

小天体と惑星の水・岩石反応と物質輸送

○黒川 宏之¹, 渋谷 岳造², 関根 康人¹,

Bethany L. Ehlmann³, 白井 文彦⁴, 菊池 早希子¹, 依田 優大^{1,5}

¹東京工業大学 地球生命研究所, ²海洋研究開発機構,

³カリフォルニア工科大学/ジェット推進研究所, ⁴宇宙科学研究所, ⁵東京大学

含水鉱物による 2.7 μm 吸収帯の存在や低いアルベドといった反射スペクトルの類似性から、C 型惑星は炭素質コンドライト隕石の母天体であると考えられてきた。しかし、セレスをはじめとする一部の大型 C 型小惑星の赤外スペクトルには、隕石には見られないアンモニアを含む層状ケイ酸塩の存在を示す 3.1 μm 吸収帯が存在する。小惑星帯質量の 30%以上を占めるこれらの小惑星に対応する隕石が存在しないことは、太陽系科学における大きな謎とされてきた。

本研究では、氷微惑星内部の水岩石反応の熱力学モデル(Shibuya et al. in prep.)と、生成物の赤外スペクトルモデル(Kurokawa et al. submitted)を組み合わせることで、様々なバルク組成・水岩石比(W/R)・温度条件での生成鉱物組み合わせと観測される反射スペクトルの理論予想を行った。そして、赤外線天文衛星あかり(Usui et al. 2019)による小惑星観測の結果との比較から、小惑星表面鉱物の生成条件を制約した。

その結果、2.7 μm (含水鉱物)に加えて 3.1 μm (アンモニア)吸収帯を持つ鉱物組み合わせは、 $\text{NH}_3 \cdot \text{CO}_2$ 氷を含むバルク組成・W/R が約 4 以上・70°C以下の低温という条件下でのみ生成することがわかった。一方、W/R が低いなどこの条件を外れると、3.1 μm 吸収帯は見られなくなる。

これらの結果から、C 型小惑星と炭素質コンドライトのスペクトル的特徴の違いを説明可能な、以下のような形成・進化シナリオを提案する。1. 大型の C 型小惑星は $\text{NH}_3 \cdot \text{CO}_2$ の雪線以遠(現在の太陽系では土星軌道以遠)で形成した。2. 昇温に伴って W/R の高い氷(水)マントルと W/R の低い岩石コアに分化し、それぞれ異なる反応物が生成した。3. 小惑星帯への移動に伴って外層の氷が昇華して失われることで、高い W/R での生成鉱物が小惑星表面に残った。4. 衝突によって小惑星が破砕するとマントル由来物質は氷が昇華しばらばらになるため、石化した岩石コア由来物質が選択的に隕石として地球上で発見された。

はやぶさ 2 や OSIRIS-REx のリターンサンプルにアンモニウム塩・ NH_3/CO_2 を含む流体包有物が含まれていた場合、この仮説の裏付けとなることが期待できる。

小天体と惑星の水・岩石反応と物質輸送

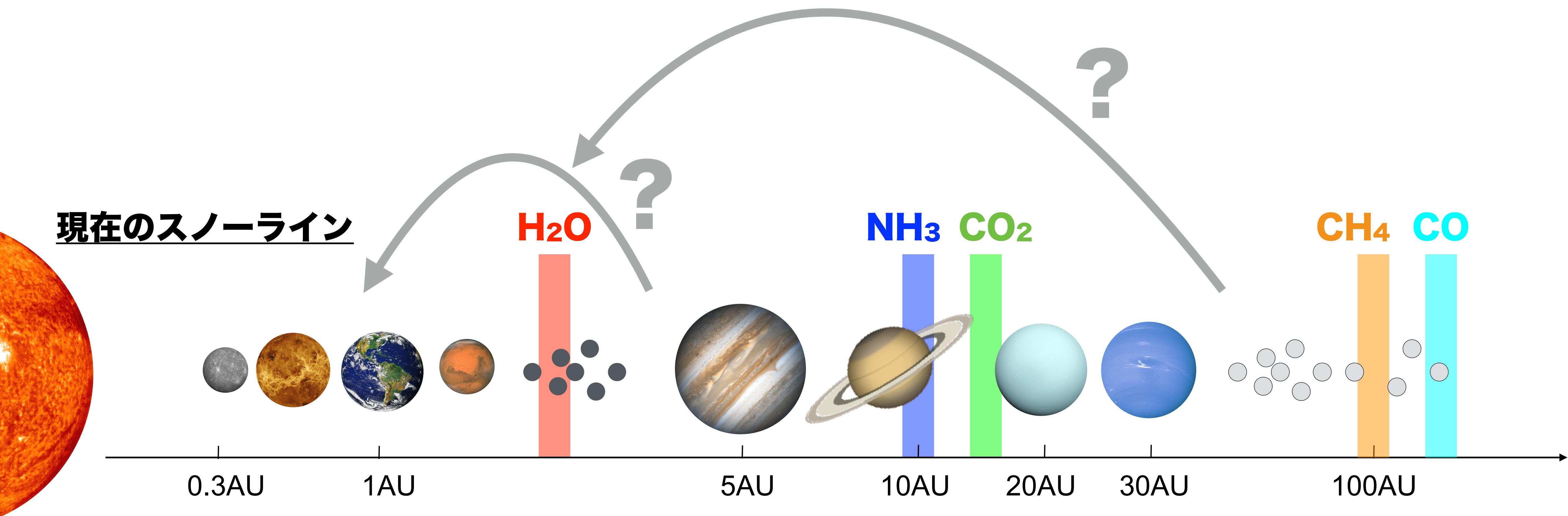
黒川 宏之¹,

渋谷 岳造², 関根 康人¹, B. L. Ehlmann^{3,4}, 臼井 文彦⁵, 菊池 早希子², 依田 優大^{1,6}

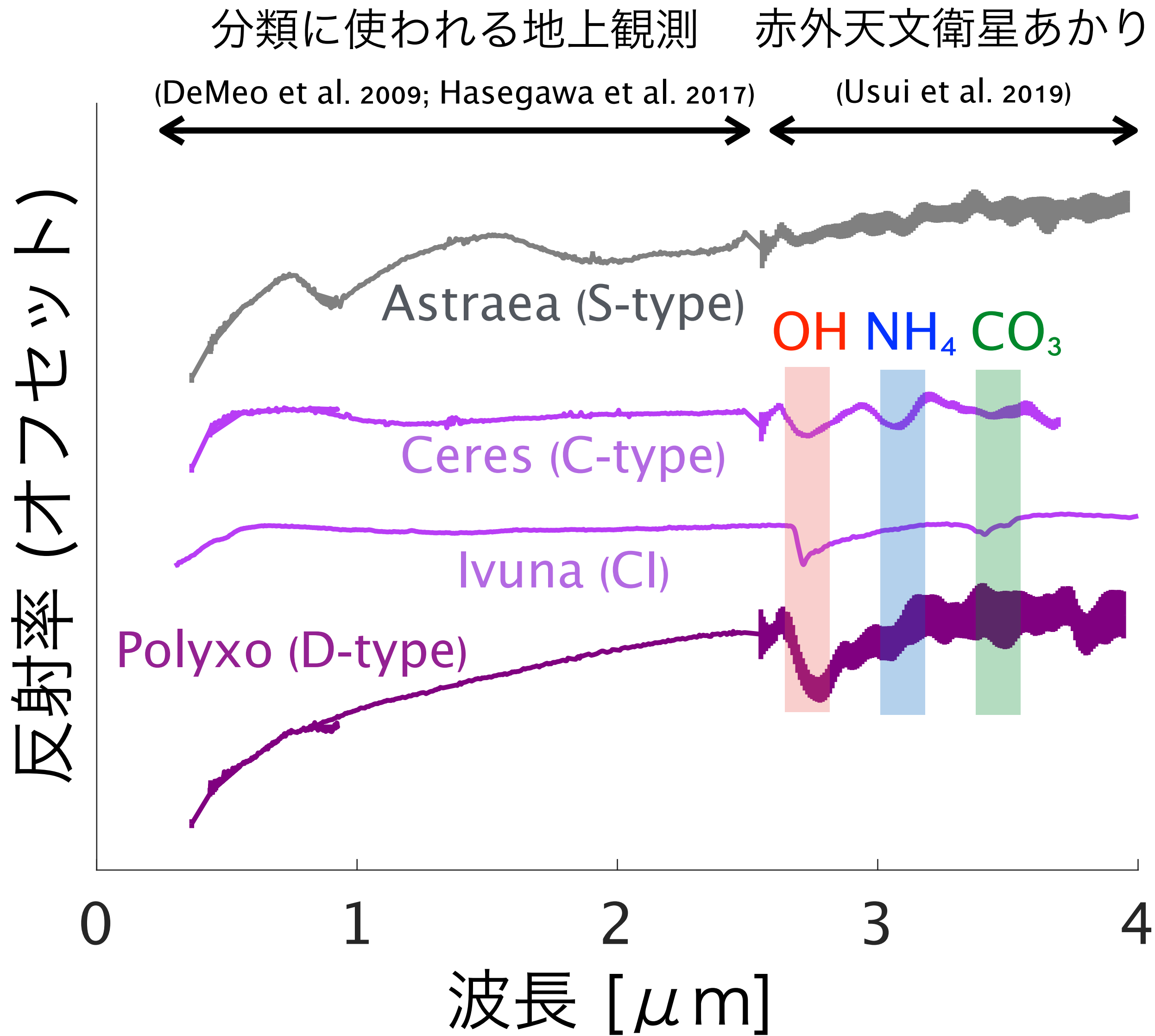
1: ELSI, 2: JAMSTEC, 3: Caltech, 4: JPL, 5: 宇宙研 6: 東京大学

太陽系の揮発性物質輸送

- 大気・水・生命のもとはどこから・どのようにやってきた？
- 揮発性元素の起源 = 炭素質コンドライト隕石 = 小惑星帯のC型小惑星 ？



C型小惑星と炭素質コンドライトの差異



2.7 μm 吸収

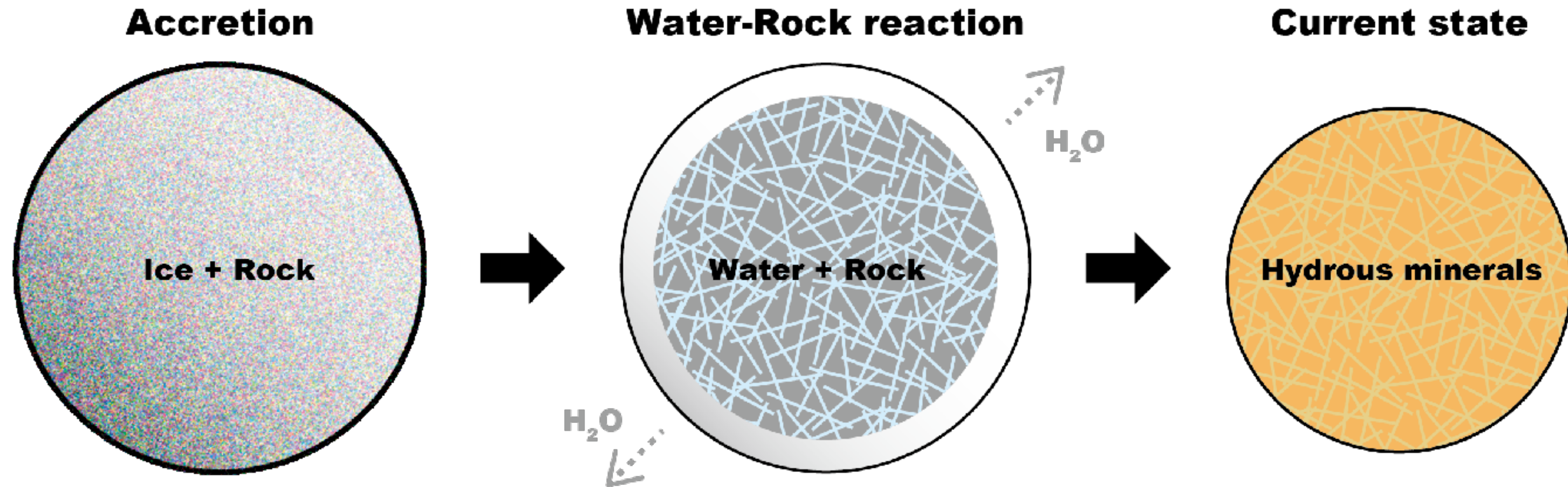
- 含水鉱物 (OH)
- 炭素質コンドライトにも見られる

3.1 μm 吸収 (今回着目！)

- アンモニアを含む層状珪酸塩 (セレス)
or 氷 (テミス) e.g., De Sanctis et al. (2015), Rivkin & Emery (2010)
- 炭素質コンドライトには存在しない

目的・手法

従来の炭素質コンドライト母天体の形成・進化モデル



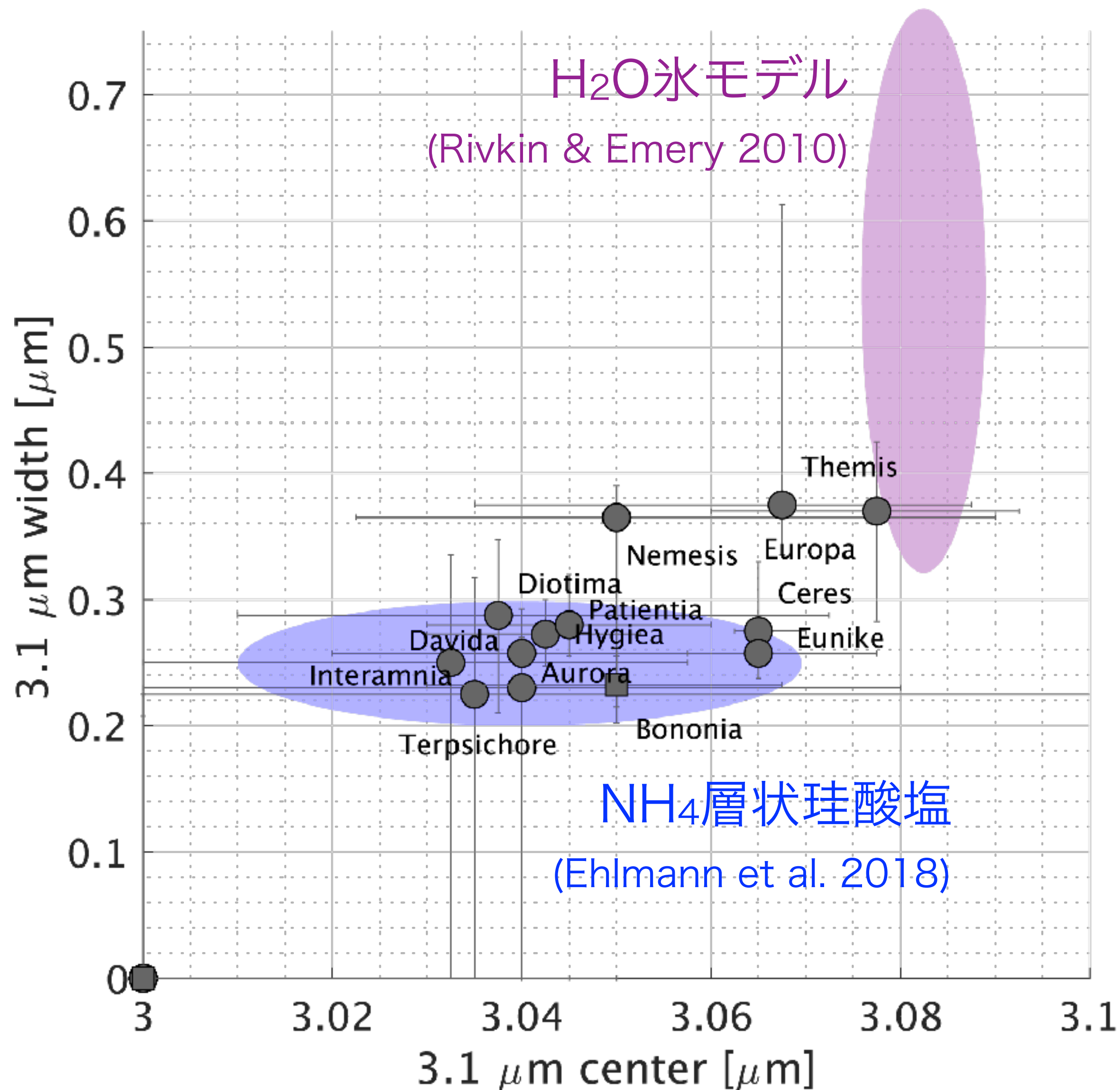
目的:

- C型小惑星の $3.1 \mu m$ 吸収の起源を解明
- C型小惑星・炭素質コンドライトの新たな形成・進化モデルを提案, 太陽系物質輸送への示唆

手法:

- あかりで観測されたC型小惑星(天体サイズ $>100 \text{ km}$)スペクトルの解析
- 小惑星内部の水岩石反応生成物の化学平衡計算・スペクトル計算

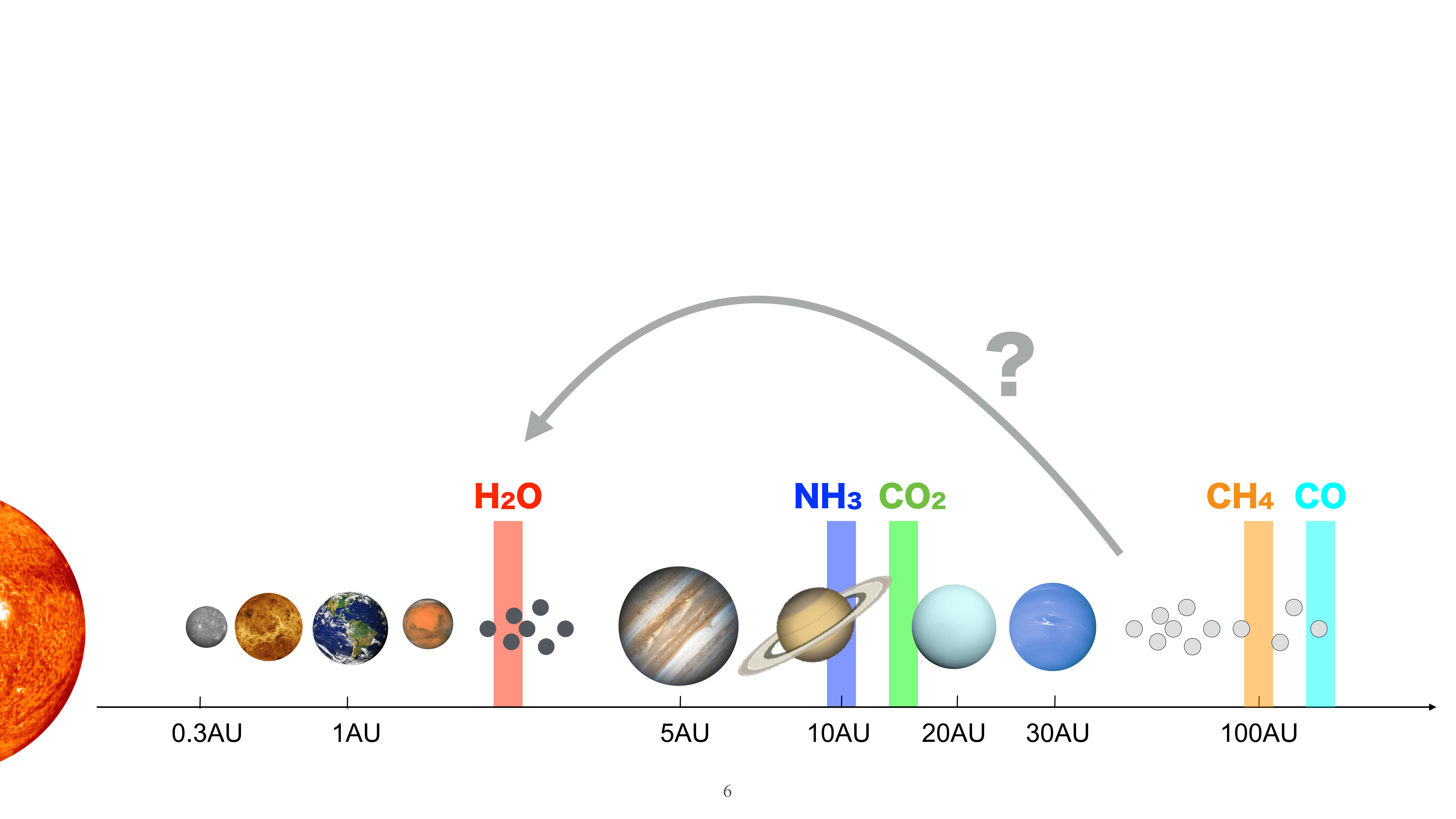
結果：3.1 μm 吸収帯



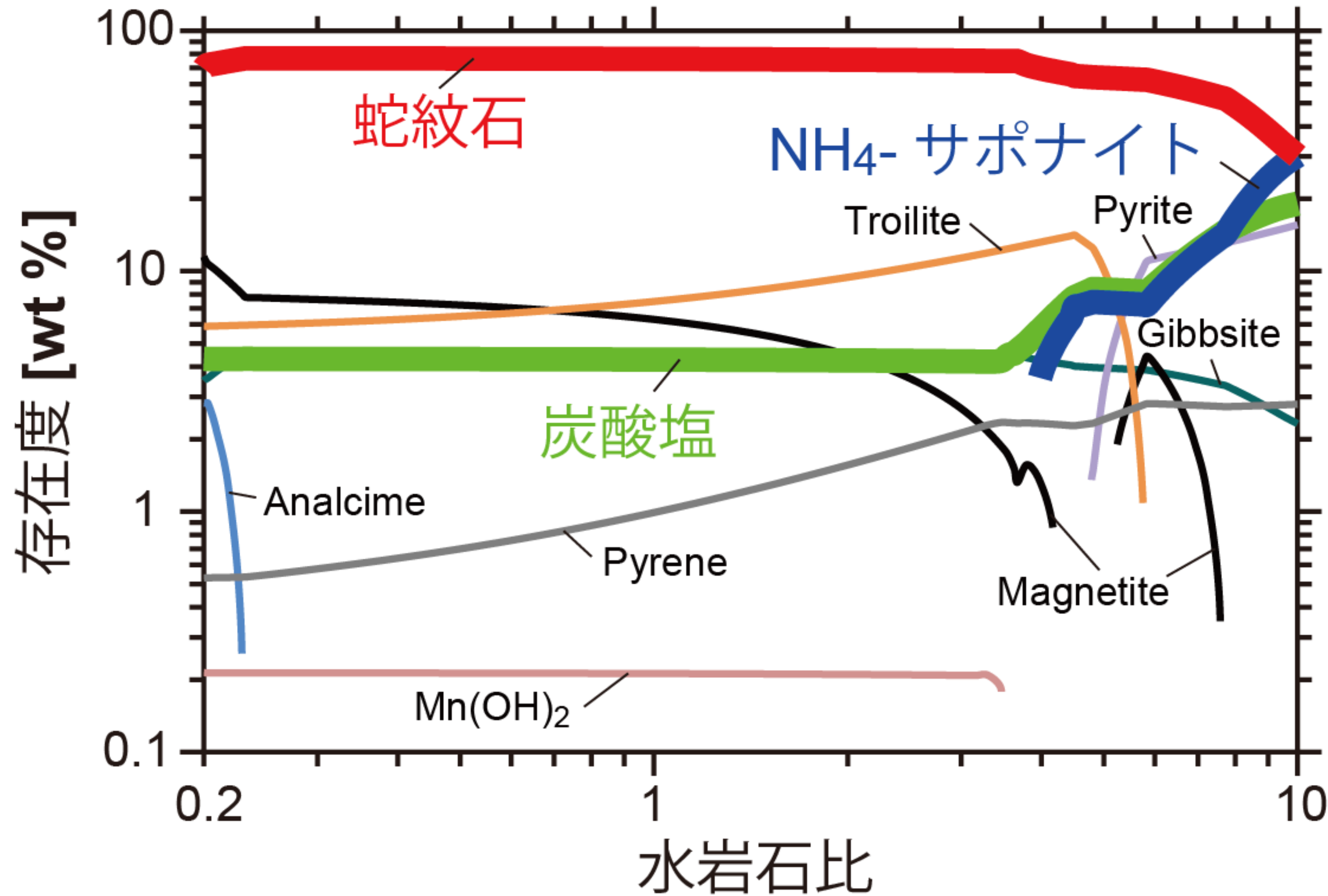
- あかりで観測されたC型小惑星のうち 3.1 μm 吸収帯を持つもの (13/21) の 吸収中心波長 vs. 吸収幅 をプロット
- NH₄層状珪酸塩, H₂O氷岩石混合モデルと比較



- テミス, エウロパを除いた 11天体がNH₄層状珪酸塩と整合的
- 地上観測データ(少サンプル)でも確認 (Takir & Emery 2012; Rivkin et al. 2015; 2019)
- 大型のC型小惑星の多くに アンモニアが存在



結果：鉱物組成



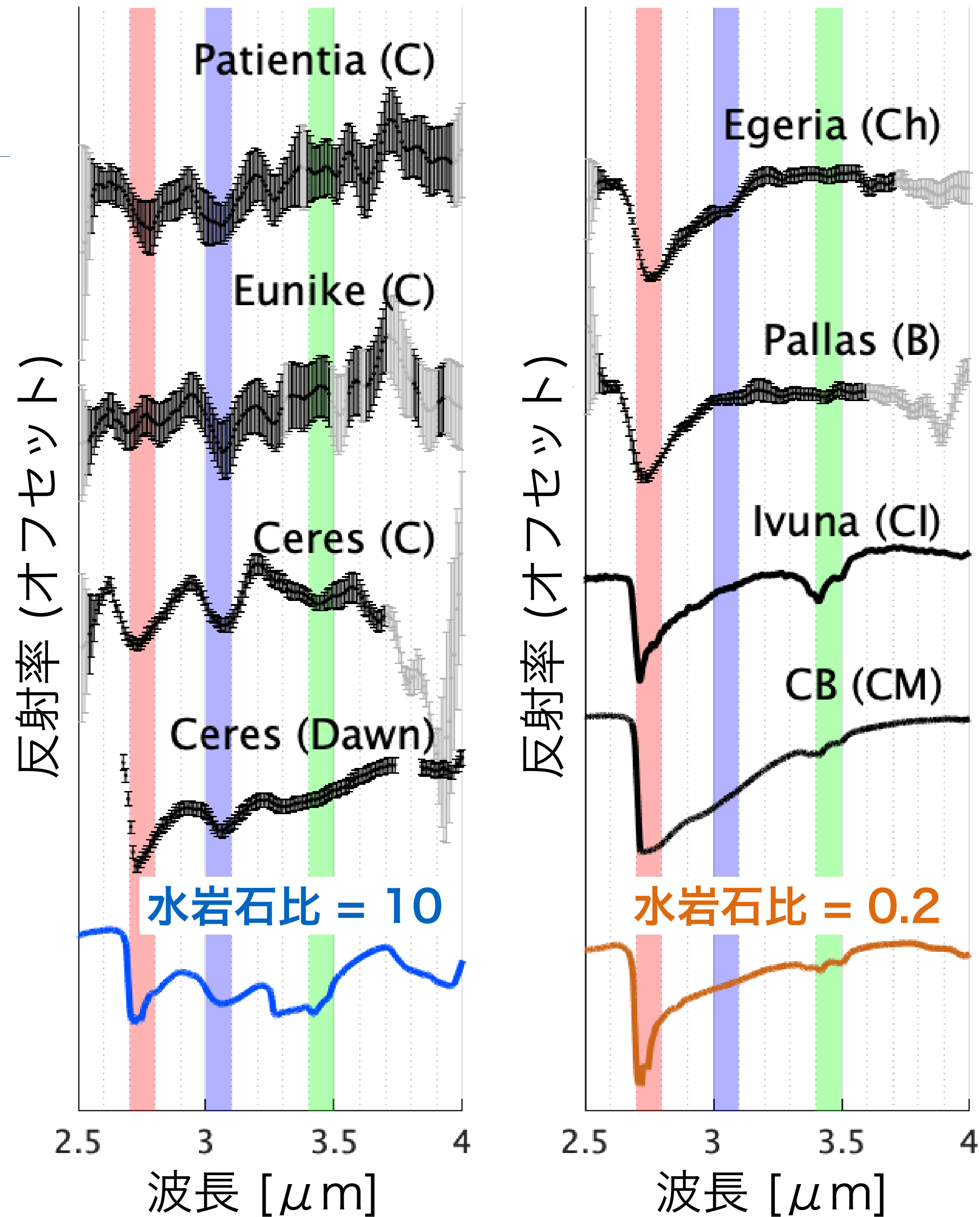
渋谷岳造さん(JAMSTEC)の熱力学計算

- 岩石(CVコンドライト)
+H₂O, NH₃, CO₂氷 初期物質
からの化学平衡計算



- 水岩石比 < 4
 - 含水鉱物 + 炭酸塩少量
 - 炭素質コンドライト的
- 水岩石比 > 4
 - NH₄層状珪酸塩 + 炭酸塩
 - C型小惑星的

結果：スペクトル

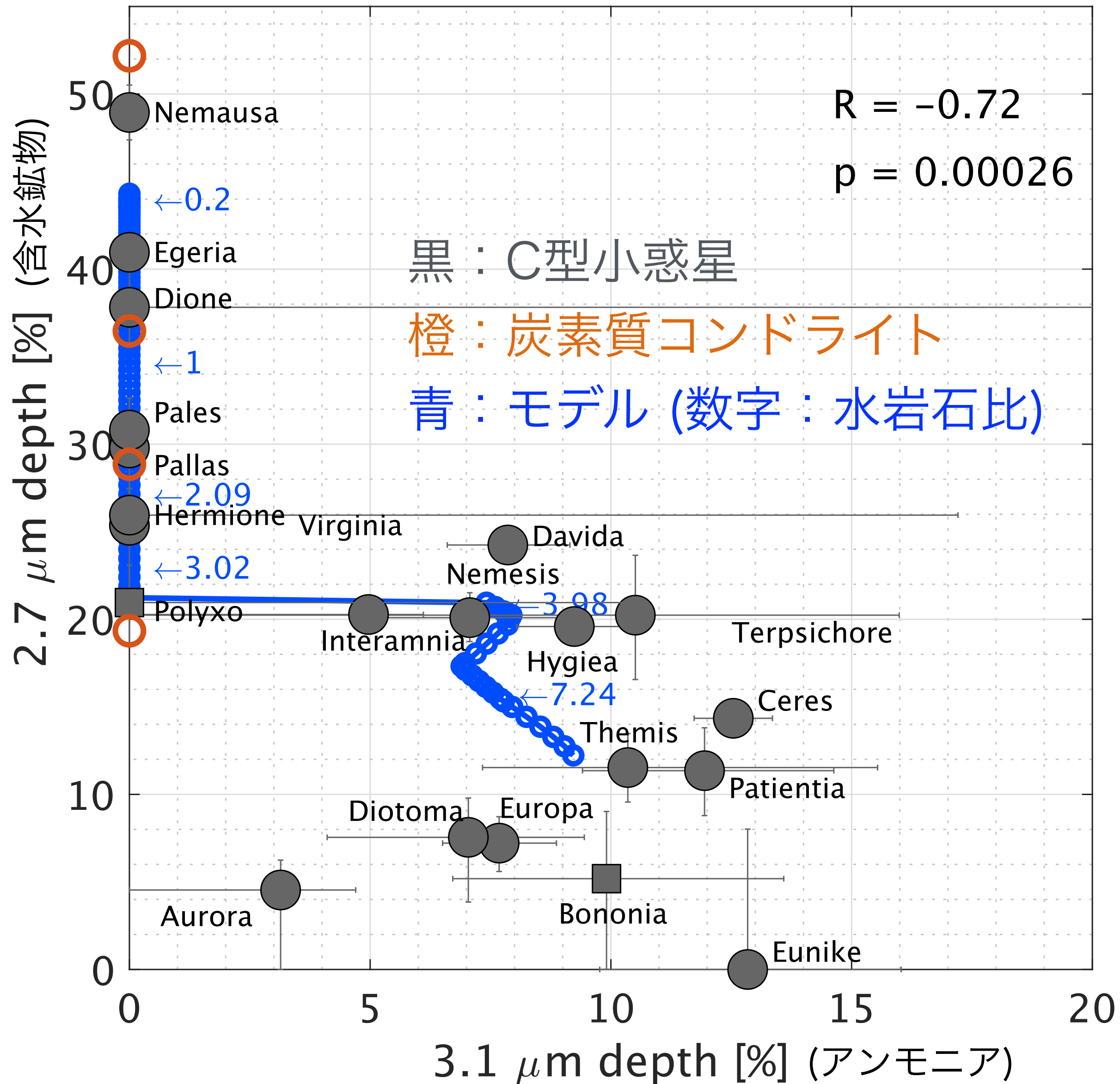


- 岩石(CVコンドライト)
+ H_2O , NH_3 , CO_2 氷 初期物質
からの化学平衡計算



- 水岩石比 < 4
 - 含水鉱物 + 炭酸塩少量
 - 炭素質コンドライト的
- 水岩石比 > 4
 - NH_4 層状珪酸塩 + 炭酸塩
 - C型小惑星的

結果：2.7 & 3.1 μm 吸収帯



観測

- C型小惑星は 2.7, 3.1 μm 吸収深さに負の相関
- 炭素質コンドライトには 3.1 μm 吸収がない

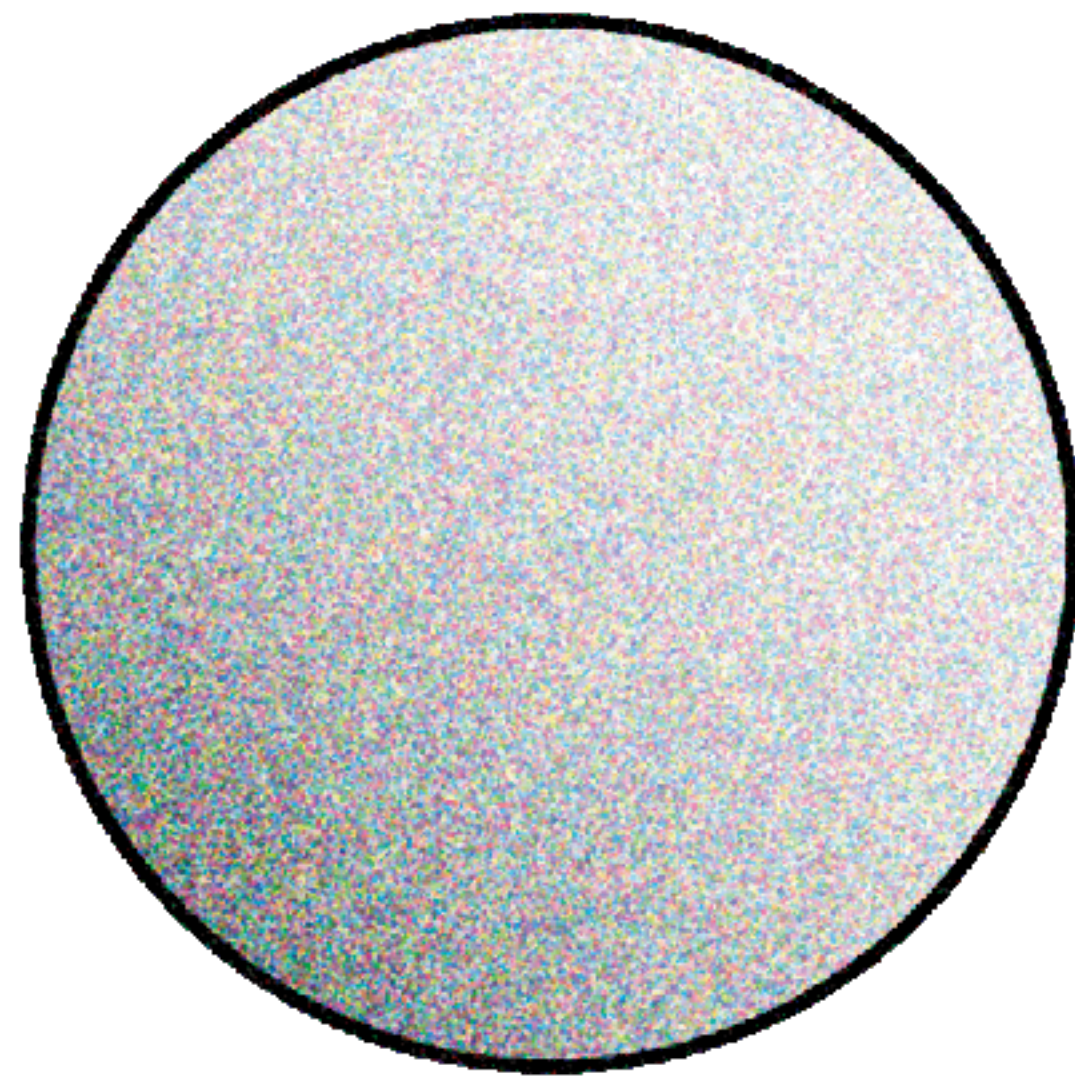
モデル

- 鉱物生成時の水岩石比の違いによって、
 - ・ 小惑星に見られる相関
 - ・ 炭素質コンドライトとの違い を再現

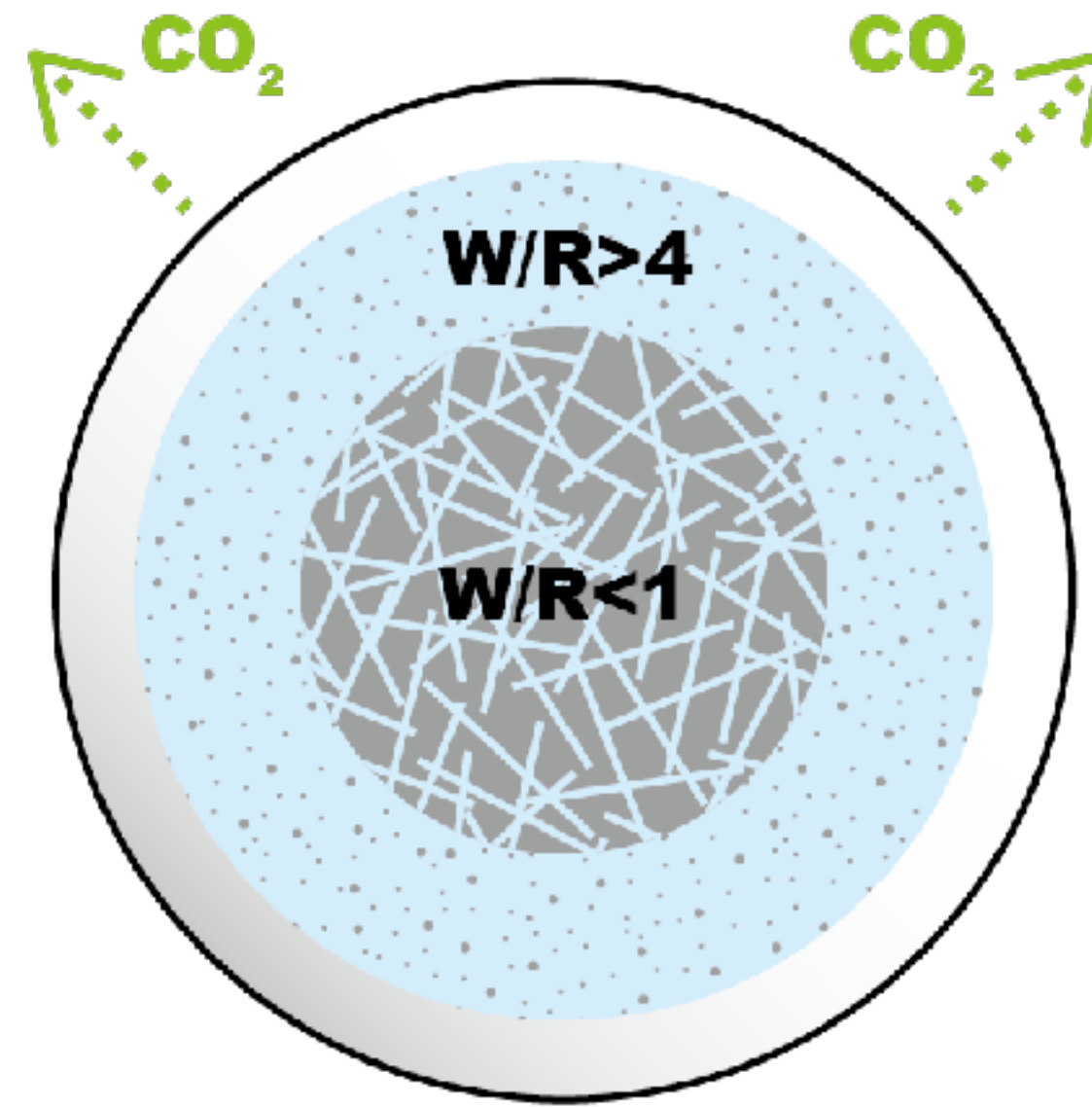


大型のC型小惑星の表面鉱物と炭素質コンドライトは異なる水岩石比で形成した

1. 集積



2. 水岩石分化

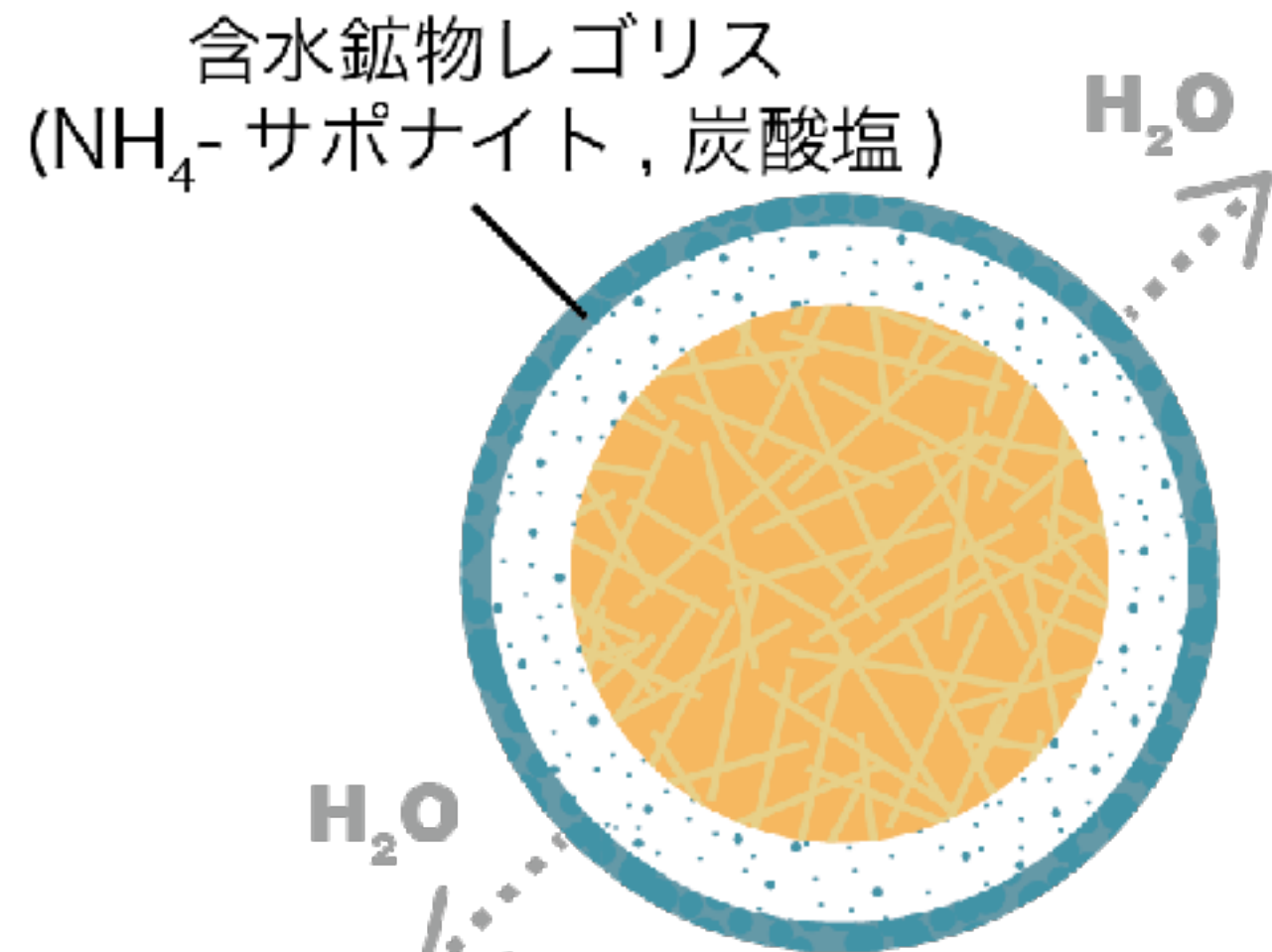


cf. 現在の氷衛星

新しい形成・進化モデル

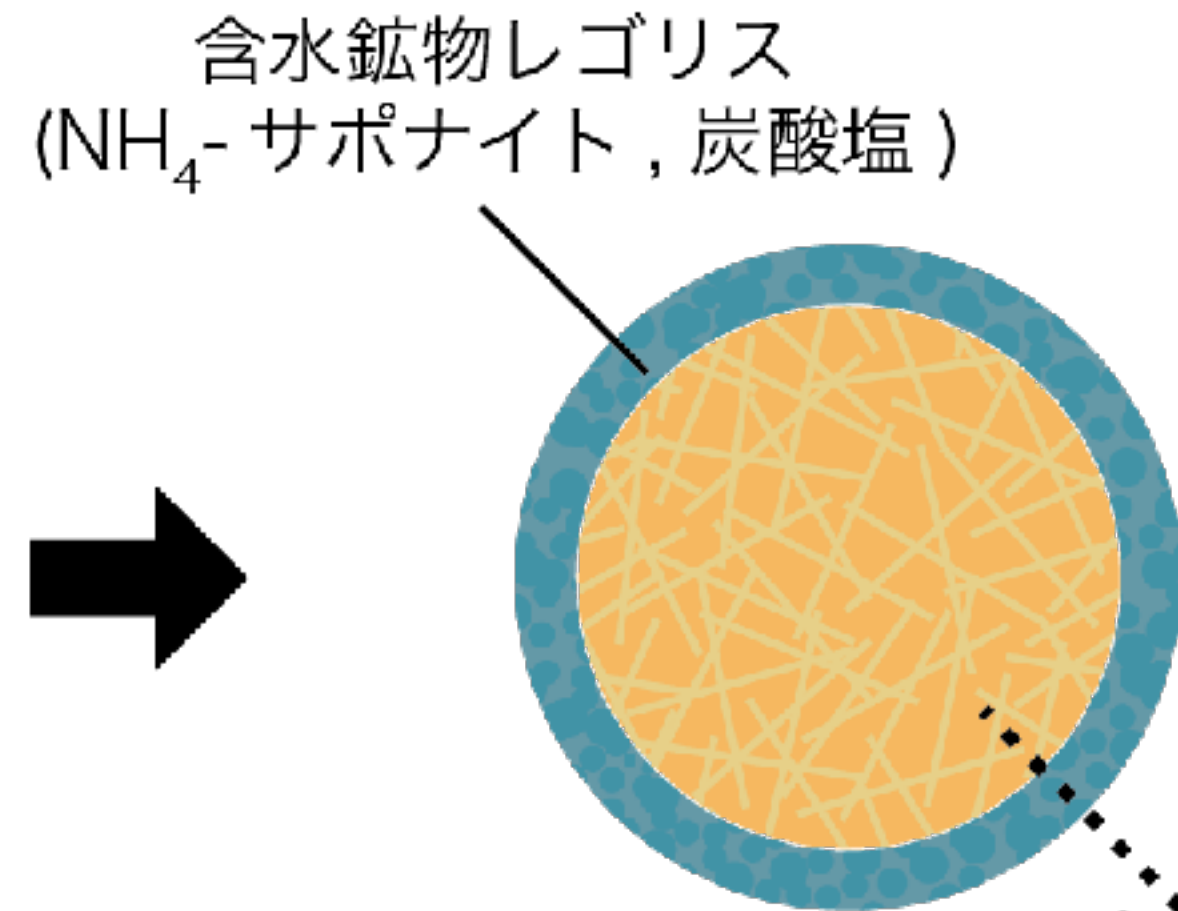
1. 彗星組成で集積(NH₃, CO₂氷)
2. 水岩石比の高い外層と低い内層に分化
3. 外層でNH₄層状珪酸塩形成
4. 破砕した内層が炭素質コンドライト

3. 凍結



e.g., セレス, メインベルト彗星

4. 水氷の散逸

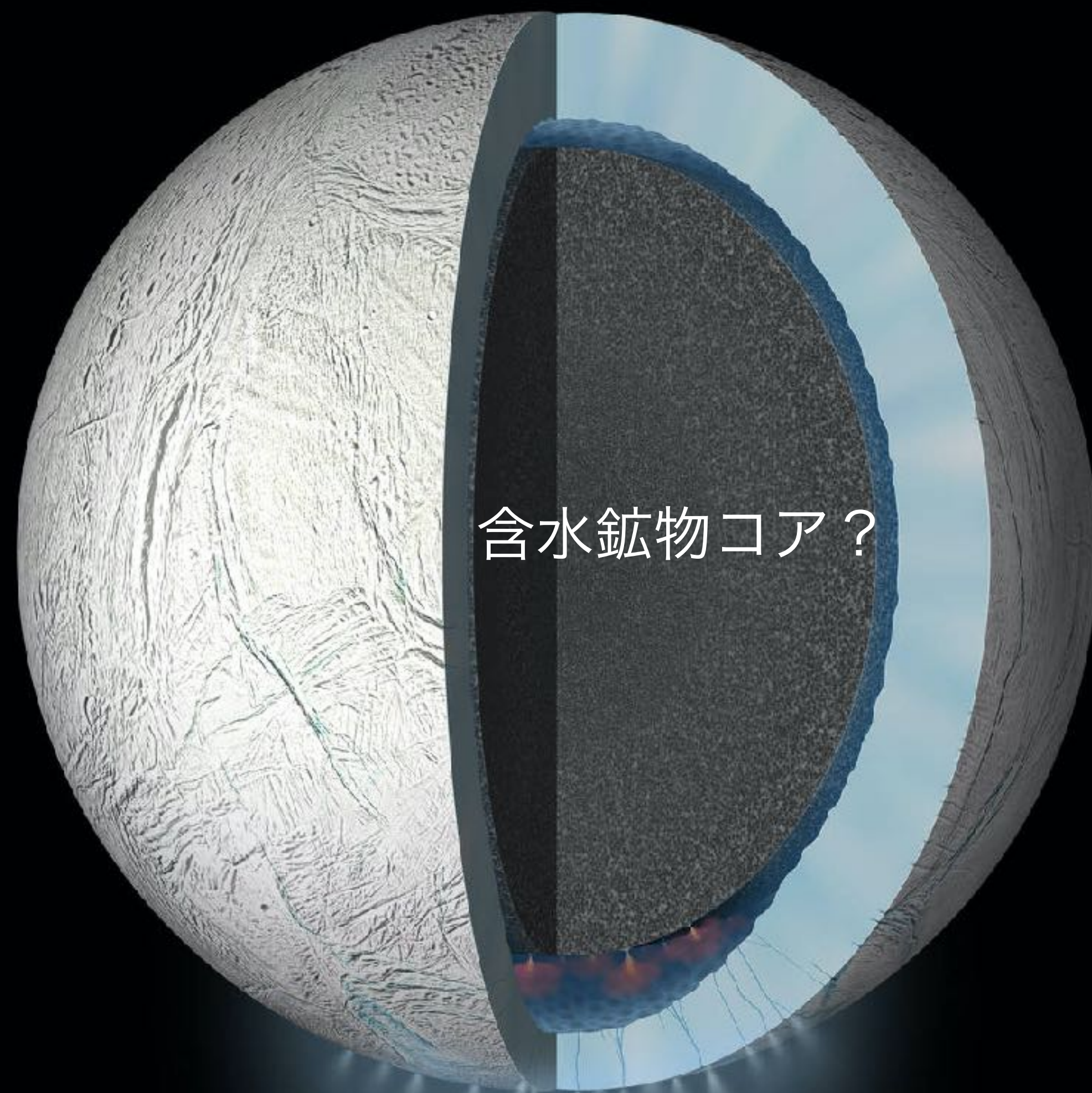


衝突破壊 → 炭素質コンドライト隕石 (含水鉱物)

	岩石 - 氷 混合物 (彗星的組成)
	地下海
	岩石コア
	含水鉱物レゴリス
	氷マントル
	含水鉱物コア

氷衛星≒C型小惑星の昔の姿

エンセラダス内部構造



タイタン, エンセラダス

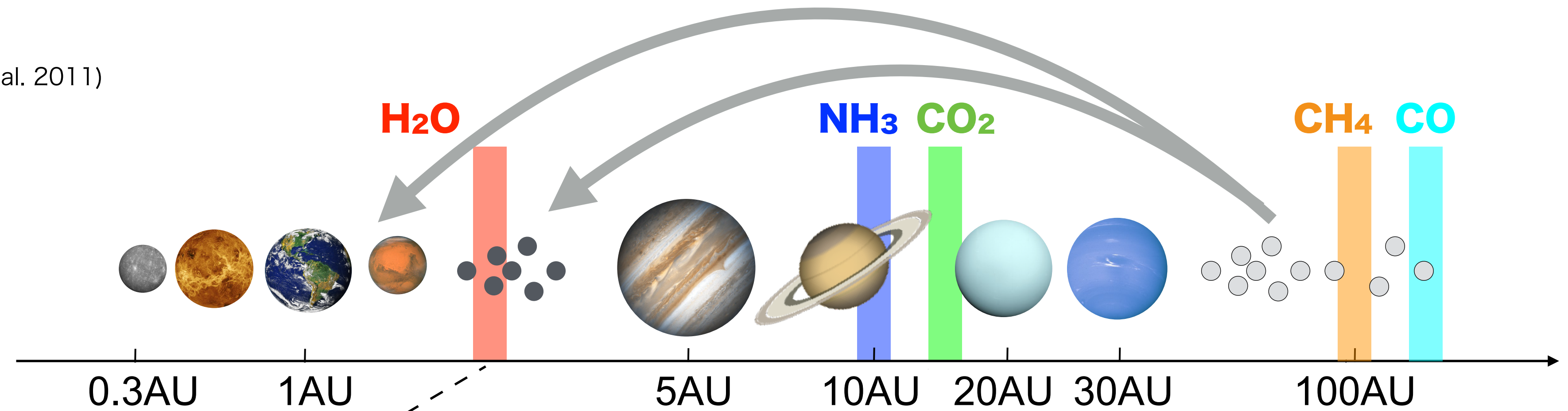
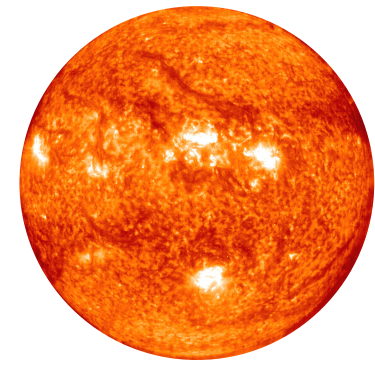
- 氷マントル・岩石コア(含水鉱物?)
(Fortes 2012; Neumann & Kruse, 2019)
- エンセラダスの NH_3 ・ CO_2 を含む噴泉ガス
(Waite et al. 2017)

ガニメデ, カリスト

- NH_3 を含む内部海? (e.g., Showman & Malhotra, 1999)
- CO_2 氷・ NH_3 氷? (e.g., Moore et al. 2004)

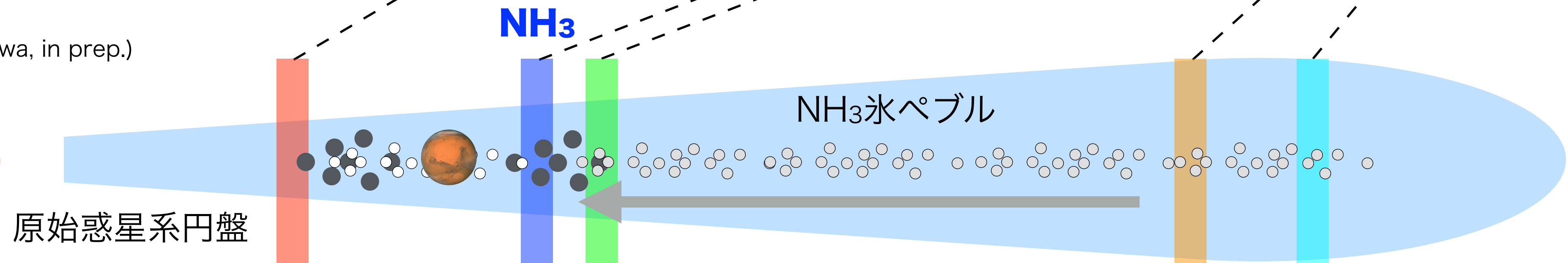
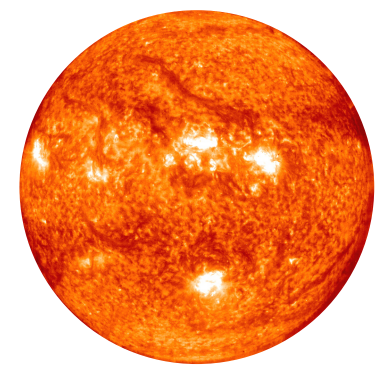
太陽系物質輸送

1. 小天体散乱 (e.g., Walsh et al. 2011)



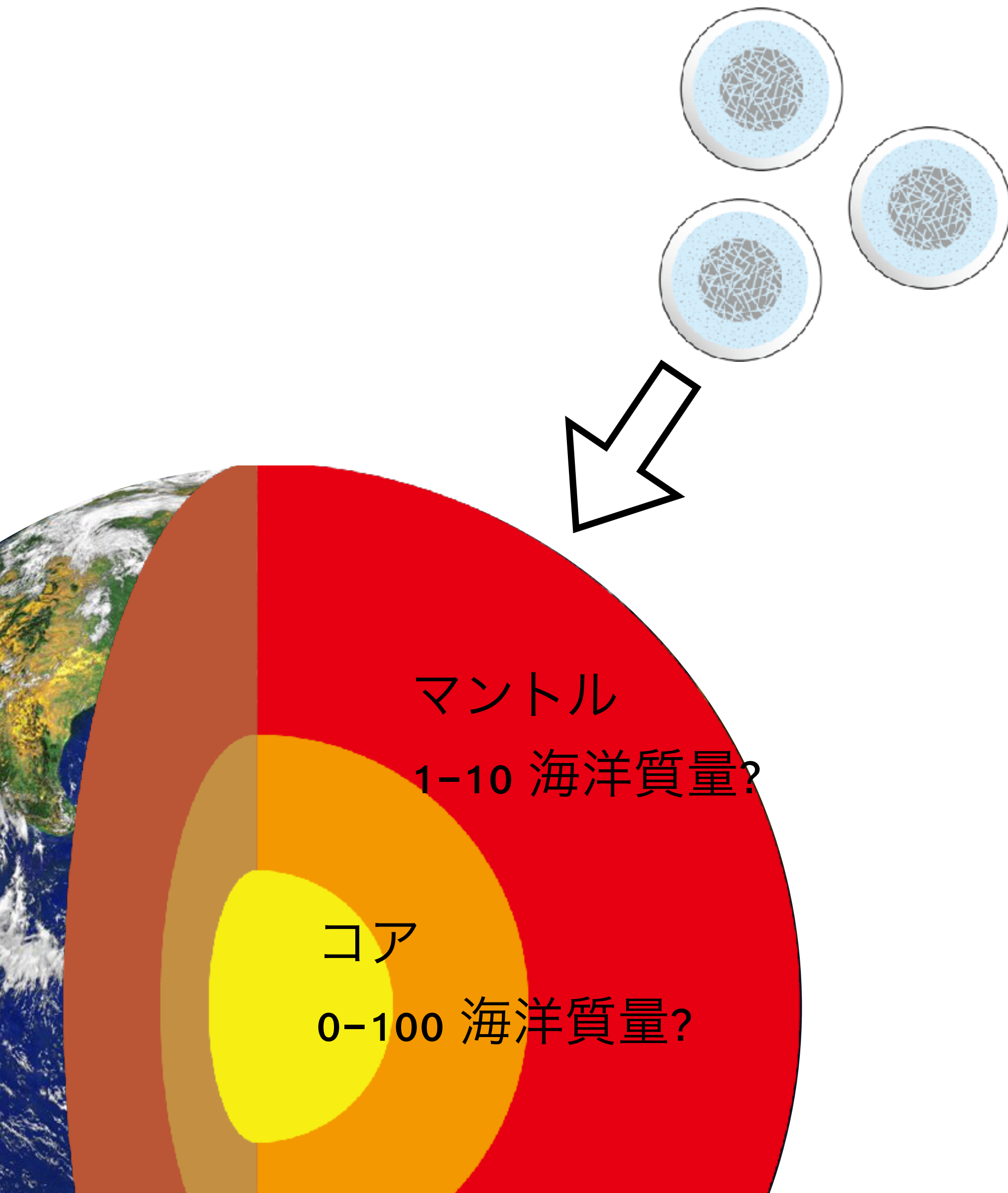
2. ペブル集積

(Sato et al. 2016; Nara, Okuzumi, Kurokawa, in prep.)



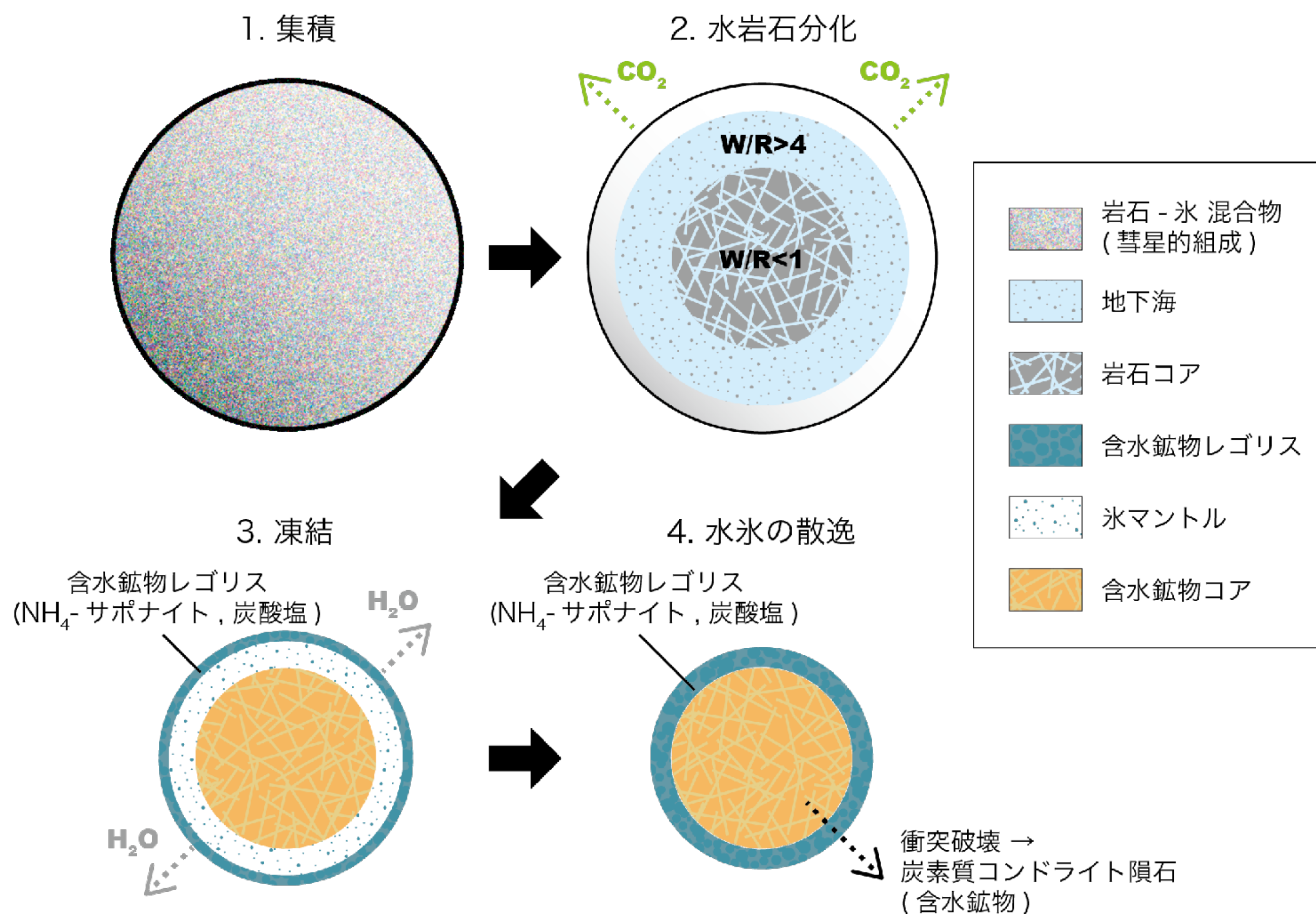
- $3.1\ \mu\text{m}$ 吸収：1 → 天体サイズ依存性なし(弱), 2 → 大きい天体に多い
- 将来的に観測数・サイズレンジを増やすことで支配的な輸送モードを制約

地球型惑星の揮発性元素の起源



- 地球マントルには 1-10 M_{EO} 相当の水
 - 含水鉱物の沈み込み (Kurokawa et al. 2018)
 - 形成期の取り込み (Hier-Majumder & Hirschmann 2017)
 - コアには最大100 M_{EO} ? (Umemoto & Hirose 2015)
- 氷マントルを纏ったコンドライト天体の集積が
“意外と水に富んだ地球”の起源?
- 火星内部の揮発性元素量 (隕石, 熱史から制約) も合わせて答え合わせをする必要

まとめ



- 大型のC型小惑星の赤外スペクトル ⇒ NH₄層状珪酸塩
- 水岩石反応+スペクトルモデル ⇒ NH₃, CO₂氷 + 水岩石比 > 4
- C型小惑星と炭素質コンドライトの起源
 1. NH₃, CO₂雪線以遠で集積
 2. 水岩石比の異なる2層に分化
 3. 外層はNH₄層状珪酸塩を含むレゴリス
 4. 破砕すると石化している内層が炭素質コンドライトとして地球に飛来
- 氷衛星・地球型惑星・太陽系探査の知見を統合することが大事！