

斜め衝突による高速度岩石エジェクタの測定

○野村啓太¹, 中村昭子¹, 長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

目的

MMX でサンプルリターンが計画されている火星衛星フォボス表面には, 火星での衝突によって放出された火星物質が存在すると考えられている^[1]. 衛星表面の火星物質質量について議論する上で, 衝突によって放出されるエジェクタのサイズと速度の関係と放出角度が重要となる. これまで我々の研究では, 玄武岩標的に弾丸を垂直衝突させ, 二次標的の面へのエジェクタ衝突を高速度カメラで撮影する新しい方法により, エジェクタが火星からフォボスに到達するのに必要な速度を上回る, 最大約 7 km/s のエジェクタのデータを得た^[2].

本研究では, 天体衝突でより典型的な斜め衝突で放出されるエジェクタについて調べることを目的として衝突実験を行った.

実験方法

昨年報告したエジェクタの通過地点に二次標的としてガラス板を設置した垂直衝突での実験^[2]の配置を変え, 弾丸の斜め衝突によって放出される高速なエジェクタのサイズと速度の同時測定を行った. 図 1 に実験の概略図を示す. 弾丸は直径約 3 mm のアルミニウム球を使用し, 速度約 7 km/s で玄武岩標的へ衝突させた. 衝突角度は 45° とした. 玄武岩標的(一次標的)の密度は 2700 kg/m^3 であり, 一辺が 10 cm 以上のものを使用した.

弾丸の玄武岩への一次衝突と玄武岩エジェクタのガラス板への二次衝突の様子をそれぞれ高速度カメラで撮影し, 撮影速度は $> 5 \times 10^5 \text{ fps}$, 露光時間は $0.2 \sim 2 \text{ } \mu\text{s}$ とした. 真空度は約 2 Pa とした.

次にガラス標的に形成されるクレーターからエジェクタのサイズを推定するために, 二次標的に用いたガラス板に対する π スケーリング則のパラメタを導出した. 図 2 に本研究で導出したスケーリング則を示す.

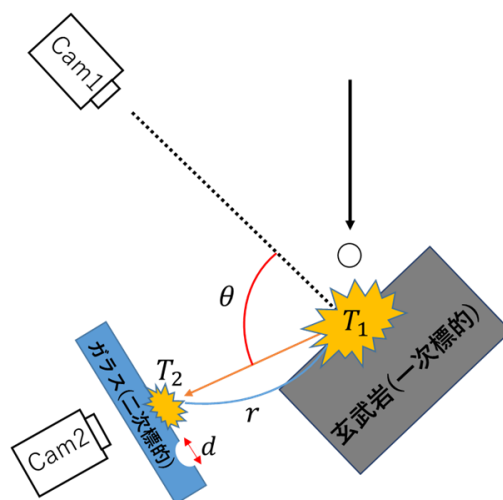


図 1: 実験概略図

$$\pi_D = \left(\frac{\rho_t}{m}\right)^{\frac{1}{3}} D \quad \pi_3 = \frac{Y}{\rho_p V_i^2} \quad \pi_4 = \frac{\rho_t}{\rho_p}$$

ここで、 ρ_t ：標的密度、 ρ_p ：弾丸密度、 m ：弾丸質量、 D ：クレーター直径、 Y ：標的引張強度、 V_i ：衝突速度である。昨年度報告したスケーリング則は、 $100\ \mu\text{m}$ サイズの玄武岩弾丸を用いた散弾衝突実験結果も用いていた

が、データのばらつきが大きかったため、ガラス球単発での実験を追加で行いスケーリング則を改良した。これまで、密度 $2500\ \text{kg/m}^3$ ・直径 $1\ \text{mm}$ のガラス球での $60\sim 198\ \text{m/s}$ (神戸大)^[3]と、直径 $0.33\ \text{mm}$ のガラス球での $1.7\sim 7.1\ \text{km/s}$ (宇宙研)の条件で実験を行った。標的には $100\times 100\times 10\ \text{mm}$ のガラス板を用いた。実験後、形成されたクレーターのスポール領域の等価円直径をもとにスケーリング則のパラメタを決定した。導出した強度支配域のスケーリング則における密度項 π_4 の指数の値は、

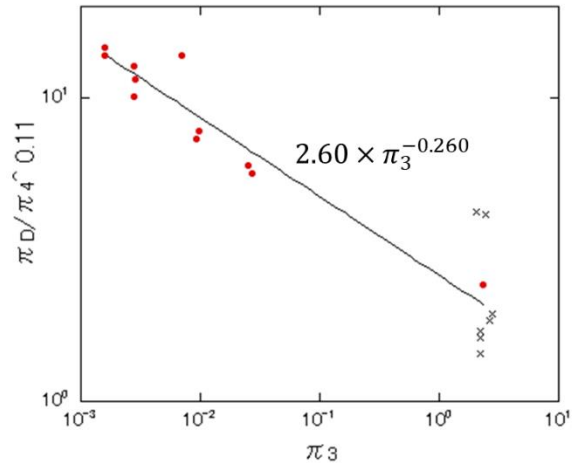


図2：導出したスケーリング則

先行研究の堆積岩に対する結果^[4]を用い、 0.11 とした。ただし、本研究で π_4 の値は1または 0.9259 なので、スケーリング則への影響はないと考えられる。

実験結果

図3は、実験で測定したエジェクタのサイズ-速度の関係を示す。なお本研究での測定データには、高速度カメラのフレーム間隔分、エジェクタ速度に誤差が生じる。例えば、撮影速度 $50\ \text{万}\ \text{fps}$ で速度 $14\ \text{km/s}$ で二次標的に衝突するエジェクタを捉えた場合、誤差は $\pm 540\ \text{m/s}$ 程度となる。本研究の二次標的を用いた実験方法で、従来の方法では測定が困難であった火星衛星への到達速度を上回る最大 $14\ \text{km/s}$ の高速なエジェ

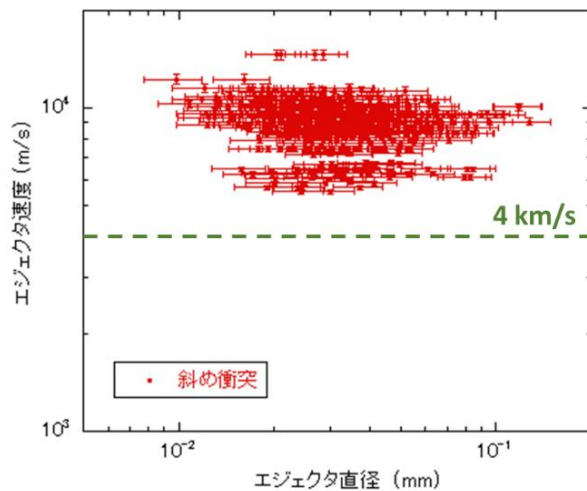


図3：計測したエジェクタのサイズ-速度

クタのサイズの見積もりができた。さらに、弾丸直径の $1/400 \sim 1/25$ ($10 \sim 130 \mu\text{m}$ サイズ) 程度の小さいエジェクタについても解析可能であることが分かった。

次にエジェクタ破片のサイズ分布を図 4 に示す。ここでは破片速度ごとのサイズ分布の違いを比較するために、大まかに速度で分けた。結果として、どの速度域でも破片サイズ分布は非常に似た形状を持つことが分かった。またエジェクタ速度が高速なものほど破片サイズは小さくなる傾向が見られた。さらに、高速なエジェクタが放出される領域について調べた。図 5 にその結果を示す。図から放出角度 θ の大きい領域に高速な破片が放出されており、 θ の減少に伴ってエジェクタ速度が遅くなる傾向が見られる。ここから、 45° の斜め衝突で放出される高速なエジェクタは標的の表面方向に拡がった後、徐々に標的の鉛直方向に放出されていると考えられる。

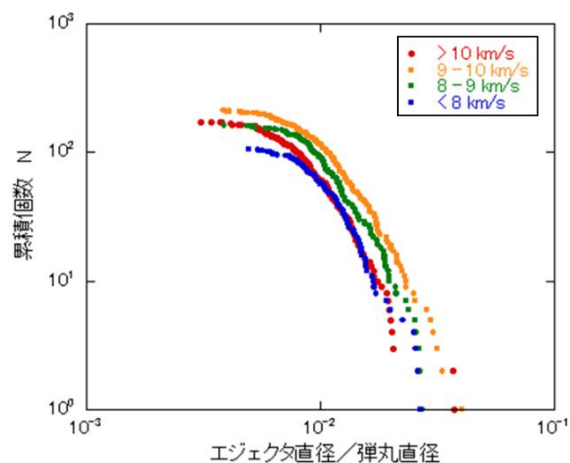


図 4：破片サイズ分布

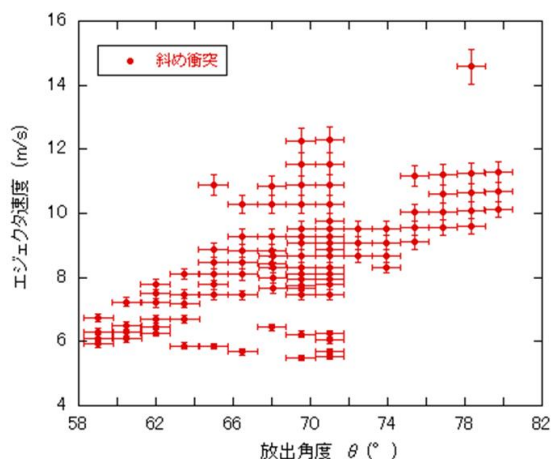


図 5：高速なエジェクタの放出角度

今後の展望

現段階では、実験ごとに設置した二次標的の範囲内 ($100 \times 150 \text{ mm}$) に飛来するエジェクタについてしか調べられていないため、二次標的の配置を変え多方向に飛来する破片を捉える実験を行うことでエジェクタ全体像の理解につなげることを目標とする。また、高速で放出された破片が弾丸由来か標的由来かを明確にするための実験を行う予定である。

まとめ

本実験からフォボスに到達するのに必要なエジェクタ速度を上回る $5 \sim 14 \text{ km/s}$ の速度を持つエジェクタのサイズと速度の同時計測に成功した。またエジェクタ速度ごとの破片サ

イズ分布は似た形状となることが分かった。さらに斜め衝突による高速なエジェクタは、衝突直後に標的の表面方向に放出され、その後、徐々に標的の鉛直方向に放出されると考えられる。

参考文献

- [1] Chappaz, L., et al., 2013. Transfer of impact ejecta material from the surface of Mars to Phobos and Deimos. *Astrobiology* 13, 963-980.
- [2] 野村啓太他, 2020. 令和元年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム講演集, SA6000149009.
- [3] 松本真由子, 2019. 神戸大学理学部惑星学科卒業研究.
- [4] Suzuki, A., et al., 2012. Laboratory experiments on crater scaling-law for sedimentary rocks in the strength regime. *J. Geophys. Res.* 117, E08012 (7 pages).