

電子線照射中における宇宙機用絶縁材料内部の空間電荷測定

本城正人*, 丸田真吾, 田中康寛, 高田達雄, 渡邊力夫
(武蔵工業大学)

Measurement of Space Charge in Electron Beam Irradiated Dielectric Materials for Spacecraft

Masato Honjoh, Shingo Maruta, Yasuhiro Tanaka, Tatu Takada, Rikio Watanabe
(Musashi Institute of Technology)

1. はじめに

人工衛星などの宇宙機は温度変化の激しい宇宙環境を飛行するため、機内の温度を一定に保つ必要があり、ポリイミドなどの絶縁材料フィルムを積層したサーマルブランケット (MLI: Multilayer Insulation) と呼ばれる断熱材で覆われている。これらの絶縁材料フィルムは、宇宙環境、すなわちプラズマ環境や放射線環境下に曝されることで、内部に電荷が蓄積し帯電する。帯電量が大きくなると放電事故が発生し、絶縁材料の劣化や搭載されている機器の誤作動・故障を引き起こすといわれている。そのため、宇宙機的设计にはポリイミドに代表される絶縁材料等の電気的特性が重要な要因となる。しかし、現在検討されている宇宙機設計のガイドラインでは、電子線などの高エネルギー粒子線が照射された絶縁材料の電気的特性はほとんど考慮されていない。

そこで本研究では、上述した宇宙機用絶縁材料内部で生じる帯電現象 (内部帯電) のメカニズムを解明するために、絶縁材料内部の電荷分布を計測する装置を開発してきた。また、真空チャンバーに設置した電子線照射装置を用いて電子線照射環境を模擬し、空間電荷分布測定法として実績のある圧力波法 (PWP 法) を用いて、真空環境における電子線照射中の高分子絶縁材料内部に蓄積する空間電荷分布測定を可能とした。これらの計測システムを用いて、これまで、絶縁材料として MLI に最も多く使用されているポリイミド (PI) および国際宇宙ステーション等で使用されているポリテトラフルオロエチレン (PTFE) に電子線を照射し、照射中および照射後のリアルタイム内部帯電計測を行ってきた。今回は、PI および PTFE に電子線を照射した際に試料内部に蓄積する電荷量および電荷分布の違いについて以下に報告する。

2. PWP 法測定原理

図 1 に PWP 法の測定原理図を示す。圧電素子にパルス電界 $e(t)$ を印加することで発生する圧力波 $p(t)$ は、電極内を伝搬し、試料に到達する。図 1 に示すように内部に空間電荷 $\rho(z)$ が存在している誘電体試料中に圧力波が伝搬すると、

試料が厚み方向に微小に変位し、それにもとない試料中に分布している空間電荷も微小変位する。その結果、試料を含む閉回路に変位電流 $i(t)$ が流れる。この変位電流 $i(t)$ を検出することで試料内部の空間電荷分布の情報を得る。また、この検出信号をアンプにより増幅し、オシロスコープで電圧信号として検出する。その後、PC により適切な信号処理を行うことで試料中の空間電荷分布を得ることができる。

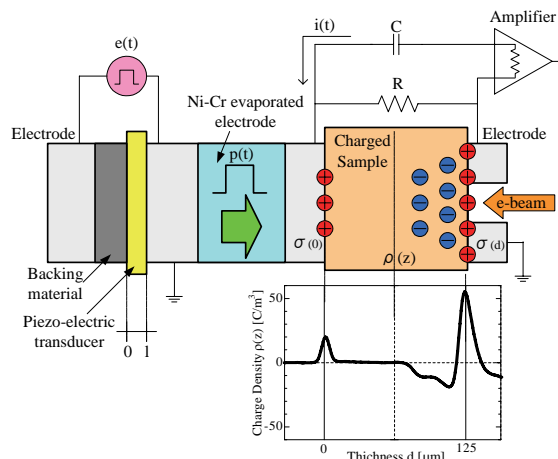


図 1 PWP 法測定原理

3. 測定装置

<3-1. PWP 測定装置>

図 2、3 に PWP 測定装置の概略図および写真を示す。本装置には、電子線を試料に照射するための直径 10mm の照射孔が照射側電極に設置され、試料表面に蒸着されたアルミ電極とともに、接地電極を構成している。また、下部電極として石英ガラス上面に Cr-Ni を蒸着して、信号検出電極として用いている。石英ガラスは、信号検出用の電極を接地導体から絶縁するために用いている。なお、真空下で試料と電極の密着性を高めるために、ガラス上面に溝を加工し、試料と電極間の空気を排気する構造にしている。

この測定装置では厚さ $4\mu\text{m}$ の PVDF (ポリフッ化ビニリデン) に、パルス幅 1nsec、電圧値 200V のパルス電圧を印加することで、幅 1nsec のパルス圧力波を発生させることができる。現在、本測定装置の位置分解能は約 $6\mu\text{m}$ であり、厚さ $50\mu\text{m}$ 程度以上の試料が測定可能となっている。

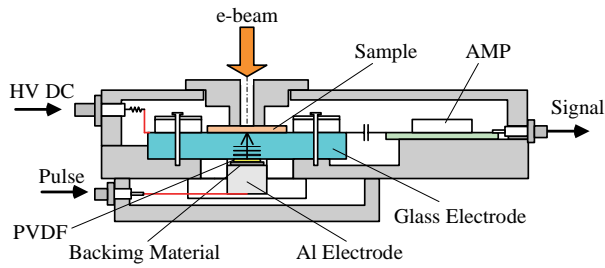


図2 PWP測定装置

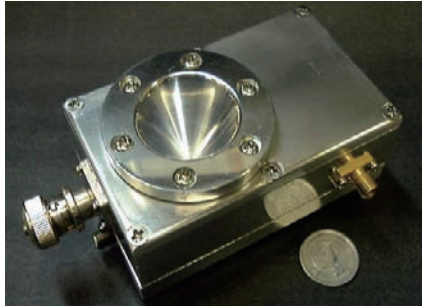


図3 測定装置写真

<3-2. 電子線照射用真空チャンバー>

図4に電子線照射用真空チャンバーの概略図、図5にチャンバーの写真を示す。電子線の照射には電子顕微鏡用のタングステンフィラメントを用い、加速エネルギー100keVまでの電子線照射が可能であり、チャンバー内の真空度は約 10^{-5} Paまで到達可能である。

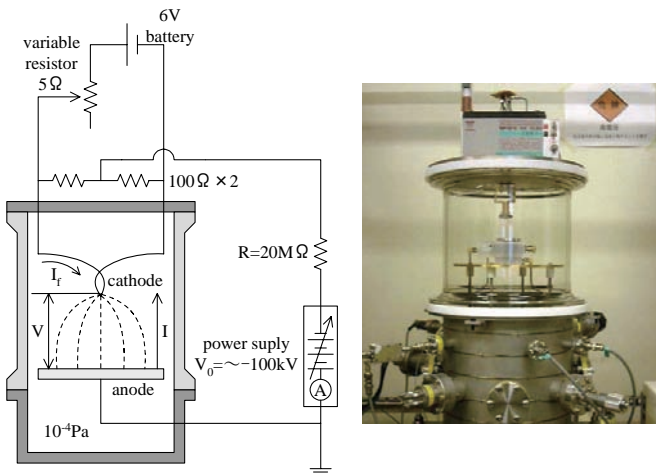


図4 電子線照射用真空チャンバー

4. 測定方法

測定に使用した試料は、厚さ約 $125\mu\text{m}$ のPIフィルム(東レ・デュボン社製、Kapton®-H)および、厚さ約 $100\mu\text{m}$ のPTFEフィルムである。今回の実験は、真空度を約 10^{-4} Paで一定にし、加速エネルギー20~80keV、電流密度 $20\sim 160\text{nA}/\text{cm}^2$ の範囲で測定を行った。なお電流密度は、あらかじめ下部電極のみに電子線を照射し、下部電極を介して流

れる電流を測定し、その測定値を下部電極の面積で除すことで算出した。測定時間は、PIにおいては、電子線照射中20分間、照射後20分間の合計40分間、PTFEにおいては電子線照射中80分間、照射後40分間の合計120分間とした。また、測定間隔はいずれの場合も30秒である。

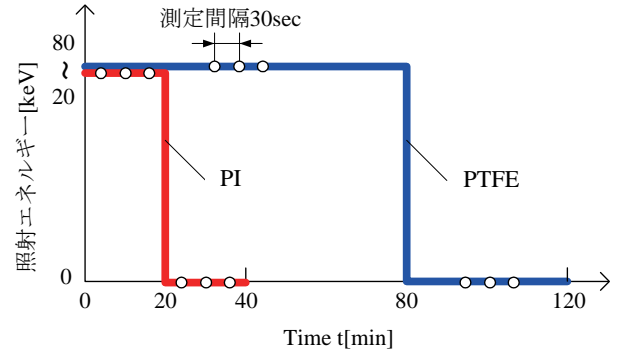


図5 測定条件

5. 実験結果および考察

<5-1. 侵入深さの加速エネルギー依存性>

まず、電子線の電流密度を $80\text{nA}/\text{cm}^2$ 一定とし、照射エネルギーを40,60,80keVと変化させた場合の、電荷分布の経時変化を観測した。図6および7-(a)(b)(c)に、各照射エネルギーの電子線を照射した際に観測されたPIおよびPTFE中の電荷分布を示す。同図中、電子線は図の右側から照射している。

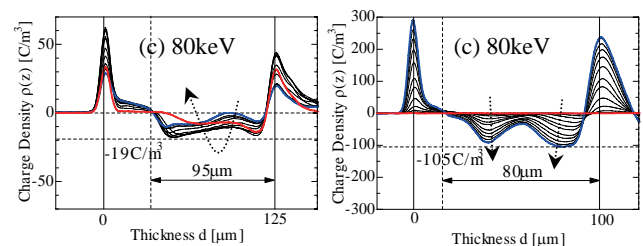
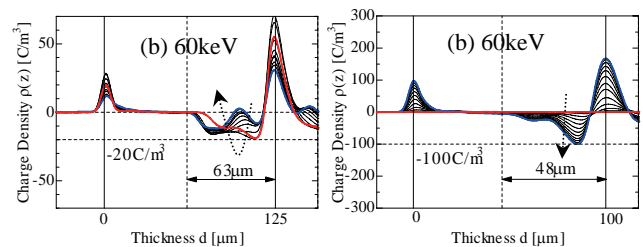
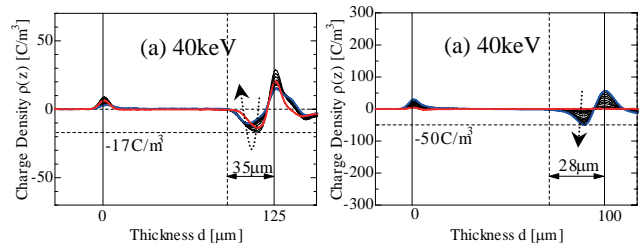


図6 PI電荷分布

図7 PTFE電荷分布

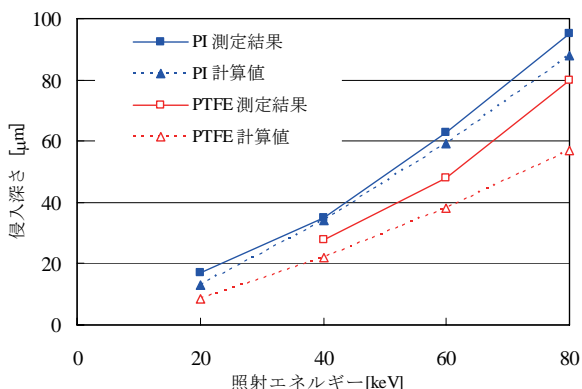


図 8 侵入深さと照射エネルギーの関係

図 6 および 7 に示した結果より、電子線を照射することにより、いずれの場合も試料中に負電荷が蓄積することがわかる。ただし、その蓄積分布および蓄積過程には試料により大きな差がある。PI においては、電子線照射開始後、比較的短時間に、ある一定の深さまでほぼ一定の電荷密度の負電荷が蓄積し、その後電子線照射中にもかかわらず、蓄積量は減少に転じている。一方、PTFE においては、電子線照射開始直後には電荷が蓄積せず、ある程度時間が経過した後、蓄積する電荷量が増大する。また、その分布は明確なピークを形成し、ピークよりも試料内部側はなだらかな分布を取る。ただし、加速エネルギーが 80keV の場合は、2つのピークを持つ分布となっている。

この照射エネルギーと電荷の進入深さの関係を図 8 に示す。ここで示した進入深さとは、図 6 および 7 に示した PI と PTFE の電荷分布のうち、分布の最も左側（照射電極と反対側）先端部分のエッジの位置を進入深さとして示したものである。なお、PI、PTFE ともに、進入深さとして示した電荷分布の先頭のエッジ位置（侵入深さ）は、照射時間が経過してもある一定の位置にとどまり、同様の実験を数回行った結果、各エネルギーにおいて進入深さは数μm 程度のばらつきで同様の傾向を示した。さらに、図 8 には以下の(1)式に示す、フェーザーの実験式より算出した最大飛程の計算値もあわせて示している。

$$R = 407 \times T^{1.38} \quad \dots \dots (1)$$

なお、(1)式で T は照射する電子のエネルギー[MeV]を示している。ここで(1)式の R は単位が面積密度[mg/cm²]であり、R を透過する物質の密度[mg/cm³]で除すことにより、最大飛程を求めることができる。すなわち、この実験式自体はアルミニウムを試料として電子の最大飛程を実験的に求めた式であるが、図 8 に示した値は、今回の試料である PI および PTFE の密度を用いて換算したものである。この結果、PI においては式(1)で算出された最大飛程と実験で得られた進入深さはよく一致しており、今回 PI 中で観測された分布の先端位置が、いわゆる最大飛程に相当すると考えら

れる。一方、PTFE では式(1)により算出された最大飛程と実験で得られた進入深さには 10~20 μm 程度の差があり、計算により得られた位置の方が、進入深さとして求めた位置よりも、比較的浅い位置を示している。これは、電荷分布における先端位置がいわゆる最大飛程を表していないと考えられる。PTFE においては、蓄積する電荷量が時間経過とともに増大し、それにとまない試料内部の電界が増大するので、蓄積量が多くなると、発生した電界により蓄積した電荷が移動すると考えられる。すなわち、ピークよりも奥に位置する電荷は、一旦試料内部に停滞した電荷が、発生した電界により移動したことにより生じたものではないかと考えられるが、詳細については、今後検討する。

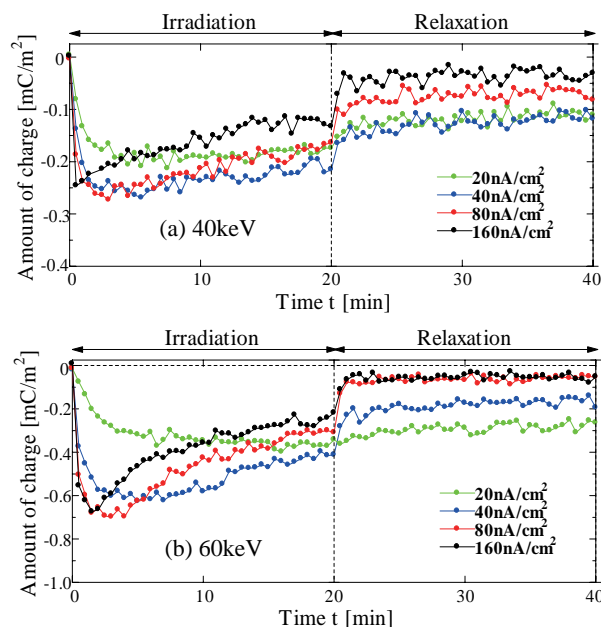


図 9 PI における蓄積電荷量の経時変化

<5-2. PI における蓄積電荷量の経時変化>

前節において電子線照射により PI 内に蓄積する電荷量が一旦増加し、その後減少する傾向にあることを示した。この関係を明確にするため、図 9 に蓄積電荷量の経時変化を示す。同図(a), (b)はそれぞれ、加速エネルギーが 40, 60 keV の際の、各照射電流密度における蓄積電荷量の経時変化を示している。なお、蓄積電荷量は、図 6 に示した電荷分布の測定結果より、蓄積した負電荷部分の波形を積分することによって求めた量である。この結果より、蓄積電荷量は照射電流密度が比較的小さい 20 nA/cm² の場合は、ある値で飽和するが、それより大きな電流量の場合は、一旦増加し、ピーク値を示した後、電子線照射中にもかかわらず、その後は減少していることが分かる。また、40 nA/cm² 以上の電流密度の場合、電流密度によらず、蓄積電荷量がほぼ一定の値に到達すると減少が始まる傾向を示している。すなわ

ち、40 keV の場合は $0.25 \sim 0.3 \text{ mC/m}^2$ 、60 keV の場合は $0.6 \sim 0.7 \text{ mC/m}^2$ の値に達すると、蓄積電荷量の減少が始まる。さらに、電子線照射後は、いずれの場合も電荷蓄積量が減少するが、電子線の電流密度が大きいほど、電子線照射後の蓄積電荷量の減少も早い傾向にある。

<5.3. PTFE における蓄積電荷量の経時変化>

図 10 に PTFE における蓄積電荷量の経時変化を示す。前節の PI では、電子線照射中にある値に達すると、蓄積電荷量が減少することを確認した。しかし、PTFE においては、照射時間にもよって蓄積電荷量が増加することが図 10 から確認できる。

また図 10 より、照射開始直後はほとんど試料内部に電荷は蓄積しないが、ある時間を境にして、急激に蓄積する電荷量が急増していることがわかる。急激ははじまる時間は、照射電流密度により異なるが、その時間をおおよそ見積もったところ、照射電流密度が 40 nA/cm^2 の場合約 45 分、 80 nA/cm^2 の場合は約 20 分、 500 nA/cm^2 の場合は約 4 分となっており、図 10 の(a)と(b)の比較からも明らかなように、照射エネルギーが異なっても、その時間はさほど変わらない。すなわち PTFE では、照射開始直後の蓄積量は PI よりも少ないが、ある一定の電荷量の電子線を照射することで、電荷を蓄える特徴をもつことになる。

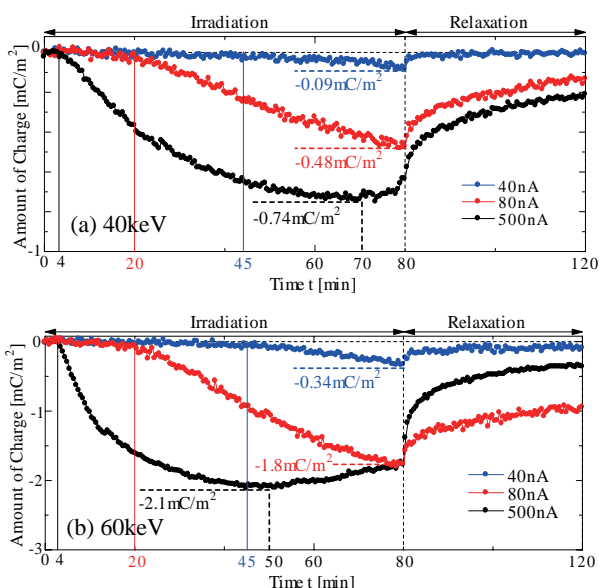


図 10 PTFE における蓄積電荷量の経時変化

<5.4. 電子線照射による特性変化の確認実験>

PI において、電子線照射中にもかかわらず蓄積電荷量が減少するという事は、電子線の照射により試料の特性が変化した可能性がある。このように、電子線照射により試料の電荷蓄積に関する特性が変化する様子を確認するため

に、以下の実験を行った。すなわち、電子線を 20 分間照射し、その後、20 分間短絡状態で保持した後に、さらに 20 分間照射を行い、このサイクルを 3 回繰り返した。なお、照射条件は、加速エネルギーを 80 keV 、電流密度を 20 および 160 nA/cm^2 とした。図 11 に実験結果を示す。図 11 の連続照射実験によると、2 回目、3 回目の照射では、1 回目と同様の経時変化を示さず、照射回数を増やすほど試料内に蓄積する負電荷は減少し、前回の照射の影響があることが分かる。すなわち、2 回目、3 回目の照射ではそれぞれ、1 回目、2 回目の照射終了時の状態を維持していることが明らかであり、電子線照射により不可逆的な特性の変化が試料内に発生していると考えられる。この原因については、今後検討する予定である。

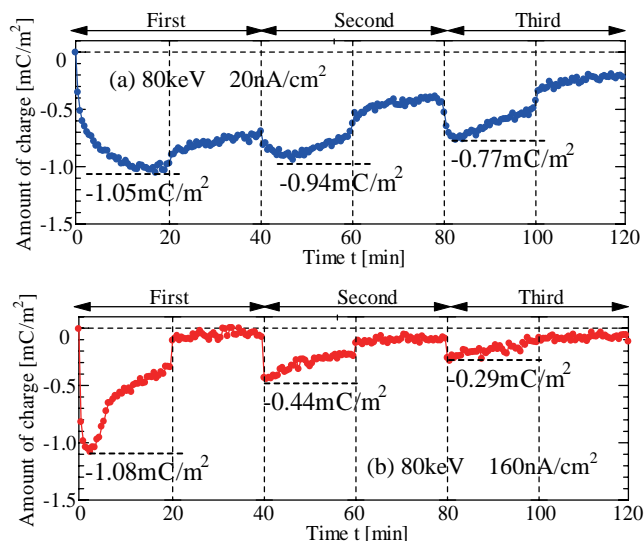


図 11 連続照射による蓄積電荷量の経時変化

なお、本研究の一部は科研費基盤(c)(16560280)の支援を受けた実施された。

文 献

- (1) 田中宏樹、田中康寛、富田信之、高田達雄：電学論 A, Vol.121, No.2 pp143-148(2001)
- (2) 電気学会技術報告 第 834 号(2001)
- (3) 放射線取扱技術、日本原子力産業会議、p.138 (H10 年)