

**国際宇宙ステーションロシアサービスモジュール利用
微小粒子捕獲実験及び材料曝露実験 (SM/MPAC&SEED 実験) の
第2回回収試料の評価解析**

Evaluation of 2nd retrieved samples for micro-particles capturer and space environment exposure device
on the Russian service module (SM/MPAC&SEED) of the international space station

部品・材料・機構技術グループ

(Electronic, Mechanical Components and Materials Engineering Group)

山県 一郎、島村 宏之、宮崎 英治

Ichiro Yamagata, Hiroyuki Shimamura, Eiji Miyazaki

Abstract

The material-exposure experiment was performed on the International Space Station using the Micro-Particles Capturer and Space Environment Exposure Device (MPAC&SEED) developed by the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). The experiment was executed on the exterior of the Russian Service Module (SM) of the International Space Station (ISS). The SM/MPAC&SEED consists of the MPAC, which captures the space debris, and the SEED, which exposes the polymeric material, the paints, the adhesive, the bearing, and the compound material. The characteristic changes of each sample in the SM/MPAC&SEED exposed for about 10 months and 28 months are described.

1. はじめに

国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) の初期利用及び宇宙実証試験として、平成 11 年度から平成 17 年度の期間でロシアサービスモジュール (SM: Russian Service Module) を利用して微小粒子捕獲及び材料曝露 (MPAC&SEED: Micro-Particles Capturer and Space Environment Exposure Device) 実験を実施した。微小粒子捕獲実験では、人工物起源のスペースデブリや天然物起源のマイクロメテオロイドについて、衝突数計測および衝突粒子の分析を行うことにより、宇宙環境モデルの最新化に寄与することを目的としており、材料曝露実験では、宇宙機用材料の耐宇宙環境性を評価することで、宇宙機の高信頼性化および高性能化に繋げることを目指している。

本実験は、搭載サンプルを含めて全く同一の SM/MPAC&SEED を 3 式製作し、これらを同時に打上げて軌道上曝露を実施し、期間をおいて 1 式ずつ回収した。このような方法は世界初の試みであり、ほぼ同一の曝露環境における材料の経年劣化を直接比較することを可能としている。

本稿では、平成 17 年度までに評価が終了している第 2 式目回収試料（曝露期間約 28 ヶ月）を中心的に、成果の概要を報告する。

2. 研究の概要

(1)SM/MPAC&SEED ハードウェア及び軌道上曝露実験

本研究のために製作した SM/MPAC&SEED 実験装置の外観を Fig.1 に示す。宇宙ステーションの進行方向に対して表側 (RAM 面) と裏側 (WAKE 面) の両方が曝露できるようになっており、微小粒子捕獲 (MPAC) 用、材料曝露 (SEED) 用及び宇宙環境モニタ用のサンプルを搭載している。また、

地上帰還時の重量を減少させるために、装置本体からサンプルホルダのみを取り出せるように工夫されている。

MPAC 実験用サンプルについては、低軌道地球周回軌道（LEO: Low Earth Orbit）上の微小デブリやマイクロメテオロイドの捕獲を目的として、シリカエアロジェル及びポリイミドフォームを、また粒子の衝突数を計測するためにアルミプレートを搭載した。

SEED 実験用として搭載したサンプルを Table 1 に示す。これらのサンプルは、JAXA 及び大学や企業など国内の研究機関より提案された材料から、材料に起因する宇宙機の不具合の発生防止に役立つかどうか、宇宙機として将来性が有望な材料であるか、等の観点により選定されたものであり、構造材料、熱制御材料および固体潤滑剤など多岐に渡っている。

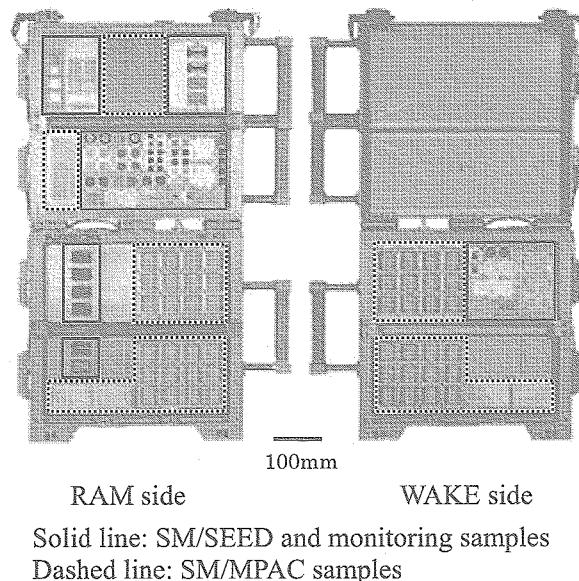


Table 1 SM/SEED samples.

Category	Sample name	Organization
Organic materials	Polyimide film	JAXA
	Poly-ether-ether-ketone film	Hokkaido University
	Carbon fiber reinforced plastics	Fuji Heavy Industries Ltd.
Inorganic materials	AlN, SiC, TiN-coated Al ₂ O ₃ , TiN coated Al	Tokyo Institute of Technology
	Cu-, Cu/BN-, TiN- or MoS ₂ -coated stainless steel	National Institute for Materials Science
	MoS ₂ -coated titanium alloy	IHI Aerospace
Solid lubricants	In tribo-coated bearings	Tohoku University
	Thermal-control white paint	JAXA
Paint	Silicone adhesive, Silicone potting compound	
Adhesives		

Fig. 1 SM/MPAC&SEED unit.

また、宇宙曝露実験時の宇宙環境に関する情報を得るために、被照射量に対する材料特性の変化量が既知であるベスペル®（原子状酸素）、ウレタンシート（紫外線）、アラニン線量計（放射線）などを宇宙環境モニタ用サンプルとして搭載した。

以上のような試料を搭載した 3 式の SM/MPAC&SEED は、2001 年 8 月にロシアのバイコヌール宇宙基地からソユーズロケットで打ち上げられ、同年 10 月の船外活動により、宇宙ステーションロシアサービスモジュール外壁に設置され、宇宙曝露実験を開始した (Fig. 2 参照)。1 式目および 2 式目のユニットは約 10 ヶ月、28 ヶ月の曝露後に、3 式目は 2005 年 8 月に約 46 ヶ月の曝露を経て地上に回収された。

材料曝露実験では、実際の宇宙空間に曝した材料について評価データを取得するだけでなく、地上で原子状酸素 (AO: Atomic Oxygen) や紫外線 (UV: Ultraviolet)、電子線 (EB: Electron Beam) を照射した対照試験や、過去の宇宙曝露実験のデータと比較し、相補的な解析を行うことが必須である。そこで、宇宙に曝露した同一のサンプルについて、宇宙曝露に先行して地上で AO、UV、EB を照射し、材料の劣化評価を行った。曝露軌道上の宇宙環境を模擬した AO、UV、EB の照射量は、JAXA の宇宙環境データベース SEES (Space Environments & Effects System: <http://sees.tksc.jaxa.jp/>) によるシミュレーション結果に基づき設定した。SEES では、宇宙機の軌道情報等を入力することで、銀河放射線の状況や太陽活動を考慮した軌道上の放射線環境や AO、UV の量をはじめとした宇宙環境を推定す

ることが可能である。

現在は、3式目の回収サンプルの評価を進めるとともに、地上対照試験のサンプルとの比較検討を行っている。また、上述した宇宙環境モニタ用サンプルの評価結果と SEES のシミュレーション結果を比較することで、各サンプルが曝されたより正確な宇宙環境を把握するための検討も進めている。本実験では多岐にわたるサンプルが搭載され、様々な興味深い実験結果が得られているが、本稿では微小粒子捕獲実験結果の一部と、張力を負荷した状態で宇宙環境曝露を行ったポリイミドフィルムと、熱放射制御用素子サンプルとして搭載したフレキシブル太陽光反射素子について、現時点での評価が終了している 2式目の回収サンプルまでの実験結果を紹介する。

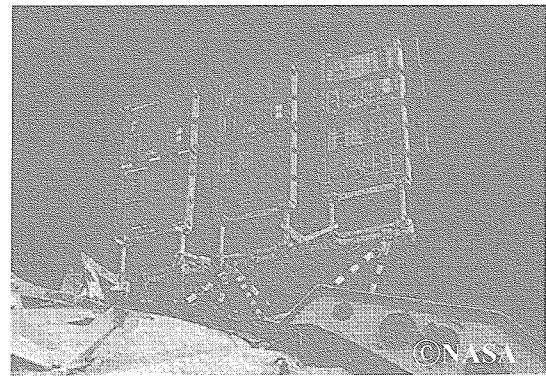


Fig. 2 Three units of SM/MPAC&SEED on the Russian Service Module.

3. 成果の概要

3. 1 曝露実験装置の打上げ及び回収

3式の SM/MPAC&SEED を搭載したプログレス補給船は、2001年 8月 21 日ソユーズロケットにより打上げられた。同年 10月 15日に実施された船外活動 (EVA: Extra-vehicular Activity) にて、サービスモジュール外壁に設置され、宇宙環境での曝露を開始した。

1式目の SM/MPAC&SEED は 315日（約 10ヶ月）の曝露の後、2002年 8月 26日に回収され、2式目及び 3式目のユニットはそれぞれ 2004年 2月 26日（曝露期間 865日、約 28ヶ月）及び 2005年 8月 18日（曝露期間 1403日、約 46ヶ月）に無事回収された。

3. 2 微小粒子捕獲実験^[1]

SM/MPAC については、試料表面の観察に加えてサンプルホルダ表面の調査を行い、ルーペ及び CCD スコープレンズにて粒子が衝突して生じた孔（衝突痕）について直径、深さ等の測定を行った。SM/MPAC として搭載された各試料について、衝突痕を計測した結果を Fig. 3 に示す。この図では、それぞれのサンプルでの衝突数を積み重ね棒グラフで示した。アルミプレートを除けば、衝突数は 1式目（曝露期間約 10ヶ月）より 2式目（曝露期間約 28ヶ月）のほうが多くなっており、曝露期間に対して順調に増加していることが伺える。しかしながら、実際には ISS の姿勢変更に従って、デブリ等の衝突確率も変わってくるため、曝露期間に対して衝突数が単純な増加傾向に従うとは限らず、今後 ISS の姿勢情報も含めた解析が必要である。

次に、回収されたエアロジェルの表面状態を Fig. 4 に示す。RAM 面搭載試料については、全体的に自濁化し、直径数十 μm 以下の細かい孔が多数観察された。さらに 2式目試料では、直径 100 μm

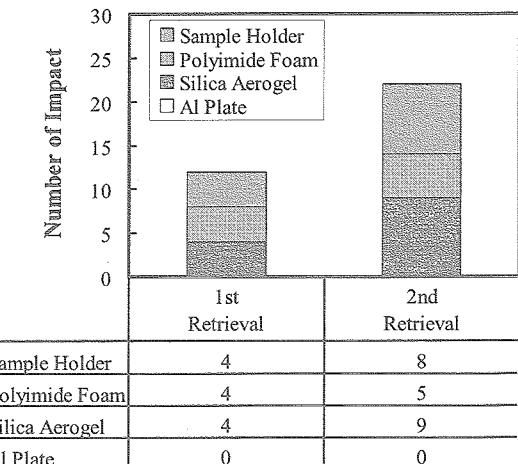


Fig. 3 Number of impact features on SM/MPAC&SEED.

程度の大きな孔も多数生じていた。一方で WAKE 面については黄褐色に変色しており、1 式目より 2 式目の試料のほうがその色合いが濃くなっていた。さらに、表面にはクラックが多数観察され、2 式目の方が 1 式目より細かくなっていた。エアロジェル表面の変質によって、粒子捕獲性能の低下が懸念されたが、エアロジェルの断面方向から観察したところ、明瞭な衝突トラックを確認することができた (Fig. 5(a))。さらに拡大すると (Fig. 5(b))、捕獲粒子も確認できたことから、表面が変質してもエアロジェルの粒子捕獲性能に影響はないと考えられる。

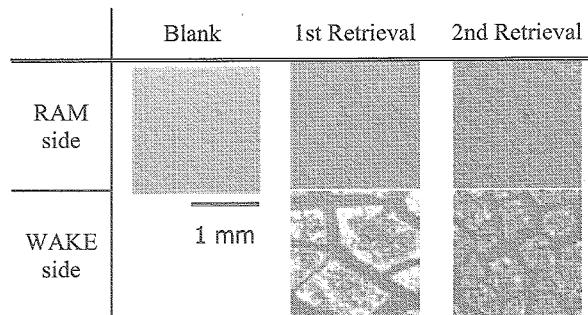


Fig. 4 Surface alterations of exposed aerogel.
(All pictures are same magnification)

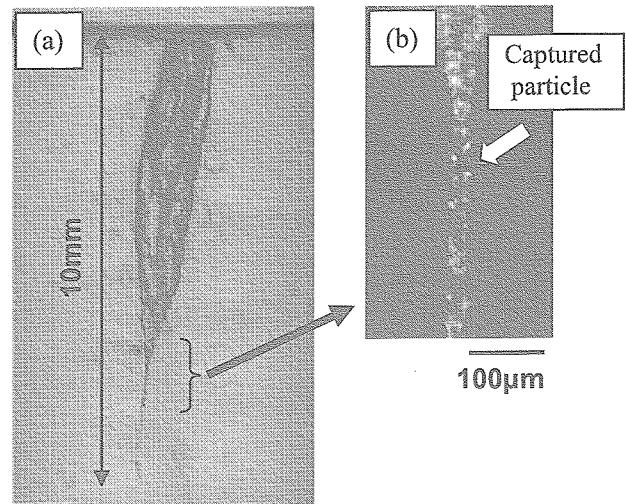


Fig. 5 Captured particle in 2nd retrieval silica aerogel.
(a) Typical track in silica aerogel (WAKE side).
(b) Magnified image (apical part).

3. 3 材料曝露実験

搭載試料の共通評価項目は、質量変化、熱光学特性（太陽光吸収率 (α_s)、垂直赤外放射率 (ε_N)）変化である。さらに、各試料固有の特性評価を実施した。曝露実験結果と比較するために、地上対照試験としてAO、UV及びEBの各単独照射を実施した。地上対照試験結果と比較することにより、宇宙環境曝露による材料の特性変化を総合的に解析する計画である。

3. 3. 1 張力負荷ポリイミドフィルム (UPILEX®-S) [2]

SM/SEEDでは、厚さ $125\mu\text{m}$ のポリイミドフィルム (UPILEX®-S) を 4 層重ねた試料に対し、無負荷 (0MPa)、低張力負荷 (1.4MPa) および高張力負荷 (7.0MPa) の 3 種類の張力を負荷した実験装置を搭載した。

約 28 ヶ月宇宙に曝露された後に回収したサンプルの外観写真を Fig. 6 に示す。曝露領域は変色しており、非曝露領域とは明らかに異なる表面状態を呈していた。FE-SEM 観察により、曝露領域は激しく侵食されていることが確認された (Fig. 7)。また、回収サンプルは曝露前と比較して質量減少が大きくなっていた。質量減少量を曝露面積とサンプルの密度で除して、平均的な膜厚減少量を推定すると、回収サンプル (約 10 ヶ月及び約 28 ヶ月曝露) の膜厚減少量は $5\sim10\mu\text{m}$ となった。

地上対照試験後のサンプルでは、AO 照射試験後のサンプル表面においてのみ回収サンプルと同様の侵食が観察され、また質量減少が見られた。よって、AO が侵食を引き起こし質量減少につながった原因と考えられる。これら表面状態の変化及び質量減少は、負荷張力に関わらず、全ての回収サンプル及び AO 照射サンプルで観察された。曝露期間に対する、回収サンプルの引張り強度の変化を Fig. 8 に示す。Fig. 8 に示した引張り強度は、質量減少より算出した平均的な膜厚減少を考慮して算出している。引張り強度は、曝露期間の増加に伴い減少した。一方、負荷張力の影響に関しては、約 10 ヶ月曝露した回収サンプル及び約 28 ヶ月曝露した回収サンプルのどちらにおいても、負荷張力の

違いによる顕著な強度変化は見られなかった。

地上対照試験では、ISS 軌道で約 1 年分に相当する量の UV または EB を照射した後においても、引張強度は未照射サンプルと比較し、ほとんど変化が見られなかった。一方、AO 照射後のサンプルは、AO 照射量の増加に伴い、引張強度が大きく減少した (Fig. 9)。また、回収サンプルと同様、負荷張力の影響は見られなかった。以上の結果から、宇宙環境に曝露された張力負荷ポリイミドフィルムの引張強度の減少は、AO に起因すると判断できる。また、試験した張力の範囲では、負荷張力による引張強度の低下がないことを確認した。

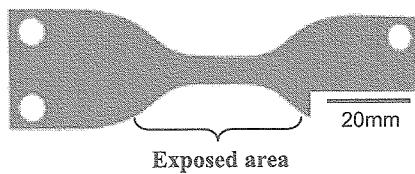


Fig. 6 Outermost surface of UPILEX®-S sample.
(2nd Retrieval)

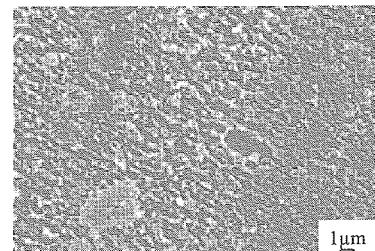


Fig. 7 Surface microstructure of exposed area
of polyimide film.

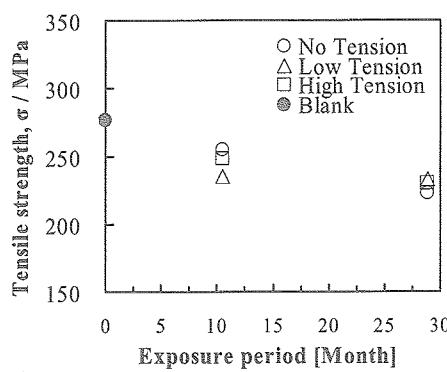


Fig. 8 Tensile strength of retrieved polyimide films.

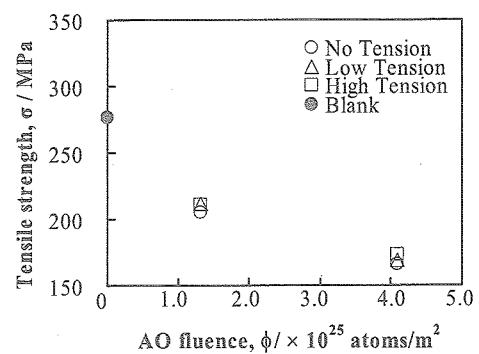


Fig. 9 Tensile strength of AO irradiated polyimide films.

3. 3. 2 フレキシブル太陽光反射素子 (F-OSR: Flexible-Optical Solar Reflector) ^[3]

評価の対象とした F-OSR は、ポリエーテルイミドをベースフィルムとして、表面に ITO (Indium-tin Oxide) 透明導電膜と酸化セリウム層、裏側に反射層 (Ag) と防食層 (Ni 合金) の多層構造を有した、厚さ約 100 μm のフィルムである。宇宙環境曝露後の熱光学特性及び質量変化を Fig. 10 に示すが、1 式目及び 2 式目回収試料のいずれも α_S および ϵ_N の変化はほとんど見られず、極めて優れた耐宇宙環境性を示した。

質量変化に関しては、曝露期間に応じて若干の増加が見られた。Fig. 10 は断面の微細組織であるが、曝露後の試料には新たな層 (以下、付着物層) の形成が認められ、その厚さは、曝露期間に応じて増加していた。この付着物層について FT-IR (フーリエ変換赤外分光法) によって分析したところ、主に SiO_x が検出された。Si は F-OSR に含まれない成分であることから、付着物層は Si を含む汚染に由来

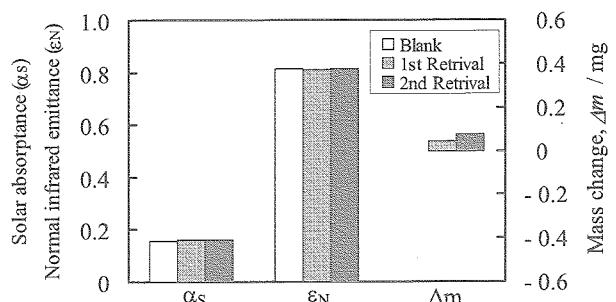


Fig. 10 Thermo-optical property and mass change of exposed F-OSR.

しているものと考えられる。Table 2 は、この付着物層を SiO_2 と仮定してその質量を推定したものであるが、曝露前後の質量変化に比較的近い値を示した。

4.まとめ

本報告では、SM/MPAC&SEED 実験にて軌道上曝露した試料の一部に関して、第 2 式目回収試料の評価結果を報告した。

MPAC 試料について、シリカエアロジェルは宇宙空間曝露によって外観上著しい変質が見られたが、衝突粒子の計測結果は概ね妥当であり、微小粒子捕獲能力に大きな異常は現れなかった。今後、詳細観察及び捕獲物の分析を通じて、軌道上ダスト環境の把握を行う予定である。

SEED 実験では、ポリイミド系試料について AO による著しい侵食が確認された。張力負荷試料では地上対照試験結果との比較から、宇宙環境における強度低下は AO の影響が大きいことを確認した。また、ほとんどの試料表面に Si を主体とする汚染が生じていた。しかしながら、F-OSR については未曝露品とほとんど変わらない熱光学特性を示しており、耐宇宙環境性に優れていることが明らかとなつた。

いずれの結果においても、曝露前、1 式目及び 2 式目と比較的順当な結果が得られており、本実験の特徴である 3 式同時打ち上げ及び順次回収の有効性が示されていると考えられる。現在行われている 3 式目回収試料の評価結果と併せて総合的な検討を行うことにより、耐宇宙環境性評価に関して有用な知見が得られることが期待される。

5. 謝辞

本研究は搭載試料提案者をはじめ、SM/MPAC&SEED の開発、運用および評価において社内外に渡る数多くの方々の御協力により行われました。この場を借りて、関係者全ての皆様に感謝の意を表します。

[参考文献]

- [1] Yamagata, I., et al.: "Overview of the Micro-Particles Capturer and Space Environment Exposure Device (MPAC&SEED) Experiment", Proceedings of the 10th International Symposium on "Materials in a Space Environment"(ISMSE), Collioure France, 2006, in press.
- [2] Shimamura,H. and Yamagata,I.: "Degradation of Tension-Loaded Polyimide Films in a Space Environment", Proceedings of the 10th International Symposium on "Materials in a Space Environment"(ISMSE), Collioure France, 2006, in press.
- [3] Miyazaki,E. and Yamagata,I.: "Results of the Space-Environment Exposure Experiment "SM/MPAC&SEED" on the International Space Station: Flexible Optical Solar Reflector", Proceedings of the 10th International Symposium on "Materials in a Space Environment"(ISMSE), Collioure France, 2006, in press.

Table 2 Estimation of new layer mass produced on F-OSR.

	Mass increase ΔM (mg)	New layer produced on F-OSR	
		Thickness (nm)	Estimated mass (mg)*
1st Retrieval	0.042	20	0.016
2nd Retrieval	0.071	80	0.065

* Calculated on the assumption that the condensed layer is whole SiO_2 (Density: 2.6 g/cm³, Exposure area: 3.14 cm²)