

電子線照射された誘電体材料の表面電位に 対する試料温度変動の影響

渡邊力夫（東京都市大学）

1 研究背景

宇宙空間において宇宙機はプラズマ環境や放射線環境に曝され、帯電現象を引き起こす。本研究室ではこれまで体積抵抗率についての研究が行われ、材料の温度を変化させて体積抵抗率を調べる研究が行われてきた。その研究において温度が低温になると体積抵抗率が上がることがわかっている。地球周回軌道で運用される宇宙機は150℃から120℃の温度変動にさらされる。帯電した宇宙機が地球によってできた日陰から日照に出る夜中から夜明けまでに温度が上昇し、蓄積電荷が拡散する。その際に物質による温度緩和特性の違いから宇宙機表面で電位差が生じてしまい放電が起きやすくなってしまう。そこで、本研究では電子線照射を受けて帯電した状態で温度変化が生じた場合の表面電位緩和特性を明らかにすることを目的とする。

2 既往研究

昨年度からは試料を低温下で帯電させ、様々な温度上昇率で試料表面の温度を上昇させたときの表面電位履歴を取得することにより体積抵抗率を算出し、誘電体材料の温度上昇率と体積抵抗率の関係を導くことを目標として研究が行われてきた。試料はKapton 200Hを用いた。しかし、昨年度は一定の温度で昇温を行うランプ制御が機能しなかったことや温度を読み取るセンサーの取り付け位置が誤っていたことから温度上昇率と体積抵抗率の関係性を導くには至っていない。

3 研究目的

本研究の目的は電荷蓄積法を用いて誘電体の体積抵抗率を測定し、試料温度上昇率と体積抵抗率の関係性を明らかにすることである。

4 研究手法

本研究は電荷蓄積法のシステムを使用して誘電体表面

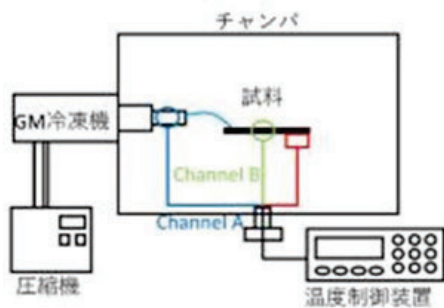


Fig. 1 Experimental equipment [1]

電位計測を行う。本研究では、冷凍機により試料を極低温まで冷却し、電子銃を一定時間照射したのちに試料台に接続したヒーターにより温度を上昇させる。Fig. 1 に実験装置の概要図を示す。温度は温度コントローラ（Cryocon, Model 22C）を使い マニュアル制御によって温度上昇率の制御を行う。さらに、微小電流計（KEITHLEY, 428）にて試料を通過した漏れ電流を計測する。体積抵抗率の算出方法は試料表面の電位を表面電位計で計測する。

5 体積抵抗率モデル

本実験では体積抵抗率を測定する手法として、電荷蓄積法を用いる。式(1)に表面電位の指数減衰モデルを示す。

$$V(t) = V_0 e^{\frac{-t}{\tau_d}} \quad (1)$$

ここで

$V(t)$: 表面電位[eV]

V_0 : 初期電位[eV]

t : 時間[s]

τ_d : 減衰時定数[s]

実験で得られた表面電位履歴より減衰定数 τ を求め式(2)に代入することで体積抵抗率を算出する。

$$\rho = \tau_d / \varepsilon \quad (2)$$

ここで

ρ : 体積抵抗率[Ω·m]

ε : 誘電率[F/m]

6 実験結果

6.1 電子線照射実験

Table 1 に実験条件を示す。ヒーター出力を30%および50%と変化させることにより昇温率を変更させた。

Table 1 Experimental conditions

ヒータ出力	30%	50%
計測時間, h	212	190
真空度, Pa	1×10^{-7}	2.5×10^{-6}
試料	Kapton200H	
照射エネルギー, eV	20	
照射時間, s	60	
温度	60K→300K	

Fig. 2, 3, 4 に電子線照射終了後の表面電位履歴を示す。なお、縦軸は負電位の大きさを示している。Fig. 2 の横軸は時間であり、長時間の表面電位変動を表している。電子照射終了直後に試料表面電位は最大となり、その後表面電位が急激に減衰していることが見て取れる。どちら

の実験においても急激な減衰が1日継続し、その後時間の経過とともに緩やかな減衰へと変化していること

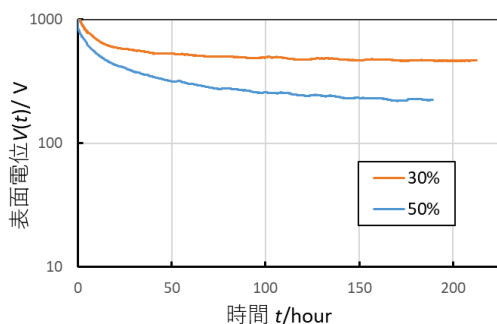


Fig. 2 Time histories of surface potential

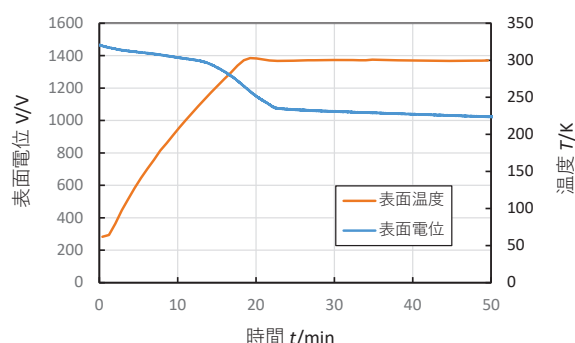


Fig. 3 Surface potential and temperature history (Manual 30%)

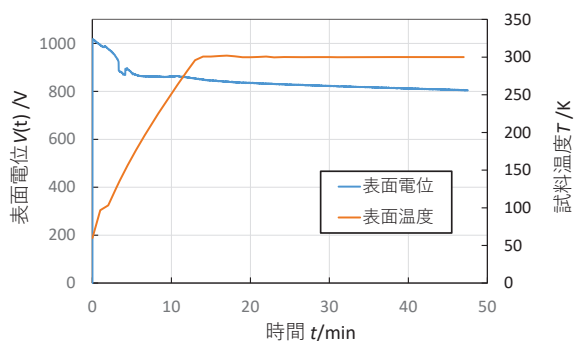


Fig. 4 Surface potential and temperature history (Manual 50%)

がわかる。ヒーター出力 50%の方がより早く電位が減衰していることもわかる。

Fig. 3, 4 は横軸が分であり、短時間領域の表面電位減衰履歴を示している。Fig. 3 より出力 30%では約 5 分で表面電位が約 200 V 減衰する電位履歴が見られた。

6.2 体積抵抗率の算出

Table 2 に、昇温中ならびに長時間領域における減衰時定数と体積抵抗率を示す。Table 2 より昇温中においてヒ-

Table 2 Volume resistivity

	30%		50%	
	昇温中	長時間領域	昇温中	長時間領域
減衰時定数, s	1.25×10^4	1.00×10^7	5.00×10^3	3.33×10^7
体積抵抗率, Ωm	4.15×10^{14}	3.31×10^{17}	1.66×10^{14}	1.11×10^{17}

ター出力 50%の方が 30%と比べて約 2.5 倍体積抵抗率が低い(導電率が高い) ことがわかる。また長時間領域においても出力 50%の方が、約 3.0 倍体積抵抗率が低い(導電率が高い) 結果が得られた。

7 考察

Table 2 よりヒーター出力 30%に比べて 50%における体積抵抗率が小さくなった要因として、試料表面の電子の励起の速度が違うからであると考えられる。誘電体は価電子帯と伝導帯に大きなエネルギーギャップがあり、低温下では電子が励起するためのエネルギーが不足しているため電荷の移動度が小さくなる。温度が上昇すると、熱エネルギーによって価電子帯に束縛されていた電子がバンドギャップを超えて伝導帯へ励起されるようになる。伝導帯に励起された電子は自由に移動できるものであり、それによって導電性がもたらされ、体積抵抗率が小さくなる。また、電子が価電子帯を離れると、その場所には正孔が発生する。正孔は電荷担体として機能し、価電子帯内を移動することで電流に寄与する。さらに、試料表面に帯電した電子は熱エネルギーが与えられると価電子帯へ入り同じような手順で導電帯へ励起される。

温度勾配が大きいほど試料内部や表面の電子に単位時間あたりに与えられる熱エネルギーが大きい。つまり、単位時間あたりに励起する電子の数が多くなる。よって時間経過に伴い、試料表面の電位の絶対値が低下し、温度勾配が大きい 50%において体積抵抗率が低くなった(導電率が高くなった)と考えられる。

8 参考文献

- [1] 三沢 伊織, 東京都市大学卒業論文, 2023.
- [2] 澁谷 優樹, 東京都市大学卒業論文, 2015.
- [3] 五家 建夫, “宇宙環境リスク事典”, 丸善株式会社サービスセンター, 2006.
- [4] 大木 義路, “誘電体物性”, 培風館, 2002.