

電子線が繰り返し照射された誘電体材料の体積抵抗率に対する試料温度の影響に関する研究

東京都市大学 後藤 浩友樹 渡邊 力夫

1. 研究背景

宇宙で運用している宇宙機はプラズマや放射線などによる過酷な環境に曝されている。それらの影響により、宇宙機は帯電し、搭載機器の故障や全損破壊を引き起こすと考えられている[1]。そのため、宇宙機は設計段階から帯電解析を行う必要があり、現在では MUSCUT[2]等の宇宙帯電シミュレーションプログラムが使用されている。帯電シミュレーションを行うには材料パラメータが必要であり、そのパラメータの一つに誘電体の体積抵抗率が挙げられる。誘電体は宇宙機表面に絶縁や断熱の目的として用いられる材料である。体積抵抗率は材料内部の電荷移動の起こりにくさを表す値であり、体積抵抗率が高い誘電体ほど絶縁性が優れている。その反面、物質内部や表面での電荷の移動度が低く、一度帯電した際の電界の緩和時間が長くなる。電界緩和時間が長くなると、電荷が累積し、放電のリスクが高くなる可能性がある。

地球周回低軌道上には、地磁気の影響により放射線流束の大きな地域がブラジル上空に存在し(SAA(南大西洋異常地域), 高度約350km~1500km), 宇宙機の帯電に起因する異常が多く見られる [1]。これは、低軌道周回衛星が SAA を通過中に放射線の影響を受けたことに起因する。例えば高度400kmで周回する宇宙機の場合90分毎にこれらの領域を周期的に通過することになる。また、極軌道をとる宇宙機も極冠域の通過は周期的となる。低軌道宇宙機は、帯電リスクの高まる領域を周期的に通過することから、周期的な荷電粒子照射が宇宙機の帯電に影響を及ぼすことが考えられる。現在までの所、周期的な荷電粒子照射が原因と特定された宇宙機の故障や事故は見当たらないが、周期的な荷電粒子照射の影響を明らかにし、もしその影響が顕著であるならば、対策を考慮する必要がある。

また、温度に関しては、低軌道上を周回する宇宙機は-150℃~+120℃の温度下に曝されることが知らされており[3], 体積抵抗率や誘電率は試料温度によって大きく変動することが知られている[4]。従って、体積抵抗率に対する温度の影響を調べることは重要である。温度が上昇すると材料内部の電子移動度が上昇し、電荷が移動しやすくなる。これは、導電率の増加を意味し、その逆数である体積抵抗率は減少することになる。

2. 研究目的

本研究では、電子線が繰り返し照射されたポリイミドフィルムの表面電位履歴を計測し、繰り返し照射が、帯電特性並びに体積抵抗率へ与える影響を明らかにすることを目的とする。本論文では特に、試料温度を変化させた実験を実施し、体積抵抗率への影響を明らかにする。

3. 計測システム

3.1 電荷蓄積法

本研究室では電荷蓄積法を用いて、体積抵抗率の算出を行っている。電荷蓄積法とは、2003年に Frederickson, Dennison らが考案した実験手法[5]で真空チャンバーと電子銃を用いて、宇宙空間での帯電状況を模擬し、電子線により誘起される表面電位の計測を行い、この時間履歴から体積抵抗率の測定を行う方法である。

Fig1 に本研究室の計測システムの概略図を示す[6]。

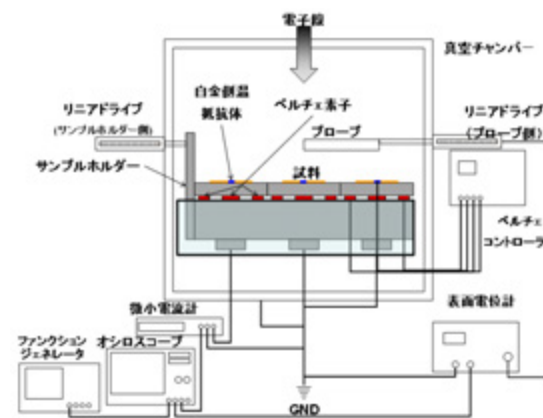


Fig1 Measurement systems of volume resistivity

表面電位計測の流れは、まず真空チャンバー内の試料台に計測試料(kapton200V)を固定し、真空引きを行う。この際油回転真空ポンプ、ターボ分子ポンプを用いる。真空チャンバー内部の圧力が 10^{-4} [Pa]以下まで低下した後、電子銃を用いて電子線を照射し、試料を帯電させる。電子線照射終了後、真空チャンバー外部からリニアドライブを操作し、真空チャンバー内部の表面電位計測プローブを試料の前に移動させ、表面電位の計測を行う。この表面電位計での測定データをオシロスコープで確認し、表面電位の時間履歴を所得する。

3.2 温度制御システム

Fig2 に試料台の断面図を示す[6].

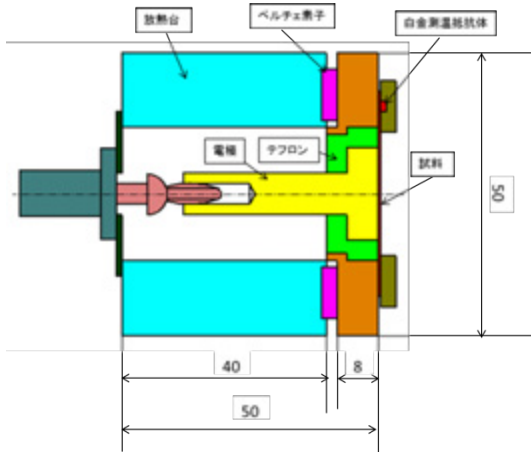


Fig2 Cross section of sample holder

Fig2 より温度制御を行うために、試料台と加熱台との間にペルチェ素子(フジタカ製, FPM-71008, 温度範囲 $-40^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$)が配置されている. 温度制御点は、白金測温抵抗体(Heraeus 製, M222-A)すなわち試料カバー直下の試料表面温度である. ペルチェコントローラ(フジタカ製, T-009-406Pt)で制御を行い、ペルチェ素子の温度を目標温度に制御し、試料温度が変化するようになっている. また、冷却を行う場合は、加熱台の上に水冷ヒートシンクをセットし、冷却水循環装置(東京理化学器械製, CCA-1111)を使用し、排熱処理を行っている.

4. 体積抵抗率評価手法

4.1 暗電流領域における体積抵抗率[7]

真空チャンバー内で電子線を試料に照射して、試料を帯電させる. 電子線照射終了後からの表面電位の時間履歴から減衰時定数を求め、体積抵抗率を求める. 電子線照射終了後から十分時間が経ち暗電流のみが流れる状態になると、表面電位の減衰は指数関数で近似できるようになる. 表面電位を $V(t)$ とすると、以下のような式が適用できる.

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

Eq.1 の τ_d [s]が減衰時定数であり、Eq.2 で表される.

$$\tau_d[s] = \varepsilon/\sigma \quad (2)$$

Eq.2 より、実験で取得できる τ_d [s]を代入することで導電率 σ [1/ Ωm]を求めることができる. ここで、 ε [F/m]は試料の誘電率である. また、体積抵抗率 ρ [Ωm]は Eq. 3 のように表すことができる.

$$\rho = 1/\sigma \quad (3)$$

ここで減衰時定数 τ_d [s]は、Eq.2, Eq.3 より Eq.4 で表せる. ε_0 [F/m]は真空の誘電率であり、 ε_r は誘電体の比誘電率である.

$$\rho = \tau_d/\varepsilon \quad (4)$$

Eq.1 に示したような指数減衰モデルを用いると、分極などの試料材質固有の値に左右されることなく体積抵抗率を求めることができる. このモデルは、分極の収まった暗電流領域を対象としているため、計測される表面電位の時間履歴を片対数グラフでプロットすることで暗電流領域である指数減衰区間を直線で確認し、指数近似を行う.

4.2 体積抵抗率の温度依存性[4][6]

Eq.6 に体積抵抗率と温度の関係を示す. 誘電体の活性化エネルギーを U [J], ボルツマン定数を κ [J/K]とすると温度 T [K]における体積抵抗率 ρ [Ωm]は、

$$\rho(T) \propto \exp(U/\kappa T) \quad (6)$$

と表せる. よって温度が上昇すると体積抵抗率は減少する.

5. 実験結果

5.1 実験条件

Table1 に実験条件を示す.

試料温度が表面電位、体積抵抗率に及ぼす影響を知るために、試料温度のみを変更し行った.

制御温度は RT, 50°C , 80°C に設定した. また、試料温度に関しては、実験前に測定した温度であり、 80°C の時に 63.9°C となってしまう. 低温環境でも実験を行う予定だったが、試料温度が下がらず、現段階では実験を行うことができなかった.

照射間隔は 90 分にし、低軌道を周回している宇宙機を模擬した. 照射エネルギーは 20keV, 照射時間は 60sec に設定した.

Table1 Experimental conditions

temperature setting[$^{\circ}\text{C}$]	RT	50	80
sample	kapton200V		
sample temperature[$^{\circ}\text{C}$]	24	41.3	63.9
Sample thickness[μm]	50		
Irradiation	Interval[min]	90	
	Energy[keV]	20	
	Time[sec]	60	
Current density[$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	65		
Vacuum level[Pa]	10^{-6}		

5.2 表面電位履歴

Fig3 に表面電位履歴の結果を示す.

縦軸に負の表面電位 V [V], 横軸に時間 t [h], を示す. 縦軸は正側に負電位を取っている.

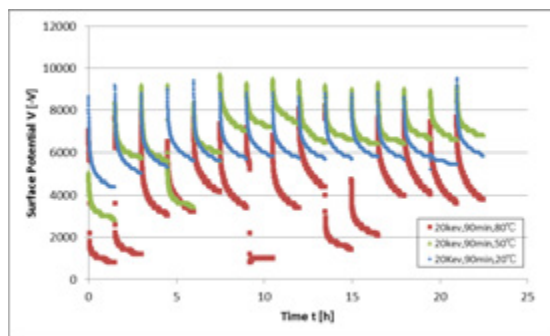


Fig3 Time history of surface potential

表面電位は繰り返し電子線を照射する影響を受け、照射回数を重ねるごとに負電位方向に上昇すると予想していたが、表面電位が回数を重ねるごとに負電位方向に上昇することはなかった。また、Fig3より、制御温度 24°C、50°Cの時に比べ 80°Cの時の方が電位の減衰が速いことがわかる。

表面電位が負電位方向に上昇しなかった理由として、RIC(放射線誘起導電率)の影響だと考えられる。RICとは照射中に過度的な導電率の向上現象のことである[9]。RICの効果は線量率に比例し、また線量率は電流密度と比例関係にあるため、RICは電流密度の増加によってRICの導電率も向上する。低軌道上での電流密度は $1[\mu A/cm^2]$ [10]であり、本研究室で用いている電子銃は 20keVの時に電流密度 $65[\mu A/cm^2]$ であるため、実際の宇宙環境の 65 倍の電流密度の影響を受けていると考えられる。そのため、RICによる導電率も向上したため、繰り返し電子線を照射しても電位の減衰が早く、負電位方向に増加することはなかったのではないかと考えられる。さらに、今回測定に使用したカプトンフィルムはRICの効果が照射後も継続されるDRICの効果はほぼ発生しないという報告がされている[8]。

ここで Fig4 に蓄積電荷量と時間の関係を示す。縦軸に蓄積電荷量 $[mC/m^2]$ 、横軸に時間 $t[min]$ を示す。

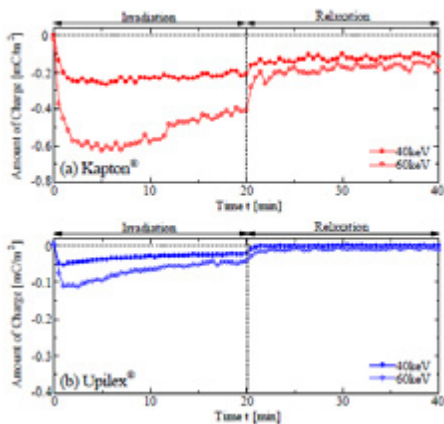


Fig4 Time dependence of accumulated total amount of charge in each sample

Fig4は電子線を照射した誘電体内部電荷計測結果から蓄積電荷量を計算し、照射中から照射後までの履歴を示したものである[8]。Fig4より、kaptonとUpilexを比較してみると電子線を60keVで照射後の蓄積電荷量を見てみると、kaptonは急激に電荷が減衰していることがわかる。

これは、電子線照射後に瞬時に絶縁特性が回復したことが言える[8]。kaptonは電荷が蓄積されやすいが、電荷の減衰も早いことが言える。よってカプトンフィルムに関していえば、電子線の繰り返し照射を耐えるのに適していることがわかる。また、24°C、50°Cに比べ 80°Cの電位の減衰が急激な理由は温度が高くなったことで、電荷の移動が早くなったためだと考えられる。

現段階では測定試料 kapton200V でしか繰り返し照射実験を行っていないため他の誘電体材料繰り返し照射実験を行い、材質の違いがどのような影響を及ぼすか調べる必要がある。

5.3 体積抵抗率

Fig5 に体積抵抗率の結果を示す。縦軸に体積抵抗率 $\rho[\Omega m]$ 、横軸に照射回数を示す。

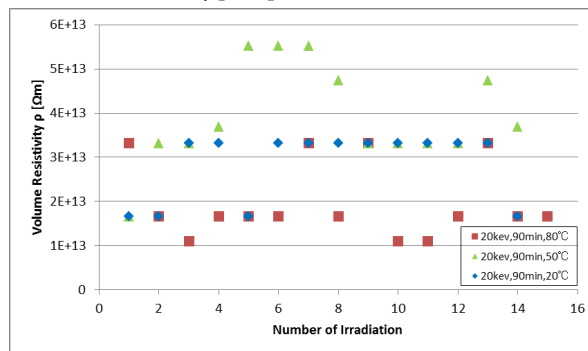


Fig5 Relation of volume resistivity and number of irradiation

体積抵抗率は Fig3 に示したデータの中でもそれぞれ電位の減衰が急な部分(0sec~100sec)に対し、指数近似曲線を引きそこから 4.1 に示した方法で求めた。

Fig5の結果より、体積抵抗率はすべて $10^{13}[\Omega m]$ であり、繰り返し照射の影響はなかったと言える。温度の影響については比較すると 24°Cより 80°Cの方が体積抵抗率は低くなり(導電率は上昇)、理論通りの結果が得られたことがわかる。しかし、理論的には 24°Cの時を基準にし、80°Cの体積抵抗率は 24°Cの体積抵抗率の約 0.25 倍の値にならないといけないが、測定値では 0.7 倍の値になってしまった。これは温度が高くなったことで、誘電体内部の電子

の移動度が上昇し、電荷の移動が速くなり導電率が増加したためだと考えられる。しかし、24°Cと50°Cを比較してみると50°Cの方が体積抵抗率は高くなってしまった。50°Cに関しては再度実験を行い、確認する必要がある。これらのことより、温度が上昇することにより、体積抵抗率は低くなるのがわかり、体積抵抗率は温度の影響を受けるということがわかった。

6. 結論

電荷蓄積法を用いて、90分間隔で電子線を照射した試料(カプトンフィルム)の表面電位履歴ならびに体積抵抗率を計測した。また、試料温度の影響を明らかにするため、試料温度を24°C、50°C、80°Cと変化させて実験を行った。実験の結果、表面電位に電子線繰り返し照射の影響であると予想した累積的な電位降下(負電位の上昇)は観測されず、電位減衰履歴から計算した体積抵抗率についても繰り返し照射の影響は見られなかった。しかし、表面電位は温度が高くなるにつれて電位の減衰が速くなることがわかった。また、体積抵抗率も温度が高いと低くなることがわかった。これらより、体積抵抗率は温度変化の影響を受けることが言える。しかし、現段階では温度を変化させた場合のデータ数が少ないため、より体積抵抗率と温度の関係に対し信憑性を持たせるために低温環境下でのデータ、50°Cでの再実験が必要だと言える。

7. 参考文献

- [1] 五家建夫, “宇宙環境リスク事典”, 丸善株式会社出版サービスセンター, 2006
- [2] T. Muranaka et al.: “Development of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT)”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 36, No. 5, 2008.
- [3] 石崎誠一等, “温度変化をともしう試料中の空間電荷分布測定手法の確立”IEEJ Trans.FM, Vol.124, No.10, 2004
- [4] 電気学会, “誘電体現象論”, 電気学会, pp. 203-258, 1973
- [5] A.R. Frederickson, J.R. Dennison: IEEE TRANSACTION ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 50, No. 6, pp.2284-2291, 2003.
- [6] 櫻井和也, “電子線照射された宇宙機用誘電体材料の体積抵抗率評価手法に関する研究”, 平成23年度東京都市大学修士論文, 2012
- [7] J.R. Dennison et al.: “PROPOSED MODIFICATIONS TO ENGINEERING DESIGN GUIDELINES RELATED TO RESISTIVITY MEASUREMENTS AND SPACECRAFT CHARGING”, 9th Spacecraft Charging Technology Conference, 2005
- [8] 谷貝健太, “電子線照射絶縁材料における内部帯電現象および電気特性変化に関する研究”, 東京都市大学修士論文概要集, 2012年
- [9] Yang, G.M., Sessler, G.M., “Radiation-induced conductivity in electron-beam irradiated insulating polymer films”, Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 1992, vol. 27, no. 4, pp. 843-84
- [10] NASA, NASA TECHNICAL HANDBOOK, 2011