

# Estimation of Volume Resistivity of Dielectric Films under Electron Irradiation

Rikio Watanabe (Musashi Inst. of Tech),  
Hiroaki Miyake and Kumi Nitta (JAXA)

## ABSTRACT

A new measurement method for volume resistivity of dielectric material has been tested and compared to the standard ASTM "capacitor method". This is intended for obtaining resistivity values of highly insulated material for spacecraft surface under realistic condition which simulates vacuum and electron beam irradiation. The resistivity value is calculated from exponential decay time constant of surface potential after electron beam irradiation ceased. The results show that the resistivity value from present method is  $10^3$  times larger than that obtained from capacitor method. This indicates that charged dielectrics need much longer field relaxation time which would cause reconsideration of current spacecraft design guideline and charge analysis.

## 1. はじめに

誘電体の体積抵抗率は、誘電体中の電荷移動のしにくさを示す指標であり、抵抗率が高いほど導電率が低く、絶縁性能が高いといえる。しかし、宇宙機に使用する誘電体フィルムについていえば、絶縁性・断熱性の高い材料ほど表面及び内部に蓄積した電荷の移動度が低いことから、一度帯電した場合に、蓄積電荷によって誘起される電界の緩和時間が数日から数ヶ月に及ぶこともある。そのため、特に周期的に荷電粒子帯を通過するような人工衛星等においては、適切な体積抵抗率を有する誘電体材料を使用する必要がある。このように、体積抵抗率は人工衛星設計における誘電体材料選定時の重要なパラメータであるだけでなく、帯電解析を行う数値シミュレーションソフトにとっても重要な入力パラメータの一つとなっている。

体積抵抗率値の計測に関しては、ASTM<sup>1)</sup>や JIS<sup>2)</sup>によって規定された標準的な計測法が存在し、現在でも誘電体体積抵抗率の標準値として利用されている。この方法は「コンデンサ法」とも呼ばれ、誘電体試料を電極で挟み、高電圧(500V)を印加し、数分後の電流値によってオームの法則から抵抗値を算出し、体積抵抗率に変換するものである。人工衛星における誘電体材料の使用形態からすると、コンデンサ法は直流電圧印加であるため、宇宙機が遭遇する真空中での電子線照射環境を模擬していない。また、直流印加後数分では、未だ誘電体材料中には分極電流が主流であり、十分時間が経過した後の暗電流による抵抗計測が誘電体本来の物性を表している。

これらに対し、FredericksonやDennisonらは、真空チャンバ内で誘電体試料に電子線を照射し、蓄積電荷によって誘起される表面電位の時間履歴を計測し、その時間変化から体積抵抗率を計測する手法を考案した<sup>3)4)</sup>。以降これを電荷蓄積法(Charge Storage Method)と呼ぶ。電荷蓄積法によって計測された体積抵抗率の値はコンデンサ法による値より $10^2 \sim 10^4$ 程度大きくなるとの報告もある。もし、より大きな体積抵抗率を人工衛星の設計や帯電解

析に用いたとすると、帯電により誘起された電界の緩和時間もより長くなるため、これまでの設計に大幅な改定が必要になってくる。そこで、本研究では、人工衛星によく用いられているポリイミド系フィルムの体積抵抗率を電荷蓄積法により求め、計測値の妥当性を検討する。

## 2. 電荷蓄積法

### 2.1 計測装置

Figure 1に電荷蓄積法による体積抵抗率計測システムの概念図を示す。真空チャンバ内に設置された誘電体試料の開放面に電子線が照射され、表面に電荷が蓄積し、電位を生ずる。その表面電位を表面電位計(Trek, Model 341B, 20kV)で計測する。なお、表面電位計のプローブは真空チャンバ内に設置されており、電子線照射時はチャンバ壁面へ待避しており、電子線照射終了に合わせて試料上面に移動する。計測値はオシロスコープ(Tektronix, 1GHz)でサンプリング・データ蓄積される。試料背面は電極を通して試料を通過する微小電流を計測している。

### 2.2 表面電荷減衰と体積抵抗率

得られた表面電位の履歴から体積抵抗率を求める。最

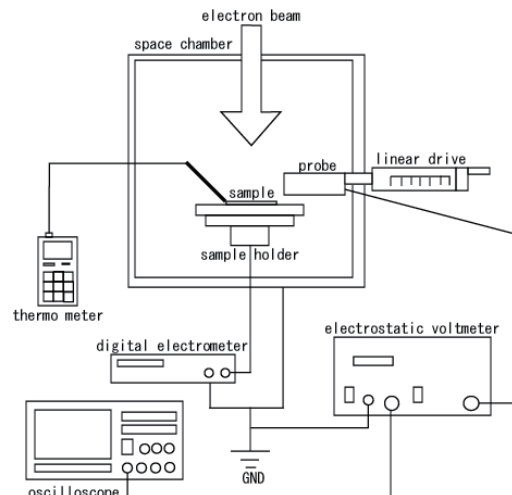


Fig. 1. Charge storage method system configuration

も簡単な表面電位減衰のモデルは、指数減衰モデルである。これは、指数減衰する電位  $V(t)$  V に対して、その減衰時定数  $\tau_d$  s を求めるものである。初期電位を  $V_0$  V とすると、電位の時間変化は式 (1) であらわされる。

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

測定された時定数と誘電率  $\epsilon$  F/m から、体積抵抗率  $\rho$   $\Omega\text{m}$  は式 (2) によって算出される。

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

この指数減衰モデルは電荷が誘電体内をドリフトする、いわゆる暗電流が流れる場合を想定しており、電子線照射直後の分極電流が支配的な状態では適用できない。従って、表面電位の計測は最低でも 1 週間程続ける必要がある。帯電した誘電体表面電位の減衰に関する詳細な物理モデルについては、文献(4)等を参照されたい。現状では、電位の時間履歴を両対数グラフにおいて確認し、指数減衰モデルが適用可能な時間帯における計測点から式 (1) を構築し、減衰時定数を求めている。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 試験条件

対象試料はポリイミド系フィルム 25 $\mu\text{m}$  であり、電子エネルギーは 10keV、電流は 5.5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  とした。真空度  $2.6 \times 10^{-4}$  Pa において 2 分間の電子線照射を行った後、表面電位の計測を開始した。

#### 3.2 表面電位の時間履歴

Figure 2(a)(b)に表面電位の時間履歴を示す。Figure 2(a)は両軸共に線形、同(b)は両対数で表記している。また、十分時間が経過し、指数減衰モデルによる近似曲線も図中に示した。

計測開始時点における表面電位は 5,010V であるが、3 分ほどで 3kV 台に減衰している。電位の急激な減衰は約 1 日(86, 400s)程続き、その後は緩やかに減少している。両対数グラフを見ると、3,000s までの領域、3,000-200,000s までの領域、200,000s 以降の領域と 3 つの領域にわけることができる。最後の 200,000s 以降の領域が暗電流領域であり、この時間帯における表面電位値から指数減衰の式(1)を近似すると、図中の近似曲線  $V(t) = 1211e^{-9.44 \times 10^{-7} t}$  となる。試料の比誘電率は 3.4 であるため、体積抵抗率を計算すると、 $3.1 \times 10^{20} \Omega\text{cm}$  となる。コンデンサ法(ASTM)による該当試料の体積抵抗率は  $1.5 \times 10^{17} \Omega\text{cm}$  であるから、電荷蓄積法の結果はコンデンサ法の結果より、約  $10^3$  倍大きくなったことになる。Dennison らの報告によれば、誘電体試料においては  $10^2 \sim 10^4$  程度大きくなるとのことで、本試験の結果はオーダ一的に Dennison らの報告と一致する。

では、千倍も大きくなった体積抵抗率をどう利用するかということであるが、もしこの値を人工衛星設計や帯電解析ソフトに利用した場合、帯電緩和時間が大幅に延長

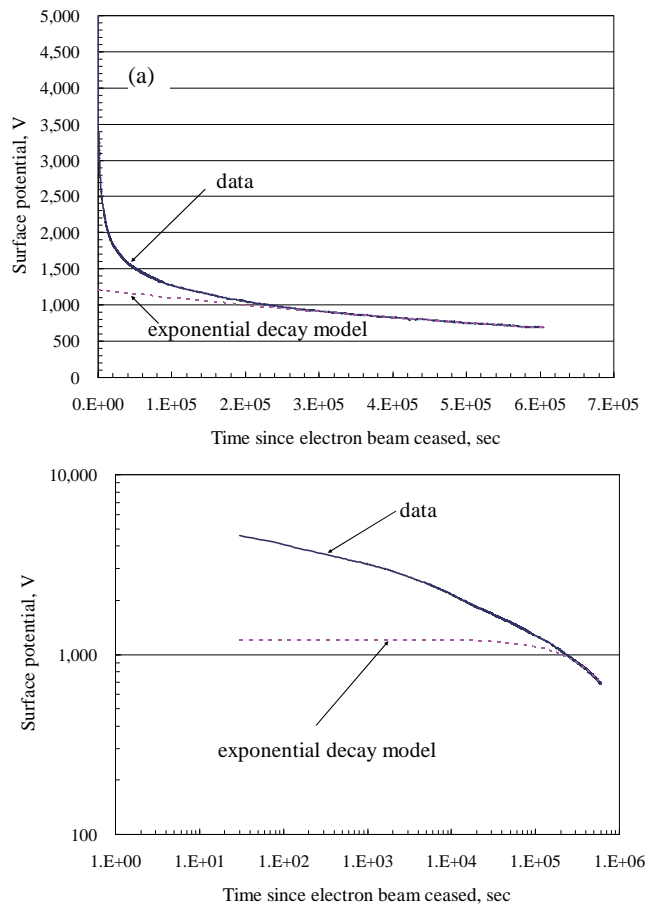


Fig. 2. Time history of surface potential. (a)linear plot, (b)double log plot

され、これまでの設計・解析手法の大幅な見直しが必要になってくる。ポリイミド系フィルムは現在人工衛星用に多用されている材料であり、これらの材料の使用に対して適切な根拠を与える必要がある。

#### 4. まとめ

現在宇宙機用に多用されているポリイミド系フィルムの体積抵抗率に関して、従来のコンデンサ法に代わる電荷蓄積法によって、測定を行った。その結果、コンデンサ法に対して 1,000 倍大きい体積抵抗率を得た。電荷蓄積法による結果をどう扱うかは、今後議論の余地があり、さらなる測定結果が必要となる。

なお、この研究は「JAXA 宇宙機設計標準 電気系分科会 帯電・放電ワーキンググループ (WG1)」の調査事項の一部として行われた。

#### 5. 参考文献

- (1) ASTM D-257-99, 1999.
- (2) JIS K6911
- (3) A.R. Frederickson and J.R. Dennison, IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 50, No. 6, 2003.
- (4) J.R. Dennison, et. al., IEEE Trans. on Plasma Sci., Vol. 34, No. 5, 2006.