

材料物性値のみで光電子放出特性を取得できる物理モデルの考案

矢部 謙治* 鈴木 鼓太郎 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)

Conceived of the physical model that get the photoelectron emission properties using material property value

Kenji Yabe* Kotaro Suzuki Hiroaki Miyake Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)
Masamichi Ohira Teppei Okumura Shiro Kawakita Masato Takahashi (JAXA)

1. はじめに

近年、通信や地球観測などの用途で数多くの人工衛星が宇宙空間で運用されている。しかし、それらの衛星は社会基盤に必要なシステムであるにもかかわらず、帯放電による誤作動・事故による被害が生じている⁽¹⁾。よって宇宙機の設計段階から帯放電現象を把握し、帯放電を考慮した材料選定を実施する必要がある。軌道上での衛星帯電の主要因として、放射線帯に捕捉されている電子や陽子、太陽光があげられる。この中でも、日照中における帯電は太陽光による光電子放出が支配的になるため、表面帯電量を見積もるうえでも、光電子放出を定量評価可能な量子効率重要な物性値となる。

これまで真空紫外分光を用いた光電子放出電流測定装置を開発し、宇宙機材料の量子効率を明らかにしてきた。さらに、帯電解析に用いる量子効率の実験値に則する物理モデルを光電子放出過程から考案してきた。しかし従来のモデルは、光電子放出過程の物理現象を考慮していないパラメータが存在している。さらに測定結果から算出する回帰係数を用いていたため、測定困難な材料においての光電子放出特性の取得が行えないのが現状である。故に今回、光電子放出過程の物理現象を考慮したモデルにて、回帰係数と材料密度との線形性を見出すことで、回帰係数を用いることなく材料物性値のみで光電子放出特性を取

得できる物理モデルを考案した。

2. 従来モデル

光が照射された際の光電子の放出原理を図1に示す。我々は W.E.Spicer のモデルを参考に光電子放出には以下の3つの過程を有すると考えた⁽²⁾。

- ① 材料のバルク内の光の吸収過程
- ② 光の吸収による電子励起過程
- ③ 励起電子の脱出過程

それぞれの過程を図1に照らし合わせると、①の光の吸収過程を吸収率 $A(h\nu)$ で表現し、②の光の吸収による電子励起過程を励起電子数 $c_e(h\nu)$ で表現し、③の励起電子の脱出過程を表面到達確率 $P_L(h\nu)$ と表面脱出確率 $P_S(h\nu)$ の積で表現している。以上のことから、4つのパラメータを積算するこ

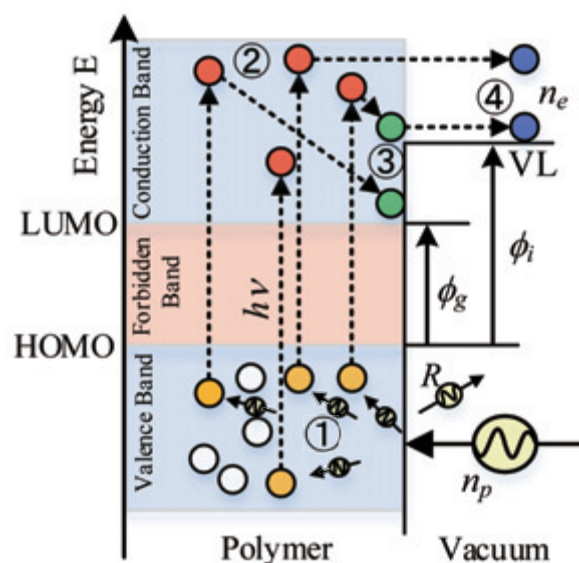


図1 光電子放出の放出原理

とで、量子効率 $q(h\nu)$ を式(1)で表す事ができる。

$$q(h\nu) = A(h\nu) \times c_e(h\nu) \times P_L(h\nu) \times P_S(h\nu) \quad (1)$$

ここで、Eq. (1)について各パラメータを光子エネルギー $h\nu$ の式で算出した結果を Eq. (2)に示す⁽³⁾。

$q(h\nu) =$

$$(1-R)(1-e^{-\alpha(h\nu)L}) \times V \times \int_{\phi_i}^{h\nu} D_e(E) f_e(E) dE \times F_1 e^{(h\nu \times F_2)} \quad (2)$$

また、同式を用いた際のポリイミド系材料における算出結果を図2に示す。

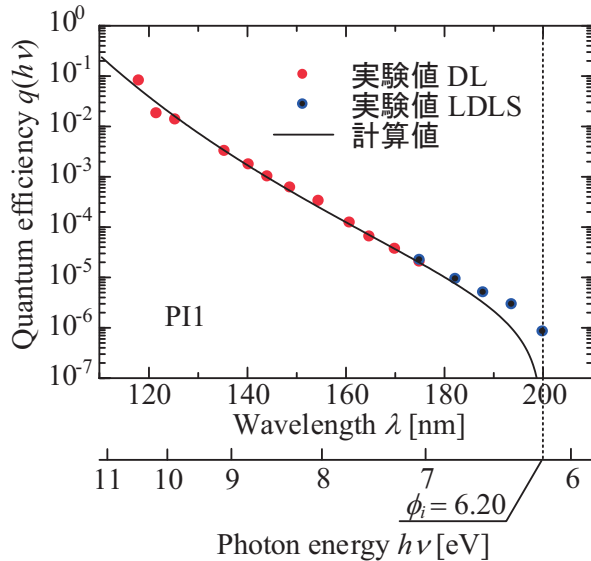


図2 従来モデルによる量子効率算出結果

縦軸は量子効率 $q(h\nu)$ 、横軸は波長 λ 及びエネルギー変換値 $h\nu$ を示している。丸プロットは測定により得られた値であり、それぞれ中塗は重水素ランプ(DL)、中抜きはキセノンランプ(LDLS)を用いた際の測定点、実線は式(2)による計算値を示している⁽⁴⁾。同図より、計算値と実験値の傾向は概ね一致していることが確認できる。ここで、式(2)は表面到達確率 $P_L(h\nu)$ と表面脱出確率 $P_S(h\nu)$ を複合パラメータとして考え以下のように示していた。

$$P_L(h\nu) \times P_S(h\nu) = F_1 \times e^{(h\nu \times F_2)} \quad (3)$$

その際、 F_1 、 F_2 を光電子放出電流測定によって算出された量子効率に即する様、回帰計算によって求めている。しかし、複合パラメータは物理的な意味を持たないことが考えられる。そのため、バルク内電子の表面到達確率 $P_L(h\nu)$ はより細かく式化する必要がある。さらに、式(2)は回帰係数 F_1 、 F_2 を用いているため測定困難な材料においての光電子放出特性の取得が行えないモデルとなつて

いる。

3. 表面到達確率 $P_L(h\nu)$ の考案

表面到達確率 $P_L(h\nu)$ とは VL 以上に励起された電子が、どの程度試料表面まで移動できるかといった確率パラメータである。そこで光子からエネルギーを受け取り VL 以上に励起した電子の総数を $n_0(E_p)$ とし、そのうち試料表面までたどり着いた電子の数を $n_l(E_p)$ とすると、表面到達確率 $P_L(h\nu)$ は(4)式に示すように $n_0(E_p)$ と $n_l(E_p)$ の商を積分することで算出することができる。このとき $E_p (= h\nu - \phi_i)$ は励起電子エネルギーを示している。積分区間については、一般的に材料内の電子が動ける最大移動範囲は光電子エネルギーが E_p の場合は同じエネルギー E_p の電子線を材料に照射したときの最大飛程 $R_{max}(E_p)$ までとなるため、0 から $R_{max}(E_p)$ までとしている。また、(5)式は $n_0(E_p)$ と $n_l(E_p)$ の商の計算を示している。同式は、ある位置 z で生成された光電子の移動距離の平均値をとることで指標化した平均脱出深さ $\lambda_d(E_p)$ を用いて表現している。

$$P_L(h\nu) = \int_0^{R_{max}(E_p)} \frac{n_l(E_p)}{n_0(E_p)} dz \quad (4)$$

$$\frac{n_l(E_p)}{n_0(E_p)} = e^{-\alpha(E_p)z} = e^{-\frac{z}{\lambda_d(E_p)}} \quad (5)$$

故に、(4)、(5)式より表面到達確率 $P_L(h\nu)$ は(6)式で表すことができる。

$$P_L(h\nu) = \int_0^{R_{max}(E_p)} e^{-\frac{z}{\lambda_d(E_p)}} dz = (1 - e^{-\frac{R_{max}(E_p)}{\lambda_d(E_p)}}) \quad (6)$$

このとき最大飛程 $R_{max}(E_p)$ 及び平均脱出深さ $\lambda_d(E_p)$ はシミュレーションにより算出する。

3.1 最大飛程 $R_{max}(E_p)$ の算出

図3にモンテカルロ法シミュレーションソフト Casino を用いてポリイミド系材料に照射エネルギー $E_p = 0.1 \sim 1$ keV の電子線を照射した際の最大飛程 $R_{max}(E_p)$ を示す。同図より、最大飛程 $R_{max}(E_p)$ を E_p の関数で近似することができる。これにより励起した電子が持つエネルギー E_p で励起電子の最大飛程 $R_{max}(E_p)$ を表すことが可能となった。

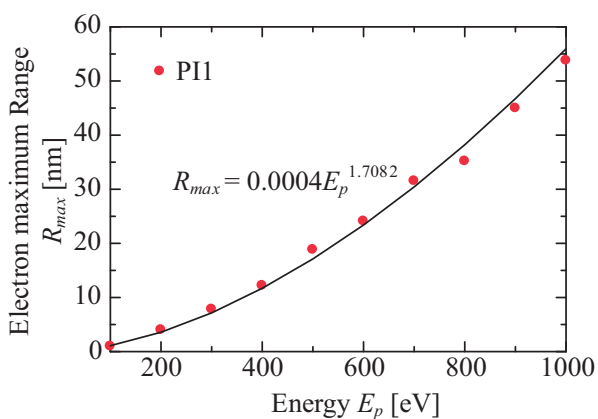


図3 Casinoにより算出した $R_{max}(E_p)$

3.2 平均脱出深さ $\lambda_d(E_p)$ の算出

最大飛程 $R_{max}(E_p)$ 同様、図4にモンテカルロ法シミュレーションソフト Casino を用いてポリイミド系材料に照射エネルギー $E_p = 0.1 \sim 1$ keV の電子線を照射した際の平均脱出深さ $\lambda_d(E_p)$ を示す。同図は照射電子が非弾性散乱等により、最終的にエネルギーが0となって止まった位置を積分することで電子の平均脱出深さ $\lambda_d(E_p)$ ($n_1(E_p)/n_0(E_p) = 36.8\%$ となる位置)を算出している。同図より、平均脱出深さ $\lambda_d(E_p)$ を E_p の関数で近似することができる。これにより励起した電子が持つエネルギー E_p で励起電子の平均脱出深さ $\lambda_d(E_p)$ を表すことが可能となった。

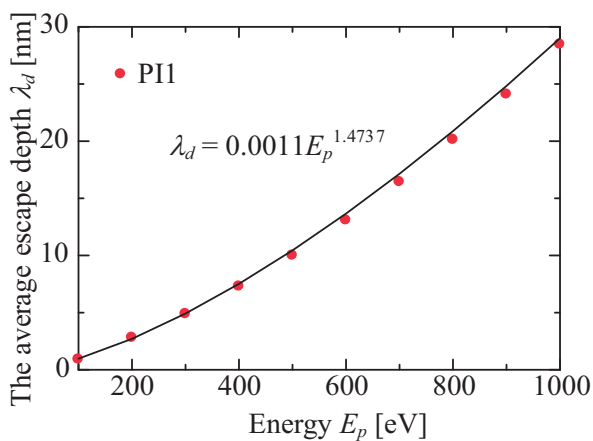


図4 Casinoにより算出した $\lambda_d(E_p)$

3.3 表面到達確率 $P_L(h\nu)$ を考慮した回帰計算

図5に表面到達確率 $P_L(h\nu)$ を考慮したポリイミド系材料における量子効率の計算値と実験値を示す。また、比較のために(2)式に示す従来モデルを用いた結果も対比して示している。同図より、

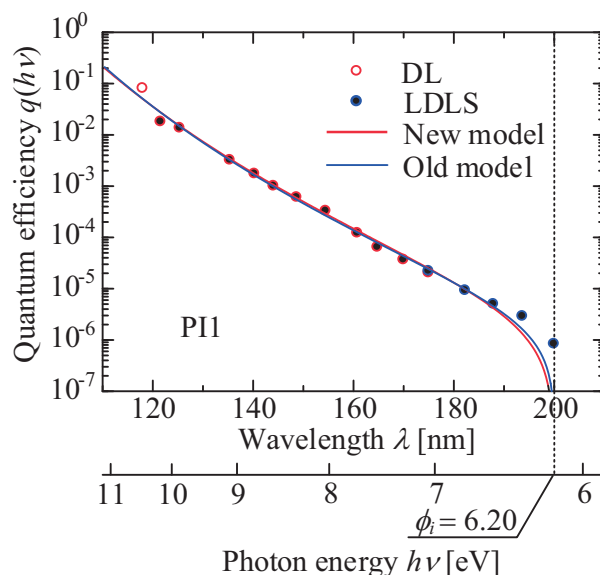


図5 考案したモデルと従来モデルとの比較
今回のモデルと従来モデルを用いた計算結果に大きな差異は確認できなかった。しかし、今回のモデル式により、表面到達確率 $P_L(h\nu)$ を物理現象も考慮した項で表現することができた。

4. 表面脱出確率 $P_S(h\nu)$ の関数化

図6に表面到達確率 $P_L(h\nu)$ を考慮したモデルを用いた、ポリイミド材料種類(PI2)とフッ素系材料3種類(ETFE, PVDF, FEP)の回帰計算結果を示す。

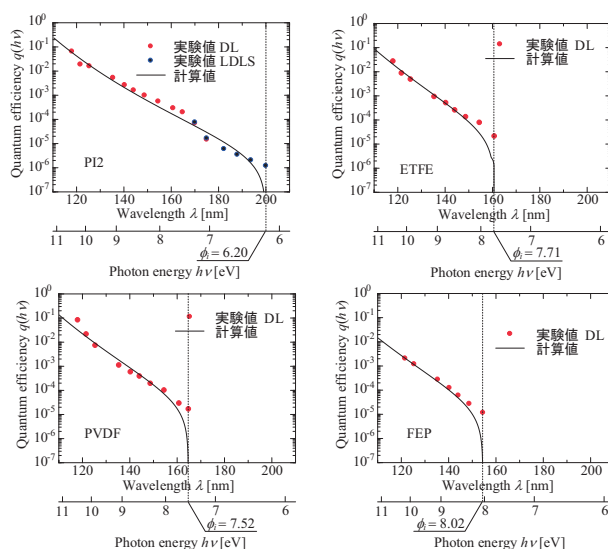


図6 各試料における実験値⁽⁴⁾と計算値の比較
図5,6より今回フィッティングパラメータとして用いているポリイミド材料種類2種類(PI1, PI2)とフッ素系材料3種類(ETFE, PVDF, FEP)の F_1 と F_2 の算出結果を表1に示す。フィッティングパラメ

表 1 回帰計算によって求めた F_1 と F_2

Material	Density[g/cm ³]	F_1	F_2
PI1	1.4	5.5E-54	1.7
PI2	1.5	1.7E-53	1.6
ETFE	1.7	3.0E-53	1.5
PVDF	1.8	5.0E-53	1.5
FEP	2.2	6.0E-53	1.3

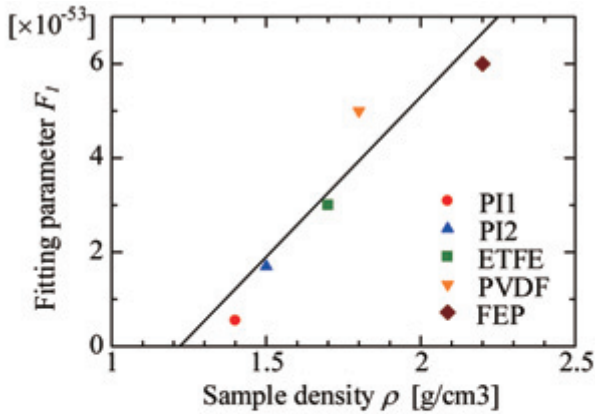


図 7 材料密度 ρ と F_1 の関係

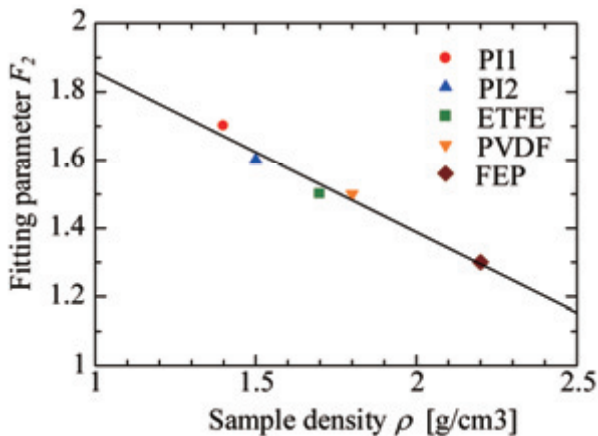


図 8 材料密度 ρ と F_2 の関係

一た F_1 と F_2 は材料の密度 ρ と相関があると考えられる。よって、 F_1 と密度 ρ の関係を図 7 に、 F_2 と密度 ρ の関係を図 8 に示す。両図より、 F_1 と ρ の間には線形増加傾向、 F_2 と ρ の間には線形減衰傾向が確認できた。このとき各パラメータ F_1 、 F_2 の近似式は以下ようになる。

$$F_1 = 7 \times 10^{-53} \rho - 9 \times 10^{-53} \quad (7)$$

$$F_2 = -0.47 \rho + 2.327 \quad (8)$$

故に、(4)、(5)式より表面脱出確率 $P_S(h\nu)$ は(9)式で表すことができる。

$$P_S(h\nu) = (7 \times 10^{-53} \rho - 9 \times 10^{-53}) e^{\{h\nu \times (-0.47 \rho + 2.327)\}} \quad (9)$$

5. 光電子放出物理モデルを用いた算出結果

図 9 に(1),(6),(9)式より導き出したポリイミド材料種類 2 種類(PI1, PI2)とフッ素系材料 3 種類(ETFE, PVDF, FEP)における量子効率の計算値と実験値の比較を示す⁽⁴⁾。同図より、PI1 に関しては全波長で高い数値を示しているが、全試料において計算値と実験値の傾向は概ね一致している事が確認できる。しかし、PVDF において、短波長側で乖離が確認できる。よって、今後は PVDF の測定を再度行う必要がある。

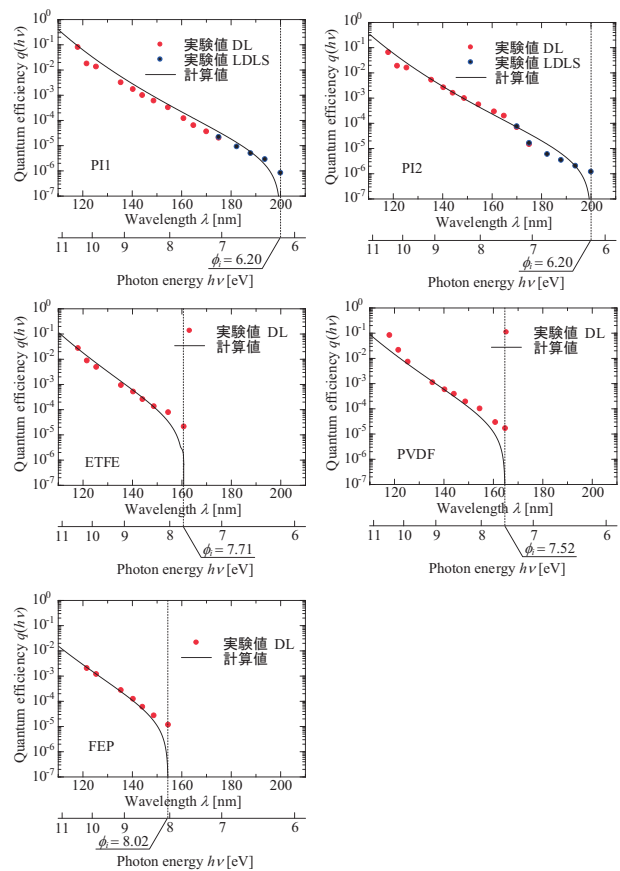


図 9 各試料における実験値⁽⁴⁾と計算値の比較

6. まとめと今後の課題

今回は表面到達確率 $P_L(h\nu)$ の考案及び、表面脱出確率 $P_S(h\nu)$ を考案することで、光電子放出特性を絶縁材料の材料物性値のみで算出できるモデルを光電子放出過程から構築した。その結果、全試料において計算値と実験値の傾向は概ね一致している事が確認できた。しかし、PVDF において、短波長側で乖離が確認できたため、今後は PVDF の測定を再度行う必要がある。

文 献

-
- (1) H. C. Koons et al: “The impact of the space environment on space systems”、Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference、Air Force Research Laboratory、AFRL-VS-TR-20001578、pp.7-11、(1998)
 - (2) W.E.Spicer, “Negative affinity 3-5 photocathodes: Their physics and technology”, Applied physics Volume 12, Issue 2, pp.115-130, 1977
 - (3) Kenji YABE: “Proposal of Photoelectron Emission Physical Model in Spacecraft Insulating Material”、30th ISTS, 34th IEPC & 6th NSAT、p.188、(2015)
 - (4) K. Nomura et al: “Analysis of the physical properties of the polymeric material for spacecraft charging by measuring the photoelectron emission current”、Proceedings of 29th International Symposium on Space Technology and Science、pp.1-4、(2013)