

宇宙材料における二次電子・光電子放出係数の測定装置開発

○宮原信（九工大・電気電子）, Wu Jiang（西安大）, Arifur R. Khan
豊田和弘（九工大・電気電子）, 趙孟佑（九工大・先端機能）

Total Electron Emission Yield Measurement of Polyimide Film Due to Different Temperatures

Akira Miyahara (Kyushu Institute of Tech.), Wu Jiang (Kyushu Institute of Tech.),
Kazuhiro Toyoda (Kyushu Institute of Tech.), Mengu Cho (Kyushu Institute of Tech.)

Key Words : Total Electron Emission Yield, Insulator, Charging, Temperature

1. はじめに

人工衛星を運用するにあたって、常に念頭に置いておかなければならないのが、放電事故の危険性である。地上の環境とは異なり宇宙空間上では、電子と陽子が乖離して形成されたプラズマ環境が、宇宙機の帯電・放電現象を誘発する。仮に太陽パネル上で放電事故を起こした場合、電力供給量の低下がそのまま運用停止につながることもある。

2003年10月、地球観測衛星みどり2号の身に起きた放電故障事故をきっかけに、九州工業大学では衛星帯電解析ソフトウェア(通称MUSCAT)の開発に携わった。MUSCATの開発により、地上における軌道上衛星の帯電シミュレーションが可能となる。この衛星帯電解析に必要となるパラメータが、宇宙機表面を構成している物質の二次電子放出係数、光電子放出係数、抵抗値にあたる。さらに状況に応じて、材料の劣化具合、温度環境といった情報を加味していかなければならない。このように、あらゆる環境・状況におけるパラメータを有するデータベースの構築が、より正確な帯電解析の実現につながる。

現在、データベース構築のために、同大学では宇宙材料の二次電子および光電子放出係数測定装置の開発を行なっている。二次電子放出係数とは、すなわち物質の帯電のしやすさを表す指標である。宇宙空間のような電子の衝突しやすい環境の中で、この係数の高い物質は正に、逆に係数の低い物質は負に帯電しやすい傾向をもっている。また光電子放出係数とは、紫外線のような短波長、強いエネルギーを持った光が、物質表面に照射されたと同時に電子を放出させる現象である。この現象は光電効果とも呼ばれ、放出傾向は表面構成物質の仕事関数に依存する。

まず二次電子放出係数の測定を行うにあたって、極低圧環境と電子の衝突環境の模擬を、電子銃を備えたオージェ電子測定装置を用いて行なった。空間の圧力は 10^{-5} Pa、電子銃は25 eV~3000 eVのレンジで電子を照射することができる。また、金属と絶縁体の薄膜サンプルについて、“パルス・スキャン法”

と呼ばれる方法を用いることによって、電子照射後に残る帯電を殆ど無視しながら、二次電子放出係数の測定を行った。

次に光電子放出係数の測定を行うにあたって、低圧環境と紫外線の模擬を、浜松ホトニクス製重水素ランプを光源とした小型真空装置を用いて行なった。空間の圧力は 10^{-5} Pa、光源の波長を限定するために波長選択フィルターを使用した。また二次電子試験同様に、パルス・スキャン法を用いて絶縁体物質の帯電影響を回避している。そのために精密自動ステージ(X-Y)、開閉10msオーダーのシャッターを使用した。

本稿での研究目的は、この二次電子放出係数測定装置に加熱器と冷却器を搭載し、高温・低温環境における二次電子放出係数の測定装置を構築すること。ならびに光電効果から得られる電子電流から、光電子放出係数を導出することである。以下、2つの項目を並列して記載する。

2. 原理

2.1 二次電子放出係数

低圧環境において、電子が宇宙機材料に衝突した場合、入射電子の数とは別個数の電子が放出される。このとき、入射電子の数(N_{in})と放出電子の数(N_{out})を比で表したものを、

$$\sigma = \frac{N_{out}}{N_{in}} \quad (1)$$

二次電子放出係数 σ と定義する。もし、放出電子の数が入射電子の数よりも多ければ($\sigma > 1$)、材料は正に帯電しようとする。逆にもし、放出電子の数が入射電子の数よりも少なければ($\sigma < 1$)、材料は負に帯電しようとする。二次電子放出係数は材料の種類だけではなく、表面状態や温度によって変化する。[1]

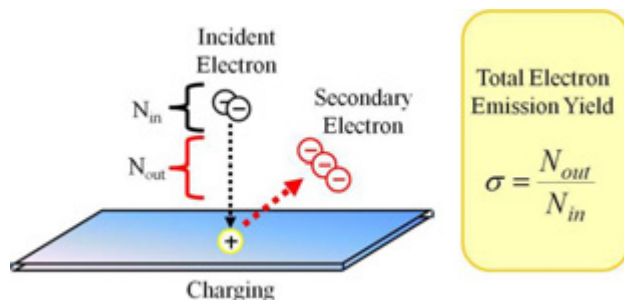


図 1 二次電子放出現象

2.2 光電子放出係数

低温環境において、紫外線のような高いエネルギーを持つ光が物質表面に照射され、かつ光エネルギーが物質の仕事関数を上回った場合に電子が放出される。この現象を光電子放出現象あるいは光電効果と呼ぶ。この時、入射した光子数に対する放出した電子数を比で表したものを光電子放出係数 $Y(\lambda)$ と定義する(量子効率とも呼ぶ)。 $Y(\lambda)$ は入射した光子線量 $F(\lambda)$ 、露光面積 S 、電荷素量 q_e 、放出した電子電流 I_{sa} を用いて以下の式(2)で表される。

$$I_{sa} = q_e \times S \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Y(\lambda) \cdot F(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

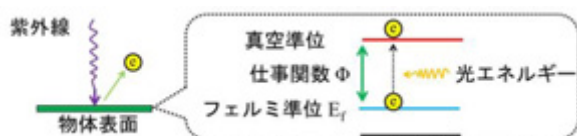


図2 光電子放出現象

3. 測定方法

3.1 温度環境の構築と二次電子放出係数測定

異なる温度環境下における二次電子放出係数の測定は、以下の3つの試験で構成されている。

- (1). 二次電子放出係数の測定
- (2). 温度環境の構築
- (3). サンプル温度の測定

以上を踏まえて試験方法を記載する。

3.1.1 パルス・スキャン方法

薄膜サンプルの二次電子放出係数を測定するために、オージェ装置を使用した。この装置は大きく分けて、電子を照射する電子銃、サンプルを移動・固定するステージ、放出した電子を捕獲するコレクタの3つの機器によって構成されており、 5×10^{-5} Paの圧力下で、固定されたサンプルに電子ビームを照射することが可能である。また、ステージとコレクタには-300 Vと-250 Vの負バイアスコンデンサを設け、コレクタとステージ間に電位差50 Vの電界を形成している。このバイアスによるメリットは2つある。ひと

つは、電子ビームの照射出力が300V増しになることで、低エネルギー電子を擬似的に測定することが出来ること。バイアスを掛けなかった場合、300 eV以下の電子はサンプルまで到達できずに離散してしまう場合がある。もう一つは、50Vの電界を形成することで電子がコレクタに引きつけられ、電子が捕獲しやすくなることである。この電界に引きつけられた放出電子はコレクタに捕獲され、コレクタ電流(I_{co})としてオシロスコープで観測される。また、サンプルが得たあるいは失った電子を補うように移動する電子電流をサンプル電流(I_{sa})として同時に観測する。これら I_{co} 、 I_{sa} はnA単位の非常に小さな電流であるため、高速電流アンプで増幅して観測を行なった。(図3)

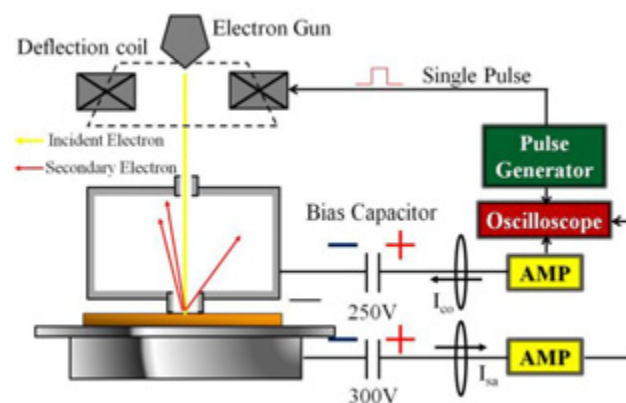


図 3 オージェ装置

二次電子放出係数は、入射する電子数に対する放出する電子数との比で表せるため、

$$\sigma = \frac{N_{out}}{N_{in}} = \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{I_{co}}{I_{co} + I_{sa}} \quad (3)$$

で計算される。ここで I_{out} は放出した電子電流、 I_{in} は入射電子電流を表す。以上の測定装置の校正を、式(3)を用いて金サンプルの二次電子放出係数の測定で行なった。その結果を次の図4に示す。[2]

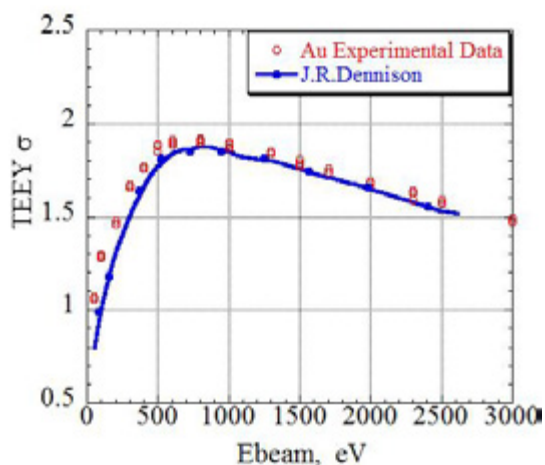


図4 金を用いた二次電子放出係数測定の校正.

導体の測定とは異なり、絶縁体の二次電子放出係数の測定では、電子照射による帯電現象を考慮する必要がある。絶縁体サンプルは、一度電子を照射すると、物質表面の電位が正または負に帯電する。物質表面の帯電は電子の放出を妨げ、二次電子放出係数の測定に大きな誤差を与える。ここで、我々は”パルス・スキャン方法”を用いることで、絶縁体の帯電をある程度回避することに成功した。[3]

パルス・スキャン方法では、電子ビームを30 μs のパルス波で照射する。パルス波を用いることで、絶縁体表面の帯電を最小限に抑えることができる。また、一度の測定ごとに照射位置を変えた。実際の測定では図5で示すように、測定箇所を5×5個用意した。これにより、常に帯電の影響を無視した測定を行うことができる。

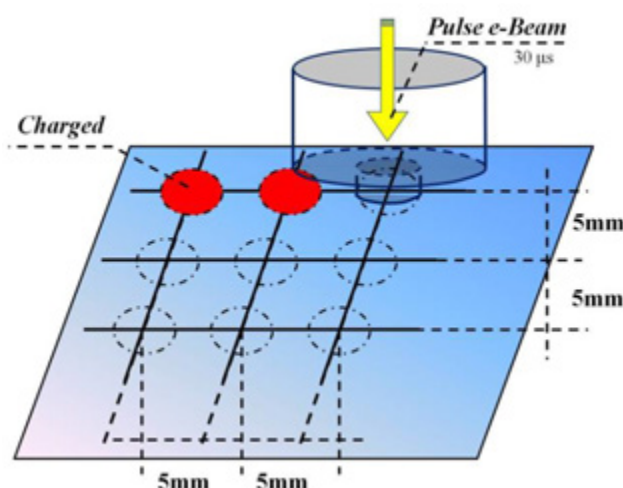


図5 パルス・スキャン方法

3.1.2. サンプルの加熱システム

計測装置にはベーキング用のヒーターが備え付け

られている。このヒーターを使用することで、装置内部を100℃以上加熱することができる。サンプル温度の測定には熱電対を使用し、温度調節器に使われるリレー装置(E5CN omron社製)をヒーターのスイッチに組み込むことで、常に100℃の温度を保つことができる。

3.1.3. サンプルの冷却システム

計測装置に液体窒素タンクを設け、サンプルの冷却システムを構築した。加熱システムであるヒーターの位置も同時に図6に示す。

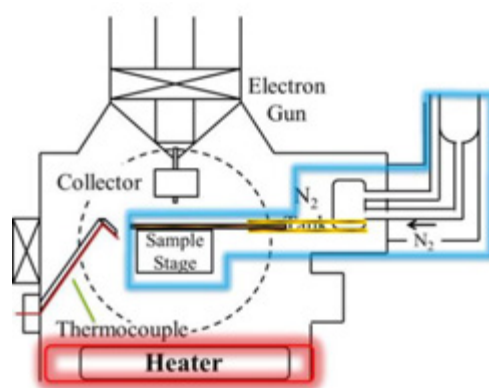


図6 温度環境の構築装置

サンプルの冷却には、液体窒素タンクから伸ばした銅板をサンプルの下に敷き、接触冷却を試みた。ただし、ステージは可動式のため、ステージに取り付けられた銅板を、タンクに取り付けられた2枚の銅板に挟みこむような形で接続されている。また、コレクタ、ステージには200V以上の負バイアスがかけられているため、銅板には薄い絶縁テープで絶縁処置を施している。

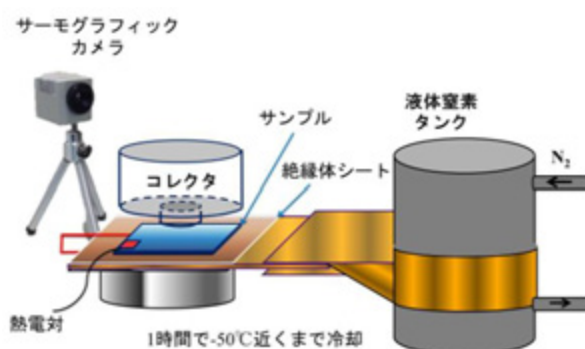


図7 低温環境の構築

低温試験を行うにあたって、サンプルの正確な温度を記録できなければならない。これらの温度の測定のために熱電対とサーモグラフィを使用した。一度サンプルに熱電対を取り付け、その温度を観測する。そしてさらに、チャンバー外の覗き窓には、サ

ーモグラフィのカメラが設置されている。これにより、チャンバー内の温度分布と温度変化の様子を視認することができる。以上の方法によりサンプル温度約-50℃を観測したが、詳しい結果については4.3章にて後述する。

3.1.4. 試験環境

以下の表1にて試験環境を示す。

表 1 システム詳細

Catalog	Value
圧力	7.2×10^{-5} Pa
入射電子エネルギー	50 eV ~ 3 keV
入射電子電流	10 ~ 30 nA
照射パルス長	30 μ s
照射面積	1 mm ²
バイアス (ステージ / コレクタ)	-300 V / -250 V
SN 比	High
サンプル	Kapton 100H
測定可能な厚み	0 ~ 2.5 mm
温度 (高温 / 室温 / 低温)	100 / 23 / -20 °C

3.2 光電子放出係数の解析

光電子放出係数(量子効率)の測定試験は以下の手順で構成されている。

(1) UVセンサを用いた入射光子電流 I_{se} の測定および、サンプルから放出した電子の電子電流 I_{sa} の測定。

(2) Matlabを用いた量子効率の解析。

以上2つの項目について試験方法を記載する。

3.2.1. 電子電流計測

UV光源から入射された紫外線の光子電流 I_{se} および、光電効果により放出した電子電流 I_{sa} を計測するために、以下図8の装置を構築した。

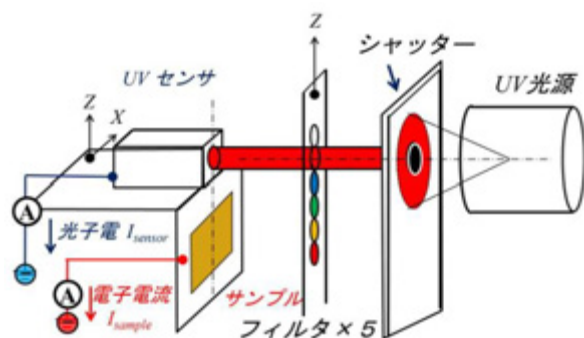


図 8 光電子電放出係数測定装置

UV光源には浜松ホトニクス製重水素ランプL1835、UVセンサには同社のH8496-16型を使用した。また、

光源とセンサの間には開閉シャッターと5つの波長選択フィルタを設けている。シャッターにはVincent社製VS25を使用し、10msで高速開閉が可能となる。波長選択フィルタは、122nm, 130nm, 138nm, 157nm, 185nm, 220nm, 248nm, 計7つの波長を選択して透過することが可能であり、その透過率と半値幅を表2に示す。

表 2 フィルタの透過率と半値幅

	122nm	130nm	138nm	157nm
透過率	15	15	15	12
半値幅	~20	20 +/-5	20 +/-7.5	20 +/-5

	185nm	220nm	248nm	
透過率	15	15	15	
半値幅	~20 +/-7.5	20 +/-5	20 +/-5	

高速開閉シャッターにより10msのパルス波となった紫外線を各フィルタに通し、UVセンサとサンプルに照射する。センサで得られた入射光子電流 I_{se} とサンプルで得られた放出電子電流 I_{sa} は、高速電流アンプにより $10^6 \sim 10^7$ 倍で増幅され、オシロスコープで計測される。その時に得られた電子電流の波形例を図9に示す。サンプルは絶縁体薄膜 Kapton 100H を用いた。

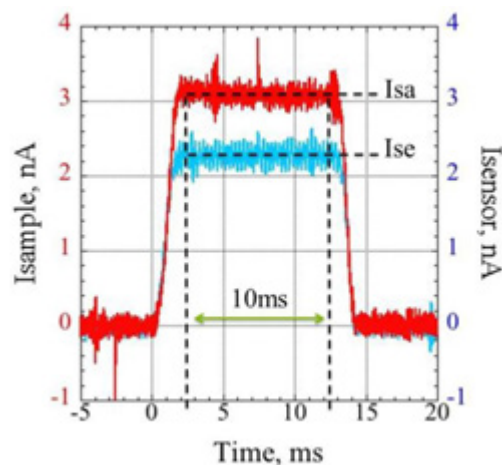


図9 122nmの入射光子電流(I_{se})と放出電子電流(I_{sa})

サンプルが絶縁体の場合は、二次電子の時と同様、パルス・スキャン法を用いて行っている。

3.2.2 量子効率の解析

放出電子電流 I_{sa} と量子効率 $Y(\lambda)$ との関係式(2)から $Y(\lambda)$ を導出する。ただし、 $Y(\lambda)$ は積分関数で表されるため、数式計算アプリケーションMatlab

(Math Works社製)を使用した簡易解析により導出を試みた。

量子効率 $Y(\lambda)$ を任意の多項式 $Y'(\lambda)$ と仮定し、式(2)に代入する。その時の電子電流 I'_{sa} を式(3)に示す。

$$I'_{sa} = q_e \times S \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Y'(\lambda) \cdot F(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

また、入射光子線量 $F(\lambda)$ は、入射光の強度、フィルターの透過率、入射光子電流 I_{se} により計算される。これらから得られた光子線量 $F(\lambda)$ を図10に示す。

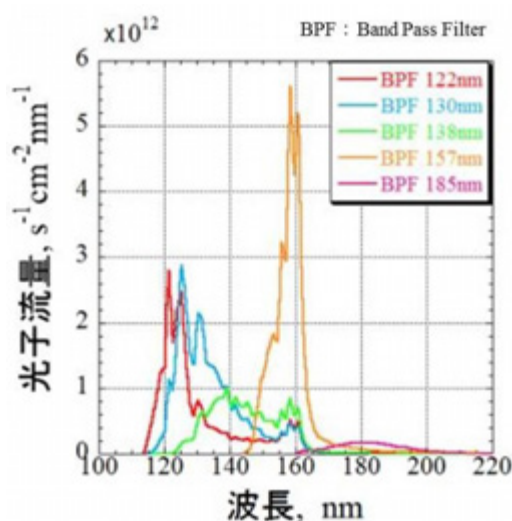


図 10 入射光子線量 $F(\lambda)$ [$s^{-1}cm^{-2}nm^{-1}$]

式(3)より導出される電子電流 I'_{sa} と、実測された電子電流 I_{sa} 偏差 Δ を最小二乗法により取る。(式(4))

$$\Delta = \left(\frac{I'_{sa}}{I_{sa}} - 1 \right)^2 \quad (4)$$

各波長で得られた電子電流について、この偏差 Δ が最小となるような多項式 $Y'(\lambda)$ を導出する。

4. 試験結果

4.1. 二次電子放出係数測定

4.1.1 常温環境試験

先に説明したオージェ装置とパルス・スキャン法を用いることで、室温における絶縁体薄膜(Kapton 100H)の二次電子放出係数測定を行なった。参考資料との比較結果を以下図7に示す。[4]

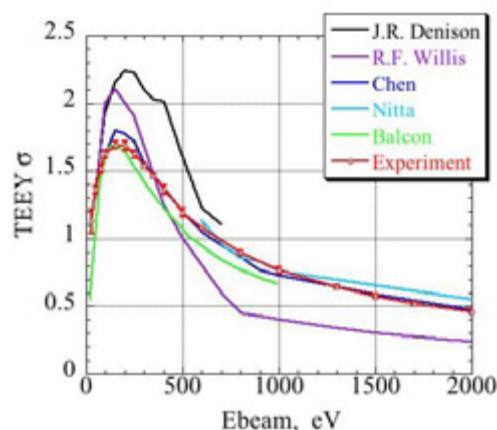


図 11 絶縁体材料の二次電子放出係数(Virgin)

図11より、すべての曲線において約200 eV付近にてピークをとる結果が得られている。入射電子エネルギーの増加に伴い上に凸となる曲線を描くのは、電子の浸透深さが深くなっていることを意味している。基本的に二次電子の放出数は、入射電子のエネルギー値に依存している。しかし、入射電子のエネルギーが大きくなるに従って、電子は物質表層深くまで潜り込む。深層に潜り込んだ電子のエネルギーは二次電子放出現象には使われず、物質中でエネルギーを吸収されてしまう。したがって、高エネルギー電子の衝突の際には、物質の電位は負に沈むことが示される。

J.R. Denison様、R.F. Willis様の曲線と我々の試験結果との比較を見ると、ピークエネルギー値は同じであっても、電子の放出数に違いが出ていることがわかる。これは帯電緩和方法の違いが起因しているのではないかと考える。我々の用いたパルス・スキャン法以外にも、帯電緩和の手段はいくつかあり、低エネルギー電子やイオンの照射、紫外線による光電効果、加熱といったものが挙げられる。

4.1.2. 高温環境試験

ベーキング用ヒーターと温度調節器により100℃を保った高温環境で、Kapton 100Hの二次電子放出係数測定を行なった。その結果を次の図12に示す。

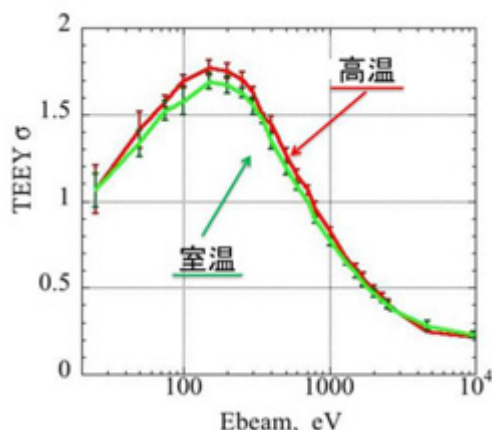


図 12 高温環境における絶縁体の二次電子放出係数

図12の結果は、室温・高温それぞれ5~10回に渡る測定の統計データもとに比較している。この結果より、高温では比較的に高い二次電子放出率を持つことがわかる。これは、加熱エネルギーが電子の動きを活発にさせ、放出率が上がったのではないかと考えている。

4.1.3. シュラウドによる冷却効果

二次電子放出係数測定試験を行う前に、熱電対によるサンプル温度の変化を記録した。その結果を図13に示す。

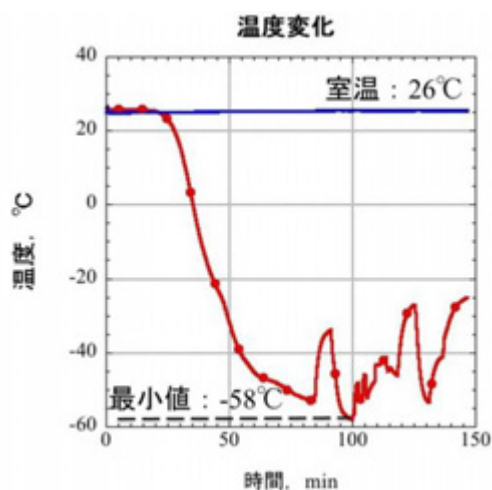


図 13 サンプルの冷却温度

使用した液体窒素は3リットル程度、冷却時間は2時間である。結果、-58℃までサンプル温度が下がることを確認した。また、サーモグラフィによる撮影を行なった為、何度か液体窒素タンクとの接続を断ち、このため一時的に温度が急上昇している。この時の上昇速度は毎分約1℃であった。再接続をした際には同様の速度で温度が低下することも確認できた。

また、5×5の測定ポイントにおける最低温度を測定した。その様子を図14に示す。

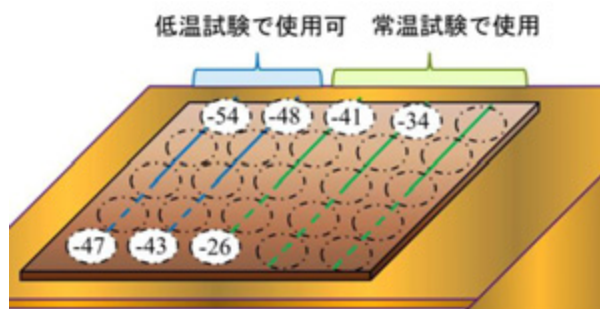


図 14 各測定点における最低温度

図14より、-50℃付近を設定温度に添えた場合、わずか2列しか測定に使用できないことが見て取れる。したがって実際の試験では、まず右反面を室温試験で使用し、続けて左半分を低温試験で使用した。この時の二次電子放出係数の測定結果を図15に示す。

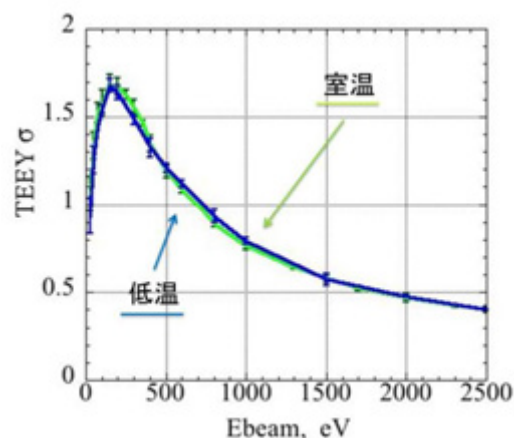


図 15 低温環境下における絶縁体の二次電子放出係数

図15より、室温と-50℃付近の低温環境との比較では、二次電子放出係数の曲線に殆ど変化が見られなかった。

4.1.4. Au(導体) の計測結果との比較

参考のため、Auについても同様の測定を行った。比較ができるよう、ポリイミドの測定結果と同時に図16.1, 16.2に示す。

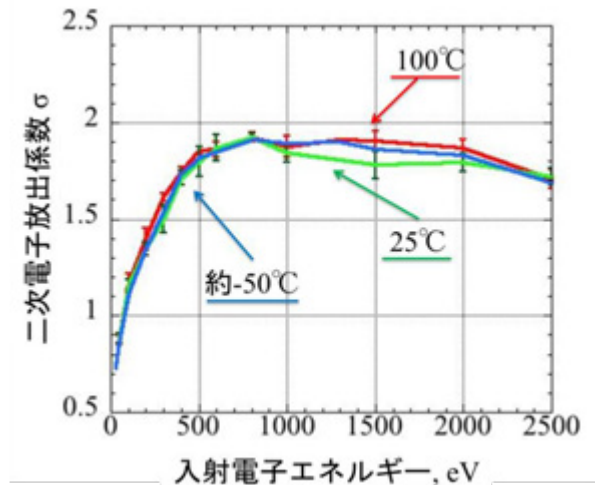


図 16.1 異なる温度環境下における導体(Au)の二次電子放出係数

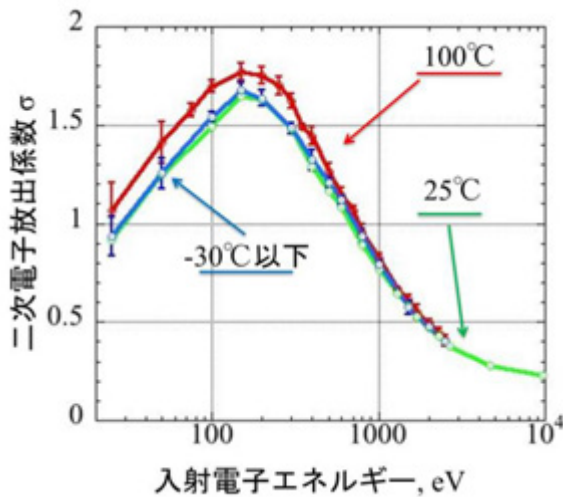


図 16.2 異なる温度環境下における絶縁体 (Kapton 100H)の二次電子放出係数

Auの結果もポリミドと同様、5~10回の測定に渡る標準偏差をエラーバーにとって比較を行っている。これより、Au(導体)では温度の違いによる二次電子放出係数の変化が殆ど現れなかった。1500eV 付近で多少の違いが見られているが、低エネルギー側ではほぼ一致していることが見て取れる。

4.2. 光電子放出係数の解析

4.2.1 電子電流計測

紫外線の照射により、UVセンサから得られた入射光子電流Ise 及びサンプルから得られた放出電子電流Isa を表3.1, 3.2に示す。使用したサンプルは、Au サンプルにカバーガラスに金蒸着したものを、絶縁体薄膜にKapton 100Hを使用した。

表 3.1 電子電流測定(Au)

	122nm	130nm	138nm	157nm
Ise[nA]	4.92	6.17	21.3	59.6

Isa[nA]	16.5	14.2	7.18	1.55
	185nm	220nm	248nm	
Ise[nA]	9	1.81	0.769	
Isa[nA]	0.113	0.045	0.022	

表 3.2 電子電流測定(Kapton 100H)

	122nm	130nm	138nm	157nm	185nm
Ise[nA]	3.08	4.19	15.45	40.9	5.87
Isa[nA]	4.33	4.53	2.63	0.452	-

185nm におけるKapton 100Hの放出電子電流Isaは、電流値が測定ノイズに紛れてしまい、計測できなかった。

4.2.2 量子効率の解析

量子効率の解析のため、任意の多項式 $Y'(\lambda)$ を以下の式(5)と仮定した。ただし、 n は波長選択フィルターの波長値を意味する。

$$\log Y'_n(\lambda) = a_{n0} + a_{n1}\lambda \quad (5)$$

式(4)より、隣り合う波長の電子電流Isa、I'saについて偏差 Δ を取り、この Δ が最小となる多項式 $Y'(\lambda)$ の係数を決定する。選択フィルターが5つの場合、4つの多項式が得られるが、それらの接点をつなぎあわせ、ひとつの量子効率曲線とする。その結果を図17.1, 17.2に示す。黒色の点線を参考とする。[5]

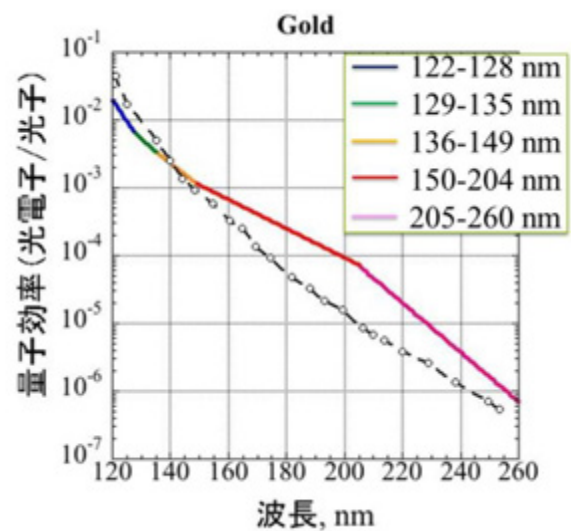


図 17.1 量子効率曲線(Au)

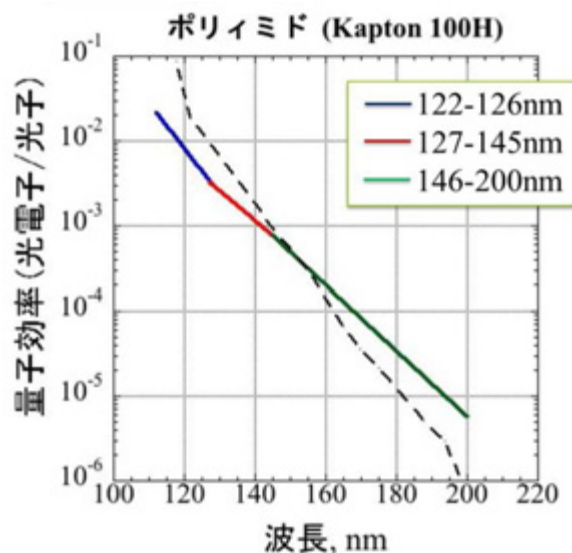


図 17.2 量子効率曲線(Kapton 100H)

以上の結果より、完全には一致していないが参考値に近い量子効率曲線の式を得ることが出来た。この結果における誤差は、試験方法の違いによるものから生じているものと考えられる。我々の試験装置が波長選択フィルターを用いて分光を行っているのに対し、参考値に用いた曲線は、分光器を使用したより細かい入射波長からの測定を行っている。

4.2.3 AM0 換算

解析による任意の多項式 $Y(\lambda)$ の導出におけるメリットは、地球軌道上における太陽光(AM0)を受けたときに放出する光電子電流密度を計算できるところにある。図18にAM0における太陽光の放射強度を示す。

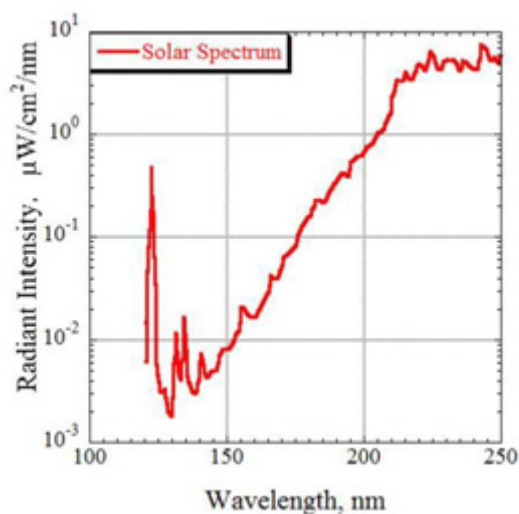


図 18 太陽光の放射強度(AM0)

また、求めたい光子電流密度は次の式(6)により与えられる。

$$j_{ph} = 1.602 \times 10^{-19} \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \cdot Y(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

$$F(\lambda) = \frac{I_r(\lambda)}{W(\lambda)} \quad (7)$$

ここで光子流量 $F(\lambda)$ は式(7)より求められる。よって式(6)から得られた光電子電流密度は

となる。

5. 結論と今後の予定

二次電子計測において、高温・室温・低温環境下における絶縁体の二次電子放出係数の測定を行った。室温を25℃とし、高温100℃、低温-50℃の温度環境を構築した。温度の値は熱電対によって計測されたものである。常温時の結果との比較より、高温時は放出率が上昇する傾向が見られ、ピーク時の上昇率は4.67%であった。しかし、低温時では室温の値から殆ど変化がなかった。

また、開閉速度10msパルス状の紫外線照射で、光電効果によるサンプルの放出電子電流の測定を行なった。得られた実測値より、計算用解析ツールMatlabを用いて光電子放出係数の解析を行ない、AM0換算した光電子電流を求めた。結果、地球軌道上で太陽光を受けた時に生じる光電子電流の密度はと求まった。

参考文献

- 1) Hainds, F. D. and Keyes, J. W.: Shock Interference in Hypersonic Flows, *AIAA J.*, **10** (1972), pp.1441-1447.
- 2) Batchelor, G. K.: *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, London, 1967, pp.1-10.
- 3) JSASS, T.: Information for Contributors to Transactions of the JSASS, *T. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, **43** (2000), pp. xxx-xxx.
- 4) Aero, A and Space, B.: How to Refer Proceedings, Proceedings of the Second International Symposium on Formats, 2010, pp. 295-367.
- 5) Kazufumi Nomura et al, Measurement system of the development of the photoelectronemission on the spacecraft materials, Spacecraft Charging Technology Conference, 2012.