

論文の内容の要旨

論文題目 固体誘電体表面における沿面放電の進展機構に関する研究

氏名 千葉 政邦

本論文は空気中におかれた固体誘電体表面に発生する沿面放電の進展機構を論及したものである。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的を論じている。電気機器においては課電導体の支持や電気絶縁を目的として、必ず固体誘電体(絶縁体)が使用されるが、この表面に沿って進展する放電が沿面放電である。沿面放電の特徴は固体誘電体が関係しない気中放電の場合よりも低い電圧で放電が発生し進展することである。低電圧電源で放電が可能なので、古くからオゾン発生器などに沿面放電が利用されてきている。近年では有害ガス処理装置に沿面放電の応用が提案されている。他方、低電圧で放電が進展することは絶縁耐電圧が低いことなので、電気絶縁の面からは沿面放電の発生および進展を如何に抑制するかが重要課題となっている。

沿面放電の基本的な特性としてストリーマ進展長と電圧の関係、およびストリーマ進展長と固体誘電体厚さ関係がある。ところが、沿面放電現象が1777年に発見されて以来、今日までに多くの研究報告がなされているが、ストリーマ進展と電圧の関係については、研究者によって2~3倍の相違があり、さらに、進展長と固体誘電体厚さについても、全く反対の特性を示すデータが示されている。今日に至っても解決されていないのは、“条件が異なるからストリーマ進展長が異なるのは当然”と考え、互いの相違について深く考察されることがなかったことによる。その他にも未解明な現象が多く残されている。このような現状にあって、本研究の主な目的は、先ず正確なストリーマ進展長を求めると同時に固体誘電体の厚さとの関係を明確にすること、次に、リーダ形成機構とリーダ出現時の沿面放電の進展現象を解明することである。さらに、この研

究過程で得られる多くの実験データは、沿面放電の応用や実用電気機器の絶縁設計の基礎資料となることを論じている。

第 2 章「沿面ストリーマ構造と進展長の抑制要因」では、各種条件下で詳細な実験を行った結果に基づいて、ストリーマ構造および進展長を抑制している要因の抽出とその効果を論じている。正極性ストリーマは固体誘電体表面に沿って進展するが、負極性ストリーマは表面ばかりなく垂直方向にも広がりをもつ構造をしていること、垂直方向に分布している電荷がドリフトしてリヒテンベルグ図形を変歪させていることを明らかにしている。さらに、正、負極性の場合とも電極から多数のストリーマが発生するが、その際に最初のストリーマが発した光子により同期がとられ、多数のストリーマが同時に発生していることを実験的に解明している。この光同期の原理に基づいて、“電極並置法”の実験手法を考案し、この手法により、ストリーマ進展長に与えるパラメータの影響が僅少であっても有効に判定できることを論じている。

多数のストリーマが同時に発生し高速進展しているので 10^{10} A/s 程度の急峻電流が流れ、電源回路のインダクタンスによって電圧降下が生じ、ストリーマ進展が抑制されていることを検証している。したがって、ストリーマ進展長を正確に求めるためには電源回路のインダクタンスを如何に減少させるかが最重要要因となる。電極形状とストリーマ進展長の関係について実験および電界計算に基づいて考察し、固体誘電体表面の電位分布がストリーマ進展長に関与していることを明らかにしている。その他に、ストリーマ進展長と発生電圧の関係を明確にするためには、発生電圧を広範囲に変化させる必要があるが、それを可能とする要因の抽出、及びその要因がストリーマ進展長に与える影響を実験的に考察している。

第 3 章「沿面ストリーマ進展長特性」では、第 2 章の知見をもとにして実験条件を整備して、固体誘電体の厚さおよび進展形状をパラメータとして、ストリーマ進展長と発生電圧との関係を測定した結果について論じている。ストリーマが固体誘電体表面を進展する形状は、ストリーマが放射状に広がって進展(放射状進展)する場合と、ストリーマが互いに平行状態を維持しながら進展(平行状進展)する場合に大別できる。両形状の場合とも、ストリーマ進展長は発生電圧の増加とともに大となるが、飽和する性質があり、固体誘電体の厚さが薄いほどこの飽和性が強く、かつ飽和は低い電圧から始まる。発生電圧が低い範囲では、固体誘電体の厚さが薄いほどストリーマ進展長が大であるが、強い飽和性のために高い電圧領域になると、薄い固体誘電体上でのストリーマ進展長は厚い固体誘電体上の場合よりも短くなる。ストリーマ進展長の飽和性はストリーマチャンネルに電流が集中することによって生じると結論している。

ある電圧におけるストリーマ進展長は固体誘電体厚さによって変わるが、最高ストリーマ進展長は発生電圧に対して次のように 1 本の直線で表すことができる。

正極性ストリーマ進展長

$$\text{放射状進展} \quad L_s = 2.5 \times V_s \quad (1)$$

$$\text{平行状進展} \quad L_s = 3.0 \times V_s \quad (2)$$

負極性ストリーマ進展長

$$\text{放射状進展, 平行状進展とも} \quad L_s = 0.9 \times V_s \quad (3)$$

ここで、 L_s はストリーマ進展長(mm)、 V_s はストリーマ発生電圧(kV)である。これらの式で与えられるストリーマ進展長は最も進展しやすい条件にある場合の進展長といえる。また、平行状進展するストリーマは放射状進展する場合よりも進展長が大である。さらに、ストリーマ進展長に関する過去の報告と比較考察を行い、本章で提示しているデータが真のストリーマ進展長に近いこと、ストリーマ進展長と固体誘電体厚さの関係についての過去の互いに相反するようなデータについても合理的に説明できることを論述している。

第 4 章「正極性沿面リーダ出現条件と沿面リーダ形成機構」では、広範な条件で測定を行いその結果に基づいて正極性ストリーマとリーダ形成との関連性を論じている。リーダ出現電圧は電極形状には依存せず、ストリーマ発生電圧が低い場合にリーダ出現電圧が低いこと、ただし、発生電圧よりもストリーマ進展長が短いことがリーダ出現に直接寄与していること、これに対してストリーマ発生電圧が高い場合にはリーダが出現しないことを明らかにしている。さらに、ストリーマ発生からリーダが形成されるまでの時間内の発光や電流波形の測定、プローブによる電位測定等の結果も合わせて総合的に考察を行い、リーダは低い電圧で発生した既存ストリーマから転換することを結論している。

ストリーマとリーダの関係についての従来の解釈では、“リーダは低い電圧で発生していた既存のストリーマから転換する”、“ある電圧以上で発生したストリーマがその根元(電極側)からリーダ化する”、の二説に分かれているが、本研究の成果は初めの説が正しいことを明らかにした。

第 5 章「負極性沿面放電のステップ進展現象」では、負極性沿面放電を光学的、電氣的、かつ高速度で測定した結果に基づいて、ステップ進展機構を論じている。沿面放電を直線的に進展させて、高感度静止カメラ、高速度流し撮りカメラで観測した結果、沿面放電が規則的に進展と休止を繰り返しながら進展していること、いわゆる、ステップ進展していることを見出している。放電の先端部に扇型に広がって進展しているストリーマ群とその後方にリーダが形成されていること、ステップ的な発光は放電先端部に新しいストリーマの発生と同時に生じることを明らかにしている。さらに、このステップ的な発光と同時にリーダの電位、電流も振動していること、リーダの発光および電位

振動は放電先端のストリーマ側から電極の方に向かって伝播していることも明らかにしている。ステップ的に発光する機構として次のようなモデルを提案し論述している。ストリーマは進展するにしたがって先端電位が低下してある長さで停止するが、その後に電極から停止したストリーマに電子が供給されてそのストリーマ先端の電位が回復し電離可能な強度に達すると、そのストリーマの先端から新しいストリーマ群が扇型に進展開始する。この新ストリーマの進展と同時に 1 ステップ前のストリーマが電離度の上昇によりリーダ化されるが、この現象が放電先端から電極方向に進行するというモデルである。休止時間は放電先端の停止しているストリーマに電子が供給されて電位が回復するまでの時間となる。

第6章「結論」では、各章の主な成果をまとめて列挙している。従来は、ストリーマ進展長を公表する際には使用した電圧波形が記述されていれば十分で、電源内部の回路条件には触れなくても支障ないとされてきた。しかし、本研究によればストリーマ進展長に及ぼす電源全体のインダクタンスの影響が大なので、電源の回路条件も明記すべきことを提起している。沿面放電の解析やシミュレーションにおいて、まず要求されるのは真のストリーマ進展長と電圧の関係であり、本研究のデータはこの分野に対しても基準特性を与えるものになると確信している。さらに、負極性沿面放電のステップ進展現象は雷放電に類似するところが多く、沿面放電で雷放電を模擬できる可能性を示唆している。また、多くの条件下で測定したストリーマ進展長、リーダ出現電圧に関する結果は、沿面放電の応用や実用機器の絶縁設計の基礎データとなると期待している。

以上、本研究を要約すると、測定環境を整えて固体誘電体表面に沿って進展するストリーマ進展長を測定した結果、信頼性の高いデータが得られ、これを基にして過去の規則性のない報告も合理的に説明できる。更に、正極性ストリーマからリーダの形成機構、および負極性沿面放電のステップ進展機構を解明している。