

地球低軌道から帰還したたんぽぽ捕集パネル アルミフレームの衝突痕と固体微粒子環境モデルとの比較

○水上恵利香(法政大), 東出真澄(JAXA), 山本啓太(法政大), 長谷川直(ISAS/JAXA),
山岸明彦(東薬大), 新井和吉(法政大), 矢野創(ISAS/JAXA)

1. 緒論

地球低軌道上にはスペースデブリ(以下デブリ)やメテオロイドなどの固体微粒子が存在する。これらは超高速で宇宙機と衝突する。このため微粒子でも非常に大きな運動エネルギーを持ち、宇宙機に深刻な被害を与える。宇宙機を安全に運用するにはデブリ環境の継続的な監視・予測が重要であるが、直径 1 mm に満たない微粒子は地上から観測できない。そこで各国は地球帰還後の宇宙機や捕集パネルの衝突痕を調査する軌道上計測を実施してきた¹⁾。軌道上計測のデータをもとに、アメリカ航空宇宙局(NASA)や欧州宇宙機関(ESA)は固体微粒子環境モデルを開発した。これらの環境モデルは微粒子の衝突危険性を判断するツールになるが、両者を比較すると誤差が存在する²⁾。モデルの精度を上げるためには軌道上計測を継続的に実施する必要がある。この一例として「たんぽぽ計画³⁾」が挙げられる。

たんぽぽ計画では固体微粒子を採集する捕集パネルなどを国際宇宙ステーション(ISS)上の簡易曝露装置「ExHAM」に取り付け、約1年間曝露する。これを4年分繰り返す。2015年から実験が開始され、1年目と2年目に曝露したパネルが帰還した。この計画には6つのサブテーマが存在し、本研究の目的は第6サブテーマ「微小デブリフラックス評価」として、捕集パネルのアルミフレームに形成された超高速衝突痕から衝突頻度を導出し、既存の微粒子環境モデルと比較することである。

既往の研究として、まず実測値を得るために山本は1年目に曝露されたアルミフレームを分析した⁴⁾。しかし2年目については未実施であるため、本研究では2年目の実測値を得る。また、1年目の分析では、衝突粒子径 10 μm 以上の衝突痕が確実に発見できていると仮定し、実測値と微粒子環境モデルを比較した。しかし、衝突痕の中には直径 10 μm 以下の衝突粒子によって形成されたものが含まれる可能性がある。また、衝突粒子径が 10 μm 以上であっても、衝突速度が遅いため形成される衝突痕が小さくなり、検出できていない可能性もある。本研究では確実に捕集パネルで検出できている衝突エネルギーの値を調べ、その領域で実測値と微粒子環境モデルを比較する。最後に衝突痕と衝突粒子の関係性を調べるために、栗原らは 100 μm 以上の粒子を使用した超高速衝突試験を実施し、衝突痕体積と衝突エネルギーの関係式を導出した⁵⁾。

しかし、実際に捕集パネルに衝突する粒子の多くが 100 μm 以下であったため、100 μm 以下の粒子に対してもこの関係式が適用可能か本研究で検討する。

2. 2年目アルミフレームの分析

2.1 捕集パネル

捕集パネルはアルミ合金(A7075-T651)製のケースにエアロゲルを収納した構造である。縦 100 mm, 横 100 mm の Type1 とそれを2つ連結した Type2 がある。ExHAM の3つの曝露面に合計 12 枚の捕集パネルが取り付けられた。アルミフレームの総曝露面積は 0.051 m² である。過去の研究と同様に、本研究では3つの曝露面をそれぞれ ram (進行方向) 面, space (宇宙) 面, JEM-Out (北) 面と呼ぶ(図1)。

2.2 アルミフレームの分析

2年目に曝露されたアルミフレームの実測値を得るため、アルミフレーム上に形成された衝突痕数を記録し、衝突痕の深さと直径を測定した。深さの測定方法について、衝突痕を光学顕微鏡で三次元撮影した画像から表面の平均高さを算出し、衝突痕最深部までの距離を深さと定義した。直径の測定方法について、表面の平均高さにおける衝突痕の断面積を正円と仮定し、その直径を衝突痕直径とした。また、衝突痕を回転楕円体と仮定し、以下の式から衝突痕体積を求めた。

$$V = \frac{1}{6} \pi \times P \times D^2 \quad (1)$$

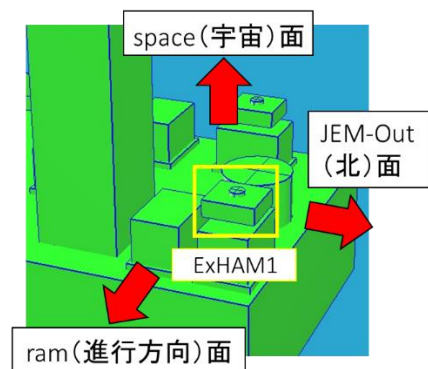


Fig. 1 Placement of TANPOPO capture panels

ここで V は衝突痕体積 (mm^3), P は衝突痕深さ (mm), D は衝突痕直径 (mm) である. さらに, 参考文献 5) で導出された衝突痕体積と衝突エネルギーの関係式から衝突エネルギーを求めた. 衝突痕体積と衝突エネルギーの関係式を以下に示す.

$$V = 0.3075E \quad (2)$$

ここで E は衝突エネルギー (J) である.

本研究では直径 $50 \mu\text{m}$ 以上の衝突痕を検出した. その結果, 直径 $50 \mu\text{m}$ 以上の衝突痕が 6 個発見された. また, 直径 $50 \mu\text{m}$ より小さい衝突痕が 9 個発見された. 直径 $50 \mu\text{m}$ 以上の衝突痕数から衝突頻度を求め, 1 年目アルミフレーム分析結果から得られた衝突頻度と比較した. ExHAM1 に搭載したパネルを比較した結果を図 2 に示す. エラーバーについて, 例えば衝突痕が 2 個検出された場合の衝突確率を考えると, 衝突痕数の取り得る範囲は 1 より大きく 3 より少ないはずである. これを衝突頻度に反映させ, エラーバーの範囲とした. 捕集試験 1 年目と 2 年目で微粒子環境に大きな変化はなかった.

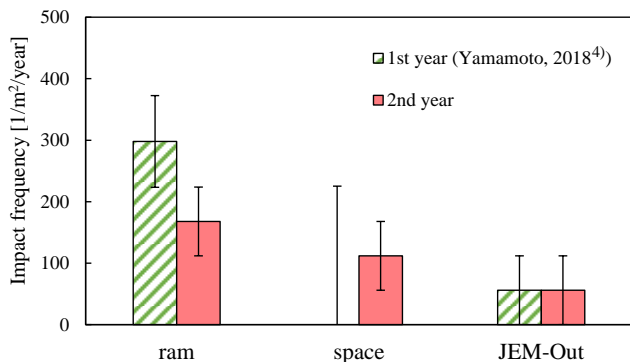


Fig. 2 Impact frequency comparison between 1st year and 2nd year TANPOPO capture panels

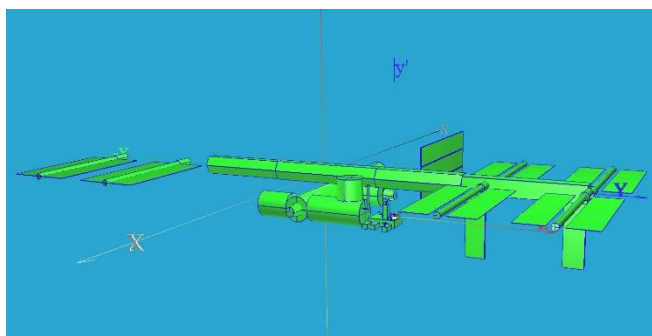


Fig. 3 ISS model

3. 衝突頻度の妥当性評価

3.1 衝突頻度解析ツール

微粒子環境モデルには ESA が開発した MASTER-2009 を使用し, 衝突頻度の予測には Turandot を使用した. Turandot とは宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と MUSCAT スペース・エンジニアリング株式会社が共同で開発したスペースデブリ衝突損傷解析ツールである. 本研究では ver. 14.22a を使用した. 解析に使用した ISS モデルを図 3 に示す.

3.2 宇宙実験データとの比較

実測値と微粒子環境モデルを比較するため, 各衝突エネルギーにおける累積衝突頻度分布を解析した. 解析条件を表 1 に示す. 本研究では衝突粒子のもつ衝突エネルギーが与えられた数値よりも大きい場合を損傷とみなし, 衝突頻度を解析した. 衝突エネルギーは 10 のべき数ごとに 6 種類設定した. ram 面について, 解析から得られた予測値と実測値を比較したグラフを図 4 に示す. 全ての面において実測値が予測値よりも少ない結果となった.

Table 1 Analysis conditions

計算期間	2016/01/01 00:00~2017/01/01 00:00
軌道長半径	6,800 km
離心率	0
軌道傾斜角	51.6 deg.
昇降点赤経	0 deg.
近地点引数	0 deg.
メテオロイドモデル	Seasonal met. (Jenniskens)

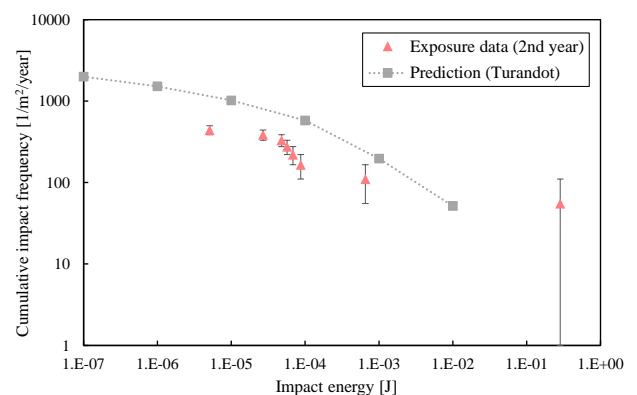


Fig. 4 Comparison of calculated impact frequency from craters on the ram surface and predicted from environment model

3.3 衝突痕直径 $\geq 50\mu\text{m}$ の衝突エネルギー推定

本研究の分析手法では直径 $50\mu\text{m}$ 以上の衝突痕は取りこぼしなく検出したので、このときの衝突エネルギーを推定した。しかし衝突痕直径から直接衝突エネルギーは求められない。そこで衝突痕体積と衝突エネルギーには比例関係があることを利用し、衝突痕直径から衝突痕体積、衝突エネルギーの順に計算した。衝突痕体積は式 (1) から求めた。超高速衝突では衝突粒子の密度ごとに衝突痕の深さを直径で除した値 (深さ直径比) が近い値になる傾向があると報告されている⁶⁾。そこで本研究では衝突粒子の材質をメテオロイドとデブリの二種類に分けて深さ直径比を算出した。Turandot による解析で space 面に衝突する粒子の約 99% がメテオロイドと予想されるため、1, 2 年目 space 面の深さ直径比をメテオロイドによる深さ直径比とした。過去の研究から $1\mu\text{m}$ 以上のデブリのおよそ 90% は固体ロケットモータのダスト、すなわちアルミナであるとわかったため、アルミナを衝突粒子とした過去の衝突試験⁵⁾および数値解析⁷⁾結果の深さ直径比をデブリによる衝突痕の深さ直径比とした。衝突エネルギーの推定には式 (1) を使用した。これによって、直径 $50\mu\text{m}$ 以上の衝突痕を生成するデブリ、メテオロイドそれぞれの衝突エネルギー範囲が求められた。この範囲の最大値を閾値とすることで、実測値で検出できなかった衝突エネルギーの領域を知ることができる。

図 4 に、直径 $50\mu\text{m}$ の衝突痕を形成する衝突エネルギーの推定範囲について、メテオロイドを青、デブリを赤で示す。青線がメテオロイド、赤線がデブリである。赤線の右端より左側の領域では直径 $50\mu\text{m}$ の衝突痕を形成する衝突エネルギーよりも小さくなる。このため実測値について、本研究の分析手法では衝突痕の取りこぼしがあり全ての衝突痕が検出されていない可能性がある。よって実測値が予測値よりも小さくなる。青線内の実測値もデブリによる全ての衝突痕が検出されているとは限らないため、実測値が予測値よりも小さくなる。赤線の右端より右側

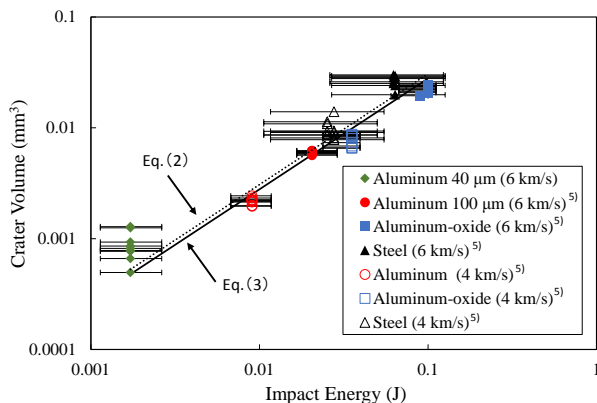


Fig. 5 Impact experiment results with 40 and 100 μm projectiles

の領域では直径 $50\mu\text{m}$ の衝突痕を形成する衝突エネルギーよりも大きくなる。このため衝突痕をほぼ検出できるとし、解析値と実測値が類似すると予想した。しかし衝突エネルギー 10^{-3}J 付近では実測値と予測値の衝突頻度に差があった。

4. 衝突痕体積と衝突エネルギー関係式の検証

実測値と予測値が類似しなかった理由について、過去の研究で得られた衝突痕体積と衝突エネルギーの関係式⁵⁾に着目した。この関係式は実際の衝突粒子よりも大きい粒径 $100\sim 500\mu\text{m}$ の粒子を使用した衝突試験から導出されたものである。粒径 $100\mu\text{m}$ 以下の粒子についても適用可能であるかを調べるため、宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を使用して A7075-T651 板に対する粒径 $40\mu\text{m}$ のアルミ粒子衝突試験を実施した。衝突粒子径以外の条件は過去に実施された衝突試験と同様である。散弾ショットによってターゲット上に 100 個以上の衝突痕が得られた。この中から任意に選んだ 10 点の衝突痕について深さおよび直径を計測した。

過去に得られた衝突粒子径 $100\mu\text{m}$ の衝突試験結果と今回得られた粒径 $40\mu\text{m}$ の衝突試験結果を図 5 に示す。全てのプロットを最小二乗法で近似したところ、以下の式が得られた。

$$V = 0.2787E \quad (3)$$

図 5 の破線が従来の関係式、実線が新しい関係式である。新しい関係式を使用すると、同じ衝突痕体積のときに求められる衝突エネルギーが 10.3% 増加することがわかった。図 4 において実測値の衝突エネルギーを 10% 増加させたグラフを図 6 に示す。関係式を変更したことによる影響はほとんどみられなかった。したがって、微粒子環境モデルによって得られる衝突頻度は実際の衝突頻度よりも高い可能性があることがわかった。

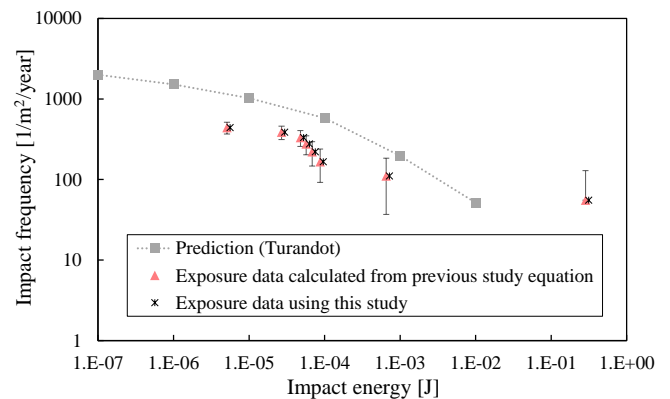


Fig. 6 Effect of modifying calibration equation

5. 結論

本研究ではアルミフレームの衝突痕と微粒子環境モデルとの比較を目的として、2年目に曝露されたアルミフレームを分析し、確実に捕集パネルで検知できている衝突エネルギーの領域で Turandot による解析結果と比較した。この結果、両者の衝突頻度は異なっていた。過去の研究で得られた衝突痕体積と衝突エネルギーの関係式について、粒径 100 μm 以下の衝突粒子から関係式を再構築したところ、従来の関係式では衝突エネルギーを小さく見積もっていることが判明した。しかし実測値と予測値に差が生じた大きな要因ではなかった。よって、固体微粒子環境モデルによって得られる衝突頻度は実際の衝突頻度よりも高い可能性がある。今後は3年目に曝露されたアルミフレームを分析し、解析結果と比較する。また、NASAが開発した微粒子環境モデル ORDEM との比較を行い、モデルの妥当性を評価する予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP16H04823 の助成を受けたものです。衝突頻度解析には MUSCAT スペース・エンジニアリング株式会社 中渡瀬竜二様にご協力頂きました。超高速衝突試験は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所超高速衝突実験共同利用施設を用いて実施されました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 矢野創：星のかけらを採りにいく-宇宙塵と小惑星探査，岩波書店，pp. 50-54，2012年。
- 2) P. H. Krisko, et al. : ORDEM 3.0 and MASTER-2009 modeled debris population comparison, Acta Astronautica, Vol. 113, pp. 204-211, 2015.
- 3) A. Yamagishi, et al. : Tanpopo: Astrobiology Exposure and Micrometeoroid Capture Experiments - Proposed Experiments at the Exposure Facility of ISS - JEM, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol. 12, No. ists29, pp. Tk_49-Tk_55, 2014.
- 4) 山本啓太：宇宙における極低密度捕集材に形成された超高速衝突痕の3次元構造解析，平成29年度法政大学卒業論文，2018年。
- 5) 栗原愛美：たんぽぽ捕集パネルに衝突する微粒子フラックス予測とエアロゲルのキャリブレーション，平成26年度法政大学大学院修士論文，2016年。
- 6) H. Friedrich. : Cratering and penetration experiments in aluminum and Teflon: Implications for space-exposed surfaces, Meteoritics&Planetary Science, Vol. 47, No. 4, pp. 763-797, 2012.
- 7) 尾田佳至朗，他：たんぽぽ捕集パネル衝突デブリ推定式における衝突角度の検討，平成27年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム，2016年。