

月軌道上での計測を見据えた宇宙機搭載用帯電計測装置の高精度化試験

三宅 弘晃¹⁾ 森田 尚斗¹⁾ 田中 康寛¹⁾
Hiroaki MAIYKE Naoto MORITA Yasuhiro TANAKA

¹⁾ 東京都市大学

（概要）

In recent years, lunar and planetary exploration, as typified by the ARTEMIS mission, has become more active, and it is very important for the stable operation of spacecraft to understand the charging and discharging phenomena caused by charged particle irradiation assuming a lunar environment. In fact, the solar photoperiod on the Moon is about one month, and the same sample is expected to be repeatedly irradiated by high-energy charged particles, especially solar protons. In this study, fluorine-based insulating material (FEP), which is used in the OSR of spacecraft, was taken up and its space charge accumulation characteristics due to repeated proton beam irradiation were evaluated using the PEA method. As a result, it was found that the interval between the first and second irradiations is the main factor for the amount of positive charge accumulation and the electric field increase.

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

現在, 宇宙機は現代社会において不可欠な存在である. 通信・放送衛星をはじめ, 宇宙開発を推進する科学衛星など, その役割は多岐にわたる. さらに, アルテミス計画 (ARTEMIS)^[1]を代表とする月や惑星探査が活発化しており, 月面基地の設置を含む次世代の宇宙開発が進展している. このような動向から, 宇宙機の重要性は今後さらに高まると予測される.

宇宙機は, 超高真空環境に加えて, 地球軌道上で $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 月面では $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]の激しい温度変化にさらされる. この環境下では, 多層断熱材 (multi layer insulator: MLI) や太陽光反射材 (Optical Solar Reflector: OSR) が使用されているが, 高エネルギー荷電粒子による材料の帯電が問題視されている. 実際この帯電現象が進行すると, 静電放電 (electro static discharge: ESD) 等による材料劣化や機器の運用異常を引き起こす.^[3]そのため, 宇宙機に使用される絶縁材料の荷電粒子による帯電・放電現象を把握することは不可欠である.

これまで, 宇宙機絶縁材料の絶縁特性に関する研究の大部分は電子線照射による影響評価が中心であり, 陽子線照射による宇宙機絶縁材料の絶縁特性に関する研究は依然として少ない. また, 一般的に荷電粒子照射による絶縁材料の帯電・放電現象に関する研究では, 表面電位計測が主に行われてきた. しかし近年の月・惑星探査では, 太陽風由来の高エネルギー陽子が材料内部に侵入し, 内部帯電を引き起こす可能性が高まる. 従って, 従来の表面電位計測だけでなく, 内部帯電計測を通じた帯電メカニズムの解明が求められており, 陽子線による帯電・劣化特性の解明は, 宇宙機の長寿命化と信頼性向上に大きく貢献する重要な課題となっている.^[4]

月面の日照周期は 29.5 日 ^[5]であり, この環境では高エネルギー荷電粒子が同一試料に繰り返し照射されることが想定される. そこで, 本研究では, OSR に使用されるフッ素系絶縁材料の電荷蓄積特性を, 日照周期を考慮した繰り返し照射環境下で評価することを目的とし, その初期的検討を実施した.

2. 実施方法

2-1 パルス静電応力 (PEA) 法の測定原理

Fig.1 に PEA 法による空間電荷分布測定の原理図を示す. PEA 法は, 絶縁材料内に蓄積した電荷の厚さ方向の分布を測定する手法である. 試料を電極で挟み, パルス電界を加えることにより, 空間電荷の蓄積した各位置で電荷密度に比例したパルス静電応力が瞬間的に発生し, 試料に蓄積している電荷が微小変位する.

微小変位した電荷から発生した圧力波は、試料内部、下部電極中を伝搬して圧電素子に到達し、電気信号へ変換される。ここで、圧電素子に到達した圧力波は、試料内で発生した位置によって圧電素子への到達時間が異なるために、空間電荷の分布は出力信号の時間変化として測定されることとなり、空間電荷の蓄積している位置 (深さ方向) がわかる。得られた電気信号はアンプで増幅し、デジタルオシロスコープ (Digital Storage Oscilloscope : DSO) で計測する。通常の PEA 法では、測定信号に固有の歪みが存在するため、コンピュータでデコンボリューション処理を行って空間電荷分布を得る。また、電圧信号を電荷量に変換するためのキャリブレーション処理も同時に行う。同図は陽子線照射下での空間電荷分布計測を可能とするため、高電圧電極に照射孔 ($\phi 10$ mm) を設けており、荷電粒子を試料に直接照射できる設計となっている。

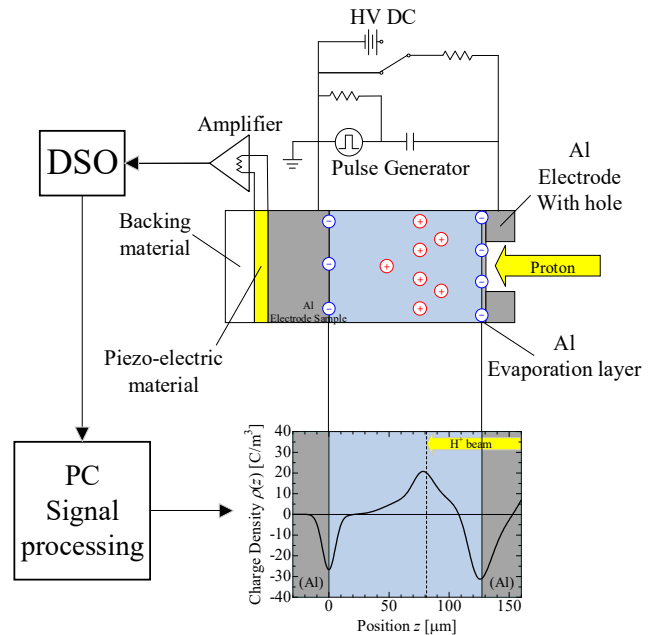


Fig.1 Schematic diagram of the

2-2 測定条件および照射条件

試料には、照射面に Al 蒸着を施した厚さ約 127 nm のシェルダール社製 FEP を用いた。陽子線源として、高崎量子応用研究所の 3MV タンデム加速器を使用した。加速エネルギーを 2 MeV とし、高照射電流密度 (15 nA/cm², 照射時間: 計 60 min) で陽子線照射中の空間電荷分布測定を 5 秒間隔で行った。この条件下で計算した陽子線の FEP 内飛程は 46 μm である。本測定では同一の試料に 2 回の陽子線照射を行った。1 回目の照射終了からそれぞれ短時間 (60 min), 長時間 (180 min) のインターバルを設け、再度 1 回目照射と同時間の照射を行った。

3. 結果及び考察、今後の展開等

3-1 空間電荷測定結果

Fig.3 に、繰り返し陽子線照射中の空間電荷測定結果を示す。同図 (A) は照射電流密度 15 nA/cm² で短時間インターバル (60 分) の場合、(B) は照射電流密度 15 nA/cm² で比較的長時間インターバル (180 分) の場合の結果をそれぞれ示している。また、同図内では以下の内容を図示している。(a) は 1 回目照射時の空間電荷分布波形、(b) は 2 回目照射時の空間電荷分布波形、(c) は空間電荷分布を試料厚さ方向に積分して算出した試料内正電荷蓄積量の経時変化を示す。なお、(c) ではインターバル時間を除いた正電荷蓄積量の経時変化を重ねて示している。さらに、図 (a), (b) では、陽子線が図中右方向から入射しており、縦黒破線は計算された陽子線の飛程を示している。また、縦黒破線より右側を陽子線照射領域、左側を陽子線未照射領域として区別している。同図 (a), (b) の結果より、1 回目の照射ではいずれの条件においても照射開始直後から正電荷の蓄積が観測され、その後、計算飛程近傍をピークとして蓄積正電荷が増加する様子が確認された。照射終了後には、陽子線通過領域および陽子線未照射領域の両方で蓄積正電荷の残存が見られた。一方、2 回目の照射では、両条件とも照射開始後から計算飛程を中心に正電荷の増加が観測された。その後、照射終了に向けて蓄積正電荷は陽子線通過領域にシフトしながら減少する傾向を示した。照射終了後には、陽子線未照射領域および一部の陽子線通過領域に正電荷の残存が確認されたが、計算飛程近傍での蓄積は見られず、1 回目照射終了時とは異なる結果が得られた。

同図 (c) より、1 回目照射では、いずれの条件においても照射開始直後から試料内の蓄積正電荷量が増加し、照射終了時には同図 (c-A), (c-B) それぞれ 0.73 mC/cm², 0.69 mC/cm² に達した。2 回目照射では照射開始直後から蓄積正電荷量が急増し、それぞれ最大 0.75 mC/cm², 0.80 mC/cm² に達した後、時間経過とともに減少した。この蓄積性電荷量減少傾向は、放射線誘起伝導 (radiation induced conductivity : RIC)⁶⁾ による導電率上昇が要因と考えられる。また、陽子線総照射量が 0.54 C/m² であるのに対し、蓄積正電荷量が極めて小さいのは、照射側 Al 蒸着面から注入された電子が RIC により蓄積正電荷を中和したためと推察される。同図 (A), (B) を比較すると、短時間インターバルでは 1 回目と 2 回目の照射に連続性が見られたが、長時間インターバルでは 2 回目照射で蓄積正電荷量が顕著に増加する傾向が確認された。

以上の結果より、長時間インターバルが 1 回目照射時と 2 回目照射時の電荷蓄積挙動に差異を生じさせる

ことが示された。この原因として、2 MeV の高エネルギー陽子線照射により試料が放射化し、その影響で電荷蓄積特性が変化している可能性が考えられる。一般に、時間経過に伴い放射性物質の量は減少するため、照射エネルギー等の加速パラメータおよびインターバル時間が電荷蓄積挙動に影響していると推察される。

3-2 陽子線照射試料の放射化評価

前節の結果から、インターバル時間によって1回目照射時と2回目照射時の電荷蓄積挙動に差異が生じることが示された。この原因として、2 MeV の高エネルギー陽子線照射による試料の放射化が電荷蓄積特性に影響を及ぼしている可能性が考えられる。一般的に、高エネルギー陽子線2MeVを超える照射時には試料が放射化することが知られている^[7]。本節では、陽子線照射時に生じる試料の放射化を調査するため、陽子線照射後にサーベイメータを用いて試料から発せられる放射線量の簡易評価を実施した。厚さ約 100 μm のダイキン社製 FEP に 2 MeV, 15 nA/cm² の陽子線を 15 分間照射し、照射 30 分後に大気中で GM 計数管式サーベイメータを用いて、放射線測定を 40 分間行った。

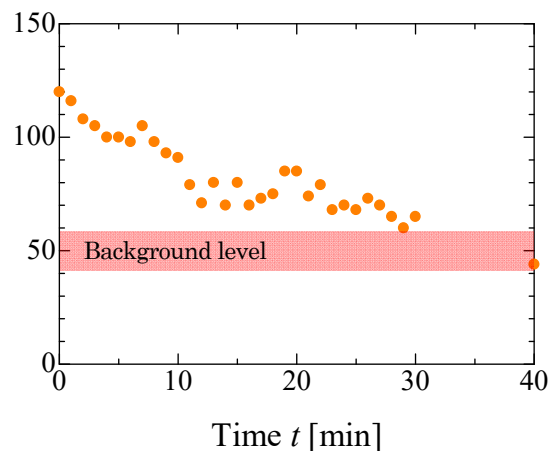


Fig. 4 Count rate on the GM counter type survey meter

その結果を Fig.4 に、各エネルギー条件下での放射線数の経時変化を示す。同図横軸は時間 [min]、縦軸は CPM [1/min] として表記している。なお、CPM は 1 分間に計測された放射線数を示す指標である。また、ピンクの帯で示されている部分は未照射試料における CPM 値 (バックグラウンド値) を表している。同図より、バックグラウンド時の約 2.5 倍の値が観測された。また、測定開始から 30 分が経過してもバックグラウンドを上回る線量が観測された。

3-3 まとめ

同一試料に 2 回の繰り返し陽子線照射を行い、インターバル時間の長短が電荷蓄積挙動に与える影響を評価した。その結果、インターバル時間が長い場合、蓄積正電荷量や電界強調が顕著に増加することが確認された。放射化が収まった試料では陽子線照射によって生じる格子欠陥等のトラップサイトによる効果が顕在化されたため、蓄積性電荷量が増加されたものと推定されるが詳細は今後の研究によって明らかにしていく予定である。

4. 引用(参照)文献等

- [1] “NASA’s Plan for Sustained Lunar Exploration and Development”, National Aeronautics and Space Administration
- [2] J. P. Williams, D. A. Paige, B. T. Greenhagen, E. Sefton-Nash, “The global surface temperatures of the Moon as measured by the Diviner Lunar Radiometer Experiment”, ICARUS, Vol 283, pp 300-325 (2016)
- [3] 三宅 弘晃, “人工衛星に及ぼす帯電放電現象について”, 電気設備学会誌, 31 巻 5 号, p.348-351 (2011)
- [4] Haruhisa Fujii, Takashi Miyamoto, “Analysis of Charged Particles Environment inside Spacecraft Affecting Internal Charging”, Proceedings of 53rd Space Sciences and Technology Conference, 1A02, p5 (2009)
- [5] Heiken, G. H et al., LUNAR SOURCEBOOK-A user’s guide to the moon, Cambridge University Press (1991)
- [6] Yang, G.M.; Sessler, G.M., “Radiation-induced conductivity in electron-beam irradiated insulating polymer films” Electrical Insulation, IEEE Transactions on, Vol. 27, Issue 4, pp.843-848, 1992
- [7] S. Tanaka, M. Fukuda, K. Nishimura, W. Yokota, T. Kamiya, “TRAC: A computer code system for calculation of radioactivity induced by charged particles and neutrons”, JESJ Vol.1990, pp157-158, 1990