

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 豊田裕之

放電現象は長い研究の歴史を持ち、その研究成果は工学的にも広く応用されているが、放電現象の進展メカニズムは未だに完全には解明されていない。本論文は、放電進展時の電圧変化を無視できる急峻方形波高電圧を用い、気中放電をナノ秒オーダの短時間領域で詳細に測定することにより、放電進展過程を明らかにし、また、絶縁性能評価に不可欠な $V-t$ 特性の推定法を提案したもので、「ナノ秒領域における絶縁ガスの放電進展現象」と題し、9章から構成されている。

第1章「序論」では、研究の背景と目的について述べている。放電研究の難しさは、放電現象が高速かつ確率に左右される現象であるため、諸要因の分離検討が難しい点にある。方形波電圧は波頭峻度の影響を無視できるため、任意の電界状況を瞬時に作り出せる。これは放電現象の微細な観察、体系的な整理を行うには理想的な電圧波形である。本研究の目的は、この方形波高電圧を用い、短時間領域に焦点を当てて放電進展を詳細に測定し、さらには数値解析によって放電電圧と遅れ時間の関係を求める手法を確立することにあることが記されている。

第2章「実験装置」では、測定に用いた実験装置の構成を紹介している。使用した急峻方形波発生装置はレーザトリガギャップを備え、規約波頭長 16 ns、最大電圧波高値 200 kV、継続時間 10 μ s、減衰率 2.5% 以下という理想的な方形波高電圧の発生を実現している。レーザトリガギャップを予め導線で短絡することにより、1.8/450 μ s という標準雷インパルス電圧に近い波頭長を持つ電圧も発生可能である。電極構成は半球-平板電極および針-平板電極である。

第3章「 $V-t$ 特性」では、主な測定対象である $V-t$ 特性の定義と、 $V-t$ 特性を用いた絶縁性能評価について述べている。

第4章「 SF_6 ガスとその混合ガスの放電特性」では、 SF_6 ガス、 $\text{SF}_6\text{-N}_2$ 混合ガス中の $V-t$ 特性、放電遅れ時間、ストリーマ進展の様子について述べている。実験結果は以下のように要約される。

平等電界中の SF_6 ガスの $V-t$ 特性は、放電遅れ時間 10 ns 以下の短時間領域まで測定可能で、極性差はない。放電遅れ時間 20 ns 以上では従来から知られているように平坦な特性となり、それより短時間側ではスパークオーバ電圧が大きく上昇する。ストリーマの進展速度は正極性が負極性の3倍以上速い。平等電界中の $\text{SF}_6\text{-N}_2$ 混合ガスの $V-t$ 特性には、放電遅れ時間 10 ns 付近の短時間領域においても混合比に対するシナジズムが現れる。

不平等電界中の SF_6 ガスの $V-t$ 特性は複数の折れ曲り点を持ち、スパークオーバ電圧は平等電界よりも低くなる。印加電圧極性による特性の変化が大きく、スパークオーバ電圧は負極性の方が高くなる。進展速度は平等電界中の半分程度で、正極性が負極性の3倍程度速い。

第5章「 CF_3I ガスとその混合ガスの放電特性」では、 CF_3I ガス、 $\text{CF}_3\text{I-N}_2$ 混合ガス、 $\text{CF}_3\text{I-Air}$ 混合ガス、 $\text{CF}_3\text{I-CO}_2$ 混合ガス中の $V-t$ 特性、放電遅れ時間、ストリーマ進展の様子について述べている。実験結果は以下のように要約される。

平等電界中の CF_3I ガスの $V-t$ 特性は、放電遅れ時間 20 ns 以上では平坦で、それ以下で大きく上昇する。 CF_3I ガスは SF_6 ガスに勝る絶縁性能を持ち、放電遅れ時間 10 μ s におけるスパークオーバ電圧は 112 kV と SF_6 ガスより 27% 程度高い。進展速度は正極性が負極性の 1.6 倍程度速い。平等電界中の $\text{CF}_3\text{I-N}_2$ 混合ガスの $V-t$ 特性は、放電遅れ時間 20 ns 以上では比較的平坦で、それ以下で大きく上昇する。 $V-t$ 特性は混合比に対してほぼ線形に変化し、 $\text{CF}_3\text{I} : \text{N}_2 = 6:$

4 の混合ガスが SF_6 ガスと同等の $V-t$ 特性を示す。平等電界中の CF_3I -Air 混合ガスの $V-t$ 特性は、 CF_3I - N_2 混合ガスとほとんど変わらない。平等電界中の CF_3I - CO_2 混合ガスの $V-t$ 特性は混合比に対してほぼ線形に変化するが、 $\text{CF}_3\text{I} : \text{CO}_2 = 4 : 6$ 混合ガス中のスパークオーバ電圧が期待されるよりもやや高くなる。

不平等電界中の CF_3I ガスの $V-t$ 特性は極性差が大きく、負極性の方が傾きが緩やかでスパークオーバ電圧が高い。ストリーマは針電極から進展し、進展速度は次第に速くなる。進展速度は正・負極性で同程度である。

第 6 章「数値解析によるストリーマ進展速度の検討」では、 SF_6 - N_2 混合ガス中のストリーマ進展モデルを構築し、数値解析による検討を行っている。電子密度のピークをストリーマ先端と仮定してストリーク写真を模した画像を描いたところ、 SF_6 混合率 40% 以上ではストリーマ進展速度が低下してゆくのに対し、20% ではほぼ一定の速度を保ち、0% では速度が増しており、実測値と一致する結果が得られ、数値シミュレーションの有効性が明らかになった。また、数値解析により求めた形成遅れ時間と最低スパークオーバ電圧から $V-t$ 特性を推定したところ、実測値に照らして妥当な結果が得られた。

第 7 章「等面積則による $V-t$ 特性の定量的評価」では、等面積則による $V-t$ 特性の定量的評価について述べている。印加電圧波形の電圧-時間積分値により決定される面積パラメータは、印加電圧がある値 V_F を下回ると急激に増大する。適正な評価結果を得るためには、 V_F 以上の印加電圧に対する面積パラメータを用いるのがよいことを明らかにした。このようにして求めた面積パラメータを用いることにより、 SF_6 - N_2 、 CF_3I -Air 混合ガス中の $V-t$ 特性を、放電遅れ時間 10 ns 付近の短時間領域まで精度良く推定できることを示した。また、第 6 章の解析結果に基づき、経験則であった等面積則に物理的な解釈を与えるに至っている。

第 8 章「結論」では、以上の成果をまとめ、内容を総括している。

第 9 章「今後の研究の方向性」では、本研究では初期データの収集にとどまった不平等電界中の放電特性測定の必要性について述べている。

以上これを要するに、本論文は、電気絶縁設計の観点からその進展特性の解明が待望されている絶縁気体中の放電現象を対象とし、特に火花破壊電圧と破壊遅れ時間との関係 ($V-t$ 特性) についてナノ秒短時間領域までの特性を明らかにした上で、ストリーマ放電のシミュレーションに基づく $V-t$ 特性推定法を新たに提案し、経験則であった等面積則に物理的な解釈を与えている点で、電気工学、特に高電圧、放電工学に貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。