

# 光電子放出電流測定による宇宙機用絶縁材料の帯電物性の解析

野村和史\* 小俣直也 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 the physical properties of the polymeric material for spacecraft charging by measuring the photoelectron emission current

Kazufumi Nomura Naoya Omata Hiroaki Miyake Yasuhiro Tanaka  
(Tokyo City University)

Masamichi Ohhira Teppei Okumura Masato Takahashi (JAXA)

### ABSTRACT

A lot of satellites in space have been widely used for satellite broadcasting, satellite telecommunication and so on, and have become very important and even necessary in our modern life. However, satellite failures caused by discharges due to surface or internal charging have recently been reported. And electrostatic discharge accounted for more than 50% of all satellite accidents.

For the above reason, we must investigate spacecraft charging due to irradiation by radioactive rays, sunlight and the plasma environment. It is required the value of secondary and photoelectron emission (SEE & PE) of spacecraft materials. SEE & PE are important parameter for surface charging on satellites.

Therefore we focused on PE of polymeric materials for satellites under sunlight irradiation.

キーワード：表面帯電 宇宙機帯電 光電子放出

(Key words: Surface charge, Spacecraft charging, Photoelectron emission)

## 1. はじめに

近年、人工衛星、宇宙探査機など数多くの宇宙機が宇宙空間で運用されている。宇宙空間では、太陽からの電磁波（紫外線、X線、 $\gamma$ 線）、高エネルギー粒子（電子、陽子、イオン）等が存在している。このような環境下に宇宙機が晒されると、宇宙機表面に用いられる絶縁材料は帯電する。そして、過度の帯電によって生じた電位差により沿面放電が発生し、絶縁材料の劣化や機器の故障を引き起こし、宇宙機の長期運用を図る上で深刻な問題となる<sup>[1]</sup>。

また、宇宙機事故の半数以上が帯電・放電に起因するという報告もされていることから、宇宙機の帯電抑止が重要な課題となっている。これらの事故の発生を最小限に留め、信頼性かつ実用性の高い宇宙機運用を実現するため、宇宙機的设计段階から帯電解析を行い、帯電・放電を考慮した材料の選定及び、設計が必要となる。

帯電解析には、使用される宇宙機材料の光電子放出、二次電子放出係数、体積抵抗率及び、誘電率などの材料帯電物性パラメータが必要となる。

そこで本研究では、真空紫外分光を用いて宇宙機用絶縁材料の光電子放出電流測定装置を開発し、量子効率を算出することで、絶縁材料の帯電物性を検証することを目的としている。

## 2. 測定手順

### 2.1 測定システム

Fig. 1 に光電子放出電流測定装置の概略図を示す。測定システムは、真空チャンバー、カレントアンプ、オシロスコープ、光源から構成されている。また、真空チャンバー内にはフォトダイオード(IRD社製 AXUV-100G)が取り付けられた試料台、ファラデーカップが取り付けられている。

本研究で用いる光源は、重水素ランプ光源（浜松ホトニクス社製 高輝度真空紫外光源システム L10366）及び、キセノンランプ光源(ENERGETIQ 製 Laser-Driven Light Sources EQ-99FC) を使用しており、重水素ランプ光源の出力波長領域は 100 - 400 nm であり、キセノンランプ光源の出力波長領域は 170 - 2100 nm である。二つの光源を使い分けることにより、照射光は 110 - 2100 nm の範囲の光を照射可能となっている。Fig. 2 に各波長の光をフォトダイオードに照射した際の光子数の測定結果を示す。また光源からの照射光は分光器を通ることで単波長光に分光される。この分光光はファラデーカップの中心に設けられた照射光を通して試料に照射され、それにより試料から放出された光電子は+50 V を印加されたファラデーカップによって収集される。本測定装置では、機械式シャッターによって分光光をパルス状にすることで絶縁材料測定時に生

じる帯電の影響を最小限にしている。

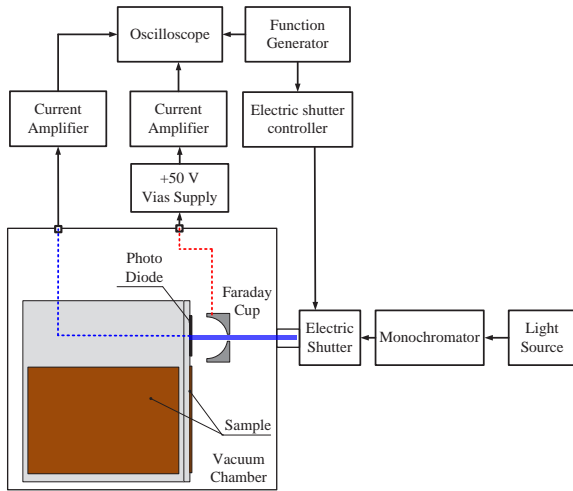


Fig. 1 Measurement system

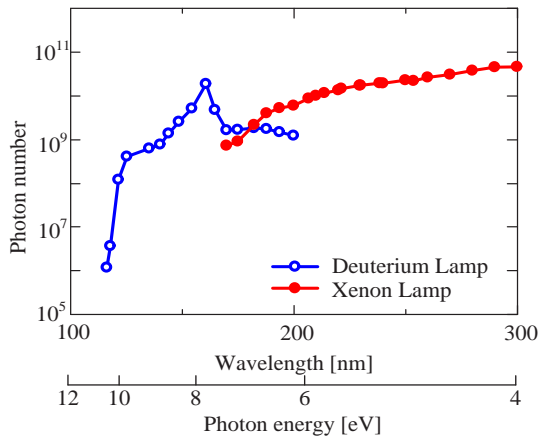


Fig. 2 Photon number of each light source

2.2 量子効率の算出

本研究では光電子放出の評価方法として量子効率を使用している。量子効率は、単位面積の物質表面に単位時間当たりに入射する光子数  $n_p$ 、光電効果により物質表面から放出された単位時間当たりの光電子数  $n_e$  の割合から定義されており、Eq.1 で表される。

$$Q = \frac{n_e}{n_p} \tag{1}$$

$n_p$  は分光された入射光をフォトダイオードに照射することでフォトダイオードから出力される電流  $I_p$  を測定し、Eq.2 を用いることで算出する。なお、Eq.2 中の  $k$  はフォトダイオードの量子効率、 $e$  は電気素量である。本研究で使用するフォトダイオードの量子効率は米国 NIST による校正値を用いている。

$$n_p = \frac{I_p}{e} \times \frac{1}{k} \tag{2}$$

$n_e$  は試料に分光光を照射し、試料から放出される電子を試料前面に取り付けられたファラデーカップにより収集することで光電子放出電流  $I_F$  を測定し、Eq.3 により、算出することができる。

$$n_e = \frac{I_F}{e} \tag{3}$$

3. 測定試料及び測定条件

Table.1 に今回測定した試料の試料厚を示す。金属材料 (Au, Al, SUS, Cu) および、高分子材料 (Kapton<sup>®</sup>-H, Upilex<sup>®</sup>-S, ETFE, PVDF, FEP) に分光されたパルス光を照射し、放出された光電子を FC により収集し測定する。なお、測定波長は、120 - 270 nm であり、各波長における光電子数と光子数を測定し Eq.3 を使用することで量子効率の算出を行っている。また、高分子材料について、光電子を放出した場所は、帯電する。そこで、Fig 3 に示すように 10 mm 間隔で測定を行うことにより帯電の影響を抑制している。

Table.1 Samples

Sample	Thickness [ $\mu\text{m}$ ]
Au	250
Al	3000
Cu	2000
SUS	2000
Kapton <sup>®</sup> -H	125
Upilex <sup>®</sup> -S	125
ETFE	100
PVDF	4.5
FEP	25

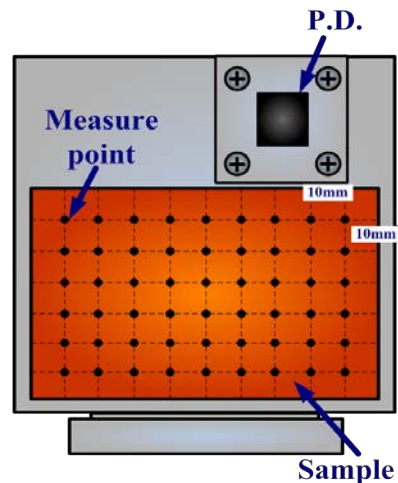


Fig. 3 Measurement point

4. 測定結果

Fig 4, 5 に金属材料及び高分子材料の量子効率の測定結果を示す。縦軸は、量子効率であり、横軸は波長およびエネルギー換算値である。

金属材料の場合、SUS, Cu より Au, Al の方が 140 nm 以上の領域においては、わずかながら高い傾向を示している。また、光電子放出の限界波長は Al, Au, SUS, Cu の順で長波長側にシフトしていることが確認された。これらの傾向は参考文献<sup>[2]</sup>においても確認できる事から、本測定システムを用いて正常に測定できている事が確認できる。

高分子材料の場合、ポリイミド系材料(Kapton<sup>®</sup>-H, Upilex<sup>®</sup>-S)の量子効率はフッ素系材料(PVDF, ETFE, FEP)より大きい傾向であることが確認でき、ポリイミド系材料はフッ素系材料より 5 倍程度光電子が放出しやすく、ポリイミド等の材料はフッ素系材料より 200 nm という長波長まで放出が確認できる。

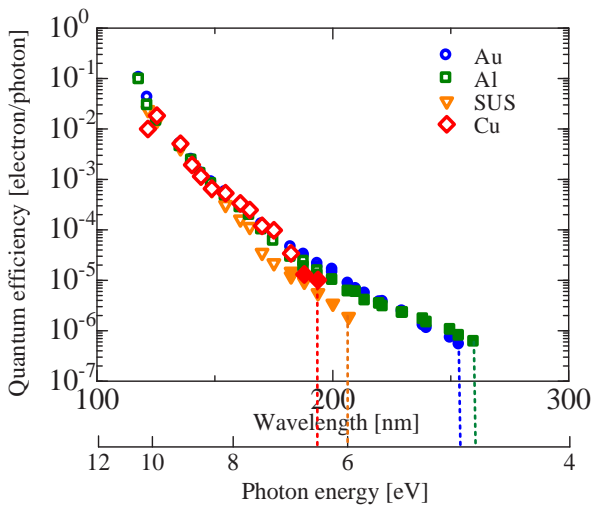


Fig.4 Quantum efficiency of metallic materials

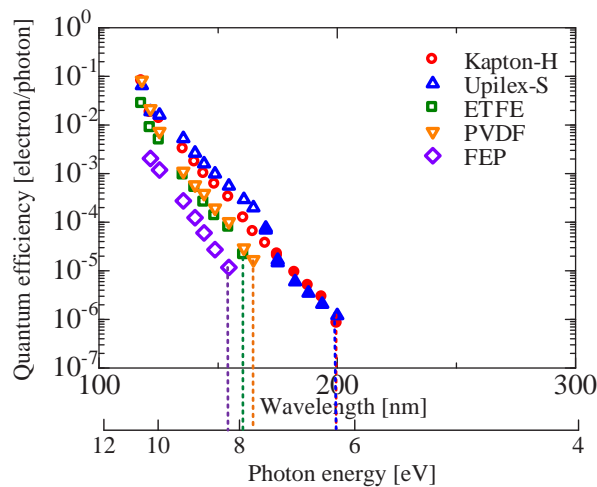


Fig.5 Quantum efficiency of Polymeric materials

4.3 仕事関数および、イオン化エネルギーの算出

前項の量子効率算出結果から得られる光電子放出の限界波長より仕事関数（または、イオン化エネルギー）の算出を行った。Table.2 に各材料における仕事関数（イオン化エネルギー）を示す。なお、比較として、文献値<sup>[2, 3]</sup>の仕事関数および、量子化学計算手法である密度汎関数法を用いて算出したイオン化エネルギーの値<sup>[4]</sup>を示す。

金属材料の場合 Au, Al は測定値と文献値はほぼ同程度であることを確認した。しかし、Cu について、測定値と文献値では異なっている事が確認できる。その原因として、今回測定した Cu の表面が酸化していたため光電子放出が生じにくくなり、文献値と異なると考えられる。

次に、高分子材料イオン化エネルギーの測定値と文献値を比較すると、イオン化エネルギーの値は、1.0 - 2.1 eV 程度異なる値となった。この差について、解析に用いた高分子モデルでは構造や環境条件は最適化されており、実際の材料の状態と異なるため生じたものと考えられる。

Table.2 Work function of each sample <sup>[2, 3, 4]</sup>

	Work function or Ionization energy [eV]	
	Reference data	Measurement data
Au	4.9 <sup>[2]</sup>	4.9
Al	4.5 <sup>[2]</sup>	4.7
Cu	4.6 <sup>[3]</sup>	6.4
SUS		6.0
Kapton <sup>®</sup> -H	5.9 <sup>[4]</sup>	6.2
Upilex <sup>®</sup> -S	5.4 <sup>[4]</sup>	6.2
ETFE	9.4 <sup>[4]</sup>	7.7
PVDF	8.6 <sup>[4]</sup>	7.5
FEP	10.4 <sup>[4]</sup>	8.3

5 結論

今回、光電子放出測定装置の開発を行い、金属材料及び、高分子材料の光電子放出測定を行った。その結果、金属材料の量子効率、仕事関数の値共に文献値とほぼ同程度であることを確認し、本測定装置の有用性を確認した。また、高分子材料の測定結果より、ポリイミド系材料の方がフッ素系材料に比べて光電子が放出しやすいことを確認した。今後は、様々な宇宙機用材料の光電子放出測定を行う。また、電子線等、宇宙環境条件で劣化処理を施した材料の光電子放出測定を行う予定である。

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”, 6th Spacecraft Charging Technology Conference, AERL-VS-TR-20001578 (2000)

[2]B. Feuerbacher, et al.: Experimental Investigation of Photoemission from Satellite Surface Materials, J.Appl. Phys.,43, 1563(1972)

[3]Herbert B. Michaelson: The work function of the elements and its periodicity, J.Appl. Phys.48,4729(1977)

[4]Yohei Komiyama et al, “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), will be published on 31th Aug. 2012 by Springer