課題番号	2023A-C13
利用区分	成果公(学術)

月探査を見据えた宇宙機搭載用帯電計測装置の開発 Ⅲ

Development of spacecraft on-board charge measurement system for Luner exploration II

 三宅 弘晃¹⁾
 榎 海星¹⁾
 田中 康寬¹⁾

 Hiroaki MAIYKE
 Kaisei ENOKI
 Yasuhiro TANAKA

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 charge accumulation behavior in the bulk of dielectric materials irradiated by a proton. From the results, the positive charges accumulated around the penetrated depth of the proton beam in the bulk. However, the charge accumulation phenomena are different between the fluorinated polymer and polyimide. Positive charge remained after the end of irradiation in the fluorinated insulating materials, but not in the PI insulating materials, indicating that the ESD risk was higher in the fluorinated insulating materials and was the material with the lowest ESD risk among these four materials.

<u>キーワード</u>: 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事から、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、宇宙機に使用される4種の高分子材料に陽子線を照射し、照射中の帯電挙動 の違いとその理由について考察したので以下に報告する。

<u>2. 実施方法</u>

測定試料として、フッ素系絶縁材料である Fluon[®] ETFE Film (100 µm, AGC Co.)、Sheldahl[®] FEP (127 µm, Sheldahl Co.)、PI 系絶縁材料である Kapton[®]-500H (125 µm, Du Pont-tray Co.)、Upilex[®]-125S (125 µm, UBE Co.)の合計 4 種の材料を用いた。陽子線照射は高崎量子応用研究所の 3 MV タンデム加速器を用

課題番号	2023A-C13
利用区分	成果公(学術)

いて行った。陽子線は約 φ5 mm のスポットを磁界偏向する事で、3 x 3 cm の四角状にスキャンした状態で照射した。陽子線の加速エネルギーは 2 MeV、照射電流密度は 30 nA/cm²、照射時間は 30 分とした。空間電荷分布測定は陽子線照射中 30 分、照射後 30 分間の合計 60 分間を 5 から 15 秒間隔で計測した。また、試料へは蒸着電極を介して電圧値 200 V、パルス幅 5 ns、繰り返し周波数 1 kHz のパルス 電圧を印加した。尚、本測定においては、陽子線照射による空間電荷蓄積挙動の観測の為、高電圧は印加せず、高電圧電極は抵抗を介して接地に接続した状態で行った。

3. 結果及び考察、今後の展開等

3-1 陽子線照射高分子材料内の空間電荷蓄積挙動

図1に各試料の加速エネルギー2 MeV の陽子線照射したにおける空間電荷分布測定結果を示す。同 図(A)、(B)、(C)、(D)に ETFE, FEP, Kapton[®]-H, Upilex[®]-S の計測結果を示す。また、同図(a)、(b)、(c)、 (d)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、陽子線照射 領域と未照射領域の最大電界の経時変化をそれぞれ示す。空間電荷分布波形、電界分布波形は照射直 後から照射終了後10分までの10分毎の波形を示している。陽子線は紙面右側から照射しており、図 中黒破線が表1に示す陽子線の計算飛程を示している。以下の考察では、計算飛程を境に照射面側を 照射領域、接地電極側を未照射領域と呼ぶ。図2に計測した空間電荷分布を試料厚さ方向に積分し算 出した、各試料内正電荷蓄積量の経時変化を示す。

図 1(A)より、ETFE は陽子線照射直後から計算飛程付近に正電荷蓄積が観測され、時間経過と共に 計算飛程を中心に、試料全体に正電荷がドリフトしていく様子が確認された。また、30 分後には蓄積 正電荷のピークは未照射領域に観測された。加えて照射時間経過に伴い、接地側電極から未照射領域 に負電荷の注入も併せて観測された。照射終了後では、照射領域に蓄積されていた正電荷は減少し、 未照射領域に正負電荷蓄積が観測され、その電荷は照射終了後 30 分経過後も残存する事が確認された。 ここで、試料内の蓄積電荷量に着目すると、図2より、照射開始直後に 0.066 mC/m²まで増加するが、 照射開始 1 分後まで一度減少し、その後時間経過と共に上昇、照射開始 15 分程度で増加率が変化、照 射終了まで蓄積量の増加が確認された。また図 1(d)より、電界値に着目すると、各領域での最大電界 は未照射領域で 8.4 kV/mm、照射領域で 4.4 kV/mm となった。照射領域での電界値は飽和傾向にある にとが分かる。

図 1(B)より、FEP は ETFE と同様に陽子線照射直後から計算飛程付近に正電荷蓄積が観測され、時間経過と共に計算飛程を中心に、試料全体に正電荷がドリフトしていく様子が確認された。未照射領域へドリフトした正電荷は電極近傍まで到達していることがわかる。また、時間経過と共に正電荷の蓄積ピークは照射領域側へシフトしていることが確認された。照射終了後では、照射領域に蓄積されていた正電荷は急激に減少し、未照射領域に正電荷蓄積が観測され、その電荷は照射終了後 30 分経過後も残存する事が確認された。ここで、試料内の正電荷蓄積量に着目すると、図2より、照射開始直後から増加傾向にあり、照射開始約 12 分で最大値 0.91 mC/m²まで増加し、その後照射中にも関わらず減少した。また図 1(d)より、電界値に着目すると、各領域での最大電界は未照射領域で 22 kV/mm、照射領域で 27 kV/mm となった。



図2 加速エネルギー2 MeV 陽子線照射中及び照射後の各試料内正電荷蓄積量の経時変化

課題番号	2023A-C13
利用区分	成果公(学術)

図 1(C)より、Kapton[®]-H は陽子線照射直後から計算飛程付近及び照射面側電極付近に正電荷蓄積が 観測された。照射面側電極付近への正電荷蓄積はフッ素系絶縁材料と異なる電荷蓄積挙動である。時 間経過と共に各位置に蓄積された正電荷は顕著なドリフト等は観測されず、蓄積量が減少する事が確 認され、照射 30 分後では試料内の正電荷はほとんど観測されなかった。図 2 より、正電荷蓄積量は照 射開始直後に最大値 0.28 mC/m²まで急激に増加し、その後は FEP と同様に照射中にも関わらず減少し た。また図 1(d)より、電界値に着目すると、各領域での最大電界は未照射領域で 3.3 kV/mm、照射領 域で 6 kV/mm となった。

図 1(D)より、Upilex[®]-S は Kapton[®]-H と同様に陽子線照射直後から計算飛程付近及び照射面側電極付 近に正電荷蓄積が観測された。時間経過と共に各位置に蓄積された正電荷は顕著なドリフト等は観測 されず、蓄積量が減少する事が確認された。照射開始初期の正電荷蓄積量の増減傾向は Kapton[®]-H と よく似た挙動となった。しかし、蓄積量は減衰するものの、10 分後以降では、大きな変化は観測され ず一定量の正電荷蓄積が確認された。さらに、照射終了と共に蓄積量は急激に減少し、照射終了後電 荷蓄積は観測されなかった。図 2 より、照射開始直後に最大値 0.17 mC/m² まで急激に増加し、その後 は FEP、Kapton[®]-H と同様に照射中にも関わらず減少した。また図 1(d)より、電界値に着目すると、 各領域での最大電界は未照射領域で 2.0 kV/mm、照射領域で 3.5 kV/mm となった。

3-2 空間電荷蓄積挙動に対する考察

前節で述べた通り、各材料で以下の様な電荷蓄積挙動に大きな違いが生じた。

①フッ素系材料では照射中に照射陽子の飛程を超え正電荷が蓄積。

②フッ素系絶縁材料及び Upilex[®]-S の照射領域に蓄積された正電荷は照射終了と共に消失し、

フッ素系絶縁材料の未照射領域に蓄積された正電荷は試料内に残存。

以上の減少にてついて以下に考察する。

- ① 飛程を超えて正電荷が蓄積する様なドリフト減少が発生しうるか、各試料で計算評価を行った。絶縁材料内のキャリアは、材料固有の電子エネルギー準位の分布にしたがい、各電荷捕縛準位(以下トラップ)をホッピングしながら電界方向に移動すると考えられる。よって、試料内に形成されたトラップ準位に電荷挙動は左右されることになる。ここでは正孔に対するトラップ準位を量子化学計算より求めた。ETFEは0.3 eV、FEPは0.1 eVは、Kapton[®]-Hは0.8 eV、Upilex[®]-Sは0.7 eVとなる。この結果より、正孔のトラップ深さはフッ素系絶縁材料がPI系絶縁材料と比較して小さい為、蓄積正電荷試料内での蓄積正電荷のドリフトが発生したと考えられる。
- ② 照射終了後の正電荷蓄積に関して考察を行う。フッ素系絶縁材料及びUpilex[®]-Sの照射領域に 蓄積された正電荷は照射終了と共に消失し、フッ素系絶縁材料の未照射領域に蓄積された正電 荷は試料内に残存した。照射領域の正電荷電荷減衰挙動は陽子線照射による、照射領域で放射 線誘起伝導(radiation induced conductivity: RIC)と呼ばれる、導電率上昇の発生が起因していると 考えられる。図3にRICが発生した場合の電荷挙動に関するモデル図を示す。同図中ĸは導電 率、Eは蓄積電荷により発生する電界、j は電極への流出電流密度を示す。各下付き文字は1が 照射領域、2は未照射領域を示す。蓄積された電荷が材料内にトラップされず電極へ掃引され ると仮定した場合、流出電流密度j は導電率κと電界 E の積で示される。ここで、陽子線照射に よる RIC でn が増加した場合、ji は上昇し、蓄積電荷は電極に掃引されやすくなる。その為、

課題番号	2023A-C13
利用区分_	成果公(学術)



図3 材料導電率が変化した場合の電荷挙動模式図

照射終了後に蓄積正電荷が急激に減少したと考えられる。X線や電子線照射による絶縁材料の RIC の発生は実験的に多く確認されており[4,5]、陽子線照射によって発生する事も十分に考え られる。また、未照射領域においては、導電率の上昇は確認されず、ドリフトした蓄積正電荷 は残存したと考えられる。蓄積電荷の残存は材料内電位及び電界が緩和されないことを意味し ており、放電現象に発展しやすい状態であると考えられる。

- <u>4. 引用(参照)文献等</u>
- R. Uchiyama, T. Hara, T. Homme, H. Miyake and Y. Tanaka, "Degradation phenomena of electric property on polymeric materials films irradiated by proton," 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 641-644.
- [2] H. Miyake, R. Uchiyama and Y. Tanaka, "The relationship between charge accumulation and scission of molecular chain in the proton irradiated PI," 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), Montpellier, France, 2016, pp. 135-138.
- [3] H. Miyake, R. Uchiyama, S. Numata, Y. Tanaka and T. Takada, "Charge accumulation phenomena in PI film irradiated by a proton," 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Cancun, Mexico, 2011, pp. 129-132.
- [4] T. Takada, H. Kikuchi, H. Miyake, Y. Tanaka, M. Yoshida and Y. Hayase, "Determination of charge-trapping sites in saturated and aromatic polymers by quantum chemical calculation," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 2, pp. 1240-1249, April 2015
- [5] H. Miyake, V. Griseri, T. Mori, Y. Tanaka, G. Teyssedre and C. Laurent, "Physicochemical analysis for fluorinated polymer films irradiated by proton," 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP), Fort Worth, TX, USA, 2017, pp. 106-109