

## 白色塗装の帯電評価手法の検討

金城富宏, 柴野靖子, 浅村和史 (国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構)

### Study of evaluation method for charge characteristics of white paint

Tomihiro KINJO, Yasuko SHIBANO, Kazushi ASAMURA (Japan Aerospace Exploration Agency)

#### 1. 目的

宇宙機は軌道上環境において、宇宙放射線に曝されるために、電気系統の不具合防止または理学ミッション要求の観点から様々な対策が必要となっている。特に、磁気圏探査衛星等のプラズマ直接探査衛星では、宇宙機外表面に帯電/放電が生じることで観測精度への影響が懸念されており、そのため宇宙機外表面において帯電と放電を抑制した設計が要求される。地球においては静止軌道付近も含む形でヴァン・アレン帯 (放射線帯) が位置し、多くの高エネルギー電子・イオンが存在することによって、ミッション軌道設計や宇宙機設計の制約となっている。宇宙放射線による宇宙機不具合を防止するためには、宇宙機構体と宇宙機外表面を電気的に接続させることで宇宙機外表面の帯電を防ぐことが有効であり、そのため宇宙機最外層には導電性が要求されている。一般的に宇宙機最外層は、目的に応じた熱制御材料で覆われており、そのため熱制御材料の帯電特性を正確に把握することは重要である。ジオスペース探査衛星「ARASE(ERG)」では、ヴァン・アレン帯にて粒子のその場観測を実現するために熱制御材料の帯電防止策が講じられている。一方で、熱制御材料の帯電特性について、地上にて軌道上環境を模擬した上で帯電特性を評価することは難しく、既存方法では必ずしも実環境を模擬できていないと考える。そこで本研究では、軌道上環境と同様に熱制御材表面に電子線が照射された状態で、帯電特性評価の実現性について実験的に評価する。

#### 2. 帯電評価手法の検討

##### 2.1 熱制御材料の選定

本研究では内部搭載機器の発熱を宇宙空間へ放熱する面(放熱面)に使用される白色塗料に着目した。放熱面材料には主に、白色塗料、銀蒸着テフロンフィルム、Optical Solar Reflector(以下 OSR)が使用される。銀蒸着テフロンおよび OSR には材料単体では要求される帯電要求を満たさないために、ITO(Indium Tin Oxide)を表面にコーティングする方法が用いられる。しかし、銀蒸着テフロンフィルム上の ITO コーティングは剥がれやすいと特徴があり、試験等のハンドリング時に無くなることが懸念されており、また OSR は銀蒸着テフロンに比べて ITO は剥がれにくい、蒸着時の治具の形状から表面積の1%程度はITOコーティングができず、絶縁体のガラスが曝露してしまうことが分かっている。そこで本研究では、ITOコーティングによって導電性を付与する材料でなく、材料自身に導電性材料が混合される白色塗料に着目する。白色塗料は、材料自身に導電性材料を混合することが可能であり、また塗装対象の形状を問わず塗布することが可能であるため、銀蒸着テフロンや OSR では困難な複雑形状にも実装可能である。本研究では、無機系白色塗料 APTEK2711 と有機系白色塗料 APTEK2719 を選定し、帯電特性評価を実施した。選定材料の基本的物性を表 1 に示す。

表 1 白色塗料の基本物性

	表面抵抗[Ω/sq]	太陽光吸収率 α [-]	赤外放射率 ε
APTEK2711	10 <sup>7</sup> ~ 10 <sup>9</sup>	0.20	0.93
APTEK2719	10 <sup>6</sup> ~ 10 <sup>9</sup>	0.26	0.93

## 2.2 電子線照射環境中での帯電評価手法の検討

既存の帯電評価手法の試験時の様子を図 1 に、試験方法のイメージを図 2 に示す<sup>1)</sup>。試験は真空チャンバにて、サンプルと真空チャンバは電氣的に結合した状態で実施される。電子銃により所定の電子ビームをサンプル表面に照射することでサンプル表面を帯電させており、このとき電子ビームがサンプル表面に照射されているかの判断には、サンプル表面とチャンバ間の電流を測定することで把握している。サンプル表面の帯電特性を評価するには、表面電位計によってサンプル表面の電位を計測する必要があるが、表面電位計は電子照射環境にて動作することが保証されていないために、一度電子銃による電子線照射を停止させる必要がある。その上で電位計をサンプル表面まで移動させ、表面電位を計測する。そしてサンプルとチャンバ間の電流が流れなくなった時刻を規定に、以下に示す近似式を用いて表面電位求めている<sup>2)</sup>。ここで  $V_{s0}$  は初期の表面電位、 $t$  は時間、 $\tau d$  は時定数である。

$$V_s = V_{s0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau d}\right)$$

一方で課題として、白色塗料の帯電緩和時間が短いため(ある程度の導電性を有しているために)、電子線照射を停止させ、電位計をサンプル表面まで移動させている数秒の間に帯電緩和が生じていると考えられる。そのため実環境のように連続して電子線照射される環境では、既存方法よりも高い表面電位を示すと考えられ、電子線を照射した状態での帯電評価手法を検討した。本研究で計測する評価対象と、既存の近似方法のイメージを図 3 に示す。電子線照射中のサンプル表面電位を計測することで、電子線照射停止後の帯電緩和の影響を無視でき、直接的に表面電位の測定が可能か評価を行う。

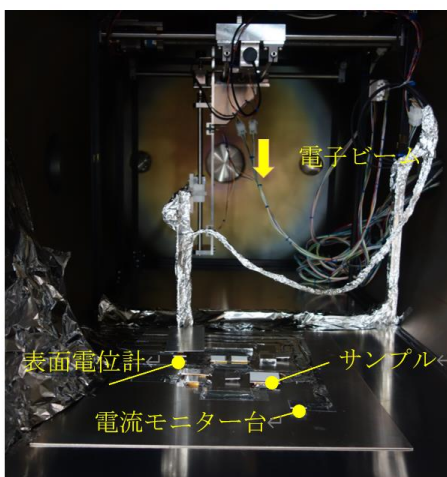


図 1 試験時の様子

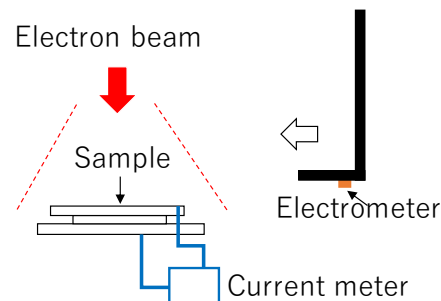


図 2 試験方法イメージ

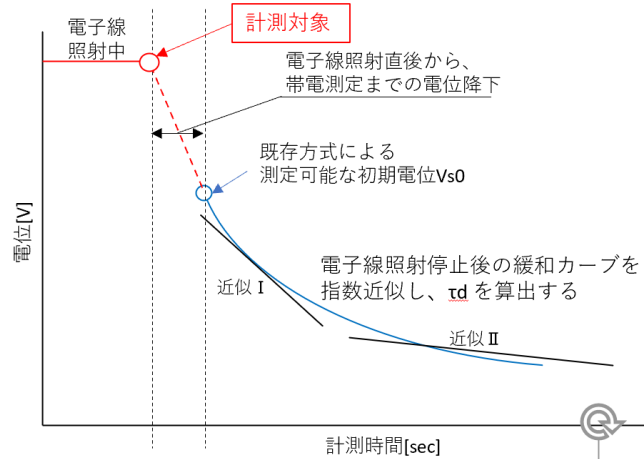


図3 本研究での計測対象と既存方式による近似方法のイメージ

### 3. 実験内容

試験は、真空チャンバーで実施し、チャンバーの上部に設置されている電子銃の照射面積内にサンプルを配置する。本研究では電子線照射中に電位計によって表面電位を計測するため、サンプルは、計測系によって電子線が遮蔽されないように配置する。一方、電位系で正しく計測を行うためには、電位計の上に、アルミ板を設置することで、電子線が直接照射されないようにする必要がある。そこで、図4に示すように電子線照射中にサンプルと計測系が干渉しないセットアップとする。さらにサンプルと表面電位計は互いに並行となるような位置関係で設置し、表面電位計とサンプル間の距離は4mm以下となるようにした。この距離は使用する電位計が可能な計測範囲に収まるように設定した。図4にサンプルと表面電位計の位置関係を示し、図5に試験時のサンプル配置の様子を示す。

試験には30mm×30mm角のアルミプレート上に、APTEK2711とAPTEK2719を塗布したサンプルを各2つずつ、計4個用意した。またチャンバー内には、電子銃による照射状態を確認するための電子フラックス計測用電極、サンプル表面電位を計測する非接触型表面電位計測センサー(Trek347)を設置した。表面電位計は3軸直線移動機構に取り付けられており、チャンバ内を3軸方向に移動が可能である。フラックス計測用電極は20mm×20mmのサイズのALプレートとし、試験サンプルの周囲に設置している。チャンバ内圧を $10^{-4}$  Pa程度の真空環境で計測を実施した。本試験では、地球周回軌道における放射線体を想定した場合に比較的高い条件を対象とし、照射電子フラックスを約 $2.4\text{nA/cm}^2$ とし、電子線エネルギーを15keVとした。なお、生成した電子ビームは厚さ $1\mu\text{m}$ のアルミ薄膜を通すことで角度散乱させている。この結果、ビームは拡散し、広範囲の照射を可能にしている。一方、アルミ薄膜通過時の電子のエネルギーロス为数keV程度あるため、供試体に照射される電子のエネルギーは15keVより低くなっている。

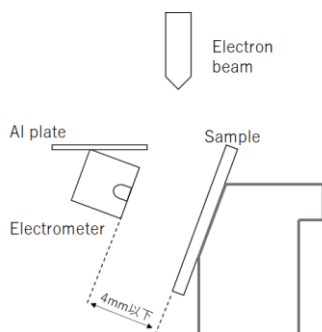


図4 サンプルと表面電位計の位置関係

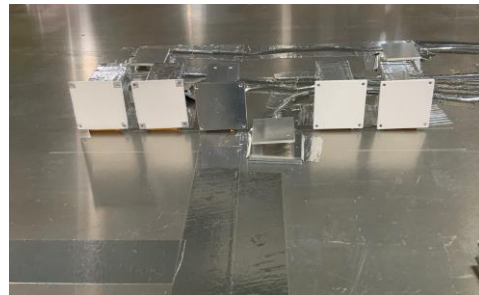


図5 試験サンプルの配置の様子

#### 4. 測定結果

電子線照射環境中にて表面電位計で測定した結果を図6に示す。結果より電子銃により電子線照射を継続した状態で、表面電位が計測出来ていることが分かる。またいずれのサンプルでも表面電位は0V以上となっており、帯電する結果となった。さらに無機系白色塗料であるAPTEK2711は、有機系白色塗料APTEK2719に比べて表面抵抗率が高いため、表面電位は高い傾向を示すと予想していたが、サンプルによってはAPTEK2711の方が低い表面電位を示した。

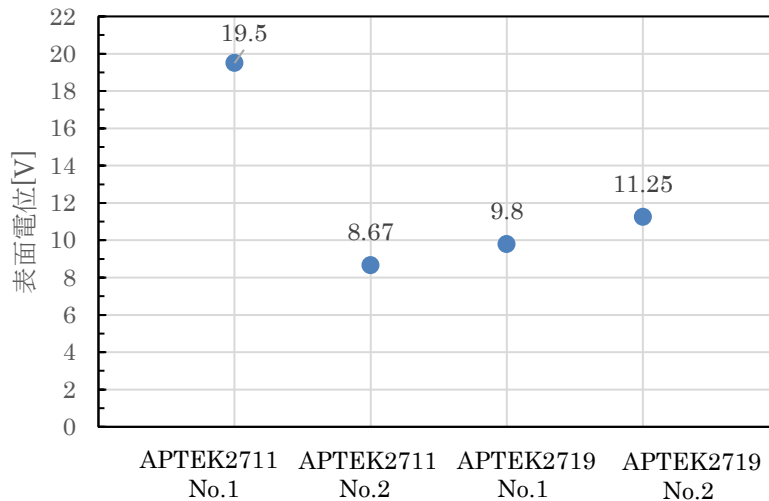


図6 試験結果

#### 5. まとめ

本研究では、軌道上環境と同様に熱制御材表面に電子線が照射された状態で、帯電特性評価の実現性について実験的な評価を実施した。サンプルと計測系の設置方法を改良することで、電子線照射環境において、表面電位が直接計測できることが確認できた。一方で、計測精度についての検証が必要であり、既存方法による計測方法との比較に加えて、サンプルと表面電位計の距離に応じた評価や周囲の二次電子による影響について今後検討していく必要があると考えている。

#### Reference

- 1) 柴野 靖子, 浅村 和史, ATO コーティング粒子を用いた導電性白色塗料の帯電性評価, 2020年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム講演
- 2) 藤井 治久, 石原 侑樹, 衛星表面材料の電子ビーム照射による帯電と2次電子放出, 第7回「宇宙環境シンポジウム」演論文集 宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-10-013