

ポリイミドにおける二次電子放出特性と照射線量の関係

谷口 大明* 小玉 一貴 三宅 弘晃 田中 康寛 (東京都市大学)
大平 正道 奥村 哲平 川北 史朗 高橋 真人 (宇宙航空研究開発機構)

The relationship between characteristic of secondary electron emission and irradiation dose in Polyimide

Hiroaki Taniguchi* Kazuki Kodama Hiroaki Miyake Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

Masamichi Ohira Tepei Okumura Shiro Kawakita Masato Takahashi (JAXA)

1. はじめに

現在、気象観測衛星をはじめとした多くの宇宙機が運用されている。宇宙環境には高エネルギー荷電粒子等の放射線が存在し、宇宙機がこれらに曝されることで表面材料は帯電・放電し、宇宙機の運用異常へ陥る危険性がある。したがって、設計段階において電位解析を行い、帯電・放電を考慮した材料選定が求められる。我が国における衛星開発では、国産の衛星解析ソフトウェア (Multi utility Spacecraft Charging Analysis Tool: MUSCAT) を用いて解析を行っている。この解析を実施するにあたり、衛星形状や表面材料の二次電子放出 (SEEY)、光電子放出電流といった帯電に関する物性値が必要となる。本研究グループでは SEEY に着目して研究を行っている。

これまで、多くの研究機関において SEEY 測定が実施されてきたが、その測定の多くは BOL (Beginning Of Life) 時の材料を対象としている。しかし、宇宙機が運用開始直後から EOL (End Of Life) 時にかけて常に宇宙環境に曝されることで、表面材料の SEEY 特性が変化する可能性が考えられる。宇宙機の更なる長期運用を図る為に、BOL から時間経過した材料の帯電特性を考慮した解析が必要であるといえる。その為に、時間経過後の材料の帯電特性を知る必要がある。

そこで今回、Kapton-H と Uplex-S に対し GEO (Geosynchronous Orbit) 上で 1、3 年間運用した際と同等線量の電子線を照射し、照射試料の SEEY

測定を行った。そして二次電子放出特性と照射線量について検討したので以下に報告する。

2. 測定システム

図 1 に用いた測定システムの概略図を示す。

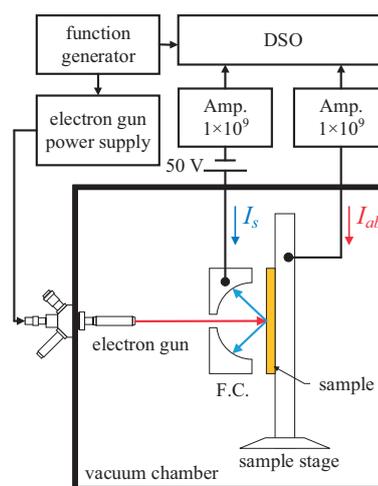


図 1 SEEY 測定システム概略図

本測定システムでは、電子銃からファラデーカップ (F.C.) を通して試料へ電子線照射を行う。この時、測定による試料の帯電を抑制するため、電子線はパルス幅 0.5 ms のパルスビームとしている。

試料への電子線照射に伴い試料から放出された電子 (二次電子) を F.C.、試料に吸収された電子を試料台にて捕獲し、それぞれ I_s 、 I_{ab} として観測する。SEEY σ を算出する際は式 (1) を用いる。

$$\sigma = \frac{I_s}{I_s + I_{ab}} \quad (1)$$

今回、一次電子エネルギー E_p を 300 eV から 5 keV という範囲で測定を行った。

3. GEO での運用を模擬した試料

GEO 上で1年間運用した際に宇宙機に照射される電子の量を 10^{15} 個/cm² として、Kapton-H と Upilex-S を対象に、50 keV 電子銃を用いて GEO 上で 1、3 年間宇宙機を運用した際と同等線量での電子線照射を行った。各試料への電子線照射条件は表 1 の通りである。同表中に示した電子線照射時間は 1 照射スポット当たりの時間であり、各試料とも 4 つの照射スポットを設けた。

表 1 50 keV 電子線照射条件

	electron beam energy [keV]	current density [nA/cm ²]	time [min/spot]
1 year	50	45	60
3 years	50	67.5	120

1、3 年間模擬試料の SEEY 測定は電子線照射約 15 h、60 h、110 h 後にそれぞれ行った。

4. 測定結果

4.1. 試料外観の変化 図 2 に Kapton-H と Upilex-S の電子線照射前後での外観を示す。運用模擬試料は、照射 110 h 後の SEEY 測定後、真空容器から取り出した際にカメラで撮影した。

同図より、すべての運用模擬試料において照射痕が確認できた。また、1、3 年間運用模擬試料において Kapton-H と比較して Upilex-S の方に色の濃い照射痕を確認することができた。

4.2. 電子線照射前後での SEEY の変化 図 3 (a) に Kapton-H の 1 年間運用模擬試料、(b) に 3 年間運用模擬試料の電子線照射前後における SEEY 測定結果を示す。縦軸が二次電子放出係数 σ 、横軸が一次電子エネルギー E_p [eV] を表す。また、表 2 に Kapton-H の各測定結果での SEEY 最大値 σ_m とその時の一次電子エネルギー E_m を示す。

同図(a)より、高エネルギー領域において照射前後で SEEY に有意差を確認できなかった。低エネルギー領域においては若干の差異を確認できた。また、照射後時間経過に伴い σ_m が減少傾向にある



(a) 電子線未照射試料



(b) 1 年間運用模擬試料



(c) 3 年間運用模擬試料

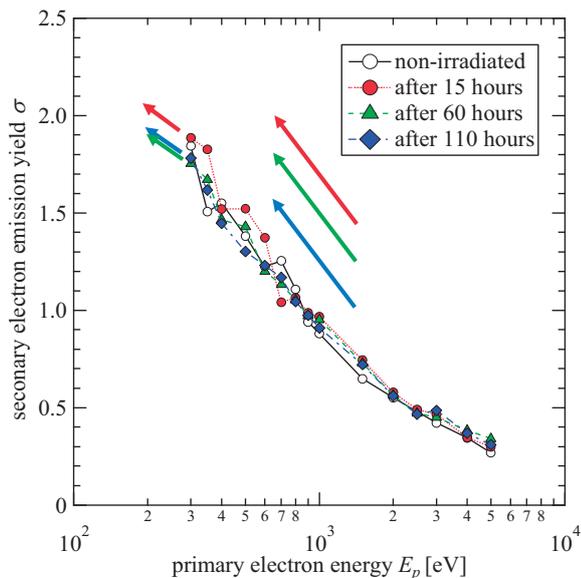
図 2 Kapton-H (左列) と Upilex-S (右列) の電子線電子線照射前後での外観

ことが確認できた。

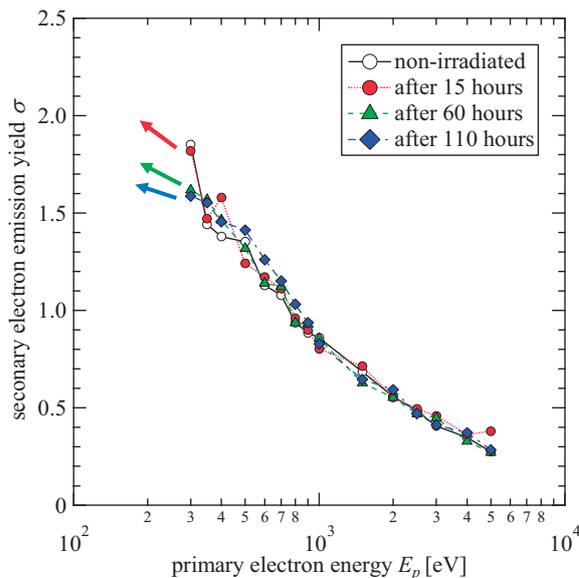
同図(b)では、照射試料で σ_m が上昇していることが確認できた。高エネルギー領域では $E_p = 4、5$ keV において照射 15 h 後に σ が低下、低エネルギー領域では照射 60 h 後までピークの出現を確認できた。しかし、いずれも時間経過により未照射試料へ近い挙動となる結果が得られた。

図 4 (a) に Upilex-S の 1 年間運用模擬試料、(b) に 3 年間運用模擬試料の電子線照射前後における SEEY 測定結果を示す。また、表 3 に Upilex-S の各測定結果での SEEY 最大値 σ_m とその時の一次電子エネルギー E_m を示す。

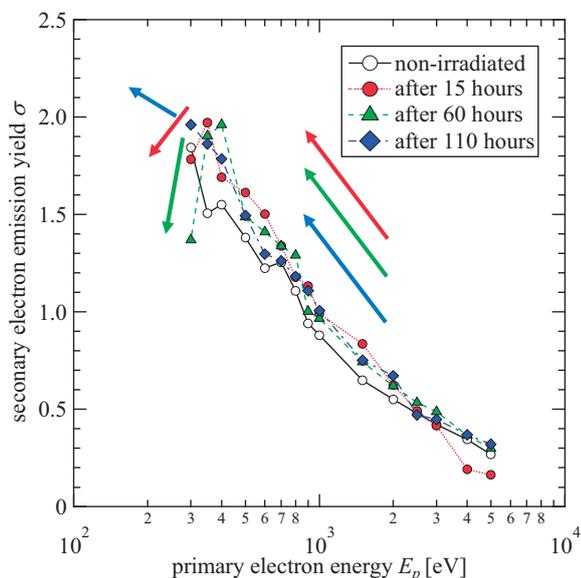
同図(a)、(b)より、両照射線量において照射試料で σ_m が減少しており、また、 $E_p = 5$ keV において照射 15 h 後は SEEY が増加しているが時間経過により未照射試料に近い値となっていることが確認できた。低エネルギー領域では、1 年間運用模擬試料では時間経過により SEEY が減少し、3 年間運用模擬試料では照射後にピークが確認され、時間経過に伴いピークが高エネルギー側へシフトする挙動が見て取れる。



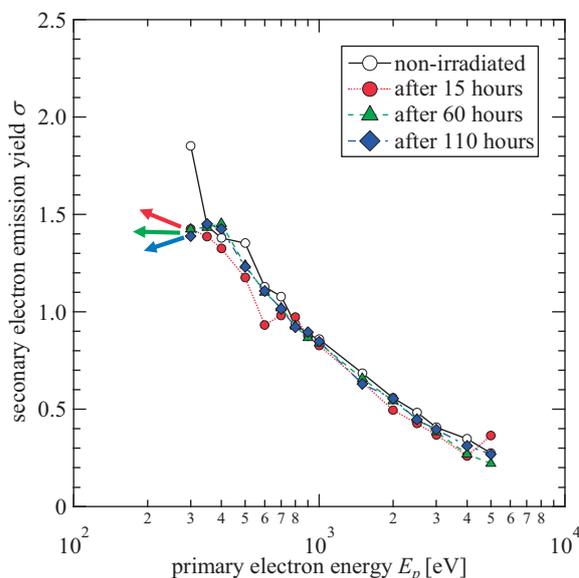
(a) 1年間運用模擬試料



(a) 1年間運用模擬試料



(b) 3年間運用模擬試料



(b) 3年間運用模擬試料

図3 Kapton-Hにおける電子線照射前後でのSEEY測定結果と時間経過によるSEEYの変化

図4 Upilex-Sにおける電子線照射前後でのSEEY測定結果と時間経過によるSEEYの変化

表2 Kapton-Hの σ_m と E_m

1年間運用模擬試料				
	non-irradiated	after 15 hours	after 60 hours	after 110 hours
σ_m	1.844	1.885	1.753	1.781
E_m	300	300	300	300
3年間運用模擬試料				
	non-irradiated	after 15 hours	after 60 hours	after 110 hours
σ_m	1.844	1.972	1.961	1.960
E_m	300	350	400	300

表3 Upilex-Sの σ_m と E_m

1年間運用模擬試料				
	non-irradiated	after 15 hours	after 60 hours	after 110 hours
σ_m	1.852	1.819	1.618	1.586
E_m	300	300	300	300
3年間運用模擬試料				
	non-irradiated	after 15 hours	after 60 hours	after 110 hours
σ_m	1.852	1.425	1.452	1.451
E_m	300	300	400	350

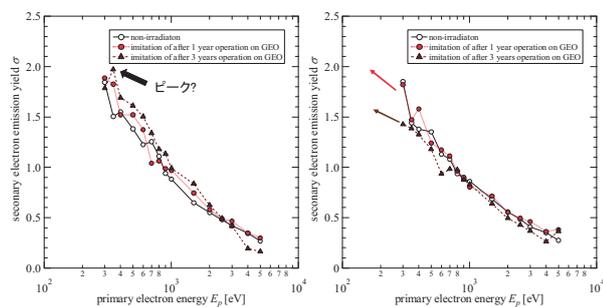
4.3. 電子線照射線量によるSEEYの変化 図5にKapton-H(左列)とUpilex-S(右列)の電子線照射線量によるSEEYの変化を示す。

同図より、Kapton-Hでは照射線量を増加させる

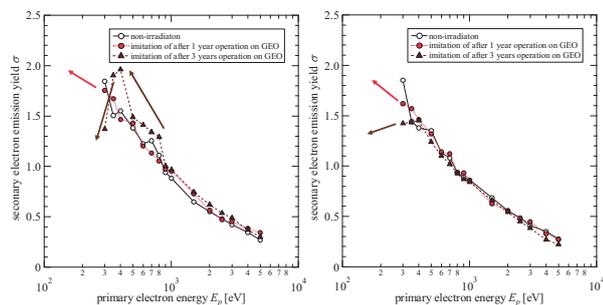
ことにより低エネルギー領域において σ_m が上昇傾向にあることが確認できた。また、照射線量に関わらず時間経過により比較的未照射試料に近いSEEYとなることが確認できる。

一方で、Upilex-S では照射線量を増加させることにより低エネルギー領域において σ_m が減少傾向にあることが確認でき、また、時間経過で照射線量増加に伴い、ピークがより高エネルギー側へシフトしていく傾向を取得することができた。

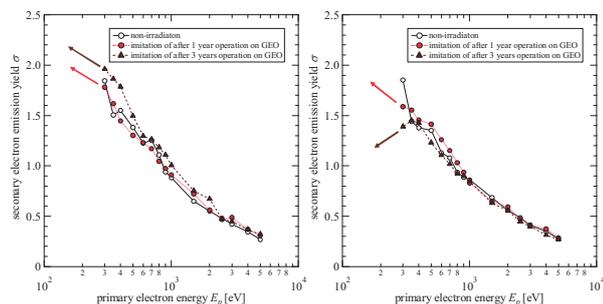
今回の測定において、Kapton-H においては照射線量による SEEY の変化が Upilex-S と比較して小さく、時間経過による SEEY に可逆性がある一方で、Upilex-S においては照射線量を増加させることで σ_m が低下していき、時間経過による可逆性がないことがわかる。



(a) 照射 15 h 後



(a) 照射 60 h 後



(a) 照射 110 h 後

図5 Kapton-H(左列)とUpilex-S(右列)の電子線照射線量によるSEEYの変化

5. まとめと将来展望

今回、Kapton-H と Upilex-S を対象に GEO で 1 年間、3 年間宇宙機を運用した際と同等線量の電子線照射を行い、SEEY 測定を行った。各試料に

おいて電子線照射前後での SEEY の比較を行ったところ、Kapton-H では照射後試料において SEEY の最大値 σ_m が上昇し、照射線量増加に伴って上昇していく傾向が得られた。また、SEEY の挙動は時間経過により未照射試料の結果に近いものとなり、可逆性を示す結果が得られた。Upilex-S では、SEEY の最大値 σ_m が低下し、照射線量増加に伴って低下していく傾向が得られた。また、時間経過に伴いピークが高エネルギー側へシフトしていく挙動が得られ、SEEY に不可逆性を示す結果が得られた。以上より、現在の解析において、Kapton-H は宇宙機運用開始から時間経過後も BOL 時の解析結果を適用できる可能性があると考えられる。

今回の測定において、測定した E_p 範囲より低エネルギー領域にピークが現れると予想できる結果が存在する。よって、更なる低エネルギー領域における SEEY の測定を行っていく。また、より電子線照射直後の SEEY 測定が行えるよう、現在新たな測定システムを構築中である。

文 献

- (1) 廣三壽, 藤井治久, 阿部俊雄, 西本博信:「静止軌道宇宙環境における熱制御用絶縁性材料の帯電観測」, 電学論 A, Vol.118, No.7-8 p.759-766 (1998)
- (2) C.Koons, J.E.Mazur, R.S.Selesnick, J.B.Blake, J.F.Fennell, J.L.Roeder and P.C.Anderson, “The Impact of the Space Environment on Space Systems”, Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference, Air Force Research Laboratory, pp.7-11, 1998