

真空環境における高分子材料の二次電子放出係数

永田 浩二郎*, 小森 あかね, 三宅 弘晃, 田中 康寛 (東京都市大学)

Secondary electron emission yield of polymer materials in vacuum environment

NAGATA Kojiro*, KOMORI Akane, MIYAKE Hiroaki, TANAKA Yasuhiro (Tokyo City University)

Secondary electron emission yield, one of the physical property used for the electrification analysis of the surface materials of spacecraft, has little data in Japan. We create semi-empirical model to know secondary electron emission yield of unmeasured samples. We measured in the low energy band and examined the necessity of the peak.

キーワード：二次電子放出係数, 半経験的モデル, フッ素系材料, Kapton

Keywords: Secondary electron emission yield, Semi-empirical model, Fluorinated sample, Kapton

1. はじめに

数多くの宇宙機が存在する宇宙空間は $\pm 150^\circ\text{C}$ と温度変化の激しい環境である。この環境から宇宙機内に搭載されている装置を保護するために宇宙機内の温度を一定に保つ必要がある。そのため宇宙機の表面はポリイミド積層体の熱制御材やフッ素系絶縁材料を用いた太陽光反射材で覆われている。しかし、これらの絶縁材料が宇宙空間に存在する高エネルギー荷電粒子やプラズマなどに曝されると、表面の絶縁材料や帯電特性の異なる材料間で電位差が発生し静電放電 (Electro Static Discharge: ESD) が発生する。ESD は材料劣化や機器故障の原因となり、宇宙機の運用不能を招く可能性がある。これを防ぐために帯電解析を行い表面材料の電気絶縁特性を考慮した材料選定を行う必要がある。この解析で用いられる絶縁特性の 1 つに二次電子放出係数 (Secondary electron emission yield: SEEY) 曲線が用いられているが、現在用いられている曲線は実測との乖離が存在する他、実測値が必要であることから未測定試料に使用不可といった問題が存在する。これまで、先行研究では実測に即した SEEY の半経験的モデルの考案を行ってきた。しかし、先行研究で用いられた実測では 300 eV 未満における測定ができず、実測でのピークが確認されていない状態であったため、信頼性が下がる可能性がある。そこで本研究では 300 eV 未満における測定を行い、ピークを確認した実測を用いたモデルと先行研究におけるモデルの比較を行うことで、実測にピークを確認することがモデルに与える影響を調査したので以下に報告する。

2. 半経験的モデル

2.1. Dekker のモデル式

Dekker の式は真の二次電子係数 δ の物理モデルである。エネルギー E_p の一次電子を照射した際の真の二次電子放出係数 $\delta(E_p)$ は、材料表面からの深さ z で生成された真の二次電子の個数 $n(z, E_p)$ と、深さ z で生成された真の二次電子が材料表面まで移動し表面から脱出する確率 $p(z)$ の積、つまり (1) 式で表すことができる。⁽¹⁾

$$\delta(E_p) = \int_0^\infty n(z, E_p) p(z) dz \quad (1)$$

$n(z, E_p)$ と真の二次電子を 1 つ生成するのに必要なエネルギー ζ の積は、材料表面から一次電子が深さ方向に移動するサイン微小距離 dz あたりに失う微小一次電子エネルギー E_p に相当する。⁽²⁾

$$\frac{dE_p}{dz} = -n(z, E_p) \times \zeta \quad (2)$$

$$\therefore n(z, E_p) = \frac{1}{\zeta} \left(-\frac{dE_p}{dz} \right) \quad (3)$$

Dekker のモデルで仮定している電子の挙動は、材料内部に入射した電子が深さ z 方向に散乱しながらエネルギーを失い、最大飛程 $R(E_p)$ の位置で停止するというモデルである。その際深さ方向の微小移動距離 dz あたりに失う微小エネルギー dE_p は一定であると仮定している。従って、最大飛程 $R(E_p)$ まで移動した電子が失うエネルギーの総量は E_p となることとなり⁽³⁾(3)式は以下のように変換される。

$$n(z, E_p) = \frac{E_p}{\zeta R(E_p)} \quad (4)$$

$p(z)$ は深さ z で生成された真の二次電子が表面から脱出

する確率 B と、材料表面まで移動する確率 $m(z)$ の積で表すことができる。

$$p(z) = B \times m(z) \quad (5)$$

$m(z)$ は、生成された真の二次電子が表面に移動する際の減少を考えればよい。ある位置 z で生成された真の二次電子が微小距離 dz を通過するとき、材料内で散乱することにより真の二次電子の個数が dN だけ減少する。このとき散乱係数を α とするとこの関係は(6)式のように示される。

$$dl = -\alpha dz \times N(z) \quad (6)$$

微小変化量 dN は、ある位置での真の二次電子量 $N(z)$ に材料毎の散乱係数 α と微小距離 dz を掛け合わせた形で表される。子の微分方程式を解くと

$$\int_{N(0)}^{N(z)} \frac{1}{N(z)} dN = \int_0^z -\alpha dz$$

$$\ln \left| \frac{N(z)}{N(0)} \right| = -\alpha z$$

$\left| \frac{N(z)}{N(0)} \right| > 0$ であるので

$$\therefore \frac{N(z)}{N(0)} = m(z) = e^{-\alpha z} \quad (7)$$

となる。このとき、 $\alpha = 1/\lambda_d$ つまり $\left| \frac{N(z)}{N(0)} \right| = \frac{1}{e}$ となる深さは電子の平均自由行程となるが、同時に生成された真の二次電子の脱出できる深さを示しているため、 $\left| \frac{N(z)}{N(0)} \right| = \frac{1}{e}$ となる深さを平均脱出深さ λ_d と定義すると(7)式は以下のように変形できる。

$$m(z) = e^{-z/\lambda_d} \quad (8)$$

また、仕事関数や表面準位の存在により、真の二次電子が材料表面から放出するという現象も確率的に表されると考えられる。そこで、真の二次電子の表面脱出確率 B を導入することで、材料内部で生成した真の二次電子が表面まで移動し、放出する確率を以下の式で表すことができる。(4)

$$p(z) = B \times m(z) = B e^{-z/\lambda_d} \quad (9)$$

(9)式は真の二次電子が生成される深さが最も深いほど表面まで移動する確率が低くなり、真の二次電子が材料表面で生成された場合でも、材料定数である真の二次電子の表面脱出確率 B の確率でしか材料表面から放出されないことを示している。(1),(4),(9)式より Dekker のモデルにおける真の二次電子放出係数 $\sigma(E_p)$ は以下のように示される。

$$\begin{aligned} \delta(E_p) &= \int_0^R n(z, E_p) p(z) dz \\ &= \int_0^R \frac{E_p}{\zeta R(E_p)} \times B e^{-z/\lambda_d} dz \\ &= \left[\frac{E_p}{\zeta R(E_p)} \times e^{-z/\lambda_d} \right]_0^{R(E_p)} \\ \therefore \delta(E_p) &= \frac{B E_p \lambda_d}{\zeta R(E_p)} \times (1 - e^{-R(E_p)/\lambda_d}) \end{aligned} \quad (10)$$

2.2. 反射電子放出係数を考慮した半経験的モデル

Dekker のモデルは、一次電子の照射により材料内部の電子が電離し、その電離電子（真の二次電子）がある確率で放

出する、というモデルであり、反射電子が考慮されていない。従って実測に即したモデルは真の二次電子放出係数である Dekker のモデルに、反射電子放出係数 η を加える必要がある。よって、(10)式に反射電子放出係数 $\eta(E_p)$ を加えた以下に示す(11)式が二次電子放出係数 $\sigma(E_p)$ のモデルであり、本研究で用いる半経験的モデルとなる。

$$\sigma(E_p) = \frac{B E_p \lambda_d}{\zeta R(E_p)} \times (1 - e^{-R(E_p)/\lambda_d}) + \eta(E_p) \quad (11)$$

3. 測定装置および測定条件

図 1 に本研究における二次電子放出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 (Kimball Physics 社製:EGG3101-C) が取り付けられており、試料にパルス幅 0.5 ms の電子線を一次電子エネルギー $E_p = 100 \text{ eV} \sim 10 \text{ keV}$ の範囲で照射することができる。3 軸に移動可能な試料台には一次電子収集用ファラデーカップ (FC_I) と試料が設置されている。また、二次電子収集用ファラデーカップ (FC_{II}) は試料設置面から 1 mm 未満の位置に設置されており電子線は FC_{II} の中心に設けられた照射口を通じて FC_I および試料に照射される。電子線照射に伴い試料から放出された二次電子は FC_{II} によって収集される。それぞれの FC で収集された電子電流は接続されたカレントアンプ (ケースレー社製:428) (増幅率 $10^6 \sim 10^8 \text{ V/A}$) で電圧信号に変換され、デジタルオシロスコープ (レクロイ社製:Wavesurfer42MXs) にて観測した。本研究では SEEY を観測した一次電子電流 I_p と二次電子電流 I_s を用いて(12)式により算出をした。

$$\sigma = \frac{I_s}{I_p} \quad (12)$$

また、本測定システムは蛍光版が取り付けられたマイクロチャンネルプレートを用いることで、実際に試料に照射される電子線を可視化し、照射位置や形状を確認すること

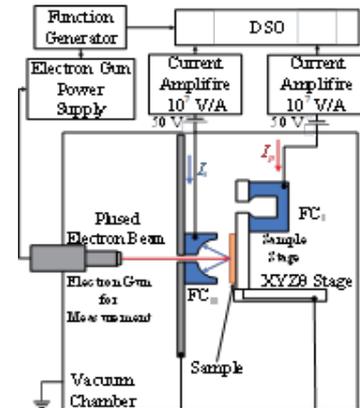


図 1 測定システム概略図

Fig.1. Schematic diagram of SEEY measurement system

が可能である。

測定試料には公称厚さ 100 μm のフッ素系材料 2 種類および Kapton を用いた。測定用一次電子線エネルギー E_p はフッ素系材料 A は 150 eV \sim 1 keV、フッ素系材料 B では

300 eV ~ 2 keV、Kapton は 150 eV ~ 2 keV である。測定ごとに約 4mm 程度の間隔をとり、測定の照射電子線による材料帯電による測定への影響を抑制した。

4. 二次電子放出係数測定結果

図 2 に 3 種類の測定試料の測定結果を示す。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。また、表 1 に本測定により得られた各試料における最大二次電子放出係数 σ_m とその時の一次電子エネルギー E_m を示す。同図から 150 eV まで測定を行ったフッ素系材料 A と Kapton ではピークが確認され、300 eV までの測定となったフッ素系材料 B ではピークの確認はできなかった。

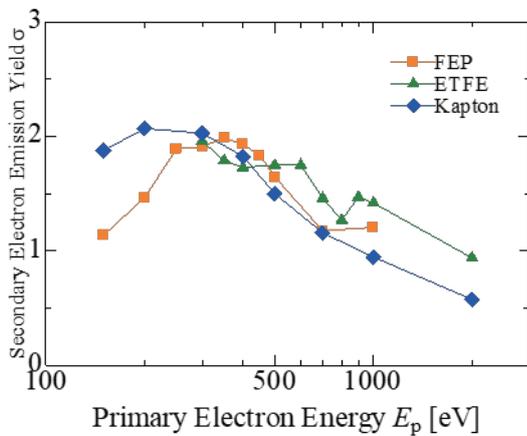


図 2 各高分子材料における二次電子放出係数測定結果
Fig.2. Measurement result of SEEY on each polymer sample

表 1 各高分子材料における最大二次電子放出係数 σ_m とそのときの一次電子エネルギー E_m

Table 1. Maximum secondary electron emission yield and the primary electron energy at each polymer sample

Sample	σ_m [-]	E_m [eV]
Fluorine A	1.990	350
Fluorine B	1.531	500
Kapton	2.070	200

5. 実測値を用いた最適化および半経験的モデルの比較

本研究では材料物性のみから SEEY 曲線を導出できるモデルとして(11)式で示される二次電子放出係数モデルを考案している。この式中で真の二次電子の表面脱出確率 B および真の二次電子の平均脱出深さ λ_d は計算で求めることができない係数であるため、二次電子放出係数 σ の測定結果の回帰係数として回帰計算を行う。

5.1. 二次電子放出係数の測定結果に対する回帰計算

図 3 に 3 種類の測定試料における二次電子放出係数の測定結果と二次電子放出係数モデルを用いた回帰計算の結果をそれぞれ示す。全ての図において縦軸は二次電子放出係

数 σ 、横軸は一次電子の照射エネルギー E_p である。また、表 2 に回帰計算による B および λ_d の計算結果を示す。

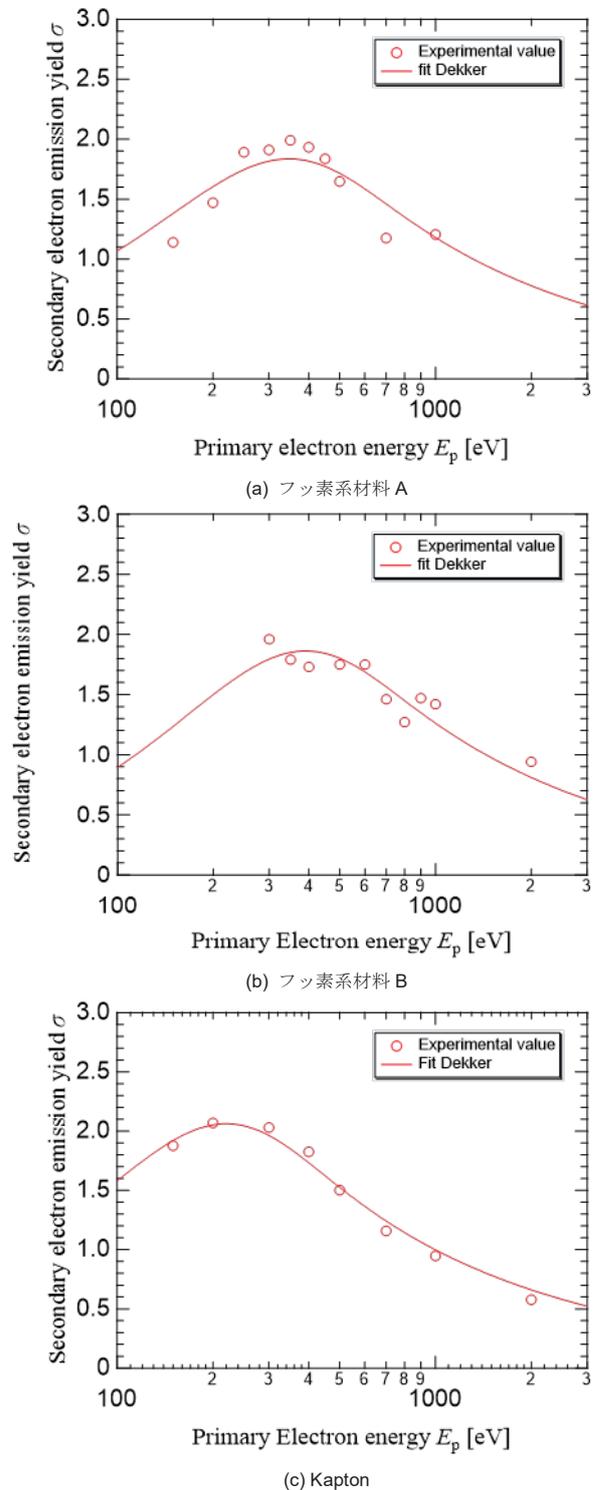


図 3 各高分子材料における二次電子放出係数測定結果及び二次電子放出係数モデルによる回帰計算結果
Fig.3. Measurement result of SEEY and regression calculation using SEEY model for each polymer sample

表 2 各高分子材料における二次電子の表面脱出確率と二次電子の平均脱出深さ

Table 2. Surface escape probability of secondary electrons and average secondary electron escape depth in each polymer sample

Sample	$B[-]$	λ_d [nm]
Fluorine A	0.081714	4.1864
Fluorine B	0.078712	4.8259
Kapton	0.060910	1.9761

5.2. 回帰係数の関数化および半経験的モデルの比較

実測値に対する回帰計算により得た真の二次電子の表面脱出確率 B 及び平均脱出深さ λ_d を材料物性値と比較・検討し、材料物性値の関数として表すことで、 B, λ_d の予測が可能になる。つまり、回帰計算時に求めることができなかつたが材料物性値を代表することで求められるため、一次電子のエネルギー E_p と材料物性値のみで二次電子放出係数曲線を求めることが可能になる。図 4,5 に本研究と先行研究にて回帰計算の結果得られた各材料における B と λ_d 、それらに対して ζ と ρ を変数とする近似直線を示す。縦軸は真の二次電子の表面脱出確率 B および真の二次電子の平均脱出深さ λ_d 、横軸は ζ / ρ [eV / (g / cm³)] および二次電子生成エネルギー ζ [eV] を示す。さらに(13)(14)式に本研究で得られた近似直線 B, λ_d 、(15)(16)式に先行研究で得られた近似直線 B_p, λ_{dp} を示す。

$$B = 0.0091242 \frac{\zeta}{\rho} + 0.044876 \quad (13)$$

$$\lambda_d = 0.43351\zeta + 0.92156 \quad (14)$$

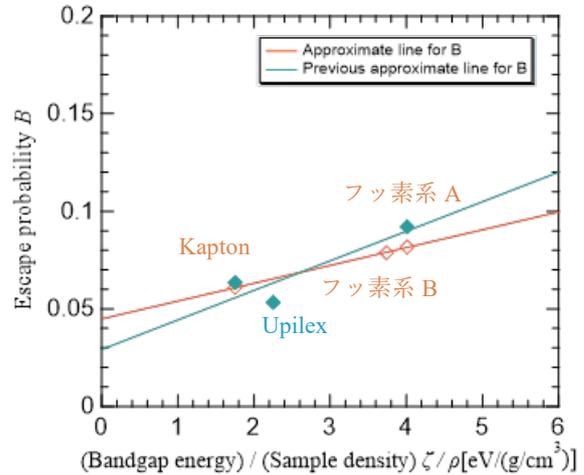
$$B = 0.015152 \frac{\zeta}{\rho} + 0.029103 \quad (15)$$

$$\lambda_d = 0.34871\zeta + 1.3151 \quad (16)$$

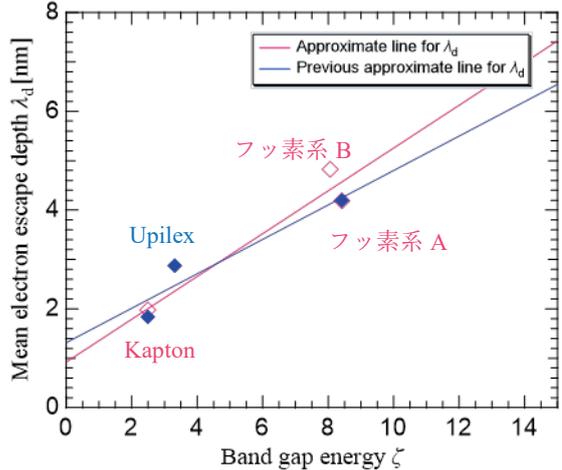
(11)式に(13)～(16)式を代入することで半経験的モデルを描くことが可能である。図 5 に本研究と先行研究の各高分子材料における SEEY の測定結果及び半経験的モデルにより求めた SEEY 曲線を示す。縦軸は二次電子放出係数 σ 、横軸は一次電子線の照射エネルギー E_p [eV] である。さらに表 3 に 2 つの半経験的モデルから求めた SEEY 曲線と測定値の平均絶対誤差を示す。この値は 0 に近いほど SEEY 曲線が測定値に近いことを表すものである。

図および表より 2 つのフッ素系材料に関して、2 つのモデルの平均絶対誤差の違いはおおよそ 0.001 ~ 0.02 程であり、大きな違いは見られなかつた。しかし、今回作成したモデルではフッ素系 A 試料の 150,200 eV における測定値にも近しかったことから低エネルギー範囲の測定を行いピークの確認を行った結果が現れたと考えられる。しかし、Kapton に関しては先行研究に比べ平均絶対誤差が約 0.07 大きいことがわかる。しかし、300 eV 以上の範囲における平均絶対誤差は今回作成したモデルの方が小さい。このことから 150,200 eV の範囲の測定値と大きく乖離していることが原因であることがわかる。この原因としてはフッ素系材料 B のピークが確認できていなかったこと、測定材料が少なかつたために近似直線の導出が不十分であったことなどが考えられる。従って、近似直線の導出が十分になるよう 300 eV 未満を含むエネルギー範囲の高分子材料の SEEY 測定を続ける必要があると考えられる。

図 4 (a) 真の二次電子の表面脱出確率 B の近似直線



(a) 真の二次電子の表面脱出確率 B の近似直線



(b) 真の二次電子の平均脱出深さ λ_d の近似直線

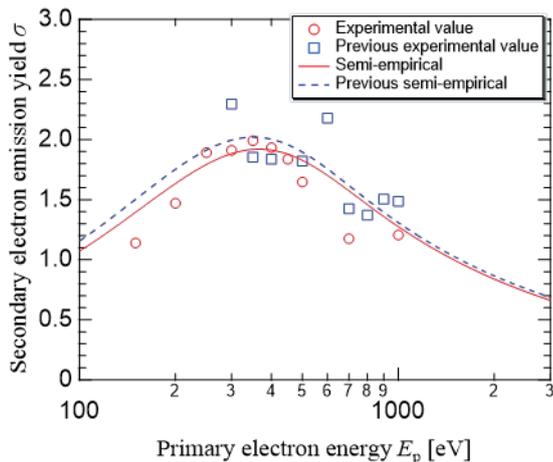
図 4 回帰係数の近似直線

Fig.4. Approximate line for regression coefficient

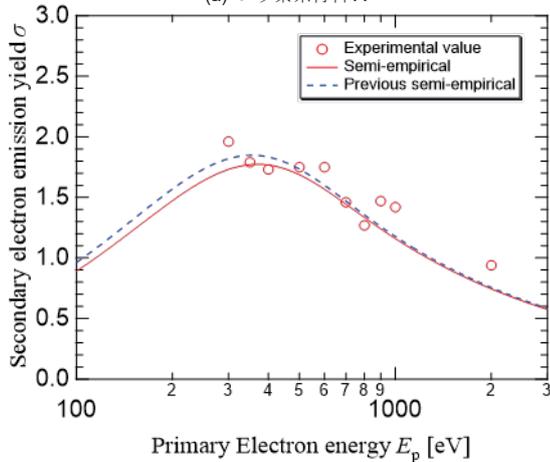
表 3 各半経験モデルと測定値の平均標準誤差

Table. 3. Mean absolute error of each semi-empirical model and measurement

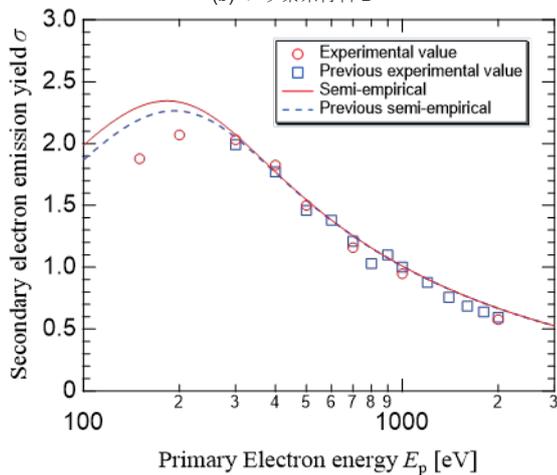
Sample	This time	Previous study
Fluorine A	0.113	0.133
Fluorine B	0.128	0.127
Kapton	0.124	0.0557



(a) フッ素系材料 A



(b) フッ素系材料 B



(c) Kapton

図5 各高分子材料における本研究及び先行研究による半経験的モデルと測定値の比較

Fig.5. Comparison of semi-empirical models and measured values from this and pre

Number 5, pp. 1179-1182, June 1 (1954)
 (2) Robert G. Lye and A. J. Dekker: "Theory of Secondary Emission", Physical Review Volume 107, Number 4, pp. 997 - 981, August 15 (1957)
 (3) J. R. Young: "Penetration of Electron in Aluminum Oxid films," Physics Review Volume 103, Number 2, pp.292 -293, July 15,(1956)

文 献

(1) A. J. Dekker: "Energy and Temperature Dependence of the Secondary Emission of MgO", Physical Review Volume 94,