ボイド放電劣化における破壊予知

正員 伊藤 真澄 (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)

Prediction of Breakdown by Void Discharge Aging

Masumi Ito, Member, Tairo Ito, Member, Takao Sakai, Member, Yoshiyasu Ehara, Non-member (Musashi Institute of Technology)

Recently, the necessity of establishing the way to diagnose the aging of insulation materials and to prediction of insulation breakdown become important.

In this paper, the prediction of breakdown is considered. A cylindrical void which is made of polyethylene is used for experiments. And the distribution of the discharge magnitude in relation to phase angle of applied voltage is measured by a partial discharge measuring system.

The discharge measurements, such as the discharge magnitude Q , number of pulses N , average discharge magnitude Q_{AV} , the skewness and the kurtosis are calculated from the distribution to estimate the time to breakdown. In the early stage of aging, life (time to breakdown) can be estimated by regression line which shows the relation between the life and the discharge measurement.

And the new parameters G and C are proposed for the prediction of breakdown and are examined their effectiveness for prevention. G -parameter is the center of gravity and C -parameter is the gradient of the discharge distribution. They symbolize the portent of the breakdown. It is confirmed that these two parameters are efficient to predict the breakdown just before the breakdown occurred.

キーワード：ボイド，部分放電，放電電荷分布，破壊予知

1. ま え が き

近年，電力機器が大容量化，高電圧化される一方，絶縁材料は薄膜化，軽量化が要求され，ポリエチレンなどの高分子材料が絶縁材料として広く用いられている。高分子絶縁の高電圧下における絶縁劣化の大きな原因の一つに，部分放電によるものがあり，特にボイドの存在下における部分放電劣化はその主因ともなり得る。この問題に対してはこれまで多くの研究がなされ^{(1)~(3)}，様々な対策が講じられてきたが，これらの対策も必ずしも万全であるとは言えない。絶縁組織中では部分放電が発生しないことが望ましいが，最近ではその発生が致命傷になるかどうかの判断が問題とさ

れてきている。すなわち，部分放電の発生により短時間に絶縁破壊に至るかどうかの判断が重要になり，絶縁破壊事故防止のための絶縁劣化診断法の確立が要請されている。また，近年ではマイクロコンピュータの発達に伴い，部分放電の測定にも利用されるようになり，測定データの分解能の向上や多量のデータを統計的に処理することが可能となり，絶縁劣化診断においてもコンピュータ診断が主流となっている。特に，最近では部分放電の発生する印加電圧の位相角に対する解析も行われ⁽⁴⁾，劣化プロセス推定のためのデータが蓄積されつつあり，今後の劣化診断のためのエキスパートシステムの構築へ多大なデータを供給することが期待される。

著者らは、これまで独自で開発した部分放電計測システムにより、平行平板状ボイドまたは絶縁厚の厚い材料の劣化末期に見られるトリイグ劣化の各プロセスに対して印加電圧の位相角解析の有意性を確認してきた⁽⁵⁾。しかし、これらの診断は定性的な判断を基に行われ、また実験の再現性にも問題があった。そこで本論文では劣化初期における実験データを蓄積し、それらを基に寿命推定を行い、更に破壊直前では破壊の前兆を象徴する放電電荷分布の変化を特徴づけるパラメータを考案し、破壊予知への有意性を検討した。特にここでは、絶縁層が薄い試料について取扱っており、放電の局所化や群小化から、破壊までの期間が比較的短い場合の検討を行った。

2. 実験

〈2・1〉 試料および電極構成 試料および電極構成を図1に示す。材料は絶縁性能に優れ、電力機器あるいはケーブルなどに広く用いられているポリエチレンを使用した。試料は一辺10 cm、厚さ1 mmの低密度ポリエチレン板の中央に直径21 mmの孔を開け、その両面に P_2O_5 の入ったデシケート内で24時間以上乾燥させた、厚さ50 μm のPEフィルム（昭和電工製ショーレックス S 5008）をシリコングリスによって貼合せ、ボイド内が空気1気圧となる三枚重ねの円筒ボイドを有する模擬ボイドを作成した。比較的大きなボイド径としたのは、赤外光の通路をできるだけ広くして精度を上げるためである。試料の両側には、500メッシュ（大きさ40×40 mm開孔率68%）を密着させて、これを電極とした。しかし、赤外線吸収スペクトルによる劣化生成物の解析に関しては別途報告する。

図1 試料および電極構成
Fig. 1. Specimen and electrode configuration.

〈2・2〉 実験方法 図2に実験システムを示す。放電パルスの検出はC-R検出回路を用い、部分放電計測システムへ入力した。システムでは、図3に示すように50 Hzの印加電圧の負のピークから正のピークまでの10 msの区間を九つの等しい領域($\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_9$)に分け、各々の領域で発生する放電パルスの放電電荷と、発生頻度を計測し、コンピュータに取り込み処理した。測定した放電パルスは正パルスのみであるが、図1の電極系は対称形であるので放電特性に対する印加電圧の極性効果は無視して、半周期の計測でも放電特性の解析には十分である。実験はAC 50 Hz, 4.2 kVを印加し、放電電荷測定は電圧印加直後から破壊に至るまで行った。放電電荷分布は図4のような位相角別の $q-n-t$ 三次元データである。これを計算処理し、放電諸量として放電電荷 Q 、パルス発生頻度 N 、平均放電電荷 Q_{AV} を求めた。またこの放電諸量の表示方式を換え、位相角特性として $\phi-Q-t$ 、 $\phi-N-t$ 、 $\phi-Q_{AV}-t$ 、表示した。図5に $\phi-Q-t$ 特性の一例を示す。更に位相角特性の分布形状を特徴づけるパラメータとして岡本らの提案した⁽⁶⁾分布のひずみ度 S 、とがり度 K を求めた。代表的な分布のひずみ度 S 、とがり度 K を図6に示す。ひずみ度 S は分布の対称性を表すパラメータであり、分布の形状が右より

図2 部分放電計測システム
Fig. 2. Partial discharge pulse measurement system

図3 位相角区間
Fig. 3. Phase angle window

図 4 位相角別放電電荷分布

Fig. 4. Distribution of discharge pulse magnitude at each phase angle window.

図 5 放電電荷の位相角特性

Fig. 5. Discharge magnitude as a function of phases.

図 6 ひずみ度 S , とがり度 K と分布形状
Fig. 6. The skewness and the kurtosis of several distributions.

の場合は負の値を、右下がりの場合は正の値となる。また、とがり度 K は放電の位相的な集中度を表す。

3. 破壊予知のためパラメータ G , C の提案

本研究では、放電電荷分布の形状を特徴づけるパラ

図 7 G 値の定義

Fig. 7. Definition of G -parameter.

メータとして分布の重心 G 値と傾き C 値を定義し破壊予知への有効性を検討した。これらのパラメータは薄手試料では破壊の前兆現象と考えられる放電の群小化を象徴し、また見掛けの放電電荷そのものの値を用いていないことから、他の実験系への適用の可能性が高いと考えられる。

〈3・1〉 G パラメータ 重心 G の値は図 7 のように、 q - n 分布の幾何学的重心 G の座標を求め、その挙動を一つの数値で表すため、原点を通り 45° 傾いた直線に垂直投影した値を G 値と定義した。これは放電の群小化が

- (i) 大きい放電パルスの減少
- (ii) 小さい放電パルスの増加

図 8 放電電荷分布形状と C 値, G 値の関係
Fig. 8. Relation between distribution patterns and parameters C and G.

が同時に起こることから、45°の直線に投影した値がこれらの変化を最も感度良く感知すると考えたからである。

〈3・2〉 C パラメータ 放電電荷分布のパルス発生頻度 n を放電電荷 q の関数と考えると

$$n=f(q) \\ =C_0+C_1q+\cdots+C_nq^n \cdots \cdots (1)$$

と表すことができる。ここで $C_0, C_1, \dots, C_n$ を最小二乗法で推定する。このとき、 C_1 は近似曲線の傾きを示す。本論文では C_1 を傾き C 値として表す。放電の群小化が起こると q - n 分布は図 8 のように変化し、分布の傾きは大きくなるが、負の傾きであるので C 値は減少する。すなわち、本論文でのパラメータによる破壊予知の判断基準は G 値が増加し、C 値が減少したとき、放電の群小化が起こり破壊の前兆であると判定することができる。

4. 結果および検討

〈4・1〉 回帰分析による寿命の推定 本研究では、得られた実験データ（データ数 40）より、電圧印加後 30 分後の放電諸量と絶縁破壊の起こるまでの時間の関係を回帰分析により求め、寿命を推定した。ここで電圧印加後 30 分における放電諸量を用いたのは以下の理由による。

(1) 実験により寿命が異なるが（最短 110 分、最長 570 分）破壊を予知するにはできるかぎり早期のほうが良い。

(2) 電圧印加直後は試料の作成状態、気温、湿度等の諸条件により様々な放電特性を示し、変動が大きい。30 分ではほぼ放電開始後の過渡の状態から定常状態になる。

まず、放電諸量と寿命の関係を知るため両者の相関係数を求め、その結果を表 1 に示す。

表 1 放電諸量と寿命の相関係数
Table 1. Correlation coefficients between time to breakdown and several discharge parameters.

	Q	N	Q_{AV}	S_Q	S_N	S_{AV}	K_Q	K_N	K_{AV}
寿命	-0.664	-0.487	-0.032	-0.684	-0.684	-0.126	0.593	0.600	0.483

Q : 放電電荷 N : パルス発生頻度 Q_{AV} : 平均放電電荷 S_Q : 放電電荷のひずみ度 S_N : 発生頻度のひずみ度 S_{AV} : 平均電荷のひずみ度 K_Q : 放電電荷のとりがり度 K_N : 発生頻度のとりがり度 K_{AV} : 平均電荷のとりがり度

図 9 電圧印加後 30 分の放電電荷と寿命の相関図

Fig. 9. Correlation map between time to breakdown and discharge magnitude after 30 min.

図 10 放電電荷のひずみ度 S_Q と寿命の相関図

Fig. 10. Correlation map between time to breakdown and skewness of discharge magnitude.

これより寿命と相関が強いのは放電電荷 Q 、放電電荷のひずみ度 S_Q 、パルス発生頻度のひずみ度 S_N 、放電電荷のとりがり度 K_Q 、パルス発生頻度のとりがり度 K_N である。しかも放電電荷 Q 、ひずみ度 S_Q, S_N とは負の相関が、とりがり度 K_Q, K_N とは正の相関を示す。これらの放電諸量と寿命との関係を図 9～図 13 に示す。図 9 は放電電荷が大きいかほど寿命が短いことを示している。ひずみ度 S は図 10、図 11 のように寿命と負の相関がある。ここで用いた電極系では位相角

図 11 発生頻度のひずみ度 S_N と寿命の相関図

Fig. 11. Correlation map between time to breakdown the skewness of the pulse number distribution.

図 12 放電電荷のとがり度 K_Q と寿命相関図

Fig. 12. Correlation map between time to breakdown and the kurtosis of the discharge magnitude distribuon.

特性が右上りの分布形状になるためひずみ度 S は負の値をとる。よって分布のひずみが大きいほど S の値は小さくなる。そのため両者の相関は負となっているが、その意味は分布のひずみが大きいほど寿命が長いことを示している。また図 12、図 13 のようにとがり度 K と寿命との間には正の相関がある。ひずみ度 S 、とがり度 K の値の変化は放電の発生する位相角の広がりにより大きく影響され、 $\phi 5$ で放電が活発に起こっていない場合はひずみ度、とがり度は大きい。つまり $\phi 5$ で放電が起こっていない、放電の発生する位相角が狭いほど寿命が長いことを示している。そこでこの五つの放電諸量と寿命の関係から回帰分析より寿命を推定する。一次回帰式を以下に示す。

$$L_1 = 663.1 - 925.7 \times Q \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$L_2 = 147.9 - 551.3 \times S_Q \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$L_3 = 122.1 - 925.7 \times S_N \quad \dots\dots\dots (4)$$

図 13 発生頻度のとがり度 K_N と寿命の相関図

Fig. 13. Correlation map between time to breakdown and the kurtosis of the pulse number distribution.

表 2 回帰分析による推定寿命

Table 2. Estimated values of time to breakdown obtained by the regresion analysis.

	(A)	(B)
寿命 L	315.0	200.0
Q	371.5	232.6
S_Q	302.3	296.7
S_N	356.3	299.3
K_Q	361.7	249.4
K_N	367.6	253.0

$$L_4 = -424.5 + 374.4 \times K_Q \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$L_5 = -511.0 + 424.5 \times K_N \quad \dots\dots\dots (6)$$

これらの式により推定した例を表 2 に示す。これらは実際の寿命が (A) 315 分、および (B) 200 分であった結果に対する (2)～(6) 式による推定値である。同表より、推定結果はばらつきが比較的大きいため、これは次節で述べるパラメータによる破壊予知の補助的な目安にとどめるのが好ましい。しかし、劣化診断を行う際に、その初期においてある程度の寿命推定を行うておくことは有効であり、今後より多くのデータを蓄積することにより推定精度も向上することが期待できる。

〈4・2〉 パラメータによる破壊予知 本研究では、放電電荷分布の形状を特徴づけるパラメータとして分布の重心 G 値と傾き C 値を定義し破壊予知への有効性を検討した。これらのパラメータは破壊の前兆現象と考えられる放電の群小化を象徴し、また見掛けの放電電荷そのものの値を用いていないことから、他の実験系への適用の可能性が高いと考えられる。パラメータによる破壊予知の判断基準は G 値が増加し、 C 値

が減少したとき、放電の群小化が起り破壊の前兆であるとする。本研究では、薄手試料であるため、放電が局所化しトリが発生すると短時間に破壊に至るものと考えられ、実験もこのことを支持する結果を示した。図14にC値、図15にG値の経時変化を示す。同図より破壊の直前にC値が減少し、G値が増加していることがわかり、C値の減少、G値の増加により破壊予知ができる。このようにC値、G値はともに放電の群小化をとらえるためのパラメータであるが、G値よりもC値のほうがより群小化を明確に示す場合が多い。ひずみ度S、とがり度Kは、厚い試料におけるトリの発生を検知することを目的としているが、これらにより破壊予知を行った報告⁽⁶⁾もある。

図 14 C 値の経時変化
Fig. 14. C-parameter in each phases.

図 15 G 値の経時変化 (a)
Fig. 15. G-parameter in each phases.

図 16 G 値の変化パターン
Fig. 16. Patterns of changes of G-parameter

る。ここで使用した試料のように放電の群小化とトリの発生と破壊が短時間に起こる場合には、破壊直前であることの予知を行うには、群小化を象徴したG値、C値のほうがはっきりとした変化を得ることができる。図1の電極系における全データ（サンプル数40）での群小化の確率、および群小化が起こった場合のこれらのパラメータによる群小化を感知する確率を表3に示す。群小化の起こる確率は70%であり、放電電荷、パルス発生頻度、平均放電電荷の放電諸量により群小化を感知する確率は78.6%、ひずみ度S、とがり度Kでは39.3%、G値、C値では92.9%であり、G値、C値が最も感度が良い。実質的な破壊予知確率は群小化の起こる確率に群小化を感知する確率を乗じたものであり、放電諸量では55.0%、ひずみ度Kでは27.5%、G値、C値では65.0%である。これらの予知確率は本論文で用いた比較的面積の広い平行平板状ボイドにおける値であり、ボイド形状、絶縁厚が変わればこれらの値も変化すると考えられるが、破壊直前に放電の群小化が起これば、いずれかのパラメータにより群小化を感知することができることから、群小化の起こる確率と破壊の予知確率は同等のものと考えられる。

しかし、群小化を的確に判定できるG値、C値でも破壊予知の確率は65%にすぎない。実際に絶縁破壊事故を未然に防止するという観点からすれば、この予知確率は十分に高いとは言えない。よって、群小化の有無が未知の状態でも適用し得る破壊予知法の提案が要求される。そこで、次にG値の位相角別の変化を劣化プロセス全体から見て劣化パターンを分類し、各々のパターンでの群小化の起こる確率から各々のパターンにおける最良の破壊予知法を提案する。劣化パターンの分類は ϕ の次数の最も低い位相角、ここで

表 3 各パラメータによる破壊予知確率
Table 3. Probability of prediction of breakdown by the parameter.

	放電諸量	S, K	G値, C値	総 合
群小化の起こる確率(%)	70.0			
群小化を感知する確率(%)	78.6	39.3	92.9	100.0
破壊予知確率(%)	55.0	27.5	65.0	70.0

図 17 G 値の経時変化(b)
Fig. 17. G-parameter (type b).

図 18 G 値の経時変化(c)
Fig. 18. G-parameter (type c).

表 4 G 値による劣化パターンの分類
および群小化確率

Table 4. Classification of aging patterns by G-parameter and probability of breakdown.

	各劣化パターンの割合	群小化の起こる確率
(a)	32.5% (13/40)	100.0% (13/13)
(b)	37.5% (15/40)	60.0% (9/15)
(c)	30.0% (12/40)	50.0% (6/12)
全 体	100.0% (40/40)	70.0% (28/40)

は $\phi 5$ の G 値の変化に着目して行う。図 16 に G 値の変化パターンを示す。(a)図は破壊直前まで $\phi 5$ の G 値が他の位相角と比べて、最も大きい値をとる場合である。図 15 はこのパターンに当てはまる。(b)図は劣化プロセス全般にわたって $\phi 5$ の G 値が減少し、劣化中期または後期で最も小さい値になるパターンである。図 17 にこのパターンの一例を示す。(c)図は

劣化初期に $\phi 5$ の G 値が急激に減少し、最も小さい値になり、破壊に至るまでその状態を維持する場合である。図 18 に一例を示す。また、各々のパターンにおける群小化の起こる確率を表 4 に示す(a)図パターンは全体の 32.5%(13/40)の割合であるが、この場合は 100%群小化が起こる。よって、この場合に G 値、 C 値で群小化を感知して破壊予知を行えばよい。(b)図は 37.5%(15/40)の割合であり、この場合群小化の起こる確率は 60%であるが、安全性を考えると $\phi 5$ の G 値が最小になったとき運転を停止することが必要である。この場合でも劣化末期での判定が行える。また(c)図は 30.0%(12/40)の割合で、群小化の起こる確率は 50%である。この場合は群小化の起こる確率が低いので、 $\langle 3 \cdot 1 \rangle$ 節で述べた回帰分析による推定寿命を参考にして破壊予知を行うのが好ましい。

5. ま と め

薄手試料を対象として、ボイド放電劣化における破壊予知法として劣化初期において放電諸量と寿命の相関を求め、回帰分析により寿命推定を行う方法と、破壊直前における破壊の前兆現象と考えられる特徴的な変化を象徴するパラメータを新たに考案し、それらにより破壊予知を行い以下のことを得た。

(1) 劣化初期における放電諸量から寿命推定ができるが、その後の劣化過程での劣化形態の変化により実際の寿命は異なる場合がある。しかし、劣化初期における放電電荷分布のパラメータの統計回帰分析により寿命の推定を行った。その結果、実寿命の 50%の範囲に収まる寿命推定ができた。

(2) 破壊の前兆現象の一つと考えられる放電の群小化を象徴するパラメータとして放電電荷分布の重心 G 値と傾き C 値を定義し、これらの値の変化により破壊予知を行った。その結果、本研究のように薄手試料でトリートメントを開始すると、直ちに破壊に至るような場合は、約 93 %の確率で群小化を感知することができ、これらのパラメータは破壊直前での予知に有効であることが確認できた。

(3) 破壊直前に群小化の起こる確率は 70%であった。絶縁破壊の未然防止の観点から群小化の起こらない場合も考慮にいられて、 G 値の位相角別の変化による破壊予知法を提案した。その際、劣化初期での寿命推定が有効になる。

最後に、本研究を遂行するにあたり実験を手伝っていただいた金田一剛史氏、秋永倫範氏、小山健氏、杉山裕之氏に感謝いたします。

(平成 2 年 4 月 2 日受付、同 2 年 6 月 1 日再受付)

文 献

- (1) 放電専門委員会技術報告, No. 45 (昭 36)
- (2) 電気学会技報(I部), No. 74 (昭 41)
- (3) 電気学会技報(II部), No. 164 (昭 59)
- (4) 松崎・伊藤, 他:「ポリエチレン内部の円筒状ボイドにおける部分放電特性の位相解析」, 電学論 A, **102**, 111 (昭 63-3)
- (5) 瀬戸・伊藤, 他:「針状ボイドにおける放電電荷分布の位相解析」, 同上 A **109**, 507 (平成-12)
- (6) 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)

伊 藤 真 澄 (正員)

昭和 39 年 10 月 21 日生。平成 2 年 3 月武蔵工業大学大学院電気工学専攻修士課程修了。

伊 藤 泰 郎 (正員)

昭和 10 年 9 月 30 日生。35 年 3 月武蔵工業大学電気工学科卒業。同年 4 月同大学副手勤, 49 年同助教授, 57 年同教授, 現在に至る。工

学博士。55 年 4 月～56 年 4 月アメリカ・クラークソン工科大学研究員。主として, 高分子絶縁材料の劣化, 放電による気体間反応に関する研究に従事。61 年電気学会論文賞受賞。

堺 孝 夫 (正員)

昭和 6 年 6 月 14 日生。33 年東北大学大学院修士課程修了。41 年武蔵工業大学教授。現在に至る。工学博士。主として, 高分子材料の伝導・劣化および沿面放電特性の研究に従事。42 年イギリス・サルフォード大学客員研究員。47, 49, 56, 61 年, 電気学会論文賞受賞。応用物理学会, IEEE 会員。

江 原 由 泰 (非会員)

昭和 31 年 9 月 22 日生。昭和 54 年 3 月群馬大学工学部合成化学科卒業。55 年 4 月三恵技研工業(株)入社。59 年武蔵工業大学電気電子工学科勤務。