

# SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合ガスにおける固体絶縁体を持つ複合電極の放電特性

古賀 充真・上野 秀樹・中山 博史

(電気系工学専攻)

## Discharging Characteristics of Composite Electrode with Solid Insulator in SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> Mixed Gas

Mitsumasa KOGA, Hideki UENO and Hiroshi NAKAYAMA

(Department of Electrical Engineering and Computer Sciences)

### abstract

Creeping and gaseous discharge characteristics of sphere-plane electrode with dielectric barrier in SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> mixed gas under  $\mu$ s pulse voltage application have been investigated. The distance from the bottom of the sphere to the plane electrode was fixed at  $g=2$ mm. In pure N<sub>2</sub>, the breakdown was occurred only at the gaseous space between the sphere and the plane. In the mixed gas with 2% of SF<sub>6</sub>, two electrical discharge paths (between sphere and plane discharge, and creeping discharge) were observed under this condition. In mixed gas with SF<sub>6</sub> higher than 3%, the flashover occurred only on the barrier surface.

**Keywords:** SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> mixed gas, triple junction, discharge path, partial discharge

### 1.はじめに

GIS(ガス絶縁開閉装置)などの電力機器に絶縁媒体として用いられているSF<sub>6</sub>は機器の縮小化に大きく貢献した。それゆえ、SF<sub>6</sub>は電力機器の絶縁媒体として重要な地位を確立している。しかし、電力機器内の高電圧導体と外部導体を支持するために固体絶縁物が用いられており固体絶縁物沿面フラッシュオーバー電圧は固体絶縁体がない場合のフラッシュオーバー電圧より低いことが知られている。その原因の一つに、固体絶縁物と電極の接触部に形成される微小ギャップによる電界集中があげられる[1]。このような二種類の誘電体と電極の三者が一点に重なった点では電界集中が生じる。この現象を三重点効果という[2]。一方、SF<sub>6</sub>は局部高電界で絶縁耐力が著しく低下し[3]、この三重点が機器の絶縁破壊を招くことが問題となっている。また、SF<sub>6</sub>の地球温暖化係数はCO<sub>2</sub>の約24,000倍と非常に高く、排出量の削減が求められている。これら二つの欠点改善のためにSF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合ガスやN<sub>2</sub>の単独使用などの研究がなされている[4]。

また、電力機器の絶縁はガスと固体絶縁体との複合絶縁方式となっている。固体絶縁物(バリア)の挿入は局部高電界から発生したコロナ放電による電荷を表面電荷上に蓄積し、その後の放電進展を変化させる[5]~[7]。このような影響からフラッシュオーバーの機構は未だ不明な点が多く、そのメカニズムの解明が必要となる。

これらの課題に対して本実験では、SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合ガスを使用し、三重点を持つときの複合電極における破壊特性の解明を目的とした。そこで、球-平板電極に固体絶縁物を球電極に接触するように配置し、パルス電圧波頭部(波頭長1.5 $\mu$ s)に焦点をしばり、SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合ガス中における三重点を持つ複合電極において、三重点におけるコロナがフラッシュオーバーに及ぼす影響について調べた。

### 2.実験方法

電極構成を図1に示す。上部電極には直径4mmのスチールボールを、下部電極には大きさ30 $\times$ 30mm<sup>2</sup>の黄銅製平板を用いた。球-平板間距離は $g=2$ mmとした。また、球電極に幅15mm、厚さ1mmの硼硅酸ガラス(体積抵抗率 $\rho=1.1 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ , 比誘電率 $\epsilon_r=7.0$ )を接触させ複合電極構成とした。この電極系を黄銅製容器(3 $\times 10^3$ cm<sup>3</sup>)内に設置し、約0.1Paまで排気後、SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合ガスを封入し、ガス圧を0.1, 0.2, 0.3MPaとした。ここで、SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合率(分圧比)を $D$ とする。すなわち、 $D=0\%$ はN<sub>2</sub>単独ガス、 $D=100\%$ はSF<sub>6</sub>単独ガスを意味している。印加電圧は、高圧方形波パルス発生装置P.G.(株)電研精機研究所)によって、 $\mu$ s方形波パルス電圧(波頭長 $T_f=1.5 \mu\text{s}$ 、波高値 $V_p=35\text{kV}$ )を発生させた。

フラッシュオーバはすべて印加パルス電圧の波頭部にて発生させ、そのときの電圧波形を高圧プローブ(HV-30,DC-50Hz,岩崎通信機(株))を介して、電圧波形はデジタルオシロスコープ(DL1540,200MS/s,150MHz,横河電機(株))で観測した。また、フラッシュオーバまでのコロナの進展過程を超高速度カメラ(IMACON468,波長領域385-900nm,HADLAND PHOTONICS.LTD.)を用いて撮影した。

なお、バリアには硼硅酸ガラスを使用しているが、これは一連の実験における先行実験による残留電荷の影響

を避け、実験の再現性を向上させるためである。ここで真空の誘電率を $\epsilon_0$ 、絶縁体の比誘電率を $\epsilon_r$ 、絶縁体の体積抵抗率を $\rho$ とすれば、絶縁体の表面堆積電荷減衰の時定数は $\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \rho$ と表される[8]。これから求まる硼硅酸ガラスの時定数は約1分である。しかし、硼硅酸ガラスの表面抵抗を考慮しなければならず、前述の時定数のみで電荷の減衰は決定されない。実際、電位計を用いて、電圧印加後1分の残留電位を測定したが検出されなかったことから、パルス電圧の印加間隔は1分以上とすることで、前印加による残留電荷の影響は避けられる。一方、実際の機器に使用されているエポキシ樹脂の表面堆積電荷減衰の時定数は約1日であり、本実験は波頭部(1.5 $\mu$ s)でのフラッシュオーバ特性を調べたものであるために、波頭部で発生したコロナによりガラス上に蓄積した電荷の減衰は波頭長の時間帯では無視でき、波頭部で生じたコロナによる蓄積電荷がその後の放電に与える影響は保持され、エポキシ樹脂と同様の結果が得られる。

### 3.実験結果

#### (3・1) フラッシュオーバ電圧 - ガス圧特性

SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合ガス中(D=0%,2%,3%)におけるフラッシュオーバ電圧(V<sub>f</sub>)-ガス圧特性(D)を図2に示す。測定は同一条件で20回行い、その平均値をプロットし、最小値,最大値をエラーバーで図示している。また、それぞれの放電経路について球-平板間でフラッシュオーバしたときは記号▲,■,●で、及び沿面フラッシュオーバはそれぞれ記号□,○で示している。なお、放電経路は石英窓から目視で確認した。

図2(a)の正極性の場合D=0%においてフラッシュオーバ電圧は、0.1MPaで約17.5kV,0.2MPaで約20.3kV,0.3MPaで約20.4kVとなり、0.1~0.2MPaではガス圧の増加に伴いフラッシュオーバ電圧も上昇し、ガス圧0.2~0.3MPaではフラッシュオーバ電圧は大きな変化はない。D=2%では、0.3MPaにおいて球-平板,沿面と両経路が確認でき、フラッシュオーバ電圧はそれぞれ27.1kV,23.5kVとなり球-平板間の方がフラッシュオーバ電圧は高くなった。球-平板でフラッシュオーバした場合のフラッシュオーバ電圧を比較するとガス圧0.1MPa,0.2MPa,0.3MPaの順に約23.8kV,23.6kV,27.1kVとガス圧0.2~0.3MPaで大きくフラッシュオーバ電圧が増加した。また、D=3%については、0.1MPaで約22.9kV,0.2MPaで約22.3kV,0.3MPaで約23.4kVとなり、明瞭な変化はみられなかった。また、いずれの

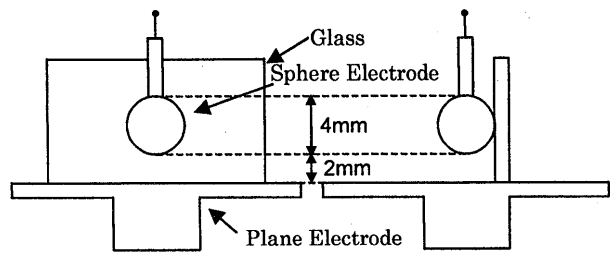


図1 電極構成図  
Fig.1. Electrode configuration

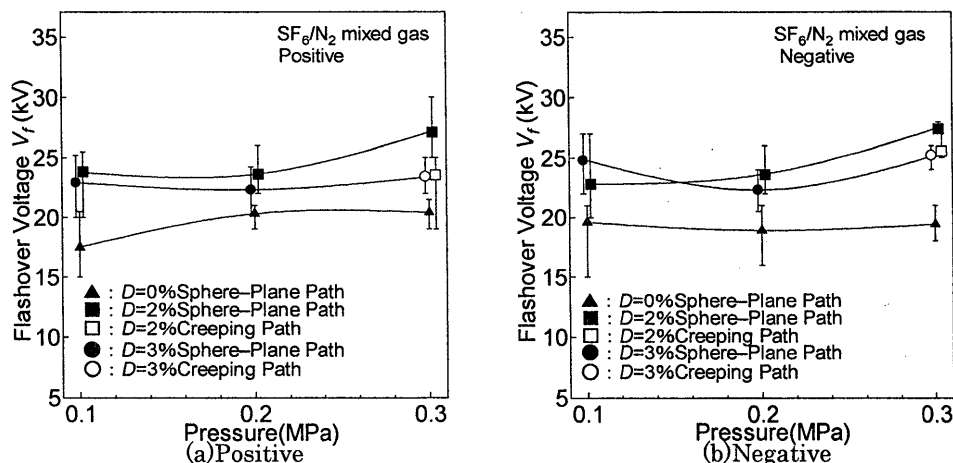


図2 フラッシュオーバ電圧-ガス圧特性(D=0%,2%,3%)  
Fig.2. Dependency of pressure on flashover voltage (D=0%,2%,3%)

圧力において  $D=0\%$  よりも  $D=2\%, 3\%$  の方がフラッシュオーバー電圧は高くなった。放電経路は、 $0.3\text{MPa}$ 、 $D=2\%, 3\%$  のとき沿面でフラッシュオーバーし、それ以外は全て球-平板間でフラッシュオーバーした。

一方、図2(b)の負極性では  $D=0\%$  においてフラッシュオーバー電圧は、 $0.1\text{MPa}$  で約  $19.6\text{kV}$ 、 $0.2\text{MPa}$  で約  $18.9\text{kV}$ 、 $0.3\text{MPa}$  で約  $19.4\text{kV}$  となり、ガス圧によるフラッシュオーバー電圧の明瞭な差は見られなかった。 $D=2\%$  正極性のときと同様に両方の放電経路がみられ球-平板、沿面それぞれ  $27.4\text{kV}$ 、 $25.5\text{kV}$  と球-平板の方がフラッシュオーバー電圧は高くなった。 $D=2\%$  のとき、球-平板で破壊したときのフラッシュオーバー電圧は、 $0.2\text{MPa}$ 、 $0.3\text{MPa}$  で大きく変化し、フラッシュオーバー電圧は、それぞれ  $23.6\text{kV}$ 、 $27.4\text{kV}$  となった。また  $D=3\%$  では、 $0.1\text{MPa}$  で約  $24.8\text{kV}$ 、 $0.2\text{MPa}$  で約  $22.3\text{kV}$ 、 $0.3\text{MPa}$  で約  $25.2\text{kV}$  とガス圧力の増加に伴い、一度フラッシュオーバー電圧は低下した後、上昇している。放電経路も正極性と同様に  $0.3\text{MPa}$ 、 $D=3\%$  で沿面フラッシュオーバーした以外は全て球-平板間となった。

両極性ともに、 $D=0\%$  よりも  $D=3\%$  のときフラッシュオーバー電圧が高くなっており、また  $0.3\text{MPa}$ 、 $D=3\%$  で放電経路は沿面となった。

### (3・2) フラッシュオーバー電圧 - $\text{SF}_6/\text{N}_2$ 混合率特性と放電経路

(3・1) で述べたように、両極性ともに、 $0.3\text{MPa}$ 、 $D=0\%$  で全て球-平板間、 $D=3\%$  で全て沿面と放電経路が変化する結果が得られた。そこで、今後は  $0.3\text{MPa}$  に着目する。 $\text{SF}_6/\text{N}_2$  混合ガス中におけるフラッシュオーバー電圧 ( $V_f$ ) -  $\text{SF}_6/\text{N}_2$  混合率 ( $D$ ) 特性を図3に示す。図中の放電経路はそれぞれ、球-平板間を記号▲、沿面を記号△とした。さらに、上向き矢印は波頭部ではフラッシュオーバーしなかったことを示しその回数を上に添えた。また、 $D=50\%$  以上では破壊しなかったために、横軸の  $D=50\%$  以上は省略している。

図3(a)の正極性では、 $D=0\%, 3\%$  におけるフラッシュオーバー電圧は、 $D=0\%$  では  $20.4\text{kV}$  となり球-平板間でフラッシュオーバーした。 $D=1\%$  でも  $D=0\%$  と同様に、全て球-平板間でフラッシュオーバーし、フラッシュオーバー電圧は  $24.3\text{kV}$  と  $D=0\%$  のときより増加した。 $D=2\%$  では二通りの放電経路が見られ、その回数は球-平板間が 20 回測定中 7 回、沿面が 20 回測定

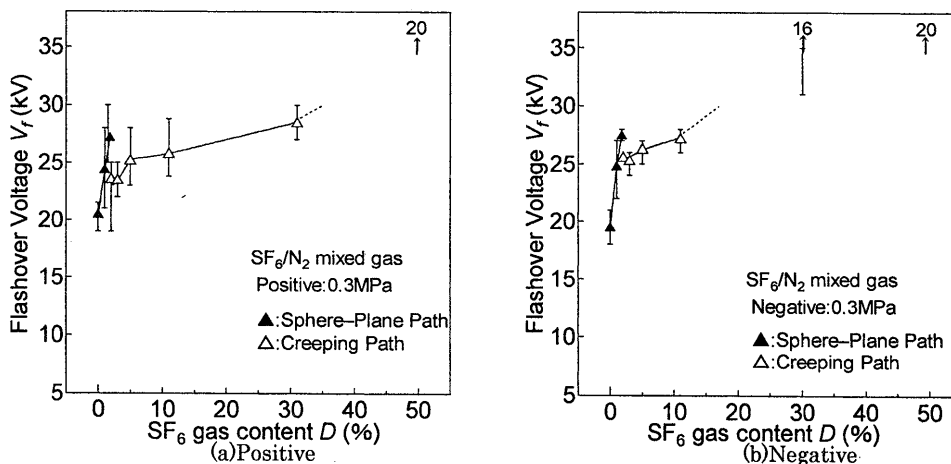


図3 フラッシュオーバー電圧 - 混合率特性 ( $0.3\text{MPa}$ )  
Fig.3. Dependency of  $\text{SF}_6$  gas content on flashover voltage ( $0.3\text{MPa}$ )

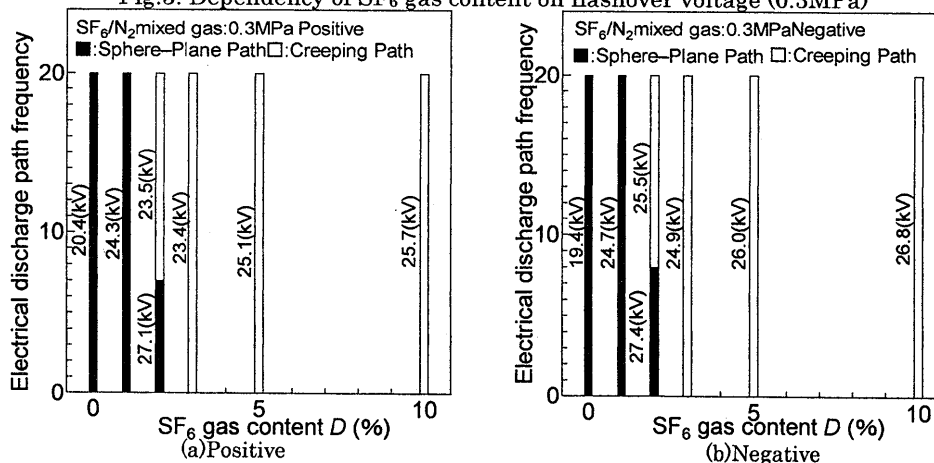


図4 各放電経路回数 - 混合率特性  
Fig.4. Dependency of  $\text{SF}_6$  gas content on electrical discharge path frequency

中 13 回でありフラッシュオーバー電圧はそれぞれ 27.1kV,23.5kV となった。 $D=3\%,5\%,10\%$ は全て沿面でフラッシュオーバーし、フラッシュオーバー電圧はそれぞれ、23.4kV,25.1kV,25.7kV となり  $D$ の増加に伴い、フラッシュオーバー電圧は上昇した。

一方、負極性でも、正極性と同様に  $D$ の増加に伴い、フラッシュオーバー電圧は上昇した。フラッシュオーバー電圧と放電経路は  $D=0\%,D=1\%$ ともに全て球-平板間でフラッシュオーバーし、フラッシュオーバー電圧はそれぞれ 19.4kV,24.7kV となった。 $D=2\%$ では正極性と同様に二通りの放電経路が観測でき、回数は球-平板間、沿面それぞれ 20 回測定中 8 回と 20 回測定中 12 回となり、フラッシュオーバー電圧はそれぞれ 27.4kV と 25.5kV となった。 $D=3\%$ 以上では全て沿面でフラッシュオーバーし、フラッシュオーバー電圧は  $D=3\%$ では 24.9kV となり、それ以降、 $D$ の増加に伴いフラッシュオーバー電圧は上昇した。

以上のことをまとめた放電経路発生回数-SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合率特性を図 4 に示す。縦軸が各放電経路の発生回数、横軸が SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合率を示している。またそのときのフラッシュオーバー電圧も図中の左側に添えた。図 4 から、両極性ともに  $D=0\%$ で全て球-平板、 $D=2\%$ では二通り、 $D=3\%$ 以上では沿面でフラッシュオーバーしたことがわかる。すなわち  $D=2,3\%$ などの微量な SF<sub>6</sub>でも気体中の放電過程に影響を及ぼしていることがわかる。

### (3-3) 超高速カメラによるコロナの進展挙動の観測

SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合率  $D$ の増加に伴う、放電経路の変化となる原因を検討するために、 $D=0\%,2\%,3\%$ で超高速カメラを使ってコロナの進展挙動を撮影した。0.3MPaにおけるコロナの進展挙動を図5,図6に示す。図の上側に撮影条件及び、放電経路とその発生回数を示す。図中の白線は電極系の配置と目盛りを示す。なお、コロナを見やすくするために三重点上部から平板電極までのバリアは省略する。各測定において撮影方向が若干異なっている。また、超高速カメラは露光時間30ns、インターフレーム時間は10nsに設定した。さらに各写真の下部に電圧値を示す。正極性は図5に示し、図5(a)は  $D=0\%$ におけるコロナの進展挙動である。Frame1(18.0~18.4kV)ではコロナは認められないが、その後、Frame2(18.5~19.1kV)で球-平板間でフラッシュオーバーした。図5(b-1),(b-2)は  $D=2\%$ における球-平板間、沿面それぞれの放電経路におけるコロナ進展挙動である。球-平板間を(b-1)で、沿面を(b-2)で表す。図5(b-1)より球-平板間フラッシュオーバーしたときでは、Frame2(24.5~25.2kV)で三重点付近からコロナ(約1.3mm)が確認でき、Frame3(25.3~25.9kV)でフラッシュオーバーした。図5(b-2)の沿面でフラッシュオーバーしたとき、Frame1(20.5~21.1kV)ではコロナが確認できないが、Frame2(21.3~22.0kV)で三重点付近から弱いコロナ(約0.7mm)が確認できた。そして、Frame3(22.3~22.9kV)でフラッシュオーバーした。同条件下でフラッシュオーバーの一つ前の写真で三重点付近からコロ

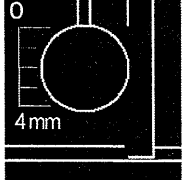
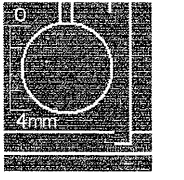
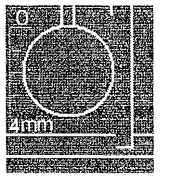
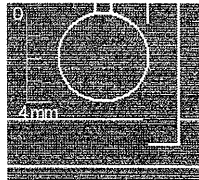
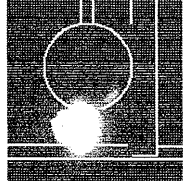
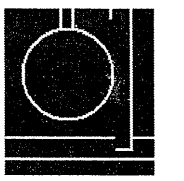
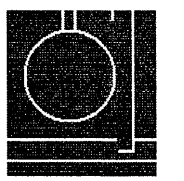
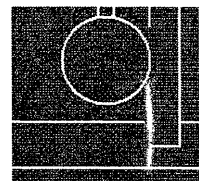
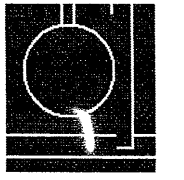
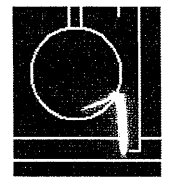
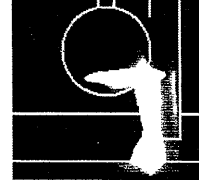
	(a)	(b-1)	(b-2)	(c)
混合率 $D$	$D=0\%$	$D=2\%$	$D=2\%$	$D=3\%$
放電経路	球-平板間	球-平板間	沿面	沿面
発生回数	20	7	13	20
				
				
				

図5 コロナ進展挙動の観測

Fig.5. Observation of corona progress behavior (SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> mixed gas : 0.3MPa,  $D=0,2,3\%$ , Positive)

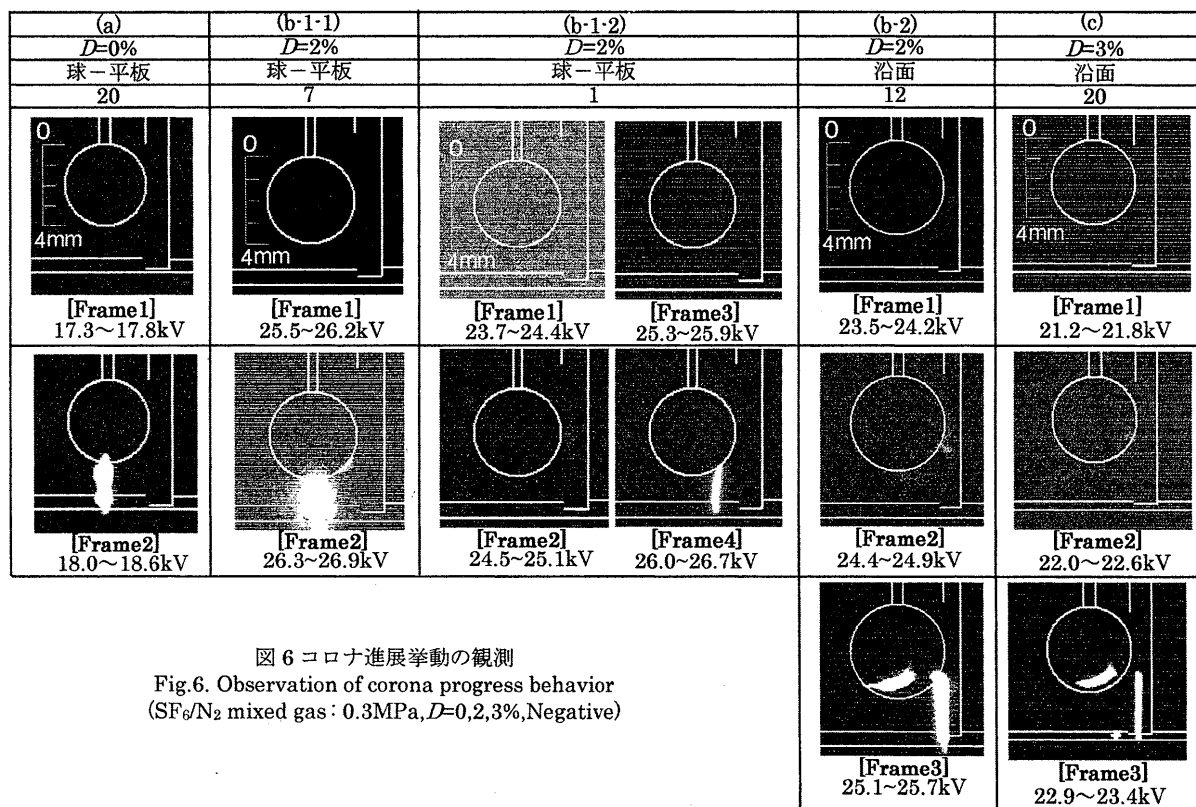


図6 コロナ進展挙動の観測  
Fig.6. Observation of corona progress behavior  
(SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> mixed gas: 0.3MPa,  $D=0,2,3\%$ , Negative)

ナが見られ、その後各経路でフラッシュオーバーしたことがわかった。すなわち、三重点付近のコロナが各放電経路に影響したことが考えられる。 $D=3\%$ の結果は図5(c)に示した。Frame2(21.6~22.2kV)で三重点付近からバリアに沿ったコロナが見られた後に、Frame3(22.4~23.0kV)にて沿面でフラッシュオーバーした。

一方、負極性におけるコロナの進展挙動を図6に示す。図6(a)は $D=0\%$ の結果である。Frame2(18.0~18.6kV)で球-平板間でフラッシュオーバーした。図6(b-1-1),(b-1-2),(b-2)は全て $D=2\%$ のときである。図6(b-1-1),(b-1-2)はともに、20回測定中8回見られた球-平板間でフラッシュオーバーしたときのものである。この条件下で8回撮影を行ったところ2通りの進展挙動が確認できたために別々に示す。図6(b-1-1)は8回撮影中7回観測されたコロナ進展挙動である。Frame2(26.3~26.9kV)で球下端からフラッシュオーバーしていることがわかる。図6(b-1-2)は8回撮影中1回見られたコロナの進展挙動である。このコロナ進展挙動は図6(b-1-2)の1回のみしか観測されていないが、図6(b-1-1)の球-平板間のフラッシュオーバー挙動とは異なる特徴的な進展挙動が見られた。Frame2(24.5~25.1kV)で、三重点付近(約1.2mm)と球下端(約1.4mm)から弱いコロナが見られたのち、Frame3(25.3~25.9kV)ではそれらのコロナが確認できなくなった。そして、Frame4(26.0~26.7kV)で球-平板間でフラッシュオーバーした。図6(b-2)は同条件下で20回測定中12回沿面でフラッシュオーバーしたときのコロナの進展挙動である。図中のFrame2(24.4~24.9kV)では三重点付近(約1.7mm)と球下端(約1.2mm)からコロナが観測され、その後Frame3(25.1~25.7kV)でバリアに沿ってフラッシュオーバーした。図6(c)は $D=3\%$ のときにおけるコロナ進展の挙動の様子である。Frame2(22.0~22.6kV)で三重点付近から弱いコロナ(約0.7mm)が確認でき、その後Frame3(22.9~23.4kV)で沿面フラッシュオーバーしたことがわかった。

#### (3-4) 検討

(3-1)の結果から両極性ともに、混合率  $D=0\%$ ではガス圧に関係なく球-平板間でフラッシュオーバーした。 $D=2\%, 0.3\text{MPa}$ においては、球-平板、沿面の二つの放電経路でフラッシュオーバーし、そして、 $D=3\%$ では $0.3\text{MPa}$ において全て沿面でフラッシュオーバーした。また、図3,4に示すように $D=3\%$ 以上で、全て沿面でフラッシュオーバーする結果となった。 $D$ の変化により放電経路が変わった理由を考察するために、まず、(3-3)の超高速カメラによるコロナ進展挙動の観測から、それぞれの混合率 $D$ について検討を行う。

図5及び図6から正、負極性ともに $D=0\%$ のFrame1ではコロナが確認できず、その後球-平板間でフラッシュオーバーしていることがわかった。これは、電界の強い三重点付近のコロナが影響していると考えられる。具体的には、三重点付近のコロナからの紫外線によって[9]、球-平板間に初期電子を発生させ、その電子が球-平板間で電離作用をおこ

し、コロナを進展させ、やがて球-平板間でフラッシュオーバーしたと考えられる。実際に三重点付近の影響を考察するために、バリアを取り除き、球-平板電極で実験を行ったところ、正極性では 0.3MPa においては、全ての混合率  $D$  で破壊しなかった。また、負極性の破壊電圧は  $D=0\%$  で約 28kV であり、それ以上の  $D$  ではフラッシュオーバーしなかった。これに対して、バリアを挿入した場合の破壊電圧は正負両極性ともに低下している。このことから、三重点付近の高電界とそれによるコロナが破壊電圧に影響していると思われる。

正極性、 $D=2\%$  では二つの放電経路が確認できたが、いずれの経路の場合においても、三重点付近からコロナが発生していることがわかる(図 5(b-1),(b-2)の Frame2)。また、Frame2 の電圧値を見ると、球-平板間が 24.5~25.2kV、沿面が 21.3~22.0kV と球-平板間でフラッシュオーバーしたときの方が高い値になっている。また図 5 の Frame2 を比較すると、球-平板間でフラッシュオーバーしたときのほうが、沿面と比べ三重点付近のコロナは発光が強く、また、三重点付近のコロナの伸びは、球-平板間が約 1.3mm、沿面が約 0.7mm と球-平板間のほうが長い。このことから三重点付近のコロナによってバリア表面に電荷がたまるが[9]、その電荷量の大きさによって、後続のコロナを抑制する大きさが異なると考えられ、それがフラッシュオーバーの経路の違いに影響していると考えられる。ギャップ中の空間電荷が三重点付近の初期コロナが大きく、そのコロナの進展を抑制されたときは、沿面距離よりも短い球-平板間でフラッシュオーバーする(図 5(b-1))。また、初期コロナが弱くなったときは、沿面コロナの進展の抑制が弱くなり、沿面でフラッシュオーバーする(図 5(b-2))と思われるが、さらに詳細な検討が必要である。

負極性、 $D=2\%$  は図 6(b-1-1),(b-1-2),(b-2)と三通りのコロナの進展挙動が観測できた。図 6(b-1-1)では、Frame1 ではコロナが確認できないが、Frame2 で球-平板間にフラッシュオーバーしている。これは  $D=0\%$  のときと同様に三重点付近のコロナが球-平板間に初期電子をつくったことが原因で、球-平板間でフラッシュオーバーした。フラッシュオーバー時の値を比較すると、 $D=0\%$  で 18.0~18.6kV、 $D=2\%$  で 26.3~26.9kV と  $D=2\%$  のほうが、 $D=0\%$  と比べてフラッシュオーバー電圧は高い。これは SF<sub>6</sub> が三重点付近のコロナを抑制したことが原因と考えられる。図 6(b-1-2)では、Frame2 で三重点付近と球下端からコロナが発生したが、Frame3 でそのコロナが確認できなくなった。Frame2 は  $D=0\%$  で述べたように、電界の強い三重点付近のコロナの発光が球-平板間に初期電子を作ったために三重点付近だけでなく、球下端にもコロナが発生したことが説明できる。しかし、Frame3 ではそれらのコロナが確認できなくなった。このようにコロナが一度消滅するのは、電荷によって電界緩和が生じるためである。その後、フラッシュオーバーに至るのは、波頭部の電圧上昇に伴って、再び衝突電離が起こるためと考えられる。

$D=3\%$  については、正負両極性ともに  $D=2\%$  において沿面でフラッシュオーバーに至った場合と同様の機構が考えられる。

以上、これらの考察から三重点付近のコロナからの紫外線等が球下端とバリア表面に初期電子を作り、それが球下端やバリア表面にコロナを進展させ、やがてフラッシュオーバーすることが考えられる。また、気体の電子付着性やバリア表面の蓄積電荷等でコロナが進展する場所が決まると思われる。その他にギャップ中の空間電荷による電界の変化も考えられ、今後更なる検討が必要である。

#### 4. まとめ

SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合ガス中で三重点を持つ複合電極において、 $\mu\text{s}$  パルス電圧波頭部における放電特性について調べた結果を以下にまとめる。

- (1)  $D=0, 2, 3\%$  におけるフラッシュオーバー電圧-ガス圧特性では両極性において、ガス圧の増加に伴いフラッシュオーバー電圧が上昇する場合(正極性:  $D=0, 2\%$ , 負極性:  $D=2\%$ )、大きな変化がない場合(正極性:  $D=3\%$ , 負極性  $D=0\%$ )、0.1~0.2MPa で一度電圧が減少した後、0.2~0.3MPa で電圧が上昇する凹形のグラフになる場合(負極性:  $D=3\%$ )の 3 パターンが得られた。また、 $D=0\%$  よりも  $D=2, 3\%$  のほうがフラッシュオーバー電圧は高くなった。放電経路は  $D=0\%$  では全て球-平板間でフラッシュオーバーし、 $D=2\%$ 、0.3MPa で、球-平板間と沿面の両方が確認できた。また、 $D=3\%$ 、0.3MPa では全て沿面でフラッシュオーバーした。
- (2) 0.3MPa におけるフラッシュオーバー電圧-混合率特性では、両極性において混合率の増加にともない、フラッシュオーバー電圧は上昇する結果が得られた。また、放電経路は両極性ともに、 $D=3\%$  以上では全て沿面でフラッシュオーバーした。
- (3)  $D=0, 2, 3\%$  における超高速カメラを用いたコロナの進展挙動の撮影では、それぞれの混合率で異なる放電特性を示した。特に正極性、 $D=2\%$  では一度三重点付近からコロナが発生し、その後、異なる経路でフラッシュオーバーした。負極性、 $D=2\%$  では、球下端と三重点付近からコロナが見られた後に、球-平板間、沿面と異なる放電経路でフラッシュオーバーした場合と、コロナが確認されずに球-平板間でフラッシュオーバーする 3 通りの結果が得られた。

以上の結果から三重点を持つ複合電極では、バリア表面の蓄積電荷や三重点付近のコロナから出る紫外線、気体の電子付着性がフラッシュオーバー特性に影響を及ぼしていることが考えられる。

#### 文 献

- 
- [1] 遠藤奎将:「ガスくさびを持つエポキシ棒の SF<sub>6</sub> ガス中沿面絶縁特性」電学論 A, 105, 11, pp. 25-32 (1985)
  - [2] 宅間薫:「複合誘電体における電界集中」, 静電気学会誌, 14, pp. 40-48 (1990)
  - [3] A. H. Cookson and O. Farish: “Particle-initiated Breakdown between Coaxial Electrodes in Compressed SF<sub>6</sub>”, IEEE Trans. PAS, 92, pp. 871-876 (1973)
  - [4] L. G. Chiristphorou and R. J. van Brunt: “SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> Mixtures Basic and HV Insulation Properties”, IEEE DEI, 2, pp. 952-1003 (1995)
  - [5] 遠藤正雄・佐藤敏郎・佐藤重範・榊原剛:「負極性直線状沿面放電の進展特性」, 電学論 A, 115, pp. 845-850 (1995)
  - [6] 遠藤正雄・関利通:「沿面線上ストリーマの進展」, 電学論 A, 103, pp. 373-378 (1983)
  - [7] 檜川善啓・釜谷文雅・西川哲司・上野秀樹・中山博史:「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>) 中の沿面放電に及ぼすバリア形状の影響」, 電学論 A, 121, pp. 751-757 (2001)
  - [8] 家田正之・沢五郎・篠原卯吉:「高分子表面電荷の減衰過程」, 電学誌, 88, pp. 1107-1113 (1968)
  - [9] 湯元雅恵・堺孝夫:「絶縁材料からの光電子放出と放電進展」, 電学論 A, 109, pp. 1-8 (1989)