

実環境を模擬した二次電子放出係数の測定及び 二次電子放出係数物理モデルの考案

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

Measurement of the Secondary Electron Emission Yield in Simulated Real Condition and Devising of the Physical Model for Secondary Electron Emission Yield

Hironu Nagato* Hiroaki Taniguchi Hiroaki Miyake Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

Masamichi Ohira Teppei Okumura Shiro Kawakita Masato Takahashi (JAXA)

1. はじめに

人工衛星などの宇宙機は、温度変化の激しい宇宙環境において機内の温度を一定に保持する為に、MLI (Multi-layer 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表面に使用されている。宇宙空間には放射線や高エネルギー粒子 (電子、陽子、重イオン)、プラズマが存在する。これらに曝されることで宇宙機表面に用いられている絶縁体は帯電していく。過度の帯電により静電放電 (Electro Static Discharge: ESD) が発生すると、宇宙機用絶縁材料の劣化や機器の誤作動などの事故を引き起こし、最悪の場合、運用不能に陥る可能性もある。従って、設計段階から宇宙機運用環境条件に基づいた電位解析を実施し、帯電・放電を考慮した材料選定が求められている。国内の衛星開発では、国産の衛星帯電解析ソフトウェア (Multi-utility Spacecraft Charging Analysis Tool: MUSCAT) を使用して衛星表面の電位解析を行っている。この解析を行うにあたり、衛星形状や表面材料の二次電子放出係数、光電子放出電流といった帯電に関する物性値が必要である。そこで本研究では二次電子放出係数 (SEE yield) σ の測定に着目した。

現在は、 σ の最大値 σ_m とその時の電子線照射エネルギー E_m を半経験式に代入することで得られ

る二次電子放出特性を用いて解析を行っている。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係数のモデル式や、A. J. Dekkerらのモデル式を基に考案された E. A. 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、特に電子線照射エネルギーが 2 keV 以上では乖離が無視できない程大きい。そこで本発表では、Dekker らが提唱している二次電子放出係数の物理モデル式 (以下、Dekker のモデル) に反射電子放出係数 η を導入し、実験に即した二次電子放出係数物理モデルの考案を行ったので報告する。

2. Dekker のモデル

これまでに当研究グループでは、Dekker のモデルを用いて測定結果に対する回帰計算を行ってきた。(1)式に、Dekker のモデル式を示す^(1,2)。

$$\delta(E_p) = \frac{BE_p\lambda_d}{\zeta R(E_p)} (1 - e^{-R(E_p)/\lambda_d}) \quad (1)$$

現在我々は、試料に電子線を照射した際に試料から放出される電子をファラデーカップにより収集するという測定系を用いて測定している。従って我々の測定結果には、電子線照射に伴い試料内部の電子が電離し、試料内部から放出された“真の”二次電子の他に、照射電子が試料表面あるいは内部において弾性散乱した後に試料外へ

放出される反射電子（後方散乱電子）も含まれている。しかし(1)式は、“真の”二次電子のみを考慮したものであり、反射電子は考慮されていないため、本研究の測定結果に対して Dekker のモデルでは不十分であると考えられる。

実験に即した二次電子放出係数物理モデルの考案にあたり、モンテカルロ法を用いた電子飛跡の計算コードである CASINO を用いて η を計算し、Dekker のモデルに導入した⁽³⁾。(2)式に、Dekker のモデルに基づいて今回考案した、実験に即した二次電子放出係数物理モデルを示す。一般に、 η を考慮した二次電子放出係数は σ で表される。

$$\sigma(E_p) = \frac{BE_p\lambda_d}{\zeta R(E_p)} (1 - e^{-R(E_p)/\lambda_d}) + \eta(E_p) \quad (2)$$

3. 二次電子放出物理モデルによる特性曲線の回帰計算

3.1. CASINO により算出した反射電子放出係数
図 1, 2 に、CASINO により算出した金属および高分子材料の η を示す。横軸は E_p [eV]、縦軸は η 及び近似式と η の残差 ε である。

両図より、各試料において η は E_p の関数であると考えられる。しかし、 η の物理モデルを考案できていないため、本報告では η に対して(3)式を用いて回帰を行い計算した。

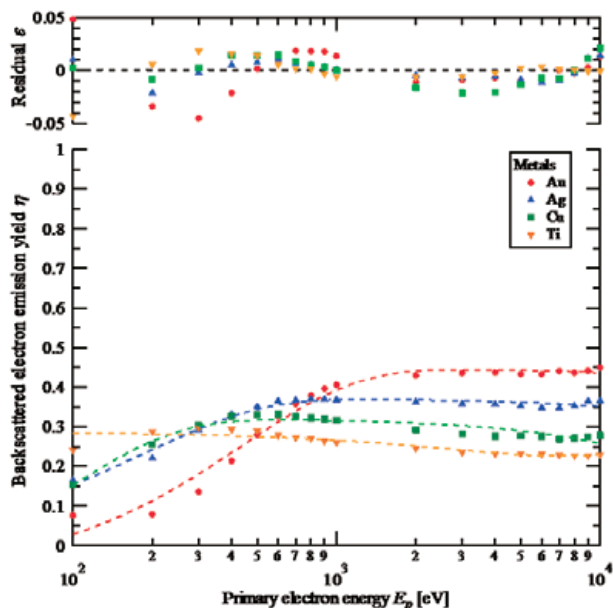


図 1 金属材料における η の E_p 依存性

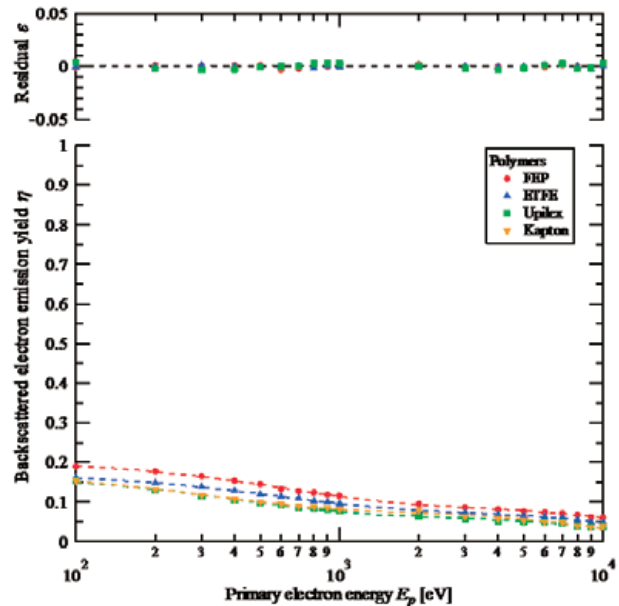


図 2 高分子材料における η の E_p 依存性

$$\eta(E_p) = (H_1 + H_2 \times E_p) + (H_3 \times e^{-\frac{E_p}{H_4}}) \quad (3)$$

ここで H_1, H_2, H_3, H_4 は回帰係数である。

3.2. Au の測定結果に対しての回帰計算
図 3 に、Au の σ 測定結果に対して Dekker のモデルと今回考案したモデルを用いた回帰曲線及び、測定結果と各モデルとの間の残差 ε を示す。横軸は E_p [eV]、縦軸は σ 及び ε である。また、プロットは測定結果、実線は考案したモデル (MOD Dekker と表記)、破線は Dekker のモデルである。

同図より、Dekker のモデルと比べ考案したモデルの方が、測定結果に対する残差が小さく、精度のよい回帰が行われていることが分かる。これは Au の σ 中に占める η の割合が大きく無視できないため、考案したモデルの方が測定結果に即した回帰曲線が得られたと考えられる。

3.3. Upilex の測定結果に対しての回帰計算
図 3 に、Upilex の σ 測定結果に対して Dekker のモデルと考案したモデルを用いた回帰曲線及び、測定結果と各モデルとの間の残差 ε を示す。

同図より、Au に比べ考案したモデルと Dekker のモデルとの差異が小さいことがわかる。Upilex の η は Au に比べ小さく、 σ 中に占める η の割合が小さいため、考案したモデルは Dekker のモデルと同等の回帰曲線になったと考えられる。

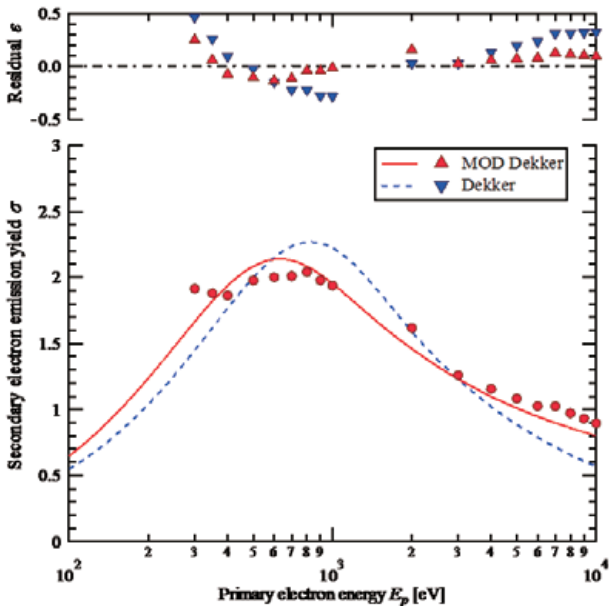


図3 Auにおける σ の測定結果と各モデル曲線との比較

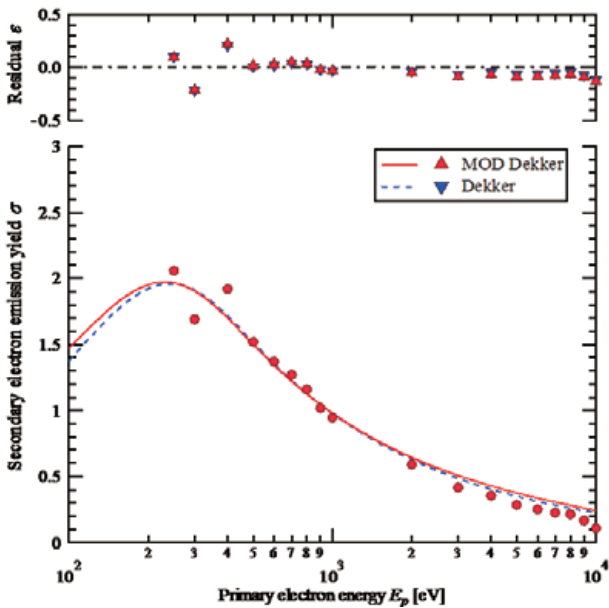


図4 Upilexにおける σ の測定結果と各モデル曲線との比較

4. 実環境を模擬した二次電子放出係数の測定

宇宙機の帯電解析に用いる二次電子放出係数をはじめとした材料の電気的特性は、BOL (Beginning of Life) 時の特性を適用しているのが現状である。しかしながら、宇宙機が放射線環境に曝されることにより、宇宙機用材料の電気的特性は変化することが考えられる。そこで我々は電子線を照射された材料における二次電子放出係数の測定を当研究グループが開発した複合物性

計測チャンバーを用いて行った⁽⁴⁾。

4.1. 電子線照射条件 宇宙機を GEO (Geostationary Earth Orbit) 上で一年間運用した際に宇宙機に照射される電子の量を 10^{15} 個/cm² とし、その量の電子線を材料に照射した前後における二次電子放出係数特性の変化を調査した。電子線の照射エネルギー 50 keV、照射電流密度 45 nA/cm² (Kapton のみ 121 nA/cm²)、照射時間 60 min (Kapton のみ 22 min) で照射を行った。なお、電子銃は物性計測チャンバーに取り付けられており、照射から測定まで真空中にてシームレスに行える。

4.2. ポリイミド系材料の二次電子放出係数 図5に、50 keV 電子線照射前後におけるポリイミド系材料の二次電子放出係数の比較を示す。また表1に、電子線照射前後における σ_m と E_m [eV]を示す。

同図より、Kapton 及び Black Kapton については電子線照射前後で σ の有意な変化を観測することは出来なかった。しかしながら、Kapton については電子線照射条件が他の2試料とは異なるため、再度測定を行う必要がある。また Upilex については、電子線を照射することにより σ が上昇し、有意な変化を観測することが出来た。

4.3. ガラスを母材とした材料の二次電子放出係数 図6,7に、50 keV 電子線照射前後におけるCMG 100 及び CMX 100 を母材とした材料の二次電子放出係数の比較をそれぞれ示す。

表1 電子線照射前後の σ_m と E_m

Sample	Before E-beam		After E-beam	
	σ_m	E_m [eV]	σ_m	E_m [eV]
Kapton	1.77	400	1.43	600
Black Kapton	2.07	350	2.08	300
Upilex	2.23	300	1.99	350
CMG 100 AR	5.02	400	4.69	300
CMG 100	15.72	800	2.59	350
CMX 100 AR	4.65	350	2.99	300
CMX 100	11.31	800	350	500

両図より、CMG 100 及び CMX 100 においては電子線照射に伴い σ の減少が確認できた。また AR コーティングが施された CMG 100 AR 及び CMX 100 AR は測定した領域において非常に高い σ を観測し、電子線照射に伴い σ の大幅な減少が確認できた。特に CMG 100 AR については母材である CMG 100 の σ を下回る結果になった。

5. まとめと今後の課題

金属及び高分子材料において二次電子放出係数の測定を行い、実験に即した二次電子放出の物理モデルを用いて測定結果に対して回帰を行った。その結果、既存のモデルに比べ、今回提案したモデルの方が測定結果に近い回帰曲線が得られた。しかしながら本報告では、反射電子放出係数はシミュレーションにより得られた値の回帰曲線を用いた。従って今後は、反射電子放出の物理モデルを考案しモデルを改良することで、より実験に即したモデルの構築を目指す。

また実環境を模擬するために、50 keV の電子線を照射した材料における二次電子放出係数の測定を行った。その結果、Kapton 系材料においては照射前後で二次電子放出係数の有意な変化は見られなかったが、Upilex においては照射後において二次電子放出係数が上昇した。しかしながら、ガラスを母材とした材料においては、照射後において二次電子放出係数が減少した。このような結果が得られた原因を解明するために、今後は SEM や FT-IR といった表面分析を行う予定である。

文 献

- (1) R. G. Lye and A. J. Dekker, "Theory of secondary emission," *Physical Review*, vol. 107, no. 4, pp. 977-981, August, 1957
- (2) Gregory Wilson, and JR Dennison, "Approximation of Range in Materials as a Function of Incident Electron Energy," *Proceedings of the 11th Spacecraft Charging Technology Conference*, pp. 1-6, 2010
- (3) CASINO: Monte Carlo Simulation for Electron Trajectory in Solids [Online], <http://www.gel.usherbrooke.ca/casino/>
- (4) 長門 拓・荒井 立朗・三宅 弘晃・田中 康寛・大平 正道・奥村 哲平・高橋 真人 (2013) 「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」『第10回 宇宙環境シンポジウム 講演論文集』

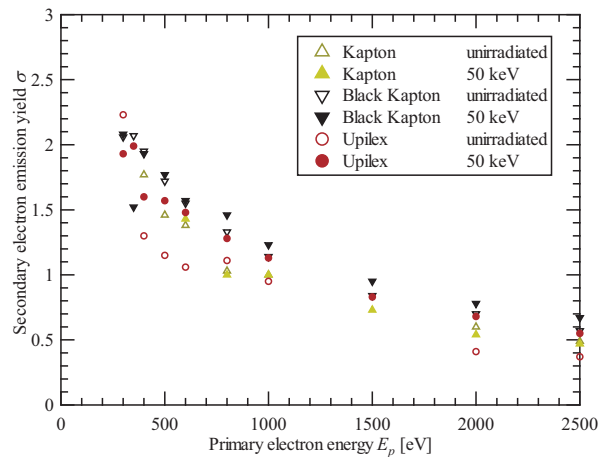


図5 50 keV 電子線照射前後におけるポリイミド系材料の二次電子放出係数比較

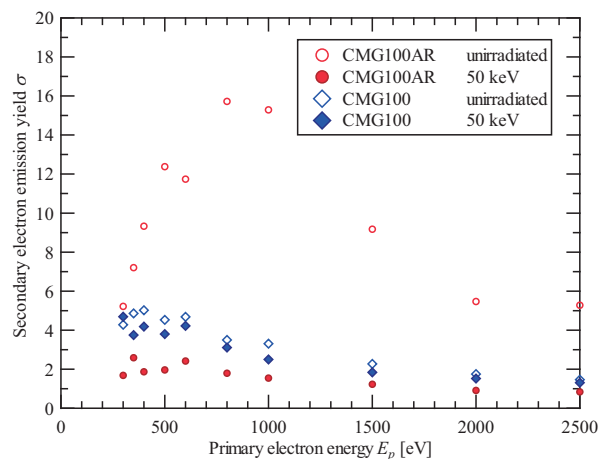


図6 50 keV 電子線照射前後における CMG 100 を母材とした材料の二次電子放出係数比較

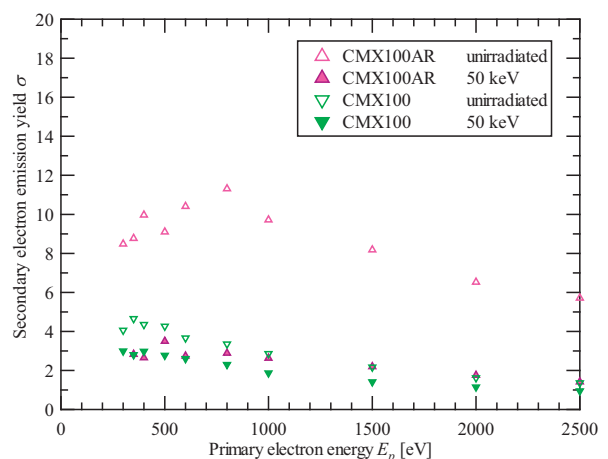


図7 50 keV 電子線照射前後における CMX 100 を母材とした材料の二次電子放出係数比較