

たんぽぽ捕集パネルに対する衝突頻度予測と 地上実験条件の検討

○栗原愛美(法政大院), 東出真澄(JAXA), 尾田佳至朗, 新井和吉(法政大),
平井隆之(JAXA), 矢野創(ISAS/JAXA), 山岸明彦(東薬大)

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、様々な物がスペース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上のデブリは特に増加しており、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。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ため、微小デブリの分布がデブリ衝突リスク評価に不可欠である。微小デブリは地上観測網からは検出不可能であるため、リスク評価にはデブリ環境モデルを利用する。欧州宇宙機関(ESA)と米国航空宇宙局(NASA)は、宇宙曝露実験結果やスペースシャトルの衝突痕等を基にしてデブリ環境モデルを開発しているが^{1,2)}、デブリ分布は時間経過と共に変化するため、最新の軌道上観測データによって定期的に改修される必要がある。デブリ衝突頻度の高い低高度軌道の曝露実験データは特に必要性が高い。

現在、国際宇宙ステーション(ISS)では「たんぽぽ」ミッションによる曝露実験が行われている。たんぽぽの主目的は宇宙生物学実験で、低密度エアロゲルをISS曝露部に設置して、ISS軌道に存在する微生物の捕集を目指している³⁾。2015年5月26日より第1回目の曝露実験が開始された。Fig. 1の黄色で示す部分がたんぽぽ捕集パネルである。捕集パネルは1年間曝露後に回収され、往還機によって地上に戻される。同実験が3回繰り返され、3年分のデータを取得

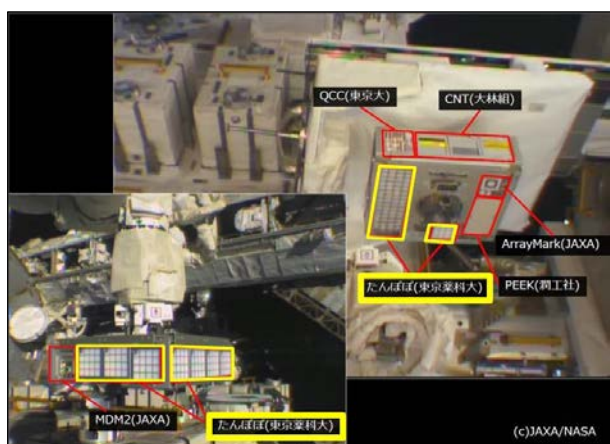


Fig. 1 TANPOPO capture panels exposed on the ISS⁴⁾

する予定である。帰還した捕集パネルには多くの微小デブリ衝突痕が存在すると考えられるので、たんぽぽでは微小デブリ分布取得もサブミッションの一つとして位置付けている。まず地上で、捕集パネル材に模擬デブリ衝突試験を行い、デブリ衝突条件と衝突痕との関係式を得ておく⁵⁾。これを校正式として、捕集パネルの衝突痕から衝突デブリ分布を求めることができる。デブリ環境モデルによって予測される衝突頻度と、捕集パネル衝突痕から得た実際の頻度とを比較し、最新の環境モデルの妥当性について検証することが、本研究の最終目的である。本論文では、ISSに搭載された捕集パネルに対する微小粒子衝突頻度の、デブリ環境モデルによる予測結果について報告する。予測結果から衝突頻度の高い条件を推定し、地上での捕集パネル校正試験が必要な実験条件範囲についても検討した。

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⁶⁾。JAXA及びMUSCATスペース・エンジニアリングによって開発されたデブリ衝突損傷リスク解析ツール、Turandot⁷⁾にMASTER-2009を適用し、衝突頻度解析を実施した。このツールでは、作成した宇宙機の三次元形状モデルと軌道条件対し、デブリ環境モデルを設定することで、モデル表面に衝突するデブリ衝突頻度を解析できる。構造物による遮蔽効果を考慮した解析が可能で、例えば太陽電池等の背後になっている構造面は、太陽電池方向からはデブリ衝突を受けない。モデル表面は面素に分割されるので、位置の違いによる頻度の違いを可視化できる。また、各面素に複数の貫通限界方程式を適用できる機能があり、これを用いると衝突損傷リスクが算出できる。本研究では貫通限界方程式機能を衝突条件の制約として適用させることで、捕集パネルへの衝突が予想されるデブリの分析を行った。

3 解析結果

3.1 詳細化モデルによる計算結果

過去の研究では、構造を簡略化したモデル(以下、簡略化モデル)で解析していた⁸⁾。簡略化モデルでは曝露実験に用いる船外簡易取付装置(ExHAM)を概形で作成し、多くの構造物を省略していた。本研究で

は Fig. 2 に示す詳細化モデルを新たに作成した. 特に ExHAM とその周辺は Fig. 3 に示すように詳細にモデル化した. パーツが増えすぎてしまうと Turandot の動作に支障が出てしまうため, 捕集パネルの視野に入らない構造物は大幅に省略した.

捕集パネルは Fig. 1 に示すように ExHAM の 3 面のみ設置されている. 設置面を, ISS の進行方向を RAM, ISS と圧部と逆側を JEM-OUT, 宇宙方向を SPACE と, 本研究では定義する (Fig. 4). 捕集パネル 1 個の面積はおよそ 100 cm² であり, ExHAM の 1 面に最大 4 個が並列して曝露される. したがって, 曝露面積を 400 cm² として衝突頻度解析を行った. 解析期間は 2015 年初頭から 1 年間曝露されたものとした.

詳細化モデルに対する粒子衝突個数を Table 1 に

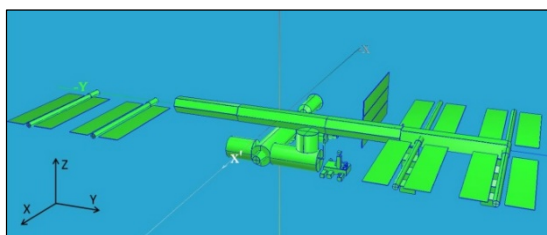


Fig. 2 Accumulated ISS model in TURANDOT

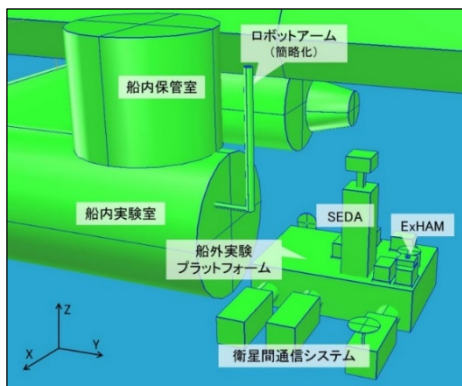


Fig. 3 Exposed facility model in TURANDOT

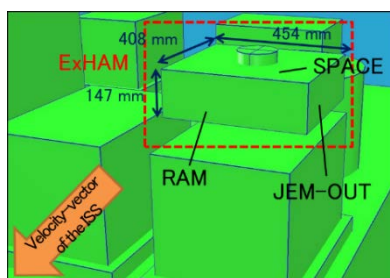


Fig. 4 Definitions of ExHAM surfaces

Table 1 Impact frequency of capture panels

Particle Diameter	Impact Frequency (1/year)		
	RAM	JEM-OUT	SPACE
100 μm ≤	0.18	0.10	0.08
10 μm ≤	14.7	6.03	7.48
1 μm ≤	73.6	35.9	33.2

示す. どの面にも直径 100 μm 以上の粒子はほとんど衝突しないが, 10 μm 以上の粒子は 1 年間に 6 個以上衝突すると予測された. RAM の粒子衝突頻度は他の面の 2 倍程度あり, 進行方向面が最も粒子が衝突しやすいことがわかった.

各面に衝突する粒子の要素割合を Fig. 5 に示す. 中抜きがメテオロイド, 中塗りがデブリの衝突頻度を表す. デブリは SPACE にはほとんど衝突しないことがわかった. 最もデブリ衝突頻度の高い RAM について, 衝突デブリの種類について調べた結果を Fig. 6 に示す. 衝突デブリの大半が固体ロケットモータダスト由来の粒子であることがわかった.

宇宙空間に存在する微小粒子は様々な速度を持ち, その分布も重要なパラメータの一つである. RAM 面に対する, 直径 1 μm 以上の粒子衝突速度分布を Fig. 7 に示す. 15~25 km/s にピークが見られ, 地上実験では再現の難しい速度域での衝突頻度が高いことがわかった.

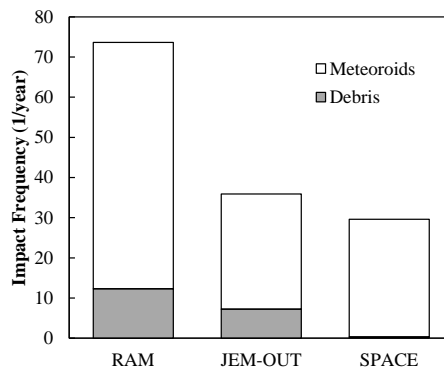


Fig. 5 Ratio of debris to meteoroid

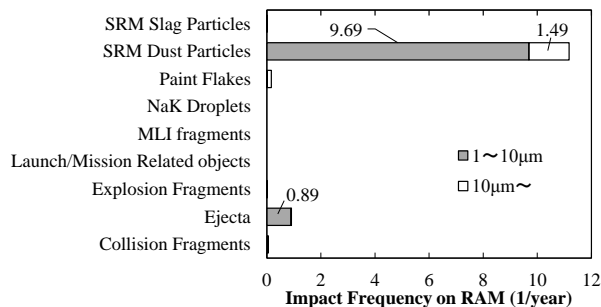


Fig. 6 Debris sources impacting on RAM

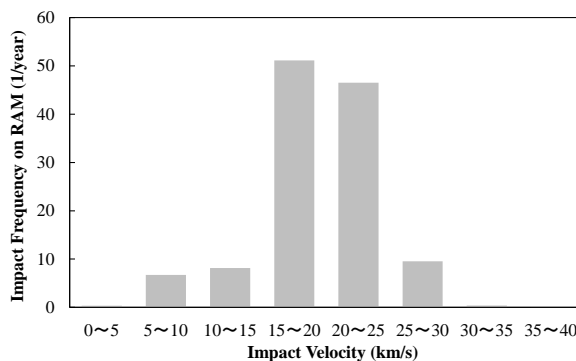


Fig. 7 Particle impact velocity on RAM surfaces

3.2 曝露期間の影響

たんぼぼでは、曝露実験は1年単位で実施し、それを3回繰り返す予定である。2015年5月より開始され、2018年までのデータが取得される。そこで、曝露期間による衝突頻度の変化について調べた。解析期間は2015、2016、2017、2018年のそれぞれ1月1日～12月31日と設定した。解析結果をFig. 8に示す。どの面においても、大幅に衝突個数が変化することはないと予測された。これは、MASTER-2009は本解析期間に衛星同士の衝突や爆発事故が起きないと予想しているためだと考えられる。もし曝露期間内に衝突や爆発が新たに発生した場合には、急激な個数変化が表れる可能性は大いに有り得る。

3.3 ISS 高度変化の影響

ISSの運用可能高度は、330～460 kmである^{9,10}。軌道傾斜角51.6度を保つためや、空気抵抗やロケット噴射による軌道修正等で、高度を変更しながら運用している。そこで、運用可能高度の上限及び下限にISSが移動した場合の、直径1 μm以上の粒子衝突個数を算出した。その結果をTable 2に示す。RAM面、JEM-OUT面では、高度60～70 kmの上昇とともに、粒子衝突個数も数個ずつ増えることがわかった。高度が上がるほど多くの粒子が存在していると考えられる。

3.4 SEDA 位置変更の影響

2015年7月に、きぼう上に設置されているSEDA(宇宙環境計測ミッション装置)の位置が変わった。そこで、配置の変化による衝突頻度の差異を調べた。変

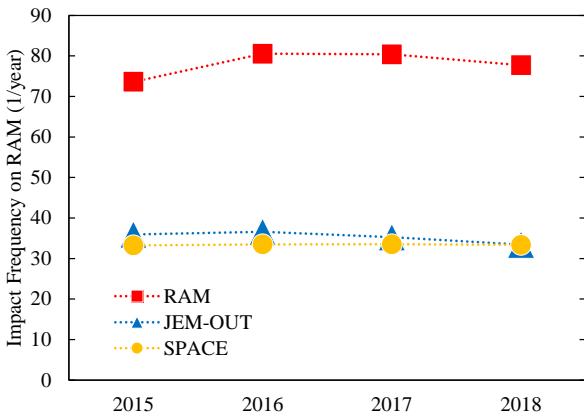


Fig. 8 Difference by analysis year

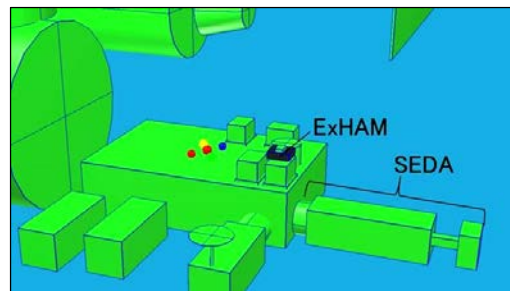
Table 2 Effect of altitude

Altitude (km)	Impact Frequency (1/year)		
	RAM	JEM-OUT	SPACE
330	69.9	32.4	34.3
400	73.6	35.9	34.4
460	77.2	38.2	34.5

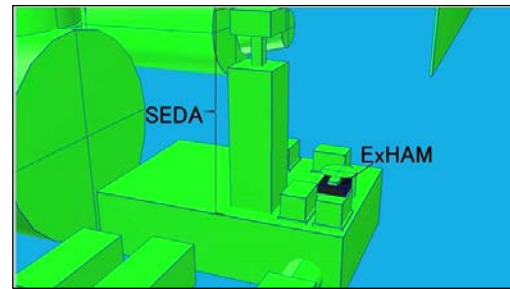
更前及び変更後の配置をFig. 9に、直径1 μm以上の衝突粒子個数の比較をTable 3に示す。RAM面においては、衝突個数に有意な差は得られなかったため、RAM面に関してはSEDAによる遮蔽の影響はないと考えられる。一方、JEM-OUT及びSPACE面に関しては、SEDAの位置変更後に衝突数の変化が見られたことから、この2面には影響があることがわかった。しかし、SEDAの位置変更後も、いずれの面においても粒子衝突が1以下になることはなく、ミッション成否に影響はないと考えられる。

3.5 衝突角度分布

ISSの構造物によって、特定の角度からの粒子は捕集パネルに衝突する前に遮蔽される可能性が高い。MASTER-2009で求めたISS軌道のフラックスと、Turandotによる他構造物の遮蔽を考慮した解析結果を比較することで、構造物による遮蔽の影響について調べた。結果をFig. 10に示す。RAM面では両者の衝突個数に明確な違いはなく、進行方向では構造物による遮蔽の影響はほとんどないと言える。JEM-OUT面では15～45 deg., SPACE面では60～75deg.において、Turandotによる結果がISS軌道のフラックスよりも小さくなった。これは、左舷側の太陽電池パネルに



(a) Before June 2015

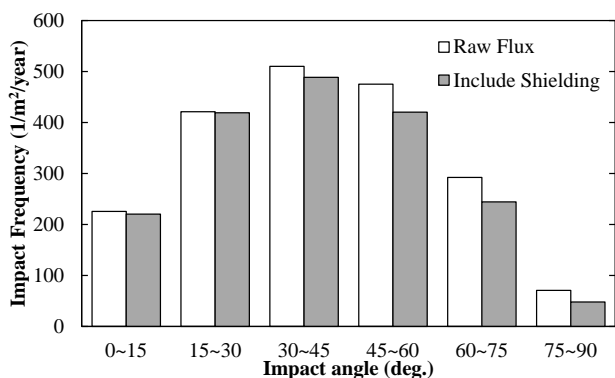


(b) After July 2015

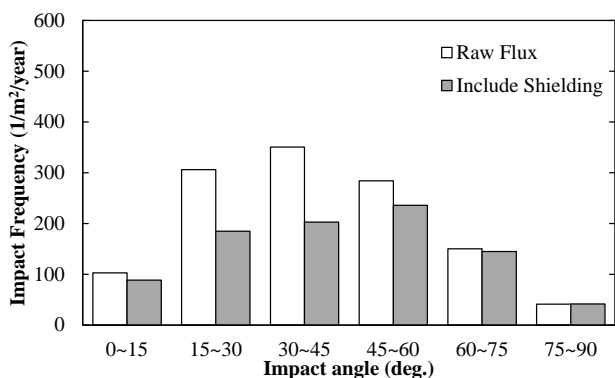
Fig. 9 Positions of SEDA and ExHAM

Table 3 Difference by SEDA's position

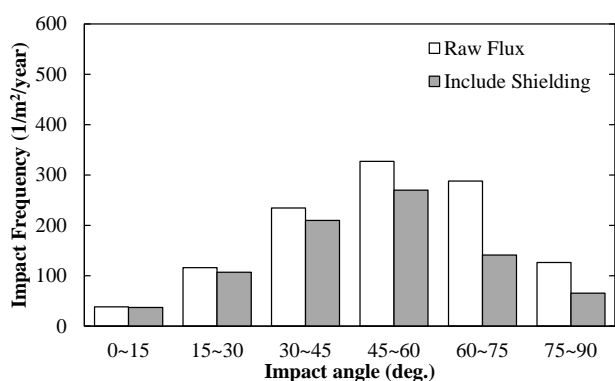
Position of SEDA	Impact Frequency (1/year)		
	RAM	JEM-OUT	SPACE
(a)	69.9	32.4	34.3
(b)	77.2	38.2	34.5



(a) RAM



(b) JEM-OUT



(c) SPACE

Fig. 10 Particle impact angle

よる遮蔽の影響と考えられる。また、RAM 面、JEM-OUT 面では 30~60 deg., SPACE 面では 45~60 deg の角度を持った粒子が多く衝突することから、これらの角度について重点的に地上実験を行っておく必要がある。

4 結言

たんぼぼ捕集パネルが ISS で 1 年間曝露された時の衝突頻度予測を行った。衝突粒子の直径、材料、速度及び角度分布を求めることができた。その結果、衝突速度 15~25 km/s で衝突する粒子が多いことがわかった。地上試験で実現することが難しい速度域で

あるため、捕集パネルの校正式を得る際に、数値解析によって高速度域を補完することが望ましい。また、粒子衝突角度は 30~60 度と予想されるため、斜め衝突を考慮した分析方法を検討する必要がある。捕集パネルを曝露する時期の違い、ISS の高度変化、SEDA の位置変更などの条件で粒子衝突頻度は変化するが、ミッション成立性に対する影響はないことがわかった。

謝辞

デブリ衝突頻度解析には MUSCAT スペース・エンジニアリング(株)八田真児様にご助言いただきました。感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Klinkrad, H.: SPACE DEBRIS - Models and Risk Analysis, Springer, 2006.
- 2) NASA Orbital Debris Program Office: Orbital Debris Quarterly News, Vol.19 (2), 2015.
- 3) Yamagishi, Y., 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 (ists29), pp. Tk_49-Tk_55, 2014.
- 4) JAXA 宇宙ステーション・きぼう 広報・情報センター: http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/150528_exham.html.
- 5) Kurihara, M., et al.: Impact Frequency Estimate of Micron-sized Meteoroids and Debris on Tanpopo Capture Panels on the ISS, *Procedia Eng.*, Vol. 13, pp. 334-340, 2015.
- 6) Flegel, S., et al.: The MASTER-2009 Space Debris Environment Model, *Proc. 5th European Conference on Space Debris*, ESA SP-672, 2009.
- 7) 八田真児, 他: デブリ衝突損傷リスク解析ツールに関する最近の機能拡充, 第 6 回スペースデブリワークショップ講演資料集, JAXA-SP-14-013, pp. 492-504, 2015.
- 8) 栗原愛美, 他: たんぼぼ捕集パネルの微小デブリ衝突頻度解析, 平成 25 年度スペースプラズマ研究会講演集, 2014.
- 9) JAXA 宇宙ステーション・きぼう 広報・情報センター: <http://iss.jaxa.jp/iss/about>.
- 10) 前田惟弘, 他: 有人宇宙システムの現状と将来, *電子情報通信学会誌*, Vol. 93 (12), pp.1020-1026, 2010.