

宇宙機熱制御用ポリイミドフィルムの耐原子状酸素性向上

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

石澤 淳一郎

ishizawa.junichiro@jaxa.jp

1. 目的

宇宙機の外面には、高分子フィルムを積層した多層断熱材 (MLI: Multi-Layer Insulation) が広く使用されている。ポリイミドフィルムは高い耐熱性の他、宇宙環境における材料劣化因子である放射線、紫外線にも優れた耐性を有することから、多層断熱材の最外層用材料として用いられている。ポリイミド裏面にはアルミニウム層を蒸着し、反射率を高めた状態で使用されるため金色に見えるが、近年問題となっている宇宙環境での帯電・放電不具合防止のため、導電性のブラックカーボン¹⁾をポリイミドに添加したフィルム (黒色を呈す) も多く用いられるようになってきている (図1)。

一方、低軌道宇宙環境 (例えば高度 700km 以下) では、原子状酸素 (AO: Atomic Oxygen) との衝突による酸化、侵食等が主たる材料劣化となることが多い。ポリイミドフィルムも他の一般的な高分子材料同様に原子状酸素によって侵食されやすく、その耐性向上が課題となっている。

一般に耐原子状酸素性の向上には、原子状酸素に対して安定な酸化物系材料や金属 (金や不動態被膜を形成する金属) による表面保護が有効と考えられているが、曝露面にアルミニウム真空蒸着膜を施工したポリイミドフィルムが国際宇宙ステーションにおいて原子状酸素による侵食を受けた例が確認された (図2) ¹⁾。

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、①酸化物系硬質膜 (アルミニウム酸化物、シリコン酸化物、インジウム・スズ酸化物等)、②原子状酸素と反応して軌道上で無機酸化物を形成するシリコン系膜及び③材料内部にシリコン成分を導入した材料の適用を中心に耐原子状酸素性ポリイミドフィルムの研究を実施している ^{2), 3)}。①では膜に損傷が入りやすく、その箇所からの原子状酸素による侵食が発生する問題があるのに対し、②、③では地上取扱い時は柔軟で扱い易い特長を有していた。本発表では、②の研究例として、国際宇宙ステーションで実施した材料曝露実験の結果について紹介する。

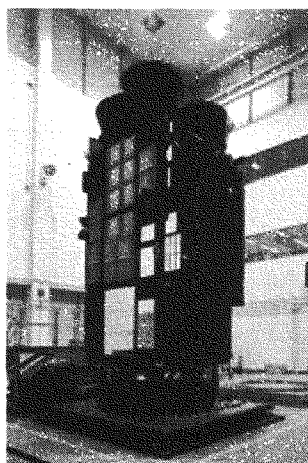
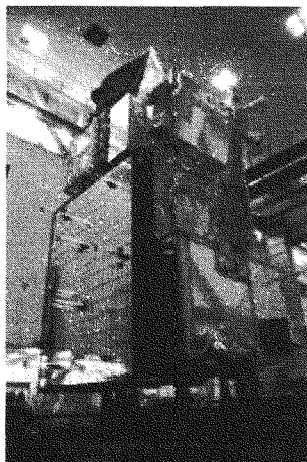


図1 多層断熱材に覆われた人工衛星
(左) 陸域観測技術衛星「だいち (ALOS)」
(右) 月周回衛星「かぐや (SELENE)」

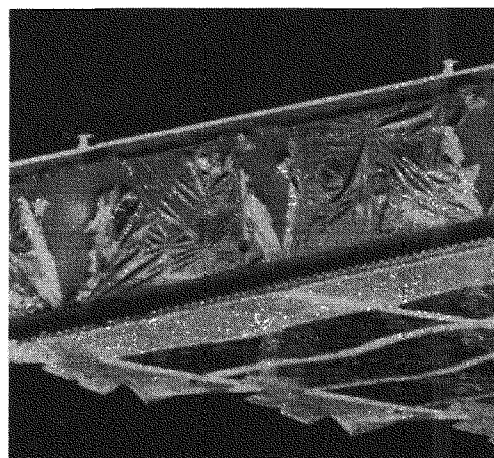


図2 国際宇宙ステーションで侵食が確認された
ポリイミドフィルム ¹⁾
ポリイミド・芳香族系高分子 最近の進歩 2008

2. 方法

2001年10月15日から約4年間、国際宇宙ステーション・ロシアサービスモジュール外壁を利用した宇宙材料曝露実験（SM/MPAC&SEED（Service Module / Micro-Particles Capturer and Space Environment Exposure Device）実験）を実施した^{4),5),6)}。同実験は同一の試料構成の3式を同時に打上げ、近接させて宇宙環境に曝した後、異なる曝露期間毎（315日間、865日間及び1403日間）に1式ずつ回収を行い、等価な環境での経時変化の評価を試みたものである。SM/MPAC&SEEDには、耐原子状酸素性ポリイミドフィルム等の材料曝露実験（SEED）用試料、3種の微小粒子捕獲（MPAC）材（シリカエアロジェル、ポリイミドフォーム、アルミニウム合金板）に加え、曝露中の環境把握のための環境モニタ材⁷⁾が搭載された（図3、4）。

耐原子状酸素性ポリイミド試料は50 μm 厚のユーピレックス®-R（宇部興産（株）製）の表面に、3 μm のポリイミドシロキサン層をコートして作製され（図5）、中心の20mm径が宇宙環境に曝露された。また、試料の一部はポリイミドシロキサン層コートが無い状態で曝露を行った（表1）。回収後の試料に対しては、質量及び熱光学特性（太陽光吸収率及び垂直赤外放射率）測定、CCDマイクロスコープ、FE-SEM、断面TEM等による形態観察、XPSによる組成及び化学結合状態等の分析評価を実施した。

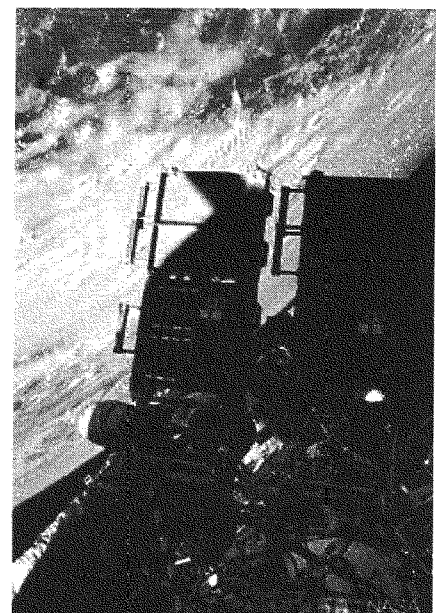
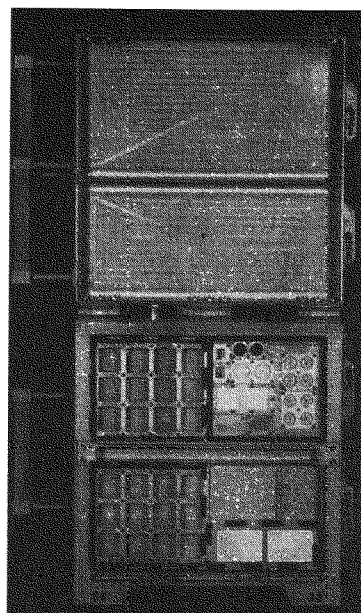
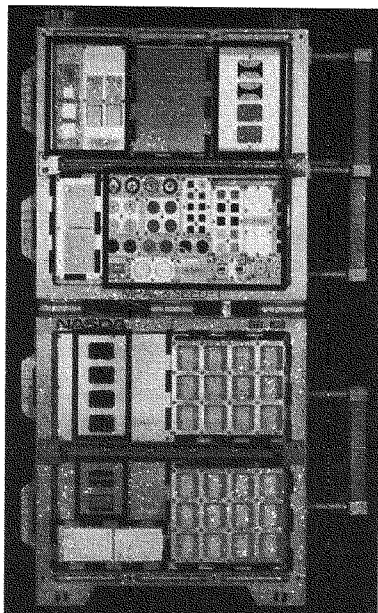


図3 SM/MPAC&SEED 外観写真

図4 軌道上の SM/MPAC&SEED

(左) RAM (進行方向) (右) WAKE (反進行方向)

実線部：材料曝露実験装置部、環境モニタ材

破線部：微小粒子捕獲実験装置部

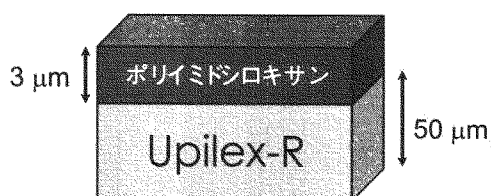


図5 シロキサンコートポリイミドフィルムの構成

表1 各式のシロキサンコートポリイミドフィルムの曝露形態

回収	試料1	試料2
1式目	コート無	コート無
2式目	コート有	コート無
3式目	コート有	コート有

3. 結果及び考察

図6にシロキサンコートポリイミドフィルムの質量変化を示す。コート無試料では、曝露期間に応じて質量が減少したが、コート有試料の質量減少は見られなかった。熱制御材料の主要特性である太陽光吸収率（太陽光照射を受ける際の入熱に関する指標）の変化を図7に示す。コート有試料はコート無試料と比較して劣化が小さく、ポリイミドシロキサンコートによる耐性向上の効果が実証された。

図8は865日間宇宙環境曝露後に回収されたコート有及びコート無試料の断面のTEM観察像である。コート無試料では原子状酸素による侵食形態として特徴的な凹凸構造が確認されたのに対し、コート有試料ではポリイミドシロキサン層表面に均質な膜が観察された。XPSによる分析結果から、同膜はシリコン酸化物（ SiO_2 ）であることが確認され、期待した耐原子状酸素性膜の形成が確認できた。一方、コート無試料表面にも不均質な付着物が見られた。この付着物もXPSによって SiO_2 が主成分であると同定された⁸⁾。これは宇宙ステーションの使用材料から発生したシリコン系のアウトガス（真空中の脱ガス）が表面に付着し、原子状酸素との反応で無機化したものと考えられる。図9はコート無試料表面のFE-SEM観察像であるが、ポリイミドの侵食形態が観察できる空隙を除き、全面に付着物が存在している。

JAXAの宇宙環境データベースSEES（Space Environment & Effects System）⁹⁾で見積もられた原子状酸素衝突量と、ポリイミドフィルムで報告されている一般的な原子状酸素反応効率（原子状酸素1個の衝突で消失する体積）とで計算される質量減少量に対し、宇宙曝露されたコート無試料の質量減少量は10分の1以下であった。SM/MPAC&SEED実験ではシリコン系のアウトガスが搭載試料に付着し、これが耐原子状酸素被膜として機能したものと考えられる。

4. 結言

本実験結果では、コート無ポリイミドフィルムについても原子状酸素による侵食が小さかったが、太陽光吸収率ではシロキサンポリイミドコートによる有効性が確認された。また、宇宙機用材料のアウトガスは原子状酸素保護の点では有利なもの、ミッション機器（特に光学計測での透過率低下）の性能に大きく影響するため制限が厳しくなっている。また、これらアウトガスの発生、付着、原子状酸素等との反応は宇宙機ミッション、環境に応じて様々であり、その耐原子状酸素性は期待すべきものではない。今後も安定した特性を示す耐原子状酸素性ポリイミドフィルムの研究に取り組んでいく。

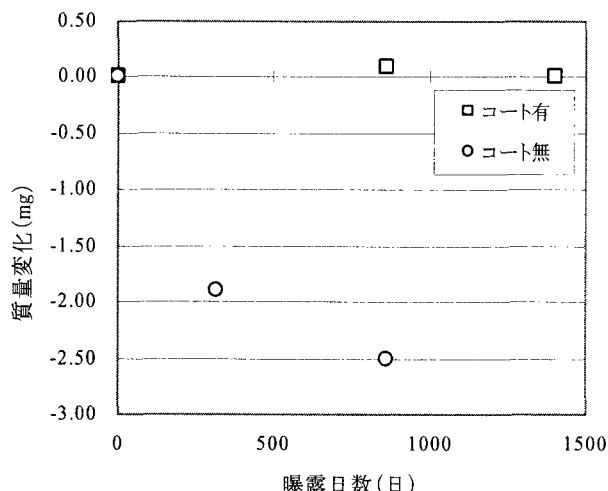


図6 シロキサンコートポリイミドフィルムの質量変化

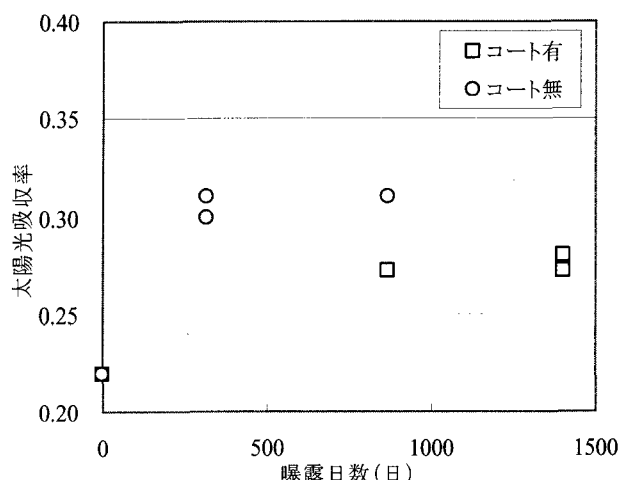


図7 シロキサンコートポリイミドフィルム・芳香族系高分子最近の進歩 2008 フィルムの太陽光吸収率変化

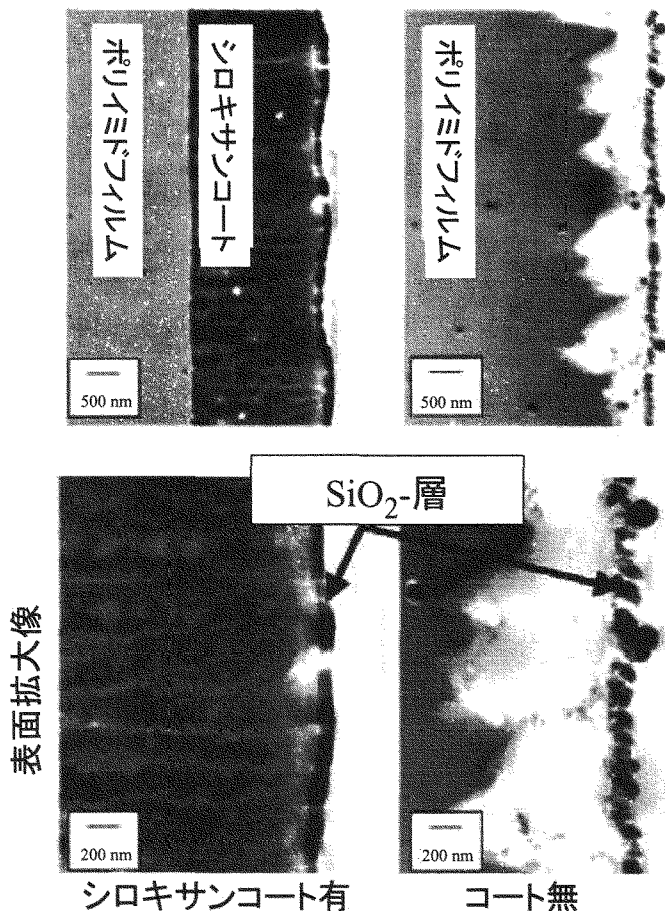


図8 シロキサンコートポリイミドフィルムの断面 TEM 観察像 (865 日間宇宙環境曝露)

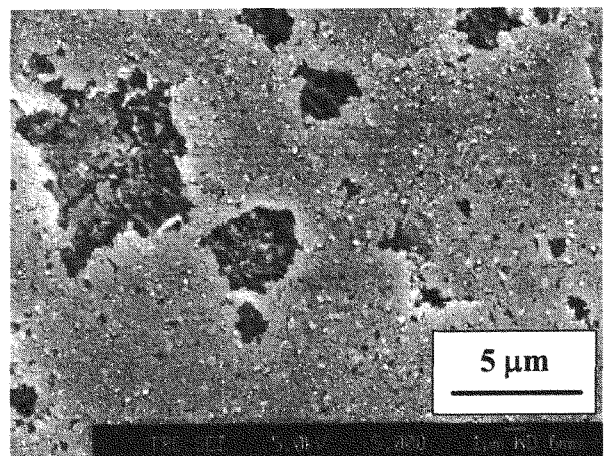


図9 コート無ポリイミドフィルムの表面 FT-IR 観察像 (865 日間宇宙環境曝露)

謝辞：宇部興産（株）航空宇宙材料開発室の方々に多大な協力を頂いた。記して感謝する。

参考文献：

- [1] Banks, Lenczewski, et al.: Durability Issues for the Protection of Materials from Atomic Oxygen Attack in Low Earth Orbit, 53rd IAC, 2002.
- [2] Imai, Iwata, et al.: Characterization of newly-developed polymeric materials for spacecraft by Combined Space Effects Test Facility, Proceedings of the 23rd ISTS, 46-651, 2002.
- [3] Imai, Ishizawa, et al.: Characterization of newly-developed polymeric materials for spacecraft by Combined Space Effects Test Facility (II) , Proceedings of the 24th ISTS, 2004. (CD-ROM)
- [4] Inoue, Imagawa, et al.: Evaluation and Analysis of the First-Retrieved Specimens of the Space Environment Exposure Device (SM/MPAC&SEED), Proceedings of the 24th ISTS, 2004. (CD-ROM)
- [5] Ishizawa, Yamagata, et al. : Evaluation and Analysis of the Second Retrieved Space Environment Exposure Device (SM/MPAC&SEED), Proceedings of the 25th ISTS, 2006. (CD-ROM)
- [6] Yamagata, Kimoto, et al.: Overview Of The Micro-Particles Capturer And Space Environment Exposure Device (MPAC&SEED) Experiment, Proceedings of the 10th ISTS, 2006. (CD-ROM)
- [7] Kimoto, Yano, et al. Passive Measurement of Atomic Oxygen, UV Fluence and Radiation Effect on the ISS using Seed Experiment, Proceedings of the 10th International Symposium on Materials in a Space Environment, 2006.(CD-ROM)
- [8] Ishizawa, Mori, et al.: Results of the Space-Environment Exposure Experiment "SM/MPAC&SEED" on the International Space Station (2) , Proceedings of the 10th International Symposium on Materials in a Space Environment, 2006.(CD-ROM)
- [9] <http://sees.tksc.jaxa.jp/>