

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

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

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おり、これまで種々の抑制・防止技術に関する研究開発がなされてきた。その中で、宇宙の荷電粒子環境（特に、電子環境）を模擬した地上設備を用いた宇宙機材料の帯電放電機構の解明を目指した研究や、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などが精力的になされて来た。

この宇宙機帯電解析手法の開発において、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来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、代表的な表面材

料である 127 μm テフロン[®]FEP (Fluorinated Ethylene Propylene copolymer) フィルムを対象に検討した結果について述べる。

2. 考え方

宇宙環境中の電子流を模擬した電子ビーム照射による絶縁性表面材料の帯電現象は、図1に示したようになる。

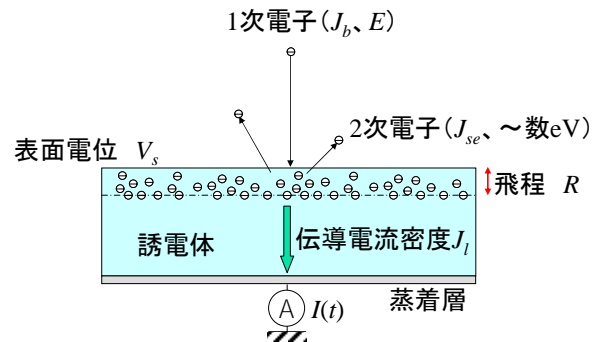


図1 絶縁性表面材料の帯電現象

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、一次電子が照射することにより、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、

$$I(t) = a\{J_b - J_{se}(E, V_s(t))\} \quad (2)$$

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。

$$\delta = \frac{J_{se}}{J_b} \quad (3)$$

この2次電子放出係数 δ は、一般に、図2のような特性になり⁽⁸⁾、あるエネルギー領域 ($E_1 < E < E_{II}$) では1より大きくなる。したがって、 $E > E_{II}$ なるエネルギーの電子が照射されると、図3(a)のように、材料は負に帯電するが、 $E < E_{II}$ なるエネルギーの電子が照射されると、2次電子の戻りがなければ、材料は正に帯電することになる。しかしながら、表面から放出される2次電子のエネルギーは数 eV であると考えられている⁽⁹⁾ので、材料が数 V の正に帯電すると、図3(b)に示すように、2次電子が材料表面の正電荷の静電力を受けて引き戻されることになり、正帯電が緩和されることになる。したがって、このような2次電子の引き戻しが無いようにすることができれば、入射電子と2次電子を分離した帯電計測を行うことができると考えられる。そのため、図3(c)に示すように、 $E - V_b < E_{II}$ となるように、試料全体を負にバイアスし (バイアス電圧 V_b)、バイアスされた裏面電極電位からの帯電電位を計測すれば、2次電子放出に基づく正帯電電位を求めることができる。

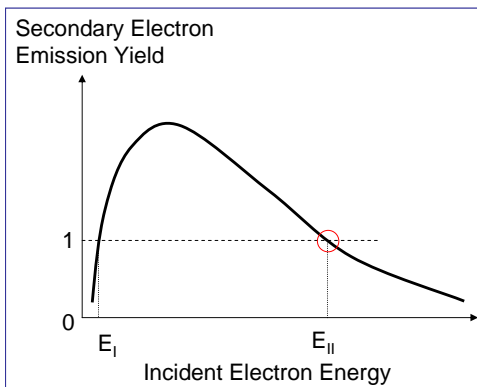


図2 一般的な2次電子放出特性

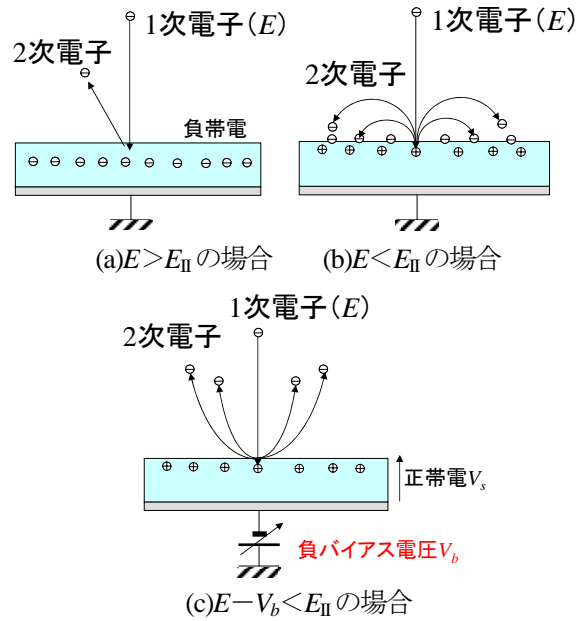


図3 絶縁性材料の帯電の様子

このように、2次電子による正帯電緩和を抑制した、電子ビーム照射による帯電特性計測に関わるモデルとして、図4に示す厚さ d 、比誘電率 ϵ_r の絶縁性材料の1次元帯電モデルを提案する。

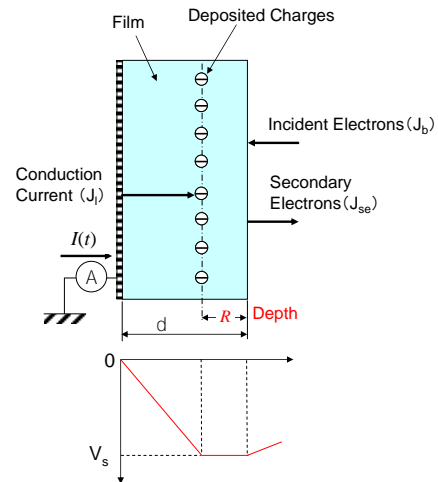


図4 電子ビーム照射による一次元帯電モデル

このモデルにおいて、電流計で観測される電流 $I(t)$ は、(1)式のように表現されるが、この1次元モデルにおいては、入射した電子が深さ 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当たりの静電容量 C は、

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d - R} \quad (4)$$

として表すことができる。ここで、 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 $J(t)$ は、非照射領域 ($(d-R)$ のバルク) の電界強度 $F(t)$ が、

$$F(t) = \frac{V_s(t)}{d-R} \quad (5)$$

であるので、

$$J_l(t) = \frac{1}{\rho_v} \cdot \frac{V_s(t)}{d-R} \quad (6)$$

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、(4)、(6)式を代入することにより、

$$I(t) = a \left\{ \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{d-R} \cdot \frac{dV_s(t)}{dt} + \frac{1}{\rho_v} \cdot \frac{V_s(t)}{d-R} \right\} \quad (7)$$

となる。また、2次電子放出係数 δ は、(2)式より、

$$\delta = \frac{J_{se}}{J_b} = \frac{aJ_b - I(t)}{aJ_b} \quad (8)$$

と表すことができ、電子ビームを照射中 $I(t)$ 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、

$$E_p(t) = | -E - V_s(t) | \quad (9)$$

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、その測定は困難を伴うので、バイアス時、(7)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ることで、 $I(t)$ 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、

$$V_s(t) = V_{s0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (10)$$

で減衰することが知られている⁽¹⁰⁾。この τ は減衰時定数であり、

$$\tau = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \rho_v \quad (11)$$

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、(11)式より、

$$\rho_v = \frac{\tau}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (12)$$

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、(7)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⁽¹¹⁾

$$\begin{cases} R = \frac{r_p}{\rho} \\ \log(r_p) = -5.1 + 1.358 \cdot \log E \\ \quad + 0.215(\log E)^2 - 0.043(\log E)^3 \end{cases} \quad (13)$$

を適用する。ただし、 r_p : 実用飛程 [g/cm^2]、 E : 電子のエネルギー [keV] ($E < 50 \text{ keV}$)、 ρ : 密度 [g/cm^3] である。(13)式を用いて、FEP ($\rho = 2.15 \text{ g}/\text{cm}^3$)、ポリイミド (PI) ($\rho = 1.43 \text{ g}/\text{cm}^3$) における飛程 R を計算すると、図5のようになる。

以上の考え方に則して、127 μm 厚テフロン[®]FEP に対して行った検討結果を以下に述べることにする。

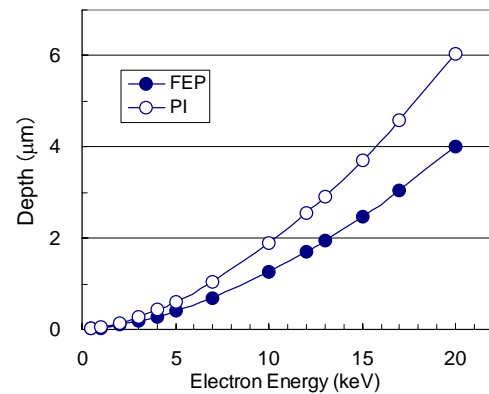


図5 FEP とポリイミド (PI) における電子侵入深さの照射エネルギー依存性

3. 実験方法

本研究に用いた実験系の概略を図6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。

電子ビーム照射中および照射停止後の試料の表面電

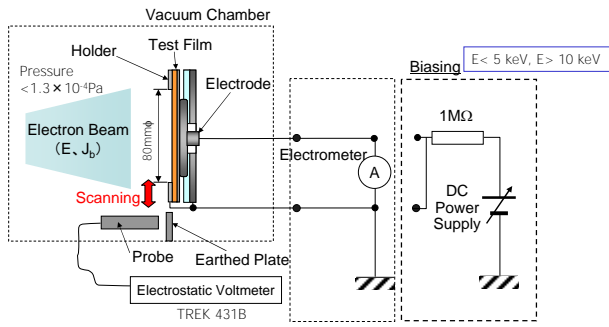


図6 実験系の概略

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 $1M\Omega$ 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。第2節で述べた考えの下、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 -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、前節で述べたように、電流計測は行っていない。

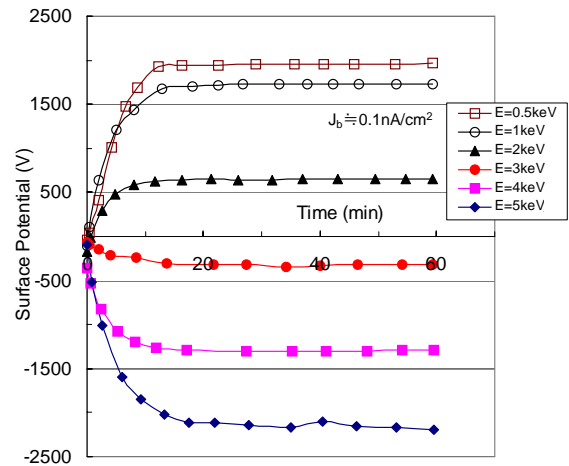
実験は全て室温（約 20°C ）で行った。

また、実験に供した表面材料は、 $127\mu\text{m}$ 厚銀蒸着テフロン®FEP フィルムである。大きさ約 $90\text{mm} \times 90\text{mm}$ 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 $1\text{mm}-100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 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、 $4^2\pi$ ($=50.3$) cm^2 であった。

4. 実験結果

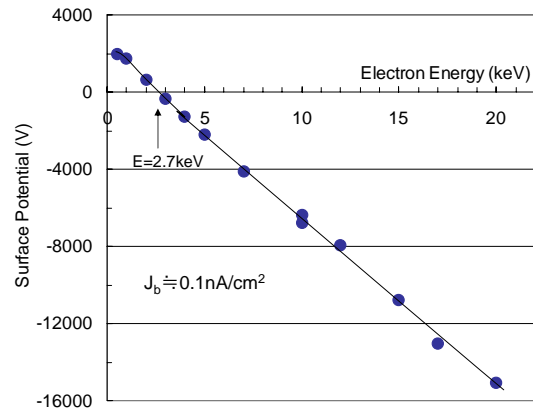
4.1 電子ビーム照射中の帯電特性

まず、電子ビーム照射中の帯電特性について述べる。図7は、 $E \leq 5\text{keV}$ で、ビーム電流密度が $J_b \doteq 0.1\text{nA/cm}^2$ 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っていくが、照射後 20 分程度ではほぼ一定値に飽和する傾向にある。この飽和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、 $E \geq 3\text{keV}$ の場合は負に帯電するが、 $E \leq 2\text{keV}$ の場合は正に帯電す

図7 $E \leq 5\text{keV}$ 、 $J_b \doteq 0.1\text{nA/cm}^2$ で照射した場合の $127\mu\text{m}$ 厚 FEP フィルムの表面電位の時間特性

る。

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8のようになる。表面電位は、照射エネルギーに対して直線的に変化し、 $E \doteq 2.7\text{keV}$ よりも高いエネルギーでは負に帯電するが、 $E < 2.7\text{keV}$ では正に帯電するということがわかる。つまり、 $E \doteq 2.7\text{keV}$ の照射では、FEP は帯電しないということになり、この $E \doteq 2.7\text{keV}$ は図2における E_{II} で、2次電子放出係数が1になるエネルギーであると考えられる。

図8 $J_b \doteq 0.1\text{nA/cm}^2$ で 60 分間電子ビームを照射したときの表面電位の照射エネルギー依存性

4.2 電子ビーム照射後の表面電位減衰特性

次に、このような種々の条件で電子ビームを 60 分間照射した後、すべての場合について、表面電位減衰特性を、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9に示す。この図から、FEP の

電位減衰は非常に小さく、1本の直線で近似できるといことがわかる。また、負に帯電した $E=5, 7, 10\text{keV}$ の場合に比べ、正に帯電した $E=0.5\text{keV}$ の場合の減衰は早いことがわかる。

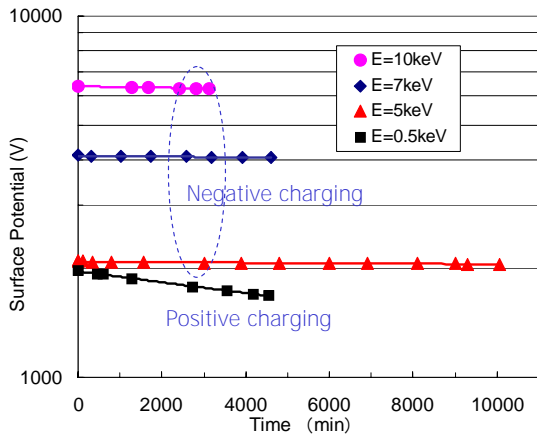


図9 電子ビーム照射後の表面電位減衰特性の例

このような表面電位減衰特性から、前節の(10)~(12)式を用いて求めた体積抵抗率を図10に示す。なお、テ

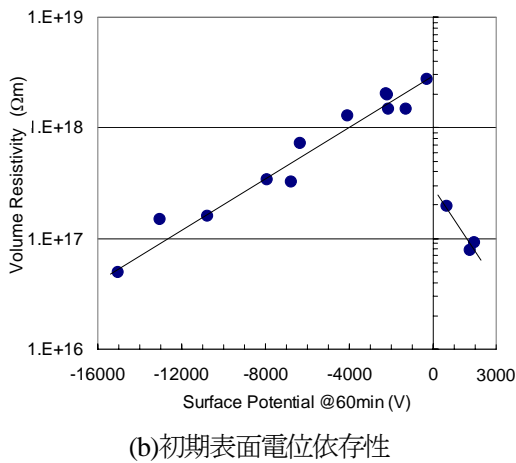
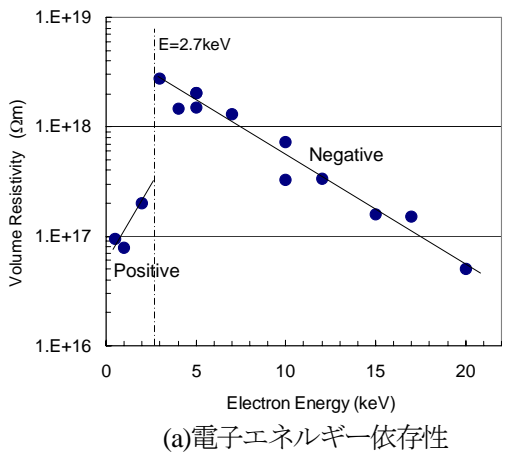


図10 電子ビーム照射後の電位減衰特性から得られたFEPフィルムの体積抵抗率

フロン[®]FEPの比誘電率は $\epsilon_r=2.1$ として求めた。図10(a)は、電子エネルギー E の関数として表したもので、また、同図(b)は60分間照射時点での表面電位(初期表面電位)の関数として表したものである。これらの図において、次のことがわかる。

- (1) $E > 2.7\text{keV}$ の場合、体積抵抗率は、電子のエネルギー E が高くなるにつれて、つまり初期表面電位が高くなるにつれて、低下する。
- (2) $E < 2.7\text{keV}$ の場合、体積抵抗率は、電子エネルギー E が低くなるにつれて、つまり初期表面電位が正に高くなるにつれて、低下する。
- (3) 負帯電時と正帯電時の体積抵抗率を比較すると、初期表面電位の絶対値が同程度であれば正帯電の方が1桁程度低くなる。

5. 実験結果の検討

ここでは、前節の実験結果から、物性値(体積抵抗率、2次電子放出係数)の検討を行う。

5.1 体積抵抗率

電子ビーム照射後の表面電位減衰特性から体積抵抗率を求めた結果、図10(b)に示したように、正・負帯電とも初期表面電位の増加と共に体積抵抗率が低下した。このことは、体積抵抗率に材料のバルク電界強度 F 依存性があることを示している。電子が照射されないバルクの電界強度 F は、第2節で述べたように、(5)式で表される。図5に示した電子の侵入距離 R を考慮して、図10(b)を電界強度 F の関数として示すと、図11のようになる。この図から、体積抵抗率の電界強度 F 依存性の近似式を求めると、負帯電の場合、

$$\rho_v = 2.89 \times 10^{18} \cdot \exp(3.13 \times 10^{-2} F) \quad [\Omega\text{m}] \tag{14}$$

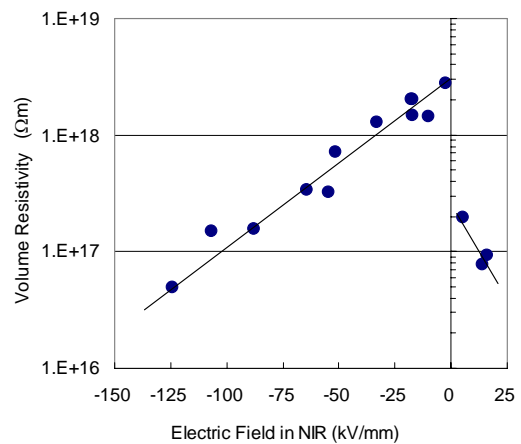


図11 FEPフィルムの体積抵抗率のバルク電界強度依存性

正帯電の場合、

$$\rho_v = 2.99 \times 10^{17} \cdot \exp(-8.36 \times 10^{-2} F) \quad [\Omega\text{m}] \quad (15)$$

で表される。このように、FEP の体積抵抗率は、正帯電の場合、負帯電よりも 1 桁程度小さくなる。これは FEP 内でホール電導が支配的である可能性を示しており、FEP 中ではホールの移動度が大きいためであると考えられる⁽¹²⁾。

5.2 帯電特性の評価

体積抵抗率ともう一つの物性値、2 次電子放出係数を求めるにあたっては、第 2 節で述べたように、電流計で計測する電流 $I(t)$ が重要である。しかし、試料全体をバイアスした場合その計測は困難であるため、ここでは、バイアスした場合の電流 $I(t)$ をシミュレーションによって求める。そのシミュレーションが妥当かどうかを、先ず $E=5\text{keV}$ の場合について検討する。

図 12(a)に、 $E=5\text{keV}$ 、 $J_b=0.14\text{nA/cm}^2$ の場合の電流特性のシミュレーション結果と実測値を示す。この図より、実験値とシミュレーション結果がほぼ一致することがわかる。図 12(b)に、計測電流の変位電流成分 (7) 式右辺第 1 項) と伝導電流成分 ((7) 式右辺第 2 項) の

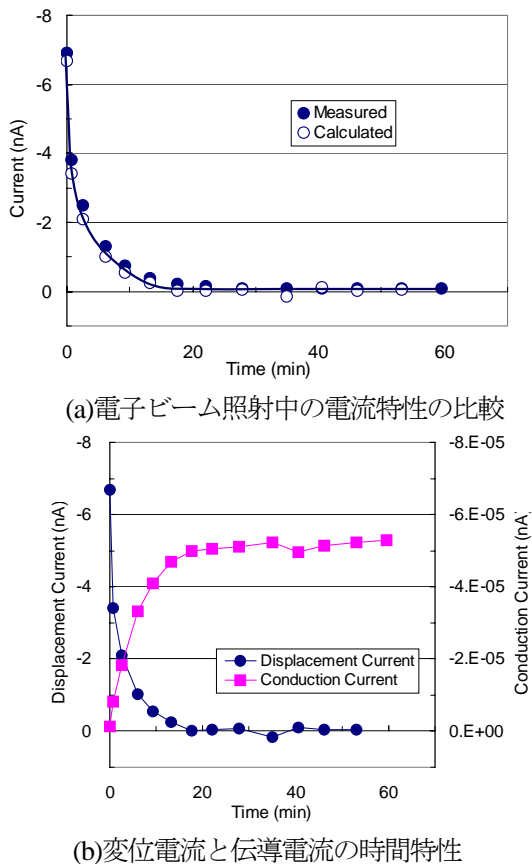


図 12 $E=5\text{keV}$ 、 $J_b=0.14\text{nA/cm}^2$ で照射された FEP フィルムの電流シミュレーション

シミュレーション結果を示すが、伝導電流成分は、FEP フィルムの体積抵抗率が極めて高いため、変位電流成分に比べ 5 桁程度小さくなり、表面電位の変化による変位電流成分だけで電流がほぼ決定するというのである。このようにして、表面電位計測から電流を評価することができる。

$E < 5\text{keV}$ の場合は、電流計測を行っていないので、本評価手法を用いて $E=0.5\text{keV}$ の場合 (図 7) を例に、表面電位特性から電流を評価すると、図 13 のようになる。このように、 $E=0.5\text{keV}$ の場合は、次節で検討するように、2 次電子放出係数が 1 よりも大きくなるので、正に帯電し、変位電流成分、伝導電流成分共に正になるということがわかる。また、正帯電の場合は、5.1 節で述べたように、体積抵抗率が低くなるので、伝導電流成分は大きくなるが、変位電流成分に比べれば 3 桁程度小さく、無視できるレベルであることも理解できる。

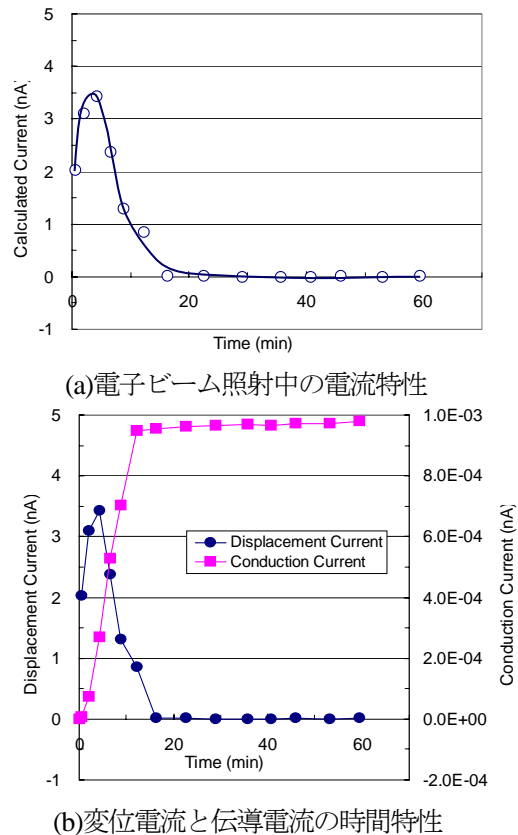
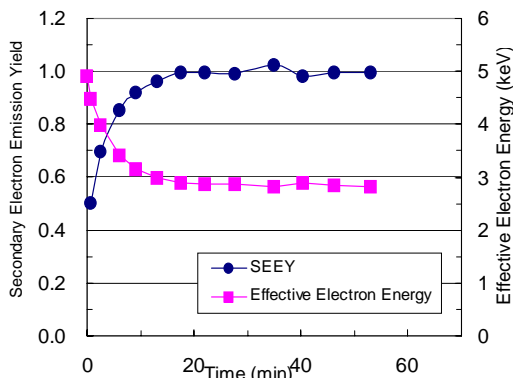


図 13 $E=0.5\text{keV}$ 、 $J_b=0.1\text{nA/cm}^2$ で照射された FEP フィルムの電流シミュレーション

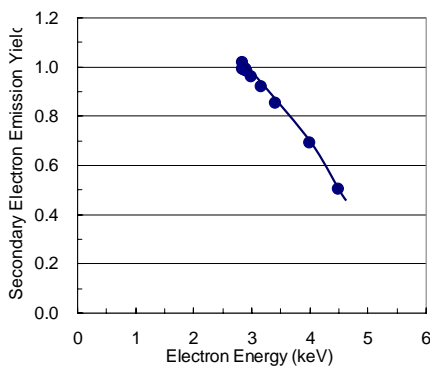
5.3 2 次電子放出係数

図 8 に示したように、 $E \leq 20\text{keV}$ のエネルギーの電子ビームを照射することにより、FEP フィルムの帯電特性を取得した結果、帯電の生じない照射エネルギー $E \approx 2.7\text{keV}$ が存在することがわかった。

次に、第2節で説明したように、(7)式により電流成分を評価し $I(t)$ を求め、(8)式と(9)式から、電子ビーム照射中の2次電子放出係数の時間変化と、実効的な入射電子エネルギーの時間変化を、 $E=5\text{keV}$ の場合について示すと、図14(a)のようになる。この図から、実効的な入射エネルギー E_p は時間と共に低下し、20分程度で 2.8keV 程度になる。一方、2次電子放出係数は、照射初期の0.5程度から時間と共に高くなり、20分程度でほぼ1になることがわかる。この特性から、 $E=5\text{keV}$ 照射時の入射エネルギーと2次電子放出係数の関係が同図(b)のように得られる。



(a)照射中の2次電子放出係数と実効的な入射エネルギーの時間特性



(b)2次電子放出係数の電子エネルギー依存性

図14 $E=5\text{keV}$ で照射中の2次電子放出係数

このような関係を、各エネルギーで照射した帯電特性から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15のようになる。少々バラツキは存在するが平均的な特性の傾向を図中破線で示すと、一般的な2次電子放出特性と同様の傾向になった(例えば、文献(13))。この図から、FEPフィルムの最大2次電子放出係数 δ_{max} 、そのエネルギー E_{max} 、2次電子放出係数が1になる高エネルギー側のエネルギー E_{II} は、それぞれ、

$$\delta_{max} \doteq 2.0, E_{max} \doteq 1.2\text{keV}, E_{II} \doteq 2.7\text{keV}$$

となった。この図において、2次電子放出係数が1よりも大きくなる領域 ($E < 2.7\text{keV}$) が存在し、その領

域の最大エネルギー E_{II} では帯電が生じない。なぜなら、照射1次電子数と放出される2次電子数が等しくなるからである。

E_{II} よりも高いエネルギーの電子を照射すると、2次電子放出係数が1よりも小さいのでFEPは負に帯電し、そのため後続の照射電子はその負帯電によって減速される。減速されたエネルギーの電子照射は2次電子数を増加させることになる。こうして負に帯電したFEPに入射する実質的なエネルギーが E_{II} になったとき、負の帯電が収束し、つまり表面電位は $-(E - E_{II})$ [kV] の電位で飽和することになる。

一方、 E_{II} よりも低いエネルギーの電子を照射すると2次電子放出係数が1よりも大きいので、FEPは正に帯電し、後続の照射電子は加速されることになる。加速された電子による2次電子放出係数は低下することになる。こうして正に帯電したFEPに入射する実質的なエネルギーが E_{II} になったとき、正の表面帯電が収束し、表面電位は $-(E - E_{II})$ [kV] で飽和することになる。

上記のことは、実験結果をかなりうまく説明する。つまり、図7に示された種々エネルギーを変えた場合の飽和表面電位は、ほぼ $-(E - 2.7)$ [kV] である。

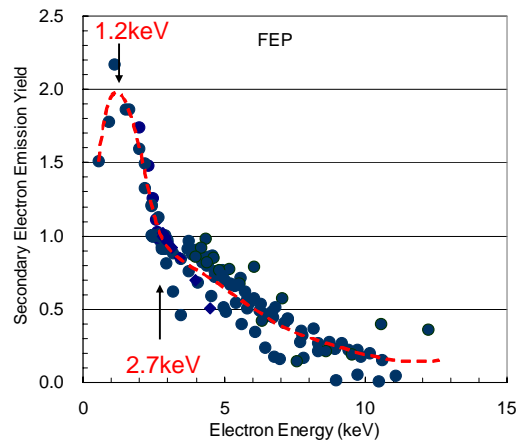


図15 FEPフィルムの2次電子放出係数の照射エネルギー依存性

6. まとめ

銀蒸着テフロンFEP熱制御材料に対して、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) 2.7keV よりも高いエネルギーの電子を照射すると負に帯電し、 2.7keV よりも低いエネルギーの電子を

照射すると正に帯電する。この閾値 2.7keV は、FEP フィルムの 2 次電子放出係数が 1 になるエネルギーである。

(2) 電子ビーム照射中の電流特性から、最大 2 次電子放出係数 $\delta_{max} \doteq 2.0$ 、そのエネルギー $E_{max} \doteq 1.2\text{keV}$ 、2 次電子放出係数が 1 になる高エネルギー側のエネルギー $E_{11} \doteq 2.7\text{keV}$ が得られた。

(3) 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求めると $10^{17} \sim 10^{18} \Omega\text{m}$ となり、表面電位が高いほど体積抵抗率は低くなった。つまり体積抵抗率にはバルク電界依存性がある。また、正帯電の場合には、体積抵抗率は負帯電の場合に比べ 1 桁程度低くなり、ホール電導が支配的であることを示している。

文 献

- (1) H. B. Garrett: "The charging of spacecraft surfaces", *Rev. Geophys.*, 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) S. T. Lai: *Fundamentals of Spacecraft Charging*, (Princeton University Press), Chap.9, pp.84-90 (2012)
- (9) S. T. Lai: *Fundamentals of Spacecraft Charging*, (Princeton University Press), Chap.3, pp.18-24 (2012)
- (10) 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)
- (11) B. Gross: "Radiation-induced charge storage and polarization effects", *Topics in Appl. Phys.*, Vol.33, pp.217-284 (1979)
- (12) B. Gross, G. M. Sessler, H. von Seggern and J. E. West: "Hole transit in Teflon films", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.34, pp.555-557 (1979)
- (13) R. F. Willis and D. K. Skinner: "Secondary electron emission yield behaviour of polymers", *Solid State Commun.*, Vol.13, pp.685-688 (1973)