

# 誘電体体積抵抗率計測と帯電評価への適用

渡邊力夫, 三宅弘晃 (武蔵工業大学)  
仁田工美 (JAXA)

## 1. 研究背景および目的

現在の我々の生活に、人工衛星等の宇宙機から得られる気象、GPS 等の様々なデータは欠かすことが出来ない。しかし、宇宙機はプラズマ環境及び放射線環境下で帯電・放電し、それが原因で搭載機器の故障や全損事故を引き起こすことが知られている[1]。

よって、宇宙機は設計段階から綿密に帯電解析を行う必要がある。宇宙機の帯電解析を行う際に重要となるパラメータに、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熱制御の目的で用いられる材料であり、体積抵抗率は物質内部の電荷移動の起こりにくさを表す値である。この体積抵抗率の高い誘電体ほど高い絶縁性を持つが、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緩和時間が長くなる。よって、体積抵抗率の値によって蓄積電荷量が大きく左右される。このように、誘電体の体積抵抗率は、人工衛星設計時の帯電解析や材料選定に際し重要なパラメータといえる。

従来、宇宙機設計時の帯電解析には、JIS[2]やASTM[3]に規定されたコンデンサ法と呼ばれる計測法で求めた体積抵抗率を利用してきた。コンデンサ法は大気中で試料に直流高電圧を印加し、数分後に流れる微小電流を測定しオームの法則により体積抵抗率を求める。しかし、実際に宇宙空間で宇宙機が曝される高電界下での帯電状況では、オームの法則が成立しないと考えられる。

そこで Frederickson, Denison らは真空チャンバと電子銃を用いて模擬的に宇宙空間での帯電状況を作り、電荷の蓄積により誘起される試料表面電位の減衰時定数から体積抵抗率を計測する手法を考案した[4]-[6]。この手法を電荷蓄積法(Charge storage method)と呼ぶ。Denison らの報告によると、電荷蓄積法によって計測したポリイミドフィルムの体積抵抗率は、コンデンサ法のそれと比較して  $10^2 \sim 10^4$  程度大きくなるとある。体積抵抗率の増加は、蓄積電荷の移動度を低下させるので、蓄積電荷によって誘起される電界の緩和時間が長期化する。仮に、電荷蓄積法で得られた値が宇宙機用誘電体の宇宙環境下での体積抵抗率として適しているのであれば、従来のコンデンサ法に依っていたこれまでの宇宙機の設計におい

て、電荷の蓄積に起因するリスクを過小評価していたことになる。従って、もし電荷蓄積法による体積抵抗率を採用するのであれば、現状の帯電解析・誘電体材料選定を根本から見直す必要がある。

本研究では電荷蓄積法を用いて誘電体の体積抵抗率を測定し、彼らの報告にある  $10^2 \sim 10^4$  倍の値が得られるかを調べる。また、得られた体積抵抗率値の宇宙機帯電設計への適用について考察を行う。

## 2. 電荷蓄積法による体積抵抗率の測定

電荷蓄積法では、まず真空チャンバ内で測定対象となる試料の表面に電子線を照射して帯電させる。帯電した試料には、その表面に電位が誘起されるので、電子線照射終了とともに表面電位計によって、表面電位を計測する。そして、表面電位の減衰時定数から体積抵抗率を求める。Fig.1 に電荷蓄積法による体積抵抗率測定システムの概略図を示す。体積抵

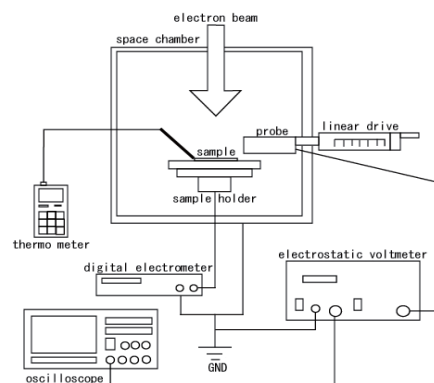


Fig.1 System configuration for charge storage method

抗率計測システムは、表面電位計、微小電流計、真空チャンバ、電子銃、試料固定テーブル、真空チャンバ内で表面電位計の測定プローブを移動させるためのリニアドライブ、熱電対で構成されている。

Fig.2 に表面電位の減衰モデルとして採用した指数減衰モデルを示す。これは、指数減衰していく表面電位に対し減衰時定数  $\tau_d, s$  を求め、求めた時定数と試料の誘電率の関係から体積抵抗率を算出するものである。

指数減衰していく表面電位を  $V(t)$ 、 $V$  とすると表面電位の時間変化は

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

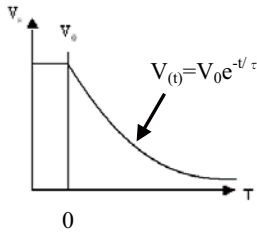


Fig.2 Exponential decay model of surface potential

で表される。  $V_0(t)$  は初期電位である。この(1)式中の  $\tau_d$  が減衰時定数であり、

$$\tau_d = \epsilon / \kappa \quad (2)$$

で表される。ここで、 $\epsilon$  と  $\kappa$  はそれぞれ試料の誘電率 F/m と導電率  $1/\Omega\text{m}$  を表している。この導電率  $\kappa$   $1/\Omega\text{m}$  と体積抵抗率  $\rho$   $\Omega\text{m}$  の

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

の関係から体積抵抗率を算出する。

表面電位の減衰は式(1)に表すように指数減衰モデルを利用していることから、表面電位の時間履歴を片対数グラフにプロットすると、指数減衰モデルの適用可能区間が直線になる。実験は、表面電位の計測値を片対数グラフでモニターしながら、1週間以上実験を続ける。そして、片対数グラフで直線となっている領域に対し、指数減衰モデルにより減衰時定数を算出し、体積抵抗率を計算する。

### 2.1 試料固定テーブル

真空チャンバ内で試料を保持するために Fig.3 に示すような試料固定テーブルを作成した。材質はアルミニウムとし、電極周りの絶縁材料にはテフロン®を使用した。全体の寸法は 80×80×30 である。試料は 40×40 とし、蒸着面を  $\phi 20$  残すので電極の寸法は  $\phi 17$  とした。そして、絶縁材料と電極はそれぞれはめ合いで固定した。その完成図を Fig.4 に示す。



Fig.3 Sample holder Fig.4 Sample holder (photo)

### 2.2 表面電位計・微少電流計

表面電位計は、Fig.5 に示すトレック製・高圧高速表面電位計 Model 341B を用いる。そして微少電流計には、Fig.6 示す株式会社アドバンテスト製 TR8652 デジタル・エレクトロメータを用いている。



Fig.5 Electrostatic voltmeter Fig.6 Digital electrometer

### 2.3 真空チャンバ

Table.1 に真空チャンバの仕様を示す。この真空チャンバの最高到達圧力(真空度)は  $10^{-6}$  Pa 台であり、これにより宇宙空間を模擬している。真空チャンバの中にはセンサ等を設置することが出来るステージがあり、このステージ上に試料固定テーブルを設置している。このステージには最高温度  $300^{\circ}\text{C}$  のヒータが設置されている。また、この真空チャンバの側面には多数のフランジが設置してあり、それらを用いて電子銃や表面電位計の測定プローブ等が取り付けられている。

Table 1 Specifications of vacuum chamber

真空チャンバ	
内径 mm	400
深さ mm	480
到達圧力 Pa	$10^{-6}$
試料加熱ステージ	
最高温度 $^{\circ}\text{C}$	300
常用温度 $^{\circ}\text{C}$	150
ステージ直径 mm	150
昇降距離 mm	200

### 2.4 電子銃

Table 2 に株式会社日本ビーテック製電子銃仕様を示す。

Table 2 Specifications of electron gun

絶縁耐圧, kV	DC50
耐真空度, Pa	$10^{-8}$
耐ベーキング温度, $^{\circ}\text{C}$	230
照射エネルギー, keV, Max	50

この電子銃は  $10^{-4}$  Pa より高い真空度で照射可能で、照射エネルギーは最大で 50 keV である。真空チャンバの中のステージに試料を固定した Fig. 4 をのせ真空排気し、電子銃から電子線を試料に照射し、試料を帯電させ、計測を行う。

### 2.5 試料及び形状

対象となる試料はポリイミド系フィルムであり、その高い耐熱、耐寒性や電気絶縁性を持つ性質から、宇宙機などにも幅広く利用されている。

試料形状は縦 40mm×横 40mm×厚さ 25 $\mu$ m で片面をアルミ蒸着し、その面を試料固定テーブルの電極に接触させている。比誘電率は 3.4 F/m で、従来までの体積抵抗率測定法であるコンデンサ法により求められた体積抵抗率は  $1 \times 10^{15} \Omega\text{m}$  (JIS), もしくは  $1.5 \times 10^{15} \Omega\text{m}$  (ASTM) である。

### 3. 体積抵抗率測定試験

#### 3.1 試験条件

試験条件を Table 3 に示す。

試料	ポリイミド系フィルム
厚さ $\mu\text{m}$	25
電子線照射エネルギー keV	10 or 20
照射時間 min	1
真空度 Pa	$10^{-4}$
測定期間 s	604800(1week) or 12009600(2weeks)

#### 3.2 試験結果及び考察

Figure 7 および Fig. 8 に電子線の照射エネルギーを変化させた際の試料の表面電位の時間履歴を示す。Fig. 7 は両軸共に線形で表記し、Fig. 8 は片対数グラフで表記している。横軸は電子線照射終了後の時間で、表面電位計プローブを試料上面に移動し終わった時点をも 0 秒としている。縦軸は試料表面上の負電位である。電子線終了直後に負電位は最大となり、その後減衰（電位値としては増加）している。電子線照射直後の試料表面電位は照射エネルギーが 10 keV の場合は -3950 V で、照射エネルギーが 20 keV の場合は -4954 V である。どちらも電子線照射終了後に負の表

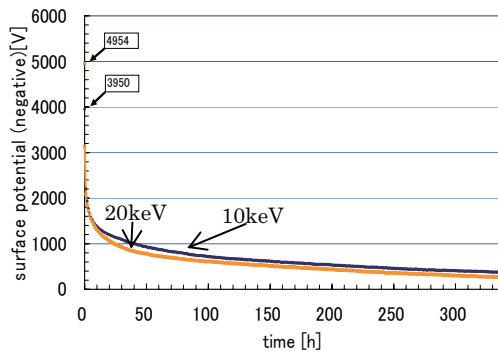


Fig. 7 Time histories of surface potential (linear

面電位が急速に減衰し、10keV 照射の場合で約 200s, 20keV の場合で約 60s で 1000V 減衰している。どちらの場合も急速な減衰がおよそ 1 日継続し、その後は緩やかな減衰へと変化していることが見てとれる。また、初期電位は 20keV 照射時の方が高く誘起されているが、減衰も大きいことが見てとれる。

ここで、片対数でプロットされた Fig.8 を見ると、照射終了後約 100 時間以降からは減衰曲線が直線となり、この領域内において指数減衰モデルが適用

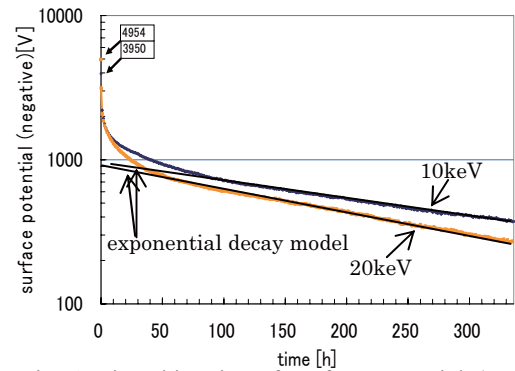


Fig. 8 Time histories of surface potential (semi logarithmic plot)

可能であるといえる。別の言い方をすれば、照射終了直後から 336 時間後までの間で、唯一の体積抵抗率を持っているわけではなく、照射終了から 100 時間後までは分極電流が流れる過渡的な状態にあり、電位の減衰は急激である。

体積抵抗率の値を計算するうえで、算定期間の影響を見るために、100 時間以降 168 時間（一週間）までと 100 時間以降 336 時間（二週間）までの二区間にそれぞれ指数減衰モデルを近似し、体積抵抗率を算出した。Table 4 にその結果を示す。

Table 4 Volume resistivity

照射エネルギー [keV]	体積抵抗率 [ $\Omega\text{m}$ ]	
	100h以降168hまで	100以降336hまで
10	$4.3 \times 10^{16}$	$4.5 \times 10^{16}$
20	$3.4 \times 10^{16}$	$3.3 \times 10^{16}$

この値は従来の JIS や ASTM に規定されたコンデンサ法により求められた値 ( $1.0 \times 10^{15} \Omega\text{m}$ ) と比較すると数十倍大きくなっているが、Dennison らの報告にあるような  $10^2 \sim 10^4$  倍にはなっていない。彼らの論文には詳細な計測結果の開示も少なく、比較考察はできない。

では、この値を宇宙機の帯電設計に用いる場合は、どのような扱いにしたらよいか。一つの考えとして、今回の結果における 100 時間以降の領域（暗電流領域）の体積抵抗率を適用することが挙げられる。暗電流領域の値は電子線被照射物質の値であり、これまでのところ、計測期間や照射エネルギーによって大きな変動はない。しかし、コンデンサ法によって得られた値の数十倍という大きさから、一度蓄積した電荷は計算上、これまでより長い時間試料内に停滞することとなる。安全側の設計にはなるであろうが、帯電の影響を過度に見積もることにもなりかねない。

もう一つの考え方として、より短時間の表面電位減衰に着目する方法がある。これは、地球周回衛星

(LEO, PEO) が周期的に帯電領域を通過することを考えると、より現実的であるといえる。すなわち、例えば極軌道衛星に関していえば、その周期は 90 分から数時間であり、電子線被曝の可能性が高い極域を通過するのも、その周期である。であるならば、上述の減衰曲線において、照射終了後数時間までの電荷減衰特性に着目して体積抵抗率を定めることも可能であるといえる。ただ、この期間は過渡的な反応状態であり、試料の違いや照射エネルギーの違いの影響もあると考えられる。また、周期的な照射・電荷蓄積とその減衰といった状態で、短時間の減衰が常に同じである保証はない。従って、短時間領域の減衰特性に基づいて減衰時定数および体積抵抗率を算出するのは、このような変動要因を加味した上で行うべきである。

Figure 9 に 20 keV 照射の場合の結果を再掲し、短時間領域における指数近似区間の例を示した。

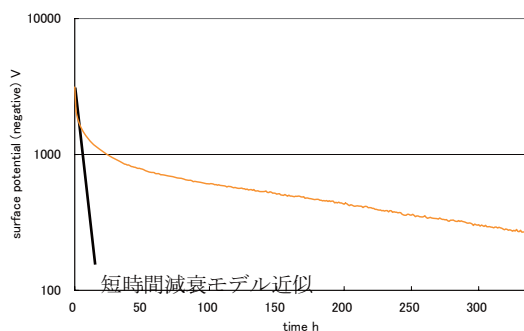


Fig.9 Short term potential decay model

また、Table 5 に短時間領域における体積抵抗率と長時間領域（暗電流領域）の体積抵抗率の比較を示した。

Table 5 Comparison of volume resistivity

Irradiation, keV	Short term, $\Omega\text{m}$	Long term, $\Omega\text{m}$
10	$3.6 \times 10^{14}$	$4.3 \times 10^{16}$
20	$3.4 \times 10^{14}$	$3.4 \times 10^{16}$

Table 5 よりわかることは、短時間領域における体積抵抗率は長期間領域に対して 2 桁小さくなり、 $10^{14} \Omega\text{m}$  のオーダーとなることである。この値はコンデンサ法による値よりも 1 桁小さい。これが意味するところは、電子線照射終了直後から表面電位の減衰は急激であり、数時間までの時定数としては短くなることである。長時間領域においては、前述の通り暗電流のみが流れる領域であり電位の減衰は緩慢で時定数も大きい（体積抵抗率も大きい）。よって、短時間領域に限っていえば、コンデンサ法によって得られた体積抵抗率の値は適用可能であるといえる。しかし、この傾向が他の誘電体材料に当てはまるかど

うかや、試料厚さと照射エネルギーとの関係に依存しないかということは未だに明らかにされてはおらず、今後慎重に実験および解析を行っていく必要がある。

#### 4. まとめ

電荷蓄積法を用いた体積抵抗率測定システムを構築し、体積抵抗率を測定した。その結果、従来のコンデンサ法により測定された値に比較して数十倍大きい値を得た。これは既報の結果ほど大きくはなく、今後の比較検討を要するといえる。また、宇宙機の帯電解析およびシミュレーションに対する体積抵抗率の適用を考えると、長時間領域の値よりはむしろ、短時間の減衰特性から算出した体積抵抗率を採用した方が実現象に即しているとも考えられる。事実、短時間領域の体積抵抗率はコンデンサ法による値より小さく、短時間領域に限っていえば、コンデンサ法による値を使用しても良いといってもよいが、実験データの蓄積により詳細に減衰特性が明らかにされない限りは、安易に短時間領域の値を使用すべきではないと考える。

現在の実験装置では、一回の実験に 1 週間以上という期間を要することから、実験の効率が大きな課題といえる。現在の測定システムに用いている試料固定テーブルは、一度に 1 枚の試料しか保持することが出来ないため一回の実験で得られるデータは 1 つである。この問題を解決するため、現在は一度に 3 枚の試料を保持し、同時に計測することの出来る装置を製作中である。この新しい装置は、ペルチェ素子を備えることで試料の温度をコントロールすることが出来る。これにより、一回の実験の効率を上げるのみならず、試料に  $-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$  にわたる温度のバリエーションを与えることで、より宇宙環境に即したデータを得られると考えられる。

#### 5. 参考文献

- [1] 五家建夫, 宇宙環境リスク辞典, 2006.
- [2] JIS C2139.
- [3] ASTM D257-99, 2005.
- [4] A.R.Frederickson and J.R.Dennison, IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 50, No. 6, 2003.
- [5] J.R.Dennison, et. al., IEEE Trans. on Plasma Sci., Vol. 34, No. 5, 2006.
- [6] P. Swaminathan, et. al., "Comparison of classical and charge storage method for determining conductivity of thin film insulators", Proc. of 8<sup>th</sup> Spacecraft Charging Technology Conference, October, 2003.