

宇宙機用絶縁材料上における沿面放電観測

渋谷一晃*, 小宮山洋平, 武田雷蔵, 三宅弘晃, 田中康寛, 高田達雄 (東京都市大学)

Observation of Surface Discharge Phenomena on Dielectric Materials

Kazuaki Shibuya, Yohei Komiyama, Raizo Takeda, Hiroaki Miyake, Yasuhiro Tanaka, Tatsuo Takada
(Tokyo City University)

ABSTRACT

We have developed a surface discharging measurement system, using Pockels effect. Pockels effect is a kind of electro-optic effect. The Pockels effect means that the phase shift of polarized light, which phases through the Pockels device, is proportional to applied electric field to the Pockels device. In this measurement system using Pockels effect, when the light which is produced by LED or LD propagate in the Pockels device, each of two orthogonal components travels different velocities which depend on the refractive index of each component. After the light passing through the Pockels device, a phase shift occurs in the light 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. Therefore, by observing the distribution of the phase shift of the emerged light from the BSO (Pockels crystal), we can measure the electric field distribution in BSO. In our experiments, we apply an sinusoidal wave voltage to a needle electrode on the sample put on the BSO cell. When the applied voltage makes a surface discharge on the sample by the applied sinusoidal voltage, the charge remained on the sample makes the electric field distribution in the BSO cell. Therefore, by measuring the distribution of the phase shift, we can observe the surface discharge pattern. In this experiment, the atmosphere pressure around the sample is controlled in the range from 101 kPa to 11 kPa. From those experimental results, we found the patterns on various materials are categorized into two characteristics. Furthermore, we also found that the two characteristics strongly depend on the ionization energy of the materials of the samples.

キーワード：沿面放電, 宇宙機, 絶縁材料, ポッケルス効果

(*Key words*: Surface discharge, Spacecraft, Dielectric, Pockels effect)

1. はじめに

近年、人工衛星、宇宙探査機などの数多くの宇宙機が宇宙空間で運用されている。宇宙空間では太陽からの電磁波(紫外線、X線、γ線)、高エネルギー粒子(電子、陽子、イオン)、プラズマが存在し、これらの存在によって宇宙機表面に用いられる絶縁体は帯電する。この帯電により生じた電位差により沿面放電が発生し、宇宙機用絶縁材料の劣化や機器の故障などの宇宙機事故を引き起こし、宇宙機の長期運用を図る上で大きな障害となっている。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し、制御機器を破損させる可能性がある。このような宇宙機事故の半数以上が帯電・放電に起因するという報告もされていることから、宇宙機の放電抑止が重要な課題となっている。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、レーザを用いて光学的に沿面放電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、沿面放電の材料依存性について調査した結果を紹介するとともに、結果に差異をもたらす原因であると考えられる材料のイオン化エネルギーについて密度汎関数法を用いた数値計算を行い、実験で得られた放電形状の比較により、放電進展パターンの類型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. 小型沿面放電測定装置

2.1. 平面光源型とレーザ光源型

Fig. 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。Fig. 1(a) に示した平面光源型測定装置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(Bi_2SiO_5)を用いており、以下のEq. 1 に示す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。Eq. 2 はハイスピードビデオカメラによって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、Eq. 1 による校正が必要である。

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

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

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。なお、Fig. 1(b) に示した従来の装置では、Eq. 2 で示した光位相変調 $\Delta\theta_m$ を利用して雑音を除去し測定精度を高めたが、同図(a)に示す装置では変量気を挿入する余裕がないため、 $\Delta\theta_m = \pi/2$ に固定した円偏光を使用した。

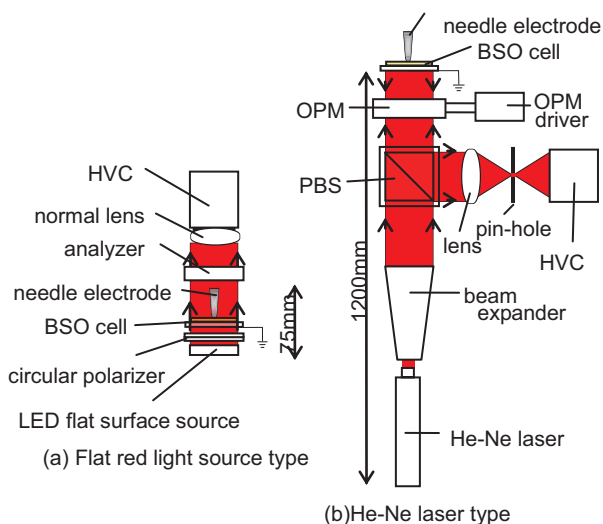


Fig. 1. Surface electric potential distribution of electro-optical measurement system.

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り、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ー光源型の 1200 mm から平面光源型の 75 mm に縮小した (Fig. 1 参照)。

(1) 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×20 mm×0.2 mm) の下面に BK7 (25 mm×25 mm×1 mm) を貼り合わせて補強し、BK7 の下面に ITO 透明電極を配置し、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上に設置した針電極を介して正弦波高電圧 (振幅 5 kV, 周波数 20 Hz) を 1 周期印加して沿面放電観測を行った。

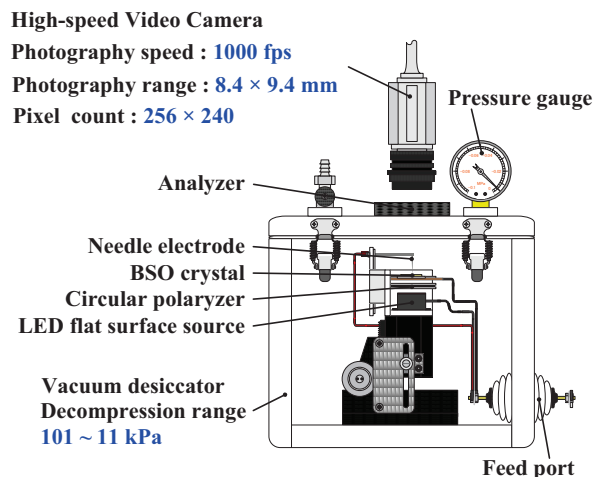


Fig. 2. Compact surface discharge measurement system under low pressure conditions

system under low pressure conditions

(2) 低気圧容器

上記の改良を行うことにより、位相差 $\Delta\theta(x,y)$ を測定する装置の小型化が可能となった。そこで、Fig. 2 に示したように沿面放電の光学観測装置を低気圧容器の亚克力製真空チャンバーに格納して実験を行った。気圧の制御範囲は大気圧 (101 kPa) から 0.1 気圧 (11 kPa) である。

(3) 沿面放電の観測画像

偏光位相差をもって出射した偏光は、デシケータと検光子を透過し、HVC で記録される。HVC は 2 次元画像 (256×240 pixel) を 1000 fps で撮影し、記録した。HVC による撮影範囲は 7.9 mm×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 の時間間隔で観測可能である。ただし、現段階では、偏光位相差 $\Delta\theta$ を表面電位 V_s に正確に校正することが困難であったので、観測結果は表面電位に比例する偏光位相差 $\Delta\theta$ [rad] の大きさをもって示している。

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

Fig. 3(I) は大気圧 (101 kPa) 下において、正極性から開始した正弦波高電圧を、高分子フィルム上の針電極に印加した際の沿面放電の観測画像である。測定に使用する試料として、宇宙機用材料として使用されている PI 系、およびフッ素系よりそれぞれ 2 種類を選定した (Table 1)。画像は 1 ms 毎に記録しており、1 周期で 50 画像を記録している。また、同図(II)は小型真空容器内の気圧を 61 kPa に減圧した時の結果である。

Table 1 Samples

Polymer	Thickness [μm]
Kapton-H	7.5
Upilex-S	7.5
PVDF (Polyvinylidene difluoride)	4.5
ETFE (Ethylene tetrafluoroethylene)	12.5

(1) 正ストリーマの発生と進展

正極性電圧を針電極に印加した際に発生する沿面放電では、針電極を中心に進展する正ストリーマ放電が測定されている。正ストリーマは各々の1本が独立して進展していることがわかる。これは、他の実験で、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ことで得られるリヒテンベルグ法で観測された正ストリーマ放電のパターンと同じである[5]。

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により加速され、針電極先端に向う。その過程で電子は気体分子と衝突し、気体分子を電離する。電離により発生した正イオンと電子のうち、質量の大きな正イオンはその場にとどまり、電子は再度加速され電極に移動するので、結果的に表面には正イオンのみが残されることになる。これが、正ストリーマの起源である。その後、再度加速された電子が、次の気体分子と衝突して電離を引き起こし、それを繰り返すことにより電子雪崩が発生する。なお、最初に発生した正ストリーマの先端には電離によって発生した正電荷が残存し、その正電荷の先端近傍に高電界が発生する。従って、その近傍に存在している電子をさらに加速し、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。

(2) 低気圧下での正ストリーマの拡大

Fig. 3 (I) (II) を絶縁体の種類ごとに比較すると、どの結果も大気圧下と比べて 61 kPa 下ではストリーマの1本1本の進展距離および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 になると1.7倍程度長く($\lambda_e=0.57 \mu\text{m}$)なる[6]。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、より長く伸びることになる。

また、正ストリーマ幅が広がる理由として、進展方向と針電極からの電界に対して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電界に対して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。さらに、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り、電離した正イオンと電子は気中で発生し、絶縁体の誘電分極電界により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中では(大気圧での $\lambda_{ion}=0.061 \mu\text{m}$, 61 kPa での $\lambda_{ion}=0.10 \mu\text{m}$)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

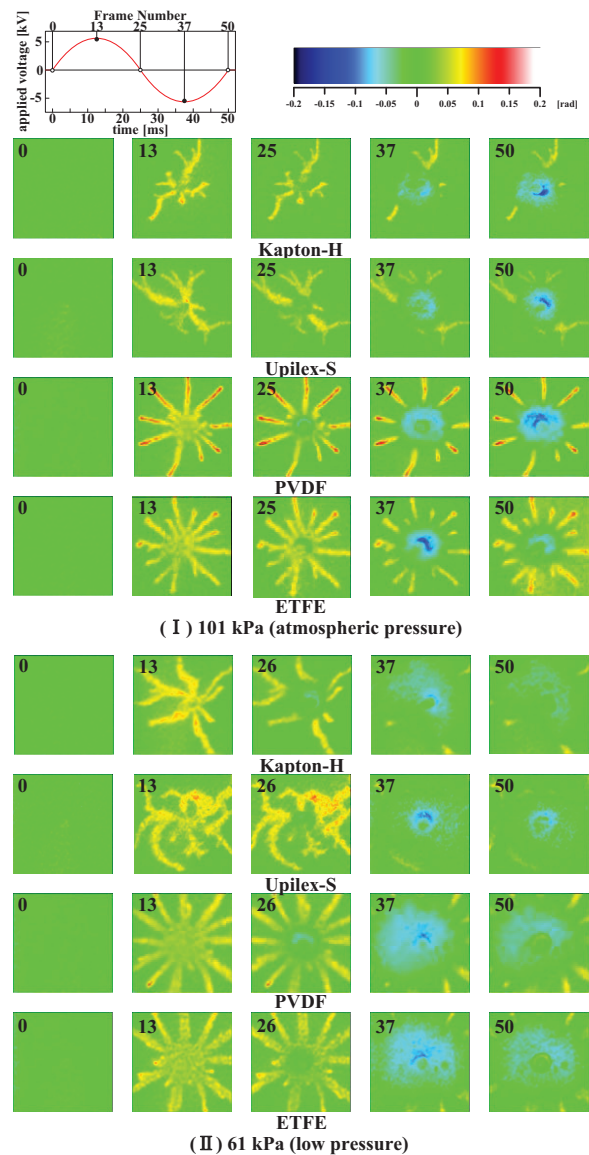


Fig. 3. Patterns of surface charge distribution. (applied positive started sine wave)

る。その結果、正ストリーマの幅が広がって観測されると考えられる。

(3) 正ストリーマ進展形状の高分子材料の依存

Fig. 3 (I)(II)におけるPI系材料に着目すると、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らず大気圧下でも同様の傾向がみられる。一方、同図のフッ素樹脂系材料に着目すると、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。

3.2. 負極性開始の正弦波電圧の沿面放電

Fig. 4 (I) 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設置した針電極に印加した際に観測される沿面放電の画像である。また、同図(II)は小型真空容器内の気圧を61 kPaに減圧したときの結果である。

(1) 負帯電分布領域の進展

Fig. 4 (I) (II) の沿面放電図形は Fig. 3 (I)(II)とは形状が全く異なる。Fig. 3 で示したストリーマは直線的または樹枝状に進展しているが、Fig. 4 で示した負帯電分布は電圧印加の初期半サイクル（負サイクル）では電極を中心に同心円形である。そして、負の最大電圧で分布の直径は最大となる。

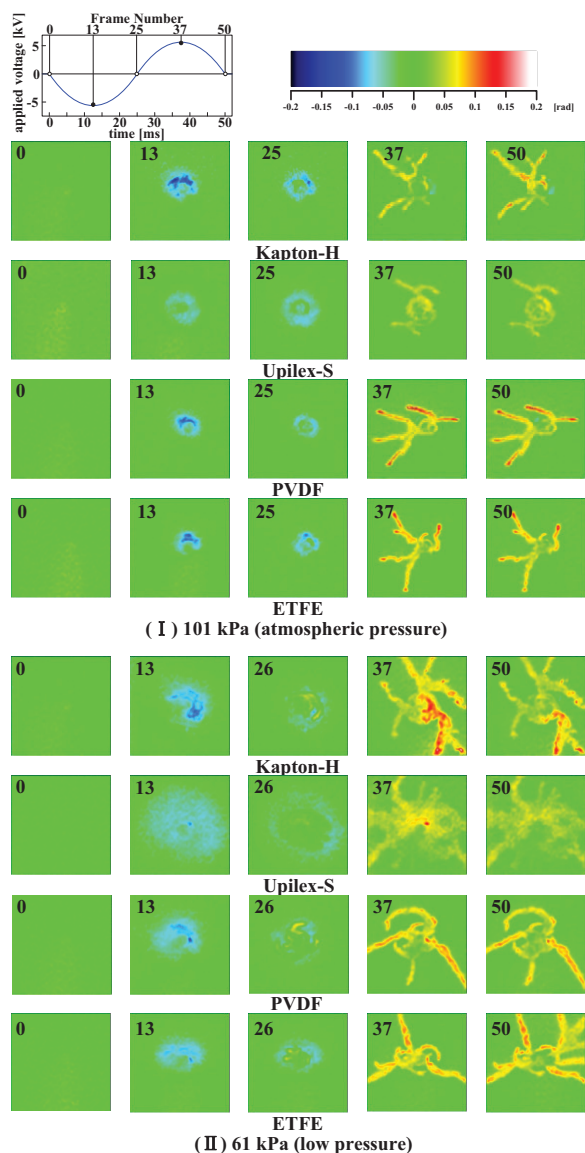


Fig. 4. Patterns of surface charge distribution.
(applied negative started sine wave)

(2) 負帯電分布領域中の正ストリーマの進展

Fig. 4(I)および(II)に示されるように、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して、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

Fig. 3, 4 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確認した。大別すると湾曲(Kapton®, Upilex®)と直進(PVDF, ETFE)の2パターンである。

また、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して、非対称に進展する。

(2) 絶縁体からの電子供給

PI 系材料上で正ストリーマが湾曲・枝分かれを起こす要因として材料からの電子の供給が関係している可能性が考えられる。材料表面から電子が供給される要因として放電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) 正ストリーマの進展形状と電子供給

絶縁体からの光電子放出に着目し、各材料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。Table 2 に計算結果である、各材料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。Table 2 から、Kapton®と Upilex®のイオン化エネルギーはそれぞれ 5.90 eV と 5.36 eV であり、PVDF と ETFE はそれぞれ 8.69 eV と 9.46 eV である。これは PI 系材料がフッ素系材料と比較して、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。よって、Kapton®,Upilex®上の正ストリーマは試料から電子が供給されるために湾曲し、PVDF,ETFE 上では電子が試料から供給されにくいため直進すると考えられる。

Table 2 Electron affinity, Ionization and Band gap energies of Various samples

Polymer	Electron affinity [eV]	Ionization energy [eV]	Band gap energy [eV]
Kapton-H	3.58	5.9	2.32
Upilex-S	3.34	5.36	2.02
PVDF	-0.53	8.69	9.22
ETFE	0.86	9.46	8.59

(4) 正ストリーマの進展形状と量子効率

密度汎関数法を用いて計算した各材料のイオン化エネルギーと光電子放出量の確認をするため、本研究室の測定装置を用いて量子効率の測定を行った。Fig. 5 は照射光の波長を変えて測定した際の各試料における量子効率である。なお、PVDF に関しては現在測定途中であるため、Kapton®, Upilex®, ETFE のみの結果を示す。

Fig. 5 に示されるように Upilex®と Kapton®の量子効率はほぼ同等の結果であるのに対し、ETFE は Upilex®と Kapton®の量子効率より低い結果となっているのが確認できる。つまり、Upilex®と Kapton®の方が ETFE より光電子放出が生

じやすく、試料からの電子が正ストリーマに供給される可能性があると考えられる。なお、本測定装置では、光源の都合上、180 nm 以下(約 7 eV 以上)の光照射による測定しかできないので、実際に放電により発生するといわれる 6.5 eV 程度の光照射による測定結果を今後取得する必要がある。

4. まとめ

本研究では、低気圧環境下での沿面放電観測が行える装置を用いて、大気圧(101 kPa)から 61 kPa の環境下で高分子

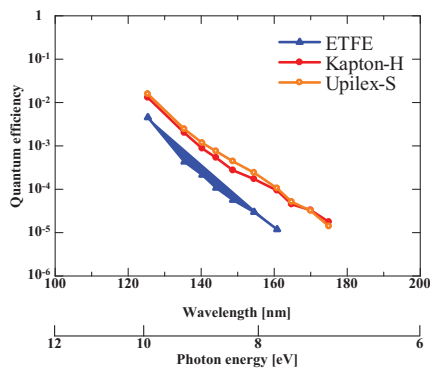


Fig. 5. Quantum efficiency of Upilex[®], Kapton[®], ETFE

材料上での交流高電圧印加にともなう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、材料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。そ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では、試料によらず湾曲・枝分かれが生じる。一方、残留正ストリーマ領域における負電荷の進展は、単なる電子の放出にともなう進展であり、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系材料のイオン化エネルギーがフッ素系材料に比べ低く、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、フッ素系材料上で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。
- (4) 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う予定である。

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: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] 八田吉典:「期待放電」, 近代科学社 (1968)
- [7] 早瀬ほか: 電学論 A, Vol.129, No.7 pp.455-462(2009)