

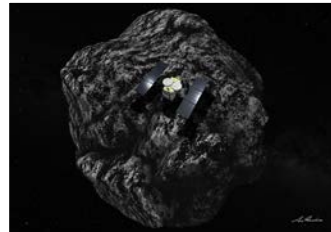
はやぶさ2のこれまでとこれから



(イラスト 池下章裕氏)



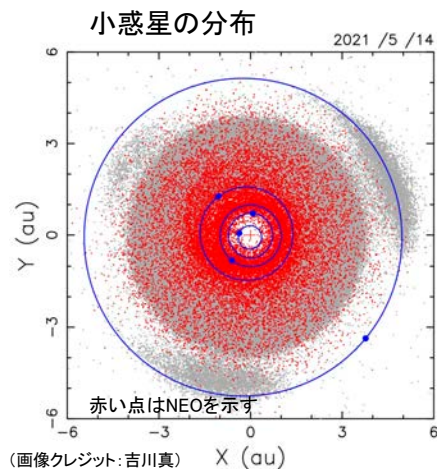
(画像クレジット: JAXA)



(イラスト 池下章裕氏)

2023年12月17日@日本橋三井タワー、東京都
吉川真(JAXA はやぶさ2#チーム)

太陽系:小惑星・彗星



現在(2023年12月10日)、発見され軌道が
求められている小天体:

小惑星: 1,329,548個
彗星: 4,594個

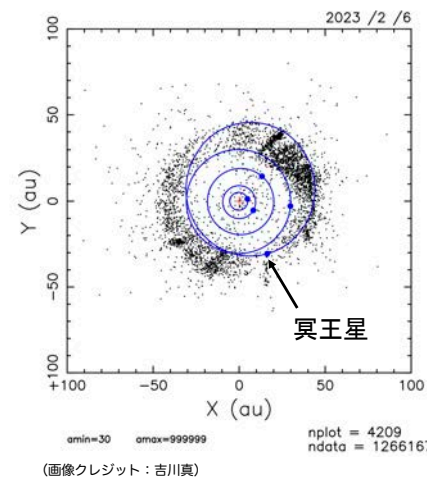
(確定番号付き小惑星: 640,000個)

地球軌道に接近する小惑星: 33,663個
(NEO: Near Earth Object)

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>

小惑星についての最近の情報

太陽系:太陽系外縁天体



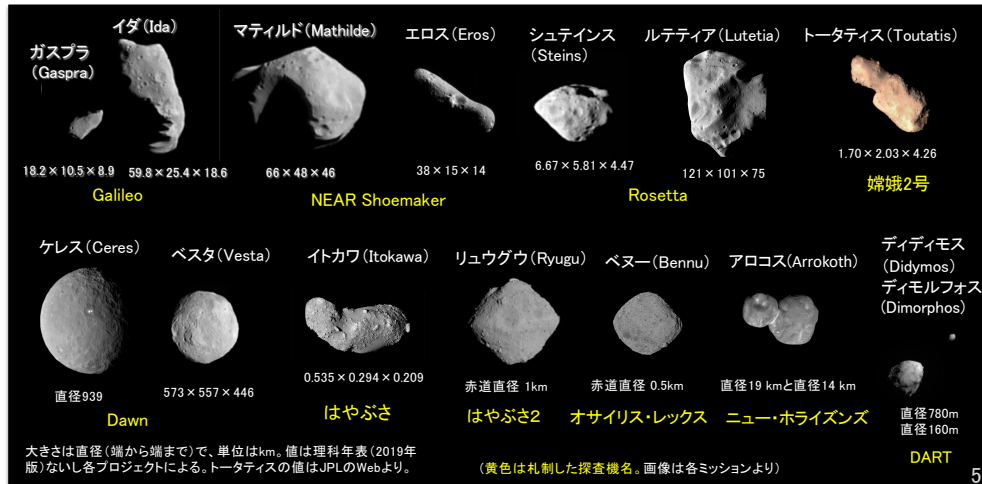
太陽系外縁天体:海王星軌道の外側
にある天体

約5272個(Distance Objects)

2023年12月10日現在

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>

探査機が接近した小惑星



5

DART探査機による小惑星の軌道変更実験

2022年9月26日



<https://dart.jhuapl.edu/Gallery/> より

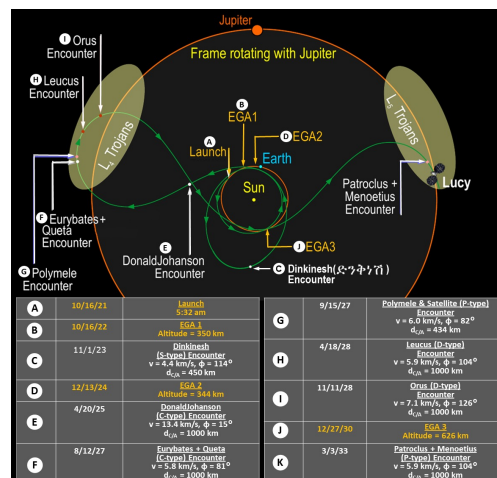
6

Lucy(ルーシー)ミッション

- 木星トロヤ群の探査: 2027年～2033年、5個のトロヤ群小惑星をフライバイ(衛星を含めると8個)
- 打上げ: 2021年10月16日
- ルーシー: 猿人女性の化石の名前(人類の起源を象徴)



<https://lucy.swri.edu/mission/Tour.html>



7

Lucy: Dinkineshフライバイ

2023年11月1日、小惑星Dinkinesh(ディンキネシュ)をフライバイ



Credit: NASA/Goddard/SwRI/Johns Hopkins APL/NOIRLab

NASA/Goddard/SwRI/Johns Hopkins APL

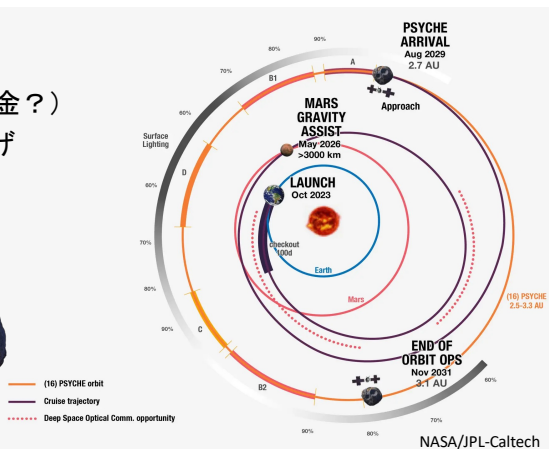
8

Psyche(サイキ)ミッション

- 金属質の小惑星の探査
- 小惑星プシケ(Psyche):
M型(鉄とニッケルの合金?)
- 打ち上げ: 2023年10月13日打ち上げ
- プシケ到着: 2029年8月(予定)



PsycheミッションWebより



<https://science.nasa.gov/mission/psyche/> g

Psyche(サイキ)ミッション(動画)



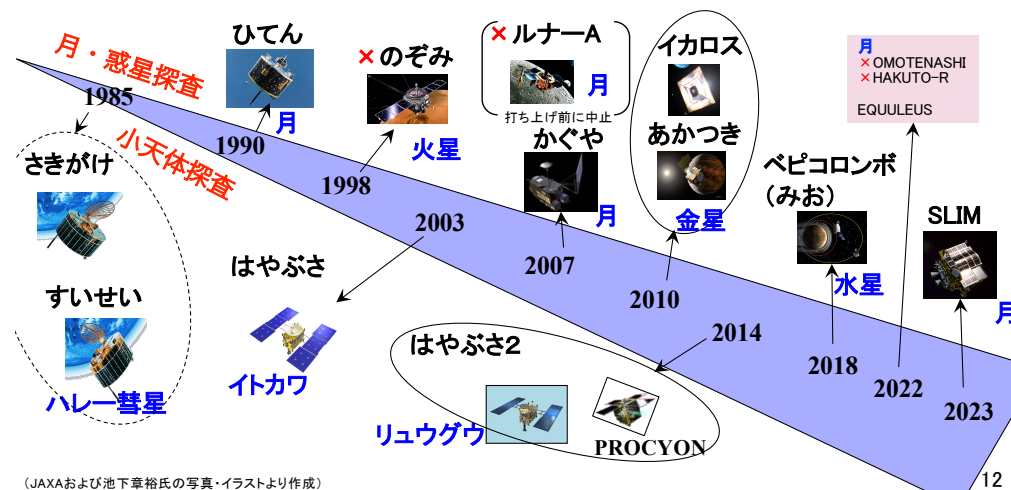
NASA's Psyche Mission to a Metal-Rich Asteroid (Teaser Trailer)

<https://psyche.asu.edu/galleries/>

10

「はやぶさ2」についての基本情報

日本の太陽系天体探査



(JAXAおよび池下章裕氏の写真・イラストより作成)

12

「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（1番目は「はやぶさ」）
- 目標天体: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、特に太陽系初期の水・有機物
- 工学目的:往復探査を確実に実行する技術



(画像クレジット: JAXA)

13

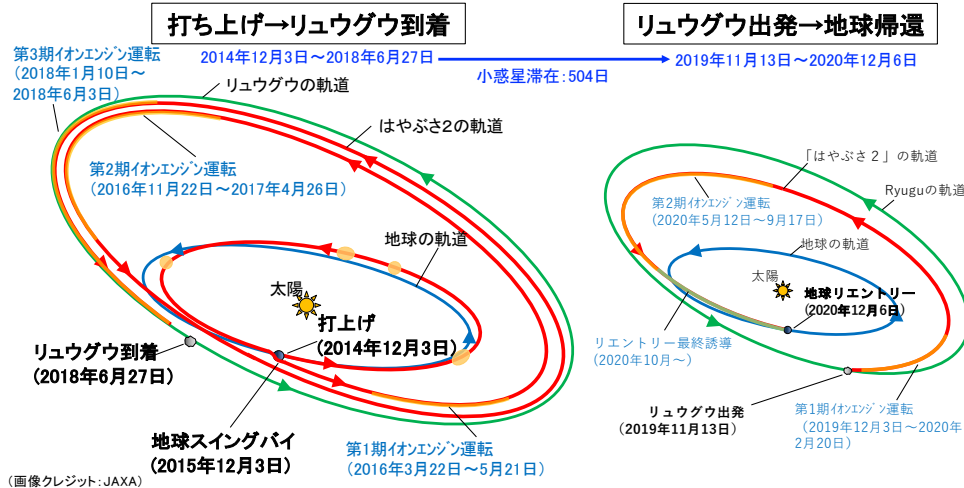
「はやぶさ2」探査機



(画像クレジット: JAXA)

14

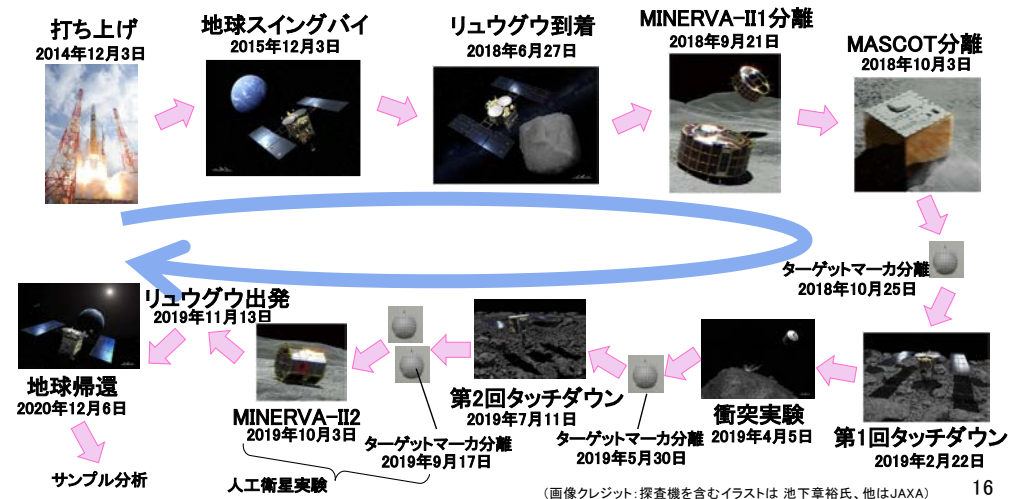
「はやぶさ2」: 打ち上げから地球帰還まで



(画像クレジット: JAXA)

15

「はやぶさ2」ミッション



(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)

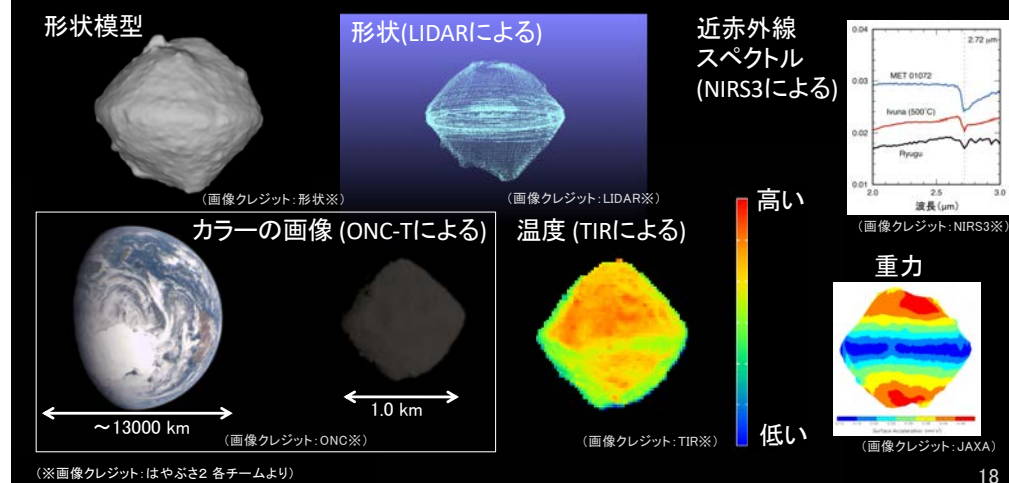
16

小惑星リュウグウ



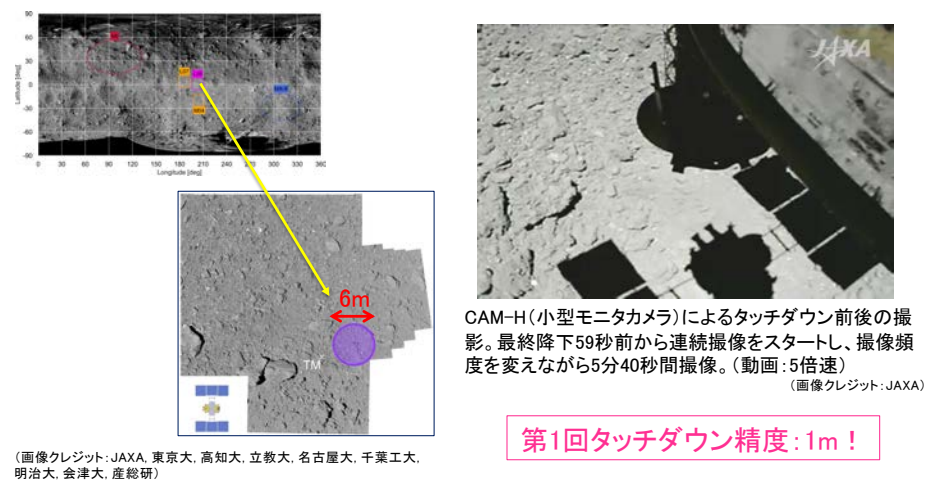
17

リュウグウの物理観測



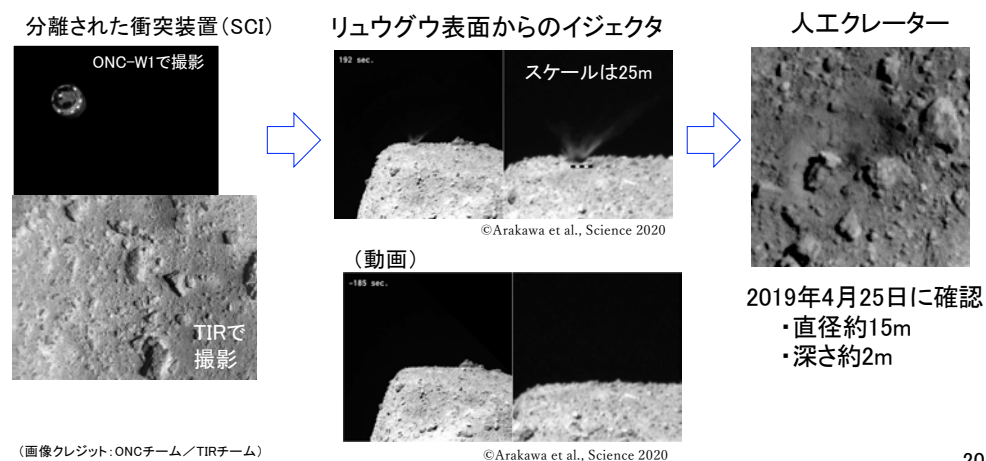
18

第1回タッチダウン: 2019年2月22日



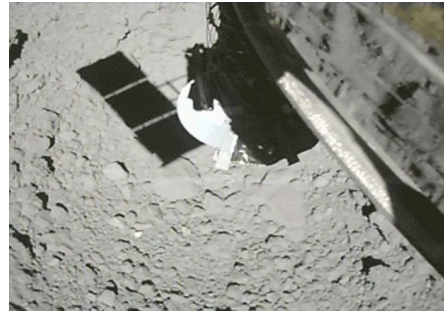
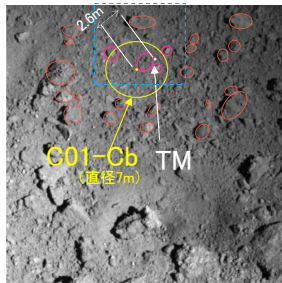
19

人工クレーター生成: 2019年4月5日



20

第2回タッチダウン:2019年7月11日



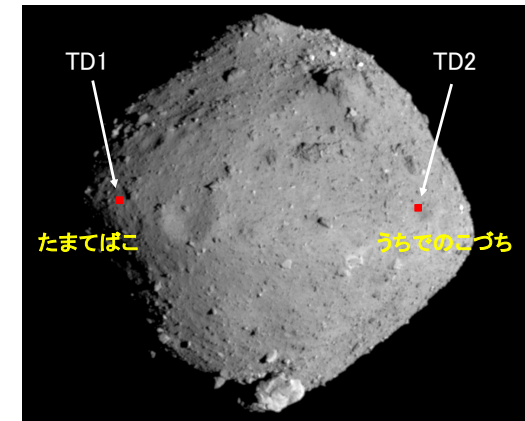
小型モニタカメラ (CAM-H) による画像 (10倍速の動画)
 撮影時刻 2019年7月11日
 始め 10:03:54 (高度約8.5m) 終わり 10:11:44 (高度約150m)
 ※撮影間隔は0.5秒～5秒

第2回タッチダウン精度:60cm!

(画像クレジット:JAXA)

21

1回目 (TD1) と2回目 (TD2) のタッチダウンの場所



2019年5月20日
 ホームポジション
 から撮影

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

22

再突入カプセル の地球帰還

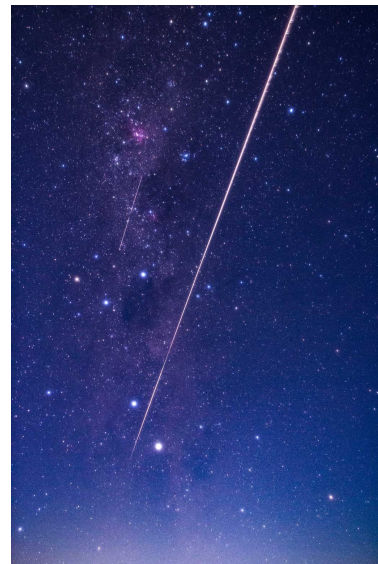
2020年12月6日

(動画)



クーバーペディで観測された火球となったカプセル

(画像クレジット:JAXA)



23

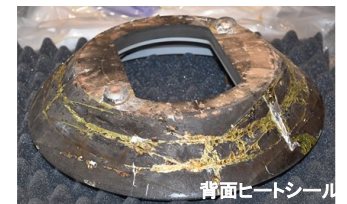
再突入カプセル(はやぶさ2)



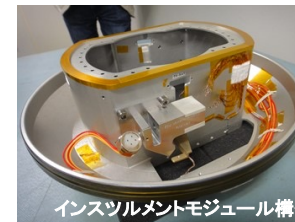
パラシュート



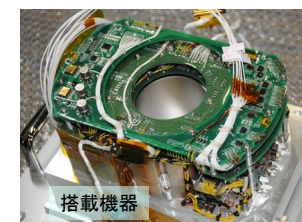
前面ヒートシールド



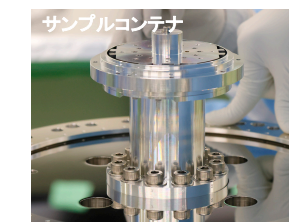
背面ヒートシールド



インストルメントモジュール構体



搭載機器

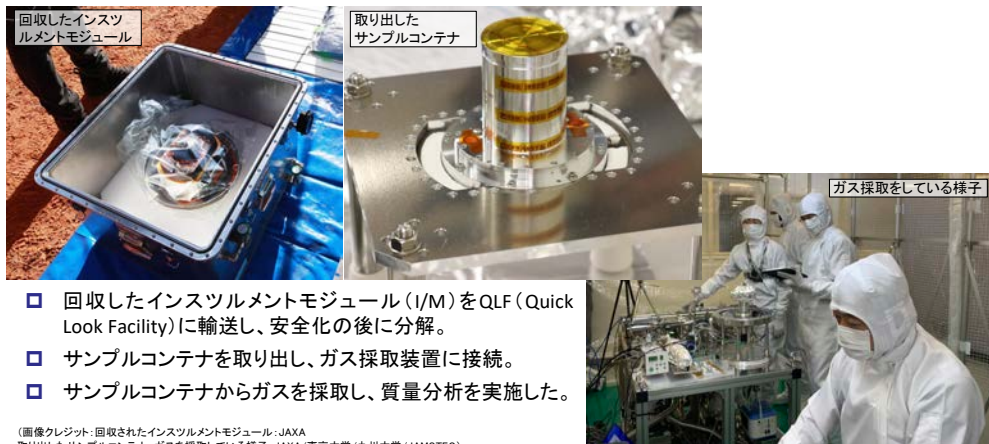


サンプルコンテナ

(画像クレジット:JAXA)

24

ガス採取



25

小惑星リュウグウのサンプル取得成功！

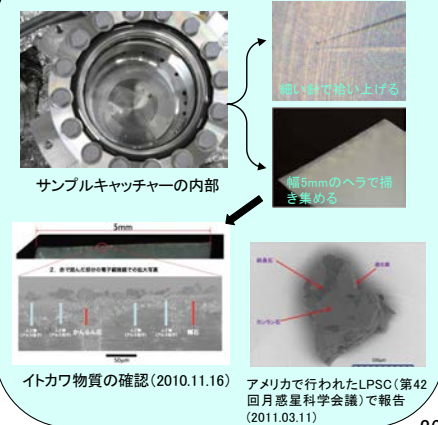
5.4g!



キャッチャーA室の蓋を外し、A室内の粒子を確認した。
2020年12月15日、11:10頃

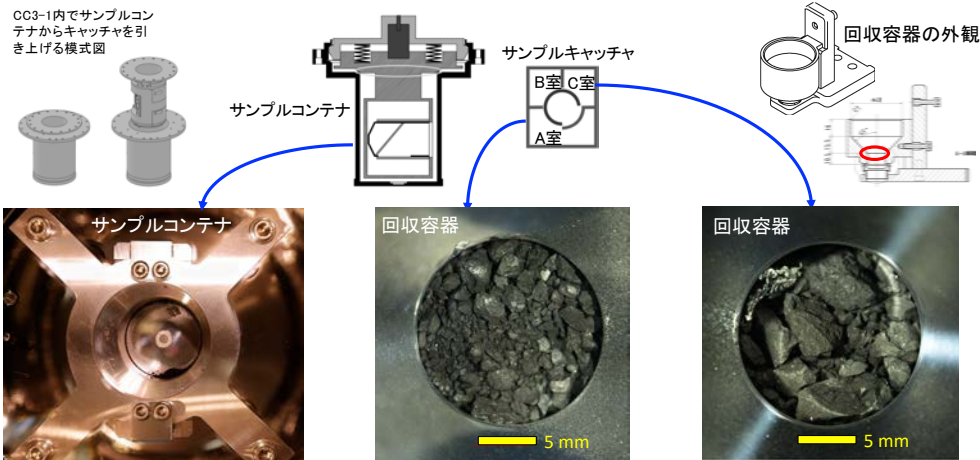
(画像クレジット: JAXA)

「はやぶさ」のとき(2010年)は・・・



26

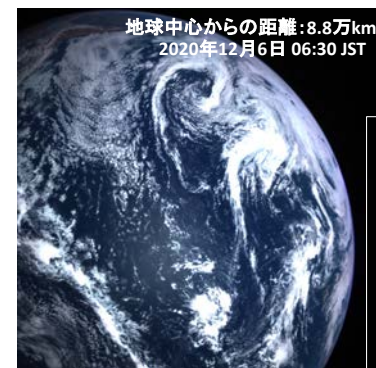
リュウグウのサンプル



(画像クレジット: JAXA)

27

「はやぶさ2」が地球に戻ってきたときの写真



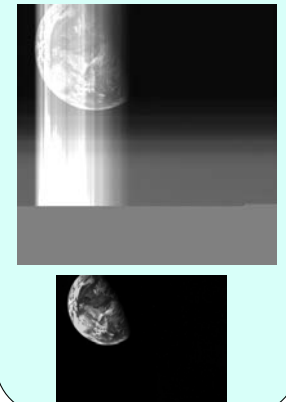
(動画)



2020年12月6日～12日撮影
(距離: 約20万 km～250万 km)

(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)

「はやぶさ」のとき
(2010年6月13日)



28

はやぶさ2拡張ミッション:はやぶさ2#

#: SHARP = Small Hazardous Asteroid Reconnaissance Probe



- ・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



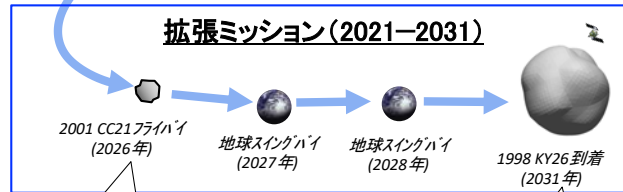
更なる探査へ

- ・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

(画像クレジット: JAXA)

「はやぶさ2」ミッション(2014-2020)

拡張ミッション(2021-2031)

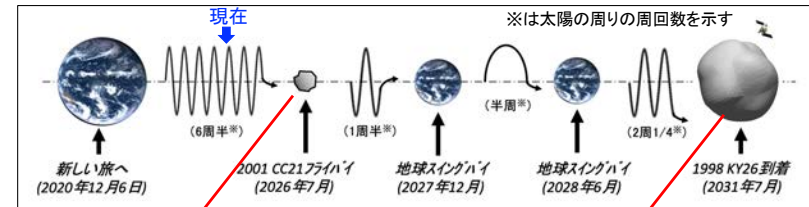


2001 CC21
直径: 約700m(アルベド0.15を仮定)
自転周期: 約5時間
形状不明
L型 → 2022年以降の観測ではS型

1998 KY26
直径: 約30m
自転周期: 約10.7分
レーダーによる形状推定
炭素質の可能性

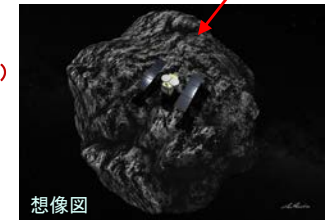
29

はやぶさ2拡張ミッション:はやぶさ2#



想像図

←高速フライバイ
探査
(相対速度: 5km/s)



想像図

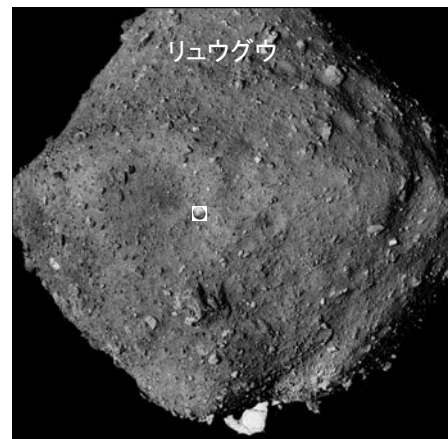
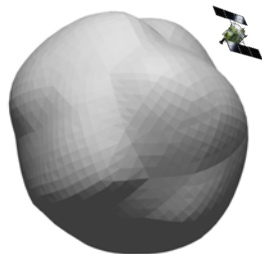
←非常に小さい
小惑星のランデ
ブー探査
(天体サイズ30m)

(画像クレジット: JAXA、イラスト: 池下章裕氏)

30

とても小さな小惑星 1998 KY26

■画像クレジット
左: Auburn University, JAXA
右: リュウグウ画像: 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
右: 1998 KY26画像: Auburn
University, JAXA



形状	球状(レーダ観測より)
平均直径	約30 m程度
自転周期	10.7 分(0.178hr)
タンブリング運動	短期時間変化は確認されず
スペクトル型	炭素質小惑星の可能性あり
軌道長半径	1.23 天文単位
公転周期	1.37年(500日)

31

「はやぶさ2」ミッションのまとめ: 資料

・ミッションのまとめビデオ

https://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20220629_movie/
短縮版

https://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20220629_movie/

・ミッションのまとめパンフレット

・拡張ミッションのパンフレット

<https://www.hayabusa2.jaxa.jp/enjoy/material/>

32

はやぶさ2ミッション:まとめビデオ(3分バージョン)



「はやぶさ2」:工学上の世界初

- 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) 地球圏外小天体の地下物質の採取
- 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

34

「はやぶさ」そして「はやぶさ2」が 教えてくれたこと

「技術」や「科学」について多くのことを教えてくれましたが、それに加えて…

- 世界初に挑戦することのすばらしさ
 - ・初めて天体を見たときの感動
 - ・困難に打ち勝つ忍耐とチームワークの大切さ
- 世界初に挑戦することの難しさ
 - ・想定外の出来事 ← 柔軟な対応能力
 - ・予期せぬトラブル ← 冷静な対応
- 現代における“真”の冒険の重要性
 - ・若い世代に(orすべての世代へ)夢を
 - ・科学と技術へ強い関心を

事前の予測
事前の準備

「はやぶさ2」
の次へ…

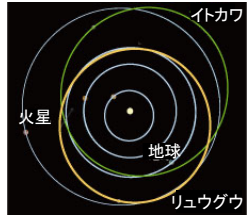
35

小惑星リュウグウについて

(162173) Ryugu のデータ

リュウグウの軌道データ

発見	1999年5月10日 リニアチーム
軌道長半径	1.20 au
軌道離心率	0.19
軌道傾斜角	5.88度
近日点距離	0.96 au
遠日点距離	1.42 au
軌道周期	1.30 年



(画像クレジット: JAXA)

リュウグウの物理データ

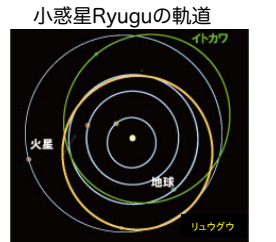
形状	コマ型  過去、自転周期が3.5時間であった可能性あり。 ラブルパイル構造
自転周期	7.63262 ± 0.00002 h (~7時間38分)
自転軸の向き $[\lambda, \beta]$	$[179.3^\circ, -87.44^\circ]$
大きさ(直径)	赤道 502 ± 2m 極 438m ± 2m
質量	$(4.50 \pm 0.06) \times 10^{11}$ kg
体積	$(3.77 \pm 0.05) \times 10^8$ m ³
全体の平均密度	1.19 ± 0.02 g/cm ³
空隙率	more than 50%
スペクトル型	Cb Sugita et al. (2019) Science
幾何アルベド	4.0 ± 0.5% Tatsumi et al. (2020), A&Ap

Watanabe et al. (2019) Science 364 37

リュウグウの初期観測結果

名称 : (162173) Ryugu (リュウグウ)
仮符号 : 1999 JU₃ ※1999年5月に発見された小惑星

- 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、 $GM \approx 30$ m³s⁻²) ※
- 体積: 0.377km³
- 密度: 1.19g/cm³ → 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
- クレーターの数密度: 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



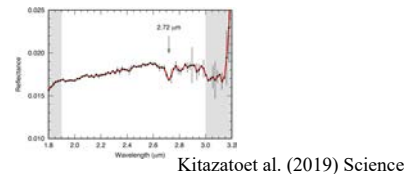
(画像のクレジット: JAXA)



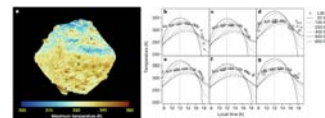
(画像クレジット: ONOチーム) 38

探査機からの観測でリュウグウについて分かったこと

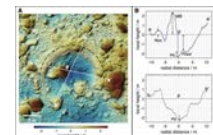
- 密度が小さい(1.19g/cm³) → リュウグウはラブルパイル天体(空隙率50%以上)
- 形がコマ型 → 過去の自転周期は3.5時間程度であった可能性が高い(現在は7.6時間)
- 2.72μmの微弱な吸収 → 含水鉱物が存在
- 黒い(反射率が小さい) → 炭素を多く含む
- 大きな人工クレーター → 表面強度が小さい
- 暖まりやすく冷めやすい → 多孔質の岩
- 表面物質が変質 → 一時的に太陽に接近



Kitazato et al. (2019) Science



Okada et al. (2020) Nature



Arakawa et al. 2020 Science 39

探査機からの観測でリュウグウについて分かったこと

リュウグウの軌道変化

リュウグウの母天体は、小惑星帯の中の内側の領域で形成された

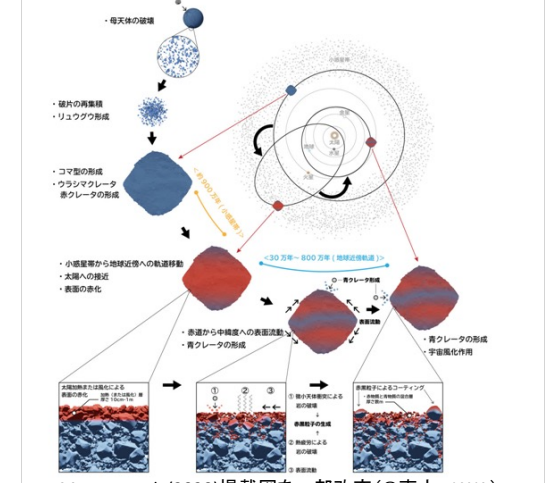
リュウグウは、ポナ族ないしオイラリア族で誕生した(?)

Sugita et al. (2019) Science

リュウグウの軌道は大きく変化し、太陽にかなり接近していた時期があった。

Morota et al. (2020) Science 368

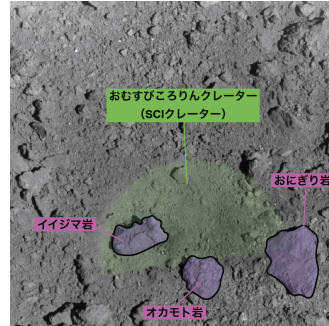
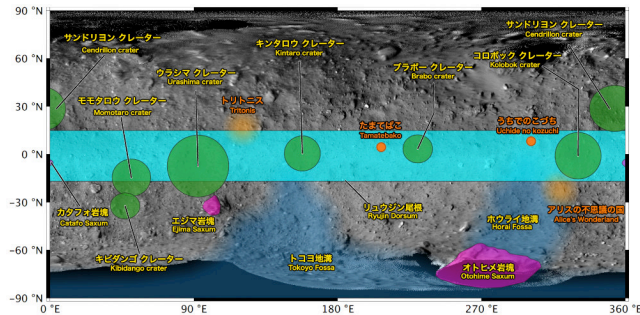
現在の軌道



Morota et al. (2020)掲載図を一部改変(©東大、JAXA) 40

リュウグウ表面の名前

人工クレーター関連名称



トリトニス (MINERVA-II1の着陸地)、アリスの不思議の国 (MASCOT着陸地)、たまてばこ (1回目のタッチダウン地点)、うちのこづち (2回目のタッチダウン地点)、また人工クレーター関連名称はニックネーム (愛称) で、国際天文学連合 (IAU) に認められた地名ではない。他の地名はIAUで認められた正式名称である。

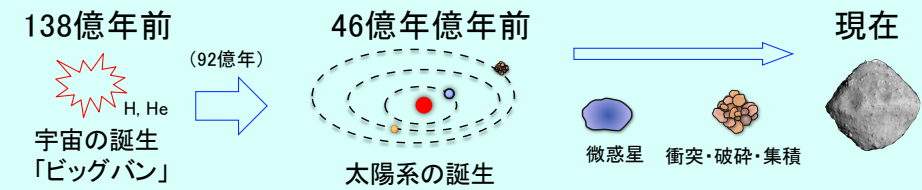
(画像クレジット: ONC※)

41

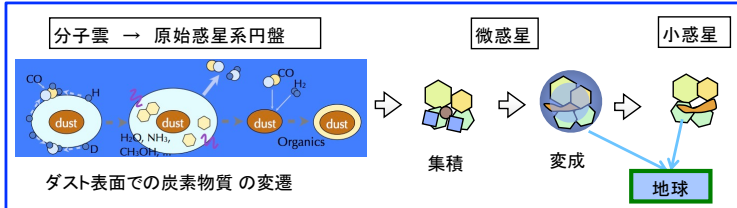
リュウグウサンプルの分析結果

サンプル分析で調べたいこと

宇宙の歴史



物質の変化



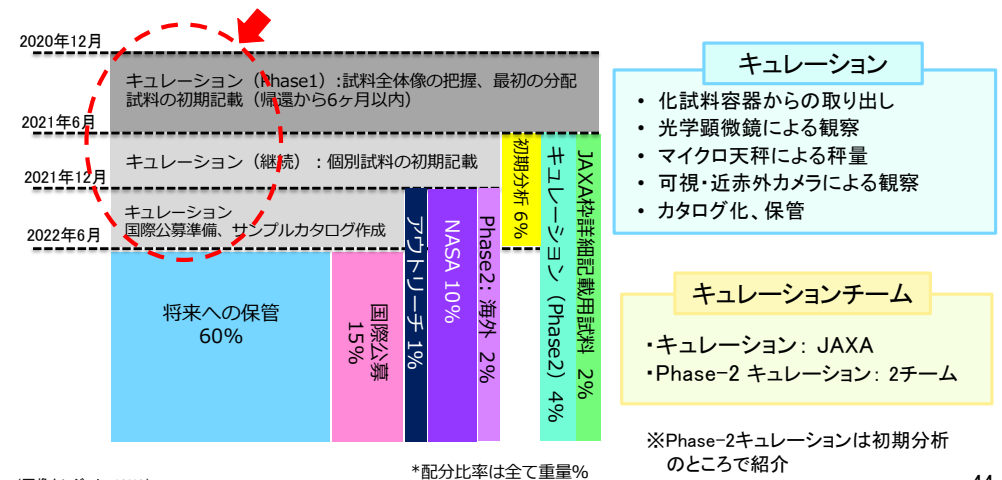
生命の起源への手がかり



(画像クレジット: JAXA)

43

サンプルのキュレーション



キュレーション

- ・ 化試料容器からの取り出し
- ・ 光学顕微鏡による観察
- ・ マイクロ天秤による秤量
- ・ 可視・近赤外カメラによる観察
- ・ カタログ化、保管

キュレーションチーム

- ・ キュレーション: JAXA
- ・ Phase-2 キュレーション: 2チーム

※Phase-2キュレーションは初期分析のところで紹介

(画像クレジット: JAXA)

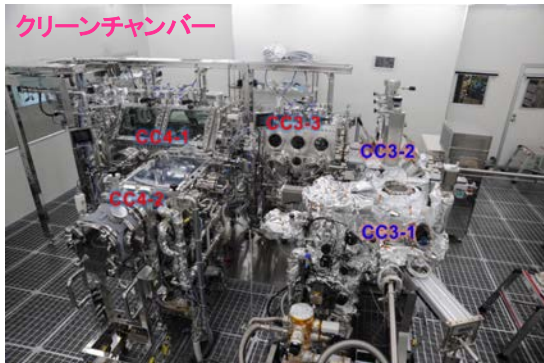
*配分比率は全て重量%

44

リュウグウ試料のキュレーション作業

地球環境からの汚染を避けるため、クリーンチャンバーから出すことなく、リュウグウ試料の初期記載作業が行われた。

クリーンチャンバー



- 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
 - ・ 粉体試料の観察
- *CC = クリーンチャンバー

(画像クレジット: JAXA)

45

キュレーションによる初期記載

初期分析・高次キュレーション用の選別に必要な情報の取得
光学顕微鏡(色・形・大きさ)・近赤外分光装置(鉱物・組成)・マイクロ天秤(質量)

CC3-3 およびCC4-2にある初期記載用の装置群



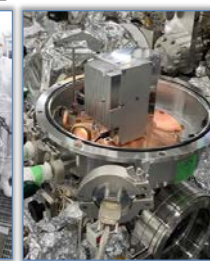
光学顕微鏡



秤量計



赤外分光計



赤外分光顕微鏡

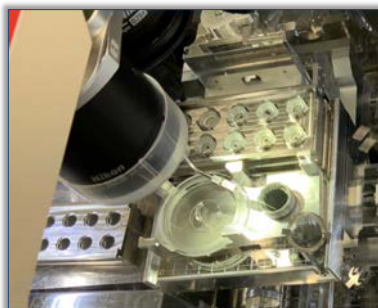
(画像クレジット: JAXA) 46

集合体試料と個別試料の選別

- ・ A・C室から大きな粒子(203個)を選別し、**個別に記載**
- ・ 集合体試料(7つの容器に分取)は、**容器ごとに記載**



A室試料の光学顕微鏡像(個別粒子選別前)



試料選別の様子(チャンバー外部から撮影)

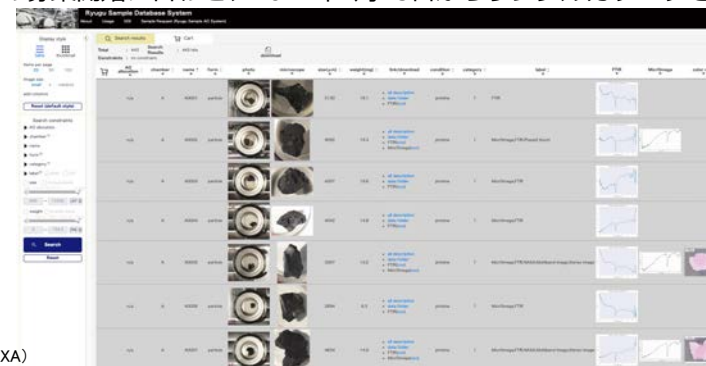


個別粒子の写真

(画像クレジット: JAXA) 47

リュウグウ粒子カタログ

国際公募の募集開始に合わせ、2022年1月13日からサンプルカタログを一般公開



(画像クレジット: JAXA)

カタログ公開先: <https://darts.isas.jaxa.jp/curation/hayabusa2/>

JAXA宇宙科学研究所地球外物質研究グループのHP <https://curation.isas.jaxa.jp/> からアクセス可能

48

キュレーションの結果:リュウグウ粒子の性質

水・有機物に富み、太陽系初期の情報を保持する、始原物質である可能性を示唆

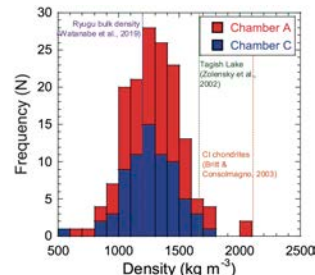
リュウグウ試料(A室の一部)の光学顕微鏡写真



- 顕微鏡観察の結果、**高温包有物が見られなかった**

Yada et al. Nature Astronomy, 2021

個別リュウグウ粒子の全体密度分布



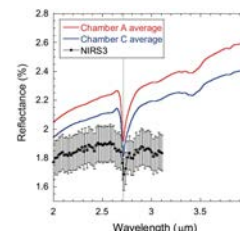
- リュウグウ粒子の**全体密度の平均値は既知のどの隕石よりも小さかった**。(平均 1.282g/cm³)
- 算出された空隙率は中間赤外カメラデータから推定された値と整合的(CIコンドライトを仮定すると46%)

49

キュレーションの結果:リュウグウ粒子の性質

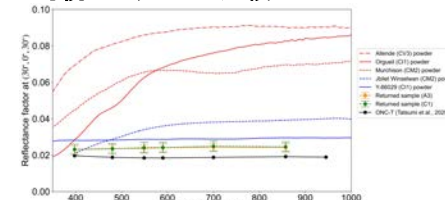
水・有機物に富み、太陽系初期の情報を保持する、始原物質である可能性を示唆

リュウグウ試料と探査機データの赤外反射スペクトルの比較



- 含水鉱物(2.7μm)、有機物、炭酸塩鉱物(3.4μm)**に特徴的な吸収特性が見られた
- 探査機搭載機器(NIRS3)のリュウグウ全球の値と同等で、**帰還試料がリュウグウ表層物質の代表である**事が明らかになった

リュウグウ試料、隕石、探査機データの可視スペクトルの比較



- 他の隕石よりも**暗く、平坦な反射特性**を示した。
- 探査機搭載機器(ONC-T)のリュウグウ全球の値と同等
⇒リュウグウ帰還試料は、太陽系の平均元素組成と最も近い、非常に始原的な隕石(CIコンドライト)と似ている

Yada et al. Nature Astronomy, 2021

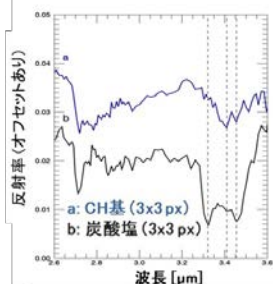
50

キュレーションの結果:リュウグウ粒子の性質

NH基・OH基・炭酸塩・有機物に富むサブミリメートル粒子の存在を示唆

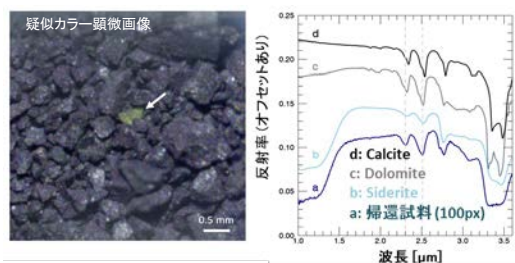
■リュウグウ試料の3.4μm吸収の特徴をマイクロオメガで粒子個別に調査

- (a) OH基(脂肪族有機化合物)の特徴 → 高温になっていない
- (b) 1%程度の粒子は炭酸塩の特徴 → 水質変成の証拠



■炭酸塩のうち最大の粒子(~0.4mm大)の特徴

- 擬似カラー画像にすると明瞭に識別可能
- 3.4μm吸収のほか、2.3μm、2.5μm、2.8μmから Fe²⁺を含む炭酸塩と思われる



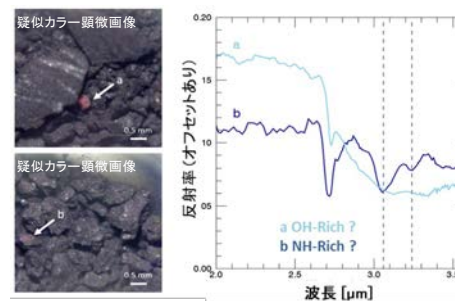
Pilorget et al. Nature Astronomy, 2021 51

キュレーションの結果:リュウグウ粒子の性質

NH基・OH基・炭酸塩・有機物に富むサブミリメートル粒子の存在を示唆

■リュウグウ試料の3.1μm吸収をマイクロオメガで粒子毎に確認

- (a) 幅広い吸収帯をもつ粒子 → OH基の可能性を示唆
- (b) 3.06μmと3.24μmの組み合わせ → NH基の可能性を示唆



◆全体平均の特徴

- 最も強い2.7μm吸収(OH基)全体が"含水"
- 低い反射率
- 0.05mm以上の高融点の含有物が無い
→ **CIコンドライト的。リュウグウの代表的物質!**

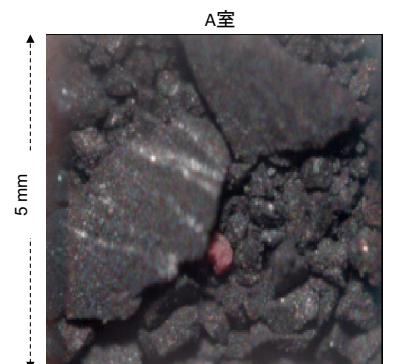
◆個別粒子の特徴

- 大部分は平均的な暗い、有機物を含む粒子
- 1%程度の粒子は炭酸塩、OH基やNH基を多く含む
→ 母天体の内部で変成度の異なる領域があり、破碎・再集積の過程でそれらが混合した!

Pilorget et al. Nature Astronomy, 2021 52

リュウグウ試料の分光観測結果

- ・ 2021年1月より帰還サンプルの非破壊・非汚染での初期記載の一環としてバルク試料の分光観察を開始
- ・ FTIR(連続赤外分光)及びMicrOmega(赤外分光顕微鏡)で測定
- ・ 共通する特徴
 - － 2.7 μ m付近の吸収 → 水に関連する特徴 (NIRS3でも観測された特徴)
 - － 3.4 μ m付近の吸収 → 有機物(-CH)や炭酸塩(-CO₃)などに関連する特徴
- ・ リュウグウからの帰還試料である確たる証拠
- ・ 水や炭素を含む始原的物質であることを示唆 (⇒今後の高精度・高解像度分析に期待)

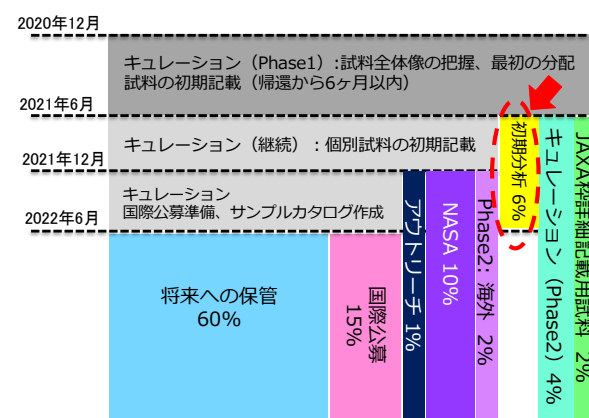


特定波長を選択して結像した顕微
赤外像
(赤色粒子) OH基の多い粒子

© MicrOmega/IAS/CNES

53

初期分析



(画像クレジット:JAXA)

*配分比率は全て重量%

初期分析于一ム

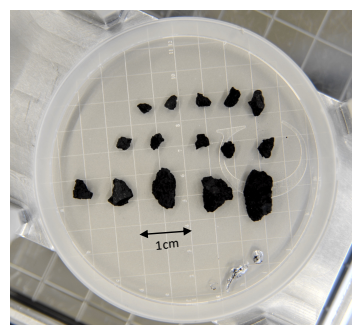
統括 橘 省吾(東京大学)

- ・化学分析チーム
 込本 尚義 (北海道大学)
- ・石の物質分析チーム
 中村 智樹 (東北大学)
- ・砂の物質分析チーム
 野口 高明 (京都大学/九州大学)
- ・揮発性成分分析チーム
 岡崎 隆司 (九州大学)
- ・固体有機物分析チーム
 薮田 ひかる (広島大学)
- ・可溶性有機物分析チーム
 奈良岡 浩 (九州大学)

14カ国・109の大学と研究機関・269名(開始時)

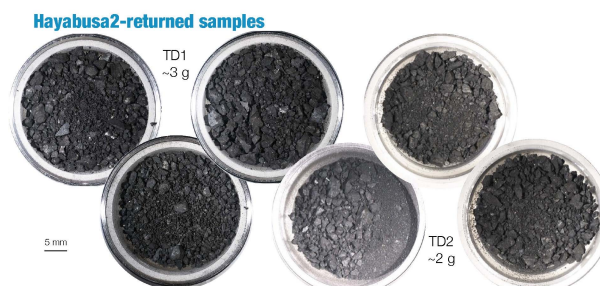
54

リュウグウのサンプル



大粒のサンプル

(credit: JAXA)



The returned particles are representative of Ryugu surface from spectroscopic and morphological perspectives (Yada+ 2021; Pilorget+ 2021; Tachibana+ 2022)

大粒のサンプル以外

55

個別のサンプルの例

橘省吾先生より



56

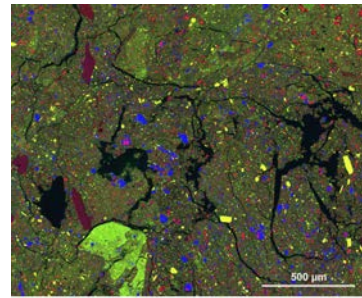
化学分析チームの結果

Yokoyama et al. Science, 9 Jun. 2022

- CIコンドライトと呼ばれるイヴナ型炭素質隕石と化学組成と同位体組成が同じ
- 太陽系が誕生してから約500万年後に水による変質(約40°Cで圧力は0.06気圧以上)
- その後100°C以上にはなっていない



リュウグウ試料は、これまで見つかった隕石を含め、人類が手に入れている天然試料のどれよりも、化学組成的に分化をしていない、最も始原始的な特徴を持っているものだと言える



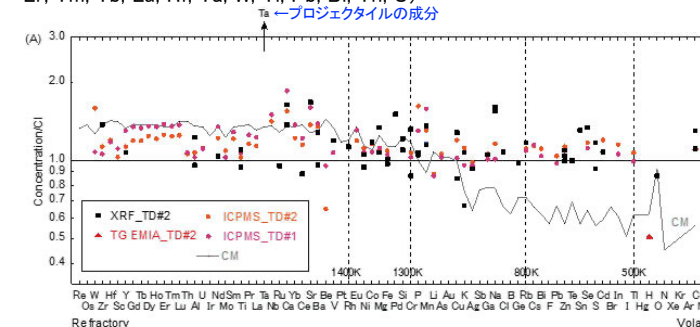
苦灰石 ブロイネル石 磁硫鉄鉱 磁鉄鉱 フィロケイ酸塩

リュウグウ試料の走査電子顕微鏡による分析イメージ:
リュウグウ試料の構成鉱物。この図上で認識できる鉱物はすべてリュウグウの母天体上で水質変成によりできた二次鉱物

58

化学分析チームの結果

66元素 (H, Li, Be, C, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U)



66元素を確認

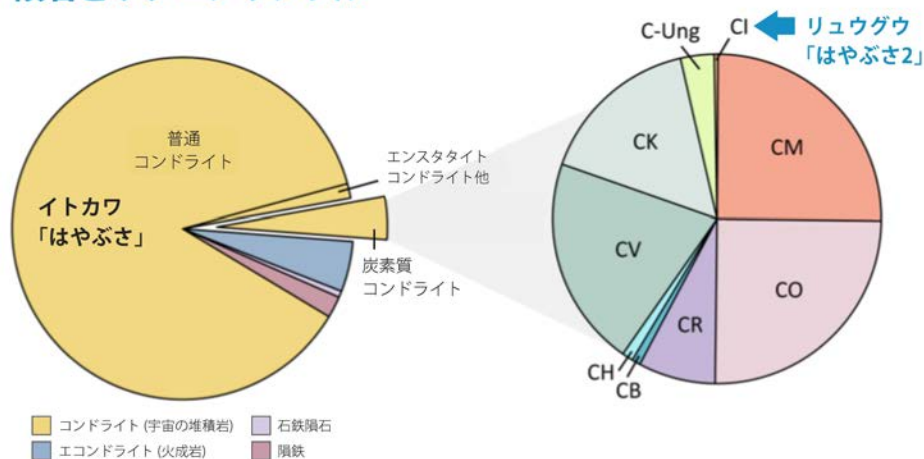
←CIコンドライト
≡太陽の成分
(揮発性成分を除く)

リュウグウ試料の元素存在度。CIコンドライトの分析値で規格化している。
1.0より上(下)の点はCIコンドライトより多量(少量)に含まれる元素。

Yokoyama et al. Science, 9 Jun. 2022 59

隕石とリターンサンプル

橘省吾先生より

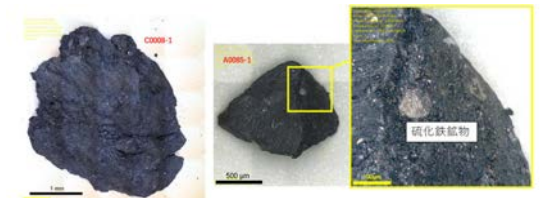


60

Phase-2キュレーション: 岡山大学チーム

E. Nakamura et al. Proceedings of The Japan Academy, Series B. Vol 98, No. 6, pp.227-282 (2022)

- 試料は主に含水層状ケイ酸塩鉱物から構成され、空隙率は約50%である。
- 小惑星リュウグウの化学組成はCIコンドライトと類似している。またリュウグウ最表面からだけでなく、人工エクレーター形成に伴って噴出した内部物質を採取出来ていたことが確認された。
- 採取に用いたタンタル製弾丸による汚染が一部試料において確認されたが、人工エクレーターを作成するために用いた銅製衝突体(SCI: 搭載型小型衝突装置)に起因する汚染は認められなかった。

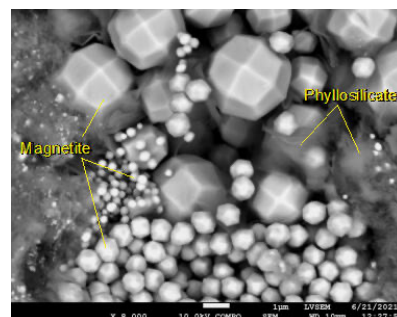


リュウグウ粒子の外観。黒色無光沢で、細かな割れ目が発達している(左)。細粒緻密なマトリクスに鉱物の集合体や自形結晶が散在している(右)。

61

Phase-2キュレーション:岡山大学チーム

- 水素、炭素および窒素同位体異常を示す星間雲を起源とするミクロンサイズの有機物質が検出された。
- 生命の起源に結びつくアミノ酸(23種類)やその他の有機物が検出された。
- 原始太陽系を構成した星間物質や太陽系前駆物質を含む始原的な特徴が保持されていた。



多面体磁鉄鉱粒子の産状を示す走査電子顕微鏡像。晶癖やサイズの異なる磁鉄鉱粒子が約10ミクロンの領域に共存している。

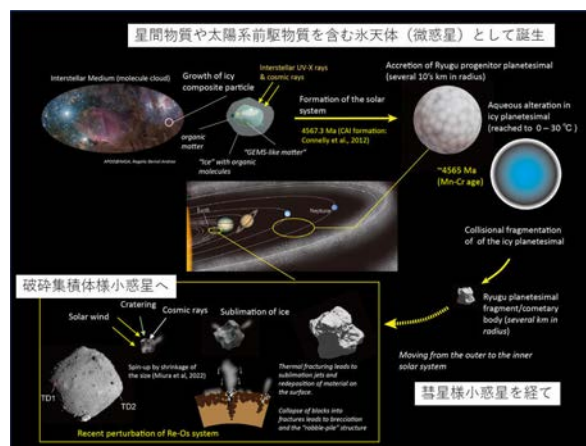
E. Nakamura et al. Proceedings of The Japan Academy, Series B. Vol 98, No. 6, pp.227-282 (2022)

Phase-2キュレーション:岡山大学チーム

- ・小惑星リュウグウの前駆天体は、太陽系外縁部において有機物およびケイ酸塩を含む氷に富むダストが集積した氷天体である(氷前駆天体)。
- ・氷前駆天体の大きさは数十キロメートルであり、太陽系形成後約260万年までの期間に水質変質を被った。
- ・氷前駆天体は破碎され、大きさ数キロメートル程度の彗星核が形成された。その後これは地球近傍軌道に移動した。彗星核から氷が昇華し、天体サイズの縮小および固体—ガスジェットに伴う物質の再堆積によって、空隙の多い低密度物質が形成された。
- ・有機物は試料に普遍的に存在し、これらは宇宙線および太陽風の照射による宇宙風化を被り、小惑星表面のアルベド特性を決定している。

E. Nakamura et al. Proceedings of The Japan Academy. Series B. Vol 98, No. 6, pp.227-282 (2022)

Phase-2キュレーション: 岡山大学チーム



小惑星リュウグウの起源と進化。星間物質や太陽系前駆物質などを起源として、太陽系外縁部で誕生した氷微惑星は、その内部の広範な水質変質の後に破碎され、彗星様小惑星として地球近傍軌道に至り、氷の昇華を伴いながら、瓦礫集積体様的小惑星へと進化した。

E. Nakamura et al. Proceedings of The Japan Academy, Series B. Vol 98, No. 6, pp.227-282 (2022)

Phase-2キュレーション: JAMSTECチーム

Motoo et al. *Nature Astronomy* 6, 1163–1171 (2022)

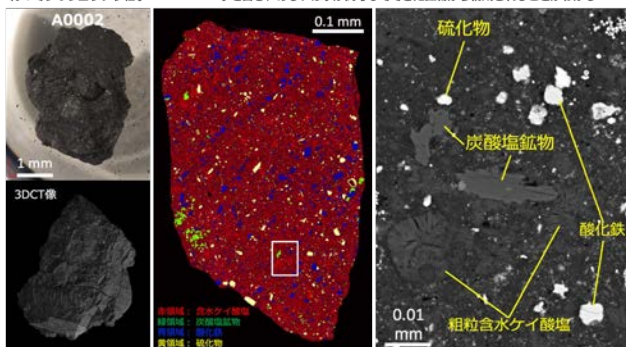
- ・分析した試料の鉱物組み合わせは、リュウグウ粒子は形成後に大規模な水質変成を受けたことを示す。
- ・微細な鉱物と有機物を含む領域の水素と窒素同位体組成の関係は、リュウグウ粒子の構成物質が太陽系外縁部で形成されたことを示唆する。
- ・粗粒の含水ケイ酸塩鉱物中に、脂肪族炭素に富む有機物が濃集していた。この特徴は、これまでの隕石の研究からは確認されておらず、リュウグウ天体に特有のものと推察される。
- ・これらの結果から、始原的天体中の粗粒含水ケイ酸塩鉱物が有機物や水のゆりかごとなり、そのままの状態地球に運ばれた可能性が考えられる。

※JAMSTEC:国立研究開発法人 海洋研究開発機構

Phase-2キュレーション: JAMSTECチーム

約4ミリのリュウグウ粒子

水を含む、あるいは水が関与してできた鉱物から構成されることがわかる

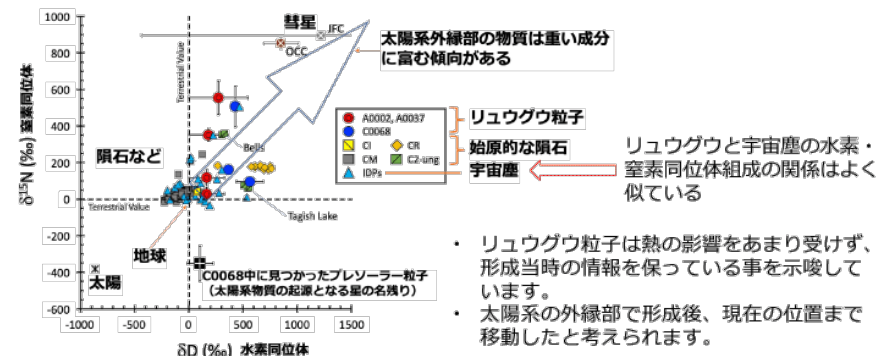


(左上) 配布された最大のリュウグウ粒子A0002、(左下) SPring-8で取得した放射光X線CT像、(中) リュウグウ粒子中の水が関与してできた鉱物群: 赤: 含水ケイ酸塩鉱物、緑: 炭酸塩鉱物、青: 酸化鉄、黄: 硫化鉱物、(右) 中図の白四角領域を電子顕微鏡で拡大した図。

Motoo et al. Nature Astronomy 6, 1163-1171 (2022)

66

Phase-2キュレーション: JAMSTECチーム



水素と窒素同位体比は太陽系外縁部での形成を示唆。グラファイトからなるプレソーラー粒子も確認された

Motoo et al. Nature Astronomy 6, 1163-1171 (2022)

67

Phase-2キュレーション: JAMSTECチーム



(左) リュウグウ粒子に含まれる多様な有機物は、大別すると三種類の異なる特徴(色ごとに異なる官能基を持つ)を持つことがSTXM(走査型透過X線顕微鏡)で分析によりわかった。(中) リュウグウ粒子中(0.02mm四方)の三種類の異なる特徴を持つ有機物ごとの分布を可視化した。(右) 左図の点線の領域の透過電子顕微鏡による観察図、粗粒の含水ケイ酸塩鉱物の中に脂肪酸炭素に富む有機物が濃集していることがわかる。

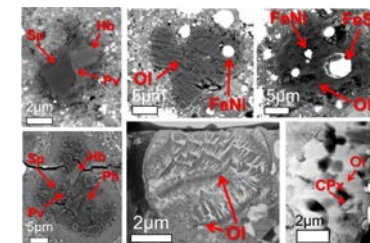
Motoo et al. Nature Astronomy 6, 1163-1171 (2022)

68

石の物質分析チームの結果

T. Nakamura et al. Science, 22 Sept. 2022

- 液体の水との反応を大規模に経験したリュウグウサンプルに高温環境(1000°C以上)でできた粒子(Ca、Alに富む包有物など)が含まれていることを発見。
- これらの高温微粒子は太陽近くで形成された後に太陽系外側まで移動し、リュウグウの材料物質と共に現在のリュウグウの元の天体(リュウグウ母天体)を形成した。
- これは、誕生時の太陽系において内側と外側で大規模な物質混合が起こっていた。



リュウグウサンプル中に発見された高温環境(1000°C以上)で形成された粒子(すべて電子顕微鏡写真)。(A、B) Ca、Alに富む包有物、(B-D) 溶融したカンラン石(OI)、金属鉄(FeNi)、硫化鉄(FeS)から形成されるコンドリュール7)、(F) アメーバー状カンラン石集合体に類似した多孔質な粒子。

69

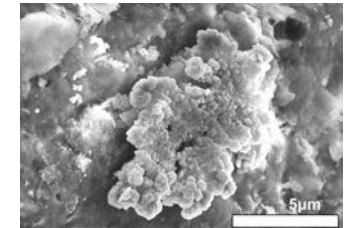
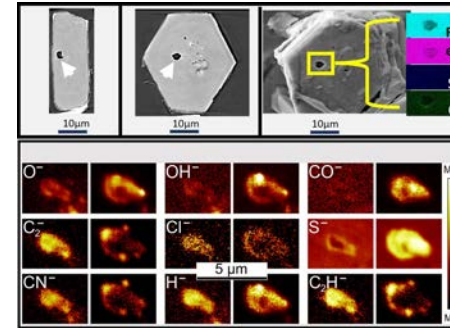
石の物質分析チームの結果

- サンプルに残された磁場の情報から、リュウグウ母天体は太陽から離れた太陽光が届かない星雲ガスの暗闇の中で生まれた可能性が高い。
- リュウグウ母天体が形成されたのは、水と二酸化炭素が氷で存在する-200℃以下の低温領域であった。
- サンプル中の結晶に閉じ込められた液体の水を発見した。この水はかつてリュウグウ母天体にあった水であり、塩や有機物を含む炭酸水であった。
- リュウグウの天体内部に存在した液体の水から、サンゴ礁のような形をした結晶が成長していた。
- リュウグウの母天体では、水と岩石の比率が表層と地下内部で異なり、地中深くの岩石の方が水を多く含んでいた。

T. Nakamura et al. Science, 22 Sept. 2022

70

石の物質分析チームの結果



リュウグウサンプル表面に発見されたテーブルサンゴに似た形をした結晶(電子顕微鏡像)。極微小の薄い結晶が積み重なるようにして成長している。

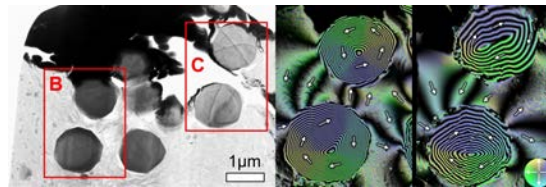
リュウグウサンプル中の6角板状の結晶(硫化鉄)の内部に発見された水とCO₂を主成分とする液体。(A, B)硫化鉄結晶中の空孔のCT像。数ミクロンの大きさの空孔(白矢印)が結晶中に存在している。(C)質量分析計で測定した空孔内に含まれていた様々なイオン種(同じ分子種の2枚の写真は、左側が空孔上部、右側が空孔中部に含まれていたイオン種を示す)。結晶の温度を-120℃にして、空孔中の液体を凍らせて分析した。(D)分析後の空孔中の液体を蒸発させて、空孔内部を観察した結果、結晶を構成する元素(鉄と硫黄)以外は検出されなかった。空孔内には液体以外の固体成分は存在しないことを示す。

T. Nakamura et al. Science, 22 Sept. 2022

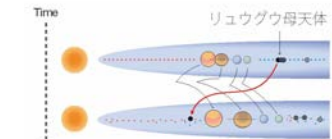
71

石の物質分析チームの結果

- サンプルの硬さ、熱の伝わりやすさ、磁気特性などを測定した。その結果、リュウグウサンプルは包丁で切れるほど柔らかい。
- 小さな磁石が数多く含まれていたことから、過去の磁場を記録した天然のハードディスク。



球状の磁鉄鉱(Fe₃O₄)結晶に刻まれた古地磁気の記録。リュウグウ試料から切り出した磁鉄鉱の透過型電子顕微鏡像(A)と電子線ホログラフィー法により得られた磁束分布像(B, C)。矢印の色は磁化の方位。粒子の内部に見られる同心円状の縞模様は、磁力線が矢印の方向に巻いていることを示している(渦状磁区構造と呼ばれる)。粒子の外側に見られる磁力線は粒子からの漏れ磁場で、リュウグウ母天体の内部が温まり、水と鉱物の反応が起こった時のリュウグウの磁場環境を反映している。



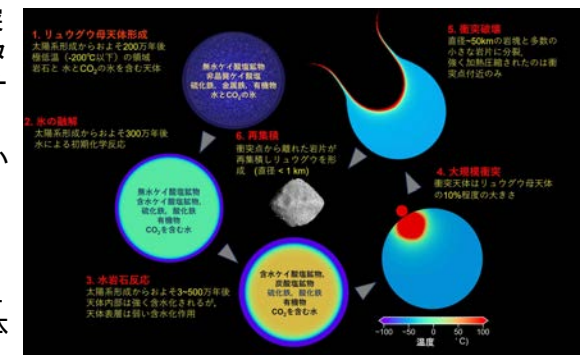
磁鉄鉱: 20-700 μTの磁場を記録
→ 太陽系内側領域の磁場情報か?
→ 太陽系初期に外側から内側に移動?

T. Nakamura et al. Science, 22 Sept. 2022

72

石の物質分析チームの結果

- リュウグウ母天体の誕生から衝突破壊までのプロセスをコンピュータによるシミュレーションで再現。(サンプルからの情報を考慮)
- リュウグウ母天体は太陽系形成から約200万年後に集積し、その後300万年をかけておよそ50℃まで温まり、水と岩石の化学反応が進行したこと、直径100km程度のリュウグウ母天体を破壊した衝突天体の大きさはせいぜい直径10 km程度であること、現在のリュウグウは衝突点から離れた領域の物質からできていることがわかった。



リュウグウサンプルの分析結果から推定されるリュウグウの形成進化プロセス。天体の温度分布や年代、衝突破壊のプロセスは数値シミュレーションで求めた。

T. Nakamura et al. Science, 22 Sept. 2022

73

ガスサンプル分析

Okazaki et al. Science Advances, Vol.8, Issue 46, 20 Oct. 2022

カプセル回収から30時間後に、オーストラリアでガス採取・分析装置(GAEA = Gas extraction and analysis system)を用いて、サンプルコンテナ内のガスの抽出・採取・質量分析を実施

- 質量/イオン価数比(m/z)が2(水素分子)、4(ヘリウム4)、28(窒素分子あるいは一酸化炭素)、40(アルゴン40)が主要なガス成分

国内外の研究機関で、ガス成分の精密な同位体分析を実施

- サンプルコンテナ内のガスは、太陽風と地球大気の混合であることが判明
- リュウグウサンプルの表面が剥離したときに遊離した太陽風が含まれる

小惑星からガス成分を気体のまま地球に持ち帰ったのは、世界初

質量分析

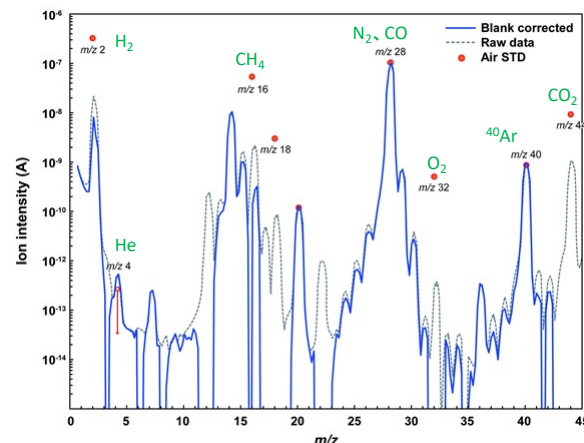
試料(分子)を高電圧をかけた真空中でイオン化し、電氣的・磁氣的な力で分離する。

↓

マスペクトル

- 横軸: m/z
- 縦軸: 検出強度

ガスサンプル分析



(元素名は吉川が追記)

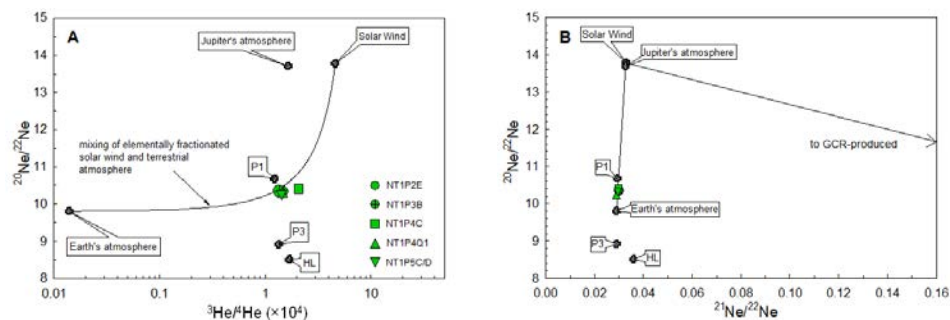
Okazaki et al. Science Advances, Vol.8, Issue 46, 20 Oct. 2022

75

GAEA搭載の質量分析装置によるコンテナガスの質量分析結果(青色実線)。横軸は質量(m)とイオン価数(z)の比(m/z)、縦軸は m/z に相当するイオンの質量分析装置での電気信号強度(任意スケール)。装置由来のガス(灰色点線)や地球大気標準ガス(赤丸)とくらべて m/z が4のガス(ヘリウム)が過剰に存在する。

$m/z=28$ のところで、縦軸の値を大気と一致させている。

ガスサンプル分析



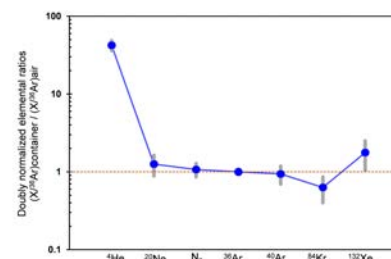
はやぶさ2コンテナガスのヘリウムおよびネオン同位体組成(緑色)。地球大気(Earth's atmosphere)と太陽風(Solar wind)の混合で説明できる。実線は端成分の混合線を表す。木星大気(Jupiter's atmosphere)、原始的希ガス(P1)、先太陽系起源希ガス(P3, HL)、および銀河宇宙線生成希ガス(GCR-produced)も比較のために示している。

^3He が地球大気に比べて100倍多い。ネオンの同位体組成も地球大気と異なる。

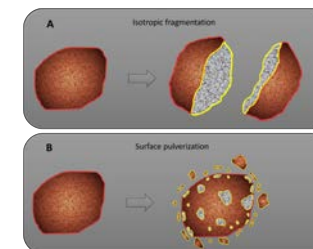
Okazaki et al. Science Advances, Vol.8, Issue 46, 20 Oct. 2022

76

ガスサンプル分析



コンテナガスの元素存在度(青実線)。測定誤差は灰色棒で示している。縦軸は ^{36}Ar と地球大気組成で規格化した存在度。横軸はガス種を示す。ヘリウムは地球大気(オレンジ色点線)に比べてひと桁以上過剰である。



総表面積のおよそ2%が剥離すれば、コンテナ内のヘリウム量を説明できる

リュウグウ試料のコンテナ内での破碎の様式。(A)等方的に割れた場合、僅かな面積(黄色線)だけから太陽風が放出される。(B)粒子表面が剥離する場合、もとの粒子サイズは大きく変化しないが、太陽風を放出する面(黄色線)を効率的に生成できる。

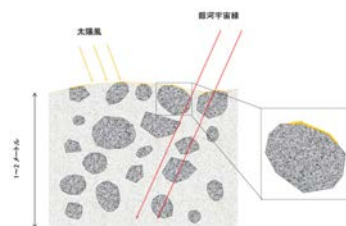
Okazaki et al. Science Advances, Vol.8, Issue 46, 20 Oct. 2022

77

希ガスと窒素同位体組成

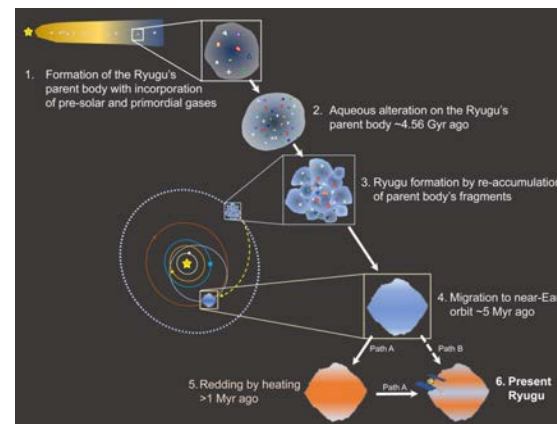
Okazaki et al. Science, 20 Oct. 2022

- リュウグウのサンプルには、太陽系形成時の希ガスが含まれている。(どの隕石より多い)
- 窒素同位体組成は、サンプルごとに異なる。
- 銀河宇宙線によって生成された希ガスと太陽風起源の希ガスも含まれている。
- ただし、太陽風起源の希ガスはわずかな量。
- 太陽風: 2試料のみ (3500年間、250年間の照射)
- 銀河宇宙線起源ネオン量: 照射期間500万年
- サンプルを100°Cに加熱してガスの検出→過去100万年間はリュウグウの表層物質の温度は100°C以上の高温を経験していない



78

希ガスと窒素同位体組成

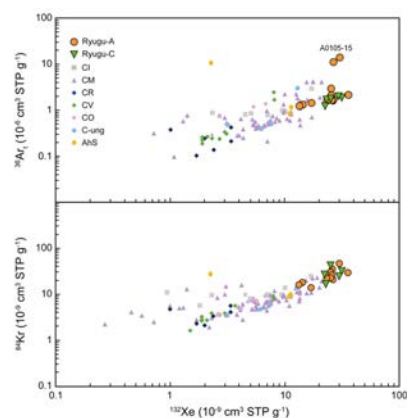


Okazaki et al. Science, 20 Oct. 2022

リュウグウの進化図。1. リュウグウ母天体の形成と先太陽および始原的ガスの獲得。2. リュウグウ母天体での水質変質(約45.6億年前)。3. 母天体破片の集積によるリュウグウ形成。4. 近地球軌道への移動(約500万年前)。5. 加熱による赤化(約100万年以上前)。6. 現在のリュウグウ。

79

希ガスと窒素同位体組成



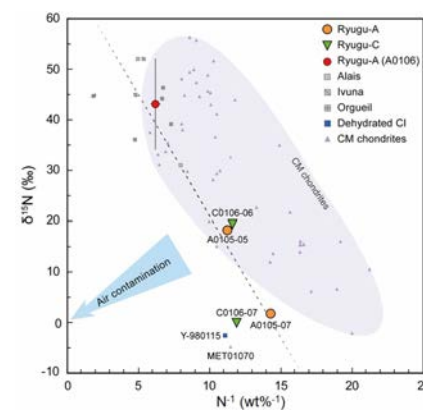
リュウグウ試料の始原的希ガスの濃度。縦軸に始原的希ガス ^{36}Ar 濃度および ^{84}Kr 濃度、横軸に ^{132}Xe 濃度を示している。リュウグウ試料(オレンジ色丸と緑色逆三角形)はこれまで知られている隕石よりも高濃度の太陽系形成時の希ガスを含んでいる。炭素質コンドライト(灰色四角、紫三角、青菱形、緑菱形、薄紫菱形、水色五角形)およびその他の隕石物質(オレンジ色六角形)も参考のために示している。

リュウグウ母天体を形成した材料物質は、CIコンドライトと同質のものであるが、炭素質物質や先太陽系物質が多く含まれていたことを示す

Okazaki et al. Science, 20 Oct. 2022

80

希ガスと窒素同位体組成



リュウグウ試料の窒素同位体組成(縦軸、地球大気との差を千分率で示したもの)と窒素存在度(重量比)の逆数(横軸)。リュウグウ(オレンジ色丸、緑色逆三角形、赤丸)は試料ごとに窒素組成が異なる。CIコンドライト(灰色および青色四角)、CMコンドライト(紫三角および紫色で囲った領域)も参考のために示している。もしも、地球大気の混入が起きた場合は水色矢印で示した方向に分析データが移動するが、その影響は見えない。

太陽系形成時にリュウグウ母天体に存在した様々な窒素を含む物質が今もリュウグウに残存していることを示唆。一部のリュウグウ試料は ^{15}N という同位体に乏しく、リュウグウ母天体での水質変質および脱水過程で ^{15}N を多く含む物質が失われたことを示唆。

Okazaki et al. Science, 20 Oct. 2022

81



Special issue 特別号 Asteroid Samples 2023年2月24日号

INTRODUCTION TO SPECIAL ISSUE

An asteroid in the laboratory KEITH T. SMITH
PERSPECTIVES

Analyzing asteroid Ryugu CHRISTOPHER D. K. HERD
RESEARCH ARTICLES

Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type carbonaceous meteorites

TETSUYA YOKOYAMA, et al.

Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu:
Direct evidence from returned samples

T. NAKAMURA, et al.

Noble gases and nitrogen in samples of asteroid Ryugu record
its volatile sources and recent surface evolution

RYUJI OKAZAKI, et al.

Soluble organic molecules in samples of the carbonaceous
asteroid (162173) Ryugu

HIROSHI NARAOKA, et al.

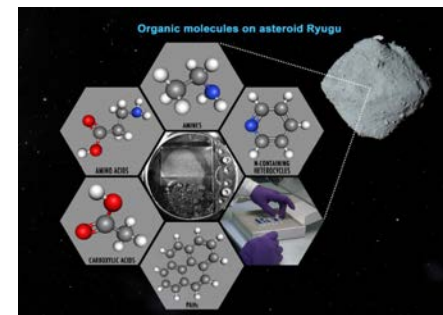
Macromolecular organic matter in samples of the asteroid
(162173) Ryugu

HIKARU YABUTA, et al.

82

有機物

- 炭素(C)と水素(H)、窒素(N)、酸素(O)、イオウ(S)を含む組成からなる有機分子が約2万種含まれていた。
- アミノ酸やカルボン酸、アミンのほかに芳香族炭化水素類などが検出された。
- 地球生命が用いるタンパク性アミノ酸(アラニンなど)のほか、非タンパク性アミノ酸(イソバリンなど)が見つかったが、左右構造を持つアミノ酸はほぼ1:1で存在し、非生物な合成プロセスを示す。
- 炭化水素としてはアルキルベンゼンや多環芳香族炭化水素であるナフタレン、フェナントレン、ピレン、フルオランテンなどが主に存在した。
- 小惑星表面からはいろいろな過程で物質が宇宙空間に放出されることが観察されており、リュウグウ表面の有機分子が他の天体に運ばれる可能性がある。また、リュウグウなどの小惑星表面は炭素資源としても利用できることを示している。

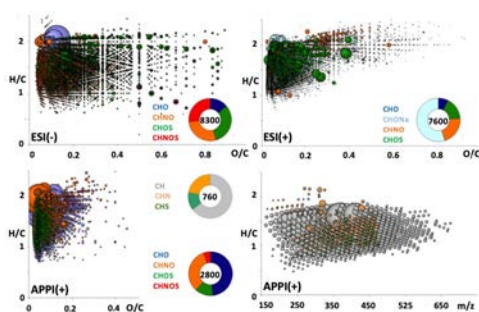


小惑星リュウグウの表面試料から見つかった有機分子の概念図

©JAXA, University of Tokyo, Kochi University, Rikkyo University, Nagoya University, Chiba Institute of Technology, Meiji University, University of Aizu, AIST, NASA, Dan Gallagher.

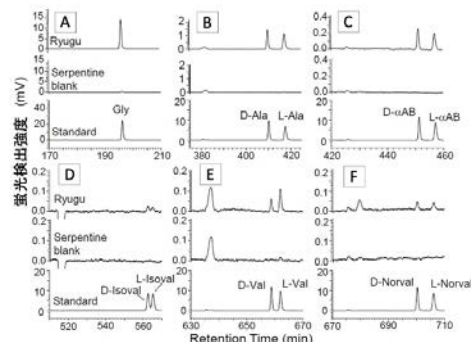
83

有機物



小惑星リュウグウ試料のアルコール抽出物から検出された約2万種の化学組成

©H. Naraoka et al. Science 379, eabn9033 (2023)



小惑星リュウグウ試料の熱水抽出・加水分解物から検出されたアミノ酸の光学分離

84

核酸塩基とビタミン

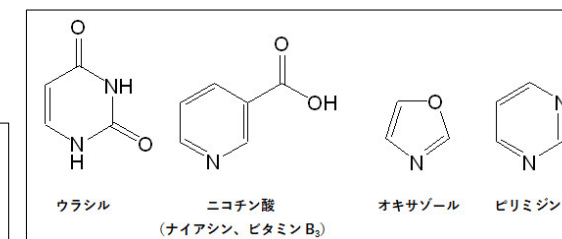
リュウグウのサンプルから、

- ウラシル...RNAに含まれる核酸塩基
- ビタミンB₃...生命の代謝に不可欠な補酵素(ナイアシンまたはニコチン酸)を発見。

Uracil in the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu (炭素質小惑星リュウグウ中ウラシルの検出)

大場康弘, et.al.

Nature Communications, 2023



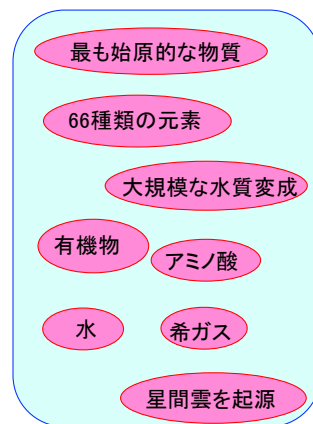
小惑星リュウグウに存在を確定させた主な窒素複素環化合物の構造

85

リュウグウのサンプルの分析で分かったこと

多くの発見

- 密度は小さく(約1.3g/cm³)、空隙率が高い(約50%)。柔らかい。
- これまで手に入れた物質の中で最も始原始的な物質(イブナ型炭素質隕石)
- 太陽系誕生の数百万年後に出来た物質。温度50度くらいで水質変成。
- 高い温度(1000℃以上)でできた粒子の存在
- 液体の水(炭酸水)
- 希ガス:太陽系形成時、銀河宇宙船起源、太陽風起源
- リュウグウの母天体:
太陽からより遠方(太陽系外縁部)で誕生 → 水質変成 → 破碎・集積 → 近地球軌道
- 有機物:2万種類を確認、アミノ酸は左手型と右手型がほぼ同数

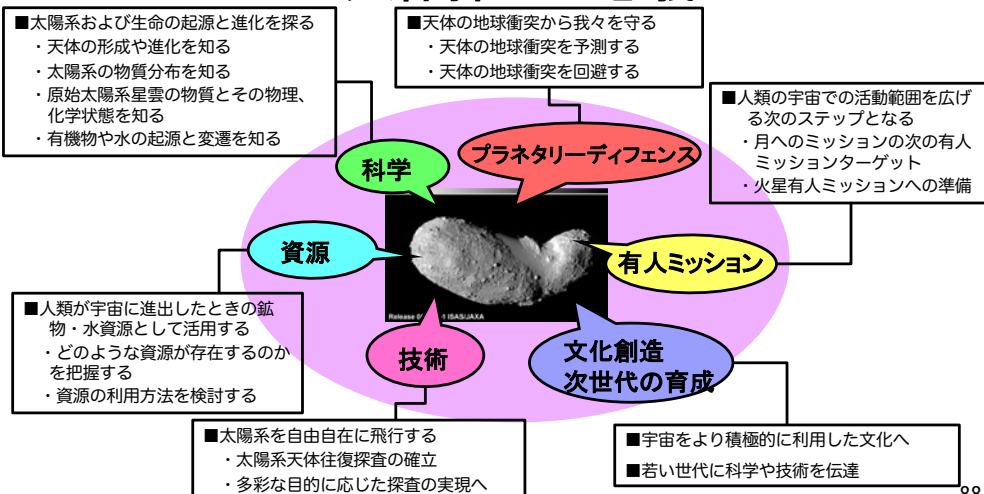


統一
的な
見
解
は
こ
れ
か
ら

86

太陽系小天体探査の意義

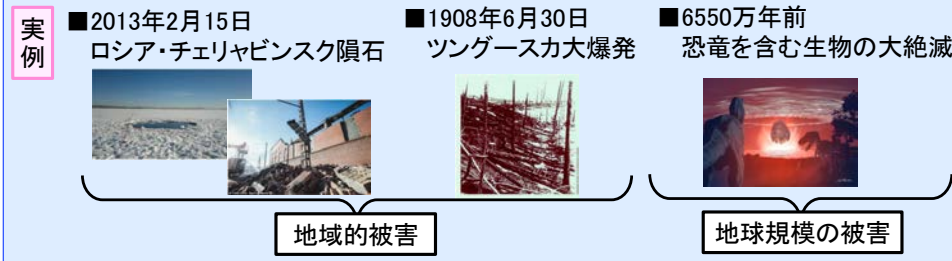
小天体探査の意義



88

プラネタリーディフェンス

小惑星や彗星のような天体が地球に衝突すると大きな自然災害となる



このような災害を事前に防ぎたい
プラネタリー・ディフェンス
(スペースガード)
※活動は1990年代初めから始まる

そのためには:
・地球接近天体の発見・追跡=[観測]
・地球接近天体の素性解明=[探査]
・天体の地球衝突回避・被害の最小化
=[技術、国際協力、法的整備、人々の理解]

89

小惑星を利用する

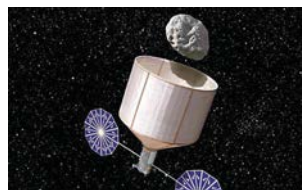
- ・ 資源: 鉱物、水
- ・ 有人ミッションのターゲット

M型小惑星の例: (216) クレオパトラ

大きさ: 217×94×81km
M型小惑星
鉄とニッケルに富む レーダー観測



小惑星を採掘



NASAの小惑星捕獲ミッション

90

太陽系空間に進出する

SLS打ち上げ
2022.11.16



(NASA)

アルテミス計画:

- ・ 2025年までに宇宙飛行士を月面に
- ・ ゲートウェイ(月周回有人拠点)
- ・ 月面基地



月軌道プラットフォームゲートウェイ

91

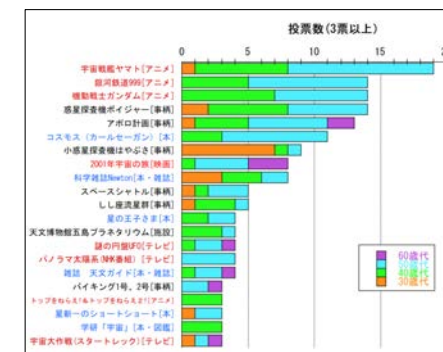
その他の話題

宇宙に目覚めた要因は？ ～「はやぶさ」「はやぶさ2」のスタッフへの調査

2020年6月、「はやぶさ」帰還10周年を記念して、「はやぶさ」「はやぶさ2」関係者にどのようなものに影響を受けて宇宙に興味を持ったのかを、「影響を受けたアニメ、本、映画、事柄」などの項目から調査

元論文:
「宇宙へのキャリアを目指した影響要因 ～「はやぶさ」「はやぶさ2」のスタッフへの調査から」(有馬比呂志、道上達広、吉川真)

近畿大学 学術情報リポジトリ
<https://kindai.repo.nii.ac.jp/records/22498>



93

小惑星 2001 CC21 の命名キャンペーン

- 小惑星 2001 CC21には確定番号98943が付与されているので、名前をつけることができます。
- 名称は皆さんから募集します。
- 募集期間は、2023年12月6日～2024年5月9日まで。
- 名称の応募は、今後準備するはやぶさ2#のWebからお願いします。
- 応募された名称から1つに絞り込む作業には、小中学生に加わってもらいます。
(小中学生はYAC※1およびKU-MA※2で選ばれた生徒)
- 2024年8月末(予定)までに名称を選定して、国際天文学連合に提案する。

• **ぜひ、ふさわしい名前を提案してください！**

※1: YAC＝公益財団法人 日本宇宙少年団

※2: KU-MA＝認定NPO法人 子ども・宇宙・未来の会

94

参考: 小惑星 (98943) 2001 CC21 について(1)

- 2001年2月3日: 米国LINEARチーム※がSocorroの観測施設にて発見
 - ・仮符号2001 CC21が付与
 - ・1982年(11月10日)にサイディング・スプリング天文台で観測されていた天体 1982 VE13と同じものであると判明
- 2020年9月: はやぶさ2延長ミッションでフライバイ探査を行う天体に選定
- 2023年4月10日: LINEARチームに、2001 CC21の名称は、はやぶさ2#プロジェクトから提案させて欲しいと申し入れをし、了承
- 2023年12月3日: 名称募集のアナウンス

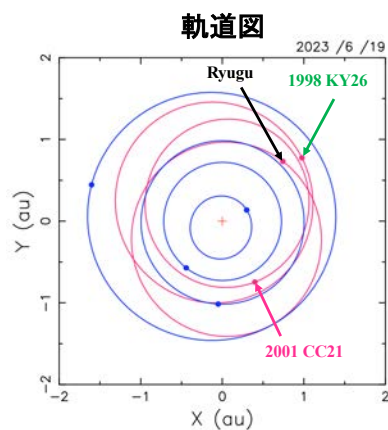
(※LINEARチームは、イトカワおよびリュウグウも発見している。)

95

参考: 小惑星 (98943) 2001 CC21 について(2)

これまでの観測で推定されている値

項目	値
軌道長半径	1.03 天文単位
軌道離心率	0.22
軌道傾斜角	4.8 度
公転周期	1.05 年
自転周期	5.0 時間
自転軸の向き	黄道面にほぼ垂直
スペクトル型	L型、最近の観測ではS型
大きさ	440mから700mくらい
形(長軸単軸比)	0.5



(画像クレジット: JAXA)

96