

# 変圧器油絶縁の面積効果と距離効果

Area effect and Distance effect of Transformer oil insulation

佐藤 徹※  
Toru Satoh  
田中 良※  
Ryou Tanaka

## 1. はじめに

変圧器の絶縁油の絶縁破壊理論や設計基準の精密化は製品改良のために常に検討され続けるテーマである。

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。これについては、それぞれ面積効果、距離効果（一般には $E-d$ 特性）と言われている。またそれらを統合して体積効果とも呼ばれている。

この現象については、既に十分研究されており、弱点破壊理論（最弱リンクモデル）とワイブル分布関数により、理論的にサイズ効果として定式化されている<sup>(1)</sup>。また、従来からの研究例や各種の実験データに基づいた統計的考察による体積効果についても解説がなされている<sup>(2)</sup>。これらによれば、ほとんどの油絶縁系が体積効果により解析・設計ができると期待されている。

しかし、一方、面積効果と距離効果は性質が異なり、単に課電体積だけの従属特性ではないという議論もある<sup>(3)</sup>。また、本来、理論的に導出されているはずの面積効果や距離効果が実験式であるとの混乱も生じており、今一度、ワイブル分布も含めて、油絶縁の原点に返って復習・考察を試みることにした。

## 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。例えば、単独の系で $P$ が1%であれば、2並列にすれば2%に、3並列にすれば3%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値は低下していく(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

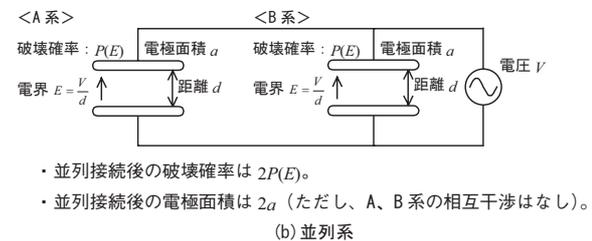
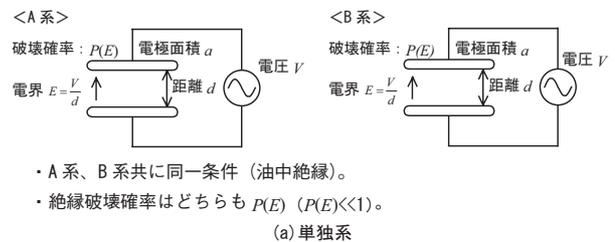


図1 面積効果の原理

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ってしまう。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)。

再度、図1のモデルで考える。A系B系の2並列の場合、それぞれで破壊「する」と「しない」の組合せが2通りで、全体系では合計4通りある。

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となるので、

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

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

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

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

※ 開発・環境事業部

となる。従って、並列後の破壊確率は、

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

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 $P \ll 1$ 、 $SP \ll 1$ )。

$$(1 - P)^S \cong 1 - SP \quad \dots \dots \dots (4)$$

の近似式を(3)式に代入すると、

$$P_s \cong SP \quad \dots \dots \dots (5)$$

となる。

これが、前述の絶縁破壊確率は面積に比例するということと一致する。しかし、この近似では、 $P$ が1に近い場合に近似がずれ、さらに $P_s$ が1をこえてしまうことがある。

もう少し良い近似として、指数関数のマクローリン展開を利用して、

$$e^{-P} = 1 - P + P^2/2! \dots \dots \dots (6)$$

から、 $P \ll 1$ とすれば、

$$e^{-P} \cong 1 - P \quad \dots \dots \dots (7)$$

となり、これを基本式(3)式に代入して、

$$P_s \cong 1 - e^{-SP} \quad \dots \dots \dots (8)$$

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、 $SP$ がいかにな大きくなっても、 $P_s$ は1を超えないという良い特性をもっている。

しかしこの式は、あくまで $P \ll 1$ の場合の近似式であるという事を認識しておく必要がある。

ここで、 $P$ が50%で $S$ が2の場合の例を再確認すると、(5)式の近似では、 $P_s$ は100%となってしまうが、(8)式の近似では63%になる。正しくは基本式(3)の75%であるので、(8)式でも $P$ が1に近いと誤差を生じている。

一般に、確率50%の破壊電界値での議論がよく行われるが、最弱リンクモデルの原理式から見れば、このあたりは誤差の大きい領域であると認識しておくことが必要である。

### (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、変数を電界 $E$ とし、増加の傾きを $m$ として、 $(E/E_0) < 1$ の条件で、

$$P = (E/E_0)^m \quad \dots \dots \dots (9)$$

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 $E$ の値である。すなわち、 $E_0$ は100%破壊電界値である。

### (3) ワイブル分布関数

基本要素(リンク)の破壊確率(9)式を(8)式に代入して、

$$P_s \cong 1 - e^{-S(E/E_0)^m} \quad \dots \dots \dots (10)$$

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。

この分布関数は、融通性が良くシェープパラメータ $m$ の値により関数の形が大きく変化して、各種事象への適合性が良い。

### (4) 面積効果はスケールパラメータである

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(10)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スケールパラメータを $E_s$ として(11)式で表現されている。

$$P_s = 1 - e^{-(E/E_s)^m} \quad \dots \dots \dots (11)$$

これを(10)式と比較すると

$$E_s = E_0 S^{-1/m} \quad \dots \dots \dots (12)$$

を得る。ワイブル分布(11)式では、本来、スケールパラメータはシェープパラメータから独立のはずであったが、実は(12)式で示されるように $m$ に依存していることが分かる。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分かる。

## 2.3 面積効果の効果定数

### (1) 破壊電界から見た面積効果

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値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 $-1/a$ 、として、この $a$ すなわ

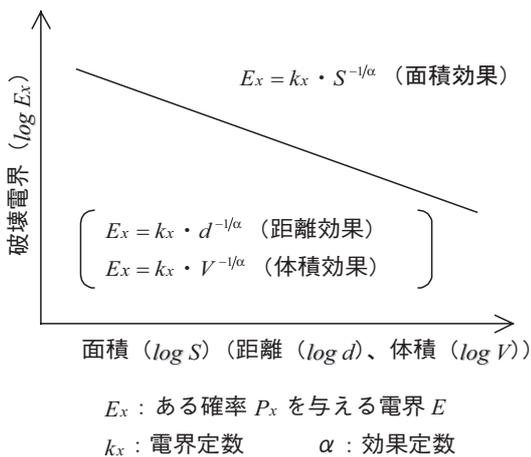


図2 面積効果(距離効果、体積効果)

ち効果の程度を、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  $P_x$  を与える電界値  $E_x$  を  $S$  の関数として求める。(10) 式を解いて、

$$E_x = k_x \cdot S^{-1/m} \quad \dots \dots \dots (13)$$

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 $\alpha$ はシェープパラメータ  $m$  と同一となる。

実は、前出(12)式のスケールパラメータは、確率  $P_x = 0.63$  の時の電界値を与える式であり、それを一般化したのが(13)式であることがわかる。

このように、面積効果は表面上、見えない場合であっても、一般のワイブル分布のスケールパラメータに組み込まれているという認識が必要である。

## 2.4 面積効果の成立条件

### (1) 弱点が電極か空間か

油絶縁については通常は空間が弱点とされているが、弱点が空間か電極表面のどちらであっても面積効果は成立する。これは、確率が同じ基本要素を並列に接続していくということが面積効果の基本原理である、ということからいえる。

### (2) 電界分布形状

いままで空間の電界分布の形状の議論をしていなかったが、この面積効果は、平等電界、不平等電界のいずれにおいても成立する。

すなわち、距離方向に不平等電界であっても、それを考慮した基本要素の並列接続が面積効果になるからである。

### (3) 全てに適用が必要

上記のように、面積効果は弱点の如何、電界分布の形状

如何に拘わらず成立する。このため平板電極の場合だけでなく、円筒電極(リード線)、変圧器コイルのターン間、セクション間などの長さやサイズを変える絶縁設計にも面積効果を適用しなければならない。

### (4) 面積効果による電界低減

部分モデルでの実験結果を、実際の変圧器設計に適用するようなサイズ変更をする場合は、面積(サイズ)効果により、破壊電界値の低減をしなければならない。その適用グラフを図3に示す。サイズ変更の場合の設計の参考にされたい。

## 2.5 体積効果への展開

### (1) 体積を考慮したワイブル分布

ワイブル分布関数(10)式の  $S$  は面積であったが、これはリンクの数  $N$  でも体積  $V$  でも成立する。要するに基本要素(リンク)を何にするかだけの話である。

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。

### (2) 体積効果定数

スケールパラメータの(12)式、または面積効果(13)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。

### (3) 体積効果の成立条件

・弱点は油空間

体積効果の場合は、「体積」と言う限り弱点は油空間と言うことになる。電極表面が弱点の場合は面積効果で議論しなければならない。

・電界分布

平等電界であれば、体積効果の変数  $V$  はそのまま空間の体積になる。不平等電界の場合は、電界の高い部分が弱点になるので、その部分を基本要素とした体積の集合になる。

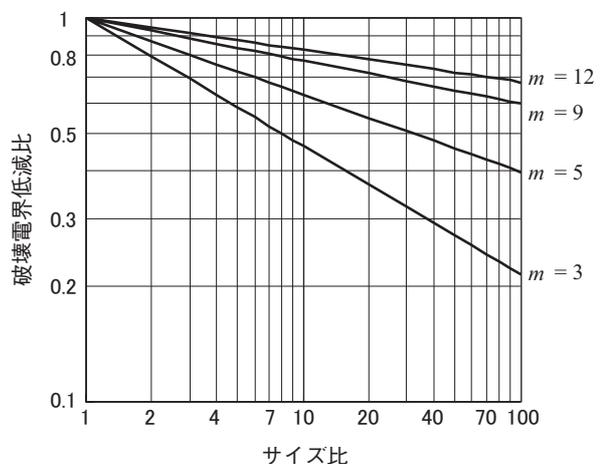


図3 サイズ変更に対する電界低減比

通常は90%以上の電界となる空間の体積積分を行って、その値を  $V$  として確率計算を行う<sup>(1)(2)</sup>。

### 3. 距離効果と絶縁破壊弱点

#### 3.1 距離効果

距離効果は一般に  $E-d$  特性と言われ、図2に示す破壊電界値  $E_x$  と電極間隔距離  $d$  の関係のことである。

距離効果の原理を図4で検討してみる。

##### (1) 中間電極を含めた直列接続

まず、図4 (a) は、電極を含めて直列接続した場合である。この場合は面積効果と同じで、全体系の破壊確率は直列数 (距離) に比例して増大する。したがって、事情は面積効果と全く同じで、

$$E_x \doteq k_x \cdot d^{-1/m} \quad \dots \dots \dots (14)$$

という結論を得る。

しかし、このような絶縁系は段絶縁などの特殊な系である。

##### (2) 中間電極を除外した直列接続

次に一般的な絶縁系である図4 (b) を検討する。ここでは、間の電極を無くしている。しかし、絶縁油空間の電界は図4 (a) と同じである。

ここで、絶縁破壊が何処から発生するかが問題になる。

絶縁油が弱点の場合は、図4 (a) と (b) では油の電界は同じであり、直列数 (距離) が増えることにより弱点が増加するため、(14) 式が成立する。

電極表面が弱点の場合は、図4 (b) では、距離が大きくなっても弱点は増えず、破壊確率に変化はない。このため距離効果は無いことになる。

##### (3) 距離効果の成立条件

・弱点は油空間

前述どおり電極表面が弱点であれば、距離効果は成立しない。

・電界分布は平等電界

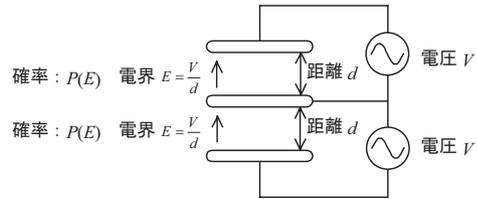
面積効果の場合の空間は距離に対して平等電界でなくてもよかったが、面積に対しては同じ電界分布が必要であった (同じ系の並列接続のため)。

逆に距離効果では、面積に対して同じ電界分布を必要としないが、距離に対しては電界分布は同じである必要がある。

不平等電界の場合は90%以上の電界体積効果により検討しなければならない。

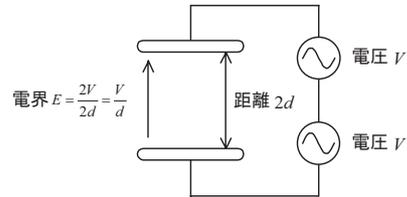
##### (4) 体積効果との関係

今までの議論から、距離効果は、結局は体積効果に帰属する事は明らかであるが、一応ワイブル分布の式で確認しておく。



・直列後の破壊確率は弱点、電界形式によらず  $2P(E)$  となる。

(a) 中間電極ありの場合 (段絶縁)



・直列後の破壊確率は弱点が油でかつ平等電界の時に  $2P(E)$  になる (中間電極ありの場合と同じになる)。

(b) 中間電極なしの場合 (一般絶縁)

図4 距離効果の原理

面積  $S$  で単位距離の絶縁系の破壊確率を  $P_s$  として、これを  $d$  倍 (距離) にした場合の破壊確率  $P_d$  は、最弱リンクモデル (3) 式を用いて、

$$P_d = 1 - (1 - P_s)^d \quad \dots \dots \dots (15)$$

となる。  $P_s$  に (11) 式を代入すると、

$$P_d = 1 - e^{-d(E/E_s)^m} \quad \dots \dots \dots (16)$$

となる。スケールパラメータについても、(12) 式を用いてまとめて、  $E_d$  とすると、

$$P_d = 1 - e^{-(E/E_d)^m} \quad \dots \dots \dots (17)$$

ただし、  $E_d = E_0(S \cdot d)^{-1/m}$

を得る。ここで、  $S$  (面積)  $\times$   $d$  (距離) は体積  $V$  であることから、スケールパラメータは、

$$E_d = E_0 V^{-1/m} \quad \dots \dots \dots (18)$$

となり、体積効果の式を得る。これ以降の議論は、面積効果の場合と同じである。

##### (5) 実験データとの差異

いままでの研究報告では、  $E-d$  特性の効果定数とシェーブパラメータ  $m$  の関係はあまり強調されておらず、通常は油の種類によらず、

$$E_x \doteq k_x \cdot d^{-1/3} \quad \dots \dots \dots (19)$$

とされている<sup>(1)(4)</sup>。

これはシェーブパラメータ  $m$  の値が3ということを示しているが、対象となる油のシェーブパラメータは、通常もっと大きく、5~15程度である。この差異は解決すべき問題である。

また、電界係数  $k_x$  についても電極サイズについて考慮されていない場合が多い。サイズを明確にして、図3で補正をすることが必要である。

## 4. 絶縁破壊弱点と各効果

### 4.1 理論的結論

効果のこれまでの検討の理論的結論を表1に示す。絶縁破壊弱点の違いによる各効果の成立状況は次のとおりである。

#### (1) 絶縁油が弱点の場合

面積効果、距離効果ともに成立する。さらに同じ議論で体積効果も成立する。

各効果定数  $\alpha$  は、油絶縁のワイブル分布のシェープパラメータ  $m$  になる。

#### (2) 電極表面が弱点の場合

面積効果のみ成立する。距離効果および体積効果は成立しない。

面積効果定数  $\alpha$  は、同じく  $m$  となるが、ここでの  $m$  は電極絶縁のシェープパラメータであり、油の値とは異なる。

#### (3) 各効果とスケールパラメータ

各効果は絶縁系のサイズが変わった場合に、破壊確率もしくは破壊電界がどう影響を受けるかということである。サイズが変わるということはスケールが変わるということと等価であり、スケール効果と呼ぶこともできる。

ワイブル分布に従う絶縁系は何らかのスケール効果があり、それはスケールパラメータの変化となって表れる。

あるサイズの絶縁系の破壊確率  $P_r$  を実験などによって求めると、

$$P_r = 1 - e^{-(E/E_r)^m} \quad \dots \dots \dots (20)$$

が得られる。 $E_r$  は、この実験より得られたスケールパラメータで、63%破壊電界に相当する。

この絶縁系のサイズを変更した場合は、変更スケール比を  $n$  倍とすると、その破壊確率  $P_n$  は、

$$P_n = 1 - e^{-(E/En)^m} \quad \dots \dots \dots (21)$$

となり、スケールパラメータ  $En$  は、

$$En = E_r \cdot n^{-1/m} \quad \dots \dots \dots (22)$$

となる。これが、スケール効果であり、各効果の統合的表現である。その特性は前出の図3と同じになる。

### 4.2 実例の検討

#### (1) 面積効果

面積効果単独の報告例は少ないようであるが、文献(2)には面積効果指数  $\alpha$  が5のデータが記載されている。これも  $m=5$  と考えるとシェープパラメータが若干小さい(バラツキが大きい)ように思われる。しかし、面積効果は電極が弱点の場合も成立するため、どちらが弱点かにより値は変わる。

#### (2) 距離効果

$E-d$  特性からすると、 $m=3$  となり、理論との整合がとれない。

電極が弱点であれば距離効果が出ないはずであるし、油が弱点であれば  $m$  はもっと大きくなるはずである。いずれにしても、今後の課題である。

#### (3) 体積効果

油が弱点の場合に成立し、良く研究されている。一般の絶縁油では、効果定数  $\alpha=9.5$  とされ<sup>(1)(4)</sup>、シェープパラメータ  $m$  から考えて整合性に問題はないと思われる。ただし、 $\alpha$  と  $m$  を別々の独立パラメータであると考えてはならないので  $\alpha=m$  の整合性検証が更に必要であると考えられる。

#### (4) 差異の考察

本来は、各効果ともに、ワイブル分布の原点に返って、シェープパラメータ、スケールパラメータで議論すべきところ、各効果があたかも独立事象であるとしての実験やデータ解析が行われている場合がある。その結果、検討の結論も、いろいろ混乱が見られている。

また、実験系のバラツキや誤差についても、再検討が必要ではないかと考えられる。もともと、ワイブル分布は最弱リンクモデルの近似式から出発しており、破壊確率  $P$  については  $P \ll 1$  が前提である。また、絶縁設計で必要とされる破壊確率は1%以下での議論が通常である。ワイブル分布の適用も確率の低い領域である。しかし、今までは50%破壊電界のような高い確率の領域(近似誤差の大きい領域)での各効果の議論が主流であったと考えられる。そのため、データと理論の乖離が大きくなったと考えられる。

更に、今回はワイブル分布に位置パラメータ(最小破壊電界値  $E_{min}$ )を導入していないが、パラメータを増すことにより、整合性が取れることになる可能性もある。

このあたりの種々の事情が、各効果、特に距離効果での理論値と実験値の差異を発生させているのではないかとと思われる。

表1 各効果の特徴

効果の種類	弱点		電界形状		効果定数
	油	電極	平等	不平等	
面積効果 $E_x = K_x \cdot S^{-1/\alpha}$	○	○	○	○	$m$
距離効果 $E_x = K_x \cdot d^{-1/\alpha}$	○	×	○	△	$m$
体積効果 $E_x = K_x \cdot V^{-1/\alpha}$	○	×	○	△	$m$

○:成立    ×:不成立  
△:条件付成立 (90%以上の電界の距離(体積)を  $d(V)$  とする。)

## 5. あとがき

変圧器油絶縁の面積効果と距離効果とワイブル分布について原点に戻って検討を行った。

その結果、絶縁破壊の弱点が絶縁油、電極の何れであっても面積効果は成立し、弱点が絶縁油の場合には距離効果ならびに体積効果が成立することが確認できた。

そして、これらの効果はワイブル分布から理論的に導き出される、スケール効果として統一的に取り扱えることがわかった。

また、 $E-d$ 特性は距離効果であり、効果指数は理論的にシェーブパラメータ  $m$  と同じことが確認できたが、一般の実験データ解析では別の事象として扱われ、効果指数も3と固定されている場合が多くあり理論的整合が望まれることも判明した。

今後は当社でも、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。

最後に、この研究に色々なデータを提供頂いた、当社の変圧器設計の関係者各位、並びに色々と一緒に有用な議論をして頂いた高岳製作所の技術部の関係者各位に感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- (1) 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)
- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) 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)