

電子線照射したフッ素系絶縁材料における空間電荷蓄積特性

久保 亘平*, 遠藤 和樹, 榎 海星, 三宅 弘晃, 田中 康寛 (東京都市大学)

Space Charge Accumulation Characteristics on Fluorine-based Insulating Material of Electron beam Irradiated

KUBO Kohei*, ENDO Kazuki, ENOKI Kaisei, MIYAKE Hiroaki,
TANAKA Yasuhiro (Tokyo City University)

Abstract

Spacecraft are covered with MLI and OSR for protecting from the hard temperature differential in space environment and keeping the temperature inside of spacecraft. As the satellite are operated in the Van-Allen belt, those insulating materials are exposed by radio-active rays, such as electron and proton. Those charged particles are injected and accumulate in the bulk of materials. And it will be origin of electric static discharge (ESD). There phenomenon may lead to the satellite operation anomaly. Therefore, it is necessary to understand charging phenomena in the bulks of materials for spacecraft based on electronic physics, for reliabilities of long-life operation. In this research, we try to understand the charging phenomena on fluorinated polymer which are used for wire harness. Space charge accumulations in the bulk of the sample irradiated by an electron under DC application were studied using the pulsed electroacoustic (PEA) method.

キーワード：宇宙機用絶縁材料,エチレン四フッ化エチレン共重合体, 空間電荷, パルス静電応力法, 電子線
(Insulating material, used for spacecraft Ethylene-tetrafluoroethylene, Space charge pulsed electroacoustic method, Electron-beam)

1. はじめに

温度変化の激しい宇宙環境下で運用されている人工衛星などの宇宙機は、機内の温度を一定に保つため、機体表面は多層断熱材(Mulch Layer Insulator : MLI)や太陽光反射材(Optical Solar Reflector : OSR)などの絶縁材料で覆われている。しかし宇宙機は、プラズマや電子・陽子などの高エネルギー荷電粒子で満たされたヴァン・アレン帯と呼ばれる領域でも運用されている。宇宙機表面の絶縁材料が高エネルギー荷電粒子に曝されると、材料内部に荷電粒子が注入されて電荷が蓄積する。荷電粒子により絶縁材料が照射され、分子鎖切断や空孔の生成により電気特性が劣化するとともに、電荷の蓄積にともなう材料内部の部分的な電界強調によって、絶縁破壊の危険性が増加する。これを起因とした宇宙機の運用異常も多く報告されており⁽¹⁾⁽²⁾, 宇宙機の信頼性向上の観点から宇宙機材料の帯放電現象を把握することは必要不可欠である。現在は、絶縁材料の帯電を計測する手法は開発され、宇宙放射線、特に電子線が照射された宇宙機材料の帯電現象の解明に努めているが、いまだ電子物性の観点から正確に把握されたとはいえない。このことから、放射線照射により生じる帯放電現象を電子物性の観点から詳細に把握することが重要となる。そこで本

研究は、電子線照射を行った宇宙機用絶縁材料に直流電圧を印加することによって生じる空間電荷蓄積特性を評価している。これまで電子線照射材料における直流課電下での空間電荷分布を大気圧下で実施することにより、電子線照射によって照射試料内に生成される電子正孔対の蓄積特性の評価を行ってきた。電子線照射後に真空チャンバーから試料を取り出し、この測定するまでに15分の時間を要する。電子正孔対の残存量は、照射終了後から指数関数的に減少していくと考えられるため、電子線照射による正確な材料内の電離・励起現象を把握するには、測定までに要する時間を圧縮することが求められる。以上より、真空チャンバー内で直流課電が可能な測定システムを構築し、真空下において電子線照射直後の直流課電下でのフッ素系絶縁材料における空間電荷分布測定を試みた。また電荷蓄積の原因と考えられる電子正孔対の観測も試みた。

2. パルス静電応力法(PEA法)測定装置

Fig. 1 にパルス静電応力(Pulse electroacoustic : PEA)法⁽³⁾の原理を示す。測定試料を高電圧電極と接地電極で挟み、高電圧とパルス電圧を印加する。これにより、試料内にパルス電界が発生することで、試料内部に蓄積していた

電荷は微小変位して圧力波が発生する．この生成された圧力波は測定試料内部から圧電素子に伝搬し，圧電素子によって電気信号に変換される．電気信号の強度は電荷量に，時間は分布にそれぞれ比例している．この手法の利点として，信号検出部が電氣的にシールドされているため電氣的雑音に強いこと，試料をシールド内部に設置する必要がないため操作性に優れていることが挙げられる．

3. 電子線照射装置 及び 測定システム

Fig. 2 に電子線照射用真空チャンバーの概略図を示す．真空チャンバー内を真空排気する場合には，大気圧から 10^{-2} Pa まではロータリーポンプ， 10^{-2} Pa 以下ではターボ分子ポンプを用いて排気しており，真空度は約 4×10^{-5} Pa まで到達可能となっている．実際に電子線を照射する際には，陰極加熱電源を用いてタングステンフィラメントに電流 I_f を流すことで加熱し熱電子放出を利用して電子を発生させる．同時に，電子加速用高電圧 V_0 をフィラメントに印加すると，陰極から接地した陽極に向かって電子が照射される．チャンバー内真空度 10^{-5} Pa より電子の平均自由行程は 25 m と求まり，チャンバーのサイズ 0.25 m より十分に長い．加速電圧 V が電子の照射エネルギーに， I が電子電流となる．これらのシステムを用いることで，本装置では加速エネルギー 100 keV までの電子線照射が可能となっている．

Fig. 3 に PEA 法を用いた空間電荷分布測定装置のセンサ部の概略図を示す．本装置は荷電粒子を試料に照射するために照射窓を設けており，荷電粒子を試料に直接注入できるため照射環境下での空間電荷計測が可能となっている．圧力波を電気信号に変換するための圧電素子は厚さ $9 \mu\text{m}$ のポリフッ化ビニリデン (Poly Vinylidene Fluoride: PVDF) を使用しており，位置分解能は約 $10 \mu\text{m}$ である．Fig. 4 に測定システムの構成図を示す．今回の研究では照射終了直後に直流高電圧を印加して電荷分布測定を行うため，高耐圧ケーブルを介して大気圧下の高電圧電源と真空チャンバー内の装置電極を接続している．このシステムの構築によって，電子線照射終了後に 15 分間の待機時間を要さずに測定を行えるようになった．

4. 測定試料および測定条件

測定試料は，公称試料厚さ $100 \mu\text{m}$ の ETFE(ethylene-tetrafluoroethylene)を用いた，試料は，照射面側にアルミニウムを電極として蒸着している．電子線の照射は真空度を 10^{-5} Pa オーダーの条件下において，加速エネルギー 60 keV，電流密度 5 nA/cm^2 の電子線を 5 分間照射した．電子線照射後に短絡時間を 0, 5, 15 分間設け，それらの試料に 20 kV/mm に相当する直流電界を 30 分間印加し，その後 30 分間の短絡時間を設けて測定を行った．

5. ETFE における空間電荷分布蓄積および考察

Fig. 5 に各測定条件下における ETFE の空間電荷分布の

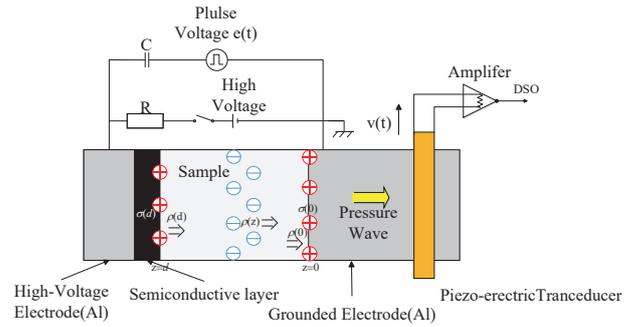


Fig. 1 Principle of PEA method

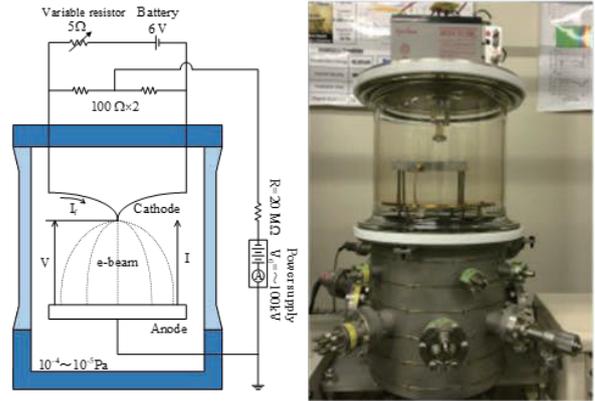


Fig. 2 Schematic diagram and photo image of vacuum chamber electron with electron gun

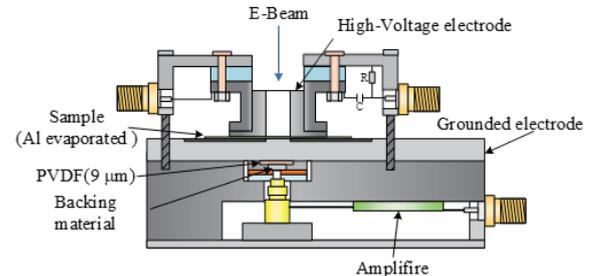


Fig. 3 Mini PEA apparatus

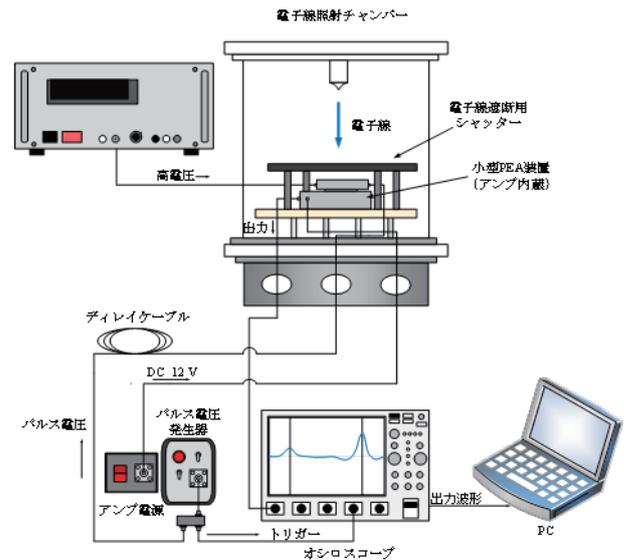


Fig. 4 Measurement system

測定結果を示す．同図(A)は電子線未照射の測定結果，同図(B-D)は電子線照射後に短絡時間を 0, 5, 15 分設けた後に電

圧印加実験を行った測定結果をそれぞれを示している。また、各図(a)は電子線照射後の電圧印加中および短絡中の空間電荷分布の継時変化、(b)に電荷分布波形、(c)に電界分布波形を示す。各図中の縦の破線は、Katz, Penfoldの実験式⁽⁴⁾より算出したものであり、この照射条件でのETFEの計算飛程は、いずれも照射表面より約31 μmの位置となる。

同図(A)より、未照射試料においては電圧が印加されても顕著な電荷の蓄積は観測されなかった。一方、電子線を照射した試料では、図(B-D)に示すように、多量の正電荷が照射電子の飛程(図中破線)付近から陰極に向かって蓄積する様子が観測された。この多量の正電荷蓄積により、正電荷蓄積と陰極間の電界が、平均電界の約1.5倍に増加している。以上より、電子線を照射したETFEに直流電界を印加することによって、照射前後で電子線照射領域の特性が変化したと考えられる。このような結果が得られた原因について、高エネルギー電子により試料内で多量の電離などにより電子正孔対が多量に発生した、または電荷注入障壁が低下し、陽極から多量の電荷が注入したためであると考えられる。

次に電子線照射後の短絡時間が電荷蓄積特性に及ぼす影響について、Table 1に電圧印加終了直後の試料内部の正電荷蓄積量を示す。Fig.5 (B-D)およびTable 1より、同図(B)照射後に短絡を15分設けたときに比べ、図(A)照射直後のほうが電圧印加時の正電荷蓄積量が多いことがわかる。この原因について、電子線照射によって生成された電子正孔対は、照射からの時間経過にともない指数関数的に減少するという傾向から、同図(A)の照射直後は試料内部に多量の電子正孔対が残存しており、電圧印加によって分極したことで正孔が内部に残存し、かつ、電子が照射面近傍に蓄積したことで陽極からの正電荷注入を促進させたため、以上のような結果が得られたと考えられる⁽⁵⁾。しかし、Table 1より、電圧印加後の正電荷蓄積量について、照射後の時間経過にともない指数関数的に減少しているとは言い難い。これは電子線照射試料内部に蓄積・残存する正電荷は上述の通り、電子正孔対の正孔と陽極から注入した正電荷が混在したものであり、電子正孔対の量を正確に観測できていないためであると考えられる。

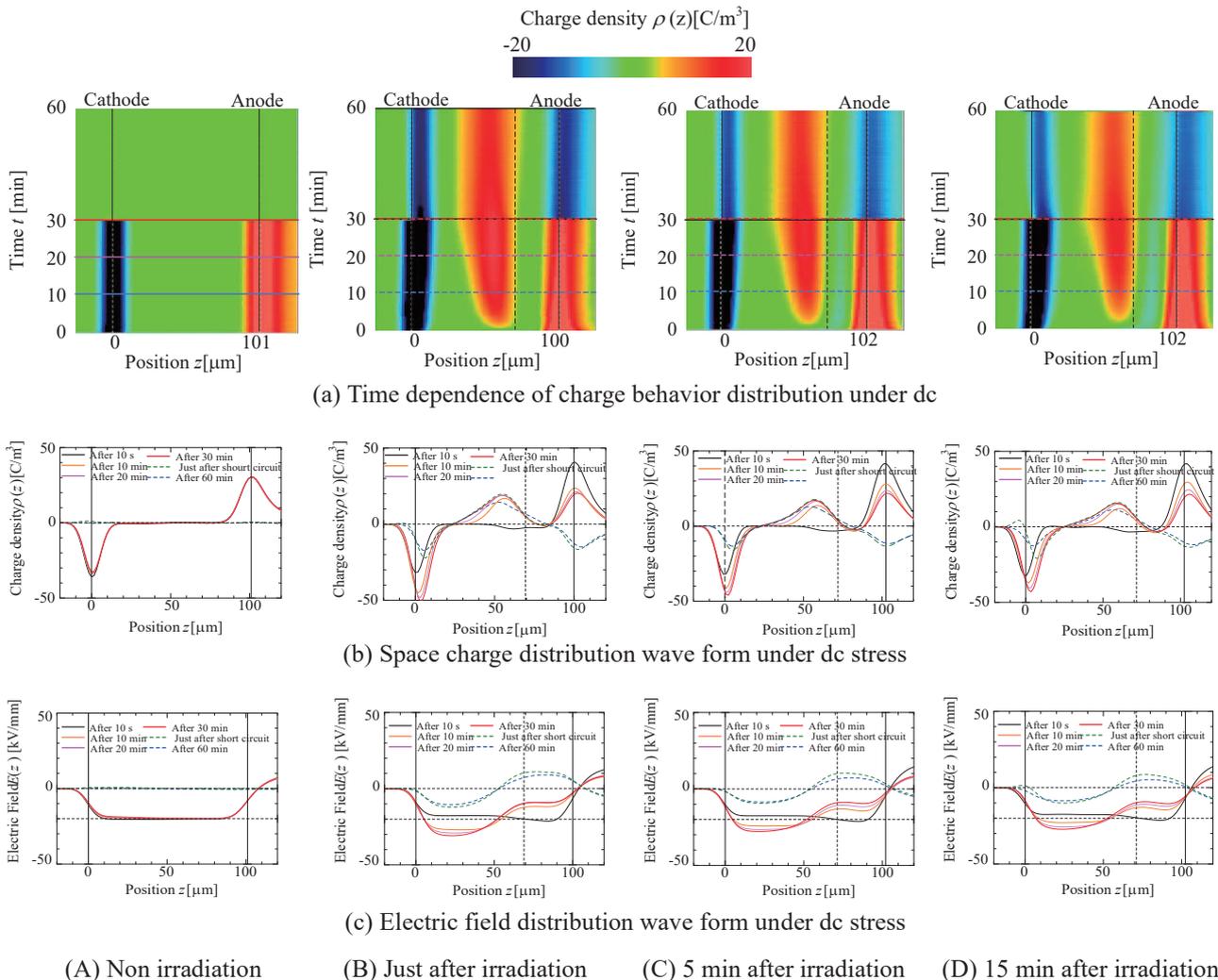


Fig. 5 Space charge distribution in ETFE irradiated by electron under vacuum condition with 20 kV/mm

6. 電極注入電荷抑制による電子正孔対観測の試み

前項において、電子線照射試料の空間電荷分布測定を行った。その結果、電圧印加にともなう電荷蓄積を観測したが、電荷の極性は正電荷蓄積が支配的であり、予想していた電子正孔対の電子の観測できなかった。これは、陽極からの多量の正電荷が注入したことで電子が打ち消されたためであると考えている。そこで、電荷注入を抑制するために、さらに印加電界を 5 kV/mm まで低減し測定を行った。また、先行研究⁽⁵⁾で実施したブロッキングレイヤーを用いた電極からの電荷注入抑制手法を用い同様に測定を行った。

ブロッキングレイヤーを挿入した測定状況のモデル図を Fig. 6 に示す。試料の照射面と高電圧電極との間に、未照射試料（公称試料厚さ $50 \mu\text{m}$ ）を挿入し電極からの電荷注入を抑制する電荷注入防止層（ブロッキングレイヤー）として使用した⁽⁵⁾。この測定手法により、電極からの電荷注入を抑制し照射試料内部に残存する電荷のみを観測できると予想した。

4 章に示した同条件で電子線を照射し、平均電界 5 kV/mm に相当する直流電圧を 30 分間印加して、電子線照射試料の空間電荷分布測定を行った。Fig. 7 に BL の有無による空間電荷測定結果を示す。同図(a)より、図 5 の 20 kV/mm 印加時の結果と比較すると、電荷蓄積量は減少している。しかしながら、同図(a)(b)より BL 層の有無による大きな差は確認されず、正電荷の蓄積が支配的であり、低電界下においても電荷注入を完全に抑制することは困難であることが分かった。ただし同図(a), (b)を比較すると、電界印加 30 分後において BL 層を用いたとき測定結果においては陽極近傍に負電荷の蓄積がわずかではあるが観測された。これは電子正孔対の電子であると考えられる為、今後の測定手法の改善で電子正孔対のみを観測できる可能性がある事が示された。

7. 結論 及び 今後の予定

真空チャンバー内で直流課電が可能な測定システムを構築し、電子線照射直後の空間電荷分布測定を行った。その結果、電子線照射されることで電荷蓄積が生じやすくなること、また電子線照射終了からの時間経過にともない電圧印加時の正電荷蓄積量は減少することが観測された。これは、電子線照射によって生成された電子正孔対が、照射終了と同時に再結合し始めているためであると考えられる。

照射後の短絡時間の短縮による正電荷蓄積量の増加が電子正孔対の残存によるものであるか同定するために、電子線直後において電子正孔対の残存量の観測を試みる。また、真空チャンバー内で電流測定を行える測定システムを構築し、電子線照射直後からの電荷注入障壁の継時変化の観測を試みる。従って今後は、電子線照射直後の電荷分布測定・電流測定によって、本研究の目的である電子線照射が電気絶縁性能に及ぼす影響について、正確に評価を行っていく。

Table 1 Amount of positive charge

電子線照射後の短絡時間 T [min]	0	5	15
正電荷蓄積量 Q_p [mC/m^2]	0.507	0.441	0.415

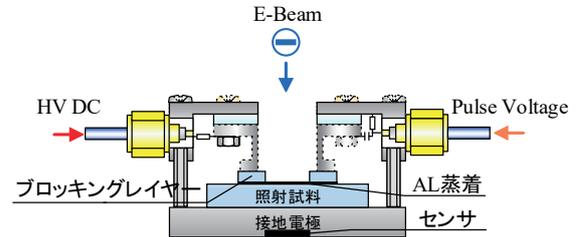


Fig.6 The schematic diagram of sample setting

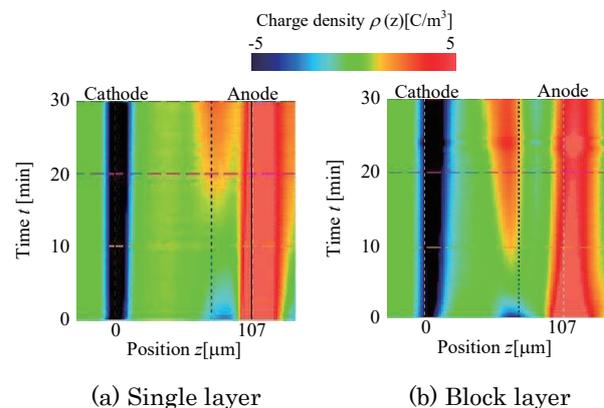


Fig.7 Space charge distribution under low electric field

文 献

- (1) 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.
- (2) 宇宙開発委員会調査部会: "環境観測技術衛星 (ADEOS-II) 「みどり II」の運用異常に係る原因究明及び今後の対策について", 宇宙開発委員会報告書, 2004
- (2) T. Talada, "Acoustic and optical methods for measuring electric charge distributions in dielectrics", IEEE Trans. Plasma Science., Vol.34, pp. 2176 - 2184, 2006
- (4) L. Katz and A. S. Penfold, "Range-energy relations for electrons and the determination of beta-ray end-point energies by absorption," Reviews of Modern Physics, vol. 24, no. 1, pp. 28 LP - 44, 1952.
- (5) 吉田 周吾, 永瀬 崇浩, 岩間 健太, 三宅 弘晃, 田中 康寛, 電子線照射フッ素系絶縁材料中の電子正孔対生成量の解析, 電気学会論文誌 A, Vol. 137, No. 11, pp. 632-638, 2017年11月