

## 論 文

## 2針背後電極を有した微小間隙内を進展する沿面放電特性

平田智之\*, 上野秀樹<sup>\*1</sup>, 中山博史\*

(2007年3月14日受付; 2008年4月28日受理)

## Characteristics of Creeping Discharge Developed in Narrow Gap on Two Needle Backside Electrodes

Tomoyuki HIRATA,\* Hideki UENO<sup>\*1</sup> and Hiroshi NAKAYAMA\*

(Received March 14, 2007; Accepted April 28, 2008)

We describe about characteristics of creeping discharge developed in the narrow gap with two backside electrodes, under a  $\mu$ s pulse voltage application. Backside electrode position  $x$  is defined by horizontal distance from an upper needle electrode to a lower needle electrode.  $D$  is mixture rate of SF<sub>6</sub>. As a result, in the case of  $x=2, 5\text{mm}$  under 0.3MPa; flashover voltage decreased from 18.4kV to 17.8kV by 3% SF<sub>6</sub> addition into N<sub>2</sub>. V-characteristics to which flashover voltage decreased in a low SF<sub>6</sub> content were obtained for  $x=2, 5\text{mm}$ . On the other hand, the V-characteristics in the flashover voltage of SF<sub>6</sub> content  $D=0\% - 10\%$  for  $x=0, 3\text{mm}$  were not observed. In corona extension obtained using ultra-high speed camera, the rapid corona extension was observed on the corona extension process in  $D=0\%$ .

## 1. はじめに

現在、都市部における電力負荷集中による需要の増加に伴い、変電機器の高電圧化・大容量化・小型化・高信頼度化などの技術開発が進められている<sup>1)</sup>。

SF<sub>6</sub>ガスは高耐電圧性や安全性などの多くの特徴を持つことから、電力機器の絶縁に用いられている<sup>2)</sup>。しかし、SF<sub>6</sub>ガスの絶縁耐力は局部的不平等電界に強く依存する。従って、機器内に導体上の突起や浮遊金属粒子などによる不平等電界を形成する配置ではSF<sub>6</sub>ガスの絶縁性能は著しく低下し<sup>3)</sup>、機器の故障に繋がる可能性がある。そのため、不平等電界におけるSF<sub>6</sub>ガスを用いた絶縁信頼性に関する研究が行われている<sup>4,5)</sup>。また、SF<sub>6</sub>ガスの地球温暖化係数はCO<sub>2</sub>に比べ23900倍で地球温暖化への影響が大きい<sup>6)</sup>。そこで代替ガスとしてSF<sub>6</sub>ガスとN<sub>2</sub>ガスの混合ガスを用い、SF<sub>6</sub>ガスの使用量を抑える研究もされている<sup>7)</sup>。

一般に、電力機器は絶縁ガスと固体絶縁物の複合絶縁方式を採用している。複合絶縁では電力機器内の三重点、金属粒子の付着、導体上の突起などにより局部的な不平等電界が生

じると、沿面放電が発生し、絶縁破壊事故が起こる。電力機器の絶縁事故への対策として極めて短時間領域で起こる放電現象を調べることは非常に重要である。また、機器に用いられている複合絶縁では、電極と固体絶縁物が接する部分や絶縁物同士の接触する部分が多く存在するため、微小な間隙の発生する可能性がある。そのため、微小間隙内を進展する沿面放電の特性を明確にする必要がある。

沿面放電は背後電極の影響を受けるため、背後電極が存在しない場合の間隙内での沿面放電特性や平板状背後電極が存在する場合の微小間隙内沿面放電特性は研究されているが<sup>8,9)</sup>、点状の背後電極を有する場合の微小間隙内沿面放電特性については、まだ未解明の点が多い。そのため、局部的な不平等電界が生じたことに起因する微小間隙内の沿面放電特性を調べることは意義あるものと考える。

そこで、2点の針背後電極を設けた構成において、針背後電極での局部高電界によるコロナの発生と沿面放電特性についてN<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>混合ガス中で調べた。2針の物理的モデルとして、一つ目は機器内の三重点での電界集中を緩和するための埋め込み電極など電極配置が複雑化したときに生じる欠陥、二つ目はGIS中の金属粒子の存在などを考えたものである。実際に機器の製造過程においてGIS中に混入した金属片の除去が最大の課題として残っている。また、スペーサを誘電率の異なる多層誘電体とすることが考えられており、その層間の剥離なども考慮した。前回の1針背後電極の場合、

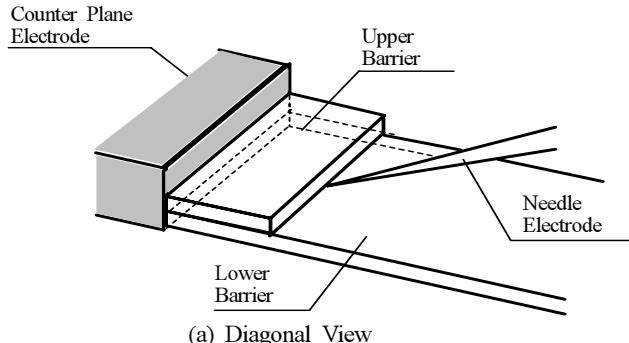
キーワード : N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>ガス、微小間隙、2針背後電極、沿面放電\* 兵庫県立大学大学院工学研究科電気系工学専攻 (671-2280  
姫路市書写 2167)Department of Electrical Engineering and Computer Sciences,  
Graduate School of Engineering, University of Hyogo, 2167  
Shosha, Himeji 671-2280, Japan<sup>1</sup>ueno@eng.u-hyogo.ac.jp

下部針電極からコロナの発光が観測された<sup>10)</sup>。そこで、1針と2針背後電極の場合の間隙内コロナの進展において、下部針電極からのコロナによる間隙内コロナ進展の促進、緩和の影響を観測した。その結果、二つの針状背後電極の位置により、放電特性に相違が見られたので報告する。

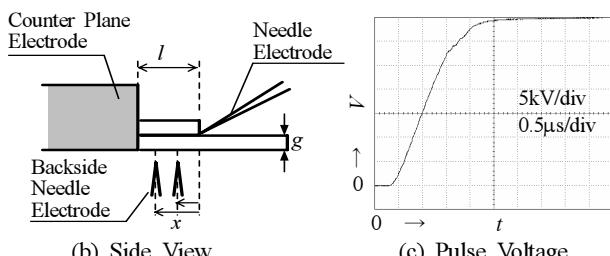
## 2. 実験方法

本実験で用いた電極構成を図1に示す。下部バリアには大きさ40mm×26mm、上部バリアには大きさ7mm×26mmの2枚の硼珪酸ガラス(厚さ $g=1\text{mm}$ )を用いて、下部バリアに直接上部バリアを重ねた。硼珪酸ガラスの表面の粗さは約50nmであるので、2枚のバリアが重なった部分は放電進展可能な微小な空間が存在していると考えられる。間隙の一端には針電極を、他方の端には対向平板電極を配置した。針-対向平板電極間距離 $l=7\text{mm}$ である。さらに、埋め込み電極表面上の突起などの電界集中源を模擬して針背後電極を下部バリアの下面に配置した。針背後電極はすべて先端曲率半径が約35μmの針を用いた。針背後電極位置 $x$ は上部針電極が下部バリアと接している点を基準として、上部針電極下端からの2本の針背後電極先端までの水平方向距離である。2本の針背後電極は対向平板電極に接続され同電位である。この電極系を黄銅製容器内に設置し、約0.1Pa以下に排気後、N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>混合ガスを封入し、0.1MPaから0.3MPaまで変化させた。

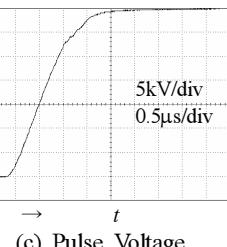
印加電圧には波頭長 $T_f=1.5\mu\text{s}$ の單一方形波パルス電圧を用いた(図1(c))。パルス発生装置は負極性パルス電圧出力であるため、針電極を接地し、対向平板電極にパルス電



(a) Diagonal View



(b) Side View



(c) Pulse Voltage

$g$ : Glass thickness 1mm  $l$ : Space length 7mm  
 $x$ : Backside needle electrode position

図1 電極構成図

Fig.1 Electrode configuration.

圧を印加した場合を正極性の結果とした。電圧波形は高圧プローブ(HV-P30, DC-50MHz, 岩崎通信機株), コロナ発光は光電子増倍管(931A, 波長領域 300-650nm, 株浜松ホトニクス)を介してデジタルオシロスコープ(DL-1540, 200 MS/s, 150MHz, 横河電機株)で観測した。印加電圧波頭部でコロナ発光が観測される電圧の瞬時値をコロナ開始電圧、波頭部でラッシュオーバが生じたときの瞬時値をラッシュオーバ電圧とした。コロナ進展と沿面放電路の様子は、感度が最大7000倍の超高速デジタルフレーミングカメラ(IMACON468, 波長領域 385~900nm, HADLAND PHOTONICS LTD.)および感度が最大20万倍の高速ゲートイメージインテンシファイアを取り付けたCCDカメラ(C4346, 株浜松ホトニクス)で撮影した。

なお、間隙を構成するバリアとして用いた硼珪酸ガラス(体積抵抗率 $\rho=1.1\times10^{12}\Omega\cdot\text{m}$ , 比誘電率 $\epsilon_r=7$ )に針-平板間で電圧を印加したときの電位減衰の時定数 $\tau$ は67秒と見積もられる<sup>11)</sup>。印加時に生じたコロナなどによるバリア上の残留電荷が次の測定に影響を及ぼさないようにするために、電圧の印加間隔は1分以上とした。実際、電荷減衰は表面伝導が関連して大きくなる。印加後の測定で残留電荷はなく、データのバラツキが比較的小くなっている。また、電圧波頭部の時間領域内( $1.5\mu\text{s}$ )でのバリア表面の電荷減衰は時定数からみて無視できるのでコロナによるバリア上の蓄積電荷がその後のインパルスコロナの進展に及ぼす影響が残り、GISのスペーサなどに用いられているエポキシ樹脂と同様な電荷蓄積の効果を含んだ実験結果が得られることになる。

## 3. 実験結果

### 3.1 ラッシュオーバ電圧およびコロナ開始電圧のN<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>混合ガス依存性

まず、針背後電極のない場合は、両極性ともパルス発生器の最高電圧35kVを加えても印加電圧波頭部ではラッシュオーバに至らない。

図2に2針背後電極のある場合の正極性ラッシュオーバ電圧 $V_f$ およびコロナ開始電圧 $V_c$ の測定を示す。ラッシュオーバ電圧 $V_f$ およびコロナ開始電圧 $V_c$ の測定は同一条件で10回行い、その平均を最大値、最小値と共に図中に示した。図中の矢印(↑)とその上の数字は、印加電圧( $V_p=35\text{kV}$ )の波頭部における10回の測定でラッシュオーバしなかったときの回数を示す。なお、放電はすべて微小間隙内を進展し、針-対向平板電極間の微小間隙内でラッシュオーバが生じていることを確認した。

図2(a)の2本の針背後電極の位置が $x=0\text{mm}$ と $x=3\text{mm}$ の場合(以降 $x=0, 3\text{mm}$ と表記する)、SF<sub>6</sub>の混合率が増加するに伴

って上昇したが、 $SF_6$ の混合率が低い領域ではガス圧によつて挙動に差が見られた。0.1MPa, 0.2MPaではフラッシュオーバ電圧は単調増加した。一方、0.3MPaの $D=0\%$ ,  $D=3\%$ では18.6kVとほぼ同じ値であるが、 $D=10\%$ では23.9kVと上昇した。 $SF_6$ の混合率が高い領域では、 $D=100\%$ のとき、0.1MPaでは27.4kV, 0.2MPaでは29.3kV, 0.3MPaでは30.4kVとフラッシュオーバ電圧は上昇した。

図2(b)の2針背後電極位置 $x=2, 5mm$ の場合、0.1MPaではフラッシュオーバ電圧 $V_f$ は単調増加となった。しかし、0.2MPaでは、 $D=0\%$ のときの約18.4kVから $D=3\%$ では約17.8kVとフラッシュオーバ電圧は少し下がり、 $D=3\%$ から $D=50\%$ へと混合率を増加させた場合、約28.5kVまでフラッシュオーバ電圧は上昇した。0.3MPaの場合も0.2MPaの場合と同様に3%付近でフラッシュオーバ電圧が低下し、その後上昇するV特性となつた。

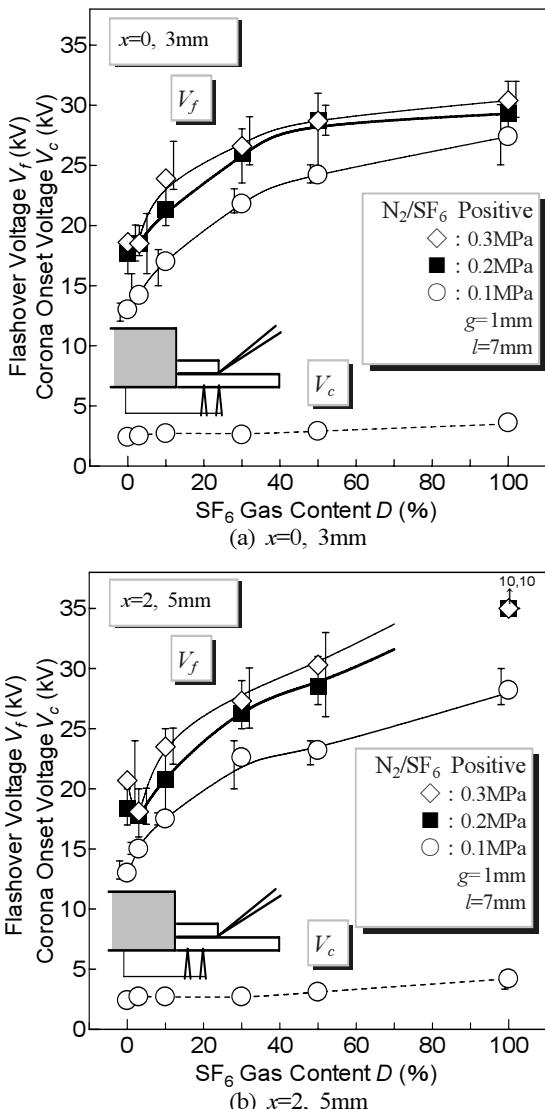


図2 2針背後電極におけるフラッシュオーバ電圧とコロナ開始電圧の $SF_6$ の混合率依存性

Fig.2 Relationship between flashover and corona onset voltage with two needle backside electrode in  $N_2/SF_6$  mixture gas.

(Positive, (a):  $x=0, 3mm$ , (b):  $x=2, 5mm$ )

なつた。

コロナ開始電圧は0.1MPa, 2針背後電極位置 $x=0, 3mm$ の場合、 $D=0\%$ のとき約2.4kVから $D=100\%$ のとき約3.6kVで、圧力の増加ではわずかに上昇した。 $x=2, 5mm$ の場合も $x=0, 3mm$ とほぼ同様な結果となり、フラッシュオーバ電圧に見られたV特性は得られなかつた。

以上のことより、前回の1針背後電極の場合と2針背後電極位置 $x=2, 5mm$ の0.2MPa, 0.3MPaの場合では、混合率3%付近でフラッシュオーバ電圧が最小値となるV特性を示した。しかし、 $x=0, 3mm$ の場合、V特性を示さず、 $D=0\%, D=3\%$ 共にほぼ同じ値となつた。これは、後で議論している2本目の針背後電極の効果と考えられる。また、コロナ開始電圧に差が見られなかつた。1針背後電極 $x=0mm$ の場合、針電極の下端に針背後電極が存在する。また、2針背後電極 $x=0, 3mm$ では3mmの地点にも針背後電極が存在する。それにより1針背後電極と比べて、2針背後電極の場合の間隙内のコロナが2針目の針背後電極付近まで進展しやすくなることでV特性の有無に影響したものと考えられる。その結果、フラッシュオーバ電圧の挙動に差がでたものと考えられる。この点に注目し、進展するコロナ挙動を観測した。

### 3.2 放電挙動の時間的分割

コロナ進展の難易がフラッシュオーバ電圧の違いを引き起こすと考えられるため、針背後電極位置 $x=0, 3mm$ と $x=2, 5mm, 0.3MPa$ について、超高速度カメラを用いて、印加電圧波頭部で微小間隙内を進展するコロナ進展の様子を時間的に分割して撮影した。針背後電極を有した微小間隙における正極性コロナの進展挙動を図3に示す。

なお、各分割撮影像(Frame)の下にパルス電圧印加後の撮影時間とそのときの電圧を示す。また、コロナの進展の様子がわかりやすくなるように、先端部を図中の小さな矢印で示し、目盛りを付加した。

図3(a)に示す $x=2, 5mm$ の $SF_6$ ガスの混合率 $D=0\%$ ( $N_2$ 単独)では、上部針先付近からコロナが発生して、Frame1で2mm, Frame2で5mmと微小間隙内を少しづつコロナが進展し、フラッシュオーバに至つた。図3(b)の3%では、微小間隙入り口付近から発生したコロナは、Frame1では微小間隙入り口付近で停滯した。その後、Frame2で2mm付近までコロナが進展した後フラッシュオーバした。また、フラッシュオーバ電圧にV特性が見られなかつた。 $x=0, 3mm$ の場合、 $D=0\%$ では上部針先付近からコロナが発生した後、印加電圧の上昇に伴つて3.5mm, 4.5mmとコロナが微小間隙内を進展した。 $D=3\%$ では、上部針先付近からコロナが発生した後、コロナ進展が停滯した。その後、5mm付近

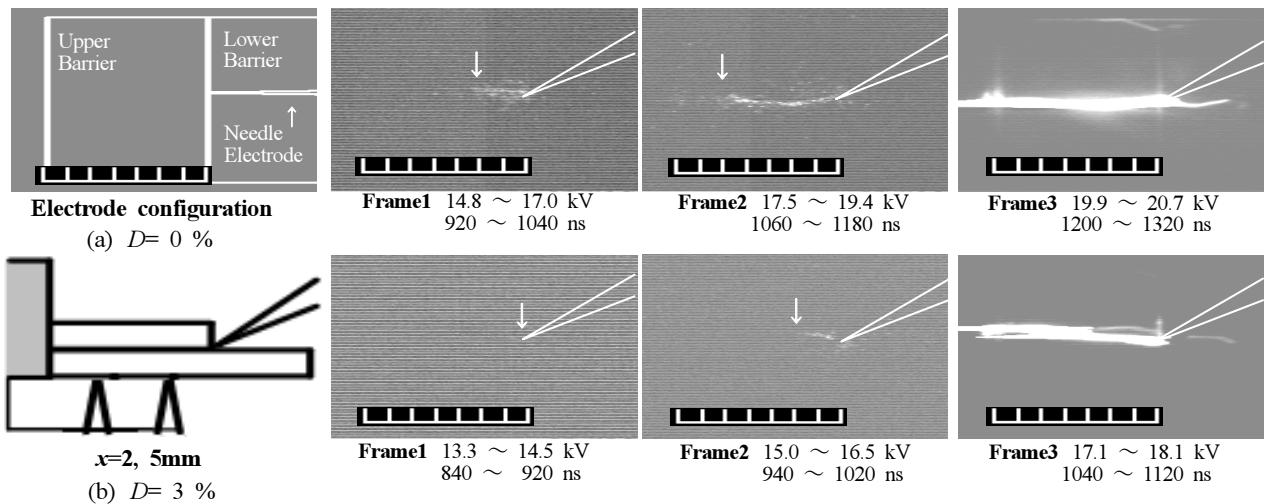


図3 超高速度カメラによる間隙内コロナ進展像

Fig.3 Corona extension images by ultrahigh-speed camera. ( $N_2/SF_6$  gas, 0.3MPa,  $x=2, 5\text{mm}$ , Positive)

までコロナが進展する結果が得られている。

図4にコロナ進展長ー印加電圧依存性を示す。図中のF記号はフラッシュオーバに至ったことを示す。 $x=0, 3\text{mm}$ ,  $x=2, 5\text{mm}$ の $D=0\%$ ,  $3\%$ とともに印加電圧の上昇に伴って、微小間隙内をコロナが徐々に進展している。 $x=0, 3\text{mm}$ の場合, $D=0\%$ のとき、コロナ進展長は瞬時電圧15.0kVで3.5mmと2針目の針背後電極付近まで伸びている。これは、1針目の針背後電極が上部針電極の真下に位置するため、2針背後電極位置 $x=2, 5\text{mm}$ に比べて電界が強い。従って、上部針電極先端から発生したコロナが微小間隙内に進入しやすく、2針目の針背後電極付近までコロナが進展したと考えられる<sup>12)</sup>。 $D=3\%$ では $D=0\%$ の場合のコロナ進展に比べ、微小間隙内コロナの進展が小さくなった。これは、 $SF_6$ ガスは電気的負性ガスであり電子付着作用により高い絶縁耐力特性を持つ。そのため、コロナの進展が $N_2$ ガスに比べて抑制されている<sup>2,12)</sup>。それ故、 $x=0, 3\text{mm}$ の場合ではフラッシュオーバ電圧にV特性が得られなかったと考えられる。一方、 $x=2, 5\text{mm}$ の場合ではコロナが進展していることから、 $D=3\%$ の方が $D=0\%$ よりコロナの伸びが大きいことがわかる。 $x=0, 3\text{mm}$ の場合と異なって、 $D=3\%$ のコロナ進展長の図は $D=0\%$ の図に比べて $x=2, 5\text{mm}$ では $D=3\%$ の方が $D=0\%$ より間隙内コロナが進展していることから、このコロナ進展の難易がフラッシュオーバ電圧の特性をV特性にしたものと考えられる。

### 3.3 光電子増倍管による微小間隙内を進展するコロナの発光波形の観測

微小間隙内沿面放電によるコロナ発光波形を、光電子増倍管を用いて観測した。図5に $N_2/SF_6$ 混合ガスにおけるコロナ進展の発光波形を示す。縦軸は印加電圧の瞬時値(kV)と発光強度(a.u.:任意単位)、横軸は時間(200ns/div)である。

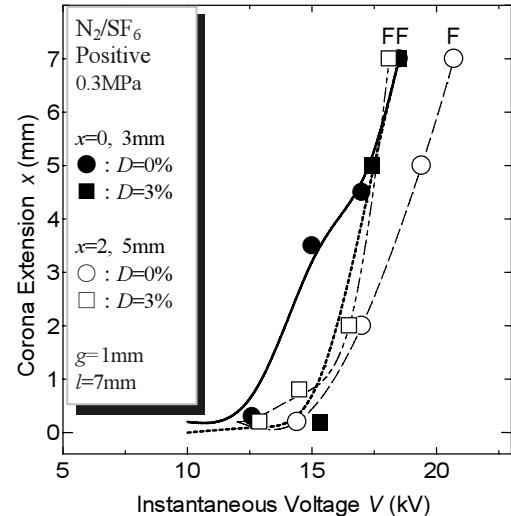


図4 コロナの伸びと印加電圧依存性

Fig.4 Corona extension – Instantaneous voltage.  
( $N_2/SF_6$  :  $x=0, 3\text{mm}$ ,  $x=2, 5\text{mm}$ , Positive)

図5の2針背後電極位置 $x=2, 5\text{mm}$ の0.3MPaでは、図5(a)の $D=0\%$ のとき440nsで約4.0a.u., 図5(b)の $D=3\%$ のとき440nsで約3.0a.u.で初期コロナが発光し、最初のパルス状のコロナ発光強度は $D=3\%$ の方が $D=0\%$ に比べて弱くなった。印加パルス電圧の波頭部の電圧上昇に伴って、コロナ発光強度は強くなかった。これは印加電圧が高くなることで上部針一対向平板電極間での電界が強くなるためであると考えられる。また、コロナ発光がパルス波形として観測されるのは、上部針電極から対向平板電極に向かって電界が弱くなっているため、コロナの進展が制限されたと考えられる。 $D=3\%$ のコロナ発光波形は、 $D=0\%$ に比べて発光波形が細くなかった。これは $SF_6$ ガスの絶縁性能に影響するものと思われる。図5(a)の $D=0\%$ , 図5(b)の $D=3\%$ ともにパルス電圧印加後660nsでコロナ発光強度がほぼピークとなった。印加パルス波頭部の電圧がある値になるとコロナ発光強度がほぼ一定となった。これは、微

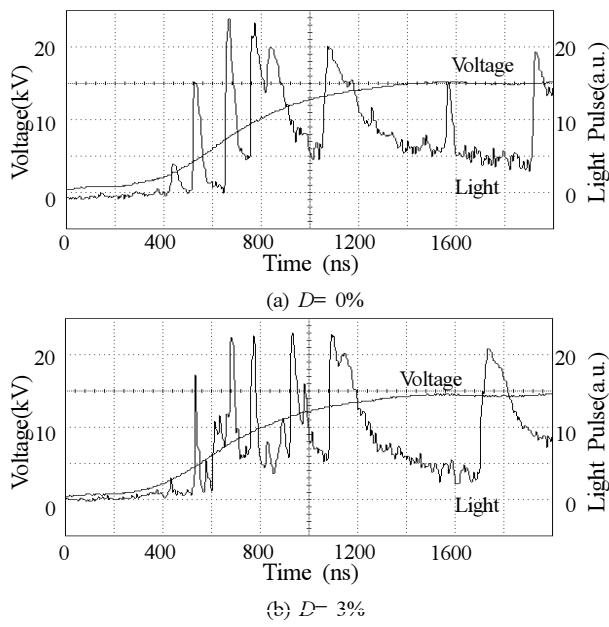


図5 コロナ発光波形

Fig.5 Corona light emission in  $x=2, 5\text{mm}$  at  $0.3\text{MPa}$ .

小間隙内コロナ先端の蓄積電荷による電界緩和作用によるものと推測される。最初のコロナ発光の時間間隔は約80nsであり、コロナ発光強度ピークを過ぎると、その時間間隔が長くなった。また、印加電圧が14kV付近のD=3%では、D=0%に比べてコロナ発光強度が大きくなり、コロナが進展していることがわかる。

### 3.4 針背後電極上部からのコロナ発光

微小間隙内進展コロナにおける針背後電極の影響を検討するため、針背後電極上部からのコロナ発光について調べた。超高速度カメラでは感度不足のために針背後電極からの微弱なコロナが観測されない。そこで、CCDカメラを用い、正極性の0.3MPaで、針背後電極の斜め下方向からコロナ発光を観測した。ここで、針背後電極の上に下部誘電体が存在する。

図6にCCDカメラを用いて測定した針背後電極上部からのコロナ発光を示す。図6(a)は1針背後電極位置 $x=0\text{mm}$ の場合で、印加電圧の上昇に伴って、微小間隙入り口の上部針電極付近のコロナ発光が強くなっていることがわかる。

図6(b)に示す2針背後電極位置 $x=0, 3\text{mm}$ の場合、D=0%では、Frame1(4.2~7.0kV)で上部針電極と2針目の針背後電極位置 $x=3\text{mm}$ の位置にコロナ発光がみられる。Frame2(7.0~10.0kV)では、1針背後電極の場合と比べて、上部針電極からのコロナは2つ目の針背後電極に向かって進展している様子が観測された。D=3%もFrame1で、上部針電極のコロナが観測されるが、針背後電極上部からのコロナ発光は観測されない。また、Frame2では、 $x=3\text{mm}$ の位置の針背後電極上部からのコロナ発光はD=0%と同じぐらいの発光強度となった。

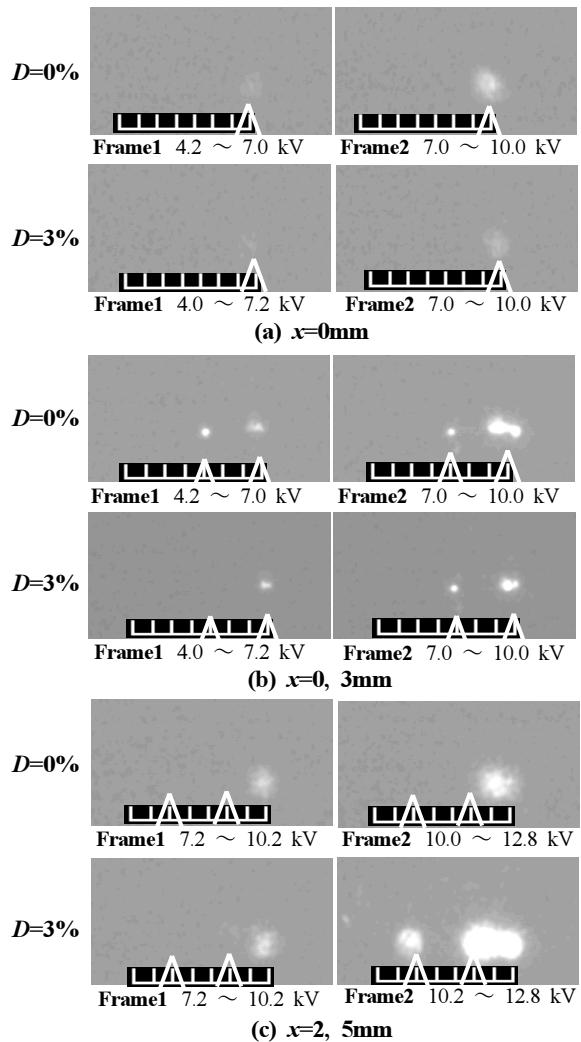


図6 針背後電極上部からのコロナ発光像

Fig.6 Corona from backside needle electrode.

2針背後電極位置 $x=0, 3\text{mm}$ では上部針電極の真下に針背後電極が存在するため、上部と下部のコロナ発光が重なり判別が困難であるので、 $x=2, 5\text{mm}$ についても観測した。D=0%ではFrame1, Frame2で上部針電極からコロナが印加電圧の上昇に伴ってコロナの発光が強くなり、コロナ進展長1.5mmと微小間隙内を進展していることがわかる。D=3%の場合も同様に印加電圧の上昇によりコロナが進展した。Frame1では $x=2\text{mm}$ 付近で弱いコロナ発光が観測され、Frame2では微小間隙内進展コロナと $x=5\text{mm}$ 付近にも強いコロナ発光が観られた。また、 $x=2\text{mm}$ 付近の針背後電極上部からのコロナ発光は微小間隙内コロナと重なっているため判別が困難であるが、 $x=5\text{mm}$ 付近の針背後電極上部からのコロナ発光が強くなっていることから $x=2\text{mm}$ のコロナも強いと思われる。針背後電極上部からコロナの発光が見られることから、パルス電圧の印加により、対向平板電極と同電位である針背後電極付近に生じた初期電子が針背後電極近傍で加速される。その加速された電子が分子と衝突電離し、正イオンと電子が残る。また、針背後電極のため、その先端部分が電界集中すること

で針背後電極上部と下部バリアの三重点部分でコロナが生じると推測される。

$x=2, 5\text{mm}$  のときは  $x=0, 3\text{mm}$  に比べ、初期段階での針背後電極上部からのコロナ発光は弱く、または発光はなく、コロナの拡がりも小さくなつた。しかし、印加電圧が上昇すると  $x=2, 5\text{mm}$  では、微小間隙内コロナや針背後電極上部からのコロナに変化が見られた。 $x=0, 3\text{mm}$  の  $D=3\%$  に比べて、針背後電極上部からのコロナ発光は小さいが、微小間隙内のコロナ進展は  $x=2, 5\text{mm}$  の方が進展し、ラッシュオーバ電圧が下がることがわかつた。これより、3%付近でラッシュオーバ電圧が低下するV特性に針背後電極上部からのコロナが影響を及ぼしていると思われる。

#### 4. 検討

針背後電極位置や  $\text{N}_2/\text{SF}_6$  の混合率に関係なく、パルス電圧が直に印加される上部針電極先端付近からコロナが発生し、ラッシュオーバに至る<sup>13)</sup>。微小間隙内を進展し、絶縁破壊に至る沿面放電においては、バリア表面からの光電子、間隙入り口付近における空間電荷やバリア表面の蓄積電荷などの影響を考慮する必要がある。まず、微小間隙の外側を進展する沿面距離よりも微小間隙内をコロナが進展する沿面距離の方が短い。これは、間隙幅が狭い場合、微小間隙幅が広い場合に比べて間隙入り口の上部針電極先端付近ではコロナが進展しにくくなり、そのコロナの蓄積電荷によって微小間隙入り口で局部的高電界が強まる影響や微小間隙内を進展するコロナによる紫外線閉じ込め効果<sup>14)</sup>によってラッシュオーバ電圧が低くなると考えている。従つて、微小間隙の外側をコロナが進展するよりも微小間隙内を進展する方がラッシュオーバに至りやすくなる。

図4の微小間隙内を進展したコロナ進展長と印加電圧依存性において、 $x=0, 3\text{mm}$  の場合、1針目の針背後電極が上部針電極の真下に位置するため、2針背後電極位置  $x=2, 5\text{mm}$  に比べて電界が強くなり、コロナが間隙内に進入しやすいと考えた。一方、 $x=2, 5\text{mm}$  の場合、 $D=3\%$ の方が  $D=0\%$  よりコロナの伸びが増大した。このコロナ進展の大小がV特性になったと考えられる。そのため、 $x=2, 5\text{mm}$  の場合について検討する。

図7に図6のCCDを用いた針背後電極上部からのコロナ発光の観測結果から、針背後電極または微小間隙内の発光コロナ長の印加電圧依存性を示す。2針背後電極位置  $x=2, 5\text{mm}$  の場合、 $D=0\%$ では、印加電圧が  $13.0\text{kV}$  付近まで針背後電極上部からのコロナの発生は認められない。印加電圧が  $10.0\text{kV}$  付近のコロナの場合、 $D=0\%$ において、微小間隙内の発光コロナ長は  $0.8\text{mm}$  である。 $D=3\%$ では、1

針目の発光コロナ長は  $0.5\text{mm}$ 、2針目の発光コロナは観測されない。そのときの微小間隙内の発光コロナ長は  $0.8\text{mm}$  とわかる。印加電圧  $10.0\text{kV}$  での針背後電極上部からの発光コロナは微小間隙内を進展するコロナに影響が見られない。これは、印加電圧が低く、針背後電極上部からのコロナも弱い。そのため、針背後電極上部からのコロナの影響が微小間隙内コロナに対して弱いと考えられる。次に、印加電圧が  $13.0\text{kV}$  付近のコロナの場合では、 $D=0\%$ のとき、微小間隙内の発光コロナ長は  $1.5\text{mm}$  である。 $D=3\%$ では、1針目の発光コロナ長は微小間隙内の発光コロナと重なるため判別が困難であった。2針目の発光コロナ長は  $1.3\text{mm}$  で、微小間隙内の発光コロナ長は  $2.7\text{mm}$  とわかる。このように、印加電圧  $13.0\text{kV}$  付近の電圧領域では、 $D=3\%$ の針背後電極上部からの発光コロナ長が大きくなつたと考えられる。

さらに、微量な  $\text{SF}_6$  ガスの混合率での現象のため、 $\text{N}_2/\text{SF}_6$  混合ガスによる影響も考慮する必要がある。筆者ら<sup>10)</sup>は既にパルス電圧印加において、沿面放電のラッシュオーバ電圧におけるV特性について以下のように報告している。印加電圧の増加時で、ストリーマ先端の電界はストリーマの導電率が高くなることで強くなる。電子エネルギーが  $2\text{eV}$  以上と  $1\text{eV}$  以下における電子付着率を比較した場合、前者の方が  $3\sim 4$  枠低くなる<sup>15)</sup>。したがつて、この領域中の電子は  $\text{SF}_6$  に付着しにくくなり、付着してもすぐに離れる。このため、微量な  $\text{SF}_6$  ガスを  $\text{N}_2$  ガスに混合すると、 $\text{SF}_6$  ガスに電子付着して生じた負イオンから、印加高電界によつて電子離脱し、初期電子が発生する確率が増す<sup>16, 17)</sup>。また、 $\text{SF}_6$  ガスが微量のため、 $\text{SF}_6$  ガスから離脱した電子は  $\text{SF}_6$

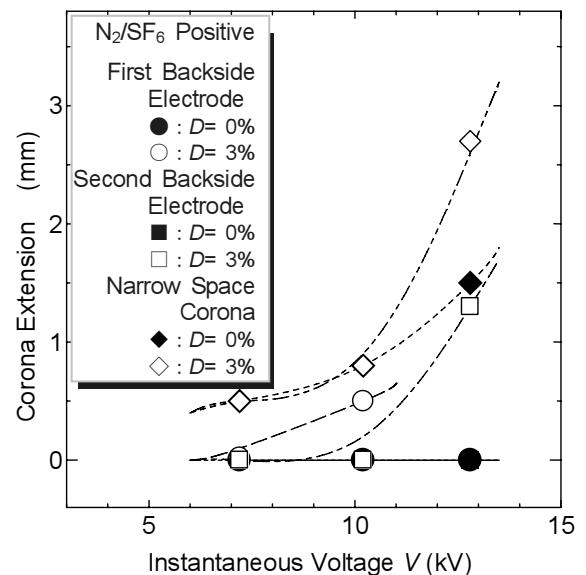


図7 発光コロナ長と印加電圧依存性  
Fig.7 Corona extension – Instantaneous voltage.  
( $\text{N}_2/\text{SF}_6 : x=2, 5\text{mm}, 0.3\text{MPa}$ , Positive)

ガスより  $N_2$  ガスと衝突しやすく、電子なだれを引き起こしやすいと考えられる。さらに、 $SF_6$  ガスの混合率  $D$  が増すと電界離脱した電子が増えるが、 $D$  の増加によって電子付着も増す。その結果、電子捕獲作用が強力になると電子の増倍が抑えられ、フランシオーバ電圧が上昇すると考えられる。

1本目と2本目の針背後電極の作用を考えると、 $x=0, 3\text{mm}$  の場合、1本目の針背後電極が上部針電極の真下に存在するためコロナは微小間隙内に入り込み易い。その後、微小間隙内のコロナが2本目の針背後電極の影響を受ける。一方、 $x=2, 5\text{mm}$  の場合、1本目の針背後電極が上部針電極の真下に存在しないため  $x=0, 3\text{mm}$  に比べて微小間隙内にコロナが進入しにくい。しかし、針背後電極位置が  $2\text{mm}, 5\text{mm}$  であるので、2つの針背後電極は微小間隙内を進展するコロナを助長する作用があると考えられる。

即ち、 $SF_6$  ガスの微量混合域において  $2\text{eV}$  付近で  $SF_6$  ガスの電子付着率が著しく低下し、初期電子の発生する確率が増す。この微量混合による作用が針背後電極に影響を及ぼし、 $D=0\%$  に比べて  $D=3\%$  の針背後電極上部からコロナが発生して微小間隙内コロナの進展に寄与したと考えられる。そのため、 $x=2, 5\text{mm}$  における  $D=0\%, 3\%$  の場合では、この作用の大小がフランシオーバ電圧の V 特性を示すか、否かの分岐点となっていると考えられる。よって、 $x=0, 3\text{mm}$  の  $D=3\%$  に比べて、 $x=2, 5\text{mm}$  の方が針背後電極上部からのコロナ発光は小さいが、微小間隙内コロナは進展し、フランシオーバ電圧が下がる V 特性となる現象が現れたものと考えられる。

パルス波頭部のように電圧の印加により、針背後電極上部が高電界となるために針背後電極の針先端部分にコロナが発生し、コロナが拡がる。また、印加パルス電圧の上昇により微小間隙内の電界が変化するので、更に詳しく調べるために、パルス電圧波頭部における電界の時間的変化に注目する必要がある。今後、これらについての検討が必要である。

## 5. まとめ

$\mu\text{s}$  方形波パルス電圧印加時の微小間隙内を進展する2針背後電極をもつ沿面放電特性の観測結果を以下にまとめる。

- 1)  $N_2/SF_6$  混合ガス中の正極性のフランシオーバ電圧において、 $x=2, 5\text{mm}$  では  $D=3\%$  付近でフランシオーバ電圧が低下する V 特性が得られた。これに対して、 $x=0, 3\text{mm}$  の場合はフランシオーバ電圧は単調増加となり、V 特性は現れなかった。即ち、針背後電極の位置によって異なるフランシオーバ電圧-  $SF_6$  混合率特性となることがわかった。
- 2) コロナの進展挙動の観測において、 $x=0, 3\text{mm}$  の  $D=0\%$  は  $3.5\text{mm}$  付近までコロナが急進展した。また、印加パルス

電圧波頭部の電圧上昇に伴ってコロナ発光強度は強くなり発光量は多くなった。これは、微小間隙内のコロナが針背後電極に影響されて徐々に進展するためと考えられる。

- 3) 針背後電極上部からのコロナ発光を観測したところ、 $x=0, 3\text{mm}$  の  $D=0\%, D=3\%$  とともに針背後電極上部からコロナ発光が観測された。 $x=2, 5\text{mm}$  の  $D=3\%$  においても  $x=2, 5\text{mm}$  付近からコロナ発光が観測されたが、 $x=0, 3\text{mm}$  の部分と比較すると電圧の初期段階では非常に弱く、微小間隙内を進展し始めるより低い電圧領域ではコロナ発光が強くなることがわかった。
- 4) 2本目の針背後電極が存在することで微小間隙内のコロナが進展しやすくなることがわかった。 $x=0, 3\text{mm}$  の場合では、コロナが発生後、微小間隙内をすぐに進展するのに加えて、針背後電極上部からのコロナも低い電圧で発生することがわかった。 $x=0, 3\text{mm}$  の  $D=3\%$  に比べて、 $x=2, 5\text{mm}$  の方が針背後電極上部からのコロナ発光は小さいが、微小間隙内のコロナは進展し、フランシオーバ電圧が下がることがわかった。

針背後電極上部からコロナが発生し、間隙内のコロナ進展挙動に影響することがわかった。このことから、電力機器の埋め込み電極表面の突起などが機器の絶縁性能に影響を及ぼす可能性がある。その他、微細化による集積回路には絶縁膜の亀裂や線間に高電界が発生し、故障を起こす可能性がある。このような広い分野に適用が可能と考えられる。

## 参考文献

- 1) 花村信：電学誌, **116** (1996) 654
- 2) 河村達雄：電学誌, **97** (1977) 349
- 3) 宅間董：電学論 B, **116** (1996) 1168
- 4) 原雅則, 栗原隆史, 小鶴進, 末廣純也, 林則行：電学論 A, **122** (2002) 650
- 5) H.Anis and K.D.Srivastava : IEEE Trans. EI, **16** (1981) 552
- 6) 電気学会技術報告： $SF_6$  の地球環境負荷と  $SF_6$  混合・代替ガス絶縁, **841**, p.1 (2001)
- 7) L.G.Christophorou and R.J.Van Brunt : IEEE Trans. DEI, **2** (1995) 952
- 8) 劉勤民, 甲斐義信, 浅井政一, 長尾雅行, 小嶋正光：電学論 A, **119** (1999) 342
- 9) 山野芳昭：電学論 A, **114** (1994) 481
- 10) 平田智之, 上野秀樹, 中山博史：電学論 C, **125** (2005) 1634
- 11) 家田正之, 沢五郎, 篠原卯吉：電学誌, **88** (1968) 1107
- 12) 上野秀樹, 平田智之, 西川哲司, 中山博史：電気材料技術雑誌, **13** (2004) 64
- 13) 平田智之, 上野秀樹, 中山博史：電気学会放電研究会資料, ED-05-163, p.65 (2005)
- 14) 御所康七, 遠藤正雄, 渡辺光弘, 金子武史：平成 11 年電気学会全国大会講演論文集, 1-226, p.267 (1998)
- 15) H.Ueno, H.Ohnishi, K.Tada, M.Onoda and H.Nakayama : Jpn. J. Appl. Phys., **38** (1999) 4182
- 16) E.Kuffel and A.Yiallizis : IEEE Trans. PAS, **97** (1978) 2359
- 17) D.F.Binns and R.J.Hood : Proc. Inst. Elect. Enger., **116** (1969) 1962