

電子ビーム照射による帯電計測から宇宙機表面材料の物性評価について (II)

Electrical Properties of Satellite Surface Materials Evaluated from Electron-Beam Charging Measurements (II)

藤井 治久

Haruhisa Fujii

奈良工業高等専門学校 電気工学科

Nara National College of Technology, Department of Electrical Engineering

fujii@elec.nara-k.ac.jp

奥村 哲平・高橋 真人

Teppei Okumura and Masato Takahashi

宇宙航空研究開発機構 研究開発本部

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Aerospace Research and Development Directorate

1. はじめに

地球近傍の宇宙環境には高エネルギー荷電粒子やプラズマが存在し、軌道に投入された宇宙機は、それらとの相互作用により帯電放電現象を来すことが知られている⁽¹⁻³⁾。帯電放電現象が発生すると宇宙機は種々の悪影響を受けるため、この帯電放電現象は宇宙機の信頼性にとって大きな脅威になっている。そのため、宇宙機の開発においては、その帯電放電現象を如何に防止・抑制するかということが重要な課題となっている。そこで、宇宙環境の中で宇宙機の帯電状況を予測するための帯電解析手法の開発が精力的になされ、わが国では、NASA の NASCAP・NASCAP-2K⁽⁴⁾ や ESA の SPIS⁽⁵⁾ に対抗し、独自の帯電解析プログラム MUSCAT (Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool) が九州工業大学 趙教授らによって開発され⁽⁶⁾ 運用されている。この MUSCAT プログラムには、各種表面材料の体積抵抗率や2次電子放出係数、光電子放出係数、RIC (Radiation-Induced Conductivity)、光電導度などの物性値をデフォルトとして入力しておく必要があるが、現時点では必ずしも十分な物性値が入力されている状況ではない。そこで、筆者らがこれまで行ってきた電子ビーム照射による各種表面材料の帯電特性データ (照射中並びに照射後) から、電気的物性値として重要な体積抵抗率や2次電子放出係数を導出し、MUSCAT プログラムに反映させることを目的として研究を行っている⁽⁷⁾。ここでは、その一環として、前報⁽⁸⁾に引き続き、代表的な表面材料である 50 μm 厚ポリイミドフィルムを対象に検討した結果について述べる。

2. 実験方法

本研究に用いた実験系の概略を図1に示す。

試料を真空チャンバに取り付けた後、真空チャンバをロータリーポンプとターボ分子ポンプで $1.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 以下に真空引きした。その状態を約半日保持した後、エネルギー E 、電流密度 J_b の電子ビームを60分間試料に照射した。

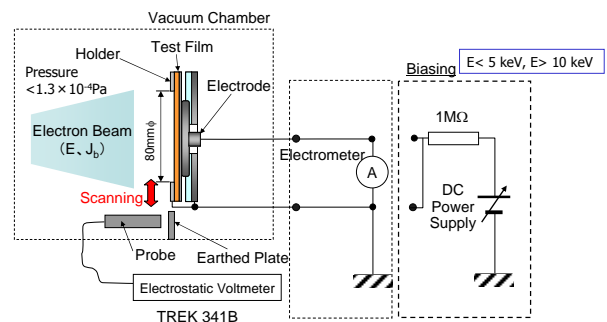


図1 実験系の概略

電子ビーム照射中および照射停止後の試料の表面電位は、非接触表面電位計 (TREK 341B) に接続されたプローブ (TREK 3450E) を、直線運動導入機により、試料表面上 3~5mm の距離を保って挿引し計測した。また、試料裏面の金属蒸着層から電極を通して流れる電流 $I(t)$ を、内部抵抗 $1\text{M}\Omega$ のペンレコーダ (横河電機 LR-8100) により計測した。

なお、本実験においては、 $E \leq 20\text{keV}$ の電子ビーム照射による帯電計測を行った。前報⁽⁸⁾で述べたように、通常2次電子放出係数が1になるエネルギー E_{II} は 5keV 以下に存在すると考えられるので、 $E < 5\text{keV}$ の場合、電子加速電圧を -5kV 固定とし、直流安定化電源 (菊水電子 PAD 1K-0.2L) により試料全体を負の電位 V_b にバイアスし電子のエネルギーを減速して試料に照射した。一方、 $E > 10\text{keV}$ の場合は、電子加速電圧を一

10kV 固定とし、試料全体を正にバイアスすることにより電子を加速して試料に照射した。なお、これらバイアス時には、電流計測は行っていない。

実験は全て室温（約 20°C）で行った。

また、実験に供した表面材料は、ポリイミド系の 2 種類のフィルムで、50 μm 厚のアルミ蒸着カプトン[®]フィルムと 50 μm 厚の UPILEX_R[®]フィルムである。大きさ約 90mm \times 90mm の試料を試料ホルダに取り付け、直径 80mm の穴の開いた厚さ 1mm-100mm \times 100mm のアルミ板でカバーした。このため、電子ビーム照射領域は、4 π (=50.3) cm²であった。

3. 実験結果

3.1 50 μm 厚カプトンフィルム

まず、電子ビーム照射中の帯電特性について述べる。図 2 は、 $E \leq 5\text{keV}$ で、ビーム電流密度が $J_b = 0.08\text{nA/cm}^2$ の場合の表面電位の時間特性を示している。何れのエネルギーの場合も、表面電位は時間と共に高くなり、また、この表面電位は照射エネルギー E に依存するということがわかる。しかしながら、 $E \geq 2\text{keV}$ の場合は負に帯電するが、 $E \leq 1\text{keV}$ の場合は正に帯電した。

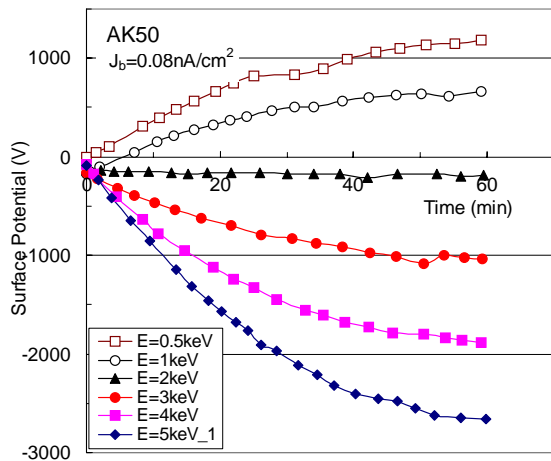


図 2 $E \leq 5\text{keV}$ 、 $J_b = 0.08\text{nA/cm}^2$ で照射した場合の 50 μm 厚カプトンフィルムの表面電位の時間特性

このような表面電位-時間特性を $E \leq 20\text{keV}$ の種々のエネルギー E で取得し、60 分間の照射による表面電位を E の関数としてプロットすると図 3 のようになる。表面電位は照射エネルギーに依存し、 $E > 1.7\text{keV}$ のエネルギーでは負に帯電するが、 $E < 1.7\text{keV}$ では正に帯電するということがわかる。つまり、 $E = 1.7\text{keV}$ の照射ではカプトンフィルムは帯電しないということになり、この $E = 1.7\text{keV}$ は 2 次電子放出係数が 1 になるエネルギー E_{II} であると考えられる。

このような種々の条件で電子ビームを 60 分間照射

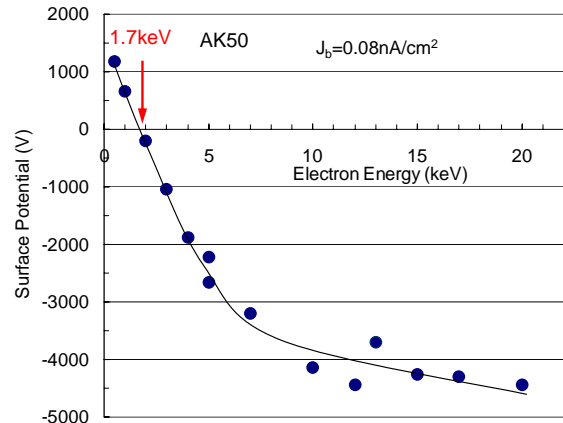


図 3 $J_b = 0.08\text{nA/cm}^2$ で 60 分間電子ビームを照射したときのカプトンフィルムの表面電位の照射エネルギー依存性

した後、すべての場合について、表面電位の減衰を、表面電位計プローブを試料中央部に配置することにより長時間にわたって測定した。その表面電位減衰の測定結果の例を図 4 に示す。この図から、 $E = 5\text{keV}$ で照射し負に帯電したカプトンフィルムの電位減衰は、短時間領域の減衰時定数の小さい場合と長時間領域の減衰時定数の大きい場合とに分けられる。しかし、 $E = 0.5\text{keV}$ で照射した場合の正帯電の減衰は、長時間にわたって減衰時定数がほぼ一定であった。

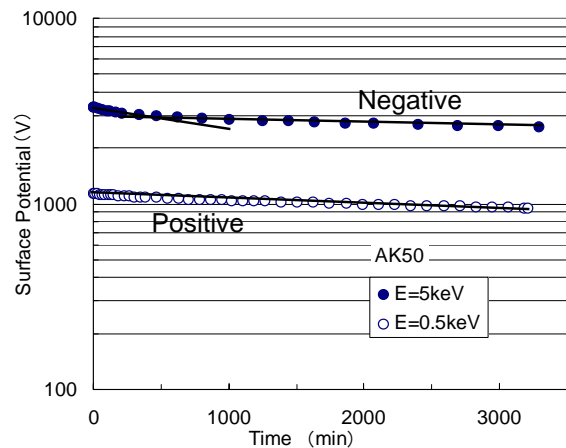


図 4 電子ビーム照射後のカプトンフィルムにおける表面電位減衰特性の例

このような表面電位減衰特性から、ポリイミドの比誘電率 $\epsilon_r = 3.5$ を用いて求めた体積抵抗率を照射エネルギーの関数として図 5 に示す。この図において、次のことがわかる。

(1) 長時間領域の減衰時定数から求めた体積抵抗率は照射エネルギーに関わらずほぼ一定で、 $3 \times 10^{16}\Omega\text{m}$ 程度である。

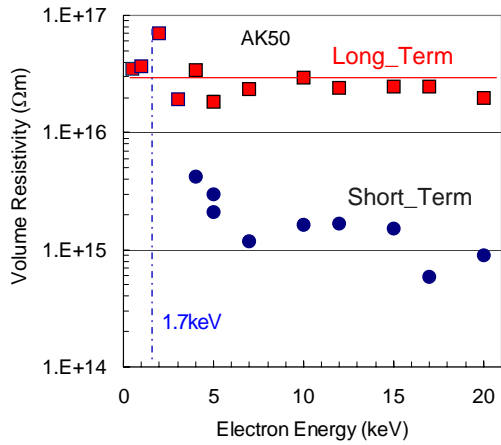


図 5 電子ビーム照射後の電位減衰特性から得られた 50 μm 厚カプトンフィルムの体積抵抗率の電子エネルギー依存性

(2) 短時間領域の減衰時定数から求めた体積抵抗率は照射エネルギーの影響を受けるが、 $1 \times 10^{15} \Omega\text{m}$ 程度である。

3.2 50 μm 厚 UPILEX_R フィルム

次に、UPILEX_R フィルムの帯電特性について述べる。

図 6 に、 $E \leq 5\text{keV}$ 、 $J_b \doteq 0.08\text{nA/cm}^2$ の条件で電子ビームを照射した場合の表面電位の時間特性を示す。また、図 7 には、電子ビームを 60 分間照射したときの表面電位を照射エネルギーの関数としてプロットしている。これらの結果は、基本的にカプトンフィルムの場合と同様の傾向であるが、2 次電子放出係数が 1 になるエネルギー E_{II} はカプトンフィルムよりも若干低い $E_{II} \doteq 1.4\text{keV}$ であると考えられる。

次に、電子ビーム照射後の電位減衰特性について述べる。図 8 には、 $E=5\text{keV}$ と $E=0.5\text{keV}$ の場合の例を示

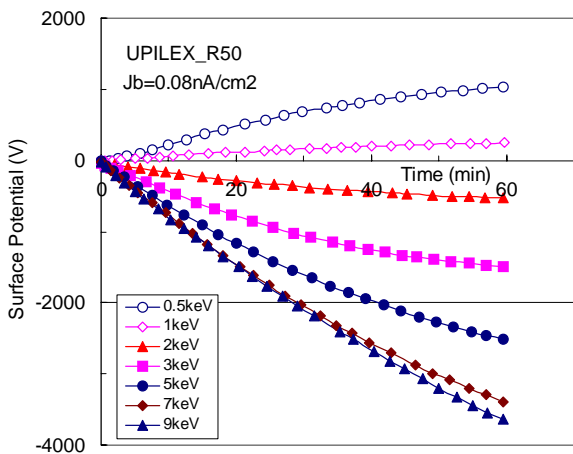


図 6 $E \leq 5\text{keV}$ 、 $J_b \doteq 0.08\text{nA/cm}^2$ で照射した場合の 50 μm 厚 UPILEX_R フィルムの表面電位の時間特性

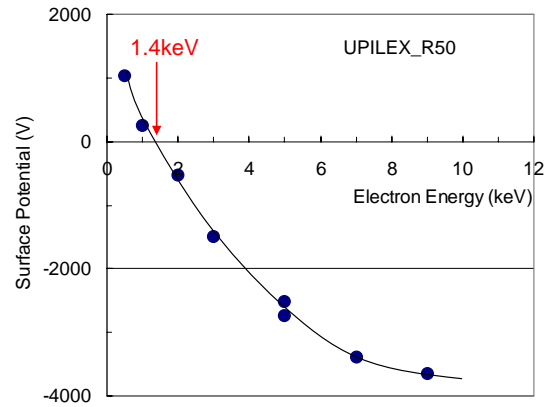


図 7 $J_b=0.08\text{nA/cm}^2$ で 60 分間電子ビームを照射したときの UPILEX_R フィルムの表面電位の照射エネルギー依存性

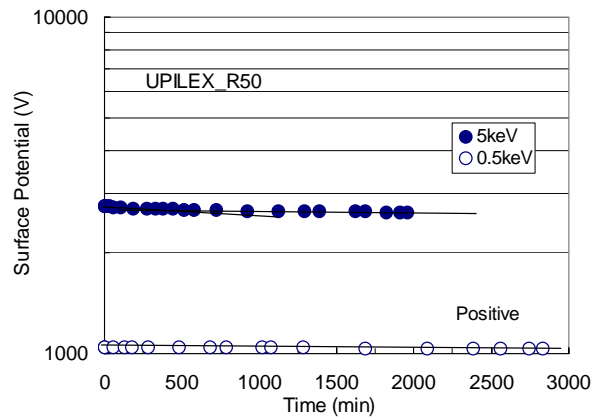


図 8 電子ビーム照射後の UPILEX_R フィルムにおける表面電位減衰特性の例

している。UPILEX_R フィルムの場合、カプトンフィルムの場合 (図 4) と比較すると減衰時定数が大きい。このような表面電位の減衰特性から、ポリイミドの比誘電率 $\epsilon_r=3.5$ を用いて求めた体積抵抗率を照射エネルギーの関数として示したのが、図 9 である。長時

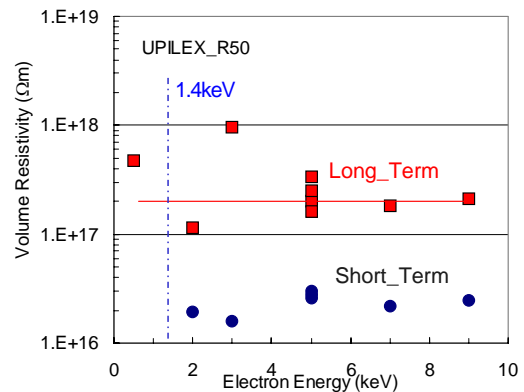


図 9 電位減衰特性から求めた 50 μm 厚 UPILEX_R フィルムの体積抵抗率の電子エネルギー依存性

間領域の減衰時定数から求めた体積抵抗率は $2 \times 10^{17} \Omega \text{m}$ 、短時間領域の減衰時定数から求めた体積抵抗率は $2 \times 10^{16} \Omega \text{m}$ 程度であるということがわかる。

4. 実験結果の検討

ここでは、前節の実験結果から、ポリイミド系フィルムの2次電子放出係数の検討を行う⁽⁸⁾。

エネルギー E 、ビーム電流密度 J_b で絶縁性表面材料に電子ビームを照射すると、そのエネルギーに応じて表面から深さ R (飛程) 付近に電子が蓄積すると共に、表面から2次電子 (後方散乱電子を含める) が放出される。この蓄積された電子によって、表面材料が表面電位 V_s に帯電する。この表面電位 V_s によって、材料内部に電界が生じ、伝導電流 J_l が流れる。したがって、表面材料裏面に設けられた蒸着電極から電流計を通して電流 $I(t)$ を計測すると、この $I(t)$ は、伝導電流成分と表面電位 V_s の変化による変位電流成分とから成り、次式で表される。

$$I(t) = a \left\{ C \frac{dV_s(t)}{dt} + J_l(V_s(t)) \right\} \quad (1)$$

ここで、 a は電子が照射される面積、 C は材料の静電容量である。

一方、電位 V_s に帯電した表面材料に入射する1次電子電流密度 J_e は、ビーム電流密度 J_b により次式で表される。

$$J_e(t) = J_b \left(\frac{E + V_s(t)}{E} \right)^{1/2} \quad (2)$$

この1次電子 J_e が照射されることにより、表面から放出される2次電子電流密度を J_{se} とすると、電流の連続性から、(1)式の $I(t)$ は、

$$I(t) = a \{ J_e(t) - J_{se}(E, V_s(t)) \} \quad (3)$$

と表すことができる。また、この2次電子放出特性は、2次電子放出係数 δ で議論され、この係数 δ は、入射1次電子数に対する2次電子数の比として、次式で表される。

$$\delta = \frac{J_{se}}{J_e} \quad (4)$$

ここで、入射した電子は深さ R のところに一様に蓄積すると考えているので、(1)式右辺第1項の変位電流成分に影響を及ぼす単位面積あたりの静電容量 C は、

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d - R} \quad (5)$$

として表すことができる。ここで、 d は試料厚さ、 ϵ_0 は真空中の誘電率 ($= 8.9 \times 10^{-12} \text{F/m}$) である。また、(1)式右辺第2項の伝導電流成分 $J_l(t)$ は、非照射領域 ($(d - R)$ のバルク) の電界強度 $F(t)$ が、

$$F(t) = \frac{V_s(t)}{d - R} \quad (6)$$

であるので、

$$J_l(t) = \frac{1}{\rho_v} \cdot \frac{V_s(t)}{d - R} \quad (7)$$

と表すことができる。ここで、 ρ_v は材料の体積抵抗率である。

したがって、(1)式は、(5)、(7)式を代入することにより、

$$I(t) = a \left\{ \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d - R} \cdot \frac{dV_s(t)}{dt} + \frac{1}{\rho_v} \cdot \frac{V_s(t)}{d - R} \right\} \quad (8)$$

となる。また、2次電子放出係数 δ は、(3)式より、

$$\delta = \frac{J_{se}}{J_e} = \frac{aJ_e(t) - I(t)}{aJ_e(t)} \quad (9)$$

と表すことができ、電子ビーム照射中の $I(t)$ は時々刻々と変化するので、 δ も時間 t の関数として $\delta(t)$ と表すことができる。この場合、試料表面に入射する電子の実効的な入射エネルギー $E_p(t)$ は、

$$E_p(t) = | -E - V_s(t) | \quad (10)$$

として、時々刻々変化する。したがって、これらの $\delta(t)$ と $E_p(t)$ の関係を求めると、2次電子放出係数の電子エネルギー依存性を求めることができる。しかしながら、試料全体を V_b にバイアスした場合、電流計も V_b にバイアスしなければならず、その測定には困難を伴うので、バイアス時、(8)式における変位電流成分は帯電電位の時間変化から、また、伝導電流成分は帯電電位 V_s によるバルク電界強度 $F(t)$ から、それぞれの電流成分を求め、 $I(t)$ を評価する。そのためには、体積抵抗率 ρ_v を正しく評価しておかねばならない。

この体積抵抗率 ρ_v は、電子ビーム照射停止後の電位減衰特性から求めることができる。一般に、 V_{s0} に帯電した材料の表面電位 $V_s(t)$ は、

$$V_s(t) = V_{s0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (11)$$

で減衰することが知られている⁽⁹⁾。この τ は減衰時定数であり、

$$\tau = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \rho_v \tag{12}$$

で表される。したがって、この時定数 τ を求めることができれば、(12)式より、

$$\rho_v = \frac{\tau}{\epsilon_0 \epsilon_r} \tag{13}$$

として体積抵抗率 ρ_v を求めることができる。

また、電流計で計測できる電流 $I(t)$ は、(8)式に示したように、照射電子の表面からの侵入深さ（飛程） R の影響を受ける。この電子の飛程 R を求める式は種々提案されているが、ここでは $E < 20\text{keV}$ の電子を対象としているので、 $E < 50\text{keV}$ 領域に対して提案された Gledhill の経験式⁽¹⁰⁾

$$\begin{cases} R = \frac{r_p}{\rho} \\ \log(r_p) = -5.1 + 1.358 \cdot \log E \\ \quad + 0.215(\log E)^2 - 0.043(\log E)^3 \end{cases} \tag{14}$$

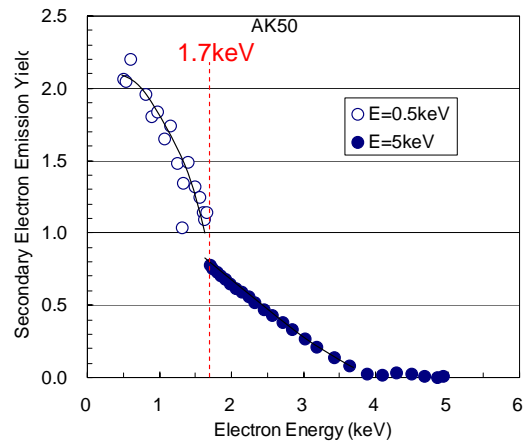
を適用する。ただし、 r_p ：実用飛程 $[\text{g}/\text{cm}^2]$ 、 E ：電子のエネルギー $[\text{keV}]$ ($E < 50\text{keV}$)、 ρ ：密度 $[\text{g}/\text{cm}^3]$ である。なお、カプトンでは $\rho = 1.43\text{g}/\text{cm}^3$ 、UPILEX_R では $\rho = 1.39\text{g}/\text{cm}^3$ として、(14)式から飛程 R を計算した。

以上の考えに立って、カプトンフィルムにおいて、図 2 に示した $E = 5\text{keV}$ と $E = 0.5\text{keV}$ の帯電特性から 2 次電子放出係数の照射エネルギー依存性を求めると、図 10(a) のようになった。また、同じく UPILEX_R フィルムに関しても、図 6 に示した帯電特性から 2 次電子放出係数の照射エネルギー依存性を求めると図 10(b) のようになった。カプトンフィルムの場合、 $E = 0.5\text{keV}$ で 2 次電子放出係数の最大値 $\delta_{\text{max}} \approx 2.1$ が存在するようである。また、UPILEX_R フィルムにおいても $E = 0.5\text{keV}$ で 2 次電子放出係数が最大値 $\delta_{\text{max}} \approx 2.1$ をとるようである。

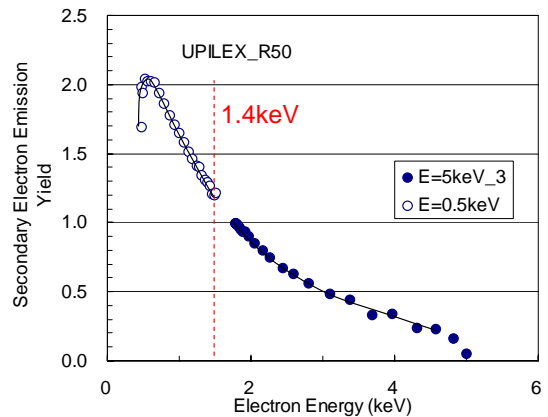
5. まとめ

宇宙機の熱制御材料として用いられる 2 種類のアルミ蒸着ポリイミドフィルム、カプトンフィルムと UPILEX_R フィルムに対して、宇宙環境プラズマ中の電子流を模擬した 20keV 以下のエネルギーの電子を照射することによって帯電特性を評価し、その結果から 2 次電子放出係数を導出した。また、電子ビーム照射停止後の電位減衰特性から体積抵抗率を検討した。その結果、次のような結果が得られた。

(1) カプトンフィルムにおいて、2 次電子放出係数は、約 0.5keV で最大値が 2.1 程度になり、約 1.7keV で



(a)カプトンフィルム



(b)UPILEX_R フィルム

図 10 ポリイミドフィルムの 2 次電子放出係数の照射エネルギー依存性

1 になった。また、体積抵抗率は $1 \times 10^{15} \Omega\text{m}$ 以上である。

(2) UPILEX_R フィルムにおいても、2 次電子放出係数は、約 0.5keV で最大値が約 2.1 となるが、約 1.4keV で 1 になった。しかし、体積抵抗率は、カプトンフィルムより 1 桁程度高く、 $2 \times 10^{16} \Omega\text{m}$ 以上である。

文献

- (1) H. B. Garrett: "The charging of spacecraft surfaces", Rev. Geophys. Space Phys., Vol.19, pp.577-616 (1981)
- (2) 趙・藤井:「宇宙環境での帯電放電現象についての研究動向と将来課題 第1回 宇宙環境と宇宙機の帯電電位」、日本航空宇宙学会誌、Vol.51、No.591、pp.109-117 (2003)
- (3) 藤井:「宇宙塵・宇宙帯電と衛星技術」、静電気学会誌、Vol.25、pp.11-18 (2001)
- (4) V. A. Davis, L. F. Neergard, M. J. Mandell, I. Katz, B. M. Gardner, J. M. Hilton and J. Minor: "Spacecraft charging calculations: NASCAP-2K

- and SEE spacecraft charging handbook”, AIAA2002-0626 (2002)
- (5) J.-F. Roussel, F. Rogier, G. Dufour, J.-C. Mateo-Velez, J. Forest, A. Hilger, D. Rodgers, L. Girard and D. Payan: “SPIS open source code, methods, capabilities, achievements and prospects”, IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.36, pp.2360-2368 (2008)
 - (6) T. Muranaka, S. Hosoda, J. Kim, S. Hatta, K. Ikeda, T. Hamanaga, M. Cho, H. Usui, O. Ueda, K. Koga and T. Goka: “Development of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT)”, IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.36, pp.2094-2102 (2008)
 - (7) 藤井・奥村・高橋：「衛星用熱制御 FEP フィルムの低エネルギー電子ビーム照射による帯電特性と2次電子放出」、電気学会論文誌A、Vol.132、pp.790-796 (2012)
 - (8) 藤井・奥村・高橋：「電子ビーム照射による帯電計測から宇宙機表面材料の物性評価について」、第9回宇宙環境シンポジウム講演論文集、pp.119-126 (2012)
 - (9) 浅野：「静電気工学における電界・電位測定法」、静電気学会誌、Vol.10、pp.205-212 (1986)
 - (10) B. Gross: “Radiation-induced charge storage and polarization effects”, Topics in Appl. Phys., Vol.33, pp.217-284 (1979)