

# 各種絶縁材料の光電子放出電流分布の測定

伊藤 広和 , 生井 諭司 , 山納 康 , 小林 信一 (埼玉大学)  
仁田 工美 (JAXA)

Measurement of distribution of photoemission current for some kinds of Insulators

Hirokazu Ito , Satoshi Namai , Yasushi Yamano , Shinichi Kobayashi (Saitama University) , Kumi Nitta (JAXA)

Various materials such as the thermal control film ,Paint-type coating materials, some kinds of insulators are used for artificial satellites. This report describes results of distributions of the photoemission current for them excited by ultraviolet-light.

The used film samples were two kinds of germanium coating materials. The painting samples were two kinds of white paint materials (inorganic conductive) which are used for the surface of antenna part in artificial satellite. Insulator samples are four materials (PTFE, Alumina, laminate board and soda glass). In addition, two composite samples which are composed of the metal and the insulator are prepared for the measurement of photoemission. The one is an insulator chip pasted on the metal board and the other is a metal chip pasted on an insulator board. The following measurement results were obtained. The photoemission current value of the Au sample around the insulator become smaller than that of metal samples. The distribution of photoemission current of the insulator on the metal influence around the insulator as well as other insulator samples. The photoemission current value of the metal chip on the insulator board is remarkably small as well as that of insulator material.

キーワード：放出型電子顕微鏡、光電子放出、電子電流

Keywords: Electron emission microscope, Photoelectron emission, electron current

## 1. まえがき

人工衛星は太陽からの電磁波や高エネルギー粒子が入射することによりその表面にある絶縁体で帯電・放電が生じ、材料が劣化したり機器の故障を引き起こしたりしていることが報告されている。帯電・放電の抑制には、宇宙環境下での衛星の電位解析を行って、放電の発生を予測したり、その対策を取る事がとられる。このような電位解析においては様々な材料における光電子放出特性を調べる必要がある。本報告では以前から測定してきた衛星用表面の熱制御材料として用いられる導電性・非導電性フィルム、白色系塗料に加え、様々な絶縁体試料について、紫外線照射時の光電子放出電流値の分布を測定した結果について述べる。

## 2. 実験装置および実験方法

図1に、今回使用した放出型電子顕微鏡が装備された実験装置の概略図を示す。実験用真空容器内の圧力はイオンポンプにより常に  $10^{-6}$ Pa 台に維持されている。試料台は、真空容器外部に設けられたパルスモータにより放出型電子顕微鏡の対物レンズ前面を走査することができるようになっており、試料表面上の電子放出点の拡大像を観測しながら電子放出点の分布を調べることができる。また、蛍光板を動作させる高電圧電源と接地の間には電流計が接続され

ており、蛍光板に入射する電子電流を測定することができる。この電子電流を測定しながら、試料を走査することにより、試料表面の電子放出特性の分布を調べることが可能である。

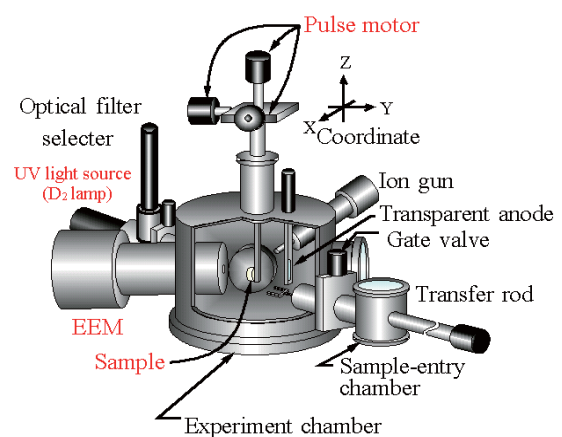


図1 実験装置概略図

図2に、放出型電子顕微鏡の概略図を示す。この顕微鏡は、文献<sup>[1],[2]</sup>に基づき当研究室で設計し製作したものである。図に示されるように、本顕微鏡は三つのユニポテンシャルレンズ、MCP、および蛍光板からなる。試料の電子放出点

は、試料と対物レンズの孔とで構成される界浸レンズにより対物レンズ内に結像し、その像を後段のレンズで拡大し、MCP上に結像させる。MCPで電子増倍の後蛍光板に投影された像を真空容器外部からビデオカメラにより観測する。

真空紫外光源は 浜松ホトニクス L1835 出力 150W を用いており、波長 115 - 400nm の UV 域に連続スペクトルを有している。図3に光源のスペクトル強度を示す。真空紫外光は、光源から放射される光の発散を軽減するために LiF 製のレンズによりビーム化した後、顕微鏡の対物レンズに設けられた孔を通して、試料に照射される。真空紫外光源には、MgF<sub>2</sub>の窓が用いられており、また、光路に LiF のレンズが使用されていることから、照射光のエネルギーの最大値は約 10.8eV である。この光路中には光学フィルターも設けられており、照射（波長）エネルギーを選択することができる。今回の実験ではフィルターを用いていないので、10.8eV 以下のスペクトルの光が試料に入射している。

今回使用した試料を表1に示す。これらの試料はそれぞれ図4に示すように金が試料表面 6mm 角の部分を除き蒸着されている。金を蒸着したのは、金を参照電極として用いることにより、試料と対物レンズの平行度を調節したり、金の光電子放出量の相対値を利用するためである。これらの試料は背後電極上にカーボンテープと導電性の接着剤を用いて固定し使用している。

次に、実験の手順について示す。測定する場所は、図5のように試料中央の 6mm 角の部分である。放出型電子顕微鏡の三つのユニポテンシャルレンズには試料表面を約 150 倍に拡大することができるような電圧がそれぞれ印加されており、蛍光板上には試料表面の直径 0.2mm の円の像が投影されている。試料を 0.2mm ステップで x-z 方向にラスタースキャンしながら蛍光板に接続されている微小電流計によってそれぞれのサンプルで電流値の測定を行い、金の平均電流値を 1 としたときの相対的な比の値を実験結果として用いる。

さらに、図6に示されるような金属・絶縁体の複合体についても調査した。一つのサンプルは金属上に絶縁体が付着したものとして Al に 3mm 四方をマスキングし、金蒸着を行い、さらにその中心約 0.5mm 四方にカプトンテープに貼り付けたものと、絶縁体上に金属が付着したものとして Cu を基板とし、カプトンを 20mm 四方に貼り付け、さらに、中心に穴を開けた 3mm 角のカプトンテープをマスキングし、金蒸着を行ったものの 2 種類について同様に分布の測定を行った。

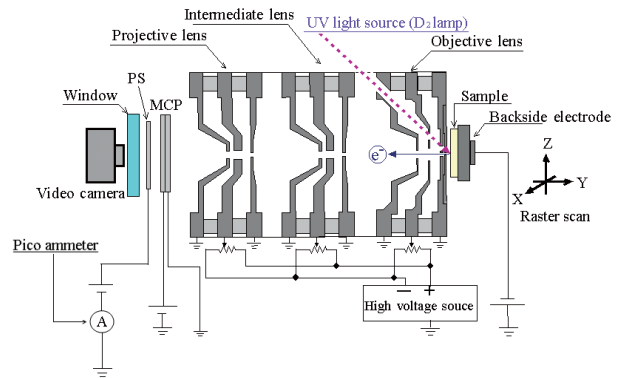


図2 放出型電子顕微鏡概略図

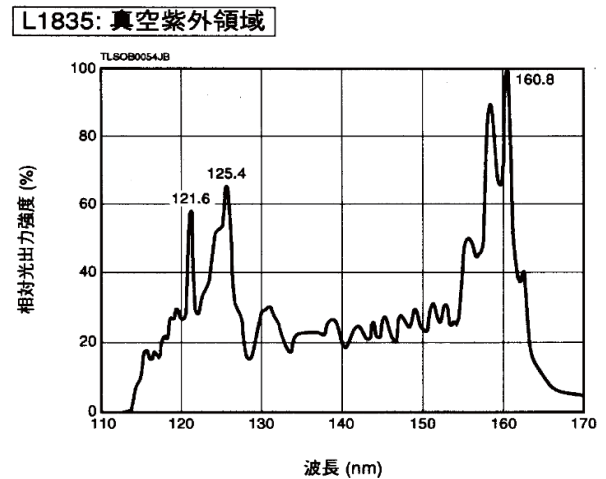


図3 放射スペクトル分布

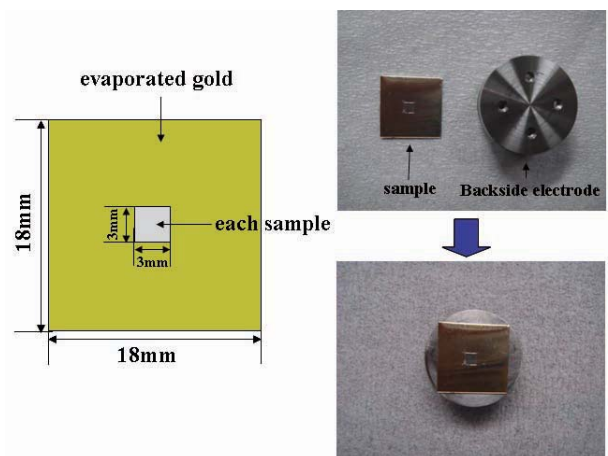


図4 試料の概略図

表 1 実験で使用した試料

名称		導電性	体積抵抗率[Ωm]	特徴
熱制御材 (白色塗料)	White Paint A	導電	$\approx 2 \times 10^6^*$	無機系
	White Paint B		$\approx 10^6^*$	
熱制御フィルム	Film A	導電	0.46(Ge)*	ポリイミドフィルム上にコーティング材を塗布
	Film B			
金属・半導体	シリコン(A)	導電	$2.0 \times 10^{-4}^*$	n型半導体
	シリコン(B)		10	n型半導体
	Al		$2.5 \times 10^{-8}^*$	-
	Cu		$1.6 \times 10^{-8}^*$	
	Fe		$8.7 \times 10^{-8}^*$	
	Ti		$4.2 \times 10^{-8}^*$	
	Ni		$6.6 \times 10^{-8}^*$	
	Ag		$1.5 \times 10^{-8}^*$	
	Au		$2.0 \times 10^{-8}^*$	
絶縁体	Sodaglass	非導電	$\approx 10^{11}$	-
	基盤材料 A		$\approx 5 \times 10^{14}$	フルオロポリマー複合体
	PTFE		$> 4 \times 10^{15}$	フッ素樹脂
	Almina		$\approx 10^{14}$	純度 99.8%

金属便覧および製品カタログ値参照、  
それ以外の材料の抵抗率は実測値<sup>[3],[4]</sup>

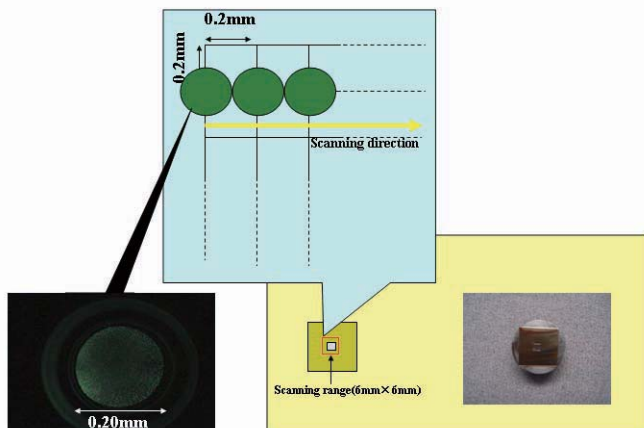


図 5 測定範囲

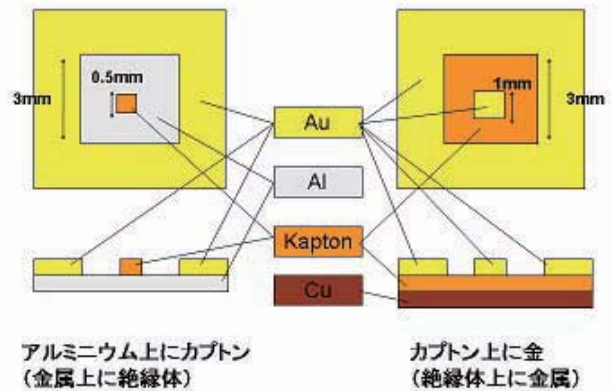


図 6 複合体試料の形状

### 3. 光電子電流分布特性

各試料の光電子電流の分布を表したものが図7である。横軸が x 方向、縦軸が z 方向である。各セルの色により電流値の大小を表している。それぞれの試料は、中央の 3mm 角の部分を除き、表面に金が蒸着されているため、中央の 1.5mm の部分が、それぞれの試料からの光電子放出電流を測定した部分であり、周りの部分は、金からの光電子放出電流を測定した部分となる。また、測定した電流値を金を 1 としての相対的な比の値、標準偏差を試料ごとにまとめたものを表 2 に示す。

図 7 を見ると、どの試料においても、共に同一の材料を測定しているにもかかわらず光電子放出電流値は場所により違いがあるということが確認される。熱制御フィルムにおいては、ポリイミド上にゲルマニウムがコーティングされているため、ほぼ同様の結果が見られた。また、白色塗料においては、金属・半導体や絶縁体試料と比べ、金との相対的な電流値が 0.3 程度と中間的な値を取った。

絶縁体においてはどの試料も電流値が金に比べ著しく低く実際の領域よりも試料の範囲が大きいように測定されているが、これは紫外線照射により絶縁体が帯電し、それにより周囲の電子が偏向を受け図 2 の測定系に電子が入らなかったためと考えられる。

また、絶縁体試料について、当研究室の実験結果<sup>[5]</sup>から紫外線照射時に絶縁体表面での帯電とその緩和が光電子の放出に影響を及ぼすことが報告されているため、光電子電流値も帯電による影響があるのではないかと考えられる。

図 8 に体積抵抗率と各種試料の光電子電流値を両対数グラフにプロットしたものを示す。体積抵抗率と光電子電流値の大小にはある関係が見られる。さらに様々な試料の測定を行うことによって未知の試料の光電子電流値の大小関係を評価する事が可能ではないかと考えられる。

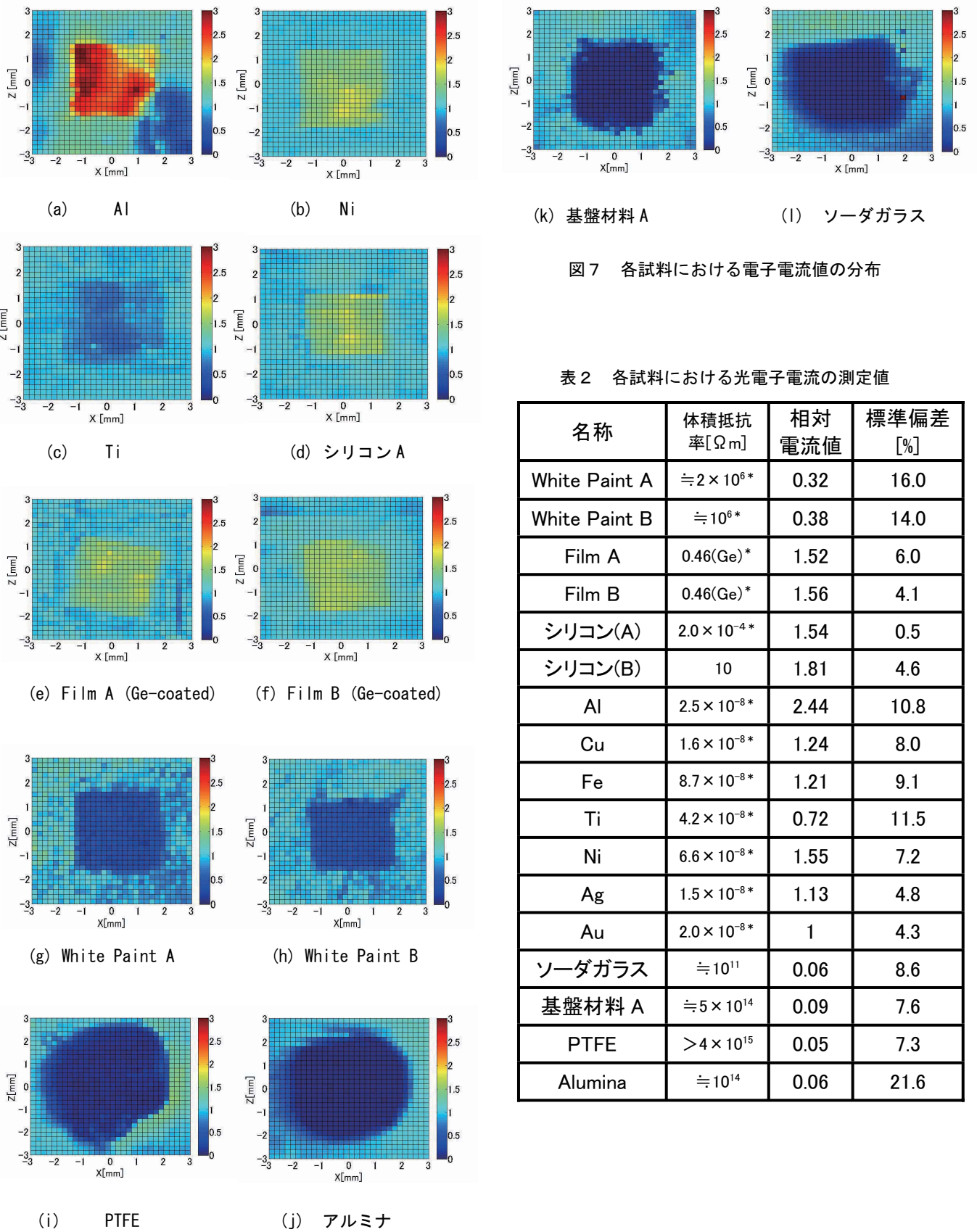
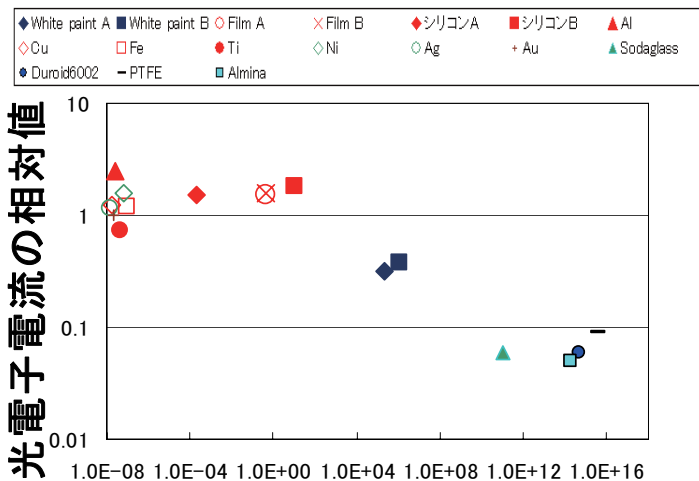


図7 各試料における電子電流値の分布

表2 各試料における光電子電流の測定値

名称	体積抵抗率[Ωm]	相対電流値	標準偏差[%]
White Paint A	$\approx 2 \times 10^6$ *	0.32	16.0
White Paint B	$\approx 10^6$ *	0.38	14.0
Film A	0.46(Ge)*	1.52	6.0
Film B	0.46(Ge)*	1.56	4.1
シリコン(A)	$2.0 \times 10^{-4}$ *	1.54	0.5
シリコン(B)	10	1.81	4.6
Al	$2.5 \times 10^{-8}$ *	2.44	10.8
Cu	$1.6 \times 10^{-8}$ *	1.24	8.0
Fe	$8.7 \times 10^{-8}$ *	1.21	9.1
Ti	$4.2 \times 10^{-8}$ *	0.72	11.5
Ni	$6.6 \times 10^{-8}$ *	1.55	7.2
Ag	$1.5 \times 10^{-8}$ *	1.13	4.8
Au	$2.0 \times 10^{-8}$ *	1	4.3
ソーダガラス	$\approx 10^{11}$	0.06	8.6
基盤材料 A	$\approx 5 \times 10^{14}$	0.09	7.6
PTFE	$> 4 \times 10^{15}$	0.05	7.3
Alumina	$\approx 10^{14}$	0.06	21.6



### 体積抵抗率[Ωm]

図8 体積抵抗率と光電子電流値との関係

#### 4. 金属、絶縁体の複合体における分布測定

図9に金属上に絶縁体としてカプトンテープを貼り付けたものの実験結果を示す。比較しやすいように、カプトンを貼り付けていない結果も同時に示してある。図9を見ると、中心のカプトンのように光電子電流値が著しく低い範囲が約1.5mm程の円形に見えるが、実際のカプトンは約0.5mm程度であり、1.0mmほど大きく見えるという結果を得た。これは、先ほどの各種絶縁体の結果と同様に、絶縁体の帯電によって測定系に電子が入り込まず、周囲に影響を及ぼしたということが考えられる。

図10に絶縁体上に金属を付けたものの実験結果を示す。こちらも同様に中央に金蒸着をさせていない試料の結果を並列に示す。図10からわかるように金蒸着させていない試料と金蒸着を施した試料の測定結果に変化がない。これは、絶縁体上に金蒸着を施したため、電気的に絶縁され、結果として表面の金においても帯電が生じたためと考えられる。

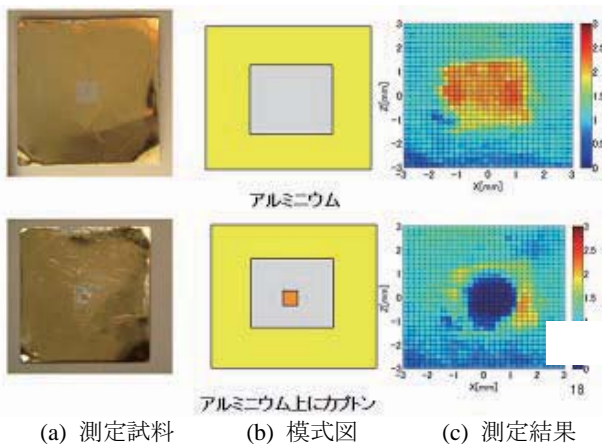


図9.金属試料上に絶縁体を付着させた試料の測定結果

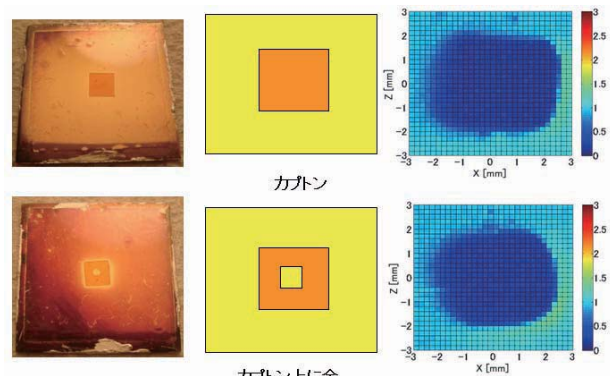


図10.絶縁体に金属を付着させた試料の測定結果

#### 5. まとめ

- 体積抵抗率と光電子電流値の間にはある相関関係があると考えられ、今後更に様々な試料について測定を行う必要がある。
- 金属上に絶縁体が付着した試料では、絶縁体からの光電子電流は周囲の金属よりも、はるかに小さい電流しか観測されなかった。さらに絶縁体の帯電の影響により周辺の金属から励起された電子が偏向を受け、測定系に電子が入らず、結果的に絶縁体の範囲でない周辺部の光電子電流値が減少したと考えられる。
- 絶縁体に金属が付着した試料では、金属が電気的に絶縁されているため、金属片でも帯電が生じたため、結果として金属からの光電子電流値が周囲の絶縁体と同様の値を示した。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたりまして、独立行政法人情報通信研究機構から白色塗料の提供を受けましたことを、深く感謝いたします。

#### 文献

[1]A. D. Archer, "Spectroscopic Studies of Field-Induce Electron Emission from Isolated Microstructures", PhD Thesis, Aston University, 1992  
 [2]Rod V Latham, "High Voltage Vacuum Insulation ; Basic Concepts and Technological Practice", pp.82-84, Academic Press, London, 1995  
 [3] 日本金属学会:「金属便覧」,丸善,pp.2-5 (1960)  
 [4] 高橋, 山納, 仁田, 小林:「GPM DPR プロジェクトで使用される熱制御材料の表面抵抗率・体積抵抗率の測定」,第3回宇宙環境シンポジウム講演論文集,pp.147-150 (2006)  
 [5] 小林, Suharyanto, 山納, 笠羽, 仁田:「光電子放出顕微鏡による電子放出様相の観測」,第2回宇宙環境シンポジウム講演論文集,pp.129-133 (2005)