

多孔質物質への衝突クレーター形成：発泡アルミ、石膏の場合の比較

○小野瀬直美（総研大）、東出真澄(JAXA)、長谷川直（JAXA）、安部正真(JAXA)

Email: onose@planeta.sci.isas.jaxa.jp

Abstract: Impact cratering experiments on gypsum targets at around 7 km/sec were produced. Their sizes are consistent with the scaling law, which is defined for gypsum craters with impact velocities range from 1 to 4 km/sec. Depth-diameter ratios indicates that the higher the impact velocity, the shallower the crater. Craters on gypsum targets are compared with those on aluminum foam plates. There are some commonalities in craters on these two kinds of porous materials, though their base materials are different. First, compaction is the most significant mechanism in impact craterings in extra porous targets. Second, impact energy is deposited deeper in the target compare to the position in the non-porous targets, even in the relatively high impact velocity region.

1. はじめに

地球周回低軌道上のスペースデブリ（以下デブリ）は、宇宙開発の進展に伴い増加の一途をたどっている。デブリの数は、カタログ化されている10cm以上のサイズのものだけでも16,000個以上存在する¹⁾。これらのデブリの衝突速度は、お互いの軌道により大きく異なるが、平均10 km/sec程度である。つまり、1mm程度の微小なデブリであっても、人工衛星に重大な結果をもたらす危険性がある。

軌道上の衛星をデブリ衝突から守るために、より計量で効率的なデブリバンパを考察する事は必用不可欠である。その素材の一つとして、著者等は発泡アルミニウムを提案してきた^{2), 3)}。単位体積辺りの貫通限界重量で比較すると、この多孔質素材はアルミニウム板の約40%の質量で、同じサイズの飛翔体の貫通を防ぐ事がわかった。

多孔質物質はターゲット圧密の過程で、飛翔体の衝突エネルギーを効率よく吸収する事で知られているが、既存の研究の多くは車両等の衝突を想定とした低速度領域でのものであり、デブリ衝突に応用できるような高速度領域での研究は、まだ少ない。よって、多孔質物質に対する高速度衝突

に於いてクレーターが形成されるメカニズムを調べる事は、効率の良いデブリバンパの開発にも有益であると考ええる。

本研究では、多孔質物質に形成されたクレーターのサイズ並びに形状の衝突速度依存性を、新しく得られた石膏ターゲットに対する7 km/secでの衝突のデータを加えて検討する。

2. 試験条件

多孔質石膏ターゲットに対する衝突クレーター形成実験を行った。石膏ターゲットは、粉末状の半水石膏と水を混和し直方体の型に流し込み、固化、乾燥させたものである。飛翔体は直径7 mmナイロン球を用い、宇宙科学研究所共同研究設備である二段式軽ガス銃を用いて7 km/secに加速した。クレーター体積の計測には同所の3Dスキャナをお借りした。

本校で使用する記号を表1に、衝突条件の詳細と実験結果を表2に記す。衝突速度6.09 km/secのものは昨年度の試験であるが、体積の計測が今年度にずれ込んだためここに再掲するものである。発泡アルミニウムのデータは2), 3)の、石膏の低速度衝突の結果は4), 5)の値を用いた。

表. 1 Nomenclatures

v_i	: Impact velocity
V_c	: Volume
D_p	: Depth
D_{cc}	: Crater Diameter
D_{cb}	: Pit Diameter
a, c	: Coefficient

表. 2 Impact conditions and results

v_i	V_c	D_p	D_{cc}	D_{bc}
km/sec	ml	mm	mm	mm
6.09	33.0	31.9	92.5	33.5
7.61	44.4	34.5	88.8	40.4
7.18	46.8	32.3	93.4	42.0

3. 実験結果と議論

石膏ターゲット上に形成されたクレーターを図. 1 に示す。本年度の実験で得られたものは右中 e) であり、他は比較のための同じ飛翔体を用いた過去の実験の成果である。衝突速度が a) から e) の順で大きくなる。図. 2 にはこれらのクレーターの断面の模式図並びに計測を行った点を示す。ただし、断面の計測は破壊計測であるため、まだ実施できていない。異なる衝突速度での実験結果より、衝突速度の増加に従い Spall 破壊された領域が広がって行くこと、また、衝突速度が 0.37 km/sec までの領域と 0.71 km/sec 以上の領域ではクレーターの形状が異なる事がわかった。前者では飛翔体の衝突断面積分のみが弾の進行方向に向けて単純に押しつぶされるのに対し、後者では衝突点から飛翔体数個分潜った位置を中心としたバルブが形成され、壁面は一様に圧密されている。衝突速度の増大に従って、Spall 破片の厚みが大きくなると、クレーター入り口径と最大径の差が小さくなる傾向が見られる。

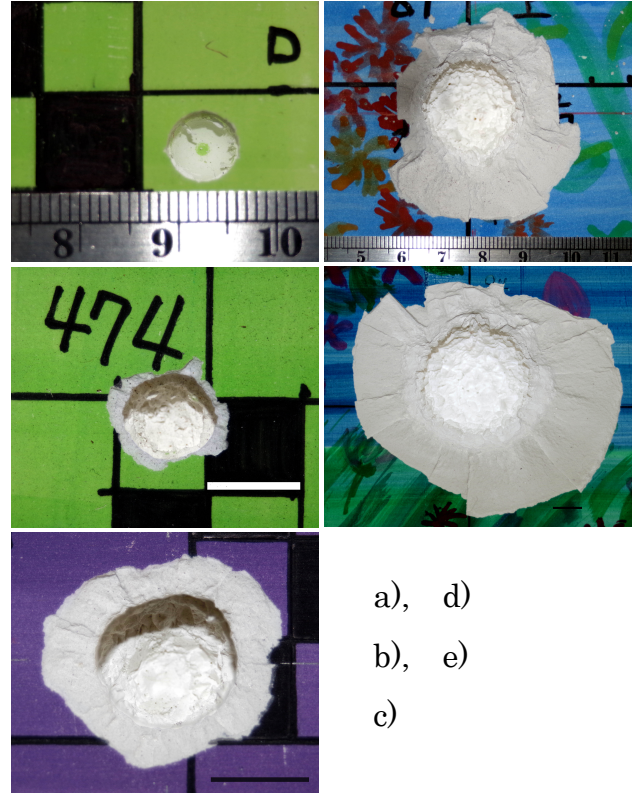


図. 1 : 直径 7 mm ナイロン球により石膏ターゲット上に形成されたクレーター。被写界深度の都合で、表面と底面の 2 枚の画像を合成したものを含む。a) 0.36 km/sec, b) 0.71 km/sec, c) 1.06 km/sec, d) 3.3 km/sec, e) 7.18 km/sec。

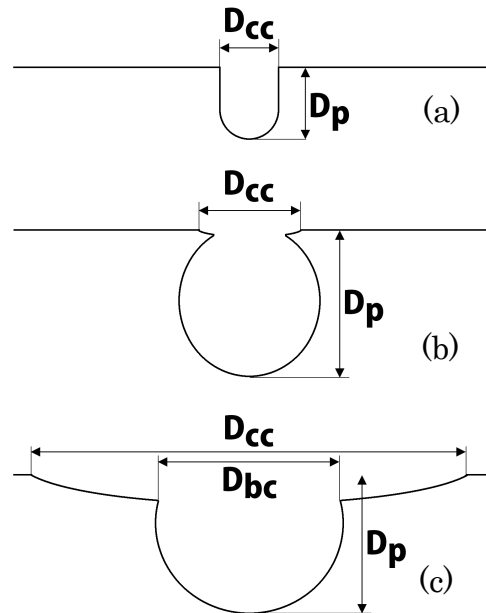


図. 2 : 多孔質物質に形成されるクレーター断面の模式図と計測箇所。a) 単純圧密の場合, b) 入り口の狭い場合, c) 広い Spall 領域を持つ場合。

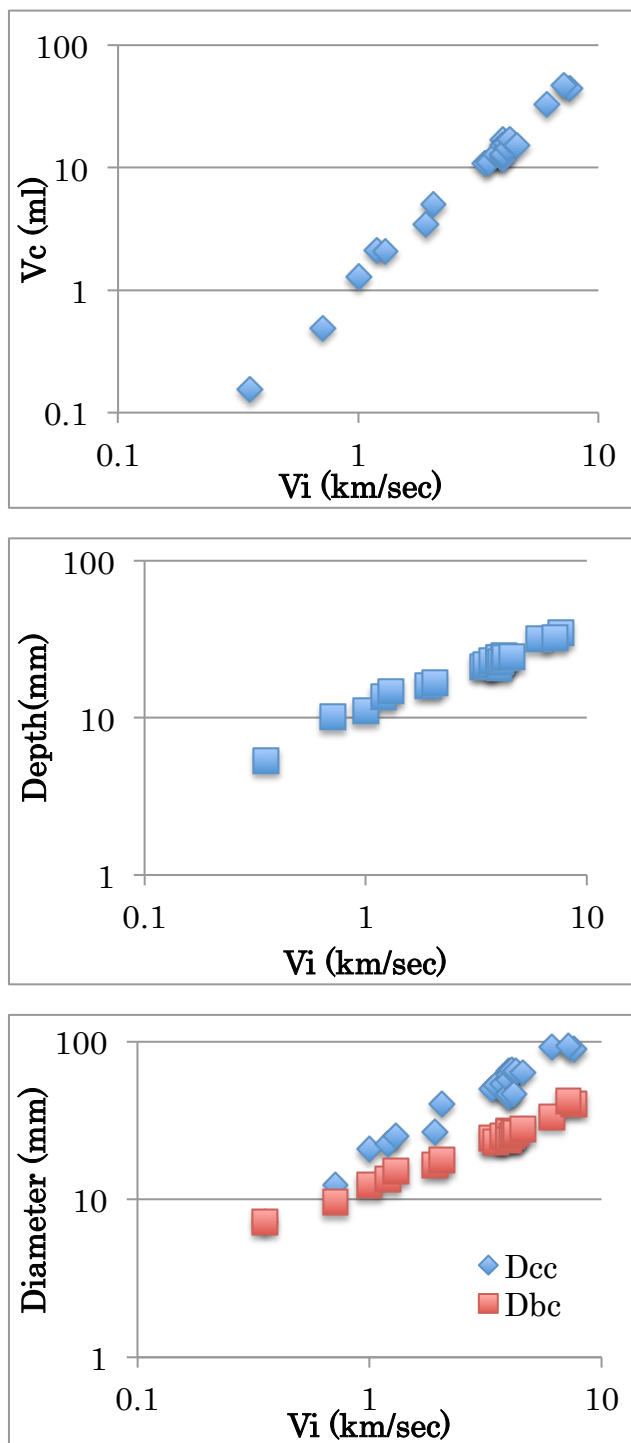


図. 3：石膏ターゲット上に形成されたクレーターサイズの衝突速度依存性。a) 体積, b) 深さ, c) 直径。

クレーターサイズの衝突速度依存性を図. 3 に示す。本実験で得られたデータは、衝突速度 1～4 km/sec での既存の実験結果と調和的である。これを、例えば、クレーター体積 V_c に対して、以下の式でカーブフィットする事により求めた衝突速度 v_i のべき係数 a の値を表. 3 に示す。

表. 3 Impact conditions and results

	This Study		Gault
	Value	1 σ	Value
V_c	1.89	0.07	2.27
D_p	0.53	0.02	0.71
D_{cc}	0.80	0.07	0.74
D_{bc}	0.63	0.03	-
D_p / D_{cc}	-0.32	0.05	-
D_p / D_{bc}	-0.07	0.02	-

$$V_c = C_{V_c} \times v_i^{a_{V_c}}$$

Gault (1972)の岩石上に形成されたクレーターサイズの飛翔体運動エネルギー依存性を衝突速度依存性に焼き直したのも表. 3 に示す。Gault のデータと比較すると、石膏ターゲット上に形成されたクレーターサイズの衝突速度依存性は岩石上の場合よりやや弱い。これは、本研究で用いた石膏ターゲットが多孔質である事に起因する可能性がある。

クレーター形状を表す変数として、深さを直径で割った値の衝突速度依存性を図. 4 に示す。石膏ターゲット上に形成されたクレーターは衝突速度が 1 km/sec 以上の高速度域に於いては、深さと pit 部分の直径がほぼ等しいが、衝突速度の増加に従って、ごくわずかに縦横比が減少している。クレーター全体としては、衝突速度の増大に従い、pit の周りに形成される、Spall 領域が広がり、結果としてより浅いクレーターが形成される。

衝突速度が 6 km/sec の時の深さ直径比を、他の多孔質物質、発泡アルミにおけるデータと比較したものを図. 5 に示す。発泡アルミのデータは、2)、3)の物を使用した。発泡アルミと石膏では母材が

異なるが、全体的な傾向として、空隙率の上昇に伴い、より深いクレーターが形成されていると考えられる。これは、空隙率が60%以上の高空隙率の領域に於いては、母材の性質より空隙率そのものが重要になってくるという可能性を否定するものではない。

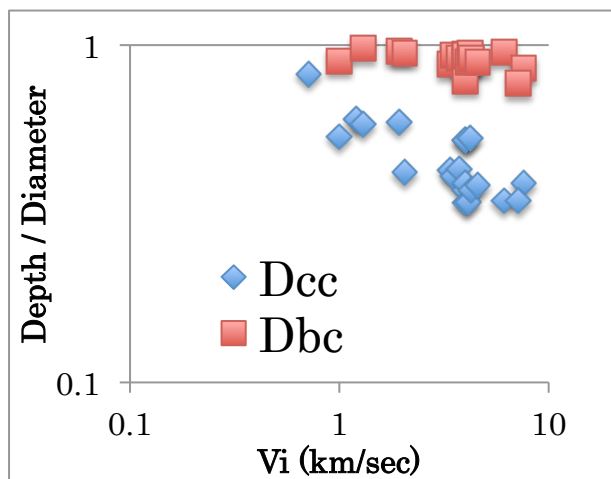


図. 4：石膏ターゲット上に形成されたクレーターの深さ直径比の衝突速度依存性

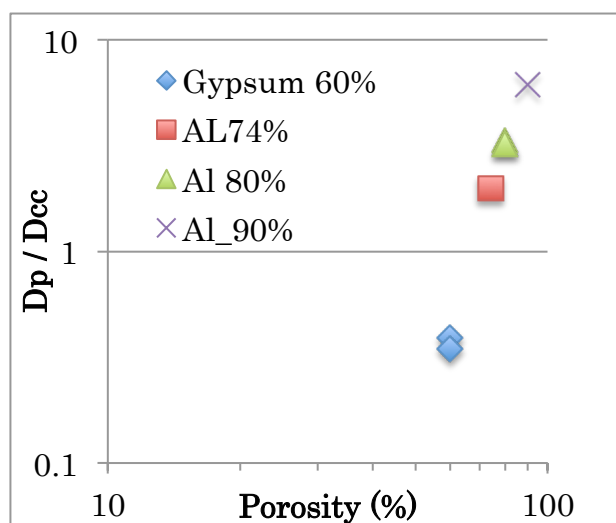


図. 5：高空隙率ターゲットに形成されたクレーターの深さ直径比。衝突速度は6 km/sec 前後のもの。

4. まとめ

多孔質物質、特に多孔質石膏に対する衝突クレーター形成に於ける衝突速度依存性を検証するために、7 mm ナイロン球、7 km/sec での実験を行

った。クレーターサイズ、クレーター形状の衝突速度依存性は、これまで行って来た4 km/sec までの実験データと矛盾しない事がわかった。本データを加えた、衝突速度が1 km/sec 以上のものを集めてカーブフィットすると、衝突速度依存性を表すべき係数の値は、Gaul の岩石に対する値よりもやや小さい事がわかった。最後に、母材の異なる発泡アルミのデータと較べると、高空隙率領域に於けるクレーター形状は母材よりも空隙率そのもののへの依存性の方が大きい可能性がある。

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、田端博士、黒澤博士、鈴木博士に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Orbital Debris Quarterly News, Volume 16, Issue 1. など
- 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 3J03, 2011.
- 3) 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.
- 4) Onose 2007 (Thesis) Mass-velocity distribution of fragments in oblique impact cratering on gypsum: Two groups of fragments and their ejection mechanisms
- 5) Onose, N., Okudaira, K. and Hasegawa, S. (2007) Proceedings of the 37th ISAS Lunar and Planetary Symposium.