

普通コンドライト隕石母天体を模擬した石膏・ガラスビーズ混合物の 衝突破壊実験

保井みなみ¹、荒川政彦²

1 神戸大学自然科学系先端融合研究環 2 神戸大学大学院理学研究科

はじめに：

普通コンドライト隕石母天体は、微惑星の衝突によって生じた衝突破片やその衝突破片の再集積によって形成した天体（主に S 型小惑星）であると考えられている。普通コンドライト隕石はミリサイズのコンドリュールと、マトリックスと呼ばれるサブミクロンサイズのシリケートダストから構成される。従って、普通コンドライト隕石母天体を形成した微惑星は、コンドリュールとマトリックスからなると予測される。そのため、普通コンドライト隕石母天体の形成条件を考える上で、上記のような微惑星の衝突破壊と再集積過程を調べるのが重要となる。

本研究では、コンドリュールおよびマトリックスを球形ガラスビーズ、石膏で模擬した混合試料を用いて衝突実験を行った。そして、衝突破片速度と衝突破壊強度に対するガラスビーズ（コンドリュール）の効果を調べた。

実験方法：

実験は、神戸大学に設置された一段式及び二段式軽ガス銃を用いて行った。標的試料は、石膏に直径 100 μ m、1mm、3mm の球形ガラスビーズを混ぜて作成した。普通コンドライト隕石に含まれるコンドリュールの体積含有率が 65-75% と見積もられていることから（Grossman et al., 1988）、ガラスビーズの体積含有率は約 60% とした。また、比較のために、ビーズを含まない純石膏標的も用意した。標的試料は、直径 30mm、高さ 20-40mm の円筒形と、1 辺 10-30mm の立方体を用意した。実験条件は次の通りである。一段式軽ガス銃の場合は、直径 10mm、質量 0.5g のナイロン球を弾丸に用いて、衝突速度を 60-180m/s とした。二段式軽ガス銃の場合は、直径 1.6mm、高さ 2.5mm、質量 7mg の円筒形ナイロンを弾丸に用いて、衝突速度を 3.3-4.2km/s とした。

標的の衝突破壊の様子を観察して衝突破片の飛翔速度を計測するため、高速度ビデオカメラを用いて撮影を行った。撮影速度は毎秒 3000-10000 コマ、シャッタースピードは 1 μ s とした。また、衝突破壊強度を調べるため、実験後に衝突破片を回収して破片の質量を計測した。

実験結果：

① 衝突破片速度

本研究では、衝突点の反対点からの飛翔速度（反対点速度 V_a ）と、衝突面の端点からの飛翔速度（端点速度 V_{c-g} ）を計測し、エネルギー密度 Q との関係性を調べた。エネルギー密度 Q は、弾丸と標的の総質量と弾丸の運動エネルギーの比（ $Q=m_p V_i^2/2(m_p+M_t)$ 、 V_i は衝突速度、 m_p と M_t は弾丸および標的質量）で定義される量である。その結果、2つの破片速度は Q の増加に伴って大きくなった。反対点速度 V_a の場合は、ビーズサイズとビーズ含有率の依存性は見られなかった。しかし、一段式銃の結果（低速度衝突）と二段式銃の結果（高速度衝突）が異なり、同じエネルギー密度では高速度衝突の結果が低速度衝突の結果より約 1 桁小さくなった。各衝突速度での関係性は低速度衝突 $V_a=5.01 \times 10^{-2} Q^{0.81}$ 、高速度衝突 $V_a=6.03 \times 10^{-3} Q^{0.81}$ となった。一方、端点速度 V_{c-g} の場合は、ビーズサイズとビーズ含有率、そして衝突速度にも依存しないことがわかった。そして、 V_{c-g} と Q の関係性は、 $V_{c-g}=9.33 \times 10^{-2} Q^{0.7}$ と表された。

② 衝突破壊強度

実験後に回収した衝突破片の最大破片質量 m_l を調べ、エネルギー密度 Q との関係性を調べた。その結果、標的質量で規格化した最大破片質量（規格化最大破片質量 m_l/M_t ）は、 Q の増加に伴って小さくなった。衝突速度範囲が同じ場合（使用した銃が同じ場合）、同じエネルギー密度では石膏の m_l/M_t がビーズ混合物の m_l/M_t よりも 5~10 倍大きくなった。一方、同じ標的であれば、高速度衝突の m_l/M_t が低速度衝突 m_l/M_t よりも約 1 桁大きくなった。ここで、衝突破壊強度 Q^* は m_l/M_t が 0.5 になるときの Q と定義される。各標的の Q^* を調べた結果、低速度衝突の場合は約 56~450J/kg となり、石膏標的が最大で、3mm 標的が最

小となった。しかし、ビーズサイズやビーズ含有率で系統的な変化は見られなかった。また高速度衝突の 100 μ m 標的の Q^* は約 980J/kg となり、低速度衝突の 100 μ m 標的よりも約 13 倍大きくなった。

議論：

実験結果から、エネルギー密度 Q と規格化最大破片質量 m_i/M_t 、反対点速度 V_a の関係は、低速度衝突と高速度衝突で異なることがわかった。これは、衝突時の発生圧力と衝撃圧の減衰率の違いが、実験結果の衝突速度による違いを反映していると考えた。エネルギー密度は発生圧力と減衰率を考慮したパラメータではない。そこで、発生圧力 P_0 と減衰率 α を考慮した無次元衝突応力 P_1 を用いて実験結果を再解析し、低速度衝突と高速度衝突の結果がうまくスケールされるかを調べた。 P_1 は Mizutani et al. (1990) によって提案された固体物質中の衝撃波生成と伝播を基に作られたパラメータで、 $P_1=(P_0/Y)(m_p\rho_t/M_t\rho_p)^{\alpha/3}$ (Y は引張強度、 ρ_t は標的の密度、 ρ_p は弾丸の密度) と表記される。衝突発生圧力 P_0 は、インピーダンスマッチング法を用いて計算した。また引張強度 Y は、衝突実験で用いた標的と同じ試料 (直径 30mm、高さ 12-18mm) を用いてブラジリアン試験を行い、得られた破壊強度を用いて計算した。そして、各関係において、衝突速度に依存せず全ての結果が最も良く一致する減衰率 α を求めた。その結果を、図 1 に示す。反対点速度 V_a は、 $V^* (=Y/\rho_t C_t, C_t$ は標的のバルク音速で計測値) で規格化し、無次元量とした。計算した結果、減衰率 α が 2 になると各関係において全ての結果が良い一致を示すことがわかった。そして、規格化最大破片質量 $m_i/M_t=12.26P_1^{-1.35}$ 、規格化反対点速度 $V_a/V^*=0.55P_1^{1.04}$ という経験式で表されることがわかった。

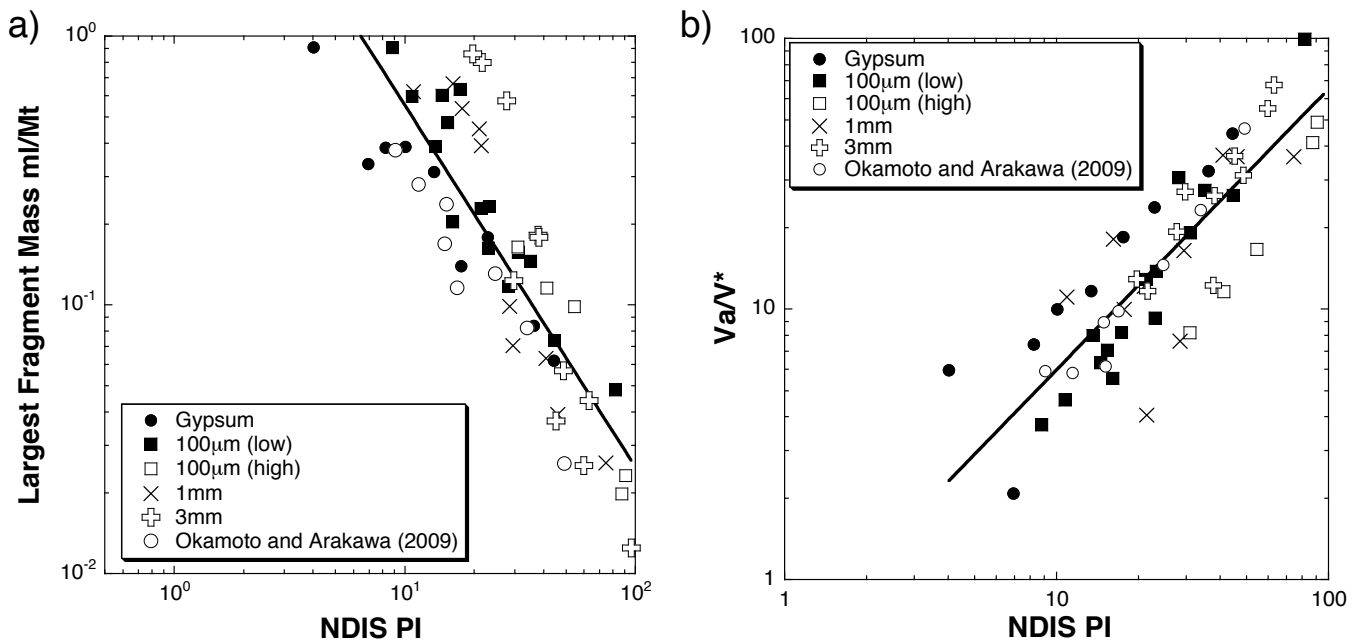


図 1 a) 規格化最大破片質量 m_i/M_t と無次元衝突応力 P_1 の関係 b) 規格化反対点速度 V_a/V^* と P_1 の関係

参考論文：

- Grossman et al. (1988), in Meteorites and the Early Solar System, 619-659.
- Mizutani et al. (1990), Icarus 87, 307-326.
- Okamoto and Arakawa (2009), Meteorit. Planet. Sci. 44, 1947-1954.

※ 本発表内容は以下の論文を基にしているため、詳細は以下を参照してもらいたい。

M. Yasui and M. Arakawa (2011), Impact experiments of porous gypsum-glass bead mixtures simulating parent bodies of ordinary chondrites: Implications for re-accumulation processes related to rubble-pile formation, Icarus 214, 754-765.