

宇宙機用材料の耐環境性 Material Durability against Space Environment

石澤淳一郎¹Junichiro Ishizawa¹**Abstract:**

Materials for spacecraft are required high tolerance against space environment such as radiation, ultraviolet rays, atomic oxygen, etc., over a long duration. Polymeric materials are widely used for spacecraft's thermal control material because of its thermal-optical properties. However polymeric materials are easily eroded by atomic oxygen in the low-Earth-orbit. JAXA has developed an atomic oxygen protective coating and demonstrated its effectiveness by ground and space experiments.

1. はじめに

人工衛星、探査機、宇宙ステーション等の宇宙機は、過酷な宇宙環境に対し、それぞれに与えられたミッションを実現するまでの期間を耐え抜かなければならない。一部の例外的な宇宙機を除き、宇宙空間に打上げられた後の修理は不可能である。そのため、宇宙環境に直接曝される材料には、耐熱性をはじめとする耐環境性が長期間安定的に発揮されるものを使用する必要がある。金属材料や無機材料（ガラス、セラミックス）と比べ、高分子材料（高分子材料をマトリックスとする複合材料を含む）は耐環境性に劣ることが多い。しかしながら、宇宙機は熱制御の目的で高分子フィルムを積層した多層断熱材によって大部分を覆われている（機能要求から高分子材料が使用される）。そのため、宇宙用材料における耐宇宙環境性の課題は、主としてこれら高分子材料に対するものとなっている。

2. 宇宙環境の材料への影響

材料の研究開発の場として利用する場合の宇宙環境は、高真空、微小重力等であるが、材料を劣化させる因子としての宇宙環境は、放射線、紫外線、原子状酸素、温度サイクル等がある。これらは、宇宙機が飛行する軌道により異なってくる。例えば、地球観測衛星や有人宇宙機は低軌道（高度約 700 km 以下）宇宙機であるが、放射線環境は比較的緩く、一方で原子状酸素の厳しい環境である。一方、通信衛星等の静止衛星（高度約 36,000 km）は過酷な放射線環境であるが、原子状酸素がほとんど存在しない環境となる。また、太陽光による紫外線や加熱に寄与するエネルギー量は、太陽からの距離が近い探査機（太陽、水星、金星探査機等）において通常の地球周回軌道環境の数倍となる（水星探査機で約 10 倍）。よって、宇宙機の材料選定の基となる環境条件は、宇宙環境モデルを基に宇宙機毎に解析される。

材料に及ぼす影響も当然環境因子によって異なる。放射線（主に電子線、陽子線、重粒子線）の高分子材料への影響は架橋や分子鎖切断であり、主に機械的特性の劣化（伸びの低下等）である。紫外線は高分子材料を変色させる作用があるが、熱制御材料の太陽光吸収率（太陽光をエネルギーとして吸収する割合を示し、材料の透過及び反射スペクトルから求められる）の増加、光学材料の反射・透過特性の劣化において問題となる。原子状酸素は低軌道環境のガス成分の内、酸素分子が紫外線のエネルギーを受けて生じるものであり、その化学的活性に加え、宇宙機との相対衝突エネルギー（秒速約 8 km 相当）も作用する。原子状酸素は高分子材料をエロージョン（侵食）し、銀（Ag）を酸化させる等、材料に対しに著しい影響を及ぼす。

4. 材料の耐宇宙環境性向上への取組み

宇宙用の多層断熱材を構成する熱制御フィルムには、耐熱性、耐放射線性、耐紫外線性に優れるポリイミドが多用されている。一方、原子状酸素には他の高分子材料と同様に耐性が低いため、低軌道環境での使用には宇宙環境に曝露される側に、原子状酸素耐性の高いコーティングを付与する必要がある。これらには SiO₂ 等の無機酸化物や酸化耐性を有する金属材料が用いられる。Figure 1 は国際宇宙ステーション（ISS）の太陽電池パドルの端部を撮影（約 1 年間の宇宙環境曝露後）したものである。端部は両面をアルミニウム蒸着した単層のポリイミドフィルムでカバーされていたが、同フィルムが破断に至った。アルミニウムは原子状酸素に対し安定な材料であるが、製造時から存在するマイクロな欠陥

1 : (独) 宇宙航空研究開発機構 電子部品・デバイス・材料グループ、JAXA Electronic Devices and Materials Group

(ピンホール)を通じて侵入した原子状酸素によって、内層のポリイミドフィルムがエロージョンされたことが地上試験によって明らかにされている^[1]。保護被膜を有するポリイミドフィルムの耐原子状酸素性確保は、保護被膜の健全性が非常に重要である。一方の無機酸化系膜 (SiO_2 等)も、製造時や地上取扱いの管理(硬質のため損傷しないように扱う)に注意が必要であり、また透明で欠陥検出が難しい課題がある。

この課題に対し JAXA では、製造から地上取扱いを含め、欠陥が発生しにくい柔軟な耐原子状酸素性膜の研究を行っている。シリコンは高分子状態で柔軟であり、フィルム等への塗布も可能である。軌道上投入後は原子状酸素との反応で、表面に原子状酸素に対し安定な SiO_2 無機膜、いわば不動態被膜を形成する。これを ISS ロシアサービスモジュール利用材料曝露実験 (SM/SEED 実験)^[2] で宇宙環境曝露させた結果を紹介する。50 μm 厚のポリイミドフィルム (宇部興産製ユープレックス®-R) の表面に、3 μm のシリコン (ポリイミドシロキサンを用いた) をコートし、各試料 (コート有, なし) の中心 20mm 径を曝露 (2001 年 10 月 15 日から最長 1403 日間) させた。地上回収後に測定した質量変化 (曝露前-曝露後の差) と曝露日数のグラフを Figure 2 に示す。シリコンコートなし試料は原子状酸素によるエロージョンと考えられる質量減少が見られたが、コート有試料では質量減少が見られなかった。コート有試料は電子顕微鏡による観察及び XPS による分析で表面に均質な SiO_2 被膜の形成が確認され、実宇宙環境での耐原子状酸素性が実証された^[3]。

5. 材料の耐宇宙環境性への課題

4項で紹介したシリコン系の耐原子状酸素性コーティングは、高い耐原子状酸素性付与機能を発揮したが、紫外線反応によって変色し、太陽光吸収率が増加してしまう課題 (但し、コートなしよりも太陽光吸収率の増加が小さい結果が SM/SEED 実験で得られた^[3]) がある。材料の耐宇宙環境性の向上は、単一の環境のみならず、負荷される環境に対し総合的に優れることが求められる。また、みどり 2 (ADEOS-2) の帯電放電不具合を受け、JAXA では曝露面に使用される材料の導電化を進めており、ITO (インジウムすず酸化物) 膜や、ポリイミドフィルムそのものにカーボンブラックを添加した導電性ポリイミドフィルムの使用が増えている。前者は無機酸化系であるため、一段の地上取扱いの配慮を有する材料となり、後者は太陽光吸収率の点で劣る課題がある。なお、最近ではスペースデブリ (宇宙ゴミ) が大幅に増加しており、今後は材料の耐デブリ性 (自らが耐えるとともに、衝突した際もデブリを増加させないような配慮) が強く求められていくものと思われる。さらに、月・惑星探査機等では通常の地球周回衛星と異なる、新たな耐環境性が求められている。

以上のように、宇宙用材料は過酷な宇宙環境に対し、長期間に亘る耐性が求められる。また、宇宙環境は使用する箇所 (軌道) により特徴的に異なり、ミッション毎に求められる特性も当然変わってくる。紹介した耐原子状酸素性コーティングのように、耐性向上研究も各国で進められているが、実用に必要特性評価に長期間を要するのが実情であり、宇宙開発の範囲拡大に伴う新たな特性要求も増加している。JAXA ではこれらの課題に対し、地上試験や宇宙材料曝露実験を通じた基礎研究を進め、その評価手法の改善向上に取り組んでいる。

5. 参考文献

- [1] B. Banks, M. Lenczewski, et al.: "Durability Issues for the Protection of Materials from Atomic Oxygen Attack in Low Earth Orbit", 53rd IAC, 2002.
- [2] Y. Kimoto, J. Ishizawa, et al.: "SM/MPAC&SEED Experiment Overview", Proceedings of International Symposium on SM/MPAC&SEED Experiment, pp.5-9, 2009.
- [3] J. Ishizawa: "Material Aging of Siloxane Coated Polyimide Film and Silicone-Based White Paint on SM/SEED Exposure Experiments", Proceedings of International Symposium on SM/MPAC&SEED Experiment, pp.139-147, 2009.

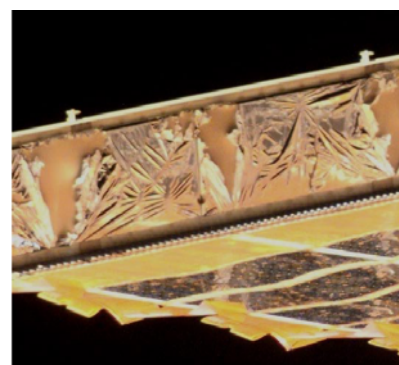


Figure 1 Eroded Kapton film on ISS photovoltaic array^[1]

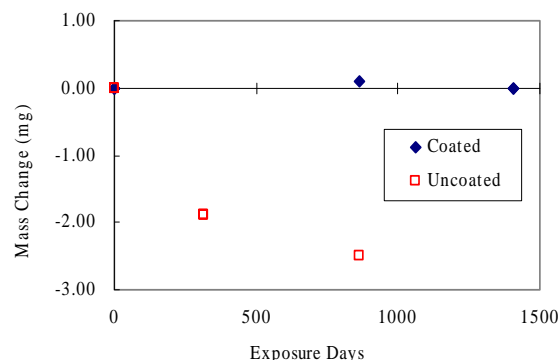


Figure 2 Solar absorptance changes of polyimide-siloxane coated UPILEX-R on SM/SEED experiment^[3]