

宇宙機用誘電体材料の極低温下における帯電特性に関する研究

渋谷優樹, 渡邊力夫, 宮坂明宏 (東京都市大学)

Charging Characteristics of Spacecraft Dielectric Material at Cryogenic Temperature

Yuki Shibuya, Rikio Watanabe, Akihiro Miyasaka (The Tokyo City University)

1 はじめに

宇宙機はプラズマや放射線環境に曝されながら飛行する。これらの宇宙環境下において宇宙機は帯電し、局所的に大きな電位差が発生し静電放電に至る可能性がある。静電放電は、宇宙機的全損や観測機器へのノイズ混入の原因になる可能性がある。宇宙機の寿命を左右しかねない要因であるため、宇宙機設計において帯電放電を考慮することは必須となった。

日本では、衛星帯電解析ソフトウェア MUSCAT(Multi Utility Spacecraft Charging Analysis Tool) [1]が開発され、宇宙機的设计段階におけるリスク評価などに用いられている。MUSCATで帯電解析を行うためには、材料のパラメータが必要になる。パラメータとは、体積抵抗率、二次電子放出係数、光電子放出係数、誘電率などである。本研究室では、これらのパラメータのうち、体積抵抗率に着目して研究を行っている。体積抵抗率は、単位体積当たりの電流の流れにくさを表すパラメータである。体積抵抗率が大きいと、材料が帯電してから緩和するまでの時間が長くなる。また、体積抵抗率は温度の影響を受けることが過去の研究で確かめられている。宇宙機に用いられる絶縁材料は、低温になるほど体積抵抗率は大きくなり、高温になるほど体積抵抗率は小さくなる。Fig. 1に体積抵抗率の温度依存性を確認することができた実験結果を示す [2]。様々な条件下における体積抵抗率のデータベースができれば、宇宙機の帯電解析に役立てることができると考えられる。

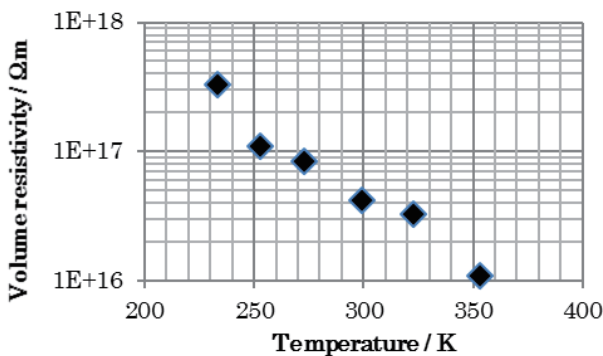


Fig. 1 Volume resistivity as function of temperature (Kapton® 200H) [2]

2 極低温下における材料パラメータ

極低温下における宇宙機用材料の体積抵抗率について、実験的に求めた例は非常に少ない。赤外線天文衛星は、

微弱な赤外線を観測するために望遠鏡部分を極低温に冷却し、太陽光を遮るサンシールドを備えている。サンシールド部分に誘電体が使われる可能性があり、部位によっては極低温になるとされている。赤外線観測衛星の例としては、NASAが開発中のJWST [3]や、JAXAとESAが共同開発中のSPICA [4]などがある。

体積抵抗率と温度の関係を表した理論式がある。常温の場合(Boltzmann factor)と極低温の場合(Mott factor)でそれぞれ式が異なる。LDPEにおいては、260 K~270 Kの間で $\exp(T^{-1})$ から $\exp(T^{-1/4})$ に遷移している [6]。

$$\rho(T) \propto \exp\left(\frac{U}{kT}\right) \quad (1)$$

$$\rho(T) \propto \exp\left(-\frac{T_V^{1/4}}{T^{1/4}}\right) \quad (2)$$

式(1) [5]は常温の場合、式(2) [6]は極低温下における体積抵抗率温度依存性を表す式である。式中の ρ は体積抵抗率 (Ωm)、 T は温度 (K)、 U は活性化エネルギー、 k はボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/K)、 T_V は温度の定数 (11604 K) である。Fig. 1 に示した実験結果は、式(1)が示すように $\exp(T^{-1})$ の関係にあることが確認できていた。

3 計測システム

体積抵抗率を求めるために、電荷蓄積法 [7]を用いた。試料を真空チャンバ内に設置し、試料に電子ビームを照射、帯電させ電子ビーム停止後の試料表面電位履歴から体積抵抗率を求める手法である。実験装置図を Fig. 2 に示す。

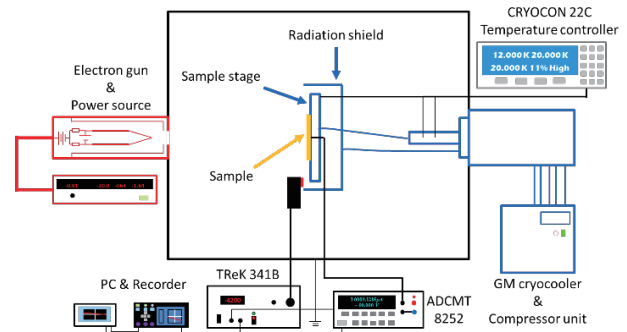


Fig. 2 Experimental setup

真空チャンバは、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Pa 以下のオーダーまで圧力

を下げることができる。赤い機器は電子銃(株式会社長州産業, VE-056S, 50 keV)と電源(株式会社長州産業, VP-058S)である。黒い機器は表面電位計(トレックジャパン株式会社製, Model 341-B), 電流計(株式会社 ADC, 8252), PC(Tektronix 株式会社, DPO7104), レコーダー(日置電機株式会社, 8430)である。青い機器は冷凍機関係で, 今回新たに導入した機器である。GM 冷凍機(住友重機械工業株式会社, V204SCP), 圧縮機ユニット(住友重機械工業株式会社, U104EWA), 極低温用温度コントローラ(Cryogenic Control Systems Inc., Model 22C), シリコンダイオード温度センサ(Scientific Instruments Inc., Si410A: サンプルステージ計測用), 50 W ヒータで構成されている。また, 極低温用のサンプルステージとシールドを新たに製作し実装した。

4 サンプルステージとクライオスタット

極低温用のサンプルステージの構成図を Fig. 3 に示す。

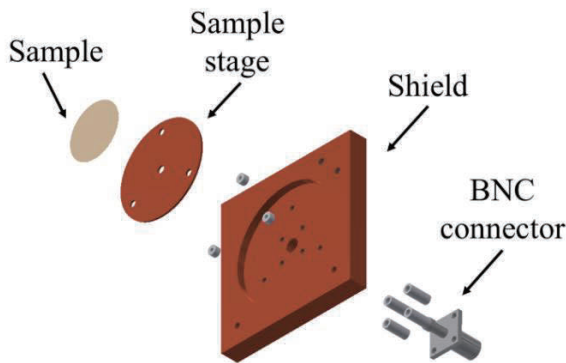


Fig. 3 Sample stage (3D model)

サンプルは, 厚さ 1 mm の無酸素銅板製サンプルステージに取り付けられる。サンプルステージは, 断熱材を介して無酸素銅製低温シールドに装着される。漏れ電流を計測する BNC 端子も備えている。

サンプルステージと冷凍機を, アース用の単線ケーブルで接続し, 真空中で伝導により冷却する。真空チャンバ内の様子を Fig. 4 に示す。

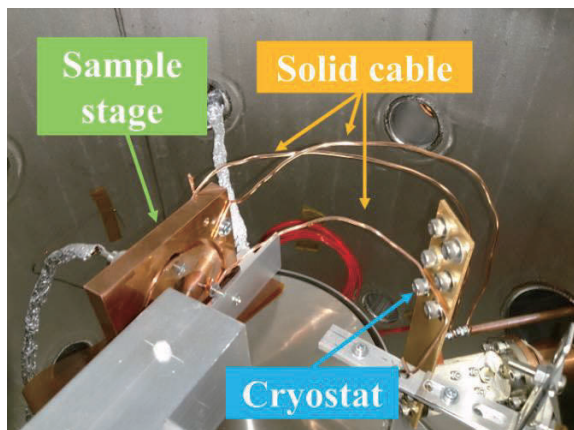


Fig. 4 Sample stage

真空中において冷凍機を起動し, サンプルステージの冷却試験を行った。その結果を Fig. 5 に示す。冷却試験の結果, 冷凍機起動後 70 min で最低温度 20 K に到達することがわかった。ただし, チャンバ壁面温度によって温度が少し変動する(±3 K)。最低温度以外では温度コントローラにより一定温度に制御されるため, チャンバ壁面温度に左右されることはなくなる。

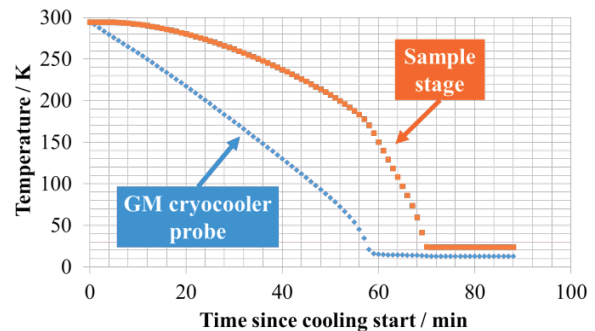


Fig. 5 Time history of sample stage temperature (cooling)

5 表面電位履歴計測結果と考察

Table 1 に, 実験条件を示す。

Table 1 Experimental conditions

Sample (Thickness)	Kapton® 200H (50 μm)
Electron beam energy, keV	20
Current density, nA/cm ²	1.14
Irradiation time, s	60
Vacuum level, Pa	10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻⁶
Temperature, K	20 / 40 / 60

Fig. 6 に, 表面電位履歴計測結果を示す。

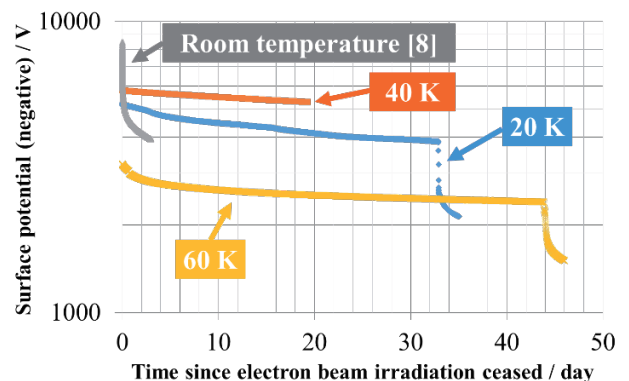


Fig. 6 Time history of surface potential (semi-log plot)

Fig. 6 の図中に各温度における表面電位履歴を示す。図中の Room temperature は 2014 年に計測された結果 [8] である。横軸は計測開始からの経過日数, 縦軸は電位を示す。本来, 電位は負であるが, モデルの適用をする都合上, 絶対値にして表示している。

Room temperature と低温下での表面電位履歴を比較すると、低温下での表面電位の減衰が小さくなっているのがわかる。電子線照射終了直後から、数 kV の高い表面電位を長時間維持している。60 K の実験結果では、40 日以上経過しても -2 kV 以下まで電位が減衰することはなかった。

Fig. 6 では、計測時間が長く短時間領域の変化が見にくいので、時間軸を対数にしたものを Fig. 7 に示す。

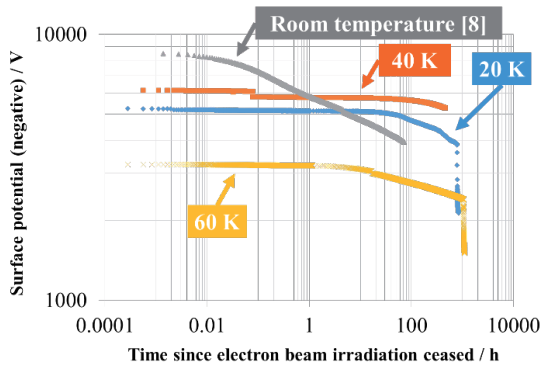


Fig. 7 Time history of surface potential (log-log plot)

電子線照射終了直後から 1 h までの短時間領域において、Room temperature は低温下の場合よりも傾きが大きいことがわかる。Room temperature では、短時間領域において 2658 V の減衰があったが、20 K では 102 V、40 K では 368 V、60 K では 31 V と、桁違いに小さい減衰であった。常温で電荷蓄積法の実験を行うと、電子線照射終了直後に電位の大きな急降下が見られるのが普通だが、低温下ではそのような現象が現れることはなかった。

4つの条件において、初期電位がバラバラであるため、各温度における表面電位履歴を各温度における初期電位で割った減衰率の履歴を Fig. 8 に示す。

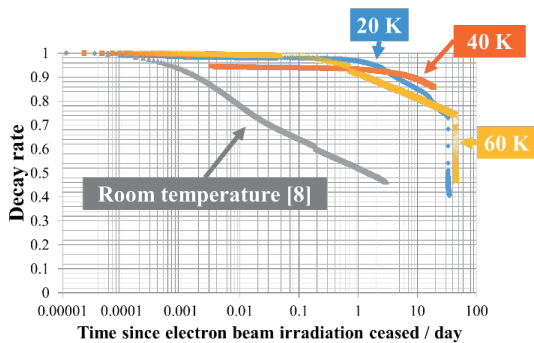


Fig. 8 Time history of decay rate (surface potential)

減衰率で低温下の結果と Room temperature の結果を比べると、計測開始初期の段階から Room temperature の表面電位は大きく減衰していることがわかる。一方、低温下では計測開始後 1 日付近から傾きが大きくなり始めている。

表面電位の減衰が小さくなった原因として、低温にすることにより蓄積電荷の移動度が減少し試料内に蓄積し

た電荷が試料外へ拡散するのが遅くなり、電荷が蓄積した状態が長時間続き、結果として表面電位の減衰が小さくなった可能性がある。

6 体積抵抗率計算結果と考察

表面電位履歴に、以下の減衰モデル[7]を適用し、体積抵抗率の計算を行った。

$$V(t) = V_0 e^{-\frac{t}{\tau_d}} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{\tau_d}{\epsilon} \quad (4)$$

式(3)及び式(4)の V_0 は初期電位、 τ_d は減衰時定数、 ϵ はサンプルの誘電率、 t は経過時間である。式(3)を表面電位履歴の短時間領域、長時間領域それぞれに適用すると、それぞれの減衰時定数がわかる。その減衰時定数を式(4)に代入すると、体積抵抗率が計算できる。各温度における体積抵抗率の計算結果を Table 2 に示す。

Table 2 Comparison of volume resistivity [Temperature]

Temperature, K	Volume resistivity, Ωm	
	Short time	Dark current
20	3.7×10^{16}	6.6×10^{17}
40	8.5×10^{15}	6.6×10^{17}
60	3.3×10^{15}	1.7×10^{18}
*300 [8]	6.5×10^{13}	5.5×10^{16}

*Table 2 の 300 K のデータは、Fig. 6 及び Fig. 7 の Room temperature のデータである。論文中に温度に関する情報が記載されていないため、ここでは 300 K とした。

低温下での体積抵抗率は、Room temperature と比較すると桁違いに大きい計算結果となった。20 K の短時間領域における体積抵抗率と、Room temperature の長時間領域における体積抵抗率が同じオーダーとなっていることがわかった。Table 2 をグラフ化したものを Fig. 9 に示す。

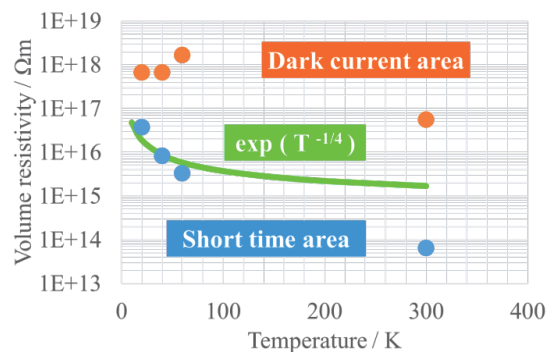


Fig. 9 Volume resistivity as function of temperature (Kapton® 200H)

短時間領域においては、Room temperature と比較して 50.8 倍～569 倍の上昇が見られ、温度の低下につれて体積抵抗率が上昇する様子も確認できた。表面電位の減衰が小さく時定数が上昇し、式(4)が示すように体積抵抗率も上昇した。

Fig. 9 中の緑色の曲線は、式(2)をもとに引いたものである。低温下、短時間領域における体積抵抗率と比較してみると、完全には一致していないものの、温度低下につれて体積抵抗率が上昇するという傾向は同じである。異なる温度における体積抵抗率を同じ実験方法により求め、どのような傾向が見られるか調べる必要がある。

長時間領域においては、低温下の体積抵抗率はいずれも Room temperature より 1 桁大きい値であった。ところが、低温下での各温度における体積抵抗率を比較すると、温度の低下につれて体積抵抗率が低下するという、予測に反した結果が得られた。原因として、計測時間の不足ではないかと考えた。今回の実験では、実験棟の緊急停電や断水などで実験を中断されたため、各データの計測時間がバラバラとなっている。まだ暗電流のみの領域に達しておらず分極の影響が入っている段階で計測を止められたため、長時間領域の体積抵抗率としては適切ではない結果であったと考えられる。計測時間が最も長かった 60 K の体積抵抗率が最も大きな値となっていた。

7 温度上昇による表面電位の急降下

20 K と 60 K の表面電位履歴で、終盤に表面電位が急降下している部分がある。これは、冷凍機が停止して常温まで昇温する時刻と一致している。よって、温度の上昇によって表面電位が急降下したと考えられる。

冷凍機が停止し、ヒータによる制御も行っていない場合、20 K から 30 min で 100 K に到達する。冷凍機停止後のサンプルステージの温度履歴を Fig. 10 に示す。

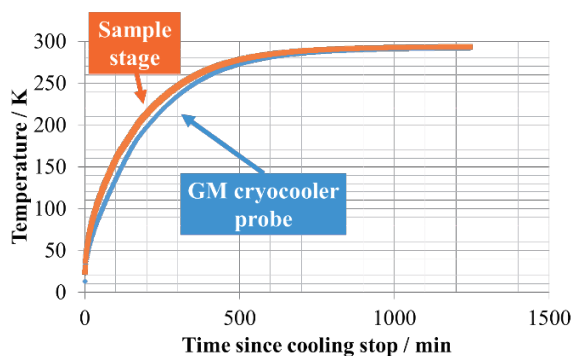


Fig. 10 Time history of sample stage temperature (Temperature rising)

温度の上昇により、蓄積電荷の移動度が上昇して表面電位が急降下した可能性がある。20 K では、表面電位が急降下する直前においては1日あたり十数 V の減衰であったが、冷凍機停止直後は1日で 1 kV 以上の減衰が見られた。

減衰する電位自体は 60 K よりも 20 K の方が大きかったが、急降下を始める直前の電位が 20 K の方が大きかったためではないかと考えた。減衰率をプロットした Fig. 8 を見てみると、急降下している部分の減衰率に大きな差はないと判断した。

8 まとめ

Kapton[®] 200H の極低温下における体積抵抗率を電荷蓄積法により求めた。その結果、電子線照射終了直後から表面電位はほとんど減衰せず、マイナス数 kV オーダーの電位を数十日間に渡って維持し続けた。体積抵抗率は、20 K の短時間領域においては、常温と比較し 569 倍に上昇した。また、温度の上昇に従って表面電位が急降下する現象を確認することができた。

今後の予定として、異なる温度における表面電位履歴を計測し、体積抵抗率の計算を行う。ただし、施設管理の都合上、緊急停電などが発生する可能性があり連続した長時間の計測は難しい。よって、短時間領域に絞って温度と体積抵抗率の関係を調べていく。

9 参考文献

- [1]. T. Muranaka, et. al., IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 36, No. 5, 2008.
- [2]. 櫻井和也, 平成 23 年度東京都市大学修士論文.
- [3]. James Webb Space Telescope Official Site, <http://jwst.nasa.gov/>
- [4]. 次世代赤外線天文衛星 SPICA, http://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/SPICA_HP/index.html
- [5]. J. I. Minow, et. al., 45th AIAA Aerospace Science Meeting, 2007.
- [6]. D. C. Ferguson, et. al., International Conference on Space Technology, 2009
- [7]. A.R.Frederickson, et. al., IEEE TRANSACTION ON NUCLEAR SCIENCE, VOL.50, No.6, pp.2284-2291, 2003.
- [8]. 八幡雅寿, 平成 26 年度東京都市大学卒業論文.