架空絶縁電線表面の沿面放電における インパルス電圧印加の影響

正員 西 敏 行 (富山高専)

正員 花 岡 良 一 (金沢工大)

正員 宮 本 紀 男 (金沢工大)

Influence of Applied Impulse Voltage on Creeping Discharges along Aerial Insulated Wire

Toshiyuki Nishi, Member(Toyama National College of Technology)

Ryoichi Hanaoka, Member(Kanazawa Institute of Technology)

Toshio Miyamoto, Member(Kanazawa Institute of Technology)

In high voltage aerial distribution systems, insulated wires are supported by insulators. If overvoltages caused by lightning occur in the central line of an insulated wire, creeping discharges progress along the wire surface from the free end of the binding wire and bring about an accident such as punch-through breakdown, disconnection of wire. The clarification of breakdown phenomena in these insulation systems will contribute to the prevention of such accidents. These creeping discharges can take on complicated phenomena due to the change of the electric field intensity on the wire surface so that the potential of the central line of wire is changed by induced lightning.

In this paper, we report the influence of the voltage change of the central line on lengths and aspects of creeping discharge when a standard impulse voltage is applied to the central line or binding wire.

キーワード：架空絶縁電線，沿面放電，誘導雷，雷インパルス，雷害対策

1. まえがき

高圧架空配電系統において、絶縁電線の支持点では、電線の心線、被覆、がいし、大地などにより複合的な絶縁系が構成される。それ故、その支持点では、雷過電圧の侵入により複雑な放電現象が発生し、電線溶断事故などの災害の原因となる⁽¹⁾。このような断線事故に対しては、電線表面に発生する沿面放電現象の解明が重要となるが、現状では未解明な点が多く存在している。また、電線表面での沿面放電は、平板上を放射状に進展する沿面放電と異なり、円筒面上を直線状に進展するため、観測も容易であり物理的にみても興味ある対象である。

著者らは、これまで架空絶縁電線の心線に誘導雷が侵入した時、電線支持点で発生する絶縁破壊の機構を明らかにするため、がいし表面の絶縁破壊後に電線表面を進展するインパルス沿面放電の特性を検討してきた^{(2)~(5)}。電線表面における沿面放電現象を複雑にしている要因として以下のことが考えられる。まず第一に、架空絶縁電線は、雨、雪などの自然現象にさらされること、第二に、誘導雷が電線の心線に侵入するため沿面放電にとって背後電極となる

心線の電位が放電の進展とともに変化することなどである。前者では、襲雷時における降雨によって電線表面に水滴が付着するため、そのような状況下の沿面放電現象は電線表面が乾燥状態のときよりもさらに複雑になることが予想される。乾燥、湿潤状態における沿面放電現象については、すでに前報⁽⁵⁾において詳細に観測し報告した。本論文では、後者の心線電位変化の影響を明らかにするため以下の実験を行った。すなわち、電線の心線にインパルス電圧を印加した場合とその対比実験としてバインド線にインパルス電圧を印加し、心線を接地してアース電位に固定した場合の両者における沿面放電現象の相違について詳細な観測を行った。前報⁽⁵⁾において、電線表面が乾燥している状態で電線の心線にインパルス電圧を印加した場合、負極性沿面放電の進展長は、印加電圧波高値（以下、 V_m と記す）の上昇に伴って単調に増加する領域と逆に徐々に減少する領域の二つに分けられることを明確にした。これは、 V_m により放電先端の様相が先端密着型と先端ジャンプ型⁽⁵⁾という二つの形態に変化し、それが進展長に影響を及ぼすためである。

本論文においては、電線の心線またはバインド線にそれ

それインパルス電圧を印加した場合の沿面放電の進展長と進展様相の相違を比較検討した。その結果、負極性沿面放電先端に現れる放電形態の変化⁽⁵⁾は、電線の心線にインパルス電圧を印加した場合に現れる特有の現象であることが判明した。すなわち、電線の心線に誘導雷が侵入した場合に発生する電線表面の沿面放電と背後電極がアース電位に固定された場合の沿面放電とは異なる特性を示す。このため、雷害対策を検討する上で、このような特性の考慮が重要であると考えられるのでここに報告する。

2. 実験方法

< 2. 1 > 実験回路 実験回路を図1 (a)、(b)に示す。(a)、(b)ともインパルス電圧発生器(IG)により標準雷インパルス電圧($\pm 1.2/50 \mu s$)を発生させた。今回は、以下の二つの実験を行った。

実験1：電線の心線に電圧印加（誘導雷サージ電圧が心線に侵入した場合を模擬）

誘導雷を模擬するため電線の心線にインパルス電圧を印加し、心線の終端は電圧波形の反射を防ぐためマッチングを行った。また、バインド線を放電電流観測用の抵抗(50 Ω)を通して接地した。実際の架空絶縁電線は、バインド線によってがいしに支持されているが、本実験では、がい

(a) 実験1：心線に電圧印加（誘導雷サージ電圧を模擬）

(b) 実験2：バインド線に電圧印加

図1 実験回路

Fig.1. Experimental circuit.

しがせん絡した状態を想定してがいしを実験回路から取り除いた。

実験2：バインド線に電圧印加（実験1の対比実験）

電線の心線を接地し、バインド線に電圧を印加した。

実験1、2とも正極性、負極性沿面放電の進展長と進展様相を詳細に観測し比較検討した。また、沿面放電は通常、バインド線の両端から進展するが、観測を容易にするため、片側からのみ進展させるようにした。すなわち、(a)、(b)のようにバインド線の片側に銅製ホーンを取り付け、電線との間にパラフィンを充填してシールドした。バインド線は、その先端が垂直に切断された直径5.5mmの合金線（鉛97%、アンチモン3%）であり、電線表面に軽く接している。表1に絶縁電線の仕様を示す。電線の全長は5mで、地上75cmの高さに架設されている。また、実験1、2の場合とも沿面放電進展後は、電線表面をアースし、アルコールで拭き残留電荷を除去した。また、実験室内は空調を行い、気温約20℃、湿度約40%に保ち実験条件を統一して進展長のばらつきを極力抑えた。

なお、実験1の場合は、絶縁電線の心線に正極性のインパルス電圧を印加したときは、バインド線先端から負極性沿面放電が進展し、負極性のインパルス電圧を印加したときは正極性沿面放電が進展することとなる。また、実験2の場合は、バインド線に印加したインパルス電圧の極性と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 > 印加電圧波高値と沿面放電進展長の関係

(I) 正極性沿面放電 図2は心線またはバインド線にインパルス電圧を印加した場合における V_m と沿面放電の進展長の関係を示す。各測定点は、10回の測定の平均値を表し、進展長のばらつきは約±10%であった。同図より心線に電圧を印加した場合の沿面放電（以下、放電（実験1）と記す）とバインド線に電圧を印加した場合の沿面放電（以下、放電（実験2）と記す）の両者に進展長の相違は見られず、いずれも V_m の上昇に伴って単調に増加する。

(II) 負極性沿面放電 図3は心線またはバインド線に電圧を印加した場合における V_m と沿面放電進展長の関係を示す。各測定点は、10回の測定の平均値である。進展長のばらつきは、バインド線に電圧を印加した場合に約±10%であった。また、心線に電圧を印加した場合には V_m

表1 供試絶縁電線

Table 1. Data of insulated wire.

仕上がり 外径 (mm)	全長 (m)	導 体			絶 縁 物		
		公 称 断面積 (mm ²)	構 成 (本/mm)	外径 (mm)	絶縁物 の厚さ (mm)	主材質	比誘 電率
10.0	5.0	22.0	7/2.0	6.0	2.0	ポリエチレン	2.3

図2 印加電圧波高値－沿面放電進展長特性
(正極性沿面放電)

Fig.2. Relation between peak value of applied impulse voltage and length of positive creeping discharge.

図3 印加電圧波高値－沿面放電進展長特性
(負極性沿面放電)

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

＝50 kVのとき約±30%、それ以外の V_m では約±10%であった。放電(実験1)の進展長は、 $V_m \leq 50$ kVにおいて V_m の上昇と共に単調に増加し、 $V_m = 50$ kVで進展長の平均値が最大となる。その後、 $V_m > 50$ kVではしだいに減少する⁽⁵⁾。一方、放電(実験2)の進展長は、 V_m の上昇に伴って単調に増加し、特に、 $V_m \geq 40$ kVでの進展長は、放電(実験1)とは非常に異なった特性を示す。例えば、

進展途中の様相
(バインド線先端より20 cmの位置)
 $V_m = 70$ kV, $L = 29$ cm

図4 正極性沿面放電の進展様相
(バインド線に電圧印加)
Fig.4. Typical aspect of positive creeping discharge.
Impulse voltage was applied to binding wire.

進展途中の様相
(バインド線先端より20 cmの位置)
 $V_m = -70$ kV, $L = 116$ cm

図5 負極性沿面放電の進展様相
(バインド線に電圧印加)
Fig.5. Typical aspect of negative creeping discharge.
Impulse voltage was applied to binding wire.

ば、 $V_m = 80$ kVでは、放電(実験2)の進展長は放電(実験1)のその約11倍となっている。また、 $V_m \leq 40$ kVでは、放電(実験2)と放電(実験1)の進展長はほとんど等しい。さらに、 $V_m = 50$ kVにおける進展長は、放電(実験2)の方が放電(実験1)よりわずかに長くなっている。これらの理由については、＜3. 2＞で詳述する。

また、図2、図3を比較すると、放電(実験1)の場合、 $V_m \approx 65$ kVにおいて正極性沿面放電と負極性沿面放電の進展長の逆転が見られる。一方、放電(実験2)では、負極性沿面放電の進展長の方が正極性沿面放電よりも常に長くなっている。

＜3. 2＞ 沿面放電の進展様相 図4、図5はバインド線に電圧を印加した場合(放電(実験2))における正極性及び負極性沿面放電の典型的な進展様相を示す。これは、静止カメラにイメージインテンシファイヤを装着

図6 正極性沿面放電先端の様相

Fig.6. Typical aspects near the tip of positive creeping discharge. Impulse voltage was applied to binding wire or central line of wire.

図7 負極性沿面放電先端の様相

Fig.7. Typical aspects near the tip of negative creeping discharge. Impulse voltage was applied to binding wire or central line of wire.

することにより撮影されたものである。両図は共にバインド線先端から20 cmの位置における進展様相である。図4は正極性沿面放電(実験2)の進展様相を示し、 $V_m = 70 \text{ kV}$ 、進展長は29 cmであった。沿面放電は電線表面からジャンプしながら進展しており、正極性沿面放電(実験1)で得られる進展形態⁽⁵⁾と同様であった。図5は、負極性沿面放電(実験2)の進展様相を示し、 $V_m = -70 \text{ kV}$ 、進展長は116 cmであった。沿面放電は電線表面に密着して進展し、電線側面に細い筋状の放電が認められる。これは、負極性沿面放電(実験1)の放電先端以外の部分で見られた様相⁽⁵⁾と同様である。すなわち、進展途中における負極性沿面放電の進展様相は、バインド線、心線のいずれに電圧を印加しても変化しないことがわかる。

図6(a)、(b)は正極性沿面放電(実験2)と(実験1)における放電先端の典型的な様相を示したものである。(a)は、バインド線に電圧を印加した場合で、 $V_m = 70 \text{ kV}$ 、進展長は30 cmであった。また、(b)は、心線に電圧を印加した場合で、 $V_m = -70 \text{ kV}$ 、進展長は28 cmであった。両図より正極性沿面放電先端では、バインド線、心線のいずれに電圧を印加しても放電先端は電線表面からジャンプしていることがわかり、進展様相に相違は見られない。すなわち、正極性沿面放電では、放電(実験2)、放電(実験1)のいずれもバインド線先端から放電先端まで電線表面をジャンプしながら進展し、両者には進展様相の相違が認められない。これが、図2に示された正極性沿面放電の進展特性において、放電(実験2)と放電(実験1)に相違が現れない理由になると考えられる。

図7(a)、(b)は、負極性沿面放電(実験2)と(実験1)の放電先端の典型的な様相を示したものである。(a)はバインド線に電圧を印加した場合で、 $V_m = -70 \text{ kV}$ 、進展長は115 cmであった。また、(b)は心線に電圧を印加した場合で、 $V_m = 70 \text{ kV}$ 、進展長は18 cmであった。(a)より負極性沿面放電(実験2)の放電先端は電線表面に密着していることがわかる。一方、(b)より負極性沿面放電(実験1)の放電先端は、 $V_m \geq 70 \text{ kV}$ において常にジャンプしている⁽⁵⁾。バインド線に電圧を印加した場合における負極性沿面放電(実験2)は、 V_m の値に関わらず常に電線側面に細い筋状の放電を伴いながら電線表面に密着して進展し、その密着状態は、放電先端まで連続しており決してジャンプすることはない。前報⁽⁵⁾で報告したように負極性沿面放電が進展するためには、放電先端が電線表面に密着していることが重要である。負極性沿面放電(実験2)は、 V_m の値に関わらず、放電先端が常に電線表面に密着している。このため、進展長は V_m の上昇に伴って単調に増加し、負極性沿面放電(実験1)の場合に見られるような進展長の急変(図3)は現れない。負極性沿面放電(実験1)の放電先端は、 $V_m \leq 40 \text{ kV}$ の電圧範囲で常に電線表面に密着している⁽⁵⁾ため、図3のように、放電(実験2)と放電(実験1)の進展長は等しくなる。 $V_m = 50 \text{ kV}$ では、負極性沿面放電(実験1)において放電先端が電線表面からジャンプして進展長が短くなるような先端ジャンプ型がほぼ50%含まれている⁽⁵⁾。そのため、進展長の平均は、放電先端が常に電線表面に密着する負極性沿面放電(実験2)より(実験1)の方がわずかに短くなる。また、 $V_m \geq 60 \text{ kV}$ では、負極性沿面放電(実験1)において、先端ジャンプ型の発生割合が増える⁽⁵⁾。従って、負極性沿面放電(実験1)の進展長は、進展長の長い先端密着型のみが存在する負極性沿面放電(実験2)よりも短くなる。

図8(a)~(c)はバインド線または心線に電圧を印加した場合における正極性及び負極性沿面放電の進展様相の概略を模式的に示したものである。(a)は正極性沿面放電(実験2)及び(実験1)の場合である。放電はバイ

図8 沿面放電進展様相の模式図

(バインド線または心線に電圧印加)

Fig.8. Schematic diagrams of positive and negative creeping discharges. Impulse voltage was applied to binding wire or central line of wire.

ンド線先端から放電先端まで常にジャンプしながら進展し、電圧をバインド線、心線のいずれに印加してもその進展長、進展様相は変化しない。(b)、(c)はそれぞれ負極性沿面放電(実験2)及び(実験1)の様相の概略である。

(b)の放電(実験2)の様相は、 V_m の値に関わらずバインド線先端から放電先端まで常に電線表面に密着しており、電線側面に細い筋状の放電を伴っている。一方、放電(実験1)は、(c-1)、(c-2)に示すように、放電先端の形態は V_m の値によって先端密着型と先端ジャンプ型の2種類が存在する⁽⁵⁾。

有限半径を有する電線では、沿面放電(実験2)と(実験1)のいずれにおいても電線表面の電界は、放電進展に伴って生ずる電線表面の帯電電荷により変化する。しかし、放電(実験1)では、それ以外に、心線に印加されたインパルス電圧による電界が電線表面に生じ、そのため電線表面上を進展する沿面放電はその電界の影響を受けることになる。 V_m が低いときは、心線電位による電線表面の電界が小さいため、負極性沿面放電(実験1)はその影響を受けず放電先端は電線表面に密着し、進展長、進展様相とも放電(実験2)と同様になる。一方、 V_m が高くなると、

心線電位による電線表面の電界が大きくなるため、負極性沿面放電(実験1)は、その影響によって放電先端が電線表面からジャンプし、進展長は放電(実験2)より短くなる。負極性沿面放電先端が、ジャンプし始めるときの V_m を前報⁽⁵⁾ではジャンプ現象誘発電圧 V_j と定義し、 V_j による電線表面の電界 E_j を表1の電線で求めた結果、 $E_j \approx 19 \text{ kV/cm}$ であった。

放電(実験2)では、心線を接地しバインド線に電圧を印加しているため、電線表面の電界は、沿面放電が進展した部分のみ変化し、沿面放電は外部からの電界によって影響を受けることはない。このように心線に電圧を印加した場合には、心線電位の変化に伴う電線表面電界の変化が沿面放電に影響を及ぼし、それが誘導雷の侵入による電線表面の沿面放電現象を一層複雑にする原因となっている。

<3. 3> 負極性沿面放電(心線に電圧印加、先端ジャンプ型) 先端における放電様相の推移 図9(a)~(e)は、 $V_m=80 \text{ kV}$ での各時刻、各裁断電圧値における負極性沿面放電(実験1)の典型的な放電先端の様相を示す。これは、イメージインテンシファイヤ付き静止カメラにより先端ジャンプ型を形成する沿面放電を電圧裁断法によって各時刻ごとに観測したものである。(a)~(e)は同一の放電ではないが、放電先端の様相が電圧印加の後、時間の経過と共にどの様に変化していくかを知ることができる。図中、 t_0 、 V_0 、 E_0 及び L は、それぞれ電圧裁断時刻、裁断電圧、 V_0 における電線表面の電界⁽⁵⁾、沿面放電進展長を示す。

時刻 $t=0$ で電線の心線に正極性インパルス電圧を印加した場合に、(a)の時刻では、まだバインド線先端から放電の進展は開始されていない。(b)において、放電は既に進展を開始しているが、この時刻ではまだ、放電先端は電線表面に密着したままである。(c)においては、(c-1)のように放電先端が電線表面に密着している場合もあるが、いずれにせよ放電先端にジャンプ現象が現れる電圧はこのときの V_0 付近である。 V_0 による電線表面の電界 E_0 を求めると、 $E_0=19.4 \text{ kV/cm}$ となり、 E_j にほぼ一致している。この電圧値では、放電先端のジャンプの度合はまだ弱く、形状は円弧状となり、密着型からジャンプ型への移行状態にあると言える。(d)においても(d-1)、(d-2)のように放電先端が電線表面に密着している場合と既にジャンプしている場合の両者が存在する。しかし、ジャンプする場合には、(d-2)のように放電先端で激しくジャンプし、このときの電圧値における放電は円弧状ではなく離散的な形態となり複雑な様相を呈している。(e)の時刻ではもはや、放電先端は電線表面に密着せず、激しくジャンプすることとなる。

4. 結論

標準雷インパルス電圧を模擬誘導雷として絶縁電線の心線に印加した場合及びその対比実験としてバインド線に印

図9 負極性沿面放電先端における放電様相の推移
(心線に電圧印加、先端ジャンプ型、 $V_m=80kV$)

Fig.9. Typical change of aspects near the tip of negative creeping discharge. Impulse voltage at $V_m=80kV$ was applied to central line of wire.

加した場合についてバインド線先端から進展する正極性及び負極性沿面放電の進展長と進展様相を詳細に観測した結果、以下のような新しい知見が得られた。

(1) 正極性沿面放電

(a) 進展長について

心線、バインド線のいずれに電圧を印加してもその

進展長に相違は見られず、印加電圧波高値の上昇に伴って単調に増加する。

(b) 進展様相について

心線、バインド線のいずれに電圧を印加してもその進展様相は変化せず、電線表面をジャンプしながら進展する。

(2) 負極性沿面放電

(a) 進展長について

①心線に電圧を印加した場合

印加電圧波高値の上昇とともに進展長の増加する領域と減少する領域が存在する。

②バインド線に電圧を印加した場合

進展長は、印加電圧波高値の上昇に伴って単調に増加する。

(b) 進展様相について

①心線に電圧を印加した場合

印加電圧波高値によって、放電先端が電線表面に密着する場合とジャンプする場合の2通りが存在する。

②バインド線に電圧を印加した場合

印加電圧波高値が変化しても放電先端は常に電線表面に密着し、ジャンプすることはない。

(3) 負極性沿面放電の先端が電線表面からジャンプし、進展長が変化する現象は、心線に誘導雷サージ電圧が侵入する場合のみであり、このことが配電線の支持点近傍における放電現象を複雑にする一因となっている。

(平成8年5月15日受付)

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(昭60-2)
- (2) 西 敏行・櫻野仁志・石橋録造・高嶋 武：「架空絶縁電線のがいし支持点近傍におけるインパルス沿面放電特性」、電学論B, 110, 209(平2-3)
- (3) 西 敏行・櫻野仁志・石橋録造・高嶋 武：「絶縁電線表面における連続インパルス沿面放電の特性」、電学論B, 111, 1269(平3-12)
- (4) T.Nishi, R.Hanaoka, R.Ishibashi & T.Korin: "Impulse Creeping Discharge Phenomena at Insulator Supporting Point of Aerial Insulated Wire", CEIDP, Annual Report, P.586(1993)
- (5) 西 敏行・花岡良一・石橋録造：「架空絶縁電線表面における乾燥、湿潤状態での沿面放電現象」、電学論B, 116, 482(平8-4)

西 敏行 (正員) 1959年3月8日生まれ。83年3月

金沢大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月ユーザック電子工業(株)〔現、(株)PFU〕入社。85年4月富山工業高等専門学校電気工学科助手、93年7月同講師、現在に至る。主として、沿面放電現象に関する研究に従事。

花岡 良一 (正員) 1950年1月12日生まれ。80年3月

金沢大学大学院工学研究科修士課程修了。88年4月金沢工業大学電気工学科講師、89年同助教授、96年同教授、現在に至る。主として、液体誘電体中の電気伝導と絶縁破壊及び電界計算法に関する研究に従事。93年9月～94年8月米国MIT客員研究員。

工学博士。応用物理学会会員、IEEE会員。

宮本 紀男 (正員) 1937年2月11日生まれ。59年3月

金沢大学工学部電気工学科卒業。同年4月三菱電機(株)入社。中央研究所にて、永久ヒューズ、SF₆ガス絶縁変電機器などの開発に従事。80年伊丹製作所開発部長、85年同所光ディスク開発プロジェクト部長、87年産業システム研究所光ディスク開発セ

ンター長、90年金沢工業大学教授。現在に至る。主として、植物が示す神秘的な電磁気現象の研究に従事。工学博士。電気学会進歩賞、科学技術庁長官賞受賞。