

# ラブルパイル天体の質量損失効率に関する実験

巽 瑛理、杉田 精司 (東京大学地球惑星科学専攻)

## はじめに

小惑星はメインベルト内で互いに衝突を繰り返し、クレーターや破壊によって徐々に質量を失っていく。それと同時に、Yarkovsky 効果により軌道が変化し、軌道共鳴帯に到達すると、メインベルト内から取り除かれることが知られている (Bottke et al., 2006)。Yarkovsky 効果は小さな天体ほど効果が大きく、小惑星が小さくなる効率はメインベルトからの質量損失に大きく寄与する。特に、10km 以下の小さな小惑星は自転速度分布からラブルパイル小惑星が占める割合が高いと考えられている (Pravec et al., 2002)。本研究では特にラブルパイル天体の質量損失メカニズムを明らかにするため、表面に岩塊のあるターゲットについてイジェクタ計測実験を行う。

先行研究によると、表面に岩塊のあるターゲットのクレーター形成は表面の岩塊を破壊するフェーズとその後の運動量輸送による掘削フェーズに分かれることが実験観察から示唆された (Tatsumi and Sugita, submitted)。しかし、破壊後の掘削流の計測はなされていない。本研究では、表面の岩塊が後期過程の掘削流形成に与える影響についてイジェクタの速度分布を計測することにより明らかにする。

## 実験条件

ラブルパイル天体は岩塊が自己重力で集積した天体であり、クレーター形成後期過程には重力が支配的で粉流体的な振る舞いをすると考えられている。しかし、天体を構成する岩塊はそれぞれ強度を持つため、砂のようなターゲットと一枚岩のターゲットの中間的なクレーター形成メカニズムを持つ。ラブルパイル天体のように表面の粒子径が比較的大きい場合に、粒子径がクレーター形成にどのような影響を及ぼすか明らかにするため、2種類のイジェクタ計測実験を行った。本衝突実験は縦型2段式形ガス銃を用いて行った。レーザーシートをターゲット面に対して垂直に照射することにより、イジェクタの軌跡を可視化し、高速度カメラ(4000fps)で撮影した。弾丸には4.8mmのポリカーボネイト製球を使用した。

### 実験1:

2種類の粒子サイズ(~1mm,3mm)の単一粒子径のターゲットを使用し粒子サイズがイジェクタ速度分布に与える影響を評価した。

実験 2 :

岩塊衝突破壊後のクレーター掘削流形成を調べるため、1mm の砂ターゲットの中心に 3x3x3cm 程度の玄武岩ブロックを置き、弾丸が最初に岩塊にあたる場合とそうでない場合について比較を行った。

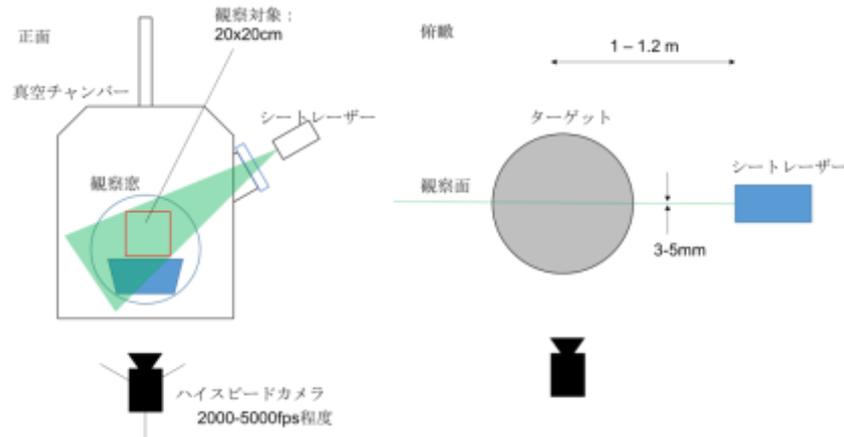


図 1 実験概略図：正面（左）、俯瞰（右）

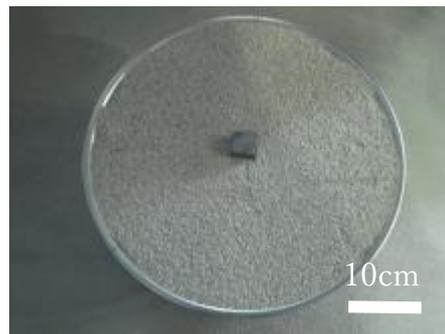


図 2 実験 2 のターゲット例。~1mm の砂ターゲットの中心に 3x3x3cm の玄武岩ブロックを置いた。

## 結果と解析

高速度カメラで撮影したイジェクタを積算し、放物線状のイジェクタ軌跡を得た。各軌跡を放物線で近似し、初期位置 $x_0$ と初期放出速度 $v_0$ 、角度 $\theta$ を求めた。

$$y = \tan \theta (x - x_0) - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta} (x - x_0)^2$$

Holsapple (1993) のスケーリング則によると、点源近似を過程できる場合、初期位置 $x_0$ と初期放出速度 $v_0$ は次のようなべき乗の関係がある。イジェクタ速度分布のべきから $\alpha$ を評価した。

$$\frac{v_0}{\sqrt{gR}} \propto \left(\frac{x_0}{R}\right)^{-(3-\alpha)/2\alpha}$$

実験で形成されたクレーター直径と深さは表 1 の通りである。

表 1 実験条件とクレーター直径・深さ

	Impact velocity (km/s)	Crater rim-to-rim diameter (mm)	Crater depth (mm)
1mm silica sand	2.09	145 – 150	34 – 36
	5.33	205 – 210	44 – 46
3mm silica sand	2.13	150 – 155	31 – 33
	5.24	215 – 220	42 – 44
1mm silica sand + basalt block	2.27	130 – 140	13 – 20
	5.62	230 – 235	38 – 39

実験 1 :

1mm, 3mm 砂ターゲットのイジェクタ速度分布を図 3 に示す。両者を比べると、粒子サイズ 3mm のほうがべきの傾きが緩やかであった。つまり  $\alpha$  は大きいという傾向が認められた。べきの値は 1-3mm の砂を使った Cintala et al. (1999) の実験と同程度 ( $\alpha = 0.6 - 0.75$ ) であった。本実験と Cintala の実験両方で、 $\alpha$  はさらに小さい粒子のターゲット (図中の実線、 $\alpha = 0.51$ ) よりも大きく、これは衝突エネルギー律則に近づいていることを示している。粒子サイズが大きく、固着力の影響が相対的に小さくなったことや、粒子間でのエネルギー損失が小さくなったためと考えられる。

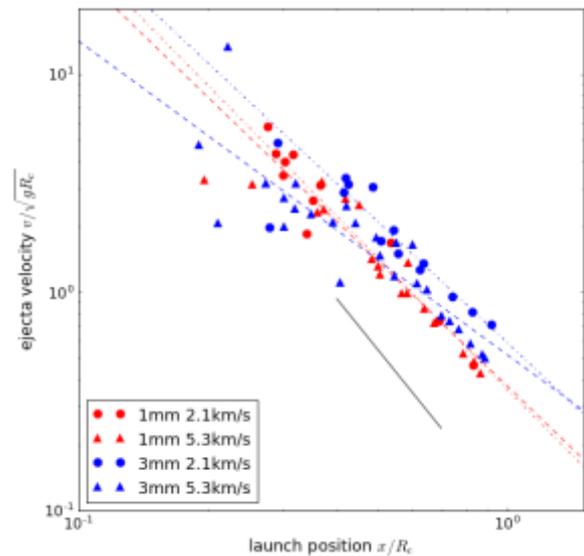


図 3 イジェクタ速度分布

実験 2 :

1mm 粒子のターゲットに玄武岩ブロックを置くことによる効果について考察する。2km/s 程度の低エネルギー衝突 ( $\xi = 1/2m_p U^2 / m_t Q^* \sim 2$ ) ではクレーターの中心に比較的大きなブロックが残っているおり、歪なクレーター形状であることが分かる。それに対して、5km/s 程度の高エネルギー衝突 ( $\xi \sim 15$ ) では玄武岩ブロック置いた場合は、ク

レータ形状は円錐型で砂にできるクレータ形状と類似している。しかし、クレータ直径が少し大きく、クレータ深さが浅くなっていることが分かる。これは、イジェクタ放出角度が浅くなっていることとも整合的である。

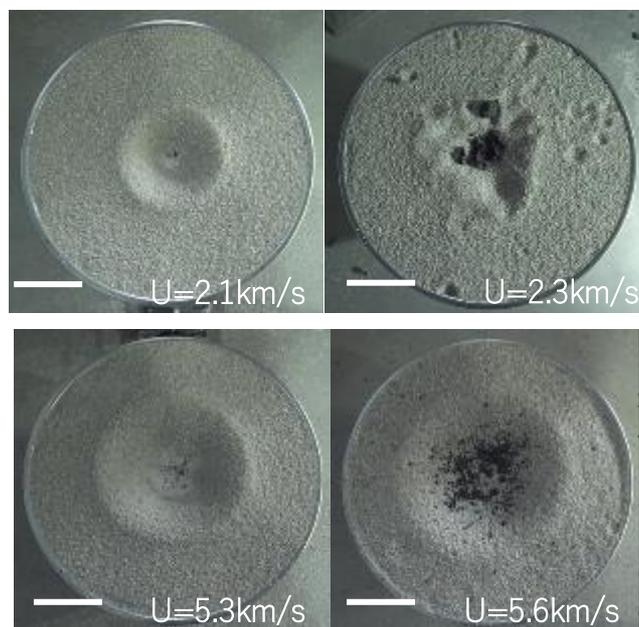


図 4 最終クレータ形状：玄武岩ブロックなし（左）、玄武岩ブロックあり（右）  
スケールバー（白）は全て 10cm

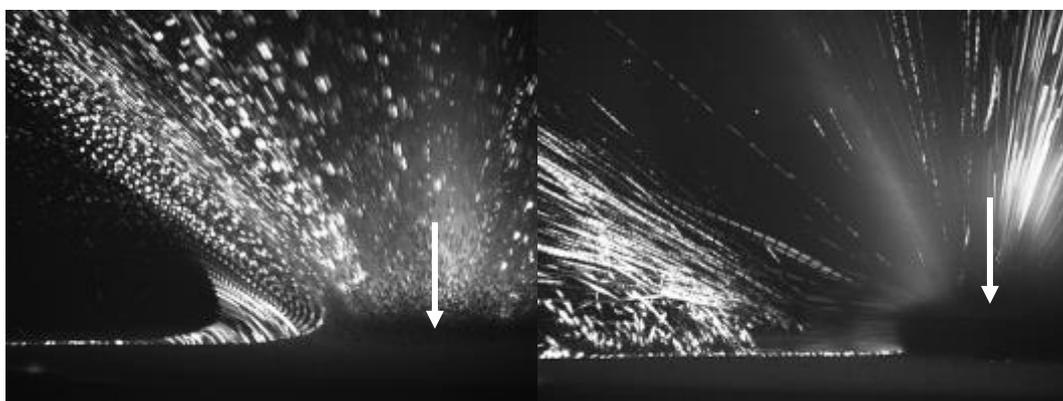


図 5 イジェクタ軌跡：玄武岩ブロックなし（左）、玄武岩ブロックあり（右）

#### 議論と展望

表面にブロックがある場合でも、衝突エネルギーがブロックの破壊エネルギーよりも十分に大きい場合にはクレータ形状はブロックがない場合と似た、円錐形になるが、砂のみのターゲットよりも浅いクレータが形成される。表面にブロックを置いた場合には直径深さ比は 0.1 程度になり、小惑星 Itokawa や Toutatis に見られる浅いクレータ

は表面の岩塊による効果かもしれない。さらに、衝突点付近にはブロック破片が残っており、衝突エネルギーによっては Itokawa 表面に見られるような破片クラスターが形成可能であることが示唆された。エジェクタの放出角度が小さいのは、岩石の応力波速度が砂に比べて非常に大きいためだと考えられる。今後、さらにエジェクタ軌跡の解析および理論的な考察を進める予定である。

#### 参考文献

- Bottke, W.F. et al., (2006), "The Yarkovsky and YORP Effects: Implications for Asteroid Dynamics", 34:157-91, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*
- Pravec, P. et al., (2002), "Asteroid Rotations", pp. 113- 122, *Asteroids III*
- Tatsumi, E. and S. Sugita, "Dynamic evolution of asteroid 25143 Itokawa inferred from cratering experiments on coarse-grained targets", (submitted to *Icarus*)
- Holsapple, K.A., (1993), "The Scaling of Impact Processes in Planetary Science", 21:333-73, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*
- Cintala, M.J. et al., (1999), "Ejection-velocity distributions from impacts into coarse-grained sand", 34, pp.605-623, *MAPS*