

火の鳥「はやぶさ」未来編 その35 ～惑星物質研究所のリユグウ試料高次キュレーション～

小林 桂¹

(要旨) 「はやぶさ2ミッション」によってもたらされたリユグウ試料のキュレーションプロセスに、岡山大学惑星物質研究所(IPM)は、「はやぶさ」初号機の帰還試料の初期分析を担当した経験をもとに高次キュレーション施設として参画した。IPMの地球惑星物質総合解析システム(CASTEM)は、微量なりユグウ試料の多角的な無機・有機分析を可能にし、貴重な科学的成果をもたらした。本稿では、IPMにおける高次キュレーションの活動内容、分析プロトコル、得られた知見、および将来のサンプルリターンを見据えた高次キュレーション施設の展望と課題について述べる。

1. はじめに

小惑星探査ミッション「はやぶさ2」は、C型小惑星リユグウから採取された貴重なサンプルを地球へ持ち帰るという偉業を達成し、太陽系形成初期の物質科学、そして地球外生命の起源の解明に重要な一歩を刻んだ。このミッションによって地球に届けられた試料は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所(JAXA/ISAS)において綿密なキュレーションプロセスを経たのち、その科学的価値を最大限に引き出すため、国内外の研究者によって解析が進められてきた。なお、キュレーションは、試料の初期記載から詳細な特性評価、将来の研究利用を目的とした長期保管に至るまで、多岐にわたるプロセスを含んでいる。

今回ははやぶさ2ミッションに関連する話題を示す機会をいただいたこともあり、「はやぶさ2」が持ち帰ったリユグウ試料の高次キュレーションにおいて重要な役割を担った岡山大学惑星物質研究所(IPM)の活動について、その基盤部分について紹介をしたい。さらに、これらの活動が今後の惑星科学研究、特に将来のサンプルリターンミッションにどのように貢献しうるか、高次キュレーション実施を通じて感じ

た点を述べることとする。

2. 高次キュレーション施設の 選定の経緯と役割

高次キュレーション(Phase2 キュレーション)は、宇宙科学研究所におけるキュレーションの一環として行われた。IPMは、小惑星探査機「はやぶさ」初号機の初期分析にも参画し、その経験と実績を基に、「はやぶさ2」ミッションにおける高次キュレーションを担当する施設として、海洋研究開発機構高知コア研究所とともに2015年に選定された[1]。その際、試料の初期記載・分析を担当する初期分析チームと高次キュレーションチームの2つが定義されることになり、その両者の役割を再度確認したい。まず、初期分析チームは、「はやぶさ2」ミッションによって持ち帰られた試料の初期分析を担う。試料が地球に帰還する前に分析フローを徹底的に議論し、試料が帰還した後、短期間に科学的成果を出すことを目標とする。これに対し、高次キュレーション施設は、初期分析とは異なり、試料の帰還後に、個々の試料または試料のグループに対して、初期記載で得られたデータや帰還試料全体の特徴を踏まえた上で、試料から最大の科学的成果が得られるよう、科学テーマと目標を設

1.岡山大学惑星物質研究所
katsura@pheasant.misasa.okayama-u.ac.jp

定し、それに向けた分析フローを検討し実施することとなった。その際、JAXAキュレーション施設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向けた人材育成を実施することも目的の一つであった。

3. 高次キュレーションを支えた研究基盤

IPMでは、世界的にもユニークな「地球惑星物質総合解析システム」(Comprehensive Analytical System for Terrestrial and Extra-terrestrial Materials: CASTEM)を研究活動の基盤として運用している。このシステムは、様々な機能を持つ分析機器群とラボから構成されている。代表的な構成機器として、主にバルク分析を行う表面電離型質量分析計(TIMs)、誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS)、安定同位体質量分析計、希ガス同位体質量分析計、高質量分解能有機質量分析計、in-situ分析を行う高空間分解能二次イオン質量分析計(HR-SIMS)、透過電子顕微鏡、走査電子顕微鏡、分光測定機器などがCASTEMの中で運用されている。またこれら機器群を連携し運用するための基盤システムとして、独自に開発を行った二次元ステージ座標共有システムや、取得データ管理データベースを活用している。また、CASTEMを遠隔地からも利用できるように、リモート運用環境の整備も進んでいる。

CASTEMの構築は、IPMにおける高次キュレーションの代表を務めた中村栄三教授が1987年にIPMの前身である岡山大学地球内部研究センターに着任したことで始まった。この解析システムは当初より、宇宙から地球へと帰還した貴重な試料をはじめ、地球上の様々な物質をターゲットとし、その組成、構造、そして起源と進化の過程を解明することを目的として整備が進められてきた。CASTEMの創設から発展にかけての時期は、日本の経済的な発展が著しい時期にもかかわらず、関連科学コミュニティからの関心が低く、国際的なサンプルリターン計画が進む中で日本のプレゼンスがまだ十分に発揮できていない状況であった。その中でもCASTEMは、将来地球外試料の多角的な解析が日本において必

ず必要になることを想定し、それを実現するシステムとして、中村教授の主導のもと多くの研究者によって発展を遂げた。現在では、共同利用・共同研究拠点であるIPMのミッションとして、国内外の研究者との共同研究に活用し、地球惑星物質科学分析分野の発展に国際的にも貢献することができている。

そのCASTEMにおいて大きな転換点となったのは、高次キュレーション施設としての活動が始まった直後、2016年10月21日にIPMから約4kmの地点を震央とする鳥取県中部地震(M6.6)による機器類およびラボの被災であった。震災によって大型分析機器のうち9台が損傷した結果、CASTEMの深刻な機能不全が生じることとなり、探査機「はやぶさ2」の帰還に向けたスケジュールの中での復旧がなるのか不安な日々であったことを思い出す。しかし、幸いにも、大学・文部科学省等の様々な支援を得て、高次キュレーションに必要な不可欠な基盤環境を2018年末までに整えることができた。加えて、この時、復旧事業の一環として有機物質解析環境(有機実験用クリーンルーム、高質量分解能有機質量分析計ほか)を整備することができたことは、高次キュレーション実施に向けて極めて重要な出来事であった。これまでCASTEMは主に岩石・鉱物・隕石などの無機物質の総合解析を行うことを目的として整備を行ってきた。しかしながら、「はやぶさ2」帰還試料はC型小惑星リュウグウの表面由来であり、それらには水や有機物が含まれていることが予想されていた(実際にそうであった)。それら水や有機物は、地球の海や生命の材料物質となった可能性もあり、太陽系前駆物質から現在に至る有機物進化の場としての小惑星の理解にとって、それらの解析は欠かすことができない要素である。加えて、それら水や有機物は単独に存在しているわけではなく、無機物質である鉱物と共存していることが本質であり、その両者の共進化の過程を理解することによって太陽系物質進化の新しい描像に迫れるのではないかと期待を高次キュレーションチームとして抱いていた。そのため、IPMで蓄積されてきた無機物に関する総合解析に、同じ解析哲学を反映させた有機物解析を統合することで、CASTEMを発展させたことは必然であったのかもしれない。実際、2018年には無機実験用クリーンルームと連携する形で有機物質の抽出を行う有機

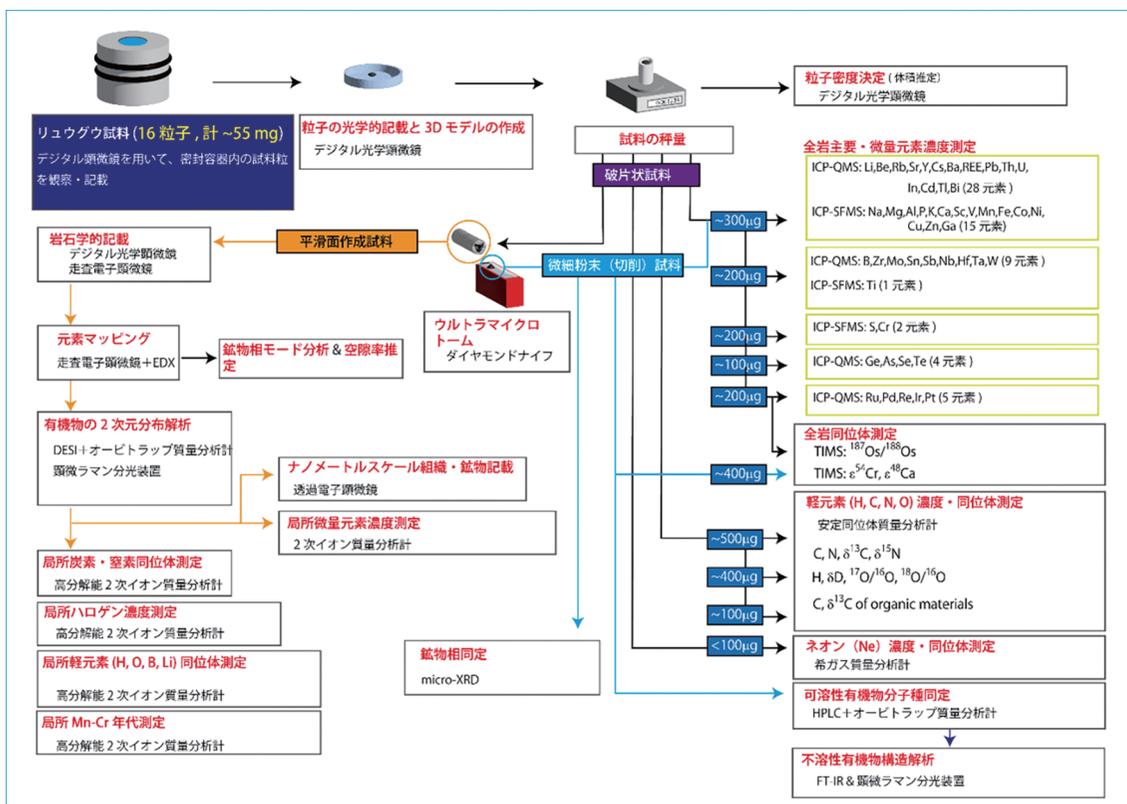


図1: 帰還粒子分析プロトコル. 粒子は1粒子ごとに基礎的記載を行ったのちに、インジウムを用いて固定し、端面よりウルトラマイクロトームによって切削を行う。切削試料は適宜回収し、70元素の濃度分析、炭素、窒素、酸素濃度および同位体分析などに加えて、可溶性・不溶性有機物解析に用いている。切削によって作成された平滑面を用いて電子線局所分析、分光による分析、有機物分布解析、局所同位体解析などが行われた。(文献[2]補遺図1を改変)

実験用クリーンルーム(ISO3～4：立ち上げ時測定)を設置し、高速流体クロマトグラフィー(HPLC)システムを備えた高質量分解能有機質量分析計を稼働させることができた。そして、隕石試料など、帰還試料の模擬物質を用いた予備実験を2019年初頭より開始することによって、順調な高次キュレーション解析へとつなげることができたのだが、今思えばまさに綱渡りのような状況であったともいえる。

4. 解析試料と総合解析プロトコル

高次キュレーションと初期分析の位置づけについては前述したが、多数の研究者が結集しチームを構成し専門的な視座から解析を行う初期分析チームに対して、IPMの高次キュレーションは、小惑星リュウグウの表面物質の俯瞰的な有機・無機物質科学的情

報を導き出すことを主眼においた。そして、初期分析および高次キュレーションに続く国際公募研究の基礎情報の蓄積ということも強く意識した。そのため、JAXAキュレーションと議論を行い、IPM高次キュレーションに割り当てられた試料量100mgの内訳として、TD1試料7粒子、TD2試料9粒子(総量55mg)と、粒子の個数に重きをおいた解析を行うこととした。すなわち、これら16粒の帰還試料に対し、粒子ごとに同じ解析プロトコルを適用することで、小惑星リュウグウ試料の物質科学的多様性に関する情報を得ることを解析戦略とした。実際に各粒子に適用した解析手法に関しては文献[4]とその補足資料を参照していただきたいが、ここでは解析の全体像の説明のため、分析フロー(図1)を示すこととした。分析フローは、粒子全体の記載を行ったのち、bulk分析とin-situ分析の2つのフローに分岐する。この



図2: 模擬試料を用いたウルトラマイクローム試料調製の様子. 手前の金属治具上に蓄積した切削片を回収し, bulk分析用に用いた.

際, 最大の課題はそれぞれの解析に用いる試料量をどうやって確保するか, にあった. 結果としてbulk分析に用いた試料量(図1参照)は $100\mu\text{g}$ レベルで実施したわけだが, ルーチンとして mg レベルの極微量試料の分析を行っている我々にとっても非常にハードルの高い分析であった. また, 1mg にも満たない粒子もある中で, いかに試料のロスを低減し, bulk分析用に試料を分割することは, 高次キュレーションプロセスにおいて非常に大きな技術的課題となった. 「はやぶさ」初号機による小惑星イトカワ帰還試料の初期分析においては, 集束イオンビーム試料加工装置(FIB)を用いた試料分割によってin-situ分析用試料調製を行ったが[2], 加工に伴う鉱物相転移や有機物へのダメージ, そしてbulk分析に影響を与える試料汚染が懸念されリュウグウ試料への適用は難しいと判断した. 最終的には, 透過電子顕微鏡用薄膜試料作製のためのウルトラマイクロームを用いて試料粒子を削剥する手法にたどり着き, 問題を克服することができた. これによりin-situ分析用の平滑面を持った粒子を調製すると同時に, 切削片を回収しbulk分析用試料に用いることが可能となった. この手法が開発されたことは, けっして派手では

ないが高次キュレーションにおける重要な技術発展要素であったといえる(図2).

高次キュレーションの一つのミッションとして, 限られた時間の中で, 各粒子の多角的解析をもとにした粒子のカタログ化を, このような一連の分析として「一つ屋根の下」(under one roof)で行うことは, 非常に大きなメリットがある. 最近, 高次キュレーションや初期分析と直接関係するものではないが, 「はやぶさ2」帰還粒子の解析中のバクテリアによる試料汚染が報告されており[3], おそらく複数の研究機関間での試料のハンドリングが行われたことが原因ではないかと推察される. むろん, 研究者は試料の汚染を避けるべく最大限努力を払ったに違いないが, やはり適用する手法が異なる中で, 試料取り扱いの共通認識を醸成することは難しいことである. 高い専門性を持った解析を実施するため, 試料の移転が必要なことは十分理解できる. しかし, IPM高次キュレーションで用いたアプローチのように, 参画研究者全員が分析フローを熟知している環境で様々な分析を行うことができたならば, リュウグウ試料の科学的価値を損なわないよう, 細心の注意を払って取り扱うことがよりたやすかったのではないか. 加え

て、“under one roof”研究環境では、解析を進める中で互いにフィードバックを行うことがやすいため、データの再確認や解析上の問題点の洗い出しを的確に行うことができたことも重要な点である。このことは、今後の初期分析・キュレーションにおいて検討する価値があるように思う。

リユウグウ試料は、始原的な物質を地球環境になるべく暴露されない状態で、人類の手にもたらされたという特徴がある。特に「有機物」の惑星である地球からの汚染を評価しうる形で無機物質・有機物質科学の両面からの解析ができたことは、惑星物質科学を大きく発展させた。IPM高次キュレーションにおいても、その解析アプローチを実現するために、CASTEMの整備を行ったことはすでに述べた。分析科学の観点から言えば、そもそも無機分析と有機分析は、その手法や注意すべき点において正反対といてもいい関係にある。幸い、リユウグウ試料の解析というミッションの中で、その両者の分析哲学を融合させた総合的な有機・無機解析の確立を指向し、解析技術の発展に努めたことは、さらなるリユウグウ試料の解析や、将来のサンプルリターンミッションで得られた試料の解析にとっても非常に大きな経験となった。その結果、生命の起源の探求や有機材料開発に関する研究にも応用が広がっていることを付記したい。

IPM高次キュレーションによって得られた科学的成果は文献[4]を参照いただきたいが、結果として、当初高次キュレーションに求められた科学的成果を決められた期日において出すことができたのではないかと考えている。とりわけ、16粒の分析粒子全てから、粒子密度や鉱物のモードといった記載情報、70種の元素種に関する濃度情報、軽元素同位体情報を得たことで、今後のリユウグウ試料の物質の不均質性、すなわち始原的太陽系物質の多様性に関する研究の端緒を拓くことができたのではないかと考えている。また、23種のアミノ酸を含む多様な有機分子が無機的な情報と紐づいて検出され、太陽系誕生から数100万年という非常に短い時間間隙において、太陽系縁辺部の氷天体中での有機・無機物質共進化場の推定も行うことができた。そして、そのような極低温環境である太陽系外縁部から、現在のリユウグウ軌道への移動という46億年間にわたる太陽系

の歴史のどこかで起った、物質移動ダイナミクスに関する新しい見方を提示できたことは非常に大きな成果であった。

5. 課題と展望

高次キュレーション施設の常定性

IPMは、全国共同利用・共同研究拠点として、国内外の研究者にその設備と所属研究者の経験を活かした研究機会を提供することがミッションとして掲げ活動している。すなわち、高次キュレーションに活用したCASTEMも、通常は共同利用研究設備として利用されている。本稿では「はやぶさ2」高次キュレーションとして、そして将来の太陽系物質科学の展開を想定した設備整備を、被災復旧というかたちで行うことができたことを紹介したが、これはまさに偶発的なものであった。現実的には「はやぶさ」、「はやぶさ2」という我が国のサンプルリターンミッションのタイムフレームの中で、たまたま人的・物的整備を行うことができたというのが正確であるかもしれない。しかし今後、人類の地球外進出が加速的に進み、それに伴って物質科学研究のフィールドも拡大するなかで、偶発的な整備に頼ることは当然不可能である。そして国際共同ミッションの推進に伴い、帰還試料を我々人類が手にする機会はより頻繁に訪れるなかで、それら試料の保管、記載を担当するキュレーション施設の活動はますます重要になる。その際に、リユウグウ試料の高次キュレーションで行われたような、総合的な解析を行う組織なり施設をどのように位置づけ、その有効性を精査したのち、計画的に発展させていくことをコミュニティとして検討する必要があるのではないか。近年の解析機器の進歩やAIを用いたデータ解析技術の発展は目覚ましいものがある。日本、そして世界の社会情勢の変化にも関連して、それらの速度にやみくもに追従することが必ずしも正解でないことを踏まえつつも、総合力としての最適解を求めて努力しなければならないだろう。そしてその根底にあるのは、人的資産の育成である。このことは高次キュレーションのミッションの一つとして掲げられていたが、IPMの活動においては必ずしもそれが達成できたとはいえない。今後、特定のミッションに依存する形だけではなく、より普遍

的な研究活動を推進する環境において、多角的な視野を持った研究者を、幅広い世代にわたって育成していく必要がある。

解析チーム間の連携

高次キュレーションと初期分析は、互いに独立した役割を担いつつも、互いに連携することで、「はやぶさ2」帰還試料から得られる科学的成果を最大化することが求められていた。結果として得られた科学的アウトプットは、高次キュレーションと初期分析チーム共、非常に科学的価値が高いもので、その観点からリュウグウ試料解析の最初のステップは良く機能したと言える。しかし、試料解析にあたっての具体的なコミュニケーションは必ずしも十分ではなかったことは課題の一つだろう。研究者としての先見性や先占権の確立の重要性は揺らぐものではないが、より緊密な情報交換によって高次キュレーション、初期分析が成功する確率がより高まるように思う。

このようなコミュニケーションを活性化するためには、「平時」、すなわちサンプルリターンミッションの谷間となるタイミングでの連携サイエンスプロジェクトを積極に実施することが一つの方策となるのではないか。特に、地球外試料のキュレーション技術の向上や哲学の共有を、JAXA/ISASキュレーションと高次キュレーションの間で継続的に行うことは、次のサンプルリターンミッションにとって非常に重要である。日本の帰還試料キュレーション体制は、いうまでもなく米国など諸外国と比較して、質は十分に高い競争力を持つが、人的資産や体制規模に関する整備を今後さらに充実を図るため、継続的な基礎研究を協力して進める必要があるだろう。地球外探査の活性化に伴うキュレーションや初期分析のやり方の変化を踏まえた連携強化について今後議論され、より良い形で発展していくのではないかと期待している。

6. まとめ

小惑星探査機「はやぶさ2」によってもたらされたリュウグウ試料の高次キュレーションに参画したことは、単に試料を分析するだけでなく、IPMとして惑星科学の未来を切り拓く上で重要な意味があった。本稿中で“under one roof”での総合解析の特

徴について概略と利点を述べたが、逆にそういった形態の組織を維持発展することの難しさも向き合わなければならない。IPMには「はやぶさ」「はやぶさ2」と二世代にわたって初期分析・キュレーションに係わった経験を活かし、火星衛星からの帰還試料、月・火星からの帰還試料といった近い将来人類の手にもたらされるだろう地球外試料の特性を思い描きながら、広く地球惑星物質の総合解析を行う拠点であることが、共同利用・共同研究施設として求められる。そのIPMでは「はやぶさ2」プロジェクトの高次キュレーション活動が現在も継続されており、当初掲げた太陽系環境における有機・無機物質の共進化と小惑星形成・進化に関する物質科学的研究を進展させている。それについては、一連の研究成果[5-11]を参照されたい。また将来に向けて、キュレーション施設を始めとしたJAXA/ISASとの人材育成に向けた取組に向けた具体的議論も進みつつある。

本稿中にも述べたが、地上での解析が重要な役割を果たすサンプルリターンミッションの頻度は今後さらに増すことは確実であり、キュレーションのあり方もそれに伴って変化していく。そして大型ミッション推進に不可欠な国際連携の枠組みの中で、例えば国内外の研究者がCASTEM(もちろんリモート環境も含め)を活用し、より広い意味での“under one roof”研究環境を提供できるIPMが将来の地球外天体探査ミッションに貢献することができることを願っている。サンプルリターンの時代を迎え、地球から見上げる太陽系物質科学から、太陽系全体を俯瞰する物質科学へのパラダイムシフトが急速に進んでいる。我々にとって「はやぶさ2」プロジェクトにおける高次キュレーションは、それを強く意識づける活動であり、将来に向けた重要な転換点となったことは間違いない。

謝辞

まず本稿をしたための機会をいただいたこと、「はやぶさ2」プロジェクトサイエンティストの渡邊誠一郎先生(名古屋大)、三浦均先生(名古屋市大)に感謝を申し上げたい。そしてもちろん、IPM高次キュレーションチームとして、共にミッションに携わったメンバー、とりわけ代表としてミッションを主導した中村

栄三教授に心より敬意を表したい。また、同じく志をもって高次キュレーションに携わったJAMSTEC高知コア研究所および初期分析チームの研究者の皆さん、そして試料の一次キュレーションを実施した白井寛裕先生、安部正真先生をはじめとしたJAXAキュレーション施設の皆さんには様々な面でご迷惑をおかけするとともに、そのご協力に感謝したい。そしてもちろん、世界で初めてC型小惑星からの試料を我々の手元に届けてくださった、津田雄一先生を始めとする「はやぶさ2」プロジェクトの全てのメンバーに、大いに感謝を申し上げたい。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 安部正真ほか, 2020, 遊星人 29, 28.
- [2] Nakamura, E. et al., 2012, PNAS 109, 4031.
- [3] Genge, M. et al., 2025, Meteorit. Planet. Sci. 60, 64.
- [4] Nakamura, E. et al., 2022, Proc. Japan Acad., Ser. B 98, 227.
- [5] Miura, H. et al., 2022, ApJL 925, L15.
- [6] Potiszil, C. et al., 2023a, Nature Communications 14, 1482.
- [7] Ota, T. et al., 2023, Universe 9, 923.
- [8] Potiszil, C. et al., 2023b, Life 13, 1443.
- [9] Tanaka, R. et al., 2024, ApJL 965, 52.
- [10] Potiszil, C. et al., 2024, Nature Astronomy 8, 1617.
- [11] Potiszil, C. et al., 2025, Earth Planet. Sci. Lett. 653, 119205.

著者紹介

小林 桂

岡山大学惑星物質研究所教授, 東京大学大学院理学系研究科地質学専攻博士課程単位取得退学, 博士(学術). 岡山大学固体地球研究センター助手, 同地球物質科学研究センター准教授を経て, 2015年10月より現職. 専門は火山岩岩石学, 同位体地球惑星化学.