

たんぽぽ捕集パネルの微小デブリ衝突頻度解析

○栗原 愛美（法政大），東出 真澄（JAXA），高柳 優，新井 和吉（法政大）
矢野 創，長谷川 直（JAXA），山岸 明彦（東京薬科大）

1. 緒論

宇宙空間には寿命を終えた人工衛星やロケットの残骸などの大きな物から，塗料やボルトといった小さな物まで，様々な物がデブリとして多数存在している．近年の各国の宇宙産業の発展により，利用頻度の高い低高度軌道(LEO)上のスペースデブリは特に増加しており，中でも直径1 mm以下の微小デブリは衛星の運用中に1回以上衝突する状況である¹⁾．微小デブリの衝突でも，衛星にとってはその任務遂行能力を奪う危険性があるが，微小デブリの分布が不明であってはデブリ衝突リスクの評価を行うことはできない．しかし，微小デブリは地上観測網からは検出できないため，モデルを用いた分布予測が必要となる．ESAとNASAは，スペースシャトル等の軌道上のデータを基にしたモデルを作成しており，このモデルを用いて予測を行うことができる．また，デブリ環境は変化していくため，常に最新のデータが必要となるが，LEO上で曝露実験を行うことで，これらのデータは取得可能である．

本研究は，「たんぽぽ」^{2,3)}の一部として実施されている．このプロジェクトは，国際宇宙ステーション(ISS)上で微生物や宇宙塵及び有機物を捕集する一方で微生物や有機物を曝露し，変成の様子を調べるというものである．しかし，実際には微生物の捕集と同時に微小デブリが衝突すると考えられるため，デブリのフラックス評価も行うことができる．デブリ分布モデルから予想される衝突頻度と，捕集実験で宇宙空間に曝露された捕集パネルに生じた衝突痕とを比較し，分布モデルの妥当性を評価する．

本研究の目的は2つある．1つ目は，ISS軌道上における微小デブリの衝突頻度の評価，2つ目は，衝突痕から衝突してきたデブリのパラメータを算出する方法の検討である．前者では，衝突頻度解析ツールを用いて捕集パネルへのデブリ衝突頻度予測，後者では，デブリ衝突で生じる衝突痕とデブリ衝突エネルギーとの関係式の導出を行う．

2. 衝突頻度解析

デブリ環境モデルには，ESAのMASTER-2009を用いた．また，デブリ衝突頻度の予測には，JAXA開発のスペースデブリ衝突損傷解析ツールTurandotを用いた．このツールでは，3D形状のモデリングと軌道条件の設定をし，解析を行うことで，MASTER-2009のデータを出力させ，面素に対する衝突頻度を算出した．

まず，簡略化したISSモデルを作成した(図1)．主要部分は，実際のスケール・構造を再現している．また，曝露実験に用いるExHAMを模擬した460 mm×410 mm×270 mmの直方体(図2)も取り付け，解析を行った．捕集パネルはExHAM上に設置される．よって本研究で

はExHAMへの衝突頻度を算出し，これを捕集パネルの衝突頻度とした．解析結果を図3に示した．縦軸は累積衝突個数，横軸は衝突粒子直径を表す．ここでは2015年の1年間を曝露期間として仮定した．進行方向であるRAM面に対する衝突頻度が最も高く，その逆の面であるWAKE面への衝突は少ないことがわかった．他の3面については，衝突頻度に有意な差はない．次に，WAKE面を除く4面の捕集パネルに対する粒子衝突頻度を算出した．捕集パネル1つの面積はおよそ100 cm²であり，1面に4つ並列させて曝露させることから，

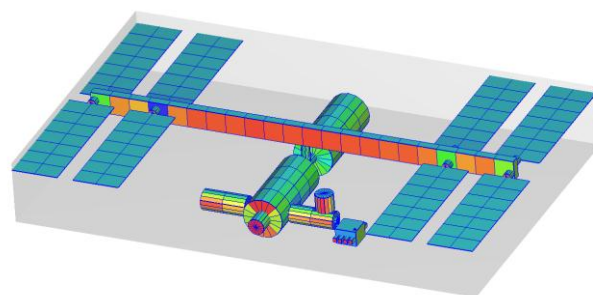


Fig. 1 ISS model



Fig. 2 ExHAM model

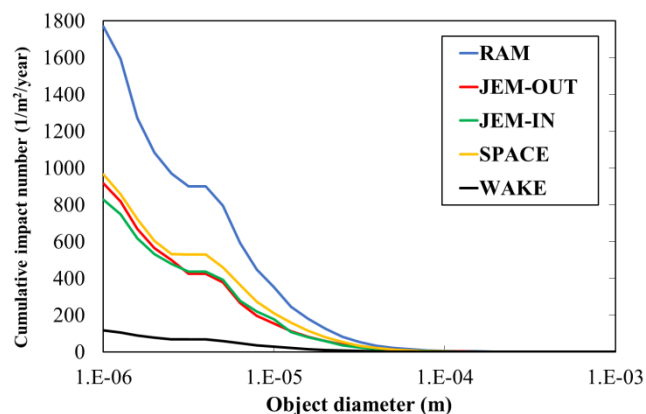


Fig. 3 Collision frequency

曝露面積を 400 cm² として計算を行った。捕集パネルに衝突する粒子の衝突個数を、表 1 に示した。直径 10 μm 以下の粒子は、捕集パネルに 1 個以上衝突することがわかった。また、直径 1 μm 以上の粒子は、RAM 面では 70 個以上捕集されるのに対し、他の 3 面は 40 個程度と大きな差が見られた。更に、デブリとメテオロイドの衝突頻度の割合を算出した。図 4 に、直径 1 μm 以上の粒子に対する累積衝突個数を示した。どの面においても、メテオロイドの衝突個数が大半を占めており、特に SPACE 面の捕集パネルに衝突する粒子のほぼ全てはメテオロイドということがわかった。これは、SPACE 面は ISS の構造上、遮蔽がほぼなく、また地球に遮蔽されることもないため、メテオロイドが衝突しやすいからであると考えられる。また、JEM-OUT 面と JEM-IN 面においては、メテオロイドとデブリの衝突頻度の割合は同等であった。JEM-IN 面の方が、ISS の構造上、遮蔽は多いと考えられるが、衝突の際の入射角度が 40 度以上であった場合には遮蔽物の影響がない。JEM-OUT 面と JEM-IN 面の違いについては、今後の課題である。RAM 面は他の 3 面よりも多くの衝突が見られ、デブリの捕集数も多いことから、RAM 面における捕集実験がデブリの衝突頻度を求めることについて最も有用であることがわかった。

3. ケース材の衝突試験

3.1 試験条件

たんぼぼで用いる捕集パネルを図 5 に示す。ケースの大きさは 100 mm×100 mm、厚さは約 20 mm である。ケースの材質には、アルミニウム合金にアロジン処理を施した A7075-T651 を用いる。アロジン処理とは、アルミニウム合金の耐食性、塗装密着性の向上を目的と

Table 1 Particle collision frequency of the capture panels (1/year)

Particle Diameter	RAM	JEM-OUT	JEM-IN	SPACE
Over 100μm	0.18	0.11	0.092	0.093
Over 10μm	14.1	6.16	7.08	8.43
Over 1μm	70.8	36.7	33.1	38.6

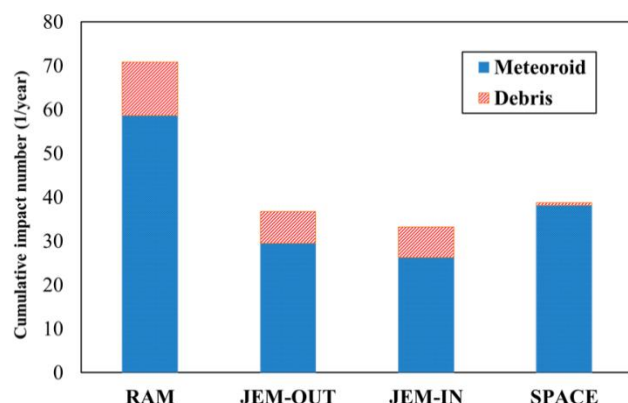


Fig. 4 Meteoroid and debris ratio

した表面処理のことである。図 5 に示した捕集パネルは、エアロゲルとそのケースから構成されている。曝露面積比にすると、エアロゲル：ケースで 6：4 となっている。捕集試験において、デブリはエアロゲルとケースの双方に衝突する。そこで本研究では、捕集試験に先立って、ケース材を供試体とし、密度及び直径の異なる模擬デブリによる超高速衝突実験を行い、レーザ顕微鏡で衝突痕（クレータ）の直径と深さを計測した。そこから、衝突痕（クレータ直径及び深さ）とデブリの衝突エネルギー（入射エネルギー）との関係式を検討した。なお、将来的にはエアロゲルについてもキャリブレーションを行う予定である。

超高速衝突実験には、ISAS/JAXA 所有の二段式軽ガス銃を使用した。ターゲットの配置を図 6 に示した。衝突速度は 6~7 km/s で、飛翔体はアルミニウム（密度 2.7 g/cm³、直径 200, 300, 500 μm）及びアルミナ（密度 3.9 g/cm³、直径 100, 200, 300 μm）を、供試体である A7075-T851 板（100 mm×100 mm、厚さ 3 mm）に対して垂直に、散弾で衝突させた。ここで、捕集試験に用いるケース材は A7075-T651 であると先に述べたが、誤って A7075-T851 を発注してしまったため、A7075-T851 の実験結果について報告する。

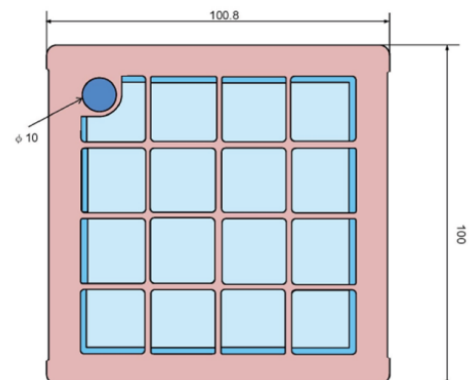


Fig.5 Capture panel ²⁾

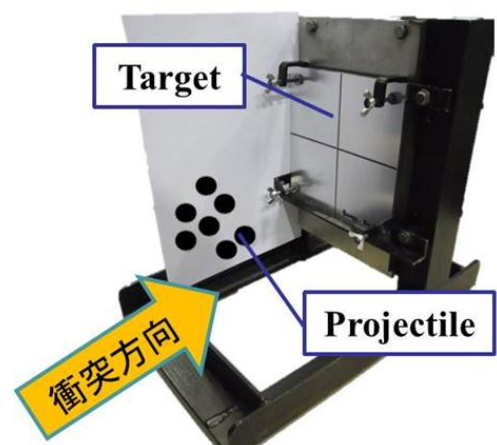


Fig. 6 Target settings

3.2 クレータ計測結果

実験後のクレータ計測には、KEYENCE 社のレーザ顕微鏡 VK-8700（倍率：対物レンズ 20 倍、精度：深さ方向 0.01 μm ）を用いた。顕微鏡で計測を行うと、深さ計測データを得ることができる。顕微鏡での計測結果例を図 7 に示した。直径 200 μm のアルミ球の衝突によって生じたクレータ(a)と、アルミナ球の衝突によって生じたクレータ(b)による計測結果であるが、目視による相違は確認できず、衝突クレータの底面形状による飛翔体材質の判断はできなかった。

縦軸にクレータ直径、横軸に飛翔体直径をとったグラフを図 8 に示した。プロットは、赤がアルミニウム、青がアルミナの飛翔体を衝突させた結果である。飛翔体の材質に関わらず、クレータ直径と飛翔体直径は比例していた。飛翔体の衝突速度はほぼ一定であったことから、飛翔体の直径と運動エネルギーまたは運動量が比例していると考えられる。

次に、縦軸にクレータ深さ、横軸に飛翔体直径をとったグラフを図 9 に示した。プロットの色は図 10 と同様である。まず、飛翔体の材質によって傾きが異なっており、クレータ深さだけでは飛翔体直径を決定できないと考えられる。点線は Cour-Palais の式による計算結果であり、以下の式で表される。

$$P_i = 5.24 d_i^{1.056} H_i^{-0.25} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{0.5} C_t^{-0.33} V_{d,i}^{0.67} \quad (1)$$

ここで、 P_i はクレータ深さ(cm)、 d_i は飛翔体直径(cm)、 H_i は供試体のブリネル硬さ、 ρ_p は飛翔体密度(g/cm^3)、 ρ_t は供試体の密度(g/cm^3)、 C_t は供試体の音速(km/s)、 $V_{d,i}$ は飛翔体速度(km/s)である。計測結果はいずれも Cour-Palais の式による予想値を下回っているため、マイクロオーダーの飛翔体については Cour-Palais の式の適用範囲外であることがわかった。

4. まとめ

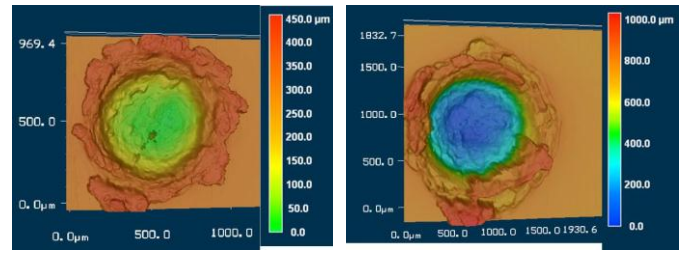
衝突頻度解析ツールを用いた捕集パネルへのデブリ衝突頻度予測を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) 捕集パネルには、直径 10 μm 以下の粒子の衝突が期待され、RAM 面に設置されたパネルには他の面と比較して約 2 倍の衝突頻度があることがわかった。また、衝突粒子のうち、メテオロイドはその大半を占めていること。
- 2) RAM 面には、他の面よりも多くのデブリが衝突するため、デブリ衝突頻度の算出には最も有用な面であること。

しかし、デブリの衝突角度や衝突するデブリの種類についてはわからないため、今後これらについて求めていく予定である。

また、エアロゲルケース材の衝突痕から、衝突してきたデブリのパラメータを算出する方法の検討を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) 飛翔体の材質に関わらず、クレータ直径と飛翔体直径は比例しており、飛翔体直径と運動エネルギーもしくは運動量が比例すると考えられること。
- 2) クレータ深さと飛翔体直径は材質によって傾きが異なっており、クレータ深さだけでは飛翔体直径



(a) 200 μm Aluminium impact (b) 200 μm Alumina impact

Fig.7 Crater depth images

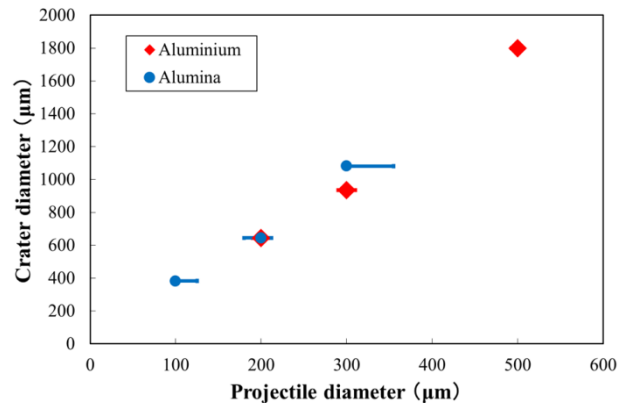


Fig. 8 Relation of crater diameter and projectile diameter

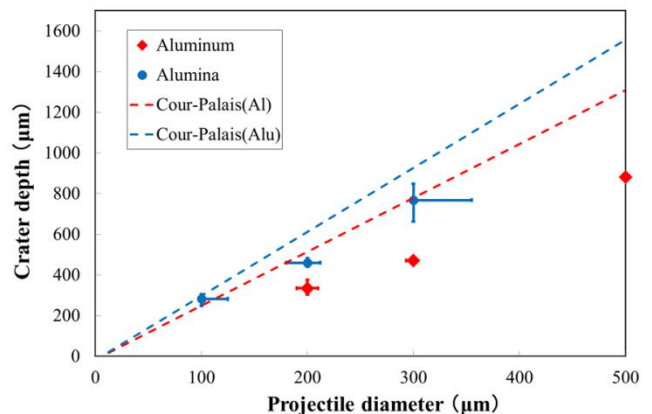


Fig. 9 Relation of crater depth and projectile diameter

が決定できないこと。

なお、本発表では A7075-T851 での結果のみを掲載したが、A7075-T651 の実験も既に行っており、今後その結果の解析を行っていく。また、エアロゲルに対する衝突試験も行ったため、解析を行う予定である。

参考文献

- 1) 木部 勢至朗, 宇宙の厄介者: スペースデブリ, 航空と文化, No.106, 日本航空協会, 2013 年.
- 2) A.Yamagishi et.al, TANPOPO: Astrobiology Exposure and Micrometeoroid Capture Experiments – Proposed Experiments at the Exposure Facility of ISS-JEM, Proc. 29th ISTS, 2013.
- 3) 山岸ら, TANPOPO:有機物と微生物の宇宙空間曝露と微隕石及び微生物の捕集実験, Biological Sciences in Space, Vol.21, No.3 (2007), pp.67-75