

## 論 文

## 大容量外鉄型変圧器における流動帶電現象

田 村 良 平\*, 渡 邊 次 男\*\*, 宮 本 晃 男\*\*, 山 田 直 也\*\*

(1979年4月26日受理)

## Static Electrification by Forced Oil Flow in Large Power Shell Form Transformer

R. TAMURA,\* T. WATANABE,\*\* T. MIYAMOTO\*\* and N. YAMADA\*\*

(Received April 26, 1979)

Static electrification phenomena in forced oil cooled large power transformer are studied on two full scale models of 500 kV transformer. The DC field due to the static charge separation by the flow of oil can possibly exceed the dielectric strength of oil to produce a discharge in oil. The important factors in the streaming electrification and the analyses for the experimental results are discussed in this paper.

## 1. ま え が き

電力系統の高電圧化を進めるにあたり、その絶縁の信頼性を確保するために広汎な努力がはらわれてきた<sup>1)</sup>。たとえば絶縁物の乾燥や油の精製技術の改善、ホットスポットをなくすための冷却ダクトの設計、さらに変圧器据付け時の吸湿を少なくする工夫等である。

ところが電力用変圧器の信頼性向上のためのこれらの技術的な進歩とともに新しい問題が出てきた。この問題とは高い固有抵抗の油が乾燥された紙絶縁物上を流れることにより生ずる流動帶電である。この流動帶電は、油が流動することにより油中の正と負の電荷が紙絶縁物面において電荷移動を起こすことによって生ずる。このようにして発生した静電気があるレベル以上蓄積されると静電気によるDC電界が油の破壊電界に達することがあり、その結果放電を惹き起こすことがある<sup>2,3)</sup>。

液体の流動帶電の現象は、石油工業の分野で送油時に発生する静電気による爆発事故を防止するという観点から研究が進められてきた<sup>4,5)</sup>。これらの研究の対象は金属パイプ系における油の帶電と、貯蔵タンクでの静電気に起因した火花放電による可燃性ガス混合物への着火爆発がその主たるものである。一方、変圧器における流動帶

電はこのようなパイプ、貯蔵タンクの現象と比べて次のような特徴がある。

絶縁油はガス空間をもたない完全に閉じた系を循環し、したがって帶電油は系外に流出することはない。また系内の温度は変圧器の運転条件により変化するので、油や紙絶縁物の固有抵抗などの材料の特性が変化する。この特性変化は、電荷分離の過程に影響を与える。

電荷分離にあずかる液相・固相の材料はともに良好な絶縁物である。また変圧器コイルは商用周波のACで励磁されるので、紙絶縁物表面での電荷分離はACストレスの影響を受ける可能性がある。

外鉄型変圧器の流動帶電現象の概念図を図1に示す。正負の電荷分離は下部タンクの油が冷却ダクトを流動するときに生ずるが、このとき一般に油は正に帯電し、したがって紙絶縁物面に負電荷が残されることになる。またこのような静電気の発生と同時に、電荷分離した正負電荷は接地物に徐々に緩和消失する。上部タンクから出た油は幾分の正電荷をもって、冷却器と油ポンプを経て再び下部タンクへ戻る。このとき冷却器と油ポンプでも若干の電荷分離と電荷緩和が生ずる。したがって変圧器における静電荷の分布は、このような電荷の分離と緩和の平衡によって決まるものとなる。

## 2. 実験方法

## 2.1 モデルおよび試験条件

外鉄型変圧器における流動帶電現象を二つのモデル変圧器によって調べた。一つは変電用パンク容量 1,000 MVA の単相変圧器であり、他は発電用の 1,000 MVA 級の3相変圧器の1/6相当の変圧器である。図2にモデ

\* 三菱電機株式会社重電事業本部 (100 東京都千代田区丸の内 2-2-3)

Heavy-Machinery Group, Mitsubishi Electric Corp., 2-2-3, Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100, Japan

\*\* 三菱電気株式会社赤穂製作所 (678-02 赤穂市天和 651) Ako Works, Mitsubishi Electric Corp., 651, Tenwa, Ako 678-02, Japan

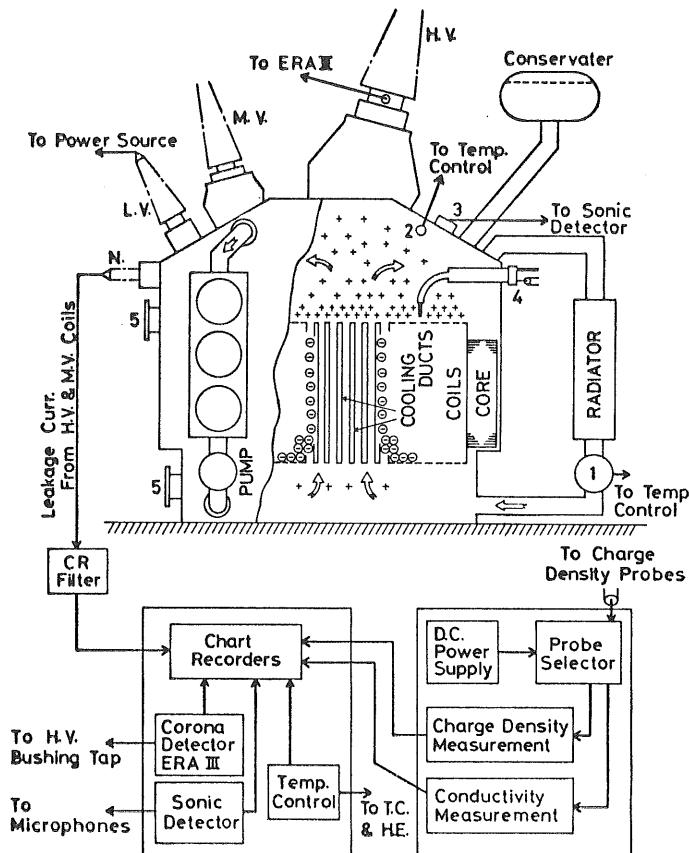


図 1 外鉄型変圧器における流動帶電の概念図と測定回路

Fig. 1 Schematic diagram of streaming electrification and test circuit of model transformer.

1: Steam heat exchanger, 2: Thermocouple, 3: Microphone ( $\times 2$ ), 4: Charge density measuring probe ( $\times 21$ ), 5: Viewing window ( $\times 11$ ).

ル変圧器の実測中の外観を示す。

モデル変圧器の油流量を定格流量の約3倍まで広範囲に変えられるよう油ポンプを増設した。変圧器本体のみの帶電を評価するため、温度制御に要する冷却器以外の冷却器を取り除いている。全流量はポンプの運転台数および配管に取り付けたゲートバルブにより制御され、また配管中の流量は各配管に取り付けられたオリフィスで測定された。油温を制御するために、スチームおよび冷却水による熱交換器を用い、モデル変圧器の平均油温を90°Cまで上げることができるようになっている。

冷却器やポンプの流動帶電の実験は図3に示す別の試験装置で行なわれた。この装置は2台の冷却器（冷却器内のスピナの有無および無）、2台のポンプおよび熱交換器を備えた除電タンクをそれぞれ絶縁して配管されている。

このようなモデル変圧器、および冷却器試験装置を用

いて変圧器における流動帶電の特性を測定した。ここでは流動帶電にとって重要な油の流量、油温および課電電圧を測定パラメータとした。また絶縁油の種類が流動帶電に与える影響を調べるために、モデル変圧器に2種の異なる絶縁油を注油して実験した。

## 2.2 測定方法

### 2.2.1 静電気による漏洩電流

油流による電荷分離の結果として、単位時間当たりに固体表面部から運び去られる電荷と平衡を保つため、異符号等量の電荷が漏洩電流として大地へ流れる。この直流の漏洩電流は変圧器における静電気発生を精度よく検出するのに簡便な測定量の一つである。この漏洩電流はコイルから大地へ流れるので、これを図1に示すように中性点端子より検出した。商用周波数のAC課電の影響をみるために変圧器を励磁した。なお、電流のAC成分はCRフィルタで大地へバイパスした。

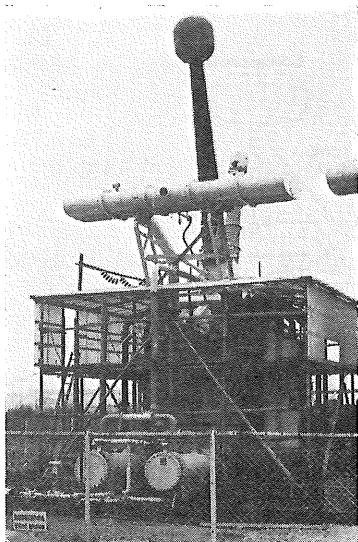


図 2 実測中のモデル変圧器

Fig. 2 Model transformer under test.

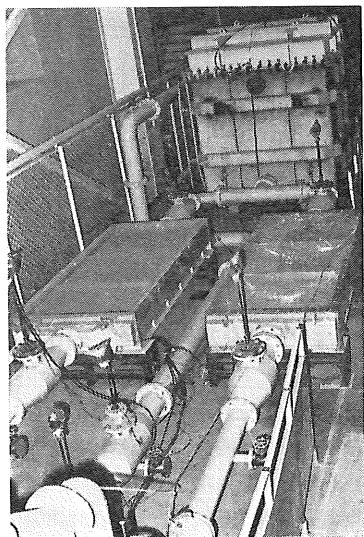


図 3 冷却器での実測状況

Fig. 3 Test setup of radiators and pumps.

ポンプの運転中に変圧器のコイルを大地より浮かすと、コイルは流動帶電によってある電位に達する。いくつかの予備実験の結果によれば、その電位はコイルからの漏洩電流と大地に対するコイルの漏洩抵抗との積にはほぼ等しかった。この場合、漏洩電流がほぼ一定状態にあったとしても、この浮動電位は測定条件に影響される漏洩抵抗に起因して変動する。このことは浮動電位よりもむしろ、漏洩電流が流動帶電のより直接的な測定量であることを意味している。なお漏洩電流はポンプ起動後、

徐々に増加して飽和値に達する傾向をもつ。本論文での漏洩電流の結果はこの飽和値をプロットしたものである。

### 2.2.2 油中電荷密度

電荷密度の分布を測定するため二つのタイプの電荷密度測定用プローブ<sup>6,7)</sup>が上部タンクと下部タンクに取り付けられた。各プローブのヘッドはタンクの外からL形の支持部を挿入し、引き出し、回転させることにより変圧器内のある範囲内に設定できる。

### 2.2.3 油の導電率

油の導電率は流動帶電に影響をおよぼす要因の一つである。この導電率は油温の変化によって変わり、また油と紙絶縁物のあいだの不純物、たとえば含有水分量の平衡条件の変化によっても変わる。油の導電率の時間的変化を測定するために、電荷密度の測定と共に用できるプローブが用いられた<sup>6)</sup>。

### 2.2.4 油の帶電度

実際の変圧器では、流動帶電の大きさを支配するのが油そのものか、油と絶縁紙との相乗作用であるかが判断し難い。そこでモデル変圧器のポンプ配管部に供試器の油のみの帶電度および電気的性質を評価する帶電度測定装置を設置している<sup>8)</sup>。図4はこの装置の写真である。

### 2.2.5 静電気放電の検出

静電気による放電音はタンク壁に取り付けられた超音波マイクロホンで、また放電の電荷量は高圧ブッシング端子にERA-III型コロナ検出器を接続して検出した。これら2通りの放電検出のほかに上下部タンクに観測窓をつけて、これらの窓からモデル変圧器の流動帶電によ

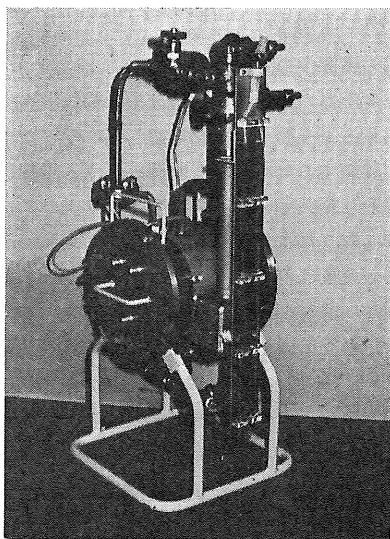


図 4 油の帶電度測定装置

Fig. 4 Analyzer for charging tendency of oil.

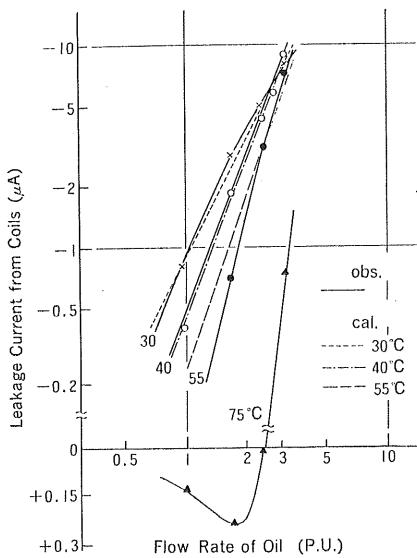


図 5 コイル漏洩電流の油流量依存性

Fig. 5 Dependence of leakage current from coils on flow rate of oil.

って生じた放電の写真を撮影した。また放電による油または油浸紙からのガス発生を検知するため、ガスクロマトグラフにより油中ガスの分析を行なった。

### 3. 実験結果

#### 3.1 漏洩電流

静電気発生に起因する高圧コイルから大地へ流れる負の直流漏洩電流は油流量に顕著に依存する。図 5 はモデル変圧器の無課電時におけるコイル漏洩電流の油流量依存性を示したものである。漏洩電流は常温で油流量の 1 ~ 2 乗に比例するが、高温になるにつれてこの傾きは大きくなる。さらに高温かつ低油流量域では、図中の 75°C のようにコイル漏洩電流の極性が反転することがある。

図 6 は油流量をパラメータとしたコイル漏洩電流の油温依存性を示している。コイル漏洩電流は低温域で増加するが、ある油温でピークを示したのち、高温域で減少する凸特性を示している。このピークを示す油温は油流量の増加とともに高温側に移行していくことがわかる。そのほか、コイル漏洩電流は AC 課電の影響を受けて若干増加する。この増加率は低油温域で小さく、高油温域で大きい<sup>2,3)</sup>。

#### 3.2 油中電荷密度

図 1 に示されるように、送油式変圧器では油は下部タンクから冷却ダクトを通して上部タンクへ向かうあい

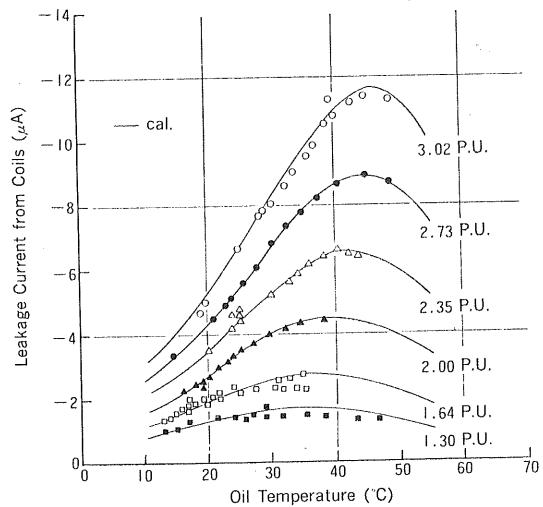


図 6 コイル漏洩電流の油温依存性

Fig. 6 Dependence of leakage current from coils on oil temperature.

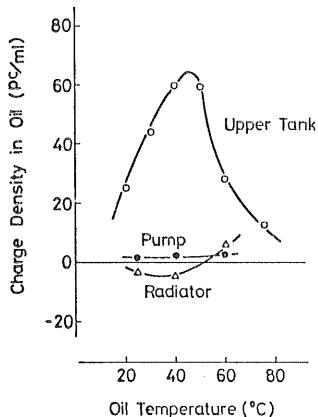


図 7 油中電荷密度の油温特性

Fig. 7 Dependence of charge density on oil temperature.

だで帶電する。それゆえ、油中電荷密度は冷却ダクトの出口部で最も高くなると考えられる。帶電油が上部タンク内に滞留するあいだに電荷は接地されたタンク壁に向けて緩和するので、タンク壁近傍の電荷密度は非常に低くなる<sup>3,9)</sup>。冷却ダクト出口部近傍の上部タンク内の油中電荷密度は、図 7 に示すようにコイル漏洩電流と同様に油温依存性においてピーク値をもっている。このことは電荷の蓄積もまた発生と類似した特性をもっていることを示唆している。同図には冷却器とポンプ内で発生する油中電荷密度の油温依存性も示されている。これら補器における油中電荷の極性は試験条件により変化するが、その電荷密度は変圧器上部タンクにおけるそれと比較す

るとかなり低いことがわかる。

上部タンクから配管へ流出する油の電荷密度は既述のように低く、また冷却器やポンプでの流動帯電は無視できるので、下部タンク内の油はほぼ中性になっていると考えられる。下部タンクに設置した油中電荷密度の測定プローブによる実測によれば、下部タンク内の油はわずかに正極性に帯電しており、その電荷密度は上部タンクのそれに比べて低いことがわかった。

### 3.3 静電気放電

油流量が非常に多い場合、変圧器内に蓄積した静電気に起因する DC 電界によって単発的な油中放電が生じる。また、極度に高い流速域ではこの放電は無課電でも発生することがある。この放電の頻度は試験条件により変化し、1分間に 2~3 回よりも高くなることがある。放電が上部タンクで起こる場合、これをタンク壁の観測窓から見ることができる。図 8 は高圧リード近傍で起こった放電の写真である。

放電を起こす下限の油流量は課電状態のほうがより低くなる。課電中にモデル変圧器で放電が頻繁に起こっている状態では、ポンプを運転している限り、課電を止めても 20~30 分間放電が継続することがある。これらの

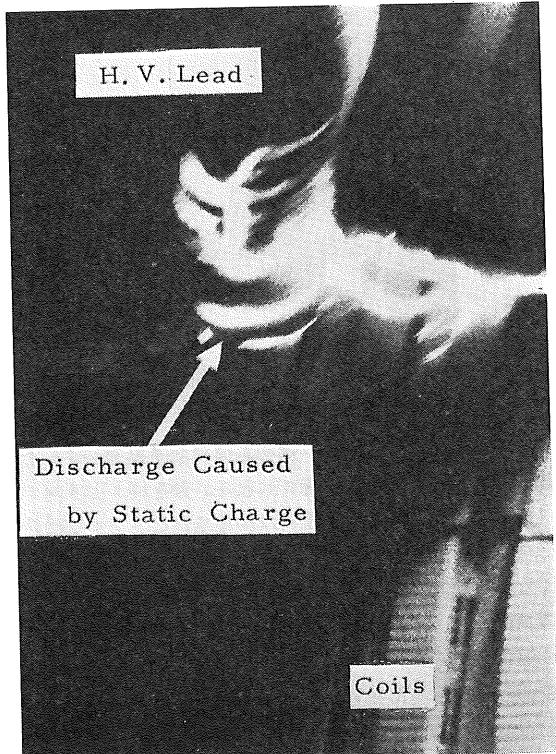


図 8 静電気放電の例

Fig. 8 An example of the discharge caused by streaming electrification.

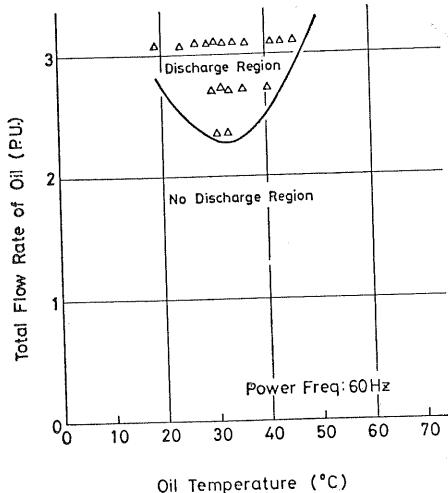


図 9 静電気放電の発生域

Fig. 9 Region of velocity and temperature of oil in which discharges are detected.

放電は上部タンク内の冷却ダクトの出口近傍で起こる場合と、コイル部下方の油ダクト入口部近傍で起こる場合がある。前者の放電は上部タンク中の正電荷によって生じた DC 電界によって進展するものと思われる。それゆえ、このタイプの放電開始限界は上部タンクの容積に関係するので、縮小モデルで再現することはできない。後者のタイプの放電はダクト入口部の紙絶縁物上に蓄積された高電荷密度の負電荷に起因する沿面放電である。このタイプの放電は縮少スケールのモデルで再現できる<sup>⑥</sup>。

上部タンクで観測された放電は一点に局在しないで、冷却ダクト出口部のほぼ全体に分布して発生している。放電の発生条件は油流量と油温に大きく依存する。図 9 は油流量と油温で表わした定格電圧印加時の放電観測領域を示したものである。図中のプロットは放電が検出された試験条件を示し、図における境界から放電領域のなかによりいっそう入った試験条件になるほど放電の頻度が高く、かつより大きな放電も観測される。静電気放電の発生により油が分解される。一連の実験終了後油をガスクロマトグラフにより分析した結果、油中コロナと同様に H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO や他の可燃性ガスが認められた。

### 3.4 絶縁油による流動帶電の差

石油製品の静電気の発生は液体の種類によって異なることがすでに知られている<sup>④</sup>。図 10 に原油、精製法の異なる 2 種類の絶縁油をモデル変圧器に適用して測定したコイル漏洩電流の油温依存性を示す。油 1 および油 2 ともに、コイル漏洩電流は油温に対しピークをもつが、

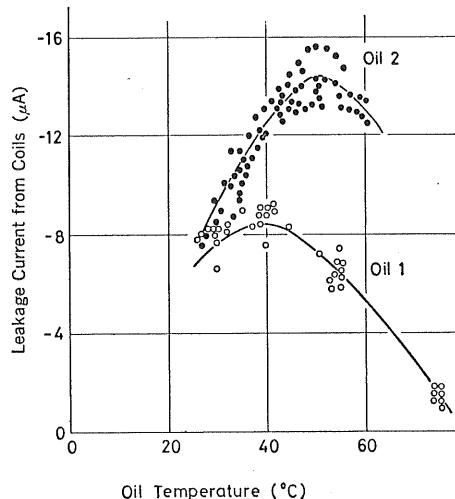


図 10 絶縁油による変圧器の流動帶電の差

Fig. 10 Dependence of leakage current from coils on oil temperature for different oils.

油 1 に比べると油 2 のほうがコイル漏洩電流が大きい。

モデル変圧器には、すでに述べたように、絶縁油の帯電度を調べるために、変圧器に使われているプレスボードと同じ材質のクラフトパルプ製モールドパイプを静電気発生部にした帯電度測定装置が装着されている。図 11 (a), (b) に、帯電度測定装置で測定した油 1 と油 2 の漏洩電流の油温依存性と導電率依存性を示す。油 1 の漏洩電流と比較すると、油 2 のそれのほうが大きくなっている。図 10 の変圧器で観測された結果と同様の傾向がみられている。

変圧器における漏洩電流は、絶縁油ばかりでなく絶縁紙によっても影響を受けると考えられる。しかし、絶縁油のみの帯電度を観測している帯電度測定装置による漏洩電流の大小関係と、実際の変圧器でのコイル漏洩電流のそれが合っていることは、図 10 でみられた漏洩電流の差が絶縁油の種類によってもたらされていることを示している。このことは変圧器の流動帶電にとって絶縁油の選定が重要であることを示唆している<sup>3)</sup>。

#### 4. 考 察

図 12 は油浸紙表面近傍において、定常的に流動帶電が生じている状況を示したものである。

油中の正イオンの分布  $q(z, x)$  は、イオンの濃度勾配による熱拡散電流と油中静電界による導電電流の平衡から次の(1)式で与えられる<sup>5,10)</sup>。

$$q(z, x) = \frac{Q(z)}{\delta} \cdot \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \quad (1)$$

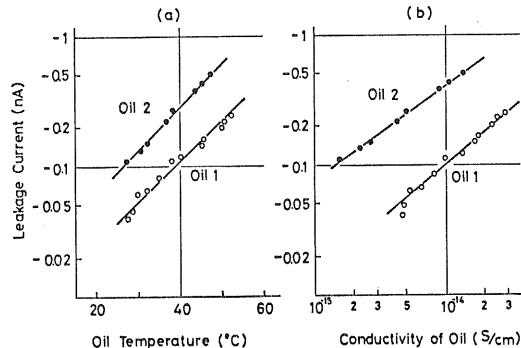


図 11 油の帯電度の油温および導電率依存性

Fig. 11 Dependence of leakage current on oil temperature and conductivity.

ここで  $x$  は油浸紙表面より油中に向かう距離、  $Q(z)$  は入口より  $z$  の点での油中正電荷によるダクトの単位周長、 単位ダクト長さ当たりの電束である。イオンの熱拡散係数を  $D$ 、 油の導電率を  $\kappa$ 、 誘電率を  $\epsilon$  とすれば、 デバイ長  $\delta$  は(2)式で表わされる<sup>10)</sup>。

$$\delta = \sqrt{D\epsilon/\kappa} \quad (2)$$

通常の変圧器の油流路は層流なので、油流速分布  $v(x)$  は、偏平な油げき  $h$  の平行ダクトを考えれば、平均流速を  $\bar{v}$  として(3)式で示される。

$$v(x) = (6\bar{v}/h^2)x(h-x) \quad (3)$$

無帶電油の流动によって、油浸紙表面と油の界面において油側に発生する静電気の電流密度を  $i_a$ 、 流動電流を  $I_s(z)$  とすれば、界面における電流の連続性から(4)式が成立する。なおダクトの周長を  $W$  とし、  $\delta \ll h$  とする。

$$i_a - \frac{\kappa}{\epsilon} \int_0^h q(z, x) dx = \frac{1}{W} \frac{dI_s(z)}{dz} \\ = \frac{d}{dz} \left[ \int_0^h q(z, x) \cdot v(x) dx \right] \quad (4)$$

ここで、  $i_a$  は油中イオン濃度  $n$  に比例し<sup>11)</sup>、  $\bar{v}^{m-1}$  に比例する<sup>6)</sup>という実験結果を用いると、以下の(5)式で表わせる。

$$i_a = A \bar{v}^{m-1} n \quad (5)$$

ただし  $A$  は油の種類、油浸紙表面の形状と性質に依存する係数、  $m$  は定数である。なお導電率、熱拡散係数、  $\kappa$  より油中イオン濃度の温度依存性はそれぞれ(6)、(7)および(8)式で表わせる。

$$\kappa = \kappa_0 \cdot \exp(-E_\kappa/kT) \quad (6)$$

$$D = D_0 \cdot \exp(-E_D/kT) \quad (7)$$

$$n = n_0 \cdot \exp(-E_n/kT) \quad (8)$$

ここで  $\kappa_0$ 、  $D_0$ 、  $n_0$  は温度によらない定数、  $E_\kappa$ 、  $E_D$ 、  $E_n$  はそれぞれ  $\kappa$ 、  $D$ 、  $n$  の活性化エネルギー、  $k$  はボルツマン定数、  $T$  は絶対温度である。なお  $E_\kappa$ 、  $E_D$ 、  $E_n$

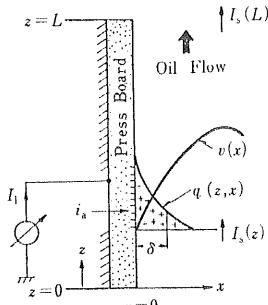


図 12

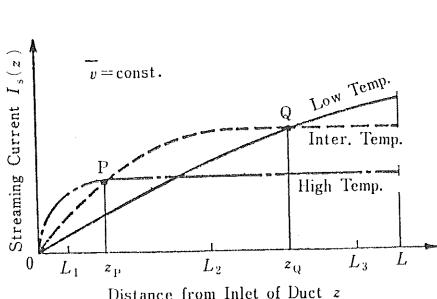


図 13

図 12 油浸紙面における流動帶電の概念図  
Fig. 12 Streaming electrification on surface of paper.

図 13 流動電流  $I_s(z)$  の増加特性  
Fig. 13 Build up of streaming current along flow direction of duct.

図 14 流動電流  $I_s(L)$  の油温依存性  
Fig. 14 Dependence of leakage current on oil temperature.

の関係は、(9) 式で表わせる<sup>12)</sup>.

$$E_\kappa = E_D + E_n \quad (9)$$

次に、(4) 式に (1)~(3) および (5)~(9) 式を代入して、流動電流  $I_s(z)$  を求めると (10) 式のようになる。

$$I_s(z) = a\bar{v}^m \cdot \exp\left(\frac{E_\kappa - E_n/2}{kT}\right) \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{z}{z_0}\right)\right\} \quad (10)$$

$$z_0 = b\bar{v} \cdot \exp\left(\frac{E_\kappa + E_n/2}{kT}\right)$$

ここで  $a$  は  $6AWn_0^{1/2}\epsilon^{3/2}/k\kappa_0^{3/2}$ 、 $b$  は  $6D_0^{1/2}\epsilon^{3/2}/k\kappa_0^{3/2}$ 、 $z_0$  は電荷緩和長である。なお油の誘電率  $\epsilon$  はほとんど温度依存性をもたないので、 $a$  と  $b$  は温度によらない定数になる。

図 13 は、 $I_s(z)$  が流路に沿ってどのように増加していくかを油温をパラメータにして示したもので、流路出口  $z=L$  での流動電流  $I_s(L)$  は、定常状態では油浸紙から接地金属へ流れ出る負の漏洩電流  $I_l$  に等しい。また図 14 は  $I_s(L)$  の油温依存性を  $L$  をパラメータにして示したものである。すなわち油流速  $\bar{v}$  を一定として考えたとき、次のようなことがいえる。

- (1) 油温が高い場合には、油中正電荷が油浸紙面へ速く緩和してしまうので電荷緩和長  $z_0$  が短く、したがって  $I_s(z)$  は、図 13 の一点鎖線で示すような低いレベルで飽和に至る。
- (2) 油温が低い場合には上記油中正電荷の緩和長が長くなるので、 $I_s(z)$  は実線で示されるようにほぼ直線的に増加し、 $z=\infty$  における飽和値は高いレベルに至る。
- (3) 油温が中間的な場合には電荷緩和長も  $I_s(z)$  の飽和値も中間的な値をとるため、破線で示すように上

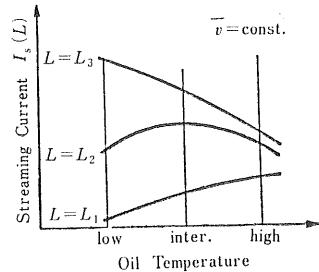


図 14

記 2 ケースのカーブとそれぞれ P 点および Q 点で交差することになる。

したがって、 $L \leq z_p$  なる流路長  $L_1$  のような場合、 $I_s(L)$  は図 14 で示されるように油温に対して単調増加し、また  $L \geq z_e$  なる流路長  $L_3$  のような場合、 $I_s(L)$  は単調に減少する。そして  $z_p < L < z_e$  なる流路長  $L_2$  のような場合、 $I_s(L)$  は中間的な油温でピークを示すような特性となる。

油流速  $\bar{v}$  を変えた場合にも上記油中正電荷の緩和の程度が変わる。油流速が低い場合にはこの緩和が顕著になり、 $I_s$  がピークを示す油温も低いほうへ移動する。図 6 ではこの特性がよく現われている。また、漏洩電流の油流速依存性において油温が高い場合、油中正電荷の緩和が油流速の低下とともに顕著になるため、低油温の場合に比べると、その油流速依存性の傾斜が大きくなることも容易に推定できる。

以上の考察から、(10) 式を応用すると実用上重要なコイル漏洩電流のピークの大きさと、その油温の予測が可能になる。 $E_\kappa$  および  $E_n$  の値は、前述の帯電度測定装置を用いて導電率および  $i_a$  の温度依存性から求められ、定数  $a$  および  $z/b$  は異なる 2 点の油温で測定したコイル漏洩電流から求められる。なお  $m$  の値は 2.75 を用いた<sup>6)</sup>。図 6 のデータから  $a$ 、 $z/b$  を求め、それらの値を (10) 式に代入すると、このモデル変圧器の場合、(10) 式のようになる。

$$I_l = -1.04 \times 10^{-13} (\bar{v}f)^{2.75} \cdot \exp(4980/T) \times [1 - \exp\{(-4.28 \times 10^{13}/\bar{v}f) \times \exp(-9510/T)\}] \quad (11)$$

ここで  $\bar{v}$  は図中の P.U. の数値であり、 $f$  は油温が変わると  $\bar{v}$  も若干変わるので、その油流量の補正係数であ

る。(1) 式の計算結果を図 6 に実線で示すと、この理論曲線と実測値はかなりよく合っている。

同様にして、図 5 のデータについても計算値と実測値の比較をすると、油温が高く低流量域での差が目立つが、30°C, 40°C の両者は比較的合っている。この差については次のように理解される。すなわちコイル近傍の油流路入口部で発生する負電荷に起因する漏洩電流は、コイル以外に下部タンク等の接地物体にも流れている<sup>3)</sup>。一方この負の漏洩電流に対応する油中正電荷もまたコイルの冷却ダクトに流入する。したがって、油中正電荷の緩和が顕著となる高温でかつ低流量域では、正電荷のコイルへの緩和電流が負の漏洩電流を越えることもある。

図 5において、55°C の低流量域で実測値が計算結果よりも下回って急な傾斜となっていること、75°C でコイル漏洩電流の極性が負から正へ反転していること、さらに図 6において低流量のケースで実測値が計算結果よりも若干低くなっているのはこのような影響によっている。

## 5. む す び

大容量外鉄型変圧器における流動帶電を 2 種類の 500 kV モデル変圧器を用いて調べた結果、以下の諸点を明らかにすることことができた。

- (1) 変圧器における流動帶電を評価する指標として、漏洩電流は精度よく測定できる簡便な量である。
- (2) コイル漏洩電流は油流量に顕著に依存する。また油流量が一定のとき、コイル漏洩電流は電荷分離と電荷緩和がほぼ等しくなるような油温で最大値を示す。本論文でこれらの諸特性の解析がなされた。
- (3) 冷却ダクト出口部近傍の油中電荷密度が実測され、この特性もコイル漏洩電流のそれに類似していることが示された。また冷却器やポンプでの発生電荷密度は低いことが確かめられた。
- (4) 油流量のきわめて高い条件で、モデル変圧器によって静電気放電が確認された。この放電の発生特性は油流量と油温で表わすと V 字形の特性で示される。
- (5) AC 電圧の励磁によって変圧器の流動帶電は助長される。コイル漏洩電流は若干増加し、静電気放電

の発生域では発生頻度が増加する。

- (6) コイル漏洩電流が油の種類によって影響されることが示された。したがって変圧器の流動帶電に対して、油を選択することは重要である。

絶縁油の流動帶電の究明にはより適切な計測法が必要である。採油することなく油の導電率や誘電正接を測定できる実装型のプローブ<sup>6)</sup>、近接物の影響を受けずに油中の電荷密度を連続的に計測できるプローブ<sup>7)</sup>、および油のみの帶電度をその電気的特性とともに評価できる帶電度測定装置<sup>8)</sup>が本研究を通じて開発された。これらの計測法は絶縁油の流動帶電の特性を明らかにするうえで有効であった。

最後に、この研究にあたりご指導ご協力いただいた各電力会社をはじめ関係各位に謝意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) T. Takagi, T. Ishii, T. Okada, K. Kurita, R. Tamura and H. Murata : 1978 CIGRE SC-12 Committee Report, No. 12-02 (1978).
- 2) 三浦良和, 渡邊次男, 石井敏次, 新田東平 : 三菱電機技報, 52, 12 (1978), 915.
- 3) R. Tamura, Y. Miura, T. Watanabe, T. Ishii, N. Yamada and T. Nitta : 1979 IEEE PES Summer Meeting, F 79 640-4 (1979).
- 4) A. Klinkenberg and J.L. van der Minne : *Electrostatics in the Petroleum Industry*, Elsevier, Amsterdam (1958).
- 5) 増田閃一 : 電子通信学会誌, 56, 818 (1973), 6.
- 6) T. Tanaka, Y. Yasojima, N. Yamada, A. Kishi and T. Nitta : 1979 IEEE PES Summer Meeting, F 79 641-2 (1979).
- 7) S. Kamoto : 1978 International Workshop on Electric Charges in Dielectrics, No. 10A-3 (1978).
- 8) 宮本晃男, 山田直也, 片岡保, 土江基夫 : 昭和 54 年電気学会全国大会, 分冊 3, No. 267 (1979).
- 9) 田村良平, 平井正好, 三浦良和, 渡邊次男, 新田東平 : 同上, 分冊 8, No. 637 (1979).
- 10) G. Schön : *Handbuch der Raumexplosion*, p. 302, Verlag Chemie (1965).
- 11) 宮本晃男, 土江基夫, 石井敏次 : 昭和 54 年電気学会全国大会, 分冊 3, No. 266 (1979).
- 12) 宮本晃男, 土江基夫 : 電気学会論文誌 A, 98, 1 (1978), 17.