

陽子線照射による宇宙機絶縁材料の体積抵抗率変化

榎 海星^{*a)}, 齊藤 慎司^{*}, 長妻 努^{*},
三宅 弘晃^{**}, 田中 康寛^{**}

Effect of Proton Irradiation on the Volume Resistivity of Spacecraft Insulating Materials

Kaisei Enoki^{*a)}, Shinji Saito^{*}, Tsutomu Nagatsuma^{*},
Hiroaki Miyake^{**}, Yasuhiro Tanaka^{**}

To accurately calculate the charge accumulation on spacecraft, it is essential to investigate the volume resistivity of insulating materials. In this study, we measured the external circuit current density of a multi-layer insulator commonly used in spacecraft to evaluate changes in volume resistivity under proton irradiation. The results indicated that the volume resistivity changed by several orders of magnitude depending on the proton irradiation dose rate.

キーワード：体積抵抗率、宇宙機帯電、絶縁材料、放射線誘起伝導、陽子線

Keywords : Volume resistivity, Spacecraft charging, Insulating material, Radiation induced conductivity, Proton beam

1. はじめに

現代社会の情報やサービスは人工衛星等の宇宙インフラにより支えられている。また、アルテミス計画をはじめとする有人での月面や惑星探査が国際協力により推進され、人工衛星・探査機・探査ローパー等の宇宙機の利用が世界的に拡大傾向である。そのため、宇宙システムの異常は大規模インフラ障害や人命に関わる事故に直結する可能性があり、更なる信頼性の確保が求められる。宇宙機は荷電粒子が存在する環境で運用されるため、構成材料として多用されている絶縁材料は帯電する。帯電量がある閾値を超えると静電放電 (Electro static discharge: ESD) が発生する。放電によって発生する電磁パルス等は多くの精密機器を搭載した宇宙機の誤作動や故障を引き起こす可能性がある⁽¹⁾。この ESD は宇宙環境起因の衛星障害の過半数を占める⁽²⁾。また、帯電は周辺の荷電粒子を引き寄せ、光学センサや粒子・電界センサへの影響も懸念されている⁽³⁾。さらに近年、宇宙機の高性能化・小型化・低コスト化に伴い、地上機器用の民生部品の宇宙機への転用が求められているが、ESD 耐性の低下が懸念されている⁽⁴⁾。そのため、宇宙機用絶縁材料の帯電現象の把握は宇宙機の安全性・信頼性向上のため、喫緊の課題である。

宇宙機設計時の絶縁材料の帯電評価は表面電位の数値解析が主である。表面電位の算出は入射量として荷電粒子の電流密度、放出量として二次電子放出電流密度、伝導電流密度、表面リーク電流密度等が用いられる⁽⁵⁾。放出される電流は二次電子放出係数、体積抵抗率、表面抵抗率等の材

料物性によって決定されるパラメータであり、正確な帯電量把握にはこれらの材料物性の把握が必要不可欠である。その中でも、体積抵抗率は放射線が照射されると数桁にわたり変化することが知られている。この現象は放射線誘起伝導 (Radiation induced conductivity: RIC) と呼ばれ、X 線や電子線による RIC は過去の実験データより、次の(1)式で表すことができると報告例がある⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

$$\frac{1}{\rho_v} = k_{RIC} \left(\frac{dD}{dt} \right)^\Delta \dots\dots\dots (1)$$

ここで ρ_v は体積抵抗率、 dD/dt は吸収線量率、 k_{RIC} 及び Δ は実験結果から得られた材料固有のパラメータを示す。しかし、材料固有のパラメータの決定要因、実験式の汎用性、さらに陽子線など他の荷電粒子による RIC への適用可能性といった課題が依然として残されている。

以上の背景より、本研究では陽子線による宇宙機絶縁材料の体積抵抗率の変化を把握することを目的に、宇宙機外皮断熱材に使用されるポリイミド系絶縁材料に着目し、陽子線照射下において、外部回路電流密度を計測した。また、得られた電流密度より、体積抵抗率を算出した結果を以下に報告する。

2. 測定システム及び測定条件

〈2・1〉 外部回路電流密度測定システム 図 1 に外部回路電流密度測定システムの模式図を示す。計測試料を高電圧電極及び検出電極の間に配置し、測定試料の両面に設けられている蒸着電極を介して任意の電界を試料に印加可能な構造となっている。試料表面を流れる電流の検出を防

ぐため、リング状のガード電極は接地されている。検出電極には微小電流計が接続されており、外部回路電流を測定することができる。また、装置には照射孔が設けられており、試料に直接陽子線を照射しながら計測が可能となっている。体積抵抗率は、計測された電流値を電極面積及び印加電界で除することで算出した。

〈2・2〉 測定試料 測定試料として、宇宙機外皮断熱材に用いられる Kapton®-200H (Du Pont-tray 製、公称厚さ: 50 μm) を用いた。以下の説明では Kapton®と記す。上述したように直流電圧印加のため、試料の両面には円形の Al 蒸着電極を設けている。

〈2・3〉 陽子線照射条件 陽子線照射は量子科学技術研究開発機構高崎量子技術基盤研究所の 3 MV タンデム加速器を用いた。照射条件は加速エネルギーを 2 MeV、照射電流密度を 0.03 nA/cm²、0.3 nA/cm²、3 nA/cm²、30 nA/cm² の 4 種とした。また、照射時間は各 30 分とした。30 nA/cm² 照射時にそのフルエンスは 3.37×10^{14} particles/cm² となり、AP8MAX (高度 8000 km, 軌道傾斜角 0 度, 円軌道) と比較すると約 1.7 年分に相当する照射量である⁽⁸⁾。図 2 に TRIM (Transport of ions matter)⁽⁹⁾で算出した、Kapton®に 2 MeV の陽子線を照射した際の粒子の試料内飛程を示す。同図に示すように、50 μm の試料を完全に貫通するエネルギーを選択した。また、TRIM により算出した線エネルギー付与を用いて、試料内に付与される吸収線量率を次の式(2)を用いて算出した^{(7),(10)}。

$$\frac{dD}{dt} = J_{\text{irrad}} \frac{E_{\text{deposit}}}{\rho \cdot \Delta x} \dots\dots\dots (2)$$

J_{irrad} は照射電流密度、 E_{deposit} は TRIM を用いて算出した陽子による単位長さあたりの線エネルギー付与、 ρ は密度、 Δx は TRIM 計算時に用いた最小長さを示す。図 3 に算出した試料内の吸収線量率分布の計算結果を示す。同図に示すように試料内に付与される吸収線量率は陽子の侵入深さによって分布を持つが、以下の議論では、その平均値を用いることとした。その平均値は 0.0059 kGy/s から 5.9 kGy/s である。

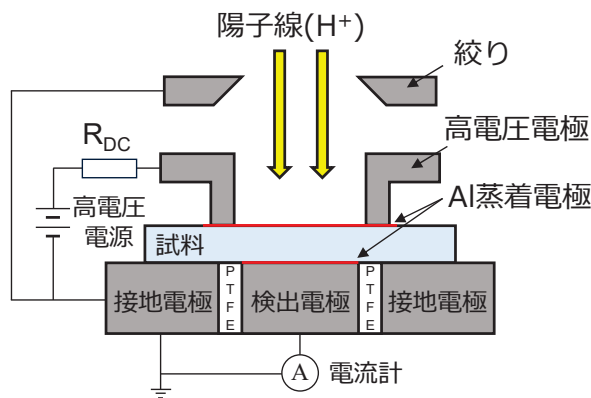


図 1 外部回路電流密度測定システム

〈2・4〉 外部回路電流密度測定条件 図 4 に本試験の測定シーケンスを示す。印加電界 20 kV/mm に相当する直流電圧を照射前 30 分、照射中 30 分、照射後 60 分間の計 120 分間印加し、5 秒間隔で電流値を測定した。また、各測定は真空度 10^{-4} から 10^{-5} Pa の真空環境下で行った。なお、陽子線そのものの照射によって流れる電流は、照射中に計測された電流値から除して、体積抵抗率を算出した。

3. 測定結果及び考察

図 5 に各吸収線量率における体積抵抗率の経時変化を示す。同図より、照射前は $10^{14} \Omega/\text{m}$ から $10^{15} \Omega/\text{m}$ 程度であり、Kapton®の公称値と一致した⁽¹¹⁾。すべての条件にて陽子線照射直後に急激な体積抵抗率の低下が確認され、その後、時間経過とともに増加していく傾向が確認された。さらに、高線量率での照射の場合、再び導電率が減少してい

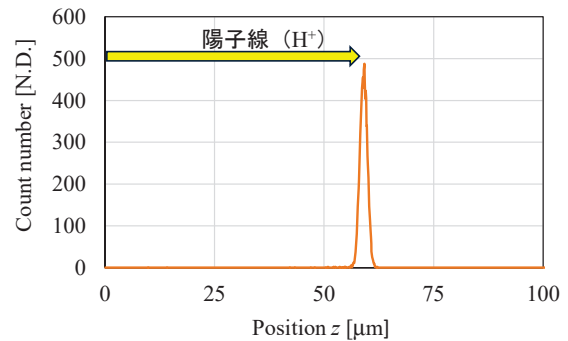


図 2 陽子線(2 MeV)の Kapton®内の計算飛程

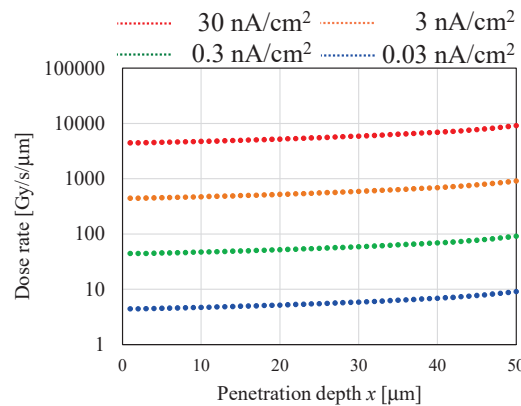


図 3 陽子線照射された Kapton®の吸収線量率分布

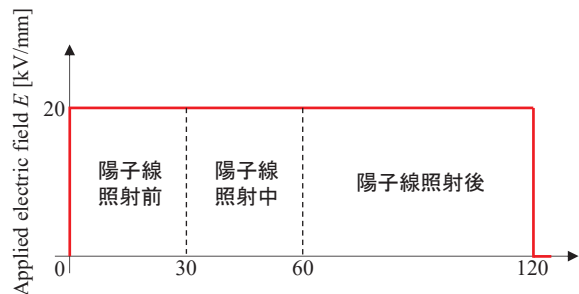


図 4 外部回路電流密度の測定シーケンス

く挙動が確認された。このように陽子線照射中においても RIC が発生していることが分かった。また、0.59 kGy/s、5.9 kGy/s で照射した場合、照射後 60 分間では、照射前と比較して体積抵抗率は低い値を維持することが分かった。この現象は遅延放射線誘起伝導 (Delayed radiation induced conductivity: DRIC) と呼ばれる現象である。この体積抵抗率の増減挙動について考える。照射初期の体積抵抗率の急激な減少に関しては、陽子線照射による電子正孔対の生成によるキャリアの急増が要因と考える。また、その後の増加については、生成された電子正孔対の再結合や、材料内に分布する電荷捕捉準位(以下、トラップ)に捕捉され、伝導キャリアが減少したためと考えられる。この現象は X 線や電子線による RIC でも観測、報告例が存在する^{(7),(12),(13)}。その後の再減少については、トラップの充満によるトラップ確率の低下や分子構造変化に伴う、トラップ深さの変化が要因と考えられるが、今後の検討課題である。さらに DRIC については、トラップされた電荷が徐々にデトラップ

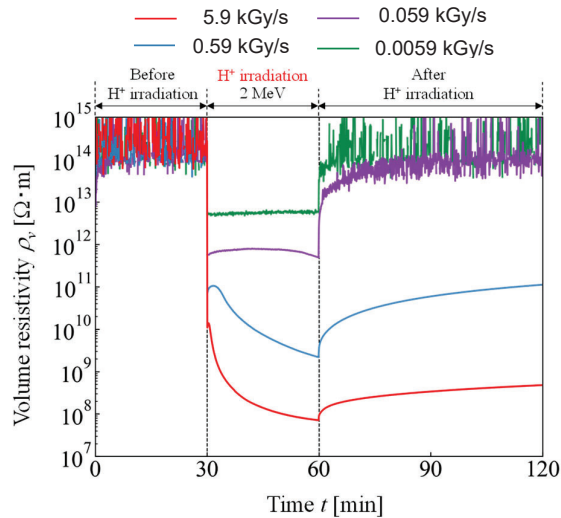


図 5 各吸収線量率における体積抵抗率の経時変化

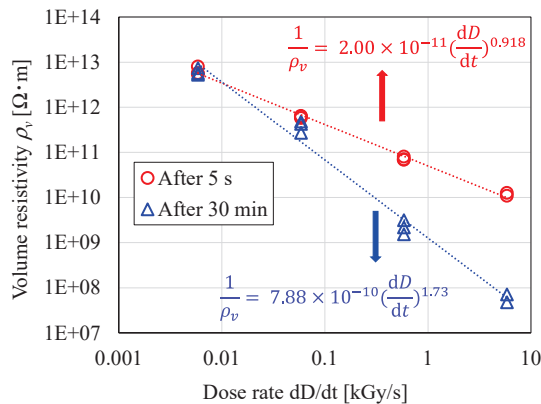


図 6 吸収線量率と体積抵抗率の関係

したことが要因と考えられる。そのため、体積抵抗率の再減少が著しく発生している 0.59 kGy/s、5.9 kGy/s の場合に DRIC が発生していると考えられる。

図 6 に照射 5 秒後及び照射 30 分後の各吸収線量率に対する体積抵抗率をそれぞれ示す。同図より、各時間において、体積抵抗率は吸収線量率の累乗で示せることが分かった。この挙動は X 線や電子線による RIC と同様である。しかし、時間経過によって材料固有のパラメータは変化していくことが分かった。この結果より、正確な帯電量算出のためには、材料固有のパラメータの変化量も把握することが必要であること明らかとなった。

図 7 に陽子線照射総量と体積抵抗率の関係を示す。同図より、陽子線照射総量が増加していくにあたり、体積抵抗率が低下していくことが分かる。また、体積抵抗率が増加傾向から減少傾向へ変化していくことが確認された。この変化は吸収線量率が小さい場合、より早い段階で発生することが分かる。図 8 に吸収線量率と体積抵抗率が増加傾向

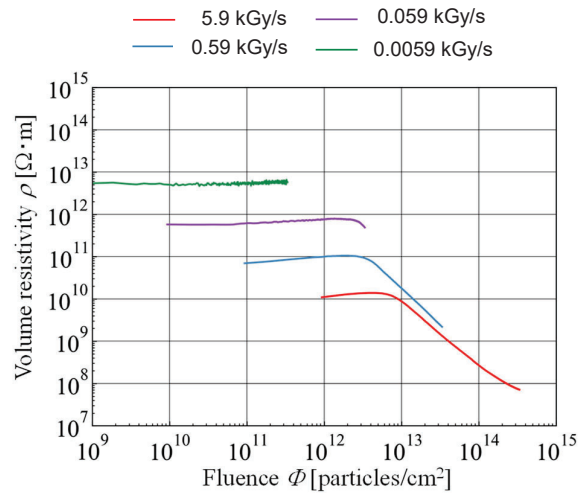


図 7 陽子線照射総量と体積抵抗率の関係

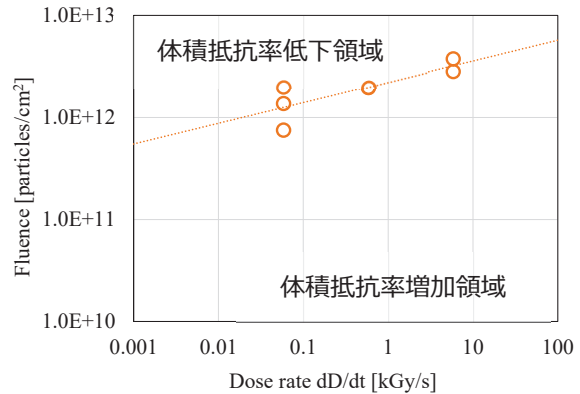


図 8 吸収線量率と照射総量及び体積抵抗率減少点の関係

から減少傾向へ移行する照射総量の関係を示す。同図に示すように、その変曲点は吸収線量率の低下に伴い、減少し、一定の関係を持っていることが分かった。そのため、今回は加速試験として高吸収線量率で照射を行っているが、実際の運用環境の場合は、より早い段階で体積抵抗率の再低下が発生すると考えられる。

4. 結論

本研究では、宇宙機の外皮断熱材に着目し、陽子線照射による体積抵抗率の変化の把握を目的に、陽子線照射中のKapton®-200Hの外部回路電流密度測定を実施した。その結果、陽子線照射により体積抵抗率は数桁に及び変化が発生することが分かった。また、X線と電子線の報告例と同様にRICは吸収線量率の累乗で示せることが明らかとなった。しかしながら、材料固有のパラメータは時間経過により変化するため、正確な帯電量の算出には常に一定の値を用いることはできないことが明らかとなった。導電率の増減要因については、電子正孔対の生成や電荷捕捉準位の変化等が考えられるが、今後の検討課題である。また、陽子線の照射総量の増加に伴い、体積抵抗率は増加傾向から、減少傾向へ変化し、その変化は照射量が大きく寄与することが示唆された。この現象は宇宙機の運用初期と比較して、後期がより帯電しづらいことを示している。現在は照射初期の物性値を利用して運用終了までの衛星設計が行われているが、過大評価となっている可能性があることが示唆された。

謝辞

本研究は量子科学技術研究開発機構の施設共用制度、および東京大学工学系研究科原子力専攻 日本原子力研究開発機構・量子科学技術研究開発機構施設利用共同研究のもとで、QST(高崎)タンデム加速器を用いて実施されました。

文 献

- (1) V. Griseri, "Behavior of Dielectrics in a Charging Space Environment and Related Anomalies in Flight," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, no. 3, pp. 689-695, 2009.
- (2) 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) Design Standard Spacecraft Charging and Discharging, Revision A, Japan Aerospace Exploration Agency, May 10, 2012.
- (4) 矢島雄三・原口英介・谷重紀・石原秀樹・木之田博：「先進民生部品による高性能・高信頼性衛星機器の開発」，電気情報通信学会誌，Vol. 108, No. 6, pp. 515-522, 2025.
- (5) 廣三壽・辻孝誠・藤井治久：「宇宙機用熱制テフロンフィルムの電子ビーム照射による放電現象とその解析」，電気学会論文誌 A, 117 巻, 12 号, pp. 1157-1164, 1997.
- (6) B. Gross, G.M. Sessler, J. E. West, "Charge Dynamics for Electron-

irradiated Polymer-foil electrets", Journal of Applied Physics, vol. 45, pp. 2841-2851, 1974.

- (7) G. M. Yang, G. M. Sessler, "Radiation-induced Conductivity in Electron-beam Irradiated Insulating Polymer Films", IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 27, no. 4, pp. 843-848, 1992.
- (8) M. S. Gussenhoven, E. G. Mullen and D. H. Brautigam, "Improved understanding of the Earth's radiation belts from the CRRES satellite," in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 43, no. 2, pp. 353-368, April 1996.
- (9) J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The stopping and range of ions in solids", Stopping and ranges of ions in matter, vol.1, Pergamon Press, 1985.
- (10) Y. Miyaji, H. Miyake, Y. Tanaka, "A Study on the Estimation of RIC (Radiation-Induced Conductivity) of Proton Irradiated Polyimide", Polymers, vol. 15-2, 337, 2023.
- (11) Du Pont-tray Co., Tokyo, Japan. Internets: Kapton® General Catalog [Online]. Available: <https://www.tkap.jp/download/pdf/kapton2007r.pdf>
- (12) A. Tyutnev, V. Saenko, A. Zhadov and E. Pozhidaev, "Radiation-Induced Conductivity in Kapton-Like Polymers Featuring Conductivity Rising With an Accumulating Dose," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 8, pp. 3739-3745, Aug. 2019
- (13) R. Gregorio Filho, B. Gross, R. M. Faria, "Induced Conductivity of Mylar and Kapton Irradiated by X-rays", IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 21, no. 3, pp. 431-436, 1986.