

論 文

大気中固体誘電体上の正インパルス沿面コロナの形成

眞鍋吉秀^{*,1}, 嶋崎俊行^{*,2}

(1999年4月23日受付, 1999年7月29日受理)

Formation of Surface Corona on Dielectric Plates under Positive Impulse Voltage in Atmospheric Air

Yoshihide MANABE^{*,1} and Toshiyuki SHIMAZAKI^{*,2}

(Received April 23, 1999; Accepted July 29, 1999)

The surface corona on dielectric plates under positive impulse voltages has been observed with the Lichtenberg figure technique and a high speed gated image intensifier in atmospheric air. The dielectric plate and X ray film were inserted perpendicularly to the axis of a rod-to-plane electrode system and the formation mechanisms of the surface positive corona discharge were investigated using the acrylic plates of 1, 2, 5, 10 mm thick and a rod electrode with the tip radius of 5, 10, 20, 50 mm. And a translucent electrode was used instead of the plane electrode to observe the luminosity of the surface corona. Experiments show that the surface corona occurred just after the voltage applications forms the ring-shaped Lichtenberg figure and luminescence. Then, a large number of streamers radially develop from the ring-shaped part. The formation mechanisms of the corona are discussed on the basis of a numerical analysis of the electron avalanche developing along the electric line of force around the rod electrode. As a result, it is found that the occurrence position of surface corona agrees with the theoretically computed point of the maximum line density of positive ion.

1. はじめに

一般的に、高電圧電力機器は荷電された導体とそれを支持する固体絶縁物から構成され、空気などの気体誘電体中で使用されることが多く、それらの三者が一点で接する点、いわゆるトリプルジャンクション¹⁾が存在する。したがって、高電圧電力機器の絶縁設計に当たっては絶縁部の弱点となるトリプルジャンクションから発生する沿面コロナの形成機構を明らかにすることが必要であろう。

沿面放電現象については、古くから多くの研究がなされており、それらの調査結果がまとめられている²⁾。また、トリプルジャンクションに関する研究では、SF₆ガス中を進展する電子なだれの大きさを計算することによりフラッシュオーバ電圧を求めた報告³⁾、SF₆ガスくさびギャップにおける部分放電特性についての報告⁴⁾やトリプルジャ

ンクション部での放電特性等の影響を考慮した物理モデルを提案した報告⁵⁾などがある。しかしながら、電圧印加後最初に進展する沿面コロナの形成機構については充分に明らかにはされていないようである。

そこで著者らは、負極性インパルス電圧を印加した場合の沿面コロナの形成機構を明らかにするために、高圧側の電極として先端が半球状で種々の直径の電極を用い、固体絶縁板の厚さを種々変化したときの沿面コロナを電荷図法によって観測した。その結果、電荷図は内部にダストの付着しない円環状の図形となり、このような電荷図となる沿面コロナの形成機構について理論的な検討を行ない、沿面コロナは電子なだれの進展に伴う正イオン線密度が最大となる固体絶縁板表面上の点から電極先端とは逆方向へ進展することから、沿面コロナによって形成される電荷図は円環状になることなどについて報告した⁶⁾。

本研究では、高圧側の電極として先端が半球状で種々の直径の棒電極および種々の厚さの固体誘電体を用い、正極性インパルス電圧印加後最初に発生進展する沿面コロナをリヒテンベルグ図法により観測した。また、沿面コロナの発光の観測は、銅平板の中央部分を切り取り、そこに金を蒸着した半透明のフィルムを張り付けたものを背後電極として用い、背後電極背後から沿面コロナの進展状況を観測

キーワード：沿面放電、沿面コロナ、電子なだれ、電界計算、リヒテンベルグ図

*福岡大学工学部電気工学科 (814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Fukuoka University, 8-19-1, Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka, 814-0180 Japan

¹⁾manabe@fukuoka-u.ac.jp

²⁾simazaki@fukuoka-u.ac.jp

できるようにした電極配置で、高速ゲートイメージインテンシファイア（シャッター付きイメージインテンシファイア）によって行なった。その結果、リヒテンベルグ図および駒撮り写真は内部に発光のない円環状の発光域からストリーマが放射状に進展した図形となる事がわかった。また、電荷重畠法により電界計算を行い電子なだれが棒電極表面に達したときの正イオン線密度を求め、正極性沿面コロナの形成機構について検討を行ったので、それらの結果について詳細に述べる。

2. 実験装置および方法

図1にリヒテンベルグ図を作成したときの電極配置を示す。実験はすべて大気中にて行い、高圧側の電極は直径 D が5, 10, 20および50mmで先端が半球状の黄銅棒を、接地した背後電極は一辺が300mmで正方形の銅平板を使用した。固体誘電体は一辺が220mmの正方形で厚さ τ が1, 2, 5, 10mmのアクリル板（三菱レーヨン製、アクリライト）でデシケータ内にて15時間以上乾燥させたものを電圧印加ごとに取り替えて使用した。印加電圧は $1/40\mu s$ の正極性インパルス波形とし、リヒテンベルグ図は棒電極とアクリル板の間に幅120mm、長さ180mmのX線フィルムを置いて作成した。また、背後電極の背後から沿面コロナの進展状況が観測できるようにするために図2に示すように銅平板の中央部分を一辺が100mmの正方形

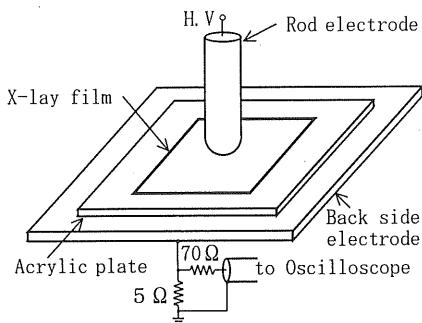


図1 電極配置

Fig. 1 Electrode arrangement.

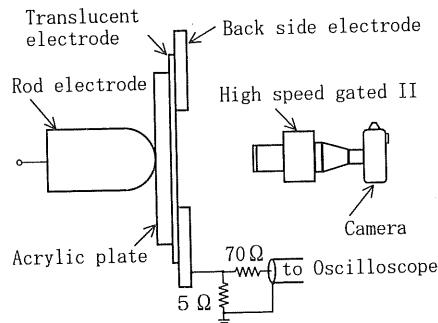


図2 実験装置

Fig. 2 Experimental apparatus.

状に切り取り、金を半透明に真空蒸着した厚さ0.1mmのプラスチックフィルムを蒸着面が銅平板側になるように張り付けたものを背後電極として用いた。この電極配置で高速ゲートイメージインテンシファイア（浜松ホトニクス社製C4273、以下高速ゲートIIと略す）を装着したカメラを用い背後電極の面に対してほぼ垂直な方向から撮影を行つた。沿面コロナ発生瞬時電圧はデジタルオシロスコープ（松下通信工業社製、VP-5741A）により測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 正極性沿面コロナの進展過程

3.1.1 沿面コロナの形状

図3は高圧側電極直径 D が50mmで、アクリル板の厚さ τ が1mmの場合のリヒテンベルグ図および電荷図と電圧電流オシログラムを示したものである。同図から、このように電極直径が大きくなると、リヒテンベルグ図は内部に発光のない円環状の部分とその円環状の部分から放射状に正ストリーマが進展した形状となることがわかる。また、電荷図も内部にダストの付着しない円環状の部分とその円環状部分から放射状に正ストリーマが進展していることがわかる。なお、同図に示した電圧値 V_c は沿面コロナ発生時の電圧で、電流パルス発生時の電圧波形から読み取ったもので電流パルスは1発のみの場合である。

図4はアクリル板の厚さ τ が1mmで、高圧側棒電極の直径 D が5, 10, 20および50mmの場合の、図5は D が50mmで τ が1, 2, 5および10mmの場合のリヒテンベルグ図を示したもので、印加電圧はほぼ沿面コロナ開始電圧である。沿面コロナの発生瞬時電圧は V_c として示している。両図から、リヒテンベルグ図は図3と同様に内部に発光のない円環状の部分とその円環状の部分から放射状に正

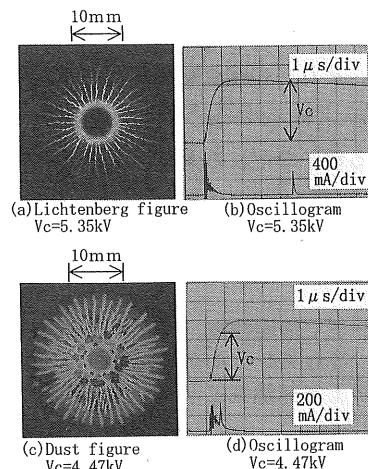


図3 リヒテンベルグ図および電荷図とオシログラム
($\tau=1\text{mm}, D=50\text{mm}$)

Fig.3 Lichtenberg and dust figure and oscillogram.

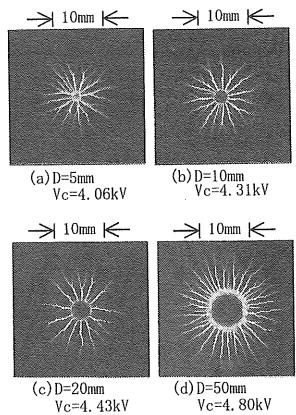


図4 リヒテンベルグ図に与える棒電極直径の影響
($\tau=1\text{mm}$)

Fig.4 Effect of rod electrode diameter Lichtenberg figure.

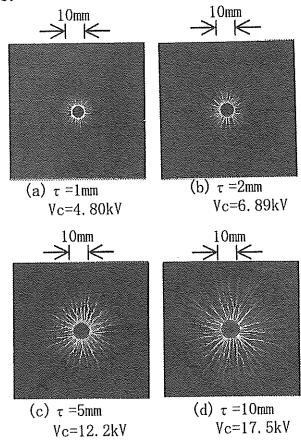


図5 リヒテンベルグ図に与える固体誘電体厚さの影響($D=50\text{mm}$)

Fig.5 Effect of solid dielectric thickness on Lichtenberg figure.

ストリーマが進展した形状となる。図4はリヒテンベルグ图形におよぼす電極直径の影響を調べたもので、電極直径 D を5, 10, 20および50mmと増加すると円環状部分の平均半径 r_R (円環状部分の内半径と外半径を加算して2で割った値)はそれぞれ0.9, 1.3, 1.9および3.6mmと大きくなることがわかる。また、図5は固体誘電体の厚さの影響を調べたもので、 τ を1, 2, 5および10mmと厚くすると、円環状部分の平均半径 r_R はそれぞれ3.6, 4.0, 4.9および5.3mmとなり、この場合も r_R は τ の増加と共に増加することがわかる。

図6は τ が1mmで D が50mmの場合におけるリヒテンベルグ图形におよぼす沿面コロナ発生電圧 V_c の影響を示したものある。同図から V_c が4.80, 5.78, 7.21および8.08kVと高くなると共にリヒテンベルグ図は大きくなり円環状部分の平均半径はそれぞれ3.6, 4.0, 4.3および4.5mmと増加することがわかる。

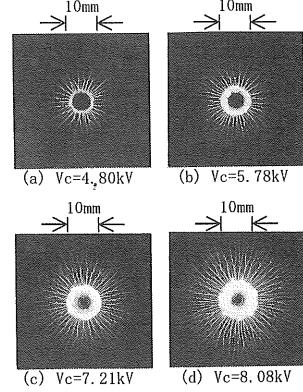


図6 リヒテンベルグ図に与えるコロナ発生電圧の影響($\tau=1\text{mm}, D=50\text{mm}$)

Fig.6 Effect of corona onset voltage on Lichtenberg figure.

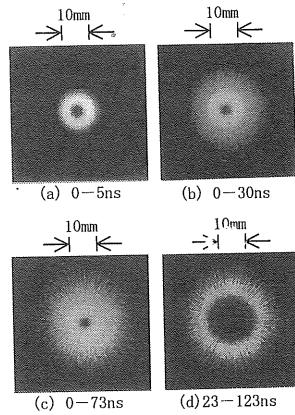


図7 沿面コロナ発光の駒撮り写真
($\tau=1\text{mm}, D=50\text{mm}$)

Fig.7 Frame photos of surface corona light emission.

3.1.2 沿面コロナの進展状況

図7は高速ゲートIIによって観測した駒撮り写真の例で τ が1mmで D が50mmの場合について示している。駒撮り撮影はゲート時間をすべて100nsとし、ゲートパルスの遅延時間を作り変化して行った。駒撮り写真に示した時間は電流パルスの立ち上がり時刻を0nsとした撮影時間を示している。電流パルスの立ち上がり開始から5ns迄の駒撮り写真{同図(a)}から、まず正グローによる円環状の発光域が形成され、30ns迄の駒撮り写真{同図(b)}ではその正グローの発光域近傍からフィラメント状の沿面正ストリーマが放射状に進展し、その後正グローはさらに発光を強め、正ストリーマはより長く進展することがわかる{同図(c)}。また、同図(e)の駒撮り写真から正グローの発光は電流パルスの発生後23ns以降は認められず、正ストリーマのみの発光となる。

3.2 正極性沿面コロナの形成機構

前節で述べたように、高圧側棒電極を大きくして沿面コロナ開始電圧程度の正インパルス電圧を印加すると、リヒ

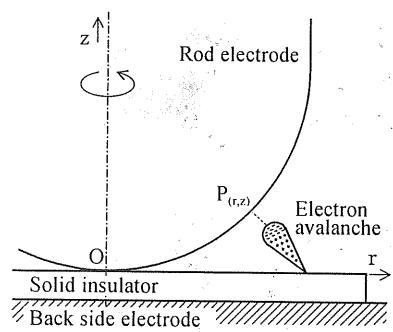
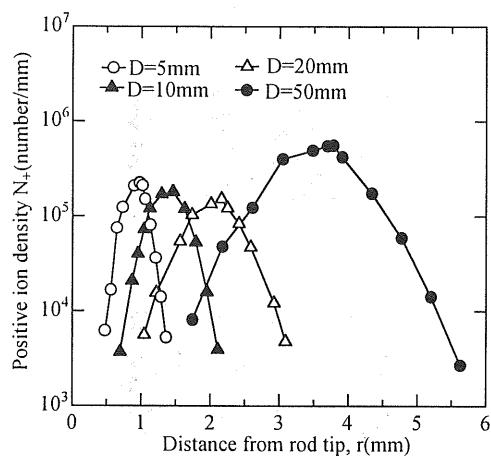


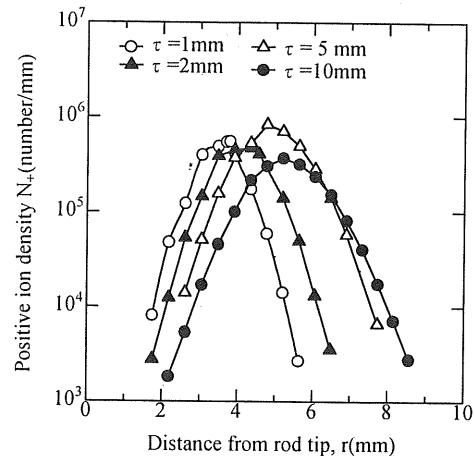
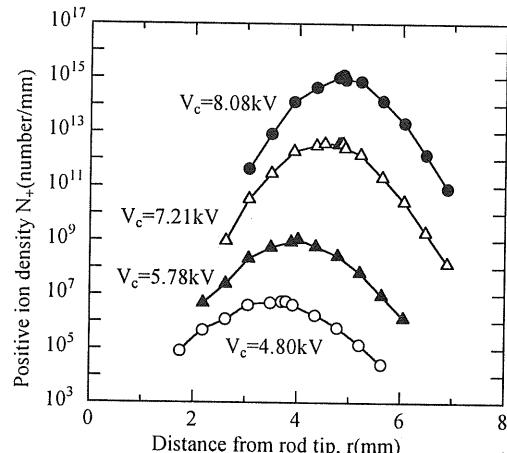
図8 電子なだれ進展の概念図

Fig.8 Conceptual figure of electron avalanche development.

図9 正イオン線密度のDによる変化($\tau=1\text{mm}$)
Fig.9 Positive ion density for various D .

テンペルグ図および沿面コロナの駒撮り写真は、いずれも内部に発光のない円環状の発光域とその円環状部分からフィラメント状の正ストリーマが放射状に多数発生する形状となり、その円環状部分の大きさは電極直径 D 、固体誘電体の厚さ τ および沿面コロナ発生電圧 V_c の増加と共に大きくなることがわかる。また、駒撮り写真の観測から沿面コロナは、まず円環状の正グローが形成されその後正ストリーマが発生進展することがわかる。すなわち、電圧印加後最初に進展する沿面コロナは棒電極先端ではなく、電極先端からやや離れた点の気中で発生し、その後、固体絶縁物表面に沿って進展するものと考えられる。本節では、正インパルス電圧印加時の沿面コロナの形成機構を明らかにするために、気中棒対平板ギャップ放電の場合と比較し、さらに電気力線に沿って進展する電子なだれ頭部の正イオン線密度等を計算により求め、理論的な検討を行う。

図8に沿面放電の場合における電子なだれ進展の概念図を示す。この電極配置で棒電極に電圧が印加され電離可能となると、棒電極先端Oは固体誘電体と接しているため、

図10 正イオン線密度の τ による変化($D=50\text{mm}$)
Fig.10 Positive ion density for various τ .図11 正イオン線密度の電圧による変化
($\tau=1\text{mm}, D=50\text{mm}$)
Fig.11 Positive ion density for various onset voltage.

電子なだれは棒電極先端からやや離れた固体誘電体上のある点から発生し、電気力線に沿って気中を電離増殖しながら進展して棒電極上の点 $P_{(r,z)}$ に到達する。すなわち、このように電極直径が大きくなると負インパルス電圧印加時の沿面放電⁶⁾と同様に最初は気中から放電が開始するものと考えられ、電子なだれの発光強度が電離数に比例するとすれば¹⁰⁾最初に発光が観測されるのは電離数が最大となる点からである。この到達点での正イオン線密度 $N_+(\ell_{rz})$ は

$$N_+(\ell_{rz}) = \alpha(\ell_{rz}) \exp \int_0^{\ell_{rz}} \{ \alpha(\ell) - \eta(\ell) \} d\ell \quad (1)$$

となる。ここで、 $\alpha(\ell)$ および $\eta(\ell)$ はそれぞれ固体誘電体表面から電気力線に沿った長さ ℓ における電子の衝突電離係数および電子の付着係数である。 α および η の値は Harrison らの実測値⁸⁾を実験式として表した式⁷⁾から計算し

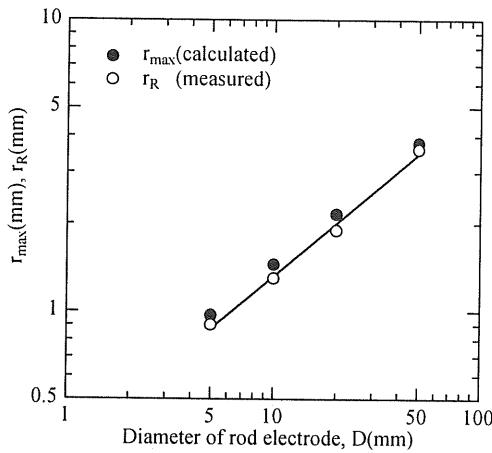


図 12 r_R と r_{\max} の比較 ($\tau = 1\text{mm}$)
Fig.12 Comparison between r_R and r_{\max} .

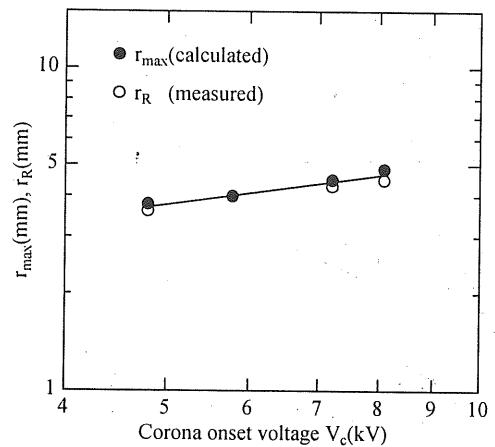


図 14 r_R と r_{\max} の比較 ($\tau = 1\text{mm}, D = 50\text{mm}$)
Fig.14 Comparison between r_R and r_{\max} .

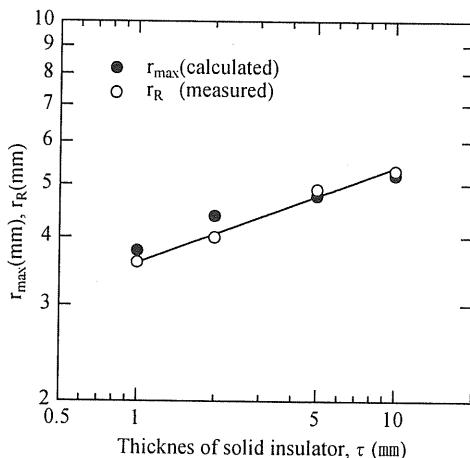


図 13 r_R と r_{\max} の比較 ($D = 50\text{mm}$)
Fig.13 Comparison between r_R and r_{\max} .

た。また、電界強度の計算は、誘電体境界面を仮想電荷の影像面とした電荷重畠法⁹⁾により行った。

図 9、図 10 および図 11 は固体誘電体表面から発生進展した電子なだれが電気力線に沿って電離増殖し、棒電極上に到達したときの正イオン線密度 $N_+(\ell rz)$ と到達点の r 座標との関係を示したものである。図 9 は棒電極電位を図 4 の実測値 V_c と同じとし、固体誘電体の厚さ τ が 1mm で棒電極直径 D が 5, 10, 20 および 50mm の場合の計算結果で、いずれの電極直径においても $N_+(\ell rz)$ の最大となる点が存在し、この点を r_{\max} とすると r_{\max} は電極直径が大きくなると共にそれぞれ 0.97, 1.45, 2.16 および 3.78mm と大きくなる事がわかる。また、 $N_+(\ell rz)$ の最大値は 1.5×10^5 から 5.6×10^5 の間であった。図 10 は棒電極直径 D が 50mm で固体誘電体の厚さ τ が 1, 2, 5 および 10mm の場合で、棒電極電位は図 5 で示した実測値 V_c と同じとして

計算を行った。この場合も $N_+(\ell rz)$ の最大となる点 r_{\max} が存在し、固体誘電体の厚さ τ が大きくなると共に r_{\max} も 3.78, 4.38, 4.77 および 5.20mm と大きくなり、 $N_+(\ell rz)$ の最大値は 3.7×10^5 から 8.4×10^5 の間となることがわかる。

図 11 は棒電極直径 D が 50mm で固体誘電体の厚さ τ が 1mm の場合で、棒電極電位は図 6 で示した実測値 V_c と同じとして計算を行った。同図から、棒電極電位が 4.80kV から 8.08kV と高くなると $N_+(\ell rz)$ の最大値は 5.5×10^6 から 1.3×10^{15} 個/mm³ と指数関数的に増加し、 $N_+(\ell rz)$ の最大となる点 r_{\max} も V_c の増加と共に 3.78, 4.00, 4.81 および 4.86mm と大きくなることがわかる。

図 12、図 13 および図 14 はリヒテンベルグ図から求めた円環状部分の平均半径 r_R と計算によって求めた正イオン線密度 $N_+(\ell rz)$ の最大となる点 r_{\max} を両対数グラフで示したものである。これらの図から τ が 1mm から 10mm, D が 5mm から 50mm までの範囲において実測で求めた r_R と計算によって求めた r_{\max} は良く一致することがわかる。また、実測で求めた r_R および計算で求めた r_{\max} と棒電極直径 D 、固体誘電体の厚さ τ および沿面コロナ発生電圧 V_c とのそれぞれの関係はほぼ直線で表すことができる。

以上述べたように、高圧側棒電極直径を大きくすると、最初に発光が観測されるのは棒電極先端ではなく棒電極先端からやや離れた点となり、その形状は内部に発光の無い円環状となる。この円環状の発光域の平均半径は電極直径、固体誘電体の厚さおよび沿面コロナの発生電圧が大きくなると共に大きくなり、計算によって求めた正イオン線密度の最大となる点と良く一致する。また、気中棒対平板ギャップにおける正極性インパルスコロナの形成過程では、棒電極にインパルス電圧が印加されると、まず陽極表面先端部分に密集した短い細条からなる弱い発光域が形成され、

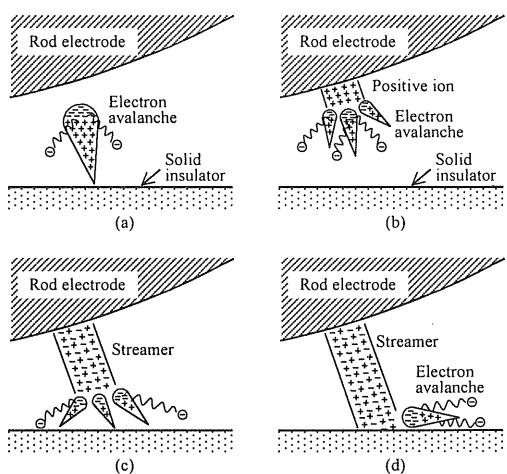


図 15 沿面コロナの進展モデル図

Fig.15 Development model of surface corona.

比較的低い速度でギャップ中に広がり、ある程度広がったころ、その先端部分から発光の強い陰極向けストリーマーが進展する事が観測⁷⁾されている。したがって、正インパルス電圧印加時の沿面コロナの形成機構は次のようになるものと考えられる。図 15 は沿面コロナ進展のモデル図を示したものである。同図は棒電極先端部分を拡大したもので、沿面放電の場合も棒電極にインパルス電圧が印加され電離可能な高電界に達すると、固体誘電体近傍の偶存電子が電気力線に沿って加速され電子なだれが発生進展するものと考えられる(同図(a))。その後棒電極に電子なだれが到達すると電子は棒電極内に流入し、残された正イオンの空間電荷電界とインパルス電圧による印加電界によって電界強度はさらに高められる。そのため、3.1.2 節で述べたように電圧印加後最初に円環状の発光域が観測される事から、電子なだれが正イオンに向かって発生進展し(同図(b))、さらに固体誘電体に向かってストリーマーが進展する(同図(c))ようになるものと考えられる。和田氏ら¹⁰⁾によるとストリーマーの電位傾度は 4.5kV/cm で、本研究での電子なだれの進展距離が $\tau = 1\text{mm}$, $D = 5\text{mm}$ で 0.2mm, $\tau = 10\text{mm}$, $D = 50\text{mm}$ で 0.55mm である事から、ストリーマーが固体誘電体表面に達したときのストリーマー先端の電位はそれぞれ 4.0 および 17.3kV となり、ストリーマー先端の電界強度は極めて高くなるものと考えられる。また、放電進展に伴う発光には 200nm までの紫外線が含まれ¹²⁾ており、それらの紫外線によって絶縁物から放出される光電子は十分電子なだれを引き起こす量がある事が報告されている¹³⁾。この光電子はストリーマーが固体誘電体に達した点、すなわちストリーマー到達点の内側(棒電極先端とストリーマー到達点の間)および外側のいずれにも発生すると考えられる(同図(c))が、ストリーマーは棒電極と同極性のため、内側の電界

強度は弱められ、ストリーマー到達点の内側においては電子なだれおよびストリーマーの発生進展は無いものと考えられる。一方、ストリーマー到達点の外側では、上述のように高電界となり、この高電界域に放出された光電子は電界によって加速されて電子なだれが発生し棒電極先端に向かって進展する(同図(d))。この電子なだれがストリーマーに到達すると電子なだれ頭部の電子はストリーマーに流入し、後に残った正電荷による空間電荷電界と印加電界とが重畠されより高い電界強度となる。この高電界により新たな電子なだれが発生進展し、その後沿面正ストリーマーとなってストリーマー到達点から外方向に進展するものと考えられる。

以上の事を負極性沿面コロナの場合⁶⁾と比較すると、負極性沿面コロナは電子なだれの進展に伴う正イオン線密度が最大となる固体絶縁板上の点から電極先端とは逆方向へ進展し、その結果電荷図は円環状になる。これを正極性の場合に当てはめると、ストリーマー到達点の外側の絶縁物表面に発生した電子なだれは上述のようにストリーマー到達点へ向かって進展する。言い換えると、負極性沿面コロナの場合から予測されるように、電子なだれは棒電極先端方向へ進展する。しかしながら、電子なだれがストリーマーに到達すると電子なだれ頭部の電子はストリーマーに流入するので、それ以上棒電極先端方向へ進展せず、ストリーマー到達点より内側部分での発光域は観測されないものと考えられる。

すなわち、図 3 から図 7 までに示したリヒテンベルグ図、電荷図および沿面コロナの駒撮り写真に見られる円環状の部分は最初に進展する電子なだれおよび棒電極表面から絶縁物に向かって気中を進展するストリーマーによる発光によるものであり、円環状部分から放射状に進展したフィラメント状の部分はストリーマーが絶縁物表面に達した後、その表面に沿って外方向に進展した沿面正ストリーマーによるものと考えられる。したがって、これらの観測図形は円環状部分とその円環状部分からフィラメント状のストリーマーが放射状に進展した図形になるものと考えられる。

4. まとめ

高圧側の電極直径を 5mm から 50mm まで、固体絶縁板の厚さ τ を 1 mm から 10mm まで変化し、沿面コロナが発生する程度の正インパルス電圧を印加し、その時の沿面コロナをリヒテンベルグ図、電荷図および高速ゲート I-I を装着したカメラで観測し、沿面コロナの進展過程を理論的に考察して、その形成機構を明らかにした。それらの結果をまとめるとつぎのようになる。

(1) 電流パルスが 1 発のみの沿面コロナの場合、リヒテンベルグ図および電荷図は円環状の部分とその円環状部分から放射状に正ストリーマーが進展した図形となる。

(2) リヒテンベルグ図の円環状部分は高圧側棒電極の直径、固体誘電体の厚さおよび沿面コロナ発生電圧の増加と共に増加する。

(3) 高速ゲートIIによる駒撮り写真的観測結果から、沿面コロナはまず円環状のグロー域が現れ、その後円環状部分から正ストリーマが放射状に進展する。

(4) リヒテンベルグ図から求めた円環状部分の平均半径と計算によって求めた正イオン線密度の最大となる点を比較すると、両者は良く一致する。

(5) 正極性沿面コロナは、電子なだれによる正イオン線密度の最大となる棒電極近傍の点からストリーマが進展し、固体絶縁物に到達する。その到達点から固体絶縁物に沿って沿面ストリーマが進展したものと考えられる。

本研究では、電圧印加後最初に進展する沿面コロナの形成機構について明らかにしたものであるが、今後はさらに高い電圧が印加された場合の絶縁破壊に至るまでの機構について解明する予定である。なお、電界計算等の数値計算は本学電子計算センターのNEC SX-3/11Rを使用した。

最後に、本研究の遂行に協力いただいた大学院生、幸野秀男氏（現在 前田建設）ならびに卒論研究生の方々に感謝する。なお、本研究の一部は本学総合研究所の専門委員会費の援助を受けたものであることを付記する。

参考文献

- 1) T.Takuma:IEEE Trans. on Elec. Insu. **26**(1991) 500
- 2) 河野照哉：電気学会技術報告(II部)，第184号(1985)
- 3) 遠藤奎将：電気学会論文誌A, **105**(1975) 589
- 4) 乾昭文、寺西常治、大久保仁、柳父悟：電気学会論文誌A, **110-A**(1990) 126
- 5) 羽馬洋之、井波潔、藤井治久、大石貴之、吉村学、仲西幸一郎：電気学会論文誌A, **114-A**(1994) 397
- 6) 真鍋吉秀、嶋崎俊行、常安暢、原雅則：電気学会論文誌A, **114-A**(1994) 710
- 7) 常安暢、赤崎正則：静電気学会誌, **3**(1979) 307
- 8) M.A.Harrison and R.Geballe:Phys.Rev., **91**(1953) 1
- 9) 真鍋吉秀、吉國宣幸、嶋崎俊行、常安暢：第38回電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, p.480, 電気関係学会九州支部連合会(1985)
- 10) 細川辰三、近藤芳孝、三好保憲：電気学会雑誌, **90**(1970) 1123
- 11) 和田敏、堀井憲爾：電気学会論文誌B, **92**(1972) 631
- 12) M.C.Bordage and G.Hartmann:J.Appl.Phys.**53**(1982)8568
- 13) 湯本雅恵、堺孝夫：電気学会論文誌A, **109-A**(1989) 1