バリア表面上の溝が N₂ ガス中 μ s パルス電圧下における 沿面放電に及ぼす影響

正員 上野 秀樹*   准員 河野 太一*
学生員 坂本 直規*   正員 中山 博史*

Influence of the Groove on Barrier Surface on Creeping Discharge Characteristics in N₂ Gas under μ s Pulse Voltage

Hideki Ueno*, Member, Taichi Kawano*, Associate,
Naoki Sakamoto*, Student Member, Hiroshi Nakayama*, Member

For a needle-plane electrode system with a barrier, which establishes the electric field across the axis of a groove, creeping discharge characteristics in N₂ gas under μ s pulse voltage applications have been investigated. The distance h between the barrier surface and the needle tip as well as the distance M between the groove center and the needle tip were changed. In the case of $h=0.3$ mm, when the needle tip is located near the far-side groove edge from the plane electrode ($M=0.6$ mm), the flashover voltage has the maximum value. At that time, a growth of a corona is suppressed near the groove edge. These unique characteristics should associate with a field relaxation.

キーワード：沿面放電, N₂ ガス, 溝, バリア

Keywords : creeping discharge, N₂ gas, groove, barrier

1. まえがき

近年、電力需要の増加に伴い電力機器の高電圧化、大容量化、小型化、さらに安全性の向上が追求されている。そのなかで、GIS(ガス絶縁開閉装置)などのガス絶縁機器に使用されている SF₆ ガスは多くの要求項目を満たし、高い評価を得ている⁽¹⁾。しかし、この SF₆ ガスの絶縁耐力はギャップ中の最大電界に強く依存するため、金属の突起や浮遊粒子などの原因による不平等電界中では、絶縁耐力が著しく低下し、異常に低い電圧で放電が開始する⁽²⁾。そのため、金属異物等の局所的な高電界発生源を模擬した研究がなされている⁽³⁾。また、SF₆ ガスの 100 年換算の地球温暖化係数(GWP)は CO₂ ガスの約 24,000 倍で、地球温暖化への影響が大きく⁽⁴⁾、排出量の削減が求められている。また、SF₆ ガスの使用量削減のため、SF₆ ガスと N₂ ガスとの混合ガスの利用や N₂ ガスの単独使用などの研究がなされている⁽⁴⁾。

一般に、電力機器の絶縁は、ガスと固体絶縁物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、局所的な高電界から発生したコロナ放電による電荷を、表面

上に蓄積し、その後の放電進展を変化させる^{(5)~(7)}。絶縁物表面の形状、特に沿面放電進展経路を横切る凹凸形状については、絶縁スペーサーやブッシングのひだと関連して調べられており、数 cm~10cm 程度の凹凸形状が沿面放電の進展を抑制し、フラッシュオーバー電圧を上昇させることが明らかにされている⁽⁸⁾。一方、絶縁物上には mm サイズの傷や注型・プレス・切削の痕が生じる可能性があるが、このような小さな溝や傷がそれを横切る沿面放電に与える影響についての報告例は少なく、不明な点が多い。

ガス絶縁機器や沿面放電における上述の課題に対して、本研究では、GIS 等の機器内に金属異物等の局部高電界発生源が存在し、雷サージが加わった場合に、絶縁スペーサー等の絶縁物表面の 1mm 程度の幅と深さの溝や傷が絶縁特性に与える影響を調べることを最終的な目的としている。本報告では、針-平板電極間に溝を有する絶縁物を配置し、針と溝の位置関係をパラメータとして、パルス電圧波頭部(波頭長 1.5 μ s)を用いて、溝を横切って進展する N₂ ガス中の沿面放電特性を調べた。

2. 実験方法

針-平板電極に溝を設けた固体絶縁物バリアを配置した電極構成を図 1 に示す。針電極には先端曲率半径が約 35 μ m

* 姫路工業大学
〒671-2201 姫路市書写 2167
Himeji Institute of Technology
2167 Shosha, Himeji 671-2201

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

の針を、平板電極には厚さ 1.0mm でその一片に丸み ($R=0.8\text{mm}$) が付けられ、上部で 25mm、下部で 25.8mm の長さの黄銅製平板を用いた。バリア(幅 26mm、厚さ 1.0mm) を平板電極および保持板で挟み、容器付属の金属電極棒端子に片持ち梁様に取り付けた。針電極先端からの垂線がバリア表面と交差した点から平板電極までの距離が 5.0mm 一定、溝の中心までの距離が M 、針電極先端からバリア表面までの距離が h となるように配置した。 M が負の値は、図 1(b)において溝の中心が針先端より右側にある配置を示す。バリア上の溝の形状は図 1(c)のように、幅 1.2mm、深さ約 0.3mm の U 字型であり、その内面には $1\mu\text{m}$ 程度の凹凸がある。また、比較として溝のない平面バリアも使用した。針電極は一条件ごとに新しいものと取り替えて測定した。

バリアには硼硅酸ガラス(体積抵抗率 $\rho=1.1 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ 、比誘電率 $\epsilon=7.0$) を使用しているが、これは一連の実験における先行加電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。電荷減衰の時定数は 67 秒と計算されるが⁹⁾、実際には、電圧印加 60 秒後においても残留電位は検出されなかった。一方、印加電圧波頭長は $1.5\mu\text{s}$ であり、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無視でき、蓄積電荷がその後の放電に与える影響は保持され、実際の機器に使用されているエポキシ樹脂と同様のデータが得られる。

上述の電極を黄銅製容器内に設置し、約 0.1Pa 以下まで排気した後、 N_2 ガスを 0.1~0.3MPa まで封入した。高圧方形波パルス発生装置((株)電研精機研究所)で発生させた μs 方形波パルス電圧(波頭長 $T_f=1.5\mu\text{s}$ 、波高値 $V_p=35\text{kV}$)を印加した。印加間隔は上述の電荷減衰を考慮して 60 秒以上とした。フラッシュオーバーは印加電圧波頭部で生じており、そのときの電圧波形は、高圧プローブ(HV-P30, DC-50MHz, 岩崎通信機(株))を介して、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。コロナ発光は、容器付属の石英窓を通し、レンズ等は使用せず電極系全体からの発光を光電子増倍管(931A, 波長領域 300-650nm, 浜松ホトニクス(株))を用いて観測した。沿面放電の挙動は超高速カメラ(IMACON468:波長領域 385-900nm, HADLAND PHOTONICS LTD.)で撮影した。

いずれの測定も、電極系を新たに構成した別バッチの実験を行い、データの再現性の確認を行っている。

3. 実験結果および検討

〈3・1〉 フラッシュオーバー電圧およびコロナ開始電圧の溝位置依存性

〈3・1・1〉 針先端の高さが $h=0\text{mm}$ の場合 針電極先端とバリア表面が接触している $h=0\text{mm}$ における、 N_2 ガス中のフラッシュオーバー電圧(V_f)およびコロナ開始電圧(V_c)の溝位置依存性を図 2 に示す。測定は同一条件で 10 回行い、その平均値とバラツキを図示している。

図 2(a)の正針の場合、 $M=-1.0\text{mm}$ においてフラッシュオーバー電圧(V_f)は、0.1MPa で約 12kV、0.2MPa で約 16kV、0.3MPa で約 20kV となり、溝のない平面バリアとほぼ同じ値であった。 $M=-1.0 \sim 0\text{mm}$ ではフラッシュオーバー電圧は上昇し、また、 $M=0 \sim 4.4\text{mm}$ では、その値は低下したが、平面バリアや $M=-1.0\text{mm}$ の値に比べると高くなっている。すなわち、いずれのガス圧においても $M=0\text{mm}$ 付近で最大となる凸型特性になった。 $M=0\text{mm}$ におけるフラッシュオーバー電圧は、 $M=-1.0\text{mm}$ の値に対して、0.1MPa で約 1.7 倍、0.2MPa で約 1.4 倍、0.3MPa で約 1.2 倍であり、ガス圧が増加すると、この増加割合は低くなった。一方、図 2(b)の負針の場合、フラッシュオーバー電圧は、いずれのガス圧においても溝位置による明瞭な差は見られず、0.1MPa で約 16kV、0.2MPa で約 25kV、0.3MPa で約 29kV であり、溝のない平面バリアの場合とほぼ同じ値である。また、 $M=0\text{mm}$ におけるコロナ開始電圧(V_c)は、正針、負針いずれにおいても、他の M の場合に比べて 1~2kV 高くなった。

正針の場合、針-平板電極間の溝位置によって、フラッシュオーバー電圧が変化するという結果が得られた。しかし、この針電極の高さ($h=0\text{mm}$)では、 $-0.6\text{mm} < M < 0.6\text{mm}$ において針先端とバリア間にガスギャップが存在する。このガスギャップの影響を検討するため、 $h=-0.3\text{mm}$ 、 $M=0\text{mm}$ 、すなわち、針先端が溝中央の底に接する配置について、フラッシュオーバー電圧の測定を行った。その結果、0.1MPa で 13kV、0.2MPa で 18kV、0.3MPa で 20kV となり、 $h=0\text{mm}$ 、 $M=0\text{mm}$ の場合より低い値となった。したがっ

て、針先端とバリアの間にギャップがない場合では、 $M=\pm 0.6\text{mm}$ 付近、すなわち針先端が溝端近傍に存在する場合、正針のフラッシュオーバー電圧が上昇していると推察される。

〈3・1・2〉 針先端の高さが $h=0.3\text{mm}$ の場合 次に、すべての溝位置 M においてガスギャップが存在する $h=0.3\text{mm}$ について検討を行った。図 3(a)に正針のフラッシュオーバー電圧を示す。いずれのガス圧においても $M=-1.0\text{mm}\sim 0.6\text{mm}$ で、フラッシュオーバー電圧は上昇、 $M=0.6\text{mm}$ 以上で低下した。また、図には示していないが、 $M=0.3\text{mm}$ についても測定した結果、 $M=0\text{mm}$ と $M=0.6\text{mm}$ の中間の値となった。すなわち、溝の端部に対応する $M=0.6\text{mm}$ 付近で最大値をとる凸型特性となった。また、 $M=-1.0\text{mm}$ における値は平面バリアを用いた場合とほぼ同じ値となった。 $M=0.6\text{mm}$ におけるフラッシュオーバー電圧は $M=-1.0\text{mm}$ を基準とした場合の、 0.1MPa で約 1.4 倍、 0.2MPa で約 1.3 倍、 0.3MPa で約 1.1 倍であり、ガス圧の上昇とともに増加割合は小さくなった。一方、コロナ開始電圧(V_c)は、ガス圧 0.2MPa 、 0.3MPa では $M=0\text{mm}$ および $M=0.6\text{mm}$ 付近で高くなる傾向が見られる。しかし、フラッシュオーバー電圧が最も大きく変化した 0.1MPa では、溝位置によるコロナ開始

電圧の明瞭な変化は認められなかった。

図 3(b)に負針における結果を示すが、いずれのガス圧においても、正針の場合にみられたような、フラッシュオーバー電圧の溝位置依存性は認められない。また、その値は、 0.1MPa で約 15kV 、 0.2MPa で約 25kV 、 0.3MPa で約 31kV であり、平面バリア、あるいは $h=0\text{mm}$ における負針の場合(図 2(b))と比較しても大きな差はなかった。また、コロナ開始電圧も溝位置による明らかな差はなかった。

以上より、正針の場合のフラッシュオーバー電圧は、図 2(a)の $h=0\text{mm}$ では、 $M=0\text{mm}$ で最大となったが、ガスギャップを排除し、常に針先がバリアに接触している場合には、溝端部の $M=\pm 0.6\text{mm}$ 付近で極大となることを示した。一方、すべての溝位置にガスギャップの存在する $h=0.3\text{mm}$ では、溝位置 $M=0.6\text{mm}$ 、すなわち、平板電極側からみて遠い方の溝端部でフラッシュオーバー電圧は最大となった。

〈3・2〉 超高速カメラによる沿面放電の観測 針先が溝の端に対応する位置 $M=0.6\text{mm}$ 付近で正針のフラッシュオーバー電圧がピークとなる原因を検討するため、超高速カメラで沿面放電の挙動を撮影した。

$h=0.3\text{mm}$ 、正針における沿面放電の挙動を図 4 に示す。

図 2 フラッシュオーバー電圧・コロナ開始電圧の溝位置依存性 ($h=0\text{mm}$, N_2 ガス)

Fig. 2. Dependency of groove position on flashover voltage and corona onset voltage ($h=0\text{mm}$, N_2 gas).

図 3 フラッシュオーバー電圧・コロナ開始電圧の溝位置依存性 ($h=0.3\text{mm}$, N_2 ガス)

Fig. 3. Dependency of groove position on flashover voltage and corona onset voltage ($h=0.3\text{mm}$, N_2 gas).

図中の白細線は電極系の配置と縮尺目盛りを示している。なお、各観測において撮影方向、撮影倍率が若干異なっている。また、光電子増倍管に比べて受光感度が低く、発光が最初に確認される電圧はコロナ開始電圧より高くなっている。図4(a)は溝のない平面バリア、0.1MPaにおける挙動である。Frame1 (10.8~11.0kV)では、針先からのコロナは認められないが、Frame2 (11.4~11.6kV)で、針先からのコロナが一気にバリア沿面を進展し、平板電極に到達している。さらに、Frame3 (11.8~12.2kV)では、針-平板間の沿面コロナは一層強くなり、Frame4でフラッシュオーバーに至っている(他のFrameに比べて光増幅度が低く設定されているため一本の筋に見える)。次に、図4(b)に示した針が溝中央に位置する $M=0\text{mm}$ 、0.1MPa の場合、Frame2 (15.1kV~15.4kV)で、針先からのコロナがバリアの溝内面、バリア表面を進展し、ほぼ平板電極にまで達している。このときの電圧は平面バリアの場合と比べて、約4kV高くなっており、その結果、フラッシュオーバー電圧も高くなったものと思われる。さらに、図4(c)は、針-平板間に溝が存在し、かつ針が溝の端にある $M=0.6\text{mm}$ におけるコロナの様子である。平面バリアや $M=0\text{mm}$ に比べて、さらに高い電圧のFrame2 (16.1kV~16.4kV)において針先からのコロナが確認されるが、そのコロナの進展は溝端近傍に留まっている。さらに、電圧が上昇したFrame3 (16.9kV~17.4kV)でコロナは沿面バリアを一気に進展しフラッシュオーバーに至っている。

至っている。すなわち、 $M=0.6\text{mm}$ におけるコロナの挙動は平面バリアや $M=0\text{mm}$ のそれと異なっていることがわかった。

次に、平面バリアにおける0.3MPaでの沿面放電挙動を図4(d)に示す。Frame2で針先からのコロナが確認され、印加電圧上昇とともに、コロナは沿面を進展し、Frame4でフラッシュオーバーに至っている。さらに、図4(e)は0.3MPa、 $M=0.6\text{mm}$ での沿面放電挙動であるが、図4(c)の0.1MPaの場合同様、針先からのコロナは、溝端部近傍でその進展は抑制されている。その後、波頭での電圧上昇とともに進展し(Frame3)、フラッシュオーバーに至る(Frame4)。すなわち、ガス圧0.3MPaにおいても、0.1MPa同様の挙動を示すが、進展し始める電圧は高く、進展も緩やかである。

一方、負針におけるコロナの進展挙動を図5に示す。図5(a)は、0.1MPaでの平面バリアにおける結果である。Frame2 (-14.1~-14.3kV)で針電極先端から平板電極側に約3.5mm沿面コロナが進展しており、Frame3 (-14.5~-14.9kV)でフラッシュオーバーに至った。図5(b)の $M=0.6\text{mm}$ では、Frame2 (-14.2~-14.4kV)で針先直下の溝の端近傍で強いコロナ発光がみられるが、沿面コロナは溝内面およびバリア表面を通り、約2.5mm進展している。平面バリアの場合に比べて、コロナが進展し始める電圧は高く、コロナの伸びも小さいが、その差は正針の場合に比べて小さく、フラッシュオーバー電圧にも大きな差は認められない。

図4 超高速カメラによる沿面放電の挙動 ($h=0.3\text{mm}$, N_2 ガス, 正針)

Fig. 4. Behavior of creeping discharge by ultrahigh-speed camera ($h=0.3\text{mm}$, Positive, N_2 gas).

図5 超高速度カメラによる沿面放電の挙動
($h=0.3\text{mm}$, N_2 ガス, 0.1MPa , 負針)

Fig. 5. Behavior of creeping discharge by ultrahigh-speed camera ($h=0.3\text{mm}$, Negative, N_2 gas, 0.1MPa).

$h=0.3\text{mm}$, 0.1MPa でのコロナ進展像をもとに、各フレームの露光終了時の電圧を瞬時印加電圧として、コロナ先端の位置 x と瞬時印加電圧の関係を図6に示す。 $x=0\text{mm}$ は針電極、 $x=5\text{mm}$ は平板電極の位置を示し、図中の FO はフラッシュオーバーしたことを示している。なお、平面バリアの正針で $x=5\text{mm}$ に複数プロットがあるのは、コロナは平板まで達しているが、フラッシュオーバーに至っていないためである。

正針の場合、平面バリアでは約 13kV 、 $M=0\text{mm}$ では約 15kV 、 $M=0.6\text{mm}$ では約 17kV で針-平板間の沿面コロナは急激に進展する。すなわち、バリア上の溝の有無、溝の位置によってコロナが沿面を進展し始める電圧に大きな差があり、その結果としてフラッシュオーバー電圧の差となって現れたものと考えられる。一方、負針では、平面バリアと $M=0.6\text{mm}$ において、コロナが進展し始める電圧およびフラッシュオーバーに至る電圧には大きな差は認められない。したがって、負針ではバリア上の溝がコロナの発生・進展に及ぼす影響は小さく、フラッシュオーバー電圧にも大きな差が現れなかったものと考えられる。

正針において、 $h=0.3\text{mm}$ の場合、コロナ開始電圧は 0.1MPa で約 9kV であり、また溝の位置 M による変化は小さいが、コロナの進展し始める電圧には差が生じている。針が溝の端にある $M=0.6\text{mm}$ の場合、針先からのコロナが溝端近傍でその進展が抑制されるという特徴的な沿面放電進展挙動が観測されており、この溝端近傍でのコロナの進展抑制が関連しているものと考えられる。また、溝端近傍でのコロナの進展抑制は、 $h=0\text{mm}$ 、 $M=0.6\text{mm}$ でも観測されている。この原因として、針先からのコロナ発生後、そのコロナによる空間電荷やバリア上の蓄積電荷のために電界緩和が起こり、コロナの進展が抑制される。この電界緩和作用が溝の存在、溝の位置によって変化するためと考えられ、その結果、 $M=0.6\text{mm}$ 付近でフラッシュオーバー電圧の極大を示すものと思われる。

〈3・3〉 光電子増倍管による光波形の観測 比較的低

図6 コロナ先端の位置-瞬時印加電圧特性
($h=0.3\text{mm}$, N_2 ガス, 0.1MPa)

Fig. 6. Corona tip position-instantaneous applied voltage characteristics ($h=0.3\text{mm}$, N_2 gas, 0.1MPa).

図7 光電子増倍管によるコロナ発光波形

($h=0.3\text{mm}$, N_2 ガス, 0.3MPa , 正針, Time scale: $500\text{ns}/\text{div}$)

Fig. 7. Corona light pulse observed with photomultiplier ($h=0.3\text{mm}$, N_2 gas: 0.3MPa , Positive, Time scale: $500\text{ns}/\text{div}$).

い印加電圧でのコロナの挙動とそれによる電界緩和を検討するため、 $h=0.3\text{mm}$ においてコロナ開始電圧付近の電圧領域で、光電子増倍管を用いてコロナの発光波形を観測した。なお、印加電圧の波高値は、フラッシュオーバー電圧測定時の 35kV よりも低く抑えられている。方形波パルス電圧を用いているため、 0.1MPa 、 0.2MPa では時間遅れによって波尾でフラッシュオーバーするため、ここでは 0.3MPa の条件にて検討を行った。

図7は正針におけるコロナ発光波形である。図7(a)には平面バリアの結果を示しているが、印加電圧 $V_p=12\text{kV}$ の場合、その波頭部の約 10kV でシャープな発光ピークが見られ、その後弱いブロードな発光が認められる。 $V_p=14\text{kV}$ の場合、約 10kV 付近でのシャープな発光はわずかに強くなり、またその後の印加電圧波頭部でのブロードな発光も強

くなっていく。さらに、 $V_p=18\text{kV}$ では、約 10kV での強い発光の後、さらに電圧が上昇したとき、再び強いシャープな発光が見られた。一方、図 7(b)の $M=0.6\text{mm}$ の場合、 $V_p=12\text{kV}$ では、平面バリアと同様に、約 10kV でシャープな発光が見られ、また、そのピークの後方に、比較的シャープで小さな発光ピークが重なっている。 V_p を上昇させた場合、後方の発光ピークはより明瞭になる。特に、 $V_p=18\text{kV}$ では、約 10kV でのシャープな発光の後方に、複数の発光ピークが存在している。すなわち、 $M=0.6\text{mm}$ の場合、コロナ開始後、コロナは間歇的に発生している。

以上のように、 0.3MPa におけるパルス電圧印加時の波頭部でのコロナ発光の様子を調べた結果、コロナの発生状態が平面バリアと $M=0.6\text{mm}$ の場合では異なることが明らかとなった。また、前節で示したより高い電圧領域における沿面コロナの進展の撮影結果でも、平面バリアの場合と $M=0.6\text{mm}$ の場合では異なっており、両者に相関があるものと推定される。印加電圧が比較的低い段階でのコロナの進展性の違い、例えば空間電荷や蓄積電荷による電界緩和作用の影響などによって、その後のコロナの伸びに差が生じている可能性がある。また、平面バリアと $M=0.6\text{mm}$ での沿面放電進展挙動やフラッシュオーバー電圧の差は、 0.3MPa に比べて、 0.1MPa においてより顕著である。したがって、 0.3MPa に比べて、 0.1MPa では、比較的印加電圧の低い段階でのコロナの状態の差やコロナがその後の沿面放電進展に与える影響が大きいものと予想される。

〈3・4〉 検討 $h=0.3\text{mm}$ 、正針において針電極の真下に溝の端が存在する $M=0.6\text{mm}$ 付近でフラッシュオーバー電圧がピークとなるが、コロナ開始電圧には、バリア上の溝の有無、溝位置 M による明瞭な差は認められなかった。したがって、フラッシュオーバー電圧の $M=0.6\text{mm}$ 付近での上昇は、コロナ開始後、コロナが進展する過程に原因があるものと言える。コロナ進展の観測から、 $M=0.6\text{mm}$ の場合、平面バリアの場合と異なり、針電極先端から発生したコロナの進展が溝の端付近で抑制され、その後の電圧上昇によって急激に進展し、フラッシュオーバーに至ることが明らかになった。また、コロナ発光波形においても、 $M=0.6\text{mm}$ では、平面バリアの場合とは異なり、コロナ開始時のシャープな発光ピークとそれに続く発光ピークが観測された。

ところで、本電極系でのコロナの進展、フラッシュオーバー過程においては、①バリア表面の蓄積電荷による電界緩和、②針先近傍、ギャップにおける空間電荷による電界緩和、③ギャップの存在による破壊電圧上昇、④コロナの沿面進展距離を考慮する必要があると考えられる。

針先の位置とフラッシュオーバー電圧を図 8 にまとめているが、上述の各要因と針先の位置によるフラッシュオーバー電圧の変化を考察する。まず、針先がバリア表面に接している場合、①の蓄積電荷による電界緩和の効果が支配的と考えられ、 $M=0\text{mm}$ ($h=-0.3\text{mm}$)および $M=\pm 1.0\text{mm}$ ($h=0\text{mm}$)ではほぼ同等のフラッシュオーバー電圧を示している。また、 $M=\pm 0.6\text{mm}$ ($h=0\text{mm}$)では、溝端部で針がバリアに接すると同

図 8 針先位置(○印)とフラッシュオーバー電圧の関係
Fig. 8. Relationship between the needle tip position (○) and the flashover voltage (0.1MPa).

時に $M=\pm 1.0\text{mm}$ に比べて、針先を取囲むガス空間が広くなっている。したがって、①の蓄積電荷の効果と②の空間電荷の効果が重畳すると考えられ、フラッシュオーバー電圧は高くなったと考えられる。

次に、針-バリア間に 0.3mm のギャップが存在する場合について考える。針とバリアが接している場合に比べて、①の蓄積電荷の効果は減少するが（特に $M=\pm 0.6\text{mm}$ で減少大）、②の空間電荷および③のギャップによる破壊電圧上昇の効果が重畳すると考えられ、特に、 $M=0\text{mm}$ でその相乗効果が大きくなっていると思われる。また、 $h=0\text{mm}$ 、 $h=0.3\text{mm}$ のいずれの場合においても、 $M=-0.6\text{mm}$ に比べて $M=0.6\text{mm}$ のほうが、 $M=-1.0\text{mm}$ に比べて $M=1.0\text{mm}$ のほうが、フラッシュオーバー電圧は高くなっている。これは、 $M=0.6, 1.0\text{mm}$ では溝を越えるために、コロナが進展する沿面距離が長くなる④の効果も加わっていると推定される。

$M=0\text{mm}$ ($h=0.3\text{mm}$)では、ギャップがさらに大きくなり、③のギャップの効果は大きくなるが、①の蓄積電荷の影響はさらに小さくなるため、 $M=0\text{mm}$ ($h=0\text{mm}$)に比べて、フラッシュオーバー電圧は低くなったものと考えられる。結果として、 $M=0\text{mm}$ ($h=0.3\text{mm}$)におけるコロナ進展・フラッシュオーバー電圧も、 $h=0.3\text{mm}$ での平面バリアと $M=0.6\text{mm}$ の中間的なものとなったと思われる。

以上より、 $h=0\text{mm}$ では $M=0\text{mm}$ 付近で、 $h=0.3\text{mm}$ では $M=0.6\text{mm}$ 付近で最大となるフラッシュオーバー電圧の溝位置依存性が現れたものと推定される。

また、ガス圧を増加させると、針先端近傍の電離領域が狭くなり⁽¹⁾、緩和作用も制限されるため、 0.1MPa に比べて、 0.3MPa の場合、コロナの進展が遅く、フラッシュオーバー電圧も高くなる。さらに、 $M=-1.0\text{mm}$ に対する $M=0.6\text{mm}$ のフラッシュオーバー電圧の上昇率も低くなったと思われる。

一方、負針の場合、 $M=0.6\text{mm}$ では、平面バリアの場合に比べて、コロナが進展し始める電圧は高く、コロナの伸びも小さいが、その差は正針の場合に比べて小さい。正針にくらべて、電界緩和作用が弱く、溝の位置 M によるフラッシュオーバー電圧に差が認められなかったものと考えられる。

しかし、現段階では本電極系におけるコロナの発生とそれによる電界緩和作用について完全に解明できていない。特に、各種効果が重畳していると推察されるが、各針位置でのそれらの定量的な解明については、更なる検討が必要である。

4. まとめ

N₂ ガス中で幅約 1.2mm, 深さ約 0.3mm の溝を設けたガラスバリアに針-平板電極を配置し, μ s パルス電圧波頭部での沿面放電特性について調べた結果を以下にまとめる。

(1) 正針において, 電極間のバリア上に溝が存在する場合, フラッシュオーバー電圧は $h=0$ mm では $M=0$ mm で最大となったが, 常にバリアと針が接する条件では, 溝端部 $M=\pm 0.6$ mm 付近で最大となった。 $h=0.3$ mm では, $M=0.6$ mm 付近で最大値をとった。また, $M=-1.0$ mm におけるフラッシュオーバー電圧に対するフラッシュオーバー電圧の最大値の比はガス圧の増大とともに減少した。一方, $h=0.3$ mm の場合のコロナ開始電圧は, 溝位置 M による明瞭な差異は認められなかった。

(2) $h=0.3$ mm における超高速カメラを用いた沿面放電挙動の観測では, 正針の場合, いずれの溝位置においても, 沿面コロナは急激に進展するが, その電圧は溝位置 M によって大きく変化した。また, フラッシュオーバー電圧が最大となった $M=0.6$ mm においては, 溝の端付近でコロナの進展が抑制されている様子が観測された。一方, 負針においては, 沿面コロナの進展する電圧や進展の様子には正針ほどの差は見られなかった。

(3) ガス圧 0.3MPa における光電子増倍管を用いた印加電圧波頭部でのコロナ発光波形の観測では, $h=0.3$ mm, 正針, $M=0.6$ mm において, コロナ開始時の強くシャープな発光に続き, 複数の比較的シャープな発光ピークが観測された。

(平成 14 年 8 月 22 日受付, 平成 15 年 5 月 28 日再受付)

文 献

- (1) T.Kawamura: "SF₆ Gas Insulated Switchgear", *J.IEE Japan*, Vol.97, No.5, pp.349-351 (1972-5) (in Japanese)
河村達雄:「SF₆ ガス絶縁開閉装置」, 電学誌, **97**, 5, pp.349-351 (1972-5)
- (2) T.Takuma: "Fundamentals of Gas Insulation and Gas Insulated Equipment", *T.IEE Japan*, Vol.116-B, No.10, pp.1168-1172 (1996-10) (in Japanese)
宅間 董:「ガス絶縁およびガス絶縁機器の基礎」, 電学論 B, **116**, 10, pp.1168-1172 (1996-10)
- (3) H.Kamatani, K.Watabe, H.Masuoka, M.Onoda, and H.Nakayama: "Exterior Corona Effect on Sphere-Plane Discharge in SF₆ Gas Utilizing Optical Measurement", *Jpn.J.Appl.Phys.*, Vol.36, pp.L170-L172 (1997)
- (4) L.G.Christophorou and R.J. van Brunt: "SF₆/N₂ Mixtures Basic and HV Insulation Properties", *IEEE DEI*, Vol.2, No.5, pp.952-1003 (1995)
- (5) M.Endo, T.Sato, S.Sato, and T.Sakakibara: "Propagation Characteristics of a Rectilinear Channeled Negative Surface Discharge", *T.IEE Japan*, Vol.115-A, No.9, pp.845-850 (1995-9) (in Japanese)
遠藤正雄・佐藤敏郎・佐藤重範・神原 剛:「負極性直線状沿面放電の進展特性」, 電学論 A, **115**, 9, pp.845-850 (1995-9)
- (6) M.Endo and T.Shizuka: "Propagation of Line Streamer on Dielectric Surface", *T.IEE Japan*, Vol.103-A, No.7, pp.373-378 (1983-7) (in Japanese)
遠藤正雄・関 利通:「沿面線状ストリーマの進展」, 電学論 A, **103**, 7, pp.373-378 (1983-7)

- (7) Y.Egawa, F.Kamatani, T.Nishikawa, H.Ueno, and H.Nakayama: "Effects of Barrier Shape on Creeping Discharge Characteristics in Gas Mixture (SF₆/N₂) under Negative μ s Pulse Voltage", *T.IEE Japan*, Vol.121-A, No.8, pp.751-757 (2001-8) (in Japanese)
繪川善啓・釜谷文雅・西川哲司・上野秀樹・中山博史:「負極性 μ s パルス電圧による混合ガス(SF₆/N₂)中の沿面放電に及ぼすバリア形状の影響」, 電学論 A, **121**, 8, pp.751-757 (2001-8)
- (8) Technical Report, IEE Japan (Part II), No.270, p.38 (1988) (in Japanese)
電気学会技術報告(II部), No.270, p.38 (1988)
- (9) M.Ieda, G.Sawa, and U.Shinohara: "A Decay Process of Surface Electric Charges Across Polymar Films", *J.IEE Japan*, Vol.88, No.6, pp.1107-1113 (1968-6) (in Japanese)
家田正之・澤 五郎・篠原明吉:「高分子表面電荷の減衰過程」, 電学誌, **88**, 6, pp.1107-1113 (1968-6)
- (10) 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.*, Vol.29, pp.1550-1551 (1990)
- (11) H.Itoh, N.Ikuta: "Ionization Current in N₂ Gas", *T.IEE Japan*, Vol.111-A, No.5, pp.410-416 (1991-5) (in Japanese)
伊藤晴雄・生田信皓:「N₂ ガス中における電離電流」, 電学論 A, **111**, 5, pp.410-416 (1991-5)

上 野 秀 樹

(正員) 1960 年 10 月 2 日生まれ。昭和 60 年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, 平成 14 年 4 月同大学大学院助教授, 現在に至る。工学博士。電気電子計測, 発変電工学を担当。主に, 沿面放電, 複合絶縁に関する研究に従事。

河 野 太 一

(准員) 1978 年 3 月 11 日生まれ。平成 13 年 3 月姫路工業大学工学部電気工学科卒業。平成 15 年 3 月同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年 4 月富士通テン(株)入社。現在に至る。平成 14 年度電気学会優秀論文発表賞受賞。

坂 本 直 規

(学生員) 1975 年 4 月 23 日生まれ。平成 10 年 3 月姫路工業大学工学部電気工学科卒業。平成 12 年 3 月同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。平成 15 年 3 月同大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年 4 月(株)ヒップ入社。現在に至る。博士(工学)。平成 12 年度電気学会優秀論文発表賞, 平成 13 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 日生まれ。昭和 40 年 3 月姫路工業大学電気工学科卒業。平成 3 年 10 月同大学電気工学科教授, 平成 14 年 4 月同大学大学院教授, 現在に至る。平成 10 年から 2 年間同大学学生部長兼任。工学博士。電気回路, 電力系統工学を担当。主として, 気体および固体絶縁物の絶縁破壊に関する研究に従事。