料を託すことができました(図

4)。輸送には英国の外交行囊制度である「Queen's Messenger」が活用され、試料は2週間後にオープン大学へ無事到着しました。これにより、直ちに分析を開始することができました。

一方、米国へは、サンフランシスコ日本領事館の科学参事官の支援のもと、外務省、文部科学省、在日米国大使館、在日NASAアタッシュェ、および全日本空輸など多くの方々の協力を得て、試料を無事にUCLAへ輸送できました。本輸送で得られた技術的・ロジスティックスの知見はASRGと共有され、ヒューストンのNASAへの試料輸送にも活かされました。

4. 得意な技術と研究をさらに伸ばす

リュウグウ試料の引き渡しから1年以内に研究成果を生み出すためには、適切なチーム編成、情報共有、分析戦略の構築が不可欠でした。世界で初めての含水・含有機物小惑星の試料をJAXAから預かり、その科学的価値に見合った研究成果を創出するためには、高い専門性と効果的なチームワークが求められます。Ph2Kでは、各メンバーの専門分野が重なり合うような構成をとり、分析法開発とサイエンスのバランスを意識したチーム体制を整えました。

チーム内では、情報共有を徹底し、新たなデータや考察が得られるたびに分析結果を再評価しました。JAXAからの情報も全員がリアルタイムで共有

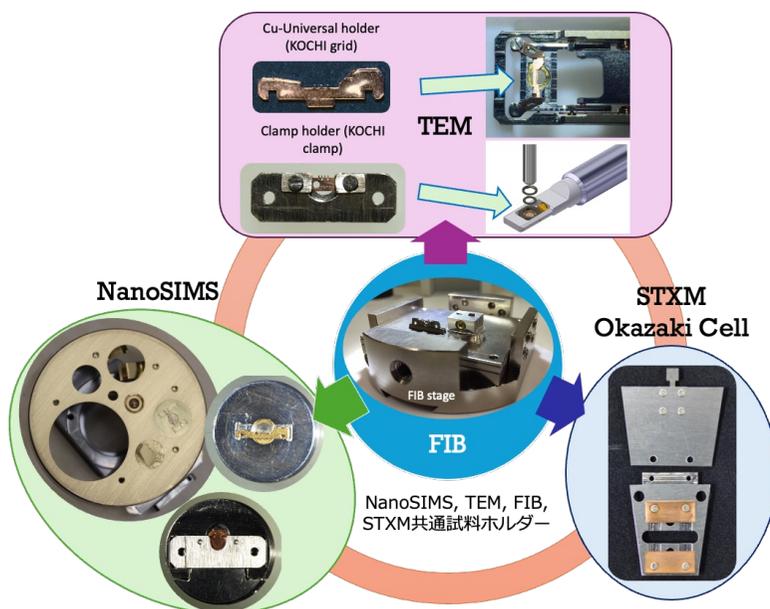


図5: (a) FIB-TEM-STXM-NanoSIMSでシームレスに分析するための共通試料ホルダー、LIGAプロセスで制作した純銅製のFIBグリッド (KOCHI Grid)と市販TEM, FIB Gridを使用可能なクランプホルダー(KOCHI Clamp).

することで、迅速な意思決定と研究の効率化を実現しました。何を決定する時もトップダウン方式ではなく、メンバー間でフラットかつ慎重に議論を重ねました。そのために、最初の1年間は毎週金曜日の午後1時半から最低2時間のウェブ会議を開催しました。この会議には、英国オープン大学のグリーンウッド博士と米国UCLA (当時) のリウ博士からも積極的に参加し、時差を超えて活発な議論を行いました。それでも時間がたりず、昼夜間わぬ個別の打ち合わせに加え、メンバー相互の専門分野への理解を深めるために、日曜夜に1時間程度の勉強会を継続的に実施しました。どの会議も自由闊達な雰囲気でも、誰もが率直に意見を交わしました。議論が白熱する場面もありましたが、その過程で多角的な視点が入り入れられ、リアルタイムでの分析データの再解釈・活用に繋がりが、最終的には学術的インパクトの高い研究成果につながったと考えています。当然ながら、はじめからこの体制が整っていたわけではなく、分析手法と技術を共同で検討し、4年にわたって実践を重ねることで、チームとしての完成度を徐々に高めていきました。

Ph2Kの「チームの完成度を高めること」とは、各研究者が得意とする分析手法をシームレスに組み合わせ、限られた試料量と時間で最大限の研究成果を得ることと同義です。この目的のために、我々は最適な分析機器の選定と手順の確立、および関連するジグなどの研究開発を行いました。具体的には、試料全体の特性を把握するためのバルク分析と、微細組織・軽元素同位体・炭素化学種の可視化を行うサブミクロンスケール分析を組み合わせた分析スキームの検討です [16-20]。南極宇宙塵や炭素質コンドライト隕石をリュウグウの模擬試料として得られた分析データを、既存の地球外物質と比較し、さらに無水・含水鉱物と有機物の共存関係を解明することで、小惑星リュウグウの起源とその形成過程を明らかにすることを目指しました。特に、本番の前に分析やハンドリングのための模擬物質として多様な南極産の隕石や微隕石を十分に使える環境はとても重要でした。リュウグウ試料と同じスキームで隕石や微隕石を分析し、データの取得をはじめとするシステムの改善を継続的に行える環境を作れたのは、サイエンスの構築だけではなくチームとしての力量を上げた要因



図5: (b) FIB-STXM-NanoSIMS-TEMのリンケージ分析。

だと考えています。

Ph2Kでは、リュウグウ粒子分析のための様々な技術の独自開発を行いました。(1) X線CT分析時の試料ドリフトを最小限に抑えるためのカーボンナノチューブテープの開発 [17, 18], (2) 半年以上かけて開発したドライ鏡面研磨法 [22], そして (3) 集束イオンビーム装置 (FIB: Focused Ion Beam apparatus), 超高空間分解能走査型二次イオン質量分析装置 (NanoSIMS), 走査型透過X線顕微鏡 (STXM: Scanning Transmission X-ray Microscopy) と透過電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscopy) 間で同じ試料をシームレスに分析するための共通試料ホルダー群の設計などです。(3)では、LIGAプロセスで制作した純銅製の大型FIBグリッド、市販のTEM, FIBグリッドを格納可能なクランプホルダー、STXM専用Okazaki Cellなどを新たに開発しました (図5a, b) [17, 20]。また、各分析拠点にはグローブボックス (露点 -80°C 以下, 酸素濃度 0.1 ppm 以下) を完備, 高知コア研究所のNanoSIMS, UVSORのSTXM, SPring-8のX線CTには、それぞれ大気非曝露搬送機構を各自で開発し、リュウグウ試料分析に挑みました。

5. リュウグウの起源を追って: チームで達成すること

2021年6月中旬に8個(1~4 mm), 合計50 mg程度のリュウグウ粒子が、Ph2Kに配分されました。そして、大型放射光施設SPring-8のBL20XUにてX線CT撮影などを行い、各粒子の内部組織と鉱物の組み合わせから、粒子ごとの分析・研究の方向性を決定しました (図6)。そして、国内外研究機関にリュウグウ粒子を地球大気に触れぬよう輸送し、各研究者の最も得意とする分析を行いました (図7)。

我々の分析で得られたリュウグウ粒子の元素組成と鉱物組織などは、他チームの成果と総合的で、「リュウグウは、太陽系の平均化学組成を持つCIコンドライトと同等であり、我々が手に入れることのできる太陽系の原材料に最も近い物質」という確証が得られました [6-9, 22]。粒子ごとに多少の違いはありましたが、水が関与して形成したと考えられる鉱物 (サポナイトやサーベنتينなどの含水ケイ酸塩鉱物、ドロマイトに代表される炭酸塩鉱物、フランボイダルマグネタイトなど) も多く見られました [6-9, 22, 23]。このことから、リュウグウには過去に氷が存在し、その氷が溶けてできた水と、もともと含まれていた鉱物が反応した結果、現在のリュウグウ粒子を構成する鉱物が作られたと考えられます。

STXMとTEMによる分析を組み合わせることで、脂肪族炭化水素に富む有機物は、粗粒の含水ケ

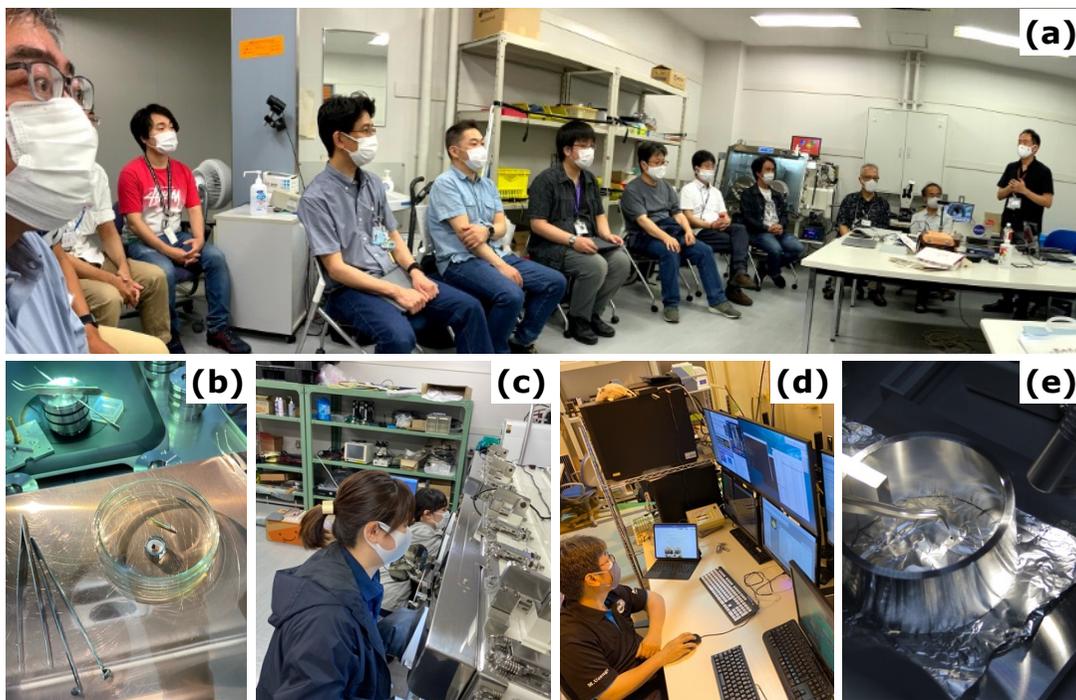


図6: (a) 2021年6月21日にSPring-8で分析の開始。 (b) リュウグウ試料を個別容器から取り出す直前。 (c) リュウグウ試料をハンドリングする中藤氏と与賀田氏。 (d) BL20でリュウグウ試料のCT撮像をする上相氏。 (e) グローブボックス内でリュウグウ試料を再分割し、回収する様子。

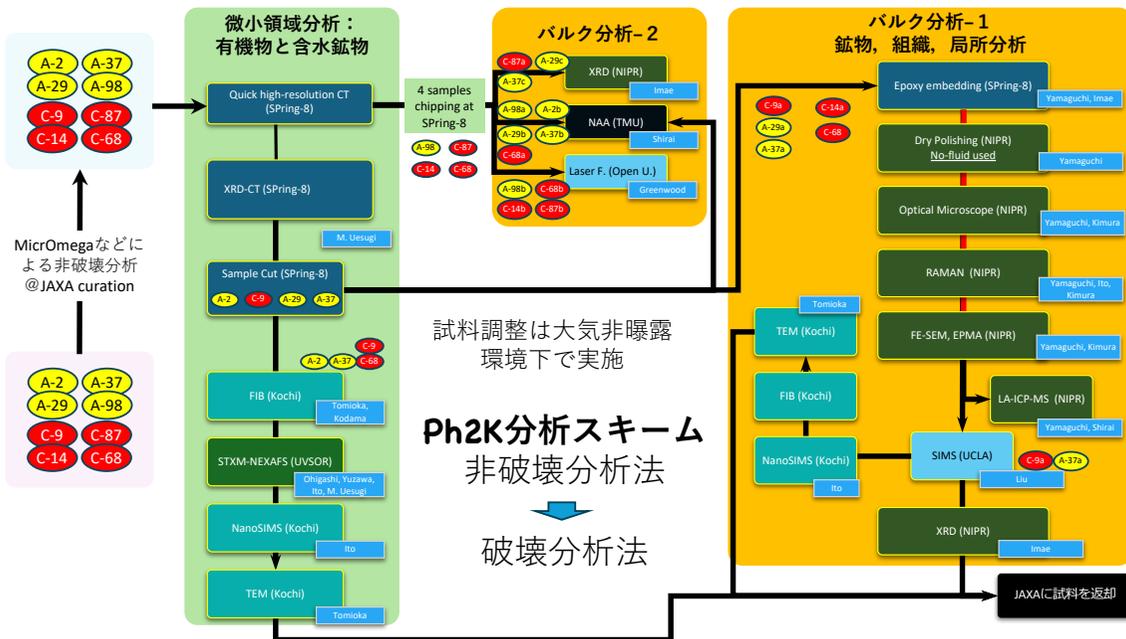


図7: Ph2Kによるリュウグウ試料の分析の流れ(A-2, C-9などはリュウグウ試料のJAXA-ID番号, 黄色=チャンパーA粒子, 赤色=チャンパーC粒子。

イ酸塩鉱物と複雑に入り混じった組織を持つことが明らかになりました [6]. この組織は、粗粒の層状ケイ酸塩鉱物が特定の有機物に形成の場を与えたことを示す証拠と考えられます。また、脂肪族炭化水素に富む有機物の分解温度に関する研究報告 [24] に基づき、リュウグウは30度以下の温度しか経験していない可能性があることがわかりました。一方、そこにはどのような種類の有機物が含まれるのか?という新しい疑問に、今回の我々の分析スキームでは答えることはできないため、今後新たな高感度・高解像度を両立した分析手法の開発が必要です。

NanoSIMSにより同じ試料を分析したところ、水素と窒素は地球と比べると重い同位体 (D, ^{15}N 成分) に富むことがわかりました [6]. この結果は、一部の宇宙塵と良い一致を示すばかりではなく、彗星などの太陽系外縁部天体の同位体比に近い傾向を示しています [25, 26]. つまり、リュウグウ粒子は熱の影響をあまり受けておらず、形成当時の物質科学的情報を保っていることを示唆しています。これらの粒子を構成する物質の少なくとも一部は、太陽系の外縁部で形成後、現在の位置まで移動したと考えられます。

地球の有機物や水がどこから来たかについては、現在も大きな議論が続いています。リュウグウ粒子に含まれる粗粒の含水ケイ酸塩鉱物は、有機物や水の供給源の候補のひとつです。粗粒の含水ケイ酸塩鉱物は熱に強く、その中に含まれる有機物に変質を受けずに地球へ運ばれた可能性があります。しかし、リュウグウ粒子の水素同位体比は地球のものより重い成分に富む一方、小惑星イトカワの粒子には、太陽風由来の軽い水素同位体組成を持つケイ酸塩鉱物が確認されています [27]. また、リュウグウにも地球と同じ水素同位体比をもつ試料もあるとの報告もあります [28]. こうした異なる水素同位体組成を持つ物質が混じり合うことで、地球の水が形成されたと考えるのが妥当です。Ph2Kでは「太陽系の外側で形成された微粒子には、水と有機物がたくさん含まれていた。これらの粒子が集合して始原的な小惑星リュウグウとなった。リュウグウはその後太陽系の内側までやってきて、太古の地球に水と有機物をもたらした供給源の一つとなった」という結論を得ました。この結論は、小惑星リュウグウだけではなく、小惑星ベヌス、隕石などのさらなる研究を組み合わせ

ることで、より詳しく検証できると考えています。

そのほかのPh2Kの研究成果として、リュウグウの前駆天体とその地質プロセスの解明 [22, 29]、これまでの報告よりも古い水質変質年代 (太陽系形成後500万年程度から180万年程度) [30]、衝突による炭素質小惑星からの放出物が従来の想定より少ない可能性 [23]、新たな始原的希ガス成分 (これまでよりも1桁高いキセノン濃度) の発見 [31]、リンとアンモニウムイオンを含むアモルファス物質の発見と生命の前駆物質としての可能性 [32] などが挙げられます。また、1年半以上に渡る大気曝露実験を行い、リュウグウ粒子は短期間でさえ大気の影響を受け、表面にカルシウム硫酸塩鉱物 (ジブサム) が形成されることを報告しました [33]. これは、地球風化の定量的な理解につながり、惑星物質のキュレーション作業を考える上で非常に重要な知見です。

Ph2K以外のチームがこれまでに報告した特筆すべき研究成果には、約20,000種類の有機分子が含まれており、その中には少なくとも20種類のアミノ酸が含まれること [7, 12, 13]、流体包有物の確認 [9]、揮発性物質に富むこと [11] や太陽系の元素組成と最も近いとCIコンドライトと主要組成、および酸素同位体比の良い一致 [7, 8]、プレソーラー粒子の存在度 [34, 35]、ナトリウム炭酸塩や岩塩など塩の結晶の発見 [36] などがあります。

6. 2025: A Space Odyssey

リュウグウ試料の帰還後1年目は、国内研究者が率いる8チームによりリュウグウ試料の分析が一斉に開始され、成果の発表は2025年現在でも続いています [例えば37-44]. 詳しくは各論文を参照してもらうとして、リュウグウ粒子は、もともと惑星科学の試料として重要であることは分かっていたが (そうであると確信していた!), キュレーション技術によって第一級以上の科学的価値を持つことになりました。OSIRIS-RExが持ち帰った小惑星ベヌスの粒子も同様の価値があり、その成果が報告されつつあります [45-47].

現在、様々な天体に対する多くのサンプルリターンミッションが実施、あるいは計画されています。中国の月探査嫦娥5号ミッションでは、Oceanus

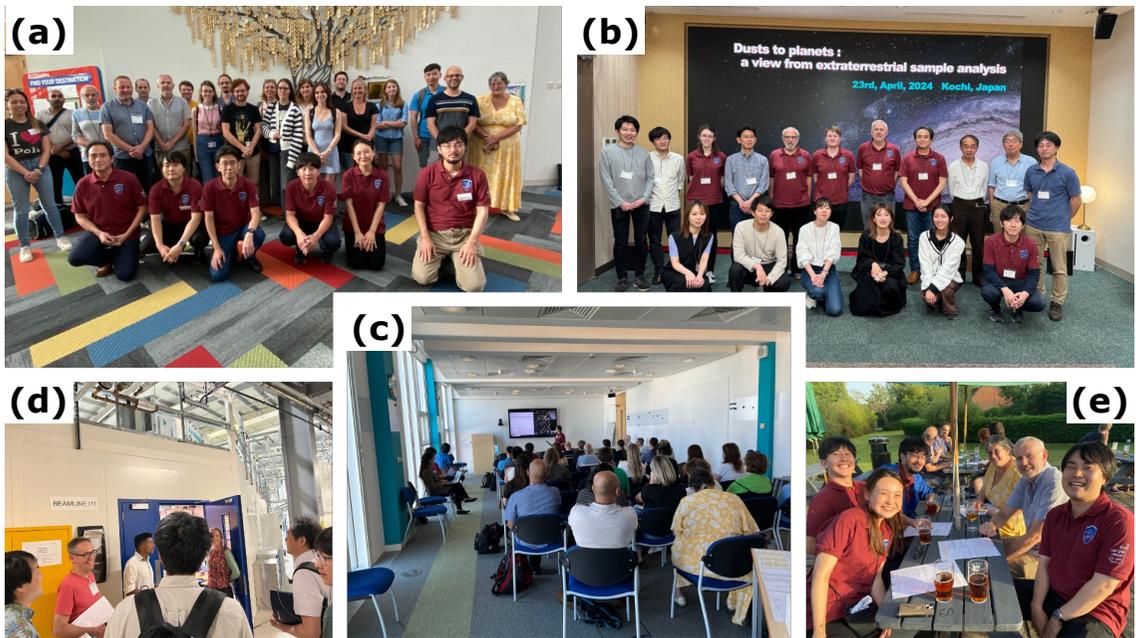


図8: (a) オープン大学でのシンポジウム集合写真, (b) 高知で行ったシンポジウム集合写真, (c) オープン大学でのシンポジウム, 英国内の惑星科学研究者らが40名ほど参加, (d) 英国ダイヤモンド放射光施設視察, (e) オープン大学のグレイディ教授, フランキー教授らとの懇親会.

Procellarum 地域からの試料が回収され, その分析により, 月の火山活動が約20億年前まで続いていたことが明らかになりました [48]. 続く嫦娥6号ミッションでは, 月の裏側からの試料の回収に成功し, 研究が進められています [49]. NASAやESAも新たな月面サンプルリターンミッションを計画しています. このような探査ミッションを通じて月天然資源を利用する技術の開発が進めば, いずれ人類の月面定住は夢ではなくなるのではないのでしょうか.

火星とその衛星に関してはどうでしょう. JAXAのMMX (Martian Moons eXploration) ミッションでは火星衛星フォボスから, そしてNASAとESAは共同で火星からのサンプルリターン (岩石や大気の試料) を進めています. 火星探査の大きな目的の一つは, 過去または現在の生命の痕跡を探ることです. もし見つかった場合には, 現在の惑星物質キュレーションのあり方や施設そのものの高度化を考えなければなりません. つまり, 長い目で見て地球の生命や有機物に影響を与えないための惑星検疫・保護の方法, そしてバイオセーフティを十分に考慮したキュレーション施設の必要性も先んじて議論する必

要があります [50-52]. ここでの議論は, 将来の有人火星探査計画にも有益です.

「はやぶさ」, 「STARDUST」, 「はやぶさ2」, 「OSIRIS-REx」などのミッションから得られたLessons Learnedは, 次世代のサンプルリターンミッションに関する提案だけにとどまりません. ここから得られた重要な知見の一つは, たとえ極めて少量の試料であっても, 適切なキュレーション, 分析チームの密接な連携と機器・研究環境の高度化により膨大な科学的情報が得られることです. さらに「適切にキュレーションされ, 汚染のない状態」で保存された過去の帰還試料を, その時代の先端技術・機器を用いて再分析することが可能です. このように, キュレーションと最先端分析を有機的に結びつけることで, 天体の起源や形成史, さらに初期太陽系における物質循環のプロセスの理解が飛躍的に進展すると期待できます [53].

太陽系や惑星に関する知見をさらに広げるために, 彗星や氷衛星, 金星などを対象にした野心的なサンプルリターンミッションが提案されれば, 世界の惑星科学コミュニティは大いに活気づくことでしょ

う。もちろん、技術的・経済的な観点から、こうしたミッションは非常に難易度が高いですが、その科学的価値は計り知れません。近い将来、世界の宇宙機関が協力する国際プロジェクトとして実施されることを、心から願ってやみません。

次世代の惑星物質科学研究者の育成についても考えなければならない時期にきています。Ph2Kでは、JSPS-Royal Society日英二国間交流事業を獲得し、オープン大学、あるいは、高知コア研究所主催の研究会を相互の国で行ったり（図8）、日英若手研究者の短期滞在をサポートしたり、さまざまな形で相互交流を深化させています。この取り組みで得られた日英若手研究者らの関係が、火星衛星探査（MMX）や深宇宙探査機DESTINY⁺ミッションへの英国若手研究者らの参加や、南極隕石を用いた共同研究などに発展しています。このような国内外の新しい交流の輪が広がるための活動は、我々のような中堅からシニアの研究者らは、決して疎かにすべきでなく、どれだけでも投資をしても良いと考えています。

惑星物質科学に携わる研究者らは、太陽系内の物質分析だけを考えているわけではありません。宇宙空間に打ち上げられた宇宙望遠鏡や観測衛星（例えば、米国のハッブル、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡や日本のあかり、ひので）や地上に建設された巨大電波望遠鏡（すばる望遠鏡、アルマ大型電波干渉計など）を用い、より遠くの星や空間を観測する研究も盛んに行われています。これらは、宇宙初期の星の形成、生命の構成要素となるような複雑な有機分子の観測も可能なため、宇宙空間における有機分子の形成と多様性が明らかになりつつあります。今後、天体観測と惑星物質分析という異なる科学的情報、また空間・時間スケールの大きく異なる視点を結びつけることで、生命に関わる有機物だけではなく、地球の形成、太陽系、ひいては宇宙そのものの理解につながるでしょう。

謝辞

はやぶさ2ミッションにおいて、設計、運用、キュレーションならびにアドミニストレーションにご尽力賜りました関係各位、なかでもプロジェクトマネージャーの津田雄一教授（JAXA）、プロジェクトサイ

エンティストの渡邊誠一郎教授（名古屋大学）に深く感謝の意を表します。また、橘教授（東京大学）率いる初期分析チーム（北海道大学・塚本教授、東北大学・中村教授、九州大学／京都大学・野口教授、九州大学・奈良岡教授と岡崎准教授、広島大学・藪田教授）、岡山大学惑星物質研究所（中村教授、小林教授ほか）の方々とともに、リュウグウ試料の分析・研究を同時期に行うことができたことは、チームメンバー全員の研究人生の中で最もやりがいがあり、輝かしいプロジェクトとなりました。

リュウグウ試料の国外輸送に際し、多くの関係諸機関の方々のご理解とご支援を賜り、Ph2Kの研究プロジェクトを無事に遂行することができました。私たちの多種多様なアイデアを具体化し、実用化へとつなげることができたのは、兵庫県の佐藤精機株式会社、北海道大学グローバルファシリティセンター（佐々木隆太副センター長）とそこに所属される技術員（女池竜二氏、武井将志氏、佐々木康隆氏、楠崎真央氏）の皆様の多大なるご支援のおかげです。また国立研究開発法人海洋研究開発機構高知コア研究所の小笠原真由氏、および国立極地研究所南極隕石ラボラトリーの小嶋智子氏（現JAXA宇宙科学研究所ASRG）の多方面にわたるご支援も欠かせませんでした。ここに厚く御礼を申し上げます。

常に励ましてくださった恩師の方々、厳しくサイエンスで戦いながらも理解しあいこれまで歩んできた国内外の研究仲間と友人、そして陰ながら支えてくれた家族に、心より感謝申し上げます。最後に、フェーズ2キュレーション高知の活動に関わったメンバー全員を謝辞にかえて記します（表1）。

参考文献

- [1] 橘省吾ほか, 2014, 地球化学 48, 265.
- [2] Yada, T. et al., 2021, Nat. Astron. 6, 214.
- [3] Pilorget, C. et al., 2021, Nat. Astron. 6, 221.
- [4] Tachibana, S. et al., 2022, Science 375, 1011.
- [5] 安部正真ほか, 2020, 日本惑星科学会誌 29, 28.
- [6] Ito, M. et al., 2022, Nat. Astron. 6, 1163.
- [7] Nakamura, E. et al., 2022, Proc. Jpn. Acad. B 98, 227.
- [8] Yokoyama, T. et al., 2022, Science 379,

- eabn7850.
- [9] Nakamura, T. et al., 2022, *Science* 379, eabn8671.
- [10] Noguchi, T. et al., 2022, *Nat. Astron.* 7, 170.
- [11] Okazaki, R. et al., 2022, *Science* 379, eabo0431.
- [12] Naraoka, H. et al., 2023, *Science* 379, eabn9033.
- [13] Yabuta, H. et al., 2023, *Science* 379, eabn9057.
- [14] Morioka, M. and Nagasawa, H., 1991, *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 751.
- [15] Nakato, A. et al., 2023, *Earth Planets Space* 75, 45.
- [16] 伊藤元雄, 2017, *ぶんせき* 9, 403.
- [17] Ito, M. et al., 2020, *Earth Planets Space* 72, 133.
- [18] Uesugi, M. et al., 2020, *Rev. Sci. Instrum.* 91, 035107.
- [19] Shirai, N. et al., 2020, *Meteor. Planet. Sci.* 55, 1665.
- [20] Kodama, Y. et al., 2020, *J. Mineral. Petrol. Sci.* 115, 407.
- [21] Nishimura, M. et al., 2023, *Earth Planets Space* 75, 131.
- [22] Yamaguchi, A. et al., 2023, *Nat. Astron.* 7, 398.
- [23] Tomioka, N. et al., 2023, *Nat. Astron.* 7, 669.
- [24] Kebukawa, Y. et al., 2010, *Meteorit. Planet. Sci.* 45, 99.
- [25] Floss, C. et al., 2006, *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 2371.
- [26] Alexander, C.M.O.'D., 2017, *Phil. Trans. R. Soc. A* 375, 20150384.
- [27] Daly, L. et al., 2021, *Nat. Astron.* 5, 1275.
- [28] Piani, L. et al., 2023, *ApJL* 946, L43.
- [29] Liu, M-C. et al., 2022, *Nat. Astron.* 6, 1172.
- [30] McCain, K. A. et al., 2023, *Nat. Astron.* 7, 309.
- [31] Verchovsky, A. B. et al., 2024, *Nat. Commun.* 15, 8075.
- [32] Pilorget, C. et al., 2024, *Nat. Astron.* 8, 1529.
- [33] Imae, N. et al., 2024, *Meteor. Planet. Sci.* 59, 1705.
- [34] Barosch, J. et al., 2022, *ApJL* 935, L3.
- [35] Nguyen, A.N. et al., 2023, *Sci. Adv.* 9, eadh1003.
- [36] Matsumoto, T. et al., 2024, *Nat. Astron.* 8, 1536.
- [37] Kebukawa, Y. et al., 2023, *Meteor. Planet. Sci.* 59, 1845.
- [38] Oba, Y. et al., 2023, *Nat. Commun.* 14, 1292.
- [39] Quirico, E. et al., 2023, *Meteor. Planet. Sci.* 59, 1907.
- [40] Changela, H. G. et al., 2024, *Nat. Commun.* 15, 6165.
- [41] De Gregorio, B. et al., 2024, *Nat. Commun.* 15, 7488.
- [42] Nittler, L. et al., 2024, *EPSL* 637, 118719.
- [43] Takano, Y. et al., 2024, *Nat. Commun.* 15, 5708.
- [44] Yoshimura, T. et al., 2024, *Nat. Commun.* 15, 6809.
- [45] Lauretta, D.S. et al., 2024, *Meteor. Planet. Sci.* 59, 2453.
- [46] McCoy, T. J. et al., 2025, *Nature* 637, 1072.
- [47] Glavin, D. P. et al., 2025, *Nat. Astron.* 9, 199.
- [48] Che, X. et al., 2021, *Science* 374, 887.
- [49] Cui, Z. et al., 2024, *Science* 386, 1395.
- [50] 矢田達ほか, 2022, *日本惑星科学会誌* 31, 153.
- [51] Yada, T. et al., 2023, *Earth Planets Space* 75, 170.
- [52] COSPAR Policy on Planetary Protection. *Space Research Today*, 2024.
- [53] Grady, M. et al., 2025, *Nat. Astron.* 9, 487.

表1: フェーズ2キュレーション高知メンバーリスト(2021年6月～2024年3月).

Name	Affiliations
Motoo Ito	Kochi Inst. Core Sample Research, JAMSTEC
Naotaka Tomioka	Kochi Inst. Core Sample Research, JAMSTEC
Masayuki Uesugi	Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)
Kentaro Uesugi	Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)
Akira Yamaguchi	National Institute of Polar Research (NIPR)
Naoya Imae	National Institute of Polar Research (NIPR)
Takuji Ohigashi	UVSOR Synchrotron Facility, Institute for Molecular Science/ Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization
Yuzuru Karouji	Space Exploration Center, JAXA / Osaka University
Naoki Shirai	Tokyo Metropolitan University / Kanagawa University
Yu Kodama	Marine Works Japan Ltd. / Toyo Corp.
Hayato Yuzawa	UVSOR Synchrotron Facility, Institute for Molecular Science
Kaori Hirahara	Osaka University
Ikuya Sakurai	Synchrotron Radiation Center, Nagoya University
Ikuo Okada	Synchrotron Radiation Center, Nagoya University
Makoto Kimura	National Institute of Polar Research (NIPR)
Ming-Chang Liu	University of California Los Angeles / Lawrence Livermore National Laboratory, USA
Richard Greenwood	Open University, UK
Akira Tsuchiyama	Ritsumeikan University
Aiko Nakato	Institute of Space and Astronautical Science, JAXA / NIPR
Kasumi Yogata	Institute of Space and Astronautical Science, JAXA
Toru Yada	Institute of Space and Astronautical Science, JAXA
Masanao Abe	Institute of Space and Astronautical Science, JAXA
Masahiro Yasutake	Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)
Kaitlyn McCain	University of California Los Angeles / Lawrence Livermore National Laboratory, USA
Nozomi Matsuda	University of California Los Angeles, USA
Kevin D. McKeegan	University of California Los Angeles, USA
Ross Findlay	Open University, UK
James A. Malley	Open University, UK
Ian A. Franchi	Open University, UK
Monica Grady	Open University, UK
Alexander (Sasha) Verchovsky	Open University, UK
Feargus Abernethy	Open University, UK
Xuchao Zhao	Open University, UK
Martin Suttle	Open University, UK
Cedric Pilorget	Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, CNRS, France
Jean-Pierre Bibring	Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, CNRS, France
Damien Loizeau	Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, CNRS, France
John Carter	Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, CNRS, France
Lucie Riu	Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, CNRS, France
Tania Le Pivert-Jolivet	Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, CNRS, France
Akihisa Takeuchi	Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)
Shun Sekimoto	Kyoto University
Keishi Okazaki	Kochi Inst. Core Sample Research JAMSTEC / Hiroshima University

著者紹介

伊藤 元雄



国立研究開発法人海洋研究開発機構高知コア研究所・首席研究員。学習院大学理学部化学科博士課程修了。博士(理学)。2001年からアリゾナ大学地球科学科JSPS海外PD, 2006年からNASA Johnson Space Center ARESとLPIでの研究員を経て, 2011年より現職。専門は惑星物質科学と二次イオン質量分析法。日本地球化学会, 日本惑星科学会, 日本分析化学会, 研究・イノベーション学会, Meteoritical Societyに所属。NASA Small Bodies Assessment GroupのCommitteeを務める。

富岡 尚敬



国立研究開発法人海洋研究開発機構高知コア研究所・首席研究員。北海道大学大学院理学研究科博士課程後期修了。博士(理学)。日本学術振興会・特別研究員PD, 神戸大学理学部・助教, 岡山大学地球物質科学研究センター・准教授, 海洋研究開発機構高知コア研究所・主任研究員を経て2024年10月より現職。専門は惑星物質科学, 高圧鉱物学。日本鉱物科学会, 日本高圧力学会, アメリカ地球物理連合, 国際隕石学会, アメリカ鉱物学会に所属。日本鉱物科学会理事, アメリカ鉱物学会フェロー等を務める。

山口 亮

国立極地研究所准教授, 南極隕石キュレーター。東京大学大学院理学系研究科鉱物学専攻博士課程を卒業後, 米国ハワイ大学博士研究員, 科学技術特別研究員(旧無機材質研究所)を経て, 1999年より現職。博士(理学)。国際隕石学会フェロー。Meteoritics & Planetary Scienceのアソシエイトエディターを務める。

中藤 亜衣子

国立極地研究所南極隕石ラボラトリー・学術支援技術専門員。東北大学大学院理学研究科博士課程修了。博士(理学)。2012年からニューメキシコ大学地球惑星科学科でPD, 2014年からJAXA/ISASでプロジェクト研究員, 2016年から京都大学で研究員, 2018年からJAXA/ISASで研究開発員を経て, 2023年より現職。専門は惑星物質科学。日本惑星科学会, Meteoritical Societyに所属。