

変圧器油絶縁の面積効果と距離効果(2)

Area effect and Distance effect of Transformer oil insulation (2)

佐藤 徹^{※1}
Toru Satoh
上巾 貴之^{※2}
Takayuki Kamihaba
高橋 誠^{※2}
Makoto Takahashi

1. はじめに

変圧器の絶縁油の面積効果と距離効果について、本誌の前号にて理論検討をした⁽¹⁾。そこでは、両効果はワイブル分布から理論的に導き出され、スケール効果として統一できることを再確認した。

その結果、スケール効果定数 α とワイブル分布の形状(シェープ)パラメータ m とは一致する事を導いた。しかし、広く行われている実験結果では一致しない場合が多いという問題点も明らかになった。

今回、その問題を解明すべく検討および実験を進めたので、以下、その結果について報告する。

2. 距離効果実験

2.1 課題

距離効果は、通常 $E-d$ 特性と呼ばれ、油絶縁において電極間の距離の増大につれ、破壊電界が低下していく現象のことである。その関係は次式で示される。

$$E_x = K_x \cdot d^{-1/\alpha} \quad \dots \dots \dots (1)$$

E_x : ある破壊確率(x : 通常は0.5)の破壊電界
 K_x : 基準距離($d=1$)における破壊電界(定数)
 d : 電極間距離
 α : 効果定数

多くの実験結果から、一般には効果定数 α は3とされている⁽²⁾⁽³⁾。

ワイブル分布の理論からは、この効果定数は、形状パラメータ m となる事が導き出される⁽¹⁾⁽²⁾。

ところが、一般に m は5~12のように3よりも大きな値をとるので、この不一致が問題になっている。この解決が課題である。

2.2 実験装置

距離効果を確認するために、図1に示す実験装置を製作した。実験用の電極は図2に示すように裸電極で、距離効果を確認するため電極間距離は1mmから5mmまで可変できる構造とした。この距離において、平等電界を保つように電界解析で確認し、電界集中は3%以下という結果であった。

絶縁油は浄油機を通して、実機レベルの清浄性を保つよ

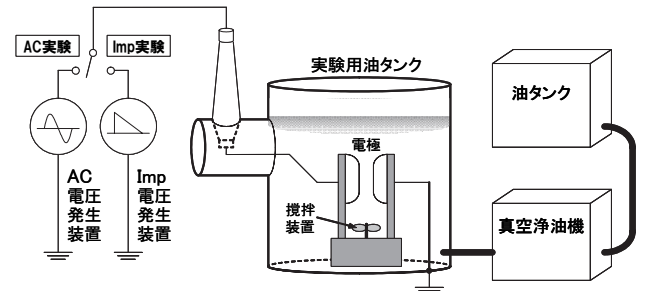


図1 実験装置の構成

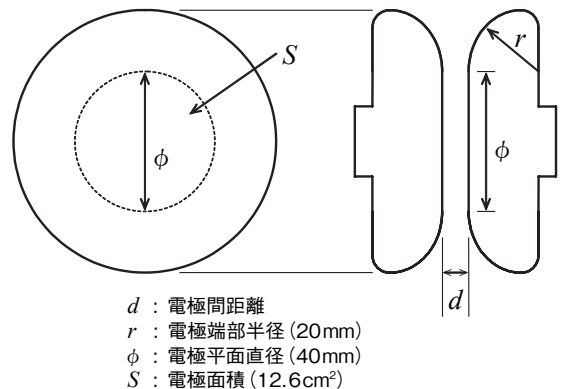


図2 電極の形状

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た。水分量は5ppm~28ppm、絶縁破壊電圧(2.5mmギャップ、交流電圧)は48kV~85kVと変化した。一連の実験毎では、結果に影響を与えるような変化がないことを確認した。

2.3 実験結果

電極間距離を変えて雷インパルス(Imp)電圧による絶縁破壊実験を実施した。電圧の正負による破壊電圧の差異は見られなかった。これは平等電界であるので当然の結果である。

電極間距離毎の絶縁破壊電圧のワイブルプロットを図3に示す。形状パラメータ m はそれほどばらつかず、平均値は11程度となった。

距離効果の関係式を求めめるために50%破壊確率の電界と電極間距離の関係をグラフにしたのが図4である。その結果、効果定数 α は8となった。

※1 電力事業部
※2 電力事業部 変圧器設計G

一般に言われている $\alpha=3$ とも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。

3. 距離効果の再検討

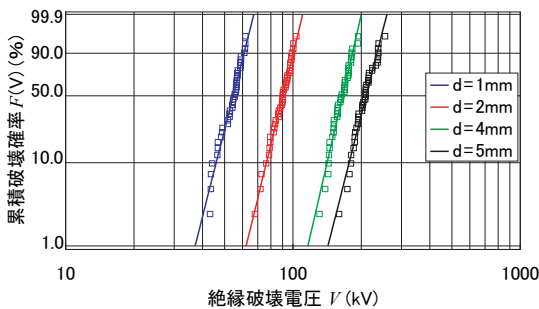
3.1 位置パラメータの導入

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。

$$P_d = 1 - \exp \left[-d \left(\frac{E - E_L}{E_0} \right)^m \right] \dots \dots \dots (2)$$

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(1)も、 $E_L=0$ として導出されている。



d (mm)	m	V_0 (kV)	V_{50} (kV)
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_{50} : 50%破壊確率の電圧
 V_0 : 尺度パラメータ ($E_0 = V_0 / d$)

図3 電極間距離毎の絶縁破壊電圧 (Imp)

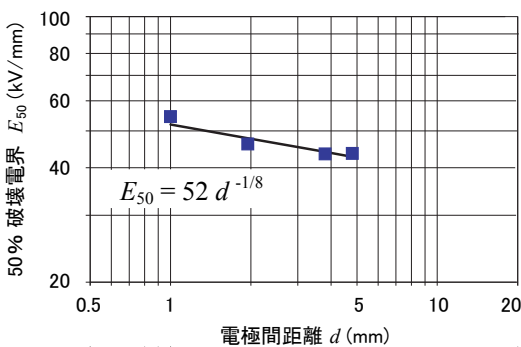


図4 距離効果 (Imp)

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⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

この考えに基づいて $E_L \neq 0$ として、(2)式から距離効果の式を導くと、次の(3)式を得る。

$$E_x = K_x \cdot d^{-1/m} + E_L \dots \dots \dots (3)$$

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

従来の距離効果の(1)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(3)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。

3.2 実験データの整理

位置パラメータを導入した(2)式により、データを整理する。

位置パラメータ導入前は、形状と尺度の2個のパラメータの推定で良かったが、今度は3個の未知パラメータを推定しなければならない。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、学会等では各種の検討・紹介がなされているが⁽⁶⁾、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、パラメータを決定していくことになる。

図3の単体のワイブルプロットにおいては、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4の距離効果については、位置パラメータ E_L と効果定数 α 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5に、距離効果を図6に示す。その結果、両者ともに形状パラメータは $m=8$ 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5を見ても分かるように、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。

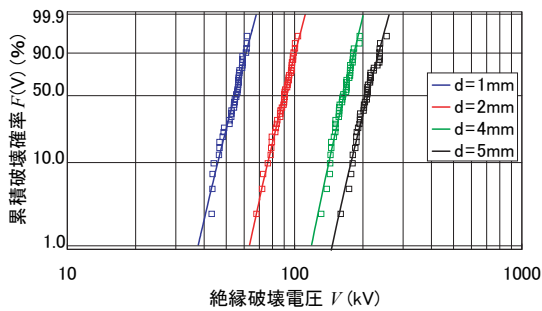
3.3 位置パラメータについての考察

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分かった。

この 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%程度のデータが必要になり、それを得るには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をしても、破壊確率は決してゼロにはならない。また、例えば1%の破壊確率で絶縁設計したとして、3相分で確率は3倍、試験を3回実施すればさらに3倍となり、すぐに破壊確率は1割にもなってしまう。

このように、条件により、すぐ破壊確率が増えてしまうとか、いつかは破壊してしまうという素朴な疑問は、位置パラメータが導入されれば解決される。電界が位置パラメータ以下であれば、サイズを増やそうが、回数や時間を増やそうが破壊確率はゼロのままである。これらはある程度経験則にも合致している。



d (mm)	V_L (kV)	m	V_0 (kV)	V_{50} (kV)
1	12	8.4	44	55
2	23	8.2	70	90
4	46	8.7	124	165
5	58	7.9	159	209

V_L : 位置パラメータ V_0 : 尺度パラメータ ($E_0 = V_0/d$)
 m : 形状パラメータ V_{50} : 50%破壊確率の電圧

図5 電極間距離毎の絶縁破壊電圧 (Imp, V_L 導入)

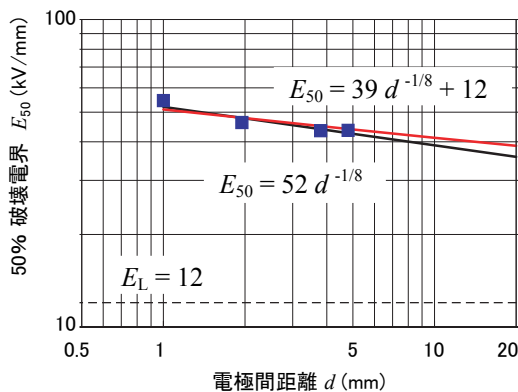


図6 距離効果 (Imp, E_L 導入)

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。

3.4 距離効果とバリア効果

絶縁耐力向上の目的でギャップを絶縁物バリアで分割することが良く行われる。この効果はバリア効果と言われている。

ところが、その根拠の一つに、ギャップを分割すれば距離効果により破壊電界が上昇するため、といわれる場合がある⁽²⁾。

しかしこの議論は、弱点が油空間にあって、ワイブル分布に従う絶縁系、すなわち最弱リンクモデルの絶縁系では成立しない。それは、分割したギャップでの破壊は、直ぐに全破壊に至るとというのが、最弱リンクモデルであるという理由による。

例えば、2分割ギャップであれば、一つのギャップが放電すれば、残りのギャップには瞬時に2倍の電圧が印加されることになり即放電にいたる。

こういうギャップを直列につなぐ、すなわち距離をのばした場合に全体の破壊電界が低下するというのが距離効果である⁽¹⁾⁽²⁾。従って、いくらギャップを分割したとしても最弱リンクモデルである限り絶縁耐力は向上しない。

バリアの効果があるのは、最弱リンクモデルが成立しない絶縁系となる場合である。それは、ある油ギャップが放電しても、残りのギャップもバリアも破壊せず、絶縁が確保されるという絶縁系が構成された場合である。ギャップの分割数を多くして、バリア絶縁物も厚くした場合が、こういう条件に合致する。

4. 面積効果実験

4.1 課題

面積効果は距離効果と同じく、体積効果(スケール効果)の一面面として、ワイブル最弱リンクモデルから理解できるはずであるが、一般にはあまり議論されていない。変圧器の絶縁設計にも考慮されない場合が多い。

このため、面積効果を実験で確認することにした。

4.2 実験装置

面積効果の確認実験は、電極を複数並列に接続して面積を可変する方法を採用した。装置と電極形状は距離効果実験と同じとし、電極は4組製作した。

今回は、電極間距離1mmでの交流(AC)電圧実験と、電極間距離1mmと5mmでの雷インパルス(Imp)電圧実験を、それぞれ面積を変えて実施した。

4組の電極(A,B,C,D)はそれぞれ単体で実験を実施し、ワイブル分布データを取り、可能な限り特性を合わせ

た。その上で、並列に接続して面積効果の実験を進めた。

4.3 実験結果

(1) AC電圧実験

実験設備の制限から、AC電圧については距離効果実験ができなかったが、面積効果については、電極間距離1mmの電極での実施が可能となった。

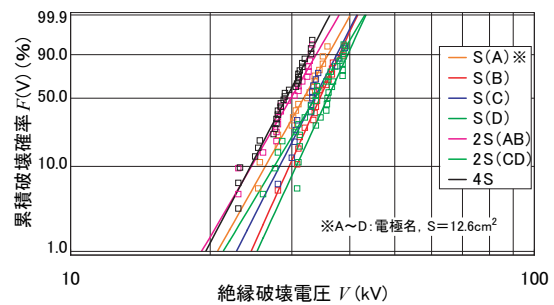
その結果の絶縁破壊電圧のワイブルプロットを図7に、面積効果については図8に示す。形状パラメータ m が11~14であり、効果定数 α は12となり、ほぼ整合は取れている。

位置パラメータについては、図7のワイブルプロットをマクロ的に見ると変曲点があるので、導入も可能であるが、今回の検討はここまでとする。AC電圧実験についてさらに精密な議論をするには、印加電圧間隔の細分化や破壊放電時間のワイブル評価などの詳細検討が必要になってくる。

(2) Imp電圧実験

雷インパルス電圧実験については、電極間距離1mmと5mmの2種類の電極について面積効果の実験を実施した。それぞれの結果を図9~図12に示す。

ここでの形状パラメータ m と効果定数 α については、電極間距離5mmでは $m=11\sim12$ 、 $\alpha=23$ と乖離してしまってい



面積	m	V_0 (kV)	V_{50} (kV)
S	11.3	35.0	33.9
$2S$	9.5	33.0	31.8
$4S$	10.6	30.2	29.1

($S=12.6\text{cm}^2$) ($d=1\text{mm}$ の一連の実験は油中水分量が多く、破壊電圧の絶対値は低下している)

図9 面積効果確認実験の絶縁破壊電圧 (Imp, $d=1\text{mm}$)

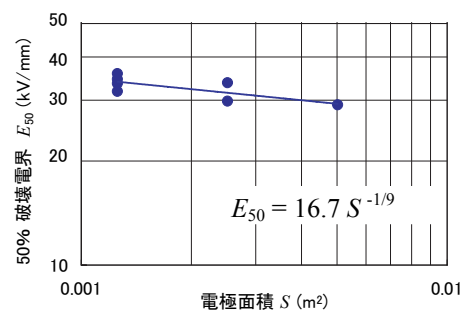
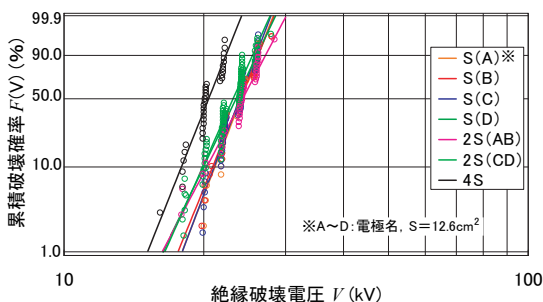


図10 面積効果 (Imp, $d=1\text{mm}$)



面積	m	V_0 (kV)	V_{50} (kV)
S	13.7	24.5	23.9
$2S$	11.6	24.5	23.7
$4S$	14.0	21.0	20.5

($S=12.6\text{cm}^2$)

図7 面積効果確認実験の絶縁破壊電圧 (AC, $d=1\text{mm}$)

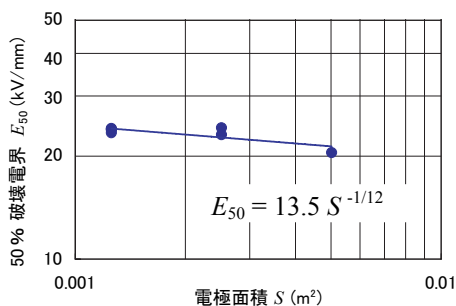
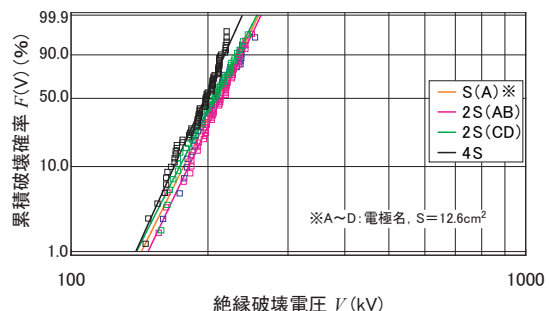


図8 面積効果 (AC, $d=1\text{mm}$)



面積	m	V_0 (kV)	V_{50} (kV)
S	11.0	217	209
$2S$	11.1	218	211
$4S$	12.1	203	197

($S=12.6\text{cm}^2$)

図11 面積効果確認実験の絶縁破壊電圧 (Imp, $d=5\text{mm}$)

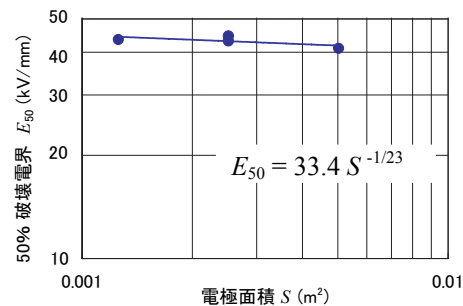


図12 面積効果 (Imp, $d=5\text{mm}$)

るが、電極間距離1mmの場合は $m=9\sim 12$ 、 $\alpha=9$ となり整合が取れている。

電極間距離5mmの実験では、放電の電極間の偏りがみられたのが面積効果を少なく(α が大)している原因と考えられる。これについては次に検討する。

4.4 面積効果についての考察

(1) 放電の偏り

単体特性を可能なかぎり合致させたにも拘わらず、電極間で放電が偏る傾向がみられた。

形状パラメータ m が大きい絶縁系であると、電極毎の絶縁特性が少し違えば、結果として破壊電圧の小さい電極側に放電が集中してしまう。今回の放電偏りは、電極間距離が1mmの電極よりも5mmの電極のほうが顕著であった。そのため面積効果定数が大きくなったと考えられる。

(2) 距離効果との差異

理論的には、両効果とも等質な油空間が構成されるという条件であれば効果係数に差はなく、どちらの効果定数も $\alpha=m$ となるはずである。しかし実験的には両効果に差が生じており、面積効果は α が大きくなる傾向である。この理由は、均一な最弱リンクモデルの油空間という条件、すなわち同じワイブル分布の要素の集合という条件の成立状況に差があると考えられる。

その概念図を図13に示す。距離効果では、距離の変化に対して電極部分は同じで、油空間のみが変化していく。一方、面積効果では、電極も変化していくため、電極の製造上のばらつきにより、最弱リンク空間の変化が面積に比例するとは言い難い状況が発生する。

このため距離効果は比較的有意なデータとして現れ、面積効果はデータの傾向にばらつきが生じるということになる。その結果、距離効果($E-d$ 特性)については多くの報告があり、面積効果については少ないという状況になっているものと思われる。

(3) ばらつきと最弱リンクモデル

電極間のばらつきが、それらを並列接続にして面積を大きくした時に、面積効果としてどう現れるかを検討してみる。

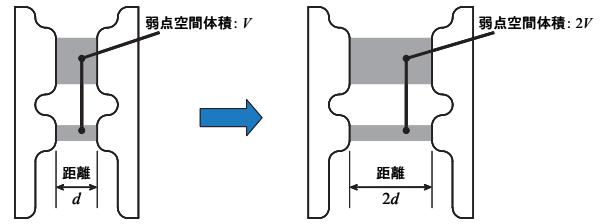
今回の面積効果実験では最大4組(A~D)の電極を用いた。それぞれの電極の絶縁破壊確率は、

$$P_{*} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{E}{E_{0*}} \right)^{m_{*}} \right] \dots \dots \dots (4)$$

で表される(ただし、* : A~D)。

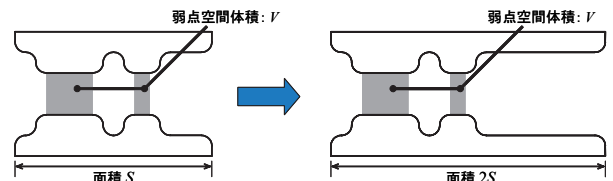
この電極を4組並列接続して面積を4倍にした場合も最弱リンクモデルの結合となる。その時の破壊確率を P_S として、破壊しない確率の式を立てると、

$$1 - P_S = (1 - P_A)(1 - P_B)(1 - P_C)(1 - P_D) \dots \dots (5)$$



弱点空間体積が距離に比例する

(a) 距離効果



弱点空間体積が面積に比例しない(例)

(b) 面積効果

図13 距離効果と面積効果の概念

となり、これと(4)式から P_S を求めると、

$$P_S = 1 - \exp \left[- \left\{ \left(\frac{E}{E_{0A}} \right)^{m_A} + \dots + \left(\frac{E}{E_{0D}} \right)^{m_D} \right\} \right] \dots \dots (6)$$

となる。これがばらつきのある場合の面積効果である。ここで、もし4組の電極にばらつきがなくて、絶縁破壊確率が全く同じであれば、

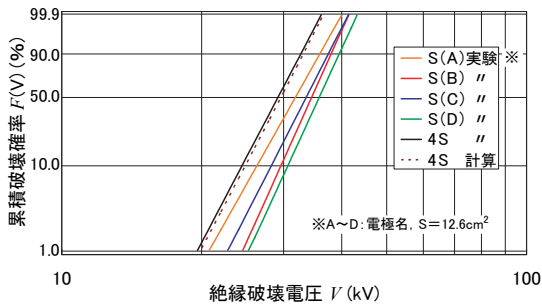
$$P_S = 1 - \exp \left[- 4 \left(\frac{E}{E_0} \right)^m \right] \dots \dots \dots (7)$$

となり、面積 S が4倍の場合の面積効果が得られる。

実際にばらつきがある4組の電極での実験結果と計算結果を図14に示す。実線が、実験データから求めたワイブルプロットであり、破線が個別の電極の特性をもとに(6)式で計算した結果である。両者は良く一致している。

この結果から、やはり面積効果は最弱リンクモデルの絶縁系の構成結果であるということが確認できる。ただし、電極にばらつきがある場合は、単に効果定数 α と形状パラメータ m とが一致する訳ではなく、 α が大きくなる傾向となることも分かった。

これは、面積増大に伴う絶縁強度の低下度合いが少ないということである。しかし、逆に増大部分の絶縁強度が低ければ、それに引きずられる。すなわち、ある面積上の弱点部分が全体の絶縁傾向に強い影響を与えているということである。



電極	A	B	C	D	A~D (4S)
m	9.9	12.4	10.9	12.1	10.6
V_0 (kV)	33.0	35.5	34.7	36.9	30.2

($S=12.6\text{cm}^2$)

図14 ばらつきによる面積効果への影響 ($l_{mp}, d=1\text{mm}$)

5. 体積効果と距離/面積効果について

前回の報告⁽¹⁾では、距離効果や面積効果は体積効果(サイズ/スケール効果)⁽²⁾⁽⁷⁾に統合されるというのが一般的ではあるが、面積効果と体積効果は別物である⁽⁸⁾という意見もあることを紹介した。筆者らは基本的には前者の考え方に沿って、理論検討と実験を進めてきたが、前述の面積効果の検討結果からは、統合は単純にはいかないことが判明した。

すなわち、理想的に均一な絶縁系では各効果とも体積効果で統一的に定式化できるが、製造にばらつきのある現実的な系では、距離効果と面積効果は別々に考える必要があるということである。

とはいえ、両効果は全く別事象が原因ではなく、共にワイプルの最弱リンクモデルで検討できる。このため面積方向と距離方向の係数を変えた、いわば拡張した「体積効果」として統一的な適用の可能性は残っている。

6. あとがき

変圧器油絶縁の距離効果と面積効果について実験と検討を行った。

その結果、距離効果については、今回の実験では位置パラメータ(最小破壊電界)を導入することにより効果定数 α と形状パラメータ m を一致させることができた。さらに、位置パラメータの導入により使用電圧における破壊確率の低減の理論的根拠が得られる可能性を示した。

しかし、多く報告されている、効果定数が小さく($\alpha=3$)、形状パラメータが大きい($m=8\sim 12$)場合においては、定数の位置パラメータの導入だけでは整合がとれないことも判明しており、依然として課題は残っている。

一方、面積効果については、単純には $\alpha=m$ とはならず、製造等のばらつきによる影響により α が大きくなる傾向が理論的にも解明できた。

当初の目的である体積(スケール)効果の統一的適用は、

面積効果の適用制限で注意が必要となり、実現には至らなかった。しかし、両効果は共に最弱リンクモデルのワイプル分布で理解できることは実験でも確認でき、両効果の相互関連性や問題点の整理もできたと考えられる。

今後は、こういう課題を念頭におき、実験データを蓄積して絶縁の基本である油絶縁の理論と実験の整合をはかるべく研究を進めていきたい。

掉尾に、今回の実験の実施や検討に対して、適切な助言や活発な議論をして頂いた、(株)高岳製作所の技術開発センターの関係各位に感謝の意を表する次第である。

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) 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)
- (3) 池田、井上、他：「変圧器油中浮遊粒子数の測定結果と絶縁破壊への影響」電気学会論文誌B Vol.118 No.11 (1998)
- (4) 毛受、矢成、他：「高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：「ワイプ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) 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)

最近登録された愛知出願

特許

特許番号	名 称	発明者	共有権利者
3926098	混合装置	田中 元宣 成田 勝 高木 康広	
3999034	再生油使用変圧器の処理装置	河内 敏紀 加藤 雅彦 白石 真澄 河瀬 文雄 佐藤 雅弥	
4007847	真空加熱設備における劣化生成物の回収および脱臭装置	鈴木 敬彦 恒川 茂樹 城 康彰 田中 良	