

# クレーター形成時のエジェクタ放出過程における三次元粒子追跡

大川初音<sup>1</sup> 荒川政彦<sup>2</sup> 保井みなみ<sup>2</sup> 長谷川直<sup>3</sup> 横田優作<sup>2</sup> 山本裕也<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学理学部 <sup>2</sup>神戸大学大学院理学研究科 <sup>3</sup>宇宙航空研究開発機構

## 1. 背景と目的

太陽系の固体天体表面には、衝突クレーターが形成されている。従って衝突現象は、太陽系天体の形成・進化の過程において普遍的な現象である。固体天体の表層進化を考える上で、衝突クレーター形成時のエジェクタの振る舞いが大変重要である。これまでもエジェクタ構成粒子の放出速度分布に関する研究は多く行われている。エジェクタ速度分布は、 $\pi$ スケール則により、

$$\frac{v_0}{\sqrt{gR}} = k_2 \left( \frac{r_0}{R} \right)^{-\frac{1}{\mu}} \quad \text{式(1)}$$

で表されることが知られている[1]。このスケール則には標的粒子のサイズ依存性が考慮されていないが、近年の小惑星探査の結果、小惑星表面を覆うボルダーやレゴリスは広いサイズ頻度分布を持つことがわかってきた[2][3]。これまで行われてきた均一粒径の付着力を持たない粉粒体標的を用いたクレーター形成実験では、軸対称のエジェクタカーテンが観察されてきた。一方で、粒径が不揃いな標的では軸対称ではない不均質なエジェクタカーテンが形成されることがわかっている[4]。

不均質なエジェクタカーテンが形成される原因として、エジェクタ粒子の放出速度のサイズ依存性が提案されている。そこで本研究では、エジェクタ放出速度のサイズ依存性を調べるため、エジェクタ粒子の軌道を三次元追跡する方法を確立することを目的とし、粒子サイズ分布を持つ粒体層へのクレーター形成実験を行った。

## 2. 実験・解析方法

標的には、直径0.1mm, 1mm, 3mm, 10mmのガラスビーズを等質量で混合したものを使用した。弾丸には直径1mmのアルミ球と鉄球を用いて、二段式軽ガス銃により加速し、衝突速度1.2~4.3km/sで標的表面に衝突させた。標的を設置する真空チャンバーの真空度は1.5~3.5Paとした。

本実験では、エジェクタ粒子の三次元軌道を得るために、同期させた2台の高速カメラ(撮影速度2000~10000fps)を使用した。まず、粒子の空間座標を決定する際に基準とするための直方体のリファレンス(30cm×30cm×40cm)をチャンバー内に設置し、これを2台のカメラで撮影する。次に、リファレンスを撤去して衝突実験を行い、高速カメラでエジェクタ粒子が放出される様子を記録する。その際、標的表面には、別々のカメラの動画の中で同一の粒子を特定できるように色をつけたガラスビーズ(直径3mm, 10mm, 18mm)を、衝突点付近に6~8個並べておく。2台のカメラのそれぞれの動画上で色付きビーズの放出軌道を追跡し、得られた位置を先に撮影したリファレンスの情報をもとに合成し、三次元座標に変換した。

## 3. 結果・考察

本実験に用いた標的では、いずれの弾丸、衝突速度においても、軸対称でない不均質なエジェクタカーテンを観察することができた。そして、2の方法で、不均質なエジェクタカーテン中でのエジェクタ粒子の三次元軌道を得ることに成功した。(図1)

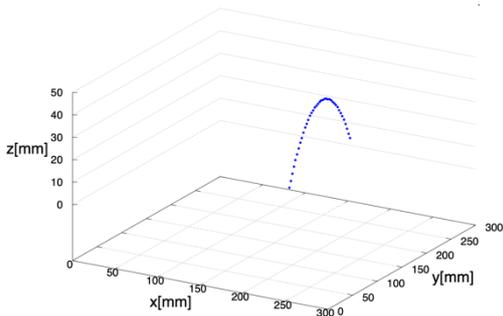


図1：鉄弾丸を用いた衝突速度 1.2km/s での実験で得られた直径 10mm のガラスビーズの三次元放出軌道。衝突点から 13.2mm の位置から放出された。

粒子が、標的表面に水平な方向には等速度で運動し、鉛直方向には約  $10\text{m/s}^2$  の重力加速度を受けて放物線を描いて運動する様子が確認され、この解析方法は妥当であると考えられる。

この方法により、粒径が不均一な標的での衝突クレーター形成時に標的表面から放出される粒子について、粒子サイズごとの放出速度を得ることができた (図2)。

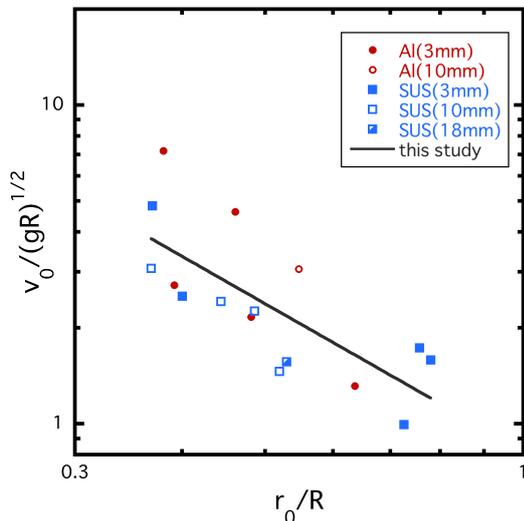


図2：エジェクタ粒子の放出速度分布。

放出速度は、同じ初期位置から放出される粒子でも 2 倍程度のばらつきが見られるが、このばらつきの原因が何であるのかは、今後の課題である。このようなばらつきは

あるが、本研究の結果は、式(1)の  $\pi$  スケール則で近似することは可能である。また、放出速度分布に関しては、エジェクタ粒子の粒径による傾向は見られないと言える。

図3は、エジェクタ粒子の放出ベクトルを、標的の真上から標的表面に投影したものである。エジェクタ粒子は、粒径によらず衝突点から放射状に放出されるが、一部は周囲の粒子とは異なる方向へ放出された。これは、粒子が標的表面から放出される前や後に、それより大きな粒子に衝突する現象が見られた粒子に限られることがわかった。

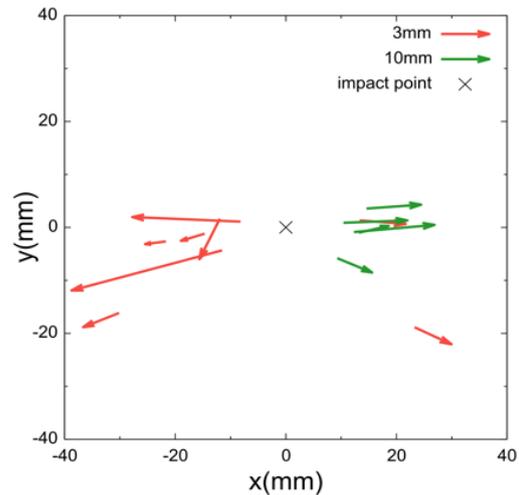


図3：標的を前上から見た時のエジェクタ粒子の放出ベクトル。

#### 参考文献：

- [1] Housen and Holsapple, 2011. Icarus 211, 856-875.
- [2] Sugita et al., 2019. Science 364, aaw0422.
- [3] Michikami et al., 2019. Icarus 331, 179-191.
- [4] Kadono et al., 2019. ApJL, 880, L30 (4pp).
- [5] Tsujido et al., 2015. Icarus 262, 79-92.