

表面導電性を持った放熱面用塗装の帯電特性評価

柴野靖子 (宇宙航空研究開発機構), 浅村和史 (宇宙航空研究開発機構)

1. 目的

人工飛翔体搭載機器において、放熱面の表面熱光学特性の維持は軌道上で搭載機器を許容温度範囲内に制御するために重要である。このため、これまでも多くの塗装膜、表面処理手法が宇宙用に応用され、使用されてきた。一方、磁気圏探査衛星などのプラズマ直接探査衛星では、衛星外表面の局所帯電/放電を抑制するために、宇宙空間に露出する表面には導電性を持たせ、衛星構体に電氣的に接続することが要求される。これは、観測対象である低エネルギープラズマ粒子の軌道が偏向されることで観測に支障をきたしたり、放電によって電場観測に人工ノイズが重畳することを避けるためである。しかし、これまで使用されてきた放熱面に使用できる塗装の多くは表面導電性を持たない。これまでも導電性白色塗装の評価が進められてきたが、アウトガスの観点から無機系の塗装となり、導電性が規定値に達しても、密着性が弱い、塗装表面から粉が落ちる、熱サイクル試験での剥がれなどの課題が挙げられてきた。また、採用する場合には粉が落ちるリスクが許容できる部分に限られる。水星磁気圏探査機「みお(MMO)」では高温耐性のある導電性白色塗装が開発され、搭載されたが、ジオスペース探査衛星「ARASE(ERG)」でも採用したものの需要が少なく販売終了となってしまった。また、導電性を持つ放熱面としてはITO付きOSR (Optical Solar Reflector) があるが、OSRはガラス薄板であり、曲面への貼り付けなど使用可能な形状が制限される。

そこで、我々は導電性が比較的高い白色塗装(APTEK2719)を導電性の低い基材(ブラックカプトンフィルム)の上に薄く塗布することで、必要な表面導電性を確保した放熱面を実現することを考えている。表面導電性が確保されていることを確認するために、~15keV程度の電子を塗装サンプルに照射し、帯電電圧及び流入電流を計測し、その帯電特性を評価する。

2. シリコン系導電性白色塗装について

使用する白色塗装はシリコン系白色塗装であり、スプレーでの加工が可能である。低アウトガスであることから宇宙用として販売される。国内ではまだ使用実績は無い塗装であるが、シリコンベースであるためフレキシブルなフィルムのような材料にも塗布できることは、無機系の塗装と比べて優位な点である。また、無機系の導電性白色塗装においては表面からの粉の脱落が懸念されるが、シリコン系の白色塗装においては表面からの粉の落下は発生しにくい。さらに、塗装はOSRなどに比べ、一度に大面積の塗布が可能であるため、放熱面製造現場における短期間開発や低コスト開発の実現につながる。

これまでシリコン系白色塗装に対して電子線照射試験、紫外線照射試験、原子状酸素照射試験を実施し、その宇宙環境耐性を評価してきた。これらの試験では塗装は30mm×30mmのアルミ板に塗布されて試験に供した。それぞれの試験は真空下で常温程度の環境で実施された。電子線照射試験においては、Van Allen帯を1年間通過する軌道を取った場合を想定して5MGyの照射線量で試験を実施した。その結果、亀裂や剥がれなどの可視観察による変化は見られなかった。また、紫外線照射と原子状酸素においては高度400km程度にて半年程度で予測される照射量での評価を行った。試験前後の熱光学特性を比較すると、垂直赤外線放射率(ϵ_N)と太陽光吸収率(α_s)にも顕著な劣化が見られないことが分かった。測定値は表1に示す。表中の*で示された値はU-4100で計測され、それ以外はTESA2000で計測した。加えて、原子状酸素によるエロージョンの効果による質量変化は-0.312mgとなった。これはMMOで使用された白色塗装の2倍程度の質量変化量であり、同メーカーが販売する無機系導電性白色塗装の質量変化よりは1/2倍程度低い結果であった。塗装は塗布時に厚さコントロールができるため、実施の塗布時には劣化量を想定した施工が必要になると考えられる。

表 1: APTEK2719 の耐環境性評価結果

Test	Total	Before		After	
		ϵ_N	α_s	ϵ_N	α_s
EB	5 MGy	0.876	0.253	0.902	0.272
UV	100 ESD	0.881	0.222*	0.887	0.225*
AO	4.3×10^{20} atoms/cm ²	0.950	0.225*	0.950	0.250*

3. 実験内容

3.1 試験サンプル

シリコン系白色塗装として APTEK 社の販売する 2719 を採用した。ブラックカプトンフィルム(100XC)表面に直接 APTEK2719 を塗布したピースを準備する。塗装は塗装販売メーカーが実施したサンプルを使用する。サンプル作成後、メーカーが計測した抵抗値は $1.5\text{G}\Omega/\square$ 程度であった。高度な導電性要求のミッションで要求される表面 - 基材間での抵抗値の条件は $1\text{G}\Omega/\square$ 程度以下とされている。ただし、表面に絶縁物と導電性物質が混在している場合などは、抵抗値が許容値以下であっても局所帯電が発生する場合がある。このため、サンプル塗装片に電子照射を行い、帯電電圧を計測し、抵抗値に分布の有無と電子が表面で留まることが無いかを確認する。サンプルの写真を図 1 に示す。

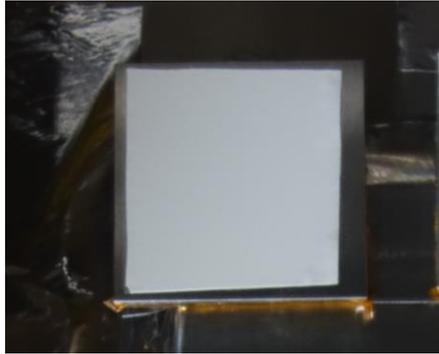


図 1 APTEK2719 を塗布したブラックカプトンフィルム

3.2 試験装置

宇宙科学研究所の中型スペースチェンバーにて試験を実施する。本チェンバーには 15keV 程度の大口径電子ビーム発生装置を装着することが可能である。チェンバー内には資料サンプル、電子フラックス計測用電極の他、非接触型表面電位計測センサーを取り付けた 2 軸直線移動機構を設置し、サンプルへの電子照射及び、流入電流、帯電電位計測を行う。試験環境は真空下かつ常温の環境とする。試験の始めに電子フラックス計測用電極にて電子線の分布を事前に確認し、サンプルに照射される電子フラックスの確認と均一に電子線が照射される環境になっていることも確認を行う。本試験では、照射電子フラックスは 0.05 , 0.5 , $1.0\text{nA}/\text{cm}^2$ 程度の 3 通りを選択した。 $1.0\text{nA}/\text{cm}^2$ は地球の放射線帯を想定した時の比較的高い場合の電子フラックスに相当する。サンプルには電子ビームを数秒照射し、その後表面電位計をサンプルの上まで移動させて電位を計測する。サンプル表面と表面電位計が極力近づくように電位計の高さ調整を行った。試験の概要図と Set up の写真を図 2 に示す。

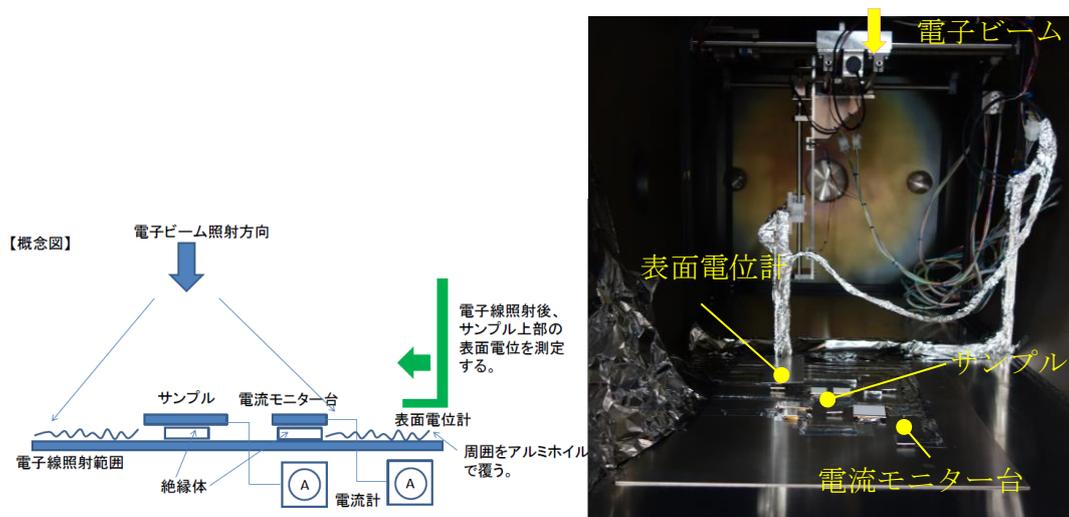


図 2 実験概要図(左)と試験 Set up(右)

4. 測定結果

3通りの照射電子フラックスで帯電計測を実施した結果を図3に示す。サンプルは 0.05nA/cm^2 においても帯電した。そして、照射電子フラックスの増加に対して線形的に帯電電圧値が低くなることが分かった。

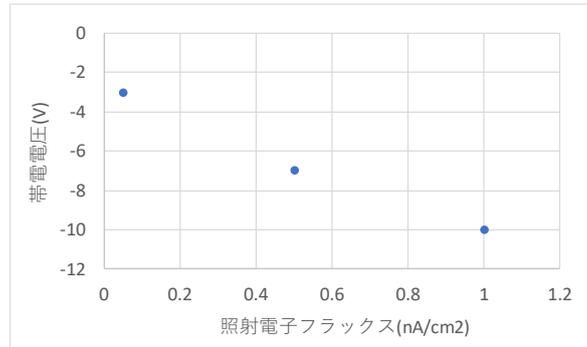


図3 照射電子フラックスに依存した帯電電圧の変化

また、それぞれの照射電子フラックスを照射したサンプルの緩和時間を比較すると図4の結果となった。緩和は指数関数的に進行し、帯電電圧が0に近づくにつれて緩和時間が長くなっており、一般的な緩和傾向を示した。ただし、緩和時間については照射電子フラックスに依存した傾向は見られなかった。

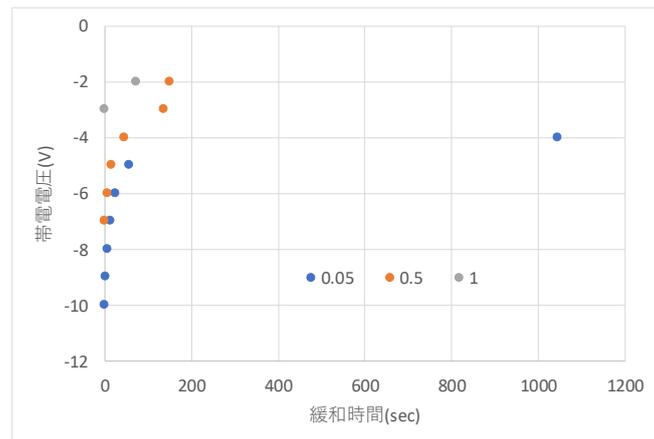


図4 照射電子フラックスに依存した緩和傾向

5. まとめ

厳しい帯電要求のあるミッションに適用するため、低抵抗値の特性を持つブラックカプトン 100XCの上に高抵抗値の白色塗装を塗布したサンプルを作成し、その帯電特性を計測した。その結果、帯電電圧は比較的小さいものの、帯電する結果となった。そのため、 $1.5\text{G}\Omega/\square$ 程度では1V以下の帯電要求を満たせないこと、表面に覆われた材料の影響が帯電特性に与える影響が大きいことが分かった。今回提案した方法では一般的な衛星の帯電要求は満たすが、高度な帯電要求の衛星への適用は検討が必要である。