

発泡アルミニウムに対する衝突クレータ形成 2

○小野瀬直美、東出真澄、長谷川直 (JAXA)

Email: onose.naomi@jaxa.jp

Abstract: Aluminum foam is tested as an important candidate material for a lightweight space debris bumper-shield. Impact experiments were produced on this material, 74, 82, and 90 % in porosity, 0.4 to 1.2 MPa in compressive strength, employing a two-stage light-gas gun in ISAS/JAXA. Aluminum, stainless steel, and copper spheres, 0.3 mm and 1.0 mm, in diameters, were used as simulant debris. All craters on aluminum foam targets show bulb-like shapes, which are narrow in entrances and large cavities inside^{1), 2)}. In order to evaluate the performance of these types of aluminum foam plates, crater depths and diameters of entrance holes are measured. Four sets of experiments indicate that the ballistic limit thickness of aluminum foam is a little larger than the value of averaged crater depths under the same impact conditions. Then the averaged crater depth is compared with the ballistic limit thickness of aluminum plate sharing the same areal weight for each impact conditions, by use of equations in Christiansen (2003)³⁾. Previous study showed that the ballistic limit thickness of aluminum foam, 82% in porosity and having normal strength, is about 60% of that of aluminum plates sharing the same weight per unit mass^{1), 2)}. This study shows as follows: 1) material of projectile has no effect on the ballistic limit thickness of aluminum foam, 2) aluminum foam stops higher velocity debris more efficiently, 3) aluminum foam with higher porosity protect debris efficiently, and 4) aluminum foam with higher material strength keeps diameters of entrance holes small, even at impacts at 7 km/sec.

1. はじめに

宇宙開発の進歩に伴い、地球周回軌道上に存在する運用中の衛星以外の人工物であるスペースデブリは増加し続けている (図. 1)。現在、低高度軌道上のスペースデブリ (以下デブリ) は、カタログ化されている 10 cm 以上のサイズのものだけでも 16,000 個以上存在する。観測の困難な微小サイズのデブリに至っては 3500 万個に達するともいわれている。さらに、デブリ同士の衝突や、推進剤タンクなどの爆発に伴い、デブリの数が著しく増加する危険性も存在する。

デブリの宇宙機への衝突速度はお互いの軌道によって決まるが、低高度軌道での平均衝突速度は 10 km/sec ほどであるといわれている。直径 7 mm のナイロン球でも、衝突速度が 7 km/sec であれば、厚さ 2 cm のアルミニウム板を貫通することができる⁵⁾。つまり、カタログ化されているデブリのみならず、cm サイズ、mm サイズのデブリであっても、宇宙機に致命的な損傷を与える可能性がある

ということである。また、衝突箇所によっては、sub mm サイズのデブリですら、重大な結果をもたらすことになりかねない。

低高度軌道上の無人機をデブリから守るためには、より軽量で効率的なデブリバンパシールドが必要である。その素材の一つとして、著者らは発泡アルミニウムを提案してきた^{1), 2)}。発泡アルミニウムに形成されたクレータの形状は、入り口が

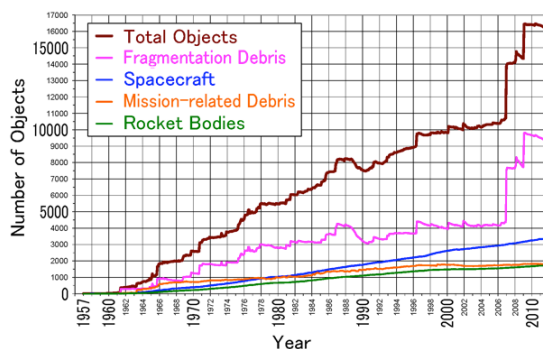


図. 1: デブリ数の増加と、その構成要素。 Orbital Debris Quarterly News⁴⁾より。

飛翔体直径の 1.5–2.5 倍と狭く、内側に広い空洞を持つバルブ型であること、単位面積あたりの貫通限界重量で比較すると、アルミニウム板の約 40%の質量で、同じ飛翔体の貫通を防ぐことがわかった。

多孔質物質は衝突エネルギーを効率よく吸収することで知られている。例えば、多孔質な石膏に対する衝突クレータ形成においては、飛翔体の運動エネルギーの 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⁶⁾。

本研究の目的は、発泡アルミニウムのデブリ防御性能を評価する事である。ターゲット側の条件としては、空隙率ならびに強度を変化させた。また、衝突条件としては、衝突速度ならびに飛翔体密度を変化させた。計測箇所は、クレータ深さと入口径である。クレータ深さは貫通限界と関係するパラメタである。また、入口径が小さければ小さいほど、二次デブリの放出を抑制する効果があると考えられる。

2. 試験条件

本研究では三菱マテリアル製発泡アルミニウムをターゲットとして使用した。空隙率 82%の Normal タイプの試料の表面並びに裏面の写真を図. 2 に示す。本製品は数十 μ の純アルミニウム粒子をバインダとともに基板に塗りつけた後、発泡、焼結させた物であり、通気性に優れた開気孔をもつ。本研究では、微小デブリに対応するために呼び孔径 300 μ m の試料を用いて実験を行った。試料の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おりに基板に接していた面であり、空隙の数密度、サイズともに、裏面よりも小さい。一方、裏面にはより大きな空隙が重なり合うように存在している。

発泡アルミニウムは基本的に薄板の製品であり、2013 年現在手に入る製品の厚さは 0.4 mm、1.0 mm、2.0 mm であるため、これらを重ね、端をテープで固定することにより厚いターゲットを作成した。

デブリ防御性能のターゲットの空隙率依存性を検証するため、従来型の空隙率 82%の物に加え、空隙率 74%、90%の物を用意した。また、ターゲット強度による影響を調べるために、圧縮強度が 2 倍の製品も用意した。Normal type の製品の圧縮強度が 0.4–0.6 MPa であるのに対して、Strong type の製品の圧縮強度は 1.3 MPa である。実験に試用したターゲットの一覧を表. 1 に示す。

模擬デブリとして、直径 1.0 mm 並びに 0.3 mm のアルミニウム、ステンレス、銅の球を用いた。

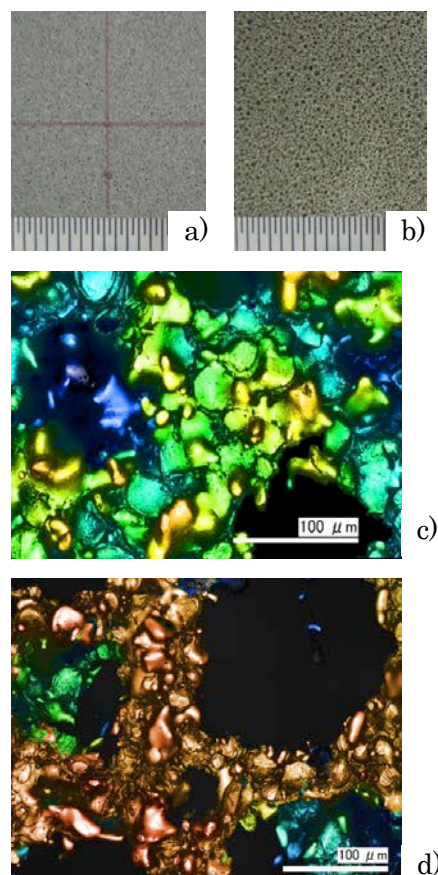


図. 2: 発泡アルミニウムの表面。a)、c)は「おもて」、b)、d)は裏。c)、d)はキーエンス レーザ顕微鏡 VKX-100 を使用して取得。色は高さを表す。

直径 1.0 mm の物は単弾で撃ち、クレータ形状の詳細を観察した。また、0.3 mm の模擬デブリは散弾で撃つことが可能であるため、データ数を稼ぐことができた。

表. 1 Impact conditions and results

Porosity		Thickness	Weight per Unit Area	Type
呼び%	実測%	呼び mm	kg/m ²	
74	74.0	1.0	0.70	Normal
74	74.1	2.0	1.41	Normal
82	80.0	0.4	0.20	Normal
82	82.2	1.0	0.49	Normal
82	81.3	2.0	1.00	Normal
90	88.6	1.0	0.29	Normal
90	88.8	2.0	0.60	Normal
82	80.3	0.4	0.20	Strong
82	82.7	1.0	0.46	Strong
82	81.9	2.0	0.97	Strong

表. 2 Impact conditions and results

Target	Projectile		V_i	BL_p	Hit	D_p/BL_p		BL_m/BL_p		D_{ent}/D_{proj}	
Porosity %	Type	Material	Diameter mm	km/sec	mm		Average	1σ	This Study	Average	1σ
82	Normal	Al	0.3	6.03	5.1	47	0.54	0.05	0.75	2.13	0.21
82	Normal	Al	1.0	6.09	18.3	4	0.54	0.05	0.65	1.55	0.10
74	Normal	Al	1.0	6.70	13.2	1	0.59			3.90	
90	Normal	Al	0.3	6.39	9.3	3	0.40	0.02		2.45	0.44
90	Normal	Al	1.0	6.69	33.0	1	0.41			2.20	
82	Strong	Al	0.3	6.20	5.1	16	0.51	0.06	0.62	2.16	0.27
82	Strong	Al	1.0	6.30	18.3	3	0.48	0.01	0.62	1.78	0.13
82	Strong	Al	1.0	6.91	20.3	2	0.45			2.16	
82	Normal	Al	0.3	4.21	3.9	16	0.57	0.04		2.07	0.25
82	Normal	Al	1.0	4.37	14.1	1	0.66			1.67	
82	Normal	Al	1.0	7.03	20.3	2	0.48			3.04	
82	Normal	Cu	0.3	5.60	9.4	18	0.52	0.07		2.12	0.23
82	Normal	Sus	0.3	4.20	6.7	12	0.73	0.07		1.90	0.17
82	Normal	Sus	0.3	5.70	8.8	5	0.56	0.03		1.97	0.12
82	Normal	Sus	1.0	4.14	23.9	1	0.59			1.30	
82	Normal	Sus	1.0	5.86	31.1	1	0.53			1.47	
82	Normal	Sus	1.0	6.906	34.4	1	0.47			NA	

本試験における模擬デブリの衝突速度は 4 – 7 km/sec であり、ISAS/JAXA の共同研究設備である新型二段式軽ガス銃を用いて実験を行った。実験条件並びに結果を表. 2 に、使用記号を表. 3 に示す。

表. 3 Nomenclatures

Symbols

- V_i : Impact velocity
 BL : Ballistic Limit
 D : Diameter
 D_p : Depth
 ρ : Density

Subscripts

- p : Predicted
m : Measured
ent : Entrance hole's
proj : Projectile's

実測された貫通限界厚さ (BL_m) を、稠密なアルミニウム板の貫通限界厚さから予測される貫通限界厚さ (BL_p) と比較する事により、発泡アルミニウムの防御性能を評価する。 BL_m は、衝突条件を固定し、発泡アルミニウムターゲットの厚さを変化させたとき、その結果が貫通・非貫通の境界となるターゲット厚さである。また、 BL_p は、Christiansen³⁾の式を用いて算出したそれぞれの衝突条件下での稠密なアルミニウム板の貫通限界厚さと、発泡アルミニウムの空隙率とから算出したものである。

3. 結果と考察

発泡アルミニウムターゲット上に形成されたクレータを図. 3 に示す。飛翔体は直径 1.0 mm のアルミニウム球、衝突速度は 6.1 km/sec、ターゲットの空隙率は 82%、強度は Normal である。ターゲット一枚目の表にみられるクレータ入り口は、模

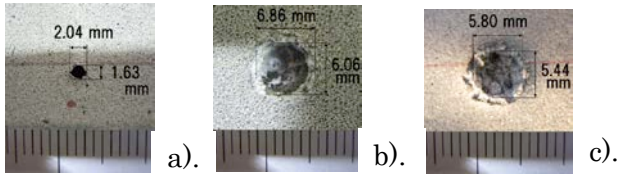


図. 3 : 衝突後のターゲット表面と内部。飛翔体は直径 1.0 mm アルミニウム球、衝突速度 6.1 km/sec。

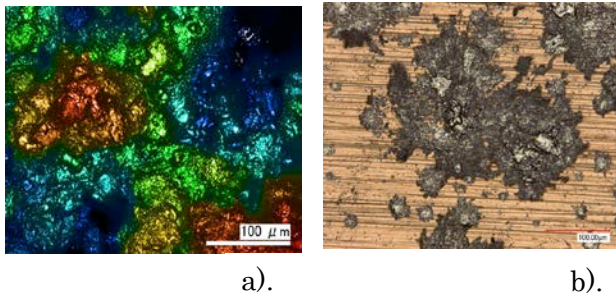


図. 4 : 熔融の痕跡 a)クレータ底。b)ターゲット後方に設置した銅の観察板の表面

擬デブリの直径の 1.5〜2 倍と小さいが、裏には大きな空洞がみられる。これに続くターゲット内部には、直径 7 mm、深さ 10 mm の空洞がある。

クレータ底並びに witness plate に付着した熔融物の顕微鏡写真を図.4 に示す。クレータの壁や底には熔融の痕跡がみられる。また、ターゲット厚さをクレータ深さに近づけた実験では、ターゲットの背後に設置した witness plate にアルミニウムの飛沫が付着した。

アルミニウム球を 6 km/sec 前後で衝突させたとき、飛翔体サイズに関わらず、ターゲットの空隙率が上がるほど BL_p で規格化したクレータ深さは減少する事がわかった。一方、入口径の空隙率による系統的な変化は見られなかった。ターゲット強度をかえた実験では、Strong タイプに形成されたクレータの方が、やや浅い事がわかった。衝突速度が 4km/sec から 7 km/sec まで変化したとき、クレータ深さは 1 mm 程度しか変化せず、従って、 BL_p と比較すると衝突速度が大きいほど、防御性能が高い事が示唆された。一方、衝突速度

が 7 km/sec の実験では、Normal タイプの試料で入口径の拡大が見られたのに対し、Strong タイプの試料では、さほどの拡大が見られなかった。飛翔体密度を変化させたとき、 BL_p で規格化したクレータ深さ、飛翔体直径で規格化したクレータ入口径ともに変化は見られなかった。

4. まとめ

貫通限界厚さはクレータ深さよりも少しだけ大きな値をとる。その入り口は狭く、破片の再放出をとどめるが、ターゲットタイプが Normal の物においては、最高速度である 7 km/sec の試験において入口径の拡大が見られた。

クレータ深さから推測される防御性能は、ターゲット空隙率、ターゲット強度、衝突速度が大きいほど高い。飛翔体密度の影響は見られなかった。

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いただきました、田端氏、黒澤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) 小野瀬直美、東出真澄、長谷川直：発泡アルミのデブリ貫通限界、第 55 回宇科連論文集 3J03, 2011.
- 2) 小野瀬直美、東出真澄、長谷川直：発泡アルミのデブリ貫通限界、第 55 回宇科連論文集 2C11, 2012.
- 3) Christiansen, E.L., Meteoroid/Debris Shielding, NASA Technical Publication 210788, 2003.
- 4) Orbital Debris Quarterly News, Volume 16, Issue 1.
- 5) Private communications スペースプラズマ共同実験設備の調整時の試射による結果。
- 6) Onose, N., Okudaira, K. and Hasegawa, S. (2008) Proceedings of the 40th ISAS Lunar and Planetary Symposium.