

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04839

研究課題名（和文）真空紫外線と電子による宇宙機太陽電池パネルの放電閾値の違い

研究課題名（英文）Difference in discharge threshold voltage on spacecraft solar array panel between vacuum ultra violet and electron beam

研究代表者

豊田 和弘（Toyoda, Kazuhiro）

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10361411

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：静止軌道では人工衛星は紫外線や電子により帯電放電するため、打ち上げ前に対策として放電発生閾値測定を行なっている。近年行った実験で電子ビームを用いた時よりも紫外線を使用した方が太陽電池上での放電閾値電圧が低くなるという結果を得た。この原因を明らかにするため、ポッケルス効果を利用し、カバーガラス端部の表面電位を詳細に計測した。ポッケルス素子は電界により屈折率が変化する特性を利用して構築したポッケルス効果による表面電位計測系を用いて表面電位の2次元分布を得た。また紫外線と電子ビームによる表面帯電分布の違いについても確認することができた。さらに帯電解析ソフトでもその違いが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

打ち上げ前に実施している太陽電池パネルの帯電放電試験では、放電のエネルギーを決定する放電閾値電圧が非常に重要となる。帯電の原因となる電子と紫外線で放電閾値電圧が異なることを実験的に明らかにし、その原因がカバーガラス端近傍の表面電位分布の違いにあると推測し、今回ポッケルス効果を用いて原因を明らかにした。ポッケルス効果により詳細な表面電位分布を得ることは学術的に意義があり、今後もこの計測方法を利用して新たな問題を解決できる。また、地上試験で紫外線と電子ビームのどちらを使用すべきかを明らかにしたことで社会的に大きな意義があった。

研究成果の概要（英文）：In geostationary orbit, satellites are charged and discharged by ultraviolet rays and electrons, so discharge generation threshold measurements are performed as a countermeasure before launch. Recent experiments have shown that the discharge threshold voltage on solar cells is lower when ultraviolet rays are used than when electron beams are used. To clarify the cause of this, we used the Pockels effect to measure the surface potential at the edge of the coverglass in detail.

A two-dimensional distribution of the surface potential was obtained using a surface potential measurement system based on the Pockels effect, which was constructed using a Pockels element that changes its refractive index depending on the electric field. We were also able to confirm the difference in the surface charge distribution between UV and electron beams. Furthermore, the difference was also clarified by the charging analysis tool.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：帯電放電 表面電位 放電閾値 ポッケルス効果

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙空間で人工衛星に搭載されている太陽電池で発生する帯電・放電現象による事故が多数報告されており、早急な対策と、打ち上げ前の入念な試験が必要不可欠である。

宇宙環境の模擬には、紫外線ランプや電子銃が用いられることが多いが、その帯電法の違いにより放電電圧閾値に数 kV の差異が出るのが先行研究により報告されている<sup>1)</sup>。

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原因であると推測され、カバーガラス端での帯電の様子を視覚的に観測する必要があるが、従来の帯電・放電試験では非接触型の表面電位プローブは撮影精度に限界があり、カバーガラス端まで測定することが不可能なことから新しい表面電位測定法を検討・実行する必要がある。

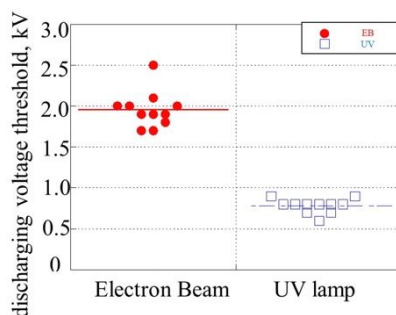


図 1 帯電法の違いによる放電電圧閾値の差異<sup>1)</sup>

### 2. 研究の目的

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用い、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究明することである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 測定原理

##### 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電界に比例して変化する現象をポッケルス効果という。これにより直交した電界波形と磁界波形を組み合わせた光波形に位相差が生じる。ポッケルス効果において、印加した電界と位相差の関係は次の式(1)で表される。

$$\Delta\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{x'} - n_{y'})l = \frac{2\pi}{\lambda}n_0^3\gamma_{41}E_{z'}l \quad (1)$$

このとき、 $\lambda$  はレーザー波長で、 $\lambda = 632.8\text{nm}$ 、 $n_0$  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。 $\gamma_{41}$  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、 $0.2\text{mm}$  である。また、 $E_{z'}$  はレーザー進行方向の電界を指す。

##### 光強度変調への変換

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に透過させると、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変化する。入射前と出力後にそれぞれ偏光板を配置することにより、位相変調を光強度変調に変換することが可能である。このとき、入射光  $I_{in}$  と出力光  $I_{out}$  の光強度の比は次の式(2)で表される。

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \sin^2\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) = \frac{1}{2}[1 - \cos(\Delta\Gamma)] \quad (2)$$

式(1)と式(2)を組み合わせることで、光強度変調へと変換できる。

## (2) 帯電試験と校正試験

図2にポッケルス効果を用いた表面電位測定法の構造図を示す。真空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(10mm×5mm、厚さ0.2mm)は、ITOガラスが塗布されたガラス板にカプトンテープで固定されており、外部から負のバイアス(-2kV)が印加されている。宇宙用太陽電池のトリプルジャンクションを再現しているため、ポッケルス素子の帯電観測はカバーガラスの帯電観測と等価であると考えられる。

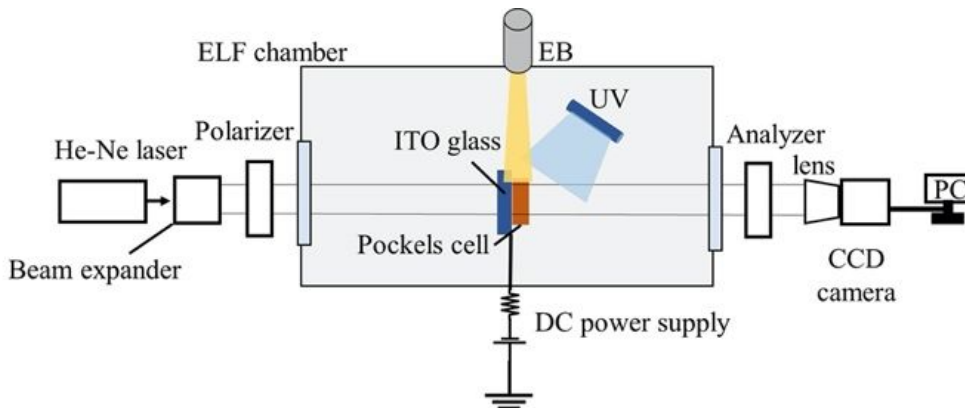


図2 ポッケルス効果を用いた計測システム<sup>2)</sup>

本研究では、紫外線と電子銃をそれぞれ用いて帯電試験を行い、光強度変調を望遠顕微鏡レンズを通してCCDカメラで観測した。

また紫外線照射による校正試験を行い、電圧 光強度校正曲線を求め、画像の光強度を2次元表面電位分布へと変換した。

## 4. 研究成果

図3は紫外線照射による校正試験によって導出された電圧 光強度校正曲線であり、その校正曲線を用いて、各帯電試験結果を表面電位分布へと変換した結果を図4と図5に示す(ポッケルス素子の部分のみ抽出)。

これらの結果から、紫外線は全体的に帯電するのに対して電子銃は端まで帯電しきれていない様子がわかる。

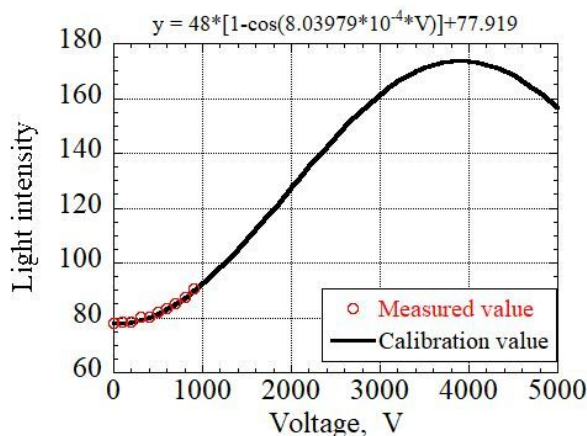


図3 電圧 光強度校正曲線

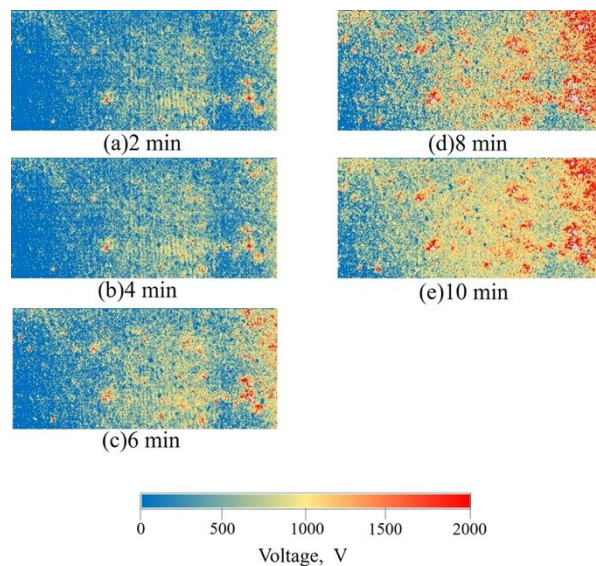


図 4 紫外線照射による表面電位分布<sup>3)</sup>

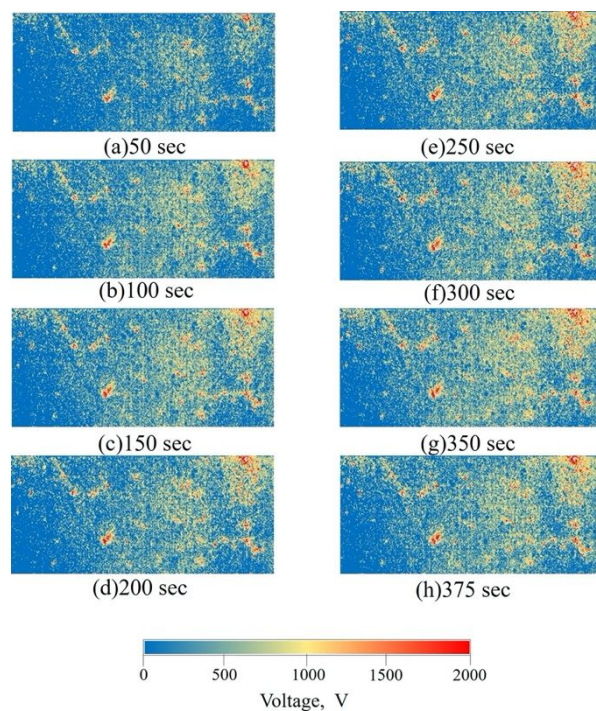


図 5 電子銃照射による表面電位分布<sup>3)</sup>

ポッケルス効果を用いた表面電位計測により、紫外線と電子ビームでカバーガラス端での帯電の様子に違いが生ずることを明らかにした。

また表面帯電解析を行った結果からも、電子ビームのみの照射では中央部に比べて端の部分では帯電しにくい、真空紫外線を照射した場合には一様に帯電していることが分かった。

これらの結果から、電子ビーム環境と真空紫外線環境では絶縁体の端の部分で表面帯電電位が異なり、それにより放電閾値が異なることを明らかにした。

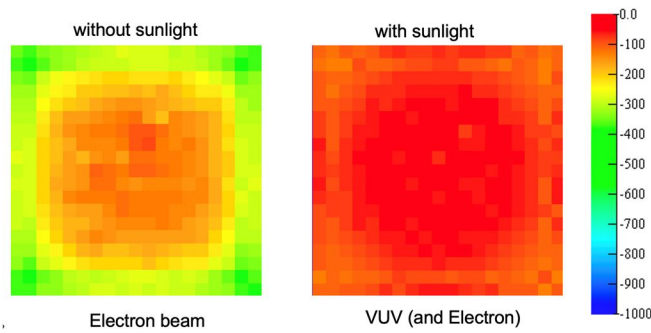


图 6 表面帯電解析結果<sup>4)</sup>

### 参考文献

- 1) Toyoda, K., Sasaki, T., Cho, M., Ohkubo, M., and Seki, K., "Difference in Discharge Threshold Voltage Between Electron Beam and Ultraviolet Environment," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 58, No. 3, pp. 619-627, 2021.
- 2) Cho, M., Miyata, N., and Hikita, M. "Effect of Arcing on Insulator Surface Potential in Plasma: Image Observation," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.37, No.1, 1999, pp150-152.
- 3) Toyoda, K., Kose, S., and Cho, M., "Difference in threshold voltage of arc inception between electron beam and ultraviolet environment: surface potential measurement with Pockels effect," *Scitech forum 2022, AIAA-2022-1989*, 2022.
- 4) Toyoda, K., Takuma, M., Kose, S., and Cho, M., "Surface potential measurement with Pockels effect under electron beam and vacuum ultraviolet environment," *16th Spacecraft Charging Technology Conference*, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kazuhiro Toyoda, Sayaka Kose, Takaaki Sasaki and Mengu Cho
2. 発表標題 Difference in threshold voltage of arc inception between electron beam and ultraviolet environment
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古瀬清郁 豊田和弘 趙孟佑
2. 発表標題 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
3. 学会等名 宇宙環境シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Toyoda, Sayaka Kose, Takaaki Sasaki, Mengu Cho
2. 発表標題 Difference in threshold voltage of arc inception between electron beam and ultraviolet environment
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------