

二次電子放出特性の解析

渋谷一晃*、長門拓、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)

Analysis of characteristic of secondary electron emission

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

ABSTRACT

We studied how to measure the secondary electron emission (SEE) of metal and insulating materials used for satellite thermal insulation or other such purposes. SEE yield measurement is very important for analyzing charge accumulation on the satellite surfaces due to the space environment because electron emission for irradiated electrons influences the amount of surface charge. Therefore, we are developing the measurement system without the deceleration voltage and enable to obtain the characteristics of the SEE yield from insulation materials irradiated by an electron beam with energy of 200 eV to 10 keV. This report introduces the developed measurement system and the SEE yield measurement results of metal sample and polymer. From those results, we discuss the characteristics of SEE that depend on each material. Furthermore, we also propose a future plan of SEE measurement for satellite materials.

キーワード：二次電子放出、宇宙機帯電、電子線

(**Key words:** Secondary Electron Emission, Spacecraft Charging, Electron Beam)

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つために、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、これらにより宇宙機表面に用いられる絶縁材料は帯電する。そして、過度に帯電した場合は静電放電(ESD)が発生し、宇宙機用絶縁材料の劣化や機器の故障などの宇宙機事故を引き起こし、運用不能状態に陥る可能性がある⁽¹⁾。Fig. 1 に示すように特に宇宙環境に起因する静止衛星の事故のうち、半数以上が帯電・放電に起因するという報告もされていることから、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。

このため衛星開発者は国産の衛星帯電解析ソフトウェア(Multi-utility Space Craft Charging Analysis Tool: MUSCAT)を使用し衛星の表面電位の解析を行っている。解析には、衛星形状の他に表面材料の光電子放出や二次電子放出といった帯電に関する物性値が必要となるため、本研究では二次電子放出測定に着目した。これまでの既報の多くでは、測定エネルギー範囲が制限されている事や計測するエネルギーの調整の為に試料に電圧を印加する等の課題を内包している場合が多い。そこで、当研究ではパルス状の電子線を用い、200 eV ~ 10 keV というエネルギー範囲で、試料への電圧印加を抑制した二次電子計測システムの構築を行った。

さらに、開発した装置によって得られた計測結果より、二次電子放出のモデル化を行うべく、各物質の固有値である密度や仕事関数あるいはイオン化エネルギーに注目し、二次電子放出

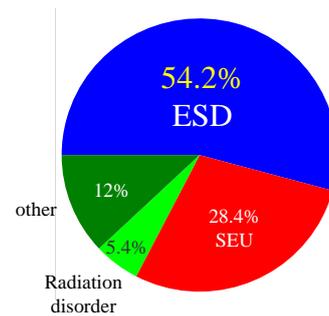


Fig. 1. Satellite destruction due to space environment.

The statistics were researched by Koons et al. The total number of accidents was 326 from 1973 to 1997

との関係について調査を行った。本報では以上の項目について報告を行う。

2 電子と材料の相互作用

Fig. 2 に電子が材料に照射された際の電子と材料の相互作用の模式図を示す。一次電子が照射された場合、電子のエネルギーによって、電子が材料を透過する。その際、材料を構成する原子核や電子との相互作用により、弾性散乱やエネルギー損失を伴う非弾性散乱を引き起こす。なお、非弾性散乱電子は、材料中の電子の電離や励起を発生させることによりエネルギーを損失する。この電離と弾性散乱によって材料表面に放出される電子が二次電子として計測される。

照射される電子線の飛程が材料の厚さ方向に深い位置に達する場合、入射電子は材料内で弾性散乱と非弾性散乱を繰り返す

ことにより、エネルギーを失い、材料表面から放出されなくなる。一方、弾性散乱により材料表面へ放出される電子は反射電子または後方散乱電子と呼ばれる。なお、二次電子が材料の構成原子の内核から発生した場合、外核の電子が内核に落ち込み、エネルギーが放出される。このエネルギーは特性 X 線と呼ばれ、この X 線によって電離された電子をオージェ電子と呼ぶ⁽²⁾。本測定装置では、このオージェ電子も発生した場合は二次電子として計測される。

多くの物質の場合、横軸に一次電子のエネルギー E_p 、縦軸に δ をプロットすると、Fig. 3 に示すように、ある一次電子のエネルギー E_m において極大値 δ_m をもつような曲線を描く。Fig. 3 において、一次電子のエネルギーを高めると δ が増加する。これは、一次電子のエネルギー増加に伴って二次電子の発生が増すためである。 E_m 以上のエネルギーでは、二次電子の発生領域が深くなるため、生成された二次電子が表面まで到達できず、結果として δ は減少する⁽³⁾。

また、試料が絶縁材料の場合において、二次電子放出係数が 1 以上では照射電子の量よりも放出電子の量の方が多くなるため、試料表面は正に帯電し、二次電子放出係数が 1 以下では負に帯電する。

3 測定システム

Fig. 4, Fig. 5 に二次電子放出係数測定システムの概略図を示す。真空チャンパーには電子銃 (Kimball Physics 社製、EGG-3101)

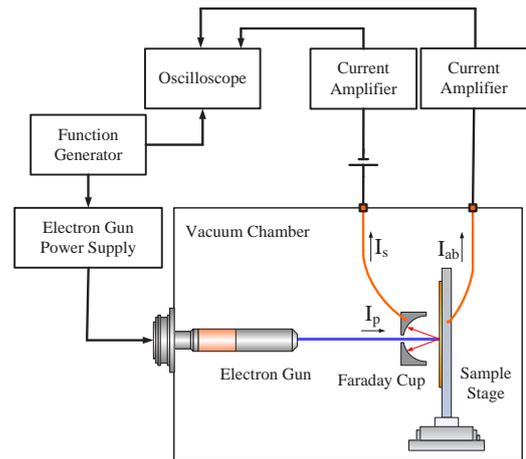


Fig. 4. Schematic diagram of measurement system of SEE yield

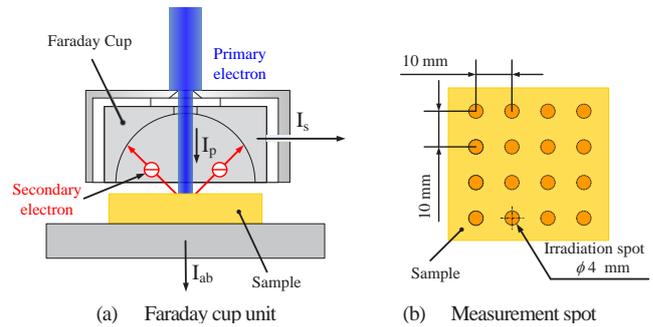


Fig. 5. Detail of measurement system

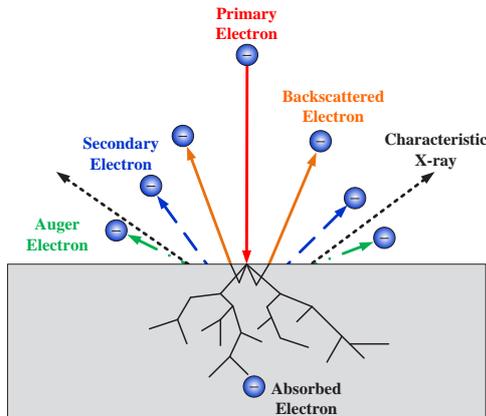


Fig. 2. Interaction of electrons and material

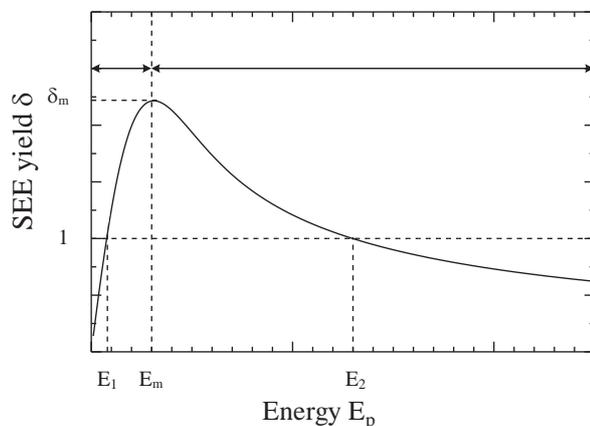


Fig. 3. Model of secondary electron emission curve

が取り付けられており、試料にパルス状の電子線 (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) を照射することができる。また、ファラデーカップは試料台の試料設置面から 3 mm の位置に設置されており、一次電子はファラデーカップの中央に設けられた照射口を通して試料に照射される。電子線照射により試料から放出された二次電子はファラデーカップによって収集される。その際、ファラデーカップおよび試料台からの出力電流信号はカレントアンプ (Keithley 社製、428 Current Amplifier) を通して電圧信号に変換・増幅され、オシロスコープ (LeCroy 社製、104MXs) で観測される。

なお、ファラデーカップはアルミニウム製であり、二次電子の収集面は半球状の形状をしている。また試料から放出された電子によるファラデーカップ収集面の二次電子放出を防ぐため、DLC (Diamond Like Carbon) コーティングが施してある。ファラデーカップには +50 V のバイアス電圧が印加されており、試料から様々な角度で放出された二次電子を収集することができる。

さらに、パルス状の電子線の生成は電子銃に搭載されたビームブランキングユニットにより行っている。また、Fig. 5 に示すように試料に照射する電子線の直径は 4 mm であり、二次電子放出による試料表面の帯電の影響を減らすため、XY ステージにより電子線の照射位置を 10 mm の間隔をあけて測定を行っている。

なお、実験は全て、チャンパーの真空度 $2 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-5}$ Pa で実施された。

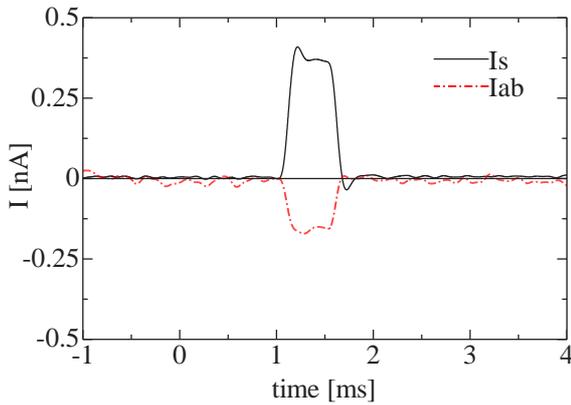


Fig. 6. Secondary electron emission current I_s on the Faraday cup and absorption current I_{ab} on sample stage

3.1 二次電子放出係数の算出方法

一般的に二次電子放出係数 δ は材料から放出された二次電子電流に対する一次電子電流の割合と定義されており、以下の式で表すことができる。

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

(δ : 二次電子放出係数、 I_p : 一次電子電流、

I_s : 二次電子電流)

本測定システムにおいては Fig 5(a)中ファラデーカップからの出力電流 I_s と試料の吸収電流 I_{ab} より以下の式を用いて算出している。

$$\delta = \frac{I_s}{I_s + I_{ab}} \quad (2)$$

(δ : 二次電子放出係数、 I_s : 二次電子電流、

I_{ab} : 吸収電流)

Fig. 6 に Kapton[®] にパルス幅 0.5 ms、加速エネルギー 400 eV の電子線を照射した際の試料の吸収電流 I_{ab} と二次電子電流 I_s の出力信号波形を示す。本測定では照射中に材料が帯電し、二次電子放出を抑制し波形が歪みさせられる恐れがあるため、同図中に示すようにパルス状の電子線照射による初期の二次電子放出を示している立ち上がり直後のピーク値を用いて二次電子放出係数の算出を行っている。

3.2 測定試料

Table 1 に本測定で使用した試料の詳細を示す。Au と Ti は参

Table 1. Measurement Samples

Sample	Thickness [μm]	Density [g/cm^3]	Work function or Ionization energy [eV]
Au	250	19.32	4.9
Ti	500	4.51	6.8
Kapton [®]	125	1.42	6.2
Upilex [®]	125	1.47	6.2
FEP	125	2.15	8.3

照試料として、ポリイミド (Kapton[®]-H and Upilex[®]-S) と FEP は実際に宇宙機表面に幅広く使用されている材料として用いた。なお、測定試料の仕事関数とイオン化エネルギーは光電子放出の測定値より算出している⁽⁴⁾。また、試料は真空チャンバーに設置する前にエタノール液中で 15 分間超音波洗浄を施している。

4 測定結果

4.1 金属材料

Fig. 7 に測定した金属材料 (Au, Ti) の二次電子放出係数 δ を示す。同図より δ_m は Au で 2.0 ($E_m = 700$ eV), Ti で 2.7 ($E_m = 250$ eV) であった。これらの値は Table 2 に合わせて掲載している。

Au の δ_m や二次放出係数の傾向が文献値と同様な値となったため、本測定システムで二次電子放出が正確に測定可能であることが確認できた⁽⁵⁾。Ti において、 δ_m は既報値 1.7 ($E_m = 250$ eV) よりも大きな値となった⁽⁶⁾。これは EDX の表面解析より、Ti の表面が酸化しており、純粋な Ti 面での測定になっていなかったためであると考えられる。

また、今回の Ti の値は既報値と異なっているが、Au より Ti の方が δ_m が大きいことは明らかである。そこで、この違いを考察すると材料の仕事関数が影響していると考えられる。一般的に二次電子放出係数の最大値は仕事関数に比例すると言われている⁽⁷⁾。Au と Ti の仕事関数を比較するとそれぞれ 4.9 eV, 6.8 eV であるため、結果として Ti よりも Au の方が二次電子を放出し

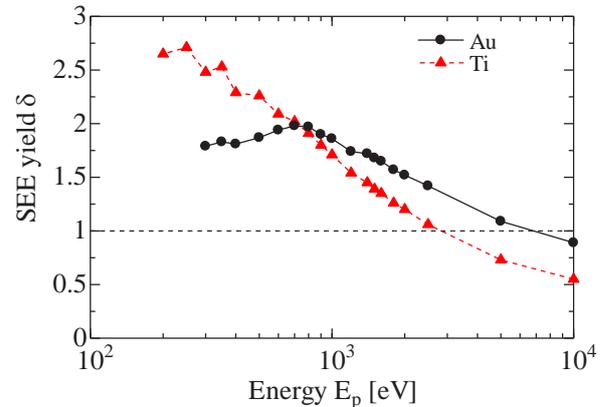


Fig. 7. Measurement results of SEE yield δ on metal sample

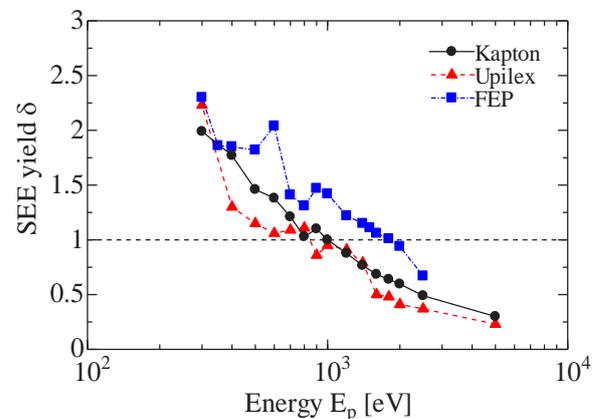


Fig. 8. Measurement results of SEE yield δ on polymer

Table 2. Measurement Results

Sample	Work function or Ionization energy [eV]	Maximum SEE yield δ_m	Energy E_m [eV]
Au	4.9	2.0	700
Ti	6.8	2.7	250
Kapton [®]	6.2	2.0	300
Upilex [®]	6.2	2.1	300
FEP	8.3	2.2	300

にくくなったと考えられる。

4.2 高分子材料

Fig. 8に測定したポリイミド (Kapton[®], Upilex[®]) およびFEPの二次電子放出係数 δ を示す。同図より δ_m は300 eV のとき Kapton[®]で2.0, Upilex[®]で2.1, FEPで2.2であった。これらの値はTable 2に合わせて掲載している。なお、本測定において二次電子放出曲線のピークを確認することができなかった

Kapton[®]とUpilex[®]で δ が1となるエネルギーは800~900 eVとほぼ一致しているが、一般的にUpilex[®]の方が δ が低くなる傾向が得られた。特に、400~700 eVの範囲では最大0.5の差があり、同じポリイミドフィルムでも差が確認された。またFEPにおいて δ は、ポリイミドより全ての照射電子のエネルギーにおいて高い値となった。これは高分子材料においても金属材料と同様にイオン化エネルギーが二次電子放出係数の最大値 δ_m に影響を与えていると考えられる。FEP, Kapton[®], Upilex[®]の仕事関数を比較するとそれぞれ6.2 eV, 6.2 eV, 8.3 eVであり、ポリイミドよりFEPの方が高くなる。その結果としてFEPよりもポリイミド(Kapton[®], Upilex[®])の方が二次電子を放出しにくくなったと考えられる。

4.3 試料密度とセカンドクロスエネルギー E_2

一般的に δ は一次電子のエネルギーによって、低いエネルギー側(1 keV以下)で1を超え上昇し、ピークを迎えた後に高いエネルギー側(1~10 keV)で減少し、1を割る傾向を示す。本報告では、Fig. 3に示すように高いエネルギー側で δ が1となる点のエネルギーをセカンドクロスエネルギー E_2 と定義し、この E_2 と試料密度 ρ の関係について検討を行った。その結果をFig. 9に示す。

同図より、 E_2 と ρ の間に線形増加傾向が確認できる。 E_2 は ρ と入射一次電子の飛程及び、試料内で一次電子によって生成される二次電子の脱出深さによって決されるものと考えられる。電子線を試料に照射した際、試料密度が低い試料は、密度が高い試料に比べ照射電子の飛程が長くなる。そして、二次電子が生成される位置が深くなる為、試料表面まで二次電子が到達しにくくなる。よって、試料密度 ρ が高くなるとエネルギー E_2 が高くなると考えられる。

5 今後の予定

真空チャンバーを用いた二次電子放出係数測定システムの構築を行い、金属材料及び、高分子材料の二次電子放出係数の測定を行った。またその結果より、試料密度や仕事関数あるいは

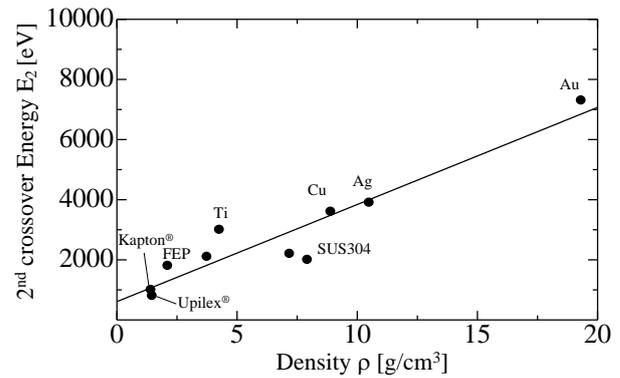


Fig. 9. The relationship between sample's density ρ and 2nd crossover energy E_2

イオン化エネルギーと二次電子放出特性の関係を調査した。今後は、更に仕事関数や密度の異なる試料の測定をし、比較・考察を行い、二次電子放出の物理モデルの作成を行う。

参考文献

- [1] H. C. Koons, J. E. Mazur, R. S. Selesnick, J. B. Blake, J. F. Fennell, J. L. Roeder and P. C. Anderson, "The Impact of the Space Environment on Space Systems", Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference, Air Force Research Laboratory, pp. 7-11 (1998)
- [2] 社団法人 日本電子顕微鏡学会関東支部: "走査型電子顕微鏡", 共立出版株式会社 (2000)
- [3] 荒木祥和: "AES 分析装置を用いた二次電子放出係数測定", Journal of Surface Analysis Vol.11 No. 2 pp. 71-76 (2004)
- [4] Yohei Komiyama, Shota Suzuki, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka and Tatsuo Takada, "Observation of Surface Discharge Phenomena on Dielectric Films Under Low Pressure Using Pockels Effect", 10th International Space Conference on Protection of Materials and Structure from the Space Environment (2011)
- [5] Hiroaki Miyake, Kumi Nitta, Shinichiro Michizono and Yoshio Saito, "Secondary Electron Emission Measurement of Insulating Materials for Spacecraft", Journal of the Vacuum Society of Japan Vol. 50, No. 5 (2007)
- [6] C. D. Thomson, "Instrumentation Studies of Electron Emission and Charging from Insulators", 8th Spacecraft Charging Technology Conference (2003)
- [7] E. M. Baroody, "A Theory of Secondary Electron Emission from Metals", Phys. Rev. 78, 780-787 (1950)