



海洋科学掘削によるマントル到達への挑戦  
—地球最大のフロンティアに挑む—

## 深く掘ることと遠くに出かけること：未踏の地からのサンプルリターン

橘 省 吾

**Digging into the mantle and flying over the Solar System: Let us get samples back from unexplored worlds!**

**Shogo Tachibana**

たちばな しょうご :

東京大学大学院理学系研究科宇宙惑星科学機構  
/JAXA 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系

未踏の地から持ち帰られる試料は、地球や太陽系に関する私たちの見方や理解をときに一新し、ときに実証する。本稿では地球外物質のサンプルリターン、特に、探査機「はやぶさ2」による小惑星リュウグウサンプルリターン探査について紹介し、地球上部マントルからのサンプルリターンへの期待を述べる。

### 1. 地球外物質サンプルリターン

サンプルリターンという言葉は、地球以外の天体から試料（サンプル）が持ち帰られることを意味する。太陽系天体の科学では、研究対象が遠く地球外であるため、「フィールドワークに出かけて、サンプリングしてきます」と簡単に言うことができない。そのため、地上からの観測や探査機が近傍で撮影した画像を使っての研究が主とならざるを得ない。しかし、探査機が持ち帰る試料の観察や分析で得られる情報は、観測データの解釈に深みを与え、また新たな事実を提供する（e.g., Longobardo, 2021）。

これまで、サンプルリターン探査で採取され、地球に持ち帰られたのは、月の岩石・レゴリス（Apollo 計画, Luna 計画, 嫦娥 5 号）、太陽風（Genesis）、彗星塵（Stardust）、S 型小惑星レゴリス（はやぶさ）、C 型小惑星岩石・レゴリス（はやぶさ2）がある（表 1）（Longobardo, 2021 and references therein）。2023 年には NASA の OSIRIS-REx 探査機（Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, Security, Regolith Explorer）が B 型小惑星の岩石・レゴリスサンプルを持ち帰る予定である（Lauretta *et al.*, (2019)）。また、JAXA は 2020 年代半ばから後半にかけて、火星衛星フォボスからのサンプルリターンをめざしている（MMX 計画；Martian Moons eXploration）（Usui *et al.*, 2020; Fujiya *et al.*, 2021; Kuramoto *et al.*, 2022）。サンプルリターンの期待が高い火星についても、NASA Perseverance ロバーが将来のサンプルリターンに向けて、後続機による地球への輸送のためのサンプル採取を現在進めている。本稿ではこれらのサンプルリターン計画のなかでも、日本が最近

天体	探査計画	主な実施機関・国	期間 (SR 実施)	試料
月	Apollo 計画	NASA	1969–1972	岩石・レゴリス (382 kg)
月	Luna 計画	ソビエト連邦	1970–1976	レゴリス (300 g)
月	嫦娥 5 号	CNSA	2020	岩石・レゴリス (1.7 kg)
太陽	Genesis	NASA	2001–2004	太陽風 (原子)
ビルト第二彗星	Stardust	NASA	1999–2006	ダスト
S 型小惑星 イトカワ	はやぶさ	JAXA	2003–2010	レゴリス
C 型小惑星 リュウグウ	はやぶさ 2	JAXA	2014–2020	岩石・レゴリス (5 g)
B 型小惑星 ベヌー	OSIRIS-REx	NASA	2016–2023 (予定)	岩石・レゴリス
火星衛星 フォボス	MMX	JAXA	2024– (予定)	岩石・レゴリス
火星	Mars Sample Return	NASA, ESA	2030 年代 帰還で計画中	岩石

表1 太陽系天体からのサンプルリターン計画.

成功させた「はやぶさ2」計画を紹介するとともに、マントルからのサンプルリターンへの期待につながっていきたい。

## 2. リターンサンプルから見えてきた太陽系

1960年代後半から1970年代にかけて、月から岩石試料やレゴリス（天体表面の細粒物質）が持ち帰られた。冷戦構造が背景にあり、月をめざす理由は科学や工学だけではなかった状況ではあるが、月試料の研究からは、月が形成直後にマグマの海に覆われていたという高温起源説が実証され（Wood et al., 1970; Smith et al., 1970）、また岩石の年代とクレーター個数密度の相関から「クレーター年代学」がつけられた（e.g., Hartmann, 1970; Wilhelms, 1987）。クレーター年代学は他の天体の表層年代推定にも使われている（ただし、その適用には注意が必要である）。持ち帰られた月試料は保管・管理されており、サンプルが持ち帰られた当時より格段に進歩した分析技術により、今も新たな科学成果が得られている（e.g., Greenwood et al., 2011; Hui et al., 2013）。2020年末に嫦娥5号によって、およそ半世紀ぶりに持ち帰られた月試料の玄武岩は形成年代が  $1963 \pm 57$  Ma であった（Che et al., 2021）。約20億年前にも月で火成活動があったことがわかり、月の熱史の再検討の必要性が示唆された。また、20億年前の年代をもつサ

ンプルが初めて採取されたことで、クレーター年代学の精度向上にも貢献があった（Yue et al., 2022）。

2004年にGenesis探査機によって持ち帰られた太陽風（太陽から流出するイオン）サンプル（Burnett et al., 2011）は、地球帰還カプセルのパラシュートが展開せず、カプセルが地面に激突するトラブルに見舞われ、慎重に分析が進められた。大きな成果のひとつは太陽風（すなわち太陽）の酸素同位体が初めて推定されたことで（McKeegan et al., 2011）、その組成は太陽系最古の物質である難揮発性包有物に類似することがわかった。難揮発性包有物に比べ、他の隕石構成物質や地球、月、火星など太陽系の酸素同位体は $^{17}\text{O}$ 、 $^{18}\text{O}$ に富んでいることが古くから知られており、難揮発性包有物だけがなんらかの原因で $^{16}\text{O}$ に富んでいると考えられてきたが、太陽系の質量の大半を占める太陽の酸素同位体組成が、難揮発性包有物に類似と推定されたことで、実は地球や他の天体の酸素同位体が太陽系の平均からずれているということが初めて明らかになった。すなわち、地球などの材料となった初期太陽系の塵はなんらかの酸素同位体変動プロセスを経験したことになる（e.g., Yamamoto et al., 2018, 2019）。

Stardust探査機は、ビルト第二彗星から放出された塵をエアロゲルでつくられた捕集器で採取し、2006年に地球にサンプルを届けた（Brownlee et al.,

2006). 汚れた雪だるまとも言われる彗星は、太陽系初期に低温環境で形成され、そのままの状態を保っている太陽系の化石と考えられている。そのため、彗星のサンプルには太陽系の材料となった銀河の塵（同位体組成が太陽系の平均値と大きく異なる微粒子として、地球外物質に発見される。プレソーラー粒子とよばれる）が豊富に含まれることが予想されていた。しかし、リターンサンプルの同位体組成は太陽系の平均値に近く、また、太陽系初期の高温で溶融過程などを経て、つくられたと考えられるコンドリュールや難揮発性包有物が含まれていた (McKeegan et al., 2006; Nakamura et al., 2008)。氷などの低温物質だけではなく、彗星に高温物質まで含まれているというのは予想外であり、太陽系初期に低温物質から高温物質までが混合されていたことが示唆された。

日本の探査機「はやぶさ」が持ち帰った近地球 S 型小惑星イトカワ表面粒子の分析によって、地球上の隕石コレクションの大半を占める普通コンドライトは S 型小惑星を起源とすることが初めて明らかとなった (Yurimoto et al., 2011; Ebihara et al., 2011)。また、小惑星の熱史や現在の地質活動が明らかとなり、イトカワはかつて 20km を超える天体で 800°C 程度の熱変成を経験したこと、太陽風や微小隕石の衝突で、表面では地形更新や粒子放出などが起きていることが明らかとなった (Nakamura et al., 2011; Tsuchiyama et al., 2011; Noguchi et al., 2011; Nagao et al., 2011)。

「はやぶさ」の後継機である探査機「はやぶさ 2」は近地球 C 型小惑星リュウグウからのサンプルリターンに成功した。C 型小惑星とはなにか、C 型小惑星には含水鉱物や有機物が含まれ、地球の海や生命の材料となりえたか、太陽系の起源と進化についてどのような情報を記憶しているのかをリターンサンプルの分析から解明することをめざす (Tachibana et al., 2014; Tachibana, 2021)。探査機は 2020 年 12 月に地球に再突入カプセルを着地させ、リターンサンプルの分析が進んでいる。後述するように、これまでにリュウグウ表面を代表する粒子が回収できたこと、含水鉱物、有機物、炭

酸塩に特徴的な赤外線吸収があることが判明している (Yada et al., 2021; Pilorget et al., 2021; Tachibana et al., 2022)。

2023 年 9 月には NASA OSIRIS-REx 探査機が、近地球 B 型小惑星ベヌーからのサンプルを持ち帰る。B 型小惑星は C 型小惑星と類似の天体と考えられてきた。探査機による分光観測から、小惑星ベヌーには含水鉱物、炭酸塩、有機物、磁鉄鉱の存在が推定されており (Hamilton et al., 2019; Simon et al., 2020)、リュウグウとの類似性も確認されている。ベヌーからのリターンサンプルとリュウグウサンプルとの比較が待たれる。

### 3. 「はやぶさ 2」がめざす科学

ここからは小惑星リュウグウからのサンプルリターンをおこなった「はやぶさ 2」探査機について、詳しく紹介したい。近地球 S 型小惑星イトカワを探索し、地球にサンプルを持ち帰った「はやぶさ」探査機は工学実証のための探査機であり、サンプルリターンに必要な工学技術の習得と実証をめざしたものであった。「はやぶさ」はさまざまなトラブルがあったにも関わらず、2010 年 6 月 13 日に地球に帰還し、世界で初めての小惑星サンプルリターンに成功した。

2006 年頃から検討が始まった「はやぶさ 2」は、初号機の「はやぶさ」が地球に帰還した後、2011 年春にプロジェクトとして立ち上がった。「はやぶさ 2」は工学実証探査機ではなく、C 型小惑星を科学探索し、サンプルリターンをおこなうことを目的とした探査機である (図 1)。

「はやぶさ 2」はなぜ C 型小惑星をめざしたのか、小惑星は望遠鏡での反射スペクトル観測によって分類される。C 型小惑星は炭素質コンドライトとよばれる始原隕石との関連が指摘されてきた。炭素質コンドライトは地上の隕石コレクションの中では 52% 程度しか存在しないが、そのほとんどは普通コンドライトとよばれる大半の隕石に比べて、熱による変成を受けていない。そのため、太陽系初期、惑星形成以前に起きた物質進化のプロセスを記憶している。また、一部の炭素質



図1た「はやぶさ2」探査機.

コンドライトには含水鉱物や有機物が含まれ、全岩の重水素/水素比 (D/H) が地球の海の D/H 比に近いために、炭素質コンドライト様物質が地球の海の材料となる水、さらには生命の材料となる有機物を原始地球にもたらしたのではないかという仮説が提唱されている (Genda, 2016 and references therein). これらから、「水や有機物を含む炭素質コンドライト = C型小惑星」という前提で、C型小惑星が地球に水や有機物を供給するという議論がなされてきた (Genda, 2016 and references therein).

しかし、これらの仮説や議論の前提条件「水や有機物を含む炭素質コンドライト = C型小惑星」ははたして正しいのだろうか。また、炭素質コンドライトはその他の隕石よりもろく、地球大気圏で燃え尽き、地上まで到達する割合が低い可能性もある。地上に到達しているものは強度が高く、代表的なものではないかもしれない。さらには、隕石は完全なる転石であり、地質情報を伴っていないという根本的な問題もある。

「はやぶさ2」は小惑星近傍での観測とリターンサンプルの分析を通じて、C型小惑星とはなにか、地上の隕石コレクションと関連はあるのか、太陽

系初期の記憶を残すのか、地球に水や有機物をもたらした可能性はあるのかを解明することをめざして立ち上がったミッションである (Tachibana et al., 2014). ロボット地質学者による宇宙でのフィールドワークともいえる。打ち上げ時期や探査機の性能などを考慮し、選ばれた対象天体は近地球軌道をもつC型小惑星 1999JU<sub>3</sub> であった。探査機打ち上げ後、仮符号だけが付けられていた 1999JU<sub>3</sub> は、海の起源を探るための天体として、リュウグウと名付けられた。

なお、「はやぶさ2」には工学目標もあり、小天体サンプルリターン探査の技術を確実とし、また新たな探査技術を獲得することもめざしていた。致命的なトラブルはひとつもなく、ミッションを完遂し、新たな技術の実証や取得にも成功したと言える (e.g., Hirabayashi and Tsuda, 2022).

#### 4. ロボット地質学者のフィールドワーク

2014年12月3日に打ち上げられた「はやぶさ2」は、2019年6月に小惑星リュウグウ (図2) に到達した。リュウグウから距離 203km の地点をホームポジションとし、小惑星と並走しながら、17ヶ月にわたり、リュウグウ近傍で観測をおこ

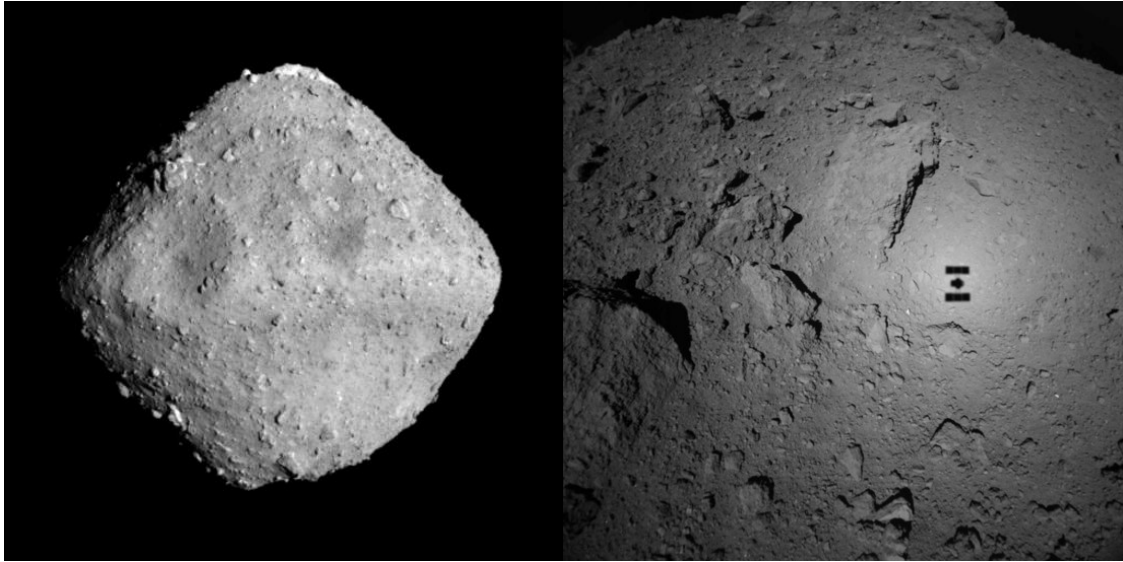


図2た「はやぶさ2」が撮影した小惑星リュウグウ.,(左) 高度22kmから撮影された小惑星全体像.,(右) 高度70 mから撮影された表面.,探査機の影が映る. (c) JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研.

なった。その結果、直径約14kmのリュウグウはそろばん玉のような形状をしていること、天体の密度が $1.19 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$ であること、表面は岩塊が覆っていること、典型的な炭素質コンドライトに比べ、とても暗く平均反射率が2.5%程度であること、表面全域で $2.72 \mu\text{m}$ の赤外吸収が存在することがまず明らかとなった (Watanabe et al., 2019; Sugita et al., 2019; Kitazato et al., 2019)。

そろばん玉状の形状は、リュウグウがかつて現在の自転周期(7.633時間)より短い自転周期をもち(～3.5時間)、遠心力で赤道付近へと物質流動がおこったためと考えられている (Watanabe et al., 2019)。表面に多数存在する10 mを超える岩塊はリュウグウ表面に現在観測されるクレーターからの放出物と考えるには大きく、また、天体のバルク密度が炭素質コンドライトなどの隕石の密度より小さいということもあり、リュウグウは前世代の天体が破壊された破片の再集積でつくられたラブルパイル(瓦礫)天体であると結論づけられた (Watanabe et al., 2019; Sugita et al., 2019)。

その後の観測で、暗い表面にわずかに色味の違いがあり、赤道域、極域がやや青く、中緯度領域

がやや赤いことがわかった (Morota et al., 2020)。現在のリュウグウの自転周期では遠心力の効果は小さく、重力ポテンシャルは中緯度域の方が低いため、赤道から中緯度領域への物質の流れがある。このため、赤道域や極域では地下の青みがかかった物質が表面にあらわれ、中緯度域では宇宙風化(大気のない天体で、太陽風や銀河宇宙線の照射、微小隕石の衝突などによって、物質の表面状態が変わること)を受け、赤みがかかった物質がたまっているのではないかと考えられている (Morota et al., 2020)。また、岩塊の熱物性測定が探査機本体や着陸機 MASCOT によっておこなわれ、得られた熱物性から、岩塊の空隙率が高い可能性も指摘されている (Grott et al., 2019; Okada et al., 2020)。人工クレーター形成実験もおこなわれた。秒速2kmで2kgの銅の衝突体がリュウグウの赤道付近に打ち込まれ、直径18m程度のクレーターが形成されたことが確認された。表面物質の凝集力が弱く、このサイズのクレーターが形成されたと考えられる (Arakawa et al., 2020)。分離カメラによるクレーター形成の瞬間の画像撮影にも成功した (Arakawa et al., 2020)。



図3た「はやぶさ2」 サンプラー。

### 5. 3 億 km 先でのサンプリング

ロボット地質学者の「はやぶさ2」は露頭でハンマーを振るって、サンプルを採取したわけではない。サンプル採取の方法は初号機「はやぶさ」を踏襲し、サンプルラホーンとよぶ約17mの長さの筒状構造が小惑星表面に着地した瞬間に弾丸（タンタル製50g）を発射し、ホーン内を舞い上がった表面物質をホーン上部に設置された格納室（サンプルキャッチャ）に採取する形式が採用された（Sawada et al., 2017）（図3）。小惑星イトカワを探索した「はやぶさ」はイトカワに着地し、地球にサンプルを持ち帰ったが、トラブルによって、弾丸は発射されなかったため、「はやぶさ2」は弾丸発射型サンプル採取装置（サンプラー）を宇宙で動作させるという最初の役目も担っていた。

「はやぶさ2」サンプラーの開発には、地球外物質科学の研究者が当初から関わり、理学ミッションとして、サンプル必要量・採取条件・コンテナ封入条件の決定、汚染の軽減および管理、新規開発要素の基礎実験などをおこなった。理学メンバーと工学メンバーが開発当初から密に議論を繰り返す、一緒に作業し、よい連携の取れたサンプ



図4 小型カメラCAM-Hが撮影した第一回着地2秒後のリュウグウ表面とサンプルラホーン。ホーン下から多数の粒子（探査機の影の中では白っぽく見えている）が飛び出している様子が見える。

ラー開発チームの目標は「リュウグウ表面の複数地点でサンプルを最低0.1g採取し、地上での汚染を最小限にし、速やかに地上分析をおこなえるサンプラー」であった。10年にもわたるミッションでこのような開発に理学メンバーが関わるにあたって、目に見える成果を継続的に出版しておくことは重要と考え、サンプラーの開発、基礎実験、汚染管理、分析装置設計・開発などに関し、中心メンバーがそれぞれ論文を出せるように進める配慮もしてきた（Tachibana et al., 2014; Sawada et al., 2017; Okazaki et al., 2017; Thuillet et al., 2019; Takano et al., 2020; Tachibana, 2021; Tachibana et al., 2022; Sakamoto et al., 2022; Miura et al., 2022）。

「はやぶさ2」のリュウグウ表面でのサンプル採取は2019年2月と7月の二回実施された。リュウグウ到達前には2018年10月に第一回のサンプル採取の実施が検討されていたが、リュウグウの全容がわかり、岩塊に覆われた表面には探査機の安全を確保して着地できる場所がほとんどなかった。そのため、理学チームは着地が可能な地点を探すこと、工学チームは当初計画していた着地精度（目標地点から50gn以内）を上げる運用方法を検討することに注力し、リハーサルを経た後に、2019年2月に一回目の着地に挑んだ。着地に許された地域は赤道近辺の直径6kmの地域で、太陽電池パドルを展開した探査機（図1）の幅には

ぼ等しい。その領域内の目標地点に17mのずれで着地に成功した。探査機が着地の瞬間を検知したタイミングで弾丸が発射され、サンブラホーンの下から弾丸発射に伴う飛散物（イジェクタ）の様子が小型カメラCAM-H（一般の方々からの寄付で開発された）で撮影された（Tachibana et al., 2022）（図4）。弾丸発射部の温度上昇を示すデータが探査機から送られ、弾丸が無事に発射されたことも確認され、初号機「はやぶさ」から持ち越された課題でもあった弾丸発射式のサンプル採取機構が宇宙で動作することを示すことができた。

2019年7月におこなわれた二回目の着地は、人工クレーターから204m離れた地点で、クレーターからのイジェクタ（すなわち地下物質）を含むサンプルの採取を試みた。二回目の着地は目標地点から0.5mと一回目を上回る精度で成功し、サンブラホーンの下でのイジェクタ放出や弾丸の発射も確認された。サンプルを格納するサンプルキャッチャは、最大三地点でのサンプル採取に対応する三部屋構造をしており（Sawada et al., 2017）、一回目の着地とは違う場所に二回目の試料の格納がおこなわれた。

2019年8月、「はやぶさ2」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（Okazaki et al., 2017）まで輸送・密封した。予定されたすべての運用を終え、「はやぶさ2」は2019年11月、地球への帰還の途についた。

## 6. リュウグウから持ち帰られたもの

打ち上げから6年経ち、2020年12月6日、「はやぶさ2」は豪州ウーメラ砂漠に、地球帰還カプセルを無事に送り届けた。予期せぬ新型コロナウイルス感染症パンデミックによって、制限の多い活動であったが、豪州政府や豪州宇宙庁の多大なサポートのもと、カプセル回収チームは帰還したカプセルの回収に成功した（図5）。回収直後にカプセルからサンプルを格納したコンテナが取り出され、コンテナ内部のガス成分を採取・その場分析をおこなった後（Tachibana et al., 2022; Miura et al., 2022）、地球帰還翌日にはコンテナは日本へと輸

送された。宇宙科学研究所のキュレーション施設に到着したのは、カプセルの着地から約57時間後であった。キュレーション施設内で、コンテナを真空中で開封するための準備作業がおこなわれ、コンテナは12月11日に「はやぶさ2」リターンサンプル用に製作されたクリーンチャンバーシステム（Abe, 2021）の真空チャンバー部に取り付けられた（図5）。チャンバーの真空引きの後、12月14日にコンテナは開封され、サンプルキャッチャが取り出された。翌日、第一回の着地での採取試料が入った格納室Aの蓋が取り外され、黒色の粒子が確認された（図6）。その後、格納室Cも開けられ、第二回の着地での採取試料も確認された（図6）。回収試料は格納室Aに約3g、格納室Cに約2g収納されており、ミッション目標の0.1gを大きく超える総量約50gのサンプル量が持ち帰られた（Yada et al., 2021; Tachibana et al., 2022）。総量50gはこれまで月以外の天体から持ち帰られたサンプル量としては最大のものである。

真空チャンバー中で採取および保管された格納室Aの粒子二粒以外のすべてのリターンサンプルは、クリーンチャンバーシステムの窒素雰囲気チャンバー内で速やかに初期記載がおこなわれた。およそ17mmを超えるサイズの粒子は一粒ごとに、また、より細粒の粒子は集合体として、光学顕微鏡観察、重量測定、可視多バンド分光撮像、赤外分光分析、赤外分光イメージングなどがおこなわれた（Yada et al., 2021; Pilorget et al., 2021）。初期記載によって、持ち帰られた粒子は可視光波長域での反射率がリュウグウ表面と同じく低いこと、含水鉱物、炭酸塩、有機物に由来すると考えられる赤外吸収ピークが見られることが明らかとなった（Yada et al., 2021; Pilorget et al., 2021）。これらの物質はリュウグウが「水や有機物を含む物質」から構成されていることを示し、炭素質コンドライトに近い物質であることがわかる（Yada et al., 2021; Pilorget et al., 2021）。また、持ち帰られた粒子の形状が、リュウグウでの二回の着地時にCAM-Hで撮影された表面粒子の形状とも似ており、リターンサンプルが小惑星リュウグウ表面を



図5 (左上) 地上に着地した再突入カプセル.,(右上) カプセル回収作業.,(左下) JAXA宇宙科学研究所キュレーション施設に設置された「はやぶさ2」粒子専用クリーンチャンバーシステム.,(右下) クリーンチャンバーシステムへのサンプルコンテナの取り付け作業.



図6た「はやぶさ2」回収サンプル.,(左) 格納室A内の第一回着地時採取サンプル.,(右) 格納室Cから取り出された第二回着地時採取サンプル.



代表する粒子であることが示された (Tachibana et al., 2022). これらのことから, ミッションで掲げた目標「リュウグウ表面の複数地点でサンプルを最低 0.1 g 採取し, 地上での汚染を最小限にし, 速やかに地上分析をおこなえるサンプラー」は達成できたと考えている.

## 7. 分析進行中

宇宙科学研究所キュレーション施設のクリーンチャンパーシステム内で, 大気非曝露条件下で初期記載されたサンプルの一部 (総量の 6% にあたる 0.3 g) が, 地球帰還から 6 ヶ月後, 「はやぶさ 2」プロジェクトチームに渡された. プロジェクトチームによる一年間の詳細分析 (初期分析) が現在進行中である. 化学分析, 17 $\mu$ m を超える粒子の岩石学・鉱物学 (石の物質分析), 0.1  $\mu$ m 程度の細粒粒子の岩石学・鉱物学 (砂の物質分析), 揮発性物質分析, 固体有機物分析, 可溶性有機物分析の 6 つの国際チームが分析にあっている. ミッション目標を超える量が持ち帰られ, 分析に使えるサンプル量が増えたため, 分析の精度が向上し, また当初予定していなかった分析もできるようになっている.

リュウグウサンプルの詳細分析によって, また, 分析結果を探査機で得た地質情報とともに解釈することで, C 型小惑星とはなにか, 「水や有機物を含む炭素質コンドライト = C 型小惑星」という仮説は正しいのか, 私達がこれまで調べてきた隕石とは一体どういうものなのか, リュウグウサンプルは太陽系の起源と進化, 地球の海や生命材料の起源を記憶するのかについて, 新たな議論を展開していきたい (Tachibana et al., 2014; Tachibana, 2021).

キュレーション活動も並行して進み, 2022 年 1 月にはサンプルカタログが公開された (<https://darts.isas.jaxa.jp/curation/hayabusa2>). 公募分析の提案も募集が始まり (<https://jaxa-ryugu-sample-ao.net>), 2022 年 6 月から公募分析が開始する. 世界中で様々な発想, 様々な手法でリュウグウサンプルが分析されることになる. サンプルの一部は将来にわたり, 保管され, 未来の最先端分析を待つ. こ

れは地上にサンプルが持ち帰られるからこそ可能になり, アポロ計画の月岩石が 50 年後の今でも分析されるように (Greenwood et al., 2011; Hui et al., 2013), 21 世紀後半のリュウグウ試料分析から, 今の私達には知り得ないなにかが得られるかもしれない. なお, このような将来の分析を可能とするためには, 長期にわたるサンプルの維持・管理をするためのキュレーション施設や体制の維持も必要であることも付記しておく (Abe, 2021; Longobardo and Hutzler, 2021; Smith et al., (2021)).

## 8. マントルをめざすことと宇宙をめざすこと

地球という惑星の地表は, 太陽系の様々な天体のなかでも殊に賑やかである (e.g., 日本地球惑星科学連合編「地球・惑星・生命」). 大気海洋系に生命や人類まで関わった物質循環があり, さらにその表面の賑やかな循環とは異なる時定数で動く固体地球が火山活動やプレート沈み込みによって, 表層物質循環を下支えしている. また, 地下にも生命圏が広がっている可能性もある. さらに固体地球はときに地震や大規模噴火を起こし, 一瞬にして, 表層の物質循環に擾乱を与える. 45 億年の地球史, 環境史, 生命史を考えるにあたり, 固体地球の構造, ダイナミクス, 進化を理解することは極めて重要である.

しかし, 3 億 km 離れた 14km 程度の大きさの天体に, 17 $\mu$ m 以下の精度で着地が可能な現代でも, 海洋地殻の数 km 下にあるマントルには私達は到達できていない. 地球はその表面より下をなかなか私達に見せてくれないようだ. もちろん地震波で構造推定はされているし, マントル起源の物質も手にしている. 下部マントルの地球化学的証拠もあるし, かつての海洋地殻から上部マントルまでの構造が地表に露出もしていたりする. しかし, 地震波だけでは物質科学的情報には乏しく, 現在手にしているマントル物質や地球化学的証拠は地上に到達するまでの過程で経験する物理化学条件の影響を受けていると考えられる. 隕石の断片的情報では不十分という理由で, リュウグウに向かった「はやぶさ 2」と同様にマントル物質を直接手

に入れることに勝るものはない。また、マントル物質を手に入れる行程の中での物理計測、化学計測、生物圏探査はダイナミックな地球の営みを直接見るという行為であり、その意義は非常に大きい。

上部マントルの限られた一部を採取するだけでよいのかという疑問を持たれることがあるかもしれない。それは小惑星探査の際に、リュウグウだけでよいのか、イトカワだけでよいのかと疑問を持たれることと同じかと思う。しかし、ひとつであってもC型小惑星やS型小惑星の物質が何でできているのかという事実を手にするだけで、望遠鏡や探査機による観測データ（多くの場合、物質科学的情報は縮退している）の見方は変わる。また、時空間情報が断片的にしか得られないことが多い地球惑星科学では、「仮定」がベースとなった「仮説」の議論がおこなわれる場合がよくあるが、未踏の地からの「事実」が得られることによって、「仮定」や「仮説」が実証され、ときに棄却されることになる。地球や太陽系、宇宙の物語をああだったら、こうだったらと壮大に語るのは楽しいことではあるが、そのためにも事実をひとつひとつ積み上げて、頑強な地盤をつくることは重要である。この2つの視点のバランスを取ることも大切であろう。

「はやぶさ2」がめざす科学も、究極には太陽系における地球の理解が目的である。地球の材料はなんだったのか、海や生命の材料はどこから来たのだろうか。45億年間、賑やかな地球ではあるが、地球全体を代表するマントルには材料の記憶は残っているはずである。はるか上を見上げ、飛び立つことと、踏みしめる大地の下を探検することの根っこは同じである。人類未踏のマントルからのサンプルリターンでたくさんの事実が得られることを期待したい。それまでに地球外からのサンプルリターンや関連した太陽系探査で得られる事実もさらに積み上がることも期待している (e.g., Dandouras et al., 2020; Tasker and Lunine, 2021)。

#### 参考文献

[1] Abe M. et al., The JAXA Planetary Material Sample Curation Facility. in Sample Return Missions: The Last Frontier

of Solar System Exploration. A. Longobardo (Ed.), Elsevier, 241-247 (2021).

[2] Arakawa M. et al., An artificial impact on the asteroid 162173 Ryugu formed a crater in the gravity-dominated regime. *Science* 368, 67-71 (2020).

[3] Brownlee D. et al., Comet 81P/Wild 2 under a microscope. *Science* 314, 1711-1716 (2006).

[4] Burnett D. S. and Genesis Science Team, Solar composition from the Genesis discovery mission. *Proc. Nat. Acad. Sci* 108, 19147-19151 (2011).

[5] Che X. et al., Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e-5. *Science* 374, 887-890 (2021).

[6] Dandouras I. et al., Future missions related to the determination of the elemental and isotopic composition of Earth, Moon and the terrestrial planets. *Space Sci. Rev.* 216, 121 (2020). doi.org/10.1007/s11214-020-00736-0

[7] Ebihara M. et al., Neutron activation analysis of a particle returned from asteroid Itokawa. *Science* 333, 1119-1121 (2011).

[8] Fujiya W. et al., Analytical protocols for Phobos regolith samples returned by the Martian Moons eXploration (MMX) mission. *Earth Planets Space* 73, Article number: 120 (2021). doi.org/10.1186/s40623-021-01438-9

[9] Genda H., Origin of Earth's oceans: An assessment of the total amount, history and supply of water. *Geochem. J.* 50, 27-42 (2016).

[10] Greenwood J. P. et al., Hydrogen isotope ratios in lunar rocks indicate delivery of cometary water to the Moon. *Nature Geoscience* 4, 79-82 (2011).

[11] Grott M. et al., Low thermal conductivity boulder with high porosity identified on C-type asteroid (162173) Ryugu. *Nature Astronomy* 3, 971-976 (2019).

[12] Hamilton V. E. et al., Evidence for widespread hydrated minerals on asteroid (101955) Bennu. *Nature Astronomy* 3, 332-340 (2019).

[13] Hartmann, W. K., Lunar cratering chronology. *Icarus* 13, 299-301 (1970).

[14] Hirabayashi M. and Tsuda Y. (eds.), Hayabusa2 Asteroid Sample Return Mission: Technological Innovation and Advances. Elsevier (2022).

[15] Hui H. et al., Water in lunar anorthosites and evidence for a wet early Moon. *Nature Geoscience* 6, 177-180 (2013).

[16] Kitazato K. et al., The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy. *Science* 364, 272-275 (2019).

[17] Kuramoto K. et al., Martian moons exploration MMX: sample return mission to Phobos elucidating formation processes of habitable planets. *Earth Planets Space* 74, Article number: 12 (2022). doi.org/10.1186/s40623-021-01545-7

[18] Lauretta D. S. et al., The unexpected surface of asteroid (101955) Bennu. *Nature* 568, 55-60 (2019).

[19] Longobardo A. and Hutzler A., The NASA's Johnson Space Center Astromaterials facilities. in Sample Return Missions: The Last Frontier of Solar System Exploration. A. Longobardo (Ed.). Elsevier, 225-239 (2021).

- [20] Longobardo, A. (ed.). *Sample Return Missions: The Last Frontier of Solar System Exploration*. Elsevier (2021).
- [21] McKeegan K. D. et al., Isotopic compositions of cometary matter returned by Stardust. *Science*-314,-1724-1728-(2006).
- [22] McKeegan K. D. et al., The oxygen isotopic composition of the Sun inferred from captured solar wind. *Science* 332, 1528-1532 (2011).
- [23] Miura Y. N. et al., The GAs Extraction and Analyses system (GAEA) for immediate extraction and measurements of volatiles in the Hayabusa2 sample container. *Earth Planets Space*, under review.
- [24] Morota T. et al., Sample collection from asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2: Implications for surface evolution. *Science* 368, 654-659 (2020).
- [25] Nagao K. et al., Irradiation history of Itokawa regolith material deduced from noble gases in the Hayabusa samples. *Science* 333, 1128-1131 (2011).
- [26] Nakamura T. et al., Chondrule like objects in short-period comet 81P/Wild 2. *Science* 321, 1664-1667 (2008).
- [27] Nakamura T. et al., Itokawa dust particles: a direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites. *Science* 333, 1113-1116 (2011).
- [28] 日本地球惑星科学連合編, 地球・惑星・生命. 東京大学出版会 (2020).
- [29] Noguchi T. et al., Incipient space weathering observed on the surface of Itokawa dust particles. *Science* 333, 1121-1125 (2011).
- [30] Okada T. et al., Highly porous nature of a primitive asteroid revealed by thermal imaging. *Nature* 579, 518-525 (2020).
- [31] Okazaki R. et al., Hayabusa2 sample catcher and container: Metal-seal system for vacuum encapsulation of returned samples with volatiles and organic compounds recovered from C-type asteroid Ryugu. *Space Sci. Rev.* 208, 107-124 (2017).
- [32] Pilorget C. et al., First analyses by MicrOmega of the samples returned to Earth by the Hayabusa2 mission. *Nat. Astron.* (2021). doi.org/10.1038/s41550-021-01549-z
- [33] Sakamoto K. et al., Environmental assessment in the pre-launch phase of Hayabusa2 for safety declaration of returned samples from the asteroid (162173) Ryugu: Background monitoring and risk management during development of the sampler system. *Earth Planets Space*, in revision.
- [34] Sawada H. et al., Hayabusa2 sampler: Collection of asteroidal surface material. *Space Sc. Rev.* 208, 81-106 (2017).
- [35] Simon A. A. et al., Widespread carbon-bearing materials on near-Earth asteroid (101955) Bennu. *Science* 10.1126/science.abc3522 (2020).
- [36] Smith C. L. et al., A roadmap for a European extraterrestrial sample curation facility—the EURO-CARES project. in *Sample Return Missions: The Last Frontier of Solar System Exploration*. A. Longobardo (Ed.). Elsevier, 249-268 (2021).
- [37] Smith, J. V. et al., Petrologic history of the moon inferred from petrography, mineralogy, and petrogenesis of apollo 11 rocks, *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.* 897-925 (1970).
- [38] Sugita S. et al., The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes. *Science* 364, eaaw0422 1-11 (2019).
- [39] Tachibana S. et al., Hayabusa2: Scientific importance of samples returned from C-type near-Earth asteroid (162173) 1999 JU3. *Geochem. J.* 48, 571-587 (2014).
- [40] Tachibana S. et al., Pebbles and sand on asteroid (162173) Ryugu: in situ observation and particles returned to Earth. *Science*, in press (2022). doi.org/10.1126/science.abj8624
- [41] Tachibana S., The Hayabusa2 mission: what will we expect from samples from C-type near-Earth asteroid (162173) Ryugu? in *Sample Return Missions: The Last Frontier of Solar System Exploration*. A. Longobardo (Ed.). Elsevier, 142-162 (2021).
- [42] Takano Y. et al., Chemical assessment of the explosive chamber in the projector system of Hayabusa2 for asteroid sampling. *Earth Planets Space* 72, Article number: 97 (2020). doi:10.1186/s40623-020-01217-y
- [43] Tasker E. J. and Lunine J. I., Future missions. in *Sample Return Missions: The Last Frontier of Solar System Exploration*. A. Longobardo (Ed.). Elsevier, 207-222 (2021).
- [44] Thuillet, F. et al., Numerical modeling of medium-speed impacts on a granular surface in a low-gravity environment Application to Hayabusa2 sampling mechanism. *Month. Not. R. Astron. Soc.* 491, 153-177 (2019).
- [45] Tsuchiyama A. et al., Three-dimensional structure of Hayabusa samples: Origin and evolution of Itokawa regolith. *Science* 333, 1125-1128 (2011).
- [46] Usui T. et al., The importance of Phobos sample return for understanding the Mars-moon system. *Space Sci. Rev.* 216, 49 (18 pp) (2020). doi.org/10.1007/s11214-020-00668-9
- [47] Watanabe S. et al., Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile. *Science* 364, 268-272 (2019).
- [48] Wilhelms, D. E., The geologic history of the Moon, *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 1348 (1987).
- [49] Wood J. A. et al., Lunar anorthosites and a geophysical model of the Moon. *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.* 965-988 (1970).
- [50] Yada T. et al., Preliminary analysis of the Hayabusa2 samples returned from C-type asteroid Ryugu. *Nat. Astron.* (2021). doi.org/10.1038/s41550-021-01550-6
- [51] Yamamoto D. et al., Oxygen isotopic exchange between amorphous silicate and water vapor and its implications to oxygen isotopic evolution in the early Solar System. *Astrophys. J.* 865, 98 (14pp) (2018).
- [52] Yamamoto D. et al., Survivability of presolar oxygen isotopic signature of amorphous silicates dust in the protosolar disk. *Meteorit. Planet. Sci.* 55, 1281-1292 (2019).
- [53] Yue Z. et al., Updated lunar cratering chronology model with the radiometric age of Chang'e-5 samples. *Nat. Astron.* (2022). doi.org/10.1038/s41550-022-01604-3
- [54] Yurimoto H. et al., Oxygen isotopic compositions of asteroidal materials returned from Itokawa by the Hayabusa mission. *Science* 333, 1116-1119 (2011). □