

多孔質物質の圧密による衝突発生圧力の吸収について

○小野瀬直美, 東出真澄, 長谷川直 (JAXA)

Email: onose.naomi@jaxa.jp

Abstract: Pore crushing is an important process during the impact cratering on porous targets. This process results in the compaction of the target, and a considerable part of the impact energy is thought to be consumed in this process. In the case of the impact on gypsum target, 31 to 62 % of the impact energy was distributed into compaction¹⁾. In this study, applicability of this effect of compaction to develop lightweight debris bumper shields is considered through impact experiments. Porous aluminum plates were employed as targets and solid aluminum spheres, 3 mm and 0.3 mm in diameter, were used as projectiles. Normal impacts at about 6 km/sec produced valve shaped craters. Damaged depths in targets were at most 71 % of the ones estimated from impact craterings on solid aluminum plate, which sharing the same mass per unit area with this porous aluminum plates. Little high speed ejecta was observed by a high-speed video camera.

1. はじめに

現在, 低高度軌道上には, カタログ化された約 10 cm 以上のサイズのものだけでも 16000 個に及ぶスペースデブリ(以下デブリ)が存在している. 観測できない微小なデブリに至っては, 3500 万個にも達すると言われている. デブリとは, 使用済みの衛星やロケット, ミッションの途中で放出されたもの, これらのデブリ同士の衝突や爆発により生じた破片などにより構成されている. デブリの衝突速度は, 軌道要素にもよるが, 平均 10 km/sec である. 宇宙開発の進歩に伴い, デブリは増加の一途をたどっており, その宇宙機への衝突のリスクも年々高まっている.

これらのスペースデブリへの対策には, デブリ観測, デブリ環境モデル, デブリ防御, デブリ発生防止の 4 つの柱がある. 本研究では, 多孔質物質が衝突により発生す

るエネルギーを吸収しやすいという性質に着目して, これのデブリ防御への応用の可能性を探るものである.

多孔質物質への衝突における衝突エネルギーの吸収に関する研究には次のようなものがある. Housen ら²⁾は, 小惑星マチルダ上の巨大クレーターの形成過程を, マチルダの空隙率の高さ並びに多孔質のターゲットへの衝突における衝撃吸収の観点から説明づけた. また, 多孔質な石膏に対する衝突クレーター形成においては, その衝突エネルギーの 31 - 62 %がターゲットの圧密に消費されていることが報告されている³⁾. さらに, デブリ防御の観点からも, 多孔質金属は有力な候補の一つであると考えられる³⁾.

2. 試験条件

従来のアルミ厚板の衝突試験結果と比較

して多孔質の有用性を検証するため、本研究では多孔質物質として三菱マテリアル製発泡アルミニウムを使用した。試料の表面並びに裏面の写真を Fig. 1 に示す。反射率の高い面を表面と定義した。表面は発泡金属を作成する際にシートに接していた面であり、表面に見られる空隙の直径並びに開孔率はともに低い。一方、裏面には表面にあるものよりも大きな空隙が重なり合うように存在する。開孔の呼び孔径は $300\ \mu\text{m}$ 。空隙率は 82% である。2 mm の試料を積層して厚板を模擬した。重ねられた多孔質金属のプレートの周囲はテープで固定した。

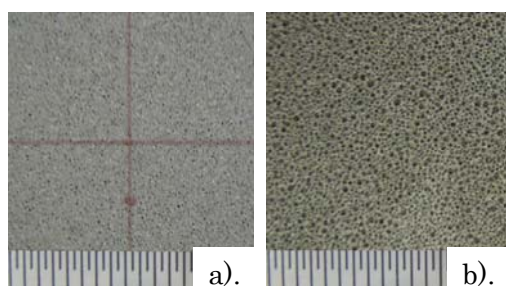


Fig. 1 Surface of a porous aluminum plate: a) the obverse: a surface with higher reflectance, b) the reverse

チャンバー内に設置されたターゲットを Fig.2 に示す。

模擬デブリとして、直径 1 mm のアルミニウム球を用いた。また、本試験における模擬デブリの衝突速度は $6\ \text{km/sec}$ である。デブリ環境モデルによると、低高度軌道で

衝突確率が高いデブリは直径 1 mm 以下のアルミナで、その平均衝突速度は約 $10\ \text{km/sec}$ であるが、二段式軽ガス銃で実現可能な衝突速度であり、他の衝突実験と比較する目的から、実験例の多いこの衝突速度が選ばれた。衝突条件を Table. 1 に示す。

飛翔体加速器には ISAS/JAXA の新型二段式軽ガス銃を用いた。直径 1 mm のアルミニウム球は樹脂製の分割サボを用いて加速された。一回のショットあたり 1 個の球を加速するシングルショット方式で射出した。

衝突の様子は、2 台の高速度ビデオカメラを用いて撮影された。衝突から数 msec までの初期の様子を、株式会社 島津製作所製 HPV-1 を用いて、それ以降 4 sec までを、株式会社 ティ・エム・リサーチ製 E2 を用いて観察を行った。

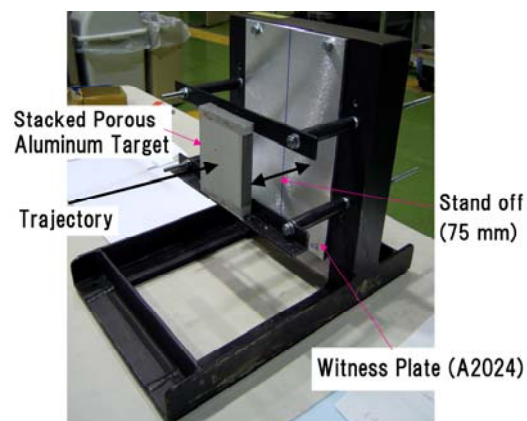


Fig. 2 Target setting

Table 1 Impact Conditions

Shot No.	Projectile		Impact Velocity: v_i [km/sec]	Target Thickness: t_t [mm]	Result
	Diameter: d_p [mm]	No.			
1	1	1	6.070	22.5	Cratering
2	1	1	6.084	14.2	Cratering

3. 試験結果

超高速衝突試験を2回実施し、合計2個の飛翔体衝突データを得た。衝突後の多孔質アルミニウムターゲットの例を Fig. 3 に示す。

ターゲット表面に見られる飛翔体の貫入孔の平均直径は 1.83 mm である。貫入孔の周囲はわずかに盛り上がるが、稠密なアルミニウムに対する衝突クレーターに見られるようなめくれ上がったリムは見られなかった。ターゲット内部には、バルブ状のクレーターがみられ、深さ 4 mm の位置におけるその直径は 6.04 mm だった。バルブに隣接する部分のターゲットには、もともとあった空隙の変形などの圧密の痕跡が見られる。このバルブ型のクレーターはエアロジェルなど空隙率の高いターゲットへの超高速衝突でもみられるものである。クレーターの底部には凹凸がみられた。深さは最大 10.2 mm である。

スタックした多孔質アルミニウム板は 6 枚目を境に容易に分離できた。6 枚目の裏側にはわずかな盛り上がりが生じたが、クラックや背面スポールなどの損傷は見られなかった。6 枚目の裏は、ターゲットの衝突面から 12 mm に相当するため、本実験で、ターゲットに変形が見られたのは、表面から 12 mm 程度と考えることができる。これらの試料に関しては今後さらなる解析を行う予定である。

今回実験を行ったすべての資料において、資料表面には飛翔体直径の 2 倍程度の貫入孔が観察され、内部にはバルブ状のクレーターが確認された。

高速度カメラ HPV-1 の画像では、衝突直後の一フレーム（フレーム間隔は 2 μ sec）

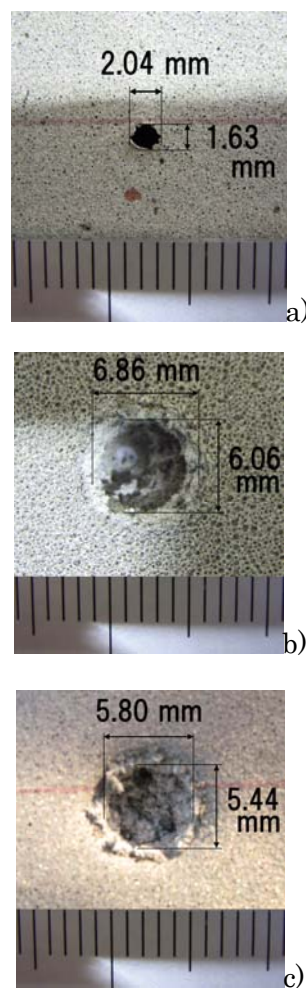


Fig. 3 Target after an impact at 6.070 km/sec, by an aluminum sphere, 1 mm in diameter. a) Surface of the target. b) Reverse side of the second layer, 4 mm in depth, looking towards the entrance of the crater. c) Obverse of the third layer, looking towards the bottom of the crater.

に、ごく薄い靄が観察されたのみで、撮影できた 290 μ sec までの間には、はっきりとした高速度の放出物は確認されなかった。

一方、4000 fps で撮影を行った E2 には、衝突から 7 msec 後から 27 msec にかけて、1 mm 以下のサイズのプレート状の破片が

複数, 10 m/sec 以下で放出されていることが初期解析からわかった. 詳しい解析はこれから実施する.

4. 議論

本実験の結果を Christiansen⁴⁾の式を用いて稠密なアルミニウムに対する衝突における貫通限界と比較する.

衝突速度 6 km/sec での直径 1 mm アルミニウム球の衝突におけるアルミニウム板の貫通限界は 3 mm である. 本実験で使用した多孔質アルミニウムの空隙率は 82 %なので, 発泡アルミニウムの厚さが 17 mm の時, 稠密なアルミ板 3 mm と面密度が等しくなる. しかしながら, 実際に多孔質アルミニウムに形成されたクレーターの深さは 10.2 mm であり, クレーター底部の圧密された領域を含めても 12 mm である. これは, 衝突エネルギーが多孔質ターゲットの圧密によって消費されたため, クレーターの深さ方向への成長が阻害されたからであると考えられる.

本実験では, ターゲットの前方に witness plate を設置せず, 高速度カメラによる撮影のみを行ったため, 定量的な評価は困難であるが, 高速度の放出物があったとしてもごくわずかであると考えられる. これは, アルミニウム板に対する超高速衝突において, 高速度の二次デブリ雲が観測されることとは対照的である. 前方に放出物が少ないように見えるので, デブリを宇宙空間に放出しないという意味でもバンパとしての有用性が高いと考えられる.

5. まとめ

空隙率 82 %, 呼び孔径 300 μm の多孔質

アルミニウムに, 直径 1 mm のアルミ球を 6 km/sec で衝突させた結果, バルブ型のクレーターが観察された. クレーターの深さ並びにターゲットが圧密を受けた深さはそれぞれ, 10.2 mm, 12 mm であり, これは, 同じ面密度を持つ稠密なアルミニウム板の貫通限界のそれぞれ, 60 %, 71 %である. 本実験によって, 微小な空隙を持つ物質の軽量デブリバンパとしての有用性が示唆された.

謝辞

本研究は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースプラズマ共同研究設備を利用して実施されました. 超高速衝突試験においてご協力くださいました, 田端氏に感謝の意を表します. 本研究では鶴井氏のサボを使用しております. ありがとうございました.

参考文献

- 1) Onose, N., Okudaira, K. and Hasegawa, S. (2008) Proceedings of the 40th ISAS Lunar and Planetary Symposium.
- 2) Housen, K. R., and Holsapple, K. A. (2003) *Icarus* 163:102-119.
- 3) Ryan, A., Christiansen, E. L., and Lear, D. M. (2010) Orbital Debris Quarterly News, Volume 14, Issue 1.
- 4) Christiansen, E.L., Meteoroid/Debris Shielding, NASA Technical Publication 210788, 2003.