

N₂ ガス中での複合電極の放電特性に及ぼす 局部コロナの影響

星田 哲男, 上野 秀樹, 中山 博史

電気系工学専攻

Influence of Local Corona on Discharge Characteristics of Composite Electrodes in Negative Polarity under N₂ Gas

Tetsuo HOSHIDA, Hideki UENO and Hiroshi NAKAYAMA
Department of Electrical Engineering and Computer Sciences

Abstract

This paper describes the influence of local corona on the discharge characteristics of composite electrodes in the negative polarity under N₂ gas. The composite electrode is the one that the needle electrode was connected with the sphere electrode parallel through a resistance. We examined the breakdown voltage and the discharge behavior depended on the horizontal distance between sphere electrode and needle electrode when the resistance was changed. As a result, the difference was seen in dependency of the clearance d between two electrodes on the breakdown voltage. From the observation using an ultrahigh-speed camera, the difference in the corona luminescence was seen at the gap between needle electrode and plan electrode.

Keyword N₂ gas, local corona, pulse voltage

1. はじめに

近年の電力需要の大幅な上昇により電力輸送の高効率化を図り、より高い送電電圧での電力輸送が求められている。そのため、電力機器の高電圧化が進み機器の安全性と信頼性がより重要になってきている。現在、GIS(ガス絶縁開閉装置)、C-GIS(キュービクル型 GIS)をはじめとする電力機器の絶縁媒体として SF₆ ガスが広く用いられている。しかし、SF₆ ガスは温室効果ガスであり、その地球温暖化係数は CO₂ の 23900 倍と非常に高く、その大気寿命も 3200 年ときわめて長い。また、SF₆ ガスの大気濃度上昇率が約 8.7%/年と高いことから、SF₆ ガスの排出量の削減が問題となっている[1]。そこで、環境負荷を軽減する目的で SF₆ ガスの代替ガスとして N₂ ガスに期待がよせられているため、N₂/SF₆ 混合ガス、N₂ 単独ガスを用いた研究が行われている[2-9]。

SF₆ ガスを用いることで電力機器の安全性ならびに信頼性は飛躍的に向上したが、SF₆ ガスは局所的な電界の増大に対し強い影響を受け、コロナ発生時には SF₆ ガスの絶縁耐力が著しく低下する場合がある。そのため、機器の絶縁設計に際して局所的な電界集中には十分な配慮がなされている[10]。しかし、機器の製造時に混入する金属異物や欠陥によってできる微小突起などは局部電界集中源となり、それを完全に除去することが困難なため、局部高電界からのコロナの対策は未だ完全なものではない。つまり、金属異物や微小突起などにより機器内の電界が不平等となり、SF₆ の絶縁耐力が著しく低下し、機器内で絶縁破壊が起こり、機器が故障する危険性がある。

絶縁機器の信頼性向上のために金属粒子が絶縁破壊に及ぼす影響について様々な研究が行われており、導体直下に突起物を設けて(球と針の直列配置)絶縁特性を調べたもの[5]、金属異物からのコロナ発生時に起こる電磁波(部分放電波形)を測定したもの[11,12]、誘電体コーティングが施された高圧導体付近の金属異物からのコロナ特性を調べたもの[13]等がある。また、球-球または針-平板電極系の中心軸上に金属異物を配置した構成[14]、二枚の平板電極による楔形ギャップ中の金属異物の挙動と破壊特性も詳しく検討されている[15]。しかし、不平等電界下では局部

高電界から発生したコロナが破壊を引き起こしていると考えられるが、局部コロナの発生位置や進展が破壊にどのように寄与するかについては不明な点が多い。

本研究では、針電極で局部高電界を発生させ、機器内の金属異物等の原因によって局部高電界が存在する場合を想定した複合（球/針-平板）電極を用いて放電特性を調べた。球電極と針電極を用いた複合電極系の研究において、球電極直下に突起物を設ける（球と針の直列配置）研究は多くなされている[5]。しかし、近年 GIS の小型化が進み、C-GIS では容器内に様々な機器（母線、遮断機、断路器など）が密集して配置されている。そのため、設置側に対して、局部高電界の発生位置によって高圧導体と並列ギャップとなる可能性がある。そこで、本研究で用いた複合電極は、導体間の破壊を引き起こす原因となる局部コロナと導体との距離に依存するコロナ挙動を調べる目的で、平板電極ギャップに対して球電極と針電極が並列に配置した。また、針電極を抵抗を介して球電極と並列に配置し、球-針電極間に電位差が生じた場合のコロナ挙動を調べることにした。

この電極を N₂ ガス中に配置し、超高速カメラによって微小なコロナのパルス電圧波頭部における駒撮りを行い、局部コロナが放電特性に及ぼす影響について調べた。

2. 実験方法

Fig.1に本実験で用いた電極図を示す。球電極の半径は $r=2.5\text{mm}$ 、針先端の曲率半径は約 $35\ \mu\text{m}$ 、平板電極の大きさは $35\times 35\text{mm}^2$ である。球-平板間のギャップ長を g とし $g=2.0\text{mm}$ に固定した。球-針電極間において電位差が生じる場合の破壊電圧とコロナの発生・進展について調べる目的で、抵抗 R を介して針電極は球電極に並列に接続した。なお、 R は $R=0.01\text{M}\Omega$ から $1.0\text{M}\Omega$ まで変化させた。また、平板電極に対して垂直方向の針先端と球先端との距離を x とした。ここで、球-平板間の距離と針-平板間の距離が等しいときを $x=0\text{mm}$ とし、平板電極に対して針先が球下端よりも上側にある場合を正と定義した。一方、球電極と針電極との水平方向の距離を d とした。ここで、球電極と針電極が接触しているときを $d=0\text{mm}$ とし、 d を 1.0mm から 5.0mm まで変化させた場合の放電特性を調べた。この電極系を黄銅製容器（約 $3\times 10^3\text{cm}^3$ ）内に入れ、N₂ ガスを $0.1\sim 0.2\text{MPa}$ まで封入した。

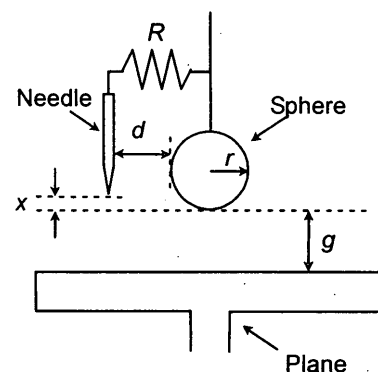


Fig.1 Electrode configuration

印加電圧は、波頭長 $1.5\ \mu\text{s}$ 、波高値 35kV の負極性方形波パルス電圧である。なお、実験で測定した破壊電圧はパルスの波頭部で破壊させたときの瞬時値である。破壊電圧の測定は同一条件で 20 回行った。電圧波形は高電圧プローブ（HV-P30, DC-500MHz, 岩崎通信機(株)）を介してオシロスコープ（DL-1540, 200MS/s, 150MHz, 黄河電気(株)）で測定した。また、放電の進展過程を超高速デジタルカメラ（IMACON468, 波長領域 $385\sim 900\text{nm}$, HADLAND PHOTONICS LTD.）で観測した。

3. 実験結果

3.1 破壊電圧-(球-針)距離 d 特性

負極性・N₂ ガス 0.1MPa 、 x （垂直方向の球下端と針先端との間の距離） $=0.5\text{mm}$ の条件下で、抵抗 R を $0.01\text{M}\Omega$ 、 $0.1\text{M}\Omega$ 、 $1.0\text{M}\Omega$ と変化させたときの破壊電圧と水平方向の球電極と針電極との距離（ d ）との関係を Fig.2 に示す。破壊電圧は各 d の値で 20 回測定を行い、その平均値で曲線を引いた。また、本実験の電極図から破壊の経路は、球-平板間での破壊と針-平板間での破壊の 2 通りの破壊経路が予測されるが、今回の研究においては全て球-平板間での破壊となった。図中の白印で球-平板間の破壊電圧を示す。

$0.01\text{M}\Omega$ における球-平板間の破壊電圧は、 $d=1.0\sim 3.0\text{mm}$ の範囲で約 15kV から 11kV まで減少し、 $d=3.0\sim 5.0\text{mm}$ の範囲で約 11kV から 16kV まで上昇した。 $0.1\text{M}\Omega$ における球-平板間の破壊電圧は、 $d=1.0\sim 2.0\text{mm}$ の範囲で約 19kV から 13kV まで減少し、 $d=2.0\sim 3.0\text{mm}$ の範囲で約 13kV から 15kV まで上昇し、 $d=3.0\sim 5.0\text{mm}$ の範囲で約 15kV から 11kV まで減少した。 $1.0\text{M}\Omega$ における球-平板間の破壊電圧は、 $d=1.0\sim 2.0\text{mm}$ の範囲で約 23kV から 16kV まで減少し、 $d=2.0\sim 5.0\text{mm}$ の範囲で約 16kV から 22kV まで上昇した。

次に破壊経路は、3 条件とも $d=1.0\sim 5.0\text{mm}$ の範囲で球-平板間のみの破壊となった。

これより、 $0.01\text{M}\Omega$ と $1.0\text{M}\Omega$ の破壊電圧- d 特性は、 $d=1.0\sim 5.0\text{mm}$ の範囲において減少し上昇する下に凸の特性を示した。一方、 $0.1\text{M}\Omega$ の破壊電圧- d 特性は、 $d=1.0\sim 2.0\text{mm}$ で減少し、 $d=2.0\sim 3.0\text{mm}$ で上昇し、 $d=3.0\sim 5.0\text{mm}$ で再び減少する特性となった。

$R=0\Omega$ の条件において、 $d=1.0, 2.0\text{mm}$ では球-平板間、針-平板間での2通りの破壊経路が観測された。しかし、針電極を球電極より 5.0mm 離すと針-平板間のみの破壊となった。また、そのときの破壊電圧は、球電極なしの針-平板間の破壊電圧とほぼ同じ値になった[7]。このことから、 d を大きくすると球電極と針電極は、それぞれ球-平板間、針-平板間の単独なものに近づくことと推測される。

以上のことより、本実験における破壊電圧は d を大きくすると針電極なしの球-平板間の破壊電圧値に近づくと思われる。実際、 $R=0.01, 1.0\text{M}\Omega$ の破壊電圧は $d=2.0\text{mm}$ 以降では上昇している。一方、 $R=0.1\text{M}\Omega$ の破壊電圧は $d=2.0\sim 3.0\text{mm}$ で上昇したが、 $d=3.0$ 以降は減少した。

3.2 破壊電圧-抵抗特性

Fig.2のデータを基にして、破壊電圧と抵抗特性を求め、Fig.3に示す。球電極と針電極間の距離 d が $1.0\sim 3.0\text{mm}$ までは挿入した抵抗値の増加と共に破壊電圧が上昇した。しかし、間隔 d が $4.0, 5.0\text{mm}$ と大きくなると、抵抗値の増加と共に破壊電圧が減少するが、その後、上昇する V 特性が得られた。

このように球電極と針電極間の距離 d の大小によって、球-平板電極間の破壊電圧-抵抗特性が異なることから、針電極からのコロナ挙動が間隔 d 、抵抗によって大きく変化する。特に、抵抗値が $0.1\text{M}\Omega$ のときの破壊電圧が特異なものとなっている。そこで、この抵抗値のときの破壊電圧の低下に焦点を当て、以下の実験を行った。

3.3 超高速カメラにおける放電挙動の観測

本実験は、抵抗を挿入して針-平板間にかかる電圧の立ち上がり時間を球-平板間にかかる電圧の立ち上がり時間よりも遅らせていることから、球-針電極間に電位差が生じる。また、針-平板間にかかる電圧の立ち上がり時間を変化させていることから、コロナ開始に影響があるものと思われる。一方、 $R=0\Omega$ の場合、 $d=1.0\sim 5.0\text{mm}$ の範囲において球-平板間での破壊と針-平板間での破壊の2通りの破壊経路が観測されている。特に、 $d=3.0\text{mm}$ 以降では針-平板間のみの破壊となっている[7]。しかし、本実験における破壊経路は、全ての条件において球-平板間のみの破壊となったことから、抵抗により針先付近から発生したコロナの進展に影響がでているものと推測される。

針-平板間でのコロナ挙動の違いが破壊電圧の特性に影響を及ぼすと考えられるため、特に針-平板間でのコロナ挙動に注目してコロナの発生から破壊までの放電挙動を、数十nsに時間分割して観測を行った。

Fig.4にガス圧 0.1MPa 、 $x=0.5\text{mm}$ 、 $d=3.0\text{mm}$ のときの放電挙動を示す。露光時間を 50ns 、インタフレーム時間を 10ns に設定している。各写真の下のは、パルス電圧を印加してから経過した時間とその時間に対する瞬時電圧となっている。Fig.4(a)は $R=0.01\text{M}\Omega$ の放電挙動で、Fig.4(b)は $R=0.1\text{M}\Omega$ の放電挙動である。なお、frame3は撮影の際、感度をおとして撮影しているため破壊時の発光が弱くなっている。 $0.01\text{M}\Omega$ (Fig.4(a))、 $0.1\text{M}\Omega$ (Fig.4(b))とも、

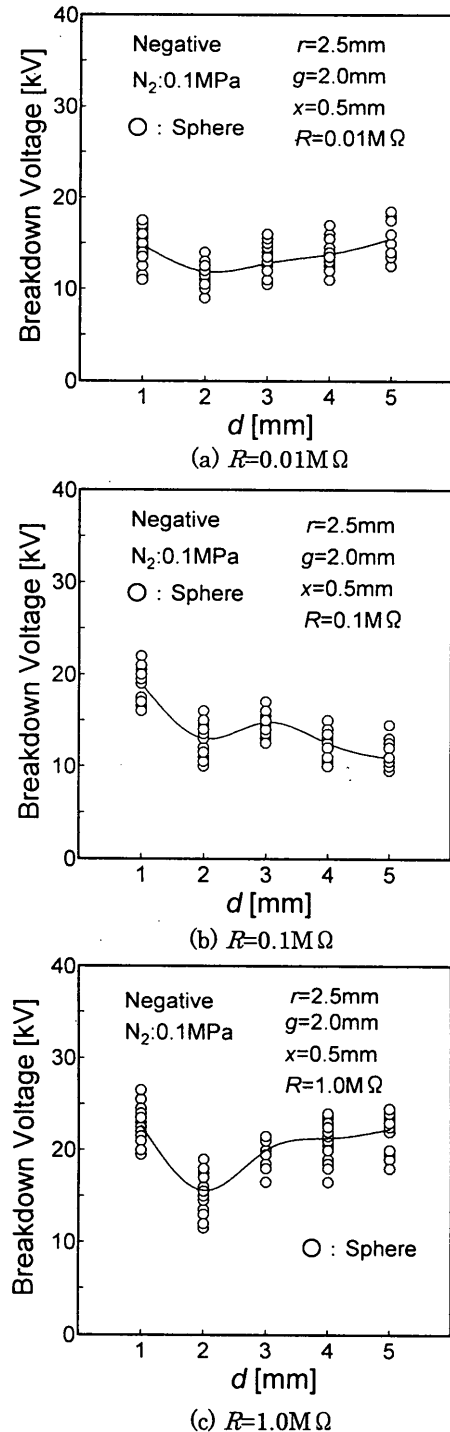


Fig.2 Dependence of d , which is the horizontal distance between sphere and needle, on the breakdown voltage.

frame2 で針-平板間，球-平板間ともに平板電極まで進展しているコロナが観測された。その後，frame3で針-平板間のコロナが消え，球-平板間で破壊した。0.01M Ω と0.1M Ω を比較すると，frame2 (Fig.4(a)(b))においてコロナが観測された電圧が，0.01M Ω の場合 10.9kV，0.1M Ω の場合 15.2kVと0.01M Ω のほうが約4kV低くなっている。また，そのときのコロナ挙動を比較すると，0.01M Ω の方が針-平板間におけるコロナ発光が強くなっている。Fig.5 にガス圧 0.1MPa， $x=0.5$ mm， $d=5.0$ mm のときの放電挙動を示す。露光時間を 50ns，インタフレーム時間を 10ns に設定している。Fig.5(a)は $R=0.01$ M Ω の放電挙動で，Fig.5(b)は $R=0.1$ M Ω の放電挙動である。なお，frame3 は撮影の際，感度をおとして撮影しているため破壊時の発光が弱くなっている。0.01M Ω (Fig.5(a))，0.1M Ω (Fig.5(b))とも，frame2 で針-平板間，球-平板間ともに平板電極まで進展しているコロナが観測された。その後，frame3で球-平板間での破壊に至った。このとき， $d=3.0$ mm のときと同様に針-平板間におけるコロナ発光は確認されなかった。0.01M Ω と0.1M Ω を比較すると，frame2 (Fig.5(a)(b))においてコロナが観測された電圧が，0.01M Ω の場合 14.0kV，0.1M Ω の場合 10.7kVと0.1M Ω のほうが約3kV低くなっている。また，そのときのコロナ挙動を比較すると，0.01M Ω の方が針-平板間のコロナ発光が強くなっている。

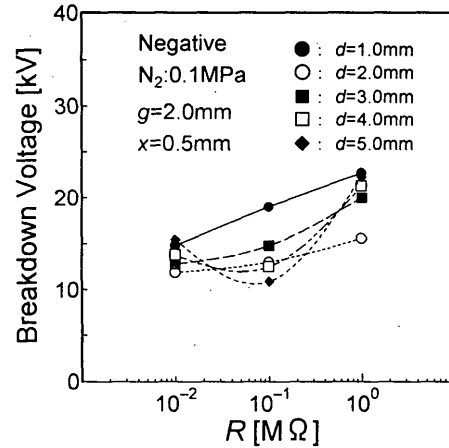


Fig.3 Dependence of R , which is the resistance, on the breakdown voltage

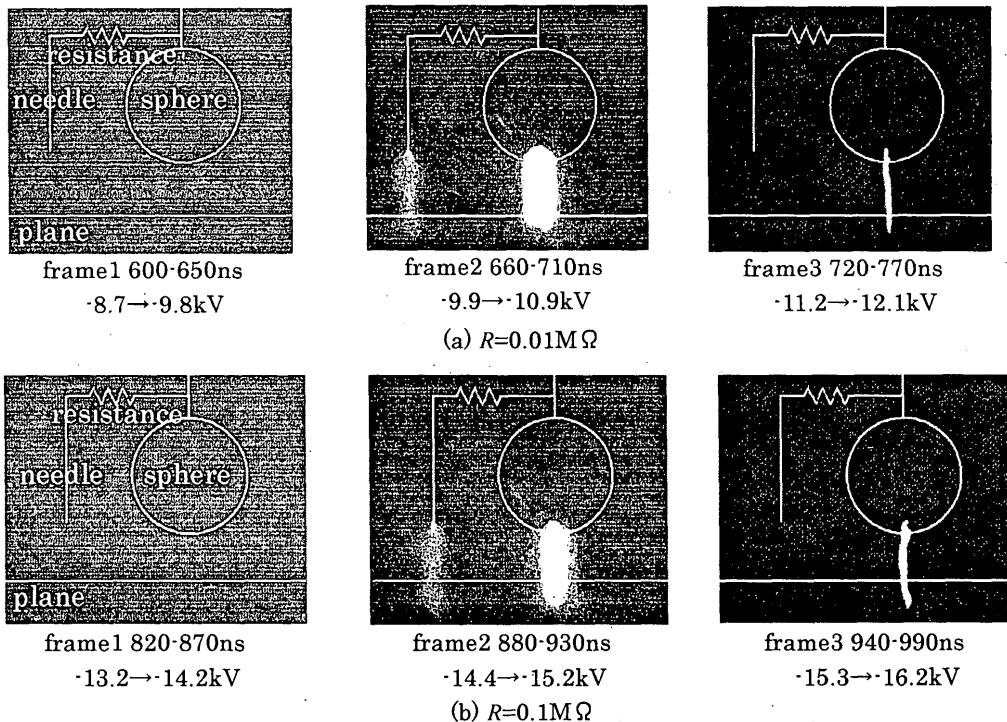


Fig.4 Development process of first corona discharge in N₂ at gas pressure of 0.1MPa ($x=0.5$ mm, $d=3.0$ mm)
 (Frame 3 dropped sensitivity from frame 1 and 2 and was taken of a picture)

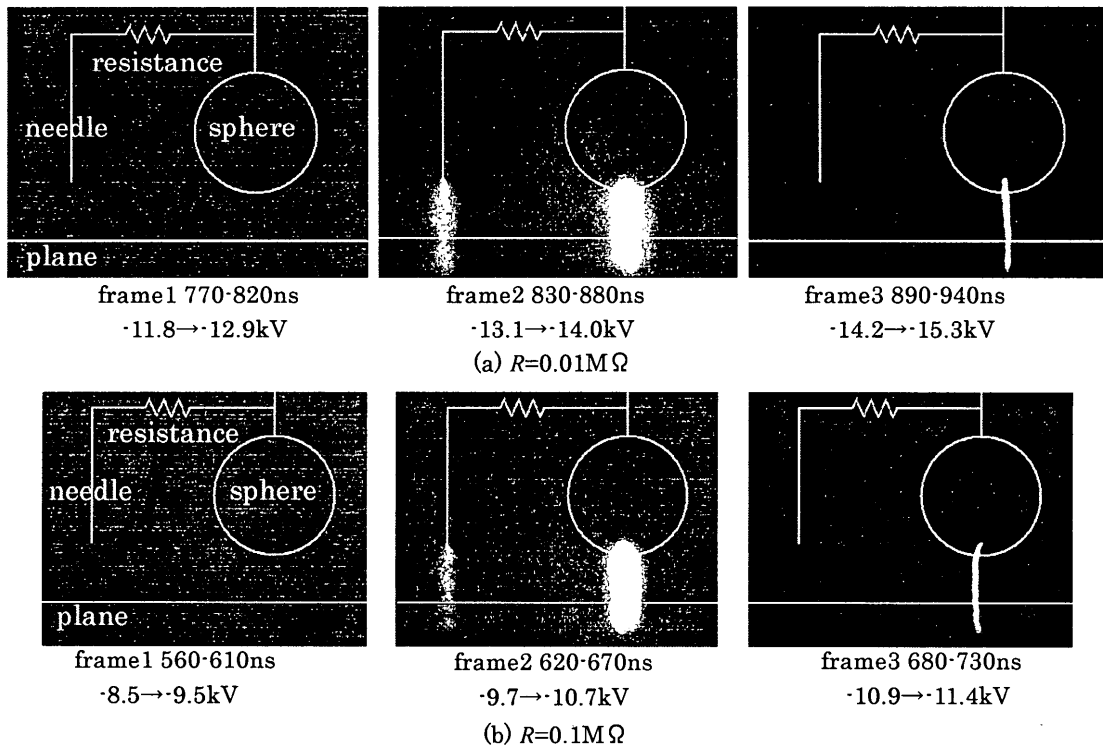


Fig.5 Development process of first corona discharge in N_2 at gas pressure of 0.1MPa ($x=0.5mm$, $d=5.0mm$)

(Frame 3 dropped sensitivity from frame 1 and 2 and was taken of a picture)

3.4 ガス圧による破壊電圧特性の変化

負極性・ N_2 ガス 0.2MPa, x (垂直方向の球下端と針先端との間の距離)=0.5mm おける破壊電圧と水平方向の球電極と針電極との距離(d)との関係を Fig.6 に示す。

0.01M Ω (Fig.6(a))の破壊電圧は、球電極と針電極間の距離 d の増加と共に破壊電圧は上昇した。0.1M Ω (Fig.6(b))の破壊電圧は、 $d=1.0\sim 2.0mm$ の範囲で減少し、 $d=2.0\sim 3.0mm$ の範囲で上昇し、 $d=3.0\sim 5.0mm$ の範囲で減少した。1.0M Ω (Fig.6(c))の破壊電圧は、 $d=1.0\sim 2.0mm$ で減少し、 $d=2.0\sim 5.0mm$ で上昇した。

これより、0.1MPa の場合と比較すると、圧力上昇による破壊電圧の変化はあまり見られなかった。また、0.01M Ω の $d=1.0\sim 2.0mm$ での破壊電圧の低下が見られなかったが、3条件ともほぼ同じ破壊電圧特性となり、0.1MPa の場合と同様に 0.1M Ω の破壊電圧特性が、 $d=3.0mm$ より減少する特異なものとなった。

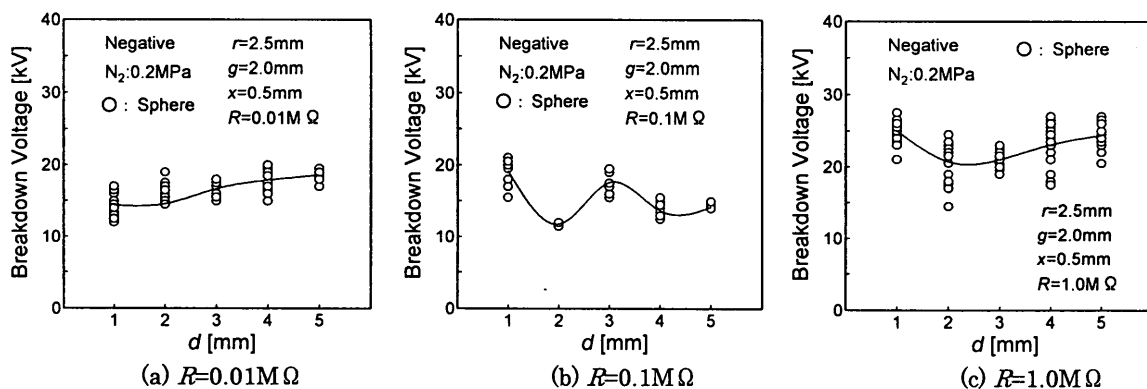


Fig.6 Dependence of d , which is the horizontal distance between sphere and needle, on the breakdown voltage.

3.5 抵抗値 $R=0\Omega$ の場合の破壊電圧特性と破壊確率特性

負極性・N₂ガス 0.1MPa, x (垂直方向の球下端と針先端との間の距離)=0.5mm, $R=0\Omega$ における破壊電圧と水平方向の球電極と針電極との距離(d)との関係を Fig.7 に示す. 針-平板間で破壊したときの電圧と球-平板間で破壊したときの電圧をそれぞれ黒印, 白印で示している.

白印で示した球-平板間の破壊電圧は, $d=1.0\sim 2.0$ mm の範囲で約 19kV から 15kV まで減少した. 一方, 黒丸で示した針-平板間での破壊電圧は, $d=1.0\sim 3.0$ mm の範囲で約 12kV から 7kV まで減少し, $d=3.0$ mm 以降は約 7kV となった.

球-平板間, 針-平板間それぞれの破壊経路の割合(破壊確率)と d との関係を Fig.8 に示す. 破壊確率は 20 回の測定中に球-平板間での破壊の回数と針-平板間での破壊の回数をまとめたものである. $d=1.0$ mm, 2.0mm での針-平板間の破壊確率はそれぞれ 0.45 および 0.7 となり, $d=3.0$ mm 以降ではすべて針-平板間での破壊となった.

これより, $d=1.0\sim 2.0$ mm の範囲では球-平板間での破壊と針-平板間での破壊の 2 通りの破壊経路が観測された. d を大きくする, つまり, 針電極を球電極から離していくと針-平板間で破壊しやすくなり, $d=3.0$ mm 以降では全て針-平板間で破壊した. また, $d=3.0$ mm 以降での針-平板間の破壊電圧(約 7kV)が, 球電極の無い針-平板構成 (Gap=2.5mm)の破壊電圧とほぼ同等の破壊電圧であった.

以上のことより, 球電極と針電極との水平方向の距離 d により, 球電極が針電極に影響を及ぼすものと思われる. そして, 針電極が球電極よりもある程度離れると, 針電極は球電極の影響を受けないと推測される.

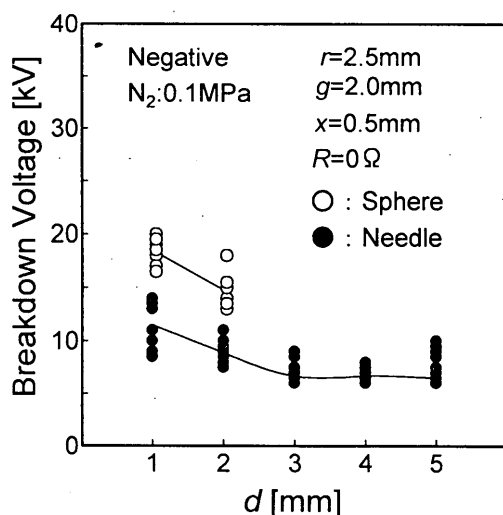


Fig.7 Dependence of d , which is the horizontal distance between sphere and needle, on the breakdown voltage.

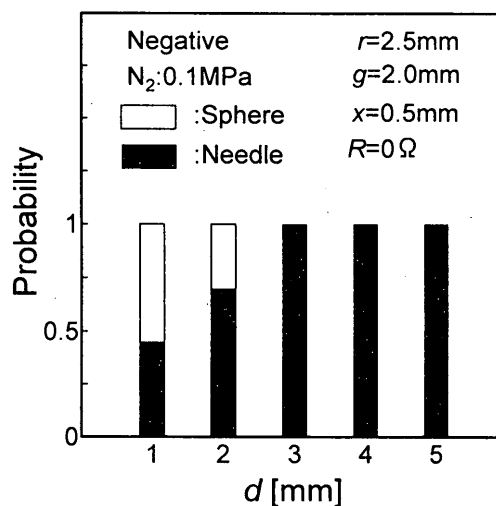


Fig.8 Dependence of d , which is the horizontal distance between sphere and needle, on the breakdown probability.

4 考察

以上の結果から, 複合電極の放電特性に及ぼす局部コロナの影響について考察する.

N₂ガス 0.1MPa, $x=0.5$ mm, 負極性の条件において破壊電圧- d 特性を調べた結果, $R=0.1\text{M}\Omega$ の特性に違いがでた. $R=0.01\text{M}\Omega$ (Fig.2(a))と $R=1.0\text{M}\Omega$ (Fig.2(c))の破壊電圧- d 特性は, $d=1.0\sim 5.0$ mm の範囲において $d=2.0$ mm で最小値をとる V 特性になった. 一方, $R=0.1\text{M}\Omega$ (Fig.2(b))の破壊電圧- d 特性は, $d=1.0\sim 2.0$ mm の範囲で減少し, $d=2.0\sim 3.0$ mm の範囲で上昇し, $d=3.0\sim 5.0$ mm の範囲で再び減少する特性となった.

$R=0\Omega$ の場合, $d=1.0\sim 5.0$ mm の範囲において球-平板間での破壊と針-平板間での破壊の 2 通りの破壊経路が観測されている. 特に, $d=3.0$ mm 以降では針-平板間のみの破壊となっている[7]. しかし, 本実験における破壊経路は, 全ての条件において球-平板間のみの破壊となった. これより, コロナは最も電界が集中する針先付近から発生・進展するが, 抵抗によりコロナの進展が抑制され, 針-平板間の破壊に至らずに球-平板間での破壊に至ったものと推測される. Fig.4(a)(b)と Fig.5(a)(b)から, 抵抗値の低い方が針-平板間におけるコロナ発光が強くなっている. これより, 抵抗が大きくなるとコロナの抑制効果が強くなると思われる. また, コロナの発生・進展と同時に空間電荷も発生するため, 空間電荷によるコロナの抑制効果も考慮しなければいけない.

本実験ような針電極を球電極と並列配置とした複合電極構成において球-平板間での破壊は, 針先付近で発生し

たコロナによる電子供給が球-平板間の破壊を引き起こしていると思われる[16]. 一方, コロナの発生・進展の際に発生する紫外線による光電離は, コロナの進展と同時に起こり, 飛火作用としてコロナ先端よりも前方の空間で生じる[17]. Fig.4(a)と(b)を比較すると, frame2において $R=0.01M\Omega$ の方が針-平板間におけるコロナ発光が強い. また, frame2における電圧も $R=0.01M\Omega$ の方が約4kV低い. これより, $d=3.0mm$ の場合, $R=0.01M\Omega$ の方が光電離作用が強く, 球-平板間に電子が供給されやすくなった結果, 破壊電圧が低くなったものと思われる. しかし, $d=5.0mm$ の場合, $R=0.01M\Omega$ の方が $0.1M\Omega$ よりも破壊電圧が高くなった. これは, 針電極を球電極より5.0mm離しているため $d=3.0mm$ よりも光電離による電子供給の影響が小さくなると思われる. そのため, $d=3.0mm$ のように $R=0.01M\Omega$ における破壊電圧が低くならなかったものと推測される.

本実験のように針-平板間にかかる電圧の立ち上がり時間を変化させている研究で, 針電極を球電極に非常に近づけると球-針電極間の電位差により, 針先から球電極に向かって進展しているコロナが観測されている[11]. 本実験では, 針電極から球電極に進展するコロナは確認されなかった. これは, 針電極を球電極よりmm単位で離しているため針-球電極間の電界が十分に高くならなかったものと思われる. また, $R=0.01, 0.1M\Omega$ と抵抗値が低い場合球-針電極間の電位差が低かったことも考えられる. これより, 球電極と針電極との間の距離 d を小さくした場合, あるいは球-針電極間の電位差を大きくするために, 抵抗値を大きくした場合のコロナ挙動を比較して今後詳しく検討する必要がある.

5 結論

N_2 ガス中において, 局部高電界をつくりだす針電極を抵抗を介して球電極と並列に接続させた球/針-平板電極構成において, 水平方向の球電極と針電極との間の距離 d , および抵抗を変化させたときのパルス放電特性を調べた結果, 以下のことがわかった.

- (1) ガス圧 $0.1MPa$, $x=0.5mm$ の条件において, 抵抗値が $0.1M\Omega$ の破壊電圧- d 特性は $0.01, 1.0M\Omega$ の破壊電圧- d 特性とは違った特性となった. $0.1M\Omega$ の破壊電圧- d 特性は, $d=1.0\sim 2.0mm$ の範囲で減少し, $d=2.0\sim 3.0mm$ の範囲で上昇し, $d=3.0\sim 5.0mm$ の範囲で再び減少する特性となった. このように, 間隔 d によって針-平板間のコロナ挙動が変化し, 球-平板間に影響するものと思われる. その結果, 間隔 d によって球-平板間の破壊電圧に違いが出るものと思われる. 特に, $R=0.1M\Omega$ の破壊電圧は特異なものとなった.
- (2) 球-平板間で破壊する場合, どの条件においても針-平板間, 球-平板間ともに平板電極まで進展しているコロナが観測された. その後, 球-平板間で破壊した. このとき, 針-平板間におけるコロナ発光が消えたが, これは球-平板間で破壊に至ったため消えたものと思われる. また, 3条件とも $d=1.0\sim 5.0mm$ の範囲においてすべて球-平板間での破壊となった.
- (3) $R=0.01M\Omega$ と $0.1M\Omega$ を比較すると, $d=3.0mm$ の場合, $0.01M\Omega$ の方が低い電圧で針-平板間, 球-平板間のコロナが確認された. その結果 $0.01M\Omega$ の破壊電圧が低くなった. 一方, $d=5.0mm$ の場合, 針-平板間, 球-平板間のコロナが観測された電圧は $0.1M\Omega$ の方が低くなり, 破壊電圧は $0.1M\Omega$ の方が低くなった.
- (4) $0.1MPa$ と $0.2MPa$ の破壊電圧について, 各抵抗の値による破壊電圧- d 特性はほぼ同じ3つのパターンとなった. また, 破壊電圧についてはほぼ同じ値となり, このような複合電極においては圧力上昇の効果がほとんどないと思われる.

参考文献

- [1] 電気設備学会:「SF₆ガス絶縁電力機器と環境問題について」, J.IEIE Jpn., 24, pp.732-733(2004)
- [2] L.G.Christphorou and L.A.Pinnaduwege: "SF₆/N₂ Mixtures Basis and HV Insulation Properties", IEEE. Trans., DEI-2, pp.952-989 (1995)
- [3] H.Ueno, N.Sakamoto and H.Nakayama: "Anomalous Creeping Flashover Characteristics in N₂/SF₆ Mixed Gas under Single Pulse Voltage", IEEE. Trans., DEI-8, pp195-202 (2001)
- [4] 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, 122-A, pp.849-855 (2002)
- [5] 五島久司, 新開裕行, 八島政史:「高気圧窒素ガスの準平等電界ギャップおよび金属異物存在下での雷インパルス絶縁特性」, 電学論, 121-B, pp.467-474 (2001)
- [6] 宅間薫:「ガス絶縁と地球温暖化問題」, 電学誌, 119, pp.232-235 (1999)
- [7] 星田哲男, 畑下武史, 上野秀樹, 中山博史:「複合電極のパルス放電特性に及ぼす針電極の影響」, 平成16年度電気学会全国大会講演論文集, G1-124 (2004)

- [8] 星田哲男, 上野秀樹, 中山博史: 「N₂ガス中における局部コロナ発生時の放電特性」, 平成16年度電気学会 基礎・材料・共通部門大会講演論文集, 10-9 (2004)
- [9] 星田哲男, 上野秀樹, 中山博史: 「N₂ガス中での放電特性に及ぼす局部コロナの影響」, 平成16年度電気設備学会全国大会講演論文集, F-9 (2004)
- [10] 川井, 宮崎, 熊井, 山口, 虎井: 「500kV GILにおけるパーティクルトラップの検討」, 電気学会 電力・エネルギー部門大会論文集, pp.850-851 (1997)
- [11] C.M.Cooke, R.E.Wootton and A.H.Cookson: "Influence of Particles on AC and DC Electrical Performance of Gas Insulated System at Extra-High-Voltage", IEEE. Trans., PAS-96, pp.768-775 (1977)
- [12] W. Ziomek and E. Kuffel: "Activity of Moving Metallic Particles in Prebreakdown State in GIS", IEEE Trans., DEI-4, pp.39-43 (1997)
- [13] 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, 117-A, pp.431-437 (1997)
- [14] M.Kubuki, R.Yoshimoto, K.Yoshizumi, S.Tsuru and M.Hara: "Estimation of dc Breakdown Mechanisms in Air Gaps Containing Floating Metallic Particles", IEEE Trans., DEI-4, pp.92-101 (1997)
- [15] K.Sakai, S.Tsuru, D.L.Abella and M.Hara: "Conducting Particles Motion and Particle-initiated Breakdown in dc Electric Field between Diverging Conducting Plates in Atmospheric Air", IEEE Trans., DEI-6, pp.122-130 (1999)
- [16] 坂本直規, 星田哲男, 上野秀樹, 中山博史: 「N₂ガス中における電極表面上の金属粒子からのコロナ特性」, 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G1-14 (2002)
- [17] 電気学会: 「改訂新版 放電ハンドブック」, オーム社, p.87 (1975)