二つの絶縁物壁面が作る微小間隙内を貫く 交流絶縁破壊

正 員 山 野 芳 昭 (千葉大)

AC Breakdown through Narrow Chink between Two Insulating Walls.

Yoshiaki Yamano, Member (Chiba University)

AC breakdown and ac partial discharge through narrow chink between two insulating walls were investigated, using a (knife edge)/(plane) electrode configuration. The chink was formed by two plane walls of PE insulator blocks. The maximum electrode distance studied was 70mm. The experiments were performed in air controlled at 20 – 25°C and 40 – 50%RH.

AC breakdown characteristics depend on width(s) of the chink: In a range of the width(s) about $1\text{mm} < s < 20\text{mm}$, the breakdown voltage decreases with the decrease in the width(s); In the range between about $100\mu\text{m} < s < 1\text{mm}$, the voltages are higher than that at 2mm of the width(s); In the range between about $15\mu\text{m} < s < 100\mu\text{m}$, the voltage decreases with the decrease in the width(s). It was found that these breakdown characteristics are corresponding to the dependence of ac partial discharge characteristics on the width of the chink: AC breakdown voltage is decreased with increases in the number and the maximum strength of positive pulse in ac partial discharges generated near the positive peak of ac applied voltage. The discussion was focused on the dependence of the number and the strength of the positive pulse on the width of the chink.

キーワード：交流絶縁破壊，沿面絶縁，微小間隙，部分放電

1. はじめに

高電圧機器等における複合絶縁化が促進されるにともない^(1, 2)、二つの固体絶縁物が互いに接触する箇所が増加する。高電圧ケーブルのジョイント部^(3, 4)にも二つの固体絶縁物(絶縁被覆層)の接触がみられる。通常このような接触部は絶縁物表面同士を密着させて、接触部に間隙ができないような措置が採られている⁽³⁾。絶縁物表面同士が完全に密着している限り、密着箇所の絶縁耐力はあまり低下しない⁽⁴⁾。しかし、運転中の振動、熱、絶縁物の経年劣化などが原因となって、接触部に微小な間隙が生じる場合がある。このような微小間隙を構成する絶縁物壁面に沿って電界が印加されていると、壁面に沿って部分放電が進展し、絶縁耐力の低下を招くことが予想される。

絶縁物同士が作る微小間隙は、二つの絶縁物表面が近い距離に接近した状態と見なすことができる。絶縁物表面上に発生する沿面部分放電の場合、沿面部分放電の伸びは絶縁物表面に帯電・蓄積する電荷(沿面部分放電によって生じた電荷)の分布状態に大きく影響を受ける⁽⁵⁾。それに伴って、沿面絶縁耐力も大きく変化する。直流やインパルス課

電の場合、帯電・蓄積する電荷はおおむね単極性であるので、電荷の帯電・蓄積が沿面部分放電の伸びに与える影響も比較的予想しやすい。一方、交流課電の場合は、印加電圧の極性が時間的に変化するので、帯電・蓄積する電荷の分布状態が複雑となり、それに伴って部分放電の発生形態も複雑に変化を受ける。たとえば、交流沿面部分放電の発生形態や絶縁物表面に帯電する電荷(部分放電によって生じたもの)の分布状態は絶縁物の種類に依存し、絶縁物の種類によっては絶縁物表面を伸びやすい形態の交流部分放電が発生し、交流沿面絶縁耐力も大きく低下する⁽⁶⁾。微小間隙内の壁面に沿って発生する部分放電の伸びや絶縁破壊も、間隙を形成する絶縁物壁面に帯電・蓄積する電荷の影響を受けるものと考えられる。しかし間隙を形成する二つの絶縁物壁面の距離が短くなると、二つの絶縁物壁面に帯電・蓄積した電荷が狭い空間を伸びる部分放電に作用を及ぼすことになる。また微小間隙の絶縁物壁面に帯電・蓄積する電荷の状態は、大気中におかれた絶縁物表面における帯電・付着状態と異なることも考えられる。したがって微小間隙内の壁面を伸びる交流部分放電および交流絶縁破壊特性は、通常の交流沿面部分放電の特性からは単純には予想できない可能性がある。

る。微小間隙を形成する絶縁物壁面に沿って生じる交流部分放電や交流絶縁破壊について検討した例は、過去にはほとんど報告されていない。これと似た例としては、絶縁物中のトリ細管を模擬する目的で固体絶縁物中に細管を設け、細管の内壁に沿った絶縁耐力特性についての報告がある⁽⁷⁻⁹⁾。しかし、これらの論文では交流課電における部分放電特性や破壊電圧特性に関する実験結果について詳しく検討されておらず、微小間隙に沿った交流破壊特性を予測することは難しい。このようなことから、本論文では不平等電界下で(部分放電が発生しやすい状況)、二つの固体絶縁物を作る微小間隙を貫く交流絶縁破壊について、間隙幅を変化させながら、交流部分放電の発生特性と関連付けて検討を行った。

2. 実験方法

図1に実験装置ならびに試料形状の概略を示す。接地平板電極の上に二つの絶縁物のブロックを置き、図1(a)に示す微小間隙を構成したものを試料とした。使用した絶縁物は低密度ポリエチレン(PE)(60mm×40mm×d, d:電極間隔)である。電極間隔(d)の最大長は70mmである。PEブロックはフライス盤で削り出した後、貴金属用の研磨布を用いて研磨した。微小間隙を構成する二つのPEブロック壁面は、平均粗さ $\pm 0.4\mu\text{m}$ 、最大粗さ $\pm 2.5\mu\text{m}$ 以内(表面粗さ計にて測定、測定精度: $0.01\mu\text{m}$)に仕上げた。PEブロック各面の平行度および寸法の規定値に対する偏差をマイクロメータおよびダイヤルゲージによって測定した結果、それらは壁面の最大粗さ以内であった。

また絶縁物試料として、図1(b)のように絶縁物ブロックの一部を切りとって空間を作り、微小間隙と空間とを高電圧刃形電極と接地平板電極との間に直列に配置したものを用いた。この試料における放電路は、刃形電極-微小間隙-空間を通り接地電極へ至る。このような試料を用いた主な理由は、高電圧刃形電極先端から離れた場所における絶縁物壁面の有無が絶縁破壊特性に及ぼす影響を調べるためである。

微小間隙の幅(s)は $15\mu\text{m}$ ~20mmの範囲で変化させた。間隙幅の調整に際して、設定する間隙幅と同じ厚さを持つ絶縁性フィルム片(あるいは絶縁物)二枚を、スペーサとして、間隙を構成するブロック面に挟んだ後、PEブロックを接地平板電極に固定した。スペーサの形状及び挿入位置を図1(c)に示す(図は代表例として空間が存在しない試料の場合を示している)。間隙にスペーサを挟むことによって、放電特性が変化しないことは確認してある。

交流(50Hz)高電圧を印加する電極として、刃形電極(図1(a))(オルファ(株)製、品番:XB56, 材質:SK-2炭素工具鋼)を使用した。不平等電界を形成させるには、一般には針電極の使用も考えられる。しかし針電極を使用した場合、間隙幅が狭くなると、針電極先端を間隙の中心に配置するのが困難となる理由から、本実験では刃形電極を用いた。使用した刃形電極の両端は、そこからフラッシュオーバーが生じな

図1 測定装置および試料

(a)--測定装置および空間の存在しない試料、
(b)--空間の存在する試料、(c)--スペーサと挿入位置(空間の存在しない試料の場合)、
Q:間隙長、s:間隙幅、d:電極間隔

Fig.1. Experimental Apparatus and Specimen.

(a)-- Experimental apparatus and specimen without space, (b)-- Specimen with space, (c)-- Spacer and its position.

Q:Length of chink, s:Width of chink, d:Electrode distance.

いように、丸みをもたせてある。交流破壊電圧の測定では、まず刃形電極への交流印加電圧を一定速度(300V/sec)で上昇させて、破壊に至った時点の印加電圧の値を測定した。同一条件の試料10組を用い、各試料毎に1分間隔で連続10回の測定を行った。測定した値(データ数=100)を平均して交流破壊電圧を求めた。なお、放電による試料の劣化を防ぐため、絶縁破壊に起因して0.3A以上の電流が流れると10ms以内に交流印加電圧が遮断できるようになっている。

部分放電パルスの測定では、発生パルス数および放電電荷(見かけの放電電荷)と印加電圧の位相との関係を求めた。図1(a)に示す検出インピーダンスによって検出した電流信号は、増幅器を経由してデジタルオシロスコープに入る。交流印加電圧1サイクル分の電流波形信号をデジタルオシロスコープ内で数値化し、パーソナルコンピュータへ取り込んだ。1つの条件の試料につき、この操作を5回(印加電圧にして任意の5サイクル)繰り返した。5サイクル分の測定結果を合計して、部分放電パルスの発生する印加電圧の位相と放電電荷との関係を求めた。

また、微小間隙内に発生する交流部分放電によって間隙を構成する絶縁物壁面に帯電・蓄積する電荷の分布状態をダストフィギュアによって観測した。使用した帯電粉は、正帯電部分に赤色粉が、負帯電部分に青色粉が付着するもの

である⁽¹⁰⁾。

すべての実験は、温度20～25℃、湿度45～50%にコントロールされた室内で行った。

3. 実験結果

<3・1> 交流絶縁破壊特性 図2に交流絶縁破壊電圧の測定結果を示す。測定値のばらつきは測定値の±5%以内であったので、図中には、煩雑さを防ぐため、ばらつき範囲を特には示していない。

まず空間が存在しない場合(図1(a)の試料)における交流破壊電圧と間隙幅(s)との関係について説明する。図2中には、その代表例として電極間隔(d)が50mmの場合について示してある(図中の曲線A)。間隙幅(s)の変化に伴って交流破壊電圧は以下のように変化する。すなわち、間隙幅(s)の範囲がほぼ $1\text{mm} < s < 20\text{mm}$ の領域(A_s 領域と呼ぶ)においては、 s を狭くすると交流破壊電圧は低下する。ほぼ $100\mu\text{m} < s < 1\text{mm}$ の領域(B_s 領域と呼ぶ)における交流破壊電圧は、 $s=2\text{mm} \sim 3\text{mm}$ のときと比べて高い値を示す。およそ $15\mu\text{m} < s < 100\mu\text{m}$ の領域(C_s 領域と呼ぶ)では、 s を狭くすると、交流破壊電圧は低下する。以上のように、空間が存在しない試料における交流絶縁破壊電圧と間隙幅(s)との関係は、三領域の s で異なる傾向を示すことがわかった。

次に空間が存在する場合(図1(b)の試料)について説明する。電極間隔(d)が一定の状態の間隙長(Q)を短くすると、前述した“ s の三領域で交流破壊電圧特性が異なる傾向”が薄れてくる。本実験の電極間隔(d)の範囲において、 Q が約 $(1/2)d$ よりも長い場合、たとえば図2の $Q=15\text{mm}$ 、 3mm の特性が示すように、 s を狭くすると交流破壊電圧はおおよそ

A_s 領域でのみ低下する傾向を示すようになる。なお実験を行った s の範囲においては、 Q を短くすることによって、交流破壊電圧は低下する傾向を示す。

以上のように、交流絶縁破壊特性の間隙幅(s)に対する依存性を、三つの領域の s (A_s 、 B_s および C_s 領域)に分けて説明した。しかし、図2からもわかるように、交流絶縁破壊特性は各 s の領域の境界を境に明確に変化するわけではない。本論文では、論旨を分かりやすくするために、便宜上 s を三つの領域に分けて特性の説明を行う。

図2には代表例として電極間隔(d)=50mmの場合について示したが、上述したような交流破壊電圧の間隙幅(s)に対する依存性および間隙長(Q)に対する依存性は、 $15\text{mm} < d < 70\text{mm}$ の範囲で観測される。

絶縁破壊発生時の交流印加電圧の位相をデジタルオシロスコープで観測したところ、実験を行った範囲における絶縁破壊は、すべて交流印加電圧の正のピーク付近(印加電圧の位相で $(2\pi/5) \sim (3\pi/5)$ の範囲)で発生している。

<3・2> 交流部分放電特性 図3に空間が存在しない試料(図1(a))における交流部分放電の放電電荷(見かけの放電電荷)と印加電圧位相との関係を示す。図は印加電圧が27kVのときの結果である。この印加電圧値は、間隙幅(s)=15 μm 、電極間隔(d)=50mmにおける交流破壊電圧の約95%の値に相当する。また図には、放電電荷が $\pm 2 \times 10^{-10}\text{C}$ 以上のパルスについて表示した。

図3のデータは、微小間隙以外の場所における部分放電も一緒に計測している。しかし、微小間隙が存在しない状態(対向する二つのPEブロック壁面同士を完全に接触させた状態)で計測される部分放電は、その発生頻度及び放電電荷ともに、微小間隙が存在するときに計測される値の20%以下であった。

図3の(a)、(b)はそれぞれ s が20mmおよび2mmの場合のもので、これらは A_s 領域($1\text{mm} < s < 20\text{mm}$)での特性を示している。この2つの図を比較するとわかるように、 s が狭くなるにともなって、交流印加電圧の正ピーク付近で発生する正パルス数、放電電荷ともに多くなる傾向を示す。負パルスについては特に顕著な変化は認められない。図3の(c)は B_s 領域における発生パルス特性の代表例を示したものである。 $s=2\text{mm}$ (図3(b): A_s 領域)の場合と比べると、交流印加電圧の正ピーク付近で発生する正パルス数、放電電荷ともに少なくなっている。負パルスについては A_s 領域と比較しても、特に顕著な変化は認められない。図3の(d)は C_s 領域における発生パルス特性の代表例を示したものである。 B_s 領域の場合(図3(c))と比べると、交流印加電圧の正ピーク付近で発生する正パルス数、放電電荷ともに多いことがわかる。また、交流印加電圧の負ピーク付近では放電電荷の大きい負パルス($5 \times 10^{-10}\text{C}$ 以上)の発生が見られる。このような放電電荷の大きい負パルスの発生は C_s 領域のみで観測される。図3には代表例として電極間隔(d)が50mmの場合について示しているが、同様の傾向が $15\text{mm} < d < 70\text{mm}$ の範囲で観測される。

図2 交流破壊電圧と間隙幅(s)との関係
電極間隔(d)=50mm, Q :間隙長, A:空間の存在しない試料の特性

Fig.2. Relations between ac breakdown voltage and width(s) of chink.

Electrode distance (d)=50mm, Q :Length of chink, A:Specimen without space.

図3 交流部分放電パルスの発生特性
 s : 間隙幅, Q : 間隙長, d : 電極間隔, V : 印加電圧
 (印加電圧5サイクル分の測定結果を合計してプロットした。)
 Fig.3. Characteristics of ac partial discharges,
 s : Width of chink, Q : Length of chink, d : Electrode distance, V : Applied voltage,
 (Sum totals of pulses in five cycles of ac applied voltages are plotted.)

図4 交流正パルスの発生数(N_p)と間隙幅(s)との関係
 (N_p は印加電圧5サイクル分の測定結果を合計したもの) Q : 間隙長, V : 印加電圧
 Fig.4. Relations between number of positive pulses and width of chink under ac applied voltage.
 (N_p is sum totals of pulses detected in five cycles of ac applied voltages)
 Q : Length of chink, V : Applied voltage.

絶縁破壊は、実験を行ったすべての s の範囲で交流印加電圧の正ピーク付近で発生していることを考えると、正ピーク付近で発生する正部分放電パルスの発生特性と交流絶縁破壊特性とは密接な関係にあるものと考えられる。そこで、交流印加電圧の正ピーク付近($(2/5)\pi < \theta < (3/5)\pi$, θ : 交流印加電圧の位相角)で発生する正パルスの発生数(N_p)および最大放電電荷(Q_m)と間隙幅(s)との関係を図4、図5に示した。 N_p は放電電荷が $1 \times 10^{-9}C$ 以上の正パルスの発生数である。(発生頻度(n)に換算すると $n = N_p \times 10$ (個/秒)である。) N_p , Q_m ともに、破壊電圧の約95%の印加電圧における値である。図4、図5に示す $Q = 50mm$ の特性は空間

図5 交流正パルスの最大放電電荷(Q_m)と間隙幅(s)との関係
 (Q_m は印加電圧5サイクル分の交流正パルスの中での最大放電電荷を示す。)
 Q : 間隙長, V : 印加電圧
 Fig.5. Relations between the maximum charge quantity of positive pulse and width of chink under ac applied voltage.
 (Q_m is the maximum charge quantity in positive pulses detected in five cycles of ac applied voltage)
 Q : Length of chink, V : Applied voltage.

が存在しない試料(図1(a))の場合であるが、空間が存在する試料(図1(b))であっても、本実験の電極間隔(d)の範囲において、 Q が約 $(1/2)d$ よりも長いと $Q = 50mm$ の特性と同様の傾向を示す。また $Q = 3mm$ の特性は、空間が存在する試料で $Q < \text{約}(1/2)d$ の範囲での特性の代表例である。

図4、図5に示すように、空間が存在しない試料($Q = 50mm$)および空間が存在する試料($Q = 3mm$)ともに、 A_s , B_s , C_s の各領域での N_p と Q_m の変化特性は、図2に示した交流破壊電圧の変化特性と相関性が見られる。すなわち、 $Q =$

50mmおよび $Q=3\text{mm}$ の両試料とも、 N_P および Q_M が多くなると、交流破壊電圧は低下している。これらのことから、交流印加電圧の正ピーク付近で発生する正部分放電パルスの発生数(N_P)および放電電荷(Q_M)が増加すると、それに起因して交流破壊電圧が低下することが考えられる。

4. 検 討

本項では、交流部分放電の発生特性の間隙幅(s)への依存性について検討する。まず A_s 領域について考える。この領域では、図4、図5に示すように、空間が存在しない試料(図1(a))および空間が存在する試料(図1(b))ともに、 s が狭くなると N_P と Q_M は増加している。言い替えると、 $Q=3\text{mm}$ の状態であっても s が狭くなると N_P と Q_M は増加する。すなわち、トリプルジャンクション(電極-絶縁物壁面-気体が接触する部分)が存在していれば、間隙幅 s を狭くすることにより、 N_P と Q_M が増加していることになるであろう。一般に、トリプルジャンクション部における部分放電の発生密度は、他の部分よりも高い。 A_s 領域で s を狭くすることは、二つのトリプルジャンクション部が1mm程度まで接近することである。二つのトリプルジャンクションが接近する(s を狭くする)ことによって電極先端近傍の部分放電の密度が高くなり、その結果として N_P と Q_M を増加させるものと考えられる。

次に B_s 領域および C_s 領域について考える。3-2項で説明したように(図4、図5)、 B_s 領域および C_s 領域における N_P と Q_M の変化は、間隙長(Q)が長いとき(本実験においては $Q>\text{約}(1/2)d$ の範囲)にのみ観測される。すなわち、微小間隙を構成する絶縁物壁面が電極先端から離れた場所に存在することが B_s および C_s 領域での N_P と Q_M の変化に関与している可能性が高い。 B_s および C_s 領域では、微小間隙の幅が1mm以下と狭いため、間隙内を通る部分放電の N_P と Q_M は対向する二つの絶縁物壁面に蓄積した電荷の影響を受けやすくなるものと考えられる。そこで、絶縁物表面に帯電・蓄積する電荷の状態をダストフィギュアによって観測した。

図6は微小間隙を構成する絶縁物壁面のダストフィギュアであり、 B_s および C_s の各領域のもの(それぞれ $s=200\mu\text{m}$ および $s=15\mu\text{m}$)を示している。ダストフィギュアは、部分放電が発生している状態(印加電圧は図3の測定時と同じ値で、破壊電圧の約95%)で印加電圧を遮断した後、作成したものである。交流印加電圧の遮断は、正→負および負→正のゼロクロスポイント(図中ではそれぞれ(+)(-), (-)(+)と標記)で行った。 $s=200\mu\text{m}$ の場合(B_s 領域の場合)、交流印加電圧の正→負のゼロクロスポイントでは赤色粉の付着(正電荷の帯電(図中のP))が多く観測される。負→正のゼロクロスポイントでは、電極との接触部(写真のJ)付近にわずかに青色粉の付着(負電荷の帯電(図中のN))が観測されるが、電極との接触部から離れた絶縁物壁面のほとんどの部分で赤色粉が付着(正電荷の帯電(図中のP))している。すなわち交流正部分放電によって帯電した正電荷のうち、電極との接触部(図中のJ)から離れた絶縁物壁面に帯電した

図6 ダストフィギュア

電極間隔(d)=間隙長(Q)=50mm, 印加電圧=27kV
P:正電荷の帯電, N:負電荷の帯電, J:刃形電極との接触点

Fig.6. Dust figures

Electrode distance(d)=Length of chink(Q)=50mm,
 $V=27\text{kV}$, P:Positively charged site,
N:Negatively charged site, J:Point where knife edged electrode is attached.

正帯電電荷のほとんどは、次に発生する交流負部分放電で中和されずに残っていることを示しているものと考えられる。この状態では、次に発生する交流正部分放電は絶縁物壁面に残留している正帯電電荷の影響を受けて発生・進展が抑制されるものと考えられる。

一方、 $s=15\mu\text{m}$ (C_s 領域)における負→正のゼロクロスポイントでは、電極との接触部から離れた絶縁物壁面で正・負の両方の電荷(図中のPおよびN)の帯電が観測される。すなわち、 C_s 領域においては、交流負部分放電による正帯電電荷の中和ならびに負電荷の帯電が、 B_s 領域よりも優勢に行われていることを示唆しているものと考えられる。このことは、部分放電特性(図3(d))において、放電電荷の多い負パルスの発生が C_s 領域で観測される(B_s 領域では観測されない)ことから裏付けられる。したがって、 C_s 領域では交流負部分放電により絶縁物壁面に帯電している正電荷がある程度中和されることによって、 B_s 領域よりも交流正部分放電が発生・進展しやすくなるものと考えられる。このことが原因となって、 C_s 領域における交流破壊電圧が B_s 領

域よりも低い値を示すものと考えられる。

5. ま と め

絶縁物(PE)の壁面で構成した微小間隙を貫く交流絶縁破壊電圧は間隙幅(s)に依存することがわかった。その依存性は、交流部分放電における正パルス(印加電圧の正のピーク付近で発生するもの)の発生数と最大放電電荷の間隙幅の変化への依存性と相関性がみられた。すなわち、正パルスの発生数と最大放電電荷が増加すると、交流破壊電圧が低下する傾向を示す。以下に、本実験の範囲において観測された交流部分放電特性および交流絶縁破壊特性の間隙幅(s)への依存性を整理して、まとめとする。

(1) $Q > \text{約}(1/2)d$ の場合

(a) $1\text{mm} < s < 20\text{mm}$ の領域: s の減少に伴って交流絶縁破壊電圧が低下する。同じく s の減少に伴って、印加電圧の正ピーク付近で発生する交流部分放電電流の正パルスの発生数、最大放電電荷が増加する。負パルスについては特に顕著な変化は認められない。

(b) $100\mu\text{m} < s < 1\text{mm}$ の領域: 交流絶縁破壊電圧は $s = 2 \sim 3\text{mm}$ における値よりも高い。印加電圧の正ピーク付近で発生する交流部分放電電流の正パルスの発生数、最大放電電荷は $s = 2\text{mm}$ 付近における値よりも減少する。負パルスについては特に顕著な変化は認められない。

(c) $15\mu\text{m} < s < 100\mu\text{m}$ の領域: s の減少に伴って交流絶縁破壊電圧が低下する。同じく s の減少に伴って、印加電圧の正ピーク付近で発生する交流部分放電電流の正パルスの発生数、最大放電電荷が増加する。他の s の領域では見られなかった放電電荷の大きい負パルスの発生が観測される。

(2) $Q < \text{約}(1/2)d$ の場合

(a) $1\text{mm} < s < 20\text{mm}$ の領域: s の減少に伴って交流絶縁破壊電圧が低下する。同じく s の減少に伴って、印加電圧の正ピーク付近で発生する交流部分放電電流の正パルスの発生数、最大放電電荷が増加する。負パルスについては特に顕著な変化は認められない。

(b) $15\mu\text{m} < s < 1\text{mm}$ の領域: s が変化しても交流破壊電圧はほとんど変化しない。また、交流部分放電の正パルスの発生特性も顕著な変化は認められない。

最後に本研究を行うにあたり、実験に協力していただいた本学学生の新幸男君ならびに鶴水達也君に感謝いたします。

(平成5年9月24日受付)

文 献

- (1) 電気学会技術報告 “有機複合材料の電気・電子絶縁への適用技術の動向” 有機複合材料の電気・電子絶縁への適用調査専門委員会編 電気学会 出版準備中
- (2) 中野, 三井: “機器絶縁における界面効果” 平成5年電気学会全国大会, S. 4-6, 1994

- (3) Kiichi Yagisawa, Takashi Karasaki, Yasuo Ozawa, Masayuki Yamaguchi, Yasuo Sekii and Masayuki Kobayashi: "Development of Extrusion Type Molded Joint for 275kV and 500k XLPE Cables" HITACHI CABLE REVIEW, pp.9-14, No.9, August, 1990.
- (4) 勝田, 吉久, 宮下, 加藤, 霜村: "CVケーブル用モールド形接続部の界面について" 電気学会誘電・絶縁材料研究会資料 DEI-92-13, 1992
- (5) 例えば, H.C.Miller: "Surface Flashover of Insulators" IEEE Trans. on EI, Vol.24, pp.765-786, 1989.
- (6) Y.Yamano, S.Kobayashi and T.Takahashi: "Improvement of flashover strength and reduction of surge charge-induced electric field enhancement of insulating material" IEEE Trans. on EI, Vol.EI-20, No.3, pp.529-536, 1986.
- (7) D.W.Auckland, A.B.Borishade and R.Cooper: "The Electric Strength of a Narrow Column of Air Bounded by a Dielectric Wall" CEIDP, pp.472-477, 1974.
- (8) A.B.Borishade: "The Development of Electrical Discharges in Simulated "Tree" Channels" IEEE Trans. on EI, Vol.EI-12, No.5, 1977.
- (9) 藤田, 能登, 吉村: "トリーを模擬したPMMA細管中の放電電圧とトリーの伸びの関係" 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-88-41, 1988
- (10) H.H.Hull: "A method for studying the distribution and sign of static charge on solid materials" J. Appl. Phys., vol.20, pp.169-170, 1949.

山野 芳昭 (正員) 昭和26年3月17日生, 51年3月東京農工大学大学院工学研究科修了。同年4月東洋紡績(株)入社。55年6月同社退社。同年同月東京農工大学工学部助手。平成2年4月千葉大学教育学部講師, 現在同助教授。工学博士。主として電気絶縁工学, 静電気工学の研究に従事。平成2年電気学会論文賞受賞。電子情報通信学会, 静電気学会、IEEE会員。