

「耐宇宙環境材料の実験」

東京工業大学大学院総合理工学研究科

小 田 原 修

1. 国際宇宙ステーションと材料曝露実験

1998年11月に建設をスタートした国際宇宙ステーション(ISS: International Space Station)の日本実験棟「きぼう(JEM: Japan Experimental Module)」の船外実験プラットフォームに、材料曝露実験装置(SEED: Space Environment Exposure Device)を配置しての材料曝露実験(JEM/SEED)が計画されている。材料曝露実験の主な目的は、宇宙機の寿命や信頼性の向上のために、様々な宇宙用材料に及ぼす宇宙放射線や原子状酸素などの影響を明らかにすることである。

これまで宇宙開発事業団では、1993年に宇宙実験・観測フリーフライヤー(SFU: Space Flyer Unit)の搭載実験機器部(EFFU: Exposure Facility Flyer Unit)を用いて約10カ月間材料曝露実験し、また1997年にSTS-85シャトルミッションで12日間MFD(Manipulator Flight Demonstration)材料曝露実験を行っている。一方、経済産業省では、宇宙環境信頼性実証システム(SERVIS: Space Environment Reliability Verification Integrated System)プロジェクトの一環として、宇宙実証試験を平成15年度に実施する予定である。米国では、1986年より6カ年間、長期曝露実験(LDEF: Long Duration Exposure Facility)衛星を用いて材料曝露実験を行っている。

材料曝露実験を通して、宇宙環境が各種材料に与える影響を調べることは、地上での対照試験との整合性を明らかにしてより信頼性の高い材料評価を行うためにも、多くの機会を利用してデータを蓄積することが重要である。JEM/SEEDは、長期の曝露実験が可能であり、望ましい実験環境を提供してくれると期待できる。

しかし、「きぼう」の打ち上げが数年先となったため、2001年10月より、ISSのロシアサービスモジュール(SM)の曝露部で、3年計画の材料曝露実験SM/SEEDを、「きぼう」でのJEM/SEEDに先駆けて行っている。¹⁾

本年10月にNASA ジョンソン宇宙センターで開催の宇宙基地管理会議での合意として、ISSの組み立てスケジュールが変更され、2000年のスケジュールでは2004年5月予定の「きぼう」船内実験室の打ち上げが2006年7月以降となっている。表1は、今後の組み立てスケジュールの概要であるが、特に「きぼう」に関わる打ち上げの遅れが大きくなっている。

表1 2002年10月に変更したISS組み立てスケジュール

打上げ期日	当初予定*	フライト	主な打上げ要素
2002年11月	[2002. 9]	11A	P1 トラス
2003年3月	[2002. 6]	ULF1	利用補給フライト
2003年5月	[2002. 12]	12A	P3/4 トラス、太陽電池パネル
2003年7月	[2003. 2]	12A.1	P5 トラス、補給艙装フライト
2004年1月	[2006. 3]	15A	S6 トラス、太陽電池パネル
2004年2月	[2003. 11]	10A	ノード2
2004年7月		ULF2	利用補給フライト
2004年9月	[2004. 4]	ATV1	欧州輸送機
2004年10月	[2004. 10]	1E	欧州実験棟
2005年1月	[2004. 9]	UF-3	補給艙装フライト
2005年4月	[2003. 10]	UF-4	カナダ特殊目的のマニピュレータ
2005年7月	[2005. 2]	UF-5	補給艙装フライト
2005年10月		UF-4.1	補給艙装フライト
2006年1月	[2005. 6]	UF-6	補給艙装フライト
2006年3月	[2004. 2]	1J/A	「きぼう」船内保管室
2006年7月	[2004. 5]	1J	「きぼう」船内実験室、 「きぼう」ロボットアーム
2006年10月		ULF3	利用補給フライト
2006年11月	[2003. 8]	3R	汎用ドッキングモジュール
2007年1月	[2002. 10]	9A.1	多目的モジュール、 科学電力プラットフォーム
2007年4月	[2006. 4]	UF-7	生命科学実験施設（セントリフュージ）
2007年6月	[2005. 1]	2J/A	「きぼう」船外実験プラット フォーム、パレット
2007年11月		ULF5	利用補給フライト
2008年1月	[2005. 5]	14A	キューボラ

* : 2000年8月発表の組立スケジュール

2. これまでの材料曝露実験の概要

2.1 SFU による材料曝露実験

1995年3月にH-IIロケット3号機で打ち上げられ、1996年1月にスペースシャトルのロボットアームで若田宇宙飛行士の操作により回収されたSFUにおいて、約10カ月間にわたり、高度約500km、軌道傾斜角28.5度で周回しての材料曝露実験が行われた。材料曝露実験は、SFU搭載実験機器部(EFFU)を用いて行われ、材料に与える影響が大きい原子状

酸素や紫外線などの累積照射量の計測もあわせて実施した。熱制御材の劣化特性、潤滑剤の寿命評価、テフロンの原子状酸素による浸食、などに関する結果を得ている。

2.2 MFD 材料曝露実験²⁾

1997年8月、スペースシャトル STS-85 による12日間のミッションにおいて、様々な宇宙材料曝露実験を実施し、耐宇宙環境性が調べられた。搭載材料は、宇宙用として宇宙開発事業団が開発した耐熱電線、宇宙用として宇宙開発事業団が開発しているエポキシ樹脂系接着剤やアクリル樹脂系粘着テープ、宇宙用として宇宙開発事業団が開発し認定部品である熱制御フィルムなどである。

2.3 SERVIS プロジェクト

宇宙環境で使用する機器などには、従来より、高信頼性部品と呼ばれる、耐環境性が保証されているが高価で納期の長い部品が使用されている。高信頼性部品は、豊富な技術データと使用実績を有する部品で、その原材料、製造/試験等のプロセスを管理することにより、高度な信頼性を有する部品である。高信頼性部品にかかわる新規部品の採用については、膨大な品質確認データの取得に長期間を要することから、高信頼性部品は民生部品と比較し最新技術の適用が遅れている。宇宙利用においては、部品の交換等の修理がほぼ不可能または非常に困難であることから、高信頼性部品の適用を要求されることになるが、このことが高コスト化、長納期化などの一因となっている。

宇宙分野は、他産業への技術的波及効果が高く、裾野の広い知識集約型・高付加価値型産業分野であり、通信放送分野、リモートセンシング分野、測位分野、輸送分野など 21世紀の経済・社会ニーズへの貢献が期待されている。しかしながら、我が国のこの分野における売上高の規模が小さく、しかもそのうち70%近くが事実上の官需で占められている。また、世界の需要動向を見ると、防衛需要が大幅に削減されて極めて厳しい状況にある一方で、世界の商用通信衛星やGPSや民生リモートセンシング市場は1兆円規模である。こうした状況を踏まえて、欧米の企業は民需主体への企業構造の転換のために企業の再編を強力に進めている最中である。このような世界的な環境変動の中で、日本の宇宙機器製造企業が規模の拡大を図っていくためには、民需を主体とした世界の商業市場へ参入していく事が必要不可欠である。

そこで経済産業省においては、民生部品や民生技術を宇宙環境で使用する機器などに転用するための技術基盤を構築し、抜本的に低コスト化と高性能化を図ることを目的に、SERVIS プロジェクトを推進している。本プロジェクトで得られた成果は、宇宙機器のコスト低減、開発・製造期間の短縮、小型軽量化、高機能・高性能化に貢献し、日本の企業の競争力強化に寄与するのみならず、石油掘削等の極限環境で使用される電子機器への適用、高空を飛ぶ航空機内で使用される高機能電子機器の放射線対策への適用等、宇宙産業以外の分野でも利用される見込みである。

打上げは平成 15 年度の予定で、約 1000km の太陽同期軌道に打ち上げ、2 年間の軌道上運用を行う計画で開発を進めている。実証衛星 1 号機で、CPT 及び機器実験装置に搭載され軌道上で評価される民生部品は 38 品種、民生技術は 7 技術である。

2.4 LDEF 材料曝露実験^{3)・6)}

米国では、1984 年 4 月にスペースシャトルチャレンジャーで、LDEF を高度 310 km で軌道傾斜角 28.5 度で打ち出し、1990 年 1 月にスペースシャトルコロンビアで回収するまでの 6 年間にわたって、材料曝露実験を行い、ミラー材としての SiC や光学材料への原子状酸素の影響などについて調べている。曝露環境における原子状酸素の全フルエンスは約 $9 \times 10^{21}/\text{cm}^2$ であり、そのエネルギーは 1 原子あたり 5eV(8km/s)である。例えば SiC の場合、その表面が 8nm 以上酸化していて、ミラー材としての性能が著しく低下したと報告している。

3. ISS における宇宙環境

宇宙開発事業団の「曝露部利用に関する案内」によると ISS 及び JEM 曝露部に搭載された曝露実験ペイロードの環境は、以下のようであると予測される。

3.1 大気

地球周辺の大気密度は、太陽活動及び地磁気活動により変動する。約 11 年周期の太陽活動の極大期に、太陽極紫外線強度(一般には地上で計測可能な波長 10.7cm の太陽電波強度を使用)は最大となる。太陽活動に伴い変動する太陽極紫外線強度と大気密度は、よい相関を示すことが知られている。一般に強度が増すと大気密度も増加する。大気密度は昼夜、季節、緯度によっても変動する。主な大気成分は酸素、窒素、ヘリウム、水素である。真空度は 10^{-6}Pa 程度であるが、ISS からの排気などにより真空度が低下する可能性がある。また、原子状酸素は、材料を侵食する成分としてよく知られており、ISS 軌道では、原子状酸素のフルエンスは、最大 5×10^{21} 個 / cm^2 / 年と予測されている。

3.2 プラズマと電離放射線

プラズマは、主に中性大気が宇宙線や太陽光などによって電離したもので、電子、酸素、水素、ヘリウム、一般化窒素等のイオンから成る。プラズマは、宇宙機表面と相互作用し、帯電、放電の原因になることがあります。また、材料の表面破壊や装置等の異常動作を引き起こすことがある。太陽フレアに関連して発生する高エネルギー粒子では、数～数百 MeV のエネルギーを持つ陽子が大部分を占めている。

3.3 電磁波

地球周辺の電磁波には、宇宙からの電磁波、地球周辺で発生する電磁波がある。宇宙からの電磁波には、主に太陽からのものがあり、その他、銀河、クエーサ、パルサ等からの電波やX線、赤外線などがある。太陽電磁波のスペクトルは、ガンマ線から、X線、紫外線、可視光、赤外線、電波まで、広い領域にわたっている。太陽電磁波には、宇宙機システムと相互作用を引き起こすものがあり、特に、X線は部品・材料劣化の主要因となる。また、紫外線は、炭素繊維強化プラスチックの構造材料などの劣化に大きく影響する。

曝露実験ペイロードは、自然環境としての電磁波の他に地上や他の宇宙機との通信、各国の早期警戒レーダやウェザレーダ等の電波放射にもさらされる。

3.4 汚染

宇宙機自体からの主な汚染源には、アウトガスを放出する構造材料など、船内からのガス排気（ベント）及びリーク、排気物（ブルーム）を放出するスラスタなどがある。これらの汚染物質は、宇宙機の表面に付着し、表面の光学特性・熱特性等を変化させる。また、周辺の大気密度・組成を変化させ、光を吸収・散乱することがある。表面に付着する汚染物質は、主に材料からのアウトガス、スラスタからのブルームであり、付着率は、宇宙機の表面温度・幾何学的形状、汚染物質の科学組成、原子状酸素のフラックス、紫外線などに依存する。これら付着物は、光学機器や排熱面等を有するシステム（太陽電池アレイ、ラジエータなど）、実験装置に悪影響を及ぼす可能性がある。

ISS 設計では、それぞれの期間毎に付着に関する条件として汚染付着率(MD)が設定されており、その汚染環境で ISS システムが所定の性能を発揮することとされている。アウトガスは、ISS に使用される構造材料、塗料、電気絶縁材料などから発生するが、一つの汚染源から付着する JEM 曝露部での MD は最大で $2.4 \times 10^{-14} \text{g} / \text{sec}$ と予測される。また、ブルームに関しては、ISS は非対称ジメチルヒドラジン $\text{H}_2\text{N}-\text{N}(\text{CH}_3)_2$ と四酸化二窒素 N_2O_4 の推進を用いてリブーストや推進力による姿勢制御を微小重力モード以外の運用モードで行うが、それらの燃焼物である水や未燃焼物が付着することがある。この他、ISS 与圧環境からのベントにより、水や水に溶けた固体が付着することがある。これらの付着については、一般に実験装置の表面温度が低いほど付着量が増加するという傾向がある。実験装置が光学機器（鏡面、レンズ等）を有する場合、センサに汚染物質が付着すると透過率や反射率などの特性が変化し、センサの S/N 比が低下することも想定される。付着による透過率・反射率劣化の度合いは検出する電磁波の波長や付着物の厚さなどによって異なり、一般に紫外線に対する透過率・反射率の劣化は可視光線や赤外線に比べ大きくなる傾向がある。実験装置が放熱板を有する場合、その熱吸収率と熱輻射率が変化し、所定の性能を発揮しない可能性もあり、物理的な遮蔽機構などの汚染防護対策の必要性が生じるかもしれない。

3.5 周辺大気の汚染

周辺大気中の汚染物質は、主に船内からのベントによるものであり、光の吸収・散乱・輻射は、汚染物質の物理的性質に依存する。これらの汚染物質は、光学機器を有する科学実験や観測実験などに悪影響を及ぼす。ISS 設計では、ISS リブーストやスペースシャトルドッキングなどの期間を除き、周辺大気の汚染に関する条件として分子カラム濃度(MCD)が設定されている。ISS では、米国実験モジュールやJEM与圧部などの与圧環境から定期的にベントが行われ、その成分には水、二酸化炭素、空気、水素、希ガスなどがある。実験装置が光学機器を有する場合、周辺大気の汚染により光の吸収・散乱・輻射が発生し、センサの S/N 比が低下する可能性がある。ISS 与圧モジュールから排出される水と二酸化炭素は赤外線を輻射する分子であり、赤外線を検出するセンサに悪影響を及ぼす可能性がある。このように、周辺大気の汚染が悪影響を及ぼす恐れがある場合、ベントなどのイベント・スケジュールを考慮した上で実験スケジュールを設定するなどの必要性が生じる。

3.6 微粒子

周辺大気中の微粒子は、宇宙機外表面からの放出（打上げ前の過程で付着していたものが再放出）船内からのベントによるものであり、光の吸収・散乱が生じます。これら微粒子は、光学機器を有する科学実験、観測実験などに悪影響を及ぼす可能性がある。ISS 設計では、ISS リブーストやスペースシャトルドッキングなどの期間を除き、微粒子に対する条件として微粒子数(PB)が設定されている。実験装置が光学機器を有する場合、微粒子により光の吸収・散乱が発生し、センサの S/N 比が低下する可能性がある。一方、実験装置が微粒子を放出する場合、ISS システムや他の実験ペイロードへの影響の問題から制約が課せられる可能性がある。

4. SM/SEED 材料曝露実験

ISS の早期利用として、ISS ロシアサービスモジュールを利用して SM/SEED 材料曝露実験が 2001 年より行われている。

4.1 実験条件

JEM と SM を比較して最も異なるのは、図 1 に示すようにその位置であり、JEM は飛行方向の先頭に位置し、SM は後方に位置している。このような位置関係では、SM/SEED 材料曝露実験での試料は、より多くの ISS から排出される汚染物質にさらされると考え

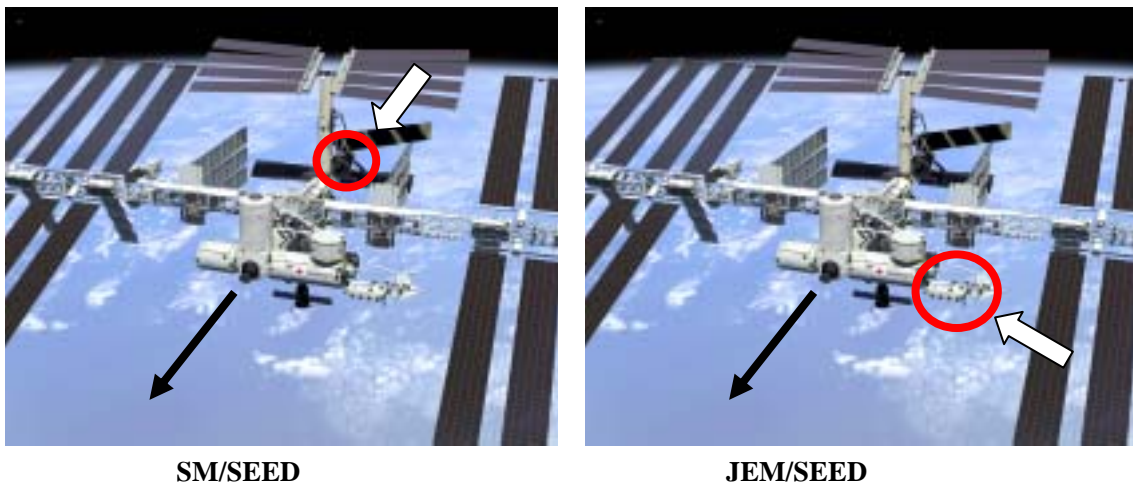


図1 ISS の飛行方向に対する SM と JEM の位置関係

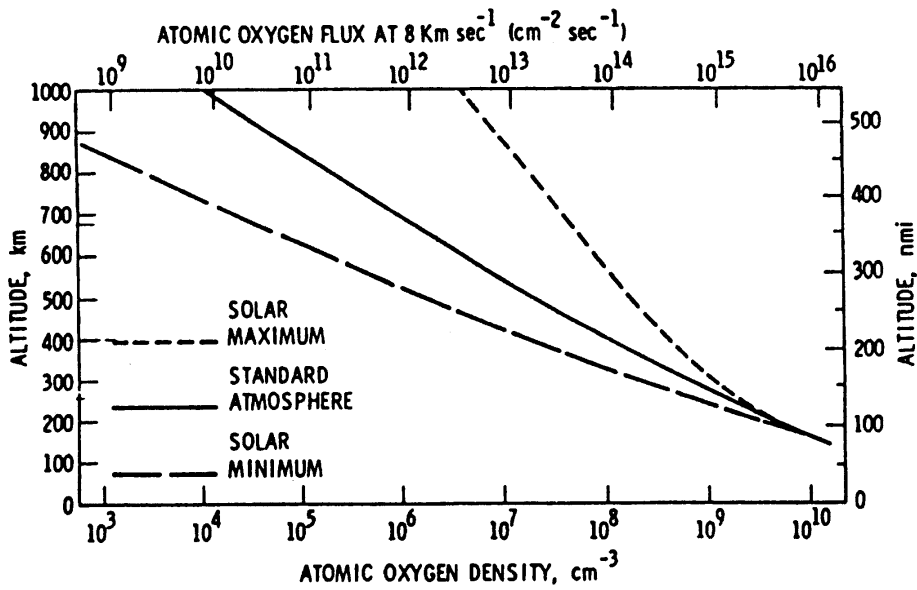


図2 高度と原子状酸素濃度との関係

られる。したがって、JEM に比べ実験中の環境の均一性は保たれない。

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は、原子状酸素、熱履歴、宇宙放射線、紫外線、真空を考える。原子状酸素に関して図 2 に示すような高度との相関があり、ISS では $10^{13} / \text{cm}^2\text{-s}$ と考えられる。

次に、熱履歴については 90 分の間に昼と夜が来ると考えてよく、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つい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 kW/m^2 を目安として考えるとよい。以上を整理して、図 3 に示す。

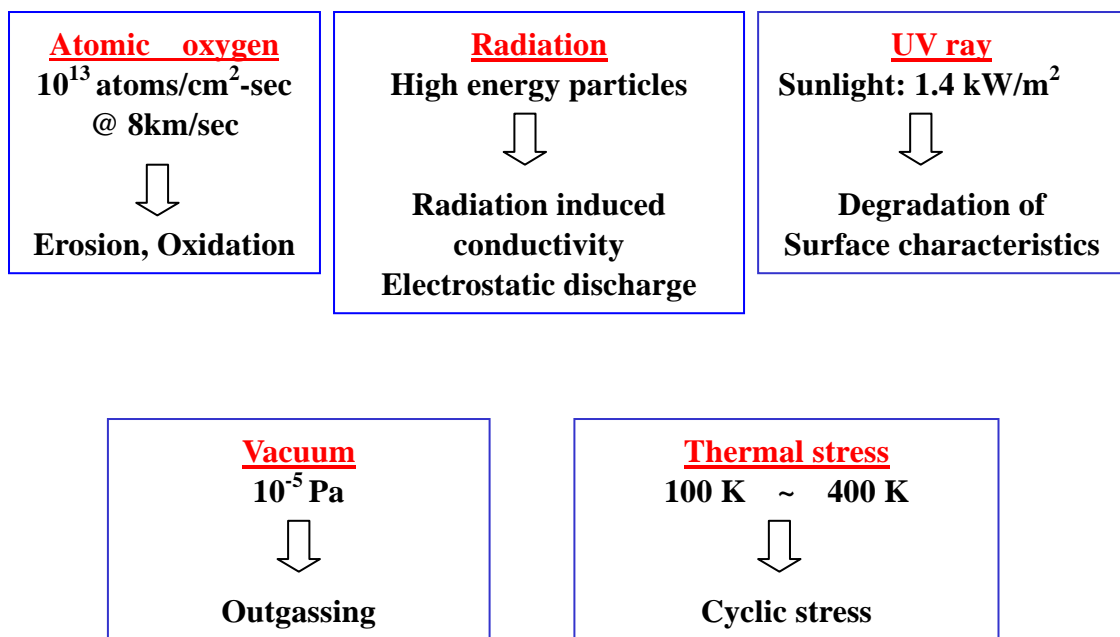


図3 SM/SEED 材料曝露実験における代表的な環境条件

4.2 実験搭載試料

現在進めている SM/SEED 材料曝露実験では、表 2 に示すように、宇宙開発事業団を始めとする 7 機関からの提案に沿って実験を行っている。ここでは、著者が提案したセラミックス材料について概説する。

表2 SM/SEED 材料曝露実験実施者リスト

提案者	提案機関	選定試料
永尾 陽典	富士重工業（株）	宇宙用構造材料
藤田 修、中村 孝	北海道大学	宇宙用柔軟膜構造材料
小田原 修	東京工業大学	宇宙用構造材料など
足立 幸志	東北大学	宇宙用固体潤滑剤
土佐 正弘	材料・物質機構	宇宙用固体潤滑剤
秋山 正雄	（株）IHI エアロスペース	宇宙用固体潤滑剤
今川 吉郎	宇宙開発事業団	宇宙用膜構造材料など

選定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(AlN)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。それぞれの試料の特徴は以下のごとくである。

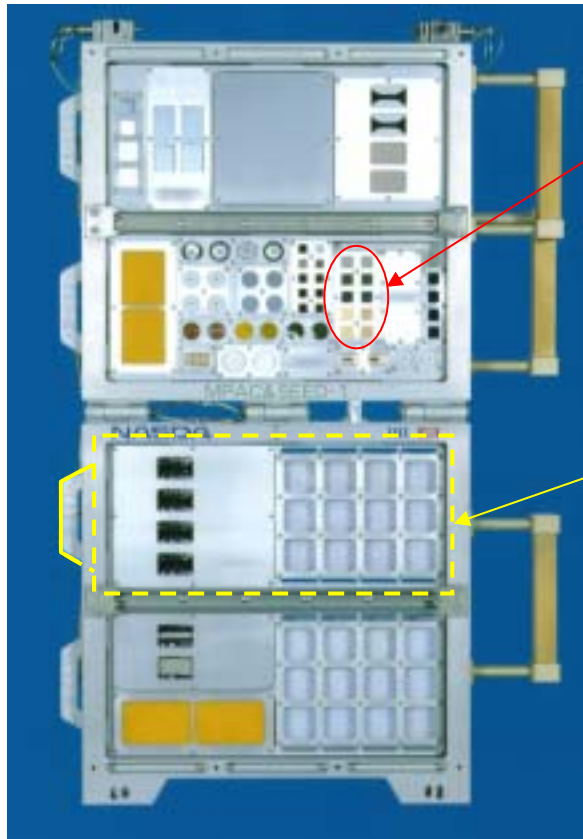
- (1) 窒化チタン/金属基板: TiNをAl(99.999%)基板上にコーティング済み(TiN厚さ推定1.2 μm、純Al板上にTiNをイオンプレーティング)
- (2) 窒化チタン/セラミック基板: TiNをAl₂O₃(99.9%)基板上にコーティング済み(TiN厚さ推定1.2 μm、焼結Al₂O₃板上にTiNをイオンプレーティング)
- (3) 窒化アルミニウム: AlN常圧焼結体(焼結温度~1700)
- (4) 炭化ケイ素(HP焼結): SiCホットプレス焼結体(焼結温度~2200)
- (5) 炭化ケイ素(反応焼結): SiC反応焼結焼結体(焼結温度~1500)

試料の形状は、17mm x 17mm x 2mmである。

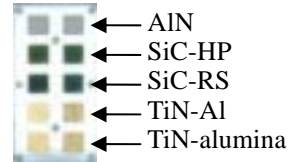
本提案試料について、窒化チタンの場合は耐紫外線材料として有望であり、窒化アルミニウムは高熱伝導材料として有望であり、炭化ケイ素は高強度高融点材料としてすでに宇宙用材料としても活用されている。材料寿命評価につながる熱、真空、放射線などの影響を調べる加速フィールド実験を実施することにより、宇宙環境材料としての可能性を把握するとともに、熱疲労や放射線照射などの環境にさらされる他分野での材料研究開発にも有効な情報が得られると期待している。

4.3 実験概要

SM/SEED 材料曝露実験は3年計画で、最初試料を3組みセットして、1年毎に1組取り外して、3年間の経時的変化を把握する。図4には、試料を収めたSEEDの様子を示す。SEEDは、2001年8月21日にバイコヌール宇宙基地より打ち上げられ、ISSに持ち込み、材料曝露実験は10月15日よりスタートした。



Our Samples



Note: two specimens for each test.

Sample tray

One SM/SEED consists of four sample trays. These trays will be collected.



(a) 曝露実験中の試料配置状況

(b) 搭載・輸送時の状況

図4 SM/SEED 試料配置状況図

曝露試験結果の評価として注目しているのは、主に熱物性変化である。図5と図6に、AINとSiCの熱物性変化をそれぞれ示すが、熱履歴の環境での原子状酸素による複合的影響が考察できることを期待している。

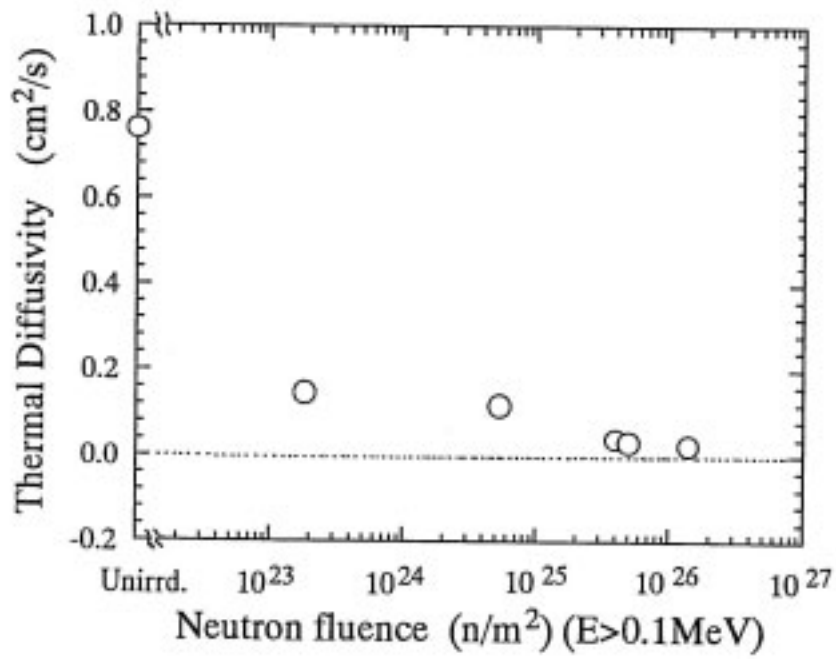


図5 中性子照射によるAlNの熱拡散率の変化

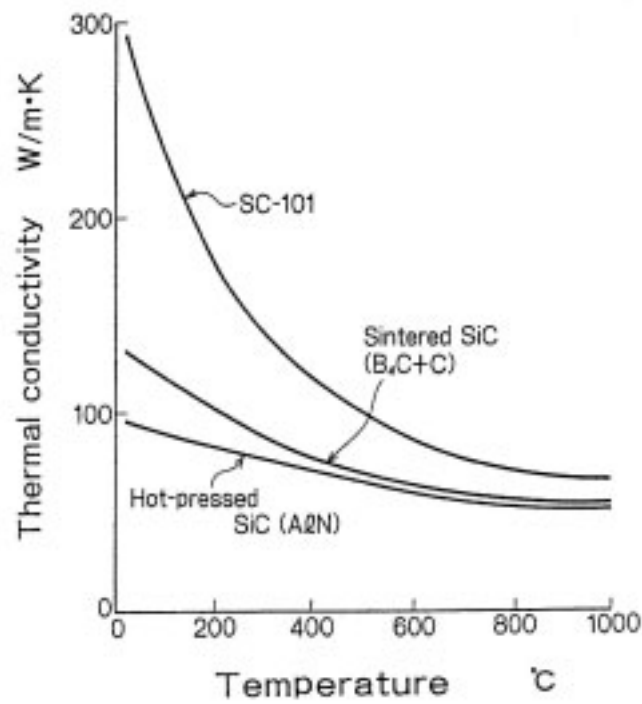


図6 SiCセラミックの熱伝導率の温度依存性

5. 今後の展望

今後の宇宙開発・宇宙環境利用では、長期飛行/長期有人活動が必須であり、それらの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、十分検討することが必要である。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」が大きな活用対象となり、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。

本実験で採用した炭化ケイ素は、結晶粒径の均一なホットプレス焼結品と結晶粒径の不均一な反応焼結品であり、それらの宇宙環境での熱、真空、放射線などの影響を調べる加速フィールド実験(90分周期での温度履歴の下での放射線及び原子状酸素の照射試験)を実施し、寿命評価を行い宇宙環境材料としての可能性及び地上での産業社会に有益な材料データを提供する。非酸化物である本実験試料は、長時間暴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と考えら、得られる成果は重電環境や燃料電池環境で利用される材料評価にも有効になり得る。

参考資料

- 1) 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ワークショップ講演集(GDZ-00021)、宇宙開発事業団技術研究本部(2000.7)
- 2) MFD 材料曝露実験成果報告書(NASDA-TMR-000011)、宇宙開発事業団(2001)
- 3) P. N. Peters, J. C. Gregory and J. T. Swann; Applied Optics, **25**, 1290-1298(1986)
- 4) G. N. Raikar, J. C. Gregory and P. N. Peters; Oxidation of Metals, **42**, 1-15(1994)
- 5) G. N. Raikar, J. C. Gregory, et al.; Surface and Interface Analysis, **23**, 77-82(1995)
- 6) J. C. Gregory; Radiation Measurements, **26**, 841-850(1996)