

宇宙機の大電力・高電圧化に資する絶縁材料の帯電特性に関する基礎研究[†]

Fundamental Research Analysis of Charging Phenomena on Dielectrics for Improvement to High Power and Voltage on Satellite

三宅 弘 晃^{*1}・渡 邊 力 夫^{*1}・鈴 木 敬 久^{*2‡}
Hiroaki MIYAKE, Rikio WATANABE and Yukihisa SUZUKI

宇宙太陽光発電では効率の観点から、MWクラスの発電と基幹電圧の高電圧化が見込まれており、宇宙放射線環境で高電圧化を許容する様な設計基準を新たに構築していく必要がある。また、衛星表面材料と放射線・高電圧の相互作用を電子物性の観点から把握していく必要もある。衛星帯電について放射線と絶縁材料との相互作用を帯電計測や電気物性値計測から定量的に評価しているので、その現状について本報する。

This paper preset how to obtain the material property of charging for spacecraft charging analyses. Currently, spacecraft have a lot of experience for the operation anomaly due to surface material charging. Japanese spacecraft development society had started to estimate the charging. We proved the material properties for the numerical analysis of spacecraft charging.

Keywords : Charging, Space Charge, Space environment, SEE, PE, Resistivity

1. はじめに

我が国の宇宙開発は、総合科学技術会議(以下、科技会議)の宇宙開発利用の基本戦略や宇宙基本法により、人工衛星や国際宇宙ステーション(ISS)を利用した地球観測や安全保障のための情報収集等の利用を中心とした体制へと大きく移行した。さらにエネルギー基本計画(H26, 4月閣議決定)により、政府はグリーンイノベーションや震災による原発停止の電力不足への対応として、宇宙太陽光発電(SSPS)を革新的技術開発として位置付けている。

また近年、衛星は小型化・高機能化が進んでおり、小型衛星を複数機、同軌道もしくは近距離で協調して運用する事で大型機と同等、或いはより高性能な機能の実現を図ろうという衛星コンステレーションシステムの開発・運用も盛んに行われてきており、軌道上で運用される衛星数は今後飛躍的に増加していく傾向にある。世界に目を向けてみると、発展途上国では陸地観測など、安全保障の為に自国で衛星システムを導入する動きも活発になっている。また、GPS衛星についてもEUでは2018年までに30機体制に、中国では2020年までに35機体制で打ち上げる予定であり、

人工衛星は世界的に安定運用が不可欠の社会インフラシステムとなっている。さらに今後の衛星開発は衛星の多機能化・高機能化の傾向にあり、経産省やJAXA、航空宇宙工業会の調査では、10年以内に20kW(現状)から25から30kWに衛星電力が増加するとしている。またSSPSではMWクラスの発電が想定されており、衛星の基幹電圧が高電圧化されることが見込まれている。

しかしながら、人工衛星は非常に厳しい放射線環境であるヴァン・アレン帯(電子や陽子等の荷電粒子、プラズマで満たされた空間)で運用される為、荷電粒子に起因した帯電・放電現象により、誤作動や永久故障するという事故が多発している。これは、衛星の表面のほぼ全域が絶縁材料で覆われていることに起因する。衛星の本体部分はポリイミドなどの高分子材料を多層化した熱制御材料(Multi layer Insulator: MLI)で覆われ、-120 ~ +150°Cという宇宙空間の激しい温度環境から保護されており、太陽電池も陽子や重イオンの太陽電池セルへの注入防止の為に全面がカバーガラスで覆われているなど、絶縁材料は宇宙機に多用されている^{1,2)}。

帯電・放電による宇宙機の障害について、米国Aerospace社のKoonsらが、米空軍やNOAA(アメリカ海洋大気局)と宇宙機障害の調査している³⁾。その調査結果である衛星の宇宙環境による障害統計結果では、1973年から1997年まで調査可能であった326件の衛星障害を原因ごとに整理すると、5割以上が帯電・放電に関連する事故となっている。また、わが国でも、環境観測技術衛星みどり2号(ADEOS-II)が2003年10月に帯電・放電によって太陽電池パドルハーネス(電力送電線)を損傷して、設計寿命の1/3以下で運用停止状態になり数百億の損失となった⁴⁾。

以上より、設計段階から宇宙機の帯電・放電を考慮した正しい設計を行い、衛星の高信頼化・長寿命化を果たす事

[†] 第1回宇宙太陽発電シンポジウム, 2015年12月15-16日, 東京にて発表

[‡] Corresponding author: y_suzuki@tmu.ac.jp

^{*1} 東京都市大学

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1,
Tokyo City University, 1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo
158-8557, Japan

^{*2} 首都大学東京

〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1,
Tpkyo Metropolitan University, 1-1 Minami-Osawa, Hachioji-shi,
Tokyo, 192-0397, Japan

が求められている。

「設計段階から宇宙機の帯電・放電を考慮した正しい設計」とは、具体的には衛星の形状、材質、運用環境から衛星の表面電位の最悪値を数値計算により求め、設計に反映させることである。

そのような状況で、国産の衛星帯電解析ソフトである Multiutility Spacecraft Charging Analysis Tool: MUSCAT が開発され、現在はこれを用いて衛星の帯電評価を実施している⁵⁾。これらの解析を実施するには二次電子や光電子放出、体積抵抗などの電気物性値が必要となる。

今後、太陽光発電衛星等の新しいシステムの運用と衛星の高電力・高電圧化により、宇宙環境による帯放電事故を抑制する事はさらに厳しい状況になると考えられるため、材料の電子物性評価を基礎から総合的に実施していく事が、SSPS をはじめとする次世代衛星の帯電防止設計に資する事となる。

そこで本稿では、帯電評価を行うための各種計測について、特に設計標準に関連の深い、二次電子・光電子放出測定及び体積抵抗測定、電子線照射材料内の温度分布について解説を行う。

2. 二次電子放出計測

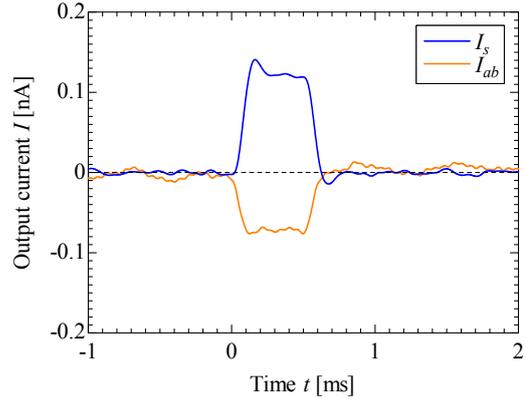
本章では二次電子放出測定に着目し説明を行う。二次電子とは、衛星の運用軌道上の地磁気に捕獲された電子が衛星に照射されることにより、衛星の表面材料から電子が放出される現象である。これまでの既報の多くでは、測定エネルギー範囲が制限されている事や計測するエネルギーの調整の為に試料に電圧を印加する等の課題を内包している場合が多い。そこで、当研究ではパルス状の電子線を用い、200 eV ~ 10 keV というエネルギー範囲で、試料への電圧印加を抑制した二次電子計測システムの構築を行い、金属材料及び高分子材料の二次電子放出計測を実施した。⁶⁾

2.1 測定システム及び測定方法 図1に示すように、本システムでは二次電子放出はパルス状の電子線により二次電子電流 I_s として観測される。二次電子放出係数 σ は、以下の式を用いて算出している。尚、 I_{ab} は吸収電流である。

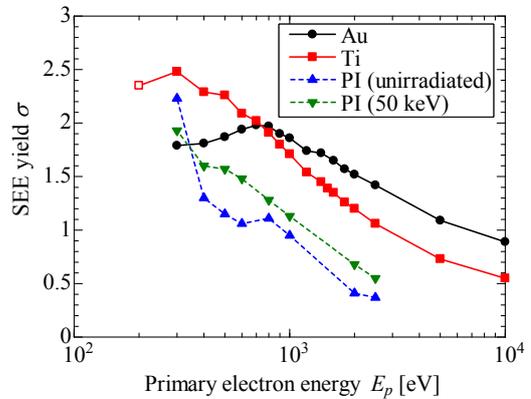
$$\sigma = \frac{I_s}{I_s + I_{ab}} \quad (1)$$

さらに本システムでは 50 keV 電子銃 (オメガトロン社製, OME-0502BW) を取り付けており、実環境を模擬した材料劣化試験を行えるシステムを構築した。測定用と劣化照射用の電子銃は 45 度の角度でチャンパー側面に取り付けられているが、XYZθステージにより試料を両電子銃に対して垂直に設置する事が可能であるため、劣化照射から二次電子計測までを大気解放せずに On-Site で実施可能となっている。

2.2 測定結果 図2に、Au 及び Ti の σ を示す。縦軸は二次電子放出係数 σ 、横軸は照射一次電子のエネルギー E_p [eV] を示す。また 200 eV 時の \square は白抜き記号で示す。同図より最大二次電子放出係数 σ_m 及び σ_m 時の一次電子エネルギー E_m は Au で 1.98 ($E_m = 700$ eV), Ti で 2.48 ($E_m = 300$ eV) であった。Ti において、 σ_m は既報値よりも大きな値となった⁷⁾。これは EDX の表面解析より Ti の表面が酸化



第1図 二次電子放出電流 I_s 及び吸収電流 I_{ab} ($E_p = 200$ eV on Ti sample)



第2図 金属及びポリイミド材料における二次電子放出収率

していることが確認できたため、純粋な Ti 面での測定になっていなかった事が原因であると考えられる。さらに同図中に、静止軌道一年分の電子線 (50 keV, 45 nA/cm², 45 min) による劣化処理前後のポリイミド (PI) の σ を示す。照射面積の制約上 300 eV ~ 2.5 keV の範囲で測定した。同図より、劣化照射を施した試料では、 $E_p = 400$ eV 以上で σ が上昇し、 $E_p = 300$ eV では減少する結果が得られた。以上より、材料ごとに、また劣化処理により二次電子放出状況が変化することが理解できる。また同図より、200 eV の結果は SN 比の問題のため、Ti のみの表示となっているが、すでに安定的に 200 eV まで測定可能なシステムに改修済みである。詳細は、今後投稿される別報をご参照頂きたい。

また、現在これらの結果を用いて、二次電子放出係数の物理モデル化も進めている。これについては現在投稿作業を進めており、こちらも別報をご参照されたい。⁸⁾

3. 光電子放出計測

本章では、光電子放出測定について解説する。宇宙機の電位は宇宙機に流入する電子、イオン、光電子、二次電子などによって決まる。特に、日照中においては光電子が支配的となるため、光電子放出が宇宙機の電位を決める大きな要因となっている。これにより宇宙環境における宇宙機の詳細な電位解析には、宇宙機材料に太陽光が照射したと

きに流れる光電子放出電流値が必要で、光電子電流値を求めるには宇宙機材料の量子効率のデータが必要とされる。そこで、光電子による電流値を求めるために宇宙機材料の量子効率測定装置を構築し計測を実施した。⁹⁾

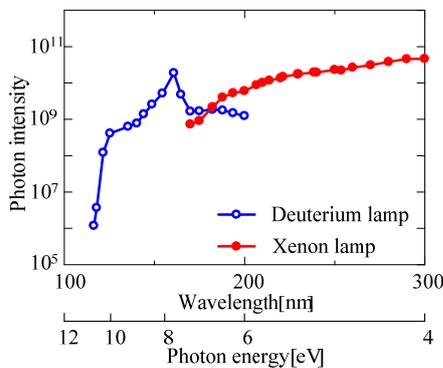
3.1 測定システム・測定方法 単位面積の物質表面に単位時間当たり入射する光量を n_p 、光電効果により放出された単位時間当たりの電子数を n_e とすると、量子効率 QE(Quantum efficiency)は(2)式に示すように定義されている。

$$QE = n_e / n_p \quad (2)$$

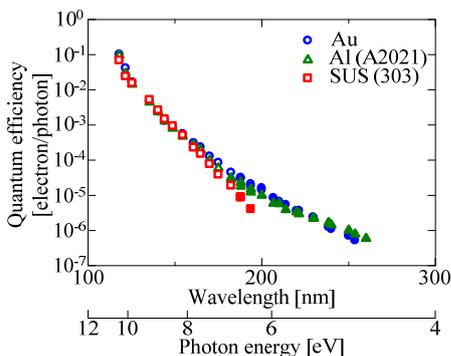
n_p は分光された光をフォトダイオード(P.D.)に入射させることより求め、 n_e は試料から放出された電子をファラデーカップにより、光電子放出電流 I_F として計測し、電気素量で除する事で求められる。

本光電子電流測定システムは、二次電子測定システムと同じ真空チャンバーに設置してあり、光源として重水素ランプ、キセノンランプの2種類を使用し、図3に示す光量にて照射している。照射光はシャッターによってパルス状にされ、照射位置を変化させることで、帯電の測定への影響を除去している。

3.2 測定結果 図4に測定した金属材料である Au, Al, SUS の光電子数・量子効率を示す。同図はそれぞれ縦軸が光電子数・量子効率、横軸は照射光の波長、およびエネルギー換算値を示している。同図より SUS が最も短波長(190 nm)で光電子放出が確認できなくなっていることわかる。また、Au と Al についてもそれぞれ、Au : 250 nm, Al : 270 nm 以降は光電子放出が確認できないため量子効率は 0 と



第3図 分光強度



第4図 金属試料における光電子放出数と量子効率

なっている。この量子効率が確認されなくなる点波長が仕事関数となっている。本測定により、光電子放出のみならず、金属では仕事関数、高分子ではイオン化エネルギーも得ることができ、材料の電子構造解析に必須な値となる。

4. 電荷蓄積法による体積抵抗測定

体積抵抗率は従来 ASTM や JIS 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。

4.1 測定方法 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から試料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(10~50 keV、1.05 nA/cm² で 60 秒照射)終了直後の電位減衰を次式に示す指数減衰モデルで近似する。

$$V(t) = V_0 e^{-t/\tau} \quad (3)$$

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。減衰時定数と誘電率 ϵ を用いて体積抵抗率 $\rho = \tau / \epsilon$ の計算が可能である。¹⁰⁾

4.2 測定結果 図5にポリイミド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。電子線照射終了直後の急激な減衰(短時間領域)と緩やかな減衰(暗電流領域)の2つの領域に分け、各領域におけるおいては(6)式を適用し体積抵抗率を求めた。その結果を図6に示す。

同図より、暗電流領域では電子線照射エネルギーの上昇により、体積抵抗率は減少する傾向にあるが、短時間領域では、電子線照射エネルギーの大きさに影響せず、一定の値をとることがわかる。コンデンサ法の測定値 ($1.0 \times 10^{15} \Omega m$) と比較すると暗電流領域では約1桁大きい大きく、短時間領域では約2桁小さい値をとることがわかる。帯電評価の際には、現状コンデンサ法の 10^{15} の値を用いているが、軌道上での状況をより正確に反映させようとして帯電計算を行うには、短時間領域における値を用いるべきである。体積抵抗が小さくなることにより、帯電量は緩和する方向に作用するが、実際に短時間領域では高電界が試料に作用している事によって体積抵抗が減少したと考えられる。高電界と放射線は相互作用により材料劣化を引き起こすため、帯電量が緩和される事だけに注目するのではなく、材料劣化にも注意を払っていく必要がある。

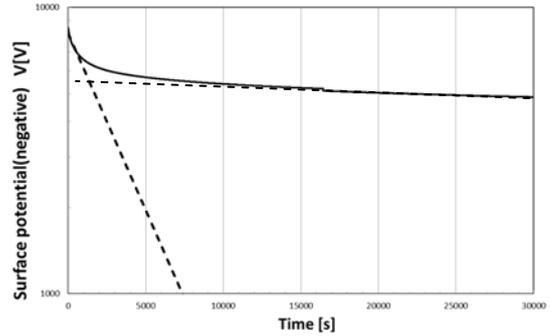
5. 感温液晶を用いた電子線照射高分子材料の温度分布

高エネルギー粒子の絶縁材料内における運動エネルギーの減衰を温度上昇として測定することは入射粒子の高分子絶縁材料内での相互作用メカニズムを知る方法の一つとして有効であると考えられる。そこで我々はこの温度上昇の分布を測定するために、感温液晶マイクロカプセル(MTLC: Micro-encapsulated Thermo-chromic Liquid Crystal)を用いて材料内部の三次元温度分布を非接触、非侵襲で測定する新しい手法で、電子線照射試料の温度分布測定を実施した¹¹⁾。

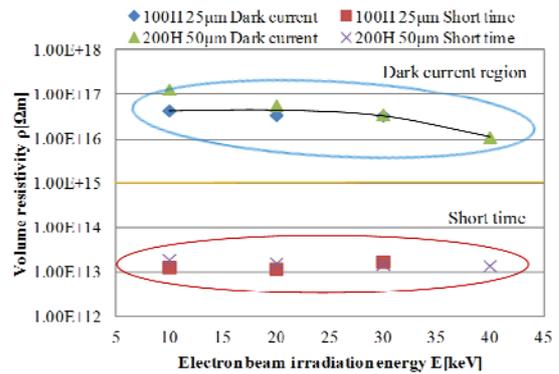
5.1 測定条件 エポキシ樹脂中に MTLC を 0.01wt%均一分散させ 30×30×10 mm に成形した試料を用いた。尚、本試料の MTLC は 30 °C(赤)から 40 °C(紫)までの呈色範囲を持つ。本試験では加速エネルギー1.0, 1.5, 2.0 MeV、電流密度 130nA/cm²、300 秒間照射し、照射中の試料の温度を2次元色分布として CCD カメラで測定した。

5.2 測定結果 図7に1 MeV 照射 120 秒後の温度変化の2次元式分布と同照射条件化でのエポキシ樹脂内の空間電荷分布を合わせて示す。同図より、MTLC による可視化の結果から温度上昇による呈色は試料上面から 1.9mm の範囲で観測されており、このことから熱源のピークの位置は試料上面から 1.9mm の範囲内にあることが予測される。PEA 法による測定からは空間電荷の蓄積量が最大になる場所は試料上面から 2.6mm の位置であることが分かる。これらの事実から電子が高分子材料中で停止する位置、つまり電荷の蓄積が多い領域の近傍ではなく、それよりも上部の領域で荷電粒子の運動エネルギーから熱エネルギーへの変換の大部分が起こっていることが示唆される。

図8に、電子の加速エネルギーに対する MTLC による発色領域の深さと空間電荷の蓄積が最大になる位置の依存性を示す。同図より、電子線の加速エネルギーの増加と共に、MTLC による照射開始から 120s 後における発色領域が深くなっていくことが分かる。一方空間電荷測定結果より、空間電荷が蓄積される位置も加速エネルギーの増加と共に深くなっていくことが分かる。これらの図から分かるように電子線が高分子試料中に落とすエネルギー分布のピークの位置は MTLC により発色している範囲の内部にあり、その位置は電子線の入射エネルギーの値によらず、常



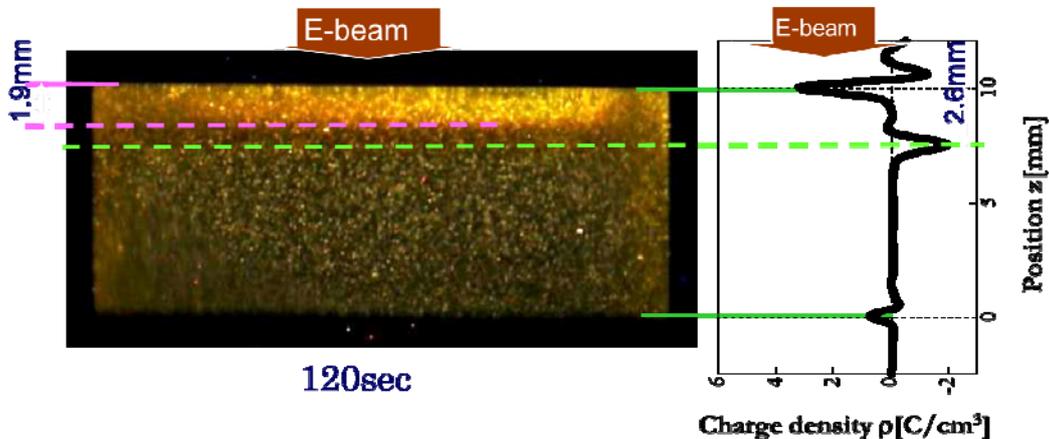
第5図 表面電位履歴



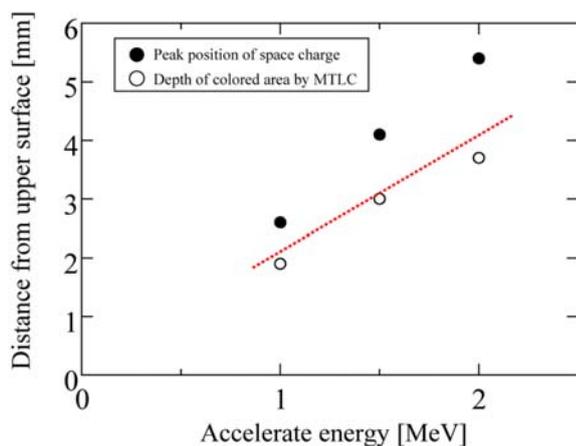
第6図 電子線照射エネルギー毎の体積抵抗率算出結果

に電荷の蓄積がピークに達する位置よりも浅い位置にあることが分かる。

以上より電子の運動エネルギーから熱エネルギーへの変換による試料内へのエネルギー吸収分布に関してそのピーク位置が加速エネルギーに依存して深くなっていく度合いは、空間電荷の蓄積位置が深くなっていく度合いよりも小さく、熱源は表面付近に集中するような傾向にある。各測定条件において青白い発光が観察されており、チェレンコフ放射が発生していることを示唆している。このチェレンコフ放射による電子のエネルギー損失を考慮した場合、そのチェレンコフ発光のピーク位置が電荷の蓄積位置より浅くなっている傾向が見られるので、MTLC による結果はある程度妥当であると予想される。



第7図 1MeV 照射時における試料内温度分布と空間電荷分布測定結果



第8図 MTLCによる発色領域の深さと空間電荷蓄積位置の電子加速エネルギーに対する依存性

6. おわりに

本稿では、衛星の高信頼化に資するための帯電評価法について、数値計算に必要な帯電物性値の取得の現状について報告を行った。これらの努力により、帯電評価の制度は向上している。しかしながら、現状の物性評価はまだ未劣化常態の BOL での評価が主体であるため、軌道上を模擬した劣化を施した EOL 試料について同様に検証をして行く必要がある。世界の設計標準のトレンドも EOL を意識したものに進んで行く方向にある。

また、今回は表面帯電の評価についてのみ報告してきたが、軌道上の荷電粒子はエネルギー分布を持つため、衛星表面材料の厚さ方向に分布して蓄積、帯電する。よって材料のバルク方向の帯電についてもパルス静電応力法(PEA法)などで、計測できるため合わせて評価をして行くことが、必要となってくる。

また、本稿で紹介した帯電に関する測定を包括的に推進し、電子物性の理解を進めて行くことで、今後の SSPS な

どの新しいシステムを運用する際に生じると予想される帯電・放電問題に対しても対応をして行くことが可能となる。

参考文献

- 1) A. C. Tribble, *The Space Environment*, Princeton University Press, 1995.
- 2) 恩藤忠典, 丸橋克英: 宇宙環境科学, オーム社, 2000.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 五家建夫, 松本晴久, 古賀清一, 木本雄吾, 三宅弘晃, 上田裕子: 衛星帯電解析ソフトの開発, 平成16年総合技術研究本部宇宙領域 宇宙科学研究本部 合同研究成果報告書, pp.141-144, JAXA-SP-05-008, ISSN-1349-113X, 2006.
- 6) 長門 拓, 渋谷 一晃, 三宅 弘晃, 田中 康寛, 大平 正道, 奥村 哲平, 川北 史朗, 高橋 真人: 劣化照射が可能な広エネルギー帯域二次電子放出測定システムの開発, 電気学会論文誌 A, Vol.135, No.7, pp. 433-434, 2015.
- 7) C. D. Thomson, V. V. Zavyalov, JR Dennison, Instrumentation Studies of Electron Emission and Charging from Insulators, 8th Spacecraft Charging Technology Conference, 2003.
- 8) Hiroaki Taniguchi, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka, Ohira Masamichi, Okumura Teppei, Kawakita Shiro, Devised The Physical of The Secondary Electron Emission Yield Based on The Experiment, Proceedings of 30th ISTS, 2015-r-62, 2015.
- 9) 野村和史, 矢部謙治, 三宅弘晃, 田中康寛, 大平正道, 奥村哲平, 高橋真人: 光電子放出電流測定による宇宙機用絶縁材料の帯電物性の解析, 第10回宇宙環境シンポジウム講演論文集, JAXA-SP-13-016, pp.95-98, 1349-113X, 2014.
- 10) 渡邊力夫, 三宅 弘晃, 田中康寛, 仁田工美: 宇宙環境を模擬下における絶縁材料の体積抵抗率計測について, 電気学会論文誌 A, Vol.132, No.1, pp. 88-94, DOI: 10.1541/ieejfms.132.88, 2012
- 11) 鈴木敬久, 三薺健太, 田中康寛, 高田達雄, 福永香: 感温液晶を用いた電子線照射下における高分子絶縁材料内部の温度分布測定, 第3回宇宙環境シンポジウム講演論文集, JAXA-SP-06-035, pp.109-112, 1349-113X, 2007.

(2016.2.16 受付)