

社会基盤の高信頼化に資する革新的衛星帯電設計標準構築のための衛星搭載用帯電計測装置の開発

Development of charging measurement system on spacecraft for innovative satellite design
standard contributing infrastructure with high reliability

三宅 弘晃¹⁾
Hiroaki MIYAKE

千葉 潮¹⁾
Ushio Chiba

田中 康寛¹⁾
Yasuhiro TANAKA

¹⁾ 東京都市大学

(概要)

高エネルギー荷電粒子が照射された表面材料で生じる帯電挙動を解析することを目的とし、真空中で高エネルギー荷電粒子照射中の衛星材料内の帯電分布計測を可能とする測定装置をパルス静電応力法により開発した。その装置を用いてプロトン照射中のフッ素材料の帯電分布計測を試みた結果、照射直後から試料内に正電荷が蓄積し、時間経過とともにその蓄積量が増加していく傾向が確認された。その正電荷は試料内のプロトン照射領域内に広く分布し、照射時間の経過とともに照射面からプロトンの飛程を超えてプロトン未到達領域にまで正電荷が移動し蓄積している事が確認された。

キーワード：

人工衛星 宇宙環境 プロトン 帯電 PEA 法

1. 目的

人工衛星などの宇宙機は、温度変化の激しい宇宙環境において、機内の温度を一定に保つために、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 Insulator)と呼ばれる熱制御材料が使用されている。しかし、MLIは銀河宇宙線と称される星間空間を飛び交う高エネルギー荷電粒子や放射線帯、プラズマ環境下などに曝されることによって、帯電・放電現象が発生し、絶縁材料の劣化や宇宙機に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。特に宇宙環境に起因する静止衛星の事故のうち、過半数以上が帯電・放電現象が原因であるという報告もなされている^[1]。2003年には、低軌道で運用されていた地球観測衛星みどり2号が、帯放電により電力送電ラインが破損し、運用が不能になる事態も生じている^[2]。そのため、宇宙機を設計する際には、MLIなどに使用される絶縁材料等の帯電特性など、電気絶縁特性の評価が重要な要因となってくる。しかしながら、設計標準における評価は宇宙機の表面電位が主体であり、内部帯電については評価することが求められているにも関わらず、その方法は具体的な記述がない現状である。したがって、宇宙環境に起因する事故を防ぐためにも、高エネルギー荷電粒子が照射された表面材料で生じる帯電挙動を解析することが重要である。

本研究では、パルス静電応力 (the pulsed electro-acoustic: PEA) 法を用いた、放射線照射チャンバー内に設置可能な小型の空間電荷計測装置を新たに開発した。この開発した装置を用いてプロトン照射中の試料内の帯電計測を実施したので以下に報告をする。

2. 実施方法

2.1 パルス静電応力法による空間電荷測定原理

図1にPEA法の原理図を示す^[3]。電極で挟んだ試料に時間幅 t_p がナノ秒のパルス電界を印加することにより、電荷蓄積位置において電荷量に比例した静電応力が t_p 秒間作用し、電荷が蓄積している箇所が微小変位する。この微小変位により発生したパルス状圧力波が試料内、接地電極を伝搬し、圧電素子に到達して電圧信号に変換される。信号電伝搬の時間差により電荷分布を、信号強度から電荷量を得る事が出来る。圧電素子から出力される電圧信号はアンプで増幅され、オシロスコープで観測される。この電圧波形を伝達関数除去等の信号処理及び電荷量校正を施すことによって空間電荷分布を得ることができる^[4]。

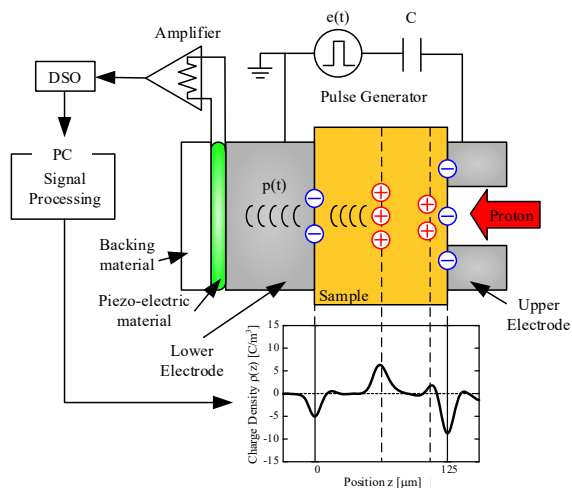


Fig.1 Principle of PEA method

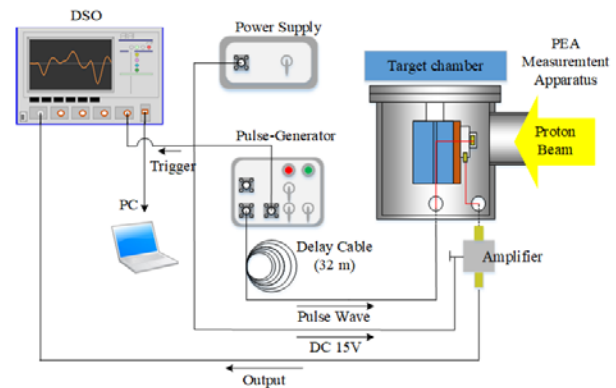


Fig.2 Schematic diagram of space charge measurement system for irradiation

2.2 空間電荷測定システム

図2に PEA 法を適用した空間電荷測定システムの概略図を示す。本システムは、空間電荷測定装置本体(以下センサユニット)、パルスジェネレータ、アンプ、アンプ用直流電源、デジタルストレージオシロスコープ、PC から構成され、空間電荷装置本体は真空チャンバー内に設置される。

センサユニットは荷電粒子を試料に照射するため、図3に示すように高電圧電極に照射口を設けており、放射線照射下での空間電荷分布計測を可能としている^[4]。また、装置のサイズは縦 40 mm、横 40 mm、高さ 37 mm と従来の空間電荷測定装置と比較し小型であり、小さなサイズのチャンバーにも対応できるようになっている。パルスジェネレータから $v_p = 120V$ 、 $t_p = 7\text{ ns}$ のパルス電圧を出力し試料に印加する。圧電素子は PVDF(厚さ 9 μm)を使用しており、装置の位置分解能は約 10 μm である。

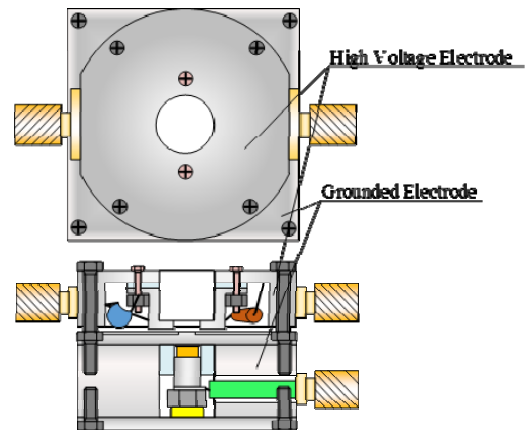


Fig. 3 Top view and cross section of developed small space charge measurement device

2.3 陽子線照射条件 及び 照射中における空間電荷測定条件

陽子線照射は量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所所有の 3MV タンデム加速器を利用した。加速エネルギー2.0 MeV、電流密度 30 nA/cm² の陽子を 30 分間照射し、その際の空間電荷分布を測定した。陽子線照射は $1 \times 10^{-5}\text{ Pa}$ にて実施した。空間電荷測定装置は前述タンデム加速器 TA ポートに接続された真空チャンバー内に、装置照射口奥に設置された試料面に対し陽子ビームが垂直入射するように設置し、電荷分布は 30 秒毎に、照射開始直前から照射終了 10 分後まで取得した。また、図4に測定用真空チャンバー内のサンプルステージに同装置を設置した状況を示している。

尚、試料には厚さ 100 及び 125 μm の FEP を用いた。試料の照射面側は約 300 Å 厚のアルミニウムを施している。

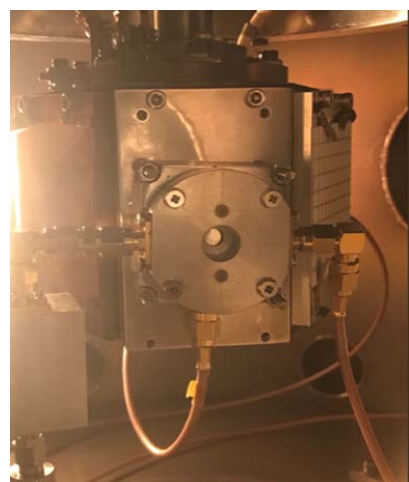


Fig. 4 Photo image of device mounting on the sample stage in the TA vacuum chamber

3. 結果及び考察

図5にプロトン照射中・後のFEP内空間電荷分布を示す。同図(a)(b)にそれぞれ125及び125 μm 厚試料のプロトン照射中の空間電荷分布を、同図(c)に100 μm 厚試料における照射後10分後までの空間電荷分布測定結果を示す。また、同図中(a)(b)において、照射開始直後(30秒)、10、20、30分後の空間電荷をそれぞれ黒、赤、青、緑で示しており、同図(c)においては照射終了直後(30秒)、5、10分後をそれぞれ黒、赤、青で示している。また、プロトンは同図右側から照射しプロトン計算飛程(66 μm)を黒の破線で示している^[5]。

同図(a)(b)より、照射直後から照射面から試料内に正電荷の蓄積が確認でき、それらは100、125 μm 試料双方で同様に確認された。電荷蓄積のピーク位置も双方にて45 μm (最大飛程の約68%の位置)にて確認できるため、再現性が確認できた。

また、蓄積電荷量は照射直後から徐々に増加し、照射10分後に最大値を取った後飽和している。さらに正電荷の蓄積は照射後10分以降に徐々に最大飛程を超えて照射側の対向電極側近傍までドリフトしている事が確認された。

照射後は同図(c)より、照射終了直後から5分後まで試料内の蓄積電荷量は減少していくが、5分後以降は減少が確認されなかった。さらに、蓄積電荷は照射中の電荷蓄積のピークが観察された位置までの電荷が消滅し、最大飛程を超えたプロトン未到達領域における正電荷蓄積が残量している。このことから、FEPでもポリイミド試料と同様にDRIC(遅延放射線誘起伝導)が発生し、プロトン照射領域における導電率が照射後も未照射試料と比較し上昇しているため、電極からの電子の注入もしくはホルルの電極へのドリフトにより、減少・消滅したものと考えられるが、今後さらなる調査が必要である^[6]。

4. 今後の展開等

本試験により、世界で初めてプロトン照射中のフッ素系試料内の帯電分布計測の照射中実時間測定が可能となったことを示せた。しかしながら、図5の測定波形を見ると、波形内に揺らぎが確認されこれはこれまでのポリイミドにおけるプロトン照射中の測定時に確認されなかった現象である。新しく開発した装置をTAポートに設置したプロトン照射中に、研究室試験時には確認されなかった大きな周期ノイズが確認された。これより以下の事が考えられる。

- ・ メンテナンスの容易性を考慮した結果、装置のセンサ部のシールドの接合が以前の装置比較し多い。
 - ・ プロトン照射時に試料の放射化から発生するX線によるオージェ電子放出の生成がグラウンドレベルの振動を引き起こす。もしくは、前述のシールド接続部の不慮箇所からセンサ部への電磁波の侵入。
- 以上より、装置シールド部の接続部分の削減等、シールド性能向上に資する装置構造の見直しに着手した。次年度夏ごろには改修した装置の運用を開始予定である。

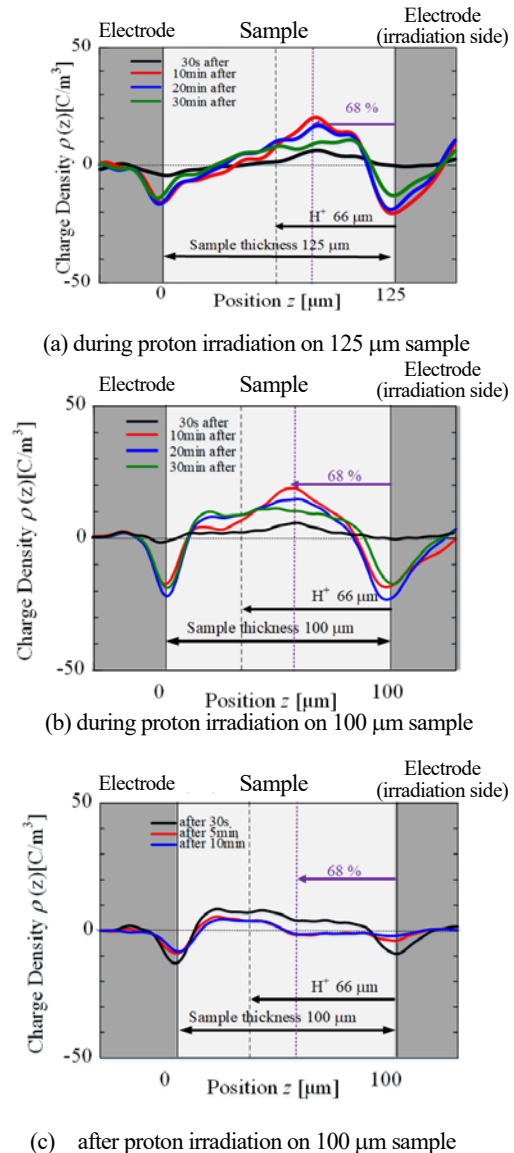


Fig.5 Space charge distribution in FEP during and after proton irradiation (2.0 MeV, 30 nA/cm²)

5. 参考文献

- [1] H. C. Koons, J. E. Mazur, R. S. Selesnick, J. B. Blake, J. F. Fennell, J. L. Roeder and P. C. Anderson : “The Impact of the Space Environment on Space Systems”, Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference, Air Force Research Laboratory, pp.7-11, 1998.
- [2] 宇宙開発委員会調査部会 : “環境観測技術衛星(ADEOS - II)「みどり II」の運用異常に係る原因究明及び今後の対策について”, 宇宙開発委員会報告書, 2004
- [3] Tatsuo TAKADA, Hiroaki MIYAKE, Yasuhiro TANAKA, “Pulse Acoustic Technology for Measurement of Charge Distribution in Dielectric Materials for Spacecraft”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 34, No. 5, pp.2176-2184, 2006
- [4] Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka, Charge Distribution in Polymethyl Methacrylate and Quartz Glass Irradiated by Protons, Sensors and Materials, Vol. 29, No. 8, pp.1213-1222, August 2017
- [5] J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark: “The Stopping and Range of Ions in Matter”, Pergamon Press, New York, 1985
- [6] Nelson Wesley Green and J. R. Dennison: “Deep Dielectric Charging of Spacecraft Polymers by Energetic Protons”, IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 36, no. 5, pp. 2482-2490, Oct 2008