

限定なし



帯電・放電試験データ集

平成 28年 5 月 20 日 制定

宇宙航空研究開発機構

免責条項

ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXA は、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXA は、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer

The information contained herein is for general informational purposes only. JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

目次

1. 概要.....	1
2. 関連文書.....	1
2.1. 適用文書.....	1
2.2. 参考文書.....	1
3. 用語の定義及び略語・記号.....	1
3.1. 用語の定義.....	1
3.2. 略語・記号.....	1
4. 試験.....	2
4.1. 過渡的持続放電 TSA の継続時間.....	2
4.2. 太陽電池セル間距離と放電に関する試験結果.....	4
4.2.1. 試験目的.....	4
4.2.2. 試験方法.....	4
4.2.3. 試験結果.....	9
4.2.4. まとめ.....	13
4.3. 二次電子放出係数の測定.....	14
4.3.1. 二次電子放出係数の基礎理論.....	14
4.3.2. 【手法 A】パルススキャン測定法 1.....	18
4.3.3. 【手法 B】パルススキャン測定法 2.....	25
4.3.4. 【手法 C】連続電子ビーム照射帯電計測法.....	44
4.4. 光電子放出・量子効率の計測.....	52
4.4.1. 光電子放出の基礎理論.....	52
4.4.2. 【手法 A】パルス照射測定法.....	55
4.4.3. 【手法 B】波長選択フィルタ測定法.....	77
4.5. 光電流密度.....	82
4.5.1. AM0 太陽光スペクトル.....	82
4.5.2. 光電流密度の計算.....	82
4.6. 体積抵抗率（導電率）・比誘電率の測定.....	83
4.6.1. 【手法 A】電荷蓄積法.....	83
4.6.2. 【手法 B】電子ビーム照射帯電電位減衰法.....	89
4.6.3. 【手法 C】帯電測定法.....	92
4.7. 帯電解析に対する材料パラメータの感度解析.....	93
4.7.1. 解析条件.....	93
4.7.2. 材料パラメータ設定.....	95
4.7.3. 解析結果.....	97

5. 帯電物性パラメータ計測結果一覧 99

1. 概要

帯電・放電試験データ集は、宇宙機設計標準 帯電放電設計標準 初版において付録-IIIとして「太陽電池セル間距離と放電に関する試験結果」及び付録-Iとして「定量的評価」に記録されていた JAXA の試験データを、帯電・放電設計標準の公開版を作成するにあたり第4階層、すなわち本書にそのまま移行したものである。

2. 関連文書

2.1. 適用文書

JERG-2-211 A 帯電・放電設計標準 A版

2.2. 参考文献

N/A

3. 用語の定義及び略語・記号

3.1. 用語の定義

・EOL

本データ集では、50keV 電子線による劣化試料を EOL として扱っている。宇宙機が GEO 上で1年間に受ける単位面積当たりの 50keV 電子量である 1×10^{15} 個を基準として電子線照射し、それを施した試料を EOL として表記している。上記の EOL 条件は、試験装置の照射能力を考慮した上で決定した。

3.2. 略語・記号

N/A

4. 試験

4.1. 過渡的持続放電 TSA の継続時間

静電気放電である一次アークに対して、放電電流に太陽電池パネル回路からの電流供給があるものを、二次放電と総称する。二次放電の内、一次放電が続いている間だけ短絡電流が流れる場合は非持続放電と呼ばれる。一次放電が終わった後でも、太陽電池パネル回路が電流を供給し続けるが、それでもある時点で自発的に止む場合を過渡的持続放電 (Temporary Sustained Arc、TSA) と呼ぶ。

過渡的持続放電 TSA の継続時間は供給される電流量に強く依存する。図 4.1-1 にアーク電流に対する TSA の継続時間をプロットしたものを示す。このデータは電子ビーム照射による逆電位勾配状態にて、各種の太陽電池と列間の距離及び列間の電圧に対して、列間二次放電試験を行った結果を示したものである。放電継続時間は、電流値に指数関数的に依存しているのがわかる。ブロッキングダイオード等によって並列回路を分離してアークに供給される電流を制限することで、TSA の継続時間を抑えることができる。逆に電流値が高いと、TSA の継続時間が 1 ミリ秒を超えた辺りから、PSA の危険が非常に高まる。

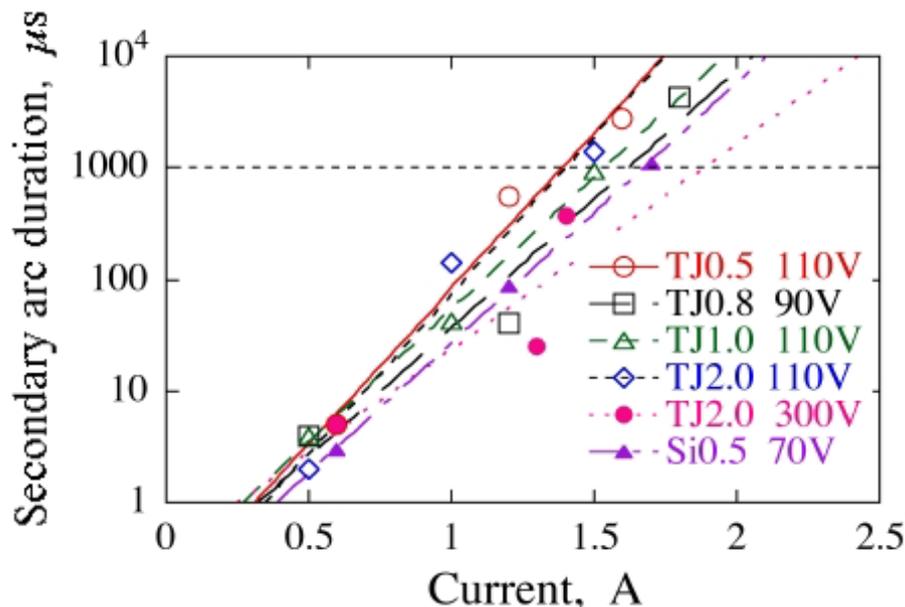


図 4.1-1 アーク電流に対する TSA の継続時間の平均値。TJ0.5 110V は Triple Junction セルで列間距離が 0.5mm、列間電圧が 110V を意味する。ここに示したデータは、セル間にグラウティング処理を施していない供試体の試験結果である。

TSA の発生を抑えるには、隣接セル間に絶縁材を充填するグラウティング処理が有効である。表 4.1-1 は 0.5mm の距離で隣接する Triple Junction セルでの二次放電試験結果である。表中の () 内の数字は過渡的持続放電(TSA)の継続時間の平均値である。各ケースで 10 回程度の過渡的持続放電を発生させている。グラウティングがあることにより、TSA の発生が抑えられると共に、セル間で一次放電が発生すること自体を抑制することができるので、二重の抑制効果をもつ。しかしなが

ら、グラウティングについては、熱サイクルや紫外線・放射線による軌道上での長期間劣化の影響を評価が、未だなされていないことに注意すべきである。

表 4.1-1 セル間にグラウティング処理を施すことによる TSA の抑制効果の例

			列間電流(A)			
			0.5	1.0	1.5	2.0
列 間 電 圧 (V)	グラウティング無 し	90	TSA (54 μ s)	TSA(231 μ s)	PSA	
		110	TSA (5 μ s)	TSA(552 μ s)	TSA(2750 μ s)	PSA
	グラウティング有 り	100	PA only			
		200	TSA (3 μ s)	TSA (128 μ s)		
		300	TSA (1547 μ s)	TSA (1427 μ s)		

4.2. 太陽電池セル間距離と放電に関する試験結果

4.2.1. 試験目的

本試験では主に三重接合セル (TJ セル) の列間で発生する持続放電の閾値を測定することを目的としている。なお、本試験は九州工業大学宇宙環境技術研究センターにて実施された。

4.2.2. 試験方法

試験には図 4.2.2-1 の太陽電池クーポンを用いた。クーポンは 24 枚のセルからなり 2 枚直列に接続されたセルが 12 組ある。試験では隣り合った 2 直列、合計 4 枚のセルを用いて並列セル間のギャップで放電を発生させる。1 枚のクーポンには 9 箇所ギャップが存在し、各々異なる列間電圧および電流で試験をすることになる。試験クーポンは異なるギャップ長を持つように製作されており、ギャップ長は 0.5mm から 2mm まで用意されている。

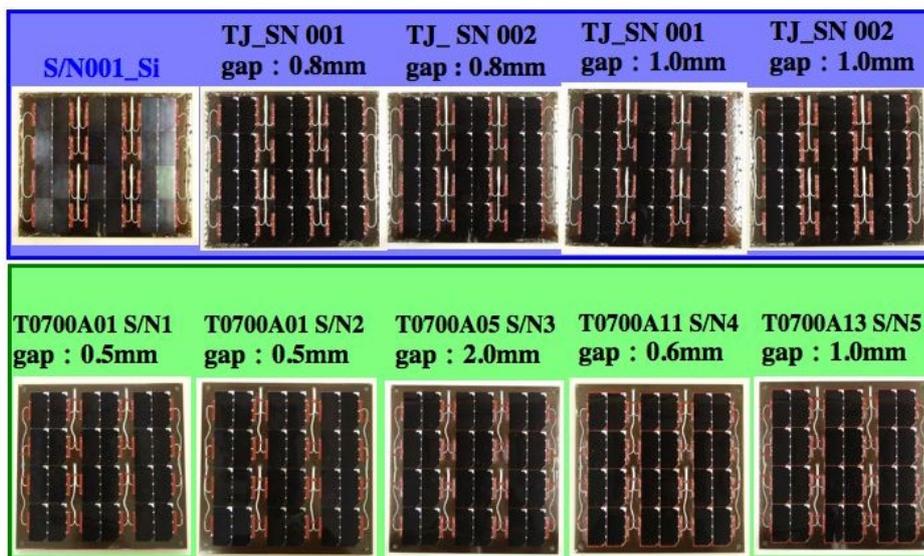


図 4.2.2-1 帯電・放電試験用クーポン

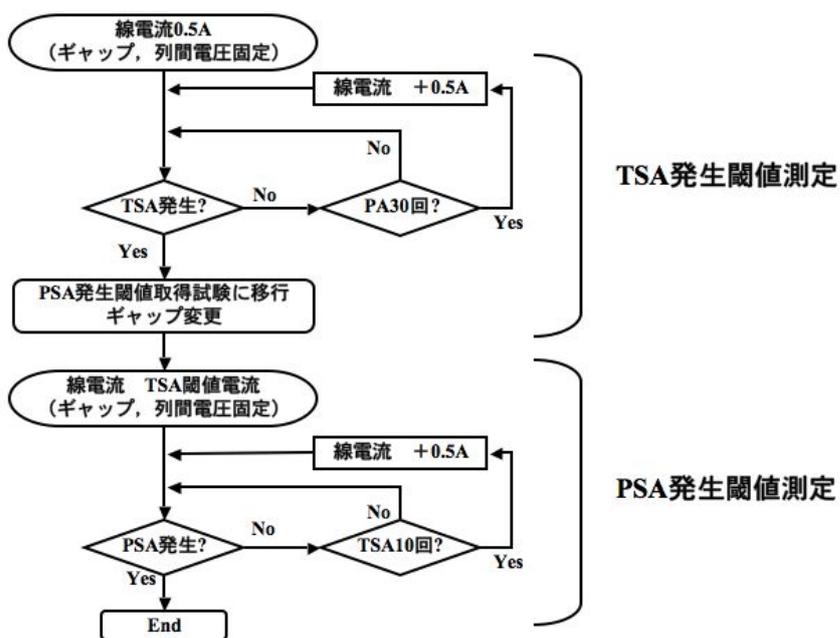


図 4.2.2-2 試験手順

S/N001 Si ではシリコンセルが使用されているが、それ以外は TJ セルである。また T0700A11 S/N4 と T0700A13 S/N5 では列間は RTV シリコンゴム (以下 RTV) で埋められているが、それ以外のクーポンの列間には RTV は塗布されていない。

試験は図 4.2.2-2 に示す手順にそって行われた。試験は過渡的持続放電 (TSA) 閾値測定と恒久的持続放電 (PSA) からなる。

TSA 発生閾値測定試験

TSA 発生閾値測定試験では各ギャップで列間電圧を固定し線電流を 0.5A から試験を開始する。TSA が発生した場合にはギャップを変更して PSA 発生閾値試験に移行するが、PA が 30 回発生しても放電が発生しない場合には線電流を表 4.2.2-1 の試験条件に従って線電流を上昇させる。ただし TSA が発生しづらい列間電圧 30V では線電流を 4A まで増加させた。また列間電圧 200V、300V はギャップ 2mm および RTV グラウティングクーポンでのみ試験を実施した。

TSA が発生しない場合には PA の規模を大きくして再度閾値試験を行った。

PSA 発生閾値測定試験

PSA 発生閾値測定ではまず TSA 閾値試験で TSA が発生した線電流値から開始し、10 回 TSA が発生しても PSA が発生しない場合には電流値を増加させる。PSA が発生した場合には試験はそこで終了する。

試験回路

試験には図 4.2.2-3 に示した回路を用いた。通常は外部コンデンサ C_{ext} として 5nF を使用し、インダクタンス L_{ext} および抵抗 R_{ext} は接続していないが、TSA が発生しなかった場合には C_{ext} 、 L_{ext} 、 R_{ext} をそれぞれ 880nF、10mH、200 Ω としフラッシュオーバ電流を模擬した PA を発生させ TSA の有無を調べた。このフラッシュオーバ模擬電流は 8x2.4m のパドル中心で 800V の乖離電圧が生じた時に発生し 10km/s の速度で進展した時の波形を考慮している。

$C_1 \sim C_3$ は 1 直列のセル内部容量とセル基板間容量を考慮したものであり、表 4.2.2-2 の値を用いた。TJ セルと Si セルでは値が異なり、列間電圧によっても異なっている。

定電流電源には宇宙環境技術研究センターで開発した定電流ダイオード電源を用いた。列間電圧の設定は線電流を固定し可変抵抗 R_L を調整することによって行った。4 枚の試験セルのうち電位の高い 2 枚のセルを Hot、低い方を Return (RTN) と呼び、Hot 側の電流を Hot-in、Hot-out で計測することで二次放電かどうかを判定している。

Hot 側で PA が発生した時に R_L に電流が流れサージ電圧が発生することを防ぐため、バスキャパシタンスを模擬した 10mF の C_{BC} を挿入している。

試験中、列間電圧は接地点とは電氣的に絶縁されたバッテリー駆動式のオシロスコープにて計測された。

測定系

図 4.2.2-4 に測定系を示す。試験は直径 0.6m、長さ 0.9 m または直径 1.0 m、長さ 1.2 m の 2 台の真空容器を用いて行なった。クーポンは真空容器内にセル面を上にして配置されている。試験時の真空容器内圧力はいずれの真空容器においても 1×10^{-3} Pa 程度である。クーポンは真空容器内ではアクリル板もしくはガラス板上に設置されており、真空容器とは電氣的に絶縁されている。クーポンの真上には電子ビーム銃が取り付けられており、試験中は電子ビームの中心が試験ギャップに照射されるようにクーポンを設置している (図 4.2.2-5)。クーポンは定電圧電源 V_{bias} を用いて負にバイアスされる。試験中の放電による発光画像は CCD カメラで撮影され、デジタル動画ファイル

として PC に記録される。また放電電流電圧波形は高速繰り返しデータ取得が可能なオシロスコープによって記録されている。

真空容器から取り出した際に顕微鏡写真を撮影する他に、設定線電流ごとに試験ギャップを長距離顕微鏡により撮影した。

これらの試験では大気開放状態から真空チャンバ中にクーポンを設置し真空にした後には $70 \pm 1^\circ\text{C}$ の温度で 2 時間のベーキングを行っている。

表 4.2.2-1 試験で用いる列間電圧および線電流

		I _{st} (A)			
		0.5	1.0	1.5	2.0
V _{st} (V)	30	○	○	○	○
	50	○	○	○	○
	70	○	○	○	○
	90	○	○	○	○
	110	○	○	○	○
	200	○	○		
	300	○	○		

表 4.2.2-2 回路コンデンサ容量

V _{st} (V)	TJ cell		Si cell	
	C ₁ 、 C ₃ [nF]	C ₂ [nF]	C ₁ 、 C ₃ [nF]	C ₂ [nF]
30~110	27	26	23	420
200	18	100		
300	16	370		

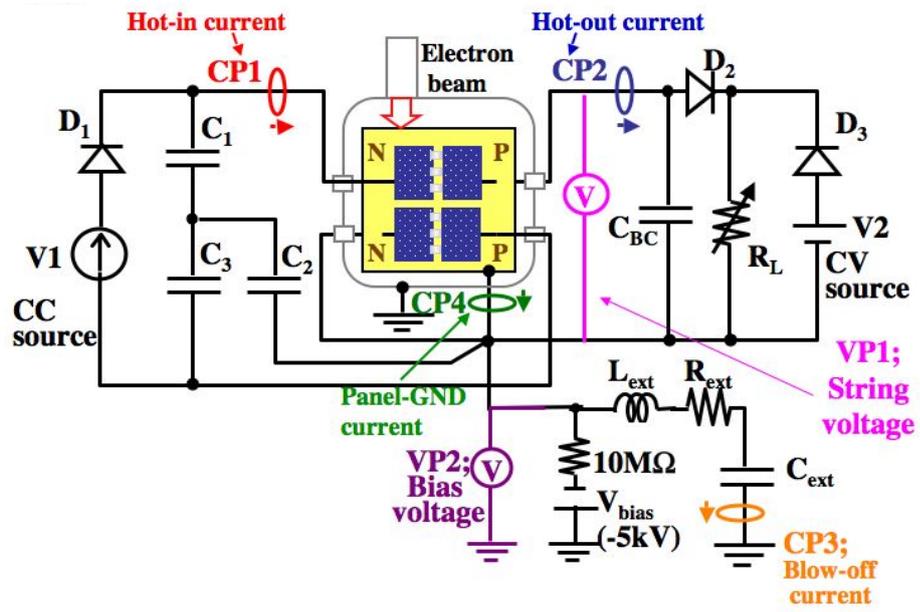


図 4.2.2-3 試験回路

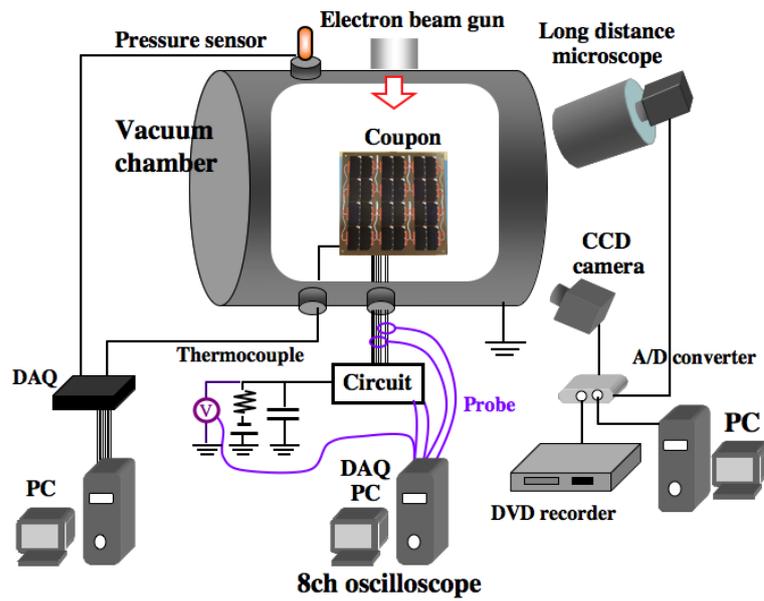


図 4.2.2-4 測定系

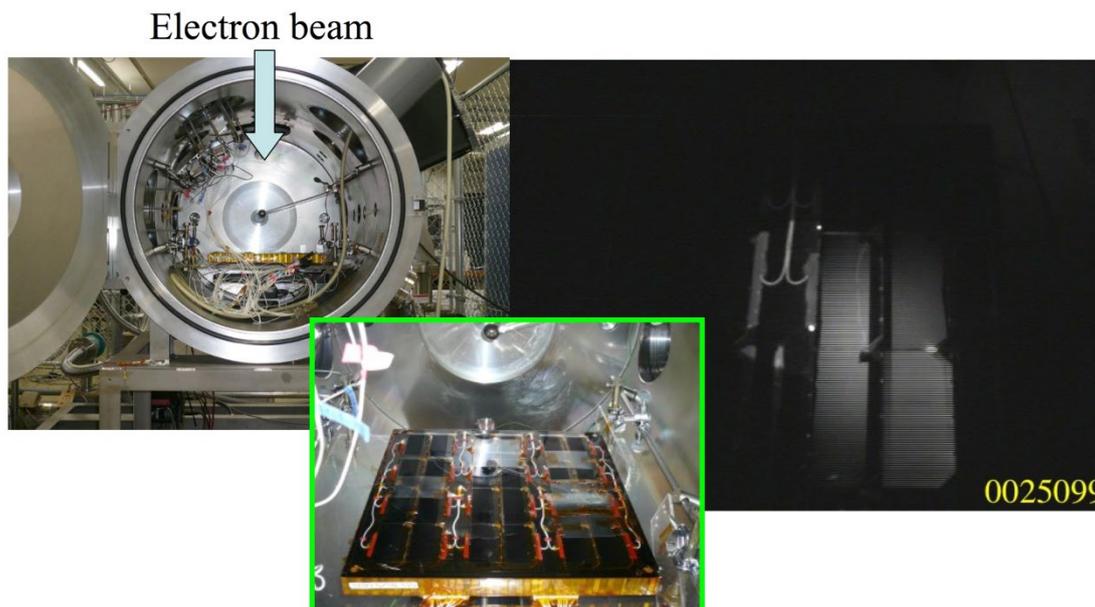


図 4.2.2-5 試験セットアップ (左図:真空チャンバにクーポンを設置した様子、中図:クーポン、右図:電子ビーム照射中のクーポン)

4.2.3. 試験結果

表 4.2.3-1～表 4.2.3-6 に各クーポンの二次放電閾値試験結果を示す。表は発生した二次放電の種類によって色分けされており、TSA、PSA が発生した場合には表中にその継続時間の平均が示してある。ただし PSA が一回目の二次放電で発生した場合には継続時間は記していない。また、括弧内の数字は二次放電発生中に流れた線電流を示している。

表 4.2.3-1 TJ0.5mm 二次放電閾値試験結果

V _{st} V	I _{st} A			
	0.5	1.0	1.5	2.0
30	No secondary arc up to 4A			
50	7μs (0.7A)	28μs	4534μs (1.7A)	
70	4μs (0.6A)	250μs (1.2A)	7747μs (1.8A)	
90	54μs (0.5A)	231μs (1.2A)		
110	5μs (0.6A)	552μs (1.2A)	2750μs (1.6A)	

PA

NSA

TSA

PSA

表 4.2.3-2 TJO.8mm 二次放電閾值試驗結果

V _{st} , V	I _{st} , A			
	0.5	1.0	1.5	2.0
30	No secondary arc up to 4A			
50		47μs	4086μs (1.7A)	
70	7μs (0.7A)	209μs (1.2A)		
90	4μs	41μs (1.2A)	4384μs (1.8A)	
110	3μs (0.6A)	179μs (1.2A)	7408μs (1.8A)	

PA
 NSA
 TSA
 PSA

表 4.2.3-3 TJ1.0mm 二次放電閾值試驗結果

V _{st} , V	I _{st} , A			
	0.5	1.0	1.5	2.0
30	No secondary arc up to 4A			
50		12μs	1126μs	4433μs
70	3μs	25μs	1225μs	
90	3μs	7μs (0.9A)	415μs (1.3A)	
110	4μs	42μs	943μs	

PA
 NSA
 TSA
 PSA

表 4.2.3-4 TJ2.0mm 二次放電閾值試驗結果

V _{st} , V	I _{st} , A			
	0.5	1.0	1.5	2.0
50	No secondary arc up to 4A			
70	7μs			
110	2μs	140μs	1400μs	3900μs
200	3μs (0.7A)	110μs (1.1A)	60μs (1.3A)	
300	5μs (0.6A)	25μs (1.3A)	370μs (1.4A)	

PA
NSA
TSA
PSA

表 4.2.3-5 TJ0.6mm RTV 二次放電閾值試驗結果

V _{st} , V	I _{st} , A			
	0.5	1.0	1.5	2.0
100				
130				
150				
200	3 μs	1547 μs		
240				> 18 ms
300	128 μs	1427 μs		

PA
NSA
TSA
PSA

表 4.2.3-6 Si0.5mm 二次放電閾値試験結果

V _{st} , V	I _{st} , A			
	0.5	1.0	1.5	2.0
30				
50	PA	PA	PA	PA
70	3μs (0.6A)	88μs (1.2A)	1098μs (1.7A)	
90				
110	4μs (0.6A)	233μs (1.2A)	727μs (1.7A)	

PA

NSA

TSA

PSA

図 4.2.3-1 に二次放電継続時間と電流の関係を示した。継続時間はそれぞれのクーポンの平均値を示しており、電圧値は列間電圧を示している。図から分かるように二次放電継続時間は電流値に依存している。約 1ms の継続時間に到達する電流値を見ると 1A~2A の間に位置し、それぞれのクーポンでの PSA 閾値結果と良く一致している。この結果から 1ms を超えるような二次放電が発生する電流値では PSA の危険性があると言える。

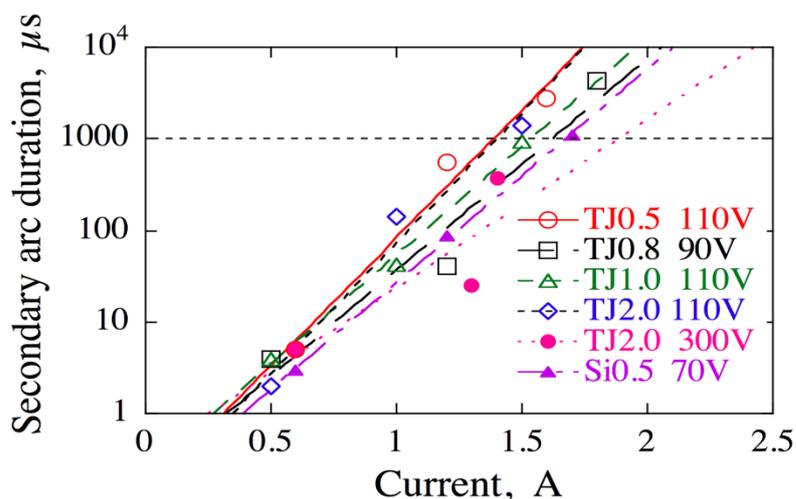


図 4.2.3-1 電流と二次放電継続時間の関係

4.2.4. まとめ

以上の結果をまとめると図 4.2.4-1 のようになる。二次放電閾値は TJ0.5mm から 1.0mm、TJ2.0mm、Si0.5mm でそれぞれ異なっている。また図では二次放電の発生状況により、二次放電が発生しない「安全」、TSA は発生するが PSA は発生しない「注意」、PSA が発生する「使用不可」、今回の試験では細かく電流値を変えて試験しておらず PSA が起きる可能性が否定できない「危険」の4つの範囲を示した。

TJ0.5mm～1.0mm では 30V 以下で二次放電が全く発生しなかったため安全となっている。二次放電の継続時間は電流の増加にともない長くなっており、電圧には依存しない傾向があった。これらのギャップ長では最低1つの電圧で 1.5A で PSA が発生していたため、1.5A 以上の電圧を使用不可とした。

TJ2.0mm の場合、50V では二次放電が発生しなかったため 50V 以下が安全な範囲である。また 2.0A 以上で PSA が発生する使用不可の範囲となっている。

Si0.5mm では安全な範囲は 50V 以下となり、1.5A 以上が使用不可となっている。

図には示していないが RTV グラウティングクーポンではギャップで放電が全く発生しておらず、PSA は発生しなかった。

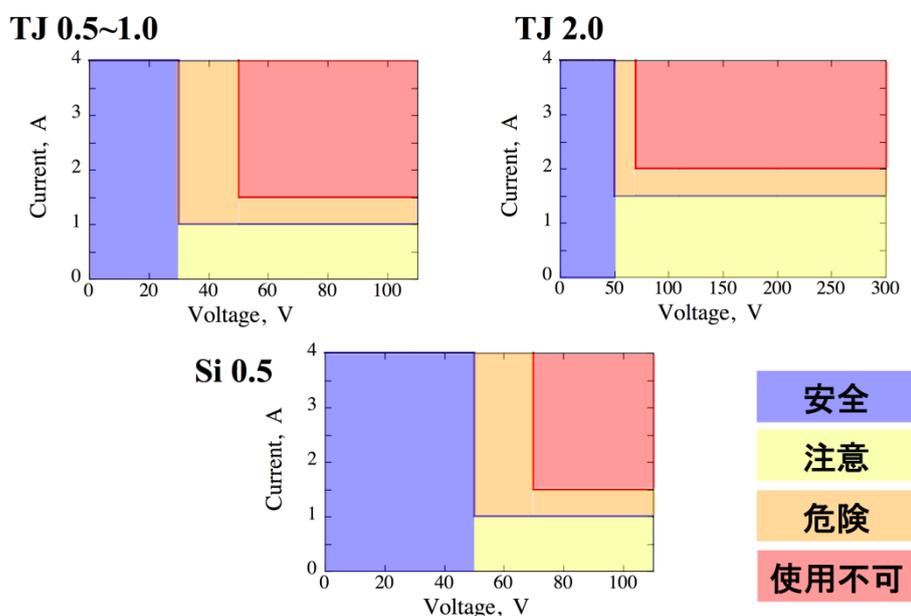


図 4.2.4-1 二次放電閾値結果まとめ

4.3. 二次電子放出係数の測定

4.3.1. 二次電子放出係数の基礎理論

二次電子放出の基礎原理、二次電子放出係数算出方法及び二次電子放出特性について記す。

4.3.1.1. 電子線と材料の相互作用

図 4.3.1-1 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^③。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遷移し、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。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。

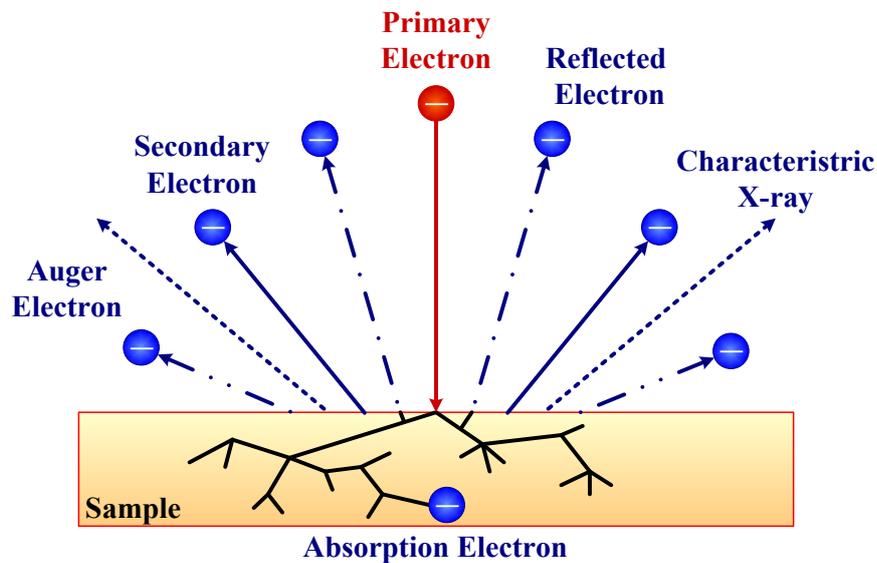


図 4.3.1-1 照射電子と材料の相互作用

4.3.1.2. 二次電子放出測定

電子が金属材料や高分子材料表面などに衝突する際、材料の表面から電子が放出される。この現象を二次電子放出 (Secondary Electron Emission: SEE) と呼ぶ。また、このとき放出される電子を二次電子 (Secondary Electron)、材料に入射する電子を一次電子 (Primary Electron) と呼ぶ。

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

$$\delta = \frac{I_s}{I_p} \quad \dots(4.3.1-1)$$

本測定システムにおいては図 4.3.1-2 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二次電子放出係数を算出している。

$$\delta = \frac{I_s}{I_s + I_{ab}} \quad \dots(4.3.1-2)$$

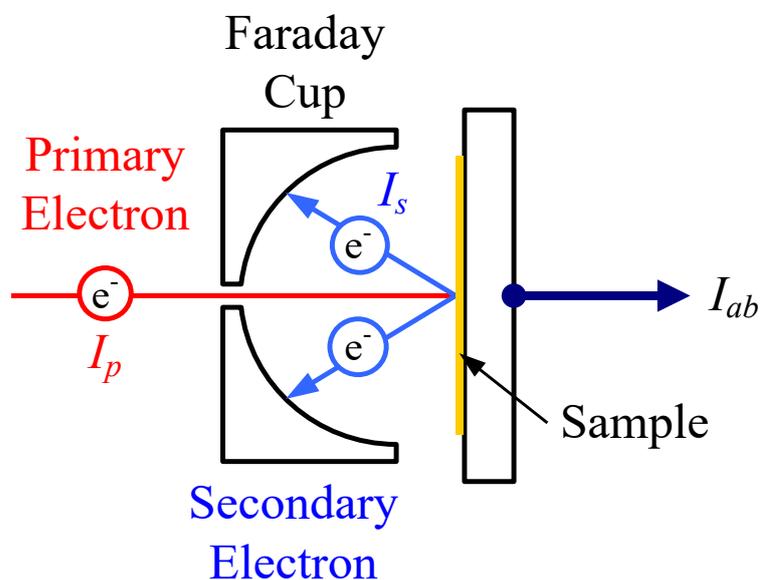


図 4.3.1-2 二次電子放出係数測定原理

4.3.1.3. 二次電子放出特性

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、図 4.3.1-3 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。図 4.3.1-3 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、材料内の電子に対するエネルギー付与が大きくなり二次電子の生成量が増す為である。 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為、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(4, 5)。

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図 4.3.1-3 に示すような特性を持つ材料に電子線を照射する際、以下に示すように領域分けすることができる。

領域(a)の場合

材料に照射する電子線の加速エネルギーが低い為、時間と共に負電荷が蓄積し、材料は負に帯電する。

領域(b)の場合

二次電子放出係数が 1 を超える場合、材料に入射される電子数に比べて、材料表面から放出する二次電子数の方が多いため、材料表面は正に帯電する。

領域(c)の場合

材料に照射する加速エネルギーが高い為、二次電子の発生領域が深くなる。その為、生成された二次電子が材料表面に到達することができず、材料は負に帯電し、結果として二次電子放出係数が減少する。

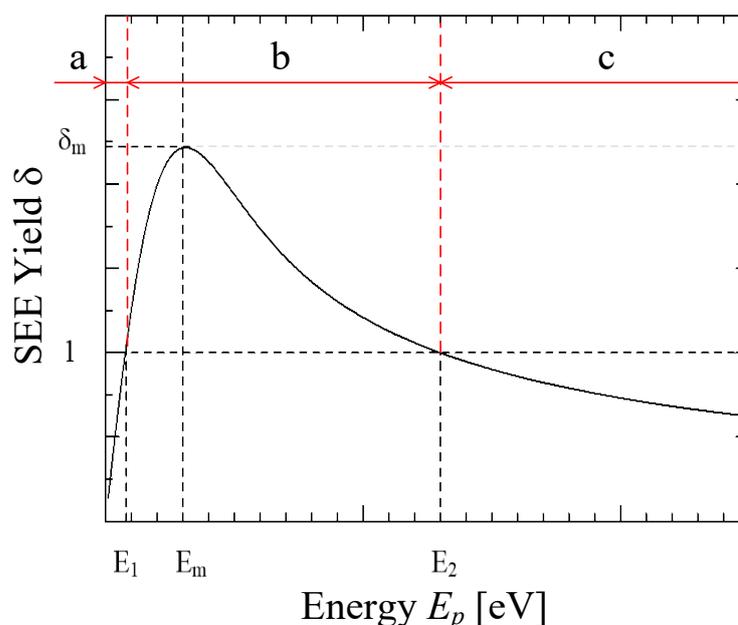


図 4.3.1-3 二次電子放出係数の普遍曲線

4.3.1.4. 材料から放出される電子エネルギー

図 4.3.1-4 にある材料にエネルギー E_p の電子を照射したとき、材料から放出される電子のエネルギースペクトラムを示す。横軸は材料に照射する電子のエネルギー、縦軸は材料から放出される電子の個数を示している。放出される電子は入射する電子のエネルギーの大きさにより生成過程の異なる電子が放出される。

① 領域 (A)

領域 A は二次電子のスペクトル領域であり、数 eV で最大値を持った後、エネルギーの増加に伴って急激に減少する分布をしている。エネルギーの低い二次電子は材料中での平均自由行程も短いため、試料表面から数 nm の範囲のところで励起され、表面障壁を超えて真空中に放出されたものが二次電子である。

② 領域 (B)

領域 B の電子は、材料に入射した電子が材料内で非弾性散乱を繰り返すことにより、エネルギー損失を受け、材料から放出された電子のエネルギー領域である。

③ 領域 (C)

0 eV 以上かつ電子のエネルギーが大きい領域 C での電子は材料に入射した電子が材料内で散乱する際、弾性散乱と非弾性散乱により、材料表面から放出された電子のエネルギー領域である。

なお、電子のエネルギーが 50 eV 以上の領域 B, C において、材料から放出される電子は反射電子となる⁽²⁾。

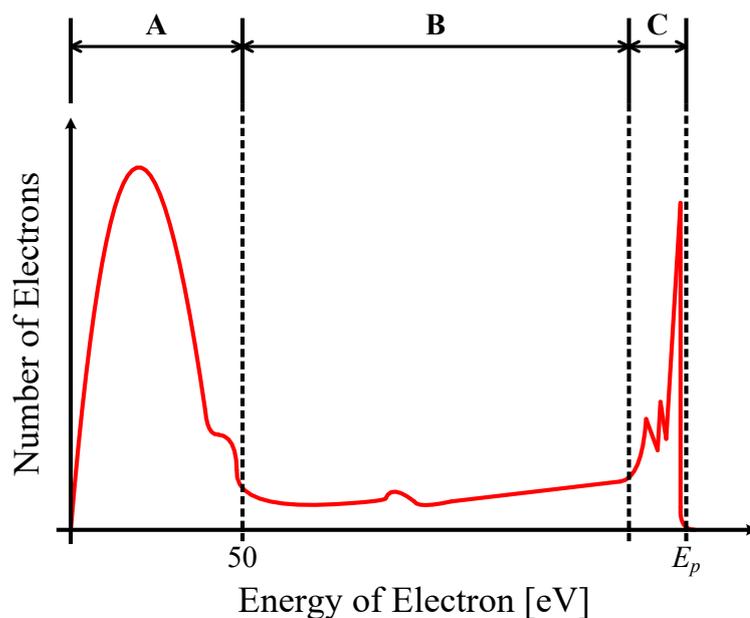


図 4.3.1-4 電子のエネルギースペクトル

4.3.2. 【手法 A】パルススキャン測定法 1

サンプルに数十マイクロ秒の電子パルス照射し、二次電子電流の計測を行った。サンプルが絶縁体の場合は表面帯電の計測への影響を抑えるため、1つの電子エネルギーを測定する毎にサンプル上の電子照射をする場所を変えた。またサンプルに負電圧を印加し、表面に照射される電子のエネルギーを低くした。

4.3.2.1. 計測方法の長所と短所

【長所】

- ・サンプルに電圧を印加するため、サンプルに入射するエネルギーを小さくすることが可能。
- ・電子ビームを数十マイクロ秒のパルス幅で照射するため、サンプル表面の帯電を抑えることができる。
- ・電流波形を広帯域で計測しているため、表面帯電による二次電子への影響を抑えた計測ができる。

【短所】

- ・サンプルにバイアス電圧を印加して電子を減速している。

4.3.2.2. 計測方法

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から測定を行なった。(図 4.3.2-1)

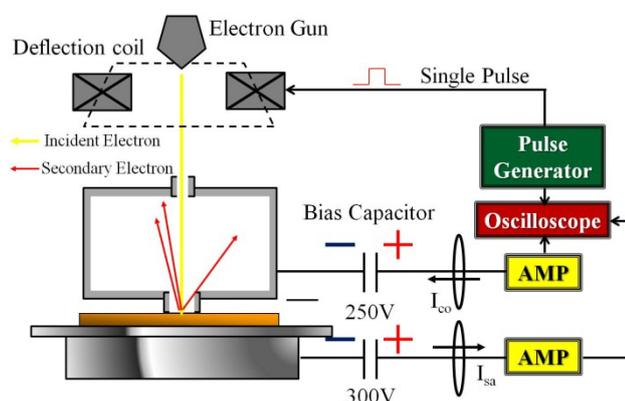


図 4.3.2-1 二次電子計測装置

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、

$$\sigma = \frac{N_{out}}{N_{in}} = \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad \dots(4.3.2-1)$$

$$\sigma = \frac{I_{co}}{I_{co}+I_{sa}} \quad \dots(4.3.2-2)$$

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(4.3.2-2) 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 4.3.2-2 に示す。

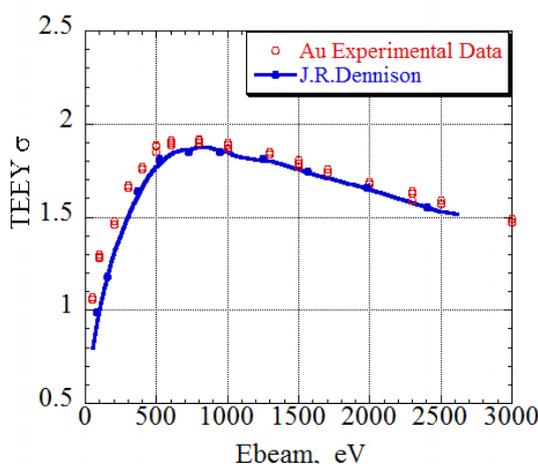


図 4.3.2-2 金を用いた二次電子放出係数測定の校正。

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。

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 4.3.2-3 で示すように、測定箇所を 5×5 個用意した。これにより、常に帯電の影響を抑えた測定を行うことができる。

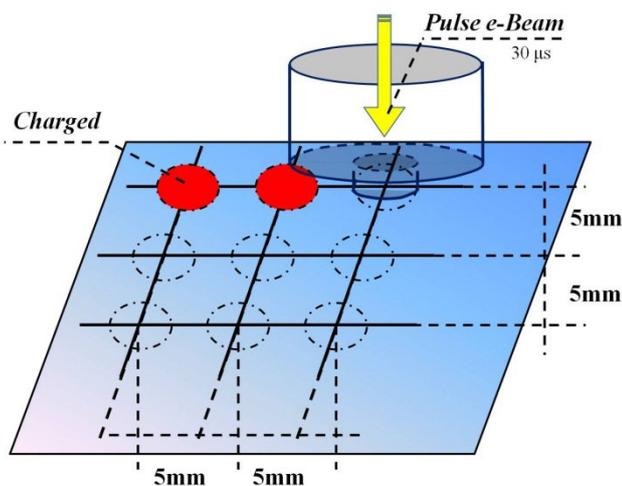


図 4.3.2-3 パルス・スキャン方法

4.3.2.3. 計測結果

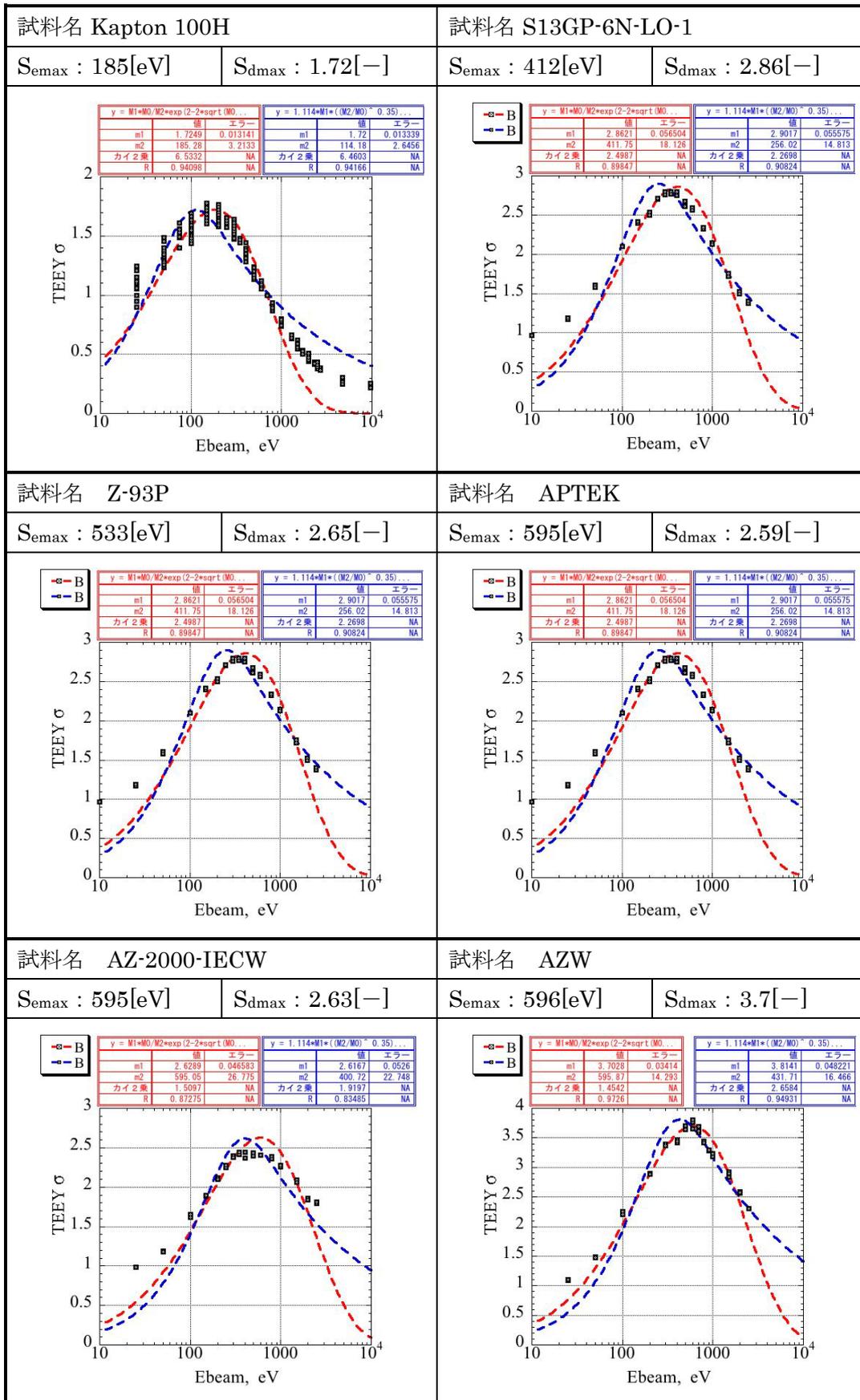
計測した試料ごとに、グラフと数値を併記。(グラフ中の $m1=S_{dmax}$, $m2=S_{emax}$ に相当)

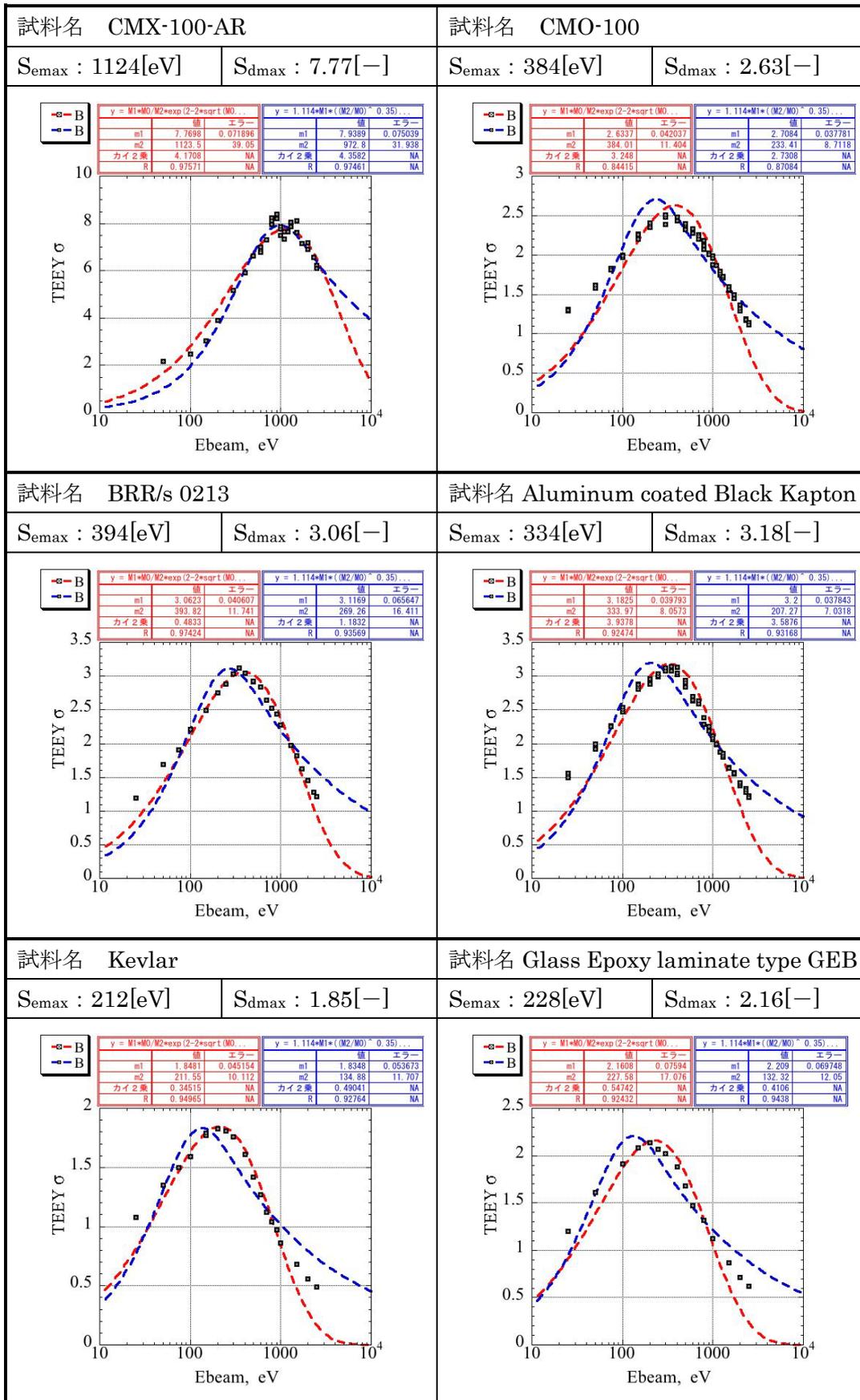
波形赤 : MUSCAT 用の式を使用

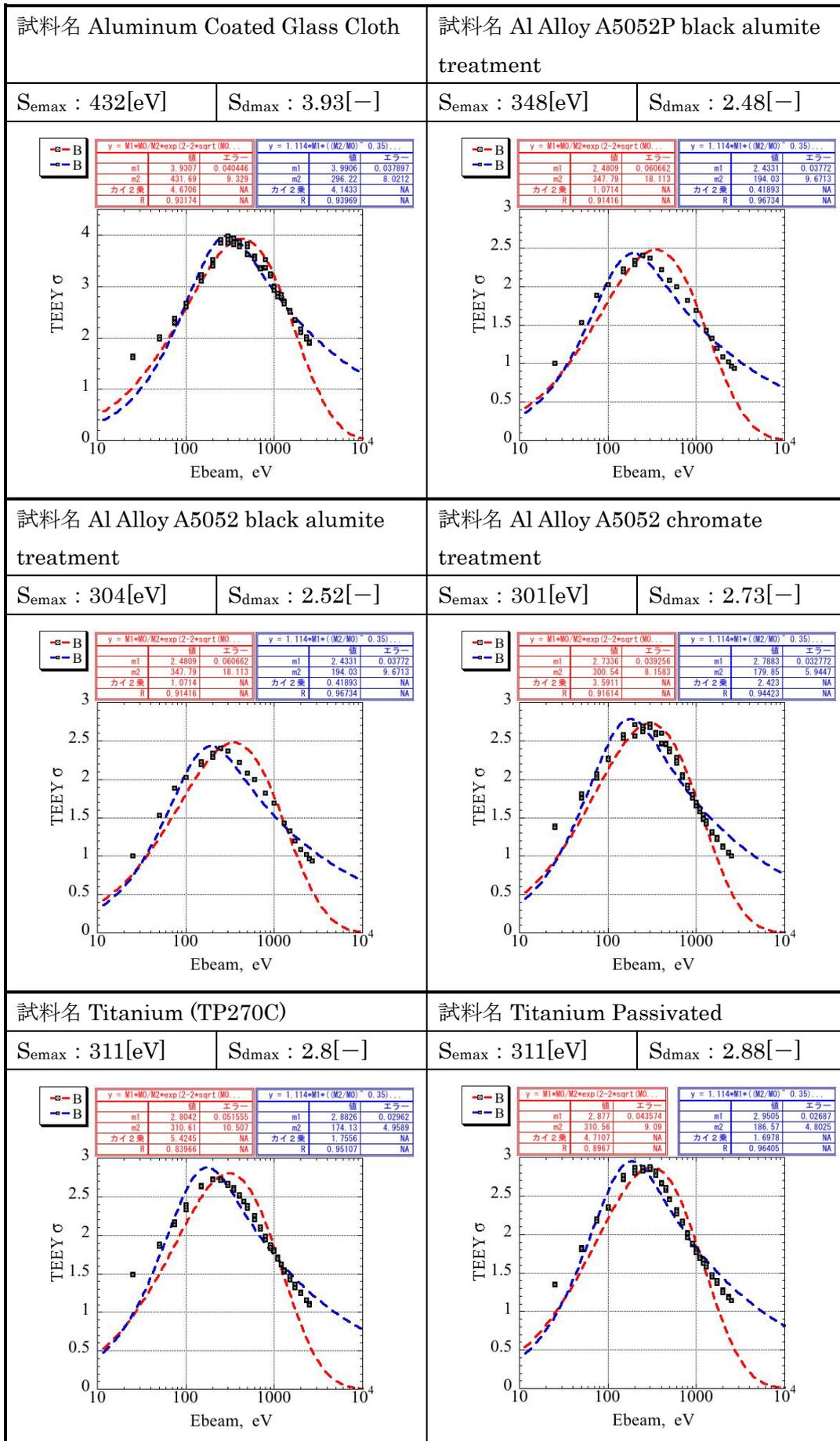
$$\delta_e(E, \theta) = \delta_{eMax} \frac{E}{E_{Max}} \exp\left(2 - 2\sqrt{\frac{E}{E_{Max}}}\right) \exp[2(1 - \cos \theta)] \quad \dots(4.3.2-3)$$

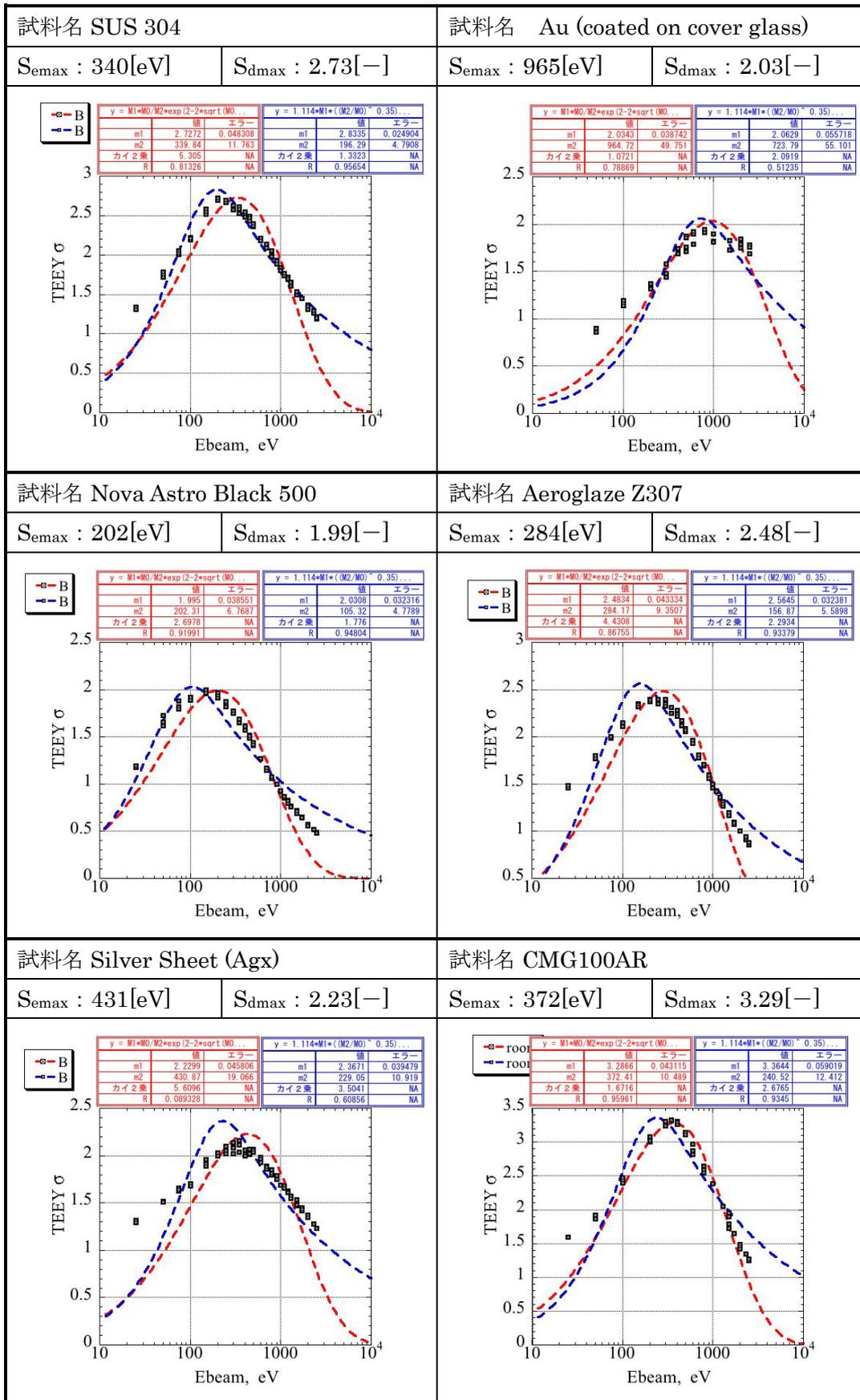
波形青 : NASCAP 用の式を使用

$$\delta_e(E, \theta) = \frac{1.114\delta_{eMax}}{\cos \theta} \left(\frac{E_{Max}}{E}\right)^{0.35} \left\{1 - \exp\left(-2.28 \cos \theta \left(\frac{E_{Max}}{E}\right)^{-1.35}\right)\right\} \quad \dots(4.3.2-3)$$









4.3.3. 【手法 B】パルススキャン測定法 2

測定原理は手法 A と同様であるが、試料にバイアス電圧を印可しない、照射領域が $\phi 5\text{mm}$ と比較的広いなど、測定システムに差異がある。

4.3.3.1. 計測方法の長所と短所

【長所】

- ①一次照射電子のエネルギー調整のための電圧をサンプルに印加をすることなく測定を行うため、当該電圧印加による試料の帯電等による二次電子測定に対する擾乱を除外する事が可能である。
- ②電子ビームをパルス照射するため、サンプルの表面帯電による、二次電子収集への影響を抑えることができる。
- ③照射領域が $\phi 4\text{mm}$ と比較的広めに設定しているため、表面状態の局所的な汚損やフラグメント等による二次電子放出に対する影響を最小限に抑制する事が可能である。
- ④劣化用の電子銃を同測定システムに設置しているため、劣化処理後、大気開放することなく真空環境下でそのまま測定を実施する事が可能である。

【短所】

- ①現測定システム上 200eV 以下(S/N の関係上試料によっては 300eV)の低エネルギー領域の測定が出来ない。

4.3.3.2. 計測方法

4.3.3.2.1. 二次電子放出係数測定システムの構成

図 4.3.3-1 に二次電子放出係数測定システムの概略図を示す。真空チャンバーには電子銃 (Kimball Physics 社製、EGG-3101) 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 $t_p = 0.5\text{ms}$ 、照射電子のエネルギー $E_p = 100\text{eV} \sim 10.0\text{keV}$) を照射することができる。また、二次電子用ファラデーカップ (以下、 FC_{II}) は試料台の試料設置面から 3mm の位置に設置されており、一次電子は FC_{II} 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 FC_{II} によって収集される。その際、 FC_{II} 及び試料台からの出力電流信号はカレントアンプ (Kethley 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、 FC_{II} 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。

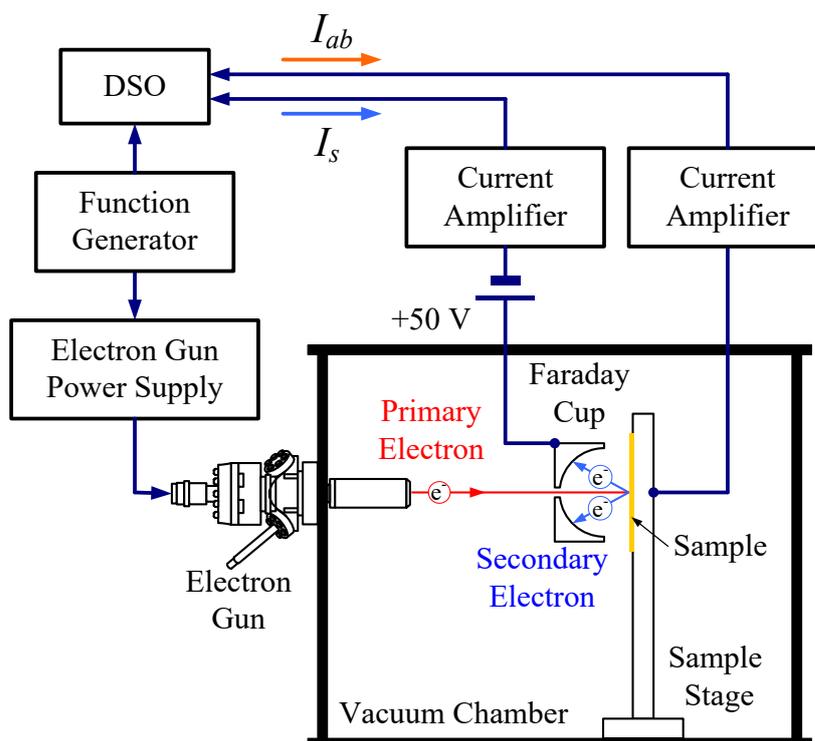


図 4.3.3-1 測定システム概略図

さらに、本測定システムは電子銃に搭載されたビームブランキングユニットを用いることでパルスビームを生成している。また、試料に照射される電子線の直径は 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為、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、チャンバーの真空度 $2 \times 10^{-5} \sim 9 \times 10^{-5}$ Pa で実施された。

また、本測定システムは蛍光板が取り付けられた Micro Channel Plate(MCP、浜松ホトニクス株式会社製 F2223) を用いることで、実際に試料に照射される電子線を可視化し、照射位置や形状を確認することが可能である。

以下の各章に測定システム内の試料台、FC_{II}、MCP、真空システムについての詳細を記す。

4.3.3.2.2. 試料台

図 4.3.3-2 に本研究で使用する試料台を示す。試料台の試料設置面の寸法は 90 mm × 120 mm であり、照射面以外をシールドすることにより、外部ノイズや拡散した電子線が信号に混入することを防いでいる。二次電子放出による試料表面の帯電の影響を減らす為、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。

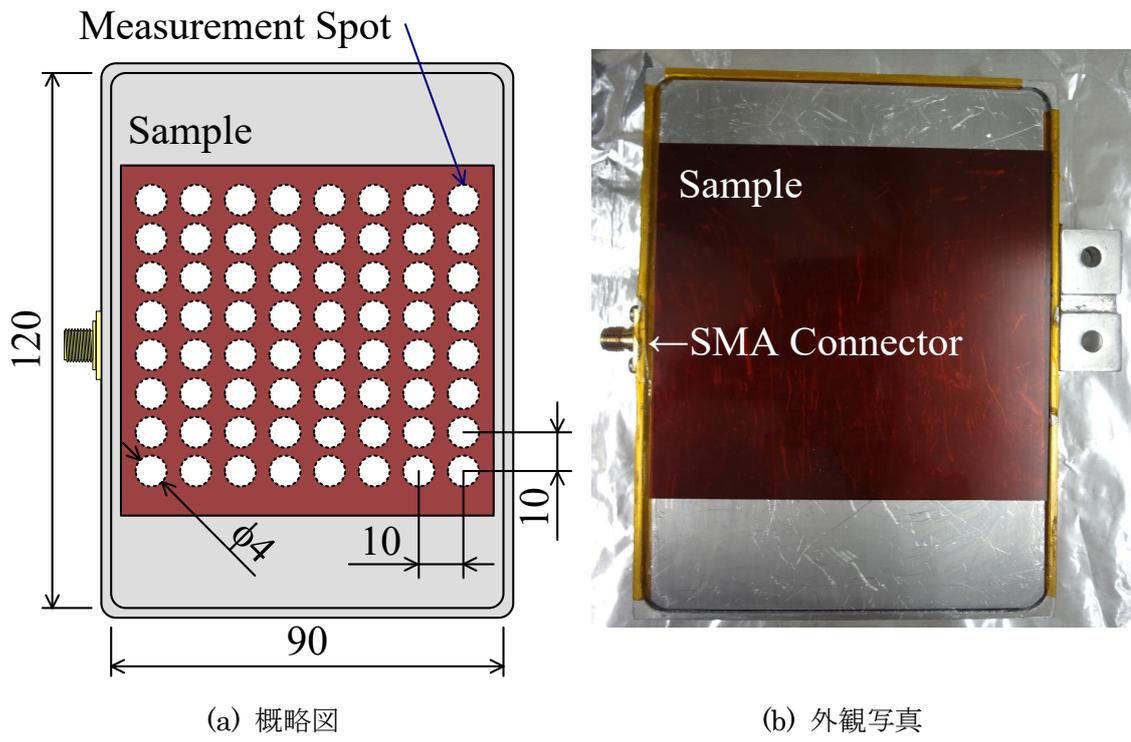


図 4.3.3-2 測定用試料台

4.3.3.2.3. 二次電子用ファラデーカップ

図 4.3.3-3 に本測定で使用する FC_{II} を示す。FC_{II} は大きく分けて電極、シールド、外部シールド、真空チャンバーに取り付ける為のロッド部で構成されている。FC_{II} 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 FC_{II} 収集面の二次電子放出を防ぐ為、DLC (Diamond Like Carbon) コーティングが施してある。そして、シールドに開けられた穴は FC_{II} の穴の径 $\phi 6.5$ mm より小さくし ($\phi 5$ mm)、更にナイフエッジを施すことで、電子線が FC_{II} に直接照射されることを抑制している。また、FC_{II} と電子銃の間に外部シールドを設置することで電子銃から拡散した電子が試料に照射されることを防いでいる。

なお、FC_{II} 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効率良く収集することができる。

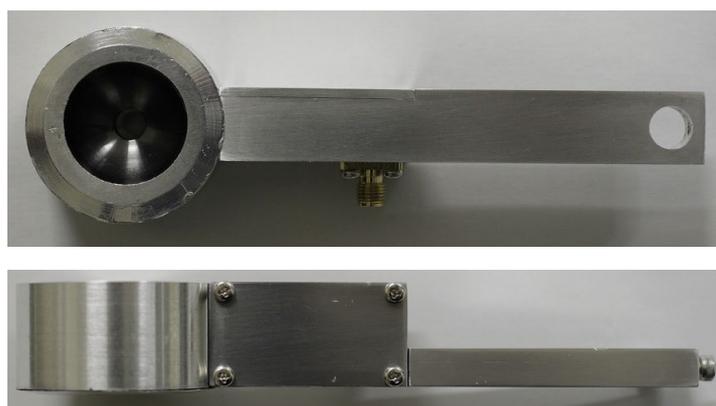
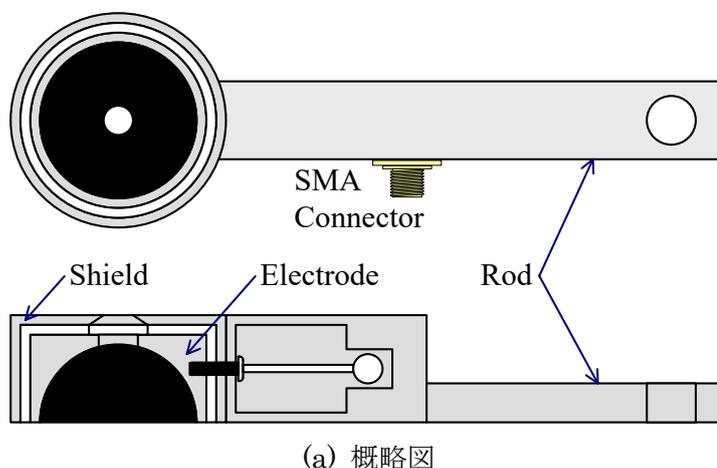


図 4.3.3-3 二次電子用ファラデーカップ

4.3.3.2.4. Micro Channel Plate (MCP)

図 4.3.3-4 に Micro Channel Plate (MCP) の原理図を示す。MCP は同図 (a) のように多数の光電子増倍管から構成されている。同図 (b) に示すように光電子増倍管は入力側・出力側 2 つの電極に電圧 V_D を印加することで光電子増倍管に電界が生じ、入射電子が入力側の電極に当たると、複数の二次電子が放出される。二次電子は電界によって加速される為、放物線軌道を描く。その後、反対側の壁に衝突して再び二次電子を放出する。このようにして電子は光電子増倍管の内壁に何回も衝突しながら出力電極へ進んでいき、結果として、増倍した電子を取り出すことができる。その為、多数の光電子増倍管から構成された MCP によって照射電子を 2 次元的に増倍し、出力電荷を蛍光体の塗布されたガラス面板で同図 (c) に示すように可視光象に変換することができる。

なお、本測定においては図 4.3.3-5, 4.3.3-6 に示すように高電圧電源により MCP の電子線照射面側の電極、出力側の電極、蛍光面の電極にディバイダーを介して電圧を印加している。

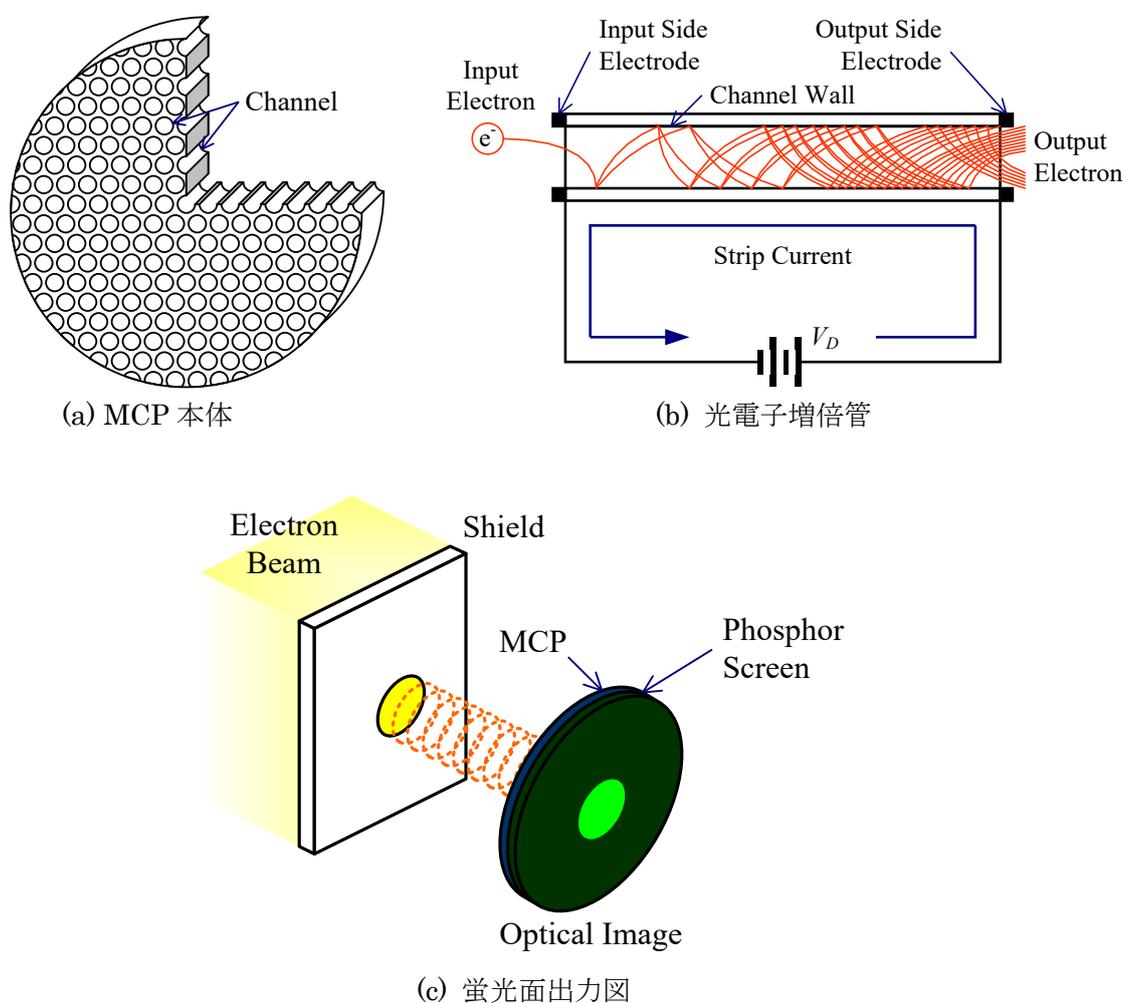


図 4.3.3-4 MCP 原理

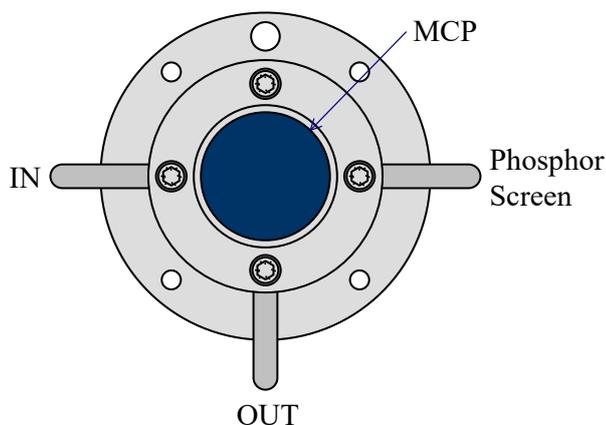


図 4.3.3-5 MCP 概略図

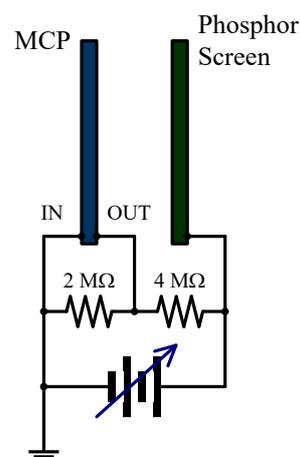


図 4.3.3-6 分圧器配線図

4.3.3.2.5. 測定結果の校正方法

図 4.3.3-7 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 の出力電流波形を示す。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変歪する恐れがある為、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。

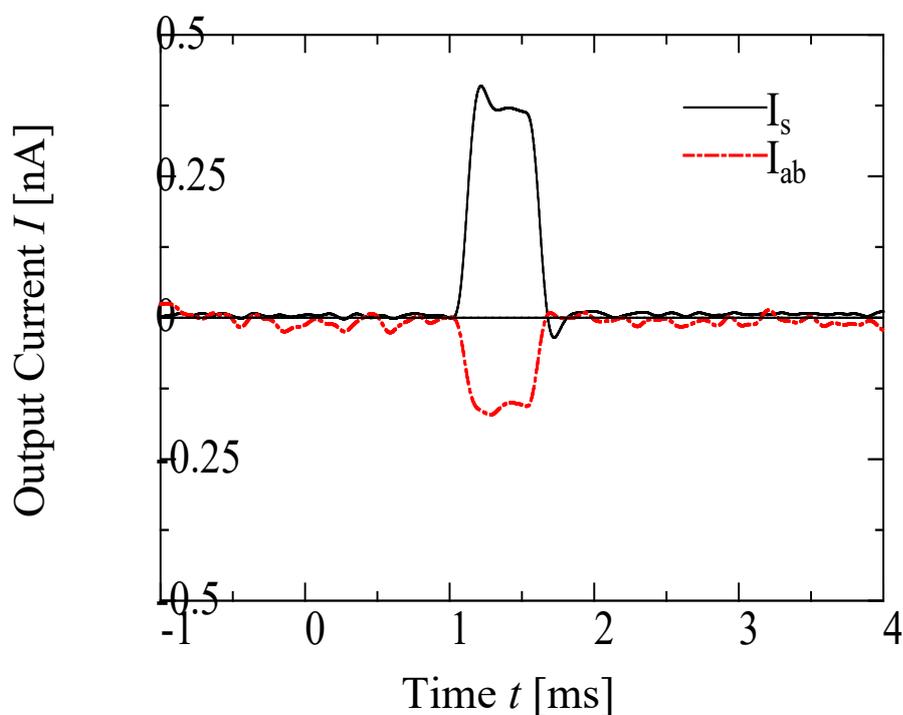


図 4.3.3-7 出力電流波形

4.3.3.3. 電子線照射による劣化試料の二次電子放出測定

前章までに、劣化処理を施していない BOL 試料での測定結果を示してきた。設計の観点からは EOL における材料物性値も必要となる。【手法 B】のシステムでは電子線による劣化試料の計測も実施した。なお、EOL の定義については、3.1 項を参照のこと。

軌道上の電子に着目し、軌道上での電子による劣化を模擬するため、50keV の電子銃を本測定システムに取り付けることで、電子線照射劣化による EOL 試料を作成し、二次電子および光電子放出の測定を実施した。なお、劣化用の高エネルギー電子線照射システムは光電子でも同様であるため、以下であわせてシステムの説明を記述する。

4.3.3.3.1. 測定システム

図 4.3.3-8 に劣化用の電子銃を取り付けた複合物性計測装置の断面図を示す。二次電子測定用電子銃の右方 45 度のチャンバー側面に、オメガトロン社製 50 keV 広角ビーム電子銃(OME-0502BW、図 4.3.3-9 参照) が取り付けられている。また、電子銃の緒言を表 4.3.3-1 に示す。

この電子銃を用いて電子線を照射し、EOL 試料を作成した後に、XYZ-Θ駆動系に取り付けられたサンプルステージを二次電子測定時には、図 4.3.3-8 中 12 時の位置に設置されている二次電子測定用の電子銃の方向に、また光電子測定時には 9 時の位置に設置されている光源の方向にそれぞれ回転をさせることで、照射から測定までを真空中で一貫して実施することが可能なシステムとなっている。これにより、大気解放時における、酸化劣化やコンタミ付着による測定への影響を除外できる。また、他機関での照射によって劣化試料を作成した場合、照射施設から測定装置までの移送する時間が必要となり、時間経過とともに劣化状況の緩和が発生する場合もあるため、真の劣化状況の確認ができないことが考えられる。本測定システムの運用により、そのような懸念も除外し、劣化した状況のみを直接計測し確認することが可能となっている。

なお劣化緩和については、ポリイミド系試料を常温・大気保管した場合、2 週間程度で着色緩和が起きることが確認されているが、軌道上の環境条件での劣化緩和及び物性値への影響については明らかではない。

表 4.3.3-1 50keV 電子銃諸言

加速電圧	0 ~ 50 keV 連続可変
フィラメントカレント	0 ~ 4 A 連続可変
バイアス電圧	0 ~ 3.0 kV 連続可変 実負荷 60 V/ 3kV
ビーム径	φ250 mm ~ φ 1000 mm/WD 1000 mm

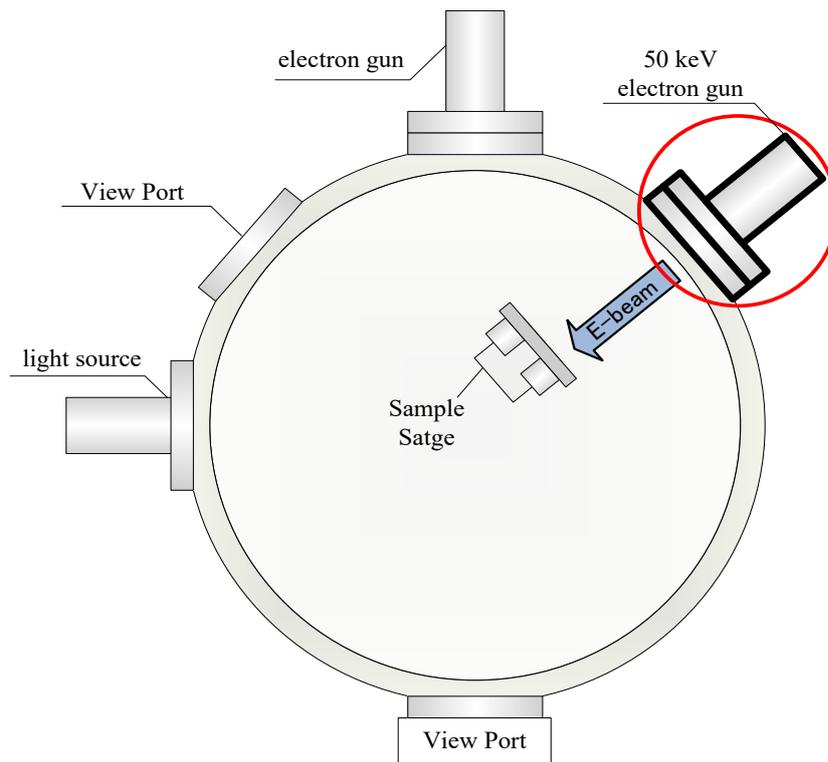


図 4.3.3-8 50keV 電子銃チャンバー内取付位置



図 4.3.3-9 50keV 電子銃

4.3.3.3.2. 劣化用 50keV 電子銃の照射電流密度分布の検証

劣化用 50keV 電子銃は高拡散で電子線を照射するタイプの電子銃であるため、電流密度分布の検証試験を実施した。図 4.3.3-10 に検証試験の実施概略図を示す。電子銃の先端から 160 mm の位置に試料が設置される為、同じ位置に図 4.3.3-10 に示す開口径 $\phi 4$ mm 一次電子測定用のファラデーカップ(以下、FC₁)を設置した。電子線を照射中に FC₁ を z 方向に掃引し、一次電子を収集することにより、照射電子の電流密度分布を計測、評価した。測定の際は、チャンバー内の圧力を 10^{-5} Pa オーダー、電子銃の加速電圧 50 keV、フィラメント電流 150 μ A とした。

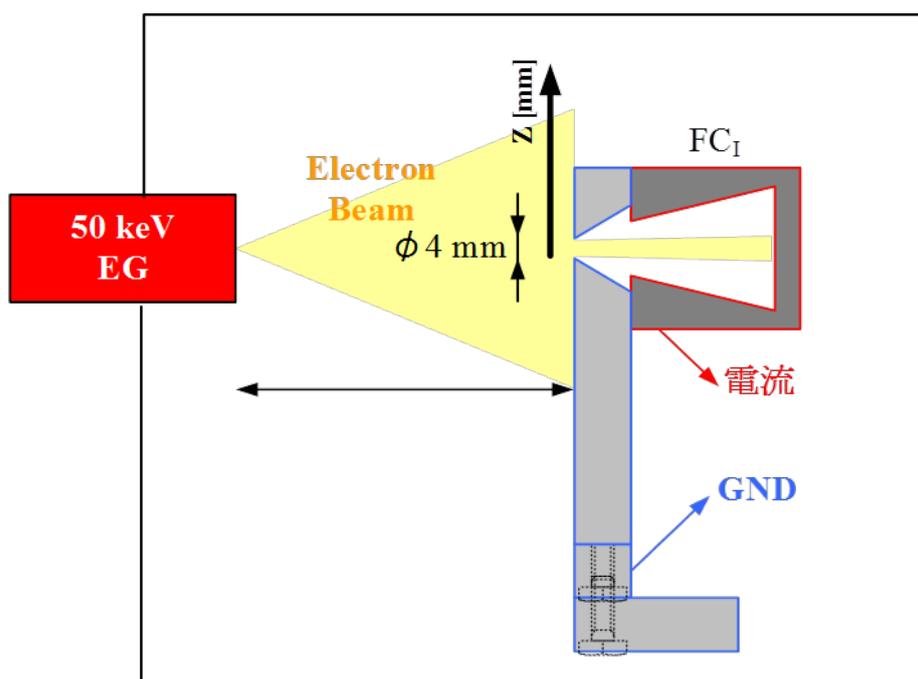


図 4.3.3-10 50 keV 電子線の拡散半径の確認試験の概略図

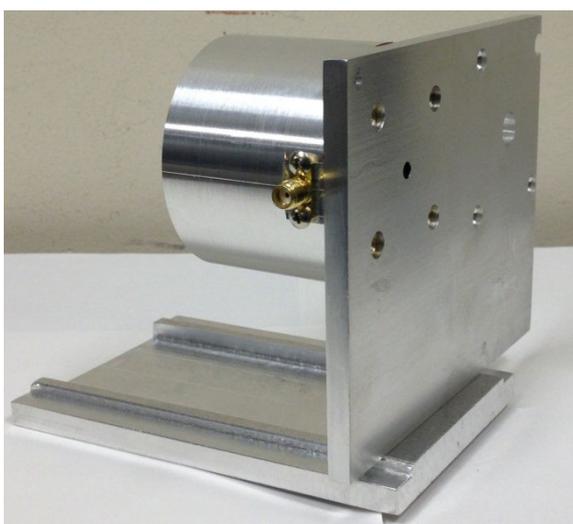


図 4.3.3-11 一次電子計測用ファラデーカップ(FC₁)外観

4.3.3.3.3. FCIによる電流密度分布測定結果 および GEO 照射試験時間の設定

電流密度分布の評価

図 4.3.3-12 に電子銃の照射電流密度分布の測定結果を示す。同図中の縦軸は照射電流密度 I_p [nA/cm^2]を、横軸は電子線の照射軸線中心からの距離 z [mm]である。同図より、照射軸線上では電流密度は $200 \text{ nA}/\text{cm}^2$ であり、ファラデーカップによる電子線の計測位置が軸線から離れるごと低下し、軸線から 5mm の位置では $50 \text{ nA}/\text{cm}^2$ に減少していく。 z を 30 mm まで計測し電流密度全体を見てみると、電流密度は距離 z に応じたガウス分布の様な特性を示している。本電子銃は高拡散型となっているが、試料の設置位置が 160 mm と比較的短いため、このような特性が得られたものと考えられる。

以上の結果より、今回の実効的な電子の照射範囲を $z = 5 \text{ mm}$ とし、その範囲の平均値である $121 \text{ nA}/\text{cm}^2$ を平均照射電流密度として本試験に用いた。

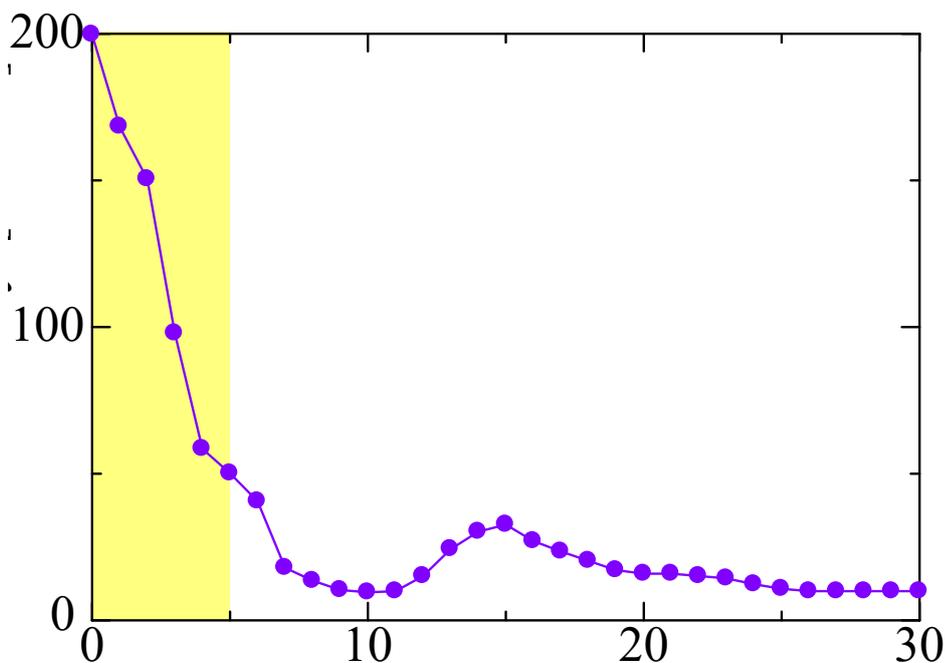


図 4.3.3-12 50 keV 電子銃による照射電子電流密度分布

GEO 環境模擬照射時間の算出

今回、宇宙機を GEO 上で 1 年間運用した際に曝される電子量を考慮し、50 keV 電子線による照射時間を行った。

宇宙機が GEO 上で 1 年間に受ける単位面積当たりの電子量 N_{GEO} は 1×10^{15} 個ある。式 1 に示すように、 N_{GEO} に電気素量 e を乗ずることで、宇宙機を GEO 上で 1 年間運用した際に照射される電流密度 J_{GEO} [nAs/cm²] が求まる。

$$J_{GEO} = N_{GEO} \times e = 1.602 \times 10^5 \text{ [nAs/cm}^2\text{]} \quad (4.3.3-1)$$

次に式 2 に示すように、 J_{GEO} を電子銃の照射電流密度 J_{EG} [nA/cm²] で除することにより電子線照射時間 T [s] が算出できる。

$$T = \frac{J_{GEO}}{J_{EG}} \quad (4.3.3-2)$$

ここで、前項より $J_{EG} = 121 \text{ nA/cm}^2$ となるので、照射時間はおよそ 22 min となる。

4.3.3.3.4. 電子線照射による EOL 試料における二次電子放出測定

本測定試験には、ポリイミドとして Kapton、Upilex、Black Kapton を、ガラス材料として CMX100AR、CMG100AR を用いた。

・照射条件

当初、1.3.2 項で示したように、加速エネルギーを 50 keV、電流密度を 121 nA/cm²、照射時間を 22 min に設定して EOL サンプルの作成を行った。しかしながら、ポリイミドに照射した際に試料の変形が確認されたので、それ以降のポリイミド以外の試料では電流密度を 45 nA/cm² に調整し、試料の変形がない状況で照射を行った。その際の照射時間は 60 min である。

・Kapton の測定結果

Kapton における電子線照射試料(EOL 試料)の測定結果を図 4.3.3-13 に示す。同図より、未照射試料と電子照射試料とは有意な差は確認できなかった。

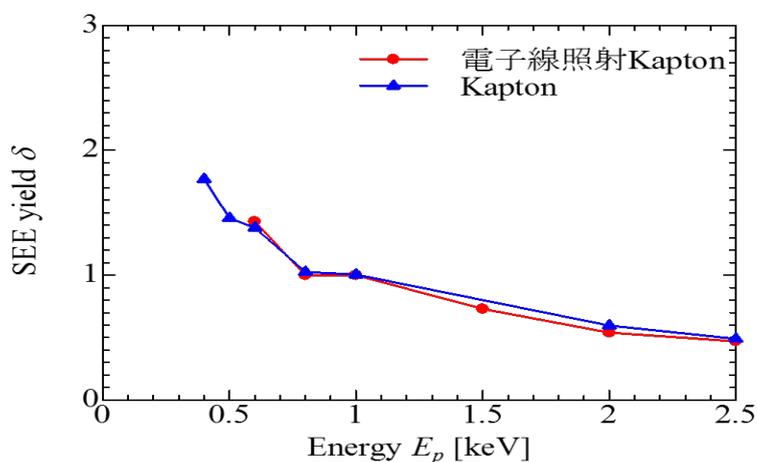


図 4.3.3-13 未照射および電子線照射(EOL) Kapton の二次電子放出測定結果

・Upilex の測定結果

Upilex における電子線照射試料(EOL 試料)の測定結果を図 4.3.3-14 に示す。同図より、400 eV 以上の領域で、電子線照射試料の方が二次電子の収率が上昇していることが確認できる。

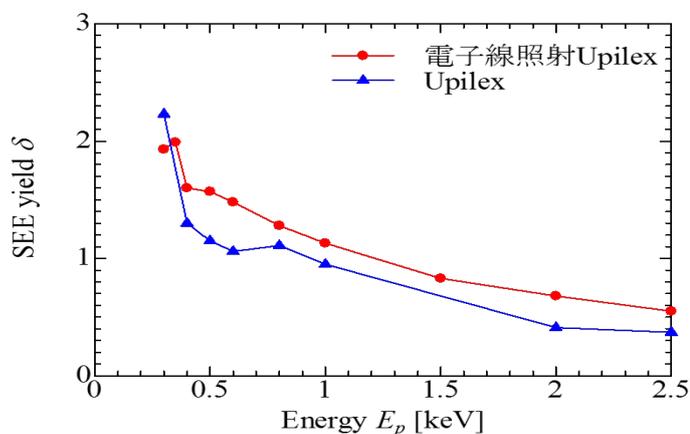


図 4.3.3-14 未照射および電子線照射(EOL) Upilex の二次電子放出測定結果

・ Black Kapton の測定結果

Black Kapton における電子線照射試料(EOL 試料)の測定結果を図 4.3.3-15 に示す。同図より、500 eV 以上の領域では僅かではあるが、Upilex と同様に二次電子の収率の上昇が確認された。但し、本測定においては、照射劣化領域が $\phi 10$ mm と狭く、十分な加算平均処理を施すことが出来ず、300 と 350 eV の測定については S/N が悪いため、今回は参考値とする。

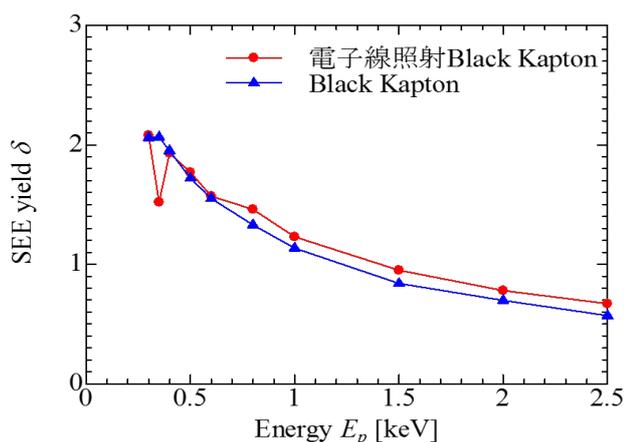


図 4.3.3-15 未照射および電子線照射(EOL) Black Kapton の二次電子放出測定結果

・ CMG100 及び CMG100AR の測定結果

未照射及び電子線照射試料(EOL 試料)CMG100 及び CMG100AR に測定結果を図 4.3.3-16 に、また CMX100 及び CMX100AR の測定結果も同様に図 4.3.3-17 に示す。同図図 4.3.3-16, 17 より、未照射試料においては、CMG 100、CMX100 とともに AR コーティングの有無による大きな違いは確認できなかったが、今回測定したエネルギー範囲においては AR コーティングが有る場合は δ が 10 以上と大きく、既報の初期の値に近い値を示している。

次に、50 keV 電子線照射に試料に関してであるが、図 4.3.3-16 及び図 4.3.3-17 より、CMG 100 と GMG 100 AR、CMX 100 と GMX 100 AR とともに 50 keV 電子線照射後の方が電子線照射前の場合と比較して δ が小さくなっており、コーティング無の基板材料の値に近い値とを示している。その傾向は CMX 試料に顕著に表れており、コーティング無の基材と同等或いは、それ以下の値を示している事が分る。この原因として 2 つの事象が考えられる。

- ①50 keV の電子線照射により、AR コーティング部分の分子構造の変化、或いは組成の変化によるエネルギーバンド構造の変化
- ②50 keV の電子線照射により、試料や試料近傍のステージが熱せられたことによるコンタミの付着

以上の事を確認していくには、材料表面の組成分析もしくは吸光度測定によるエネルギーバンドギャップ測定が必要であると考えられる。

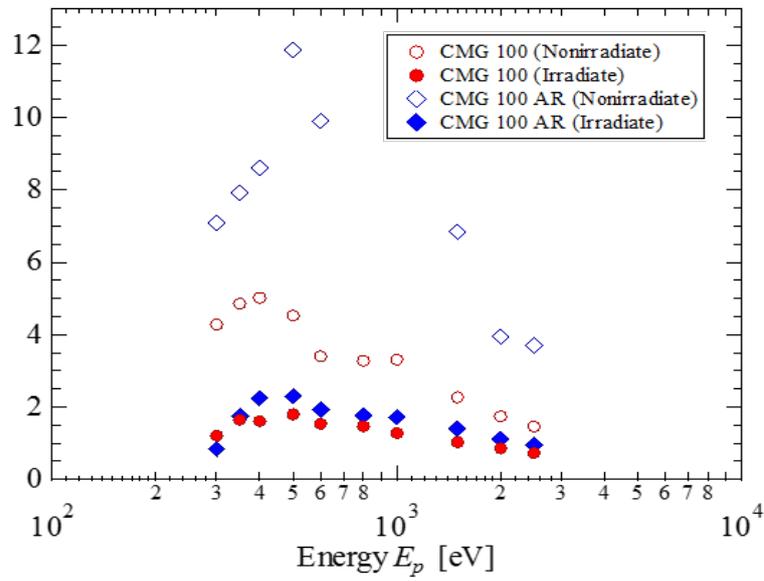


図 4.3.3-16 未照射および電子線照射(EOL)CMG100 及び CMG100AR の二次電子放出測定結果

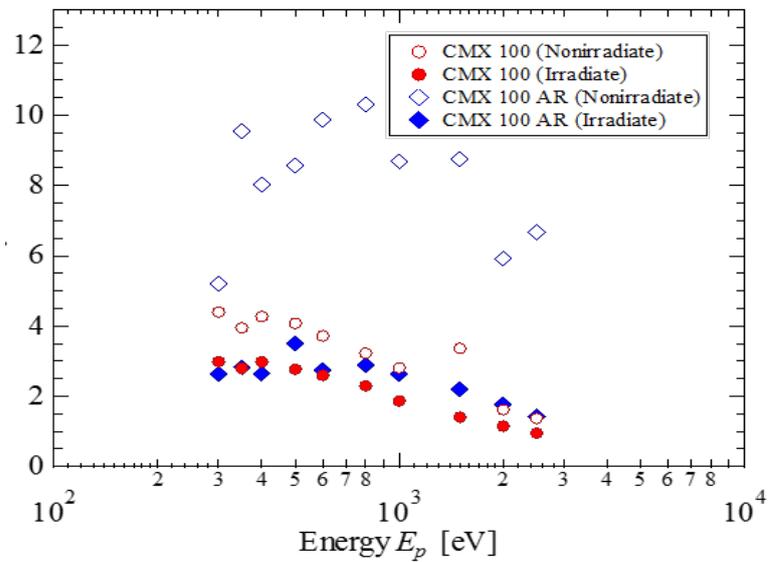
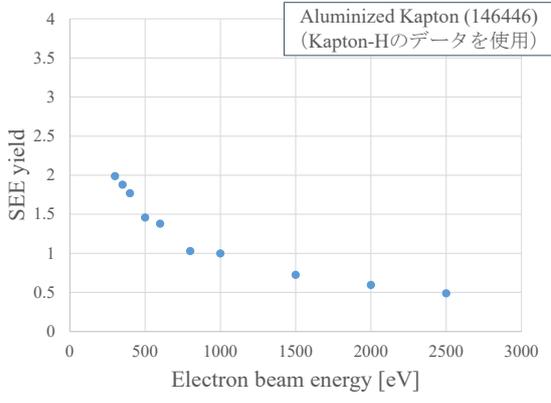
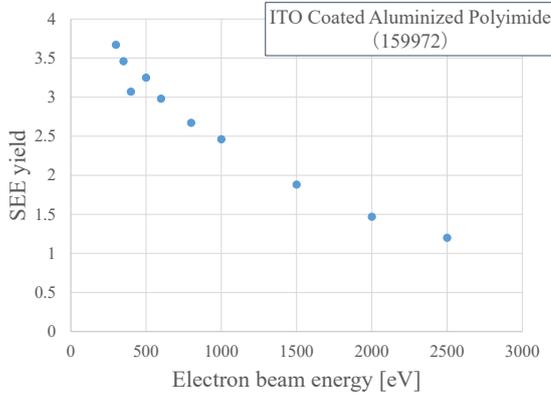
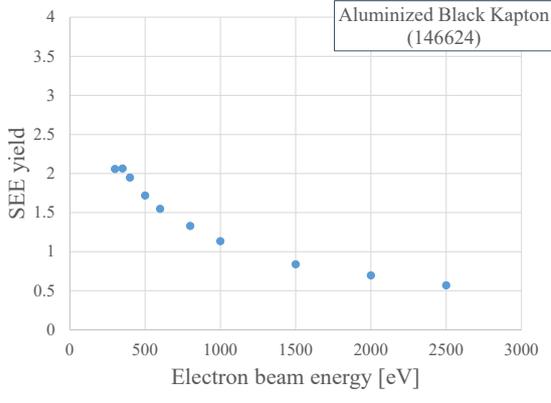
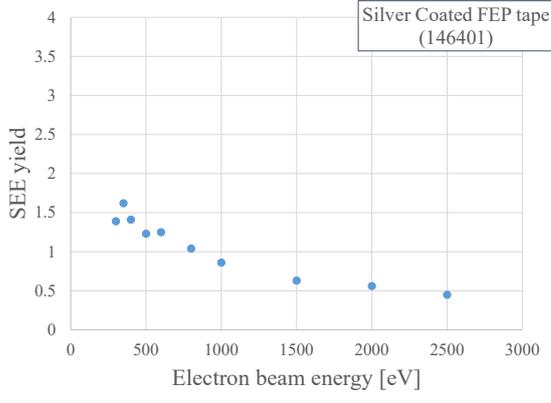
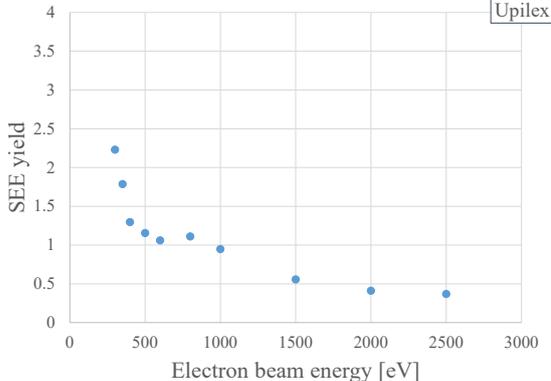
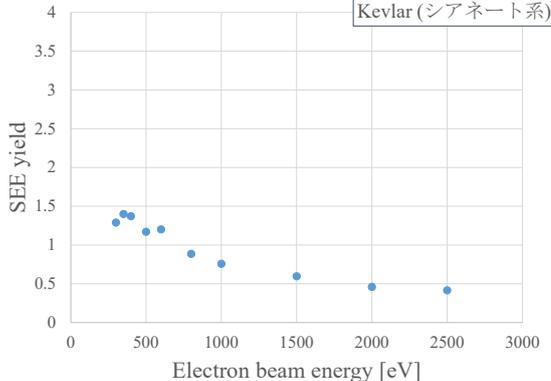


図 4.3.3-17 未照射および電子線照射(EOL)CMX100 及び CMX100AR の二次電子放出測定結果

4.3.3.4. 計測結果

<p>F2 Aluminized Kapton (146446) (Kapton-Hのデータを使用)</p>	<p>F3 ITO Coated Aluminized Polyimide (159972)</p>		
<p>S_{emax} : 300 [eV]</p>	<p>S_{dmax} : 1.99 [-]</p>	<p>S_{emax} : 300 [eV]</p>	<p>S_{dmax} : 3.67 [-]</p>
 <p>Aluminized Kapton (146446) (Kapton-Hのデータを使用)</p>	 <p>ITO Coated Aluminized Polyimide (159972)</p>		
<p>F5 Aluminized Black Kapton (146624)</p>	<p>F9 Silver Coated FEP tape (146401)</p>		
<p>S_{emax} : 350 [eV]</p>	<p>S_{dmax} : 2.07 [-]</p>	<p>S_{emax} : 350 [eV]</p>	<p>S_{dmax} : 1.62 [-]</p>
 <p>Aluminized Black Kapton (146624)</p>	 <p>Silver Coated FEP tape (146401)</p>		
<p>F15 Upilex</p>	<p>S4 Kevlar (シアネート系)</p>		
<p>S_{emax} : 300 [eV]</p>	<p>S_{dmax} : 2.23 [-]</p>	<p>S_{emax} : 350 [eV]</p>	<p>S_{dmax} : 1.40 [-]</p>
 <p>Upilex</p>	 <p>Kevlar (シアネート系)</p>		

S5 CFRP PAN 系エポキシ		S6 CFRP PAN 系シアネート	
$S_{emax} : 350 [eV]$	$S_{dmax} : 2.17 [-]$	$S_{emax} : 300 [eV]$	$S_{dmax} : 1.68 [-]$
<p>CFRP PAN系エポキシ</p>		<p>CFRP PAN系シアネート</p>	
S7 CFRP PITCH 系シアネート UD		S8 CFRP PITCH 系シアネート 三軸織り	
$S_{emax} : 300 [eV]$	$S_{dmax} : 1.68 [-]$	$S_{emax} : 350 [eV]$	$S_{dmax} : 0.83 [-]$
<p>CFRP PITCH系シアネート UD</p>		<p>CFRP PITCH系シアネート 三軸織り</p>	
G1 BRR/s 0213		M1 Silver Sheet (Agx)	
$S_{emax} : 600 [eV]$	$S_{dmax} : 3.05 [-]$	$S_{emax} : 400 [eV]$	$S_{dmax} : 2.54 [-]$
<p>BRR/s 0213</p>		<p>Silver Sheet (Agx)</p>	

M2 Au		M4 Silver Bus Bar	
$S_{emax} : 800 [eV]$	$S_{dmax} : 1.97 [-]$	$S_{emax} : 350, 500 [eV]$	$S_{dmax} : 2.31 [-]$
<p>Au</p>		<p>Silver Bus Bar</p>	
M5 Al Alloy A5052P alumite treatment		M7 Al Alloy A5052 chromate treatment	
$S_{emax} : 400 [eV]$	$S_{dmax} : 2.57 [-]$	$S_{emax} : 400 [eV]$	$S_{dmax} : 2.96 [-]$
<p>Al Alloy A5052P alumite treatment</p>		<p>Al Alloy A5052 chromate treatment</p>	
M8 SUS 304		M9 Titanium (TP270C)	
$S_{emax} : 350 [eV]$	$S_{dmax} : 2.40 [-]$	$S_{emax} : 350 [eV]$	$S_{dmax} : 2.52 [-]$
<p>SUS 304</p>		<p>Titanium (TP270C)</p>	

M10 Titanium Passivated		EB1 電子照射 Kapton	
$S_{emax} : 350 [eV]$	$S_{dmax} : 3.06 [-]$	$S_{emax} : 600 [eV]$	$S_{dmax} : 1.43 [-]$
<p>Titanium Passivated</p>		<p>電子照射 Kapton</p>	
EB2 電子照射 Black Kapton		EB3 電子照射 Upilex	
$S_{emax} : 300 [eV]$	$S_{dmax} : 2.08 [-]$	$S_{emax} : 350 [eV]$	$S_{dmax} : 1.99 [-]$
<p>電子照射 Black Kapton</p>		<p>電子照射 Upilex</p>	
P1 AZW/LA-II		P2 S13GP:6N/LO-1	
$S_{emax} : 600 [eV]$	$S_{dmax} : 3.51 [-]$	$S_{emax} : 350 [eV]$	$S_{dmax} : 2.35 [-]$
<p>AZW/LA-II</p>		<p>S13GP:6N/LO-1</p>	

P4 S13GP $S_{emax} : 400 \text{ [eV]}$ $S_{dmax} : 2.73 \text{ [-]}$		P6 Z-93P $S_{emax} : 500 \text{ [eV]}$ $S_{dmax} : 2.57 \text{ [-]}$																																													
<table border="1"> <caption>Approximate data for S13GP</caption> <thead> <tr> <th>Electron beam energy [eV]</th> <th>SEE yield</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>250</td><td>2.2</td></tr> <tr><td>350</td><td>2.7</td></tr> <tr><td>400</td><td>2.7</td></tr> <tr><td>500</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>600</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>800</td><td>2.3</td></tr> <tr><td>1000</td><td>2.2</td></tr> <tr><td>1500</td><td>1.6</td></tr> <tr><td>2000</td><td>1.5</td></tr> <tr><td>2500</td><td>1.4</td></tr> </tbody> </table>		Electron beam energy [eV]	SEE yield	250	2.2	350	2.7	400	2.7	500	2.5	600	2.6	800	2.3	1000	2.2	1500	1.6	2000	1.5	2500	1.4	<table border="1"> <caption>Approximate data for Z-93P</caption> <thead> <tr> <th>Electron beam energy [eV]</th> <th>SEE yield</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>250</td><td>2.2</td></tr> <tr><td>350</td><td>2.4</td></tr> <tr><td>400</td><td>2.4</td></tr> <tr><td>500</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>600</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>800</td><td>2.3</td></tr> <tr><td>1000</td><td>2.2</td></tr> <tr><td>1500</td><td>1.9</td></tr> <tr><td>2000</td><td>1.7</td></tr> <tr><td>2500</td><td>1.5</td></tr> </tbody> </table>		Electron beam energy [eV]	SEE yield	250	2.2	350	2.4	400	2.4	500	2.6	600	2.6	800	2.3	1000	2.2	1500	1.9	2000	1.7	2500	1.5
Electron beam energy [eV]	SEE yield																																														
250	2.2																																														
350	2.7																																														
400	2.7																																														
500	2.5																																														
600	2.6																																														
800	2.3																																														
1000	2.2																																														
1500	1.6																																														
2000	1.5																																														
2500	1.4																																														
Electron beam energy [eV]	SEE yield																																														
250	2.2																																														
350	2.4																																														
400	2.4																																														
500	2.6																																														
600	2.6																																														
800	2.3																																														
1000	2.2																																														
1500	1.9																																														
2000	1.7																																														
2500	1.5																																														
P7 AZ-2000-IECW $S_{emax} : 400 \text{ [eV]}$ $S_{dmax} : 2.57 \text{ [-]}$		P11 Aeroglaze Z307 $S_{emax} : 400 \text{ [eV]}$ $S_{dmax} : 2.76 \text{ [-]}$																																													
<table border="1"> <caption>Approximate data for AZ-2000-IECW</caption> <thead> <tr> <th>Electron beam energy [eV]</th> <th>SEE yield</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>250</td><td>2.2</td></tr> <tr><td>350</td><td>2.4</td></tr> <tr><td>400</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>500</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>600</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>800</td><td>2.3</td></tr> <tr><td>1000</td><td>2.4</td></tr> <tr><td>1500</td><td>1.9</td></tr> <tr><td>2000</td><td>1.8</td></tr> <tr><td>2500</td><td>1.7</td></tr> </tbody> </table>		Electron beam energy [eV]	SEE yield	250	2.2	350	2.4	400	2.6	500	2.5	600	2.5	800	2.3	1000	2.4	1500	1.9	2000	1.8	2500	1.7	<table border="1"> <caption>Approximate data for Aeroglaze Z307</caption> <thead> <tr> <th>Electron beam energy [eV]</th> <th>SEE yield</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>250</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>350</td><td>2.7</td></tr> <tr><td>400</td><td>2.8</td></tr> <tr><td>500</td><td>2.3</td></tr> <tr><td>600</td><td>2.2</td></tr> <tr><td>800</td><td>1.9</td></tr> <tr><td>1000</td><td>1.6</td></tr> <tr><td>1500</td><td>1.3</td></tr> <tr><td>2000</td><td>1.1</td></tr> <tr><td>2500</td><td>1.0</td></tr> </tbody> </table>		Electron beam energy [eV]	SEE yield	250	2.5	350	2.7	400	2.8	500	2.3	600	2.2	800	1.9	1000	1.6	1500	1.3	2000	1.1	2500	1.0
Electron beam energy [eV]	SEE yield																																														
250	2.2																																														
350	2.4																																														
400	2.6																																														
500	2.5																																														
600	2.5																																														
800	2.3																																														
1000	2.4																																														
1500	1.9																																														
2000	1.8																																														
2500	1.7																																														
Electron beam energy [eV]	SEE yield																																														
250	2.5																																														
350	2.7																																														
400	2.8																																														
500	2.3																																														
600	2.2																																														
800	1.9																																														
1000	1.6																																														
1500	1.3																																														
2000	1.1																																														
2500	1.0																																														
P12 APTEK 2711 $S_{emax} : 400 \text{ [eV]}$ $S_{dmax} : 2.58 \text{ [-]}$																																															
<table border="1"> <caption>Approximate data for APTEK 2711</caption> <thead> <tr> <th>Electron beam energy [eV]</th> <th>SEE yield</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>250</td><td>2.4</td></tr> <tr><td>350</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>400</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>500</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>600</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>800</td><td>2.4</td></tr> <tr><td>1000</td><td>2.3</td></tr> <tr><td>1500</td><td>2.0</td></tr> <tr><td>2000</td><td>1.8</td></tr> <tr><td>2500</td><td>1.6</td></tr> </tbody> </table>		Electron beam energy [eV]	SEE yield	250	2.4	350	2.5	400	2.6	500	2.5	600	2.5	800	2.4	1000	2.3	1500	2.0	2000	1.8	2500	1.6																								
Electron beam energy [eV]	SEE yield																																														
250	2.4																																														
350	2.5																																														
400	2.6																																														
500	2.5																																														
600	2.5																																														
800	2.4																																														
1000	2.3																																														
1500	2.0																																														
2000	1.8																																														
2500	1.6																																														

4.3.4. 【手法 C】連続電子ビーム照射帯電計測法

本手法は、比較的低エネルギーの電子ビームを対象材料に連続的に照射しながら表面電位の時間特性を計測し、また、電子ビーム照射停止後の対象材料の表面電位の減衰特性を計測して、その解析データを用いて 2 次電子放出係数のエネルギー依存性を導出するものである。

まず、電子ビーム照射後の電位減衰特性から減衰時定数を求め、その減衰時定数から材料の体積抵抗率を求める（体積抵抗率の導出に関しては、4.6.2 節にも記載）。その体積抵抗率を用いて電子ビーム照射中の表面電位から伝導電流を求め、また、電子ビーム照射中の表面電位の時間的变化から変位電流を求める。これらの電流を合算したものが照射中のバルク電流であり、入射ビーム電流からこのバルク電流を引いたものが 2 次電子放出電流になる。この 2 次電子放出電流と入射ビーム電流の比率が 2 次電子放出係数である。また、照射中の表面電位の時間特性から実際に入射する電子のエネルギーの時間的变化を求め、この時間特性と 2 次電子放出係数の時間特性から、2 次電子放出係数の照射エネルギー依存性を求める。

4.3.4.1. 計測方法の長所と短所

【長所】

- 一連の電子ビーム照射中及び照射後の表面電位計測から 2 次電子放出係数と体積抵抗率が導出できる。
- 対象材料の帯電を積極的に利用する。
- 電子ビームをパルス化する必要はない。
- 電子ビームの加速電圧が一定の状態、材料の帯電電位により電子の入射エネルギーが変わり、また、材料全体をバイアスすることによっても入射エネルギーを変えることができる。

【短所】

- 抵抗率の比較的小さい材料に対しては、帯電しにくいので 2 次電子放出係数の評価が困難。
- ビームの均一性が必要である。
- 詳細な評価には照射中の表面電流の評価が必要。

4.3.4.2. 計測方法

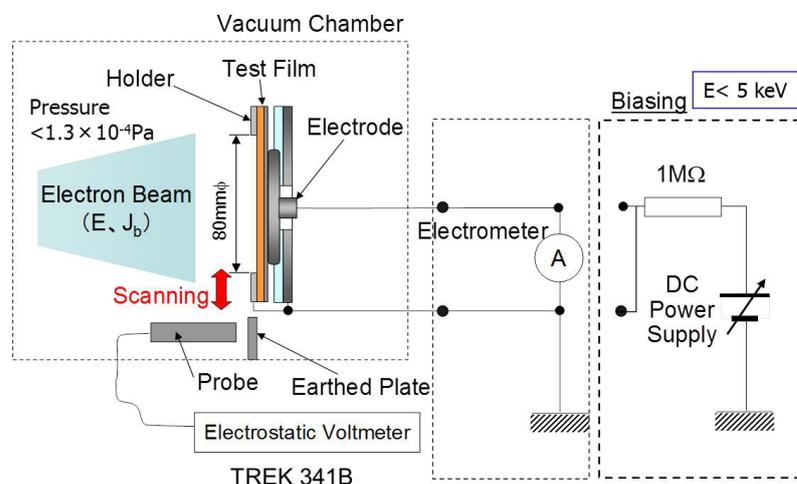


図 4.3.4-1 実験系の概略

図 4.3.4-1 に、実験系の概略図を示す。試料ホルダーに取り付けられた試料に一定の加速電圧で加速された電子ビームを一定時間（例えば、60 分）照射する。この間、時々刻々と変化する表面電位を非接触表面電位計プローブで試料表面上を掃引することにより計測する。また、照射停止後の電位は、長時間プローブを試料表面上に配置することにより、表面電位の減衰特性として取得する。なお、2 次電子放出係数が 1 より大きくなる電子のエネルギーは通常数 10eV～数 keV の領域にあるので、通常 5keV 以下のエネルギーの電子ビームを用いる。

この計測手法の流れを図 4.3.4-2 に示す。対象材料を電子ビームエネルギー E で照射したときの表面電位 V_s の時間特性を取得する。また、そのエネルギーで照射した後の表面電位の減衰特性を長時間にわたって取得する。これらのデータを用いて 2 次電子放出係数のエネルギー依存性を求める。まず、照射後の対象材料の表面電位減衰特性は、

$$V_s(t) = V_{s0} \cdot \exp(-\frac{t}{\tau}) \quad \dots(4.3.4-1)$$

で表現できる。ここで、 V_{s0} ：ビーム照射停止時の表面電位（初期表面電位）、 τ ：減衰時定数、である。この減衰時定数 τ は、

$$\tau = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \rho_v \quad \dots(4.3.4-2)$$

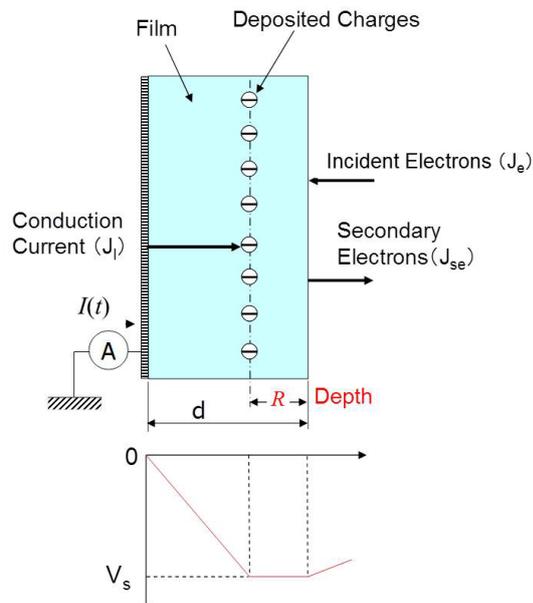
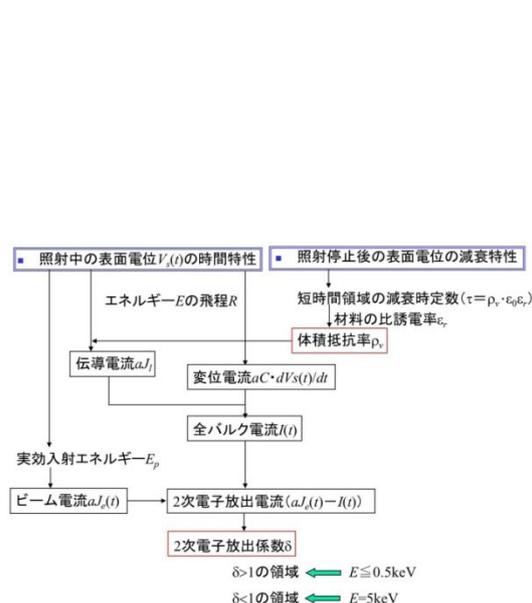
で表され、材料の比誘電率 ϵ_r (ϵ_0 ：真空中の誘電率 = $8.9 \times 10^{-12} \text{F/m}$) が既知ならば、体積抵抗率 ρ_v を求めることができる。

次に、この体積抵抗率 ρ_v を用いて、電子ビーム照射中の帯電特性から、照射中に流れる各種電流を評価する。そのために、図 4.3.4-1 の 1 次元帯電モデルを考える。バルク中を流れる電流 $I(t)$ は、変位電流と伝導電流の和として、

$$I(t) = a \left\{ C \frac{dV_s(t)}{dt} + J_l(V_s(t)) \right\} \quad \dots(4.3.4-3)$$

で表される。ここで、 a ：電子ビーム照射面積、 J_l ：伝導電流密度、 C ：単位面積あたりの実効的な静電容量、である。電子の飛程 R を考慮すると、

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d-R} \quad \dots(4.3.4-4)$$



また、伝導電流密度 J_l は、

$$J_l = \frac{1}{\rho_v} \cdot \frac{V_s(t)}{d-R} \quad \dots(4.3.4-5)$$

となる。したがって、(4.3.4-3)式は、

$$I(t) = a \left\{ \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d-R} \cdot \frac{dV_s(t)}{dt} + \frac{1}{\rho_v} \cdot \frac{V_s(t)}{d-R} \right\} \quad \dots(4.3.4-6)$$

となる。

一方、エネルギー E で照射された対象材料が表面電位 $V_s(t)$ に帯電することにより、実効的に試料に入射する電子のエネルギー $E_p(t)$ は、

$$E_p(t) = |-E - V_s(t)| \quad \dots(4.3.4-7)$$

の関係になり、エネルギー E でビーム電流密度 J_b のビームは、実効的に

$$J_e(t) = J_b \cdot \left\{ \frac{E_p(t)}{E} \right\}^{1/2} \quad \dots(4.3.4-8)$$

となって試料に入射する。この時、表面から 2 次電子として放出される電流密度 $J_{se}(t)$ は、

$$aJ_{se}(t) = a \cdot J_e(t) - I(t) \quad \dots(4.3.4-9)$$

で表される。

2 次電子放出係数 δ は、入射ビーム電流密度 $J_e(t)$ に対する 2 次電子放出電流密度 $J_{se}(t)$ の比であるので、

$$\delta = \frac{J_{se}(t)}{J_e(t)} = \frac{aJ_e(t) - I(t)}{aJ_e(t)} \quad \dots(4.3.4-10)$$

となり、照射中の時刻 t における各種電流の時間特性を求め、(4.3.4-10)式より 2 次電子放出係数の時間特性 $\delta(t)$ とその時の実効的な入射エネルギー $E_p(t)$ の関係を求めれば、2 次電子放出係数 δ のエネルギー依存性が取得できることになる。なお、2 次電子放出係数は、通常図 4.3.4-1 のような特性になり、 $\delta < 1$ の場合には負の帯電になり、 $\delta > 1$ の場合は正の帯電になる。このエネルギー領域を把握するために、 $\delta < 1$ になるエネルギー領域の通常 $E=5\text{keV}$ を使用して帯電特性を取得する。一方、 $\delta > 1$ の正帯電領域に対しては、 $E < 0.5\text{keV}$ の電子エネルギーを使用する。ただ、このエネルギーの電子ビームを引き出すのは困難であり、また、このエネルギー領域の電子を引き出せたとして直接材料に照射すると 2 次電子が多数発生して正の帯電が生ずるが、2 次電子のエネルギーは数 eV とエネルギーが小さいので、正の帯電によって材料に引き戻される。そのため、帯電が中和され正確な 2 次電子放出電流を求めることができない。そこで、本手法では、試料から放出される 2 次電子の引き戻しが無いよう試料全体を負にバイアスし、このバイアス電圧と電子の加速電圧の差を実効的な照射エネルギーとする。本手法では、電子の加速電圧を通常 -5kV にし、試料を負にバイアスする電圧を、例えば、 -4.5kV にして、照射エネルギー E を $E=0.5\text{keV}$ にする。

この手法により、2 次電子放出係数を取得した例を、 $125\mu\text{mFEP}$ フィルムを例に示す。図 4.3.4-5 は、 $E=5\text{keV}$ 、 $J_b=0.13\text{nA/cm}^2$ の条件で電子ビームを 60 分間照射したときの帯電特性(a)と照射後の表面電位減衰特性(b)である。

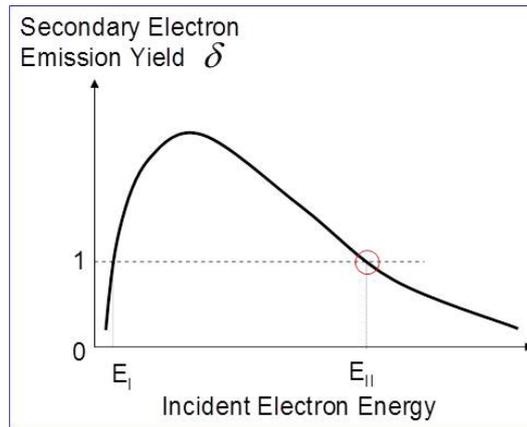
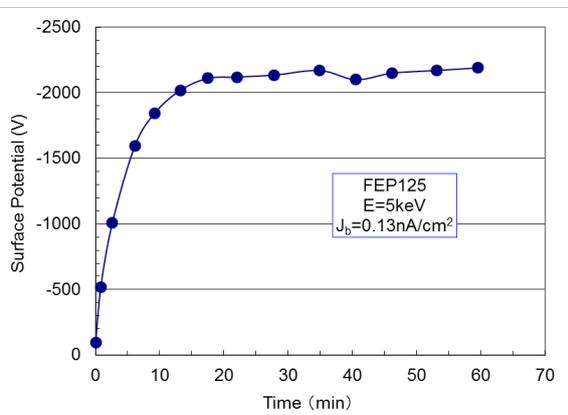
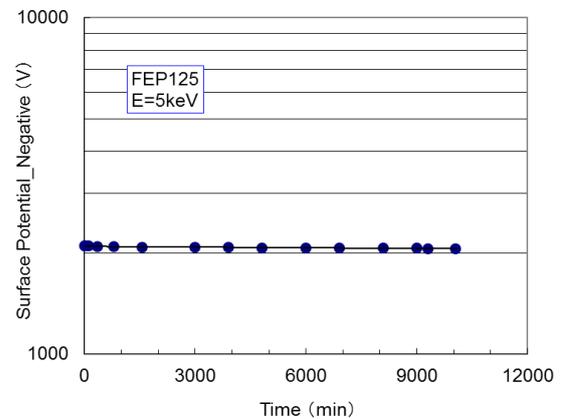


図 4.3.4-4 一般的な 2 次電子放出特性

この ρ_v を用いて、帯電特性(図 4.3.4-5 (a))から、各種電流と実効入射エネルギー、2 次電子放出係数の時間特性を求めたのを図 4.3.4-6 に示す。図 4.3.4-6 (a)は、(4.3.4-6)式の変位電流成分と伝導電流成分を分離して示したものである。また、図 4.3.4-6 (b)は、(4.3.4-7)、(4.3.4-8)式より求めた実効入射エネルギー $E_p(t)$ と入射ビーム電流 $J_e(t)$ を求めたものである。さらに図 4.3.4-6 (c)は、図 4.3.4-6 (a) より求めたバルク電流 $I(t)$ と(4.3.4-9)式から求めた 2 次電子放出電流 $J_{se}(t)$ である。図 4.3.4-6 (d)は、(4.3.4-10)式より求めた 2 次電子放出係数の時間特性 $\delta(t)$ と図 4.3.4-6 (b)に示した実効入射エネルギー $E_p(t)$ である。この $E_p(t)$ と $\delta(t)$ から 2 次電子放出係数 δ の電子エネルギー依存性が求まる。

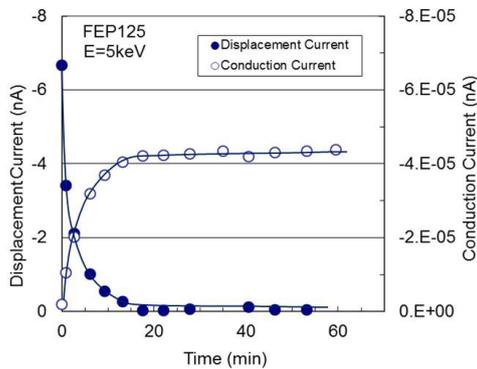


(a) 照射中の表面電位—時間特性

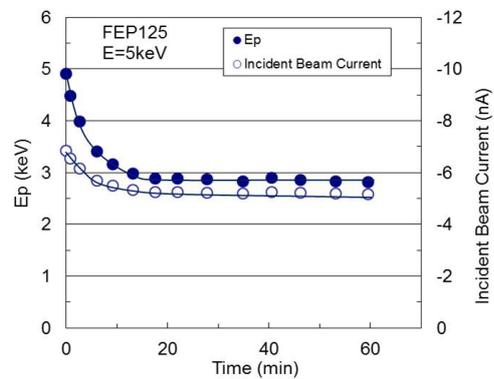


(b) 照射後の表面電位減衰特性

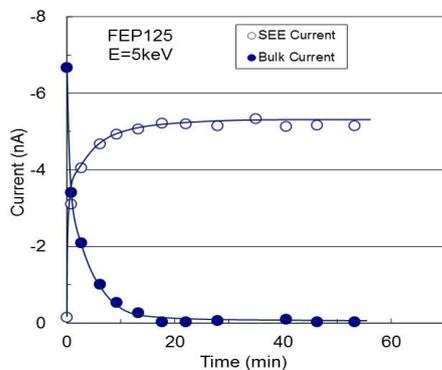
図 4.3.4-5 E=5keV、 $J_b=0.13nA/cm^2$ 電子ビーム照射による 125 μm FEP フィルムの帯電特性



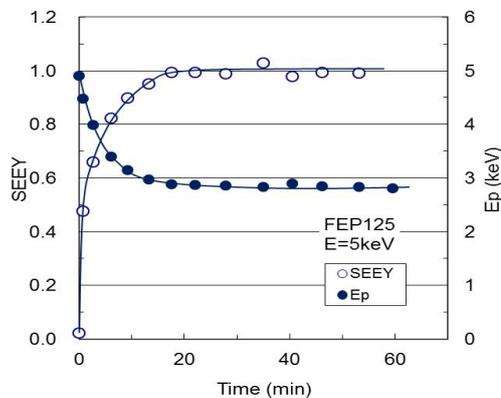
(a) 伝導電流と変位電流



(b) 実効入射エネルギーと入射ビーム電流



(c) バルク電流と2次電子放出電流



(d) 2次電子放出係数と実効入射エネルギー

図 4.3.4-6 125 μ mFEP フィルムにおける E=5keV 電子ビーム照射時の各種電流と2次電子放出特性

次に、 $\delta > 1$ の領域を求めた $E=0.3\text{keV}$ (電子の加速電圧 -5kV 、試料バイアス電圧 -4.7kV)電子照射の場合の 125 μm FEP フィルムの評価結果について述べる。なお、電流密度 $J_b=0.10\text{nA/cm}^2$ は、 $E=5\text{keV}$ での値である。図 4.3.4-7 に照射中の帯電特性 (a) と照射後の電位減衰特性(b)を示す。照射中の表面電位は時間と共に正に帯電していくが、“S” 字型の特性を示すのが特徴的である。また照射後の電位減衰特性は、負帯電の場合 (図 4.3.4-5 (b)) に比べ速い。この減衰時定数から、 $\epsilon_r=2.1$ を用いて体積抵抗率 ρ_v を求めると、

$$\rho_v = 5.9 \times 10^{16} \Omega\text{m}$$

が得られた。この ρ_v を用いて帯電特性 (図 4.3.4-7 (a)) から、各種電流と実効入射エネルギー、2次電子放出係数の時間特性を求めると、図 4.3.4-8 のようになる。図 4.3.4-8(a)は、(4.3.4-6)式の変位電流成分と伝導電流成分を分離して示したものである。また、図 4.3.4-8(b)は、(4.3.4-7)、(4.3.4-8)式より求めた実効入射エネルギー $E_p(t)$ と入射ビーム電流 $J_e(t)$ を求めたものである。さらに、図 4.3.4-8(c)は、図 4.3.4-8 (a) より求めたバルク電流 $I(t)$ と(4.3.4-9)式から求めた2次電子放出電流 $J_{se}(t)$ である。図 4.3.4-8 (d)は、(4.3.4-10)式より求めた2次電子放出係数の時間特性 $\delta(t)$ と図 4.3.4-8 (b)に示した実効入射エネルギー $E_p(t)$ である。この $E_p(t)$ と $\delta(t)$ から2次電子放出係数 δ の電子エネルギー依存性が求まる。

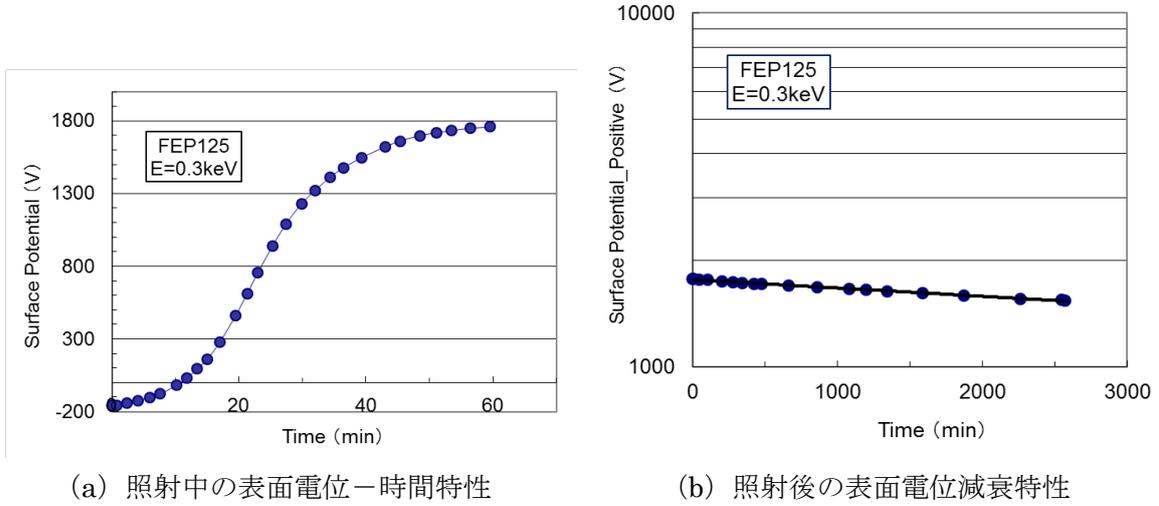


図 4.3.4-7 E=0.3keV、 $J_b=0.10\text{nA/cm}^2$ 電子ビーム照射による 125 μm FEP フィルムの帯電特性

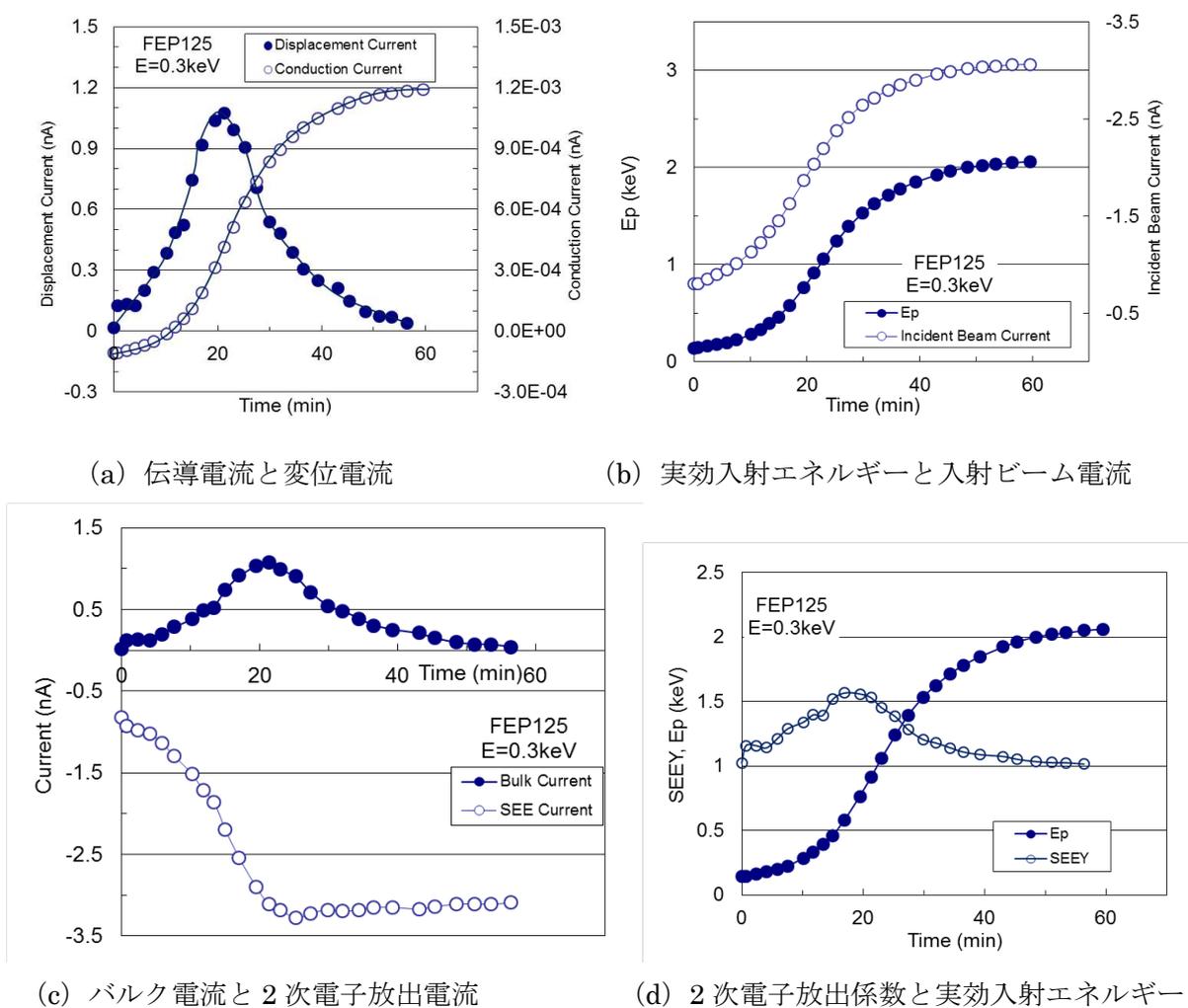


図 4.3.4-8 125 μm FEP フィルムにおける E=0.3keV 電子ビーム照射時の各種電流と 2 次電子放出特性

これらの2次電子放出係数の時間特性 $\delta(t)$ と実効入射エネルギー $E_p(t)$ の関係(図4.3.4-6(d)、図4.3.4-8(d))から求めた $125\mu\text{mFEP}$ の2次電子放出係数のエネルギー依存性を示すと、図4.3.4-9のようになる。この特性から、2次電子放出係数の最大値 δ_{max} 、 $\delta=1$ になる高エネルギー側の電子エネルギー(セカンドクロス) E_{II} を求めると、

$$\delta_{\text{max}}=1.6 \quad @0.6\text{keV}$$

$$E_{\text{II}}=2.1\text{keV}$$

が得られる。

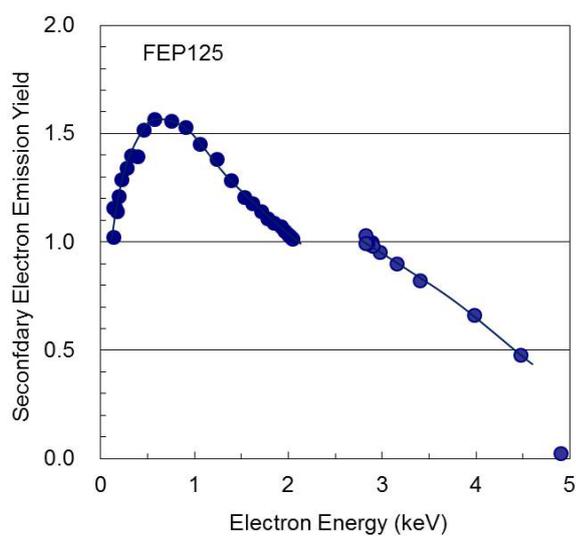


図 4.3.4-9 $125\mu\text{mFEP}$ フィルムの2次電子放出係数の電子エネルギー依存性

4.3.4.3. 計測結果

125μm FEP		50μm ETFE	
$S_{emax} : 600[eV]$	$S_{dmax} : 1.6[-]$	$S_{emax} : 500[eV]$	$S_{dmax} : 1.9[-]$
50μm Kapton		50μm UPILEX_R	
$S_{emax} : 400[eV]$	$S_{dmax} : 1.7[-]$	$S_{emax} : 550[eV]$	$S_{dmax} : 2.0[-]$

4.4. 光電子放出・量子効率の計測

光電子放出と量子効率算出方法について記す。

4.4.1. 光電子放出の基礎理論

4.4.1.1. 電子放出

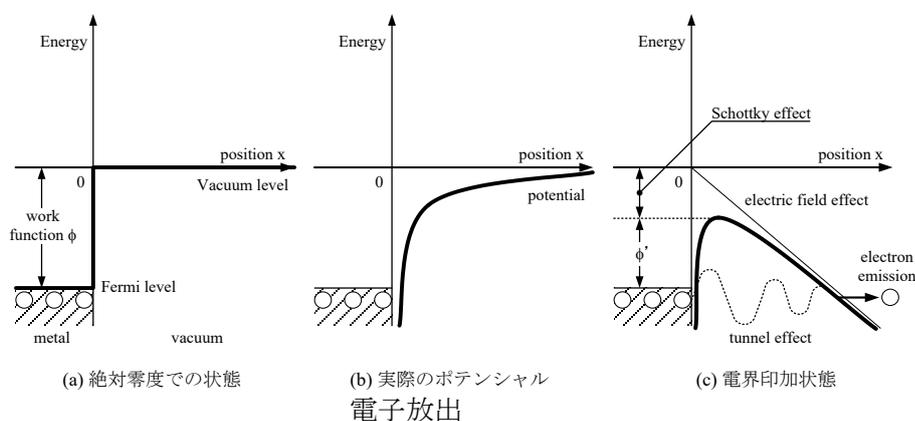
金属を高温にしたり、外部から電界を加えたり、あるいは光を照射したりすると、表面から電子が放出されることがある。これを電子放出 (Electron emission) と呼ぶ。電子放出を起こさせるためには、金属表面近くの電子になんらかの方法でエネルギーを与え、金属の外に取り出さなければならない。

金属内電子にエネルギーを与える方法の違いによって、電子放出は(1)光電子放出、(2)熱電子放出、(3)二次電子放出、(4)電界電子放出などに分類することができるが、こうした現象に共通して言えることは、金属内に閉じ込められた電子が外部に出てくるには、金属によって定まるエネルギーが必要である、ということである。ある大きさを持った金属では、電子はその内部に閉じ込められている。それは電子が外部に逃げられないような障壁(Barrier)があるからである。図 4.4.1-1(a)において、太線は金属表面周辺の位置が $X=0$ の時の電子のポテンシャルエネルギーを示している。 X の値が 0 より小さいとき、斜線部分の帯は金属内部の自由電子のエネルギー分布を示している。 X の値が 0 より大きいときには、 X 軸上の線は電子が金属表面に現れるための最小のエネルギーを示している。この差、つまりフェルミ準位から金属表面までの位置エネルギーの差を仕事関数と言い、 ϕ で表す。単位は通常電子ボルト[eV]で表される。

仕事関数は、表面物性を応用する場合に重要な物性量であるため古くから研究が行われてきた。

理論的検討は、金属を一様な密度の正電荷中に負電荷が分布するものとするジェリウムモデルを用いた議論から始まり、面方位依存性、原子修飾による影響に関して実験を定性的に説明することができている。近年計算機を利用した研究が著しく進歩しており、金属単結晶の場合、実験で定めるパラメータを含まない第一原理計算により、高い精度で実験結果を再現できるようになっている。

半導体、絶縁体の場合、添加する不純物により禁制帯内でフェルミ準位が容易に変化する。さらに電子は必ずしも直接的にフェルミ準位から真空に放出されないため仕事関数は電子放出に対する物質の性質を代表する物性にならない。むしろ、電子親和力、禁制帯幅などで議論するほうが実態を反映しているといえる。さらに、高密度で存在する表面準位の影響を無視することができない。



4.4.1.2. 光電子放出

固体表面に光を照射すると、固体内電子は光からエネルギーを吸収して高いエネルギー準位に励起されるか、あるいは、表面のポテンシャル障壁を越えて真空中に放出される。この現象を光電効果(Photoelectric effect)または光電子放出(Photoelectron emission)という。放出された電子の持つ最大エネルギーが入射する光の波長だけで決まり、その強さに依存しないことは、アインシュタインの光子説で説明され、その後の量子力学の発展に重要な礎石となった歴史的な事実である。

光子のエネルギーは $E = h\nu$ で表されるからこのエネルギーが電子に与えられて仕事関数 ϕ よりも大きければ電子は外部にとび出す。そのときの最大速度を v とすれば、次式が得られる。^[3]

$$E = h\nu - \phi \quad (4.4.1-1)$$

光の振動数がある値より小さい場合には $h\nu < \phi$ となるので光電子は出ない。今、 $h\nu_c = \phi$ なる周波数 ν_c を限界周波数、その波長 λ_c を限界波長という。

また、光電効果は次の二つの機構に分けられる。

I 体積光電効果：物質の内部に侵入する光によって生ずるもので、発生した電子の半分は表面に、半分は内部に拡散していく。表面に向かう電子も一部しか外に出られない。

II 表面光電効果：光が表面にあたったときに起こる効果で、光電子の数は偏光方向によって強く支配される。なめらかな表面についていえば、電磁波の電気ベクトルが表面に垂直な成分を持っているときに表面効果が存在するとみられる。粗い表面では偏光の効果はあまり関係しない。

金属表面の温度が高くなると、伝導体においてフェルミ準位以上のエネルギーを持つ電子が存在するようになるから、光のエネルギーが ϕ 以下の場合でも光電子放出が起きる可能性がある。しかし、常温ではその数は非常に少ない。ところが、少しでもこのような電子があると実験的に限界波長、すなわち金属の仕事関数を正確に求めることは難しい。光電子放出のための仕事関数を正確に求めるためには、単位強度の光を照射したときの光電子電流を表す次式の光電子放出に関するファウラーの式が用いられる。

$$J = \frac{1}{2} PAT^2 F(x) \quad (4.4.1-2)$$

$$x = \frac{h(\nu_c - \nu)}{kT} \quad (4.4.1-3)$$

$$F(x) = \begin{cases} \frac{\pi^2}{6} + \frac{x^2}{2} - e^x + \frac{e^{2x}}{2^2} - \frac{e^{3x}}{3^2} + \dots & (\nu > \nu_c) \\ e^x - \frac{e^{-2x}}{2^2} + \frac{e^{-3x}}{3^2} - \dots & (\nu \leq \nu_c) \end{cases} \quad (4.4.1-4)$$

$$F(x) = \begin{cases} \frac{\pi^2}{6} + \frac{x^2}{2} - e^x + \frac{e^{2x}}{2^2} - \frac{e^{3x}}{3^2} + \dots & (\nu > \nu_c) \\ e^x - \frac{e^{-2x}}{2^2} + \frac{e^{-3x}}{3^2} - \dots & (\nu \leq \nu_c) \end{cases} \quad (4.4.1-5)$$

ここで、 J は放出電流値、 A は熱電子放出定数、 ν_c は限界周波数、 P は光子を吸収して脱出する確率である。

4.4.1.3. 量子効率

エネルギー $h\nu$ 以上の光子が金属に吸収されれば、1個以上の電子が飛び出しうるが、実際にはその効率はかなり低く、数%以下である。単位面積の金属表面に単位時間当たり入射する光子数を n_p 、そこから単位時間当たり放出される電子の数を n_e とすると、 $Q = n_e/n_p$ を量子効率という。

量子効率が一定であれば $Q = n_e/n_p$ より、光電子電流は光子数の増加とともに増加するが、実際には光電子放出量は金属の種類や表面の状態によって波長選択性がある。例えば、アルカリ金属ではある波長において光電子電流が極大値を示す。また、入射光の偏波面によって入射角依存性が変わり、光の電界ベクトルが表面に対して垂直なときは、単位面積あたり入射する光の量に応じて光電子電流が変化するが、電界ベクトルが表面に対して平行の時には、入射角が増えるに従って光電子電流が増大する。

量子効率測定方法は試料に光を当て、光電子放出電流 I_p を測定するという形が基本的である。 I を素電荷 e で割れば n_e が算出される。また、同様に光をフォトダイオードに照射することで流れる電流 I_p も測定する。ここで、フォトダイオードの量子効率 Q から光量が以下の式で求められる。

$$n_p = \frac{I_p}{e \cdot Q} \quad \dots(4.4.1-6)$$

以上の結果を元に、 n_e を n_p で除す事によって量子効率(Q)が求まる。

4.4.2. 【手法 A】パルス照射測定法

回折格子分光器を用いて分光した単色光を試料にパルス照射し、発生した光電子をファラデーカップで収集する。

4.4.2.1. 計測方法の長所と短所

【長所】

- ①重水素とキセノンの2つの光源を使用しているため、116～500 nm までほぼ一定の光量を1 nm 波長ごとの分光で測定可能である。(出射スリットの変更が可能であり、0.5 nm 程度までシームレスに調整可能)
- ②パルス光を照射可能であり、サンプルの表面帯電による二次電子収集への影響を抑制する事が可能である。
- ③量子効率の取得より、材料物性値(仕事関数、イオン化エネルギー等)も同時に取得する事が可能である。

【短所】

現状比較できる装置が存在しないため、無い。

4.4.2.2. 計測方法

4.4.2.2.1. 測定システム

図 4.4.2-1 に光電子放出電流測定装置の概略図を示す。真空チャンバー内には試料台、ファラデーカップが取り付けられている。光源は、重水素ランプ光源、キセノンランプ光源を使用しており、光源を使い分けることにより、照射光は110～580 nm (2.1～12 eV)の範囲の光を照射可能となっている。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。この分光はファラデーカップの中心に設けられた照射口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。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 (Kethley 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、本測定装置では、機械式シャッターによって照射光を時間幅 30 ms の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。

また、試料に照射する照射光の直径は4 mm であり、XY ステージを用いて、Fig. 3 に示す様に、測定毎に照射位置を10 mm 移動させ、常に未照射領域での測定を行う事で帯電による光電子放出への影響を除去している。

試料台は駆動装置に取り付けられており、その制御はステージコントローラーを用いて行うことができる。ステージコントローラーを用いた駆動系の制御は、試料台はX軸方向、Y軸方向、Z軸方向への移動、X-Y軸の回転が可能であり、ファラデーカップはZ軸方向のみ移動が可能となっている。

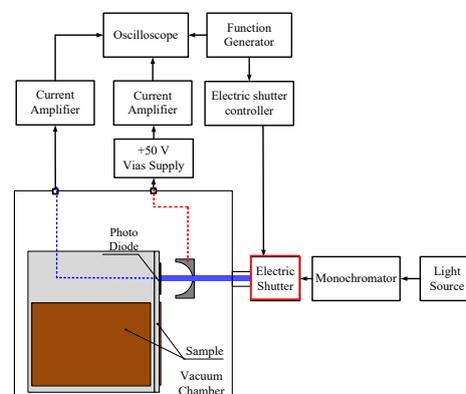


図 4.4.2-1 光電子放出測定システム

4.4.2.2. 試料台

図 4.4.2-2 に本測定に使用する試料台を示す。試料台は図 4.4.2-2 に示すように立方体の形状をしており、縦 100 mm×横 100 mm×厚さ 3 mm の試料取り付け面が 3 枚、縦 100 mm×横 100 mm×厚さ 3 mm の台座が 1 枚、真空チャンバーと絶縁するためのアクリル板、駆動装置取り付け台となっている。この試料台は駆動装置の X-Y 軸回転によって紫外光照射面を変えることで、効率よく測定が行えるようにした。また、試料台にはフォトダイオード用端子を取り付けており、試料台に直接フォトダイオードを取り付けることができる。さらにフォトダイオード用端子と試料台の間にアクリル板、端子固定にアクリルねじを用いることで、端子の接地を試料台とは別系統とした。ここで、測定試料については導電性両面テープ（3M 社製）を用いることで、試料台に貼り付けを行った。

4.4.2.3. フォトダイオード

本研究では光源システムより照射される紫外光の光量を測定するためにシリコンフォトダイオード(IRD 社製 AXUV-100G)を用いた。図 4.4.2-3 にフォトダイオードを示す。フォトダイオードの寸法は縦 15 mm×横 16.5 mm×2.6 mm となっており、アノード・カソードの信号線が各一本ずつある。フォトダイオードの量子効率も NIST より校正されている。そのため、フォトダイオードに紫外光を照射することで流れる電流値を測定することで、照射された紫外光の光子数を算出することができる。この光子数は測定試料の量子効率を算出する際に用いる。

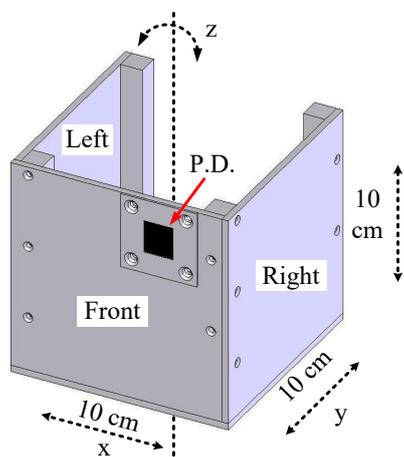


図 4.4.2-2 試料台図 4.4.1-1

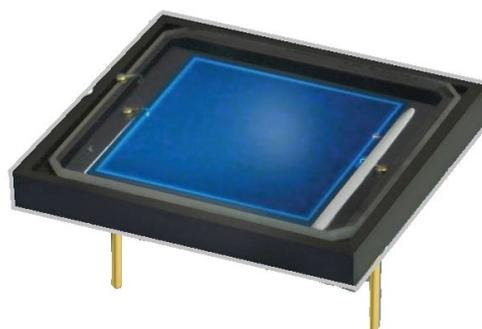


図 4.4.2-3 IRD-AXUV

4.4.2.2.4. ファラデーカップ

図 4.4.2-4 に今回設計した F.C.ユニットを示す。F.C.ユニットは大きく分けて F.C.、アルミニウム製のシールド、真空チャンバー内に取り付けるためのロッドで構成されており、F.C.とシールドの間はテフロンで絶縁・固定している。なお、シールドは、DLC(Diamond Like Carbon)コーティングを施すことでシールドでの二次電子放出を抑制することが出来る。また、F.C.は光電子の収集量が増加するように半球状にした。F.C.にはシールドとはテフロンの中空棒で絶縁されたネジが取り付けられる設計となっており、SMA コネクタの芯線に接続された銅線をネジに直接はんだ付けする設計となっている。これにより、F.C.の収集面以外をシールドで覆うことが出来る。

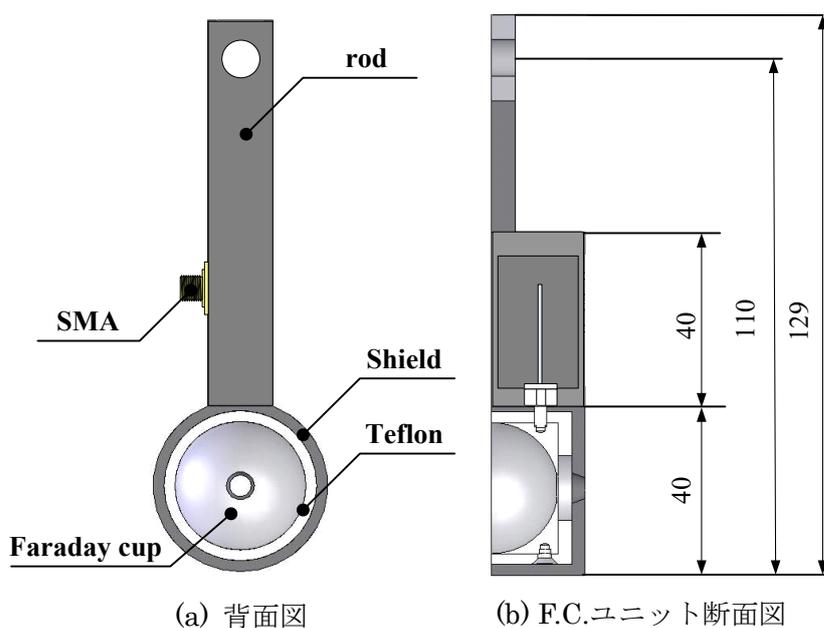


図 4.4.2-4 F.C.ユニット

4.4.2.2.5. 光源システム

光源システム概要図を図 4.4.2-5 に示す。光源システムは大きく分類すると、短波長（高エネルギー）領域の量子効率測定用光源、長波長（低エネルギー）領域の量子効率測定用光源、2 種類の光源より出力された照射光はモノクロメータ、コリメータを用いることで単色化・平行光化を行う分光システムとなる。表 4.4.2-1 に今回使用したモノクロメータの仕様を示す。また、実際にフォトダイオードを用いて測定した各光源の照射光量を図 4.4.2-6 に示している。なお測定の際はスリット幅を 1 mm としている。

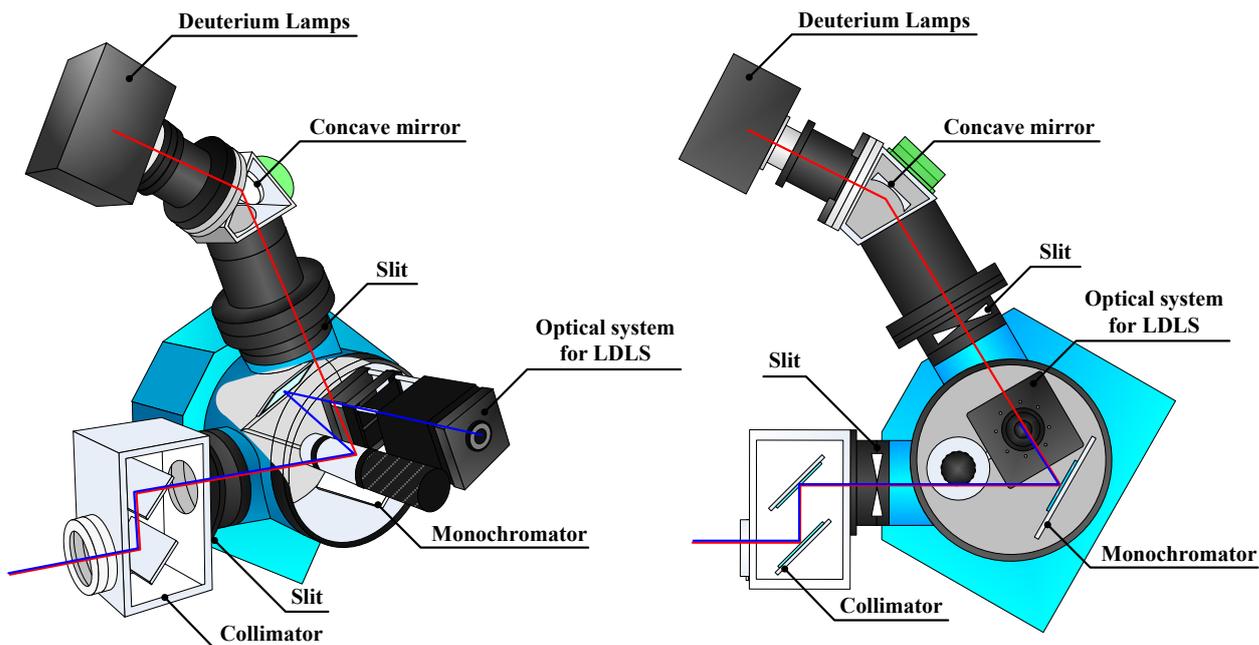


図 4.4.2-5 真空紫外・可視光源システム

表 4.4.2-1 分光器 仕様

光学設計	凹面ホログラフィックグレーティング
焦点距離	200 mm
波長領域	50~550 nm

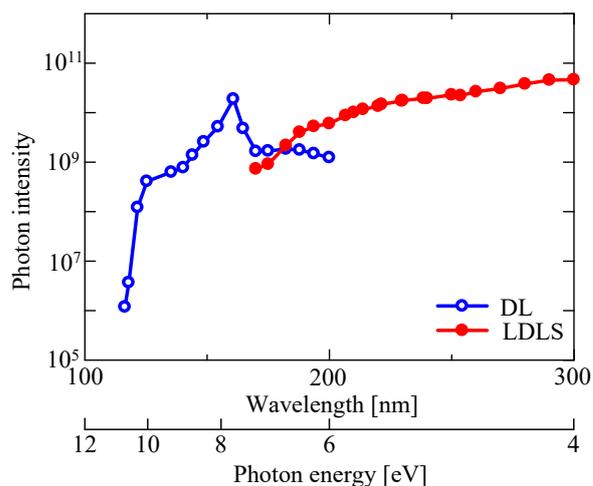


図 4.4.2-6 真空紫外・可視光源システムの光量

4.4.2.2.6. 電子シャッターユニット

本測定においては最終的に絶縁材料における光電子放出電流の安定的な測定を目標としている。絶縁材料での測定においては、連続的に紫外光を試料に照射することにより試料表面が正帯電し、時間の経過とともに電子を放出しにくくなるため、連続光での測定は困難であるという問題点がある。そこで、帯電による測定結果への影響を少しでも低減させるため、照射光をパルス光とすることで、照射時間を制限しその影響を緩和させている。実際には、図 4.4.2-7 に示す光源システムと真空チャンバーの接続フランジの間にシャッターユニットを組み込み、オシロスコープのトリガ信号と同期したシャッターの開閉信号により、パルス光を生成するシステムとなっている。



図 4.4.2-7 電子シャッターユニット

表 4.4.2-2 シャッターユニットの仕様

Input Current	2.5 A Minimum
Input Voltage	12 Vdc
	90–264 Vac, 47–63 Hz
Maximum Repetition Rate	2 Hz
Minimum Recharge Time	200 msec
Output Voltage	9 Vdc
Preset Shutter Speeds ²	1/8, 1/15, 1/30, 1/60 sec
TTL Input	3–7 Vdc

4.4.2.3. 測定および校正方法

4.4.2.3.1. 光電子放出測定方法

絶縁材料の光電子放出電流測定を行うにあたり、帯電の影響を考慮するため、紫外光を照射する位置を一回の照射ごとに変える必要がある。図 4.4.2-8 に紫外光照射位置の例を示す。同図中に示した点の位置が紫外光を照射する測定ポイントであり、照射光の形状が直径 4 mm の円であるため、測定ポイントが重ならないようポイント間隔は 10 mm としている。測定する波長は 116~300 nm であり、この波長領域内で P.D.の量子効率が校正されている波長における測定を行う。通常の測定においては、1 波長あたり 4 回の加算平均を行うことができる計算となっている。

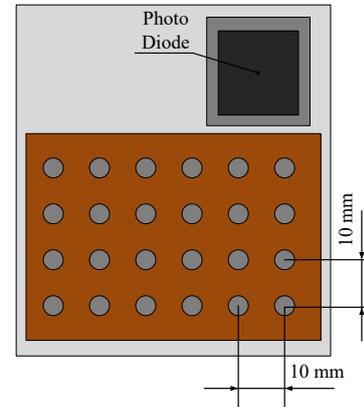


図 4.4.2-8 測定位置

測定手順は、まず P.D.の量子効率が校正されている波長の紫外光を P.D.に照射し、次に絶縁材料に照射するといった手順で測定を行った。

測定システムの簡単な構成と、測定手順のフローチャートを図 4.4.2-9 に示す。

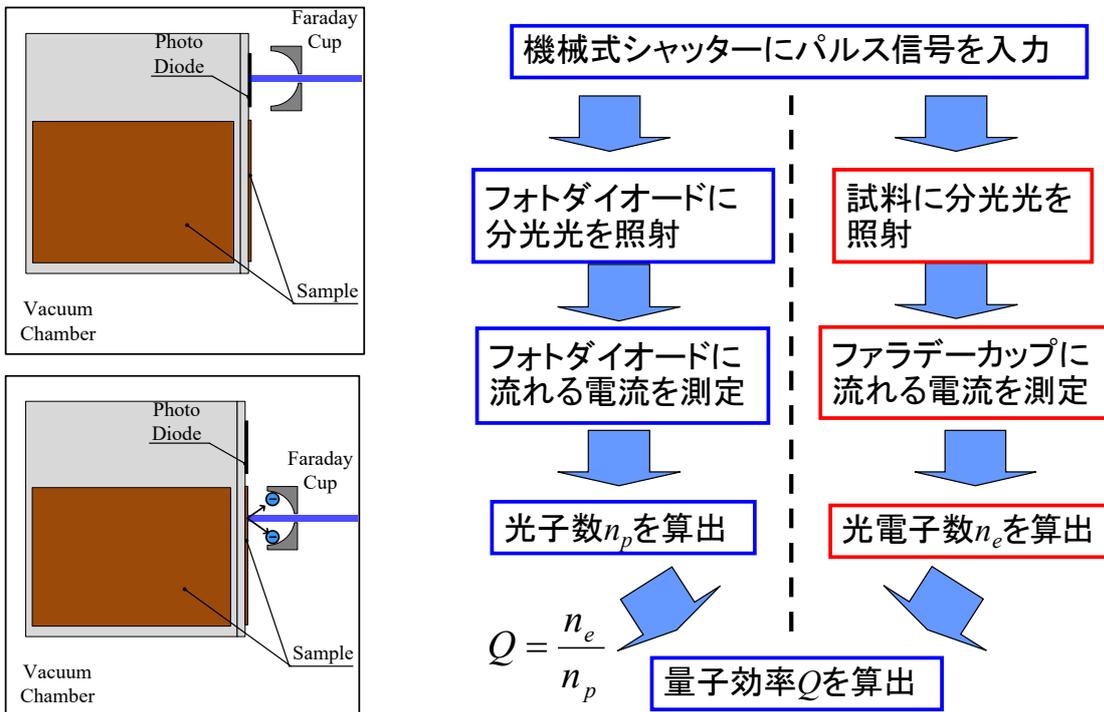


図 4.4.2-9 測定フローチャー

4.4.2.3.2. 校正方法

(a) フォトダイオード出力波形の校正方法

図 4.4.2-10 にオシロスコープから観測される P.D. 出力波形を示す。同図の横軸は時間[ms]、縦軸は電圧 [mV]を示しており、P.D.に流れる電流値を、カレントアンプを用いて電圧値に変換・増幅し測定している。同図中の P.D.出力波形の点線部は、パルス状の紫外光が P.D.に照射された際に P.D.から出力される総電流量（総電荷量）に相当し、次式中の P_{Vt} [Vt]で表している。ここで、P.D.に流れる電流量 P_{At} は式(4.4.2-1)を用いて算出し、 P_{At} を電気素量で除することで式(4.4.2-2)に示す様に、P.D.に流れる電子数 n_{pe} を算出できる。

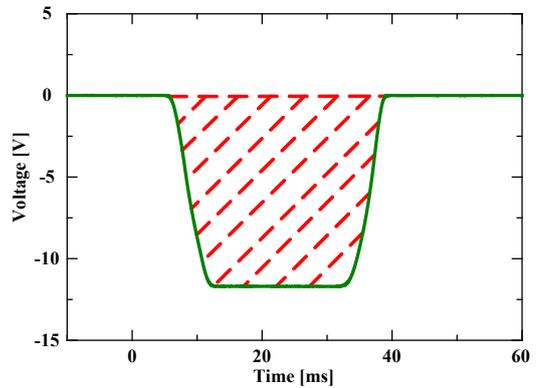


図 4.4.2-10 P.D.出力波形

$$\frac{P_{Vt}[Vt]}{A[V/A]} = P_{At}[At] \quad \dots \quad (4.4.2-1)$$

$$\frac{P_{At}[C]}{e[C]} = n_{pe}[electron] \quad \dots \quad (4.4.2-2)$$

校正済みの P.D.を用いれば、各波長における量子効率 Q により、P.D.に照射される光子数 n_p を算出できる。

$$\frac{n_{pe}[electron]}{Q[electron / photon]} = n_p[photon] \quad \dots(4.4.2-3)$$

なお、 n_p は単位面積の物質表面に単位時間当たり入射する光子数を示している。

(b) ファラデーカップ出力波形の校正方法

図 4.4.2-11 にオシロスコープから観測される F.C.出力波形を示す。同図中の横軸は時間 [ms]、縦軸は電圧 [mV]を示しており、F.C.に流れる電流値を、カレントアンプを用いて電圧値に変換している。同図中の F.C.出力波形内部の点線部は、材料から放出され F.C.によって収集された光電子の総電流量（総電荷量）に相当し、式(4.4.2-4)中の F_{Vt} [Vt]で表している。式(4.4.2-1)と同様、式(4.4.2-4)の様に電流量 F_{At} を算出し、 F_{At} を電気素量で除することで式(4.4.2-5)に示す様に F.C.に流れる電子数 n_e を算出できる。

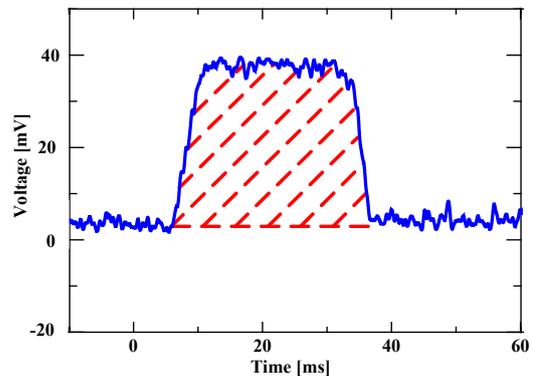


図 4.4.2-11 F.C.出力波形

$$\frac{F_{Vt}[Vt]}{A[V/A]} = F_{At}[At] \quad \dots(4.4.2-4)$$

$$\frac{F_{At}[C]}{e[C]} = n_e[electron] \quad \dots(4.4.2-5)$$

(c) 量子効率の校正方法

式(4.4.2-5)に示す様に n_e を n_p で除するとで、測定対象の量子効率を求めることができる。

$$\frac{n_e[\text{electron}]}{n_p[\text{photon}]} = QE[\text{electron / photon}] \quad \dots \quad (4.4.2-6)$$

4.4.2.1. 電子線照射による EOL 試料における光電子放出測定を用いた量子効率の評価

本測定試験には、ポリイミドとして Kapton、Upilex、Black Kapton を、ガラス材料として CMX100AR、CMG100AR を用いた。劣化システムについては、4.3.3.3.1 を参照のこと。また、EOL の定義については、3.1 項を参照のこと。

4.4.2.1.1. 照射条件

当初、4.3.3.3.1 で述べた、二次電子放出測定の際の劣化照射条件等同様で、加速エネルギーを 50 keV、電流密度を 121 nA/cm²、照射時間を 22 min に設定して EOL サンプルの作成を行った。しかしながら、ポリイミドに照射した際に試料の変形が確認されたので、それ以降のポリイミド以外の試料では電流密度を 45 nA/cm² に調整し、試料の変形がない状況で照射を行った。その際の照射時間は 60 min である。

・ Kapton®-H の量子効率

図 4.4.2-12 に Kapton®-H の光電子電流測定による量子効率を示す。同図中、縦軸は量子効率 Q 、横軸は波長 λ [nm] を示しておりエネルギー換算値 E [eV] も示している。同図より、照射試料はほぼ全ての波長領域において、量子効率が上昇している事が確認できる。このことから電子線照射されることで試料の分子構造が変化したことや、イオン化エネルギー内に準位が形成され光電子放出が生じやすくなったことが考えられる。そこで、照射前後の試料の表面状態の記録した結果を図 4.4.2-13 に示す。同図より照射前後を比較すると、照射痕が残っていることが確認でき、照射痕を拭いて確認したところ表面に関しては炭化したわけではなかった為、試料の光吸収量が増えることから、禁止帯内に準位が形成されたと考えられる。ここで、図 4.4.2-14 に禁止帯内に準位が生成されたときのバンド構造の概略図を示す。同図より、生成された準位に存在する電子も光電子になり放出するため光電子の放出量が増加したことが考えられる。しかし今回、照射痕が確認できない位置を測定面としていることや、図 4.4.2-12 の量子効率の結果より照射後の試料の方が早くに測定限界に達していることからイオン化エネルギーが大きいことが確認できる為、以下の 2 つの現象について検討していく必要がある。

- ① 50 keV の電子線照射により、分子構造の変化(組成の変化)によるエネルギーバンド構造の変化
- ② 50 keV の電子線照射により、試料や試料近傍のステージが熱せられたことによるコンタミの付着

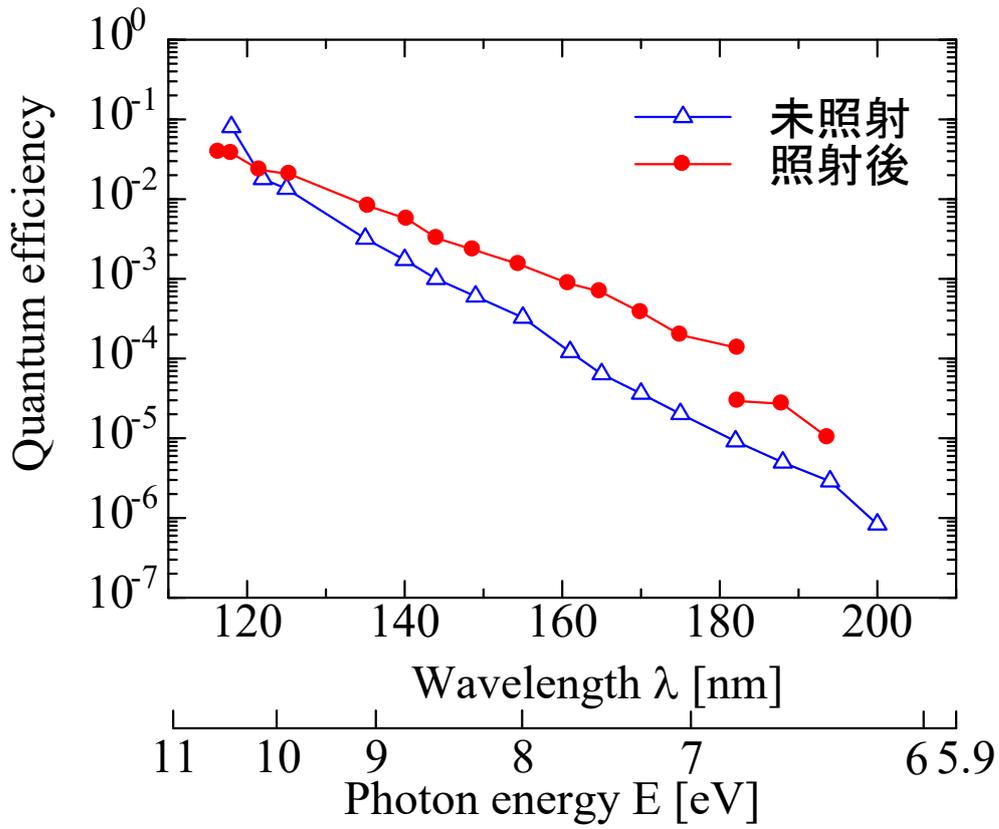


図 4.4.2-12 未照射および電子線照射(EOL)Kapton®-H の量子効率

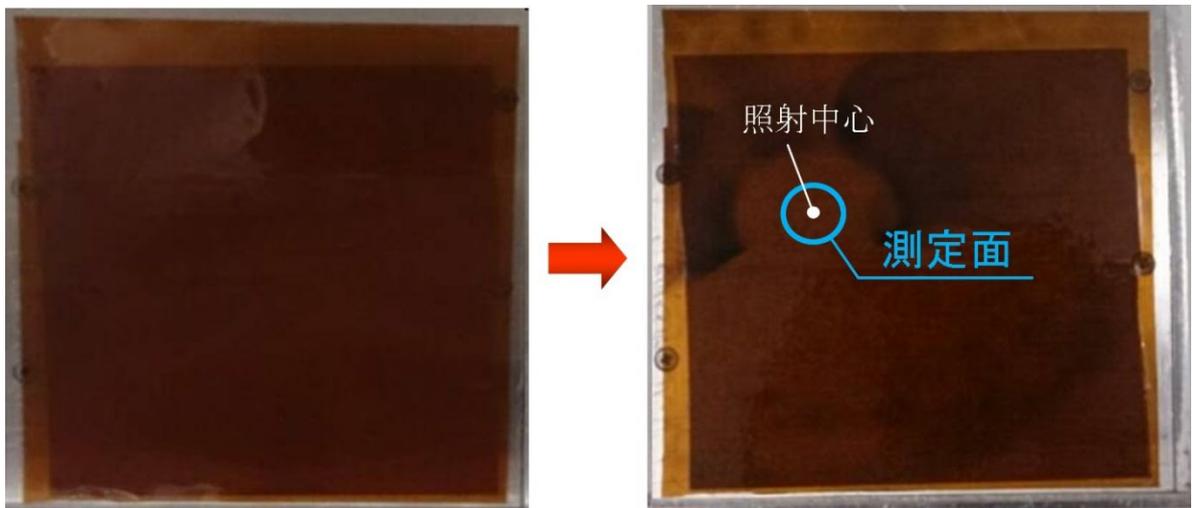


図 4.4.2-13 Kapton®-H 照射前後の試料表面の状況

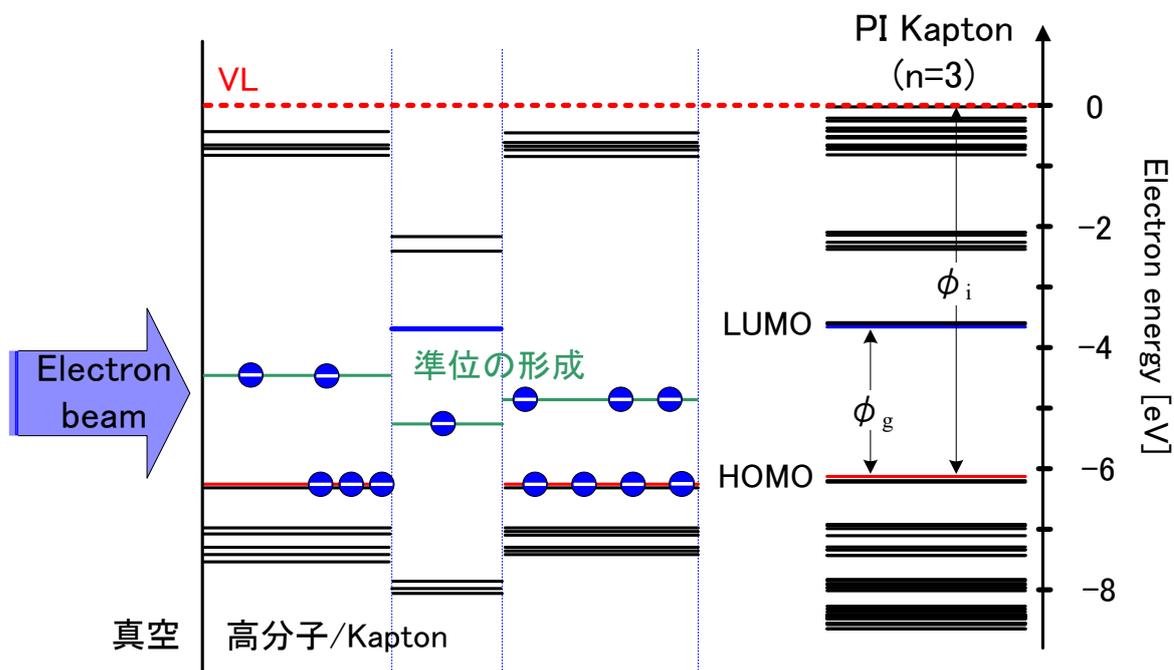


図 4.4.2-14 禁止帯内に準位が生成されたときのバンド構造

・Upilex®-S の量子効率

図 4.4.2-15 に Upilex®-S 25 μm の量子効率を示す。このとき縦軸は量子効率 Q 、横軸は波長 λ [nm] を示しており、比較として未照射時の測定結果も示している。同図より、170 nm 以長の波長において未照射試料より量子効率が上昇している事がわかる。

図 4.4.2-16 より、照射後の試料では照射痕が確認できるため、試料の禁止帯内に準位が形成され、カラーセンターが形成されたものと考えられる。

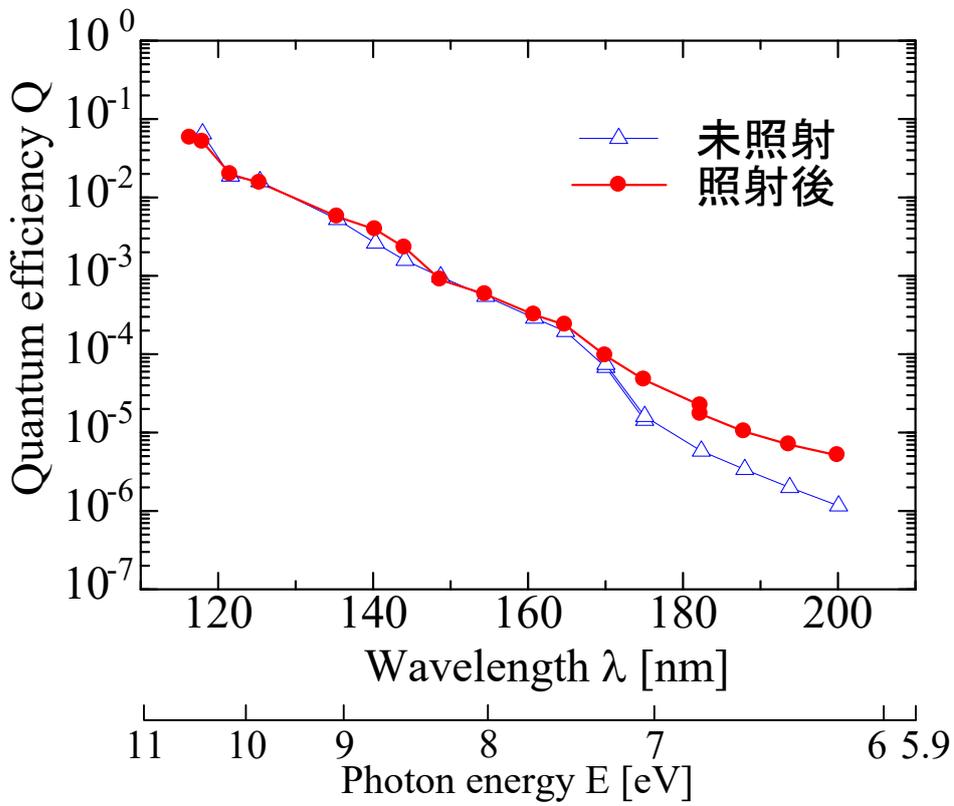


図 4.4.2-15 Upilex®-S 測定結果 (量子効率)

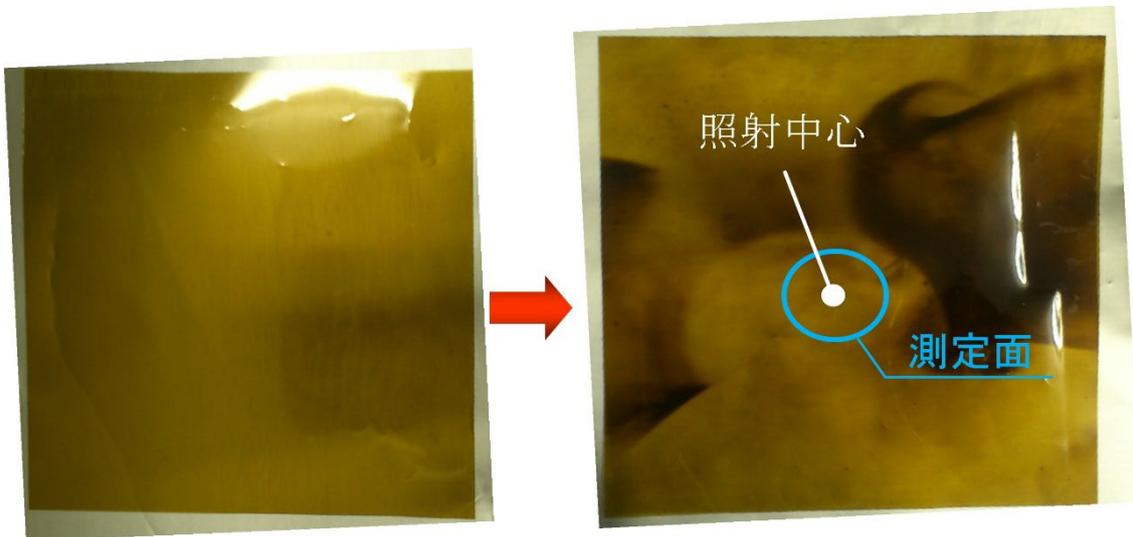


図 4.4.2-16 Upilex®-S 照射前後の試料の表面状態

・ **Black Kapton** の量子効率

図 4.4.2-17 に **Black Kapton** の量子効率を示す。同図より、照射試料では測定した全ての波長領域において量子効率が上昇している事が確認できる。

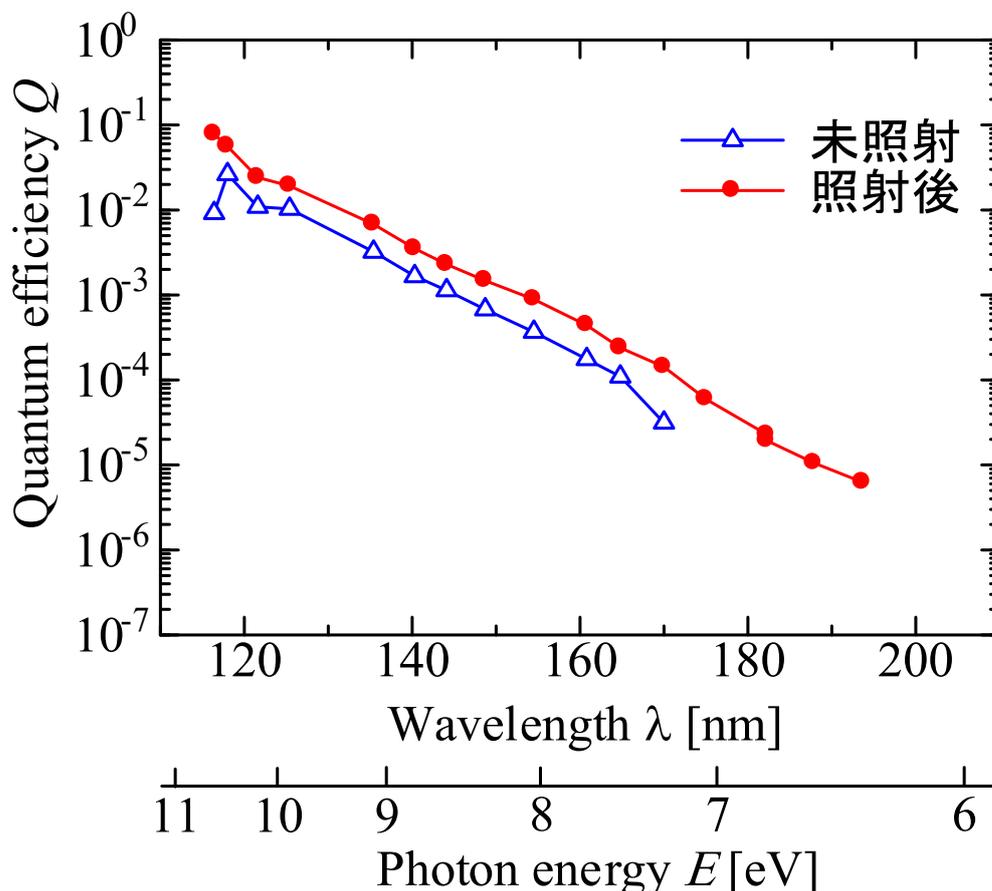


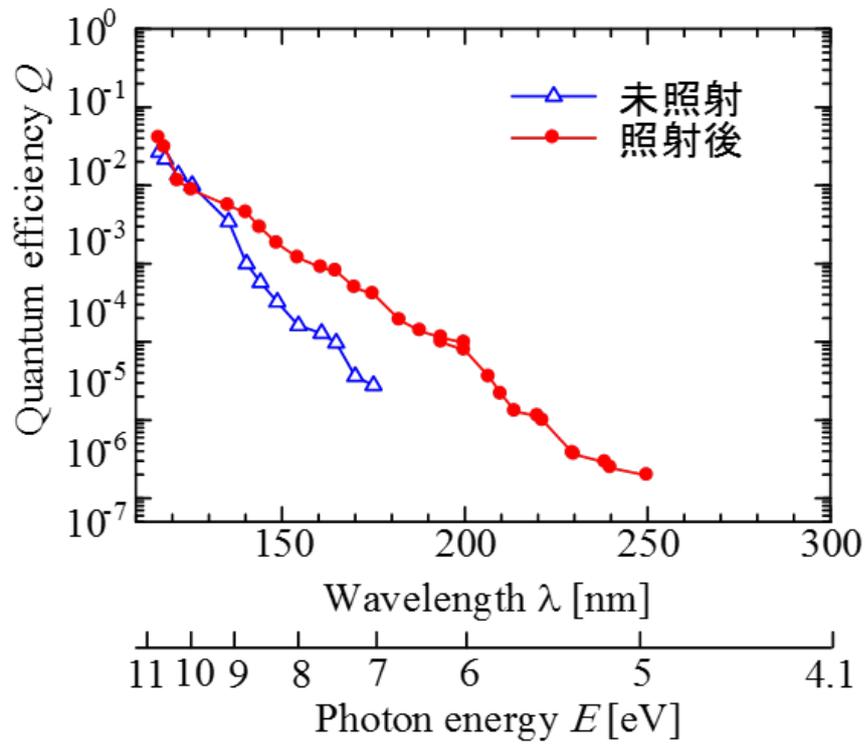
図 4.4.2-17 **Black Kapton** の量子効率

・ **ガラス材料(CMG100、CMG100AR、CMX100、CMX100AR)**の量子効率

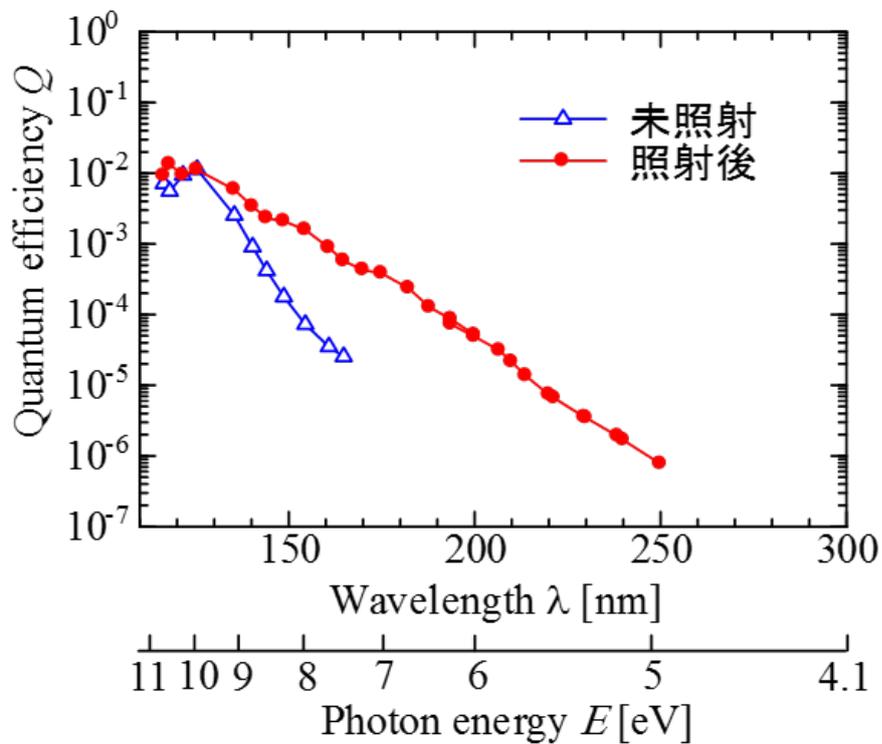
図 4.4.2-18 に **CMG100** および **CMG100AR** の量子効率を示す。同図より、照射試料では両試料共に測定した全ての波長領域において量子効率が上昇している事が確認できる。

また、図 4.4.2-19 に **CMX100** および **CMX100AR** の量子効率を示す。同図より、こちらも **CMG** の結果と同様に、照射試料では両試料共に測定した全ての波長領域において量子効率が上昇している事が確認できる。

図 4.4.2-18、19 より **CMG** および **CMX** の全ての試料において、照射後の試料では光電子が観察される限界波長が **170 nm** から **250 nm** へと大幅に増加している。電子線照射によって材料表面の組成が変化したことより、イオン化エネルギーが減少したためであると考えられる。表面にコンタミが付いたことによる影響も検討する必要があるが、一般的にコンタミによる試料表面の汚損は量子効率が低下する方向に作用すると考えられるので、材料の組成変化を優先して検証するべきであるとする。

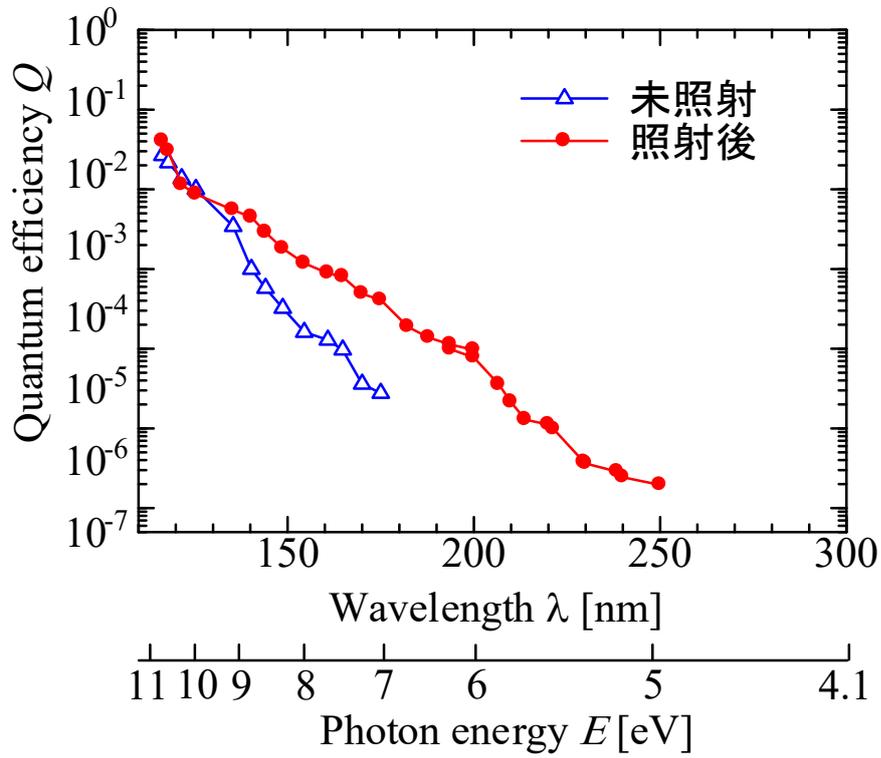


(a) CMG100

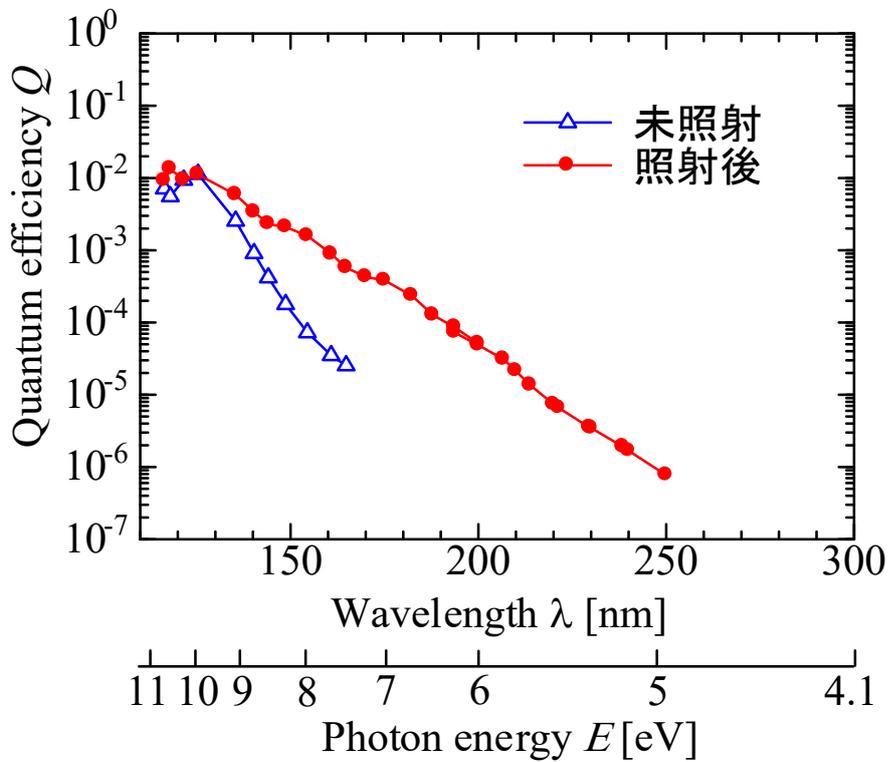


(b) CMG100AR

図 4.4.2-18 CMG100 および CMG100AR の量子効率



(a) CMG100



(b) CMX100AR

図 4.4.2-19 CMX100 および CMX100AR の量子効率

4.4.2.2. 計測結果

グラフ中、青は DL 光源による測定、オレンジは LDLS 光源による測定を表す。オレンジのグラフがないものは、LDLS 光源での測定を実施した上で光電子が検出できなかったことを示す。

<p>F1 Aluminized UPILEX Film (NASDA-1048/101-050R-NANN)</p>	<p>F2 Aluminized Kapton (146446)</p>
<p>aph: 3.7 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 0.4 [10uA/m²]</p>
<p>F3 ITO Coated Aluminized Polyimide (159972)</p>	<p>F4 ITO Coated Aluminized UPILEX Film (NASDA-1048/101-050R-TANN)</p>
<p>aph: 1.7 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 1.5 [10uA/m²]</p>

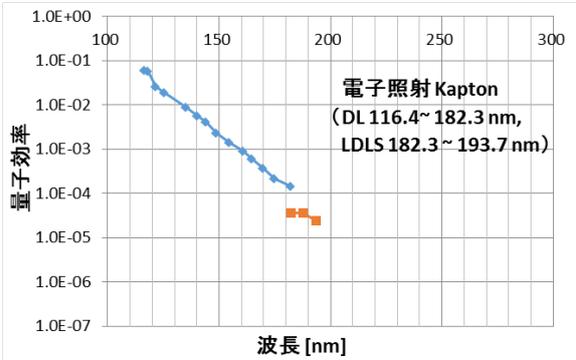
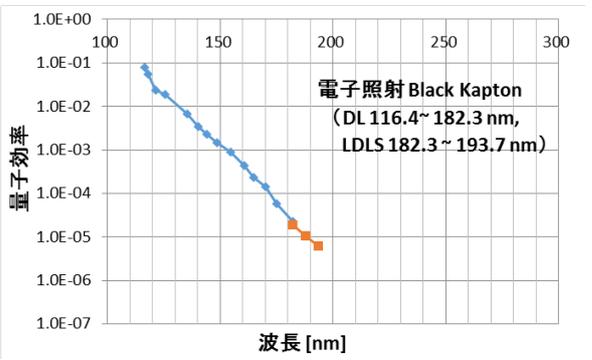
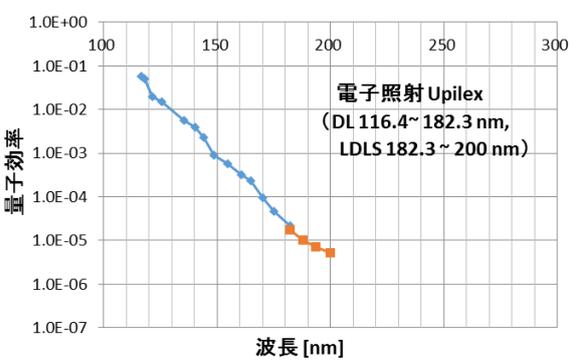
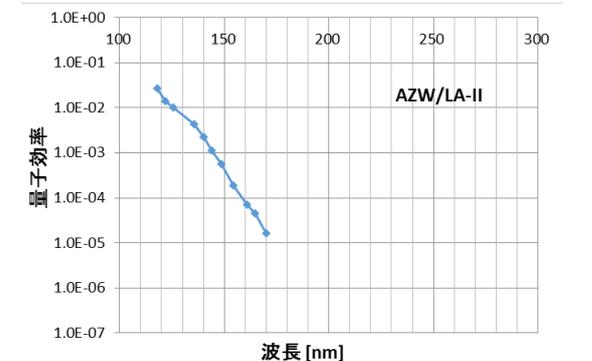
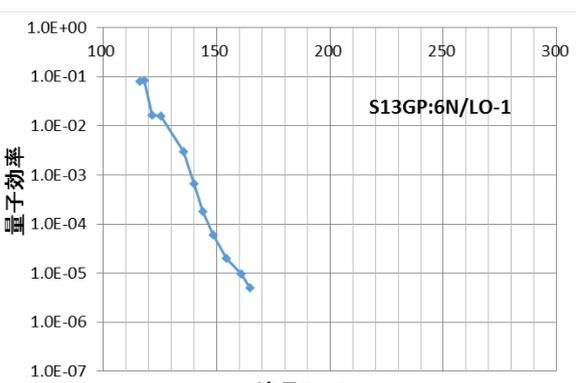
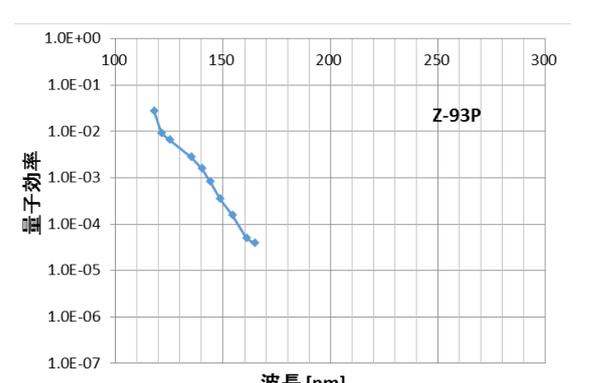
<p>F5 Aluminized Black Kapton (146624)</p>	<p>F6 Germanium Coated Black Kapton (160928)</p>
<p>aph: 0.9 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 1.0 [10uA/m²]</p>
<p>Aluminized Black Kapton (146624)</p>	<p>Germanium Coated Black Kapton (160928)</p>
<p>F7 Tedler Kapton (163785)</p>	<p>F8 Germanium Coated Tedler Kapton (163390)</p>
<p>aph: 2.7 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 2.5 [10uA/m²]</p>
<p>Tedler Kapton (163785)</p>	<p>Germanium Coated Tedler Kapton (163390)</p>
<p>F9 Silver Coated FEP tape (146401)</p>	<p>F10 Silverized PEI (NASDA-1048/301-075E-TSNN- II)</p>
<p>aph: 0.8 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 2.2 [10uA/m²]</p>
<p>Silver Coated FEP tape (146401)</p>	<p>Silverized PEI (NASDA-1048/301-075E-TSNN- II)</p>

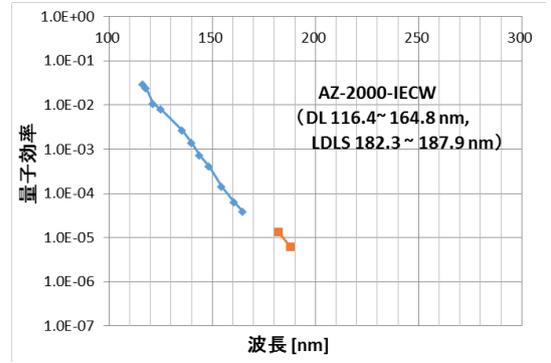
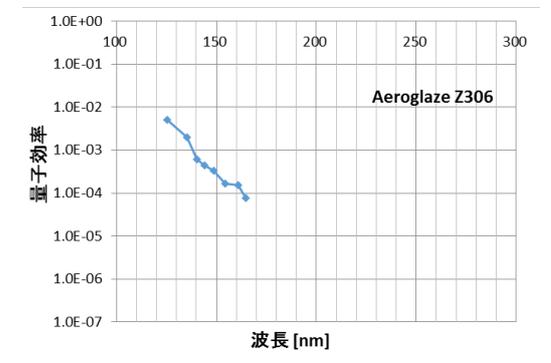
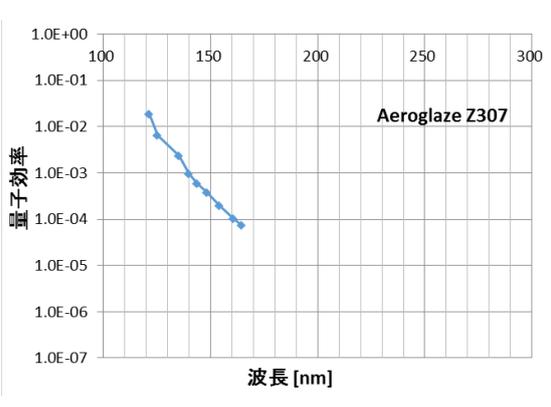
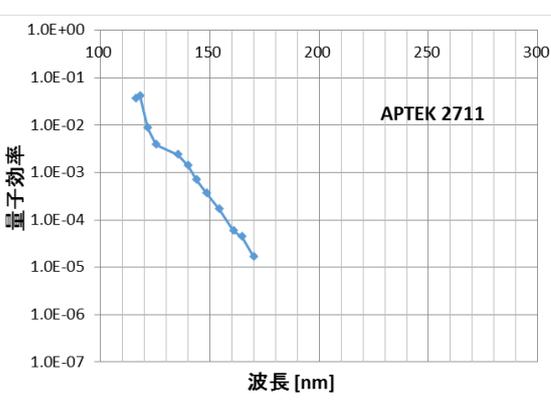
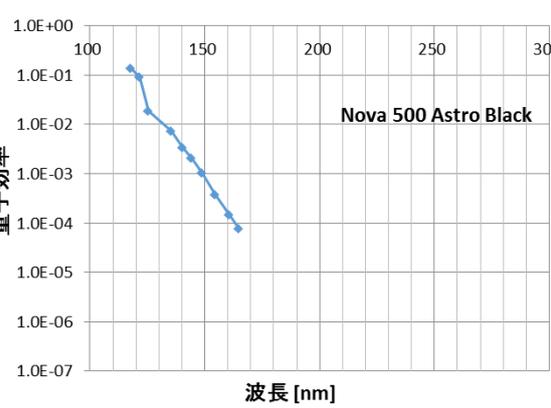
<p>F11 Aluminized Black Kapton (146624)</p>	<p>F14 ITO Coated Silver FEP Tape with 9703 Conductive Acrylic Adhesive (149598)</p>
<p>aph: 1.5 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 1.5 [10uA/m²]</p>
<p>F15 Upilex</p>	<p>F16 Teflon FEP</p>
<p>aph: 1.6 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 0.06 [10uA/m²]</p>
<p>F17 Kapton500H</p>	<p>S1 Glass Epoxy laminate type GEB</p>
<p>aph: 1.5 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 2.5 [10uA/m²]</p>

<p>S2 3M™ Glass Cloth Electrical Tape 79</p>	<p>S4 Kevlar (シアネート系)</p>
<p>aph: 0.5 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 2.3 [10uA/m²]</p>
<p>3M™ Glass Cloth Electrical Tape 79</p>	<p>Kevlar (シアネート系)</p>
<p>S5 CFRP PAN 系エポキシ</p>	<p>S6 CFRP PAN 系シアネート</p>
<p>aph: 1.4 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 0.5 [10uA/m²]</p>
<p>CFRP PAN系エポキシ</p>	<p>CFRP PAN系シアネート</p>
<p>S7 CFRP PITCH 系シアネート UD</p>	<p>S8 CFRP PITCH 系シアネート 三軸織り</p>
<p>aph: 3.7 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 5.4 [10uA/m²]</p>
<p>CFRP PITCH系シアネート UD</p>	<p>CFRP PITCH系シアネート 三軸織り</p>

<p>B1 RTV S691 A/B</p>	<p>G4 CMO 100</p>
<p>aph: 0.6 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 1.9 [10uA/m²]</p>
<p>RTV S691 A/B</p>	<p>CMO 100</p>
<p>M1 Silver Sheet (Agx)</p>	<p>M2 Au</p>
<p>aph: 2.2 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 3.5 [10uA/m²]</p>
<p>Silver Sheet (Agx) (DL 116.4~187.9 nm, LDLS 182.3~230 nm)</p>	<p>Au (DL 116.4~200 nm, LDLS 187.9~253.7 nm)</p>
<p>M3 Ag</p>	<p>M4 Silver Bus Bar</p>
<p>aph: 3.0 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 2.9 [10uA/m²]</p>
<p>Ag</p>	<p>Silver Bus Bar (DL 116.4~193.7 nm, LDLS 182.3~221.4 nm)</p>

<p>M5 Al Alloy A5052P alumite treatment</p>	<p>M6 Al Alloy A5052 black alumite treatment</p>
<p>aph: 2.4 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 2.2 [10uA/m²]</p>
<p>Al Alloy A5052P alumite treatment (DL 116.4~182.3 nm, LDLS 182.3 ~ 193.7 nm)</p>	<p>Al Alloy A5052 black alumite treatment (DL 116.4~182.3 nm, LDLS 182.3 ~ 187.9 nm)</p>
<p>M7 Al Alloy A5052 chromate treatment</p>	<p>M8 SUS 304</p>
<p>aph: 2.8 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 1.5 [10uA/m²]</p>
<p>Al Alloy A5052 chromate treatment (DL 116.4~182.3 nm, LDLS 182.3 ~ 193.7 nm)</p>	<p>SUS 304 (DL 116.4~182.3 nm, LDLS 187.9 ~ 206.7 nm)</p>
<p>M9 Titanium (TP270C)</p>	<p>M10 Titanium Passivated</p>
<p>aph: 1.4 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 1.5 [10uA/m²]</p>
<p>Titanium (TP270C) (DL 121.6 ~ 175 nm, LDLS 175 ~ 182.3 nm)</p>	<p>Titanium Passivated (DL 121.6 ~ 175 nm, LDLS 175 ~ 187.9 nm)</p>

<p>EB1 電子照射 Kapton</p>	<p>EB2 電子照射 Black Kapton</p>
<p>aph: 2.1 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 1.9 [10uA/m²]</p>
	
<p>EB3 電子照射 Upilex</p>	<p>P1 AZW/LA-II</p>
<p>aph: 1.6 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 1.1 [10uA/m²]</p>
	
<p>P2 S13GP:6N/LO-1</p>	<p>P6 Z-93P</p>
<p>aph: 1.5 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 0.7 [10uA/m²]</p>
	

<p>P7 AZ-2000-IECW</p>	<p>P10 Aeroglaze Z306</p>
<p>aph: 0.8 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 0.03 [10uA/m²]</p>
	
<p>P11 Aeroglaze Z307</p>	<p>P12 APTEK 2711</p>
<p>aph: 0.6 [10uA/m²]</p>	<p>aph: 0.8 [10uA/m²]</p>
	
<p>P13 Nova 500 Astro Black</p>	
<p>aph: 6.0 [10uA/m²]</p>	
	

4.4.3. 【手法 B】 波長選択フィルタ測定法

サンプルに真空紫外光をパルス状に照射して光電子電流を計測する。最大7種類の波長選択フィルタを用いて真空紫外光の波長範囲を制限し、波長範囲毎の光電子電流を計測する。その結果を基に量子効率を計算している。

4.4.3.1. 計測方法の長所と短所

【長所】

- ・紫外光をパルス状に照射することで表面帯電の計測への影響を抑える。

【短所】

- ・比較的大きな半値幅を持ったフィルタを使用している。

4.4.3.2. 計測方法

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 4.4.3-1 の装置を構築した。

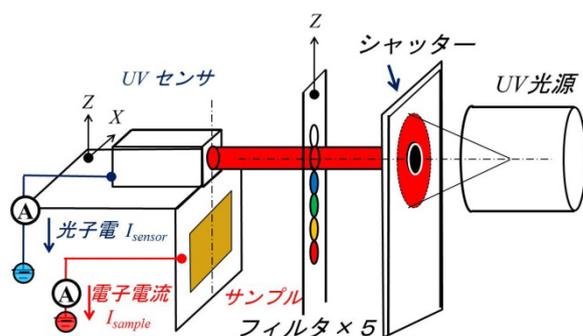


図 4.4.3-1 光電子電放出係数測定装置

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 4.4.3-1 に示す。

表 4.4.3-1 フィルタの透過率と半値幅

	122nm	130nm	138nm	157nm	185nm	220nm	248nm
透過率	15	15	15	12	15	15	15
半値幅	~20	20 +/-5	20 +/-7.5	20 +/-5	~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ーに通し、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 4.4.3-2 に示す。サンプルは絶縁体薄膜 Kapton 100H を用いた。

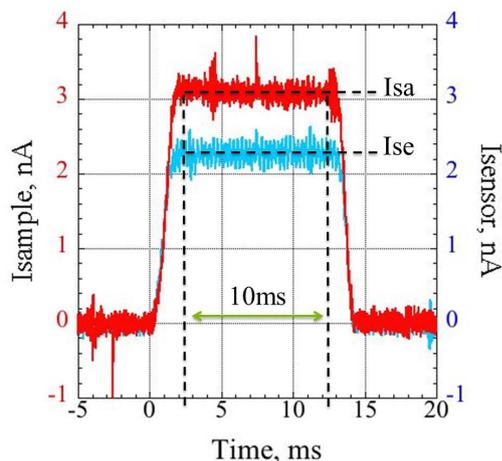


図 4.4.3-1 122nm の入射光子電流(I_{se})と放出電子電流(I_{sa})

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。

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(4.4.3-1) で表される。

$$I_{sa} = q_e \times S \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Y(\lambda) \cdot F(\lambda) d\lambda \quad \dots(4.4.3-1)$$

放出電子電流 I_{sa} と量子効率 $Y(\lambda)$ との関係式(4.4.3-1)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 を使用して量子効率を計算した。

量子効率 $Y(\lambda)$ を任意の多項式 $Y'(\lambda)$ と仮定し、式(4.4.3-1) に代入する。その時の電子電流 I'_{sa} を式(4.4.3-2)に示す。

$$I'_{sa} = q_e \times S \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Y'(\lambda) \cdot F(\lambda) d\lambda \quad \dots(4.4.3-2)$$

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 4.4.3-3 に示す。

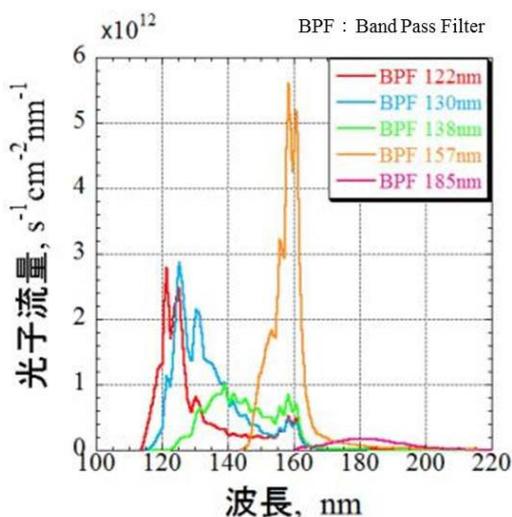


図 4.4.3-1 入射光子線量 $F(\lambda)[s^{-1}cm^{-2}nm^{-1}]$

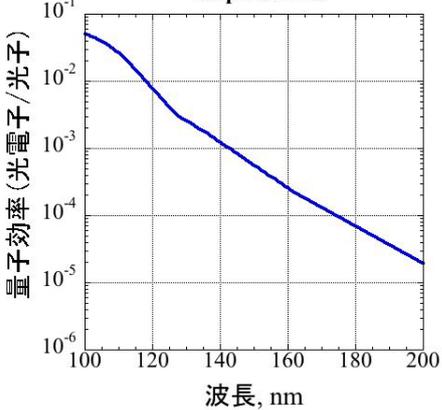
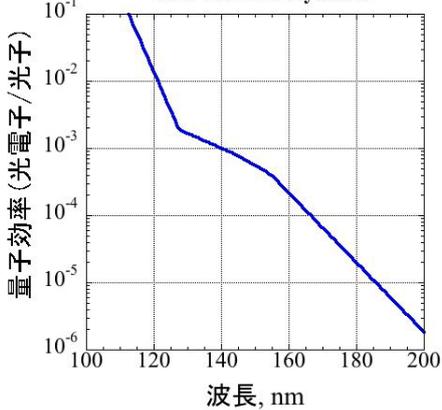
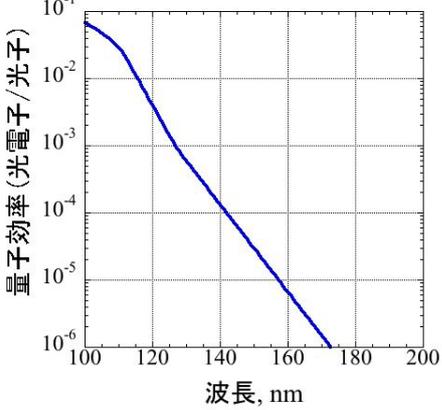
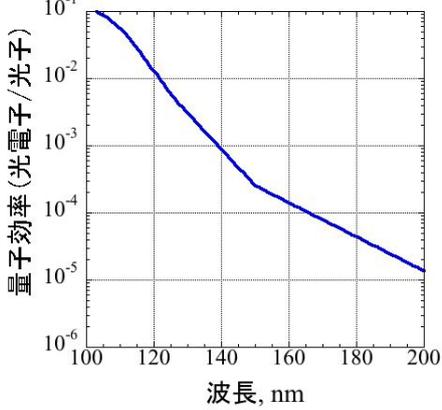
式(4.4.3-2)より導出される電子電流 I'_{sa} と、実測された電子電流 I_{sa} 偏差 Δ を式(4.4.3-3)のように求めた。

$$\Delta = \left(\frac{I'_{sa}}{I_{sa}} - 1 \right)^2 \quad \dots(4.4.3-3)$$

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 $Y(\lambda)$ を導出した。

4.4.3.3. 計測結果

試料名 Kapton 100H	試料名 Upilex
aph: 0.207 [10uA/m ²]	aph: 0.192[10uA/m ²]

試料名 Kapton 300H	試料名 ITO coated Polyimide
aph: 0.232[10uA/m ²]	aph: 0.250[10uA/m ²]
<p style="text-align: center;">Kapton 300H</p> 	<p style="text-align: center;">ITO coated Polyimide</p> 
試料名 CMG ITO	試料名 CMO 100
aph: 0.0723[10uA/m ²]	aph: 0.297[10uA/m ²]
<p style="text-align: center;">CMG ITO</p> 	<p style="text-align: center;">CMO 100</p> 

試料名 CMX AR	試料名 CFRP (Epoxy)
aph: 0.156[10uA/m ²]	aph: 0.0645[10uA/m ²]
<p style="text-align: center;">CMX AR</p>	<p style="text-align: center;">CFRP</p>
試料名 FRP	試料名 Au (coated on cover glass)
aph: 0.0131[10uA/m ²]	aph: 1.28[10uA/m ²]
<p style="text-align: center;">FRP</p>	<p style="text-align: center;">Au</p>

4.5. 光電流密度

光電流密度とは、軌道上で太陽光を受けた際に材料が放出する光電子を電流量として現した指標である。MUSCAT では $\alpha_{ph}[10 \mu A/cm^2]$ で示す。

計算に用いる AM0 太陽光スペクトルと、量子効率を用いた計算方法について記す。

4.5.1. AM0 太陽光スペクトル

光電流密度の計算に用いる AM0 太陽光スペクトルには、以下を使用する。

- 0.304~118.5nm : JAXA 整理データ
- 119.5nm 以上 : ASTM-E-490a

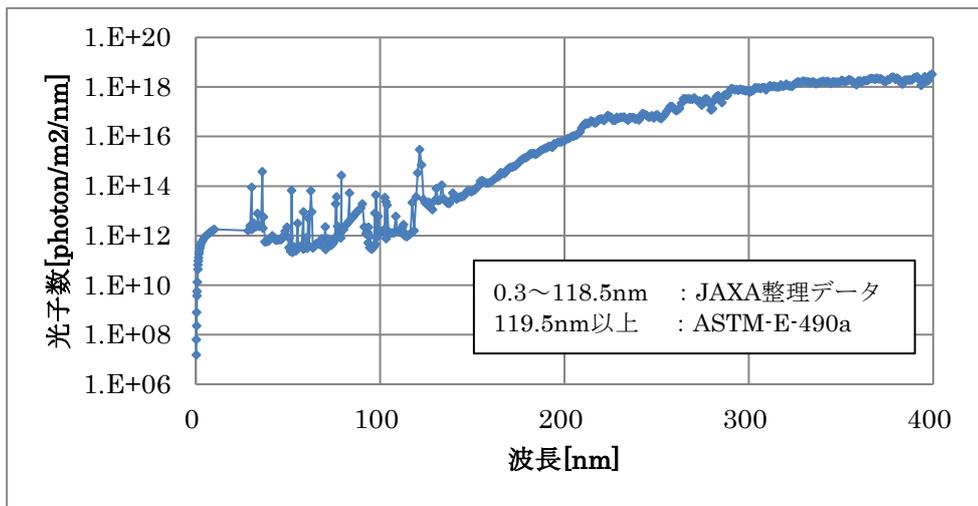


図 4.5.1-1 AM0 太陽光スペクトル

4.5.2. 光電流密度の計算

光電流密度は量子効率 Q と以下の式で計算される。

$$\alpha_{ph} = \int_0^{\infty} (Q \cdot AM0) d\lambda \quad \dots(4.5.2-1)$$

量子効率の測定点間は直線近似し、計測システム上の測定限界により計測出来ない場合は、短波長側は測定値の最大値で直線外挿補正する。長波長側は一般的に量子効率が十分小さく光電流密度に大きな影響を与えないため、特に外挿補正する必要はない。

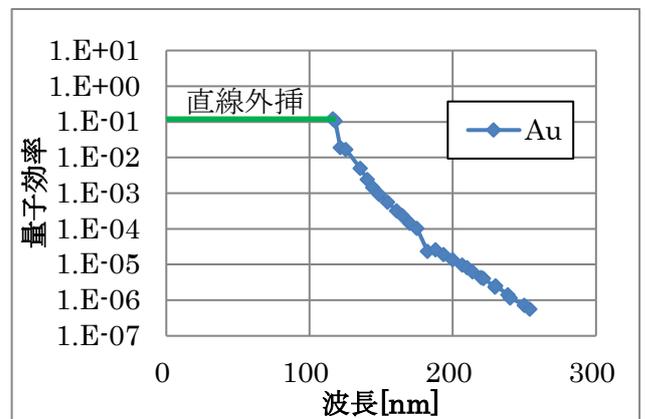


図 4.5.2-1 量子効率外挿例

4.6. 体積抵抗率（導電率）・比誘電率の測定

4.6.1. 【手法 A】電荷蓄積法

体積抵抗率は従来 ASTM^[4.6.1]や JIS^[4.6.2]で規定された計測手法（コンデンサ法）により測定が行われてきた。コンデンサ法は誘電体試料に直流電圧を印加し、一定時間後の電流値からオームの法則を使用して体積抵抗率を計測するため、オームの法則が適用できなくなる高電界下では使用できない。宇宙環境下に置かれた宇宙機は高電界が形成されることから、宇宙空間における誘電体材料の帯放電特性を適切に把握するためには、試料を真空槽に入れて電子線を照射し、試料表面の電位履歴を静電プローブ等で計測し、その減衰時定数から体積抵抗率を計測する必要がある。このような手法を電荷蓄積法と呼び、Frederickson ら^[4.6.3, 4.6.4]によって提案された。

4.6.1.1. 計測方法の長所と短所

【長所】

- ①真空下での電子線照射という、宇宙機が遭遇する環境を模擬した状態での試験なので、より現実に近い状況下における試料の状態を測定できる。
- ②対象材料の誘電率が既知であれば簡便に体積抵抗率を求めることができる。
- ③電子ビームの照射エネルギーや照射電荷量を変えることにより、軌道環境に合わせて帯電電位をコントロールでき、体積抵抗率の帯電電位依存性、あるいは電子の飛程を考慮してバルクの電界強度をパラメータに体積抵抗率を評価することができる。
- ④電子線照射後の試料表面電位履歴が得られるので、宇宙機表面電位解析の参考データとなりうる。

【短所】

- ①従来手法のコンデンサ法と比較して、電子線エネルギーや電子電流、照射時間など、照射に関する試験パラメータが増加するため、試験条件に十分な検討を要する。
- ②体積抵抗率の大きな材料に対しては真空中で長時間の計測が必要である。
- ③照射電子のエネルギーにより飛程が変わるので、飛程の十分な評価が必要である。

4.6.1.2. 計測方法

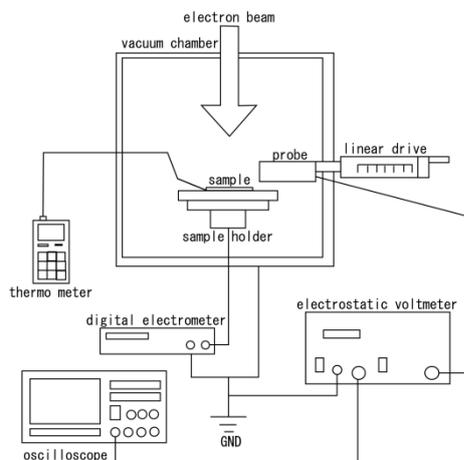


図 4.6.1-1 電荷蓄積法計測システム

図 4.6.1-1 に電荷蓄積法による体積抵抗率計測の実験装置図を示す。真空槽内に設置された誘電体試料に電子線が照射されると試料内部に空間電荷が蓄積するとともに、真空中に晒された照射面上には負電位が形成される。電子線の照射を止めた直後に試料表面の電位を計測するためのプローブを試料表面上数 mm の箇所に移動させ、表面電位の経時変化を取得する。得られた表面電位履歴より体積抵抗率を得るが、宇宙機の表面電位を解析するには電子線照射終了直後における表面電位減衰に注目する必要がある。電子線照射終了直後の電位減衰を指数減衰モデル（式（4.6.1-1））で近似する。

$$V(t) = V_0 e^{-t/\tau} \quad \dots (4.6.1-1)$$

ここで、 V_0 は時刻 $t=0$ （電子線照射終了時）における表面電位であり、 τ は減衰時定数である。減衰時定数が分かると、誘電率 ϵ を用いて体積抵抗率 ρ が計算できる。

$$\rho = \tau/\epsilon \quad \dots (4.6.1-2)$$

表 4.6.1-1 に試験条件を示す。計測試料としては、代表的なポリイミドフィルムとして Kapton (200H) と Upilex (50S) を、太陽電池カバーガラスとして CMG100AR を採用した。体積抵抗率の計算に必要な比誘電率は Kapton が 3.4、Upilex が 3.4、CMG100AR が 8.6 とした。

表 4.6.1-1 実験条件

試料厚さ [μm]	50
照射時間 [s]	60
照射エネルギー [keV]	20
電流密度 [nA/cm^2]	1.05
圧力 [Pa]	1×10^{-5}

4.6.1.3. 計測結果

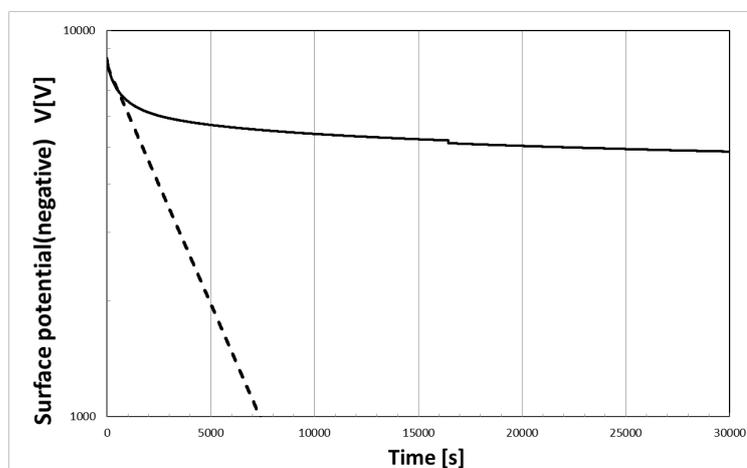


図 4.6.1-2 表面電位履歴

図 4.6.1-2 に Kapton フィルムの表面電位履歴を示す。横軸は電子線照射終了後からの時間を表しており、縦軸（対数軸）は表面電位（負電位）を表している。表面電位は電子線照射終了後急激に減衰しており、その後は比較的ゆるやかに減衰するようになる。ここで、電子線照射終了直後の急激な減衰時における減衰時定数を得るために、指数減衰モデルによる近似線を鎖線で表した。縦軸が対数軸であることから、指数減衰近似曲線は直線となる。この曲線から得られた時定数から求めた体積抵抗率は $4.8 \times 10^{14} [\Omega\text{m}]$ である。

電荷蓄積法は電子線照射により実際に近い状況を再現しているが、照射のパラメータが含まれることになる。しかしながら、電子線照射終了直後の電位減衰に関していえば、電子線エネルギー、試料温度の影響は体積抵抗率のオーダーが変わるほどではないことが実験的に明らかになっており [4.6.5]、概ね $10^{14} [\Omega\text{m}]$ のオーダーである。

4.6.1.4. 電子線による加速劣化試料（EOL 試料）の体積抵抗率

宇宙機が軌道上で経験する環境を地上設備で模擬することは難しい。例えば電子線の影響については、軌道上における電子線はエネルギー分布を持つため地上設備で再現するには特別な工夫が必要となる。また、宇宙機用材料の劣化に関してもプラズマや放射線、原子状酸素やデブリ、コンタミネーションなどの現象が複合的に作用し宇宙機が実際に経験する環境条件の完全な再現は困難である。しかしながら、個別の要素に関してその経年的な影響を調査し宇宙機設計に役立てることは重要である。ここでは、電子線の長時間連続照射による加速劣化試験の概要とその結果を示す。加速劣化の条件を表 4.6.1-2 に示す。想定としては、GEO 上 1 年分の電子量 $1.0 \times 10^{15} [\text{electrons} / \text{cm}^2]$ (3.1 項参照) とした。加速劣化時の電子線電流密度は長時間の電子線照射でも試料の熱変形が起きない程度 ($5.24 [\text{nA}/\text{cm}^2]$) とした。これは GEO 最悪時環境 ($1 [\text{nA}/\text{cm}^2]$) の 5 倍程度の電流密度である。規定のフルエンスに達した後は電子線照射を終了し 24 時間真空槽内で放置する。その後、前項と同じ照射条件 (表 4.6.1-1) で電子線を照射し、電子線照射終了後から表面電位履歴を取得して体積抵抗率を計測した。

4.6.1.5. BOL 試料と EOL 試料（電子線劣化）の体積抵抗率比較

ポリイミド試料の体積抵抗率は BOL において 10^{14} [Ωm] のオーダーである。一方 EOL においては、 10^{15} [Ωm] オーダーに上昇しており、表面電位の減衰率が小さくなる傾向にある。しかしながら、電子線照射終了（表面電位計測開始）時における負電位は EOL 試料の方が低下しており帯電量も少ないことがわかる。このことから電子線劣化後のポリイミド試料においては電荷の蓄積は少なくなるが、蓄積した電荷の散逸にはより時間が掛かることがわかる。CMG100AR においては体積抵抗率の変化は小さいが、電子線照射終了時の負電位はポリイミドフィルムと同様に低下していることがわかる。加速劣化試料の物性値については加速劣化条件の違いや回復時の条件（時間、温度、圧力）に大きく影響を受けることが予想されるため、より詳細な検討が必要であると考えられる。

4.6.1.6. 参考文献

(4.6.1) ASTM D257-99,(2005)

(4.6.2) JIS C 2139 (2008)

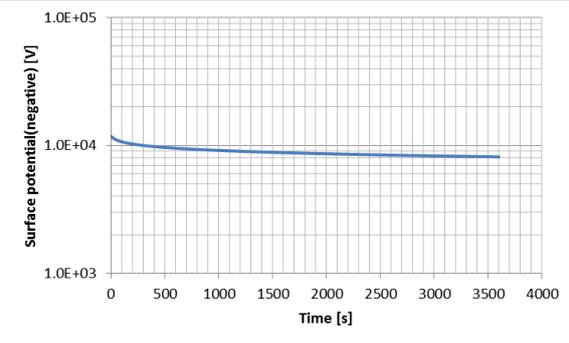
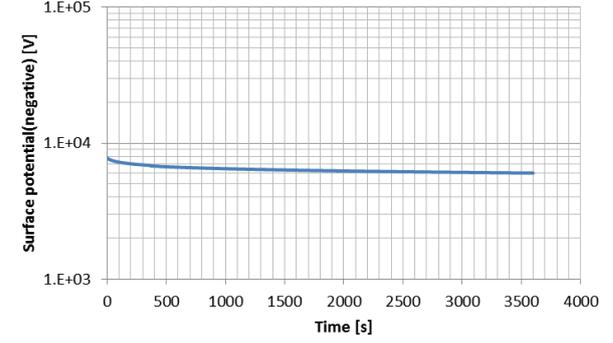
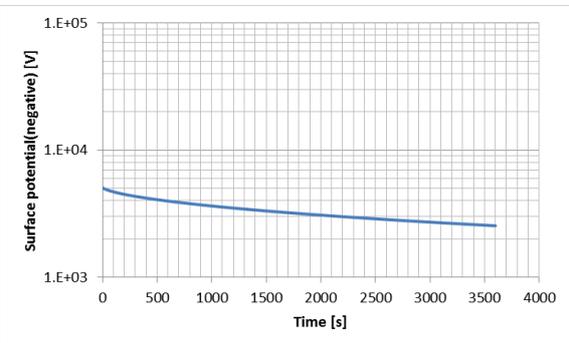
(4.6.3) A.R. Frederickson and J.R. Dennison: “Measurement of Conductivity and Charge Storage in Insulators Related to Spacecraft Charging”, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 50, No. 6, pp. 24-27 (2003)

(4.6.4) A.R. Frederickson, C.E. Benson and J.F. Bockman: “Measurement of Charge Storage and Leakage in Polyimides”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 208, pp. 454-460 (2003)

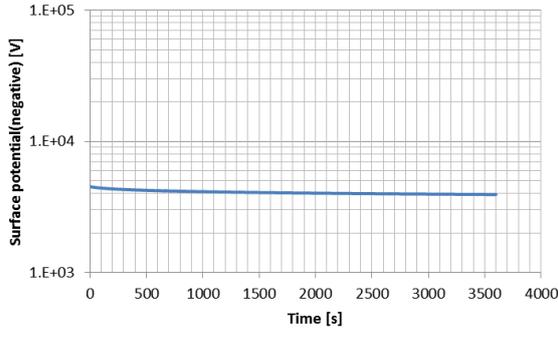
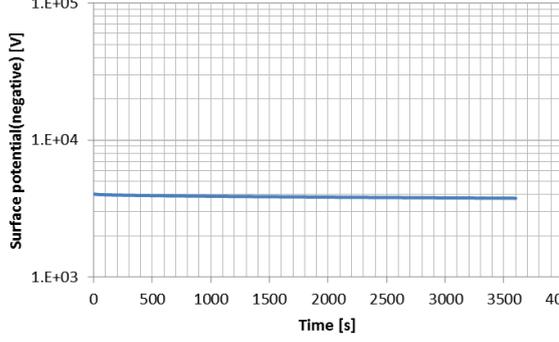
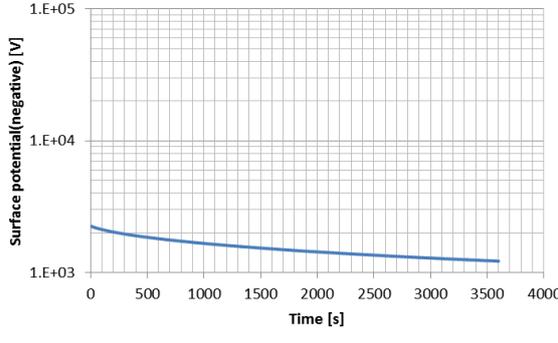
(4.6.5) R. Watanabe, H. Miyake, T. Okumura and M. Takahashi: “Effect of Temperature and Electron Energy on Volume Resistivity of Polyimide Film under Spacecraft Environment”, 2012 IEEE CEIDP, 5C-14 (2012)

4.6.1.7. 計測結果

グラフは電子線照射後の帯電緩和における short 領域の様子を表す。

<p>F17 Kapton</p>	<p>Upilex</p>
<p>Cond: 2.1×10^{-15} [1/ohm/m]</p>	<p>Cond: 1.4×10^{-15} [1/ohm/m]</p>
<p>Res: 4.8×10^{14} [ohm·m]</p>	<p>Res: 7.4×10^{14} [ohm·m]</p>
	
<p>CMG100AR</p>	<p>試料名</p>
<p>Cond: 1.3×10^{-14} [1/ohm/m]</p>	<p>Cond: [1/ohm/m]</p>
<p>Res: 7.5×10^{13} [ohm·m]</p>	
	

4.6.1.8. 計測結果 (EOL 試料 : 電子線加速劣化)

F17 Kapton	Upilex
Cond: 8.6×10^{-16} [1/ohm/m]	Cond: 4.7×10^{-16} [1/ohm/m]
Res: 1.2×10^{15} [ohm·m]	Res: 2.1×10^{15} [ohm·m]
	
CMG100AR	試料名
Cond: 1.2×10^{-14} [1/ohm/m]	Cond: [1/ohm/m]
Res: 8.4×10^{13} [ohm·m]	
	

4.6.2. 【手法 B】 電子ビーム照射帯電電位減衰法

本手法は、対象材料に電子ビームを照射して帯電させた後その帯電電位の減衰を長時間かけて測定し、減衰の時定数を求める。減衰時定数は、体積抵抗率と誘電率の積として表されるので、誘電率が既知であれば体積抵抗率を求めることができる。原理は手法 A と等しく、システムが異なるが、体積抵抗率測定技術としての短所・長所は 4.6.1.1 と同様である。

4.6.2.1. 計測方法

実験系は 4.3.4.2 節に示した図 4.3.4-1 と同じである。ある一定の照射エネルギー E、ビーム電流密度 J_b で対象材料にある時間連続的に電子ビームを照射した後、電子ビーム照射を停止し、その後の表面電位の変化を非接触表面電位計プローブを対象材料上に配置して計測する。

例として、図 4.6.2-1 に 125 μm FEP フィルムの表面電位減衰特性を示す。図中、負帯電の場合は $E=5\text{keV}$ 、 $J_b=0.13\text{nA/cm}^2$ で 60 分間照射した場合で、一方の正帯電の場合は、 $E=0.3\text{keV}$ 、 $J_b=0.10\text{nA/cm}^2$ で同じく 60 分間照射した場合の例を示す (4.3.4.2 の図 4.3.4-5 (b) と図 4.3.4-7 (b)) をまとめたものである。

このように、対象誘電材料の表面電位 $V_s(t)$ は、電子ビーム照射停止時 ($t=0$) の表面電位 (初期表面電位) を V_{s0} とすると、指数関数的に減衰し、

$$V_s(t) = V_{s0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \dots(4.6.2-1)$$

で表され τ が減衰時定数となる。またこの減衰時定数 τ は、材料の誘電率と体積抵抗率の積として、

$$\tau = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \rho_v \quad \dots(4.6.2-2)$$

となる。ここで、 ϵ_0 : 真空中の誘電率 ($=8.9 \times 10^{-12}\text{F/m}$)、 ϵ_r : 比誘電率、 ρ_v : 体積抵抗率、である。よって、比誘電率 ϵ_r が既知であれば、減衰時定数 τ から、体積抵抗率 ρ_v を求めることができる。

図 4.6.2-1 の 125 μm FEP において、負帯電の場合は、

$$\rho_v = 2.0 \times 10^{18} \quad [\Omega\text{m}]$$

正帯電の場合は、

$$\rho_v = 5.9 \times 10^{16} \quad [\Omega\text{m}]$$

が得られる。

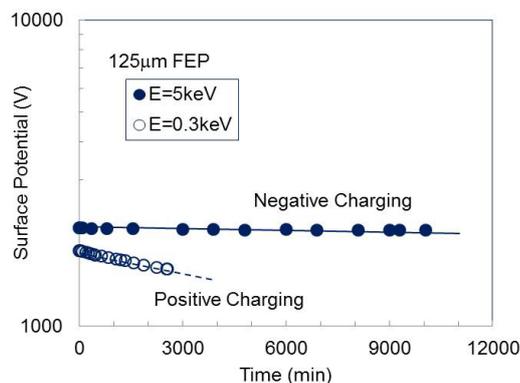


図 4.6.2-1 125 μm FEP における電子ビーム照射後の表面電位減衰特性

一方、図 4.6.2-2 には、ポリイミド系の 50 μm Kapton と UPILEX_R の $E=5\text{keV}$ で照射した後の

電位減衰特性を示している。この図からわかるように、いずれのポリイミドフィルムも減衰は、短時間領域では減衰時定数が小さく、長時間領域になると減衰時定数が大きくなる傾向にある。つまり、減衰時定数には二つの成分 τ_s 、 τ_l がある。これらの減衰時定数から、(4.4.3-2)式を使って体積抵抗率（短時間領域 ρ_{vs} 、長時間領域 ρ_{vl} ）を求めると、Kapton では、

$$\rho_{vs} = 4.4 \times 10^{15} \quad [\Omega\text{m}]$$

$$\rho_{vl} = 5.0 \times 10^{16} \quad [\Omega\text{m}]$$

UPILEX_R では、

$$\rho_{vs} = 2.6 \times 10^{16} \quad [\Omega\text{m}]$$

$$\rho_{vl} = 2.0 \times 10^{17} \quad [\Omega\text{m}]$$

が得られる。

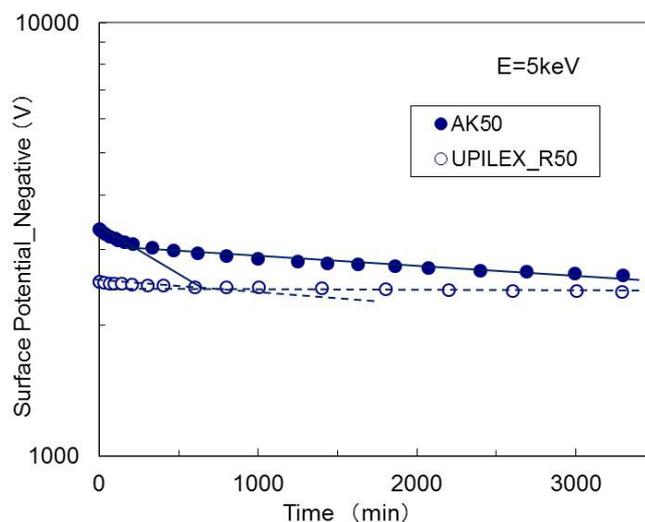
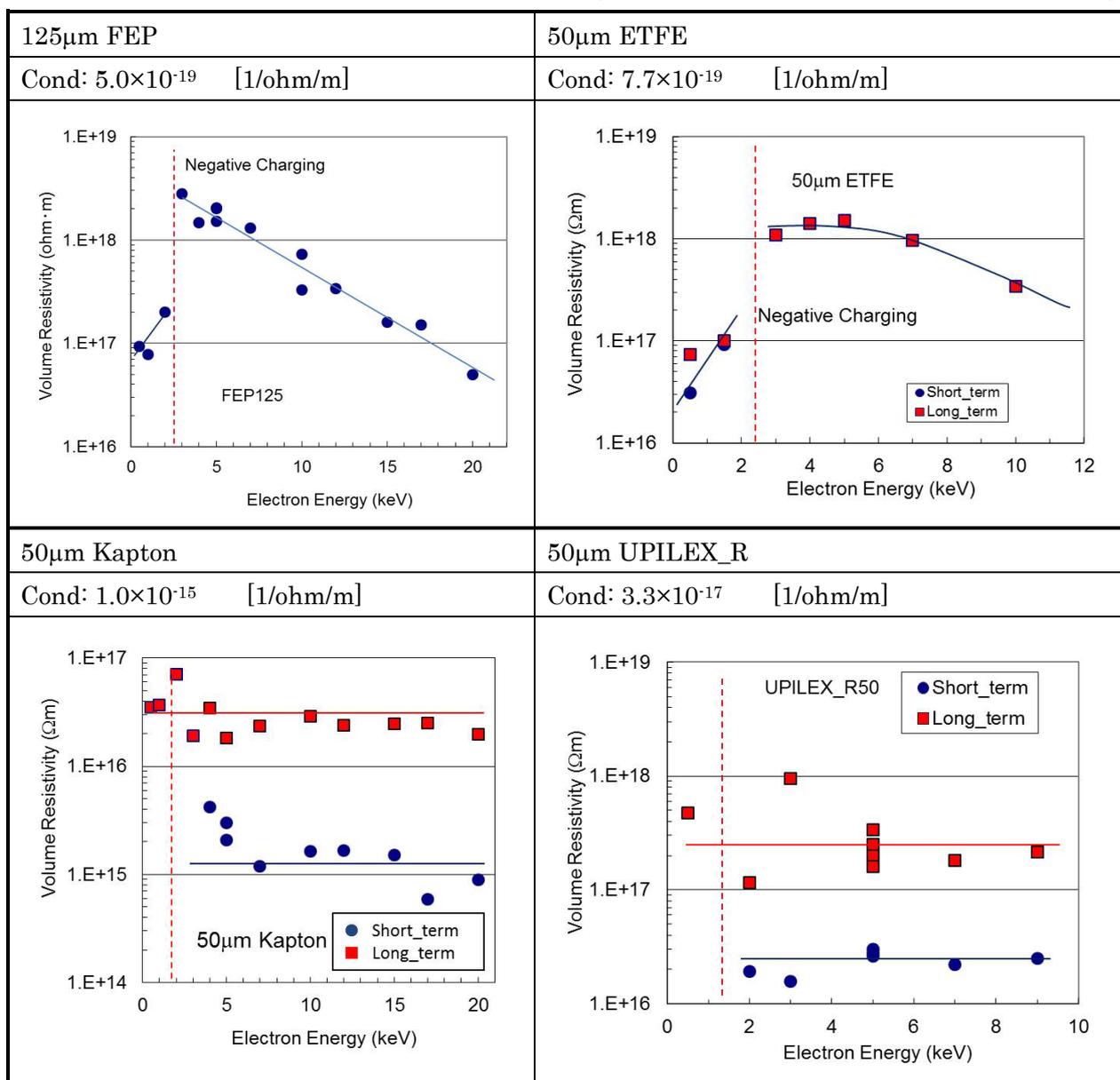


図 4.6.2-2 50 μm ポリイミドにおける電子ビーム照射後の表面電位減衰特性

4.6.2.2. 計測結果

グラフは照射する電子エネルギーごとの体積抵抗値。代表的に-5keVのエネルギーの時の値を入れた。



4.6.3. 【手法 C】帯電測定法

本手法は 4.3.4.2 節 に述べた測定手法とシステムを用いて、体積抵抗率と誘電率を同時に算出する方法である。表面電位の推移と体積抵抗率から試料中を流れる伝導電流を算出し、照射中に裏面に流入するバルク電流から試料表面に蓄積する電荷 Q を算出する。また表面電位 V から $Q=CV$ を用いて静電容量 C を求め比誘電率 ϵ_r を算出し、さらに体積抵抗率 ρ_v を算出する。

4.6.3.1. 計測方法の長所と短所

【長所】

- ・体積抵抗率・誘電率・二次電子放出係数を一つの実験から求めることができる。
- ・真空中の宇宙環境に近い環境下で、直流での誘電率を計測出来る。

【短所】

- ・体積抵抗率の大きな材料に対しては真空中で長時間の計測が必要である。
- ・照射電子のエネルギーにより飛程が変わるので、飛程の十分な評価が必要である。
- ・体積抵抗率の低い(およそ $1 \times 10^{13} [\Omega \cdot m]$ 以下)試料では計測が困難。

4.6.3.2. 計測方法

実験システムは 4.3.4.2 節に示した図 4.3.4-1 と同様であるため省略する。図 4.3.4-1 のモデルでは試料裏面で計測されるバルク電流 $I(t)$ は以下で表される。

$$I(t) = A \left\{ \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} \cdot \frac{dV_s(t)}{dt} + \frac{1}{\rho_v} \cdot \frac{V_s(t)}{d} \right\} \quad \dots(4.6.3-1)$$

ただし、表面電位 $V_s(t)$ 、試料面積 A 、試料厚 d 、体積抵抗率 ρ_v とする。これを両辺積分して整理することで蓄積電荷 Q が求められる。

$$\int I(t) dt = Q + \frac{A}{\rho_v d} \int V_s(t) dt \quad \dots(4.6.3-2)$$

$$Q = \int I(t) dt - \frac{A}{\rho_v d} \int V_s(t) dt \quad \dots(4.6.3-3)$$

また減衰時定数 τ_d として、電荷蓄積法の体積抵抗率の式から

$$\rho_v = \frac{\tau_d}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad \dots(4.6.3-4)$$

またバルク流入電荷を Q_B とすると

$$Q_B = \int I(t) dt \quad \dots(4.6.3-5)$$

とおけるため、(4.6.3-3)に(4.6.3-4)及び(4.6.3-5)を導入して、

$$Q = Q_B - \frac{A \epsilon_r \epsilon_0}{\tau_d d} \int V_s(t) dt \quad \dots(4.6.3-6)$$

照射前後の表面電位の差を ΔV として、(4.6.3-6)をコンデンサの式

$$Q = \frac{A \epsilon_r \epsilon_0}{d} \Delta V \quad \dots(4.6.3-7)$$

に導入して ϵ_r について整理すると、

$$\epsilon_r = \frac{Q_B}{\frac{A \epsilon_0}{d} \left\{ \Delta V + \frac{1}{\tau_d} \int V_s(t) dt \right\}} \quad \dots(4.6.3-8)$$

(4.6.3-8)及び(4.6.3-4)より、比誘電率 ϵ_r と体積抵抗率 ρ_v を算出する。

4.6.3.3. 測定結果

125 μ m FEP	50 μ m ETFE
Cond: 3.9×10^{-17} [1/ohm/m]	Cond: 5.5×10^{-17} [1/ohm/m]
Epsil: 1.9 [-]	Epsil: 2.0 [-]
50 μ m Kapton	50 μ m UPILEX_R
Cond: 3.5×10^{-15} [1/ohm/m]	Cond: 4.1×10^{-17} [1/ohm/m]
Epsil: 3.6 [-]	Epsil: 3.2 [-]

4.7. 帯電解析に対する材料パラメータの感度解析

材料パラメータの計測にあたって、材料パラメータの変化が帯電解析全体に与える影響を検証するため、衛星帯電解析ソフト(Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool:MUSCAT)を用いて実験計画法の L18 直交表を用いて各材料パラメータを変更し、乖離電圧と飽和時間に対して影響度解析を行った。その結果を報告する。

4.7.1. 解析条件

解析に使用した衛星構体モデルを図 4.7.1-1 に示す。衛星構体モデルには 2m \times 2m の直方体を使用し、六面中 5 面をブラックカプトンの材料パラメータを基とした導体材料とし、残り一面を 4.7.1 で述べる材料パラメータを設定した不導体テスト材料を設置した不導体面としている。また解析では、不導体面が太陽光入射方向に正対する受光時解析と、不導体面が受光面の真逆となる非受光時解析の 2 パターンを実施した。また衛星のメッシュサイズは 0.5m とした。これは一般的な帯電解析からすると衛星サイズに対して非常に粗いメッシュであるが、衛星形状と環境条件が単純であることから解析時間短縮のため採用した。

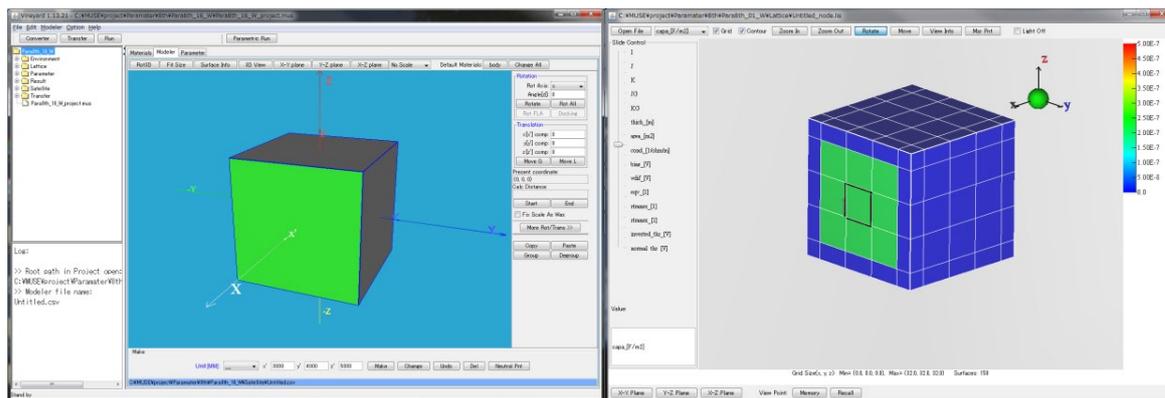


図 4.7.1-1 衛星構体モデル

宇宙環境は平均的 GEO 環境を設定した。平均的 GEO 環境には、MUSCAT の Parametric Run 機能から、地方時 18 時におけるもっとも発生確率の高い環境を使用した。非受光時の解析設定条件の模式図を図 4.7.1-2 に示す。受光時には、不導体のテスト材料が受光面に設定される。さらに、MUSCAT に入力した環境条件、宇宙環境に対する衛星の姿勢・速度に関するパラメータ、その他 MUSCAT の環境をそれぞれ表 4.7.1-1,2,3 に示す。

表 4.7.1-1 解析に用いた GEO 環境条件

電子 PIC/PT electron	Number density	1250000	m ⁻³
	Temperture	1500	eV
プロトン PT low energy ion	Mass,mi/me	1836	-
	Number density	1000000	m ⁻³
	Temperture	5000	eV
二次電子	Temperture	2	eV
光電子	Temperture	1.5	eV

表 4.7.1-2 衛星姿勢・速度パラメータ

	Magnetic Field Vector[nT]	Direction of the Sun	Ambient Plasma Velocity[km/s]
X	0.0	-1	3.07
Y	0.0	0	0.0
Z	0.0	0	0.0

表 4.7.1-3 その他オプション設定

Code option 1	<p>< Code option ></p> <p>Is plasma temperature double maxwellian? <input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No</p> <p>Do you consider photo electron? <input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No</p> <p>Do you consider secondary electron? <input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No</p>
Code option 2	<p>< Code option ></p> <p>Do you consider the sheath plasma? <input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No</p> <p>Do you consider conductive current? <input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No</p> <p>Do you use RIC(Radiation Induced Conductance)? <input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No</p> <p>Do you use fast computation? <input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No ※</p> <p>Terminate condition: Maximum inverted gradient [V] 1000</p> <p>Terminate condition: Maximum normal gradient [V] 5000</p> <p>※ : 受光解析時は No</p>

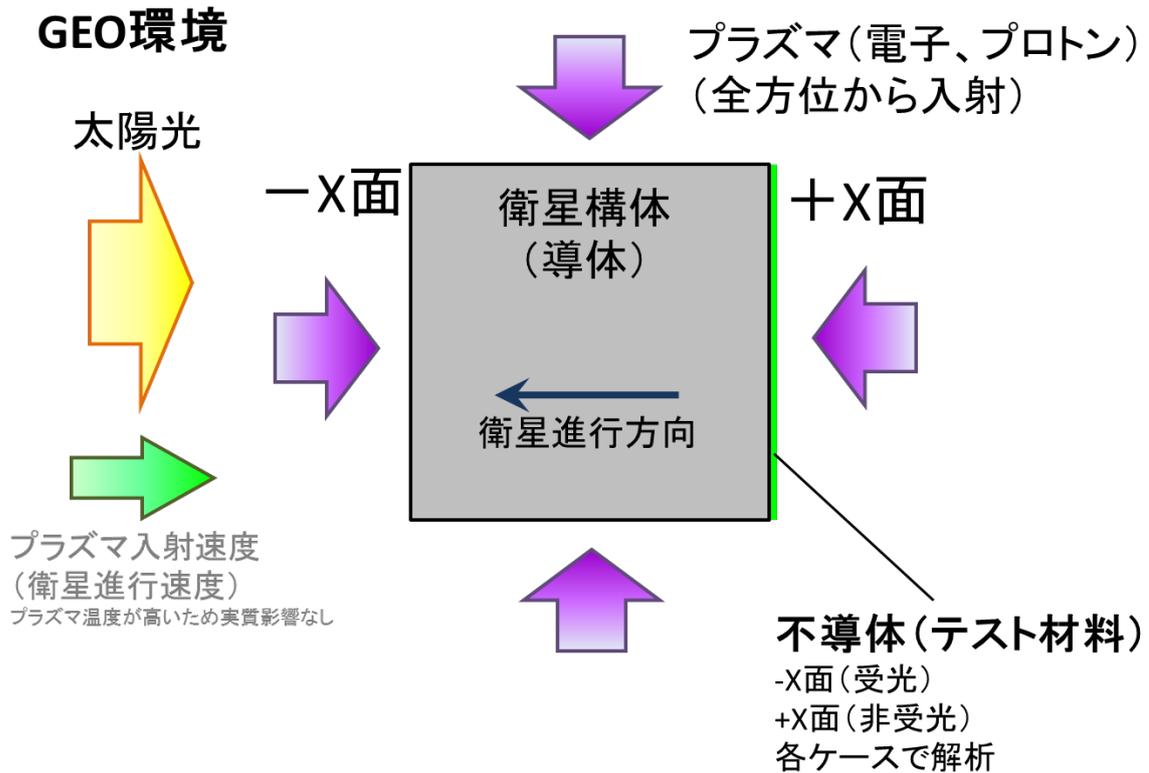


図 4.7.1-2 解析設定条件模式図

4.7.2. 材料パラメータ設定

MUSCAT における帯電解析で使用する代表的材料パラメータは表 4.7.2-1 に示す 4 項目 5 パラメータである。それぞれのパラメータに対して、実測値や事前解析の結果を基に表 4.7.2-2 に示す通りそれぞれ二水準を設定した。その設定値を実験計画法の L16 直交表に基づいて 16 パターンの組み合わせを作成し、受光時・非受光についてそれぞれ直交解析を実施した。L16 直交表に基づいたパラメータ設定の組み合わせを表 4.7.2-3 に示す。

表 4.7.2-1 帯電解析に使用する材料パラメータ

光電流密度		α_{ph}	[10 μ A/m ²]
二次電子放出係数	最大時エネルギー	S _{emax}	[eV]
	最大放出係数	S _{dmax}	[-]
導電率		Cond	[1/ Ω m]
比誘電率		Epsil	[-]

表 4.7.2-2 材料パラメータ水準設定

	α_{ph}	S _{emax}	S _{dmax}	Cond	Epsil
第 1 水準	0.8	150	1.5	1.0 \times 10 ¹⁸	2.5
第 2 水準	1.5	200	2	1.0 \times 10 ¹⁴	3.5

表 4.7.2-3 L16 直交表に基づいたパラメータ設定の組み合わせ

分類	NAME	α_{ph}	S _{emax}	S _{dmax}	Cond	Epsil
導体	Body	1	300	1.8	-	-
誘電体 (疑似材料パラメータ)	No.01	0.8	150	1.5	1.0×10^{18}	2.5
	No.02	0.8	150	1.5	1.0×10^{14}	3.5
	No.03	0.8	150	2	1.0×10^{18}	3.5
	No.04	0.8	150	2	1.0×10^{14}	2.5
	No.05	0.8	200	1.5	1.0×10^{18}	3.5
	No.06	0.8	200	1.5	1.0×10^{14}	2.5
	No.07	0.8	200	2	1.0×10^{18}	2.5
	No.08	0.8	200	2	1.0×10^{14}	3.5
	No.09	1.5(0.9)	150	1.5	1.0×10^{18}	3.5
	No.10	1.5(0.9)	150	1.5	1.0×10^{14}	2.5
	No.11	1.5(0.9)	150	2	1.0×10^{18}	2.5
	No.12	1.5(0.9)	150	2	1.0×10^{14}	3.5
	No.13	1.5(0.9)	200	1.5	1.0×10^{18}	2.5
	No.14	1.5(0.9)	200	1.5	1.0×10^{14}	3.5
	No.15	1.5(0.9)	200	2	1.0×10^{18}	3.5
No.16	1.5(0.9)	200	2	1.0×10^{14}	2.5	

α_{ph} カッコ内は受光時解析時の値

4.7.3. 解析結果

解析結果を以下に示す。解析では構体とテスト材料表面の電位差を乖離電圧として、その飽和値と飽和するまでにかかる時間を解析指標として、直交解析を行った。

4.7.3.1. 非受光時解析結果

テスト材料に光が当たっていない非受光時解析の結果である。不導体面のメッシュ中心の電位と構体電位の差を乖離電圧として、各テスト材料を設定した際の乖離電圧の時間推移グラフを図4.7.3-1に示す。これにより、飽和乖離電圧と飽和時間について直交解析を実施するのに十分な分散を得られてることがわかる。飽和の判断定義は「100step 毎の変化率 1%以下が三回連続で続いた場合」とした。

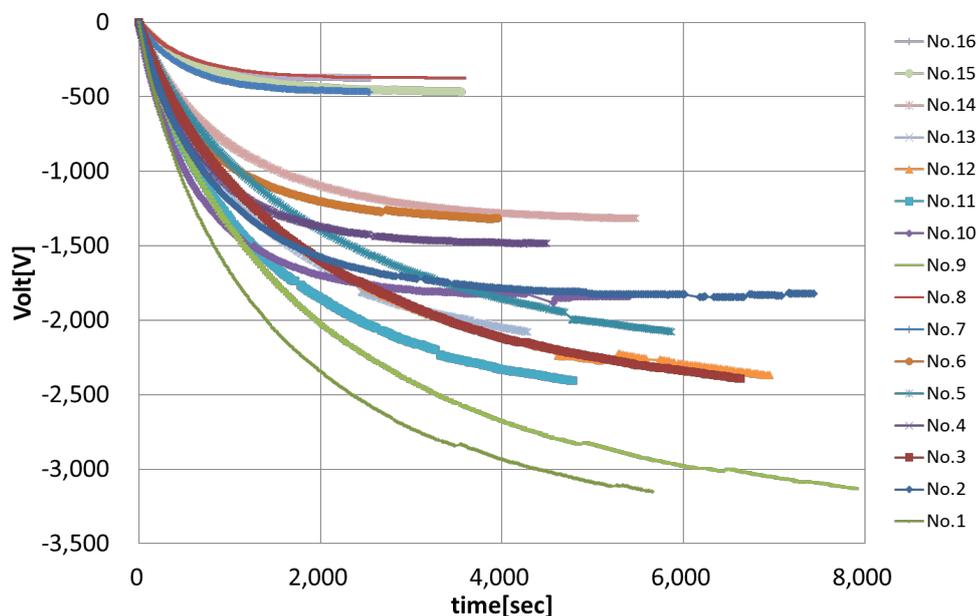


図 4.7.3-1 非受光時乖離電圧

表 4.7.3-1 非受光時直交解析結果

		α_{ph}	Semax	Sdmax	Se × Sd	Cond	Epsil	誤差
乖離 電圧 [V]	寄与率[%]	-	54	24	7	9	0	3
	水準効果1[V]	30	-460	-304	166	-191	-36	-
	水準効果2[V]	-30	460	304	-166	191	36	-
飽和 時間 [sec]	寄与率[%]	-	21	11	16	13	29	7
	水準効果1[sec]	-19	261	191	-230	203	-309	-
	水準効果2[sec]	19	-261	-191	230	-203	309	-

直交解析結果を表4.7.3-1に示す。乖離電圧の全平均は-1278V、飽和時間の全平均は1623secであった。テスト材料に光が入射していないため、 α_{ph} の影響は誤差にプーリングした。乖離電圧では二次電子放出係数のSemaxとSdmaxおよびその相互作用が寄与率の85%を占めることが分かった。Semaxでは値が150eVから200eVへ50eVずれることで、全平均の-1278Vを中心に-1728Vから-818Vまで920Vの変化が発生することになる。また飽和時間に関しては影響はある程度分散しているが、誘電率Epsilの影響が最大となることがわかった。

4.7.3.2. 受光時解析

テスト材料に光が入射した際の受光時解析の結果である。各テスト材料を設定した際の乖離電圧の時間推移グラフを図 4.7.3-2 に示す。これにより、飽和乖離電圧については直交解析を実施するのに十分な分散を得られたが、飽和時間については十分な分散が得られないことがわかったため、解析は飽和乖離電圧に対してのみ実施した。

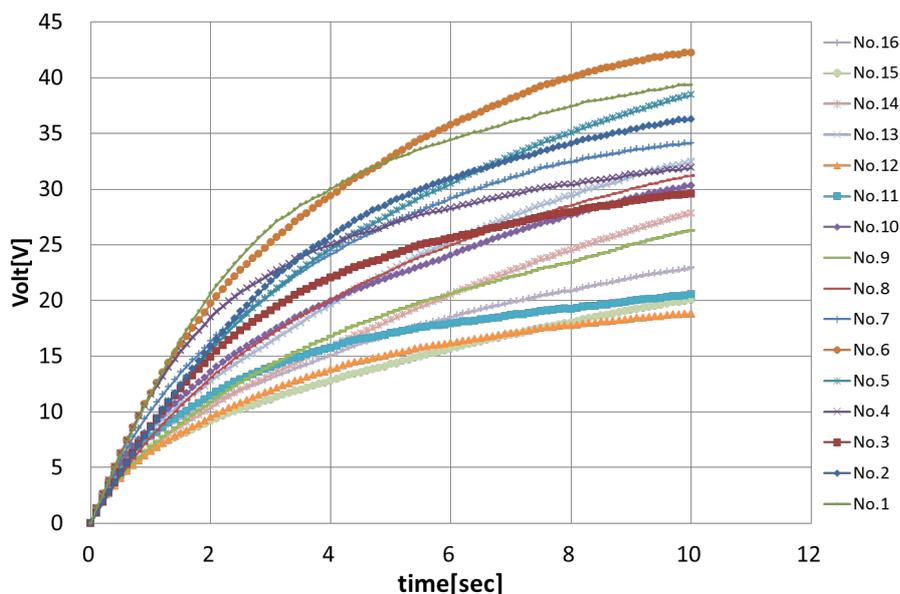


図 4.7.3-2 受光時乖離電圧

表 4.7.3-2 非受光時直交解析結果

	α_{ph}	Semax	Sdmax	Cond	Epsil	誤差
寄与率[%]	44	10	40	0	3	4
水準効果 1[V]	4.3	-2.0	4.1	0.0	1.1	-
水準効果 2[V]	-4.3	2.0	-4.1	0.0	-1.1	-

直交解析結果を表 4.7.3-2 に示す。乖離電圧の全平均は 28.4V であった。寄与率は高電流密度 α_{ph} の 44% が最大で、次いで Sdmax の 40% が高く、この二つのパラメータで 84% あるが、水準効果の絶対値がいずれも低く、さらに事前に実施した予備解析では α_{ph} の第二水準を 1.5 とした場合、第二水準を含むパターンではいずれも 5V 程度で飽和して帯電が進展しなかった。また実際の宇宙材料では α_{ph} の平均は $1.9[10\mu A/m^2]$ であり、 $1.0[10\mu A/m^2]$ を下回る材料がほとんどないことから、実解析上は受光面の帯電は光によって緩和され、GEO 平常環境下では帯電進展しないといえる。

5. 帯電物性パラメータ計測結果一覧

測定した帯電物性パラメータの計測結果一覧を示す。測定手法によりパラメータが複数ある場合には、測定装置の測定精度や他のパラメータとの整合性を考慮して、帯電解析の「推奨値」を示した。帯電解析を行う際の参考としていただきたい。また推奨値が入っていないパラメータについては、本文書を参考に個別に測定を行うことを推奨する。ただし測定が困難である場合や、4.7章の解析結果などから解析対象宇宙機の軌道環境条件上、該当パラメータの影響が非常に軽微であると判断できる場合は、公開情報を基にした一般的な値の代用も検討出来る。

表 5-1 計測結果一覧 (1/9)

Aluminized UPILEX Film (NASDA-1048/101-050R-NANN)						
F1	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	
	aph [10uA/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	比誘電率 Epsil [-]
	推奨値	3.7	推奨値		推奨値	推奨値
	手法A	3.7	手法A		手法A	
	手法B		手法B		手法B	
			手法C		手法C	手法C
Aluminized Kapton (146446)						
F2	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	
	aph [10uA/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	比誘電率 Epsil [-]
	推奨値	0.4	推奨値	300	1.99	推奨値
	手法A	0.4	手法A			
	手法B		手法B	300	1.99	
			手法C			手法C
ITO Coated Aluminized Polyimide (159972)						
F3	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	
	aph [10uA/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	比誘電率 Epsil [-]
	推奨値	1.7	推奨値	300	3.67	推奨値
	手法A	1.7	手法A			
	手法B	0.250	手法B	300	3.67	
			手法C			手法C
ITO Coated Aluminized UPILEX Film (NASDA-1048/101-050R-TANN)						
F4	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	
	aph [10uA/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	比誘電率 Epsil [-]
	推奨値	1.5	推奨値		推奨値	推奨値
	手法A	1.5	手法A		手法A	
	手法B		手法B		手法B	
			手法C		手法C	手法C
Aluminized Black Kapton (146624)						
F5	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	
	aph [10uA/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	比誘電率 Epsil [-]
	推奨値	0.9	推奨値	350	2.7	推奨値
	手法A	0.9	手法A			
	手法B		手法B	350	2.07	
			手法C			手法C
Germanium Coated Black Kapton (160928)						
F6	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	
	aph [10uA/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	比誘電率 Epsil [-]
	推奨値	1.0	推奨値		推奨値	推奨値
	手法A	1.0	手法A		手法A	
	手法B		手法B		手法B	
			手法C		手法C	手法C
Tedler Kapton (163785)						
F7	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	
	aph [10uA/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	比誘電率 Epsil [-]
	推奨値	2.7	推奨値		推奨値	推奨値
	手法A	2.7	手法A		手法A	
	手法B		手法B		手法B	
			手法C		手法C	手法C

表 5-1 計測結果一覽 (2/9)

Germanium Coated Tedler Kapton (163390)							
F8	光電流密度		二次電子放出係数		導電率		比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond		Epsil
	[10uA/m ²]		[eV]	[-]	[1/ohm·m]		[-]
	推奨値	2.5	推奨値		推奨値		推奨値
	手法A	2.5	手法A			手法A	
	手法B		手法B			手法B	
			手法C			手法C	手法C
Silver Coated FEP tape (146401)							
F9	光電流密度		二次電子放出係数		導電率		比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond		Epsil
	[10uA/m ²]		[eV]	[-]	[1/ohm·m]		[-]
	推奨値	0.8	推奨値	350	1.62	推奨値	推奨値
	手法A	0.8	手法A			手法A	
	手法B		手法B	350	1.62	手法B	
			手法C			手法C	手法C
Silverized PEI (NASDA-1048/301-075E-TSNN- II)							
F10	光電流密度		二次電子放出係数		導電率		比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond		Epsil
	[10uA/m ²]		[eV]	[-]	[1/ohm·m]		[-]
	推奨値	2.2	推奨値		推奨値		推奨値
	手法A	2.2	手法A			手法A	
	手法B		手法B			手法B	
			手法C			手法C	手法C
Aluminized Black Kapton (146624)							
F11	光電流密度		二次電子放出係数		導電率		比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond		Epsil
	[10uA/m ²]		[eV]	[-]	[1/ohm·m]		[-]
	推奨値	1.5	推奨値	334	2.18	推奨値	推奨値
	手法A	1.5	手法A	334	3.18	手法A	
	手法B		手法B			手法B	
			手法C			手法C	手法C
ITO Coated Silver FEP Tape with 9703 Conductive Acrylic Adhesive (149598)							
F14	光電流密度		二次電子放出係数		導電率		比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond		Epsil
	[10uA/m ²]		[eV]	[-]	[1/ohm·m]		[-]
	推奨値	1.5	推奨値		推奨値		推奨値
	手法A	1.5	手法A			手法A	
	手法B		手法B			手法B	
			手法C			手法C	手法C
Upilex							
F15	光電流密度		二次電子放出係数		導電率		比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond		Epsil
	[10uA/m ²]		[eV]	[-]	[1/ohm·m]		[-]
	推奨値	1.6	推奨値	300	2.23	推奨値	1.4×10^{-15}
	手法A	1.6	手法A			手法A	1.4×10^{-15}
	手法B	0.192	手法B	300	2.23	手法B	3.3×10^{-17}
			手法C	550	2.0	手法C	4.1×10^{-17} 手法C 3.2
Teflon FEP							
F16	光電流密度		二次電子放出係数		導電率		比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond		Epsil
	[10uA/m ²]		[eV]	[-]	[1/ohm·m]		[-]
	推奨値	0.06	推奨値	600	1.6	推奨値	5.0×10^{-19}
	手法A	0.06	手法A			手法A	
	手法B	0.0131	手法B			手法B	5.0×10^{-19}
			手法C	600	1.6	手法C	3.9×10^{-17} 手法C 1.9

表 5-1 計測結果一覧 (3/9)

Kapton									
F17	光電流密度		二次電子放出係数			導電率		比誘電率	
	aph [10 μ A/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm \cdot m]		Epsil [-]		
	推奨値	1.5	推奨値	185	1.72	推奨値	2.1×10^{-15}	推奨値	3.6
	手法A	1.5	手法A	185	1.72	手法A	2.1×10^{-15}		
	手法B	0.207	手法B			手法B	1.0×10^{-15}		
			手法C	400	1.7	手法C	3.5×10^{-15}	手法C	3.6
ETFE									
F18	光電流密度		二次電子放出係数			導電率		比誘電率	
	aph [10 μ A/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm \cdot m]		Epsil [-]		
	推奨値		推奨値	500	1.9	推奨値	7.7×10^{-19}	推奨値	
	手法A		手法A			手法A			
	手法B		手法B			手法B	7.7×10^{-19}		
			手法C	500	1.9	手法C	5.5×10^{-17}	手法C	2.0
Glass Epoxy laminate type GEB									
S1	光電流密度		二次電子放出係数			導電率		比誘電率	
	aph [10 μ A/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm \cdot m]		Epsil [-]		
	推奨値	2.5	推奨値	228	2.16	推奨値		推奨値	
	手法A	2.5	手法A	228	2.16	手法A			
	手法B		手法B			手法B			
			手法C			手法C		手法C	
3M™ Glass Cloth Electrical Tape 79									
S2	光電流密度		二次電子放出係数			導電率		比誘電率	
	aph [10 μ A/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm \cdot m]		Epsil [-]		
	推奨値	0.5	推奨値	432	3.93	推奨値		推奨値	
	手法A	0.5	手法A	432	3.93	手法A			
	手法B		手法B			手法B			
			手法C			手法C		手法C	
Kevlar (シアネート系)									
S4	光電流密度		二次電子放出係数			導電率		比誘電率	
	aph [10 μ A/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm \cdot m]		Epsil [-]		
	推奨値	2.3	推奨値	212	1.85	推奨値		推奨値	
	手法A	2.3	手法A	212	1.85	手法A			
	手法B		手法B	350	1.4	手法B			
			手法C			手法C		手法C	
CFRP PAN系エポキシ									
S5	光電流密度		二次電子放出係数			導電率		比誘電率	
	aph [10 μ A/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm \cdot m]		Epsil [-]		
	推奨値	1.4	推奨値	350	2.17	推奨値		推奨値	
	手法A	1.4	手法A			手法A			
	手法B	0.0645	手法B	350	2.17	手法B			
			手法C			手法C		手法C	
CFRP PAN系シアネート									
S6	光電流密度		二次電子放出係数			導電率		比誘電率	
	aph [10 μ A/m ²]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm \cdot m]		Epsil [-]		
	推奨値	0.5	推奨値	300	1.68	推奨値		推奨値	
	手法A	0.5	手法A			手法A			
	手法B		手法B	300	1.68	手法B			
			手法C			手法C		手法C	

表 5-1 計測結果一覧 (4/9)

CFRP PITCH系シアネット UD							
S7	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ²]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	3.7	推奨値	300	1.68	推奨値	推奨値
	手法A	3.7	手法A			手法A	
	手法B		手法B	300	1.68	手法B	
			手法C			手法C	手法C
CFRP PITCH系シアネット 三軸織り							
S8	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ²]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	5.4	推奨値	350	0.83	推奨値	推奨値
	手法A	5.4	手法A			手法A	
	手法B		手法B	350	0.83	手法B	
			手法C			手法C	手法C
Silver Sheet (Agx)							
M1	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ²]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	2.2	推奨値	431	2.23	推奨値	推奨値
	手法A	2.2	手法A	431	2.23	手法A	
	手法B		手法B	400	2.54	手法B	
			手法C			手法C	手法C
Au							
M2	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ²]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	3.5	推奨値	965	2.03	推奨値	推奨値
	手法A	3.5	手法A	965	2.03	手法A	
	手法B	1.28	手法B	800	1.97	手法B	
			手法C			手法C	手法C
Ag							
M3	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ²]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	3.0	推奨値			推奨値	推奨値
	手法A	3.0	手法A			手法A	
	手法B		手法B			手法B	
			手法C			手法C	手法C
Silver Bus Bar							
M4	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ²]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	2.9	推奨値	350	2.31	推奨値	推奨値
	手法A	2.9	手法A			手法A	
	手法B		手法B	350	2.31	手法B	
			手法C			手法C	手法C
Al Alloy A5052P alumite treatment							
M5	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ²]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	2.4	推奨値	348	2.48	推奨値	推奨値
	手法A	2.4	手法A	348	2.48	手法A	
	手法B		手法B	400	2.57	手法B	
			手法C			手法C	手法C

表 5-1 計測結果一覧 (5/9)

Al Alloy A5052 black alumite treatment							
M6	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ²]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	2.2	推奨値	304	2.52	推奨値	推奨値
	手法A	2.2	手法A	304	2.52	手法A	
	手法B		手法B			手法B	
			手法C			手法C	
Al Alloy A5052 chromate treatment							
M7	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ²]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	2.8	推奨値	301	2.73	推奨値	推奨値
	手法A	2.8	手法A	301	2.73	手法A	
	手法B		手法B	400	2.96	手法B	
			手法C			手法C	
SUS 304							
M8	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ²]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	1.5	推奨値	340	2.73	推奨値	推奨値
	手法A	1.5	手法A	340	2.73	手法A	
	手法B		手法B	350	2.40	手法B	
			手法C			手法C	
Titanium (TP270C)							
M9	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ²]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	1.4	推奨値	311	2.80	推奨値	推奨値
	手法A	1.4	手法A	311	2.80	手法A	
	手法B		手法B	350	2.52	手法B	
			手法C			手法C	
Titanium Passivated							
M10	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ²]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	1.5	推奨値	311	2.88	推奨値	推奨値
	手法A	1.5	手法A	311	2.88	手法A	
	手法B		手法B	350	3.06	手法B	
			手法C			手法C	
RTV S691 A/B							
B1	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ²]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [1/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	0.6	推奨値			推奨値	推奨値
	手法A	0.6	手法A			手法A	
	手法B		手法B			手法B	
			手法C			手法C	
AZW/LA-II							
P1	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率		
	aph [10uA/m ³]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [2/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	1.1	推奨値	596	3.70	推奨値	推奨値
	手法A	1.1	手法A	596	3.70	手法A	
	手法B		手法B	600	3.51	手法B	
			手法C			手法C	

表 5-1 計測結果一覧 (6/9)

S13GP:6N/LO-1						
P2	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond	Epsil
	[10uA/m4]		[eV]	[-]	[3/ohm·m]	[-]
	推奨値	1.5	推奨値	412	2.86	推奨値
	手法A	1.5	手法A	412	2.86	手法A
	手法B		手法B	350	2.35	手法B
			手法C			手法C
DS13N						
P3	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond	Epsil
	[10uA/m5]		[eV]	[-]	[4/ohm·m]	[-]
	推奨値		推奨値			推奨値
	手法A		手法A			手法A
	手法B		手法B			手法B
			手法C			手法C
S13GP						
P4	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond	Epsil
	[10uA/m6]		[eV]	[-]	[5/ohm·m]	[-]
	推奨値		推奨値	400	2.73	推奨値
	手法A		手法A			手法A
	手法B		手法B	400	2.73	手法B
			手法C			手法C
Z-93C55						
P5	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond	Epsil
	[10uA/m7]		[eV]	[-]	[6/ohm·m]	[-]
	推奨値		推奨値			推奨値
	手法A		手法A			手法A
	手法B		手法B			手法B
			手法C			手法C
Z-93P						
P6	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond	Epsil
	[10uA/m8]		[eV]	[-]	[7/ohm·m]	[-]
	推奨値	0.7	推奨値	533	2.65	推奨値
	手法A	0.7	手法A	533	2.65	手法A
	手法B		手法B	500	2.57	手法B
			手法C			手法C
AZ-2000-IECW						
P7	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond	Epsil
	[10uA/m4]		[eV]	[-]	[3/ohm·m]	[-]
	推奨値	0.8	推奨値	595	2.63	推奨値
	手法A	0.8	手法A	595	2.63	手法A
	手法B		手法B	400	2.57	手法B
			手法C			手法C
AZ-2100-IECW						
P8	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph		Semax	Sdmax	Cond	Epsil
	[10uA/m5]		[eV]	[-]	[4/ohm·m]	[-]
	推奨値		推奨値			推奨値
	手法A		手法A			手法A
	手法B		手法B			手法B
			手法C			手法C

表 5-1 計測結果一覧 (7/9)

AZ-93					
P9	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph [10uA/m6]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [5/ohm·m]	Epsil [-]
	推奨値	推奨値		推奨値	推奨値
	手法A	手法A		手法A	
	手法B	手法B		手法B	
		手法C		手法C	手法C
Aeroglaze Z306					
P10	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph [10uA/m7]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [6/ohm·m]	Epsil [-]
	推奨値	0.03	推奨値	推奨値	推奨値
	手法A	0.03	手法A	手法A	
	手法B		手法B	手法B	
			手法C	手法C	手法C
Aeroglaze Z307					
P11	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph [10uA/m8]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [7/ohm·m]	Epsil [-]
	推奨値	0.6	推奨値	284	2.48
	手法A	0.6	手法A	284	2.48
	手法B		手法B	400	2.76
			手法C	手法C	手法C
APTEK					
P12	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph [10uA/m9]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [8/ohm·m]	Epsil [-]
	推奨値	0.8	推奨値	595	2.59
	手法A	0.8	手法A	595	2.59
	手法B		手法B	400	2.58
			手法C	手法C	手法C
CV-1121-1					
P13	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph [10uA/m4]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [3/ohm·m]	Epsil [-]
	推奨値	6.0	推奨値	推奨値	推奨値
	手法A	6.0	手法A	手法A	
	手法B		手法B	手法B	
			手法C	手法C	手法C
Nova 500 Astro Black					
P14	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph [10uA/m5]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [4/ohm·m]	Epsil [-]
	推奨値	推奨値	202	1.99	推奨値
	手法A	手法A	202	1.99	手法A
	手法B	手法B		手法B	
		手法C		手法C	手法C
BRR/s 0213					
G1	光電流密度	二次電子放出係数		導電率	比誘電率
	aph [10uA/m6]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [5/ohm·m]	Epsil [-]
	推奨値	推奨値	394	3.06	推奨値
	手法A	手法A	394	3.06	手法A
	手法B	手法B	600	3.05	手法B
		手法C		手法C	手法C

表 5-1 計測結果一覧 (8/9)

CMG 100 ITO						
G2	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	
	aph [10uA/m7]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [6/ohm·m]	比誘電率 Epsil [-]
	推奨値	0.07	推奨値		推奨値	推奨値
	手法A		手法A		手法A	
	手法B	0.07	手法B		手法B	
			手法C		手法C	手法C
CMX-100-AR						
G3	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	
	aph [10uA/m8]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [7/ohm·m]	比誘電率 Epsil [-]
	推奨値	0.156	推奨値	1124	7.77	推奨値
	手法A		手法A	1124	7.77	
	手法B	0.156	手法B			
			手法C			手法C
CMO 100						
G4	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	
	aph [10uA/m9]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [8/ohm·m]	比誘電率 Epsil [-]
	推奨値	1.9	推奨値	384	2.63	推奨値
	手法A	1.9	手法A	384	2.63	
	手法B	0.297	手法B			
			手法C			手法C
CMG-100-AR						
G5	光電流密度		二次電子放出係数		導電率	
	aph [10uA/m8]		Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [7/ohm·m]	比誘電率 Epsil [-]
	推奨値		推奨値	372	3.29	推奨値
	手法A		手法A	372	3.29	1.3×10^{-14}
	手法B		手法B			1.3×10^{-14}
			手法C			手法C

表 5-1 計測結果一覧 (9/9)

電子照射 Kapton							
EB1	光電流密度	二次電子放出係数		導電率		比誘電率	
	aph [10uA/m5]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [4/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	推奨値	600	1.43	推奨値	8.6×10 ⁻¹⁶	推奨値
	手法A	手法A			手法A	8.6×10 ⁻¹⁶	
	手法B	手法B	600	1.43	手法B		
		手法C			手法C		手法C
電子照射 Black Kapton							
EB2	光電流密度	二次電子放出係数		導電率		比誘電率	
	aph [10uA/m6]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [5/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	推奨値	300	2.08	推奨値		推奨値
	手法A	手法A			手法A		
	手法B	手法B	300	2.08	手法B		
		手法C			手法C		手法C
電子照射 Upilex							
EB3	光電流密度	二次電子放出係数		導電率		比誘電率	
	aph [10uA/m7]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [6/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	推奨値	350	1.99	推奨値	4.7×10 ⁻¹⁶	推奨値
	手法A	手法A			手法A	4.7×10 ⁻¹⁶	
	手法B	手法B	350	1.99	手法B		
		手法C			手法C		手法C
電子照射 CMG100AR							
EB4	光電流密度	二次電子放出係数		導電率		比誘電率	
	aph [10uA/m8]	Semax [eV]	Sdmax [-]	Cond [7/ohm·m]	Epsil [-]		
	推奨値	推奨値			推奨値	1.2×10 ⁻¹⁴	推奨値
	手法A	手法A			手法A	1.2×10 ⁻¹⁴	
	手法B	手法B			手法B		
		手法C			手法C		手法C