

# 背後電極を有する微小間隙内を進展する沿面放電特性

平田 智之, 上野 秀樹, 中山 博史

電気系工学専攻

## Characteristics of Creeping Discharge Developed in Narrow Gap with Backside Electrode

Tomoyuki HIRATA, Hideki UENO and Hiroshi NAKAYAMA

Department of Electrical Engineering and Computer Sciences

### Abstract

The flashover voltage with a backside electrode below needle was lower than one without a backside electrode. Under  $\mu\text{s}$  pulse voltage application, we describe about characteristics of creeping discharge developed in narrow gap with a backside electrode. Using CCD camera and ultra-high speed camera, we observed corona extension process. As a result, in result of the flashover voltage and corona onset voltage, flashover voltage decreased in positive polarity of  $\text{SF}_6$  content  $D=3\%$ . In corona extension using ultra-high speed camera, the peculiar difference were observed on the corona extension process, the corona extension decreased in  $D=0\%$ , rapid flashover were observed in  $D=3\%$ . Using CCD camera, the small corona were detected from backside electrode.

Key word :  $\text{SF}_6$  gas, creeping discharge, narrow gap, backside electrode

### 1.はじめに

近年、電力需要の増加に伴い、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きた[1]. そのなかで、ガス絶縁開閉装置(GIS)などの電力機器の絶縁には  $\text{SF}_6$  ガスが用いられており、 $\text{SF}_6$  ガスは高耐電圧性や安全性などの多くの要求項目を満たし高い評価を得ている[2,3]. しかし、 $\text{SF}_6$  ガスの絶縁耐力は最大電界に強く依存し、機器内に導体上の突起や浮遊金属粒子などによる局所的な高電界の形成など、不平等電界を形成する配置ではその絶縁性能は著しく低下する[4]. そのため、直径 4mm の球電極にバリアを接触させて三重点をつくり、 $\text{SF}_6$  ガス又は  $\text{N}_2/\text{SF}_6$  混合ガスを用いた研究などがされている[5-7].

また、 $\text{SF}_6$  ガスの地球温暖化係数は  $\text{CO}_2$  に比べ 23900 倍もあるため、地球温暖化への影響が大きい[8]. そこで代替ガスとして  $\text{SF}_6$  ガスと  $\text{N}_2$  ガスの混合気体や、 $\text{N}_2$  ガス単独で  $\text{SF}_6$  ガスの使用量を抑えるといった研究もされている[9-11].

一般に、電力機器の絶縁物は単独で用いられることは少なく、多くの場合は、絶縁ガスと固体絶縁物をスペーサとして用いた複合絶縁方式を用いている。電力機器の絶縁技術は、 $\text{SF}_6$  ガスを主とするガス絶縁特性の研究に加えて、電極間に絶縁物のバリアを挿入した様々な複合絶縁方式についても活発に研究されている[12,13]. 機器の複合絶縁化により、電極と固体絶縁物が接する部分や絶縁物同士が接触する部分が多くなる。このような接続部は間隙などが生じないようにされているが、機器の運転中の熱や振動などの経年劣化で接続部に微小な間隙が生じたり、固体絶縁物に亀裂が生じる可能性がある。そこに、雷サージが加わったときの機器内の浮遊金属粒子や導体上の突起により局所的な不平等電界が生じると、機器の故障に繋がる可能性がある。電力機器の信頼性を向上させるため、亀裂を貫く沿面放電の特性を明確にする必要があるが、まだ未解明の点が多い[14-17]. また、スペーサによる三重点の影響を緩和するため埋め込み電極が採用されている場合があり、その表面に突起などがあるとき、突起の先端の形状により、針・球背後電極とみなし得る可能性がある。

本研究では、GIS 内においてスペーサとして用いられている固体絶縁物に亀裂が生じたとき、間隙内を進展する沿面放電の特性を明らかにすることを目的としている。雷サージや内部の異常電圧を  $\mu\text{s}$  方形波パルス電圧、絶縁ガスには  $\text{SF}_6$  ガスと  $\text{N}_2/\text{SF}_6$  混合ガスを用い、局所的な不平等電界を針-平板電極で模擬した。この針-平板電極間に、硼硅酸ガラスを二枚重ねて間隙を構成したバリアを挿入し、間隙内を進展する沿面放電特性を調べた。

## 2. 実験方法

本実験で用いた電極構成を Fig.1 に示す。間隙を模擬したバリアは、厚さ約 1mm の硼硅酸ガラスを用いている。下部バリアには大きさ 40mm × 26mm, 上部バリアには大きさ 7mm × 26mm の硼硅酸ガラスを重ねて微小間隙を模擬した。上・下部の針電極には先端曲率半径が約 35  $\mu$ m の針を用い、球電極には直径が約 3mm の球を用いた。他方の間隙の端には、厚さ 5mm, 大きさ 10mm × 30mm の黄銅製電極を設置している。対向電極と背後電極は同電位である。背後電極の位置  $M$  は下部針電極や球電極が下部バリアと接している点が基準となっており、上部針電極下端から水平方向の位置である。本実験では、針背後電極を有したときのものを電極構成 A (Fig.1(b-1)), 球背後電極を有したときのものを電極構成 B (Fig.1(b-2))とした。針-対向平板電極間距離  $L = 7$ mm 一定で、間隙幅  $d = 0$   $\mu$ m 一定である。ここで、間隙幅  $d = 0$   $\mu$ m とは下部バリアに直接上部バリアを重ねたもので、硼硅酸ガラスの表面の粗さは約 50nm の精度で製造されているため、放電進展が可能な微小な間隙が存在する。この電極系を黄銅製容器内に入れ、約 0.1Pa の真空中に排気した後、SF<sub>6</sub> ガス、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。

針-対向平板電極間に波頭長  $T_f = 1.5$   $\mu$ s の単一方形波パルス電圧を印加した。電圧波形は高圧プローブ (HV-P30, DC-50MHz, 岩崎通信機(株)) を、コロナ発光は光電子増倍管 (931A, 波長領域 300-650nm, ㈱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始める電圧の瞬時値をコロナ開始電圧、波頭部でフラッシュオーバが生じたときの瞬時値をフラッシュオーバ電圧とした。コロナ進展と沿面放電の様子を、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.) や本実験で使用した感度が最大 20 万倍の高速ゲートイメージングカメラを取り付けた CCD カメラ (C4346, ㈱浜松ホトニクス) で撮影した。

なお、硼硅酸ガラス (体積抵抗率  $\rho = 1.1 \times 10^{12}$   $\Omega \cdot \text{m}$ , 比誘電率  $\epsilon_r = 7$ ) の電位減衰の時定数  $\tau$  は約 1 分である。電圧の印加時の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、電圧の印加間隔は 1 分以上とした。また、電圧波頭部の時間領域 (1.5  $\mu$ s) でのバリア表面の電荷減衰は無視できるので、コロナによるバリア上の蓄積電荷がその後のコロナの進展に及ぼす影響は GIS のスペーサなどに用いられているエポキシ樹脂と同等の実験結果が得られる。

## 3. 実験結果

### 3.1 フラッシュオーバ電圧およびコロナ開始電圧の背後電極位置依存性

背後電極なしの場合は、印加電圧 35kV を加えてもフラッシュオーバに至らなかった [6, 15]。背後電極を有するとき、フラッシュオーバに至るのに背後電極の位置の影響があると思われる。そこで、SF<sub>6</sub> ガス中のフラッシュオーバ電圧およびコロナ開始電圧の針・球背後電極位置依存性を Fig.2 に示す。針背後電極および球背後電極の場合の結果をそれぞれ Fig.2(a), Fig.2(b) に示す。フラッシュオーバ電圧およびコロナ開始電圧の測定は同一条件で各々 10 回、5 回行い、その平均を最大値、最小値とともに図中に示した。図中の  $\uparrow$  矢印は、印加電圧 ( $V_p = 35$ kV) の波頭部で絶縁破壊しなかったことを示し、その上の数字は絶縁破壊しなかった回数を示す。なお、放電はすべて間隙内を進展し、針-対向平板電極間の間隙内でフラッシュオーバが生じていることを確認した。

針背後電極を有した電極構成 A のフラッシュオーバ電圧において、0.1MPa では、背後電極位置  $M = 0$ mm から 3mm までフラッシュオーバ電圧は約 24.5kV とほぼ一定で、 $M = 6$ mm のとき約 27.5kV とゆるやかに上昇した。0.2MPa, 0.3MPa でも、0.1MPa のときと同じような背後電極位置依存性が得られた。コロナ開始電圧は 0.1MPa の値を載せている。間隙幅  $M$  を変化させても約 4.0kV とほぼ一定で、0.3MPa では約 5.0kV とわずかに増加した。球背後電極を有した電極構成 B のフラッシュオーバ電圧において、0.1MPa では、 $M = 0$ mm のとき約 24.5kV から 2mm のとき約 23.0kV まで低下し、6mm のとき約 29.0kV とフラッシュオーバ電圧は上昇した。0.2MPa も 0.1MPa のときと同じような背後電極位置依存性が得られた。0.3MPa では、フラッシュオー

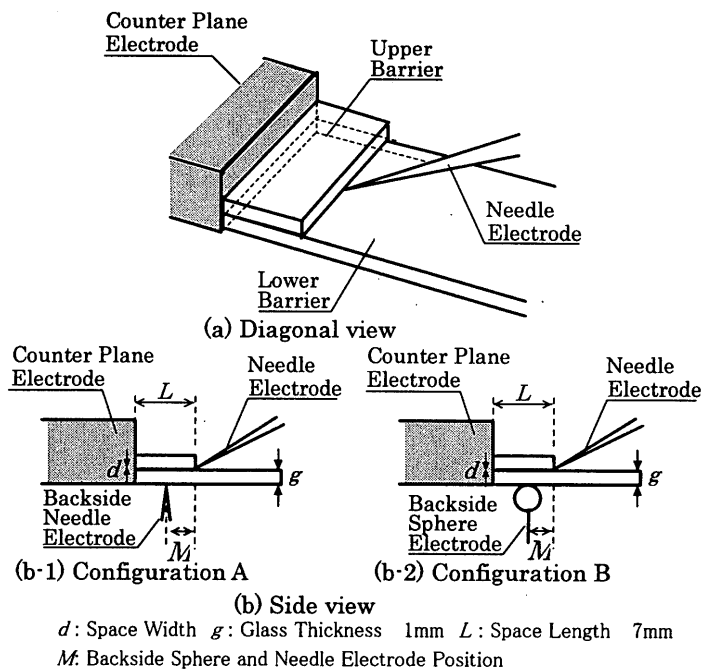


Fig.1 Electrode configuration

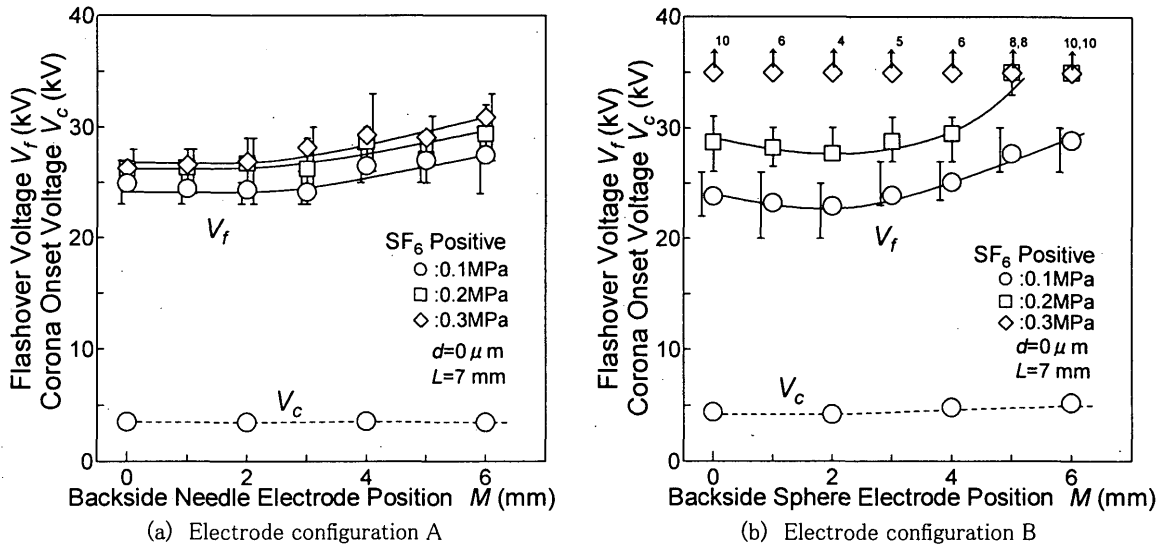


Fig.2 Backside needle and sphere electrode position dependence on flashover and corona onset voltage

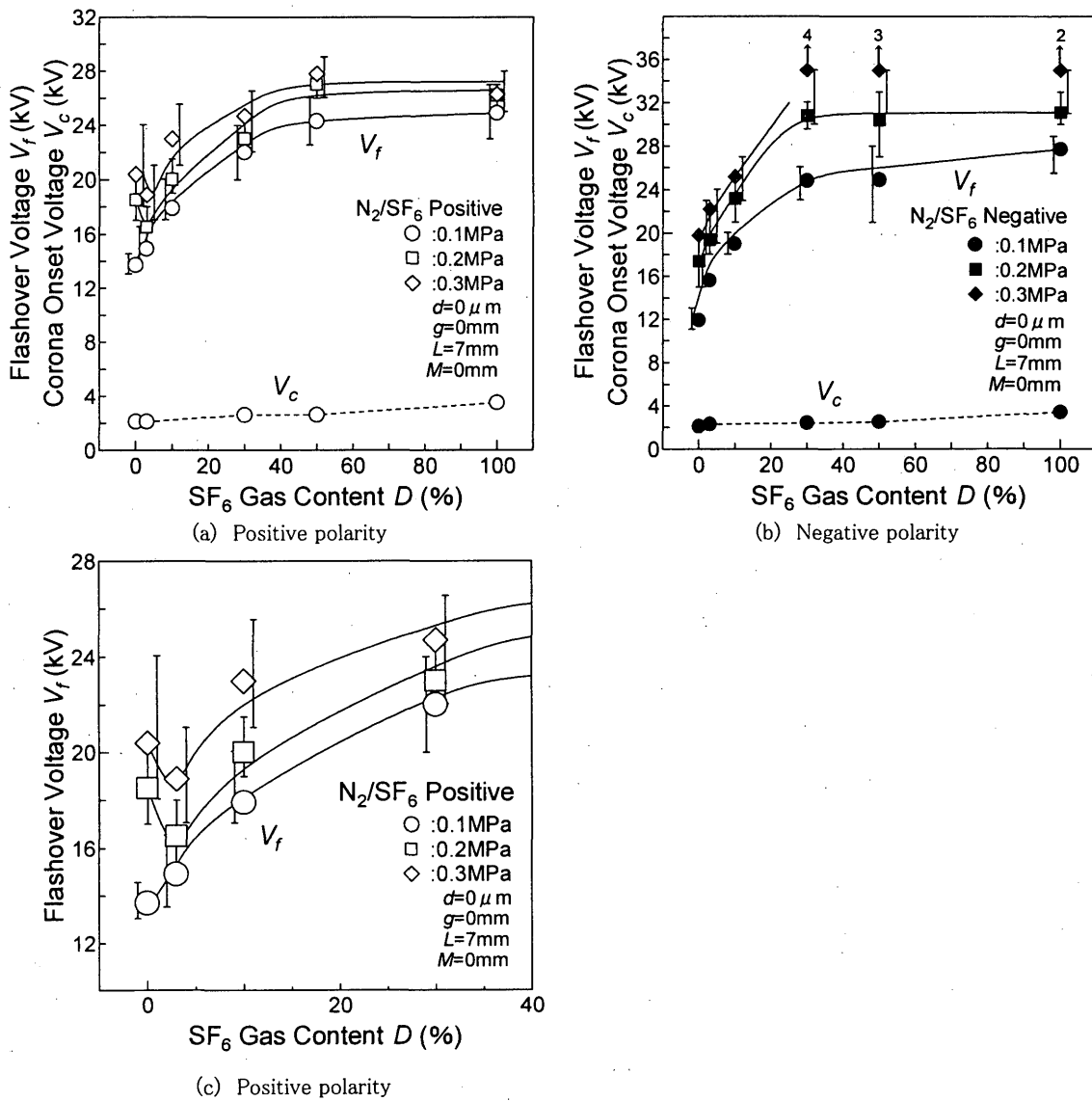


Fig.3 Flashover and corona onset voltage in  $N_2/SF_6$  mixture gas with backside needle electrode

バに至らなかった。コロナ開始電圧は 0.1MPa では約 4.5kV とほぼ一定で、0.3MPa では約 6.5kV とわずかに増加した。

針・球背後電極を有したフラッシュオーバ電圧の背後電極位置依存性では、球背後電極を有した電極構成 A のとき、圧力変化に違いがみられるが、これは球背後電極にすることで針背後電極よりも電界が弱くなったためと考えている。また、 $M=2\text{mm}$  でわずかながら変化はあるが、Fig.2(a)と Fig.2(b)で、ある  $M$  の値までフラッシュオーバ電圧はほぼ一定で、その後  $M$  の増大とともにフラッシュオーバ電圧が上昇するという特徴は似ている。そこで、針背後電極を有した電極構成 A において  $\text{N}_2/\text{SF}_6$  混合ガス依存性を調べた。フラッシュオーバ電圧とコロナ開始電圧の  $\text{N}_2/\text{SF}_6$  混合ガス依存性を Fig.3 に示す。Fig.3(c)は Fig.3(a)の一部を拡大したものとなっている。

Fig.3(a)と Fig.3(c)の正極性の 0.1MPa では、 $\text{SF}_6$  ガスの混合率  $D=0\%$  のとき約 13.5kV から 50% のとき約 24.3kV までフラッシュオーバ電圧は急上昇し、50% から 100% ではほぼ一定となった。0.2MPa では、0% のとき約 18.5kV から 3% のとき約 16.5kV までフラッシュオーバ電圧は下がり、3% から 50% のとき約 27.0kV までフラッシュオーバ電圧は急上昇し、50% から 100% ではほぼ一定となった。0.3MPa も 0.2MPa と同様に、0% のとき約 20.4kV から 3% のとき約 18.9kV に下がり、30% のとき約 24.7kV まで急激に上昇し、30% から 100% ではほぼ一定となった。コロナ開始電圧は、0% のとき約 2.2kV から 100% のとき約 3.5kV と変化は少なく、圧力変化ではわずかに増加した。Fig.3(b)の負極性において、0.1MPa では、0% のとき約 12.0kV から 30% のとき約 25.0kV までフラッシュオーバ電圧は急上昇し、30% から 100% のとき約 28.0kV までゆるやかに上昇した。0.2MPa では、0% のとき約 17.5kV から 30% のとき約 30.5kV まで急激な変化が見られ、30% からは飽和している。0.3MPa では、10% まで 0.1MPa、0.2MPa のときと同様な変化の仕方になっている。コロナ開始電圧は 0% のとき約 2.1kV から 100% のとき約 3.3kV と変化は少なく、圧力変化ではわずかに増加した。このことから、フラッシュオーバ電圧の変化は、コロナ開始以後、コロナが進展し、電極間の導電性が増してフラッシュオーバに至る。このコロナの進展の難易がフラッシュオーバ電圧の結果に違いがでる。

### 3.2 超高速カメラによる印加電圧波頭部を時間的分割した放電挙動の観測

コロナ開始からフラッシュオーバまで電子なだれによりコロナが進展する。そのコロナの進展の難易がフラッシュオーバ電圧の結果に違いがでることから、針背後電極を有した電極構成 A において、 $\text{N}_2/\text{SF}_6$  混合ガスの 0.2MPa、 $d=0\mu\text{m}$ 、 $M=0\text{mm}$  に対し、 $\mu\text{s}$  方形波パルス電圧波頭部(波高値  $V_p=35\text{kV}$ )を用いて、間隙内のコロナ進展の様子を超高速カメラで印加電圧

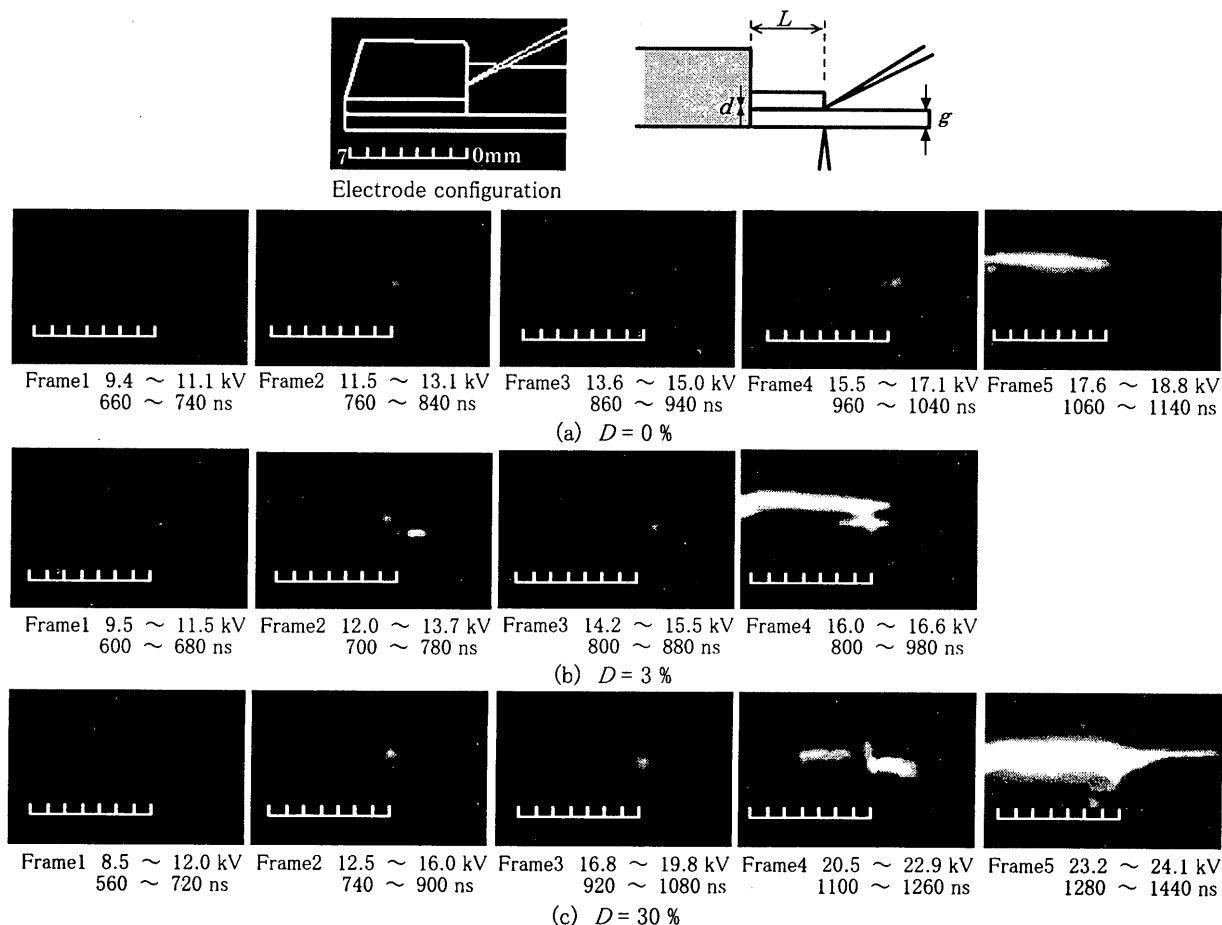


Fig.4 Corona extension images by ultrahigh-speed camera ( $\text{N}_2/\text{SF}_6$ : 0.2MPa,  $d=0\mu\text{m}$ ,  $M=0\text{mm}$ , Positive)

波頭部を時間的に分割したコマ撮り撮影を行った。

針背後電極を有した電極構成 A における正極性コロナの進展挙動を Fig.4 に示す。それぞれの Frame の下に電圧を印加してからの撮影時間とそのときの電圧を示す。また、コロナの進展の長さがわかりやすいように目盛りを設けた。ここで、フラッシュオーバー電圧が著しく変化した SF<sub>6</sub> ガスの混合率  $D=0\%$  から 30% に焦点を当てており、そのときのコロナ開始電圧は約 2.2kV から 2.6kV である。各 Frame によっては、コロナが上部バリアの上面を進展し、フラッシュオーバーに至っているように見えるが、上部バリアによる光の屈折のためである。

Fig.4(a) に示す針背後電極を有した電極構成 A の SF<sub>6</sub> ガスの混合率  $D=0\%$  では、Frame1(9.4~11.1kV, 660~740ns) で間隙入り口付近の上部針先付近からコロナが出て、Frame2(11.5~13.1kV, 760~840ns) でコロナが間隙内を進展し、Frame3(13.6~15.0kV, 860~940ns) でコロナの伸びが小さくなり、Frame4(15.5~17.1kV, 960~1040ns) で再びコロナが間隙内を進展し、Frame5(17.6~18.8kV, 1060~1140ns) でフラッシュオーバーに至った。Fig.4(b) の  $D=3\%$  では、Frame1(9.5~11.5kV, 600~680ns) で上部針先付近からコロナが出て、Frame2(12.0~13.7kV, 700~780ns), Frame3(14.2~15.5kV, 800~880ns) でコロナが間隙内を進展し、Frame4(16.0~16.6kV, 900~980ns) でフラッシュオーバーに至った。Fig.4(c) の  $D=30\%$  では、Frame1(8.5~12.0kV, 560~720ns) では間隙入り口付近のコロナは見られず、Frame2(12.5~16.0kV, 740~900ns) で上部針先付近からコロナが出て、Frame3(16.8~19.8kV, 920~1080ns), Frame4(20.5~22.9kV, 1100~1260ns) でコロナが間隙内を進展し、Frame5(23.2~24.1kV, 1280~1440ns) でフラッシュオーバーに至った。

針背後電極を有した電極構成 A における正極性コロナの進展挙動を超高速度カメラで撮影した。その結果を Fig.5 に示す。印加電圧が 12kV 付近では、SF<sub>6</sub> ガスの混合率  $D=3\%$  のとき、コロナが最も伸びており、 $D=30\%$  のとき、コロナの進展が最も小さい。印加電圧が 12kV から 15kV の範囲のとき、 $D=0\%$  では、印加電圧が上昇するとコロナは間隙内を進展するが 15kV 付近で一度コロナが小さくなる。Fig.4(a) の  $D=0\%$  の N<sub>2</sub> ガス単独の場合、同じ露光時間 80ns である Frame2(11.5~13.1kV, 760~840ns), Frame4(15.5~17.1kV, 960~1040ns) より Frame3(13.6~15.0kV, 860~940ns) のコロナの発光が弱いのは、進展したコロナのガラス上の蓄積電荷や空間電荷の影響と思われる。そのため、コロナの導電性が弱まって、コロナの進展が遅くなりフラッシュオーバー電圧が上昇したと思われる。 $D=3\%$ , 30% では、印加電圧が上昇するにつれてコロナが進展する。印加電圧が 15kV 以上の範囲になると、 $D=3\%$  のときのフラッシュオーバー電圧が最も低く、30% のときが最も高くなった。ここで、SF<sub>6</sub> ガスは電気的負性気体の特性を持つ[18]。そのため、N<sub>2</sub> ガスに SF<sub>6</sub> ガスが混入することで電子の供給源として影響を与えていると考えられる。

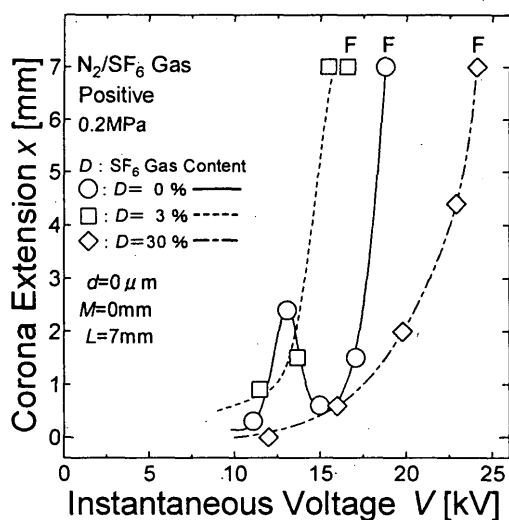


Fig.5 Relationship between corona extension and applied voltage (N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>: 0.2MPa,  $d=0\mu\text{m}$ ,  $M=0\text{mm}$ , Positive)

### 3.3 超高速度ゲートイメージインテンシファイア CCD カメラによる背後電極からのコロナ発光の観測

間隙内のコロナの進展に背後電極がどのように影響しているのかを調べた。超高速度カメラでは背後電極からのコロナ発光が観測されないために、超高速度ゲートイメージインテンシファイアを搭載した CCD カメラを用いて、0.2MPa, 針背後電極位置  $M=2\text{mm}$ , 間隙幅  $d=0\mu\text{m}$ , 正極性における背後電極からのコロナ発光を観測した。 $M=2\text{mm}$  にした理由は、 $M=0\text{mm}$  では上部針電極の真下に針背後電極が存在するため、上部針電極と針背後電極のコロナ発光が重なって、判別が困難になるためである。

Fig.6 に CCD カメラを用いて、0.2MPa, 針背後電極位置  $M=2\text{mm}$ , 間隙幅  $d=0\mu\text{m}$  のときの正極性における背後電極からのコロナ発光を示す。SF<sub>6</sub> ガスの混合率  $D=0\%$ , 3%とも Frame1(6.0~8.0kV, 7.0~9.5kV) では、針背後電極からコロナの発光は見られない。Frame2(8.0~10.0kV,

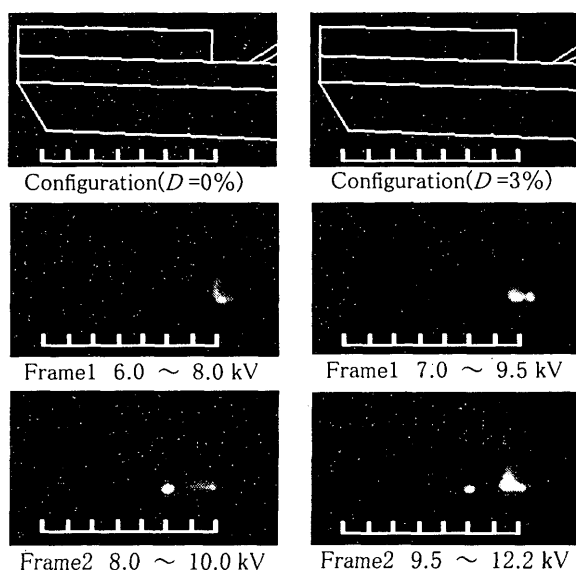


Fig.6 Corona from backside needle electrode (N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>: 0.2MPa,  $d=0\mu\text{m}$ ,  $M=2\text{mm}$ , Positive)

9.5~12.2kV)のとき、針背後電極からコロナの発光が見られた。また、3%よりも0%の方が針背後電極からのコロナ発光は広がっているが、上部針-平板電極間の長さ7mmに対して0.3mmのコロナの広がりである。

#### 4. 検討

以上の結果より、針背後電極を有した電極構成 A におけるコロナの進展とフラッシュオーバー電圧に及ぼす  $N_2/SF_6$  混合ガスの影響について考察する。針背後電極の位置や  $N_2/SF_6$  混合ガスに関係なく、上部針電極先端付近からコロナが発生する[6,14,15]。このことから、コロナの進展においては、紫外線や初期コロナによるバリア表面からの光電子、間隙入り口付近での空間電荷やバリア表面での蓄積電荷などの影響を考慮する必要がある。

上述したように、Fig.3(a)のフラッシュオーバー電圧の変化は電気的負性気体特性を持つ微量な  $SF_6$  ガスが  $N_2$  ガスに混入することで、電子の存在確立が増すとともに、 $SF_6$  ガス単独より絶縁耐力が低い混合ガスでは、低電界でも容易に電子を加速させることができるために電子の供給源として影響を及ぼしたと考える。混合率  $D$  が増すと高い絶縁性能よりフラッシュオーバー電圧が上昇する[2,3]。また、微量な混合率でフラッシュオーバー電圧が低下するという報告がある[19]。要するに、 $SF_6$  は電子を捕捉する力を持つので  $SF_6$  が増すほど、電界がかかると電子を放出する確率が上がる。このため初期電子供給が容易になる。したがって、ストリーマがけ形成しやすく、フラッシュオーバーがしやすくなる。しかし、 $SF_6$  の混合率が30%、50%と増加すると、高電界下での電子の増幅は抑えられるのでフラッシュオーバー電圧は上昇する。このような理由で、フラッシュオーバー電圧と混合率依存性はV特性になる。しかし、現在のところ、なぜ3%でフラッシュオーバー電圧が最低になるのかについては不明である。実際に、Fig.4の針背後電極を有した電極構成 A での正極性におけるコロナの進展挙動で、Fig.4(a)の  $D=0\%$  のとき、上部針電極先端から出たコロナが間隙内を進展しているが、Frame3(13.6~15.0kV, 860~940ns)でコロナの伸びが小さくなり、フラッシュオーバー電圧が上昇している。これは、 $D=0\%$  とは、 $N_2$  単独ガスのため、 $N_2/SF_6$  混合ガスに比べ電子の存在確立が少ない。そのため、進展したコロナの逆電界作用によりコロナの発光が薄くなり、コロナが小さくなったものと考えられる。Fig.4(b)の  $D=3\%$ 、Fig.4(c)の  $D=30\%$  では、上部針電極先端から出た間隙内を進展しているコロナの発光は強く、コロナの長さが小さくなることなくフラッシュオーバーまで至っている。これは、電気的負性気体特性を持つ微量な  $SF_6$  ガスが  $N_2$  ガスに混入することで電子の供給源として影響しているためと考える。

Fig.6の針背後電極からのコロナ発光の観測での0.2MPa、針背後電極位置  $M=2\text{mm}$ 、間隙幅  $d=0\mu\text{m}$  のときの正極性において、CCDカメラを用いて背後電極からのコロナ発光の観測では、 $M=2\text{mm}$  の位置にある針背後電極からコロナの発光が見られた。このことから、針背後電極の針先付近にコロナが出ることで、針状から0.3mmの平板状背後電極に変わると考えられ、間隙入り口付近に背後電極が近づく。そのため、上部針先から出たコロナに間隙内へ進展しやすいと考える。

このように、針背後電極は、パルス電圧の印加により、その部分が高電界となるためにコロナが発生する。その後、電圧の上昇により、そのコロナの広がり、間隙内の電界が変化していくために、静的な電界から動的な電界を考える必要がある。今後、針背後電極からのコロナについてより詳しい検討をする必要がある。

#### 5. まとめ

$N_2/SF_6$  混合ガス中において、針-平板電極間に微小間隙を設置した電極系に  $\mu\text{s}$  方形波パルス電圧を印加したときの間隙内を進展する沿面放電特性を調べた結果を以下にまとめる。

- (1)  $N_2/SF_6$  混合ガス中のフラッシュオーバー電圧において、正極性の0.2MPaでは、 $SF_6$ の混合率  $D$ の増加に伴って  $D=0\%$ のとき約18.8kVから  $D=3\%$ のとき約16.6kVまで低下し、 $D=100\%$ のとき約25.0kVまで上昇した。負極性では、 $D=0\%$ のとき約17.5kVから  $D=30\%$ のとき約30.5kVまで急激な変化が見られ、 $D=30\%$ からは飽和した。
- (2) コロナ開始電圧において、正極性では、 $D=0\%$ のとき約2.5kVから  $D=100\%$ のとき約3.7kVと変化した。負極正では正極性よりも少し低い電圧となった。
- (3) 超高速カメラによる放電挙動を観測すると、0.2MPa、正極性では、 $SF_6$ の混合率  $D=0\%$ のとき、15kV付近でコロナの伸びが小さくなるのが見られ、その後、またコロナが進展し、フラッシュオーバーに至った。 $D=3\%$ のとき、14.2kVから15.5kVでコロナが急激に伸び、フラッシュオーバーに至った。 $D=30\%$ のとき、コロナは徐々に進展し、フラッシュオーバーに至った。
- (4) CCDカメラによる針背後電極からのコロナ発光の観測において、針背後電極からコロナの発光が見られ、 $D=3\%$ のコロナ発光より  $D=0\%$ のコロナ発光の方が広がっていたが、上部針-平板電極間の長さ7mmに対して0.3mmのコロナの広がりであった。

#### 参考文献

- [1] 花村:「高度化する変電技術」, 電学誌, 116, pp.654-657(1996)
- [2] 河村:「 $SF_6$ ガス絶縁開閉装置」, 電学誌, 97, pp.349-354(1977)
- [3] 青野・大野:「 $SF_6$ ガスの電力分野への応用」, 電学誌, 115, pp.495-497(1995)

- [4] 宅間:「ガス絶縁およびガス絶縁機器の基礎」, 電学論 B, 116, pp.1168-1172(1996)
- [5] H.Kamatani, K.Watabe, H.Masuoka, M.Onoda and H.Nakayama:“Exterior Corona Effect on Sphere-Plane Discharge in SF<sub>6</sub> Gas Utilizing Optical Measurement”, Jpn.J.Appl.Phys., 36, pp.170-172(1997)
- [6] 平田・吉村・上野・中山:「針背後電極をもつ微小間隙の沿面放電特性」, 平成 16 年電気学会全国大会講演論文集, 1-027, p.30(2004)
- [7] 西川・上野・中山:「(球-ガラス-平板)複合電極のパルス放電特性」, 平成 15 年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G1-16(2003)
- [8] 電気学会技術報告:「SF<sub>6</sub>の地球環境負荷とSF<sub>6</sub>混合・代替ガス絶縁」, 841, pp.1-11(2001)
- [9] 加古・吉村・上野・中山:「バリア上の窪み形状が放電特性に及ぼす影響」, 平成 16 年電気学会全国大会講演論文集, 1-142, p.157(2004)
- [10] 星田・畑下・上野・中山:「複合電極のパルス放電特性に及ぼす針電極の影響」, 平成 16 年電気学会全国大会講演論文集, 1-124, p.135(2004)
- [11] 沼田・西川・上野・中山:「 $\mu s$  パルス電圧波頭における複合電極の放電特性」, 平成 16 年電気学会全国大会講演論文集, 1-143, p.158(2004)
- [12] 遠藤・佐藤・佐藤・榊原:「負極性直線状沿面放電の進展特性」, 電学論 A, 115, pp.845-850(1995)
- [13] 渡部・釜谷・小林・小野田・中山:「SF<sub>6</sub> および N<sub>2</sub> ガス中のパルス電圧による沿面放電特性に及ぼすバリアの効果」, 電学論 A, 117, pp.1090-1096(1997)
- [14] 西川・坂本・上野・中山:「 $\mu s$  パルス電圧波頭部における絶縁物微小間隙を貫く沿面放電と背後電極の影響」, 電学論 C, 122, pp.1894-1901(2002)
- [15] 上野・増岡・中山:「固体絶縁物微小間隙内の沿面放電特性」, 電学論 A, 120, pp.25-30(2000)
- [16] 大野・山野:「背後電極を有する絶縁物に存在する微小間隙を貫く交流絶縁破壊」, 電学論 A, 121, pp.70-75(2001)
- [17] 平田・上野・中山:「微小間隙の沿面放電におよぼす針背後電極の影響」, 平成 16 年電気学会電力エネルギー部門大会一般セッション論文, GIS・ガス絶縁, 327(2004)
- [18] 中西:「SF<sub>6</sub>ガスの特性」, 電学誌, 97, pp.330-333(1977)
- [19] 繪川・釜谷・西川・上野・中山:「負極性  $\mu s$  パルス電圧による混合ガス(SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>)中の沿面放電特性に及ぼすバリア形状の影響」, 電学論 A, 121, pp.751-757(2001)