



第13回宇宙科学奨励賞記念講演

小惑星探査機の観測と室内実験による  
C型小惑星の進化史の解明

巽 瑛理

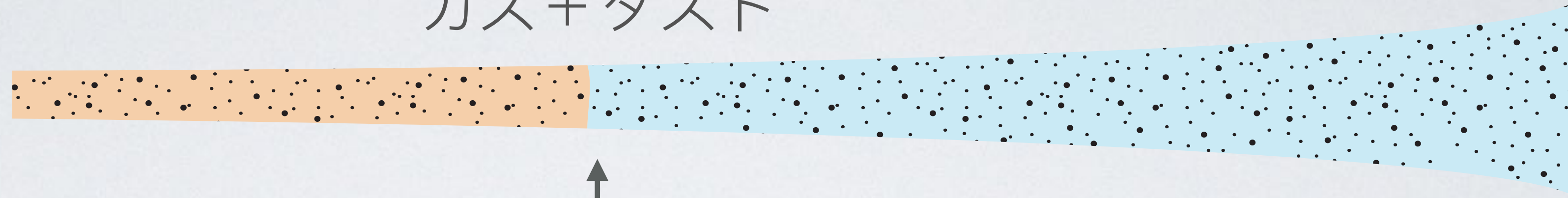
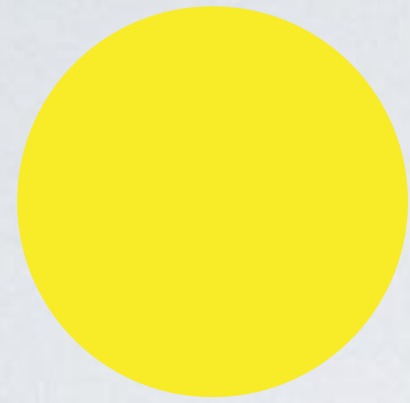
Instituto de Astrofísica de Canarias

2021-04-27

ダイナミックな

# 惑星形成論

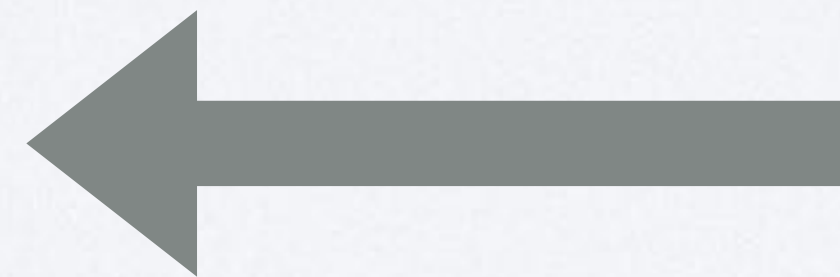
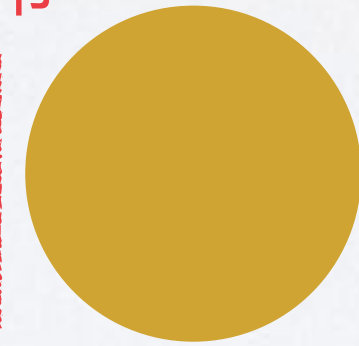
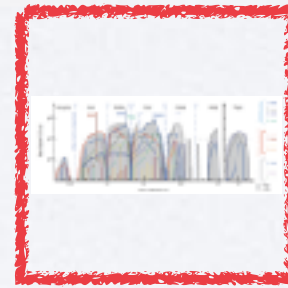
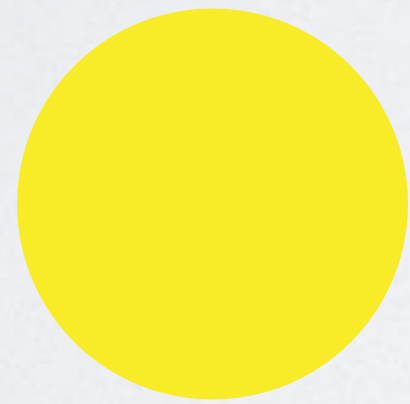
ガス+ダスト



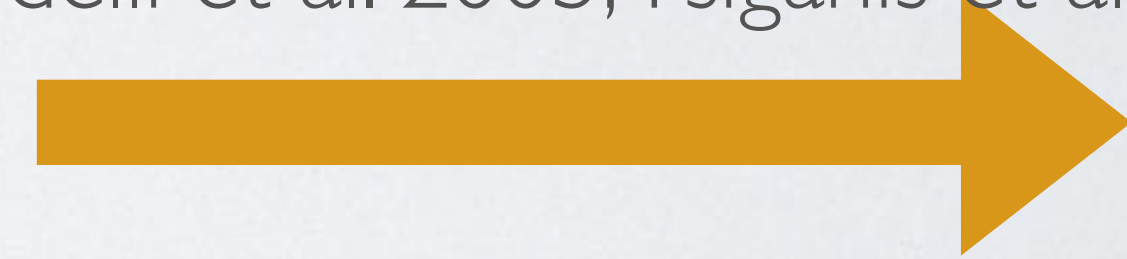
↑  
雪線

Hayashi et al. (1985)

e.g. Nice model  
(Gomes et al. 2005, Levison et al. 2005,  
Morbidelli et al. 2005, Tsiganis et al. 2005)



e.g. Grand-Tack model (Walsh et al. 2011)

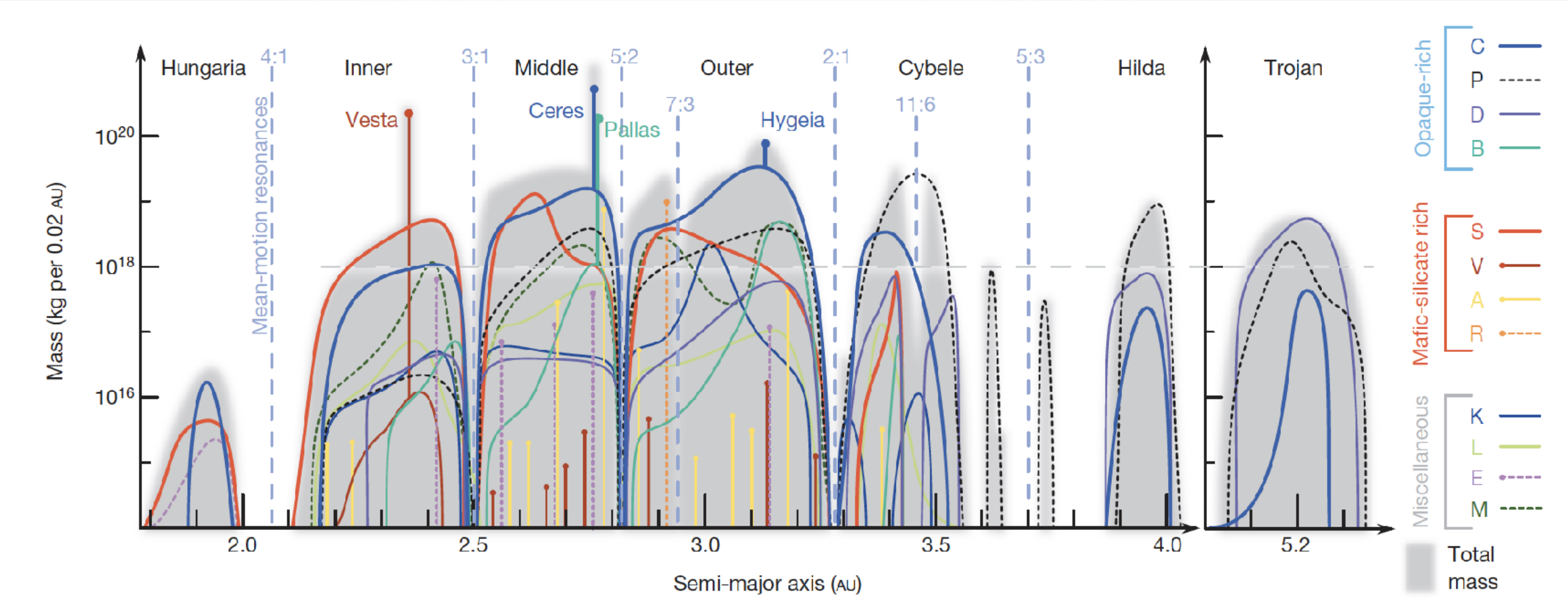


小惑星帯



ダイナミックな

# 惑星形成論



DeMeo & Carry (2014)

もともと大きく環境の異なるところでできた、苦鉄質なもの(S)と炭素質なもの(C)が動径方向に混ざり合っている。

# 惑星科学における小惑星の重要性

- 太陽系形成の初期条件  
小惑星は地球をはじめとする惑星の材料物質
- 生命の星・地球になるための条件  
小惑星による地球への水・有機物供給



# サンプルリターン時代

- 1999年→2004年→2006年

スターダスト→彗星8IP Wild

- 2003年→2005年→2010年

はやぶさ→S型小惑星イトカワ

S型は内側小惑星帯に最も多く存在。

S型小惑星と普通コンドライト隕石の関係が明らかに。

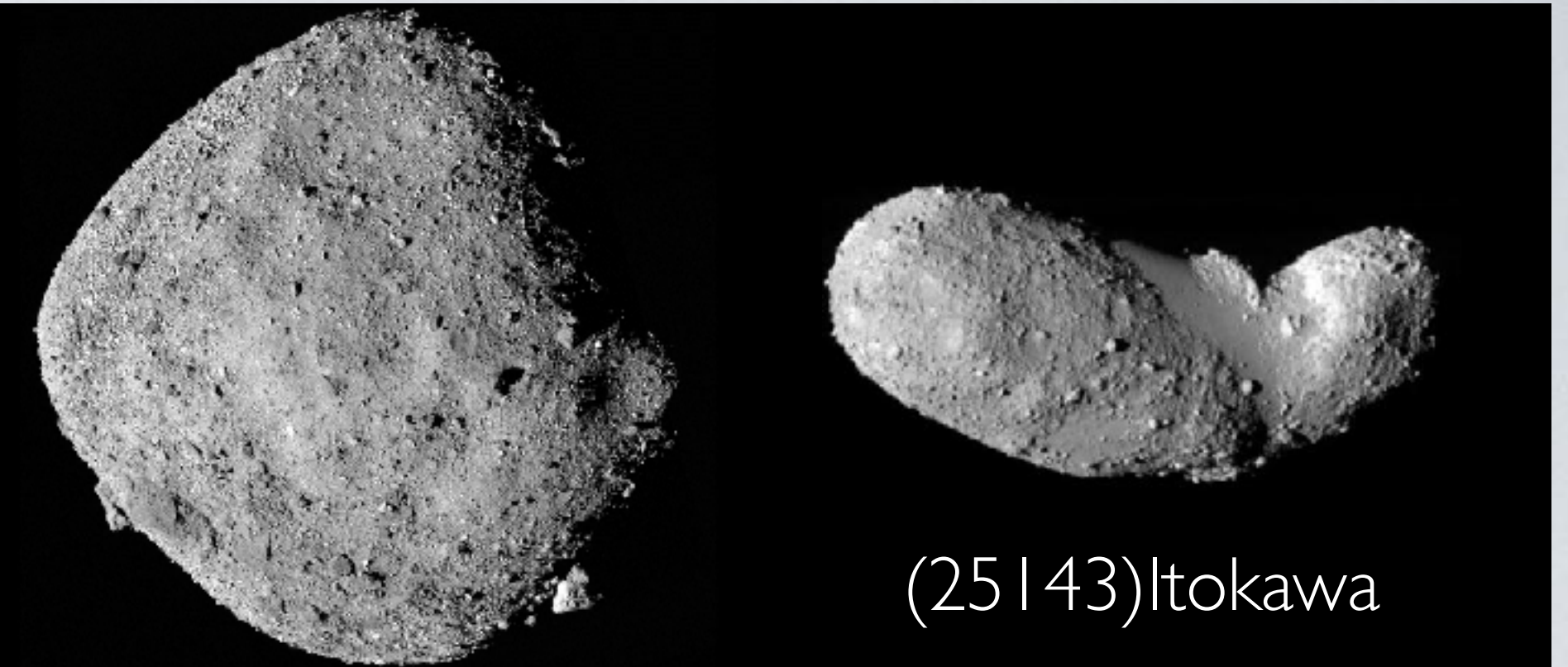
(Nakamura et al. 2011)

- 2014年→2019年→2020年12月

はやぶさ2→C型小惑星リュウグウ

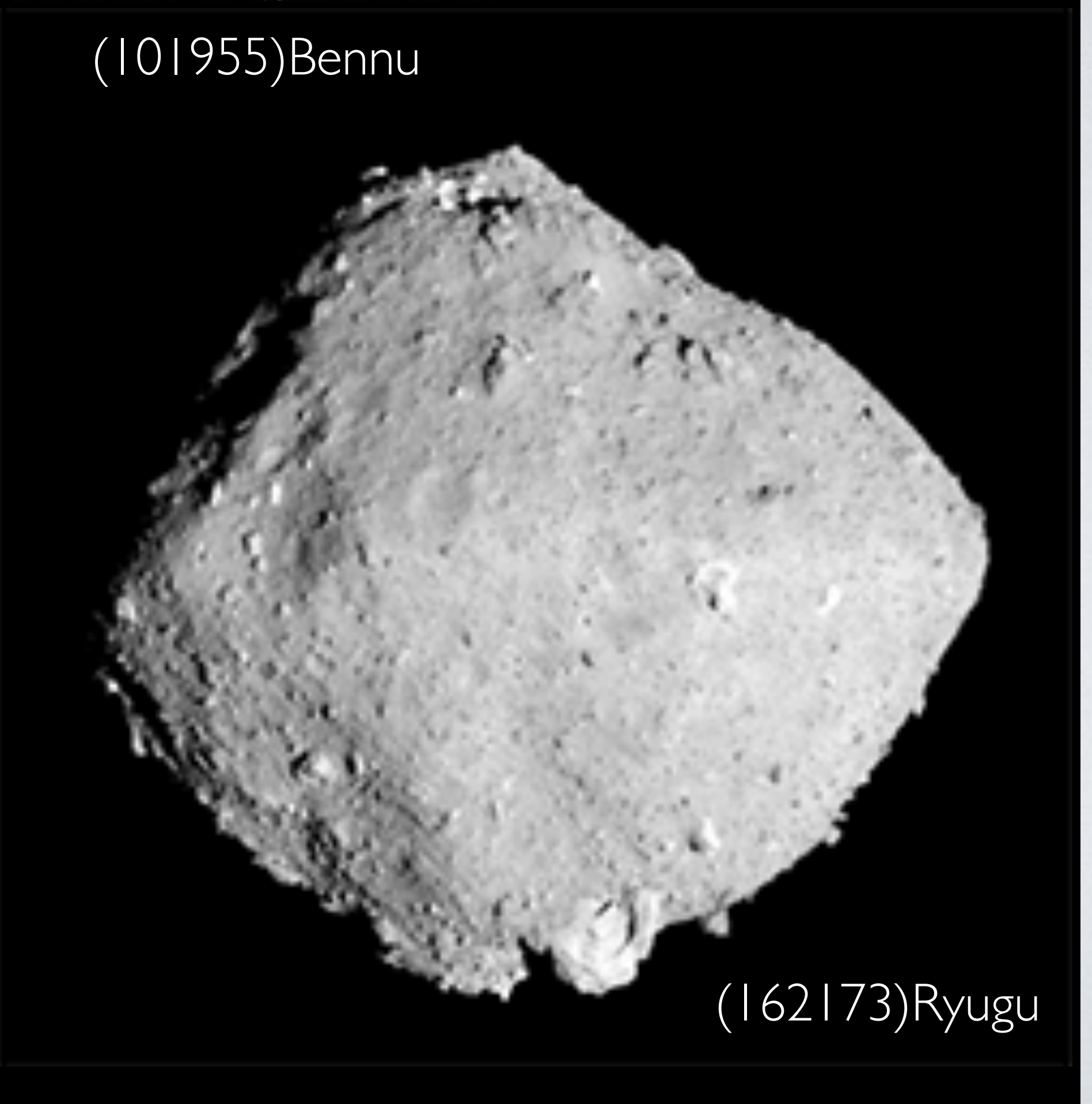
- 2016年→2020年→2023年（予定）

OSIRIS-REx→B型小惑星ベヌー



(101955)Bennu

(25143)Itokawa

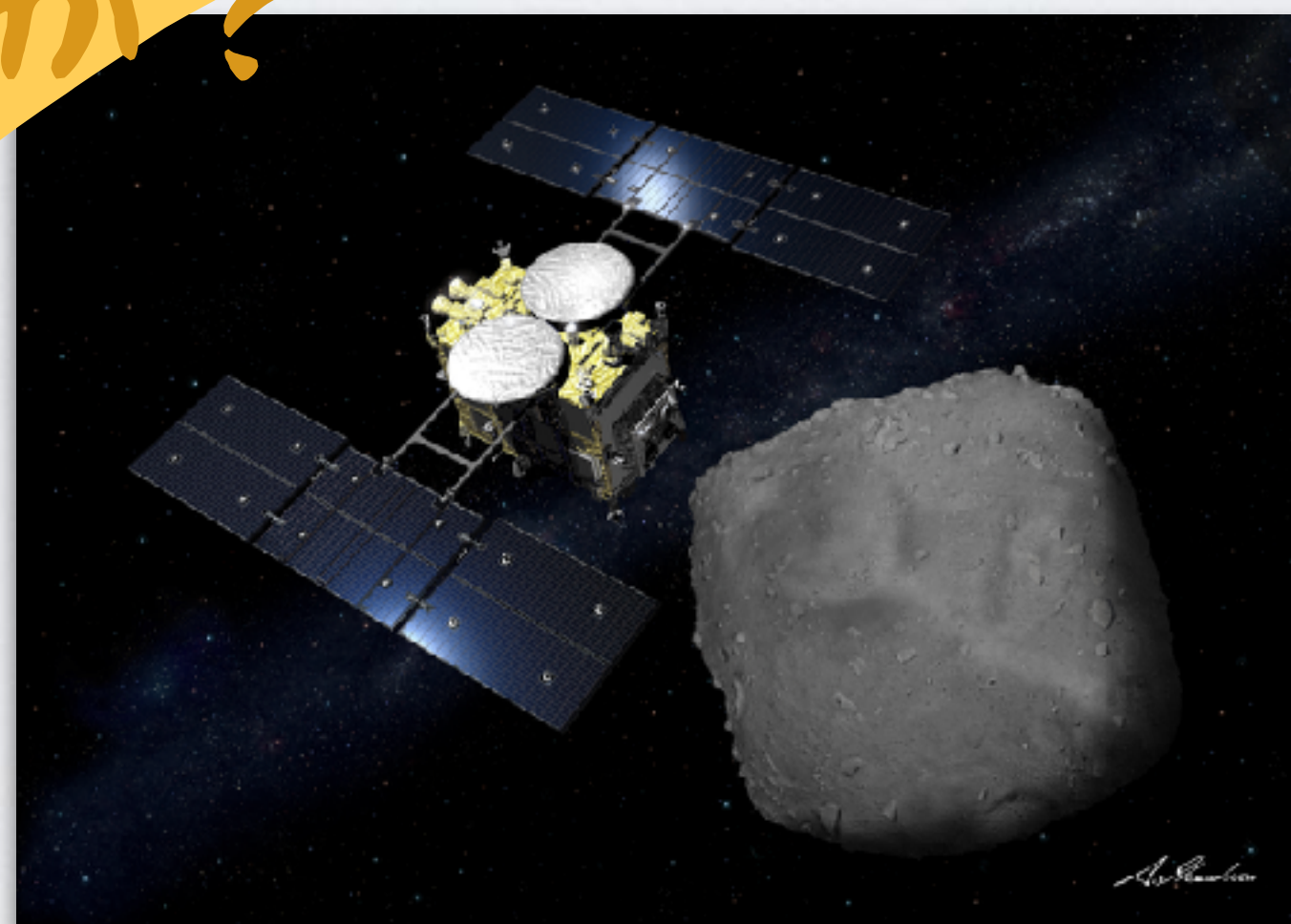
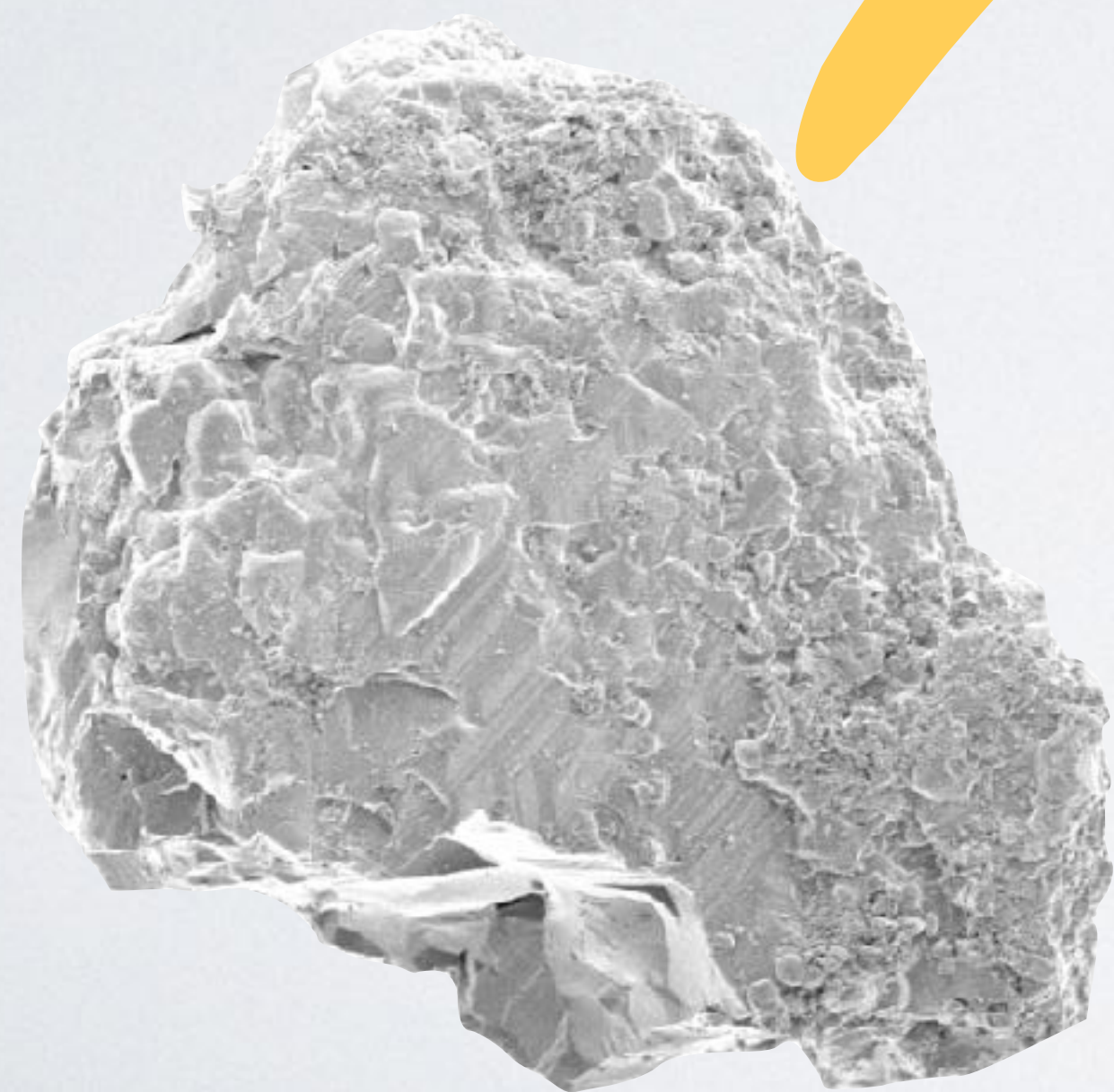


(162173)Ryugu



# サンプルと惑星形成史を結びつけるリモセンデータ

サンプルは  
どこから、どうやって、  
やってきたのか？



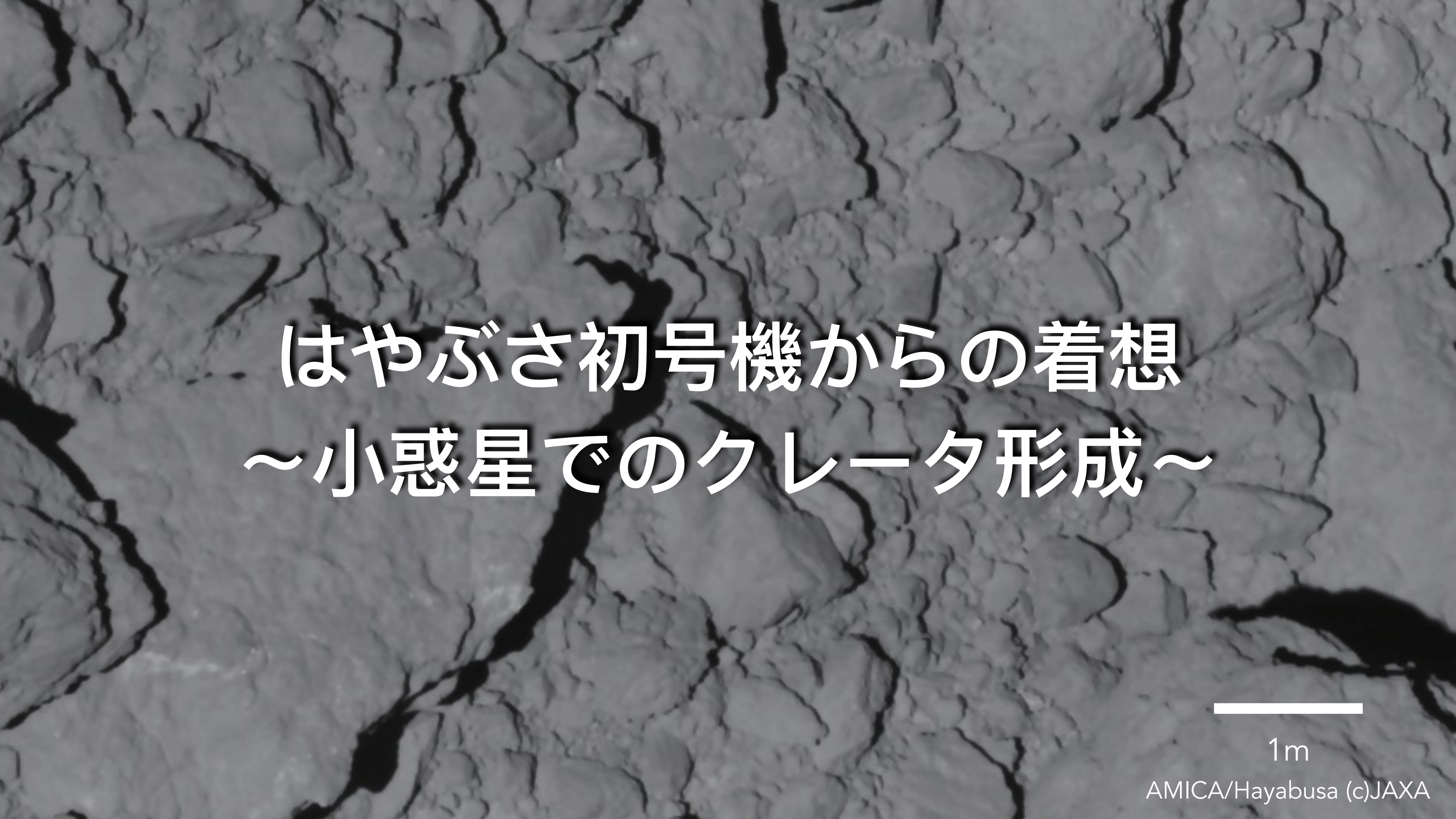
©池下章裕



©NASA

- 物質学的な情報 (e.g., 隕石タイプ、組成、同位体比) と観測的な情報 (e.g., スペクトルタイプ) の橋渡し。
- サンプルを採取した天体の歴史。
- 産状記載。





はやぶさ初号機からの着想  
～小惑星でのクレータ形成～



1m



# クレータ年代学

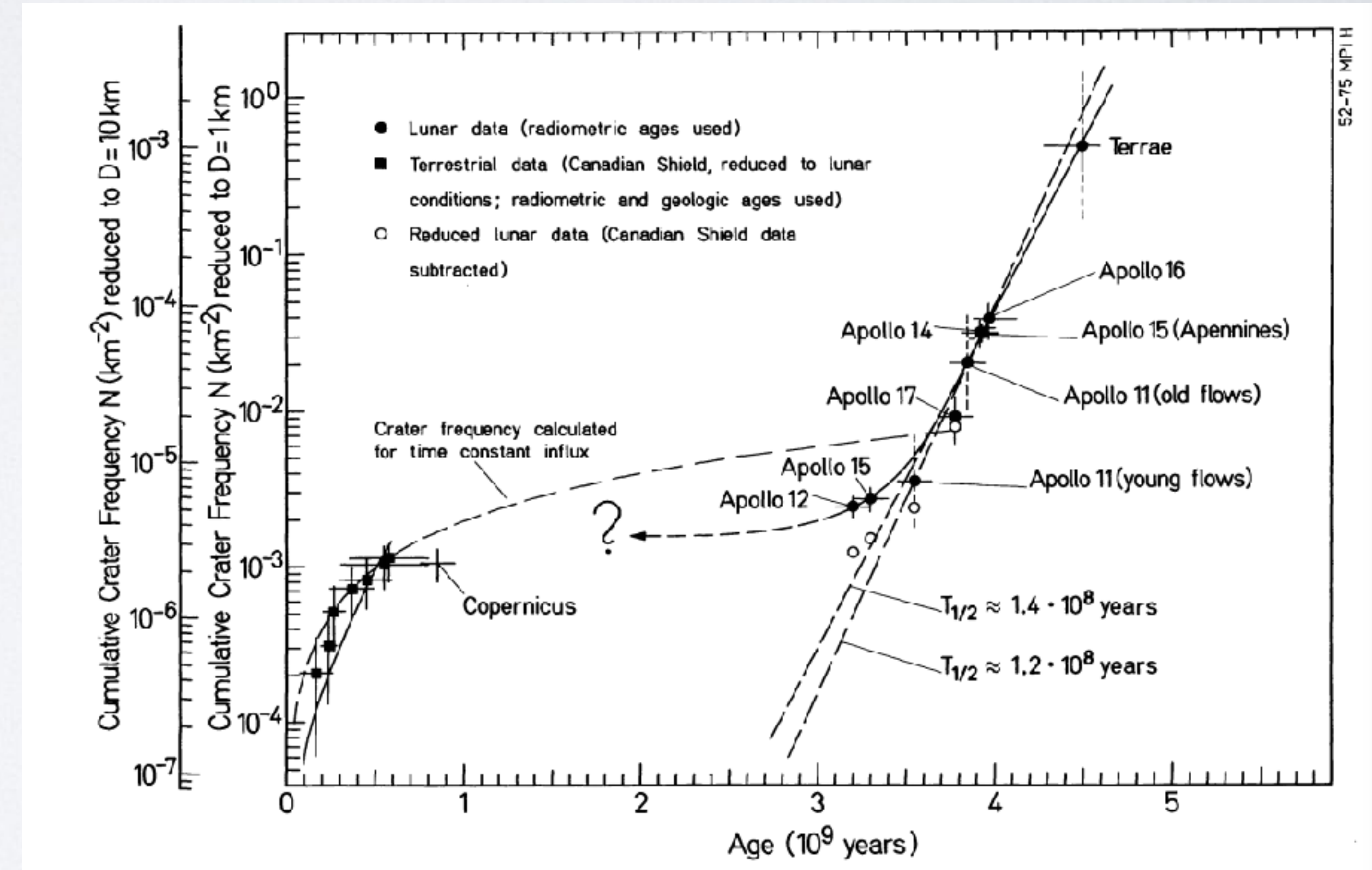
クレータ形成効率 × 衝突頻度 × 表面年代 = 観測されるクレータ数密度

↑  
インパクトに対する  
クレータサイズ

求めたいもの

多ければ多いほど古い

- 月
  - アポロサンプル→クレータ形成効率 × 衝突頻度
- 火星
  - 月モデルからの拡張。
- ラブルパイル小惑星
  - N体数値計算→衝突頻度
  - 実験→クレータ形成効率
  - これまでのクレータ則を使っていいのだろうか?





# 礫ターゲットに対するクレータ形成

- \* インパクターサイズ < 礫サイズ
- \* 縦型 2 段式軽ガス銃 @ JAXA による実験

## ターゲット

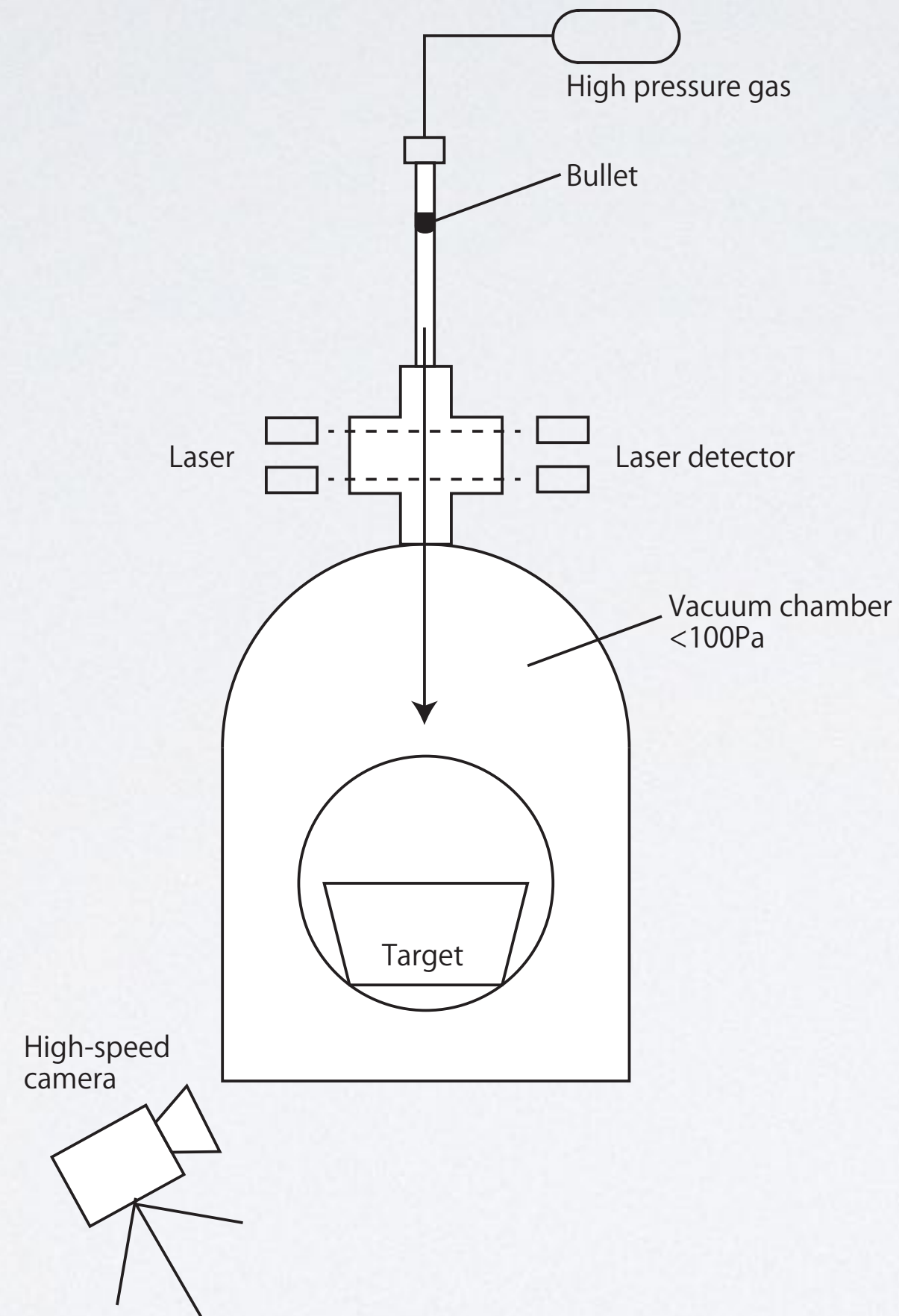
- Pumice  
~15mm, 9mm, 7mm
- Basalt  
~16mm, 9mm

## インパクター

- polycarbonate bullets  
10mm and 4.6mm

## 衝突速度

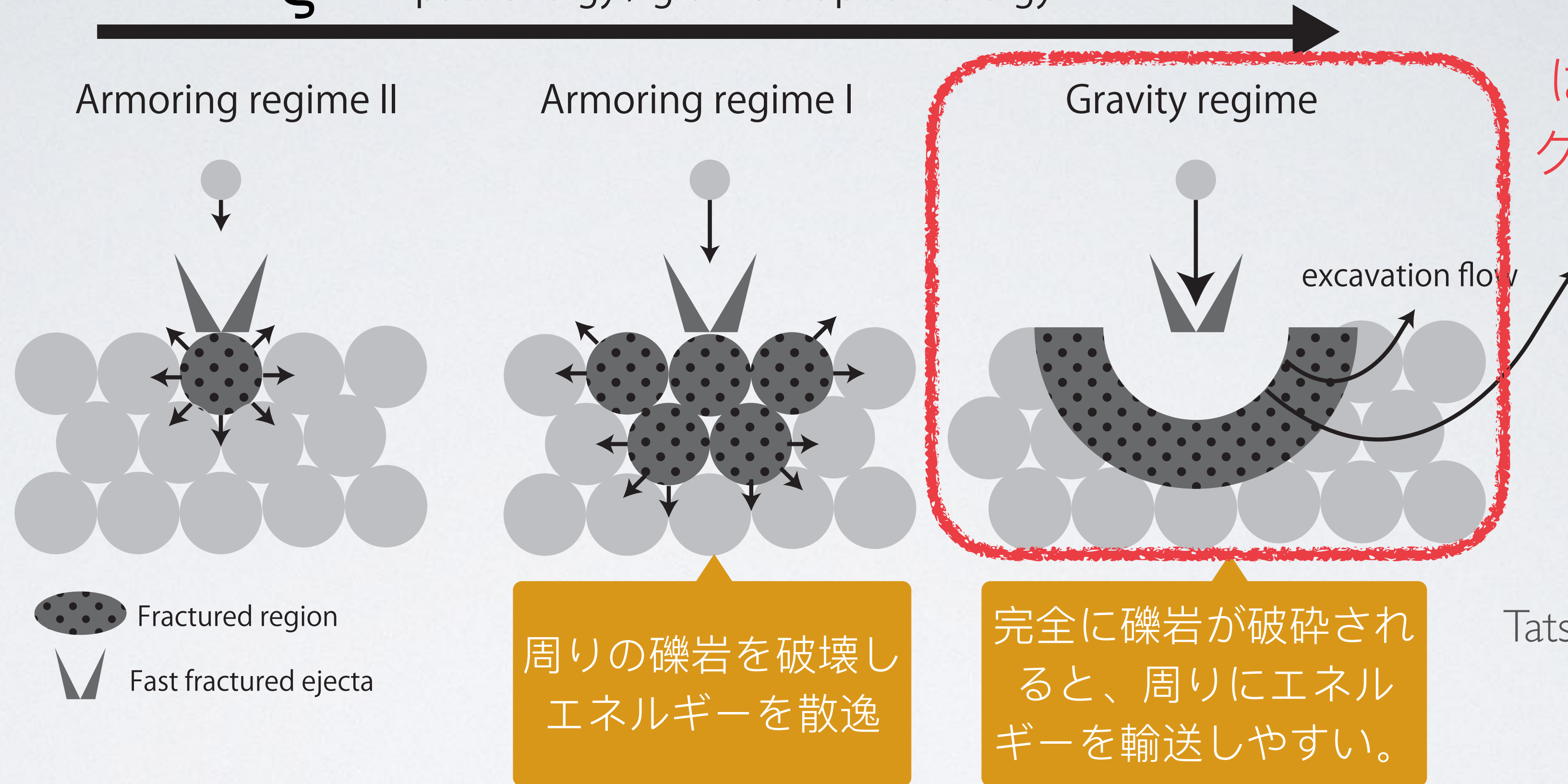
- low: 70 - 220 m/s
- high: 1 - 6 km/s





# 衝突エネルギーとクレータの形成モード

$$\xi = \text{Impact energy} / \text{grain disruption energy}$$



Tatsumi et al. (2018)

- 礫を破砕するためのエネルギーと衝突エネルギーの関係で、クレータ形成のモードが変わる。
- ここから小惑星のクレータ年代を推定することができる。
- はやぶさ 2 SCIでは重力則に近いものができると予測できる。(平均的な大きさの礫に衝突すると仮定)



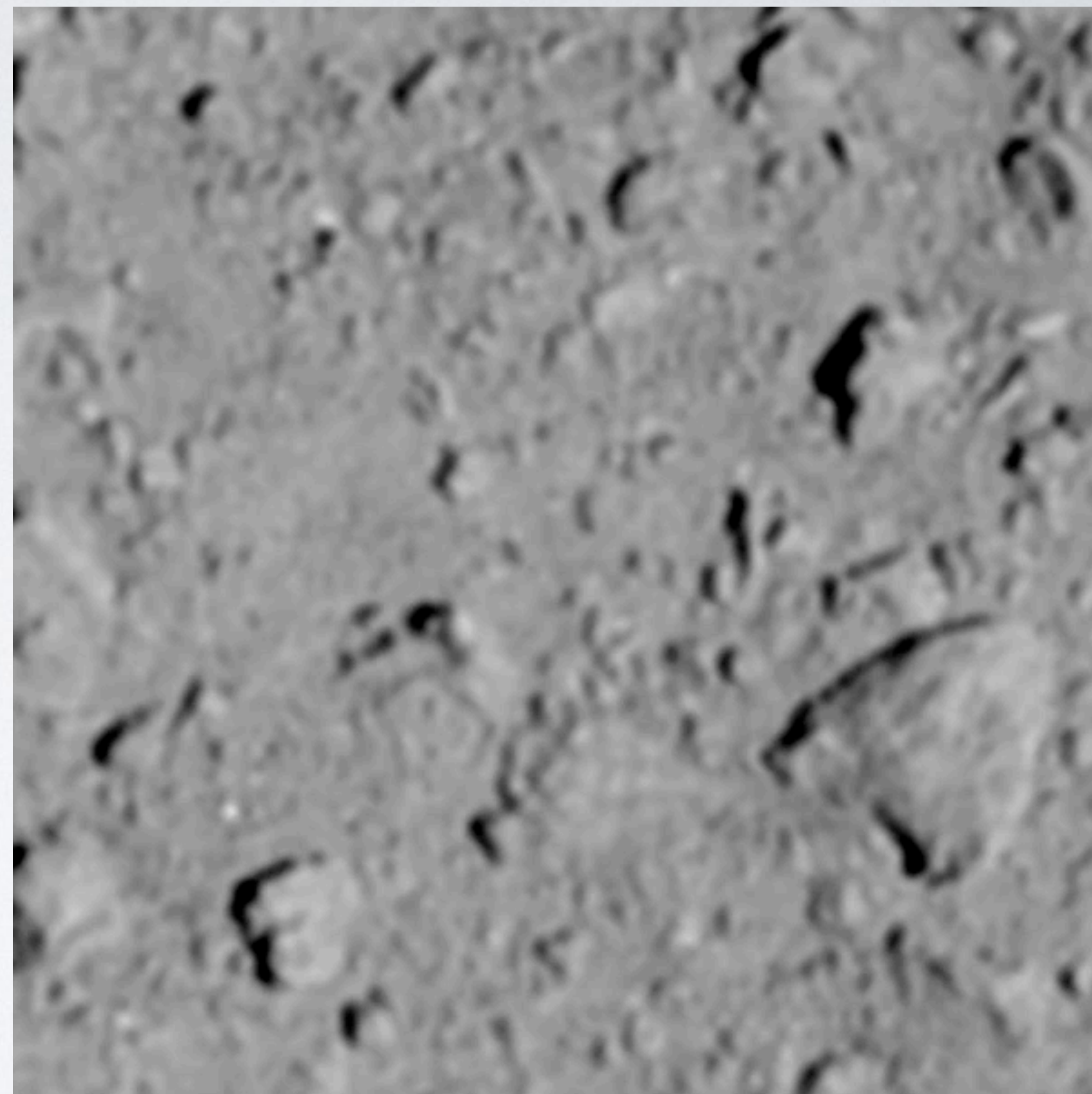
# SMALL CARRY-ON IMPACTOR (SCI)

- はやぶさ 2 で世界初の小惑星上でのクレータ形成実験 (**SCI**) が行われた。
- **SCI (おむすびころりん) クレータ**

Aarakawa et al. (2020)

- 半円形
- Diameter:  $14.5 \pm 0.8$  m
- Depth: 1.7 m
- 地上でできる 7 倍の大きさ。  
→重力則と整合的。

リュウグウの表面年代は10Myr程度と太陽系の歴史 (4.5Gyr) に比べると非常に若い。



5m

Aarakawa et al. (2020)





# 分光画像から解明されたC型小惑星史 ～母天体の情報を探して～

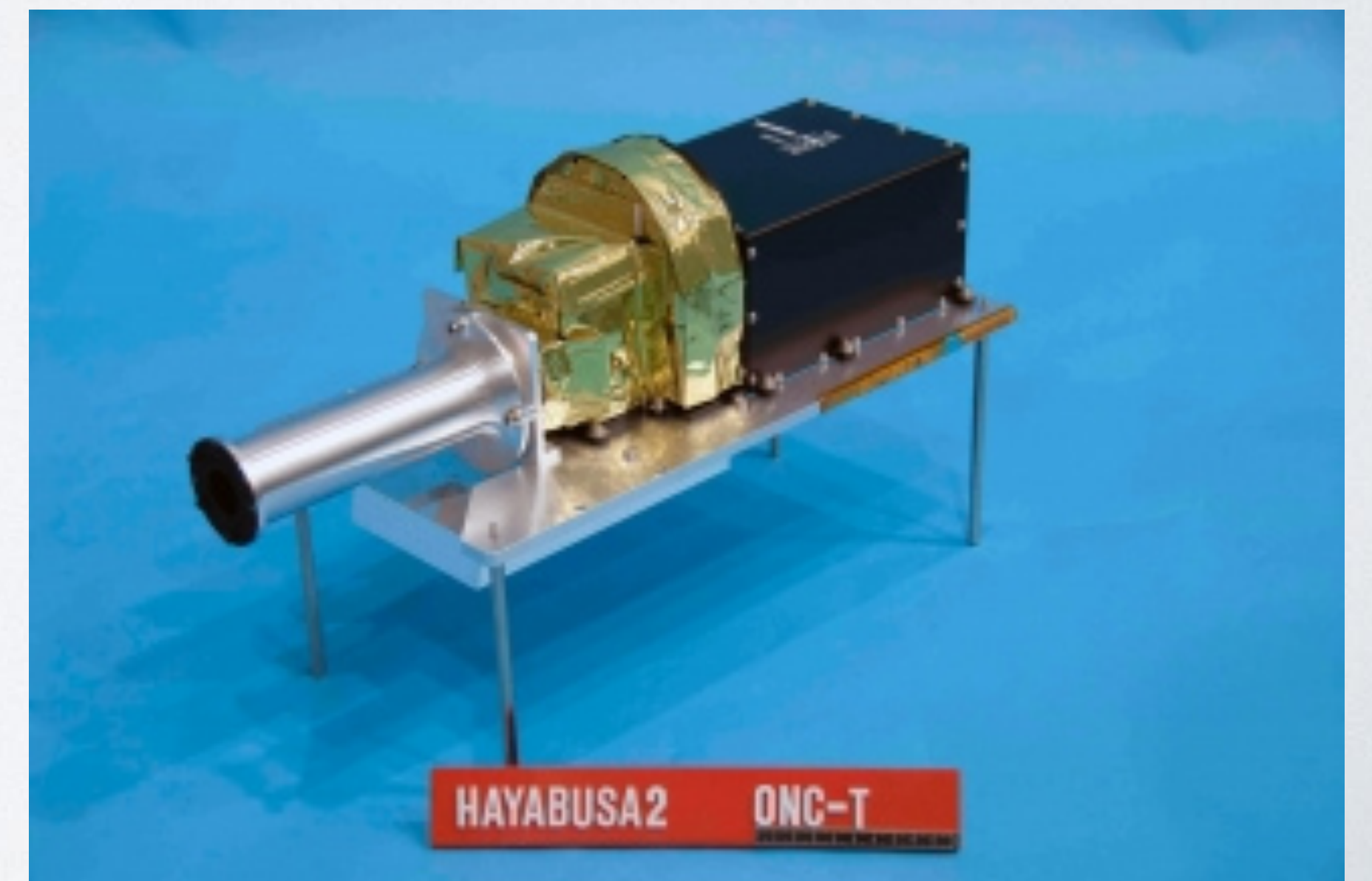
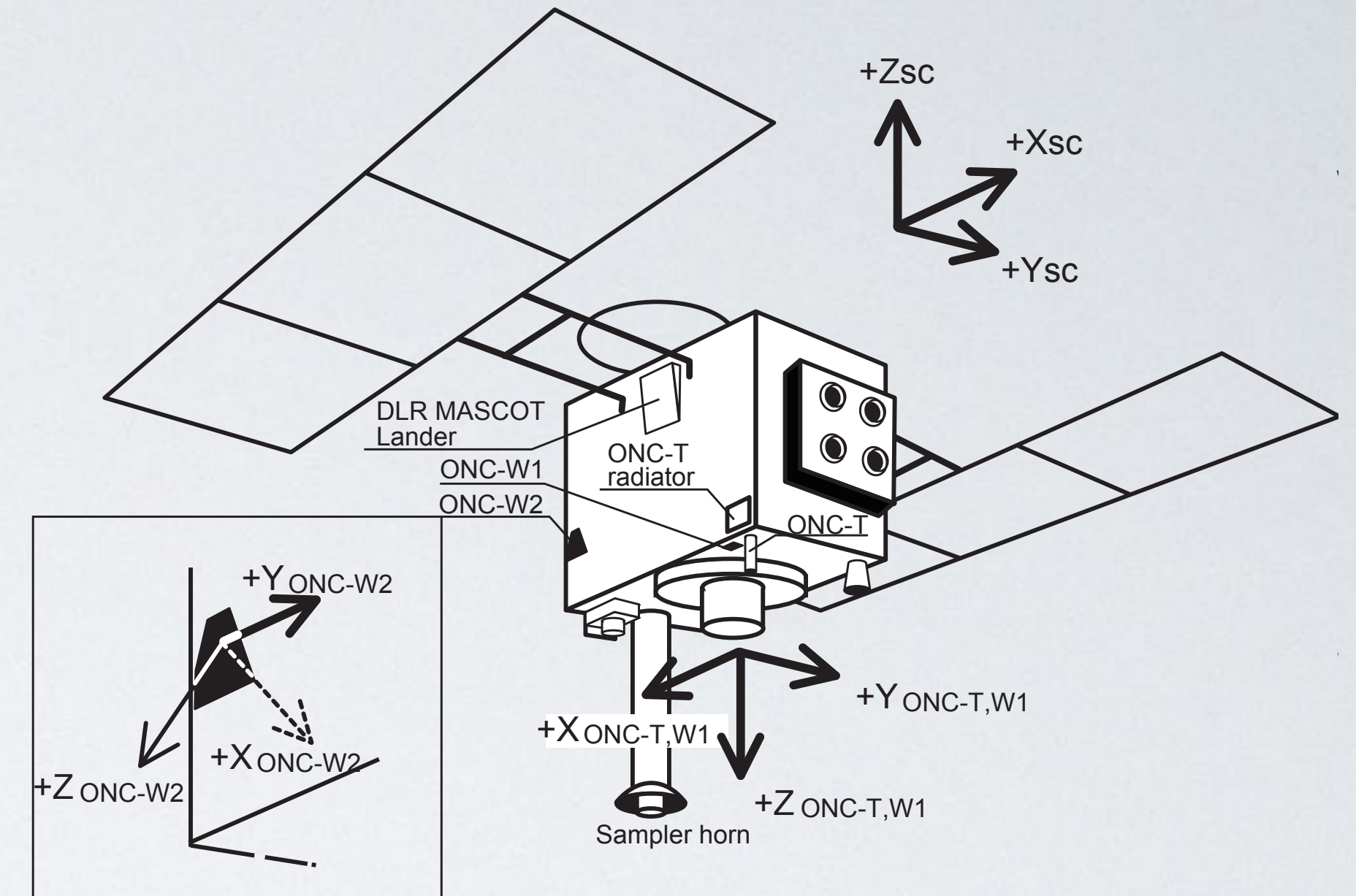
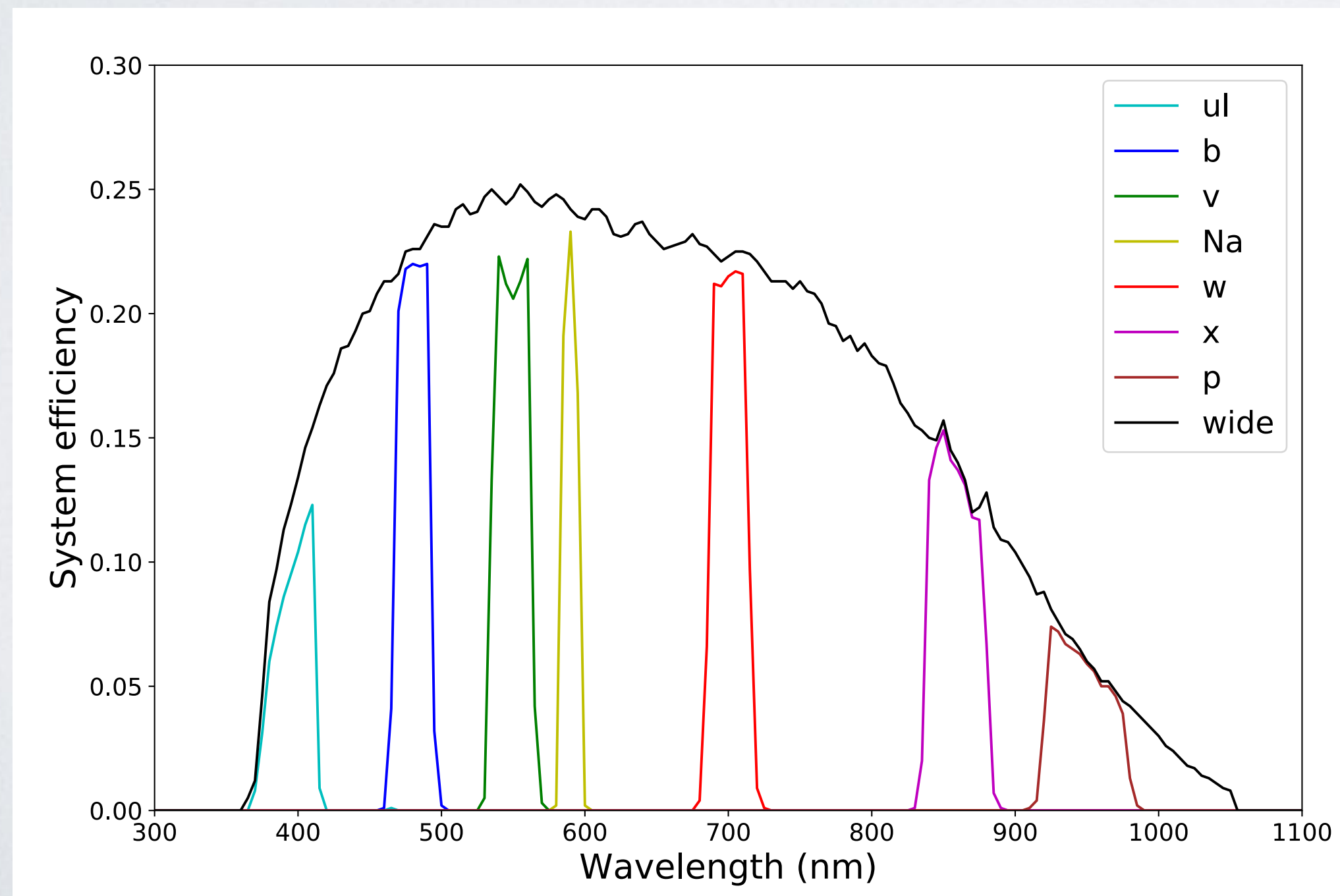
1m





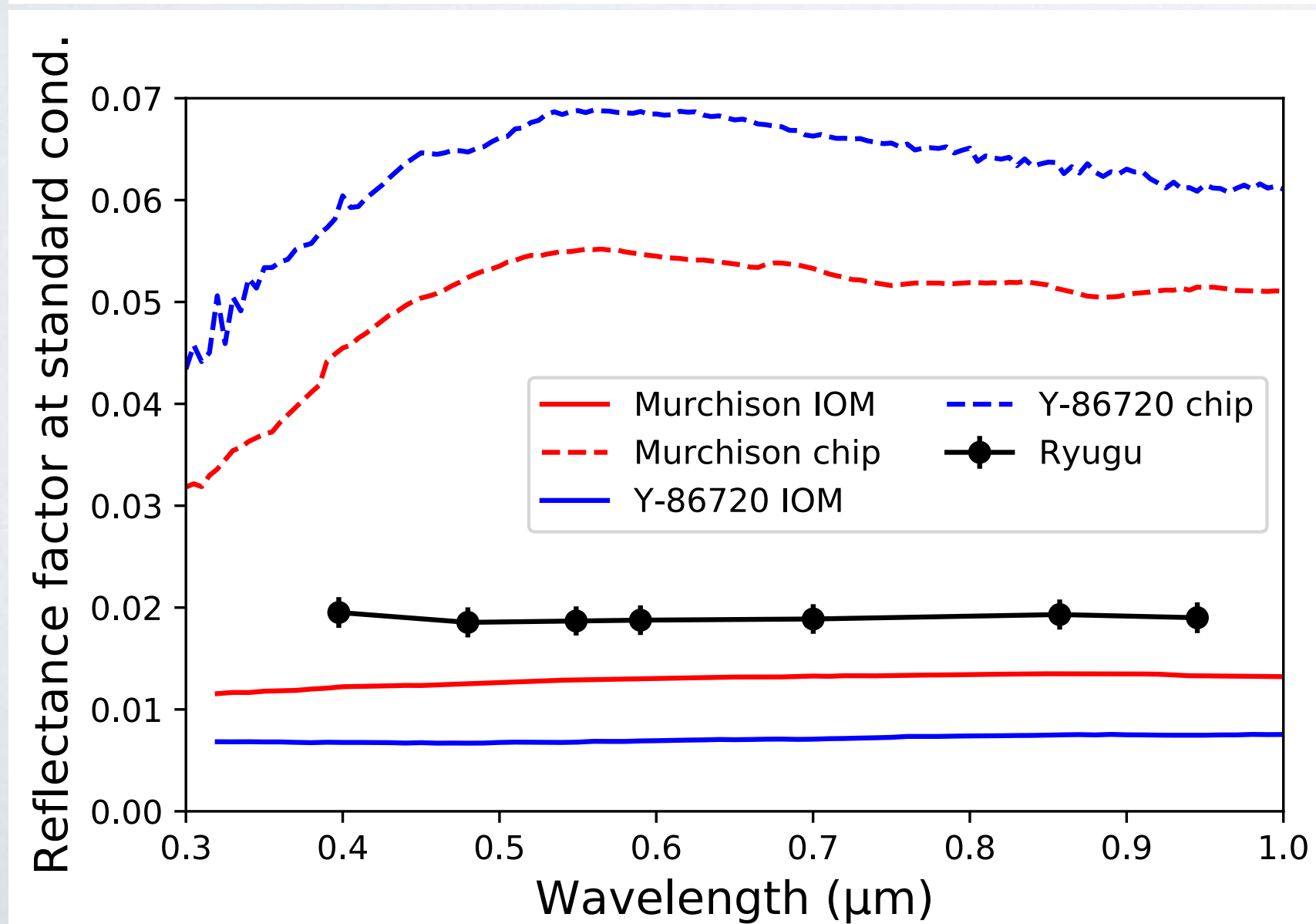
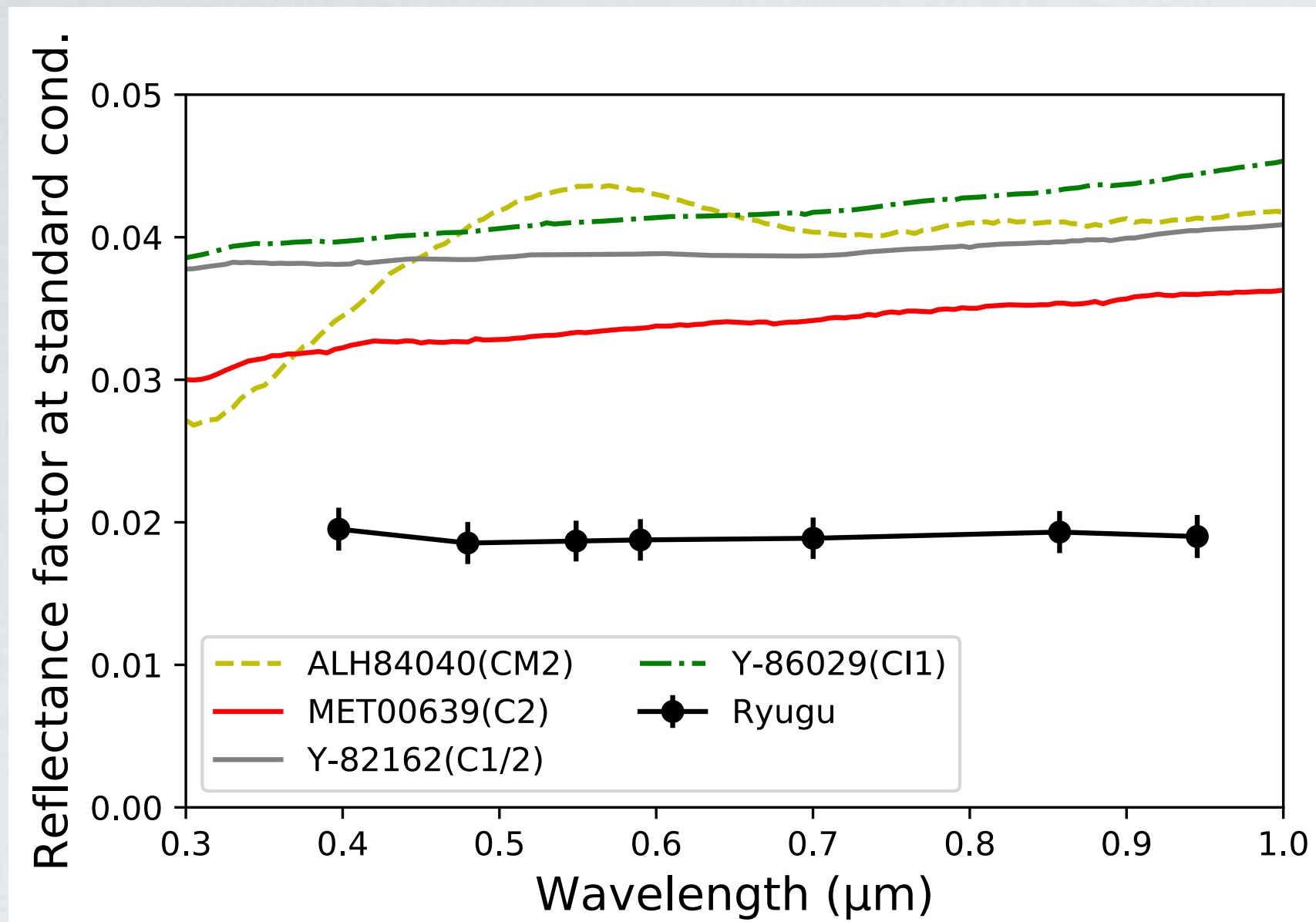
# はやぶさ2 光学航法カメラ (ONC)

- はやぶさ2 に搭載された可視カメラ。はやぶさのAMICAを元に作られた。  
**ONC-T**: 望遠カメラ  
**ONC-W1,W2**: 広角カメラ
- ONC-Tは0.40–0.85 $\mu\text{m}$ の波長域を7バンドで観測することができる。
- 地球から小惑星に到着するまでに、重点的なキャリブレーションを行った。空間的な測光精度<1%。(Tatsumi et al. 2019)





# C型小惑星リュウグウ： 全球平均反射スペクトル



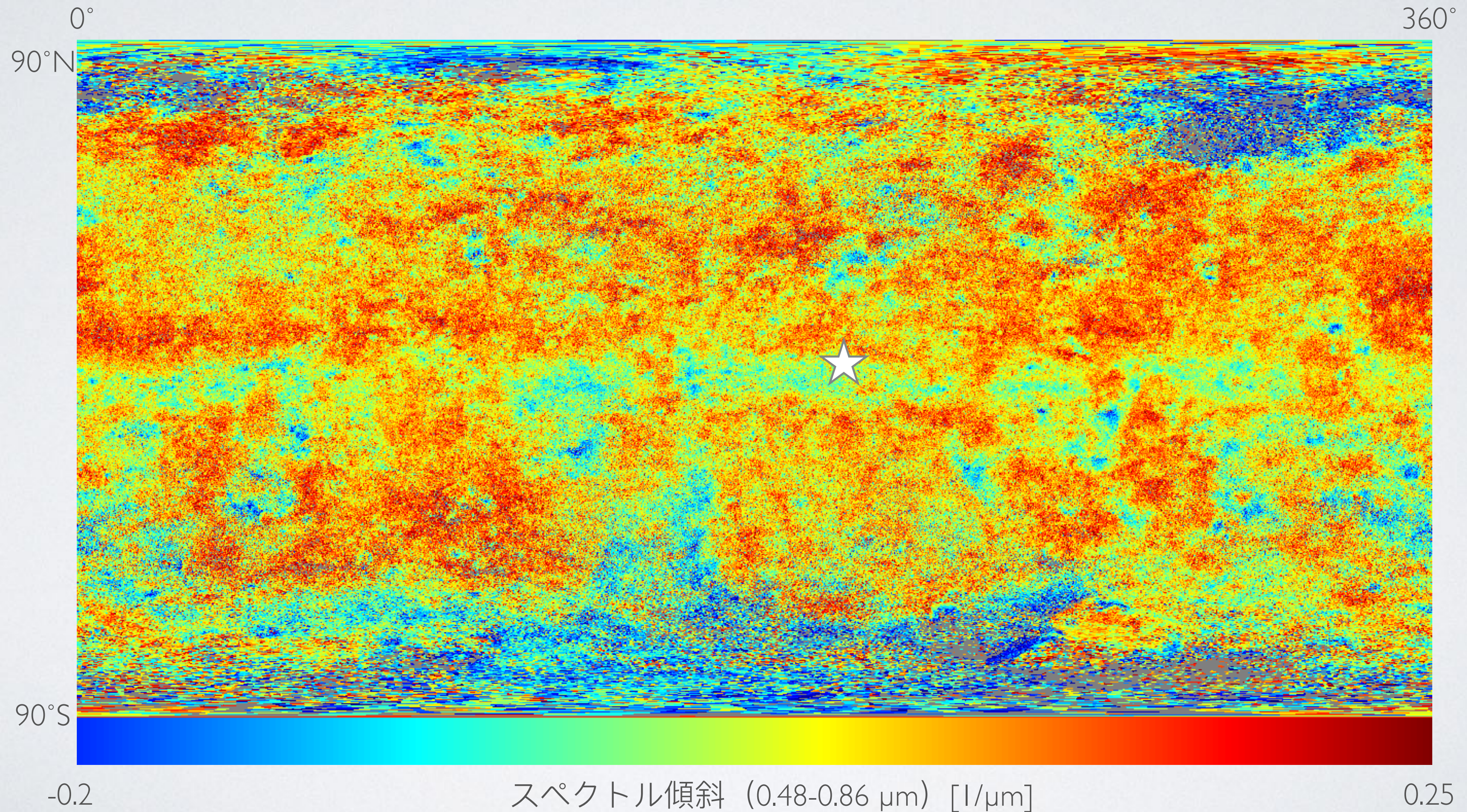
- リュウグウの幾何アルベドは **$4.0 \pm 0.5\%$** と隕石に比べても暗い。
- スペクトルが完全に一致するような隕石は見つかっていない。
- 平均反射スペクトルはフラットでC/F型に分類される。炭素質コンドライト隕石によくみられるUVの吸収がない。
- スペクトル形状と反射率から、最も近い隕石スペクトルは**熱変成したCM/CIコンドライト隕石**。
- CM隕石中のIOM（有機物）ともスペクトルが似ている。
- 低アルベドから2wt%以上の炭素を含むと予想される。  
(通常のCM/CIよりも多い。)



# C型小惑星リュウグウ： ONCによる全球マップ

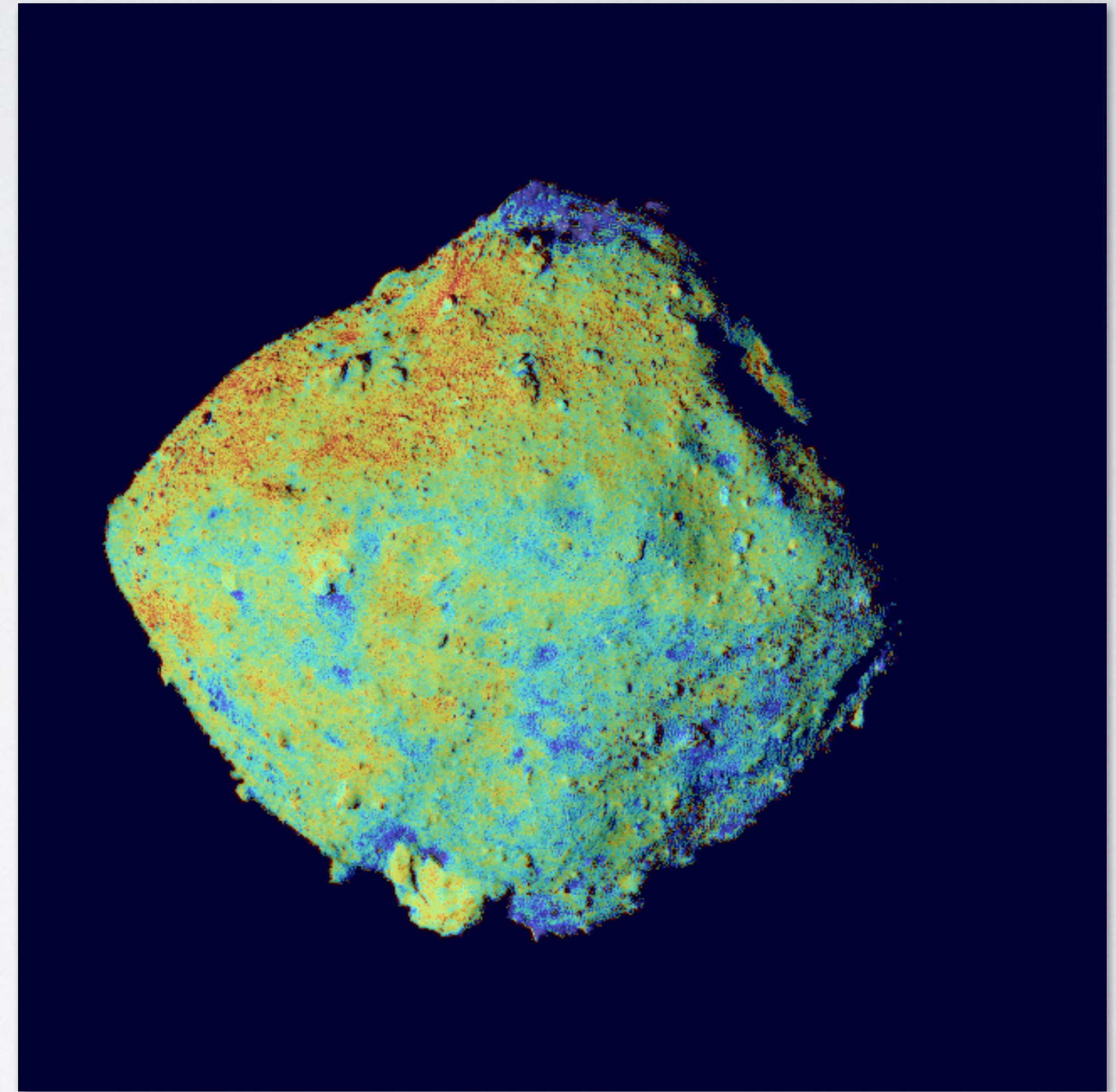
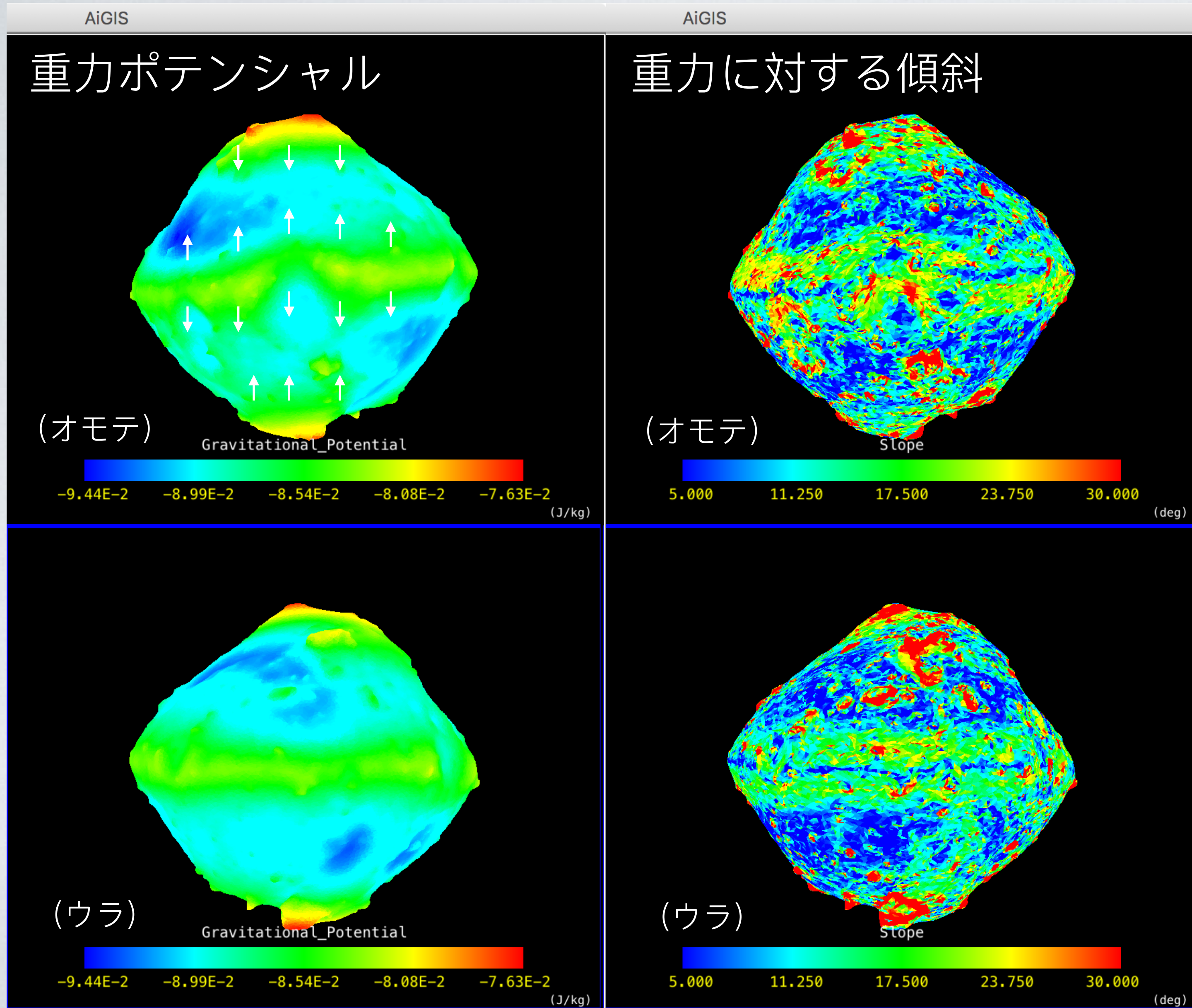
- 2018年6月に小惑星リュウグウに到着。7月にHPからの観測。

自転軸がほぼ直立していたため、到着直後に全球のマッピングを行うことが可能。





# C型小惑星リュウグウ：ONCによる全球マップ

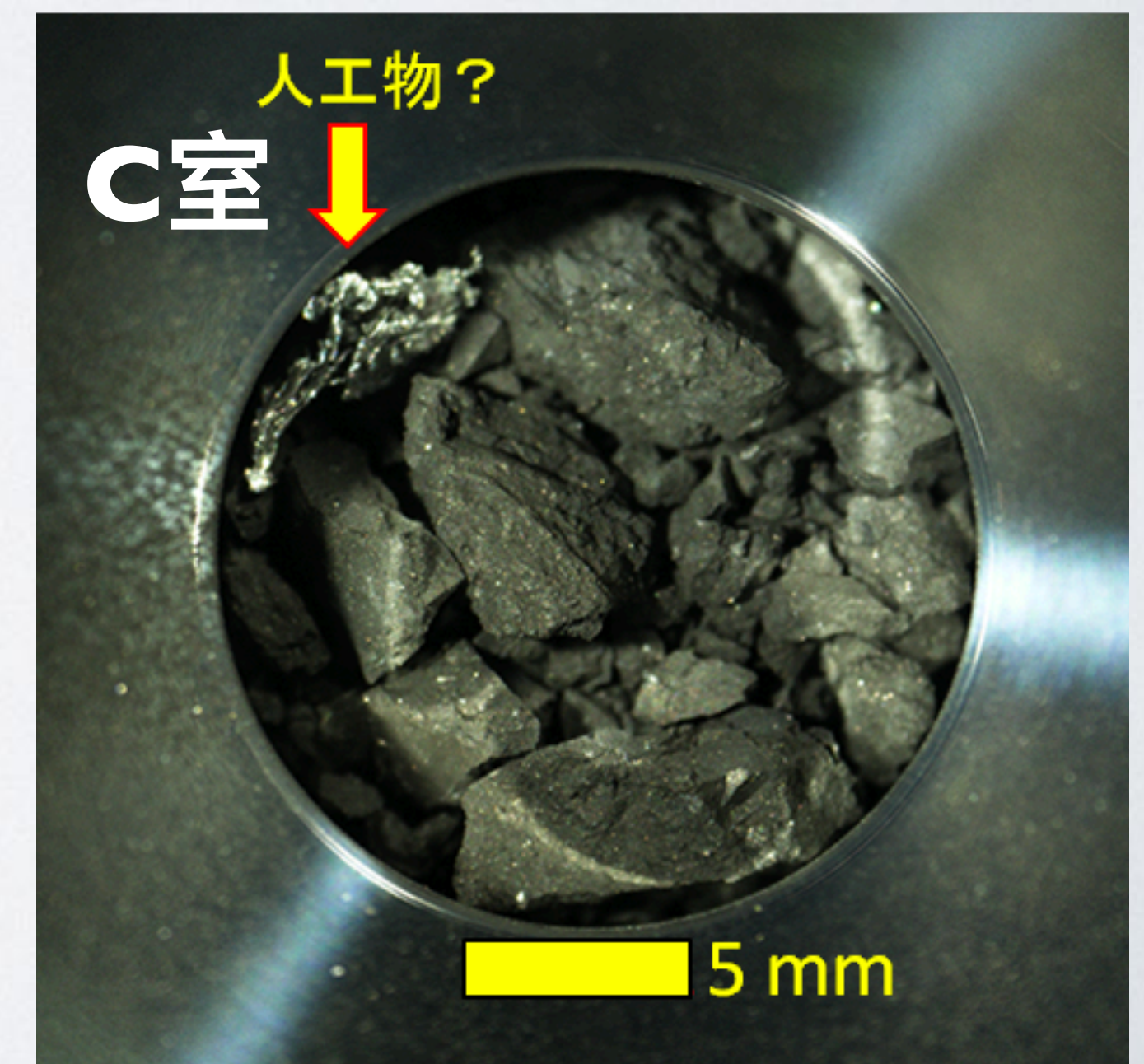
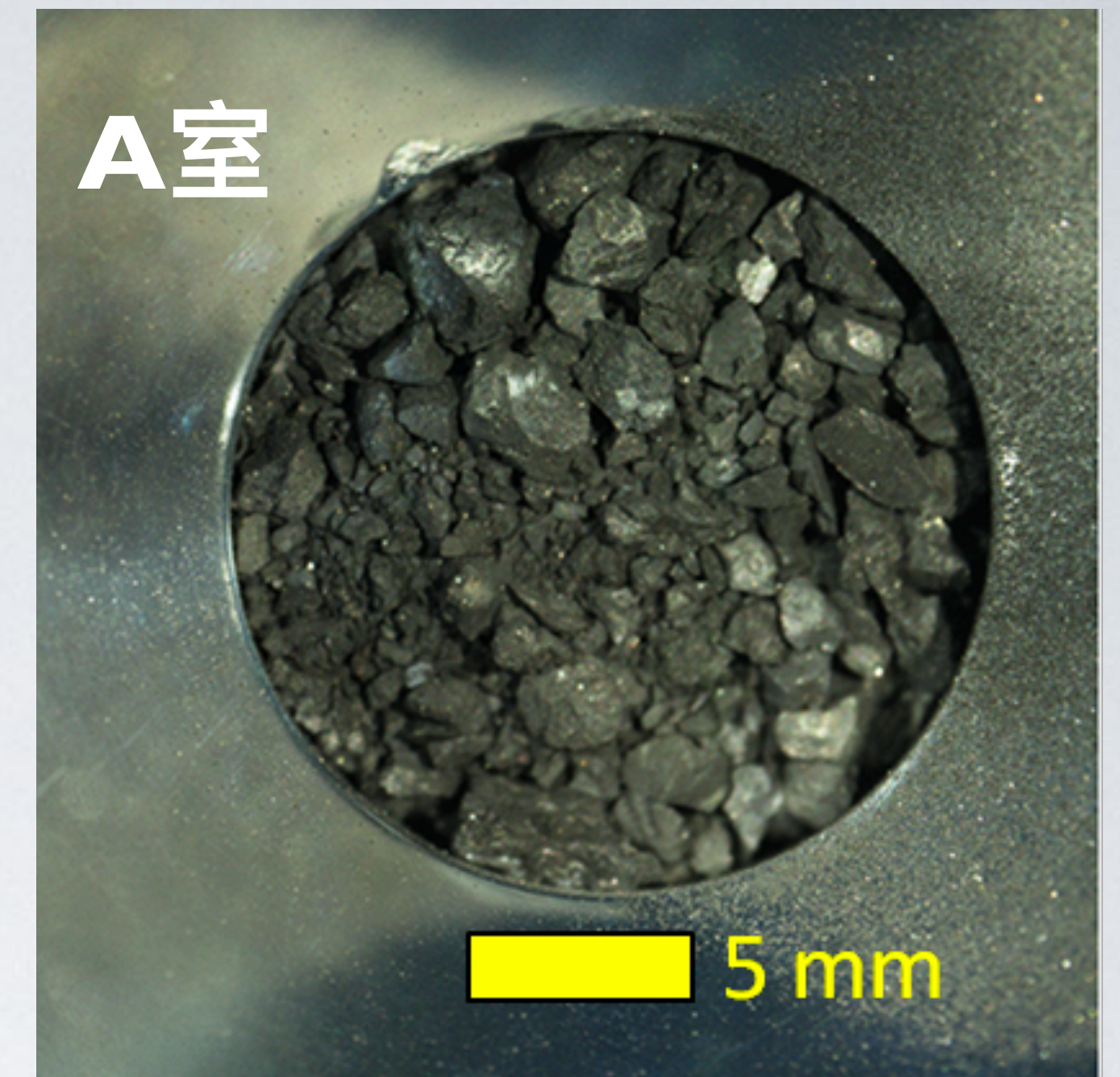


ONC-T観測によるスペクトル傾斜



# サンプル採取地点

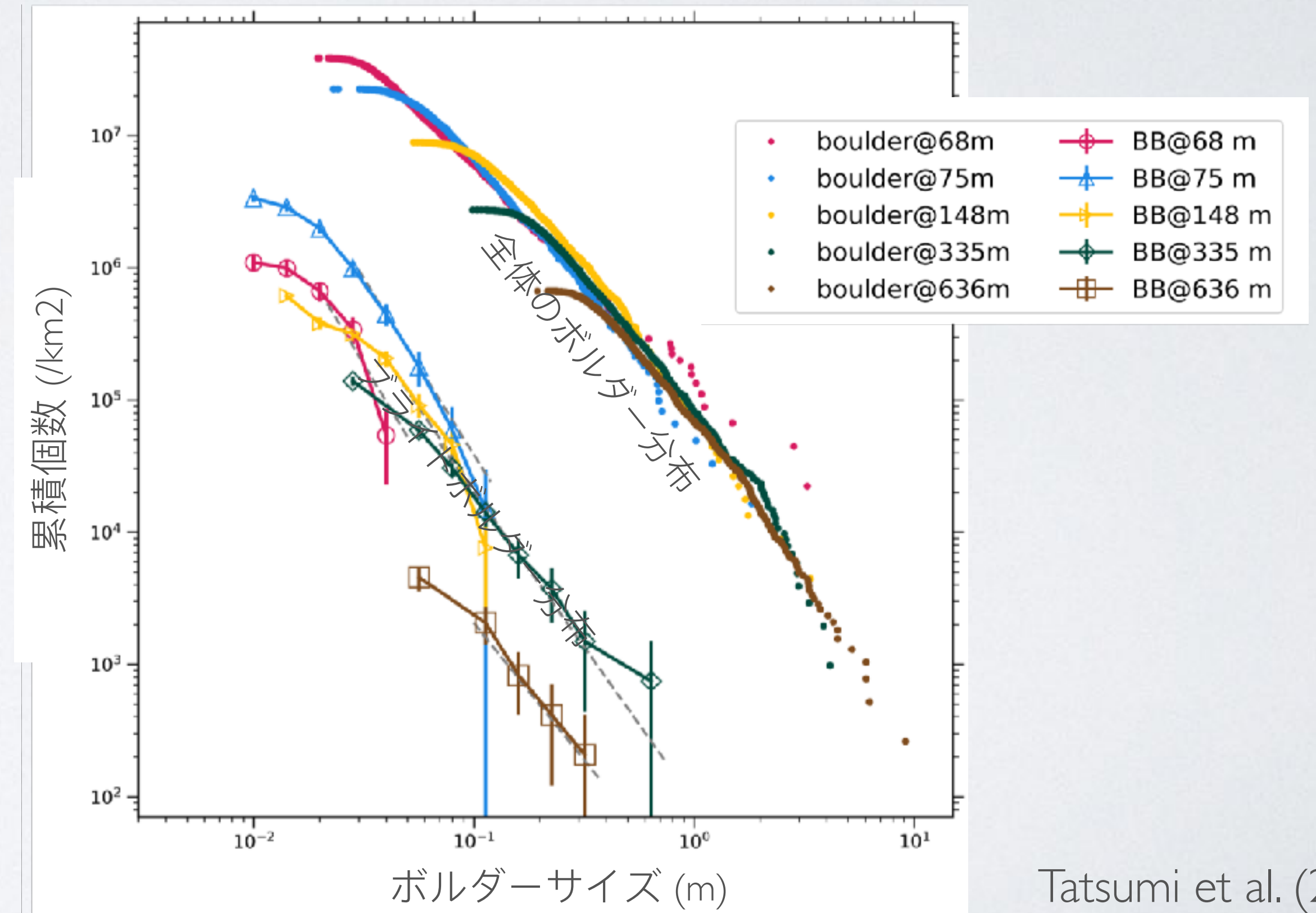
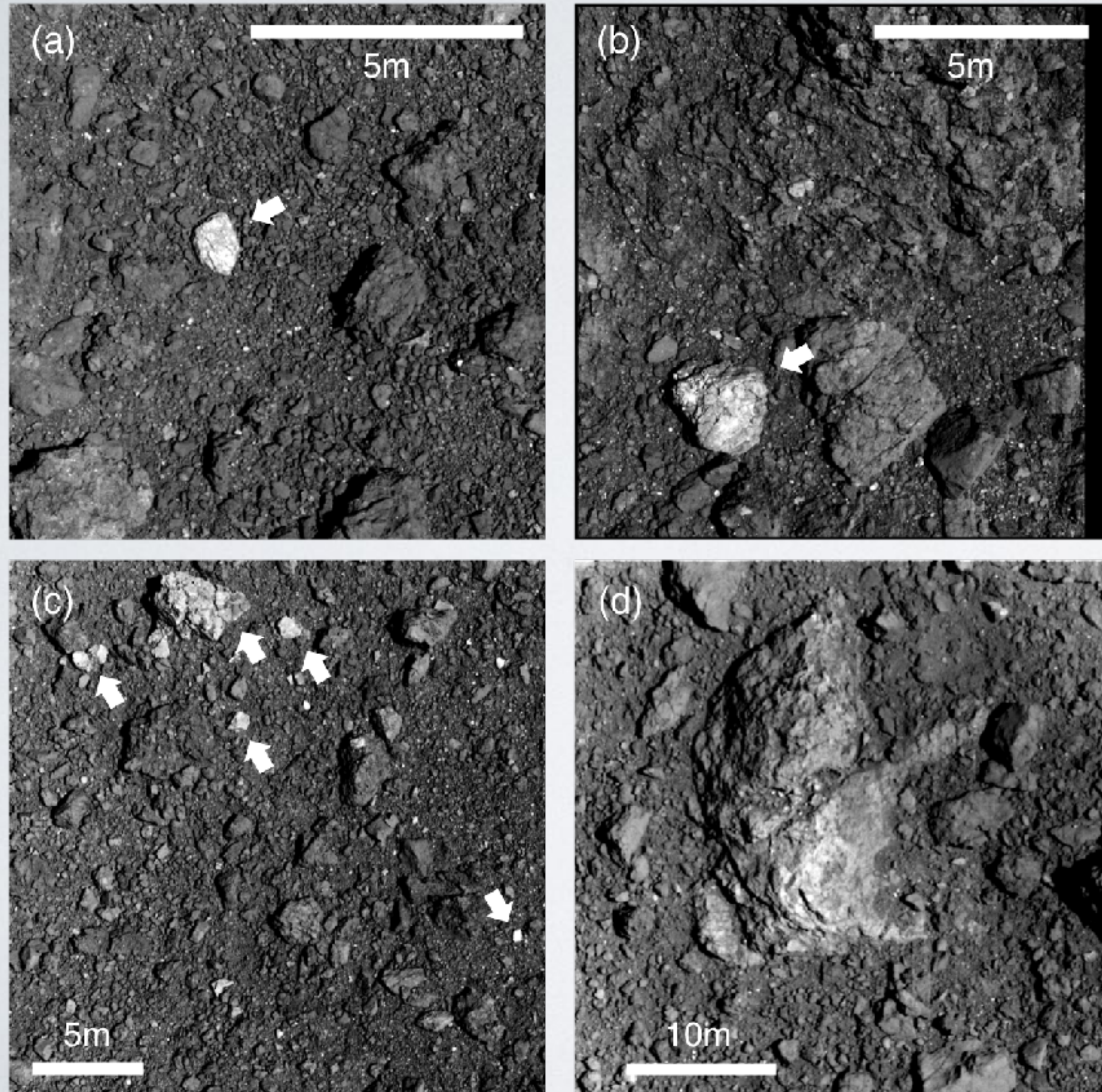
- 重力ポテンシャルが高い場所、赤道および極域が青くなっている。  
→重力が高い場所から低い場所への物質の移動。  
→青い場所は表面の物質が移動して露出した場所。
- サンプル採取地点は赤道に近く、比較的青い場所。  
赤い部分も混ざっている。
- 2度目はSCIのイジェクタのある場所。





# リュウグウ上のブライトボルダー

- リュグウ平均に対して1.5倍以上明るいボルダーを発見。
- 小さいものほど数多く存在する。
- 場所に関わらず分布。  
0.03–1%程度の表面積を占める。



Tatsumi et al. (2020)

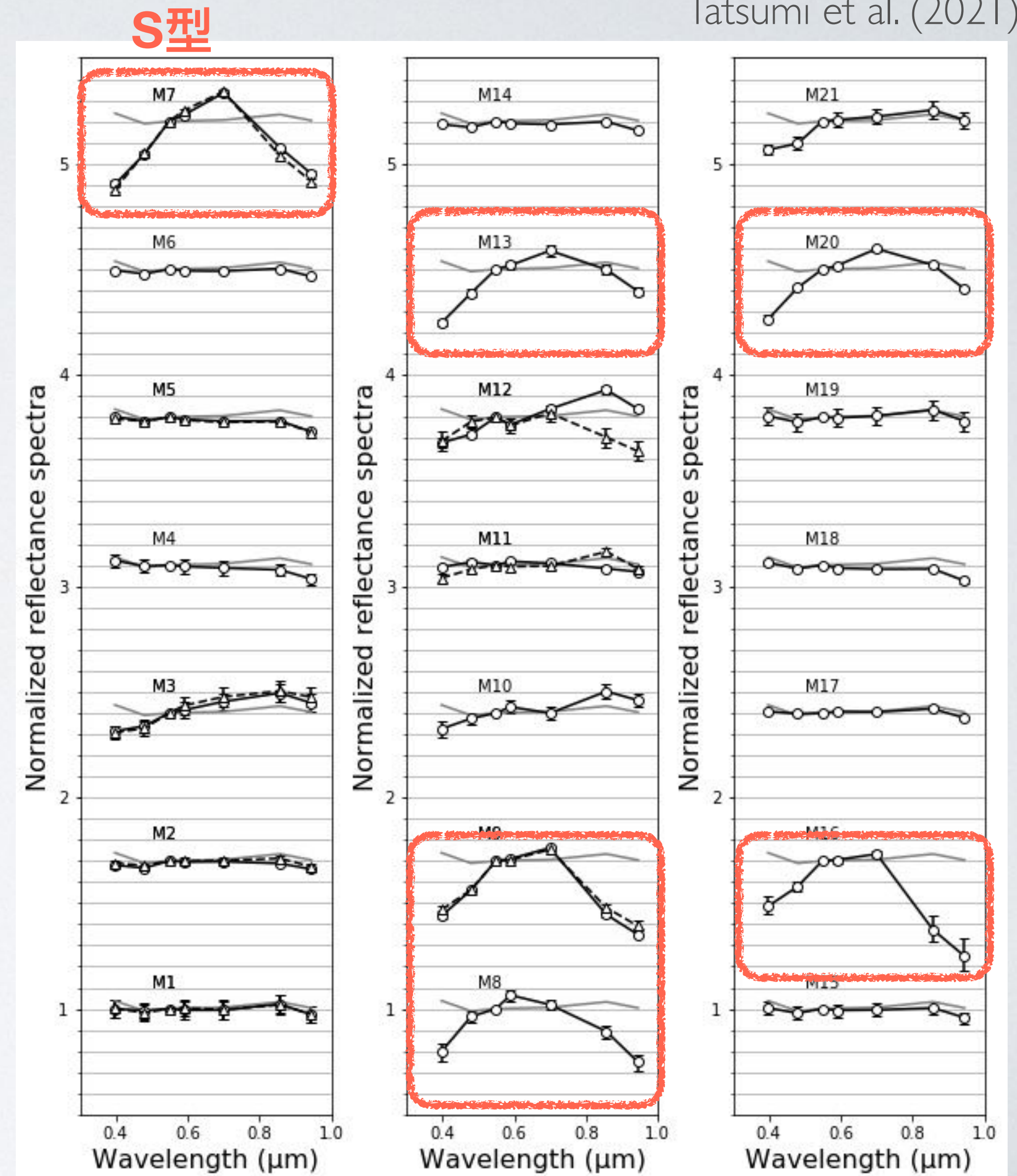
Tatsumi et al. (2021)



# 2種類のスペクトルタイプ: S型とC型

Tatsumi et al. (2021)

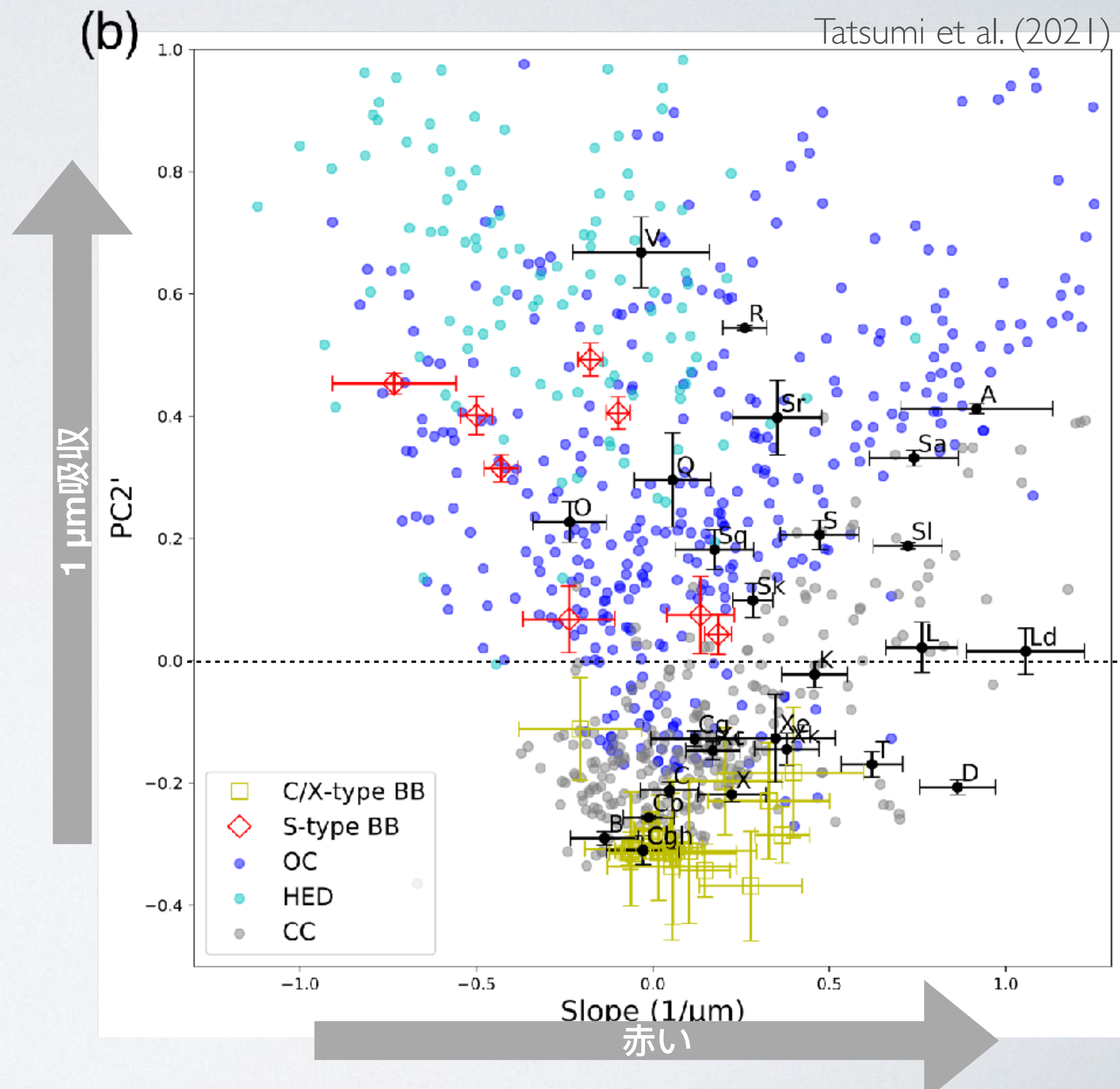
- ONC-T画像からブライトボルダー (21個) の可視反射スペクトルを調べた。  
→ 2種類のスペクトルタイプが存在することを発見。
- S型 (6個)  
1  $\mu\text{m}$ に向かって吸収を示す。
- C型 (15個)  
フラットなスペクトル形状。UVに吸収を示すものも。





# SPECTRAL DIVERSITY OF BRIGHT BOULDERS

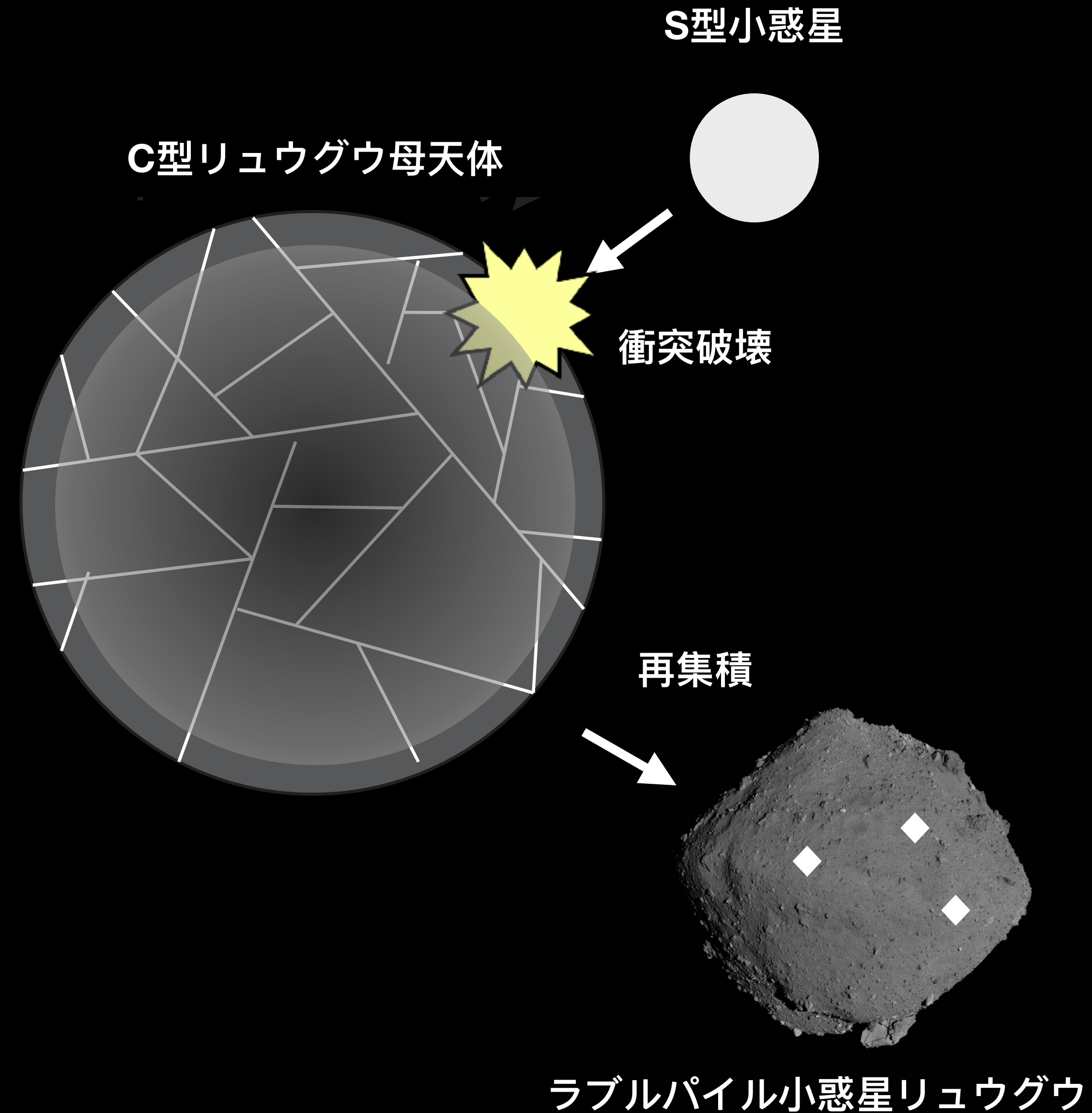
- メインベルト小惑星 (SMASSII) および隕石との比較。
- S型のブライトボルダ―はS型小惑星群、普通コンドライト隕石、HED隕石に近い。NIRS3の観測からHED隕石よりも普通コンドライト隕石に近いことが示された。
- C型のブライトボルダ―はC型の小惑星群、炭素質コンドライト隕石に近い。





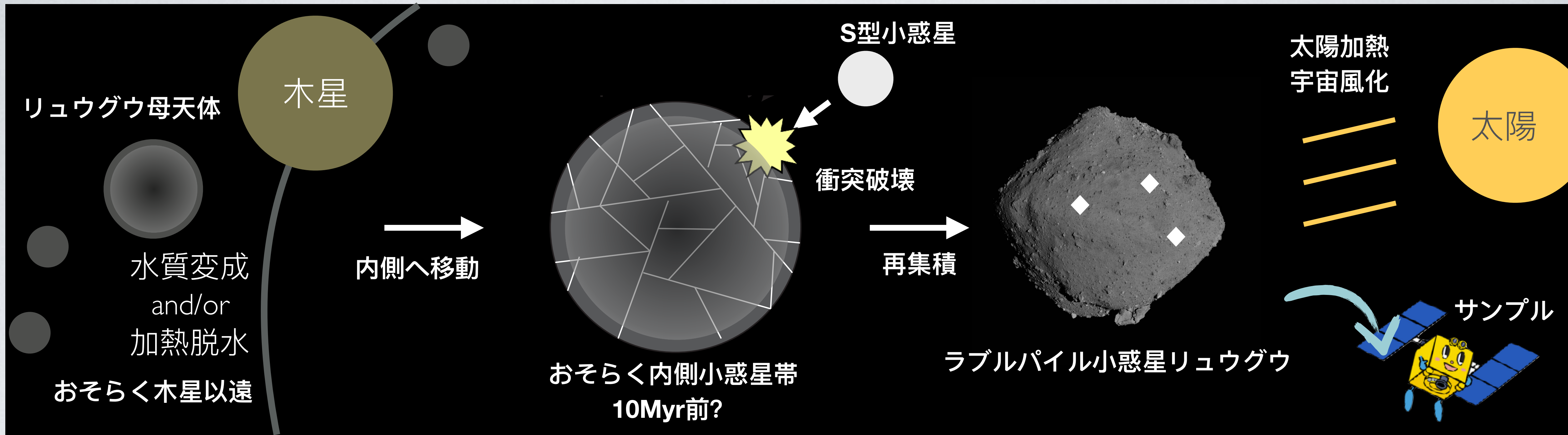
# リュウグウ母天体とS型小惑星の衝突

- リュウグウは20–30mのインパクターで破壊されてしまう。  
→破壊を免れて、>0.5 mのブライトボルダーを複数個集めるのは統計的に難しい。
- S型のブライトボルダーはリュウグウの母天体が破壊される時に混ざったものと考えられる。
- 内側小惑星帯にはS型小惑星が最も多く存在する。  
さらにリュウグウの起源の可能性のあるPolana族はNysa族(S型)と混在する。





# リュウグウの物語



- はやぶさ2のリモセンダーデータからリュウグウの母天体が形成してから、現在までの歴史がある程度明らかになった。
- サンプルはこれまでの隕石の中にないものかもしれない。



# 研究成果のまとめ

- 室内衝突実験により、ラブルパイル小惑星のクレータ形成メカニズムを明らかにした。  
→小惑星でのクレータ年代学確立に貢献。
- はやぶさ2 ONCの機上校正を行い、分光の礎を築いた。  
→全球マッピングや、試料採取地点選定に貢献。
- はやぶさ2 ONC-Tデータから、外来物質を発見した。  
→初期太陽系から現在のリュウグウに至るまでの物質混合過程の一部を実証。



# 今後の展開

- 今後のサンプル分析で、リュウグウとリュウグウの母天体の詳しい歴史がさらに明らかになる。例えば、形成年代、経験温度など。
- リュウグウの太陽系内での位置づけを明らかにする必要がある。  
リュウグウは一般的なC型小惑星か？  
→地上望遠鏡観測データによる統計的な解釈が重要。
- これからも**MMX**を含め、サンプルリターン時代は続く。  
→サンプルリターンで得られた試料を太陽系史に焼き直し、統計的な議論。  
**JWST**などの宇宙望遠鏡が鍵になるかもしれない。



# 謝辞

- 十数年前に大学の講義で川口先生のはやぶさの話を知った時には、自分のはやぶさ2にここまで深く関わるとは思ってもみませんでした。先人方のたくさんの努力の積み重ねと私の少しの偶然がこの賞まで結びついているように感じます。
- 推薦者である杉田精司教授には、惑星科学ならではの“曖昧さの定量”を教えてくださいました。
- 長谷川直氏をはじめ超高速衝突実験施設のみなさまには厚く実験の指導をいただきました。
- はやぶさ2プロジェクトの中では様々な方々に、宇宙探査という営みとそれに伴う情熱、楽しさや苦しさを教えてくださいいただき深く感謝しています。