

二次標的を用いた高速度エジェクタの実験的研究

○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

1. はじめに

火星衛星からのサンプルリターンが 2020 年代に計画されており、火星衛星の起源解明が期待されている。これらの衛星には、火星から衝突によって放出される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が重要となる。具体的には、火星での衝突クレーター形成にともなって火星から脱出し、衛星に到達するエジェクタの量の推定に制約を与えることが可能となる。衝突エジェクタのサイズと速度に関する研究として、モデル計算[2]、月や火星の二次クレーター解析[3]や室内実験[4]などが行われており、エジェクタのサイズと速度の関係には傾向があることが示されている。しかし、二次クレーター解析では解析方法の都合上、天体の脱出速度未満のエジェクタについてしか調べることができない。また室内実験においても 100 m/s 以上のエジェクタのサイズ-速度の情報は限定的である。衛星フォボス表面における火星物質の推定には、火星からフォボスに到達するのに必要なエジェクタ速度の 4 km/s を超える高速なエジェクタについて調べる必要がある。

そこで本研究では、火星から衛星フォボスへの到達速度を上回る高速なエジェクタのサイズ-速度関係を同時測定することを目的として、二次標的を用いた衝突実験を行った。

2. 実験

2.1. エジェクタのサイズ-速度

従来の実験方法では測定が困難であった高速なエジェクタのサイズと速度を同時測定するために、エジェクタの放出地点に二次標的としてガラス板を設置し、玄武岩標的への衝突実験を行った。実験は、宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸は直径約 3 mm のアルミニウム・アルミナ・ガラス球を使用し、速度約 5 または 7 km/s でターゲットへ垂直に衝突させた。玄武岩標的(一次標的)の密度は 2700 kg/m³であり、一辺が 10 cm 以上のものを使用した。ガラス標的(二次標的)の密度は 2500 kg/m³であり、100×50×5 mm の板を 3 枚並べ、衝突点からみて 100×150 mm の範囲に放出されるエジェクタを捉えられるように設置した。

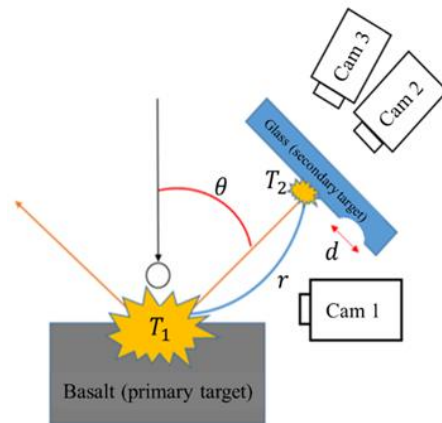


図 1 実験概略図

ガラス板への二次衝突によるクレーターの形成は、高速度カメラ（図1のCam2,3）を用いて、 $10^4\text{--}5\times 10^5$ fps で記録した。ガラス板の設置角度 θ は、エジェクタが二次標的に当たるように、ターゲットの法線とのなす角 $25\text{--}40^\circ$ の範囲で変えた。一次衝突での破片の放出過程は、ターゲットの側面と上部に設置した高速度カメラ（図1のCam1）で撮影した。真空度は 2.5 Pa 未満とした。

一次衝突で放出された玄武岩エジェクタの二次標的への飛行時間 $T_2 - T_1$ と一次衝突点からガラスターゲットに形成されたクレーター間の距離 r からエジェクタの速度、玄武岩エジェクタによってガラス板にできたクレーターの直径 d とそのクレーターを形成したエジェクタの速度からスケーリング則を用いてエジェクタのサイズを算出した。

2.2. スケーリング則

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、ガラス標的に対するスケーリング則のパラメタを導出した。本研究では、無次元パラメタを用いた π スケーリングを使用した。

$$\pi_D = \left(\frac{\rho_t}{m}\right)^{\frac{1}{3}} D \quad (1)$$

$$\pi_3 = \frac{Y}{\rho_p V_i^2} \quad (2)$$

$$\pi_4 = \frac{\rho_t}{\rho_p} \quad (3)$$

ここで ρ_t は標的密度、 ρ_p は弾丸密度、 m は弾丸質量、 D はクレーター直径、 Y は標的強度、 V_i は衝突速度である。

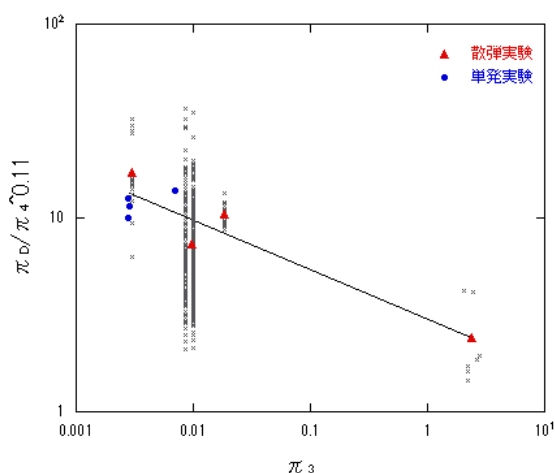


図2 ガラスターゲットに対するスケーリング則

これまで、密度 2500 kg/m^3 のガラス球の $60\text{--}198\text{ m/s}$ のデータ(神戸大)[5]と、ガラス球の単発・散弾および密度 2700 kg/m^3 でサイズ $100 \pm 20\ \mu\text{m}$ の玄武岩の散弾の $2\text{--}5\text{ km/s}$ のデータ(宇宙研)が得られている。標的には $100 \times 100 \times 10\text{ mm}$ のガラス板を用いた。実験後、光学顕微鏡を用いて形成されたクレーターの拡大画像を取得し、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。二次標的に形成されたクレーターとキャリブレーション実験で得られたクレーターには、判別できるような大きな違いは見られなかった。

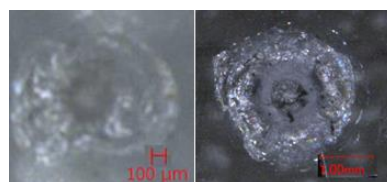


図3 (左)二次標的
(右)キャリブレーション

散弾実験で得られたクレーターにはサイズのばらつきが大きかったため、算術平均サイズを用いた。玄武岩散弾を用いた衝突実験でクレーターサイズのばらつきが大きい理由と

して、実験に用いた弾丸は不規則形状であり標的と衝突した面やターゲットへの到達速度の違いによる影響が考えられる。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、先行研究の堆積岩に対する結果[6]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。

2.3. 解析

例として、アルミニウム弾丸を速度7 km/sで衝突させた実験で二次標的を捉えた高速度カメラのコマ送りの画像を図4に示す。時間経過とともにエジェクタがガラス板に衝突している様子が確認できる。高速度カメラの画像から速度を算出したクレーター、顕微鏡画像からサイズを測定したクレーターの座標をそれぞれ求めた(図5: エラーバーは高速度カメラの分解能で表示)。この実験で測定したクレーターの直径は1 mm程度であるのに対し、1ピクセル(0.44 mm)の精度で一致していることから、サイズを推定したものと速度を計測したエジェクタは一致していることが確認できた。

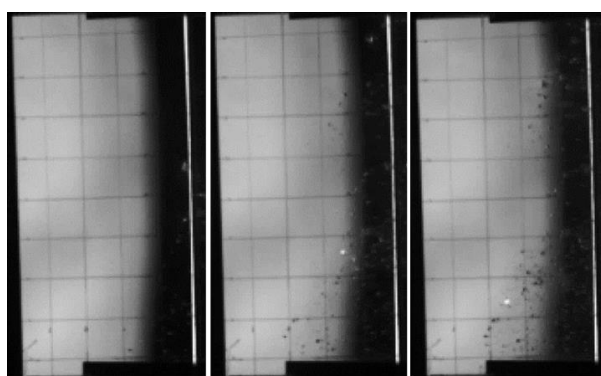


図4 高速度カメラ画像
(30000 fps, グリッドは一辺10 mm)

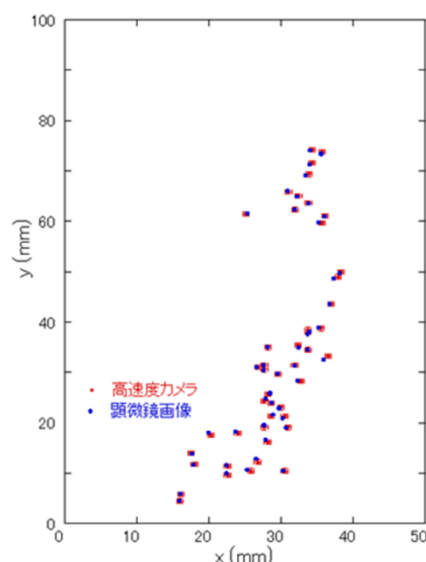


図5 クレーター位置確認

さらに、SEM-EDSで実験後のガラス標的表面の衝突痕の元素分析を行い、衝突痕が標的起源か弾丸起源かを調べた。

3. 実験結果

図6は、実験で測定したエジェクタのサイズ-速度の関係で、二次標的を用いて推定したデータ(カラー点)と一次衝突点を撮影した高速度カメラ画像から算出する従来の方法で測定したデータ(黒点)[5]を示す。なお本研究で測定データは、高速度カメラのフレーム間隔分、測定されるエジェクタ速度に誤差が生じる。例えば、高速度カメラを用いて10万fpsで速度7 km/sで二次標的に衝突するエジェクタを捉えた場合、 ± 500 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

速度を上回る高速なエジェクタのサイズの見積もりが可能であることが分かった。さらに、弾丸直径の 1/400 (数 10 μm サイズ)程度 of 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。

アルミニウム弾丸を 7 km/s で衝突させた実験後のガラス板表面の SEM-EDS 分析の結果、二次標的に到達する弾丸物質(アルミニウム)は溶融しており、クレーターを形成していないことが確認できた。よってアルミニウム弾丸実験で測定した二次標的上のクレーターは、標的物質(玄武岩)により形成された可能性が高いことが確認できた。

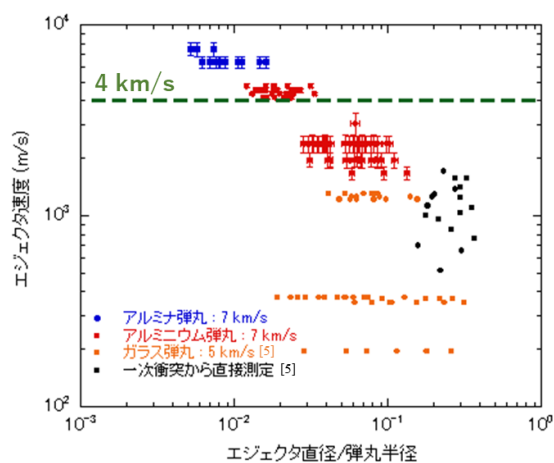


図 6 エジェクタのサイズー速度関係

4. まとめ

高速度エジェクタのサイズー速度関係を導出することを目的として、二次標的を用いた衝突実験を行った。本実験で用いた手法で、衝突点を高速度カメラで撮影する従来の方法では測定が困難であった、火星から衛星フォボスへの到達速度を上回る高速なエジェクタのサイズー速度関係の導出が可能であることが確かめられた。

謝辞

SEM-EDS 観察では、神戸大学瀬戸雄介氏、家本あかね氏にお世話になりました。また、(株) ナックイメージテクノロジーには、高速度カメラ ACS-1 デモ機をお貸しいただいたこと感謝します。

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] Melosh, H.J., 1984. Impact Ejection, Spallation, and the Origin of Meteorites. *Icarus* 59, 234-260.
- [3] Hirase, Y., Nakamura, A., Michikami, T., 2004. Ejecta size-velocity relation derived from the distribution of the secondary craters of kilometer-sized craters on Mars. *Planet. Space. Sci.* 52, 1103-1108.
- [4] Nakamura, A., Fujiwara, A., Kadono, T., 1994. Velocity of finer fragments from impact. *Planet. Space. Sci.* 42, 1043-1052.
- [5] 松本真由子, 2019. 神戸大学理学部惑星学科卒業研究.
- [6] 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).