

低密度弾丸を用いた 焼結体の高速度衝突実験

○村上雄一¹, 中村昭子¹, 長谷川直²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²宇宙科学研究所

1. 背景・目的

太陽系の小天体の空隙率は最大で 86 % になる天体もあると考えられており (Consolmagno et al., 2008)、カイパーベルト天体や木星・土星軌道の小天体などは氷質であると考えられており、氷質のラブルパイル構造を持つ天体は焼結によって結びついている可能性がある。ここで、焼結とは粒子が融点よりも低い温度のときに起こる、粒子と粒子の間が物質で満たされ結合する過程 (Poppe, 2003) のことである。現在、原始惑星系円盤において、様々な揮発性物質による焼結が起こっているかもしれないと考えられている (Okuzumi et al., 2016)。また、衝突現象は太陽系形成において重要な過程であり、このような天体の衝突現象を模擬するために、低密度の標的を用いた衝突実験が行われてきた (e.g. Okamoto et al., 2015)。本研究では、従来よりも低密度の弾丸も用いて異なる強度の標的を用いた実験を行い、弾丸密度と標的強度の効果を調べる。

2. 実験

2.1. 標的試料

試料は直径 55 μm の中空ガラスビーズをろつぼに入れ、電気炉で 6 時間かけて 800, 650 $^{\circ}\text{C}$ まで上昇させ、6 時間維持しおよそ一日かけて室温まで冷却して作成した。図 1 に、それぞれの焼結体を示す。大きさは 800 $^{\circ}\text{C}$ が $\Phi 58 \times 56 \text{ mm}$, $\Phi 40 \times 29 \text{ mm}$ の 2 種類、650 $^{\circ}\text{C}$ が上底 $\Phi 65 \text{ mm}$ 、下底 $\Phi 78 \text{ mm}$ 、高さ 78 mm の 1 種類で、密度はそれぞれ約 0.36, 0.15 g/cm^3 、空隙率は約 86, 94 % である。図 1 にそれぞれの写真を示す。

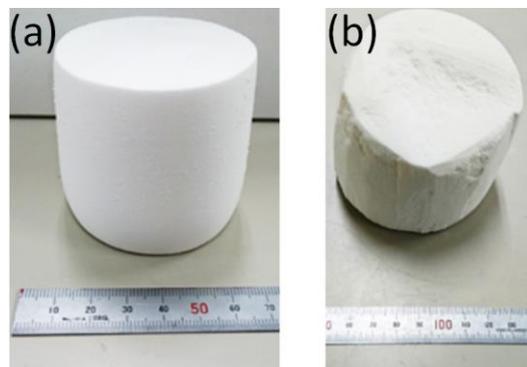


図 1 標的試料。(a) 焼結温度 800 $^{\circ}\text{C}$ の試料、(b) 焼結温度 650 $^{\circ}\text{C}$ の試料。

2.2 標的強度

標的試料を厚み約 2 cm にカットしたのち直径約 1 cm の円柱にくり抜いて、神戸大学にある一軸圧縮試験機 EZ Graph を使用し試験力が最大で 500 N、変位速度は 1 mm/min で圧縮試験を行った。その結果を図 2 に示す。図 2 の横軸の規格化深さとは、試料表面から強度を計測した部分の距離を深さとし、深さを試料の高さで規格化したものである。図 2 から、強度は 2 種類の試料で約 1 桁異なり、試料内部の強度のばらつきは 2 倍以内であることが分かる。

また、図 3 は中空ガラスビーズ焼結体の空隙率と強度の関係を示したグラフで、中空ガラスビーズ焼結体の最大空隙率は約 95% である。図 3 で示すように焼結度合を変化させることによって焼結体は最大空隙率付近で同じ空隙率で強度の値を変化させることが可能である。

2.3 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 $\Phi 3.2$ mm のナイロン球 (密度 1.1 g/cm³) と $\Phi 3 \times 2.5$ mm の木 (密度 0.74 g/cm³) 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. 弾丸密度の効果

図 4 に 800°C の試料の実験結果を示す。ここで、 m_L は最大破片質量、 m_t は標的質量である。最大破片質量比がちょうど 0.5 となるときのエネルギー密度を Q^* とすると、本研究では 7.0×10^3 J/kg、Okamoto et al. (2015) では 7.0×10^3 J/kg となり先行研究と一致した。よって、低密

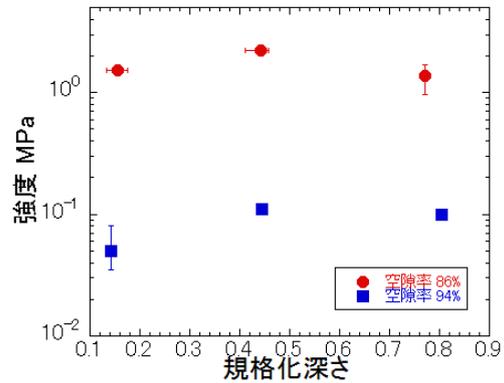


図 2 横軸は試料表面から強度を計測した部分の距離を深さとし、深さを試料の高さで規格化したものである。

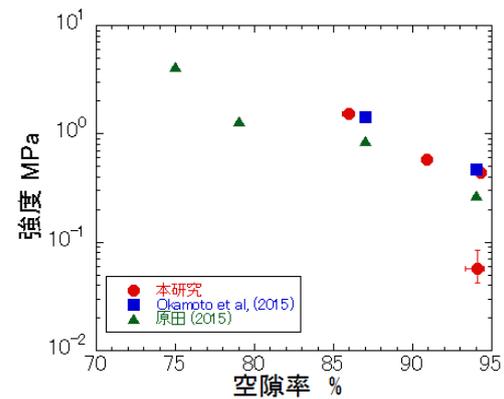


図 3 中空ガラスビーズ焼結体の強度と空隙率の関係を表している。

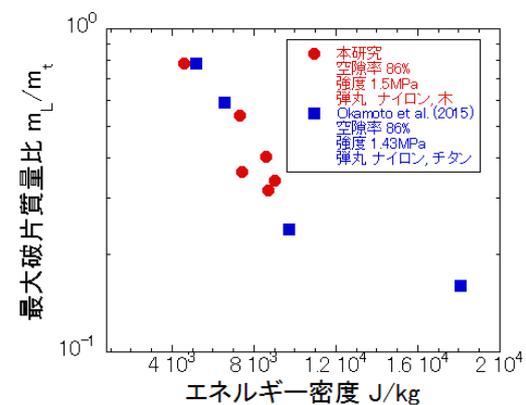


図 4 空隙率が 84 % の試料のエネルギー密度と最大破片質量比の関係を表している。

度の弾丸を用いても衝突結果に影響はないと考えられる。

3.2. 標的強度の効果

図 5 に 650°C の試料の実験結果を示す。本研究では、 $Q^*=2.0 \times 10^3 \text{ J/kg}$ となり、Okamoto et al. (2015) では $Q^*=1.1 \times 10^4 \text{ J/kg}$ となっている。試料の空隙率はともに 94% であるが、圧縮強度が本研究では $0.057 \pm 0.020 \text{ MPa}$ で Okamoto et al. (2015) では $0.43 \pm 0.13 \text{ MPa}$ となっており強度が異なると Q^* も大きく異なることが分かる。

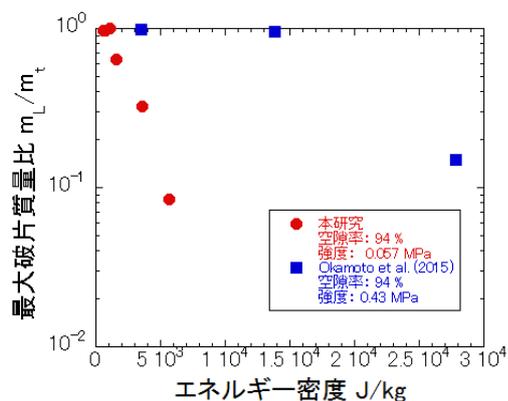


図 5 空隙率が 94 % の試料で強度が異なる場合の衝突結果を示している。

4. 空隙の効果

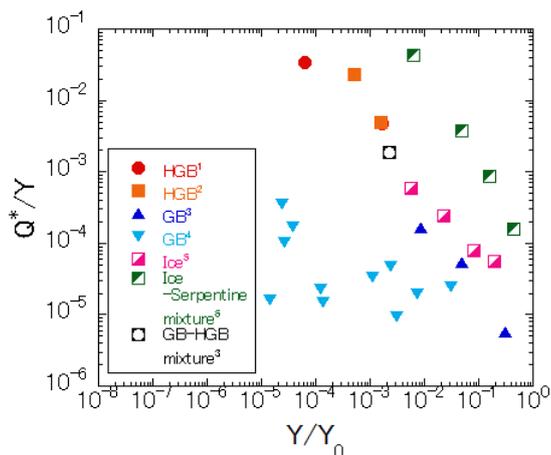


図 6 横軸は試料強度を空隙がない密な場合の強度で規格化したもので、縦軸は Q^* を標的強度で割ったものになっている。; 1 (本研究) , 2 (Okamoto et al., 2015), 3 (Love et al., 1993) , 4 (Setoh et al., 2010) , 5 (Shimaki & Arakawa, 2012) , 6 (Arakawa & Tomizuka, 2004)

図 6 は、横軸は Y/Y_0 、縦軸は Q^*/Y (Y : 圧縮強度, Y_0 : 空隙率が 0 のときの圧縮強度) で、 Y/Y_0 が小さくなるにつれて Q^*/Y が大きくなることが分かる。しかし、同じ空隙率の場合だと強度は異なっても Q^*/Y の値はほぼ一定とみなすことができ、 Q^*/Y は空隙率の関数で表せるかもしれないということが分かった。また、氷蛇紋岩粉末混合物 (Arakawa and Tomizuka, 2009) は、 Y/Y_0 が小さくなるにつれて Q^*/Y が大きくなるという傾向は他のデータと同じであるが、 Q^*/Y の絶対値は異なっていることが分かる。今後、混合物の焼結体を作成し衝突破壊実験を行っていく予定である。

5. まとめ

従来の実験よりも密度が低い弾丸を用いても衝突結果に変化は見られなかった。また、先行研究で用いられた試料と同じ空隙率ではあるが、強度が異なる試料を用いることによって、 Q^*/Y は空隙率の関数で表すことができ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 of impact strength between ice and ice-silicate mixture. *Icarus* 170, 193-201.
- Love, Stanley G., Hörz, F., Brownlee, Donald E., 1993. Target porosity effects in impact cratering and collisional disruption. *Icarus* 105, 216-224.
- 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.
- Setoh, M., et al., 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.
- Shimaki, Y., Arakawa, M., 2012. Experience study on collisional disruption of highly porous icy bodies. *Icarus* 59, 462-477.