

MLI 用耐 AO 性材料に対する超高速衝突実験結果について

久保 優子*¹、木本 雄吾*¹、梅田 花織*²、長谷川 直*¹

*1 宇宙航空研究開発機構 *2 株式会社エイ・イー・エス

1. 背景

地上から高度約 200-700km の大気は主に原子状酸素（Atomic oxygen : AO）と呼ばれる物質が占める。原子状酸素とは酸素分子が紫外線により分解したものであり、有機材料を劣化させることが広く知られている。そのため、低軌道衛星開発時の課題の 1 つとなっている。なぜならば、通常宇宙機の周囲には多層断熱材（Multilayer Insulation : MLI）が設置され、その最外層に用いられている材料が有機材料の一つであるポリイミドだからである。ポリイミドは耐熱性や耐放射線性に優れるため古くから MLI の最外層として使用されているが、他の有機材料と同じく原子状酸素による劣化は免れない（図-1 参照）。そこで、我々は「自己組織化」や「自己修復性」というキーワードに着目し、従来のポリイミドに代わる、耐原子状酸素性を有する材料の研究開発を行っている。「自己組織化」とは、原子状酸素の照射を受けた材料が自ら表面に耐原子状酸素性の層を生成する機能を指し、「自己修復性」とは、自己組織化により生成した耐原子状酸素性の層が損傷した際、再度原子状酸素の照射を受けることで、層を自ら修復する特性を指す。

話題は変わるが、先行研究¹⁾によると、材料の耐原子状酸素性はデブリとの衝突により低下することが報告されている。そのため、我々が研究開発を行い、地上評価で自己修復性を確認している各材料についても、デブリとの衝突による特性変化の有無を評価する必要があると考えた。そこで、デブリが衝突した耐原子状酸素性材料の自己修復性能の定量的評価を行うべく、一連の実験を計画した。

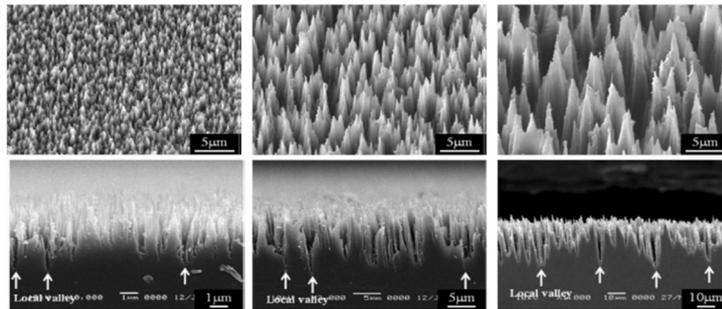


図-1 原子状酸素により劣化したポリイミドの表面（上段）及び断面（下段）構造²⁾
（図の左から右に進むにつれ、原子状酸素の照射量が増加）

2. 評価計画

全体の評価計画を図-2 に示す。我々の評価計画では、2 回の衝突試験の実施を計画している。1 回目の衝突試験（衝突試験 1）は、試験コンフィギュレーションの確立と、2 年目に実施する衝突試験 2 におけるサンプルの観察方法の検討を目的に実施する。本報告現在、1 回目の超高速衝突実験を完了し、サンプル観察を実施している状況である。そのため、本資料 4 項では現在までの観察結を報

告する。計画 2 年目には衝突試験 2 を実施予定である。衝突試験 2 では、サンプルに原子状酸素を照射し、サンプル表面に耐原子状酸素層を生成した状態（自己組織化した状態）で衝突実験を行う計画としている。衝突実験後に再度原子状酸素を照射し、自己修復させ、その修復量を定量的に評価する。

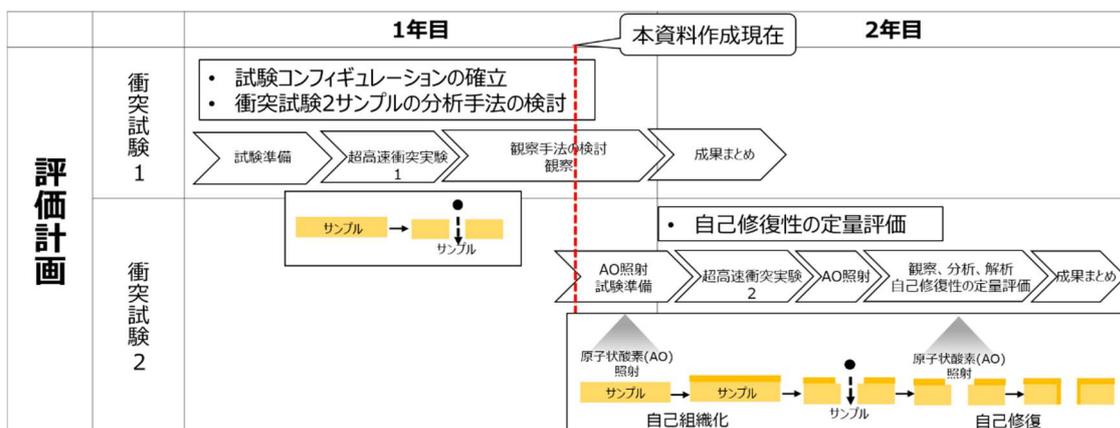


図-2 評価計画

3. 試験方法

試験サンプルは表-1 に示す 3 種のポリイミドフィルムとした。1 つ目のサンプルはシロキサン変性ポリイミド (BSF-30)³⁾ である。2 つ目のサンプルはシルセスキオキサン (SQ) コート付きポリイミド⁴⁾ (以後「SQ サンプル」と呼ぶ) であり、ポリイミド表面に SQ と呼ばれる表面コート剤を塗布したサンプルである。これら、2 サンプルは自己組織化及び自己修復性を有する。一方で、3 つ目のサンプルである ITO コート付きポリイミドフィルム (以降「ITO サンプル」と呼ぶ) は、自己組織化及び自己修復性を持たず、先に述べた 2 サンプルとの比較のために採用したものである。各サンプルはいずれも裏面に Al を蒸着した状態で衝突試験を行った。サンプルの設置方法を図-3 に示す。デブリに模したフライヤは図-3 の矢印の向きにサンプルと衝突し、この時最初にフライヤに衝突する面 (BSF-30 であればポリイミド面、SQ サンプル及び ITO サンプルであれば表面コート剤面) を衝突面、Al 面を出口面と呼ぶ。また、衝突実験の試験条件を表-2、試験方法を図-4 に示す。作成したサンプルはキーエンス社製の超深度マルチアングルレンズ VHX-D510 を用いて CCD 及び SEM 観察を行った。観察に当たっては観察角度を調整しながら進めた。また、衝突面側及び出口側の両面から観察を行った。

表-1 試験サンプル

No.	サンプル名	備考
1.	シロキサン変性ポリイミド (BSF-30)	自己組織化、自己修復性能あり
2.	シルセスキオキサン (SQ) コート付きポリイミド	自己組織化、自己修復性能あり
3.	透明導電膜 (ITO) コート付きポリイミド	自己組織化、自己修復性能なし

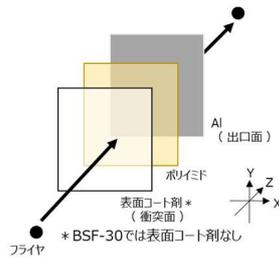


図-3 サンプル設置方法

表-2 試験条件

項目	条件
衝突速度	6km/s
フライヤサイズ	0.3mm
フライヤ材質	鋼球 (ステンレス)
衝突角度	0°, 30°, 60°
照射方法	散弾法

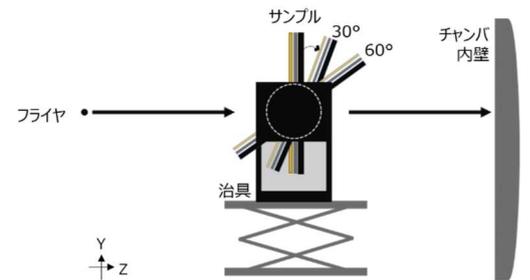


図-4 試験方法

4. 試験結果

衝突試験によって得られた各サンプルの衝突痕の形状及び周辺状態を比較した結果、サンプル毎に特徴があることが分かった。具体的には、BSF-30 は衝突痕の穴径が他サンプルと比較すると小さく、かつ衝突痕内部が凹状(窪んだような形状)になっていた点が挙げられる。それに対して、SQ サンプル及びITO サンプルでは衝突痕の形状及び周辺の様子が類似しており、両サンプル共、衝突痕周囲では Z 軸方向 (フライヤの飛行方向に平行な方向) にフィルムの突出が見られた。突出部分の内側は溶融したような様子が観察され、突出部の外側は破片状の物体が観察された。このように、BSF-30 とその他 2 サンプルの間で差異が見られた一方、すべてのサンプルに共通する特徴も確認された。具体的には、サンプル出口面側で溶融物の飛散が見られた点である。上述した内容を含めた 3 サンプルの衝突痕の特徴を表-3 にまとめる。また、表-2 に示すとおり、本試験は 3 種類の衝突角度を用いて実施した。その結果、衝突角度が大きくなると、衝突痕の形状が円形から涙型へ変化することを確認した。当該傾向についても全てのサンプルで共通していた。

表-3 各サンプルの衝突痕の特徴のまとめ

		衝突痕の 大きさ	衝突痕 内部の凹み	衝突痕 周辺の状態	Z方向への 突出	Z方向 突出部分 内部の状態	Z方向 突出部分 外部の状態
BSF-30	衝突面	小	あり	層状剥離	-	-	-
	出口面			溶融物飛散			
SQ	衝突面	中	-	-	あり	溶融	破片状
	出口面			溶融物飛散			
ITO	衝突面	大	-	-	あり	溶融	微細破片状
	出口面			溶融物飛散			

5. 今後の展望

本資料 2 項で示した評価計画に従い、衝突試験 1 で作製したサンプルの更なる分析及び衝突試験 2 を実施する。加えて、衝突試験 1 の実施の過程で新たな課題（フィルムの耐 AO 性の変化及び先行研究との破壊モードの差異）を識別したことから、課題解決のために追加の衝突実験を新たに計画し、本研究を計画的に進める。

6. 参考文献

1. R. Verker, E. Grossman, N. Eliaz, Erosion of POSS-polyimide films under hypervelocity impact and atomic oxygen: The role of mechanical properties at elevated temperatures, *Acta Materialia* 57 (2009) 1112–1119
2. 島村宏之, 中村孝, Investigation of Degradation Mechanisms in Mechanical Properties of Polyimide Films Exposed to a Low Earth Orbit, Vol. 95, pp. 21–33. 2010
3. Eiji Miyazaki, Masahito Tagawa, Kumiko Yokota, Rikio Yokota, Yugo Kimoto, Junichiro Ishizawa, "Investigation into tolerance of polysiloxane-block-polyimide film against atomic oxygen", *Acta Astronautica* 66 (2010) 922–928
4. Yugo Kimoto, et al. "Development of Space-Qualified Photocurable-Silsesquioxane-Coated Polyimide Films", *Journal of Spacecraft and Rockets* 53(6):1028-1034, November 2016. <https://doi.org/10.2514/1.A33488>