

高空隙率標的への高速衝突実験： キャビティ形状と衝突破壊

○岡本 尚也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 宇宙科学研究所

はじめに

太陽系始原天体はその形成期には非常に大きな空隙をもっていたとされ、空隙率にして99%を超えていたことが考えられている。これらの天体は衝突やガス円盤から受ける抵抗による圧縮、また焼結の影響を受けて空隙率を失いながら現在の天体へ成長していったと思われるが、現在でもいくらかの天体は空隙率が非常に高く、86%の空隙率を持つものまで存在する[1]。また、Grand tack modelやNice modelといった太陽系形成モデルでは、巨大惑星に移動に伴い、強度・空隙率・密度の異なる天体同士が衝突した可能性が考えられる[2,3]。よって始原天体の衝突進化を考えるには、空隙率の非常に高い天体への物性の異なる弾丸の衝突現象が重要となってくる。先行研究で使われてきたターゲットの空隙率は80%までであり、これよりさらに大きな空隙を持つ天体への衝突現象を理解するには不十分である。本研究では空隙率80, 87, 94%を持つターゲットを用意した。これに対し的高速衝突実験を行い、形成されるキャビティの形状と衝突破壊強度を調べた。過去に行われた様々なターゲットに対する衝突実験の結果も合わせ、キャビティの最大径・入口径・最大径までの距離、そして衝突破壊強度をそれぞれ無次元化した量を用いて解析を行った。

実験方法

ターゲットには空隙率の異なる3種類の焼結体を用意した。中空ガラスビーズ(直径:55 μm , 殻厚:0.95 μm)を焼結させて空隙率94%, 87%の焼結体(fluffy94, fluffy87)を、粒径5 μm のガラスビーズを焼結させて空隙率80%の焼結体(fluffy80)をそれぞれ得た。弾丸にはチタン(4.5 g cm^{-3})、アルミニウム(2.7 g cm^{-3})、ナイロン(1.1 g cm^{-3})から成る直径1mmと3.2mmの球と直径3.2mm×高さ2.0mmの円柱形の玄武岩(2.7 g cm^{-3})を用いた。衝突速度は1.8–7.2 km s^{-1} の範囲で実験を行った。実験後にターゲットの破壊があったものはその破片を回収し、破壊せずに弾丸がターゲット内部に捉えられものに関してはCT撮像装置を用いてX線透過画像を取得した。

結果 & 議論

衝突トラックの形状は弾丸直径程度の径で広がるニンジン型と、太短いキャビティを持つカブ型の2つのタイプが観察された[4]。図1はカブ型トラックのキャビティを表してい

る。キャビティの形状は、入口径 D_{ent} が弾丸直径 d_p の数倍程度で、最大径 D_{max} が衝突面からいくらか深い場所 L_{max} に位置している特徴を持つ。衝突弾丸を点源として振る舞うことを仮定することで得られたクレータスケーリング則ではクレーター直径 D は以下のように無次元数を用いて整理される[5]。

$$\frac{D}{d_p} \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^{\nu} = H' \left(\frac{Y}{\rho_t v_0^2} \right)^{-\frac{\mu}{2}}. \quad (1)$$

ここで、 Y , ρ_t , v_0 , ρ_p はそれぞれターゲット強度、ターゲット密度、衝突速度、弾丸密度を表す。 H' , μ , ν はスケーリング定数である。 ν は物質によらず典型的に0.4という値をとることが知られており[6],ここでも0.4とした。このスケーリング則を用いて D_{ent} と D_{max} を整理したグラフが図2である。空隙率87%、94%を持つターゲットの実験結果と先行研究で用いられた空隙率>~90%をもつ foamed polystyrene(発泡スチロール)ターゲットの実験結果は似たところにプロットされた。これらをフィッティングしたところ以下の経験式が得られた。

$$\frac{D_{\text{max}}}{d_p} \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^{0.4} = 10^{-1.52 \pm 0.27} \left(\frac{Y}{\rho_t v_0^2} \right)^{-0.49 \pm 0.07}. \quad (2)$$

$$\frac{D_{\text{ent}}}{d_p} \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^{0.4} = 10^{-2.12 \pm 0.39} \left(\frac{Y}{\rho_t v_0^2} \right)^{-0.53 \pm 0.11}. \quad (3)$$

また、ターゲットの空隙率が大きいほど縦軸の値が大きくなる傾向がみられた。これは空隙率が大きいと衝撃波の減衰が速く、小さなキャビティが形成されるためだと考えられる。

弾丸の運動は以下の式で表される[4]:

$$\frac{dv}{dt} = -\alpha v^2, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{C_d \rho_t \pi r_p^2}{2m_p} = \frac{3C_d \rho_t}{8r_p \rho_p} \text{ [1/m]}. \quad (5)$$

ここで v , t , C_d , r_p , m_p はそれぞれ弾丸速度、時間、抵抗係数、弾丸半径、弾丸質量を表す。式(4)から、運動エネルギーと衝突点から進んだ弾丸の距離の関係式が導かれる。弾丸の運動エネルギーが初期の1/e倍になるときの弾丸の進んだ距離を特徴的長さ L_0 とすると L_0 は次式で表される。

$$L_0 = \frac{2\rho_p}{3C_d \rho_t} d_p. \quad (6)$$

抵抗係数は弾丸の変形・破壊が大きくなると共に大きくなることが知られており、初期発生動圧 $\rho_t v_0^2$ とは以下の経験的な関係がある[4]。

$$C_d = (0.65 \pm 0.18) + (0.97 \pm 0.11) \log_{10} \left(\frac{\rho_t v_0^2}{Y_{pt}} \right). \quad (7)$$

ここで Y_{pt} は弾丸の引っ張り強度を表す。式(6)と式(7)を用いて計算し、弾丸直径で規格化し

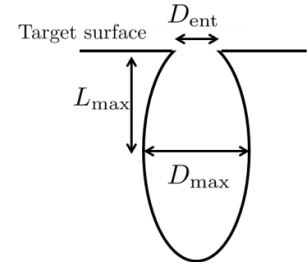


図1 キャビティ形状のスケッチ。

た L_0 と L_{\max} の関係を表したものが図3である。特徴的長さ L_0 が大きくなるほど、最大径までの距離 L_{\max} は大きくなっている。また空隙率依存性は見られない。これから、 L_{\max} は運動エネルギーの減衰、さらに言うと、弾丸の変形・破壊の程度を反映する抵抗係数と弾丸/ターゲットの密度比の両方の影響を受けていることが示唆された。

衝突によって最大破片の質量 M_L が元のターゲットの質量 M_t の半分になるときのエネルギー密度のことを衝突破壊強度 Q^* という。エネルギー密度 Q は弾丸質量に対してターゲット質量が大きいときは以下の式で表される。

$$Q = \frac{\frac{1}{2}m_p v_0^2}{M_t}. \quad (8)$$

図4は最大破片質量割合とエネルギー密度の関係を表したグラフである。弾丸の壊れ方の傾向は似ており、ターゲット空隙率の違いによってはっきりとした違いは表れなかった。 $Q = 10^a(M_L/M_t)^b$ の式を用いてデータフィッティングし、fluffy94, fluffy87, fluffy80の衝突破壊強度 Q^* を求めたところ、それぞれ $6.6 \pm 2.1 \text{ kJ kg}^{-1}$, $3.1 \pm 0.5 \text{ kJ kg}^{-1}$, $2.4 \pm 0.9 \text{ kJ kg}^{-1}$ となり、これらは純氷や玄武岩ターゲットの Q^* よりも大きな値であった。得られた衝突破壊強度を使い、 $\rho_t Q^*/Y$ という無次元量を考え、この無次元量と空隙率との関係を表したものが図5である。先行研究で使われた様々な物質、空隙率を持つターゲットの結果も合わせてプロットされている。 Y にはターゲットの圧縮強度を代入して計算を行った。空隙率の増加とともに $\rho_t Q^*/Y$ は増加している関係にある。この無次元量での解析ではターゲット物質の違いや衝突速度の違いによらず、同じ空隙率において $\rho_t Q^*/Y$ は一桁以内に収まった。

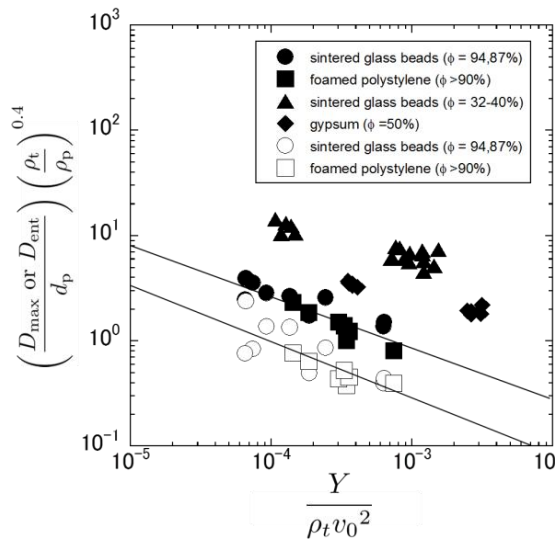


図2 Eq.(1)を用いて D_{ent} と D_{max} を整理したグラフ。色塗りのマークは D_{max} を白抜きマークは D_{ent} に関するプロットである。Hiraoka (2008), Ishibashi et al. (1990), Yasui et al., (2012)の結果をあわせてプロット。

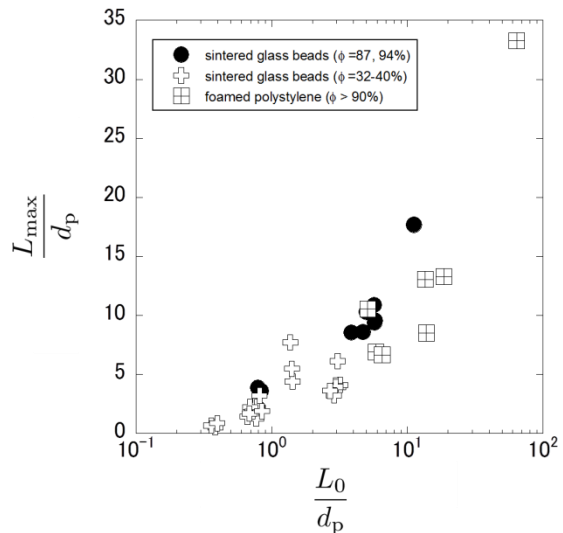


図3 弾丸直径で規格化した L_{\max} と L_0 の関係。Hiraoka (2008)とIshibashi et al. (1990)の結果を合わせてプロットしている。

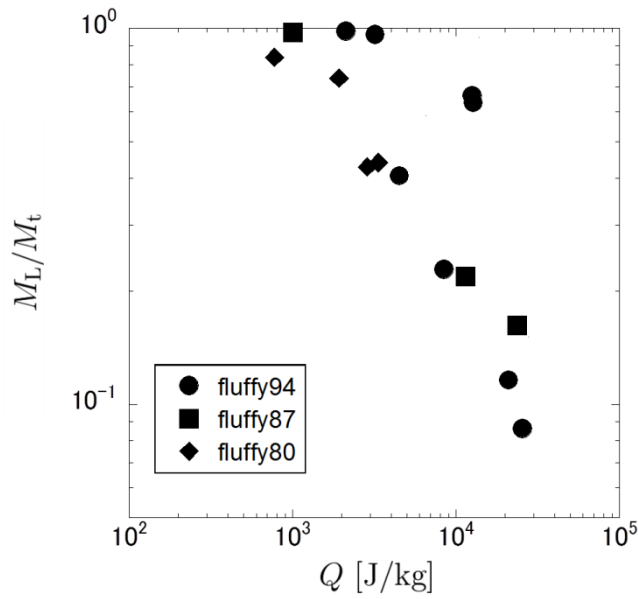


図4 最大破片質量割合とエネルギー密度の関係。

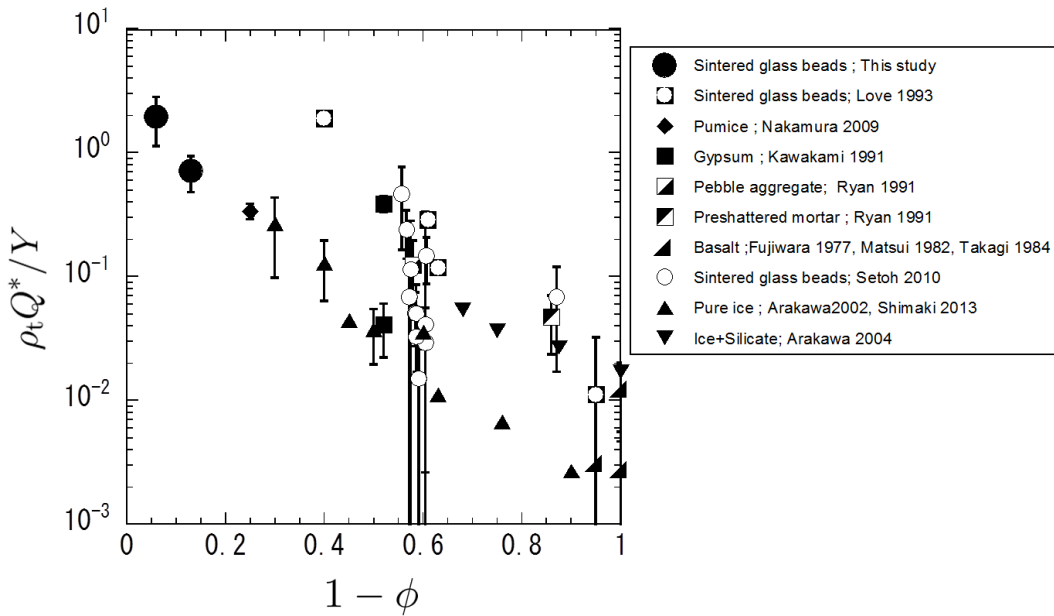


図5 無次元量 $\rho_t Q^*/Y$ と1-空隙率の関係。

参考文献

- [1] Consolmagno, G. J., et al., *Chemie der Erde (Geochemistry)* 68:1-29, 2008.
- [2] Walsh, K. J., et al., *MAPS*, 47, 1941-1947, 2012.
- [3] Gomes, R., et al., *Nature* 435, 466-469, 2005.
- [4] Okamoto, T., et al., *Icarus* 224, 209-217, 2013.
- [5] Housen, K. R. and Holsapple, K. A., *Icarus* 163, 102-119, 2003.
- [6] Housen, K. R. and Holsapple, K. A., *Icarus*, 211, 856-875, 2011.