

小型沿面放電分布測定装置による低気圧中の沿面放電観測

鈴木祥太*, 八島巧実, 小宮山洋平, 高田達雄,

三宅弘晃, 田中康寛 (東京都市大学)

Observation of surface discharge under low pressure using LED light source and Pockels effect

Shota Suzuki*, Takumi Yashima, Yohei Komiyama, Tatsuo Takada, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

Two dimensional dynamic surface discharge phenomena have been investigated using an electro-optical Pockels effect with a flat red-light source of LED (Light Emitting Diode) array. To make clear the surface condition damaged due to the cosmic ray such as high energy electrons, photon and gamma ray, etc., the size of electro optical measurement system should be down to less than 70 mm cubic and the pressure inside the vessel also should be reduced less than atmosphere pressure. We have experimentally studied the dynamic surface discharge phenomena on a BSO crystal or some high molecular insulating film (Polyimide, Polyethylene terephthalate and Polyvinylidene-fluoride) with the HVC (High-speed Video Camera) under the ac peak voltage of 5 kV during one cycle at the pressures of 21 to 101kPa. From this work, it is found that the pattern obtained by the negative discharge was always a concentric circle, which is caused by the electron emission from the needle electrode. On the other hand, the pattern of positive streamer has characteristic shape that depends on the kind of insulating material. These results show that the propagation of positive streamer is influenced by photoelectric effect from insulating film.

キーワード：沿面放電，低気圧放電，ポッケルス効果，偏光位相差，表面帯電

1. はじめに

宇宙機が運用される宇宙空間には、太陽から放射される高エネルギーの電子やプロトンなどの荷電粒子、ガンマ線やエックス線などの高エネルギー電磁波が多量に存在している。このような環境下で飛行している宇宙機はその表面を構成している高分子材料が帯電し、沿面放電の事故が発生している⁽¹⁾。このような事故は、宇宙機に搭載された機器の誤作動を引き起こし、故障の原因の 50%以上になると報告されている⁽²⁾。沿面放電が宇宙機の表面で起きると、強力な電磁波雑音が発生すると共に制御機器を破損させることになる。また、太陽電池で発電した数kWの電力が放電路に集中的に消費され、絶縁材料の損傷を招き、電力供給の回復ができなくなるなどの重大事故を招いている。

実際の宇宙機は真空中($10^{-5} \sim 10^{-9}$ Pa)で運用されているので、前述したような放電は起こらない。しかし、宇宙微粒子や荷電粒子の衝突により、衛星機器表面からプラズマなどが放出され、局所的な気圧が真空中から低気圧状態(10～50kPa)に変化する。その結果、このような低気圧状態の場所に放電開始電圧以上の電圧が発生すると、放電事故を引き起こすことになる。

宇宙機システムの高信頼性と長寿命化を実現するために、沿面放電の事故対策が必要である。そこで、沿面放電発生時の絶縁体表面状態を時間的および空間的に詳細に観察する必要がある。

筆者らはこれまでに、電気光学効果の一種であるポッケ

ルス効果を応用し、レーザ光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が、宇宙環境を模擬した小型真空容器内での観測を行う場合は装置が小型であることが必要となる⁽³⁾。そこで、光源に発光ダイオード(LED)を用いた小型沿面放電測定装置を作製し、小型真空容器内に格納することのできる装置を開発してきた。本稿では作製した小型装置を用いて低気圧環境下におけるBSO結晶上および高分子絶縁体フィルム上での沿面放電観測を行ったので報告する。

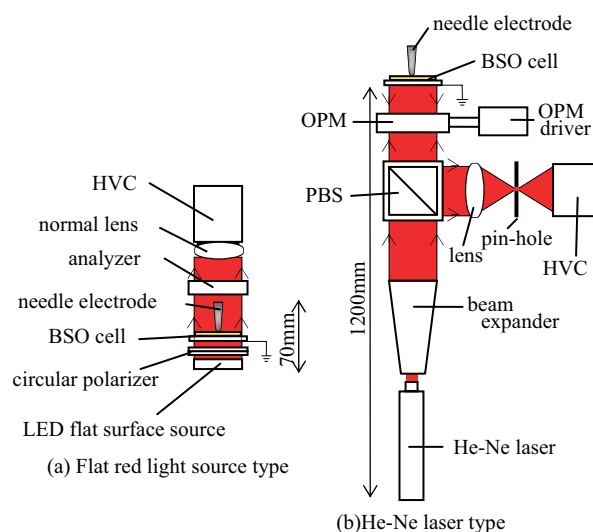


図1 表面電位分布測定システム

Fig. 1. Surface electric potential distribution of electro-optical measurement system.

2. LED 平面光源型の小型沿面放電測定装置

〈2・1〉 平面光源型とレーザ光源型 図 1 はポッケルス効果による偏光位相差 $\Delta\theta(x,y)$ を計測して、残留電荷の表面電位分布 $V_s(x,y)$ を測定するシステムである。図 1(a)に示した平面光源型は本研究で開発した計測系であり、同図(b)のレーザ光源型⁽³⁾⁽⁴⁾は以前に報告した計測系である。両者ともポッケルス素子にBSO結晶($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$)を用いており、(1)式のポッケルス効果の偏光位相差が表面電位 $V_s(x,y)$ に比例する関係を利用したものである。(2)式は計測される光強度分布 $I(x,y)$ と $\Delta\theta(x,y)$ の関係式である。この光学系で $V_s(x,y)$ を測定する場合、直接計測できる量は $\Delta\theta(x,y)$ である。したがって、 $V_s(x,y)$ を求めるためには、(1)式による校正曲線が必要である。

$$\Delta\theta(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 d_{13} V_s(x,y) \dots\dots\dots (1)$$

$$I(x,y) = I_0(x,y) \sin^2 \left[\frac{\Delta\theta \pm \Delta\theta_m}{2} \right] \dots\dots\dots (2)$$

図 1(b)の場合、光位相変調 $\Delta\theta_m$ を利用して雑音を除去したが、図 1(a)の場合には、 $\Delta\theta_m = \pi/2$ に固定した円偏光を使用した。ここで、 n_0 は常光線屈折率であり、 d_{13} はポッケルス定数である。

〈2・2〉 小型沿面放電測定装置の構成 本研究は低気圧下における沿面放電を観測することが目的であるので、光学測定装置を真空容器内に設置することが望ましい。そのために光学測定装置の小型化を図ることが必要になった。以下に示すように、光学測定系の長さはレーザ光源型の1200mmから平面光源型の70mmに縮小した(図 1 参照)。

(1) LED平面光源の採用 図 1(a)は小型化を図った平面光源型の測定装置である。図 1(b)のレーザ光源型は、光源にHe-Neレーザを用いており、ビーム径の拡大のためビー

ム・エキスパンダを必要とした。そのため、光学測定装置の全長は1200mmと大型になった。そこで、He-Neレーザ管(長さ:350mm)とビーム・エキスパンダ(長さ:300mm)の代わりに、LED(波長 651nm \pm 50)を6 \times 6個配列した平面光源を採用した。結果として、平面光源の大きさは35mm \times 27mm \times 30mmになった。

(2) 透過型光学系 図 1(b)のレーザ光源型は、偏光された光をBSOポッケルス素子で反射させる反射型を採用した。反射光は偏光ビーム・スプリッタにより高速度カメラ(HVC)に導いている。そこで小型化を図るために、この偏光ビーム・スプリッタを削除して透過型を採用した。この透過型測定装置を図 2 に示す。装置の筐体の底に平面光源(30mm)があり、その上部に円偏光板(0.75mm)、BSO cell(1.2mm)、針電極の順番で配置した。

(3) 画像処理によるS/N比の向上 図 1(b)のレーザ光源型では、S/N比を向上させるため位相変調の画像ロックインを行っている。この処理のために位相変調器が挿入されていたので、光路長が延長し装置の長尺化につながっていた。そこで、図 1(a)の平面光源型では、画像データの雑音成分を空間周波数領域の低周波フィルタ(LPF)と空間的移動平均および時間的加算平均による画像処理を行い、S/N比の向上を図った。

(4) 低気圧容器 上記の改良を行うことにより、位相差 $\Delta\theta(x,y)$ 測定装置の小型化が可能となった。図 2 に描いたように、沿面放電の光学観測装置は、低気圧容器の亚克力製真空デシケータ(170mm \times 170mm \times 180mm)に格納されている。気圧の制御範囲は大気圧(101kPa)から0.01 気圧(1kPa)である。

(5) 沿面放電の光学観測装置 センサ部である BSO cell の構造は、BSO 単結晶(20mm \times 20mm \times 0.2mm)の下面にBK7(25mm \times 25mm \times 1mm)を貼り合わせて補強し、BK7 の下面全体に ITO 透明電極を施し、接地させている。この BSO 単結晶表面またはその上に高分子絶縁体フィルムを置き、針電極を通して正弦波高電圧(最大振幅値 5kV、周波数 20Hz)を 1 周期印加して沿面放電の観測を行った。使用した高分子絶縁体フィルムは宇宙機でよく用いられるポリイミド(PI:7.5 μ m)と、比較のためにポリエチレンテレフタレート(PET:25 μ m)およびポリビニリデンフルオライド(PVDF:4.5 μ m)を用いた。

(6) 沿面放電の観測画像 偏光位相差を持って出射した偏光は、デシケータと検光子を透過し、高速度カメラ(HVC: Photron社製FASTCAM-PCI)で記録される。HVCは2次元画像(256 \times 240pixel)を1000fpsで撮影した後記録した。HVCによる撮影範囲は7.9 mm \times 8.5 mmである。このHVCを用いることにより、2次元の沿面放電による表面電位分布 $V_s(x,y)$ の経時変化を1msecの時間間隔で観測が可能である。現在の段階では、偏光位相差 $\Delta\theta$ を表面電位 V_s に校正できていないので、観測結果は偏光位相差 $\Delta\theta[\text{rad}]$ の大きさを示している。

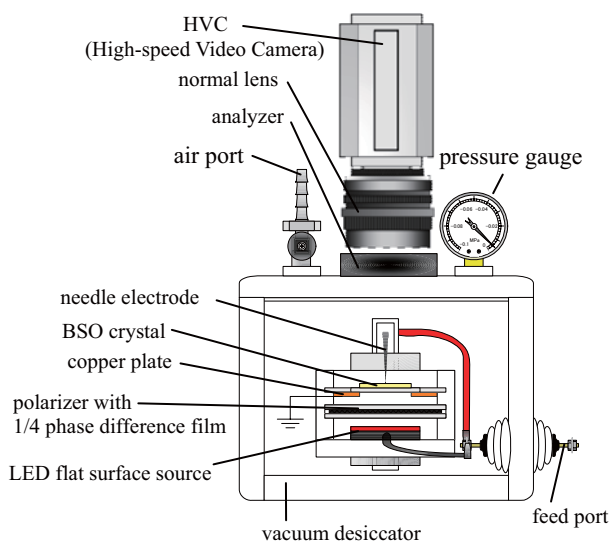


図 2 小型沿面放電測定装置と小型真空容器の概略

Fig. 2 Compact surface discharge measurement system under low pressure conditions

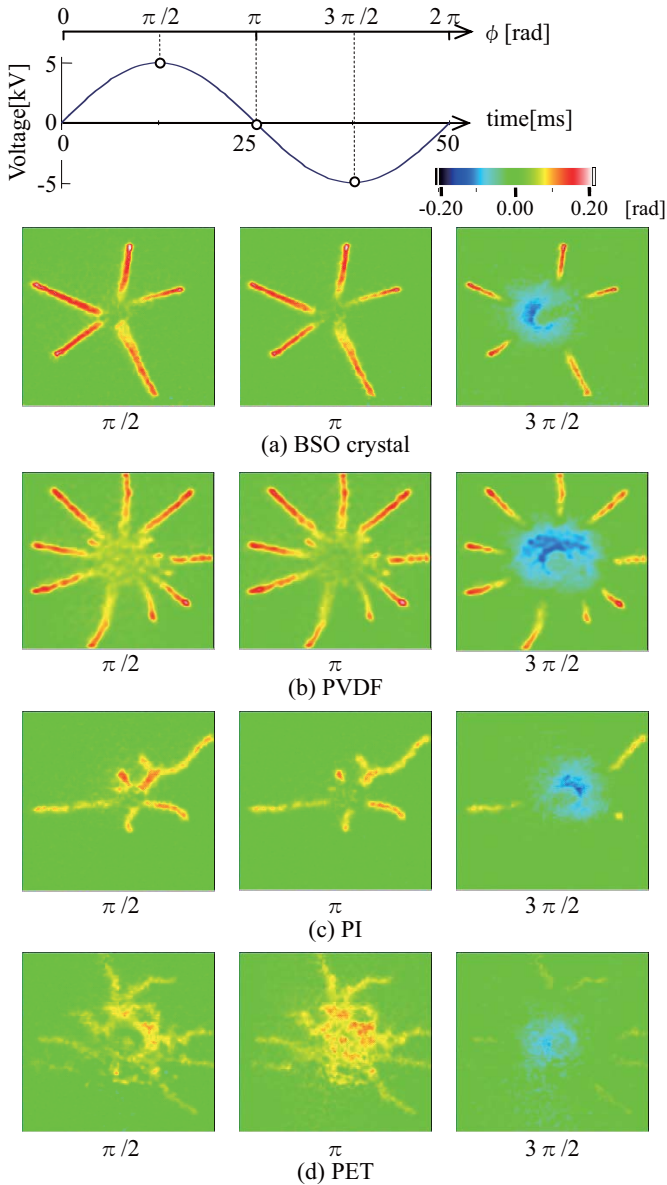


図3 正極性開始正弦波電圧の沿面放電
(101kPa、1 気圧)

Fig. 3. Surface discharge pattern by a cycle application of positive start sine wave form voltage for atmosphere.

3. 高分子絶縁体上の沿面放電

〈3・1〉 観測条件 本測定装置は針電極に高電圧(周波数 20Hz、振幅 5kV、1 周期)を印加し、BSO結晶上および高分子絶縁体(PVDF,PI,PET)上において針電極先端から発生する沿面放電を観測している。観測は 1ms毎に計測しており、1 周期で 50 画像を記録している。

〈3・2〉 正極性開始の正弦波高電圧の沿面放電 図3に大気圧(101kPa)下において、正極性から始まる正弦波高電圧をBSO結晶上および高分子絶縁体上に印加した時の沿面放電の観測画像を示す。同図は、電圧印加の振幅値が正の最大値($\phi = \pi/2$)の 13msec、零クロス($\phi = \pi$)の 25msec、負最大値($\phi = 3\pi/2$)の 38msecなどの電位に比例関係を持つ偏光位相差の分布画像を示している。また、それぞれ同図(a)がBSO

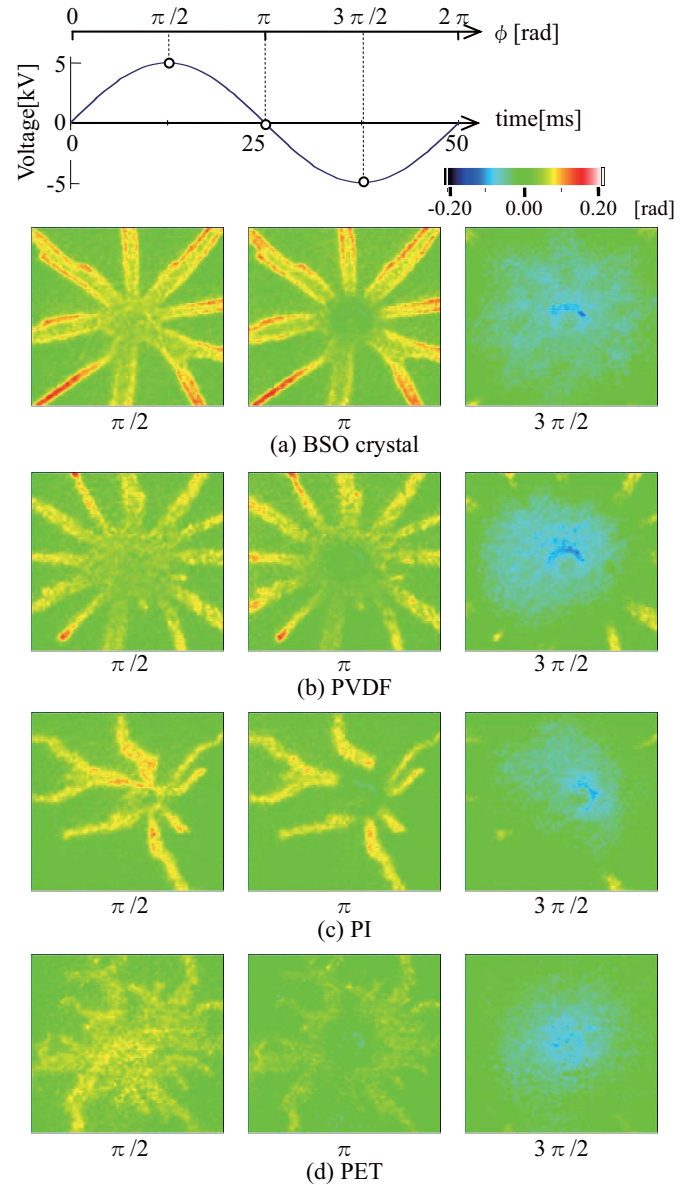


図4 正極性開始正弦波電圧の沿面放電
(61kPa、0.6 気圧)

Fig. 4. Surface discharge pattern by a cycle application of positive start sine wave form voltage for low pressure.

結晶、(b) PVDF、(c) PI、(d) PET上での測定結果である。

(1) 正ストリーマの発生と進展 図3左の $\phi = \pi/2$ (13ms)に示した観測結果は正ストリーマが進展し、停止した後を示している。同図より BSO 結晶上および PVDF 上の正ストリーマは直線的に進展し、PI および PET 上の正ストリーマは湾曲・枝分かれをしながら進展している。

正極性電圧を印加した際に発生する沿面放電は、針電極を中心に進展する正ストリーマ放電である。正ストリーマは各々の 1 本が独立して進展している。これは、インパルス電圧印加の沿面放電の終了後に、帯電粉末のトナーをふりかけるリヒテンベルグ法 (またはダストフィギャ法) で得られる正ストリーマ放電のパターンと同じである⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

正ストリーマの発生と進展は次のように考えられている。正極性の針電極先端に 8~10 kV/cm の高電界が発生する

と、その近傍に存在していた電子はこの電界で加速され、針電極先端に向う⁽⁷⁾。その過程で電子は気体分子と衝突し、最初の電子雪崩(アバランシェ)放電を起こす。これが、正ストリーマの発生である。

最初に発生した正ストリーマ先端に正電荷が残存し、その正電荷の先端近傍に高電界(正電荷による電界と印加電界の重畳)が発生する。従って、その近傍に存在している電子を加速し、中性分子と衝突電離のアバランシェ放電を継続的に起こす。この場合、放電は正ストリーマ先端の電離可能な電界まで進展する。電離できない電界になると正ストリーマの進展は停止する。

(2) 低気圧下での正ストリーマの進展 図4は大気圧より減圧した 61kPa(0.6 気圧)下での沿面放電の観測結果である。図3および図4を絶縁体の種類ごとに比較すると、どの結果も大気圧下に比べて61kPa下では正ストリーマの1本1本の進展距離および正ストリーマ幅が増加していることが確認できる。大気圧の電子の平均自由行程 λ_e は $\lambda_e=0.34\mu\text{m}$ であるが、61kPa(0.6 気圧)になると1.7倍程度長く($\lambda_e=0.57\mu\text{m}$)なる。パッシェンの法則に代表されるように、平均自由行程が長いと電子の電界から得るエネルギーは大きくなる。⁽⁸⁾その結果、気圧が低くなると電離に必要な正ストリーマ先端電界は低くても放電が容易に起こるので、正ストリーマ先端での電離は維持され、より先まで進展することになる。また、正ストリーマ幅が広がる理由として、正電荷同士の反発による横方向へのドリフトが考えられる。正ストリーマは絶縁体表面近傍の気中放電によるものである。よって、電離した正イオンと電子は気相中で発生し、絶縁体の誘電分極電界により正イオンと電子は絶縁体表面に引き寄せられる。その過程で、平均自由行程が長くなった気相中では、正イオン同士の反発力で幅を広げる方向に移動しやすくなる。その結果、正ストリーマの正電荷の幅が広がって観測されると考えられる。

(3) 正ストリーマの進展形状 図3-(a),(b)および図4-(a),(b)はそれぞれBSO結晶上およびPVDF上の大気圧下および61kPa(0.6 気圧)下での観測結果である。BSO結晶上およびPVDF上での正ストリーマは1本ずつ独立し、直線的に放射状に進展している。この特徴は気圧による依存性はなく、大気圧下および減圧下での正ストリーマは直線的進展をみせる。一方、図3-(c),(d)および図4-(c),(d)はそれぞれPIおよびPET上での大気圧下および61kPa(0.6 気圧)下での観測結果より、PIおよびPET上での正ストリーマは1本毎に独立して進展し、それぞれが湾曲や枝分かれをしながら進展している。この特徴もまた気圧に依存することがなく、大気圧下および減圧下で同様の特徴を示す。また、この正ストリーマの進展形状の試料依存性については次節で詳しく述べる。

(4) 負電荷による正ストリーマの中和 図3および図4中央の $\phi=\pi$ (25msec)のデータに示されるように、印加した正弦波電圧が正から負に極性反転する過程で、正ストリーマの残留電荷は負電荷により中和した形状を表してい

る。この負電荷分布は電極先端を中心に同心円形である。この中和は極性が負に反転した後に起きておらず、極性反転以前の低電圧になった正極性のときに中和現象が起きている。この段階で残留正電荷と電極先端との間の電界は強調され、電極先端から電子放出が開始している。その結果、この電子放出は残留正電荷を中和している。

〈3・3〉 負極性開始の正弦波高電圧の沿面放電 図5は大気圧(101kPa)下において、負極性から始まる正弦波高電圧を高分子絶縁体上に印加した時の沿面放電の観測画像である。また、図6は小型真空容器内の気圧を61kPa(0.6 気圧)に調節した時の結果である。

(1) 負帯電分布領域の進展 図5および図6の沿面放電図形は図3および図4と形状が全く違う。図3および図4で示した正ストリーマは直線的または樹枝状に進展しているが、図5および図6で示した負帯電分布は電極先端を中心に同心円形である。そして、負の最大電圧で負帯電分布の直径は最大となる。

(2) 負帯電分布領域の正ストリーマの進展 図5および図6の右 $\phi=3\pi/2$ (38ms)で示されるように、正弦波電圧の極性が反転し針電極が正極性になると、正ストリーマが負帯電分布の中に広がって進展している(厳密に言いますと、極性が反転する直前にも同様の現象が起こっている)。負帯電分布領域中の正ストリーマの進展はBSO結晶上および各高分子試料上の種類に依存せず、著しく湾曲し直線から逸脱し非対称に進展する。

4. 正ストリーマの湾曲機構

〈4・1〉 正ストリーマの進展パターン 図3,4,5,6から、正ストリーマの進展には以下のような特徴が観測された。まず、残留電荷が存在していないときの正ストリーマの進展は図3,4で示したように、BSO結晶上およびPVDF上では直線的進展を見せ、PI上およびPET上では湾曲・枝分かれといった試料による正ストリーマの進展形状の依存性が確認できた。次に、図5,6から、負帯電領域中の正ストリーマの進展ではBSO結晶上および全ての試料上で湾曲して進展し、試料による依存性は確認できない。さらに、図5,6において負帯電領域以外の正ストリーマの進展形状に着目すると、BSO結晶上およびPVDF上では直線的であり、PI上およびPET上では湾曲・枝分かれといった特徴を示した。これは図3,4で示した試料の依存性と一致する。

〈4・2〉 電子による正ストリーマの湾曲 残留した負帯電領域に正ストリーマが進展する場合、絶縁体表面にトラップされた電子が豊富に帯電しているので、電子の供給源がすでに存在している領域で正ストリーマが進展することになる。従って、正ストリーマの進路が湾曲することは、たまたま絶縁体表面の帯電電子が放出された方向に正ストリーマが進展するためである。ストリーマ先端の正電界は8~10 kV/cm程度である。このような高電界になると、表面トラップ電子は気中に放出され、衝突電離により起す種電子になる可能性は十分にある。つまり、電子の供給が豊富

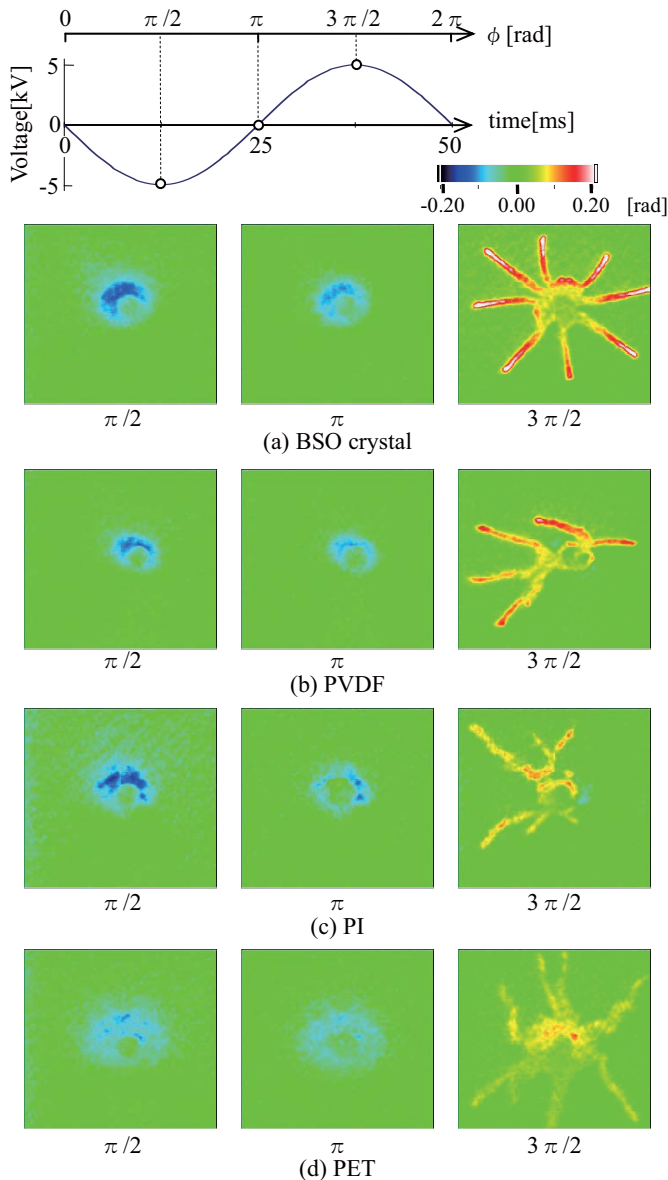


図5 負極性開始正弦波電圧の沿面放電
(101kPa、1 気圧)

Fig. 5. Surface discharge pattern by a cycle application of negative start sine wave form voltage for atmosphere.

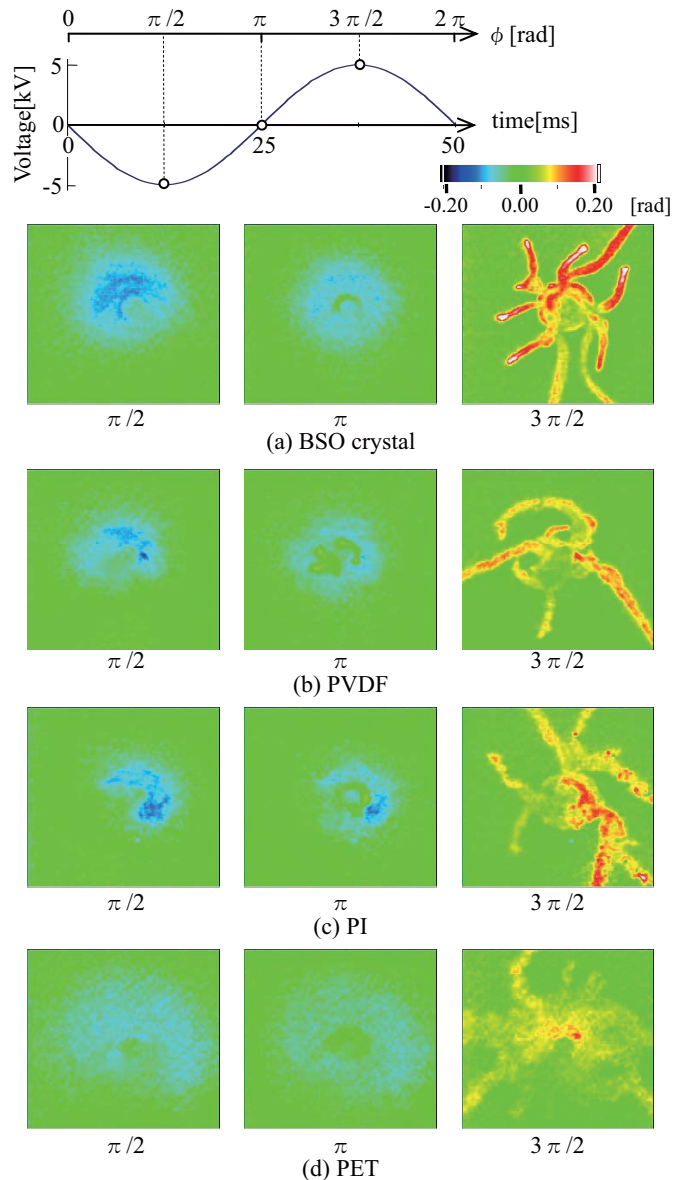


図6 負極性開始正弦波電圧の沿面放電
(61kPa、0.6 気圧)

Fig. 6. Surface discharge pattern by a cycle application of negative start sine wave form voltage for low pressure.

であれば正ストリーマの進展形状は湾曲・枝分かれが発生すると考えられる。

〈4・3〉 正ストリーマの試料依存性 残留電荷のないPI上およびPET上で正ストリーマが湾曲・枝分かれを起こす要因として電子の供給が関係している可能性が考えられる。絶縁体表面から電子が供給される要因として以下の2通りが考えられる。

- (i) 電子のホッピングによる2次電子の叩き出し
- (ii) 再結合による発光によって引き起こされる光電効果による絶縁体からの電子の放出

本測定は大気圧下および減圧下(0.1 気圧)での沿面放電を観測しているため、絶縁体表面からの電子が供給される要因としては(ii)が妥当と思われる。そこで、図7に密度汎関

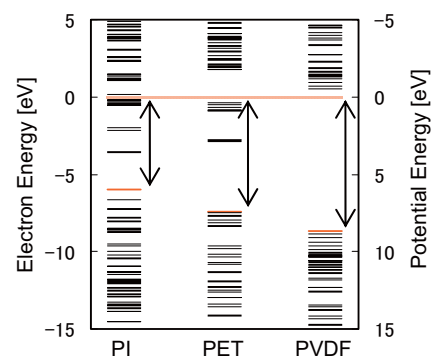


図7 試料のエネルギーバンド
(DFTによる計算結果)

Fig.7. The result of Energy Band of Sample
(by DFT method)

表1 試料のイオン化エネルギー

Table 1. Ionization energy of samples

sample	Ionization energy [eV]
PI	5.90
PET	6.98
PVDF	8.70
BSO crystal	166

数法(DFT)によって計算した各試料のエネルギー準位を示す。また、表 1 に各試料のイオン化エネルギーをまとめたものを示す。ただし、表 1 で示した BSO 結晶の結果のみ半経験的分子軌道法によって算出したイオン化エネルギーである。

図 7 および表 1 から、PI と PET のイオン化エネルギーはそれぞれ 5.99eV と 6.98eV であり、BSO 結晶と PVDF はそれぞれ 166eV と 8.70eV である。これは PI と PET が PVDF と BSO 結晶より電子を試料表面へ放出しやすいことを示している。このことより、PI および PET 上の正ストリーマは試料から供給されるために湾曲・枝分かれをし、BSO 結晶および PVDF 上では電子が試料より供給されにくいため直線的に進展すると考えられる。

5. まとめ

LED 平面光源およびポッケルス効果を用いた小型沿面放電の光学測定装置を開発した。本測定装置は真空容器に設置できるので、低気圧下の沿面放電現象の電位分布に比例した偏光位相差の 2 次元分布を 1ms の時間間隔で計測できるようになった。この実験では、気圧は大気圧(101kPa)から 0.2 気圧(21kPa)の範囲で BSO 結晶上および高分子絶縁体試料(PI,PET,PVDF)上での沿面放電現象を測定した。その主な成果は以下の通りである。

(1) 正ストリーマは 1 本 1 本独立して進展し、その進展形状は絶縁体の種類によって直線的に進展するものと湾曲・枝分かれをするものがある。

(2) 負帯電分布領域を進展する正ストリーマは試料によらず湾曲・枝分かれをする。

(3) 密度汎関数法および半経験的分子軌道法による計算により、PI および PET のイオン化エネルギーが BSO 結晶および PVDF に比べ低く、それらの試料は正ストリーマが湾曲・枝分かれをする傾向にある。一方、比較的イオン化エネルギーの高い BSO 結晶および PVDF 上の正ストリーマの進展は直線的である。

今後の研究課題としては偏光位相差 $\Delta\theta(x,y)$ の値を表面電位 $V_s(x,y)$ のそれに校正することが必要である。さらに、現在は 3 種類の高分子絶縁体上でのみの結果であるため、比較対象を増やすために新たな高分子絶縁体試料上での沿面放電観測を行い、密度汎関数法などの計算結果との比較を行う必要がある。

文 献

- (1) H. 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", 6th Spacecraft Charging Technology Conference, AERL-VS-TR-20001578 (2000)
- (2) 五家建夫:「宇宙環境リスク事典」, 丸善 (2006)
- (3) Y. Zhu, T. Takada and Demin Tu: "An Optical Measurement Technique for Studying Residual Surface Charge Distribution", J.Phys.D:Appli.Phys.,Vol.28, pp.1468-1477 (1995)
- (4) Y. Zhu, T. Takada, Y. Inoue and Demin Tu: "Dynamic Observation of Needle-plane Surface Discharge using the Electro-optical Pockels Effect", IEEE Trans. DEI, Vol.3, No.3, pp460-468, (1996)
- (5) Y. Murooka and S. Koyama: "A nanosecond surface discharge study in low pressures", J. Appl. Phys., Vol.50, pp.6200 (1979)
- (6) Yotsuo Toriyama:「Dust Figure of Surface Discharge and its Applications」, Kinokuniya pp.9-15 (1961)
- (7) 熊田, 千葉, 日高, 濱田, 宅間:「ポッケルス効果を用いた正極性沿面放電進展時の電位分布直接測定」, 電学論誌 A, Vol.120, No.2, pp.204-210 (2000)
- (8) 八田吉典:「気体放電」, 近代科学社(1968)