

論 文

SF₆ ガス中(金属/ZnO)複合電極系における
μs パルス電圧による放電特性上野 秀樹^{*1}, 坂本 直規^{*}, 国中 嘉人^{*}, 中山 博史^{*}

(2002年7月15日受付; 2002年11月8日受理)

Discharge Characteristics of (Metal/ZnO) Composite Electrode Systems
under μs Pulse Voltage in SF₆Hideki UENO,^{*1} Naoki SAKAMOTO,^{*} Yoshito KUNINAKA^{*} and Hiroshi NAKAYAMA^{*}

(Received July 15, 2002; Accepted November 8, 2002)

A (metal/ZnO) composite electrode was consisted by contacting with a ZnO disc on a sphere or a needle. Discharge phenomena for the (metal/ZnO) – plane configuration have been investigated. The flashover voltage for the (sphere/ZnO) system was less than that of the (needle/ZnO) in all investigated front duration. And the polarity effect on the flashover voltage was also found. It's considered that these differences on the flashover voltage characteristics due to the corona inception and extension processes. On the contrary, the flashover voltage – time characteristics were similar to those for the needle – plane with small gap.

1. はじめに

SF₆ ガスは優れた絶縁性能を有することから, GIS や GIL 等の絶縁媒体に利用されてきた。しかし, SF₆ ガスは CO₂ やフロンガスと同様地球温暖化ガスである⁽¹⁾。このため, 近年 SF₆ ガスに代わるガス絶縁の研究が行われ, N₂/SF₆ 混合ガスや高気圧 N₂ ガスを用いた絶縁方式が有望視されている⁽²⁾。また, SF₆ ガス絶縁は局部的な電界増加に対し, きわめて強い影響を受けるため, 導体上の突起や金属異物等の局部高電界発生源にも多大な注意を払わなければならないといった問題も有している。

ところで, ガス絶縁機器などの電力機器の内部では, 高圧導体とその支持絶縁スペーサ部分や導体がモールドされた部分等, ガスと固体絶縁物による複合絶縁構成となっている。このような部分では, 高圧導体と絶縁物部分に微小なギャップが生じ, 絶縁物とガスの誘電率の違いから局部的に電界集中が起きる。さらに, 導体, 固体絶縁物とガスによる三重点(トリプルジャンクション)が存在し, そこで電界集中が発生する可能性もある⁽³⁾。

このように, 機器内部では様々な局部高電界発生源が存在し, そこで発生する局部コロナは機器の絶縁性能に大きな影響を及ぼす。それ故, 複合絶縁構成における導体と絶縁物間の接触部に発生するコロナとその影響を明らかにすることは, 機器の高

電圧化・小型化・高信頼性化において重要な課題である。

高圧導体と接地導体の金属間におけるコロナの特性は詳細に調べられているが⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾, 金属と誘電体間に生じる微小ギャップや三重点でのコロナの発生とそれが及ぼす影響は未だ完全には理解されていない。筆者らも電力機器の絶縁性能向上を目的に, 不平等電界下, 微小ギャップでの絶縁特性, 複合絶縁特性⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾, および金属と固体誘電体との複合電極構成や補助電極構成における放電特性を方形波パルス電圧を用いて調べてきた⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾。

GIS 等の電力機器では, 三重点をはじめとして, 種々の局部高電界発生源が, 単独あるいは複数存在する。また, 固体絶縁物においては, 長期にわたる熱や振動, コロナ等によって劣化が生じ, その表面抵抗率や体積抵抗率, 電子放出性等が変化するものと考えられる。上述の観点から, 絶縁性のガラスやそれと比較して抵抗率が低く, 一方で電子放出性の高い ZnO セラミクスを固体誘電体として用い, 三重点と金属異物等の局部高電界発生源の共存を, 球(針)–平板電極系の球(針)電極に固体誘電体を接触させた(金属/誘電体)複合電極で模擬した。前報では, 1 気圧の N₂ ガス中における(針/誘電体)複合電極のコロナと放電特性について報告した⁽¹²⁾⁽¹³⁾。本報告では, 固体誘電体を ZnO とした(球/ZnO)あるいは(針/ZnO)複合電極において, 波頭長の異なるパルス電圧を用い, 針先や三重点等の局部高電界発生源によるコロナの発生と進展を SF₆ ガス中で検討した結果を述べる。

キーワード: 複合電極, 三重点, コロナ, パルス電圧, ZnO

^{*}姫路工業大学大学院工学研究科電気系工学専攻
(672-2201 姫路市書写 2167)

Department of Electrical Engineering and Computer Sciences,
Graduate School of Engineering, Himeji Institute of Technology,
2167 Shosha, Himeji 671-2201, Japan

¹ueno@elct.eng.himeji-tech.ac.jp

2. 実験方法

本実験に用いた(金属/ZnO)複合電極構成を図1に示す。図1(a)

には(球/ZnO)電極を, 図 1 (b)には(針/ZnO)電極を示している. 球電極には半径が約 2.5mm のスチールボールを, 針電極には先端曲率半径が約 35 μ m の木綿針を用い, 半径 16mm, 厚さ 0.5mm の半円板の ZnO セラミクス(体積抵抗率 $6 \times 10^6 \Omega$ m, 比誘電率 8)を球電極あるいは針電極に接触させて, 三重点, およびそれと突起等の局部高電界発生源の共存を模擬した複合電極を構成した. 平板電極には大きさが 35×35 mm² の黄銅製平板を用いた. 球下端あるいは針先端から ZnO の下端までの距離を $L=6$ mm, ZnO 下端から平板電極までの距離を $M=1$ mm とした. この複合電極系を黄銅製容器(約 3×10^3 cm³)内に配置し, 約 10^{-1} Pa まで減圧後, SF₆ ガスを 0.1~0.3MPa の範囲で封入した.

方形波パルス電圧発生器を用い, 複合電極系にパルス電圧を印加し, その波頭部でフラッシュオーバーさせた. このとき, 電極系と並列に高周波コンデンサを挿入し, 印加パルス電圧の波頭長を $T_f=1.5\sim 50\mu$ s で変化させた. また, パルス電圧の波頭部で最初のコロナ発光が観測される電圧をコロナ開始電圧とした. 電圧波形およびコロナ発光波形は, 高圧プローブ(HV-P30, DC-50MHz, 岩崎通信機(株)), 光電子増倍管(931A, 波長領域 300~650nm, 浜松ホトニクス(株))を介してオシロスコープ(DL-1540, 150MHz, 横河電機(株))で測定した.

コロナ発光の撮影は, イメージインテンシファイア(XX1500, PHILIPS LTD.)を取り付けたスティルカメラあるいは高速デジタルフレーミングカメラ(IMACON468, HADLAND PHOTO-NICS LTD.)を用いて, 容器の石英窓を通して行った.

3. 実験結果および考察

3.1 フラッシュオーバー電圧特性

SF₆ ガス中において複合電極系に波頭長の異なるインパルス電圧を印加した場合, フラッシュオーバー電圧特性を調べた. 図 2(a)は(球/ZnO)電極を, 図 2(b)は(針/ZnO)電極を用いたときの SF₆ ガス中におけるフラッシュオーバー電圧-時間特性(V_f-t 特性)である. 図中の縦の破線は印加電圧 (波高値 25kV) の波頭部の波形を示している.

図 2(a)の(球/ZnO)電極において, そのフラッシュオーバー電圧 V_f の下限値を正極性と負極性とで比較してみる. 0.1MPa の場合, 正極性の値は負極性の値よりも波頭長 1.5 μ s で約 3kV, 5~50 μ s で約 5kV 高い. また, 気圧が 0.2, 0.3MPa の場合においても, 正

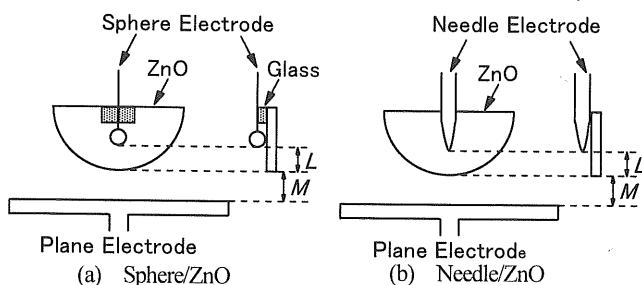


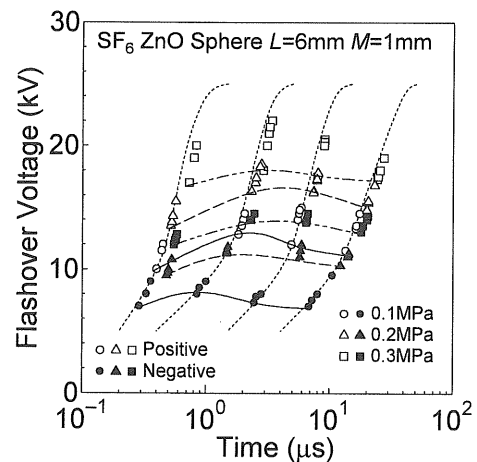
図 1 電極構成

Fig.1 Electrode configuration.

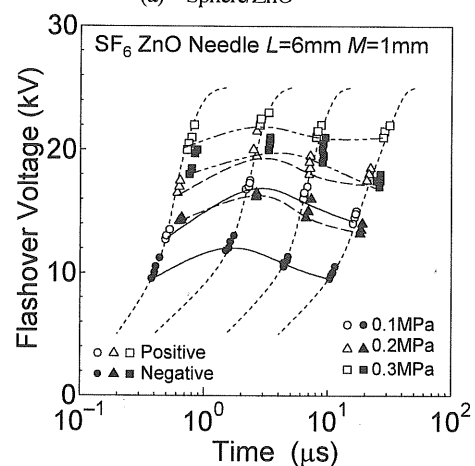
極性のほうが高くなっている. 図 2(b)に示した(針/ZnO)電極の場合も同様に, 0.1~0.3MPa において, 波頭長 1.5 μ s で約 3kV, 5~50 μ s で約 5kV, 正極性のほうが高い. すなわち, いずれの電極系においても, フラッシュオーバー電圧 V_f は負極性に比べて, 正極性のほうが高くなるという明瞭な極性効果が観測された. 固体誘電体をガラスとした(球/glass)電極および(針/glass)電極においては印加電圧 35kV ではフラッシュオーバーに至らず, また前報の 0.1MPa の N₂ ガス中での(針/glass)電極($L=7$ mm, $M=1$ mm)におけるフラッシュオーバー電圧が正極性で 18kV, 負極性で 21kV であり⁽¹²⁾, これらの結果と比較すると, 今回得られた ZnO を用いた(金属/ZnO)電極系の SF₆ ガス中のフラッシュオーバー電圧は低く, 極性効果も異なっている.

次に, (球/ZnO)電極と(針/ZnO)電極でフラッシュオーバー電圧を比較すると, いずれの気圧, 極性においても, (球/ZnO)電極を用いた方が(針/ZnO)電極を用いたときよりもフラッシュオーバー電圧は低くなっている. 例えば, 0.1MPa において, 波頭長 1.5 μ s では 2kV であり, 5~15 μ s では約 3.5kV, 50 μ s では約 2kV, (球/ZnO)電極のほうがフラッシュオーバー電圧は低い.

また, フラッシュオーバー電圧 V_f の下限値の印加電圧波頭長による変化を見てみる. 複合電極系の構成, 極性, 気圧に関係なく,



(a) Sphere/ZnO



(b) Needle/ZnO

図 2 SF₆ ガス中におけるフラッシュオーバー電圧
Fig.2 Flashover voltage in SF₆ gas.

波頭長が 1.5~5 μ s の短い領域では右上がりの、5~50 μ s の長い領域では右下がりの変化を示し、山型の V_c-t 特性となっている。この山型の V_c-t 特性は、SF₆ ガス中の針-平板不平等微小ガスギャップ放電でも観測されており、印加電圧の波頭峻度が大きい場合、針先近傍に形成される SF₆ 負イオンが関係した空間電荷の電界緩和作用が小さくなることで説明されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

(金属/ZnO)-平板電極間のフラッシュオーバー電圧特性を調べた結果、印加電圧波頭長によらず、フラッシュオーバー電圧は正極性のほうが高いという極性効果が現れ、また、(針/ZnO)電極系に比べて(球/ZnO)電極系のほうがフラッシュオーバー電圧は低くなるという電極構成の差が存在することが明らかになった。一方、SF₆ ガス中の V_c-t 特性は、(球/ZnO)、(針/ZnO)いずれの電極系においても、ZnO の存在にもかかわらず、微小な不平等ガスギャップにおいて見られるものとなった。

3.2 コロナ開始電圧特性

波頭長を変化させたときの両電極系におけるコロナ開始電圧の変化を調べた。図3に SF₆ ガス 0.1MPa 中でのコロナ開始電圧-時間特性 (V_c-t 特性)を示す。図中の縦の破線は印加電圧 (波高値 8kV) の波頭部の波形を示している。 V_c-t 特性の山型とは異なり、(球/ZnO)電極の場合、両極性とも V_c はほとんど印加電圧波頭長によって変化しない。一方、(針/ZnO)電極では両極性とも波頭長が長くなると V_c は低下する右下がりの特性となった。この特性は正極性でより顕著に現れた。

インパルス電圧の波頭部の破壊においては、初期電子供給の時間遅れがフラッシュオーバー電圧に影響を及ぼし、電圧の印加時間が短いほど初期電子の存在確率が小さい⁽¹¹⁾。コロナ開始電圧の V_c-t 特性において、(針/ZnO)電極を用いたときは(球/ZnO)電極とは異なり、両極性とも右下がりの特性となり、波頭長 1.5~5 μ s にかけて傾きが急となったのは、針電極が球電極に比べ電極の体積が小さく、コロナの発生する放電空間が狭く、初期電子供給の遅れが大きいためと考えられる。

また、両電極系ともに正極性の V_c は、(球/ZnO)電極で約 1kV、(針/ZnO)電極では、波頭長 1.5, 5 μ s で 1~1.5kV、15~50 μ s で 1kV、

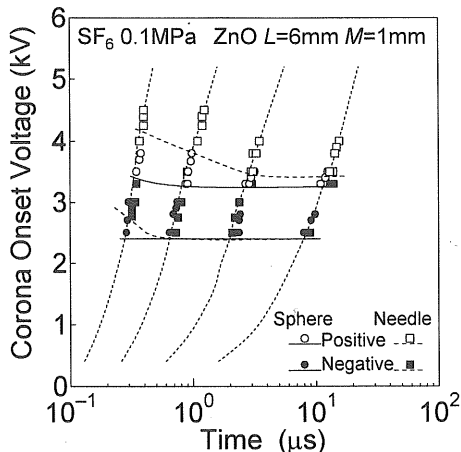


図3 SF₆ ガス中におけるコロナ開始電圧
Fig.3 Corona onset voltage in SF₆ gas.

負極性よりも高くなっており、フラッシュオーバー電圧同様、極性効果が認められた。

3.3 光電子増倍管によるコロナの光学的測定

(球/ZnO)電極と、(針/ZnO)電極ではフラッシュオーバー電圧やコロナ開始電圧に差が認められた。そこで、コロナの発生と進展についてさらに調べるため、波頭長 1.5, 5 μ s について光電子増倍管を用いて、コロナの発光および発光強度について検討した。

図4は SF₆ ガス 0.1MPa 中で(球/ZnO)電極を用いた場合の波頭長 1.5, 5 μ s におけるコロナ発光波形である。図4(a)の正極性、波頭長 1.5 μ s では印加電圧波頭部において、最初に観測される発光(以下第1発光と称する)の強度は約 180a.u.を示し、また後続の弱い発光が波頭部において観測された。波頭長 5 μ s でも、第1発光の強さは約 180a.u.であったが、波頭長 1.5 μ s に見られたような波頭部での後続の発光ピークは観測されなかった。一方、図4(b)の負極性、波頭長 1.5 μ s では、印加電圧波頭部の第1発光のピークの強さは約 450a.u.であり、その後も第1発光と同程度の強度を示す発光が波頭部で観測された。また、波頭長 5 μ s では、第1発光のピークの強度は約 130a.u.と弱くなっており、波頭部における後続の発光ピークの数も少なく、強度も弱くなっている。

次に、(針/ZnO)電極の場合の結果を図5に示す。図5(a)の正極性、図5(b)に負極性の結果を示しているが、いずれの極性、

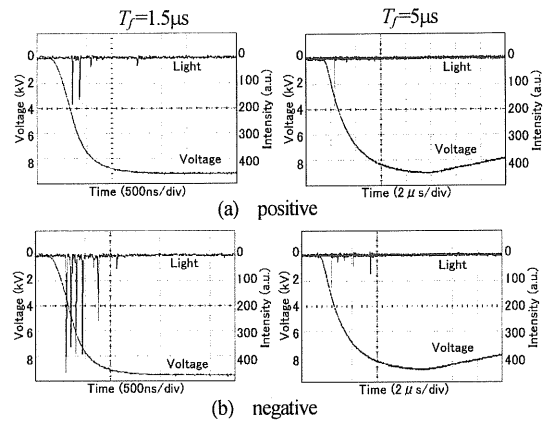


図4 コロナ発光波形 ((球/ZnO)電極, SF₆:0.1MPa)
Fig.4 Corona light emission (SF₆:0.1MPa, Sphere/ZnO).

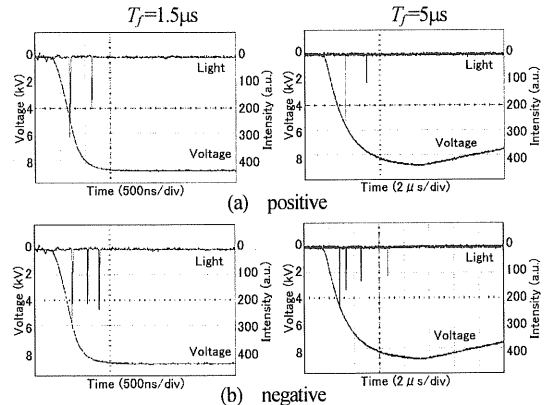


図5 コロナ発光波形 ((針/ZnO)電極, SF₆:0.1MPa)
Fig.5 Corona light emission (SF₆:0.1MPa, Needle/ZnO).

波頭長においても、その第1発光強度は250-300a.u.で大きな差はない。また、いずれの条件においても後続の発光ピークが見られたが、負極性でより多く現れた。また、波頭長 1.5μs の場合に比べて、波頭長 5μs の場合において、後続の発光の強度は弱くなっていることもわかる。

波頭長 5μs の場合に比べて、波頭長 1.5μs の場合、第1発光後に印加電圧波頭部において複数の強く鋭い発光が観測される。図3に示したように、波頭長 1.5μs の方が波頭長 5μs に比べて、コロナ開始電圧は高く、これは初期電子の供給の遅れに間に印加電圧が上昇するためと考えられ、球(針)電極近傍の電子が電界より得るエネルギーも大きいと考えられる。このとき形成される同極性の荷電粒子（例えば SF₆⁻）は、波頭峻度の大きいため電圧上昇中にはほとんど移動しないと考えられる。この空間電荷による電界と印加電圧による電界の重畳により、コロナ先端の電界は非常に強くなり、電離が活発に行なわれ、コロナは進展しやすいものと考えられる。すなわち、コロナによる電界緩和作用は小さい。その結果、波頭長 1.5μs では複数のピークが観測されたものと言える。一方、波頭長が長くなると波頭峻度が小さくなるため、波頭長 1.5μs より低い電圧でコロナは発生し、電圧上昇中に同極性の荷電粒子はドリフトや拡散により球(針)電極の近くに拡がって分布する。また、電界の上昇率も小さく、電子が得るエネルギーも小さい。したがって、コロナ自身で発生した空間電荷による電界緩和⁽¹⁴⁾のため衝突電離が起りにくく、複数のピークが観測されなかったと考えられる。特に、負極性、(球/ZnO)電極系でより顕著に現れているが、これは、(球/ZnO)電極系と(針/ZnO)電極系における初期電子供給確率の差によるものと考えられる。

3.4 イメージインテンシファイアによるコロナ発生の様子

コロナの発生場所を明らかにするために、イメージインテンシファイアを用い、コロナの撮影を行った。図6(a)はSF₆ガス0.1MPa中で(球/ZnO)電極を用いたときの正極性、波頭長 1.5μs、印加電圧 8.5kV におけるコロナの静止写真である。写真上には白い点線で電極系の配置図を対応させて示している。(球/ZnO)電極では、正・負両極性とも三重点でのみコロナ発光が確認され、三重点からコロナが発生することが明らかとなった。

一方、(球/ZnO)電極の場合と同様、印加電圧 8.5kV における(針/ZnO)電極を用いた場合のコロナ静止写真を図6(b)に示す。コロナの発生場所をみると、(球/ZnO)電極系では三重点であるのに対して、(針/ZnO)電極系では、いずれの極性においても針先端であり、異なった結果が得られた。また、コロナ発光の領域は、(球/ZnO)電極系に比べて狭く、針先近傍に限られている。

また、波頭長 5μs の場合についても調べた結果、波頭長 5μs に比べて、波頭長 1.5μs のほうが強い発光が観測されたが、いずれの電極系、極性においても、コロナの発生場所については、波頭長 1.5μs の場合と同じであった。

以上のインテンシファイアによるコロナ静止写真から、コロナの発生場所は、(球/ZnO)電極では三重点、(針/ZnO)電極では針先端で、コロナの発生場所が異なることが明らかになった。N₂ガス中において(針/glass)電極では、まず針先からのコロナが発生し、その後、三重点からもコロナの発生が見られ、(針/ZnO)電極では、コロナは三重点から発生することが明らかとなっている⁽¹⁵⁾。したがって、誘電体の種類(ガラスと ZnO)、金属電極の種類(球と針)、ガスの種類(N₂と SF₆)によって、コロナの発生やコロナの進展過程が変化していると考えられる。

3.5 高速度カメラによる放電進展の観測

(球/ZnO)電極系および(針/ZnO)電極系に対して、比較的低い印加電圧においてコロナの発生とコロナの様子やフラッシュオーバー電圧特性について調べた。その結果、コロナの発生場所が異なること、(針/ZnO)電極系のほうが高いフラッシュオーバー電圧を示すこと、また極性効果があることが明らかとなった。そこで、コロナの発生・進展とフラッシュオーバー電圧の関連について検討するため、コロナ進展の様子を高速度カメラを用いて観測した。

図7はSF₆ガス0.1MPa中において(球/ZnO)電極を用いたときの、印加電圧の波頭長 1.5μs におけるコロナの進展の様子である。図中の白い点線は電極系の配置を示している。図7(a)は正極性におけるコロナの進展像で、Frame 2以降においてZnO下端と平板電極間でコロナ発光が観測され、印加電圧の上昇とともに強くなり(Frame3)、ZnO-平板電極間でフラッシュオーバーに至る(Frame4)。図6(a)に示したコロナ静止写真では、三重点からコロナ発光が観測されたのに対して、本観測では確認できなかったが、これは静止写真の撮影と高速度カメラによる撮影では、インテンシファイアの感度、増幅率、露光時間が異なっているためである。図6(a)と図7(a)の結果を総合すると、まず三重点でコロナが発生するが、そのコロナは弱く、平板電極方向にほとんど進展しない。その後、電圧の上昇によりZnOと平板電極間でコロナが発生し、そのコロナの成長によりフラッシュオーバーに至るものと考えられる。

次に、図7(b)は負極性、コロナの進展の様子である。この場合、Frame 2以降において、図6(a)に示したコロナ静止写真同

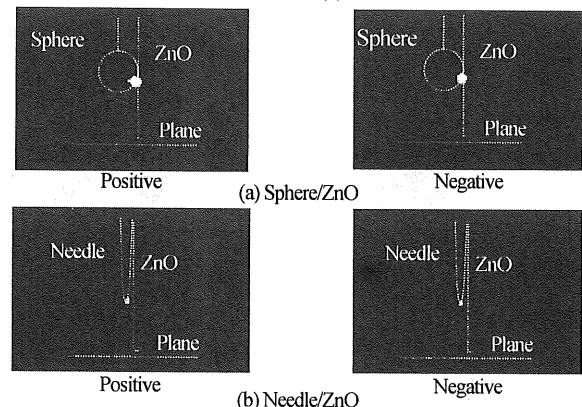


図6 コロナ像(SF₆:0.1MPa, T=1.5μs, V_p=8.5kV)
Fig.6 Images of corona (SF₆:0.1MPa, T=1.5μs, V_p=8.5kV).

様、三重点からコロナ発光が見られ、その後、印加電圧の上昇とともにコロナは ZnO 浴面を平板方向に進展していく (Frame3,4)。また、図には示されていないが、さらに電圧が上昇した場合、正極性と同様に ZnO 下端と平板電極間でコロナが発生し、フラッシュオーバーに至った。このようなコロナの進展過程、すなわち、三重点あるいは針先からのコロナ発生後、ZnO 下端と平板電極間でのフラッシュオーバーは、N₂ ガス中の(針/ZnO)電極においても観測され、(針/glass)電極に見られるガラス浴面やガスギャップ中のコロナ進展とは異なっている⁽¹³⁾。

図8は(針/ZnO)電極を用いたときのコロナ進展像である。図8(a)は正極性の結果である。Frame 2以降において(球/ZnO)電極の場合と同様、ZnO 下端と平板電極の間でコロナ発光が見られたが、図6(b)の結果を考慮すると、針先端と ZnO 下端の2箇所でもコロナが発生しているものと見られる。図8(b)は負極性におけるコロナの進展像で、Frame 2以降において針先端と ZnO の間と、ZnO-平板電極間の2箇所でコロナ発光が見られる。しかし、Frame3, 4に示すように、印加電圧が上昇しても針先からのコロナは ZnO 浴面を進展せず、針先近傍にとどまっている。

コロナ静止写真およびコロナ駒撮り写真からコロナの進展過程は以下のように考えられる。まず、(球/ZnO)電極系では三重点から、(針/ZnO)電極系では針先端からコロナが発生する。正極性では、三重点あるいは針先からのコロナは弱く、印加電圧が上昇してもあまり成長せず、その後印加電圧が上昇して ZnO-平板電極間でフラッシュオーバーに至る。一方、負極性では、三重点あるいは針先からのコロナは印加電圧の上昇により強くな

り、(球/ZnO)電極系では ZnO 浴面でのコロナの進展も観測される。しかしながら、印加電圧がさらに上昇すると、正極性同様に、ZnO-平板電極間でのコロナの発生、フラッシュオーバーに至る。また、フラッシュオーバー電圧から考えて、ZnO-平板電極間でのコロナの発生と進展は、正極性に比べて負極性のほうがより低い電圧で生じているものと推定される。

波頭長 5 μ s の場合についても同様に観測を行ったが、波頭長 1.5 μ s の場合とほぼ同じ進展形態が得られたが、コロナの進展は波頭長 1.5 μ s のほうが速いことがわかった。このコロナの進展速度の違いが、フラッシュオーバー電圧の差となっているものと考えられる。

4. 検討

SF₆ ガス中での(金属/ZnO)複合電極系の放電特性を調べた。得られた結果を既報の N₂ ガス中(針/誘電体)複合電極の結果と比較してみる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。まず、フラッシュオーバー電圧 V_f に関して、球電極、針電極いずれを用いた(金属/ZnO)電極系の V_f は(金属/glass)電極系のそれよりも低い。さらに、N₂ ガス中の(針/glass)電極系では、正極性よりも負極性の V_f のほうが高いのに対して、ZnO を用いた場合、逆に正極性の V_f が負極性よりも高くなることが明らかとなった。また、(針/ZnO)電極の場合、(球/ZnO)電極よりもフラッシュオーバー電圧は高くなることもわかった。一方、 V_f の印加電圧波頭長依存性は、波頭長 1.5~5 μ s にかけて V_f が上昇し、微小な不平等ガスギャップ中同様、山形となった⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

次に、コロナの発生については、N₂ ガス中の(針/誘電体)電極

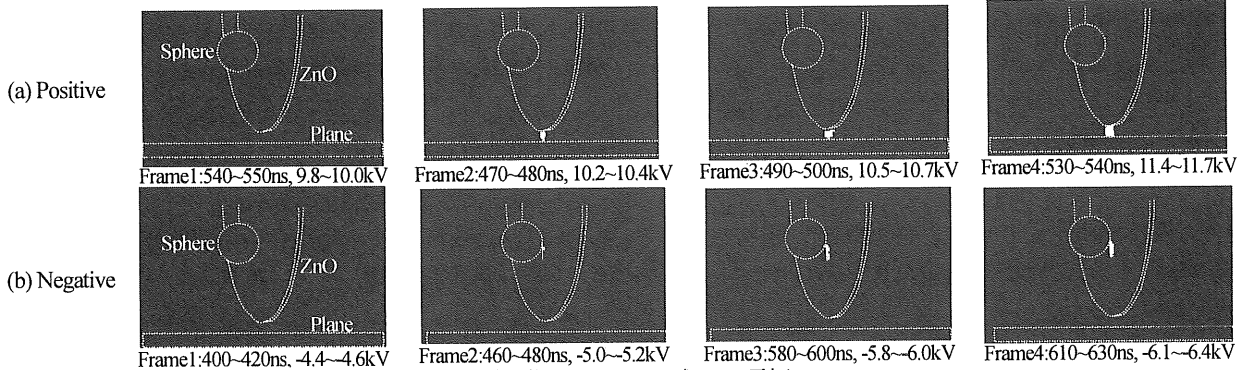


図7 コロナ進展像(SF₆0.1MPa, (球/ZnO)電極, $T_f=1.5\mu$ s)

Fig.7 Corona extension images (SF₆0.1MPa, Sphere/ZnO, $T_f=1.5\mu$ s).

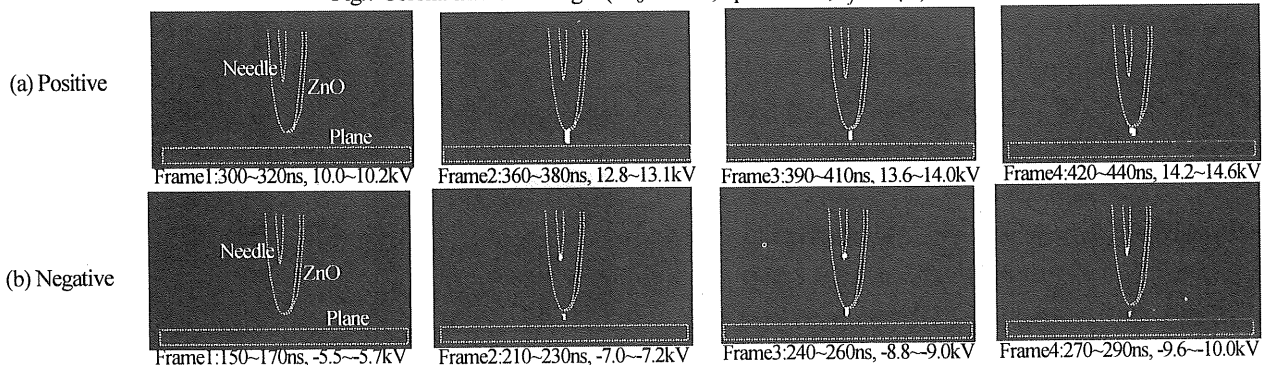


図8 コロナ進展像(SF₆0.1MPa, (針/ZnO)電極, $T_f=1.5\mu$ s)

Fig.8 Corona extension images (SF₆0.1MPa, Needle/ZnO, $T_f=1.5\mu$ s).

系では、誘電体の種類に関係なく、三重点近傍でのコロナが観測されたのに対し、本実験のSF₆ガス中では、(球/ZnO)電極では三重点で、(針/ZnO)電極では針先でコロナの発生が認められた。また、コロナの進展に関しては、ZnOを用いた場合、三重点あるいは針先近傍でのコロナ発生後、沿面コロナはほとんど観測されずZnO下端と平板電極間でフラッシュオーバーに至る。一方、SF₆ガス中の(金属/glass)電極については明らかでないが、N₂ガス中の結果から、ガラス沿面あるいは針-平板間のガスギャップをコロナが進展しフラッシュオーバーに至り、GISのエポキシ樹脂スペーサ部でのコロナの挙動に類似したものと推察される⁽¹⁵⁾。したがって、(金属/誘電体)複合電極におけるコロナの進展過程は、誘電体の物性によって決まるものと考えられる。

以上のように(金属/誘電体)複合電極の構成やガス誘電体の種類が変化した場合、そのコロナの特性やフラッシュオーバー特性は種々の類似点や相違点が認められるが、ここでは、今回SF₆ガス中の(金属/ZnO)複合電極に関する結果をもとに、局部高電界発生源である三重点や針先端とそこからコロナやフラッシュオーバー特性の関係を考察してみる。

まず、極性効果の違いは、高速度カメラの撮影による結果から、ZnO側が高電圧になるときの極性が関係していると考えられる。すなわち、ZnO側が負極性高電圧であるとき、ガス中の初期電子が電界増加により加速され、衝突電離を繰り返す。このとき、電極の曲率半径の大きい球電極では、球先端部より三重点がより高電界となり、この部分からコロナが発生する⁽¹⁵⁾。(針/ZnO)電極の場合、三重点も針先端も高電界となる。しかし、三重点より下方に、球電極の曲率半径($r=2.5\text{mm}$)に比べて、曲率半径が2桁小さい($r=35\mu\text{m}$)針先端が存在する。そのため、三重点よりも針先端が高電界と考えられ、針先端よりコロナが発生する。針電極とZnOは接触しており、また針先端からのコロナにより、針先端とZnO間の空間の導電性は増している。このため、針先近くのZnOからZnO下端およびZnO下端と平板電極間のガスギャップで印加電圧は分担される。ZnOの電圧分担が大きくなり、ZnOの結晶粒界での電界が高くなると、トンネル効果によりZnOの導電性が急増し電流が流れやすくなる⁽¹⁶⁾。それゆえ、針先の電界は緩和され、ZnO下端に電界が集中するものと考えられる⁽¹³⁾。その結果、電子放出が容易になったZnO下端から放出され、ZnO下端でコロナが観測されたと考えられる。

一方、ZnO側が正極性高電圧であるとき、球、針電極からの電子放出は考えにくく、また、球、針電極に向かうほど電界が低下するため、トンネル効果によるZnOからの電子放出も考えられない。ZnO下端と平板間で発生するコロナは、ZnO-平板間のガスギャップ中における偶存電子の衝突電離により発生したと考えられる。正極性でのZnOと平板間におけるコロナの発生と、負極性におけるそれとを比べると、負極性におけるZnO下端からの電子放出による電離の方が発生しやすく、コロナは

発生しやすい。このため正極性の V_f が、負極性よりも高くなったと考えられる。

次に、電極の違いによるフラッシュオーバー電圧 V_f の差について考えてみる。まず、球電極を用いた場合は、電極先端の曲率半径が大きいため、高電界部分を形成しにくく、三重点からコロナが発生する。一方、球電極は針電極に比べて電極の体積が大きい。すなわち、電極体積の大きい球電極では、電離の起こる空間が広く、三重点で発生するコロナやガス中のSF₆イオンから離脱した電子が、球先端などの電界が強い部分に供給され、後続の電子なだれの初期電子となると考えられる。したがって、後続の電子なだれが発生し、ストリーマを形成しやすい。それゆえ、波頭部で複数の発光ピークが観測され、発光領域は(針/ZnO)電極系に比べて広く、またZnO沿面を進展したと考えられる。これは、上述のように負極性で顕著となる。

一方、針電極の場合は、電極体積が小さく電離の発生する空間は小さいが、針先端に高電界部分を形成するため、コロナ静止写真において針先端でコロナの発生が見られる。また、電離空間が小さいため球電極のように他の高電界部への電子の供給源になるとは考えにくく、針先端近傍以外で電子なだれは発生しにくい。その結果、コロナ発光波形の測定では、第1発光の発光ピークは(球/ZnO)電極と同様に強いが、印加電圧波頭部での後続の電子なだれ、コロナの進展に関係していると考えられる後続の発光ピークの数はいくつか少なくなっていると考えられる。

これらのことから、(球/ZnO)電極の場合は、(針/ZnO)電極と異なり、三重点で発生したコロナやガス中の電子がトリガとなり、次の電子なだれを引きおこし、コロナは進展しやすいものと考えられる。そのため、特に、負極性ではZnOを流れる電流も増大し、ZnO下端からの電子放出も容易になり、フラッシュオーバー電圧が低くなったものと思われる。一方、いずれの電極系・極性においてもZnO下端と平板電極間でフラッシュオーバーに至っており、この間の放電特性がフラッシュオーバー電圧およびその波頭長依存性に対して、支配的と考えられる。

以上、コロナの発生と進展には三重点が関連していることが明らかになったが、そのコロナの進展とフラッシュオーバー電圧や V_f -特性との詳細な関係については、さらに検討が必要である。

5. まとめ

球、針電極側にZnOを接触させて(金属/ZnO)複合電極を構成し、複合電極-平板電極間に波頭長の異なるインパルス電圧を印加したときの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) SF₆ガス中、(球/ZnO)電極を用いた場合のフラッシュオーバー電圧は(針/ZnO)電極を用いた場合に比べて低いことがわかった。また、両電極系ともに、正極性のフラッシュオーバー電圧が負極性のそれよりも高いことがわかった。

- (2) SF₆ ガス中のコロナ開始電圧は、(球/ZnO)電極では波頭長にほとんど依存しない。一方、(針/ZnO)電極では右下がりの特性が得られ、波頭長の短い領域では、(針/ZnO)電極のコロナ開始電圧が、(球/ZnO)電極に比べて高くなった。
- (3) SF₆ ガス中の負極性において、(球/ZnO)電極では三重点からコロナの発光が見られた。一方、(針/ZnO)電極では、針先端と ZnO の間からコロナが発生した。(球/ZnO)電極系では三重点からのコロナと ZnO 沿面でのコロナの進展が認められ、(針/ZnO)では針先からのコロナの発生が認められるにもかかわらず、フラッシュオーバーは ZnO 下端と平板電極間で生じた。また、コロナ発光、進展挙動から、三重点は、コロナ発生後の進展過程において、他の高電界部に対する初期電子供給源になっていると考えられる。

参考文献

- 1) 社団法人 環境情報科学センター:「図説 環境科学」, 朝倉書店, p.98 (1994)
- 2) L.G.Christophoru and R.J.Van Brunt: "SF₆/N₂ Mixtures Basis and HV Insulation Properties", IEEE. Trans. on DEI, 2 (1995) 952
- 3) 宅間董:「複合誘電体における電界集中」, 静電気学会誌, 14 (1990) 40
- 4) 細川辰三・近藤芳孝・三好保徳:「空气中負性コロナの前駆現象」, 電学論, 89 (1969) 1823
- 5) 細川辰三・三好保徳:「空气中正針コロナとその前駆パルス」, 電学論 A, 93 (1973) 420
- 6) 細川辰三:「コロナ放電機構と最近の研究動向」, 電学論 A, 111, (1991) 370
- 7) 中山博史・小野田光宣・黒川繁寿・天川清士:「不平等電界ギャップにおける混合ガス(SF₆/N₂)の絶縁破壊」, 応用物理, 58 (1989) 445
- 8) 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 (1990) 1550
- 9) 上野秀樹・渡部克典・中山博史:「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 (1999) 266
- 10) 釜谷文博・渡部克典・小野田光宣・中山博史:「パルス電圧による SF₆ ガス中の放電特性に及ぼす補助電極の影響」, 電学論 A, 117 (1997) 431
- 11) 中山博史・小野田光宣・天川清士・住野安弘:「(ZnO/金属)複合電極を有する微小ギャップのインパルス放電特性」, 電学論 A, 115 (1995) 839
- 12) 坂本直規・国中嘉人・上野秀樹・中山博史:「複合電極系におけるパルス電圧による放電特性」, 電学論 A, 120 (2000) 804
- 13) 坂本直規・国中嘉人・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沿面放電」, 電学論 A, 122 (2002) 849
- 14) H. Anis and K. D. Srivastava: "Pre-Breakdown Discharges in Rod-Plane Gaps in SF₆ Under Positive Switching Impulses", IEEE. Trans.on EI, 16 (1981) 552
- 15) 羽馬洋之・井波潔・吉村学・仲西幸一郎:「SF₆ ガス中トリプルジャンクションに起因する沿面放電の破壊電圧の推定」, 電学論 A, 115 (1995) 1078
- 16) 須藤一:「電極および電極関連材料」, アイピーシー, p.110 (1989)