

論 文

油浸絶縁での静電気帶電により生ずる電位分布の計算法と
油中部分放電現象への適用

檜 垣 勝*, 宮 尾 博*, 遠 藤 馨*, 大 谷 弘 容**

(1979年10月11日受付)

A Calculation of Potential Distribution Caused by Static Electrification
Owing to Oil Flow in a Oil-Paper Insulation System and Its
Application to Partial Discharge Phenomena in Oil

M. HIGAKI,* H. MIYAO,* K. ENDOH* and H. OHTANI**

(Received October 11, 1979)

Assuming that the positive current which was caused by the charge separation flowed into the insulating oil at the interface between the insulating oil and the solid insulating materials, we developed a calculation method of DC potential distribution which is caused by the static electrification in the oil-paper insulation system. In order to confirm the appropriateness of the calculation method of DC potential distribution developed in this paper, static electrification tests in large scale models of oil flow were carried out actually. And then, the comparison between the calculation of the potential distribution and the experimental results in the models was carried out by investigating the condition and the location of the occurrence of partial discharges in the models. Consequently, the calculated results of the potential distribution in the models agree well with the experimental results of the static electrification in the models, and it is concluded that the calculation method of the potential distribution is very useful for the clarification of the static electrification phenomena which are caused by oil flow.

1. まえがき

液体と固体とが摩擦すると静電気が発生することは良く知られている。とくに石油等のパイプライン輸送において静電気が発生し、貯蔵タンクあるいはタンカー等の火災や爆発を引き起こしたことから、この分野では液体と固体との摩擦帶電に関する研究が積極的に進められてきている¹⁻³⁾。

液体と固体とが摩擦して静電気が発生すると、それらの媒質中に何らかの直流電位および電界が生ずることになる。固体が金属であり、接地されているならば、液体に帶電した静電荷により液体中に直流電位および電界が生ずる。その電位および電界は、液体中に存在する帶電電荷量がわかっていれば、ポアソンの式を解くことにより容易に求められる。一方、固体が絶縁物であるならば、

絶縁物の表面に静電気が発生するだけでなく、その静電荷が蓄積していくことになる。絶縁物表面に静電荷が蓄積された場合の電位分布を解析するためには、その絶縁物表面での電荷分布がわかっている必要がある。しかし、実際にどのような電荷分布になっているかを正しく把握することは非常に難しい。したがって、絶縁物表面上に適当な電荷分布を仮定して電位分布を求めているとどまっている。

変圧器等の油浸絶縁機器においては、絶縁媒体として絶縁油が使用されており、巻線などを有効に冷却するために強制的に油を流すことが一般に行なわれている。油が流れることにより絶縁油と固体とが摩擦され、静電気が発生する。一般に絶縁油が正に、固体が負に帶電しやすい傾向がある。したがって、変圧器などの油浸絶縁機器においても油流により静電気帶電が起こることになる。最近では変圧器内において、静電気帶電によって条件によっては油中部分放電も起こりうることがわかっている⁵⁾。このような油浸絶縁機器における静電気帶電現象を定量的に解明するためには、その静電気帶電でどのくらいの直流電圧がその内部に発生しているのかを解析する必要がある。しかし、この油浸絶縁系での静電気帶

* 株式会社日立製作所日立研究所 (319-12 日立市久慈町 4026)

Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., 4026,
Kuji-cho, Hitachi 319-12, Japan

** 株式会社日立製作所国分工場 (316 日立市国分町 1-1-1)
Kokubu Works, Hitachi Ltd., 1-1-1, Kokubu-cho,
Hitachi 316, Japan

電においては、前述の絶縁物表面での帶電電荷量を考慮して解析する必要があり、従来ほとんど解析されていない。そこで今回、絶縁物表面に蓄積される静電荷によって生ずる電位分布を解析しうる計算手法の開発を試みた。

絶縁物表面での静電気帶電による電位分布を解析するに当たって次のような仮定をおいている。

- (1) 定常状態における電位分布を求める、したがって任意の点における電流密度を i とすると、

$$\operatorname{div} i = 0$$

が成り立つ。

- (2) 絶縁油と固体絶縁物との界面で油流により電荷分離がおき、固体絶縁物表面に負電荷が蓄積する。
- (3) 絶縁油と固体絶縁物との界面で、油流による発生電流密度 J_g という概念を導入する。この発生電流密度は、材質、温度、流速、その他の要因によって影響されるので、ここでは実測データを用いる。

上記の仮定と境界条件とを考慮して、静電気帶電による電位分布の解析を試みた。さらに、このような電位分布の解析手法がどの程度有効であるかを検証するため、大型絶縁モデルを作製し、実際に油を流して試験し、電位分布計算結果と比較、検討した。その結果、本論文で報告する電位分布の解析手法の有用性が確認された。

2. 電位分布の計算方式

2.1 計算式の導出

絶縁油と固体絶縁物とからなる複合絶縁系において、油流によって静電気帶電し、定常状態になった場合を考える。そのとき任意の媒質中の電流密度を i (A/m^2) とすると、定常状態では電荷密度の時間変化はないことがら、

$$\operatorname{div} i = 0 \quad (1)$$

が成り立っている。このうち、静電気帶電による伝導電流密度を i_c とすると、

$$i_c = \kappa E \quad (2)$$

である。ここで κ は媒質の導電率 (S/m)、 E はその点における電界の強さ (V/m) である。電位 V を用いて書き直すと、

$$i_c = -\kappa \cdot \operatorname{grad} V \quad (3)$$

となる。

一般には以上の関係が成り立っているが、個々の部位では次のようになっている。

(a) 絶縁油と固体絶縁物との界面を含む領域

この領域では、図1(a)のごとく、その界面で電荷分離がおき、絶縁物表面は負に、絶縁油は正に帯電する。この油中正電荷は油とともに動いて領域外に出でいき、絶

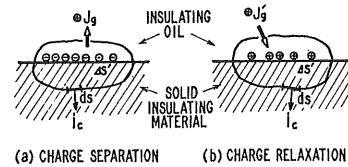


図1 絶縁油と固体絶縁物との界面での静電気帶電時の電流の概念

Fig. 1 Conception of current caused by static electrification at the interface between insulating oil and solid insulating material.

縁物表面に負電荷が残る。これがその界面での発生電流密度 J_g (A/m^2) である。定常状態ではその領域内の電荷密度の時間変化はないことから、その領域からの発生電流に等しく、かつ負極性の伝導電流が流れることになる。すなわち、

$$J_g \cdot \Delta s' - \int_{\Delta s} i_c \cdot ds = 0 \quad (4)$$

ここで ds は領域の面積要素であり、 $\Delta s'$ は領域内の界面の面積である。(3) 式を用いて(4)式を書き直すと、

$$\int_{\Delta s} (\kappa \cdot \operatorname{grad} V) \cdot ds = -J_g \cdot \Delta s' \quad (5)$$

となる。

図1(b)のごとく、絶縁物表面に正電荷が緩和する場合には、その緩和電流密度を J_g' とすると、

$$\int_{\Delta s} (\kappa \cdot \operatorname{grad} V) \cdot ds = J_g' \cdot \Delta s' \quad (6)$$

となる。

(b) 固体絶縁物のみの領域

この領域では、伝導電流 i_c が流れているだけであり、

$$\operatorname{div} (\kappa \cdot \operatorname{grad} V) = 0 \quad (7)$$

あるいは書き直して

$$\int_{\Delta s} (\kappa \cdot \operatorname{grad} V) \cdot ds = 0 \quad (8)$$

となっている。

(c) 絶縁油のみの領域

この領域においては、伝導電流 i_c のほかに油中正電荷の油流による流動電流を考える必要があり、

$$i = \kappa \cdot E + q_+ v \quad (9)$$

である。ここで q_+ は油中正電荷密度 (C/m^3)、 v はその点における油の流速 (m/s) である。(9)式をある閉曲面 Δs について面積積分すると、(1)式が成り立っていることから、

$$\int_{\Delta s} \kappa \cdot E \cdot ds + \int_{\Delta s} q_+ v \cdot ds = 0 \quad (10)$$

となる。(10)式の第2項は、ある閉曲面上流入、流出する流動電流の和であり、定常状態では電荷の蓄積はないことからゼロである。したがって、(10)式を書き直すと、

$$\int_{ds} (\kappa \cdot \text{grad } V) \cdot ds = 0 \quad (11)$$

となり、固体絶縁物のみの領域での計算式(8)と同じになる。

したがって、絶縁油と固体絶縁物とからなる複合絶縁系を多数の領域に分割し、絶縁油と固体絶縁物との界面では(5)または(6)式が成り立ち、その他の領域では(8)式が成り立つとし、かつ境界条件をも満たすように各領域の節点の電位を数値計算することにより、静電気帶電したときの定常状態の電位分布を求めることができる。

2.2 数値計算のための計算式の導出

前述の式を解析的に解くことは難しいので、電子計算機を用いた数値計算により求める。電位分布の数値計算を行なうには従来の静電界の計算に用いられているのとほぼ同じ手法が採用でき、差分法でも有限要素法でも解ける。本論では差分法を使用し、一般的に利用頻度の多い軸対称場について解析した例について報告する。

いま図2のような円筒座標系において、絶縁油と固体絶縁物とからなる複合絶縁系を多数の領域に分割した場合を考える。領域の交点での電位 ϕ_0 は、(5)あるいは(6)式と(8)式とが成り立つことから、隣り合う領域の交点での電位 $\phi_1 \sim \phi_4$ と次のようないかだ式がある。

$$a_1\phi_1 + a_2\phi_2 + a_3\phi_3 + a_4\phi_4 - a_0\phi_0 = -i_0 \quad (12)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \{\kappa_4 h_4 (1 - h_4/4R_0) + \kappa_1 h_2 (1 + h_2/4R_0)\} / h_1 \\ a_2 &= \{\kappa_3 h_4 (1 - h_4/4R_0) + \kappa_2 h_2 (1 + h_2/4R_0)\} / h_3 \\ a_3 &= (\kappa_1 h_1 + \kappa_2 h_3) (1 + h_2/2R_0) / h_2 \\ a_4 &= (\kappa_4 h_1 + \kappa_3 h_3) (1 - h_4/2R_0) / h_4 \\ a_0 &= a_1 + a_2 + a_3 + a_4 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

(12)式の右辺の i_0 は、その領域内での絶縁油と固体絶縁物との界面における単位長さ（円周方向）当りの発生電流である。緩和電流の場合は(12)式の右辺は i_0 となり、その界面が存在しない領域では $i_0 = 0$ である。図2のような場合には界面での発生電流密度を J_g とすると、

$$i_0 = J_g \{h_2 (1 + h_2/4R_0) + h_4 (1 - h_4/4R_0)\} \quad (14)$$

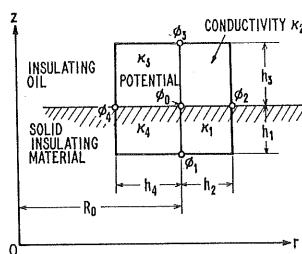


図2 差分法による油-紙絶縁系の領域分割

Fig. 2 Division of a oil-paper insulation system according to the differential mesh method.

である。

軸対称場での対称軸を含む領域においては、

$$b_1\phi_1 + b_2\phi_2 + b_3\phi_3 - b_0\phi_0 = 0 \quad (15)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= (h_2/h_1) \kappa_1 \\ b_2 &= 2(h_1\kappa_1 + h_3\kappa_2) / h_2 \\ b_3 &= (h_2/h_3) \kappa_2 \\ b_0 &= b_1 + b_2 + b_3 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

である。

したがって、複合絶縁系での静電気帶電による電位分布を求めるには、一般の静電場の電界計算と同様に、計算対象場を適当な大きさの領域に分割し、各領域において(12)あるいは(15)式が成り立つように連立方程式を立て、かつ境界条件が満たされたように各領域の交点の電位を数値計算すれば良い。複合絶縁系での一般の静電界あるいは直流電場の電界計算と異なる点は、静電気帶電の場合、(12)式の右辺が0でない場合が存在することである。

2.3 界面での発生電流密度

静電気帶電による電位分布を解析するには、絶縁油と固体絶縁物との界面における油流による発生電流密度 J_g がわかっている必要がある。界面での発生電流の大きさは材質、温度、油流速、その他種々の要因によって決まるものであり、理論的に求められる段階に至っていないのが現状である。

そこで、固体絶縁物として、通常の油浸絶縁機器に使用されている絶縁油を含浸した一般のプレスボードを使用し、そのプレスボードと絶縁油との界面における油流による発生電流密度を実測した。図3に実験装置を示す。プレスボードのなかに断面が $9.6 \times 10 \text{ mm}^2$ の油道を設け、その油道内に油を流している。プレスボードの外側に5個に分割した電極を取り付け、プレスボードと絶縁油との界面で電荷分離により発生した静電荷の大地への

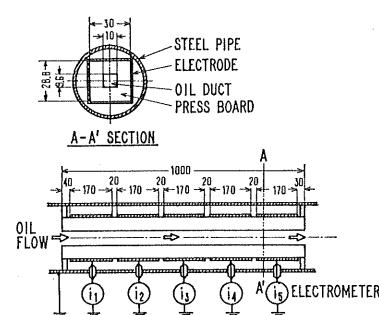


図3 プレスボードパイプの構造

Fig. 3 Construction of press board pipe.

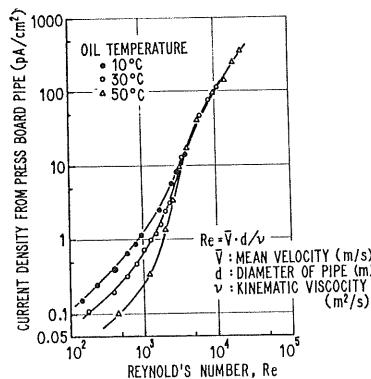


図 4 プレスボードパイプでのレイノルズ数と発生電流密度との関係（実測）

Fig. 4 Relation between Reynold's number and current density from press board pipe (measured).

漏洩電流を測定した。図 4 は、このような実験装置を用いて実測されたプレスボードと絶縁油との界面での発生電流密度である。層流領域では発生電流密度はレイノルズ数に比例し、油温が低いほど発生電流密度は大きい。乱流領域では発生電流密度はレイノルズ数の約 2 乗に比例し、油温によらないこと、層流から乱流への遷移領域では発生電流密度のレイノルズ数依存性が大きく、油温が高いほどその依存性が大きいことなどが特徴である。

絶縁油と固体絶縁物との界面での油流による発生電流密度は油流方向に対して一様ではなく、長さ依存性があるため、この発生電流密度の油流方向に関する長さ依存性を考慮して計算を進める必要がある。乱流においては、入口部での発生電流密度を J_{g0} 、入口から l (m) の距離での発生電流密度を l の関数として $J_g(l)$ とすると、

$$J_g(l) = J_{g0} \exp(-l/\bar{v}\tau) \quad (17)$$

となることが知られている⁴⁾。ここで \bar{v} は油道内の油の平均流速、 τ は緩和時間であり、次式で与えられる。

$$\tau = \epsilon/\kappa \quad (18)$$

ここで ϵ は油の誘電率、 κ は油の初期導電率である。

層流における発生電流密度の長さ依存性は未だ理論的に解析されていない。図 3 のモデルを用いて、プレスボードと絶縁油との界面での発生電流の長さ依存性を層流領域について実測した結果が図 5 である。層流領域においても、

$$J_g(l) = J_{g0} \exp(-\alpha l/\bar{v}\tau) \quad (19)$$

という関係が成立つが、乱流とは異なり α は 1 とはならず、3~10 の範囲内にある。

3. 絶縁モデルでの実験結果と計算結果との比較

前章で述べた静電気帶電による電位分布の計算方法が

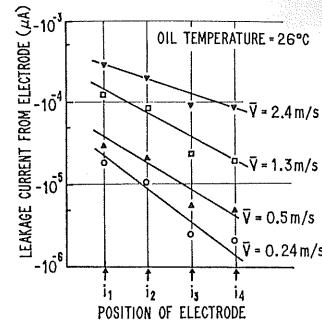


図 5 電極の位置と電極の対地漏洩電流との関係（実測）

Fig. 5 Relation between position of electrode in press board pipe and leakage current from the electrode (measured).

どの程度の精度を有するか、これを検証するために大型の油流絶縁モデルを製作し、実際に油を流して試験し、電位分布の計算結果と比較、検討した。その際、実際に絶縁油が流れている絶縁モデルにプローブを挿入し、その帶電電位を測定して計算結果と比較する方法も考えられるが、プローブの帶電電位が高くなってくると帶電した電荷の大地への漏洩が起り、正しい帶電電位の測定が難しくなる。そこで筆者らは、大型の油流絶縁モデルの内部電極の帶電電位のほかに、油を流すことによってモデル内部で油中部分放電を起こさせ、そのときの部分放電の発生条件と電位分布の計算結果とを比較することにより、本論の電位分布計算方法の妥当性をチェックすることとした。

3.1 モデルの構造と試験回路

モデルの構造とその油循環回路を図 6 に示す。ポンプによりモデル内に強制的に油を流し込み、静電気帶電させる。油温も熱油循環装置により変化させた。絶縁モデルの中心導体の帶電電位あるいは対地漏洩電流、および外側電極の対地漏洩電流が実測された。油中部分放電の発生は、対地漏洩電流の瞬時変化、放電音の検出、および観察窓からの放電光の観測によって検出された。

実験モデルとしては 2 種類のモデルを用いた。図 6(a) はモデル A の断面形状であり、6 層の絶縁筒のあいだを油が流れるようになっている。同図(b) はモデル B の断面形状であり、4 層の絶縁筒のあいだを油が流れるようになっている。モデル A では平均流速で最大 1.3 m/s まで、モデル B では 3.4 m/s まで油を流しうるようしている。これらのモデルは、紙中水分が 0.5% 以下となるよう十分乾燥された。絶縁油も十分脱気、脱水され、油中ガス分 0.2% 以下、油中水分 5 ppm 以下であった。絶縁油の導電率は室温で $3 \times 10^{-13} \text{ S/m}$ であった。

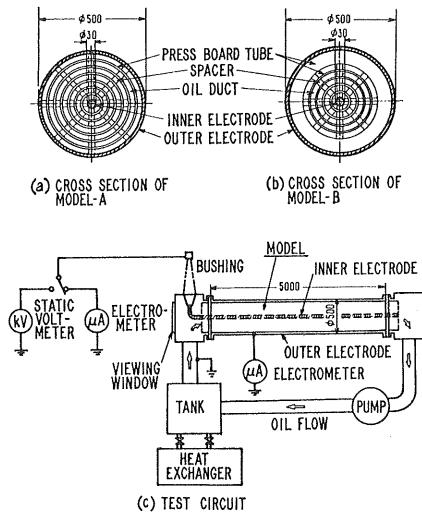
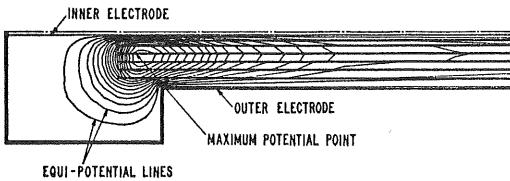


図 6 大型油流モデルの断面形状と油循環回路

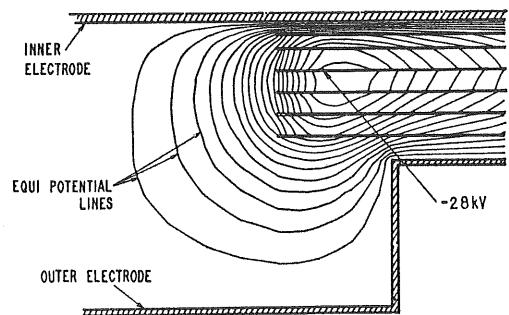
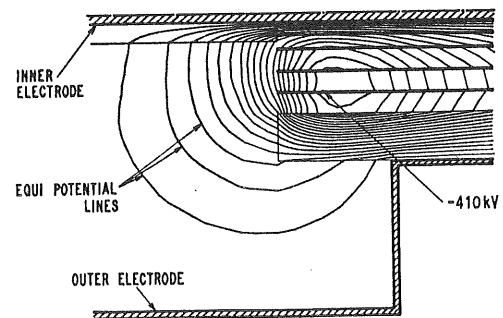
Fig. 6 Cross section of large scale oil flow models and test circuit.

図 7 モデル A の電位分布計算結果 (30°C , 1.3 m/s)Fig. 7 A calculated result of potential distribution in model A (30°C , 1.3 m/s).

3.2 モデルでの電位分布の計算結果

まずモデル A, B で油を流したときの電位分布を本論の計算方法にしたがって計算してみた。図 7 はモデル A で最大流速 1.3 m/s , 油温 30°C のときの電位分布の計算結果である。電位分布の計算に当たっては、モデル全体が接地されたタンクのなかに入っている、モデルの中心導体も外側電極も接地状態にあるとして境界条件を定めている。また等電位線は最大電位の 5% 間隔で描かれている。図 7 ではモデル A の油流入部だけがプロットされているが、実際には下流部分も含めて電位分布計算されている。ただし下部部分での電位は油流入部部分の電位に比べてずっと低いので、図 7 では省略されているだけである。

図 8 は、図 7 の電位分布を拡大したものであり、とくに最大電位を示す部位が存在するモデル油流入部の電位分布を示したものである。この場合の最大電位は絶縁筒表面に発生し、 -28 kV と計算された。油隙にかかる電界強度は最大でも 0.5 kV/mm と算出される。したが

図 8 モデル A の油流入部での電位分布計算結果 (30°C , 1.3 m/s)Fig. 8 A calculated result of potential distribution in the vicinity of the entrance of model A (30°C , 1.3 m/s).図 9 モデル B の油流入部での電位分布計算結果 (30°C , 3.0 m/s)Fig. 9 A calculated result of potential distribution in the vicinity of the entrance of model B (30°C , 3.0 m/s).

ってモデル A では最大に油を流しても油中放電の発生はないものと予想される。

図 9 はモデル B で流速 3.0 m/s , 油温 30°C のときの電位分布の計算結果であり、油流入部での電位分布を拡大して示したものである。入口部分の絶縁筒表面に最大電位が発生し、 -410 kV と計算された。油隙にかかる電界強度は最大で 7.3 kV/mm と算出された。この電界強度の値は絶縁油の破壊強度に近く、 3.0 m/s くらいで油を流すとモデル B で油中部分放電が起こることがあると予想される。

なお、最大電位が負極性となるのは、油流による電荷分離によって絶縁筒表面に負電荷が残って蓄積し、その帶電電位を計算しているからである。

3.3 実験結果と計算結果との比較

モデル A で中心導体をエレクトロメータを介して接地し、温度を $10 \sim 66^{\circ}\text{C}$ の範囲で変え、最大油流速 1.3

m/s まで油を流して試験してみたが、油中放電の発生はなかった。このことは、モデル A での電位分布計算結果から予想されたことに一致している。次に、モデル A で中心導体を大地から絶縁し、油温 30°C、油流速 1.3 m/s での中心導体の帶電電位を実測した。その結果、中心導体は -10 kV まで帶電しうることがわかった。前述のモデル A での電位分布の計算結果と比較して、実測された中心導体の帶電電位のはうが少し低い。この違いは、計算においては中心導体を接地したときの絶縁筒表面の最大電位を求めていたのに対し、実験においては中心導体の平均的な帶電電位を測定しているからである。したがってこれらの相違を考慮すると、電位分布の計算結果はモデル A での実験結果と良く合っていると考えられる。

次に、モデル B で油温を 25~47°C の範囲で変えて、流速を最大 3.4 m/s まで上げて試験した。その際中心導体はエレクトロメータを介して接地した。モデル B で油流速と中心導体の対地漏洩電流との関係を実測した結果が図 10 に示されている。油流速の約 3 乗に比例して対地漏洩電流は増大し、油温が高いほど発生電荷量も大きい傾向が見られる。また中心導体の対地漏洩電流が約 0.8 μ A を超えると部分放電が発生することもわかった。油の流速で考えると、流速が約 3.0 m/s を超すと部分放電が起きた。このことは前にモデル B での電位分布を計算したときに予想したことと良く一致している。したがって、油流によって静電気帯電したときの電位分布の計算結果が、2 種の油流絶縁モデルでの実験結果と良く一致することが確認された。

モデル B の油流入口部で油中部分放電が発生したときの写真観測例が図 11(a) に示されている。同図 (b) はその部分放電の位置を説明したものである。中心導体に近い絶縁筒と絶縁筒とのあいだの油隙で放電が発生しており、その位置は電位分布を計算したときに最も高い電界強度が生じていた油隙に近かった。

図 12 は、油中部分放電が発生したときに中心導体の対地漏洩電流に現われるパルス状の電流をオシロスコープにより観測した結果の一例である。部分放電が発生すると対地漏洩電流にこのようなパルスが現われるので、このパルス状電流を測定することにより内部部分放電の発生を検出することができる。その際、単発のパルス状電流が発生することもあるし、図 12 のように複数個の

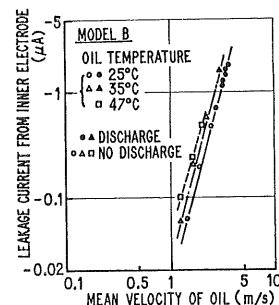
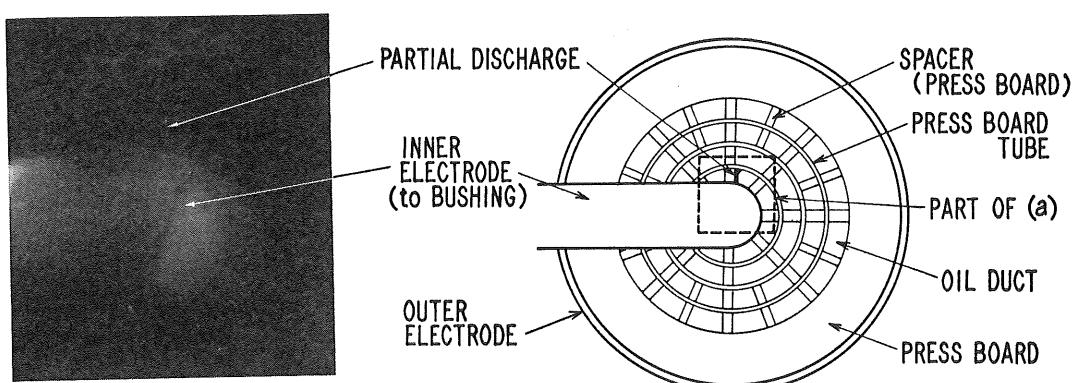


図 10 油の平均流速とモデル B の中心導体の対地漏洩電流との関係（実測）

Fig. 10 Relation between mean velocity and leakage current from inner electrode in model B (measured).



(a) A PHOTOGRAPH OF PARTIAL DISCHARGE

(b) BRIEF OUTLINE OF THE LOCATION OF PARTIAL DISCHARGE

図 11 モデル B での油中部分放電の観測とその位置

Fig. 11 Observation of partial discharges in oil and its location in model B.

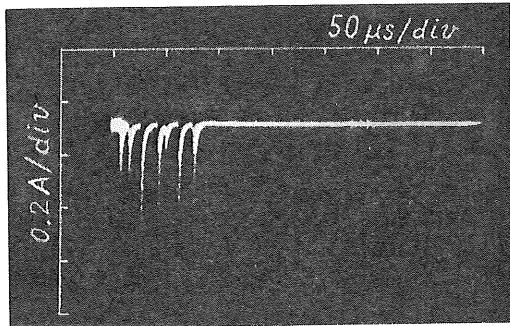


図 12 中心導体の対地漏洩電流に生ずる部分放電時のパルス状電流

Fig. 12 Pulsed current caused by partial discharges in the leakage current from inner electrode in model B.

パルス状電流が発生することもある。

4. 結 言

絶縁油と固体絶縁物との界面において、油流による電荷の発生あるいは電荷の緩和によって生ずる帶電電位とその分布を計算する方法について検討した。また、大型の油流絶縁モデルでの実験結果と電位分布計算結果とを比較した。その結果次のようなことが明らかとなった。

(1) 絶縁油と固体絶縁物との界面での発生電流密度あるいは緩和電流密度という概念を導入することにより、絶縁油と固体絶縁物の複合絶縁系における静電気帯電によって生ずる電位分布を計算することができる。

(2) 実際に大型絶縁モデルで油を流して試験した結果、電位分布の計算結果はその実測結果を良く説明できる。

したがって、この電位分布計算手法を静電気帯電現象の解明に適用することにより、油浸絶縁機器における静電気帯電現象をより定量的に解析することが可能であり、さらには油流による静電気帯電に対してどこに弱点が存在するかを明らかにすることも可能である。この計算手法を送油式変圧器での静電気帯電現象に適用し、有効な結果を得ている⁵⁾。

最後に、本研究を進めるに当たり有益なご指導とご助言をいただいた東京電力株式会社高木顧問および関係者の方々、東京大学工学部電気工学科増田教授、東京農工大学工学部電気工学科村崎教授に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) A. Klinkenberg and J. L. van der Minne : *Electrostatics in the Petroleum Industry*, Elsevier Publishing Co. (1958).
- 2) W.M. Bustin, T.L. Culbertson and C.E. Schleckser : Proc. Am. Pet. Inst., 37 (III) (1957), 24.
- 3) D.T. Rogers, J.P. McDermott and J.C. Munday : *ibid.*, 37 (III) (1957), 44.
- 4) G. Schön : *Handbuch der Raumexplosion*, p. 302, Verlag Chemie (1965).
- 5) M. Higaki, Y. Kako, M. Moriyama, M. Hirano, K. Hiraishi and K. Kurita : IEEE PES 1979 Winter Meeting, F79-231-2 (1979).