

第10回宇宙環境シンポジウム

金属材料における二次電子放出係数曲線物理モデル式の最適化 及び測定システムの改修

長門 拓* 荒井 立朗 三宅 弘晃 田中 康寛 (東京都市大学)
大平 正道 奥村 哲平 高橋 真人 (宇宙航空研究開発機構)

Optimization of secondary electron emission yield curve physical model formula for metal materials

Hiromu Nagato, Tatsuro Arai, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University),
Masamichi Ohira, Tepei Okumura, Masato Takahashi (JAXA)

1. はじめに

宇宙環境で運用される人工衛星などの宇宙機は、機内の温度を一定に保つ為に絶縁材料フィルムを積層した MLI (Multilayer Insulator) と呼ばれる多層の絶縁フィルムから成る熱制御材料が宇宙機の表面に使用されている。しかし宇宙空間では、放射線や高エネルギー粒子 (電子、陽子、重イオン)、プラズマが存在し、これらにより MLI は帯電する。そして、過度に帯電した場合は静電放電が発生し、材料の劣化や機器の故障などの運用異常が発生し、運用不能に陥る可能性がある⁽¹⁾。そこで、実際の宇宙機運用の環境条件に基づいた帯電解析を設計段階から実施し、帯電・放電を考慮した材料選定が必要となる。この為、衛星開発者は衛星帯電解析ソフトウェアを使用し衛星表面の電位解析を行っている。解析には衛星形状の他に、表面材料の二次電子放出や光電子放出といった帯電に関する物性値が必要となる為、本研究では二次電子放出係数 (SEE yield) δ の測定に着眼した。

現在は、 δ の最大値 δ_m とその時の電子線の照射エネルギー E_m を半経験式に入力することで得られる二次電子放出特性を用いて数値解析を行っている。しかし、衛星の帯電・放電設計標準に記載されている二次電子放出特性のモデル式や、A. J. Dekker らのモデル式を基に作成された Burke の半経験式では、実際の測定結果との間に差異が確認され、特に照射エネルギーが 2 keV 以上では乖離が無視できない程大きい。そこで本報告では、物質の固有値である密度に着目し、幅広いエネルギー領域 (200 eV~10 keV) で測定出来ている金属材料において実験結果と密度の関係を整理し、数値計算モデルの最適化を実施したので報告する。

2. 二次電子放出測定システム

Fig. 1 に、二次電子放出係数測定システムの概略図を示す。真空チャンバーには電子銃が取り付けられており、試料に電子線 (パルス幅 $t_p = 0.5$ ms, 照射電子のエネルギー $E_p = 100$ eV ~ 10.0 keV、以下、一次電子) を照射することがで

きる。また、二次電子用ファラデーカップ (以下、FCII) は試料台の試料設置面から 3 mm の位置に配置されており、一次電子により試料から放出された二次電子は、FCII により I_s として収集される。それと同時に、試料台では吸収電流 I_{ab} の計測を実施している。FCII 及び試料台からの出力電流信号はカレントアンプ (428 Current Amplifier, Keithley 社製) を通して電圧信号に変換・増幅され、デジタルオシロスコープ (104MXs, LeCroy 社製) で観測される。

試料に照射する電子線の直径は 4 mm であり、実験は全て、真空チャンバーの真空度 $2 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5}$ Pa で実施された。

3. 二次電子放出係数の算出方法

一般的に δ は、入射一次電子電流 I_p に対する試料から放出された二次電子電流 I_s の割合と定義されている。本測定システムにおいては、Fig. 1 中の I_s と I_{ab} より以下の式を用いて算出している。また本測定では、反射電子も二次電子として収集している。

$$\delta = \frac{I_s}{I_p} = \frac{I_s}{I_s + I_{ab}} \quad (1)$$

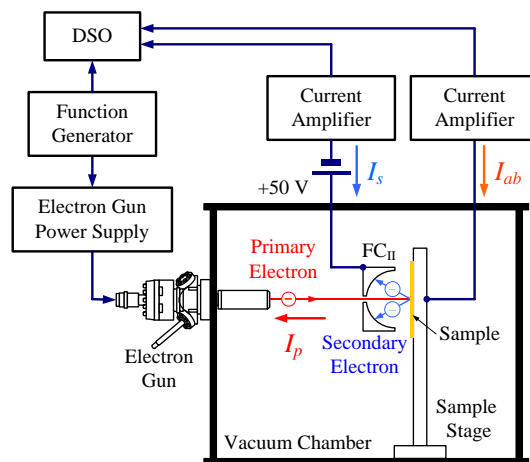


Fig. 1. Schematic diagram of measurement system of SEE yield

4. 数値計算モデルの最適化

現在、数値計算モデルの最適化を実施するにあたり用いているのが Burke の半経験式である。(2)式に、Burke の半経験式を示す⁽²⁾。(2)式中の係数を実験値に適合するように最適化を行った上で、 $a_1 \sim a_3$ 及び δ_m , E_m の各係数と試料密度 ρ の関係を調査した。これらの係数は LM (Levenberg-Marquardt) 法により、測定結果を用いて(2)式に合わせた近似式を導出することで算出した。

$$\delta(E_p) = \frac{a_1 \delta_m \left\{ 1 - \exp \left(- \left(\frac{a_3 E_p}{E_m} \right)^{a_2+1} \right) \right\}}{\left(\frac{a_3 E_p}{E_m} \right)^{a_2}} \quad (2)$$

ここで、 E_p は一次電子のエネルギー、 $a_1 \sim a_3$ は材料定数、 δ_m , E_m はそれぞれ二次電子放出係数 δ の最大値とその時の一次電子のエネルギーである。

4.1 試料密度と材料定数の関係 Fig. 2 に、(2)式中の係数 $a_1 \sim a_3$ と密度 ρ の関係を示す。横軸は ρ [g/cm³]、縦軸は $a_1 \sim a_3$ である。

同図より、 $a_1 \sim a_3$ と ρ はそれぞれ比例関係にあり、一次関数で近似できるということが考えられる。 a_1 及び a_3 に関しては、二次電子の平均脱出深さ等に依存する値であることから⁽³⁾、 ρ に比例した値になったと考えられる。

4.2 試料密度と二次電子放出係数の最大値の関係 Fig. 3 に、 δ_m 及び E_m と ρ の関係を示す。横軸は ρ [g/cm³]、縦軸の第一軸は δ_m 、縦軸の第二軸は E_m [eV] である。

同図より、 δ 曲線の最大値 (E_m , δ_m) も ρ に比例しているということが考えられる。また、Fig. 2, 3 中の最小二乗法を用いて導出した δ_m , E_m の一次関数より、 δ_m は(3)式の様に表示され、Fig. 4 中の破線にある様な E_m の一次関数で表すことができる。

$$\delta_m = -1.7466 \times 10^{-3} E_m + 3.0523 \quad (3)$$

4.3 Burke の半経験式の最適化 以上より、得られた $a_1 \sim a_3$ 及び E_m , δ_m を(2)式に適用すると、(2)式を ρ の関数で表すことができる。Fig. 4 に、算出した SEE yield と測定値の比較を示す。横軸は E_p [eV]、縦軸は δ である。

同図より、密度の小さい Ti, Ag, Au の順に δ_m の値が減少し、また E_m も高エネルギー側に遷移していることが確認できる。また、測定したエネルギー範囲において、最適化された式と測定値は良い一致を示している。

5. 測定システムの改良

現在我々が使用している測定システムでは、一次電子電流を直接測定することができない為、試料台からの吸収電流 I_{ab} を測定して二次電子放出係数を算出している。しかし、吸収電流は低エネルギー領域 (300 eV 以下) において S/N が低い。そこで、試料台からの信号を用いない、一次電子電流を測定できる一次電子用ファラデーカップ (以下、FC₁) を用いた測定システムの開発をした。

Fig. 5, 6 に、製作した FC₁ 及び、FC₁ を用いた新しい測定システム概略図をそれぞれ示す。MCP に電子線を照射シ

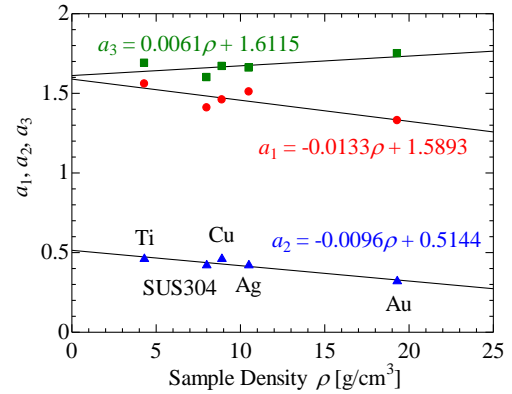


Fig. 2. Relationship between parameter a_1 , a_2 , a_3 and sample density ρ

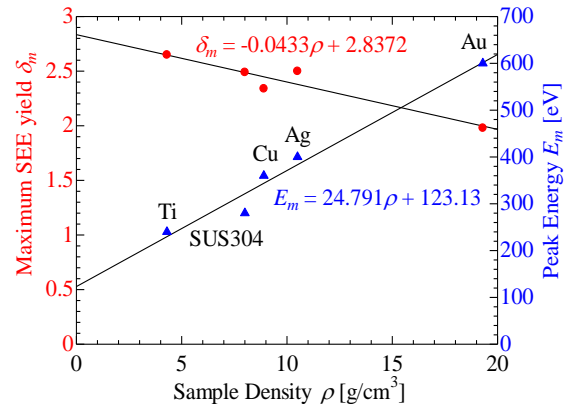


Fig. 3. Relationship between maximum SEE yield δ_m , peak energy E_m and sample density ρ

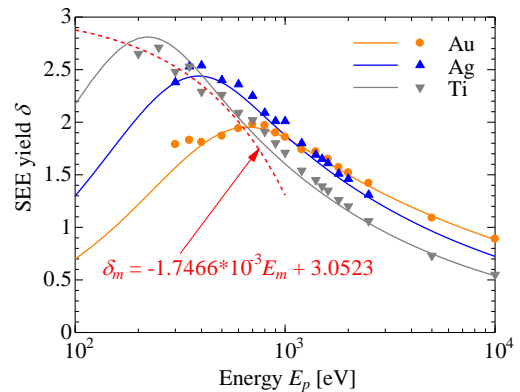


Fig. 4. Comparison between semi-empirical model and measurement results of SEE yield δ on metal sample

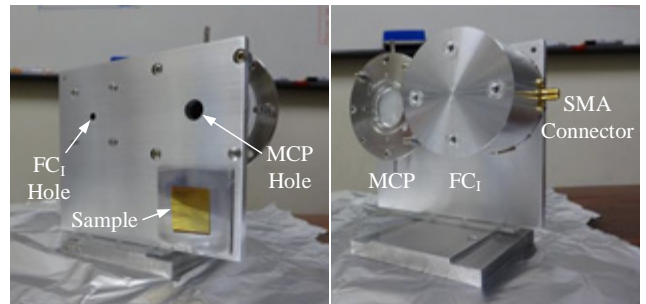


Fig. 5. Faraday cup unit for primary electron beam I_p

ラメータの調整を行った後、FC_I にパルス状電子線を照射し、一次電子電流を観測する。その後、試料にパルス状電子線を照射し二次電子電流を観測する。

Fig. 7に、FC_Iにエネルギー $E_p = 150$ eV、パルス幅 $t_p = 0.5$ msの電子線を照射した際の実出力電流信号を示す。同図より、150 eVの低エネルギー電子線が観測できたといえる。今後は、今回製作したシステムを用いて、二次電子放出係数の低エネルギー側の測定を行っていく予定である。

6. まとめ

5種類の金属試料において二次電子放出係数の測定を行った。得られた測定結果からBurkeの半経験式中の係数を算出し、試料密度との関係を調査することでBurkeの半経験式を最適化した。その結果、測定した範囲において測定値と良い一致を示す式を導出した。今後は、今回測定した金属以外の試料や高分子材料などの低密度試料の測定をし、導出した式と比較する。また、半経験式内の係数と仕事関数や二次電子の平均脱出距離等の係数との関連性を調査し、より正確なモデル化を目指す。

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, "Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference", Air Force Research Laboratory, 6, pp. 7-11 (1998).
- (2) E. A. Burke, "Secondary Emission from Polymers", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-27, No. 6, December (1980).
- (3) Bai-Peng Song, Wen-Wei Shen, Hai-Bao Mu, Jun-Bo Deng, Xi-Wei Hao and Guan-Jun Zhang, "Measurements of Secondary Electron Emission from Dielectric Window Materials", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 41, No. 8, August (2013).

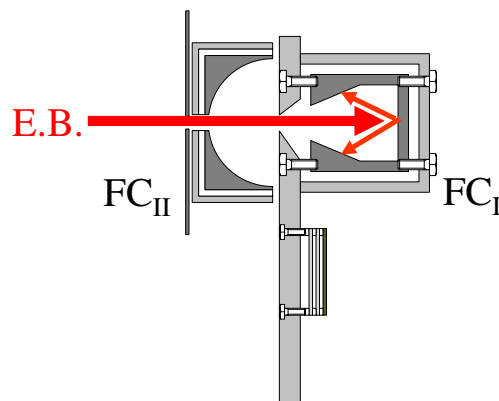


Fig. 6. Diagrammatical view of the FC_I

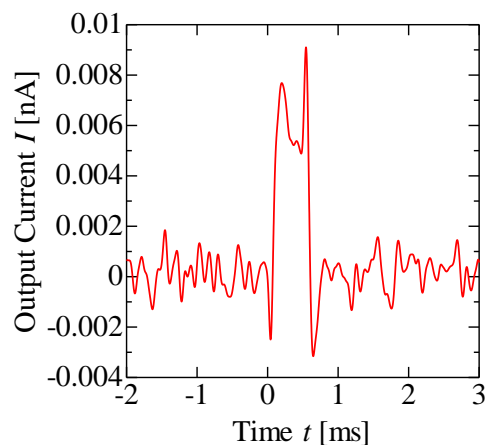


Fig. 7. Output current from the FC_I
($E_p = 150$ eV, $t_p = 0.5$ ms)