針状ボイドにおける放電電荷分布の位相角解析

准員 瀬戸 啓司 (武蔵工大)

正員 伊藤 泰郎 (武蔵工大)

正員 堺 孝夫 (武蔵工大)

非会員 江原 由泰 (武蔵工大)

1. ま え が き

ますます強まる安定した電力供給への要請に対し、電力機器や電力ケーブルなどをはじめ、電力系統における絶縁性能の重要性は一段と高められていると言える。そこで、従来に比べ絶縁材料として耐久性、電気的特性などの優れた高分子材料が広く用いられている。また、それに従い使用電界も向上してきている。しかし、高分子材料内部または導体との境界にボイドなどの欠陥が存在すると、そこで部分放電を生じ材料を劣化させ、ついには絶縁破壊を生じてしまうことは、以前より知られている事実である。この問題に対しては多くの研究がなされ、そして様々な対策が講じられてきた⁽¹⁾。しかし現在に至るまで、それらの対策は必ずしも万全ではない。絶縁組織の中で、部分放電が発生しないことが望ましいが、近年では発生してもその放電が致命的であるかどうかを問題とするようになってきた。すなわち、最低限度、絶縁破壊事故だけは防止しようという観点に立ち、破壊予知のための絶縁劣化診断法を確立しようとする動きである⁽²⁾。その中でも部分放電を測定する手法は、絶縁物中のボイドなどの欠陥部分を検出するのに有効であることから広く行われている。また、その手段もコンピュータを用いた計測および解析が主流となっている。一方、部分放電特性量の新しい情報として、部分放電パルスの発生する印加電圧の位相角に対する解析が、劣化のプロ

セスまで推定できる可能性もあるので、注目されてきている⁽³⁾⁽⁴⁾。

著者らは、放電電荷分布を印加電圧(AC 50 Hz)の位相角により分離して解析できる部分放電計測システムを独自に開発した⁽⁵⁾。それにより、平板状に広いボイド形状の場合について放電パルス分布を位相により分類し解析してきた。そこで特に本論文では、絶縁厚の厚い材料の劣化末期にみられる劣化⁽⁶⁾過程における印加電圧の位相角解析の有意性を調べた。その結果、トリッキング劣化の各プロセスに対して放電電荷分布の顕著に位相角特有な特性が確認され、その有意性を確認することができた。

2. 実 験

〈2・1〉 試料および電極構成 実験に使用した試料および電極構成を図1に示す。試料の材料としては透明性に優れ、トリッキング試験によく用いられる高分子材料である、PMMA(ポリメチルメタアクリレート、三菱レーヨン製アクリライト)を用いた。電極は高压側としてスチール製針電極、接地側として銅製平板電極を用いた。

ボイド放電からトリッキングに転移し、短時間で破壊に至るプロセスを、放電電荷分布の変化と結びつけることをまず優先して考えた。従って、ここでは厚手試料にボイドを有するものとし、以下に示す手順により作成した。

図1 試料および電極構成
Fig. 1. Sample and electrodes.

Phase Angle Analysis of Discharge Magnitude Distribution in a Fine Void. By Keiji Seto, Associate, Tairo Ito, Member, Takao Sakai, Member & Yoshiyasu Ehara, Non-member (Musashi Institute of Technology, Department of Electrical and Electronic Engineering).

瀬戸啓司：准員，武蔵工業大学電気電子工学科

伊藤泰郎：正員，武蔵工業大学電気電子工学科

堺 孝夫：正員，武蔵工業大学電気電子工学科

江原由泰：非会員，武蔵工業大学電気電子工学科

(1) 保温槽内において 180°C一定とし 15 分間加熱した。

(2) 加熱中、先端曲率半径 10 μm の標準針電極 (オグラ宝石製トリーイング試験用針電極) を図 1 のように対向平面までの距離 4 mm となるよう挿入した。

(3) 針電極挿入後、挿入時の試料のひずみを取除くために、再度 180°C一定とし 15 分間加熱した。

(4) 室温まで徐冷後、針を引抜き、針先に長さ 1.5 mm の針状ボイドを作成した。この際、ボイド内には 1 気圧の空気を封入した。また、試料と針電極はエポキシ樹脂系接着剤によりシールした。

これらの手順により作成した試料は、試験前に実体顕微鏡 (倍率 180 倍) で観察し、ボイド先端にき裂など、異常のないものを試験に用いた。また、接地側電極と試料間は密着性を良くするため、試料面には導電性銀ペイントを塗布した。

(2・2) 実験方法

(1) 高電圧加電および放電パルス計測 高電圧は交流 50 Hz, 14 kV 一定の状態に加電を継続し、トリー発生後 30 分経過するまで継続した。高電圧加電

図 2 部分放電計測システム

Fig. 2. Internal discharge pulse measurement system.

図 3 計測区間

Fig. 3. Discharge pulses measuring periods.

図 4 観測システム

Fig. 4. Observation system of tree.

中の放電電荷分布計測をするため、図 2 に示す部分放電計測システム⁽⁵⁾を用いた。放電電荷は C-R 並列回路を用いて検出し、計測システムへ入力した。システムでは、図 3 に示す区間を計測区間とし、この区間ごとに発生する正の放電パルスを区別して計測した。放電電荷分布は、発生するすべての放電の放電電荷の分布である全放電電荷分布およびこの区間を九つの等しい領域に分割した位相別放電電荷分布の二種類で計測した。それぞれの放電電荷分布は $q-n-t$ (放電電荷-発生頻度-時間) により三次元表示した。位相別放電電荷分布において、負のピークから順に各々 $\phi 1 \sim \phi 9$ と名付けた。

また、本研究においてはトリーの発生とは樹脂状の枝分かれが多数生じたときとし、一点のみの侵食が成長し、ビット状となっているものはすべてビットの生成と分類した。ここでビットは顕微鏡の倍率から、5 μm 程度が検出限界である。

(2) ボイドおよびトリー形状の観察 放電パルスの計測と同時に、ボイドおよびトリー形状を観察するために、図 4 に示すような配置に実体顕微鏡 (倍率 160 倍) を備え付け加電を行った。この際、必要に応じ顕微鏡写真を撮影し、ボイドおよびトリー形状の評価を行った。

3. 実験結果および検討

<3・1> 放電電荷分布の経時変化 図 5 に放電電荷の経時変化の代表例を示す。この分布は電圧印加 336 分後にトリーの発生がみられ、その後 24 分経過後の 360 分後に計測を停止した例である。

(a) 図に全放電電荷分布を、(b) 図に位相別放電電荷分布を示す。(a) 図において、電圧印加開始から 150 分の期間において徐々に最大放電電荷および発生頻度とも減少している。その後、171 分付近から発生頻度が増加し、そして 336 分後、放電電荷、発生頻度とも顕著な急増がみられる。この 336 分の時点において、ボイド先端には実体顕微鏡によりトリーの発生が確認され、この時点からトリーが進展を開始していた。

次に、(a) 図の全放電電荷分布を (b) 図のように位相別に分解した放電電荷分布から、次のことがわかる。電圧印加初期から、 $\phi 4 \sim \phi 9$ において発生している放電の最大放電電荷、発生頻度とも徐々に減少しており、この変化は 168 分後まで継続する。その後、電圧印加後 132 分から 168 分の期間、 $\phi 6 \sim \phi 9$ において、放電電荷分布に表示できる大きさ (検出感度 0.3 pC) の放電パルスの発生はほとんどみられない。

Fig. 5. Distribution of discharge magnitude.

しかし、このことはこの期間 (132 分～168 分) に、この位相領域 ($\phi 6 \sim \phi 9$) において放電が発生していないことを意味するものではなく、いわゆる放電電荷の群小化が生じていると考えてよい⁽⁸⁾。この群小化が生じている期間において、放電発光は弱まることなく継続していることも確認されており⁽⁷⁾、このことから放電電荷の群小化が生じていると考えるのは妥当であろう。一方、 $\phi 3$ においては徐々に放電の発生頻度が増大してきている。ここで示したように、位相別放電電荷において一方の位相領域では放電電荷、発生頻度も増大するが、他の位相領域では放電電荷、発生頻度も減少し、更に放電電荷の群小化が生ずるような変化は、放電電荷分布を位相角により分解しなければ検出できない。

その後 168 分～333 分付近において、 $\phi 5 \sim \phi 9$ で約 2 pC 以下の放電電荷の発生頻度の急増がみられる。この段階で、ボイド先端を実体顕微鏡で観察してみた

ところ、すじ状のピットが観察された (図 6)。そして、そのピットが徐々に成長し、336 分後 $\phi 3 \sim \phi 9$ において放電電荷、発生頻度も増大しており、これと同時に放電の発生領域が $\phi 2$ に広がった。この時点では、前述したようにボイド先端にトリイが発生し、進展していた。また、トリイの進展に伴い、 $\phi 4 \sim \phi 9$ において放電電荷が増大しており、特に $\phi 7 \sim \phi 9$ における増加が顕著である。

168 分～333 分付近における、約 2 pC 以下の放電電荷の発生頻度が急増している期間には、次のような現象の変化がみられた。このような分布変化 (約 2 pC 以下の放電電荷の発生頻度が急増) が生じたときに、ボイド先端を実体顕微鏡で観察してみたところ、すじ状のピットが観察されることが多かった。しかし、ボイド先端には実体顕微鏡では何も変化が確認できない場合もあった。この変化が生じたときには、分子鎖の切断など、実体顕微鏡では確認できないトリイの芽と

図 6 ボイド形状写真(90 倍)

Fig. 6. Photographs of void shape and tree.

表 1 劣化状態と放電電荷分布の変化
Table 1. Steps of deterioration and its characteristic of discharge magnitude distribution.

劣化状態	全放電電荷分布	位相別放電電荷分布
劣化初期～中期	最大放電電荷減少	最大放電電荷減少 ($\phi 4 \sim \phi 9$) 発生位相角 $\phi 3$ に広がる
劣化中期～末期	最大放電電荷減少	放電電荷群小化 ($\phi 6 \sim \phi 9$)
トリーの芽発生		2 pC 以下の発生頻度増加
トリー発生	放電電荷, 発生頻度急増	放電電荷, 発生頻度急増 ($\phi 4 \sim \phi 9$) 発生位相角 $\phi 2$ に広がる
トリー進展	最大放電電荷増大	$\phi 7 \sim \phi 9$ の最大放電電荷増大

なるものが形成されていると考えられる。図 5 の結果で確認されたビット(図 6)は、分子鎖の切断などのトリーの芽が成長したものと考えられる。

上記のように、時間の経過に対する放電電荷分布の変化とビット状のトリーの芽の形成からトリーの成長までの過程の対応について述べてきた。ここで、全放電電荷および位相別放電電荷分布の変化と劣化のプロセスとの相互関係についてまとめてみると表 1 のように結び付けることができる。

このように、放電電荷分布の変化を位相角により解析することで、劣化に対する変化が詳細となり、劣化の進展プロセスの判定を的確に行うことができる。

〈3・2〉 放電電荷分布とトリー形状 トリーが発生し、30 分経過後までの放電電荷分布の変化とトリーの密度および進展速度、すなわちトリーの形状との関係に着目し検討した。

(1) 放電電荷分布とトリー密度 顕著に異なる二つの放電電荷分布の例を図 7, 図 8 に示す。いずれの場合も、放電電荷分布が変化してから 30 分を含めたほぼ 150 分間の経時変化を示す。図 7 の分布は、電圧印加 600 分後に放電電荷、発生頻度とも増大した例である。この 600 分の時点においてトリーが発生し、進展を開始した。また、図 8 の分布は電圧印加 240 分後に図 7 の例と同様の変化を示した。このときトリーが発生し進展を開始した。

ここで図 7, 図 8 の全放電電荷分布を比較すると顕著な違いはみられない。しかし、放電電荷の比較的大きな放電 (4 pC 以上) の発生頻度が前者の分布では大きい。この放電電荷分布の違いは、トリー形状の違いに起因しているものと考えられる。図 7 および図 8 の放電電荷分布に対応するトリー形状の写真を図 9 および図 10 にそれぞれ示す。両図とも、トリー発生時および進展を開始してから 30 分経過時のトリー形状

図 7 放電電荷分布

Fig. 7. Distribution of discharge magnitude.

(a) 全放電電荷分布

(b) 位相別放電電荷分布

図 8 放電電荷分布

Fig. 8. Distribution of discharge magnitude.

図 9 トリー形状写真

Fig. 9. Photographs of tree shape.

図 10 トリー形状写真

Fig. 10. Photographs of tree shape.

写真を示す。両トリー写真では、トリー密度の違いが顕著である。すなわち、図 9 のトリーのほうが図 10 のトリーに比べ密度が高い。このトリー密度の違いは全放電電荷分布としては 4 pC 以上の放電の発生頻度に現れていると考えられる。

次に、図 7 および図 8 の位相別放電電荷についてみると、全放電電荷分布でみられた 4 pC 以上の放電の発生頻度が図 7 で高いことは、当然全放電電荷分布と共通している。また、位相別放電電荷分布を比較すると、 ϕ の次数の小さい位相領域、すなわち $\phi 3 \sim \phi 5$ 付近での最大放電電荷の大きさおよびその発生頻度は、図 8 の場合より図 7 のほうが大きい点が顕著に異なっている。このことは、トリー密度が大きい場合のほう(図 9 の場合のほうが図 10 の場合よりトリー密度大)が、 ϕ の次数の小さい領域における最大放電電荷の大きさおよび放電電荷の発生頻度が大きいことを示している。このことを明らかにするために、 $\phi 3$ の最大放電電荷の大きさとトリー密度の関係を図 11(サンプル数: 27)に示した。ここで示した高トリー密度領域とは、次のように定義した。トリーの形状を写真撮影し、14 倍となるようプリントする。その写真上に、次のような二つの条件を満たす円を描き、その円の直径により定義した(図 12 に例を示す)。

(i) ボイド先端に接する円

(ii) 円内において、白色化したトリーの占める面

 図 11 $\phi 3$ の最大放電電荷とトリー密度の関係

 Fig. 11. Relation of maximum discharge magnitude in phase area $\phi 3$ and tree density.

積が、円全体の面積の 90 % となるような円

図 11 では、トリ密度は $\phi 3$ における最大放電電荷の大きさと相関関係にあるとみることができる。

上記のように、 ϕ の次数の小さい領域における最大放電電荷とトリ密度との間に比較的顕著な相関が得られた理由は、以下のように考えている。

$\phi 3 \sim \phi 5$ で生じる放電は印加電圧の極性が変わってから生じる最初の放電である。正のピークから負のピークまでの半周期の間に生じた負の放電による残留電荷の影響を最も受けやすい条件下にある。すなわち、トリ密度の高い場合は、トリ密度の低い場合に比べ、それだけ多くの残留電荷がトリ管壁にたい積していると考えられる。このたい積電荷の影響により放電が大きくなったと考えている。このことは、等価的にみるとトリ密度が高いことが放電面積が拡大した状態と考えることもできる。一方、 $\phi 7 \sim \phi 9$ で生じる放電

図 12 高トリ密度領域の定義
Fig. 12. Definition of high tree density.

(a) 全放電電荷分布

(b) 位相別放電電荷分布

図 13 放電電荷分布
Fig. 13. Distribution of discharge magnitude.

は残留電荷の影響が小さく、上記のような違いが明りように現れなかったであろう。

全放電電荷分布においては、大きい放電電荷の発生頻度の「多少」のみが、トリの密度の違いを示す判定基準であった。しかし、位相別放電電荷分布により解析することにより、 ϕ の次数の小さい領域での最大放電電荷の大きさおよび大きい放電電荷の発生頻度の「多少」など、トリ密度の違いが複数の放電電荷分布パラメータの変化として現れた。従って、放電電荷分布の位相角特性からのトリの進展形状の判定が比較的容易となった。このことから、トリイング劣化に対して放電パルスの発生位相角による解析は有効であると考えられる。

(2) 放電電荷分布とトリ進展速度 前述のように、ピットの発生、トリの発生およびトリの進展により、放電電荷の大きさおよびその発生頻度とも、各プロセスにおいて特徴的な変化がもたらされる。特に、全放電電荷分布より位相別放電電荷分布における変化が顕著であることを示した。ここでは、トリの進展速度と放電電荷分布の変化との関連性に着目し検討する。

図 13 および図 14 にトリ長さの異なる場合の放電電荷分布を示す。図 13 は電圧印加 162 分後に、また

(a) 全放電電荷分布

(b) 位相別放電電荷分布

図 14 放電電荷分布
Fig. 14. Distribution of discharge magnitude.

(a) 全放電電荷分布

(b) 位相別放電電荷分布

図 15 トリー形状写真(14倍)

Fig. 15. Photographs of tree shape (tree type).

図 16 トリー形状写真(14倍)

Fig. 16. Photographs of tree shape (bush type).

図 14 は電圧印加 897 分後に、それぞれ放電電荷、発生頻度とも増大し、このときトリーが発生し、進展を開始した。

図 13 および図 14 の全放電電荷分布を比べると、最大放電電荷の増加割合は前者のほうが後者に比べ大きい。図 13、図 14 の放電電荷分布に対応したトリー進展の変化を、それぞれ図 15、図 16 に示す。両図は従来からトリー状トリーおよびブッシュ状トリーとその形状から分類される。全放電電荷分布の比較からみると、最大放電電荷の増加割合、すなわち単位時間あたりの最大放電電荷の増加割合が大きい場合のほうがトリーの進展速度が速いことをおおむね判定することができる。従って、全放電電荷分布の最大放電電荷の増加割合によりトリーの進展速度の判定が可能であると言える。このことはまた最大放電電荷の増加割合により、トリーがトリー状かブッシュ状かを判定できることを示している。

更に、図 13、図 14 の位相別放電電荷分布からみると、トリー進展速度の判定はより明瞭となる。位相別放電電荷分布では、 ϕ の次数の小さい位相領域よりも ϕ の次数の大きい位相領域のほうが最大放電電荷の増加割合が顕著である。図 13(b) の $\phi 7 \sim \phi 9$ 付近の最大放電電荷の増加割合のほうが図 14(b) のそれに比べ大きいことがわかる。このことから、全放電電荷分布における最大放電電荷の変化率は、位相別放電電荷における ϕ の次数の大きい領域($\phi 7 \sim \phi 9$ 付近)の最大放電電荷の変化率に依存していると言える。トリーの進展速度は伸び長さに相応し、従って進展速度

 図 17 $\phi 8$ の最大放電電荷とトリーの伸びの関係

 Fig. 17. Relation of maximum discharge magnitude in phase area $\phi 8$ and tree length.

は $\phi 7 \sim \phi 9$ の位相領域の最大放電電荷の増加割合に依存することになる。この理由は、次のように考えられる。針状ボイドで起こる放電は、針電極近傍では印加電圧の低い領域で発生し、針電極より離れたトリー先端では印加電圧の高い領域で発生するであろう。従って、トリー長が長い場合の放電電荷は印加電圧の高い $\phi 7 \sim \phi 9$ の領域の最大放電電荷を支配する。前項で述べたトリー密度を評価した $\phi 3$ における最大放電電荷

は電極近傍で発生する放電を示していると言うことができる。このように、位相別放電電荷の $\phi 7 \sim \phi 9$ の領域の最大放電電荷の増加割合により、トリ－の進展速度が判定できることが明らかとなった。以上に示した位相別放電電荷分布の変化とトリ－の進展速度の関係は、他の多くの試料でも共通した現象である。図17に $\phi 8$ の最大放電電荷とトリ－の伸びの関係を示す(サンプル数:16)。同図をみると、 $\phi 8$ の最大放電電荷の大きさはトリ－の伸び長さと相関関係にあるとみることができる。

トリ－密度の判定の場合と同様に、全放電電荷分布より位相別放電電荷分布のほうが、トリ－の伸びに対する最大放電電荷の変化が明りょうに現れている。トリ－の密度や伸び速度の判定には、全放電電荷分布より位相別放電電荷分布のほうが確実であり容易であることが明らかとなった。

4. ま と め

針状ボイド内における放電の発生からトリ－の進展までのプロセスにおける放電電荷分布変化の位相特性を解析したところ、以下のことが明らかとなった。

(1) 劣化初期から中期において、 $\phi 4 \sim \phi 9$ の位相角領域で最大放電電荷が減少する。また、放電パルスの発生位相角領域が印加電圧の負のピーク付近の $\phi 3$ に広がる。

(2) 劣化中期から末期において、 $\phi 4 \sim \phi 9$ の位相角領域で放電電荷の群小化が生じる。また、放電電荷の群小化が生じていたものが、トリ－の芽が形成されることにより、突然約2 pC以下の放電電荷の発生頻度が増大する。

(3) トリ－が発生することにより、 $\phi 4 \sim \phi 9$ の位相角領域において放電電荷、発生頻度とも増大する。

また、放電パルスの発生位相角領域が負のピーク付近の $\phi 2$ にまで広がる。

(4) トリ－発生後、放電電荷分布の比較的大きい放電電荷(約4 pC以上)の発生頻度により、トリ－密度の判定が可能である。特に、位相別放電電荷分布の $\phi 3 \sim \phi 5$ 付近の位相角領域に顕著に特性が現れており、その位相角領域の最大放電電荷および比較的大きい放電電荷(約4 pC以上)の発生頻度により判定が可能である。

(5) トリ－発生後、放電電荷分布の最大放電電荷の増加割合によりトリ－の進展速度の判定が可能である。特に、位相別放電電荷分布の $\phi 7 \sim \phi 9$ 付近の位相角領域における最大放電電荷の増大割合とトリ－の伸びの対応が顕著であり、この位相角領域を解析することでトリ－の進展速度の判定が可能である。

終りに、本研究を遂行するにあたり手伝っていただいた坪井宏之氏、成願克彦氏、斎藤 忠氏に感謝いたします。

(平成元年3月29日受付, 同元年8月11日再受付)

文 献

- (1) 例えば、電気学会技報(II)部, No. 164 (昭59)
- (2) 電気学会技報(II)部, No. 182 (昭59)
- (3) 岡本・田中:「部分放電のサイクル平均 $\phi-q$ 特性—6種類の電極形状により実験—」, 電学論A, 102, 381 (昭57-7)
- (4) 長尾・伊崎・藤野・小崎:「パソコンによる部分放電解析システムのトリ－検出への応用」, 電気学会絶縁材料研資, EIM-84-70 (昭59)
- (5) 松崎・伊藤・堺:「ポリエチレン内部の円筒形ボイドにおける部分放電特性の位相角解析」, 電学論A, 108, 111 (昭63-3)
- (6) 電気学会技報(I)部, No. 100 (昭46)
- (7) 瀬戸・斎藤・坪井・江原・伊藤・堺:「トリ－イング劣化における放電電荷分布の位相角解析」, 平元電気学会会大, No. 275
- (8) 北村:「エポキシ樹脂の内部部分放電劣化に関する研究」, 学位論文