

# 変圧器油絶縁の面積効果と距離効果(3)

Area effect and Distance effect of Transformer oil Insulation (3)

上巾 貴之<sup>※1</sup>  
Takayuki Kamihaba  
高橋 誠<sup>※1</sup>  
Makoto Takahashi  
佐藤 徹<sup>※2</sup>  
Toru Satoh

## 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ー  $m$  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ー  $m$  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ー  $m$  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。つまり、距離効果実験では電極は不変であり、弱点の油空間が距離に比例していくため、効果定数は形状パラメーター  $m$  になるが、面積の増大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)ことが理由であると考えられる。

その面積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というアイデアが出てきた。

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。

## 2. 拡張した体積効果の仮定

### 2.1 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(1)式で表される。

(1)式は、電極間体積  $V$  = 電極面積  $S$  × 電極間距離  $d$  であるので、(1)'式で表すことができる。

(1)'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。

これまで筆者らは、ワイブル分布の最弱リンクモデルで理論的な考察を行い、体積効果の効果定数  $\alpha (> 0)$  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とを確認し、報告してきた。(1)'式は、筆者らの理論的な考察結果と一致する。

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もなされている<sup>(3)</sup>。

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

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

$E_X$  : 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

#### (2) 距離・面積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>(4)</sup>。しかし、筆者らの実験結果(平等電界・裸電極、標準雷インパルス電圧印加時)では、距離効果の効果定数  $\alpha=8$  が得られている<sup>(2)</sup>。また、距離効果の効果定数  $\alpha=22$  程度とする実験結果の報告もある<sup>(5)</sup>。

さらに距離効果と面積効果について実験を行い、同じ電極間体積でも電極間距離と電極面積が異なる場合、破壊電界が異なるという報告もある<sup>(6)</sup>。この報告では、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している。

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、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という二通りの考え方がある。

筆者らは、体積効果について整理を行った。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

※1 電力事業部 変圧器技術部 大形技術G 変圧器技術T  
※2 電力事業部

るため、それぞれ別の定数とし、拡張した体積効果として検討した。

## 2.2 拡張した体積効果の仮定

従来の体積効果の(1)式で、等価面積 $S'$ の考えを導入すると、

$$E_X = K_X V'^{-\frac{1}{\alpha}} = K_X (S' \cdot d)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

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、(2)式は、

$$E_X = K_X (S^{\frac{1}{z}} \cdot d)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。(3)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。

(3)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

$$E_{Xd} = K_d d^{-\frac{1}{\alpha}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$E_{XS} = K_S S^{-\frac{1}{z\alpha}} = K_S S^{-\frac{1}{\beta}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$E_{Xd}$ : 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

$E_{XS}$ : 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

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

拡張した体積効果の実験検証は、今までの実験結果<sup>(2)</sup>と、今回新たに行った実験結果を総合的に検討した。

今回行った実験では、今までの実験で使用した電極(図2、電極A)より電極面積を大きくした電極(図2、電極B)で実験を行い、面積効果の効果定数を求めた。

さらに面積効果定数 $\beta$ から、面積低減係数 $z$ 、等価面積を求め、それにより、拡張した体積効果を定式化することとした。

## 3. 実験

### 3.1 実験装置と実験方法

距離効果と面積効果を確認するための実験は、図1に示す装置で行った。

実験用の電極は図2に示す形状の裸電極とした。

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。

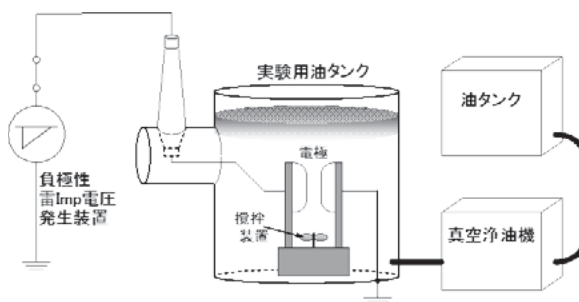
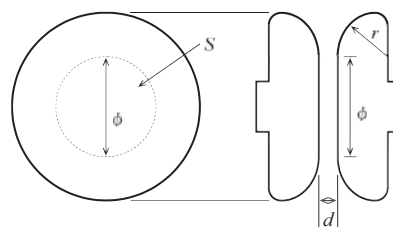


図1 実験装置の構成



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2 電極の形状

電極形状は、図3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。

絶縁油は浄油機を通して、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 $\mu$ s)とし、ステップアップ法により印加した。

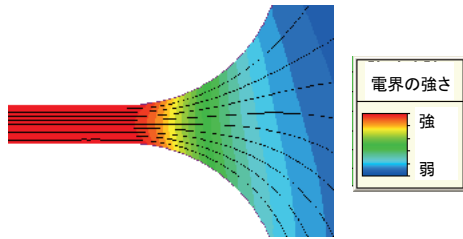
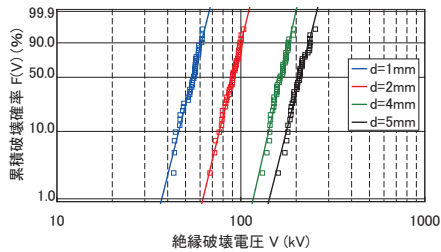


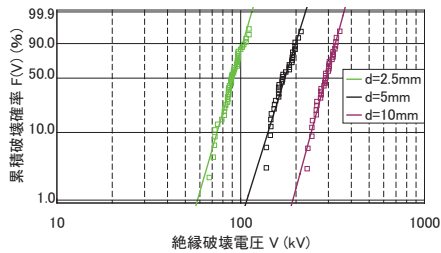
図3 電界解析結果の例(電極A、d=5mm)



d (mm)	m	V <sub>0</sub>	V <sub>50</sub>
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<sub>0</sub>: 尺度パラメータ(kV)  
V<sub>50</sub>: 50%破壊確率の絶縁破壊電圧(kV)

(a) 電極A



d (mm)	m	V <sub>0</sub>	V <sub>50</sub>
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<sub>0</sub>: 尺度パラメータ(kV)  
V<sub>50</sub>: 50%破壊確率の絶縁破壊電圧(kV)

(b) 電極B

図4 電極間距離毎の絶縁破壊電圧

## 3.2 実験結果

実験結果を図4に示す。図4は、電極A(文献2において報告済み)、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ものである。電極A、電極Bにおいて、形状パラメータmは9~12程度であった。

## 4. 拡張した体積効果の検討

### 4.1 距離効果定数と面積効果定数

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とする。

平均破壊電界E<sub>50</sub>と電極間距離dとの関係を図5に、電極間距離5mmにおける平均破壊電界E<sub>50</sub>と電極面積Sとの関係を図6に示す。

距離効果定数αは、図5から、電極Aではα=7.5、電極Bではα=6.3となった。面積効果定数βは図6から、β=11.1となった。

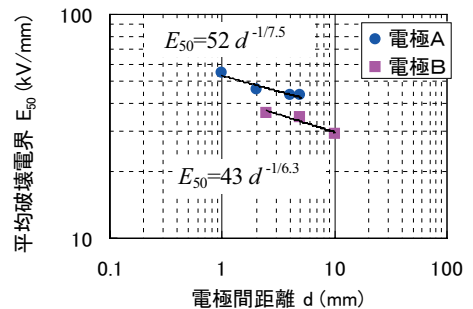


図5 距離効果

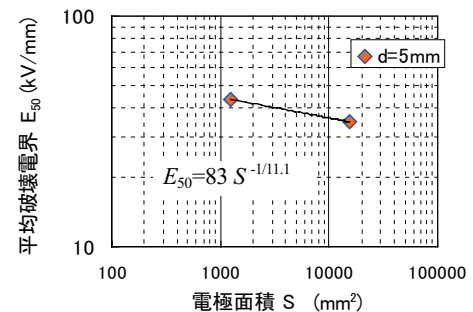


図6 面積効果

## 4.2 拡張した体積効果

距離効果の実験結果と面積効果の実験結果から、距離効果定数 $\alpha=6.3\sim 7.5$ 、面積効果定数 $\beta=11.1$ である。よって面積低減係数 $z=\beta/\alpha\approx 2$ とし、等価面積を $S' = S^{\frac{1}{2}} = \sqrt{S}$ とした。

平均破壊電界 $E_{50}$ と等価体積 $V' (= \sqrt{S} \cdot d)$ との関係を図7に示す。

拡張した体積効果の効果定数は6となり、(6)式のように定式化することができた。

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

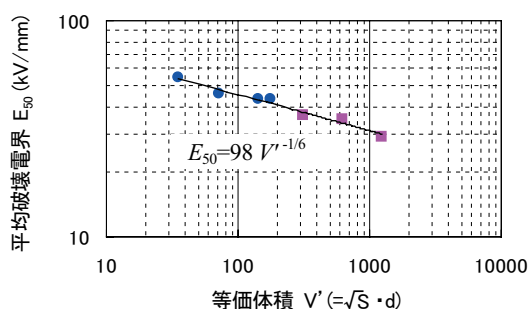


図7 拡張した体積効果

## 5. まとめ

変圧器油絶縁の距離効果と面積効果は、絶縁破壊の弱点空間が均一である理想的な絶縁系では理論的には体積効果で統一的に定式化できる。しかし製造上のばらつきがある現実的な系では、面積依存性が低くなり面積効果は現れにくくなるため、距離効果と面積効果は別々に考える必要がある。

筆者らは、実験検討を行い、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。

## 6. あとがき

これまで筆者らは、距離効果、面積効果、体積効果の各効果定数と形状パラメータは理論的には一致すること、実験結果においては位置パラメータ(最小破壊電界)を導入することにより、距離効果定数と形状パラメータが一致することを報告<sup>(1)(2)</sup>してきた。

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を導入する検討が課題である。

## 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、上中、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) 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)
- (4) 放電ハンドブック出版委員会：「液体誘電体の高電界現象と絶縁破壊」『放電ハンドブック(下)』電気学会(1998)
- (5) 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)
- (6) 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)