

# 宇宙航空研究開発機構特別資料

## JAXA Special Publication

---

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 回収試料評価結果  
第2回中間報告会 講演集

2007年3月

宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency





写真1. 国際宇宙ステーション  
(STS-114 ミッションにて撮影)

©NASA

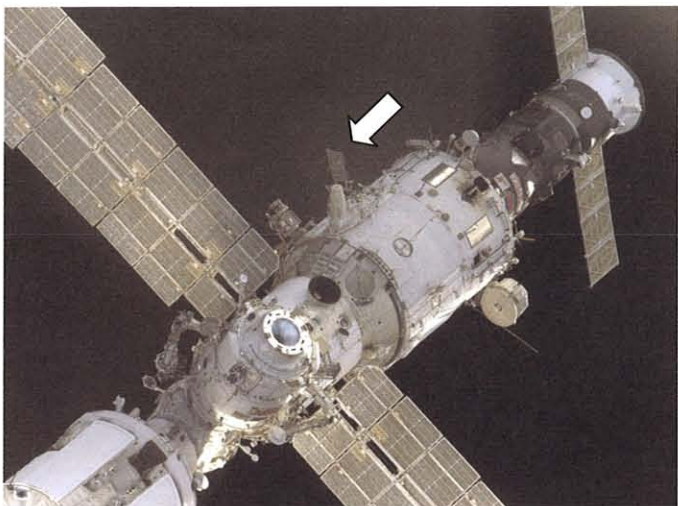


写真2. ロシアサービスモジュール  
(ズヴェズダ)拡大図

図中の矢印は、第2回実験装置回収後の  
SM/MPAC&SEED3 式目

©NASA

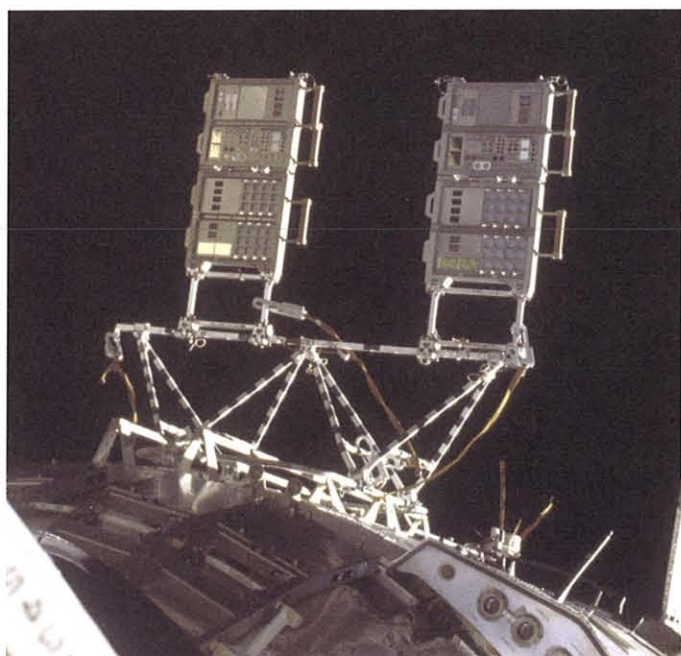


写真3. SM/MPAC&SEED 拡大図  
(第2回実験装置回収前)

©RSC/Energia, ©NASA



まえがき

宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、国際宇宙ステーションの初期利用として、ロシアサービスモジュールを利用した微小粒子捕獲実験及び材料曝露実験を行った。本実験では、同じ試料を搭載した実験装置 3 式を 2001 年 8 月にロシアのソユーズロケットで打上げ、同年 10 月に宇宙飛行士による船外活動によりロシアサービスモジュール外壁に 3 式を同時に設置して曝露実験を開始した。1 式目の試料は 2002 年 8 月に船内に回収され、11 月に地上に帰還した。2 式目の試料は 2004 年 2 月に回収、4 月に地上帰還、そして最後の 3 式目の試料は 2005 年 8 月に回収され、10 月に地上に帰還し、すべての試料が成功裏に回収された。

微小粒子捕獲実験では、スペースデブリ、マイクロメテオロイド等の宇宙空間に存在する微小粒子を捕獲し、その起源や存在・分布量を把握することを目的としており、微小粒子に関する宇宙環境モデルの構築にもデータは生かされる。材料曝露実験では、宇宙用の材料を宇宙環境に曝露し、その耐性、劣化挙動及び劣化メカニズムを評価・解明することを目的としており、大学、研究機関、民間企業など計 7 機関から提案され選定された試料を宇宙環境に曝露した。同じ試料を曝露期間を変化させて回収した今回の実験は世界でも初めての試みであり、新たな知見が得られることが期待される。

宇宙曝露実験という性格上、将来の宇宙開発あるいは関連の科学技術の発展に貢献できるかどうかは、回収した試料の分析・評価にかかっていると言っても過言ではなく、試料提案研究者間あるいは関連研究者との情報や意見交換が重要である。2004 年 3 月に、第 1 回の回収試料の分析・評価結果について意見交換する場として第 1 回中間報告会を開催した。2006 年 2 月には第 2 回の回収試料の分析・評価結果について議論するために第 2 回中間報告会を開催した。本講演集は、第 2 回の中間報告会の講演前刷をまとめたものである。

第 1 回、第 2 回の中間報告会での活発な討議を通して、宇宙環境が材料に及ぼす影響がかなり明確に捉えられつつあるが、一方、相反する結果やコンタミネーションの影響など、新たな課題も明らかとなってきた。現在、第 3 回目の回収試料の分析・評価が進められており、その研究成果は逐次報告されている。2008 年 3 月に全 3 回の回収試料の評価解析結果を総合した研究成果を報告する予定でいるが、宇宙開発だけでなく関連科学技術の発展に大きく寄与する成果が公表されるものと確信している。

2007 年 3 月

宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部

部品・材料・機構技術グループ

鈴木 峰男



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 回収試料評価結果  
第2回中間報告会 講演集

目 次

まえがき	
第2回中間報告会プログラム	1
第2回中間報告会開催結果概要	2
第2回中間報告会ポスター	3
実験概要・現状説明	5
軌道上曝露環境について	11
微小粒子捕獲実験(MPAC 実験)の評価結果報告	15
材料曝露実験(SEED 実験)試料提案機関による報告	23
北海道大学	25
東北大学	27
富士重工業株式会社	29
東京工業大学	31
(独)物質・材料研究機構	33
株式会社 IHI エアロスペース	35
(独)宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 部品・材料・機構技術グループ	37





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）  
第2回中間報告会

日 時：2006 年 2 月 21 日（火）13:30～17:50

会 場：宇宙航空研究開発機構 筑波宇宙センター  
総合開発推進棟 2 階中会議室 A

プログラム

- 13:30-13:35 開会挨拶  
JAXA 総合技術研究本部 参与 狼 嘉彰
- 13:35-13:50 実験概要・現状説明  
JAXA 総合技術研究本部 部品・材料・機構技術グループ 山県 一郎
- 13:50-14:10 軌道上曝露環境について  
JAXA 総合技術研究本部 部品・材料・機構技術グループ 木本 雄吾
- 14:10-14:50 微小粒子捕獲実験（MPAC 実験）の評価結果報告  
（発表：15 分、質疑応答：5 分）  
14:10-14:30 IHI/ISAS 北澤 幸人  
14:30-14:50 茨城大学 野口 高明
- 14:50-17:20 材料曝露実験（SEED 実験）試料提案機関による報告  
（発表：15 分、質疑応答：5 分）  
14:50-15:10 北海道大学 中村 孝  
15:10-15:30 東北大学 足立 幸志  
15:30-15:40 休憩  
15:40-16:00 富士重工業株式会社 荒川 陽司  
16:00-16:20 東京工業大学 小田原 修  
16:20-16:40 独立行政法人物質・材料研究機構 土佐 正弘  
16:40-17:00 株式会社 IHI エアロスペース 秋山 正雄  
17:00-17:20 JAXA 総合技術研究本部 部品・材料・機構技術グループ  
JAXA 総合技術研究本部 部品・材料・機構技術グループ 山県 一郎
- 17:20-17:40 全体質疑応答
- 17:40-17:45 今後の予定  
JAXA 総合技術研究本部 部品・材料・機構技術グループ 山県 一郎
- 17:45-17:50 閉会挨拶  
JAXA 総合技術研究本部 部品・材料・機構技術グループ 鈴木 峰男

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)  
第2回中間報告会

開催結果概要

1. 開催日時・会場

日 時:平成 18 年 2 月 21 日(火)13:30～17:50

会 場:独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 筑波宇宙センター  
総合開発推進棟2階 中会議室 A

2. 参加者数

○プロジェクト関係者 (試料提案者、選定チームメンバ、等)	27 名
○プロジェクト関係者以外の JAXA 職員	17 名
○一般参加者 (大学、民間企業等)	18 名

合計 62 名

以上

# 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

# 第2回中間報告会

日時 2006年2月21日(火) 13:30~17:50

会場 独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)  
筑波宇宙センター  
総合開発推進棟2階 中会議室A

参加費 無料

会場準備の都合上、**参加登録**にご協力下さい。

参加登録・お問合せ先:

総合技術研究本部 部品・材料・機構技術グループ

電話 029-868-4378 FAX 029-868-5969

電子メール seed@jaxa.jp





## 実験概要・現状説明





## 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）の実験概要

宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部

木本雄吾，鈴木峰男，山県一郎，宮崎英治，石澤淳一郎，馬場尚子，森一之，島村宏之

### 1. はじめに

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装置（Service Module/Micro-Particles Capturer and Space Environment Exposure Device：SM/MPAC&SEED）の実験概要、目的等について述べる。

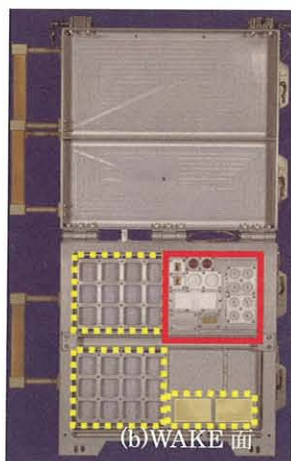
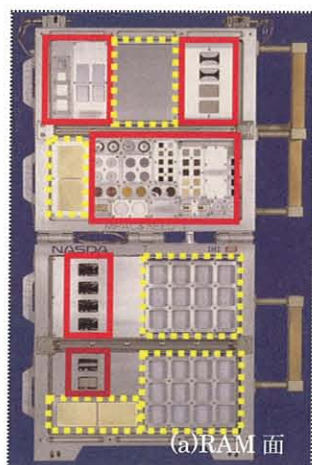
### 2. SM/MPAC&SEED 実験の目的

宇宙環境下に曝露された部品・材料は宇宙放射線、原子状酸素、紫外線等の影響を受け、劣化する。宇宙機の長寿命化、高信頼性化のためには、これら実影響を把握する必要がある。また地上で試験評価する手法、各種パラメータの把握等については、徐々に確立されつつある技術ではあるが、まだ完全には確立されていない。宇宙材料曝露実験は、宇宙空間に部品・材料を一定期間曝露する実験であるが、宇宙空間に曝露された材料を地上で解析することで、宇宙での実証することだけではなく、宇宙環境の影響の把握、地上評価手法の確立等、今後の宇宙用機器の開発に資する実験である。SM/MPAC&SEED は微小粒子捕獲実験装置（MPAC）と材料曝露実験装置（SEED）から構成される。MPAC はスペースデブリ、マイクロメテオロイド等の宇宙空間に存在する微小粒子を捕獲し、その起源や存在・分布量を把握する実験であり、微小粒子に関する宇宙環境モデルの構築にもデータは生かされる。SEED は宇宙用部品・材料を直接宇宙環境に曝露し、その耐性、劣化挙動及び劣化メカニズムを評価・解明するための実験である。SM/MPAC&SEED は同じ試料を搭載したコンポーネントが3式あり、打上げから約1年、約2年、そして3年後にそれぞれ地上へ回収されるシステムである。同じ試料を約1、2、3年毎に回収し評価を行うことで材料の経時変化評価を行うことができる。JAXA（旧 NASDA）は1992年のEOIM-III（Evaluation of Oxygen Interaction with Materials-III）ミッションへの参加、1997年STS-85フライトのMFD（Manipulator Flight Demonstration）の一部としてのESEM（Evaluation of Space Environment and effects on Materials：材料曝露実験）、SFU（Space Flyer Unit：1995年3月打上げ、1996年1月回収）のEFFU（Exposed Facility Flyer Unit：SFU搭載実験機器部）を通じ、材料曝露実験を行ってきた。

### 3. SM/MPAC&SEED の構成と搭載試料

SM/MPAC&SEED は同じ試料を搭載したコンポーネントが3式あるが、それぞれのコンポーネントは4つのサンプルホルダーとそのケースから構成される。サンプルホルダーのNo.3と4はRAM面とWAKE面に試料を搭載している。サンプルホルダーを図3-1に、搭載材料について表3-1に示す。

SM/MPAC&SEED は同じくNASDA（当時）の実験装置である高精細度テレビジョン（HDTV）カメラシステムと共に、日本時間2001年8月21日午後6時23分バイコヌール宇宙基地（カザフスタン共和国）からソユーズロケットにより打ち上げられた。その後、同年10月15日の船外活動（EVA）にて国際宇宙ステーションロシアサービスモジュール船壁SM/MPAC&SEEDは設置され、曝露実験が開始された。図3-2にEVAによる取り付け作業の様子と軌道上の運用状態（第一回収前）を示す。



実線：SEED 部分（環境モニタ材含）

点線：MPAC 部分

図 3-1 サンプルホルダー

#### SEED

	搭載実験試料名	実験試料提案機関	主な用途
1	CF/Polycyanate	富士重工業（株）	再利用型往還機用構造材料
2	CF/PIXA		
3	PEEK（張力負荷）	北海道大学 大学院	宇宙用膜構造物用構造材料
4	AlN	東京工業大学 大学院	宇宙用構造材料・機能材料
5	SiC（反応焼結）		
6	SiC（HP）		
7	TiN coated Al		
8	TiN coated Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
9	Ball Bearing -1	東北大学 大学院	宇宙用機構部品
10	Ball Bearing -2		
11	Ball Bearing -3		
12	SUS304	(独)物質・材料研究機構	宇宙用固体潤滑膜
13	Cu coated SUS304		
14	CuBN coated SUS304		
15	TiN coated SUS304		
16	MoS2 coated SUS304		
17	MoS2 coated Ti alloy	(株)アイ・エイチ・アイ エアロスペース	宇宙用固体潤滑剤
18	張力負荷 ポリイミドフィルム (UPILEX-S)	(独)宇宙航空研究開発機構	宇宙用膜構造物用構造材料
19	耐原子状酸素性向上型ポリイミドフィルム		宇宙用熱制御材料(フィルム)
20	フレキシブル 太陽光反射素子		宇宙用熱制御材料（塗料）
21	白色塗料		宇宙用接着剤
22	シリコン系 接着剤		宇宙用接着剤
23	シリコン系 ポッティング剤		宇宙用ポッティング材

#### MPAC

1	シリカエアロジェル	(独)宇宙航空研究開発機構	微小粒子捕獲
2	ポリイミドフォーム		衝突痕計測
3	アルミニウムプレート		



表 3-1 搭載試料



図 3-2 MPAC&SEED 取付船外活動 (2001 年 10 月)

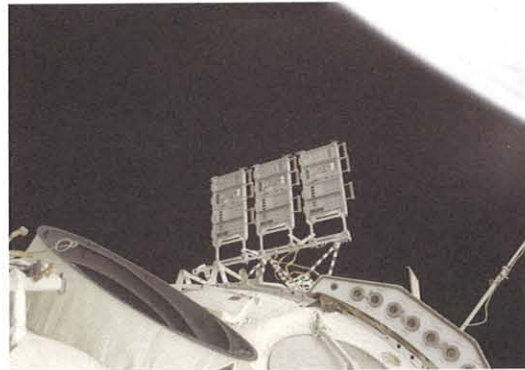


図 3-2 SM/MPAC&SEED の軌道上運用状態

第1式目の SM/MPAC&SEED は 2002 年 8 月 26 日に、2 式目の実験装置は 2004 年 2 月 27 日にそれぞれ ISS 内に回収された。第1式目の曝露期間は約 10 ヶ月間 (315 日間)、第2式目は約 28 ヶ月間 (865 日間) であった。曝露期間等スケジュールについて表 3-2 に示す。第3式目の ISS 内への回収は 2005 年 8 月 19 日に行われ、無事地上へ回収された。

表 3-2 スケジュール

2001	02	03	04	05	06	07
SM1 <span style="display: inline-block; width: 100px; height: 10px; background-color: red;"></span> 曝露期間 10 ヶ月						
SM2 <span style="display: inline-block; width: 200px; height: 10px; background-color: red;"></span> 期間 28 ヶ月						
SM3 <span style="display: inline-block; width: 300px; height: 10px; background-color: red;"></span> 期間 46 ヶ月						
船外活動 曝露開始 10/15	船外活動 SM1 改収 8/26		船外活動 SM2 改収 2/27		船外活動 SM3 改収 8/19	
打上げ 8/21	地上 11/10		地上 4/30		地上 10/11	

## 5. 研究発表リスト

- 1) I. Yamagata, et al., "OVERVIEW OF THE MICRO-PARTICLES CAPTURER AND SPACE ENVIRONMENT EXPOSURE DEVICE (MPAC&SEED) EXPERIMENT", The 10th International Symposium on "Materials in a Space Environment", ISMSE 2006, Collioure (France), June 2004 (to be published).
- 2) T. Inoue, et al., "Evaluation and Analysis of the First-Retrieved Specimens of the Space Environment Exposure Device (SM/MPAC&SEED)", 24th ISTS, June 2004.
- 3) 井上利彦ら, "国際宇宙ステーション ロシアサービスモジュール利用材料曝露実験 (SM/SEED 実験) 第1回回収試料の評価解析", 日本マイクロ重力応用学会 第20回学術講演会 (JASMAC-20), 福井, 2004 年.
- 4) F. Imai and K. Imagawa, "NASDA'S Space Environment Exposure Experiment on ISS - First Retrieval of SM/MPAC&SEED", 9th International Symposium on Materials in a Space Environment, ESA SP-540, pp. 589-594, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands, 2003.
- 5) 今川吉郎ら, "NASDA における宇宙用材料に関する研究概要", 日本金属学会 2003 年春期 (第132回) 大会, 千葉, 2003 年.



## 軌道上曝露環境について



## 軌道上曝露環境の解析結果

宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 木本雄吾, 山県一郎, 宮崎英治, 石澤淳一郎, 鈴木峰男

### 1. はじめに

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) において、第2式目回収品が曝露された期間の宇宙環境について、環境モニタ材を基に解析した結果を報告する。

### 2. 曝露期間と ISS の軌道条件

SM/MPAC&SEED は同じく NASDA (当時) の実験装置である高精細度テレビジョン (HDTV) カメラシステムと共に、日本時間 2001 年 8 月 21 日午後 6 時 23 分バイコヌール宇宙基地 (カザフスタン共和国) からソユーズロケットにより打ち上げられた。その後、同年 10 月 15 日の船外活動 (EVA) にて国際宇宙ステーションロシアサービスモジュール船壁 SM/MPAC&SEED は設置され、曝露実験が開始された。SM/MPAC&SEED は同一サンプルを搭載したものが3式あり、宇宙空間への曝露期間をずらして、1式ずつ地上へ回収される。第1式目の SM/MPAC&SEED は 2002 年 8 月 26 日に、2式目の実験装置は 2004 年 2 月 27 日にそれぞれ ISS 内に回収された。第1式目の曝露期間は約 10 ヶ月間 (315 日間)、第2式目は約 28 ヶ月間 (865 日間) であった。

ロシア、エネルギア社提供の実フライトデータと NORAD Two-Line Element Set Historical Archive からの軌道六要素から算出した ISS の軌道傾斜角 (平均) は 51.6 度、飛行高度 (平均) は 385km であった。ISS 飛行姿勢は、XPOP (X-axis Perpendicular on Orbit Plane : ISS の X 軸が軌道面に垂直となる飛行姿勢) と XVV (X-Axis toward the Velocity Vector : ISS の X 軸が進行方向を向く飛行姿勢) とが交互に運用されている。そのため、進行方向に対して試料面は常に垂直とはなっていない。XVV と XPOP の割合は第2回回収品の曝露期間においては、それぞれ 54% と 46% であった (第1回回収品の期間においては、59% と 41%)。

### 3. 環境モニタ材とその解析結果

SM/MPAC&SEED は電力及び通信を必要としないパッシブな実験のため、曝露された期間におけるその場の宇宙環境情報はリアルタイムにはモニタできない。そのため、材料へ及ぼす影響が大きい因子と考えられる、原子状酸素、紫外線、及び宇宙放射線 (主に捕捉電子と捕捉陽子) の被曝総量をモニタする材料を環境モニタ材として搭載し、地上で回収後解析し、それら環境因子を評価した。原子状酸素モニタ用としては、ポリイミド樹脂 (ベスペル) とカーボンフィルム (PAMDEC : Passive Atomic Oxygen Monitoring Device Equipped with Carbon Film) を使用した。紫外線モニタ用としては、ポリウレタン樹脂を使用した。宇宙放射線による放射線吸収線量モニタ用として、TLD (Thermo Luminescent Dosimetry)、アラニン線量計 (アミノグレイ) 及び RADFET (Radiation Sensitive Field Effect Transistor) を使用した。また軌道上温度については、各4つのサンプルホルダの裏側に設置したサーモラベルによって到達最高温度のみをモニタした。搭載場所について図 3-1 に示す。

環境モニタ材の評価結果について表 3-1 に示す。また JAXA の宇宙環境計測情報システム SEES

(<http://sees.tksc.jaxa.jp/>) にある各種モデルを用いて、原子状酸素、紫外線、放射線吸収線量の計算を行い、環境モニタ材の評価結果と比較した。原子状酸素について、ベスペルはモデル計算値、PAMDEC より 1 桁小さかった。一方で PAMDEC は第2回回収品データが第1回回収品データより減少したデータであった。紫外線について、WAKE 面の値は宇宙環境モデルからの値の 1.3 倍であった。一方、RAM 面の値は宇宙環境モデルからの値の 8 倍だ



った。RAM 面は、第 2 回回収品データが第 1 回回収品データより少ない値となり、RAM 面については、信頼性が乏しい結果となった。放射線吸収線量について、第一回回収時のデータはモデルとの乖離が大きい、第 2 回回収時の場合は、その差が小さくなった。3 つの環境モニタ材料のシールド厚 $[g/cm^2]$ と放射線吸収線量 $[Gy]$ の関係で比較した結果も、第 2 回回収時のデータは宇宙環境モデルの値へ近づいていた。

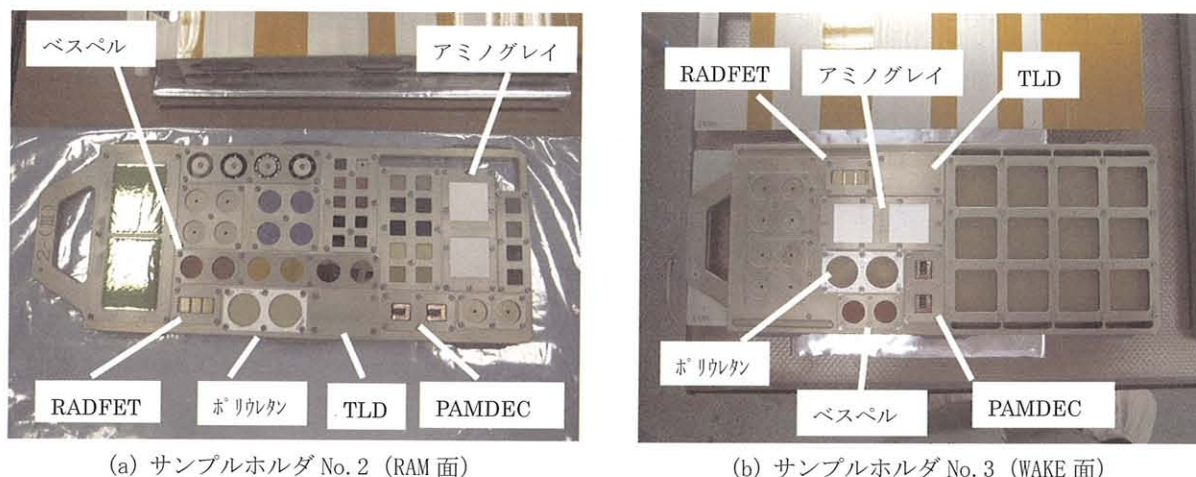


図 3-1 環境モニタ材の搭載場所

表 3-1 環境モニタ材の評価結果

	モニタ	解析結果	備考
到達最高温度	サーモラベル	50 $[^{\circ}C]$ 90 $[^{\circ}C]$	サンプルホルダ No. 1, 2 の裏面 サンプルホルダ No. 3, 4 の裏面
原子状酸素	ベスベル	$2.9 \times 10^{20} [atoms/cm^2]$ (RAM 面) $4.2 \times 10^{20} [atoms/cm^2]$ (WAKE 面)	
	PAMDEC	$1 \times 10^{21} [atoms/cm^2]$	
紫外線	ポリウレタン	15.8 [ESD] (RAM 面) 201.0 [ESD] (WAKE 面)	
放射線吸収線量	アミノグレイ	15.3 [Gy] (RAM 面) 21.9 [mGy] (WAKE 面)	Al 換算 0.15mm シールド厚
	RADFET	5.99 [Gy] (RAM 面) 4.29 [mGy] (WAKE 面)	Al 換算 0.8mm シールド厚
	TLD	115.86 [mGy] (RAM 面) 92.27 [mGy] (WAKE 面)	Al 換算 4.5mm シールド厚

#### 4. 評価結果と考察

原子状酸素フルエンスやトータルの紫外線量は第 1 回目回時に比較すると減少した結果が得られた。ベスベル、PAMDEC については、表面へのコンタミネーションによる影響によって計測原理の基となる侵食が妨げられたことが一因であると考えられる。また、WAKE 面ポリウレタンについては、保護カバーガラス表面への汚染量の増加の影響等があり、減少した計測結果が得られたと考えられる。放射線吸収線量については、ほぼ妥当な結果が得られたと考えられる。第 3 回目回収の環境モニタ材の解析結果を基に総合的な解析を今後行う。

#### 5. 研究発表リスト

- 1) Y. Kimoto, et al., "Measurement of Atomic Oxygen, UV Fluence and Radiation Effect on the ISS Using SEED Experiment", The 10th ISMSE, Collioure (France), 19-23 June 2006 (in printing).

# 微小粒子捕獲実験(MPAC 実験)の 評価結果報告





## SM/MPAC1 次評価 (初期分析) 報告

石川島播磨重工業(株) 北澤幸人, (株)エイ・イー・エス Michael J. Neish, 茨城大学 野口高明

宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 山県一郎, 木本雄吾, 石澤淳一郎, 鈴木峰男

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 藤原顯

### 1. はじめに

「ダスト捕獲実験」(MPAC: Micro-Particle Capturer)は、ISS 軌道上の宇宙ダスト (メテオロイド&デブリ) の存在量や組成等の調査を目的とする。この実験により、宇宙環境モデルの最新化に貢献するとともに、ISS の安全な宇宙活動に支障をきたす恐れのある微小粒子環境の把握、搭載機器や機構・部品等へダスト衝突の影響、ISS から放出されるダスト (2 次デブリを含む) 等の評価が可能と考えられる。ここでは 1 次評価 (初期分析) の中間結果として、全体目視観察及びダスト捕獲材として「シリカエアロジェル」を用いた実験を中心に報告する。

### 2. SM/MPAC1 次評価 (初期分析) の目的

1 次評価 (初期分析) では、MPAC 試料並びに構体の衝突孔や衝突痕 (もしくはそれらの可能性がある痕跡) を詳細評価 (2 次分析) に供するための基本データの取得、及び代表的な衝突孔や捕獲物の分析を行う。具体的には、次を主目的とする; 1) 構体を含む MPAC&SEED 全体 (SEED 試料を除く) の目視観察による、衝突孔 (痕) 候補の位置、形状、画像の記載、2) CCD スコープ等を用いた MPAC 試料の全面光学調査による衝突孔 (痕) 候補の位置、形状、画像の記載、3) シリカエアロジェルで検出された代表的な衝突孔・捕獲ダストの組成分析

### 3. MPAC&SEED 実験装置の全体構成及び MPAC 実験装置の構成

MPAC&SEED 実験装置の全体構成については、本中間報告会の鈴木ほかの講演を参照されたい。MPAC&SEED 構体の材質は 7075-T7352 アルミニウム合金、構体サンプル固定用のパネル (厚さ 1mm) は 6061-T6 アルミニウム合金である。MPAC 実験装置はパッシブ型のダストコレクタであり、ダスト捕獲材には、シリカエアロジェル、ポリイミドフォーム (厚さ 12.5  $\mu\text{m}$  のアルミ蒸着ポリイミドフィルム付)、及び 6061-T6 アルミニウム合金板の三種類を用いた。

### 4. 1 次評価 (初期分析) の実施手順

#### 4. 1 MPAC&SEED 構体の全体観察

8 倍のルーペを使用して、サンプルホルダの曝露面 (6 面 / 1 式) 全面の目視調査を行い、衝突孔・衝突痕の可能性のある痕跡の有無を確認した。確認した痕跡について、部品 ID、位置座標、CCD スコープによる拡大画像 (写真、スケッチ)、痕跡の概略寸法の記録を行った。

#### 4. 2 MPAC 試料 (ダスト捕獲材) の分析

##### (1) 6061-T6 アルミニウム合金板、及びポリイミドフォームの分析

CCD スコープ、レーザー顕微鏡を用いて全面サーベイを行い、衝突孔・衝突痕の位置座計測と画像取得を行った。

##### (2) シリカエアロジェルの分析

MPAC&SEED 全体の外観目視検査後、構体からエアロジェルを取外し、次の手順で分析を行った; 1) エアロジェル 1 個 (曝露面: 3.7cm $\times$ 3.7cm) 毎に 150 倍の CCD スコープ (FOV: 1mm $\times$ 1mm) で全面を目視検査、2) 衝突孔 (も

しくは類似の痕跡)の座標位置記録、及び写真撮影、スケッチの実施(なお、地上対照試験[超高速度衝突試験]での実績から、 $T/D_{\text{ent}}$ (孔の長さ/孔の入り口径) $>1$ を記録対象とした。)、3)衝突孔の形状パラメータ(長さ、深さ、孔径等)の計測及び捕獲物の調査、4)顕著な衝突孔や捕獲物について、周囲エアロジェルの切断及び捕獲物の抽出、5)衝突孔内壁や捕獲物に対し、SEM、EDS、ラマン分光分析等を用いた分析の実施。

## 5. 実施結果

### 5. 1 MPAC&SEED 構体の全体観察、アルミニウム合金板、及びポリイミドフォームの分析

詳細評価(2次分析)に供する位置・画像データを取得し、所期の作業目標を達成した。

### 5. 2 シリカエアロジェルの分析

シリカエアロジェルの WAKE 面は黄色に変色し、無数の細かなひび割れが確認できた。また、黄色化の濃度・ひび割れの細かさは、第2回収試料(以下、「SM#2」)は、第1回収試料(以下、「SM#1」)より顕著になっている。RAM 面は白濁化しており、SM#1 では入り口径が  $20\mu\text{m}$  程度以下、長さ  $300\mu\text{m}$  程度以下の衝突孔がエアロジェル1個あたり最大数十個みられた。一方、SM#2 では、「孔」に代わって乳白色状の楕円体状の異物(大きさ:平均  $100\mu\text{m}$  程度)がエアロジェル1個あたり数千個みられた。エアロジェルの表面の変質関わらず、入り口径が  $100\mu\text{m}$  以上の衝突孔の形状は、地上対照試験と良く一致し、また、孔内からは捕獲物や残留物が回収できた。

## 6. 考察

- 1)シリカエアロジェルによるダストフラックス実測値は、MASTER-2001 環境モデルの計算値より、大きな値を示す。  
この理由としては、MASTER-2001 の不確実性、過去のミッション(LDEF や ODC 等)でみられたものと同様な dust swarms (ダスト雲)の衝突、ISS やソユーズ、シャトルから放出されるデブリ(コンタミ)や二次デブリの影響等が考えられる。
- 2)シリカエアロジェル WAKE 面の変質は、シリカエアロジェル表面に金属蒸着を  $\mu\text{m}$  オーダーの厚さで施した時に発生した変質と類似している。また、SM#2 の RAM 面の異物は、シリカエアロジェルにアルコール(IPA)を噴霧した際に発生する異物と酷似している。変質原因特定のためには、コンタミネーションに関する詳細な情報が必要である。
- 3)エアロジェル表面の変質に関わらず、主要な衝突孔の形状は、地上対照試験と良く一致し、衝突孔形状からダスト衝突パラメータを推定可能と判断できた。また、捕獲物や残留物も検出できた。
- 4)金属アルミニウムや、酸化銀と硫化銀の混合物等、主として「スペースデブリ」が捕獲された。また、二次デブリと推定される捕獲物(直径  $20\mu\text{m}$  の酸化銀と硫化銀の混合体に、直径  $1\mu\text{m}$  程度の輝石粒子を含む)も存在した。捕獲物の組成分析の詳細は、本中間報告会の野口ほかの講演を参照されたい。

## 7. 研究発表リスト

- 1) T. Noguchi, Y. Kitazawa, M. J. Neish, I. Yamagata, Y. Kimoto, J. Ishizawa, M. Suzuki, A. Fujiwara, Y. Yamaura, S. Yamane; Passive measurement of dust particles on the ISS (MPAC): Third report on aerogel dust collectors, European Geosciences Union, General Assembly 2006 Vienna, Austria, 02 - 07 April 2006 (Abstract) (in printing), (2006).
- 2) 北澤幸人, Michael J. Neish, 野口高明, 山県一郎, 木本雄吾, 石澤淳一郎, 藤原顕, 鈴木峰男; 国際宇宙ステーションにおけるダスト捕獲実験 (MPAC), 日本金属学会 2006 年春期大会講演概要, 2006 年 3 月 21-23 日 (印刷中), (2006).
- 3) 北澤幸人, Michael J. Neish, 野口高明, 山県一郎, 今川吉郎; 国際宇宙ステーションにおけるダスト捕獲実験 (MPAC), 第2回スペースデブリワークショップ講演資料集, 独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 2005 年 12 月 8-9 日, 78-90, 2005, (2005).
- 4) M. J. Neish, Y. Kitazawa, T. Noguchi, T. Inoue, K. Imagawa, T. Goka, Y. Ochi; PASSIVE MEASUREMENT OF DUST PARTICLES ON THE ISS USING MPAC: EXPERIMENT SUMMARY, PARTICLE FLUXES AND CHEMICAL ANALYSIS, Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18-20 April 2005 (ESA SP-587, August 2005), (2005).
- 5) 北澤幸人; 宇宙開発と宇宙の「塵」, 港区ロータリークラブ講演集: 国際ロータリー第2750地区東京新南ロータリークラブ 2004~2005年度卓話抄録集, 32-34, (2005).
- 6) Y. Kitazawa, T. Noguchi, M. J. Neish, T. Inoue, J. Ishizawa, A. Fujiwara, K. Imagawa, Y. Yamaura, Y. Watanabe, A. Murakami; First Year Mission Results of Passive Measurement Experiment of Dust Particles on ISS (MPAC), Preprints of 24th Int. Symp. on Space Technology and Science, Miyazaki, Japan, 30 May to 6 June 2004 (CD-ROM), (2004).
- 7) Y. Kitazawa, M. J. Neish, T. Inoue, K. Imagawa, A. Fujiwara; First Year Mission Results of Passive Measurement Experiment of Dust Particles on ISS (MPAC), the 35th COSPAR Assembly, Paris, France, 17-25 July 2004, (Abstract), (2004).
- 8) M. J. Neish, K. Imagawa, T. Inoue, J. Ishizawa, Y. Kitazawa, Y. Yamaura, A. Murakami and Y. Ochi, Microparticle capture on the International Space Station using aerogel and polyimide foam; Proceeding of 9th International Symposium on Materials in a Space Environment, Noordwijk, The Netherlands, 16-20 June 2003, ESA SP-540, 431-435, (2003).
- 9) 宇宙開発事業団; 宇宙開発事業団技術報告 MFD 材料曝露実験 成果報告書, NASDA-TMR-000011, ISSN1345-7888, 宇宙開発事業団, 2001 年 3 月, (2001).
- 10) Y. Kitazawa, K. Kawachi, K. Fukasawa, Y. Yamaura, T. Miyadera, R. Nakamura, K. Imagawa, C. Kamakura, Y. Nakayama, and Y. Tachi; MPAC: Passive Measurement Experiment of Dust Particles on ISS, Proceedings of the twenty-second international symposium on space technology and science, 2077-2082, (2000).
- 11) 北澤幸人; 宇宙ダスト研究の現状 - 宇宙実験の観点から -, 日本マイクロ重力応用学会誌, Vol. 17, No. 2, 104-113, (2000).
- 12) 北澤幸人; 宇宙を創る『塵』, 日産アーク Monthly, Vol. 9, No. 9, (2000).
- 13) 北澤幸人, 藤原顕, 門野敏彦, 今川吉郎, 鎌倉千秋, 岡田豊, 上松和夫; シリカエアロジェルへの宇宙ダストの超高速衝突に関する実験的研究, 日本惑星科学会秋季講演会 講演予稿集, 305, (1999).
- 14) 北澤幸人, 河内啓輔, 荻原和広, 宮寺 岳仁, 中村 龍太, 今川吉郎, 鎌倉千秋, 中山陽一, 舘 義昭; 国際宇宙ステーション (ISS) に於けるダスト捕獲実験 (MPAC) の概要, 日本惑星科学会秋季講演会 講演予稿集, 306, (1999).
- 15) 鎌倉千秋, 今川吉郎, 中山陽一, 舘義昭, 河内啓輔, 北澤幸人, 荻原和広, 宮寺岳人, 中村龍太; 国際宇宙ステーション (ISS) に於ける微小粒子捕獲実験/材料曝露実験の概要, 第43回宇宙科学技術連合講演会 (日本航空宇宙学会主催) 講演論文, 神戸, 10月20-22日, (1999).
- 16) Y. Kitazawa, A. Fujiwara, T. Kadono, K. Imagawa, Y. Okada and K. Uematsu; Hypervelocity Impact Experiments on Aerogel Dust-Collector, Journal of Geophysical Research, Vol. 104 E9, 22035-22052, (1999).
- 17) 北澤 幸人, 天方 雷太, 河内 啓輔, 伏木 克美, 今川吉郎, 岡田豊; JEM曝露部搭載用微小粒子捕獲装置の開発, 第14回宇宙ステーション講演会講演集, 105-106, (1998).
- 18) 北澤幸人, 今川吉郎, 岡田豊, 藤原顕, 門野敏彦; エアロジェルを用いたダストコレクタの超高速衝突実験, 太陽系科学シンポジウム, 53-56, (1998).
- 19) Y. Kitazawa, K. Imagawa, Y. Okada, A. Fujiwara, T. Kadono, and R. Amagata; Hypervelocity Impact Tests and Post-Flight Analysis on MFD Dust Collectors, Proceeding of the 21th International Symposium on Space Technology and Science, 1842-1847, (1998).
- 20) NASDA ESEM Final Report, Evaluation of Space Environment and Effects on Materials (ESEM) Archive System, NASA Langley Research Center, NASA Home Page, 1998, <http://setas-www.larc.nasa.gov/esem/AOE.html>, (1998).
- 21) 大橋英雄, 北澤幸人, 矢野創; 宇宙空間でのダストの直接計測/捕集, 日本惑星科学会誌, 1997 年 12 月号, 312-325 (1997).
- 22) 矢野創, 北澤幸人, 木部勢至朗, 野上謙一; JEM 曝露部を用いたメテオロイド及びスペースデブリの直接捕集・

連続計測の研究, 第 13 回宇宙ステーション講演会 講演集, (1997)

- 23) M. J. Neish, S. P. Deshpande, S. Kibe, H. Yano, Y. Kitazawa, and S. Yamamoto: Micrometeoroid and space debris impacts on the Space Flyer Unit and hypervelocity impact calibration of its materials, Proc. Second European Conf. on Space Debris, ESA-SP-393, 177-182, (1997).
- 24) M. J. Neish, H. Yano, S. Kibe, S. P. Deshpande, Y. Kitazawa, and S. Yamamoto: Hypervelocity impact damage to Space Flyer Unit multi-layer insulation, Proc. Int'l Symp. on Materials in Space Environment, Toulouse, France, (1997).
- 25) M. J. Neish, S. Kibe, H. Yano and Y. Kitazawa: Impact calibration of SFU surfaces, 第 17 回衝撃波シンポジウム講演論文集, 衝撃波研究会・文部省宇宙科学 研究所・東北大学流体力学研究所, p233-236, (1997).
- 26) 北澤幸人, 今川吉郎, 藤原顯, 岡田豊; MFD 材料曝露実験用ダストコレクタの開発; 第 17 回衝撃波シンポジウム講演論文集, 衝撃波研究会・文部省宇宙科学 研究所・東北大学流体力学研究所, (1997).
- 27) H. Yoshida, H. Hoshi, K. Uematsu and Y. Kitazawa; A single, small particle launch system by electrothermal gun and microsabot, Review of Scientific Instruments Vol.68, No.1, Part 1, 178-183, (1997).
- 28) Y. Kitazawa, K. Imagawa, A. Fujiwara, H. Yoshida, K. Fusegi; Preliminary Study on Development of Dust Collector Using Low Density Material, 20th International Symposium on Space Technology and Science (Abstract), (1996).
- 29) 北澤幸人, 上松和夫; 微小デブリの衝突試験技術と計測技術, 平成 6 年度衝撃波シンポジウム 講演集, 衝撃波研究会・文部省宇宙科学 研究所・東北大学流体力学研究所, (1995).
- 30) 北澤幸人; 宇宙ステーション軌道上での微小デブリ計測の検討 第 11 回宇宙ステーション講演会講演集, p73-74, (1995).
- 31) Y. Kitazawa, A. Fujiwara, H. Yoshida, and K. Uematsu; Preliminary Study of Dust Impact onto Low Density Material International Astronomical Union (150th Colloquium) (Abstract), (1995).
- 32) 北澤幸人, 今川吉郎, 藤原顯, 岡田豊; 低密度物質を用いたダストコレクターの開発, 日本惑星科学会, 秋季講演会講演集, (1995)
- 33) 北澤幸人, 上松和夫; 微小デブリの衝突試験技術と計測技術, 石川島播磨技報 Vol. 35, No. 2, 143-149, (1995).
- 34) 北澤幸人; 微小デブリ観測/捕獲一体型計測器の検討, 第 38 回宇宙科学技術連合講演会講演集, (1994)
- 35) 北澤幸人, 上松和夫, 吉田博夫; MLI への微小デブリ衝突試験, 第 38 回宇宙科学技術連合講演会講演集, (1994)
- 36) 上松和夫, 吉田博夫, 北澤幸人, ; ET ガンを用いた微小デブリ衝突試験, 第 37 回宇宙科学技術連合講演会講演集, (1993).
- 37) 航空宇宙学会編: スペース・デブリ研究会報告書 (刊行物), 日本航空宇宙学会, (1993).
- 38) 木元健一, 森初男, 佐藤恵一, 北澤幸人, 三好孝一; デブリ観測/捕獲実験衛星の概念検討, 将来の宇宙活動ワークショップ/月面基地ワークショップ 92, (1992).

## SM/MPAC&SEED 第2回回収試料に含まれる2次デブリの詳細分析

茨城大学 野口高明, 九州大学 中村智樹, 石川島播磨重工業㈱ 北澤幸人

### 1. はじめに

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) の2回の回収エアロジェルの1次評価概要については、北澤ら<sup>1)</sup>, Neish et al.<sup>2)</sup> において報告されている。本発表では、我々は第2回回収のエアロジェルに観察された顕著な試料捕獲トラックのひとつから捕獲された粒子の詳細分析について報告する。実際に大気圏外において曝露を行ったエアロジェルから捕獲粒子を取り出して分析を行った研究は、最近まで Mir に搭載したエアロジェルから捕獲粒子を取り出して分析した例 (Hörz et al., 2000) などわずかであった。しかし、Stardust 探査機に搭載したエアロジェルで捕獲した研究例が今後爆発的に増加すると考えられる。この場合、捕獲粒子に各種非破壊分析を行うのでは、捕獲粒子について誤った結論を導く可能性があるため<sup>3)</sup>、エアロジェルから粒子を取り出しての分析は重要である。

### 2. 分析した試料と作業手順について

第2回回収の SM/MPAC&SEED に搭載されていた ISS の Wake 面側シリカエアロジェルのひとつに見られたキャロット状のトラックに捕獲されていた黒および透明の粒子を、茨城大学理学部のクリーンルームにおいて、実体顕微鏡下で鋭利なタングステン針を用いてエアロジェルから取り出した。取り出した試料は、直径  $5\mu\text{m}$  のグラスファイバーにアセトンに可溶な接着剤を極少量用いて取り付け、高エネルギー加速器研究機構の放射光実験施設において、X 線回折を行なった。透明な粒子はシリカエアロジェルの融けたものであったが、黒い粒子は銀の酸化物と硫化物の混合物であると同定された。この粒子について、さらに茨城大学機器分析センターの透過電子顕微鏡 (TEM) を用いて詳細観察を行った。TEM 試料は、超薄切片法を用いて作成した。また、超薄切片を切り出した残りの試料断面を同センターの走査電子顕微鏡 (SEM) で観察した。

### 3. 結果と議論

捕獲粒子の主要構成物質は、 $\text{Ag}_2\text{O}$  (立方晶系) と  $\text{Ag}_2\text{S}$  (単斜晶系、鉱物の arcanthite と同結晶構造) である。超薄切片を観察すると、捕獲粒子の表面  $0.2\mu\text{m}$  は連続的なリム構造を持っている。リムは、捕獲粒子全体の内部に比べて粗粒 (直径  $50\text{-}100\text{nm}$ ) の  $\text{Ag}_2\text{S}$  と酸化銀、これらの粒子の粒間を埋める S を含むアモルファスな物質からなる。この S を含むアモルファス物質は非常に不安定で、電子線が照射されるとすぐに分解が始まり S が失われる。電子線回折によると、捕獲粒子表面の酸化銀は、複雑な双晶を持つものも多く、 $\text{Ag}_2\text{O}$  以外の酸化銀も含まれている。それに対して内部は極細粒 (直径  $<30\text{nm}$ ) の  $\text{Ag}_2\text{O}$  結晶のゆるい集合体である。捕獲粒子の断面試料の SEM 観察からも、内部には大きな空隙があることが分かる。しかし、このような物質が人工衛星やロケットのどのようなところで用いられていた物質であるかは現状では明らかではない。

捕獲粒子の超薄切片のひとつからは、捕獲粒子のリムに Ca に乏しい輝石（直径  $<1.5\mu\text{m}$ ）が見出された。その電子線回折パターンは斜方輝石であることを示している。TEM に取り付けたエネルギー分散型スペクトロメータ（EDS）によって、 $\text{Wo}_1\text{En}_{85}\text{Fs}_{14}$  ( $\text{Ca}_{0.02}\text{Mg}_{1.70}\text{Fe}_{0.28}\text{Si}_2\text{O}_6$ ) という化学組成を持つことが分かった。輝石は隕石や宇宙塵に一般的な鉱物である。地球上で回収あるいは捕集された地球外物質ばかりでなく、Mir においてエアロジェルを用いて捕獲されたマイクロメテオロイドにも Ca に乏しい輝石が確認されている。このように一般的な鉱物であることから、この輝石粒子は、このスペースデブリを発生させたメテオロイドの残留物ではないかと考えられる。言い換えると、このスペースデブリは 2 次デブリである可能性が高い。

残留鉱物粒子はただ一粒発見されただけなので、その起源に対する不確定性は大きい。しかしながら、地球上で捕獲・採集される各種の宇宙塵や隕石の中では、化学組成の均一な  $\text{Fs}_{15}$  から  $\text{Fs}_{20}$  程度の斜方輝石を多く含むものは比較的限られている。隕石の中では普通コンドライトというもっとも数の多い隕石のグループに属する H コンドライトが代表的なものである。H コンドライトは地球上で回収された隕石の 31% を占める一般的な物質である（Grady, 2000）が、数百  $\mu\text{m}$  以下の宇宙塵にはほとんど存在しないことが知られている（Beckerling and Bischoff, 1995）。このことを考慮すると、2 次デブリを発生させる元となったメテオロイドは H コンドライト的物質であり、約 1mm 以上ある隕石的なサイズを持った物質であった可能性が高いと考えられる。

#### 4. エアロジェルからの粒子取出しについて

本報告において捕獲粒子の掘り出しは実体鏡下でフリーハンドで行ったが、フリーハンドでは直径約  $20\mu\text{m}$  以下の捕獲粒子の回収の成功率は相当低い。より小さな捕獲粒子の取り出しを確実に出来るようにするため、本年度の科研費で駿河精機製電動マイクロマニピュレータを導入し、エアロジェル捕獲実験によって捕獲された微小粒子の掘り出しを試みている。角膜手術用の小型メスを用いているがエアロジェルを滑らかに切り出すことは困難である。最近、エアロジェルの切り出しにはピエゾアクチュエータを取り付けた小型メスが非常に有効であるという論文が出た（Ishii et al., 2005）。この論文によると、アクチュエータの振動数（50-60Hz 程度）をコントロールすると滑らかに切り出すことが可能である。次年度の JAXA の MPAC 分析にあったっては、ピエゾアクチュエーターを導入し、捕獲粒子の取り出しの確実性を向上させるとともに、より小さな捕獲粒子の取り出し・分析を可能にすることが適切である。

#### 5. 研究発表リスト

- 1) 北澤幸人, Neisch, 野口高明, 山県一郎, 木本雄吾, 石澤淳一郎, 鈴木峰男, 藤原顕 SM/MPAC 1 次評価（初期分析）報告. 本報告書.
- 2) M. J. Neish, Y. Kitazawa, T. Noguchi, T. Inoue, K. Imagawa, T. Goka, Y. Ochi; PASSIVE MEASUREMENT OF DUST PARTICLES ON THE ISS USING MPAC: EXPERIMENT SUMMARY, PARTICLE FLUXES AND CHEMICAL ANALYSIS, Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18-20 April 2005 (ESA SP-587, August 2005), (2005).
- 3) T. Noguchi, T. Nakamura, K. Okudaira, H. Yano, S. Sugita, and M. J. Burchell (投稿中) Thermal alteration of hydrated minerals during hypervelocity capture to silica aerogel at the flyby speed of STARDUST. Meteoritics and Planetary Science.

材料曝露実験(SEED 実験)

試料提案機関による報告





## PEEK 膜材の張力負荷宇宙環境曝露実験

北海道大学大学院工学研究科機械宇宙工学専攻

中村 孝, 藤田 修

### 1. はじめに

国際宇宙ステーション(ISS)や多くの人工衛星が飛行する高度 100~1000km の低地球軌道 (LEO) は、原子状酸素(AO)、紫外線(UV)、各種放射線が作用する過酷な環境である。特に高分子材料を宇宙機の構造部材に使用するためには、これらの環境因子が材料強度に与える影響を明確にしておく必要がある。そこで本研究では、耐熱高分子ポリエーテルエーテルケトン (PEEK) の膜材を張力を加えた状態で ISS 軌道に曝露する実験を行なった。さらに、この結果を地上対照実験(試料への AO, UV, および電子線(EB)の照射実験)の結果と比較することで、PEEK の強度特性に与える LEO の環境因子を明らかにした。

### 2. 実験方法

供試材は厚さ 0.4 mm の PEEK シート(住友ベークライト製 FS-1100C)である。試料形状は長さ 97~100mm, 平行部幅 30, 18, 6mm の 3 種類であり、それぞれに 0 MPa, 1.6MPa, 4.7MPa の引張応力が生じるようにスプリングを用いて張力を加えた。この 3 種類の試料を 1 式として、合計 3 式を ISS 軌道に曝露した。本報告では軌道に 315 日曝露した第 1 回回収試料と、865 日曝露した第 2 回回収試料の分析を行った。曝露前後の試料について、表面観察および質量計測を行った。その後、曝露試料から、幅 1mm×長さ 80mm の試験片を切り出し、温度  $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $50\pm5\%$  に 48 時間保持した後、同一環境で引張試験を行った。引張試験は、無負荷材、低負荷材、高負荷材それぞれ 3 回ずつ、ASTM-D882-95a に従って実施した。

### 3. 実験結果

**3. 1 材料劣化とその影響因子** Fig.1 に無負荷の曝露試料を示す。同図中央の矩形部が曝露領域である。この領域は茶色に変色し、周囲と比べて光沢を失っていた。曝露期間や負荷応力に関わらず、全ての試料にこの特徴が認められた。地上での AO, UV, EB 照射実験のうち、茶色の変色をもたらしたのは UV のみであり、光沢を消失させたのは AO だけであった。したがって、この領域は AO と UV に同時に曝されたものと判断できる。質量測定の結果、全ての試料において曝露後に質量の減少が認められた。地上実験のうち質量損失が確認されたのは AO 照射実験に限られることから、この理由は AO が曝露部表面を退行させたためと判断される。質量減少量を曝露面積と試料の密度で除して、平均的な膜厚減少量を求めた。その結果を Fig.2 に示す。膜厚減少量は第 1 回回収試料で  $4\sim6\mu\text{m}$ 、第 2 回回収試料で  $7\sim10\mu\text{m}$  となり、曝露期間の増加に伴い増大している。この膜厚減少量と曝露中の負荷応力の間に明瞭な傾向は認められなかった。

膜厚減少を考慮して、曝露後の断面積で引張試験結果を整理したところ、曝露期間や負荷応力に関わらず、弾性率、および降伏強さに変化は生じないことが示された。これに対し、

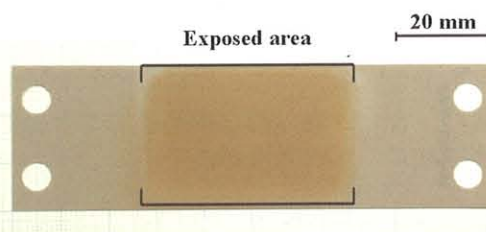


Fig.1 Test piece surface  
(2nd retrieved sample, stress:0MPa)

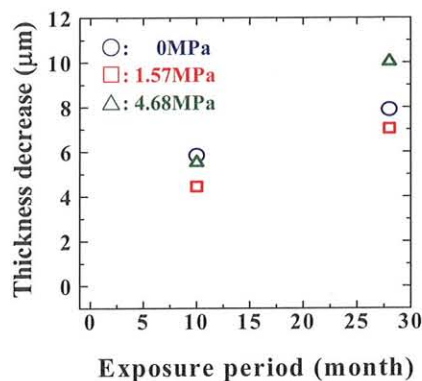


Fig.2 Relation between thickness decrease and exposure period

破断伸びは曝露後に減少した。Fig. 3 に破断伸びに及ぼす曝露期間と負荷応力の関係を示す。同一の負荷応力で比較すれば、曝露期間の長いほど破断伸びは小さくなっている。特に第2回回収試料の破断伸びは曝露前の20~60%に低下した。地上実験の中で試料の破断伸びを減少させたのはUVだけであったことから、この挙動は軌道上のUVに起因すると判断できる。また、第1回回収試料、第2回回収試料ともに、応力を加えた試料の破断伸びは無負荷のそれに比べて大きな値を示しており、機械特性に及ぼす環境と応力の相乗効果が確認された。

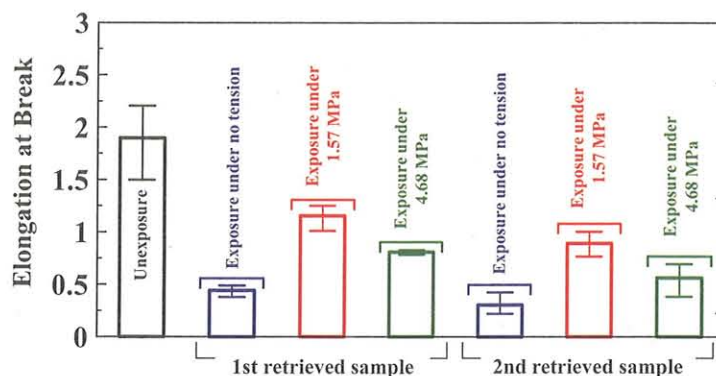


Fig.3 Elongation at break before and after exposure

**3.2 コンタミネーションの影響** 前節では材料劣化とその影響因子を定性的に示したが、宇宙環境の計測値と材料劣化量の整合性は必ずしも得られていない。JAXA 技術資料 GDZ-05005 によれば、第2回回収試料のA0フルエンスは $1 \times 10^{21}$  (atoms/cm<sup>2</sup>)のオーダーである。地上で同程度のA0 ( $1.31 \times 10^{21}$  (atoms/cm<sup>2</sup>))を照射した場合の膜厚減少量は約45  $\mu$ mであったのに対し、第2回回収試料の膜厚減少量(7~10  $\mu$ m)は、この値の約20%に過ぎない。また、同資料においてUVフルエンスは約200ESD  $\approx 2 \times 10^5$  (J/cm<sup>2</sup>)の値と報告されている。地上でこの約1/6のUV ( $3.47 \times 10^4$  (J/cm<sup>2</sup>))を照射した試料の破断伸びが照射前の3~5%にまで低下したのに対し、第2回回収試料の破断伸びは曝露前の20~60%に留まっている。つまり、曝露試料が受けた実際のA0およびUV量は宇宙環境計測値より小さい可能性がある。この要因を調べるために、試料表面のコンタミネーションについて検討した。Fig. 4 に曝露部の拡大写真を示す。表面には、白く明るく見える領域が認められ、一部に暗い部分が観察された。この白い領域の曝露部面積に対する割合は、負荷応力や曝露期間に関わらず、70~80%であった。また、元素分析の結果、曝露前に比べSiとOの検出強度の増加が認められた。以上からFig. 4の白い領域は酸化ケイ素系の化合物と考えられる。酸化ケイ素はA0との反応性が低く、また、光の透過率も低いことを考えると、曝露試料の劣化はこのような化合物によって妨げられていた可能性が高い。

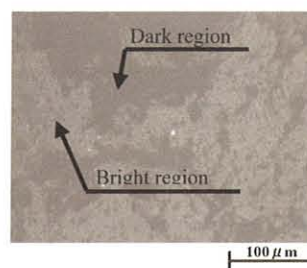


Fig.4 High magnification view of the exposed area (2nd retrieved sample, stress:1.5MPa)

#### 4. 研究発表リスト

- (1) Nakamura, H., Nakamura, T., Noguchi, T., Imagawa, K., "Photodegradation of PEEK sheets under tensile stress", Polymer Degradation and Stability, Vol.91, pp740-746, (2006)
- (2) 中村 寛, 中村 孝, 野口 徹, 藤田 修, 今川吉郎, 井上利彦, "原子状酸素を照射したPEEK膜材の機械特性", 日本機械学会論文集 (A編), 71巻, 710号, pp1327-1332, (2005)
- (3) Nakamura, T., Nakamura, H., Fujita, O., Noguchi, T. and Imagawa, K., "The Space Exposure Experiment of PEEK Sheets Under Tensile Stress", JSME International Journal, Ser. A., Vol.47, No.3, pp 365-370, (2004)
- (4) Nakamura, T., Nakamura, H., Fujita, O., Imagawa, K., Noguchi, T., and Inoue, T., "The Space Exposure Experiment of Tension Loaded PEEK Sheets Utilizing the International Space Station", Proceedings of the 24th International Symposium on Space Technology and Science (Selected Papers), pp756-759, (2004)
- (5) Nakamura, T., Nakamura, H., Fujita, O., Noguchi, T., Imagawa, K. and Inoue, T., "Damage Properties of PEEK Films Irradiated by Atomic Oxygen", Key Engineering Materials, Vols.261-263, pp 1617-1622, (2003)
- (6) Nakamura, T., Nakamura, H., Fujita, O., Noguchi, T. and Imagawa, K., "The Degradation of PEEK Sheets Accelerated by Stress in a Real Space Environment Based on the Space Exposure Experiment", Proceedings of the International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics, CD-ROM, (2003)



## 宇宙用固体潤滑剤(トライボコーティング膜を施した玉軸受)の曝露実験 -曝露環境下の宇宙機器のための新固体潤滑膜形成法-

東北大学大学院工学研究科

機械システムデザイン工学専攻 足立 幸志

### 1. はじめに

しゅう動部における「摩擦制御」は、宇宙機器の信頼性と耐久性を保证するためのキーテクノロジーである。宇宙機器に代表される真空環境下における機器のしゅう動部の多くは、固体潤滑剤を用いて潤滑される。しかし固体潤滑は、液体を用いた潤滑と比較し「高摩擦であり潤滑剤の摩耗による寿命が存在する」などの本質的に避けられない欠点を有している。

これに対し、従来使用されている軟質金属薄膜より低い摩擦係数を半永久的に持続することのできる固体潤滑法として In-situ トライボコーティング潤滑法が提案され、すべり摩擦試験及び玉軸受試験においてその有効性が実証されている<sup>(1)</sup>。

本プロジェクトでは、このトライボコーティングを施した玉軸受と一般的に使用される既存の真空玉軸受を曝露実験に供し、宇宙環境への曝露によるこれら潤滑膜の材料特性および軸受の摩擦特性の変化より、トライボコーティング膜の曝露環境下の宇宙機器のための新固体潤滑膜形成法としての可能性を明らかにすることを主たる目的とする。

### 2. 成膜及び実験装置

トライボコーティングシステムを有する玉軸受摩擦試験機の概略を図1に示す。スラスト荷重は錘によって外輪のみに与られ、軸受の内輪はモータにより直接駆動される。軸受に発生する摩擦力は外輪の回転を抑える板ばねに貼り付けたひずみゲージの出力から算出した。潤滑剤(インジウム: In)を内蔵しモリブデン(Mo)線を巻きつけたセラミック製の坩堝が、玉軸受の下部に設置され、Mo線に通電加熱することにより被膜材料を蒸発させ、トライボコーティング膜を形成する。これらの装置は、 $10^{-6}$  Pa の真空下に設置された。

トライボコーティングを施した2種類の玉軸受と一般的に使用される既存の真空玉軸受の合計3種類を曝露実験に供した。試験片の仕様を表1に示す。

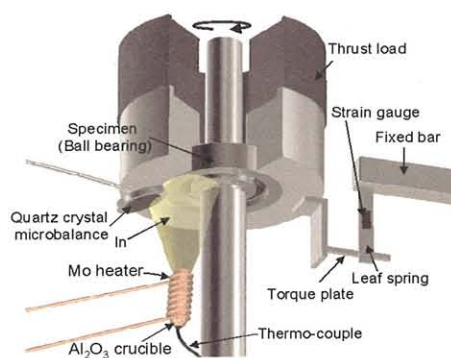


図1 成膜・摩擦実験装置の概略図

表1 3種類の試験片の仕様

内外輪	SUS440C		
玉	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SUS440C (MoS <sub>2</sub> )	
保持器		SUS440C	フッ素樹脂
潤滑剤	Tribo-coated In		MoS <sub>2</sub> フッ素樹脂
質量	17.32 g	18.21 g	18.00 g
ID	BR1	BR2	BR3
形状 (厚さ8mm)			

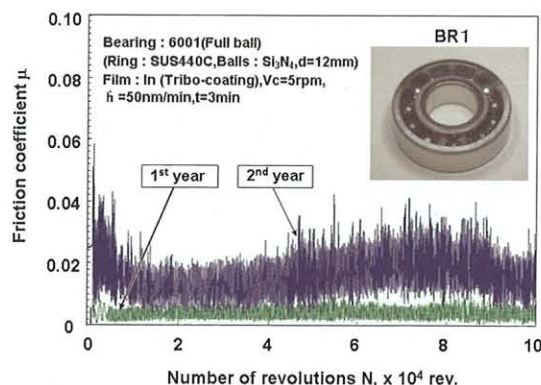


図2 曝露試験片の摩擦特性

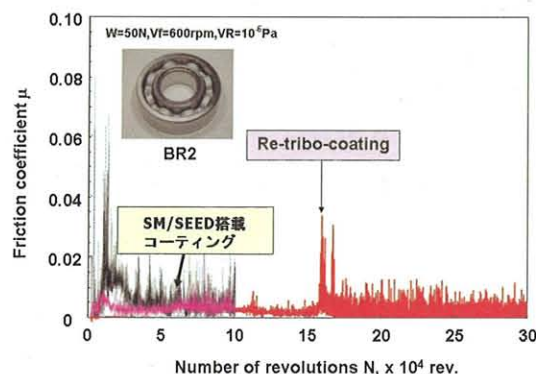


図3 曝露試験片の再トライボコーティング

### 3. 曝露実験結果

図2に、1,2年間宇宙空間に曝露させた玉軸受(BR1)の摩擦特性を示す。1年間宇宙環境に曝露した玉軸受の摩擦特性は、初期の低い摩擦状態を維持しているのに対し、2年間宇宙環境に曝露した玉軸受では、相対的に高い摩擦特性を示している。2年間宇宙環境に曝露させたBR3の摩擦特性も同様に高い特性を示しており、いずれの試験片においても、宇宙環境下において潤滑膜の特性が劣化したことを示唆している。

図3にBR2の試験片(1年間曝露)において、摩擦係数の急増が見られた地点での再トライボコーティングの結果を示す。1x10<sup>5</sup> cycleの低摩擦の後に潤滑膜の消失に伴う摩擦係数の上昇が観測されたが、再トライボコーティングにより、再び当初の低い摩擦に修復することに成功している。これは、宇宙環境に曝露した試験片であっても、軸受使用中の再トライボコーティングにより潤滑膜の修復が可能であることを実証した結果といえる。

### 4. おわりに

2年間、宇宙空間に曝露した試験片においては、いずれの試験片においても相対的に高い摩擦特性を示した。また、1年間宇宙空間に曝露した試験片であっても、1x10<sup>5</sup> cycleでの摩擦の急増が見られ寿命の低下を示した。これらは宇宙環境における曝露の影響と考えられるが、本実験のもつ特異性を考慮した場合、現時点で曝露による潤滑剤の劣化のみの影響であるとの判断は困難である。これらの点に関しては、3年間宇宙環境に曝露された試験片の結果を含め総合的に判断する予定である。

一方、宇宙環境に曝露された試験片であってもトライボコーティング法による潤滑膜のその場修復の可能性を示せたことは大きな意義を持つ。現在、研究室にて進行中のその場トライボコーティングのためのマイクロユニットを導入し、宇宙環境に曝露されるような環境であっても、潤滑特性の変化を感知、診断そして修復し、常に低い摩擦を実現できる自己修復軸受実現の可能性を意味している。

### 参考文献

- (1) K. Adachi, H. Shibuya, S. Obara, K. Kato, Film formation mechanisms of indium by tribo-coating on ball bearing in UHV, Synopses of the International Tribology Conference, Kobe, 2005 82005) P-44.

## 宇宙機構造用複合材料曝露試験評価

富士重工業株式会社 航空宇宙カンパニー  
航空機設計部 荒川陽司

### 1. はじめに

現在、多くの宇宙機に軽量化を目的として炭素繊維強化プラスチックを初めとする複合材料が適用されている。複合材料の宇宙空間での適用が増加するとともに、複合材料の宇宙環境因子(電子線、紫外線、熱サイクル、超真空、原子状酸素)による影響に関する宇宙環境を模擬した地上での研究が数多く実施されてきた。しかし、その結果では、複合宇宙環境の影響は、単一環境の単なる足し算とはならないことが知られており、複合材料の宇宙環境での耐久性を正確に知るために、すべての宇宙環境因子を同時に負荷する総合環境での評価が必要である。しかし現実的には、地上ですべての宇宙環境因子を同時に負荷することは困難であるため、宇宙での曝露実験による実証が大きな意味を持つ。つまり、宇宙曝露実験により複合材料への影響を知ると共に、地上対照試験との対応を明らかにすることにより、材料スクリーニング、初期設計段階で適切な材料選定が可能となる。

### 2. 供試材料

今回の宇宙曝露試験に供した複合材料は、今後宇宙機に適用が想定される構造材料用炭素繊維強化複合材である2種の材料を選定した。一方はピッチ系高弾性炭素繊維とポリシアネート系複合材(Y S 90 A/R S - 3)であり、ポリシアネート樹脂は吸湿、アウトガスが少なく、複合材成型時にマイクロクラックの発生も少ないことが特徴である。もう一方はPAN系炭素繊維と耐熱熱可塑ポリイミド系複合材料(IM600/PIXA)であり、耐熱性、耐放射線性に優れ、成形性も良いことが特徴である。

### 3. これまでの試験結果及び評価

#### 3. 1 試験方法

軌道上環境曝露、宇宙環境因子負荷(原子状酸素曝露、電子線照射、紫外線照射)及び無負荷(バージン材)を経た供試体について反射法による超音波探傷試験及び断面観察を実施した。

超音波探傷試験と断面観察では複合材料の特徴的な微小破壊形態であるデラミネーションやトランスバースクラック等を評価することで、繊維と樹脂との界面劣化状況についてデータを蓄積することを目的としている。

#### 3. 2 評価

超音波探傷試験により、軌道上環境曝露、宇宙環境因子負荷、無負荷を経た供試体について、



それぞれ、剥離、ボイド、クラックと推定される信号が検出されたが、環境負荷による差は明確ではなかった。特に本試験では繊維方向に生じる信号が多く認められたため、劣化か繊維かの見極める必要がある。

また、断面観察については各環境負荷供試体のうち、軌道上環境曝露、及び各種宇宙環境因子負荷が0~1 のクラック数だったのに対して、無負荷（バージン材）が3~4 個と最も多い観察結果となった。

以上の試験結果より、第1 回回収、第2 回回収で複合材としての明確な劣化は認められなかったが、第3 回回収供試体を含めた総合的な評価が必要である。

図1～4に超音波探傷試験及び断面観察結果を1 例として示す。

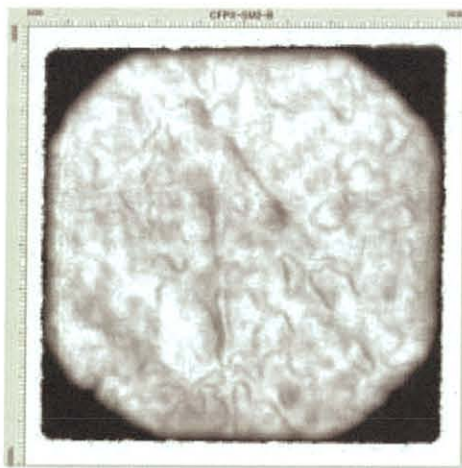


図1 第2回回収熱可塑ポリイミド系複合材  
超音波探傷試験結果

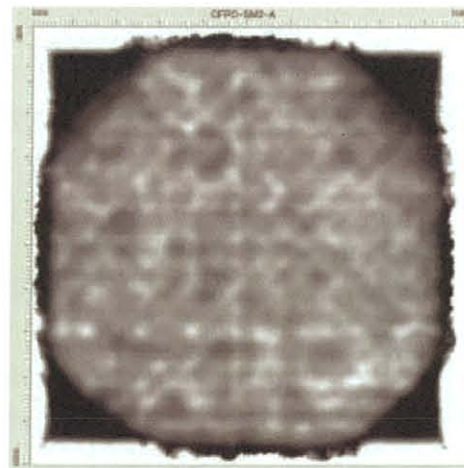


図2 第2回回収ポリシアネート系複合材  
超音波探傷試験結果



図3 第2回回収熱可塑ポリイミド系複合材  
断面観察結果

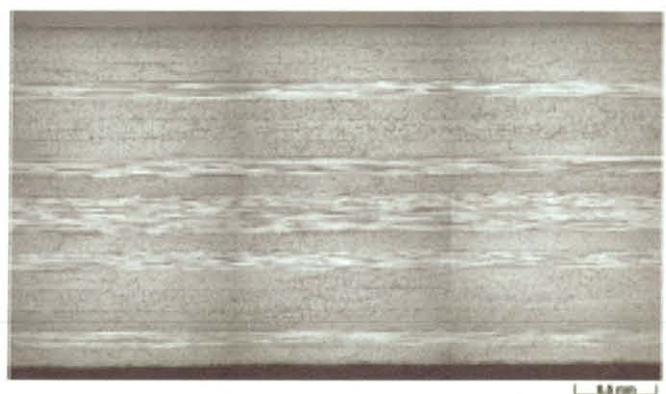


図4 第2回回収ポリシアネート系複合材  
断面観察結果

## セラミック材料曝露実験 – 第1回及び第2回収試料の結果

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

物質科学創造専攻 小田原修

### 1. はじめに

これからの宇宙開発・宇宙環境利用では長期飛行／長期有人活動が必須であり、ミッションを信頼性高く安心して遂行するためには、利用材料の寿命評価、特に地上では考えなくても良い数百キロメートルの環境に豊富な原子状酸素との共存性について、材料曝露試験を通して十分検討することが必要である。我が国の従来の実績としては、宇宙実験・観測フリーフライヤーの搭載実験機器部を用いて行った約10カ月間の材料曝露実験、STS-85シャトルミッションによる12日間の材料曝露実験、宇宙環境信頼性実証システムプロジェクトの一環としての宇宙実証試験、などがある。米国では、1986年より6カ年間、長期曝露実験衛星でセラミック材料も含めた材料曝露実験を行っている。

2001年10月15日より、国際宇宙ステーション(ISS)のロシアサービスモジュール(SM)の曝露部に材料曝露実験装置(SEED)を配置して、非酸化物系セラミック材料の材料曝露実験(SM/SEED)を3年計画で行っている。長期滞在が必須の状況では、「その場資源」と「宇宙エネルギー環境」が大きな活用対象であり、比強度の高い軽量材料としての本実験試料類の寿命評価は重要である。特に、炭化ケイ素は構造材としての重要性ばかりでなく、今後のエネルギー利用の高利用効率化(限られた資源を最大限に利用する)に重要なパワーデバイスとして注目されている。本発表では、2002年8月26日に回収した315日間の曝露結果と2004年2月26日に回収した865日間の曝露結果について報告する。

### 2. 実験条件

ISSは、約400kmの高度を51.6度の軌道傾斜角で周回するので、約90分で地球を一周する。着目する環境因子として、原子状酸素、熱履歴、宇宙放射線、紫外線、真空が考えられる。原子状酸素には高度との相関があり、ISSでは $10^{13}/\text{cm}^2\text{s}$ 程度と考えられる。熱履歴については、90分間に昼と夜が来ると考えて、その間に現れる100Kから400K程度の温度差を周回しながら繰り返すという、一種の熱疲労試験の環境となる。放射線と紫外線については、太陽に影響される条件が強く、これから数年は太陽活動が落ち着く方向であるので、条件的には緩く、加速材料試験としては望ましくない環境と言えるかもしれない。原子状酸素の濃度に関しても太陽フレアの影響が強く、フルエンスで一桁の差は現れる。したがって、現状の数値はあくまでも予測であり、実際には実験近傍で環境の値を測定しなければいけない。紫外線のエネルギーとしては、 $1.4\text{kW}/\text{m}^2$ を目安として考える。試料は炭化物と窒化物試料であり、炭化ケイ素(SiC)と窒化アルミニウムと窒化チタン(TiN)の3化合物について、SiCとTiNについてはそれぞれ2種類選び、全部で5つの異なる試料条件とした。試料の形状は、17mm x 17mm x 2mmである。

### 3. 実験結果

本実験で採用したSiCは、結晶粒径が均一なホットプレス焼結品(HP-SiC)と結晶粒径が不均一で組成が不均質である反応焼結品(RS-SiC)である。非酸化物である本実験試料は、長時間曝露による酸化反応が起こり、特に粒界での酸化物層の形成は試料の特性の劣化に大きく影響する。図1(a)及び図1(b)は、二次イオン質量分析法(SIMS)によるHP-SiCとRS-SiCの深さ分析結果である。それぞれの試料の曝露面からの質量数16の量の質量数28の量に対する比率として表している。

HP-SiC に比べ RS-SiC の酸素量は総じて少なくなっているが、深さ方向への分布から判断した侵入深さはいずれも同等であり、曝露時間が長くなるほど原子状酸素の侵入長は深くなると判断できた。このような結果は原子状酸素との試料の酸化反応に起因すると考えられる。地上実験としての原子状酸素照射試験での表面粗さ変化の結果から判断すると、表面でのエロージョンによる作用すると考えられる。すなわち、原子状酸素の照射だけでの影響は試料表面が最も大きかったが、曝露環境の場合には複合効果として酸化反応の進展で内部まで酸素の侵入が見られたと考えられる。

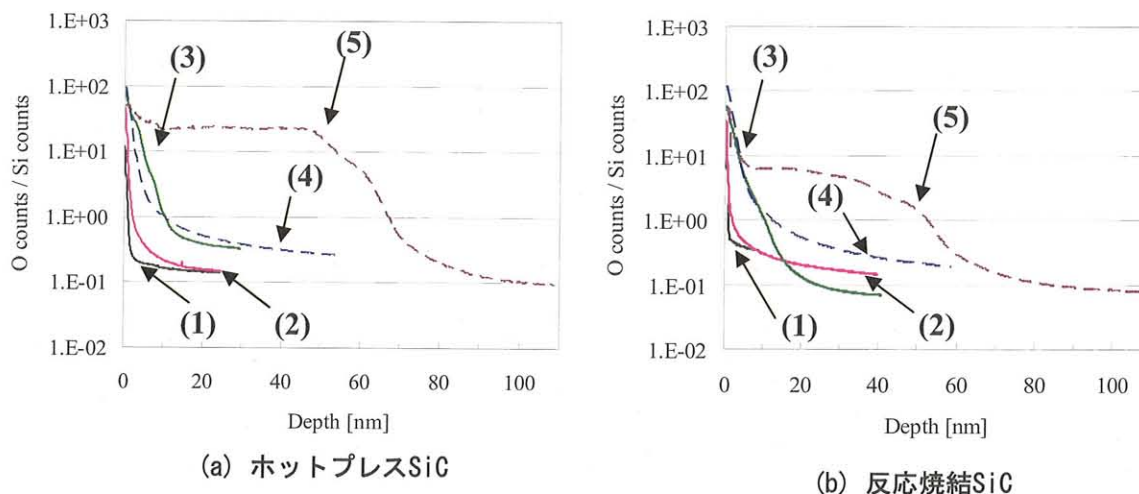


図1 SM/SEED 炭化ケイ素試料内の酸素分布（質量数 16/質量数 28）としての SIMS 深さ方向分析結果

(1): 未照射材、(2): 原子状酸素照射材（半年間）、(3): SM/SEED 材（315 日間）、  
(4): 原子状酸素照射材（一年間）、(5): SM/SEED 材（865 日間）

#### 4. 研究発表リスト

- 1) Osamu Odawara and Eiji Miyazaki, "Space Exposure Tests of Carbide and Nitride Ceramics Carried out on ISS", J. Jpn. Soc. Microgravity Appl. 18[S], 37, 2001.
- 2) Eiji Miyazaki and Osamu Odawara, "Space Exposure Tests of Ceramic Materials on International Space Station", 2nd Pan-Pacific Basin Workshop Proceedings on Microgravity Science, PaperET-1038, 2001.
- 3) Osamu Odawara and Eiji Miyazaki, "Material Exposure Tests on ISS", J. Jpn. Soc. Microgravity Appl. 19[S], 19, 2002.
- 4) Osamu Odawara, Eiji Miyazaki, Masami Imai and Toyohiko Yano, "Material Exposure Tests for the First One Year on ISS", J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 20[S], 43, 2003.
- 5) Osamu Odawara, Eiji Miyazaki, Masami Imai and Toyohiko Yano, "Exposure Tests of Carbide and Nitride Ceramics with SM/SEED on ISS", Proc. 24th Int'l. Symp. Space Tech. Sci., 765-769, 2004.
- 6) Osamu Odawara, Eiji Miyazaki, Masami Imai and Toyohiko Yano, "ISS SM/SEED Exposure Tests of Ceramic Materials", J. Jpn. Soc. Microgravity Appl. 21[S], 59, 2004.
- 7) Toshihide Tobitsuka, Masamitsu Imai, Osamu Odawara and Toyohiko Yano, "Property Change of Non-Oxide Ceramics Exposed in a Space Environment", The 3rd Int'l. Workshop for Advanced Ceramics, 74, 2005.
- 8) Toshihide Tobitsuka, Masamitsu Imai, Osamu Odawara and Toyohiko Yano, "Property Evaluation of Ceramic Specimens Exposed in a Space Environment for One Year", The 6th Japan/China Workshop on Microgravity Sciences, 91-92, 2005.
- 9) Toshihide Tobitsuka, Masamitsu Imai, Toyohiko Yano and Osamu Odawara, "Change of the Material Surface Properties during the ISS SM/SEED Materials Exposure Test", J. Jpn. Soc. Microgravity Appl. 22(4), 294, 2005.



## 材料曝露実験(SM/MPAC&SEED)による固体潤滑材被膜の摩擦特性変化

物質・材料研究機構 笠原章 後藤真宏 太田悟志 木村隆 福島整 土佐正弘  
宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 井上利彦 宮崎英治 今川吉郎

### 1. はじめに

宇宙軌道環境では、原子状酸素、紫外線、電子線、放射線、宇宙塵、熱変化等複合因子により摩擦係数の増大や摩耗量の増加の問題が懸念され固体潤滑材料にとって過酷な環境であり、したがって、駆動部材料はそのままでは摩擦増大の他に酸化や照射損傷によって一層摩擦が増大する可能性があるために高性能固体潤滑剤の被覆により長期にわたって円滑な駆動が保証されることが望まれている。

そこで、TiNをはじめとする4種類の異なる摩擦特性を持つ固体潤滑材料をステンレス鋼に被覆した試料を軌道上に打ち上げ設置しこの軌道上において1年ならびに1年以上の長期間わたって軌道環境で曝露し地上に回収した後、摩擦特性、表面構造、ならびに組織組成等を分析して軌道用固体潤滑被覆膜の軌道環境曝露の影響について検討し、特に、曝露試料、および地上保管比較試料とで、摩擦特性、加熱処理による効果、荷重依存性摩擦測定による凝着力、表面形状など基本的特性変化について報告したい。

### 2. 方 法

基板には、市販のSUS304 オーステナイト系ステンレス鋼（14x14x1mm<sup>3</sup>）を用い、高周波マグネトロンスパッタ蒸着装置を用いて単層膜のCu、化合物膜のTiN、MoS<sub>2</sub>、および、Cu+BN 混合膜をそれぞれ被覆した。SUS304 基板、TiN/SUS、MoS<sub>2</sub>/SUS、Cu/SUS、Cu+BN/SUS の計5試料を1組とし、地上保管用試料1組、軌道曝露試料3組さらに、地上対照試料3組の総計7組、35枚の試料を作製した。

国際共同宇宙ステーションのロシアモジュール(SM/MPAC&SEED)における宇宙軌道曝露環境は、平均軌道高度約400km、曝露日数315日および865日、真空度10<sup>-5</sup>Pa 台、また、飛行軸に対して直交曝露59%、平行曝露41%であった。さらに、地上対照試料3組はそれぞれ原子状酸素、紫外線、電子線照射を軌道空間での照射量の0.5年、および1年相当量分模擬照射した。

超高真空対応バウレンレーベン型摩擦試験器を用いた摩擦（ $\mu$ ）測定の主な条件として、荷重0.48N、摩擦距離5mm、測定回数5回、測定圧子1/8インチ径SUS304球を用い、N<sub>2</sub>大気圧雰囲気下および真空中（10<sup>-5</sup>Pa）での両測定を行った。また、凝着力変化のための荷重依存性の測定は荷重0.98mN、0.19N、摩擦距離5mm、測定回数5回、測定圧子1/8インチ径サファイア球を用いてN<sub>2</sub>大気圧雰囲気下で測定した。さらに、真空中で加熱することにより被膜の摩擦特性に対する安定性を評価した。

試料表面形状の変化は、表面原子間力顕微鏡を用いて観察し、さらに、表面における化学組成や化学結合状態の変化はX線光電子分光分析器を用いて測定した。

### 3. 結 果

図1に軌道環境曝露（1年及び2年間）試料の摩擦係数（ベースライン破線）、ならびに加熱後の真空中摩擦の時間変化を示す。曝露しないステンレス鋼の測定では粗さによる差異はあるものの

一般に加熱により摩擦係数が増大し ( $\mu$  : 0.3~0.4)、なかなか減少していかないが ( $10^6$ sec 後で  $\mu$  : 0.2~0.3)、1年間曝露したステンレス鋼試料では、加熱による摩擦係数の上昇が小さく、また、冷却後低い値に短時間で戻ることが示された。さらに、他の曝露試料についても同様の傾向が見られ、特に、Cu 試料、TiN 試料、MoS<sub>2</sub> 試料、およびCu+BN混合膜試料についても加熱によっても真空摩擦の上昇はほとんど観察されなかった。また、2年間曝露した試料ではMoS<sub>2</sub> 試料以外若干の摩擦増加傾向にあることが示された。

#### 4. 研究発表リスト

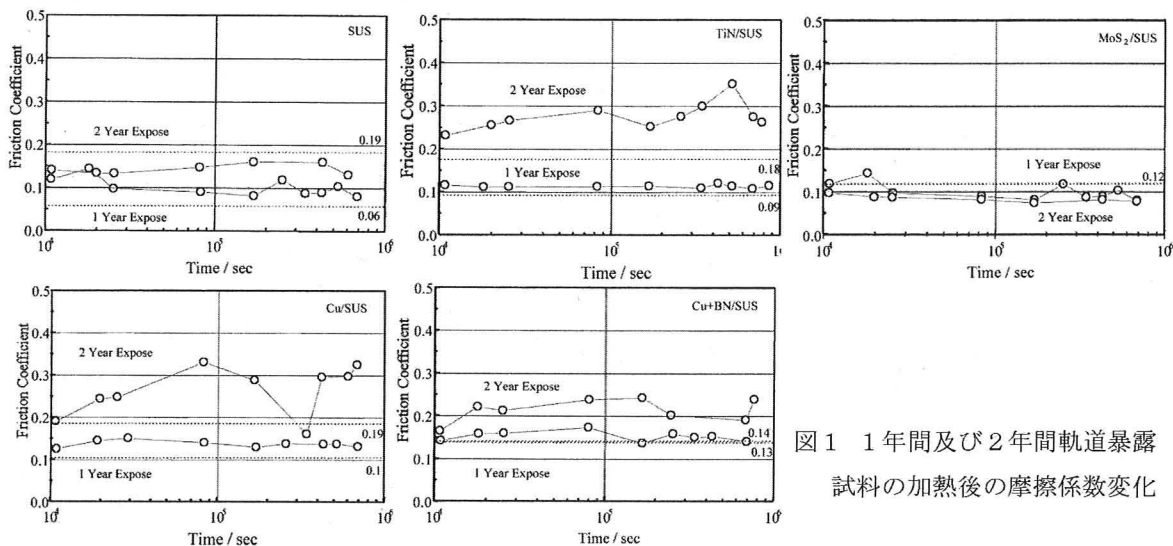


図1 1年間及び2年間軌道曝露  
試料の加熱後の摩擦係数変化

- 1) 軌道環境曝露による固体潤滑材料の摩擦特性変化, 日本真空協会第46回真空に関する連合講演会, 東京, 2005年.
- 2) Lubricative Coating for Space Orbit, The 4th International Symposium on Electrochemical Processing of tailored Materials (EPTM2005), 京都, 2005年.
- 3) Effect of Exposure in Orbit on Friction of Lubricative Coating, The International Astronautical Federation 56th International Astronautical Congress, 福岡, 2005年.
- 4) Effect of orbit environmental condition on friction of surface modified stainless steels, 日本トライボロジー学会International Tribology Conference Kobe 2005, 神戸, 2005年.
- 5) Frictional change in lubricant coating by exposure in orbit, International Symposium on Space Technology and Science (24th ISTS), 宮崎, 2004年.
- 6) 潤滑被膜の軌道環境曝露試験後の表面特性変化, 日本マイクログラビティ応用学会第20回学術講演会 (JSMAC-20), 福井, 2004年.
- 7) 潤滑被覆膜の摩擦に及ぼす軌道環境の影響, 日本真空協会第45回真空に関する連合講演会, 大阪, 2004年.
- 8) 軌道曝露材の摩擦特性変化, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議2004, 鳥取, 2004年.
- 9) 潤滑被膜の軌道環境曝露試験による特性変化, 日本真空協会第44回真空に関する連合講演会, 東京, 2003年.
- 10) 低軌道飛行体用潤滑被覆, 「きぼう」船外実験プラットフォーム利用材料曝露実験公開ワークショップ, つくば, 2002年.

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 第2回中間報告会 (2006. 2. 21)

国際宇宙ステーションロシアサービスモジュール利用材料曝露実験 (SM/SEED実験)  
回収試料評価結果 第二回中間報告会  
—MoS<sub>2</sub>焼成膜—

(株) アイ・エイ・アイ・エアロスペース 秋山 正雄  
岸 克宏  
神戸大学 工学部 田川 雅人  
宇宙航空研究開発機構 松本 康司

### 1. はじめに

今後の宇宙開発・宇宙環境利用では、長期運用／長期有人活動が必須であり、それらのミッションの信頼性を確保するためには、使用する材料の寿命評価、特に低地球軌道特有の宇宙環境下での材料の耐久性を十分に検討することが必要である。本研究では宇宙用固体潤滑剤として最も多用されている有機バインダー結合二硫化モリブデン焼成膜が長期間低地球軌道環境に曝された場合の影響を明らかにするために、実際に Service Module / Space Environment Exposure Device ( SM/SEED ) ミッションで国際宇宙ステーションのロシアサービスモジュール・ズヴェズダに2年間搭載され、宇宙環境に曝露された二硫化モリブデン焼成膜について、その表面解析結果を報告する。

### 2. 供試体

2年曝露供試体を図－1に示す。

### 3. 評価

#### 3.1 密着性試験結果

地上対照試験供試体では、紫外線・電子線2年分照射供試体の被膜の密着性に関しては実用上問題となるような挙動は認められなかった。

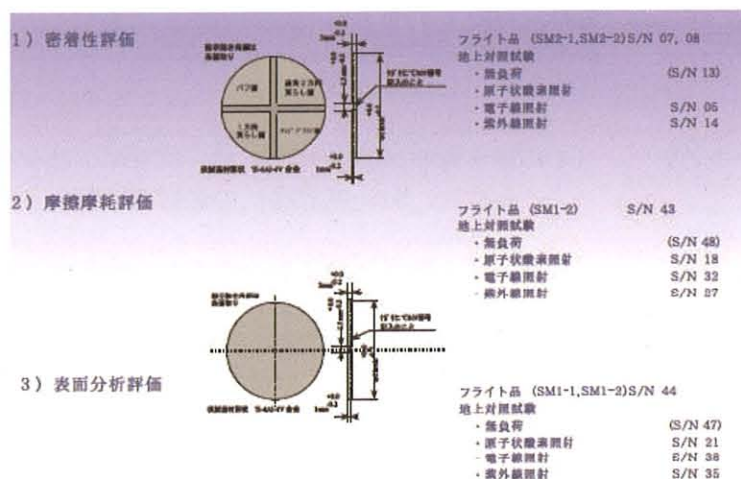
また、実環境においてもフライト2年程度では、被膜の密着性に関し実用上問題となるような挙動は認められなかった。

#### 3.2 摩擦摩耗試験結果

表－1に試験結果を示す。

紫外線照射供試体における摩擦係数の低減は、ポリイミドの紫外線による硬化に起因すると判断しており、紫外線照射供試体以外は、摩擦係数が、0.03～0.06となっている。

軌道上1年曝露、2年曝露供試体では、表面のSiO<sub>2</sub>による汚染に対しても有機系バインダーMoS<sub>2</sub>潤滑膜として十分機能することが確認できた。



図－1 供試体

表－1 摩擦摩耗試験結果

Sample	Initial friction coefficient	Steady-state friction coefficient
Control	0.059	0.033
UV-exposed	0.039	0.018
Atomic oxygen-exposed	0.063	0.031
Flight sample (1 year in orbit)	0.047	0.024
Flight sample (2 years in orbit)	0.062	0.027

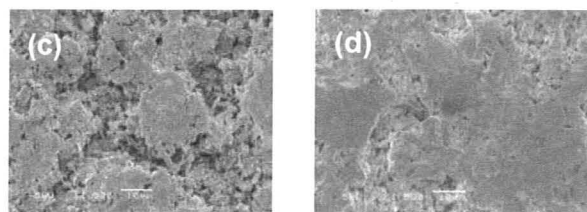
国際宇宙ステーション ロシアサービスモジュール利用微小粒子捕獲実験及び材料曝露実験 第2回中間報告会 (2006. 2. 21)

### 3. 3 表面分析結果

表面分析としては、SEMによる表面観察、XPS、EDSによる表面組成分析を実施した。

SEMによる表面観察では、無負荷供試体を含め、地上対照試験供試体に対し、2年曝露供試体では、表面のMoS<sub>2</sub>が、図-2の様に、滑らかになったような状態であった。

一方、1年曝露供試体から懸念されていたSiによる汚染に対しては、XPS、EDS双方において計測されており、表-2に示す様に、2年曝露供試体において、そのSiが増加していることが計測された。



(地上；AO照射) (軌道上；2年曝露)

図-2 SEM写真

表-2 EDSによる表面分析結果

Sample	C	O	S	Mo	Sb	Si
Control	68.2	11.8	10.9	7.2	1.9	0
Flight sample (1 year in orbit)	52.9	21.7	11.3	9.8	3.7	0.5
Flight sample (2 years in orbit)	29.8	36.8	16.5	10.8	4.0	2.3

### 4. 2年目曝露実験での結論

1年曝露供試体、2年曝露供試体及び、それに対応した地上対照試験供試体による密着性、摩擦摩耗及び表面分析結果より得られた結果を以下に整理する。

- (1) 地上対照試験供試体及び、フライト品（2年曝露相当）に対し、密着性、摩擦抵抗、表面分析を行い、MoS<sub>2</sub>焼成膜への影響を評価し、1年目曝露供試体とほぼ同様な傾向であることを確認できた。
- (2) 軌道上曝露2年においても、下記現象を確認した。
  - 摩擦摩耗においては、1年曝露に対し、2年曝露では、初期摩擦は、変化しない。（定常摩擦では、やや低下する傾向は継続している。）
  - 表面にSiO<sub>2</sub>の付着が確認され、表面分析に対し、影響を及ぼしている。
- (3) 1年曝露供試体において、SiO<sub>2</sub>による潤滑特性への影響が懸念されたが、2年曝露供試体では、表面のSiO<sub>2</sub>による汚染に対しても有機系バインダMoS<sub>2</sub>潤滑膜として十分機能することが確認でき、JEM用に選定した有機系バインダMoS<sub>2</sub>焼成膜が、JEM10年運用に対し、十分機能性能を維持できる可能性が高いことが期待できそうである。（最終的な判断は、3年曝露供試体での結果で総合的に判断する。）

### 5. 研究発表リスト

- 1) Masahito Tagawa, Koji Matsumoto, Hidetoshi Asada, Kunitaka Ochi, Kumiko Yokota, Masao Akiyama, European Space Mechanism and Tribology Conference: ESMATS-11, "SURFACE AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF THE MoS<sub>2</sub>-BASED LUBRICANTS RETRIEVED FROM REAL LEO SPACE ENVIRONMENT: THE FIRST AND SECOND YEAR RESULTS OBTAINED BY SM/SEED"
- 2) Koji MATSUMOTO, Kichiro IMAGAWA, Masahito TAGAWA, Masao AKIYAMA, World Tribology Congress III September 12-16, 2005, WTC2005-64029, "CHANGES IN TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF MOS<sub>2</sub> FILM EXPOSED TO LEO ON SM/SEED"

## 国際宇宙ステーションロシアサービスモジュール利用 微小粒子捕獲実験および材料曝露実験 (SM/MPAC&SEED 実験) JAXA 提案 SEED 試料評価結果

宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部  
部品・材料・機構技術グループ

山県 一郎、宮崎 英治、石澤 淳一郎、島村 宏之、森 一之、鈴木 峰男

### 1. はじめに

軌道上宇宙環境の把握、宇宙用部品・材料の耐宇宙環境性評価、高性能・長寿命材料の開発、JAXA 認定部品・材料の宇宙実証を目的として、国際宇宙ステーション (ISS : International Space Station) を利用した宇宙実験である、「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 : Service Module / Micro-Particle Capturer and Space Environment Exposure Device) を、2001 年 8 月より開始している。本実験は、同一試料構成の実験装置 3 式を同時に ISS 外壁で宇宙空間に曝露開始し、約 1 年間隔で 1 式ずつ地上に回収するというものである。本材料曝露実験に供している試料は、JAXA のほか、大学、研究機関、メーカーから提案を受け、23 種類の試料が選定されている。

本稿では、JAXA から提案した宇宙用材料について、第 2 式目回収試料 (曝露期間約 28 ヶ月) を中心に報告する。

### 2. 実験概要

本実験は、図 1 に示すハードウェアに表 1 に示す JAXA 提案試料を搭載した。本実験装置は両面に曝露面を有し、ISS 進行方向に正対する面を「RAM 面」、その裏面を「WAKE 面」と呼んでいる。張力負荷ポリイミドフィルム (UPILEX-S) を除く 5 試料は、それぞれ 2 枚ずつ、隣接する位置に搭載した。張力負荷ポリイミドフィルムについては、125  $\mu$ m フィルムを 4 枚重ねたものを 1 組として、引張荷重 0N、4.12N および 20.59N についてそれぞれ 2 組ずつ搭載した。

また、地上対照試験として、紫外線、電子線および原子状酸素を、上記曝露実験と同等の試料に照射した。

曝露実験および地上対照試験後の試料は、基礎評価として外観観察、質量測定、太陽光吸収率および垂直赤外放射率の測定を行い、必要に応じて原子間力顕微鏡 (AFM) 観察やフーリエ変換赤外分光分析 (FT-IR) などの詳細分析を行った。また、ポリイミドフィルム (UPILEX-S) およびシリコン系接着剤については、引張試験を実施した。

### 3. 実験結果

#### 3. 1. 張力負荷ポリイミドフィルム (UPILEX-S)

曝露実験後の外観観察では、4 枚重ねの試料のうち、最表層の 1 枚目だけ著しい変色が見られた。原子間力顕微鏡 (AFM) では、表面に細かな凹凸が多数観察された。

質量減少については、地上対照試験結果から原子状酸素の影響が大きいと考えられるが、フライト

品について見ると、1回目、2回目回収試料ともに同程度となっていた。引張強度は、地上対照試験結果では、原子状酸素のみ照射量に伴う明らかな引張強度の低下が認められた。これは、原子状酸素がフィルム表面を侵食して生じた凹凸が、破断の起点になっている可能性が考えられる。一方、フライト品の引張試験結果では、曝露期間による大きな差異は認められなかった。

### 3. 2. 耐原子状酸素性向上型ポリイミドフィルム (UPILEX-R)

同種フィルムは、低軌道で原子状酸素による重量減少（侵食）が大きい問題があったが、2回目回収試料からは、ほとんど質量減少が見られなかった。

耐原子状酸素性向上のため表面に付与したポリイミドシロキサン層において、表層に均質な層が形成されていること、また、同層が変性シリカ層であることが、断面観察及び FT-IR によって確認されたことから、期待通りの耐原子状酸素性膜の形成がなされたと判断できる。

一方で、太陽光吸収率の増加が見られたが、地上対照試験との比較から、主に紫外線による影響と判断できる。

### 3. 2. フレキシブル太陽光反射素子 (F-OSR)

フライト前後の質量測定結果では、質量が増加する傾向が見られた。28ヶ月間で 0.08mg 程度増加していた。太陽光吸収率および垂直赤外放射率はそれぞれ、0.16、0.81 でほぼ一定の結果となった。表面を FT-IR 分析したところ、主に SiOx で覆われたことがわかった。さらに、図 6 に示す断面 TEM 画像から、付着物層の厚さは 10~20nm となり、SiO<sub>2</sub>の密度を用いて付着物の質量を算出すると、増加質量と概ね一致することがわかった。F-OSR 試料の成分には Si が含まれていないことから、この付着物は Si を含む外来物質によるものと考えられる。

フライト前後の質量測定結果では、質量が増加する傾向が見られた。28ヶ月間で 0.08mg 程度増加していた。太陽光吸収率および垂直赤外放射率はそれぞれ、0.16、0.81 でほぼ一定の結果となった。表面を FT-IR 分析したところ、主に SiOx で覆われたことがわかった。さらに、図 6 に示す断面 TEM 画像から、付着物層の厚さは 10~20nm となり、SiO<sub>2</sub>の密度を用いて付着物の質量を算出すると、増加質量と概ね一致することがわかった。F-OSR 試料の成分には Si が含まれていないことから、この付着物は Si を含む外来物質によるものと考えられる。

### 3. 3. 白色塗料

白色塗料については、28ヶ月間で 0.35mg 程度減少しており、質量が減少する傾向が見られた。また、太陽光吸収率は増加しており、フライト前からの増加量は 1 式目で 1.8%、2 式目で 16%となった。一方、垂直赤外放射率は、ほぼ一定の結果であった。

1 式目、2 式目相当の地上対照試験の結果では、原子状酸素、電子線照射による影響変化が頭打ちになるのに対し、紫外線照射試験では、照射量の増加に従い、徐々に太陽光吸収率も増加していた。そのため、太陽光吸収率の変化は、紫外線若しくは外部汚染の影響と考える。

### 3. 4. シリコン系接着剤およびポッティング材

フライト前後の外観観察および質量測定では、顕著な変化は見られなかった。シリコン系接着剤の引張せん断試験結果では、フライト期間に従って、破断荷重およびせん断強さが若干低下する傾向が見られた。ポッティング材については、外観観察において大きな変化は見られなかったが、電界放

射形走査型電子顕微鏡（FE-SEM）観察では、フライト後試料に亀裂が多数観察された。原子状酸素の地上対照試験でも類似した組織が観察されていることから、ポッティング材表面の亀裂は原子状酸素の影響が大きいと考えられる。しかしながら、第2回目回収試料にはこのような亀裂は観察されておらず、今後実施する第3回目回収試料の観察結果を含めて検討する予定である。

#### 4. 研究発表リスト

- 1) F. Imai and K. Imagawa, "NASDA'S Space Environment Exposure Experiment on ISS - First Retrieval of SM/MPAC&SEED", 9th International Symposium on Materials in a Space Environment, ESA SP-540, pp. 589-594, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands, 2003.
- 2) 井上利彦ら, "国際宇宙ステーション ロシアサービスモジュール利用材料曝露実験 (SM/SEED 実験) 第1回回収試料の評価解析", 日本マイクログラビティ応用学会 第20回学術講演会 (JASMAC-20), 福井, 2004年.
- 3) 今川吉郎ら, "NASDA における宇宙用材料に関する研究概要", 日本金属学会 2003年春期 (第132回) 大会, 千葉, 2003年.

表 1.材料曝露実験 (SEED 実験) JAXA 提案試料一覧

	搭載実験試料名	主な用途
1	張力負荷 ポリイミドフィルム (UPILEX-S)	宇宙用膜構造物用構造材料
2	耐原子状酸素性向上型ポリイミドフィルム	宇宙用熱制御材料(フィルム)
3	フレキシブル太陽光反射素子 (F-OSR)	
4	白色塗料	宇宙用熱制御材料 (塗料)
5	シリコーン系 接着剤	宇宙用接着剤
6	シリコーン系ポッティング剤	宇宙用ポッティング材



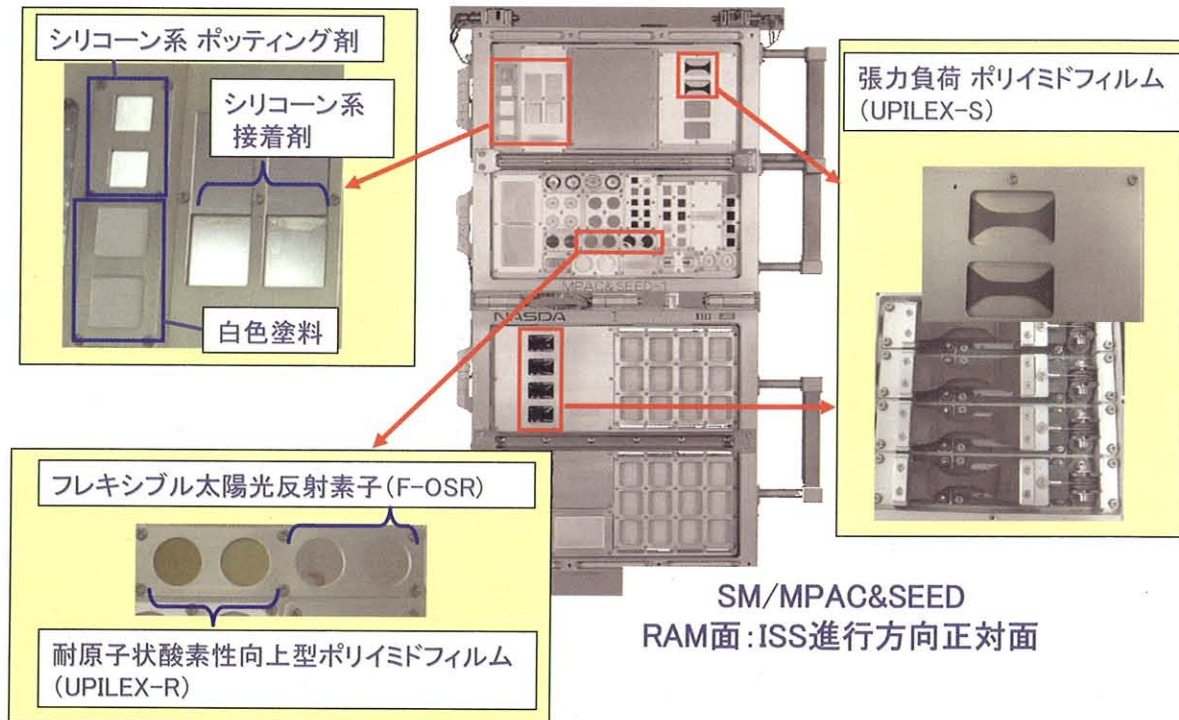


図 1.JAXA 提案試料搭載位置

宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-06-021

---

発行日 平成 19 年 3 月 30 日  
編集・発行 宇宙航空研究開発機構  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1  
URL: <http://www.jaxa.jp/>  
印刷・製本 ケーティエス情報株式会社

---

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター  
〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1  
TEL: 029-868-2079 FAX: 029-868-2956

---

© 2007 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工作することを禁じます。

**R2100** この用紙は地球環境・森林資源のため再生紙を使用しています。

