

火の鳥「はやぶさ」未来編 その26 ~リュウグウ帰還試料のキュレーション~

矢田 達¹, 安部 正真¹, 岡田 達明¹, 中藤 亜衣子¹, 与賀田 佳澄¹, 宮崎 明子¹, 西村 征洋¹, 坂本 佳奈子¹, 畠田 健太郎², 熊谷 和也², 古屋 静萌^{1,3}, 岩前 絢子^{2,4}, 吉武 美和^{1,5}, 人見 勇矢², 副島 広道², 長島 加奈¹, 金丸 礼¹, 山本 大貴^{1,6}, 林 佑¹, 深井 稜汰¹, 管原 春菜¹, 鈴木 志野¹, 橘 省吾^{1,3}, 臼井 寛裕¹, 塚本 尚義^{1,7}, 藤本 正樹^{1,6}, 澤田 弘崇¹, 岡崎 隆司⁸, 高野 淑識⁹, 三浦 弥生¹⁰, 矢野 創¹, Trevor Ireland¹¹, 杉田 精司¹², 長 勇一郎¹², 湯本 航生¹², 矢部 佑奈¹², 森 晶輝¹², Jean-Pierre Bibring¹³, Cedric Pilorget¹³, Rosario Brunetto¹³, Lucie Riu^{1,13}, Damian Loizeau¹³, Lionel Lourit¹³, Vincent Hamm¹³, 中澤 暁¹, 田中 智¹, 佐伯 孝尚¹, 吉川 真¹, 渡邊 誠一郎¹⁴, 津田 雄一¹

(抄録) 2020年12月6日に小惑星探査機「はやぶさ2」はC型小惑星リュウグウ表層物質を収めた再突入カプセルを地球に帰還させた。回収された再突入カプセルに収められた試料コンテナは、オーストラリア現地でのガス採取を実施した後、JAXA相模原キャンパスの惑星物質試料受入設備に搬入され、チェンバー導入前の部品取り外し・洗浄等のプロセスを経てクリーンチェンバー内で真空中での開封・高純度窒素環境下での帰還試料の取り出し・初期記載が行われた。これらのリュウグウ帰還試料の初期記載の結果、これまでに回収されたとの隕石よりも反射率が低く、全体密度が小さい事が判明した。また、赤外反射スペクトルの吸収特性から水酸基を含む含水鉱物と炭酸塩鉱物、及びCH結合に富む有機物が試料中に含まれることが明らかになった。これらの情報を既知の隕石と比較すると、CIコンドライト隕石に最も似ていると言える。また探査機搭載機器によって得られた可視・近赤外スペクトルと比較した結果、帰還試料はリュウグウ表層全体を代表している事が分かった。取り出された試料の一部は既に初期分析チーム、2次キュレーションチーム、NASAへ配分され、更に国際公募研究による配布が予定されている。本稿では一連の試料取り扱いプロセス・初期記載内容について述べる。

1. はじめに—サンプルリターン ミッションとキュレーションの意義—

本稿では、本誌の『火の鳥「はやぶさ」未来編』の連載で「はやぶさ2」メインミッションのトリを飾る、リュウグウ帰還試料の受け入れ・記載について、報告させて頂く。ご存じの通り、2014年12月に打ち上げら

れた小惑星探査機「はやぶさ2」は、目標天体の地球近傍C型小惑星162173リュウグウにおける近傍観測・試料採集を行い、2020年12月6日オーストラリアに小惑星試料を収めた再突入カプセルを帰還させた[1-3]。

「はやぶさ2」のようなサンプルリターンミッションが他のミッションと大きく異なる点は、リモートセンシ

1.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
2.(株)マリン・ワーク・ジャパン
3.東京大学宇宙惑星科学機構
4.東洋大学
5.特許庁
6.東京工業大学地球生命研究所
7.北海道大学大学院理学研究院
8.九州大学大学院理学研究院

9.海洋研究開発機構
10.東京大学地震研究所
11.オーストラリアクィーンズランド大学
12.東京大学大学院理学系研究科
13.フランス宇宙天体物理学研究所
14.名古屋大学大学院環境学研究所
yada@planeta.sci.isas.jaxa.jp

ング観測を行った探査対象天体から実際に試料を持ち帰る所にある。リモートセンシング探査で知り得るのは、探査機を打ち上げた時点での技術レベルで開発された観測機器で、対象天体近傍での限られた時間で行った観測で得られたデータとなるが、サンプルリターンミッションでは帰還した試料を将来にわたって繰り返し分析することが出来る。例えば、遠い将来、画期的な分析技術の躍進があった場合、再び帰還試料をその技術を用いて分析する事により、新たな科学的成果を創出する事が可能である。前例としてはアポロ11~17号が1969年~1972年に月から持ち帰った試料から、半世紀経った今でも新たな研究成果が生み出されている[例えば4]。サンプルリターンミッションは長期間にわたって科学的成果を創出し続ける、非常に息の長い探査であると言える。また、地球に落下する隕石と小惑星の望遠鏡観測による可視・近赤外スペクトルを比較して、それぞれの隕石の母天体と小惑星のスペクトルタイプとを関連付ける為の研究がなされてきたが[5]、この研究の実証の為には実際の小惑星の試料を持ち帰って隕石と比較するのが一番の早道である。サンプルリターンミッションは、地質学者が地球の成り立ちを知る為に地質図を作る様に、人類が太陽系の成り立ちを知る為に太陽系全体の地質図を完成させるのに欠くことの出来ない探査である。この人類の宝とも言うべきサンプルリターンミッションによる帰還試料を受け入れ、科学的価値を損なう事無く取り扱い、タイムリーに研究供与することで新たな惑星物質科学成果の創出をもたらす、将来にわたって適切に保管・管理する業務が、帰還試料キュレーションである。

以下、本稿では「はやぶさ2」帰還試料キュレーションについて、その試料帰還前の準備から実際の帰還後の試料処理過程、試料の初期記載の成果を概観する。

2. 帰還前の準備

本誌「火の鳥」はやぶさ」未来編」連載その14 [6]及びその20[7]でも触れているとおり、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所地球外物質研究グループ(Astromaterials Science Research Group, 以後ASRG)では、2015年より「はやぶさ2」帰還試



図1: オーストラリアウーメラ制限区域に着陸した、探査機「はやぶさ2」再突入カプセルの機器モジュールの回収作業の様子。連載その23の図3の集合写真と同じ木が写っている[3]。

料受入設備仕様検討委員会を立ち上げて、設備仕様検討を進め、2016年からクリーンルーム新設工事に着手し、並行して「はやぶさ2」帰還試料専用のクリーンチェンバー(以下CCと略す)の設計・製造・設置を進めた。2018年の新設クリーンルームへのCCの設置以降、2年間にわたって機器の機能・性能確認、関連機器・器具の整備を進めつつ、帰還試料の受け入れ・初期記載のリハーサルを実施し、2020年12月の試料帰還本番に備えた。特に、研究機関間輸送に用いる為の密閉型容器(Facility to Facility Transfer Container, FFTC)やチェンバー内で用いる試料容器や治具の仕様については、シール性能の確認なども含めて二次キュレーション高知チームメンバーの助力により開発されたことをここに明記しておきたい[8]。本連載その23でも触れられているが[3]、受け入れ準備の途上において、新型コロナウイルスが全世界で蔓延する状況となった。この為、最初の緊急事態宣言により1ヶ月余り現場作業の休止を余儀なくされたり、作業再開後も国内及び海外拠点との連帯に苦心する事となった。例えば、後述される、初期記載分析機器の一つである赤外顕微鏡MicrOmegaについては、開発元のフランス宇宙天体物理学研究所から機器を受け入れる為に、来訪した開発元技術者が2週間の隔離期間を経て、設置・調整作業に当たる、などというような経緯もあった。また、本来はASRG人員の少なくとも1名はオーストラリアでの再突入カプセル回収作業に立ち会う予定だった所を、その後の帰国後の隔離により本来の試

料受け入れ作業に参加できなくなることを鑑み、カプセル回収作業への参加は見送ることとなった。

3. カプセルの回収からガス採取まで

当初の予定通り、探査機「はやぶさ2」から切り離された再突入カプセルはオーストラリア現地時間2020年12月6日2時24分頃、オーストラリアウーメラ制限区域(Woomera Prohibited Area, 以後WPA)内に着地した(図1)。その発見時の経緯の詳細は本連載その23を参照して頂きたい[3]。回収された再突入カプセルの内、試料コンテナを含む部分は機器モジュールと呼ばれる。この機器モジュールはWPA内のオーストラリア軍の施設内に持ち込まれ、バッテリーなどの危険物を取り外した後、試料コンテナを取り出し、施設内に設置されたクリーンブースに持ち込まれた。試料コンテナはその表面の洗浄を行った上で、ガス採取・分析を行う為に開発されたガス採取・分析装置に接続された。真空中でコンテナの底面に穴を開けコンテナ内に密封されていたガスサンプルの大部分は真空ラインに設置されているガスタンクに回収され、ガスサンプルの一部は四重極質量分析計によってその場分析が行われた(図2)。これは地球外天体から回収された世界で初めてのガスサンプルとなる。ガス採取を実施した後、コンテナは真空中で密封され、窒素封入された金属ケースに収められて輸

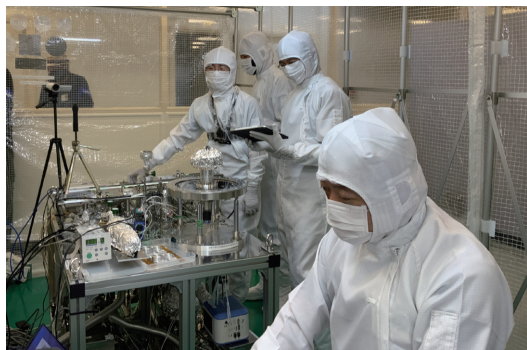


図2: オーストラリアウーメラ制限区域内の軍施設に設置されたクリーンブース内で行われた試料コンテナからのガス採取の様子。中央のフランジ上に据え付けられているのが、回収された試料コンテナで、フランジはガス採取・分析装置の真空ラインに接続されている。ガス採取・分析装置には四重極質量分析計、ガス採取用タンクが備えられている。

送コンテナに収納し、WPA内の軍用空港からチャーター機で東京国際空港(羽田)まで空輸された。

4. クリーンチェンバー導入まで

2020年12月8日早朝に東京国際空港(羽田)に着陸したチャーター機から取り出された輸送コンテナはエアサスペンション車に搭載されてJAXA相模原キャンパスまで陸送された。地元の方々からの歓迎を受けて輸送コンテナを載せたエアサスペンション車は惑星物質試料受入設備に到着し、輸送コンテナは惑星物質試料受入設備に持ち込まれた。この後、試料コンテナはCCに導入されるまでの作業はオーストラリア現地からチャーター機で帰国したサンプラーチーム(SMP)人員4名と国内で待機していたSMP1名及びASRGから選ばれた共同作業員2名により進められた。当時の検疫規定により海外から帰国した邦人は2週間の隔離が必要となっていたが、日本側の人員との接触がないよう対策を講じることを条件に、SMP帰国班とASRG2名、国内SMP1名による帰国直後の作業が認められた。また、オーストラリア輸送からCCへの試料搬入まで作業記録係1名が帯同した。これらの人員と国内のASRGメンバーとの完全隔離の為に、2チームのクリーンルームへの入室口を別々にして動線が交わらない様にし、また、クリーンルーム外では間仕切りを設けて環境を完全に隔離する措置を執った。

このような環境の元、サンプラーチームはまず輸送コンテナから試料コンテナを取り出し、外観チェックを行った。その後、コンテナの外蓋の上に取り付いている背面アブレーターを取り外す為に(図3)、アブレーターをフタに締結しているネジ頭を露出させるべく、フライス盤によるアブレターの切削作業をクリーンルーム内で実施した。通常、クリーンルームと工作機械はその清浄度の違いから相容れないものであるが、クリーンルーム内に設置された独立排気区画にフライス盤を設置し、機器や切削作業で排出される汚染物がクリーンルームを汚染しない様に配慮した。切削作業により露出したネジを取り外して背面アブレーターを取り外した後、コンテナの外面を真空吸引及び湿式・乾式ワイブにより洗浄を行い、50 μ m以上の汚染物が存在しないのを確認して

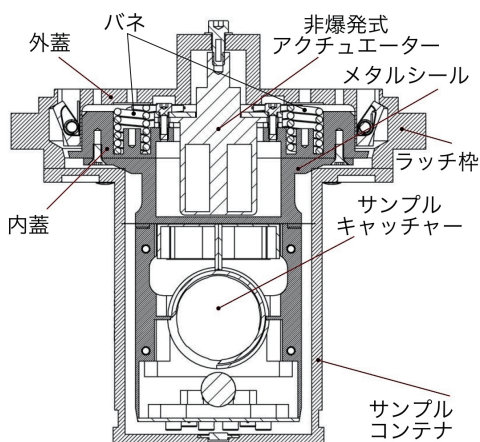


図3:「はやぶさ2」試料コンテナの断面図。主にサンプルコンテナ、サンプルキャッチャー、内蓋、外蓋、ラッチ枠から構成される。内蓋のメタルシールとコンテナのエッジによるメタルシールにより、試料をおさめたキャッチャーは小惑星近傍での閉止時の環境を保っている。この外蓋の上には再突入時の加熱からサンプルを保護する為の背面アブレーターが締結されていた。

から、試料コンテナから不要部品を取り外す作業に移った。図3に示すとおり、試料コンテナの蓋は内蓋と外蓋の2重構造になっており、二つのフタの間にバネが設置されており、外蓋はラッチ枠により固定され、バネの斥力で内蓋をコンテナ下部のメタルシールに押し付けることで真空密封を保持している。部品取り外し作業では、試料コンテナが設置されているフランジごとコンテナ開封機構に設置し、蓋全体を開封機構の器具により押さえ、ラッチ枠を取り外した。ラッチ枠を取り外すことにより外蓋は分離できるようになるので、内蓋を別の器具で押さえて外蓋・バネなどの部品を取り外した。これによりチェンバーに導入可能な状態になったので、導入直前にもう一度真空吸引及び湿式・乾式ワイプにより洗浄を行い、開封機構ごとCCに締結して真空排気を開始し、高真空に到達させた。この一連の作業にあたって、常にコンテナを保持している荷重、及びコンテナの真空度を継続モニターすることで、リークによる地球大気の汚染の無い事を確認しつつ作業を進めた。試料コンテナの日本帰国から3日目、地球への試料帰還から132時間(5日半)で試料コンテナはCCまで導入された。

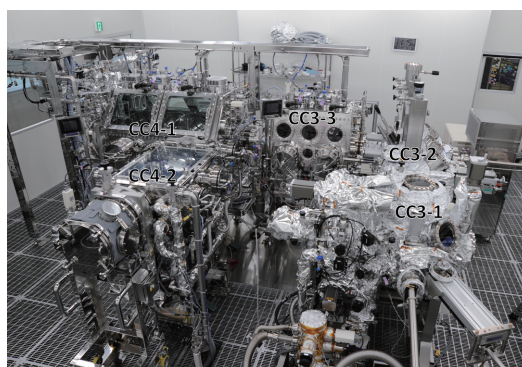


図4:「はやぶさ2」帰還試料用CCの俯瞰写真。右下から反時計回りにCC3-1, CC3-2, CC3-3, CC4-1, CC4-2という配置になっている。CC3-1, CC3-2は真空作業用, CC3-3は真空及び高純度窒素作業兼用, CC4-1, CC4-2は高純度窒素作業用となっている。

5. クリーンチェンバー内での帰還試料取り出し

図4に「はやぶさ2」帰還試料用CCの俯瞰写真を示す。CCはCC3-1, CC3-2, CC3-3, CC4-1, CC4-2の5室から構成される。CCの番号が3から始まっているのは、「はやぶさ」初号機帰還試料用CCであるCC1, CC2との混同を避ける為に通し番号とした事に因る。CC3-1, CC3-2が真空環境でのコンテナ開封、一部試料回収の為、CC3-3が試料取り扱い環境を真空から高純度窒素に変換する為、CC4-1, CC4-2が高純度窒素環境で試料の取り出し、初期記載を実施する為に準備された[7]。「はやぶさ」初号機では真空でのコンテナ開封以降、S型小惑星イトカワからの帰還試料は全て窒素環境で取り扱われたが[9, 10], C型小惑星リュウグウの帰還試料を取り扱う「はやぶさ2」帰還試料用CCでは、試料に含まれると推定される地球外起源の主に炭素、窒素、酸素、水素からなる有機物を窒素環境にも触れさせたくない、というサイエンス側からの要求を受け、試料の一部を真空環境で取り分けられるような仕様になっている。

さて、試料コンテナのCC導入以降の作業担当は、ASRGメンバーに引き継がれた。コンテナを設置したコンテナ開封機構フランジは前述のCC3-1に接合され、真空排気された。高真空環境において、

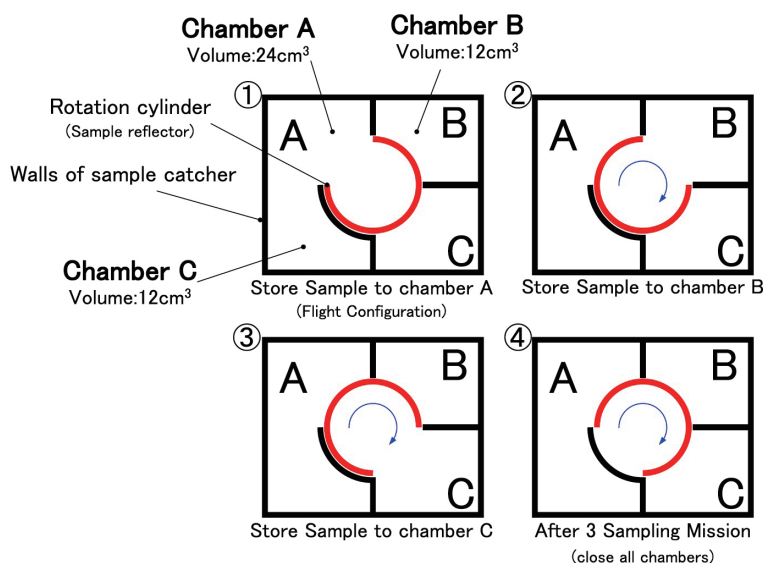


図5:「はやぶさ」サンプルキャッチャーの構造を示した模式図。[11]のFig. 14の一部を抜粋。サンプルの入り口である回転筒が回転することにより、採集試料を3つの部屋(A室, B室, C室)に取り分けることが出来る。

真空ホールド状態にしてから、コンテナ開封機構により内蓋を内蓋に締結されたサンプルキャッチャーごと上昇させ、試料コンテナを開封した。図5にサンプルキャッチャーの模式図を示す[11]。サンプルキャッチャーは回転筒を中心に3つの部屋に区切られており、A室に小惑星リュウグウ表面における1回目のタッチダウンの試料が、C室に2回目のタッチダウンの試料が収められている[2, 11]。試料コンテナから取り出されたサンプルキャッチャーは上下反転してA室を上に向けた状態で同じく高真空環境のCC3-2に搬送され、CC3-1とCC3-2間ゲートバルブは閉じられた。この際、CC3-1内に残された試料コンテナ内には黒色の粉体試料が確認された。CC3-2にはキャッチャーを設置できるステージが3箇所準備されており、ステージ1がA室フタネジ取り外し及びA室フタ取り外し、ステージ2が試料観察・ピックアップ、ステージ3がA室フタ清掃及び石英フタ取り付けCC3-3搬送、とそれぞれ異なる機能を備えている。CC3-1からCC3-2のステージ1に搬送されたキャッチャーは、まずステージ3にてA室フタ表面をテフロンヘラでワイプすることで表面に付着している微粒子を取り除いた。これはこの後の静電チャックによるフタの吸着の際の障害を取り除く為の措置である。キャッチャーはステージ1に戻され、A室フタを

締結している六角穴ボルト4本の取り外し・回収を実施した。これによりキャッチャーA室フタは取り外し可能となった。続いてステージ1上で静電チャックによってフタを取り外した。ここで初めてキャッチャーA室内部に捕獲されている1回目のタッチダウン試料を目にすることが出来た。この作業は、普段のクリーンスーツ着用に加えてゴーグルも装着するなど十分な感染対策を実施した上でサンプラーチームも立ち会う中で行われた。想定を上回る大量の試料がA室に収められているのが確認され(図6)、両チームのスタッフで喜びを分かち合った瞬間だった。その後、キャッチャーはステージ2に搬送され、ボアスコープによる写真撮影を実施した上で、キャッチャーA室内一部試料を専用器具によりピックアップし、2-3mmサイズの粒子2個が真空中で取り分けられ、合成石英ガラス製の容器に回収された。残りの大部分の試料を収めたキャッチャーはステージ3に送られ、合成石英ガラス製の仮蓋を取り付けた後、真空環境のCC3-3に搬送された。キャッチャーのCC3-3搬送後、CC3-2とCC3-3の間のゲートバルブは閉じられ、以後、現在に到るまで、試料コンテナ内にこぼれていた粉体試料はCC3-1内に、取り分けられたリュウグウA室粒子2個はCC3-2内に真空環境のまま保管されている。



図6:CC3-2内で「はやぶさ2」サンプルキャッチャーA室を開封した様子。多数の黒色粒子が収められていた。このA室に収められているのは、小惑星リュウグウ表面で実施した1回目のタッチダウンで捕獲された試料である。キャッチャーの外径は48mm。

上記のゲートバルブ閉止後、キャッチャーを受け取ったCC3-3は高純度窒素スローリークにより大気圧高純度窒素環境へ移行した。以後、グローブによるハンドリングに移行するので、サンプルキャッチャーを汚染させずにハンドリングする為に、まず、キャッチャーにアタッチメントを取り付けてから、内蓋とキャッチャーを締結している六角穴ボルト4本を取り外し、キャッチャーはCC3-3からCC4-1を経由してCC4-2に送られた。CC4-2ではキャッチャーごとサンプルステージに設置され、実体顕微鏡によるA室全体の写真撮影が行われた。その後、アタッチメントごとキャッチャー全体の秤量が行われて、風袋重量を差し引いた、この時点でのキャッチャー内の帰還試料の総重量は 5.424 ± 0.217 gであった。その後、キャッチャーはCC4-1に戻され、専用治具を使って分解・試料回収が行われた。キャッチャーA室試料は $\phi 23$ mmのサファイアガラス製容器3つに、キャッチャーB室試料は同容器1つに、キャッチャーC室試料は同容器3つに回収された。まず、このバルク試料に対して、後述の初期記載が行われた後、真空ピンセットを用いてバルク試料中の大きい粒子から順に拾い出しと初期記載を順次行っている。

6. 帰還試料の初期記載

6.1 初期記載手法

まずここでは初期記載手法について述べる。「はやぶさ2」帰還試料の初期記載では、後に続く初期分析への影響を考慮し、非汚染・非破壊を原則とした5つの手法が適用された。初期記載では既に前述されたものも含めて、実体顕微鏡による光学観察・撮像、電子天秤による秤量、フーリエ変換赤外分光計(FT-IR)による赤外反射スペクトル測定、赤外分光顕微鏡MicrOmegaによる赤外線反射スペクトル撮像、そして、6バンドフィルターデジタル顕微鏡による可視分光スペクトル撮像・分析となる。これら全ての初期記載がCCの高純度窒素環境下で実施された。

顕微鏡はニコン製双眼実体顕微鏡SMZ1270iをベースに付属の電動制御ステージを開発し、CC4-2上に取り付けてある。CC4-2は上面前面がガラス窓で構成されており、この窓を介してCC4-2内の手動サンプルステージに設置された試料の観察・撮像を行う仕様となっている。電動制御ステージを活用した広範囲マップ撮影や立体物の全焦点画像撮影も可能である。顕微鏡のズーム倍率変更の度にスケールキャリブレーションを実施し、正確な寸法測定に努めた。

電子天秤はメトラー・トレド製XP-404S(最大計量値410g, 最小表示0.1mg)をベースに秤量部と表示部を分離し、有機物による汚染を最小限に抑えるため、チェンバー内に入れる秤量部に改造を加えた。秤量部はカバーをSUS304製の工作品に置き換えて可能な限りシールを施し、信号・電源ケーブルはテフロン被覆のものに交換し、ハーメチックシールフランジを介してチェンバー外の表示部と結線して計測できる様にした。チェンバー内の窒素環境による帯電の影響を抑制する為に、ステンレスメッシュを内張した石英ガラス製風防を準備した。試料秤量前に標準分銅の秤量を実施し、秤量値の再現性を確認している。

FT-IRはゲートバルブを介してCC4-2に締結された専用チェンバー上に本体が設置され、チェンバーのサファイアガラス製ビューポートを介してチェンバー内に設置された試料の赤外反射スペクトルを測定できる様な仕様になっている。本体は日本分光製

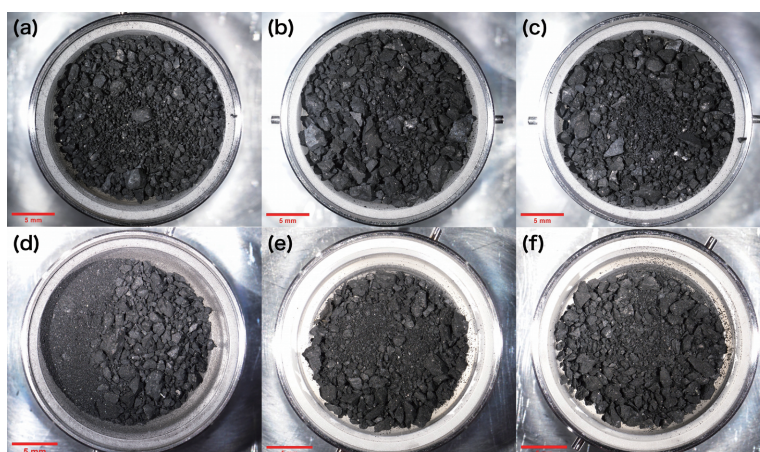


図7:「はやぶさ2」サンプルキャッチャーA室(a-c)とC室(d-f)からサファイアガラス製容器に回収されたリュウグウ帰還試料の光学顕微鏡写真. 文献[16]のExtended Data Fig.1を使用. 黒色の数mmの粒子からサブmm以下の微粒子で構成される. C室からはこれらの粒子とは別の容器に最大10mm超の小石サイズの粒子が10個以上回収されている.

VIR-300(測定波長域1~5 μm , In-Sb検出器搭載, 入射・出射角それぞれ 16° , 実効最少ビーム径1mm程度)で, チェンバーに対して本体を上下動させることで, チェンバー内に固定されている試料に対して焦点位置を合わせる. チェンバー内には試料と一緒にリファレンスとしてインフラゴールドが設置されており, インフラゴールドでバックグラウンド測定を行い, 試料測定前後にリファレンスとしてインフラゴールド測定を実施している.

MicrOmegaはフランス宇宙天体物理研究所が開発し, JAXA-CNES連携協定によりJAXAに提供された分析機器で, ほぼ同等性能の機器が「はやぶさ2」搭載着陸機MASCOTにも搭載されていた[12]. 測定波長域は0.99~3.65 μm , ピクセルサイズ22 μm で, CC3-3に締結された付属チェンバー内のXYZ θ 軸電動ステージ上に設置されたサンプルに対してサファイアガラス製ビューポートを介して赤外反射スペクトルイメージングが可能な仕様となっている. FT-IRだと数mmの試料上で多くても2, 3点程度しか測定できないが, MicrOmegaでは同じサンプルの100 μm レベルの組織に対してのスペクトル測定が可能である. キャリブレーションの為に2~3ヶ月に1回程度の頻度で99%スペクトラロンとインフラゴールドの測定を行っている.

可視分光スペクトル分析は, CC4-2上の実体顕微

鏡を退避し, CC4-2上のフレームに組み付けられたモノクロCMOSカメラKiralux CS895MUと6バンドフィルター(ul: 0.39 μm , b: 0.48 μm , v: 0.55 μm , Na:0.59 μm , w: 0.70 μm , x: 0.85 μm)付き光源を使用して行う. CC4-2内のサンプルステージ上に設置された試料に入射角 30° で単色光を照射し, 垂直の位相から撮像した画像を解析し, スペクトルを得た. この可視光6バンドの波長は探査機「はやぶさ2」に搭載された光学航法カメラONC-Tに搭載されたバンドパスフィルターの波長と対応している[13-15].

6.2 初期記載結果

上記に上げた5つの項目についての初期記載を, まず前述のA室3つ, C室3つのバルク試料に対して実施した. これらの成果は[16, 17]にまとめられているが, ここではその図表を引用しつつ, リュウグウ試料初期記載により明らかになったことを紹介する. まず, バルク試料の秤量により, 1回目のタッチダウン試料を収めたA室からは 3.237 ± 0.002 g, 2回目のタッチダウン試料を収めたC室からは 2.025 ± 0.003 gの試料が回収された事が判明した. A室, C室それぞれのバルク試料が収められたサファイア容器の顕微鏡写真を図7に示す. リュウグウ帰還試料が黒色の数mmの粒子からサブmmの微粒子から

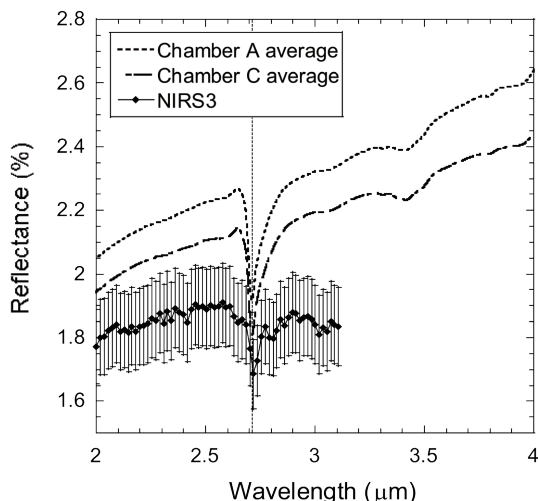


図8:FT-IR分析により取得された「はやぶさ2」帰還A室及びC室バルク試料の赤外反射スペクトル。文献[16]のFig.3bを一部改変して使用。比較の為に「はやぶさ2」搭載近赤外分光計によって得られたリュウグウ表層全球の赤外反射スペクトルを示す[18]。

構成されることが分かるが、特に注目すべきはこれらの試料の表面を観察した限りでは、コンドライト隕石に典型的なchondruleやCAI (Ca-, Al-rich inclusion)が見られないことである。

このA室及びC室のバルク試料に対して実施したFT-IR分析による赤外反射スペクトルを図8に示す。A室、C室共に2.7 μm に大きな吸収、3.1 μm 及び3.4 μm に微弱な吸収の特徴が見られた。これらはそれぞれO-H結合、N-H結合、及びC-H結合若しくは炭酸塩の吸収波長に対応しており、試料の大部分を層状ケイ酸塩などの含水鉱物が占めており、炭酸塩鉱物及び窒素化合物を含む有機物が含まれていることが示唆される。この傾向はMicrOmegaによるバルク試料分析でも同様であり[17]、二種の異なる分析機器の結果が矛盾しない事でデータの妥当性が保証された。図8中には探査機「はやぶさ2」搭載近赤外分光計NIRS3によるリュウグウ天体全体の表層反射スペクトルが比較対象として示されているが[18]、反射率や2.7 μm の大きな吸収特性は同等であり、これは帰還したリュウグウ試料がリュウグウ表層全体の代表的な物質であることを示している。

可視分光測定によって得られた、A室、C室バルク試料の可視光6バンド波長の反射スペクトルを図9に示す。比較の為に「はやぶさ2」搭載光学航法カメラ

ONC-Tによって得られたリュウグウ表層全球の可視反射スペクトル[14]、及びリュウグウと同じC型小惑星を起源に持つと思われる始原的炭素質コンドライト隕石の実験室データ[13, 19]を示す。A室、C室バルク試料はリュウグウ全球平均と同等の反射率で平坦なスペクトルを示しており、FT-IRとNIRS3の比較と同様に、帰還したリュウグウ試料がリュウグウ表層全体の代表的な物質であることを示している。また、帰還試料の反射率は、同じ入射・出射角の条件で実験室測定された、どの始原的炭素質コンドライト隕石のものよりも低い値を示した。これもリュウグウ試料の大きな特徴の一つである。

前述したとおり、バルク試料に対する分析の後、それらの試料から1mm以上の粒子のピックアップを実施した。合成石英ガラス製シャーレ上に拾い出された粒子はA、C室合わせて1000個以上になった。このシャーレを顕微鏡でマップ撮影し、画像処理ソフトで個別粒子の最大フェレー径と最小フェレー径を算出し、各粒子の平均粒径を求めた。このA室、C室個別粒子の平均粒径(横軸)と積算個数(縦軸)の関係をそれぞれ対数表示したグラフを図10に示す。この図において粒径2mm以下で急速に積算個数が増えなくなってプロファイルの傾きが小さくなるのは、大きな粒子から拾い出し、2mm以下の粒子は未だ拾い切れていないというスケジュールを優先した選択的ピックアップによる人為的な影響が原因と考えられる。この種のグラフでは一般的に傾きにより粒度分布を評価するが、人為的な影響を排除する為、傾きが急速に変化する前までの値で、A室、C室、全体(A室+C室)について傾きを計算した。その結果、A室が -4.59 ± 0.44 、C室が -3.15 ± 0.20 、全体(A室+C室)が -3.88 ± 0.25 となった。この傾きの絶対値が大きいほど、小さいサイズの粒子が多いサイズ分布である事を示す。A室の絶対値がC室と比較して大きいのは、C室の試料総重量がA室より小さいのに最大粒子がC室から回収されている点と合っている。A室の粒度分布が比較的均質であるのに対して、C室の粒径が大きい側の分布が歪なのは、2回目タッチダウンにより回収されたC室試料に探査機「はやぶさ2」搭載小型衝突装置(Small Carry-on Impactor, SCI)によって作られた人工クレーターからの放出物が含まれている事が原

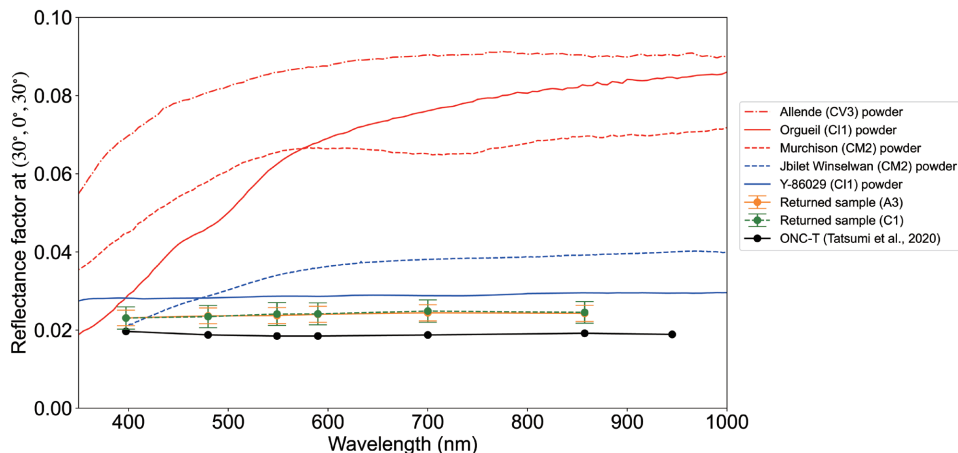


図9: 可視分光分析により取得された「はやぶさ2」帰還A室及びC室バルク試料の可視反射スペクトル. 文献[16]のFig.4を使用. 比較の為に「はやぶさ2」搭載光学航法カメラONC-Tによって得られたリュウグウ表層全球の可視反射スペクトル[14], 及びリュウグウと同じC型小惑星を起源に持つと思われる原始的炭素質コンドライト隕石の実験室データ[13, 19]を示す.

因となっている可能性がある[20, 21]. 実際, 2回目タッチダウン地点はSCI人工クレーターから20mの距離にあり, 一定量のクレーター放出物が含まれていると見込まれている[2, 21]. また, 回収試料全体(A室+C室)のサイズ分布の傾き(-3.88)は, ONC-Tで観測されたリュウグウ全球の5m以上の岩塊のサイズ分布の傾き(-2.65)よりも大きい[22]. これについては, 元々のリュウグウ表層のレゴリス粒子のサイズ分布が破壊や熱疲労などの小天体表層プロセスにより岩塊より細くなった可能性もあるが, 一方でサンプリング時のタンタル製弾丸撃ち込みによる衝撃や, 採集後の地球までのフライト・地球大気圏再突入・着陸の衝撃・カプセル回収後の空輸・陸送による振動・惑星物質受入設備内でのハンドリング時などの2次的プロセスによる破壊の影響も否定できない. 現時点では帰還試料の粒度分布から, リュウグウ表層レゴリス粒子の粒度分布に対する強い制約を与えることは難しい.

個別に拾い出された粒子はそれぞれサファイアガラス製個別容器に収納され, 光学顕微鏡撮像, 秤量が行われている. A室, C室合計200個強までの個別粒子の記載を終えた時点での顕微鏡画像から, 粒子の水平方向の最大・最少フェレー径(a, b), 及び粒子の最高点と容器面との焦点位置から求めた粒子の垂直方向の高さ(t)を計測し, 個別粒子の3次元平均粒径(D_p)を次式(1)により求めた.

$$D_p = \sqrt[3]{abt} \quad (1)$$

不定形粒子の3次元平均粒径から粒子体積を推定する次式(2)により個別粒子の体積(V_p)を推定した[23].

$$V_p = \frac{\pi}{6} (0.928 \times D_p)^3 \quad (2)$$

式(2)により算出された V_p と実際に秤量された個別粒子の重量から導き出した, 個別リュウグウ粒子の全体密度の分布を図11に示す. この分布が示すとおり, A室粒子とC室粒子で全体密度の分布には大きな違いは無く, それらの粒子の全体密度の平均値は $1282 \pm 231 \text{ kg m}^{-3}$ だった. これに対して, 「はやぶさ2」の近傍観測から求められたリュウグウの全体密度は $1190 \pm 20 \text{ kg m}^{-3}$ [1], リュウグウと同様のC型小惑星が起源と思われる原始的炭素質コンドライト隕石であるCIコンドライト隕石の全体密度が 2110 kg m^{-3} , Tagish Lake隕石の全体密度が 1660 kg m^{-3} である[24, 25]. Tagish Lake隕石が報告されている最も全体密度の小さい隕石なので, リュウグウ帰還試料は既知のどの隕石よりも全体密度が小さいことになる. 更に, リュウグウ帰還試料と最も似ているCIコンドライト隕石の粒子密度(内部の割れ目, 空隙を除いた試料部分のみの密度, 2380 kg m^{-3})か

表1: リュウグウ帰還試料と既知の始原的炭素質コンドライト隕石[24, 25, 28-30]の比較.

	0.55 μm における反射率	CAIs (体積%)	Chondrules (体積%)	全体密度 (kg m^{-3})	3 μm 帯吸収
Ryugu	~0.02	観察されず	観察されず	1282 \pm 231	有り
CI	0.063	<0.01	0	2110	有り
Tagish Lake	0.02	稀に存在	<17	1660	有り
CM	0.065	1.21	20	2120	有り
CR	-	0.12	55	3100	有り
CO	0.10-0.13	0.99	40	2950	無し
CV	0.086	2.98	45	2950	無し

らリュウグウ粒子の空隙率を計算すると、46%となる。この空隙率の値は、中間赤外カメラTIRの観測データと着陸機MASCOT搭載の熱放射計MARAの観測データから推定されたリュウグウ表層の空隙率30-50%の範囲内に収まり[26, 27]、小惑星リュウグウの観測データとも矛盾しない。

これらのリュウグウ帰還試料の初期記載データをまとめて、既知の始原的炭素質コンドライト隕石[24, 25, 28-30]と比較した結果を表1に示す。始原的炭素質コンドライト隕石と比較すると、CIコンドライト隕石と最も特徴が似通っていると言える。ただし、既知のどの隕石よりも反射率が低く、全体密度が小さい、という特徴を持っている。今後、出版される初期分析の成果により既知の隕石との比較の詳細が明らか

になるだろう。

7. 試料配布

上記の論文出版後も初期記載は進み、現在、個別容器に拾い出されて顕微鏡撮像・秤量が終わった粒子の数は400個を超える。それらの粒子について順次FT-IR分析、MicrOmega分析、可視分光測定を進めている。これらの初期記載データはRyugu

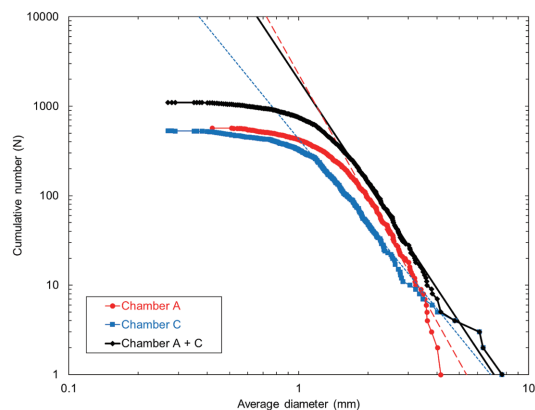


図10: 「はやぶさ2」サンプルキャッチャーA室及びC室バルク試料から拾い出された個別リュウグウ粒子の平均粒径(横軸)における積算個数(縦軸)を対数プロットした粒度分布。文献[16]のFig.1を使用。全般的に平均粒径2mmを切る辺りから傾きが小さくなっている。

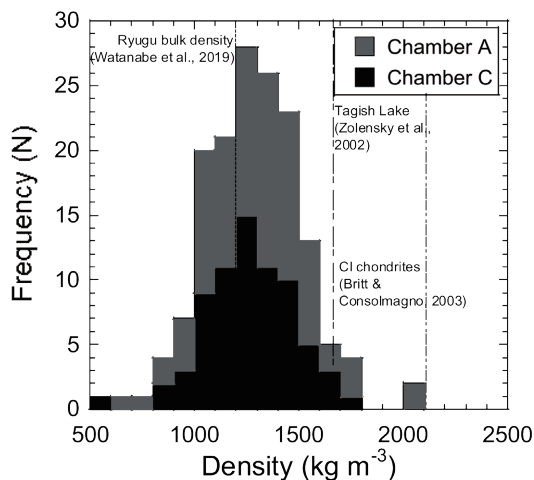


図11: サンプルキャッチャーA室及びC室から回収された個別リュウグウ粒子の全体密度(kg m^{-3})の分布。文献[16]のFig.2を一部改変して使用。A室粒子とC室粒子で分布が大きく変わらないのが分かる。ここに挙げられているA室、C室個別リュウグウ粒子の全体密度の平均値は1282 \pm 231 kg m^{-3} である。比較の為に「はやぶさ2」近傍観測により推定されたリュウグウの全体密度[1]、始原的炭素質コンドライト隕石であるCIコンドライト隕石[24]及びTagish Lake隕石[25]の全体密度の文献値を示す。

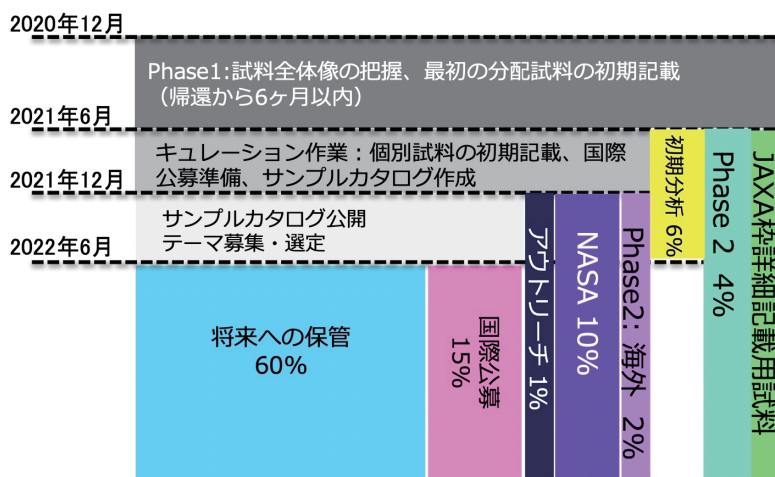


図12: 「はやぶさ2」帰還試料の配分比率及びスケジュール。2021年6月試料全体の6 wt%が初期分析チームに、4 wt%が2次キュレーションチームに配布され研究が進められている。本稿が出版される頃には国際公募研究への配布が始まる予定である。

Sample Database Systemにまとめられて公開されている(<https://darts.isas.jaxa.jp/curation/hayabusa2/>)[31].

本連載その20に言及されている予定通り[7], これらの初期記載の完了した粒子の一部について, 昨年6月に国内外の選抜された研究者から構成された初期分析チームと国内の連帯協力機関を中心とした2次キュレーションチームに対して, それぞれ全体の6 wt%と4 wt%にあたる試料を配分し, 分析研究が進められている。その配分割合については当初の想定を上回る試料が回収された為, 帰還前に想定されていた[7]の比率からは若干変更されている(図12参照)。この夏にもその分析成果は論文として出版される運びとなっている。更に, JAXAとNASAとの間で結ばれた覚え書きに基づき, 試料の10 wt%について, NASAに引き渡した。また, 4月下旬まで上記のデータベースで公開されているリュウグウ粒子の一部を対象に研究公募を行い, 評価の高かった研究申請者に対して本稿が出版される6月頃には配分が始まる予定になっている。次の研究公募もこの冬配布予定で準備が進められており, 初期分析の成果発表以降も引き続き研究成果が次々と発表されると期待される。

8. 今後の予定・展望

本誌『火の鳥「はやぶさ」未来編』連載その25でも紹介されたとおり[32], 「はやぶさ2」探査機は拡張ミッションに向けて再び地球を離れたが, 地球に帰還したリュウグウ試料は, 今後数十年に渡って貴重な初期太陽系・小天体表層の情報を提供し続けるだろう。また, 来年9月にはリュウグウと同じく始原的小天体と目されるB型小惑星ベヌからNASAの探査機OSIRIS-RExが試料を地球に帰還させる予定であり, 前述のJAXA-NASA間の覚え書きに基づき, その0.5 wt%はJAXAに提供される予定である[33]。JAXAではこの試料も「はやぶさ2」帰還試料と同様に, 初期記載・研究供与を実施する予定であり, このベヌ帰還試料とリュウグウ帰還試料との比較により, 太陽系の始原的小天体の知見を大きく躍進すると期待される。更に, 2024年にはJAXAが火星衛星探査機MMX (Martian Moon eXplorer)を打ち上げる予定である[34]。このMMXは火星の衛星であるフォボスの表層から試料を採集し, 2029年には地球に持ち帰る予定で, 火星衛星の起源や内惑星—外惑星領域間の相互作用の影響についても新たな知見をもたらすと期待されている。今後も, JAXAにおける帰還試料キュレーションは惑星物質科学において中心的な役割を担っていくことにな

る。この将来にわたって保持・管理されるべき人類の宝である帰還試料のキュレーションを担う次世代のキュレーターの育成も重要な課題である。JAXA宇宙科学研究所ASRGでは一般へのアウトリーチを積極的に進め、次世代を担う人材を広く発掘し、その育成に努めていく。

謝辞

小惑星探査機「はやぶさ2」が無事小惑星リュウグウの試料を地球に帰還させ、今日我々が試料を手に行っているのも、プロジェクトの立ち上げ、設計・製造・組み立て・試験、打ち上げ、往路・近傍・復路運用、試料の帰還・回収まで携わって頂いたプロジェクトチームのメンバー、関連業界の研究者及びメーカー担当者の方々のご尽力、そして応援して下さいました方があったことである。ここに厚く御礼申し上げたい。また、試料容器類の開発に尽力して頂いた、二次キュレーション高知チームメンバーに多大なる感謝を申し上げたい。本稿の執筆にあたって、三浦均さんには種々のサポートを頂いたので、ここに謝意を表したい。

参考文献

- [1] Watanabe, S. et al., 2019, *Science* 364, 268.
- [2] Tsuda, Y. et al., 2020, *Acta Astronaut.* 171, 42.
- [3] 中澤暁ほか, 2021, 日本惑星科学会誌 30, 18.
- [4] Stadermann, A. et al., 2022, *Meteoritics Planet. Sci.* 57, 794.
- [5] Rivkin, A. S. et al., 2015, in *Asteroids IV* (Tucson: Univ. Arizona Press), 65.
- [6] 安部正真ほか, 2018, 日本惑星科学会誌 27, 92.
- [7] 安部正真ほか, 2020, 日本惑星科学会誌 29, 28.
- [8] Ito, M. et al, 2020, *Earth Planets Space* 72, 133.
- [9] 矢田達ほか, 2013, 日本惑星科学会誌 22, 68.
- [10] Yada, T. et al., 2014, *Meteoritics Planet. Sci.* 49, 135.
- [11] Sawada, H. et al., 2017, *Space Sci. Rev.* 208, 81.
- [12] Bibring, J.-P. et al., 2017, *Space Sci. Rev.* 208, 401.
- [13] Sugita, S. et al., 2019, *Science* 364, eaaw0422.
- [14] Tatsumi, E. et al., 2020, *Astron. Astrophys.* 639, A83.
- [15] 巽瑛理ほか, 2021, 日本惑星科学会誌 30, 64.
- [16] Yada, T. et al., 2021, *Nature Astron.* 6, 214.
- [17] Pilorget, C. et al., 2021, *Nature Astron.* 6, 221.
- [18] Kitazato, K. et al., 2019, *Science* 364, 272.
- [19] Pieters, C. M., 1983, *J. Geophys. Res.* 88, 9534.
- [20] 門野敏彦, 2020, 日本惑星科学会誌 29, 222.
- [21] Arakawa, M. et al., 2020, *Science* 368, 67.
- [22] Michikami, T. et al., 2019, *Icarus* 331, 179.
- [23] Bagheri, G. H. et al., 2015, *Powder Technol.* 270, 141.
- [24] Britt, D. T. and Consolmagno G. J., 2001, *Meteoritics Planet. Sci.* 36, 1161.
- [25] Zolensky, M. E. et al., 2002, *Meteoritics Planet. Sci.* 37, 737.
- [26] Okada, T. et al., 2020, *Nature* 579, 518.
- [27] Grott, M. et al., 2019, *Nature Astron.* 3, 971.
- [28] Hutchison, R., 2004, *Meteorites A petrologic chemical and isotopic synthesis* (Cambridge: Cambridge Univ. Press).
- [29] Nakamura, T. et al., 2003, *Earth Planet. Sci. Lett.* 207, 83.
- [30] Hezel D. C. et al., 2008, *Meteoritics Planet. Sci.* 43, 1879.
- [31] 地球外物質研究グループほか, 2022, <https://doi.org/10.17597/ISAS.DARTS/CUR-Ryugu-description>.
- [32] 寫生有理ほか, 2021, 日本惑星科学会誌 30, 169.
- [33] Sandford, S. A. et al., 2020, *Acta Astronaut.* 166, 391.
- [34] Kuramoto, K. et al., 2022, *Earth Planets Space* 74, 12.