

円筒誘電体表面の沿面放電に及ぼすバリアの影響

西 敏 行*

Effect of Barrier on Creeping Discharge along Cylinder Dielectric Surface

NISHI Toshiyuki*

The study of the creeping discharge is very important on the engineering from the viewpoint of the dielectric breakdown prevention. The creeping discharge develops on the dielectric surface, when the abnormal voltage like an inductive lightning surge invades to the equipment inside. Creeping discharge can develop on the plane and the cylinder dielectric surface, and it causes the dielectric breakdown phenomenon. It is necessary to clarify the creeping discharge phenomenon in order to prevent the accidents of dielectric breakdown in the equipment. However, there are many unsolved points in the characteristics of the creeping discharge. The cylinder dielectrics are used for the coating for wires inside a high voltage equipment like the transformer. The creeping discharge develops along the insulated wire surface inside the high voltage equipment, when the inductive lightning surge invades to one. In a high voltage installation, it is important to stop the development of creeping discharge in safety aspect. In this paper, I report the characteristics of creeping discharge which develops along the cylinder dielectric surface with the barrier. It has been clarified that the blocking effect on the development of positive and negative creeping discharges.

キーワード: 沿面放電, 円筒誘電体, バリア, 雷インパルス

1. まえがき

高電圧機器内部に電源ラインから誘導雷サージのような異常電圧が侵入すると、機器内部の絶縁が破壊され、機器の焼損、火災等の危険が生じる。この場合、機器内部に侵入した異常電圧は、機器の接地端子あるいは接地された筐体との間で絶縁破壊を起こす場合が多い。この絶縁破壊は、主に機器内部で発生する沿面放電に起因する。沿面放電は、異常電圧により機器の高電圧側電極と接地側電極を絶縁している誘電体表面で発生する。このとき、沿面放電の進展により両電極間が短絡状態になるか、あるいは、誘電体表面の弱点部で貫通破壊が生じると、短絡電流により機器を焼損する場合がある。このように、沿面放電の発生は、機器の絶縁を脅かすだけでなく、絶縁に関して

重要な役割を担っている誘電体の劣化、エネルギー損失を生じさせる。このため、沿面放電の発生や進展を阻止することは、機器の安全性向上において極めて重要である。

沿面放電に関する研究^{(1)~(4)}は、従来から種々のものが報告されている。しかし、その進展過程、進展長は、多くの要因が複雑に絡み合っているため、不明な点が多いのが現状である。

前報^{(5),(6)}では、沿面放電が発生する誘電体形状の一つとして、配電線の被覆等に使用されている円筒誘電体に着目し、その表面にバリアを設けることにより、沿面放電の進展阻止、進展長抑制にどのような効果があるかを調べた。この場合、バリアの厚さ及び高電圧側電極からバリアまでの距離を一定とし、バリアの高さを変化させたときの沿面放電進展抑制効果を観測し報告した。本研究では、バリアの高さと高電圧側電極からバリアまでの距離を変化させ、バリアの位置による沿面放電進展阻止効果を観測したので報告する。

* 電気工学科
e-mail:nishi@toyama-nct.ac.jp

2. 実験方法

図1は、実験回路を示す。インパルス電圧発生器 (IG)により標準雷インパルス電圧を発生させ、円筒誘電体表面に設置した高電圧側電極に印加した。円筒誘電体として、長さ2.0m、外径2.6cm、内径2.0cm、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、外径1.0cm、肉厚1.5mm、長さ2.5mのステンレスパイプを使用した。これを塩化ビニールパイプ内部に挿入し、放電電流波形観測用の抵抗37.5Ωを通して接地した。沿面放電は、高電圧側電極の両端から電線表面に沿って左右両方向に進展するが、バリアは塩化ビニールパイプ上に1箇所のみ設置した。この状態で、高電圧側電極からバリアまでの距離d、バリアの高さhをそれぞれ変化させ、左方向に進展する沿面放電の進展阻止状況をイメージインテンシファイヤ付き静止カメラで観測した。このとき、沿面放電は右方向へは自由に進展可能である。同図における高電圧側電極からバリアまでの距離dは、d=0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0cmまで変化させた。また、バリアの高さhは、h=1.0, 2.0, 3.0, 4.0cmまで変化させた。

図2は、図1に示される塩化ビニールパイプ表面に設置したバリアの形状を示す。バリアは、厚さ5.0mmのベニヤ板を半径R=2.3, 3.3, 4.3, 5.3cmの円形に加工し、5種類製作した。これらを塩化ビニールパイプの外径と同じ寸法(2.6cm)でくり抜き、塩化ビニールパイプ表面にアクリル系接着剤で固定した。これにより、バリアの高さhを塩化ビニールパイプ表面からh=1.0, 2.0, 3.0, 4.0cmまで変化させることが可能である。

図3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55.0mm、直径5.0mmの銅棒であり、塩化ビニールパイプ表面に軽く接している。また、電極の両端は、半径2.5mmの半球状に加工し、電極先端に電界が集中しないように工夫した。

実験に際して、高電圧側電極に印加電圧波高値(以後、 V_m と記す) $V_m = 70$ または -70 kVの標準雷インパルス電圧を1回のみ印加した。今回の実験では、正極性、負極性沿面放電の進展長、進展様相およびバリアによる進展阻止状況をイメージインテンシファイ

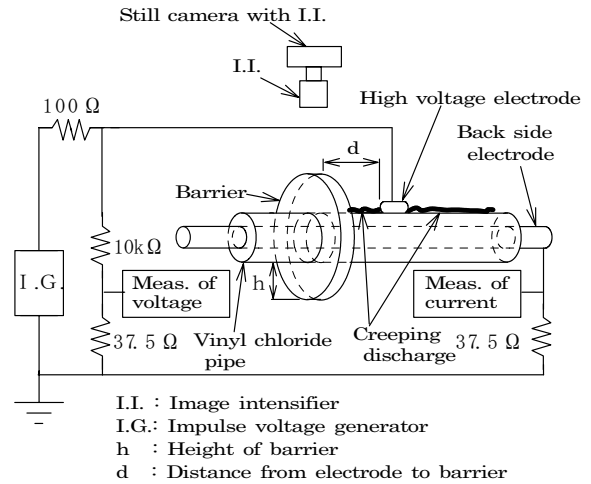
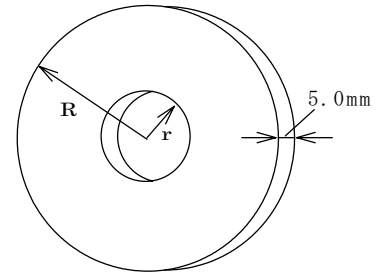


図1 実験回路

Fig.1. Experimental circuit.



r=1.3cm
R=2.3, 3.3, 4.3, 5.3cm

図2 バリアの形状

Fig.2. Shape of barrier.

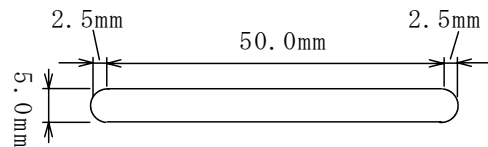


図3 高電圧側電極の形状

Fig.3. Shape of high voltage electrode.

ヤ付き静止カメラで観測した。バリアによる正極性、負極性沿面放電の進展阻止率は、高電圧側電極からバリアまでの距離d、バリアの高さhを種々変化させ、各々の場合について10回ずつ観測を行うことにより求めた。バリアにより沿面放電の進展が完全に阻止された、あるいは、放電がバリアを乗り越えてはいるが、バリア近傍で進展を停止している場合を進展阻止可能な位置、バリアの高さとした。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°C、湿度約 40%に保ち実験条件を統一した。塩化ビニールパイプ表面に沿面放電が進展した後は、表面をエチルアルコールで拭き、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（バリアがない場合）

図4は、塩化ビニールパイプ上にバリアがない場合における正極性、負極性沿面放電の V_m と沿面放電進展長 L 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。同図より、塩化ビニールパイプ上にバリアがない場合、正極性、負極性沿面放電の進展長 L は、 V_m の上昇とともに単調に増加していくことがわかる。この進展長特性については、既報⁽⁵⁾で詳細に報告しているため、ここでは、進展長特性を図示するに留める。

3.2 沿面放電に対するバリア効果

(a) 正極性沿面放電 図5は、塩化ビニールパイプ上にバリアを設置した場合における正極性沿面放電の典型的な進展様相を示す。これは、 $V_m = 70\text{kV}$ 、バリアの高さ $h = 1.0\text{cm}$ 、高電圧側電極からバリアまでの距離 $d = 0\text{cm}$ の場合である。同図より、正極性沿面放電は、バリアを乗り越え進展を継続していることがわかる。このときは、進展長 $L = 39.3\text{cm}$ であった。観測の結果、バリアの高さ $h = 1.0\text{cm}$ 、高電圧側電極からバリアまでの距離 $d = 0\text{cm}$ の場合、バリアによる正極性沿面放電の進展阻止率は 0%であり、進展阻止は不可能であることが判明した。

図6 (a), (b) は、 $V_m = 70\text{kV}$ 、バリアの高さ $h = 1.0\text{cm}$ 、高電圧側電極からバリアまでの距離 $d = 10.0\text{cm}$ の場合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) では、沿面放電が、バリアを乗り越え進展を継続している。このときは、沿面放電の進展長 $L = 20.7\text{cm}$ であった。一方、同図 (b) の場合、沿面放電は、バリアにより進展を阻止されていることがわかる。バリアの高さ $h = 1.0\text{cm}$ 、高電圧側電極からバリアまで

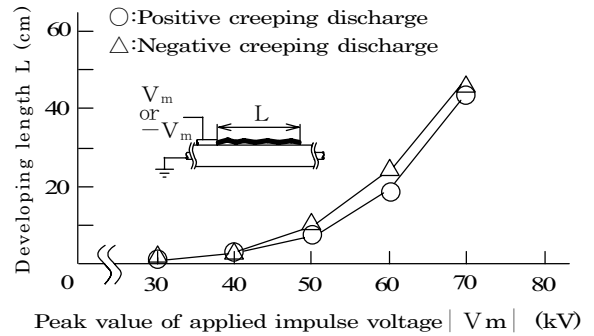


図4 印加電圧波高値－沿面放電進展長特性 (バリアがない場合)

Fig.4. Relation between length of creeping discharge and peak value of applied impulse voltage without barrier.

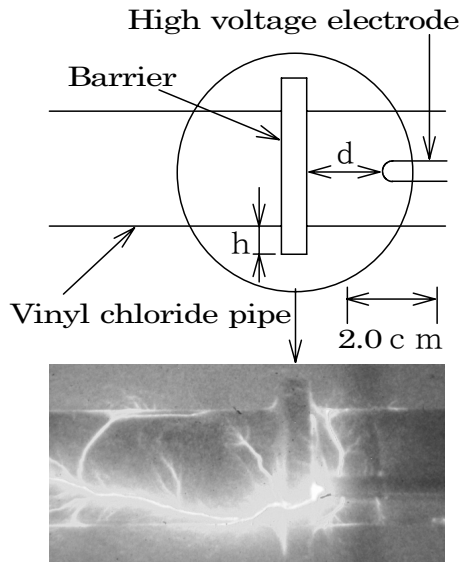


図5 正極性沿面放電の進展様相

($V_m = 70\text{kV}$, $h = 1.0\text{cm}$, $d = 0\text{cm}$, $L = 39.3\text{cm}$)
Fig.5. Typical aspects of positive creeping discharge with a barrier.

の距離 $d = 10.0\text{cm}$ の場合、沿面放電は、バリアにより進展を阻止される場合と阻止されずに進展を継続する場合が観測された。このときのバリアによる進展阻止率は 60%であった。

図7は、 $V_m = 70\text{kV}$ 、バリアの高さ $h = 4.0\text{cm}$ 、高電圧側電極からバリアまでの距離 $d = 10.0\text{cm}$ の場合における正極性沿面放電の典型的な進展様相を示す。同図より、沿面放電は、バリアにより進展を阻止されていることがわかる。観測の結果、このときの進展阻止率は 100%であり、バリアを乗り越えて進展する場合は観測されなかった。

(b) 負極性沿面放電 図8(a), (b)は, $V_m = -70\text{kV}$, バリアの高さ $h = 1.0\text{cm}$, 高電圧側電極からバリアまでの距離 $d = 0\text{cm}$ の場合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)より, 沿面放電は, バリアを乗り越え進展を継続していることがわかる。このときは, 進展長 $L = 32.1\text{cm}$ であった。一方, 同図(b)の場合, 沿面放電は, バリアにより進展を阻止されていることがわかる。バリアの高さ $h = 1.0\text{cm}$, 高電圧側電極からバリアまでの距離 $d = 0\text{cm}$ の場合, 沿面放電は, バリアにより進展を阻止される場合と阻止されない場合が観測された。このときの進展阻止率は20%であった。

図9(a), (b)は, $V_m = -70\text{kV}$, バリアの高さ $h = 1.0\text{cm}$, 高電圧側電極からバリアまでの距離 $d = 5.0\text{cm}$ の場合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)より, 沿面放電は, バリアを乗り越え進展を継続していることがわかる。このときは, 進展長 $L = 23.4\text{cm}$ であった。一方, 同図(b)の場合, 沿面放電は, バリアにより進展を阻止されていることがわかる。バリアの高さ $h = 1.0\text{cm}$, 高電圧側電極からバリアまでの距離 $d = 5.0\text{cm}$ の場合, 沿面放電は, バリアにより進展を阻止される場合と阻止されない場合が観測された。このときの進展阻止率は20%であった。

図10は, $V_m = -70\text{kV}$, バリアの高さ $h = 1.0\text{cm}$, 高電圧側電極からバリアまでの距離 $d = 15.0\text{cm}$ のときの負極性沿面放電の典型的な進展様相を示す。同図より, 沿面放電は, バリアにより進展を阻止されていることがわかる。観測の結果, このときのバリアによる進展阻止率は100%であった。図11は, $V_m = -70\text{kV}$, バリアの高さ $h = 4.0\text{cm}$, 高電圧側電極からバリアまでの距離 $d = 5.0\text{cm}$ の場合における負極性沿面放電の典型的な進展様相を示す。同図より, 負極性沿面放電は, バリアにより進展を阻止されていることが確認できる。観測の結果, このときのバリアによる進展阻止率は100%であった。

図12(a), (b)は, 正極性, 負極性沿面放電において, バリアの高さ h を変化させたときの電極からバリアまでの距離 d と進展阻止率の関係を示す。同図(a)より, 正極性沿面放電の場合, バリアの高さ $h = 4.0\text{cm}$ 以上であれば, 電極からバリアまでの距離 d の値に関わらず

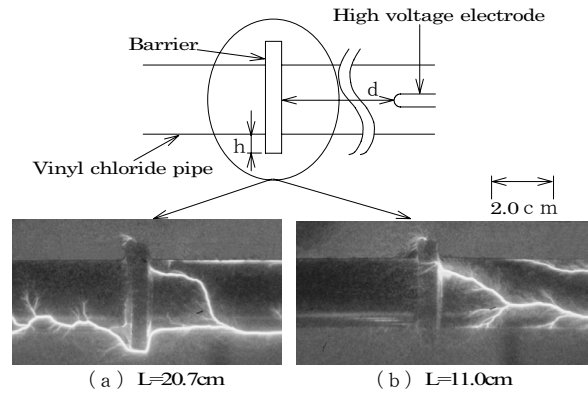


図6 正極性沿面放電の進展様相

($V_m = 70\text{kV}$, $h = 1.0\text{cm}$, $d = 10.0\text{cm}$)

Fig.6. Typical aspects of positive creeping discharge with a barrier.

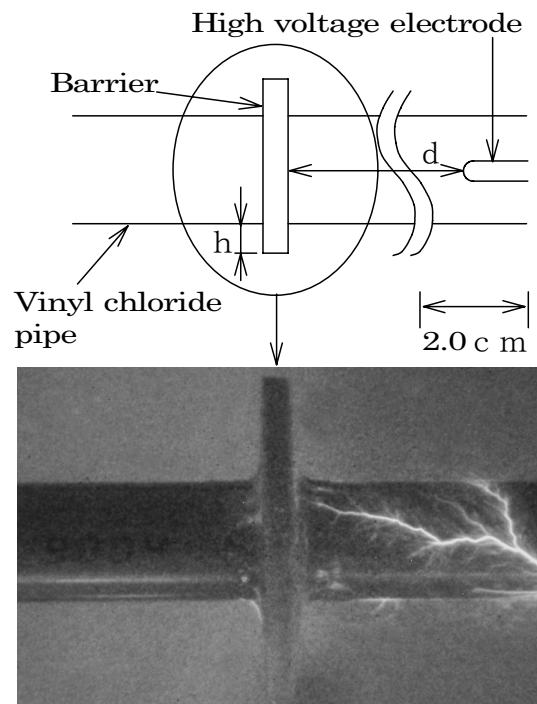
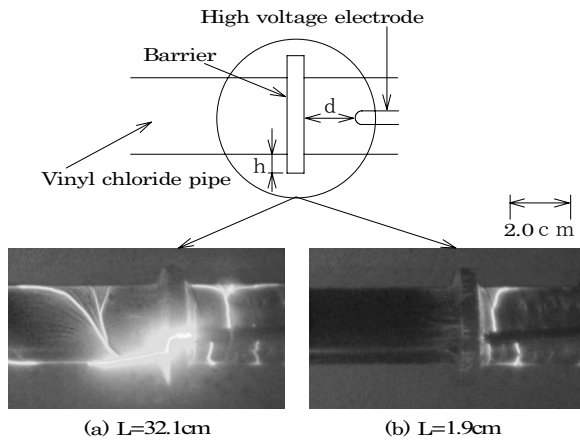


図7 正極性沿面放電の進展様相

($V_m = 70\text{kV}$, $h = 4.0\text{cm}$, $d = 10.0\text{cm}$, $L = 11.0\text{cm}$)

Fig.7. Typical aspects of positive creeping discharge with a barrier.

進展阻止率が100%になる。また, $d = 20.0\text{cm}$ 以上であれば, h の値に関わらず進展阻止率が100%になる。同図(b)より, 負極性沿面放電の場合, バリアの高さ $h = 3.0\text{cm}$ 以上であれば, d の値に関わらず進展阻止率が100%になる。また, $d = 10.0\text{cm}$ 以上であれば, h の値に関わらず進展阻止率が100%になる。これらよ

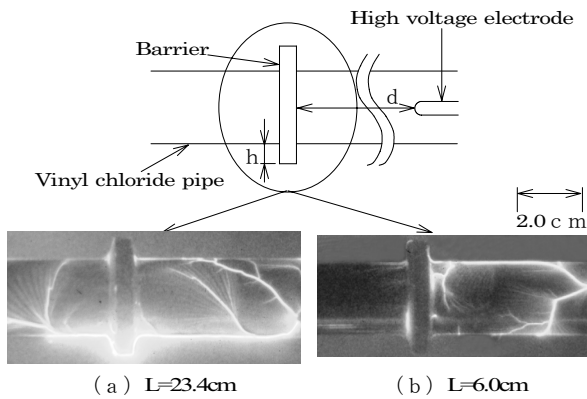


(a) L=32.1cm (b) L=1.9cm

図8 負極性沿面放電の進展様相

($V_m = -70\text{kV}$, $h = 1.0\text{cm}$, $d = 0\text{cm}$)

Fig.8. Typical aspects of negative creeping discharge with a barrier.



(a) L=23.4cm (b) L=6.0cm

図9 負極性沿面放電の進展様相

($V_m = -70\text{kV}$, $h = 1.0\text{cm}$, $d = 5.0\text{cm}$)

Fig.9. Typical aspects of negative creeping discharge with a barrier.

り、正極性、負極性沿面放電ともに進展阻止率を100%にするためには、バリアの高さを4.0cm以上にするか、あるいは、電極からバリアまでの距離を20.0cm以上にすれば良いことがわかる。

4. 結論

直線状背後電極を有する円筒誘電体表面で発生する沿面放電現象をイメージインテンシファイア付き静止カメラで観測し、誘電体表面に設けたバリアによる進展阻止効果を調べた。実験では、インパルス電圧発生器によって波高値70または-70kVの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。このとき、バリアの高さおよび高電圧側

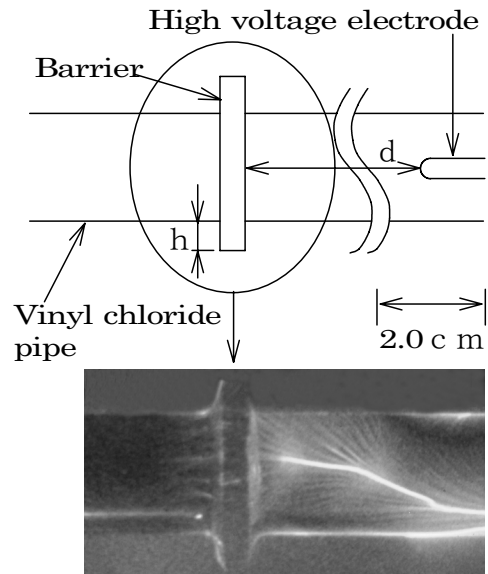


図10 負極性沿面放電の進展様相

($V_m = -70\text{kV}$, $h = 1.0\text{cm}$, $d = 15.0\text{cm}$)

Fig.10. Typical aspects of negative creeping discharge with a barrier.

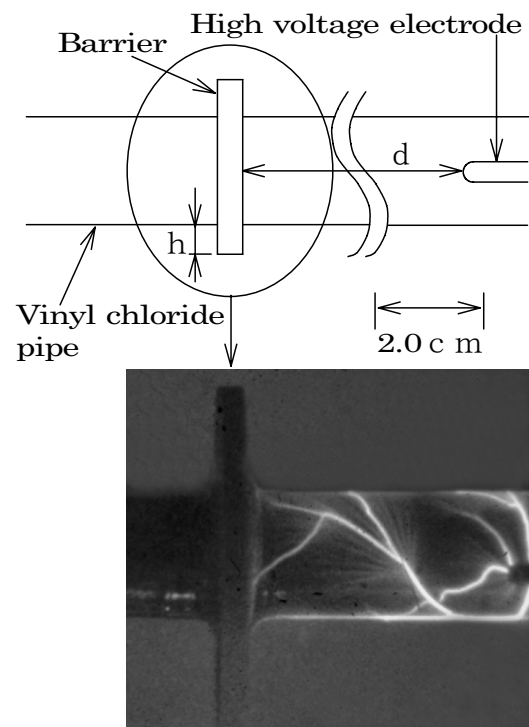


図11 負極性沿面放電の進展様相

($V_m = -70\text{kV}$, $h = 4.0\text{cm}$, $d = 5.0\text{cm}$)

Fig.11. Typical aspects of negative creeping discharge with a barrier.

電極からバリアまでの距離を変化させ、円筒誘電体表面を進展する正極性、負極性沿面放電の進展長、進

展様相および進展に対するバリア効果を観測し検討した。その結果、以下のような新しい知見が得られた。

(1) 正極性沿面放電

- ・印加電圧波高値 70kVにおいて、バリアによる進展阻止効果は、負極性沿面放電よりも小さい。
- ・電極からバリアまでの距離に関わらず、バリアの高さが 4.0cm以上で有効な進展阻止効果が得られる。
- ・バリアの高さが 1.0cm以上のとき、電極からバリアまでの距離が 20.0cm以上で有効な進展阻止効果が得られる。

(2) 負極性沿面放電

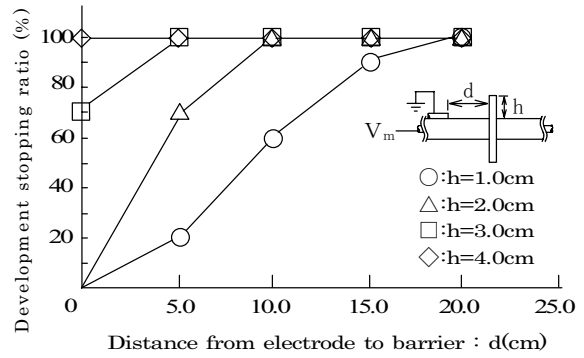
- ・印加電圧波高値 -70kVにおいて、バリアによる進展阻止効果は、正極性沿面放電より高い。
- ・電極からバリアまでの距離に関わらず、バリアの高さが 3.0cm以上で有効な進展阻止効果が得られる。
- ・バリアの高さが 1.0cm以上のとき、電極からバリアまでの距離が 10.0cm以上で有効な進展阻止効果が得られる。

(3) 沿面放電の進展阻止に対しては、放電の極性に関わらず、以下のように結論づけられる。

- (a) 沿面放電の進展を電極から任意の位置で阻止するためには、バリアの高さを 4.0cm以上にすると効果的である。
- (b) バリアの高さに制限がある場合は、バリアの高さを少なくとも 1.0cm以上確保し、電極からバリアまでの距離を 20.0cm以上にすれば有効な進展阻止効果が得られる。

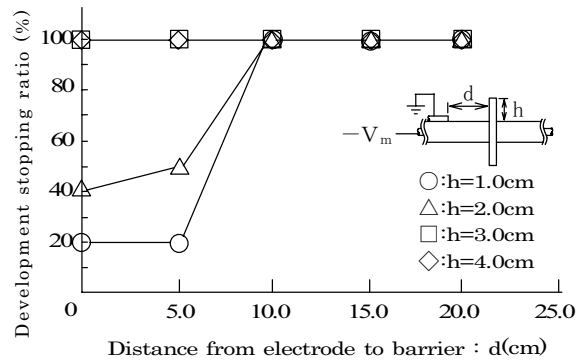
4. 謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(c), No.17560275)の補助を受けて行われたことを記し謝意を表す。また、本研究を遂行するにあたり、熱心に実験を行った本校卒研生池上直毅君に感謝する。



(a) 正極性沿面放電

(a) Positive creeping discharge. (Vm=70kV)



(b) 負極性沿面放電

(b) Negative creeping discharge. (Vm=-70kV)

図 12 電極からバリアまでの距離dと
進展阻止率の関係

Fig.12. Relation between development stopping ratio and distance from electrode to barrier.

5. 参考文献

- (1) 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)
- (2) 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)
- (3) 伊藤泰朗・富永 明・宮内秀幸・M. S. A. A. Hammam・杉沼義隆:「ピンがい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)

- (4) 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)
- (5) 西 敏行:「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」, 富山工業高等専門学校紀要, 41 巻, pp. 15-20 (2007)
- (6) 西 敏行:「直線状背後電極を伴う誘電体表面の沿面放電に対するバリア効果」, 富山工業高等専門学校紀要, 42 巻, pp. 1-6 (2008)

(2008. 12. 26 受理)