

## 小論文

## くぼみ電極による交流沿面部分放電の低減とその要因

鶴水達也\*, 山野芳昭\*<sup>†</sup>

(1997年3月17日受理)

Decrease in ac Surface Partial Discharges by  
Hollow Electrode and Its Factors

Tatsuya TSURUMIZU\* and Yoshiaki YAMANO\*

(Received March 17, 1997)

We studied a decrease in ac surface partial discharges (surface PD) by using hollow electrode. In the experiments, the surface PD was measured in air by changing a width of the hollow space ( $h$ ) and a thickness of an insulator ( $t$ ). The insulator used had an inner electrode connected to ground potential. The most effective decrease in the surface PD was obtained when  $h=7$  mm and  $t=7.5$  mm. Under these dimensions, an integrated magnitude of the PD pulse for the hollow insulator was 82% smaller than that for the insulator without hollow. The factors, which act on the decrease in surface PD by the hollow electrode, were discussed using the experimental results and calculation of electric field. It was found that the decreasing ratio of surface PD measured is increased when the increasing ratio of a cross-angle is increased. The cross-angle is an angle formed by electric force line and insulating surface. The field relaxation near the triple junction by accumulated charge on the insulator (produced by the surface PD) was estimated not to be a remarkable factor for the decrease by the hollow electrode.

## 1. はじめに

高電圧絶縁機器において、絶縁物-高電圧導体-気体が接触する部分(トリプルジャンクション:以下では、TJと略す)は電界の歪み・集中が生じやすく、沿面部分放電が発生しやすい。沿面部分放電が発生すると、絶縁材料の劣化が促進し、高電圧機器の信頼性を低下させることにつながる。

筆者らは以前に、“くぼみ電極”を用いると、背後電極を有する絶縁物のTJで発生する交流沿面部分放電(以下では、PDと略す)の低減ができることを示した。前報<sup>1)</sup>では、“くぼみ電極”によるPDの低減効果に影響を与える要因として、二つの可能性を示唆した。すなわち、(1)PDの発生にともなって絶縁物表面に帯電・蓄積する電荷に起因したTJ近傍の電界の変化、(2)“くぼみ電極”の形状そのものに起因したTJ近傍の電界の変化である。

しかし、二つの要因それぞれについて、その妥当性は考えられるものの、PDの低減にどの程度顕著な影響を及ぼしているのかは明らかではない。本報告では、上述の二つの要因に関して、新たな実験結果と数値計算のもとに検討を行った。

キーワード:くぼみ電極, 部分放電, 背後電極, 沿面電界, 蓄積電荷

\* 千葉大学教育学部 (263 千葉市稲毛区弥生町 1-33)  
Faculty of Education, Chiba University, 1-33 Yayoicho,  
Inage-ku, Chiba 263, Japan

## 2. 実験方法

## 2.1 くぼみ電極の形状

“くぼみ電極”の形状(断面図)を図1(a)に示す。絶縁物は外形20 mmの塩化ビニル製のパイプである。パイプの中には硫酸銅水溶液を注入し、それを背後電極として使用した。今回は、くぼみ空間幅( $h$ )を $5\text{ mm} \leq h \leq 15\text{ mm}$ の範囲で変化させた。絶縁物の厚さ( $t$ :パイプの肉厚)は、 $2\text{ mm} \leq t \leq 7.5\text{ mm}$ の範囲で変化させた。TJにおける電極曲率半径は5 mmである。また比較として、くぼみのない電極(“くぼみなし電極”:図1(b))も用いた。電極の表面はすべて鏡面仕上げを行っている。

## 2.2 沿面部分放電の測定方法

沿面部分放電の測定系の概要を図1(c)に示す。背後電極は接地側に接続してある。部分放電測定時の交流50 Hz印加電圧は“くぼみ電極”使用時の部分放電開始電圧の1.2倍の値である。部分放電開始電圧は、 $1 \times 10^{-11}$  C以上の放電電荷を持つ部分放電パルスが検出されたときの印加電圧の値とした。なお、本論文では交流電圧を実効値で表示する。

測定は電圧を印加してから3分後に開始した。図中のインピーダンスZで検出された部分放電電流信号は増幅器を通して、デジタルストレージオシロスコープへ導かれた後、PCへ送られる。一つの試料につき交流印加電圧1 cycles分のパルス信号を45 sごとに、合計300 cyclesの取

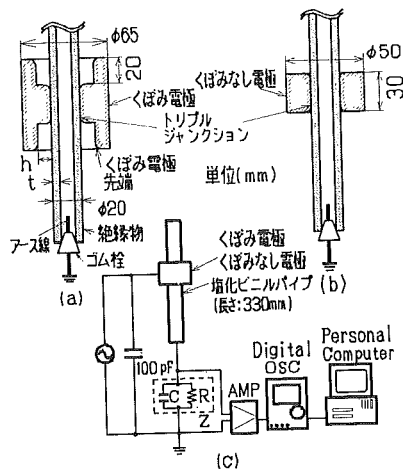


図1 試料の形状と部分放電測定系  
Fig. 1 Configuration of specimen and diagram for PD measurement.

(a) くぼみ電極と絶縁物, (b) くぼみなし電極と絶縁物, (c) 部分放電測定系,  $h$ : くぼみ空間幅,  $t$ : 絶縁物の厚さ,  $Z$ : 検出インピーダンス ( $C$ : 2,200 pF,  $R$ : 560  $\Omega$ ), AMP: 増幅器.

り込みを行った。なお、見かけの放電電荷の絶対値が  $1 \times 10^{-11}$  C 以上のパルスについて取り扱った。

### 2.3 絶縁物表面の電位分布の測定

PD 開始電圧の 1.2 倍の電圧を 5 分間印加した後、印加電圧を遮断した。電圧の遮断位相は交流電圧のほぼゼロクロスである。以下では、交流電圧の極性が正 $\rightarrow$ 負あるいは負 $\rightarrow$ 正となる瞬間の位相を、それぞれを正 $\rightarrow$ 負あるいは負 $\rightarrow$ 正のゼロクロスという。実測によると印加電圧のゼロクロスより約 4~5 deg ずれた位相で遮断が行われている。次に、高電圧電極のみを取りはずした後、表面電位計のプロープを絶縁物表面に沿ってスキヤニングさせながら、絶縁物表面の電位分布を測定した。スキヤニングのステップ間隔は 1 mm である。使用した表面電位計 (Monroe: Model 260) のプロープの分解能は  $3 \times 6$  mm ではあるが、この測定によって絶縁物表面のおおよその電位分布は把握できるものと考えられる。なお実験は、すべて温度 20~23°C、湿度 50~55% に調節された室内で行った。

### 2.4 TJ 近傍における電界の数値計算

本実験に使用した形状の絶縁物における TJ 近傍の電界を、電荷重畳法による数値計算<sup>2)</sup>により求めた。3次元回転対称場において、絶縁物の比誘電率を 3.4 として計算を行った。用いた仮想電荷の総数は 1,024 個である。電極表面における計算結果の誤差が 0.3% 以内に収まるように仮想電荷の配置を行った。

## 3. 実験結果と検討

### 3.1 くぼみ電極による PD の低減効果について

前報<sup>1)</sup>では、くぼみ空間幅 ( $h$ ) を 10 mm 一定の状態

の発生数と放電電荷の低減効果を示した。本報では、 $h$  を 5~15 mm の間で変化させたときの低減効果を示す。

図2および図3は、絶縁物の厚さ ( $t$ ) およびくぼみ空間幅 ( $h$ ) を変化させたときの“くぼみ電極”における PD 発生パルス数および放電電荷を示したものである。図中の発生パルス数および放電電荷は、印加電圧 100 cycles 分の積算値に換算してある。なお放電電荷は、その絶対値を積算している。PD は電極の両端で発生するため、発生パルス数および放電電荷は両端での発生量の合計である。比較のため、図には“くぼみなし電極”におけるデータも絶縁物の厚さ ( $t$ ) のみをパラメータとして載せている。

これらの図からわかるように、実験を行った  $t$  および  $h$  の範囲においては、“くぼみ電極”の使用により PD の積算発生数および積算放電電荷が低減している。 $t$  を一定にして  $h$  を変化させた場合は、 $h$  が 7~10 mm において PD の低減効果が高くなる。  $h$  を 5 mm に近づけると、測

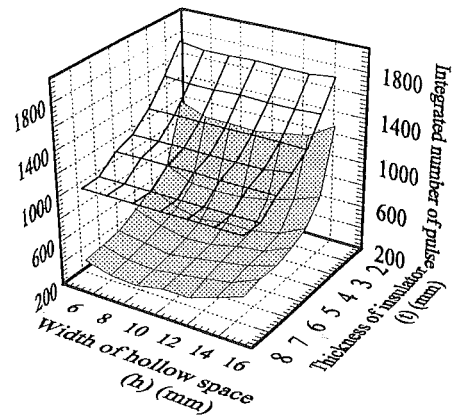


図2 くぼみ電極における PD パルスの積算発生数  
Fig. 2 Integrated number of PD pulse for hollow electrode.

実線はくぼみなし電極における積算発生数。データは印加電圧 100 cycles 分の積算値に換算。

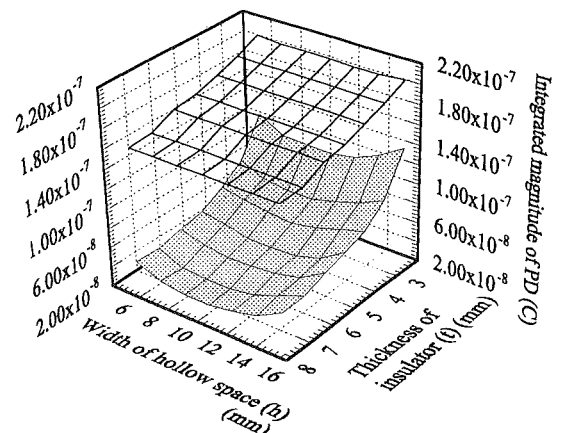


図3 くぼみ電極における PD パルスの積算放電電荷  
Fig. 3 Integrated magnitude of PD pulse for hollow electrode.

実線はくぼみなし電極における積算放電電荷。データは印加電圧 100 cycles 分の積算値に換算。

定される積算発生パルス数ならびに積算放電電荷が増加する傾向にある。これは、 $h$ を5 mm 近辺まで近づけると図1における“くぼみ電極の先端”付近から、PDの発生が観測されることに原因があると考えられる。したがってこれ以降の検討は、 $h \geq 7$  mm の範囲で行うこととする。

実験を行った範囲で最大の低減効果が観測されたのは、 $t=7.5$  mm および  $h=7$  mm の場合である。この場合、PDパルスの積算発生数および積算放電電荷の減少率は、それぞれ約71%および約82%であった。

“くぼみ電極”によりPDが低減する原因として、前述した二つの要因を前報<sup>1)</sup>で示した。以下では、この二つの要因について、実験結果を基に検討を行う。

### 3.2 帯電・蓄積電荷に基づく絶縁物表面の電位分布

図4はTJ近傍に帯電・蓄積した電荷(以下では、表面電荷という)に基づく電位分布の一例である。図に示す表面電位分布は、ほぼゼロクロスで遮断したものである。印加電圧をほぼゼロクロスの位相で遮断を行っているため、電圧遮断に起因した逆放電の影響は少ないものと考えられる。図に示すように、電圧遮断位相がどちらのゼロクロスにおいても、電位分布はピークを持っている。ピークからTJまでの絶縁物表面の領域では、交流の各cycleで発生する正および負のPDに基づく電荷の帯電と中和が繰り返されているものと考えられる<sup>3)</sup>。一方、ピークより離れた絶縁物表面の領域では、どちらのゼロクロスにおいても正極性の電位が観測される。これは、負のPDによる正電荷(正のPDに基づくもの)の中和が完全に行われなため、絶縁物表面に正電荷が蓄積することによるものと考えられる<sup>3)</sup>。平板状絶縁物表面におけるPDにおいても、同様の原因と考えられる正電荷の蓄積が報告されている<sup>4)</sup>。

図4を見ると、どちらのゼロクロスにおいても、表面電位のピークは“くぼみなし電極”より“くぼみ電極”の方がTJに近い位置に存在している。しかし、PD発生時の印加電圧の値を考えると、ピークにおける表面電位の値は極めて低い。図4に示した絶縁物の厚さが7.5 mmの場合、印加電圧は11.8 kVである。

### 3.3 TJ近傍の電界に及ぼす表面電荷の影響とPDの低減効果との関係

測定した絶縁物表面の電位分布から求めた帯電電荷分布を用いて、帯電電荷がTJ近傍の電界に及ぼす影響を数値計算によって検討した。絶縁物の帯電電荷密度が最大になると予想される印加電圧の位相は、印加電圧が正あるいは負のピークとなる位相(それぞれ90 degと180 degの位相角に対応するものとする)であろう。したがって、印加電圧が正および負ピークの位相における電界の計算を行った。ただし帯電電荷分布は、以下に述べる理由から、印加

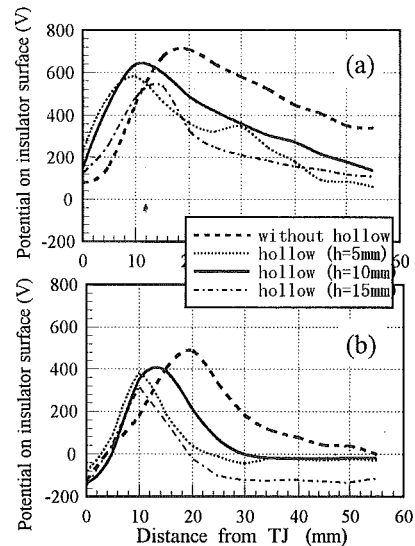


図4 絶縁物の表面電位分布

Fig. 4 Distribution of surface potential on insulator.

(a)印加電圧をほぼ正→負のゼロクロスで遮断、(b)印加電圧をほぼ負→正のゼロクロスで遮断。PD発生時の印加電圧: 11.8 kV,  $t: 7.5$  mm.

電圧が正ピークのときは図4(a)の分布を、負ピークのときは図4(b)の分布を用いた。

前報の実験結果<sup>1)</sup>で示したように、90~180 degおよび270~360 degの位相角の範囲で発生するPDは、発生数および放電電荷ともに少ない。すなわち、絶縁物の厚さが2.5 mmの場合、90~180 degおよび270~360 degで観測されるパルスはそれぞれ0.2個/cycle程度である。そしてそれらの放電電荷は高々 $2 \times 10^{-11}$  C/pulseである<sup>1)</sup>。絶縁物の厚さが7.5 mmでのPDの発生数はさらに少ない。このことから、印加電圧の正および負のピークにおける表面電荷分布は、それぞれ図4(a)および図4(b)における分布と大幅な違いはないものと予想される。

数値計算の結果、“くぼみ電極”において表面電荷の有無に起因して生じる絶縁物表面の電界の変化率は、今回の実験の範囲において7%以下であった。これは、前述したように、印加電圧に比べて表面電荷の電位が極めて低い、すなわち帯電密度が極めて低いことに起因していると考えられる。TJから発生するPDは帯電電荷に基づく電界緩和によって規制されているが、電荷の高密度な帯電あるいは特別な分布が“くぼみ電極”によるPD低減効果自体の主たる要因になっているとは考えにくい。

### 3.4 絶縁物表面と電気力線とが交差する角度とPDの低減率との対応性

本項では、“くぼみ電極”の形状そのものに起因した電界の変化がPDの低減に及ぼす影響について検討を行う。前報<sup>1)</sup>では、“くぼみ電極”を使用することにより、絶縁物表面における水平電界成分の減少と垂直電界成分の増加が、PD

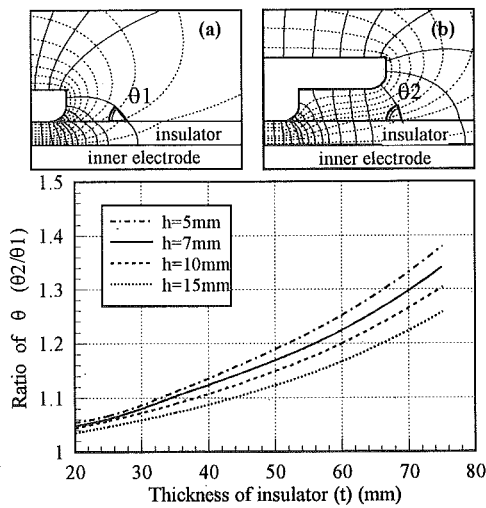


図5 交差角の比 ( $\theta_2/\theta_1$ ) と絶縁物の厚さとの関係  
 Fig. 5 Relation between ratio of  $\theta$  ( $\theta_2/\theta_1$ ) and thickness of insulator.

(a) くぼみなし電極における電気力線と等電位線, (b) くぼみ電極における電気力線と等電位線, 交差角は TJ から 15 mm 離れた絶縁物表面における値.

の低減に関与していると考えられることを述べた。すなわち、絶縁物表面における電界の水平成分の減少と垂直成分の増加は、発生した PD の伸びを抑制する方向に作用するものと考えた。もしこのことが PD の低減と関連しているとすれば、絶縁物表面と電気力線とが交差する角度 (交差角) が PD の低減に大きく関与していることが考えられる。

図5は、“くぼみなし電極”を“くぼみ電極”に変えることによる交差角 ( $\theta$ ) の変化率を、数値計算から求めたものである。交差角は TJ から 15 mm の絶縁物表面における値を用いている。この図から、絶縁物の厚さ ( $t$ ) が厚くなるに従い、またくぼみ空間幅 ( $h$ ) が 15 mm から 7 mm に近づくほど、交差角の比が大きくなる傾向にあることがわかる。TJ から 5~20 mm の範囲での交差角の値を用いても上述の傾向は変わらない。

次に、図2と図3に示した測定結果を用いて、“くぼみ電極”による PD 低減の効果と、交差角の比との対応性を調べてみた。図6は、“くぼみなし電極”を“くぼみ電極”に交換することによる交差角の比 ( $\theta_2/\theta_1$ ) と、PD パルスの発生数および放電電荷に関する減少率との関係をプロットしたものである。図における交差角は、TJ から 15 mm における値を用いている。PD パルスの減少率とは、(くぼみ電極における値)/(くぼみなし電極における値)のことである。

図6のプロットが示すように、“くぼみなし電極”を“くぼみ電極”に交換した場合、交差角の比が大きいくほど PD の発生数ならびに放電電荷量の積算値の減少率が大きくなる傾向にある。この傾向は、TJ から 5~20 mm の範囲での交差角の値を用いても変わらない。このように交差角の比と PD の低減効果との間には、実験を行った範囲にお

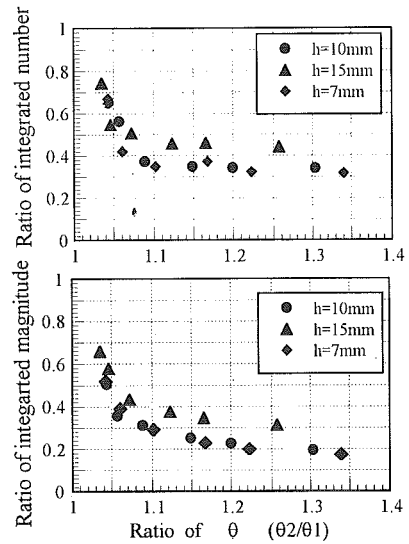


図6 PD パルスの発生数および放電電荷量の減少率と交差角 ( $\theta$ ) の比との関係

Fig. 6 Relation between increasing ratio for cross angle ( $\theta$ ) and decreasing ratio for number or magnitude of PD pulse.

絶縁物の厚さ 2~7.5 mm におけるデータをプロットした。

いて、結果として一応の対応がとれることがわかった。“くぼみ電極”による PD 低減は、“くぼみ電極”自体の形状に起因した電界の変化が影響を与えている可能性が高いものと考えられる。

4. まとめ

1) 本実験の範囲において、“くぼみ電極”による PD の低減効果が最も大きく観測されたのは、 $t=7.5$  mm,  $h=7$  mm の場合である。この場合、PD パルスの発生数および放電電荷の減少率は、それぞれ積算値で約 71% および約 82% であった。

2) TJ から発生する PD は絶縁物表面上の帯電電荷に基づく電界緩和によって規制されてはいるが、電荷の高密度な帯電あるいは特別な分布が“くぼみ電極”による PD 低減効果自体の主たる要因になっているとは考えにくい。

3) “くぼみなし電極”を“くぼみ電極”に交換することによる交差角の増加が大きいくほど、PD の低減率 (実測値) が大きくなる傾向がみられた。

参考文献

- 1) 鶴水達也, 山野芳昭: 電気学会論文誌 A, **117-A** (1997) 324
- 2) 河野照哉, 宅間 董: 数値電界計算法, p. 188, コロナ社, (1980)
- 3) Y. Yamano, Y. Takahashi and S. Kobayashi: IEEE Trans. Elect. Insul., **EI-20** (1985) 529
- 4) 川崎俊之, 高田達雄: 静電気学会誌, **18** (1994) 538