

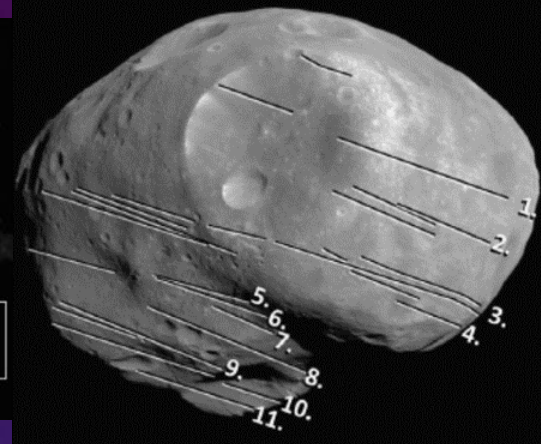
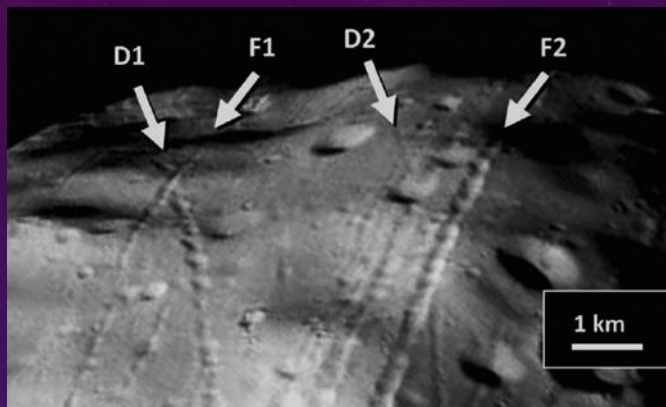
Phobos' groovesの成因— 粉体流に形成する凝集体研究 に基づく考察

長足友哉¹, 中村昭子¹, 和田浩二²

1 神戸大学大学院理学研究科,

2 千葉工業大学惑星探査研究センター

Phobos' grooves の起源



内的要因

- Fracture: 亀裂 (衝突、潮汐) ⇒ レゴリスが落ちる ⇒ 溝

外的要因

- Rolling Boulder: Stickneyクレーターからのboulderが転がった跡
- Cratering:

Stickney クレーターからのboulder の衝突

Phobos 衝突でPhobos重力圏を脱した放出物の再衝突:

“Sesquinary (1.5次) 衝突” (Nayak and Asphaug, 2016)

火星衝突放出物の衝突 (Murray and Heggie, 2014)

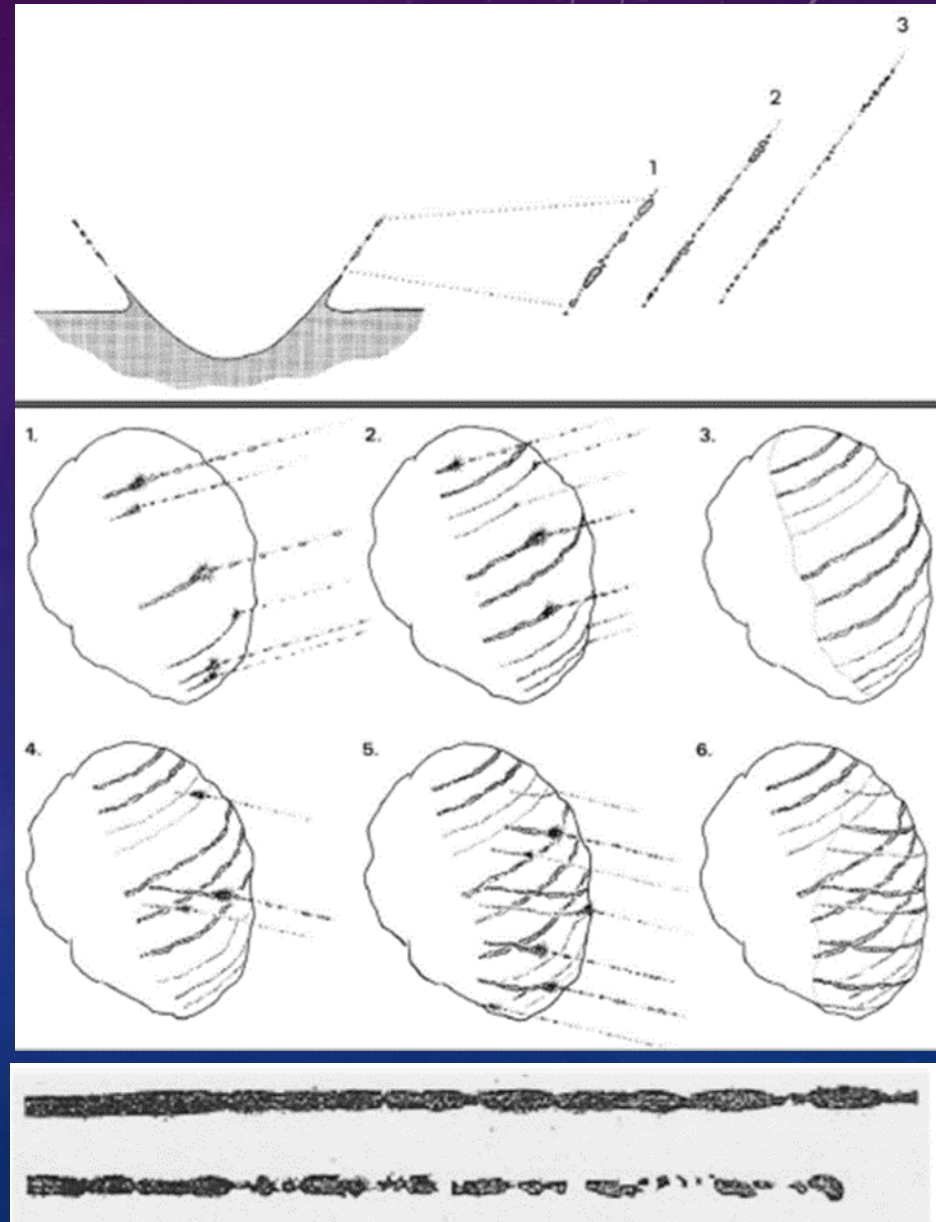
惑星リングの衝突

衝突速度
↓

火星衝突放出物の衝突

(Murray and Heggie, 2014)

- 火星での大衝突でメルトジェットが生じ、不安定のため、巨大な「droplet」に分裂
- Phobos表面に衝突し、クレーターチェーンを作る
- 同じ衝突の放出物が互いに平行な一連のクレーターチェーン(groove family)を作る
- 同様の衝突が起こると、交差するクレーターチェーンを作る
- 粉体ジェットについても図のみの記載がある(右下図)



疑問点 (そのような大きいメルトドロップレットはできるか?)

- 形成されるメルトドロップレットのサイズ d_p は、次式のように見積もられる (e.g., Melosh and Vickery, 1991)

$$r_p \sim \left(\frac{\sigma}{\rho \dot{v}^2} \right)^{1/3} \sim \left(\frac{\sigma r_{\text{imp}}^2}{\rho v_{\text{imp}}^2} \right)^{1/3}$$

せん断速度: $\dot{v} \sim v_{\text{imp}}/r_{\text{imp}}$ 、衝突速度: v_{imp}

衝突体半径: r_{imp} 、物質の表面張力: σ 、密度: ρ

- $r_{\text{imp}} = 40 \text{ km}$ の衝突体により、シリケイトメルトができたとし、 $\sigma \sim 0.3 \text{ N m}^{-1}$ (Walker and Mullins, 1981)、 $\rho = 2100 \text{ kg m}^{-3}$ 、 $v_{\text{imp}} = 11 \text{ km s}^{-1}$ (Murray and Heggie, 2014) を用いると、

$$r_p \sim 0.12 \text{ m}$$

- Phobos に groove crater を作るのに必要なメルトドロップレットの大きさは直径数 m ~ 数十 m (Murray and Heggie, 2014) で困難。

疑問点(細長いクレーター)



球形衝突体では、水平に近い角度での斜め衝突が必要

- $L/W > 1$ となるための衝突角度の閾値

$$\alpha_{crit} = 90^\circ \left(\frac{R}{a}\right)^{-0.82}$$

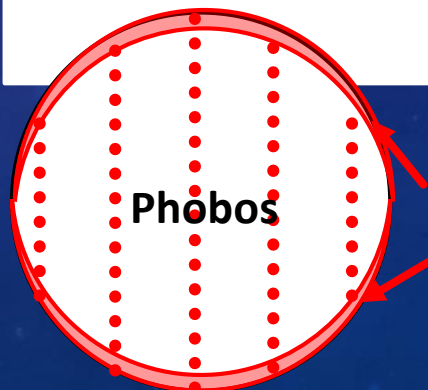
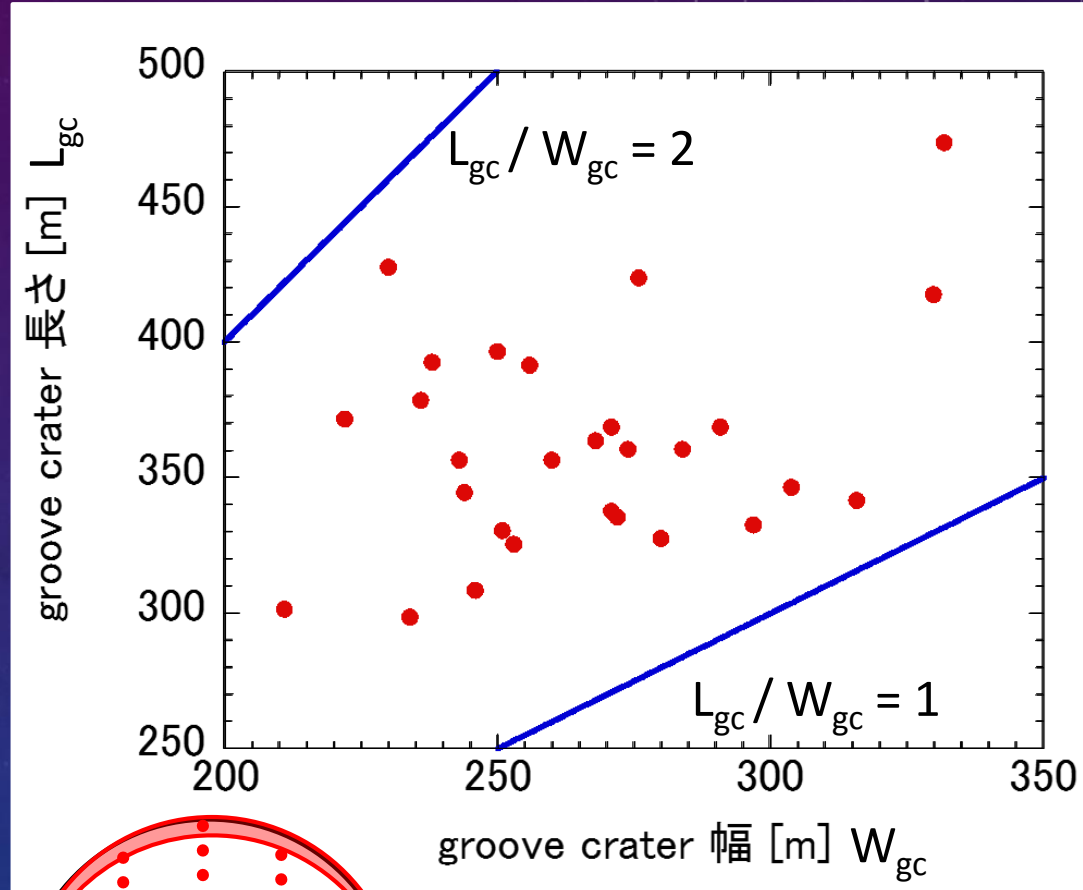
R : クレーター半径

a : 衝突体半径

(Elbeshausen et al., 2013)

(衝突速度が大 \rightarrow R/a が大)

- 火星衝突放出物(Murray and Heggie, 2014)の値を用いると、 $\alpha_{crit} \sim 10^\circ$ となり、水平に近い斜め衝突が必要だが、チェーン方向に 10° 以下を保つのは不可能



衝突体のうち、チェーン方向に 10° 以下で衝突できるのはほんのわずか

本研究の目的

- 自由落下粉体流実験により得られるクラスターの特性から、Phobos' groovesの形成に対する考察を行う。

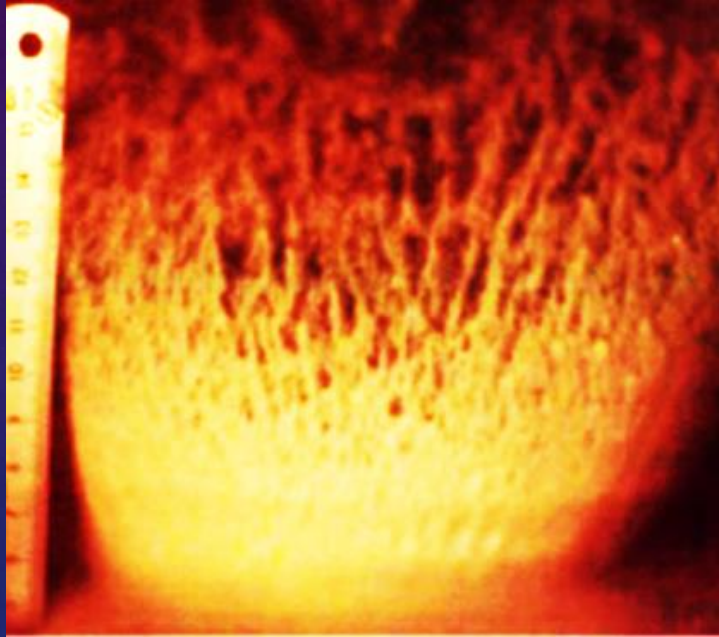
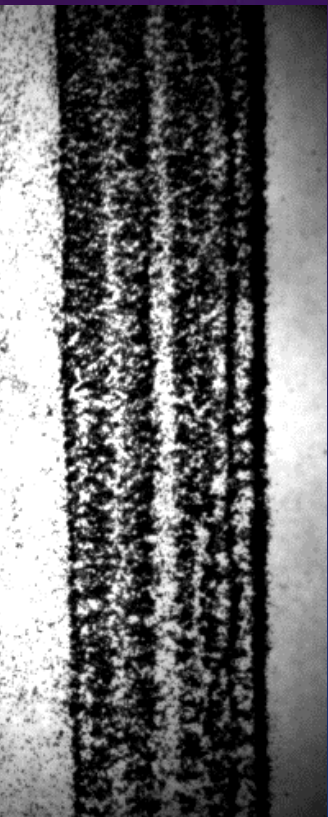
具体的には

- 粒子クラスター衝突でgroovesに存在するチェーン状クレーターは形成可能か？
- クラスターの衝突速度、サイズを推定する

以上のことを、クラスター密度の測定（長足他、連合大会、2018）をもとに議論する

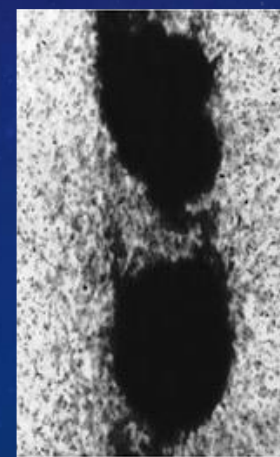
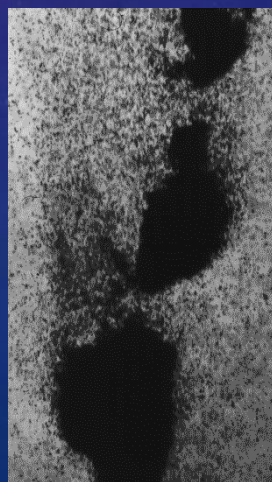
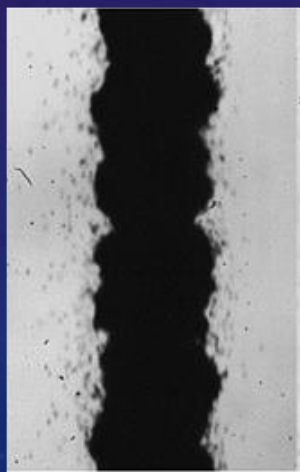
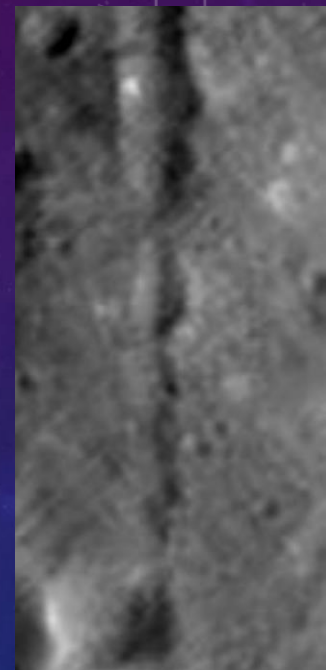
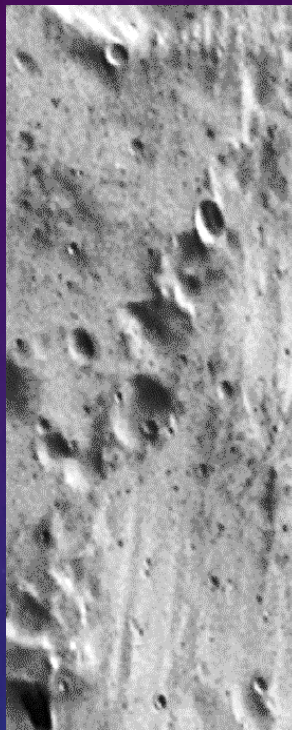
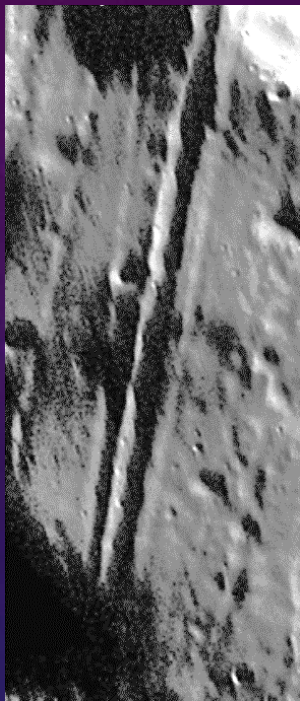
自由落下粉体流

- 粉体層ターゲットへの衝突実験で、衝突放出物に筋状構造
- クレーターレイの起源？ (Kadono et al., 2015)



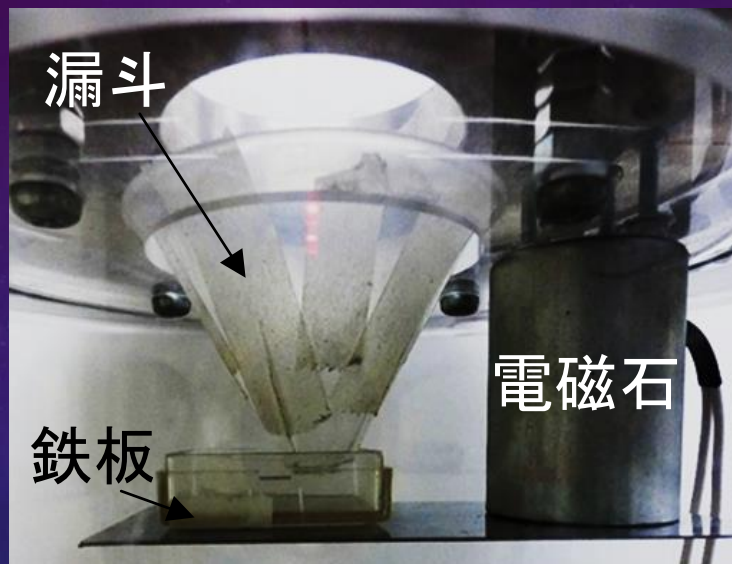
- シート状で自由落下する粉体流でもいくつかの筋に分かれる。
- 柱状で自由落下する粉体流でクラスターが形成する (Royer et al., 2009; Nagaashi et al., PEPS, in press.)

Phobos' Grooves と 粉体流クラスタ

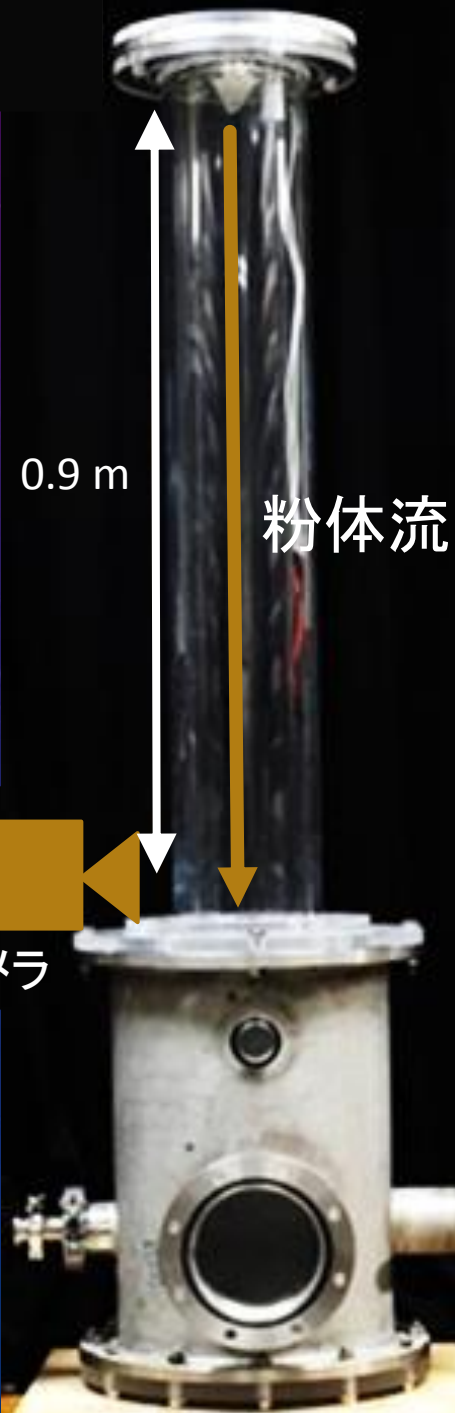


粉体流の実験手法

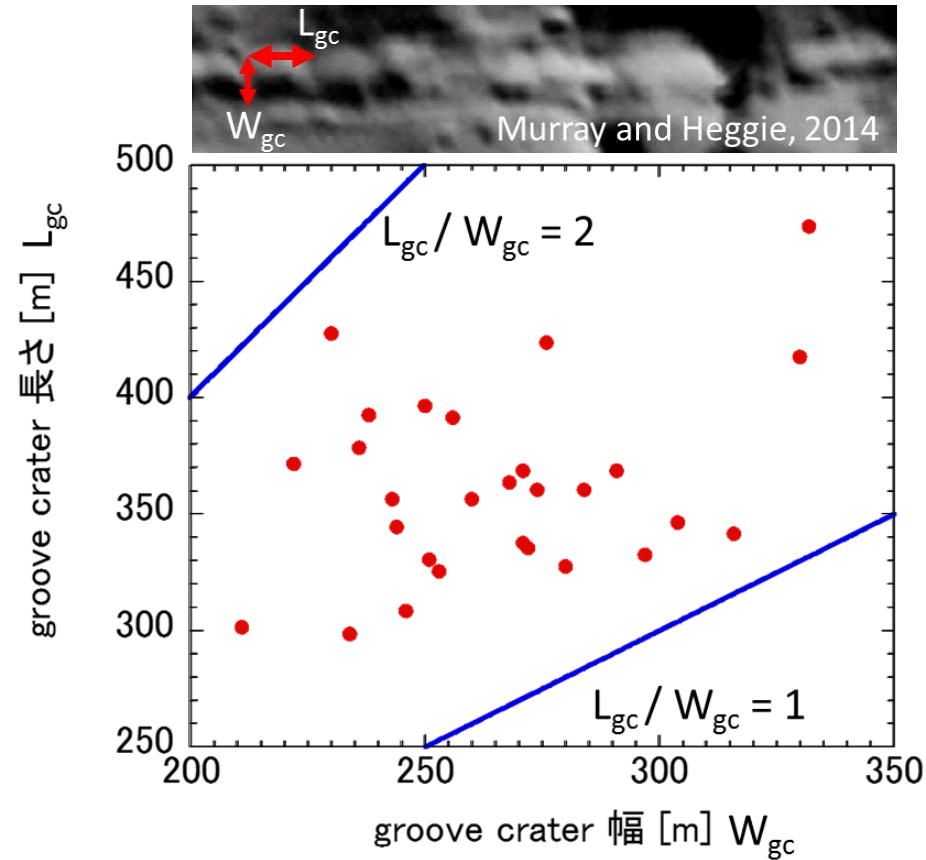
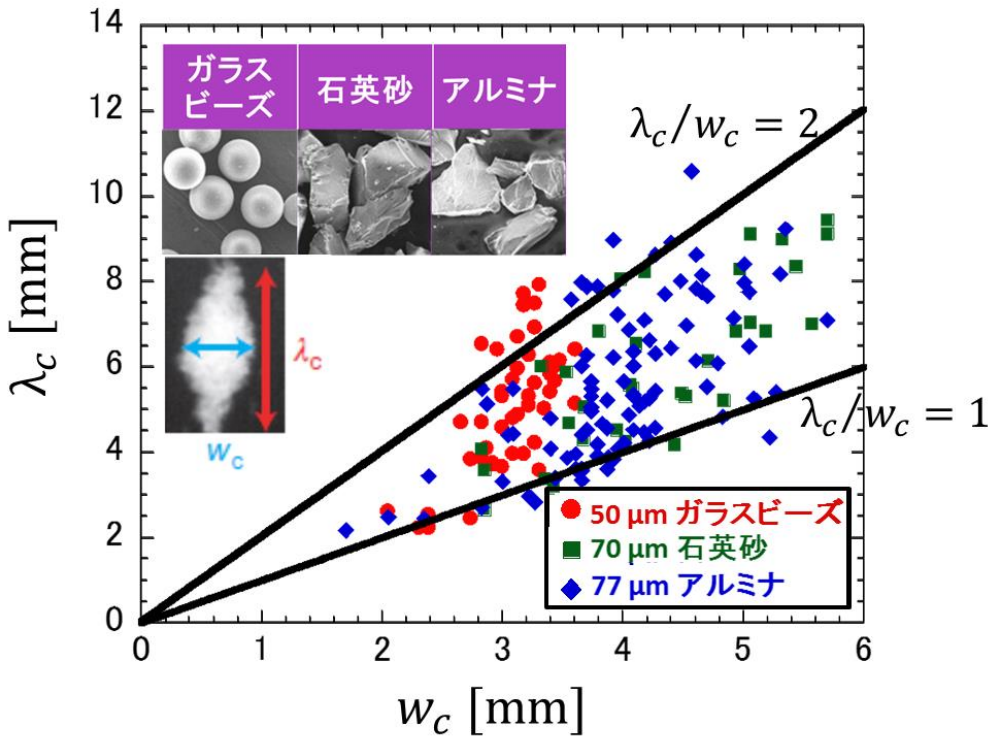
- 粒子の入った漏斗を設置
- 電磁石の電源を切ることによって粉体流が作られる
- 定点高速カメラで撮影し、クラスターの形状を解析
- 粉体流をフラッシュX線により撮像し、クラスターの密度を推定



高速カメラ

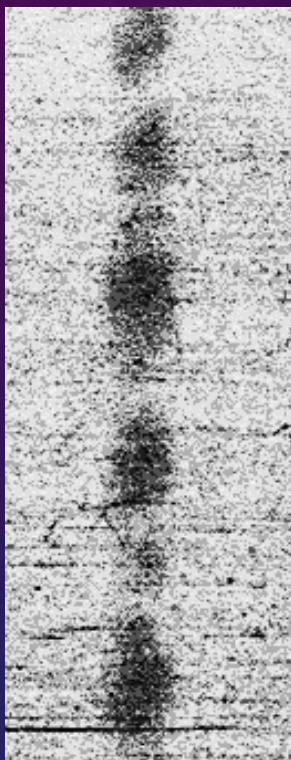


クラスターのサイズと形状

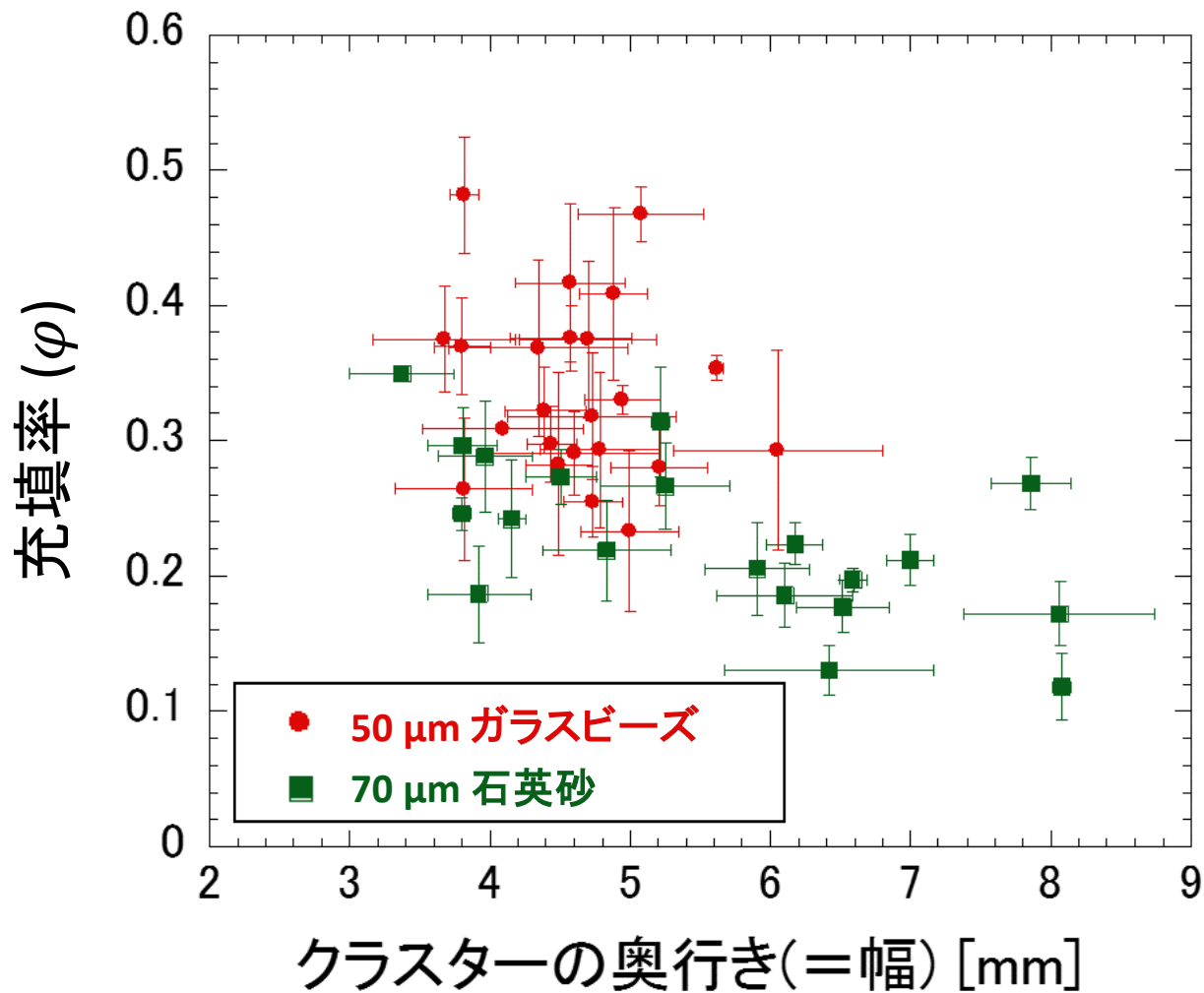


- クラスターの形状はGrooveのクレーターの形状と似ている

クラスターの充填率 (ϕ)



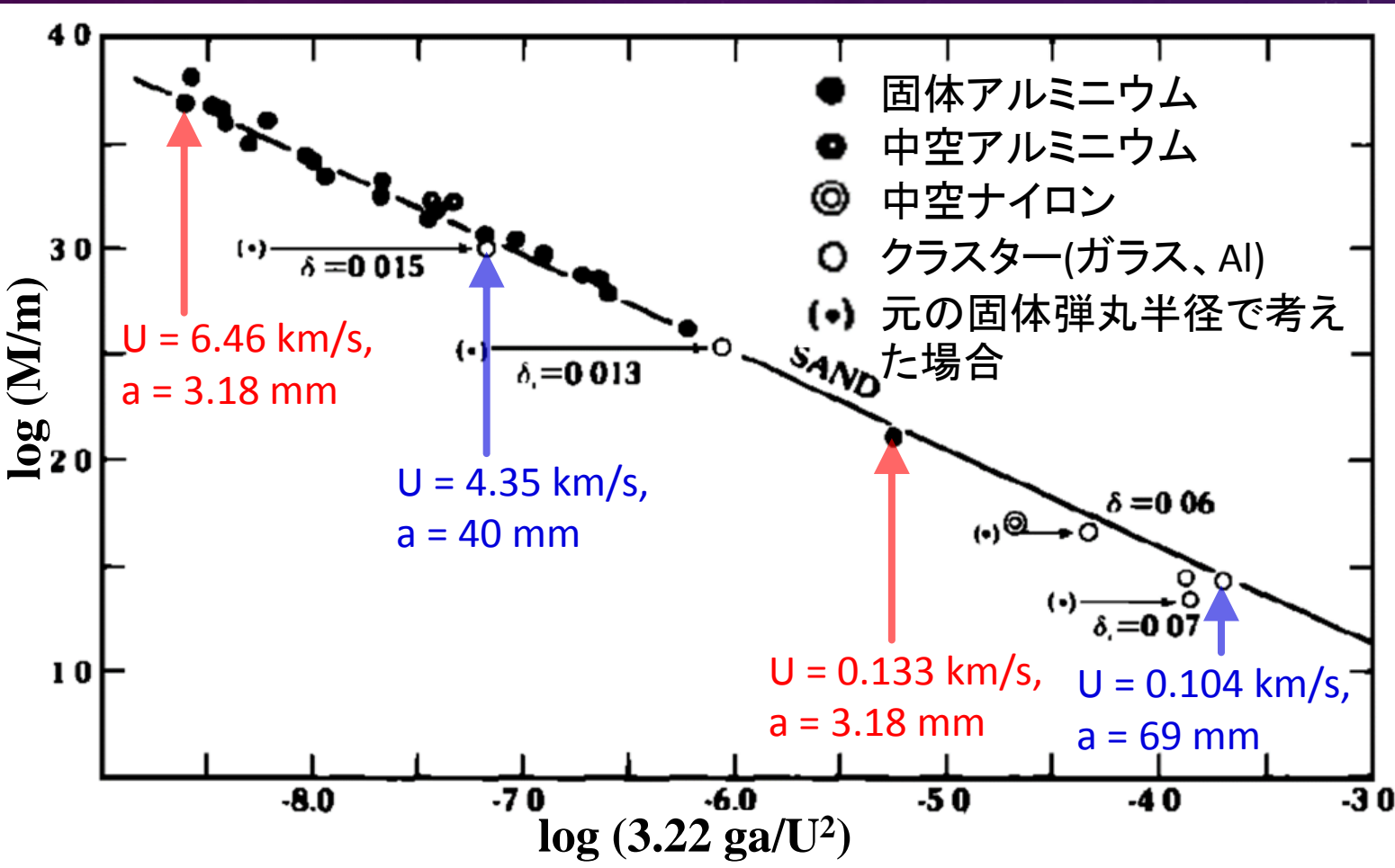
50 μm ガラスビーズ
X線透過画像



- 充填率は30%程度

クラスター衝突のクレータースケーリング則

(Schultz and Gault, 1985)



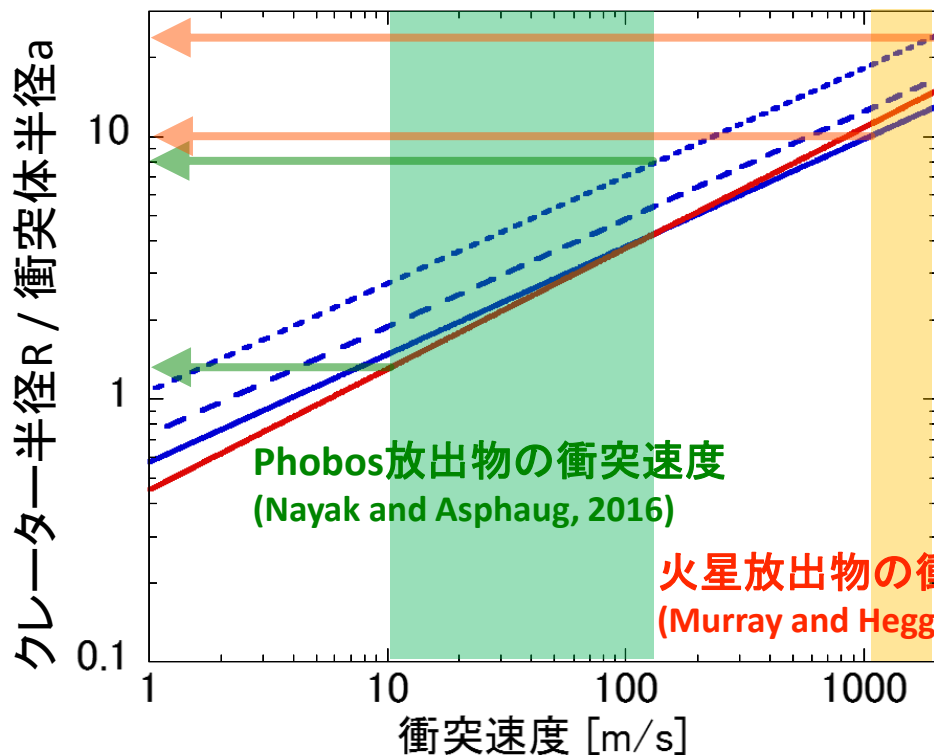
M: targetから取り去られた質量
 m: 衝突体質量
 g: 重力加速度
 a: 衝突体半径
 U: 衝突速度
 δ : 衝突体密度

- クラスター衝突の場合も、通常のスケーリング則が使える

議論 (必要なクラスタのサイズ)

Target	Type ^a	H ₁ ^a	H ₂ ^a	μ ^a	ν ^a	ρ (kg/m ³)	δ (kg/m ³)	Y (Pa)	g (m/s ²)
Weak. cement. basalt	強度 支配	-	0.38	0.46	0.4	1800	600	10 ³	0.0068
Sand	重力 支配	0.59	-	0.41	0.4	1600	600	0	0.0068

(a. Housen and Holsapple, 2011)



強度支配

$$R \left(\frac{\rho}{m} \right)^{\frac{1}{3}} = H_2 \left(\frac{\rho}{\delta} \right)^{\frac{1-3\nu}{3}} \left[\frac{Y}{\rho U^2} \right]^{-\frac{\mu}{2}}$$

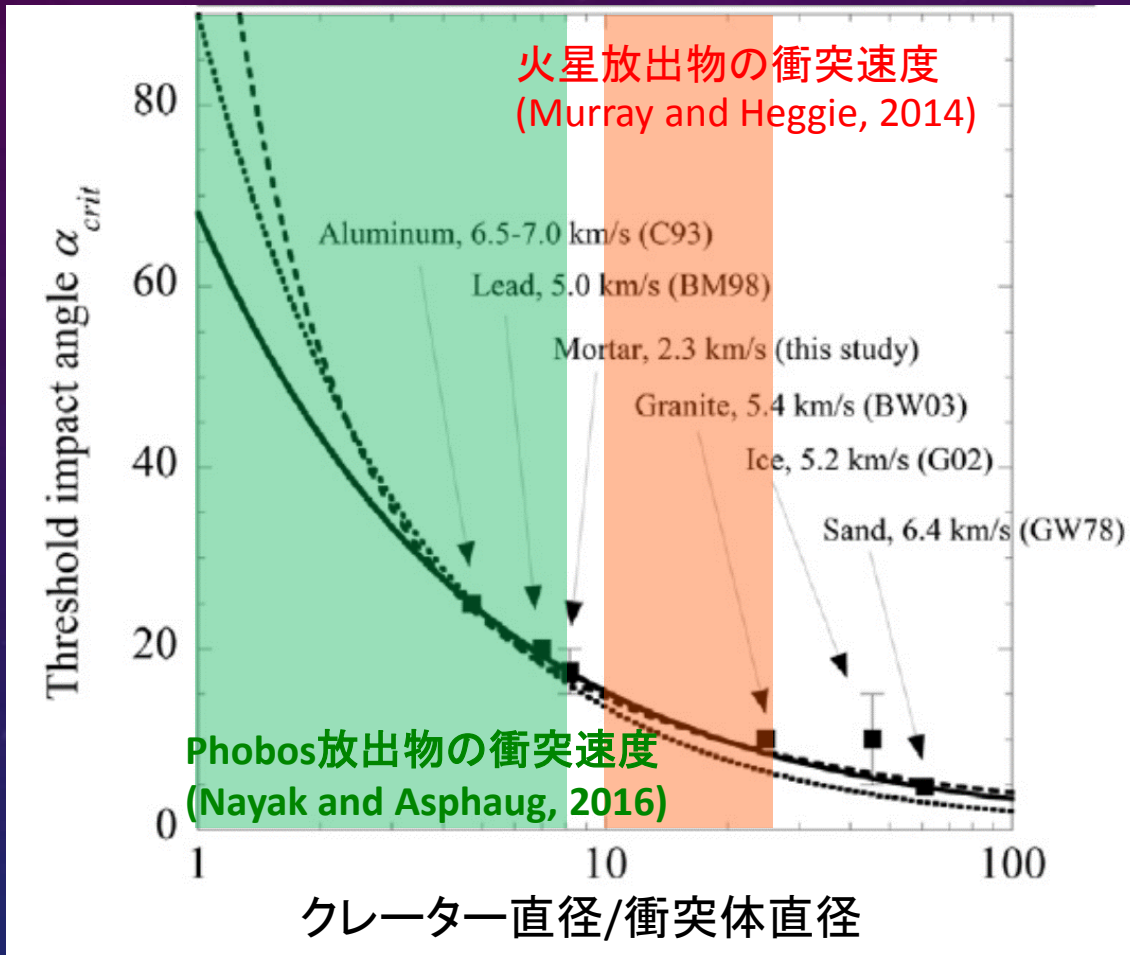
重力支配

$$R \left(\frac{\rho}{m} \right)^{\frac{1}{3}} = H_1 \left(\frac{\rho}{\delta} \right)^{\frac{2+\mu-6\nu}{3(2+\mu)}} \left[\frac{ga}{U^2} \right]^{-\frac{\mu}{2+\mu}}$$

- 重力支配、R = 11.5 m
- 重力支配、R = 73 m
- 重力支配、R = 237.5 m
- 強度支配

必要なサイズはPhobos放出物: 1.5-180 m
火星放出物: 0.5-25 m

クレーター直径/衝突体直径と クレーター形状(円or楕円)の関係

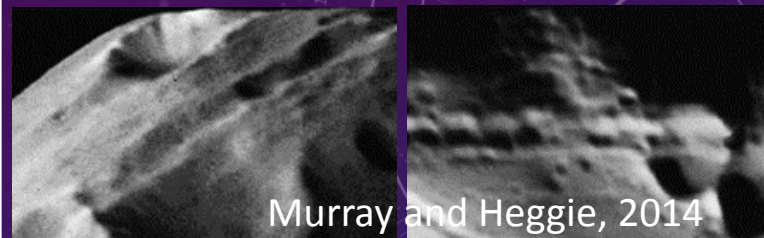
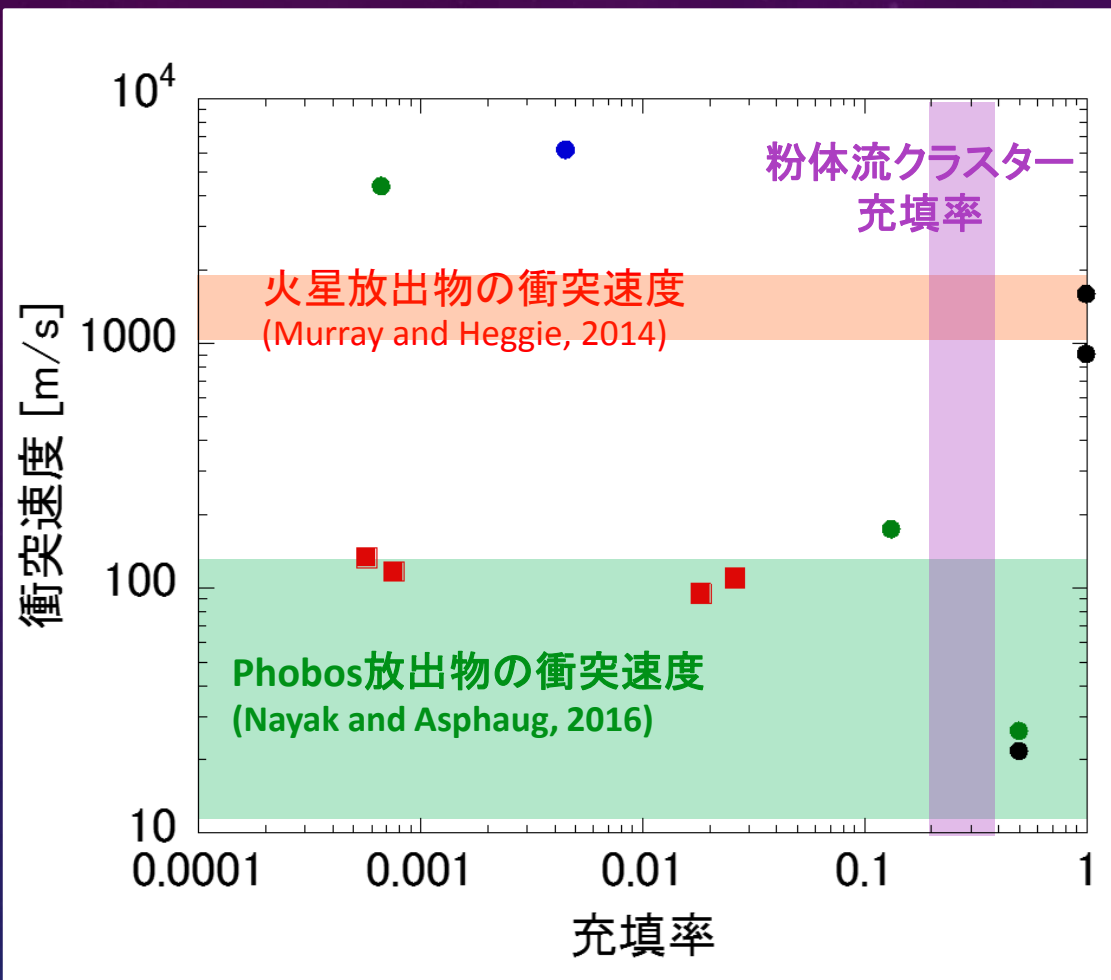


(衝突速度が大→
クレーター直径/衝突体直径が大)
(Michikami et al., 2017)

- 低速度では衝突体の入射方向にクレーターが長くなり、長軸方向が揃わない可能性がある

クラスター衝突のクレーター形状

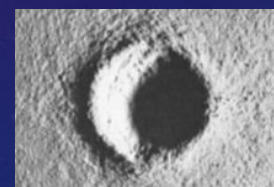
(Schultz and Gault, 1985)



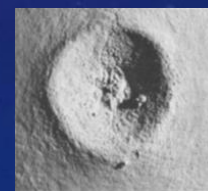
- central pit
- bowl-shaped
- central mound
- flat floor



central pit



bowl-shaped



central mound



flat floor

・クラスター衝突では
衝突速度大 → 固体弾丸同様のクレーター
衝突速度小 → 浅いクレーターができるかも

参考 (必要なクラスターの質量 m について)

$$\text{Strength regime : } R\left(\frac{\rho}{m}\right)^{1/3} = H_2 \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{(1-3\nu)/3} \left[\frac{Y}{\rho U^2}\right]^{-\mu/2}$$

$$m \propto \delta^{1-3\nu} \sim \delta^{-0.2}$$

$$\text{Gravity regime : } R\left(\frac{\rho}{m}\right)^{1/3} = H_1 \left(\frac{\rho}{\delta}\right)^{(2+\mu-6\nu)/[3(2+\mu)]} \left[\frac{ga}{U^2}\right]^{-\mu/(2+\mu)}$$

$$m \propto \delta^{\frac{2+\mu-6\nu}{2+\mu}} \sim \delta^{0.004} \quad (\text{Housen and Holsapple, 2011})$$

- 衝突体密度(δ)への依存性は小さいので、Groovesを作るのに必要な放出物の総量は、液滴モデル(Murray and Heggie, 2014)とほぼ同じになる

$$\text{総質量: } (2 - 30) \times 10^9 \text{ kg}$$

$$\text{Groove family当たりの平均質量: } 2 \times 10^{(8-9)} \text{ kg}$$

参考 (そのようなクラスター質量は火星衝突放出物で説明可能か?)

火星への衝突速度12 km/sの時、方位角 A° の範囲内での放出速度4 km/sを上回る放出物体積を大雑把に見積もると

$$V_{v_{ej} \geq 4 \text{ km/s}} \sim$$

$$\pi(1.2^2 - 0.8^2) \times 0.05 \times R_p^3 \times \left(\frac{A}{360^\circ}\right)$$

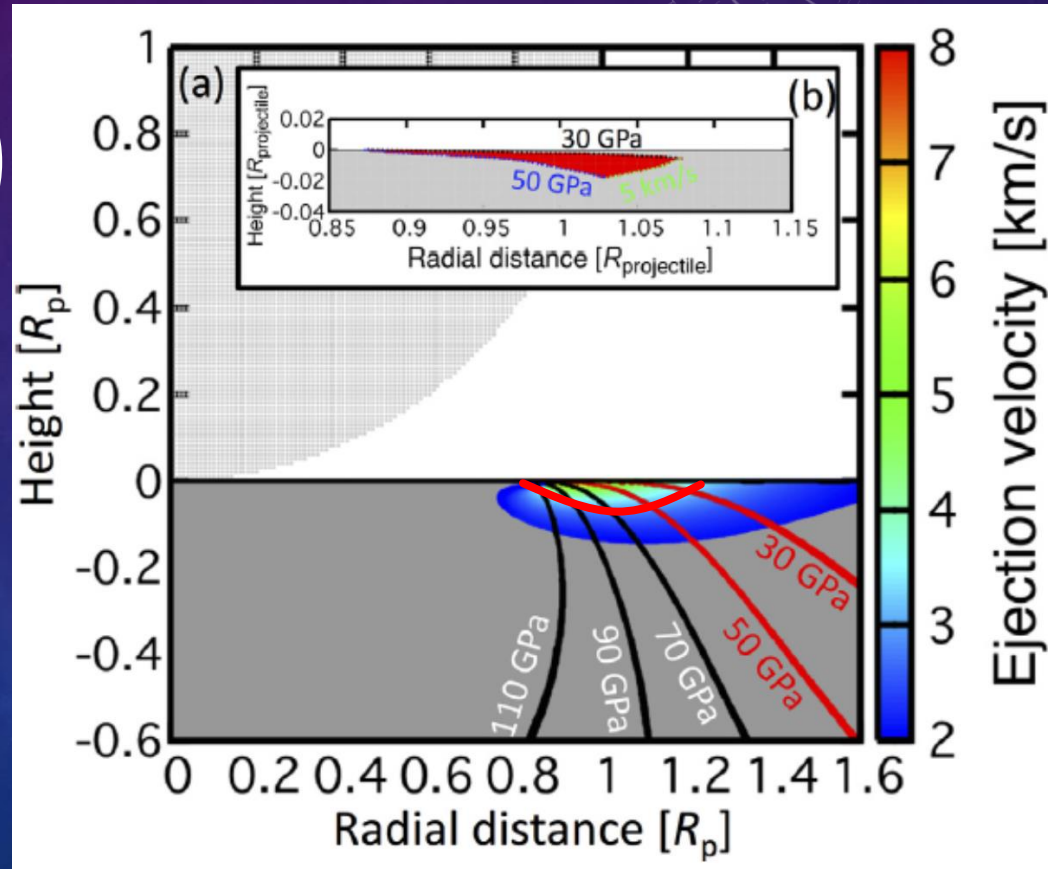
半径10 kmの衝突体、衝突放出物の筋状構造間の角度(3°)を使い(Kadono et al., 2015)、

$$V_{v_{ej} \geq 4 \text{ km/s}} \sim 1 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$M_{v_{ej} \geq 4 \text{ km/s}} \sim 3 \times 10^{12} \text{ kg}$$

> 平均的なgroove familyの形成に必要な質量:

$$2 \times 10^{8 \sim 9} \text{ kg}$$



(Kurosawa et al., 2018)

まとめ

自由落下粉体流実験により得られるクラスタの特性を調べ、Phobos' groovesの形成に対する考察を行った

- 粉体流クラスタとGrooveに見られる細長いcraterのaspect比は類似
- 衝突速度が大きければ(1~2 km/s)、クラスタ衝突で、固体弾丸と同様の深さかつ楕円のクレーターのチェーンを形成できる
- 衝突速度が小さければ(10~100 m/s)、クラスタ衝突で、長軸方向の揃ったクレーターのチェーンの形成は困難
- 低速度クラスタ衝突で、固体弾丸衝突と異なり、浅いクレーターが形成するかもしれない
- (半径10kmの衝突体の火星衝突での衝突放出物はPhobosに平均的なGroove familyを形成するのに必要な放出物の総質量を十分に上回る)