

衛星表面材料の電子ビーム照射による帯電と2次電子放出

Electron Beam Induced Charging and Secondary Electron Emission of Thermal Control Materials

藤井 治久、石原 侑樹

Haruhisa Fujii and Yuhki Ishihara

奈良工業高等専門学校 電気工学科

Nara National College of Technology, Department of Electrical Engineering

E-mail: fujii@elec.nara-k.ac.jp

1. はじめに

宇宙開発の進展とともに、通信衛星、放送衛星、地球観測衛星など多くの衛星が打ち上げられ、われわれの社会生活に多大の恩恵をもたらして来た。これらの衛星は、真空、熱、高エネルギー荷電粒子、プラズマ、太陽光といった苛酷な宇宙環境の中で長期にわたって高い信頼性を発揮し続けねばならない。そのため衛星に搭載された電気・電子機器を熱真空環境から保護する目的で衛星表面の面積にわたって熱制御材料が取り付けられる。これらの熱制御材料は、銀蒸着テフロン[®]FEP (Fluorinated Ethylene Propylene Copolymer)、アルミ蒸着カプトン[®]、アルミ蒸着マイラ[®]、あるいはOSR (Optical Solar Reflector) などである。これらの熱制御材料は、テフロンFEPなどの絶縁材料の裏面に銀やアルミニウムの金属が蒸着されたもので、絶縁材料が宇宙に露出した状態で使用される。そのため、宇宙環境のプラズマにより帯電し、場合によると放電する可能性がある⁽¹⁾。このような放電ESD (Electrostatic Discharge) が生じることが衛星の運用と信頼性にとって大きな脅威であるため、このような衛星帯電現象の解明、帯電防止技術に関わる研究開発が多くなされて来た⁽²⁻⁴⁾。これらの研究開発においては、比較的高エネルギーの数10keVの電子ビームを熱制御材料に照射することによって帯電放電特性が取得された。しかしながら、宇宙プラズマ中における電子のエネルギーは広範囲に分布しており、比較的低エネルギーの電子も多数存在する⁽⁵⁾。そこで本研究では、20keVよりも低いエネルギーの電子をこれら表面材料に照射することにより帯電特性を取得し、これらの特性から2次電子放出特性について議論した。また、電子ビーム照射後の帯電電位の減衰特性から体積抵抗率の検討も行った。なお、本研究では代表的な熱制御材料である銀蒸着テフロンFEPとアルミ蒸着カプトンの2種類について評価を行った。

2. 実験方法

図1に実験系の概略を示す。

熱制御材料試料を真空チャンバに取り付けた後、試料からのリード線を真空チャンバの高電圧導入端

子に接続した。その後、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 1×10^{-6} Torr以下に真空引きを行った。その状態を約半日保持し、電子エネルギー E 、電流密度 J_e 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帯電電位は、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て計測した。また、試料を流れる電流は、試料裏面の金属蒸着層から電極を通して流れる電流をペンレコーダにより計測した。

なお、本実験においては、 $E=20\text{keV}$ 以下の電子ビーム照射による帯電計測を行ったが、電子銃の性能の関係で、 $E<5\text{keV}$ の場合は直流電源 (菊水電子、PAD 1K-0.2L) により試料全体を負にバイアスし電子を減速して照射した。一方、 $E>10\text{keV}$ の場合は、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照射した。

なお、実験は全て室温 (約 20°C) で行った。

また、実験に供した熱制御材料は次の2種である。

(1) 127 μm 厚銀蒸着テフロン[®]FEP

(2) 50 μm アルミ蒸着カプトン[®]

これら試料の大きさは約 90mm^2 で、各試料は試料ホルダに取り付けられ、直径80mmの穴が開いた厚さ1mm、 100mm^2 のアルミ板でカバーされている。したがって、試料の電子ビーム照射領域は $4^2\pi\text{cm}^2$ であった。

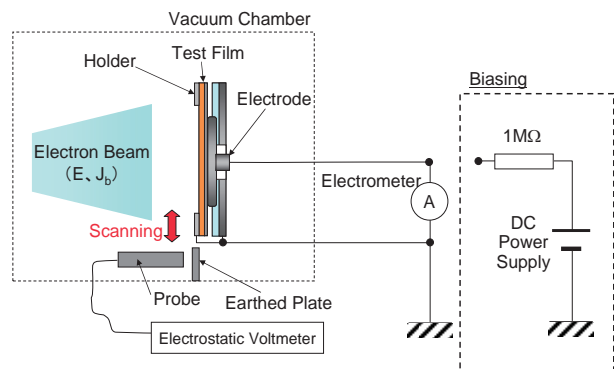


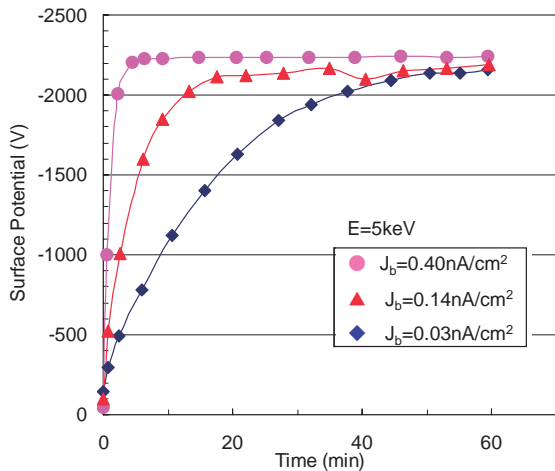
図1 実験系の概略

3. 実験結果

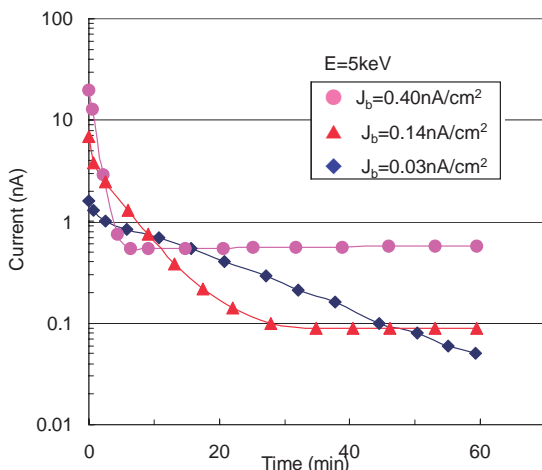
3.1 テフロン FEP

(a)電子ビーム照射時の帯電特性

はじめに、電子のエネルギー $E=5\text{keV}$ で、ビーム電流密度 J_b を3レベルで変化させて照射したときの表面電位とバルク電流の時間特性を図2に示す。表面電位は時間と共に負に高くなり次第に飽和する傾向になる。ビーム電流密度 J_b の大きい方が早く飽和電位に到達することがわかる。一方、バルク電流は時間と共に急激に低下し、表面電位が飽和電位に到達した後、一定の電流値になっていく。



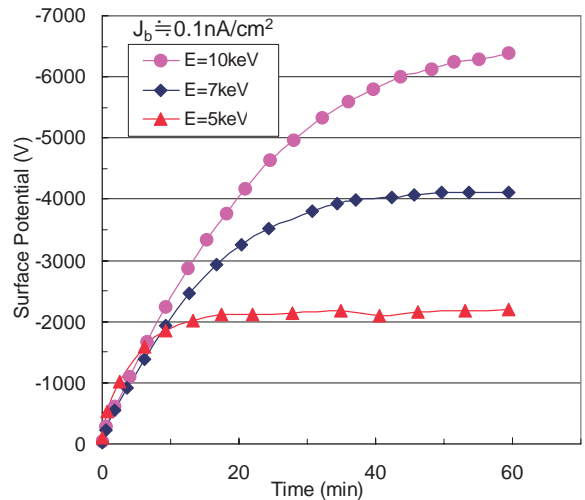
(a) 表面電位



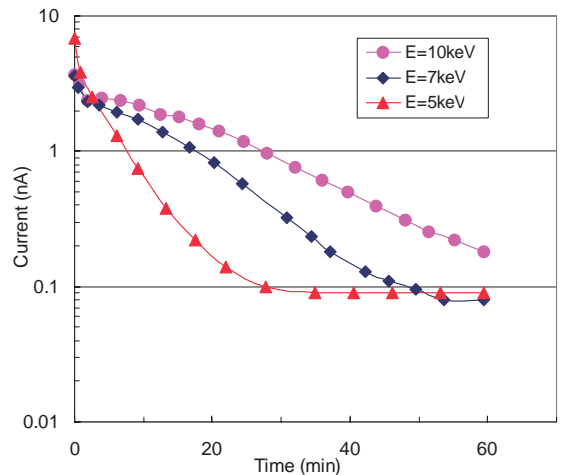
(b) バルク電流

図2 $E=5\text{keV}$ で照射した場合の銀蒸着テフロンFEPの帯電特性

次に、ビーム電流密度を $J_b \approx 0.1\text{nA/cm}^2$ として、エネルギー E を変えた場合の帯電特性を図3に示す。表面帯電電位は、 J_b が等しいため、ビーム照射開始直後はほぼ等しい電位上昇速度であるが、エネルギー E の大きい方が電位は高いレベルに達するということがわかる。この図3(a)から、表面電位の飽和は E に依存するということがわかる。



(a) 表面電位



(b) バルク電流

図3 $J_b \approx 0.1\text{nA/cm}^2$ で照射した場合の銀蒸着テフロンFEPの帯電特性

次に、図4に $J_b \approx 0.1\text{nA/cm}^2$ 一定として、 $E \leq 5\text{keV}$ の場合の表面電位の時間特性を示す。図3と同様に、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。また、この図から、FEPフィルムは、 $E \geq 3\text{keV}$ の場合に負に帯電するが、 $E \leq 2\text{keV}$ の場合には逆に正に帯電するということがわかる。

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5のようになる。表面電位は、照射電子エネルギー E に関して直線的に変化することがわかり、 $E \approx 2.7\text{keV}$ よりも大きな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、 $E \approx 2.7\text{keV}$ の照射では、テフロンFEPは帯電しないということになり、この $E \approx 2.7\text{keV}$ は、テフロンFEPの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。

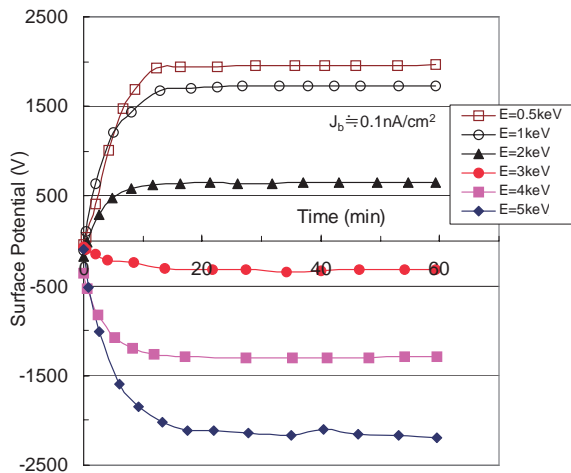


図4 $E \leq 5\text{keV}$ での電子ビーム照射による銀蒸着テフロン FEP の表面電位-時間特性

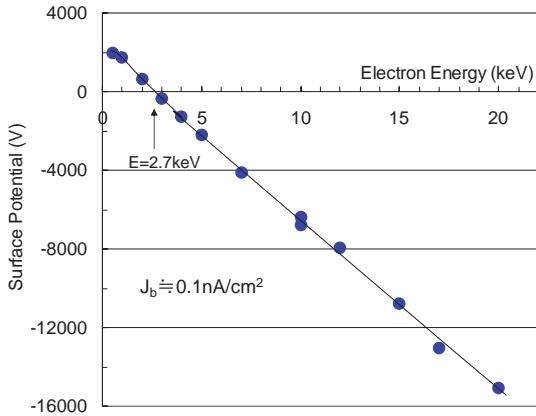


図5 銀蒸着テフロン FEP に $J_b=0.1\text{nA/cm}^2$ の条件で60分間電子ビームを照射した場合の表面電位の照射エネルギー依存性

(b)電子ビーム照射後の帯電電位減衰特性

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、全ての場合について、電子ビーム照射停止後の表面電位減衰特性を、表面電位計プローブを試料中央上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6に示す。この図から、テフロン FEP の表面電位の減衰は非常に小さく、1本の直線で近似できるということがわかる。しかしながら、負に帯電した $E=5, 7, 10\text{keV}$ の場合に比べ、正に帯電した $E=0.5\text{keV}$ の場合の方が減衰は速いことがわかる。

一般に、帯電した絶縁体の表面電位 V_s は、次式で近似できる。

$$V_s = V_{s0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad \dots (1)$$

ここで、 V_{s0} 、 t 、 τ 、はそれぞれ、初期表面電位、時間、減衰時定数である。また、この減衰時定数 τ は、絶縁体の誘電率 ϵ ($=\epsilon_0\epsilon_r$ 、 ϵ_0 :真空中の誘電率 ($=8.9 \times 10^{-12}\text{F/m}$)、 ϵ_r :比誘電率)と体積抵抗率 ρ を用いて、

$$\tau = \epsilon \cdot \rho = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \rho, \quad \dots (2)$$

で表される。

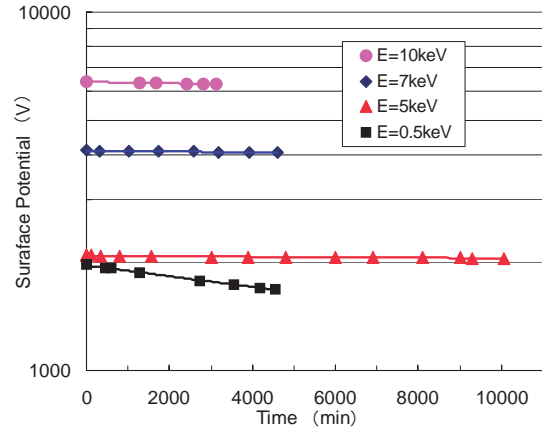
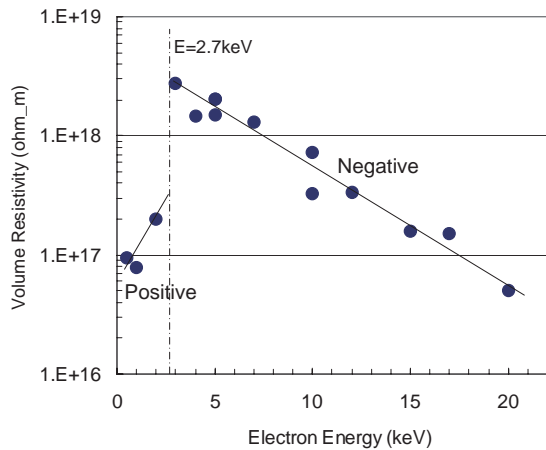


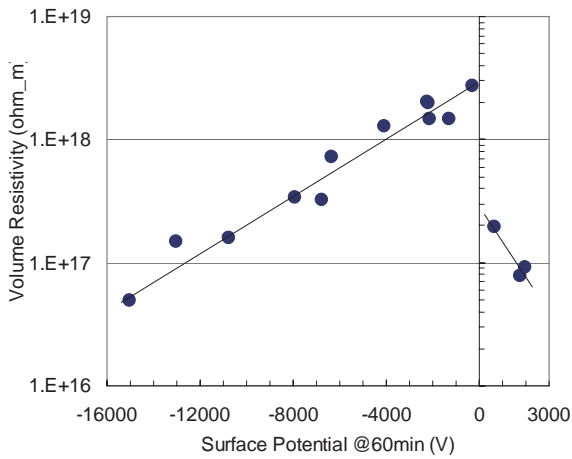
図6 銀蒸着テフロン FEP における電子ビーム照射後の表面電位の減衰特性の例

(1)、(2)式とテフロン FEP の比誘電率 $\epsilon_r=2.1$ を用いて求めた体積抵抗率を図7に示す。図7 (a) は電子照射エネルギー E の関数として表したもので、また同図 (b) は60分間の照射時点での表面電位の関数として表したものである。これらの図から、次のことがわかる。

- (1) $E > 2.7\text{keV}$ の場合、体積抵抗率は、電子エネルギー E が高くなるにつれて、つまり表面電位が高くなるにつれて、低下するということがわかる。
- (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、つまり表面電位が正に高くなるにつれて、低下するということがわかる。
- (3) 負帯電時の体積抵抗率と正帯電時の体積抵抗率を比較すると、表面電位の絶対値が同様であれば正帯電の場合の方が1桁程度小さくなる。



(a)照射電子エネルギー依存性



(b)表面電位依存性

図7 テフロン FEP の表面電位減衰特性から得られた体積抵抗率

3.2 アルミ蒸着カプトン

次に、50 μm 厚アルミ蒸着カプトンについて、テフロンFEPと同様の実験条件で実施した結果について述べる。

(a)電子ビーム照射中の帯電特性

50 μm アルミ蒸着カプトンにおいても $E \leq 20\text{keV}$ で電子ビーム照射を行った。図8に、 $J_b = 0.08\text{nA/cm}^2$ で $E \leq 5\text{keV}$ の場合の表面帯電電位の時間依存性を示す。表面電位は時間と共に高くなり、次第に飽和する傾向を示す。しかしながら、 $E \geq 2\text{keV}$ の場合カプトンは負に帯電するが、 $E = 1\text{keV}$ と 0.5keV の場合に正に帯電するということがわかる。

このような帯電特性から、 $E \leq 20\text{keV}$ で、 $J_b = 0.08\text{nA/cm}^2$ の条件で電子ビームを照射し、60分間照射した時の表面電位を照射エネルギーの関数として示すと、図9のようになる。この図から、負帯電は $E > 1.8\text{keV}$ の場合に生じ、 $E < 1.8\text{keV}$ では正に帯電するということがわかる。このことから、 $E = 1.8\text{keV}$ が、カプトンにおける2次電子放出係数が1になるエネ

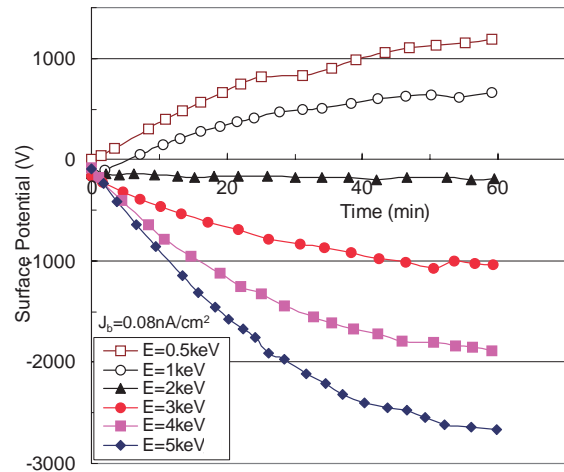


図8 $E = 5\text{keV}$ 以下での電子ビーム照射によるアルミ蒸着カプトンの表面電位-時間特性

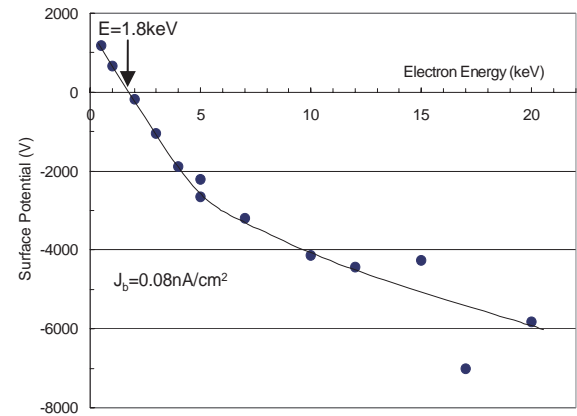


図9 アルミ蒸着カプトンに $J_b = 0.08\text{nA/cm}^2$ で60分照射した場合の表面電位の照射エネルギー依存性

ルギーであると考えられる。

(b)電子ビーム照射後の帯電電位減衰特性

50 μm 厚カプトンにおいても、各種の電子ビーム照射条件で60分間照射した後、表面電位の減衰特性を測定した。その結果の例を図10に示す。この図において、 $E = 3\text{keV}$ で照射された後の初期表面電位が低い場合の減衰は1本の直線で近似できるが、 $E = 10\text{keV}$ で照射された初期表面電位が高い場合には1本の直線で近似できないと考えられる。そのため、同図に示したように2本の直線で近似した。つまり、(1)式の減衰時定数 τ には2つの成分があり、短時間領域(0-200分)の早い成分 τ_f と長時間領域(>1000分)の遅い成分 τ_s の2つから成っていると考えられる。このような減衰時定数から、(2)式とカプトン(ポリイミド)の比誘電率 $\epsilon_r = 3.5$ を使って体積抵抗率 ρ を求めた。図11に、その体積抵抗率の照射電子エネルギー依存性を示す。この図から、 $E \geq 4\text{keV}$ では、体積抵抗率が短時間領域の減衰時定数か

ら求めたものと長時間領域の減衰時定数から求めたものの2つに分離するが、 $E < 4\text{keV}$ では1つの体積抵抗率として求められた。この図において、 $E < 4\text{keV}$ の体積抵抗率と、 $E \geq 4\text{keV}$ の長時間領域の体積抵抗率はほぼ等しく $(2-3) \times 10^{16} \Omega\text{m}$ であると考えられる。また、図12には、初期表面電位の関数として短時間領域の体積抵抗率をプロットした。この図から、体積抵抗率は、初期表面電位の増加と共に低下するが、テフロンFEPの場合(図7(b))で見られたような正負の違いはないと考えられる。また、同程度の電位で比較すると、カプトンの体積抵抗率はテフロンFEPの体積抵抗率よりも低いことがわかる。

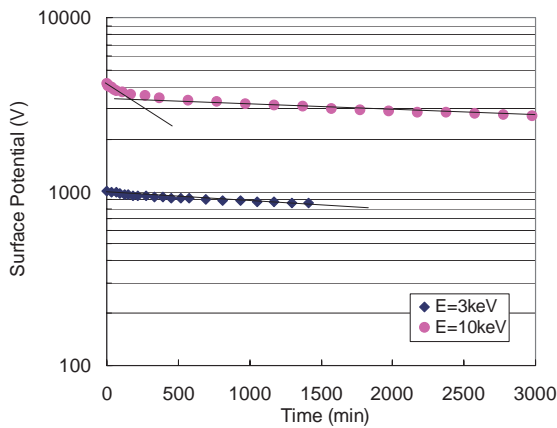


図10 アルミ蒸着カプトンにおける電子ビーム照射後の表面電位減衰特性の例(負電位)

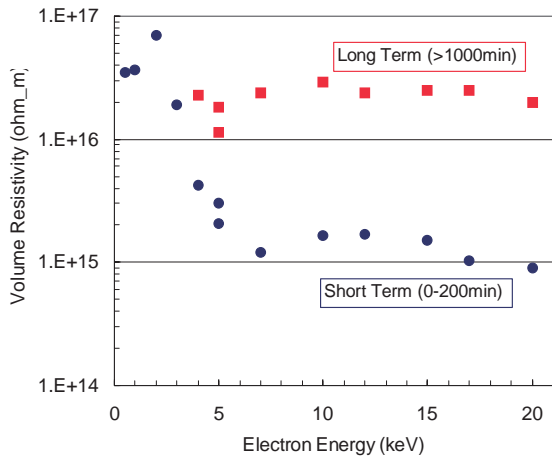


図11 アルミ蒸着カプトンにおける体積抵抗率の照射エネルギー依存性

4. 実験結果の検討

4.1 帯電特性と2次電子放出について

$E \leq 20\text{keV}$ のエネルギーの電子ビームを照射することにより、テフロンFEPとカプトンの帯電特性を取得した。その結果、いずれの熱制御材料においても、帯電が生じない照射エネルギーが存在すること

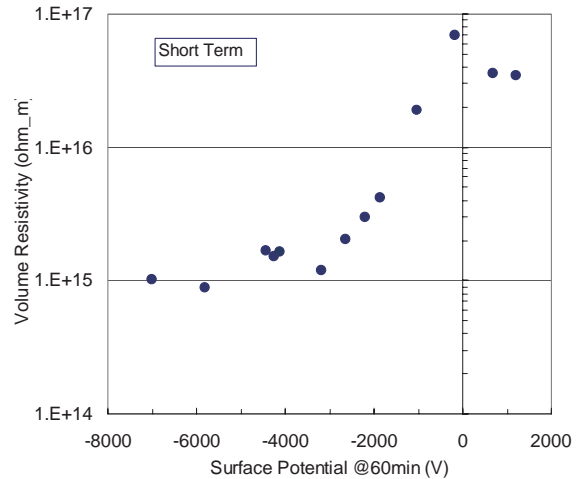


図12 アルミ蒸着カプトンにおける体積抵抗率の表面電位依存性

がわかった。そのエネルギーよりも高いエネルギーの電子を照射すると負に帯電するが、そのエネルギー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。この照射エネルギーは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13に、一般的な絶縁材料の2次電子放出特性を照射電子のエネルギーの関数として示す⁽⁶⁾。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。何故なら、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。今回の実験で得られたこの E_{II} を表1に示す。

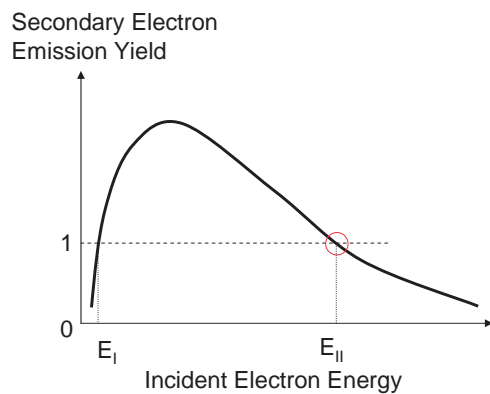


図13 一般的な2次電子放出特性

表1 今回得られた各種熱制御材料の特性

Material	E_{II} (keV)	Volume Resistivity (Ωm) @ 1000V
Teflon FEP	2.7	2×10^{18} (negative) 2×10^{17} (positive)
Kapton	1.8	2×10^{16}

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よりも小さいので絶縁物は負に

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次電子の数を増加させることになる。こうして、負に帯電した絶縁物に入射する実質的なエネルギーが E_{II} になったとき、負の表面帯電は停止し、つまり表面電位は $(E-E_{II})$ 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次電子放出係数は1よりも大きいので、絶縁物は正に帯電し、後続の照射電子はその正帯電によって加速されることになる。加速された電子による2次電子放出数は低下することになる。こうして、正に帯電した絶縁物に入射する実質的なエネルギーが E_{II} になったとき、正の表面帯電は停止し、表面電位は $(E-E_{II})$ で飽和することになる。

上記のことは、テフロンFEPで得られた結果をかなりうまく説明する。例えば、図2(a)で、 $E=5\text{keV}$ で照射された場合 -2.3kV 程度で飽和しているが、これは $E_{II}=2.7\text{keV}$ であることから説明できる。

4.2 体積抵抗率について

テフロンFEPとカプトンにおいて、電子ビーム照射後の電位減衰特性から体積抵抗率を求め、図7(b)と図12示したように、初期表面電位の増加と共に体積抵抗率は低下した。このことは、体積抵抗率に材料のバルク電界強度依存性があるということを示している。それ故、衛星帯電電位分布解析においては、この熱制御材料の体積抵抗率のバルク電界強度依存性を考慮する必要があると考えられる。表1には、図7(b)、図12から得られた表面電位1000Vでの体積抵抗率を示している。この表から、テフロンFEPの体積抵抗率は、カプトンよりも1桁以上高いということがわかる。これは、銀蒸着テフロンFEPが熱制御材料として非常に帯電しやすいということを示している。しかしながら、テフロンFEPの体積抵抗率は正帯電の場合には小さくなり、これはテフロンFEPがホール電導を行う可能性を示していると思われる⁽⁷⁾。

5. まとめ

銀蒸着テフロンFEPとアルミ蒸着カプトンの2種類の熱制御材料に対して、宇宙環境プラズマ中の電子を模擬した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、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) テフロンFEPは、カプトンに比べると1桁以上体積抵抗率が高いので、高い電位に帯電しやすい。
- (2) いずれの材料においても、ある閾値エネルギーよりも高いエネルギーの電子を照射すると負に帯電し、その閾値エネルギーよりも低いエネ

ルギーの電子を照射すると正に帯電する。

- (3) その閾値エネルギーは、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、テフロンFEPで2.7keV、カプトンでは1.8keVと求められた。
- (4) 電子ビーム照射後の電位減衰特性から、体積抵抗率を求めると、テフロンFEPでは $10^{18}-10^{17}\Omega\text{m}$ で、表面電位が高いほど体積抵抗率は小さくなった。つまり、体積抵抗率にはバルク電界強度依存性がある。また、カプトンも体積抵抗率にバルク電界強度依存性があり、その値は $10^{16}-10^{15}\Omega\text{m}$ 程度であった。

参考文献

- 1) H. B. Garrett, "The charging of spacecraft surfaces", Rev. Geophys. Space Phys., Vol.19, pp.577-616 (1981)
- 2) C. K. Purvis, N. J. Stevens and J. C. Oglebay, "Charging characteristics of materials: Comparison of experimental results with simple analytical models", Proc. Spacecraft Charging Technology Conf., NASA TMX-73537, pp.459-486 (1977)
- 3) H. Fujii, Y. Shibuya, Y. Abe and R. Kasai, "Electrostatic charging and arc discharges on satellite dielectrics simulated by electron beam", J. Spacecrafts and Rockets, Vol.25, pp.156-161 (1988)
- 4) 廣・藤井、「電子ビーム照射による宇宙用熱制御材料高分子フィルムの帯電特性」、電気学会論文誌 A, 第117巻、pp.805-811(1997)
- 5) D. Hastings and H. Garrett, *Spacecraft - Environment Interactions*, Cambridge University Press, pp.53-70 (1996)
- 6) R. F. Willis and D. K. Skinner, "Secondary electron emission yield behaviour of polymers", Solid State Commun., Vol.13, p.685 (1973)
- 7) B. Gross, M. Sessler, H. von Seggarn and J. West, Appl. Phys. Letter, Vol.34, p.555 (1979)