

平成14年度 宇宙開発事業団 技術研究本部
研究成果報告会

国際宇宙ステーション利用材料曝露実験概要



平成15年6月6日(金) アジュール竹芝

宇宙開発事業団 技術研究本部
マテリアル・機構技術グループ
今川 吉郎



はじめに

技術研究本部 マテリアル・機構技術グループが進めている国際宇宙ステーション(ISS)を利用した材料曝露実験は、ISSの最も早期の利用を実現した宇宙実験の一つである。

プロジェクトとの関わり

1. ISS利用機会の有効活用

- ・「きぼう」船外実験プラットフォーム初期利用(JEM/MPAC&SEED実験)
- ・ISS初期利用(ロシアサービスモジュール利用) (SM/MPAC&SEED実験)

2. 得られた実験成果のISS、人工衛星等の各種プロジェクトへの反映



国際宇宙ステーション(1)

国際宇宙ステーションは、地上から約400km上空に建設される巨大な有人実験施設です。米国が提唱し、米、日、欧、露、加等の16ヶ国が参加して、1998年から宇宙ステーションの建設を開始しています。宇宙ステーションが完成するのは2008年以降の予定です。



現在の国際宇宙ステーション

S112E05823

©NASA

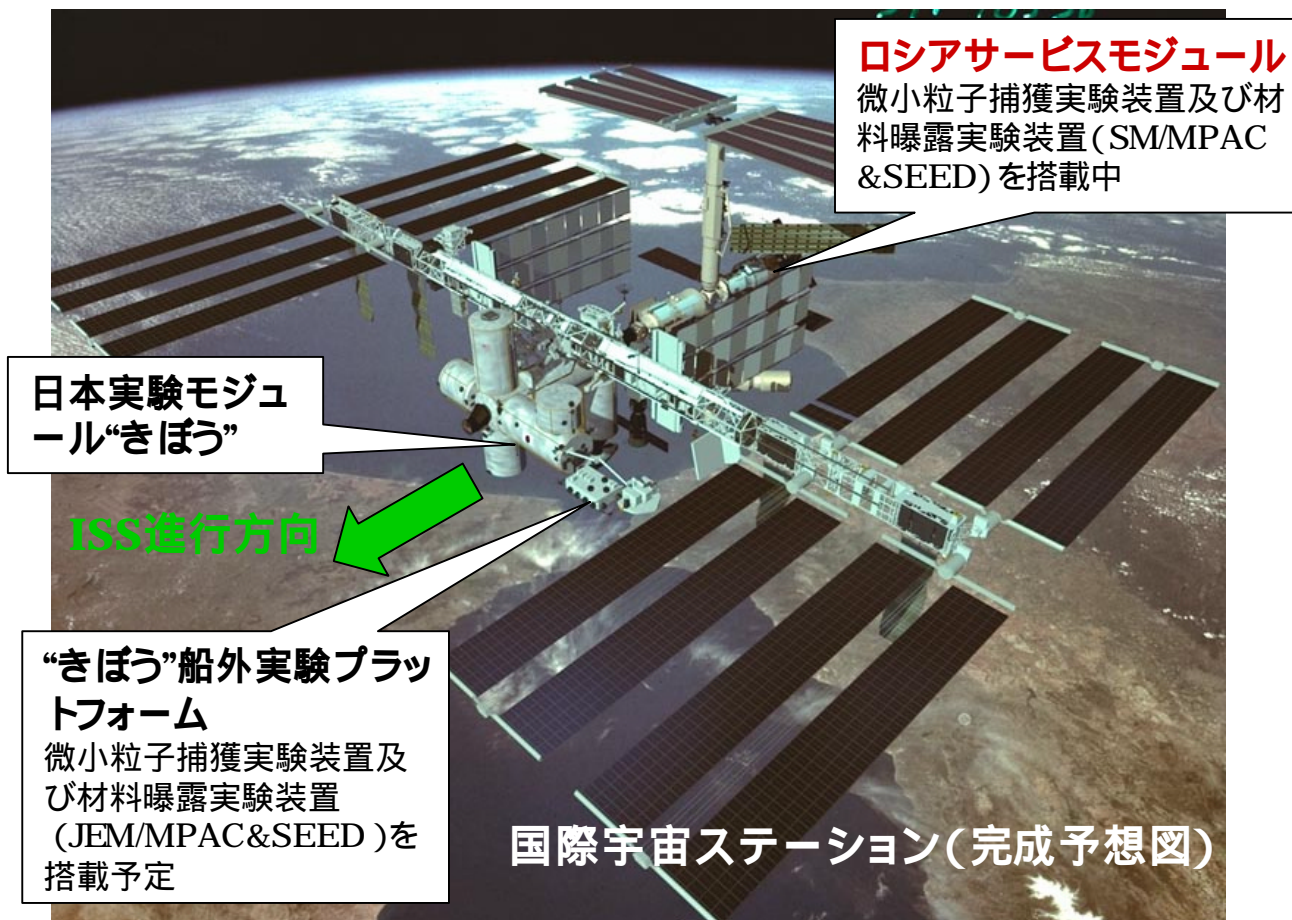


国際宇宙ステーション(完成予想図)

©NASDA



国際宇宙ステーション(2)



進行方向をラム側 (RAM側) と呼び、進行方向の逆方向をウェーク側 (WAKE側) と呼びます。ウェークとは、元々、船の後ろにできる航跡を意味します。



宇宙実証試験 - 微小粒子捕獲実験及び材料曝露実験 -

微小粒子捕獲実験：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、その起源や存在・分布量を把握。

(MPAC実験)

➡ **宇宙環境モデルの最新化に貢献**

材料曝露実験：宇宙機用部品・材料の耐宇宙環境性評価、劣化メカニズム解析。
(耐原子状酸素性、耐紫外線性、耐放射線性、汚染評価等)

(SEED実験)

➡ **宇宙機の信頼性向上に貢献
地上評価試験のリファレンス**

宇宙ステーション (ISS) 内 2ヶ所で実験を実施し、両者の環境を比較

「きぼう」船外実験プラットフォーム利用 MPAC&SEED実験

ISS進行方向に向かって 遮蔽物・汚染の影響が少ない環境での評価が可能。
最前方へ搭載 実施予定：2007～2010年 (約3年間)

サービスモジュール利用 MPAC&SEED実験

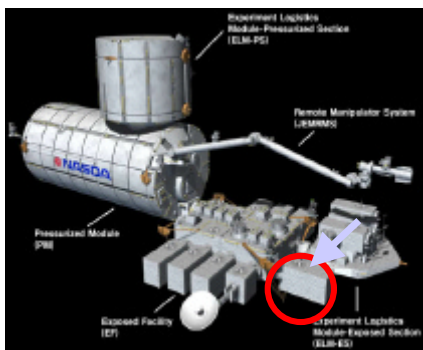
ISS進行方向に向かって 汚染等の影響を加味した評価が可能。
最後方へ搭載 実施中：2001～2002年 (約1年間)
～2003年 (約2年間)
～2004年 (約3年間)

ISS利用により、従来より長期間の曝露実験が可能。



二つのMPAC&SEED実験

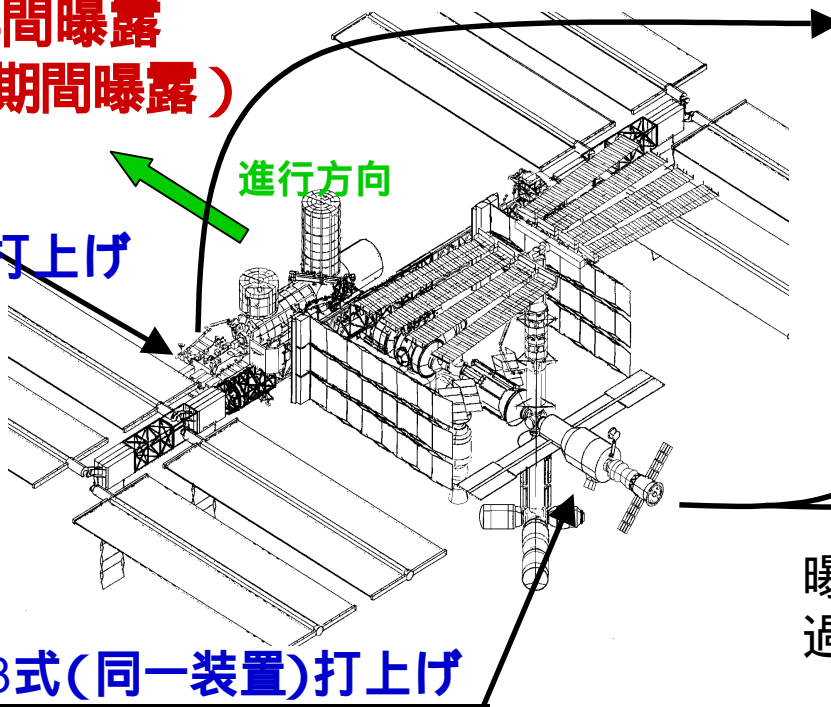
「きぼう」船外実験プラットフォーム利用 MPAC&SEED実験



3年間曝露
(長期間曝露)

1式打上げ

進行方向



曝露開始後、1, 2, 3年経過毎に1式ずつ回収

サービスモジュール利用 MPAC&SEED実験

【2001.10 ~ 実施中】

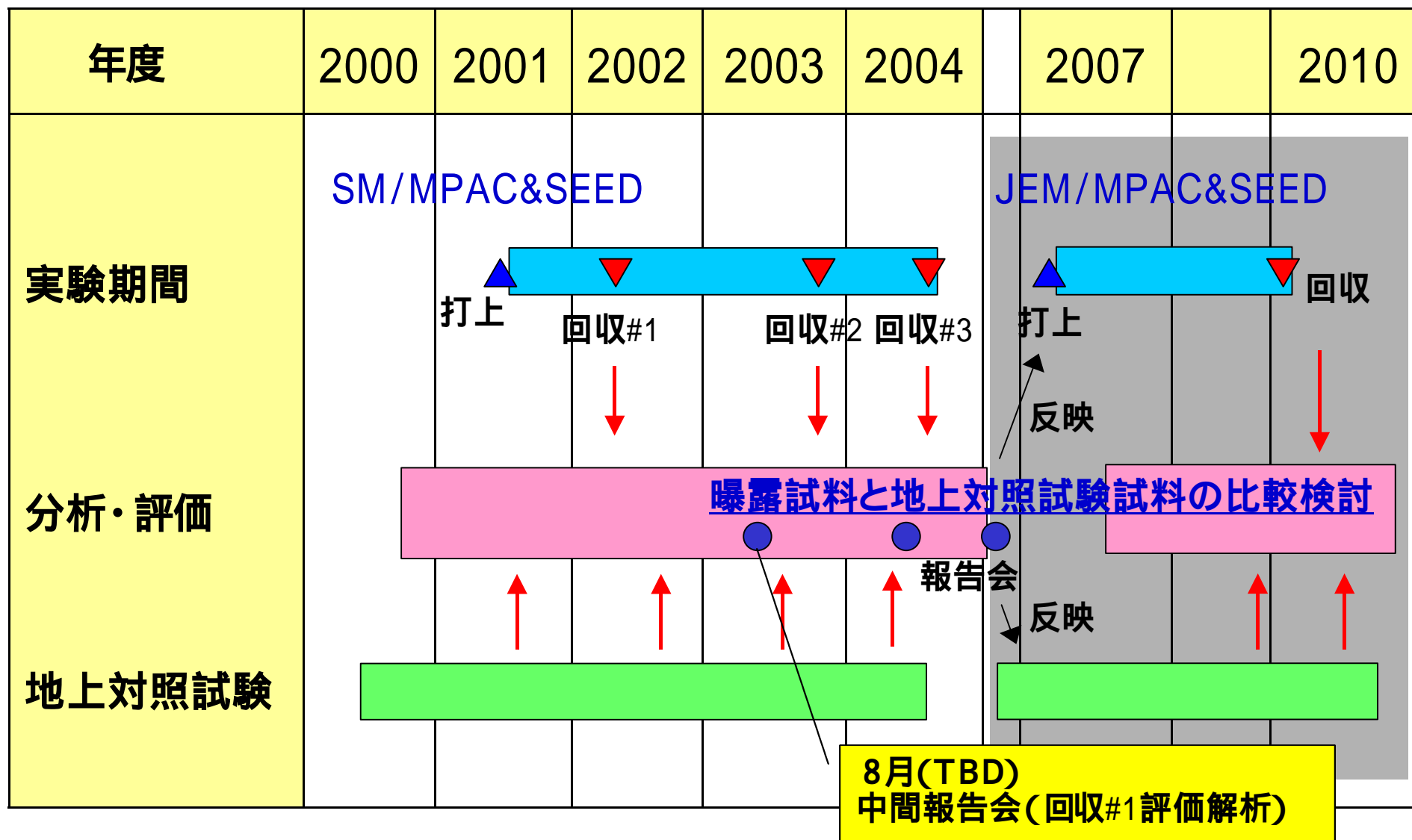


実験装置(3式)

1, 2, 3年間曝露
(長期間曝露 & 経年変化評価)



MPAC&SEED実験スケジュール



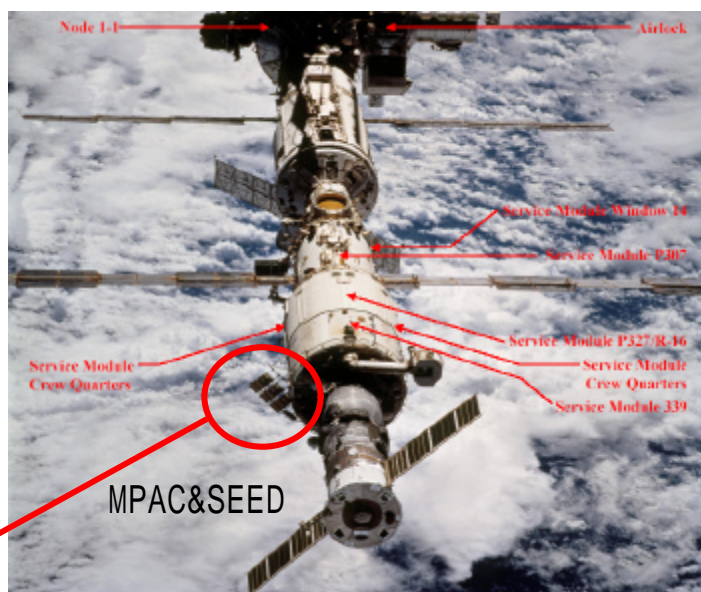


サービスモジュール利用 MPAC&SEED実験

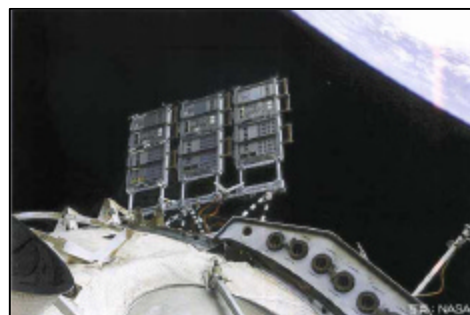


MPAC&SEED取付船外活動
(2001年10月)

約1～3年間の
曝露期間



装置搭載位置



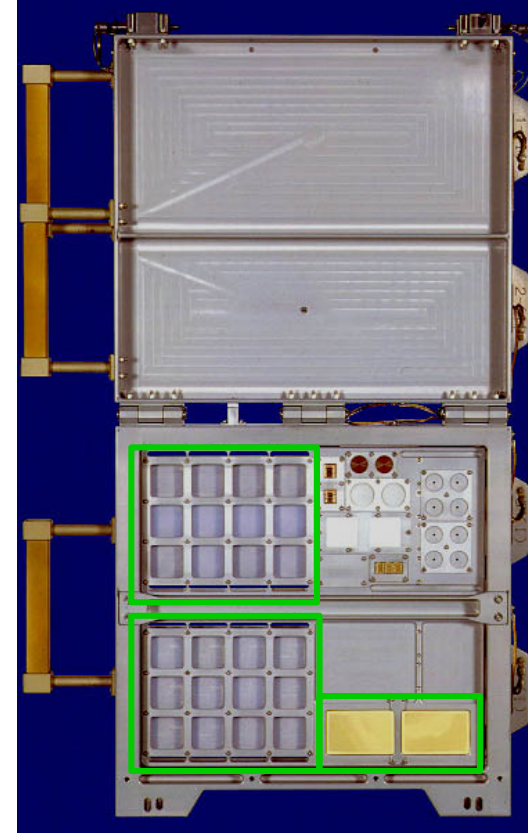
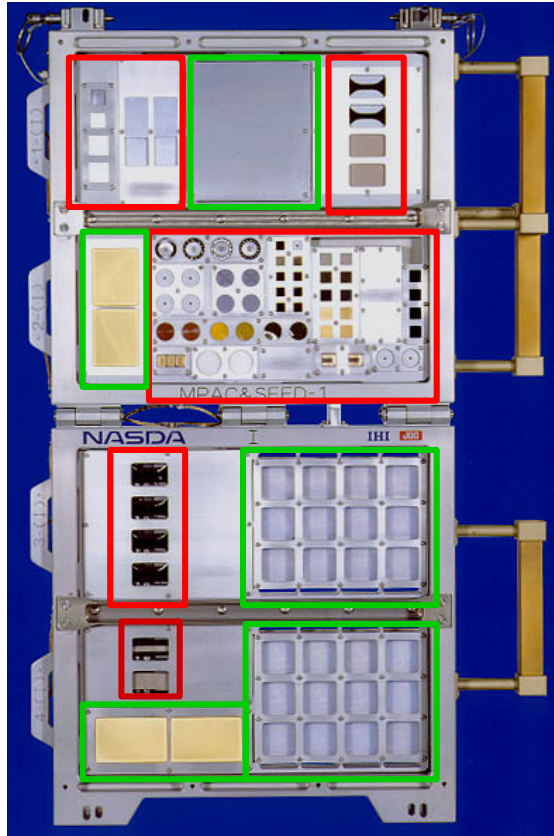
実験中の装置拡大写真
(第1回サンプル回収前)



第1回サンプル回収船外活動
(2002年8月)



サービスモジュール利用 MPAC&SEED



RAM面: ISS進行方向

WAKE面: ISS逆進行方向

赤枠内: 材料曝露実験部分

緑枠内: 微小粒子捕獲実験部分



SM/SEED第1回回収試料の解析結果(中間報告)



SM材料曝露実験装置搭載実験試料

	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 (HIP)		
7	TiN coated Al		
8	TiN coated Al ₂ O ₃	東北大学 大学院	宇宙用機構部品
9	Ball Bearing -1		
10	Ball Bearing -2		
11	Ball Bearing -3	物質・材料研究機構	宇宙用固体潤滑膜
12	SUS304		
13	Cu coated SUS304		
14	CuBN coated SUS304		
15	TiN coated SUS304		
16	MoS ₂ coated SUS304		
17	MoS ₂ 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)	宇宙開発事業団	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	シリコーン系 接着剤		宇宙用ポッティング材
23	シリコーン系 ポッティング剤		



曝露実験条件及び地上対照試験条件

曝露実験条件

高度：407km
軌道傾斜角：51.6deg
曝露期間：約10ヶ月(第1回回収品)
(2001年10月15日～2002年8月26日)

本報告では
AO: 1.32×10^{25} [atoms/m²]
UV: 35.2 [ESD]
EB: 1.64×10^{16} [e/m²]
の地上対照試料と比較。

地上対照試験条件

	原子状酸素 (AO) [atoms/m ²]			紫外線 (UV) [ESD]			電子線 (EB) [e/m ²]		
	0.5年	1.0年	3.0年	0.5年	1.0年	3.0年	0.5年	1.0年	3.0年
照射量	2.01×10^{25}	3.51×10^{25}	7.59×10^{25}	35.2	69.1	207.5	1.64×10^{16}	3.30×10^{16}	9.89×10^{16}

実曝露環境を事前に推測することは困難であるため、地上対照試験(0.5、1.0、3.0年)の値から内挿して曝露実験試料のリファレンスとする。
(以上の照射量は宇宙環境計測情報システム(SEES)を用いて算出した
参照 <http://sees.tksc.nasda.go.jp/>)

* 現在、搭載環境モニタ材により実曝露環境を解析中



曝露実験試料の評価内容

曝露実験試料の評価項目

- 1．外観検査（光学顕微鏡観察）
- 2．質量計測
- 3．太陽光吸収率（ α_s ）
- 4．垂直赤外放射率（ ϵ_N ）

NASDAで一括実施(完了)

- 5．各試料固有の特性評価（非破壊試験、破壊試験）

例）熱制御材料：材料分析、引張試験
構造材料：材料分析、引張試験
固体潤滑剤：材料分析、摩擦試験

その他、せん断引張試験、電気特性測定、
硬さ測定、走査型電子顕微鏡観察など

各搭載試料提案機関で
実施(現在、実施中)

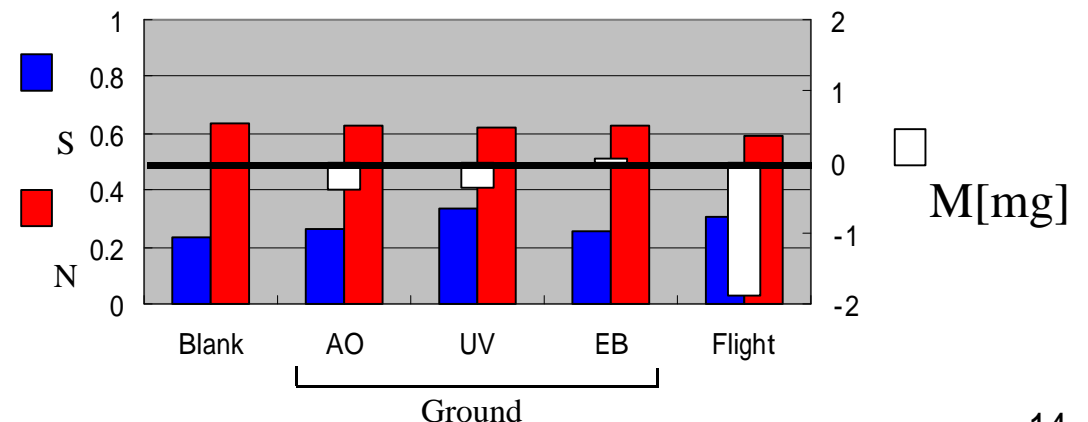
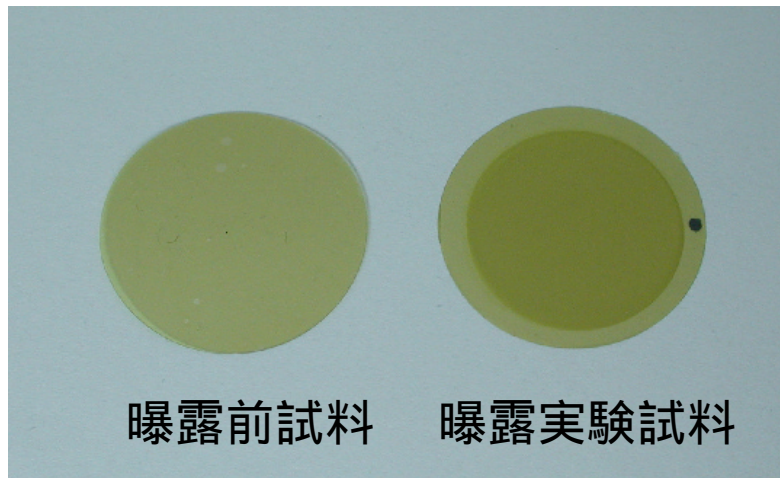
現在、第4項の垂直赤外放射率（ ϵ_N ）までの評価を完了し、第5項の各試料固有の特性評価を各提案機関において実施中である。今回は、NASDAで一括実施した第4項までの評価結果の概要について報告する。



耐原子状酸素性向上型ポリイミドフィルム

外観: 曝露実験試料 (Flight) は 曝露前 (Blank) と比較すると、僅かに着色した。
質量 (M): 曝露実験試料と地上対照試験試料 (Ground) を比較すると、曝露実験試料の方が大きく減少 (減少率: 5%) した。地上対照試験の結果では、耐AO性向上の効果が見られたが、実宇宙環境におけるAQ、UV、EBの複合照射の影響が大きい。

熱光学特性: 曝露実験試料及び地上対照試験試料は、いずれも太陽光吸収率 (S) が増加した。地上対照試験の結果では、UVの影響 (約30%の増加) が顕著である。垂直赤外放射率 (N) には、大きな変化は見られなかった。



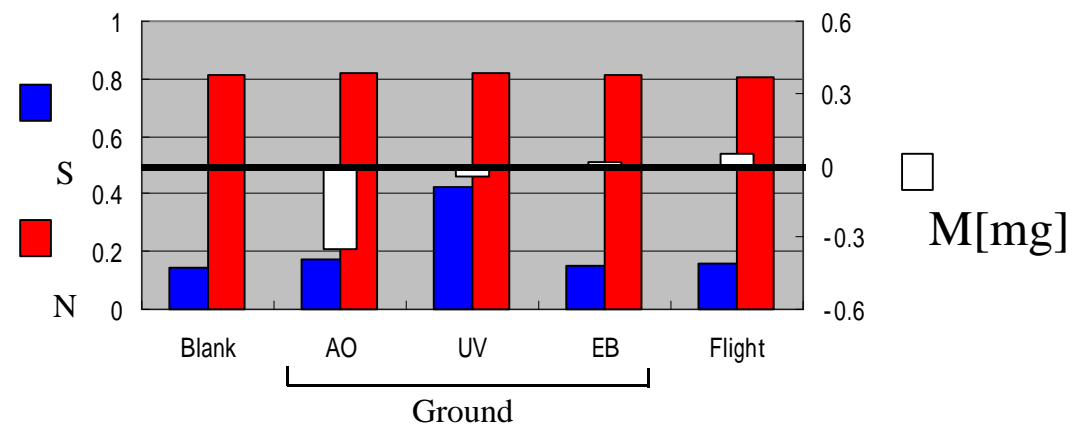
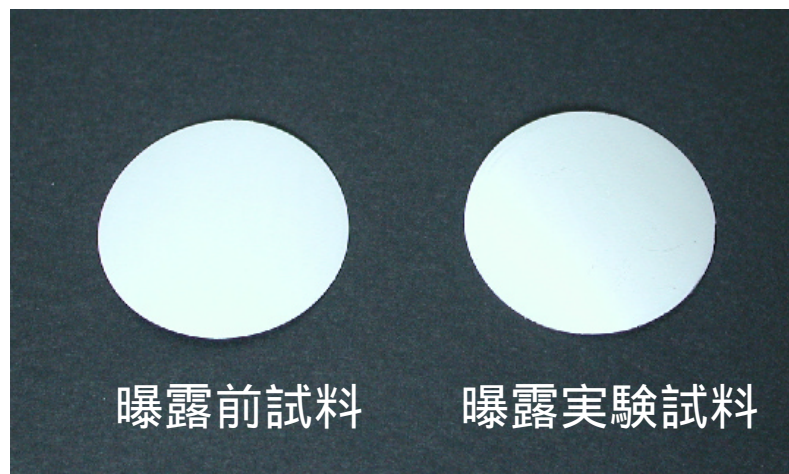


フレキシブル太陽光反射素子

外観：顕著な変化は見られなかった。

質量(M)：地上対照試料のAO単独照射で大きな減少(減少率：0.7%)を示した。

熱光学特性：太陽光吸収率(α_s)は、地上対照試験試料のUV単独照射で顕著な増加(増加率：約180%)を示した。垂直赤外放射率(ϵ_N)には大きな変化は見られなかった。

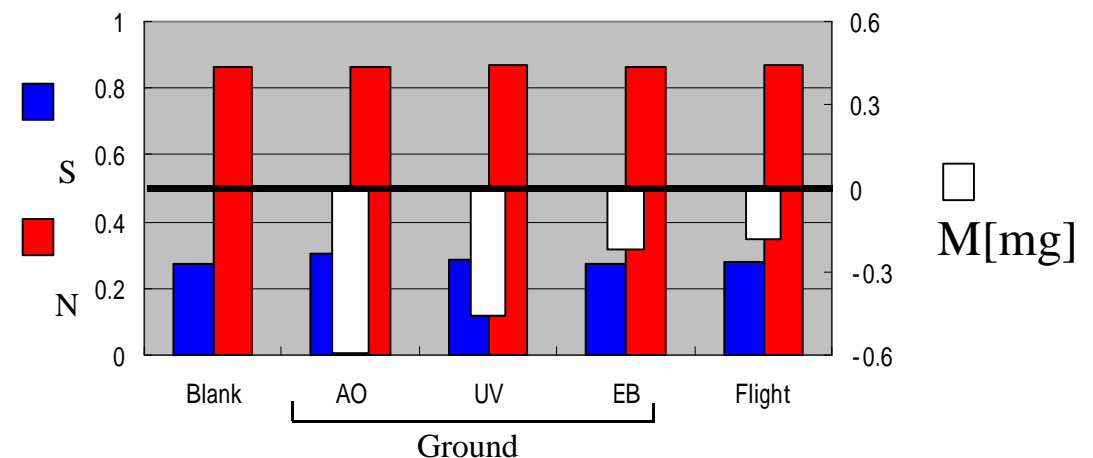
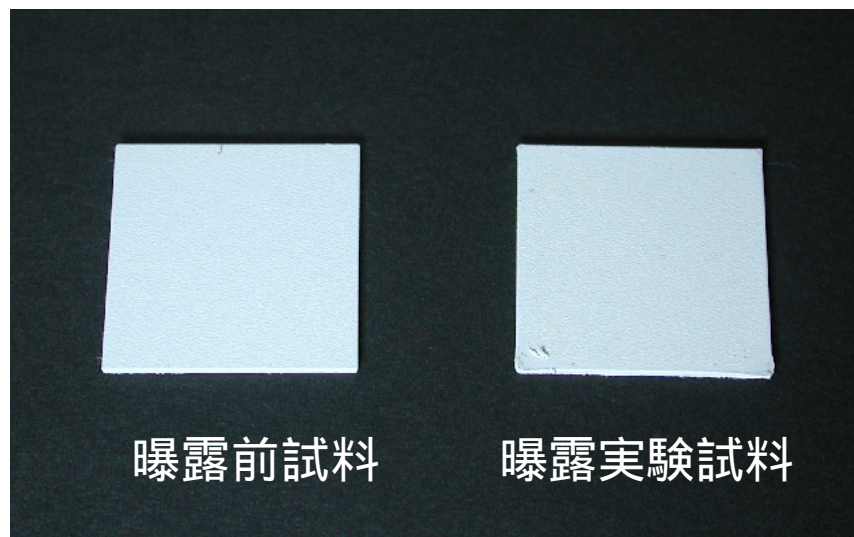




白色塗料

外観：曝露実験試料は、曝露前と比較すると、極僅かに褐色に変化した。
質量(M)：曝露実験試料及び地上対照試験試料とも減少した。地上対照試験試料のAQ、UV単独照射で大きな減少(減少率 AO: 0.4% UV: 0.3%)を示した。

熱光学特性：太陽光吸収率(S)は、地上対照試験試料のAO単独照射で最大の変化(増加率：約10%)を示した。垂直赤外放射率(N)は、大きな変化は見られなかった。



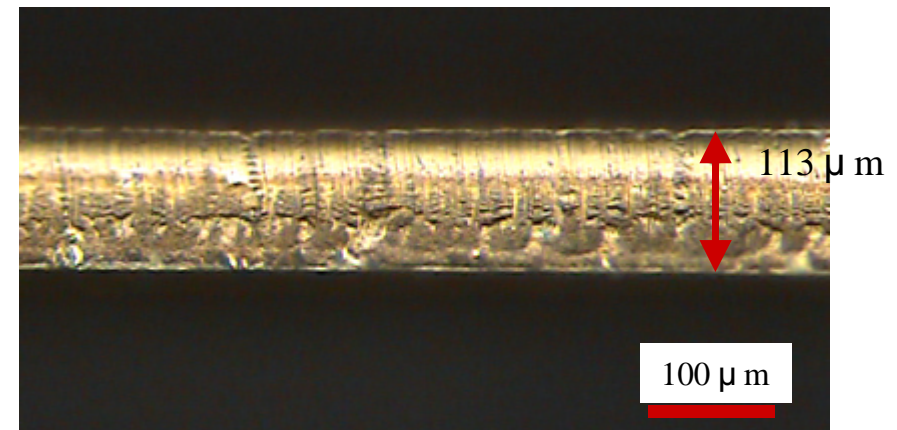
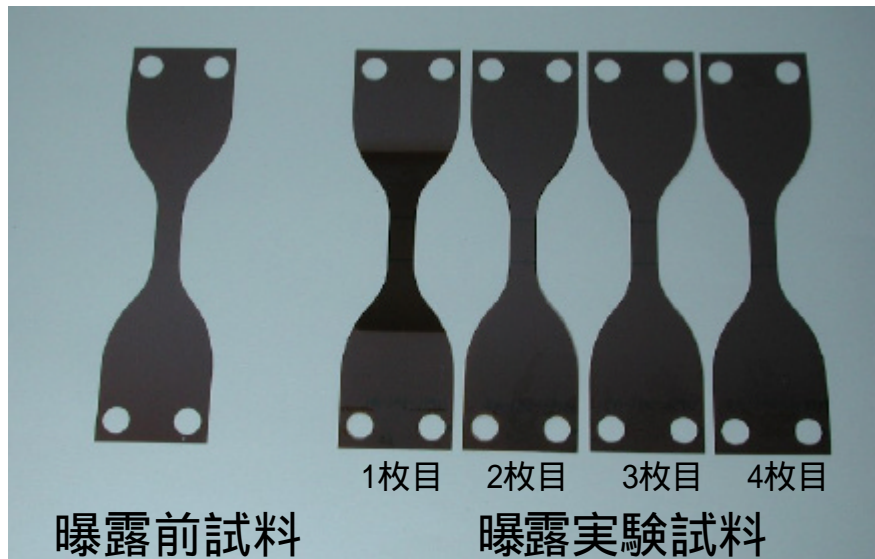


張力負荷ポリイミドフィルム(UPILEX-S) (1)

無負荷、低張力負荷(4.12N)、高張力負荷(20.59N)の3種類の試料を曝露実験に供した。曝露面から順番に1、2、3、4枚目とし、4枚重ねで搭載した。

外観：宇宙空間に直接曝露される1枚目の曝露部分が、AOで侵食されていた(曝露前試料厚さ：125 μm)。2枚目以降の試料に関しては、変化はなかった。

質量(M)：無負荷試料では、約1.3%の減少率、張力負荷試料では、約0.4%の減少率であった(4枚重ね一式)。

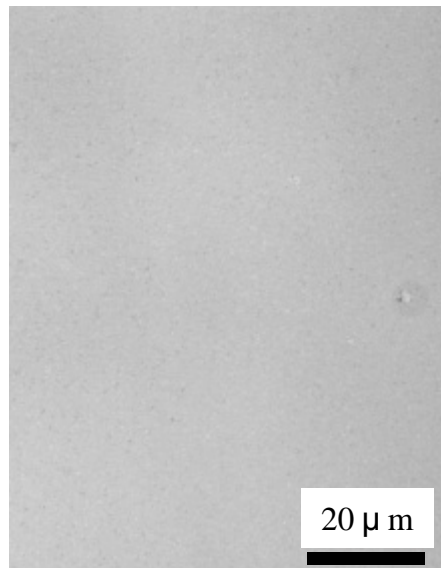


曝露実験試料張力負荷ポリイミドフィルム(4.12N)
(1枚目)の曝露部断面の光学顕微鏡観察結果

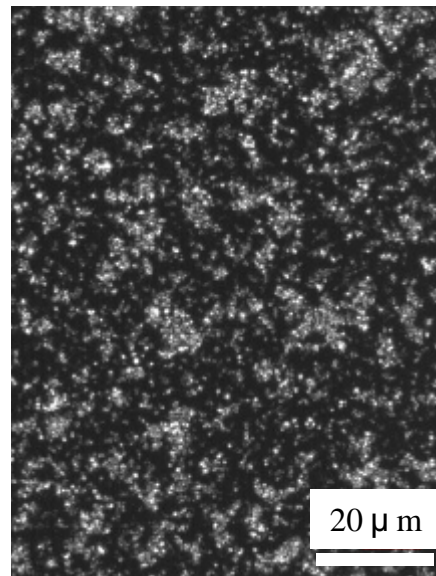


張力負荷ポリイミドフィルム(UPILEX-S) (2)

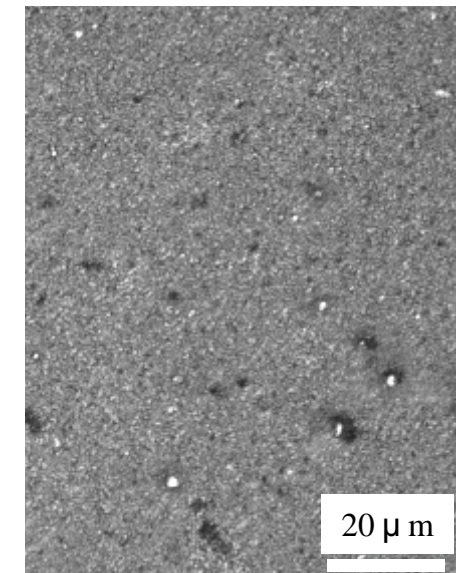
顕微鏡観察の結果、曝露実験後の試料には、若干の汚染が観察された。



曝露前試料表面



AO(0.5年分)照射後試料表面

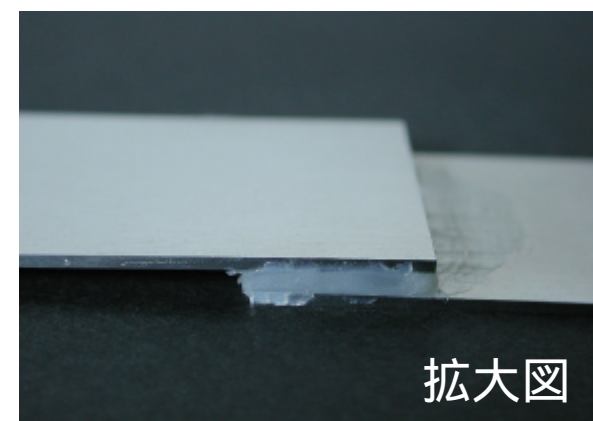
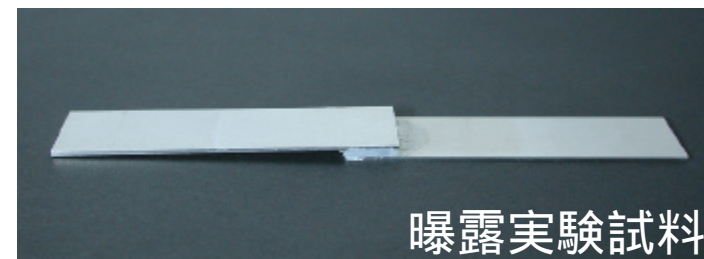


曝露実験試料表面

その他の試料

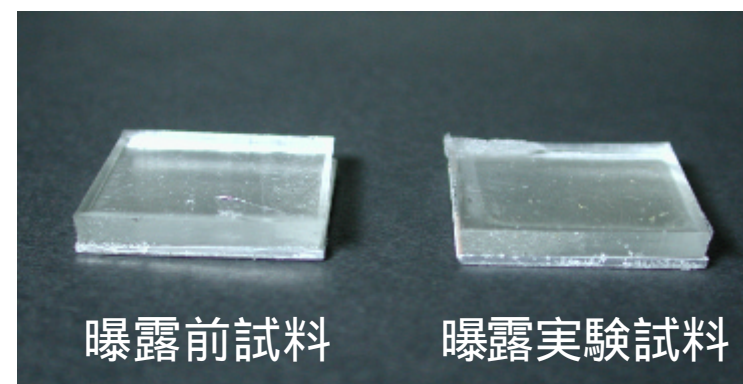
シリコーン系 接着剤

曝露実験試料には、外観に顕著な変化は見られなかった。質量変化率は、最大で約0.7%の減少であった。



シリコーン系 ポッティング剤

曝露実験試料には、外観に顕著な変化は見られなかった。質量変化率は、約0.01%の減少であった。





SM/MPAC第1回回収試料の解析結果(中間報告)



SM微小粒子捕獲実験装置搭載捕獲材料

	搭載捕獲材料名	実験提案機関	使用目的
1	アルミ板	宇宙開発事業団	微小粒子衝突頻度の計測
2	シリカエアロジェル		微小粒子衝突エネルギー、組成等の分析
3	ポリイミドフォーム		微小粒子衝突エネルギー、組成等の分析

アルミ板 (フライト品)

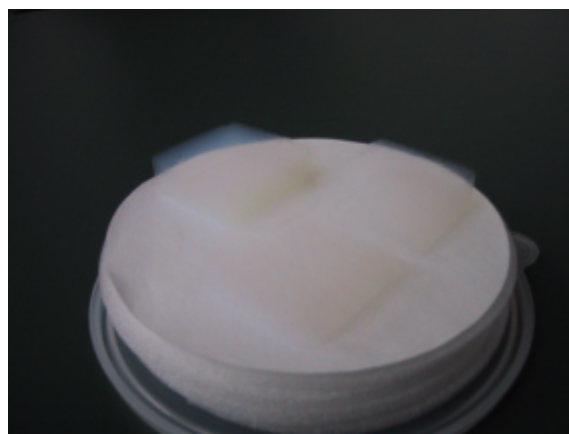
材質 : アルミニウム



シリカエアロジェル

材質 : SiO_2

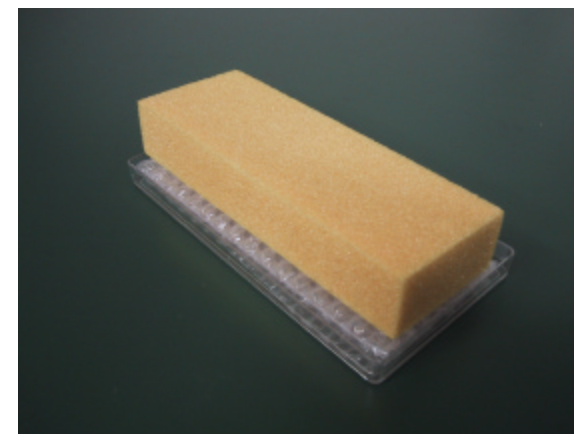
密度 : 0.03 g/cm^3



ポリイミドフォーム (マイクロポアフォーム)

材質 : ポリイミド

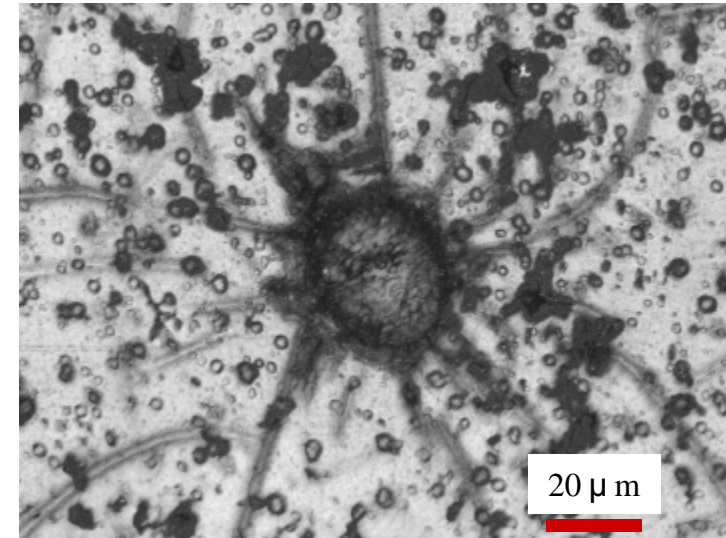
密度 : 0.01 g/cm^3



アルミ板

レーザー顕微鏡で観察した結果、2点の衝突痕を識別した(全体面積: 207.4 cm²)。

識別できた衝突痕の数は、宇宙環境モデルによる予測結果より少なかった。識別できたものより小さな衝突痕があると考えられるが、アルミ板表面の傷との判別が困難な状況である。

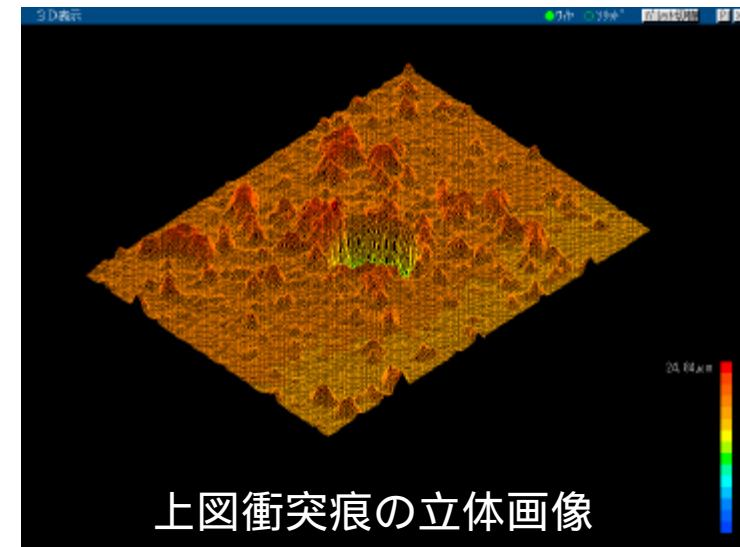


衝突痕 平均直径: 約26.0 μm
深さ: 約13.0 μm

アルミ板衝突予測結果

捕獲粒径 [μm]	2001年[1年間]	2001 ~ 2002年 [2年間]	2001 ~ 2003年 [3年間]
5 ~ 10	12個	24個	36個
10 ~ 50	9個	19個	28個
50 ~ 100	1個	2個	3個
100 ~ 1,000	0.3個	0.7個	1個


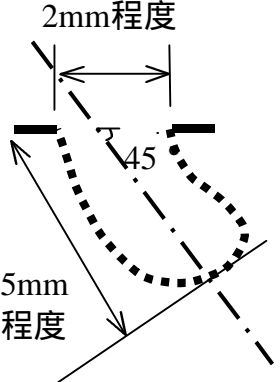
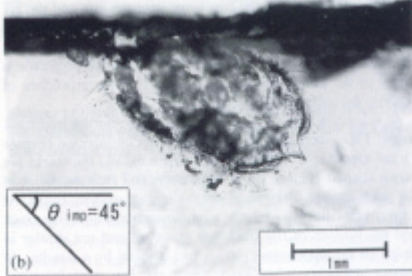
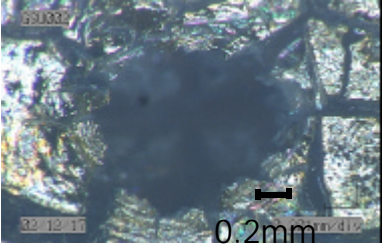
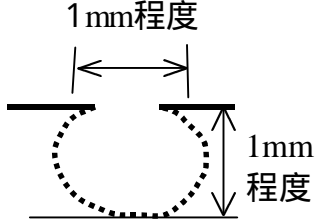
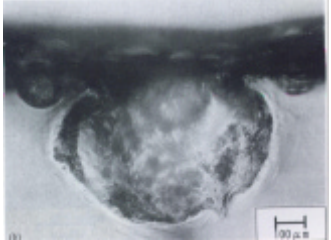
* 周囲構造物による遮蔽効果を見ない



上図衝突痕の立体画像

シリカエアロジェル(1)

目視観察にて識別した2点の衝突孔の顕微鏡観察結果

画像	断面形状(推定)	対応する形状の地上試験例	微小粒子推定衝突速度と入射角度	微小粒子推定粒径
<p>衝突孔1</p>  <p>[斜め上方よりの画像]</p>	 <p>[深さ値は目視による推定]</p>	 <p>微小粒子の粒径: 160μm(平均) 微小粒子の衝突速度: 6.5km/s 微小粒子の入射角度: 45度</p>	<p>速度: 5~10km/s 角度: 約45度</p> <p>・速度は孔の深さ / 入り口径比から推定(次頁図1参照)。 ・角度は孔形状から推定。</p>	<p>粒径: 200~250μm</p> <p>・微小粒子粒径と孔の入り口径との関連データから推定(次頁図2参照)。</p>
<p>衝突孔2</p>  <p>[上方よりの画像]</p>	 <p>[深さ方向は目視による推定]</p>	 <p>微小粒子の粒径: 55μm(平均) 微小粒子の衝突速度: 9.8km/s 微小粒子の入射角度: 90度(垂直)</p>	<p>速度: 10km/s以上 角度: 不明</p> <p>・速度は孔の深さ / 入り口径比から推定(次頁図1参照)。 ・「クレーター」形状の場合、入射角度は識別困難</p>	<p>粒径: 約100μm</p> <p>・微小粒子粒径と孔の入り口径との関連データから推定(次頁図2参照)。</p>

シリカエアロジェル(2)

・エアロジェルの地上対照試験結果

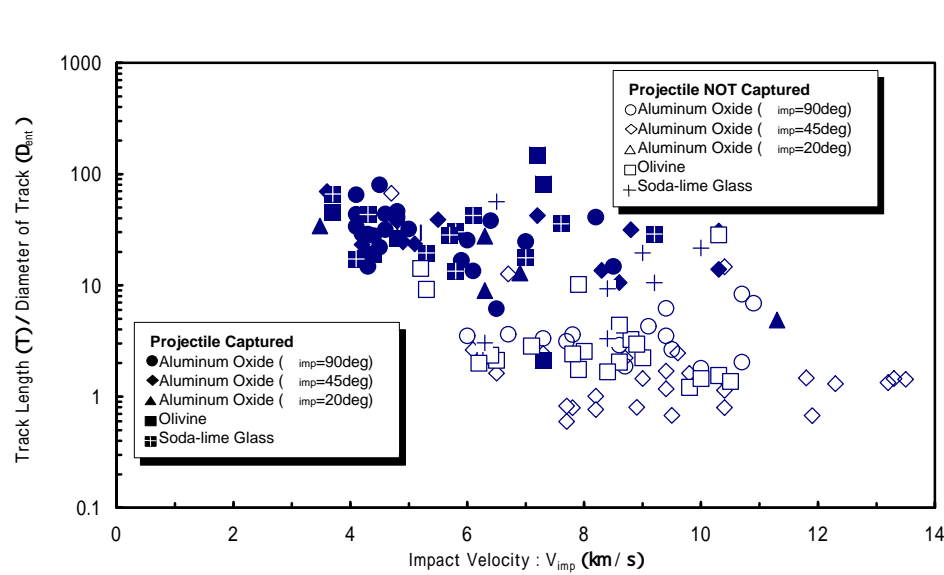


図1 微小粒子の衝突速度(V_{imp})に対する衝突孔扁平度(深さ[T] / 入り口径[D_{ent}])

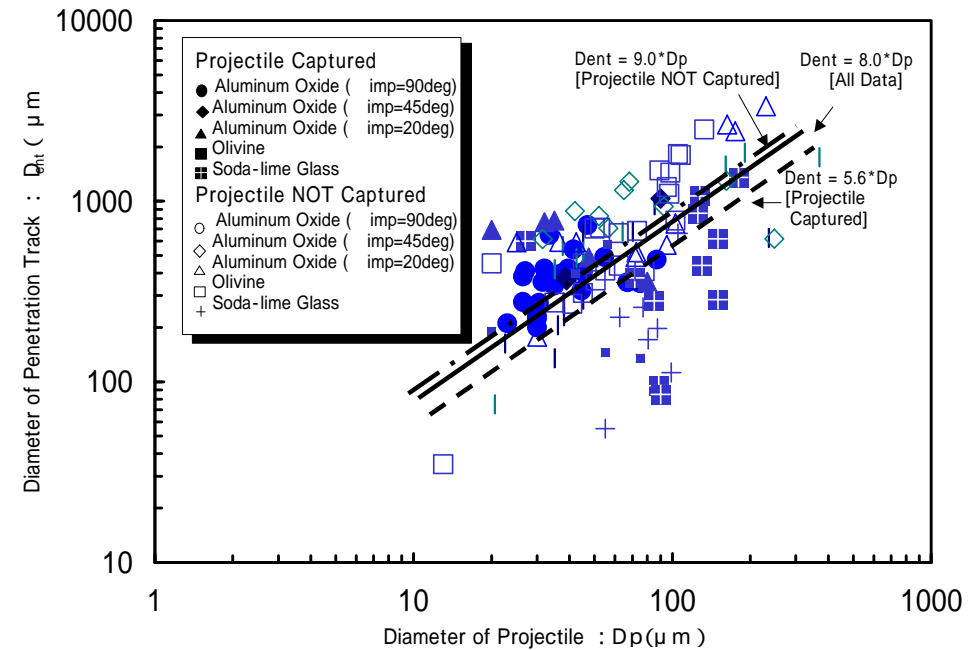


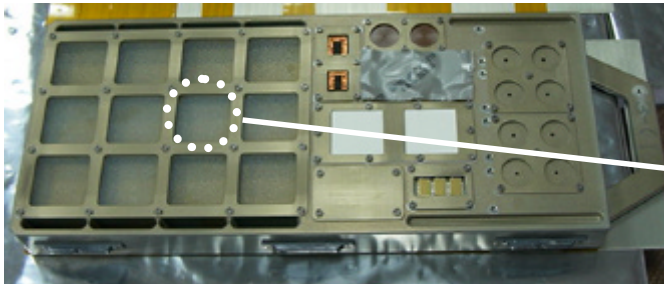
図2 微小粒子の粒径(D_p)に対する衝突孔入り口径(D_{ent})



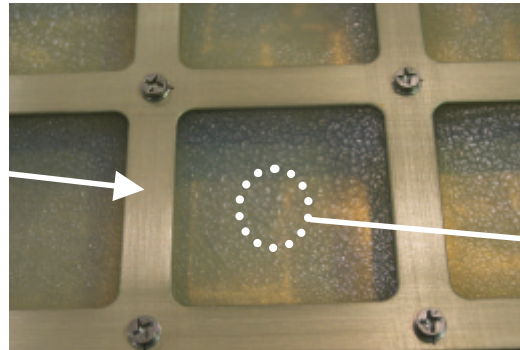
汚染の解析結果(中間報告)



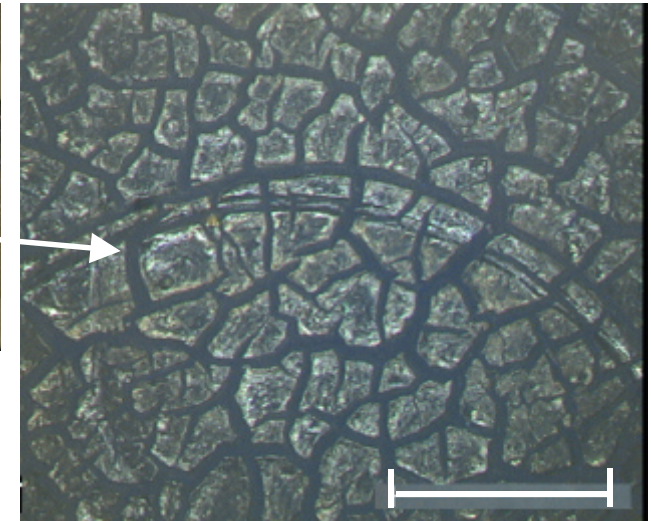
汚 染



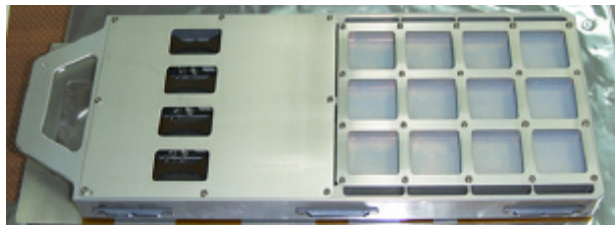
WAKE面全体



エアロジェル拡大



4mm



参考: RAM面の状態

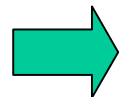
- WAKE面は RAM面に比べ全体的に汚染。
ISSスラスタからの汚染と考えられる。
- エアロジェル表面を拡大すると細かなひび割れが存在。





今後の分析スケジュール

1. SEED試料: 搭載試料提案機関による各試料固有の分析、評価(材料分析、摩擦試験など)を実施中
(~8月(TBD))
2. MPAC捕獲材料: 引続き、衝突痕、衝突孔の形状等の詳細評価中。捕獲微小粒子の組成分析、飛来方向解析等を実施予定(~8月(TBD))
3. その他
汚染物質の材料分析
UVモニタガラスの衝突痕評価



**8月(TBD)
中間報告会(第1回回収品評価解析結果)**



まとめ

SM/MPAC&SEED実験試料に関して、評価を進めつつある。本実験の成果は、部品・材料の貴重な宇宙実証データとして、各プロジェクトの確実な遂行に反映していく。

汚染状況分析によりISSの汚染環境を評価し、今後のISSの運用、利用に貢献する。

今後も、機会がある毎に材料曝露実験を実施し、異なる軌道環境における微小粒子環境の把握、部品・材料の耐宇宙環境性評価等を行うことにより、信頼性の高いデータ蓄積を押し進め、宇宙機の信頼性向上へ寄与していく。