

モーニングセミナー 愛知学院大学楠元学舎110周年記念講堂

はやぶさ2の採取した砂の分析~砂の分析からなにがわかるのか?!~

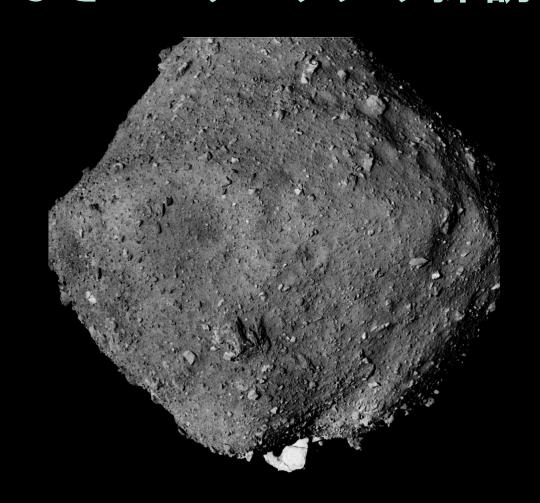
渡邊誠一郎

名古屋大学 大学院 環境学研究科

2023年6月13日(火) 7:00-8:00



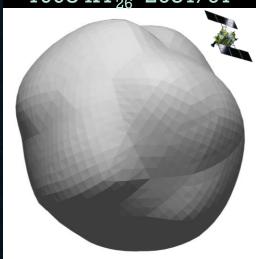
1. はやぶさ2のリュウグウ探訪を振り返る



はやぶさ2探査の流れ

日付はすべて日本時間

1998 KY₂₆ 2031/07



地球スイングバイ 2015/12/03













MASCOT 着陸 2018/10/03



リュウグウ 出発 2019/11/13



MINERVA-II2 分離 2019/10/03



マーカ放出 2019/09/17



第二回目 タッチダウン 2019/07/11



ターゲット マーカ分離

2019/05/30



衝突装置 SCI 2019/04/05



分離

第一回タッチダウン 2019/02/22 03/24

地球帰還 2020/12/06

Illustrations including spacecraft by Akihiro Ikeshita, others by JAXA

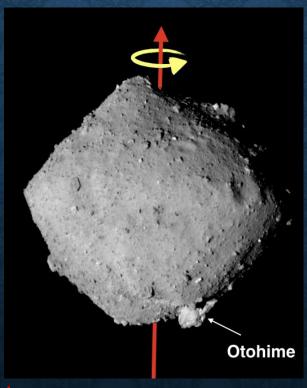




2. 小惑星リュウグウの素顔

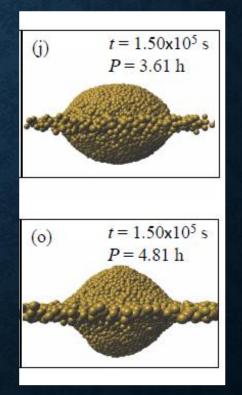
地球軌道と火星軌道にまたがる楕円軌道を持つ地球接近小惑星 →

- 自転: 逆行回転, 周期: 7.63時間
- そろばん珠形(top shape) 鋭い赤道リッジ(山脈)をもつ.
- 赤道半径 R_E: 502±2 m
 - 極半径 R_p: 438±2 m $(R_{\rm p}/R_{\rm E}=0.873)$.
- バルク密度 1.2 g/cm³ (= Bennu)↑質量÷体積.
- ・空隙率 > 50% [半分すきま!] 母天体破壊⇒ラブルパイル天体



Watanabe et al. 2019, Science





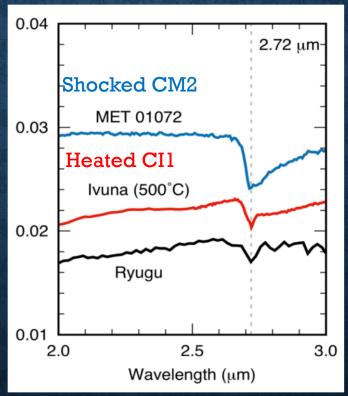
Sugiura et al. 2021, Icarus 04/24



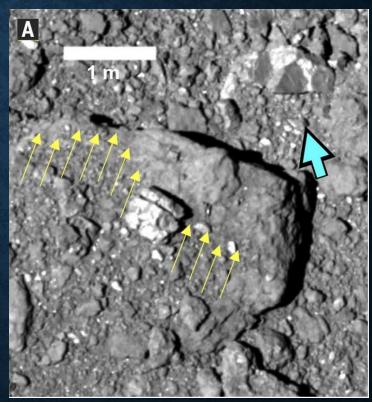
母天体(微惑星)の貴重な記憶

- 水(含水鉱物)が全表面に存在(NIRS3, ONC-T):
- ・ 微惑星時代の"温泉"を記憶:
- ・ 非常に暗い表面 ← 有機物.
- ・地上分析で謎を明らかに!

Kitazato et al. 2019 Science



Sugita et al. 2019 Science





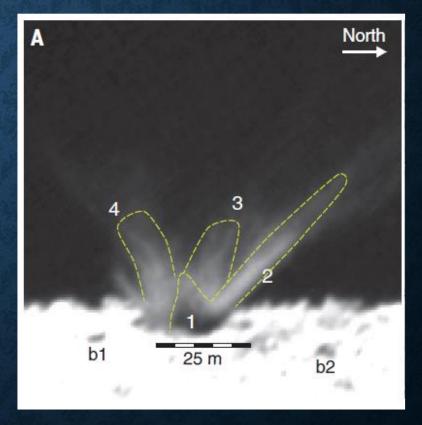
リュウグウでの人エクレーター生成実験

人エクレーター(リム間直径で約18m)

衝突前後 の画像を 交互表示

© JAXA/U Tokyo/Kochi U/Rikkyo U/ Nagoya U/ Chiba Inst of Tech/Meiji U/U Aizu/AIST

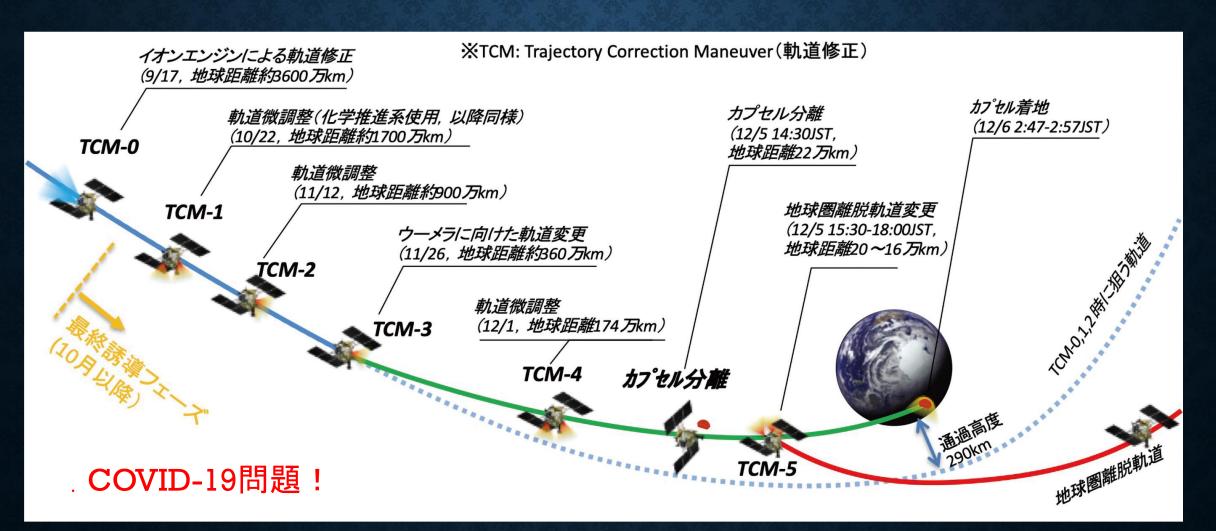
分離カメラが捉えたクレーターからの放出物



Arakawa et al. 2020, Science



3. 玉手箱の帰還:地球帰還時の軌道計画

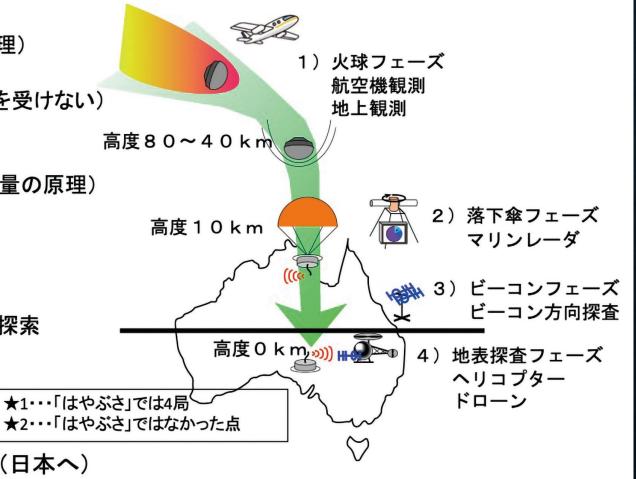




カプセル回収シーケンス

中澤暁ほか 2021, 遊・星・人

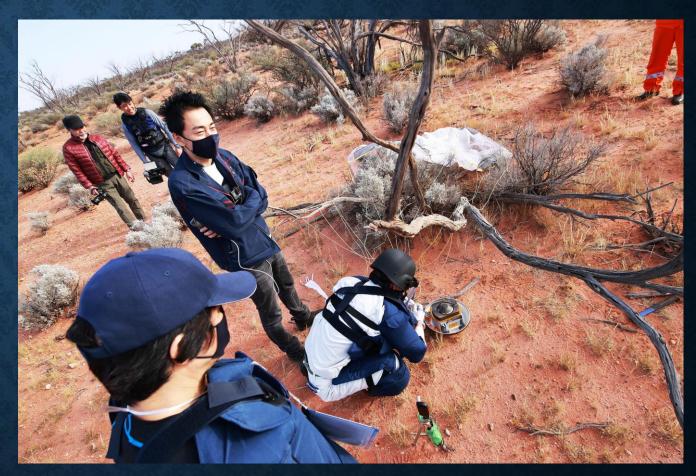
- 探索(火球フェーズ)
 - 光学観測(地上)光跡を数局で計測(三角測量の原理)
 - 光学観測(航空機)光跡を雲上から計測(天候の影響を受けない)
- 探索(落下傘フェーズ)
 - 方向探索(ビーコン)
 ビーコンを計5局*¹で受信(三角測量の原理)
- 方向探索(マリンレーダ) ★2
 方向と距離を計測可。
- 探索(地表探査フェーズ)
 - <u>方向探索(ヘリコプター)</u> 着地後のビーコンをヘリコプターで探索
 - ドローン*²
 上空から空撮。画像解析で識別。
- ■輸送
 - 安全化処理、分解
 - カプセル内のガス採取*2、輸送(日本へ)





4. 玉手箱の中身は?

←はやぶさ2 カプセル の軌跡 2020年 12月6日 (at Coober Pedy, 豪州) © JAXA

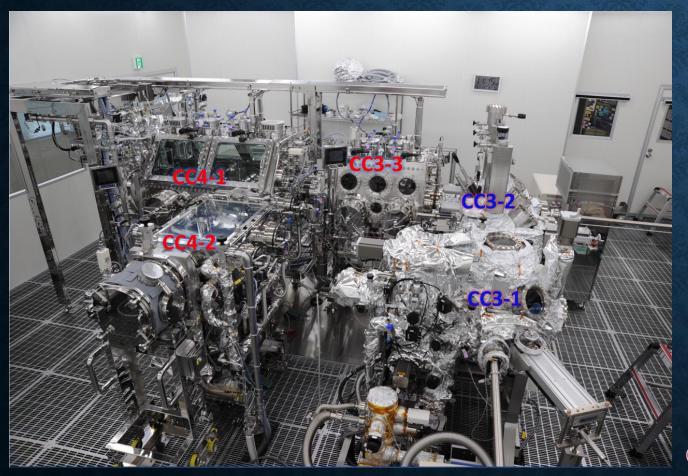


落下したパラシュートとカプセルの発見 © JAXA



フェーズ1キュレーション(初期記載作業)

・地球環境からの汚染を避けるため、クリーンチャンバー(下図)から出すことなく、 リュウグウ試料の初期記載(フェーズ1キュレーション)作業が行われた(帰還後半年間)



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:

• 真空から窒素ガス環境への移行

CC4-1:

• 小粒子 (< mm) の処理

CC4-2:

- ・大粒子(≧ 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

© JAXA



玉手箱を開けてみると...

キャッチャーA室に入っていたリュウグウ粒子

真空中でのリュウグウ粒子の取り出し(動画)

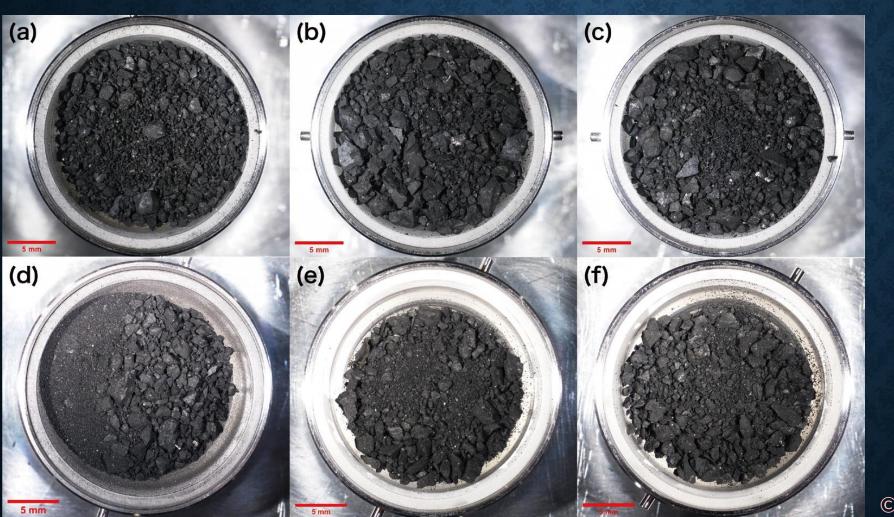


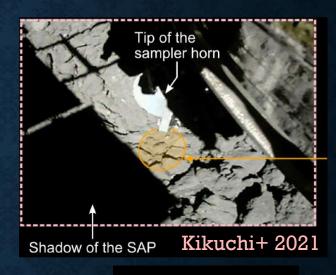


© JAXA



キャッチャーA室とC室から取り出した試料





合計 5.4グラムの 試料を回収. 計画の50倍以上!

©JAXA

キャッチャーA室(上段)とC室(下段)から回収した粒子.赤いスケールは5 mm.



試料選別・分配に要する情報の取得

CC3-3 およびCC4-2 に設置された初期記載用の装置群









© JAXA

光学顕微鏡

秤量計

赤外分光計

赤外分光顕微鏡 MicrOmega



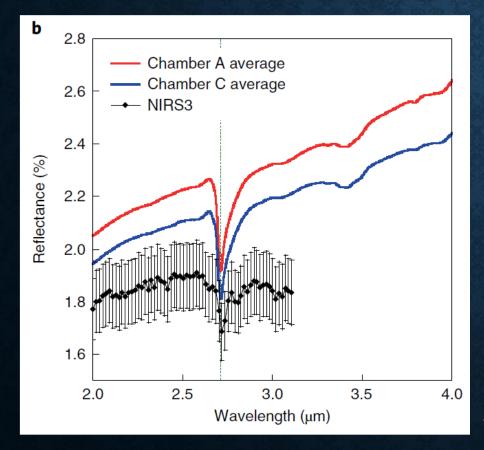
試料に水・炭素は確かに含まれていた

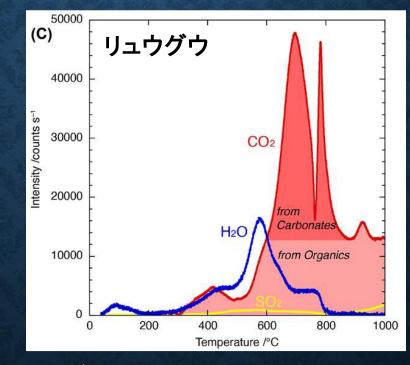
 $H_2O:$ 7wt%

有機C: 3wt%

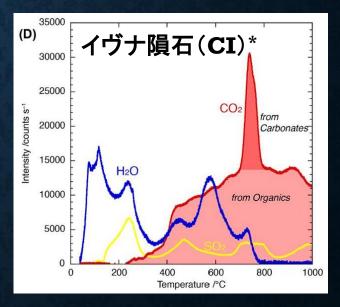
炭酸塩C: 1.5wt%

- リュウグウ試料のフーリエ変換赤外分光装置(FTIR)による近赤外スペクトルの測定(左:b)
- He流中での試料の連続昇温で熱分解・放出されたガスを四重極質量分析装置で測定(中央・右)





*1938年12月16日落下



↑ Yokoyama et al. 2022, *Science*

←Yada et al. 2022, *Nature Astron.*



MicrOmega のリベンジ

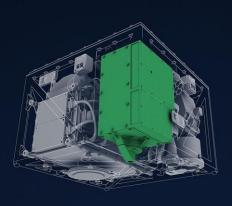
リュウグウ試料の近赤外スペクトル

左:a:OHに富む粒子

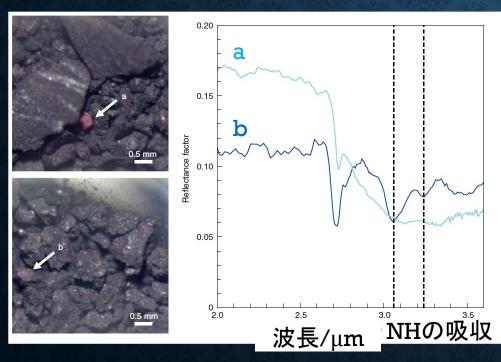
b: NHに富む粒子

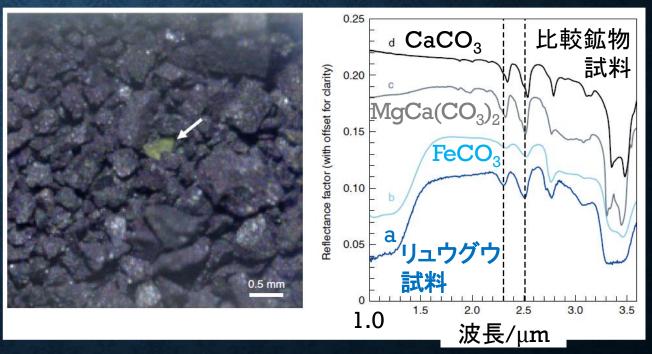
右:a:炭酸塩粒子











Pilorget et al. 2022, Nature Astron.

窒素化合物や炭酸塩の存在を示す!

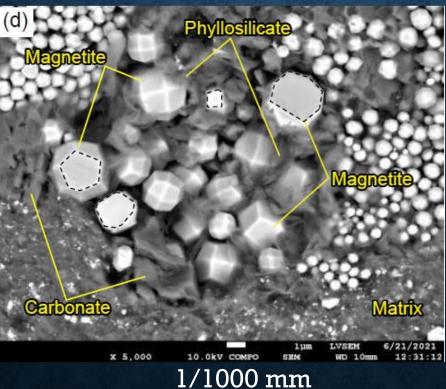


電子顕微鏡の下の宝石たち

- ・おもちゃ箱の中のような多様な形態の粒
- 母天体の"温泉"中で、析出・組成変化した 水質変成鉱物
- コンドリュール, CAIはほとんど存在しない

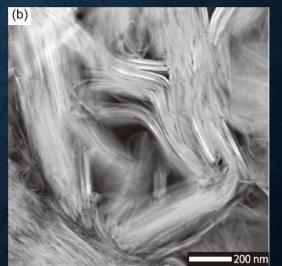
磁鉄鉱(Fe₃O₄) "フランボイド"

> E. Nakamura et al. 2022 *Proc. Jpn. Acad. Ser. B*





1/100 mm



2/10000 mm

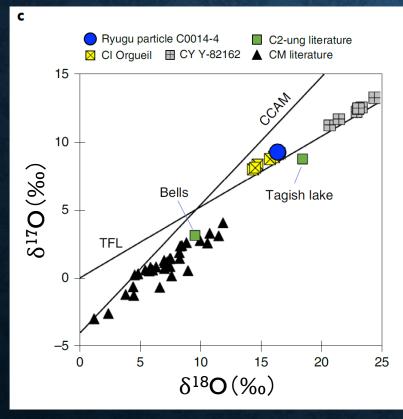
層状ケイ酸塩

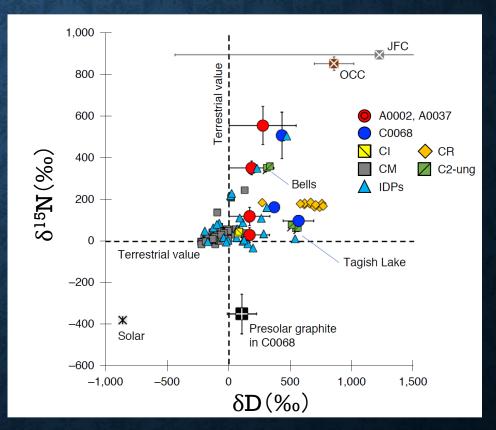
化鉄



同位体の指紋が語ること(1)

- 炭素質コンドライトのうち、CIコンドライト(イヴナタイプ)に近いことを示す(左)
- ・ プレソーラー粒子(太陽系を生んだ星間分子雲の生き残り粒子)の存在(右)





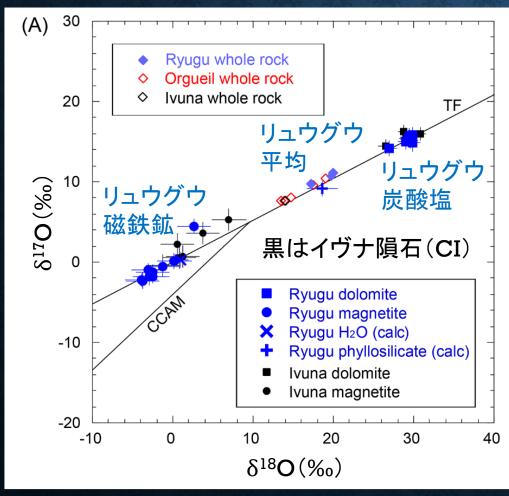
 $\delta^m O = 1000 \times \left[\left({^m O}/{^{16} O} \right) / \left({^m O}/{^{16} O} \right)_{\text{standard}} - 1 \right]$

Ito et al. 2022, Nature Astron.

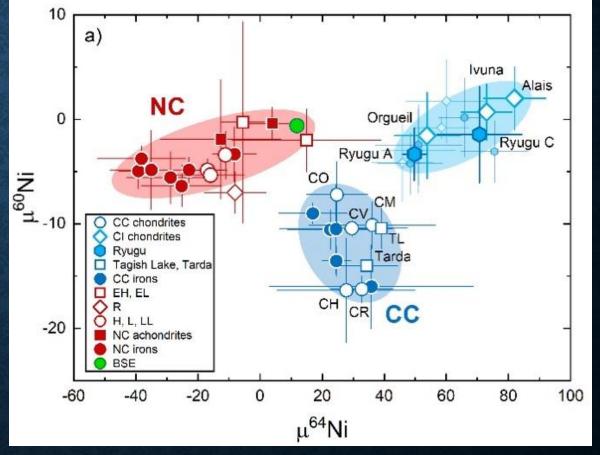


同位体の指紋が語ること(2)

母天体の"温泉"の温度は約40℃



母天体は木星軌道の外側で生成 ⇒ 大移動?



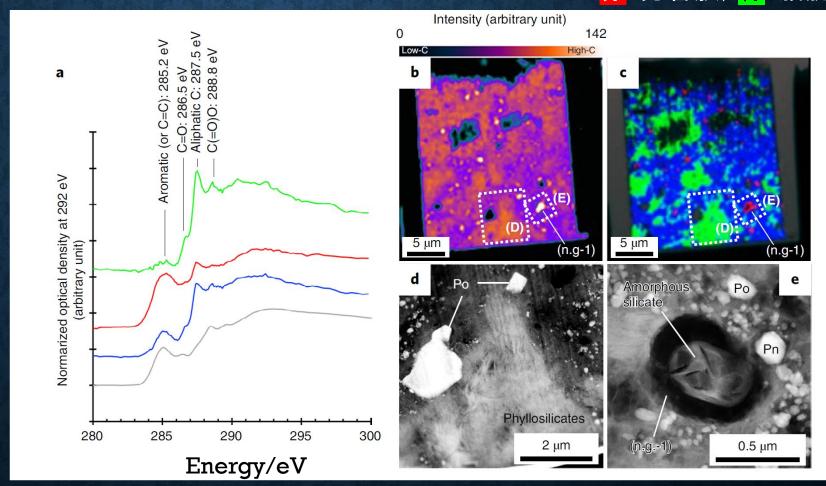
Spitzer et al. 2023, LPSC #2488



有機物微粒子(ナノグロビュール)

赤:芳香族,<mark>縁</mark>:脂肪族

- 有機物微粒子(右)
- 層状ケイ酸塩中に 広く有機物が分布
- 20種類以上のアミノ酸が同定される
- 核酸塩基など窒素 を含む多様な環状 有機化合物が存在
- ・これらは、母天体の"温泉"での有機物の合成を示唆

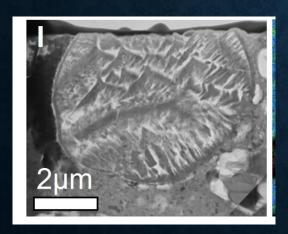


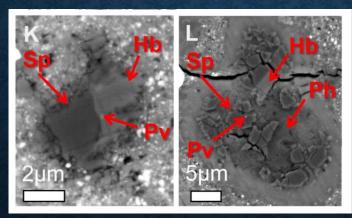
Ito et al. 2022, Nature Astron.



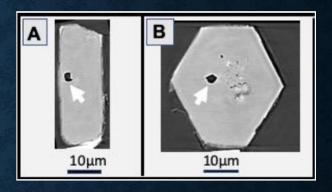
リュウグウ母天体は土星軌道の外側で生まれた

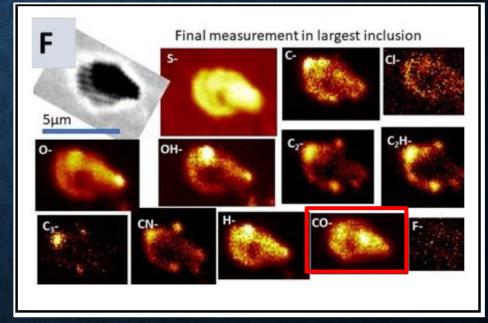
- ・ドライアイス存在領域でのリュウグウ母天体の生成を 示唆する流体包有物(右図上下)
- 微小コンドリュール(急冷を示す組織)(左下 I)
- 微小なカルシウム・アルミニウムに富む包有物(CAI) (右下 K, L)
- ⇒ ともに他のコンドライト中のものの約1/10の大きさ





CO₂を含む水 が硫化鉄鉱物 の中に閉じ込 められていた





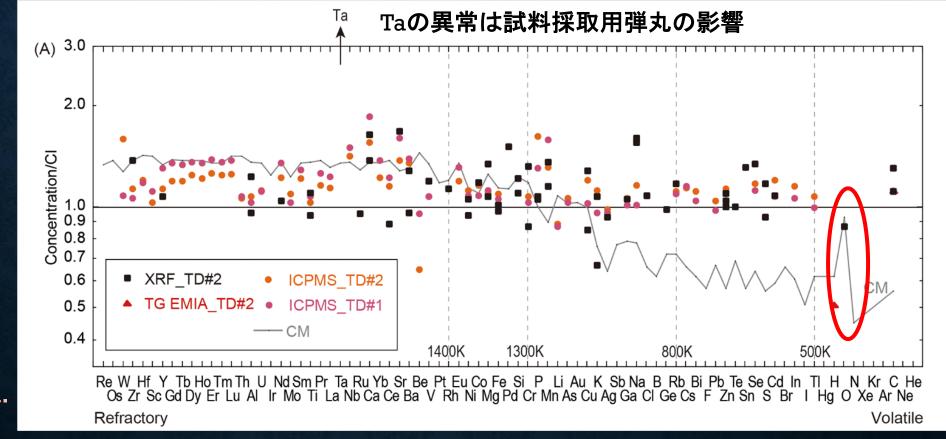
T. Nakamura et al. 2022, Science



リュウグウ粒子の元素存在度

化学的に見て 太陽系で最も始原的な物質

- CIコンドライトの元素存在量に対するリュウグウ試料の元素比
- 水素(H)と酸素(O)以外はほぼ1程度. リュウグウ試料は, CIコンドライトにきわめて近い:

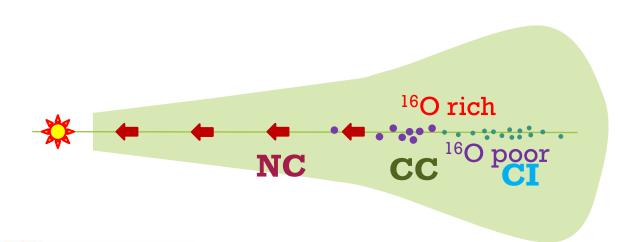


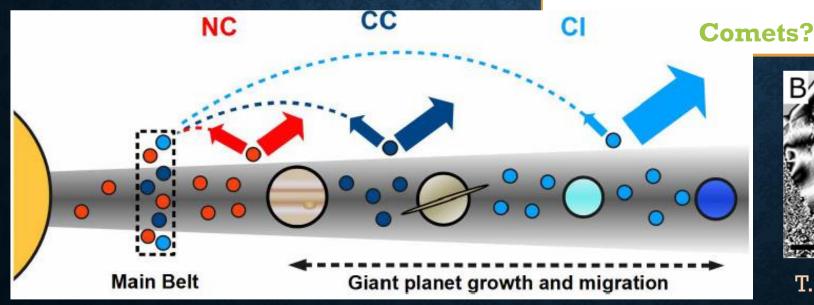
Yokoyama et al. 2022, *Science*

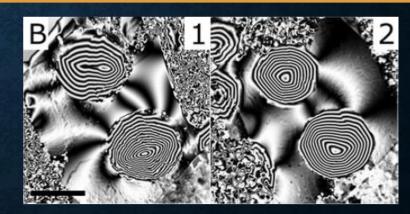


太陽系初期に粒子と微惑星が大移動!

- 太陽のすぐそばで生成された粒子(CAI)が 太陽系の遠方領域まで運ばれる
- ・ 酸素同位体異なる粒子⇒リュウグウ母天体
- 巨大惑星が暴れて、微惑星が内側へ





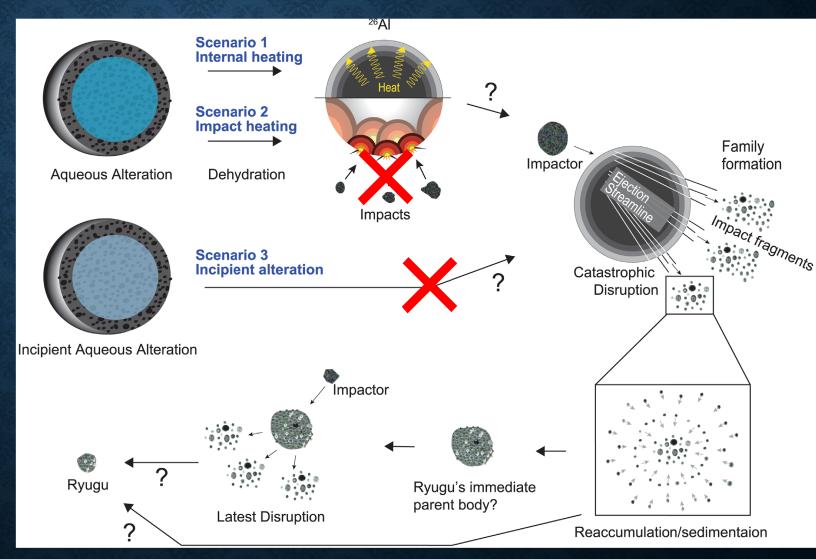


T. Nakamura et al. 2022, Science



母天体からリュウグウに至るまで

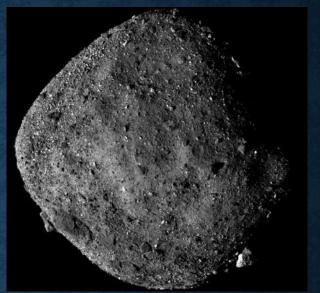
- ²⁶Alの崩壊熱で, リュウグウ 母天体中に温泉が生じた(太 陽系形成の数百万年後)
- ・リュウグウ母天体の上で、温水により砂が粘土化し、複雑な有機物が合成されたようだ、アミノ酸や核酸などが生命材料物質が試料から見つかった.
 - ⇒ 初期地球への海·生命 材料の供給源
- その後, 母天体が衝突破壊され, 破片が集まってリュウグ ウが形成された.



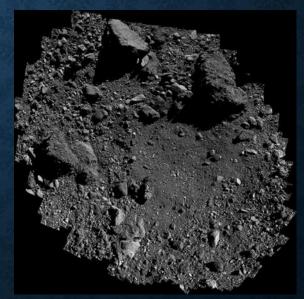


これからも続々と成果が...

- ・リュウグウ試料は世界中で分析が進行中...
- 2023年9月にアメリカのOSIRIS-RExが小惑星ベンヌ(Bennu)から表面試料を持ち帰る予定. 日本にも試料配分.
- リュウグウとベンヌの試料の比較で、さらに 太陽系の謎が明らかになる「地図」を手に 入れることができる
- 彗星物質との違いを明らかにすることが、 次世代サンプルリターン探査の焦点
 - 彗星核/枯渇彗星サンプルリターン



小惑星ベンヌのモザイク画像



ナイチンゲール Nightingale

2020.10.20 にベンヌの表面試料採取に成功 © ともに NASA/Goddard/Univ of Arizona 24/24