

小惑星探査機「はやぶさ2」 記者説明会

2021年2月4日

JAXA はやぶさ2プロジェクト



本日の内容

- プロジェクトの現状（概要）
1. 探査機の運用状況
 2. キュレーション作業
 3. LIDAR光リンク実験の結果
 4. NIRS3論文紹介
 5. LIDAR論文紹介
 6. 今後の予定



プロジェクトの現状（概要）



■ 探査機運用

- 拡張ミッションのためのイオンエンジンの運転を1月5日から開始し、これまでの動力航行時間は577時間である。

■ キュレーション作業

- リュウグウより帰還した粒子・バルク粉体試料を観察用の容器に移動させ、高精細な光学顕微鏡画像の取得および重量測定を進めている。



1. 探査機の運用状況



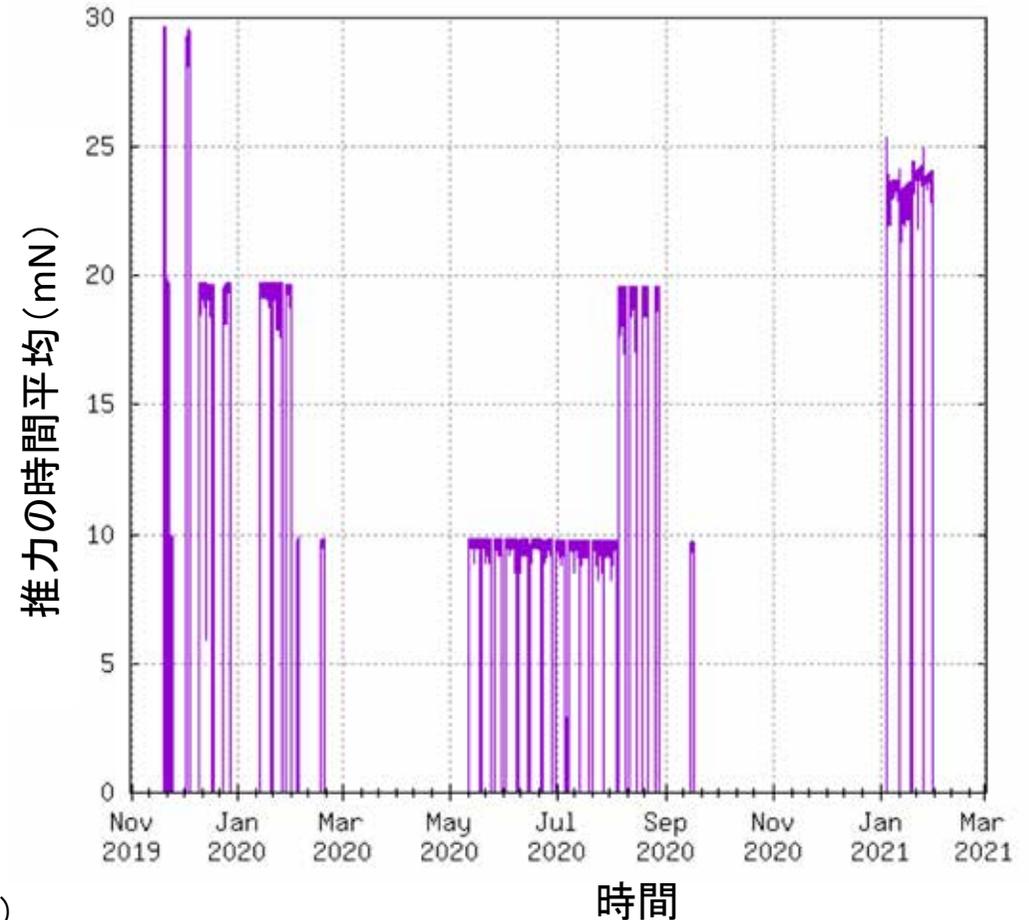
- 1月5日からイオンエンジンの運転を再開した。
- 累積の動力航行時間は、地球帰還前に9,514時間だったが、1月26日に10,000時間を超えた。(1月31日で10,091時間)
- 推進剤節約のために、効率(比推力)が高いことを優先して、1台あたり約8mNという控えめの推力で3台運転を行った。(これは「はやぶさ」のときの最大推力に相当)
- 最短太陽距離の記録を更新中で、1月30日のイオンエンジン停止時点で0.853au (auは天文単位)であった。これは「はやぶさ」でのイオンエンジン動作中に経験した最短太陽距離である0.86auをわずかに下回る。
- 1月5日から1月31日までの動力航行時間は577時間となった。



1. 探査機の運用状況



- ・2021年1月5日に、イオンエンジン B・C・D 3台で運転開始。
- ・軌道に対して減速方向。
- ・イオンエンジン累積運転時間(2021年1月31日時点)
 - A: 6705 時間
 - B: 611 時間
 - C: 8652 時間
 - D: 8106 時間
 - IES (動力航行) : 10091 時間
- ・11月頃まで断続的に運転し、その後はしばらく休止する。



(画像クレジット: JAXA)



2. キュレーション作業



- A室試料を観察用容器(全3皿:下図)に分取し、重量測定・光学顕微鏡観察を開始。

* 重量(下記)は各観察容器内の試料の重さ。個別に分取した粒子の重さは含まれない。



容器の内径は21 mm

(画像クレジット: JAXA)

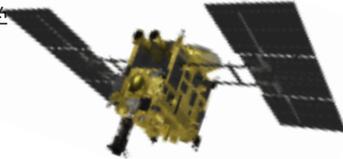


3. LIDAR光リンク実験の結果

エコー・トランスポンダ方式によるはやぶさ2-地上局間の2Wayレーザーリンクに成功



フランス コートダジュール大学
CNRS コートダジュール天文台



フランスのコートダジュール天文台（グラス局）がはやぶさ2 LIDARからのダウンリンク信号を受信、2Wayレーザーリンクに成功した。

2020年12月9日 約100万km

2020年12月21日 約600万km

NICT小金井局、EOSストロムロ局は1Way（アップリンク）に成功した。
信号解析は継続中。



オーストラリア
EOS Space Systems Pty Ltd
ストロムロ衛星レーザー測距施設



ドイツ ミュンヘン工科大学
ヴェッツェル天文台



国立研究開発法人
情報通信研究機構

通信協力
JPL/NASA
Deep Space Network
Canberra, Madrid



千葉工業大学
惑星探査研究センター



一橋大学
地学研究室



LIDAR

(画像クレジット: JAXA)



3. LIDAR光リンク実験の結果

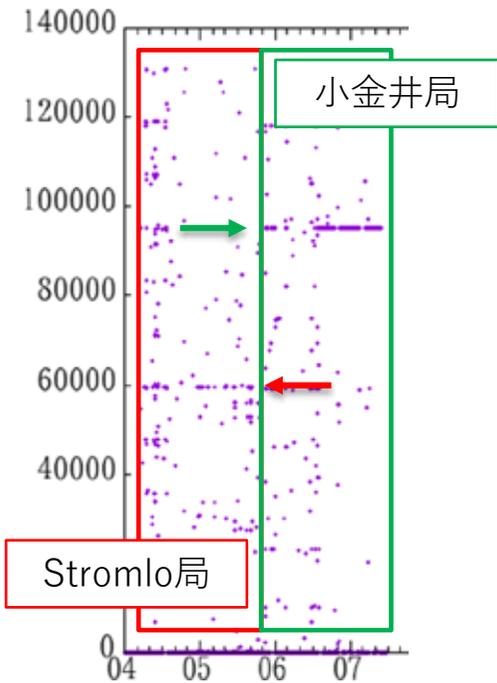


アップリンク (往路)

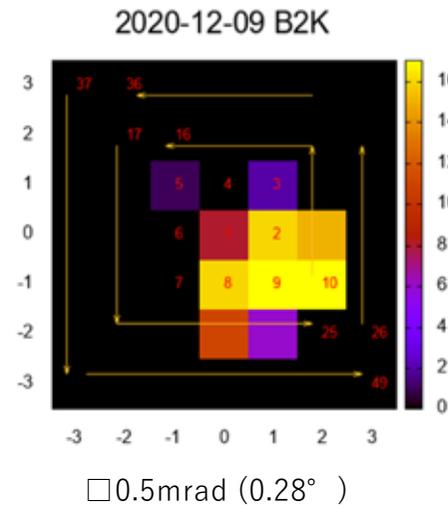
小金井局、ストロムロ局、グラス局が成功

ダウンリンク (復路)

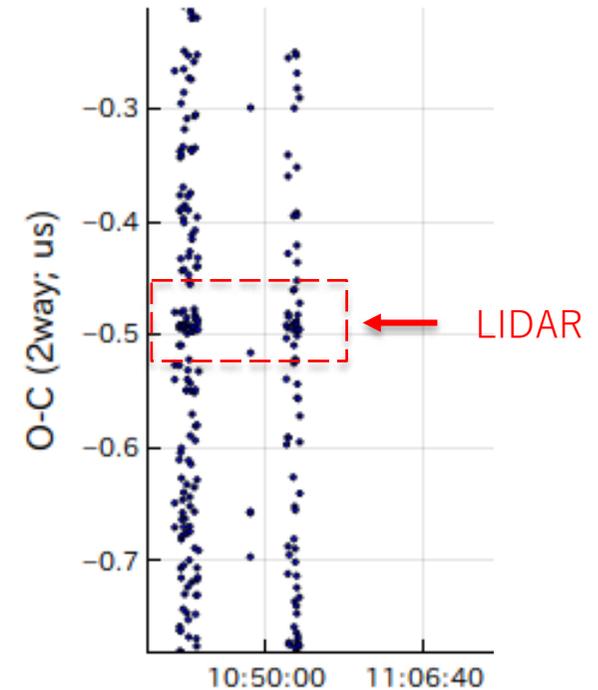
アップリンクと合わせてグラス局が成功



NICT小金井局からのアップリンク検出頻度の分布



はやぶさ2が姿勢を渦巻き状にスキャンして、LIDARの視野範囲を確認した結果。LIDARが信号を検出した回数が多いほど明るい色として示されている。



CNRSコートダジュール天文台が受信した信号のタイミング、ランダムに入っているのは太陽光や検出器の熱によるノイズ。赤破線枠内に一定のタイミングで入っている信号が見られる。

LIDARが測定した、NICT小金井局とEOSストロムロ局のレーザーパルス間隔

(画像クレジット: JAXA, 国立天文台、千葉工大、一橋大、NICT、CNRS、EOS、ミュンヘン工大)



3. LIDAR光リンク実験の結果



惑星探査機 – 地上レーザ測距局の光リンク成功例

- 2005年 米国Messenger 2400万km 非同期 2Way (往復)
- 2005年 米国Mars Global Surveyor 8000万km 1Way (片道)
- 2009年 米国Lunar Reconnaissance Orbiter 38.5万km 2Way
- 2013年 米国Lunar Laser Communication Demonstration 38.5万km 622Mbps
- 2015年 はやぶさ2 660万km 1Way (片道)
- 2020年 はやぶさ2 600万km 同期 2Way (往復)

はやぶさ 2 LIDARの2Wayリンク確立は海外局との協力によって成し得た希少な実験成功例

成果と意義

- ・ 1局で2Wayリンクに成功、3局で1Wayリンクに成功
- ・ エコー・トランスポンダによる惑星探査機-地上局間の2Way最初の例
- ・ 太陽によるノイズが多い昼間に、リンクを確立することに成功
- ・ 安定したアップリンクにより、LIDARの視野詳細を測定
- ・ 将来の深宇宙レーザ測距の可能性と高精度軌道決定に向けた技術蓄積
- ・ 海外レーザ局との協力して成功



4. NIRS3論文紹介

概要

- 近赤外分光計 (NIRS3) を用いて小惑星リュウグウの地下物質を直接観測した結果に基づく研究成果に関する論文が、イギリスのオンラインジャーナル「Nature Astronomy」に2021年1月4日 (日本時間1月5日) 掲載された。
- 論文では、リュウグウの地下物質が、表面物質と同様に加熱による部分的な脱水作用を経験しているものの、表面と比べて水分に富んでいることや、加熱がリュウグウの前身となる母天体上で起きたことなどの発見を報告している。



4. NIRS3論文紹介

論文情報

タイトル: Thermally altered subsurface material of asteroid (162173) Ryugu
(小惑星リュウグウの熱変成した地下物質)

著者名: 北里宏平¹★, Ralph Milliken², 岩田隆浩^{3,4}, 安部正真^{3,4}, 大竹真紀子¹
他96名

★責任著者, ¹会津大学, ²ブラウン大学, ³宇宙航空研究開発機構,
⁴総合研究大学院大学, 他32機関

雑誌名: Nature Astronomy

掲載日: 2021年1月4日(日本時間1月5日)

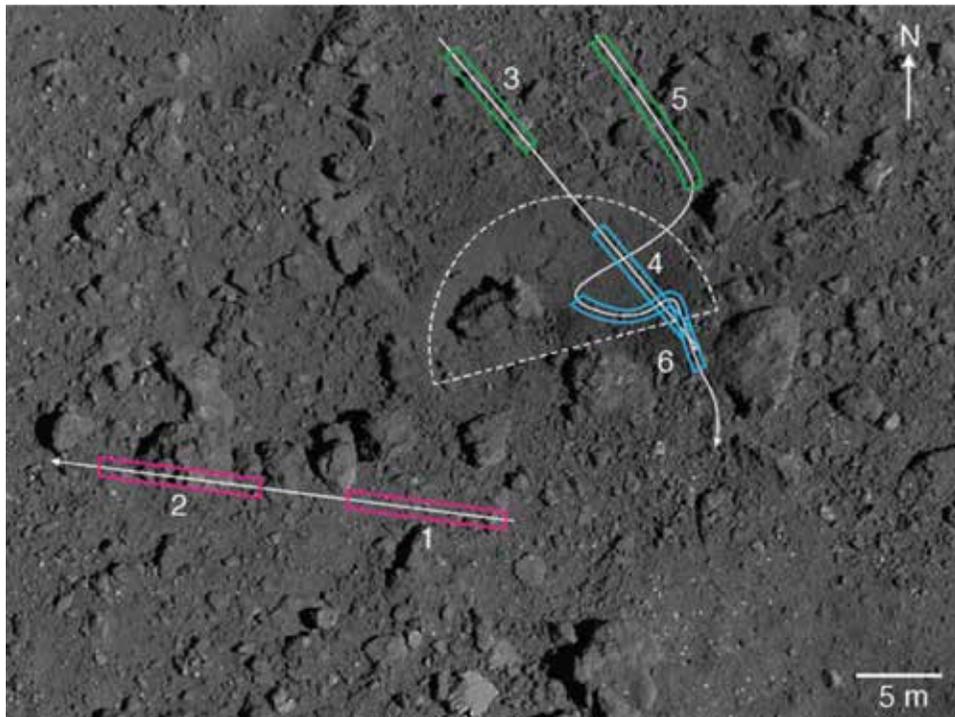
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41550-020-01271-2>



4. NIRS3論文紹介



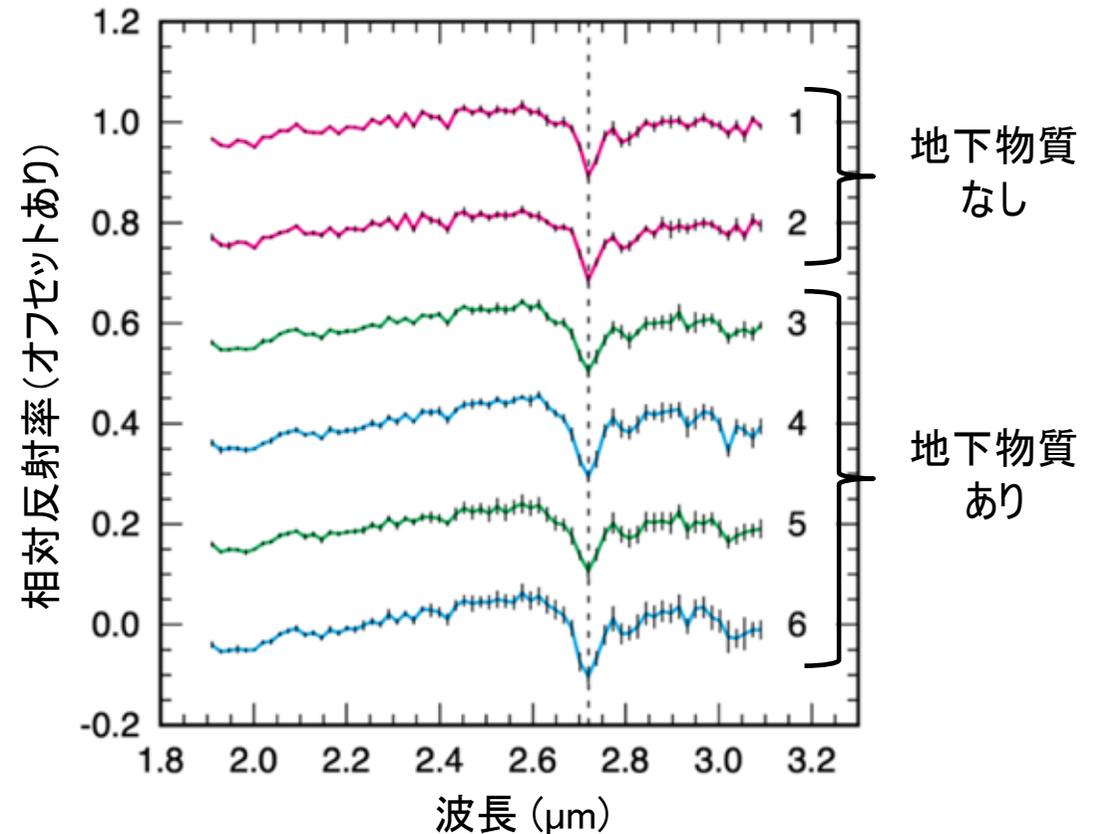
NIRS3によるSCIクレーター観測



SCIクレーター(点線)とNIRS3の観測線(矢印曲線)

(画像クレジット: 会津大、JAXA)

(図は Kitazato et al. (2021) の掲載図を一部改変)



NIRS3の反射スペクトル. 2.7 μm 付近の凹みが水酸基の吸収

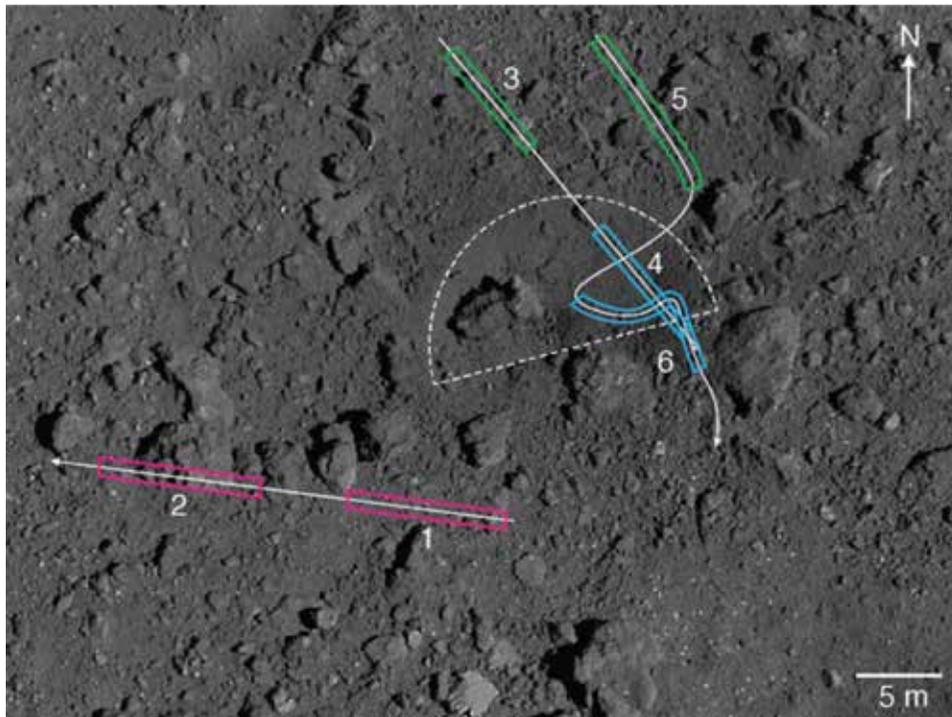


4. NIRS3論文紹介



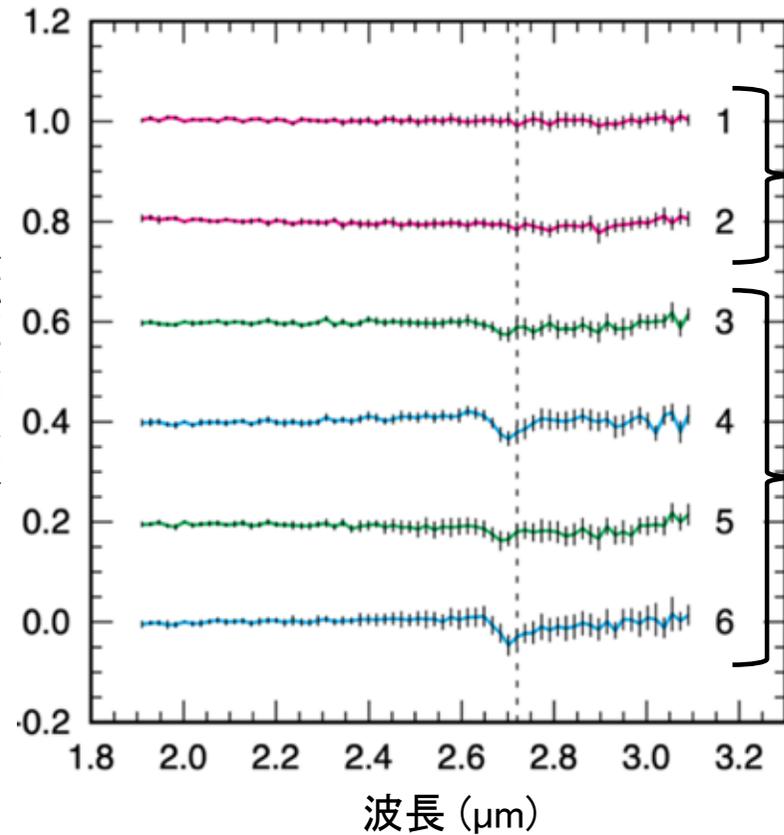
NIRS3によるSCIクレーター観測

(図は Kitazato et al. (2021) の掲載図を一部改変)



SCIクレーター(点線)とNIRS3の観測線(矢印曲線)

標準スペクトルとの相対反射率の比
(オフセットあり)

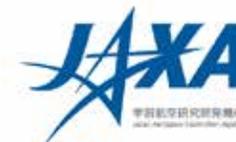


地下物質
なし

地下物質
あり

地下は表面よりもわずかに吸収が深い

(画像クレジット: 会津大、JAXA)



4. NIRS3論文紹介

観測結果と解釈のまとめ

地下・表面	観測結果	解釈
相違点	地下の方が表面よりわずかに水酸基の吸収が深く、水分に富んでいる。	リュウグウが形成された後に太陽光による加熱または宇宙風化作用によって表面の水分が一部失われた。
共通点	地下も表面と同様に水酸基の吸収幅が狭く、300°C以上の加熱による部分的な脱水を経験している。	リュウグウが現在より太陽に接近する軌道を回っていたとしても、太陽光による加熱では地下物質の温度は200°Cまでしか上がらない*。 リュウグウ物質は母天体での内部加熱または衝撃加熱によって熱変成した。

*論文では数値計算によってこのことを立証している。



5. LIDAR論文紹介(概要)



- レーザ高度計(LIDAR)チームから下記の3本の論文成果が出された。
- レーザ高度計によって小惑星近傍から観測された距離データを駆使して、探査機軌道を精確に決めることができた。カメラ画像の解析に活用されるとともに、将来の火星衛星計画(MMX)にも有用な技術を開発することができた。

松本(国立天文台)ほか Icarus誌 2020年3月

山本(国立天文台)ほか EPS誌 2020年6月

野田(国立天文台)ほか EPS誌 2021年1月



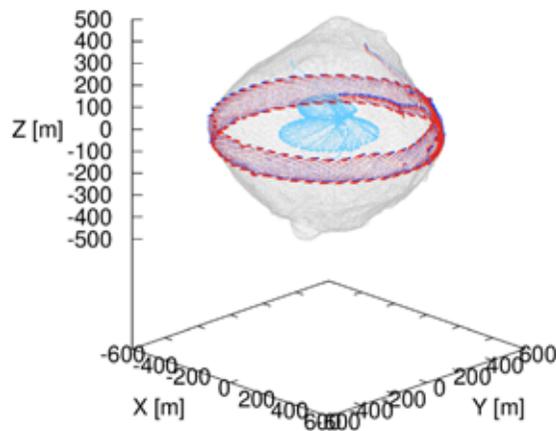
5. LIDAR論文紹介(その1)



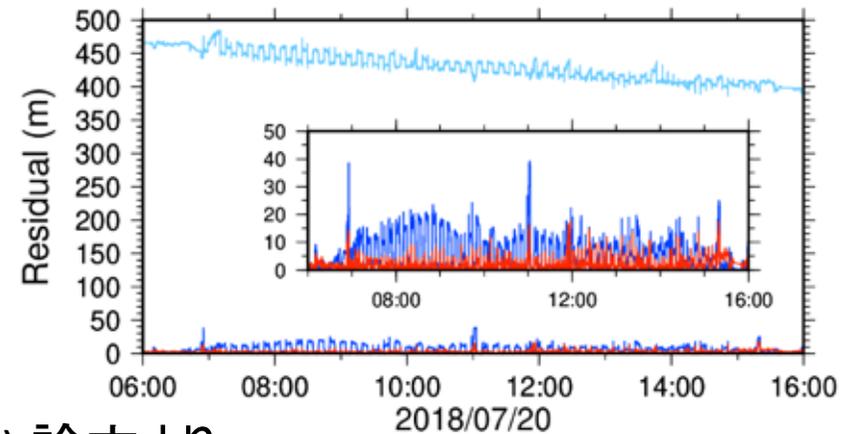
Matsumoto, K., and 39 colleagues, “Improving Hayabusa2 trajectory by combining LIDAR data and a shape model”, Icarus, 338, 113574, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113574> 掲載日 2020年3月1日

- LIDAR測距データの時系列に含まれる地形情報を形状モデルに合わせこむことにより、探査機軌道を改良した。
- ドップラー追跡データや画像データがない期間であっても軌道推定が可能。
- 改良された探査機軌道は、他の観測機器のデータ解析にも活用された。

LIDAR
フットプリント



残差時系列



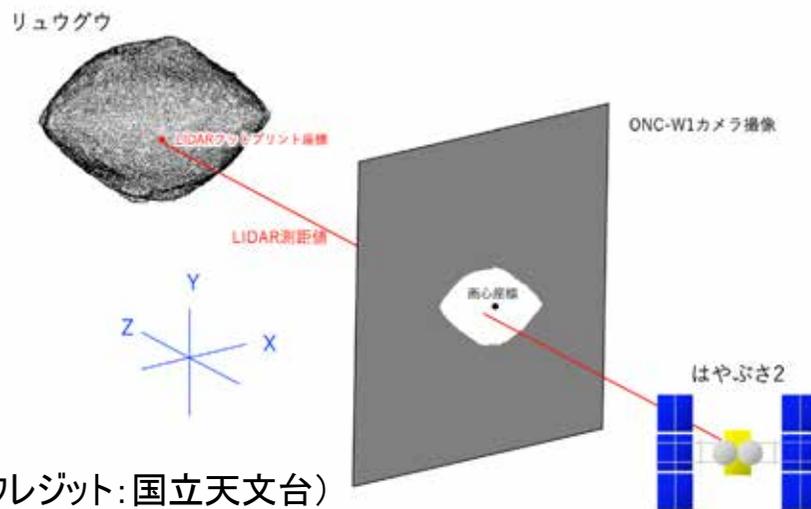
Matsumoto et al. (2020) 論文より



5. LIDAR論文紹介(その2)

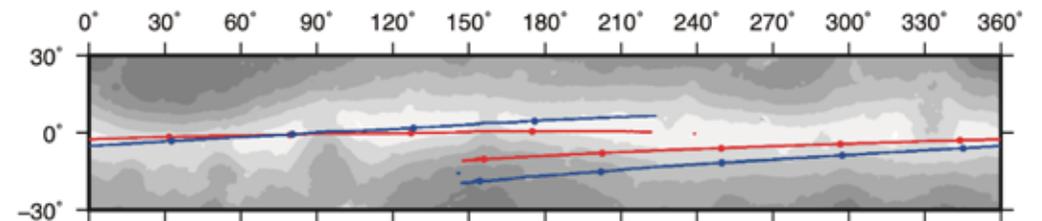


- Yamamoto, K. and 37 colleagues, “Dynamic precise orbit determination of Hayabusa2 using laser altimeter (LIDAR) and image tracking data sets”, Earth Planets and Space (2020) 72: 85, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01213-2>, 掲載日2020年6月12日
- 地形フィッティングによって幾何学的に決められた探査機軌道を、LIDARレーザー高度計から得られる測距データとONC-W1カメラから得られる画心データを用いた力学的な軌道決定によって改良した。
- 本研究は、はやぶさ2ミッションだけでなく、将来の小天体のミッションに対しても、精密な軌道を得るための手法の一つとして役立つことが期待される。



(画像クレジット: 国立天文台)

<https://www.miz.nao.ac.jp/rise/c/reading/paper-detail-20200706>



赤: 地形フィッティング軌道から計算されたLIDARフットプリント位置
 青: 本研究の軌道から計算されたLIDARフットプリント位置

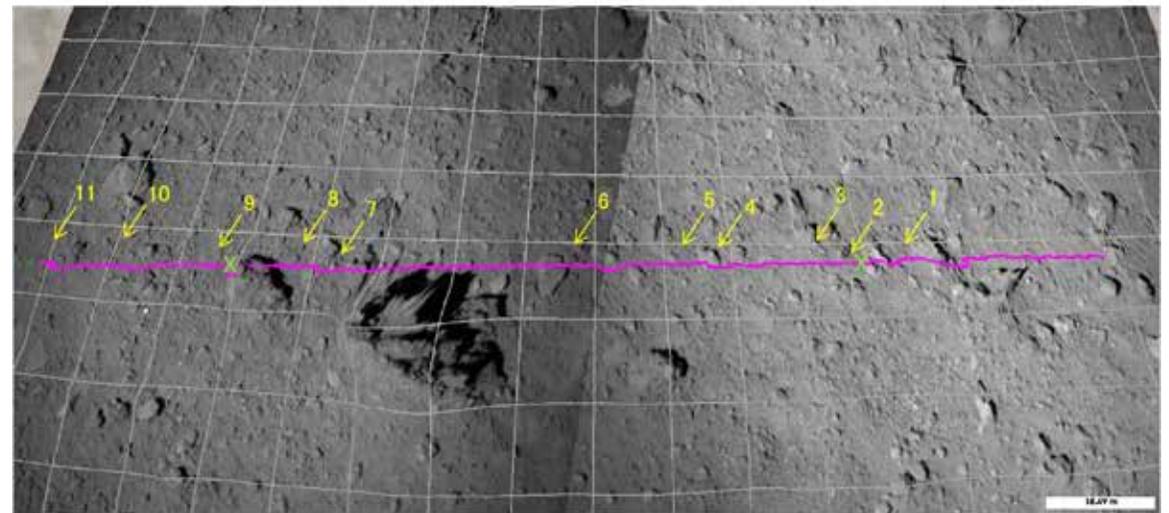
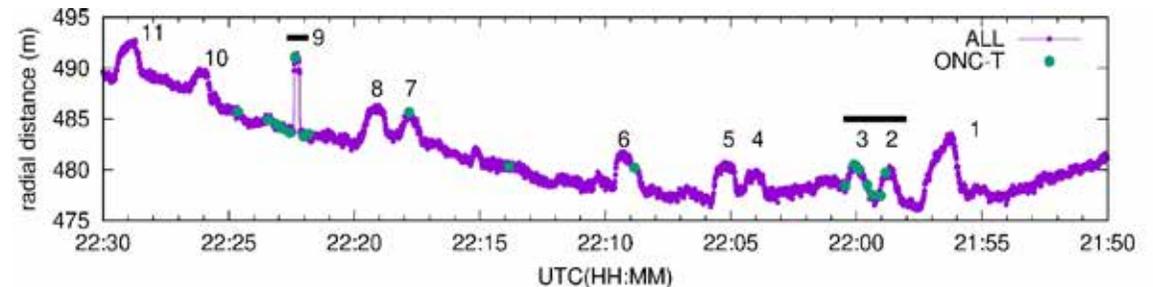
Yamamoto et al. (2020)論文より



5. LIDAR論文紹介(その3)



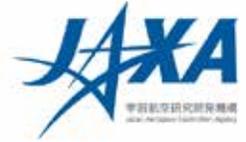
- Noda, H., and 51 colleagues, “Alignment determination of the Hayabusa2 laser altimeter (LIDAR)”, Earth, Planets and Space volume 73, Article number: 21 (2021), <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01342-8> 掲載日 2021年1月20日
- LIDARの時系列地形データをONC-T画像と比較して、LIDARの望遠鏡の向きを正確に求めた。LIDARデータを用いて推定される探査機軌道の詳細化に貢献する。



Noda et al., 2021 論文より



6. 今後の予定



■ 運用の予定

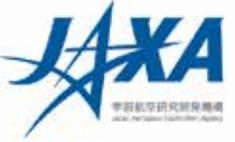
2021年2月-3月

イオンエンジンの動作試験
(太陽距離が小さい場合)

■ 記者説明会等

2021年2月or3月 TBD

記者説明会@オンライン



参考資料



「はやぶさ2」概要



目的

「はやぶさ」が探査したS型小惑星イトカワよりも始原的なタイプであるC型小惑星リュウグウの探査及びサンプルリターンを行い、原始太陽系における鉱物・水・有機物の相互作用を解明することで、地球・海・生命の起源と進化に迫るとともに、「はやぶさ」で実証した深宇宙往復探査技術を維持・発展させて、本分野で世界を牽引する。

期待される成果と効果

- ・水や有機物に富むC型小惑星の探査により、地球・海・生命の原材料間の相互作用と進化を解明し、太陽系科学を発展させる。
- ・衝突装置によって生成されるクレーター付近からのサンプル採取という新たな挑戦も行うことで、日本がこの分野において、さらに世界をリードする。
- ・太陽系天体往復探査の安定した技術を確立する。

特色:

- ・世界初のC型微小地球接近小惑星のサンプルリターンである。
- ・小惑星にランデブーしながら衝突装置を衝突させて、その前後を観測するという世界初の試みを行う。
- ・「はやぶさ」の探査成果と合わせることで、太陽系内の物質分布や起源と進化過程について、より深く知ることができる。

国際的位置づけ:

- ・日本が先頭に立った始原天体探査の分野で、C型小惑星という新たな地点へ到達させる。
- ・「はやぶさ」探査機によって得た独自性と優位性を発揮し、日本の惑星科学及び太陽系探査技術の進展を図るとともに、始原天体探査のフロンティアを拓く。
- ・NASAにおいても、小惑星サンプルリターンミッションOSIRIS-REx（打上げ:平成28年、小惑星到着:平成30年、地球帰還:令和5年）が実施されており、サンプルの交換が取り決められていることに加えて科学者の相互交流が行われており、両者の成果を比較・検証することによる科学的成果も期待されている。



(イラスト 池下章裕氏)

「はやぶさ2」主要緒元

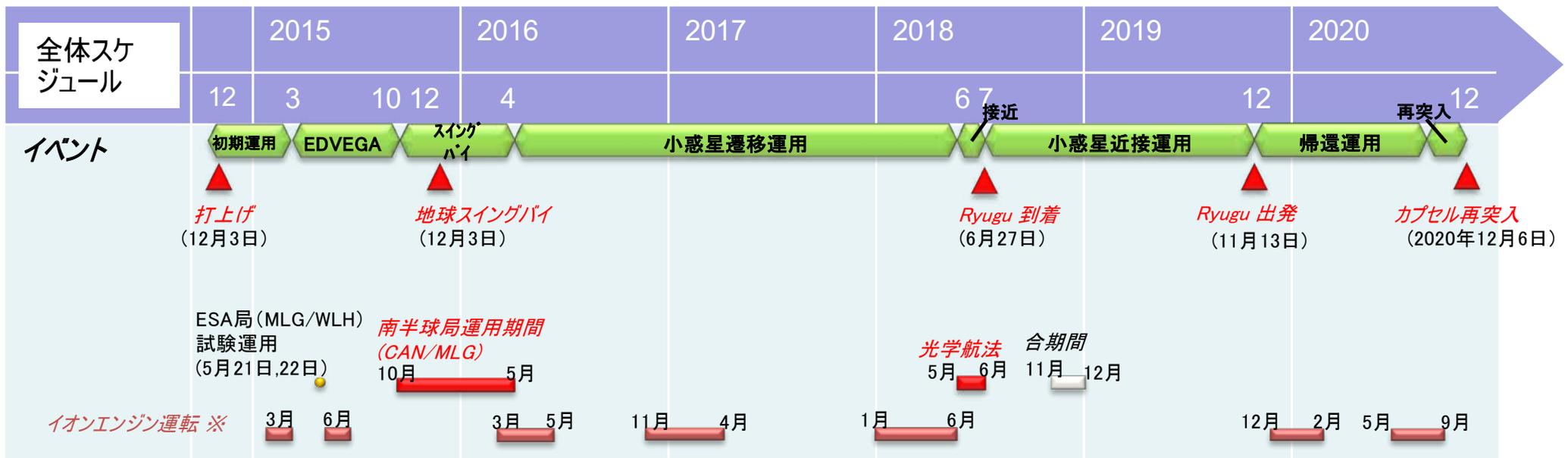
質量	約 609kg
打上げ	平成26年(2014年)12月3日
軌道	小惑星往復
小惑星到着	平成30年(2018年)6月27日
小惑星滞在期間	約17ヶ月
小惑星出発	令和元年(2019年)11月13日
地球帰還	令和2年(2020年)12月6日
探査対象天体	地球接近小惑星 Ryugu(リュウグウ)

主要搭載機器

サンプリング機構、地球帰還カプセル、光学カメラ、レーザー測距計、科学観測機器(近赤外、中間赤外)、衝突装置、小型ローバ



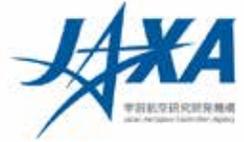
プロジェクトの全体スケジュール



(画像クレジット: JAXA)



ミッションの流れ概要



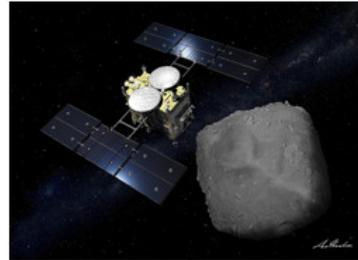
打ち上げ
2014年12月3日



地球スイングバイ
2015年12月3日



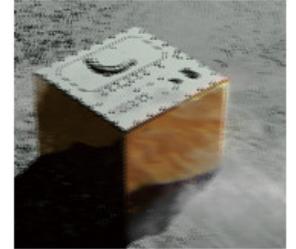
リュウグウ到着
2018年6月27日



MINERVA-II1分離
2018年9月21日



MASCOT分離
2018年10月3日



ターゲットマーカ分離
2018年10月25日



リュウグウ出発
2019年11月13日

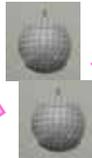


地球帰還
2020年12月6日

MINERVA-II2
2019年10月3日



ターゲットマーカ分離
2019年9月17日



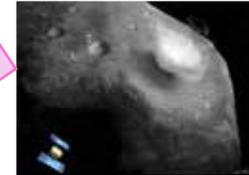
第2回タッチダウン
2019年7月11日



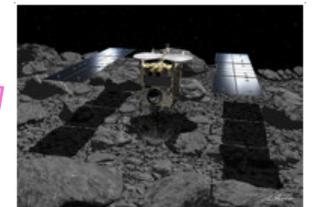
ターゲットマーカ分離
2019年5月30日



衝突装置
2019年4月5日



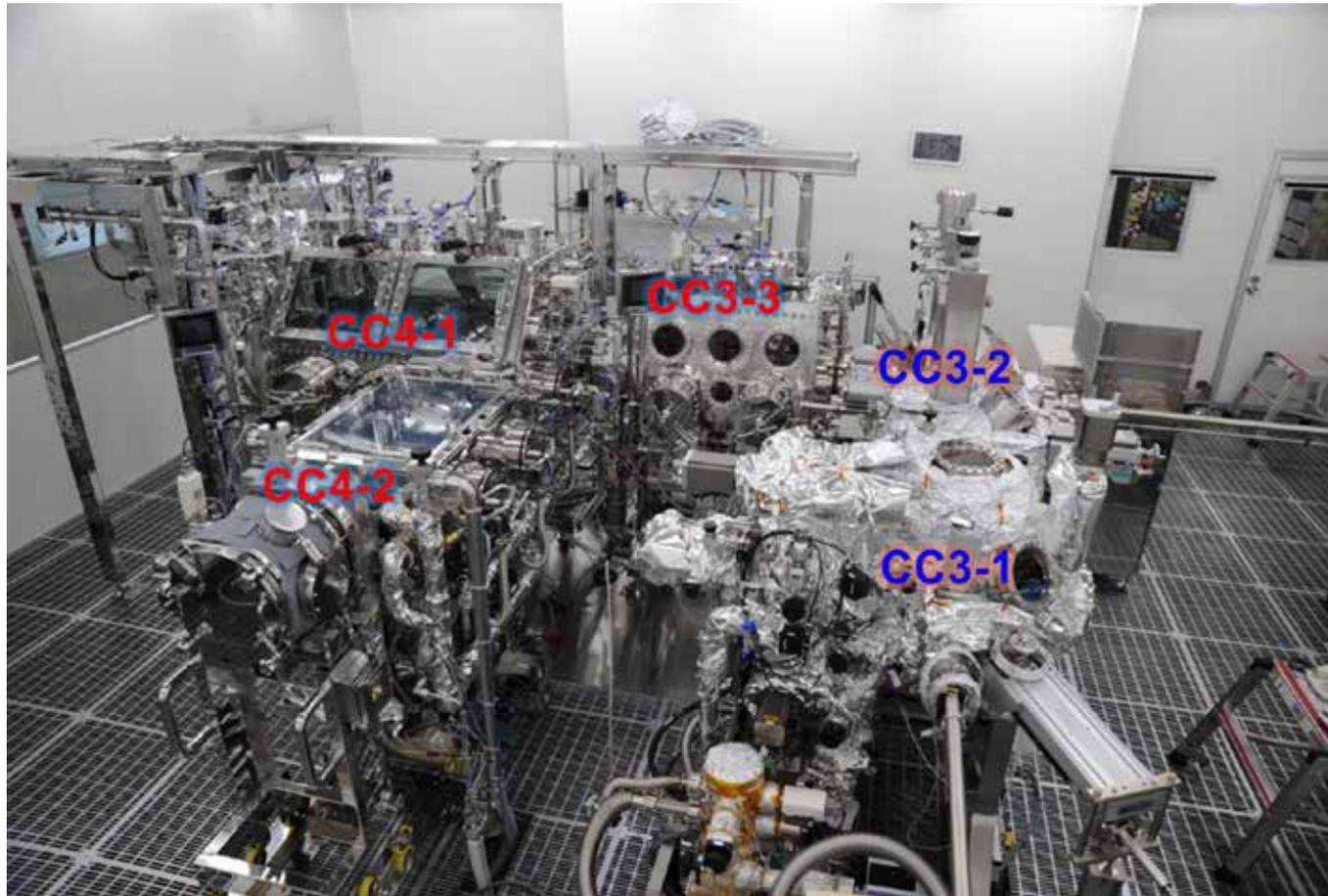
第1回タッチダウン
2019年2月22日



(画像クレジット: 探査機を含むイラストは 池下章裕氏、他はJAXA)



クリーンチャンバー概要



CC3-1 :
真空下でのサンプルコンテナの
開封

CC3-2 :
真空下でのサンプル採取

CC3-3 :
真空から窒素環境への移行

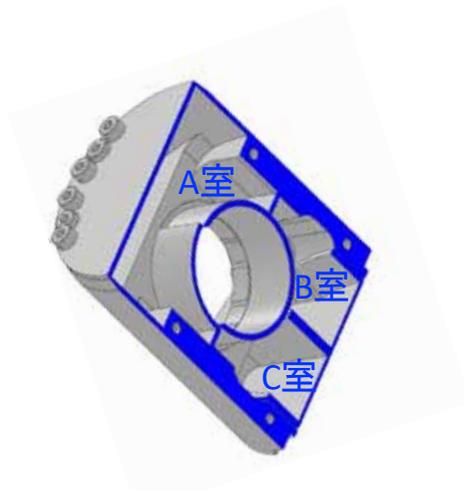
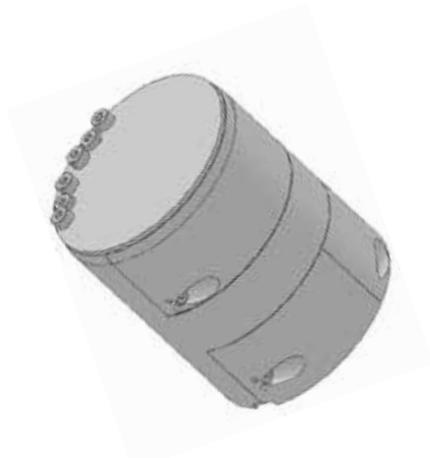
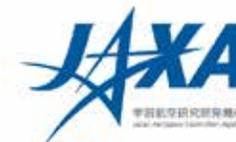
CC4-1 :
サブミリサイズ粒子の処理

CC4-2 :
比較的大きな粒子 (> mm) の
処理・観察・選別

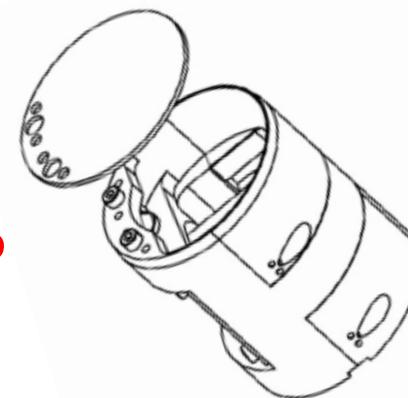
(画像クレジット: JAXA)



参考資料：キャッチャー開封作業



↓
A室上方から
粒子を確認



- サンプルキャッチャをクリーンチャンバCC3-2室に移動し、サンプルキャッチャA室の蓋を真空中で開封。
- A室内に多数の粒子を確認。タッチダウン#1で採取したリュウグウのサンプルと考えられる。
- A室からいくつかのサンプルをピックアップ。そのまま真空中で保管。
- その後、CC3-3室に移動し、窒素環境下でA室・B室・C室の開封を行った。

(画像クレジット: JAXA)



参考資料：観察用容器の概要

