

論 文

電子ビーム照射によるポリエチレンテレフタレート (PET) フィルムの帶電特性とその解析

藤井 治久*,†, 廣三壽**

(1999年4月15日受付; 1999年10月26日受理)

Charging Characteristics of Polyethylene Terephthalate (PET) Film Induced by Electron Beam

Haruhisa FUJII* and Sanju HIRO**

(Received April 15, 1999; Accepted October 26, 1999)

We investigated the electrostatic charging phenomena of polyethylene terephthalate (PET) film used as the thermal control material of spacecraft by electron irradiation simulating the hot plasma in space. The PET film of the thickness of $25 \mu\text{m}$ was tested under the irradiation conditions of the electron energy E lower than 40 keV and the beam current density J_b lower than 1nA/cm^2 . The surface potential V_s of the film was obtained as functions of E and J_b at the constant irradiation time. The obtained experimental results are as follows. (1) V_s increased with increase of J_b . When $V_s \propto J_b^n$ is assumed, the n value is between 0.5 and 0.8. (2) In V_s-E characteristic, V_s has the peak at about 15 keV. These results were explained by an one-dimensional charging model in which one charge-deposition layer is assumed to be formed in the bulk of the film and the volume resistivity and the secondary electron emission coefficient of the PET film are considered.

1. はじめに

通信衛星などの人工衛星表面には、宇宙の熱真空環境から衛星内部に搭載された機器を熱的に保護する目的で、各種の熱制御材料が使用される。熱制御材料には、高分子フィルムの裏面に金属を蒸着したフレキシブルタイプや、石英ガラス板の裏面に銀を蒸着したリジッドタイプ（通常、OSR: Optical Solar Reflector と呼ばれる）がある。これらの熱制御材料は、高分子フィルムや石英ガラス板などの絶縁物が宇宙に露出した形態で、衛星表面の広い面積にわたって取り付けられる¹⁾。このため、これらの熱制御材料は宇宙環境に存在する電子、陽子などの荷電粒子により帶電し、特に、静止軌道（高度 36,000 km）等の高々度を飛翔す

る衛星が地球の蝕に入った場合や、地磁気嵐²⁾に遭遇した場合、電子の影響を大きく受けることが知られている³⁻⁵⁾。この帶電により、宇宙機器・システムが種々の悪影響を受ける。例えば、衛星本体から放出された促進材などが静電的に表面に付着して衛星表面材料の特性劣化を引き起こしたり、放電を誘発し衛星の予期せぬ動作異常を生じさせたりする³⁻⁵⁾。従って、この衛星表面材料の帶電機構を解明し、帶電抑制・防止技術を開発することが、将来大型化する衛星の信頼性向上、長寿命化に不可欠である。

ところで、この衛星表面材料の帶電現象に関し、NASA (National Aeronautics & Space Administration) や ESA (European Space Agency) などを中心にして、宇宙環境を模擬した荷電ビーム照射による各種表面材料の帶電特性評価や、材料表面の導電性コーティングによる帶電防止技術などが種々検討され⁶⁾、また我が国でも帶電に起因した放電に伴うガス放出などの検討が行われているが⁷⁾、材料の帶電機構について充分な検討が行われていないのが現状であると考えられる。

以上の観点から、著者らはこれまで、静止軌道などの高々度の宇宙プラズマ中を飛翔する衛星が太陽活動の活発な地磁気嵐発生時に地球の蝕に入った場合に受ける電子流を模擬した電子ビームを高真空中で照射することにより、

キーワード：電子ビーム照射、ポリエチレンテレフタレート (PET)、宇宙環境、熱制御材料、帶電

* 三菱電機株式会社先端技術総合研究所 (661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1)

Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation, 8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661-8661, Japan

** 現) アドバンスト・ディスプレイ (ADI) (861-1198 熊本県菊池郡西合志町御代志 997)

Advanced Display Inc. (ADI), 997, Miyoshi, Nishigoshi, Kikuchi, Kumamoto 861-1198, Japan

[†] fujii@ele.crl.melco.co.jp

テフロン FEP (Fluorinated Ethylene Propylene Co-polymer) やカプトン PI (Poly Imide) などの高分子フィルムの帶電や放電特性を取得し、その解析を行ってきた⁸⁻¹⁰⁾。本論文では、これらの高分子フィルムの中で、多層熱制御材料としてよく使用されるマイラ PET (Polyethylene Terephthalate) フィルムの帶電と放電に関し詳細な実験データを取得し、先行論文で用いた手法により解析を行った結果について述べている。電子ビーム照射は、平均エネルギーが数 10 keV、ビーム電流密度が 10^{-9} A/cm^2 に達する過酷な条件¹¹⁾ を模擬し、暗室内で照射した。ここでは、電子ビーム照射による PET フィルムの帶電電位のビーム電流密度や電子エネルギー依存性などを詳細に検討し、フィルムへの電子侵入深さやフィルムの体積抵抗率の視点から帶電機構に関して考察し、その一次元モデルによるシミュレーションについても併せて検討した。

2. 実験方法

図 1 に、本実験で用いた電子ビーム照射系および測定系の概略図を示している。

直径 57 mm に切り出した、裏面がアルミ蒸着された厚さ $25 \mu\text{m}$ のマイラ PET フィルムを試料台に取り付けた後、真空容器に納めソープショーンポンプとイオンポンプで真空排気を行った。真空容器内の圧力が $1.3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ ($1 \times 10^{-6} \text{ Torr}$) 以下になった時点でエネルギー E およびビーム電流密度 J_b の電子ビームを試料に照射した。照射時間 T_i は全て 60 分とした。試料表面でのビーム径は約 70 mm であるが、試料台の内径が 50 mm であるので、照射領域は 19.6 cm^2 である。なお、ビーム電流密度は、予め試料台部中央に取り付けたファラデーカップにより測定した。

試料の表面電位は非接触表面電位計 (TREK 340HV 型) を用いて測定した。電子ビーム照射中は、表面電位計に接続された静電プローブ (TREK 4031S 型) の検知部 6 が図 1 (b) に示した軌跡を描くように、回転運動導入機に取り付

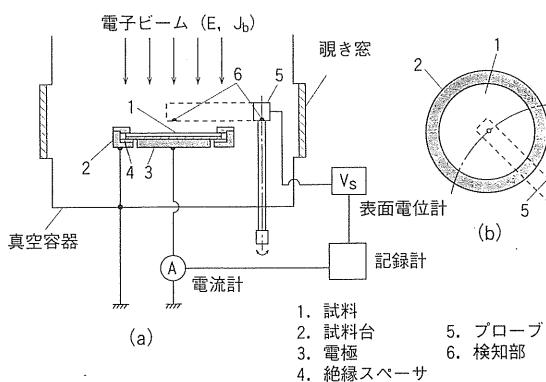


図 1 実験系の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

けられたプローブを試料表面上で掃引した。プローブと試料表面との間隔は 5~6 mm とした。また、電子ビーム照射中の試料フィルム中を流れるバルク電流を、エレクトロメータ (Keithley 410A 型) で測定した。

なお、測定は全て室温 (20°C) で行った。

実験に供した PET フィルムの諸元を表 1 に示す。

3. 実験結果

3.1 電子ビーム照射による帶電電位の時間特性

前章で述べた実験方法により、供試 PET フィルムの帶電特性を種々の電子ビーム照射条件下で取得した。その一例として、図 2 に、 $E=20 \text{ keV}$ の電子ビームを種々のビーム電流密度で照射したときの表面電位およびバルク電流の時

表 1 供試 PET フィルムの諸元

Table 1 Tested PET film.

フィルム名	マイラ PET Polyethylene terephthalate
比誘電率 ϵ_r	3.1
密度 $\rho [\text{g}/\text{cm}^3]$	1.38
体積抵抗率 $\rho_v [\Omega \cdot \text{cm}]$	1.0×10^{18}
厚さ $d [\mu\text{m}]$	25
蒸着金属	アルミニウム

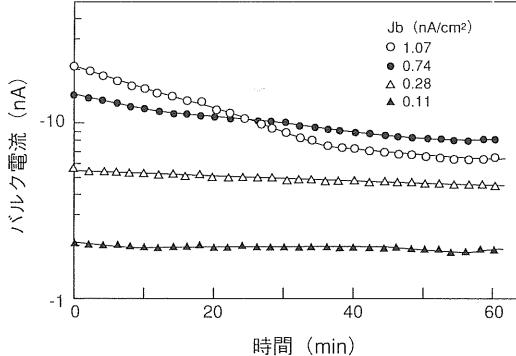
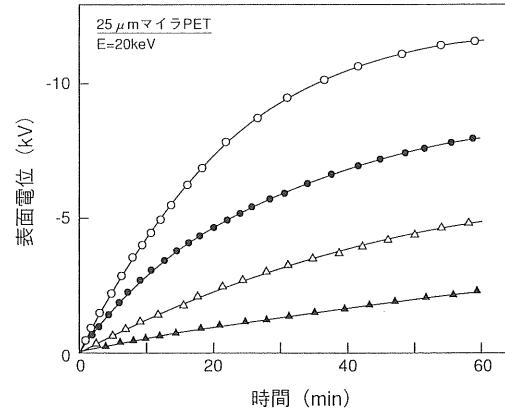


図 2 $E=20 \text{ keV}$ での帶電特性

Fig. 2 Charging characteristics of PET film irradiated by electron beam with $E=20 \text{ keV}$.

(a) 表面電位の時間特性、(b) バulk電流の時間特性。

間特性を示す。これらより、次のことがわかる。

(1) 表面電位 V_s は時間と共に単調に増加するが、次第に表面電位形成速度 dV_s/dt は小さくなる。また、初期表面電位形成速度はほぼビーム電流密度に比例するが、ビーム電流密度の大きい場合、表面電位は早く飽和する傾向にある。

(2) パルク電流は時間の経過と共に次第に減少していくが、ビーム電流密度が大きいほど減少速度は大きい。

このような帶電の時間特性は、先行の論文¹⁰⁾に示したテフロン FEP の場合と同じであるが、FEP で見られたような沿面放電は、PET において今回の照射条件下では発生しなかった。

3.2 帯電電位のビーム電流密度依存性

3.1 節で述べた表面電位-時間特性における $T_i=60\text{ min}$ での表面電位を各照射エネルギー下でのビーム電流密度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 V_s はビーム電流密度 J_b の増加と共に高くなるが、次第に

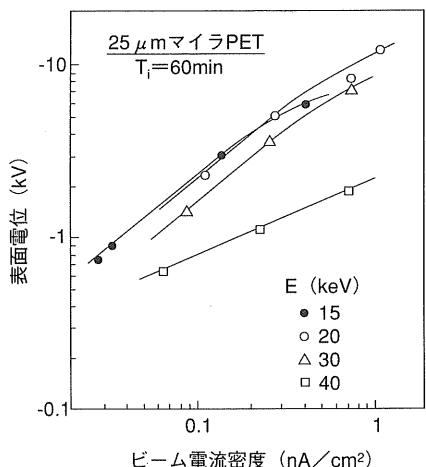


図 3 表面電位のビーム電流密度依存性

Fig. 3 Electron-beam current density dependences of surface potential of PET film.

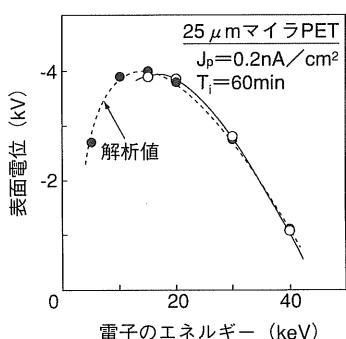


図 4 表面電位の電子の照射エネルギー依存性 ($J_b=0.2\text{ nA}/\text{cm}^2$)

Fig. 4 Electron energy dependence of surface potential of PET film irradiated by electron beam with $J_b=0.2\text{ nA}/\text{cm}^2$.

飽和の傾向を示す。この図より、 $V_s \propto J_b^n$ とすると、 n 値は低 J_b の場合、

$$E=15\sim30\text{ keV} \text{ のとき, } n \approx 0.8$$

$$E=40\text{ keV} \text{ のとき, } n \approx 0.5$$

となる。

3.3 帯電電位の照射エネルギー依存性

次に、図 3 に示した表面電位のビーム電流密度依存性から、 $J_b=0.2\text{ nA}/\text{cm}^2$ での表面電位を照射エネルギーの関数として求めた。図 4 に、その実験結果を実線で示している。これより、表面電位は照射エネルギーに依存し、高エネルギー領域ではエネルギーと共に低くなるが、約 15 keV で表面電位がピークを持つ傾向にあるということがわかる⁹⁾。

4. 実験結果の検討

ここでは、得られた結果を説明するために、まず帶電のモデル化を行い、そのモデルに基づいた帶電形成の定式化を行う。そのモデル化式にパラメータを導入して帶電特性をシミュレーション解析し、実験値と比較検討する。最後に初期帶電特性についても言及する。

4.1 帯電のモデル化

エネルギー E の電子ビームを絶縁物に照射すると、入射電子はそのエネルギーによって決まる深さ分布をもって蓄積するが^{12,13)}、時間の経過と共に電気伝導と拡散によりその電荷の蓄積はある密度分布を形成していく。ここでは簡略化のために、電子ビームが照射される面から x の位置に、注入された全電子が蓄積し、表面電位 V_s が形成されると仮定する図 5 に示した一次元モデルを考える。この場合、

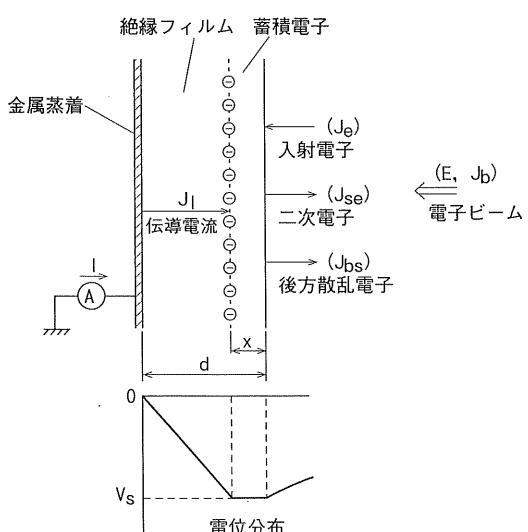


図 5 電子ビーム照射による絶縁物の一次元帯電モデル

Fig. 5 An one-dimensional charge-up model of insulator irradiated by electron beam.

電流計で観測されるパルク電流 I は、変位電流成分と伝導電流成分とから成り、次式で表される。

$$I = a \{ C \cdot dVs/dt + Jl(Vs) \} \quad (1)$$

$$= a \{ Je(E, Vs) - Jse(E, Vs) - Jbs(E, Vs) \} \quad (2)$$

ここで、 a ：試料の表面積、 C ：試料の単位面積当たりの静電容量、 Jl ：伝導電流密度、 Je ：試料に入射する電子電流密度、 Jse ：二次電子放出電流密度、 Jbs ：後方散乱電子電流密度である。なお、このモデルでは、表面漏洩電流は帶電への寄与が小さいので、無視している。

(1) および (2) 式より、

$$\begin{aligned} C \cdot dVs/dt &= Je(E, Vs) - Jse(E, Vs) \\ &\quad - Jbs(E, Vs) - Jl(Vs) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。

ところで、試料表面の電位が 0V のときの電子の試料表面到達時の速度を v_o 、帶電電位が Vs のときの電子の表面到達時の速度を v_s 、更に、電子の質量、電荷量を、それぞれ、 m 、 e 、電子の加速電圧を Vb ($eVb=E$) とすると、

$$eVb = mv_o^2/2, e(Vb - Vs) = mv_s^2/2$$

であるので、

$$v_o = (2eVb/m)^{1/2}, v_s = \{2e(Vb - Vs)/m\}^{1/2}$$

と表され、帶電電位が Vs のときの入射電子電流密度 Je は、

$$Je = Jb \cdot (v_s/v_o) = Jb(1 - Vs/Vb)^{1/2} \quad (4)$$

となる。また、 Jse 、 Jbs は Je に比例するので、

$$\left. \begin{aligned} Jse &= Ase Je = Ase Jb (1 - Vs/Vb)^{1/2} \\ Jbs &= Abs Je = Abs Jb (1 - Vs/Vb)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

と表される。ここで、 Ase ：二次電子放出係数 [$= K \cdot (E - eVs)^{-0.725}$ 、 K ：定数]、 Abs ：後方散乱係数 [$= 0.1(E - eVs)^{-0.2}$]^{14,15)}、である。(4) 式と (5) 式から、(3) 式は、

$$C \cdot dVs/dt = Jb(1 - Vs/Vb)^{1/2} \cdot (1 - Ase - Abs) - Jl \quad (6)$$

となる。

また、上述したように、全電子が x の位置に蓄積すると仮定したので、実効的な単位面積当たりの静電容量 C は、

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r / (d - x) \quad (7)$$

として表される。ここで、 ϵ_0 ：真空中の誘電率、 ϵ_r ：材料の比誘電率、 d ：サンプル厚さ、である。

更に、伝導電流密度 Jl は、 x の位置に蓄積した電荷によって形成される電界 $Vs/(d-x)$ と体積抵抗率 ρ_v によって、

$$Jl = 1/\rho_v \cdot Vs/(d-x) \quad (8)$$

と表される。

以上から、(6) 式は

$$\begin{aligned} dVs/dt &= (d-x)/\epsilon_0 \epsilon_r \cdot [Jb(1 - Vs/Vb)^{1/2} \cdot \\ &\quad (1 - Ase - Abs) - 1/\rho_v \cdot Vs/(d-x)] \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

4.2 帯電モデルによるシミュレーション

前節のモデル化式 (9) に、表 1 に示した PET フィルムの物性値 ϵ_r 、 ρ_v および厚さ d を、また文献^{15,16)}により二次電子放出係数 Ase に対して $K=1.0$ を代入して、実験値にできる限りフィットする x を求めてシミュレーション解析した。なお、本解析において PET の体積抵抗率 ρ_v は、ポリイミド PI のような電界依存性⁹⁾がないと仮定した。図 2 に示した $E=20$ keV、 $Jb=1.07$ nA/cm² と $Jb=0.28$ nA/cm² の照射条件を例にとって、(9) 式により電子ビーム照射時の帶電電位の時間特性を求める、図 6 の破線の解析値になる。但し、この場合、 $x=6.3 \mu\text{m}$ とした。解析値と実線の実験値(図 2(a) より)とがよく一致していると考えられる。

このようにして、各照射条件下で $Ti=60$ min 後の到達表面電位 Vs をシミュレーションによって求め、照射エネルギー依存性として示したのが、図 4 の破線である。なお、これらの解析において実験結果に最もよく一致するシミュレーション結果を与える x の値を表 2 に示す。

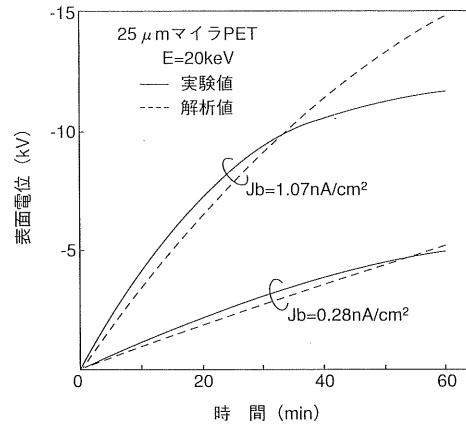


図 6 25 μm PET フィルムにおける帯電特性の実験値と解析値の比較

Fig. 6 Comparison between the experimental result and the analytical result for the charging characteristic of the electron-beam-irradiated 25 μm thick PET film.

表 2 電子の蓄積距離 x

Table 2 Distance x of electron deposition layer from the surface of the PET film.

電子エネルギー $E[\text{keV}]$	電子の蓄積距離 $x[\mu\text{m}]$
15	3.8
20	6.3
30	12.5
40	20.5
電子の飛程 R との比較	
$@ Jb=0.2 \text{ nA/cm}^2, Ti=60 \text{ min.}$	

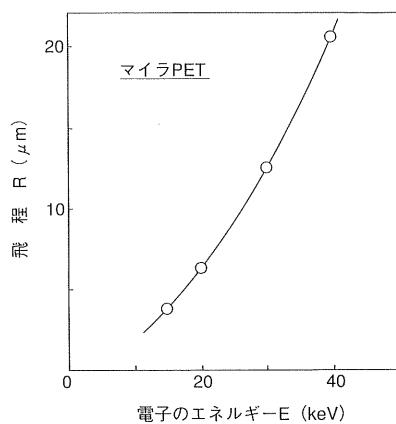


図 7 PET における飛程 R の照射エネルギー依存性
Fig. 7 Electron energy dependence of electron depth R for the PET film.

4.3 電子蓄積位置について

ところで、4.1節で述べたように、電子は照射エネルギーで決まる深さ分布をもって蓄積するが、この最大侵入距離(飛程) R (表面電位が 0 V のときの飛程)は、Gledhill によって次の経験式で与えられている¹²⁾.

$$R = r_p / \rho \quad (10)$$

$$\log(r_p) = -5.1 + 1.358 \cdot \log E + 0.215(\log E)^2 - 0.043(\log E)^3 \quad (11)$$

ここで、 r_p : 実用飛程 [g/cm²]、 E : 電子のエネルギー [keV](但し、 $E < 50$ keV)、 ρ : 密度 [g/cm³]、である。図 7 に、(10) 式および(11)式を用い、PET に対して実験の照射エネルギーで飛程 R を計算した結果を示している。

この飛程 R と、前節で最適値として求められた電子蓄積位置 x とを比較すると、PET に対して、文献 9)で求めた $x=R$ の関係になる。このことは、次のように考えることができる。PET フィルムが電子ビーム照射により帶電するとその電位により照射電子は減速され、電子の蓄積位置が次第に照射面側に移動する。しかし、帶電によって生じたバルク電界と体積抵抗率による伝導電流((8)式)が増え、電子は対向電極側に移動し、PET 中の電子の見かけ上の位置は帶電しても 0 V のときとほとんど変わらないと考えられる。

4.4 帯電電位の電子照射エネルギー依存性について

図 4 に示した到達表面電位の照射エネルギー依存性において、実験値、解析値共に 15 keV のエネルギーを持つ傾向にあるということがわかる。このピークを示す照射エネルギーは材料および膜厚により変化する⁹⁾。その原因は次のように考えられる。

15 keV 以下の低照射エネルギーの場合、エネルギーが大きくなると二次電子放出係数 ($Ase+Abs$) は小さくなるため¹⁶⁾、(9)式より、同一ビーム電流密度 Jb では蓄積される

電荷量が大きくなる。よって、同一 Jb 条件で照射エネルギーが大きくなると到達表面電位も大きくなる。しかし、表 2 に示したように、照射エネルギーが大きくなり電子の蓄積位置 x が試料厚さに比べて無視し得ないようになると、(7)式より見かけ上の静電容量 C が大きくなると共に、非照射領域の電界強度 $Vs/(d-x)$ も大きくなるため、(8)式より伝導電流密度も大きくなり、電位形成速度 dVs/dt は小さくなる。このため、一定照射時間での到達表面電位は小さくなると考えられる。従って、図 4 に示したような、照射エネルギーに対して表面電位 Vs がピークを持つ特性が得られると考えられる。

4.5 帯電電位のビーム電流密度依存性について

次に、図 3 の $Vs-Jb$ 特性について検討する。テフロン FEP フィルムのように体積抵抗率 ρ_v が大きく ($\rho_v=1.0 \times 10^{19} \Omega\text{cm}$)、高電界での伝導電流密度 Jl が無視しうる場合を考えると⁹⁾、(9)式より、

$$dVs/dt = (d-x)/\epsilon_0\epsilon_s \cdot Jb (1-Vs/Vb)^{1/2} \cdot (1-Ase-Abs) \quad (9')$$

となる。帯電電位 Vs が加速電圧 Vb に比べて充分小さい場合、つまり、 $Vs/Vb \ll 1$ 、 $Ase+Abs \ll 1$ の場合、

$$dVs/dt \simeq (d-x)/\epsilon_0\epsilon_s \cdot Jb \quad (9'')$$

と表され、 $dVs/dt \propto Jb$ となる。これは、一定時間でほぼビーム電流密度 Jb に比例して表面電位 Vs が高くなるということを示している。つまり、 $Vs \propto Jb^n$ とすると、 $n=1$ である。しかしながら、PET の場合、表 1 に示したように、 $\rho_v=1 \times 10^{18} \Omega\text{cm}$ であるため、FEP の ρ_v に比べると小さく、伝導電流 Jl が無視し得ず、 $0.5 < n < 0.8$ となる特性が得られたものと考えられる。

4.6 帯電電位形成の初期特性について

図 2(a) のように、一定エネルギーの電子ビームを照射すると、表面電位 Vs はビーム電流密度 Jb が大きければ早く立ち上がる。これは、照射初期では表面電位が小さく、伝導電流成分 Jl が無視し得るので、(9'')式より dVs/dt がほぼ Jb に比例するためである。一方、照射エネルギーが大きくなると、電子の侵入距離が大きくなるので、(7)式より試料の実効的な静電容量 C は大きくなる。従って、(9'')式より、ビーム電流密度 Jb が一定であっても、照射エネルギーが大きい場合、電位形成速度 dVs/dt が小さくなる。

5. まとめ

人工衛星用熱制御材料として使用されるマイラ PET フィルムに電子ビームを照射することにより帶電特性を検討した。電子ビーム照射条件は、静止軌道など高々度の宇宙環境にある人工衛星が遭遇するであろう苛酷な電子流を模擬し、エネルギー 15~40 keV、ビーム電流密度 1 nA/cm² 程

度以下の範囲で行った。その結果、次のことがわかった。

- (1) 一定時間内に到達する表面電位はビーム電流密度 J_b と共に高くなり、 $V_s \propto J_b^n$ とすると、 $0.5 < n < 0.8$ となる。
- (2) 一定ビーム電流密度で一定時間に到達する表面電位は、15~40 keV の本実験条件下で照射エネルギーが小さくなるにつれて高くなるが、約 15 keV をピークに低下する傾向を示す。このピークが生ずる原因是、PET フィルム表面からの電子の侵入蓄積距離が照射エネルギーによって変化することから説明される。

参考文献

- 1) 門谷建蔵、佐藤文彦：電気学会誌, **105** (1985) 1046
- 2) 上出洋介：オーロラと磁気嵐, p. 31, 東京大学出版会 (1982)
- 3) H.B. Garrett: Rev. Geophys. Space Phys., **19** (1981) 577
- 4) 藤井治久、西本博信：静電気学会誌, **13** (1989) 172
- 5) 藤井治久、園田克己、西本博信：電気学会論文誌 A, **113** (1993) 609
- 6) 例えは、Spacecraft Charging Technology 1980, NASA CP-2182/AFGL-TR-81-0270 (1981)
- 7) 小松原実、石井 勝、津村英志：電気学会論文誌 A, **114** (1994) 528
- 8) H. Fujii, Y. Shibuya, T. Abe, R. Kasai and H. Nishimoto: J. Spacecraft & Rockets, **25** (1988) 156
- 9) 廣 三壽、藤井治久：電気学会論文誌 A, **117** (1997) 805
- 10) 廣 三壽、辻 孝誠、藤井治久：電気学会論文誌 A, **117** (1997) 1157
- 11) C.K. Purvis, H.B. Garrett and A.C. Whittlesey: NASA TP-2361 (1984)
- 12) B. Gross: Topics in Appl. Phys., **33** (1979) 217
- 13) A. Palov, H. Fujii and S. Hiro: Jpn. J. Appl. Phys., **37** (1998) 6170
- 14) C.K. Purvis, N.J. Stevens and J.C. Oglebay: Proc. Spacecraft Charging Technol. Conf., AFGL-TR-77-0051/NASA TMX-73537 (1977) 459
- 15) R.D. Reeves and K.G. Balmain: IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-28** (1981) 4547
- 16) R.F. Willis and D.K. Skinner: Solid State Commun., **13** (1973) 685