

# 小型表面帯電分布計測システムの開発

糸山 弘行\*, 鈴木 祥太, 田中 康寛, 高田 達雄(武蔵工業大学)

Development of a small size measurement system for observing a surface charge

Hiroyuki Momiyama, Shouta Suzuki, Tanaka Yasuhiro, Tatsuo Takada (Musashi Institute of Technology)

## ABSTRACT

The purpose of this research work is to develop a small size measurement system to observe the surface charge distribution on insulator in vacuum chamber for space environmental test. Recently, a lot of satellites many purposes like a telecommunication, a weather report are being launched. These satellites are flying in a very severe space environment where the high energy radiations are scattered from the sun. In this environment, electrical charging phenomenon occurs on the insulation of spacecraft surface and electrical discharge or dielectric breakdown occurs by the high electric field. Therefore devices in spacecraft have a risk of failure. So we need to find out a mechanism for the occurrence of surface discharge on insulation and a best insulating materials for space conditions. Until now, my senior at our laboratory has made a measuring system of surface charging on insulation using the BSO crystal has Pockels effect. The measuring system has been used the observation of surface discharging on insulation under conditions of non-destructive and non-contact. However this measuring system is large size and the techniques for setting an optical axis is hard. So it was difficult to apply the measuring system to the space environment simulator of small vacuum chamber. So we need to make a small size measurement system for surface discharging observation. By using a plate type light source of LED and changing a optical type, the system area can be reduced  $200 \times 150\text{mm}$  from  $1200 \times 700\text{mm}$ . Then we researched surface charging on BSO crystal and Kapton film, by using the small system. Then we researched measuring accuracy of the small system.

**Key words:** Pockels effect, Surface charging, plate type light source

## 1. はじめに

宇宙機が飛行する宇宙空間では、太陽から多量のプラズマやイオン、プロトンなどの荷電粒子、γ線などの高エネルギー電磁波が放出されている。この環境下において、宇宙機表面に用いられる絶縁体は帯電し、沿面放電や絶縁破壊が発生する可能性がある。これらの現象は、宇宙機に搭載された機器の誤作動や故障を引き起こすことがあるので、宇宙機システムの高信頼度化、長寿命化のためには、絶縁体表面上で発生する放電発生メカニズムの解明や、沿面放電の絶縁材料依存性を調査する必要がある。そこで、これまで、電気光学効果の一種であるポッケルス効果を示す誘電体結晶を用いて、光学的に沿面放電の2次元分布を計測する装置を開発してきた。この装置を用いて、非破壊、非接触で絶縁体表面の沿面放電進展過程を観測することが可能であるが、光学系の調整に長時間必要とする上、大型であるため、宇宙環境を模擬した真空チャンバー内等の特殊環境下における測定が困難であった。そこで、我々は、特殊環境下での測定を可能とするために、光学調整が簡便な小型装置の開発をすることを目的としている。

## 2. ポッケルス効果を用いた表面帯電分布の測定原理

### 2.1 ポッケルス効果

以下にポッケルス効果による偏光位相差について説明する。

図1に示すポッケルス素子表面に電荷が存在していたとすると、この電荷により、ポッケルス素子のz方向に電界が発生し、素子内で誘電率のx方向、y方向成分に異方性が生じる。これにより素子内の屈折率がx方向とy方向で異なるため、ポッケルス素子内を伝播する電磁波のx方向、y方向に速度差が発生する。これにより出射光には偏光位相差 $\Delta\theta$ が発生する。この偏光位相差は、式(1)で表され<sup>(1)</sup>、Z方向成分の電界を積分することにより、表面電位分布の式として表すことができる。

$$\Delta\theta_{(x,y)} = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} \int_0^d E_z dz = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} V \quad (1)$$

$\Delta\theta$ : 偏光位相差       $E_z$ : z方向成分の電界

$n_0$ : 常光線屈折率       $\lambda$ : 波長

$\gamma_{41}$ : ポッケルス係数       $d$ : ポッケルス素子の厚さ

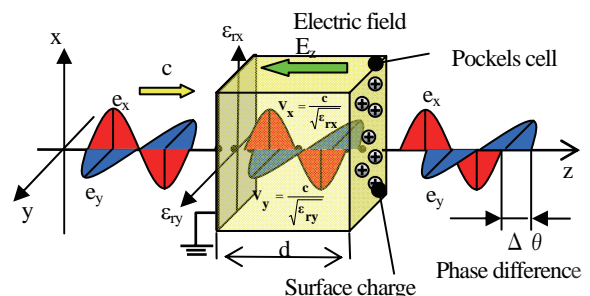


Fig.1 Principle of pockels effect

## 2.2 表面帯電分布の測定原理

以下に沿面放電観測に用いる光学系と各素子での偏光状態を説明する。図2は偏光子、λ/4板、ポッケルス素子であるBSO結晶、検光子の各素子の配置とそれを透過する光の偏光状態を示している。偏光子を透過する光は直線偏光となり、λ/4板を透過することで円偏光となる。次に、円偏光が表面電荷発生時のBSO結晶を透過することにより位相差が発生するため、円偏光が楕円偏光となる。次に楕円偏光が検光子に入射するという偏光状態となっている。また、この光学系では、ポッケルス効果による偏光位相差Δθと最大光強度I<sub>0</sub>、放電発生時光強度Iの関係を表す式(2)で表すことができる。この式のうち、最大光強度I<sub>0</sub>と放電発生時の光強度Iおよび、最小光強度I<sub>off</sub>は測定可能であるので、3つの光強度から偏光位相差Δθを算出することができる。また、位相差分布から愛器(1)により表面電位分布を算出することができる。

$$\frac{I_{(x,y)} - I_{off(x,y)}}{I_{0(x,y)} - I_{off(x,y)}} = \sin^2 \left( \frac{\Delta\theta_{(x,y)}}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \quad (2)$$

Δθ: 偏光位相差                      I<sub>0</sub>: 最大光強度  
 I: 放電発生時の光強度            I<sub>off</sub>: 最小光強度

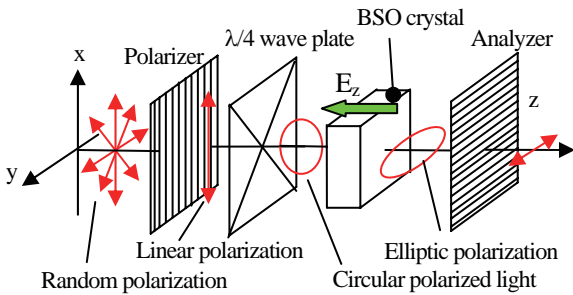


Fig.2 Principle of measurement for surface charge

## 3. 小型表面帯電計測システムの構成

図3に小型沿面放電測定システムを示す。装置のサイズは、縦60mm、横53mm、高さ65mmである。装置の筐体部分は、アクリルで作製しており、筐体側面に溝を設け、筐体下部にはLED平面光源を設置する。溝にはスライド板にはめ込んだ円偏光フィルム(偏光子-λ/4)、BSO結晶を取り付ける。この装置で、沿面放電発生時の透過光を装置上部に設置したハイスピードビデオカメラで撮影することで、沿面放電の経時変化を可視化することができる。以下に装置の小型化の詳細について述べる。

### 3.1 平面光源の採用

これまででは、光源にHe-Neレーザー光源を使用していたが、作製した小型沿面放電測定装置では、発光ダイオード(LED)を6×6個を並べたLED平面光源を採用した。その結果、従来の装置でφレーザー・ビーム径1mmを50mmに拡大するビーム・エキスパンダーが不要になる。なお、平面光源の波長は

651nmを中心に半値幅50nmに広がっているが、使用した光学素子等の機能には、ほとんど影響がないことを確認している。この装置の改良により、レーザー本体およびビーム・エキスパンダーで長さ約650mmであった部分が、平面光源により、長さ約9mmにまで小型化できた。

### 3.2 透過型光学系の採用

装置の小型化のため、沿面放電を観測するセンサー部の改良点について示す。従来は、BSO結晶面の反射光を計測する方式であったが、この従来型では、ミラーや偏光ビームスプリッターなどが必要になり、光路長も長く取る必要があったため、それらの素子が不要で光路長も最短に出来る透過型に変更した。透過型にすることにより、各素子を直線的に配置でき、面積の縮小が可能となった。すなわち、53mm×60mmに収めることができた。ただし、透過光型の採用により、不透明の絶縁材料の沿面放電の計測が困難になることが欠点である。

### 3.3 円偏光フィルム

円偏光を得るために、λ/4の位相差フィルム付き偏光子(透過光軸φ=0°の偏光子に進相軸がφ=45°の位相板が貼られた円偏光フィルム)を、平面光源とBSO結晶の間に挿入した。従来の装置では、PBSと1/8波長板がこの役割を果たしていたが、この円偏光フィルムを採用したことにより、光路長を短縮することができた。なお、円偏光フィルムは、使用する波長によっては、楕円偏光を出射するが、今回使用した平面光源では、ほぼ円偏光とみなせることを確認した。

### 3.4 光路長の短縮

上述した改良により、光路長は、平面光源、円偏光フィルム、BSO結晶、針電極、検光子、ハイスピードビデオカメラのレンズまでの101mmである。従来の装置の光路長が約1200mmであったので、光路長をおおよそ1/10程度に短縮できた。

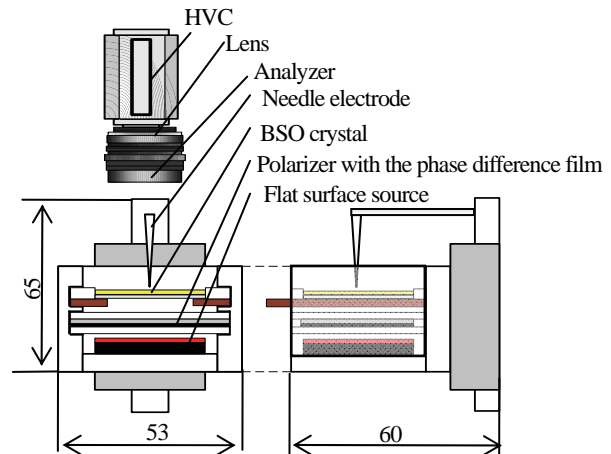


Fig.3 The small size measurement system for surface

### 3.5 LPFによる画像処理

従来のシステムでは、S/N比を向上させるため画像ロックインアンプの手法を使っていたが、位相変調用のBSO結晶などが必要であり、装置を小型化するために、この装置では、この手法を用いていない。そこで、取得した画像のS/N比を向上するために低帯域フィルタ(LPF)により画像の高周波成分を低減させた。具体的には、ハイスピードカメラで計測した光強度から位相差分布を算出した後、LPFをかけることにより、高周波ノイズの除去を行った。ロックインアンプを用いた従来の手法では、数枚を積算して1枚の画像を得ていたためにハイスピードカメラの最小の時間分解能で画像を取得することができなかったが、今回の装置では、ハイスピードカメラの最小の時間分解能でのデータ取得が可能となった。

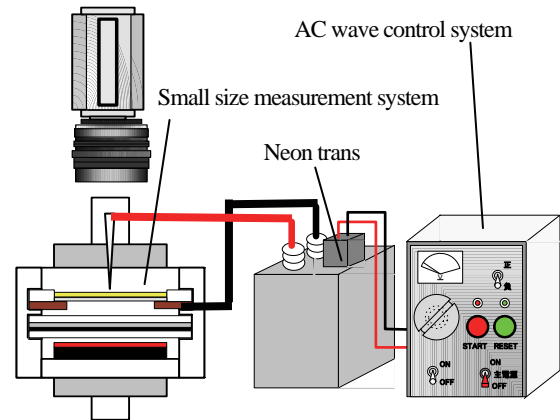


Fig.4 measurement system

## 4. 沿面放電観測例

### 4.1 実験条件、手法

図4に実験装置を示す。実験装置は、単発・複発交流波形制御回路、ネオントランス、小型沿面放電測定システムで構成されている。この装置を用いて、大気中においてBSO結晶上、Kapton®上での沿面放電観測実験を行った。実験条件として、BSO結晶に印加する電圧波形は、図5に示す波形であり、振幅5kV、50Hzの交流を1周期分印加した。この電圧印加時のBSO結晶表面の画像をハイスピードビデオカメラで撮影した。また、信号処理により沿面放電撮影画像を位相差分布表示とするために、沿面放電発生時の光強度I、最大光強度 $I_0$ 、最小光強度 $I_{off}$ の光強度を測定した。

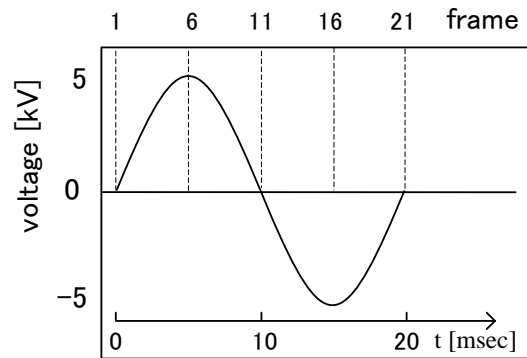


Fig.5 Voltage wave

### 4.2 沿面放電観測結果

以下にBSO結晶上、Kapton®上(12.5 $\mu$ m)での沿面放電の経時変化の結果を示す。画像は、信号処理を行い、位相差分布表示としている。また、測定範囲は、針電極を中心に10mm $\times$ 10mmの範囲である。図6はBSO結晶上での沿面放電の進展結果を示し、図7はKapton®12.5 $\mu$ m上の沿面放電結果を示す。画像の下部にフレームナンバーを示しており、図6のframeと対応した沿面放電の進展画像を示している。また、測定精度の比較のために、図8に従来の装置でのBSO結晶上での沿面放電結果、図9にKapton®12.5 $\mu$ m上での沿面放電進展結果を示す。

Table1 measurement sample

試料	Kapton
厚さ( $\mu$ m)	0(センサ上)
	12.5

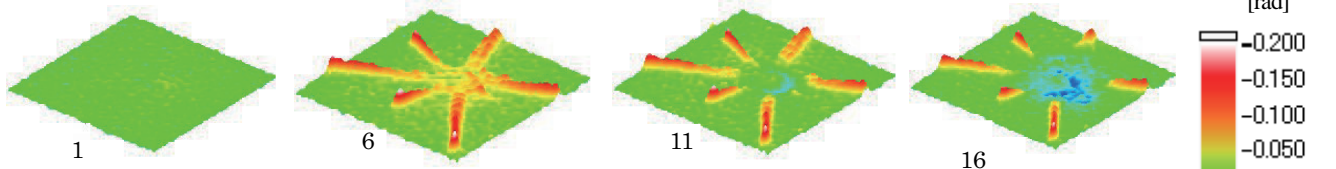


Fig.6 Result of surface charging on BSO crystal

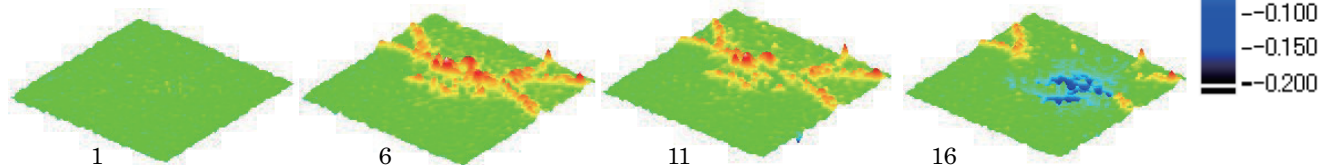


Fig.7 Result of surface charging on Kapton film(12.5  $\mu$  m)

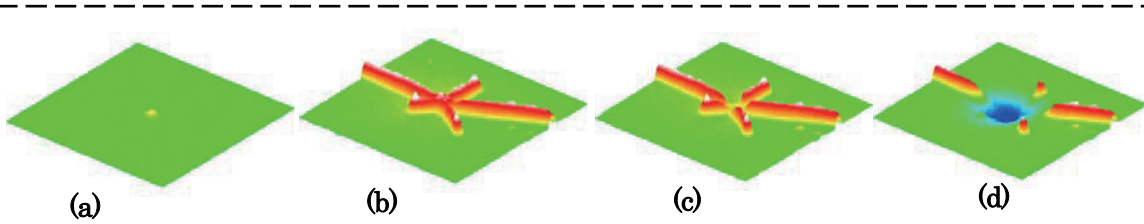


Fig.8 Result of surface charge on BSO crystal by using the existing device

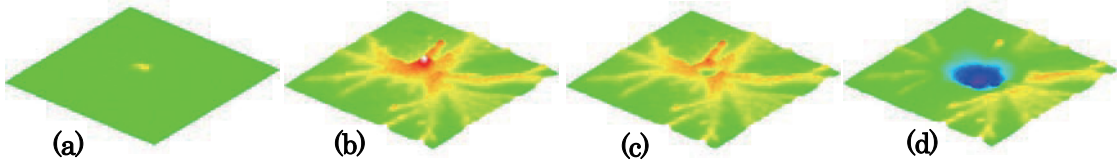
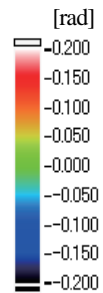
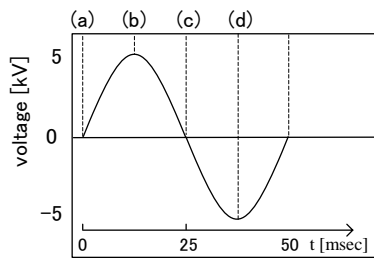


Fig.9 Result of surface charging on Kapton film(12.5 μm) by using the existing device



#### 4. 3印加電圧と沿面放電の進展

図7のBSO結晶上での沿面放電観測結果より、振幅5kV、50Hzの正弦波電圧を1周期印加した結果、印加電圧+5kVとなるフレームナンバー6では、放射上に伸びる正極性ストリーマが6本確認できる。次に、印加電圧-5kVとなるフレームナンバー16では、針電極付近に同心円状の負極性ストリーマが進展していることが確認できる。また、図8よりkapton®12.5 μm上での沿面放電結果では、印加電圧5kVとなるフレームナンバー6で、樹脂状に進展する正極性ストリーマが観測でき、印加電圧が-5kVとなるフレームナンバー16で、針電極を中心に同心円状に広がる負極性ストリーマが確認できた。

#### 5. 小型化した沿面放電測定システムの性能

将来的に、特殊環境を作り出す小型真空チャンバー内において、沿面放電を観測するために、沿面放電測定装置の小型化を図った結果、小型沿面放電測定システムのサイズは、縦60mm、横53mm、高さ65mmとなった。実験に用いる小型チャンバー内の直径は250mmであり、小型沿面放電測定装置より大きい場合、装置をチャンバー内に収めることが可能であると言える。また、装置をモジュール化したことにより、小型真空チャンバー内で、光学系のセッティングが不要となる装置となった。

次に小型装置の沿面放電測定精度について検討する。図7、図8に示したBSO結晶上における沿面放電観測結果とKapton®上における沿面放電結果から、画像に目立つノイズがのることなく、正極性、負極性ストリーマを視認することができた。図9、図10に示す従来の装置でのBSO結晶上、Kapton12.5 μm上における沿面放電観測結果と比較すると、

小型装置のBSO結晶における沿面放電結果では、従来と同様のストリーマの進展が確認できる。しかしKapton(12.5 μm)上において、従来の装置では、正極性ストリーマの進展の先端部まで詳細に観測することが可能であるが、小型装置での結果では、ストリーマの進展は確認できるが、従来の装置の結果に比べると、画像が粗いため、ストリーマの進展を詳細に観測することができないことが確認できる。このため、作製した小型装置において、Kapton®上での沿面放電を詳細に観測することは困難であることが確認できる。

#### 6. まとめ

透過型の光学系を採用したことで、沿面放電測定システムの小型化に成功した。また、装置をモジュール化することにより、光学系のセッティングが容易となる装置の開発に成功した。小型沿面放電観測装置を用いて、沿面放電観測を行った結果、BSO結晶上において沿面放電観測が可能であるといえた。しかし、Kapton®上では、ストリーマの進展画像は得られるが、従来と同等の精度を出すことができなかった。

#### 文献

- (1) 川崎俊之・高田達雄：電気光学効果を用いた誘電体表面電荷分布の測定に関する研究：平成5年
- (2) 安野順介・田中康寛・高田達雄：電気光学効果を用いた絶縁体表面上の2次元電位、電界分布光学測定装置の開発：平成18年