

# 惑星物質固体物性測定コンソーシアム ～2025年度活動報告～

石崎 拓也<sup>1</sup>, 小野寺 圭祐<sup>2</sup>, 田中 智<sup>1</sup>, 佐藤 雅彦<sup>3</sup>, 榎戸 祐馬<sup>1</sup>, 金丸 礼<sup>1</sup>

(要旨) リュウグウの初期分析で得られたリターンサンプルの固体物性測定の知見を基に, 将来のサンプルリターンミッションに向けて測定体制の整備と測定技術の改良・開発を行う「惑星物質固体物性測定コンソーシアム」を2025年に発足した. 本稿では, 2025年度に実施したキックオフワークショップなどの活動状況について紹介する.



図1: 日本地球惑星科学連合大会2025でのキックオフ会議の様子.

## 1. 提案概要

地球外物質の固体物性はその物質が天体上で経験した熱作用や衝突現象などの熱・機械的な物質の反応・進化過程を支配するパラメータであり, 天体の形成過程や進化環境を推定するのに不可欠である.

そして固体物性は物質の元素存在度や鉱物組成から, 空隙率やクラック分布などの機械的特性に至るまで様々な要因に依存して値が変化するため, 類似試料からの類推は危険であり, ひとつの現物試料について体系的に分析することが重要となる. はやぶさ2ミッションでは小惑星リュウグウからのリターンサンプルについて, 日本国内の大学・研究機関により固体物性の体系的な分析が行われた. これは地球外物質の固体物性に関する大規模な体系的分析として初の試みであり, 小惑星リュウグウの形成過程を議論する

1.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

2.岡山大学惑星物質研究所

3.東京理科大学

Ishizaki.takuya@jaxa.jp



図2: ワークショップの様子。

ための根拠となる極めて重要な成果が得られた。

さらに将来のリターンサンプルの固体物性分析を効果的に行うための重要な経験も得られた。リターンサンプルの固体物性には集合体の値ではなく、一次情報として一粒子の値が求められるが、リターンサンプルは隕石試料と比較してサイズが小さいため、微小試料を分析できる方法である必要がある。また量が限られ貴重であるため、試料の科学的価値を棄損しないよう加工や汚染を伴わない条件で分析することが求められる。しかし隕石の分析を前提としたこれまでの分析法は非破壊・非汚染の条件に適合しないものも多く、リュウグウ試料の分析ではやむを得ず破壊・汚染を伴う分析方法が用いられた項目もあった。そしてそれにより分析量が限られたため、複数のサンプルについて同様の分析を行う統計的分析は叶わなかった。このような知見から、MMXをはじめとした将来のリターンサンプルミッションに向けて、リュウグウ試料の初期分析で明らかになった、微小試料を非破壊・非汚染で分析するための課題を各分析項目で検討し改善に向けた技術開発を行うためのコンソーシアムを創成した。以下では2025年度の活動について概観するとともに、2026年度以降の活

動方針についての展望を紹介する。

## 2. JpGU2025でのキックオフ会議

2025年5月20日に地球惑星科学コミュニティに向けてコンソーシアム創設の宣言並びに意見交換の場としてキックオフ会議をJpGU2025にて実施した(図1)。直前の開催アナウンスにも関わらず現地・オンライン併せて30名を超える研究者・学生に参加いただいた。当日は発起人よりコンソーシアム設立の経緯(固体物性の科学的意義や現状の課題)・過去のサンプル測定結果のレビュー(リュウグウ試料・アポロレゴリス試料)を行い、その後コミュニティメンバーとの意見交換を行った。「JAXAキュレーションとの関係性が不明瞭」「最終的なアウトプットのイメージが不明確」などコンソーシアムの未熟な方針設定に起因するコメントがある一方で、測定すべきパラメータの具体的な要望(浸透率・衝撃圧縮に関するデータなど)やリモートセンシング観測の解釈補助としての役割への期待など、活動を後押しするような意見も出た。キックオフ会議後、佐藤雅彦(東京理科大)・榎戸祐馬(JAXA宇宙研)・金丸礼(JAXA宇宙研)がコ

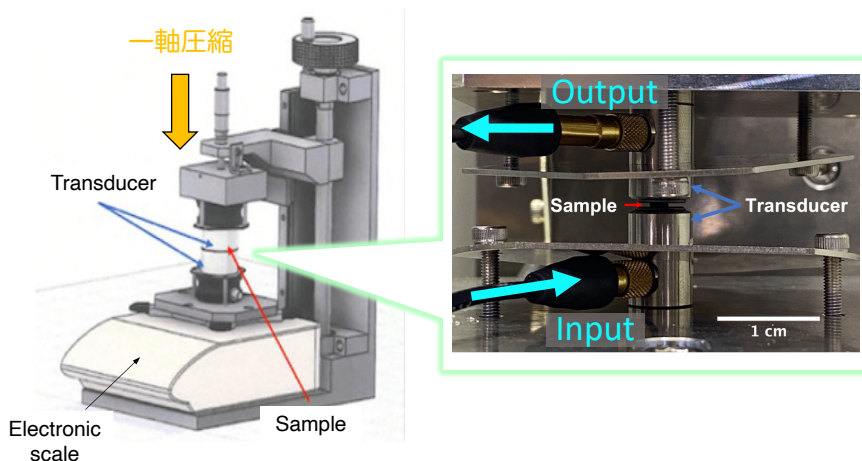


図3: (左) 弾性波速度測定システムの概略. ロードセル式電子秤の上に平板試料を挟む形で一对のトランスデューサを配置し, 上方からの一軸圧縮下にて弾性波速度の測定を行う. (右) トランスデューサ部の拡大図.

アメンバーとして参加し, 6人体制で当コンソーシアムの運営・地球惑星科学コミュニティへの宣伝・隕石試料を用いた試験測定・外部資金獲得の準備等を実施してきている. 今後も定期的なコンソーシアム活動の報告及びコミュニティとの意見交換の場としてJpGUでのミーティングは継続する予定である.

### 3. 第一回惑星物質固体物性測定 コンソーシアムワークショップの開催

2025年9月2日に東京理科大学神楽坂キャンパスにて, 将来のサンプルリターンミッションに向けた固体物性分析の体系的な枠組みを整備することを目的として, 第一回惑星物質固体物性測定コンソーシアムワークショップを開催した(図2). 現地・オンラインあわせて22名が参加し, 幅広い専門分野の参加者による活発な議論が行われた. 本ワークショップ第一部ではリュウグウ試料等のこれまでの帰還試料の固体物性測定経験者から測定で得られた教訓が共有された. また第二部では将来のサンプルリターンミッションに向けて, 固体物性の適用先である太陽系の形成・進化シミュレーションを専門とする研究者から, シミュレーションの場で必要とされる固体物性値やその条件が提案された. さらに第三部では第一部と第二部の内容を踏まえた総合討論を実施した. 第

四部に行われた東京理科大・佐藤研究室の磁気物性測定装置の見学も盛況であった.

ワークショップを通して, リュウグウの初期分析では測定できなかった物性値のリクエストや固体物性コミュニティの継続・拡大方法など多岐にわたる議論が行われる中で, 将来のリターンサンプルの固体物性を体系的に理解するにあたっての課題として, 試料で測定した物性値をどのようにして天体の物理現象に適用するかというスケールアップにあることが挙げられた. そこで, 「サンプルスケールから天体スケールへの固体物性のスケールアップの理論体系の構築」を今後の活動で解決すべき課題として共有し, これをコンソーシアムの最終的な科学目標とすることを決定した.

今後も定期的にワークショップを開催し, 引き続き議論を進めていくことを計画している.

### 4. サンプル加工実験

力学強度の低い始原物質の機械物性測定における課題の一つに試料成形が挙げられる. 例えば, リュウグウ試料やイヴナ隕石試料の弾性波速度測定[1]ではパルス透過法[2]を採用し, 図3に示すように二つのトランスデューサの間に試料を挟む形で測定を実施した. この測定においては, 岩石試料の平

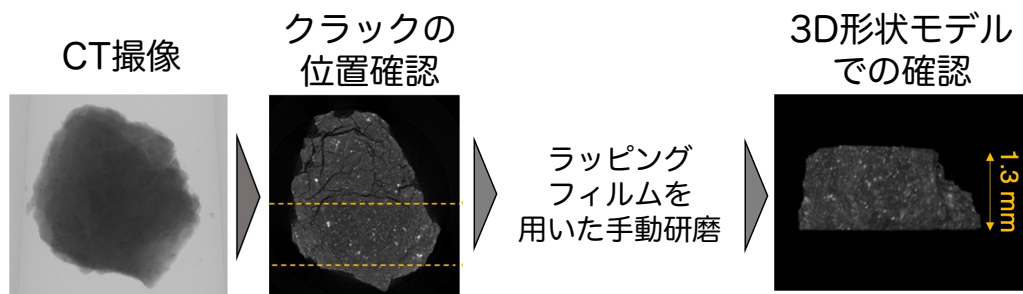


図4: 試料の形状加工プロセス(イヴナ隕石の例).

板加工が必須であり、図4に示すようにX線CT撮像による3次元形状モデルの作成・クラック位置の特定・ラッピングフィルムを用いたマニュアルでのドライ研磨を行い、最終的に1 mm厚程度の平板試料を作成した。この手法の問題点として、加工の成功率が三割程度と低いこと、また加工の精度が個人の技量に依存し、再現性を担保できないことが挙げられる。

以上のような現状の課題解決に向けて、我々は力学強度の低い物質をより機械的かつ成功率の高い集束イオンビーム(FIB)での加工アプローチを試みた。本手法はイオンを電界で加速・集束して試料に照射することで生じるスパッタリング現象(照射イオンが対象試料を構成する原子を弾き出す現象)を利用することで試料の切削加工を行う。加工精度はビーム径に依存するが、例えば弾性波速度測定に必要な平面度(< 数  $\mu\text{m}$ )と比べると2-3桁精度の高い加工が可能で、我々の求める精度での試料作成が達成できると期待される。

実験は2025年7月23日~24日にJAXA宇宙科学研究所地球外物質研究グループにて実施した。加工にはFIB-SEM複合装置NX2000を使用し、対象はリュウグウ試料よりも力学強度の低いタギッシュレイク隕石を使用した。図5に加工の様子を示す。2025年7月23日は10時~18時、翌は10時~17時の計15時間程度FIBによる加工を行った結果、 $60 \times 450 \mu\text{m}$ の領域を約0.3 mm深さまで切削することができた。切断面の精度は予想通り、弾性波速度の測定に

は十分な平面度を有していたもののmmスケールでサンプルの2面(異方性を測定するとすると6面)を加工するには長時間の稼働が必要となる。当然ながらタギッシュレイク隕石より力学強度の高い試料ではさらに時間を要すると予想される。

FIBによる加工では、作業中に試料が破損するリスクは低く、その加工精度は我々の要求を十分に満たすものであるが、加工時間の長さが大きな課題として挙げられる。次年度はよりビーム出力の高いプラズマFIBを用いて加工時間の短縮化を試みる。

## 5. まとめと将来展望

これまでのリターンサンプルの固体物性分析で得られた知見を集約し、将来のサンプルリターンミッションに向けて測定体制の構築と測定技術の改良・開発を行うための惑星物質固体物性測定コンソーシアムを発足させ、2025年度はJpGU2025でのキックオフやワークショップを開催した。また固体物性測定のための基礎技術として、力学強度の低いサンプルを精密に加工する方法の開発にも着手した。

今後も継続して、固体物性を体系的に測定するための体制と技術・環境の整備を進めるとともに、2026年度はリファレンス試料を用いて測定の実証を行いながら、試料への破壊と汚染レベルに応じた効率的な測定フローの構築に取り組む計画である。また2025年度のワークショップで実施したような、測

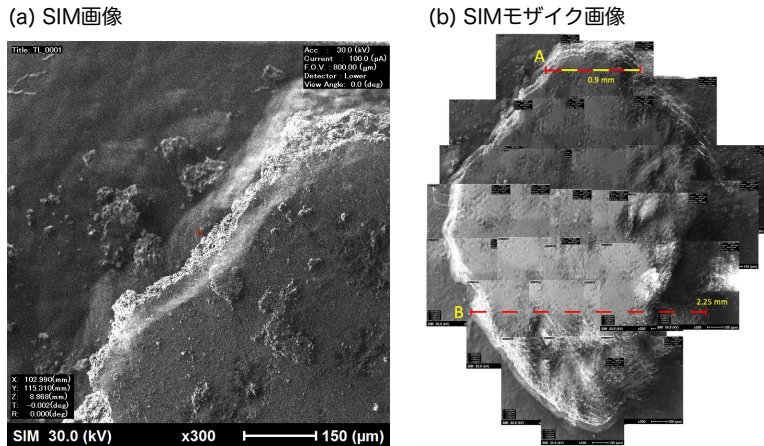


図5: Scanning Ion Microscope (SIM) 画像. (a)  $0.8 \times 0.8$  mmの単一画像. 画像右下半分にタギッシュレイク隕石が写っている. (b) 試料全体のモザイク画像. 加工試験ではA断面の切削を試みた.

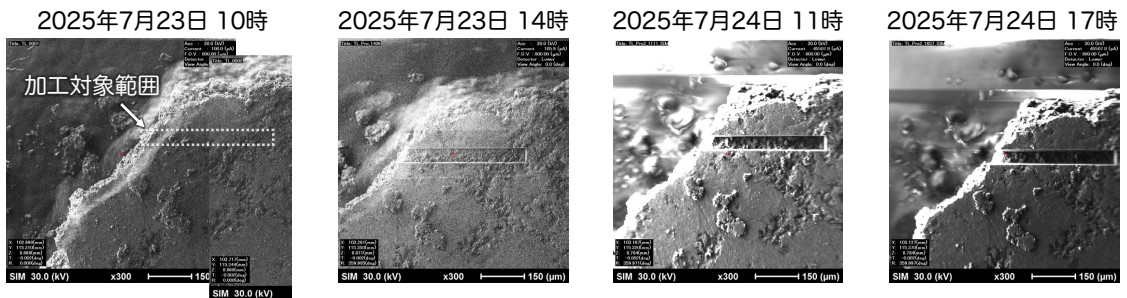


図6: FIBを用いた切削加工の様子. 左2枚のSIM画像は2025年7月23日, 右2枚は2025年7月24日の加工作業中に撮像したもの.

定した固体物性が利用される先の科学的成果の検討も引き続き推進し, 2026年度は地球型惑星内部ダイナミクスの分野にも取り組むことを計画している. そこでは固体物性のスカラー値だけでなく異方性も重要な情報となることから(例えば, [3]), 物性の異方性を測定する技術も検証する.

## 6. 謝辞

実験にはJAXA宇宙科学研究所地球外物質研究グループのFIB-SEM複合装置NX2000を使用させていただいた. また, サンプル加工実験で使用したタギッシュレイク隕石は中村昭子教授(神戸大学)より提供いただいた. ここに感謝の意を示したい.

## 7. 引用文献

- [1] Onodera, K. et al., 2025, J. Geophys. Res. Planets 130, e2025JE008944.
- [2] Birch, F., 1960, J. Geophys. Res. 65, 559.
- [3] Morishige, Y., 2025, Tectonophysics 911, 230822.