

高空隙率小天体模擬標的の衝突破壊実験 ：焼結温度の異なる混合物の影響

○村上雄一¹，中村昭子¹，瀬戸雄介¹，長谷川直²

¹神戸大学大学院理研究科，²宇宙科学研究所

1. 背景・目的

太陽系初期の小天体はかなり高い空隙率を持つと考えられ、最大で 86%になる天体もあると考えられている(Consolmagno et al., 2008)。土星の小衛星の場合、それらが氷 (0.9 g/cm^3) と岩石 (2.6 g/cm^3) の混合物だと仮定すると空隙率は約 40~80%と見積もられる。また、近日点が 1~3 AU の彗星の表面は氷粒子が焼結により固化し、Europa では氷地殻が焼結を経験しているかもしれない (Gundlach et al., 2018)。このような、高い空隙率を持ち、混合物を混ぜた焼結体の衝突実験破壊実験の例はあまりないので、高い空隙率を持つ焼結体における混合物の衝突破壊実験への影響を調べた。

2. 実験

2.1. 実験試料

HGB のみ、もしくは HGB とパーライトを混合させた粉を容器に入れ、電気炉で加熱して焼結させて作成した。試料はそれぞれ HGB 試料を 2 種類(HGB87, HGB94)、混合物試料(以下 mix)(mix2:1, mix1:1)を 2 種類の合計 4 種類用意した。標的試料の物性は表 1 にまとめられている。

2.2. 衝突実験

衝突実験は宇宙科学研究所にある二段式ガス銃を用いて、真空条件下で衝突速度 2~7 km/s で行った。弾丸には $\Phi 3.2 \text{ mm}$ のナイロン球 (密度 1.1 g/cm^3) と $\Phi 3 \times 2.5 \text{ mm}$ の木 (密度 0.74 g/cm^3) の円柱を用い、衝突による破壊の様子をハイスピードカメラにより 5400 コマ毎秒で撮影した。

3. 実験結果

3.1. 最大破片質量比とエネルギー密度

最大破片質量比 m_L/m_t (m_L :最大破片質量、 m_t :標的質量)とエネルギー密度 Q の関係は図1のようになり、最大破片質量比がちょうど0.5となるエネルギー密度 Q^* はそれぞれ表1に示す値となった。

3.2. 反対点圧力

反対点圧力 P_a は反対点速度 V_a を用いて(1)式のように表せ、初期発生圧力と反対点圧力は(2)式のように表すことができる。

$$P_a = \frac{\rho_t C_t V_a}{2} \quad (1)$$

$$P_a = P_0 \left(\frac{L_p}{L_t} \right)^n \quad (2)$$

ここで、 V_a は反対点速度、 n は減衰率、 L_t は試料長さ、 L_p は弾丸直径、 C_t は標的のバルク音速、 P_0 は初期発生圧力、 P_a は反対点圧力である。

図2は初期発生圧力と反対点圧力の関係を示し、本研究で用いた試料の減衰率は3~4の間であると考えられることが分かる。

3.3. 減衰率の見積もり

本研究では、衝突破壊において弾丸が標的試料に貫入してから弾丸が破裂するということが見受けられた。そこで、弾丸の貫入を考慮しない場合(n_{suf})とする場合(n_{PD})の2種類の減衰率を求めた(表1参照)。HGB94を除いて、貫入を考慮しない場合は純物質と混合物試料では大きな違いは見られないが、貫入を考慮した場合は純物質試料より混合物試料のほうが大きい値となっている。

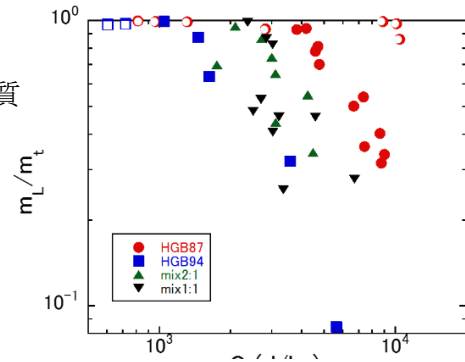


図1 Q と最大は変質量比中抜きはシンボルはクレータリングや弾丸が試料を掠めるように衝突したものになっている。

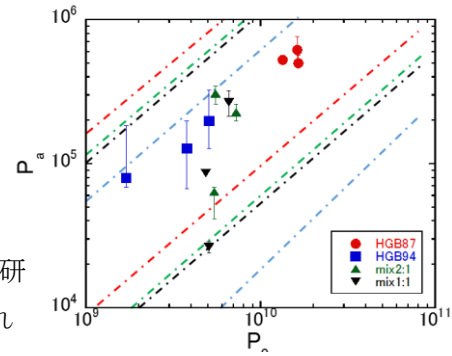


図2 初期発生圧力と反対点圧力点線は、左側が $n=3$ 、右側が $n=4$ の場合を示している。

表1 標的試料の物性値

試料	空隙率 (%)	圧縮強度 (MPa)	Q^* (J/kg)	n_{suf}	n_{PD}
HGB87	85.8 ± 0.3	1.7 ± 0.4	$6.6 \times 10^3 \pm 510$	3.6 ± 0.0	3.9 ± 0.1
HGB94	94.1 ± 0.2	0.09 ± 0.03	$1.8 \times 10^3 \pm 220$	3.2 ± 0.2	3.7 ± 0.2
mix1:1	89.3 ± 0.1	0.25 ± 0.06	$4.0 \times 10^3 \pm 840$	3.5 ± 0.2	4.1 ± 0.2
mix2:1	90.6 ± 0.3	0.09 ± 0.02	$3.6 \times 10^3 \pm 670$	3.6 ± 0.3	4.3 ± 0.2

4. 無次元 Q^* と標的試料の空隙率

4.1. 無次元 Q^*

$$\frac{\rho_t Q}{Y_c} = \frac{\rho_t \frac{1}{2} m_p v_i^2}{Y_c (m_t + m_p)} \sim \frac{\rho_t \frac{1}{2} m_p v_i^2}{Y_c m_t} \quad (3)$$

$$m_t \propto \rho_t L_t^3 \quad (4)$$

$$m_p \propto \rho_p L_p^3 \quad (5)$$

$$\frac{\rho_t Q}{Y_c} \sim \frac{1}{2} \frac{\rho_p v_i^2}{Y_c} \left(\frac{L_p}{L_t} \right)^3 \quad (6)$$

様々な物質の Q^* を比較するため $\rho_t Q^*/Y_c$ を導入する。 $m_t \gg m_p$ とすると、(3)式のように変形することができ、 m_t と m_p は(4),(5)式のように表せるのでこれらを(3)式の最右辺に代入すると $\rho_t Q^*/Y_c$ は(6)式のように表すことができる。ここで、 m_t は標的質量、 m_p は弾丸質量、 ρ_t は標的密度、 ρ_p は弾丸密度、 Y_c は圧縮強度、 L_t は試料長さ、 L_p は弾丸直径、 P_0 は初期発生圧力である。 $\rho_p v_i^2$ は単位体積あたりのエネルギーを表し、圧力の次元を持つので、 $\rho_t Q^*/Y_c$ は距離の3乗比例して減衰すると仮定した際の反対点での圧力を、圧縮強度で規格化したものである。図3に初期発生圧力と $\rho_p v_i^2/2$ の関係を示す。 $\rho_p v_i^2/2$ は初期発生圧力よりも少し小さい値となっていることが分かる。

4.2. 空隙の効果

図4に空隙率と $\rho_t Q^*/Y_c$ の関係を示す。全体の傾向として $\rho_t Q^*/Y_c$ は充填率が小さくなると大きくなっていくが、混合物（黒い四角のシンボルは、純物質とは傾向が異なるということが見受けられる。これは充填率が小さくなると弾丸の持つエネルギーが伝わりにくくなっていること、純物質と混合物では同じ空隙率でも減衰率が異なるということに起因しているかもしれない。

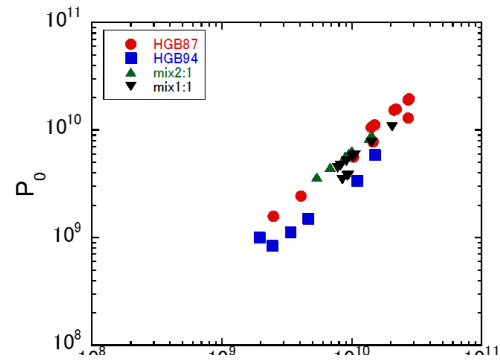


図3 初期発生圧力と $\rho_p v_i^2/2$ の関係

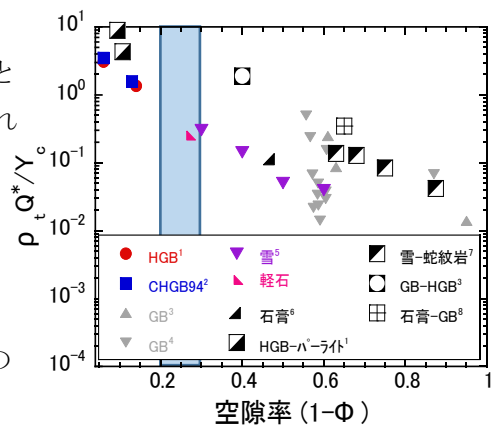


図4 空隙率と無次元 Q^*

Φ は充填率で、1) 本研究、2) Okamoto et al. (2015)、3) Love et al. (1993)、4) Setoh et al. (2010)、5) Shimaki and Arakawa (2012)、6) Okamoto et al. (2009) 7) Arakawa and Tomizuka (2004)、8) Yasui and Arakawa (2011)である。

5. まとめ

高い空隙率を持ち、強度が小さい混合物焼結体を標的を用いて衝突破壊実験を行った。 $\rho Q^*/Y_c$ は充填率が小さくなると大きくなっており、弾丸の持つエネルギーが伝わりにくくなっているかもしれないということや、純物質試料と混合物試料では異なる傾向が見られ減衰率の違いが関係しているかもしれないということが分かった。

参考文献

- Arakawa, M., Tomizuka, D., 2004. Ice silicate fractionation among icy bodies due to the difference of impact strength between ice and ice silicate mixture. *Icarus* 170, 193–201.
- B. Gundlach, J. Ratte, J. Blum, J. Oesert, and S. N. Gorb., 2018. Sintering and sublimation of micrometre-sized water-ice particles: the formation of surface crusts on icy Solar System bodies. *MNRAS* 479, 5272–5287
- Consolmagno, G., Britt, D., Macke, R., 2008. The significance of meteorite density and porosity. *Chemie der Erde - Geochemistry* 68, 1–29.
- Love, Stanley, G., Hörz, F., Brownlee, Donald E., 1993. Target porosity effects in impact cratering and collisional disruption. *Icarus* 105, 216–224.
- M. Setoh, A.M. Nakamura, P. Michel, K. Hirata, Y. Yamashita, S. Hasegawa, N. Onose, and K. Okudaira., 2010. High- and low-velocity impact experiments on porous sintered glass bead targets of different compressive strength: outcome sensitivity and scaling. *Icarus*, 205:702-711.
- Okamoto, T., Nakamura, A.M., Hasegawa, S., 2015. Impact experiments on highly porous targets: cavity morphology and disruption thresholds in the strength regime. *Planet. Space Sci.* 107, 36–44.
- Shimaki, Y., Arakawa, M., 2012. Experimental study on collisional disruption of highly porous icy bodies. *Icarus* 218, 737–750.
- Minami Yasui, Masahiko 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.