

# 石英砂ターゲットにおける クレーターエジェクタの速度分布に関する実験的研究

○辻堂さやか<sup>1</sup>, 保井みなみ<sup>1</sup>, 荒川政彦<sup>1</sup>, 松榮一真<sup>1</sup>, 高野翔太<sup>1</sup>, 長谷川直<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

## 1. はじめに

太陽系のほとんどの天体表面には衝突クレーターが観測されており、衝突クレーターの形成過程は太陽系の形成・進化において普遍的な現象と言える。そして、天体衝突により引き起こされる表層進化の研究を行うには、衝突クレーターに関するスケール則が必要である。このスケール則を用いることで実験室での cm サイズのクレーターから、天体規模の km サイズのクレーターまで、クレーター形成に関わる様々な現象を推定することが可能となる。(Housen et al., 1983) そして特に、衝突クレーター形成に伴うエジェクタの速度分布に対する理解は、天体表層の物質収支や移動、さらに混合を議論する上で不可欠である。具体的には、エジェクタ速度分布のスケール則を利用することで、クレーター周りのエジェクタ堆積物の分布を定量的に決定することや (Housen et al., 1983)、衝突の際に天体から脱出するエジェクタの量を決定すること (Yamamoto and Mukai, 1998) が可能となる。例えば、Michikami et al., 2008 では、エジェクタ質量分布からイトカワのレゴリス層の厚さや、ボルダーの個数とサイズ分布を推定している。

エジェクタ速度分布に関するスケール則は、Housen and Holsapple, 2011 にまとめられている。次元解析で求められる式は①となる。

$$v_0/\sqrt{gR} = a(x_0/R)^{-1/\mu} \quad \text{—式①}$$
( $v_0$ :放出速度、 $g$ :重力加速度、 $R$ :クレーター半径、 $x_0$ :初期位置、 $a, \mu$ :定数) また、Maxwell, 1977 は、粉粒体に対して形成されるクレーターの地下における流線をモデリングした(Zモデル)。その結果、エジェクタがターゲット表面から放出される角度 $\theta$ は式②のように表されることを導いた。

$$\tan \theta = Z - 2 \quad \text{—式②}$$

さらに、Housen et al., 1983 により、このスケール則と Z モデルは以下のように関連付

けられた。

$$Z = 1/\mu \quad \text{—式③}$$

そして、Croft(1980)は、流線の始点が深さを持つ場合に対して、この Z モデルを拡張している。

一方、レゴリス層を模擬した砂などの粉粒体標的への衝突実験により、エジェクタ速度分布を求める研究が過去に幾つか行われている。例えば、Cintala et al., 1999 ではシート状レーザーを用いて衝突速度( $v_i$ )800-1900m/s の範囲で砂に対するスケール則が求められている( $\mu=0.50-0.65$ )。また、Hermalyn and Schultz, 2011 では密度 0.9–8.8g/cm<sup>3</sup> の弾丸を用いて砂へのクレーター形成実験が行われており( $v_i \sim 5$ km/s)、PTV 法により速度分布が求められた。しかし、エジェクタの個々の粒子の観測によって速度分布を詳細に調べた研究、また、弾丸密度依存性、衝突速度依存性について系統的に調べた研究はまだ十分であるとは言えない。

そこで、本研究の目的は重力支配域におけるクレーター形成過程の網羅的な研究の一貫として、エジェクタ速度分布のスケール則を再構築することである。特に、エジェクタ速度分布の弾丸密度依存性と衝突速度依存性について調べることにした。

## 2. 実験・解析方法

まず、弾丸密度依存性を調べるため、神戸大学の一段式縦型軽ガス銃を用いて衝突速度 ~200m/s の低速度域で密度の異なる 8 種類の弾丸を用いた実験を行った。弾丸はナイロン(Ny)、ガラス(Gl)、アルミナ( $Al_2O_3$ )、チタン(Ti)、ジルコニア( $ZrO_2$ )、鉄(Fe)、銅(Cu)、鉛(Pb)(密度 1.1-11.3g/cm<sup>3</sup>)でいずれも直径は 3mm とした。この弾丸を直径 10mm のサボを用いて、一段式軽ガス銃により加速した。標的を設置する真空チャンバー内の圧力は、 $<10^3$ Pa とし、撮影速度 2000fps の高速ビデオ

カメラによりクレーター形成の様子を観察した。

また、衝突速度依存性を調べるため、宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて衝突速度 1.6-6.9km/s における高速度域での実験も行った。高速度域での実験では弾丸は直径 4.7mm のポリカーボネイト球(PC)とした。真空チャンバー内の圧力は $\sim 7.0$ Pa とし、撮影速度の異なる 4 つの高速ビデオカメラを用いてクレーター形成の様子を観察した (600-125000fps)。低速度域、高速度域どちらの実験においても標的粒子には、直径 500  $\mu$ m、空隙率 44.7%の石英砂を用いた。

高速ビデオカメラにより得られた動画から、放出された個々の標的粒子の軌跡を計測することによってエジェクタ速度分布を求めた。 $>30$  個の粒子の軌跡を追い、個々の粒子が弾道軌道を描いていると仮定して、それぞれの粒子の放出位置と放出速度、そして放出角度の関係を求めた。また、形成後のクレーター直径を計測することにより、クレーターサイズのスケール則についても調べた。

さらに、実際のクレーター形成の際の弾丸貫入過程について調べるため、低速度域において先程と同様 8 種類の弾丸を用いて quarter-space 実験も行い、クレーター形成時のターゲット内部の掘削流についても調べた。

### 3. 結果・考察

エジェクタ速度のスケール則(式①)において、弾丸密度が $<6$ g/cm<sup>3</sup>の範囲では、 $\mu$ は弾丸密度に比例していることがわかった。(図 1)

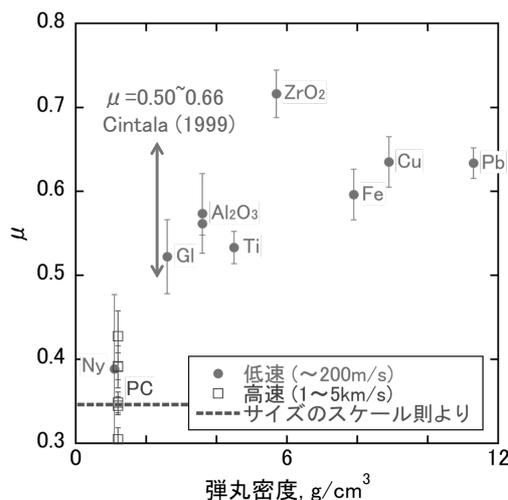


図 1 :  $\mu$  の弾丸密度依存性

さらに、速度分布から求めた  $\mu$  とクレーターサイズのスケール則から求めた  $\mu$  は Ny · PC 弾丸では、ほぼ一致することがわかった。一

方、a の弾丸密度依存性は見られなかった。また、今回の実験ではエジェクタ速度のスケール則の有意な衝突速度依存性は見られなかった。

放出角度  $\theta$  については、低速度域における実験では衝突点近傍で大きく、放出位置が遠くなると共に小さくなり、0.6R 以遠でほぼ一定になるという傾向がみられた。また、高速度域における実験では、衝突点近傍でばらつくものの、0.3R 以遠では  $v_1$  によらず $\sim 40^\circ$ で一定となることがわかった。また、それぞれの実験について、放出角度が比較的一定となる範囲での平均値を  $\theta_{ave}$  とした。(低速度域:0.6-0.8R、高速度域:0.3-0.5R)

次に、図 2 は  $\mu$  と  $\theta$  の関係を表したグラフであり、丸は低速度域における実験結果、四角は高速度域における実験結果、実線は式②、③により得られた結果を表す。このグラフから、高速度域での結果と低速度域でのナイロン弾丸の結果は Z モデルと合うが、それ以外の高密度弾丸については Z モデルの結果から大きくずれていることがわかる。そこで、Z モデルを流線の始点が深さを持つ場合に拡張した Croft(1980)のモデルにより、Z と始点深さを変化させた時の  $\mu$  と  $\theta$  関係を調べた。破線が Z 毎の関係、飛び破線が始点深さ毎の関係を表す。このグラフから、各弾丸について Z と始点深さの推定が可能となる。Quarter-space 実験の結果、Ny、Gl、Ti、Fe 弾丸については推定される Z と d を用いてモデリングした流線と観測された掘削流が一致した。その他の弾丸については、一致しなかったが、始点は一点ではなく時間と共に移動していくと仮定すれば、全ての実験結果について説明できる。

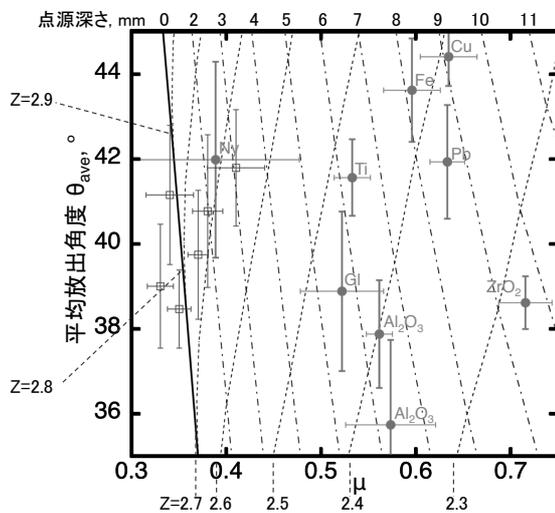


図 2 :  $\mu$  と  $\theta$  の関係