

大粒子を含むターゲットから衝突によって放出される粉体のパターン

門野敏彦¹, 末次竜¹, 荒川大¹, 笠木祥喜¹, 永山秀一¹, 鈴木絢子, 長谷川直²

¹産業医科大学, ²宇宙科学研究所

1. はじめに

JAXA の小惑星探査機「はやぶさ2」はリュウグウに到着し、すでに数多くのリモートセンシングデータが送られてきている (Watanabe et al. 2019 ; Sugita et al. 2019). この探査機は”Small Carry-on Impactor” (SCI)と呼ばれる衝突装置を持っており、微少重力下で「現実の」小惑星物質に「現実の」スケールでの宇宙衝突実験を初めて行う予定である (Arakawa et al. 2017). 「はやぶさ2」での宇宙衝突実験の一つの特徴は、DCAM3 と呼ばれるカメラによりクレーター形成のその場観測を行うことである (Ogawa et al. 2017). 今回われわれは、室内衝突実験の結果を基にして DCAM3 によるイジェクタの画像からリュウグウの表層及び下層構造に関する情報が得られる可能性を示す.

これまでの観測からリュウグウ表面はサイズ分布が「べき乗則」に従う岩塊に覆われていることがわかった (Sugita et al. 2019). 岩塊のサイズ分布がべき乗則に従うということは特徴的な岩塊サイズが無いということであり、SCI 衝突実験において「ターゲット」のサイズを事前に推定することが出来ないということの意味している. Arakawa et al. (2017) は小惑星の表面状態を構成粒子のサイズによって、一枚岩 (>1.5 m), ボルダ領域 (15 cm - 1.5 m), 小石層 (5 - 15 cm), 粗い粒子層 (1 mm - 5 cm), 細かい粒子層 (<1 mm) のように分類している. SCI 衝突実験における「弾丸」の大きさは~10-20 cm であるので、一枚岩に衝突する場合にはクレーター形成は強度支配域のスケーリング則に従うはずである (たとえば Holsapple 1993). また、ボルダ領域に衝突する場合には弾丸と同等またはそれ以上の大きさの粒子群への衝突となり、これは近年研究が進んでいる「アーミング効果」が重要になる (たとえば Tatsumi and Sugita 2018). さらに、弾丸に比べて十分小さい細かい粒子層への衝突では重力支配域でのスケーリング則に従うクレーターが形成される (Holsapple 1993) か、または、細かい粒子層が「ふわふわ (fluffy)」で空隙率が高ければ、深いピット (たとえば Housen et al. 1999) または貫入孔 (たとえば Kadono et al. 2012) が形成されるだろう. しかしながら、弾丸サイズと同等またはそれ以下の粒子層への衝突はほとんど研究されておらず、弾丸が小石や粗い粒子を含むターゲットに衝突した場合にクレーター形成過程がどうなるのかはよくわかっていない.

我々は最近、弾丸に比べて十分小さい、同一サイズを持つ粉体ターゲットに対する衝突実験を行い、クレーター形成過程において飛び出す粉体 (イジェクタ) のパターンを観測し、衝突速度や粉体のサイズや形状に対するイジェクタのパターンの依存性を調べている (Kadono et al. 2015, 2019). 今回、サイズ分布の効果、特に、構成粒子として弾丸と同程度またはそれ以下の

粒子を含む場合，すなわち SCI が小石や粗い粒子を含むターゲットに衝突する場合のイジェクタのパターンを調べる．今回の実験では，細かいガラスビーズ（0.1 mm ϕ ）に直径 1 mm と直径 4 mm のガラス球を混ぜたターゲットによる衝突実験を行った（弾丸直径 4.8 mm）．混合率を変えてイジェクタのパターンを観測し，ガラス球を混ぜた事によるパターンへの影響を調べた．

2. 実験

JAXA 宇宙科学研究所の縦型二段式水素銃を用いて，直径 4.8 mm のポリカーボネイト球をプロジェクトイルとして，速度およそ 2.5 km/s で 0.1 mm のガラスビーズに対していくつかの混合比で 1 mm 球と 4 mm 球を混ぜたターゲットに衝突させた．イジェクタが放出される様子をハイスピードカメラ（SHIMADZU HPV-X）によって撮影した（表 1）．

表 1：実験条件

| Shot No. | Inclusion | 混合率 (wt%) | 衝突速度 (km/s) |
|----------|-----------|-----------|-------------|
| 420 | 1 mm | 20 | 2.51 |
| 422 | 1 mm | 50 | 2.58 |
| 424 | 1 mm | 66 | 2.57 |
| 425 | 1 mm | 100 | 2.62 |
| 421 | 4 mm | 20 | 2.49 |
| 423 | 4 mm | 50 | 2.54 |
| 428 | 4 mm | 66 | 2.69 |

3. 結果

図 1 は(a) 1 mm 球および(b) 4 mm 球を 0.1 mm ガラスビーズに 20 wt%で混合したターゲットに対する衝突によって放出されたイジェクタの様子をとらえた画像である．1 mm 球と 4 mm 球の場合で明らかにイジェクタのパターンは異なる．これらは 0.1 mm ガラスビーズのみの場合（Kadono et al. 2019）とも違っている．

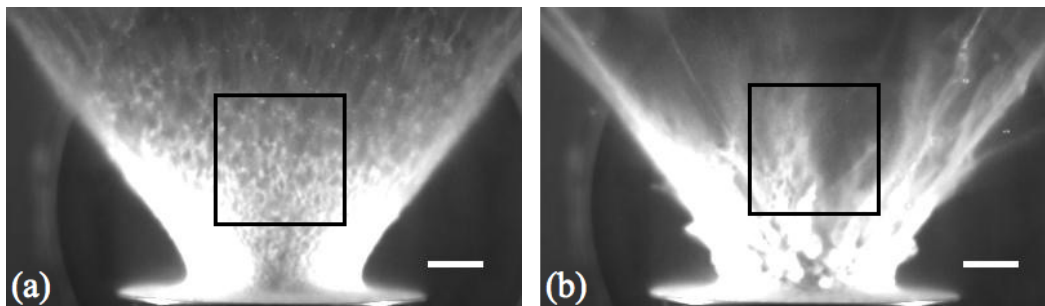


図 1 衝突から 30 ms 後のイジェクタの様子．弾丸は上方から垂直に衝突．(a) 1 mm 球を混合したターゲット（20 wt%）(b) 4 mm 球を混合したターゲット（20 wt%）

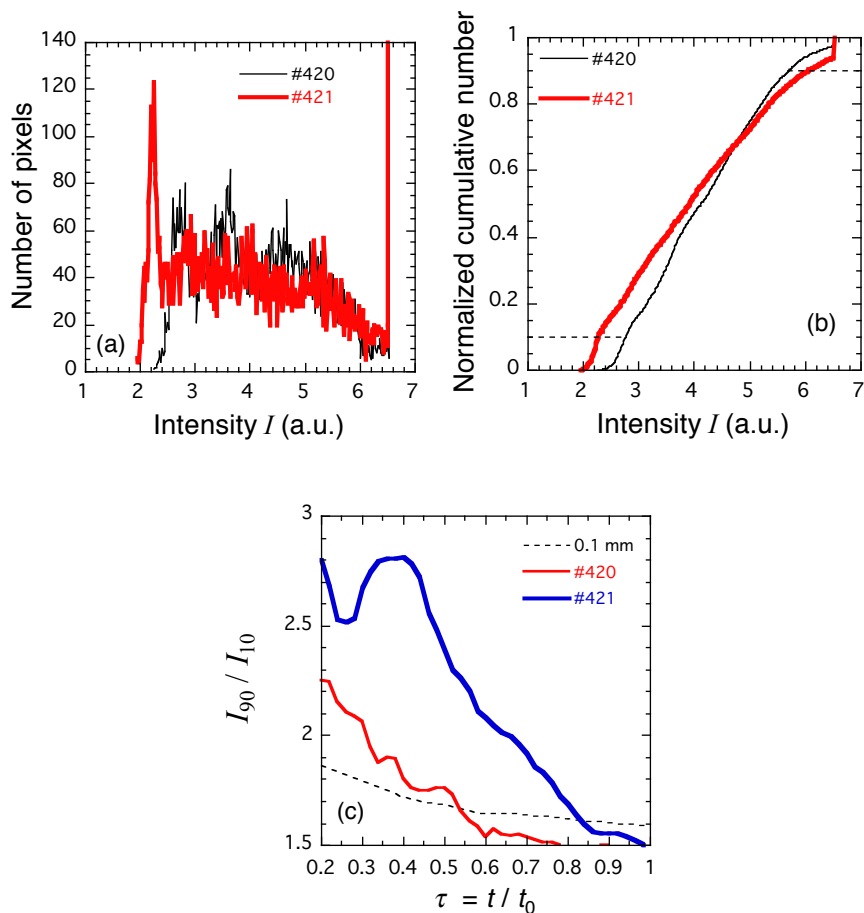


図2 (a) 衝突から 30 ms 後のイジェクタの輝度分布. (b)ある輝度 I よりも小さい輝度を持つピクセルの積算個数. (c)積算個数 0.9 と 0.1 での輝度 I_{90} と I_{10} の比の時間変化.

図 2a は図 1a と 1b に示したイジェクタについて□内の輝度(Intensity)の分布を示している. 図 2b はある輝度 I よりも小さい輝度を持つピクセルの積算個数である(縦軸は総ピクセル数で規格化されており, 基にしたデータは図 2a と同じである). 4 mm の場合の方が傾きは緩く, コントラストが強いことを示している. 積算個数の 0.9 と 0.1 での輝度をそれぞれ I_{90} と I_{10} として, 比 I_{90}/I_{10} を衝突からの時間の関数としてプロットした(図 2c). 横軸 τ は特徴的なクレーター形成時間 t_0 で規格化された衝突からの時間である. ここでクレーター形成時間として $(D_c/g)^{1/2}$ を考えると (D_c はクレーター直径, g は重力加速度), 今回の実験では $(D_c/g)^{1/2} \sim 100$ ms であったので, $t_0 = 100$ ms とした. 4 mm 球を含むターゲットからのイジェクタでは I_{90}/I_{10} 比は $\tau \sim 0.2-0.3$ において 2.5 以上で激しくばらついており, その後, 急激に減少する. これに対して 1 mm 球を含むターゲットでは, はじめ I_{90}/I_{10} 比は 2 - 2.5 であり, その後, 時間と共に減衰し, 破線で示された大粒子のない場合 (0.1 mm のみの場合; Kadono et al. 2019) の曲線に漸近して

いるように見える。図には示していないが、1 mm と 4 mm を混合させた標的では中間的な挙動を示している。また、0.1 mm だけおよび 1 mm 粒子だけの場合は I_{90}/I_{10} 比は ~ 2 であり、緩やかに減少またはほとんど一定である。

4. パターン形成における大粒子の役割

衝突によるクレーター形成過程においてターゲットの粉体が加速されるときに動径方向以外のゆらぎ速度成分を持ち、粉体がお互いに非弾性衝突をすることによって濃集しパターンが形成されるという機構が提案されている (Kadono et al. 2015, 2019)。ベースとなる小さい粒子に相対的に大きな粒子が混合している場合、その衝突断面積は大きいため、小さい粒子のみの場合に比べて衝突による濃集はさらに推進されるはずである。また、掘削流において大きい粒子が「障害物」として小さい粒子の流れを乱し、小さい粒子の濃集や拡散を促進していることも考えられる。特に 4 mm 粒子を混合した場合のイジェクタで典型的に見られるコントラストの強いパターン (たとえば図 1b) は、この影響が強く出ていると思われる。

5. まとめと今後

相対的に大きな粒子が混合されたターゲットから衝突により放出されるイジェクタのパターンは、その粒子のサイズとベースとなる小さい粒子のサイズ比に大きく依存している。これを利用すれば DCAM3 によって取得される SCI 衝突で放出されるイジェクタのパターンからリュウグウ表層及び下層の構造を推定することが可能だろう。

参考文献

- Arakawa, M., et al. 2017, *Space Sci. Rev.*, 208, 187
Holsapple, K. 1993, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 21, 333
Housen, K. R., Holsapple, K. A., & Voss, M. E. 1999, *Nature*, 402, 155
Kadono, T., et al. 2012, *Icarus*, 221, 587
Kadono, T., et al. 2015, *Icarus*, 250, 215
Kadono, T., et al. 2019, submitted to *ApJ*
Ogawa, K., et al. 2017, *Space Sci. Rev.*, 208, 125
Sugita, S., et al. 2019, submitted to *Science*
Tatsumi, E., & Sugita, S. 2018, *Icarus*, 300, 227
Watanabe, S., et al. 2019, submitted to *Science*