N₂/SF₆ ガス中固体絶縁物間隙内の放電進展特性

正員 上野 秀樹 (姫路工大), 正員 増岡 裕晃 (姫路工大)
正員 中山 博史 (姫路工大)

Discharge Extension Behavior in Narrow Gap Filled with N₂/SF₆ Gas between Insulators
Hideki UENO, Member, Hiroaki MASUOKA, Member and Hiroshi NAKAYAMA, Member
(Himeji Institute of Technology)

The flashover characteristics in N₂/SF₆ gas mixtures for the needle-plane electrode configuration with an insulating barrier consisting of two separated insulators with a narrow gap, which is just below and along the needle electrode, have been investigated. The SF₆ gas content dependence of flashover voltage strongly depended on the gap width. And the reduction of flashover voltage by the addition of small amount of SF₆ gas was found for the wider gap width ($\geq 500\mu\text{m}$) under the gas pressure of 0.3MPa. Thus anomalous dependence of the flashover voltage should result in the change of the discharge extension path and its behavior in the narrow gap induced by the addition of SF₆ gas into N₂ gas.

キーワード: 微小間隙, N₂/SF₆ 混合ガス, 沿面放電, パルス電圧

1. はじめに

一般に, 高電圧機器では, 電極と固体絶縁物が接する部分や絶縁物同士が接続する部分が多くみられる。例えば, GIS における高圧導体の絶縁スペーサ部分や巻線素線やリードとその絶縁支持部分である。このような固体とガスによる複合絶縁に関する研究は数多くなされ⁽¹⁾, 高電圧機器の小型化や信頼性の向上が図られてきた⁽²⁾。

通常, 電極と絶縁物あるいは絶縁物同士の接続部は, 間隙等が生じないように配慮がなされている。しかし, 運転中の振動・熱・絶縁物の経年劣化などによって, この接続部に微小な間隙や支持固体絶縁物に亀裂が発生することがある。この微小間隙や亀裂が絶縁特性に与える影響については, 明確にはなっていない⁽³⁻⁷⁾。筆者らは, C-GIS 等の絶縁の信頼性向上を念頭に置き, SF₆ ガスを用いた複合絶縁構成において, 固体絶縁物間の微小間隙が, 不平等電界の絶縁特性に及ぼす影響を調べ, フラッシュオーバー電圧における特異な間隙幅依存性を見出している⁽⁸⁾。

ところで, SF₆ ガスは優れた絶縁性能を有し, ガス絶縁機器に広く利用されている。一方, 局部高電界下では, 絶縁耐力が著しく低下すること⁽⁹⁾, 温室効果ガスであることなどの問題も有している⁽¹⁰⁾。そこで, SF₆ 代替ガスに関する研究が行われており, N₂/SF₆ 混合ガスや高気圧 N₂ ガスが有望視されている^(11,12)。我々も, 各種混合ガス中, 不平等電界下の絶縁特性, 沿面放電特性を調べており⁽¹³⁻¹⁵⁾, N₂ ガスへの SF₆ ガスの微量混合により負極性沿面フラッシュオーバー電圧が大幅に低下する特異な現象を見出している⁽¹⁶⁾。

以上のことから, 電力機器等における絶縁物に形成され

た $10\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ の微小な間隙や亀裂が絶縁特性に及ぼす影響を検討するため, 本論文では N₂/SF₆ 混合ガス中で微小間隙や亀裂を模擬した固体絶縁物間隙内の放電進展特性を調べた。その結果, 間隙内での放電進展特性はガスの混合比や間隙幅等によって大きく変化することが明らかになった。

2. 実験方法

本研究で用いた電極構成を図 1 に示す。上部電極には先端曲率半径約 $35\mu\text{m}$ の針を, 下部電極には大きさ $20\times 30\text{mm}^2$, 厚さ 1mm の黄銅製平板を用いた。針-平板電極間距離は 3.0mm 一定とした。平板電極上に 2 枚の硼硅酸ガラスバリア (厚さ 3.0mm , 大きさ $15\times 15\text{mm}^2$) を針電極直下に間隙ができるよう配置し, 間隙長 (Gap length) $L=3.0\text{mm}$ の微小間隙を形成した。この 2 枚のガラスバリアの配置間隔を調整し, 間隙幅 (Gap width) を $W=15\sim 1000\mu\text{m}$ の範囲で変化させた。この電極系を黄銅製容器 (約 $3\times 10^3\text{cm}^3$) 内に入れ, 約 0.1Pa まで排気・減圧後, N₂/SF₆ 混合ガスをガス圧 $p=0.1\sim 0.3\text{MPa}$ の範囲で封入した。なお, 既報の SF₆ ガス中の実験から, 間隙幅による放電特性の変化が最も顕著に現れる

図 1 電極配置
Fig. 1. Electrode configuration.

条件は $L=3.0\text{mm}$, $p=0.3\text{MPa}$ であるため⁽⁸⁾, ここでは電極間距離(間隙長) $L=3.0\text{mm}$ 一定とした。

印加電圧には, 波頭長 $T_f=1.5\mu\text{s}$, 波高値 $V_p=35\text{kV}$ の方形波パルス電圧を用いた。パルス電圧印加時の電圧波形およびコロナ発光は, 高圧プローブ(HV-P30, DC-50MHz, 岩崎通信機)および光電子増倍管(931A, 波長領域 300-650nm, 浜松ホトニクス)を介しオシロスコープ(DL-1540, 150MHz, 横河電機)で測定した。なお, 印加パルス波頭部で針-平板間にフラッシュオーバーが生じた瞬間, コロナが発生し始める瞬間の電圧をフラッシュオーバー電圧, コロナ開始電圧とした。また, フラッシュオーバーに至る放電の様子は容器の石英窓を通し, 高速デジタルフレーミングカメラ(IMACON468: 波長領域 385-900nm, HADLAND PHOTONICS)で撮影した。

なお, 実験に用いた硼硅酸ガラス(体積抵抗率 $\rho=10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$, 比誘電率 $\epsilon_r=7$)の電位減衰時定数は約 1 分である⁽¹⁷⁾。即ち, μs パルス電圧波頭部でのコロナの発生によるバリア上の堆積電荷の減衰は無視でき, それが放電進展に及ぼす効果は十分保持されている。一方, パルス電圧の印加間隔を 1 分以上とすることで, 複数回の電圧印加, 測定に対して, 前課電時の堆積電荷の影響は避けられる。

3. 実験結果および考察

3.1> フラッシュオーバー電圧の SF₆ ガス混合比依存性

間隙長 $L=3.0\text{mm}$, 間隙幅 $W=15\sim 1000\mu\text{m}$, ガス圧 $p=0.3\text{MPa}$ におけるフラッシュオーバー電圧(FOV)の SF₆ ガス混合比依存性を図2に示す。同一条件で10回測定を行い, その平均値, 最大値, 最小値を図中に示した。また, 図中の矢印と数字は, その回数, 印加パルス電圧の波頭部でフラッシュオーバーに至らなかったことを示している。なお, 混合比 D は全ガス圧 p に対する SF₆ ガスの分圧比である。

図 2(a)は, 正極性(針電極が正極)の結果である。間隙幅 $W=15, 100\mu\text{m}$ の場合, N₂ ($D=0\%$)ガス中の FOV は約 10kV であり, また SF₆ ガスの混合比の増大とともに FOV は上昇する。特に, 混合比 $D=30\%$ 以下の領域における FOV の上

昇割合が高い。一方, 間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$ では, $W=15, 100\mu\text{m}$ の場合とは異なり, 低混合比領域の FOV に特異な変化が見られた。即ち, 3%の SF₆ ガス混合により, FOV は N₂ ガス中の値(約 15kV)より約 2kV 低下した。また, 図 2(b)には, 負極性(針電極が負極)の結果を示した。間隙幅 $W=15, 100\mu\text{m}$ の場合では, SF₆ ガスの混合比の増大とともに FOV は単調に上昇するのに対し, 間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$ では, 3%の SF₆ ガス混合により FOV は, 24kV から 21kV に低下した。即ち, FOV の値は正極性に比べ高いが, 間隙幅 W による SF₆ ガス混合比依存性の変化は, 正極性と同一である。

次に, 間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$ における負極性 FOV の SF₆ ガス混合比依存性のガス圧による変化を図3に示す。ガス圧 $p=0.1, 0.2\text{MPa}$ の N₂ ガス中における FOV は各々 10kV, 16kV であり, SF₆ ガスの混合比 D の増大とともに FOV は上昇した。また, $D=10\%$ 以下の低混合比領域での上昇は顕著であるが, $D=30\%$ 以上では飽和した。この SF₆ ガス混合比依存性は, 準平等電界下のガス中放電の結果と一致している⁽¹⁸⁾。

一方, ガス圧 $p=0.3\text{MPa}$ の場合, 既に述べたように N₂ ガス中の FOV に対し, N₂/SF₆ ($D=3\%$)ガス中の FOV は約 3kV 低下した。即ち, N₂ ガスに微量の SF₆ ガスを混合すると, FOV は N₂ ガス中の値に比べて低下し, 極小を有する SF₆ ガス混合比依存性となる。また, 正極性においても同様の結果が得られた。以上の結果から, 間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$, ガス圧 $p=0.3\text{MPa}$ においてのみ, N₂ ガスへの SF₆ ガスの微量混合により, FOV が低下することが明らかとなった。

ところで, SF₆ ガス混合による正負両極性あるいは負極性 FOV の低下は, 長ギャップ放電において, いくつか報告されている^(19,20)。我々は微小ギャップの針-平板電極間に平板状バリアを挿入した場合, 負極性においてのみ, SF₆ ガスの微量混合域で沿面 FOV の低下が顕著に引き起こされることを見出している^(14,16)。また, 異物付着スペーサでの負極性雷インパルス沿面破壊電圧においても類似の現象が報告されている⁽²¹⁾。本研究では, 間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$, ガス圧 $p=0.3\text{MPa}$ の条件において正負両極性の FOV が低下した。したがって, FOV の低下の見られる条件が異なってお

図2 フラッシュオーバー電圧の SF₆ ガス混合比依存性(ガス圧 $p=0.3\text{MPa}$)
Fig.2. SF₆ gas content dependence of flashover voltage ($p=0.3\text{MPa}$).

図3 負極性フラッシュオーバー電圧の SF₆ ガス混合比依存性 (間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$)
Fig.3. SF₆ gas content dependence of negative flashover voltage ($W=1000\mu\text{m}$).

り、その原因が異なることも考えられる。そこで、いずれの報告においても FOV の低下が認められる負極性に焦点を絞り、本構成における放電特性の検討をさらに進めた。

<3.2> コロナ開始電圧の SF₆ ガス混合比依存性

ガス圧 $p=0.3\text{MPa}$ における負極性コロナ開始電圧(COV)の SF₆ ガス混合比依存性を調べた。その結果を図 4 に示した。いずれの間隙幅 W においても、3%の SF₆ ガスの混合により COV は上昇した。また、いずれの混合比においても COV は上昇し、N₂ ガスへの SF₆ ガスの混合による COV の低下は観測されなかった。このような COV の SF₆ ガス混合比依存性は、バリアの存在しない針-平板電極間のガスギャップ放電に見られるものと同じである⁽²²⁾。しかし、間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$ では、SF₆ ガスの微量混合によって COV は上昇するにもかかわらず、FOV は低下している。このことは、FOV の低下は、バリアや微小間隙がコロナ開始段階までに及ぼす影響によるものではなく、コロナ開始以降、微小間隙内を放電が進展する過程（ガスギャップ中および間隙内壁）に起因していることを示唆している。

<3.3> 沿面フラッシュオーバー電圧の間隙幅依存性

図 5 に種々の混合比の N₂/SF₆ ガス中 ($p=0.3\text{MPa}$) における負極性 FOV の間隙幅依存性を示す。N₂ ($D=0\%$) ガス中の場合、 $W<200\mu\text{m}$ の領域では FOV は間隙幅 W によらず、約 18kV でほぼ一定の値となっている。一方、 $W=500, 1000\mu\text{m}$ では、FOV は各々 22kV, 23kV となり、間隙幅 W が大きくなると、FOV は上昇した。

また、SF₆ ($D=100\%$) ガス中では、間隙幅 $W=100\sim 200\mu\text{m}$ で FOV が極小となる U 字型の特性を示す。即ち、 $W<100\mu\text{m}$ の領域では、間隙幅が小さくなるにしたがい FOV は上昇し、 $W=15\mu\text{m}$ における FOV は 35kV 以上となる。これはガス/固体の界面効果によるものと考えられる^(6,24)。他方、 $W>200\mu\text{m}$ では、間隙幅の増大とともに、FOV は上昇する。これは、放電経路がガスギャップと間隙内壁沿面の直列であるため、間隙幅が大きくなるとフラッシュオーバーに至るまでの放電路が長くなることによっている⁽⁸⁾。N₂ ($D=0\%$) および SF₆ ($D=100\%$) ガス中でのこのような FOV の変化は、 $L=3.0\text{mm}$, $p=0.3\text{MPa}$ までの範囲では、 L , p の増大とともに顕著になり、本条件において最も明瞭に現れる⁽²³⁾。

一方、N₂/SF₆ ($D=3\%$) ガスでは、N₂ ガスや SF₆ ガス中とは異なり、 $W=15\sim 1000\mu\text{m}$ の範囲において、負極性 FOV は約 20kV で、間隙幅 W による変化はほとんど見られない。この結果、間隙幅 $W\geq 500\mu\text{m}$ の領域では、N₂ ガスの負極性 FOV に比べ、N₂/SF₆ ($D=3\%$) ガス中の値の方が低くなる。SF₆ ガスの混合比をさらに増大すると、その FOV の間隙幅依存性は、SF₆ ($D=100\%$) ガス中のそれへと変化していく。

以上の FOV および COV の SF₆ ガス混合比依存性、FOV の間隙幅依存性の結果から、間隙幅が $W\geq 500\mu\text{m}$ の領域では、N₂ ガスに微量の SF₆ ガスを混合した場合、針先からの放電進展過程が大きく変化するため、N₂ ガス中に比べ

図 4 負極性コロナ開始電圧の SF₆ ガス混合比依存性 ($p=0.3\text{MPa}$)

Fig.4. SF₆ gas content dependence of negative corona onset voltage under the pressure of $p=0.3\text{MPa}$.

図 5 N₂/SF₆ 混合ガス中の負極性フラッシュオーバー電圧の間隙幅依存性 ($p=0.3\text{MPa}$)

Fig.5. Gap width dependence of negative flashover voltage under the pressure of $p=0.3\text{MPa}$.

N₂/SF₆ ($D=3\%$) ガス中の FOV が低下するものと考えられる。

<3.4> 放電進展形態の高速度カメラによる観測

SF₆ ガスの微量混合により FOV の低下が見られる間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$, N₂ ($D=0\%$) および N₂/SF₆ ($D=3\%$) ガス中の間隙内での放電進展形態を高速度カメラを用いて観測し、その放電の様子を図 6 に示す。撮影は右上の模式図に矢印で示した間隙に対し垂直方向より行い、コロナ発光が確認された最初のフレームを Frame 1 としている。また、最後の Frame 以外は、最大感度で撮影の後、画像処理が施されている。

図 6(a) に示す $p=0.3\text{MPa}$, N₂ ($D=0\%$) ガス中の場合、Frame 1 において、針先から平板方向へ進展する弱いコロナ発光が観測される。その後、Frame 2, 3 の約 100ns 間最大感度でも検出できないほどコロナ発光は弱くなる。そして Frame 4 において針先から平板までシャワー状のグロー的なコロナの進展が観測され、さらに Frame 5 でコロナ発光は強くなり、その後、Frame 6 でフラッシュオーバーに至っている。また、このような進展形態は間隙幅 $W=100\mu\text{m}$ においても観測された。

図 6 N₂/SF₆ 混合ガス中の放電進展像 ($W=1000\mu\text{m}$)
Fig.6. Discharge extension images in N₂/SF₆ gas ($W=1000\mu\text{m}$).

一方、図 6(b)に示す $p=0.3\text{MPa}$, N₂/SF₆($D=3\%$)ガス中では、Frame 1 での針先からのコロナ発光が見られた後、その発光は N₂($D=0\%$)ガスの場合同様、非常に弱くなる(Frame 2)。Frame 3 で再びコロナ発光が観測されるが、N₂($D=0\%$)ガス中のような平板電極まで進展したシャワー状のコロナは観測されず、針先から比較的強い発光のコロナが観測されるが、コロナの拡がりや平板電極方向への進展は抑制されている (Frame 3, 4)。その後、Frame 5 でフラッシュオーバーに至っている。この N₂/SF₆($D=3\%$)ガス中における微小間隙内の放電進展形態は、既に報告している SF₆($D=100\%$)ガス中におけるそれに近い⁽⁸⁾。したがって、3%の SF₆ ガスの混合では、負イオン形成とそれによる放電進展抑制効果が顕著に現れ、それ故、N₂($D=0\%$)ガスに比べて、コロナは拡がり、進展ともに抑えられているものと思われる。さらに、N₂/SF₆($D=3\%$)ガスの場合、Frame 1 で発光が観測された後、針から平板方向への放電の伸びは、Frame 3 では 1.0mm, Frame 4 でも 1.2mm 程度に抑制されている。ところが、その後印加電圧がわずかに 1.5kV 上昇した Frame 5 では、放電が一気に進展し、フラッシュオーバーに至っている。

比較として FOV の低下が見られなかった $p=0.2\text{MPa}$, N₂/SF₆($D=3\%$)における放電進展挙動を図 6(c)に示した。Frame 1 で針先からの弱いコロナ発光が観測されるが、 $p=0.3\text{MPa}$ の場合と異なり、Frame 2~Frame 4 まで徐々にコロナ発光は強くなるとともに、平板方向に進展している。

以上より、 $p=0.3\text{MPa}$, N₂/SF₆($D=3\%$)ガス中における間隙内での放電進展は、コロナ開始後、ある程度電圧が上昇するまでは、放電の進展は抑制されるが、その後の進展は極めて速い。これらの過程が FOV の低下に関係しているものと思われる。

間隙幅 $W=15\mu\text{m}$ についても、その放電進展形態を調べた。N₂($D=0\%$)ガス中では、 $W=1000\mu\text{m}$ の場合とほぼ同様の進展形態が観測された。一方、N₂/SF₆($D=3\%$)ガス中では、 $W=1000\mu\text{m}$ に比べ COV が低いことから、早い段階から発光が見られ、また波頭部の電圧の上昇とともに、徐々に進展し、フラッシュオーバーに至った。また、進展は N₂($D=0\%$)ガスに比べ抑制されており、間隙幅 $W=15\mu\text{m}$ では、3%の SF₆ ガス混合により FOV は上昇するものと考えられる。

以上の結果から、間隙幅によって、N₂/SF₆($D=3\%$)ガス中

の放電進展過程が変化し、SF₆ガスの混合によるFOVの挙動が変化したと考えられる。これは、間隙内のガスギャップやバリアの間隙内壁面における電荷の分布、蓄積状態が間隙幅によって変化するためと思われる。

<3.5> 間隙内における放電進展経路

間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$ において、ガス圧 $p=0.3\text{MPa}$ の N₂/SF₆ ($D=3\%$) ガス中では、N₂ ガス中に比べて、コロナ開始後、ある程度の電圧までは、間隙内での放電の進展は抑制されるものの、電圧が高くなると、急激に放電は進展し、フラッシュオーバーに至る。これが FOV の低下に関係しているものと考えられる。そこで、放電進展過程をさらに検討するため、間隙内における放電進展経路について詳しく調べた。

本電極配置では、図 7(a)に示すように、針先端からバリア間隙内壁へのガスギャップ中の進展過程と間隙内壁沿面の進展過程が存在する。そこで、針先からの放電が間隙内壁沿面に到達した点を観測し、図 7(a)のようにバリア間隙の上部部から到達点までの距離 L' を測定した。なお、測定は 50 回行い、間隙内沿面の到達点 L' とその確率を求めた。

図 7(b)に間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$ 、ガス圧 $p=0.3\text{MPa}$ における針から進展した放電のバリア間隙内壁到達点 L' とその確率を示した。N₂ ($D=0\%$) ガス中では、 $L' \leq 1.0\text{mm}$ が 55%、 $L' \leq 1.5\text{mm}$ が 29%であり、放電は針から平板方向に進展しな

(a) 放電進展の経路

(b) 間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$

図 7 放電進展経路の SF₆ ガス混合比による変化 ($p=0.3\text{MPa}$)

Fig.7. Variation of discharge extension path in the narrow gap in N₂/SF₆ gas ($p=0.3\text{MPa}$).

図 8 間隙内での放電進展経路のガス圧による変化 ($W=1000\mu\text{m}$)

Fig.8. Variation of discharge extension path in the narrow gap by gas pressure ($W=1000\mu\text{m}$).

がら間隙内壁に到達し、その後間隙内壁沿面を進展する。これに対し、N₂/SF₆ ($D=3\%$) ガス中では、 $L'=0\text{mm}$ が 12%、 $L' \leq 0.5\text{mm}$ が 86%、 $L' \leq 1.0\text{mm}$ が 2%となり、ガスギャップ中の平板方向の進展は抑えられ、間隙内壁上端近傍に到達し、間隙内壁沿面を進展するようになる。さらに、SF₆ ガスの混合比を増大すると、この傾向はより顕著になった。

間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$ においてガス圧 p を変化させた場合の放電進展経路の変化を図 8 に示した。図 8(a)の N₂ ($D=0\%$) ガス中では、ガス圧の上昇とともに、ガスギャップ中の放電が間隙内壁に到達する位置はバリア上端より遠くなり、ガスギャップを平板方向に進展するようになる。一方 N₂/SF₆ ($D=3\%$) ガス中の結果を図 8(b)に示すが、逆にガス圧の上昇によって、ガスギャップ中の平板方向への進展は抑えられ、沿面放電に移行しやすくなることがわかる。

このように、間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$ の場合、N₂ ($D=0\%$) ガス中では、ガス圧が高くなるほど、FOV におけるガスギャップ中の放電進展の影響は大きくなる。それに対して、N₂/SF₆ ($D=3\%$) ガス中では、放電はガスギャップ中よりむしろ、間隙内壁沿面を進展しやすく、その影響が大きくなる。

ところで、SF₆ ガスの混合による間隙内での放電進展経路の変化は次のように考えられる。N₂ ($D=0\%$) ガス中 ($p=0.3\text{MPa}$) の臨界電界における電子のドリフト速度は $1.4 \times 10^7 \text{cm/s}$ である。また、SF₆ ガス中の電子のドリフト速度は $2.2 \times 10^7 \text{cm/s}$ であり、ガスギャップの平板電極方向への電子の進展には大きな差はないと考えられる⁽¹¹⁾。一方、電子付着によって形成される SF₆ のドリフト速度は、 $1.7 \times 10^4 \text{cm/s}$ と遅いため⁽²⁵⁾、SF₆ が針先近傍に残る。したがって、N₂ ガス中では、放電はガスギャップを平板方向に向かって進展しやすいが、SF₆ ガスを混合すると針先近傍に残った SF₆ によって、平板方向への放電進展は抑制される。

図 9 に、ガス圧 $p=0.3\text{MPa}$ 、電極間距離 $L=3.0\text{mm}$ での針—平板のみのガスギャップ放電および電極間にガラスバリアを沿わした沿面放電の FOV の SF₆ ガス混合比依存性を間隙幅 $W=1000\mu\text{m}$ の場合と比較して示す。N₂ ($D=0\%$) ガス中の場合、間隙内放電 ($W=1000\mu\text{m}$) の FOV は、ガスギャップ放電および沿面放電の FOV と大きな差は見られない。一方、

図 9 FOV におけるバリアの影響 ($p=0.3\text{MPa}$)

Fig.9. Influence of barrier on FOV ($p=0.3\text{MPa}$).

図 10 間隙内壁沿面のダストフィギュア ($p=0.3\text{MPa}$, $V_p=15\text{kV}$)

SF₆を含むガス中では、間隙内放電と沿面放電の FOV は、ガスギャップ放電の FOV と比べて大幅に低下している。わずか 3% の SF₆ ガス混合においても、間隙内放電および沿面放電の FOV はガスギャップ放電の値に対して約 10kV も低下している。このことから、SF₆ ガスを混合した場合、微小間隙内の放電はガスギャップよりも内壁沿面を進展しやすく、ガスギャップ放電から沿面放電への移行の難易によって放電特性が左右されることが考えられる。その結果、高速度カメラによって観測された急激な放電の進展や N₂(D=0%) に対する FOV の低下が現れたものと考えられる。また、それは針先端部、内壁沿面上の電荷の影響を受ける。

そこで、内壁沿面の電荷蓄積状態をダストフィギュアにより検討した。図 10 には、印加電圧 $V_p=15\text{kV}$ 、負極性のときの $p=0.3\text{MPa}$ における間隙内壁沿面のダストフィギュアを示した。なお、この場合ガラスの替わりに厚さ 3mm のアクリル板を用いた。間隙幅 $W=100\mu\text{m}$ の場合、図 10(a) の N₂ ガス中では、針先から中央付近まで広がった負の帯電領域が見られる。一方、N₂/SF₆(D=3%) では(図 10(b))、針先端近傍付近にわずかに点状の負帯電領域が見られるのみであり、内壁での電荷蓄積は抑えられている。すなわち、針先からのコロナによって負イオンが形成され、それにより放電進展が抑制され、FOV が上昇するものと考えられる。

一方、図 10(c) に示す $W=1000\mu\text{m}$ の N₂ ガス中では、 $W=100\mu\text{m}$ と同様、負帯電領域は、針先からの放射状に広がり、その先端はバリア中央まで達している。また、 $W=100\mu\text{m}$ に比べて、粉末の付着量は多い。さらに、平板電極近くに達する弱い環状領域も見られ、蓄積電荷はバリア内壁沿面に広がり、電界緩和が生じフラッシュオーバーに至りにくいものと思われる。ところが、N₂/SF₆(D=3%) では(図 10(d))、 $W=100\mu\text{m}$ の場合と異なり、針先近傍の点状とその外側の平板近くまで達した強い環状の帯電領域が認められた(図 10(d))。また、N₂ 中と比較して、強く帯電した領域は平板方向に伸びており、間隙内で沿面放電が進展している。これは、間隙上部での電界緩和による放電進展抑制効果が異なっているためと考えられる。

以上のように、コロナによる間隙内壁沿面における電荷の蓄積状態が大きく異なっている。その結果、 $W=1000\mu\text{m}$ の場合、N₂ ガス中に比べて、N₂/SF₆(D=3%) 中では間隙上

端より沿面を進展し、沿面の影響が大きいため FOV が低くなったものと考えられる。しかし、FOV の低下と内壁沿面上の電荷との関係については、さらに検討が必要である。

4. まとめ

本論文では N₂/SF₆ 混合ガス中で二つの固体絶縁物間に $15\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ の亀裂や隙間を模擬した微小間隙を形成し、その間隙内での放電進展特性を調べた。N₂, SF₆ ガス中での微小間隙内の放電において、電極間距離 $L=3.0\text{mm}$ 、ガス圧 $p=0.3\text{MPa}$ までの範囲では、 L が長くなるほど、また p が高くなるほどフラッシュオーバー電圧の間隙幅 W による変化は顕著となることから、上記条件を中心に調べた。その結果をまとめると以下ようになる。

- (1) $L=3.0\text{mm}$ では、ガス圧 $p=0.3\text{MPa}$ の場合、間隙幅 W が $500\mu\text{m}$ 以上で、N₂ ガスおよび SF₆ ガス中のフラッシュオーバー電圧は、間隙幅の増大とともに大きく上昇する。一方、N₂/SF₆(D=3%) 中のフラッシュオーバー電圧の間隙幅による変化は見られない。その結果、上記条件において、N₂/SF₆(D=3%) 中のフラッシュオーバー電圧は、N₂ ガス中の値より低いものとなった。また、フラッシュオーバー電圧の低下は正負両極性で見られた。
- (2) N₂/SF₆ 混合ガス中の間隙内放電($W=1000\mu\text{m}$)の放電進展過程、進展経路について検討を行った。その結果、N₂ ガス中では、ガスギャップ中を平板方向に進展しやすいが、SF₆ の混合により、ガスギャップ中の平板方向への放電進展が抑えられ、間隙内壁沿面を進展しやすくなる。それゆえ、N₂ ガス中ではガスギャップ放電の特性が、N₂/SF₆ ガス中では沿面放電の特性が、間隙内放電の特性を支配しているものといえる。
- (3) 間隙幅や SF₆ ガスの混合によって、間隙内壁沿面における帯電領域、電荷の蓄積状態は異なる。 $W=1000\mu\text{m}$ において、N₂/SF₆(D=3%) 中では、針先近傍、間隙上部での負電荷によりギャップ中の平板方向への進展は抑制されるが、間隙内沿面での抑制効果は充分ではなく、沿面放電に移行しやすい。そのため、沿面放電と同様の特性、フラッシュオーバー電圧の低下が現れたものと考えられる。
(平成 12 年 10 月 6 日受付, 平成 13 年 6 月 8 日再受付)

文 献

- (1) 放電バリア効果調査専門委員会：「放電バリア効果—バリアによる放電進展の阻止—抑制効果—」, 電気学会技術報告(II 部), 第 270 号(1988).
- (2) ガス絶縁開閉装置の絶縁技術専門委員会：「急しゅん波サージと GIS の絶縁問題」, 電気学会技術報告 (II 部), 第 324 号 (1990).
- (3) 山野：「二つの絶縁物壁面が作る微小間隙内を貫く交流絶縁破壊」, 電学論 A, **114**, 481 (1994).
- (4) Y.Yamano and T.Tsurumizu: "Effect of charge accumulation on ac breakdown through a crack between two insulating walls", IEEE Trans., **DEI-2**, 492 (1995).
- (5) 遠藤, 佐藤, 佐藤, 榊原：「負極性直線沿面放電の進展特性」電学論 A, **115**, 845 (1995).
- (6) 劉, 甲斐, 浅井, 長尾, 小崎：「固体絶縁物の界面空隙

に連なる空気ギャップにおける部分放電現象」, 電学論 A, **119**, 209 (1999).

- (7) 劉, 甲斐, 浅井, 長尾, 小崎: 「固体絶縁物の界面空隙に連なる空気ギャップにおける部分放電の電圧依存性と部分放電発光の観測」 電学論 A, **119**, 342 (1999).
- (8) 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**, 25 (2000).
- (9) A.H.Cookson and O.Farish: "Particle-initiated breakdown between coaxial electrodes in compressed SF₆", IEEE Trans., **PAS-92**, 871 (1973).
- (10) L.Niemeyer and F.Y.Chu: "SF₆ and the atmosphere", IEEE Trans., **EI-27**, 184 (1992).
- (11) L.G.Christophorou and R.J.Van Brunt: "SF₆/N₂ mixtures: Basic and HV Insulation properties", IEEE Trans., **DEI-2**, 952 (1995).
- (12) 宅間: 「ガス絶縁と地球温暖化問題」, 電学誌, **119**, 232 (1999).
- (13) 渡部, 釜谷, 小林, 小野田, 中山: 「SF₆および N₂ 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**, 1090 (1997).
- (14) 上野, 渡部, 中山: 「N₂/SF₆, N₂/O₂ 混合ガス中における沿面放電特性」, 静電気学会誌, **23**, 266 (1999).
- (15) 渡部, 四宮, 上野, 小野田, 中山: 「混合ガス(N₂/SF₆)中のパルス電圧による沿面放電特性」, 電学論 A, **119**, 6 (1999).
- (16) H.Ueno, N.Sakamoto and H.Nakayama: "Anomalous creeping flashover characteristics in N₂/SF₆ mixed gas under single pulse voltage", IEEE Trans., **DEI-8**, 195 (2001).
- (17) 家田, 沢, 篠原: 「高分子表面電荷の減衰過程」, 電学誌, **88**, 1107 (1968).
- (18) T.Takuma, T.Watanabe and K.Kita, "Breakdown characteristics of compressed-gas mixtures in nearly uniform fields", Proc. IEE, **119**, 927 (1972).
- (19) T.Watanabe and T.Takuma, "The breakdown voltage and discharge extension of long gaps in nitrogen-SF₆ and air-SF₆ gas mixtures", J. Appl. Phys., **48**, 3281 (1977).
- (20) Y.A.Safar, N.H.Malik and A.H.Qureshi: "Impulse breakdown behavior of Negative rod-plane gaps in SF₆-N₂, SF₆-air and SF₆-CO₂ mixtures", IEEE Trans., **EI-17**, 441 (1980).
- (21) 保科, 佐藤, 寺西, 小林: 「実規模ガス絶縁母線の混合ガス絶縁特性」, 平成 11 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集 B, 13 (1999).
- (22) H.Nakayama, M.Onoda, S.Kuroda and K.Amakawa, "Polarity effects on the corona and breakdown of mixture (SF₆/N₂) in a needle-plane gap under pulse voltage", Jpn. J. Appl. Phys., **29**, 1550 (1990).
- (23) 上野, 増岡, 中山: 「微小間隙内を進展する沿面放電とその特性」, 電気学会放電研究会資料, ED-99-42 (1999).
- (24) 御所, 遠藤, 渡辺, 金子: 「誘電体-誘電体の界面に生ずるインパルス界面放電」, 平成 11 年電気学会全国大会講演論文集, 1-267(1999).
- (25) E.W.McDaniel and M.R.C.McDowell: "Low-field mobilities of the negative ions in oxygen, sulfur hexafluoride, sulfur dioxide and hydrogen chloride", Phys. Rev., **114**, 1028 (1959).

上野 秀樹(正員) 1960 年 10 月 2 日生。昭和 60 年 3 月

信州大学大学院工学研究科修士課程修了。昭和 63 年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年 4 月住友電気工業(株)入社。平成 9 年 10 月姫路工業大学工学部電気工学科助教授, 現在に至る。工学博士。電気計測, 電気電子材料学を担当。主として, 複合絶縁, 沿面放電に関する研究に従事。

増岡 裕晃(正員) 1974 年 4 月 8 日生。平成 9 年 3 月姫

路工業大学工学部電気工学科卒業。平成 11 年 3 月同大学大学院工学研究科修士課程電気系工学専攻修了。同年 4 月(株)ユアサコーポレーション入社, 現在に至る。平成 10 年度電気関係学会関西支部連合大会奨励賞受賞。

中山 博史(正員) 1943 年 3 月 14 日生。昭和 40 年 3 月

姫路工業大学電気工学科卒業。平成 3 年 10 月同大学工学部電気工学科教授, 現在に至る。平成 10 年 4 月から 2 年間同大学学生部長。工学博士。電気回路, 電力系統工学を担当。主に, 気体および固体誘電体の絶縁破壊に関する研究に従事。