

社会基盤の高信頼化に資する次世代型人工衛星の革新的帯電設計評価手法の確立

機械システム工学科

三宅 弘晃

1. 研究背景・目的

人工衛星は必須の社会インフラとなっており、測位や地球観測、さらには今後は複数衛星の同時運用による機能を拡張して運用させるコンステレーション衛星が多数利用される傾向にある。また、衛星の電力需要は増加しており、現状最大 20 kW から 25~30 kW にここ 10 年程度で増加することが見込まれている。エネルギー基本計画(H26/4/11 閣議決定)では、宇宙太陽光発電を将来の革新的技術と位置づけ、2040 年を目指して MW クラスの太陽光発電衛星の実用化を目指しており、衛星の基幹電圧がより高電圧となる為、衛星の帯電が大きな問題となる。これまでの衛星の運用異常は、その半数以上が放射線による帯電に起因している。衛星が社会インフラとして必須なものとなっており、かつ、大災害等の安全保障を担うシステムの根幹を担う様になりつつある状況では、さらなる高信頼化が求められており、それを実現するためには衛星材料の電子物性を盛り込んだ高度な衛星設計手法が必要となる。よって、申請者の研究の包括的最終到達目標として「**社会基盤の高信頼化に資する次世代型人工衛星の革新的帯電設計評価手法の確立**」を設定し研究を推進している。その中で本報告では、「①二次電子による表面帯電物性の解析」及び「②パルス電子線 TOF 法による移動度計測」について報告をする。

2. 研究方法

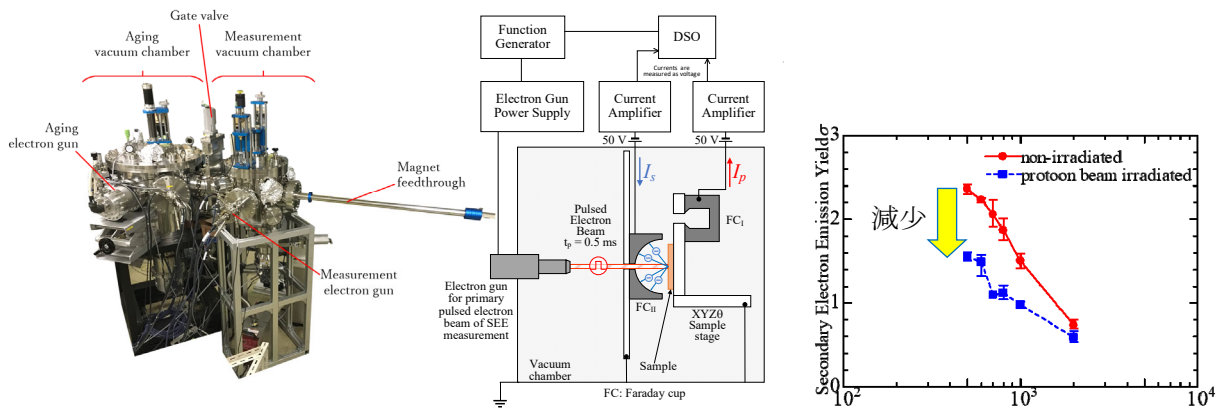
2-1 二次電子放出測定

2-1-1 二次電子放出係数測定原理

二次電子放出係数 (Secondary electron emission yield: SEEY)は衛星の表面帯電を決定する重要な帯電物性値である。これまでは、衛星が軌道上で運用開始される前の状態(Beginning of Life: EOL とする)での評価を行ってきたが、運用後期(End of Life: EOL とする)の評価も設計要素の一つとして考慮した際に、衛星の信頼性を大きく向上し寿命化に資する事が期待される。本研究では SEEY を一次電子電流 I_p と二次電子電流 I_s を用い(1)式により算出をした。図 1 に SEEY 測定システムの概略図を示す⁽¹⁾。 I_p 、 I_s はそれぞれファラデーカップ(Faraday Cup: FC)に接続されたケースレー社製カレントアンプ 428 (増幅率 $10^6 \sim 10^8$ V/A) で電圧信号としてレクロイ社製デジタルオシロスコープ Wavesurfer42MXs にて観測した。

$$\sigma = I_s / I_p \quad (1)$$

測定試料には電子線及び陽子線照射を施した公称厚さ 100 または 125 μm のフッ素材料を用いた。陽子線照射条件は同じく 2 MeV、30 nA/cm²、30 min である。また、測定用の一次電子線エネルギー E_p の範囲は $E_p = 500 \text{ eV} \sim 5 \text{ keV}$ とし、パルス状の電子線($t_p = 0.5 \text{ ms}$)を使用し、且つ測定ごとに試料の計測位置を数 mm 程度の間隔をとり、



(a) Photo image of complex electronic physic property measurement system for space application

(b) Schematic diagram of SEE measurement

Fig.1 Measurement system of SEE yield

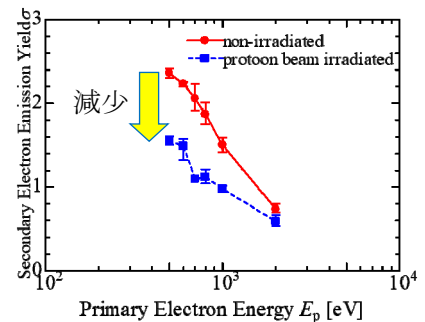


Fig.2 SEE yield on FEP irradiated by proton

測定照射電子線による材料帯電の測定への影響を抑制した。

2-2-1 陽子線照射試料の二次電子放出係数

図2に未照射、陽子線照射試料のSEEYの測定結果を示す。同図の縦軸にはSEEY σ 、横軸には一次電子線のエネルギー E_p [eV] を示している。同図より、未照射試料と比較し、全ての計測領域において未照射を下回り、最大で $\sigma = 0.5$ 程度の差が生じていることが分る。これまでの陽子線照射フッ素系材料の物性解析の結果より、照射試料においては分子鎖切断や、新たな局在準位の形成が確認されている為、本測定においても、照射電子が材料内で捕獲され試料外に放出されづらい状況になっている為、SEEYの低下が観測されたものと考えられる⁽²⁾。

2-2 パルス電子線を用いた移動度計測

宇宙機材料の電気物性を理解するために、キャリア移動度は最も重要な物質特性の一つである。一般的に絶縁材料のキャリア密度は非常に小さいため、電気伝導の研究では外部から強制的に紫外光、電子線、X線あるいは γ 線などによってキャリアを励起させる必要が生じる。しかし、キャリアの移動度が非常に小さい、寿命が短い、得られる電流値が微小であることなどから、測定が困難である。そこで前節で用いた図1に示す複合物性計測装置の試料台を本測定に適した形に回収(図3参照)し、電子線パルスによるTime of Flight (TOF) 法を用いたキャリア移動度の測定を行った。

試料として厚さは約 $50 \mu\text{m}$ の低密度ポリエチレン(LDPE)を使用した。電子線パルスを照射し、外部回路電流値を観測した。測定手順は、定常状態に至るまで、1時間直流電圧を印加した後にパルス時間幅 $\Delta t_p = 25 \mu\text{s}$ のパルス電子線を照射する。パルス電子線の加速エネルギーは 10 keV 、照射電流密度は 29 nA/cm^2 である。Katz と Penfold の実験式より、本測定では試料内の照射面から $1.8 \mu\text{m}$ 以内の深さでキャリアが発生する。図4にパルス状の電子線を照射した際の外部回路電流波形を示す。さらに同図の測定結果と各条件での平均印加電界および、(2)式を用いてキャリア移動度 μ を算出した。

$$\mu = \frac{v_{e,h}}{E} = \frac{d}{E\Delta t_p} = \frac{d^2}{V\Delta t_p} \quad (2)$$

$\Delta t_p = 25 \mu\text{s}$ の電子線を照射したとき、 μ は平均印加電界 -50 kV/mm のとき $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、平均印加電界 -75 kV/mm のとき、 $6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ となった。式(1)より移動度は電界に比例して小さくなる事が分かるが、今回の測定においては理論通りその傾向を確認することができた。

4. 結言・今後の展開

軌道上の陽子環境を模擬照射した試料においてSEEY測定を行い、未劣化状態の物との大きな差が観察された。今後は電子線も含めて他の衛星材料に拡大し検証を行う。また移動度測定においても、標準試料であるLDPEの移動度を求める事には成功しLDPEにおいては帯電電荷の放出速度を見積もれる状況となった。移動度計測においては他の衛星材料に拡大し測定を行う。さらにはこれらの結果を統合し、衛星材料の帯電シミュレーションに応用する予定である。

参考文献

- (1) 長門 拓 他, 劣化照射が可能な広エネルギー帯域二次電子放出測定システムの開発, 電気学会論文誌 A, Vol. 135, No. 7, pp. 433 – 434, 2015年7月
- (2) Hiroaki Miyake et al., Physicochemical Analysis for fluorinated Polymer Films Irradiated by Proton, 2017 The Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), USB, pp.106-109, 2017/10

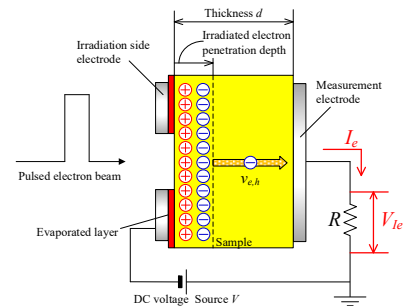


Fig. 3 Modified sample stage for carrier mobility

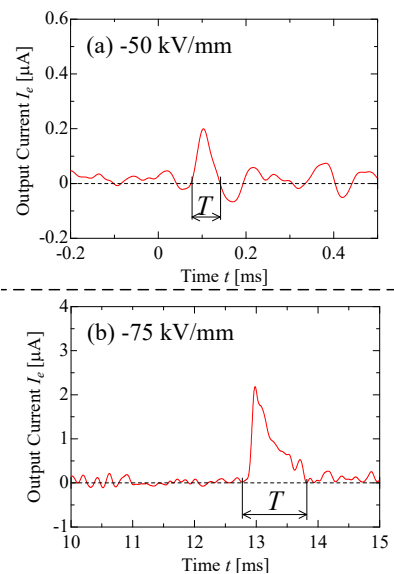


Fig. 4 External circuit current on LDPE irradiated by pulsed electron beam

本研究に関する研究発表

- ・ 永田浩二郎、佐藤奈摘、三宅弘晃、田中康寛、「放射線照射フッ素材料における二次電子放出係数の測定」, H31 電気学会全国大会講演論文集, p.68, 2019
- ・ 三宅 弘晃、熊田 亜紀子、小迫 雅裕、佐藤 正寛、平野敏行、「直流絶縁技術のブレークスルーに向けた計算科学を活用した絶縁材料設計手法の創成」, パワーアカデミー特別推進研究中間報告, H31 パワーアカデミー成果報告会, 2019
- ・ 2019 年放電学会年次大会(東京都市大学開催, 発表予定)
- ・ 第 16 回宇宙環境シンポジウム(東京都市大学開催, 発表予定)

以 上