

宇宙放射線環境の衛星材料における電気物性に関する基礎研究

Analysis of Charging Property on Dielectric Materials for Spacecraft under
Radioactive Rays Environment

三宅 弘晃¹⁾ 内山 龍¹⁾ 田中 康寛¹⁾

Hiroaki MIYAKE Ryo UCHIYAMA Yasuhiro TANAKA

¹⁾ 東京都市大学

パルス静電応力法(Pulsed Electro-acoustic Method: 以下 PEA 法)を用いた内部帯電計測装置を開発し、荷電粒子照射下における絶縁材料の内部帯電計測を行っている。電子線照射下における絶縁材料内の帯電計測は本研究室をはじめとする国内外の研究施設で行われてきたが、プロトンが照射された絶縁材料の電荷分布計測は行われていない。そこで本研究では、プロトン照射下における絶縁材料の内部帯電計測、および照射材料の電気的特性の評価を行い、それらの研究結果を宇宙機設計標準への応用を目指す。本研究課題では、特にプロトン照射材料に対し電流計測、直流高電圧下における材料内の空間電荷挙動から帯電物性の解析を行った。

キーワード：人工衛星, 帯電, 運用異常, プロトン照射, PEA法, 分極電荷, 伝導電流

1. 目的

人工衛星などの宇宙機は宇宙空間の激しい温度変動から機内の温度を一定に保つために、熱制御材で覆われている。熱制御材は、Multi Layer Insulator (MLI)と呼ばれ、ポリイミドフィルム (PI) を複数積層したものが用いられている。MLI は宇宙空間において、電子や陽子などの高エネルギー荷電粒子線に直接曝されることにより、絶縁材料内部に荷電粒子が注入され、電荷が蓄積される。絶縁材料の帯電によって、絶縁材料と宇宙機の接地(基準電位)との間に電位差が生じ、放電や材料の絶縁破壊を引き起こす。この帯放電現象は絶縁材料の劣化や、放電によって生じる電磁波ノイズにより宇宙機内部の電子機器の故障・誤作動、電力送電ライン等の基幹システムの破損を生じさせ、最悪の場合宇宙機の運用異常につながるという報告がなされている^[1]。そのため、宇宙機の設計には高分子絶縁材料の電気的特性が重要な要因となり、現在の宇宙機設計標準でも設計時に帯電評価を行うことを求めている。しかしながら、現設計標準では高エネルギー荷電粒子が照射された絶縁材料の内部帯電や導電率等の電気的特性は、計測・評価手法が確立されていない等の理由から、まだ反映されていない。

そこで当研究グループでは、宇宙機の絶縁材料で生じる内部帯電の電荷蓄積現象を解明するために、パルス静電応力法 (Pulsed Electroacoustic Method: PEA 法) を用いた内部帯電計測装置を開発し、荷電粒子照射下における絶縁材料の内部帯電計測を中心に帯電挙動の解析を行っている。昨年までにプロトン(陽子)ポリイミド試料に対して内部帯電計測及び電流計測を実施してきた。その結果、照射試料内部には正電荷が蓄積し、照射試料の電流計測から算出した導電率では未照射材料と比較し 10^3 倍も大きくなる場合がある事が明らかになった。これらの挙動を解析するために、本研究では照射試料に直流高電圧を印加し、その際の材料内部の帯電挙動を PEA 法により計測し、照射材料の電気物性の評価を行う。さらに本研究で得られた知見の宇宙機設計標準への反映を目指す。

2. 方法—内部帯電計測手法と実験条件—

試料には厚さ 50 μm のポリイミドフィルム(以下 PI)を用い、コンデンサ法、パルス静電応力法(PEA)によって電流測定、試料内空間電荷分布計測を行った⁽¹⁾。プロトンの加速エネルギーは 1.0, 2.0 MeV、電流密度は 30 nA/cm² として試料に 30 分間照射し、照射後約 1 日経過した試料について、直流電界 100 kV/mm を 120 分印加し、その際の電流密度の経時変化及び試料内空間電荷挙動を観測した。

3. 結果及び考察

図1に未照射試料及びプロトン照射した試料の直流高電圧印加時における電流密度の経時変化を、図2に空間電荷挙動をそれぞれ示す。ここで、図2の(b)(c)に示したプロトン照射材料における測定結果では、図中右側から照射しており、図中縦の破線はプロトンの飛程位置の数値計算結果を示したものである⁽²⁾。

図1より、未照射試料の場合、印加時間の経過に伴い電流密度は 8.0 nA/m² まで減衰した。照射試料では、1.0 MeV 照射試料では 3.0×10⁻⁷ A/m² で一定値を取り、2.0 MeV 照射試料では一度 1.0×10⁻⁵ A/m² まで減衰した後上昇を始め、電流密度 2.5×10⁻⁴ A/m² に達した際に絶縁破壊に至った。

次に図2より、未照射試料の場合、電圧を印加しても試料内部に顕著な空間電荷の蓄積は観察されない。照射試料では、電圧印加開始直後から試料内に正・負電荷の分極蓄積が見られた。またこれらの試料内分極電荷量はプロトンの照射エネルギーの増加に伴い増加していることが確認できる。ここでプロトンの加速エネルギーに対する、粒子の試料への侵入深さは約 59 μm であり、粒子は試料を十分貫通し、正電荷の蓄積はしないと考えられる。そのため、電界印加より観測された正・負電荷の蓄積は、プロトン照射により、分子間の結合が切断される事で生じた正・負キャリアによる空間電荷分極であると考えられる。

以上より、プロトン照射した試料における電流密度の上昇は、試料内空間電荷分極によるものだと考えられる。しかし、電界印加中における電流密度の減衰後の上昇については空間電荷挙動としては示されていない。この現象はプロトン照射によって試料バルク中の導電率が放射線誘起伝導などにより上昇したためと考えられ、今後詳細な調査を行う予定である。

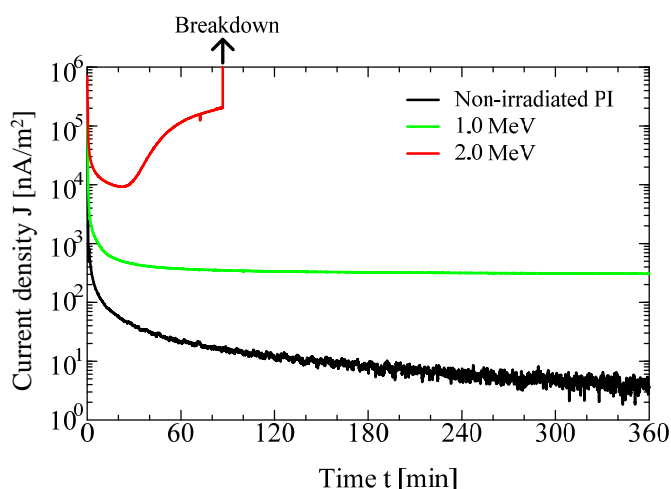


図1 電流密度の経時変化
Fig.1 Time dependence of current density

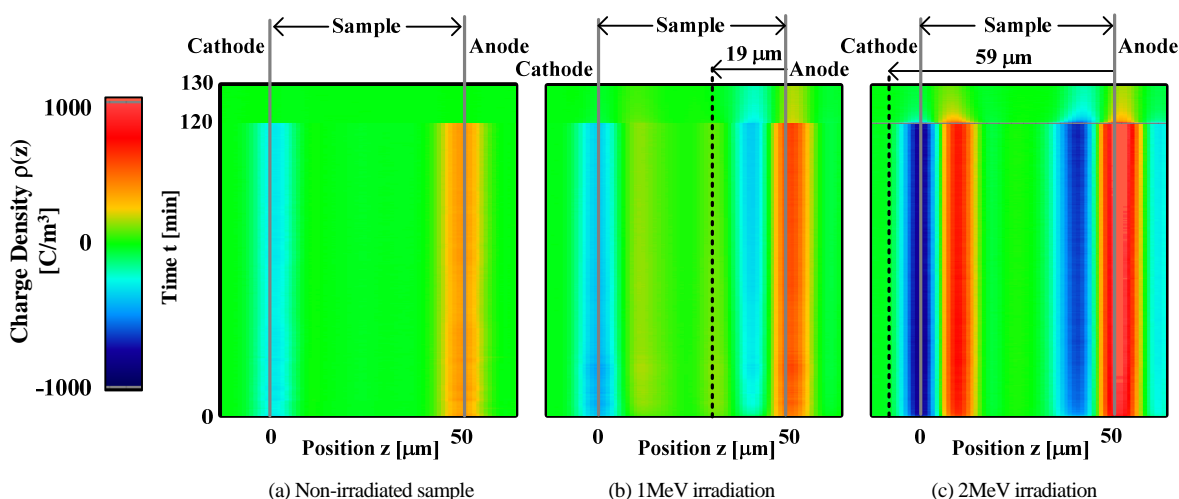


図2 プロトン(proton)照射・未照射 PI の直流高電圧印加時における空間電荷挙動
Fig.2 Space charge behavior in proton-irradiated/non-irradiated PI under HVDC

4. 引用(参照)文献等

- (1) Tatsuo TAKADA, Hiroaki MIYAKE, and Yasuhiro 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, October, 2006
- (2) J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Solids", Pergamon Press, New York, 1985