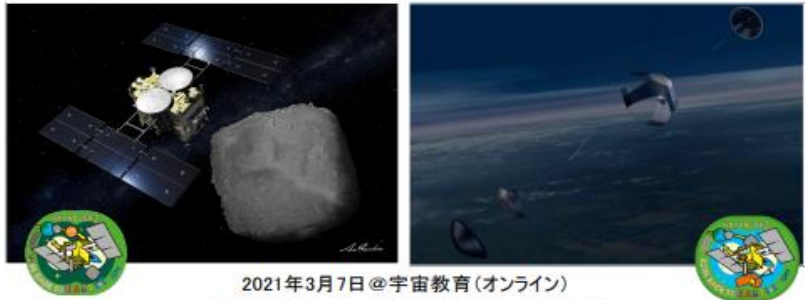


3月7日 YACオンライン教室資料

宇宙教育オンラインセミナー

小惑星探査機「はやぶさ2」の挑戦とその成果

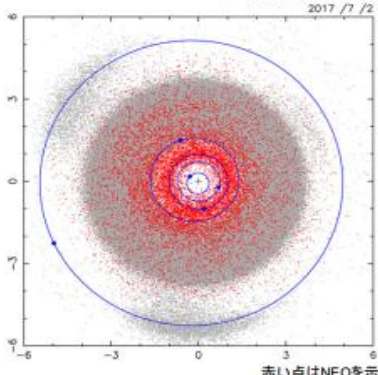


2021年3月7日 @宇宙教育(オンライン)

吉川真(JAXA はやぶさ2プロジェクト)

(イラスト 池下恵祐氏)

小惑星の分布と個数



現在(2021年3月1日)、発見され軌道が求められている小惑星：
1,049,264個

確定番号付き：
547,966個

地球軌道に接近するもの
(NEO: Near Earth Object)：
25,335個

国際天文学連合 マイナープラネットセンターのWebより
<https://minorplanetcenter.net/mpc/summary>

4

探査機が見た小惑星



大きさは直径(横から縦まで)で、単位はkm。値はトータリス以外は理科年表(平成28年度)による。トータリスの値はJPLのWebより。

(画像は各ミッションより)

5

小惑星探査:2018年以降の展開



(画像は各ミッションより)

7

小天体探査がなぜ重要か



8

「はやぶさ2」ミッション

- 世界で2番目の小惑星サンプルリターンミッション（「はやぶさ」に続く）
- 目標天体：小惑星リュウグウ - C型の地球接近小惑星
- 科学目的：太陽系や生命の起源・進化、太陽系初期の有機物
- 工学的目的：往復探査を確実に実行する技術



はやぶさ (2003-2010)



(イラスト 池下章裕氏)

はやぶさ2 (2014-2020)



10

小惑星サンプルリターンミッションの科学

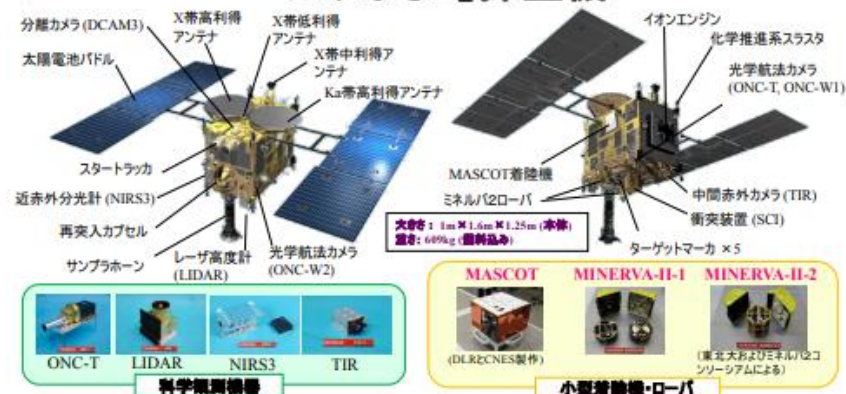


(画像クレジット: JAXA)

- 46億年前に太陽系天体が誕生した頃の物質が小惑星には残っている。
- 惑星を作った物質や、生命の原材料となった物質が解明できる。
- 太陽系や生命の起源や進化に迫る。

11

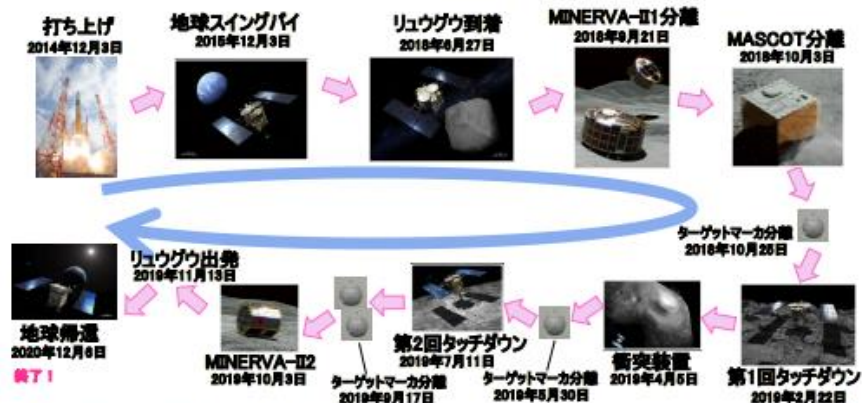
「はやぶさ2」探査機



(画像クレジット: JAXA)

12

ミッションの流れ概要



(画像クレジット: 探査機を含むイラストは 池下幸祐氏、他はJAXA)

13

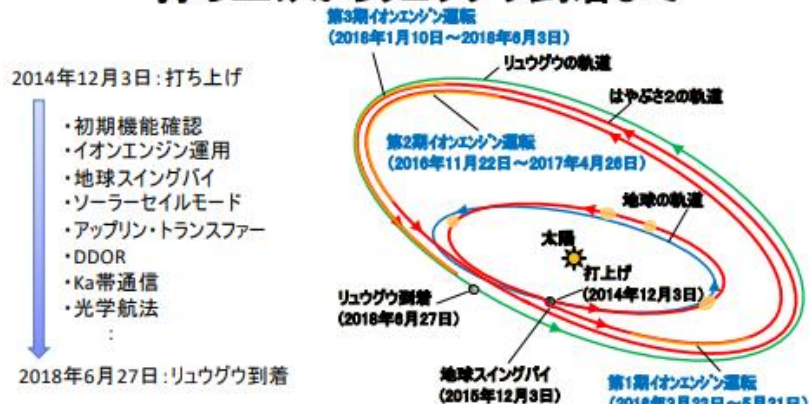
「はやぶさ」ミッションの経緯



(画像クレジット: イラストは 池下幸祐氏、火球の画像は 大宮浩次氏、他はJAXA)

15

打ち上げからリュウグウ到着まで



(画像クレジット: JAXA)

16

小惑星リュウグウ

2018年6月30日



(画像クレジット: JAXA、東京大、高知大、立教大、名古屋大、千葉工大、明治大、金沢大、産総研)

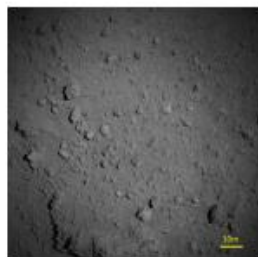
高度20kmより

18

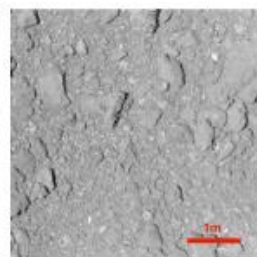
小惑星リュウグウ



高度6kmより
2018年7月20日



高度1kmより
2018年8月7日



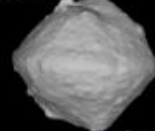
高度42mより
2018年10月15日

(画像クレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 金沢大, 産総研)

19

リュウグウの物理観測

形状模型



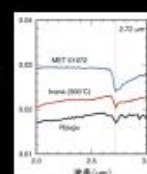
(画像クレジット: 形状※)

形状(LIDARによる)



(画像クレジット: LIDAR※)

近赤外線
スペクトル
(NIRS3による)



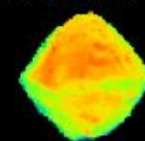
(画像クレジット: NIRS3※)

カラーの画像 (ONC-Tによる)



(画像クレジット: ONC※)

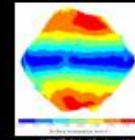
温度 (TIRによる)



(画像クレジット: TIR※)

高い
低い

重力



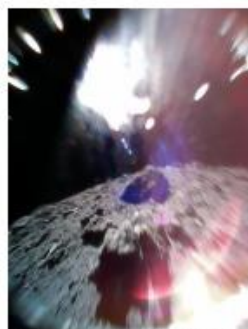
(画像クレジット: JAXA)

(※画像クレジット: はやりか2 各チームより)

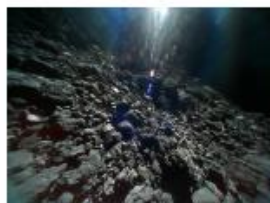
20

MINERVA-II1運用

分離: 2018年9月21日



表面付近でホップして移動中
2018年9月22日



リュウグウ表面
2018年9月23日

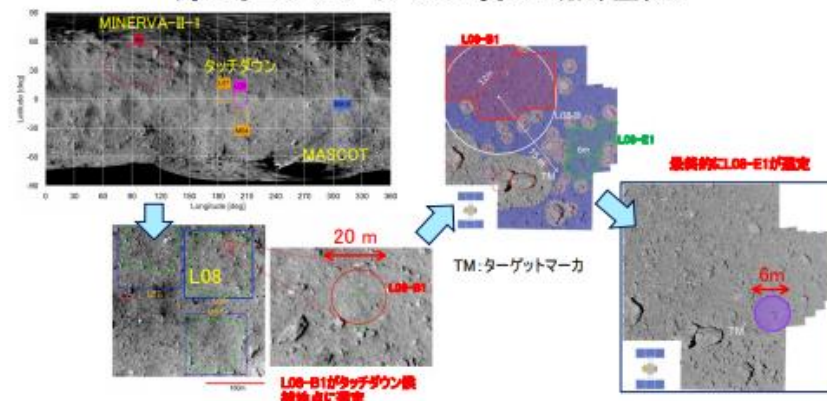


リュウグウ表面で見た太陽の動き
2018年9月23日

(画像クレジット: JAXA)

21

第1回タッチダウン着地点選定



(画像クレジット: JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 金沢大, 産総研)

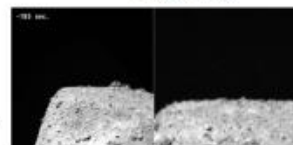
22

分離:2019年4月5日

リュウグウ表面からのイジェクタ



スケールは25m

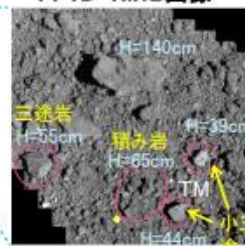
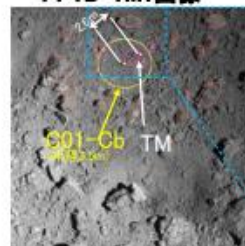


©Arakawa et al.,
Science 2020

23

PPTD-TM1画像

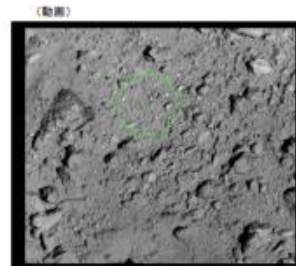
PPTD-TM1B画像



C01-Cb 中心

Hは推定された高さの最大値(最も高い推定値)
※岩の名称はニックネームであり、正式な名称ではない。

TM=ターゲットマーカ



タッチダウン候補地点付近のDEM (Digital Elevation Map)

(画像クレジット) JAXA、東京大、高知大、立教大、名古屋大、千葉工大、明治大、金澤大、産総研、右図はさらに神戸大、産業医大を追加

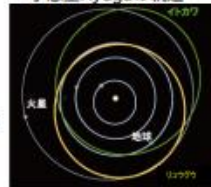
25

- ・ コマ(独楽)型、円形の赤道形状
- ・ 半径: 平均 約450 m (赤道半径 約500 m、極半径約440 m)
- ・ 質量: 約4.5億トン (4.50×10^{11} kg、 GM : 約30 m^2s^{-2})※
- ・ 体積: 0.377 km^3
- ・ 密度: 1.19 $\text{g/cm}^3 \rightarrow$ Porosity は50%以上
- ・ 自転軸の向き: $(\lambda, \beta) = (180^\circ, -87^\circ)$
- ・ 赤道傾斜角: 約8°
- ・ 自転周期: $P = 7.63$ 時間(逆行自転)
- ・ 反射率因子(v -band): 0.02
- ・ フレーターの数密度: イトカワやエロスと同等
- ・ 多数のボルダー(岩塊)の存在: 最大のものは南極付近に存在(約130m)
- ・ 可視光におけるスペクトル: 平坦、赤道付近や極付近で青っぽい
- ・ 近赤外におけるスペクトル: 平坦な(少し赤みがかった)スペクトル、水による弱い吸収あり
- ・ 輝度温度: 強い roughness 効果あり(昼間における温度変化が小さい)、赤道付近で熱慣性がより大きい

(※赤道での重力は地球の約8万分の1、イトカワの数倍の重力となる)

(※赤道での重力は地球の約8万分の1、イトカワの数倍の重力となる)

小惑星Ryuguの軌道



(画像のクレジット: JAXA)



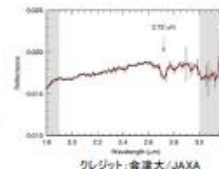
「画像クレジット: ONCチーム」

22

- ・リュウグウはダブルパイル天体（空隙率50%以上）
- ・衝突破砕によって作られた破片が再集積して誕生
- ・過去の自転周期は3.5時間程度であった可能性が高い（現在は7.6時間）
- ・赤道リッジ付近には新鮮な物質が露出
- ・2.72 μ mの微弱な吸収あり＝含水鉱物が存在
- ・内部加熱ないし衝突加熱を受けた天体が元の物質
- ・小惑星帯内側のボラナ族ないしオイリア族がリュウグウの母天体の起源である可能性（14億年ないし8億年前に衝突・再集積リュウグウの直接の母天体となる）



Watanabe et al. 2019



クレジット:倉澤大/JAXA

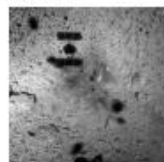
28

リュウグウについて分かったこと:その2

- 地球上に比べて7倍大きなクレーターが形成 → クレーターは重力によって形成が制限＝表面の物質の強度は弱い
- リュウグウの小惑星帯滞在期間は1000万年程度
- リュウグウ表面の赤黒い粒子は太陽による加熱・風化作用による → 一時的に太陽に接近する軌道にあった
- リュウグウ表面物質は、高空隙率 = ふわふわな宇宙塵から稠密な岩石になる途中の段階?
- リュウグウ表面物質は、非常にデコボコ(アア溶岩(ハワイ)と同程度)
- リュウグウは非常に黒い: 平均幾何アルベドは $4.0 \pm 0.5\%$ 、標準反射率は $1.87 \pm 0.14\%$ → 炭素含有量が $>2\text{wt.}\%$ と高い

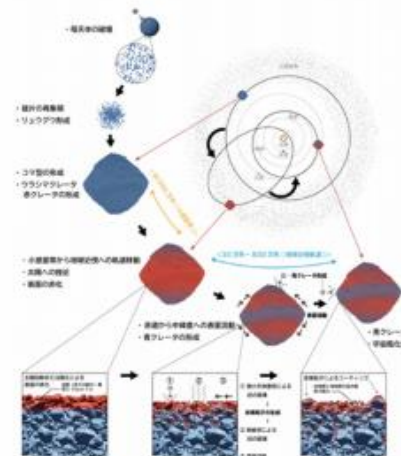


アア溶岩(野口星奈氏提供)
※リュウグウは数メートル四方での凹凸度合い、アア溶岩は数十センチメートル四方での凹凸度合い



(画像クレジット: JAXA 東京大、高知大、立教大、名古屋大、千葉工大、明治大、金沢大、産総研) 29

リュウグウの進化史

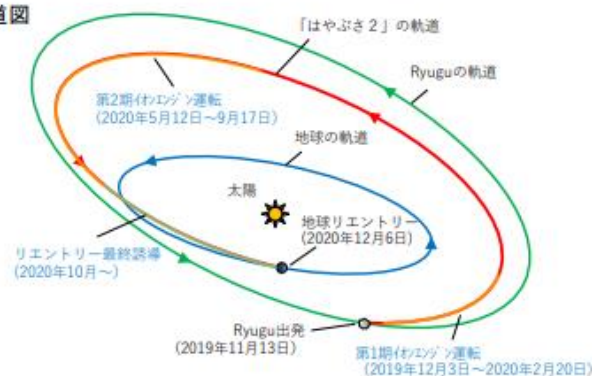


Morota et al. (2020)掲載図を一部改変し、軌道変化と対比させた図
(© 東大、JAXA)

30

リュウグウ出発から地球帰還まで

帰還フェーズ軌道図

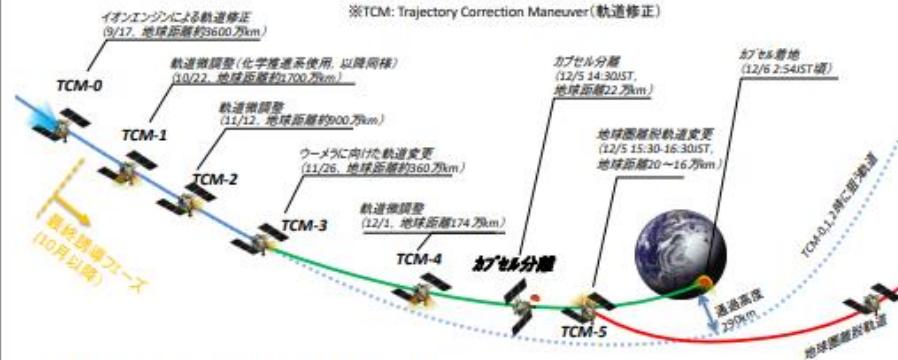


(画像クレジット: JAXA)

32

リエントリー最終誘導運用

※TCM: Trajectory Correction Maneuver (軌道修正)



- TCM-0,1,2時は、地球から200km以上離れた点を通る軌道に入れる。
- カプセル分離後、TCM-5によって探査機本体は地球圏を再離脱する。

(画像クレジット: JAXA)

33

TCM-3

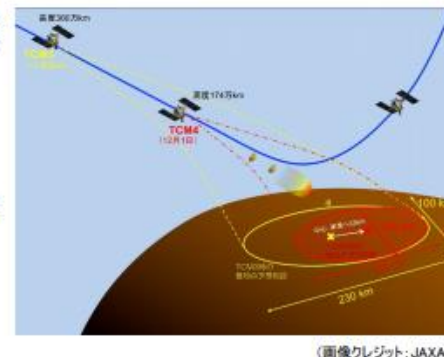
- 11月25日、豪州帰還安全責任者(CRSO: Commonwealth Return Safety Officer)から、「はやぶさ2」をオーストラリア・ウーメラ管理区域(WPA)への再突入軌道へ遷移させる許可を取得。
- 11月26日、16時頃(日本時間)、化学エンジン(RCS)による精密軌道制御の3回目となるTCM-3を行い、予定通りの軌道修正が達成。
- 軌道制御量は約1.2m/s



35

TCM-4

- 12月1日にTCM-4の軌道制御を実施
- TCM-4における軌道制御量は約4.6cm/s
- TCM-4によりカプセルの着地予定領域は南東に33km移動



36

再突入カプセル回収計画

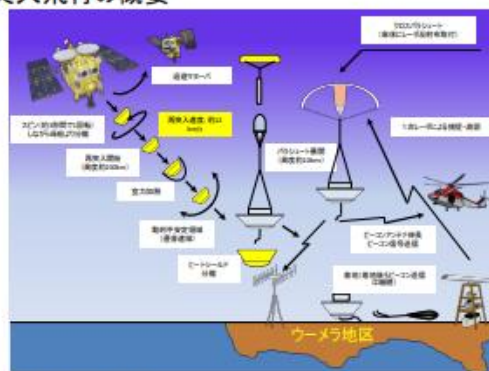
再突入飛行の概要

■ 再突入の飛行シーケンス

- 大気圏再突入
(「はやぶさ2」はカプセルのみ再突入)
- ↓
- ヒートシールド分離
- ↓
- パラシュート開傘
- ↓
- ビーコン発信
- ↓
- 着地

■ 着地点:

オーストラリア ウーメラ地区



(画像クレジット: JAXA)

42

カプセル着地場所:ウーメラ



(画像クレジット: JAXA)

Australian Air Forceが公開している閉鎖領域



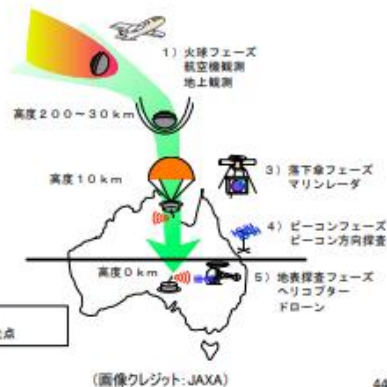
出典:

https://www.airforce.gov.au/sites/default/files/attachment_a_-_access_zones_plus_stuart_highway_and_partial_green_zone_exclusion3-9_december_2020.pdf?utm_source=miragenews&utm_medium=miragenews&utm_campaign=news

43

カプセル回収オペレーションの概要

- 探索(火球フェーズ)
 - ・ 光学観測(地上)
 - 光跡を数局で計測(三角測量の原理)
 - ・ 光学観測(航空機)
 - 光跡を雲上から計測(天候の影響を受けない)
- 探索(落下傘フェーズ)
 - ・ 方向探索(ビーコン)
 - ビーコンを計5局*1で受信(三角測量の原理)
 - ・ 方向探索(マリンレーダ) *2
 - 方向と距離を計測可。
- 探索(地表探索フェーズ)
 - ・ 方向探索(ヘリコプター)
 - 着地後のビーコンをヘリコプターで探索
 - ・ ドローン*2
 - 上空から空撮。画像解析で識別。
- 輸送
 - ・ 安全化処理、分解
 - ・ カプセル内のガス採取*2、輸送(日本へ)



*1...「はやぶさ」では4局
*2...「はやぶさ」ではなかった点

44

カプセル回収準備(実際)



MRSアンテナ組立完了



有翼無人機(UAV)



DFSアンテナ組立完了
(画像クレジット: JAXA)



光学観測(GOS)の様子



回収したサンプルをヘリコプターからQLFに
運ぶ様子

45

再突入カプセル の火球観測



(画像クレジット: JAXA)

クーバーベディの火球



49

再突入カプセルの発見



(画像クレジット: JAXA)

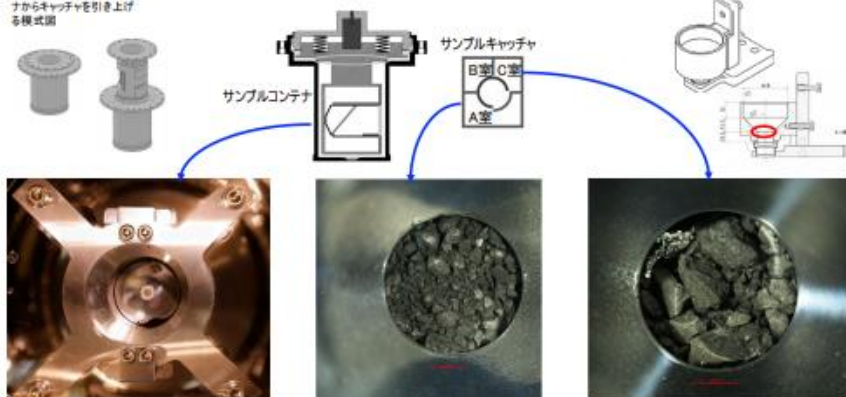


53

リュウグウのサンプル

回収容器の外観

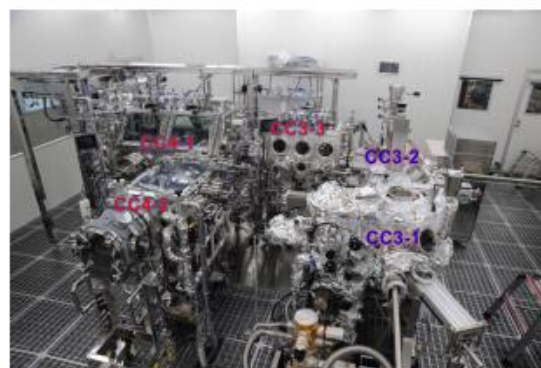
CC3-1内でサンプルコンテナからキャッチャーを引き上げる模式図



(画像クレジット: JAXA)

62

クリーンチャンバー概要

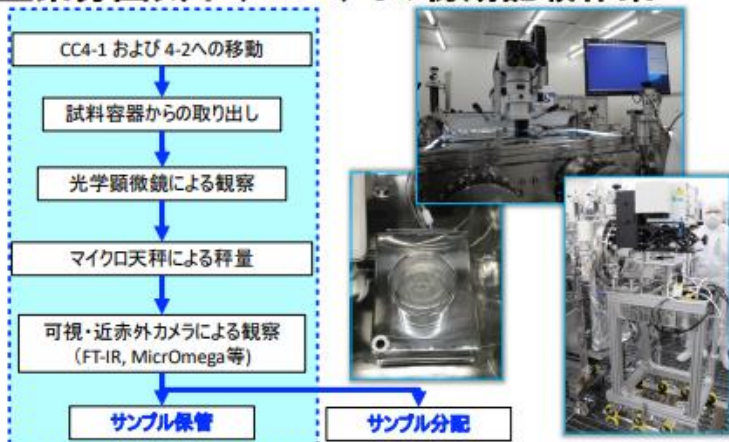


- CC3-1:
真空中でのサンプルコンテナの開封
- CC3-2:
真空中でのサンプル採取
- CC3-3:
真空中から窒素環境への移行
- CC4-1:
サブミクロンサイズの粒子の処理
- CC4-2:
比較的大きな粒子(> mm)の処理・観察・選別

(画像クレジット: JAXA)

66

窒素雰囲気下(CC-4)での初期記載作業



(画像クレジット: JAXA)

67

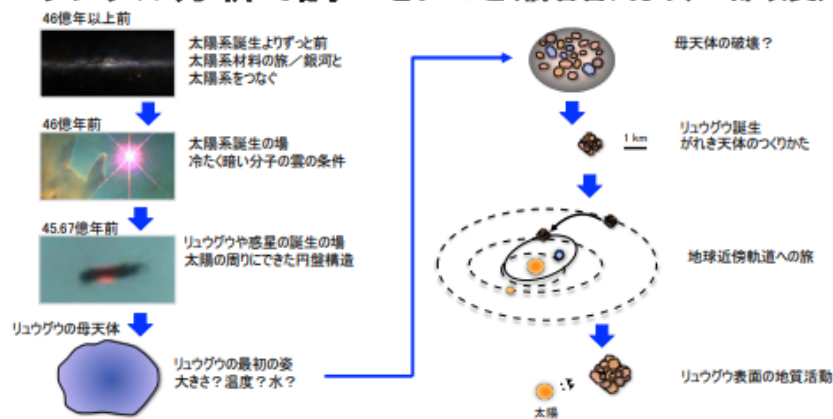
サンプル分配スケジュール(予定)



(画像クレジット: JAXA)

68

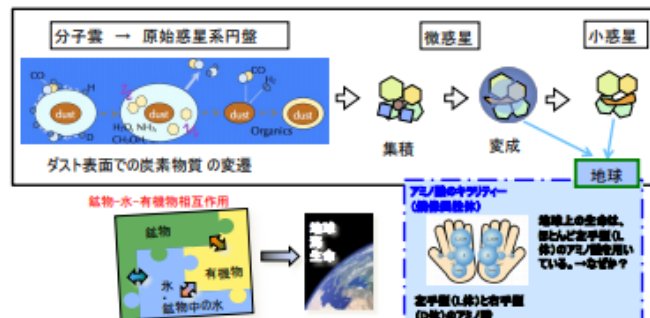
サンプル分析で調べたいこと(橋本氏より、一部改変)



69

「はやぶさ2」による有機物の解明

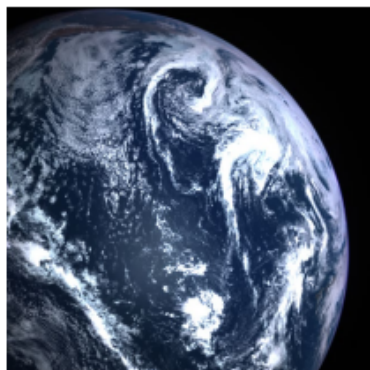
- (1) 水や有機物などの揮発性物質は、分子雲の中で塵(ダスト)表面で生成した。
- (2) 原始太陽系円盤内や微惑星で水質変成・熱変性を受けて変化した。
- (3) 最終的に地球に蓄積して地球生命の材料になった。



(画像クレジット: JAXA)

70

ONC-Tによる撮像:「行ってきます。地球」



(画像クレジット: JAXA, 産総研, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大)

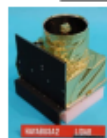
再出発直後の地球カラー画像

- 地球中心からの距離: 8.8万km
- 時刻: 日本時間12/6(日)6:30am
(地球最接近から約4時間後)
- 画面右上に南極、上端に南米西岸が写っている。

72

LIDAR光リンク実験に成功

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レーザリンクに成功

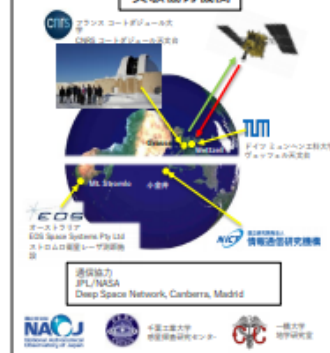


LIDAR

成果

- フランス グラス局で2Wayリンク(アップリンクとダウンリンク)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
- 2Wayリンクとしては、2005年のメッセンジャー探査機による2400万kmの距離に次ぐ世界2番目の距離になる。ただし、メッセンジャー探査機は非同期での実験であった。「はやぶさ2」では同期による実験であり、同期による実験成功は世界初。
- 1Wayリンク(アップリンク)に関しては、3局(グラス局、NICT小金井局、EOSストロムロ局)で成功した。

実験協力機関



74

拡張ミッション

- ・探査機はまだ運用できる状態
- ・イオンエンジンの燃料であるキセノンは50%残っている



更なる探査を行いたい

- ・長期宇宙航行という技術的な挑戦
- ・これまで探査されたことがない種類の天体(大きさ30m、自転周期10分)
- ・プラネタリーディフェンスに関連した科学と技術

「はやぶさ2」ミッション(2014-2020)



拡張ミッション(2021-2031)

飛行中: 黄道光や系外惑星の観測を継続

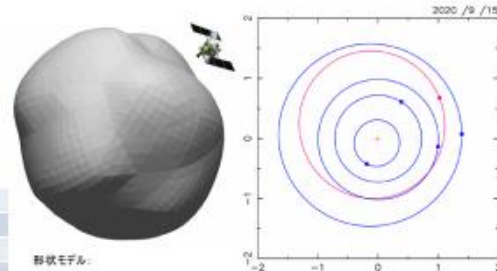


(画像クレジット: JAXA)

75

拡張ミッションの目的地: 1998 KY26

- ・1998年5月28日に、米国のスペースウォッチ・プロジェクトによって発見(このときの地球最近距離は約80万km)
- ・1998年6月にレーダによる観測が行われる(S. Ostroらによる)。



形状モデル:

画像クレジット:

Auburn University, JAXA
1998 KY26 の形状モデルの元データ:
Ostro et al. (1999), Radar and optical
observations of asteroid 1998 KY26,
Science, 285, 5, 427, 557-559.

軌道図:

赤色が1998 KY26の軌道で、青色が惑星の軌道(内側から水星、金星、地球、火星)。天体の位置は、2020年9月15日現在。(画像クレジット: JAXA)

76

「はやぶさ2」のまとめ

「はやぶさ2」が成し遂げた工学上の世界初

■総飛行時間: **2195日**
(2194日13時間32分ほど)

- ・打上げ:
2014年12月3日(水)13時22分04秒
- ・カプセル着地(=消感):
2020年12月6日2時54分

■総飛行距離: **52億4千万km**

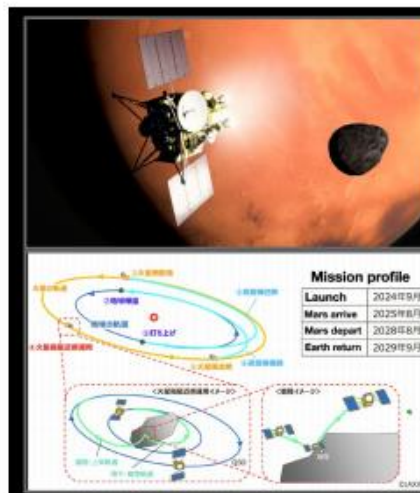
- ・往路: 31億km
- ・小惑星近傍: 13.2億km
- ・復路: 8.2億km

- (1) 小型探査ロボットによる小天体表面の移動探査
- (2) 複数の探査ロボットの小天体上への投下・展開
- (3) 小惑星での人工クレーターの作成とその過程・前後の詳細観測
- (4) 天体着陸精度60cmの実現
- (5) 同一天体2地点への着陸
- (6) 地球圏外の天体の地下物質へのアクセス
- (7) 最小・複数の小天体周回人工衛星の実現
- (8) 地球圏外からの気体状態の物質のサンプルリターン
- (9) C型小惑星の物質のサンプルリターン

「はやぶさ2」の学術的成果 ← 現在、論文で発表中

- (1) C型微小小惑星の物理的性質の解明
- (2) 小惑星リュウグウの軌道進化
- (3) C型小惑星の物質分析 ← 今後

79



MMX
Martian Moons Exploration

火星衛星探査計画

世界初火星圏住還ミッション
火星衛星フォボス・ダイモスの謎に迫る

はやぶさ2に続く3機目のサンプルリターンミッション
火星衛星フォボスからのサンプル採取を狙う

概要

原始太陽系における「有機物・水の移動、天体への供給」過程の解明に貢献するため、火星衛星に含まれる含水鉱物・水・有機物などを解析することにより、水や有機物の存在を明らかにするとともに、火星衛星の由来を解明する、世界初の火星衛星サンプルリターンミッション。

<http://mmx.isas.jaxa.jp>

@mmx_jaxa_jp