

SF₆/N₂ 混合ガス中で三重点を有する複合電極の放電特性

沼田 子路・上野 秀樹・中山 博史

(電気系工学専攻)

Discharge Characteristics of Composite Electrode with Triple Junction in SF₆/N₂ Mixed Gas

Shiro NUMATA, Hideki UENO and Hiroshi NAKAYAMA
(Department of Electrical Engineering and Computer Sciences)

Abstract

This paper describes the discharge characteristics of a composite electrode with a triple junction at wave front of μ s pulse voltage in SF₆/N₂ mixed gas. The composite electrode was consisted of a sphere with a borosilicate glass on a sphere-plane configuration. In each polarity, the flashover voltage increased rapidly at a low mixture rate. As the mixture rate increase, the increase rate became small. Moreover, path of flashover shifted creeping path from sphere-plane path when the gas pressure and in the mixture rate. Then we investigated detailed process of the breakdown by using ultra-high speed camera. The point of observation is $D=0\%$ and $D=3\%$ on 0.3MPa in each polarity. As a result, the corona generated from triple junction disappeared once, and it appeared between the steel ball and glass again, finally the corona progressed the creeping path in $D=3\%$.

Key words : composite electrode, triple junction, SF₆/N₂ mixed gas

1. はじめに

GIS(ガス絶縁開閉装置)は,小形・軽量・高信頼・保守点検の省力化など数多くの利点を持っているため,現在では開閉機器の主流となっている.近年,電力需要の増大の傾向により,都市部での高電圧・大容量変電所の建設が行われるようになっており,環境調和・建設コスト低減の観点から,高電圧機器でも,さらに大幅な小形・軽量化が要求されている[1].

GISの絶縁媒体には絶縁性能に優れたSF₆ガスが多く用いられているが,SF₆ガスは温室効果ガスの性質を示すことから,地球環境への負荷を軽減する目的で,排出を削減するとともに,SF₆ガス単独に代わる新しい絶縁方式の確立が望まれている[2].また,GISなどのSF₆ガス絶縁機器では,高電圧導体を絶縁支持するため,固体絶縁物が用いられている.実際の機器では,この固体絶縁物が高電圧電極および接地電極に取り付けられるため,いわゆる三重点(トリプルジャンクション)の存在は避けられない.三重点部の形状によっては,著しい局所的電界集中が生じるため,絶縁物上に沿面放電が発生し,機器の絶縁性能が低下することが知られている.このような絶縁物沿面放電に関しては,一連の放電過程のうち,部分放電開始特性に重点をおいた研究が行われている.しかしながら,部分放電の発生後から全路破壊に至るまでの現象については,未解明な部分が多く残っている[3].

GISの高圧導体とそれを支持するためのスペーサの接触部(三重点)を模擬した場合のパルス放電特性は明らかになっていない.そのため,我々の研究室においても電力機器における絶縁性能向上を目的とし,不平等電界下,微小ギャップでの絶縁特性,および三重点と金属異物の共存を針電極に固体絶縁物を接触させた複合電極で模擬したパルス放電特性を調べてきた.その結果,微小ギャップを有し,針と誘電体を接触した複合電極において印加電圧の極性によりコロナの発生・進展が異なることがわかった[4-6].そこで,本研究ではSF₆ガス単独に代わる新しいガスとして,SF₆/N₂混合ガスを用いた場合において,球電極と誘電体との接触で形成された三重点がコロナの進展挙動にどのような影響を及ぼすかを調べることを目的とした[7][8].

すなわち,SF₆/N₂混合ガス中において,GIS内部の三重点から生じるコロナの進展挙動を調べることを目的とし,GISの内部構造を模擬するために高圧側導体に球,絶縁物に硼硅酸ガラスを接触させ三重点を構成し,複合電極とした.この電極系をSF₆/N₂混合ガス中に設置し, μ s方形波パルス電圧を印加し,そのときのフラッシュオーバー電圧特性やフラッシュオーバーの経路,コロナの様子を観察した.

2. 実験方法

Fig. 1 に電極構成図を示す. 球電極に直径約 4mm のスチールボールを, 平板電極には黄銅製平板 ($30 \times 30 \text{mm}^2$) を用いた. 球電極には幅 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, 硼硅酸ガラスを平板電極に対して垂直に設置し, 複合電極を構成した. そして, 球先端から平板電極までの距離を 2mm に固定した. Fig. 2 に実験回路図を示す. 電極を黄銅製容器 (約 $3 \times 10^3 \text{cm}^3$) 内に設置し, SF_6/N_2 混合ガスを 0.1~0.3MPa まで封入した. 印加電圧には μs 方形波パルス電圧 (波頭長 $1.5 \mu\text{s}$, 波高値 35kV) を使用した. フラッシュオーバー電圧はすべて波頭部で破壊させたときの瞬時値であり, 測定は同一条件で 20 回行った. 電圧波形は高電圧プローブ (HV-P30, 岩崎通信機 (株)) を介してデジタルオシロスコープ (DL1540, 横河電機 (株)) で測定した. また, 放電の進展過程を超高速度カメラ (IMACON468, HADLAND PHOTONICS, LTD.) を用いて観測した. ここで真空の誘電率を ϵ_0 , 絶縁体の比誘電率を ϵ_r , 絶縁体の体積抵抗率を ρ とすれば, 絶縁体の表面堆積電荷減衰の時定数は $\epsilon_0 \epsilon_r \rho$ と表される [5]. これから求まる硼硅酸ガラスの時定数は約 1 分である. 実際, 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. 本研究ではパルス電圧波頭部における放電特性を調べることを目的としており, 波頭長が $1.5 \mu\text{s}$ であるため, 波頭部で起こる放電特性を調べる際にはガラス表面での電荷減衰が無視できる. したがって, 波頭部の時間ではコロナによる蓄積電荷が放電の進展に及ぼす影響は保持されている. 以上のことから本研究の目的とするパルス電圧波頭部での放電特性の検討において, 一般に GIS に用いられているエポキシ樹脂のスペーサを硼硅酸ガラスで模擬することは問題ないと考える.

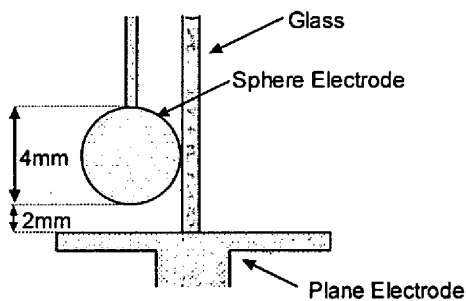


Fig.1 Electrode configuration

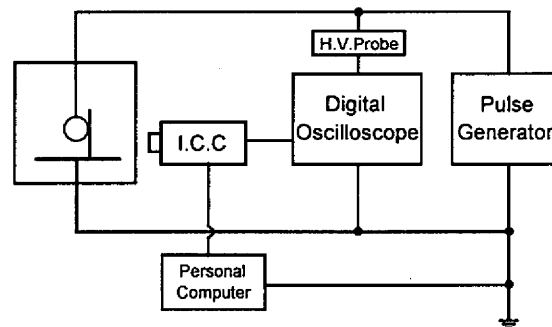


Fig.2 Experimental circuit diagram

3. 実験結果

〈3. 1〉フラッシュオーバー電圧-混合率特性

Fig. 3~5 に SF_6/N_2 混合ガス 0.1~0.3MPa 中におけるフラッシュオーバー電圧 (V_f) と混合率 (D) との関係を示す. 測定は 20 回行った. 正極性, 負極性とも 0.1MPa では $D=0\%$ で約 17.5kV から $D=100\%$ で約 27.5kV まで上昇し, 0.2MPa, 0.3MPa では $D=0\%$ で約 20.0kV から $D=50\%$ で約 28.0kV までフラッシュオーバー電圧は上昇した. このことから, SF_6 ガスを加えることによって, 上昇率は異なるがフラッシュオーバー電圧は常に上昇する傾向が見られる.

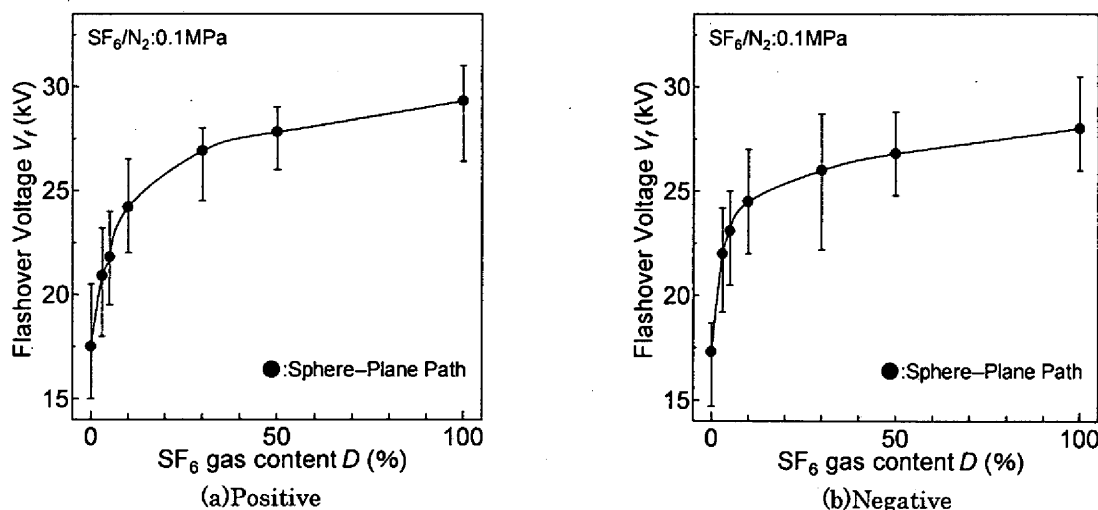


Fig.3 Flashover voltage in SF_6/N_2 mixture gas with composite electrode (0.1MPa)

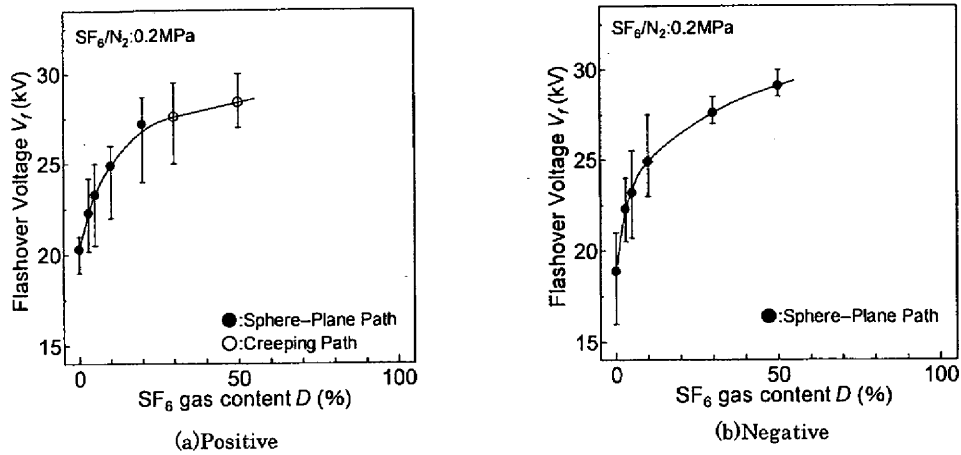
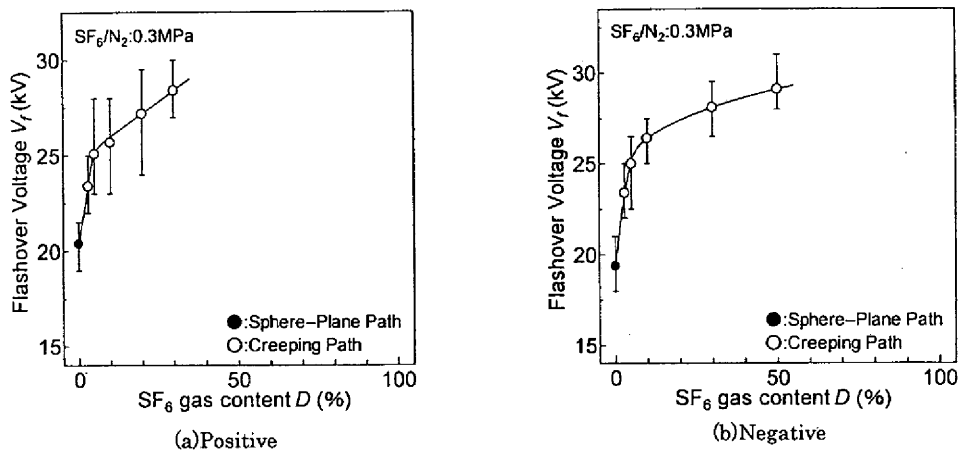
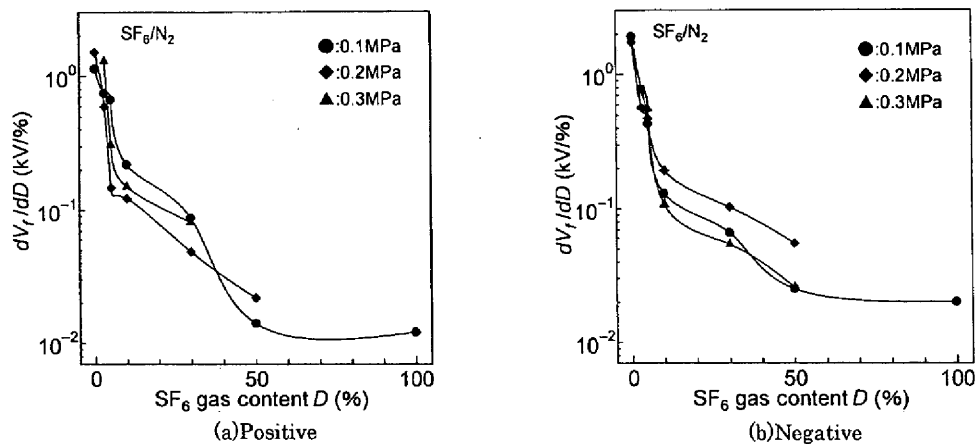
Fig. 4 Flashover voltage in SF₆/N₂ mixture gas with composite electrode (0.2MPa)Fig. 5 Flashover voltage in SF₆/N₂ mixture gas with composite electrode (0.3MPa)

Fig. 3~5ではガス圧や極性の違いによって、それぞれの混合率 D でのフラッシュオーバー電圧の上昇率の変化がわかりにくいため、それぞれの点で接線を引き、その傾きを dV_f/dD とし、横軸に D 、縦軸に接線の傾き dV_f/dD を取り、正極性の 0.1~0.3MPa と、負極性の 0.1~0.3MPa で比較した。なお、ここでは、エラーバーを省略する。正極性では $D=0\%$ で約 1.3kV/% から $D=100\%$ で約 0.01kV/% まで低下し、負極性では $D=0\%$ で約 1.8kV/% から $D=100\%$ で約 0.02kV/% まで低下した。また、極性で比較すると、正極性に比べ、負極性では全体的に D に対応する dV_f/dD の値が高くなっている。

Fig. 6 dV_f/dD -SF₆ gas content D characteristics

〈3. 2〉フラッシュオーバー電圧の極性効果

フラッシュオーバー電圧の極性効果について調べた。その結果を Fig. 7 に示す。0.1MPa では、 $D=0\sim 10\%$ 付近までは、負極性のフラッシュオーバー電圧が高く、 $D=10\%$ 以上になると、正極性の方が高くなっている。次に0.2MPa では、0.1MPa とは反対で、 $D=0\sim 10\%$ 付近までは正極性のフラッシュオーバー電圧が高く、 $D=10\%$ 以上になると、負極性の方が高い。なお、0.3MPa では、正極性、負極性ともほぼ同じような増加率となった。

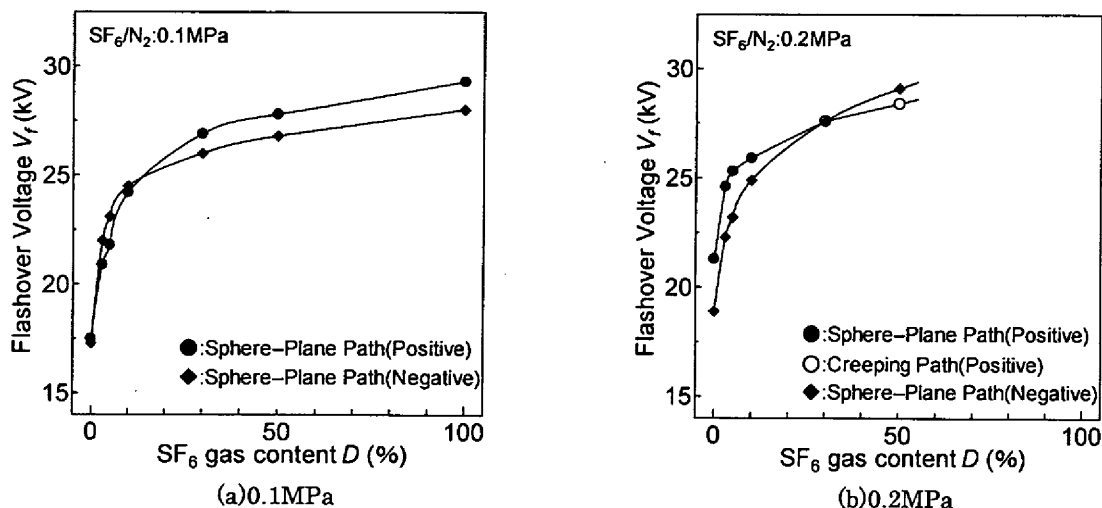


Fig.7 Flashover voltage in SF₆/N₂ mixture gas with composite electrode

〈3. 3〉フラッシュオーバー電圧—ガス圧特性

ガス圧の変化とフラッシュオーバー電圧の関係を探るため、 $D=0\%$ 、 3% それぞれについて、横軸にガス圧、縦軸にフラッシュオーバー電圧を取り、正極性と負極性を比較した。 $D=0\%$ の正極性では、0.1~0.2MPa にかけてフラッシュオーバー電圧が大きくあがっている。しかし、エラーバーの上限は、0.1、0.2MPa とほとんど変わらず、下限が0.2MPa では0.1MPa より高くなっているためである。また、負極性でも同じように、0.1~0.2MPa にかけてフラッシュオーバー電圧が大きくあがっているが、正極性と同じ理由と思われる。次に $D=3\%$ の正極性では、ガス圧をあげると、平均値もエラーバーの上限と下限も徐々にあがっている。負極性では、少しあがっているが、エラーバーの上限が0.2MPa に比べ、0.1MPa の方が大きくなっている。下限は0.2MPa の方が大きい。

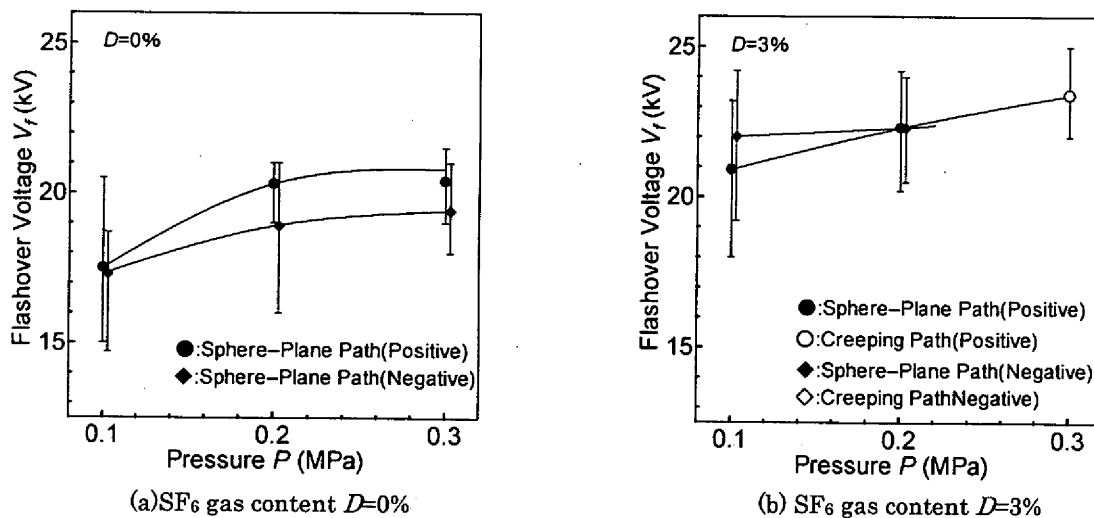


Fig.8 Dependency of gas pressure on flashover voltage

〈3.4〉フラッシュオーバーの経路

フラッシュオーバーの経路に注目する。0.1MPa では正極性、負極性どちらの場合も球—平板間でフラッシュオーバーに至り、0.2MPa では、正極性のみ $D=20\sim30\%$ 付近でフラッシュオーバーの経路が球—平板間から沿面に変化し、負極性では、0.1MPa 同様、すべて球—平板間でフラッシュオーバーした。また、0.3MPa では、正極性、負極性とも $D=0\sim3\%$ 付近で球—平板間から沿面に変化した。極性で比較すると、0.1,0.3MPa ではフラッシュオーバーの経路は同じであったが、0.2MPa のみ、正極性の $D=20\sim30\%$ 付近でフラッシュオーバーの経路が変化している。ガス圧(p)に注目すると、正極性ではガス圧を増加させると、沿面でフラッシュオーバーに至りやすくなった。また、負極性では 0.1,0.2MPa ではフラッシュオーバーの経路の違いは見られず、0.3MPa のみ $D=3\%$ 以上で沿面が観測された。これらのことを Fig.9,10 にまとめる。なお、表中の●は球—平板間でフラッシュオーバーしたことを、○は沿面でフラッシュオーバーしたことを表す。また、正極性、 $D=20\%$ の 0.1MPa と 0.3MPa の箇所は測定していないので、横棒で記した。

$p \backslash D$	0%	3%	5%	10%	20%	30%	50%	100%	$p \backslash D$	0%	3%	5%	10%	30%	50%	100%
0.1MPa	●	●	●	●	-	●	●	●	0.1MPa	●	●	●	●	●	●	●
0.2MPa	●	●	●	●	●	○	○	○	0.2MPa	●	●	●	●	●	●	●
0.3MPa	●	○	○	○	-	○	○	○	0.3MPa	●	○	○	○	○	○	○

Fig.9 Different flashover's path observed in each mixed gas (Positive)

Fig.10 Different flashover's path observed in each mixed gas (Negative)

〈3.5〉超高速カメラによるコロナの進展挙動の観測

本研究では、三重点がコロナの進展挙動にどのような影響を及ぼすかを調べることを主目的としているため、Fig.9.10 で、フラッシュオーバーの経路の変化している箇所を重点的に超高速カメラで観測を行った。まず、0.3MPa,正極性、 $D=0\%$ と 3%におけるフラッシュオーバーの過程を比較した結果を Fig.11 に示す。なお、観測はすべて斜め上方から行った。上段の $D=0\%$ では、Frame2(21.3~21.6kV)で球—平板間においてフラッシュオーバーした。下段の $D=3\%$ では、Frame2(22.2~22.4kV)で三重点付近からガラス沿面をコロナが進展し、Frame3(22.5~22.7kV)でコロナが一度消滅し、Frame4(22.8~23.0kV)で球—ガラス間からコロナが発生し、そのコロナが沿面を介してフラッシュオーバーに至った。

Fig.12 に正極性、0.3MPa のコロナの伸び—瞬時印加電圧特性を示す。横軸の瞬時電圧とは露光終了時に対応する電圧であり、縦軸がコロナの伸びを示す。また、▲が $D=0\%$ 、△が $D=3\%$ を表している。 $D=3\%$ では、電圧が Frame2 の 22.4kV 付近で△印の沿面コロナの伸びは約 1.0mm、23.0kV 付近で沿面を介してフラッシュオーバーした。つまり、SF₆ガスを加えると、コロナ開始電圧が上昇し、フラッシュオーバーに至るまでのコロナの伸びが抑制される。

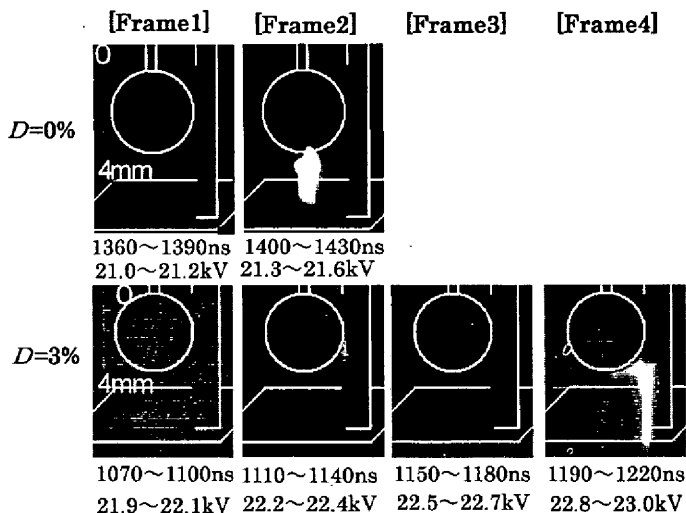


Fig.11 Behavior of discharge observed using ultra-high speed camera (SF₆/N₂ mixed gas:0.3MPa, $D=0\%,3\%$, Positive)

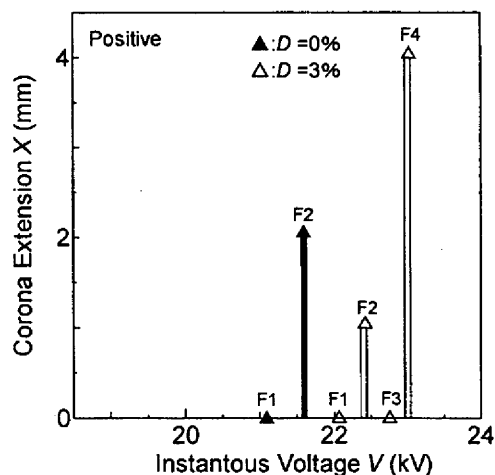


Fig.12 Corona extension-instantaneous voltage characteristics (SF₆/N₂ mixed gas:0.3MPa, $D=0\%,3\%$, Positive)

0.3MPa, 負極性, $D=0\%$ と 3% の部分と比較した結果を Fig. 13 に示す. 上段の $D=0\%$ では, Frame2 (19.5~19.8kV) で球—ガラス間に点在するコロナが観測され, Frame3 (20.0~20.3kV) で球—平板間においてフラッシュオーバーした. 下段の $D=3\%$ では, Frame2 (22.0~22.2kV) で三重点付近からコロナが発生し, Frame3 (22.4~22.7kV) でコロナが一度消滅し, Frame4 (22.8~22.9kV) で球—ガラス間にコロナが発生し, Frame5 (23.0~23.2kV) でガラス沿面を介してフラッシュオーバーに至った.

Fig. 14 に負極性, 0.3MPa のコロナの伸び—瞬間電圧特性を示す. 図中の記号はすべて正極性と同じである. $D=3\%$ では, 電圧が Frame2 の 22.2kV 付近で△印の沿面コロナの伸びは約 1.3mm, 22.9kV 付近で約 0.3mm, 23.2kV 付近で沿面を介してフラッシュオーバーした.

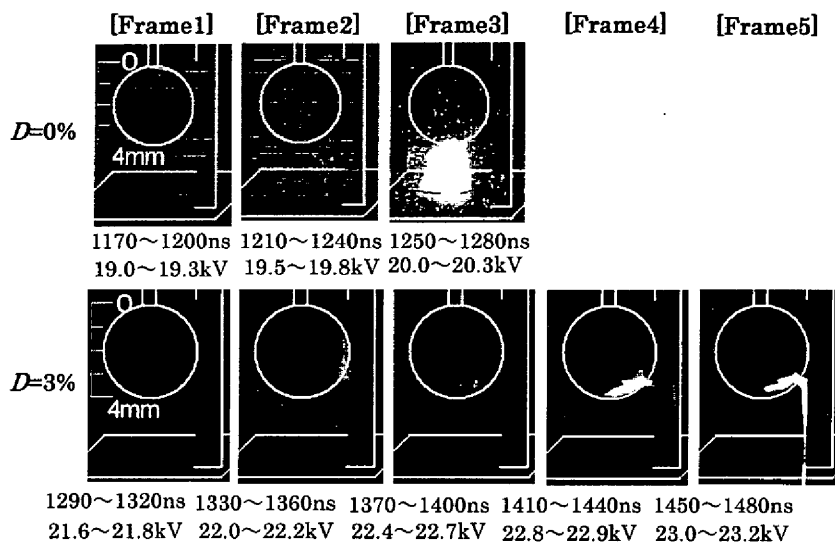


Fig. 13 Behavior of discharge observed using ultra-high speed camera (SF₆/N₂ mixed gas:0.3MPa, $D=0\%,3\%$, Negative)

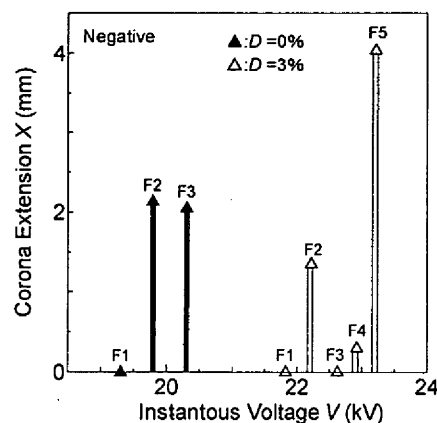


Fig. 14 Corona extension— instantaneous voltage characteristics (SF₆/N₂ mixed gas:0.3MPa, $D=0\%,3\%$, Negative)

4. 検討

正極性, 負極性いずれの場合も, 混合率 D が 0% ではフラッシュオーバー電圧が 20kV 付近で, D を増加させると, フラッシュオーバー電圧は上昇し, $D=100\%$ では, 0.1MPa で 25~30kV 付近まで上昇し, 0.2, 0.3MPa においては印加電圧の最大値 (35kV) でもフラッシュオーバーに至らないところまで上昇した. また, それぞれの D における dV/dD の傾きは正極性では $D=0\%$ で約 1.3kV/% から $D=100\%$ で約 0.01kV/% まで低下し, 負極性では $D=0\%$ で約 1.8kV/% から $D=100\%$ で約 0.02kV/% まで低下した. 最も低下の激しかった部分は, 正極性, 負極性とも $D=0\sim10\%$ 付近で, 微量な SF₆ ガスを加えることで, フラッシュオーバー電圧は効率的に上昇するが, D が増すにつれて, SF₆ ガスを加えた分だけフラッシュオーバー電圧が上昇しないことがわかる. フラッシュオーバー電圧の極性効果については, 0.1MPa では D が低い部分では負極性のフラッシュオーバー電圧の上昇率が高く, $D=10\%$ 付近から, 正極性のフラッシュオーバー電圧の上昇率が高いことがわかった. また, 0.2MPa では, 0.1MPa とは逆に, D が低い箇所では正極性のフラッシュオーバー電圧の上昇率が高く, $D=30\%$ 付近から, 負極性のフラッシュオーバー電圧の上昇率が高くなっていた. フラッシュオーバー電圧のガス圧特性は, $D=0\%,3\%$ とともに, ガス圧と共に, フラッシュオーバー電圧は高くなっていた. 平均値では, 特に正極性の 0.1~0.2MPa の間でフラッシュオーバー電圧の上昇が大きい.

混合ガスの圧力を増加すると, 電子の平均自由行程 λ が短くなる. その間に電子が得るエネルギーは $eE\lambda$ で電子がだれが発生するための条件は $eE\lambda > eV_i$ である. N₂ ガスと SF₆ ガスの電離電圧はそれぞれ 15.6eV, 15.8eV であるが, N₂ ガスは 5.23eV に励起電圧, 8.2eV, 9.77eV に準安定電圧を有する [10] ので, 混合ガスの場合は N₂ ガスの方が SF₆ ガスに比べて容易に電離される. 従って, 混合ガスの場合, V_i として N₂ ガスのそれを考える. 電離平均自由行程 λ が短くなると, より高い電界 E が必要である. よって, フラッシュオーバー電圧はガス圧と共に増加するといえる. しかし, SF₆ ガスは電子を付着する能力を持つが SF₆ ガスの電子付着断面積は約 2~4eV の電子エネルギー [11] に対して, 非常に小さくなるので, $eE\lambda$ の値がこの範囲になると, SF₆ ガスの電子付着能力が極端に低下する. それゆえ, 高電界が存在する場合, SF₆ ガスを含む気体のフラッシュオーバー電圧は, 平等電界下とは異なる特性になるものと考えられる.

フラッシュオーバーの経路について, 正極性, 負極性とも D の増加で沿面でフラッシュオーバーに至りやすい. また, ガス圧の増加によっても沿面でフラッシュオーバーしやすくなった. 本研究のように三重点を模擬した研究において, 一般に三

重点付近の電界は強いことが知られている[2]. このことから、 D の増加や、ガス圧の増加によって、コロナ開始電圧が上昇し、電界の強い三重点からコロナが発生しやすくなると思われる。

最後に、超高速カメラを用いて、混合率 D の違いによってコロナの発生箇所と進展の様子を観測した結果について述べる。0.3MPa では正極性、負極性とも $D=3\%$ で、電界の強い三重点付近からコロナが発生し、一度消滅してから、球-ガラス間から発生したコロナが浴面を介してフラッシュオーバーに至った。このように、三重点付近からコロナが発生する場合、三重点付近からコロナが発生することにより、空間の電界が変化するため、コロナの進展過程の断定は難しいのが現状である。 $D=0\%$ では、 $D=3\%$ に比べてフラッシュオーバー電圧が低いので、三重点付近からコロナが発生する前に、球-平板間でフラッシュオーバーに至るため、 $D=3\%$ のような特性は現れていないものと推測される。

5. まとめ

直径4mmの球電極に硼硅酸ガラスを接触させ、球下端と平板電極までの距離を2mmに設定した複合電極構成におけるパルス放電特性について調べた結果を以下にまとめる。

- (1) フラッシュオーバー電圧は正極性、負極性とも、混合率の低い箇所では混合率 D の増加に伴いフラッシュオーバー電圧が急激に上昇し、 D が大きくなっていくにつれて、緩やかに上昇し続けるという特性が得られた。また、ガス圧によって比較すると、ガス圧の増加とともに若干ではあるが、フラッシュオーバー電圧は高くなった。
- (2) フラッシュオーバー電圧の経路は正極性、負極性とも、 D の増加とともに、またガス圧の増加とともに浴面でフラッシュオーバーしやすくなっていた。具体的には正極性の場合、0.2MPa の $D=20\sim 30\%$ 付近と 0.3MPa の $D=0\sim 3\%$ 付近、負極性では $D=0\sim 3\%$ 付近、この3箇所ですらフラッシュオーバーの経路の変化が見られた。
- (3) 超高速カメラによってコロナの進展挙動の観測を行った結果、正極性、負極性とも、 $D=0\%$ では三重点付近からコロナが発生する前に球-平板間でフラッシュオーバーした、 $D=3\%$ では三重点付近から発生したコロナが一度消滅し、球-ガラス間から浴面を介してフラッシュオーバーに至った。

文 献

- [1] 西田功, 大野政智, 黒沢幸夫, 大下陽一: 「ガス絶縁開閉装置の電力流通技術への対応」, 日立評論, 73, pp. 15-22 (1991)
- [2] 宅間董: 「ガス絶縁と地球温暖化問題」, 電学誌, 119, pp. 232-235 (1999)
- [3] 羽馬洋之, 井波深, 吉村学, 仲西幸一郎: 「SF₆ ガス中浴面リーダ放電に及ぼす電圧極性の影響」, 電学論 A, 114, pp. 467-475 (1994)
- [4] 坂本直規, 國中嘉人, 上野秀樹, 中山博史: 「(針-誘電体, 半導体)複合電極における局部コロナの挙動と浴面放電」, 電学論 A, 122, pp. 849-855, (2002)
- [5] 上野秀樹, 坂本直規, 國中嘉人, 中山博史: 「SF₆ ガス(金属/ZnO)複合電極系における μ s パルス電圧による放電特性」, 静電学誌, 27, 1, pp. 32-38 (2003)
- [6] 平田智之, 上野秀樹, 中山博史: 「N₂/SF₆ 混合ガス中における微小間隙内を貫く浴面放電特性」, 平成 17 年電気学会全国大会講演論文集, 1-083, p. 98 (2005)
- [7] 沼田子路, 西川寛之, 上野秀樹, 中山博史: 「 μ 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)
- [8] 沼田子路, 松島琢, 上野秀樹, 中山博史: 「 μ s 方形波パルス電圧下での SF₆/N₂ 混合ガス中における複合電極の放電特性」, 平成 17 年電気学会全国大会講演論文集, 1-082, p. 97 (2005)
- [10] 電気学会: 高電圧工学, 第二次改訂版, p. 14 (1983)
- [11] 電気学会: 放電ハンドブック, p. 41 (1974)