

論 文

モデルによる大型変圧器内の流動帶電現象の研究

田 中 俊 秀*, 山 田 直 也**, 岸 章 夫**, 八十島 義 行*

(1979年5月29日受理)

Model Approach to Static Electrification Phenomena by Oil Flow in Large Power Transformers

T. TANAKA,* N. YAMADA,** A. KISHI** and Y. YASOJIMA*

(Received May 29, 1979)

Static electrification phenomenon due to oil flow in large power transformers is a new and important factor to be studied to achieve reliable insulation design of large power transformers. A test apparatus with a closed oil loop was constructed to investigate this phenomenon. Pipe-ducts made of pressboard or kraft-paper, or a model duct simulating a part of a shell type power transformer were installed in the test apparatus, and experimental studies on the static electrification were carried out. The method of measuring charge density of oil has not been established yet. The standard methods for measurement of electrical conductivity of oil do not give the exact value to discuss static electrification phenomena in large power transformers. Therefore, new measuring techniques of charge density and electrical conductivity of oil have been developed in the course of this study. In this paper, experimental results and measuring techniques are presented.

1. まえがき

最近、送油冷却式の大型変圧器において流動帶電現象が機器の絶縁性能に影響を及ぼす可能性があり、注目されるようになっている^{1,2)}。筆者らは大型変圧器内の流動帶電現象の解明と、それを抑制するための有効な手法をみつけるために実規模のモデル変圧器を用いた実験から各種モデルを用いた基礎実験まで広汎な研究を進めてきた³⁾。本論文で述べる流動帶電試験装置はそのうちの一つで、流動帶電現象の基礎特性を詳細に理解し、さらに大型変圧器内の流動帶電現象を模擬することを目的としている。また本装置はモデル変圧器に比べて取扱いが比較的簡単であるので、材料面など基礎実験で得られた流動帶電の抑制技術を実変圧器に適用するための検証も行なうことができる。流動帶電の一つの指標である油中電荷密度の測定はまだ完成されておらず、また流動帶電現象を理解するために重要な因子である油の導電率の測定

も従来の規格などで示されている手法では十分でない。そこで、これらの測定技術の開発も同時に行なってきた。

本報告では、流動帶電試験装置を用いて得られた実験結果と、各種測定法の概略について紹介する。

2. 実験装置

2.1 流動帶電試験装置の概略

流動帶電試験装置はポンプ、ヒータ、クーラと五つのタンクより構成されており、約2,000lの油が入るようになっている。五つのタンクはそれぞれ上流側タンク、試料タンク、下流側タンク、コンサベータ、緩和タンクと呼ばれ、試料タンクにはクラフト紙やプレスボードで作られたパイプ状ダクトや、変圧器内的一部分を模擬した油流ダクトを設置して各種の実験を行なう。図1に油流ダクトを設置した場合の構成図を示す。

装置のおのとの部分は互いに電気的に絶縁し、さらに全体を大地から浮かせて、それぞれの部分から漏洩していく電流を測定できるようになっている。図2に実験中の流動帶電試験装置の全景を示す。

2.1.1 パイプ状ダクト

流動帶電現象の基礎的な特性を把握するための実験には、単純な形状のパイプ状ダクトを使用した。このパイプ状ダクトはクラフト紙またはプレスボードで作られて

* 三菱電機株式会社中央研究所 (661 尼崎市南清水字中野 80)

Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corp., 80, Aza-Nakano, Minamishimizu, Amagasaki 661, Japan

** 三菱電機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

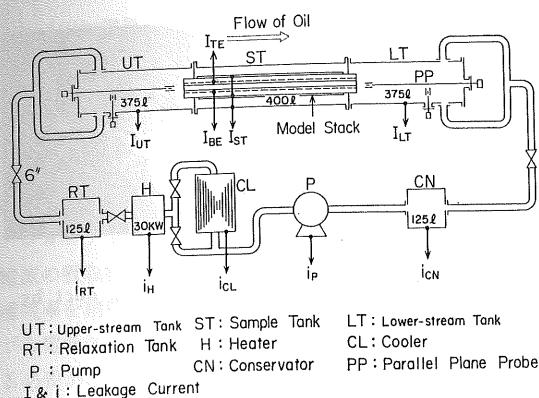


図 1 流動帶電試験装置の概略

Fig. 1 Schematic diagram of the test apparatus for static electrification by oil flow.

おり、内径 $20\text{ mm}\phi$ 、外径 $31.6\text{ mm}\phi$ で長さは 1 m である。このパイプを試料タンク内で 4 本つなぎ合わせ、 4 m のダクトを形成する。さらにパイプの外側には各実験目的に応じて、パイプから漏洩する電流を測定するための電極やパイプに課電するための電極などが取り付けられる。

2.1.2 油流ダクト

変圧器内の流動帶電現象を模擬するため図 3 に示すような油流ダクトを用いた。7 枚の平板プレスボードをアクリルのスペーサーを用いて 6.4 mm 間隔で積み上げ、6 層のダクトを構成している。このアクリルのスペーサーは透明で、横側からダクト内部を観測できるようになっている。ダクト内部には油流を乱し流動帶電を大きくするため、ダクト壁の片面に障害片を張り付けてある。

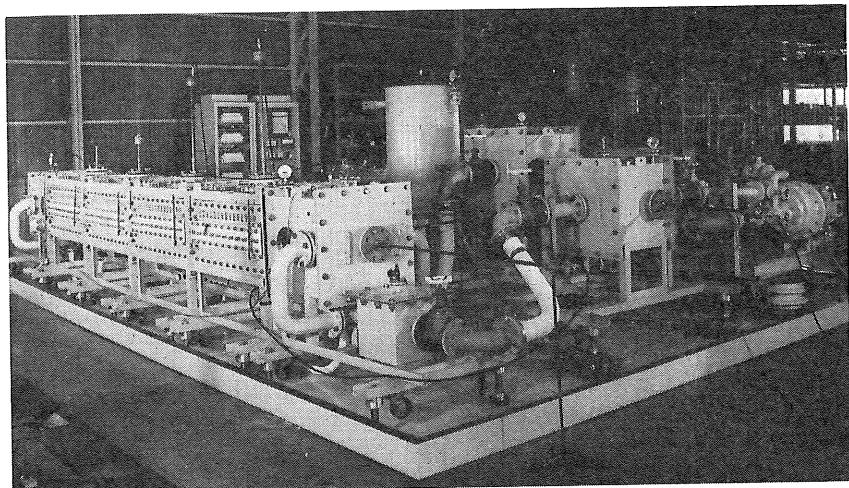


図 2 流動帶電試験装置の全景

Fig. 2 Whole view of the test apparatus.

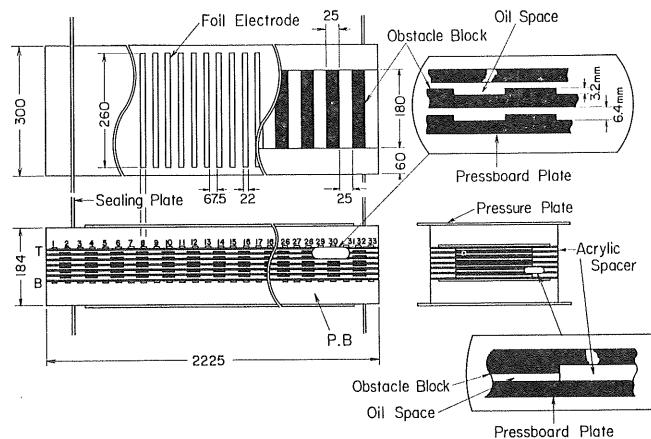


図 3 油流ダクトの構造

Fig. 3 Detailed construction of the model duct.

ダクト上下端には 33 枚ずつの銅箔電極が埋め込まれている。これらの電極は、接地したときにはダクトからの漏洩電流を、大地から浮かすと帶電電圧を測定できるようになっている。電極の外側はさらに厚いプレスボード板を用いて絶縁し、全体を圧力板で締めつけてある。

2.2 油流速、油温の制御と管理

パイプ状ダクトおよび油流ダクト内を流れる油流速の制御は配管に取り付けられたゲートバルブの開閉操作により行なっている。パイプ状ダクト内の平均油流速は最高約 300 cm/s であり、この油流速の範囲では層流および乱流の両方の状態で実験を行なうことができる。油流ダクトにおける油流速はダクト内の障害片に面した最も狭い場所 (3.2 mm) における平均油流速で表現し、最高の油流速は 240 cm/s である。この流速の範囲内ではダクト内の断面積が変化するところで一部渦流を形成するが、その他のところでは層流とみなすことができる。この状態を計算機や光学的手法により解析しているが、シミュレーション法を用いて測定した一例を図 4 に示す。

油流速を常時監視するため、差圧伝送器 (共和電業 PD-2KA) を用いて上流側と下流側タンク間の圧力差を測定し、常時記録計で記録している。この測定値とパイプもしくは油流ダクトの構造、および油の動粘度から油流速を算出することができる。本実験に使用した油の動粘度は 21°C で 16.5 cSt, 80°C で 3.1 cSt である。この温度依存性は ASTM D 341-43 (1949) に示される "Chart E" のグラフ上で直線になる。

油の温度は下流側タンク内の油温を検知し、ヒータとクーラーを ON-OFF 制御することにより調整する。すべての実験は室温以上の油温で行なっている。油温を上げて実験する場合、油温上昇後漏洩電流が十分落ちなくて油温を一定に保ち、その時間は通常数時間を必要とした。本研究においては 20~70°C の範囲で実験を行ない、油温設定の精度は ±2°C 以内であった。

3. 測定手法と実験結果

3.1 油の導電率と誘電正接

流动帶電現象を理解するうえにおいて、油の導電率は重要な因子の一つである。一般に絶縁油の導電率の測定手法に関しては、JIS, ASTM, IEC や他の規格によって規定されている。これらの規格によると、同軸円筒の電極に試料油を採油し直流電圧を印加して測定する。通常、電圧印加後の導電電流は吸収特性を示し、これらの規格では電圧を印加してから 1 分後の導電電流より導電率を算出する。しかしこれらの規格に基づく測定では連続測定ができないことや、測定時に採油するため外気や電極の影響を受けるなどいろいろな問題点が含まれてい

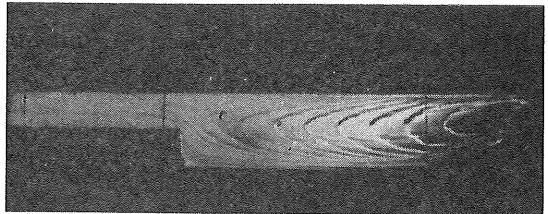


図 4 油流ダクト内の油流の観測

Fig. 4 Visualization of oil flow in the duct by Schlieren method.

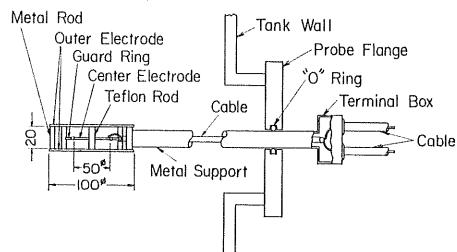


図 5 平行平板型プローブ

Fig. 5 Parallel plane probe.

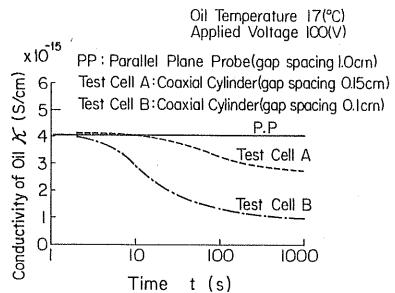


図 6 各種電極による油の導電率の時間変化

Fig. 6 Absorption characteristics of oil conductivity on three different test cells.

る。したがって、流动帶電現象の研究を進めるにあたり、油の導電率を連続的に、しかも精度よく測定する手法を見つけるために実験を行なった。

図 5 に示した平行平板型プローブ（以下プローブと略す）および 2 種類の同軸円筒型試験電極を用いて、直流電圧を印加したあとの導電率の時間依存性を調べた。プローブを用いて油の導電率を測定する場合、外側電極に直流電圧 100 V を印加し、振動容量型微小電流電位計（タケダ理研 TR-84M）を用いて中心電極から流出する接地電流を測定する。この際、中心電極の端部効果を防ぐためガードリングを接地する。プローブおよび各電極による導電率の時間依存性を図 6 に示す。同図によれば課電電極と測定電極のギャップ長が短いほど、いいか

えれば印加電界が高いほど吸収特性が大きく、吸収特性が電極の構造や印加電界に大きく影響されることが判明した。しかし、いずれの電極の場合も電圧印加直後 $t=0$ 近傍ではほとんどギャップ長に依存せず、比較的よく一致している。したがって本研究においては $t=0$ での導電率 $\kappa_{t=0}$ を採用している。

プローブでは電極間隙を 1 cm と広くしてあり、導電电流の吸収特性はほとんどでこないため、 $t=0$ 近傍の導電率を精度よく求めることができる。さらに、プローブの電極部は常に油中に浸されており、試料油を採油する必要がないため採油過程の誤差を除くことができる。以上のような理由から、本研究においては流動帶電試験装置に取り付けたプローブを用いて油の導電率を測定しており、得られたデータのばらつきは数%以内に収まっている。

本実験には変圧器油 (JIS 2 号油) を使用した。図 7 は流動帶電試験装置に油流ダクトを設置して行なった実験における油の導電率の油温依存性を示したものである。通常、油の導電率の油温依存性はアレニウスの関係に従い次式で表わされる。

$$\kappa = \kappa_0 \exp(-W_0/kT) \quad (1)$$

ただし、 W_0 は油の導電率の活性化エネルギー、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 κ_0 は定数である。図 7 より油の導電率と絶対温度の逆数の関係が低温域において直線となり、式 (1) に合うことがわかる。しかし高温域においては直線関係から離れてくる。これは変圧器のように油と絶縁紙が共存している場合に起こりうる特有な現象で、絶縁紙中の水分などイオン性物質が高温になると油中に拡散するためであろうと考えられる。この結果はプローブをモデル変圧器や流動帶電試験装置に装着し、新油の導電率を精度よくしかも連続的に測定した結果、新

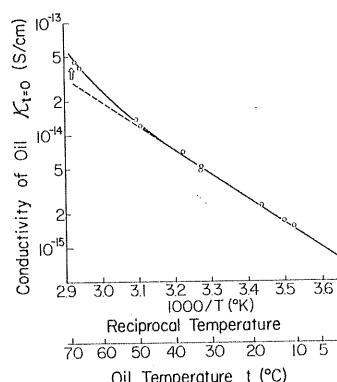


Fig. 7 油の導電率の油温依存性

Fig. 7 Temperature dependence of oil conductivity.

しくわかった現象である。

また、本プローブを使用して油の誘電正接も測定することができる。高精度キャパシタンスプリッジ (GR 社 Type 1621) を用いて 20 Hz ~ 10 kHz まで油の誘電正接を測定したが、プローブによる誘電正接の測定値と、直流法によって求められた油の導電率 $\kappa_{t=0}$ から算出した誘電正接の計算値とは常によい一致を示したので詳細は省くこととする。

3.2 漏洩電流

油流による静電気の発生量を調べるには、装置や試料など各部分から漏洩してくる電流を測定することが比較的簡単で、しかも精度のよいデータを得る方法である。

3.2.1 流動帶電試験装置における漏洩電流分布

流動帶電試験装置を構成しているおののおのの部分は互いに絶縁されるとともに、全体を大地から絶縁してあり、流動帶電による漏洩電流を測定できるようになっている。試料タンクに油流ダクトを設置した場合における漏洩電流は次のように区分けして測定した。

I_{TE} : ダクト上部の埋込み箇への漏洩電流の総和

I_{BE} : ダクト下部の埋込み箇への漏洩電流の総和

I_{UT} : 上流側タンクへの漏洩電流

I_{LT} : 下流側タンクへの漏洩電流

I_{ST} : 試料タンク、圧力板などへの漏洩電流の総和

I_P : ポンプ、ヒータ、クーラ、コンサベータ、緩和タンク、配管などへの漏洩電流の総和

表 1 に異なった油流速、油温における各部分からの漏洩電流分布を示す。表中 I_S は I_{TE} , I_{BE} , I_{ST} , I_{UT} の総和であり、ダクトから漏洩する単位時間当たりの負電荷量を示している。一方 I_R は I_{LT} および I_P の和であり、その値はダクトから油流により流出する正電荷量である。同表をみれば I_S および I_R の絶対値はほぼ等しいことがわかる。また、 I_S と I_R の絶対値の差は実験の誤差を示しており、本実験においては約 10% 程度に収まっている。

表 1 では上流側タンクへの漏洩電流は負極性になっている。しかし、図 5 に示した平行平板型プローブを用いて上流側タンク内の油中電荷密度を測定した結果、油が帶電していないことが判明している (測定法に関しては後述する)。したがって、上流側タンクへ流れる負極性の電流はダクト入口近傍に蓄積した負電荷が、油や油流ダクトを支えている絶縁物の沿面を通して上流側タンクへ漏洩することに起因するものである。また、各部分からの漏洩電流の分布は試験条件によって変化する。たとえば、試験中に埋込み箇を大地から浮かせると I_{TE} や I_{BE} の漏洩電流がすぐに I_{ST} や I_{UT} に移動する。しかし漏洩電流の総和 I_S は変化せず油流ダクト内で発生した正

表 1 流動帶電試験装置における漏洩電流分布

Table 1 Distribution of leakage current for different flow velocities and temperatures.

単位 (nA)

\bar{v} (cm/s)	I_{TE}	I_{BE}	I_{ST}	I_{UT}	I_S	I_{LT}	I_P	I_R
(1) 49.4	-75	-55	+17	-10	-123	+90	+48	+138
(2) 46.3	-100	-63	+5	-20	-188	+160	+70	+230
(3) 66.0	-200	-180	-65	-30	-475	+380	+130	+510
(1) 93.0	-280	-200	+110	-15	-385	+240	+130	+370
(2) 94.8	-540	-350	+172	-50	-768	+520	+170	+690
(3) 98.0	-900	-500	+350	-80	-1,130	+800	+290	+1,090
(1) 146.6	-800	-580	+580	-80	-880	+450	+265	+715
(2) 155.0	-1,300	-1,350	+1,150	-200	-1,700	+1,200	+440	+1,640
(3) 153.0	-4,600	-3,900	+5,950	-580	-3,130	+2,000	+450	+2,450

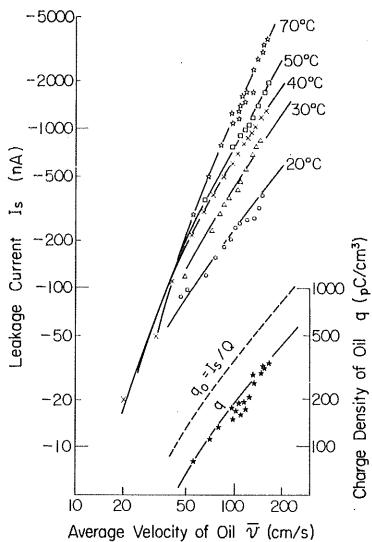
(1) 30°C, $\kappa=4.6 \times 10^{-15} \text{ S/cm}$ (2) 50°C, $\kappa=1.4 \times 10^{-14} \text{ S/cm}$ (3) 70°C, $\kappa=5.4 \times 10^{-14} \text{ S/cm}$ 

図 8 漏洩電流および油中電荷密度の油流速依存性

Fig. 8 Dependence of leakage current and charge density of oil on flow velocity of oil.

味の電荷量をよく表わしている。

3.2.2 漏洩電流 I_s の油流速依存性

流動帶電による静電気発生量は油流速および油温に大きく依存する。図 8 は漏洩電流 I_s の油流速依存性を油温をパラメータとして示している。同図より漏洩電流 I_s は油流速の 2~4 乗に比例し、油温が高くなれば勾配も大きくなっていることがわかる。

3.2.3 パイプ状ダクト内での漏洩電流分布

油がパイプ状ダクト内を流れる場合における漏洩電流

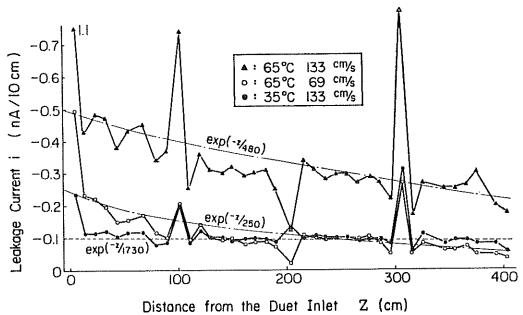


図 9 パイプ状ダクト内での漏洩電流分布

Fig. 9 Distribution of leakage current from the pipe-ducts.

の油流方向の分布、すなわちパイプ内での漏洩電流分布の一例を図 9 に示す。同図をみれば油流方向に対して漏洩電流は減少することがわかる。入口から 0, 100, 200, 300 cm 近傍で急激に変化しているのは、それぞれパイプの接続部分で、パイプ内壁の負電荷がパイプ接続部の沿面を通して電極に漏洩するためであろう。

Schön⁴⁾ らによれば、金属パイプ内で発生する静電気は緩和長 $Z_e = \bar{v} \tau$ で指数関数的に単調減少することが示された。ただし \bar{v} はパイプ内での平均油流速、 τ は緩和時間で $\tau = \epsilon/\kappa$ (ϵ : 油の誘電率、 κ : 油の導電率) である。この関係を図 9 に示すと、それぞれ一点鎖線のようになり測定結果とよく一致している。このことから、金属パイプの場合の考え方方がプレスボーデパイプにも適用できることがわかる。

3.3 油中電荷密度

流動帶電により発生した油中電荷密度を測定するため、数種の油中電荷密度測定装置を開発した。

3.3.1 油中電荷密度測定装置

本研究において開発した油中電荷密度測定装置は、大きく分けて電圧測定型と電流測定型がある。

(a) 電圧測定型（平行平板型プローブ）

図5に示す平行平板型プローブを用いて油中電荷密度を求める場合は、2枚の外部電極を接地しガードリングを中心電極に接続した状態で中心電極の電位を高入力インピーダンスの電位計（河口電機：表面電位計、小林理研：回転セクタ電位計、春日電機：集電式電位計、タケダ理研：振動容量型微小電流電位計）を用いて測定する。今プローブが均一な電荷密度 q をもった油中に浸されているとすると、中心電極の電位 V_c は次式で与えられる。

$$V_c = qd^2/2\epsilon \quad (2)$$

ここで、 d は中心電極と外部電極とのあいだの距離、 ϵ は試料油の誘電率である。したがって、プローブの電極間に存在する油中電荷密度が均一であれば、中心電極の電位を測定することにより油中電荷密度を求めることができる。

(b) 電流測定型（吸引式プローブ）

このプローブは細長い同軸円筒状の構造で、外円筒は接地され内円筒はテフロンで絶縁されている。油中電荷密度の測定に際しては、定量ポンプにより試料油を吸い込んで内円筒に流れる電流を測定する。油中電荷密度は、この電流値と定量ポンプによる吸引流量より算出される。この手法を用いれば、平行平板型プローブにくらべ分解能、応答特性のよい測定を行なうことができる⁵⁾。

3.3.2 測定例

流動帶電試験装置には各部分に平行平板型プローブを装着してある。油流ダクトを用いた実験においてプローブにより流動帶電試験装置内の油中電荷密度およびその分布を測定した。

上流側タンク内の電荷密度は常に 1 pC/cm^3 以下であり、ポンプやクーラなどで発生した電荷が緩和タンク内でよく緩和しており油流ダクトには帯電していない油が送り込まれていることがわかる。

下流側タンク内のダクト出口後方 10 cm で測定した油中電荷密度の油流速依存性を図8に示す。もし各層のダクトから流出される正電荷の密度が等しいとすると、油中電荷密度 q_0 は漏洩電流 I_s を全油流量 Q で割った値で与えられる。図中の破線は 70°C における I_s を用いて算出した q_0 である。実際の測定値 q は計算値 q_0 の約半分になっている。この差はダクトから流出される油中電荷密度の不均一性や、プローブの電極部がダクト出

口部から少し下部にずれているのが原因と考えられる。しかし、測定値の油流速依存性は相対的に計算値とよく合っており、装置全体としてみれば、定性的には油中電荷密度 q で考えても漏洩電流 I_s で考えても同じであることがわかる。

モデル変圧器を用いた実験では、平行平板型プローブや吸引式プローブを実装し、変圧器内部の油中電荷密度およびその分布など種々のデータを得ている。

3.4 帯電電圧

流動帶電による放電の発生はプレスボード表面に蓄積した負電荷に密接に関係しており、その負電荷による電位を測定することは重要なことである。しかし実際にには、プレスボード表面の電位を直接測定することは非常に困難であるため、油流ダクトの実験ではダクト上部に埋め込んだ1番目の箱の帶電電圧を測定した。その帶電電圧の油流速依存性を図10に示す。同図では帶電電圧の温度依存性はかなり複雑な関係を示しているが、油流速が 120 cm/s 以下では 40°C 近傍で帶電電圧が最も高くなっている。これは、油流速が一定ならば 40°C 近傍で最も放電が発生しやすいようになっていることを示している。

3.5 放電

油流ダクトを用いた実験では、油流速を十分高くすると流動帶電により放電が発生するようになる。

3.5.1 放電の検出

油流ダクト内で発生する放電は以下の三つの方法により検出した。

(a) 音響的手法

二つの超音波マイクを使用して放電およびその発生場所を検出することができる。油流ダクトの入口と出口近傍の試料タンク壁に超音波マイクを取り付け、それからの電気信号を增幅しペンレコーダで記録するとともにスピーカにも接続してある。目でみることのできないような小さい放電の発生場所は、これらのマイクからの信

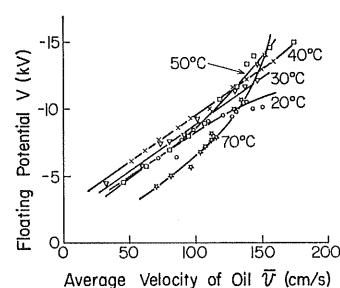


図 10 埋込み箱の帶電電圧の油流速依存性

Fig. 10 Velocity dependence of floating potential of the foil electrode.

号の到達時間差をオシロスコープで測ることにより推定できる。

(b) 電気的手法

油流ダクトの各埋込み箇への漏洩電流に重畳した誘導電流より放電を検出することができる。放電電荷量は漏洩電流 I_{TE} に重畳した誘導電流の積分波形のピーク値より推定した。また漏洩電流 I_{TE} をトランジエントレコーダ (Biomation Model 8100) を用いて放電による誘導電流だけでなく、放電の前駆現象の測定も行なった。

(c) 光学的手法

油流ダクト内で発生した放電は、試料タンク側面の観測窓を通して光学的に観測することができる。静止カメラにより放電の撮影を行なうとともに、放電の過渡現象を観測するためにイメージコンバータカメラを用いてストリーフ写真やこま撮り写真の撮影を行なった。

3.5.2 放電発生条件

種々の放電電荷量をもった放電が発生する場合の油流速と油の導電率の関係を図 11 に示す。図中破線は放電電荷量が一定の境界を示している。油流ダクトは実際の変圧器内部の油流ダクト部分に比較して多くの障害片を設けることにより放電が発生しやすくなっている。油の導電率 $\kappa_{t=0}$ が $1 \times 10^{-14} \text{ S/cm}$ 近傍では油流速が 40 cm/s になれば小さい放電が発生するようになる。油流速をさらに上げてゆくと小さい放電の発生頻度は増加し、放電電荷量の大きい放電がそれらに重畳して発生するようになる。

図 10 の帶電電圧がそれぞれ -10 kV , -5 kV になるとときの油流速を求め、図 11 の放電領域のグラフに記入すると実線で示すようになる。この結果を見れば、帶電電圧が一定の曲線は放電電荷量が一定の境界とほぼ一致しており、帶電電圧の測定結果からも放電領域が V 字曲線になることがわかる。

3.5.3 静止カメラによる観測

図 12 は油流ダクト内で発生する放電電荷量が $1 \mu\text{C}$ を越すような大きい放電を静止カメラで撮影したものである。この放電はダクト入口から出口方向に 1 m 以上も進展している。また放電の一部分はダクト内部からダクト側面のプレスボードとアクリルのスペーサとの境界面を這って外に出たのち、大地に向かって飛んでいるのがわかる。

3.5.4 放電による誘導電流の過渡現象

図 12 に示すような大放電による埋込み箇への誘導電流の過渡現象をトランジエントレコーダを用いて測定した。その一例を図 13 に示す。図 13(a) は油流ダクト上部に埋め込まれた 33 枚の埋込み箇に誘起する電流の合計 I_{TE} を測定したものであり、同 (b) はダクト入口から 3 番目および 17 番目の埋込み箇からの漏洩電流 $i_{TE}(#3)$, $i_{TE}(#17)$ を同時に測定したものである。これ

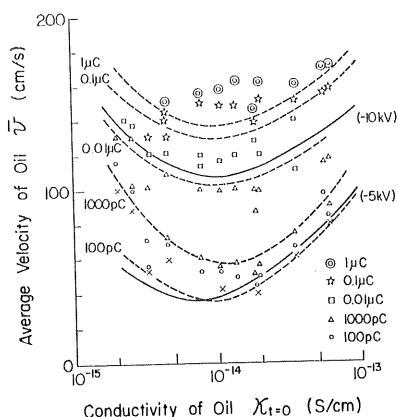


図 11 放電発生領域の導電率依存性

Fig. 11 Region of velocity and conductivity of oil where discharges are observed.



図 12 油流ダクト内で発生する放電

Fig. 12 Photograph of a discharge in the model duct.

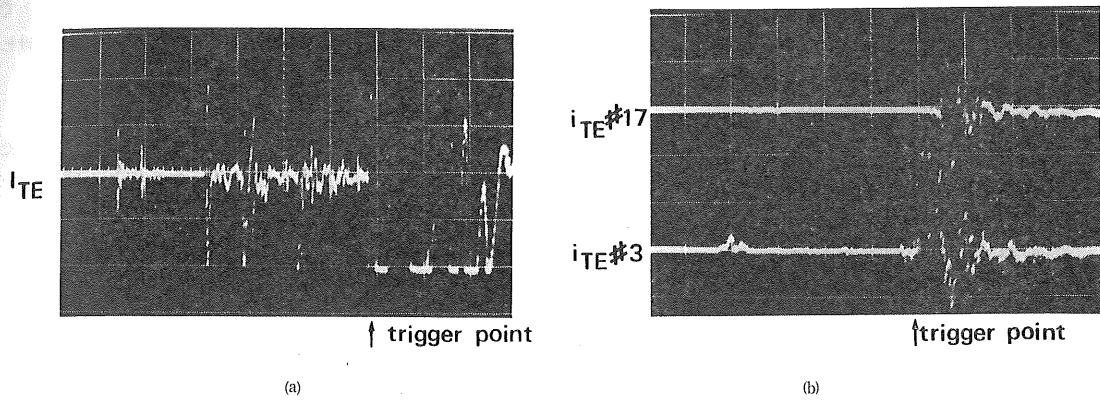


図 13 放電による誘導電流の過渡現象

Fig. 13 Transient phenomena of induced current.

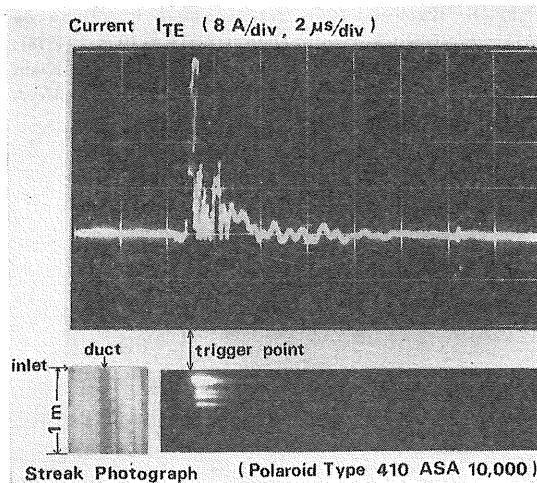
(a) I_{TE} (0.8 A/div, 4 μ s/div), (b) $i_{TE} \#3, i_{TE} \#17$ (8 A/div, 4 μ s/div).

図 14 放電のストリーク写真と誘導電流

Fig. 14 Induced current and streak photograph of a discharge.

らの電流はトランジエントレコーダ特有のプリトリガ機能を駆使して測定しており、大きな放電が発生したときに動作するようにトリガレベルを調整した。したがって同図においてトリガ点以後の波形が大放電の部分を示していることになる。

この図が示すように、大半の場合大放電が起こる前に10~30 μ s程度連続して小さい放電が起こっている。しかもこの小さい放電は図 13(b)が示すように $i_{TE}(\#3)$ 、すなわち油流ダクト入口近傍で起こっており、続いて図 12のような大放電が起こっている。

3.5.5 イメージコンバータカメラによる測定

図 14 に放電のストリーク写真とそれに対応する誘導電流の波形を示す。この電流波形は図 13(a)の場合と同

様 I_{TE} を測定したものであり、電流のピーク値は 30 A を越えている。ストリーク写真は左端の静止写真に示すように、油流ダクト入口から 1 m の長さの部分を 2 μ s/cm で走査して撮影したものである。また電流波形の横軸も 2 μ s/div でありストリーク写真と対応している。トランジエントレコーダおよびイメージコンバータカメラは放電による電気信号を用いてトリガしており、トリガが入ってからストリークカメラが動作するまでの時間遅れは 150 ns である。このストリーク写真より次のようなことがわかる。

- (1) 図 12 のような大きい放電は油流ダクト入口から油流方向に向かって走る。
- (2) ストリーク写真に写るような輝度の明るい部分は、油流ダクト内 1 m の距離を約 1 μ s で走り、放電の進展速度は約 10⁸ cm/s と非常に速い。
- (3) 放電は先端が光りながら進展する。

3.5.6 放電による痕跡とガス発生

油流ダクトを用いた一連の実験終了後、油流ダクトを解体した。その結果、プレスボード表面には図 15 に示すような多数のトリー状の放電痕跡が発見された。これらの痕跡はプレスボード表面において黒く変色し、かすかに隆起しているところから、放電の一部はプレスボードの表皮下を走ったものとみられる。

また放電は油やプレスボードの一部を分解し、可燃性ガスを生成する。実験の開始前と終了後に試料油の油中ガスの分析を行なった。その結果、H₂, C₂H₂, CO のほか各種の炭化水素ガスの著しい増加がみられた。

4. おわりに

以上、流動帶電試験装置を用いて得られた実験結果と各種測定法の概要を紹介した。ここで述べた内容、とく

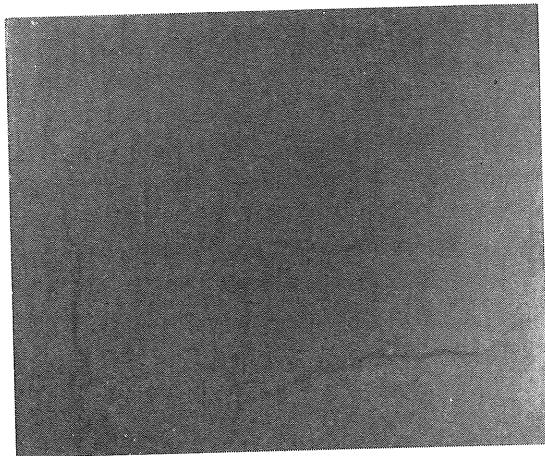


図 15 プレスボード上の放電痕跡

Fig. 15 Tracks on the pressboard surface made by discharges.

に測定法などについては、パイプラインなど石油業界で行なわれている研究と類似した点も多く、少しでも参考になれば幸いである。なお、各項目の詳細なデータ、現

象の解析や考察については改めて別に報告するつもりである。一部、油流ダクトを用いた実験結果の考察に関しては文献 6) を参照願いたい。

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厚くお礼申し上げます。

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) 菅 寿郎, 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, F79 640-4 (1979).
- 4) G. Schön : *Handbuch der Raumexplosion*, Verlag Chemie (1965).
- 5) S. Kamoto : 1978 International Workshop on Electric Charges in Dielectrics, No. 10 A-3 (1978).
- 6) T. Tanaka, Y. Yasojima, N. Yamada, A. Kishi and T. Nitta : 1979 IEEE PES Summer Meeting, F79 641-2 (1979).