

電界放出顕微鏡を用いた衛星帯電防止用受動型電子エミッタの開発

九州工業大学 工学府 先端機能システム専攻 博士前期課程 2 年 趙研究室 14350908 岡田優美子

1 研究背景

国際宇宙ステーション(ISS: International Space Station)の軌道上では太陽電池パネルを用いて約 110kW の発電を行い、国際宇宙ステーションの電力を賄っている。宇宙機の太陽電池パネルによる発電電力は技術開発に伴って増加傾向にある。一方で、宇宙環境は地上とは異なり、高真空や周囲のプラズマとの相互作用、太陽活動によって受けるサブストームの影響など過酷な環境である。

サブストームにより、高エネルギー電子が人工衛星に流入することで衛星は負に帯電し、太陽電池パネル上での放電につながる。衛星の帯電・放電現象は太陽電池パネルの供給電力の低下や、最悪の場合運用停止を招く恐れがある。そのため、衛星の帯電現象を緩和させて、太陽電池パネル上での放電現象を防ぐことが重要である。我々の研究室では、帯電・放電現象を防止するために衛星帯電防止用受動型電子エミッタ(ELF: EElectron emitting Film)の開発に取り組んでいる。

2 研究目的

本研究の目的は、開発段階にある ELF 素子の表面形状に伴う電子放出のメカニズムを専用の電界放出電子顕微鏡(FEM: Field Emission Microscope)を用いて評価・解明することである。FEM では ELF 素子の表面形状、電界放出電子電流分布、電界増倍係数 β を計測し、電子放出箇所とその形状を評価する。そして、FEM で得られた評価結果を ELF 素子の技術開発の指標の一つとしていく。

3 原理

図 1 に実際の ELF 素子、図 1 中に赤色で示す部分を拡大した写真を図 2 の右側、そしてその構造を図 2 の左側に示す。また、図 2 中に赤色で示す部分がトリプルジャンクションである。この部分から電界放出の原理を用いて電子放出を行う。

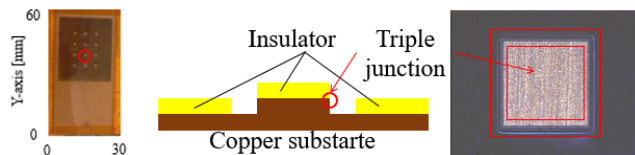


図 1 ELF Fig.1 ELF
図 2(左)突起の構造、(右)突起拡大図 Fig.2 Schematic drawing (Left) and Protuberance on ELF (Right)

図 3 に ELF 素子の動作システム、図 4 に動作時の衛星構体とカバーガラスの電位の推移を示す。サブストームにより、太陽電池パネルの表面のカバーガラスに高エネルギー粒子が流入することで二次電子が発生し、表面が正に帯電する。その結果、カバーガラスと衛星構体との間に

図 2 のような電位差が生じる。そのため、ELF 素子を太陽電池と宇宙機に接地して接続していた場合、カバーガラスの電位が放電の閾値に達する前に、ELF 素子からの電子放出により、衛星構体とカバーガラスの電位は図 2 のようになる。つまり、ELF 素子は、太陽電池パネル上で放電が発生する前に、ELF 素子から電子放出を行い、衛星の帯電を緩和させて、放電の発生を未然に防ぐことができる。

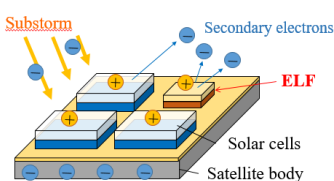


図 3 ELF 素子の動作システム

Fig.3 Operational system of ELF

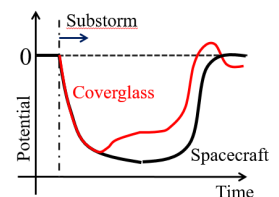


図 4 ELF 動作時の衛星構体とカバーガラスの電位の推移

Fig.4 Satellite and coverglass electric potential changing while ELF operating

ELF 素子の電子放出の原理は、金属内の電子分布と通過確率より、電子放出電流密度と印加電界の関係式を導くことができる。この関係式は式(1)に、

Fowler-Nordheim の式を変形させると、

$$\ln Id^2 = -\frac{Bd}{\beta V} - \ln \frac{1}{A\beta^2 V^2 S} \quad (1)$$

という式が得られる。 β は電界増倍係数、 V は印加電圧、 d は電極間距離、 I は電子放出電流、 S はエミッタのエミッション面積、 E は電子放出箇所に印加する電界強度であり、 A と B は、

$$A = \frac{1.54 \times 10^{-6}}{\phi}, B = 6.83 \times 10^7 \phi^{1.5} \quad (2)$$

である。 ϕ は仕事関数であり、 A, B は鏡像効果を考えないときの値である。式(1)より、測定データを $\ln Id^2$ と $\frac{d}{V}$ に代入してプロットすると、直線のグラフが得られる。これを F-N プロットと呼び、図 5 に示す。図 5 のプロットの傾きから電界増倍係数を算出することができる。この値から ELF 素子の最適な形状を検討していく。

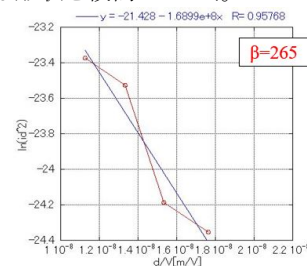


図 5 F-N プロット Fig.5 F-N plot

4 試験システム

図3にFEMの試験システムを示す。ここでは、レーザーフォーカス変位計を用いて CCD 画像、表面形状を測定し、真空容器内に設置された針を用いて電界放出電子電流分布、電界増倍係数を測定することができる。本研究では、FEMを改良しており、変位計のフォーカス調整と測定用針の固定を行った。改善点としては、針の先端はずれることなく、定点で固定することができるようになった。一方で、針の先端を、FEM試験システムの分解能より、最低2μm以下に収める必要がある。また、レーザーフォーカス変位計に1軸ステージを設置したことで変位計のピントを調節することができるようになった。このシステムにより、針の測定点の観測が可能となり、実験をより迅速に、より正確に行うことができるようになった。

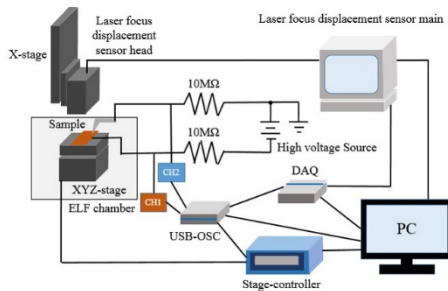


図6 FEM測定システム

Fig.6 FEM measurement system

5 研究成果

5.1 FEM試験結果

改良版FEMについて、図7に示すように、表面形状と電界放出電子電流分布の測定結果より、測定方向(Y軸方向)に誤差が生じていた。測定用針の先端部が大きすぎるのが原因であり、今後は最低でも2μmに分解能を収める必要がある。

また、FEMが開発されたばかりのシステムであることから、サンプルのデータ数が少なく、電界増倍係数をもとに形状を評価・検討することができない。そのため、今後はより多くのデータを取得していくことで、ELFの最適な形状の比較を行っていく。

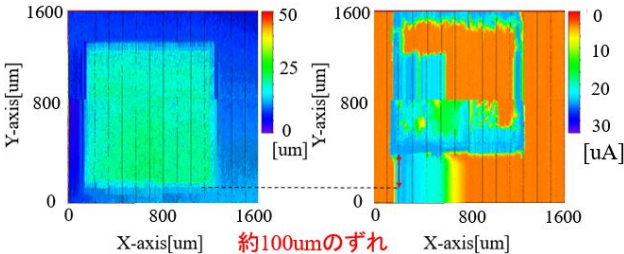


図7(左)表面形状、(右)電界放出電子電流分布
Fig.7 Surface topography (Left) and Electric field electron current distribution measurement (Right)

5.2 材料別電界増倍係数計測

材料別に電界増倍係数の比較を行ったが、表1に示すように、値にばらつきが多かった。この理由として、電界

増倍係数測定の際、サンプルに針が接触して表面を傷つけていることが挙げられる。今後の課題としては、針とサンプルを非接触の状態を保ち、測定を行う必要がある。

	タフビッチ銅	無酸素銅	真鍮板	クローム銅
平均値	314	571	282	473

表1 電界増倍係数の値比較

Table.1 Comparison of field multiplication coefficient

5.3 電界増倍係数の解析方法の検討

電界増倍係数を算出するために適したデータの選定に関して検討を行った。測定方法は、針とサンプルを離れた場所から1μmずつ近づけていき、その時の高さ、電圧、電流の3つのデータを取得して図8に示すようなF-Nプロットを作成する。ここで電界増倍係数を算出するために用いるデータは電子電流が流れ始める点から接触する点までである。この範囲が、図8で黄色の枠で囲んでいる部分となるため、測定パラメータのフィッティングを行い、再解析することでより正確な電界増倍係数を算出することができると結論づけた。

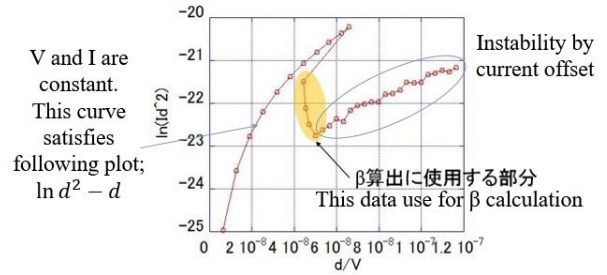


図8 F-Nプロットにおける電圧フィッティング

Fig.8 Voltage fitting of F-N plot

一方で、現在のデータ選定方法では、実際にβの値算出に使用されるプロットの数には4点程度であるため、より正確なβを求めるためには、より多くのプロット数が必要である。そのため、式(1)のパラメータより、電源電圧より電圧Vを変化させて計測を行った。結果を図9に示す。

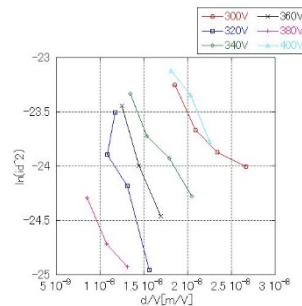


図9 各電圧で測定されたF-Nプロットの解析結果

Fig.9 Analysis result of F-N plot by each voltage

これより、式(1)における切片が変化するため、すべてのデータを一つの直線として電界増倍係数を算出することができなかった。今後は、より分解能の高いステージを用いて計測を行う必要がある。