

# 宇宙機材料の二次電子放出係数及び光電子放出係数の測定

川崎和貴, 宮原信, Essien Ewang, 井上俊佑

豊田和弘, 趙孟佑

九州工業大学, 日本

[k108031k@mail.kyutech.jp](mailto:k108031k@mail.kyutech.jp)

**Keyword:** Secondary electron, Photoelectron, Black-Kapton, Teflon

宇宙機の帯電状況を知るために材料の二次電子放出係数、光電子放出係数を知ることが必要である。この二つの値は電子放出のしやすさを表したもので、宇宙機の電流収支を計算することに用いられる。電子放出係数は材料によって様々でデータベースの構築が重要である。

これまで我々は金と Kapton の二次電子放出係数、光電子放出係数の測定を行ってきた。そして今回、新しい材料として Black Kapton と Teflon に着目した。これら二つは実際に宇宙機表面の熱制御材料として用いられている。だが、この二つの材料はまだ二次電子放出係数、光電子放出係数のデータが少ない。従ってこの二つの材料の測定を行い、また材料表面の放射線や UV、原子状酸素での劣化による測定も同様に行う。これにより、Black Kapton と Teflon の帯電解析のためのデータベースを構築するとともに劣化特性との考察を行う。

## 1. 背景・目的

帯電解析ソフトに必要な値が三つある。それは衛星に使われている材料の帯電のしやすさを数値化した二次電子放出係数と光電子放出係数、そして抵抗値である。この値を得ることで帯電解析が高精度になる。

また、宇宙で長く運用されている衛星は宇宙環境によって影響を受ける。特に静止軌道にある衛星は高いエネルギーの放射線による影響が大きい。本論文では放射線による劣化を模擬したサンプルの測定を行なった。

今回測定したサンプルは熱制御材料に使われている Black Kapton Teflon である。この二つのサンプルの二次電子光電子測定をする。

## 2. 電子放出

### 2.1. 二次電子放出係数

二次電子放出とは高エネルギーの電子が個体物質に衝突することで発生する。この時の入射電子と放出電子の比が二次電子放出係数である。波形を示す。

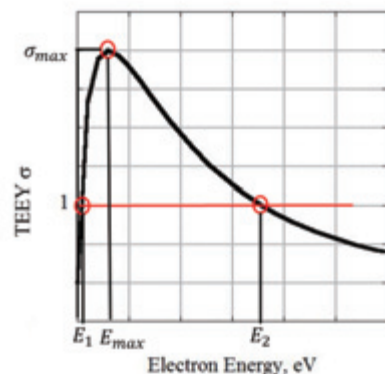


図1 二次電子放出係数

$\sigma_{\max}$  は二次電子放出係数最大値で  $E_{\max}$  はそのときの最大値  $E_1, E_2$  は二次電子放出係数が 1 のときのエネルギーである

2.2. 光電子放出係数

光電子放出とは波長の短い（エネルギーの高い）光が個体物質に照射されることで光電効果により電子が飛び出すという現象である。光電子放出を起こす波長領域は紫外線である。

入射した光子と放出した電子の比が光電子放出係数という。

3. 実験手法

3.1. 二次電子

二次電子測定システムはオージェマイクロスコブ装置(JAMP-10SX)でできている。子の装置には電子銃 LaB6 が備わっている。電子銃のエネルギーは 10~3keV である。真空度は  $3.5 \times 10^{-5}$ Pa まで下げることができる。

電子銃から電子を打ち出し、サンプルに衝突、その後コレクタとサンプルステージからの電流を計測できる。

コレクタはステージにたいして+50V バイアスしている。このため放出した電子を全て電流として取得できる。全体を図に示す。

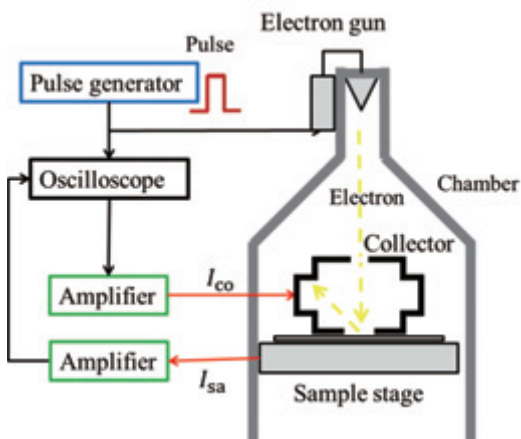


図2 二次電子測定システム

この装置により得られた電流値より二次電子放出係数は

$$\sigma = \frac{I_{collector}}{I_{primary}} = \frac{I_{collector}}{I_{collector} + I_{sample}}$$

と表せる。電子銃のエネルギーを 10eV~3keV に変えて測定した。

3.2. 光電子

光電子測定システムは  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Pa まで真空にできるチャンパー中に紫外線光源の D2 ランプがあり、UV センサ、サンプルにそれぞれ照射できるようになっている。また、中にはバンドパスフィルタが備わっており紫外光を 122nm, 130nm, 138nm, 157nm, 185nm の波長に分けられる。この波長で光電子測定を行う。外観図を示す。

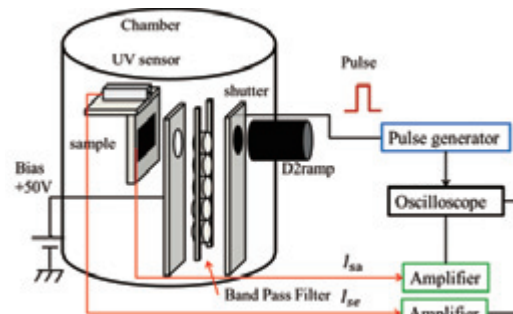


図3 光電子測定システム

これにより得られた電流値は

$$I_{se} = I$$

$$I_{sa} = j_{ph} \times S$$

とする。S は照射面積である。また照射強度  $I_r$  は次式である。

$$I_r(\lambda) = \frac{I}{I_{re}} \times I_{re}(\lambda)$$

$I_{re}$  は UV センサの相対電子電流、 $I_{re}$  は UV センサの相対照射強度である。 $I_{re}$  は次式で求められる。

$$I_{re} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{re}(\lambda) \times R(\lambda) d\lambda \times S$$

R は UV センサの受光感度である。光電子放出係数解析法を説明する。

まず、光電子放出係数 Y は

$$Y(\lambda) = \frac{j_{ph}}{1.602 \times 10^{-19} \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) d\lambda}$$

で表せる。 $j_{ph}$  は光電子電流密度、F は光子流量である。F は次式で求まる。

$$F(\lambda) = \frac{I_r(\lambda)}{W(\lambda)}$$

W は光子のエネルギーである。  
 また W は

$$W(\lambda) = \frac{hc}{\lambda}$$

であり h はプランク定数、c は光速、  
 λ は波長である。

**3.3.放射線劣化サンプル**

放射線劣化サンプルの作成をした。陽子線と電子線をサンプルに照射した。静止軌道 GEO で 1、5、10、15 年相当の劣化をさせた。

群馬県高崎市、日本原子力機構高崎量子応用研究所で電子線を当てた。電子のエネルギーは 1MeV、電子電流は 1.88 mA であった。

また福井県敦賀市、若狭湾エネルギー研究センターで陽子線を当てた。エネルギーは 50keV で 1 μA/cm<sup>2</sup> である。

その後サンプルは真空容器に入れて持ち帰った。そして二次電子、光電子測定を行なった。

**4.測定結果**

**4.1.二次電子放出係数**

まず virgin サンプルの波形を示す。

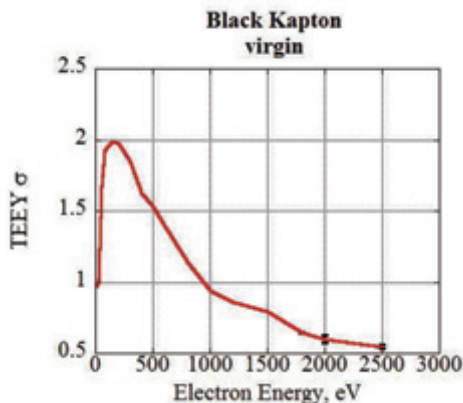


図 4 Black Kapton virgin  
 2 次電子測定

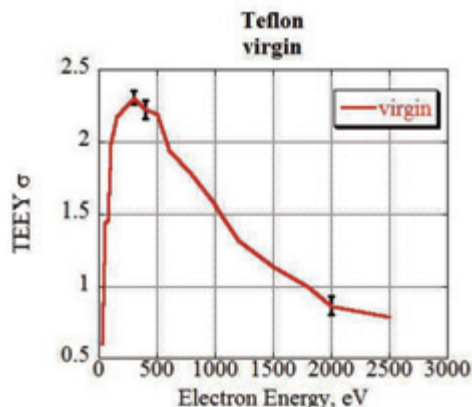


図 5 Teflon virgin  
 二次電子測定

放射線劣化サンプルの測定結果を図に示す。

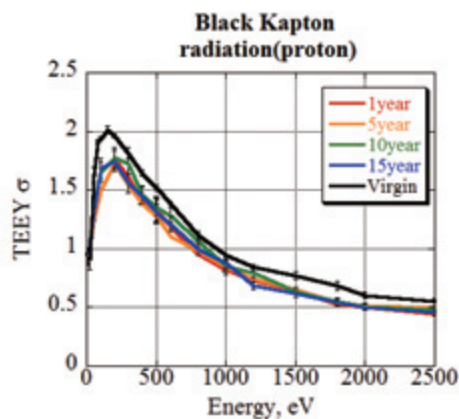


図 6 BlackKapton 陽子線劣化  
 二次電子測定

陽子線による劣化はほとんど見られなかった。

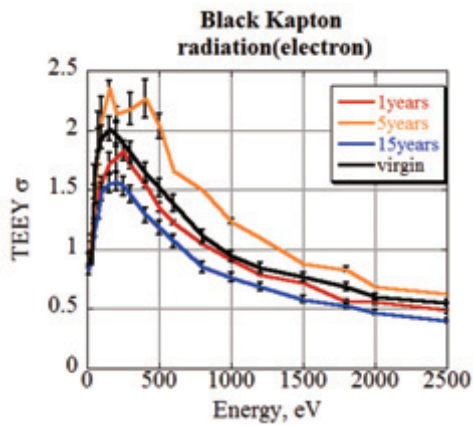


図7 BlackKapton 電子線劣化  
二次電子測定

5年相当のサンプルのみ上がった。

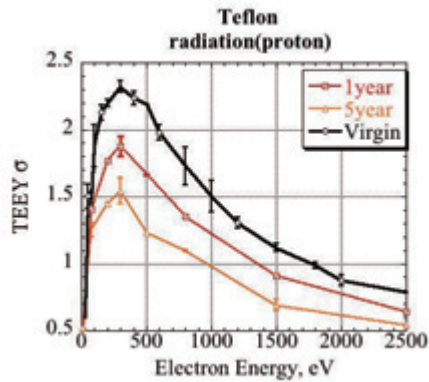


図8 Teflon 陽子線劣化  
二次電子測定

1年5年と年ごとに下がった。

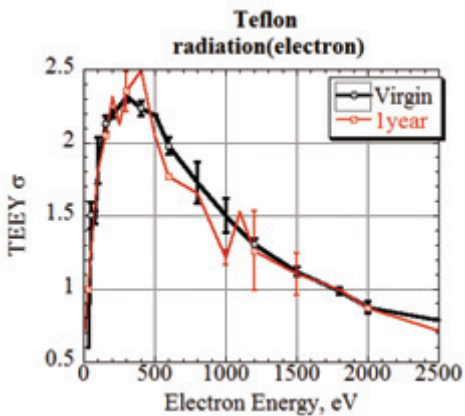


図9 Teflon 電子線劣化  
二次電子測定

ピーク値が少し上がった。  
あまり変化は見られなかった。

#### 4.2.光電子放出係数

測定結果を下図に示す。

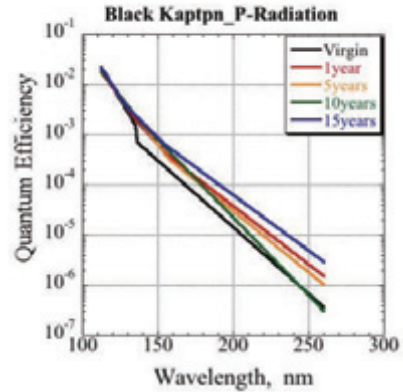


図10 BlackKapton 陽子線劣化  
光電子測定

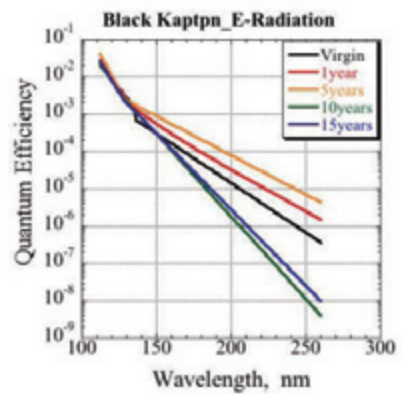


図11 BlackKapton 電子線劣化  
光電子測定

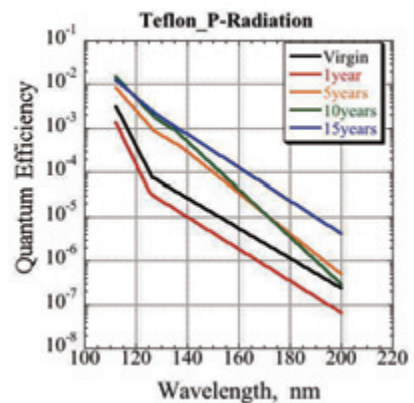


図12 Teflon 陽子線劣化  
光電子測定

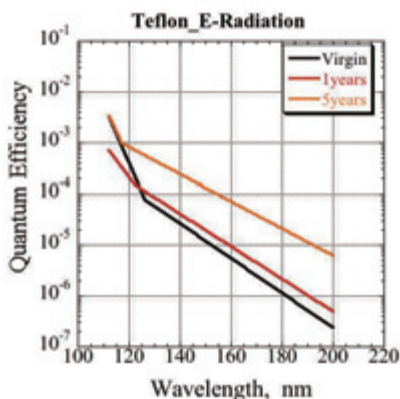


図 13 Teflon 電子線劣化  
光電子測定

また測定した光電子放出係数より  
太陽スペクトル (AM0) での光電  
子電流密度  $j$  を求める。

$$j_{ph} = 1.602 \times 10^{-19} \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \cdot Y(\lambda) d\lambda$$

$F$  は太陽光の光子流量で照射強度  $I_r$   
は太陽スペクトルを用いて計算する。図  
に太陽スペクトルを示す。

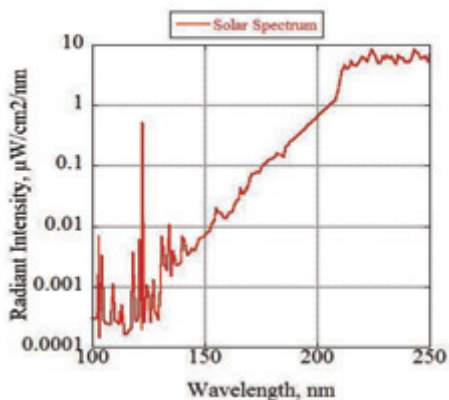


図 14 太陽スペクトル(AM0)

計算結果を表にまとめた。

BlackKapton

計測条件	光電子 @AM0 [μA/m <sup>2</sup> ]
Virgin	6.64
陽子線 (1year)	7.45
陽子線 (5year)	8.43
陽子線 (10years)	4.7
陽子線 (15years)	11.65
電子線 (1year)	6.91
電子線 (5year)	8.43
電子線 (10years)	1.68
電子線 (15years)	1.87

Teflon

計測条件	光電子 @AM0 [μA/m <sup>2</sup> ]
Virgin	0.063
陽子線 (1year)	0.027
陽子線 (5year)	0.057
陽子線 (10years)	0.108
陽子線 (15years)	0.138
電子線 (1year)	0.065
電子線 (5year)	0.091
電子線 (10years)	測定不能
電子線 (15years)	測定不能

結果を図に示す。

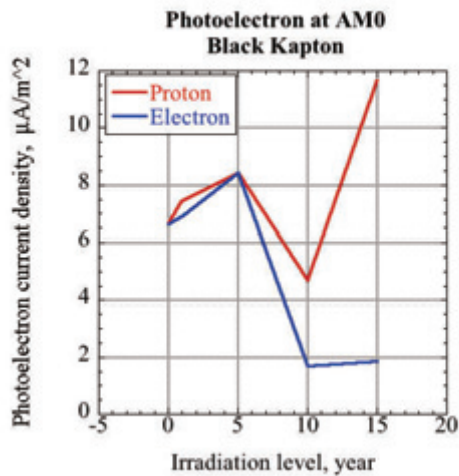


図 15 Black Kapton  
光電子電流密度の変化 AM0

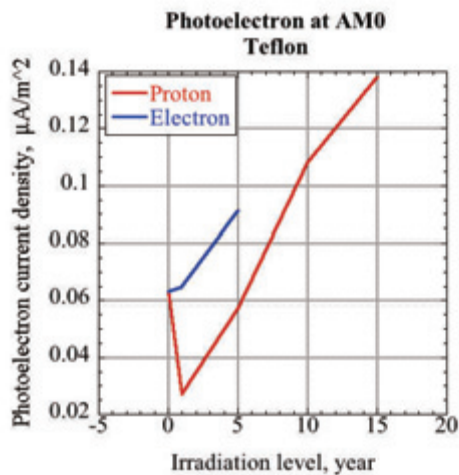


図 16 Teflon  
光電子電流密度の変化 AM0

## 5. 結論

BlackKapton と Teflon の二次電子、光電子測定を行った。また放射線環境に晒されたサンプルの二次電子、光電子の測定を行なった。

### BlackKapton

二次電子測定では陽子線だとあまり変わらず、電子線だと5年だけ上がり他は下がった。

光電子測定では陽子線は10年だけ下がり他は上がった、電子線は1年5年が上がり10年15年が大きく下がった。

### Teflon

二次電子測定で陽子線だと1年、5年と年ごとに下がった。電子線だとあまり変化はなかった。

だが、5年以上の劣化サンプルは電子線によって破壊され測定できなかった。

光電子測定では陽子線は1年が大きく下がりそこから5年10年15年と年ごとに上がった。電子線は1年5年と徐々に上がった。

## 6. 今後

Black Kapton と Teflon について、他の宇宙環境（原子状酸素、紫外線）を模擬し劣化させたサンプルを作成し、二次電子と光電子測定を行なおうと考えている。

また、高温時と低温時での二次電子測定も行なおうと考えている。

### 参考文献

- 1) J. Wu, "Effects of Energetic Electron and Proton Irradiation on Electron Emission Yield of Polyimide Induced by Electron and Photon," AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN Vol.12 ISTS29 p. Pr\_13Pr\_19, 2014.
- 2) C. D. Thomson, "Electron emission properties of insulator materials pertinent to the International Space Station," 8th Spacecraft Charging Technol. Conf p.1-16, 2003.
- 3) J. R. Dennison et al: Evolution of the Electron Yield Curves of Insulators as a Function of Impinging Electron Fluence and Energy, IEEE Trans. Plasma Sci., 34(2006), pp. 2204-2218.