

超低地球軌道衛星の長寿命化で要求される耐原子状酸素性ポリイミドフィルム

Atomic-Oxygen-Resistant Polyimide Films

Required for Long-Lived Very Low Earth Orbit Satellites

宇宙航空研究開発機構 後藤亜希

E-mail: goto.aki@jaxa.jp

要旨

近年、高度 300 km 以下の超低地球軌道 (VLEO) の衛星利用に期待が高まっているが、残留大気密度が高く、その主成分である原子状酸素 (AO) による有機材の機能低下や、大きな大気抗力に伴う推進システム要求の圧迫が技術的障壁となっている。本稿は、VLEO 衛星での適用が期待される Si 含有耐 AO 性ポリイミドフィルムの耐宇宙環境性を、国際宇宙ステーション (ISS) や超低高度衛星技術試験機 (SLATS) を用いた宇宙曝露実験で評価した結果を紹介する。

1. 緒言

超低地球軌道 (very low Earth orbit, VLEO) と呼ばれる地上高度 300 km 以下の宇宙空間は、地球観測の高解像度化、通信・ロケット輸送の低コスト化、宇宙環境リスクの低減 (放射線、デブリ由来) が期待され、その衛星利用に対する期待が高まってきている^{1,2}。実際に現在、VLEO 衛星に必要な技術開発が日本に加え、米国、欧州、アジア諸国の宇宙機関やスタートアップ企業により急速に進められており、2025 年以降の衛星打上



図 1 VLEO 衛星先端のノーズコーンの例。(SkimSat, Thales Alenia Space)

げ計画も発表されつつある (米国 Albedo、欧州 SkimSat 他)。しかし、VLEO は従来の高度の低地球軌道 (low Earth orbit, LEO) と比べて残留大気の密度が桁違いに高いため (例えば高度 300–150 km は、国際宇宙ステーション [ISS] 高度である ~400 km と比べ、10–1,000 倍の大気密度と推定される)³、大きな大気抗力 (ドラッグ) が避けられず、衛星軌道 (高度) を長時間維持することが技術的障壁となっている⁴。大気ドラッグを補償するための推進剤搭載量には限界があるため、現時点で欧州宇宙機関が開発した GOCE (高度 270 km で 4 年 7 か月運用) を超える運用期間の VLEO 衛星は一機もない。さらに、残留大気の主成分である原子状酸素 (atomic oxygen, AO) の密度も著しく高く、その高速衝突 (宇宙機周回速度である ~8 km s⁻¹) に伴う熱制御、構造、コーティング用途の有機材の深刻な浸食とそれに伴う機能低下は、衛星システムの故障要因となり得る。

「より低い高度を、より長時間」運用するためには、高効率な推進システムの確立に加え、大気ドラッグを最小化可能な衛星設計と材料設計が必要となる。特に材料設計については、大気衝突に

よる衛星表面へのエネルギー遷移を抑制できるよう、耐 AO 性が高く、表面の平滑性をナノスケールで維持できる材料を VLEO 衛星の最外層（衛星先端のノーズコーンなど）として適用することが望ましい（図 1）⁵。ノーズコーンの表面材や衛星構体の熱制御材の候補として、JAXA と東亜合成が開発した耐 AO 性シルセスキオキサン（SQ）コーティング⁶と、JAXA と日鉄ケミカル&マテリアルが開発した耐 AO 性シロキサン変性ポリイミドフィルム（BSF-30）が挙げられる（図 2）⁷。これらのような Si 含有の有機材は、AO との反応で耐酸化膜であるシリカ（SiO_x）を表面に形成するため、母材のさらなる浸食を抑制することができる。本研究では、実環境での耐久性を明らかにすることを目的とし、SQ コートポリイミドフィルムと BSF-30 を ISS⁸⁻¹⁰ および超低高度衛星技術試験機（Super Low Altitude Test Satellite、SLATS、「つばめ」）¹¹⁻¹³ に搭載して宇宙曝露を行い、曝露サンプルの分析^{8,9} および軌道上光学観察データの解析を行った¹²。

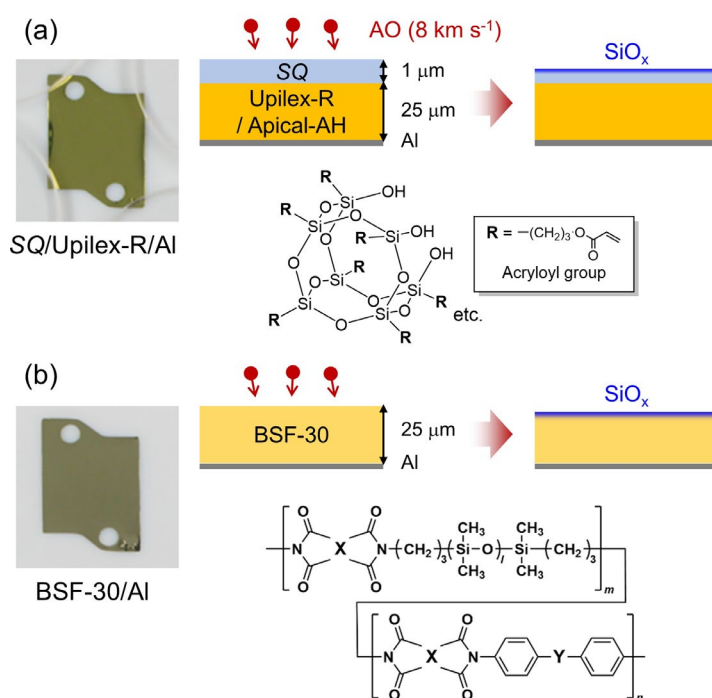


図 2 (a) SQ コートポリイミドフィルム⁶ および (b) BSF-30⁷ の外観写真（未曝露）、断面と AO との相互作用の模式図、化学構造。(a) の化学構造は、SQ コーティングのモノマーの例を示す⁶。(b) の化学構造中の X、Y、l、m、n は非公開⁷。

表 1 ISS/MDM2 実験の概要⁸⁻¹⁰

サンプル (曝露面積: 1 cm ²)	SQ コート Upilex-R/Al、 BSF-30/Al、UV 遮蔽コート付き BSF-30/Ag、他 13 種類	
	高度	~400 km
曝露	サンプル	ExHAM (簡易曝露実験装置)
	搭載位置	の ram (ISS 進行方向) 面
	曝露期間	2025/5/26–2016/6/13 (~1 年)
	AO フル エンス	1–2 × 10 ²¹ atoms cm ⁻² (Vespel の浸食により評価) ⁸
UV 放射 照度		98 ESD (equivalent solar days、 1 ESD = 1.02 × 10 ⁷ J m ⁻²) ⁸
評価		曝露後地上回収し、分析

2. 実験

SQ コートポリイミドフィルム（コーティング: 1 μm 厚、東亜合成、ポリイミドフィルム: 25 μm 厚）および BSF-30 (25 μm 厚、日鉄ケミカル&マテリアル) について、ISS (Material Degradation Monitor 2、MDM2 実験)⁸⁻¹⁰ および SLATS (MDM 実験)¹¹⁻¹³ 上で宇宙曝露を行った。未曝露サンプル

の外観写真と化学構造 (SQ コーティングについてはモノマーの化学構造) を、図 2 に示す^{6,7}。SQ コーティングは、シルセスキオキサン誘導体の混合物からなるモノマー (図 2a) を塗布し、UV で重合 (光硬化) させることで、ポリイミドフィルムを含むさまざまな基材に対して製膜できる⁶。BSF-30 は、ポリシロキサン含有のポリイミドモノマーとポリシロキサン非含有のポリイミドモノマーのブロック共重合体 (図 2b) からなるフィルム材となる⁷。なお、BSF-30

については、酸化インジウム錫 (ITO) と酸化セリウム (CeO₂) からなる UV 遮蔽コーティングを表面に施したサンプルも、ISS/MDM2、SLATS/MDM にて曝露した。以上のフィルムサンプルの背面 (曝露面の反対側) は、Al または Ag の金属蒸着層が施されていた。両曝露実験の概要を、表 1、2 にそれぞれまとめる。詳細は、以下の既報に示す通りとなる^{8,9,11-13}。

3. 結果と考察

3.1. SQ コートポリイミドフィルム⁸⁻¹⁰

ISS/MDM2 で曝露した SQ コートポリイミドフィルムの外観写真を、図 3a に示す⁸。曝露エリアは黄変しており、「熱光学特性」とよばれる衛星の表面温度を決定づける材料パラメータの一つである太陽光吸収率 (α_s) は、曝露によって 0.34 から 0.38 に増大していた。この黄変は、太陽光の UV によりシルセスキオキサンの有機部位中の C=O 結合などが切断され、ラジカルが生成し、その結果として結合の組換えが生じたことによるものと考えられる¹⁴。

ISS/MDM2 での LEO 環境 (特に AO) への

表 2 SLATS/MDM 実験の概要¹¹⁻¹³

サンプル (曝露面積: 1 cm ²)	SQ コート Apical-AH/Al、 BSF-30/Al、UV 遮蔽コート付き BSF-30/Ag、他 10 種類
高度	560–160 km (徐々に降下) ¹¹
サンプル 搭載位置	SLATS +Z 面 (サンプル曝露面は +X を向く)
曝露期間	2017/12/23–2019/10/1 (~1 年 9 か月)
AO フル エンス	1.1×10^{22} atoms cm ⁻² (NRLMSISE-00 中性大気モデル ³ により評価) ¹²
UV 放射 照度	3.4 ESD ¹²
評価	サンプル前面および背面に取 付けた LED 照明下で、CCD カメラ観測 (週 1 回以上)

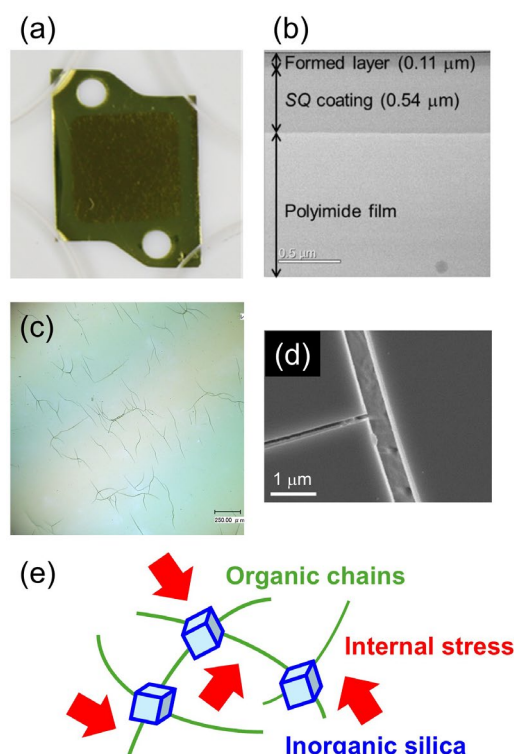


図 3 ISS/MDM2 曝露 SQ コート Upilex-R フィルムの (a) 外観写真⁸、(b) 曝露部の断面 STEM 像¹⁰、表面の (c) 光学顕微鏡¹⁰ および (d) FE-SEM 像⁸、(e) 内部応力の模式図。(a–d) は既報より転載^{8,10}。

曝露による質量損失は、 0.08 mg cm^{-2} (同時に曝露したポリイミドの一種である Vespel の $\sim 1\%$) であった。また、X 線光電子分光 (XPS) や走査透過電子顕微鏡-エネルギー分散型 X 線分光 (TEM-EDX) により、曝露の結果 *SQ* コーティングが $\sim 420 \text{ nm}$ 程度消費され、シリカ (SiO_x) が $\sim 110 \text{ nm}$ 程度形成されたこともわかった (図 3b)^{8, 9}。AO によりシルセスキオキサンの有機部位が浸食され、表面に耐酸化性のあるシリカ (SiO_x) が残存し、下層のポリイミドフィルムの浸食が抑制されたものと考えられる。

しかしながら、ISS/MDM2 で曝露した表面には、ポリイミドフィルム層まで達するクラックが多数形成されていた (図 3c、d)^{8, 10}。また、SLATS/MDM における LEO および VLEO 環境曝露においても、 $\sim 1 \times 10^{21} \text{ atoms cm}^{-2}$ 以上の AO フルエンスで、可視光の拡散反射の増大としてクラック発生が示唆された¹²。*SQ* コーティングは、シルセスキオキサンの有機部位の重合により、無機シリカが架橋点として導入された構造を有する (図 3e)。このシルセスキオキサンの連結構造のために、AO による有機部位の浸食とそれに伴うシリカの集積により、コーティングやフィルムに内部応力が発生し、クラックが生じたものと考えられる。顕微ラマン分光を用いた最近の評価では、AO 曝露した *SQ* コートポリイミドフィルムについて、(1) (クラック未発生時に) ポリイミド層内に圧縮応力の発生、(2) クラック発生に伴う圧縮応力の解放が観測されている⁹。先に示した通り、VLEO は従来の高度の LEO と比べて AO の密度が桁違いに高いため、一旦クラックが発生すると、クラック内でポリイミドの AO による浸食が進行し易く、フィルムの熱光学特性や機械特性に大きく影響を与え得る。さらに、フィルム上のクラックは、VLEO で大気成分の多段散乱によるドラッグ増大をもたらす可能性もある⁵。長寿命の VLEO 衛星の表面材としてシルセスキオキサンコートポリイミドフィルムを適用するためには、AO との相互作用に伴う内部応力やクラック発生が抑制されるよう、コーティングの分子構造を改良させる必要がある。

3.2. BSF-30^{8-10, 15}

ISS/MDM2 で曝露した BSF-30 と UV 遮蔽コート (ITO、 CeO_2) BSF-30 の外観写真を、図 4a、b に示す⁸。未コート BSF-30 の曝露エリアは黄変し、太陽光吸収率は 0.27 から 0.34 に増大していた。他方、UV 遮蔽コート BSF-30 は、曝露に伴う黄変や太陽光吸収率の変化はわずかであった ($0.23 \rightarrow 0.24$)。UV 遮蔽コーティングにより、UV への曝露に伴う BSF-30 ポリマー中の化学結合切断が抑制されたものと考えられる。また、曝露による BSF-30 の質量損失は 0.02 mg cm^{-2} とわずかであり (Vespel の $0.2\text{--}0.4\%$)、UV 遮蔽コート BSF-30 ではほぼゼロ (-0.01 mg cm^{-2} 、若干の質量増大) であった。*SQ* コートポリイミドフィルムと比べても、未コートの BSF-30 は AO に対する十分高い浸食耐性をもち、UV 遮蔽コーティングは UV 遮蔽能に加え、さらなる耐 AO 性を BSF-30 に対して付与できることがわかった。

ISS/MDM2 曝露後の BSF-30、UV 遮蔽コート BSF-30 の FE-SEM 像を図 4c、d に示す⁸。未コート BSF-30 の表面は、未曝露フィルムと同様にナノスケールで平滑で、*SQ* コートポリイミドフィルムで観測されたようなクラックの形成は見られなかった。UV 遮蔽コート BSF-30 についても、曝露に伴う顕著な表面モルフォロジーの変化は見られなかった。なお、UV 遮蔽コートフィルム表

面の方が未コートフィルムよりもラフであるのは、ITO/CeO₂ コーティング自体の構造に由来する。両フィルムについて、SLATS/MDM での LEO、VLEO 曝露においても (AO フルエンス: 1.1×10^{22} atoms cm⁻²)、光学特性の顕著な変化は見られなかった¹²。両フィルムは、高密度の AO が存在する VLEO 衛星に適用しても、十分な耐 AO 性を発揮するものと考えられる。特に未コートの BSF-30 については、ナノスケールでの平滑性が AO 曝露後も維持されていたため、大気成分の多段散乱が抑制され、低ドラッグ性も発揮する可能性が高い。米国コロラド大学の散乱実験装置を用いた最近の研究では、AO 曝露 BSF-30 (AO フルエンス: $\sim 1 \times 10^{21}$ atoms cm⁻²) 表面において、AO (~ 8 km s⁻¹) は鏡面的な散乱特性 (impulsive scattering, IS ともよばれる) を示すことがわかっている¹⁵。ガスの表面散乱は、鏡面的 (IS) または拡散的 (thermal desorption, TD) に大別できるが、鏡面的散乱を支配的にできれば、ガスの表面へのエネルギー付与 (ドラッグに相当) を最小化できる。したがって、AO 曝露後も鏡面散乱特性が支配的となる BSF-30 を、VLEO 衛星先端のノーズコーン (図 1) の表面材などとして適用すれば、衛星上のドラッグを抑制でき、衛星寿命の延長も期待できる。

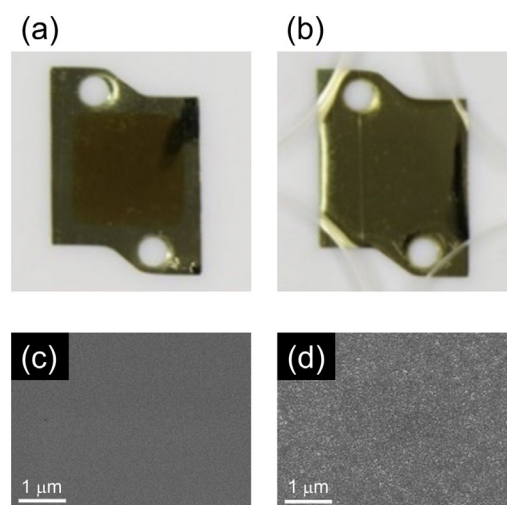


図 4 ISS/MDM2 曝露 (a, c) BSF-30 および (b, d) UV 遮蔽コート BSF-30 の (a, b) 外観写真および (c, d) FE-SEM 像 (既報より転載)⁸。

4. 結論

AO 密度の高い VLEO での適用を期待したポリイミドフィルムである SQ (シルセスキオキサン) コートポリイミドフィルム、BSF-30 (ポリシロキサン-ポリイミドブロック共重合体フィルム) について、実宇宙環境での耐久性を明らかにすることを目的とし、宇宙曝露実験 ISS/MDM2、SLATS/MDM にて LEO、VLEO 環境への曝露を行った。SQ コートポリイミドフィルムについては、シルセスキオキサンによりポリイミドフィルムの AO による浸食を抑制できたものの、コーティングの反応の結果生じる内部応力により、クラックが発生することを見出した。VLEO 衛星で適用可能なコーティングの創出に向け、現在シルセスキオキサンの分子設計の改良に取り組んでいる。他方、(未コートの) BSF-30 については、UV による変色は生じたものの、AO による浸食はわずかでクラック発生も見られなかった。最近の研究で、AO 曝露 BSF-30 上での AO の鏡面的な散乱挙動が観測されたため、低ドラッグ性と耐 AO 性を兼ね備えた VLEO 衛星表面材としての BSF-30 の適用が期待できる。BSF-30 または開発中の新型 BSF については、実機搭載に向けた研究開発を行う計画となっている。宇宙や地上装置での材料評価や新材料開発など「宇宙材料技術」を通し、未踏技術である「VLEO 衛星 5 年以上運用」の世界に先駆けた実現に貢献していく。

謝辞

本研究は、JAXA 研究開発部門木本雄吾博士、宮崎英治博士、土屋佑太氏、行松和輝氏、梅田花織氏と実施しました。宇宙曝露実験では、JAXA SLATS プロジェクト、ExHAM プロジェクトの皆様にお世話になりました。散乱実験は、University of Colorado Boulder の Prof. Timothy K. Minton と実施しました。サンプル準備や評価の一部は、(株) エイ・イー・エスの皆様に支援を受けました。東亜合成、日鉄ケミカル&マテリアルの皆様に、材料の提供や宇宙曝露結果に関する議論をいただきました。本研究の一部は、JSPS 科研費 (20KK0327) の支援を受けました。

参考文献

1. Crisp, N. H., et al. *Prog. Aerosp. Sci.* **2020**, *117*, 100619.
2. Roberts, P. C. E., et al. *Proceedings of 71st International Astronautical Congress*, 2020.
3. Picone, J. M., et al. *J. Geophys. Res.* **2002**, *107*, SIA 15-1–SIA 15-16.
4. Hild, F., et al. *Acta Astronaut.* **2022**, *201*, 340–352.
5. Minton, T. K., et al. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13*, 51673–51684.
6. Kimoto, Y., et al. *J Spacecr. Rockets* **2016**, *53*, 1028–1034.
7. Miyazaki, E., et al. *Acta Astronaut.* **2010**, *66*, 922–928.
8. Goto, A., et al. *CEAS Space J.* **2021**, *13*, 415–432.
9. Goto, A., et al. *Proceedings of 2nd International Symposium on Very Low Earth Orbit Missions and Technologies*, 2025.
10. Goto, A. et al. *Proceedings of 14th International Symposium on Materials in the Space Environment and 12th International Conference on Protection of Materials from Space Environment*, 2018.
11. Kawasaki, H., et al. *Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2018.
12. Goto, A., et al. *Acta Astronaut.* **2023**, *212*, 70–83.
13. Kimoto, Y., et al. *Acta Astronaut.* **2021**, *179*, 695–701.
14. Joyce, A. D. NASA/TM-103711, 1991.
15. Goto, A., et al. *COSPAR 45th Scientific Assembly*, 2024.