

クレーター内部に残存した含水インパクト物質の水和状態

松原光佑¹, 山口祐香理¹, 中村昭子¹, 長谷川直², 和田武彦³

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所,

³自然科学研究機構国立天文台

近年の分光観測により, 月や分化した小惑星の表面から水や水酸基が検出されている (e.g., Li and Milliken, 2017; Arredondo et al., 2024). これらの物質の一部はインパクト天体からもたらされた可能性が考えられているが, その起源については議論が続いている. また, これらの物質がどのような形態 (例えば, 鉱物やガラス中に捕らわれているのか, 霜として天体表面に付着しているのか) は明らかになっていない. 本研究では, 天体衝突によってもたらされた含水物質について調査するために高速度衝突実験を行い, インパクト物質の水和状態変化について調査した.

二段式軽ガス銃を用いて, 直径 3 mm 程度の岩石弾丸を鉄鋼ターゲットに対して約 3-7 km/s で垂直衝突させた. 岩石弾丸として, 内部に水酸基を含む含水物質である蛇紋岩および無水物質であるカンラン岩を用いた. チャンバー内は 1 Pa 程度に減圧している. このような条件で, およそ 40-140 GPa の衝突圧力が生じ, ターゲット上には直径 1 cm 程度のクレーターが形成された. クレーター内部には溶融した弾丸物質が付着しており, その結晶性や水和状態を推定するために 2 種類の分光測定を行った.

顕微ラマン分光測定では, 岩石弾丸およびクレーター試料に対して波長 532 nm, ビーム径 0.7 μm のレーザーを照射し, 150-1800 cm^{-1} の波数領域のスペクトルを取得した. 赤外分光測定では, クレーター底面の法線方向から 30° の角度で光を入射させ, 垂直方向の反射スペクトルを FTIR を用いて取得した. 測定波長は 0.7-2.5 μm および 1.3-27 μm (高精度で測定できるのは 15 μm 程度まで) とした.

蛇紋岩弾丸を衝突させたクレーターの顕微ラマン分光測定では, 最も低速の約 3 km/s で衝突させたクレーターからのみ蛇紋石のピークが認められた. そのピーク幅は未衝突の弾丸と比較して広く, 衝突によって結晶性が悪化したことが示唆された. 赤外反射スペクトルは, 弾丸物質や衝突速度に関わらず水酸基と分子水の吸収が隣接する 3 μm 帯において吸収を示した. 蛇紋岩弾丸を衝突させたクレーター試料の 3 μm 帯における吸収深さは, 衝突圧力が約 100 GPa を超えると, カンラン岩を衝突させたクレーターと同程度であった. これは 100 GPa を超える衝突によるクレーターでは吸着水のみが測定に影響を及ぼしており, クレーター内部に残存した弾丸物質はほとんど水和していないことを示唆する. また, いずれの衝突速度においても水酸基による 1.4 μm の吸収は確認されなかった. 赤外反射スペクトル測定では顕微ラマン分光測定と比較して径の大きいビームを照射しており, 局所的に残存した蛇紋石のピークを検出できなかった可能性が示唆される. 一方, 低い衝突圧力においては分子水の吸収を示す 6.1 μm の吸収が確認され, その吸収深さは 3 μm 帯の吸収とともに増加する傾向がみられ, 3 μm 帯の吸収はほぼ分子水に起因すると考えられる. 軽石に対して蛇紋岩を衝突させた実験的研究 (Daly and Schultz, 2018) では, 蛇紋石の分解によって生じた水蒸気がメルトに捕獲されることを示唆している. 本実験においても同様にクレーター内のメルトに蛇紋岩由来の水蒸気が捕獲され, その捕獲作用は低速度衝突において顕著であった可能性がある.

本研究は JAXA 宇宙科学研究所の超高速度衝突実験施設および宇宙放射線装置の共同利用実験により行いました.

クレーター内部に残存した 含水インパクト物質の水和状態

松原 光佑¹, 山口 裕香理¹, 中村 昭子¹, 長谷川 直², 和田 武彦³

¹神戸大学大学院理学研究科

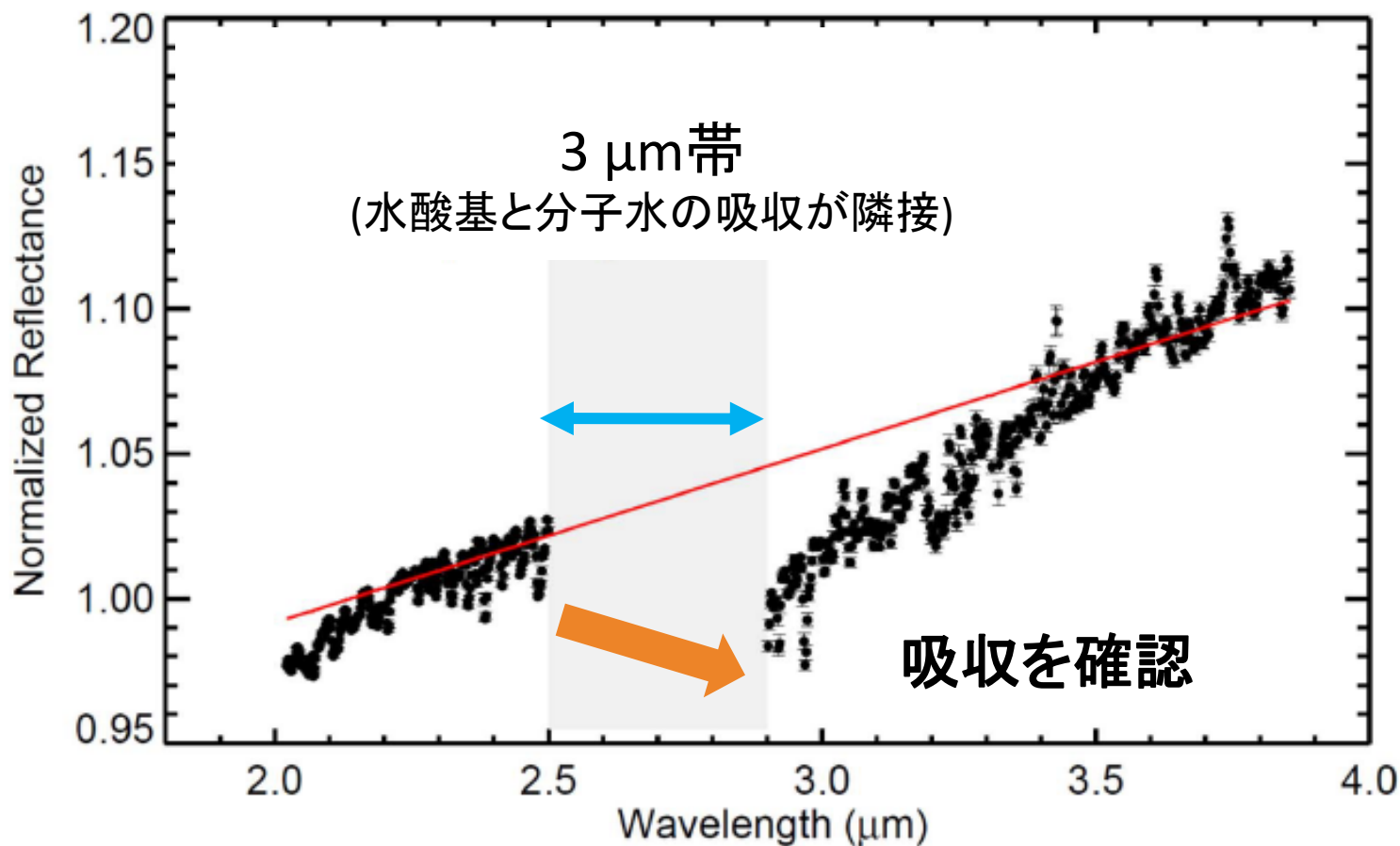
²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

³自然科学研究機構国立天文台

本研究は, JAXA宇宙科学研究所の超高速度衝突実験施設および宇宙放射線装置の共同利用実験により行いました.

月や分化した小惑星の反射スペクトル観測において $3\text{ }\mu\text{m}$ 帯の吸収を検出

→ **水酸基/分子水が存在** (e.g., Takir et al., 2017; Li and Milliken, 2017; Jarmak et al., 2024)



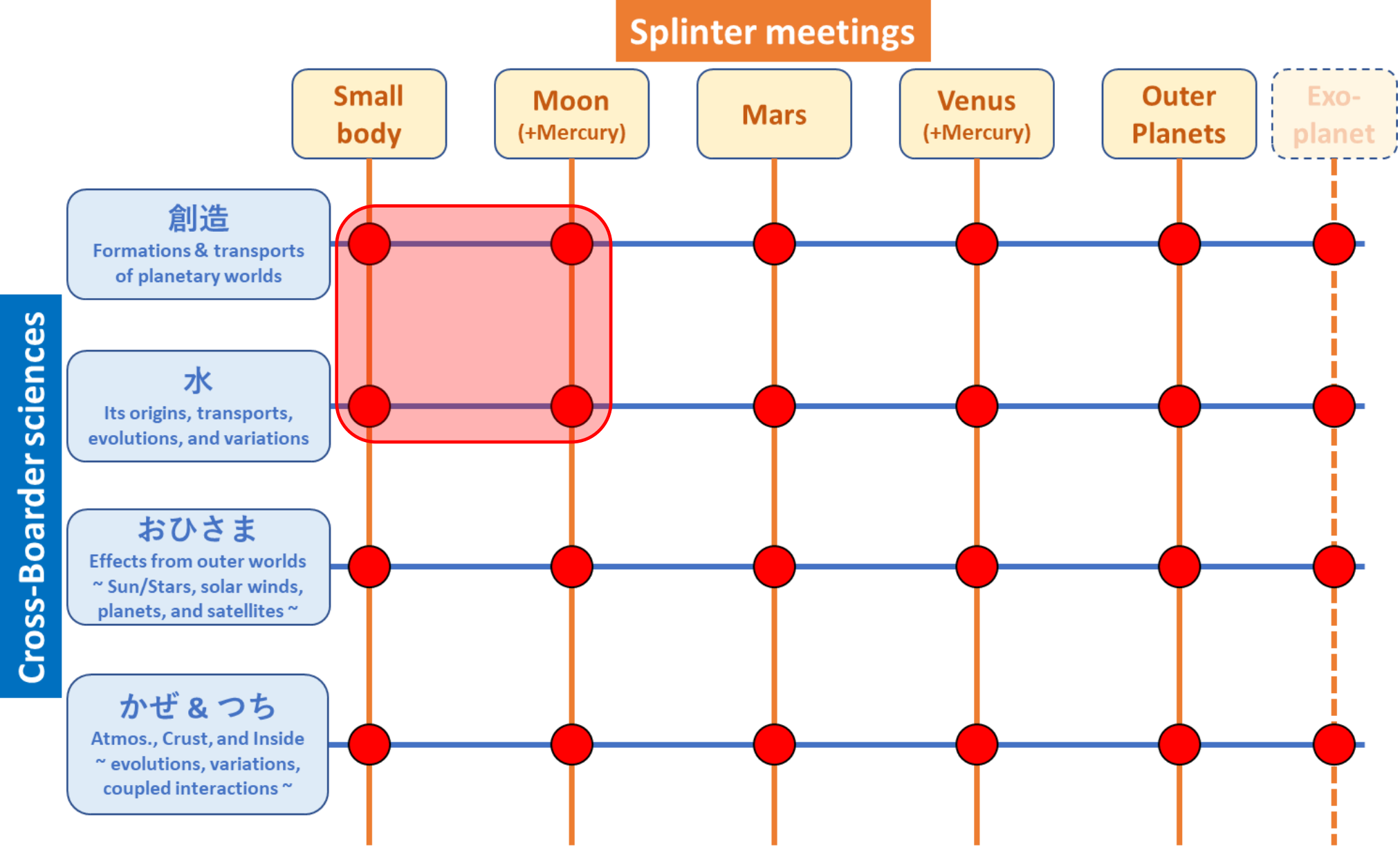
水酸基/水の一部はインパクトによってもたらされた可能性

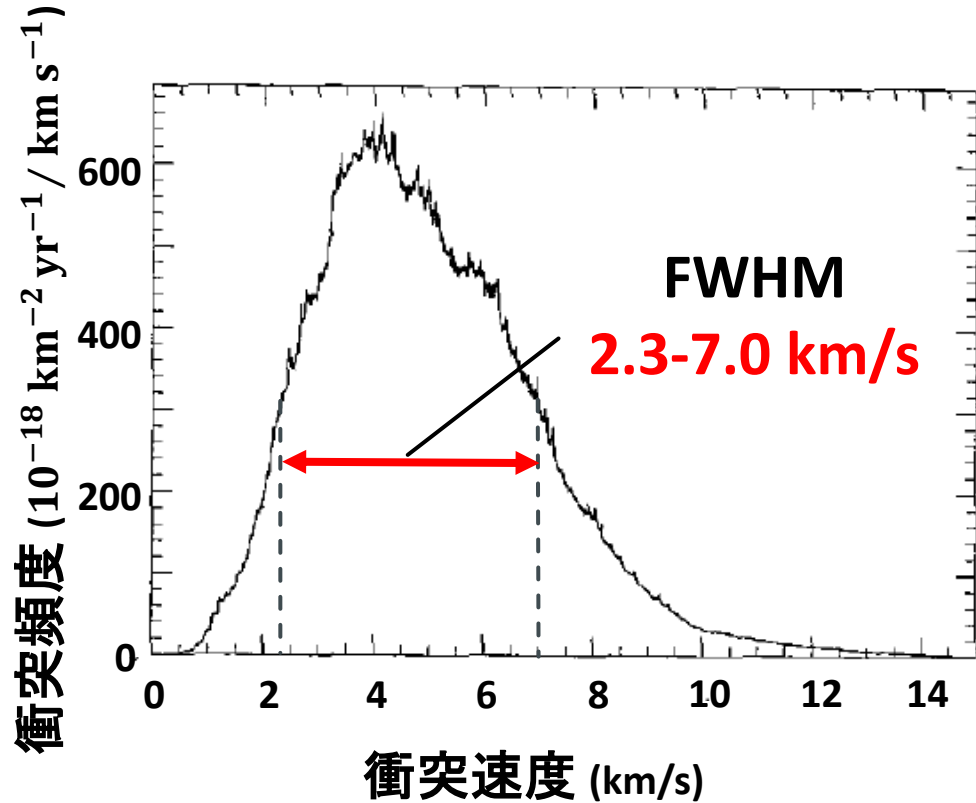
→ 水和状態を $3\text{ }\mu\text{m}$ 帯の観測のみに基づいて制約することは困難

小惑星表面に水がどのように存在するのかは明らかになっていない

- 鉱物内の構造水、流体包有物
- 天体表面に付着した霜
- ガラスの中に含まれる水

M型小惑星Psycheの反射スペクトル (Takir et al., 2017)





小惑星帯における衝突速度分布
(Bottke et al., 1994)

鉄質小惑星

→鉄

岩石質小惑星

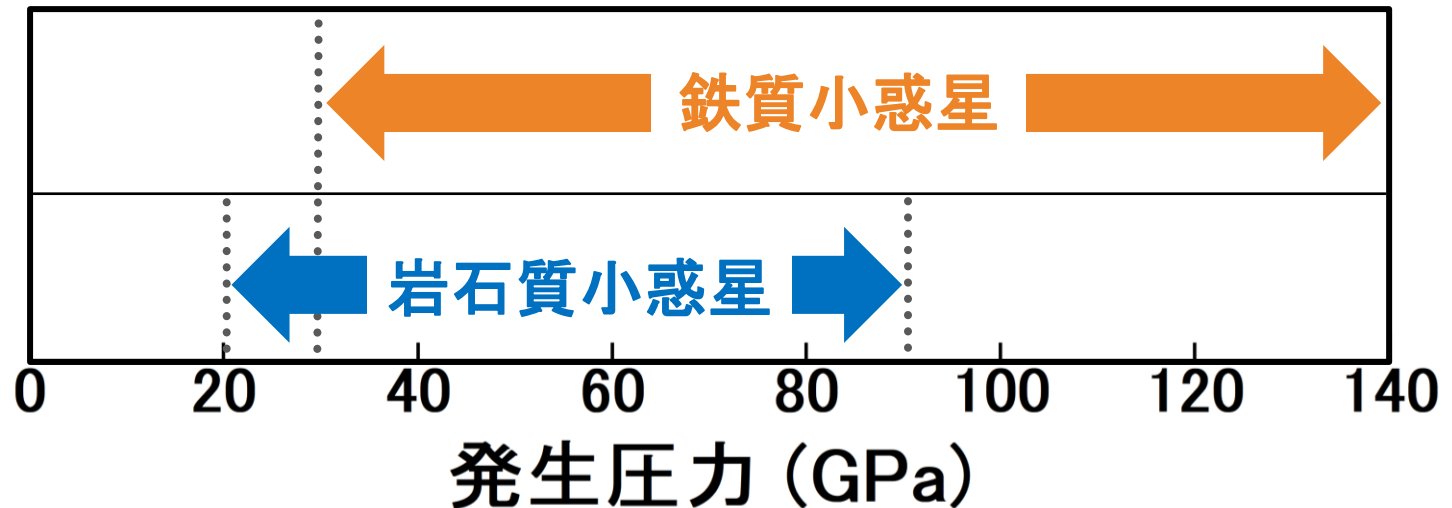
→玄武岩

とみなし、蛇紋岩インパクトが典型的な衝突速度で発生する圧力を推定

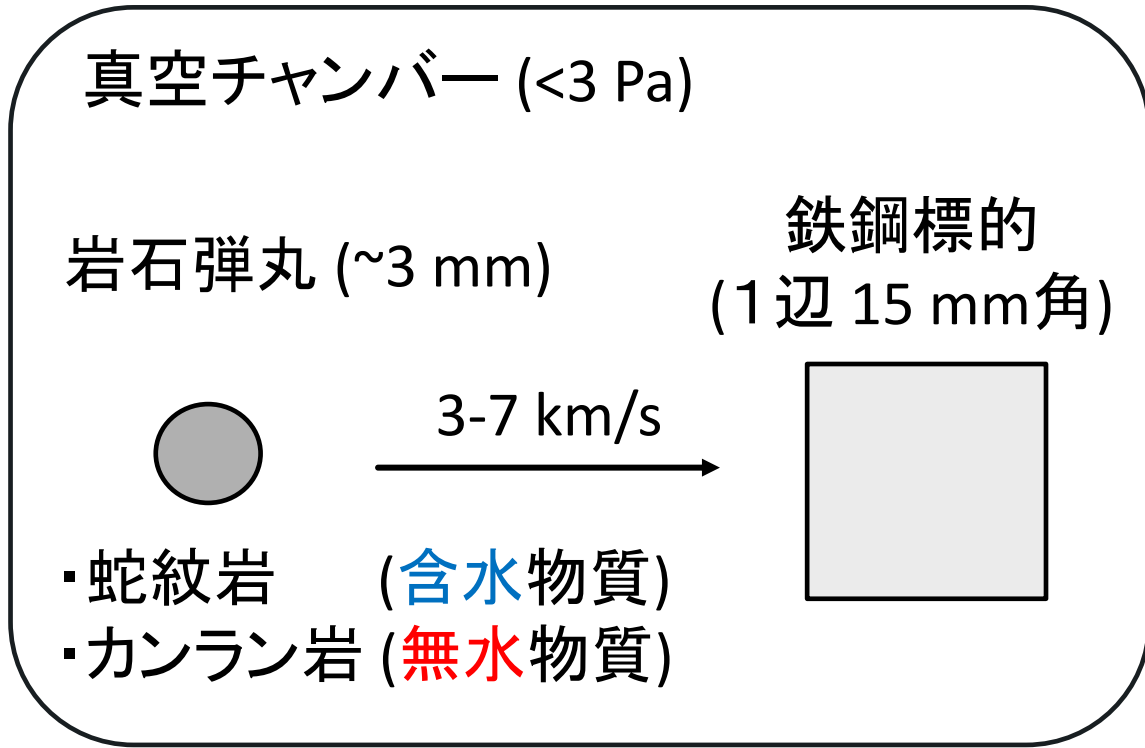
蛇紋石・・・水酸基を含む含水鉱物

天体物質の主要な含水相と考えられる

(e.g., Wilkening et al., 1978)

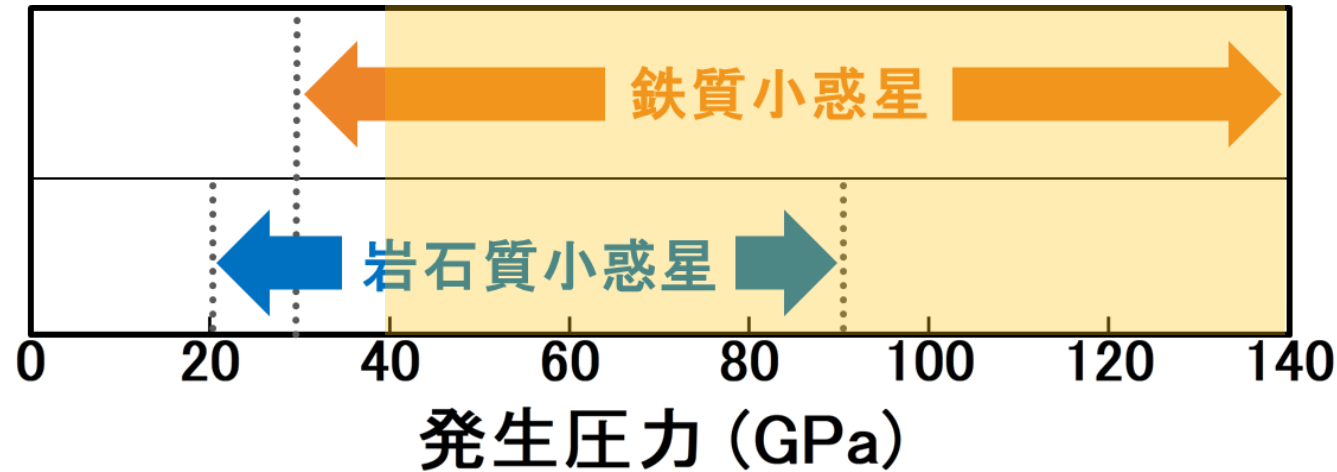


JAXA宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を使用し、含水物質を含むインパクターの衝突を再現



実験セットアップ

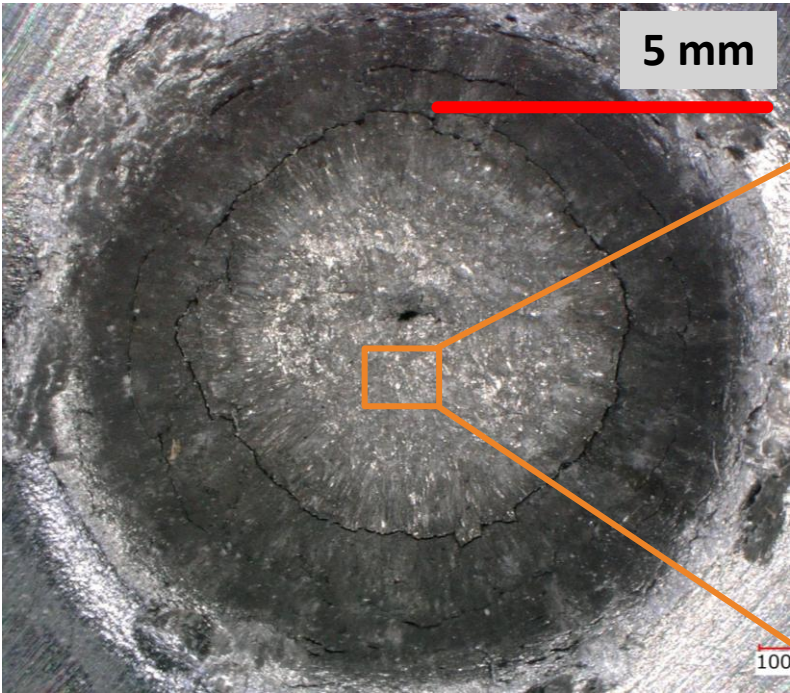
衝突実験における発生圧力
(40-140 GPa)



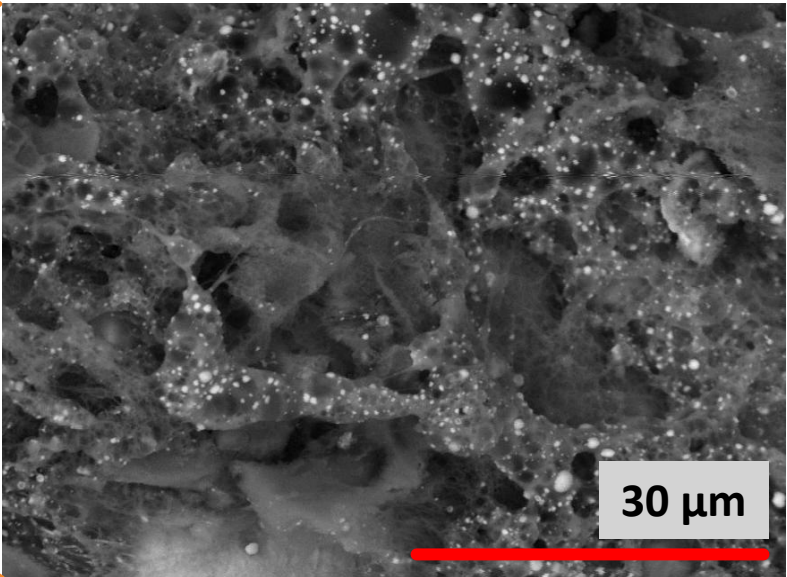
小惑星帯における典型的な衝突圧力を再現することが可能

赤外反射スペクトル測定
顕微ラマン分光測定

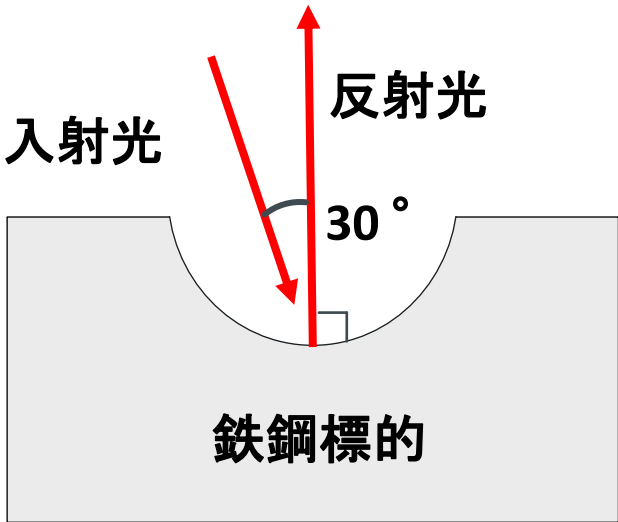
→ 弾丸物質の水和状態
→ 蛇紋石の検出、結晶性の変化



蛇紋岩弾丸
衝突クレーター (~3 km/s)



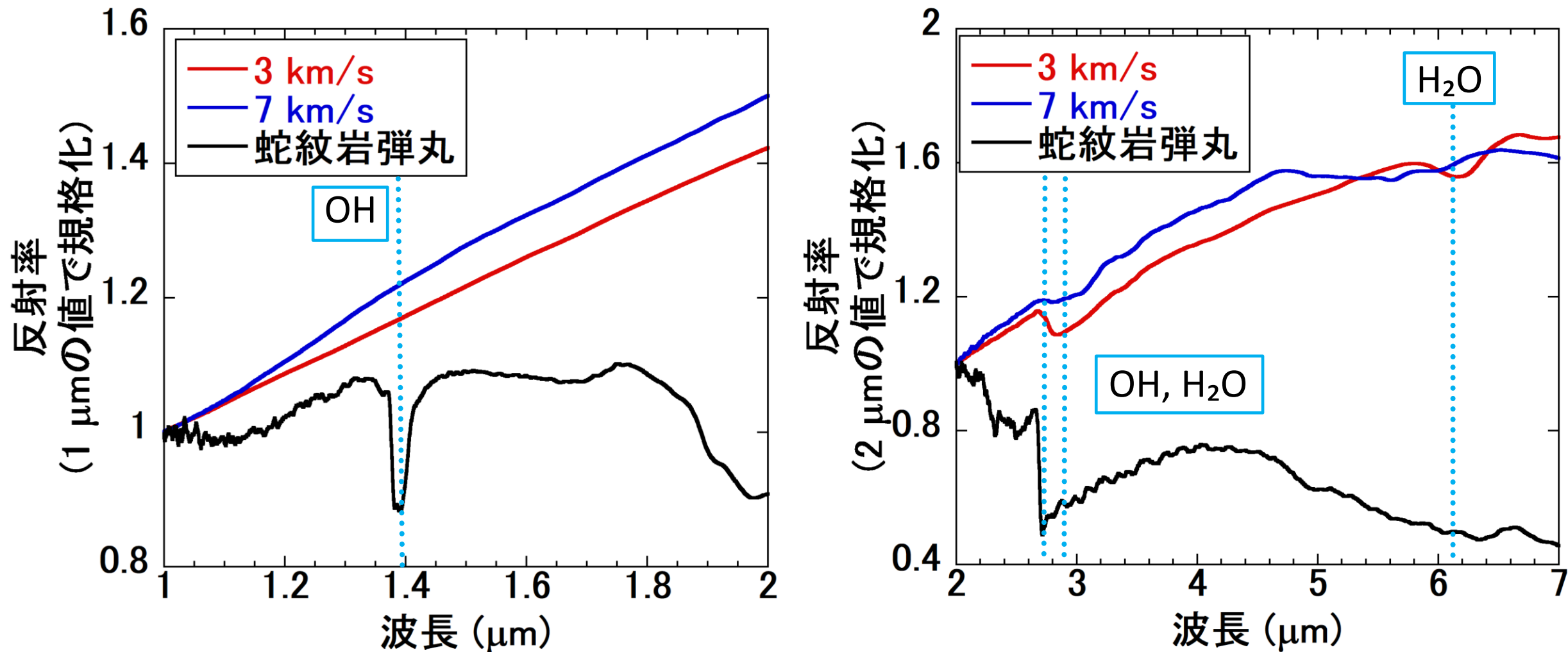
クレーター内部
反射電子像



反射スペクトルの
測定セットアップ

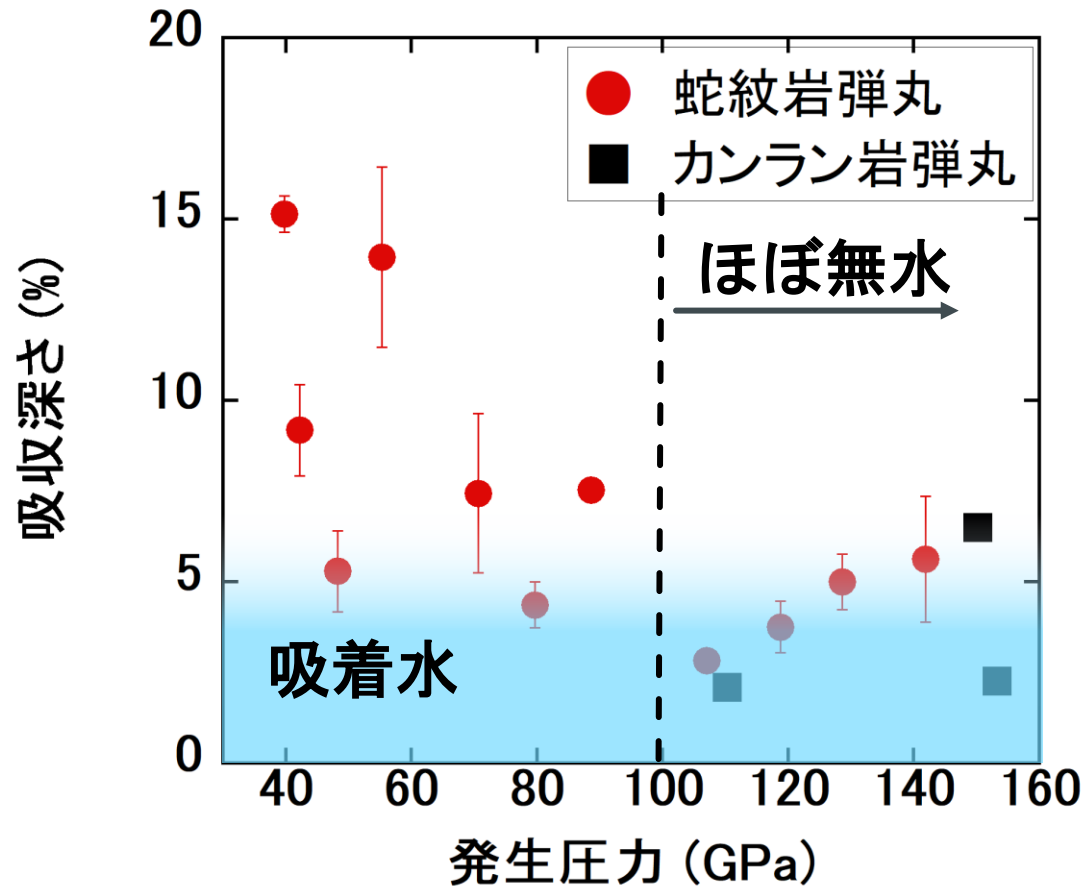
分光測定条件

測定波長 (μm)	検出器	光源	ビーム径	測定環境	波数分解能
1.3 - 27	LN-MCT	タングステンランプ	1 mm	<2 hPa	4 cm ⁻¹
0.7-2.5	InGaAs				

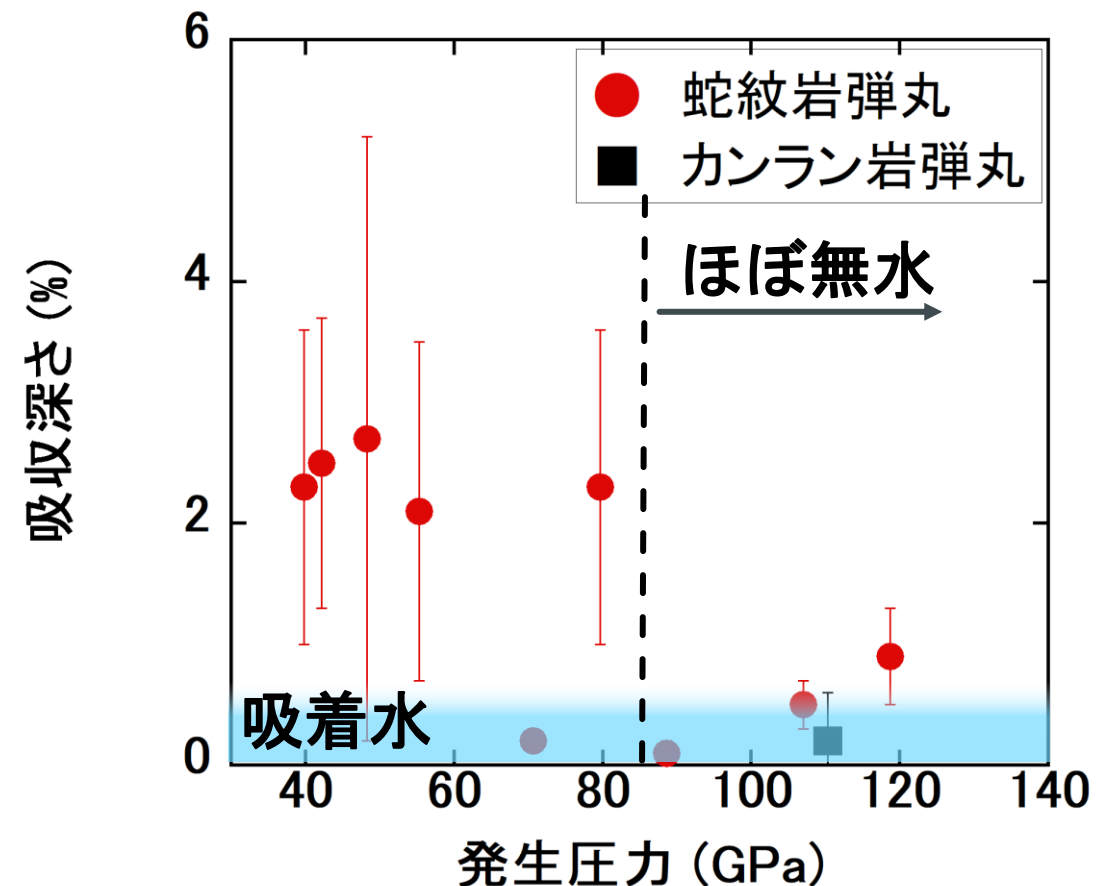


蛇紋岩弾丸およびクレーター試料の赤外反射スペクトル

- クレーター内部からは**水酸基は検出されない**
- 水酸基と分子水の吸収が隣接する 3 μm 帯、分子水のみに起因する 6 μm の吸収を検出



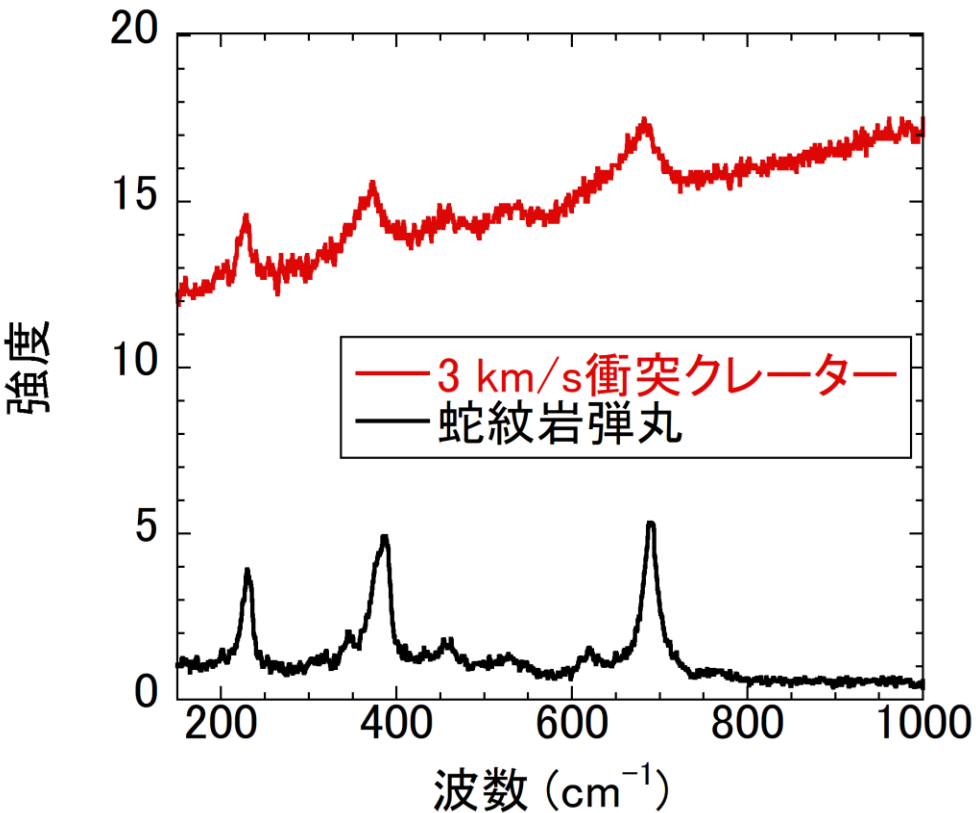
3 μm帯における吸収深さ
水酸基&水



6 μm帯における吸収深さ
分子水

およそ 80-100 GPaを下回る圧力を経験したクレーターの内部は分子水を含む
→メルトが固化する際に分子水を捕獲した可能性 (Daly and Schultz, 2018)

測定波数	ビーム径	レーザー波長	波数分解能
150-1800 cm^{-1}	0.7 μm	532 nm	1.0-1.3 cm^{-1}



蛇紋岩弾丸および ~3 km/s衝突クレーター内部の蛇紋石のスペクトル

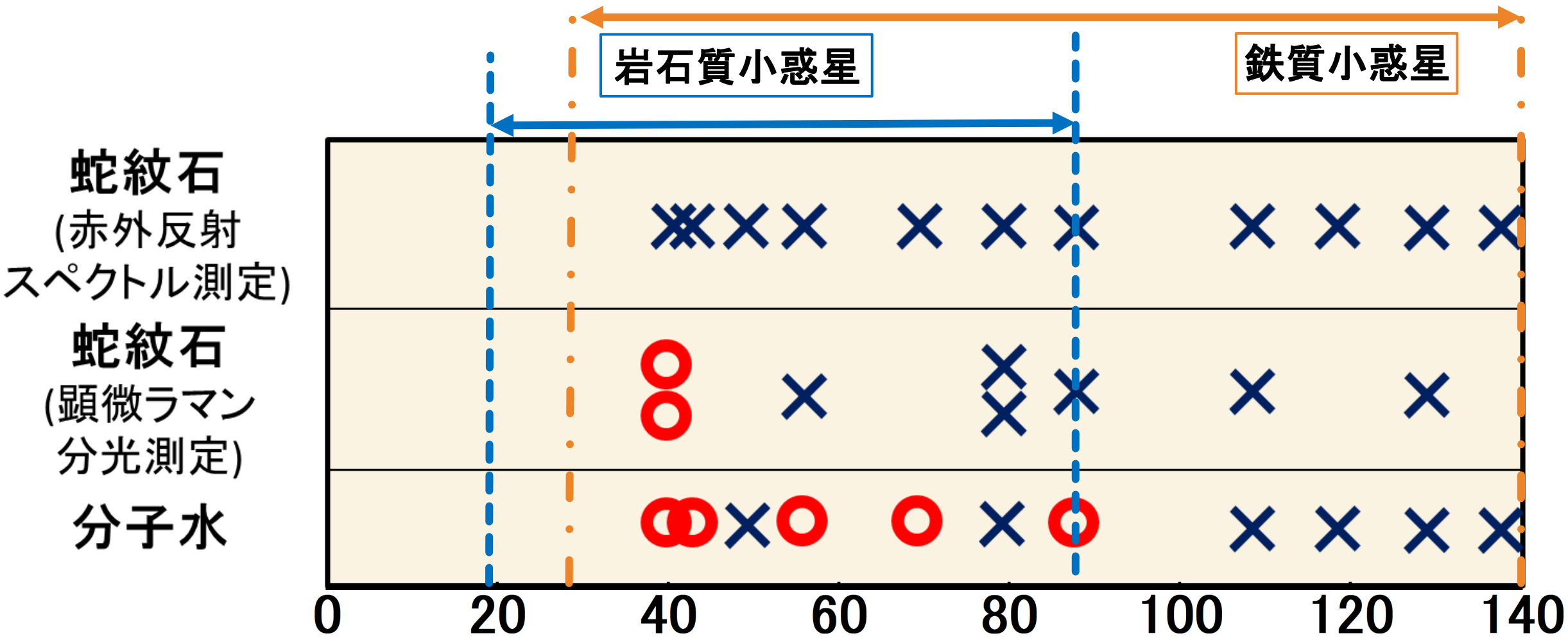
約 3 km/s (本研究で最低速度)で衝突させたクレーターからのみ蛇紋石を検出

ピークが浅化 → 衝突によって結晶性が悪化

- ・ 赤外反射スペクトル測定 (ビーム径 1 mm) → 未検出
- ・ 顕微ラマン分光測定 (ビーム径 0.7 μm) → 検出

衝突によって破碎され、結晶性が悪化した蛇紋石が局所的に存在

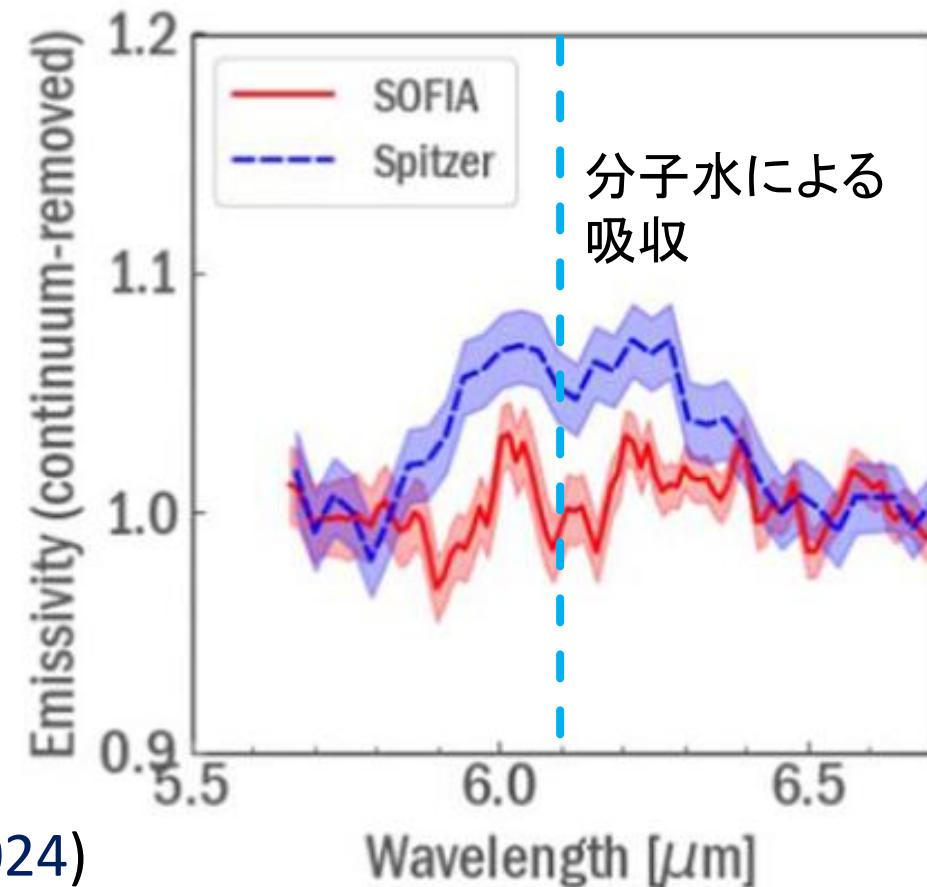
→ 赤外反射スペクトル測定で検出されなかった可能性



- 蛇紋岩弾丸を 3–7 km/s の速度 (40–140 GPa) で鉄鋼ターゲットに衝突
- 40 GPa 程度の圧力では、結晶性の悪い蛇紋石がクレーター内部に局所的に残存
- 小惑星の組成 (鉄質/岩石質) に関わらず、衝突によって発生した メルトが放出された分子水を捕獲する可能性

- 小惑星表面には衝突によって輸送され、メルトに捕獲された分子水が存在し得る
- 実際に **分子水の存在が実証されつつある** (Arredondo et al., 2024)

→ 分光観測における 3,6 μm 帯の吸収として検出される可能性



S型小惑星Irisの反射スペクトル (Arredondo et al., 2024)