火の鳥「はやぶさ」未来編 その20 ~小惑星リュウグウからの リターンサンプル分析の全体像~

安部 正真¹, 橘 省吾², 小林 桂³, 伊藤 元雄⁴, 渡邊 誠一郎⁵

(要旨) 探査機「はやぶさ2」は小惑星リュウグウ表面での試料採取のための二回の着陸運用を成功させ、 現在,地球帰還に向けて,飛行中である.2020年末に地球に届けられるリュウグウ試料は,地球帰還か ら6ヶ月の期間, JAXAキュレーション施設内に設置された専用のクリーンチャンバーの中で,地球大気 にさらされず,窒素ガス中で初期記載される.その後,一部試料に対し,外部機関でのJAXA主導の高 次キュレーションならびに「はやぶさ2」科学チームによる初期分析がおこなわれる.地球帰還から18ヶ月 後には,それらの分析結果はカタログ化され,国際公募による分析に試料が配布される.本稿では,初 期記載,高次キュレーション,初期分析に関し,それぞれの目的や実施内容,計画について示し,国際公 募開始以前にJAXAならびに「はやぶさ2」プロジェクトが主導しておこなうリュウグウ試料分析の全体像 を紹介する.

1. リュウグウ表面での試料採取

探査機「はやぶさ2」は小惑星リュウグウでの近傍 観測(2018年6月-2019年11月)を終えた.リモート センシング観測によって,(1)リュウグウが独楽(コ マ)を上下に重ねたような形をしており,平均半径は およそ450 mであること,(2)バルク密度が1.19 ± 0.03 g cm-3であり,炭素質コンドライトの密度を 想定すると,天体全体として,50-60%の空隙率を もつこと,(3)表面全域に10 mを超える大きな岩塊 (大きさ約25 cmを超える岩石を岩塊とよぶ)が多く 存在し,リュウグウ表面物質の幾何アルベド(反射 能)は~4.5%しかなく,典型的な炭素質コンドライト よりも暗いこと,(4)表面全域に2.72 μmの吸収が

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所
東京大学・宇宙惑星科学機構
3.岡山大学・惑星物質研究所
4.海洋研究開発機構・高知コア研究所
5.名古屋大学・大学院環境学研究科
abe.masanao@jaxa.jp

見られるが、含水鉱物を含む炭素質コンドライトに 比べ、吸収が弱いこと、などが明らかとなった [e.g., 1-3]. また、着陸機MASCOTによって、表面に細 かい粒子が積もっているような様子は見られないこ と、数cmサイズの表面岩石の熱伝導度が隕石の典 型値より小さいことが明らかになった [4, 5]. これら の事実は、リュウグウが既存の隕石とは異なる物質 科学的特徴をもつことを示唆する、含水鉱物の低い 存在度は、リュウグウが加熱などによって含水鉱物 を失ったためか、そもそも母天体で水質変成があま り進行しなかったためか、いずれかの可能性が考え られるが、現時点でははっきりとしない。

「はやぶさ2」は2019年2月,7月の二度,リュウグ ウ表面への着地に成功した.試料採取のための弾 丸の発射も確認された.「はやぶさ2」サンプラーシス テム [6-8] は「はやぶさ」を踏襲しており,弾丸発射 型の試料採取機構が宇宙環境で動作することが初 めて示された.第一回目の着地および試料採取は赤 道付近でおこなわれた.第二回目の着地は衝突装置 SCIによって赤道付近につくられた人工クレーター 周辺でおこなわれ、採取された試料にはクレーター から掘り起こされた地下物質が含まれていることが 期待される。

初回と二回目の着陸の間にはサンプルキャッチャ 内の試料導入口位置を変更し、二度の着陸で得ら れた試料をサンプルキャッチャ内の個別の格納室に 収納した.2019年8月には、サンプルキャッチャを地 球帰還カプセル内のサンプルコンテナに収納する運 用もおこない、試料採取運用における全動作が無事 に完了した.「はやぶさ2」は小惑星リュウグウ近傍で の運用を11月に終え、現在、地球へ帰還中である. 地球帰還カプセルは2020年末に地球に届けられる.

2. JAXAキュレーションにおける 初期記載

2.1 キュレーション設備への帰還試料受入

「はやぶさ2」の帰還試料の受入については, JAXA宇宙科学研究所の地球外物質研究グループ が, JAXA相模原キャンパスに設置された試料受入 れ設備(キュレーション設備)を用いて行う.

帰還試料は探査機の帰還カプセルのサンプルコ ンテナ内のサンプルキャッチャに収納されている. 地球帰還時に探査機から分離されたカプセルは豪 州で回収される予定である.カプセルは回収後,現 地でサンプルコンテナ内のガスが回収された後,輸 送コンテナに封入され,日本に空輸され,キュレー ション設備に運び込まれる予定である.帰還カプ セル回収からキュレーション設備への搬入までは, JAXAに組織されたカプセル回収隊が主導して行 い,地球外物質研究グループの作業はサンプルコン テナ受入後からスタートする.

2.2 サンプルコンテナの クリーンチャンバー搬入

キュレーション設備受入時,サンプルコンテナに は,帰還カプセルのインスツルメンタルモジュールと 呼ばれる構造体や,サンプルアブレータ(熱防御材) がついているため,そのままではクリーンチャンバー には入れられない.そのため,クラス10000レベルの 加工洗浄室と呼ばれるエリアで、インスツルメンタル モジュールとサンプルアブレータの除去を行う.特に サンプルアブレータはサンプルコンテナと締結してい るネジからの熱の流入を防ぐために、ネジ頭までア ブレータで蓋をされているため、フライス盤を用いて アブレータを削り出すという加工作業をクリーンルー ム内に独立排気エリアを設けて行う必要がある.

余計なものを取り除いたサンプルコンテナは表面 を清浄にした後, 試料準備室(クラス1000) で蓋開 封機構に組付けられる.サンプルコンテナは帰還 試料の大気暴露を防ぐためにメタルシールされて いる.サンプルコンテナの蓋は内と外の二重構造に なっており,ラッチ拘束された外蓋とばね力によっ て,内蓋がサンプルコンテナのシール部に押し付け られることで内部の密閉が保たれている.サンプル コンテナの内蓋だけをジグを使って反跳を抑え,外 蓋とばねを除去してから,最終的に蓋開封機構に組 付けられることになる.

2.3 試料の取り出しと初期記載

「はやぶさ2」の試料受入れのためのクリーンチャ ンバー(以下CCと略す)は,第2処理室(クラス100 ~1000)に設置され、5室(CC3-1,2,3;CC4-1,2) から構成されている(図1,2.4節).蓋開封機構は台 車でCC3-1下部に設置され、CC3-1の下面フランジ に取り付けられる.蓋開封機構取り付け後にクリー ンチャンバー内は真空環境にされる.

サンプルコンテナの開封は、内蓋を抑えている機 構をチャンバー外からの操作で解除し、内蓋を持ち 上げることで行う、内蓋はサンプルキャッチャと締 結されているため、この操作で、サンプルキャッチャ がサンプルコンテナから露出する、露出したサンプ ルキャッチャをCC3-1の第1トランスファーロッドで つかみ、CC3-2へ水平搬送する、CC3-2で第1トラ ンスファーロッドを用いてサンプルキャッチャを反転 し、内蓋を下にして、CC3-2の第1ステージに設置する.

サンプルキャッチャはA, B, C室の3部屋構成に なっており、1回目の着地の際の採取試料はA室に、 2回目の着地の際の採取試料はC室に入っている. CC3-2の第1ステージではキャッチャA室の蓋のネ ジを外し、蓋を取り除く.

蓋を取り除いた後、CC3-2の第2トランスファー



図1:「はやぶさ2」試料受入れ専用の新クリーンチャンバー.5室構成(CC3-1からCC4-2)となっている.

ロッドを用いてCC3-2の第2ステージに移動させ, スコープカメラで観察しながら,A室の試料の一部 を,鉗子機構を用いてピックアップし,CC3-2内に 設置した石英皿に保管する.その後,CC3-2の第3 ステージに移動させ,A室の開口部に試料飛散防止 用石英キャップを載せてから,CC3-2の第3トランス ファーロッドを用いてCC3-3に移動させる.ここまで の作業をすべて真空環境下で行う.サンプルキャッ チャがCC3-3に移動完了後,CC3-3とCC3-2の間 のゲートを閉めてから,CC3-3を窒素パージし,以 降,窒素雰囲気下でグローブ操作を行う.

CC3-3からは、サンプルキャッチャはキャッチャ ハンドリング治具を介してつかむことで、グローブ操 作でも安全かつ確実にその分解および試料の取り 出しが行えるようになっている。サンプルキャッチャ は分解する前に、CC4-2室で全体重量を計測し、回 収された試料のおおよその総量を計測する。その 後、CC4-1で、A室の試料の取り出し、B室の取り外 し、B室の試料の取り出し、C室の取り外し、C室の 試料の取り出しを行う。

各室からの試料の取り出しは,各室の開口部に 石英容器をかぶせた状態で全体を反転させて,各 室内の試料を石英容器に移し変える.この手法は, 「はやぶさ」初号機でも行った方法である. 石英容器 に移し替えられた各室の試料は再度CC4-2に移さ れ、各室の試料重量を計測したのち、光学観測と分 光観察を行う、光学観察では試料のサイズ分布に ついての概略の情報も得る予定である.分光観察 はここでは集合体としての分光データを取得予定で ある.分光観察はFTIRによる反射スペクトル測定 と、フランス宇宙天体物理学研究所(IAS)が開発し たMicrOmegaによる分光イメージ測定を準備中で ある. MicrOmegaは、「はやぶさ2」のMASCOT に搭載された分光イメージャーを帰還試料の測定 が行えるように専用に新規製作したものを用いる. このMicrOmegaの使用は2019年6月にJAXAと CNES間で締結された[JAXA地球外試料キュレー ションセンターにおけるMicrOmegaでの「はやぶさ 2|帰還試料分析に関する協力活動についての実施 取り決め」によって実現したものである.

各部屋の試料の集合体としての測定後に,個別粒 子のピックアップを行う.「はやぶさ」初号機では最 大でも300µmサイズの試料であったのに対して,「は やぶさ2」ではmmサイズの試料も帰還することが期 待されている. そのため,地球外物質研究グループ では,mmサイズの試料もハンドリングできるツール を開発中である.個別粒子はピックアップされた後, 個別の容器に収納され,光学顕微鏡での記載を行う.また大きなものは個別の秤量と分光データの取 得を予定している.個別粒子のピックアップと観察 は,大きい粒子から行い,最初の6か月間では最大 200粒子程度と考えている.

2.4 JAXAキュレーション設備

ここまで, 帰還カプセル回収から, 試料の個別ピッ クアップと試料の初期記載までの流れを説明した. 続いて, 試料受入設備について簡単に紹介する.

試料受入れ設備の検討の経緯については. [9] に書かれている. 2015年から検討がスタートし、ク リーンルームとクリーンチャンバーの完成は2018 年である. クリーンルームを,「はやぶさ」初号機用 クリーンルームの隣の部屋に新しく新設し、その中 に、「はやぶさ2」専用のクリーンチャンバーを設置 している. 「はやぶさ2」のクリーンチャンバーは5室 構成で、CC3-1, 3-2, 3-3, 4-1, 4-2と呼ばれている。 CC3-1, 3-2は真空環境下でのハンドリング、CC4-1, 4-2は窒素環境下でのハンドリングを行える仕様で CC3-3はその両方の機能を備えている。チャンバー はステンレス製で内面は複合電解研磨処理され超 精密洗浄されている、 クリーンルームへ設置後ベー キングで脱ガス処理を行い、真空環境下では残留ガ ス分析四重極型質量分析計(RGA-QMS)を用いて、 窒素環境下では大気圧イオン化質量分析計(API-MS)を用いて環境モニタを行う. 窒素ガスについて は、最高グレードの液体窒素から気化器および流出 型純化機を用いて不純物を取り除くと同時に、循環 型純化器でクリーンチャンバー内のガスを随時精製 しながら環境を維持する.

「はやぶさ」初号機のチャンバー構成が2室であっ たのに対し、「はやぶさ2」では5室構成となったのに は理由がある.一つは真空環境下での試料の取り 出しおよび保管を可能にするために、専用のCC3-2 を作ったことである.CC3-2には真空環境で動作す る機構を複数取り付け、ネジの取り外しや蓋の取り 外し、試料の回収などを行うことが可能である.ま た各種スコープカメラを備え、サンプルキャッチャ 内の試料の様子や作業の様子をリアルタイムで観 察できる機能も備えている.またCC3-3は真空環 境から窒素環境に変えるエアロック機能を備えると 同時に,拡張ポートを備え,将来の新しい機能を付 加できるようにしている.前述のMicrOmegaによ る分光測定機能は,チャンバー仕様の決定後に追 加することが決まったため,このポートを用いて行 う.拡張ポートにはゲートバルブがついているため, MicrOmega測定が完了した後には,別の機能を付 け替えることも可能である.

CC4-2も「はやぶさ」初号機にはなかった作業用 チャンバーである。「はやぶさ」初号機の帰還試料は ほとんどが100μm以下と小さく、静電制御マニピュ レータ[10]と呼ばれる専用のハンドリングツールを 開発し、これまで約1000粒子のピックアップに成功 しているが、作業効率が悪く、当初は1日1粒程度の ハンドリングがやっとであった.「はやぶさ2」では限 られた時間で初期記載を完了し、後段の詳細分析に 分配する作業を速やかに行う必要がある. 幸い、「は やぶさ2」の帰還試料は初号機よりも大きなサイズで あることが期待されており、 試料ハンドリングも手作 業で拾い上げることも可能なように、チャンバー上面 をすべて窓面として、手元を目視して作業できるよう なチャンバーを新たに設計している. これにより光 学観察も、光学顕微鏡をチャンバー内に入れること なく、窓越しに設置観察できると同時に、電動モー タを用いて自動マッピングも可能となり、試料観察 の効率も格段に向上している.

CC4-1は「はやぶさ」初号機の静電マニピュレータ を設置したチャンバーと同様な設計であるが,主に キャッチャハンドリング治具を用いた,キャッチャの 分解作業を,個別ピックアップした試料の一時保管 スペースとして用いる予定である.

CC4-1とCC4-2にはハンドリングツールや試料容 器の出し入れのための搬入出用のポートが用意さ れており、専用の搬入出用チャンバーを取り付けて、 チャンバー内を真空排気および窒素置換を繰り返し 行い、清浄化された環境にしてからゲートバルブを 開け、出し入れを行う、テフロン製のジグなどは水分 や大気の脱ガス効率が悪く、清浄化まで時間がかか る傾向があるため、「はやぶさ2」用の搬入出ポート は内部ヒータを備えており、脱ガス効率を上げて、も のの出し入れの作業性の向上も図っている. CC4-2の搬入出ポートはフーリエ変換赤外分光光 度計(FTIR)の測定チャンバーの接続ポートも兼ね ている.FTIRはキャッチャの各室から取り出した 試料を集合体として石英容器に回収した後,拡散 反射スペクトルデータを取得することを予定してい る.測定光のスポットサイズは1 mm ゆ程度であるた め,試料サイズが大きい場合は,個別の反射スペクト ルデータも取得可能である.測定波長範囲は0.67µ mから5µmと「はやぶさ2」搭載の近赤外線分光計 NIRS3の観測波長域をカバーしており,リモートセ ンシングデータとの比較することが可能である.チャ ンバー上部にはサファイヤ製の窓があり,チャンバー 外に設置したFTIR測定装置と外部光学系を介し て,チャンバー内の試料を分光測定する.

重量測定については、CC4-2に接続した搬入出 室を介して、秤量装置をCC4-2に導入して行う予定 である、「はやぶさ」初号機では秤量装置を、 ゲート バルブを介して隔離し、測定時のみゲートを開ける 方式であったが、装置から秤量皿までの距離がある ため振動の影響を受けやすく、測定精度が十分出 せない問題点があった. そのため,「はやぶさ2」で は装置本体を専用のアルミケースで覆うことでコンタ ミネーション源となることを極力避けると同時に、秤 量測定時のみチャンバー内に導入し、測定終了後は 速やかに外に出すことで、チャンバー内汚染を極力 低くする方式を選択している. この方式はNASAの Johnson Space Centerが採用している方式でも ある. チャンバー内はドライな窒素環境下でグロー ブ操作や窒素循環の風の摩擦により静電気が発生 しやすく、秤量装置は静電気の影響を受けやすいた め、秤量想定時には、金属メッシュを取り付けた専 用の風防を用いて測定環境の安定化を実現し、測定 精度の向上を図っている.

CC4-1には将来の試料保管のための拡張ポート も用意している.初号機では,同様の拡張ポートに 試料保管庫を取り付け,保管庫には無電源で駆動す るゲッタポンプが2式搭載されている.保管庫に試 料保管後,保管庫をチャンバーから切り離すことで, 停電時にも安全に試料保管をすることが可能であ る.

チャンバー内で用いるハンドリングツールおよび 試料容器は合成石英または、ステンレスおよびアル ミまたはテフロンを原則としている.チャンバー搬入 前には,超純水および有機溶剤で超音波洗浄を行い、メタル製品以外は酸アルカリ溶液を用いた洗浄 も併用している.有機物除去に関しては、ベーク処 理する方法もあるが、有機物以外の汚染レベルが悪 化することを考慮して、UVオゾン洗浄を採用するこ とを検討している.

3. 初期記載後の試料分配の流れ

3.1 Phase2キュレーションの位置づけ

帰還試料受入れ6か月後に,初期分析を開始する ことになっている.また初期記載作業と並行して, キュレーション主導のもと,高次キュレーション(以 後Phase2キュレーションと呼ぶ)をJAXA外部の 研究機関と共同で行うことになっている.Phase2 キュレーションについては2015年3月に開催された 第5回キュレーション専門委員会でその必要性が議 論された.

その時の資料によれば、必要性については「「はや ぶさ2」の帰還後、その試料に最も多く接する機会 を持つのはISASキュレーショングループである.し たがってそのハンドリングの経験から、初期分析や、 外部の研究者からは提案されていない研究テーマ を創出することが出来るはずである.拠点分析は、 このキュレーションメンバーの経験を生かしたサイ エンステーマに基づく分析を実施する枠組みとして、 「はやぶさ2」の試料から得られるサイエンス成果を 最大化するために設定することを目的とする.また、 拠点との共同研究を通し、キュレーションとその他 の研究施設の人材交流、技術情報交換などを行い、 将来のサンプルリターンへの人材育成を実施する.」 とある.

初期分析との違いについては次のように整理され た.初期分析は試料が帰ってくる前にあらかじめ徹 底的に議論された分析フローにのっとって,試料が 帰ってきてから短期間に科学成果を出すことを目標 とするものである.一方,Phase2キュレーションは, 試料の帰還後,ある個々の試料,あるいはある試料 のグループに対して,初期記載で得られたデータを もとに,帰還試料全体の特徴などを踏まえた上で, 与えられた試料から最大の科学成果が得られるよう サイエンステーマ・目標を設定し、それを達成する分 析フローを検討して、実施するものである。

その後,専門委員会での2度にわたる書類審査を 経て,2015年5月の第6回キュレーション専門員会で, 岡山大学・地球惑星物質科学研究センター(現惑星 物質研究所)(Phase2三朝:代表中村栄三)と国立 研究開発法人・海洋研究開発機構(JAMSTEC)高 知コア研究所(Phase2高知:代表 伊藤元雄)の2か 所が選定された.そして、キュレーション主導のも と、それぞれの研究機関がリュウグウ試料の分析を 独立に担当することとなる.

JAMSTEC高知コア研究所については,2018年 4月の第14回キュレーション専門委員会において,地 球外物質研究グループが連携協定や共同研究契約 を結んでいる大学共同利用機関法人・自然科学研究 機構・分子科学研究所,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,高輝度光 科学研究センターの研究機関と連携する体制に拡 張することを提案し,承認されている(ただしあくま でも主体は高知コア研究所である).

3.2 Phase2三朝の取り組み

岡山大学惑星物質研究所(IPM)は、小惑星探 査機「はやぶさ」によってもたらされた小惑星イト カワ由来の帰還試料の初期分析を担当し、限られ た微粒子試料の総合解析によって、微小重力天 体表層環境に関する新たな物質科学知見を得た [11]. その初期分析において重要な役割を果たし たのは, 多様な局所分析, バルク分析機器を組み 合わせ対象試料から複合的な物理化学情報を取り 出すことを可能とした地球惑星物質総合解析シス テム(Comprehensive Analytical System for Terrestrial and Extraterrestrial Materials: CASTEM)を用いた総合物質科学的解析であっ た[12]. そして小惑星リュウグウからの帰還試料の Phase2キュレーションにおいても、さらに発展した CASTEMを最大限活用し、総合的な観点から帰還 試料の起源・進化に関わる情報を抽出する予定であ る. そして国際AOの基礎となる基本的な物質科学 的情報を与え、継続的な研究の効率化を図ることを 目的とする.

小惑星探査機「はやぶさ2」によるリモートセンシ

ングによって得られた形体・形状情報、物性、物質 科学的情報によって、小惑星リュウグウの描像の理 解が進みつつある[2]. 岡山大学惑星物質研究所で 実施するPhase2キュレーションにおいては、これ らの情報に基づき推定される物質科学的多様性を 持つ微小重力天体形成モデルをあらかじめ想定し [13], 帰還試料の総合解析によってそのモデルを検 証する準備を進めている. リュウグウは、分光学的 手法によって有機物質を含むことが示唆されており、 太陽系環境における有機―無機物質の共進化およ びマクロな小惑星形成・進化に関する物質科学的検 証が最大のサイエンステーマとなる。 岡山大学惑星 物質研究所では、地球近傍小惑星の形成およびそ の後の物質進化における彗星の関与を強く示唆する 物質科学的証拠を隕石試料中に見出している[14]. そしてリュウグウにおいても同様の形成・進化モデル が適用可能であり、それを示す物質科学的痕跡を 帰還試料に探りたいと考えている. そのため、多様 な解析手法のなかから最適な手法を組み合わせる CASTEM2をさらに拡張し、LC超高質量分解能有 機質量分析計およびGC有機質量分析計をシステム に導入することによって、多くの有機物質を含むと推 定されるリュウグウからの帰還試料に対応できる解 析体制の整備を行った. これらの有機物質解析シス テムに加え、電子顕微鏡や二次イオン質量分析計, 安定同位体質量分析計,希ガス質量分析計を中心と したシーケンシャルな分析ルーチンの開発、評価に 精力的に進めている. また、Phase2キュレーション 実施向けた人的体制整備にも取り組む.

3.3 Phase2高知の取り組み

Phase2高知は、JAMSTEC高知コア研究所を 中核として複数の研究機関(国立極地研究所、分子 科学研究所UVSOR,高輝度光科学研究センター (SPring-8),首都大学東京、大阪大学、あいちシ ンクロトロン光センター、マリン・ワーク・ジャパン) と連携し、小惑星リュウグウ試料分析の実施体制を 整えている.彼らは、地球由来の汚染を極力排した 国内外研究機関間の試料輸送手段の検討、複数の 分析機器間での試料搬送法の確立、そして汚染源 となる地球物質の物質化学的データの取集から始ま り、リュウグウ試料の分析を見据え、連携研究機関 が持つ分析機器・技術の先鋭化にチームとして取り 組んできた [15-18].

リュウグウ試料に含まれる有機物と含水鉱物は. 微小・微細な組織として複雑に共存する可能性が高 い. そこで. Phase2高知では. リュウグウ試料の 分析に対して以下の取り組みを実施する.(1)放射 光分析を中心とした非破壊分析から質量分析などの 破壊分析へとシームレスにつなげた分析システム(二 次元・三次元の高解像度組織観察、分子構造・化学 種同定, 軽元素同位体比, 結晶構造, 主要・微量元 素組成など)を開発し、試料の物質科学的特徴を総 合的に取得する。(2)得られた分析結果・手法は、 初期分析チームへフィードバックするとともに、国際 AOやキュレーション作業に資するベンチマークとす る.(3)国立極地研究所が保有する多様な地球外 物質(隕石、微隕石)の分析データを利活用し、リュ ウグウ試料の太陽系物質としての普遍性と特殊性を 探求する.

3.4 JAXAキュレーションにおける詳細分析

相模原のキュレーション施設内で行う詳細分析に ついて,第14回キュレーション専門委員会で提案が あり,承認されている.

キュレーションで実施する初期記載は原則として 非破壊・非汚染としているため、実施できる測定は 光学観察, 分光観測と秤量測定に限られている. は やぶさ初号機ではサンプルカタログ作成に当たり, SEM/EDS測定を行い、試料の鉱物種データを取 得しているが、「はやぶさ2」 試料には有機物が多く 含まれていることが想定されており、SEM測定にお いて電子ビームによる試料ダメージが懸念されるこ とから、初期記載では実施されないため、一部の試 料について、次の目的のためにキュレーションにて早 い段階で試料ダメージを許容する詳細分析の実施 が認められている、その目的とは、その時の資料に よれば、「(1)持ち帰った試料が小惑星リュウグウ起 源の試料なのかどうかを明確にする.(2)リュウグ ウ試料がどのタイプの惑星物質と近いかを明らかに する.(3)リュウグウ試料に対して、汚染物質がどの 程度含まれるかを明らかにする.」の3点である. 上 記の目的を達成する為に、原則として地球外物質研 究グループの装置を用いて行う予定である.

3.5 海外機関への試料分配

このほか、初期記載後の試料分配先としては、 JAXA・NASA間で結ばれたMOUに基づき、試料 帰還後1年以内にNASAに10%の試料を分配する ことが決まっている。またMOUには分配する試料 はrepresentativeでunprocessedであることと 明記されており、「はやぶさ2」の初期記載でSEM/ EDSを実施しない理由にもなっている。また、帰還 後1年半後には国際公募研究(国際AO)を開始する ことも記載されており、そのためのカタログ作りも前 述の機関への試料分配後に継続して行う必要もあ る。さらに高次キュレーションの海外枠として、一部 の試料を海外チームに、国際公募研究の開始前に 分配することもかねてから提案されており、その分配 のタイミングと分配先についての検討が現在も継続 中である。

以上,初期記載から国際公募研究までの試料分配 のタイミングについての現時点での案を図2に示す.

4.「はやぶさ2」チームがおこなう リュウグウ試料初期分析

初期分析の役割は,(1)リュウグウ表面試料がどう いう物質であるかを明らかにし,(2)「はやぶさ2」計 画が掲げるサイエンス目標をリターンサンプル分析 から解明することに挑み,(3)その後の国際分析(国 際AO)に対し,リュウグウ試料の科学的ポテンシャ ルを示すことである.

「はやぶさ2」計画が掲げてきたサイエンス目標は, 1) 微惑星から小惑星に至るまでの熱変成とそれに 伴う物質進化の紐解き,2) 衝突破壊・合体のプロセ スを含めた小天体物理進化の謎解き,3) 小惑星で の鉱物・水・有機物相互作用による有機物複雑進化 過程の探索,4) 原始太陽系円盤内での高温物質か ら揮発性物質までの物質混合・循環の解明である。 初期分析では、これらの4つの目標の下に、銀河・分 子雲,初期太陽系円盤、微惑星、メインベルト小惑 星、近地球型小惑星といった進化ステージごとの物 質進化を追うことを目標とする[6,19].「はやぶさ2」 がリュウグウで得たkm-mmスケールでの観測情報 を,mm-原子スケールの分析情報と結びつけ、観測



Principle flow for HYB2 returned samples

図2:「はやぶさ2」帰還試料の試料分配予定. 試料の分配比率については最終的にはHayabusa2 Sample Allocation Committee(HSAC) で決定される予定である.

データを解釈する物質科学的証拠を提供することも 重要な役割として当然含まれる.(1),(2)で十分な成 果が得られれば,自ずと(3)の役割を果たすことがで きるものと考えている.

持ち帰られた試料が(地球起源ではなく)リュウグ ウ起源であることを鉱物種,組織,同位体などの分 析から結論づけた上で,これまでのリュウグウでの 観測結果 [e.g., 1-5] をもとにして,以下のような科 学目標に取り組む.

4.1 リュウグウ試料とはなにか

これまでの地上の隕石や惑星間塵コレクションに 見られる化学的,岩石鉱物学的多様性の中に,リュ ウグウ試料を位置づけることである.イトカワ粒子 に対しても,初期分析でその作業がおこなわれた [20-22].着陸機MASCOTによるリュウグウ表面 の詳細観察では,コンドライトに見られるようなmm サイズのコンドリュール,CAI様の構造が確認され た一方で[4],熱放射計での分析では,数cmサイズ の表面岩石の熱伝導度が地上の隕石より小さいこと が明らかとなった[5].これはリュウグウ表面岩石が 隕石より空隙率が高いことを示唆し,リュウグウの 岩石がこれまで人類が手にした地球外物質とは異な る可能性が高いことを意味する(空隙率が高く脆い 岩石であれば、大気圏突入時に破壊され、地上に隕 石として落ちてこない可能性がある).リュウグウ試 料とはなにか、まずはこの点を明らかにする.

4.2 太陽系の初期化学条件

太陽系始原物質には、太陽系形成以前に進化末 期の恒星周囲で形成された微粒子(太陽系とは極端 に異なる同位体組成をもち、プレソーラー粒子とよ ばれる)が一部含まれる。始原隕石に比べ、宇宙塵 により多くのプレソーラー粒子が含まれていること が知られている. リモートセンシング観測が示すリュ ウグウは含水鉱物起源のOH振動が表面全域に見 られるものの、その存在度は含水鉱物を含む炭素質 コンドライトより少ないものであった [3]. その原因 は加熱による脱水であったかもしれないし、そもそ も含水鉱物形成が進んでいないのかもしれない [2, 3]. リュウグウが加熱による脱水を経験した天体で はなく, 鉱物と水の反応が限定的で, 彗星的天体で あった場合には、 リュウグウ試料にプレソーラー粒 子が高濃度で含まれている可能性がある. 分子雲や 初期太陽系円盤外縁部に起源をもつと考えられる重 水素や15Nに富んだ有機物についても同様の期待が あり,超炭素質宇宙塵のように有機物に富む場合に は,太陽系初期の低温起源有機物も多く含まれる可 能性がある.

4.3 初期太陽系物質進化

コンドライトは,全岩化学組成,鉄の酸化還元状 態,酸素同位体などの違いで化学的に分類される. 一部の隕石には化学グループの異なる岩片が入って いることが知られているが,小惑星規模で化学的多 様性があるかどうかはわかっていない.「はやぶさ2」 は表面二地点への着陸に成功し,試料回収オペレー ションをおこなった.二地点からの回収試料の化学 的・岩石学的・鉱物学的特徴から,小惑星の化学的 多様性の有無を明らかにする.

また,コンドライトには,初期太陽系円盤で高温 ガスの凝縮や,固体物質の高温溶融でつくられた難 揮発性包有物(CAI)やコンドリュールが含まれる. それらの岩石学・鉱物学的観察,元素・同位体分析 を組み合わせ,形成条件を制約するとともに,放射 性同位体の壊変系を利用して形成年代を決定する. リュウグウ試料に含まれる初期太陽系円盤物質の形 成年代は,リュウグウ母天体の形成年代の制約とな る.

4.4 リュウグウ母天体での熱変成・水質変成

形成直後のリュウグウ母天体(微惑星)では、²⁶A1 などの短寿命放射性核種の壊変などで天体の加熱 が起こりうる.母天体にH₂O氷が含まれていた場合 には、氷が溶け、岩石と水との反応で含水鉱物が 形成される.リュウグウ試料の鉱物組み合わせや組 成、組織を調べることで、リュウグウ母天体で起き た熱や水による物質変成の有無や程度を解明する. また、放射壊変系を利用して、変成・変質年代を決 定する.リュウグウはラブルパイル天体であることか ら[1,2]、表面試料には母天体の様々な深さで形成 された岩石試料が混在している可能性もある.試料 ごとの変成度などから、母天体での変成プロセス、 構造や熱史について知見が得られることも期待され る.

4.5 リュウグウの形成・進化・現在の地質活動

リュウグウがどのように形成され、進化してきたか

を理解するためには、リュウグウ試料のバルク密度, 強度,熱伝導率、アルベドなどの物性情報は有用で ある.これらの情報をもとに、リュウグウがラブルパ イル天体であることの実証や「はやぶさ2」が観測し た科学データの物質科学的意義付けが可能となる. 衝突による衝撃変成や物質混合の証拠がある場合 には、衝撃の規模の推定や(可能な場合)衝撃脈の 年代測定などから、小惑星での衝突の歴史、ラブ ルパイル天体形成時期の考察をおこなうことができ る.

小惑星イトカワ表面粒子の分析で、小惑星は現在 においても、表面地質活動が続いていることが発見 された [11, 23-25]. リュウグウ試料に対しても, 宇 宙風化プロセス(太陽風イオンの撃ち込み)の有無や 宇宙風化年代を決定する.また,宇宙線生成核種 量からも粒子の表面滞在期間を求め、C型小惑星で の宇宙風化プロセスを初めて明らかにする。特に二 回目の着陸では、SCIインパクトでのイジェクタとし て、地下物質が採取されている可能性が高い。一回 目の着陸時の回収試料との岩石学・鉱物学的差異や 宇宙線生成核種量などを調べ、地下物質の同定を おこなう、地下物質と表面物質の違いからは、表面 地質プロセスの考察が可能となる。例えば、表面か ら数十cm以上の深さでは太陽光加熱の影響が少な いため、太陽光が表面での脱水を引き起こした場合 には含水鉱物量に差異が見られるかもしれない.

4.6 海や生命の材料の進化の場としての 小惑星

太陽系小天体の水や有機物は、地球の海や生命の 材料物質となった可能性がある.これまで、炭素質コ ンドライト中の水素のD/H比が地球の海のD/H比 と似ていることから、炭素質コンドライトが地球に水 をもたらしたという議論がおこなわれてきた.炭素質 コンドライトはC型小惑星との関連が指摘されてきた が、リュウグウ試料のD/H比から、C型小惑星が地 球の水の起源となりうるかどうかという議論が初め て可能となる.また、アミノ酸や糖などの生体関連分 子にも注目し、生命材料物質の宇宙における最終進 化の場としての小惑星の役割を明らかにする.

4.7 分析体制

「はやぶさ2」サンプラーシステムの特徴により[6-8],初期分析で扱う試料を,mmサイズ程度の粗粒 粒子,<100µmサイズ程度の細粒粒子,コンテナ内 で採取されたガスとする.粗粒粒子はサンプルコン テナ内で着地点ごとに分けて,収納されるため,採 取地点固有の情報や不均一性の議論が可能であ る.一方で,細粒粒子はサンプルキャッチャ内で混 合の可能性があり,表面全体の平均的特徴や表面 での地質プロセスである宇宙風化の評価などに用い る.また,コンテナから回収されるガス成分は,存 在すれば,世界で初めての気体状態のリターンサン プルとなるが,試料中に含まれる揮発性有機物や表 面から遊離する太陽風希ガスなどが得られる可能性 があると考えている.

これらの試料の特徴を考慮して、分析チームには 分析対象に応じた6つのサブチームを設けている. 同位体分析・化学分析チーム(バルク元素・同位体分 析,微小部同位体分析,年代測定),粗粒粒子に対 する鉱物学・岩石学的研究チーム(非破壊三次元組 織·鉱物分析, 鉱物·組織記載, 分光特性, 粒子物 理特性),細粒粒子に対する鉱物学的,岩石学的研 究チーム(微細構造分析,宇宙風化,ならびに他チー ムへの試料準備ハブ).ガス成分分析チーム(太陽 風希ガス,太陽宇宙線希ガス,銀河宇宙線希ガス, 揮発性有機物,H2O),不溶性有機物分析チーム(化 学組成・同位体組成(バルク,局所,官能基),構造), 可溶性有機物分析チーム(分子元素組成,同位体組 成,構造,光学異性体,生体関連分子)の6つのチー ムである. それぞれのチームを率いるのは、 圦本尚 義(北大),中村智樹(東北大),野口高明(九州大), 岡崎隆司(九州大), 薮田ひかる(広島大), 奈良岡 浩(九州大)である. 各チームには海外からの研究者 も参加し、国際チームとして、分析をおこなう、また、 分析結果を統合し、 リモートセンシング観測と連携 したサイエンスを展開するための統合チームも組織 し、分析チーム全体として、リュウグウ試料の詳細 記載.「はやぶさ2」サイエンスへの物質科学からの 貢献をおこなう.

5. まとめ

探査機「はやぶさ2」はリュウグウ表面ならびに地

下浅部から採取された試料を2020年末,地球に持ち帰る.「はやぶさ2」が見たリュウグウは,典型的な 隕石試料とは異なる物質でできている可能性がある. C型小惑星とはなにか,私たちは初めて物質科 学から明らかにすることができる. 探査機による観 測データとあわせ,リュウグウおよび太陽系の起源 と進化に関する新たな制約をリターンサンプルから 存分に引き出したい.

参考文献

- [1] Watanabe, S. et al., 2019, Science 364, 268.
- [2] Sugita, S. et al., 2019, Science 364, 252.
- [3] Kitazato, K., 2019, Science 364, 272.
- [4] Jaumann, R., 2019, Nat. Astron. 3, 971.
- [5] Grott, M. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 971.
- [6] Tachibana, S. et al., 2014, Geochem. J. 48, 571.
- [7] Okazaki, R., 2017, Space Sci. Rev. 208, 107.
- [8] Sawada, H., 2017, Space Sci. Rev. 208, 81.
- [9] 安部正真, 圦本尚義, 2018, 遊星人 27, 92.
- [10] 藤村彰夫, 2011, 静電気学会誌 35, 255.
- [11] Nakamura, E. et al., 2012, PNAS 109, E624.
- [12] Nakamura, E. et al., 2003, ISAS Report SP 16, 49.
- [13] Potiszil, C. et al. (under review), Astrobiology.
- [14] Nakamura, E. et al., 2019, Proc. Japan Acad. Ser. B 95, 165.
- [15] 伊藤元雄, 2017, ぶんせき9, 403.
- [16] Ohigashi, T. et al., (in revision), Review of Scientific Instruments.
- [17] Shirai, N. et al., (in revision), Meteorites & Planetary Science.
- [18] Uesugi, M. et al., (in revision), Review of Scientific Instruments.
- [19] 橘省吾, 2013, 遊星人 22, 261.
- [20] Yurimoto, H. et al., 2011, Science 333, 1116.
- [21] Nakamura, T. et al., 2011, Science 333, 1113.
- [22] Ebihara, M. et al., 2011, Science 333, 1119.
- [23] Noguchi, T. et al., 2011, Science 333, 1121.
- [24] Tsuchiyama, A. et al., 2011, Science 333, 1125.
- [25] Nagao, K. et al., 2011, Science 333, 1128.