

宇宙用太陽電池におけるポッケルス効果を用いた表面電位測定システムの検討

古瀬 清郁, 豊田 和弘, 趙 孟佑

(九州工業大学 大学院工学研究院 宇宙システム工学研究系)

概要

人工衛星の運用に必要不可欠な太陽電池であるが、この太陽電池上で起こる帯電・放電現象が人工衛星の故障原因の半数以上を占めている。これらの現象のメカニズム解明のため、試験で帯電時・放電時の宇宙用太陽電池表面の電位測定を行う必要がある。この帯電・放電試験であるが、先行研究により、帯電法の違いによって放電電圧閾値の差異が生じることがわかっている。この原因をカバーガラス端に生じる電界によるものであると考察し、カバーガラス端の表面電位の詳細計測を行うためにポッケルス効果を用いた表面電位測定法を検討する。簡易的な動作確認試験を行った結果、電圧を加えたことにより、光強度が変調することを画像処理により確認した。

1 はじめに

これまでにも、九州工業大学宇宙環境技術ラボラトリーでは宇宙機の帯電・放電試験が行われてきた。実際に宇宙で運用予定の宇宙用太陽電池や、太陽電池を模擬したサンプル等を真空チャンバーの中に入れ、外部回路を用いて意図的に帯電・放電現象を誘起させる。このときの放電の様子を CCD カメラや表面電位測定プローブを用いて撮影・測定することで試験を行ってきた。また、真空チャンバーは電子ビームや紫外線ランプが装備することができる。これらを用いることで、宇宙環境を模擬することが可能である。ここで言う宇宙環境とは、太陽の光を直接受ける日照部と、地球の影に入ることで太陽の光を受けない日陰部の 2 種類を指す。日照部では、多くの紫外線の影響を強く受けることから、地上では紫外線ランプが用いられる。一方で、日陰部では、宇宙空間に存在する高エネルギー電子の影響を強く受けることから、電子ビームを用いて再現されることが多い。

しかし、紫外線ランプを用いて帯電させた場合と、電子ビームを用いて帯電させた場合とで、放電電圧閾値に数 kV の差異が出るのが先行研究により報告されている[1]。

これは、宇宙機本体とカバーガラス間に電位差によってカバーガラス端に生じる電界が影響を与えているのではないかと予想される。電子ビームを用いて帯電させた場合、電子ビームとは電子を高速で放出する装置である。通常、放出された電子はカバーガラスや宇宙機本体に衝突し、負に帯電させるが、カバーガラス端に電界が生じている場合、電子は電界に干渉され、その軌道が変わる。これにより、カバーガラス端では上手く帯電できていない可能性がある。一方、紫外線ランプを用いて帯電させた場合、紫外線は電界の影響を受けないため、カバーガラス端まで上手く帯電される。これが放電電圧閾値に影響を与える原因ではないかと考察されている。

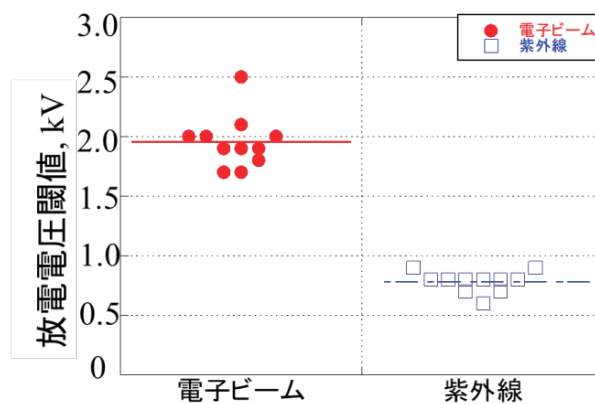


図 1 帯電の違いによる放電電圧閾値の差異[1]

従来、帯電・放電試験を行う際には表面電位の測定手段として非接触型の表面電位測定プローブが用いられてきた。LabVIEW で作成した表面電位測定プログラムと同期させることによって、電位の高さを色で識別した 2 次元データを取得することが可能であり、視覚的な電位測定が実現する。通常、プローブの測定距離はおおよそ 2mm~2.5mm に設定されているため、測定スポットサイズは直径 7.5mm~10mm となる。この測定スポットを平均化し、出力したものが電位データとして表示される。

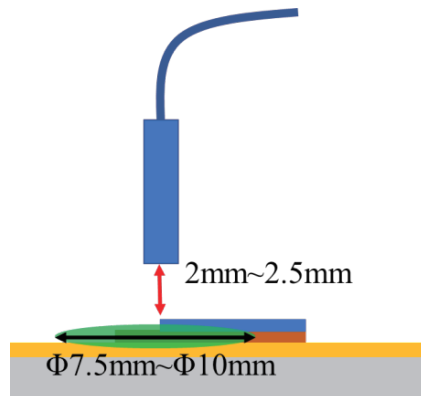


図 2 測定距離と測定面積

本研究の目的は、カバーガラス端における電界が与える帯電への影響を測定するために、従来の表面電位プローブ法よりも、高精度・高分解能であるポッケルス効果を用いた表面電位測定法を検討し[2][3]、帯電法の違いによる放電電圧閾値の差異が生じる原を究明することである。

3 ポッケルス効果を用いた表面電位測定原理

3.1 ポッケルス効果

ポッケルス素子と呼ばれる特定の光学素子に外部から電界を加えると、それを透過する光の屈折率が変化する現象が存在する。光波形は直交した電界波形と磁界波形を組み合わせた横波であるが、通常その二つの波形の位相差は0degである。ここで、電界を加えたポッケルス素子を通すことにより位相差 θ が生じる。この位相差が、印加した電界の1乗に比例するものをポッケルス効果といい、2乗に比例するものをカー効果という。このポッケルス効果とカー効果が同時に見られることは滅多になく、対象となる物質によって現象が定まる。ポッケルス効果において、印加した電界と位相差 θ の関係は次の式1で表される[4]。

$$\theta = 2\pi n_0^3 \gamma_{41} E_z L / \lambda \quad \dots(1)$$

このとき、 λ はレーザー波長で、 $\lambda=632.8\text{nm}$ である。 n_0 は屈折率で、レーザー波長 $\lambda=632.8\text{nm}$ のとき $n_0=2.53$ である。 γ_{41} はポッケルス係数で、 $\gamma_{41}=5.0 \times 10^{-12}\text{V/m}$ である。 L はポッケルス素子の厚みで、 $L=1\text{mm}$ である。また、 E_z はレーザー進行方向の電界を指す。

今研究では、レーザー光はフルミラーを通じて2回ポッケルス素子を透過するため、実際に計測部での位相差は式1の位相の2倍となる。

3.2 偏光

光が直線偏光であるレーザーを光源とし、電界を加えたポッケルス素子を透過させると、ポッケルス効果によって生じた位相差により偏光波形は楕円偏光となる。これを、偏光キューブに通すことで光強度が変化する。このとき、入力光 I_{in} と出力光 I_{out} の光強度の比は次の式2で表される[4]。

$$I_{in}/I_{out} = (1 - \cos \theta') / 2 \quad \dots(2)$$

このとき、 θ' はポッケルス効果によって生じた位相差 θ をフルミラーによる往復分を考慮して2倍にしたものである。

3.3 測定原理

前述の式1と式2を組み合わせると光強度と電界の関係がわかる。その関係を用いることで光強度の観測によって電界を逆算で求めることが可能である。

実際の試験方法としては、小窓を取り付けた真空チャンバーの外にHe-Neレーザーを配置する。その前方には偏

光キューブを接地し、P波のみを取り出す。その後、レーザー光はチャンバー内に配置されたポッケルス素子に照射される。このポッケルス素子は、宇宙用太陽電池のトリプルジャンクション部分を再現するために10mm×5mm、厚さ1mmの4枚綴りになっており、ITOガラスが塗布されたガラス板に接着されている。また、光の旋光性を考慮し、ポッケルス素子透過後の光をフルミラーで反射させ、再び小窓から外部の偏光キューブを通して出力させる。出力での光強度変調を、望遠レンズを取り付けたCCDカメラで取り込み、画像データとして取り出す[5]。

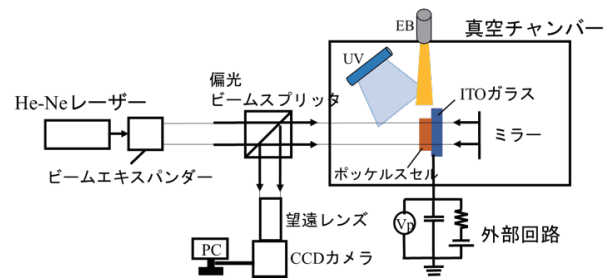


図3 ポッケルス効果を用いた計測システム

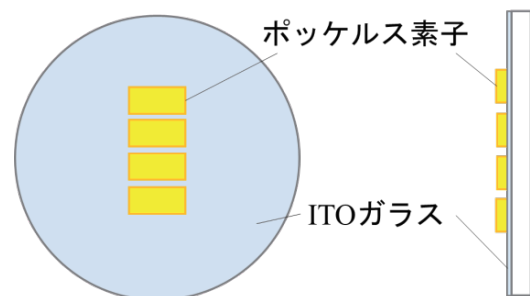


図4 ポッケルス素子

4 動作確認試験

実際にポッケルス素子をチャンバー内に入れ、紫外線ランプや電子ビームを用いた試験を行う前に、大気中での電界と光強度の較正が必要である。そのためにも、実際にポッケルス効果による光強度変調を確認しなければならない。以下に動作確認試験の全体構造を示す。また、ポッケルス素子には、0V、-250V、-500Vの電圧を、直流電源を用いて印加する。

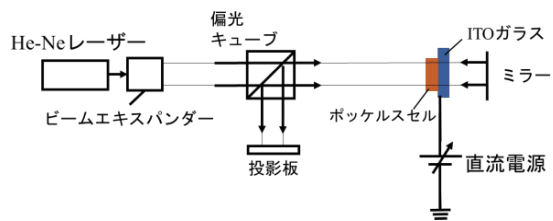
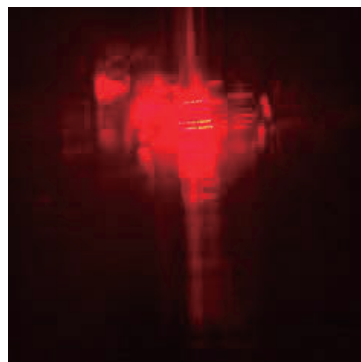


図5 動作確認試験

5 結果

0V、-250V、-500Vをそれぞれ印加した際の実験結果を以下に示す。写真中央部の長方形が縦4枚に並んでいる箇所がポッケルス素子に該当する部分である。



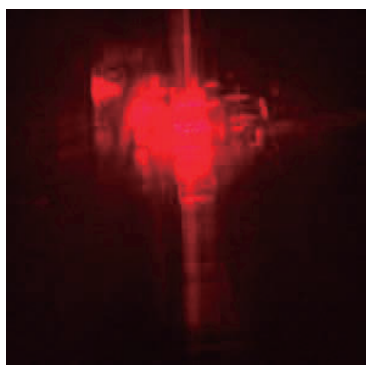
(c)-500V

図6 動作確認試験結果

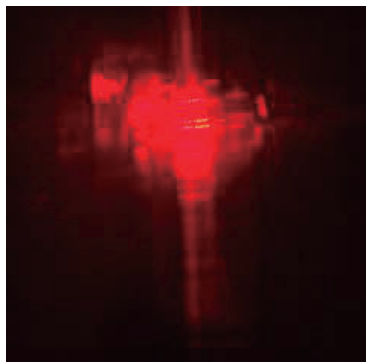
これらの結果を用いて画像処理を行い、変調を確認する。

6 変調確認

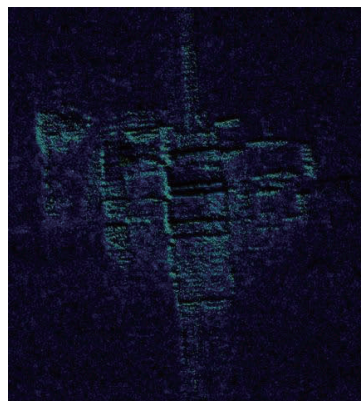
変調確認のため、画像処理を行う。電圧無印加時(0V)のときの画像と電圧印加時(-250V, -500V)の画像の減算処理を行うことでその差分を見ることが可能である。差分が確認できれば変調ができていと言え。画像処理の結果を以下に示す。なお、それぞれ電圧印加時の画像から無印加時の画像を、ImageJを用いて減算処理している。



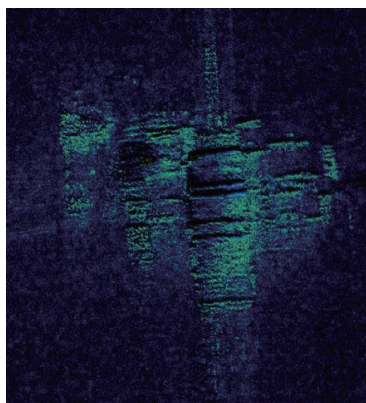
(a)0V



(b)-250V



(a) -250V sub 0V



(b)-500V sub 0V

図7 画像処理による変調の確認

この処理により、電圧を印加することによる光変調を確認することができた。また、電圧を印加するほど変調が強くなっていることも確認ができた。

7 まとめと今後の展望

今回の動作確認試験により、ポッケルス効果を用いた表面電位測定法の有効性について検討した。現在は画像処理や撮影等すべて手動で行っているため、それらに関しては改良の余地があるが、測定システム自体は有効性があるとみなせた。また、今後の展望として、以下の作業を行う必要がある。

- ・大気中での電界-光強度の校正試験
- ・光強度変調を取り出すための画像処理システムの構築
- ・チャンバーを用いた帯電・放電試験

これにより、帯電法の違いによる放電電圧閾値の差異が生じる原因を解明する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K04839 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 佐々木孝明、豊田和弘、趙孟佑(九州工業大学)、大久保充、関一義(三菱電機)、「電子ビームと紫外線を帯電手法とする太陽電池カバーガラスの表面電位測定実験」、第15回「宇宙環境シンポジウム」講演論文集、2018
- [2] 熊田亜紀子、千葉政邦、日高邦彦、「ポッケルス素子

による沿面放電の電位・電界・速度の測定」、電気学会研究会資料. ED, 放電研究会 1997(167), 103-108, 1997-11-18

- [3] 安野順介、日月應裕、田中康寛、高田達雄、「ポッケルス効果を用いた絶縁材料表面上の放電分布観測」、電気学会研究会資料. DEI, 誘電・絶縁材料研究会 2006(52), 31-36, 2006-09-22
- [4] 新井潤、趙孟佑(九州工業大学)、「ポッケルス効果を用いた低地球軌道プラズマ環境下での帯電に関する研究」、九州工業大学卒業論文、2000
- [5] Mengu Cho, Naoki Miyata and Masayuki Hikita “Effect of Arcing on Insulator Surface Potential in Plasma: Image Observation,” Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.37, No.1, 1999, pp150-152.