

## 小惑星レゴリス模擬標的に対する衝突実験： 他天体由来インパクターの破壊と捕獲

長岡宏樹<sup>[1]</sup>、中村昭子<sup>[1]</sup>、鈴木絢子<sup>[2]</sup>、長谷川直<sup>[2]</sup>

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

多くの隕石は小惑星のかけらであり、コンドライト母天体は太陽系形成のごく初期に熱的活動を停止したと考えられるため、太陽系初期の情報を得られると考えられている。隕石には異なる母天体由来と思われる岩片が混じっているものがあり、例えば、普通コンドライトである筑波隕石には炭素質コンドライトの岩片が含まれている[1]。このような隕石は小惑星表面のレゴリスに他天体由来のインパクターが衝突し、その破片がレゴリスと共に固化することによって形成したと考えられている[2]。また、実際に小惑星表面上に存在し、他天体由来かもしれない物質として小惑星ベスタの表面上に存在する黒い物質がある。これは炭素質コンドライトのインパクターによってもたらされたと考えられており[3]、ベスタ起源だと考えられている HED 隕石に炭素質コンドライトクラストが含まれていること[4]と調和的である。他天体由来の岩片を含む隕石の形成プロセスを調べるためには弾丸破壊や生き残りについて調べる必要があるが、これまで弾丸破壊に着目した研究はあまり行われていない。数少ない実験的研究として、隕石や岩石弾丸を砂標的に衝突させた[5]があるが、これは火星への衝突を模擬しているため衝突速度範囲が狭い(1.35-1.69 km/s)。そこで本研究では、衝突速度を変化させることにより衝突条件と弾丸破壊の程度の間接的な関係性を調べることで、さらには実験で得られた弾丸破片から隕石中の他天体由来と思われる岩片の形成プロセスを推定することを目的とした。これまでに神戸大学では比較的低速度(5-960 m/s)での衝突実験を行い[6]、今回はより高速度での実験を行った。

### 実験方法

弾丸の加速には宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を使用し、弾丸は直径 3.2 mm の玄武岩とアエンデ隕石、標的は粒径数 10  $\mu\text{m}$ 、数 100  $\mu\text{m}$  のシリカサンドを用いた。横撃ちのために標的容器からシリカサンドがこぼれ落ちるのを防ぐために容器表面を紙で覆い、中心に直径 3 cm の穴を開けた。衝突速度は小惑星帯での平均衝突速度 $\sim 5 \text{ km/s}$ [7]を模擬する 2, 5 km/s である。衝突後の弾丸破片は目開き 500  $\mu\text{m}$  のふるいで容器内に残ったシリカサンドのみをふるうことで回収した。

### 結果と考察

初期発生圧力を弾丸の動的引張強度で規格化したものと最大破片質量割合との関係を調べた。初期発生圧力を計算するために必要なシリカサンドの音速は[8]での多孔質石英のバルク密度と音速の関係(図 1)を用いて推定した。具体的には 1430  $\text{kg/m}^3$  の多孔質石英は 1877  $\text{kg/m}^3$  のものと比較して音速が、2750 m/s から 870 m/s すなわち 1/3.2 まで減少する。この関係を用いて、宇宙科学研究所で使用した密度 1300  $\text{kg/m}^3$  のシリカサンドの音速も 1610  $\text{kg/m}^3$  の砂の音速(1700 m/s)から 1/3.2 まで減少するとして 530 m/s と推定した。s に

関してはどの物質も 1 前後であるために今回は 1 と仮定した。動的な引張強度は強度と歪速度の関係式 ( $\sigma \propto \dot{\epsilon}^{3/(m+3)}$   $m$ : ワイブルパラメータ[9]、玄武岩は 9[10]、パイロフィライトは 7.4[6]という値が得られている) から推定した。強度が増加し始めるときの歪速度は 10 とした[11]。低速度実験の結果とあわせて今回の実験結果を図 2 に示すが、km/s オーダーでの最大破片質量割合は比較的 low 速度である 100 m/s オーダーでの衝突実験結果[6]から予想される値よりも大きいことがわかる。

高速度実験での回収破片質量が予想よりも大きくなった要因としては破片同士の付着が挙げられ、付着メカニズムを調べるために走査型電子顕微鏡による観察を行った。図 3 は玄武岩をシリカサンド(粒径~数 10  $\mu\text{m}$ )に 5 km/s(~20 GPa 相当)で衝突させて得られた弾丸破片の電子顕微鏡画像である。色の暗い領域がシリカサンド、明るい領域が玄武岩であり、穴や空洞のような気孔が多く存在していることから熔融したことを示唆している。このことから弾丸破片の熔融後、破片同士やシリカサンドと共に固化したことで弾丸破片質量が増加したと考えた。しかし、岩石は衝撃圧力が数 10 GPa 以上でないと熔融し始めない[12]が本研究では~4 GPa(2 km/s)でも気孔は確認され、アエンデ弾丸破片でも小規模ながら確認した。そこで衝突による温度上昇を計算すると玄武岩弾丸は 2 km/s のとき 330 K、5 km/s のとき 710 K まで温度が上昇し、シリカサンドは 2 km/s のとき 1100 K、5 km/s のとき >1900 K ( $\text{SiO}_2$  の融点) まで温度が上昇するという結果を得た。これにより弾丸破片は高温となったシリカサンド中で加熱されて熔融したと考え、そのイメージ図を図 4 に示す。普通コンドライトのプレインビュー隕石には炭素質クラストのリム部分が溶けているものがあり[13]、これも図 4 で示すように衝突後に高温となったレゴリス中でインパクト破片が加熱されて熔融した結果かもしれない。

#### 謝辞

弾丸破片の薄片作成や電子顕微鏡観察を手伝って頂いた神戸大学大学院理学研究科の野口剛史氏と電子天秤をお貸し頂いた瀬戸雄介助教に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] Nakashima D. et al. (2003) *Earth, Planetary Science Letters*, 212, 321-336.
- [2] Rubin A. et al. (1983) *Meteoritics*, 18, 179-196.
- [3] Reddy V. et al. (2012) *Icarus*, 221, 544-559.
- [4] Zolensky M. et al. (1996) *Meteoritics and Planetary science*, 31, 518-537.
- [5] Bland P. et al. (2001) *Lunar and Planetary Science*, XXXIII, abstract, 1764
- [6] Nagaoka et al. (2014) *Meteoritics and Planetary science*, 49, 69-79.
- [7] Bottke W. et al. (1994) *Icarus*, 107, 255-268.
- [8] Ahrens T. and Johnson M. (1995) Washington DC: The America Geophysical Union, 35-44.
- [9] Grady D. and Kipp M. (1980) *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 17, 147-157.
- [10] Benz W. and Asphaug E. (1994) *Icarus*, 107, 98-116.

[11] Kimberley J. and Ramesh K. (2011) *Meteoritics & Planetary Science*, 46, 1653-1669.

[12] Melosh J. (1989) New York: Oxford University Press. 253 p.

[13] Rubin A. and Bottke W. (2009) *Meteoritics and Planetary science*, 44, 701-724

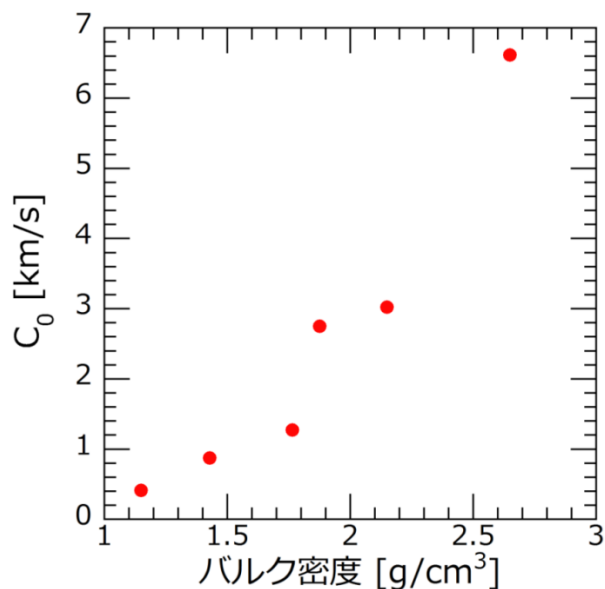


図1 多孔質石英のバルク密度と音速の関係[8]。

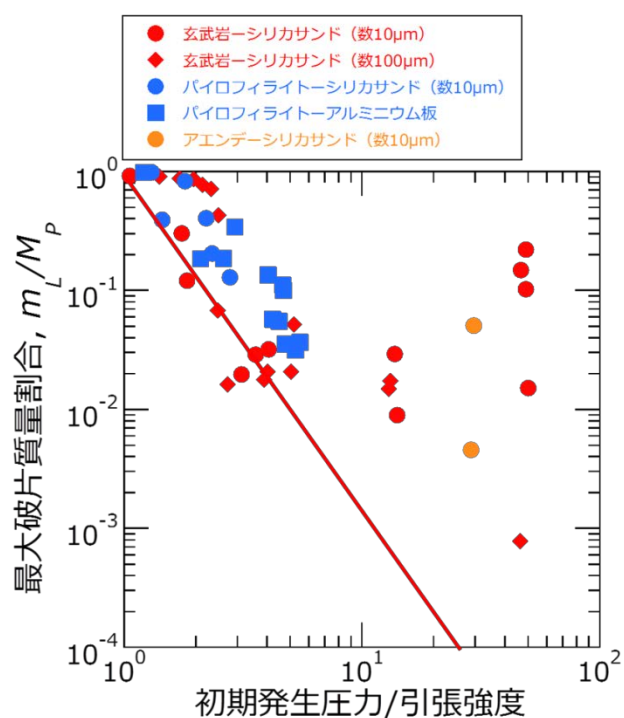


図2 初期発生圧力を動的引張強度で規格化したものと最大破片質量割合との関係。

横軸 10 以下のデータは低速度衝突実験の結果[6]であり、実線は玄武岩弾丸の低速度実験結果をフィッティングしたもの。

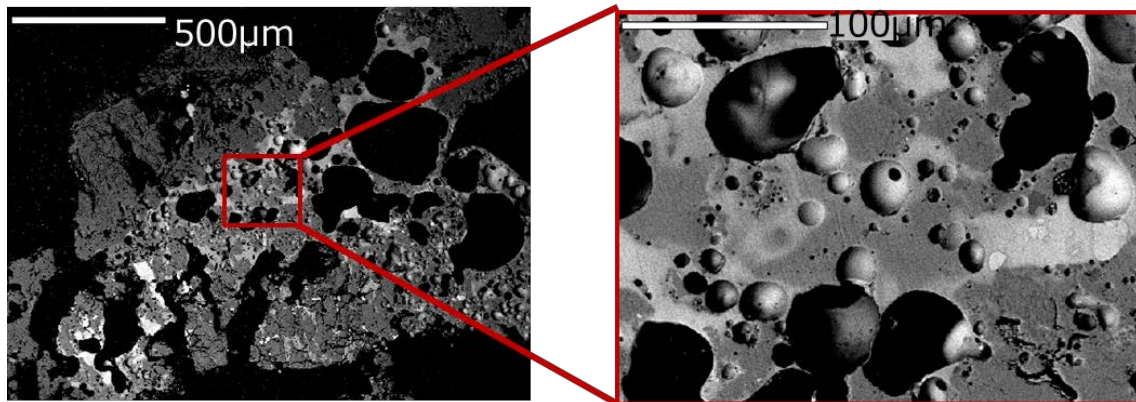


図3 玄武岩を粒径数  $10\ \mu\text{m}$  のシリカサンドに  $5\ \text{km/s}$  で衝突させて得られた弾丸破片の電子顕微鏡画像。左画像の赤い四角を拡大したものが右画像であり、色の暗い領域がシリカサンドで、暗い領域が玄武岩である。

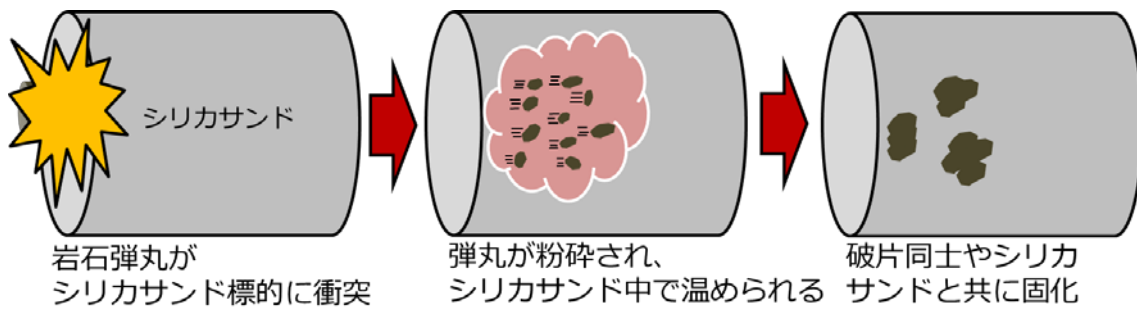


図4 弾丸破片が破片同士やシリカサンドと共に固化するイメージ図。