

## 論 文

## 大気中固体絶縁体上の負インパルス沿面コロナの進展機構

眞鍋吉秀\*,1, 嶋崎俊行\*

(1997年6月18日受理)

Development Mechanisms of Negative Impulse Surface Corona  
on Solid Insulator in Atmospheric Air

Yoshihide MANABE\*,1 and Toshiyuki SHIMAZAKI\*

(Received June 18, 1997)

The surface corona on dielectric plates under negative impulse voltages has been observed with a high speed gated image intensifier and the dust figure technique in atmospheric air. The dielectric plate was inserted perpendicularly to the axis of a rod-to-plane electrode system and the Development mechanisms of the surface negative corona discharge were investigated using the acrylic plates of 1, 2, 5 mm thick and a rod electrode with the tip radius of 30, 50, 125 mm. Experiments show that the first corona and the second corona occurred just after the voltage application from the double ring-shaped luminescence and the dust figure on the dielectric surface. The formation mechanisms of the second corona are discussed on the basis of a numerical analysis for the electron avalanche developed along the electric line of force around the rod electrode, in consideration of the effect of the residual electric charges by the first negative surface corona. As a result, it is found that the occurrence position of second surface corona agrees with the theoretically computed maximum point of the number of electron or the line density of positive ion.

## 1. まえがき

コロナの形成機構については、SF<sub>6</sub>ガス絶縁機器などの高電圧電力機器の絶縁設計に対する工学的応用面だけでなく、物理学的な面からもきわめて興味のあるところである。そのため、気中棒対平板ギャップにおけるコロナ形成機構については、発生進展特性やその形成機構などが詳細に明らかにされ、さらに種々の理論的検討がなされてきた<sup>1-3)</sup>。しかし、異種の誘電体の境界面に生じる沿面コロナについては、一般的にその発生が高圧側電極と絶縁物の狭い部分に生じるため、その光学的観測はきわめて困難である。そのため沿面放電に関する研究は、古くから多くの研究者によって行われてきたにもかかわらず<sup>4)</sup>、沿面コロナの観測および形成機構の解明については、未だ十分にはなされていないようである。

そこで著者らは、高圧側の電極として種々の直径の先端が半球状の電極を用い、固体絶縁板の厚さを種々変化した

ときの電圧印加後最初に発生進展する負インパルス沿面コロナ、すなわち第1沿面コロナを電荷図法によって観測し、電荷図は内部にダストの付着しない円環状の図形となることを報告した。更に、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い、第1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、主として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明らかにした<sup>5)</sup>。しかし、上述の第1沿面コロナの進展過程については、沿面コロナの発光は高圧側の電極の影になるため観測が難しく、主として気中棒対平板におけるインパルスコロナの観測結果<sup>6)</sup>から推定したものであった。また、第1沿面コロナの発生進展後、端子電圧の上昇により新たな沿面コロナ、すなわち第2沿面コロナが第1沿面コロナの外側に形成されるが、このような端子電圧の上昇による新たな沿面コロナの発生、進展についてはほとんど明らかにされていない。

本研究では、背後電極として金を蒸着した半透明のフィルムを用い、背後電極背後から沿面コロナの進展状況を観測できるようにした電極配置で、負極性インパルス電圧印加時の電荷図、および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）による沿面コロナの観測を行った。また、第2沿面コロナの形

キーワード：沿面放電、沿面コロナ、電子なだれ、電界計算

\* 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

<sup>1</sup> manabe@tsat.fukuoka-u.ac.jp

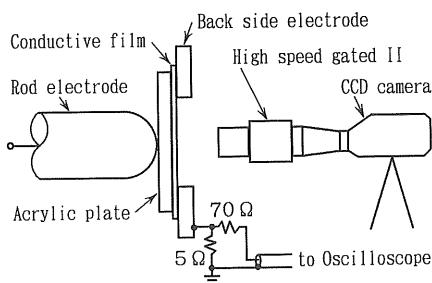


図 1 実験装置  
Fig. 1 Experimental apparatus.

成機構などを検討するために、第1沿面コロナによる固体絶縁板上の残留電荷量を第1沿面コロナの放電電荷量と等しい電荷量のリング電荷によって代用して電界計算を行い、電子なだれが固体絶縁板上に達したときの電子数あるいは正イオン線密度などを求めた。その結果、第2沿面コロナは、先行する第1沿面コロナの進展に伴う固体誘電体板上の残留電荷のため、その付近の電界が緩和され、第1沿面コロナの外側に進展し、しかも第1沿面コロナの場合と同様に、電子数あるいは正イオン線密度が最大になる点から第2沿面コロナは発生することが明らかになった。ここではこの場合観測される二重の円環状となる電荷図の形成機構および沿面コロナの進展状況について詳細に述べる。

## 2. 実験装置および方法

図1に電極配置を示す。実験はすべて大気中にて行い、高圧側の電極としては直径  $D$  が 30, 50 および 125 mm で先端が半球状の黄銅棒を、接地した背後電極としては背後電極背後から沿面コロナの進展状況を観測できるようにするため、一辺が 300 mm で正方形形状の銅平板の中央部分を 100 mm 四方切り取り、金を半透明に真空蒸着した厚さ 0.1 mm 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使用した。固体絶縁板としては厚さ  $\tau$  が 1, 2 および 5 mm、一辺が 220 mm のアクリル板（三菱レーヨン製、アクリライト）を使用した。なお、アクリル板はデシケータ内にて 15 時間以上乾燥させたものを用い、電圧印加ごとに取り替え、またコロナの発生のばらつきを少なくするために高圧側電極を紫外線によって照射した。印加電圧は  $1/40 \mu\text{s}$  の負極性インパルス波形とし、沿面コロナの進展状況を高速ゲートイメージインテンシファイア（浜松ホトニクス製 C4273、以下高速ゲート II と省略する）を装着した CCD カメラ（HADLAND PHOTONICS 社製、 $1,134 \times 486$  画素）を用い、背後電極の面に対してほぼ垂直になるように配置して撮影し、電圧印加後アクリル板を取り出して電荷図を作成した。電荷図は CCD カメラにより画像処理装置（HADLAND PHOTONICS 社

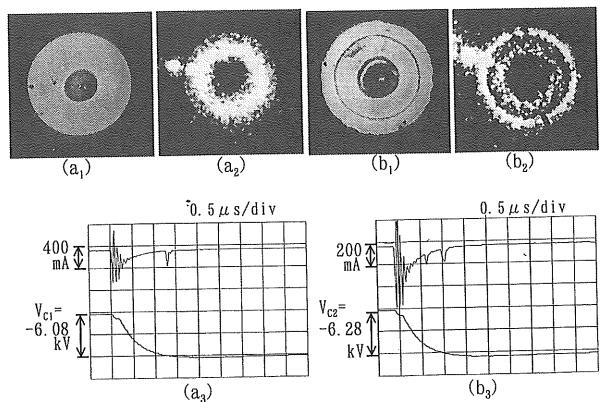


図 2 沿面コロナの形状とオシログラム  
Fig. 2 Shape of surface corona and oscilloscopes.

製、SV 553 DR）に取り込み、濃度分布などを測定した。なお、電荷図作成の際は粉末が一様に散布されるよう注意した。沿面コロナ発生瞬時電圧および固体絶縁板上の放電電荷量の測定はデジタルオシロスコープ（松下通信工業製、VP-5741A）を使用した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 沿面コロナの進展過程

#### 3.1.1 沿面コロナの形状

図2は高圧側電極直径  $D$  が 125 mm で、アクリル板の厚さ  $\tau$  が 1 mm（固有容量  $C_0$  が  $26 \text{ nF/m}^2$ ）の場合の電荷図（同図 (a<sub>1</sub>), (b<sub>1</sub>)}, 高速ゲート II による駒撮り写真（同図 (a<sub>2</sub>), (b<sub>2</sub>)} および電圧電流オシログラム（同図 (a<sub>3</sub>), (b<sub>3</sub>)} を示したものである。なお、高速ゲート II による駒撮りのゲート時間は、第1および第2沿面コロナの進展開始から終了までが十分撮影できるように電圧印加後  $0.5 \mu\text{s}$  から  $4 \mu\text{s}$  までの  $3.5 \mu\text{s}$  としている。同図 (a<sub>1</sub>)～(a<sub>3</sub>) は第1沿面コロナのみが進展した場合で、すでに報告<sup>5)</sup>したように、電荷図は内部にダストの付着しない円環状の形状となり（同図 (a<sub>1</sub>)》，電流波形は印加電圧がほぼ波高値に達した頃（電圧印加後約  $1.3 \mu\text{s}$ ）ただ1個のパルスが発生することがわかる（同図 (a<sub>3</sub>)）。沿面コロナの駒撮り写真（同図 (a<sub>2</sub>)} から、発光域は電極先端には全く認められず電極先端からやや横方向にずれた位置にあり、電荷図とほぼ同様に円環状となることがわかる。同図 (b<sub>1</sub>)～(b<sub>3</sub>) はさらに印加電圧が高くなつて第1および第2沿面コロナが発生進展した場合で、電荷図は内部にダストの付着しない境界の明瞭な二重の円環状の形状となり（同図 (b<sub>1</sub>)），駒撮り写真からは境界がやや不明瞭ではあるが、ほぼ電荷図と同様な二重の円環状の発光域が認められる（同図 (b<sub>2</sub>)）。電流波形では印加電圧波頭（電圧印加後約  $0.7 \mu\text{s}$ ）で最初の電流パルスの発生が認められ、その後端子電圧がほぼ波高値に達した頃（電圧印加後約  $1.2 \mu\text{s}$ ）に2発目の電流パルスが発生するこ

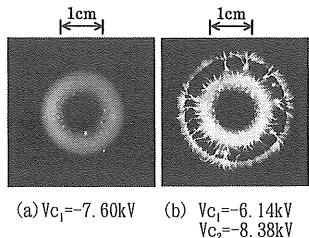


図 3 リヒテンベルグ図  
Fig. 3 Lichtenberg figures.

とがわかる{同図(b<sub>3</sub>)}。電荷図と駒撮り写真的発光図形のそれぞれの平均半径(内半径と外半径の和を2で割った値)を比較すると、発光図形の方が電荷図よりもやや小さいが、これは後で述べるようにリヒテンベルグ図形の外側部分の発光が弱いためと考えられる。なお、同図(a<sub>2</sub>), (b<sub>2</sub>)の駒撮り写真において円環状の発光域の外側左上に認められる発光は紫外線照射によるものであり、同図(a<sub>3</sub>), (b<sub>3</sub>)中に示している $V_{c_1}$ および $V_{c_2}$ はそれぞれ第1および第2沿面コロナの発生瞬時電圧を示したもので、電流パルス発生時の電圧波形から読み取ったものである。

図3はアクリル板の厚さ $\tau$ が1 mmの上に幅120 mm、長さ180 mm、厚さ0.2 mmのX線フィルムを置いて作成したリヒテンベルグ図を示したもので、電極直径 $D$ が125 mmの場合である。同図(a)は電流パルスが1個の場合、すなわち第1沿面コロナのみが発生した場合で、同図(b)は電流パルスが2個の場合、すなわち第1および第2沿面コロナが発生した場合である。同図(b)から第1沿面コロナの外側に円環状の第2沿面コロナが発生し、二重の円環状の図形となるが、それぞれの円環状の外側部分の発光は内側部分と比較するとやや弱いことがわかる。なお、同図(b)の円環状の図形の中に認められるフィラメント状の発光図形はバックディスチャージによるものである。

### 3.1.2 沿面コロナの進展状況

図4は高速ゲートIIによる駒撮り写真およびゲートパルスと電圧電流波形の時間的な関係を、ゲートパルスの番号と駒撮り写真的番号を対応させて示したもので、同図(1)～(3)は第1沿面コロナの、同図(4), (5)は第2沿面コロナの場合である。なお、駒撮り写真は一度の電圧印加で1駒の写真となるので電圧波高値を一定としてゲートパルスの遅延時間を種々変化させ、ゲート時間はすべて100 nsとして撮影を行った。この場合、まず電圧波頭で第1沿面コロナが発生進展し、円環状のやや弱い発光域が観測され{同図(1)}、その後発光は強くなつて発光域の幅も広がり{同図(2)}、円環状の発光域はその外側部分を残して衰退し{同図(3)}、やがて発光は認められなくなる。その後端子電圧が更に上昇しほぼ波高値に達すると、第2沿面コ

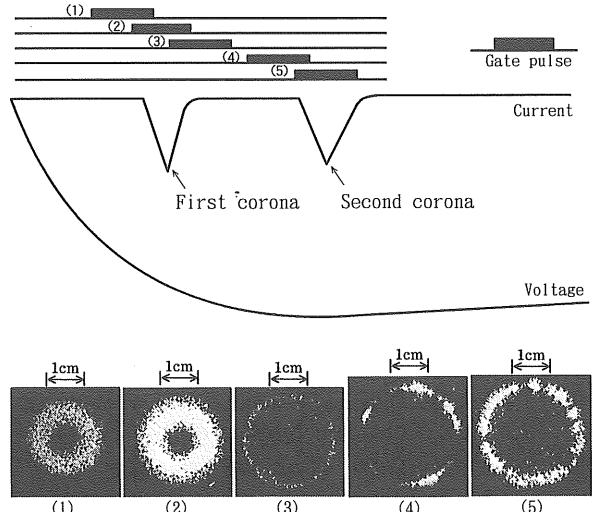


図 4 駒撮り写真とゲートパルス時間  
Fig. 4 Frame photos and gate pulse time.

ロナが進展するが、この場合、先行の第1沿面コロナの発光域の外側にほぼ円状に数箇所強い発光域が現れ{同図(4)}、その後円環状の発光域が認められるようになる{同図(5)}。

以上のことから、第1沿面コロナが発生する電圧より更に印加電圧が上昇すると、第1沿面コロナは電圧波頭で発生進展し、その進展に伴つて発生した負の残留電荷は固体絶縁板上に円環状に蓄積され、その近傍の電界強度を緩和する。しかしその後の端子電圧の上昇によって電界強度が増加し、その残留電荷の外側に第2沿面コロナが発生進展するため、電荷図および駒撮り写真による発光図形は、二重の円環状になるものと考えられる。そこで、この第2沿面コロナの発生進展機構を明らかにするために、先行する第1沿面コロナによる残留電荷を考慮して電界計算を行い、第1沿面コロナの場合<sup>5)</sup>と同様に、正イオン線密度などを求め、電荷図および駒撮り写真による観測結果と比較検討して述べる。

### 3.2 沿面コロナの形成機構

高圧側電極直径が大きい場合の第1沿面コロナの形成機構については、最初に電極と固体絶縁板の間の気中において沿面コロナが進展するため、気中棒対平板ギャップにおける負インパルスコロナの形成機構<sup>6,7)</sup>と対応させて検討を行つた<sup>5)</sup>。その結果、沿面放電の場合は電極先端中心部が固体絶縁板と接しているため、電極中心からやや横方向へ離れた点から放電が始まり、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、この図形の大きさは電極直径および固体絶縁板の厚さが大きくなるとともに増加する。この内径と外径の平均半径、すなわち最初に放電が始まると思われる点が電離に関する輸送係数を使って理論的に求

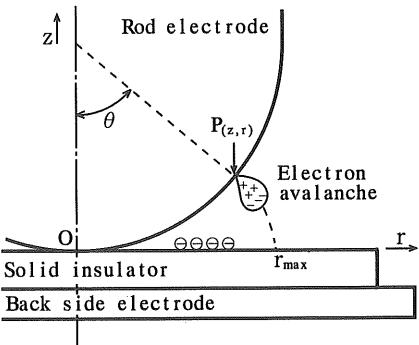


図 5 沿面コロナ進展の概念図

Fig. 5 Conceptual figure of surface corona development.

められることを明らかにした。ここでは、第1沿面コロナに続いて発生進展する第2沿面コロナの形成機構について検討を行う。

図5に第2沿面コロナ進展の概念図を示す。同図において、電極先端と固体絶縁板の接する点をO、電極上の点P(z, r)の位置を示す角度をθ、第1沿面コロナの進展に伴う残留電荷を $\ominus$ で示す。この残留電荷は電極と同極性<sup>5)</sup>のため、この間の電界は弱められるが、印加電圧の上昇によって電界強度が増加し、その後電離可能となる電極上の点は残留電荷の影響の少ない外側の点になるものと考えられる。いま、第1沿面コロナの発生進展後端子電圧が更に上昇し、電離増殖に十分な電界強度に達したとすると、電極表面上の点P(z, r)を出発した電子なだれが電気力線に沿って電離増殖し、 $l_{zr}$ の距離進んだときの電子なだれ頭部の電子数 $n_e(l_{zr})$ は

$$n_e(l_{zr}) = \exp \int_0^{l_{zr}} \{ \alpha(l) - \eta(l) \} dl \quad (\text{number}) \quad (1)$$

となる。ここで、 $\alpha(l)$ および $\eta(l)$ はそれぞれ電極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。この電子なだれが、更に単位長さ進展する間に発生する正イオンの数、すなわち正イオン線密度 $N_+(l_{zr})$ は

$$N_+(l_{zr}) = \alpha(l_{zr}) \exp \int_0^{l_{zr}} \{ \alpha(l) - \eta(l) \} dl \quad (\text{number/mm}) \quad (2)$$

となる。ところで、第1沿面コロナの開始点は $N_+(l_{zr})$ の最大となる点である<sup>5)</sup>。すなわち、電子なだれに伴う発光が主として電子の衝突励起によるものとし、ある区間内の衝突励起数が同じ区間内の衝突電離数、したがって、正イオンの発生数が多いほど多くなるものとすると<sup>1)</sup>、電子なだれの進展に伴う発光は、 $N_+(l_{zr})$ の値が大きい区域ほど強いことになる。そのため、最初に観測可能となる発光域は、

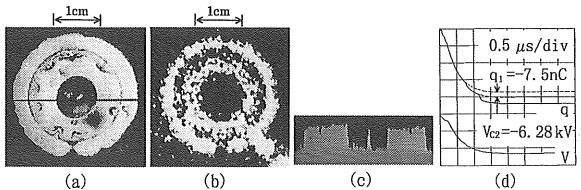


図 6 電荷図濃度および放電電荷量

Fig. 6 Density of dust figure and charge quantity of discharge.

$N_+(l_{zr})$ が最大となる点を中心として形成されることになる。そこで、第2沿面コロナの場合も、実測によって残留電荷の位置、分布および電荷量を測定し、空間電荷のある場合の電界計算<sup>8)</sup>を行うことによって残留電荷を考慮し、 $N_+(l_{zr})$ の値が最大となる点 $r_{max}$ を求めることがければ、第2沿面コロナの開始点が推定できるものと考えられる。

図6は第1および第2沿面コロナが発生進展した場合の電荷図(同図(a)), コロナの駒撮り写真(同図(b)), 電荷図の直径上(電荷図中の黒線で示す)の濃度分布(同図(c))および電荷量電圧オシログラム(同図(d))を示したものである。同図(a)の第1沿面コロナによる円環状图形の内半径 $r_i$ および外半径 $r_o$ を求めるとき、それぞれ4.2 mmおよび9.5 mmとなり、第1沿面コロナによる残留電荷はこの範囲に分布していることがわかる。残留電荷の分布状態は表面電位計によって測定を試みたが、分解能が十分ではなく、本研究においては、粉末は電荷量の多い部分ほどより多く、同量の部分は同じ量付着するものと仮定して電荷図の濃度分布を測定した。同図(c)はその結果で、第1および第2沿面コロナともに粉末の分布状態はほぼ一様であることから、残留電荷は一様に分布しているものと推定した。同図(d)は背後電極に接続した5Ωの抵抗によって測定した電流波形をデジタルオシロスコープに記憶し、その積分機能を用いて電荷量に変換し電荷量波形と電圧波形を示したもので、電荷量が急に増加している部分が沿面コロナの放電電荷によるものである。この電荷量の波形には電極系に流れる充電電流も含まれているため、沿面コロナが発生しなかった場合の充電電流を差し引いて、第1沿面コロナによる放電電荷量 $q_1$ を求めるところ $-7.5\text{ nC}$ となった。しかし、この $q_1$ は本研究の電極配置のように部分放電が発生する場合は見掛けの放電電荷と称され、固体絶縁板上の残留電荷量(真の放電電荷量)を正確に表すものではないといわれているが<sup>9)</sup>、ここでは放電電荷量を残留電荷として検討する。次に、図6(a)および(b)の第2沿面コロナによる発光強度が最大となる半径 $r_R$ は、10.1 mmとなつた。表1は以上の測定を電極直径 $D$ および固体絶縁板の厚さ $\tau$ を変化して行った結果をまとめたもので、 $D$ および $\tau$

表 1 沿面コロナの実測値

Table 1 Measured values of surface corona.

$D$ (mm)	$\tau$ (mm)	$r_i$ (mm)	$r_o$ (mm)	$q_i$ (nC)	$V_{C2}$ (kV)	$r_R$ (mm)
30	1	1.6	4.4	2.50	5.67	4.8
50	1	2.3	5.8	4.38	5.97	6.4
125	1	4.2	9.5	7.50	6.28	10.1
125	2	5.5	9.3	25.0	8.77	11.1
125	5	5.3	13.0	18.8	15.47	15.1

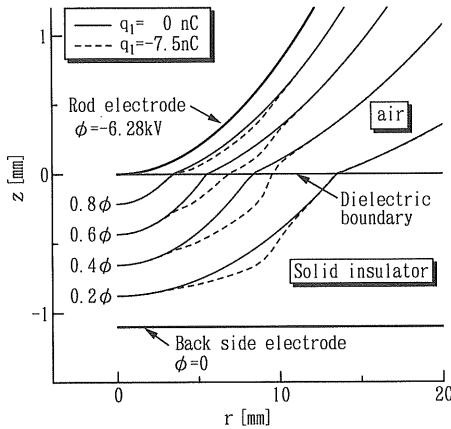


図 7 電位分布

Fig. 7 Distribution of potential.

が増加するとともに  $r_R$  は大きくなることがわかる。なお、 $V_{C2}$  は第 2 沿面コロナ発生電圧、 $r_i$  および  $r_o$  は第 1 沿面コロナによる円環状图形の内半径および外半径である。

静電界の計算は、誘電体境界面を仮想電荷の影像面とした電荷重畠法<sup>10)</sup>にて行い、第 1 沿面コロナによる残留電荷  $q_i$  は、内半径  $r_i$ 、外半径  $r_o$  の間に等間隔に配置した 40 個のリング電荷によって代用した。また、 $\alpha$  および  $\eta$  は Harrison ら<sup>11)</sup>の測定値を次の近似式で計算した。

$$\alpha = p [4.1846 \exp\{-17l p/E(l)\} + 4.35 \times 10^{-4}] \quad (m^{-1}) \quad (3)$$

$$\eta = p [6.6 \times 10^{-3} \{1.3332 E(l)/p - 31\}^2 + 3.45] \times 10^{-3} \quad (m^{-1}) \quad (4)$$

ここで、 $E(l)$  は電極表面から電気力線に沿った長さ  $l$  における電界強度 [V/m] で、 $p$  は 101.3 kPa として計算した。なお、電位の最大誤差は電極電位の 0.67% であった。

### 3.2.1 電位分布と電界分布

図 7 および図 8 は電極直径  $D$  を 125 mm、固体絶縁板の厚さ  $\tau$  を 1 mm、電極の電位  $\phi$  を図 6 の第 2 沿面コロナが発生した電圧  $V_{C2}$  と同じ  $-6.28$  kV とした場合の電極先端付近の電位分布および電極上の電界強度を、残留電荷のある場合（図中破線で示す）とない場合（図中実線で示す）について示したものである。なお、図 8 の電極上の位置は電極先端との角度  $\theta$ （電極先端で  $\theta=0$ ）で表している。

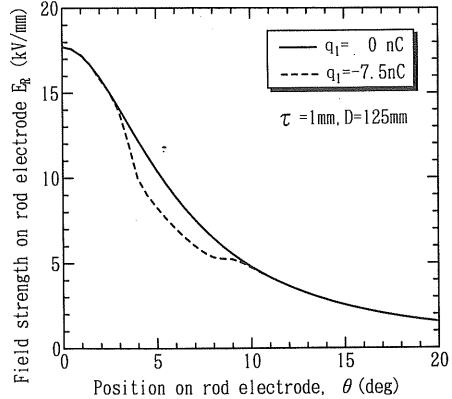


図 8 電極上の電界分布

Fig. 8 Distribution of electric field on rod electrode.

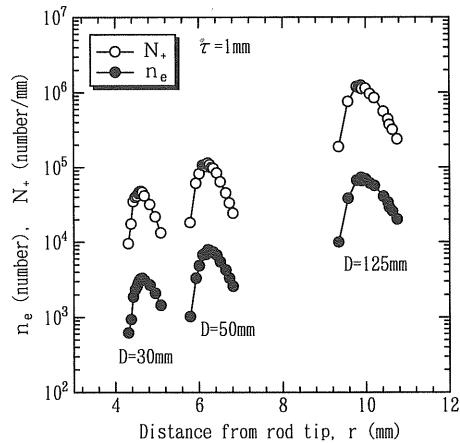
図 9 固体誘電体板上の  $n_e$  および  $N_+$  ( $\tau=1$  mm)  
Fig. 9  $n_e$  and  $N_+$  on solid dielectric plate ( $\tau=1$  mm).

図 7 の電位分布は等電位線の様子を  $0.2\phi$  ごとに示しており、わかりやすいように、 $z$  方向の寸法は  $r$  方向の寸法に比べて約 10 倍に拡大して表示している。同図から、残留電荷のある場合は  $r$  座標で 4~10 mm 付近の電極と誘電体境界面の間は、残留電荷の影響を大きく受けて等電位線の間隔が広がり、電界強度が低下するが、それ以外の  $r$  の範囲では残留電荷の影響はきわめて少ないことがわかる。

図 8 から、残留電荷のない場合、電極表面での電界強度  $E_R$  は  $17.7$  kV/mm となり、先端から離れるとともに電界強度は単調に減少し、 $\theta$  が  $10$  deg で  $4.8$  kV/mm まで低下する。しかし、残留電荷がある場合は  $\theta$  が  $3$ ~ $8.5$  deg の間で残留電荷の影響を受け、残留電荷のない場合に比べて最大約 25% 低下することがわかる。したがって、印加電圧が 10% 減少すると正イオン線密度は約  $1/10$  に減少する<sup>5)</sup> ことから考えると、電界強度の 25% の低下は、第 2 沿面コロナの進展に著しい影響を与え、第 1 沿面コロナが発生進展した後端子電圧が多少増加しても、残留電荷の影響のある電極上から第 2 沿面コロナは進展できず、影響の少ない点

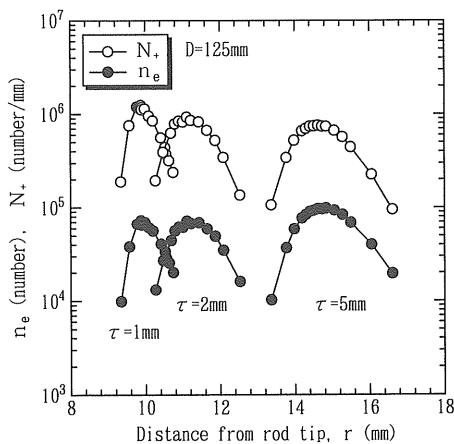


図 10 固体誘電体板上の  $n_e$  および  $N_+$  ( $D=125$  mm)  
Fig. 10  $n_e$  and  $N_+$  on solid dielectric plate ( $D=125$  mm).

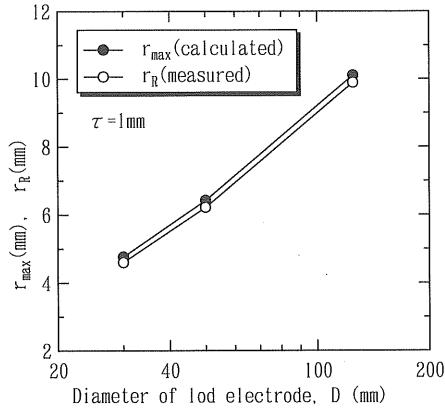


図 11  $r_{\max}$  と  $r_R$  の比較 ( $\tau=1$  mm)  
Fig. 11 Comparison between  $r_{\max}$  and  $r_R$  ( $\tau=1$  mm).

から進展するものと予想される。

### 3.2.2 第2沿面コロナの形成機構

図9および図10は残留電荷  $q_1$  を考慮して電界計算を行い、電極表面から出発した電子なだれが電離増殖し、 $l_{zr}$  の距離進んで固体絶縁板上の点  $r$  に達したときの電子なだれ頭部の電子数  $n_e(l_{zr})$  および正イオン線密度  $N_+(l_{zr})$  を示したものである。図9は  $\tau$  が 1 mm,  $D$  が 30, 50 および 125 mm の場合、図10は  $\tau$  が 1, 2 および 5 mm,  $D$  が 125 mm の場合である。図9および図10から、 $n_e(l_{zr})$  および  $N_+(l_{zr})$  はいずれの  $D$  および  $\tau$  においても最大となる点  $r_{\max}$  が存在し、両者の  $r_{\max}$  は一致することがわかる。この  $r_{\max}$  を求めると、 $\tau$  が 1 mm で  $D$  が 30, 50 および 125 mm の場合、それぞれ 4.60, 6.22, および 9.89 mm,  $D$  が 125 mm で  $\tau$  が 1, 2 および 5 mm の場合、それぞれ 9.89, 11.12 および 14.63 となった。なお、この場合の電極電位は第2沿面コロナ発生電圧  $V_{c2}$  で、表1の実測値を用いた。また、図9において  $n_e(l_{zr})$  および  $N_+(l_{zr})$  の最大値は  $D$  によって 1 柄程度異なるが、これは電極電位が 10%変化すると  $N_+(l_{zr})$

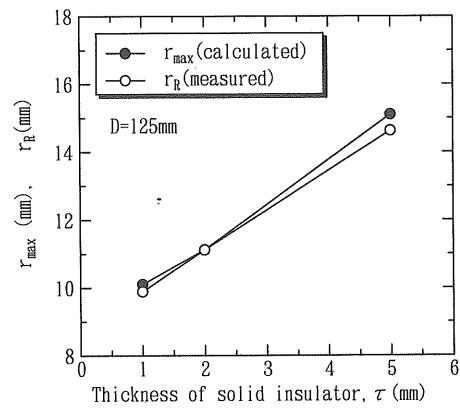


図 12  $r_{\max}$  と  $r_R$  の比較 ( $D=125$  mm)

Fig. 12 Comparison between  $r_{\max}$  and  $r_R$  ( $D=125$  mm).

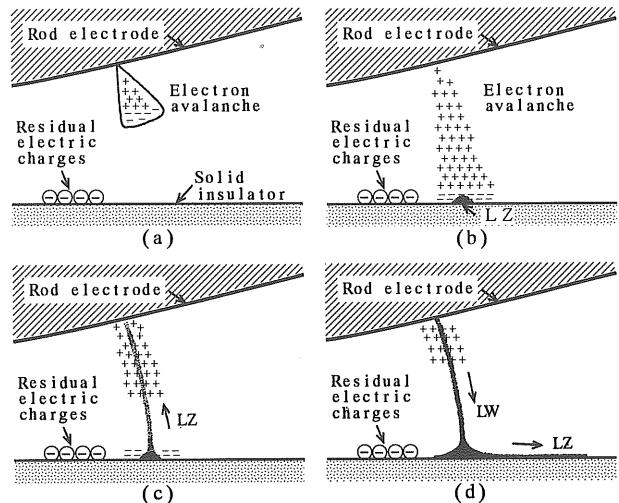


図 13 第2沿面コロナ進展のモデル図

Fig. 13 Development model of second surface corona.

の値が約 1 柄変化する<sup>5)</sup> ことから、 $D$  の影響によるものではなく実測値  $V_{c2}$  のばらつきによるものと考えられる。

図11および図12は上述の計算で求めた  $r_{\max}$  と表1の実測から求めた半径  $r_R$  を比較したもので、 $\tau$  が 1 から 5 mm,  $D$  が 30 から 125 mm の範囲においてよく一致することがわかる。

以上述べたことから、第2沿面コロナの形成過程を気中棒対平板ギャップにおける負コロナの形成機構<sup>6)</sup>と対比して述べると以下のようになるものと考えられる。図13は第2沿面コロナの進展モデル図で、第1沿面コロナ進展終了後の第2沿面コロナ進展開始以降について示している。すなわち第1沿面コロナの進展によって固体絶縁板上に円環状に残留した負電荷のため、その付近の電界は弱められ、一旦、沿面コロナの進展は停止するが、その後の端子電圧の上昇によって、残留電荷の影響の少ない電極上の点では、再び電離増殖が可能になる(同図(a))。この点を出発した電子なだれは指数関数的に正イオンの発生数を増加し

ながら固体絶縁板の点  $r_{\max}$  まで進展し、この  $r_{\max}$  を中心として正の空間電荷が固体絶縁板表面近傍に多量に発生し、発光域 LZ が形成される（同図 (b)）。この多量に発生した正の空間電荷のため電極と正の空間電荷の間の電界は強められ、空中棒対平板ギャップの場合と同様に多数の電子なだれの軌跡を示していると考えられる電離による発光域 LZ<sup>6)</sup> が電極に向かって進展し、電極に到達する（同図 (c)）。この到達点からは、電離を起こすに十分なほど強い波頭電界を有する波<sup>12)</sup> すなわち、空中放電では電離電圧波<sup>12,13)</sup> と呼ばれる発光波 LW が固体絶縁板表面まで進展する。この電離電圧波の伝搬によって、電位が再形成され、チャネルは新しい電離状態になり<sup>12)</sup>、その表面の発光を強め、更に発光域 LZ、すなわち、第 2 沿面コロナを固体絶縁板表面に沿って進展させるものと考えられる（同図 (d)）。この場合、 $r_{\max}$  は残留電荷の分布域のすぐ外側となるため、電極先端中心方向へは進展できず、外方向へ進展するものと考えられる。したがって、電荷図および駒撮り写真による発光域の図形は二重の円環状の図形となる。なお、この固体絶縁板表面に沿って進展する沿面コロナはリヒテンベルグ図の観測からわかるように、外側部分では発光が弱く、そのため、駒撮り写真では外側部分の発光域が十分に観測できず、電荷図形と比較すると、駒撮り写真による発光域はやや小さくなつたものと考えられる。

#### 4. まとめ

高圧側の電極直径を 30 mm から 125 mm まで、固体絶縁板の厚さ  $\tau$  を 1 mm から 5 mm まで変化し、第 1 沿面コロナが発生する電圧よりも更に高い電圧を印加した場合の負インパルス沿面コロナを、電荷図および高速ゲート II を装着した CCD カメラで観測し、その時発生進展する第 2 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きのようになる。

(1) 第 1 沿面コロナが発生する電圧よりも更に高い電圧を印加すると、電荷図、リヒテンベルグ図および高速ゲート II により観測した発光図は 2 重の円環状の図形となる。

(2) 高速ゲート II による駒撮り写真の観測結果から、1 発目および 2 発目の電流パルスはそれぞれ第 1 および第 2 沿面コロナに対応し、第二沿面コロナは第 1 沿面コロナの外側に発生進展する。

(3) 第 1 沿面コロナの進展に伴う残留電荷の影響を考慮して高圧側電極先端付近の電位分布および電極上の電界強度を計算すると、残留電荷付近の等電位線は間隔が広く

なり、また電極上の電界強度は、その付近で最大約 25%低下し、残留電荷による電界緩和がみられる。

(4) 絶縁板上の正イオン線密度が最大となる点  $r_{\max}$  を、残留電荷の影響を考慮して求めると、駒撮り写真から求めた第 2 沿面コロナの発光強度の最大となる半径  $r_R$  とよく一致する。

(5) 二重の円環状となる電荷図および発光図形は、第 1 沿面コロナの進展後さらに端子電圧が上昇することによって残留電荷の影響の少ない点から進展した電子なだれが絶縁板上の点  $r_{\max}$  に達し、その点から主として電極先端とは逆方向へ進展する第 2 沿面コロナによって形成されたものである。

本研究では、第 1 沿面コロナによる残留電荷の影響を考慮して電界計算を行うことにより、後続の第 2 沿面コロナの形成機構を明らかにしたものであるが、今後は更に高い電圧を印加した場合の、第 3、第 4 沿面コロナの形成機構や、その後発生すると考えられる負リーダの進展機構について明らかにする必要がある。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、本研究の遂行に際して協力いただいた本学大学院生、尾花 清氏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付記する。

#### 参考文献

- 1) 細川辰三、近藤芳孝、三好保憲：電気学会雑誌、**90** (1970) 1123
- 2) 三好保憲：火花放電理論入門、電気書院 (1957)
- 3) 常安暢、生澤泰二、西嶋喜代人、渡辺健二：電気学会論文誌 A、**108-A** (1988) 183
- 4) 河野照哉：電気学会技術報告(II部)，第 184 号 (1985)
- 5) 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
- 6) 常安暢、赤崎正則：静電気学会誌、**3** (1979) 307
- 7) 常安暢、嶋崎俊行、赤崎正則：電気学会論文誌 A、**98-A** (1978) 373
- 8) H. Singer, H. Steinbigler and P. Weiss : IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-93 (1974) 1660
- 9) 岡本英夫、井関昇、松葉博則、夏目文夫：高電圧試験ハンドブック、原田達哉編、p. 395、電気学会 (1983)
- 10) 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、p. 480、電気関係学会九州支部連合会 (1985)
- 11) M.A. Harrison and R. Geballe : Phys. Rev., **91** (1953) 1
- 12) L.B. Loeb(鈴木俊男抄訳)：電気学会雑誌、**95** (1975) 859
- 13) L.B. Loeb : *Electrical Coronas*, p. 137, Univ. of California Press, Berkeley (1965)