

東北大学惑星圏研究会
10:00—10:20, Feb17, 2021

01-03 はやぶさ2の成果から 見えてきた太陽系物質輸送

渡邊誠一郎 (名古屋大学, はやぶさ2プロジェクトサイエンティスト)
はやぶさ2サイエンスチーム

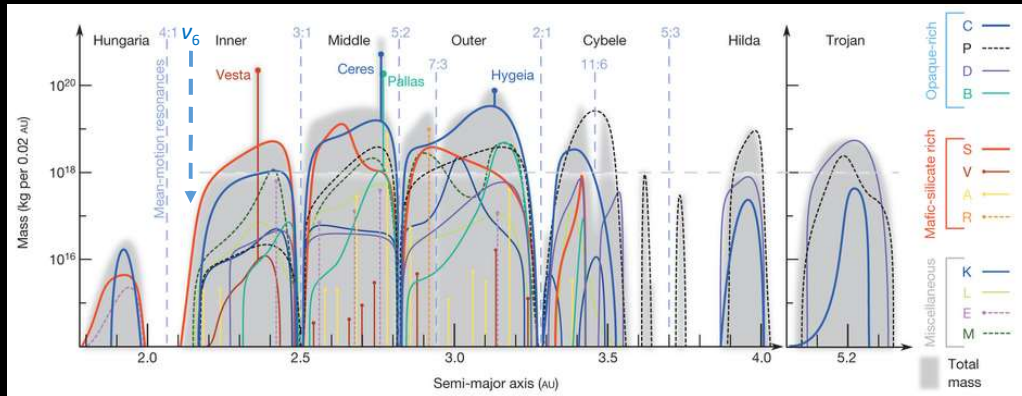
Credit: JAXA/U Tokyo/Kochi U/Rikkyo U/
Nagoya U/Chiba Inst of Tech/Meiji U/U Aizu/AIST

要旨

- 探査機「はやぶさ2」は2018年6月～19年11月にかけてC型小惑星リュウグウの近傍に滞在し、可視・中間赤外の撮像、可視・近赤外分光、LIDAR測距、ローバ・ランダによる表面その場観測、人工クレーター衝突実験、表層試料採取等を行った。
- はやぶさ2の大目的の1つは、太陽系物質輸送過程の解明である。小惑星帯での衝突破壊で生成された破片天体はヤーコフスキー効果により軌道半径が変化し、惑星との平均/永年共鳴領域に達すると軌道離心率が増加し、地球軌道領域へと供給される。
- さらに惑星形成過程におけるペブル集積や巨大惑星移動についても地球の材料物質の議論には重要な役割を果たした。
- 破片集積天体リュウグウは、こうした過程を解明する上で理想的な天体であり、はやぶさ2近傍探査結果と今後の地上試料分析が期待される。
- 例:リュウグウには赤・青物質が分布することが観測から明らかになったが、これは始原的な青物質が、軌道進化の途中で近日点が一時的に小さくなった時に風化を受け赤物質となったと考えるとうまく説明される (Morota et al. 2020)。

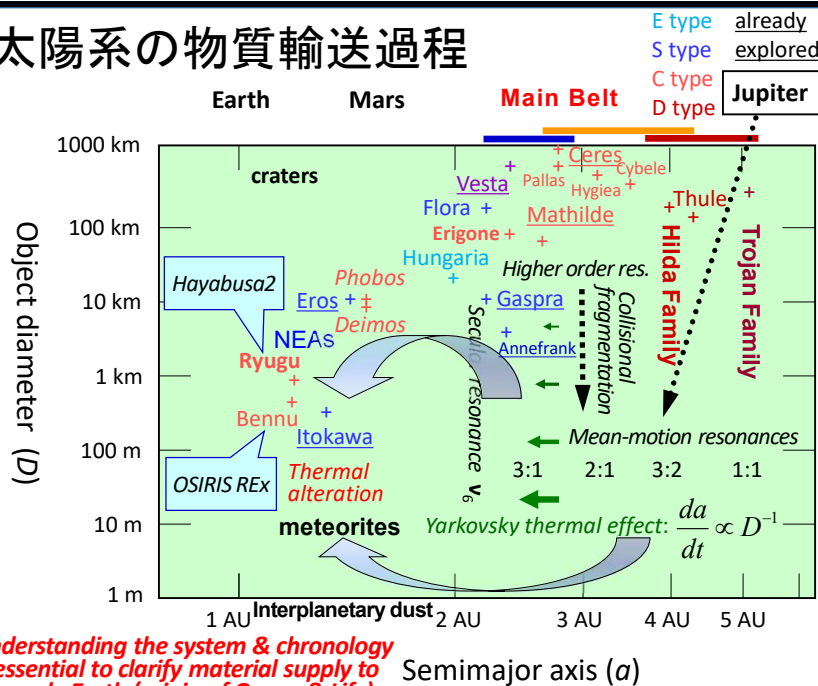
1. 太陽系の物質輸送過程: 小惑星帯 ⇒ 地球軌道

- 小惑星帯におけるスペクトル分類 (taxonomy types) 別の分布



DeMeo & Carry 2014, *Nature* 505, 629.

太陽系の物質輸送過程

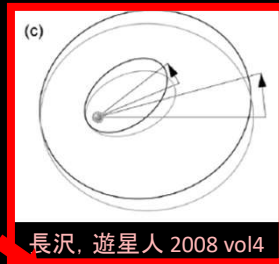
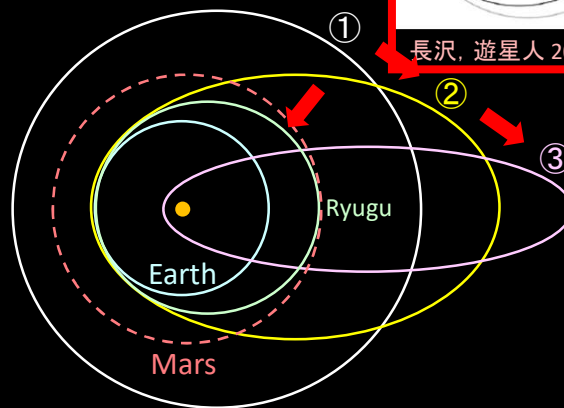


Understanding the system & chronology is essential to clarify material supply to the early Earth (origin of Ocean & Life)

04/25

永年共鳴による軌道進化：近地球小惑星へ

- ν_6 ：小惑星と土星で楕円軌道の近日点方向の回転角速度が同期
- 軌道長半径を保存しながら離心率が増大：① ⇒ ③
- 地球・火星による重力散乱で小惑星帯から分離
- リュウグウは現在、地球軌道と火星軌道をつなぐような楕円軌道

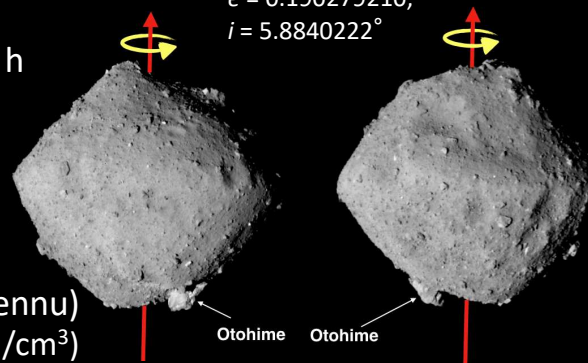


05/25

2. はやぶさ2が見いだした小惑星リュウグウの諸元

- 自転：傾斜角： 172° ，周期：7.6326 h
- コマ型 (Spinning-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 ($R_p/R_E = 0.873$)
- バルク密度： 1.19 ± 0.02 g/cm³ (= Benu) (Ch/Cgh: 1.6–2.4 g/cm³, BCG: 0.8–1.5 g/cm³)
- 空隙率 > 50% [構成粒子の物質密度が > 2.4 g/cm³ (= Orgueil CI 隕石)]

リュウグウの軌道要素
 $a = 1.18956373$ au,
 $e = 0.190279210$,
 $i = 5.8840222^\circ$



Watanabe+ 2019, Science

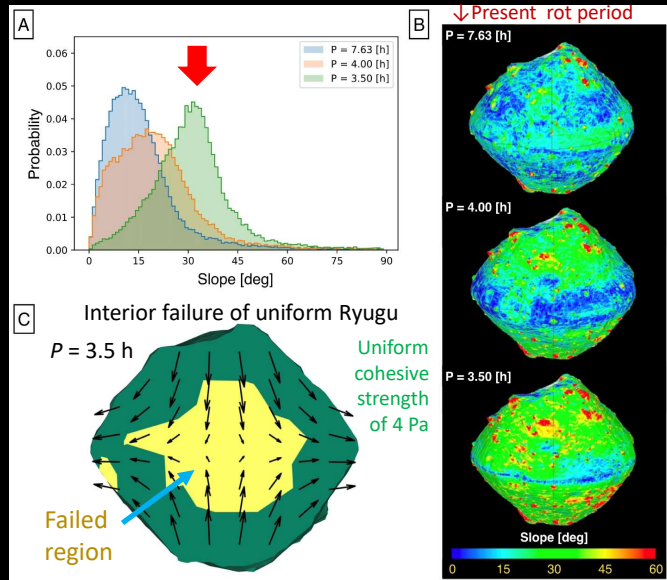
※BCG types B/Cb/C/Cg; 明瞭な 0.7- μ m 吸収を持たず

06/25

3. リュウグウの形状形成

Watanabe+ 2019, Science

- 現在の平均密度と形状を保ち、現在より高速自転させていった際の表面傾斜の頻度分布 [A] とマップ [B]
- $P = 3.5$ h のとき表面傾斜 ($\sim 31^\circ$ [A]) は典型的な摩擦角 $\sim 35^\circ$ に近く、表面傾斜変化幅は最小 [B] となった。これは**高速自転時に赤道リッジが形成された**ことを示唆。
- 塑性 FEM 計算 [C]: $P = 3.5$ h のとき、構成物質の凝集力が一様で弱ければ、降伏領域 (黄色) が内部に広がり、赤道面に平行な動径方向と自転軸に沿う方向の塑性変形が生じる。



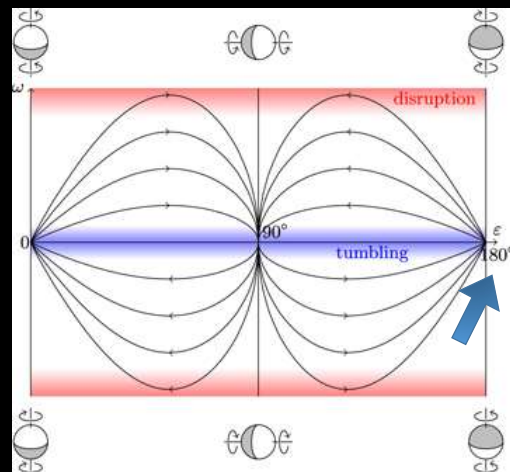
07/25

YORP サイクル: 自転変化

- **YORP効果**: 非等方な熱放射によるトルクが生む、小天体の自転軸傾斜角: ϵ と自転角速度: ω の、ゆっくりとした変化のこと。
- YORPサイクル (右図: ϵ - ω ダイアグラム ただし、ある形状を仮定したもの)
- YORP自転変化のタイムスケール

$$\sim 3 \times 10^6 \left(\frac{D}{1 \text{ km}} \right)^2 \left(\frac{a}{1 \text{ au}} \right)^2 \text{ yr}$$

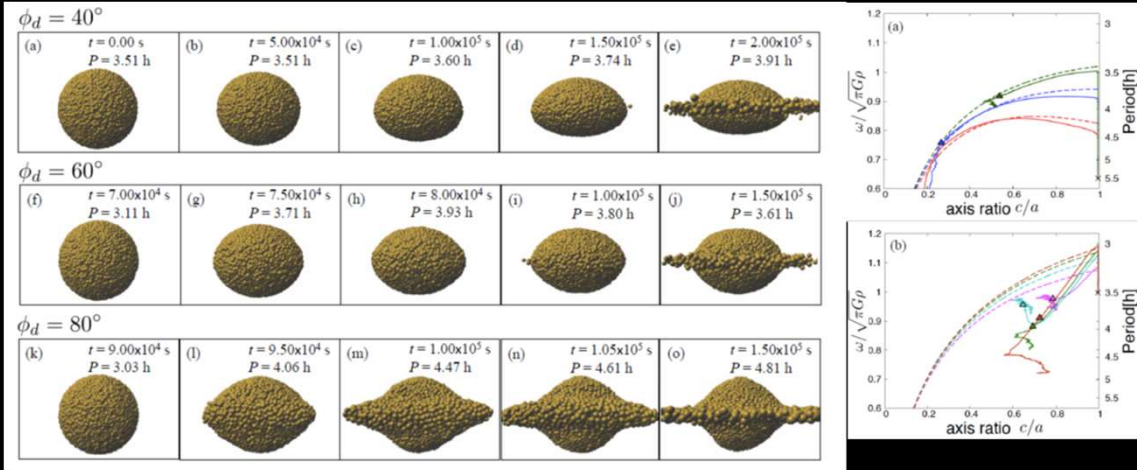
- リュウグウの自転状態は $\epsilon = 180^\circ$ に向かってスピンドアウン (右図の青の矢印)



08/25

回転不安定の粉体 SPH シミュレーション

Sugiura+ 2020, submitted to *Icarus*

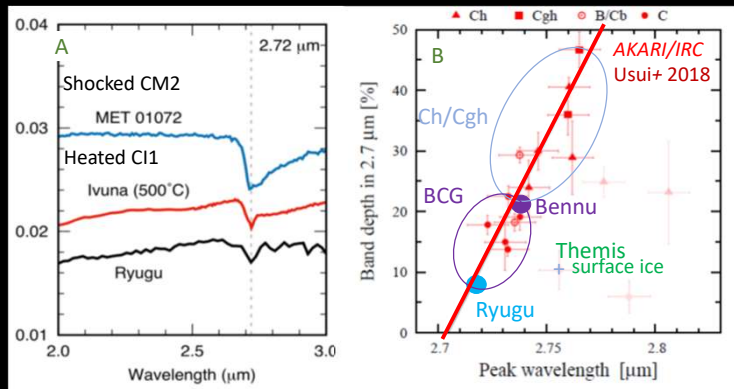


10/25

4. リュウグウ上の水 (含水鉱物)

Kitazato+ 2019 Science

- NIRS3 によって全球にわたる **2.72 μm の吸収** (~7.5%) Mg-OH [A: Kitazato+ 2019, *Science*].
- 吸収の中心波長・形状は加熱/衝撃・含水炭素質コンドライトと対応 [A]
- 広義C型小惑星が示す(吸収波長 vs 深度)トレンドにRyugu, Bennuは乗っている.
- 強度が弱く, 大気圏突入で分裂するため隕石として残りにくい



Material strength

Meteorites/IDPs

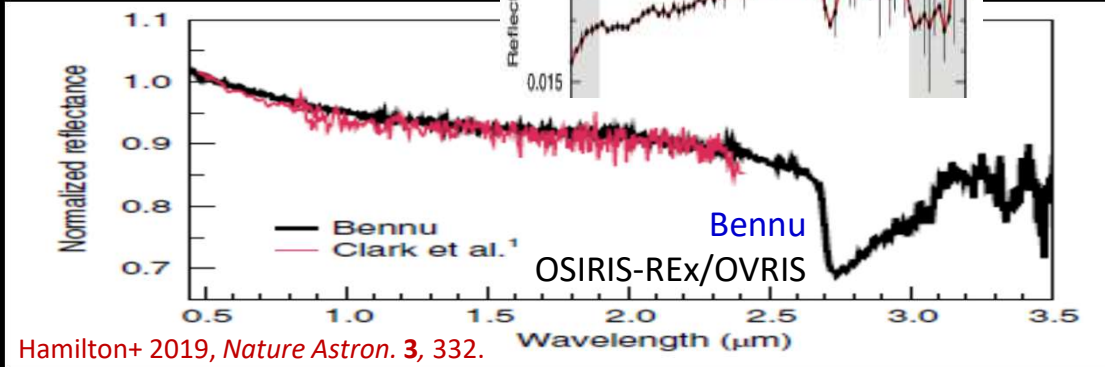
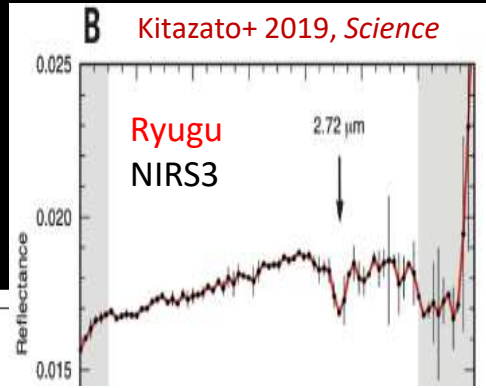
Formation of shape

11/25



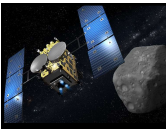
Ryugu と Bennu 3 μm帯吸収の比較

- Ryugu: 2.72 μm, ~7.5%, 狭帯 →
- Bennu: 2.74 μm, ~20%, 広帯 ↓



Hamilton+ 2019, *Nature Astron.* **3**, 332.

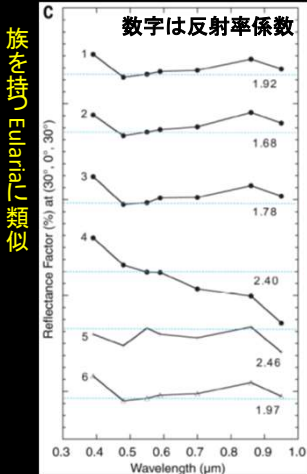
12/25



5. 起源小惑星族の推定

Ryugu 可視スペクトル $p_v = 4.5 \pm 0.2\%$, $S = 10\%/μm$

Bright spots: S型小惑星の破片? S型 BSsの反射sp

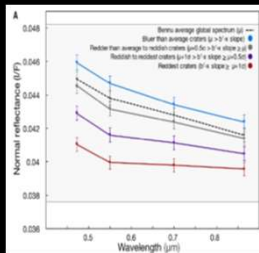


族を呼ぶ Eulariaに類似

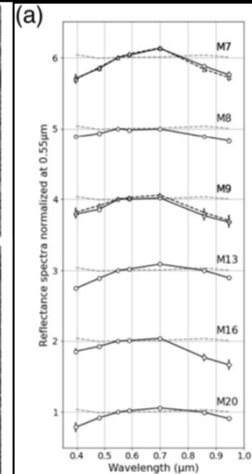
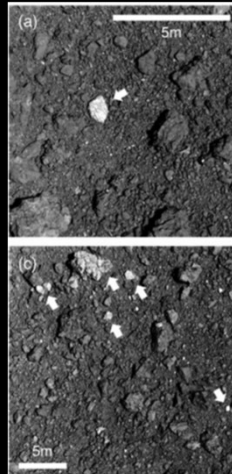
“赤い”領域

Otohime Boulder
“青い”領域 (明るく平滑な岩塊)

Bennu 可視表面反射スペクトル



DellaGiustina+ 2020, *Science* eabc3660



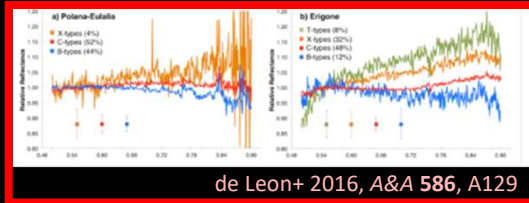
Sugita+ 2019, *Science*

Tatsumi+ 2020, *Nature Astron.*

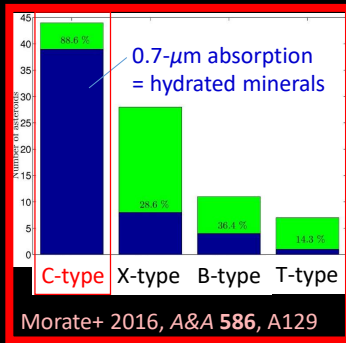
小惑星帯内側の炭素質小惑星族(低軌道傾斜角)

族形成年代, ρ_v , S [μm^{-1}]

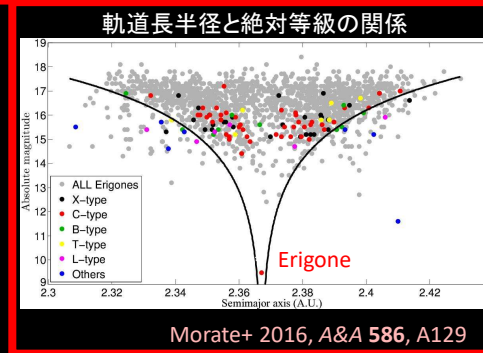
- Polana: 1250–1550 Ma, 0.044, -12%
- Eulalia: 680–1200 Ma, 0.054, -1.1%
- Erigone: 100–160 Ma, 0.041, 13%



de Leon+ 2016, A&A 586, A129



Morate+ 2016, A&A 586, A129

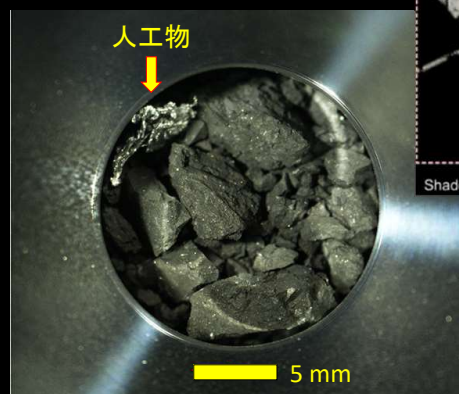


Morate+ 2016, A&A 586, A129

帰還試料が“鍵”：キャッチャーA室とC室からの試料

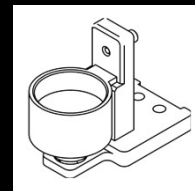
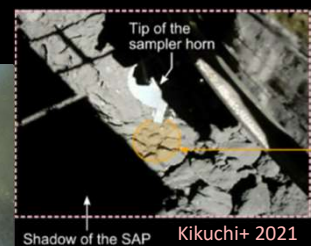


A室 (回収容器内) の光学顕微鏡像

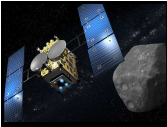


B室 (回収容器内) の光学顕微鏡像

©JAXA



回収容器概観



15/25

6. SCI実験 → 表層凝集力と天体年齢

- 第1回目TD時のONC-W1画像: 大量の岩塊が舞い上がった ⇒ 表面の凝集力はかなり弱い
- リュウグウ構成粒子の凝集力は
 - 天体の変形過程
 - 小惑星帯から地球への物質輸送過程
 - (クレーターリム付近の掘削流・破片放出を支配するため)クレーターサイズ分布と年代学
 にそれぞれ強く影響を与える
- 衝突装置 (SCI) による人工クレーター生成実験は表層の強度／凝集力を知る上で決定的だった



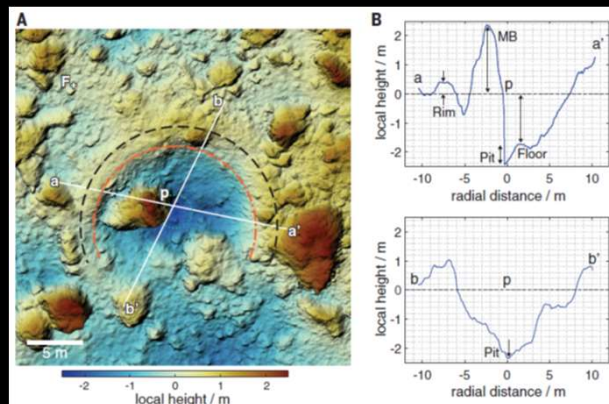
Morota+ 2020, Science



16/25

リュウグウでの人工クレーター生成実験 ('19 4/5)

- SCI クレーター (リム間直径で約18 m, $f=60$)



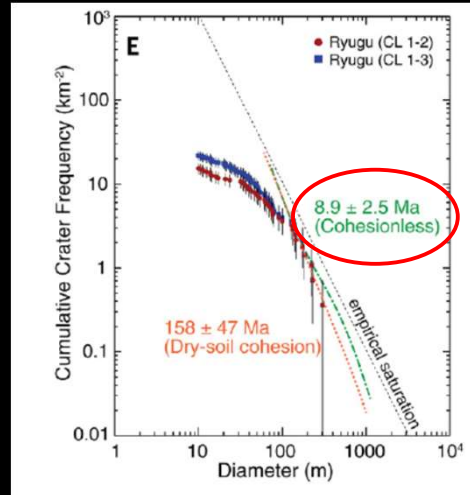
Credit: JAXA/U Tokyo/Kochi U/Rikkyo U/ Nagoya U/Chiba Inst of Tech/Meiji U/U Aizu/AIST

Arakawa+ 2020, Science

SCI実験結果のクレーター年代学への応用

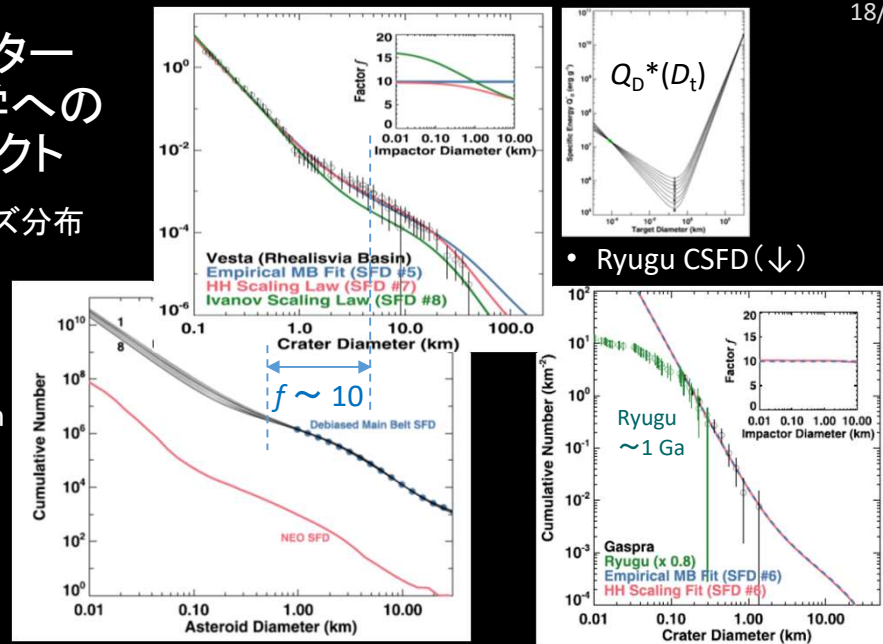
Sugita+ 2019, Science

- 衝突エネルギーと掘削クレーター直径の関係(スケーリング則)を確立
- クレーターが大きい \Rightarrow 年代は若く更新
- リュウグウ表層年代: 従来 160 Ma \Rightarrow **新たな推定: ~ 10 Ma**
- 起源小惑星衝突候補の破壊年代より1桁以上若い (Eularia: 830_{-100}^{+370} Ma) ...
 - リュウグウは、さらなる衝突破壊を経験?
 - 形成後に高速自転による形状変化によって表面が更新された?

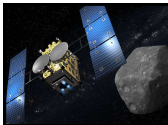


クレーター年代学へのインパクト

- MB小惑星のサイズ分布 (左下)
- {強度 \rightarrow 重力} 支配域遷移領域 (Q_D^* : 右上) が天体直径で数百mのへこみを生む
- MB小惑星上のクレーターのサイズ頻度分布 (CSFD: 中央上)



Bottke+ 2020, AJ 160, 14

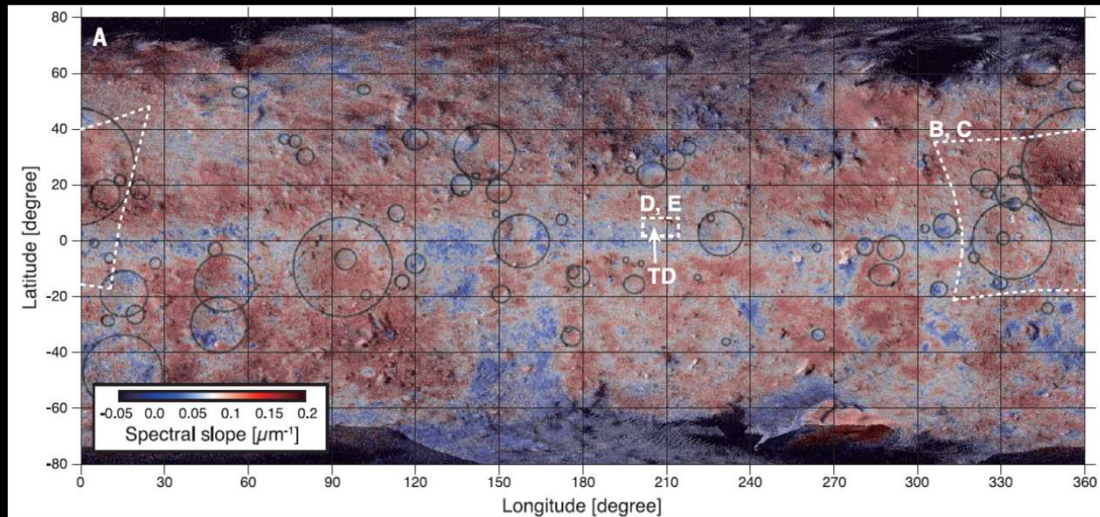


7. “赤”領域と“青”領域から推定される歴史

19/25

両極, 赤道リッジ(山脈), 地溝(トラフ)で“青い”

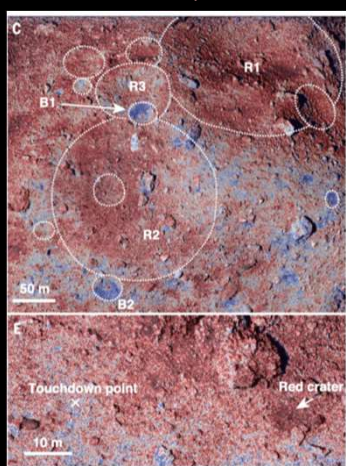
Morota 2020, *Science*



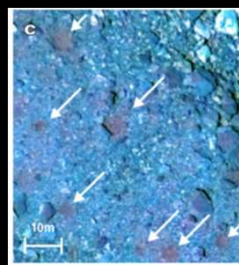
クレーターと色の堆積学的対応関係の解析 ⇒ “青い”クレーターは若い！

20/25

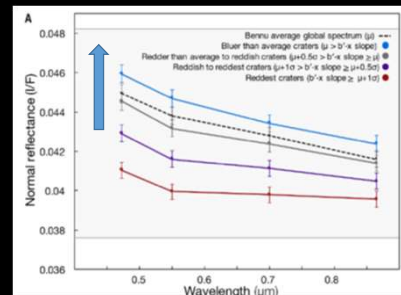
Morota+ 2020, *Science*



- Ryuguは熱変成・宇宙風化により赤化が示唆される
- “青い”クレーターほど若い



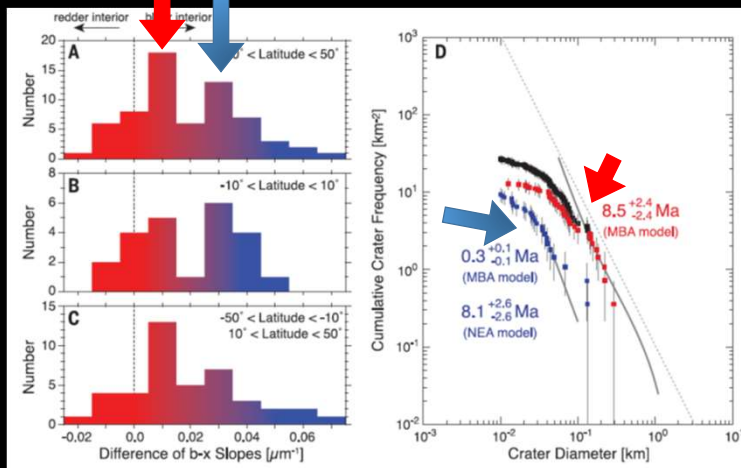
- 一方, Bennuは宇宙風化により $>0.55 \mu\text{m}$ で青化が示唆される
- “赤い”クレーターほど若い？
- ただし, Ryugu “青い” craters は, Bennu “赤い” craters より赤い



DellaGiustina+ 2020, *Science* eabc3660

21/25

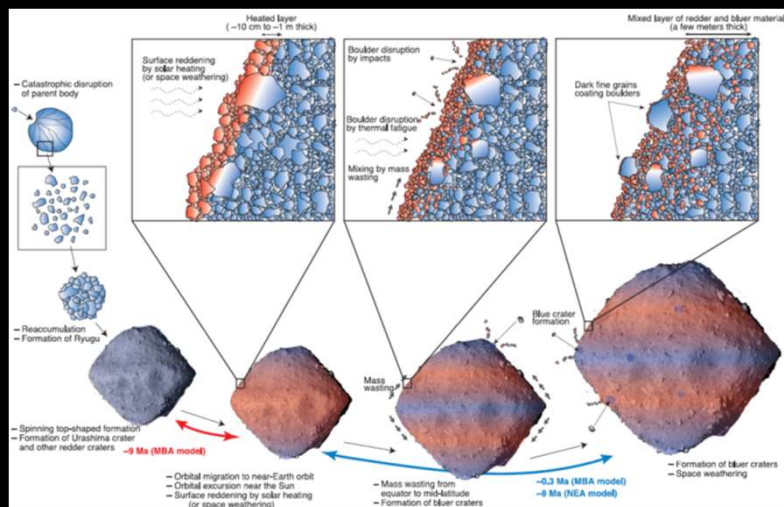
短期間で表面の赤化が起こった ⇒ クレーター年代学による赤化時期の推定

Morota+ 2020, *Science*

- クレーター内外のb-x勾配(0.48–0.86 μm)差でヒストグラム化; 内が“赤”と“青”のものに分離(A, B, C: 緯度帯別)
- クレーター累積サイズ頻度分布を“赤”と“青”それぞれのクレーターで表示(D): “赤”は小惑星帯で 8.5 ± 2.4 Maに, “青”は近地球領域で 8.1 ± 2.6 Maに相当

22/25

リュウグウの歴史の再構築

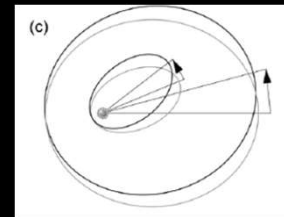
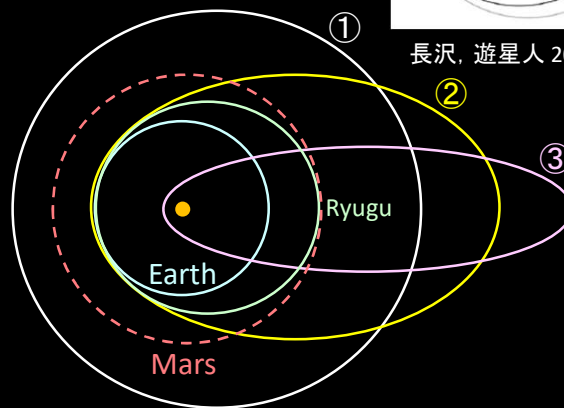
Morota+ 2020, *Science*

- リュウグウは小惑星帯で“青”物質で形成
- 小惑星帯でコマ型形成
- やがて地球接近小惑星となり, さらに一次的に近日点が太陽に近い軌道をとったため, 放射や太陽風で急速に赤化
- 極近く/谷は赤化せず
- すぐに近日点は離れ, 赤化は短期間で停止
- 崖崩れ(赤道リッジ)や天体衝突で地下の“青”が一部で表面に露出

23/25

永年共鳴による軌道進化：太陽近接軌道

- ν_6 : 小惑星と土星で楕円軌道の近日点方向の回転角速度が同期
- 軌道長半径を保存しながら離心率が増大: ① ⇒ ②
- このとき、一次的に ③ の状態が達成されれば、太陽による赤化が進行
- 地球・火星による重力散乱で遠日点距離が変化



長沢, 遊星人 2008 vol4

24/25

8. まとめ

- リュウグウのコマ型形状は過去の高速自転時に地滑りにより形成された
 - YORP効果による自転速度変化 or リュウグウ形成時の再集積時
 - 楕円体化表面地滑りや内部変形, 表層や内部の強度・凝集力に依存
 - 形成シナリオの弁別には, 帰還試料の地上分析とBennuとの比較が重要
 - NIRS3・ONC-T ⇒ リュウグウは水と有機物を含有. 隕石には対応しない?
 - ONC-T赤青分布 ⇒ 軌道進化途上, 近日点の小さい軌道に短時間滞在
 - SCI実験 ⇒ 衝突クレーター付近の表層強度は非常に弱い, 不均質性もある
 - SCI実験 ⇒ リュウグウの表面年代は約1000万年 << 衝突族形成年代
表面地滑りによって過去のクレーターが消された.
- ⇒ 以上は, 帰還試料 (> 5.4 g) の地上分析と拡張ミッションで検証される見込み
現在は, キュレーションが進行中



はやぶさ2の主要な論文成果(近傍観測)

25/25

Watanabe et al. (2019), “Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu — a spinning top-shaped rubble pile”, *Science* **364**, 268.

Kitazato et al. (2019), “The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy”, *Science* **364**, 272.

Sugita et al. (2019), “The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes”, *Science* **364**, eaaw0422.

Jaumann et al. (2019), “Images from the surface of asteroid Ryugu show rocks similar to carbonaceous chondrite meteorites”, *Science* **365**, 817.

Okada et al. (2020), “Highly porous nature of a primitive asteroid revealed by thermal imaging”, *Nature* **578**, 529.

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

Morota et al. (2020), “Sample collection from asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2: Implications for surface evolution”, *Science* **368**, 654.

Grott et al. (2019), “High porosity boulders identified on C-type asteroid (162173) Ryugu”, *Nature Astron.* **3**, 971.

Tatsumi et al. (2020), “Bright boulders suggest past collision between an anhydrous-silicate-rich asteroid and the parent body of Ryugu” *Nature Astron.* doi:10.1038/s41550-020-1179-z

Kitazato et al. (2021), *Nature Astron.* Doi:10.1038/s41550-020-01271-2