

太陽系小天体への低密度脆性体衝突における 貫入・圧密・破壊

○原田竣也¹，中村昭子¹，岡本尚也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

太陽系小天体の空隙率は最大で 86% であると見積もられている[1]。また、近年では小天体へ接近しての探査が盛んになっており、これにより小天体表層の衝突クレーターが詳しく観察されるようになった。クレーターは小天体表層の物性を知る手がかりとなり、たとえばそのサイズから小天体表層の強度が見積もられる[2]。また、Stardust による Wild2 彗星探査から、Wild2 のダストに高温起源である CAI に似た物質が含まれていることがわかった[3]。彗星は太陽系外縁由来であると考えられることから、これは彗星が他天体由来の物質を獲得していることを示しているかもしれない。

空隙を持つ標的への衝突実験はこれまでも行われており、さまざまな物質・空隙率の標的が用いられてきた。それにより、衝突によって形成されるクレーターは、標的の空隙率が大きくなるほど深く直径の小さいものとなることがわかっている(e.g. [4])。一方、弾丸に着目すると衝突後標的の内部に貫入することが観察されており、貫入抵抗則を用いることで貫入深さを予想できる[5, 6]。また弾丸は衝突時に弾丸強度の数十倍の発生圧力を受けることで壊れ始めることが示されている[6, 7]。これら先行研究では、金属や岩石やナイロンといった様々な弾丸が使用されているが、いずれも密な弾丸であり、空隙を持っているものは使われていない。しかし、空隙を持つ天体表層に、同じように空隙を持つような天体が衝突することは十分考えられる。本研究では、空隙を含む脆性ながらも、高速度での衝突実験ができるある程度の強度を持つ弾丸を用意し、高空隙率な標的に対する衝突実験を行い、密な弾丸での結果との違いを比較した。

実験方法

空隙を持つ標的として、空隙率が 75-94% の 55 μm 中空ガラスビーズの焼結体(fluffy)，と空隙率が 51-77% の石膏および焼石膏を用いた。また、弾丸の破壊を調べるために SUS，アルミニウム，ナイロンの平板も使用した。弾丸には二種類の多孔質アルミナ球を使用しており、径が 8 mm で空隙率が 25% の物を AL-L，径が 3 mm で空隙率が 55% の物を AL-S とする。この二つの弾丸の圧壊強度はいずれも 10 MPa 程度である。衝突実験には神戸大学の小型ガス銃と縦型火薬銃，宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用い，衝突速度約 35 m/s から 5 km/s の間で実験を行った。

なお、本稿では物質名の後に数字を続けて表記し，それにより物質の空隙率を表すものとする。つまり"fluffy75"ならば，これは空隙率が 75% の fluffy を示す。

実験結果と考察

実験により標的には孔が形成され、弾丸については貫入や破壊が見られた。孔の形状は主に衝突速度や標的の空隙率に依存しており、空隙率が大きい標的ほど深く狭い孔が形成され、弾丸の衝突速度が大きいほど孔の直径が大きくなった。この形状の変化は密な弾丸を衝突させた場合と同様の結果である。

弾丸は標的の内部に貫入しており、壊れている場合や元の形のまま残っている場合があった。貫入中の弾丸は、標的物質からの抵抗を受けることでその速度を落としていき停止すると考えられる。この時の弾丸断面積 S 、抵抗係数 C_d を含めた弾丸の貫入則は次のように表すことができ[6];

$$m_f \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} C_d \rho_t S_f v^2 - S_f Y_{tc}$$

ある時刻 t における弾丸の速度 v を計算していくことで最終的な貫入距離を求められる。 ρ_t と Y_{tc} はそれぞれ標的の密度と圧縮強度であり、 m_f は弾丸の最大破片の質量を、 S_f は弾丸の最大破片の断面積を示す。このモデルより得られた理論的な貫入深さと、実験結果から得られた貫入深さを比較したものが図1である。図内の破線が貫入則と実験結果の一致を示し、その差はいずれも小さいことがわかる。この貫入則はこれまでエアロジェル[5]やfluffy[6]といった高空隙率標的に対する密な弾丸や強度の大きい弾丸を使った実験で適用されてきたが、今回の結果から、弾丸の密度、強度、空隙率といった物性に貫入則が依存しないことが言える。

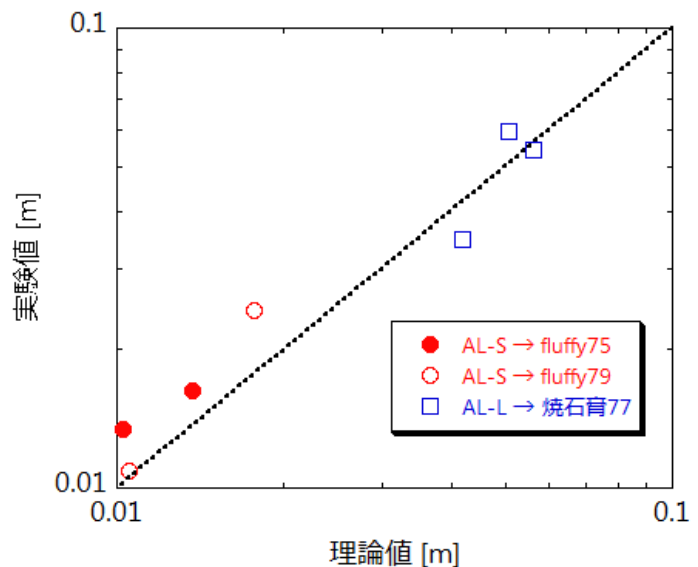


図1 弾丸貫入抵抗則と実験値の比較。

また、孔の内部から弾丸の最大破片を回収し、衝突破壊の程度を調べた。直感的に、衝突速度が大きいほど、あるいは衝突時の初期発生圧力が大きいほど破片は小さくなることが考えられる。ここでは初期発生圧力を、Rankine-Hugoniotの関係式を用いて見積もっている(e.g. [8])。横軸に衝突時の初期発生圧力を弾丸強度で規格化した値を、縦軸に最大破片質量割合を取り、実験結果をプロットしたものが図2である。最大破片質量割合は、最大破片の質量を元の弾丸の質量で割った値であるため、小さくなるほど粉々に壊れたことを示す。これまでの研究結果では、弾丸強度の数十倍程度の初期発生圧力で弾丸が壊れ始めることがわかっている[6, 7]。今回の実験結果からも同様の傾向が見られた(図内①線)。一方、高速度でのAL-S弾丸の衝突実験で大きな弾丸

破片が残る場合が見られた。衝突によって弾丸がどの程度壊れるかを調べるために、衝突後に弾丸が貫入しないようなアルミ板やナイロン板への衝突実験も行い、破壊の程度を確認した。その結果、前述と同様な傾向が見られる一方で、衝突時の初期発生圧力が大きくなるほど最大破片が大きくなる傾向も見られた（図内②線）。これは標的表面に衝突した弾丸が圧密され、固まったためとみられる。

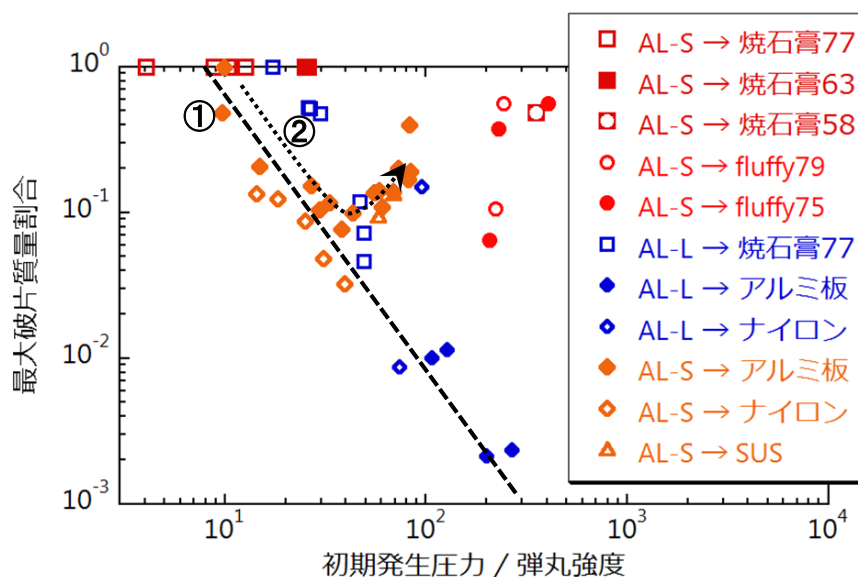


図2 弾丸の最大破片質量割合について、弾丸圧壊強度を発生圧力で規格化した値でプロットしたグラフ。

このような傾向を示す弾丸破片が実際に圧密されているかを確認するために、元のAL-S弾丸と破片の断面をSEMで観察した。図3にその画像の例を示す。ここで、黒を空隙部分、白をアルミナ粒子の部分であるとして、その面積比から断面空隙率を調べた。その結果、元の弾丸の断面空隙率が約53%であるのに対し、アルミ板および焼石膏に衝突した弾丸破片の断面空隙率はそれぞれ約43%、約37%となり、空隙率が小さくなっていることがわかった。また、破片の断面に見られる黒い部分は元の弾丸のそれより細かくなっていることから、構造的な変化を受けていることも示唆される。これらより、板へ衝突した弾丸破片は圧密されており、また、高速度衝突の破片の場合でも弾丸が圧密されたと考えられる。高速度衝突した弾丸は粉々に壊れると思われるが、今回そうならず弾丸破片が残っているのは、空隙を持つような弾丸にはその空隙が潰れる"余裕"があるために圧密されて固まったためだと考えられる。密な弾丸の場合は潰されるような隙間が無いから、このような圧密現象は見られないだろう。

この結果から高速度衝突でも、高空隙率天体に空隙を持つような小天体が衝突することで、衝突体が貫入中に圧密され、粉々にならずに獲得される可能性があると考えられる。ただし、この現象は現在のところAL-S弾丸でしか見られていないため、この弾丸特有のものかもしれない。今後、他の弾丸を使用した場合でも、高速度での破片の圧密や最大破片割合の増大が確認されるかどうかを検証していく必要がある。

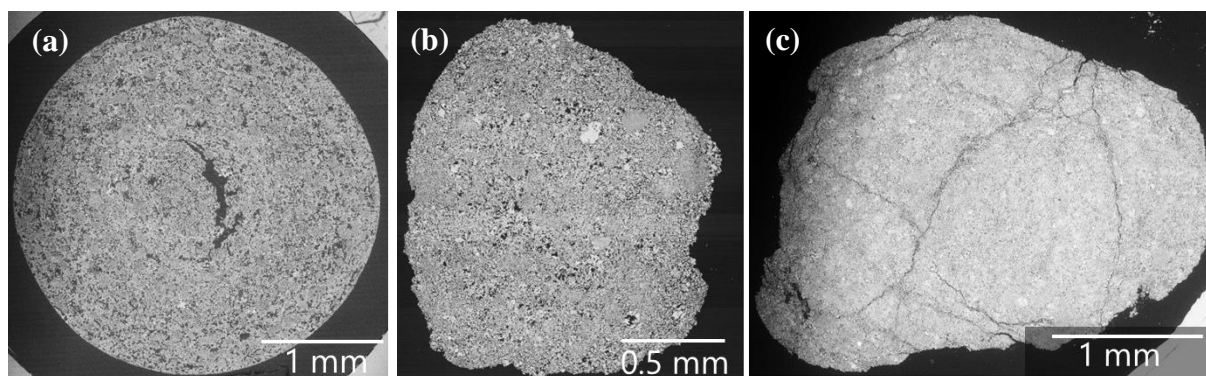


図 3 AL-S 弾丸の断面 SEM 画像. (a)元の弾丸の断面. 断面空隙率は約 53%. (b)衝突速度 198 m/s でアルミ板に衝突させた際の弾丸破片の断面. 空隙率は約 43%. (c)衝突速度 1977 m/s で焼石膏 58 に衝突させた際の弾丸破片の断面. 空隙率は約 37%.

参考文献

- [1] G. J. Consolmagno et al. (2008). *Chemie der Erde*, 68, 1-29.
- [2] T. Okamoto et al. (2015) *Planetary and Space Science*, 107, 36-44.
- [3] D. Brownlee et al. (2012) *Meteoritics and Planetary Science*, 47, 4, 453-470.
- [4] T. Michikami et al. (2007) *Planetary and Space Science*, 55, 70-88.
- [5] R. Niimi et al. (2011) *Icarus*, 211, 986-992.
- [6] T. Okamoto et al. (2013) *Icarus*, 224, 209-217.
- [7] H. Nagaoka et al. (2014) *Meteoritics & Planetary Science*, 49, Nr 1, 69-79.
- [8] H. J. Melosh (1989) *Impact Cratering: A Geologic Process*, Oxford University Press.