

小型沿面放電測定装置を用いた低気圧環境下における沿面放電観測

小宮山洋平*,三宅弘晃, 高田達雄, 田中康寛 (東京都市大学)

Observation of Surface Discharge Phenomena on Polymeric Materials under Low Pressure using Pockels effect and LED light source

Yohei Komiyma*, Hiroaki Miyake, Tatsuo Takada, Yasuhiro Tanaka (Tokyo City University)

We have developed a surface discharging measurement system, using Pockels effect. Pockels effect is a kind of electro-optic effect. It is the Pockels effect that The Phase shift of polarized light is proportional to applied electric field on the Pockels device. When the light which is produced by LED or LD propagate in the Pockels device, each of the two components travels at different velocities which depend on the refractive index of each component. After passing through the Pockels device, a phase shift occurs between the two components. This results in an elliptical polarization of the emerging beam. The degree of the phase shift and the ellipticity depend on the electric field being applied to the Pockels device. We observed charging distributions on BSO (Pockels crystal) and several polymeric materials using the Pockels measurement system which is described above. When that experimental were carried out with the conditions which are as follows, Applied sine wave voltage ($V_P=5$ kV, $f=20$ Hz) to produce discharge. The around pressure of the system is controlled the range from 101 kPa (air atmosphere) to 21 kPa. From those experiment results, we found few characteristics which are as follows, Streamer length and width are grown. Streamer shape depends on the ionization energy of each material. In the negative charging area, the streamer grown direction is inflected..

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、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運用されている宇宙機では、その表面を構成している高分子材料の帯電により発生する沿面放電を原因とした事故が発生している。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。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。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。宇宙機は真空中 ($10^{-5} \sim 10^{-9}$ Pa) を航行しているので、前述したような放電は起こらないはずであるが、実際には宇宙微粒子や荷電粒子の宇宙機との衝突により、宇宙機表面からプラズマなどが放出され、局所的な気圧が真空状態から低気圧状態 (10~50 kPa) 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位差が発生すると、放電事故を引き起こすことになる。したがって、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り、そのためには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。

これまで本研究班では、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。しかし、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。そこで、光源に 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。これまで、完成した小型装置を用いて低気圧環境下 (10~90 kPa) での沿面放電観測を行い、放電形状の気圧依存性を確認している。

本稿では、沿面放電（正ストリーマの進展形状）の絶縁体依存性について、密度汎関数法を用いた数値計算の結果と実験で得られた放電形状の比較により、ストリーマの進展パターンと試料のイオン化エネルギーの関係性について調査したので報告する。

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) のレーザ光源型は以前に報告した計測系である [3][4]。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。

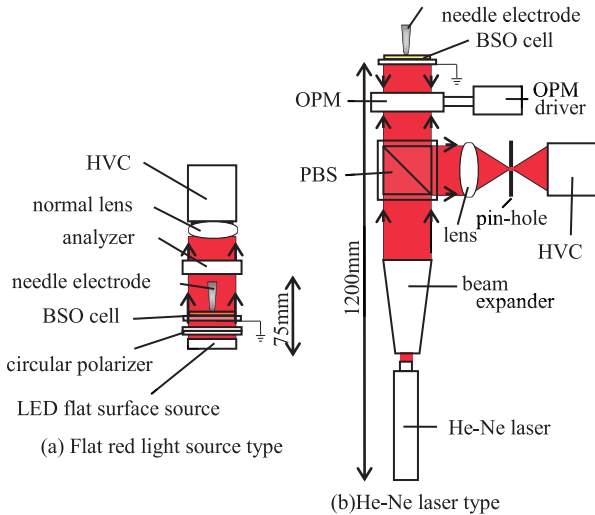


Fig. 1. Surface electric potential distribution of electro-optical measurement system.

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

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

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 1200 mm から平面光源型の 75 mm 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 1200 mm と大型になった。そこで、He-Ne レーザ管(長さ:350 mm)とビーム・エキスパンダ(長さ:300 mm)の代わりに、LED(波長 651 nm \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 27 mm \times 48 mm \times 30 mm 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・スプリッタによりハイスピードビデオカメラ(HVC:Photron 社製 FASTCAM-PCI)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。装置の管体の底に平面光源(30 mm)があり、その上部に円偏光板(0.75 mm)、BSO cell(1.2 mm)、針電極の順番で配置した。

High-speed Video Camera

Photography speed : 1000 fps

Photography range : 8.4 \times 9.4 mm

Pixel count : 256 \times 240

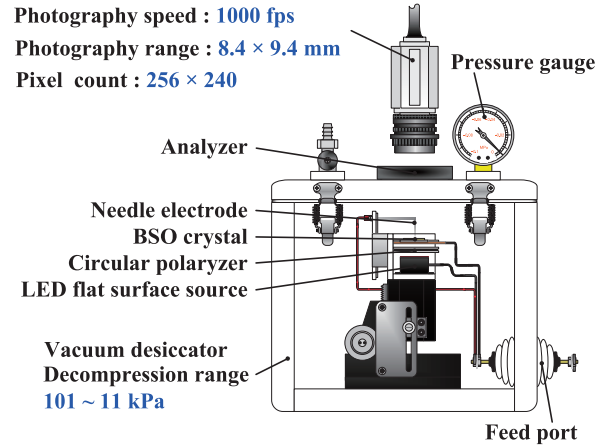


Fig. 2 Compact surface discharge measurement system under low pressure conditions

(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ー(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チャンバー(170 mm \times 170 mm \times 180 mm)に格納されている。気圧の制御範囲は大気圧(101 kPa)から 0.1 気圧(11 kPa)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(20 mm \times 20 mm \times 0.2 mm)の下面に BK7(25 mm \times 25 mm \times 1 mm)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置いた高分子フィルム表面の上に針電極を通して正弦波高電圧(最大振幅値 5 kV, 周波数 20 Hz)を 1 周期印加して沿面放電の観測を行った。

(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、ハイスピードビデオカメラ(HVC)で記録される。HVC は 2 次元画像(256 \times 240 pixel)を 1000 fps 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 1 msec の時間間隔での観測が可能である。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。

3. 高分子絶縁体上の沿面放電

3.1 正極性開始の正弦波電圧の沿面放電

図 3 は大気圧(101 kPa)下において、正極性開始正弦波高

電圧を高分子フィルム上に印加した時の沿面放電の観測画像である。画像は 1 msec 毎に記録しており、1 周期で 50 画像を記録している。同図は、電圧印加の振幅値が正の最大値($\phi=\pi/2$)の 13 msec、零クロス($\phi=\pi$)の 25 msec、負最大値($\phi=3\pi/2$)の 37 msec などの電位分布画像を示している。また、それぞれ同図(a)が PI(Kapton[®])、(b) PET、(c) PVDF、(d) LDPE 上での測定結果である。そして、図 4 は小型真空容器内の気圧を大気圧より減圧した 61 kPa(0.6 気圧)に調節したときの結果である。

(1) 正ストリーマの発生と進展 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。このように、正ストリーマ先端の電界が放電を維持することになり、正ストリーマは直線的に進展する。ところで、この近傍に存在している電子は偶然に気中に存在していた電子であるのか、材料表面から放出された電子であるかの検討は必要である。

(2) 低気圧下での正ストリーマの拡大 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 61 kPa 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は $\lambda_e=0.34 \mu\text{m}$ であるが、61 kPa(0.6 気圧)になると 1.7 倍程度長く($\lambda_e=0.57 \mu\text{m}$)なる。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。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、より先まで伸びることになる。

また、正ストリーマ幅が広がる理由として、進展方向と直角方向にも放電が進展していることと、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。低気圧下においては直角方向の放電の進展距離が伸びるため、ストリーマ幅は広がる。そして、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(大気圧での $\lambda_{\text{ion}}=0.061 \mu\text{m}$, 61 kPa での $\lambda_{\text{ion}}=0.10 \mu\text{m}$)正イオン同士の反

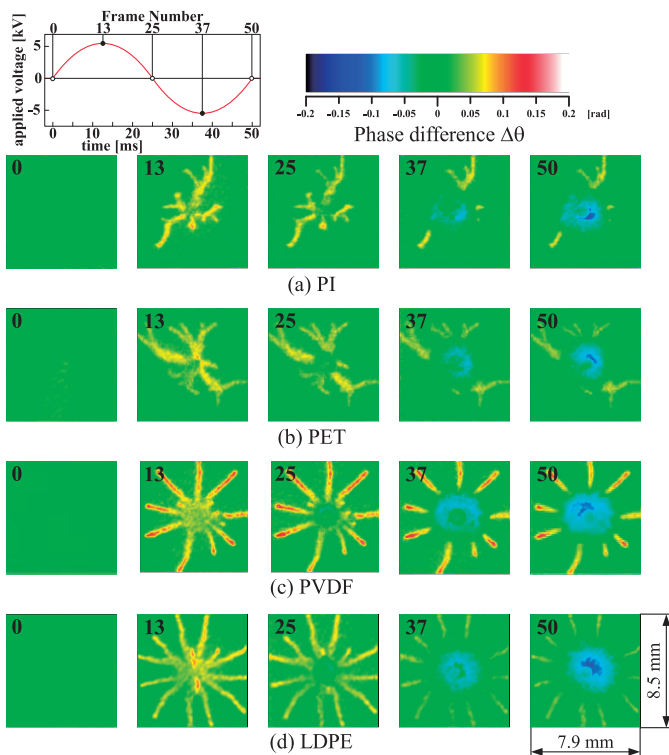


Fig. 3. Surface discharge pattern under a cycle voltage application of positive start sine wave in atmospheric pressure.

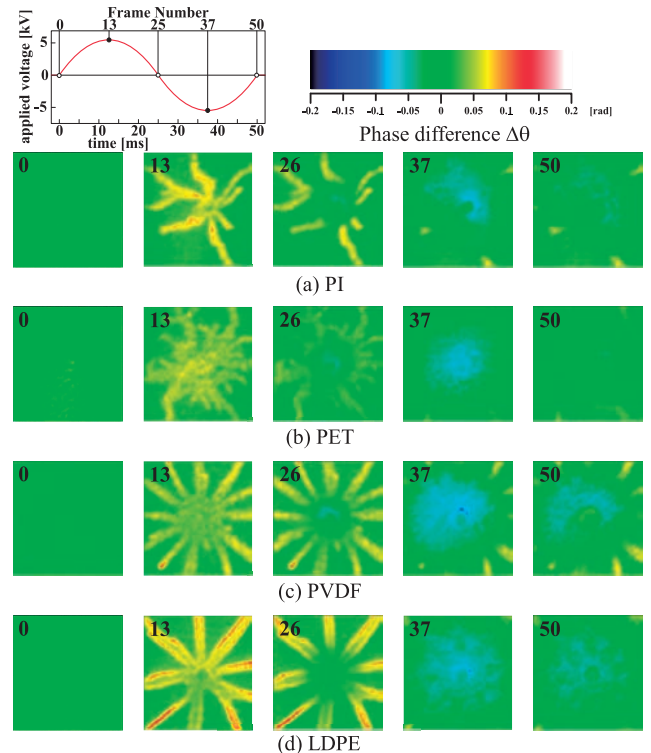


Fig. 4. Surface discharge pattern under a cycle voltage application of positive start sine wave in low pressure.

発力で幅を広げる方向に移動しやすくなる。その結果、正ストリーマの幅が広がって観測される。

(3) 正ストリーマ進展形状の高分子材料の依存 図3(a),(b)および図4(a),(b)はそれぞれPIおよびPET上での大気圧下および61 kPa(0.6 気圧)下での観測結果である。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PVDFおよびLDPE上での大気圧下および61 kPa(0.6 気圧)下での観測結果である。PVDFおよびLDPE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。

(4) 負電荷による正ストリーマの中和 図3および図4の $\phi=\pi$ (25 msec)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。また、図3,4の $\phi=3/2\pi$ (37 msec)のデータに示されるように、電子放出による中和が進み、負帯電領域が同心円状に分布していることが確認できる。この負帯電分布領域は減圧に伴う電子の平

均自由行程の増加とともに広がっている。

3.2 負極性開始の正弦波電圧の沿面放電

図5は大気圧(101 kPa)下において、負極性開始正弦波高電圧を高分子フィルム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61 kPa(0.6 気圧)に調節したときの結果である。

(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) 負帯電分布領域中の正ストリーマの進展 図5および図6の $\phi=3\pi/2$ (37 msec)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。負帯電分布領域中の正ストリーマの進展は高分子フィルムの種類に依存せず、著しく湾曲し直線から逸脱、非対称に進展する。

3.3 正ストリーマの湾曲の機構

(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形状には絶縁体の種類による依存性があることを観測した。大別すると以下の2パターンである。

(I) 湾曲(PI, PET)

(II) 直線的(PVDF, LDPE)

ところで、残留した負帯電領域に正ストリーマが進展する場合、絶縁体の種類に依存せず、著しく湾曲し直線から逸脱、非対称に進展する。

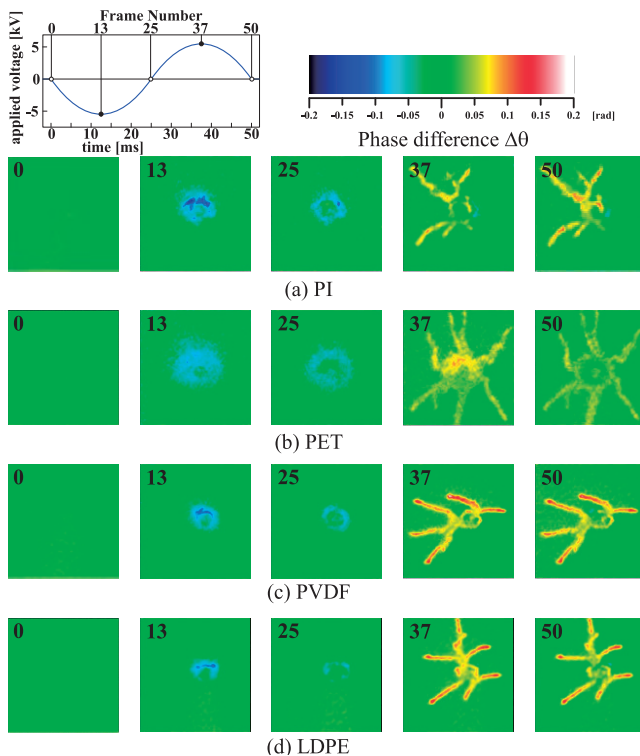


Fig. 5. Surface discharge pattern under a cycle voltage application of negative start sine wave in atmospheric pressure.

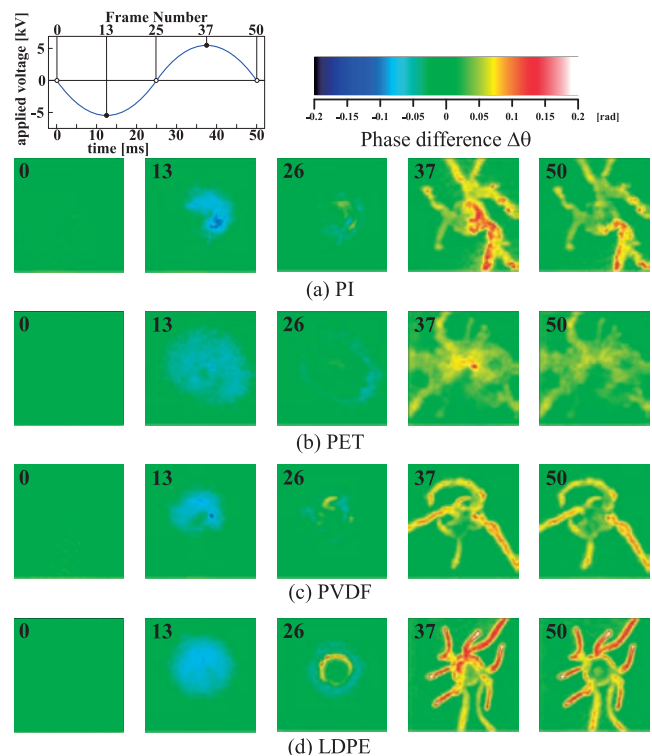


Fig. 6. Surface discharge pattern under a cycle voltage application of negative start sine wave in low pressure.

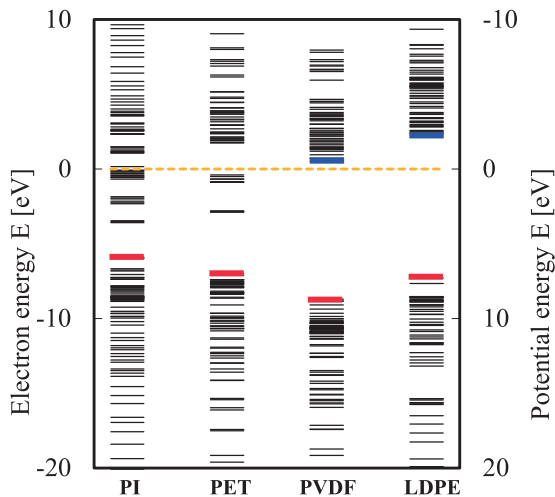


Figure 7. Energy structure of each sample

Table 1. Energy structure of each sample

sample	electron affinity	ionization energy	band gap energy
PI	3.58	5.9	2.32
PET	2.88	6.98	4.1
PVDF	-0.53	8.69	9.22
LDPE	-2.37	7.29	9.66

(2) 絶縁体からの電子供給 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再結合による発光に伴う絶縁体からの光電子放出が可能性としては高いと考えられる。

(3) 正ストリーマ進展形状と電子供給 絶縁体からの光電子放出に着目し、各高分子フィルムのエネルギーバンドを密度汎関数法(DFT:Gaussian03)を用いて計算した。図7にその計算結果を示す。また、表1に各高分子フィルムのバンドギャップエネルギー ϕ_g 、電子親和力 χ 、イオン化エネルギー ϕ_i をまとめたものを示す。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5.90 eVと6.98 eVであり、PVDFとLDPEはそれぞれ8.70 eVと7.29 eVである。これはPIとPETがPVDF、LDPEと比較して、より小さなエネルギーの供給で電子を試料表面へ放出することを示している。このことより、PIおよびPET上の正ストリーマは試料自体から電子が供給されるために湾曲し、PVDF、LDPE上では電子が試料から供給されにくいいため直線的に進展すると考えられる。

4. まとめ・今後の課題

本研究により、LED 平面光源およびポッケルス効果を用いた小型の沿面放電光学測定装置を開発した。本測定装置は真空容器内に設置できるので、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1 msec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(101 kPa)から0.2 気圧(21 kPa)の範囲で高分子フィ

ルム(PI, PET, PVDF, LDPE)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。これに対し、負極性の進展は同心円状である。そして、これらの進展は気圧の減少と共に大きくなる。
- (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。他方、残留正ストリーマ領域における負電荷の進展は、単なる電子とイオンの中和による進展であり、その形状は常に同心円形となる。
- (3) 密度汎関数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PVDF、LDPE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PVDF、LDPE上の正ストリーマの進展は直線的である。このことから、正ストリーマの進展形状には試料からの電子供給が関係していると考えられる。

今後の研究課題としては放電光による光電子放出と正ストリーマパターンとの関係性を検証するため、試料からの光電子放出の測定および放電スペクトルの測定を行っていく予定である。また装置のさらなる高分解能化・高感度化を図り、測定サンプル数を増加させたいと考えている。

参 考 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:Appl.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, pp.460-468 (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)