

# ポリイミドフィルムの表面電位履歴に対する電子線繰り返し照射の影響

東京都市大学 渡邊 力夫 准教授, 佐藤 正悟

## 概要

Effect of cyclic electron irradiation on dielectric film for spacecraft is investigated experimentally because it may cause cumulative charge deposition onto the film surface. 60sec and 30sec irradiation time, 90 min and 30 min interval 40keV and 20keV energy, irradiation are tested and the result indicates that the surface potential does not fall significantly as we expected. Results of volume resistivities just after each irradiation show that resistivity is unchanged during multiple irradiations and it is lower in the case of 30 min interval and 40keV energy case.

## 1 序論

宇宙機表面材料は、電子や陽子などの宇宙放射線によって充電され、絶縁破壊に起因する静電放電 (ESD) は、軌道上の宇宙船の故障や異常が発生す。我々の研究室では真空条件下で電子線を照射した後に誘電体膜の表面電位を測定するシステムある。[1]この表面電位履歴から体積抵抗率を算出する。一回の電子線照射の理論及び実験は多くなされており[2], フレデリクソン[3]らによって宇宙機材料への応用が行われてきた。例えばポリイミドフィルム上の表面電位は電子線照射後-10kV まで低下し、それが分極電流によって急速に回復する。分極電流による電位の回復が終わると減衰は数週間かけて穏やかに回復する。表面電位の時間変化は電子照射エネルギー、フラックス、温度などの照射条件や環境条件に大きく依存する。また誘電体フィルムの種類によっても異なる。

宇宙機は極冠域または SAA 領域の様に高フラックス領域を通過するが、地球を周回する宇宙機は電子や陽子などの周期的に荷電粒子の衝突の影響を受ける。その間隔は高度、傾斜、離心率などの軌道パラメータに依存する。そこで宇宙機表面用誘電材料は電子線の繰り返し照射の影響を受け、表面上が高電位になる可能性がある。典型的な例として環境観測技術衛星「みどり II」(ADEOS-II)のように太陽路地パドルの電源ケーブルで ESD によって損傷を受ける可能性がある。[4]このように周期的な電子線照射の影響を考慮した宇宙機の帯電解析を行う必要がある。そこで本研究では、繰り返し照射が誘電体の表面電位に与える影響を明らかにするために、誘電体フィルム (Kapton®) に電子線繰り返し照射の実験を行った。

## 2 計測システム

Fig.1に計測システムの概略図を示す。

表面電位計測の流れを説明すると、まず真空チャンバー内の試料台に計測試料 (カプトン®) 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。

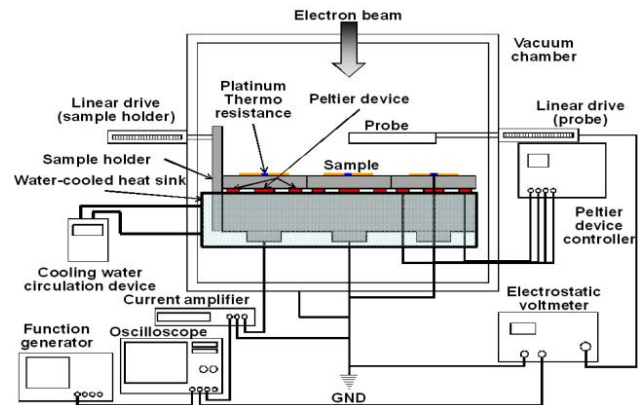


Fig.1 Measurement system

## 3 電荷蓄積法

電荷蓄積法とは Frederickson, Dennison [5]らが考案した実験方法で、チャンバーや電子銃を用いて宇宙空間を模擬して行われる。電子線照射後、時間が経過すると減衰が一定になり、その点から後のことを暗電流領域と呼んでいる。この点から指数関数で近似することができ、表面電位を  $V_s$  とすれば

$$V_s = V_0 \exp^{-t/\tau_d} \quad (1)$$

で表すことができる。この(1)式と指数関数で近似した式を比較することで減衰時定数  $\tau_d$  [s] を求めることができ、

$$\tau_d = \epsilon/\kappa, \quad \rho = 1/\kappa = \tau_d/\epsilon \quad (2)$$

の式に数値を代入することで体積抵抗率 [ $\Omega\text{m}$ ] を求めることができる。ここで  $\epsilon$  [F/m] は試料の誘電率、 $\kappa$  [1/ $\Omega$ ] は導電率であり、この式は暗電流領域でのみ用いることができる。

短時間領域では、表面電位を  $V$ 、初期電位を  $V_0$  とすれば、

$$V = V_0 [\epsilon_r^\infty + (1 - \epsilon_r^\infty) \exp^{-t/\tau_p}]^{-1} \quad (3)$$

で表すことができる。分極時定数  $\tau_p$  [s] から体積抵抗率 [ $\Omega\text{m}$ ] を求める。今回は計測時間が短いため(3)式を用いて体積抵抗率の取得を行う。

## 4 実験結果

### 4.1 実験条件

試料は一般的に宇宙機表面材料に用いるポリイミドフィルム（東レ・デュポンの Kapton®200V）を使用した。

Table.1 に実験条件を示す。

Table.1 Experimental conditions

Experiment No.	1	2	3	4	5	6
Sample thickness [ $\mu\text{m}$ ]	50	50	50	50	50	50
Irradiation	Interval [min]	30	30	30	90	90
	Energy [keV]	20	20	40	20	20
	Time [sec]	60	30	30	60	30
Current density [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	65	65	151	65	65	151
Vacuum level [Pa]	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$

電子電流は実際の宇宙環境に比べて相対的に高いので、電子線照射時間は 30, 60 秒に設定した。

### 4.2 表面電位履歴

30 分の照射間隔は非現実的ではあるが迅速な繰り返し照射の影響を調べるために、30 分間隔と設定した。90 分の照射間隔は LEO の軌道周期の環境を模擬して 90 分間隔を設定した。試料により多い線量、高いエネルギーを与える為に 60 秒、40keV 照射の実験を行った。電子線照射の影響でフィルムの高速電荷緩和が完全に成されていないことので照射の回数が進むにつれて電位が低下していくと予想した。Fig.1 は間隔 30 分の結果である。Fig.2 は間隔 90 分の結果である。横軸は経過時間[h]、縦軸は表面電位[-V]でグラフでは正側が負になっている。

繰り返し照射の影響で表面電位は低下すると予想したが、カプトンフィルムでは低下し続ける事はなかった。この結果は体積抵抗率が減少し、電荷緩和が向上する RIC (放射線誘起伝導) の効果が関連していると考えた。しかし、照射エネルギー 40keV での実験においては、微量な低下が見られたが、これも低下し続ける事はなかった。これはフィルムの表面で電荷の緩和が十分に成されていなかった事が原因と考えた。また 20keV 照射では毎回の電位の上昇は 4kV 程であるが、40keV の照射では 5~6kV とより急激に上昇した事がわかる。これは飛程が深くなり、より電荷の緩和が早くなった可能性があると考えた。これらの事からカプトンフィルムは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った。カプトンフィルムよりも体積抵抗率の低いものでも実験を行う必要がある。

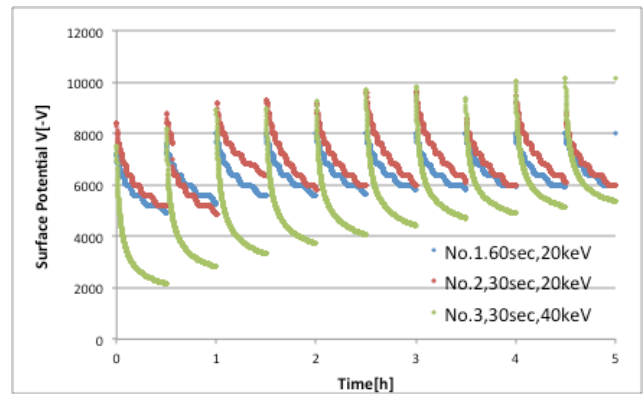


Fig.1 Time histories of surface potential with cyclic electron irradiation(30 min interval)

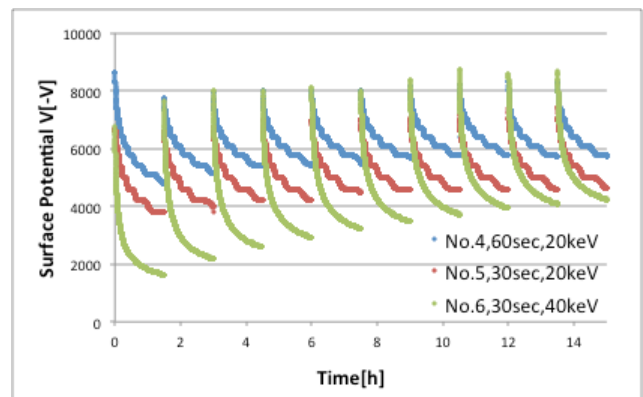


Fig.2 Time histories of surface potential with cyclic electron irradiation(90 min interval)

### 4.3 体積抵抗率

体積抵抗率の算出は、分極電流が支配的である短時間領域を計測したので、分極減衰モデルを用いた。Fig. 5 に各照射毎の体積抵抗率の変動を示す。縦軸は対数目盛りで体積抵抗率[ $\Omega\text{m}$ ]、横軸は各照射回数である。ただ、短時間領域で用いる分極減衰モデルでは電極電流及び RIC の効果による電荷緩和の影響で体積抵抗率は低いと算出される。結果は体積抵抗率に大きな変化がないというカプトンフィルムの重要な特徴が表れた。また、照射時間は体積抵抗率に大きな影響はない。照射間隔が長くなると体積抵抗率は高くなる。これは長い時間、計測する事ができるので電位の上昇が緩やかになる領域まで計測したためであると考えた。さらに照射エネルギーが高くなると体積抵抗率は低下した。これは電位の上昇がより急激になったことが原因であると考えた。

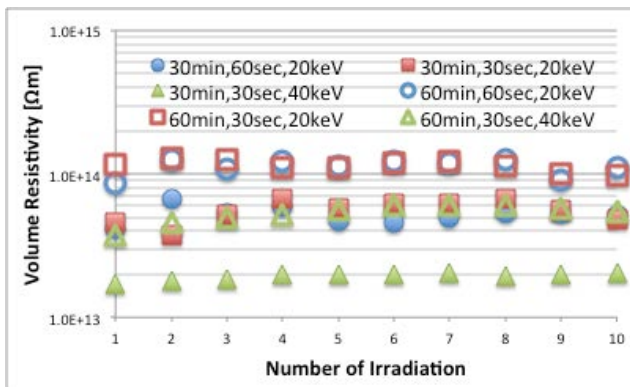


Fig.5 Volume resistivities at each radiation

## 5 結論

カプトンフィルムの表面電位に周期的電子線照射効果を真空状態で実験的な検討を行った。繰り返し照射の間隔は典型的な低軌道の周期である 90 分とより急速な場合（軌道上の宇宙機としては現実的ではない。）として 30 分でも行った。照射時間は 60 秒と 30 秒、照射エネルギーは 20keV と 40keV で実験を行った。表面電位は -10kV から -7kV まで低下するが、回数毎に低下して行く事はなかった。エネルギーが高くなる事で電荷の緩和はより急激になった。体積抵抗率においても照射毎に大きな変化は起きなかった。体積抵抗率は照射間隔が長くなると大きくなり、照射エネルギーが高くなると低くなる。照射時間については大きな影響は見られなかった。これらの結果はカプトンフィルムの優れた抗放射線特性が起因となっていると考えた。よって他の誘電体材料についても同様の実験を行う必要がある。また低温環境などでの実験も行う。

## 6 参考文献

- [1] Watanabe, R., Sakurai, K., Miyake, H. and Nitta, K., "Effect of Temperature on Surface Potential of Electron-irradiated Polyimide Film," Proc. 10th Spacecraft Charging Technology Conf., Albuquerque, NM, 20-24 September, 2010.
- [2] e.g. B. Gross: "Radiation-induced Charge Storage and Polarization Effects", in : G.M. Sessler (Ed.), "Electrets", Springer, Berlin, 1980.
- [3] A.R. Frederickson and J.R. Dennison: "Measurement of Conductivity and Charge Storage in Insulators Related to Spacecraft Charging", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 50, No. 6, pp. 24-27, 2003.
- [4] S. Kawakita, et. al., "Investigation of an Operational Anomaly of the ADEOS-II Satellite," Proc. 9th Spacecraft Charging Technology Conf., Tsukuba, Japan, 4-8 April, 2005.
- [5] John R. Dennison et al., "Methods for High Resistivity Measurements Related to Spacecraft Charging", Plasma Science, 2006, Vol.34, pp.2191-2203