

帯電現象に関わる衛星材料の物性パラメータの計測

Material properties measurements related to engineering
design optimization guidelines and spacecraft charging

総合技術研究本部 電源技術グループ

Space power engineering group

仁田工美、川北史朗、高橋真人、艸分宏昌、岐部公一

K. Nitta, S. Kawakita, M. Takahashi, H. Kusawake, K. Kibe

環境計測グループ

Space environment measurement group

三宅弘晃

H. Miyake

部品・材料・機構技術グループ

Electronic, mechanical components and materials engineering group

石澤淳一郎

J. Ishizawa

宇宙科学研究本部宇宙輸送工学研究系

Department of space transportation engineering

國中均

Abstract

The key parameters in modeling spacecraft charging are the secondary electron emission (SEE) coefficient and photoelectron emission (PE) coefficient of metals and insulating materials. This work is focused on the analysis and measurement of SEE and PE. A review is presented of methods to measure SEE and PE—including the using SEM with short-pulsed electron for accelerating voltage of 600V-5kV, a vacuum chamber with a low energy electron beam for accelerating voltage 100V-2kV, a measurement system of photo-electron emission, and a photoelectron emission image by vacuum ultraviolet light (VUV). This review is based on joint studies conducted for Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) at High Energy Accelerator Research Organization (KEK), at Musashi Institute of Technology and at Saitama University to investigate the relation to spacecraft charging. This report summarizes some typical measurement results after briefly explaining the measurement project.

1. はじめに

2002年12月に打ち上げられたみどり2号(ADEOS-II)の2003年10月に起こった運用異常は、帯電・放電が主要因と推定されている^[1]。更に、海外でも帯電・放電は軌道上の主要な不具合の一因とされている。

帯電・放電に関する設計の妥当性を検証するためには、計算機シミュレーションによる帯電解析が必要であり、現在、衛星帯電解析ソフト(Multiutility Spacecraft Charging Analysis Tool : MUSCAT)の開発^[2]が進められているが、下記の点から、「材料パラメータ取得試験」の必要性が確認されている。

- ・解析精度の向上のためには、実際に使用されている材料データを解析ソフトの入力データとする必要があること。

- ・材料データが開示されているのは一部の材料に限られており、更に開示されているとしても BOL 時のデータで、EOL のデータは全くと言って良いほど開示されていないこと。

帯電解析に必要な材料パラメータとしては、二次電子放出係数(SEE : 入射電子数に対する放出される電子数)、プロトン照射による二次電子放出係数、光電子放出係数、体積抵抗率、表面抵抗率及び内部帯電などが考えられる。

本研究は平成17年度より実施しており、初年度は二次電子放出係数(SEE)及び光電子放出係数(PE)に特化して、劣化を考慮しない材料パラメータ取得試験を行うことにより、衛星帯電解析ソフトの精度向上を図る。なお、評価対象の材料については、日本の人工衛星の外表面に使用している主要な材料を網羅することし、優先度を設定して順次試験を行うと共に、劣化条件についても検討する。最適な方法を確立することを目標に他の研究機関で採用されている測定方法を分析し、高エネルギー加速器研究機構(KEK)、武蔵工業大学及び埼玉大学との共同研究のもと実施している。

2. 研究の概要

平成17年度は以下の項目について研究を行った。

(1) 材料パラメータ測定手法の検討

二次電子放出係数及び光電子放出係数の測定手法について調査検討を行い、各研究機関での測定を行うこととした。

(2) 高エネルギー領域(600eV-5KeV)における二次電子放出係数の測定

二次電子放出係数の測定装置を KEK との共同研究で整備し、標準材料の測定を行った。さらに衛星設計基準作成 WG 1 提供による各種材料の計測を行った。

(3) 低エネルギー領域(200eV-2KeV)における二次電子放出係数の測定装置の構築

二次電子放出係数の測定装置を武蔵工業大学との共同研究で新たに立ち上げ、標準材料の測定を行った。

(4) 光電子放出係数測定装置の構築

光電子放出係数の測定装置を武蔵工業大学との共同研究で新たに立ち上げた。

(5) 光電子放出分布測定

光電子放出分布の測定装置を埼玉大学との共同研究で整備し、標準材料の測定を行った。

3. 成果の概要

(1) 材料パラメータ測定手法の検討

本研究プロジェクト開始に当たって、日本国内のみならず、NASA及びESAなど世界の宇宙機関で行われている材料パラメータ取得手法について調査検討を行った^{[3][4]}。その結果、人工衛星の外表面に使用している主要な材料を網羅する材料データベースは存在せず、二次電子放出係数、光電子放出係数等の材料パラメータはほとんど取得されていないことがわかった。特にEOL時のデータを開示している例は、海外でも皆無に等しく、国際的にも有用なデータとなり得ると考えられた。そこで、国内の現有試験設備等の実績を調査し、以下の分担で必要な試験を効率的に実施することとした。

・二次電子放出係数

低エネルギー領域 : 武蔵工業大学

高エネルギー領域 : 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

・光電子放出係数

定量的測定 : 武蔵工業大学

面分布測定 : 埼玉大学

・宇宙環境劣化試験 (放射線、原子状酸素及び紫外線)

JAXA 総合技術研究本部

加えて、材料パラメータ取得試験は、設計標準で要求する衛星帯電解析ソフトの精度向上の為に必要であることから、評価すべき宇宙機の外部使用材料について、WG1の全委員で議論し決定した。

(2) 高エネルギー領域 (600eV-5KeV) における

二次電子放出係数の測定

KEKにおいて、ファラデーカップを取り付けたビームブランキング型走査電子顕微鏡を用いて測定を行った^[5]。二次電子放出(SEE)の測定装置を図1に示す。材料表面の帯電を避けるためにパルスビーム法(パルス幅1ms, 電流100pA)を用いている。

二次電子放出係数は加速エネルギー E_p を600eV~5keVまで変化させ、各エネルギー毎の入射一次照射電子電流 I_p とその際の二次電子放出電流 I_s の計測を行い、 I_p と I_s のピーク値の比を取ることで得られる。

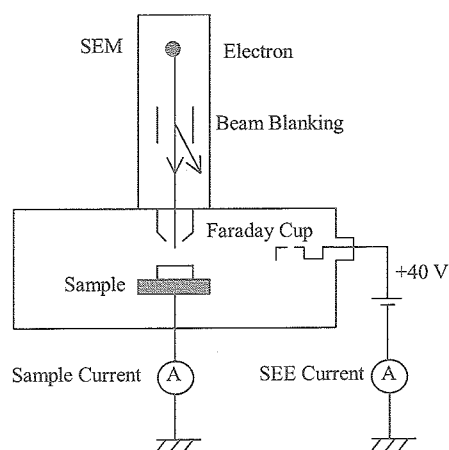


Fig. 1 SEE measurement system Primary electron current is a 1ms, 100 pA pulse. Primary and secondary electrons were captured by the faraday cup with +40 V applied. SEE yield is determined by the rate of the primary electron current (I_p) to the secondary electron current (I_s).

標準試料として用いているAu、Ag、石英ガラスと実際に人工衛星の太陽電子カバーガラスに用いられているMgF₂コーティングを施したガラス材料の4種の測定結果を図2に示す。二次電子放出係数の最大値はAu、Ag及び石英ガラスにおいてそれぞれ 1.75 (E_p=600eV)、1.67 (E_p=700eV) 及び 3.38 (E_p=700eV) であることが分かる。また、MgF₂コーティングを施したガラス材料ではE_p=800eVの時 5.72 と最大値となっている。標準材料の測定結果は、文献等で報告されている値と一致することが確かめられた^[4]。また、同装置で測定された結果とも矛盾がないことが確かめられた^{[6][7]}。

(3) 低エネルギー領域 (200eV-2KeV) にお

ける二次電子放出係数の測定装置の構築

二次電子放出係数が最大値となる加速エネルギーは、金属で 100eV-800eV、絶縁物では 300eV-2KeVと報告されている^[8]。武蔵工業大学において、低エネルギー領域での測定装置を構築した。一般的に電子銃は低エネルギーの電子を引き出そうとすると、電子の軌跡が広がってしまうだけでなく、引き出しにくくなってしまふ。このため、電子銃から電子を放出させる加速電極の開口端を広くして、静電レンズの原理を用いて、低エネルギーの電子を照射できるように工夫した。2つのリング電極から構成される加速電極部の静電レンズでビーム径を調整した。

一次電子電流は回転試料台の一部に設けたΦ30mmの穴を通してファラデーゲージで測定し、二次電子電流は試料台上部に設けた半球のファラデーカップで測定した。二次電子放出係数は加速エネルギーE_pを200eV~2keVまで変化させ、高エネルギー領域の場合と同様各エネルギー毎の入射一次照射電子電流I_pとその際の二次電子放出電流I_sの計測を行い、I_pとI_sのピーク値の比を取ることによって得られる。図4に高エネルギー領域での測定結果と低エネルギー領域での測定結果を併記した。両者は概ね一致していると考えられ、低エネルギー領域での測定に目処が立ったことが確認できた。

(4) 光電子放出係数測定装置の構築

図4に示すような測定装置を武蔵工業大学において構築した。光源には放射波長範囲115nm-400nmの重水素ランプを用い、試料面に分光器を通して単色光にして照射し、光電子電流を測定する。用いた分光器の分散逆数は5.5nmであるが、放出電流は微弱であることが予想されるため、入射スリット及び出射スリット幅は0.3mmとし、集光レンズにはMgF₂を

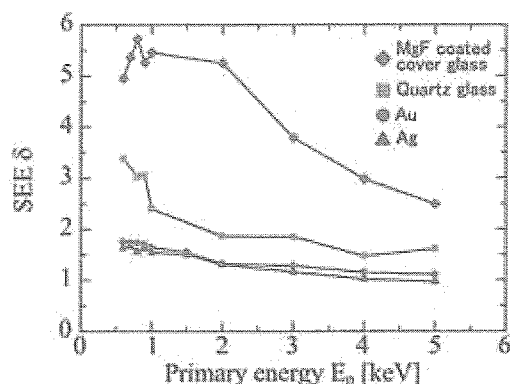


Fig. 2 Relation of the SEE yield of MgF coated cover glass to the primary electron energy.

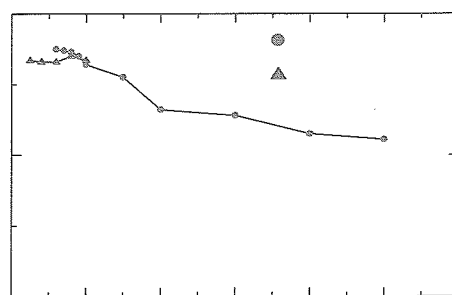


Fig. 3 Relation of the SEE yield of the Au to the primary electron energy compared with low energy electron beam and BBSEM.

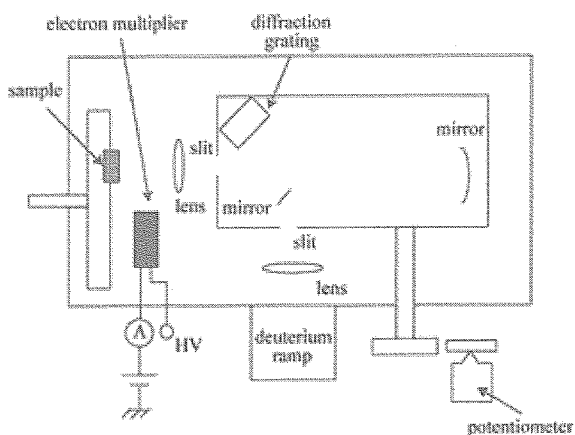


Fig.4 Experimental set-up for measuring the photoelectron emission.

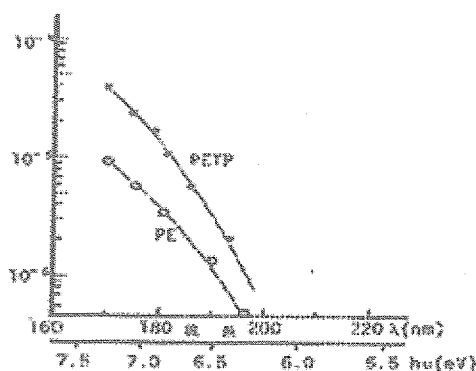


Fig.5 PETP and PE of quantum efficiency on the photoelectron emission energy

EEMは3つのレンズによって構成されており、 $\Phi 30\text{mm}$ のマイクロチャンネル・プレート(MCP)によって増幅され、蛍光スクリーン(PS)に像が投影される。測定画像はビデオカメラによって記録される。

後方電極に -1KeV のバイアス電圧を印加した際の、Auの光電子放出分布を図7に示す。分布範囲は $\pm 5\text{mm}$ である。通常Auの光電子放出は一様であると推察されるが、表面に付着

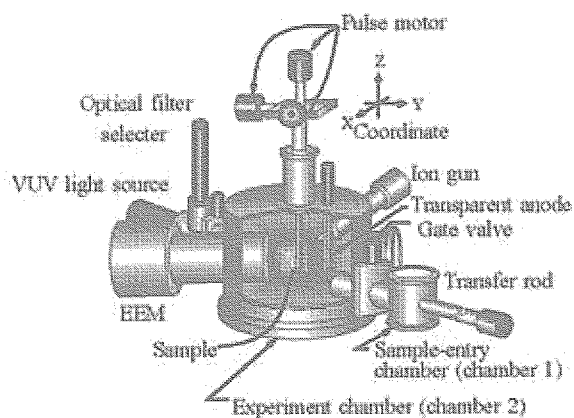


Fig. 6 Experiment set-up of EEM

用いた。照射強度及び照射面積は、別途試料面に装着した光電子増倍管によって測定する。光電子電流の値は、試料面に対して斜めに設けた光電子増倍管によって測定する。

図5にポリエチレン(PE)及びポリエチレンテレフタレート(PETP)の測定した量子効率の結果を示す^[9]。光照射による光電子電流の値を測定し、照射された光の光子数に対する放出される光電子数の割合である量子効率を計算した。この値を基に太陽光スペクトル照射時の光電子数に換算を行い、帯電解析時の入力値として用いる予定である。

(5) 光電子放出分布測定

埼玉大学において、図6に示す、光電子放出顕微鏡(EEM)を用いて、光電子放出電流の定性的な面分布測定を行った。試料導入部と試験部の2つのチャンバーを備えており、ゲートバルブを介して用いることで、常に試験部を真空に保っている。光源には、(4)の測定と同じ重水素ランプを用いている。試料台は、パルスモーターによってX、Y、Zの3軸移動が可能で、測定時に試料表面を動かすことで、分布測定が行える。

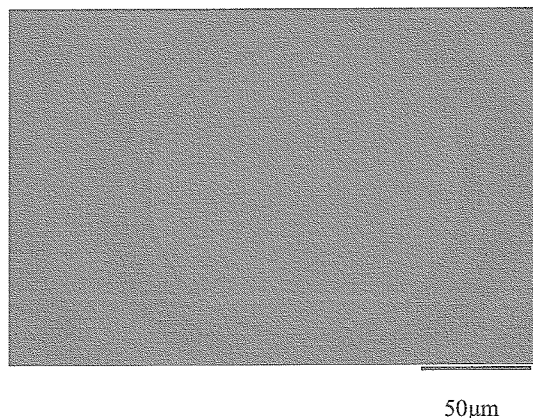


Fig. 7 Aspects of photoelectron emission sites observed by the EEM, when a voltage of -1.0kV

した水分や汚れなどによると考えられる、光電子放出の多い箇所が見受けられる。絶縁物を測定した場合には、帯電緩和による分布の偏りが生じることが今までの測定でわかっている。

4. まとめ

- 材料パラメータ測定の手法の調査と検討を行い、帯電解析ソフトMUSCATの入力データ測定を行うプロジェクトを立ち上げた。
- 200eV—5KeVの範囲で二次電子放出係数測定を行えることを示した。
- 光電子放出係数及び光電子電流分布の測定手法を示し、Auの表面においても、光電子放出分布に偏りがあることを示した。

5. 謝辞

また本報告の執筆にあたり、測定や検討におきまして多大なご協力を頂きました武蔵工業大学の湯本雅恵教授、埼玉大学の小林研一教授、ならびに高エネルギー加速器研究機構の斉藤芳雄教授、道園進一郎助手に感謝いたします。

[参考文献]

- [1] 宇宙開発委員会調査部会, “環境観測技術衛星(ADEOS-II)「みどりII」の運用異常に係る原因究明及び今後の対策について”, 宇宙開発委員会報告書, (2004)
- [2] T. Muranaka et. al., “Recent Progress of Development of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool(MUSCAT)”, AIAA Paper AIAA-2006-0408, 2006.
- [3] V. Viel, R. Reulet, “Irradiation Facilities and Test”, Space Technology Course, Space Environment :Prevention of risks related to spacecraft charging”, CEPADUES Editions, ISBN 2 85428 579 4, pp. 285-315, April 2002.
- [4] 電気学会技術報告 第1001号
- [5] S. Kawakita, M. Imaizumi, M. Takahashi, M. Matsuda, S. Michizono and Y. Saito, “Influence of high energy electrons and protons on secondary electron emission of cover glasses for space solar cells”, 2002 Proceedings of 20th ISDEIV, pp.21-24, 2002.
- [6] Y. Saito: IEEE Tran. Die. Elect. Ins. 2, 243 (1995)
- [7] S. Michizono, Y. Saito and A. Inagaki: J. Vacuum Society of Japan, 40, 436 (1997)
- [8] H. Seiler “Secondary electron emission in the scanning electron microscope”, J. Applied Physics, NO. 54, ppR1-R18, 1983
- [9] 湯本雅恵、堺孝夫, “絶縁材料からの光電子放出と放電進展”, 電学論 A, 109 巻 1 号, 1989
- [10] H. Asari et al., “Photoelectron Emission Images of Aluminas Excited by Ultraviolet Light”, ACED-2000