

月探査を見据えた宇宙機搭載用帯電計測装置の開発Ⅱ

Development of on-board charging measurement apparatus for lunar exploration II

三宅 弘晃¹⁾
Hiroaki MIYAKE

榎 海星¹⁾
Kaisei ENOKI

田中 康寛¹⁾
Yasuhiro TNAKA

¹⁾東京都市大学

(概要)

As spacecraft engaged in operations beyond the Earth's magnetosphere are subjected under various energetic proton environments, the surface materials which is consisted of polymer materials will be charged by protons. This charging and discharging phenomena may be the origin of the fatal operation anomalies. In this study, we measured the space charge distribution in the polymer during proton beam irradiation, aiming to understand the relationship between the irradiated proton energy and the charge accumulation behavior in the bulk of fluorinated ethylene propylene (FEP). From the results, the positive charges accumulated around the penetrated depth of the proton beam in the bulk. Furthermore, charge accumulation and its enhancement in the non-penetrated zone of the irradiated proton was observed with irradiation energy progress, and it is also confirmed that the charge accumulation and electric field increased after irradiation concomitantly with irradiation energy.

キーワード : 宇宙機, 陽子線, 表面絶縁材料, 帯電, パルス静電応力法

1. 目的

近年、地球磁気圏外である月・惑星探査が加速度的に進んでおり、アメリカ・日本では有人月探査を主体とした ARTEMIS 計画[1]が進められ、宇宙安全保障の確保が求められている。

宇宙機は荷電粒子が多量に存在する環境下で運用されていることから、宇宙機表面の絶縁材料の荷電粒子による帯電及び放電が発生し、運用異常に陥る可能性が有る。実際に放電現象は宇宙機運用異常の主要因[2]とされており、気象衛星ひまわりにおいては荷電粒子増大時に運用異常の増加が確認されている[3]。その為、荷電粒子による宇宙機絶縁材料の帯電・放電機構を解明する事は、宇宙機の信頼性向上に直結すると考えられる。ここで、地球磁気圏外で運用される宇宙機には、地球地磁気で保護される事無く、太陽陽子が直接降り注ぐ為、高エネルギー陽子線による帯電機構を考慮する必要がある。絶縁材料の荷電粒子による帯電評価には、一般的に表面電位計測が行われているが、高エネルギー陽子が絶縁材料に照射されると、材料内部に電荷蓄積が発生する。表面電位は電荷蓄積位置により変化する為、絶縁材料の帯電・放電機構の解明には材料内部の電荷蓄積挙動を計測評価が必要であると考えられる。そこで、本研究では陽子線照射エネルギーと電荷蓄積挙動の関係を明らかにする為、電流密度を固定した上で、加速エネルギーを変更した際の蓄積電荷量とそれにより形成される最大電界を、パルス静電応力(Pulsed electroacoustic : PEA)を用いて行ったので以下に報告する。

2. 測定原理及び電極の構造

図 1 に PEA 法の原理図を示す。同図に示すように高電圧、接地電極の間に試料を挿入し、パルス電圧を加えることにより、空間電荷の蓄積された各位置で電荷密度に比例したパルス静電応力が発生し、パルス状の圧力波が発生する。圧力波が試料、電極を伝搬し、圧電素子に入力されることで電圧信号に変換される。この電圧信号は、Mini-Circuits 社製広帯域増幅器 MAR-

6+で増幅し、デジタルオシロスコープ (National Instruments 社製 PXIe-5160) で計測する。圧電素子に到達する圧力波は試料内の蓄積位置によって到達時間差が生じるため、オシロスコープで観測される波形は、空間電荷分布を示している事となる。測定結果は電圧信号である為、電荷量に校正し空間電荷分布を得ている[4, 5]。本装置は荷電粒子照射用の仕様であり、試料に直接電子線を照射するための照射孔が設けられている。

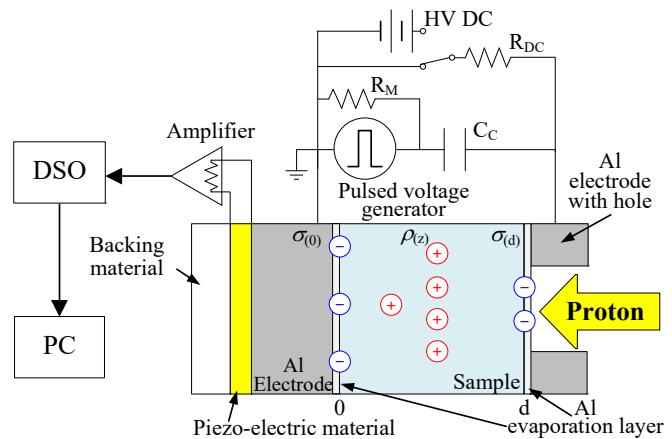


図1 測定原理及び測定電極の構造

3. 陽子線照射下におけるリアルタイム帯電計測

3.1 照射条件及び照射条件

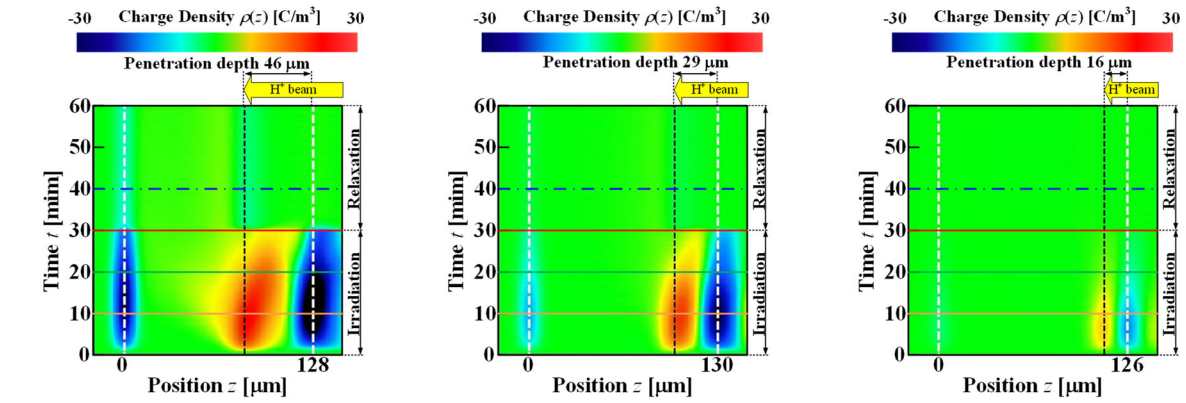
測定試料として、宇宙機熱制御材に使用される FEP (Fluorinated ethylene propylene, シェルダール社製 公称厚さ 125 μm)を用いた。試料の照射面側にはパルス電圧を印加する為、アルミ蒸着が施されている。陽子線照射は量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所の 3 MV タンデム加速器を使用した。陽子線照射条件は、加速エネルギーを 1.0 ～ 2.0 MeV まで 0.5 MeV 変化させ、照射電流密度は 30 nA/cm²、照射時間は 30 分とした。尚、各エネルギーで照射した陽子線の FEP 内計算飛程は 1 MeV から順にそれぞれ 16, 29, 46 μm となる[6]。空間電荷分布計測は照射中 30 分、照射後 30 分の合計 60 分間を 5 秒間隔で行った。

3.2 測定結果及び考察

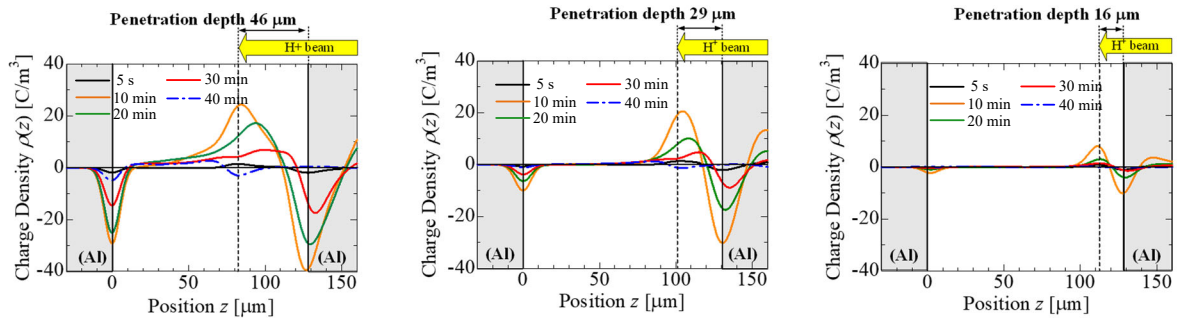
図 2 に各エネルギーの陽子線照射中及び照射後における FEP 内の空間電荷分布測定結果を示す。同図(A)～(C)に加速エネルギー 2.0、1.5、1.0 MeV 照射時の測定結果、(a)～(c)に空間電荷分布の経時変化を示すカラーチャート、空間電荷分布波形、電界分布波形を示す。同図中において紙面右側から左側に向かって陽子線を照射しており、全ての図の試料内に示されている縦黒破線は照射陽子の各計算飛程を示す。また、計算飛程右側の試料内を照射領域、左側の試料内を未照射領域とする。図 3 に各加速エネルギーに対する試料内蓄積電荷量の経時変化を示す。

図 2,3 より、全ての照射条件での共通の結果として、照射開始直後に計算飛程付近に正電荷蓄積が観測され、正電荷蓄積量は照射時間経過と共に上昇した後、照射面側にドリフトし、正電荷蓄積量が減少していく挙動が観測された。これは、陽子線照射により放射線誘導導電 (Radiation induced conductivity : RIC)と呼ばれる導電率の上昇が発生し、発生電界により照射面側電極から注入した負電荷が試料内を移動した為と考えられる。一般に放射線を絶縁材料に照射した場合、RIC が発生する事が既知[8]であり、陽子線照射時においても発生したと考えられる。また、加速エネルギー 2 MeV の場合、計算飛程付近に蓄積された正電荷は未照射領域へのドリフトも併せて確認されたが、未照射領域への正電荷の移動は加速エネルギー 1.5 MeV、1.0 MeV 照射時では顕著に確認されなかった。これは、高エネルギー陽子線照射に伴い、試料が放射化し照射領域から二次放射線として γ 線や δ 線が放出され、試料全体に照射されることで、上述した陽子線起因の RIC とは別の二次放射線照射による RIC が発生し試料導電率が上昇し、発生電界に従って正電荷がドリフトした為と考えられる。また、未照射領域の電荷蓄積要因について、2.0 MeV で照射された場合、未照射領域最大電界は、28 kV/mm 程度であり、1.5 MeV 照射の 1.6 倍、1.0 MeV 照射の 4.3 倍となる事から、電界強調による注入も考えられる。

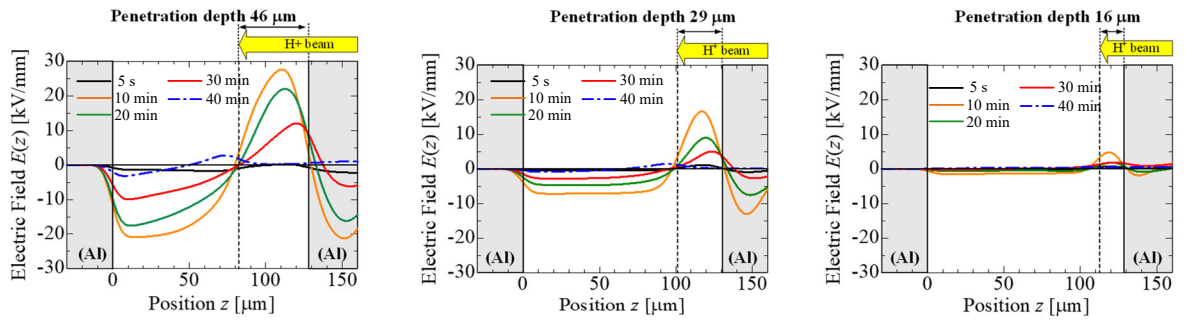
図 4 に図 2 で示した各加速エネルギーに対する照射領域及び未照射領域における電界の最大値を示す。同図より、陽子線照射による照射領域の電界は、加速エネルギーに対して比例関係



(a) 空間電荷分布の経時変化を示すカラーチャート



(b) 空間電荷分布波形



(c) 電界分布波形

(A) 2.0 MeV

(B) 1.5 MeV

(C) 1.0 MeV

図2 各加速エネルギーの陽子線照射中のFEP空間電荷分布計測結果

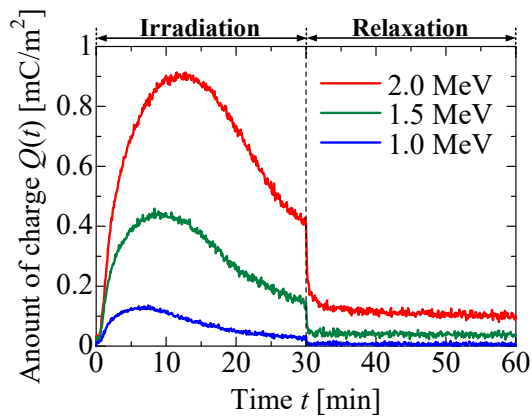


図3 各加速エネルギー陽子線照射中及び照射後の試料内正電荷蓄積量経時変化

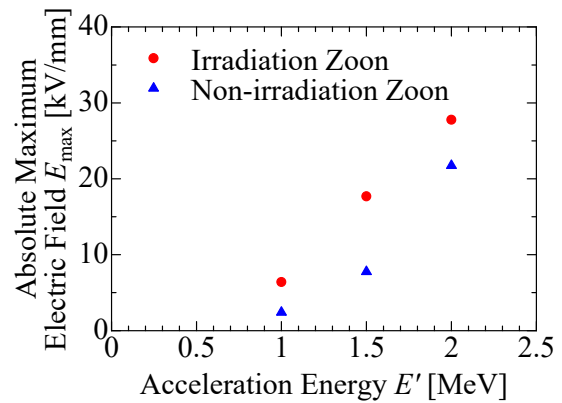


図4 照射エネルギーと各領域の最大電界値

にあり、未照射領域は電荷蓄積の影響を受け、比例関係を取らないことが分かった。また、陽子線照射後に着目すると加速エネルギー上昇に伴い、照射後に試料内に残存している正電荷量が多いことが分かる。照射陽子の加速エネルギーが増加すると、未照射領域にドリフトしていく蓄積電荷成分が発生し、その電荷は深いトラップに存在しており、照射後もその量が残存していると考えられる。

4. まとめ

陽子線照射時の FEP の帯電挙動と陽子線加速エネルギーの関係を明らかにする為、加速エネルギー1.0 MeV~2.0 MeV の陽子線照射時の空間電荷分布測定を行った。その結果、正電荷は計算飛程付近に蓄積され、RIC の発生が要因とみられる陽子線照射中の正電荷蓄積量の減少も確認された。また、加速エネルギーの上昇に従い、試料内電界の上昇、未照射領域への正電荷蓄積及び照射後の残存量の増加が確認された。電界上昇は材料の絶縁破壊につながる可能性、照射後の残存は宇宙機運用中に帯電緩和が出来ず放電リスク増大に繋がる可能性があり、今後電荷蓄積メカニズムを詳細に検討を行っていく必要がある。

5. 引用(参照)文献等

- [1] “NASA’ s Plan for Sustained Lunar Exploration and Development”, (2021/1/24 閲覧)
- [2] 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)
- [3] Kaori Sekiguchi, Tsutomu Nagatsuma, “Impact of Space Environment on Geostationary Meteorological Satellite Data Outage”, Space Weather, Vol.20, No.5, 10.1029/2021SW002965, 2022.
- [4] H. Miyake and Y. Tanaka : “Space Charge Distribution in Polymethyl Methacrylate and Quartz Glass Irradiated by Protons”, Sensor and Materials, Vol. 29, No. 8, pp. 1213-1222, (2017)
- [5] Y. Li, M. Yasuda and T. Takada : “Pulsed Electroacoustic Method for Measurement of Charge Accumulation in Solid Dielectrics”, IEEE Trans. DEI, Vol.1, No. 2, pp.188-195, (1994)
- [6] J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Matter", Pergamon Press, New York, 1985
- [7] Kaisei Enoki, Kazuki Endo, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka ; Surface and internal Charge Measurement in Fluorinated Polymer Irradiated by Electron Using Non-contact Type PEA Method Measurement Apparatus, IEEJ Trans. F.M., Vol.141・No. 12, p665 - p671, 2021 年
- [8] G. M. Yang, G. M. Sessler, “Radiation-induced Conductivity in Electron-beam Irradiated Insulating Polymer Films”, IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 4, pp. 843 – 848, 1992 年