



Title	変圧器油絶縁の面積効果と距離効果
Author(s)	佐藤, 徹; 上巾, 貴之; 高橋, 誠
Citation	電気材料技術雑誌. 2012, 21, p. 46-55
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/76895">https://hdl.handle.net/11094/76895</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 変圧器油絶縁の面積効果と距離効果

佐藤 徹、上巾 貴之、高橋 誠

愛知電機株式会社 電力事業部 〒486-8666 愛知県春日井市愛知町1番地

筆者らは、変圧器の絶縁油の面積効果と距離効果について、ワイブル分布を含め、原点に立ち戻った考察を行ってきた。その成果として、理論的には、絶縁破壊の弱点が均等な油空間では、距離効果、面積効果、体積効果のいずれも破壊確率はワイブル分布の最弱リンクモデルで考えることができ、各効果定数は形状パラメータ  $m$  と一致することを確認できた。

実験においても、距離効果については、効果定数が形状パラメータ  $m$  と一致することを確認できた。しかし面積効果の実験では、予想したほど絶縁破壊電界の低下に面積依存性は少なく、効果定数が形状パラメータ  $m$  より大きいという結果が得られた。

その理由として、電極の製造上のばらつきから、面積の増大がそのまま油空間の弱点増加に比例しないということが考えられた。今回はその面積効果の面積依存性の低減度合いを調べ、拡張した体積効果に展開するための実験検討を行ったので報告する。

キーワード：面積効果、距離効果( $E-d$  特性)、ワイブル分布、体積効果

### Area Effect and Distance Effect of Transformer Oil Insulation

Toru Satoh, Takayuki Kamihaba, Makoto Takahashi

Electric Power Products Division, Aichi Electric Co., Ltd.

1 Aichi-cho, Kasugai, Aichi 486-8666 Japan

We returned to the starting point, and we theoretically considered about the oil insulation which included Weibull distribution. As a result, in case of equal oil space for breakdown defect, we confirmed that the probabilities of failure of a distance effect, an area effect either of the volume effect was thought by the weakest link model of Weibull distribution and we also confirmed that each effect constant number agreed with shape parameter  $m$ .

In case of experiment of a distance effect, whereas we confirmed that the effect constant number agreed with shape parameter  $m$ , in case of experiment of an area effect, we confirmed that the effect constant number was bigger than shape parameter  $m$ .

The reason is due to the manufacturing irregularity of the electrode. Therefore, we considered that the increase of the area was not proportional to the increase of the oil space defect.

In this paper, we examined about the reduction degrees of the area dependence of the area effect and studied to develop the conventional volume effect to the extended volume effect.

**Keywords** : Area Effect, Distance Effect ( $E-d$  Characteristics), Weibull Distribution, Volume Effect

## 1. はじめに

油絶縁系において、電極の対向する面積もしくは距離が増加するにつれ、その絶縁破壊電界の値が低下していく現象が知られている。この現象はそれぞれ面積効果、距離効果（一般には  $E$ - $d$  特性）と言われており、それらを統合して体積効果とも呼ばれている。

これまで筆者らは、変圧器の絶縁油の面積効果と距離効果について、ワイブル分布を含め、原点に立ち戻った考察を行ってきた。その成果として、理論的には、絶縁破壊の弱点が均等な油空間の場合は、距離効果、面積効果、体積効果のいずれも破壊確率はワイブル分布の最弱リンクモデルで考えることができ、各効果定数は形状パラメータ  $m$  と一致することを確認できた<sup>(1)(2)</sup>。

実験においても距離効果については、効果定数が形状パラメータ  $m$  と一致することを確認できた。しかし面積効果の実験では、予想したほど絶縁破壊電界の低下に面積依存性は少なく、効果定数が形状パラメータ  $m$  より大きいという結果が得られた。そして実際の電極系では面積効果定数と距離効果定数が異なる理由を考察し、従来とは異なる体積効果の仮説を立て検討した。その結果、面積依存性の低減度合いを調べ、等価面積を導入することにより、別々に考える必要がある距離効果と面積効果を統一し、拡張した体積効果として定式化することができることを確認した。

本論文では、変圧器の絶縁油の面積効果と距離効果について、ワイブル分布を含め原点に立ち戻って行った考察と、実験による距離効果と面積効果の定数と形状パラメータとの整合の確認、実験で得られた結果から、従来とは異なる体積効果を検討した結果を報告する。

## 2. 面積効果とワイブル分布

### 2.1 面積効果

面積効果を原理にさかのぼって考えてみる。

#### (1) 絶縁破壊確率は面積に比例する

同一の絶縁系を 2 つ並列にした場合を考える（図 1）。単独の系の絶縁破壊確率を  $P$  とすると、並列にした後の絶縁破壊確率は 2 倍になる。逆に、

同じ破壊確率の値を基準にすれば、並列数が増えるにつれ破壊電界は低下していく（ただし比例関係ではない）。以上が面積効果の基本原理である。そこで、図 1 の破壊確率  $P$  の単独系の電極対向面積  $a$  を単位面積( $a=1$ )と置き直して  $S$  個並列にしていけば、全体の面積は  $S$  になり、全体の絶縁破壊確率は  $SP$  になる。ただし、比例関係が成立するのは、単位系の確率が  $P \ll 1$  および全体の確率が  $SP \ll 1$  の場合である。例えば  $P$  が 50% であった場合は、2 並列としても  $SP$  は 100% にはならず 75% になる。この問題を次に考える。

#### (2) 面積効果是最弱リンクモデルである

絶縁破壊を点（単位空間）の集合系で考える。絶縁系では系の中のある 1 点が破壊すると、それだけで系全体の破壊となる。この事情は鎖リンクを直列につないで、鎖全体の切れる確率を考えた、ワイブルの最弱リンクモデルと同じである（鎖リンクが単位空間に相当する）。

最弱リンクモデルでは、破壊確率は、どちらか一方、もしくは両方が破壊する総合確率を求めることになる。しかし、計算は、逆にどちらも破壊しない確率を求めて、全体から引き算をした方が容易である。並列後の破壊する確率を  $P_S$  とすると、破壊しない確率は単独系の破壊しない確率の積集合となるので、

$$1 - P_S = (1 - P)^2 \quad \dots\dots(1)$$

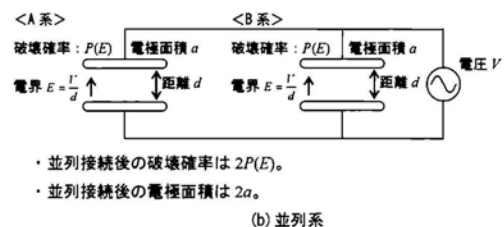
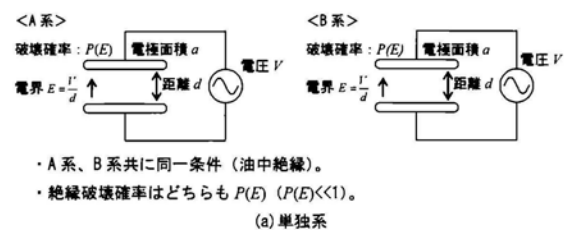


図 1 面積効果の原理

となる。ここで、 $P$  が 50% で 2 並列とした後の  $P_s$  が 75% となることがわかる。

さらに、単独系を単位面積とすれば、並列数が面積  $S$  となるので、(1)式が一般化でき、

$$1 - P_s = (1 - P)^S \quad \cdots \cdots (2)$$

となる。従って、並列後の破壊確率は、

$$P_s = 1 - (1 - P)^S \quad \cdots \cdots (3)$$

となる。これが面積効果の基本式である。この  $S$  をリンク数  $N$  とすれば、ワイブルの最弱リンクモデルになる。すなわち面積効果の基本は、最弱リンクモデルと等価であり理論的に導きだされる。このため実験式ではないということがいえる。

## 2.2 ワイブル分布

絶縁破壊の確率はワイブル分布に従うというのが一般的である。面積効果からワイブル分布を導いてみる。

### (1) 最弱リンクモデルの近似

最弱リンクモデルの破壊確率は面積効果の破壊確率と同じで、基本式(3)式で表された。この式を扱いやすい式に近似してみる (ただし  $P \ll 1$ 、 $SP \ll 1$ )。マクローリン展開を利用して、

$$e^{-P} = 1 - P + P^2/2! \cdots \doteq 1 - P \quad \cdots \cdots (4)$$

となる。これを基本式(3)式に代入して、

$$P_s \doteq 1 - e^{-SP} \quad \cdots \cdots (5)$$

を得る。これがワイブル分布関数の第一段目である。この式は、あくまで  $P \ll 1$  の場合の近似式である。

### (2) リンクの破壊確率

ワイブル分布関数の第二段目として、リンク (弱点 = 基本要素 = 単位空間) の破壊確率  $P$  の形を決めなければならない。ここでは、単位空間には弱点は一つしか存在しないと考えて、その  $P$  の形を経験的に決める。そこで、 $P$  は単調増加関数として、変数を  $E$ 、増加の傾きを  $m$  として、 $(E/E_0)$

$< 1$  の条件で、

$$P = (E/E_0)^m \quad \cdots \cdots (6)$$

とする。ここで  $m$  は形状 (シェープ) パラメータ、 $E_0$  は尺度 (スケール) パラメータといわれる。 $E_0$  は  $m$  の値に左右されず、 $P$  が 1 となる  $E$  の値、すなわち 100% 破壊電界である。

### (3) ワイブル分布関数

基本要素 (リンク) の破壊確率(6)式を(5)式に代入して、

$$P_s \doteq 1 - e^{-S(E/E_0)^m} \quad \cdots \cdots (7)$$

を得る。これがワイブル分布関数である。ワイブル分布のオリジナル式は、面積  $S$  ではなくリンク数  $N$  で表現されているが、本質的には全く同じである。この式は、本来は最弱リンクモデルの基本式 (3)式の近似式であるが、一般には等号で結ばれている。

### (4) 面積効果は尺度パラメータである

実際に、実験等でワイブル分布の各パラメータを求める場合には、本来考慮すべき(7)式の  $S$  は無視される場合がほとんどである。その時のワイブル分布は尺度パラメータを  $E_s$  として(8)式で表現されている。

$$P_s \doteq 1 - e^{-(E/E_s)^m} \quad \cdots \cdots (8)$$

これを(7)式と比較すると

$$E_s \doteq E_0 S^{-1/m} \quad \cdots \cdots (9)$$

を得る。ワイブル分布(8)式では、本来、尺度パラメータは形状パラメータから独立のはずであったが、実は(9)式で示されるように  $m$  に依存していることがわかる。また、この式の意味するところは、後から述べる面積効果や距離効果の式そのものであることもわかる。

## 2.3 面積効果の効果定数

### (1) 破壊電界からみた面積効果

一般に、面積効果は図2に示すように、ある破

壊確率の電界が面積の増大につれて低下するグラフ（両対数）で表される。このグラフの傾きを  $-1/\alpha$  として、この  $\alpha$  を各効果の効果定数と呼ぶことにする。傾きが大きい、すなわち効果が大きいときは  $\alpha$  が小さくなる。

## (2) 面積効果定数の導出

ある破壊確率  $P_x$  を与える電界  $E_x$  を  $S$  の関数として求める。(7)式を解いて、

$$E_x = k_x \cdot S^{-1/m} \quad \dots\dots(10)$$

ただし、 $k_x = E_0 (-\ln(1 - P_x))^{1/m}$

を得る。すなわち、面積効果定数  $\alpha$  は形状パラメータ  $m$  と同一となる。

## 2.4 体積効果と距離効果の効果定数

### (1) 体積効果への展開と効果定数

ワイブル分布関数(7)式の  $S$  は面積であったが、これはリンク数  $N$  でも体積  $V$  でも成立する。弱点の基本要素を単位体積空間とすれば、リンク数  $N$  は体積  $V$  と同じとなる。

尺度パラメータの(9)式、または面積効果の(10)式の面積  $S$  を体積  $V$  に変えれば、そのまま体積効果の式になる。体積効果定数  $\alpha$  も  $m$  と同一になる。

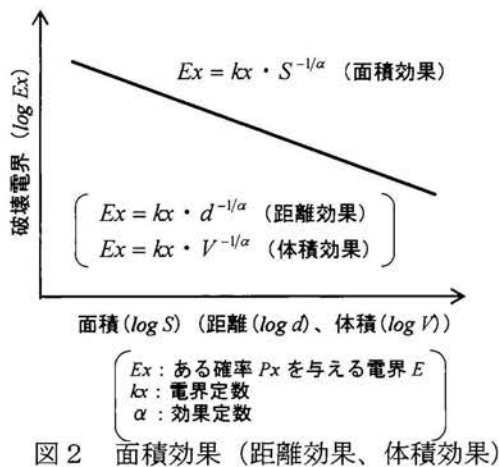


図2 面積効果（距離効果、体積効果）

$$E_x = k_x \cdot S^{-1/\alpha} \quad (\text{面積効果}) \quad \dots\dots(11)$$

$$E_x = k_x \cdot d^{-1/\alpha} \quad (\text{距離効果}) \quad \dots\dots(12)$$

$$E_x = k_x \cdot V^{-1/\alpha} \quad (\text{体積効果}) \quad \dots\dots(13)$$

## (2) 距離効果の効果定数

距離効果は一般に  $E-d$  特性と言われ、図2に示す破壊電界  $E_x$  と電極間距離  $d$  の関係のことである。原理に立ち返って考えると、距離効果は結局は体積効果に帰属することがわかる。つまり距離効果定数  $\alpha$  も  $m$  と同一になる。

## 2.5 各効果定数と形状パラメータ

以上のことから、理論的には、絶縁破壊の弱点が均等な油空間の場合は、距離効果、面積効果、体積効果のいずれも破壊確率は、ワイブル分布の最弱リンクモデルで考えることができ、各効果定数は形状パラメータ  $m$  と一致する

## 3. 実験

距離効果、面積効果の効果定数と、形状パラメータとの関係を確認するため、実験を行った。

距離効果と面積効果を確認するための実験は、図3に示す装置で行った。

実験用の電極は、図4に示す形状の裸電極とした。

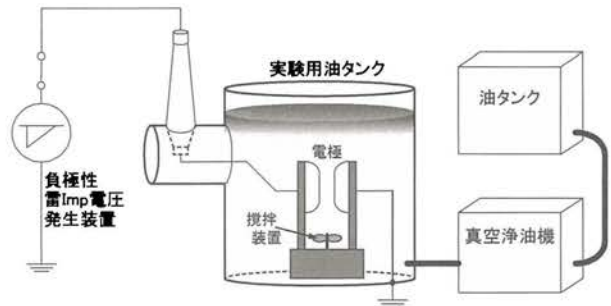
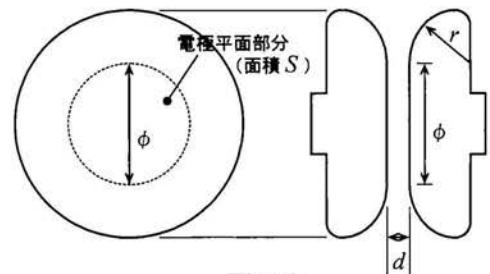


図3 実験装置



電極寸法

	電極A	電極B
$d$ : 電極間距離 (mm)	1, 2, 4, 5	2.5, 5, 10
$r$ : 端部半径 (mm)	20	70
$\phi$ : 平面部直径 (mm)	40	140
$S$ : 平面部面積 (mm <sup>2</sup> )	$1.26 \times 10^3$	$1.54 \times 10^4$

図4 電極形状



面積効果を確認するため、電極平面部の面積が異なる2種類（電極A、電極Bとする）を使用した。また距離効果を確認するため、電極Aでは電極間距離を1mmから5mm、電極Bでは電極間距離を2.5mmから10mmまで可変できる構造とした。

電極形状は、図5に示すように、電極間距離を可変しても平等電界が保たれるように電界解析結果をもとに決定した。この距離での電界集中は、3%以下であることを確認している。

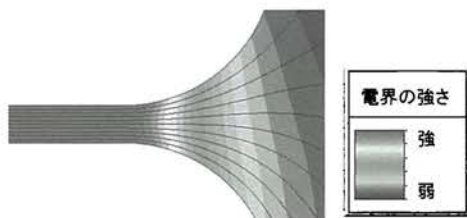


図5 電界解析結果の例（電極A、 $d=5\text{mm}$ ）

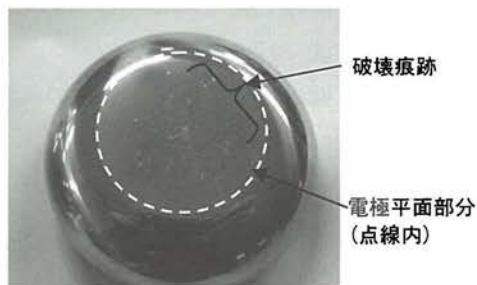
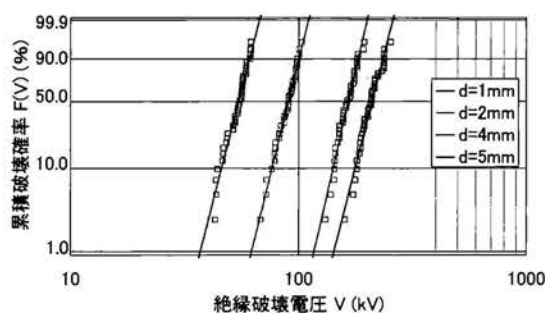


図6 絶縁破壊痕跡の例（電極A）



試験結果(電極A)

$d$ (mm)	$m$	$V_0$	$V_{50}$
1	11.0	56	55
2	11.4	93	90
4	12.2	170	165
5	11.0	217	209

$m$ : 形状パラメータ  
 $V_0$ : 尺度パラメータ(kV)  
 $V_{50}$ : 50%破壊確率の絶縁破壊電圧(kV)

図7 電極間距離毎の絶縁破壊電圧（電極A）

また、図6に示すように、一つの電極間距離の実験終了ごとに、電極表面の破壊痕跡調査を行い、絶縁破壊が端部に集中せず電極平面部分で生じていることを確認している。

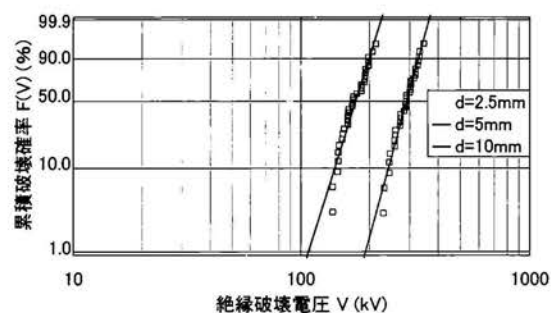
絶縁油は淨油機を通して、実機レベルの清浄性を保つようにした。実験期間中は定期的に、絶縁油を採取し、油中ガス分析、水分量測定、絶縁破壊電圧測定を実施し、実験結果に影響を与えるような変化がないことを確認している。

印加電圧は、負極性の標準雷インパルス電圧 ( $-1.2/50\mu\text{s}$ ) とし、ステップアップ法により印加した。印加開始電圧は想定破壊電圧の70%、ステップアップ電圧は想定破壊電圧の5%とした。絶縁破壊後は、攪拌装置により電極間の油を30分間攪拌し、5分間静置した後、次の実験を行った。

#### 4. 距離効果についての検討

##### (1) 実験結果と距離効果

実験結果を図7、図8に示す。図7は電極Aにおける電極間距離毎の絶縁破壊電圧をワイブルプロットした結果、図8は電極Bにおける電極間距離毎の絶縁破壊電圧をワイブルプロットした結果である。電極Aにおける形状パラメータ  $m$  は11~12程度、電極Bにおける形状パラメータ  $m$  は9~10程度となった。



試験結果(電極B)

$d$ (mm)	$m$	$V_0$	$V_{50}$
2.5	9.6	94	91
5	8.9	181	174
10	10.2	302	291

$m$ : 形状パラメータ  
 $V_0$ : 尺度パラメータ(kV)  
 $V_{50}$ : 50%破壊確率の絶縁破壊電圧(kV)

図8 電極間距離毎の絶縁破壊電圧（電極B）

実験結果から、ワイブル分布の50%破壊確率の絶縁破壊電圧を平均破壊電圧とし、平均破壊電圧を電極間距離で除した値を平均破壊電界  $E_{50}$  とする。

平均破壊電界  $E_{50}$  と電極間距離  $d$  との関係を図9に示す。その結果、電極Aにおける距離効果定数  $\alpha$  は7.5、電極Bにおける距離効果定数  $\alpha$  は6.3となった。一般に言われている  $\alpha=3$  <sup>(3)</sup> と異なった結果であるが、ワイブル分布の理論から導き出される  $\alpha=m$  ともならなかった。

## (2) 位置パラメータ導入による距離効果の再検討

理論と実験の整合を取るために、ワイブル分布において位置パラメータ  $E_L$  (最小破壊電界) の導入を試みる。この場合、ワイブル分布は次式となる。

$$P_d = 1 - \exp \left[ -d \left( \frac{E - E_L}{E_0} \right)^m \right] \quad \cdots \cdots (14)$$

$P_d$  : 破壊確率                       $d$  : 電極間距離  
 $E$  : 電界                               $E_L$  : 位置パラメータ  
 $E_0$  : 尺度パラメータ               $m$  : 形状パラメータ

もともとワイブル分布には位置パラメータが入っているが、多くの実験データ、特に雷インパルス電圧破壊では  $E_L=0$  とみなしても大勢に影響が無いことから、位置パラメータの考慮はされていない場合が多い。前出の距離効果の式(12)も、 $E_L=0$  として導出されている。

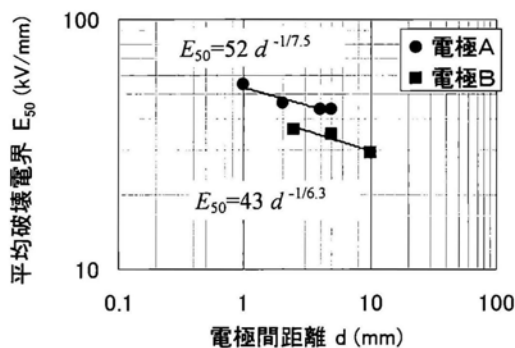


図9 距離効果

位置パラメータ  $E_L$  をゼロとすることは、破壊電界の最小値はないと仮定しているということである。一方、絶縁破壊するスレッシュホールド(しきい値)電界を仮定する考えもある<sup>(4)(5)</sup>。

この考えに基づいて  $E_L \neq 0$  として、(14)式から距離効果の式を導くと、次の(15)式を得る。

$$E_x = K_x \cdot d^{-(1/m)} + E_L \quad \cdots \cdots (15)$$

従来の距離効果の(12)式では、距離  $d \rightarrow \infty$  で  $E_x = 0$  となり、電界が無くても破壊するということになるが、上記(15)式では、距離  $d \rightarrow \infty$  で  $E_x = E_L$  となる。これは、距離効果にもスレッシュホールドがあり、その値が位置パラメータになることを示している。

位置パラメータを導入した(14)式により、データを整理する。位置パラメータを推定するには確率の小さい領域までのデータが必要になるが、そのためには膨大な実験データが必要となる。また、位置パラメータを求める手法も、各種の検討・紹介がされている<sup>(6)</sup>が、少ないデータでは得られる結果にばらつきが大きく、簡単には適用できない。このため、ある程度の拘束条件を考えて、パラメータを決定する。

電極Aにおいて、位置パラメータの導入を導入した距離効果を考える。

図7の単体のワイブルプロットでは、位置パラメータ  $E_L$  と形状パラメータ  $m$  には強い相関関係がある。一方、図9の距離効果については、位置パラメータ  $E_L$  と効果定数  $\alpha$  の相関関係は比較的弱い。このため、距離効果の効果定数を基本にして、単体のワイブルプロットと整合が取れる、定数としての  $E_L$  を決定する。今回の実験では最適な値は  $E_L = 12$  kV/mm となった。

位置パラメータを導入して、カーブフィッティングした単体のワイブルプロットを図10に、距離効果を図11に示す。その結果、両者ともに形状パラメータは  $m \approx 8$  となり理論と実験の整合がとれることになった。

単体の図 10 を見てもわかるように、位置パラメータの導入に無理はなく、データと理論カーブ（実線）は良く合致している。

今回の裸電極での実験・検討では、導入した位置パラメータ  $E_L$  を、50%破壊電界の数分の 1 程度にすると距離効果との整合がとれることがわかった。 $E_L$  の値は小さいため、単体のワイブルプロットで確認しようとする、確率が 0.1%～0.01%程度のデータ、つまり数千回以上の破壊実験が必要になる。このため、従来は位置パラメータは考慮しないのが一般的であった。

しかし、位置パラメータを導入しないと、どんなに安全率をとって絶縁設計しても、破壊確率は決してゼロにはならない。いつかは破壊してしまうことになる。しかし、位置パラメータが導入されれば、この疑問は解決され、電界が位置パラメータ以下であれば、破壊確率はゼロのままである。これらはある程度の経験則にも合致している。これらの諸事情を勘案すると、今後の絶縁評価には位置パラメータの導入も考慮が必要ではないかと考えられる。

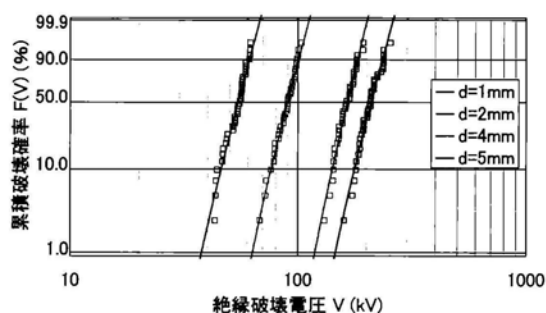


図 10 電極間距離毎の絶縁破壊電圧（電極A,  $V_L$  導入）

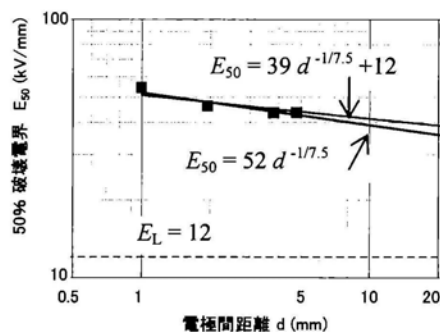


図 11 距離効果（ $E$ - $d$  特性）（電極A,  $V_L$  導入）

## 5. 面積効果についての検討

### (1) 実験結果と面積効果

電極間距離 5mm における平均破壊電界  $E_{50}$  と、電極A、電極Bの電極面積  $S$  との関係を図 12 に示す。

面積効果定数  $\beta$  は図 12 から  $\beta = 11.1$  となった。

実験結果から、距離効果定数  $\alpha$  と面積効果定数  $\beta$  の関係をみると、距離効果定数  $\alpha$  と面積効果定数  $\beta$  が異なり、面積効果定数が距離効果定数より大きい、つまり絶縁破壊電界の低下は距離依存性に比べ、面積依存性が少ないという結果が得られた。

理論的には、距離効果、面積効果の効果定数は同じとなるが、現実の電極系では、距離効果、面積効果の定数は異なると考えられる。距離効果と面積効果の定数は別の定数であると考え、拡張した体積効果として検討を行った。

## 6 体積効果についての検討

### 6.1 従来の体積効果の考え方

#### (1) 距離・面積効果の統一的な考え方

従来の体積効果は一般的に(16)式で表される。

$$E_X = K_X V^{-\frac{1}{\alpha}} \quad \dots\dots (16)$$

(16)式は、電極間体積  $V$  = 電極面積  $S$  × 電極間距離  $d$  であるので、(17)式で表すことができる。

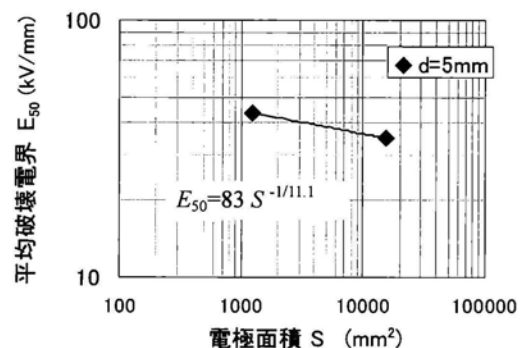


図 12 面積効果



$$E_X = K_X (S \cdot d)^{-\frac{1}{\alpha}} = K_X S^{-\frac{1}{\alpha}} \cdot d^{-\frac{1}{\alpha}} \dots\dots\dots(17)$$

$E_X$ : ある破壊確率(通常は 50%)の破壊電界	(kV/mm)
$K_X$ : 体積効果における電界定数	(kV/mm)
$V$ : 電極間体積	(1p.u.=1mm <sup>3</sup> )
$S$ : 電極面積	(1p.u.=1mm <sup>2</sup> )
$d$ : 電極間距離	(1p.u.=1mm)
$\alpha$ : 効果定数	

(17)式から、体積効果の効果定数は、距離効果の効果定数と面積効果の効果定数と等しくなる。これは2項で示した通りである。

実験については、距離効果、面積効果を統一的に体積効果として示した報告がなされている<sup>(7)</sup>。

## (2) 面積・距離効果は別物であるとする考え方

距離効果 ( $E$ - $d$  特性) の効果定数  $\alpha$  については、実験的に得られている  $\alpha = 3$  が一般的である<sup>(3)</sup> が、3 とは異なる報告<sup>(8)</sup> や、電極の距離方向と面積方向では絶縁破壊電界強度の低下の度合いが異なるため、距離効果と面積効果は別々に考える必要があるとの報告<sup>(9)</sup> がある。

## (3) 実験結果に基づいた 距離・面積効果の概念

このように従来の体積効果の考え方には、距離効果と面積効果は体積効果として統一化して考えることができるというもの (6.1 項(1)) と、距離効果と面積効果、体積効果は別物として考えるべきである (6.1 項(2)) という二通りの考え方がある。

距離効果と面積効果の定数が異なる理由は次のように考えられる。距離効果の実験では、電極は不変であり、弱点の油空間は距離に比例していくため、効果定数は形状パラメータ  $m$  になる。

一方、面積効果の実験では、電極が変化するため、油空間の弱点増加が面積に比例しない (比例よりも少ない) と考えられる。

そこで、電極面積の変化に対する弱点空間の変化の低減度合いが分かれば、低減した面積を弱点空間に比例する等価面積として新たに導入し、その上で、拡張した体積効果として定式化できるのではないかと考えた。

面積効果の面積依存性の低減度合いを調べ、拡張した体積効果に展開するための検討を行った。

## 6.2 拡張した体積効果の仮定

従来の体積効果の(16)式で、等価面積  $S'$  の考えを導入すると、

$$E_X = K_X V'^{-\frac{1}{\alpha}} = K_X (S' \cdot d)^{-\frac{1}{\alpha}} \dots\dots\dots(18)$$

となる ( $V'$  : 等価体積)。

ここで、等価面積  $S' = S^{\frac{1}{z}} (= \sqrt[z]{S})$  であり、 $z$  を面積低減係数と呼ぶ。

すると、(18)式は、

$$E_X = K_X (S^{\frac{1}{z}} \cdot d)^{-\frac{1}{\alpha}} \dots\dots\dots(19)$$

となる。(19)式を拡張した体積効果の式とする。

この式を使えば、距離方向と面積方向の絶縁破壊電界の強度の低下の度合いが異なる場合、すなわち距離効果定数と面積効果定数が異なる場合でも、一つの式で定式化することができる。

(19)式において、面積効果と距離効果を独立して表現すると、それぞれ

$$E_{Xd} = K_d d^{-\frac{1}{\alpha}} \dots\dots\dots(20)$$

$$E_{XS} = K_S S^{-\frac{1}{z\alpha}} = K_S S^{-\frac{1}{\beta}} \dots\dots\dots(21)$$

$E_{Xd}$ : 距離効果における、ある破壊確率(通常は 50%)の破壊電界	(kV/mm)
$K_d$ : 距離効果における電界定数	(kV/mm)
$\alpha$ : 距離効果定数	
$d$ : 電極間距離	(1p.u.=1mm)
$E_{XS}$ : 面積効果における、ある破壊確率(通常は 50%)の破壊電界	(kV/mm)
$K_S$ : 面積効果における電界定数	(kV/mm)
$z$ : 面積低減係数	
$\beta$ : 面積効果定数	
$S$ : 電極面積	(1p.u.=1mm <sup>2</sup> )

となり、距離効果定数は  $\alpha$ 、面積効果定数は  $\beta = z\alpha$  となる。

6.3 拡張した体積効果の検討

距離効果と面積効果の実験結果から、距離効果定数は $\alpha = 6.3 \sim 7.5$ 、面積効果定数は $\beta = 11.1$ である。6.2項で示したように面積低減係数を $z = \beta / \alpha \approx 2$ とし、等価面積を $S' = S^{1/2} = \sqrt{S}$ とした。

平均破壊電界  $E_{50}$  の実験値を、等価体積  $V'$  ( $= \sqrt{S} \cdot d$ ) でプロットし直したデータを図 13 に示す。このデータから算出した拡張体積効果の効果定数は 6 となるので、(19)式のように定式化することができる。

：

$$E_{50} = 98 (\sqrt{S} \cdot d)^{-1/6} = 98 V'^{-1/6} \dots\dots (22)$$

この関係を図 13 に直線で示すと、実験データとよく一致する。このことから、等価体積による拡張体積効果の定式化が妥当であることがわかった。

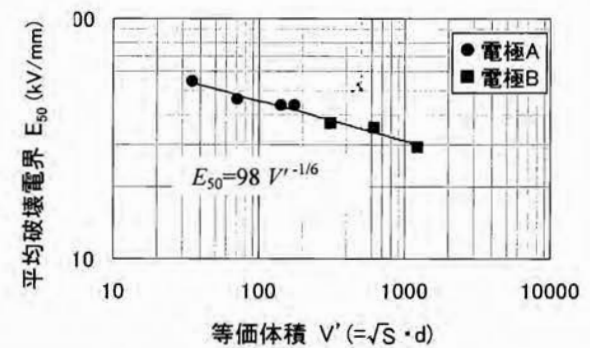


図 13 拡張した体積効果

7. まとめ

変圧器の絶縁油の面積効果と距離効果について、ワイブル分布を含め、原点に立ち戻った考察を行った。

その成果として、理論的には、絶縁破壊の弱点が均等な油空間の場合は、距離効果、面積効果、体積効果のいずれも破壊確率はワイブル分布の最弱リンクモデルで考えることができ、各効果定数は形状パラメータ  $m$  と一致することを確認した。

実験を行い理論の確認を行った結果、距離効果については、位置パラメータを導入することによ

り、距離効果定数と形状パラメータ  $m$  が一致することを確認した。

体積効果については、現実的な系では、電極の製造上のばらつきから面積依存性が低くなるため、距離効果と面積効果の効果定数は別々に考える必要があること、また面積依存性の低減度合いを考慮した等価面積を導入することで、距離効果と面積効果を統一し、拡張した体積効果として定式化できることを確認した。

今後は、面積効果や、拡張した体積効果にも位置パラメータ（最小破壊電界）を導入し、より統一的な定式化の検討が課題である。

参考文献

- (1) 佐藤、田中：「変圧器油絶縁の面積効果と距離効果」愛知電機技報 No.28 (2007)
- (2) 佐藤、上巾、高橋：「変圧器油絶縁の面積効果と距離効果(2)」愛知電機技報 No.29 (2008)
- (3) 放電ハンドブック出版委員会：「放電ハンドブック（下）」電気学会 (1998)
- (4) 毛受、矢成、他：「高電圧大容量変圧器における絶縁技術」東芝レビュー Vol.32, No.11 (1977)
- (5) 統計的絶縁設計調査専門委員会：「絶縁設計における統計的手法」電気学会技術報告（Ⅱ部）第229号 (1986)
- (6) 廣瀬：「ワイブル分布の統計的推測とその周辺」REAJ 誌 Vol.22, No.5 (2000)
- (7) 毛受、池田：「変圧器油の絶縁破壊の統計的考察について」電気学会誌 Vol.92, No.12 (1972)
- (8) 井上、山田、他：「変圧器油の油ギャップ絶縁破壊特性」平成23年電気学会電力・エネルギー部門大会 235 (2011)
- (9) 杉本、宮城、他：「変圧器絶縁における油隙の絶縁評価方法」電気学会静止器研究会 SA-85-2 (1985)

(2012年6月11日受理)

佐藤 徹



1950 年生まれ。1972 年名古屋大学理学部物理学科卒業。同年愛知電機株式会社入社。主として、パワエレ機器、変圧器関連機器、核融合電源、配電線自動化装置等の製品開発に従事。現在、同社専務取締役。電気学会正員。

上巾 貴之



1971 年生まれ。1994 年名古屋工業大学卒業。同年愛知電機株式会社入社。主として、電力用変圧器の研究開発に従事。電気学会正員。

高橋 誠



1964 年生まれ。1988 年愛知電機株式会社入社。主として、電力用変圧器の研究開発、開発設計に従事。電気学会上級会員。

（本論文は平成 23 年度電気材料技術優秀論文賞受賞内容をまとめたものである）