

円柱状背後電極を伴う円筒誘電体表面の 沿面放電に関する進展基本特性

西 敏 行*

Characteristics of Development in Creeping Discharge along Cylinder Dielectric Surface with Cylindric Back Side Electrode

Toshiyuki Nishi

In the transformers for high voltage and the high voltage aerial distribution lines, etc., dielectric breakdown countermeasure by the lightning surge becomes an important problem. In high voltage aerial distribution lines, creeping discharges develop along the electric wire surface from free end of binding wire, when lightning surge invades in the central line of wire. And it becomes a cause of disasters such as punch-through breakdown and melting wire. In order to prevent these accidents, the elucidation of the creeping discharge phenomena which develop along the cylinder dielectric surface like electric wire is very important from fundamental point of view. However, the creeping discharge which occurs by the lightning surge is complicated phenomenon. Therefore, the properties of creeping discharge remain largely unknown.

In this paper, we report the characteristics of creeping discharge phenomena which develop along the cylinder dielectric surface with cylindric back side electrode applying the lightning impulse voltage.

It has been clarified that the developing length and aspect of creeping discharge remarkably differ, when the polarity of the creeping discharge is different.

キーワード：沿面放電、円筒誘電体、背後電極、雷インパルス

1. まえがき

高圧送電線や配電線及び高電圧機器においては、雷過電圧の侵入による絶縁破壊対策が重要な課題となる。雷災害の原因としては、直撃雷と誘導雷が挙げられる。このうち、誘導雷は、配電線などの近傍に落雷が生じた際に、電線の心線に電磁誘導により過電圧が誘導されて発生する。誘導雷の

波高値は、配電線と落雷地点との距離によって変化する。その大きさは、数kV程度のものから百数十kV程度のもので観測⁽¹⁾されている。この中でも百kV以下のものが大半である。

高圧配電線等は、がいしにより支持されており、大地とは絶縁されている。雷過電圧が電線の心線に侵入し電線支持点に到達したとき、雷過電圧ががいしの絶縁耐力より大きければ、がいし表面の絶縁破壊が生じ、配電線表面に沿面放電が進展する。その際、電線被覆にピンホール等の弱点部が存在すれば、そこで、被覆の貫通破壊が生じ、電

* 電気工学科

線溶断⁽¹⁾などの災害の原因となる。このような災害を未然に防ぐためには、電線のような円筒誘電体表面に発生する沿面放電の特性を基礎的な面から解明することが重要である。しかし、沿面放電の特性は、誘電体の誘電率、厚さ、形状、表面状態、印加する電圧の種類（直流、交流、インパルスなど）、極性、大きさ、電極の形状などによって複雑に変化する。そのため、その特性解明は困難を極める。

沿面放電の研究は、従来から平板状誘電体表面を進展する場合についてなされたものが多い^(2~4)。この場合、電極構成としては、接地した銅板を背後電極とし、その上に平板状誘電体を密着して置き、さらに、その表面に針電極等の高電圧側電極を配置することとなる。このとき、沿面放電は、高電圧側電極を中心として誘電体板上を放射状に進展する。

沿面放電には、平板状誘電体表面を進展するものだけではなく、円筒誘電体表面を進展するものも存在する。このような沿面放電は、誘導雷発生時に絶縁電線表面を進展する場合に相当する。また、その特性解明は、電線支持点における絶縁強化、誘導雷による電線溶断事故防止に大きく貢献する。しかし、円筒誘電体表面を進展する沿面放電は、平板状誘電体表面を進展する場合と異なり、その進展特性が複雑なため、特性解明はほとんど行われておらず、研究例^(5~7)もあまり見られない。

本論文では、円筒誘電体に接地した円柱状背後電極を挿入し、誘電体表面に円筒形状の電極を配置した。この電極に正または負極性インパルス電圧を印加することにより誘電体表面に正または負極性沿面放電を発生させた。このとき、沿面放電の極性によりその進展基本特性となる進展長、進展様相、放電電流波形がどのように異なるのか観測した。その結果、円筒状誘電体表面に発生する沿面放電は、その極性によって進展基本特性が著しく異なることが判明したので報告する。

2. 実験方法

図1は、実験回路を示す。インパルス電圧発生

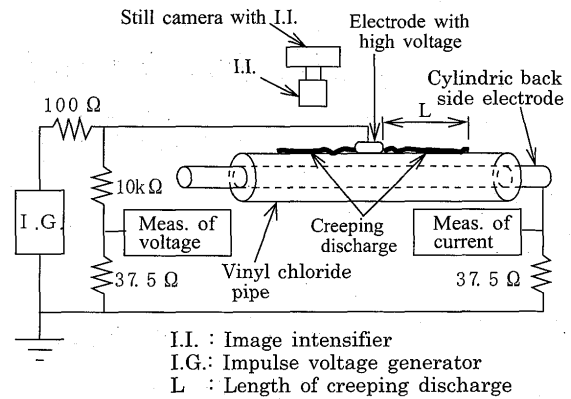


図1 実験回路

Fig.1. Experimental circuit.

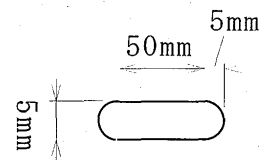


図2 高電圧側電極の形状

Fig.2. Shape of high voltage electrode.

器(IG)により標準雷インパルス電圧を発生させ、円筒誘電体表面の高電圧側電極に印加した。円筒誘電体として、長さ2.0m、外形26mm、内径20mm、比誘電率3.0の塩化ビニールパイプを使用した。背後電極として、仕上がり外径10mm、肉厚1.5mm、長さ2.5mのステンレスパイプを使用した。背後電極は、塩化ビニールパイプ内部に挿入して密着させるとともに放電電流波形観測用の抵抗37.5Ωを通して接地した。図2は、インパルス電圧を印加する高電圧側電極の形状を示す。高電圧側電極は、長さ60mm、直径5mmの銅棒である。その先端は、半径5mmの半球状に加工され、塩化ビニールパイプに軽く接している。

実験に際しては、高電圧側電極にインパルス電圧を1回のみ印加した。今回の実験では、正極性および負極性沿面放電の進展長と進展様相を暗視装置付き静止カメラで観測した。また、放電電流波形は、デジタルオシロスコープで観測した。実験室は空調を行い、気温約20℃、湿度約40%に保ち実験条件を統一した。また、塩化ビニールパイ

プ表面に沿面放電が進展した後は、表面をアルコールで拭き、電荷を除去して残留電荷の影響を排除した。なお、図1の回路図より、高電圧側電極に印加するインパルス電圧の極性と塩化ビニールパイプ上を進展する沿面放電の極性は同一となる。

3. 実験結果および考察

3.1 沿面放電の進展長特性

(a) 正極性沿面放電 図3は、正極性沿面放電における印加電圧波高値と沿面放電進展長の関係を示す。グラフ上のプロットは、10回の測定の平均値を示す。正極性沿面放電は、インパルス電圧の波高値(以下、 V_m と記す) $V_m \approx 30 \text{ kV}$ において進展を開始することがわかる。その後、進展長は、 V_m の上昇と共に単調に増加していく。 $V_m < 50 \text{ kV}$ においては、進展長の増加は緩やかであるが、 $V_m \geq 50 \text{ kV}$ では、 V_m の上昇と共に急増することとなる。

(b) 負極性沿面放電 図4は、負極性沿面放電における印加電圧波高値と沿面放電進展長の関係を示す。グラフ上のプロットは、10回の測定の平均値を示す。負極性沿面放電は、正極性沿面放電の場合と同様に、 $|V_m| \approx 30 \text{ kV}$ において進展を開始することがわかる。その後、進展長は、 V_m の上昇と共に単調に増加していく。図3、4を比較すると、 $|V_m| \leq 40 \text{ kV}$ においては、正極性、負極性沿面放電とも進展長はほぼ同一となる。しかし、 $|V_m| \geq 50 \text{ kV}$ では、負極性沿面放電の進展長の方が、同一の V_m における正極性沿面放電のそれより約1.2倍長くなることがわかる。進展長の増加割合は、正極性沿面放電の場合と同様に、 $|V_m| < 50 \text{ kV}$ においては、緩やかであるが、 $|V_m| \geq 50 \text{ kV}$ では、 V_m の上昇と共に急増することとなる。

3.2 沿面放電の進展様相

(a) 正極性沿面放電 図5(a)、(b)はそれぞれ、高電圧側電極先端、放電先端における正極性沿面放電の典型的な進展様相を示す。同図(a)、(b)はそれぞれ、 $V_m = 50, 70 \text{ kV}$ であり、進展長はそれぞれ、8.1、41.8 cmであった。(a)よ

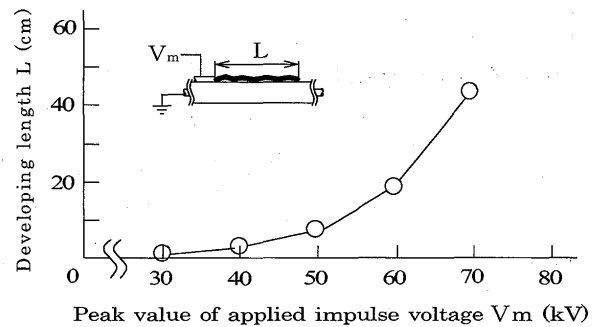


図3 印加電圧波高値—沿面放電進展長特性 (正極性沿面放電)

Fig.3. Relation between length of positive creeping discharge and peak value of applied impulse voltage.

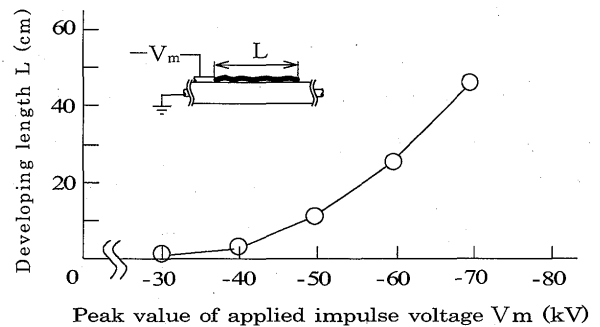


図4 印加電圧波高値—沿面放電進展長特性 (負極性沿面放電)

Fig.4. Relation between length of negative creeping discharge and peak value of applied impulse voltage.

り、正極性沿面放電における高電圧側電極先端の進展様相は、放電の幹をなすリーダ部分から多くの細かいチャンネルが生じ、さらに、チャンネル先端は、円筒誘電体表面から細かくジャンプしながら進展していることがわかる。(b)より、放電先端においても高電圧側電極先端と同様に、放電は誘電体表面を細かくジャンプしながら進展していることがわかる。また、進展途中においても同様の様相が確認された。これらより、正極性沿面放電は、電極先端から放電先端まで進展途中において、その様相は変化せず、放電の幹をなすリーダから細かく分岐したチャンネルが発生し、それらが誘電

体表面を細かくジャンプしながら進展すると言える。

(b) 負極性沿面放電 図6(a)、(b)はそれぞれ、高電圧側電極先端、放電先端における負極性沿面放電の典型的な進展様相を示す。同図(a)、(b)はそれぞれ、 $V_m = -50$ 、 -70 kVであり、進展長はそれぞれ、11.2、46.4 cmであった。

(a)より、負極性沿面放電における高電圧側電極先端の進展様相は、正極性沿面放電とは異なり、放電の幹をなすリーダ部分から細かい筋状の放電が誘電体表面を無数に覆うように密着して進展していることがわかる。(b)より、放電先端においても誘電体表面に密着している様相が確認される。また、進展途中においても同様の様相が確認された。これらより、負極性沿面放電は、電極先端から放電先端まで常に誘電体表面に密着しながら進展し、進展途中でその様相は変化しないと言える。

3.3 沿面放電の電流波形

(a) 正極性沿面放電 図7は、印加電圧波形と正極性沿面放電の典型的な放電電流波形を示す。これは、 $V_m = 70$ kVの場合であり、進展長は、40.6 cmであった。正極性沿面放電の場合、放電電流は、インパルス電圧が高電圧側電極に印加されるとほぼ同時に流出し始め、複数個のパルスを伴うことがわかる。同図における電流の最大値は、8.1 Aであった。また、電流値がゼロに戻る時刻は、正極性沿面放電が進展を停止した時刻を示す。同図の場合、正極性沿面放電の進展時間は $5.2 \mu s$ である。放電の進展長を進展時間で割れば、平均進展速度 v を求めることができる。正極性沿面放電の場合、平均で 7.8×10^4 m/sであった。

(b) 負極性沿面放電 図8は、印加電圧波形と負極性沿面放電の典型的な放電電流波形を示す。これは、 $V_m = -70$ kVの場合であり、進展長は、46.9 cmであった。負極性沿面放電の場合、放電電流は、正極性沿面放電の場合と同様に、インパルス電圧が高電圧側電極に印加されるとほぼ同時に流出し始める。電流波形に複数個のパルスが含まれることは正極性沿面放電の場合と同様である。また、同図の場合、電流の最大値は、 -11.6 Aで

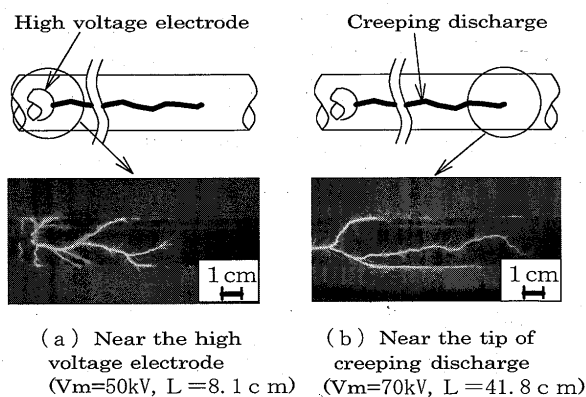


図5 正極性沿面放電の進展様相

Fig.5. Typical aspects of positive creeping discharge.

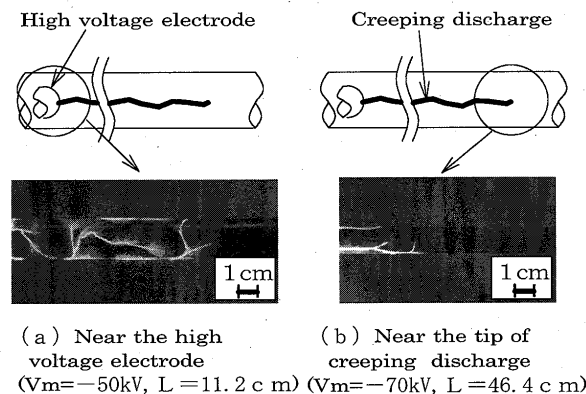


図6 負極性沿面放電の進展様相

Fig.6. Typical aspects of negative creeping discharge.

あり、これは、図7の正極性沿面放電の場合の約1.4倍となる。電流値がゼロに戻る時刻は、正極性沿面放電の場合と同様に、負極性沿面放電が進展を停止した時刻を示す。同図の場合、負極性沿面放電の進展時間は $5.1 \mu s$ であり、図7の正極性沿面放電とほぼ同じ進展時間となる。負極性沿面放電の放電電流の最大値が、正極性沿面放電のそれよりも大きくなるのは、同一 V_m において負極性沿面放電の方が正極性沿面放電よりも進展長が長いと思われる。放電の進展長を進展時間で割れば、負極性沿面放電の平均進展速度 v を求めることができる。負極性沿面放電の場合、平均で 9.2×10^4 m/sであった。これは、正極性沿

面放電の約1.2倍となる。

4. 結論

沿面放電の研究は、高電圧機器の絶縁耐力向上、絶縁破壊の抑制などに関連して工学上極めて重要である。この分野の研究は、従来、平板状の接地側電極の上に誘電体板を密着して置き、その表面に高電圧側電極を配置した状態で観測されることが多い。沿面放電は、これ以外の場合として、円筒誘電体表面に発生するものも存在する。本論文では、高圧配電線のような円筒誘電体が存在する場合に雷サージ電圧が印加されたとき、円筒誘電体表面に発生する沿面放電の進展基本特性の解明を行った。電極構成として、高圧配電線のような円筒状誘電体内部に円柱状背後電極が存在する場合を考え、誘電体表面に電極を配置し、この電極にインパルス電圧を印加した。このとき、誘電体表面を進展する沿面放電の進展長、進展様相、放電電流波形を観測した。その結果、以下のような新しい知見を得た。

(1) 正極性沿面放電

(a) 進展長について

正極性沿面放電は、印加電圧波高値が約30 kVになると進展を開始する。進展長は、印加電圧波高値の上昇と共に単調に増加する。進展長の増加割合は、印加電圧波高値が50 kV未満では緩く、50 kV以上では急増する。

(b) 進展様相について

正極性沿面放電の進展様相は、電極先端から放電先端まで常に誘電体表面を細かくジャンプしながら進展し、進展途中で様相は変化しない。

(c) 放電電流波形

電極にインパルス電圧が印加されるとほぼ同時に電流が流出する。電流波形には複数個のパルスが含まれ、電流の最大値は約8.1 Aであり、流出時間は最長で約 $5.2 \mu\text{s}$ である。沿面放電進展長と放電電流流出時間より求めた平均進展速度は、約 $7.8 \times 10^4 \text{ m/s}$ となる。

(2) 負極性沿面放電

(a) 進展長について

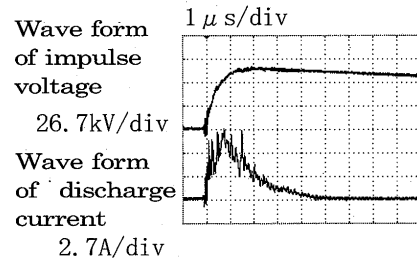


図7 印加電圧波形と正極性沿面放電電流波形例
($V_m = 70 \text{ kV}$ 、 $L = 40.6 \text{ cm}$)

Fig.7. Typical wave forms of applied impulse voltage and electric current of positive creeping discharge.

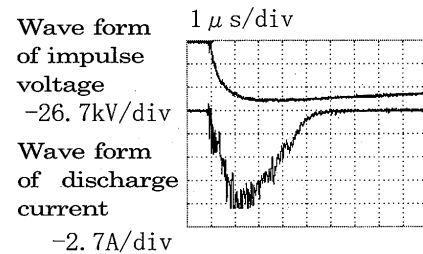


図8 印加電圧波形と負極性沿面放電電流波形例
($V_m = -70 \text{ kV}$ 、 $L = 46.9 \text{ cm}$)

Fig.8. Typical wave forms of applied impulse voltage and electric current of negative creeping discharge.

負極性沿面放電は印加電圧波高値が約 -30 kV になると進展を開始する。進展長は、印加電圧波高値の上昇と共に単調に増加する。進展長の増加割合は、印加電圧波高値が -50 kV までは緩く、 -50 kV 以下では急増する。同一印加電圧波高値において、正極性沿面放電の進展長と比較すると、負極性沿面放電の進展長の方が、約1.2倍長くなる。

(b) 進展様相について

負極性沿面放電の進展様相は、電極先端から放電先端まで常に誘電体表面に密着しながら進展し、進展途中で様相は変化しない。放電は、幹をなす太いリーダから両側に細い筋状の放電が細かく伸びる。

(c) 放電電流波形

電極にインパルス電圧が印加されるとほぼ同時に電流が流出する。電流波形には複数個のパルスが含まれており、これは、正極性沿面放電の場合よりも多くなる。電流の最大値は、約 -11.6A であり、正極性沿面放電より約1.4倍大きい。電流流出時間は最長で約 $5.1\mu\text{s}$ であり、これは正極性沿面放電の場合とほぼ同じである。沿面放電進展長と放電電流流出時間より求めた平均進展速度は、約 $9.2\times 10^4\text{m/s}$ となり、正極性沿面放電より約1.2倍速く進展する。

終わりに、本研究の一部は、日本学術振興会科研費の補助を受けて行われたことを記し謝意を表す。

文 献

- (1) 電気協同研究会：「配電線雷害対策」、電気協同研究、第40巻、第6号（1985）
- (2) 横井良秀、鈴木喜彦：「衝撃電荷図における Back Discharge について」、電気学会雑誌、87巻、3号、pp. 169-174（1979）
- (3) 嶋崎俊行、常安 暢、赤崎正則：「大気中正インパルス電圧印加時におけるアクリル樹脂板の沿面フラッシュオーバー過程」、電気学会論文誌A、102巻、4号、pp. 219-226（1982）
- (4) 嶋崎俊行、常安 暢、赤崎正則：「大気中負インパルス電圧印加時における絶縁板の沿面フラッシュオーバー機構」、電気学会論文誌A、105巻、2号、pp. 71-78（1985）
- (5) 伊藤泰朗・富永 明・宮内秀幸・M. S. A. A. Hammam・杉沼義隆：「ピンがいしに把持された絶縁電線の放電特性」、電気学会論文誌B、103巻、8号、pp. 561-567（1983）
- (6) 高橋 勉・金田輝男・杉沼義隆：「絶縁細線上の沿面ストリーマの進展」、電気学会論文誌A、113巻、7号、pp. 503-510（1993）
- (7) T.Nishi, R.Hanaoka, R.Ishibashi and T.Korin : "Impulse Creeping Discharge Phenomena at Insulator Supporting Point of Aerial Insulated Wire", CEIDP, Annual Report, pp.586-591（1993）

（2006. 11. 24 受理）