

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420816

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Charging Characteristics of Spacecraft Dielectric Material at Cryogenic Temperature

研究代表者

渡邊 力夫 (Watanabe, Rikio)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：20308026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙機で使用されている誘電体材料に対し、極低温真空下で帯電させた状態における表面電位履歴を取得し、体積抵抗率を計算した。対象試料としてはKaptonフィルムを利用し、20 keVの電子を1.0 nA/cm²の密度で照射した。試料温度はGMサイクルを利用した冷凍機とヒーターを組み合わせ、PID制御により指定した温度に保持した。本研究では20K、40K、60K、80K、100Kの試料温度を設定した。得られた表面電位履歴から、極低温下においては帯電した電位が数十日間保持されていることがわかった。また、体積抵抗率の温度依存性については、温度の-1/4乗に比例することが分かった。

研究成果の概要(英文)：Charging analysis of spacecraft is necessary to prevent charging accident of spacecraft. In this study, volume resistivity of insulating material for spacecraft at cryogenic temperature was experimentally investigated because some spacecraft such as infrared space telescopes are operated at cryogenic temperature. The charge storage method was used to obtain volume resistivity from potential histories of dielectric films after electron irradiation. Experimental results of Kapton film indicated that the volume resistivity of short time region at 20 K increased by 569 times compared to room temperature. Surface potential remained kV order for several tens of days which may increase the risk of electrostatic discharge. The volume resistivity of the short time region showed the dependency according to $\exp(T^{-1/4})$.

研究分野：宇宙工学

キーワード：体積抵抗率 極低温 宇宙機帯電

1. 研究開始当初の背景

本研究を開始するにあたっての問題点としては、宇宙機の熱制御材等に利用されている誘電体材料が宇宙環境下におけるプラズマや放射線により帯電し、宇宙機の他の箇所との電位差による放電や誘電体自体の絶縁破壊により破損し、宇宙機の不具合や故障に繋がる現象があげられる。このため、宇宙機は帯放電現象に関して設計段階から入念な解析やシミュレーションが必要である。特に、電子線が照射された誘電体試料の表面電位特性を実験的に明らかにすることは重要である。

赤外線天文衛星等においては、熱雑音を低減する目的で宇宙環境下においても極低温下(数 K 程度)に冷却されることがある。誘電体材料は一般的に温度が低下するにつれて内部に蓄積された電荷の移動度が減少し、蓄積電荷に誘起される表面電位の緩和時間は長くなる。宇宙機において電位の高い状態(電子の場合は負方向)が続くと、放電リスクが高まり宇宙機故障に繋がる可能性が高い。しかしながら、宇宙機用誘電体材料の極低温下における帯放電特性、特に電子線が照射された試料の表面電位特性に関して調べられた例は少なく、帯放電リスクの査定に支障を来している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙機用誘電体材料、特にポリイミド系材料に対し、真空極低温下において電子線を照射し、蓄積した電荷による表面電位の特性を明らかにするとともに、表面電位の時間履歴から体積抵抗率を計算し、極低温域における体積抵抗率の温度依存性を明らかにすることである。

体積抵抗率は、常温域ではアーレニウス型の減衰 $\exp(T^{-1})$ で記述できることが知られているが、極低温下においては蓄積電荷(電子)がポテンシャル障壁を越えるほどのエネルギーを持たないため、ホッピング電導が主体となり、温度のべき乗指数関数 $\exp(T^n)$ に比例するとされている。本研究では、極低温域における体積抵抗率の温度依存性に関し、どのようなモデルで記述できるのかを検討する。

3. 研究の方法

本研究では、電荷蓄積法(Charge Storage Method)と呼ばれる手法を用いる。これは真空チャンバ内に設置した誘電体試料に対し、電子線を照射し、内部に蓄積した電荷によって誘起される表面電位を非接触の表面電位計で計測するものである。図1に計測システムを示す。試料の冷却にはヘリウムガスを冷媒とした GM(Gifford-McMahon)サイクル冷凍機を使用した。最低到達温度は 12K である。冷凍機から試料台への伝熱経路は図2に示す通りで、銅線を利用した。これにより、試料温度は最低 20K まで冷却することができた。また、ヒーターを併設することと、試料温度を制御する温度調整装置を導入することにより、試

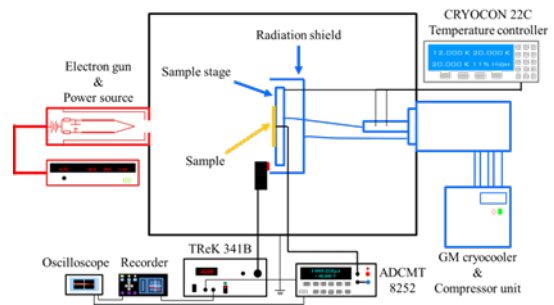


図1 実験装置

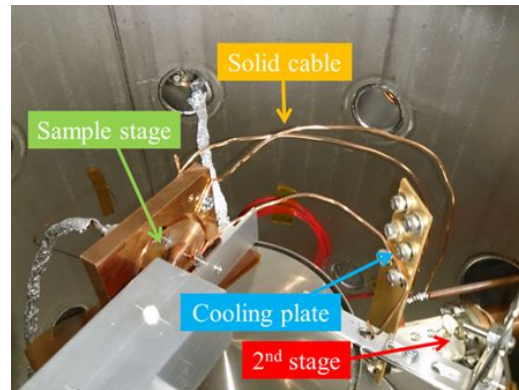


図2 試料台と冷却通路

料温度を任意の値に保持することができる。

電子照射終了後から表面電位を取得し、その履歴から体積抵抗率を計算する。表面電位の減衰モデルとしては式(1)に示す指数減衰モデルを適用した。これにより、減衰時定数を得て、式(2)により体積抵抗率に変換する。

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

$$\rho = \frac{\tau_d}{\epsilon} \quad (2)$$

ここに、 V は電位、 V_0 は初期電位、 τ_d は減衰時定数、 ϵ は誘電率、 ρ は体積抵抗率を示す。

4. 研究成果

表1に試験条件を示す。対象試料はポリイミドフィルムとして代表的な試料である Kapton[®]を使用した。試料温度は 20K から 100K とし、試験期間中に渡って指定温度を保持した。電子線の電流密度は地球周回低軌道上における最悪時電流を想定している。

表2 実験条件

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 / 100

図3に表面電位履歴を示す。横軸は電子線照射終了後からの時間を「日」で表している。

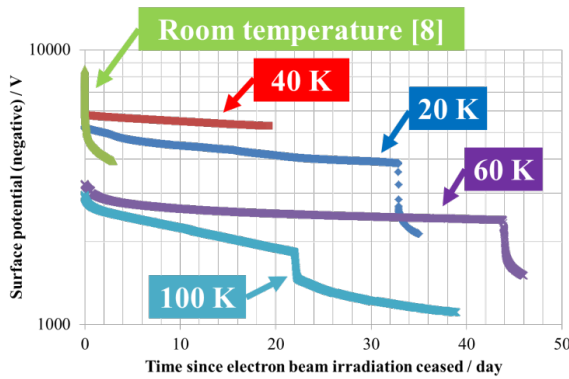


図3 表面電位履歴

縦軸は負の表面電位を表している。図から分かるように、電子線照射終了直後に数 kV に帯電した試料表面の電位 40 日以上経過しても数 kV を維持しており、極低温下において試料中電荷の移動度が大きく低下していることがわかる。このことは、極低温下において帯電した誘電体材料は宇宙環境下において長期間高電位を露出することになり、放電リスクが大きくなることを意味している。

温度による減衰率の違いを比較するために、初期電位により規格化した表面電位履歴を計算した(図4)。室温の場合は照射終了直後から急速に電位が減衰し、数日間で数 kV の減衰がみられるのに対し、極低温の場合には長時間、負の高電位が維持されていることがわかる。また、20K の場合に最も長時間高電位が保持されることがわかった。

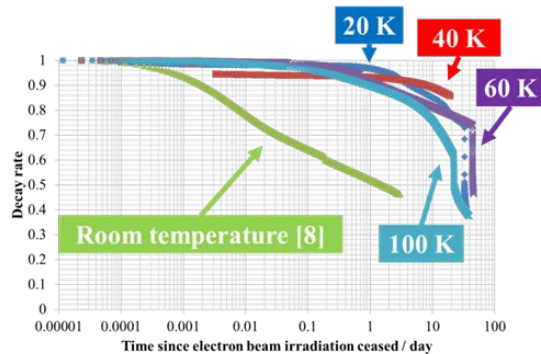


図4 表面電位減衰率

得られた表面電位履歴から体積抵抗率を計算した。体積抵抗率の計算にあたっては、時間帯により2種類の体積抵抗率を算出した。1つは電子線照射終了直後の分極電流による急激な電位減衰を表す短時間領域(Short time region)であり、2つ目は試料の暗電流により支配される暗電流領域で(Dark current region)ある。図5に計算された体積抵抗率と試料温度の関係を示す。横軸は試料温度、縦軸は体積抵抗率(Ωm)を表す。図中には短時間領域の値と長時間領域の値を示した。図より、極低温下における体積抵抗率は短時間・長時間ともに、常温の値より2から3桁上昇することがわかる。これは電荷の移動度が減少し、電位減衰が長時間に渡ることを示している。

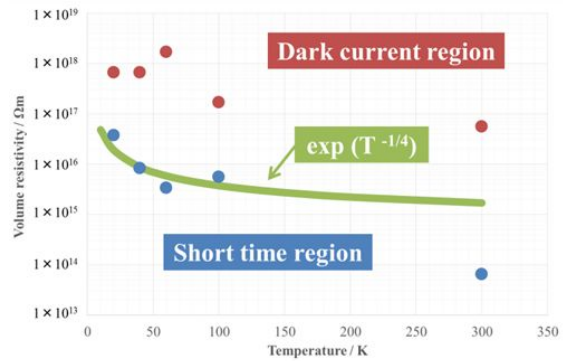


図5 体積抵抗率の温度依存性

また、短時間領域の体積抵抗率はホッピング伝導による移動度モデルに基づいて予測されている $\exp(T^{-1/4})$ に比例した関係で説明できることがわかる。さらに、このモデルは常温域の体積抵抗率について適用できないこともわかった。

以上より、本研究では、極低温下において帯電した誘電体材料の体積抵抗率は常温に比べて非常に大きくなり、かつ、その温度依存性がホッピング伝導に基づくモデルによって説明できることがわかった。

<引用文献>

A. R. Frederickson, et. al., IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 50, No. 6, pp. 2284-2291, 2003.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

Yuki Shibuya, Rikio Watanabe, and Akihiro Miyasaka, Charging Characteristics of Spacecraft Dielectric Material at Cryogenic Temperature, 31th ISTS, June 6, 2017, Himegin hall (Ehime).

澁谷優樹, 渡邊力夫, 宮坂明宏, 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, 第13回宇宙環境シンポジウム, 2016年11月2日, 情報通信研究機構(東京).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 力夫 (WATANABE, Rikio)
 東京都市大学・工学部・准教授
 研究者番号: 20308026

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号:

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号 :

(4)研究協力者

なし ()