

電子線照射した材料を対象とする二次電子放出係数測定装置の開発

谷口 大明* 佐藤 奈摘 三宅 弘晃 田中 康寛 (東京都市大学)
奥村 哲平 川北 史朗 高橋 真人 古賀 清一 (宇宙航空研究開発機構)

Development of Secondary Electron Emission Yield Measurement System for Electron Beam Irradiated Materials

Hiroaki Taniguchi* Natsumi Satoh Hiroaki Miyake Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)
Tepei Okumura Shiro Kawakita Masato Takahashi Kiyokazu Koga (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 (Multiutility 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、材料の二次電子放出係数 (SEY)、光電子放出係数、体積抵抗率といった帯電に関する物性値が必要となる。当研究グループでは SEY に着目し、装置構築から測定まで一貫して研究を行っている。

これまで、様々な研究者により SEY 測定が実施されてきたが、その測定結果の多くが宇宙機の運用開始 (Beginning Of Life: BOL) 時に相当する。BOL から運用終了 (End Of Life: EOL) にかけて宇宙機は継続的に宇宙環境に曝され、この過程で表面材料の帯電物性が変化する可能性がある。当研究グループでは宇宙放射線の中でも、特に電子線によって生じる材料の劣化に着目し、電子線照射後の材料の SEY 測定を行ってきた。しかし、これまでに得られた結果は、測定装置の制限により、電子線照射から半日以上時間が経過したもの

となっていた。そこで今回、電子線照射から SEY 測定まで真空を保持し、電子線照射直後から測定可能な SEY 測定装置の開発を行った。

2. 従来用いてきた測定装置

2.1. 電子線照射から測定までの流れ

Fig. 1 に従来用いてきた電子線照射及び測定装置の概略を示す。本装置では次の手順で材料への電子線照射および電子線照射材料の SEY 測定を行う。(1) 測定用電子銃を用いて電子線未照射材料の SEY 測定を行う (同図(a))。(2) 自動回転ステージを用いて試料面を 50 keV 電子銃側へ向け、試料へ電子線照射を行う (同図(b))。(3) 再度試料面を測定用電子銃へ向け、電子線照射試料の SEY 測定を行う。

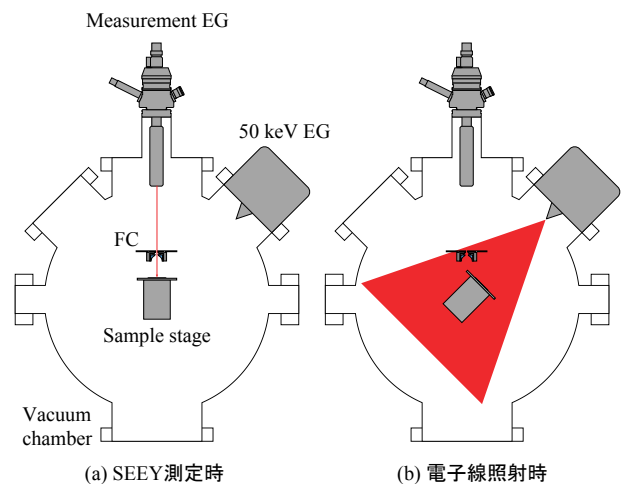


Fig. 1 従来の電子線照射及び測定装置概略図

ここで、電子線照射後は自動回転ステージが動作不能となり、復帰まで半日程度を要することから、電子線照射直後の SEEY 測定ができない。現在、本原因として電子線照射時の発熱によるモータ軸の熱膨張を考えている。また、電子線照射時に試料から発生するコンタミネーションにより測定系が汚染される可能性がある。

2.2. 吸収電流法を用いた測定システム

Fig. 2 に吸収電流法を用いた SEEY 測定システムの概略を示す。本測定システムでは電子銃からファラデーカップ (FC) を通して試料へパルス幅 0.5 ms のパルス電子ビーム照射を行う。試料への電子線照射に伴い試料から放出された電子を FC、試料に吸収された電子を試料台にて捕獲し、それぞれ二次電子電流 I_s 、吸収電流 I_{ab} として観測する。SEEY を算出する際は式(1)を用いる。

$$\sigma = \frac{I_s}{I_s + I_{ab}} \tag{1}$$

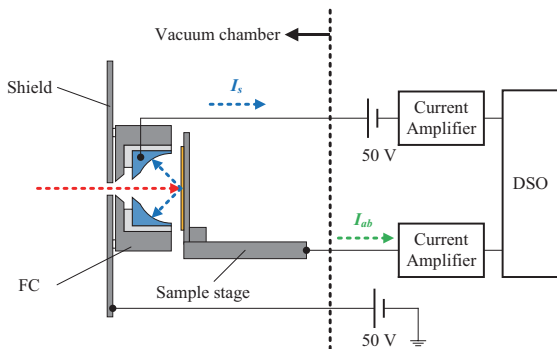


Fig. 2 吸収電流法による SEEY 測定システム

本手法では低一次電子エネルギー E_p 領域において I_{ab} の測定感度が低下し、パルス波形の読取りが難しいといった問題を抱えていた。Fig. 3 に $E_p = 0.25$ keV にて観測された I_{ab} 波形を示す。

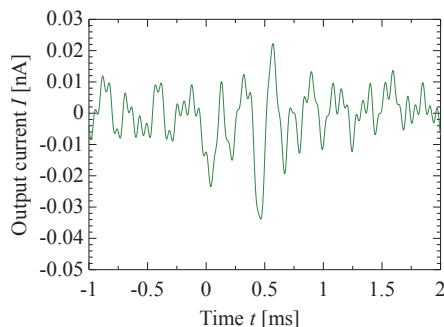


Fig. 3 $E_p = 0.25$ keV における I_{ab} 波形

2.3. 測定結果

Fig. 4 にこれまでに当研究において取得した Upilex-S の電子線照射前後の SEEY 測定結果を示す。試料への電子線照射条件は Table 1 の通りである。

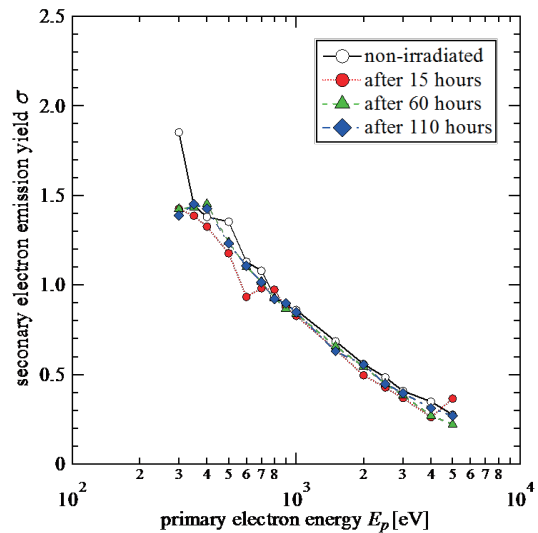


Fig. 4 Upilex-S の電子線照射前後の SEEY 測定結果

Table 1 電子線照射条件

ENERGY [keV]	CURRENT DENSITY [nA/cm ²]	TIME [min]
50	67	120

ここで、GEO 上で宇宙機を 1 年間運用した際に表面に照射される電子数を 10^{15} 個/cm² としている。

同図より、一次電子エネルギー $E_p = 300$ eV 付近にて電子線照射前後で SEEY の変化が顕著であるが、 $E_p = 300$ eV が測定下限となっていた。電子線照射により SEEY が大きく変化する領域は低 E_p 領域であると考えられるため、測定 E_p 下限の引き下げが必要であると考えられる。

2.4. 本装置における問題点と改善案

Fig.1 及び Fig.2 に示した測定装置が抱える問題として、次の 3 つが挙げられた。(i) 電子線照射後にステージモータが動作しないことによる測定開始時刻の遅れが発生すること。(ii) 電子線照射時に発生するコンタミネーションによる測定系の汚染が懸念されること。(iii) $E_p = 300$ eV 未満

の測定が困難であること。

今回、(i)の改善案として測定手法の見直し、(ii)および (iii) の改善案として電子線照射チャンバーと SEEY 測定チャンバーの分離を行った。

3. 新たに開発した測定装置

3.1. 電子線照射から測定までの流れ

Fig. 5 に新たに開発を行った測定装置の概略を示す。本装置での電子線照射から SEEY 測定は次の手順である。(1) SEEY 測定用チャンバーにて電子線未照射試料の SEEY 測定を行う。(2) マグネットフィードスルー (MFT) を用いて試料台を電子線照射用チャンバーへ搬送し、ゲートバルブを閉じて 50 keV 電子銃を用いて試料へ電子線照射を行う。(3) MFT を使用して試料台を SEEY 測定用チャンバーへ搬送し、電子線照射試料の SEEY 測定を行う。

今回、電子線照射用と SEEY 測定用でチャンバーを分離し、モータを使用しない手法で試料台を移動させることとした。更に、両チャンバー間にゲートバルブを設けたことで、電子線照射時のコンタミネーションから測定系を保護することが可能である。

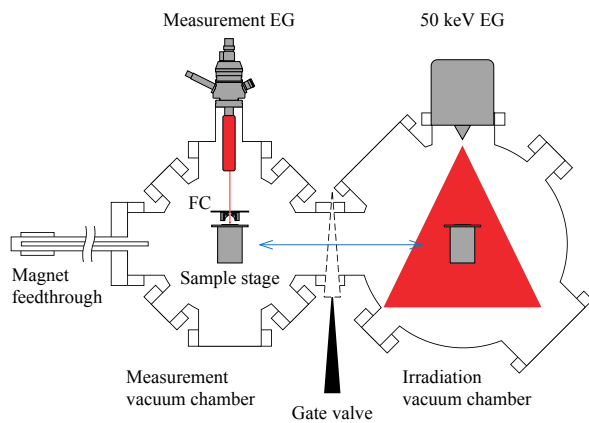


Fig. 5 開発した電子線照射および SEEY 測定装置

3.2. 一次電子電流法測定システム

Fig. 6 に一次電子電流法の概略を示す。一次電子電流法においても吸収電流法と同様のパルス電子ビームを用いる。

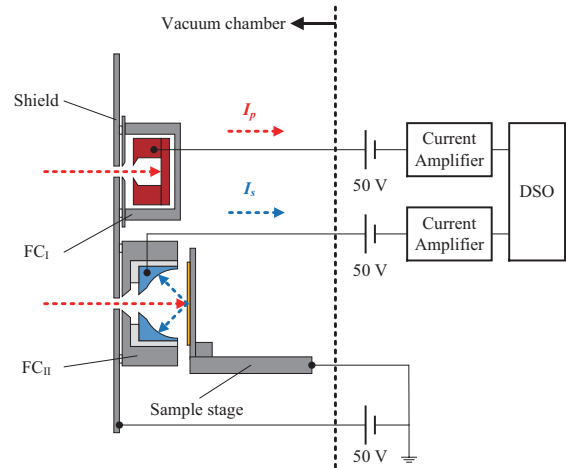


Fig. 6 一次電子電流法による SEEY 測定システム

本システムでは一次電子捕獲用、二次電子捕獲用で 2 つのファラデーカップ (FC_I, FC_{II}) を設けている。一次電子電流 I_p を観測する際は FC_I へ電子線を照射し、 I_s を測定する際は吸収電流法と同様の方法で観測を行う。FC_I, FC_{II} の配置を切り替えることで観測する電流を選択できる。SEEY を算出する際は式(2)を用いる。

$$\sigma = \frac{I_s}{I_p} \quad (2)$$

Fig. 7 に本手法で観測した $E_p = 0.15$ keV にて観測された I_p 波形を示す。同図より、Fig. 3 と比較して鮮明にパルス波形を観測することが出来ており、吸収電流法と一次電子電流法で同等の I_s を観測した場合、一次電子電流法を用いることでより低 E_p で正確な SEEY 測定が可能であると考えられる。

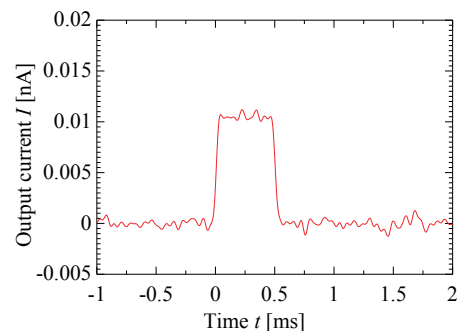


Fig. 7 $E_p = 0.15$ eV における I_p 波形

3.4. Au における二次電子放出係数測定結果比較

Fig. 8 に吸収電流法、一次電子電流法で測定を

実施した Au の SEEY 測定結果を示す。また、リファレンスとしてユタ州立大学が取得した結果も併せて示す。

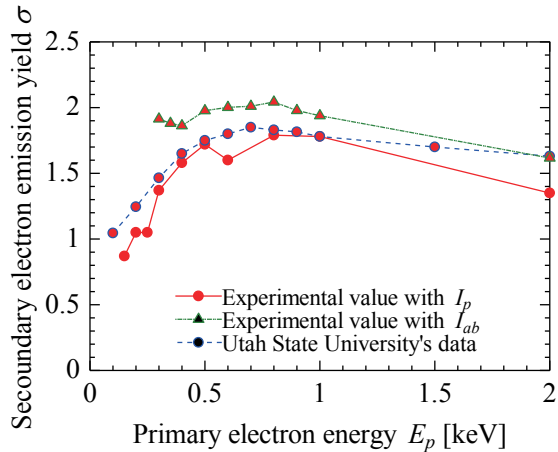


Fig.8 Au の SEEY 測定結果

同図より、吸収電流法と比較して一次電子電流法では測定 E_p 下限が低いことが確認できた。また、他機関と類似した傾向を得られていることから有用性のある結果が得られていると考えられる。

4. まとめ

これまで、当研究グループが行ってきた電子線照射試料の SEEY 測定を行う際は、試料への電子線照射と SEEY 測定を同一のチャンバー内で行ってきた。これにより、試料台を動かすためのステージが半日以上動作不能となり、電子線照射後すぐの SEEY 測定ができない問題や、周囲の測定系汚染の問題が引き起こされた。また、吸収電流法を用いていたことから、測定 E_p 下限が 0.3 keV となっていた。

そこで、電子線照射と SEEY 測定を行うチャンバーを分離、および測定手法として一次電子電流法の採用を実施した。これにより、電子線照射直後からの SEEY 測定が可能となり、電子線照射時の測定系汚染の問題も解消した。また、一次電子電流法にて 0.15 keV における I_p 波形が観測できていることから、測定 E_p 下限の引き下げにも成功した。今後、本装置を用いて電子線照射試料の SEEY 測定を行っていく。

文 献

- (1) H. C. Koons et al: "The impact of the space environment on space systems", Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference, Air Force Research Laboratory, AFRL-VS-TR-20001578, pp.7-11, (1998)
- (2) 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)
- (3) H.Nagato, K.Shibuya, H.Miyake, Y.Tanaka, M.Ohira, T.Okumura, S.Kawakita, M.Takahashi: "Development of Secondary Electron Emission Measurement System for Wide Energy Range with Aging", IEEJ Transactions Fundamentals and Materials, Vol. 135, No. 7, pp. 433-434, (2015)