Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2026-11-25

氷岩石混合物からなる多孔質天体上のクレーター形成に関する実験的研究

野口, 琴海 ; 保井, みなみ ; 荒川, 政彦 ; 大川, 初音 ; 豊嶋, 遥名 ; 菊川, 涼介 ; 大西, 彩華 ; 大橋, 拓磨 ; 大坪, 晴太郎 ; 崎村, 達也

(Citation)
神大「知の種」

(Issue Date)
2026

(Resource Type)
conference poster

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100505672

神戸大学

氷岩石混合物からなる多孔質天体上のクレーター形成に関する実験的研究

野口琴海

保井みなみ, 荒川政彦, 大川初音, 豊嶋遥名, 菊川涼介, 大西彩華, 大橋拓磨, 大坪晴太郎, 﨑村達也

神戸大学 大学院理学研究科

1. Introduction

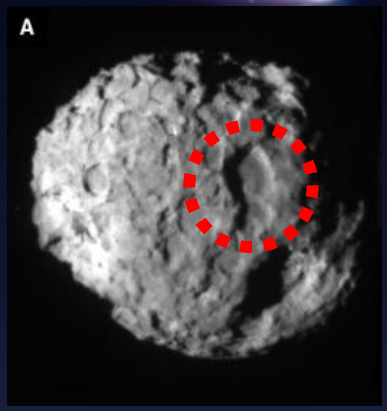
✓彗星核

・始原的な天体であり，多くの彗星探査ミッションが行われてきた

➢ 表面には**円形のくぼ地**が存在 [M. El-Maarry et al. 2015]

→ 一部は衝突起源である可能性

・氷と岩石からなる多孔質な物質



彗星核表面のくぼ地 ▸
(81P/Wild2, NASA)

➢ Rosettaミッション(ESA,2014–2016) およびその後の研究から得られた67Pの物性

・低バルク密度：$532 \pm 7\ \mathrm{kgm^{-3}}$ [Jorda et al. 2016]

・ダスト/氷質量比（R）：$0.5 - 1.7$ [Marschall et al. 2025]

→ ダスト質量含有率：$33 - 63\ \mathrm{wt\%}$　　※ $f_{dust} = R/(1+R)$

✓氷岩石混合試料において，岩石含有率が衝突による破壊過程やクレーター形成に及ぼす影響は十分に解明されていない

氷，岩石混合物を用いた衝突実験により，

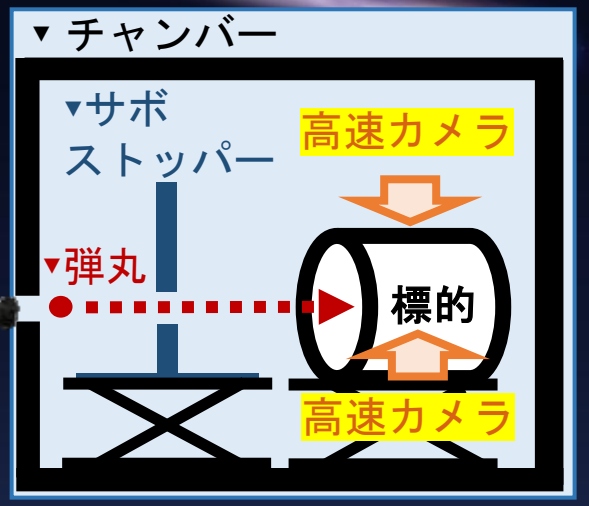
岩石含有率がクレーター形成過程に及ぼす影響を明らかにする

2. Experimental Methods

✓衝突実験(-15℃の低温室内で実施)

- 装置：横型二段式軽ガス銃
- 弾丸:アルミニウム球 (直径2 mm, 密度2.79 g/cm³)
- 衝突速度：1～6 km/s





▲ 横型二段式軽ガス銃

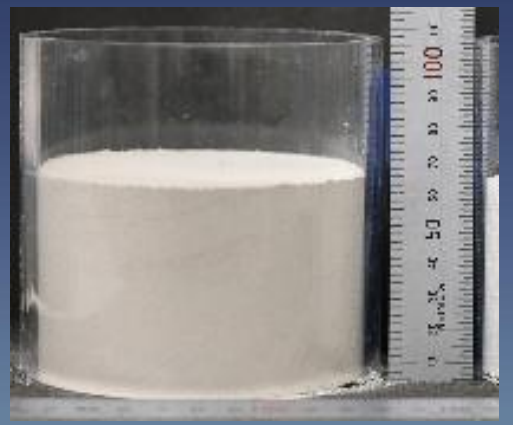
➢試料

- 円柱形の氷, 岩石混合試料(直径 100 mm, 高さ60 mm)

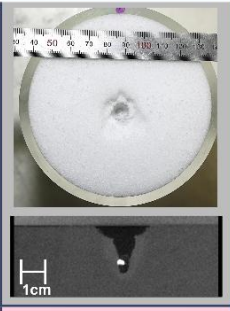
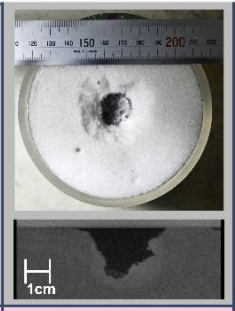
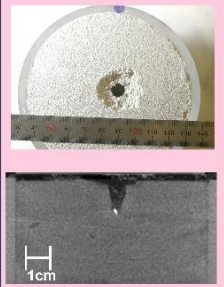
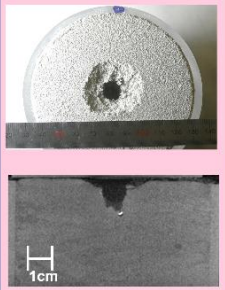
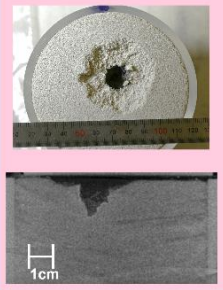
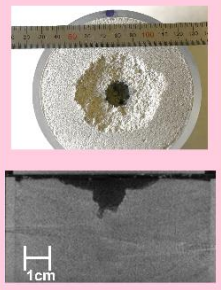
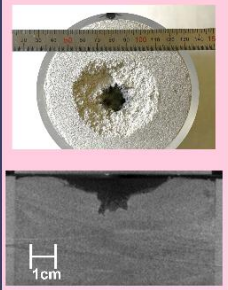
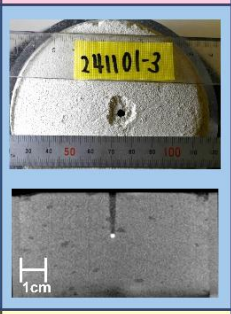
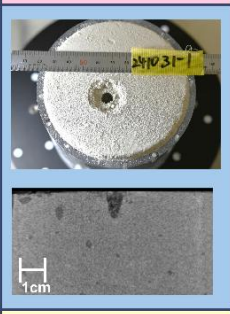
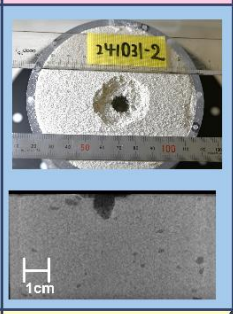
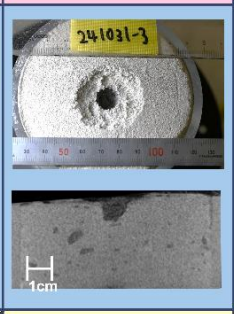
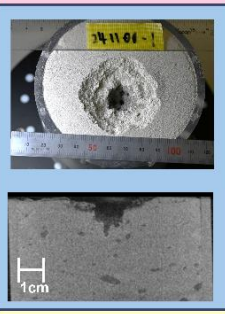
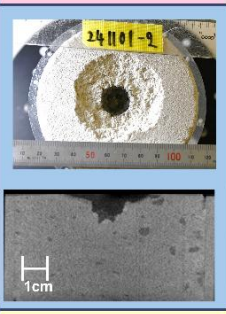
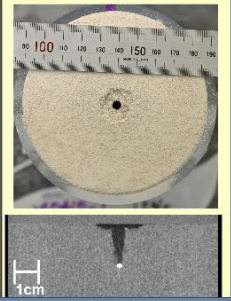
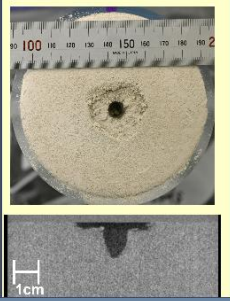
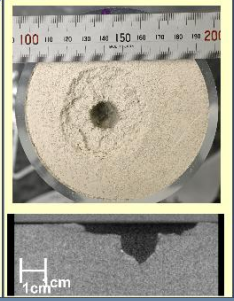
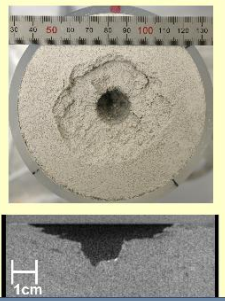
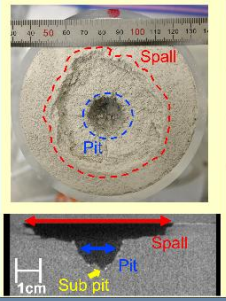
→ 氷粒子(< 710μm)とモンモリロナイト粉末(~2 μm)を均一に混合し, 油圧式ポンプで圧縮

岩石質量含有率 (wt.%)	0	30	40	60
岩石体積含有率 (vol.%)	**0**	**8.6**	**12.0**	**22.0**
空隙率 (%)	40	40	40	40
平均密度 (kg/m³)	555	678	715	871
焼結期間 (hour)	70~73	72~90	72~90	70~73
圧縮強度 (MPa)		**0.60**	**0.41**	**0.12**

▾衝突実験用試料 (60 wt%)



3. Experimental Results

岩石質量含有率	1 km/s	2 km/s	3 km/s	4 km/s	5 km/s	6 km/s
0 wt% Ice						
30 wt% Montmorillonite						
40 wt% Montmorillonite						
60 wt% Montmorillonite (~2 μm)						

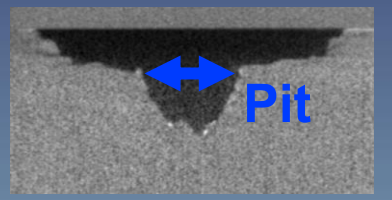
✓クレーターサイズ

- スポール半径r(m) ：
  一眼カメラで得られた画像から
  スポール領域の面積を求め，
  面積に相当する半径として求めた



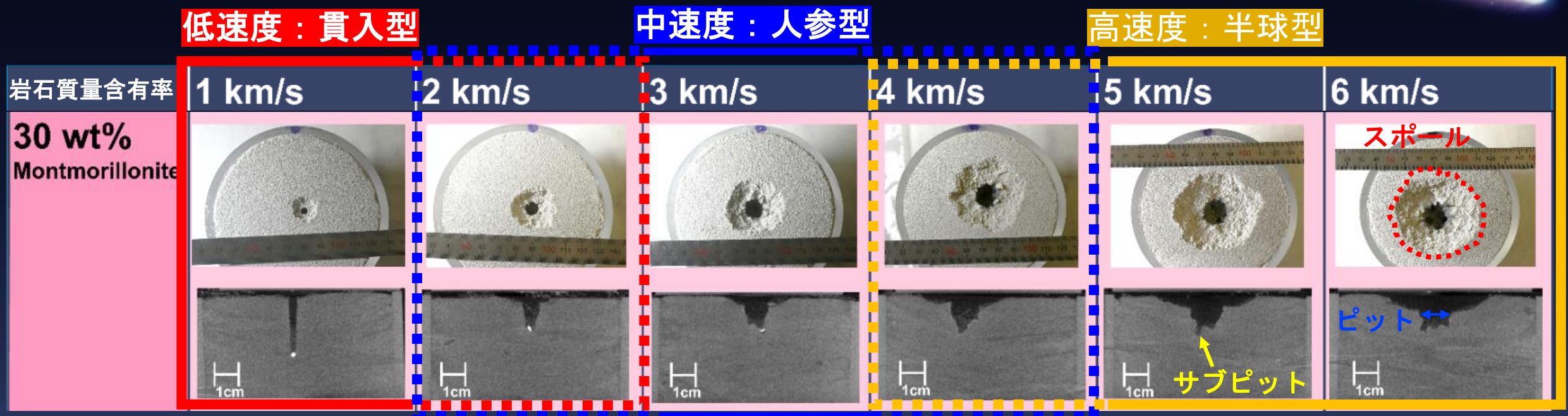
◂ 岩石含有率：60 wt%
モンモリロナイト
衝突速度：6 km/s

- ピット半径r(m) ：
  CT画像より最大半径として求めた



◂ 岩石含有率：60 wt%
モンモリロナイト
衝突速度：6 km/s

3. Experimental Results



✓クレーター形態

・衝突点直下に半球状のピットが形成

・ピット周囲に浅い円形領域であるスポールが形成

・衝突速度の増加と伴に，ピット断面は貫入型 → 人参型 →半球型へと変化する

・高速度では弾丸破片によるサブピットが形成される

3. Experimental Results クレーター半径

✓運動エネルギー依存性

運動エネルギーの増加とともに大きくなる

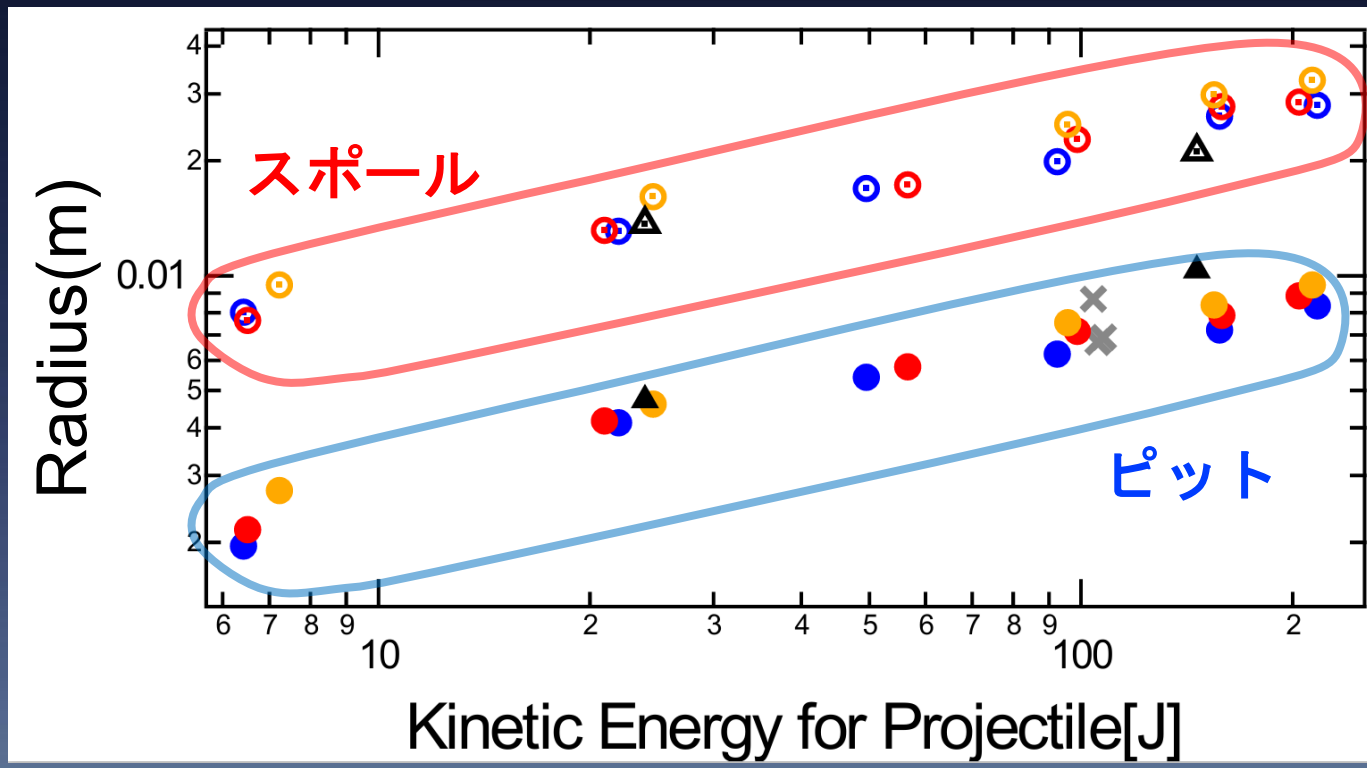
✓岩石含有率依存性

含有率 0 wt.%,30 wt.%, 40 wt.%, 60 wt.%
におけるピット半径,スポール半径
の大きさは同程度

岩石含有率の変化は小さいと考えられる

→圧縮強度は岩石含有率の増加に伴い
低下するものの, クレーターサイズ
にはその影響が明瞭に現れていない

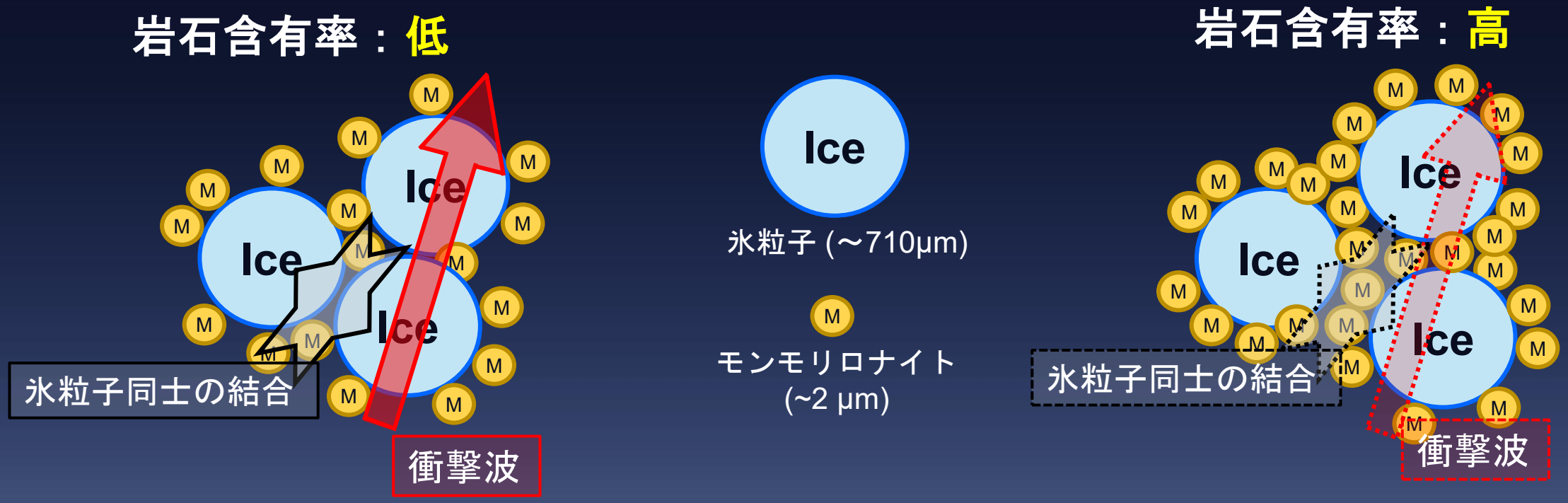
岩石含有率：0 wt.% [△,▲]
0 wt.% [×] (Sasai et al. 2024)
30 wt.% [○,●]
40 wt.% [○,●]
60 wt.% [○,●]



※空隙率は全て40 %

3. Experimental Results

✓岩石は氷粒子の結合を阻害し，氷粒子同士の結合は岩石粒子よりも衝撃波を伝播しやすい



✓岩石含有率が低くなる：強度↑，衝撃によるエネルギーの伝わりやすさ↑

✓岩石含有率が高くなる：強度↓，衝撃によるエネルギーの伝わりやすさ↓

→ 二つの効果により，結果としてクレーターサイズに大きな変化が見られなかった可能性がある

4.Compressive strength test

✓圧縮強度試験

装置：一軸圧縮試験機　　歪速度：5.0×10^{-3} to $1.6 \times 10^{-1}\ s^{-1}$

➢試料

・氷と岩石を混合した円柱形試料（直径20 mm，高さ60 mm）

・空隙率：40 %　　・焼結期間：68-74時間

・岩石質量含有率：30, 40, 50, 60 wt%

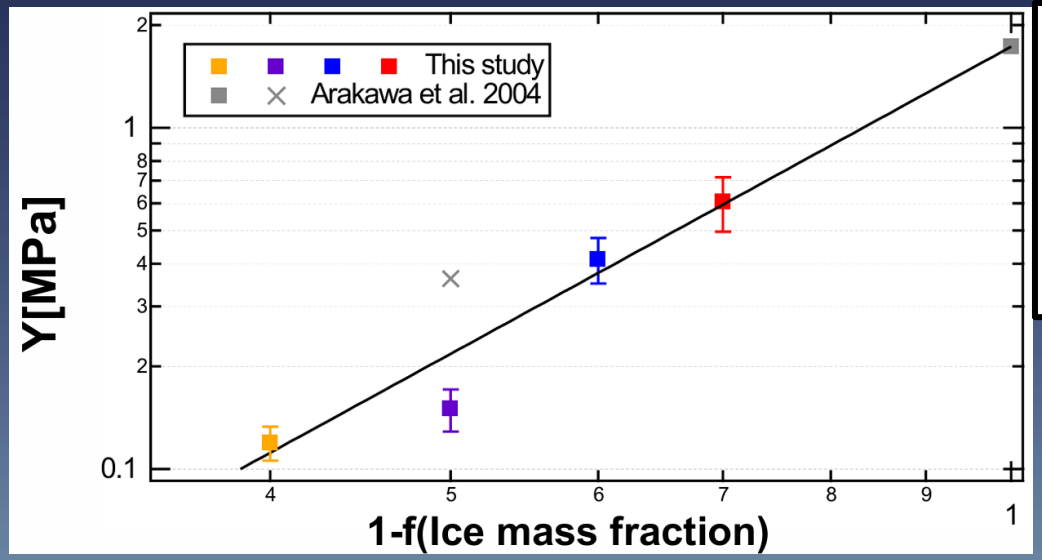


圧縮試験用試料 (60 wt%) ▲



一軸圧縮試験機 ▲

✓ 圧縮強度Yと岩石含有率f (氷含有率(1-fとして関係式を求めた))



0.60 MPa (30 wt%)

0.41 MPa (40 wt%)

0.15 MPa (50 wt%)

0.12 MPa (60 wt%)

✓モンモリロナイト含有率(f)
が増えるほど／氷含有率(1-f)
が減るほど圧縮強度は小さくなる

$$Y = (1.77 \pm 0.10)(1 - f)^{2.80 \pm 0.41}$$

5. Discussion πスケール則

クレーターサイズと衝突条件の関係を示す

$$\pi_R = H_1 \pi_4^{\frac{1-3\nu}{3}} \pi_Y^{\frac{-\mu}{2}},$$

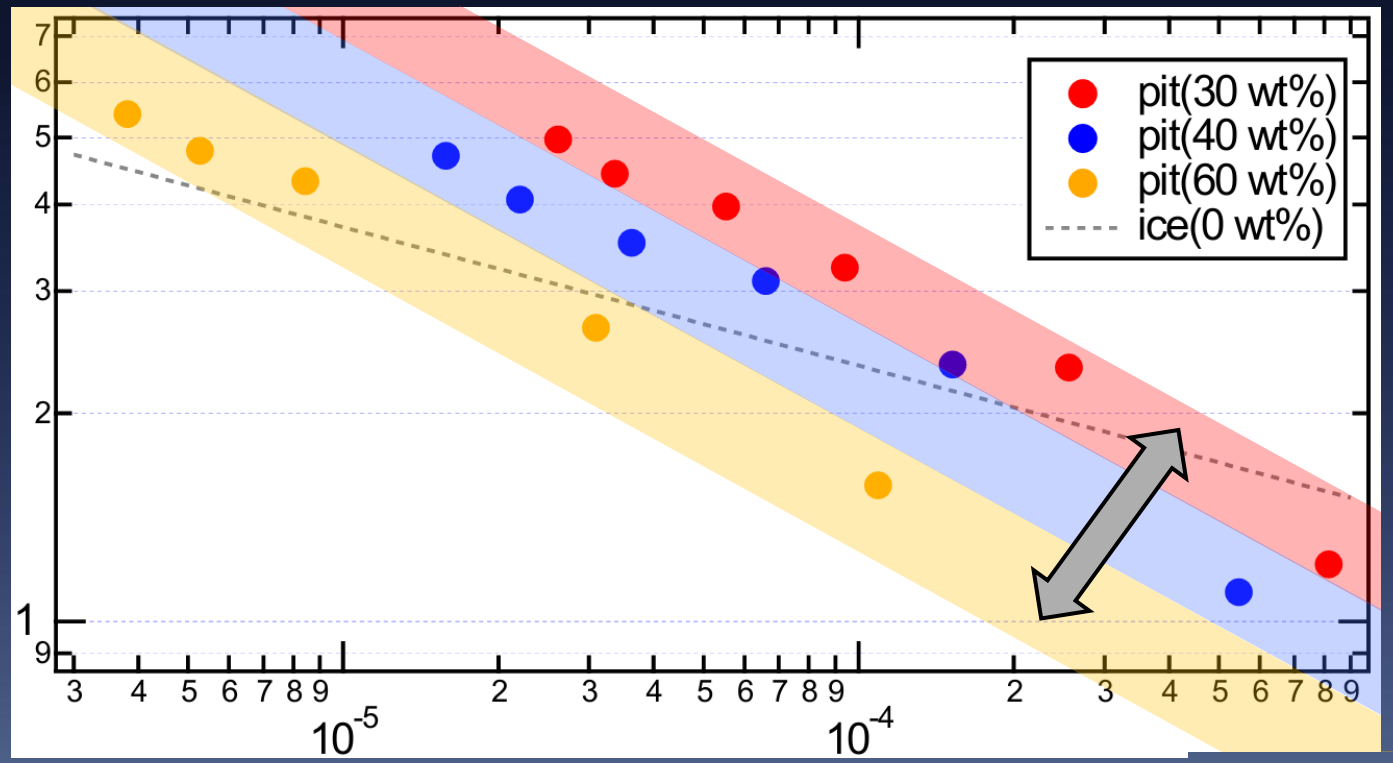
$$\pi_R = \left(\frac{\rho_t}{m_p}\right)^{\frac{1}{3}} R, \quad \pi_Y = \left(\frac{Y}{\rho_t v_i^{\,2}}\right), \quad \pi_4 = \frac{\rho_t}{\delta}$$

H_1, ν, μ：標的物質に依存する定数, v_i：衝突速度, Y：標的の強度
ρ_t：標的の密度, m：弾丸の質量, R：クレーター半径, δ：弾丸密度

ただし, $\nu = 0.4$を使用してπ_4の指数を-0.067とした (Housen and Holsapple.2011)

5. Discussion πスケール則

✓異なる岩石含有率におけるスケーリング則（空隙率：40 %，岩石：モンモリロナイト）



規格化半径 $\left(\frac{\pi_R}{\pi_4{}^{-0.067}}\right)$

規格化強度 (π_Y)

✓強度(π_Y)による規格化では，

岩石含有率毎にばらつきが生じる

↓

異なる岩石含有率におけるクレーター形成は**強度(π_Y)だけでは説明できない可能性がある**

↓

有効強度：$\pi_Y{}^* = f^\gamma \times \pi_Y$ の導入

f：岩石体積含有率

[f=0.086(30 wt%), 0.120(40 wt%), 0.220(60wt%)]

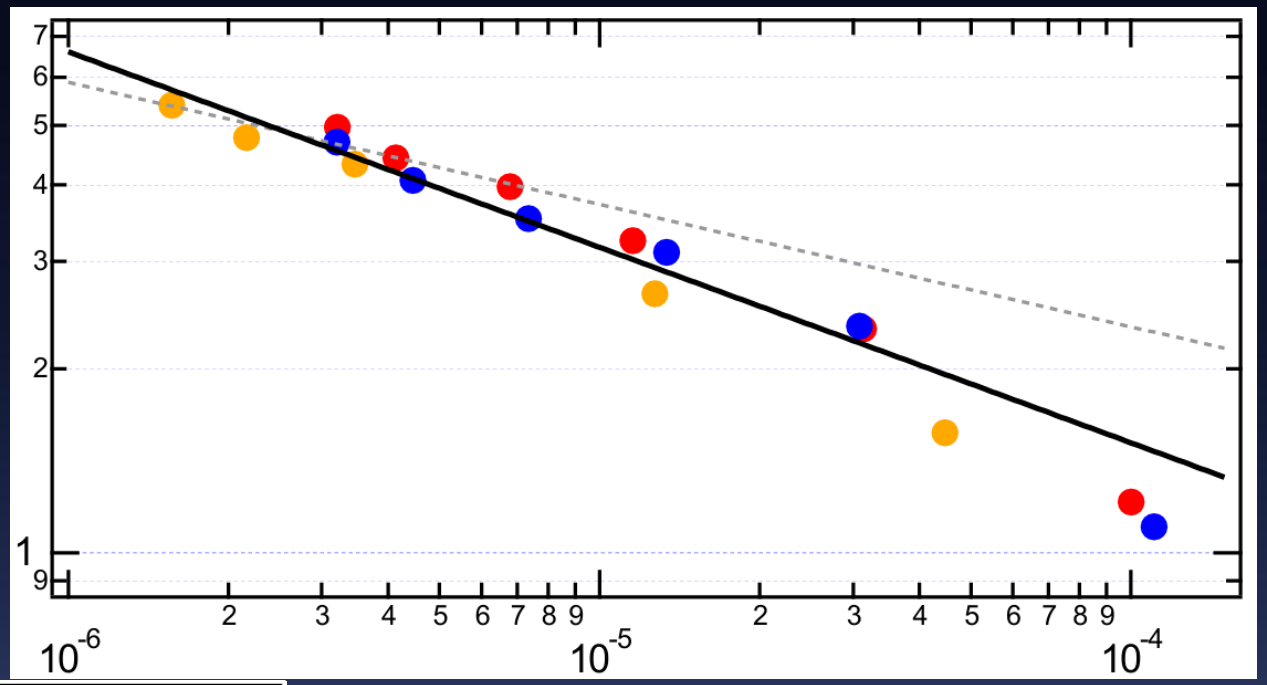
γ：定数

→ 両対数空間における決定係数R^2が最大となるよう最適化した値

：$\gamma = 1.74$を用いた

5. Discussion πスケール則

規格化半径 $\left(\frac{\pi_R}{\pi_4^{-0.067}}\right)$



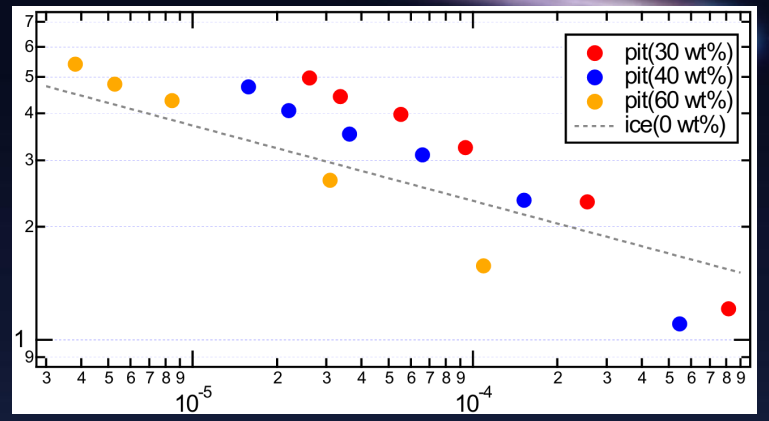
pit (30 wt%)
pit (40 wt%)
pit (60 wt%)
ice+rock (This study)
ice (Sasai et al. 2024)

有効強度（π_Y^*）

$\pi_Y^* = f^\gamma \times \pi_Y$

f：岩石含有率,
γ：定数 (=1.74)

規格化半径 $\left(\frac{\pi_R}{\pi_4^{-0.067}}\right)$



規格化強度 (π_Y)

有効強度（π_Y^*）を適用

✓ピット半径のスケーリング則（▬）：

$$\pi_R/\pi_4^{-0.067} = 10^{-1.10\pm0.11}\pi_Y{}^{*-0.32\pm0.02}$$

$$\mu = 0.64 \pm 0.04$$