

GPM/DPR プロジェクトで使用される 熱制御材料の表面抵抗率・体積抵抗率の測定

高橋 昌宏(埼玉大学), 山納 康(埼玉大学), 仁田 工美(JAXA), 小林 信一(埼玉大学)

Measurement of Surface and Volume Resistivity of
thermal control materials used for the GPM/DPR project
Masahiro Takahashi (Saitama University), Yasushi Yamano (Saitama University),
Kumi Nitta (JAXA), Shinichi Kobayashi (Saitama University)

This paper describes surface and volume resistivity of materials used for thermal control of a GPM/DPR project's satellite. Materials used were three kind of white inorganic paint materials, which were called "AZ-93, AZ-2100 and AZ-2000" respectively. These inorganic paint materials are planned to be used for the antenna portion of DPR. The surface resistivity and volume resistivity were measured in atmospheric and vacuum condition. The measurement results showed that the surface resistivity in vacuum condition becomes higher than that in atmospheric condition. As the cause, the influence of moisture vapor adsorbed on the surface of thermal control materials can be considered.

キーワード: 真空, 表面抵抗率, 体積抵抗率

Keywords: Vacuum, Surface resistivity, Volume resistivity

1. はじめに

現在、地球温暖化による気候の変化と考えられる水不足、洪水等が多発しており、今後もこのような異常気象が増えることが予想されている。これらの問題に対応するために、淡水資源の源である降雨を正確に把握し、異常気象への予測や対策の技術を向上させることが必要と becoming.

このため全球降水観測計画(GPM:Global Precipitation Measurement)が進められている⁽¹⁾。GPM計画は二周波降水レーダー(DPR: Dual-frequency Precipitation Radar)とマイクロ波放射計を搭載した主衛星と副衛星群で構成されており、観測範囲を高緯度まで広げ、より高精度、高頻度の観測を目指している。このプロジェクトの主衛星に搭載されるDPRは高感度な降水観測と降水システムのパラメータの推定ができ、これらの情報を用いて推定降水量の精度を向上させることが可能になる。

DPR のアンテナ部分に使われる熱制御材料を選定するには、機械的特性、熱光学特性、そして電気的特性などの特性評価が必要不可欠となるが、電気的特性に関しては国内では未評価であるため、データの蓄積が必要とされている。

ここではアンテナ部の熱制御材料について表面抵抗率・体積抵抗率を測定したので報告を行う。特に表面抵抗率は周囲環境によって大きく変化することが予想されるので、大気中の測定に加えて、真空中において測定を行った。それらの測定結果に加え、真空中で代表的なアルミナセラミックスの表面抵抗率・体積抵抗率の測定結果についても併せて述べる。

2. 測定試料

測定に使用した熱制御材料は AZ-93、AZ-2000、AZ-2100 の3種類である。測定した熱制御材料の特性を表1に示す。AZ-93 は非導電性の無機系白色塗料で、AZ-2100、AZ-2000 は導電性の無機系白色塗料であり、いずれも水溶性の塗料である。ここで膜厚は公称値である。図1に、熱制御材料と光学顕微鏡による塗料表面拡大画像を示す。熱制御材料はアルミ板上の25mm四方に塗布しており、塗料表面を光学顕微鏡で拡大すると、図1のような凹凸を確認できた。

これらの試料を真空容器に導入すると容器内圧力が大きく上昇し、脱ガスの多い試料であることがわかった。脱ガスが多い理由として、塗料が水溶性であるため塗料内部に水分を多く含んでいる影響が考えられる。

表1 熱制御材料の特徴

名称	導電性	特性	膜厚[μm]
AZ-93	非導電性	無機系白色塗料・ 水溶性	133
AZ-2100	導電性		145
AZ-2000			

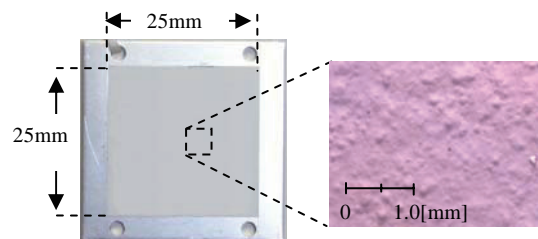


図1 熱制御材料の写真

3. 実験方法・装置

実験は、真空中で表面抵抗率・体積抵抗率測定を行うことができるin-situ実験装置を用いて行った⁽²⁾。図2にin-situ実験装置の概略図を示す。この装置で実際に大気に開放するのは試料導入容器のみであり、他の容器は常に $10^{-7} \sim 10^{-8}$ Paの超高真空中に保たれて、大気の影響による汚染物質の吸着などを防ぐことができる。真空中での抵抗率の測定は同図に示す電圧印加試験容器で行った。

本実験では図1で示した熱制御材料に対して、抵抗率測定用に銀ペーストを用いて電極を作製した⁽³⁾。電極作製後の試料の概略図を図3に、各電極の寸法を表2に示す。

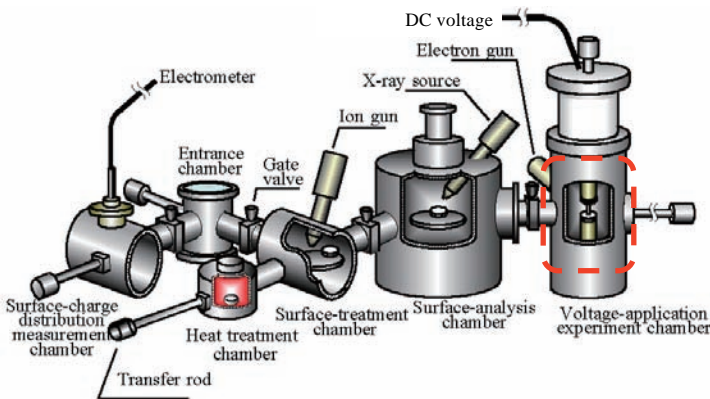


図2 in-situ 実験装置

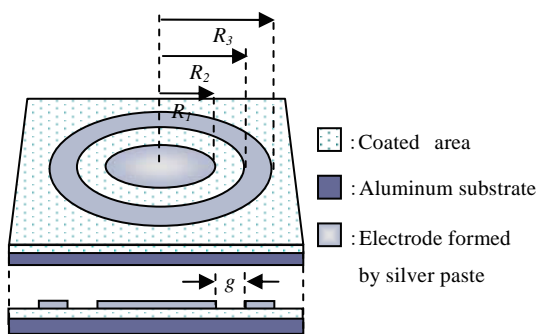


図3 電極作製後の熱制御材料の概略図

表2 電極作成後の試料の寸法(単位: [mm])

R_1	R_2	R_3	電極間距離 g
6.0	8.0	11.0	2.0

また、絶縁破壊試験容器内に作成した表面抵抗・体積抵抗の測定回路を図4、図5に示す。これらの回路により、試料表面に流れる電流 I_s および試料内部を流れる電流 I_b を測定することができ、表面抵抗率・体積抵抗率を算出することができる。

表面抵抗率 σ [Ω]の算出は、印加電圧 V [V]、塗料表面に流れた電流値 I_s [A]を用いて、(1)式に従って算出する⁽³⁾。

$$\text{表面抵抗率 } \sigma = \frac{P V}{g I_s} [\Omega] \cdots (1)$$

ここで g は電極間隔、 P は有効円周長であり、(2)式および(3)式で表される。

$$\text{電極間隔 } g = R_2 - R_1 = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m} \cdots (2)$$

$$\text{有効円周長 } P = 2\pi \times \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) = 2.2 \times 10^{-2} \text{ m} \cdots (3)$$

また体積抵抗率 ρ [$\Omega \text{ m}$]の算出は、測定した電圧 V [V]、塗料内部を流れた電流値 I_b [A]を用いて、(4)式に従って算出する⁽³⁾。

$$\text{体積抵抗率 } \rho = \frac{A V}{t I_b} [\Omega \text{ m}] \cdots (4)$$

ここで t は塗料の膜厚、 A は有効面積である。各塗料の膜厚を表1に示す。また有効面積 A は(6)式で表される。

$$\text{有効面積 } A = \pi \times \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right)^2 = 1.54 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdots (6)$$

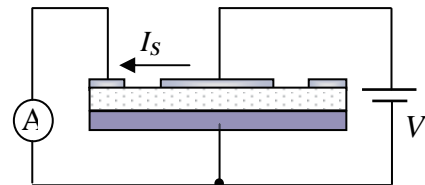


図4 表面抵抗測定用回路

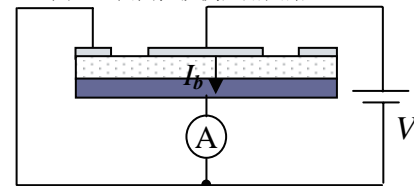


図5 体積抵抗測定用回路

実験手順としては、大気中で抵抗率を測定し、続いて同一試料を用いて真空中で表面抵抗率を測定した。

4. 結果および考察

AZ-2100 について、大気中と真空中での印加電圧と表面抵抗率の関係を図6に示す。また大気中と真空中での印加電圧と体積抵抗率の関係を図7に示す。

真空中の表面抵抗率は $2.5 \times 10^{11} \Omega$ (100V値)で大気中での測定結果に比べて、3桁以上高くなった。これは真空中で、試料表面に吸着していた水蒸気などの吸着物質が脱離したためであると考えられる。一方、大気中と真空中で体積抵抗率の測定結果を比較すると、真空中で塗料内部に含まれる水分が脱離するためか、真空中の体積抵抗率が大気中の測定結果より、やや高くなったが、表面抵抗率ほどは大気中と真空中で大きな変化は現れなかった。その理由として表面抵抗率が試料表面の吸着ガスや汚染物の影響を受けるのに対して、体積抵抗率は試料内部を流れる電流により算出されるため、試料周囲の環境の影響は少ないからであると考えられる。

各塗料(AZ-93、AZ-2000、AZ-2100)の表面抵抗率の測定結果を表3に示す。また同様に、各塗料の体積抵抗率の測定結果を表4に示す。

表3から、いずれの各塗料においても真空中での表面抵抗率が大気中と比べて大きく増加することが確認できた。既に述べたように、水溶性である塗料の表面および内部に多量に含まれていた水分が真空中で脱離したため、表面抵抗率が大きく増加したと考えられる。さらにAZ-93、AZ-2000、AZ-2100の表面抵抗率を比較すると、数値に大きな差が見られず、非導電性塗料(AZ-93)と導電性塗料(AZ-2000、AZ-2100)の違いが表面抵抗率には現れないことが確認できた。

一方、表4より、各塗料について大気中と真空中で体積抵抗率はほとんど変化しないこと、さらに表面抵抗率の測定結果と同様に、非導電性塗料(AZ-93)と導電性塗料(AZ-2000、AZ-2100)の違いが体積抵抗率にも現れなかったことが確認できた。

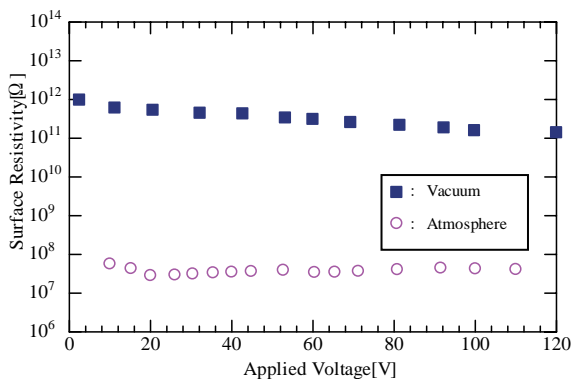


図6 印加電圧と表面抵抗率の関係

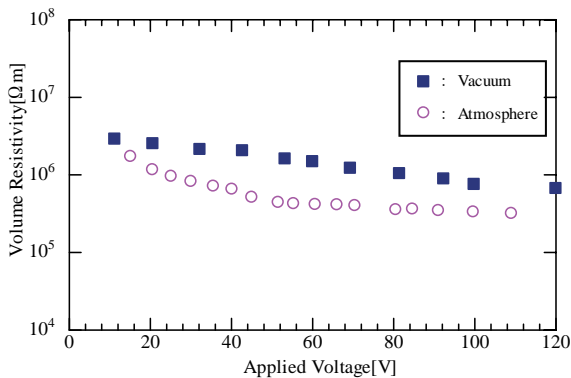


図7 印加電圧と体積抵抗率の関係

表3 各塗料の表面抵抗率(単位: [Ω]) (100V 値)

	導電性	大気中	真空中
AZ-93	非導電性	7.9×10^7	2.1×10^{11}
AZ-2000	導電性	5.2×10^7	3.7×10^{11}
AZ-2100		4.0×10^7	2.5×10^{11}

表4 各塗料の体積抵抗率(単位: [Ωm]) (100V 値)

	導電性	大気中	真空中
AZ-93	非導電性	4.3×10^5	7.3×10^5
AZ-2000	導電性	1.0×10^6	1.1×10^6
AZ-2100		3.3×10^5	1.3×10^6

< 補足実験 >

大気中および真空中で抵抗率を測定した塗料とは別のサンプルの AZ-93、AZ-2000、AZ-2100 を用意し、これらに紫外線を照射した後に、真空中で抵抗率を測定した。紫

外線照射した領域を図8に示す。塗料の中心部分 6mm四方に最大エネルギー10.8eV(115nm)の紫外線を照射し、その照射した領域に銀ペーストで電極を作製した。表面抵抗率を測定する際に塗料表面の電極間を流れる電流を測定するが、今回、この電極間の塗料表面には紫外線を照射していないので、表面抵抗率の測定には紫外線を照射したことによる影響が現れないと考えられる。その一方で、試料内部を流れる電流には影響が出る可能性があり、そのため体積抵抗率の測定には紫外線を照射したことによる影響が現れる可能性がある。真空中における紫外線照射前後の各塗料(AZ-93、AZ-2000、AZ-2100)の表面抵抗率の測定結果を表5に示す。また同様に、紫外線照射前後の各塗料の体積抵抗率の測定結果を表6に示す。

紫外線照射前後で、表面抵抗率の測定結果に大きな違いが見られなかった。表面抵抗測定に大きく影響する塗料表面の電極間には紫外線を照射していないので、この結果は妥当だと言える。一方、体積抵抗率のほうは照射前後で試料によって差が現れた。これは塗料に紫外線を照射したことによる影響も考えられるが、それ以外にも紫外線を照射した塗料と照射していない塗料で塗料内部に含まれる水分の脱離量の違いも測定結果に影響していると思われる。

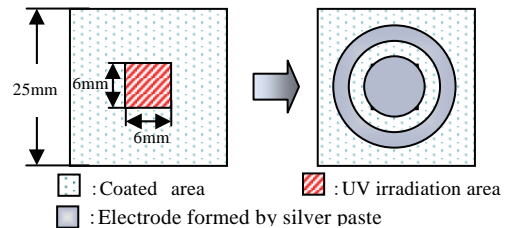


図8 紫外線照射した領域

表5 各塗料の表面抵抗率(単位: [Ω]) (100V 値)

	真空中(紫外線照射前)	真空中(紫外線照射前)
AZ-93	2.1×10^{11}	2.0×10^{11}
AZ-2000	3.7×10^{11}	3.7×10^{11}
AZ-2100	2.5×10^{11}	2.4×10^{11}

表6 各塗料の体積抵抗率(単位: [Ωm]) (100V 値)

	真空中(紫外線照射前)	真空中(紫外線照射前)
AZ-93	7.3×10^5	1.2×10^6
AZ-2000	1.1×10^6	6.7×10^6
AZ-2100	1.3×10^6	7.5×10^5

また熱制御材料の抵抗率測定の参考データとして、真空中で代表的な絶縁材料であるアルミナセラミックス(純度95%)の抵抗率測定結果を図8、図9に示す。

図8より、アルミナの表面抵抗率が大気中では $1.6 \times 10^{14} \Omega$ 、真空中では $6.7 \times 10^{16} \Omega$ となり、熱制御材料の結果と同様に真空中での表面抵抗率が大気中での測定結果に比べて大きくなった。

また図9より、体積抵抗率は表面抵抗率とは違い、大気中と真空中で変化は見られず、 $8.1 \times 10^{13} \Omega m$ となった。今回測定に使用したアルミナの体積抵抗率は、カタログ値で $> 10^{13} \Omega m$ となっており、測定結果が条件を満たして

いることから正しく測定ができていると考えられる。

今回の実験で、真空中での表面抵抗率が大気中に比べて大きく増加する傾向がみられた。そこで、絶縁破壊試験容器の容器内圧力を大気圧から中真空まで排気して、容器内圧力を下げていきながらアルミナの表面抵抗率を測定した。その結果を図10に示す。

大気圧から $1.0 \times 10^4 \text{Pa}$ に容器内圧力を低下させていくと、容器内圧力の低下とともに表面抵抗率が増加した。一方、容器内圧力を $1.0 \times 10^4 \text{Pa}$ からさらに下げていくと、表面抵抗率は増加することなく、ほぼ一定の値を示した。その後、排気した状態から大気圧になるまでHeガスを注入していくと、同図に示すように表面抵抗率は減少せず、真空環境の表面抵抗率と同様の値を示しました。このことから、大気中の表面抵抗率の値には周囲環境の水蒸気とその吸着量が大きく関わっている可能性があることがわかる。

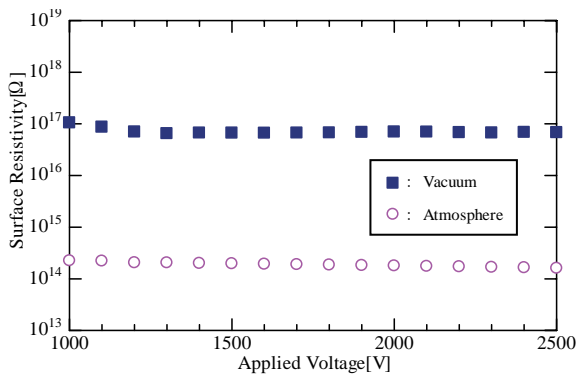


図8 印加電圧と表面抵抗率の関係

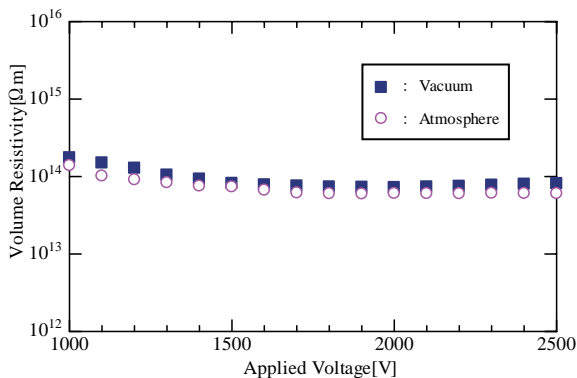


図9 印加電圧と体積抵抗率の関係

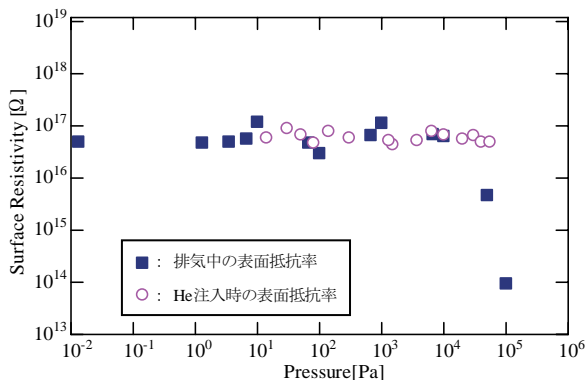


図10 容器内圧力と表面抵抗率の関係

5. まとめ

測定した全ての熱制御材料において、大気中よりも真空中で表面抵抗率が高くなることが確認できた。アルミナの容器内圧力と表面抵抗率の関係から、表面抵抗率は周りの雰囲気により大きく変化し、その中でも水蒸気の影響が最も大きいと考えられる。

一方、体積抵抗率は真空中の測定結果の方が大気中の測定結果より、やや高くなったが、表面抵抗率ほど大気中と真空中で大きな変化は現れなかった。

また非導電性塗料(AZ-93)と導電性塗料(AZ-2000、AZ-2100)には表面抵抗率・体積抵抗率に明確な違いが現れなかった。

文 献

- (1) 全球降水計画パンフレット, JAXA
- (2) Tumiran, Suharyanto, Y.Yamano, S.Kobayashi, and Y.saito: "Effect of In-situ Annealing Ceramics in Vacuum", Proc. XIV Int. Sym. High Voltage Engineering, p. C-14 (2005)
- (3) 日本規格協会編:「JIS ハンドブックセラミックス」, Vol.35, pp.140-207 (2002)