

高空隙率標的への 低密度脆性弾丸の高速衝突実験

○原田竣也¹, 中村昭子¹, 岡本尚也¹, 青木隆修¹, 鈴木絢子², 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

はじめに

太陽系には平均密度が 1 g/cm^3 よりも小さい小天体が存在し, これら天体表面は空隙を含んでいると考えられる. 彗星や氷天体などがこれに当てはまり, このような天体への探査機による観測が進んでいる. 近年では Cassini が土星の衛星に接近し, 今後も Rosetta による彗星核探査が計画されている. 観測が進むことで天体の表面地形の高解像度の画像が得られ, 天体表面に存在する小クレーターが詳しく調べられるようになる. クレーターなどの地形は表面の物性を反映しており, これを調べることは天体表層の構成物質を推定する一つの手段となる.

空隙を持つ天体模擬標的への衝突実験はこれまでも行われている. 雪[1]や石膏[2], ガラスビーズ焼結体[3, 4]などが用いられており, これら標的空隙率は 4-94%と幅広い. しかしこれまでの実験では高空隙率標的に低密度の弾丸を衝突させた例は少ない. 高い空隙を持つ天体表面に同程度の物質が衝突するなどの現象は十分に起こり得るといえる. そこで本研究ではその条件を模擬した衝突実験を行い, 衝突によって形成されるクレーターや弾丸の破壊の程度などを実験的に調べる.

実験方法

標的にはガラスビーズ焼結体と及び石膏を用いた. それぞれの空隙率は 74, 40%である. ガラスビーズ焼結体は, 粒径 $55 \mu\text{m}$ の中空ガラスビーズを円柱状のアルミナるつぽに入れ, 温度 700°C で 6 時間焼結したものを使用した. 以下この中空ガラスビーズ焼結体を "fluffy74" と記述する. 石膏は硫酸カルシウム半水和物と水を混ぜたものを容器に入れ, 60°C で一週間程度十分乾燥させたものを使用した. 弾丸には多孔質のアルミナ球を使用した. このバルク密度は $\sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ で空隙率は $\sim 55\%$ である. いずれの空隙率も, 試料の体積と質量を計測することで計算して求めている.

実験には宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて, $2\text{-}5 \text{ km/s}$ の範囲の衝突速度で実験を行った. また, 衝突後から $20\text{-}500 \mu\text{s}$ の間に三回フラッシュ X 線を照射し, イ

イメージングプレートに標的の内部の状態を撮影した。チャンバー内の標的やイメージングプレートの設置は図1のようにした。

実験後、標的に形成されたクレーターの断面を作成しその形状を計測した。fluffy74の場合はのこぎりと眼科用のメスを用いてクレーターの中心を切った。石膏標的の場合は宇宙科学研究所のレーザー測距計を使用し、クレーターの

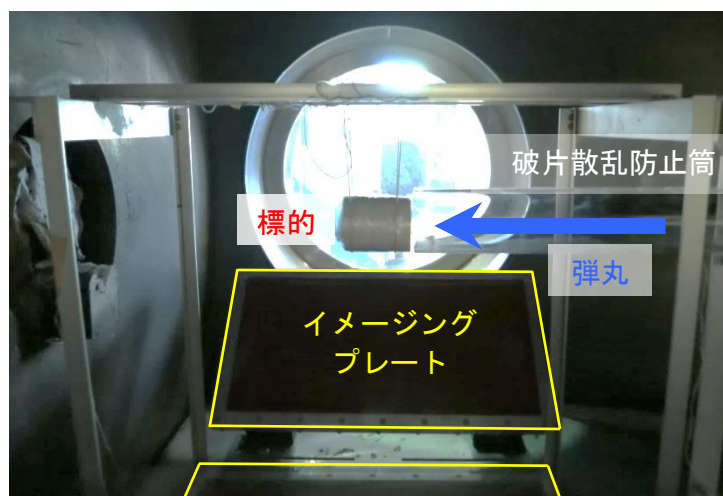


図1 チャンバー内のセッティング。吊るした標的に弾丸を衝突させ、フラッシュ X 線を上部から照射し下部のイメージングプレートに撮影する。

の三次元情報を得ることで断面を作成した。クレーターの体積は、石膏の場合はその三次元情報から求めた。fluffy74 や X 線画像の場合は、直径を深さ方向に一定間隔で計測し、クレーターが円盤の積み重ねであるとして計算した。また、fluffy74 への衝突実験では弾丸の破片がクレーター下部に残っており、回収しその質量を計測した。

結果と考察

クレーターの深さは標的の空隙率が大きい fluffy74 の方が、また、衝突速度が大きい方が深くなった。入り口直径は石膏標的の方が、また、衝突速度が大きい方が大きくなった。石膏標的にはスポールが生じている。内部の形状は、石膏は円錐のように下部に向かうに連れ小さくなっているが、fluffy74 の場合は、クレーターの中心部分が膨らんで入り口直径よりも大きくなっている。この傾向は衝突速度が大きいほど顕著になる。これら形状の違いの要因の一つに、衝撃波の伝播への空隙率の影響が考えられる。標的の空隙率が大きい場合、小さい場合よりも衝撃波が伝わりにくく、破壊が進まなくなるとみられる。そのため、空隙率が小さい場合はクレーターの直径が大きくなる。標的の空隙率が大きい場合は弾丸が破壊されにくくなり、より深いクレーターができるようになると考えられる。

フラッシュ X 線から得られた画像から、クレーターの成長過程が見られる。これより各撮影時間でのクレーター体積がわかり、体積の時間変化を調べることができる。図2はその結果である。縦軸の π_v 及び横軸の π_t はそれぞれ以下のように記される。

$$\pi_v = \frac{\rho_t V(t)}{m_p}, \quad \pi_t = \frac{v_i t}{r_p}.$$

(ρ_t : 標的密度, $V(t)$: 時刻 t でのクレーター体積, m_p : 弾丸質量, v_i : 衝突速度, r_p : 弾丸半径)

● 石膏(50%) (Yasui et al., 2012) ● fluffy74 2 km/s
 ○ 玄武岩-fluffy94 ● fluffy74 3 km/s
 ○ チタン-fluffy87 ● 石膏(40%) 2 km/s
 (Okamoto et al., 2013) ● 石膏(40%) 3 km/s

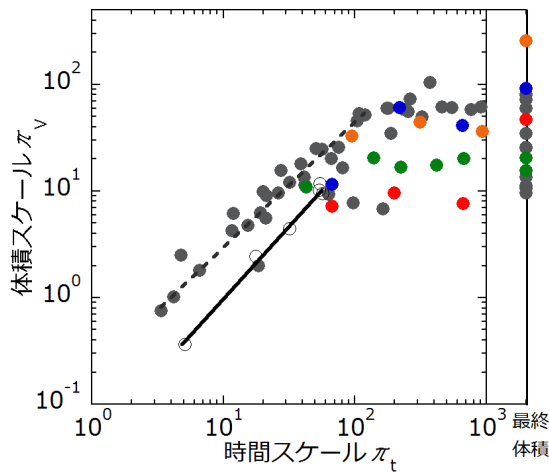


図2 クレーター体積の時間変化. 右に行くほど時間が経ち, 上に行くほど体積が大きくなる事を示す. 色付きが本実験での結果を示す.

○ 石膏 50% (Yasui et al.)
 ● 石膏 40%
 ● fluffy74
 ○ 玄武岩 (Dohi et al., 2012)

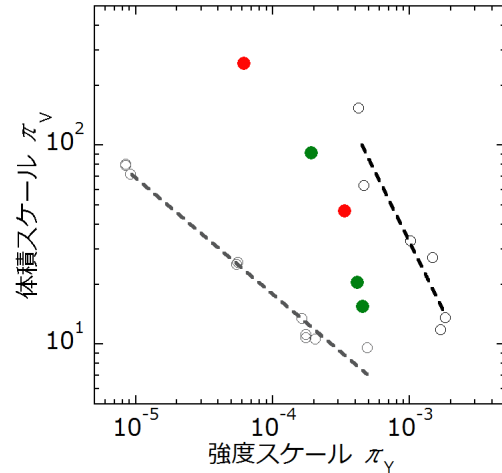


図3 クレーターの最終体積. 色付きが本実験での結果を示す.

石膏や, 空隙率が 94, 87%の中空ガラスビーズ焼結体(fluffy94, fluffy87)への先行研究[2, 4]による実験結果が黒及び灰色で示す. それぞれで似た傾きの二本の直線に沿っている. 今回の実験での観測時刻はその直線よりも時間が経過した後であり, クレーターの成長が緩やかになった部分を見ていることがわかる. 今後, 今回計測した衝突からの時間よりも早い時間で撮影し, 先行研究との結果を比較することが必要である.

クレーターの最終体積を計測した結果が図3である. ここでの横軸 π_γ は以下の通りである.

$$\pi_\gamma = \frac{Y_t}{\rho_t v_i^2}.$$

(Y_t : 標的圧縮強度)

ここで $\rho_t v_i^2$ は衝突時の発生圧力を簡易的に表しており, 強度スケールは標的強度と発生圧力の比であると捉えられる. 空隙率 50%の石膏への衝突実験の結果[2]より体積が大きいクレーターができるが, 玄武岩への場合[5]よりは小さい事がわかる. この結果も空隙による衝撃波の減衰が要因であると考えられる. fluffy74 への場合が石膏と同程度の結果を示すのは, 弾丸の貫入による効果が大きかったことが考えられる.

衝突時に破壊された弾丸のうち, 回収できたものはその質量を計測し, 最大破片質量割合を求めた. 最大破片質量割合は, 破片の中で最大の質量を元の弾丸の質量で割った値である. この結果を図4に示す. 横軸は衝突時の初期発生圧力を, 弾丸の強度で割った値である. この時, 初期発生圧力 P は Rankine-Hugoniot の関係式,

$$P = \rho Uu, U = C + su$$

(ρ : 密度, U : 衝撃波速度, u : 粒子速度, C : バルク音速, s : 係数)

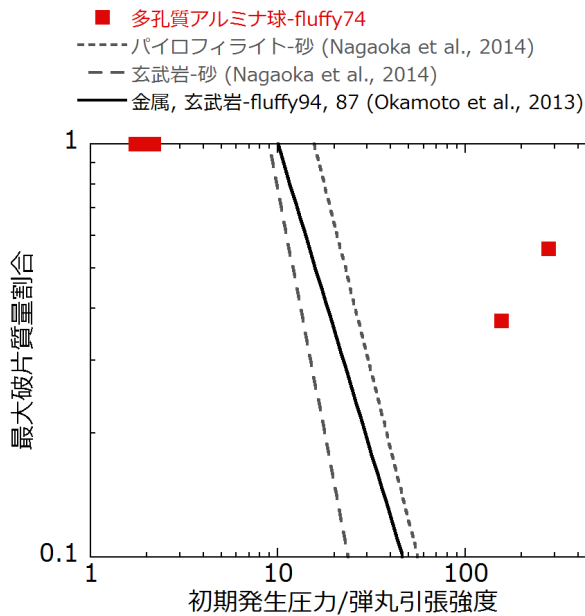


図4 弾丸の最大破片質量割合. 先行研究では弾丸強度の10倍程度の初期発生圧力から弾丸が壊れるとされるが, 今回はそれよりも大きくなった.

から求めた[6]. 先行研究の結果[4, 7]から, 弾丸は弾丸引張強度の10倍程度の初期発生圧力から壊れることが報告されているが, 今回使用した多孔質アルミナ球は, それらよりもさらに10倍程度大きい初期発生圧力で壊れることを示し, 破壊されにくいことがわかった. これは弾丸が空隙を持つことで壊れにくくなったか, 衝突時に弾丸が圧縮され最大破片の密度が元より大きくなったことが原因だと考えられる. 空隙を持った脆性な弾丸が破壊されるプロセスを解明する必要がある.

参考文献

- [1] M. Arakawa and M. Yasui (2011) *Icarus*, 216, 1-9
- [2] M. Yasui et al. (2012) *Icarus*, 221, 646-657
- [3] T. Michikami et al. (2007) *Planetary and Space Science*, 55, 70-88
- [4] T. Okamoto et al. (2013) *Icarus*, 224, 209-217
- [5] K. Dohi et al. (2012) *Icarus*, 218, 751-759
- [6] H. J. Melosh (1989) *Impact Cratering: A Geologic Process*, Oxford University Press
- [7] H. Nagaoka et al. (2014) *Meteoritics & Planetary Science*, 49, Nr 1, 69-79