

# 有人探査システム 月面隕石防護構造の研究

関谷 優太、坂本 佑介、和田 勝<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構

## 1. はじめに

現在、様々な国で月探査計画が進められているところであるが、我が国でも NASA の協力の下、月面探査を目的とした有人と無人探査機の検討を実施している。有人と無人探査機での想定運用期間（10 年間）に安全・確実な探査を実現するためには、月面に降り注ぐ隕石や氷等の飛来物に対する強固な防護性能が求められるため、現在運用中の日本実験棟「きぼう」でのデブリ防護シールドの研究や設計の成果を参考に、月面での隕石飛来に対する軽量堅固な防護構造の検討を行っている。本稿では、与圧ローバ窓構造の隕石防護性能の評価を目的とした、高速衝突試験結果を紹介する。

## 2. 月面隕石飛来環境の調査

月面隕石飛来環境に関して NASA がまとめたデータベースである MEM-3<sup>1)</sup> を基に整理した月面での隕石等の飛来環境（密度、速度、方向）について図 1 ～ 図 3 に示す。

現在軌道上 400 km で運用中の国際宇宙ステーション（以下、ISS）でのアルミを中心としたデブリ環境とは大きく異なり、月面への飛来物は彗星由来の氷成分や石質隕石（コンドライト；隕鉄）が主成分であり、かつ飛来速度が 20km/s を超える高い範囲まで広く分布していることがわかる。また、月面ではこれら飛来物が月面に衝突した後の撥ね返りによる二次衝突も想定されるが、本稿では一次衝突のみを考慮した。

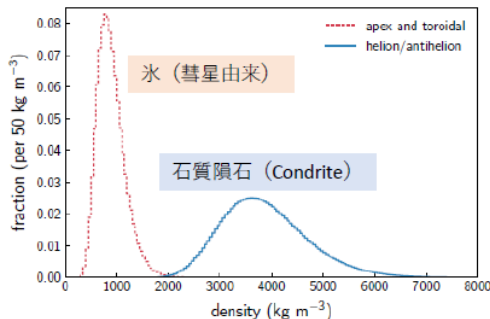


図 1 月面における飛来物の密度分布

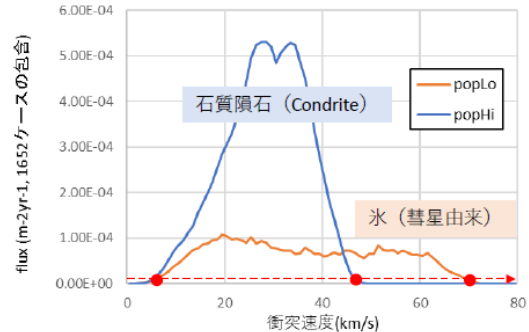


図 2 月面における飛来物の速度分布

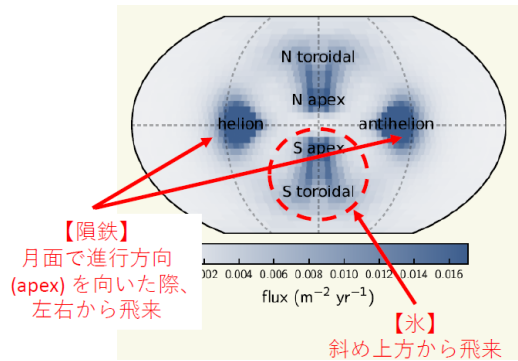


図 3 月面における飛来物の飛来方向

## 3. 非貫通確率 (PNP) と貫通限界曲線 (BLE)

有人と無人探査機の隕石防護性能に対する要求は、運用期間中における非貫通確率 (PNP: Probability of Non Penetration) の形で課される。PNP 要求の定義を以下、式(1)に示す。

$$\text{PNP} \geq 0.99999^{(A \cdot Y)} \quad (1)$$

A = 飛来物が衝突し得る与圧壁の総面積

Y = 衝突の危険に晒される期間

これを踏まえ現状の検討内容をもとに PNP 目標値を算出すると、

$$\begin{aligned} \text{PNP 目標} &: 0.99999^{(A \cdot Y)} \\ &= 0.9975 \end{aligned} \quad (2)$$

(検討当時: A=28.3<sup>(\*)1)</sup> [m<sup>2</sup>]、Y=9<sup>(\*)1)</sup> [year])

有人と無人探査機の PNP の実力値を算出するには、Bumper コード (現版は Bumper-III) と呼ばれる NASA 作成の計算プログラムに、前項の MEM-3 及び有人と無人探査機の貫通限界曲線 (BLE: Ballistic Limit Equation) を入力することで算出できる。

BLE は図 4 に示すように飛来物の衝突速度を横軸、飛来物の粒径を縦軸とした場合の曲線であり、「きぼう」などの ISS モジュールでは BLE が試験及びシミュレーションで確立済み<sup>2)</sup>であり、Bumper-III コードにデータベースとして存在している。

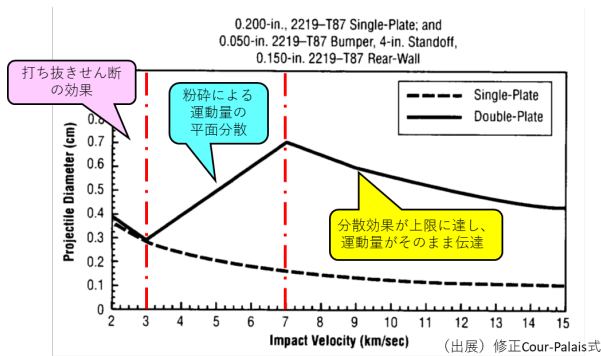


図 4 貫通限界曲線 (BLE) の一例 (壁の枚数の効果)

例えば 1.27mm 板厚のアルミバンパを 3.81mm 板厚のアルミ与圧壁の 100mm 前方に配置した二重壁構造 (Double-Plate; Whipple バンパとも呼ぶ) の場合、BLE は図 4 に見られる下記のような単壁(Single-Plate)とは異なる特徴を有している。

- 3 km/s までは速度増加と共に貫通できる粒径は減少する (運動量に依存)
- 3 km/s~7 km/s では、衝突した飛翔体やバンパが破碎しデブリとなり、飛翔体の有する運動量が分散されるため、速度増加と共に粒径が大きくなる。(運動量に依存しない)
- 7 km/s 以上では粉碎効果はなくなり、再び運動量に依存した傾向に戻る。(再び、運動量に依存) 運用中の日本実験棟「きぼう」も上記特性を活用した防護設計を行った。(図 5:「きぼう」進行方向に艤装される防護設計例)

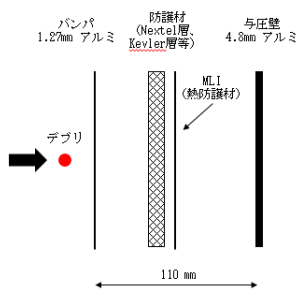


図 5 「きぼう」のデブリ防護設計例

一方で、飛来物の主成分が異なる月面環境での BLE は未確立のため、今後、試験や解析から有人と圧ローバの BLE を適切に定義していく必要がある。今回は NASA ハンドブック<sup>3)</sup>を参考に BLE パラメータである飛翔体密度を隕鉄 (密度: 3.8g/cm<sup>3</sup>) および氷 (密度: 0.9g/cm<sup>3</sup>) に置き換え、その他のパラメータとして飛翔体衝突角度は 0° (垂直衝突)、バンパ・与圧壁材料物性および壁間距離は図 6 の仕様を用いて推定した BLE (図 7) を用いた。

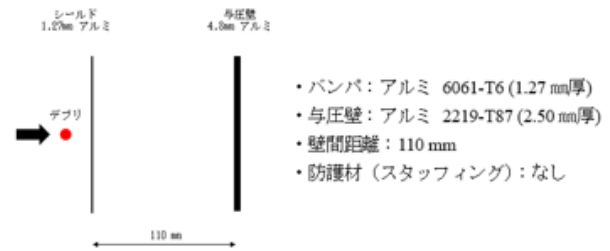


図 6 今回検討のデブリ防護設計

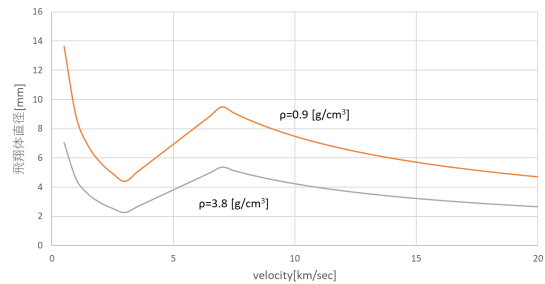


図 7 飛翔体密度: 0.9g/cm<sup>3</sup>、3.8g/cm<sup>3</sup> の BLE 結果

#### 4. 非貫通確率 (PNP) の算出

月面への打ち上げ機能力の制約から、システム質量の低減は、有人と圧ローバに課される大きな課題の一つである。本研究においては、軽量化と隕石防護性能 (PNP 要求) を両立するべく、防護仕様を検討し、上述の仕様 (図 6) を一次案として採用した。

本仕様での Bumper-III による PNP 検証結果は 0.9979 であり、これは目標であった 0.9975 (前述(2)) を上回る結果となった。これにより、ISS モジュール等の前例と比較して与圧壁を薄く、スタッフィングを必要としない形体の成立性が確認できた。

#### 5. 窓構造の評価

与圧ローバには、搭乗クルーが船外を目視確認するための窓構造が取り付けられる予定で、与圧壁同様に月面の隕石飛来環境に晒される。視認性や対擦傷性の観点ではガラスが最適であるが、ガラスはその脆性ゆえ隕石衝突による破壊とその後のキャビン内の急減圧に至ることから、透明性と破壊靱性で適

度な特性を有するポリカーボネートやアクリルを候補に検討を進めている。なお、現在月面ローバの窓構造の構成は、図 8（窓構造組立）を想定している。

本試験では、ポリカーボネート二重窓（前段：バンパーシールド、後段：耐圧窓）に対して板厚をパラメータとして高速衝突試験を実施し、図 7 に示した与圧ローバ与圧壁の目標 BLE との性能比較を行った。

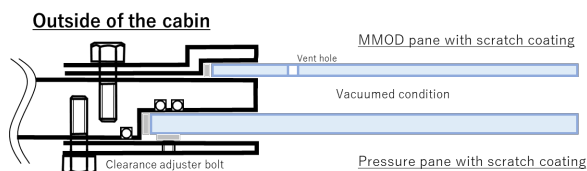


図 8 想定する窓構造組立

## 6. 高速衝突試験結果と今後の予定

ポリカ材料の供試体は Sabic 社製 Lexan™ EXELL™ D シートを使用し、飛翔体は隕鉄相当密度 ( $\rho = 3.8\text{g/cm}^3$ ) であるアルミナ球を使用し、飛翔体粒径、射出速度、板間距離の組み合わせにて評価を実施した。表 1、図 9 に評価条件および試験結果を示す。評価試験はケース①②を宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所(以下、ISAS)、ケース③④⑤を神戸大学にて実施した。

試験ID	設備	飛翔体種類	試験条件		供試体				試験結果		
			粒径(mm)	速度(km/sec)	Bumper	厚み(mm)	Rear Wall	厚み(mm)	板間距離(mm)	Bumper	Rear Wall
①	ISAS	アルミナ	3.2	5.019	ポリカ	3	ポリカ	10	110	貫通	非貫通
②	ISAS	アルミナ	3.2	3.228	ポリカ	3	ポリカ	10	110	貫通	非貫通
③	神戸大	アルミナ	2	4.84	ポリカ	3	ポリカ	10	110	貫通	非貫通
④	神戸大	アルミナ	2	4.85	ポリカ	3	ポリカ	10	30	貫通	非貫通
⑤	神戸大	アルミナ	2	2.96	ポリカ	3	ポリカ	10	30	貫通	貫通

表 1 試験条件と試験結果

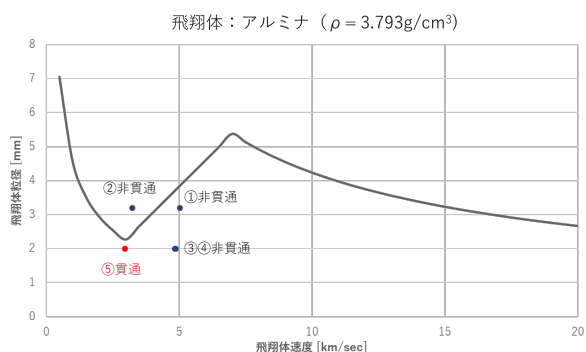


図 9 目標 BLE と試験結果の比較

板間距離を 110mm 取ったケース①～③に関しては、いずれも Rear Wall は非貫通であり、目標となる貫通限界曲線と比較して、良い結果となった。特にケース

②に関しては、目標 BLE では貫通域に属する試験条件であり、バンパーシールド側ポリカーボネートの更なる板薄化も可能な見込みが得られた。

そこで窓構造組立の軽量化を目的とし板間距離を 30mm としてケース④⑤の試験を実施した。結果として、飛翔体速度の遅いケース⑤のみで Rear Wall の貫通が見られ、3~5km/s の速度域において、同じ飛翔体粒径でも射出速度が速いほうが貫通しないという、貫通限界曲線に沿った結果を示した。ケース⑤は、目標 BLE においては非貫通を期待する試験条件であったため、この板厚(3mm/10mm)/板間距離(30mm)の組み合わせでは、目標とする隕石防護性能を満たさないということが確認された。

今後の取り組みとしては、板厚/板間距離/飛翔体速度をパラメータにデータ数を増やすとともに、ポリカーボネート以外に窓材料候補となるアクリル材料での試験実施を計画する。

## 参考文献

- 1) NASA: NASA Meteoroid Engineering Model Version 3 (NASA/TM-2020-220555)、2020
- 2) 白木邦明ら、:JEM与圧部構造の宇宙デブリ防御性能に関する性能評価シミュレーション、日本航空宇宙学会論文集 1999年47巻544号 p189-196、1999
- 3) NASA: Handbook for Designing MMOD Protection (JSC-64399)、2009