

機関番号：32678

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760655

研究課題名(和文) 宇宙環境模擬下における誘電体体積抵抗率計測手法の確立

研究課題名(英文) Measurement of Volume Resistivity for Dielectric Film under Space Simulated Environment

研究代表者

渡邊 力夫 (WATANABE RIKIO)

東京都市大学・工学部・講師

研究者番号：20308026

研究成果の概要(和文)：宇宙機用誘電体材料を選定する際に材料特性値として参照される体積抵抗率に関し、宇宙環境を模した真空かつ電子線照射下における試料表面電位履歴を取得することにより算出する電荷蓄積法を利用して計測を実施した。体積抵抗率に影響を与える各種パラメータ(電子線照射エネルギー、照射量、試料温度、試料湿度、試料厚さ)の影響を体系的に調べ、計測手法を確立した。また、計測データを宇宙機用材料選定用データとしてまとめた。

研究成果の概要(英文)：Volume resistivity of dielectric films under space environment is obtained with a charge storage method. Volume resistivity is calculated from a time history of surface potential where electron beam is irradiated in a vacuum chamber. Effects of experimental parameters such as irradiation energy, dose, temperature, humidity and sample thickness on volume resistivity are investigated. Experimental procedure as standard measurement method for volume resistivity is established.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 2010年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 総計 | 2,900,000 | 870,000 | 3,770,000 |

研究分野：航空宇宙工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：構造・材料，宇宙環境

1. 研究開始当初の背景

地球周回低軌道(LEO)や静止軌道(GEO)上を周回する人工衛星等の宇宙機においては、プラズマや高エネルギー荷電粒子に起因する帯電によって故障や運用停止などの事故が起こる。帯電に起因する不具合を減少させるための研究はNASA, ESA, JAXAなどの研究機関を中心にして実施され、適切な対応策や設計基準が確立されつつあり、不具合の減少に役立ってはいる。宇宙機の帯電は、主に宇宙機表面に利用されている誘電体に関連しており、誘電体の選定時には、その体積抵抗率が参照される。体積抵抗率の値に関しては、従来 JIS K6911 や ASTM D257 などに

よって規定されている直流電圧印可法(コンデンサ法)が利用されてきた。しかし、誘電体が実際に使用される宇宙環境下、特に真空と荷電粒子環境の環境下においては、どのような特性値が得られるかは不明であり、宇宙空間を模擬した環境下における計測が必要である。また、従来の計測法との比較検討のため、これらの計測基準に沿った体積抵抗率の計測を行うことが望ましい。

そこで提案されたのが電荷蓄積法という体積抵抗率計測手法である。これは高真空下において誘電体試料に電子線を照射し、それによって試料表面に誘起される電位の履歴から体積抵抗率を求めるものである。これに

より、誘電体材料が実際に使用されている環境における特性値の把握ができ、より適切な材料選定をすることができる。

しかしながら、電荷蓄積法の試験手法は未だ確立されておらず、体積抵抗率に影響を与える電子線照射エネルギーや試料温度などを変えた場合の計測実験も不十分である。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに構築した電荷蓄積法による体積抵抗率計測システムを利用して宇宙機用誘電体材料（主にポリイミド）の体積抵抗率を系統的に取得する。その上で、電子線照射エネルギー・試料温度・試料湿度などの試験パラメータが体積抵抗率に与える影響を定量的に把握して誘電体材料表面電位の履歴をモデル化する。また、取得した試料は誘電体材料選定へ向けて系統的にまとめる。

3. 研究の方法

実験装置としては既存の真空槽・電子銃・表面電位計を利用して高真空（ 10^{-6} Pa）下に誘電体材料を設置し、10keV～50keVの照射エネルギーをもつ電子線を照射する。試料を通過する微小電流は既存の微小電流計と本補助金により購入したエレクトロメータを使用した。試料温度を変化させるためにペルチェ素子を利用した。図1に試料台断面図を示す。ペルチェ素子は直流電圧を印加することにより熱の流れを生じ、加熱・冷却を一つの素子で電気的に実施できる。今回の温度範囲は+80℃から-40℃とした。試料を冷却する場合背面は高温となるため、真空槽外部から水循環による冷却を行った。冷却システムは本補助金により工面した。

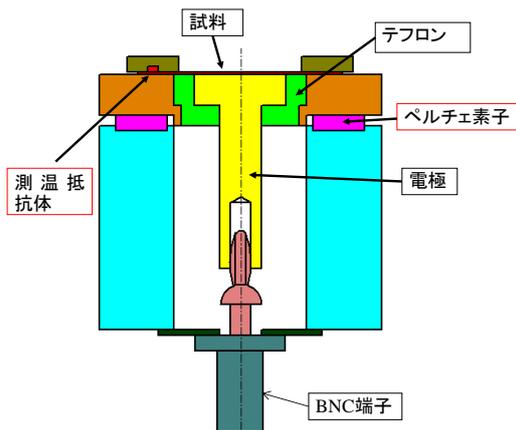


図1 試料台断面図

電子線照射により帯電した誘電体は、その表面に電位が生ずる。その電位を非接触の表面電位計で計測し、オシロスコープに記録をする。図2に計測システムの概略図を示す。

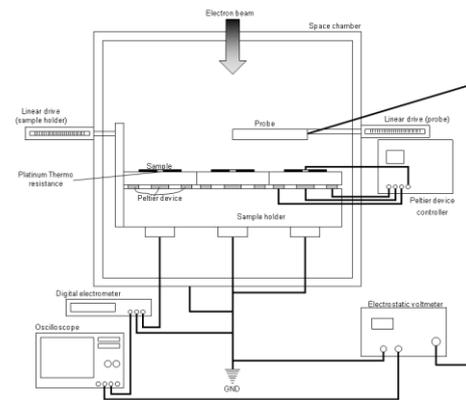


図2 電荷蓄積法による計測システム

電子線による誘電体帯電においては、電子線照射によって試料表面に負電位が観察される。電位は十分時間が経つとゼロまで回復するが、その過程における電位変化の時定数 τ_d と体積抵抗率 ρ_v は誘電率 ϵ を介して式(1)のような関係がある。

$$\tau_d = \rho_v \epsilon \quad (1)$$

従って、電位変化の時定数を得ることにより、体積抵抗率を計算することができる。実験条件としてはまず、電子線照射エネルギーを変化させた。電子のエネルギーは試料内に侵入する電子の距離（深さ、飛程とよぶ）を決める。また、電子線の照射を受けた材料の部位は導電率が向上する現象（RIC, Radiation Induced Conductivity）が観察されるので、試料厚さと密接な関連がある。もう一つ重要な条件は試料温度である。試料温度は試料を構成する結晶格子のエネルギー状態に依存し、一般的には温度が高いと結晶格子の振動エネルギーが向上し、より導電性が高くなる（体積抵抗率は低くなる）。温度が低くなるとその逆になるのであるが、宇宙機搭載状態における温度範囲は±120℃程度とされ、体積抵抗率の変動もそれにつれて大きくなると予想される。本研究では、+80℃から-40℃の範囲で温度を正確に保持し、体積抵抗率実験を行った。

また、電荷蓄積法以前に利用されていたコンデンサ法の計測システムも本補助金により構築し、電荷蓄積法との比較検討や温度や湿度による計測値の変化などについて検討を行った。

計測対象とする誘電体材料としては、現在宇宙機の熱制御材や絶縁体としてよく利用されているポリイミドフィルムのうち、Kapton®フィルムを使用した。試料厚さとしては、電子線照射エネルギーとの関係性を検討するために、25μmと50μmのものを使用した。湿度の影響に関しては、これを除外するために、試料を真空槽内に設置し、真空到達後数

時間ヒーターにより試料を加熱し、揮発成分と水分を抜いている。これは実際の宇宙機において使用される環境に近い状態である。

4. 研究成果

(1) 電子線照射エネルギーの影響 まずは $25\ \mu\text{m}$ 試料に対して体積抵抗率計測実験を実施した。電子線のポリイミドに対する飛程は照射エネルギーに依存するが、照射エネルギーが 30keV の場合、理論的な飛程は $23\ \mu\text{m}$ であり、試料内すべての領域を電子が通過したことになる。各照射エネルギーに対する表面電位履歴を図3に示す。

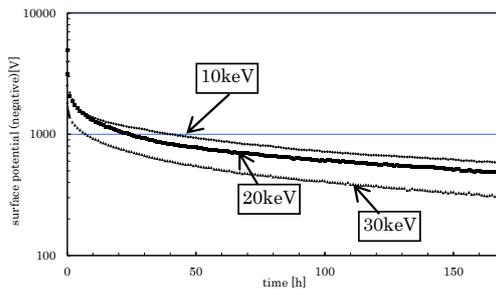


図3 電子線照射後の表面電位履歴 ($25\ \mu\text{m}$)

図3の横軸は電子線照射終了後からの時間を示し、縦軸は負電位を表す。電子線照射により試料表面に電子が蓄積し、表面に負電位を生ずる。本実験では -3kV 程度の電位が観察された。その後、表面の電荷は試料を回り込むか試料を通過することにより散逸し、試料表面の負電位は減衰することとなる。体積抵抗率の算出に使用する減衰時定数は、電位変化が指数的な変動をする場合に算出できる。指数減衰するという事は、片対数グラフ(図3)において、変動が直線的になることを表し、図3においては照射終了後50時間後以降である。これを暗電流における体積抵抗率とよぶ。一方、電子線照射終了直後も指数減衰モデルを適用でき、これを短時間領域における体積抵抗率と呼ぶ。具体的な体積抵抗率の値は $50\ \mu\text{m}$ の結果と一緒に示すが、負電位の減衰率は 30keV 照射の場合の方が 10keV 照射の場合と比較してやや大きくなる。電位減衰の程度も、 30keV の方が大きく、170時間後には、 -300V 程度まで緩和されている。

試料厚さの影響を調べるために、 $50\ \mu\text{m}$ 厚試料に対しても同様な実験を実施した。その結果を図4に示す。

横軸は同じく電子線照射終了後からの時間を示し、縦軸は表面電位(負電位)を表している。照射エネルギーが低い場合は照射による負電位の緩和量が小さく、170時間後においても -1kV 程度の電位を保っている。一方、照射エネルギーが大きいと、試料内部の深い位置まで電子が通過侵入し、その影響による導電率向上効果が顕著になり、電荷拡散が促進

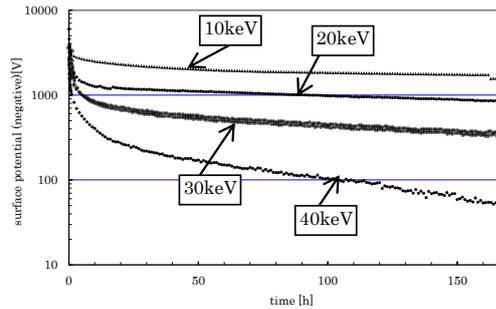


図4 電子線照射後の表面電位履歴 ($50\ \mu\text{m}$)

される。その結果として、表面電位は大幅に緩和され、170時間後においては -40V 程度までになっている。これは一見、蓄積した表面電荷がうまく拡散されているように見えるが、絶縁材料の性能としては絶縁劣化を示していることになり、ケーブル皮膜などの絶縁特性が重要な箇所に高エネルギー粒子が侵入した場合の材料損傷が著しいことも示している。図5に体積抵抗率と照射エネルギーの関係を示す。 $25\ \mu\text{m}$ と $50\ \mu\text{m}$ の両方の結果を記した。

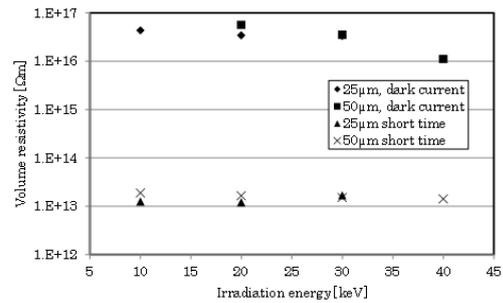


図5 体積抵抗率の照射エネルギー依存性

図5からわかるように、暗電流領域における体積抵抗率はおおむね $10^{16}\ \Omega\text{m}$ のオーダーであるが、照射エネルギーを高くするにつれて下がる傾向を示している。これは、電子の通過領域が深くなるにつれて導電率向上効果が大きくなるからである。すなわち、ある厚さの試料に対して、どの程度深くまで電子が侵入するかによって、該当試料の導電率や体積抵抗率は変化する。このことより、照射エネルギーが体積抵抗率に与える影響は、試料厚さと密接に関連しており、単独では議論できないことが分かる。現在、照射エネルギーと試料厚さに関する一般的なモデル式を検討している。短時間領域においては、照射エネルギーの依存性は見られずに、 $10^{13}\ \Omega\text{m}$ であった。参考までに、コンデンサ法による体積抵抗率は $10^{13}\ \Omega\text{m}$ 程度であり、短時間領域における体積抵抗率と対応する関係にある。このことから、数時間程度の短期的な誘電応答の時間範囲内であれば、コンデンサ法による計測結果も参考にして良いことになる。しかしながら、

より長い時間領域まで考慮する場合、表面電位の長期的な減衰が表れる照射終了後数日後のデータを取得して体積抵抗率を議論しなければならない。

電荷蓄積法における電子線照射エネルギーの依存性を明確に示したのは本研究が初めてであり、学会発表等においては大きな反響を呼んだ。今後の展開としては、モデル式の検討が必要であり、現在検討を進めている。

(2) 試料温度の影響

次に、試料厚さ $50\ \mu\text{m}$ の Kapton®200H を用いて、温度の影響を調べた。ペルチェコントローラの温度設定を $233\text{K}(-40^\circ\text{C})$ から $353\text{K}(80^\circ\text{C})$ と温度を変化させて、 $299\text{K}[\text{RT}]$ を含めて6つの場合で計測を行った。図6に実験結果を示す。横軸は電子線照射終了からの時間を、縦軸は負電位を示す。

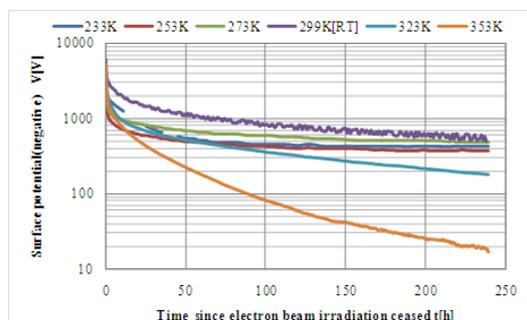


図6 電子線照射後の表面電位履歴（温度の影響）

図から明らかなように、温度を上げて行くにつれて電荷減衰率は大きくなり、帯電は大幅に緩和されていることがわかる。このことは、もし宇宙機で使用されている誘電体材料が帯電した場合、温度を上昇させることにより蓄積電荷を散逸させ帯電電位を下げるができる可能性を示している。対照的に、温度が低い場合は電位緩和率が大幅に減少し、電荷が抜けにくい状況になっている。

図6から各温度における体積抵抗率を計測した結果を図7にまとめる。横軸は試料温度を、縦軸は体積抵抗率を示している。暗電流領域における値と短時間領域における値を示している。図から明らかなように、暗電流領域における体積抵抗率は、温度の上昇に伴い減少している。体積抵抗率の値は $353\text{K}(80^\circ\text{C})$ の場合、室温の値に比べて四分の一にもなっている。また、 $233\text{K}(-40^\circ\text{C})$ の場合は、室温に比べて約8倍大きくなっている。このように誘電体の体積抵抗率（導電率）は温度によって大きく左右される。このことは理論的にも説明が付き、本実験結果も理論解析の結果と良く一致する。一方、短時間領域における体積抵抗率は温度の影響をさほど受けない。体積抵抗率の温度依存性に関しては、極低温下において今回の結果と異なる傾

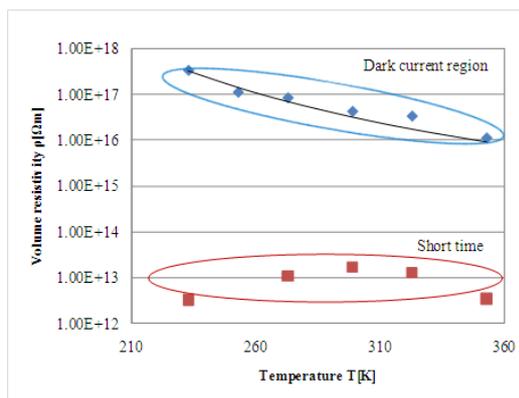


図7 体積抵抗率と温度の関係

向が見られるとの報告もあり、今後は宇宙機が遭遇するような極低温下における計測実験を実施し、より現実に近い温度範囲における誘電体体積抵抗率の変化に関する一般的なモデル構築を進めたい。

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3件）

① R. Watanabe, K. Sakurai, H. Miyake and K. Nitta, Effect of Temperature on Surface Potential of Electron-irradiated Polyimide Film, 12th Spacecraft Charging Technology Conference, 2010年9月21日, Albuquerque, NM, USA.

② 櫻井, 渡邊, 三宅, 仁田, 電荷蓄積法による誘電体体積抵抗率計測におけるパラメータ依存性について, 第7回宇宙環境シンポジウム, 2010年10月20日, 東京国際フォーラム (東京).

③ 櫻井, 江面, 森岡, 渡邊, 誘電体体積抵抗率計測時の温度可変システムについて, 第6回宇宙環境シンポジウム, 2009年10月30日, 北九州国際会議場 (福岡県).

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

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・講師

研究者番号：20308026