

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 spacecraft on-board charge measurement system for establishing innovative
satellite ESD design standard contributing for high reliability of social infrastructure

三宅 弘晃¹⁾ 榎 海星¹⁾ 田中 康寛¹⁾
Hiroaki MAIYKE Kaisei ENOKI Yasuhiro TANAKA

¹⁾ 東京都市大学

(概要)

Surface materials of spacecraft operated in low and medium earth orbits, such as a GPS observation satellite and earth observation satellite, are charged and discharged due to radio-active rays, such as electrons and protons. Such electro-static discharge is the one of origin of satellite operation anomaly. Therefore, in this study, we focus the proton irradiated on ETFE (ethylene - tetrafluoroethylene copolymer) and measure the space charge distribution using newly developed non-contact type space charge measurement system which can measure space charge accumulation during proton irradiation. We were able to get the result that positive charges were accumulated at the calculated penetration depth of the irradiated electron and negative charges were drifted accumulated from the ground electrode. The amount of positive charge accumulation was larger than the contact type apparatus's results.

キーワード : 宇宙機, 陽子線, 帯電, パルス静電応力法

1. 目的

近年宇宙開発・利用の深度は目覚ましい。位置測位衛星(GNSS)は、我々の生活に欠かせないインフラ衛星の一つとして利用されている。更に、宇宙開発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・日本では周・惑星探査用プラットフォーム宇宙ステーションの整備と月探査を主体として ARTEMIS 計画[1]や、中国では嫦娥計画、ロシア・EU ではルナ計画といった月面探査計画が進められている。

これらの宇宙機が運用される環境で重要な環境要素として高エネルギー陽子があげられる。GNSSでは高度約2万km(一部静止軌道)の中軌道(medium earth orbit : MEO)で運用されるため、地球磁気圏に捕獲された陽子が多い領域である。また、月軌道は地球磁気圏から外れるため、地球地磁気で防護されることなく、直接高エネルギーの太陽陽子が直接降り注ぐ。衛星の帯放電事故の5割以上はこれらの陽子による宇宙機熱制御材の帯放電が衛星の運用異常を引き起こす事は広く知られている事から、陽子線による熱制御材の帯電物性を把握する事はGNSS運用の信頼性向上の為に繋がりが、月軌道上の宇宙ステーションの安全性を確保する事にも繋がるため必要不可欠である。

しかしながら、これ迄は磁気圏内の静止軌道をターゲットとし、電子線照射絶縁材料に関する絶縁特性に関する研究が多く実施報告されているが、陽子線照射絶縁材料の絶縁特性に関する研究報告例は、非常に少ない[2]。そこで本研究では、陽子線をターゲット環境因子とし、陽子線を照射した宇宙機材料の絶縁特性を評価する事とした。一般的に絶縁材料の荷電粒子照射による帯放電現象の調査は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た場合、絶縁材料内部に侵入・帯電されるため、帯電物性メカニズムの解明には内部帯電計測が必須であると考えられる[4]。そこで本研究における帯電計測・評価には、主としてパルス静電応力(pulsed electroacoustic : PEA)法[5]を用い、以下の事を行ったので、以下に報告を行う。

2. 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および電荷蓄積挙動に関する考察

3.1 測定条件及び照射条件

測定装置には、先行研究で開発した試料上方に開口率90%以上の電気鋳造メッシュを空間ギャップを介して配置した開放型空間電荷測定装置を用いた[6,7]。

測定試料として、フッ素系材料であるETFE(ethylene-tetrafluoroethylene, 100 μm)を用いた。試料の照射面側にはパルス電圧を印加するため、アルミ蒸着が施されている。空間電荷分布の測定は陽子線照

射前から照射中・後と連続的に 10 秒間隔で行った。陽子線照射は量研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。陽子線照射は、加速エネルギー 2 MeV、照射電流密度 30 nA/cm²、照射時間は 30 分とした。この照射フルエンスは MEO で約 7 年分に相当する量である。尚、陽子線の ETFE 内計算飛程は 51 μm となる[7]。空間電荷計測は照射中 30 分、照射後 30 分の合計 60 分間を 10 秒間隔で行った。また、照射側の蒸着電極面上の誘導電荷信号は空気(もしくは真空)と接した面となるため、音響整合が取れず、この電極面上の電荷から発生した圧力波は全て試料側に伝搬するため、実際の信号地値と比較しおよそ 2 倍の値を示している[8]。

3.2 非接触型電極を用いた陽子線照射中の空間電荷測定

図 1 に陽子線照射時の FEP 内空間電荷分布測定結果を示す。同図(a)から(g)にそれぞれ、空間電荷蓄積モデル、空間電荷分布波形、電界分布波形、電位分布波形、蓄積電荷量の経時変化、最大電界の経時変化、表面電位の経時変化を示す。

同図(b)より、陽子線照射 5 秒後に計算飛程付近に正電荷蓄積、試料表面に負電荷蓄積が観測された。

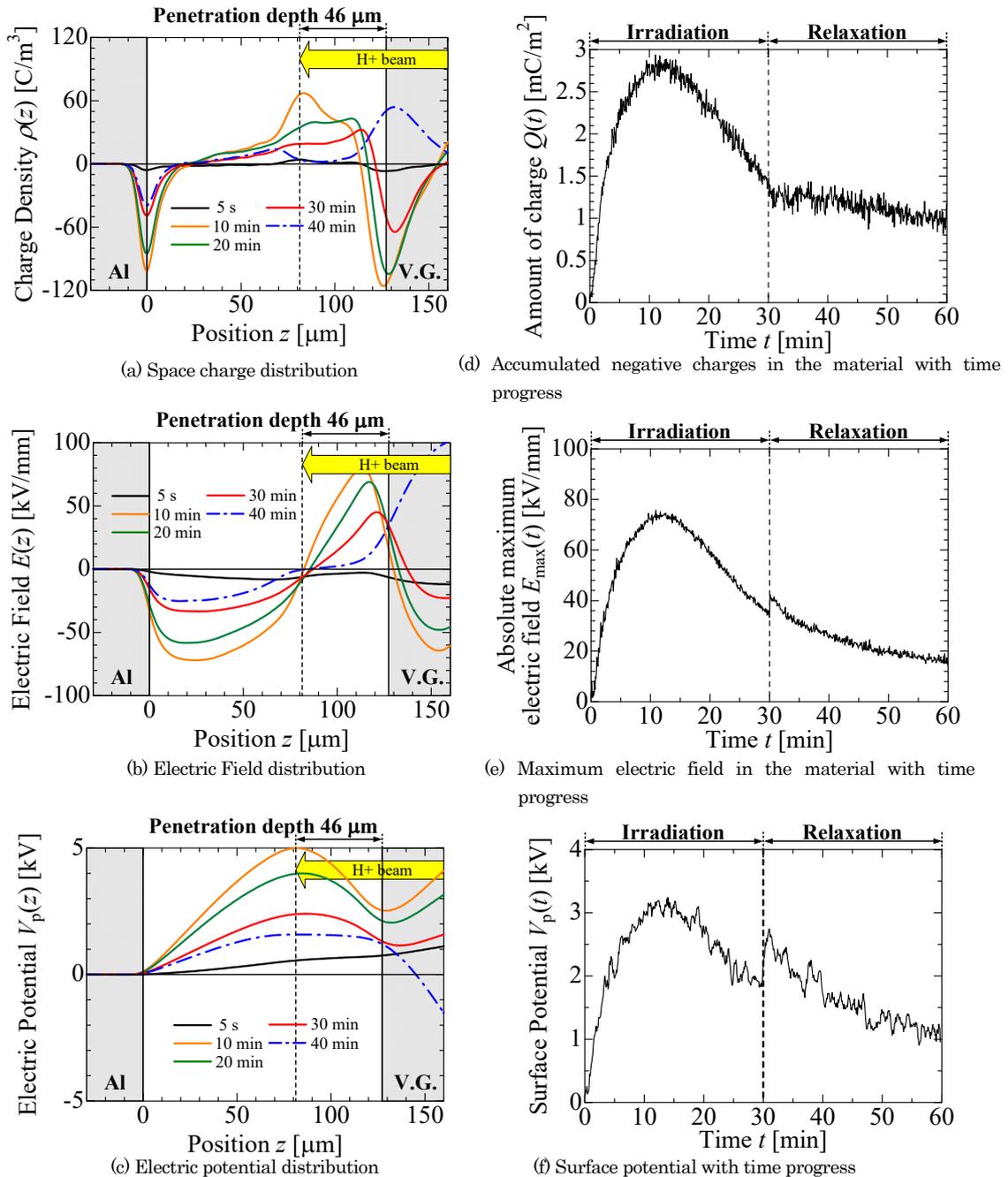


Fig. 1. Space charge distribution under proton beam irradiation

また、照射開始 10 分後には蓄積量は互いに増大し、照射 20 分から 30 分にかけて蓄積負電荷は減少、また蓄積正電荷は減少し試料表面側にドリフトしていく挙動が観測された。

さらに、照射終了後においては、試料表面の負電荷は観測されず、正電荷の蓄積が観測された。まず、試料表面の負電荷蓄積は、陽子線がメッシュを通過する際、メッシュから、2 次電子が放出され、正帯電している試料に引き寄せられる形で、試料表面に蓄積したものと考えた。正電荷の試料表面方向への移動に関しては、同図(c)の電界分布より、計算飛程より照射面側に蓄積した正電荷は試料表面方向に移動する。このため、試料表面方向に移動し、前述した表面に蓄積した二次電子と見かけ上打ち消しあうことで、減少していると考えられる。照射終了直後に照射面側に正電荷蓄積の信号が確認できることから、陽子線照射による蓄積正電荷と表面に蓄積した二次電子は、その大部分は再結合をしてないと考えられる事が妥当である。

同図(c)、(f)より、計算飛程から接地側電極にかけての最大電界は約 75 kV/mm となっており、電子線照射時同様に絶縁破壊の可能性が十分に考えられる。

また、同図(g)より、試料の表面電位は約 3 kV 程度まで上昇しており、本測定装置の電極構成を考えると、帯電表面からメッシュ電極までは 163 μm 程度のギャップであることから、本測定装置においてはその電極構成上放電リスクがある電位まで上昇しているといえる。

同図(e)より、正電荷蓄積量は照射開始約 12 分後を境に増加傾向から、減少傾向へ移行していることが分かる。これは、蓄積正電荷増大する事で電界が増大し電界方向(本実験では照射面側と想定)への積正電荷のドリフト、乃至は照射面側から誘導負電荷の注入・ドリフトにより、見かけ上減少しているように打ち消しあっている為と考えられる。また、電荷の移動しやすさには、導電率が大きく関わってくる。陽子線照射により発生した導電率の上昇、放射線誘起伝導(RIC)の発生も寄与していると考えられる。現在 Ge 検出器を用いた照射試料の放射化について解析中であり、得られた解析結果を用いて総合的な蓄積電荷挙動として、次年度の報告時に合わせて報告をする予定である。

4. 引用(参照)文献等

- [1] “NASA’ s Plan for Sustained Lunar Exploration and Development”, (2021/1/24 閲覧)
- [2] Nelson Wesley Green and J.R. Dennison, “Deep Dielectric Charging of Spacecraft Polymers by Energetic Protons”, IEEE Tran. Plasma Sci., vol. 36, no.5, pp2482-2490, (2008)
- [3] 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)
- [4] 藤井 治久, 宮本 尚使:「宇宙機内部帯電に及ぼす荷電粒子環境の解析」, 第 53 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1A02, p.5 (2009)
- [5] T. Takada, H. Miyake, and Y. Tanaka, “Pulse Acoustic Technology for Measurement of Charge Distribution in Dielectric Materials for Spacecraft”, IEEE NPSC Transactions on Plasma Science, Vol. 34, No. 5, pp.2176-2184,2006
- [6] 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)
- [7] 2020 年度 QST 施設共用制度成果報告書, 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, 2020-C08, 2021
- [8] J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Matter", Pergamon Press, New York, 1985
- [9] 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)
- [10] Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita “Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS)” version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 684-690 (2018)
- [11] Kazuki Endo, Kaisei Enoki, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka : “A New Method of Measuring Electron-hole Pairs with the PEA Method Just after Electron Irradiation”, ISEIM, pp .289-292, (2020)