絶縁物中の非貫通微小間隙内を進展する交流部分放電

正 員 渡辺 憲道* 正 員 山野 芳昭**

AC Partial Discharges Propagating into an Unpenetrated Crack in an Insulator

Norimichi Watanabe*, Member, Yoshiaki Yamano**, Member

A test insulator with unpenetrated crack was constructed from two insulating blocks on an insulating board. Inner walls of the crack were formed by the surfaces of two blocks. The test insulator with the crack was set in a needle-plane electrode system. When ac (50Hz) high voltage is applied between the electrodes, PD generates from the needle electrode propagating through the crack, and its propagation is restricted at the dead end of the crack. The material of the blocks is PMMA. The crack width (s) ranged from $10\mu\text{m}$ to $1000\mu\text{m}$. The experiments were performed in air controlled at $20\text{-}25^\circ\text{C}$ and $40\text{-}50\text{RH}$.

The experimental results show that the magnitude of positive pulse due to ac PD depends on the width of the crack. The maximum magnitude of positive pulse in the area of the width $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ (narrow area) is 2 times larger than that in the area of width $500\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$ (wide area); The larger magnitude of positive pulse $> 2 \times 10^{-8}\text{C}$ is observed only in the narrow area. It appears every 3-4 cycles of applied ac. The generation mechanism of the large magnitude of the pulse is discussed focusing on the charge accumulation on the insulating wall in the crack. The dust-figure suggests that the positive accumulated charge on the wall in the narrow area of width restricts the propagation of positive PD along the insulating wall of the crack. The positive pulse of large magnitude may be generated just after the cycle of negative PD where the accumulated positive charge is largely neutralized by the negative PD.

キーワード：微小間隙，界面，複合絶縁，部分放電

Keywords : crack, interface, composite insulation, partial discharge

1. はじめに

高電圧機器では、複数の絶縁物を組み合わせて使用する複合絶縁がよく用いられている。複合絶縁では異なった絶縁物の表面同士が接触するので、そこでは接触界面が形成される⁽¹⁾。このような接触界面は、絶縁物の製造初期には密着しているが、長期間使用下にあると、熱や経時的な劣化によって微小な間隙が生じることがある。この微小間隙に高電界が印加されていると、間隙で部分放電が発生し、さらなる絶縁物の劣化が促進されることになる。また発生した部分放電が微小間隙に沿って進展すると、それが原因となって絶縁耐力が低下する可能性が考えられる⁽²⁾。

一般に、部分放電には絶縁物表面を進展しやすい性質が

あることが知られている⁽³⁾。対向する二つの絶縁物表面で形成される微小間隙では、部分放電がさらに進展しやすいことも考えられる。また、微小間隙に部分放電が発生すると、それにともない微小間隙内の絶縁物表面に電荷が帯電・蓄積する。この帯電・蓄積電荷は、部分放電の成長や進展に大きな影響を及ぼす可能性が考えられる。

筆者の一人は、これまでに"電極間を貫通する微小間隙"において、微小間隙を進展する部分放電の発生について検討を行ってきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。その結果、部分放電の発生強度や頻度は、微小間隙の間隙幅に依存することが明らかになった。また、この依存性は、微小間隙を形成する個体絶縁物表面に帯電・蓄積する電荷分布状態の間隙幅への依存性から説明できることを示した。

今回は、"電極間を貫通していない微小間隙"について取り扱った。本報告では、非貫通微小間隙内を進展する部分放電において、それが微小間隙の非貫通部分にダメージを与えながら、ある程度安定して長時間にわたって発生している状態の部分放電特性を検討することを目的とした。ある

* 科学警察研究所
〒277-0882 柏市柏の葉 6-3-1
National Research Institute of Police Science
6-3-1, Kashiwanoha, Kashiwa 277-0882

** 千葉大学
〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33
Chiba University
1-33, Yayoicho, Inage-ku, Chiba 263-8522

程度安定して長時間にわたって発生している状態の部分放電が継続すると、最終的には非貫通部分を短絡させ絶縁破壊に至る。非貫通部分にこのような形態の絶縁破壊を生じさせる原因となる部分放電特性を検討することは、非貫通微小間隙の絶縁破壊特性を解明する上で重要であると考えられる。

具体的には、針－平板電極の間に非貫通の微小間隙を形成させた固体絶縁物を配置し、針電極から部分放電を発生させ、微小間隙の内部を進展する部分放電の発生特性について検討を行った。このとき微小間隙は、対向する平板電極まで貫通していない状態である。電極間を貫通している微小間隙で発生する部分放電は、何かしらの形で対向する平板電極と電荷のやりとりが考えられるのに対して、非貫通の微小間隙を進展する部分放電は、対向する平板電極と直接の電荷のやりとりは考えられない。したがって、部分放電によって発生した電荷の一部は、微小間隙の壁面や非貫通部分に帯電・蓄積し、それが部分放電の発生特性に大きく関与することが推測される。

2. 実験方法

〈2・1〉 試料および電極 図1に試料および電極構成を示す。針－平板電極の間に二つの polymethyl methacrylate (以下、PMMA と記す)ブロック(40mm×75mm× ℓ (ℓ : 間隙長)、図中の B)と PMMA 板(100mm×100mm× t (t : 非貫通長)、図中の C)が図に示すように配置してある。PMMA 板の上に二つの PMMA ブロックを乗せ、間隙幅(s)を隔てて配置することで、電極間を貫通していない微小間隙の形成を行った。この二つの PMMA ブロックと PMMA 板の表面は、平均粗さ $\pm 0.05\mu\text{m}$ 、最大粗さ $\pm 0.3\mu\text{m}$ で仕上げてある。微小間隙の中心に配置した針電極(先端曲率半径約 $5\mu\text{m}$ 、図中の A)と PMMA ブロック上側表面との間には、気相(気相長(g))を設けた。したがって、交流高電圧(50Hz)を印加した針電極から発生する部分放電は気相を経

て、微小間隙を進展し、非貫通部分(PMMA 板)に至ることになる。電極間隔(d)は 45mm を代表値とした。この理由は後述する。また、間隙長(ℓ)の値は、主として 40mm (すなわち、気相長(g)の値は 2mm)の場合について取り扱った。この理由についても後述(〈3・1〉節)する。

非貫通長(t)は、 3mm とした。これは、 ℓ を可能な限り長く設定しようとしたためである。つまり、 ℓ が長いと、それだけ部分放電に及ぼす間隙の影響が強くなると考えたためである。 $t < 3\text{mm}$ ではない理由については、後述(〈2・2〉節)する。

電極間隔(d)については、 45mm の場合の実験結果を代表値として示した。これは、 $g=2\text{mm}$ 、 $t=3\text{mm}$ と一定の状態、 d を $25\text{mm} < d < 65\text{mm}$ の範囲で変化させても(それにつれ、 ℓ は $20\text{mm} < \ell < 60\text{mm}$ の範囲で変化する)得られる部分放電特性の傾向に変化が見られなかったためである。

間隙幅(s)は、 $10\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$ の範囲で変化させた。間隙幅は、絶縁フィルム片をスペーサとして PMMA ブロックの間に挟むことによって調節した。スペーサの有無によって、放電特性が変化しないことは確認してある。

〈2・2〉 交流部分放電の測定 測定は、電圧を印加してから2分後に開始した。発生する部分放電に基づくパルス状電流は、図1に示すインピーダンス($C=0.0047\mu\text{F}$ 、 $R=3\text{k}\Omega$)によって検出し、増幅器(増幅率: 20dB)及びディジタルストレージオシロスコープ(YOKOGAWA DL1200E)を介してコンピュータに取り込んだ。

本論文で示す交流部分放電に関する全てのデータは、交流印加電圧 300 サイクル中に測定された部分放電に基づくパルスを積算したものである。この結果から、間隙長および間隙幅の変化にともなう部分放電パルスの発生特性の変化について検討を行った。本測定では、見かけの放電電荷 $Q > \pm 1 \times 10^{-9}\text{C}$ のパルスについて取り扱った。これは、放電電荷の大きい部分放電パルスほど間隙内を進展して、非貫通部分にダメージを与えられるからである。

特別な場合を除いて、印加電圧 30kV のデータを示す。図1に示す電極構成において間隙幅(s)= $1000\mu\text{m}$ とした場合は、印加電圧を 32kV 以上にすると、10分以内に $t=3\text{mm}$ の非貫通部分で貫通破壊(punch through 破壊)が生じる。印加電圧 30kV (上記印加電圧値の約95%の値に相当する)の場合は、6時間以上経過しても punch through 破壊が発生しない。また、 $t \leq 2\text{mm}$ の場合は放電電荷 $Q > \pm 1 \times 10^{-9}\text{C}$ のパルスを有する部分放電が発生する電圧まで印加電圧を上昇させると、5分以内に punch through 破壊が生じる。

なお、電極間隔(d)、間隙幅(s)が同じ状態の貫通微小間隙の試料(すなわち、 $t=0\text{mm}$)において印加電圧を 30kV とすると、極めて短時間で短絡破壊が生じる。

〈2・3〉 ダストフィギュアの作成 微小間隙内を進展する部分放電は、間隙壁面に帯電・蓄積する電荷の分布状態に強く依存することが考えられる。そこで、微小間隙を形成している PMMA 壁面(間隙壁面)に帯電してい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。

A: 針電極, B: PMMA ブロック, C: PMMA 板, D: 平板電極,
d: 電極間隔, g: 気相長, ℓ : 間隙長, t: 非貫通長, s: 間隙幅,
AMP: 増幅器, OSC: デジタルストレージオシロスコープ,
PC: パーソナルコンピュータ

図1 電極構成および試料

Fig. 1. Experimental apparatus and specimen.

30kVの交流印加電圧で2分間の部分放電を微小間隙に発生させた後、印加電圧を遮断した。そして、試料に帯電粉をふりかけて、ダストフィギュアの作成を行った。印加電圧の遮断位相は、印加電圧の正→負あるいは負→正のゼロクロスポイントにて行った。使用した帯電粉は、赤色の粉末が正電荷に帯電している領域に付着し、青色の粉末が負電荷に帯電している領域に付着するものである⁶⁾。

なお、本論文におけるすべての実験は温度 20～25℃、相対湿度 40～50%にコントロールされた室内で行った。

3. 実験結果と考察

〈3・1〉 間隙長の変化による交流部分放電発生特性の違い 本論文で示す部分放電特性の実験結果は、主として電極間隔 $d=45\text{mm}$ において、間隙長 $\ell=40\text{mm}$ (すなわち、気相長 $g=2\text{mm}$) のときのデータである。この項では、なぜ $\ell=40\text{mm}$ のときの部分放電特性に着目して検討するのかについて説明する(電極間隔の代表値を $d=45\text{mm}$ にした理由は〈2・1〉節で説明した)。

図2は、印加電圧 300 サイクル分の交流部分放電パルスのうち、正パルスについての最大放電電荷と間隙長(ℓ)との関係について示したものである。最大放電電荷に着目した理由は、放電電荷の大きい部分放電パルスほど間隙内を進展して、非貫通部分にダメージを与えられと考えられるからである。図2の上部の横軸は気相長(g)を示している。電極間隔(d)および非貫通長(t)はそれぞれ $d=45\text{mm}$ 、 $t=3\text{mm}$ と一定の状態である。なぜ正パルスに着目するかについては、後述する。

図2に示すように、間隙長が $10\text{mm} < \ell < 30\text{mm}$ の領域では、 ℓ の増加にともなって正パルスの最大放電電荷は減少する。この ℓ の領域では、正パルスの最大放電電荷が間隙

幅 $s=100\mu\text{m}$ と $s=1000\mu\text{m}$ とでほぼ同じ値を示している。すなわち、正パルスの最大放電電荷は、 s の変化に対して影響を受けていない。一方、間隙長が $\ell > 30\text{mm}$ の領域では、 ℓ の増加にともなって正パルスの最大放電電荷も増加する。この ℓ の領域における正パルスの最大放電電荷は、 $s=100\mu\text{m}$ と $s=1000\mu\text{m}$ とで異なる値を示す。すなわち、 $\ell > 30\text{mm}$ の領域では、正パルスの最大放電電荷が s の変化に対して影響を受けていることになる。

本報告の場合、 d および t が一定であるので、 $10\text{mm} < \ell < 30\text{mm}$ の領域は $\ell > 30\text{mm}$ の領域に比べて針電極から間隙に至るまでの g が長い。 g が長くなると、針電極から発生した部分放電は、間隙内における成長よりも、気相領域での成長が優勢になるであろう。そのため、 $10\text{mm} < \ell < 30\text{mm}$ の領域では、 s が変化しても正パルスの最大放電電荷にはほとんど変化が観測されなくなるものと考えられる。また、この間隙幅の領域では、 ℓ の増加にともなって正パルスの最大放電電荷は減少している。これは、気相長 g の減少にともなって気相領域における部分放電の成長が弱まるためと考えられる。一方、 $\ell > 30\text{mm}$ の領域では、間隙内における部分放電の成長が優勢になる。そして、 ℓ の増加にともなって間隙内を部分放電が長い距離を進展するので、 s の値に関わらず正パルスの最大放電電荷が増加するものと考えられる。

以上のことから、間隙幅の変化にともなう部分放電特性(特に放電電荷の大きい部分放電パルスの発生特性)を検討するためには、 $g < 12\text{mm}$ (すなわち、 $\ell > 30\text{mm}$) とすることが必要である。しかし、 $g \leq 1\text{mm}$ となると、発生する部分放電特性は試料を配置する毎に大きく変化してしまう。これは、針電極の位置が間隙の中心からわずかに外れると、針電極から発生した部分放電が間隙内を進展しにくくなるためと考えられる。このようなことから、本論文では $g=2\text{mm}$ の場合について検討を行うこととした。以下では、特にことわりのない限り $g=2\text{mm}$ 、すなわち $\ell=40\text{mm}$ における実験結果を提示する。

〈3・2〉 交流部分放電の発生特性 図3は、印加電圧 300 サイクルにおける交流部分放電パルスの放電電荷とその発生位相との関係を示す。図3(a)および図3(b)は、それぞれ $s=100\mu\text{m}$ および $s=1000\mu\text{m}$ の場合についての結果である。図中の正弦波は、交流印加電圧の位相を示している。

図3(a)と図3(b)の間で部分放電パルスの発生特性を比較すると、 $s=100\mu\text{m}$ では放電電荷 $Q > 2 \times 10^{-8}\text{C}$ の大きい正パルスが発生しているのに対して、 $s=1000\mu\text{m}$ ではこの大きい正パルスが発生していない。この大きい正パルスは、平均して印加電圧の 3～4 サイクルに 1 発の割合で検出される。間隙幅が $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域において、この大きい正パルスは検出されるが、 $500\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$ の領域では検出されない。一方、負パルスは $s=100\mu\text{m}$ と $s=1000\mu\text{m}$ とともに図に示すように、放電電荷 $Q < 5 \times 10^{-9}\text{C}$ の小さいパルスのみが発生している。実験を行ったすべての s ($10\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$) において、小さい負パルスのみ検出される。図3(a)

図2 間隙長あるいは気相長と正パルスの最大放電電荷
Fig. 2. Relation among maximum magnitude of positive pulses, length of crack, and length of gap.

(a): $s = 100\mu\text{m}$ の場合, (b): $s = 1000\mu\text{m}$ の場合
 s : 間隙幅, 間隙長 (ℓ) = 40mm, 印加電圧 = 30kV
 (印加電圧 300 サイクル分のパルスを積算)

図3 交流部分放電パルスの発生特性

Fig. 3. Characteristics of ac PD pulses.

表1 交流部分放電パルスの発生数

Table 1. Number of ac PD pulses.

Phase of applied voltage (deg.)		0 ~ 90	90 ~ 180	180 ~ 270	270 ~ 360
Polarity of pulse		positive	negative	negative	positive
Number of pulses (N)	$s = 100\mu\text{m}$	790	860	680	840
	$s = 1000\mu\text{m}$	810	840	770	860

s : 間隙幅, 間隙長 (ℓ) = 40mm, 印加電圧 = 30kV
 (印加電圧 1 サイクル分の放電電荷 $2.5 \times 10^{-11}\text{C} < |Q| < 1.0 \times 10^{-9}\text{C}$ の積算パルスの代表例)

と図 3(b)では放電電荷 $Q > \pm 1 \times 10^{-9}\text{C}$ のパルスを対象としたため, 負パルスの発生数が正パルスと比較して極端に少ないように見える。そこで, 検出インピーダンスを変えて, 放電電荷 $2.5 \times 10^{-11}\text{C} < |Q| < 1 \times 10^{-9}\text{C}$ の範囲における正負のパルスを検出した。その結果を表 1 に示す。印加電圧位相にして 90deg.~270deg.間に発生する負パルスの数は, 0deg.~90deg.ならびに 270deg.~360deg.で発生する正パルスとほぼ同じことがわかる。

上記のように間隙幅の変化に対し, 正パルスの発生に顕著な違いが認められることから, 以下では, 主として発生する交流部分放電の正パルスに着目して詳しく検討を行うことにする。

〈3・3〉 交流正部分放電パルスの放電電荷分布 間隙幅が $10\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$ の領域における正パルスの特徴を

s : 間隙幅, 間隙長 (ℓ) = 40mm, 印加電圧 = 30kV
 (印加電圧 300 サイクル分のパルスを積算)

図4 交流正部分放電パルスの放電電荷分布

Fig. 4. Distribution of positive pulses.

詳しく調べるため, 図 4 に交流正部分放電パルスの放電電荷分布を示す。図中の $s = 100\mu\text{m}$ と $s = 1000\mu\text{m}$ における正パルスの放電電荷分布は, 図 3(a) と図 3(b) の結果を基にして示している。

$s = 100\mu\text{m}$ と $s = 1000\mu\text{m}$ との放電電荷分布(図 4)を比較してみると, $s = 100\mu\text{m}$ においてのみ, 放電電荷 $Q > 2 \times 10^{-8}\text{C}$ の正パルスが発生していることがわかる。この正パルスの発生数自体は少なく, 〈3・2〉節で述べたように, 印加電圧サイクルにして 3~4 サイクルに 1 発の割合で検出される。以下では, 放電電荷 $Q > 2 \times 10^{-8}\text{C}$ の正パルスのことを, "大きい正パルス"と略称する。一方, $s = 1000\mu\text{m}$ では, 正パルスの発生数自体は多いが, "大きい正パルス"の発生は見られない。

〈3・4〉 交流正部分放電の間隙幅への依存性 図 5 に正パルスの最大放電電荷の間隙幅への依存性を示す。図には, $\ell = 40\text{mm}$ におけるデータのほかに, 比較のため $\ell = 30\text{mm}$ (すなわち, $d = 45\text{mm}$, $g = 12\text{mm}$, $t = 3\text{mm}$) の場合についても示している。

図 5 に示すように, 正パルスの最大放電電荷に間隙幅への顕著な依存性は, $\ell = 40\text{mm}$ において見られる。すなわち, $\ell = 40\text{mm}$ において, 間隙幅が $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域での正パルスの最大放電電荷は, $500\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$ の領域のそれと比べると大きい。この 2 つの領域を分ける s の値は, $200\mu\text{m} < s < 500\mu\text{m}$ の間に存在すると考えられる。なお, 図 5 の結果を基にして, 図 3(a) と図 3(b) はそれぞれ $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ および $500\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$ の領域における部分放電特性の代表例として示した。

次に, 正パルス発生数の間隙幅への依存性について図 6 に示す。図には, 間隙長 $\ell = 40\text{mm}$ において, 放電電荷 $Q > 1 \times 10^{-9}\text{C}$ の正パルスの発生数および放電電荷 $Q > 2 \times 10^{-8}\text{C}$ の正パルスの発生数を示している。放電電荷 $Q > 2 \times 10^{-8}\text{C}$ の正パルスとは, 〈3・2〉節で説明した"大きい正パルス"である。

ℓ : 間隙長, 印加電圧=30kV

図5 交流正部分放電パルスの最大放電電荷と間隙幅
Fig. 5. Relation between maximum magnitude of positive pulses and width of crack.

(印加電圧 300 サイクル分のパルスを積算)
 ℓ : 間隙長, 印加電圧=30kV

図6 交流正部分放電パルスの積算発生数と間隙幅
Fig. 6. Relation between number of positive pulses and width of crack.

また、比較のため $\ell = 30\text{mm}$ の場合についても、放電電荷 $Q > 1 \times 10^{-9}\text{C}$ の正パルスの発生数を示した。

図6に示すように、放電電荷 $Q > 1 \times 10^{-9}\text{C}$ の正パルスの発生数に間隙幅への依存性は、 $\ell = 40\text{mm}$ において見られる。すなわち、間隙幅 $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域における正パルスの発生数は、 $500\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$ の領域と比べると少ない。しかし、“大きい正パルス”(図中の○)については、間隙幅が $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域でのみ発生している。この“大きい正パルス”が発生することが原因となって、図5に見られるように、 $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域における最大放電電荷が $500\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$ の領域と比較して大きくなっている。

一方、 $\ell = 30\text{mm}$ における正パルスの最大放電電荷および発生数については、図5および図6に示すように、間隙幅への依存性がほとんど見られない。この傾向は $10\text{mm} < \ell < 30\text{mm}$ の領域で観測される。

以上のことから、 $\ell = 40\text{mm}$ (すなわち、 $g = 2\text{mm}$)の場合、発生する交流部分放電の正パルスの最大放電電荷と発生数

は、間隙幅の変化に依存することがわかった。 $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域で発生する正パルスの特徴は、発生数は少ないが、放電電荷の大きいパルスが含まれていることである。 $500\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$ の領域での正パルスは、発生数自体は多いが、放電電荷の大きいパルスが含まれていない。なお、部分放電が s の変化に依存性を与える $25\text{mm} < d < 65\text{mm}$ の範囲(それにつれ、間隙長は $20\text{mm} < \ell < 60\text{mm}$ の範囲で変化する)では、同じ部分放電特性を示した。また、この d あるいは ℓ の範囲において、部分放電が2つの領域を分ける s の値は、 $200\mu\text{m} < s < 500\mu\text{m}$ の間に存在する。

〈3・5〉 間隙壁面の帯電電荷 間隙幅の変化に対する針電極先端の電界について、数値解析を行った。その結果、実験を行った範囲の間隙幅では、針電極先端の電界強度は間隙幅の変化にほとんど影響を受けないことがわかった。また、非貫通部分の有無が針電極先端の電界強度に及ぼす影響は、ほとんどないことがわかった。間隙幅の変化に対する部分放電開始電圧(2pC のパルスが検出されたときの印加電圧)について測定した結果、 $d = 45\text{mm}$, $g = 2\text{mm}$, $\ell = 40\text{mm}$, $t = 3\text{mm}$ における部分放電開始電圧は、間隙幅の変化に依存せず、 $2.0 \sim 2.1\text{kV}$ となることがわかった。すなわち、上述の“大きい正パルス”の発生は、単に試料形状の変化に起因した針電極先端の電界強度の変化が直接の原因ではなく、空間電荷を考慮に入れた検討が必要になると考えられる。

針電極から発生した部分放電によって生じた電荷の一部は、間隙を形成する間隙壁面および非貫通部上面(PMMA板表面)に帯電・蓄積するであろう。したがって、間隙を進展する部分放電は、間隙壁面および非貫通部上面の電荷分布状態の影響を顕著に受けるものと考えられる。そこで、間隙壁面に帯電している電荷の分布状態を、ダストフィギュアによって観察した。

図7(a)および図7(b)はそれぞれ $s = 100\mu\text{m}$ および $s = 1000\mu\text{m}$ における間隙壁面のダストフィギュアである。これらは、それぞれ間隙幅が $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ および $500\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$ の領域における代表例である。図中の(+)→(-)は正→負のゼロクロスポイントで印加電圧を遮断した場合のダストフィギュアであり、(-)→(+)は負→正で遮断した場合である。

$s = 100\mu\text{m}$ (図7(a))の場合について説明する。(+)→(-)では、正電荷の帯電を示す赤色粉(図中のP1)が、針電極先端より約10mm離れた箇所から非貫通部分(PMMA板、図中のC)の間まで樹枝状に付着している。樹枝状に付着した赤色粉は、ストリーマ状の正部分放電が間隙壁面に沿って進展したことを示していると考えられる。非接触型電位計で、非貫通部上面に近い間隙壁面の電位を測定したところ、(+)→(-)において約+12kVであった。針電極からP1に至る間隙壁面上には、ほとんど粉が付着していない。これは、電圧位相にして90deg.~180deg.間に発生する負部分放電による正帯電電荷の中和に起因していると考えられる。なお、図3には放電電荷 $Q > \pm 1 \times 10^{-9}\text{C}$ のパルスについて表示した

図7 ダストフィギュア
 Fig. 7. Dust figures.

ため、90deg.~180deg.間において負パルスは表示されていない。しかし、それ以下の放電電荷を持つ負パルスについては、表1に示すように、その発生が観測されている。樹枝状に付着した赤色粉の状態を(+)→(-)と(-)→(+)とで比較すると、(-)→(+)では赤色粉が付着している領域が狭く、なおかつ針電極先端からより遠くの位置に付着している。これは、発生する負部分放電により、帯電していた正電荷の一部が中和されたためと考えられる。(-)→(+)では負電荷の帯電を示す青色粉(図中の N2)は針電極先端付近に見られるが、その他の箇所では高密度の付着は見られない。これは、図3(a)に示すように発生する負パルスの放電電荷が正パルスの放電電荷と比較して小さいことと関係しているものと考えられる。

$s=1000\mu\text{m}$ (図7(b))におけるダストフィギュアでは、(+)→(-)と(-)→(+)の両方とも正電荷の帯電(図中の P3, P4)が多く見られるが、樹枝状の図形を示していない。これは、針電極から発生する部分放電のほとんどが、間隙壁面に沿って進展せず、間隙内の空間を進展していることによるものと考えられる。すなわち、間隙幅が $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域では、針電極から発生した部分放電は間隙壁面に沿って進展する確率が、 $500\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$ の領域よりも高くなることを間接的に示しているものと考えられる。

なお、 $s=100\mu\text{m}$, $s=1000\mu\text{m}$ の非貫通部上面では、いずれも非貫通部上面に近い間隙壁面と同じ程度の帯電が観測された。

〈3・6〉 間隙壁面の帯電電荷 図7(a)の(+)→(-)において観察された正電荷の帯電領域(図7の P1)が間隙壁面に存在すると、正電荷による電界緩和のため正部分放電は微

(印加電圧 300 サイクル分のデータから、それぞれ 20 サイクルを任意に抽出して積算)
 A: 放電電荷の大きい正パルスが発生した場合の直前の負部分放電パルス
 B: 放電電荷の大きい正パルスが発生しない場合の直前の負部分放電パルス
 間隙長(l)=40mm, 間隙幅(s)=100 μm , 印加電圧=30kV

図8 交流負部分放電パルスの放電電荷分布
 Fig. 8. Distribution of negative pulses.

小間隙を進展しにくい。間隙幅が $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域で実際に観測されている大きい正パルスが発生するためには、何らかの要因によって、この正電荷の帯電密度が低下することが必要である。この正電荷の帯電密度を低下させる要因として考えられるのは、放電電荷の大きい正パルスが発生する直前の負部分放電による中和作用であろう。負部分放電によって正帯電電荷の中和が優勢に生じた場合、次の印加電圧サイクルの正部分放電は、電界緩和が弱くなるため、その進展・成長が大きくなるはずである。そこで、間隙幅が $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域で発生する負パルスの放電電荷分布について、その直後の印加電圧サイクルで放電電荷の大きい正パルスが発生する場合と、発生しない場合とに分けて、その相違を比較してみることにする。

図8は、 $s=100\mu\text{m}$ における負パルスの放電電荷分布を示したものである。図中の A は大きい正パルスが発生した場合について、その直前の印加電圧サイクルで発生する負パルスの放電電荷分布を示している。図中の B は大きい正パルスが発生しない場合について、その直前の印加電圧サイクルで発生する負パルスの放電電荷分布を示している。これらのデータは、測定した印加電圧 300 サイクル分の測定結果から、それぞれの場合について 1 サイクルずつ合計 20 サイクルを任意に抽出して積算したものである。

図中の A と B の放電電荷分布の特徴を比較すると、A の場合は放電電荷 $Q > -4 \times 10^{-9}\text{C}$ の負パルスの発生数が B の場合に比べて顕著である。B の場合は放電電荷 $Q > -4 \times 10^{-9}\text{C}$ の負パルスの発生が極めて少なく、20 サイクルで 1 発程度の割合で検出された。すなわち、大きい正パルスが発生する場合、その直前の印加電圧サイクルの負部分放電でも比

較的放電電荷の大きい負パルスが発生していることになる。この比較的放電電荷の大きい負パルスの発生によって、間隙壁面および非貫通部上面に帯電している正電荷が中和され、次の印加電圧サイクルの正部分放電において電界緩和が弱くなるため、大きい正パルスが発生するものと考えられる。

以上のことから、非貫通間隙における部分放電の特徴として、次のことがいえる。つまり、非貫通間隙を進展する部分放電特性は、間隙幅の変化に対して2つの領域に分けることができる。間隙幅(s)が小さい領域では、間隙壁面および非貫通部上面に帯電・蓄積した正電荷を中和する負部分放電が発生する。それにより、間隙壁面と非貫通部上面に帯電・蓄積していた正電荷が中和されるため、次のサイクルの正部分放電では放電電荷の大きい正パルスが発生する。大きい正パルスをともなう部分放電は、非貫通部分にダメージを与える可能性があるものと考えられる。一方、間隙幅(s)の大きい領域では、大きい正パルスをともなう部分放電は発生しない。本実験で使用した試料では、2つの s の領域を分ける値は、 $200\mu\text{m} < s < 500\mu\text{m}$ の間に存在する。なお、数値解析によって求めた針電極先端の電界強度自体は間隙幅(s)の変化に対して、ほとんど影響を受けない。

非貫通間隙の壁面に帯電する電荷の電位は、貫通間隙の壁面と比べると⁽⁴⁾⁽⁵⁾、2倍程度大きい値を示している。これについては、非貫通間隙の特徴(PMMA板の影響が大きい)と考えられる。つまり、高い印加電圧まで絶縁破壊が生じないので、それだけ間隙壁面および非貫通部上面に高い密度の電荷を帯電させることが可能である。貫通間隙では、約 $50\mu\text{m}$ 以下の間隙幅において部分放電が間隙に帯電する電荷の影響を受けるのに対して⁽⁴⁾⁽⁵⁾、非貫通間隙では約 $200\mu\text{m}$ 以下の間隙幅で影響が認められる。このことは、非貫通間隙において壁面および非貫通部上面に高密度の電荷が帯電していることに起因しているものと考えられる。

なぜ、間隙幅が $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域においてのみ、負部分放電による正電荷の帯電領域の中和が生じやすいのかについては、現在のところ不明である。しかし、固体絶縁物表面で発生する部分放電は進展しやすいことが一般的に知られている⁽³⁾。間隙幅が $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域では間隙壁面に沿って交流正部分放電が発生していることから、交流負部分放電も間隙壁面に沿って進展しやすいかも知れない。それが正電荷の中和作用につながっているものと推測される。

4. 実験結果と考察

本報告では、固体絶縁物同士が接する界面に生じた非貫通の微小間隙を進展する部分放電の特性について検討を行った。以下に、検討した結果を番号順にまとめる。なお、以下の(1)～(3)は、実験に用いた試料において、間隙幅の変化が部分放電の発生特性に顕著な影響を及ぼす間隙長 $l=40\text{mm}$ (電極間隔 $d=45\text{mm}$ を代表値とした場合)での結果を基にしてまとめたものである。

(1) 間隙幅 $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域にのみ、大きい正パルス(放電電荷 $Q > 2 \times 10^{-8}\text{C}$)が発生している。この大きい正パルスは、平均して3～4サイクルに1発の割合で検出される。一方、間隙幅 $500\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$ の領域では、この大きい正パルスの発生は観測されない。なお、電極間隔を $25\text{mm} < d < 65\text{mm}$ の範囲で変化させても(それにつれ、間隙長は $20\text{mm} < l < 60\text{mm}$ の範囲で変化する)、間隙幅が $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域では放電電荷の大きい正パルスが発生する傾向は変わらないことを確認している。

(2) 間隙幅 $10\mu\text{m} < s < 200\mu\text{m}$ の領域では、間隙を形成する間隙壁面で樹枝状に帯電した正電荷の分布が観測される。この樹枝状の図形から、ストリーマ状の正部分放電が間隙壁面に沿って進展したものと考えられる。一方、間隙幅 $500\mu\text{m} < s < 1000\mu\text{m}$ の領域では、樹枝状に帯電した正電荷の分布が観測されない。

(3) 実験結果を基に、放電電荷の大きい正部分放電の発生メカニズムとして、以下のことが考えられた。まず、発生する正部分放電(大きい正パルスを含まない)によって、微小間隙の壁面および非貫通部上面には、正電荷が帯電・蓄積する。次の負部分放電において、間隙幅が小さい場合には、間隙壁面および非貫通部上面に帯電・蓄積していた正電荷が中和される。そのことにより、次のサイクルでは放電電荷の大きいパルスをともなう正部分放電が発生する。間隙幅が大きいと、負部分放電による正帯電電荷の中和作用が生じず、次のサイクルの正部分放電では残留する正電荷の影響を受け、放電電荷の大きいパルスをともなう正部分放電が発生しない。本実験で使用した試料では、2つの s の領域を分ける値は、 $200\mu\text{m} < s < 500\mu\text{m}$ の間に存在した。なお、数値計算によって求めた針電極先端の電界強度自体は間隙幅 s の変化に対して、ほとんど影響を受けない。

なお、絶縁材料として低密度ポリエチレンを用いた場合についても同じ実験を行ったが、上記した(1)、(2)、(3)の事項については同様の結果が得られた。

(平成13年11月1日受付、平成14年12月13日再受付)

文 献

- (1) "Evaluation and Analysis on the Interfacial Phenomena of a Composite Insulation", IEE Technical Report, No. 694 (1998) (in Japanese)
「複合絶縁の界面現象とその評価」, 電気学会技報, No.649, 第1章 (1998)
- (2) Y. Kitamura and S. Hirabayashi: "Charge of Internal Partial Discharge on Epoxy Resin during Voltage Endurance Test", *T. IEE Japan*, Vol. 103-A, No. 9, pp. 507-514 (1993-3) (in Japanese)
北村洋一・平林庄司:「エポキシ樹脂における内部部分放電の経時変化」, 電学論A, **103**, 9, pp. 507-514 (1993-9)
- (3) T. Sakai, H. Nagata, and T. Takada: "Surface Charge of Positive Streamer on Dielectric Material", *T. IEE Japan*, Vol. 98-A, No.10, pp. 553-539 (1978-10) (in Japanese)
堺 孝夫・永田博道・高田達雄:「誘電体沿面における正ストリーマと電荷」, 電学論A, **98**, 10, pp. 553- 539 (1978-10)

- (4) Y. Yamano : "AC Breakdown through Narrow Chink between Two Insulating Walls", *T. IEE Japan*, Vol. 114-A, No. 6, pp. 481-486 (1994-6) (in Japanese)
 山野芳昭 : 「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」, 電学論 A, **114**, 6, pp. 481-486 (1994-6)
- (5) Y. Yamano and T. Tsurumizu : "Effect of Charge Accumulation on ac Breakdown through a Crack between Two Insulating Walls", *IEEE Trans. DEI*, Vol. 2, No. 3, pp.492-498 (1995)
- (6) H. H. Hull : "A Method of Studying the Distribution and Sign of Static Charge on Solid Materials", *J. Appl. Phys.*, Vol.20, pp.1157-1159 (1949-12)

渡 辺 憲 道

(正員) 1967年4月23日生まれ。91年3月東京理科大学工学部電気工学科卒業。92年警察庁科学警察研究所勤務。静電気学会会員

山 野 芳 昭

(正員) 1951年3月17日生まれ。76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。80年6月東京農工大学工学部助手。88年4月千葉大学教育学部講師。同助教授を経て、現在同教授。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。