

# 中空弾丸の衝突によって放出される粉体のパターン

門野敏彦<sup>1</sup> 前田琉成<sup>1</sup> 宮路仁衣奈<sup>1</sup> 村山綾弥香<sup>1</sup> 渡邊竜也<sup>1</sup> 吉田二美<sup>1</sup> 樋口有理可<sup>1</sup>

長谷川直<sup>2</sup> 鳶生有理<sup>2</sup> 鈴木絢子<sup>3</sup> 末次竜<sup>4</sup>

<sup>1</sup>産業医科大学 <sup>2</sup>宇宙科学研究所 <sup>3</sup>東洋大学 <sup>4</sup>大島商船高等専門学校

## Ejecta generated by the impact of hollow impactors

T. Kadono<sup>1</sup>, R. Maeda<sup>1</sup>, N. Miyaji<sup>1</sup>, A. Murayama<sup>1</sup>, T. Watanabe<sup>1</sup>, F. Yoshida<sup>1</sup>, A. Higuchi<sup>1</sup>, S.

Hasegawa<sup>2</sup>, Y. Shimaki<sup>2</sup>, A. I. Suzuki<sup>3</sup>, R. Suetsugu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>University of Occupational and Environmental Health, <sup>2</sup>Institute of Space and Astronautical Science, <sup>3</sup>Toyo University, <sup>4</sup>National Institute of Technology, Oshima College

### 1) 研究の背景

近年, Deep Impact, LCROSS, Hayabusa2 など, 惑星探査で衝突実験が行われるようになった. そこで使われたインパクターは, これまでの室内実験で用いられてきたインパクターとは異なり, たとえば Deep Impact は制御できる小型衛星 (A'Hearn et al. 2005), LCROSS はロケットの使用済み燃料タンク (Colaprete et al. 2010), Hayabusa2 は銅板を変形させた中空の弾丸 (Saiki et al. 2017) である. インパクターが中身の詰まった「中実」ではない構造を持っていても, 形成されるクレーターサイズはインパクター密度として「バルク密度」を設定すれば従来のスケーリング則で記述可能であった (Arakawa et al. 2019; Kadono et al. 2022).

中実のインパクターを粉粒体標的に高速度で衝突させるとクレーター形成の際に標的表面から約 45 度で放出される「エジェクタカーテン」が観測される (たとえば Kadono et al. 2020). ところが LCROSS の衝突を模擬するために行われた中空アルミニウム弾丸を使った約 2.5km/s での衝突実験では, エジェクタカーテンに加えてターゲット表面に垂直に飛び出す高角度の「高角ブルーム」の発生が確認された (Schultz et al. 2010; Hermalyn et al. 2012). しかし高角ブルーム発生メカニズムは解明されていない.

もし, 高角ブルームの発生メカニズムが解明されエジェクタの量や方向をインパクターの形状で制御することができれば, 将来の惑星探査への応用が期待できる. たとえば, はやぶさ 2 ではサンプル採取用ホーンを接地させるために小惑星表面まで探査機本体が降下しなければならなかった. 降下せず上空で採取できるようにエジェクタの放出方向を制御できればこのような危険な運用は避けることができるだろう. また, DART や HERA (たとえば Cheng et al. 2018; Michel et al. 2018) のように地球に落下する危険がある小惑星にインパクターを衝突させて軌道を変える計画でも, エジェクタの速度と質量の制御が効率のよい軌道変更につながるだろう.

そこで, 高角ブルーム発生機構の解明を行うためにガラスビーズ標的に対して中実でない様々な形状のインパクターを用いた衝突実験を行い, 高速カメラでエジェクタの様子を撮影した. その結果を報告する.

## 2) 実験方法

実験には図1のような円筒型（T型）および底を持つコップ型（C型）のアルミニウムインパクターを用いた。インパクターの外径は全て4.75 mm, T型は側面の厚さ $t = 1.5, 1.0, 0.5$  mmの三種類, C型は側面と底の厚さは等しく,  $t = 1.5, 1.0, 0.5$  mmの三種類, 用意した。インパクターはJAXA宇宙科学研究所の縦型二段式水素銃を用いて速度およそ2.5 km/sに加速しサイズを変えたガラスビーズ標的に衝突させた。衝突直前のインパクターの姿勢を高速カメラSHIMADZU HPV-Xにより高フレームレート（2または5  $\mu$ s/f）で確認し, エジェクタが放出される様子を別の高速カメラPHANTOM V1621によって低フレームレート（2 ms/f）で撮影した。実験の配置は図2, インパクターと標的および衝突条件については表1に載せてある。

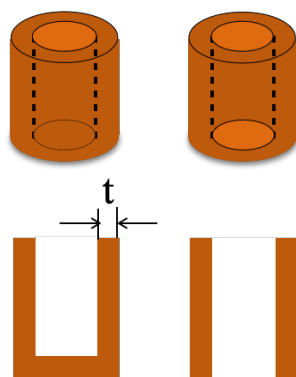


図1. インパクターの形状の外観（上）と断面（下）.（右）円筒型（T型）,（左）コップ型（C型）. C型の側面と底の厚さは等しい. それぞれ厚さ  $t = 1.5, 1.0, 0.5$  mmの三種類用意した.

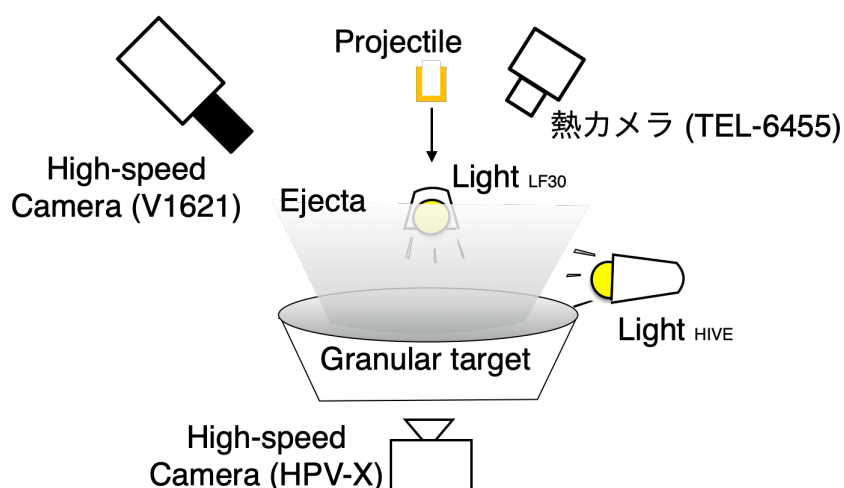


図2. 実験配置図. HPV-Xは標的の表面に平行に設置し, V1621は斜め上から撮影した.

表 1. 実験条件

Shot No.	Impactor*	Target 粒子サイズ $\mu\text{m}$ (公称値)	真空度 (Pa)	衝突速度 (km/s)
765	T3	100	0.9	1.912
766	T3	100	1.5	2.670
767	T3	100	1.5	2.664
768	T3	38	1.5	1.888
769	C3-bottom	100	1.5	2.420
770	C3-bottom	50	0.6	2.470
771	C3-top	100	1.5	2.438
772	T3	50+100 (2種類混合)	1.5	2.597
773	T2	50+100 (2種類混合)	1.5	2.494
774	T2	100	1.5	2.421

\*インパクターの形状

T2 : T型,  $t = 1.0 \text{ mm}$

T3 : T型,  $t = 0.5 \text{ mm}$

C3 : C型,  $t = 0.5 \text{ mm}$  ; bottomはコップの底から衝突, topは開口部から衝突

### 3) 結果と考察

図3に実験結果の一例(#769)を示す。上段は高フレームレートで撮影された HPV-X のスナップショット, 下段は低フレームレートで撮影された V1621 のスナップショットである。(左上)は衝突直前のインパクター(C型厚さ0.5 mm)である。傾いている様子がわかる。下段の画像では通常の45度に放出されたエジェクタカーテンに加えて中央に垂直に放出されている物体が確認できるが, 右上(衝突後20 $\mu\text{s}$ )の高フレームレートで撮影された画像では変形したインパクターと思われる物体が中央に見える。低いフレームレートでは露光時間が長い画像がぼやけてしまっているが, 下段の画像に映っている中央の垂直に放出された物体も跳ね返ったインパクターであると考えられる。

今回の実験では, 図3と同様に, 低フレームレートのカメラで撮影された画像に中央に垂直に飛び出す物体が何例も見られたが, これらはどれも高フレームレートで撮影された画像で確認すると変形したインパクターであり, 垂直方向に放出されている粉体は確認できなかった。今回はどの場合もインパクターが傾いて衝突しており, 対称性が悪いために高角プリズムが出ていないのかもしれない。

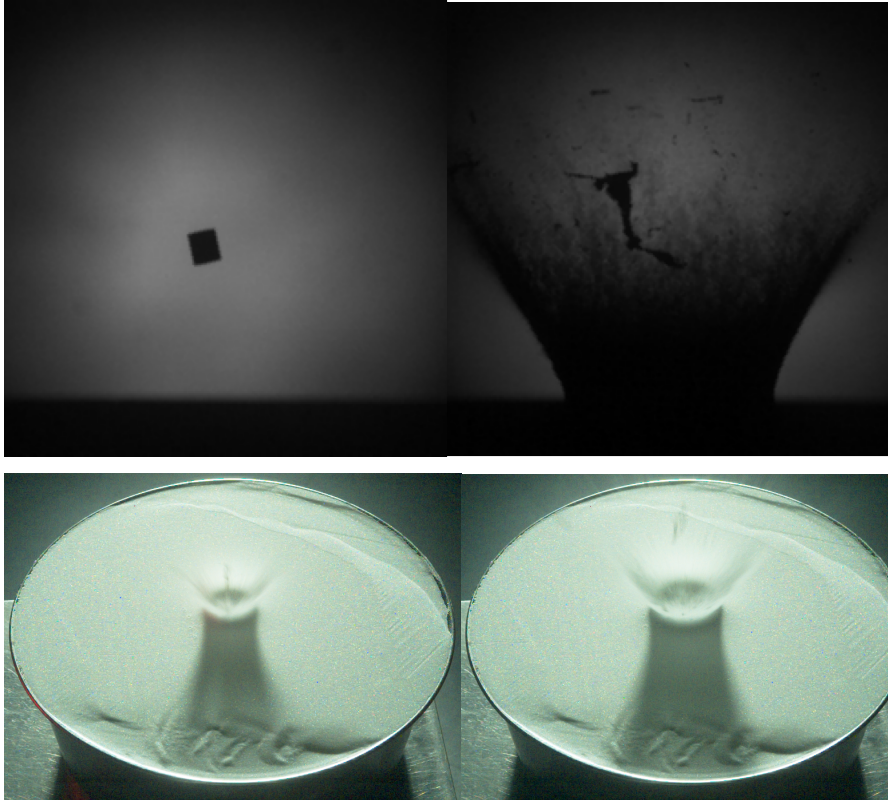


図3. 観測結果の一例 (#769). (上段) HPV-Xによるスナップショット. (左) 衝突前のインパクターの姿勢, (右) 衝突後  $20\mu\text{s}$ . 通常の $\sim 45$ 度のエジェクタカーテンの中央に変形したインパクターが見える. (下段) V1621によるスナップショット. (左) 衝突直後 (2 ms), (右) 衝突後 4 ms. どちらもエジェクタカーテンの中央に垂直に跳ね返るインパクターが見える.

今後に向けて、インパクターの傾きの影響を抑えるために以下のように実験条件を見直した：  
(i) インパクターの材質をサボと同じ材質であるポリカーボネートにする, (ii) 中空の弾丸を 3D プリンターで制作する. 2022 年 1 月に実験を行う予定であったがコロナ禍のためにマシンタイムがキャンセルされ来年度以降に実験予定である.

謝辞. 実験の遂行については宇宙科学研究所の木内真人氏にサポートしていただいた.

参考文献

- A'Hearn M. F., et al. (2005) *Science* 310, 258
- Arakawa M., et al. (2020) *Science* 368, 67
- Cheng A., et al. (2018) *Planet. Space Sci.* 157, 104
- Colaprete A., et al. (2010) *Science* 330, 463
- Hermalyn B., et al. (2012) *Icarus* 218, 654
- Kadono T., et al. (2020) *Icarus* 339, 113590
- Michel P., et al. (2018) *Adv. Space. Res.* 62, 2261
- Saiki T., et al. (2017) *Space Science Reviews* 208,165
- Schultz P. H., (2010) *Science* 330, 468